

## 安全研究に係る事前評価結果

令和6年12月25日  
原子力規制委員会

### 1. 評価の対象

原子力規制庁長官官房技術基盤グループで実施する安全研究プロジェクトのうち、事前評価の対象となるプロジェクトは、以下に示す11件である。

事前評価対象プロジェクト

| No. | プロジェクト名                                      | 実施期間（年度）                  |
|-----|----------------------------------------------|---------------------------|
| 1   | 地殻内地震津波の波源断層のモデル化及び津波堆積物に基づく津波高推定に関する研究      | R7 - R10<br>(2025 - 2028) |
| 2   | 火山活動及び火山モニタリング評価に関する調査・研究                    | R7 - R11<br>(2025 - 2029) |
| 3   | 地震作用に対する原子炉建屋等の構造部材の耐力評価手法の適用性等に関する研究        | R7 - R10<br>(2025 - 2028) |
| 4   | 地震荷重を受ける容器・配管溶接部の損傷形態等に関する研究                 | R7 - R10<br>(2025 - 2028) |
| 5   | 原子力施設の経年劣化等を考慮した火災影響評価手法の整備に関する研究            | R7 - R10<br>(2025 - 2028) |
| 6   | 改良型燃料炉心核特性評価技術に関する高度化研究                      | R7 - R10<br>(2025 - 2028) |
| 7   | 次世代炉の事故解析に必要な基盤技術の構築に関する研究                   | R7 - R10<br>(2025 - 2028) |
| 8   | 実機材料等を活用した経年劣化評価・検証に係る研究（フェーズ2）              | R7 - R11<br>(2025 - 2029) |
| 9   | 東京電力福島第一原子力発電所燃料デブリ分布の放射線計測に基づく推定方法に関する研究    | R7 - R11<br>(2025 - 2029) |
| 10  | 第一種廃棄物埋設施設の性能評価及び線量評価に関する研究                  | R7 - R11<br>(2025 - 2029) |
| 11  | 放射性廃棄物の処分前管理及び施設の廃止措置に係る放射能濃度評価等の信頼性確保に関する研究 | R7 - R10<br>(2025 - 2028) |

### 2. 事前評価結果

上記の安全研究プロジェクトについて、原子力規制庁が実施した事前評価に係る自己評価（別添）は妥当である。

## 安全研究プロジェクトに係る事前評価結果

令和6年12月23日  
原子力規制庁

### 1. 評価対象プロジェクト

今回の事前評価の対象は、令和7年度に研究を開始する以下の安全研究プロジェクト11件である（参考3）。

- ① 地殻内地震津波の波源断層のモデル化及び津波堆積物に基づく津波高推定に関する研究
- ② 火山活動及び火山モニタリング評価に関する調査・研究
- ③ 地震作用に対する原子炉建屋等の構造部材の耐力評価手法の適用性等に関する研究
- ④ 地震荷重を受ける容器・配管溶接部の損傷形態等に関する研究
- ⑤ 原子力施設の経年劣化等を考慮した火災影響評価手法の整備に関する研究
- ⑥ 改良型燃料炉心核特性評価技術に関する高度化研究
- ⑦ 次世代炉の事故解析に必要な基盤技術の構築に関する研究
- ⑧ 実機材料等を活用した経年劣化評価・検証に係る研究（フェーズ2）
- ⑨ 東京電力福島第一原子力発電所燃料デブリ分布の放射線計測に基づく推定方法に関する研究
- ⑩ 第一種廃棄物埋設施設の性能評価及び線量評価に関する研究
- ⑪ 放射性廃棄物の処分前管理及び施設の廃止措置に係る放射能濃度評価等の信頼性確保に関する研究

### 2. 評価の方法

事前評価は、「原子力規制委員会における安全研究の基本方針（原規技発第1607064号（平成28年7月6日原子力規制委員会決定）」（参考1）及び「安全研究プロジェクトの評価実施要領（原規技発第1904162号（平成31年4月16日原子力規制庁長官制定）」（参考2）に基づき、安全研究プロジェクトに関する成果目標及び実施計画に関する適切性、研究の進め方に関する技術的適切性並びに知見の活用先の設定に関する適切性を評価した。

なお、研究の進め方に関する技術的適切性の評価に当たっては、客観性を加味する観点から、技術評価検討会を開催し、外部専門家の評価意見及び産業界等の専門的な技術的知見を有する者（専門技術者）の意見を聴取して参考とした（参考4）。

### 3. 評価結果

各安全研究プロジェクトについて、成果目標、実施計画及び技術的観点からの研究の進め方について適切であると評価できる（参考5）。そのため、外部専門家等から受けた

意見を研究計画に反映した上で、令和7年度から各安全研究プロジェクトを開始することとする。

各安全研究プロジェクトに関する評価の概要は、以下のとおりである。

### **3. 1 地殻内地震津波の波源断層のモデル化及び津波堆積物に基づく津波高推定に関する研究 (R7-R10)**

#### **(1) 「成果目標及び実施計画（成果の公表計画を含む。）に関する適切性」について**

本研究では、目的及びその成果の活用先と整合しており、成果目標についても成果の公表も含めて明確に設定していることから、適切と判断する。

#### **(2) 「研究の進め方に関する技術的適切性」について**

本研究では、国内外の過去の研究及び最新知見を踏まえており、実施内容及び手法並びに結果の評価手法については適切であり、重大な見落としがないとの評価を受けていることから、適切と判断する。

また、技術評価検討会での意見を踏まえ、地殻内地震による津波の特性化波源断層モデル設定方法の整備に関して、セグメントの連動性に関する考え方についても明確にした上で、連動性による津波への影響を把握しながら研究を進めていくこととする。

#### **(3) 「知見の活用先の設定に関する適切性」について**

本研究に関係する二つの課等の長からは適切であるとの評価を受けたが、残り一つの課等の長からは現時点で適否の判断が難しいとするコメントを受けた。

### **3. 2 火山活動及び火山モニタリング評価に関する調査・研究 (R7-R11)**

#### **(1) 「成果目標及び実施計画（成果の公表計画を含む。）に関する適切性」について**

本研究では、目的及びその成果の活用先と整合しており、成果目標についても成果の公表も含めて明確に設定していることから、適切と判断する。

#### **(2) 「研究の進め方に関する技術的適切性」について**

本研究では、国内外の過去の研究及び最新知見を踏まえており、実施内容及び手法並びに結果の評価手法については適切であり、重大な見落としがないとの評価を受けていることから、適切と判断する。

また、技術評価検討会での意見を踏まえ、観測に当たっては、降下火砕物の移流拡散等の全体的な傾向を把握しつつ、機器への影響の観点も含め、見落としが無いように知見等を蓄積していくこととする。

#### **(3) 「知見の活用先の設定に関する適切性」について**

本研究に関係する課等の長から、適切であるとの評価を受けた。

### **3.3 地震作用に対する原子炉建屋等の構造部材の耐力評価手法の適用性等に関する研究 (R7-R10)**

#### **(1) 「成果目標及び実施計画（成果の公表計画を含む。）に関する適切性」について**

本研究では、建物・構築物に係る規制課題に対して既往の知見を踏まえて立案されており、本研究の目的及びその成果の活用先と整合していること等から、適切と判断する。

#### **(2) 「研究の進め方に関する技術的適切性」について**

本研究では、国内外の過去の研究及び最新知見を踏まえており、実施内容及び手法並びに結果の評価手法については適切であり、重大な見落としがないとの評価を受けていることから、適切と判断する。

また、技術評価検討会での意見を踏まえ、数値解析の検証と妥当性確認に関する学会等の最新の知見を踏まえて研究を進める必要があることから国内外の学会等の動向を注視し、必要に応じて、これらの知見にも留意して研究を進めることとする。

#### **(3) 「知見の活用先の設定に関する適切性」について**

本研究に係る課等の長から、適切であるとの評価を受けた。

### **3.4 地震荷重を受ける容器・配管溶接部の損傷形態等に関する研究 (R7-R10)**

#### **(1) 「成果目標及び実施計画（成果の公表計画を含む。）に関する適切性」について**

本研究では、外部事象に対する設備のフラジリティ評価手法の信頼性向上を図り、規制基準等への反映の検討、民間規格の妥当性判断及び外部事象を対象としたリスク情報の活用等に資する技術的知見を拡充する計画となっており、本プロジェクトの目的や知見の活用先と整合していること等から、適切と判断する。

#### **(2) 「研究の進め方に関する技術的適切性」について**

本研究では、国内外の過去の研究及び最新知見を踏まえており、実施内容及び手法並びに結果の評価手法については適切であり、重大な見落としがないとの評価を受けていることから、適切と判断する。

また、技術評価検討会での意見を踏まえ、既往研究と本研究の結果を比較し、相違がある場合はその要因を明らかにした上で、評価手法の検討等に取り組むこととする。

#### **(3) 「知見の活用先の設定に関する適切性」について**

本研究に係る課等の長から、適切であるとの評価を受けた。

### **3.5 原子力施設の経年劣化等を考慮した火災影響評価手法の整備に関する研究 (R7-R10)**

#### **(1) 「成果目標及び実施計画（成果の公表計画を含む。）に関する適切性」について**

本研究では、火災防護・高経年化分野の規制課題及び先行研究を踏まえて計画が立案されており、成果目標及び実施計画は目的や知見の活用先と整合していること等から、

適切と判断する。

(2)「研究の進め方に関する技術的適切性」について

本研究では、国内外の過去の研究及び最新知見を踏まえており、実施内容及び手法並びに結果の評価手法については適切であり、重大な見落としがないとの評価を受けていることから、適切と判断する。

また、技術評価検討会での意見を踏まえ、火災影響評価手法・解析コード等の整備では、適切な精度目標を設定してモデルを設定した上で火災解析を行うこととする。

(3)「知見の活用先の設定に関する適切性」について

本研究に関係する課等の長から、適切であるとの評価を受けた。

### 3. 6 改良型燃料炉心核特性評価技術に関する高度化研究 (R7-R10)

(1)「成果目標及び実施計画（成果の公表計画を含む。）に関する適切性」について

本研究では、10 行 10 列燃料装荷炉心の適合性審査に必要な技術的知見を収集する計画が具体的に示されており、成果目標及び実施計画は明確で、かつ実現可能な内容であること等から、適切と判断する。

(2)「研究の進め方に関する技術的適切性」について

本研究では、国内外の過去の研究及び最新知見を踏まえており、実施内容及び手法並びに結果の評価手法については適切であり、重大な見落としがないとの評価を受けていることから、適切と判断する。

また、技術評価検討会での意見を踏まえ、海外の 10 行 10 列燃料装荷実機炉心に関する情報を収集するとともに、10 行 10 列燃料集合体固有の現象等について整理しながら研究を推進していくこととする。

(3)「知見の活用先の設定に関する適切性」について

本研究に関係する課等の長から、適切であるとの評価を受けた。

### 3. 7 次世代炉の事故解析に必要な基盤技術の構築に関する研究 (R7-R10)

(1)「成果目標及び実施計画（成果の公表計画を含む。）に関する適切性」について

本研究では、次世代炉（高速炉及び高温ガス炉）に関する規制課題を踏まえて立案されており、成果目標及び実施計画は目的や知見の活用先と整合していること等から、適切と判断する。

(2)「研究の進め方に関する技術的適切性」について

本研究では、国内外の過去の研究及び最新知見を踏まえており、実施内容及び手法並びに結果の評価手法については適切であり、重大な見落としがないとの評価を受けていることから、適切と判断する。

また、技術評価検討会での意見を踏まえ、高速炉、高温ガス炉とも、国内外の開発動向や国外規制動向などの技術情報の収集を継続し、適宜研究計画に反映していくこととする。

(3)「知見の活用先の設定に関する適切性」について

本研究に関係する課等の長から、適切であるとの評価を受けた。

### **3. 8 実機材料等を活用した経年劣化評価・検証に係る研究（フェーズ2）（R7-R11）**

(1)「成果目標及び実施計画（成果の公表計画を含む。）に関する適切性」について

本研究では、研究計画案が目的及びその成果の活用先と整合しており、成果の公表も含め、最終成果目標を明確に設定していることから、適切と判断する。

(2)「研究の進め方に関する技術的適切性」について

本研究では、国内外の過去の研究及び最新知見を踏まえており、実施内容及び手法並びに結果の評価手法については適切であり、重大な見落としがないとの評価を受けていることから、適切と判断する。

また、技術評価検討会での意見を踏まえ、詳細な試験条件等を設定して研究を実施することとする。

(3)「知見の活用先の設定に関する適切性」について

本研究に関係する課等の長から、適切であるとの評価を受けた。

### **3. 9 東京電力福島第一原子力発電所燃料デブリ分布の放射線計測に基づく推定方法に関する研究（R7-R11）**

(1)「成果目標及び実施計画（成果の公表計画を含む。）に関する適切性」について

本研究では、成果の活用先や論文公表も含め最終目標も明確に設定しており、他機関の先行調査及び先行研究の成果を踏まえた研究計画となっていることから、適切と判断する。

(2)「研究の進め方に関する技術的適切性」について

本研究では、国内外の過去の研究及び最新知見を踏まえており、実施内容及び手法並びに結果の評価手法については適切であり、重大な見落としがないとの評価を受けていることから、適切と判断する。

また、技術評価検討会での意見を踏まえ、事業者動向や炉内調査結果を参考に必要な知見の収集に努め、シミュレーション計算及び検証実験において様々な状況を考慮した知見の取得を進めることとする。

(3)「知見の活用先の設定に関する適切性」について

本研究に関係する課等の長から、適切であるとの評価を受けた。

### **3. 1 0 第一種廃棄物埋設施設の性能評価及び線量評価に関する研究（R7-R11）**

#### **（１）「成果目標及び実施計画（成果の公表計画を含む。）に関する適切性」について**

本研究では、国内の事業の進捗や国際的な動向を踏まえて策定され、目的や知見の活用先と整合しており、論文等の公表計画、プロジェクト終了後の成果の取りまとめの方針も適切に設定されていることから、適切と判断する。

#### **（２）「研究の進め方に関する技術的適切性」について**

本研究では、国内外の過去の研究及び最新知見を踏まえており、実施内容及び手法並びに結果の評価手法については適切であり、重大な見落としがないとの評価を受けていることから、適切と判断する。

また、技術評価検討会での意見を踏まえ、核種移行性能に係る研究に関して、地下環境の多様性を考慮し、重要となる因子の整理とそれらに着目した検討を進めることとする。

#### **（３）「知見の活用先の設定に関する適切性」について**

本研究に係る課等の長から、適切であるとの評価を受けた。

### **3. 1 1 放射性廃棄物の処分前管理及び施設の廃止措置に係る放射能濃度評価等の信頼性確保に関する研究（R7-R10）**

#### **（１）「成果目標及び実施計画（成果の公表計画を含む。）に関する適切性」について**

本研究では、研究計画案が目的及びその成果の活用先と整合し、実施内容も個々の項目に対して明確になっており、成果の公表も含め最終成果目標を明確に設定していることから、適切と判断する。

#### **（２）「研究の進め方に関する技術的適切性」について**

本研究では、国内外の過去の研究及び最新知見を踏まえており、実施内容及び手法並びに結果の評価手法については適切であり、重大な見落としがないとの評価を受けていることから、適切と判断する。

また、技術評価検討会での意見を踏まえ、廃棄体等の安全性確認に関する新たな放射能濃度評価上の課題の調査対象などを研究計画に明記した上で研究を進めることとする。

#### **（３）「知見の活用先の設定に関する適切性」について**

本研究に係る課等の長から、適切であるとの評価を受けた。

制定 平成28年7月6日 原規技発第1607064号 原子力規制委員会決定  
改正 令和元年5月29日 原規技発第1905294号 原子力規制委員会決定

原子力規制委員会における安全研究の基本方針を次のとおり定める。

平成28年7月6日

原子力規制委員会

#### 原子力規制委員会における安全研究の基本方針

原子力規制委員会は、安全研究の進め方に関する基本的な考え方、実施体制等の基本方針を次のとおり定める。

# 原子力規制委員会における安全研究の基本方針

平成28年7月6日

原子力規制委員会

## 1. 安全研究の意義

原子力規制委員会（以下「委員会」という。）は、東京電力福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえ、その業務を遂行するに当たっては、科学的・技術的な見地から、独立して意思決定を行うこととしている。また、安全を支えるのは知識基盤、人材基盤、施設基盤等の技術基盤であり、特に、深く幅広い視点から物事を捉え、的確な判断ができる高度な科学的・技術的専門性が重要であるとの認識に基づき、原子力規制庁（以下「規制庁」という。）の個々の職員及び組織全体の科学的・技術的専門性を向上させることなどにより、原子力規制等を支える強固な技術基盤を構築し維持していくことが不可欠である。

原子力規制等における課題に対応するための知見を収集し、また、自ら生み出す研究活動は、科学的・技術的能力の向上、強固な技術基盤の構築等を行うための最も効果的な方策の一つである。委員会は、安全研究を通じこれらを実現し又原子力規制等に最大限活用していく。

## 2. 安全研究の基本的な考え方

### (1) 安全研究の目的

委員会における安全研究の目的は、次のとおりとする。なお、事業者等が行うべき技術開発や信頼性向上を安全研究の目的とはしない。

#### ① 規制基準等の整備に活用するための知見の収集・整備

委員会が所管する核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（以下「原子炉等規制法」という。）及び放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律（以下「RI法」という。）に関する規制制度、規制基準及び解釈・審査ガイド並びに原子力災害対策特別措置法（以下「原災法」という。）に基づく原子力災害対策指針及びその関連規定等の策定又は改正並びに放射線障害防止の技術的基準に関する法律に基づく放射線審議会の所掌事務の遂行に必要となる科学的・技術的知見の収集・整備

#### ② 審査等の際の判断に必要な知見の収集・整備

原子炉等規制法、RI法及び原災法に基づく委員会の審査、検査、その他の原子力規制等に係る活動（以下「規制活動」という。）に関し、事業者からの申請又は報告の内容の確認や原子力災害時の判断に必要なデータや情報等の科学的・技術的知見の収集・整備

### ③ 規制活動に必要な手段の整備

安全評価に使用する解析コード、緊急時モニタリング技術等の委員会が規制活動を遂行するに当たり必要となる手段の整備

### ④ 技術基盤の構築・維持

将来の規制活動に役立つ新たな知見の創出、原子力規制等における高度な専門性を有する人材の確保及び育成等の技術基盤の構築・維持

なお、④の技術基盤の構築・維持については、①～③を明確にした上で目的に加える場合があるものとする。

## (2) 安全研究を行う上での留意事項

### ① 内外の研究機関の活用

安全研究の実施に当たっては、研究資源を有する技術支援機関や大学・学会等の国内関係機関との連携が重要であることを踏まえ、これら機関の技術力に応じて広く活用する。また、これら機関の活用に加えて国外の研究機関や国際機関との連携・協力に積極的に取り組む。

### ② 独立性、中立性及び透明性の確保

委員会が実施する安全研究は、委員会の規制活動に必要な科学的・技術的知見の収集・整備、技術基盤の構築・維持等を目的としていることから、その実施に当たっては規制活動と同様に、独立性、中立性及び透明性を確保する。なお、事業者等において行われる安全性向上を目的とする研究開発について、委員会の安全研究の必要性から試験データ等を含む情報交換等を行う場合があり得るが、その際においても独立性、中立性及び透明性を確保する。

### ③ 知見の共有と情報の発信

安全研究を通じて得られる成果は、安全研究の担当部署にとどまらず、委員会全体の科学的・技術的能力の向上、強固な技術基盤の構築等に役立てていく必要があることから、共有に努める。また、安全研究の成果は公共財であるとの認識の下、広く原子力安全に役立てることが望まれることから、対外的な情報の発信に努める。

## 3. 安全研究プロジェクトの企画と評価

### (1) 安全研究プロジェクトの企画

委員会は、次年度以降を対象に「今後推進すべき安全研究の分野及びその実施方針」(以下「実施方針」という。)を原則として毎年度策定する。

規制庁は、科学的・技術的知見等の安全研究の成果が原子力規制等において確実に反

映・活用されるよう、実施方針に基づき研究テーマの設定及び研究実施内容の策定を行う過程において、規制活動におけるニーズ、内外の最新技術動向等を踏まえ、安全研究の成果及びその活用方策を明確化した上で安全研究プロジェクトを企画する。

なお、事故・トラブル、自然災害及びその他安全に影響する重要課題に対応するため速やかに安全研究が必要となる場合は、実施方針を改定せずとも、関連する安全研究プロジェクトにおける課題の追加又は内容の見直しを行うなどにより、柔軟に対応する。

## (2) 安全研究プロジェクトの評価

委員会は、安全研究の的確な実施及び成果の活用を図るため、各安全研究プロジェクトの開始・終了等の節目において評価を実施する。安全研究プロジェクトの開始時においては事前評価、終了時においては事後評価を行うこととし、期間が長いものについては原則として中間評価を実施する。

委員会が実施する安全研究の目的に関し、得られた科学的・技術的知見の反映先は自らの規制活動であることから、これらの安全研究の評価は基本的に自己評価とする。他方、研究手法、成果の取りまとめ方法等の技術的妥当性については、評価に客観性を加味する観点から、事前評価、中間評価及び事後評価に際し、外部専門家の評価意見及び産業界等の専門的な技術的知見を有する者(専門技術者)の意見を聴取し参考とする。

### ① 事前評価

実施方針に従って計画された新規の安全研究プロジェクトについて、当該分野の最新動向等を踏まえた成果目標及び研究手法・計画の技術的妥当性の評価を行う。

### ② 中間評価

研究期間が5年以上の場合は、原則として研究開始から3年ごとに中間評価を行う。当該評価では、実施方針との整合性について確認するとともに、研究の進捗状況や成果、当該分野の最新動向等を踏まえ、改めて成果目標及び研究手法・計画の技術的妥当性の評価を行う。その上で、当該評価の結果に基づき必要に応じ研究計画の見直しを行う。

### ③ 事後評価

安全研究プロジェクトの終了後、研究成果を確認し、成果目標の達成状況及び成果の活用状況、見通し等について評価を行う。

安全研究の実施状況に関する毎年度の評価については、年度業務計画の管理の一部として、安全研究の担当部署において実施する。

また、安全研究プロジェクトの成果の活用状況等について一定期間後に実施する評価(追跡評価)については、安全研究プロジェクトを分野ごとに束ね、数年分を取りまとめた上で実施し、委員会への報告を求めるものとする。

## 4. 安全研究の実施体制

委員会は、規制庁に安全研究の担当部署として技術基盤グループ及び放射線防護グループを擁し、研究職員が安全研究を自ら手がけており、得られた成果は基準整備など、規制に活用している。

また、国外を含む規制庁内外の研修制度、学会参加、論文等の成果の公表、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下「JAEA」という。）安全研究センターとの人材交流等により、科学的・技術的能力の向上及び強化に努めている。

安全研究の実施に際しては、安全研究の委託や試験等の請負を大学、民間企業等との契約により実施するとともに、他省庁と共同所管している技術支援機関としてのJAEA及び国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構（以下「QST」という。）と連携するほか、国外の研究機関や国際機関とも連携・協力している。

こうした多様な安全研究の実施体制に関し、技術支援機関の役割及び期待並びに国際機関等との関係は次のとおりである。

### (1) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(JAEA)

技術支援機関としてのJAEAの役割は、原子炉施設、核燃料サイクル施設、廃棄物処理・処分、原子力防災などの分野における先導的・先進的な研究を推進するとともに、単独で又は規制庁の研究職員と共同で行う当該分野の研究を通じ、技術支援に必要な人材の確保及び育成、規制庁職員の人材育成支援、安全研究に必要な試験研究施設等の維持・整備を行うことである。

また、原子力分野における我が国唯一の総合的な研究機関であることを踏まえ、他の研究機関、大学等との協力の中心的役割を担うことを期待する。

### (2) 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構(QST)

技術支援機関としてのQSTの役割は、長期間を要する低線量の被ばく等による放射線の人への影響評価を含め、放射線安全・防護及び被ばく医療等に係る分野の研究を推進することである。また、技術支援機関及び防災基本計画等の中核的な指定公共機関として、原子力規制等及び原子力災害時の技術支援に必要な人材の確保及び育成を行うことである。

また、当該分野における国際原子力機関（以下「IAEA」という。）、原子放射線の影響に関する国連科学委員会（UNSCEAR）、世界保健機関（WHO）等の国際機関との協力の中心的役割を担うことを期待する。

### (3) 国際機関及び諸外国の規制機関等との連携

原子力安全は国際的に共通の問題であり、国際共同研究等に参加することは、国際的な認識の共有を図るほか、限られた試験施設を活用した貴重な試験データの取得及び最新知見の取得の観点から重要である。

このため、IAEA、経済協力開発機構原子力機関（OECD／NEA）等の国際機関、米国原子力規制委員会（NRC）、仏国放射線防護原子力安全研究所（IRSN）等の諸外国の規制関係機関との連携を積極的に推進するとともに、これら機関との共同研究に関し、安全研究の国際動向や我が国の課題との共通性等を踏まえた上で、積極的に参加する。

## 5. その他

以下の安全研究の関連文書は廃止する。

- ① 原子力規制委員会における安全研究の推進について（平成25年9月25日原子力規制委員会）
- ② 原子力規制委員会における安全研究について－平成27年度版－（平成27年4月22日原子力規制委員会）

ただし、原子力規制委員会における安全研究について－平成27年度版－のうち「4. 安全研究が必要な研究分野」については、委員会において本文書が決定された後、平成28年度の安全研究の実施の終了をもって廃止する。

## 安全研究プロジェクトの評価実施要領（抜粋）

平成 31 年 4 月 16 日 制定  
 令和 3 年 8 月 26 日 改正  
 令和 6 年 12 月 23 日 改正  
 原子力規制庁

（前略）

### 3. 安全研究プロジェクトの評価

安全研究プロジェクトの評価は、事前評価（3. 1）、中間評価（3. 2）及び事後評価（3. 3）についてそれぞれ行う。この際、これらの評価に連続性と一貫性を持たせるため、以下の視点から一貫した評価を行う。

- ・ 目標・成果の適切性
- ・ 研究の進め方に関する技術的適切性
- ・ 研究の管理の適切性

追跡評価（3. 4）については、安全研究プロジェクト終了後の成果の公表・活用状況の傾向を把握するため、終了から 2 年以上が経過した安全研究プロジェクトを分野ごとに束ね、成果の公表・活用実績について数年分を取りまとめて確認を行う。

#### 3. 1 事前評価

##### （1）事前評価の目的

事前評価は、基本方針に基づき原則として毎年度作成する「今後推進すべき安全研究の分野及びその実施方針」（以下「実施方針」という。）に従い計画された新規の安全研究プロジェクト（後継の安全研究プロジェクトも含む。）について、その計画の適切性を評価することを目的とする。

なお、事前評価に先立ち、実施方針策定時に、新規安全研究プロジェクトの概要及び実施の要否を確認し、原子力規制委員会の了承を受けることとする。

##### （2）事前評価結果の活用

事前評価の結果は、安全研究プロジェクトの開始前に策定する研究計画（研究の背景、目的、知見の活用先、研究概要、成果目標、実施計画（成果の公表計画を含む。）等を定めたものをいう。以下同じ。）の案の変更の要否の判断等に活用する。

##### （3）事前評価の実施時期

事前評価は、安全研究プロジェクト開始の前年度の 12 月（次年度の当初予算案の

決定)以降に行う。

#### (4) 事前評価の方法

事前評価は、様式 1 による当該安全研究プロジェクトを実施するための研究計画案を作成した上で、以下の評価項目ごとにその適切性を評価する。

##### ① 成果目標及び実施計画（成果の公表計画を含む。）に関する適切性

以下の観点を踏まえて評価する。

- ・ 目的や知見の活用先との整合性（規制上必要な時期に必要な知見が得られる計画となっているかなど）
- ・ 明確性及び実現可能性

##### ② 研究の進め方に関する技術的適切性

##### ③ 知見の活用先の設定に関する適切性

項目②の評価は、研究手法、成果の取りまとめ方法等の技術的適切性の評価について客観性を確保するため、技術評価検討会（外部専門家の評価意見及び産業界等の専門的な技術的知見を有する者（専門技術者）の意見を聴取するための公開会合をいう。以下同じ。）<sup>1</sup>での議論を経た上で行うものとする。

#### (5) 事前評価の手続

安全研究プロジェクトを担当する安全技術管理官等（安全技術管理官又はその代理として技術基盤グループ長が指名する者をいう。）（以下「担当安全技術管理官等」という。）は、技術評価検討会での意見等を踏まえ、評価項目（項目③に係るものを除く。）ごとの評価を様式 2（事前評価書）に記載する。項目③については、実施方針における研究の必要性や研究課題に応じて、当該安全研究プロジェクトに係る課等<sup>2</sup>の長に評価を求める。それらを基に、最終的な研究計画案の変更の要否及び変更が必要な場合はその変更内容を様式 2 に記載して評価案を作成し、それを原子力規制委員会へ諮る。

（後略）

<sup>1</sup> 技術評価検討会における外部専門家については、公正性及び中立性確保の観点から、利害関係者が評価に加わらないよう十分に配慮する。なお、評価の視点は、①国内外の過去の研究及び最新知見を踏まえているか、②解析実施手法、実験方法が適切か、③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か、並びに④重大な見落とし（観点の欠落）がないかの 4 点とする。

<sup>2</sup> 原子力規制委員会行政文書管理要領第 2 条に規定される「課等」を示す。

## 研究計画

|               |           |           |            |
|---------------|-----------|-----------|------------|
| 担当部署          |           | 担当責任者     |            |
| 実施期間          |           | 主担当者      |            |
| 1. プロジェクト名称   |           |           |            |
| 2. カテゴリー・研究分野 |           |           |            |
| 3. 背景         |           |           |            |
| 4. 目的         |           |           |            |
| 5. 知見の活用先     |           |           |            |
| 6. 安全研究概要     |           |           |            |
| 7. 成果目標と実施計画  |           |           |            |
| 実施項目          | 〇〇年度      | 〇〇年度      | 〇〇年度       |
| (1) 〇〇〇〇      | 〇〇 (実施内容) | 〇〇 (実施内容) | 成果の公表<br>▼ |
| 8. 実施体制       |           |           |            |
| 9. 備考         |           |           |            |

## 事前評価書

### 安全研究プロジェクト名（期間）

#### 1. プロジェクトの目的

#### 2. 研究概要

#### 3. 事前評価結果

##### （１）評価項目ごとの評価

##### ① 成果目標及び実施計画（成果の公表計画を含む。）に関する適切性：適・否

- 担当安全技術管理官等によるコメント  
（目的や知見の活用先との整合性について記載）  
（明確性及び実現可能性について記載）

##### ② 研究の進め方に関する技術的適切性：適・否

- 担当安全技術管理官等によるコメント

（技術評価検討会における主な意見及びその対応）

➤  
➤

##### ③ 知見の活用先の設定に関する適切性：適・否

- 関係する課等の長によるコメント（適・否<sup>6</sup>、〇〇部門）  
（関係する課等の長が複数人の場合には、全ての者による評価を記載）

##### （２）研究計画案の変更の要否及び変更が必要な場合はその変更内容

- 担当安全技術管理官等によるコメント

---

<sup>6</sup> 現時点の具体的な規制ニーズではなく、中長期的観点から実施する安全研究プロジェクトであって、現時点で適否の判断が難しい場合には「－」とし、その理由を含めてコメントを記載する。

参考3

表1 令和6年度及び令和7年度の安全研究プロジェクトの一覧

黄色網掛け：令和6年度終了プロジェクト、緑色網掛け：令和7年度新規プロジェクト

| No. | 令和6年度 安全研究プロジェクト                        |
|-----|-----------------------------------------|
| 1   | 地震動評価手法の信頼性向上に関する研究                     |
| 2   | 断層の活動性評価手法に関する研究                        |
| 3   | 津波評価手法及び既往津波の波源推定に関する研究                 |
| -   | -                                       |
| 4   | 外部事象に係る施設・設備のフラジリティ評価手法の高度化に関する研究       |
| 5   | 火災防護に係る影響評価に関する研究（フェーズ2）                |
| 6   | 原子力規制検査のためのレベル1PRAに関する研究                |
| 7   | 重大事故進展を踏まえた水素挙動に関する研究                   |
| 8   | 重大事故時における重要物理化学現象の不確かさ低減に係る実験           |
| 9   | 核特性解析における最適評価手法及び不確かさ評価手法に関する研究         |
| -   | -                                       |
| 10  | 事故耐性燃料等の事故時挙動研究                         |
| 11  | 実機材料等を活用した経年劣化評価・検証に係る研究                |
| 12  | 福島第一原子力発電所燃料デブリの臨界評価手法の整備               |
| 13  | 再処理施設及び MOX 燃料加工施設における重大事故等の事象進展に係る研究   |
| 14  | 廃棄物埋設における長期性能評価に関する研究                   |
| 15  | 放射性廃棄物の放射能濃度等の定量評価技術に関する研究              |
| 16  | 特定重大事故等対処施設等を考慮した緊急時活動レベル（EAL）見直しに関する研究 |
| 17  | 放射線防護のための線量及び健康リスク評価の精度向上に関する研究         |

| No. | 令和7年度 安全研究プロジェクト                             |
|-----|----------------------------------------------|
| 1   | 地震動評価手法の信頼性向上に関する研究                          |
| 2   | 断層の活動性評価手法に関する研究                             |
| 3   | 地殻内地震津波の波源断層のモデル化及び津波堆積物に基づく津波高推定に関する研究      |
| 4   | 火山活動及び火山モニタリング評価に関する調査・研究                    |
| 5   | 地震作用に対する原子炉建屋等の構造部材の耐力評価手法の適用性等に関する研究        |
| 6   | 地震荷重を受ける容器・配管溶接部の損傷形態等に関する研究                 |
| 7   | 原子力施設の経年劣化等を考慮した火災影響評価手法の整備に関する研究            |
| 8   | 原子力規制検査のためのレベル1PRAに関する研究                     |
| 9   | 重大事故進展を踏まえた水素挙動に関する研究                        |
| 10  | 重大事故時における重要物理化学現象の不確かさ低減に係る実験                |
| 11  | 改良型燃料炉心核特性評価技術に関する高度化研究                      |
| 12  | 次世代炉の事故解析に必要な基盤技術の構築に関する研究                   |
| 13  | 事故耐性燃料等の事故時挙動研究                              |
| 14  | 実機材料等を活用した経年劣化評価・検証に係る研究（フェーズ2）              |
| 15  | 東京電力福島第一原子力発電所燃料デブリ分布の放射線計測に基づく推定方法に関する研究    |
| 16  | 再処理施設及び MOX 燃料加工施設における重大事故等の事象進展に係る研究        |
| 17  | 第一種廃棄物埋設施設の性能評価及び線量評価に関する研究                  |
| 18  | 放射性廃棄物の処分前管理及び施設の廃止措置に係る放射能濃度評価等の信頼性確保に関する研究 |
| 19  | 特定重大事故等対処施設等を考慮した緊急時活動レベル（EAL）見直しに関する研究      |
| 20  | 放射線防護のための線量及び健康リスク評価の精度向上に関する研究              |

## 技術評価検討会 名簿

(五十音順)

### 1. 第14回プラント安全技術評価検討会（令和6年10月18日開催）

#### 外部専門家

|       |                                       |
|-------|---------------------------------------|
| 北田 孝典 | 国立大学法人大阪大学<br>大学院工学研究科 環境エネルギー工学専攻 教授 |
| 五福 明夫 | 公立大学法人岡山県立大学 副学長                      |
| 山路 哲史 | 学校法人早稲田大学<br>理工学術院先進理工学研究科 教授         |

#### 専門技術者

|       |                                                              |
|-------|--------------------------------------------------------------|
| 新井 健司 | 東芝エネルギーシステムズ株式会社<br>磯子エンジニアリングセンター 原子力安全システム設計部<br>担当部長      |
| 井村 諭  | 三菱重工業株式会社<br>原子力セグメント炉心・安全技術部 次長                             |
| 溝上 伸也 | 東京電力ホールディングス株式会社<br>福島第一廃炉推進カンパニー 燃料デブリ取り出しプログラム部<br>スペシャリスト |

### 2. 第7回材料技術評価検討会（令和6年10月22日開催）

#### 外部専門家

|       |                                                   |
|-------|---------------------------------------------------|
| 大塚 雄市 | 国立大学法人長岡技術科学大学<br>大学院工学研究科 システム安全工学分野 准教授         |
| 黒田 雅利 | 国立大学法人熊本大学<br>大学院先端科学研究部 産業基盤部門 機械システム設計分野<br>准教授 |

#### 専門技術者

|       |                                               |
|-------|-----------------------------------------------|
| 釜谷 昌幸 | 株式会社原子力安全システム研究所<br>技術システム研究所 主席研究員           |
| 寺地 巧  | 株式会社原子力安全システム研究所<br>技術システム研究所 高経年化研究グループ リーダー |

### 3. 第6回バックエンド技術評価検討会（令和6年10月16日開催）

#### 外部専門家

井口 哲夫 名古屋大学名誉教授  
半井 健一郎 国立大学法人広島大学  
大学院先進理工系科学研究科 教授  
新堀 雄一 国立大学法人東北大学  
大学院工学研究科 教授

#### 専門技術者

鈴木 寛 原子力発電環境整備機構  
技術部 工学技術グループ マネージャー  
渡邊 将人 中部電力株式会社  
技術開発本部 原子力安全技術研究所 プラントグループ  
研究主査

### 4. 第15回地震・津波技術評価検討会（令和6年10月28日開催）

#### 外部専門家

規矩 大義 関東学院大学  
理工学部 土木学系 教授  
澁谷 忠弘 国立大学法人横浜国立大学  
総合学術高等研究院 教授

#### 専門技術者

梅木 芳人 中部電力株式会社  
原子力本部原子力土建部設計管理グループ 専任課長  
土志田 潔 一般財団法人電力中央研究所  
原子力リスク研究センター 自然外部事象研究チーム  
研究推進マネージャー  
松山 昌史 一般財団法人電力中央研究所  
原子力リスク研究センター自然外部事象研究チーム  
チームリーダー

5. 第16回地震・津波技術評価検討会（令和6年10月29日開催）

外部専門家

|       |                                      |
|-------|--------------------------------------|
| 糸井 達哉 | 国立大学法人東京大学<br>大学院工学系研究科 准教授          |
| 鎌滝 孝信 | 学校法人加計学園岡山理科大学<br>理学部基礎理学科 教授        |
| 酒井 直樹 | 国立研究開発法人防災科学技術研究所<br>水・土砂防災研究部門 副部門長 |

専門技術者

|       |                                                        |
|-------|--------------------------------------------------------|
| 梅木 芳人 | 中部電力株式会社<br>原子力本部原子力土建部設計管理グループ 専任課長                   |
| 土志田 潔 | 一般財団法人電力中央研究所<br>原子力リスク研究センター 自然外部事象研究チーム<br>研究推進マネジャー |
| 松山 昌史 | 一般財団法人電力中央研究所<br>原子力リスク研究センター自然外部事象研究チーム<br>チームリーダー    |

## 事前評価書

令和 6 年 1 2 月 2 3 日  
原 子 力 規 制 庁

### I. 地殻内地震津波の波源断層のモデル化及び津波堆積物に基づく津波高推定に関する研究 (R7-R10)

#### 1. プロジェクトの目的

本プロジェクトでは「地殻内地震による津波の特性化波源断層モデル設定方法の整備」、「津波堆積物に基づく津波規模の推定方法の整備」及び「沿岸域における重畳津波の特性に係る知見の拡充」の研究を行い、基準津波の策定に係る技術的根拠を整備するとともに、審査等の際の判断に必要となる津波評価技術に係る知見を収集し、その評価方法を整備することを目的とする。

#### 2. 研究概要

令和 6 年能登半島地震を含む国内外の地殻内地震の特徴（地震タイプ、地殻変動、連動性等）及び海底で発生する地すべりに関する知見を調査するとともに、地殻内地震による津波波源の震源像を考慮した特性化波源断層モデルの設定方法を整備し、津波評価方法の精緻化を図る。

地形ごとの津波堆積物の特徴（厚さ、分布範囲等）と津波規模（津波高、浸水範囲、流速分布、周期等）との関係性の有無や程度を確認し、津波堆積物から津波高や浸水範囲等を推定する方法を整備する。

津波水位評価における保守性及び精度向上の観点より、地震津波と地すべり津波等が沿岸域で重畳する場合の津波の特性に関する知見を拡充する。

#### 3. 事前評価結果

##### (1) 評価項目ごとの評価

##### ① 成果目標及び実施計画（成果の公表計画を含む。）に関する適切性：適

- 研究計画案は、基準津波の策定に係る技術的根拠を整備し、審査等の際の判断に必要な津波評価技術に係る知見を収集する計画となっており、本プロジェクトの成果目標は、目的及び知見の活用先と整合性がとれている。また、成果を適時公表する予定等、段階的な行程表が具体的に示されており、成果目標及び実施計画は明確かつ実現可能な内容である。以上から、成果目標及び実施計画は適切であると評価する。

##### ② 研究の進め方に関する技術的適切性：適

- 国内外の過去の研究及び最新知見を踏まえているか、解析実施手法・実験方法が

適切か、解析結果の評価手法・実験結果の評価手法が適切か、並びに重大な見落とし（観点の欠落）がないかの各観点について、技術評価検討会においても適切とする評価を受けていることから、技術的適切性を有していると判断する。

- 研究の進め方は、技術評価検討会において確認されたように、既往の地殻内地震の津波波源モデルや津波堆積物の堆積層厚と浸水深に関する過去の研究、令和6年能登半島地震に関する知見がおおむね適切にレビューされており、調査・研究手法に反映されている。

（技術評価検討会における主な意見及びその対応）

- 国内外の過去の研究が取り込まれているが、引き続き、最新知見を取り入れながら研究を進めてほしいとの意見があった。
- 地殻内地震による津波の特性化波源断層モデル設定方法の整備に関して、セグメントの連動性に関する検討も必要であり、その考え方についても明確にした上で研究を行うことが望ましいとの意見があった。検討事項の1つと考えており、研究計画にも明確に示し、連動性による津波への影響を把握しながら研究を進めていくこととする。
- 津波堆積物に基づく津波規模の推定方法の整備に関して、津波堆積物には当時の地形、前面の供給源の有無等による様々な不確かさが存在するため、解釈や考察は慎重に進めた方がよいとの意見があった。上記の不確かさの存在を認識しつつ、本検討を慎重に進めていくこととする。
- 沿岸域における重畳津波の特性に係る知見の拡充に関して、沿岸で海岸線に平行に進行する津波挙動は、その高さが非線形性や分散性により増幅する可能性がある未解明な現象であり、その浸水量や波力の評価について整理しておく必要があるとの意見があった。津波の非線形性及び分散性の両者を高次まで考慮することが可能なモデルの研究に取り組むとともに、浸水量や波力の評価については関連安全研究プロジェクトと情報の連携を図りながら、検討を進めていくこととする。
- 詳細は、別表1を参照。

### ③ 知見の活用先の設定に関する適切性： 適

- 関係する課等の長によるコメント（適、技術基盤課）
  - 本プロジェクトにより、規制に反映すべき新たな知見が得られた場合には、規制基準等への反映の検討に活用される等、規制への活用が期待されるものであり、知見の活用先は適切に設定されている。
- 関係する課等の長によるコメント（一、地震・津波審査部門）
  - 研究成果は、現行規制基準や審査ガイドの妥当性を確認するための根拠や新しい知見を踏まえて審査ガイドにおける解説等に活用されるように整理する必要があるが、現状の「5. 活用先の設定」では、そもそも本研究が規制に活用されるかどうか明確でなく、規制への反映を目的としているかも判断

できないことから、適切性の評価を「－」としている。

- 関係する課等の長によるコメント（適、核燃料施設等監視部門）
  - 研究の背景や目的を踏まえて知見の活用先が設定されている。

## （２）研究計画案の変更の要否及び変更が必要な場合はその変更内容

研究の進め方については、成果目標、実施計画及び技術的観点からいずれも適切であると評価できるため、研究計画案の実施内容の変更は不要とする。

なお、技術評価検討会及び関係する課等の意見を踏まえ、以下の点について研究計画案を修正する。

- 各テーマにおいて、説明性向上のため、説明及び語句を適切なものに修正するとともに、現象の具体例を追加する。
- 個別研究テーマの一部において、「重畳津波のハザード評価に係る知見の拡充」から「沿岸域における重畳津波の特性に係る知見の拡充」に研究テーマ名を変更する。
- 関係課室からの意見を踏まえて、「知見の活用先」の具体例として、基準津波の策定に関する審査ガイドの対応項目を示す。
- 詳細は、添付資料を参照。

## Ⅱ. 火山活動及び火山モニタリング評価に関する調査・研究（R7～R11）

### 1. プロジェクトの目的

本プロジェクトでは、「設計対応不可能な火山事象を伴う火山活動の評価」、「火山影響評価の根拠が維持されていることの確認のための火山活動のモニタリング」及び「気中降下火砕物濃度の推定方法」について、その技術的根拠となる分析データを取得し、審査等での判断に資する具体的な事例となる火山活動及び火山モニタリングに係る調査・評価手法を開発するとともに、気中降下火砕物濃度推定及び実現象に基づく降下火砕物の影響評価に資する知見を蓄積することを目的とする。

### 2. 研究概要

火山活動可能性評価手法の整備に関する調査・研究として、火山噴出物の地球化学的データを網羅的に整理し、マグマの形成プロセスの多様性等に関する知見を蓄積する。

火山モニタリング評価手法に関する調査・研究として、地球物理学的手法による定常的な反射法探査手法に関する技術的知見、海域での地殻変動や地震活動等に関する観測データの蓄積、物質科学的手法によるマグマの蓄積深度や蓄積時間等に関する分析データ、地下水の希土類元素組成データ等の蓄積を行う。

気中降下火砕物濃度の推定方法を整備するための調査として、降灰観測データの蓄積、観測方法の適用性、プラント機器に対する降灰粒子の挙動や凝集の影響把握に資する知見を蓄積する。

### 3. 事前評価結果

#### (1) 評価項目ごとの評価

##### ① 成果目標及び実施計画（成果の公表計画を含む。）に関する適切性：適

- 研究計画案は、火山活動及び火山モニタリング評価、気中降下火砕物濃度の推定に係る技術的根拠を整備し、審査等での判断に資する火山影響評価技術に係る知見を収集する計画となっており、本プロジェクトの成果目標は、目的及び知見の活用先と整合性がとれている。また、成果を適宜公表する予定等、段階的な行程表が具体的に示されており、成果目標及び実施計画は明確かつ実現可能な内容である。以上から、成果目標及び実施計画は適切であると判断する。

##### ② 研究の進め方に関する技術的適切性：適

- 国内外の過去の研究及び最新知見を踏まえているか、解析実施手法・実験方法が適切か、解析結果の評価手法・実験結果の評価手法が適切か、並びに重大な見落とし（観点の欠落）がないかの各観点について、技術評価検討会においても適切とする評価を受けていることから、技術的適切性を有していると判断する。
- 研究の進め方は、技術評価検討会において確認されたように、火山活動評価や火山モニタリング評価に関する過去の研究や知見がおおむね適切にレビューされており、調査・研究手法に反映されている。

#### (技術評価検討会における主な意見及びその対応)

- 国内外の過去の研究が取り込まれているが、引き続き、最新知見を取り入れながら研究を進めてほしいとの意見があった。
- 火山に関する研究は、学術的な知見が他の自然ハザード現象以上に不足していると考えられ、現地調査や実観測によるデータの拡充が必要であり、それらの蓄積に期待するとの意見があった。得られた調査データや観測データを基に、事例研究の積み上げを着実に進めていくこととする。
- 火山活動可能性評価手法の整備に関する調査・研究については、例示した文献に固執せず、噴火規模やマグマ特性等に関する他の文献や、全岩化学組成以外にマグマ粘性に影響を与える斑晶量等についても検討すべきとの意見があった。個別の手法や特定のデータにとらわれないよう、広い視野を持って研究を進めていくこととする。
- 気中降下火砕物濃度の推定方法の整備に資する知見蓄積のための調査については、安全規制上最も影響が大きいと判断した範囲にしばって効果的な観測を行うことで、結果的に視野が狭くなることを懸念するとの意見があった。観測に当たっては、降下火砕物の移流拡散等の全体的な傾向を把握しつつ、機器への影響の観点も含め、見落としが無いように知見を蓄積していくこととする。
- 研究の背景として「不確実性の低減」をあげているが、自然現象を対象とした研究においては低減ができない部分も多いため、加えて「不確実性の把握」

についても念頭に置くべきとの意見があった。重要な観点であるので、実施する研究においては、観測データ等の不確実性の把握についても留意しながら進めていくこととする。

➤ 詳細は、別表2を参照。

③ 知見の活用先の設定に関する適切性： 適

● 関係する課等の長によるコメント（適、地震・津波審査部門）

➤ 火山影響評価に係る活用先については、規制ニーズを踏まえていると考える。今後、審査ガイドの記載内容の具体的な事例や評価の留意点として反映することを求める。

(2) 研究計画案の変更の要否及び変更が必要な場合はその変更内容

研究の進め方については、成果目標、実施計画及び技術的観点からいずれも適切であると評価できるため、研究計画案の実施内容の変更は不要とする。

なお、関係する課等の意見を踏まえ、以下の点について研究計画案を修正する。

- 「5. 知見の活用先」に記載した研究成果の活用先について、評価ガイドの具体的な対応箇所を追記する。
- 詳細は、添付資料を参照。

Ⅲ. 地震作用に対する原子炉建屋等の構造部材の耐力評価手法の適用性等に関する研究(R7～R10)

1. プロジェクトの目的

本プロジェクトでは、耐震及び耐衝撃評価において、近年採用されつつある新たな評価手法の適用性等に関する技術的知見を拡充し、当該手法を適用する際の考え方を整理することを目的とする。

耐震評価に関しては、基準地震動に対し、原子炉建屋等の非線形性を考慮した三次元有限要素解析手法の適用性、屋外重要土木構造物等の構造物及び周辺地盤の非線形性を考慮した有限要素解析手法の適用性を確認する。耐衝撃評価に関しては、先端形状や剛性等が異なる飛翔体の衝突によるアーチ構造等の特殊形状構造物の損傷及び地中構造物周辺の岩盤等への貫入に対する安全性評価手法の適用性を確認する。

2. 研究概要

原子炉建屋基礎版等の面部材のせん断評価に関する既往の試験結果を対象とした解析的検討等により、弾塑性有限要素解析のモデル化及びせん断評価における応力平均化の適用性、適用範囲等を明確にする。

地盤へ逸散する影響を小さくした単純な構造物模型及び構造の複雑さ等の要因を考慮した構造物模型による振動実験及び解析的検討を実施し、三次元有限要素モデルにおける構造減衰の設定の考え方を明確にする。

屋外重要土木構造物を想定した模型を用いた振動実験及び解析的検討を実施し、解析手法の適用性、適用範囲、入力パラメータの設定の妥当性等に関する考え方を明確にし、当該評価における留意事項を抽出する。

岩盤等試験体への貫入実験、平板及びアーチ構造試験体への柔飛翔体の衝突実験を通して、各種損傷状況を整理するとともに、既往の評価式、解析手法等の適用性を明確にする。

### 3. 事前評価結果

#### (1) 評価項目ごとの評価

##### ① 成果目標及び実施計画（成果の公表計画を含む。）に関する適切性： 適

- 研究計画案は、建物・構築物の耐震及び耐衝撃評価において新たに採用されつつある評価手法の適用性等に関する技術的知見を拡充し、審査等において当該手法の適用性を確認する際の考え方を明確にする計画となっており、本プロジェクトの成果目標は、目的及び知見の活用先と整合性がとれている。また、各研究項目の実施内容、成果の公表予定等、段階的な行程が具体的に示されており、成果目標及び実施計画は明確かつ実現可能な内容である。以上から、成果目標及び実施計画は適切と判断する。

##### ② 研究の進め方に関する技術的適切性： 適

- 国内外の過去の研究及び最新知見を踏まえているか、解析実施手法・実験方法が適切か、解析結果の評価手法・実験結果の評価手法が適切か、並びに重大な見落とし（観点の欠落）がないかの各観点について、技術評価検討会においても適切とする評価を受けていることから、技術的適切性を有していると判断する。
- 研究の進め方は、技術評価検討会において確認されたように、柔飛翔体の衝突評価に関する既往の実験事例、建屋三次元有限要素解析手法に関する既往の知見等を参考に実験や解析の実施方法等を計画している。なお、研究実施に当たっては技術評価検討会で出された意見を踏まえ、適切に実験や解析条件等を設定し研究を実施する。

#### (技術評価検討会における主な意見及びその対応)

- 国内外の研究で得られた知見については、これまでの研究の背景にも明確に記載されており、それらを踏まえた研究計画がなされているので適切と考えたとの意見があった。
- 数値解析の検証と妥当性確認については、学会等の最新の知見を踏まえて研究を進める必要があるとの意見があった。国内外の学会等の動向を注視し、必要に応じて、これらの知見にも留意して研究を進めることとする。
- 詳細は、別表 3を参照。

③ 知見の活用先の設定に関する適切性： 適

- 関係する課等の長によるコメント（適、技術基盤課）
  - 本プロジェクトにより、規制に反映すべき新たな知見が得られた場合には、規制基準等への反映の検討に活用される等、規制への活用が期待されるものであり、知見の活用先は適切に設定されている。
- 関係する課等の長によるコメント（適、実用炉審査部門）
  - 耐衝撃評価手法の適用性については、大型航空機等による衝突影響評価に係る審査において妥当性判断に資する技術的知見として活用されることが期待されるため、知見の活用先は適切に設定されている。
- 関係する課等の長によるコメント（適、地震・津波審査部門）
  - 建物・構築物等の耐震評価における非線形性を考慮した有限要素解析手法の適用性に関する研究に関する研究成果は、審査における妥当性判断のための技術的根拠及び留意すべき確認事項として取りまとめられ、解析評価手法について、適用範囲を含めて適用性・妥当性判断に資する技術的知見として、審査に活用するため審査ガイドに反映することが期待される。

（２）研究計画案の変更の要否及び変更が必要な場合はその変更内容

研究の進め方については、成果目標、実施計画及び技術的観点からいずれも適切であると評価できるため、研究計画案の実施内容の変更は不要とする。

なお、技術評価検討会及び関係する課等の意見を踏まえ、以下の点について研究計画案を修正する。

- 外部専門家・専門技術者からの意見を踏まえて、「６．安全研究概要」及び「７．成果目標と実施計画」の個別研究テーマの一部において、分かりやすさの観点で説明及び語句を適切なものに修正するとともに、「９．備考」に関連論文を追加する。
- 関係課室からの意見を踏まえて、「３．背景」、「５．知見の活用先」及び「７．成果目標と実施計画」に記載された研究の必要性、研究成果の活用先の具体例を修正する。
- 詳細は、添付資料を参照。

IV. 地震荷重を受ける容器・配管溶接部の損傷形態等に関する研究（R7～R10）

1. プロジェクトの目的

定期事業者検査や規制基準適合性審査での規則への適合性の確認は、常に最新の科学的・技術的知見に基づいて行う必要がある。また、新たな原子力規制検査が施行され、内部事象を対象としたリスク情報の活用が開始されたが、自然災害に関する日本の地域特性を勘案すると、今後は外部事象を対象としたリスク情報を活用する必要がある。

本プロジェクトは、最新の研究動向等を踏まえて外部事象に対する設備のフラジリティ評価手法の信頼性向上を図り、規制基準等への反映の検討、民間規格の妥当性判断及

び外部事象を対象としたリスク情報の活用等に資する技術的知見を拡充する。

## 2. 研究概要

今後、産業界にて整備予定の確率論的破壊力学を活用した供用期間中検査の妥当性確認のため、地震荷重によって容器・配管の溶接部が損傷に至る確率等について、技術的知見を拡充する。

原子力規制検査で用いる確率論的地震リスク評価の信頼性向上のため、地震時の設備の同時損傷確率に関する既往の算定手法の適切性を確認するための技術的知見を拡充する。

現行の規制基準等への反映の検討のため、粒径の細かい土砂等が多く混入した津波の発生可能性やそれが防潮堤等に及ぼす影響に係る技術的知見を拡充するとともに、既往の設備の耐震試験で観察される損傷モードとは異なる衝撃振動による損傷モードの発生原因を明らかにする。

## 3. 事前評価結果

### (1) 評価項目ごとの評価

#### ① 成果目標及び実施計画（成果の公表計画を含む。）に関する適切性： 適

- 研究計画案は、外部事象に対する設備のフラジリティ評価手法の信頼性向上を図り、規制基準等への反映の検討、民間規格の妥当性判断及び外部事象を対象としたリスク情報の活用等に資する技術的知見を拡充する計画となっており、本プロジェクトの目的や知見の活用先と整合していることから適切と判断する。
- 各研究の成果目標及び実施計画についても、成果の公表も含めた実施行程が示されており、明確であり実現可能な内容となっていることから適切と判断する。

#### ② 研究の進め方に関する技術的適切性： 適

- 国内外の過去の研究及び最新知見を踏まえているか、解析実施手法・実験方法が適切か、解析結果の評価手法・実験結果の評価手法が適切か、並びに重大な見落とし（観点の欠落）がないかの各観点について、技術評価検討会においても適切とする評価を受けていることから、技術的適切性を有していると判断する。
- 研究の進め方は、技術評価検討会において確認されたように、設備の同時損傷確率の算定や黒津波の影響評価等に係る過去の研究、最新知見を踏まえた適切な研究計画となっている。また、定められた期間で適切な計画となっており、実施手法、実験方法についても適切である。

（技術評価検討会における主な意見及びその対応）

- 定められた期間で適切な計画となっており、実施手法、実験方法は適切であるとの意見があった。
- 「地震荷重を受ける容器・配管溶接部の損傷形態に係る技術的知見の拡充」について、過去の実験データを精査した上で、より精緻な実験計画とすること

とが望ましいとの意見があった。本研究の初年度に実施する文献調査において、新たな実験の必要性を精査した上で、精緻な実験計画を策定することとする。

- 「黒津波の発生可能性評価及び影響評価に係る技術的知見の拡充」について、密度増加による水深係数の増加の要因や既往評価の有効性等を詳細に分析した上で、評価手法の検討等を進めると良いとの意見があった。既往研究と本研究の結果を比較し、相違がある場合はその要因を明らかにした上で、評価手法の検討に取り組むこととする。
- 「既往の設備の耐震試験で観察される損傷モードとは異なる衝撃振動による損傷モードに係る技術的知見の拡充」について、複数の故障モードの相互作用についても考慮する必要があるとの意見があった。電動弁駆動部の損傷モードの原因究明に当たっては、固定ボルトの緩みに起因する応答増幅に加え、衝撃特有の現象を起因とする材料破損が複合的に作用して損傷した可能性も含め、研究を進めることとする。
- 詳細は、別表 4を参照。

### ③ 知見の活用先の設定に関する適切性： 適

- 関係する課等の長によるコメント（適、技術基盤課）
  - 本プロジェクトにより、規制に反映すべき新たな知見が得られた場合には、規制基準等への反映の検討に活用される等、規制への活用が期待されるものであり、知見の活用先は適切に設定されている。
  - また、「地震荷重を受ける容器・配管溶接部の損傷形態に係る技術的知見の拡充」については、今後、PFMを活用した供用期間中検査が日本機械学会「発電用原子力設備規格 維持規格」に取り入れられた際に、その技術評価における妥当性確認において活用が期待される。
- 関係する課等の長によるコメント（適、実用炉審査部門）
  - 既往の設備の耐震試験で観察される損傷モードとは異なる衝撃振動による損傷モードの発生原因の究明については、大型航空機の衝突に対する設備の安全評価に関連する規則・解釈や審査ガイドの根拠知見の拡充に活用されるとともに航空機衝突による影響評価に係る審査において妥当性判断に資する技術的知見として活用されることが期待されるため、知見の活用先は適切に設定されている。
- 関係する課等の長によるコメント（適、地震・津波審査部門）
  - 「黒津波の発生可能性評価及び影響評価に係る技術的知見の拡充」の研究成果は、審査における妥当性判断のための技術的根拠及び留意すべき確認事項として取りまとめられ、黒津波の発生可能性及び波力・波圧評価について、審査における基準適合性判断に資する技術的知見として、審査に活用するため審査ガイドに反映することが期待される。
- 関係する課等の長によるコメント（適、検査監督総括課）

- 研究の背景や目的を踏まえて知見の活用先が設定されている。本研究のうち、「地震時の設備の同時損傷確率の算定手法に係る技術的知見の拡充」により得られる知見は、地震PRAから得られる知見の幅を広げるものであり、適切性確認におけるフラジリティの妥当性の確認などに活用できる可能性があると考えている。

## (2) 研究計画案の変更の可否及び変更が必要な場合はその変更内容

研究の進め方については、成果目標、実施計画及び技術的観点からいずれも適切であると評価できるため、研究計画案の実施内容の変更は不要とする。

なお、技術評価検討会及び関係する課等の意見を踏まえ、以下の点について研究計画案を修正する。

- 「地震荷重を受ける容器・配管溶接部の損傷形態に係る技術的知見の拡充」について、外部専門家から紹介された配管分岐部（ティ）の地震時損傷に関する参考文献を「6. 安全研究概要」にて引用する。
- 「黒津波の発生可能性評価及び影響評価に係る技術的知見の拡充」について、粒子を多く含む水が非常用海水冷却系に及ぼす影響評価についても課題の一つであることを「3. 背景」に追記する。また、「水深係数」の原論文を引用する。
- 各研究について、「4. 目的」の記載を「7. 成果目標と実施計画」の「成果目標」に合わせて修正する。
- 関係課室からの意見を踏まえて、「3. 背景」、「4. 目的」、「5. 知見の活用先」及び「7. 成果目標と実施計画」に記載された研究成果の活用方法や活用先の具体例を修正する。
- 詳細は、添付資料を参照。

## V. 原子力施設の経年劣化等を考慮した火災影響評価手法の整備に関する研究 (R7～R10)

### 1. プロジェクトの目的

火災は原子力施設における共通原因故障を引き起こす起因事象の中でも重要な事象の一つであることから、火災事象について継続的に知見を拡充する必要がある。本プロジェクトでは、運転開始後 30 年以降に事業者より申請される長期施設管理計画における電気・計装品の経年劣化評価の妥当性確認に必要な知見を取得するとともに、電気・計装品の経年劣化を踏まえた火災に係る試験・解析及び火災影響評価手法・解析コードの整備を行い、火災防護に係る規制基準類の妥当性確認に資する技術的知見を取得する。

### 2. 研究概要

事故時環境で機能要求のある電気・計装設備の実機材料の劣化状態や事故時性能を評価して長期健全性評価の留意点を抽出するとともに、実機材料高圧ケーブルの水トリー劣化の状況等を調査して適用されている絶縁診断による劣化評価の保守性を確認する。また、火災時を模擬した電気ケーブルの熱劣化試験を行い、温度、構成材料等が絶縁抵抗

低下に与える影響を評価するとともに、経年劣化模擬ケーブルを用いた燃焼試験等を行い難燃性の経年劣化影響を評価する。さらに、ケーブルや可燃性液体等の火災試験データ等を取得して火災解析を行い解析コードの妥当性確認を行うとともに、海外機関等の火災解析手法も参考として火災影響評価手法・解析コードの整備を行う。

### 3. 事前評価結果

#### (1) 評価項目ごとの評価

##### ① 成果目標及び実施計画（成果の公表計画を含む。）に関する適切性： 適

- 研究計画は火災防護・高経年化分野の規制課題及び先行研究を踏まえて立案されており、実験・解析で適用する方法や手順も具体的に示されている。また、成果の公表も計画していることから、成果目標及び実施計画は適切と評価する。

##### ② 研究の進め方に関する技術的適切性： 適

- 国内外の過去の研究及び最新知見を踏まえているか、解析実施手法・実験方法が適切か、解析結果の評価手法・実験結果の評価手法が適切か、並びに重大な見落とし（観点の欠落）がないかの各観点について、技術評価検討会においても適切とする評価を受けていることから、技術的適切性を有していると判断する。

（技術評価検討会における主な意見及びその対応）

- 火災解析の精度目標を設定し適切な数値モデルを想定することが重要との意見があった。適切な精度目標を設定してモデルを設定し火災解析を行う。
- 先行研究との関係を整理しておくこと、研究人材の技術継承に留意すべきとの意見があった。これらの点にも留意して研究を推進していく。
- 詳細は、**別表5**を参照。

##### ③ 知見の活用先の設定に関する適切性： 適

- 関係する課等の長によるコメント（適、技術基盤課）
  - 本プロジェクトにより、規制に反映すべき新たな知見が得られた場合には、規制基準等への反映の検討に活用される等、規制への活用が期待されるものであり、知見の活用先は適切に設定されている。
- 関係する課等の長によるコメント（適、火災対策室）
  - 研究の背景や目的を踏まえて知見の活用先が設定されており、電気ケーブル等の経年劣化影響による絶縁低下現象の評価の研究により、火災防護審査基準や内部火災ガイド等の改訂も見据え、火災評価手法の信頼性の向上に必要な知見が得られると考える。
- 関係する課等の長によるコメント（適、実用炉審査部門、高経年化審査部門）
  - 本プロジェクトの電気ケーブル等の経年劣化影響を考慮した絶縁低下現象等に係る評価は、長期施設管理計画認可申請等の審査における技術的知見としての活用が期待されるため、知見の活用先は適切に設定されている。

- 関係する課等の長によるコメント（適、検査監督総括課）
  - 研究の背景や目的を踏まえて知見の活用先が設定されている。また、本研究のうち、「火災影響評価手法・解析コード等の整備」により整備された解析コード等は、原子力規制検査において確認された気付き事項の安全への影響評価などに活用できる可能性があると考えている。
- 関係する課等の長によるコメント（適、核燃料施設等監視部門）
  - 研究の背景や目的を踏まえて知見の活用先が設定されている。なお、火災時におけるケーブルの熱劣化等に関する研究は、研究計画の記載において現行のガイド等における課題をより具体的に示すことで、知見の活用先の設定が適切であることが明確になると考える。

## （２）研究計画案の変更の要否及び変更が必要な場合はその変更内容

研究の進め方については、成果目標、実施計画及び技術的観点からいずれも適切であると評価できるため、研究計画案の実施内容の変更は不要とする。

なお、技術評価検討会及び関係する課等の意見を踏まえ、以下の点について研究計画案を修正する。

- 背景でケーブル熱劣化研究に係る課題と現行のガイド等の関係を具体的に示す。
- 目的で電気・計装設備に係る研究の成果の反映先をより明確に示す。
- 研究概要で火災解析では必要かつ適切な精度目標を設定する旨追記する。
- 実施計画で実機材と経年劣化模擬材の比較を行う際の適用手法を明記する。
- 詳細は、添付資料を参照。

## VI. 改良型燃料炉心核特性評価技術に関する高度化研究（R7～R10）

### 1. プロジェクトの目的

10 行 10 列燃料集合体については、型式証明審査が開始されており、今後、安全評価に用いる解析コードのトピカルレポートが承認された後、事業者より 10 行 10 列燃料集合体導入に伴う設置変更許可の申請がなされる見込みである。本研究では、10 行 10 列燃料集合体の設計や安全解析コードの変更等、従来技術からの変更点に関して調査するとともに、詳細炉心解析コード等を整備して解析を行い、設置変更許可申請の適合性審査において、事業者が実施した安全評価の妥当性を判断する際の技術的根拠となる知見を取得する。

### 2. 研究概要

海外の 10 行 10 列燃料装荷実機炉心を参考に、炉心解析に必要な 10 行 10 列燃料装荷炉心データを整備し、それをもとに安全解析用の炉心モデルを作成する等、10 行 10 列燃料装荷炉心の安全評価に必要な技術基盤の構築を図る。また、最適評価コード、詳細炉心解析コード等を整備し、従来型燃料装荷炉心も対象に含めて解析を行い、核特性解析手法や評価モデルの違いが評価結果に与える影響等を明らかにする等、炉心解析

基盤技術の高度化及び知見の拡充を図る。

### 3. 事前評価結果

#### (1) 評価項目ごとの評価

##### ① 成果目標及び実施計画（成果の公表計画を含む。）に関する適切性： 適

- 研究計画（案）は、10行10列燃料装荷炉心の適合性審査に必要な技術的知見の収集を目的として作成されており、成果目標及び実施計画は明確で、かつ実現可能な内容である。成果の公表も計画されていることから、成果目標及び実施計画は適切であると評価する。

##### ② 研究の進め方に関する技術的適切性： 適

- 国内外の過去の研究及び最新知見を踏まえているか、解析実施手法・実験方法が適切か、解析結果の評価手法・実験結果の評価手法が適切か、並びに重大な見落とし（観点の欠落）がないかの各観点について、技術評価検討会においても適切とする評価を受けていることから、技術的適切性を有していると判断する。

（技術評価検討会における主な意見及びその対応）

- 10行10列燃料装荷炉心において、特有の現象や解析精度向上が必要とされる現象について整理すべきとの意見があった。海外の10行10列燃料装荷実機炉心に関する情報を収集するとともに、10行10列燃料集合体固有の現象等について整理しながら研究を推進していく。
- 詳細は、別表6を参照。

##### ③ 知見の活用先の設定に関する適切性： 適

- 関係する課等の長によるコメント（適、実用炉審査部門）
  - 当部門からのニーズである“（1）10行10列燃料装荷炉心に対する評価技術の高度化”については、事業者の10行10列燃料集合体に関する設置変更許可申請の適合性審査において、過渡解析及び設計基準事故解析の妥当性を確認するための技術的根拠の一環として活用できるものと判断できることから、活用先の設定は“適”と判断する。但し、過渡解析及び設計基準事故解析の妥当性を確認するためには、熱流動解析の検討も必要なことから、シビアアクシデントの熱流動グループとの連携について、実施計画に含める必要がある。
  - “（2）炉心解析基盤技術の高度化整備”については、当部門としてはシーズに区分されるものの認識であり、本研究の成果が将来的には、当部門の基準適合性審査の過程において新知見として活用される可能性はあると判断する。また、事業者の安全性向上評価の内容を確認する場合にも、活用される可能性はあると判断する。但し、活用先としている“最新知見を反映した安全規制の実現”については、ここでいう“安全規制の実現”の範囲が明

確ではない（審査への活用に留まるのか、規則またはガイド作成・ガイドまでに及ぶのか）ため、現時点では適否の判断はしないものとする。

## （２）研究計画案の変更の要否及び変更が必要な場合はその変更内容

研究の進め方については、成果目標、実施計画及び技術的観点からいずれも適切と評価できるため、研究計画案の実施内容の変更は不要とする。

なお、関係する課等の意見を踏まえ、以下の点について研究計画案に追記する。

- 10行10列燃料集合体関連の審査の状況を注視して、本プロジェクトから得られる成果が審査に活用できるよう、スケジュールや優先度については柔軟に対応することとする。
- 詳細は、添付資料を参照。

## VII. 次世代炉の事故解析に必要な基盤技術の構築に関する研究（R7～R10）

### 1. プロジェクトの目的

高速炉実証炉及び高温ガス炉実証炉の適合性審査において事業者側評価の妥当性を判断するために必要となる技術的知見の取得を目的として、高速炉及び高温ガス炉の国内外開発動向及び海外規制動向を調査する。さらに、実証炉に関する設計情報等を収集・整理する。これらの情報に基づき、高速炉及び高温ガス炉のそれぞれの特徴を考慮した事故解析手法を整備し、予備解析を行う。

### 2. 研究概要

高速炉実証炉の設計及び新規の安全対策の評価のため、高速炉の国内外開発動向及び海外規制動向を調査するとともに、実証炉に関する設計情報等を収集・整理する。これを踏まえて、決定論及び確率論的評価手法の改良整備と技術的知見を取得する。特に、新規技術が安全性に及ぼす影響の確認のため、新規技術に関する知見を取得する。

高温ガス炉実証炉についても、同様に国内外開発動向及び海外規制動向を調査するとともに、実証炉に関する設計情報等を収集・整理する。高温ガス炉の安全上の特徴を整理して、実証炉の安全上重要となる論点を整理する。また、評価事故シーケンスの選定手法及びその評価に必要な事故解析手法を確立し、関連する技術的知見を収集する。

### 3. 事前評価結果

#### （１）評価項目ごとの評価

##### ① 成果目標及び実施計画（成果の公表計画を含む。）に関する適切性： 適

- 研究計画は次世代炉（高速炉及び高温ガス炉）に関する規制課題を踏まえて立案されており、高速炉実証炉及び高温ガス炉実証炉の適合性審査に必要となりうる技術的知見について、事故解析手法の整備と予備解析をとおして収集する計画が具体的に示されている。また、成果の公表も計画していることから、成果目標及び実施計画は適切と判断する。

## ② 研究の進め方に関する技術的適切性： 適

- 国内外の過去の研究及び最新知見を踏まえているか、解析実施手法・実験方法が適切か、解析結果の評価手法・実験結果の評価手法が適切か、並びに重大な見落とし（観点の欠落）がないかの各観点について、技術評価検討会においても適切とする評価を受けていることから、技術的適切性を有していると判断する。

（技術評価検討会における主な意見及びその対応）

- 研究計画は技術的に適切であるが、高速炉、高温ガス炉とも、国内外の開発動向や国外規制動向等の情報収集を進めながら、適切に研究計画に反映するとともに、重要度に応じて効率的に研究を進めていくべきとの意見があった。最新知見を含め広く情報収集を行い、研究計画へ反映するとともに、重要度や効率性を意識しながら研究を推進していく。
- 詳細は、**別表 7**を参照。

## ③ 知見の活用先の設定に関する適切性： 適

- 関係する課等の長によるコメント（適、研究炉等審査部門）
  - 現在検討されている次世代炉（ナトリウム冷却型高速炉、高温ガス炉）の概念に対して、様々な可能性を考慮して幅広く知見を蓄積することが必要である。
  - 高速炉における燃料技術、免震条件の地震 PRA など、知見の必要性に応じて研究計画を柔軟に見直すことが必要である。
  - 『解析手法の整備』については、審査における活用方法の観点から当部門と協議を継続し、必要に応じて研究計画に柔軟に見直すことが必要である。

## （２）研究計画案の変更の要否及び変更が必要な場合はその変更内容

研究の進め方については、成果目標、実施計画及び技術的観点からいずれも適切と評価できるため、研究計画案の実施内容の変更は不要とする。

なお、技術評価検討会の意見を踏まえ、以下の点について研究計画案を修正する。

- 一部の説明及び語句を適切なものに修正する。
- 研究計画遂行に関して、専門家と議論するために、優先度に応じて、一部の研究項目の学会発表を２年目に前倒しする。
- 詳細は、**添付資料**を参照。

## VIII. 実機材料等を活用した経年劣化評価・検証に係る研究（フェーズ 2）（R7～R11）

### 1. プロジェクトの目的

国内外の廃止措置中の原子力発電所から長期間使用した実機材料を採取して試験・分析を行い、原子炉容器及び炉内構造物の健全性に関する知見を拡充し、これまでに実施してきた加速劣化試験結果に基づく経年劣化評価手法の保守性を確認する。

## 2. 研究概要

原子炉容器の中性子照射脆化評価に係る研究について、原子炉容器の高経年化に伴う中性子照射脆化の進行に関連し、実機材料（スウェーデンのリングハルス 2 号機（PWR）の監視試験片、原子炉容器本体及びアーカイブ材）を用いた破壊靱性試験等を実施し、取得した試験結果より破壊靱性温度移行量とシャルピー衝撃試験温度移行量との関係を整理する。

炉内構造物の中性子照射による靱性低下に係る研究について、炉内構造物の高経年化に伴う中性子照射による破壊靱性低下に関連し、実機材料（上部格子板等）を用いた破壊靱性試験データを取得し、加速照射試験等により取得した破壊靱性試験データの下限により策定された一般社団法人日本機械学会維持規格の破壊力学的評価式の保守性を確認する。

予防保全対策施工箇所に対する長期健全性評価に係る研究について、応力腐食割れ対策として事業者が実施した予防保全対策実施箇所における長期供用期間における圧縮残留応力の維持を確認するため、実機材料（炉心シュラウド等）を用いた測定を実施する。

PWR 炉内構造物の長期健全性評価に係る研究について、高照射領域における照射誘起型応力腐食割れの感受性を確認するため、実機材料（炉内構造物（バッフルフォーマーボルト等））を用いた研究を実施する。なお、対象となる炉内構造物の取替工事は令和 11 年頃（予定）を目途に実施することから、本フェーズでは事業者の状況を確認し、研究計画案を立案する。

## 3. 事前評価結果

### （1）評価項目ごとの評価

#### ① 成果目標及び実施計画（成果の公表計画を含む。）に関する適切性： 適

- 研究計画（案）は本研究の目的及びその成果の活用先と整合しており、成果の公表も含め、最終成果目標を明確に設定していることから適切と判断する。
- 研究計画（案）では試験で適用する方法や手法が具体的に示されており、成果目標及び実施計画は明確であり実現可能な内容となっていると判断する。

#### ② 研究の進め方に関する技術的適切性： 適

- 国内外の過去の研究及び最新知見を踏まえているか、解析実施手法・実験方法が適切か、解析結果の評価手法・実験結果の評価手法が適切か、並びに重大な見落とし（観点の欠落）がないかの各観点について、技術評価検討会においても適切とする評価を受けていることから、技術的適切性を有していると判断する。

（技術評価検討会における主な意見及びその対応）

- 実機材料を分析・評価することで、原子力プラントの安全性を検証する試みであり、有益な知見が得られるものと判断できる。過去の研究や最新知見では、実験室で行われる加速試験の妥当性や、長時間用いられた材料の健全性に対する保

守性が議論されることがあるが、本研究はこれらニーズに対応した計画となっているとの評価を受けた。

➤ 詳細は、別表 8を参照。

### ③ 知見の活用先の設定に関する適切性： 適

#### ● 関係する課等の長によるコメント（適、技術基盤課）

➤ 本研究で得られた技術的知見は、実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈第 14 条等に引用された民間規格の技術評価の技術的根拠等として活用が期待されるものであり、知見の活用先は適切に設定されている。

#### ● 関係する課等の長によるコメント（適、実用炉審査部門、高経年化審査部門）

➤ 本プロジェクトの研究内容は、長期施設管理計画認可申請等の審査における技術的知見としての活用が期待されるため、知見の活用先は適切に設定されている。

## （２）研究計画案の変更の要否及び変更が必要な場合はその変更内容

研究の進め方については、成果目標、実施計画及び技術的観点からいずれも適切であると評価でき、技術評価検討会及び関係する課等から変更を要する意見はなかったため、研究計画案の実施内容の変更は不要とする。

## Ⅸ. 東京電力福島第一原子力発電所燃料デブリ分布の放射線計測に基づく推定方法に関する研究（R7～R11）

### 1. プロジェクトの目的

東京電力福島第一原子力発電所（以下「1F」という。）では廃炉作業が続けられており、規制庁はその安全性や技術的妥当性を確認する必要がある。廃炉作業の一環として、燃料デブリ分布の推定が行われると想定されるが、規制庁では当該分野に対する知見が不足している。そこで、放射線計測に基づく既存技術や類似研究の調査により情報を収集、整理するとともに、燃料デブリ分布推定への適用候補技術に関して実験及び解析により成立性等を検証し、得られた知見を事業者が実施する廃炉作業の技術的妥当性の評価や1F 事故分析等に活用する。なお、本プロジェクトでは、計測技術や推定方法の確立・実用化は目的としない。

### 2. 研究概要

本プロジェクトでは、中性子計測に基づく燃料デブリ分布の推定方法の成立性等に主眼を置き、以下の研究を実施する。また、研究期間中に得られる炉内調査結果や事業者動向等により、研究計画や内容の見直しを随時実施し、廃炉作業の安全性や技術的妥当性の確認に必要な知見を取得していく。

燃料デブリから放出される中性子を計測して燃料デブリの分布を推定する方法に対し

て、既存技術等の情報収集及び整理を行う。有効性の高い技術に対しては 1F 炉内で想定される状況を考慮した解析及び実験を実施することにより、当該技術の適用範囲や特性等に関する知見を取得、整理する。

中性子放射化法を用いた既存技術等の情報収集及び整理を行い、燃料デブリ分布推定に対する適用性を評価する。適用可能である場合には、上記同様に解析及び実験を実施することにより、当該技術の適用範囲や特性等に関する知見を取得、整理する。

### 3. 事前評価結果

#### (1) 評価項目ごとの評価

##### ① 成果目標及び実施計画（成果の公表計画を含む。）に関する適切性： 適

- 既存技術に基づいて、1F 廃炉作業の安全性や技術的妥当性の確認に必要な知見を取得する研究実施計画となっており、成果目標も明確かつ適切に設定されている。また、成果の公表も計画されていることから、成果目標及び実施計画は適切であると評価する。

##### ② 研究の進め方に関する技術的適切性： 適

- 国内外の過去の研究及び最新知見を踏まえているか、解析実施手法・実験方法が適切か、解析結果の評価手法・実験結果の評価手法が適切か、並びに重大な見落とし（観点の欠落）がないかの各観点について、技術評価検討会においても適切とする評価を受けていることから、技術的適切性を有していると判断する。
- 研究対象として、これまでの廃炉作業の経緯や現状の技術開発を踏まえて具体的に 2 種類の中性子計測方法に焦点を当て、1F 炉内で想定される状況を考慮した測定方法や線源推定方法等について知見を取得することとしており、技術的に適切な研究計画であると評価できる。
- 技術評価検討会において、中性子計測に関する知見の収集は技術的に適切と評価された。ただし、中性子計測以外の方法等についての意見もあり、燃料デブリの試験的取出しや炉内調査等から得られる情報を注視し、研究の進め方を適宜見直すこととする。

#### (技術評価検討会における主な意見及びその対応)

- 中性子計測結果から燃料デブリ分布を画像化する技術（マッピング技術等）の扱いが不明確であるとの意見があった。線源推定方法における重要技術であることを研究計画の中で明記する。
- ガンマ線や放射線以外の計測に基づく燃料デブリ分布推定方法も考えられるため検討に値するとの意見があった。中性子計測に基づく方法を主眼とするが、それ以外も当初から可能性を否定せずに、事業者動向や炉内調査結果を踏まえたうえで、必要な知見の収集に努める。
- 炉内で燃料デブリが置かれている状況や中性子吸収材等による中性子計測への影響の検討が重要であるとの意見があった。シミュレーション計算や検

証実験において様々な状況を考慮した知見の取得を進めることとする。

➤ 詳細は、**別表 9**を参照。

③ 知見の活用先の設定に関する適切性： 適

- 関係する課等の長によるコメント（適、東京電力福島第一原子力発電所事故対策室）
  - 事故の分析に係る活用先については、適切であると考ええる。
  - 「実施計画の審査」について、東京電力の申請内容によっては、本研究の知見を実施計画の審査に活用するとは限らないため、知見の活用先から「実施計画の審査」を除いていただきたい。
  - 研究計画（案）中の「3. 背景」及び「4. 目的」についても同じ趣旨で修正をお願いしたい。

（2）研究計画案の変更の要否及び変更が必要な場合はその変更内容

研究の進め方については、成果目標、実施計画及び技術的観点からいずれも適切と評価できるため、研究計画案の実施内容の変更は不要とする。

なお、技術評価検討会及び関係する課等の意見を踏まえ、以下の点について研究計画案に追記する。

- 知見の活用先を「事業者の廃炉作業に係る安全確保及び技術的妥当性の評価、並びに事故分析」と改め、「実施計画の審査」は必要に応じた対応と位置付ける。
- 中性子計測結果から燃料デブリ分布を画像化する技術が知見収集の対象であることを記載する。
- 詳細は、**添付資料**を参照。

**X. 第一種廃棄物埋設施設の性能評価及び線量評価に関する研究（R7～11）**

1. プロジェクトの目的

第一種廃棄物埋設の安全確保に必要な事項の体系的な整理に基づき、第一種廃棄物埋設施設の性能評価及び線量評価の観点から、安全確保に求められる規制基準等の整備及び審査等に必要な科学的・技術的知見を取得することで、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」で述べられている、最終処分に関する安全の確保のための規制に関する事項の順次整備に資することを目的とする。

2. 研究概要

第一種廃棄物埋設施設を対象に、施設の構成要素の性能評価及び処分システムの線量評価に係る科学的・技術的知見を取得する。

性能評価に関しては、処分システムの構成部材の長期的な性能を評価する観点で、天然バリアに係る隔離性能、地下水流動性能及び核種移行性能に関する研究として、隆起・侵食の評価手法や地下水流動モデルの妥当性検証方法の検討等を行う。また、人工バリ

アに係る各部材の長期的な性能として長期物質安定性能、透水性能等に関する検討等を行う。

線量評価に関しては、構成部材ごとの設計の裕度や経年変化に着目した核種移行及び線量評価を通じて、性能の不確かさが線量へ与える影響について系統的に整理する観点で、構成部材ごとの設計の裕度や経年変化に着目した核種移行及び線量評価を通じて、性能の不確かさが線量へ与える影響について検討する。

### 3. 事前評価結果

#### (1) 評価項目ごとの評価

##### ① 成果目標及び実施計画（成果の公表計画を含む。）に関する適切性： 適

- 研究計画案は、国内の事業の進捗や国際的な動向を踏まえて策定されており、目的や知見の活用先と整合している。また、実施内容の明確性及び実現可能性についても妥当である。さらに、論文等の公表計画、プロジェクト終了後の成果の取りまとめの方針も適切に設定されている。

##### ② 研究の進め方に関する技術的適切性： 適

- 国内外の過去の研究及び最新知見を踏まえているか、解析実施手法・実験方法が適切か、解析結果の評価手法・実験結果の評価手法が適切か、並びに重大な見落とし（観点の欠落）がないかの各観点について、技術評価検討会においてもおおむね適切とする評価を受けていることから、技術的適切性を有していると判断する。
- 技術評価検討会において、一部試験の前提条件等が不明確とされた点については、コメントを踏まえて研究計画案に追記する。

#### (技術評価検討会における主な意見及びその対応)

- 本プロジェクトは国内外の最新動向を踏まえて計画されており、課題設定や研究の進め方はおおむね適切に設定されている、と評価された。
- 核種移行性能に係る研究に関して、地下環境の多様性を考慮し、重要となる因子の整理とそれらに着目した検討が必要とのコメントがあった。既往の研究を参考にデータの取得と環境因子の重要性についても念頭に起きながら研究を進めることとする。
- セメント系部材に係る研究に関して、要求される安全機能とひび割れ等の部材特性との関係及び先行研究との関係についての説明が必要との指摘があったため、研究計画（案）に説明を追記する。
- ベントナイトに係る研究に関して、課題設定において前提となる冠水の状態設定が重要との指摘があった。核種移行が始まる初期状態等を考慮し研究を進めることとする。
- 詳細は、別表 10を参照。

### ③ 知見の活用先の設定に関する適切性： 適

- 関係する課等の長によるコメント（適、原子力規制企画課）
  - 第一種廃棄物埋設施設に係る地層処分の安全確保のために必要な技術的事項に関し研究を行い、知見を収集整理することは、今後規制基準を策定する上で必要不可欠である。
- 関係する課等の長によるコメント（適、研究炉等審査部門）
  - 地層処分の審査において、立地選定における隆起・侵食作用に係る評価、安全評価における地下水流動解析及び核種移行に係る評価の適切性を審査で判断するための技術基盤の整備に資すると考える。
- 関係する課等の長によるコメント（適、核燃料施設等監視部門）
  - 本研究により得られた知見・評価・データ等は、第一種埋設施設に係る規制ツール（審査のための判断根拠、ガイド類の制定等）の整備に活用することが明示的に示されていることから、適切であると考ええる。

### （２）研究計画案の変更の要否及び変更が必要な場合はその変更内容

研究の進め方については、成果目標、実施計画及び技術的観点からいずれも適切であると評価できるため、研究計画案の実施内容の変更は不要とする。

なお、技術評価検討会において試験の前提条件等が不明確と指摘された以下の点について研究計画案に追記する。

- 核種移行性能に係る研究に関して、具体的な研究対象がわかるように研究計画案に追記する。
- セメント系部材に係る研究に関して、想定する施設と安全機能の関係及び先行研究について研究計画案に追記する。
- ベントナイトに係る研究について、課題設定の前提を研究計画案に追記する。
- 詳細は、添付資料を参照。

## XI. 放射性廃棄物の処分前管理及び施設の廃止措置に係る放射能濃度評価等の信頼性確保に関する研究（R7～R10）

### 1. プロジェクトの目的

放射性廃棄物の処分前管理及び施設の廃止措置に係る分野における事業（変更）許可申請及び後段規制において、クリアランスの確認、廃棄体等の安全性の確認及び廃止措置の終了確認を適切に行う上で必要となる科学的・技術的知見を取得し、蓄積する。

### 2. 研究概要

クリアランスの確認に関しては、クリアランス対象物を放射線測定する際、放射能濃度の値を信頼性を確保して導出する方法について知見を蓄積するとともに、国内外の動向調査を行い、放射線測定・評価手段における定量評価の妥当性を合理的に確認するための手段の開発及びバックデータの整備を進める。廃棄体等の安全性確認に関しては、

新たな性状の廃棄体及び廃棄物についての放射能濃度評価、放射化計算の活用、ウラン廃棄物等の放射能濃度評価等に係る知見の蓄積を行う。廃止措置におけるエンドステートに関しては、原子力施設のエンドステートに関する海外での事例及び国際原子力機関（IAEA）での議論を踏まえた国際状況を調査し、技術的な課題を抽出する。また、上記それぞれに共通する放射性核種含有廃棄物等の特性評価方法に関する知見の蓄積も行う。

### 3. 事前評価結果

#### （１）評価項目ごとの評価

##### ① 成果目標及び実施計画（成果の公表計画を含む。）に関する適切性：適

- 研究計画案は、国内の事業の進捗や国際的な動向を踏まえて策定されており、目的や知見の活用先と整合している。また、論文等の公表計画、プロジェクト終了後の成果の取りまとめの方針も適切に設定されている。

##### ② 研究の進め方に関する技術的適切性：適

- 国内外の過去の研究及び最新知見を踏まえているか、解析実施手法・実験方法が適切か、解析結果の評価手法・実験結果の評価手法が適切か、並びに重大な見落とし（観点の欠落）がないかの各観点について、技術評価検討会においても適切とする評価を受けていることから、技術的適切性を有していると判断する。

#### （技術評価検討会における主な意見及びその対応）

- 本プロジェクトは国内外の最新動向を踏まえて計画されており、課題設定や研究の進め方はおおむね適切に設定されていると評価された。
- 廃棄体等の安全性確認における新たな放射能濃度評価上の課題の調査及び放射性核種含有廃棄物等の特性評価方法における化学分析における速度論的事象について具体的に何を取り扱おうとしているかを計画書の段階より明確化した方が良いとの意見があり、それに対応して取り扱う事象を具体的に定めて研究を行うこととした。
- クリアランスの確認に関しては、具体的なクリアランスの評価の中での測定・評価に関する技術的項目についてどこまで安全研究で行うかという質問があった。実際の評価に用いられる具体的な測定・評価技術については事業者側で整備する内容であり、それを確認するための技術的知見の蓄積が安全研究の中で実施する内容となるが、研究を進める中で事業者側の技術動向をしっかりと意識しながら研究を進めていくこととする。
- 廃止措置エンドステートにおける除染困難な放射性物質の取扱いに関する国際動向など、研究を通じて得られた知見については研究期間中であっても社会とコミュニケーションを図り、進めて欲しいという意見があった。本研究では、得られた研究成果を学会発表や論文投稿により広く公開するなどして社会とコミュニケーションを取るように努めることとする。
- 詳細は、別表 1 1を参照。

### ③ 知見の活用先の設定に関する適切性：適

- 関係する課等の長によるコメント（適、原子力規制企画課）
  - 熔融処理をした上でのクリアランスなど国際的なクリアランスに関する規制動向に関する調査結果について、必要に応じて規制制度に取り入れることが期待される。
- 関係する課等の長によるコメント（適、実用炉審査部門、高経年化審査部門）
  - 研究成果からの技術的知見が「廃止措置の終了確認における敷地土壌等の状況の判定に関するガイド」等の内規に反映され、審査に活用されることが期待されるため、知見の活用先は適切に設定されている。
- 関係する課等の長によるコメント（適、研究炉等審査部門）
  - クリアランスの審査において、今後申請が想定されるクリアランス対象物の多様化に対して、放射能濃度の測定及び評価の適切性を審査で判断するための技術基盤の整備に資すると考える。
  - 埋設施設やクリアランスの審査において、今後申請が想定されるウラン廃棄物、研究施設等廃棄物及び定量が難しい放射性廃棄物の放射能濃度の測定及び評価の適切性を審査で判断するための技術基盤の整備に資すると考える。
- 関係する課等の長によるコメント（適、核燃料施設等監視部門）
  - 本研究により得られた知見・評価・データ等は、新規クリアランス対象物、ドラム缶以外の新規放射性廃棄物等それぞれに係る規制ツール（各種規則に基づく確認及び審査基準による審査等）の整備に活用することが明示的に示されていることから、適切であると考ええる。

### （２）研究計画案の変更の要否及び変更が必要な場合はその変更内容

研究の進め方については、成果目標、実施計画及び技術的観点からいずれも適切であると評価できるため、研究計画案の実施内容の変更は不要とする。

なお、技術評価検討会の意見を踏まえ、以下の点について研究計画案に追記する。

- 廃棄体等の安全性確認に関する新たな放射能濃度評価上の課題の調査について、廃棄物の発生源の特徴の考慮に関する追記を行う。
- 詳細は、添付資料を参照。

# 別表 1

## 地殻内地震津波の波源断層のモデル化及び津波堆積物に基づく津波高推定に関する研究 に対する外部専門家の評価意見及び専門技術者の意見並びに回答

### (外部専門家の評価意見及び回答)

| No.     | 評価項目                       | 評価意見                                                                                                                                                                                                                                                         | 回答                                                                                                                                                                                                                    |
|---------|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 糸井 達哉 氏 |                            |                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                       |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | 能登半島地震で得られた課題として指摘されている「複数の波源で津波が発生する場合に沿岸域で津波が重なり(重畳し)、津波水位が高くなることが考えられるため、重畳津波の評価に係る知見の拡充が重要である。」は、「港湾内の防潮堤や岩壁に沿って伝播する重畳津波」の必要性に関する論拠として提示されているものでしょうか。現状の記述では、直接関係あるものとは考えられず(あるとしてもそのごく一部であり)、計画書として論理の飛躍があるようにも感じます。計画書の補足説明(か計画の見直し)の修正が必要なようにも考えられます。 | 複数の波源からの津波の重畳が、岸壁沿いを伝播する津波と直接関係しているような誤解を招く文章構成になっていました。そこで、能登半島地震における岸壁沿いを伝播する津波の事例等を追加するとともに、岸壁沿いを伝播する津波の水位増加機構と複数の津波の重畳による水位増加機構は同等であることと、両者の関係性について補足説明を追加しました。これらを踏まえ、沿岸域で重畳する津波の特性に係る知見の拡充が重要であるという文章構成に修正しました。 |
| 2       | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。         | おおむね適切である。                                                                                                                                                                                                                                                   | 拝承いたします。                                                                                                                                                                                                              |
| 3       | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | おおむね適切である。                                                                                                                                                                                                                                                   | 拝承いたします。                                                                                                                                                                                                              |
| 4       | ④ 重大な見落とし(観測点の欠落)がないか。     | 特性化波源モデルを構築する上では、セグメントの連動性などに関する検討も必要と考えられる。そのあたりの考え方についても明確にした上で研究を行うことが望ましいと考える。                                                                                                                                                                           | 地殻内地震の特性化波源モデルを構築する上では、セグメントの連動性も検討すべき事項の1つと考えています。研究計画の図4中に検討事項として挙げていましたが、文章中においても、「1. 背景」で地殻内地震における連動性の可能性を示唆し、「6. 安全研究概要」でも連動性を検討する                                                                               |

| No.     | 評価項目                     | 評価意見                                                      | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|---------|--------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         |                          |                                                           | <p>旨、明記しました。</p> <p>なお、連動性に関する知見収集については、安全研究プロジェクト「断層の活動性評価手法に関する研究」の担当班と協力して行っていく予定です。</p>                                                                                                                                                                                                                                             |
| 5       | その他                      | <p>特になし。</p> <p>技術検討会当日のご意見</p>                           | <p>－</p> <p>技術検討会において「重畳津波」という用語が学術的に定義されている言葉なのか等を含めて検討いただきたい旨、ご指摘いただきました。</p> <p>津波の「重畳」、「重合」、「組合せ」等、様々な言い方があるようですが、「〇〇津波」のように専門的に認知された用語はないようです。当該プロジェクトにおいては研究計画の「3. 背景」において、複数の波源からの津波の重畳や岸壁沿いを伝播する津波の水位増加に対して「重畳津波」を用語として定義することで使用したいと思います。ただし、研究を進める中で、重畳津波の特性（非線形性・分散性の影響や波高・位相の変化率等）が明らかになりましたら、改めて論文等で定義づけも含めて反映したいと思います。</p> |
| 鎌滝 孝信 氏 |                          |                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか | 現状では問題ないと考えます。今後も最新知見についてのレビューを定期的に公表していただくようなことをご検討ください。 | <p>技術基盤グループ最新知見等の反映プログラム※に沿って、国内外の最新知見の収集及び公表を継続していきます。</p> <p>※原子力規制庁では、国際会議等で得られた最新知見、海外の最新規制情報、安全研究により得られた最新知見及び新たに規制基準に反映すべきと考えられる情報等を収集・分析するためのプロセスが設けられています。収集・分析した結果については、2ヶ月ごとに開催される技術情報検討会と呼ばれる公開会合の場にて報告しています。</p>                                                                                                            |
| 2       | ② 解析実施手法、実               | 「(1)地殻内地震による津波の特性化波源断層モデル設定方法の整備」に関して、一                   | (1)について、地殻内地震を対象とする場合は、地震タイプや連動性等、検討事項が                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

| No. | 評価項目                             | 評価意見                                                                                                                                                                                                                                                                      | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-----|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     | <p>験方法が適切か。</p>                  | <p>般的にどうかということを扱うとケースが膨大になるため、既存の原子力サイトに影響を与える可能性があるケースを優先して研究を進めることをご検討ください。</p> <p>「(2)津波堆積物に基づく津波規模の推定方法の整備」に関しては、海底、沿岸、陸上それぞれの地形の影響、津波堆積物を構成する物質の種類や供給量など、非常に多くのパラメータが関係すると考えられるため、(1)同様に既存サイトに絞って検討した方が良いかと思います。また、現地調査やシミュレーションに加えて、地形を模した上での水槽実験などの実施もご検討ください。</p> | <p>多くなることが想定されます。特に津波に大きく影響するケースから優先的に検討していく予定ですが、既存サイトがある地域の情報も参考に進めていきたいと思います。</p> <p>(2)についても、非常に多くのパラメータが関係すると考えております。まず、安全研究計画の1年目に実施予定の既往研究の知見収集の中で、津波堆積物から津波規模を推定するに当たって有用なパラメータを抽出し整理していきたいと考えていますが、現状では数値解析結果から入手可能な、津波高・浸水範囲・流速分布・周期といった津波特性と、地形分類・勾配・底質粒径といった地形特性のパラメータに絞って、津波堆積物の特徴との関係性を分析する予定です。</p> <p>一方、水槽実験に関しては、津波堆積物に関する従来型の1次元水路実験ではなく、平面的な地形を模した実験を指してのコメントと認識しています。前例が少ない実験となりますので、スケールのみならず、地形や底質特性が及ぼす効果を把握することが、効果的な実験デザインには重要になると推測します。したがって、今後の水槽実験の実施可能性も踏まえて、効果的な実験デザインを検討するための基礎情報を得るためにも、まずは令和6年度までに得られた解析結果の分析に注力したいと考えています。</p> |
| 3   | <p>③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。</p> | -                                                                                                                                                                                                                                                                         | -                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

| No.     | 評価項目                    | 評価意見                                                                                                 | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|---------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4       | ④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。    | 現状では問題ないと考えます。最新知見を取り入れながら、適宜研究計画を修正しつつ研究を進めることを期待します。                                               | 最新知見収集を随時実施し、内容を確認した上で、適宜、研究計画に取り込んでいきたいと考えています。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 5       | その他                     | 研究項目(1)～(3)のいずれも短期間で成果が得られるようなものではないと思いますが、時間をかけてでも着実に研究を進めていただくことを期待します。                            | 年度ごとに成果を確認し、着実に研究を進めていきたいと考えています。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 酒井 直樹 氏 |                         |                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 1       | ①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか | 2024 年能登半島地震から生じた課題からテーマを検討し最新の知見を踏まえている。                                                            | 拝承いたします。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 2       | ②解析実施手法、実験方法が適切か。       | 資料 1.2 の 13 ページで重畳津波のハザード評価において、解析ツール作成を目的に置いているが、具体的にどんな条件（施設と地形の関係等）に適用するのかを、いくつか具体的にあげて検討したほうがよい。 | 重畳津波については、孤立波の重畳による非線形干渉の研究分野において主要な、1 次元的な「①衝突」及び「②追い越し」、並びに 2 次元的な「③斜め交差」の計 3 パターンの重畳を対象とすることを想定します。①は防潮堤等への津波の正面衝突、②は波高の大きな津波が波高の小さな津波を追いつきながら港内へ到達する場合、③は港内で 2 波が交差する場合や岸壁に沿って伝播する津波に相当します。これらの条件に対する入射波は、孤立波等を想定します。この内、中程度までの振幅を有する孤立波の重畳に対する学術研究は広く行われています。しかしながら、実現象や水理実験でも確認される大振幅孤立波を精度良く再現できる理論解や、それらの挙動を精度良く解析できる数値モデルは限られているため、学術的な基礎研究においても大振幅孤立波の重畳は未解明な点が多い内容です。上記のような大振幅孤立波を含む様々な津波を精度良く解析できる解析ツールを整備し、知見の拡充を図りたいと考えています。なお、「6. 安全研究概要」におい |

| No. | 評価項目                       | 評価意見                                                                                    | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-----|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     |                            | <p>津波堆積物の評価に関しては、12 ページのように具体的な地形が見えてくると、10m メッシュの地形よりも細かいものが必要になってくるのではないかな？</p>       | <p>て、上記重畳パターンの具体例を追記しました。</p> <p>津波堆積物の評価に関しては、評価対象によって求められる解像度は異なると考えます。例えば、堆積範囲の評価においては、現状の 10 m 程度の解像度で十分であるものの、微地形に影響される堆積厚のばらつきを評価するには解像度は粗いと考えます。しかしながら、10 m 未満の解像度の微地形を含む高精細地形データに基づいてモデル化した堆積厚の特徴から津波規模を推定しようとする場合、現地の津波堆積物に対応する微地形を推定する必要がありますと考えられます。</p> <p>そこで、高精細地形データに基づいて堆積厚のばらつきと微地形との関係性を評価する代わりに、近年の津波堆積物の広範な調査結果に基づいて、任意の範囲内における堆積厚のばらつきの特徴を評価することにより、10 m の解像度のまま、ご指摘頂いた解像度の課題を補いたいと思います。</p> |
| 3   | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | -                                                                                       | -                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 4   | ④ 重大な見落とし（観測点の欠落）がないか。     | <p>全体的には問題ないと思われる。地震の研究は頻発する現象ではないので、進めるにあたって他機関や地震調査研究推進本部等との連携もしながら進めるとよいのではないかな。</p> | <p>研究を進めるに当たっては、技術基盤グループ最新知見等の反映プログラムに沿って、他機関や地震調査研究推進本部等を含む国内外の最新知見の収集を随時実施し、内容を確認した上で、適宜、研究計画に取り込んでいきたいと考えています。また、関係機関との意見交換も実現できるように検討していきたいと思います。</p>                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 5   | その他                        | -                                                                                       | -                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

(専門技術者の意見及び回答)

| No.     | 評価項目                      | 意見                                                                                                                                                                                                                | 回答                                                                                                                                                                                                               |
|---------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 梅木 芳人 氏 |                           |                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                  |
| 1       | ①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | -                                                                                                                                                                                                                 | -                                                                                                                                                                                                                |
| 2       | ②解析実施手法、実験方法が適切か。         | (3) 重畳津波のハザード評価に係る知見の拡充<br>・「ハザード評価」という言葉は PRA をイメージしたものと混同されがちです。用語を見直されてはいかがでしょうか。                                                                                                                              | 研究テーマ名を「沿岸域における重畳津波の特性に係る知見の拡充」に変更いたしました。                                                                                                                                                                        |
| 3       | ③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | (2) 津波堆積物に基づく津波規模の推定方法の整備<br>・津波堆積物の検討に際しては様々な要因(当時の地形、前面の供給源、堆積物分布認定など)による不確かさが存在すると思われますので、解釈や考察は慎重に進めていただくと良いと思います。<br>・資料に堆積物層厚と堆積面積の例が示されていますが、これら以外の津波規模推定に有用な要因の有無について分析し、今後の汎用性を考慮した広範囲の検討が進められることを期待します。 | 津波堆積物に基づく津波規模の推定に関する検討においては、当時の地形、前面の供給源の有無、津波堆積物情報(観測・解析堆積層厚、認定等)等の様々な不確かさが存在していることを踏まえ、本検討は慎重に進めていきたいと思います。<br>また、津波規模推定に有用な要因については、安全研究計画の 1 年目で実施する予定の既往研究の知見収集の中で抽出して、汎用性を考慮した広範囲の検討となるよう意識的に整理していきたいと思います。 |
| 4       | ④重大な見落とし(観点の欠落)がないか。      | -                                                                                                                                                                                                                 | -                                                                                                                                                                                                                |
| 5       | その他                       | -                                                                                                                                                                                                                 | -                                                                                                                                                                                                                |
| 土志田 潔 氏 |                           |                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                  |
| 1       | ①国内外の過去の研究、最新知見を          | (1)能登半島地震関連の断層や地殻変動、海底地滑りに関する最新の知見を随時反映されたい。また、近年も日本近海の海域火山における地滑り、地殻変動等に起因する津                                                                                                                                    | 能登半島地震関連の最新知見の収集は技術基盤グループ最新知見等の反映プログラムに沿って随時実施しており、内容を確認した上で、適宜、研究計画に取り込んでいきたいと考えています。                                                                                                                           |

| No. | 評価項目                      | 意見                                                                 | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-----|---------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     | 踏まえているか                   | 波が発生しており、これらの事象も発生源に含めると良い。                                        | また、日本近海の海域火山に関連する津波については、その発生メカニズムも重要ですが、当該研究計画では、まずは令和6年能登半島地震のように大きな津波を引き起こす地殻内地震に注力したいと考えております。ただし、当部門では、上述したとおり技術基盤グループ最新知見等の反映プログラムに沿って、研究計画の実施と並行して様々な外部事象に関する最新知見収集を行っています。日本近海の海域火山(例えば鳥島近海で発生した津波)についても最新知見の収集を継続しており、このような知見についても、内容を確認した上で、今後の研究計画に取り込んでいきたいと考えております。 |
| 2   | ②解析実施手法、実験方法が適切か。         | -                                                                  | -                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 3   | ③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | (3)研究目的として保守性の確認が挙げられているが、今後は、解析結果から得られる確率分布全体をPRAに適用する事も可能と考えられる。 | 本研究では、津波の非線形性及び分散性の両者を高次まで考慮することが可能な鉛直積分型波動モデルを開発又は既存の3次元数値モデルを活用することを想定しています。そのため、従来型の非分散波理論や非線形分散波理論による津波評価モデルよりも高精度に沿岸域で重畳する津波の特徴を再現できると期待しています。<br>得られたデータに基づく確率分布も高精度な評価結果が得られてPRA等への有効活用につながることも考えられるため、解析結果を整理した後、データの利用可能性を検討したいと思います。                                   |
| 4   | ④重大な見落とし(観点の欠             | -                                                                  | -                                                                                                                                                                                                                                                                                |

| No.     | 評価項目                      | 意見                                                                                                                                                                                                         | 回答                                                                                                                                                                                                         |
|---------|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         | 落)がないか。                   |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                            |
| 5       | その他                       | (2)本研究により、同じ津波高さに対し堆積物が相対的に厚い地域、事例が見出される可能性がある。このような事例は土砂を多く含む津波の発生実績を示す可能性があるため、第15回検討会の議題「地震荷重を受ける容器・配管溶接部の損傷形態等に関する研究(3)黒津波の発生可能性評価及び影響評価に係る技術的知見の拡充」と連携されると良い。                                         | 最終目的が異なるため、第15回検討会の議題「地震荷重を受ける容器・配管溶接部の損傷形態等に関する研究(3)黒津波の発生可能性評価及び影響評価に係る技術的知見の拡充」とは別の研究計画となっていますが、共有できるデータ、方法等については、現在実施している研究も含めて連携を図ってきました。(2)の研究の担当者が上記研究テーマにも参加するとともに、引き続き、連携を図りながら研究を進めていきたいと考えています。 |
| 松山 昌史 氏 |                           |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                            |
| 1       | ①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | 資料1-2のスライド9「(1)地殻内地震による津波・・・」において、ジョイントインバージョン解析を行うにあたって、本研究の対象断層タイプとは異なるが、2011年太平洋沖地震に関して、地殻変動、津波記録、地震記録などを用いたジョイントインバージョン研究が複数実施されており、それらの比較研究(八木(2012、地震))をレビュー、知見の整理をしたうえで研究を進めるべきである。                 | 八木(2012、地震)では、2011年東北地方太平洋沖地震に関して、用いるデータ(主に地震波形記録)や断層モデル等の違いによる再現解析結果の相違が示されています。同地震による津波に関して、複数の再現解析結果がありますので、当庁の過年度の成果だけではなく、それらをレビューした上で研究を進めていきたいと考えています。                                              |
| 2       | ②解析実施手法、実験方法が適切か。         | -                                                                                                                                                                                                          | -                                                                                                                                                                                                          |
| 3       | ③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | 資料1-2スライド12「(2)津波堆積物に基づく・・・」に関する研究内容は、計算結果のビッグデータを活用したチャレンジングな内容と考える。巨視的な視点として、地形のみならず土砂移動解析手法における侵食特性と堆積特性、それを地形などの影響による流速場(流速分布含む)の時刻歴やの特徴なども考慮して、堆積物の特徴と結びつけることが重要と感じた。性急に成果を上げることは難しいかもしれないが、貴重なビッグデータ | 津波による侵食・堆積特性に影響する流速特性に関して、最大流速分布は取得しているものの、時刻歴データは十分な数を取っていません。ただし、その少ない時刻歴データから津波周期の情報は抽出できるため、流速特性への影響因子として分析に加えられると考えます。したがって、研究計画で挙げた津波高分布(浸水範囲含む)に流速分布、周期等を加味し、それ                                     |

| No. | 評価項目                  | 意見                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     |                       | リスク情報として活用するために時間をかけて研究を続けるべきであろう。                                                                                                                                                                                                                                                     | らと地形ごとの津波堆積物の特徴との関係性を分析したいと思います。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 4   | ④ 重大な見落とし(観点の欠落)がないか。 | -                                                                                                                                                                                                                                                                                      | -                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 5   | その他                   | <p>資料 1-2「(3)重畳津波のハザード評価・・・」における 2 つ以上の津波の重ね合わせによる沿岸で海岸線に平行に進行する津波挙動は、その高さが非線形性や分散性により増幅する可能性がある未解明な現象であり、その評価には研究開発が必要である。</p> <p>あわせて、沿岸の発電所に与えるリスクを評価する上で、このような津波の発電所敷地内への影響として、その浸水量や波力の評価について整理しておく必要がある。なお、波力については、流速方向が海岸線方向であることから、海岸線に垂直な方向には津波に水位に応じた静水圧に近い力が作用すると推察される。</p> | <p>本研究では、津波の非線形性及び分散性の両者を高次まで考慮することが可能な鉛直積分型波動モデルを開発又は 3 次元数値モデルを活用することを想定しています。前者については、計算アルゴリズムの構築や計算安定性の確保の難しさが懸念されるため、研究開発に取り組む予定です。</p> <p>また、斜め入射する際の浸水量や波力については不明な点が多い耐津波設計に関わる重要なテーマであり、ご提案に感謝致します。これらの評価には 3 次元数値モデルの利用が必要になると推測します。ただし、浸水量及び波力は安全研究プロジェクト「地震荷重を受ける容器・配管溶接部の損傷形態等に関する研究」において研究対象としているため、上記安全研究プロジェクトとの情報の連携を図りながら、検討を進めたいと思います。</p> |

## 別表 2

### 火山活動及び火山モニタリング評価に関する調査・研究 に対する外部専門家の評価意見及び専門技術者の意見並びに回答

#### (外部専門家の評価意見及び回答)

| No.     | 評価項目                       | 評価意見                                                                                                                                                                                                | 回答                                                                                      |
|---------|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| 糸井 達哉 氏 |                            |                                                                                                                                                                                                     |                                                                                         |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | おおむね適切であると考えるが、事業者側の研究を含めた既往研究に関する詳細なレビューの結果を提示いただけると、評価項目により適切な判断ができると思われる。                                                                                                                        | 今後、学協会における研究動向についても幅広くウォッチし、関連研究をレビューするなど、本プロジェクトの位置づけを明確に示せるように知見の整備を進めます。             |
| 2       | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。         | おおむね適切であると考えられるが、④に記載の点について若干の懸念が存在する。                                                                                                                                                              | No. 4 にて併せて回答いたします。                                                                     |
| 3       | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | おおむね適切である。                                                                                                                                                                                          | 拝承致します。                                                                                 |
| 4       | ④ 重大な見落とし（観点の欠落）がないか。      | (3)の観測について、専門家の判断で安全規制上最も影響が大きいだろうという範囲にしぼって効果的な観測を行うことを目指していると理解します。一方で、そのことで結果的に視野が狭くなることを懸念します。全体的な傾向をつかむことで風下側の観測記録がどの程度保守的なのかを把握することもできますし、そもそも風下側でない部分に原子力安全上重要な現象が存在する可能性も完全には否定できないように思います。 | 前提条件としている内容が本当に最も厳しい条件であるかについては、都度検討しつつ、また、研究内容を俯瞰的に捉えることも行いながら、見落としが無いように研究を進めたいと思います。 |
| 5       | その他                        | 「不確実性の低減」を研究の背景としてあげていますが、自然現象を対象とする研究ですので、低減ができない部分も                                                                                                                                               | 自然現象を扱っている以上、観測データ等の不確実性を低減できない部分がありますので、その不確実性の程度をいかに                                  |

| No.     | 評価項目                       | 評価意見                                                                                                                                             | 回答                                                      |
|---------|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
|         |                            | 多々あるはずと考えます。「不確実性の低減」を目指す研究に加えて、「不確実性の把握」を実現するような安全研究もないと片手落ちのような印象を受けますが、いかがでしょうか。今後、ご検討いただけるとういと考えます。                                          | 把握するかが重要かと考えます。進めていく研究においても、その点を留意しながら取り組んでいければと考えています。 |
| 鎌滝 孝信 氏 |                            |                                                                                                                                                  |                                                         |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | -                                                                                                                                                | -                                                       |
| 2       | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。         | 現状ではより長期にわたる観測、現地調査といった事例を増やしていくという部分が重要と感じました。提示された研究計画に沿って着実に研究を進めていくことを期待します。                                                                 | 拝承致します。                                                 |
| 3       | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | -                                                                                                                                                | -                                                       |
| 4       | ④ 重大な見落とし（観点の欠落）がないか。      | -                                                                                                                                                | -                                                       |
| 5       | その他                        | 「設計対応が不可能な火山事象の発電所への影響や巨大噴火の可能性」については、他の自然事象以上に知見が不足した状況にあると考えられるため、研究計画に沿って着実に成果を積み上げていくことが必要と考えます。「火山活動のモニタリング評価」、「気中降下火砕物濃度の推定方法の整備」についても、最新知 | 拝承致します。着実に研究成果を出せるように進めます。                              |

| No.     | 評価項目                       | 評価意見                                                                                                                                                                                              | 回答                                                                                                       |
|---------|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         |                            | 見を踏まえた事例研究の積み上げを着実に実施していくことを期待します。                                                                                                                                                                |                                                                                                          |
| 酒井 直樹 氏 |                            |                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                          |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | 踏まえている。                                                                                                                                                                                           | 拝承致します。                                                                                                  |
| 2       | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。         | <p>・資料 2-2 の 11 ページにおいて、海底地盤変動観測装置、13 ページにおいて、高温高圧相平衡実験等を中心にしたテーマであり、新たな知見が拡充されることは火山学にとって大きな成果になると考えられるので、ぜひ進めてほしい。</p> <p>・火山灰の計測に関しては、細粒火山灰粒子はごく僅かということであるが、観測機器の計測の限界があり、そこでの検討も必要かと思われる。</p> | <p>・拝承致します。</p> <p>・少量の火山灰粒子の検知に加え、降下火砕物の粒径と観測機器の性能の関係についても留意しつつ、調査研究を進めたいと思います。</p>                     |
| 3       | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | -                                                                                                                                                                                                 | -                                                                                                        |
| 4       | ④ 重大な見落とし（観点の欠落）がないか。      | 火山は個別性が高いので、それをどう一般的な考え方に持って行くことができるのかを常に考える必要があると思われる。そのためにも、他機関だけでなく新しくできる火山調査研究推進本部との連携も重要である。                                                                                                 | 成果に対して一般化できるもの、できないものを意識し研究を進めたいと考えています。また、新たに発足した火山調査研究推進本部等の動向を注視し、関係機関との意見交換も実現できるように検討していきたいと思っています。 |
| 5       | その他                        | -                                                                                                                                                                                                 | -                                                                                                        |

(専門技術者の意見及び回答)

| No.     | 評価項目                       | 意見                                                                                                                                                        | 回答                                                                                                                                                                     |
|---------|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 梅木 芳人 氏 |                            |                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                        |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | (1) 設計対応不可能な火山事象を伴う火山活動の評価に関する知見の拡充<br>・一つの文献に固執しているように見えます。本文献に関して真に深掘すべきかの事前検討が必要ではないでしょうか。                                                             | ・説明資料で示した文献は、新規研究提案のきっかけになったものです。事前検討において、本論文の精査を行い、例えば、同位体分析等も行う必要があるなど、本論文の知見だけでは十分ではないことを認識しておりますので、ご意見を念頭におき、研究を進めていきたいと考えています。                                    |
| 2       | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。         | -                                                                                                                                                         | -                                                                                                                                                                      |
| 3       | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | (3) 気中降下火砕物濃度の推定方法<br>・実現象に基づいた、より現実的な評価ができるようになることを期待しています。                                                                                              | 拝承致します。                                                                                                                                                                |
| 4       | ④ 重大な見落とし（観点の欠落）がないか。      | -                                                                                                                                                         | -                                                                                                                                                                      |
| 5       | その他                        | -                                                                                                                                                         | -                                                                                                                                                                      |
| 土志田 潔 氏 |                            |                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                        |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | ・(1) 噴火規模とマグマ特性の関係や、国内の深成岩体の噴火能力を取りまとめた論文についても参照されると良い。<br><br>・「気中降下火砕物濃度の推定方法」等、「濃度」の用語が用いられているが、吸気フィルタ等への影響を検討する際には、粒径（粒子径）が大きいほど吸引され難い。降灰現象に加え、機器を対象と | ・糸井外部専門家のNo.1のコメントにも関連する内容であるかと思しますので、研究を進めていく際には、適宜関連情報も参照しながら実施したいと思います。<br><br>・(3)の研究についても、降下火山灰粒子の特性及び機器の特性を踏まえ、アウトプットが「粒径を考慮した評価の実施に向けた知見」となるように、取りまとめたいと考えています。 |

| No. | 評価項目                       | 意見                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     |                            | した試験、解析について、粒径を考慮した評価の実施に向けて知見を収集いただきたい。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 2   | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。         | <p>・ (1) (i) 全岩化学組成に加え、マグマの粘性に影響を与える、斑晶量、マグマの温度、含水量についても検討されると良い。また、メルトの化学組成についても検討されると良い。(ii) Weber and Sheldrake 論文では、全岩化学組成の幅以外にも、化学組成の幅が広いグループでは頻度分布がバイモーダル、狭いグループはユニモーダルであり、ピークのシリカ値が両者で異なる等の特徴が認められる。個々の火山に対し、ピークの数やシリカ値による分類の可能性を検討してはどうか。(iii) 過年度までの研究で、巨大噴火に先立ち噴出率が低下した時期が有ると判明している火山を対象に、各種マグマ特性の時系列変化を調査する事が効果的と考える。</p> <p>・ (2) ・ (3) 共通：カルデラ火山のモニタリングや降灰現象の観測については、火山調査研究推進本部や海外の機関と連携し、開発した手法を複数の活動的な火山に適用し、観測実績の増加を加速する事が望ましい。</p> | <p>・ (i) について、マグマ特性を示すデータをしっかりと取得できるように分析等も実施していきたいと思います。(ii) については、Weber and Sheldrake 論文で示された全岩化学組成の <math>\text{SiO}_2</math> の組成幅だけにとらわれず、同位体組成等にも注目して進めたいと考えていますが、この論文に関するご意見についても検討を進めたいと思います。また、(iii) について、過年度までに得た成果を活用しつつ調査研究を進めたいと思います。</p> <p>・ 国内外の研究機関の状況をウォッチし、連携が可能な内容については、連携して研究が出来るように努力をしていきたいと思います。</p> |
| 3   | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | -                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | -                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 4   | ④ 重大な見落とし（観点の欠落）がないか。      | -                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | -                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

| No.     | 評価項目                      | 意見                                                                                                                                                                                       | 回答                                                                                                              |
|---------|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5       | その他                       | 資料（2-1）、（2-2）の多数箇所：「適応」は「適用」と思われます。<br>資料（2-2）スライド16：実施項目（1）aのR7年度「地球科学的データ」は「地球化学的データ」「物質科学的データ」等と思われます。                                                                                | 修正致しました。                                                                                                        |
| 松山 昌史 氏 |                           |                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                 |
| 1       | ①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | -                                                                                                                                                                                        | -                                                                                                               |
| 2       | ②解析実施手法、実験方法が適切か。         | -                                                                                                                                                                                        | -                                                                                                               |
| 3       | ③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | -                                                                                                                                                                                        | -                                                                                                               |
| 4       | ④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。      | -                                                                                                                                                                                        | -                                                                                                               |
| 5       | その他                       | 火山評価については、学術的な知見が他の自然ハザード現象以上に不足していると考えられる。よって、火山災害のリスクを有する日本では、調査や観測による火山に関するあらゆるデータの拡充が必要であり、本資料の研究も重要である。<br>また、モニタリングについては、原子力のみならず住民の避難というソフト対策の観点で重要である。現在、文部科学省などの関係省庁も火山研究の拡充を図っ | 火山評価に資する調査や観測によるデータの拡充が必要であることを念頭に研究を進めたいと考えています。また、新たに発足した火山調査研究推進本部等の動向を注視し、関係機関との意見交換も実現できるように検討していきたいと思います。 |

| No. | 評価項目 | 意見                                       | 回答 |
|-----|------|------------------------------------------|----|
|     |      | ている。研究の効率化を進めるために、<br>定期的な情報交換を進めるべきである。 |    |

# 別表 3

## 地震作用に対する原子炉建屋等の構造部材の耐力評価手法の適用性等に関する研究 に対する外部専門家の評価意見及び専門技術者の意見並びに回答

### (外部専門家の評価意見及び回答)

| No.     | 評価項目                     | 評価意見                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|---------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 規矩 大義 氏 |                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 1       | ①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。 | ・国内外の研究で得られた知見については、これまでの研究の背景にも明確に記載されており、それらを踏まえた研究計画がなされているので適切と考えます。                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | ・拝承いたします。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 2       | ②解析実施手法、実験方法が適切か。        | <p>(1)a. 原子炉建屋等の基礎版や耐震壁等の面部材のせん断評価手法の適用性に関する研究</p> <p>・解析実施方法は適切と考えます。今後、実機建屋を模擬して解析される際に、浮き上がりが生じたときの基礎版への面外方向の荷重設定については、既往の実験（解析）結果等を踏まえて設定されると思いますが、礫質土（砂質土）への押し込みと大変形による地盤の塑性化の範囲を考慮して設定されることを期待します。</p> <p>(1)c. 屋外重要土木構造物の地震応答解析手法の適用性に関する研究</p> <p>・令和 6 年までの研究でも指摘されておられるように、比較的密な礫質土は液状化し難い材料ではありますが、表層、或いは中間層に難透水性の層（例えば、厚いコンクリート版や粘土層）が存在・挟在すると過剰間隙水圧の蓄積が促進されたり</p> | <p>(1)a. 原子炉建屋等の基礎版や耐震壁等の面部材のせん断評価手法の適用性に関する研究</p> <p>・実機建屋を模擬した検討は、設計評価での適用の観点で、原子炉建屋等の基礎版等の面部材の評価が厳しくなる荷重条件や境界条件等による解析的検討を主に実施することで考えております。地盤の塑性化等を考慮した場合、それにより原子炉建屋等の面部材に作用する荷重が小さくなると想像しております。実際の原子炉建屋等の安全上重要な建物・構築物は堅固な岩盤等に設置されていることから、基本的には地盤の大変形や塑性化は、ほとんど無いものと想定されますが、より現実的な条件での影響も意識した研究計画を策定し、研究を進めたいと思います。</p> <p>(1)c. 屋外重要土木構造物の地震応答解析手法の適用性に関する研究</p> <p>・比較的密な礫質土地盤と難透水性地盤等との関係に関するご意見有り難うございます。令和6年度までの研究においては、礫質土単層地盤を用いて地下水が地表面にある条件で実験を実施し、液状化に至るような過剰間隙水圧の上昇、蓄積を確認して</p> |

| No. | 評価項目                      | 評価意見                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-----|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     |                           | <p>しますので、対象に応じて考慮されることをお奨めします。</p> <p>・構造物周辺や盛土近傍などで、水平成層地盤とは主応力軸方向が異なり、初期せん断応力が作用する領域では、模型地盤の不均質さが初期液状化のタイミングや応答に影響を与えると思われますので、施工プロセスを考慮した模型の作製とともに、評価時にも考慮されることが求められます。</p>                                                                                                                         | <p>おります。まずは、引き続き単層地盤を用いて基本的な挙動を確認していきたいと考えておりますが、その過程で、過剰間隙水圧の蓄積が促進した状態（液状化状態）で、これまでとは異なる挙動が確認された場合には、いただきましたご意見も参考に検討したいと思います。</p> <p>・初期せん断応力の影響については、これまでの研究においても、水平成層地盤上の盛土を対象に施工過程を想定して、水平成層地盤を作製後、盛土を形成しています。また、模型地盤の作製過程を踏まえた解析評価を実施しておりますが、いただきましたご意見にも留意して研究を進めたいと思います。</p>                                                       |
| 3   | ③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | <p>(1)c. 屋外重要土木構造物の地震応答解析手法の適用性に関する研究</p> <p>・側方流動に関して、原子力発電所特有の地盤を想定した場合、緩い砂地盤で生じる流動のような、振動後の流動変形（残留変型）は大きくないと思われることから、むしろ、地震動の向きと大きさの影響を考慮した評価が必要と思われます。</p> <p>・液状化の発生が見込まれる地盤の実験では、地下水位を地表面に設定することが多く行われますが、地表面の非液状化層の存在が変形や応答結果に大きく影響するので、特に密な砂地盤や礫地盤の場合には、表層の非液状化層（不飽和層）の影響を考慮した評価が必要と思われます。</p> | <p>(1)c. 屋外重要土木構造物の地震応答解析手法の適用性に関する研究</p> <p>・原子力発電所敷地地盤の多くは、比較的密な状態となっておりますが、それ程密ではない砂質地盤があることや原子力発電所の地震動の大きさも踏まえ、傾斜した地盤での流動変形と構造物への影響を確認するとともに、当該評価に用いる解析手法の適用性確認の観点で計画しております。ただし、当該地盤の検討においては、いただきましたご意見も参考に研究を進めたいと思います。</p> <p>・表層の非液状化層の影響については、令和6年度の実験において検討しております。地表面まで液状化層の場合との相違等を整理した上で、非液状化層を考慮した模型実験の可否を検討し研究を進めたいと思います。</p> |
| 4   | ④重大な見落とし（観点               | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

| No.            | 評価項目                     | 評価意見                                                                                                                                                                                                                                                         | 回答                                                                                                                                                                                                 |
|----------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                | の欠落)がないか。                |                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                    |
| 5              | その他                      | <p>(2) 建物・構築物等への飛翔体衝突における耐衝撃評価手法の適用性に関する研究</p> <p>・安全研究概要には、「地盤(岩盤)中に設置された重要構造物も存在し、上載層の地盤への飛翔体の貫入評価が求められる」とありますが、岩盤ではない、土系の上層地盤による衝撃力の減衰、逸散等については、今期(令和7～10年)以降の研究と考えてよいでしょうか。</p>                                                                          | <p>(2) 建物・構築物等への飛翔体衝突における耐衝撃評価手法の適用性に関する研究</p> <p>・当プロジェクトでは、これまでの研究との連続性から、岩盤を対象とした研究を実施する計画となっています。土系の上層地盤に対する評価につきましては、令和11年度以降の研究プロジェクトの計画立案の際に検討いたします。</p>                                    |
| <p>渋谷 忠弘 氏</p> |                          |                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                    |
| 1              | ①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。 | <p>・固体や熱流体を対象とする数値シミュレーションの Verification and Validation (V&amp;V、検証と妥当性確認、以下 V&amp;V) は、米国機械学会(The American Society of Mechanical Engineers)が行っている標準化の規格策定とその文書発行のための活動、NAFEMS のような国際コミュニティ等が中心的な役割を果たしている。地盤のモデリングまで含む活動は多くはないと思われるが、最新の知見を整理しておく必要がある。</p> | <p>・地盤関係の V&amp;V につきましては、国内の学会において活動が行われており、構造物関係も含め、国内外の学会等の動向を注視し、これらの知見にも留意して研究を進めたいと思います。</p>                                                                                                 |
| 2              | ②解析実施手法、実験方法が適切か。        | <p>・解析実施手法は適切である。実験方法も概ね妥当であると思われるが、小規模実験を実規模現象とリンクさせるためのアプローチをより明確にされた方がよいと思われる。(2)a.構造物の設置状況及び形状特性を考慮した飛翔体衝撃作用に対する安全性評価に関する研究について、衝突速度 50～160m/s は、実験装置に起因した制約があるのか実現象を想定した条件なのかを確認する必要がある。</p>                                                            | <p>・「(2)a.構造物の設置状況及び形状特性を考慮した飛翔体衝撃作用に対する安全性評価に関する研究」における衝突速度は、実現象を想定したものです。また、実現象とリンクさせるために、形状特性を考慮した安全性評価に関する研究では、スケール効果の確認として小型模型実験と中型模型実験を実施する計画です。</p> <p>また、いただきましたご意見を踏まえ、研究計画に説明を追加します。</p> |
| 3              | ③解析結果の評価手法、実験結果の評価手      | <p>①と関連して、解析の不確かさも考慮した検討を進めていただくことを推奨します。</p>                                                                                                                                                                                                                | <p>・解析での不確かさには、モデル化、理論的な構成則、入力条件等の様々な要因が考えられます。実験等との再現性の確認とともに、各種の不確かさを考慮した解析</p>                                                                                                                  |

| No. | 評価項目                              | 評価意見                                     | 回答                                                                                                                                                                   |
|-----|-----------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     | 法 が 適 切<br>か。                     |                                          | の感度の確認等を進めていきたいと思<br>います。                                                                                                                                            |
| 4   | ④ 重大な見<br>落とし(観<br>点の欠落)が<br>ないか。 | ・特にないと思われます。                             | ・拝承いたします。                                                                                                                                                            |
| 5   | その他                               | ・将来的には、容器・配管系の解析との統<br>合も視野に入れた成果を期待します。 | ・本プロジェクトでは、まずは建物自体の解<br>析評価手法等の適用性確認を目的とし<br>ておりますが、建物内に設置される機器等<br>への影響又は機器等からの影響を踏まえ<br>た検討を計画しております。解析評価手法<br>の適用性等が順次確認されることで、将<br>来的には機器等の統合もできるものと思<br>えております。 |

(専門技術者の意見及び回答)

| No.     | 評価項目                      | 意見                                                                                                                           | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 梅木 芳人 氏 |                           |                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 1       | ①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。  | —                                                                                                                            | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 2       | ②解析実施手法、実験方法が適切か。         | <p>(1)a.原子炉建屋等の基礎版や耐震壁等の面部材のせん断評価手法の適用性に関する研究</p> <p>・建屋全体モデルだけではなく、基礎部分の部分モデルでの評価手順(応力の受け渡し方法など)も整理できると計算負荷が低減できると思います。</p> | <p>(1)a. 原子炉建屋等の基礎版や耐震壁等の面部材のせん断評価手法の適用性に関する研究</p> <p>・本プロジェクトでは、建屋全体モデルによる検討を前提としておりません。ご意見を踏まえ、研究計画に補足を追加します。</p> <p>また、説明資料における実機建屋を模擬した解析モデルについても、建屋全体ではなく、実機建屋の基礎版を模擬した解析モデルを想定しております。既往の部材試験を対象とし、有限要素法に基づいた再現・感度解析を実施して、局所的な破壊に対する既往の解析手法の適用性、適用範囲等を確認してから、実機建屋の基礎版を模擬した解析モデルにより、適用性等に関する検討を実施する計画です。部分モデルでの評価手順に関しては、部材試験を対象とした局所的な破壊に関する解析検討結果を踏まえて基礎版の解析モデルによる検討を実施する際の検討項目になるものと想定されます。頂いたご意見も意識し具体的な研究計画を策定し、研究を進めたいと思います。</p> |
| 3       | ③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | <p>(1)a.原子炉建屋等の基礎版や耐震壁等の面部材のせん断評価手法の適用性に関する研究</p> <p>・FEMの課題の一つは、要素一つ一つの結果と部材全体評価とのつながりにあると認識しており、応力平均化の検討は極めて重</p>          | <p>(1)a. 原子炉建屋等の基礎版や耐震壁等の面部材のせん断評価手法の適用性に関する研究</p> <p>・本プロジェクトにおいては、面部材の面外せん断評価に関する既往の部材試験を対象として限られた条件での検討であることを前提に、原子炉建屋等の基礎版や耐震</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |

| No.     | 評価項目                    | 意見                                                                                                                                             | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|---------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         |                         | 要と考えます。適用範囲や評価手順が明確になることを期待します。                                                                                                                | 壁等の面部材の面外せん断評価に関する一事例として、有限要素法に基づく解析モデルや評価手法の適用性、適用範囲等が明確になるよう研究計画を策定し、研究を進めることで考えています。                                                                                                                                                                                                                   |
| 4       | ④重大な見落とし(観点の欠落)がないか。    | (1)b.建物・構築物の地震時挙動を考慮した三次元有限要素解析モデルにおける減衰の設定に関する基礎的研究<br>・構造の複雑さ等の要因が定量的に算定できると評価に取り込みやすいと思います。                                                 | (1)b.建物・構築物の地震時挙動を考慮した三次元有限要素解析モデルにおける減衰の設定に関する基礎的研究<br>・本プロジェクトでは、実験及び解析により検討を進めることから、ある程度、定量的な傾向が得られると考えています。一方、模型実験は原子力発電所施設を想定して、単純な構造模型に構造の複雑さとして幾つかの要因を考慮しますが、実規模の実験は困難なことから、まずは基礎的な研究の位置づけで小規模な模型を用いた実験を計画しております。いただきましたご意見については、本プロジェクトでの成果も踏まえ、将来的に実規模等の研究によって評価されるものと考えられます。                    |
| 5       | その他                     | —                                                                                                                                              | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 土志田 潔 氏 |                         |                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 1       | ①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか | (2) 柔飛翔体の衝突に関する試験条件の設定に際し、当所が実施した試験等を参照いただく事も一案と考える(例えば坂本他、電力中央研究所報告 N15004、2015 年。大沼他、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 20, No. 3, pp. 1063-1068, 1998 年)。 | (2) 建物・構築物等への飛翔体衝突における耐衝撃評価手法の適用性に関する研究<br>・研究計画の立案に際しては、国内外の知見を収集確認しており、電力中央研究所で実施されている衝撃研究についても参考にさせていただいております。また、規制庁では柔飛翔体を用いた研究として、直径 30mm・長さ 60mm・質量 0.33kg の小型柔飛翔体から直径 250mm・長さ 2,600mm・質量 25kg の大型柔飛翔体を用いた実験の経験がございます。これらの知見を踏まえて研究計画を立案しております。試験条件の設定に関する記載を追加して、ご紹介頂きました文献を含め関連する文献を引用させていただきます。 |

| No.     | 評価項目                      | 意見                                                                                                       | 回答                                                                                                                                                                                                                                           |
|---------|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2       | ②解析実施手法、実験方法が適切か。         | —                                                                                                        | —                                                                                                                                                                                                                                            |
| 3       | ③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | —                                                                                                        | —                                                                                                                                                                                                                                            |
| 4       | ④重大な見落とし(観点の欠落)がないか。      | —                                                                                                        | —                                                                                                                                                                                                                                            |
| 5       | その他                       | (各項目共通) 今後は規制においても PRA の活用を意識し、リスク評価の観点で技術開発項目を体系的に位置付ける事が望ましい。安全性への寄与が大きい事象を優先的に選定し、技術開発項目を設定する事が考えられる。 | ・本プロジェクトは、建物・構築物の評価手法の適用性に関する研究テーマとなっておりますが、本研究成果は、今後のリスク評価のうち、より現実的なフラジリティ評価に資するものと考えております。現状、耐震、耐津波分野においてはリスク評価を視野に入れた研究が多方面で進められておりますが、耐衝撃分野も含めて、将来的なリスク評価への適用も見据えて検討を進めるとともに、次期以降の研究計画の立案に際しては、安全性への影響が大きい外部事象として、衝突事象も含めて検討したいと思っております。 |
| 松山 昌史 氏 |                           |                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                              |
| 1       | ①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | —                                                                                                        | —                                                                                                                                                                                                                                            |
| 2       | ②解析実施手法、実験方法が適切か。         | —                                                                                                        | —                                                                                                                                                                                                                                            |

| No. | 評価項目                      | 意見                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3   | ③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | 「(2)a.構造物の設置状況及び・・・」に関する令和7年度以降の研究内容について、飛翔体の衝突条件については、リスク評価の観点から、損傷しやすい条件から損傷しづらい条件まで幅広い条件で実施し、フラジリティ評価の必要な全体像の把握に努めるべきである。もしくはこれまでの既往研究結果を基にある程度のフラジリティ評価に関する全体像が整理されているのであれば、それを示した上で令和7年度以降の研究内容がどこを詰めていくのか示していただけだと理解が得やすい。すなわち、スライド15にある「これまでの確認できていない衝突条件」を示す図などが必要ではないだろうか。 | (2) 建物・構築物等への飛翔体衝突における耐衝撃評価手法の適用性に関する研究・将来的視点では、リスク評価に繋げることを想定しております。そのためにも、現状の衝突評価に対する技術レベルを向上させ、技術的知見を拡充すべきと考えております。当該分野は、新規規制基準の策定により追加となった要件が多く、現状、基礎的な研究課題が残されており、その一つについて規制の観点から既往評価式の適用性の確認を優先課題としております。本プロジェクトでの成果によって、飛翔体の条件、被衝突体の条件を体系的に整理することができると考えられ、フラジリティ評価の全体像を考えていく上での参考となるものと考えられます。 |
| 4   | ④重大な見落とし(観点の欠落)がないか。      | —                                                                                                                                                                                                                                                                                   | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 5   | その他                       | —                                                                                                                                                                                                                                                                                   | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |

# 別表 4

## 地震荷重を受ける容器・配管溶接部の損傷形態等に関する研究 に対する外部専門家の評価意見及び専門技術者の意見並びに回答

### (外部専門家の評価意見及び回答)

| No.     | 評価項目                       | 評価意見                                                                                                                                                                                                                                      | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|---------|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 規矩 大義 氏 |                            |                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | 過去の研究、最新知見を踏まえた研究計画であると思います。                                                                                                                                                                                                              | 拝承いたします。                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 2       | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。         | (2)地震時の設備の同時損傷確率の算定手法に係る技術的知見の拡充<br>設計情報を用いずに、現実的なパラメータを用いた多数回の地震応答解析を実施される際に、基盤地震動、地盤物性値、建屋物性値各々の影響の度合いが異なるため、一定のルールを定めたパラメータ移動がなされるものと理解しています。                                                                                          | 基盤地震動、地盤物性値、建屋の物性値はそれぞれ不確かさを有し、その大きさは異なります。また、建屋の地震応答の大きさは、これらの物性値の個々の大きさ、及び物性値の組合せの影響を大きく受けます。このため本研究では、これらの物性値の不確かさの大きさの違いを踏まえた上でランダムに物性値の組合せを行い、地震応答解析ケースを設定します。                                                                                                                                         |
| 3       | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | (3) 黒津波の発生可能性評価及び影響評価に係る技術的知見の拡充<br>図5左側にある「黒津波の発生可能性の評価」において計測された土の細粒分含有率は、津波堆積物の粒度から得られたものと思われませんが、底泥や海性粘土を含む海底地盤としては幾分小さい値と思われます。粘性を有する濁水となるには、もう少し細粒分の多い土砂かと思われますし、粘土分含有率(PC)などの指標もあるかと思えます。また、細かい粒子の含有量だけでなく、粒度組成も考慮に入れられた方が良いと思います。 | 黒津波の発生が確認された地域でも、計測された細粒分含有率は 20%程度でした。海底堆積と直接的に比較はできないものの、例えば、松尾(物理化学的見地からのいわゆるヘドロの工学的性質について、1973年)がヘドロの粒度組成として示した値と比べて非常に小さい値です。主な理由として、有機物の付着等による粗粒化の影響や、震災後の風雨により細粒子が流され移動した影響の二つを考えました。したがって、本来はもう少し細粒分の多い土砂であったと推測されます。<br>本研究では、他組織が実施した津波堆積物調査の結果を分析に用いました。ご指摘の粘土分含有率及び粒度組成は計測されていませんが、今後は、計測された項目の |

| No.     | 評価項目                    | 評価意見                                                                                                                                                                                                                     | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         |                         |                                                                                                                                                                                                                          | 内、粒度分布に係る指標である、メジアン径や平均径にも着目いたします。                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 4       | ④重大な見落とし(観点の欠落)がないか。    | —                                                                                                                                                                                                                        | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 5       | その他                     | —                                                                                                                                                                                                                        | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 澁谷 忠弘 氏 |                         |                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 1       | ①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか | 応力腐食割れ特有の性質としてき裂形状及び発生個所のみを対象とする本検討対象の地震荷重を受けるき裂を含む配管の損傷については、国内外で多くの研究が行われている。実験計画の策定に当たっては、過去の実験データを精査したうえでより精緻な計画とすることが望ましい。                                                                                          | 当該分野では既往の試験事例が多く報告されていることから、本研究の初年度(令和7年度)に実施する文献調査において、新たな実験の必要性も十分に精査した上で、実験計画を策定いたします。                                                                                                                                                                                                                             |
| 2       | ②解析実施手法、実験方法が適切か。       | 定められた期間で適切な計画となっており、実施手法、実験方法は適切である。実験計画については、①で精査した内容を反映していただくことが望ましい。<br><br>既往の設備の耐震試験で観察される損傷モードとは異なる損傷モードについて、今回対象としている損傷モードの分析手法としては適切である。一方、抽出した損傷モードが現在の安全性評価手法に係る技術的知見の拡充に貢献するかは、システム全体の損傷モードを俯瞰したうえで考慮する必要がある。 | 上述のとおり、実験計画については、①で精査した内容を反映し、研究を進めて参ります。<br><br>システム全体を俯瞰した上で、現在の安全性評価に寄与する損傷モードを把握することは重要であると認識しております。先行研究では、まず、原子力施設内の安全上重要なシステムに関連する設備を幅広く調査し、衝撃振動に対して脆弱と考えられる設備を選定しました。その上で、上述で選定した電動弁駆動部(実機)や電気盤縮小模型(内蔵機器は実機)等について、振動台の加振性能を踏まえて、部品レベルではなく、実機を対象とした衝撃加振試験を実施し、普遍的な成果が得られるように研究を行いました。引き続き、ご指摘事項を念頭に、研究を進めて参ります。 |
| 3       | ③解析結果の評価手法、実験結果の評価      | 解析結果及び実験結果の評価において、溶接部の不確かさをどのように考慮するのか明確にしておく必要がある。                                                                                                                                                                      | 溶接部の不確かさを踏まえて地震時の損傷を評価する手法は確立されていないことから、本研究の中で、その影響の評価を行いたいと考えております。                                                                                                                                                                                                                                                  |

| No. | 評価項目                  | 評価意見                                                                                                                                                                                        | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-----|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     | 評価手法が適切か。             | <p>地震荷重を受けるき裂の損傷評価は、弾塑性変形を考慮した破壊力学評価が必要となるが、評価結果を規制体系にどのように組み込むのか明確にする必要がある。</p> <p>ボルトのゆるみを考慮した故障モードの評価は、個別の故障モードの詳細分析として適切である。一方、特定の損傷モードの詳細分析結果にとどまらず、普遍的な知見が拡充されるように評価手法を検討する必要がある。</p> | <p>弾塑性変形を考慮した破壊力学評価は、従来のプラントの耐震設計及び維持管理で用いられる評価手法とは大きく異なりますので、更なる知見の拡充を行った上で、規制体系への反映については慎重に検討して行きたいと思います。</p> <p>本研究では、まずは弾塑性を考慮した評価手法と従来手法の適用性について分析し、各評価手法の留意事項を整理したいと考えています。</p> <p>実験で得られた知見を普遍化することは重要なことと認識しております。</p> <p>これまでの耐震試験を通じて、耐震性評価についてはある程度の知見が蓄積されるとともに、その知見は一般化されていると考えております。耐衝撃性評価にあたっては、基本的には耐震性評価手法を活用することができることを実験・解析的に確認しており、相当程度まで一般的な耐震性評価技術が耐衝撃性評価にも適用できるものと考えております。</p> <p>現在は、従来の耐震性評価手法では扱えない、衝撃特有の現象（例えば極短周期・高加速度）に起因する損傷について知見を拡充すべく研究を実施しております。まずは特定の損傷モードの発生原因等の知見について検討を行う計画ですが、得られた成果の汎用性・知見の拡充についても引き続き検討を行いたいと考えます。</p> |
| 4   | ④重大な見落とし（観測点の欠落）がないか。 | <p>実機の損傷モードは複雑であり、複数の故障モードの相互作用についても考慮する必要があると思われます。</p>                                                                                                                                    | <p>機器の損傷は複数の損傷要因が重なり合い、互いに相互作用し合って発生するものと考えております。電動弁駆動部の加振試験から得られた損傷モードにつきましても、固定ボルトの緩みに起因する応答増幅が損傷要因の一つとして挙げられますが、電動弁の材質が脆性材料であることから衝撃特有の現象（極短周期・高加速度）を起因</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

| No. | 評価項目 | 評価意見                                                                                                          | 回答                                                                                             |
|-----|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     |      |                                                                                                               | とする材料破損も損傷要因と考えられ、これらの損傷要因が複合的に作用した可能性もあるのではないかと考えております。そのため、(3)の研究では、上記の観点も含め、研究を進めて参ります。     |
| 5   | その他  | 全体的に、原子力システムの限界状態における特定の損傷モードを調査する内容としては、重要かつ意義のある結果が期待できる。ただし、研究成果は現行の規制体系の適正化なども視野に入れた評価を進めていただけるとよいと思われます。 | 現行の規制体系の適正化も視野に入れ、研究成果の評価を進めます。なお、(1)や(2)の研究は、規制へのリスク情報の活用を目指しており、その成果は現行の規制体系の適正化に繋がると考えています。 |

(専門技術者の意見及び回答)

| No.     | 評価項目                       | 意見                                                                                                                                                                                                                              | 回答                                                                                                                                    |
|---------|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 梅木 芳人 氏 |                            |                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                       |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | —                                                                                                                                                                                                                               | —                                                                                                                                     |
| 2       | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。         | —                                                                                                                                                                                                                               | —                                                                                                                                     |
| 3       | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | (3) 黒津波の発生可能性評価及び影響評価に係る技術的知見の拡充<br>・密度増加による水深係数の増加の要因や既往評価の有効性などを詳細に分析したうえで、評価手法の検討などを進めていただく方が良いと思います。                                                                                                                        | これまで様々な機関で、密度増加による波力や水深係数の増加に係る研究がなされてきました。そのため、既往研究と本研究の結果を比較し、傾向の相違等を確認する必要があると考えております。相違がある場合は、その要因を明らかにした上で、評価手法の検討に取り組むことといたします。 |
| 4       | ④ 重大な見落とし(観点の欠落)がないか。      | —                                                                                                                                                                                                                               | —                                                                                                                                     |
| 5       | その他                        | 全体<br>・規制庁の研究成果は民間規格を策定する際には極めて重要な知見となりますので、節目節目において関連する民間団体とも共有しながら進めていただく方が良いと思います。                                                                                                                                           | 節目節目で安全研究成果の取りまとめを行い、安全研究成果報告書や学術論文等の公表を通じて、民間団体と共有いたします。                                                                             |
| 土志田 潔 氏 |                            |                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                       |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | (1) 配管の損傷については、既往モデルの保守性や、検証と妥当性確認(V&V)等の課題に対する検討が行われた、次の研究も参考になる。<br><a href="https://www.nsystemkoubo.jp/result/achv_report/document/r47report.pdf">https://www.nsystemkoubo.jp/result/achv_report/document/r47report.pdf</a> | 本報告書は、配管分岐部(ティ)の地震時損傷に関する知見に関連する内容であることから、参考文献として引用させていただきます。                                                                         |

| No. | 評価項目                      | 意見                                                                                                                                                                                                                                                             | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2   | ②解析実施手法、実験方法が適切か。         | <p>(3) 第16回検討会の議題「地殻内地震津波の波源断層のモデル化及び津波堆積物に基づく津波高推定に関する研究 (2)津波堆積物に基づく津波規模の推定方法の整備」において、相対的に堆積物の層厚が厚い地域が見出される可能性がある。このような事例は土砂を多く含む津波の発生実績を示す可能性があるため、本研究と連携されると良い。</p> <p>(4) 衝撃振動によるボルト緩みがフランジ損傷の主要な要因と判明した場合には、防振あるいはボルト緩み予防等の対策、効果を検討するための試験を計画されると良い。</p> | <p>「地殻内地震津波の波源断層のモデル化及び津波堆積物に基づく津波高推定に関する研究 (2)津波堆積物に基づく津波規模の推定方法の整備」(以下、「津波堆積物研究」と呼びます。)で得られる知見は、黒津波の発生可能性を評価する上で有用と考えられます。本研究には、研究計画の「8. 実施体制」に示すように、津波堆積物研究における担当者も参加しています。両研究で得られた知見を共有することで、過去の津波の発生実績の観点からも、黒津波の発生可能性を評価します。</p> <p>本研究では、まずはフランジ損傷の原因究明に注力し、電動弁駆動部の衝撃加振試験結果の詳細分析、ボルト緩みに係る文献調査及び応答解析、破断面の破壊力学的分析等を実施いたします。その結果、衝撃振動によるボルト緩みがフランジ損傷の主要な原因と判明した場合には、衝撃振動によるボルト緩みに係る知見拡充にあわせて、事業者の対策の妥当性を判断するために研究成果が活用できるよう、研究計画を立案したいと考えます。</p> |
| 3   | ③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | —                                                                                                                                                                                                                                                              | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 4   | ④重大な見落とし(観測点の欠落)がないか。     | <p>(3) 本研究は津波防護施設等の評価を対象に実施されているが、粒子を多く含む水は密度や粘性が変化する事から、本件で得られた知見を海水取水設備に対する影響の研究にも適用していく事が望ましい。粒子を多く含む水は降下火山灰や漂流軽石等でも発生し得るため、そのような研究の適用範囲は広いと考えられる。</p>                                                                                                      | <p>黒津波が与える影響について、複数の課題があることを踏まえ、本研究では特に影響の大きいと考えられる構造物への影響評価を優先しました。粒子を多く含む水が非常用海水冷却系に及ぼす影響評価についても、課題の一つであることを、研究計画の「3. 背景」に追記いたしました。</p> <p>本研究で得られた知見は、海水取水設備</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

| No.     | 評価項目                       | 意見                                                                                                                                        | 回答                                                                                                                                                                                     |
|---------|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         |                            |                                                                                                                                           | に対する影響評価の必要性の判断に適用できると考えております。規制庁での海水取水設備に対する影響評価に係る研究の実施については、その結果と他研究との優先度を鑑みて判断したいと考えます。                                                                                            |
| 5       | その他                        | —                                                                                                                                         | —                                                                                                                                                                                      |
| 松山 昌史 氏 |                            |                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                        |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | 資料の分量に限られるためであろうが、全体的に過去の研究の引用が少ない印象がある。例えば、「(3)黒津波の発生可能性・・」では、津波波力に関する水深係数の検討を行っているが、水深係数の原論文は引用されていない。詳細報告書においては、その点は改善されていると推察する。      | 研究成果を安全研究成果報告書や学術論文等として公表する際には、参考とした全ての既往研究を引用し、明確に示すことといたします。<br>また、(3)の研究では、研究計画中に用いている水深係数の原論文が引用されていないため、それを「9. 備考」に追記いたしました。                                                      |
| 2       | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。         | 黒津波の発生可能性評価に係る知見として、細粒分含有率は、人口密度及び港湾形状等に基づく閉鎖度指標と因果関係があることを示した点は、新しい研究成果であり評価できるものと考えます。今後、原子力発電所における津波に含まれる細粒分を定量的に評価するために有用化する研究が必要である。 | この研究は、黒津波の発生可能性を評価するための、簡易なスクリーニング手法の構築を目指す研究です。次年度以降の研究では、原子力発電所に来襲する津波に含まれる可能性のある細粒分と、発電所近傍海域の底質の量・位置の関係を明らかにすることを予定しております。これにより、スクリーニングで抽出されたサイトについて、津波に含まれる細粒分を評価する方法を示したいと考えています。 |
| 3       | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | 「(3)黒津波の発生可能性・・」のスライド 13 の図 5 の右図について、「密度増加により水深係数が増加し得ることを示した」とありますが、その理由、特に食塩と粘土の違いについて、考察することは必須と考えますので、その点について記載と課題を今後示してください。        | 食塩と粘土で現れた水深係数の傾向の違いは、粘性係数の違いに起因した可能性等を考えております。具体的には、粘性係数の大きい粘土では、底面摩擦の影響が大きく最大波力が減少しやすく、水深係数の傾向が食塩のそれと異なった可能性を考えております。<br>ご指摘の考察については、上記の検討を取りまとめた後、学術論文等で公開する予定です。                    |
| 4       | ④ 重大な見落とし（観                | —                                                                                                                                         | —                                                                                                                                                                                      |

| No. | 評価項目           | 意見 | 回答 |
|-----|----------------|----|----|
|     | 点の欠落)<br>がないか。 |    |    |
| 5   | その他            | —  | —  |

**別表 5**

原子力施設の経年劣化等を考慮した火災影響評価手法の整備に関する研究  
に対する外部専門家の評価意見及び専門技術者の意見並びに回答

(外部専門家の評価意見及び回答)

| No.     | 評価項目                       | 評価意見                                                                                                                                                                                | 回答                                                                                                                         |
|---------|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 北田 孝典 氏 |                            |                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                            |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | —                                                                                                                                                                                   | —                                                                                                                          |
| 2       | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。         | —                                                                                                                                                                                   | —                                                                                                                          |
| 3       | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | —                                                                                                                                                                                   | —                                                                                                                          |
| 4       | ④ 重大な見落とし（観点の欠落）がないか。      | —                                                                                                                                                                                   | —                                                                                                                          |
| 5       | その他                        | 「技術的な評価手法の妥当性確認に必要な知見の取得」を、目的として記載されていることに少し違和感があります。絶縁低下に関しても 30 年超での経年劣化を踏まえた長期保全計画が多くのプラントで出され、その妥当性が確認されている状況では「現行の評価手法の高度化(改善・改良)に必要な知見の取得」であり、(2)のコード整備につなげる知見等の拡充とすべきかと思います。 | 本研究では、特に今後想定されるより長期間の原子炉の運転に係る長期施設管理計画の認可申請における経年劣化の技術的な評価の妥当性の確認に必要な知見の取得を行うため、これを踏まえて目的を記載しておりますが、そのことが分かるように研究計画に追記します。 |

| No.     | 評価項目                       | 評価意見                                                                                                                                                    | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---------|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 五福 明夫 氏 |                            |                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | 継続的に実施されている研究であり、これまでの知見と研究段階を踏まえた計画となっていると考えられる。なお、火災のリスクについては原子力プラント以外の工業プラントにおいても、対策を重視されていると思われるので、工業プラントでのケーブル劣化に関する研究や経験も参考にされるとより良い研究計画になると思われる。 | ご意見拝承いたしました。一般産業における研究動向や運転経験も継続的に把握して参考としながら研究を進めていきたいと思います。                                                                                                                                                                                                                      |
| 2       | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。         | 火災での延焼や熱によるケーブル等の劣化の検討では、施設の構造モデルに基づいて、火災の広がりや熱風の流動の数値シミュレーションが必要となると思われるので、どの程度の精度を求めるかの目標を設定して適切な数値モデルの想定をすることが重要と考えられる。                              | 米国原子力規制委員会の例では、NUREG-1824(Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications)で試験データの不確かさを、NUREG-1934(Nuclear Power Plant Fire Modeling Analysis Guidelines (NPP FIRE MAG))で解析の不確かさを議論しています。これらを参考にして、過剰すぎず適切な精度目標を設定して解析を進めます。その旨研究計画に追記します。 |
| 3       | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | 適切と評価される。                                                                                                                                               | 拝承いたします。                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 4       | ④ 重大な見落とし(観点の欠落)がないか。      | 特に重大な見落としは無いと思われる。                                                                                                                                      | 拝承いたします。                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 5       | その他                        | 指摘事項等はありません。                                                                                                                                            | —                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 山路 哲史 氏 |                            |                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | 平成14年度以降、日本が世界を先導して取り組んできた重要な規制庁の研究であると認められます。一方で、それ以降の規制庁事業で成果が得られている間に世界ではどのような進展があったのかについても常に最新の状況を確認し、それを広く周知                                       | ご意見拝承いたしました。本研究に関わる海外の最新技術動向を確認し、国内関係者に広く周知しながら研究を進めていきたいと思います。                                                                                                                                                                                                                    |

| No. | 評価項目                      | 評価意見                                                                                                                        | 回答                                                                           |
|-----|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
|     |                           | しながら進めることが大事ではないかと考えます。                                                                                                     |                                                                              |
| 2   | ②解析実施手法、実験方法が適切か。         | これまでの経験を踏まえて適切な研究推進の方法が示されていると認められます。                                                                                       | 拝承いたします。                                                                     |
| 3   | ③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | これまでの経験を踏まえて適切な評価手法が示されていると認められます。                                                                                          | 拝承いたします。                                                                     |
| 4   | ④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。      | 重大な見落としは、認められませんが、一連の研究が日本で展開されるようになった以降に世界でどのような進展があったのかを整理して最新の世界の状況を広く国内関係者にも周知しながら進めることが今後、重大な見落としを防止するために有効ではないかと考えます。 | ご意見拝承いたしました。本研究に関わる海外の最新技術動向を確認して国内関係者に広く周知し、重大な見落としがないように研究を進めていきたいと思いをします。 |
| 5   | その他                       | (なし)                                                                                                                        | —                                                                            |

(専門技術者の意見及び回答)

| No.     | 評価項目                     | 意見                                                                                                                                                                                                                                                                      | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|---------|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 新井 健司 氏 |                          |                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか | <p>・原子力発電所の高経年対策実施基準 2021 では、電気編として、工業材料で想定される経年劣化事象のうち、絶縁特性低下の詳細事象には、熱劣化、部分放電、トリッキング、トラッキング、放射線劣化が抽出されています。これらの経年劣化について、評価対象の電気ケーブルに対して、考慮要否を整理してはどうでしょうか。</p> <p>・今回の評価対象であれば、樹脂材料は一般に低線量でも長期に放射線の照射を受けると劣化することが知られています。放射線劣化の影響がないことを定量的に確認しておく必要があるのではないのでしょうか。</p> | <p>・ご指摘の資料は、日本原子力学会標準「原子力発電所高経年化対策実施基準 2021」の附属書 D における「経年劣化事象一覧表(電気編)」(p.41)と理解しております。また、規格基準類や一般的な知見も踏まえて、研究において考慮すべき経年劣化要因を検討すべきとのご意見と理解しています。規制研究については、安全重要度の高い設備や安全に対する影響度が大きいと考えられる事象に着目することが重要であり、本研究計画策定に当たっては、関連する規制審査、運転経験・先行研究(一般産業の内容を含む)やご指摘の日本原子力学会標準等を踏まえて劣化事象の考慮要否を含めて検討をしております。本研究のうち、経年劣化に係る主な研究項目についての整理をご説明します。「事故時環境で機能要求のある電気・計装設備に係る研究」では、研究対象は、主に設計基準事故時及び重大事故等時に厳しい環境となる原子炉格納容器内に設置されている安全系の低圧区分の機器であるケーブル、電気ペネトレーション、電動弁駆動部、検出器等が該当します。したがって、これらの機器に対する経年劣化要因としては、学会標準が示す「熱劣化、部分放電、トリッキング、トラッキング、放射線劣化」のうち、熱劣化と放射線劣化を考慮します。「高圧ケーブルの水トリ劣化に係る研究」では、屋外敷設(管理区域外)の高圧 CV ケーブルの水トリを対象としております。一般産業でも高圧ケーブルの故障原因の多くを水トリが占めており、また、過去の高経年化技術評価で水トリによる絶縁特性低下が高経年化対策上着目すべき経年劣化事象とされ</p> |

| No. | 評価項目                           | 意見                                                                                                                                                                                                                                                  | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     |                                |                                                                                                                                                                                                                                                     | <p>ているためこれを選定しています。水トリ<br/>劣化は、学会標準に示された劣化要因のう<br/>ち「トリイニング」に該当します。なお、放射<br/>線劣化は管理区域外のため考慮しません。<br/>通常使用時の温度による熱劣化が考<br/>えられますが、本研究項目では実機材料を<br/>分析するため、その影響も確認できると考<br/>えています。</p> <p>・高分子材料の放射線線量率による影響を<br/>適切に把握した上で、研究において考慮す<br/>べきとのご意見と理解しており、重要な点と<br/>考えております。放射線線量率の大きさ<br/>により高分子材料の劣化状態が変わることが<br/>知られており、これまで線量率影響に着目<br/>した検討も行っております。例えば、高分子<br/>材料に模擬的な放射線劣化を付与する場<br/>合、大きすぎる放射線線量率で照射した場<br/>合、高分子材料内の酸素拡散が追いつか<br/>ずに外表面のみ劣化が生じてしまうことか<br/>ら、先行研究では低線量率での劣化模擬<br/>手法を策定しています。また、ケーブル絶<br/>縁材料の熱・放射線による劣化特性を取得<br/>しており、そのデータを踏まえて低線量率<br/>側で放射線の影響がなくなると考えられる<br/>閾値を定量的に確認しております。本研<br/>究でも、ご指摘のような低線量率側の放射<br/>線劣化の影響についても留意し、試験条件<br/>の設定や評価を行いたいと考えています。</p> |
| 2   | ② 解析実<br>施手法、実<br>験方法が<br>適切か。 | <p>・長期使用された実機材の活用を検討され<br/>ています。経年劣化模擬材で多くの結果を<br/>得て、実機材での検証、妥当性の確認を検<br/>討されているならば、経年劣化に影響があ<br/>る、環境条件の履歴(温度、湿度、放射線<br/>等)と運転条件の履歴(電圧、電流履歴、<br/>発熱温度等)を把握して、(おそらくは加速<br/>して製造された)経年劣化模擬材とのベン<br/>チマークが必要と考えます。経年劣化模擬<br/>材は加速条件で製作することが想像され、</p> | <p>・ご意見拝承いたしました。実機材料を入<br/>手するに当たり、ご指摘のとおり、当該実<br/>機材料の使用されていた環境条件及び使<br/>用条件に係る情報を入手します。経年劣化<br/>模擬材との比較を行う際は、この入手した<br/>情報に基づき加速劣化条件を設定して経<br/>年劣化模擬材を作成し比較を行います。経<br/>年劣化模擬材との比較を行う際の検証方<br/>法として、高分子絶縁材料の表面観察、密<br/>度測定、フーリエ変換赤外分光法(FT-IR)、示</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

| No. | 評価項目                      | 意見                                                                                                                                                                      | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     |                           | <p>その模擬材の適切性の検証方法を明確にすべきと考えます。</p> <p>・経年劣化の過程には、通常運転時だけでなく、事故には至らない過渡運転等、電気ケーブル、電気・計装品の交換を必須としない事象履歴を含むこともありえる場合、今回の経年劣化の条件設定で考慮されているでしょうか。</p>                        | <p>差熱-熱重量測定(TG-DTA)、破断時伸びなどを行います。これらを研究計画に反映します。</p> <p>・電気・計装設備の健全性評価においては、通常運転時等に想定される劣化要因に対応した試験条件(熱、放射線による経年劣化の他、機器によっては振動や動作回数など)が設定されます。一方で、実機において仮に通常運転時等で事前に試験等で想定されない事象が発生した場合は、個々にその影響について評価が行われ、必要に応じて取替や補修等が行われて健全性が維持されると理解しています。このような事象の発生の有無や影響の程度は、個別のプラントや設備によると考えられ、予め試験条件を設定すること自体が難しいのではないかと考えられます。このため、本研究における試験条件の設定ではご指摘の点は考慮しない予定ですが、入手する実機材料の過去の使用条件の履歴等において、通常とは異なる使用状態があった場合には、研究の考察等で考慮していくことを考えています。</p> |
| 3   | ③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | 特記事項なし                                                                                                                                                                  | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 4   | ④重大な見落とし(観点の欠落)がないか。      | <p>・「4. 目的(1)」において「経年劣化影響を考慮した火災時・事故時・通常運転時の絶縁低下現象の評価」とされています。「経年劣化した電気ケーブルでも事故時に安全に停止できる知見の獲得」をスコープに含める場合、事故の定義が必要ではないでしょうか? 「7. 成果目標と実施計画(1)」にも、事故時、通常運転時についての絶縁低</p> | <p>・「(1)電気ケーブル等の経年劣化を考慮した火災時・事故時・通常運転時の絶縁低下現象の評価」において、ご指摘の「経年劣化した電気ケーブルでも事故時に安全に停止できる知見の獲得」は、「事故時環境で機能要求のある電気・計装設備に係る研究」において行います。事故については、設計基準事故と重大事故等(重大事故に至るおそれがある事故又は重大事故)を考慮し、</p>                                                                                                                                                                                                                                                 |

| No. | 評価項目 | 意見                                                                                                                                                                                             | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     |      | 下現象の評価についての記載が確認できませんでした。                                                                                                                                                                      | <p>試験条件はそれぞれの事故の包含条件を踏まえて設定することを考えています。</p> <p>・「7. 成果目標と実施計画(1)」についてのご指摘については、(1)のタイトルを包括的に記載しているため研究項目の記載箇所の対応関係が分かりにくいことに起因すると思いますが、</p> <p>・「事故時」の「絶縁低下現象の評価」については、「2)電気・計装設備の健全性評価に係る研究」の「a.事故時環境で機能要求のある電気・計装設備に係る研究」全体に関連しますが、より具体的には、7.の成果目標の「事故時環境下における性能を評価する」、R7 年度・R8 年度・R9 年度・R10 年度のそれぞれ a.の「実機ケーブル等の入手状況に応じ、機器分析により劣化状態を評価するとともに事故時環境下における性能を評価する」が該当します。</p> <p>・「通常運転時」の「絶縁低下現象の評価」については、「2)電気・計装設備の健全性評価に係る研究」の「b.高圧ケーブルの水トリー劣化に係る研究」全体に関連しますが、より具体的には、成果目標の「高圧 CV ケーブルの水トリー劣化については、実機高圧 CV ケーブルの劣化状態を分析し」、R7 年度・R8 年度・R9 年度・R10 年度のそれぞれ b.の項目全部が該当します。</p> |
| 5   | その他  | ・「火災影響評価手法・解析コード等の整備」に関して、「火災防護に係る規制の高度化等に資する評価手法等を整備するため、既往の知見の調査、必要に応じた火災試験を行い、その成果をゾーンモデル及びフィールドモデルによる火災影響評価手法に反映することにより高精度化を図る」とあります。規制に適用するためには何が必要なのか(要件や解析精度など)を議論されて、具体的な目標設定のうえで、同様の研 | ご意見拝承いたしました。ご指摘のとおり、規制への反映の可否を検討するに当たって必要な解析精度等を検討した上で、研究実施に当たっては海外機関とも協力して効率的に実施していきたいと思っています。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

| No.     | 評価項目                                   | 意見                                                    | 回答       |
|---------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------|
|         |                                        | 究を実施している海外機関とも協力のうえ、効率的に実施されることを期待します。                |          |
| 井村 諭 氏  |                                        |                                                       |          |
| 1       | ① 国内 外の 過去の 研究、最新 知見を踏ま えているか          | コメント有りません。                                            | —        |
| 2       | ② 解析 実 施手法、実 験 方法 が 適切か。               | コメント有りません。                                            | —        |
| 3       | ③ 解析 結 果 の 評価 手法、実験 結果 の 評価 手 法 が 適切か。 | コメント有りません。                                            | —        |
| 4       | ④ 重大な見 落とし（観 点の欠落） がないか。               | コメント有りません。                                            | —        |
| 5       | その他                                    | コメント有りません。                                            | —        |
| 溝上 伸也 氏 |                                        |                                                       |          |
| 1       | ① 国内 外の 過去の 研究、最新 知見を踏ま えているか          | 本事業も含め、火災影響評価手法はかなり歴史のある事業であり、最新の知見も踏まえて研究計画が立案されている。 | 拝承いたします。 |
| 2       | ② 解析 実 施手法、実 験 方法 が 適切か。               | 確立した評価手法にのっとっていると考えられるため、適切に立案されていると評価。               | 拝承いたします。 |
| 3       | ③ 解析 結 果 の 評価 手法、実験 結果 の 評             | 確立した評価手法にのっとっていると考えられるため、適切に立案されていると評価。               | 拝承いたします。 |

| No. | 評価項目                             | 意見                                                                                                                              | 回答                                                                                                       |
|-----|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     | 価 手 法 が<br>適切か。                  |                                                                                                                                 |                                                                                                          |
| 4   | ④重大な見<br>落とし（観<br>点の欠落）<br>がないか。 | 特になし                                                                                                                            | —                                                                                                        |
| 5   | その他                              | 長期にわたる研究となっているため、漫然<br>と研究を継続していると取られないように、<br>過去の研究との関連性を明確に整理して<br>おくことが望ましい。また、人財の入れ替わ<br>りもあると考えられるので、技術継承につ<br>いても留意してほしい。 | ご意見拝承いたしました。過去の研究との<br>関係を明確に整理し、今後の体外的な説<br>明を行う際には留意したいと思います。ま<br>た、人材の入れ替わりも考慮して技術継承<br>に留意して研究を進めます。 |

別表 6

改良型燃料炉心核特性評価技術に関する高度化研究  
に対する外部専門家の評価意見及び専門技術者の意見並びに回答

(外部専門家の評価意見及び回答)

| No.     | 評価項目                       | 評価意見                                                                                                                                   | 回答                                                                                                                               |
|---------|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 北田 孝典 氏 |                            |                                                                                                                                        |                                                                                                                                  |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | —                                                                                                                                      | —                                                                                                                                |
| 2       | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。         | 計算時間及び計算メモリという計算負荷の低減に対して、並列化だけでは計算時間だけを対象としていると思います。次元削減手法や、MOC に対してメッシュ数の削減に効果があると予想できるノード法の適用など、計算メモリの削減に寄与するであろう手法についても検討すべきと考えます。 | 次元削減手法などについては、順次導入を検討し、当該コードへの反映を進めてまいります。すでに、2次元MOC計算機能には、線形ソース近似を採用するなどのメッシュ数を削減する取り組みを実施しております。                               |
| 3       | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | —                                                                                                                                      | —                                                                                                                                |
| 4       | ④ 重大な見落とし(観点の欠落)がないか。      | —                                                                                                                                      | —                                                                                                                                |
| 5       | その他                        | 事業者から型式証明の申請がなされており審査中であるとのことであるが、当該審査が終われば事業者は早々に当該燃料を用いた炉心設計について進めていくと予想されます。計画では R10 までですが、当該燃料を用いた炉心設計において、審査を進めるうえでの優先度の高い内容を早期   | 型式証明審査が終了した後に、トピカルレポート制度にて安全解析に用いる解析コードの審査が実施される予定です。その後、設置許可変更申請審査の中で、10×10 燃料炉心の安全性が審査されます。事業者側の炉心設計は早々に進められると考えられますが、実際の審査までは |

| No.     | 評価項目                       | 評価意見                                                                                                                                                                                                                          | 回答                                                                                                                                                                                                      |
|---------|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         |                            | に実施していくなどが必要と考えます(事業者から申請されたときに審査ができない状況を避けることが望ましいと考えます)                                                                                                                                                                     | 時間があるため、本研究成果の審査への活用は十分可能と考えます。ただし、審査が早期に進む可能性もありますので、審査の状況を注視しつつ、優先順位をつけて研究を進めていきます。                                                                                                                   |
| 五福 明夫 氏 |                            |                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                         |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | 過去の研究、最新知見を踏まえていると評価されるが、これまでの燃料棒の知見が適用できない(適用困難な)点が明確でないように感じる。確かに10×10燃料集合体のデータは少ないと思われるが、解析手法としては従来の燃料集合体で十分検討されているのではないのでしょうか。<br>解析コードが従来の燃料集合体に特化されているので改良が必要との説明であったが、10×10燃料集合体に特有の現象や解析精度向上が必要とされる現象が整理されていると良いと考える。 | 10×10燃料集合体装荷炉心の最適評価については、これまでに取り扱ってきた9×9燃料集合体装荷炉心の安全評価が主に1点炉動特性コードで実施されていたことから、知見が少なく、安全評価におけるモデル化など、検討すべき事項が多く存在すると考えられます。<br>それらを明らかにするために、10×10燃料集合体装荷炉心に特有な現象や解析精度向上が必要とされる現象などの整理を実施することを予定しております。 |
| 2       | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。         | 従来の研究の延長線上にあり、解析対象の相違への対応や解析結果の視覚化部分の改良が主な内容のようであるが、10×10燃料集合体に特有の現象や解析精度向上が必要とされる現象への取組もあった方が良いと思われる。                                                                                                                        | 海外での10×10燃料集合体装荷炉心の燃焼追跡解析事例、安全規制上のポイントなどを収集し、10×10燃料集合体装荷炉心に特有の現象や解析精度向上が必要とされる現象の特定に努めたいと考えております。                                                                                                      |
| 3       | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | 適切であると評価されます。                                                                                                                                                                                                                 | 拝承いたします。                                                                                                                                                                                                |
| 4       | ④ 重大な見落とし(観点の欠落)がないか。      | 重大な見落としはないと思われるが、上記の①と②を考慮いただくと良いと思います。                                                                                                                                                                                       | 承知いたしました。本プロジェクトでは、核設計の違いが安全解析に及ぼす影響などを踏まえながら、10×10燃料集合体装荷炉心特有の現象や解析精度向上が必要とされる現象を明らかにしたいと考えております。                                                                                                      |
| 5       | その他                        | 指摘事項等はありません。                                                                                                                                                                                                                  | —                                                                                                                                                                                                       |

| No.     | 評価項目                                                      | 評価意見                                                                                                                                                        | 回答       |
|---------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
|         |                                                           |                                                                                                                                                             |          |
| 山路 哲史 氏 |                                                           |                                                                                                                                                             |          |
| 1       | ① 国内 外<br>の 過 去 の<br>研究、最新<br>知見を踏ま<br>えているか              | 改良型燃料炉心(10×10BWR 燃料炉心)<br>は海外では既に実用化されており、日本でも独自の技術でこれに対応した評価技術を整備しようとするものですので、適切に立案されていると認められます。                                                           | 拝承いたします。 |
| 2       | ② 解 析 実<br>施手法、実<br>験 方 法 が<br>適切か。                       | 最新の best estimate 解析手法を活用するものであって、適切であると認められます。                                                                                                             | 拝承いたします。 |
| 3       | ③ 解 析 結<br>果 の 評 価<br>手法、実験<br>結 果 の 評<br>価 手 法 が<br>適切か。 | 従来炉心に比べて運転サイクル末期に炉心の出力が炉心上部に歪みやすくなることは BWR の高燃焼度化に伴う本質的な炉心核特性と認められますので、適切な評価手法が提案されているものと認められます。                                                            | 拝承いたします。 |
| 4       | ④ 重大な見<br>落とし(観<br>点の欠落)<br>がないか。                         | 重大な見落としは見当たりませんが、国際機関(OECD Nuclear Energy Agency)の作業部会(WPRS)で実施されたベンチマークの知見を活用すると共に、本事業の研究で得られる成果も、国際機関の活動等に対して積極的に発信することで、多様な観点から日本の研究活動の妥当性を確認できるものと考えます。 | 拝承いたします。 |
| 5       | その他                                                       | —                                                                                                                                                           | —        |

(専門技術者の意見及び回答)

| No.     | 評価項目                       | 意見                                                                                                                                                                                            | 回答                                                                                                                                                                                                   |
|---------|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 新井 健司 氏 |                            |                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                      |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | 特記事項なし                                                                                                                                                                                        | —                                                                                                                                                                                                    |
| 2       | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。         | ・「(2)a. 3次元詳細炉心動特性解析コードの改良整備」に関して、「R9 年度～R10 年度は、3次元詳細炉心動特性解析コードを用いて、実機炉心を非均質炉心体系として取り扱い、制御棒位置及び減速材密度が時間変化する事象に対する解析精度の評価を完了する。」とありますが、「解析精度の評価」は具体的にどのように実施し、何が得られれば完了する計画か、明示されることが必要と考えます。 | 3次元詳細炉心動特性解析コードで得られた実機炉心体系の実効増倍率や核分裂反応率などについて、モンテカルロコードで得られた計算結果と比較することにより検証をおこなうことを考えております。最終的に、3次元詳細炉心動特性解析コードの解析精度がモンテカルロコードの解析精度と概ね一致していることをもって、完了する計画となっております。したがって、解析精度の評価方針などを個票に記載させていただきます。 |
| 3       | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | 特記事項なし                                                                                                                                                                                        | —                                                                                                                                                                                                    |
| 4       | ④ 重大な見落とし(観点の欠落)がないか。      | 特記事項なし                                                                                                                                                                                        | —                                                                                                                                                                                                    |
| 5       | その他                        | ・3次元詳細炉心動特性解析コードについては「実機炉心レベルへの適用が困難、計算時間、計算メモリ計算コストの低減」が課題として挙げられ、(2)a で取り組むこととしていますが、これらの指標は計算体系の大きさやメッシュサイズ、対象とする解析事象によっても大きく異なるものと考えられることから、研究達成度を明確にするためには、具体的にどの程度の計算時間・計算メ             | 3次元詳細炉心動特性解析コードの改良がすべて完了した段階で、並列化計算機能を導入することを考えております。現在、PWR 実機相当の静解析では、1CPU で30日程度の計算時間を必要とします。このため、数十 CPU を用いた並列化計算で1日程度の計算時間を目指しております。また、規制庁の並列計算機のメモリ制限によ                                         |

| No.     | 評価項目                       | 意見                                                                                                                                                                                              | 回答                                                                                                                                                                                                                                                      |
|---------|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         |                            | モリの低減が必要なのか、定量目標が必要と考えます。                                                                                                                                                                       | り、16GB 以内を目標に、低減対策などを講じることを検討しております。                                                                                                                                                                                                                    |
| 井村 諭 氏  |                            |                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | 10×10 燃料を採用すると軸方向出力分布のピークが上に歪む効果が顕在化するため、最適評価コード、ひいては統計手法が必要となっているが、なぜこの効果が顕在化すると最適コードが必要なのか？10×10 燃料でなくても、制御棒が下から挿入される BWR では同じ効果が有るのではないのか？その程度によって最適コードの必要性有無が変わってくる理由が良く分からない。何かしきい値でもあるのか？ | TVAPS 効果は、10×10 型燃料装荷炉心以外でも認められますが、10×10 型燃料装荷炉心では取替体数を低減するため、サイクル末期の炉心燃焼度が高くなり、軸方向出力分布がより上部ピークになり、10×10 型燃料装荷炉心では、TVAPS 効果がより顕在化します。このため、1 点近似炉心解析コードでなく、最適評価コードの導入が必要となります。また、運転時の異常な過渡変化、設計基準事故の安全解析において、統計的安全評価手法を採用することにより、合理的な裕度を評価できるなどの利点があります。 |
| 2       | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。         | コメント有りません。                                                                                                                                                                                      | —                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 3       | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | コメント有りません。                                                                                                                                                                                      | —                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 4       | ④ 重大な見落とし（観点の欠落）がないか。      | コメント有りません。                                                                                                                                                                                      | —                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 5       | その他                        | —                                                                                                                                                                                               | —                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 溝上 伸也 氏 |                            |                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | 基本的には、過去の知見等を踏まえた計画になっていると理解した。なお、現在の BWR の過渡・事故解析の設置許可申請書の記載は黎明期より使用されてきた 1 点炉近似の解析コードを前提としたものとなって                                                                                             | 10×10 燃料集合体装荷炉心の最適評価については、これまでの取り扱ってきた 9×9 燃料集合体装荷炉心など、1 点炉動特性コードで安全解析を実施していたことから、知見が少なく、安全評価におけるモデ                                                                                                                                                     |

| No. | 評価項目                       | 意見                                                                                                                                                                                                                                              | 回答                                                                                                                  |
|-----|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     |                            | いるため、炉心を 3 次元化した解析コードを活用するために必要な審査の考え方についても考慮が必要。例えば、検討会でも質問した 1.3%dk の仮定や、スクラムカーブ、ボイド率など、1 点炉近似の解析コードでは入力値であったものが、炉心 3 次元解析コードでは入力値とはならないことをどう扱うか、といった問題である。                                                                                   | ル化など、検討すべき事項が多く存在すると考えられます。ご意見で頂いた1点炉近似の解析コードで用いた制御棒価値、スクラムカーブなどの位置づけなども含めて検討したいと考えております。                           |
| 2   | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。         | 平衡炉心の作成やピンパワーリコンストラクションなどは比較的枯れた技術であるので、着実に整備がなされるものと認識している。プラナーMOCなどの大きな計算機資源を必要とする技術については、許認可解析に導入される保守性の考え方とのバランスで適切性を評価していただきたいと考えている。                                                                                                      | 拝承いたします。                                                                                                            |
| 3   | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | 研究計画(案)でも言及されている統計的安全評価手法の適用に係る実施基準に沿って、適切に評価が行われるのであれば、評価手法の適切性が担保されとの認識                                                                                                                                                                       | 拝承いたします。                                                                                                            |
| 4   | ④ 重大な見落とし(観点の欠落)がないか。      | 反応度投入事象は過渡・事故解析に関するごく一部の事象である。資料においては、BWRの加圧事象におけるTVAPSについて言及されているにも関わらず、研究対象ではプラント全体の過渡・事故解析に対する言及が無い。過渡・事故解析の解析手法の開発は一体としてなされることが望ましいと考える。なお、核熱水力安定性解析は過渡・事故解析ではないが、燃料棒径が小さい10×10燃料核熱水力安定性評価が重要となってくることもあり、核動特性部分だけでなく熱水力も含めた総合的な評価体制が必要との認識。 | ご意見のとおり、核動特性部分だけでなく熱水力も含めた総合的な評価体制が必要であると認識しております。ご指摘いただいた熱水力安定性評価を含めて、すでに熱流動を担当する職員と適宜、協議して本プロジェクトを進めていくこととしております。 |
| 5   | その他                        | —                                                                                                                                                                                                                                               | —                                                                                                                   |

# 別表 7

## 次世代炉の事故解析に必要な基盤技術の構築に関する研究 に対する外部専門家の評価意見及び専門技術者の意見並びに回答

### (外部専門家の評価意見及び回答)

| No.     | 評価項目                      | 評価意見                                                                                                                                          | 回答                                                                                     |
|---------|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| 北田 孝典 氏 |                           |                                                                                                                                               |                                                                                        |
| 1       | ①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。  | —                                                                                                                                             | —                                                                                      |
| 2       | ②解析実施手法、実験方法が適切か。         | —                                                                                                                                             | —                                                                                      |
| 3       | ③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | 妥当性確認に必要なデータ(必要十分か、データの不確かさの大きさ)をしっかりと確認いただきたい。<br>「FP 挙動」「GEM」「FAIDUS」にかかる使えるデータは使うとのことであるが、十分であるかの観点でも確認いただき、必要なら実験を実施することも視野に入れて進めていただきたい。 | 妥当性確認に必要な実験データの十分性や不確かさについては、確認しつつ研究を進めてまいります。<br>また、優先度等に応じて実験の必要性についても検討していきたいと思います。 |
| 4       | ④重大な見落とし(観点の欠落)がないか。      | —                                                                                                                                             | —                                                                                      |
| 5       | その他                       | 計画では、金属燃料に関する検討も R10 年度まで進められるとなっているが、事業者で R8 年度末に予定している燃料種の決定を踏まえて、計画を適切に見直していただきたい。                                                         | ご指摘のとおり、R8 年度に高速炉実証炉における燃料技術の選択がなされると聞いておりますので、その状況も踏まえて本研究計画を適切に見直してまいります。            |
| 五福 明夫 氏 |                           |                                                                                                                                               |                                                                                        |
| 1       | ①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。  | ・Small Modular Reactor などのプラント形式を対象としないのが最初疑問であったが、日本で検討が進められている次世代炉の事故解析に必要な基盤技術の構築に関する研究                                                    | ・御指摘のとおり、学協会、海外の規制機関等から幅広く情報を収集することにより、可能な限り網羅的に情報を収集したいと考                             |

| No. | 評価項目                      | 評価意見                                                                                                                                                                                   | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     | 見を踏まえているか。                | <p>代炉に対する事故解析のための基盤技術の検討と理解した。Na 冷却の高速増殖炉や高温ガス炉の研究での知見の収集段階では、網羅的な調査を期待する。</p> <p>・PRA は安全解析手法の1つであるので、「高温ガス炉に適した PRA 手法」が何を意味しているのかが不明確に感じる。PRA 適用でどのような点が課題であるかを明確にしておく方が良いと考える。</p> | <p>えております。</p> <p>・御指摘を踏まえて「高温ガス炉の安全上の特徴を踏まえた PRA 手法」と修正いたします。高温ガス炉では、被覆燃料粒子の頑健性を生かして燃料破損そのものの排除を目指す設計、格納容器の機密性を要求せずに「機能的閉じ込め」により被覆燃料粒子、燃料要素、原子炉冷却材圧力バウンダリ及び原子炉建屋で総合的に放射性物質を閉じ込める安全設計概念等、軽水炉とは異なる安全性へのアプローチが検討されています。高温ガス炉設計に基づく安全上の特徴を踏まえると、PRA 手法における従来の炉心損傷頻度、格納容器破損頻度等の考え方の適切性から検討する必要があると認識しており、この研究計画の中で検討していきたいと考えています。</p> |
| 2   | ②解析実施手法、実験方法が適切か。         | <p>研究組織体制を考えると研究項目が多すぎるように感じる。初年度(令和7年度)に検討項目毎に優先度について評価し、検討項目を少し絞る方が良いと考える。</p>                                                                                                       | <p>具体的な設計にどのような安全上の特徴が盛り込まれるか等、開発側の動向を注視しつつ、それを踏まえて研究項目の重要度や優先度を判断し、各項目の検討の深さや詳細さについて合理化を図っていきたいと思います。</p>                                                                                                                                                                                                                         |
| 3   | ③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | <p>評価方法の大枠が計画で示されていると理解しており、その点では適切と思われる。</p>                                                                                                                                          | <p>拝承いたします</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 4   | ④重大な見落とし(観点の欠落)がないか。      | <p>今回の研究の範囲内では重大な見落としは無いと思われる。</p>                                                                                                                                                     | <p>拝承いたします。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

| No.     | 評価項目                      | 評価意見                                                                                                                                                                            | 回答                                                                                                                                                               |
|---------|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5       | その他                       | 次世代炉としては今回対象としたシステム形式以外にも研究されているので、世界的な研究動向については適宜情報収集（どのような研究機関でどのようなシステム形式を対象に研究されているか、など）をしておく方が良いと考える。                                                                      | 本研究計画は、「GX 実現に向けた基本方針」における「導入に向けた技術ロードマップ」を踏まえて策定していますが、ご指摘を踏まえ、他の炉システムについても情報収集を行ってまいります。                                                                       |
| 山路 哲史 氏 |                           |                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                  |
| 1       | ①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。  | 最新の知見を踏まえていることが確認できましたが、高速炉炉心損傷挙動解析コード（ASTERIA-SFR）の説明図にやや分かり難い記載がありました。ご説明にあったように、FEMAXI-FBR の解析範囲は燃料ピンの破損限界までであり、破損挙動までは解析の対象外である場合、一部の説明図は修正を要するのではないのでしょうか。                 | いただいたご意見について拝承し、研究計画（案）の図5を適正化致します。<br>なお、FEMAXI-FBR は、燃料ピンの内圧破損及び溶融破損の有無を計算し、破損と判定した場合には、破損に伴う燃料物質の流路側への放出量計算も行います。ただし、流路側へ放出された物質の挙動はCONCORD で計算するコード設計としています。 |
| 2       | ②解析実施手法、実験方法が適切か。         | これまでの経験を踏まえて適切な研究推進の方法が示されていると認められます。                                                                                                                                           | 拝承いたします。                                                                                                                                                         |
| 3       | ③解析結果の評価手法、実験結果の評価方法が適切か。 | これまでの経験を踏まえて適切な評価手法が示されていると認められます。                                                                                                                                              | 拝承いたします。                                                                                                                                                         |
| 4       | ④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。      | 重要な見落としは認められませんでした。が、研究計画に示された学会発表時期（3年度目）はやや遅い印象を受けました。本事業の研究から得られる成果がまとまってから発表する意図と思われますが、研究成果をまとめる以前に、研究の計画や過程を広く学会関係者に周知してレビューされるようにすることで、重大な見落とし等を多様な観点から確認できるのではないのでしょうか。 | 御指摘のように、研究を実施するに当たっての計画、過程等についても様々な有識者等の意見を伺って適宜フィードバックを掛けることにより、適切に研究を進めていきたいと考えております。このため、一部の研究項目については、2年度目に学会発表を実施するよう修正いたします。                                |
| 5       | その他                       | —                                                                                                                                                                               | —                                                                                                                                                                |

(専門技術者の意見及び回答)

| No.     | 評価項目                      | 意見                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 回答                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 新井 健司 氏 |                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                        |
| 1       | ①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。  | <p>・「高速炉実証炉及び高温ガス炉実証炉の適合性審査において必要となる技術的知見の取得」を研究の目的として、「高速炉及び高温ガス炉の国内外開発動向及び海外規制動向を調査」を行うこととなっています。海外では具体的なPJの進展に合わせて、規制機関における規制制度の具体化も進められているものと予測されることから、過去の知見の活用とともに、海外規制機関との協力も積極的に進め、重複なく効率的に遂行されることを期待します。</p> <p>・6.安全研究概要(2)a.の国内外の開発動向・研究動向で考慮されているかとは思いますが、ガス炉の被覆燃料粒子の頑健性は高温ガス炉の安全性を確保する重要な要素であることから、その技術・開発レベルについては注視する必要があります。</p> <p>・リスク情報活用に関しては、次世代炉の特徴を考慮しつつ、手法の整備が先行している軽水炉のPRAも適用できる部分は活用し、効率的に進められることを期待します。</p> | <p>・高速炉・高温ガス炉の開発動向・規制動向の調査においては、海外規制機関(米国NRC)等との協力により効率的に進めたいと考えています。</p> <p>・高温ガス炉の被覆燃料粒子の頑健性が安全上重要な役割を果たすことはご指摘の通りであり、我々もかねてより重々認識しておりますので、引き続き産学界動向を含め注視していく予定です。</p> <p>・リスク情報活用については、米国NRCでの規制動向や軽水炉PRAの手法等を参考とし、効率的に進める計画です。</p> |
| 2       | ②解析実施手法、実験方法が適切か。         | 特記事項なし                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | —                                                                                                                                                                                                                                      |
| 3       | ③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | 特記事項なし                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | —                                                                                                                                                                                                                                      |
| 4       | ④重大な見落とし(観点               | <p>・観点の欠落がないことを確認するために、また、課題の全体像を把握し効率的に必要な手法の整備を進めるために、個別コ</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | <p>・本研究計画では、既設炉の審査実績や、海外での開発動向及び規制動向を参照しながら、実証炉の評価対象事象と現象を想</p>                                                                                                                                                                        |

| No.    | 評価項目                    | 意見                                                                                                                                                                                                                                       | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|--------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|        | の欠落)がないか。               | ードのモデルの過不足ではなく、次世代炉の規制における評価対象事象と現象を定義し、その重要度を分類、その評価手法や必要データの全体像を示したのち、過去の知見においてカバーできる領域、海外との協力においてカバーできる領域(技術導入含む)および新たに開発が必要となる領域をわかりやすく示し、新たに開発される領域については重要度を示して、重要度に応じて効率的に開発されることを期待します。                                           | 定して手法の整備計画案を策定しました。本研究で対象とする実証炉の設計情報については現時点では十分に得られてはいないため、本研究計画で調査を並行して行います。その調査結果と設計の具体化に応じて、重要度の見直しを行い、重要度に応じた手法の開発を効率的に進めていきたいと思っています。                                                                                                                                       |
| 5      | その他                     | ・「研究計画 6. 安全研究概要(2)高温ガス炉の事故解析手法検討」の図8にはプラント概念図の例として水素製造プラントへの熱供給概念が示されているように、実証炉以降の高温ガス炉の用途としては、水素製造に代表される熱供給用途と、従来の発電用途、もしくは併用のケースが考えられます。原子炉等規制法の第四十三条の三の五では発電用原子炉に関する記載となっていますが、事故解析手法やPRA手法の構築に当たっては、熱供給用途に対する扱いについても一考する必要があると考えます。 | ・公開情報によると、高温ガス炉実証炉でも、水素製造のための熱利用及び従来の発電の用途が検討されています。JAEAのHTTR(高温工学試験研究炉)においても熱利用試験を行う計画があり、規制部に対して適用法規に係る行政相談(本年5、6月)があったと認識しています。それらの議論の動向や、高温ガス炉実証炉の開発状況を踏まえて、必要に応じ、実証炉の事故解析手法の整備計画に反映していく予定です。                                                                                 |
| 井村 諭 氏 |                         |                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 1      | ①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか | ・GEM(ジェム)はSASS(エスエーエスエス)のバックアップ設備であり、必須の設備では無いと理解していますが、この研究を実施する意義を教えてください。<br>・今回研究課題としている、「v ナトリウム・水反応」については、長年にわたり評価手法を構築及び高度化してきたとの認識ですが、実証炉向けに特筆すべき技術的課題があるのでしょうか？                                                                 | ・GEM は一例として示したものであり、昨今の開発動向からご指摘のとおりと考えますので、研究対象とする炉心損傷防止策はSASSに差し替えさせていただきます。<br>・「v ナトリウム・水反応」については、高速増殖原型炉もんじゅの廃止措置段階への移行に伴い研究を中断しておりました。一方、実証炉は蒸気発生器を有する設計が見込まれること、技術継承の観点からも評価手法の整備及び関連する最新知見の収集を再開することは重要な課題と認識しており、研究課題として挙げております。実証炉においては、新たな技術的課題は確認しておりませんが、設計の具体化に応じてナ |

| No. | 評価項目                      | 意見                                                                                                                                                                | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-----|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     |                           | <p>・安全上の特徴の整理において、HTTR で事故時の模擬試験を行っているので、そういった情報もインプット条件として頂ければと思います。</p>                                                                                         | <p>トリウム・水反応の影響評価を実施予定です。</p> <p>・2024 年 3 月に実施された原子炉出力 100%での炉心流量喪失試験等、HTTR の模擬試験の結果については注目しており、本研究計画の参考情報としたいと考えています。</p>                                                                                                                                                                                                                 |
| 2   | ②解析実施手法、実験方法が適切か。         | <p>・FP 移行は物理現象として複雑だと思います。どのように V&amp;V を進めていくのでしょうか？</p> <p>・セシウム・ナトリウム化合物エアロゾル挙動試験が計画されています。放射線環境下での化学反応等による化合物の振る舞いは現象として重要と考えますが、放射線環境下での試験を計画しているのでしょうか？</p> | <p>・Verification に関しては、濃度拡散、蒸発等の基本的な現象に着目して、理論式や同等の計算機能を有する解析コードとの比較を通じて検証する予定です。一方、Validation に関しては、事故時の環境を模擬した FAUST 試験等を対象に試験解析を行い、解析モデルの妥当性を確認していく予定です。</p> <p>・まずはエアロゾルの基本的な挙動を把握すること目指して大学等にて基礎的な試験を実施することを想定しています。現在のところは管理区域が必要になる放射線環境下での試験は計画しておりません。研究を遂行する中で放射線環境下での試験が不可欠であることが明らかとなった場合には、そのような試験の実現について模索していきたいと考えています。</p> |
| 3   | ③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | コメント有りません。                                                                                                                                                        | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 4   | ④重大な見落とし(観点の欠落)がないか。      | <p>・PRA 手法を整備するとあるが、地震 PRA 手法も整備するのでしょうか？免震設計が採用される場合、地震 PRA への影響があると考えられます。</p>                                                                                  | <p>・本研究計画は、出力運転時の内的事象 PRA 手法の整備を対象としております。地震 PRA については、発電炉の PRA、免震設計を含めた国内外での開発動向の情報を収集し、内的事象モデルの整備後に着手できるよう知見を整理していく予定です。</p>                                                                                                                                                                                                             |
| 5   | その他                       | コメント有りません。                                                                                                                                                        | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

| No.     | 評価項目                      | 意見                                                                                                                                                                                                         | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|---------|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 溝上 伸也 氏 |                           |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 1       | ①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | 検討会でも確認したが、米国での MELCOR の開発状況について、さらなる調査が必要と考えられる。検討会では主旨に沿った回答が得られなかったとの認識。単一のコード体系で思想が異なる多くの炉型を評価できるようにすることは、必ずしも正しい答えではないが、それを選択した経緯を調査することで、わが国における複数の次世代炉の解析コード体系のあり方について説得力のある説明ができるのではないかと考える。       | ご質問を取り違えており大変失礼しました。非軽水炉に対する MELCOR の開発過程に関しては、CSARP 協定への参加及び文献調査を通じて調査しております。NRC では、多様な炉型に対する解析技術の習得に要する期間、開発コストの削減等の背景から、MELCOR への複数の炉型を扱う解析モデルの導入等、解析コード体系を開発したと経緯があると認識しております。<br>上述の経緯を参考として、本研究計画では MELCOR を導入することで金属燃料高速炉炉心及び高温ガス炉のシビアアクシデント解析手法の一本化等についても検討しております。MELCOR の開発方針や経緯等についてさらなる調査を行い、解析コード体系の在り方を含め説明性を向上できるよう検討したいと思います。 |
| 2       | ②解析実施手法、実験方法が適切か。         | 解析コード開発の方法としては、従来実施されてきた方法を踏襲していると考えられるため、大きな問題はないと考えられる。一方で、軽水炉の解析コード開発においては、EMDAP、統計的安全評価の実施基準など、定型化された、効率的かつ説明性の高いコード開発の流れにそった開発が一般的になっていることを踏まえると、開発者個々の素養に依存しがちであるモジュールごとの開発をより効率的に実施できるのではないかと考えられる。 | ・ご指摘のように、これまで軽水炉で蓄積された解析コード開発に関する知見を踏まえ、可能な限り効率的に解析コード開発を進めてまいります。                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 3       | ③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | ②へのコメントと関連するが、実炉の存在しない炉型に対する解析結果の妥当性確認は難しいため、妥当性確認のための方法論を含む定型化された開発手法を意識した開発を実施することが望ましい。                                                                                                                 | ・日本原子力学会標準「シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン」等を参照しつつ、既往試験解析やベンチマーク解析、実機を使用した過渡試験等に基づき解析結果の妥当性確認を行う計画としています。                                                                                                                                                                                                                                           |
| 4       | ④重大な見落とし(観点               | 特になし                                                                                                                                                                                                       | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |

| No. | 評価項目      | 意見 | 回答 |
|-----|-----------|----|----|
|     | の欠落)がないか。 |    |    |
| 5   | その他       | —  | —  |

# 別表 8

## 実機材料等を活用した経年劣化評価・検証に係る研究(フェーズ2) に対する外部専門家の評価意見及び専門技術者の意見並びに回答

### (外部専門家の評価意見及び回答)

| No.     | 評価項目                     | 評価意見                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 大塚 雄市 氏 |                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか | <p>経年劣化評価手法の保守性は、これまで実機環境で使用された材料を用いて十分に検証されていないという問題意識のもとにフェーズ2の計画が立案されており、過去の知見を適切に把握していると考えられます。一方で、実機で使用された材料を活用することにより材料の機械的性質などがより広範にばらつくことが想定されます。そのようなばらつきをも考慮の対象とするのかについてもご検討いただきたいと思います。また、確率論的破壊力学評価(PFM)の適用の可能性からも、破壊靱性値の照射材におけるばらつきの要因について、機械的性質の変化との対応についての知見も活用することを検討いただきたいと思います。</p> <p>特に、圧縮応力付与部の長期使用時の緩和効果について、解析・実験的にも知見は原子力分野以外でもありますので、機械工学・材料工学分野での知見についても、収集することをお願い致します。</p> | <p>今後推進すべき安全研究の分野及びその実施方針(令和6年7月3日 原子力規制委員会)H)材料・構造のH-2「PFM を用いた検査程度の技術的妥当性を確認するため、解析手法の信頼性に関する知見を調査する。」に記載のとおり、当課では、国内外での既往の知見を調査することとなっています。また、「安全研究及び研究開発に関する原子力事業者との技術的な意見交換個別テーマ会合(経年劣化)」におきましても、PFMに関する活用については議論していくこととなっておりますので、本研究成果とともに今後の技術基盤確立に向けた検討をしていきたいと思っています。</p> <p>また、取得したデータのバラツキに関する検討及び圧縮応力付与部の緩和効果に係る他分野の知見(解析・実験)収集についてはフェーズ1で実施しております。その研究内容については、事後評価(成果報告書)の際にご説明させていただきます。</p> |
| 2       | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。       | <p>サンプルの採取法について制約がある中で、適切に検討されていると判断されます。事業者からの実機使用材料の提供時期が見通せないとの説明がありましたので、フェーズ1の知見も踏まえ、加速試験片などを活用し、残留応力測定法について妥当性を検討いただくことも必要ではないか</p>                                                                                                                                                                                                                                                              | <p>残留応力測定法の妥当性及び <math>J_{IC}</math> 試験の試験片寸法及び採取数等の検討につきましては、フェーズ1で研究を実施しております。その研究内容については、フェーズ1に関する事後評価(成果報告書)の際にご説明させていただきます。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                       |

| No. | 評価項目                       | 評価意見                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 回答                                                                                                                                                                                     |
|-----|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     |                            | <p>と感じました。</p> <p>破壊靱性評価について、<math>J_{IC}</math> を実際に測定するとの説明がありましたが、その測定法についても複数試験片を用いるのか、単一試験片を用いるのかなど測定法にバリエーションがあると思いますので、どの方法で計測するのかを事前に評価することが望まれます。</p>                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                        |
| 3   | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | <p>破壊靱性評価式の保守性を検討するとの説明がありましたが、シャルピー試験片と CT 試験片での測定値の相関性評価について、特に実機材料を使用した場合にばらつきが大きくなる可能性も懸念されます。その場合に、保守性を評価するのみならず、機械的性質・微視構造などの変化も踏まえ、非保守的になりうるとしたらどのような変化によるものなのか、そのメカニズムにもある程度議論を深めていくことが望まれます。</p> <p>検討会でも指摘されていましたが、X 線残留応力評価手法について、既存の手法との比較評価を標準サンプルなどですでに検証していることと思いますが、その点についても説明があることが望ましいと思います。</p> | <p>研究計画にも破断面の分析等記載しておりますが、その分析より、機構論的な検討についても可能な範囲で実施していきたいと思っております。</p> <p>また、X 線残留応力評価手法については既存の手法と比較し検証を実施しています。なお、測定で用いる最適手法に関する検討内容については、フェーズ1に関する事後評価(成果報告書)の際にご説明させていただきます。</p> |
| 4   | ④ 重大な見落とし(観点の欠落)がないか。      | <p>特に重大な見落としがあるようには見受けられません。</p> <p>予防保全対策施工箇所に対する長期健全性評価に係る研究については、目標値となる圧縮応力がどの程度まで低下しても、規制上問題となる損傷・破壊モードの基準値に与える影響が許容できるのかについて、圧縮応力の低下がありうることを前提とした規制上の考え方についても、研究の進捗に応じてお示しいただきたいと思います。</p>                                                                                                                    | <p>検討会の中でも申し上げましたが、研究計画に記載のとおり、成果の取りまとめにおいて、頂きました御意見を含め検討していきたいと思います。</p>                                                                                                              |
| 5   | その他                        | <p>破壊靱性評価手法を実際の安全規制に活用していることは貴重な取り組みだと考</p>                                                                                                                                                                                                                                                                        | <p>御意見拝承しました。</p>                                                                                                                                                                      |

| No.     | 評価項目                       | 評価意見                                                                                                                                                                                                                                                        | 回答                                                                                             |
|---------|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         |                            | えます。原子力分野のみならず、機械・電気・土木・化学など多様な分野の学会および学生さん向けにも、安全規制における破壊力学の実機適用性についての研究紹介・交流などを行うことで、安全基盤技術の研究の活性化や産学官連携もご考慮頂ければ幸いです。                                                                                                                                     |                                                                                                |
| 黒田 雅利 氏 |                            |                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | 全体として実験事実に関しては、これまでの研究や知見を十分踏まえたものになっていると評価致します。ただ照射材の実験データは情報量が限定されるため、非照射材で他にも参考になりそうな研究事例や、実験だけでなく理論や解析による知見も取り入れられると、さらに良くなると考えます。                                                                                                                      | 非照射材料を用いた研究及びそれらの結果を基にしたデータ解析等をフェーズ1で実施しております。その研究内容については、フェーズ1に関する事後評価(成果報告書)の際にご説明させていただきます。 |
| 2       | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。         | 全体として実機材料の取得が前提の研究課題であり、特に【(1)原子炉容器の中性子照射脆化評価に係る研究】では委託先が海外の計画となっていることから、実機材料が計画通りのスケジュールで入手できない場合や、必要なサンプル数が確保できない場合等の対策を、事前に検討しておく必要があると考えます。その他、現時点での計画としては適切であると考えます。                                                                                   | 海外炉の材料取得になるため、先方の研究機関とは密に連絡を取りながら研究を進めて行きたいと思います。また、不測の事態も想定し、研究計画を臨機応変に変更できるように考えて参ります。       |
| 3       | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | 全体として評価手法や評価式の保守性(安全側であること)を、実機材料を用いた実験により確認することは、安全研究を行う上で最も優先すべき重要なことであると評価致します。ただ計画通りのサンプル数を確保できない場合に備えて実験事実を補完するために、理論や解析を組み合わせた評価や、メカニズムにまで踏み込んだ検討もご検討下さい。例えば【(3)予防保全対策施工箇所に対する長期健全性評価に係る研究】においては、残留応力の変化だけでなく転位密度などの変化も併せて評価することで、メカニズムの検討にも役立つと考えます。 | 研究計画に記載のとおり、破断面の分析及び取得データの分析等を実施しておりますが、その分析から、機構論的な検討についても可能な範囲で実施していきたいと思っております。             |

| No. | 評価項目                         | 評価意見            | 回答       |
|-----|------------------------------|-----------------|----------|
| 4   | ④重大な見落とし（観<br>点の欠落）<br>がないか。 | 現時点では特に見当たりません。 | 拝承いたします。 |
| 5   | その他                          | —               | —        |

(専門技術者の意見及び回答)

| No.     | 評価項目                       | 意見                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 回答                                                                                                                                                                                                                                                           |
|---------|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 釜谷 昌幸 氏 |                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | 過去の研究や知見が適切にレビューされており、これらを踏まえた目的が設定され、試験が計画されている。実機材を用いた貴重なデータが得られると期待できる。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | —                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 2       | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。         | <p>【原子炉容器の中性子照射脆化評価に係る研究】</p> <p>未照射材を用いた場合でも、破壊靱性は材料の強度(硬さや降伏強度)に依存する。破壊靱性の評価にあたっては、強度特性の変化による影響と、照射による材質変化による影響を区別して考察できるよう、機械特性を丁寧に取得することが望まれる。</p> <p>【炉内構造物の中性子照射による靱性低下に係る研究】</p> <p>実機評価を行う際には、破壊靱性の下限値のみでなく、ばらつきが大きいことも問題になる。材料の強度特性や異方性の影響など、ばらつきの要因を考察した上で、下限値の議論が行なえるように試験データを取得することが望まれる。</p> <p>【予防保全対策施工箇所に対する長期健全性評価に係る研究】</p> <p>残留応力測定は非破壊的な手法だけではなく、破壊的な手法も選択肢に含めて最適な手法を選択するのがよい。</p> | <p>【原子炉容器の中性子照射脆化評価に係る研究】及び【炉内構造物の中性子照射による靱性低下に係る研究】については、研究計画に記載している機械特性試験においては、御意見の趣旨を踏まえ、照射による強度(硬さや降伏強度)の材質変化への影響等を確認し、考察していきたいと思えます。</p> <p>【予防保全対策施工箇所に対する長期健全性評価に係る研究】での御意見については、測定で用いる手法の検討内容(最適な手法の選択について)をフェーズ1に関する事後評価(成果報告書)の際にご説明させていただきます。</p> |
| 3       | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | 問題は見当たらない。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 拝承いたします。                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 4       | ④ 重大な見落とし(観                | 見落としなど問題は見当たらない。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 拝承いたします。                                                                                                                                                                                                                                                     |

| No.    | 評価項目                     | 意見                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 回答                                                                                                                                                                                                                               |
|--------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|        | 点の欠落)がないか。               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                  |
| 5      | その他                      | 本研究では貴重な実機データが得られることから、研究のスコープとの関連がない場合でも、取得可能な材料特性(機械強度や微視組織など)を採取することを心掛けていただきたい。                                                                                                                                                                                                                                                                        | 可能な範囲で実施していきたいと思っております。                                                                                                                                                                                                          |
| 寺地 巧 氏 |                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                  |
| 1      | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか | 高経年化対応という観点から重要なテーマを検討した上で、実機で使われた材料を用いて研究する取り組みとなっている。実機材料を分析・評価することで、原子力プラントの安全性を検証する試みであり、有益な知見が得られるものと判断できる。過去の研究や最新知見では、実験室で行われる加速試験の妥当性や、長時間用いられた材料の健全性に対する保守性が議論されることがあるが、本研究はこれらニーズに対応した計画となっている。                                                                                                                                                  | 拝承いたします。                                                                                                                                                                                                                         |
| 2      | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。       | 一部で海外プラントの材料を活用する計画となっているが、これらは国内の廃炉工程の都合を踏まえたもので合理的な研究計画と判断できる。放射線を有する実機材を用いるには、安全上の都合もあるため調整を含み多くの労力と費用を必要とすることが想定される。研究計画は、事業推進を目指して丁寧に検討されたもので、合理的な取り組みである。一方、詳細の検討内容については今後精査される予定と思われるが、破壊靱性値の取得などのデータ採取に留まらず、微視組織の観察・分析など機構論的な検討にも期待したい。機構研究を国内で重点的に実施できれば、技術力維持や安全規制にかかわる人材の育成にもつながり有益と考えられる。また、応力評価などについては比較的新しい手法にも取り組んでいるため、従来法との違いの検証も重要と思われる。 | <p>研究計画にも破断面の分析等記載しておりますが、その分析より、機構論的な検討についても可能な範囲で実施していきたいと思っております。</p> <p>また、国内で取得した材料については、国内の研究機関で、海外で取得した材料については、国内に輸送できれば国内でも実施し、人材育成等も含め対応していきたいと思います。</p> <p>応力評価に係わる新手法の検証は、フェーズ 1 でも確認しており、概ね従来法と差異が無いことを確認しております。</p> |

| No. | 評価項目                      | 意見                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-----|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3   | ③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | <p>現行の安全規制に係る技術的妥当性を検証する評価が想定されており、全体を通して妥当な内容と判断される。一方で、将来の安全規制の在り方を考えた場合、決定論的なリスク評価だけではなく、確率論的な概念導入を見据えた技術基盤の確立についても期待したい。具体的には、得られたデータのばらつきの根拠や妥当性に対しても、機構論的な評価を行うことで確率論的な概念導入に際して有益な知見となることが考えられる。また、海外知見と異なるデータ傾向などが得られた場合は、その理論的妥当性を検証することが必要と思われる。</p> <p>他に、ピーニングなどの応力改善技術は、圧縮応力の有無よりも、割れが生じない応力条件の維持が重要と判断されるため、結果の整理においては科学的根拠に基づいた判定を要すると考えられる。</p> | <p>今後推進すべき安全研究の分野及びその実施方針(令和6年7月3日 原子力規制委員会)H)材料・構造のH-2「PFM を用いた検査程度の技術的妥当性を確認するため、解析手法の信頼性に関する知見を調査する。」に記載のとおり、当課では、国内外での既往知見を調査することとなっています。また、「安全研究及び研究開発に関する原子力事業者との技術的な意見交換個別テーマ会合(経年劣化)」におきましても、PFMに関する活用については議論していくこととなっておりますので、本研究成果とともに今後の技術基盤確立に向けた検討をしていきたいと思いをします。</p> <p>また、応力測定の結果は、研究計画に記載のとおり、成果の取りまとめにおいて、頂きましたコメントを含め検討していきたいと思いをします。</p> |
| 4   | ④重大な見落とし(観点の欠落)がないか。      | <p>本項目は実機材活用研究としての取り組みだが、成果を有効に活用するためには並行して基礎的な機構研究も推進することが重要と思われる。国内外で取り組まれている基礎研究との情報交流を踏まえつつ、不足する知見に対する取り組みのサポートに対しても期待したい。基礎研究の推進は、合理的な規制判断に必要な専門家の育成および技術伝承という側面でも重要と考える。</p>                                                                                                                                                                             | <p>御意見拝承しました。</p> <p>なお、フェーズ1より委託先において委員会を設置し、意見交換ができる場を設けています。フェーズ2においても同様に委員会を設け、産学官での意見交換を行い、人材育成という観点でも情報交流等を実施して参りたいと思いをします。</p>                                                                                                                                                                                                                      |
| 5   | その他                       | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

# 別表 9

## 東京電力福島第一原子力発電所燃料デブリ分布の放射線計測に基づく推定方法に関する研究 に対する外部専門家の評価意見及び専門技術者の意見並びに回答

### (外部専門家の評価意見及び回答)

| No.     | 評価項目                                            | 評価意見                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 北田 孝典 氏 |                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 1       | ① 国内 外<br>の 過 去 の<br>研 究、最 新<br>知 見を踏ま<br>えているか | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 2       | ② 解 析 実<br>施 手 法、実<br>験 方 法 が<br>適 切 か。         | <p>R10 での段階的な取り出し規模の拡大に<br/>向けて分布を詳細に把握することが目的、<br/>ですので、少し研究計画に違和感がありま<br/>す。</p> <p>放射線計測によって、どのようなデータが<br/>得られるかも大切でありアンフォールディ<br/>ング法の適用も研究対象とすべきですが、む<br/>しろ、得られるデータを用いてどのようにし<br/>てマッピングを行うか、を目的とすべきでは<br/>と思います。実際の場面を想定すれば、放<br/>射線計測結果だけでなく画像データも非常<br/>に有益な情報であることは容易に予想でき<br/>るため、アンフォールディングされた放射線<br/>計測結果、画像データ、シミュレーション結<br/>果など、利用可能な様々なデータを組み合<br/>わせてマッピングを行う技術そのものが、<br/>本項目での対象になるのでは、と考えま<br/>す。</p> <p>R8 以降ではマッピング方法の検討を行うと<br/>のことですので、様々なデータを融合した<br/>マッピング技術を機械学習などの手法も組<br/>み合わせながら実施することを検討いただ<br/>ければと思います。</p> | <p>本プロジェクトの成果は燃料デブリ取出し<br/>作業以外にも広く廃炉作業に活用するもの<br/>として、規制部門からのニーズを基に協議<br/>を行ったうえで研究期間を設定したもので<br/>すが、事業者の動向等により知見が必要と<br/>なる時期が変わることを考慮し、規制部門<br/>と連携しながら取得する知見の優先度を意<br/>識して研究を進めてまいります。</p> <p>取得したデータに基づいて燃料デブリ分布<br/>の画像化を行うマッピング技術について<br/>は、行程表等の中ではアンフォールディ<br/>ング法等と併せて線源推定方法と大括りに表<br/>現していましたので、光学画像やシミュレ<br/>ーション結果との比較と併せて、測定、デー<br/>タ処理、マッピングの流れを意識した計画と<br/>したいと思います。</p> <p>また、マッピング技術は放射線測定とは別<br/>分野の技術が中心となり、専門外の知見が<br/>必要となりますので、研究初期から情報収<br/>集に努めてまいります。</p> <p>一方で、どのようなマッピング技術を採用す<br/>るかは事業者の裁量となり、規制側はその<br/>妥当性を判断する立場として、現場で運用<br/>する技術の目標や仕様を我々が限定しな<br/>いように研究を進める必要がある旨をご理</p> |

| No.     | 評価項目                       | 評価意見                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|---------|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         |                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 解いただけますと幸いです。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 3       | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 4       | ④ 重大な見落とし（観点の欠落）がないか。      | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 5       | その他                        | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 五福 明夫 氏 |                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | 過去の研究や最新知見を踏まえていると思われる。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 拝承いたします。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 2       | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。         | <p>研究目標はデブリ中の燃料デブリの分布（塊の位置、形状、量、など）の精度良い推定と理解される。単一のセンサでは通常は強度（この場合は中性子の強度）のみが測定結果として得られるので、分布を分析するには様々な位置での計測が必要である。また、燃料デブリの情報は中性子強度計測やカメラのようなパッシブなセンサだけではなく、超音波などのアクティブなセンサも存在する。</p> <p>一般に、パッシブなセンサでは、対象物との間の物質の影響を受ける。また、中性子センサから得られる中性子強度は、燃料デブリの量、燃料デブリから放出される中性子強度、燃料デブリの形状、センサとの間にある物質、センサの特性（指向性など）の関数となるため、量や形状の推定には工夫が必要となり、場合によっては燃料デブリからの中性子強度は均一などの仮定が必要となる。</p> | <p>詳細なご意見をありがとうございます。</p> <p>本プロジェクトでは、説明資料でご紹介しましたように事業者が放射線計測による燃料デブリの情報取得を進めている事例等に基づき、事業名称にあるとおり放射線計測に基づく方法に焦点を当てていますが、他にも様々な計測方法の候補は存在しますので、事業者動向を適宜確認してまいります。</p> <p>放射線計測に基づく推定方法については、外部から中性子を燃料デブリに照射して、中性子増倍効果を発現させることによって増幅される中性子や即発ガンマ線を捉えるアクティブに類する手法もありますが、再臨界の恐れのある系に対しての適用は細心の注意が必要となりますので、検討することとなった場合には慎重に安全性を検証してまいります。</p> <p>また、本プロジェクトでは技術開発を目的としておらず、ご指摘にある適用範囲等の検</p> |

| No.     | 評価項目                       | 評価意見                                                                                                                                                                  | 回答                                                                                                                                                                                                                                              |
|---------|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         |                            | これらのことから、計画にも記されているように、どの程度の推定が可能であるかの適用範囲と妥当な仮定設定の検討となると思われる。                                                                                                        | 討が主目的となりますので、それらを明確にできるよう研究を進めてまいります。                                                                                                                                                                                                           |
| 3       | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | 燃料デブリの取り出しに対する安全審査で必要な項目と研究計画とが整合しているかどうかの説明があまり無いので、適切かどうかの判断が困難である。安全審査においては、再臨界の可能性があるかどうか、また、取り出し途中および取り出した燃料デブリの塊による作業員の放射線被曝ではないかと想像しているため、そのような観点での評価も必要と思われる。 | 本プロジェクトでは、燃料デブリの取出し作業をはじめとした廃炉作業全体において、燃料デブリ分布を放射線計測により推定する際の安全性や確実性に係る知見取得を対象とした計画となっていますが、本研究の成果は作業員への被ばく低減にも知見提供が可能と考えています。<br>また、ご指摘にあります再臨界の可能性については、別プロジェクト「福島第一原子力発電所燃料デブリの臨界評価手法の整備」にて JAEA の STACY 更新炉を用いた実験研究が進行しており、その成果が活用される見込みです。 |
| 4       | ④ 重大な見落とし（観測点の欠落）がないか。     | 燃料デブリ取り出し作業に対する安全審査項目と研究の整合性について確認すると良いと思われる。                                                                                                                         | 規制部門との情報共有を適切に実施し、規制ニーズに沿った研究となることを意識してまいります。                                                                                                                                                                                                   |
| 5       | その他                        | 指摘事項等はありません。                                                                                                                                                          | —                                                                                                                                                                                                                                               |
| 山路 哲史 氏 |                            |                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | 本研究は、技術開発そのものではなく既存技術の活用法に着目しているとのこと説明は理解できました。                                                                                                                       | ご理解のとおり、本プロジェクトは現場で採用する技術の開発を目的としたものではなく、適切な規制活動を実施するための知見の収集となります。                                                                                                                                                                             |
| 2       | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。         | これまでの経験を踏まえて適切な研究推進の方法が示されていると認められます。                                                                                                                                 | 拝承いたします。                                                                                                                                                                                                                                        |
| 3       | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | これまでの経験を踏まえて適切な評価手法が示されていると認められます。                                                                                                                                    | 拝承いたします。                                                                                                                                                                                                                                        |

| No. | 評価項目                 | 評価意見                                                                                                                                                    | 回答                                               |
|-----|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 4   | ④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。 | 重大な見落としは見当たりませんでした。研究計画から大部分が委託研究とされることが読み取れます。近年は人で不足で公共事業の入札が不調になることも珍しくありませんので、学会発表等を通じて関係機関に広く貴庁の取り組みをご発信頂き、普段から広く周知しておくことも今後の円滑な研究推進に有用ではないかと思います。 | 学会や研究会での発表、研究機関との意見交換等を積極的に実施し、研究事業の周知を進めてまいります。 |
| 5   | その他                  | —                                                                                                                                                       | —                                                |

(専門技術者の意見及び回答)

| No.     | 評価項目                       | 意見                                                                                                                                                                                                                                           | 回答                                                                                                                                                                                                                                      |
|---------|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 新井 健司 氏 |                            |                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                         |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | <p>・燃料デブリの分布を測定する方法として、2015～2017年に宇宙線ミュオンを利用した技術開発が行われており(関連図書[1])、1F-1/3号機において実際に測定が実施されています。これと対比させて、今回提案されている技術開発の特徴(ねらい、利点)が整理されると良いと思います。</p> <p>関連図書[1] 平成25年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金(原子炉内燃料デブリ検知技術の開発)完了報告 平成27年12月、技術研究組合 国際廃炉研究開発機構</p> | <p>宇宙船ミュオンを利用した技術は、高密度の核燃料物質に対する大まかな炉内分布を観測することを最初の目的として実施されたと理解しており、お示しいただいた関連図書からも、分解能向上等に向けての様々な取組がなされたことが分かります。</p> <p>それに対し本プロジェクトでは、対象物の光学画像との比較なども行いながら、局所的な分布をより詳細に得る技術(開発を行うのは事業者側です。)に対して、規制側として評価するための知見を得ることを目的としております。</p> |
| 2       | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。         | <p>・「1F炉内の燃料デブリの状況を概念的に模擬できる実験施設」について具体的な記載がありませんが、ガンマ線照射場において複数の中性子源と中性子検出器の配置を模擬できる施設であることが望まれます。</p>                                                                                                                                      | <p>該当する実験施設としては、研究用原子炉や臨界実験装置等が挙げられますが、中性子源や検出器の配置等の自由度を考慮すると、後者が適しているかと考えております。その他の種類の施設に関しても可能性を検討し、本事業に最適な実験施設を選定してまいります。</p>                                                                                                        |
| 3       | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | <p>・デブリが存在する環境は様々(水中、気中)であり、また、デブリの形状も多様である中で、「中性子検出器による計測に基づく燃料デブリ分布の推定方法」は環境や形状の違いを考慮して適用できる技術となるのかトールゲートを設けて、適用性を確認しながら進めることが重要と考えます。「放射化法」と同じく、適用の可否判断を行程の中に含めることが妥当ではないでしょうか？</p>                                                       | <p>説明資料でも事例をご紹介しましたように、中性子検出器による1F炉内での測定は実績がありますので、放射化法に対して検討を予定しているように全く適用できない可能性は無いと考えておりますが、ご指摘のあった燃料デブリが水中、又は気中にあるのか等の状況により、適／不適の判断は当然必要となります。</p> <p>本プロジェクトでは、不適と判断すべき根拠を整理することも重要となりますので、両計測方法とも個別の条件に対する適用可否判断は明確にしてまいります。</p>  |
| 4       | ④ 重大な見落とし(観                | <p>・気中工法の場合、燃料デブリが気中露出部と水没部に分かれることがあり得ます。混在する場合も考慮する必要があると考え</p>                                                                                                                                                                             | <p>事前検討の中で露出・水没の混在状態についても簡易評価を行い、単独状態とは異なる傾向が見えておりますので、より詳細</p>                                                                                                                                                                         |

| No. | 評価項目      | 意見                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     | 点の欠落がないか。 | <p>ます。</p> <p>・周囲からのバックグラウンドをコリメートで影響を低減したとして、取り出し作業の妥当性を確認するためには、具体的にどのような表面積単位の燃料デブリの分布が必要なのか、また、燃料デブリを深さ方向に掘削しますので、深さ方向の計測範囲と、深さ方向の分布も計測する意図ならば分解能の目標設定が必要と考えます。燃料デブリ分布情報を、その後の燃料デブリの取り出し作業に活用することがあるならば、「安全、確実、合理的」の観点で活用方法が必要で、その方法を実現するための上記の範囲と分解能に加え、計測レンジ、放射化のための設置時間等の計測仕様の設定が必要と考えます。</p> <p>・充填工法の場合は充填後の燃料デブリ加工前の適用は困難で、充填材との境界面の燃料デブリを加工した後からの適用となります。</p> | <p>な検討を進めてまいります。</p> <p>また、現場作業における性能目標や仕様の設定、取り出し工法に合わせた技術運用の方向性等については、事業者側が検討していくものと考えています。規制側は、事業者の検討内容に対して「安全、確実、合理的」等の観点から妥当性を検討しますので、現場で運用する技術の目標や仕様を我々が限定しないように研究を進める必要がある旨をご理解いただけますと幸いです。</p>                                                                                      |
| 5   | その他       | <p>・本技術の適用について、「研究計画」の図1を見ると、気中の広い空間内のどこかに点在するデブリ(ホットスポット)を探す、ことを想定しているように思われました。一方、1F2/3の格納容器内部調査の映像によると、ペDESTAL内にはほぼ全面的にデブリ(と思われる堆積物)が広がっています。この場合、すでにデブリが全面にあるのはわかっているので、どの領域に燃料成分が多いのか、どの領域は構造材と見なして良いのか、表面をサーベイして、燃料成分の多寡を判定し、マッピングする技術が重要に思われます。マッピングの仕様を明確にさせていただくと、現実的な適用性が評価できると考えます。</p> <p>・実機適用の適切性確認が研究開発の最終目標と考えますが、最終目標までの工程表を作成し、想定される課題を明確にした</p>       | <p>上記 No.4 に回答しましたように、マッピング技術に対しても、規制側が方針や仕様を限定することはありませんので、それぞれの技術の特徴や限界等について広く知見を収集することを目的としている旨をご理解いただけますと幸いです。</p> <p>また、最終目標に向けての行程や位置付け等を明確化することの重要性は認識していますが、未だに 1F 炉内状況の不確かさが大きく、取出し工法も決定されていない状況にある中で明確な行程等を用意することが困難でありますので、これからの調査で得られていく情報を随時取り込みながら、頻繁に見直すことで計画を更新してまいります。</p> |

| No.     | 評価項目                       | 意見                                                                                               | 回答                                                                                                                                                               |
|---------|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         |                            | うえで、今回実施する研究がどのように位置付けられるのか、マイルストーンとともに記載されていることが望ましいと考えます。                                      |                                                                                                                                                                  |
| 井村 論 氏  |                            |                                                                                                  |                                                                                                                                                                  |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | —                                                                                                | —                                                                                                                                                                |
| 2       | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。         | 中性子計測に限定していますが、ガンマ線（スペクトル）を測定することでも、FP 核種の分布（燃料と帯同していればデブリ分布に相当）が分かり有益ではないかと思いますので、ご検討頂ければと思います。 | 事業者が実施したペDESTAL外部でのガンマ線計測では、核分裂生成核種由来の信号判別ができており、有効な情報になり得ると理解しております。<br>より放射線束の強いペDESTAL内部において、指向性を伴ったガンマ線情報を得ることが現実的であるかどうかを先ずは見極め、情報の活用方法や手段について知見を収集してまいります。 |
| 3       | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | —                                                                                                | —                                                                                                                                                                |
| 4       | ④ 重大な見落とし（観測点の欠落）がないか。     | 水没状態と露出状態が代表で示されていますが、中性子計測に影響を及ぼすものとして、中性子吸収材等が混在している状況も考えられますので、様々なデブリの状況・状況を推定して進めて頂ければと思います。 | 検討会でご説明した資料の中では、中性子の運動に対して影響を及ぼすコンクリートによって、計測結果に大きな影響を与えるとのシミュレーション結果が得られており、ご指摘のように制御棒等の中性子吸収材による影響も検討する必要があります。<br>その他も含めて様々な炉内状況を考慮した検討を進めてまいります。             |
| 5       | その他                        | —                                                                                                | —                                                                                                                                                                |
| 溝上 伸也 氏 |                            |                                                                                                  |                                                                                                                                                                  |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新             | 資料に記載のあった福島第一 1 号機の中性子測定は、本事業と同じように、中性子束の測定値と視覚的な画像情報を活用す                                        | 当該測定実績は、格納容器環境下における中性子検出の可否を検証し、主に熱中性子の検出によって燃料デブリに対するどの                                                                                                         |

| No. | 評価項目                       | 意見                                                                                                                                                                                                                                                                 | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     | 知見を踏まえているか                 | ることで、デブリ分布(ただし測定ポイントごと)を評価しようとするものである。事実として、この測定による評価は想定通りには進まなかった。本事業でもこの評価と同じような状況となる可能性が高いと考えられるが、このような過去の知見を踏まえた研究計画とはなっていないように見受けられる。                                                                                                                         | <p>ような情報がどこまで得られるかを実測確認したものと理解しており、一定の成果は得られたものと考えています。</p> <p>本プロジェクトでは、上記より得られた知見等をベースと考え、中性子の飛行方向、エネルギーの違い、中性子の運動に影響を与える周辺物質を考慮に入れること等を手始めとして、様々な可能性を検討、検証していく計画であると捉えていただければ幸いです。</p>                                                                          |
| 2   | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。         | 解析を実施する前の限定的な情報しか与えられていないが、手法の妥当性についての見込みは、既知の分布をもとに測定値が説明できることを示したものである。しかしながら、現実には、未知の線源(点線源ではない)に対して、有限の測定値をもとに線源の3次元分布を再構成することを目指していると考えられるが、それに対する具体的な説明がないため、解析実施手法の妥当性を判断できない。                                                                              | <p>説明資料等でご紹介しました評価例は、実施内容の状況を明確にさせていただくために掲載したイメージ図となります。</p> <p>本プロジェクトは技術開発ではなく、技術の適用性判断の基となる知見を広く収集することを目的としており、既知の状況に対する現象の分析は有効な手掛かりになると考えています。ご指摘にある未知の状況に対する評価方法の知見の必要性も認識していますが、未知の分布を再構成する技術の確立を目指したものではない旨をご理解いただければ幸いです。</p>                            |
| 3   | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | 一般的には、解析評価手法は、実測との比較により行われるが、多くの場合において実測値が存在しないことが、その適切性評価の妨げとなる。本手法についても、デブリ分布の予測に使用されるものであり、現在未知である、デブリの組成を含めたデブリ分布の実測値は無いことから、模擬試験等により結果の妥当性の評価をするしか方法が無いと認識している。しかしながら、提示された情報は既知のデブリ分布に対する中性子束の場所による数値の違いを説明できることに留まっており、結果の評価手法に関する具体的な説明がないため、その妥当性を判断できない。 | <p>上記 No.2 に回答と同様に、説明資料等でご紹介しました評価例は、実施内容の状況を明確にさせていただくために掲載したイメージ図となります。</p> <p>本プロジェクトの性質として、解析結果や実験結果に対してどのような評価を行えば燃料デブリ分布を適切に推定できるかを評価しますので、ご指摘のとおり、模擬的な実験の結果に対する再現性等を手掛かりに評価を進め、様々な評価手法の特性を整理していくことになるかと存じます。</p> <p>評価項目に対して御意見を考えにくい説明内容になっており、失礼しました。</p> |
| 4   | ④ 重大な見落とし(観                | デブリ分布を評価することを目的とした福島第一1号機のペDESTAL外への堆積物に                                                                                                                                                                                                                           | 拝承しました。既存の調査、検討結果に加え、現在進行中の他機関による事業等も参                                                                                                                                                                                                                             |

| No. | 評価項目      | 意見                                                 | 回答        |
|-----|-----------|----------------------------------------------------|-----------|
|     | 点の欠落がないか。 | 対する測定履歴は、本事業を実施するうえで参考になると考えられるため、必ず確認しておくことが望まれる。 | 照してまいります。 |
| 5   | その他       | —                                                  | —         |

一種廃棄物埋設施設の性能評価及び線量評価に関する研究  
に対する外部専門家の評価意見及び専門技術者の意見並びに回答

(外部専門家の評価意見及び回答)

| No.     | 評価項目                     | 評価意見                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 井口 哲夫 氏 |                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか | <ul style="list-style-type: none"> <li>国内の過去の研究成果や最新知見・情勢は十分調査・把握され、本研究の計画策定(課題設定)と実施内容に盛り込まれていることは分る。</li> <li>国外研究の最新知見(例えば、仏の処分地決定に係る経緯や技術動向など)がどの程度反映されているか、申請書やプレゼン資料からは読み取りにくい。</li> </ul>                                                                                                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>拝承いたします。</li> <li>研究計画案の6.(1)の「・・・を中心とした研究開発動向等を踏まえ・・・」の「等」に諸外国における最新知見を含んでおりますが、明示的に読めないため、研究計画案に明示します。</li> </ul>                                                                                                                                                               |
| 2       | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。       | <ul style="list-style-type: none"> <li>本研究計画で抽出・設定された各課題で提案されている調査および解析手法、また相補的な試験方法はほぼ妥当と思われるが、以下の点が若干気に懸かるところ。</li> <li>セメント系部材の長期物質安定性能及び透水性能に関する研究で、分布ひび割れ内部の透水性試験を行う際、深部ひび割れ状況の把握に X 線 CT スキャン等を用いることが示されているが、得られる情報が試験体系のサイズ等に大きく依存すると思われる。ひび割れ内部構造とマクロな透水性能の関係づけ(モデル化)を明確にした上で、適切な試験計画を立案する必要がある。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>拝承いたします。</li> <li>X 線 CT スキャンで測定可能な空隙構造がセメント系部材のマクロな透水性能と相関関係があると考えています。本年度実施している中深度処分を対象にした研究において、ひび割れの発生状況(内部のひび割れ性状)の評価を行っておりますので、その知見も踏まえて、来年度以降の研究における試験条件等を適切に設定していきたいと考えています。また、内部構造と透水性能の関連付けについて、X 線 CT スキャンの測定データ等をモデル化した解析評価を実施することも将来的な展開として検討していきたいと思ひます。</li> </ul> |

| No. | 評価項目                       | 評価意見                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     |                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>ベントナイトの長期透水性能および初期状態の評価に関する研究でも同様に、ベントナイトの微小構造の変化をX線回折等で観察する試験の有用性は理解できるが、膨大な既往研究の成果を精査していただき、新規に実施する試験計画の立案が望まれる。</li> </ul>                                                                                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>ベントナイトについては、既往の研究における種々の分析、モデル検討等をよく参照して進めてまいります。問題意識としては、過去にモンモリロナイト密度と空隙構造の関係を想定して透水特性を説明するモデルを構築し論文発表しておりますが、それに用いたデータが、X線回折を除くと全てサンプルの外側から測定されるマクロ量であって、空隙構造を直接見たものではないというところから来ております。透水特性から物質移行特性へ展開していくにつれ、空隙構造の理解の重要性はさらに高まると考えており、そのためにX線回折、ナノCT等の何らかの方法で空隙構造をできるだけ観察し、これを理解につなげることができないかと考えております。研究計画案に明示します。</li> </ul> |
| 3   | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | <ul style="list-style-type: none"> <li>本研究における解析および実験結果の評価手法は概ね妥当で、適切なアウトプットのとりまとめが期待できると思うが、以下の2点に留意いただきたい。</li> <li>隔離性能に関する研究(沿岸域陸域/海域の隆起・浸食評価)において、時間スケールと見込まれる不確かさの関係を明確にいただき、規制側の保守性担保の適切なロジックの構築を望む。</li> <li>地層処分システムの性能の不確かさが線量評価に与える影響についての研究で、既存の線量評価コードをベースにし</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>拝承いたします。</li> <li>保守性担保に関しては、隔離性能に限らず、時間スケールと見込まれる不確かさを踏まえて、どの程度の保守性が見込まれていればよいのかは地層処分の安全を考える上で重要な課題であると認識しています。これらは将来的に原子力規制委員会での議論を踏まえて決まると理解しておりますが、本研究においては、現在の技術でどの程度の評価期間に対して、どの程度のことが言えるのかを技術的観点から明らかにし、知見を蓄積していく予定です。</li> <li>出発点の仮定が定量性に大きく影響するため、どのような処分場を想定するかという観点は重要と考えます。一方で、</li> </ul>                           |

| No. | 評価項目                 | 評価意見                                                                                                                                                                                                                         | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-----|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     |                      | <p>て、本研究で得られた新知見(パラメータ)を反映させることで評価精度の向上を図るという手順は理解できるものの、前提条件となる処分場の仮定の仕方次第で定量性に大きく影響すると思われる。この最初の出発点をしっかり定義しないと、改良した線量評価モデルで感度解析を行っても、従来研究で示されている評価と定性的に大差ない結果しか得られないのではないのか？</p>                                           | <p>従来の研究では組み上げた処分システムに対して個別に検討したパラメータを設定し、それらのパラメータが処分システム全体を通じた線量にどのように影響を及ぼすかという観点で検討されてきたものと認識しています。これらの従来研究では最終的な線量の増減が主眼となっており、核種の移行過程において各部材が最低限持つべき移行抑制機能というのがどの程度なのかという点を判断することが困難であると考えています。母岩も含めた処分システム全体の中で、どの場所(部材)でどの程度の時間スケールで移行を遅延させる必要があるかというのは核種毎に異なりますので、本研究では、どの核種の移行をどのような時間スケールで遅らせることが出来るかといった点に主眼を置いて、部材毎の出口からのフラックスに着目した核種移行に係る検討を行うことにより、処分システムの各部材が持つべき移行抑制に係る性能を明確にすることを目的としております。新知見の反映に加えて上記のような観点で検討することによって既往研究との差別化を図っていくことを考えています。</p> |
| 4   | ④重大な見落とし(観点の欠落)がないか。 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 第一種廃棄物埋設の規制基準等の整備の第一段階として、規制側の視点を明確にした適切な課題が抽出・設定されており、特に重大な見落としは見られない。</li> <li>• ただ、高レベル廃棄物処分で、可逆性／回収可能性に配慮することは国際的な趨勢になっているので、本研究における処分場構成要素や部材性能にどのように影響するのか知りたいところ。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 拝承いたします。</li> <li>• 可逆性／回収可能性が処分場構成要素等に与える影響については国際的にも議論されるとともに各国において検討が進んでいます。現時点でこれらに関する研究課題は設定しておりませんが、諸外国における議論の状況をフォローしつ</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

| No.      | 評価項目                     | 評価意見                                                                                                                                                                                 | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|----------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|          |                          |                                                                                                                                                                                      | つ、規制の観点で必要なものがあれば将来の研究計画に取り込みます。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 5        | その他                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>本研究の背景で、従来の処分研究との相違点について、処分場の構成部材性能の実力値を把握することで、保守的パラメータの妥当性を評価するとあるが、事業者の提示した保守性を確認する際、規制側の考える保守性の提示も必要ではないか？</li> </ul>                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>③でもご回答したように、どの程度の保守性を見込めばよいかについては、将来的に原子力規制委員会での議論を踏まえて決まると理解しておりますが、本研究においては、現在の技術でどの程度の評価期間に対して、どの程度のことが言えるのかを技術的観点から明らかにし、知見を蓄積していく予定です。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 半井 健一郎 氏 |                          |                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 1        | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか | <ul style="list-style-type: none"> <li>セメント系材料の透水性に及ぼすひび割れの影響やカルシウムシリケート水和物の長期安定性についての研究は国内外に数多くあります。すでに前年度までに詳細を議論されていたのかもしれませんが、先行研究との関係について、より分かりやすくご説明をいただけるとよいと考えます。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>ひび割れの影響については、コンクリート工学会のひび割れ調査、補修・補強指針などで防水性の観点からのひび割れの基準は0.2mmとなっており、先行研究を踏まえた保守性を持たせた数値であることは承知しています。しかし、長期性能評価といった場合に保守性の基準の数値ではなく、ひび割れ内部の形状も含めた実力値がどの程度あるのかという点が重要であると考えています。特にコンクリートのこれまでは一定のひび割れ幅などでの先行研究が多く、骨材の有無等に言及した検討はあまり多くないと考えています。埋設施設の評価の際に、これまでのひび割れ幅の基準で同様に評価して問題ないのかを整理していければと考えています。</li> <li>セメント系部材に関して、300年という埋設施設の操業期間中は、片側は坑道内面の乾燥状態と反対側が天然バリアと接した湿潤状態という安定しない状態となります。このような状態におけるカルシウムシリケート水和物の安定性を評価するためには、第一原理計算、分子動力学、熱力学平衡計算等の評価手法ごとの特徴を踏まえ、どの評価手法が適</li> </ul> |

| No. | 評価項目              | 評価意見                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     |                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 切かを整理します。そのため、まずは先行研究を調査することから始める予定であり、安全研究を実施する中で既往研究との関係を取りまとめてまいります。既往研究との関係を研究計画案に明示します。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 2   | ②解析実施手法、実験方法が適切か。 | <ul style="list-style-type: none"> <li>コンクリートのひび割れに関しては、二次鉱物の析出による閉塞の可能性もあり、作用させる水の組成が重要なパラメータのひとつとなります。想定する処分環境や現象、対象期間を踏まえた適切な実験条件の設定をお願いします。また、セメント水和物の安定性に関して、第一原理等の解析手法を使用されますが、着目する現象によっては、すでに実績のある地球化学モデルなどの熱力学的な解析手法が有用と考えられる場合もあります。第一原理等の解析手法を用いることの意義についても、より分かりやすく説明することが求められます。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>今回対象としている「長期性能評価における C-S-H のナノ構造や外的環境要因による水和構造の知見」は、操業期間中における片側は坑道内面の乾燥状態と反対側が天然バリアと接した湿潤状態という安定しない状態における水和構造及び C-S-H のナノ構造の解明に向けて、取り組む基礎的調査の段階です。300 年程度という長期間を加速試験的に実証することが困難であることから、第一原理等の解析手法による評価の適用性を検討するものです。「第一原理等の解析手法」の「等」にはご意見であげていただいたとおり、第一原理計算以外に古典的 MD や熱力学的な解析手法も想定しています。これらの解析手法のセメント系材料への適用に関する既往の知見があることは承知していますが、地層処分の評価期間の長期性を踏まえてどこまで適用可能か、また、どの解析手法で、どの程度の詳細度で検討すべきかを、今後の研究の中で整理していきたいと考えています。</li> <li>一方、ひび割れ内部の透水性評価も C-S-H のナノ構造等と同様の操業期間中を対象としておりますが、あくまで巨視的なひび割れの幅や貫通状態などの内部形状に応じて、透水性能がどのように変化するかといった知見が、これまでは一定のひび割れ幅などでしか整理されていなかったことから、ひび割れの内部形</li> </ul> |

| No. | 評価項目                       | 評価意見                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 回答                                                                                                                                                           |
|-----|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     |                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <p>状等を X 線 CT スキャンで測定し、その透水性能とひび割れ形状の関係を明らかにするものであります。このさらなる展開として、ひび割れ内部において、炭酸カルシウム等の水和生成物によってひび割れの狭隘部が変化することも想定し検討を進めることを考えております。想定する環境条件を研究計画案に明示します。</p> |
| 3   | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | <ul style="list-style-type: none"> <li>結果の評価については、従来の概念設計に基づいて明確化した「安全確保に必要な性能」が重要な前提条件となります。すなわち、「安全確保に必要な性能」を発揮すべき期間や環境条件等によって、解析や実験の結果の意味が異なる可能性があります。長期的な変遷を何らかの加速試験や外挿にて議論する場合には、特にご留意ください。</li> </ul>                                                                                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>ご指摘の点に留意して研究を進めてまいります。</li> </ul>                                                                                     |
| 4   | ④ 重大な見落とし（観点の欠落）がないか。      | <ul style="list-style-type: none"> <li>①～③に指摘した事項を整理いただくことで、重大な見落としはなくなると考えます。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>拝承いたします。</li> </ul>                                                                                                   |
| 5   | その他                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>従来の線量評価に追加する新規の評価として構成部材ごとの性能照査手法が導入されています。この構成部材ごとの性能評価は工学的な設計における最適化などに役立つと考えますが、スライド資料に記載されたような処分システムの弱点の抽出は、処分システム全体の評価を対象とした従来の線量評価が有効と考えられますので、（検討会での口頭説明の通り）誤解のない表現への修正をお願いします。</li> <li>セメント水和物の長期安定性に関連した「溶出」と「溶脱」はいずれも英語では「leaching」ですが、国内の関連研究では、重金属などの微量成分が溶け出す</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>個別部材の性能が処分システムに与える影響を見極めたうえで、処分システム全体のパフォーマンスを評価するものであることがわかるように研究計画案に明示します。</li> <li>「溶脱」に修正します。</li> </ul>          |

| No.     | 評価項目                     | 評価意見                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|---------|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         |                          | ことを「溶出」、水和物そのものが溶け出して構造が変化することを「溶脱」として、用語を使い分けているものが多くあります。今回は水和物の構造変化に着目したものであることから、「溶脱」を用いることが好ましいと考えます。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 新堀 雄一 氏 |                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか | <ul style="list-style-type: none"> <li>国際的な動向である性能規定を基にした審査を踏まえ、国内外の過去の研究や最新知見を基にした課題抽出がなされていると思います。</li> <li>但し、②および③に記述させて頂いたように、いくつかの詳細の点で、課題への取り組みに曖昧な部分もありますので、より明確化されると更にいいかと存じます。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>拝承いたします。</li> <li>個別のご指摘への対応は②及び③のとおりとさせていただきます。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 2       | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。       | <ul style="list-style-type: none"> <li>全体として概ね適切に設定されていると存じます。</li> <li>なお、(C)核種移行性能に関する研究では、処分場の設置や廃棄体の定置に伴う地下環境の変化は、酸化還元状態を含め多面的であり、それらに伴って生じる無機系の擬似コロイドもあろうかと存じます。有機、無機の双方のコロイドについて考慮すると理解しましたが、コロイドと収着核種の関係について、データの取得と伴に、規制の観点から環境(場)の多様性を考慮し、重要となる因子の整理を、既往の研究・調査をも参考に着実に進めて頂くことを期待しております。また、ベントナイトについては、定置後の冠水の状況(飽和・不飽和)の違いによって、何を初期とするかが曖昧になることも考慮する必要があるように思います。限られた期間ですので、冠水の状況についてもどこに着眼しているかが明確になるとよりいいかと思います。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>拝承いたします。</li> <li>地下環境は多様であり、無機・有機コロイドの存在状態や核種の収着の現象は環境条件に左右されと考えます。規制の観点で重要となるのは、どのような環境下であればコロイドによる核種移行の影響が顕在化するのかという点ですので、まずは着目する環境因子を絞った形での検討になるかと思います。既往の研究を参考にし、データの取得と共に環境因子の重要度についても念頭に置きながら研究を進めて参ります。<br/>また、ベントナイトについては研究計画案で「初期状態」とは、核種移行が始まる緩衝材全体が冠水した状態を想定しています。ベントナイト中での核種移行は拡散支配になると考えられておりますが、拡散場となるための初期透水性が極めて低く、その状態が長期的に安定であることが必要です。核種移行が始ま</li> </ul> |

| No. | 評価項目                       | 評価意見                                                                                                                                                                                                         | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     |                            |                                                                                                                                                                                                              | <p>るのは、緩衝材が冠水してオーバーパックに腐食貫通孔が開いた後になります。そのような状態を想定していることを研究計画案において明示します。他方、研究課題の「f. 緩衝材の力学緩衝性能の評価」では、偏膨潤や、操業中の流出といった問題もありますので、それらにも着目することを研究計画案において明示します。</p>                                                                                                                                                                              |
| 3   | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | <ul style="list-style-type: none"> <li>概ね適切に設定されていると存じます。</li> <li>但し、セメント系部材の長期物質安定性および透水性能に関する研究において、ひび割れの知見と CSH のナノ構造や外環境要因による水和構造の知見との結びつきは、要求される安全機能の視点から、どのように束ねられるかをより明確に説明する必要があるかと思えます。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>拝承いたします。</li> <li>ひび割れの知見及び C-S-H のナノ構造と要求される安全機能の関連について、安全機能で求められる対象施設を研究計画案に明示します。</li> </ul> <p>今回対象としている TRU 等廃棄物の埋設施設は、緩衝材とセメント系部材を組み合わせたバリアのほか、セメント系部材のバリアのみの処分坑道も想定されているため、低透水性もしくは低拡散性を安全機能として有すると考えております。この後者の場合には、ひび割れ内部の透水性能が埋設施設から漏出する放射性物質のフラックスを低減する機能へ影響を与えられられるため、研究課題を設定しました。</p> |
| 4   | ④ 重大な見落とし（観点の欠落）がないか。      | <ul style="list-style-type: none"> <li>重大な見落としはないと存じます。</li> </ul>                                                                                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>拝承いたします。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 5   | その他                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>国際的な動向や現在の国内の事業の進捗を考慮し、第一種廃棄物埋設施設（天然バリアを含む）が備えるべき安全機能およびそれらに係る構成要素の性能を体系的に整理した上で、HLW のみならず TRU の一部の処分をも配慮し、併せて線量評価にも着眼する建付けになっております。本計画は、その枠組み</li> </ul>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>拝承いたします。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                |

| No. | 評価項目 | 評価意見                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 回答                                                                                                                                                                           |
|-----|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     |      | <p>のもとで課題抽出がなされていると思います。特に安全評価における保守性についての度合いについても本研究を基軸としてより明確になることを期待しております。また、長期的な視点にたつて、規制の人材育成にも主眼が置かれていることも理解できます。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 但し、個別の研究については、前述の枠組みが理解されないと、これら研究の新規性や意義が理解されないことも考えられ、NRA レポートなど、可能な範囲で早期に考え方を公表されることが望まれます。</li> <li>• なお、これは今後の課題かとも思いますが、線量のみならず、いわゆる補完的安全指標(e.g.,濃度など)を利用することも「環境」の防護を確認する上で有効かと存じます。今回、得られる知見はその側面からも有益なものになると考えております。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 研究の前提となる考え方等については早い時期に取りまとめて公表してまいります。</li> <li>• 線量以外の指標については、「(2)線量評価に関する研究」において、個別バリアの性能を線量だけでなくフラックスで評価することを想定しています。</li> </ul> |

(専門技術者の意見及び回答)

| No.    | 評価項目                     | 意見                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|--------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 鈴木 覚 氏 |                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 1      | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (p6)「詳細設計に基づく個別要素技術の安全機能を踏まえた性能を評価する性能照査手法(以下、「性能評価」という)の導入」という点につきまして、国際機関で定義されている“性能評価”と、今回新たに導入するとされた“性能評価”の違いについて解説があるかと思ひます(例えば、NEA (2012) “Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, Outcomes of the NEA MeSA Initiative”, NEA No. 6923.)。また、性能照査の導入が、保守的パラメータの設定や実力値の評価とどのような関係にあるのか、時間スケールに関して、極めて長期間の性能照査に伴われる不確実性をどのように取り扱おうとしているかについても言及があると良いと思ひます。</li> <li>• (p11)「岩盤が具備すべき安全機能を操業中における落盤防止機能並びに閉鎖後期間における隔離機能、移行抑制機能及び分散機能と分類」とありますが、ここに挙げられている機能の分類について、もう少し説明が必要と考えられます。例えば、IAEA が公開している放射性廃棄物処分場の安全要求事項との対応関係に関する説明があると良いと考えられます。また、地層処分システムの時間的な変遷に伴って、どのような安全機能を付与するのかといったことについても検討結果の記述があると良いと思ひます。これらの分類が、今回の安全研究に関連する機能のみを抽出したので</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (p6)性能評価に関連する用語として英語、日本語で様々なものがあり、それぞれの定義は示されているものの、様々とられ方がされていると理解しています。研究計画案では、詳細設計に基づく個別要素の実力値の評価を行うことが重要であると整理し、それを「性能評価」として説明しています。これは国際的な動向とも整合的であると考えています。なお、国際的な動向との比較は、今後作成する技術文書の中で背景情報として整理したいと思ひます。また、性能評価の導入による影響については、まずは部材ごとにどの程度の期間まで実力値を評価できるのか、当該評価にどの程度の不確かさが含まれるのかといった知見を蓄積するものと考えています。</li> <li>• (p11)安全機能の分類については、IAEA の文書等も参考にして内部で検討を行い、第一種廃棄物埋設施設が具備すべき安全機能及びそれらに係る構成部材の性能を体系的に整理しました。さらに、その性能を評価するために必要な研究課題を網羅的に抽出した上で、規制側の研究の位置づけ、研究課題の重要性及び緊急性を考慮して優先順位を決定し、本安全研究プロジェクトとして計画しております。内部での検討の詳細が、安全研究計画の中で十分に記載されていない部分がありますが、これに関しては今後の、規制庁の研究部門から</li> </ul> |

| No. | 評価項目 | 意見                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     |      | <p>あれば、そのことを記載してあると良いと考えられます。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• (p11)落盤の防止は、岩盤のみに具備すべき機能というよりは、坑道の形状と支保工の組み合わせによって、達成されるべきものと考えます。</li> <li>• (p12)この研究課題に限ったことではありませんが、どのような安全規制を目的として設定された研究なのか、より詳しい説明があると良いと思います。例えば、侵食量を評価する手法が様々にある中で、採用した手法の妥当性をどのように評価するか等。</li> <li>• (p15)セメント系のバリア要素についてのみ記載がありますが、その理由と、他の人工バリア材料や他の安全機能との関係について、解説を望みます。</li> <li>• (p15)セメント系のバリア要素にどこまで低透水性や低拡散性などの機能を期待できるのか、研究することは意義があると思われます。同じ TRU 等廃棄物でも、発熱性の廃棄物もありますので、そのような場合には、セメント系材料を用いる部材の性能に対する熱の影響についても検討しておくといと考えられます。</li> <li>• (p20)「a. 地層処分システムの性能の不確かさが線量評価に与える影響についての研究」については、過去に JAEA 安全研究センターで同様の研究を実施されているように思いますが、どのよう</li> </ul> | <p>発行される文書(NRA 技術ノート等)にて、公表を検討しております。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• (p11)施工と密接に関係しておりますので、将来的な課題として整理しており、現時点では研究計画案には含めていません。</li> <li>• (p12)第一種埋設施設の安全性確保がなされていることを確実にするために、技術的にどのようなことをしなければならないか、そのためにはどのような知見を蓄積しなければならないか、といった視点から研究課題を設定しています。最終的に、安全確保に必要な事項をどのような規制ツールに落とし込むかは将来的な議論であると考えています。</li> <li>• (p15)セメント系部材において低透水性及び低拡散性に係る長期物質安定性が重要としている理由について、TRU 等廃棄物における放射性核種を閉じ込める及び移行遅延させる際に施設設計による安全機能の考慮の有無があるとは思いますが、少なくともどちらかは必要な安全機能であると考えているためです。</li> <li>• セメント系部材の性能に対する熱の影響は、セメントの水和反応及びナノ構造の変質とも大きく関連していくと理解しており、第一原理等の解析手法の調査などで熱の影響についても考慮していきたいと考えています。</li> <li>• (p20)線量評価に関する研究は過去にも行われていますが、従来の研究では組み上げた処分システムに対して個別に検討したパラメータを設定し、それらのパラメータが処分システム全体を通じた線量にどのように影響を及ぼすかとい</li> </ul> |

| No. | 評価項目               | 意見                                                                                                                                                                                                                                            | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     |                    | な点が従来と異なるのか、新規性について説明があると良いと思います。                                                                                                                                                                                                             | う観点で検討されてきたものと認識しています。これらの従来研究では最終的な線量の増減が主眼となっており、核種の移行過程において各部材が最低限持つべき移行抑制機能というのがどの程度なのかという点を判断することが困難であると考えています。母岩も含めた処分システム全体の中で、どの場所(部材)でどの程度の時間スケールで移行を遅延させる必要があるかというのは核種毎に異なりますので、本研究では、どの核種の移行をどのような時間スケールで遅らせることが出来るかといった点に主眼をおいて、部材毎の出口からのフラックスに着目した核種移行に係る検討を行うことにより、処分システムの各部材が持つべき移行抑制に係る性能を明確にすることを目的としております。新知見の反映に加えて上記のような観点で検討することによって既往研究との差別化を図っていくことを考えています。 |
| 2   | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (p13)地下水流動の研究対象とするモデルフィールドのデータを見てみないと分かりませんが、モデル化・解析の目的(対象とする現象)や、岩盤の種類、対象とする領域の大きさ(空間スケール)に応じて、適用する解析手法や水理地質構造のモデル化方法を具体化していくことが望まれます。</li> <li>• (p13)掘削影響領域(あるいは掘削損傷領域)の評価がどのような評価を目的と</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (p13)モデルフィールドとしては、陸側には平野があり、海側に遠浅の大陸棚が広がり、地下には比較的透水性の低い新第三紀堆積岩層が広がる地域において、地下深部を通過する地下水の涵養域から湧出域までを含んだ領域の大きさで研究を実施する予定です。この地域は、比較的データと検討の蓄積が進んでいるフィールドですが、地層処分の対象とする深度の情報が不足しているため、今後の研究で地層処分対象深度のデータを蓄積し、既存の知見を踏まえながら解析手法、水理地質のモデル化方法を具体化していきます。</li> <li>• (p13)廃棄物埋設地周辺の岩盤については、坑道掘削による応力の解放に伴</li> </ul>                               |

| No. | 評価項目                       | 意見                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     |                            | <p>した研究であるのかについて説明の追加が望まれます。その目的に応じて、検討内容が変わるものと考えられます。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• (p16)「第一原理等の解析手法」について、“等”に含まれる調査対象の範囲を明確にしてから調査を進めると良いと思われます。第一原理計算と古典的 MD では、取り扱う空間の大きさも時間の長さも異なっており、調べたいセメント系部材の特性によって、適用可能な解析方法が異なることから注意が必要と考えられます。また、分子シミュレーションの結果をどう品質保証していくか、また、シミュレーションの V&amp;V をどう進めるのかという点についても調査が必要と考えられます。最新の解析技術の適用性を検討する上で重要な情報のため、是非とも進めていただくことを望みます。</li> </ul> | <p>い坑道周辺に亀裂を含む緩み域等が発生することが想定され、このような領域の水理特性の変化を把握し地下水流動評価に適切に反映されていることの妥当性確認に必要な知見の取得を目的としています。このため、応力状態と発生する損傷状態(亀裂の形状、幅等)の関係、さらに水理特性との関係について力学水理連成試験機等を用いた実験を行うことで明らかとします。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• (p16)「第一原理等の解析手法」の「等」には、第一原理計算以外に古典的 MD や熱力学的な解析手法も想定しております。これらの解析手法のセメント系材料への適用に関して既往の知見があることは承知していますが、地層処分の評価期間の長期性を踏まえてどこまで適用可能か、また、どの解析手法でどの程度の詳細度で検討すべきかを今後の研究計画の中で整理していきたいと考えています。第一原理等の解析手法の V&amp;V 等の課題に対する取組みについては将来的な展開として検討したいと思えます。</li> </ul> |
| 3   | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• コロイド移行の研究において、“経路孔径の影響”について研究することが計画されているが、どのようなコロイド移行経路を対象とした研究であるのかについて説明を追記いただいた方がよいと思います。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ”経路孔径の影響”に関する研究で対象としているのは地下水中に溶存した核種の移行に対する影響を考えています。”コロイド移行”と”経路孔径の影響”が別の研究であることが分かるように研究計画案に明示します。なお、経路孔径の影響に関しては、経路孔径の縮小に伴う電気二重層の寄与の影響について検討予定であり、「6. 安全研究概要」(1)、c, に記載しております。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 4   | ④ 重大な見落とし(観                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 「膨潤と透水の性能を整理するためX線回折等の試験の実施」に関して、X線回</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ベントナイト中の物質移行に係る空隙には、粒子間とそれより狭い層間があり、</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

| No. | 評価項目       | 意見                                                                                                                                                                       | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     | 点の欠落)がないか。 | 折法では、周期的な結晶構造しか調べることができないため、ベントナイトの場合、ほとんど水が通らない層間空隙(幅1 nm)を測定することになると考えられます。透水性について研究するのであれば、主要な地下水の移行経路となる不規則な形状の外部空隙のサイズ等を評価できる手法を適用していくべきと思われます。                     | 低配合のベントナイト混合土ではさらに大きなスケールの空隙又は不均一性に基づく高透水部の分布があり、それらが全体の透水性に影響していると理解しております。ベントナイト(又はその中のモンモリロナイト)の有効密度が上がるに従って、大きな空隙からつぶれて透水性はより小さな空隙の特性に支配されるようになると考えております。透水特性についてはこのような考え方に基づいてモンモリロナイト密度と透水係数の関係を説明するモデルを構築し、比較的説明性のある結果を導いていると考えております。このモデルの結果では、地層処分に用いられる高配合ベントナイト混合土においては、層間が果たす役割が大きくなっています。問題は、このような検討も、用いているデータはサンプルの外側から観測できるマクロ量であって空隙構造を直接見ているのではないところにあります。透水特性から物質移行特性へつなげていくに従って、より空隙特性の実像を知ることが重要であると考えており、何らかの観測を組み合わせたいというのが本研究の主旨です。具体的な方法は、よく調査して臨みたいと考えており、X線回折、ナノCTやその他の方法の適用を検討する旨を研究計画案に明示します。 |
| 5   | その他        | <ul style="list-style-type: none"> <li>今後、公表予定の研究課題の導出過程に関する報告書についても共有いただき、確認の機会をいただけますことを望みます。</li> <li>実施内容によっては、目的との関係が読み取りづらいテーマもありますので、今後、詳細な計画や実施結果を示して</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>報告書については、一般に公になった時点でご確認いただければと思います。</li> <li>拝承いたします。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

| No.     | 評価項目                       | 意見                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 回答                                                                                                                                                                                                      |
|---------|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         |                            | <p>いただく中で、説明いただけると、より適切な意見を検討できるようになります。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>以下については、表現の再考をご検討ください。 <ul style="list-style-type: none"> <li>長期物質安定性能→長期物質安定性？</li> <li>核種移行性能→核種移行遅延性能？</li> <li>地下水流動性能→地下水流動特性？</li> <li>p.13 実験的検討、等→実験的検討等？</li> <li>P. 14 移行特性に関する検討、等→移行特性に関する検討等</li> <li>p.18 化学的な反応等の初期条件→化学的な反応は初期条件には含まれないのでは？</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>1 点目から 3 点目に関しては安全機能と部材性能の関係を明確に結び付ける観点で、あえて「〇〇性能」と記載しています。4 点目から 6 点目については、バックエンド技術評価委員会での説明資料は簡略化して書いたためにわかりにくい記載となっていたかもしれませんが、研究計画案には明確に記載しております。</li> </ul> |
| 渡邊 将人 氏 |                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                         |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | <ul style="list-style-type: none"> <li>専門外につき、回答を差し控えさせていただきます。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                             | -                                                                                                                                                                                                       |
| 2       | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。         | <ul style="list-style-type: none"> <li>専門外につき、回答を差し控えさせていただきます。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                             | -                                                                                                                                                                                                       |
| 3       | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | <ul style="list-style-type: none"> <li>専門外につき、回答を差し控えさせていただきます。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                             | -                                                                                                                                                                                                       |
| 4       | ④ 重大な見落とし（観点の欠落）がないか。      | <ul style="list-style-type: none"> <li>専門外につき、回答を差し控えさせていただきます。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                             | -                                                                                                                                                                                                       |

| No. | 評価項目 | 意見 | 回答 |
|-----|------|----|----|
| 5   | その他  | -  | -  |

# 別表 1 1

## 放射性廃棄物の処分前管理及び施設の廃止措置に係る放射能濃度評価等の信頼性確保に関する研究に対する外部専門家の評価意見及び専門技術者の意見並びに回答

### (外部専門家の評価意見及び回答)

| No.     | 評価項目                     | 評価意見                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 井口 哲夫 氏 |                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか | 本研究提案の中で、放射性核種含有廃棄物等の特性評価方法に関する研究項目について、やや事前調査が物足りない感はあるが、それ以外の研究項目は、国内外の過去の研究、現状、最新知見を踏まえて研究計画が策定されている。                                                                                                                                                                                                                                                                            | 拝承いたします。<br>放射性核種含有廃棄物等の特性評価方法に関する研究に関しては、研究を進める中で調査を並行して進めます。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 2       | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。       | <p>4つの研究項目で提案されている解析手法や実験手法は概ね妥当と思われるが、以下の点をもう少し明確にしていただけるとよい。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・クリアランスの確認では、規制側で独立に用意する放射線測定・評価手段の整備は含まれているのか否か。</li> <li>・廃棄体等の安全性確認では、日本原子力学会標準の成果を活用されとのことであるが、調査と課題整理を実施することは分るものの、規制側の解析を行う視点で、具体的に何を行うのかが今一つ判然としない。</li> <li>・廃止措置におけるエンドステート調査について、現行の海外事例の調査により技術的課題を抽出整理して、研究課題を設定するという流れはよく分るが、我が国における条件付きサイト解放のあり方</li> </ul> | <p>拝承いたします。個別の御指摘には以下のとおり回答いたします。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・クリアランスの確認に関しては令和元年度の審査基準の策定と同時に規制側による測定のプロセスが無くなりましたので、規制側で独立に用意する放射線測定・評価手段は本安全研究の対象とはしておりません。</li> <li>・廃棄体等の安全性確認については他の専門家からのコメントもあり、ウランの崩壊系列を利用する等、廃棄物発生源の特徴を考慮した放射能濃度評価上の課題を調査するといった形で、具体的な調査項目が分かるように計画書を修正いたします。課題の調査に当たってはウランクリアランスに係る日本原子力学会標準も参照しつつ進めて参ります。</li> <li>・廃止措置におけるエンドステート調査については、まずは2年間海外事例の調査を行った後、その内容を確認した上で進め方を定める流れとしておりますが、その際に我が国におけるサイト解放のあり方</li> </ul> |

| No. | 評価項目                      | 評価意見                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 回答                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     |                           | <p>に力点を置くと明記した方がメリハリが出るのでは？</p> <p>・放射性核種含有廃棄物等の特性評価方法に関する研究について、質量分析技術を規制側の手段として整備するという意図は十分理解できるものの、現行のすべての核種組成や化学形態分析技術をすべて網羅して調査整理するというのは、学術研究ではありと思うが、規制研究として実施するのはいかがなものか？</p> <p>まずは、規制ニーズに合致してなおかつ規制側の見えそうな質量分析手法の性能仕様を固めてから、既存の分析技術の調査を進めていくのが合理的ではないか？</p>                                                                                                                        | <p>の視点を含めて検討を進めたいと思います。</p> <p>・放射性核種含有廃棄物等の特性評価方法に関する研究については、網羅的な検討ではなく、国内外の先行研究及び計量標準機関の開発動向を参照しながら測定対象核種と代表的な対象試料を絞り込み、計量トレーサビリティと測定の不確かさを考慮しながら、研究を進めて参る予定です。</p>                                                                                                                              |
| 3   | ③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | <p>4つの研究項目について、調査分析結果で実施される評価内容は適切であると判断するものの、手法的な特徴は必ずしもよく見えないところはある。敢えてコメント(要望)するならば、以下の2点：</p> <p>・クリアランスの確認では、溶融処理を行った後に測定を行う場合について、民間事業者等による集中クリアランスプロセスのプレゼン資料(規制庁福井県面談資料)にあるような、溶融後のCL検認だけではなく、CL推定物の搬入から、溶融後のCL物とスラグ等二次廃棄物(L3)を仕分けするまでを念頭においた検討を行っていただきたい。</p> <p>・放射性核種含有廃棄物等の特性評価方法に関する研究では、R7年度に実験装置の導入・整備とあるが、本研究項目の最終アウトプットである質量分析技術の測定不確かさの体系化実証にどのように活用していくのかを明確にしていきたい。</p> | <p>拝承いたします。2点のコメントに対しては以下のように回答いたします。</p> <p>・クリアランスの確認については、溶融後のCL検認だけではなく、CL推定物の搬入から、溶融後のCL物とスラグ等二次廃棄物(L3)を仕分けするまでの間で測定の信頼性を確保するために必要な項目も対象としておりますので、御指摘内容を意識して検討を進めて参ります。</p> <p>・放射性核種含有廃棄物等の特性評価方法に関する研究では現在国家計量標準関係の方で行われている内容と歩調を合わせながら導入・整備した実験装置を用いて実際に質量分析技術の測定不確かさの体系化を進めていくこととします。</p> |
| 4   | ④重大な見落とし(観                | <p>本研究提案では、明確な目的設定がされているので、重大な見落とし等はないと思</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <p>拝承いたします。</p> <p>なお、放射性核種含有廃棄物等の特性評</p>                                                                                                                                                                                                                                                          |

| No.      | 評価項目                       | 評価意見                                                                                                                                     | 回答                                                                                                                                     |
|----------|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|          | 点の欠落がないか。                  | われる。ただ、繰り返しになるが、放射性核種含有廃棄物等の特性評価方法に関する研究については、5年後の最終成果の実効性を高めるためにも、規制側ニーズに沿って、実施内容をもう少し精査・絞り込みをされた方がよいように思われる。                           | 価方法については、研究を進めていく中で御指摘内容を意識して調査・検討を進め、原子力規制庁内における年度毎の研究課題の調整プロセスなどを経て具体的な実施内容を確認しながら進めていくこととします。                                       |
| 5        | その他                        | 特になし。                                                                                                                                    | —                                                                                                                                      |
| 半井 健一郎 氏 |                            |                                                                                                                                          |                                                                                                                                        |
| 1        | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | 専門外であるため、評価を差し控えます。                                                                                                                      | —                                                                                                                                      |
| 2        | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。         | 専門外であるため、評価を差し控えます。                                                                                                                      | —                                                                                                                                      |
| 3        | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | 専門外であるため、評価を差し控えます。                                                                                                                      | —                                                                                                                                      |
| 4        | ④ 重大な見落とし（観点の欠落）がないか。      | 専門外であるため、評価を差し控えます。                                                                                                                      | —                                                                                                                                      |
| 5        | その他                        | 一般に、採取試料の測定における不確かさにおいては、測定の精度のみならず、試料採取（サンプリング）の影響が大きくなります。測定自体の不確かさについて研究（4）で検討する一方、サンプリングの不確かさは研究（1）、（2）、（3）にて検討されることでしたが、重要な事項であるので、 | サンプリングの不確かさについては（1）クリアランスについては研究計画書の背景でも述べているとおり事業者においてサンプリングによる測定が行われておりますので、研究を進める中で具体的な検討に含めて行ってまいります。まずは対象物の放射能濃度が低いことからばらつきの影響の大き |

| No.     | 評価項目                       | 評価意見                                                                                                                                                                                                                                             | 回答                                                                                                                                                                                                                                                           |
|---------|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         |                            | より明示的に検討項目に加えるとよいのではないかと考えます。                                                                                                                                                                                                                    | い(1)について具体的な検討を進めた上で、(2)、(3)につきましては、サンプリングの影響が測定結果の信頼性確保に大きく影響するような場合には具体的に取り込む形で進めていきたいと思います。                                                                                                                                                               |
| 新堀 雄一 氏 |                            |                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | 一連の研究課題は、国際的および国内の事業者の動向を踏まえ、規制の観点から重要かつ喫緊のものであり、提示された研究計画は過去の研究および最新知見を踏まえていると存じます。                                                                                                                                                             | 拝承いたします。                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 2       | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。         | 研究の進め方について、適切なものとなっていると存じます。なお、廃棄体等の安全性確認において、新たな放射能濃度評価上の課題の調査については、具体的に何を狙っているかが、計画書の段階でも記載があるとより明確かと存じます。                                                                                                                                     | 拝承いたします。「新たな放射能濃度評価上の課題の調査」については、他の専門家からのコメントもあり、ウランの崩壊系列を利用する等、廃棄物発生源の特徴を考慮した放射能濃度評価上の課題を調査するといった形で、具体的な調査項目が分かるように明確化する形で計画書を修正いたします。具体的には、文章中にも記載したウランの崩壊系列上の Pa-234m を利用した測定に係る課題のほか、例えば研究施設等廃棄物の測定核種として選定された核種が当該廃棄物の放射能評価上妥当なものであるか判断するための課題等を想定しています。 |
| 3       | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | 評価手法については概ね適切かと存じます。なお、放射性核種含有廃棄物等の特性評価方法に関する研究において、化学分析では、各元素の化学形態、化学平衡論および速度論的事象を考慮し、これらに依存するメカニズムを理解することについても言及されております。この中で、速度論的事象については、物質(核種)が置かれている場(系)によって、過程を律速する事象(素反応のみならず、物質移動が効く場合もあります)が異なることから、具体的に何を狙っているのかをより明確になっているとより良いと思いました。 | 拝承いたします。<br>(4)放射性核種含有廃棄物等の特性評価方法における速度論的事象については、あくまで分析プロセスの各ステップでの事象に絞っておりますので、その旨明確化して計画書を修正いたします。<br>なお、(1)～(3)の項目の中で速度論的な事象の考慮が必要となった際には御指摘を踏まえて問題をしっかり絞って、成果を出していくこととします。                                                                               |

| No. | 評価項目                         | 評価意見                                                                                                                                   | 回答                                                             |
|-----|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 4   | ④重大な見落とし（観<br>点の欠落）<br>がないか。 | 重大な見落としはなかったと存じます。                                                                                                                     | 拝承いたします。                                                       |
| 5   | その他                          | エンドステートにおける除染困難な放射性物質の取り扱いについては、その課題設定についても丁寧に説明をしていく必要がある項目の一つと認識しております。ある程度まとまった時点で、学会、研究会や勉強会等を通じて、社会とコミュニケーションを図り、進めて頂ければと思っております。 | 本項目につきましては、ある程度まとまった段階で都度社会とコミュニケーションを取って安全研究を進めて行きたいと思っております。 |

(専門技術者の意見及び回答)

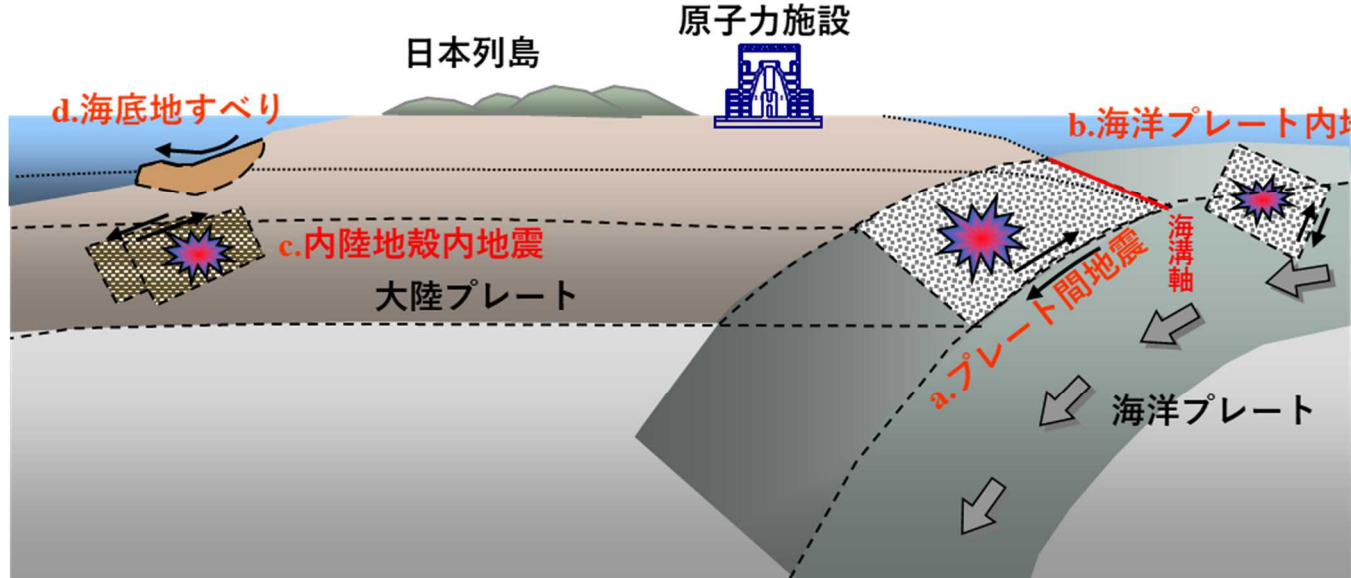
| No.     | 評価項目                       | 意見                                                                                                                                       | 回答                                            |
|---------|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 鈴木 覚 氏  |                            |                                                                                                                                          |                                               |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | 専門分野外につき特に意見はございません。                                                                                                                     | —                                             |
| 2       | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。         | 専門分野外につき特に意見はございません。                                                                                                                     | —                                             |
| 3       | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | 専門分野外につき特に意見はございません。                                                                                                                     | —                                             |
| 4       | ④ 重大な見落とし(観点の欠落)がないか。      | 専門分野外につき特に意見はございません。                                                                                                                     | —                                             |
| 5       | その他                        | —                                                                                                                                        | —                                             |
| 渡邊 将人 氏 |                            |                                                                                                                                          |                                               |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | 前フェーズ研究から継続的に実施しているので、国内外の過去の研究、最新知見を踏まえていると考えます。                                                                                        | 拝承いたします。                                      |
| 2       | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。         | ①事業者とのコミュニケーション<br>研究対象とする「新たな形状の廃棄体及びコンクリート等廃棄物」の具体的な仕様については、事業者とコミュニケーションを取って頂き、今後申請される予定のものを優先的に検討頂ければ、研究成果がより有用的になると考えます。<br>②不確かさ評価 | ①、②、④につきましては、いただいたコメントを踏まえて研究を進めていきたいと思いをします。 |

| No. | 評価項目                       | 意見                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 回答                                                                                          |
|-----|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
|     |                            | <p>「試料の採取、試料からの対象核種の溶解等の前処理、濃縮、化学分離、質量分析等の各ステップにおける測定の不確かさ評価」において、各ステップのパラメータのうち有意なものを選定して、どのように考慮（分布形状と数値範囲など）するという標準的な評価プロセス案を研究成果として提示頂ければ、非常に有用と考えます。</p> <p>③条件付きクリアランス<br/>溶融処理について検討すると伺いましたが、そのほかに国内に導入することによりメリットがあるシナリオについても検討して頂きたいです。シナリオとして、再利用先を限定する場合、表面汚染密度で判断する場合、再利用までに長期保管する場合などです。</p> <p>④事業者が将来にわたって採用する可能性のある放射線測定・評価手段（追加コメント）<br/>上記は、説明 PPT の 2P にある「評価単位全体の放射線測定ではなくサンプリングによる測定」が該当すると存じます。審査内規では、選定した測定単位が代表性を有する条件として、「濃度がおおむね同じ」であることを示す、または「保守的に評価できる場所」で測定することが求められており、このうち前者を定量的に示すことについては、事業者も試行錯誤している状況と史料しております。このあたりを研究で検討して頂ければ、有用と考えます。</p> | <p>③につきましては、今後すすめる調査の中でそうした内容がないかは意識して研究を進めますが、具体的に取り込むかどうかは、関係部門と確認しながら進めていきたいと思っています。</p> |
| 3   | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | 最終的な研究結果で判断したいと存じます。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 研究成果については安全研究成果報告書において取りまとめます。                                                              |

| No. | 評価項目                         | 意見                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 回答                                                                                                                                                                        |
|-----|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4   | ④重大な見落とし（観<br>点の欠落）<br>がないか。 | <p>①規則 274 核種の放射化計算<br/>新規クリアランス対象物の評価対象核種は、規則 33 核種ではなく、規則 274 核種から選定する必要があります。現在、規則 274 核種を計算できる放射化計算コードは JAEA が開発中（開発担当者がシニア定年直前と聞く）であり、一般公開されていない。放射化計算コードで計算できない核種は、事業者が手計算で申請してくる可能性があり、その妥当性を確認するためにも、規則 274 核種を計算できる放射化計算コードの開発と検証も優先順位が高いと考えます。</p> <p>②廃棄体への封入前に必要なデータの洗い出し<br/>放射能濃度が高い廃棄体は蓋締めなどを行うことが想定される。また、廃止措置が先行する事業者は、廃棄確認の方法が確定する前に、容器に収納せざるを得ない状況となっているおそれがある。そこで、放射能濃度を測定評価する際、容器に収納前さらには解体前に取得しておくべきデータを幅広く抽出しておくことは、容器への再収納リスクを低減するのに有効であると考えます。</p> | <p>①につきましては放射化計算コードの開発及びその妥当性確認自体は申請者側にて行われるものですので、原子力規制庁が行う安全研究としてそうしたコードの開発までをも行うことは対象外ですが、事業者側の動きについては把握していきたいと思えます。</p> <p>②についてはいただいた観点を踏まえて具体的な研究を進めていきたいと思えます。</p> |
| 5   | その他                          | <p>①追加質問<br/>「主要測定核種として従来の Co-60, Cs-137 以外の核種が選定された場合のうち、銅の放射化による場合及び樹脂類に含まれる塩素の放射化による場合」に対する質問です。ここで想定される場合とは、どのような炉型と対象系統なのでしょうか？ また、Co-60, Cs-137 以外の主要測定核種とは、どのような核種でしょうか？</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <p>炉型というよりは、対象物としてのケーブルや配電盤等がクリアランスされる場合を想定しています。ケーブルの場合ですと、銅の放射化による Ni-63 等が主要測定核種となることが想定されます。</p>                                                                      |

**事前評価対象安全研究プロジェクトの研究計画  
(外部専門家等から受けた意見を踏まえ朱記修正)**

研究計画（案）

|                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |       |                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|------------------------------------------------------|
| 1. プロジェクト<br>(始期：R7 年度<br>終期：R10 年度)                                                                                                                                                            | 3. 地殻内地震津波の波源断層のモデル化及び津波堆積物に基づく津波高推定に関する研究                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 担当部署  | 技術基盤グループ<br>地震・津波研究部門                                |
|                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 担当責任者 | 内田淳一 統括技術研究調査官                                       |
| 2. カテゴリー・研究分野                                                                                                                                                                                   | 【横断的原子力安全】 A) 外部事象（地震、津波、火山等） A-1<ハザード関連>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 主担当者  | 道口陽子 主任技術研究調査官<br>佐藤太一 副主任技術研究調査官<br>山下 啓 副主任技術研究調査官 |
| 3. 背景                                                                                                                                                                                           | <p>平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震による津波（以下「東北地震津波」という。）の発生以後、東京電力福島第一原子力発電所の事故を教訓に、平成 25 年に「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（平成 25 年原子力規制委員会規則第 5 号）」（以下「<b>現行</b>規制基準」という。）及び各種の審査ガイドが施行された。「基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド（原管地発第 1306193 号（平成 25 年 6 月 19 日原子力規制委員会決定）」（以下「津波審査ガイド」という。）には、基本方針として、「基準津波の策定」について、「最新の科学的・技術的知見を踏まえ、（中略）地震学的見地から想定することが適切なもの」とすること、また、「不確かさを考慮して数値解析を実施し、策定すること。」が記されている。これらの<b>現行</b>規制基準及び津波審査ガイドに基づいて、現在、既設発電所の適合性審査が行われている。</p> <p>また、平成 25 年に改正された「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和 32 年法律第 166 号）」により、事業者に対する「安全性の向上のための評価」の実施が規定され、適合性審査を終えた既設発電所から順次、安全性向上評価が定期的に行われている。この安全性向上評価は、事業者が主体的に行うものであるが、常に最新の科学的・技術的知見に基づいてなされる必要がある。上述の適合性審査及び安全性向上評価の確認に関連した原子力規制の継続的な高度化のためには、「基準津波の策定」等に係る種々の評価方法について継続的な改善が重要である。</p> <p>これまでの津波に係る安全研究では、上記の背景を踏まえ、平成 28 年度までのプロジェクト「津波ハザード関連評価技術の整備」において、東北地震津波の波源推定の知見を基にプレート間地震（図 1）による津波を対象とした将来の津波高を想定するため、津波波源の特性を断層の長さ、幅、すべり量等の主要なパラメータで簡略化した波源断層モデル（特性化波源断層モデル）の設定方法、同特性化波源断層モデルを用いた確率論的津波ハザード解析方法、津波痕跡高情報及び津波堆積物情報を集めた津波痕跡データベース、津波堆積物に基づく津波波源推定方法等に係る知見を蓄積してきた。これらの成果<sup>(1)-(6)</sup>の一部<sup>(1)(2)</sup>は、上記の津波審査ガイドに反映され、既設発電所の適合性審査において有用な知見の一つとして活用されてきた。</p> <p>令和 2 年度までのプロジェクト「津波ハザード評価の信頼性向上に関する研究」では、津波の発生要因となる地震の規模や発生頻度に係る不確かさが確率論的津波ハザードに与える影響、海洋プレートが大陸プレートの下に沈み込み始める海溝軸付近で発生するプレート間地震による津波を対象とした海底面の水平方向の地殻変動を考慮した既往の津波評価方法の適用性等に関する知見を蓄積した。これらの成果の一部<sup>(7)-(10)</sup>は、広く原子力安全に役立てるため、学術論文として公表した。</p> <p>令和 6 年度までのプロジェクト「津波評価手法及び既往津波の波源推定に関する研究」では、海溝軸付近で発生する津波の特徴を考慮した特性化波源断層モデルの設定方法、津波堆積物の不確かさを考慮した津波波源推定方法に係る知見を蓄積してきている。これらの成果についても、今後、学術論文等として公表する予定である。</p> <p>これまで、東北地震津波の発生や今後発生が想定される南海トラフ地震による津波の評価のため、主にプレート間地震を対象として、特性化波源断層モデル等の津波評価方法に係る知見の充実化を図ってきた。プレート間地震に対する津波評価方法の更なる精緻化は重要であるが、一方で、地殻内地震による津波に対しては、プレート間地震のような特性化波源断層モデル等の評価方法に係る知見は十分ではない。また、津波堆積物は津波によって海底や沿岸の砂泥や礫等が侵食・運搬されて陸域に再堆積したものであり、その分布範囲等の特徴からその津波による浸水範囲等の規模の推定に利用されているが、それらの具体的な関係性がはっきり分かっていない。さらに、津波<b>ハザード</b>評価の精度及び保守性は、津波の伝播特性に係る基礎的知見の拡充やそれらを反映した津波評価方法の整備等を行うことで向上する。したがって、津波評価に係る基礎及び応用研究を継続し、関連する科学的・技術的知見の拡充と原子力規制への反映を図ることが重要である。</p> |       |                                                      |
|                                                                                                                                                                                                 | <div></div> <p>図 1 津波の発生要因例のイメージ</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |       |                                                      |
| <p>令和 6 年 1 月 1 日に石川県能登地方で発生した地震（以下「令和 6 年能登半島地震」という。）では、海域の活断層による地殻内地震によって津波が発生した。広域的な地殻変動が認められ、一部の地域では特に大きな隆起等が観測されている。これは、断層のすべり量分布等の空間的な不均質性によるものと考えられるが、そのメカニズムや不均質性の程度は不明であり、津波への影響につ</p> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |       |                                                      |

いては十分に解明されていない。しかし、令和 6 年能登半島地震では、断層近傍での地殻変動量や津波の観測データが得られており、地殻内地震の震源像（断層形状、配置、すべり分布等）を知る上で有用性が高く、これらの情報等を活用することで津波評価方法の精緻化が期待できる。また、海岸付近の一部では津波堆積物が確認された。津波堆積物の分布状況等を踏まえると、津波の挙動や形成過程を予測するためには、地形の影響等に係る知見が重要である。さらに、~~海底地すべりによっても津波が発生した可能性がある。地震及び海底地すべりが同時に発生する等、複数の波源で津波が発生する場合に沿岸域で津波が重なり（重畳し）、津波水位が高くなることが考えられるため、重畳津波の評価に係る知見の拡充が重要である。~~地震による津波及び海底地すべりによる津波が同時に発生し、沿岸域で重なった（重畳した）と考えられている<sup>(11)</sup>。また、港湾内の岸壁沿いで高水位を伴い伝播する津波が局所的に水位を増加させたことがビデオ映像より確認でき<sup>(12)</sup>、被害を拡大させた要因として指摘されている<sup>(13)(14)</sup>。後者のような、鉛直壁に対して津波が衝突又は斜めに伝播する際に生じる壁面沿いの水位上昇は、鉛直壁の位置を軸に両方向から同じ津波が入射して、その 2 つの津波が重畳する場合と同等である。したがって、前者は異なる 2 つの津波が、後者は同一の 2 つの津波が重畳する事象である。沿岸域では、このような複数の津波の重畳による水位上昇等の発生が考えられるため、沿岸域で重畳する津波（以下「重畳津波」という。）の特性に係る知見の拡充が重要である。

上記を踏まえ、審査等の際の判断に必要な新たな知見の収集・整備の一環として、本プロジェクトでは、「(1) 地殻内地震による津波の特性化波源断層モデル設定方法の整備」、「(2) 津波堆積物に基づく津波規模の推定方法の整備」及び「(3) ~~沿岸域における~~重畳津波の~~ハザード評価特性~~に係る知見の拡充」を行う。以下、各研究テーマについて記す。

#### (1) 地殻内地震による津波の特性化波源断層モデル設定方法の整備

~~海域の活断層による地殻内地震では津波が発生する場合があります。~~津波審査ガイドにおいて規制基準では、「海域の活断層による地殻内地震」を津波の発生要因として挙げ、津波審査ガイドでは、「海域の活断層の調査結果に基づいて、将来の活動を否定できない海域の活断層に想定される地殻内地震を対象に津波波源を設定していることを確認する。」等とされている。地震調査研究推進本部の「津波レシピ」<sup>(15)</sup>では、将来の津波を想定する方法として、プレート間地震を対象に、津波波源の特性を断層の長さ、幅、すべり量等の主要なパラメータで簡略化した特性化波源断層モデルを示している。地殻内地震に関しては、これまでに日本海で発生した地殻内地震を対象に、痕跡記録を再現するための津波波源モデルが検討<sup>(16) - (18)</sup>されているが、特性化波源断層モデルの設定方法の検討は十分でない。また、津波審査ガイドにおいても、プレート間地震と比較して、「海域の活断層による地殻内地震に起因する津波波源の設定」に関する具体的な方法例が少ない。地殻内地震による津波の評価は、対象地域周辺の実現象等の既往情報に基づき行われているが、実現象から得られたパラメータは、地震津波ごとに特徴が異なる等のため不確かさが~~大きく、また大きいこと~~、断層タイプの違いにより津波への影響程度も異なること、~~複数の断層が連動する場合もある~~こと等から、津波の予測評価を行う上では課題がある。このようなことから、地殻内地震においても、プレート間地震と同様に、将来の津波を想定するに当たり、特性化波源断層モデルを設定するための調査・研究が必要である。

#### (2) 津波堆積物に基づく津波規模の推定方法の整備

~~規制基準及び~~津波審査ガイドでは、基準津波の選定結果の検証において、津波堆積物等について十分な調査を実施した結果に基づき、基準津波による遡上津波が敷地周辺における津波堆積物等の地質学的証拠等から推定される津波の規模を上回っていることを確認するとされている。このように津波堆積物は、その分布範囲等からその津波による浸水範囲等の規模の推定に利用されている。ただし、津波堆積物の分布標高や分布範囲は、津波の津波高及び浸水範囲と必ずしも整合しておらず<sup>(19)</sup>、津波規模との具体的な関係性がはっきりと分かっていない。また、津波堆積物の形成（堆積作用・侵食作用）には、地形等の影響を受けることが考えられる。津波堆積物と津波規模の関係の一例として、東北地震津波の仙台湾沿岸（平野）の調査結果から津波堆積物の堆積層厚と浸水深に関する知見<sup>(20)</sup>が得られている。しかし、谷地形の場合では、地形効果による津波の流速や向き等が影響し、平野での堆積作用とは異なることが考えられ、当該知見をそのまま他地形へ適用することは難しい。津波規模の評価精度をより向上させるためには、地形ごとの津波堆積物の特徴<sup>(21)(22)</sup>と津波規模との関係性についての調査・研究が必要である。

#### (3) ~~沿岸域における~~重畳津波の~~ハザード評価特性~~に係る知見の拡充

~~地震及び海底地すべりが同時に発生し、これら複数の波源で津波が発生する場合、沿岸域で津波が重畳することがある。また、港湾内の防潮堤や岩壁のような鉛直壁に対し、津波が衝突又は斜めに伝播する際に生じる壁面沿いの水位上昇も重畳と見なすことができる。これは、鉛直壁沿いの津波の挙動が、鉛直壁の位置を軸に両方向から同じ津波が入射して、これら 2 つの津波が重畳する場合と同等であると考えて良いためである。~~令和 6 年能登半島地震では重畳津波による局所的な水位上昇が被害を拡大させた要因の一つとして考えられている<sup>(19)</sup>。規制基準及び津波審査ガイドでは、津波発生要因に係るサイトの地学的背景、津波発生要因の関連性を踏まえ、地震起因による津波と地震起因ではない津波（例えば地すべり、火山現象等に伴う津波）等の組合せを考慮していることを確認するとされている。また、設計対象である津波防護施設、浸水防止設備、津波監視設備の位置における津波の時刻歴波形のうち、施設、設備に最も影響が大きいものを当該施設、設備の入力津波として設定していることを確認するとされている。さらに、津波評価手法においては、津波の分散波の発生が見込まれる場合には、分散性を考慮した理論式を用いる必要があるとされている。

主に孤立波\*を対象とした水面波の研究分野では、重畳のパターン<sup>(23) - (25)</sup>や水面波の性質の違い<sup>(26)(27)</sup>が、重畳した波の波高及び位相の変化率に影響することが知られている。このような水面波の重畳現象では、波の非線形性・分散性\*\*によって、水位が 4 倍にまで増幅する場合があるとされる<sup>(25)</sup>。同じ水面波である津波の重畳においても同様の影響の可能性はあるが、その程度や特徴については十分に分かっていない<sup>(28)</sup>。これは、従来の津波研究は一つの波源による津波に主眼が置かれていたほか、波の非線形性・分散性を高次まで取り扱える理論が限られ、それらを用いた数値解析も難しい等の課題があり、体系的に取り組まれてこなかったことが背景にあると考えられる。このため、重畳津波の~~ハザード評価に~~対してにおいて、津波の非線形性・分散性の両者がどの程度影響するのかは十分に分かっていない。重畳津波の~~ハザード評価~~の精度及び保守性を向上するためには、重畳津波の伝播特性に関する知見とそれへの理解の深さが求められる。津波水位評価の保守性の観点では、同評価で一般的に使用される非分散モデルによる重畳津波の水位が、より精緻な（例えば、分散性を考慮した）数値モデルによる水位を上回っていることを確認することが重要である。また、津波の非線形性・分散性の影響により水位が増加又は時刻歴波形が有意に変化するような重畳パターンで適切な理論式が用いられ

|           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|           | <p>るようにするためには、重畳津波の基本特性である水位や位相の変化等に関する知見の拡充が重要である。</p> <p>* 水面波の一種。水深一定の条件の下、単一の水面の盛り上がり方が形を変えず一定速度で伝播する波のこと。波高/水深によって波形と波速が一意的に決まる。</p> <p>** 波の非線形性：波高が水深に対して無視できない大きさの場合において、波速増加、波形の前傾化、波高増加等を生じる性質を指す。また、波の非線形性により、重畳による波高は、重畳する各波の単純重ね合わせの波高より大きくなる場合や小さくなる場合がある。</p> <p>波の分散性：波の波長（又は周波数）によって波速が異なる性質を指す。波の分散性により、波を構成する成分波はそれぞれの波速で伝播するため分散して波形が変化する。なお、孤立波は、波を前傾化させる性質（非線形性）と分散させる性質（分散性）が均衡した状態にあるため、波形が変化しない。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 4. 目的     | <p>本プロジェクトでは以下の研究を行い、<b>基準津波の策定に係る技術的根拠を整備するとともに</b>、審査等の際の判断に必要な津波<b>ハザード</b>の評価技術に係る知見を収集し、その評価方法を整備することを目的とする。</p> <p>(1) 地殻内地震による津波の特性化波源断層モデル設定方法の整備<br/>令和6年能登半島地震を含む国内外の地殻内地震<b>による特徴（地震タイプ、地殻変動、連動性等）</b>及び海底で発生する地すべりに関する知見を調査するとともに、地殻内地震による津波波源の震源像を考慮した特性化波源断層モデルの設定方法を整備し、津波評価方法の精緻化を図る。</p> <p>(2) 津波堆積物に基づく津波規模の推定方法の整備<br/>地形ごとの津波堆積物の特徴（厚さ、分布範囲等）と津波規模（津波高、浸水範囲、<b>流速分布、周期等</b>）との関係性の有無や程度を確認し、津波堆積物から津波高や浸水範囲等を推定する方法を整備する。</p> <p>(3) <b>沿岸域における重畳津波のハザード評価特性</b>に係る知見の拡充<br/>津波水位評価における保守性及び精度の向上の観点より、地震津波と地すべり津波等が沿岸域で重畳する場合の津波の<b>ハザード評価特性</b>に関する知見を拡充する。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 5. 知見の活用先 | <p><b>各研究テーマで本プロジェクトにより、規制に反映すべき新たな知見が得られた成果場合には、各々現行の規制基準等への反映の検討に活用される。具体的には、津波審査ガイドの以下の項目に資する知見の一つとしてとりまとめ、津波審査ガイドへの反映の要否について検討するに活用される。</b></p> <p>(1)：「<b>海域の活断層による地殻内地震に起因する津波波源の設定</b>」（津波審査ガイド3.3.4）のうち<b>波源設定方法</b></p> <p>(2)：「<b>津波波源の設定</b>」及び「<b>基準津波の選定結果の検証</b>」（津波審査ガイド3.6）のうち<b>津波堆積物を用いた津波高等の推定方法</b></p> <p>(3)：「<b>津波発生要因の組合せ津波評価手法及び評価条件</b>」（津波審査ガイド3.4）のうち<b>津波の数値計算手法</b></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 6. 安全研究概要 | <p>本プロジェクトの研究は、「原子力規制委員会における安全研究の基本方針」（令和元年5月29日原子力規制委員会決定）における安全研究のうち以下の分類に基づき実施する。</p> <p>審査等の際の判断に必要な知見の収集・整備（以下「分類②」という。）</p> <p>(1) 地殻内地震による津波の特性化波源断層モデル設定方法の整備【分類②】</p> <p>地殻内地震による津波に関しては、断層面のすべりの不均質性を考慮した津波波源モデルの検討は行われているが、特性化波源断層モデルの設定方法の検討は十分でない。令和6年能登半島地震では、断層近傍での地殻変動量や津波の観測データが得られており、これらの情報等を活用することで津波評価方法の精緻化が期待できる。そこで、まず、令和6年能登半島地震を含む国内外の地殻内地震<b>による特徴（断層タイプ、地殻変動（隆起・沈降）、連動性等）</b>等に関する知見を収集する（図2）。また、観測津波波形と観測地殻変動データを用いて<b>津波波源を再現解析</b>するジョイント・インバージョン解析を行うため、地殻内地震及び津波に係る地殻変動、津波<b>水位波形、津波痕跡</b>のデータ等を収集・整備し、ジョイント・インバージョン解析の結果から波源情報（位置、形状、すべり量等）を得る（図3）。これらの<b>結果及び既往の再現解析結果</b>に基づき、将来の津波を想定する方法として、地殻内地震による津波の特性化波源断層モデルの設定方法（波源のすべり量の大きさや位置の配置、面積比率等）を整備する（図4）。<b>地殻内地震による津波の特性化波源断層モデルの設定方法の整備に当たっては、プレート間地震とは異なり、地震タイプの違いによる津波への影響や、複数の波源断層モデルが連動する場合等についても検討する。</b></p> <div data-bbox="709 2139 1627 2605"> </div> <p>図2 海域の活断層による地殻内地震における地盤の隆起・津波発生イメージ（逆断層の場合）</p> |

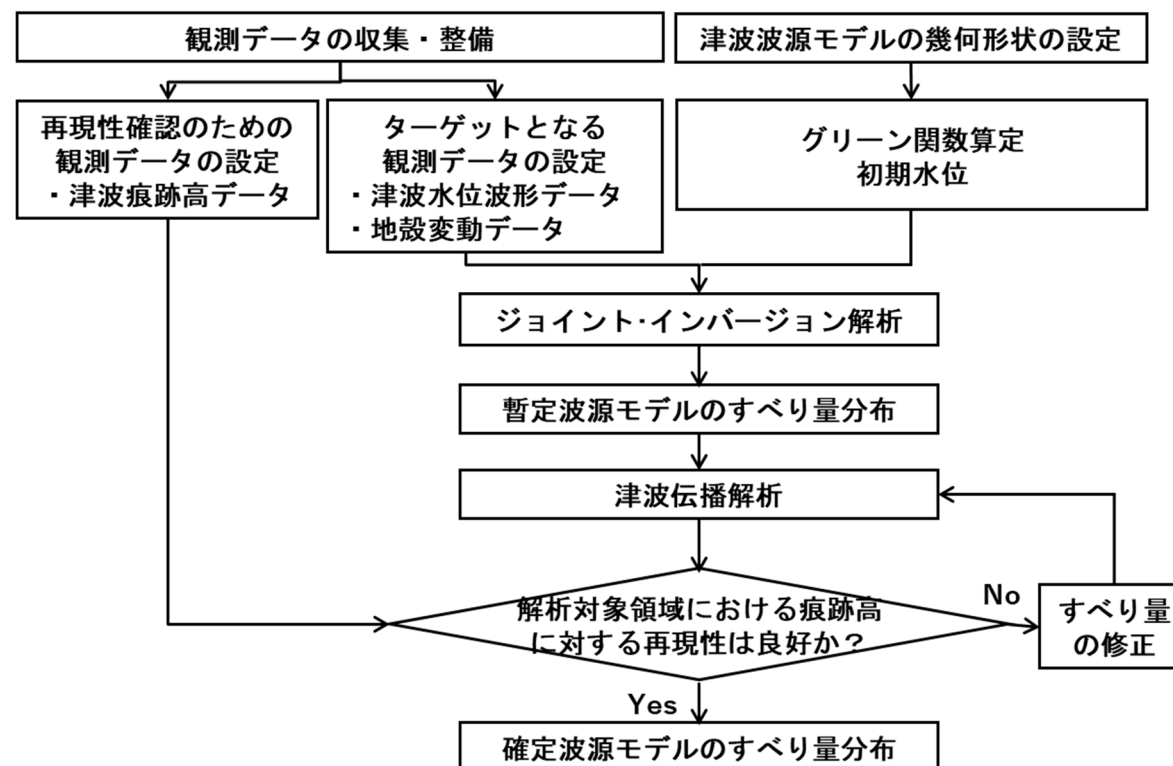
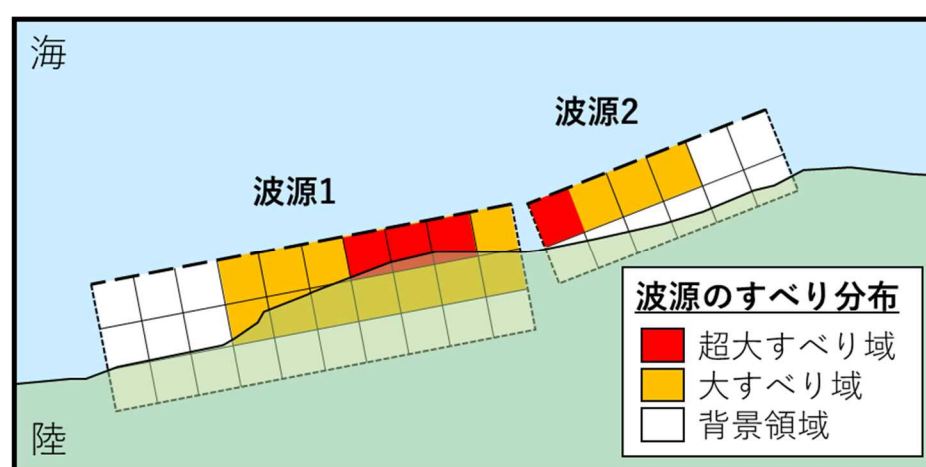


図3 ジョイント・インバージョン解析のフロー



【検討事項】

- 波源のすべり分布の設定について
  - ・各すべり域のすべり量の大きさ
  - ・各すべり域の位置の配置
  - ・各すべり域の面積比率
- 地震タイプの違いの検討
  - ・逆断層、正断層、横ずれ断層
- 地震規模の大きさによる検討
- 連動性の検討（例えば波源1と波源2が同時に活動する場合） etc.

図4 地殻内地震による津波の特性化波源断層モデルのイメージ

(2) 津波堆積物に基づく津波規模の推定方法の整備【分類②】

津波堆積物に基づく津波規模の評価精度をより向上させるためには、地形ごとの津波堆積物の特徴と津波規模との関係性について把握する必要がある。前プロジェクトの実施研究の一つである「既往の巨大津波の波源推定」では、東日本太平洋沿岸の18地域を対象として、既往の津波波源モデル（16通り）の他に独自に設定した特性化波源断層モデル（図5：193通り）によるシナリオ波源の計209通りの土砂移動解析を実施し、様々な地形及び津波規模の条件下における津波堆積物分布（図6）を推定した。その土砂移動解析結果から、各地域における地形の巨視的及び微視的な特性を抽出し、津波堆積物の堆積状況と津波高・浸水深・浸水範囲・流速分布・周期等の津波規模との関係性の有無や程度を確認するとともに、津波堆積物の層厚等の堆積状況から津波高等の津波規模を推定する方法を整備する（図7）。



図5 特性化波源断層モデル（土砂移動解析・データベース登録）<sup>(29)</sup>

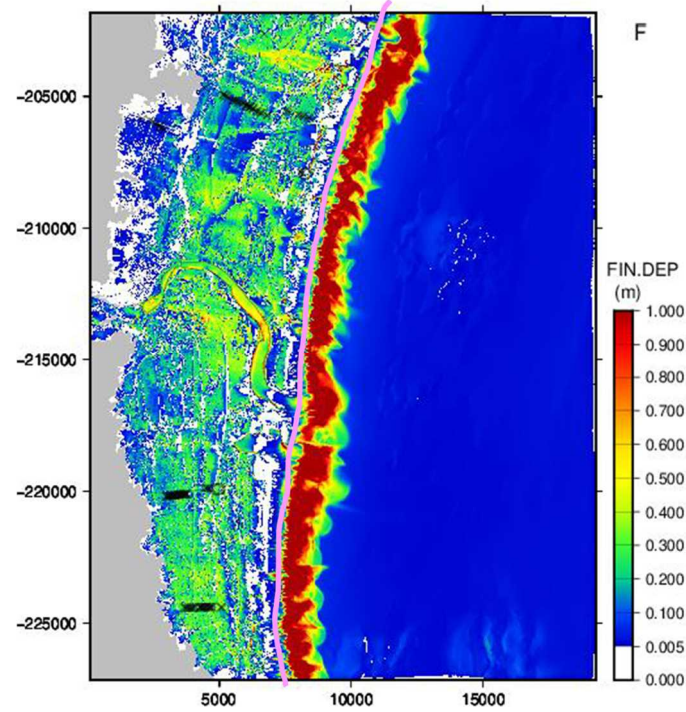


図6 土砂移動解析による津波堆積物の層厚分布の一例  
(対象：仙台平野) (汀線：ピンク、陸：左、海：右)

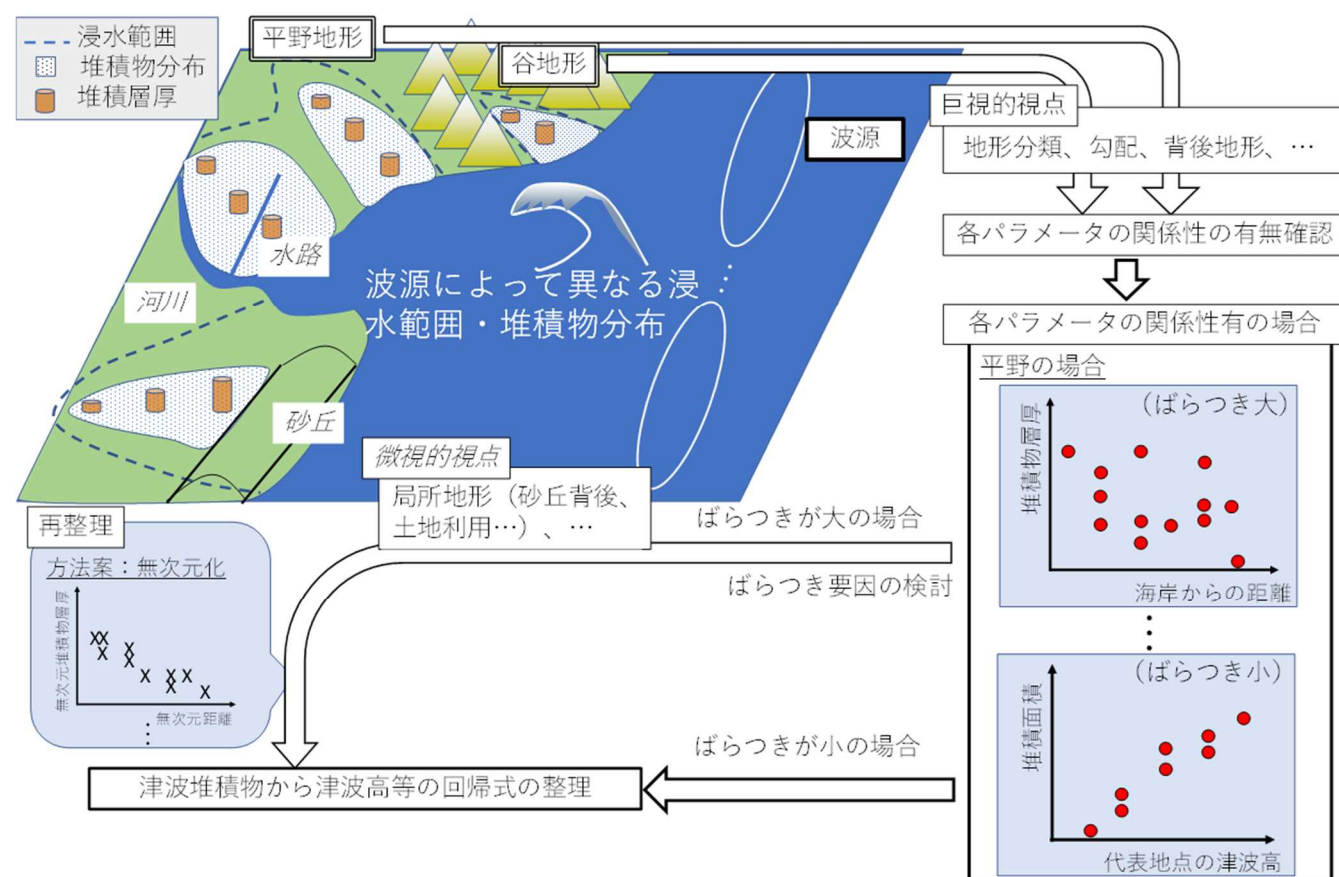


図7 津波堆積物に基づく津波規模の推定方法構築の流れ

### (3) 沿岸域における重畳津波のハザード評価特性に係る知見の拡充【分類②】

地震及び海底地すべりが同時に発生し、これら複数の波源で津波が発生する場合、沿岸域で重畳することがある。また、港湾内の防潮堤や岩壁に沿って伝播する津波（図8）も重畳現象の一つである。このような津波を含む水面波の伝播特性に関する知見と、それへの理解の深さが、津波ハザード評価の精度及び保守性の向上に繋がる。したがって、水面波の伝播特性に関する基礎研究を継続することにより、知見の拡充と実用への反映のサイクルを築くことが重要である。孤立波の研究分野では、例えば、斜め交差による波高増幅率に関する理論解（図9）等、多くの知見が蓄積されている。しかしながら、これらの知見のみでは、孤立波と性質が異なる津波や理論の適用限界を超える大振幅波の挙動を正しく評価できない。このため、津波の重畳現象については不明な点が多い。そこでまず、沿岸域における重畳する津波に関する知見を収集する。次に、様々な波高の津波を高精度に再現することが可能な解析ツールを整備し、津波の波高及び重畳パターンに関して体系的・網羅的な条件下での数値解析を実施する。重畳パターンとして、防潮堤等へ津波が正面衝突する場合（同一の2つの津波の正面衝突と同等）、波高の大きな津波が波高の小さな津波を追い越しながら港湾内へ到達する場合、港湾で2つの津波が斜め交差する場合、岸壁に沿って津波が伝播する場合等を想定する。最後に、津波水位評価の保守性の確認の観点では、ハザード評価同評価における重畳津波の非線形性・分散性の影響の有無を調べる。また、重畳津波のハザード評価で適切な理論式を選択するための基礎情報として、重畳パターンによる波高及び位相の変化率を整理して重畳津波の特徴及び傾向特性を調べる。

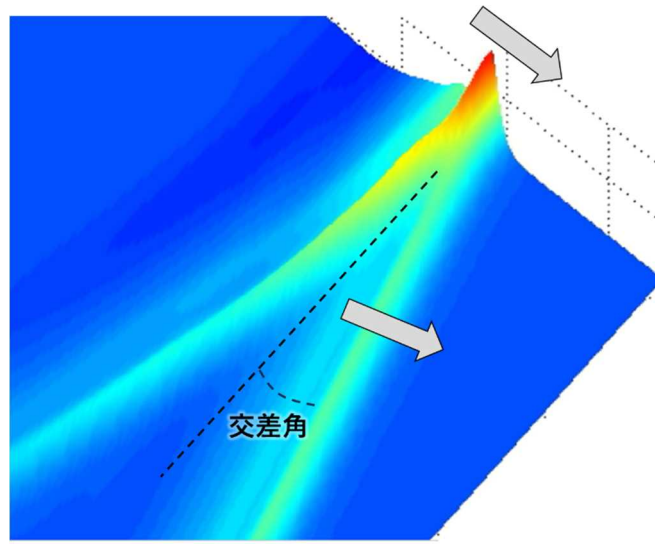


図8 鉛直壁沿いを斜めに伝播する重畳津波の解析例 ( $\varepsilon=0.1$ 、交差角  $15^\circ$  の場合)

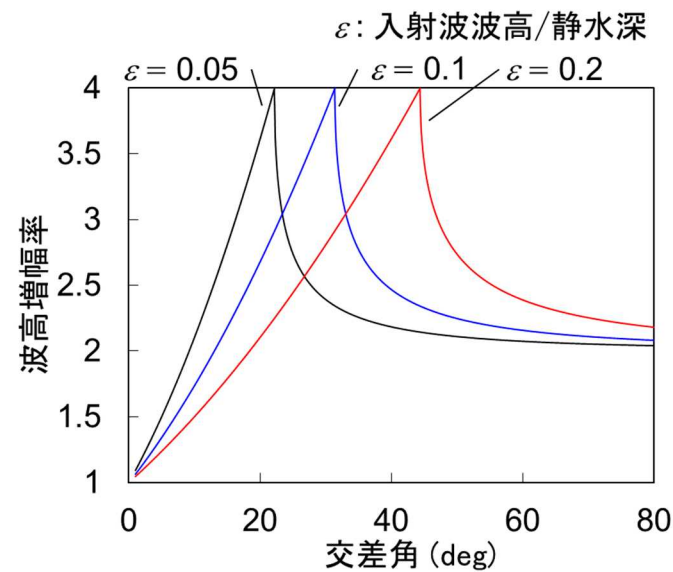


図9 同一波高の2つの孤立波が斜め交差する場合の波高増幅率の理論<sup>(25)</sup>による解

7. 成果目標と実施計画

(1) 地殻内地震による津波の特性化波源断層モデル設定方法の整備

成果目標：地殻内地震及び津波に係る震源及び波源情報を取得し、地殻内地震による津波の特性化波源断層モデルの設定方法（すべり量の大きさや位置の配置、面積比率等）を整備する。

- 実施計画：
- ・令和6年能登半島地震によるを含む国内外の地殻内地震の特徴（地震タイプ、地殻変動（隆起・沈降）、連動性等）及び海底で発生する地すべりに関する知見を収集する。また、既往の国内外の地殻内地震及び津波を含めた地殻変動データ、津波水位波形データ、津波痕跡データ等を収集し、津波のジョイント・インバージョン解析を実施するためのデータを整備する。
  - ・既往の国内外の地殻内地震による津波のジョイント・インバージョン解析を実施し、各地震津波の波源情報（位置、形状、すべり量等）を取得する。
  - ・令和10年度までにジョイント・インバージョン解析結果及び既往の再現解析結果に基づき、地殻内地震による津波の特性化波源断層モデルの設定方法を提案し、とりまとめる。
  - ・令和11年度以降に、これらの成果は論文等としてとりまとめる。

(2) 津波堆積物に基づく津波規模の推定方法の整備

成果目標：地形ごとの津波堆積物の特徴（厚さ、分布範囲等）と津波規模（津波高、浸水範囲、流速分布、周期等）との関係性の有無や程度を確認し、津波堆積物から津波高を推定する方法を整備する。

- 実施計画：
- ・津波堆積物と津波規模に関する既往研究の知見収集を行い、津波堆積物の特徴について巨視的・微視的な観点で分類する。
  - ・令和6年度までに実施した209通りのシナリオ波源による土砂移動解析結果に対し、まずは巨視的特性（地形分類等）に基づいて、津波堆積物の特徴（厚さ、分布範囲等）と津波規模（津波高、浸水範囲、流速分布、周期等）との関係性の有無を確認する。次に、関係性が認められてもばらつきが大きい場合は、微視的特性（砂丘背後、土地利用等）の観点でデータを再整理し、再度、関係性の有無を確認する。
  - ・確認した関係性を踏まえ、令和10年度までに津波堆積物から津波高等の津波規模を推定する方法を整備する。
  - ・令和9年度以降に、これらの成果は論文等としてとりまとめる。

(3) 沿岸域における重畳津波のハザード評価特性に係る知見の拡充

成果目標：ハザード津波評価における重畳津波の非線形性・分散性の影響、並びに津波の性質（波高や波長等）及び重畳パターンに応じた重畳津波の波高及び位相の変化率に関する知見を拡充する。

- 実施計画：
- ・沿岸域における重畳する津波に関する知見を収集し、重畳津波のハザード評価方法の現状と課題を調査する。
  - ・様々な波高の津波を高精度に再現することが可能な解析ツールを整備する。
  - ・非線形浅水理論に基づく従来の解析ツール及び上記の解析ツールに基づき、重畳パターンに関する体系的・網羅的な条件下での数値解析を実施する。
  - ・以上の結果に基づき、令和10年度までに重畳パターンによる波高及び位相の変化率を整理する。また、津波水位評価の保守性の確認の観点より、ハザード評価同評価における重畳津波の非線形性・分散性の影響の有無を調べる。
  - ・令和11年度以降に、これらの成果は論文等としてとりまとめる。

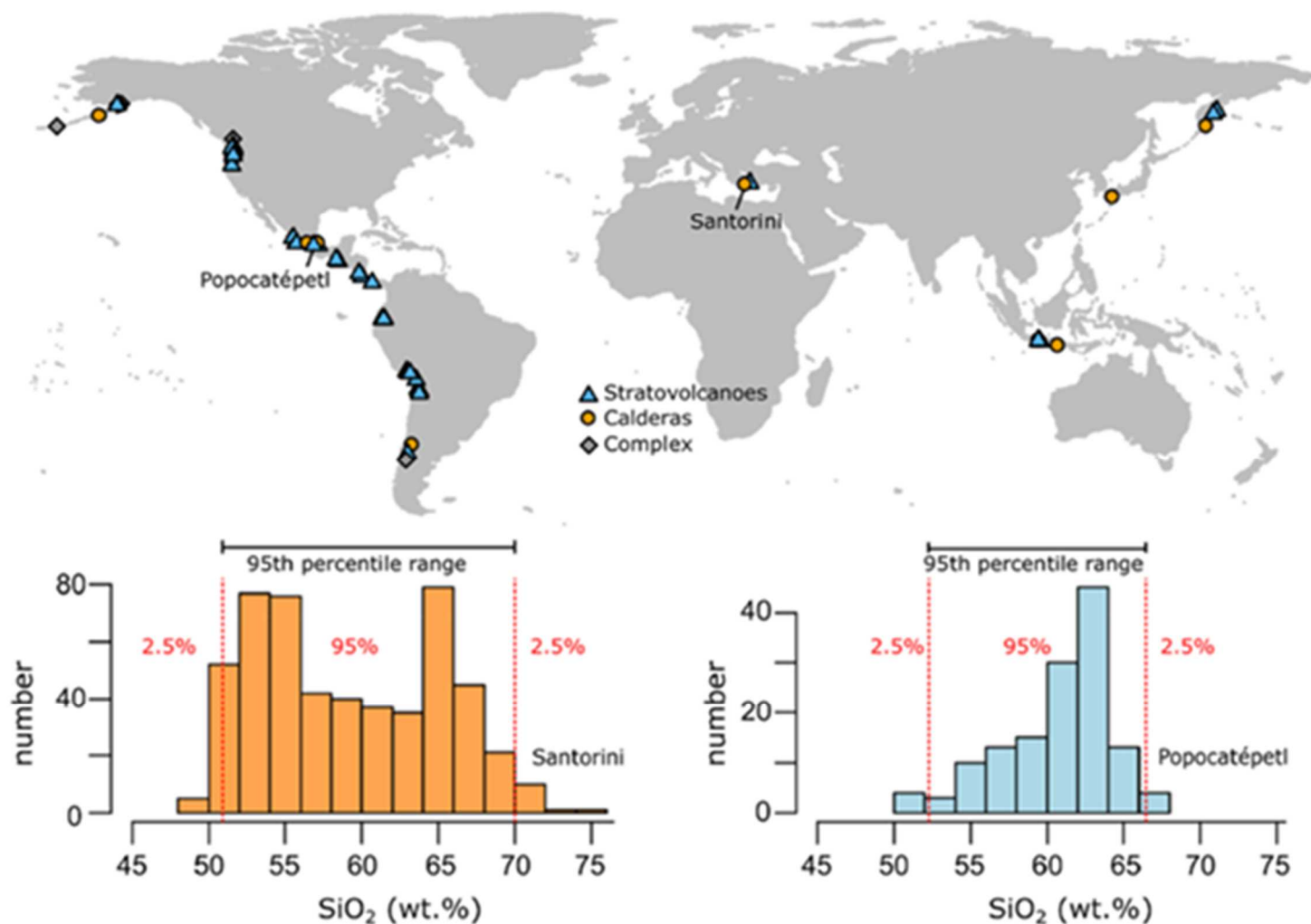
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                               |                                   |                                                |                                                      |                                                                                                                             |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         | 行程表                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                               |                                   |                                                |                                                      |                                                                                                                             |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | R7 年度                                         | R8 年度                             | R9 年度                                          | R10 年度                                               | R11 年度以降                                                                                                                    |
|         | (1) 地殻内地震による津波の特性化波源断層モデル設定方法の整備                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 令和6年能登半島地震を含む国内外の地殻内地震による地殻変動等に関する知見収集、データの整備 | 既往の国内外の地殻内地震による津波のジョイント・インバージョン解析 | ジョイント・インバージョン解析及び地殻内地震による津波の特性化波源断層モデルの設定方法の整備 | 津波の特性化波源断層モデルの設定方法の取りまとめ                             | 論文投稿▽<br><br>審査ガイド現行の規制基準等への反映の要否について検討  |
|         | (2) 津波堆積物に基づく津波規模の推定方法の整備                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 既往研究の知見の収集                                    | 巨視的及び微視的な特性抽出等のデータ整理、関係性の確認       | 津波堆積物から津波規模を推定する方法の整備                          | 取りまとめ                                                | 論文投稿▽<br><br>審査ガイド現行の規制基準等への反映の要否について検討  |
|         | (3) 沿岸域における重畳津波のハザード評価特性に係る知見の拡充                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 沿岸域におけるで重畳する津波の知見収集及び重畳津波のハザード評価方法の現状と課題の調査   | 解析方法の選定及び解析ツールの整備                 | 解析ツールの整備及び解析の実施                                | 波高及び位相の変化率、並びにハザード津波水位評価における重畳津波の非線形性・分散性の影響検討の取りまとめ | 論文投稿▽<br><br>審査ガイド現行の規制基準等への反映の要否について検討 |
|         | ※有用な研究成果は、研究期間中においても適宜論文として公表する。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                               |                                   |                                                |                                                      |                                                                                                                             |
| 8. 実施体制 | 【地震・津波研究部門における実施者（実施項目ごとに主担当者に○を記載）】<br>○ 道口陽子 主任技術研究調査官（実施項目（1）、（2）、（3）関係）<br>○ 佐藤太一 副主任技術研究調査官（実施項目（1）、（2）、（3）関係）<br>○ 山下 啓 副主任技術研究調査官（実施項目（1）、（2）、（3）関係）<br><br>【委託研究先】<br>なし<br><br>【共同研究先】<br>未定                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                               |                                   |                                                |                                                      |                                                                                                                             |
| 9. 備考   | 【文 献】<br>(1) 杉野英治, 呉長江, 是永真理子, 根本信, 岩渕洋子, 蛭沢勝三：原子力サイトにおける 2011 東北地震津波の検証、日本地震工学会論文集, Vol.13, No.2, pp.2-21, 2013.<br>(2) 杉野英治, 岩渕洋子, 橋本紀彦, 松末和之, 蛭澤勝三, 亀田弘行, 今村文彦：プレート間地震による津波の特性化波源モデルの提案, 日本地震工学会論文集, Vol.14, No.5, pp.1-18, 2014.<br>(3) 内田淳一, 岩渕洋子, 杉野英治：日本海東縁部における広域的地殻構造境界の津波波源の設定—認識論的不確実さ要因の一つとして—, 日本地震工学会論文集, Vol.19, No.4, pp.122-155, 2019.<br>(4) 佐藤太一, 杉野英治：確率論的手法を用いた海底地すべり危険度判定手法の構築, 日本地震工学会論文集, Vol.19, No.6, pp.283-295, 2019.<br>(5) Sugino, H. and Abe, Y.: SIMPLE MODELING OF PHASE AND AMPLITUDE SPECTRA FOR OBSERVED TSUNAMI WAVES, 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE, 2020.<br>(6) 杉野英治, 阿部雄太：統計的手法を用いた津波模擬波形の提案, 日本地震工学会論文集, Vol.21, No.1, pp.1-24, 2021.<br>(7) 道口陽子, 三戸部佑太, 杉野英治, 田中仁：地殻変動の水平変位による津波初期水位への影響に関する実験的検討, 土木学会論文集 B2（海岸工学）, Vol.75, No.2, pp.I_343-I_348, 2019.<br>(8) Michiguchi, Y., Mitobe, Y., Sugino, H. and Tanaka, H.: COMPARATIVE STUDY OF EXPERIMENTS AND ANALYSES ON TSUNAMI GENERATION BY HORIZONTAL CRUSTAL DEFORMATION, 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE, 2020.<br>(9) 佐藤太一, 杉野英治：Mw8.8 以下のプレート間地震津波に対する特性化波源モデルの再現性, 土木学会論文集 B2（海岸工学）, Vol.76, No.2, pp.I_337-I_342, 2020.<br>(10) 道口陽子, 杉野英治, 三戸部佑太, 田中仁：地殻変動の水平変位寄与分の考慮方法の違いによる 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の推定波源のすべり量分布の比較, 日本地震工学会論文集, Vol.22, No.5, pp.25-42, 2022.<br>(11) Yanagisawa, H., Abe, I. and Baba, T.: WHAT WAS THE SOURCE OF THE NONSEISMIC TSUNAMI THAT OCCURRED IN TOYAMA BAY DURING THE 2024NOTO PENINSULA EARTHQUAKE, Scientific Reports, 14:18245, 2024.<br>(12) ANN news：地震から津波が到達するまで...32 分ノーカット 石川・珠洲市 2024 年 1 月 1 日【能登半島地震 被害状況マップ#1】, <a href="https://www.youtube.com/watch?v=T_839fN7ZNU&amp;t=4s">https://www.youtube.com/watch?v=T_839fN7ZNU&amp;t=4s</a> . (2024 年 10 月アクセス) |                                               |                                   |                                                |                                                      |                                                                                                                             |

- (13) Takagi, H., Siddiq, N.L., Tanako, F. and De La Rosa, D.P.B.: LOCALLY AMPLIFIED TSUNAMI IN IIDA BAY DUE TO THE 2024 NOTO PENINSULA EARTHQUAKE, Ocean Engineering, Vol.307, 118180, 2024.
- (14) 鈴木高二朗, 千田優, 鶴田修己, 藤木峻, 里村大樹, 中澤祐飛, 高川智博, 野津厚, 宮田正史, 山川匠, 伴孝宏, 志賀守, 中川康之: 能登半島地震津波による飯田港等での港湾施設の被害について, 土木学会論文集, Vol.80, No.17, 24-17091, 2024.
- (15) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 波源断層を特性化した津波の予測手法 (津波レシピ), 2017.  
[https://www.jishin.go.jp/main/tsunami/17jan\\_tsunami-recipe.pdf](https://www.jishin.go.jp/main/tsunami/17jan_tsunami-recipe.pdf), (2024 年 6 月 27 日)
- (16) 木場正信, 安中正, 稲垣和男, 田中寛好, 曾良岡宏: 海域活断層に想定される津波の波源モデル設定法, 海岸工学論文集, Vol. 48 巻, pp. 326-330, 2001.
- (17) 根本信, 高瀬嗣郎, 長谷部大輔, 横田崇: 日本海におけるアスペリティを考慮した津波波源モデルの検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.B2-65, No.1, pp.346-350, 2009.
- (18) 国土交通省: 日本海における大規模地震に関する調査検討会報告書, 2014,  
[https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai\\_blog/daikibojishinchousa/](https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/daikibojishinchousa/), (2024 年 6 月 27 日)
- (19) 菅原大助: 津波堆積物と津波の規模について, 地学雑誌, Vol.123, No.6, pp.797-812, 2014.
- (20) Goto, K., Hashimoto, K., Sugawara, D., Yanagisawa, H. and Abe, T.: SPATIAL THICKNESS VARIABILITY OF THE 2011 TO-HOKU-OKI TSUNAMI DEPOSITS ALONG THE COASTLINE OF SENDAI BAY, Marine Geology, Vol.358, pp.38-48, 2014.
- (21) Abe, T., Goto, K. and Sugawara, D.: SPATIAL DISTRIBUTION AND SOURCES OF TSUNAMI DEPOSITS IN A NARROW VALLEY SETTING – INSIGHT FROM 2011 TOHOKU-OKI TSUNAMI DEPOSITS IN NORTHEASTERN JAPAN, Progress in Earth and Planetary Science, Vol.7, No.7, 2020.
- (22) Nakamura, Y., Nishimura, Y. and Putra, P.S.: LOCAL VARIATION OF INUNDATION, SEDIMENTARY CHARACTERISTICS, AND MINERAL ASSEMBLAGES OF THE 2011 TOHOKU-OKI TSUNAMI ON THE MISAWA COAST, AOMORI, JAPAN, Sedimentary Geology, Vol.282, pp.216-227, 2012.
- (23) Su, C.H. and R.M. Mirie: ON HEAD-ON COLLISION BETWEEN SOLITARY WAVES, Journal of Fluid Mechanics, Vol.98, pp.509-525, 1980.
- (24) 片岡武: 水面孤立波の衝突, 追い越しの理論解—片方の振幅が大きい場合—, 京都大学数理解析研究所講究録, 第 1594 号, pp.186-202, 2008.
- (25) Miles, J.W.: OBLIQUELY INTERACTING SOLITARY WAVES, Journal of Fluid Mechanics, Vol.79, pp.157-169, 1977.
- (26) 山下啓, 柿沼太郎, 山元公, 中山恵介: マッハステム形成過程の数値解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I\_006-I\_010, 2012.
- (27) 山下啓, 柿沼太郎, 中山恵介: 表面孤立波及び内部孤立波の特性, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.72, No.1, pp.27-41, 2016.
- (28) Chen Z., Heller, V. and Briganti, R.: NUMERICAL MODELLING OF TSUNAMI PROPAGATION IN IDEALISED CONVERGING WATER BODY GEOMETRIES, Coastal Engineering, Vol.189, 104482, 2024.
- (29) 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社: 令和 3 年度原子力規制庁請負成果報告書特性化波源モデルによるシナリオ波源を用いた土砂移動解析, 2022.

研究計画（案）

|                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |       |                                                                |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|----------------------------------------------------------------|
| 1. 1. プロジェクト<br>(始期：R7年度終<br>期：R11年度) | 4. 火山活動及び火山モニタリング評価に関する調査・研究                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 担当部署  | 技術基盤グループ<br>地震・津波研究部門                                          |
|                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 担当責任者 | 内田淳一 統括技術研究調査官                                                 |
| 2. カテゴリー・研究<br>分野                     | 【横断的原子力安全】 A) 外部事象（地震、津波、火山等） A-1<ハザ<br>ード関連>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 主担当者  | 西来邦章 主任技術研究調査官<br>廣井良美 技術研究調査官<br>佐藤勇輝 技術研究調査官<br>大野鷹士 技術研究調査官 |
| 3. 背景                                 | <p>「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（平成25年原子力規制委員会規則第5号）」第6条第1項では、「安全施設（兼用キャスクを除く。）は、想定される自然事象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない」とされており、「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈（原規技発第1306193号（平成25年6月19日原子力規制委員会決定）」第6条第2項において、想定される自然現象に適用されるものの一つに、火山の影響が示されている。そのうえで、火山の影響を適切に評価する一例として、「原子力発電所の火山影響評価ガイド（原規技発第13061910号（平成25年6月19日原子力規制委員会決定）」（以下「評価ガイド」という。）が示されているが、新規制基準適合性審査（以下「同審査」という。）において、事業者が行った調査・評価の妥当性を確認するためには、同審査等での判断に資する具体的な指標が必要であり、これらの指標に常に最新知見を反映していくことが重要である。</p> <p>同審査では、運用期間中に設計対応が不可能な火山事象が発電所に影響を及ぼす可能性が十分小さいかどうかを判断する必要があり、火山の活動履歴、現在の火山の状態等の知見に基づいた評価が行われている。特に、評価ガイドで定義されている巨大噴火<sup>*1</sup>に関する評価については、低頻度の自然現象で調査例は少ないが、「現在の活動状況は巨大噴火が差し迫った状態ではないと評価でき、運用期間中における巨大噴火の可能性を示す科学的合理性のある具体的な根拠が得られていない場合は、運用期間中における巨大噴火の可能性が十分に小さいと判断できる。」と記述されている。このため、継続的に設計対応が不可能な火山事象の発電所への影響や巨大噴火の可能性等に資する知見の拡充を行い、従前の研究等で示されたマグマ溜まりの位置等のデータの不確実性の低減を図るとともに、火山活動評価法の妥当性を評価し、留意点を整理する必要がある。また、評価対象火山の噴火規模の評価についても、規模を類推するための具体的な方法は提示されておらず評価上の課題であるため、継続的に火山活動評価に資する知見の拡充を図ることが重要である。後述するように、近年、過去にカルデラを形成するような大規模な噴火を起こしていない火山の中から、火山岩の組成に基づく地球化学的特徴を見分けることで、カルデラを形成するような噴火を起こす可能性が高い火山を識別できる可能性を提案した知見<sup>(1)</sup>が示された。このような知見は検討対象火山の噴火規模推定のための情報の一つとなり得るため、国内外の火山のデータを再整理したうえで、提案された手法の適用<sup>応</sup>性について調査研究を行うことが重要である。</p> <p>また、評価ガイドでは、設計対応が不可能な火山事象が第四紀（約258万年前以降）に敷地に到達した可能性のある施設を有する事業者に対して、「評価時から状態の変化の検知により評価の根拠が維持されていることを確認することを目的」とした火山モニタリングを行い、「モニタリングにより観測データの有意な変化を把握した場合には、状況に応じた判断・対応を行うこととする」と記載している。そのうえで、事業者から保安規定に基づいて提出される火山活動のモニタリング評価結果に対し、原子力規制庁（以下「規制庁」という。）では、原子炉安全専門審査会原子炉火山部会においてまとめられた「火山モニタリングにおける『観測データに有意な変化があったと判断する目安』について 報告書」<sup>(2)</sup>に照らし、評価がなされている。このような状況から、規制庁においても、引き続き、国内外の火山研究の最新の動向及び知見を収集するとともに、これまでに得られた研究成果を踏まえつつ、特にモニタリング評価に資する低頻度の自然現象である巨大噴火のプロセスに関する知見の拡充を図ることが重要である。そして、火山モニタリング評価法の妥当性を評価し、留意点を明らかにする必要がある。</p> <p>さらに、評価ガイドでは、降下火砕物の影響評価における確認事項並びに設計及び運用等による安全施設の機能維持が可能かどうかを評価するための気中降下火砕物濃度の推定方法が例示されている。そのうえで、同審査では、降下火砕物による建屋及び機器への影響を確認している。しかしながら、実際の気中降下火砕物濃度の観測事例、降灰時の粒子の挙動、凝集の効果等について、調査又は実証した事例が少ないため、これらに係る知見を継続的に蓄積する必要がある。</p> <p>*1：地下のマグマが一気に地上に噴出し、大量の火砕流となるような噴火であり、その規模として噴出物の量が数十 km<sup>3</sup>程度を超えるようなものをいう。</p> |       |                                                                |
| 4. 目的                                 | <p>本プロジェクトでは、「設計対応不可能な火山事象を伴う火山活動の評価」、「火山影響評価の根拠が維持されていることの確認を目的とした火山活動のモニタリング」及び「気中降下火砕物濃度の推定方法」について、その技術的根拠となる分析データを取得し、審査等での判断に資する具体的な事例となる火山活動及び火山モニタリングに係る調査・評価手法を開発するとともに、気中降下火砕物濃度推定及び実現象に基づく降下火砕物の影響評価に資する知見を蓄積することを目的とする。</p> <p>(1) 設計対応不可能な火山事象を伴う火山活動の評価に係る知見の拡充</p> <p>a. 火山活動可能性評価手法の整備に関する調査・研究</p> <p>噴火規模推定に資する火山活動評価として、噴出物の地球化学的データ（全岩化学組成、同位体組成等）を網羅的に整理し、マグマの形成プロセスの多様性等に関する知見を蓄積する。</p> <p>(2) 火山活動のモニタリングに係る知見の拡充及び評価手法の精度向上</p> <p>a. 地球物理学的手法による火山モニタリング評価の知見蓄積に関する調査・研究</p> <p>現在のカルデラ火山の地下の様子及びその時空間変化を精度よく捉えて、火山モニタリング評価ができるよう、定常的な反射法探査手法、海域での地殻変動や地震活動等に関するデータ等を蓄積する。</p> <p>b. 物質科学的手法による火山モニタリング評価の知見蓄積に関する調査・研究</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |                                                                |

|           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|           | <p>噴出物の分析を基に過去から現在までのマグマ溜まりの時空間変化を精度よく捉え、また、マグマ溜まり由来の火山ガス成分を含む地下水の分析を基に現在のマグマ溜まりの状況を評価できるよう、マグマの蓄積深度、蓄積時間等に関するデータ、地下水の希土類元素組成データ等を蓄積する。</p> <p>(3) 気中降下火砕物濃度の推定方法</p> <p>a. 気中降下火砕物濃度の推定方法の整備に資する知見蓄積のための調査</p> <p>リアルタイムでの降灰観測データを蓄積するとともに、気中降下火砕物濃度の推定に資する観測方法の適用性について検討する。さらに、降下火砕物のプラント機器、特に吸気フィルタへの影響について、粒子の挙動や凝集の効果による影響に資する知見を蓄積する。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 5. 知見の活用先 | <p>本プロジェクトで得られた知見は、火山影響評価の以下の項目に関する審査等での判断に資する具体的な事例として活用される。</p> <p>(1) 「将来の火山活動可能性」(評価ガイド 3.3) <b>←の完新世に活動を行っていない火山に関する評価</b>、「火山活動の規模と設計対応不可能な火山事象の評価」(評価ガイド 4.1(3)) <b>の検討対象火山の噴火規模推定に関する評価</b></p> <p>(2) 「火山活動の可能性評価」(評価ガイド 4.1(2)) <b>の原子力発電所の運用期間中における検討対象火山の活動の可能性の総合的評価</b>、「火山影響評価の根拠が維持されていることの確認を目的とした火山活動のモニタリング」(評価ガイド 6.) <b>の評価時からの状態の変化の検知</b></p> <p>(3) 「個別評価の結果を受けた原子力発電所への火山事象の影響評価」の降下火砕物(評価ガイド 5.1) <b>の直接的影響の確認事項</b>、「気中降下火砕物濃度の推定手法」(評価ガイド添付 1) <b>の参考とするパラメータ値</b></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 6. 安全研究概要 | <p>本プロジェクトの研究は、「原子力規制委員会における安全研究の基本方針」(令和元年 5 月 29 日原子力規制委員会決定)における安全研究のうち以下の分類に基づき実施する。</p> <p>① 規制基準等の整備に活用するための知見の収集・整備(以下「分類①」という。)</p> <p>② 審査等の際の判断に必要な知見の収集・整備(以下「分類②」という。)</p> <p>(1) 設計対応不可能な火山事象を伴う火山活動の評価に係る知見の拡充</p> <p>a. 火山活動可能性評価手法の整備に関する調査・研究【分類①】</p> <p>火山活動可能性評価手法として、過去にカルデラを形成するような大規模な噴火を起こしていない火山の中から、火山岩の地球化学的特徴を用いてカルデラを形成するような噴火を起こす可能性が高い火山を識別できる可能性を提案した知見<sup>(1)</sup>が示されたが、検討対象が 54 火山(日本国内は 1 火山)に留まっており(図 1)、また、課題としてマグマ形成プロセスに関する検討の必要性も示されている<sup>(1)</sup>。したがって、十分な量の化学組成データに基づく当該手法の適用性の検討を行うため、国内外の火山の地球化学的データの収集・分析を行い、検証を行う。検証結果を踏まえ、巨大噴火を起こした火山及び巨大噴火を起こしていない火山を対象とした野外調査を行い、採取した岩石試料を用いた分析によって全岩化学組成データ、同位体組成データ等を取得し、噴火規模推定に資するマグマ形成プロセスの多様性(地殻物質の同化作用*<sup>2</sup>、マグマの混合作用*<sup>3</sup>等)等の知見を得る(図 2)。特に、国内については詳細な火山活動史が明らかになっている火山が多いことから、マグマ生成場の時空間変化についての傾向分析も行う。以上の知見をもとに、マグマの形成プロセスを考慮した噴火規模推定に資する火山活動可能性評価手法の整備、その適用性の範囲及び留意点を取りまとめる。</p> <p>*2: マグマが地殻の岩石を取り込んでマグマ自身の性質が変化すること。</p> <p>*3: 異なる性質のマグマ同士が混合して別のマグマが生成すること。</p> |



Weber & Sheldrake (2022) <sup>(1)</sup>より

図1 分析対象とした火山の分布と全岩化学組成のヒストグラムの例（オレンジ：カルデラ火山、ブルー：成層火山）

54 火山（日本国内は1 火山）について火山岩の地球化学的特徴を調査した結果、カルデラ形成を引き起こした火山では、多様なマグマを噴出している（ $\text{SiO}_2$  含有量の幅が広い）のに対し、ほとんどの成層火山ではそのような傾向がない（ $\text{SiO}_2$  含有量の幅が狭い）ことを示し、カルデラを形成するような噴火を起こす可能性が高い火山を識別できる可能性が示された。

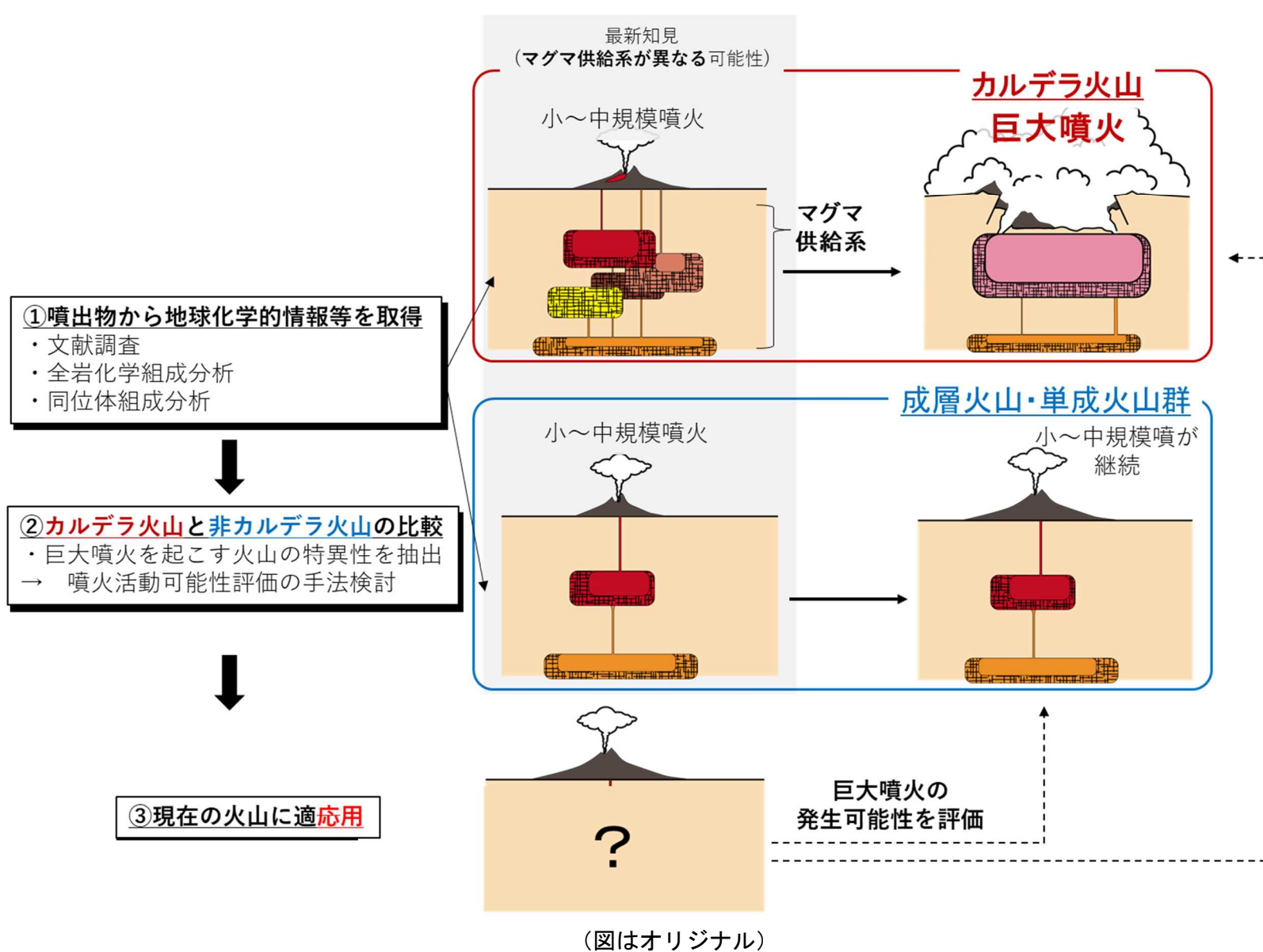


図2 「噴火規模推定に資する火山活動評価」に資するマグマの形成プロセスの多様性の検討方法

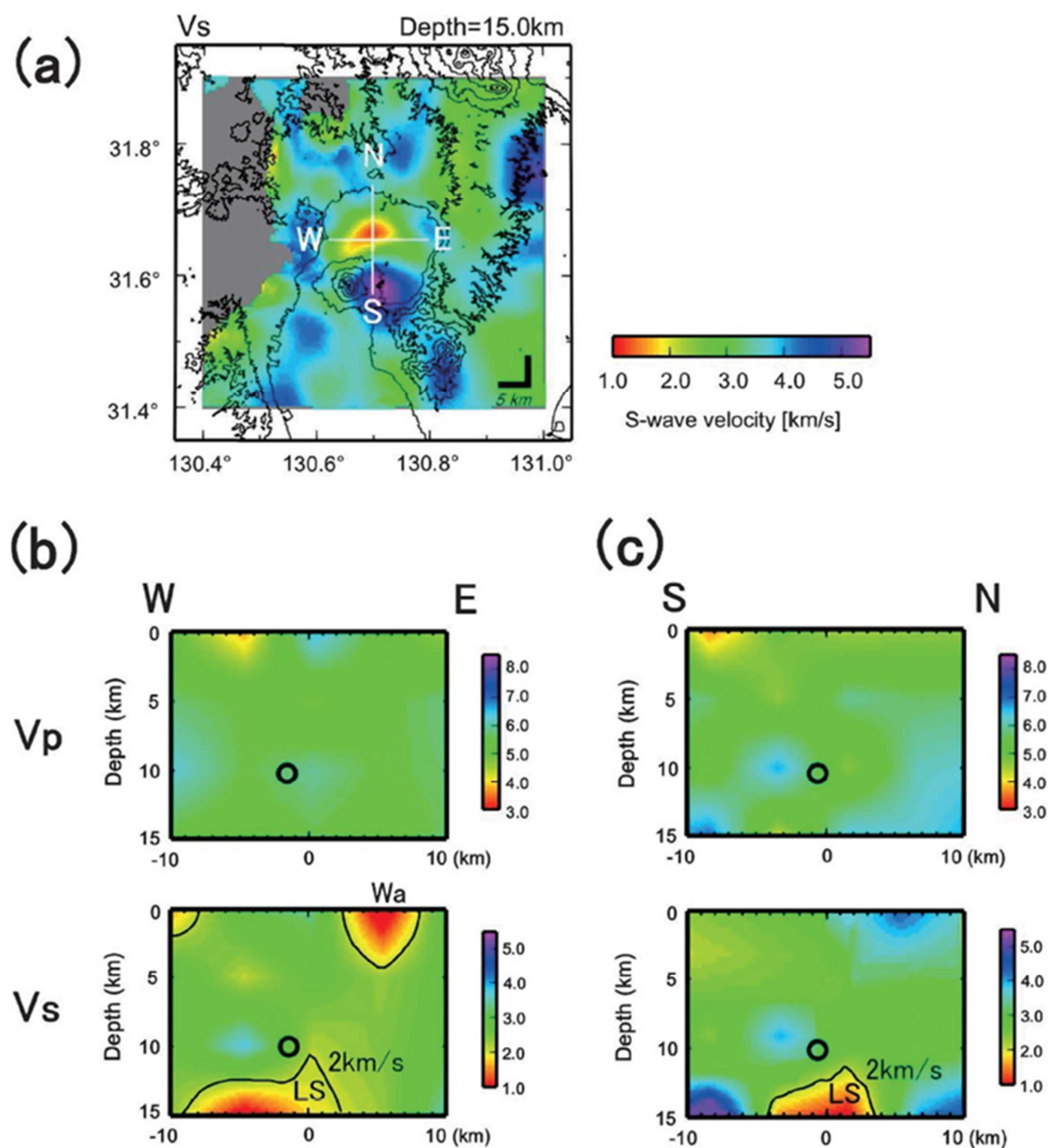
日本国内の火山の過去の噴火に伴う噴出物の地球化学的情報等を網羅的に収集し、カルデラを形成するような噴火を起こす可能性が高い火山を識別できる可能性を提案した知見 <sup>(1)</sup> の日本の火山への適用可能性を確認するとともに、当該知見 <sup>(1)</sup> をベースに巨大噴火の発生可能性評価の手法をとりまとめ、現在の火山に適用する。

(2) 火山活動のモニタリングに係る知見の拡充及び評価手法の整備

a. 地球物理学的手法による火山モニタリング評価の知見蓄積に関する調査・研究【分類①及び分類②】

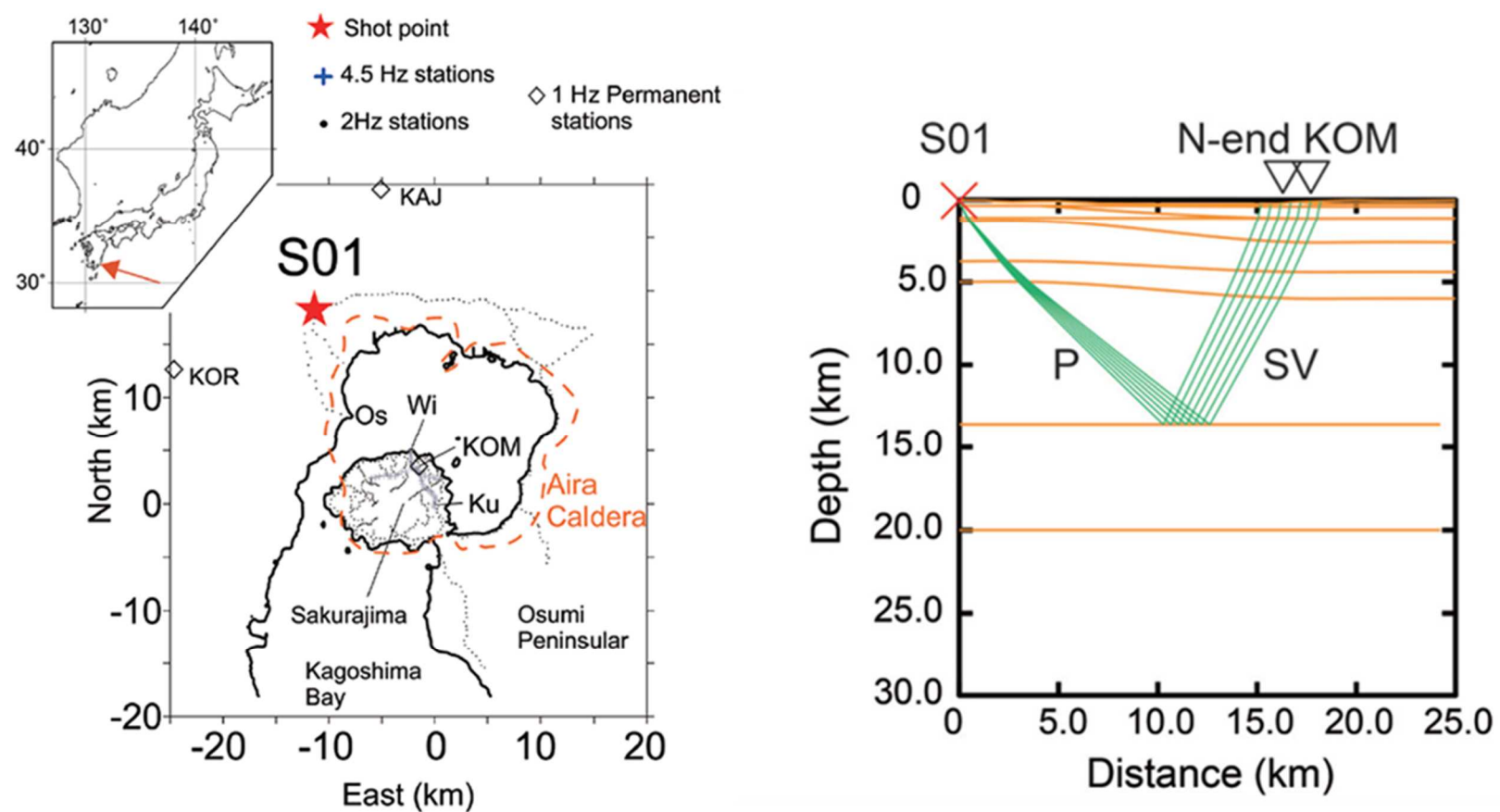
前安全研究プロジェクト（大規模噴火プロセス等の知見の蓄積に係る研究（H31-R5））では、自然地震波観測データに基づく始良カルデラ下の3次元地震波トモグラフィ解析により、カルデラ下の中央部の深さ15 kmにおいてせん断波（S波）速度が顕著に遅い領域が存在することが明らかになったとともに<sup>(3)</sup>（図3）、人工地震を用いた反射法探査によって始良カルデラ下の深さ13.6 kmからの反射波を捉えられたことを示す結果が得られた<sup>(4)</sup>（図4）。これら成果は、委託先から論文が出され、始良カルデラ下に存在する低速度領域内の物性変化を検知できる可能性を示した。また、海域での地盤変動観測を行うための装置の設計・建造を行い、海底に同装置を設置した<sup>(5)</sup>（図5）。

本プロジェクトでは、委託事業において始良カルデラ下で見出された低速度領域の反射面を定常的に捉えるための長期連続反射法探査として、これまでに実施した試験用水槽における試験発振等の基礎実験に係る成果<sup>(1)</sup>を踏まえ、シミュレーション、人工地震の発振源の設計・建造等を行い、定常的な火山モニタリングに資する観測手法を整備する。また、海底地盤変動観測装置を用いた観測を実施し、データを取得・蓄積するとともに、取得したデータについて年単位での季節変動の評価を行い、その影響を除去したうえで、火山モニタリングに資する定量的な観測データの取得手法を実証する（図6）。さらに、継続的に実施している自然地震及び地盤変動の観測データを取得・蓄積するとともに、過去の観測データと併せて、始良カルデラ下で見出されている低速度領域等、地下構造やマグマ活動の時空間変化を明らかにする。以上の調査・研究結果を踏まえ、規制庁実施研究において火山モニタリングの評価に資する知見及び評価手法をとりまとめる。



為栗ほか（2022）<sup>(3)</sup>より

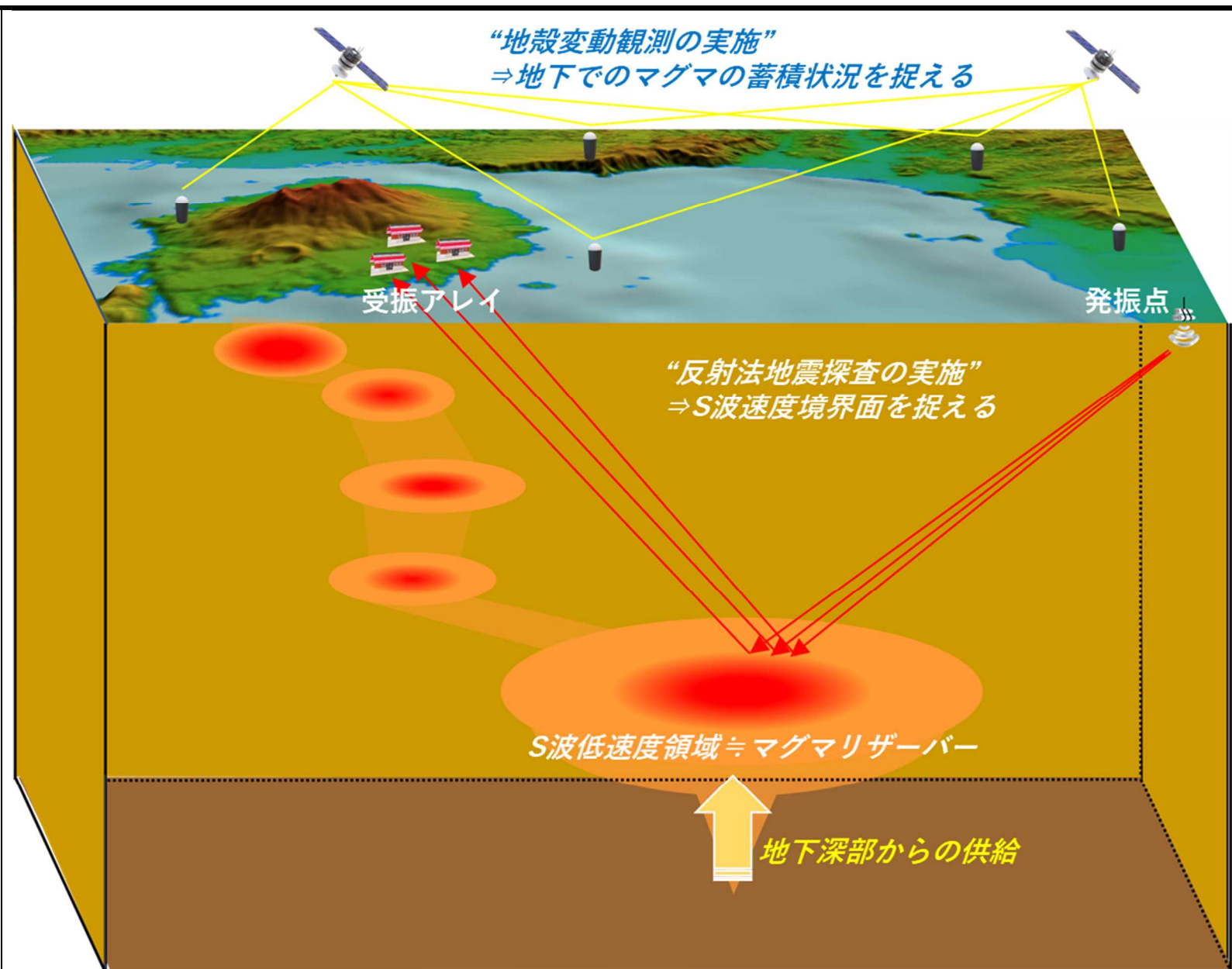
図3 始良カルデラのP波速度(Vp)とS波速度(Vs)の鉛直断面図



筒井ほか (2021) <sup>(4)</sup> より  
 図4 始良カルデラ下の深さ 13.6 kmの変換反射波の波線経路図



図5 海底地盤変動観測装置



(図はオリジナル。鳥観図は地理院地図3Dで作成。地下構造は京都大学(2024)<sup>(6)</sup>に基づく。)

図6 本研究で扱う地球物理学的手法による火山モニタリング評価手法

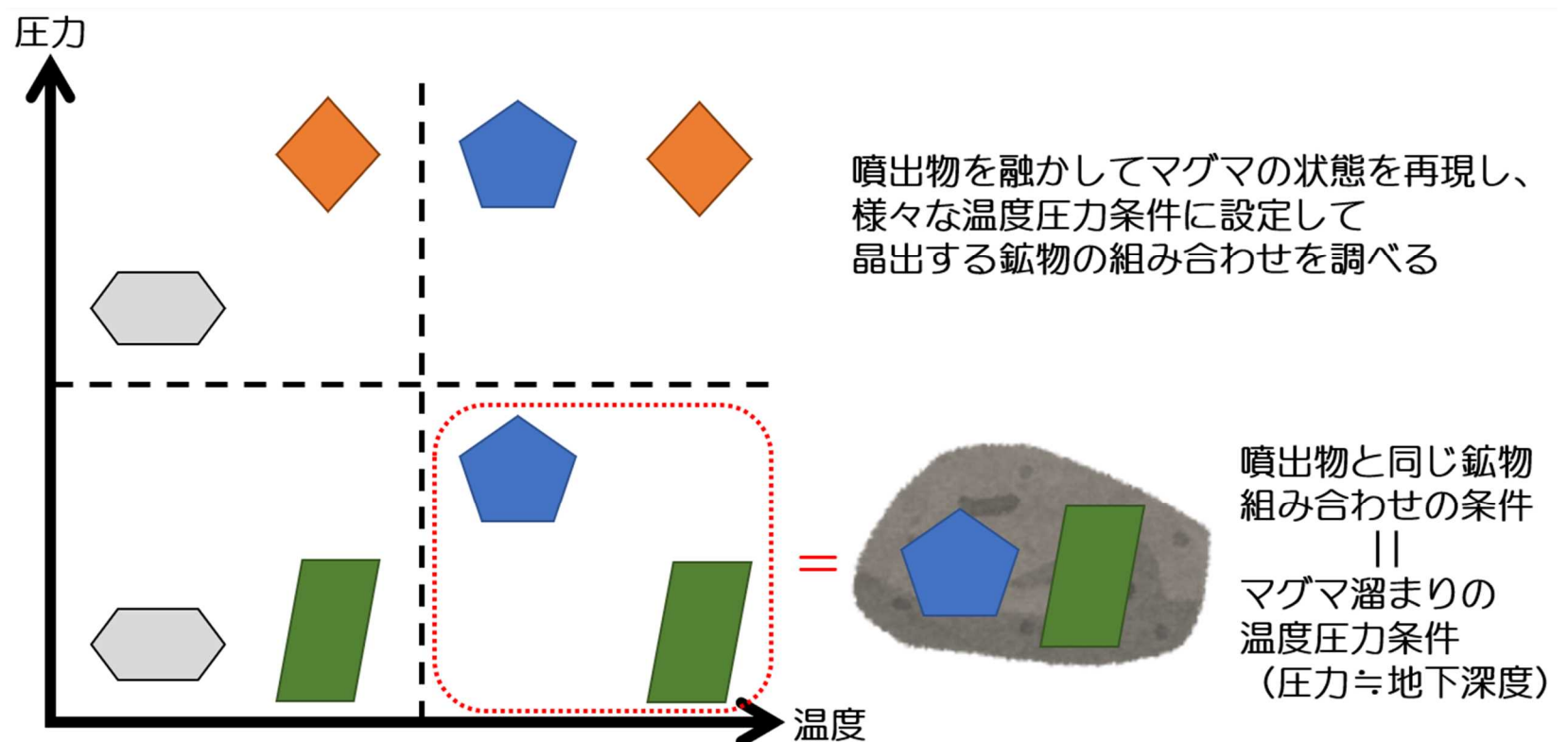
b. 物質科学的手法による火山モニタリング評価の知見蓄積に関する調査・研究【分類①及び分類②】

物質科学的手法として巨大噴火を起こした火山及び噴火頻度の高い火山を対象とした野外調査を行い、全岩化学組成データ、斑晶鉱物の化学組成データ、年代データ等を取得する。具体的には、マグマ溜まりの滞留位置に関する知見を蓄積することを目的として、適切な噴出物試料を採取し、規制庁実施研究及び委託事業において斑晶鉱物<sup>\*4</sup>/メルト包有物<sup>\*5</sup>組成分析、委託事業において高温高压相平衡実験<sup>\*6</sup>等を実施する(図7)。マグマの滞留時間に関する知見を蓄積することを目的として、適切な噴出物試料を採取し、規制庁実施研究及び委託事業において元素拡散組織の解析等を実施する(図8)。これらを踏まえ、マグマ滞留の物理条件、滞留時間等を推定し、マグマ溜まりの時空間変化に資する知見を蓄積するとともに、カルデラシステムの時間進展の検討を行う。また、委託事業において地下のマグマの状態推定に関する知見を蓄積することを目的として、適切な地下水試料を採取し、現在の地下のマグマの種別の判別の検討を行う。これらの知見をもとに、マグマ溜まりの時空間変化に資する知見を拡充するとともに、地下のマグマの状態把握に資するマグマ種別判別手法を提示し、規制庁実施研究において物質科学的見地による火山モニタリング評価に資する情報としてとりまとめる。

\*4：火山岩において、マグマ溜まり内で時間をかけて晶出・成長するため、石基鉱物（マグマが急激に冷やされた際に晶出する微小な鉱物）と比べて大きな鉱物。

\*5：斑晶鉱物が成長する際に何らかの要因で結晶化しないまま鉱物中に取り込まれてしまったメルト（マグマのうち液体の部分）。取り込まれることによって周囲のマグマと隔たれるため、取り込まれた時点でのマグマ溜まりのメルトの状態を保持している場合が多い。

\*6：マグマ溜まりの状態（高温高压）を再現し、対象のマグマ組成において各鉱物が安定して存在する平衡条件を明らかにする実験。

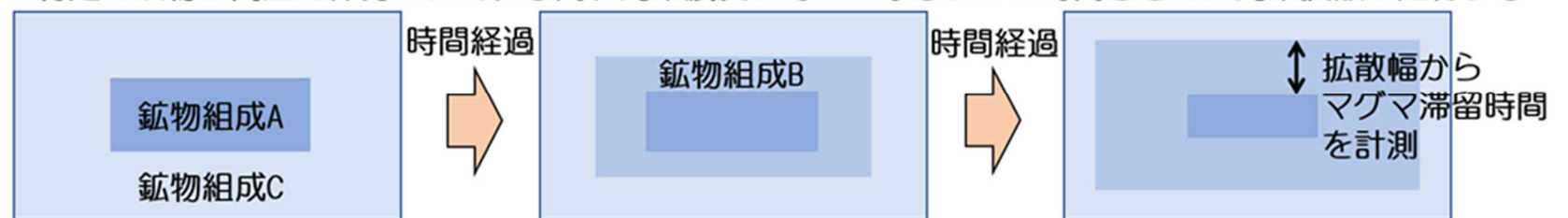


(図はオリジナル)

図7 高温高压相平衡実験を用いたマグマ溜まり滞留位置推定方法の概要

噴出物の斑晶鉱物/メルト包有物の組成等の状態を分析によって明らかにした後、噴出物を設定した温度圧力条件で保持し、形成される斑晶鉱物/メルト包有物の状態を調査する。それを繰り返し、噴出物の斑晶鉱物/メルト包有物の状態を再現できる温度圧力条件を特定することで、噴出物が滞留していたマグマ溜まりの位置を特定することができる。

特定の鉱物は高温で保持されている間、元素濃度が均一になるように時間とともに元素拡散が進行する



(図はオリジナル)

図8 元素拡散を用いたマグマ溜まり滞留時間推定方法の概要

一般に、鉱物はマグマ溜まり内で晶出・成長し、その化学組成は鉱物の周囲に存在するマグマの組成を反映して変化する。マグマの組成変化により鉱物の組成が変化した場合、一部の鉱物はマグマ溜まり内で高温状態に保持されている間、変化前と変化後の組成の中間組成となるように元素拡散が進行する。拡散の進行は時間に依存するため、拡散幅を調査することでマグマ組成が変化してから拡散が停止する(=噴火によって地表に噴出し、高温状態が保持されなくなる)までの時間を測ることができる。

### (3) 気中降下火砕物濃度の推定方法の整備

#### a. 気中降下火砕物濃度の推定方法の整備に資する知見蓄積のための調査【分類①】

気中降下火砕物濃度の推定方法として、実際に噴火をしている火山において、降灰中の火山灰の量、粒子の数及び粒子の落下速度のリアルタイム観測を行い、知見を蓄積するとともに、観測機器の改良を行い、より効率的にデータを取得できるように移動観測体制を強化する。得られたデータを分析し、そのデータを基に降灰時の凝集と粒子の浮遊現象に関する調査を行い、火山灰の気中濃度推定に資する知見を蓄積する。これらの知見をもとに、濃度推定に資する手法の適用性等の検討及び整備を行うとともに、火山灰のフィルタ等への吸引挙動に関する調査等を実施し、実現象に基づいた影響評価に資する知見を蓄積する(図9)。

|                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                         | <div> <div>観測手法の適用性</div> <div>①光学式ディストロメーター及び吸入型粉塵採取装置を用いた降灰観測</div> <div> <ul style="list-style-type: none"> <li>降下火山灰粒子の粒径及び落下速度のリアルタイム観測</li> <li>地表付近に浮遊する火山灰濃度の観測</li> <li>直接採取した火山灰試料データとの比較</li> <li>観測機器の改良</li> </ul> </div> <div>↓</div> <div>②濃度推定手法の適用性の検討</div> <div>↓</div> <div>機器への影響検討</div> <div>①粒子挙動及び凝集に関する検討</div> <div>↓</div> <div>②実現象に基づく吸気フィルタ等への影響評価</div> </div> <div> <div> <div>(a) 観測対象とする桜島火山</div> <div>(b) 降灰観測に係る観測機器一式（左から採取用バケツ、光学式ディストロメーター、吸入型粉塵採取装置）</div> <div>(c) 光学式ディストロメーターの測定原理に係る概念図（水平平板状のレーザー検出面を発光部と受光部の間に形成。降下粒子が検出面を通過する際に発生する電圧降下とその継続時間に基づいて、当該粒子の粒径と落下速度を算出。）</div> </div> <div>(図はオリジナル)</div> <div>図9 降灰観測及び機器への影響に関する調査の概要</div> </div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <div>7. 成果目標と実施計画</div> | <div> <div>(1) 設計対応不可能な火山事象を伴う火山活動の評価に係る知見の拡充</div> <div>a. 火山活動可能性評価手法の整備に関する調査・研究</div> <div>成果目標：マグマ形成プロセスの多様性を考慮した火山活動可能性評価手法を整備する。</div> <div>実施計画：</div> <div> <ul style="list-style-type: none"> <li>既往手法の適用性の確認を行うことを目的として、国内外の火山の地球化学的データを取得し、データの整理を行い、適用性の分析、課題抽出を行う。</li> <li>上記成果目標を達成するため、試料採取、全岩化学組成分析、同位体組成分析等を行い、マグマ生成場の時空間変化の傾向分析及び地殻の熱的進化過程の検討を行う。</li> <li>マグマ形成プロセスの多様性に関するデータの取りまとめを行い、噴火規模推定に資する火山活動可能性評価に資する知見拡充及び評価手法を整備する。</li> <li>既往手法に関する適用性については、令和9年度までにデータを整理し、論文等に取りまとめる。</li> <li>マグマ形成プロセスの多様性、噴火規模推定に資する火山活動可能性評価に資する知見拡充及び評価手法の整備については、令和11年度以降に論文等で取りまとめる。</li> </ul> </div> <div>(2) 火山活動のモニタリングに係る知見の拡充及び評価手法の整備</div> <div>a. 地球物理学的手法による火山モニタリング評価の知見蓄積に関する調査・研究</div> <div>成果目標：地下構造探査等に基づく地下のマグマ活動の評価を考慮した地球物理学の見地による火山モニタリングの評価手法を整備する。</div> <div>実施計画：</div> <div> <ul style="list-style-type: none"> <li>委託事業において長期間において繰り返し反射法探査を行うための発振設備を建造し、発振実験を実施する（R7～R10年度）。</li> <li>委託事業において発振される波形の安定性を検証するとともに、観測された反射波の振幅等の変化の検証を行う。また、通常状態と判断するために参照する波形について、シミュレーション等を実施し構築する（R8～R10年度）。</li> <li>委託事業において海底地盤変動観測装置による地盤変動観測データの評価を実施する（R7～R10年度）。</li> <li>委託事業において継続的に実施している地震観測及び地殻変動観測によるデータ蓄積を行うとともに、カルデラ周辺での地震観測結果を精査し、地下のマグマ活動の変化について検討する（R7～R10年度）。</li> <li>以上の調査・研究結果で得られた能動的な地下構造調査手法及び火山モニタリング評価に資する知見については、令和11年以降に NRA 技術ノート等に取りまとめる。</li> </ul> </div> <div>b. 物質科学的手法による火山モニタリング評価の知見蓄積に関する調査・研究</div> <div>成果目標：岩石学的分析に基づくマグマ溜まりの時空間変化等の評価を考慮した物質科学的見地による火山モニタリング評価手法を整備する。</div> <div>実施計画：</div> <div> <ul style="list-style-type: none"> <li>マグマ溜まりの滞留位置に関する知見を蓄積することを目的として、適切な試料を採取し、規制庁実施研究及び委託事業において斑晶鉱物/メルト包有物組成分析、委託事業において高温高压相平衡実験等を実施する（R7～R9年度）。</li> <li>マグマの滞留時間に関する知見を蓄積することを目的として、適切な試料を採取し、規制庁実施研究及び委託事業において元素拡散組織の解析等を実施する（R7～R9年度）。</li> <li>上記の知見を踏まえ、規制庁実施研究及び委託事業においてマグマ滞留の物理条件、滞留時間等を推定し、カルデラシステムの時間進展の検討を行う（R10年度）。</li> <li>規制庁実施研究において得られたマグマ溜まりの時空間変化に資する知見については、令和11年以降に論文等に取りまとめる。</li> </ul> </div> </div> |

- ・委託事業で得られた地下のマグマの状態把握に資するマグマ種別判別手法及び物質科学的見地による火山モニタリング評価に資する知見については、令和11年度以降にNRA技術ノート等に取りまとめる。

(3) 気中降下火砕物濃度の推定方法の整備

a. 気中降下火砕物濃度の推定方法の整備に資する知見蓄積のための調査

成果目標：気中降下火砕物濃度の推定及び吸気フィルタ等のプラント機器へ影響に関する降灰時の粒子の挙動や凝集の程度等に関する知見を蓄積する。

実施計画：

- ・降灰観測を実施するとともに、より効率的にデータを取得できるように観測機器の改良を行う。
- ・得られた観測データを基に、気中降下火砕物濃度の推定に資する観測手法の適用性を検討し、令和9年度までに降灰時の気中降下火砕物濃度及び火山灰粒子の凝集・浮遊現象について論文等にとりまとめる。
- ・観測によって得られた粒子の挙動や凝集について分析を行い、吸気フィルタ等への吸引挙動に関する調査等を行う。
- ・実現象に基づいた影響評価に資する知見を蓄積し、令和11年度以降に論文等に取りまとめる。

行程表

| 項目                                         | R7年度                                                                                                                                                                                                                  | R8年度                                         | R9年度                                                                                 | R10年度                                                           | R11年度                                                           |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| (1) a. 火山活動可能性評価手法の整備に関する調査・研究             | <div>▽学会発表</div> <div>▽論文投稿</div> <div>▽学会発表</div> <div>▽論文作成</div>                                                                                                                                                   |                                              |                                                                                      |                                                                 |                                                                 |
|                                            | <div>＜既往手法の適用性（規制庁）＞</div> <div>・国内外の火山の地球化学的データの取得</div>                                                                                                                                                             | <div>・既往手法の適用性の分析及び課題抽出</div>                | <div>＜マグマ形成プロセスの多様性（規制庁）＞</div> <div>・試料採取</div> <div>・室内分析（全岩化学組成分析、微量元素組成分析）</div> | <div>・室内分析（微量元素組成分析、同位体比分析）</div> <div>・マグマ生成場の時空間変化の傾向分析</div> | <div>・追加分析</div> <div>・地殻の熱的進化過程の検討</div> <div>・多様性の要因の検討</div> |
| (2) a. 地球物理学的手法による火山モニタリング評価の知見蓄積に関する調査・研究 | <div>＜手法の検討（規制庁）＞</div> <div>・火山活動可能性評価手法の検討</div> <div>・手法まとめ、課題整理、論文作成</div>                                                                                                                                        |                                              |                                                                                      |                                                                 |                                                                 |
|                                            | <div>▽NRA技術ノート等の作成</div>                                                                                                                                                                                              |                                              |                                                                                      |                                                                 |                                                                 |
| (2) b. 物質科学的手法による火山モニタリング評価の知見蓄積に関する調査・研究  | <div>＜反射法地震探査（委託）＞</div> <div>・発振設備建造、参照波形シミュレーション</div> <div>・発振実験、波形安定性の検証、参照波形の構築</div> <div>・発振実験、波形安定性の検証、参照波形の構築</div> <div>・発振実験、反射波変化の検証</div> <div>・能動的な地下構造調査手法の提示</div>                                    |                                              |                                                                                      |                                                                 |                                                                 |
|                                            | <div>＜自然地震観測、地殻変動観測（委託）＞</div> <div>・データ蓄積、カルデラ周辺地震の精査</div> <div>・データ蓄積、カルデラ周辺地震の精査</div> <div>・データ蓄積、カルデラ周辺地震の精査</div> <div>・データ蓄積、地下構造変化の検討、海底地盤変動観測の評価</div> <div>・データ蓄積</div> <div>・火山モニタリング評価に資する情報のとりまとめ</div> |                                              |                                                                                      |                                                                 |                                                                 |
| (2) b. 物質科学的手法による火山モニタリング評価の知見蓄積に関する調査・研究  | <div>▽学会発表</div> <div>▽論文作成</div> <div>▽NRA技術ノート等の作成</div>                                                                                                                                                            |                                              |                                                                                      |                                                                 |                                                                 |
|                                            | <div>＜マグマ溜まりの時空間変化推定（規制庁）＞</div> <div>・元素拡散解析</div> <div>・斑晶鉱物/メルト包有物分析</div>                                                                                                                                         | <div>・元素拡散解析</div> <div>・斑晶鉱物/メルト包有物分析</div> | <div>・元素拡散解析</div> <div>・斑晶鉱物/メルト包有物分析</div>                                         | <div>・マグマ滞留の滞留時間の推定</div>                                       | <div>・火山モニタリング評価に資する情報のとりまとめ</div>                              |
| (2) b. 物質科学的手法による火山モニタリング評価の知見蓄積に関する調査・研究  | <div>＜マグマ溜まりの時空間変化推定（委託）＞</div> <div>・分析対象物質の選定</div> <div>・斑晶鉱物/メルト包有物分析（珪長質側）</div>                                                                                                                                 |                                              |                                                                                      |                                                                 |                                                                 |
|                                            | <div>・元素拡散解析</div> <div>・高温高压相平衡実験</div> <div>・出発物質の選定</div> <div>・斑晶鉱物/メルト包有物分析（苦鉄質側）</div> <div>・マグマ滞留の物理条件の推定</div> <div>・マグマ滞留システムの時間進展の検討</div> <div>・地球物理学的観測とマグマ貯留システムの対応</div>                                |                                              |                                                                                      |                                                                 |                                                                 |

|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                     |  |                                                                                                                            |       |       |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | <div>←地球化学的データによるマグマの種別判定（委託）→</div> <div><div>・試料採取<br/>・主溶存元素等の化学分析</div><div>・試料採取<br/>・主溶存元素等の化学分析</div><div>・希土類元素解析<br/>・化学的ベースラインの把握</div><div>・希土類元素を用いたマグマ種別判定法の検討</div><div>・確度の高いマグマ種別判定法の検討</div></div> |  |                                                                                                                            |       |       |
|         | （３） a. 気中降下火砕物濃度の推定方法の整備に資する知見蓄積のための調査                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ▽学会発表                                                                                                                                                                                                               |  | ▽論文投稿                                                                                                                      | ▽学会発表 | ▽論文作成 |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | <div>←観測手法の適用性（規制庁）→</div> <div><div>・降灰観測<br/>・観測機器の改良</div><div>・降灰観測<br/>・観測機器の改良</div><div>・降灰観測<br/>・濃度推定方法の適用性の検討</div></div>                                                                                 |  |                                                                                                                            |       |       |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | <div>▽規制庁実施研究<br/>▼委託研究の取りまとめ</div>                                                                                                                                                                                 |  | <div>←機器への影響検討（規制庁）→</div> <div><div>・粒子挙動及び凝集に関する検討</div><div>・粒子挙動及び凝集に関する検討</div><div>・実現象に基づく吸気フィルタ等への影響評価</div></div> |       |       |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                     |  |                                                                                                                            |       |       |
| 8. 実施体制 | <div>【地震・津波研究部門における実施者】</div> <div><div>○ 西来邦章 主任技術研究調査官（実施項目（２）a 関係）</div><div>○ 廣井良美 技術研究調査官（実施項目（２）b 関係）</div><div>○ 佐藤勇輝 技術研究調査官（実施項目（１）a 関係）</div><div>○ 大野鷹士 技術研究調査官（実施項目（３）a 関係）</div><div>金田泰明 技術研究調査官</div><div>安池由幸 専門職</div></div> <div>【委託研究先】</div> <div>実施項目（２）a 未定</div> <div>実施項目（２）b 未定</div> <div>【共同研究先】</div> <div>実施項目（１）a 未定</div> <div>実施項目（２）b 未定</div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                     |  |                                                                                                                            |       |       |
| 9. 備考   | <div>文 献</div> <div><div>（１） Weber, G., Sheldrake T.E., “Geochemical variability as an indicator for large magnitude eruptions in volcanic arcs” , Scientific Reports, Vol. 12, 2022. doi: 10.1038/s41598-022-19902-1</div><div>（２） 原子炉安全専門審査会、原子炉火山部会、火山モニタリングにおける「観測データに有意な変化があったと判断する目安」について 報告書、令和２年</div><div>（３） 為栗健、八木原寛、筒井智樹、井口正人、「高分解能な３次元地震波速度構造解析による始良カルデラ下のイメージング」、火山、67巻、1号、pp. 69-76、令和３年</div><div>（４） 筒井智樹、為栗健、井口正人、「人工地震記録による始良カルデラ西部の地殻内Ｓ波地震反射面の推定」、火山、66巻、2号、pp. 71-81、令和３年</div><div>（５） 京都大学防災研究所、令和４年度原子力規制庁委託研究成果報告書 原子力施設等防災対策等委託費（火山性地殻変動と地下構造及びマグマ活動に関する研究）事業、228p、令和５年</div><div>（６） 京都大学防災研究所、令和５年度原子力規制庁委託研究成果報告書 原子力施設等防災対策等委託費（火山性地殻変動と地下構造及びマグマ活動に関する研究）事業、332p、令和６年</div></div> |                                                                                                                                                                                                                     |  |                                                                                                                            |       |       |

研究計画（案）

|                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |       |                                                                                     |
|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. プロジェクト<br>(始期：R7年度<br>終期：R10年度) | 5. 地震作用に対する原子炉建屋等の構造部材の耐力評価手法の適用性等に関する研究                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 担当部署  | 技術基盤グループ<br>地震・津波研究部門                                                               |
|                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 担当責任者 | 山崎宏晃 上席技術研究調査官                                                                      |
| 2. カテゴリー・<br>研究分野                  | 【横断的原子力安全】 A) 外部事象（地震、津波、火山等） A-2<フラジリティ関連>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 主担当者  | 平松昌子 主任技術研究調査官<br>太田良巳 主任技術研究調査官<br>森谷 寛 副主任技術研究調査官<br>山川光稀 技術研究調査官<br>土屋 隆 技術研究調査官 |
| 3. 背景                              | <p>「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（平成25年原子力規制委員会規則第5号）」及び「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈（原規技発第1306193号（平成25年6月19日原子力規制委員会決定））」（以下「設置許可基準規則解釈」という。）では、外部事象（地震、津波その他の自然現象、大型航空機の衝突等）に対する設計基準対象施設及び重大事故等対処施設の規制要求事項が規定されている。特に、設計基準対象施設については「地震による損傷の防止」（第4条）、「津波による損傷の防止」（第5条）、地震・津波以外の「外部からの衝撃による損傷の防止」（第6条）等において、重大事故等対処施設については「特定重大事故等対処施設」（第42条）、「重大事故等対処設備」（第43条）等において、各要求事項が規定されている。また、平成25年に改正された「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和32年法律第166号）」（以下「原子炉等規制法」という。）により、事業者に対する安全性の向上のための評価の実施が規定されている。</p> <p>原子力発電所の敷地地盤及び建物・構築物は、発電所によって多種多様であり、各発電所の条件等を踏まえて、<b>設置許可基準規則等の規制基準（以下「規制基準」という。）</b>実用発電用原子炉に係る<b>新規制基準（以下「新規制基準」という。）</b>の適合性審査が行われている。また、近年、基準地震動の増大に伴い新たな耐震評価手法が用いられつつあり、その技術的妥当性及び適用性の確認には、多大な時間が費やされることがある。このため、科学的合理性を持って効率的な審査を進めるためには、関連する技術分野の動向を把握し、安全研究によって、これまでの適合性審査等において実績の無い新たな評価手法等の妥当性及び適用性に係る知見を蓄積しておく必要がある。</p> <p>このため、<b>新規制基準</b>の適合性審査における耐震及び耐衝撃設計・評価に関する技術的課題に対して、これまで、安全研究により技術的知見を蓄積してきた。例えば、安全研究プロジェクト「外部事象に係る施設・設備のフラジリティ評価手法の高度化に関する研究」（令和3年度～令和6年度）（以下「前プロジェクト」という。）においては、接地率が小さい状態となる建物・構築物の応答評価<sup>(1)、(2)</sup>、鉄筋コンクリート造原子炉格納容器の事故時の高温状態を考慮した耐震評価<sup>(3)</sup>、質点系モデルによる建物・構築物の地震応答解析における減衰（地震動が建物等を伝わる際の振動エネルギーの低減）の設定、実機原子炉建屋に高密度に配置した地震計による地震観測記録等を用いた原子炉建屋の精緻な三次元挙動の把握<sup>(4)、(5)</sup>、地盤の液状化による地中構造物への影響<sup>(6)、(7)</sup>、剛な飛翔体衝突による建物・構築物の損傷評価手法の適用性等<sup>(8)、(9)、(10)</sup>の研究を実施し、審査の妥当性判断に資する知見等を蓄積してきた。</p> <p>原子炉建屋等の耐震評価については、近年の設計用地震力の増大に伴い、建屋基礎の浮き上がりが大きくなり、既往の浮き上がり評価とは異なる評価手法が適用されている事例もあることから、これら評価手法の適用性を把握するため接地率の低下に関する課題に対して、既往の実験結果の再現解析を実施し、浮き上がり挙動等に関する知見を蓄積してきた。しかし、浮き上がり時に発生する原子炉建屋基礎版等の面部材に作用する面外方向の荷重に対して、面部材の応力－ひずみ関係で表される材料特性の非線形性を考慮した三次元有限要素解析手法が適用されつつあるが<sup>例えば、(11)、(12)</sup>、これらの妥当性及び適用範囲等を検討した事例はほとんどなく、審査における妥当性判断等に資する技術的知見を蓄積する必要がある。また、主に、非常時における海水の通水機能を求められる鉄筋コンクリート造の地中構造物（例えば、非常用取水設備に関連する海水ポンプ基礎、海水管ダクト等）である屋外重要土木構造物等の耐震評価については、「耐震設計に関する設工認審査ガイド（原管地発第1306195号（平成25年6月19日原子力規制委員会決定））」（以下「耐震設工認審査ガイド」という。）では、構造物及び周辺地盤の非線形挙動の程度に応じて適切な地震応答解析手法を選定していることを確認することとされており、これまで、構造物周辺の礫質土地盤を対象に液状化時の地盤挙動や防潮堤等の構造物へ及ぼす影響について実験及び再現解析を実施し技術的知見を蓄積してきたが、構造物の耐震評価に必要な部材の発生応力への影響までは確認できていない。当該実験及び再現解析は水平成層地盤を対象としており、令和6年能登半島地震で大きな被害をもたらした地盤の側方流動（地震時に発生する液状化に伴い、傾斜した地盤が水平方向に大きく変位する現象）が発生するような傾斜した地盤の大きな地盤変状による構造物への影響及び当該影響の評価に用いる解析手法の適用性、保守性が明確では無く、これらに関する技術的知見を拡充する必要がある。</p> <p>また、新検査制度、安全性向上評価における原子炉建屋の現実的なフラジリティ評価<sup>例えば、(13)、(14)</sup>、国際原子力機関（IAEA）、米国原子力規制委員会（NRC）等において積極的に取り組まれているリスク評価<sup>例えば、(15)、(16)</sup>、既設の実用炉と構造形式や設置条件等が大きく異なる革新炉や新型炉の原子炉建屋の耐震評価では、原子炉建屋や周辺地盤の応答挙動等を詳細に把握する必要があることから、非線形性を考慮した三次元有限要素解析の適用が想定される。一方、これまでの安全研究では、比較的単純な構造を含んだ原子力施設を対象に地震応答解析における減衰の設定に関する既往知見の調査分析、既往実験結果の再現解析を行い、質点系解析モデルの減衰の設定に関する知見を蓄積してきたが、三次元有限要素解析モデルの減衰の設定に関する知見は十分ではない。このため、非線形性を考慮した三次元有限要素解析の適用にあたり、解析モデルの減衰の設定に係る知見を拡充する必要がある。</p> <p>一方、<b>新規制基準</b>では、竜巻飛来物、大型航空機など様々な飛翔体衝突に対する建物・構築物の耐衝撃評価が求められている。国内の原子力施設は、立地場所や敷地面積が限られ、地下埋設された重要構造物も存在し、これら施設への飛翔体衝突の影響として、構造物周辺の岩盤等への飛翔体の貫入の評価が求められるが、このような評価手法に関する知見は国内外でほとんどない。また、原子力施設の構造には、矩形断面構造の他に円筒形断面構造のような曲面を持った壁の構造物も存在するが、<b>耐衝撃評価に関する既往の知見衝突評価</b>は、表面が平坦な壁（以下「平板」という。）を対象としたものが主であり、円筒形断面構造のような表面が曲面を持った壁（以下「アーチ構造」という。）に対する<b>衝突評価</b>の知見はほとんどない。<b>そのため、評価精度の向上に資する根拠知見の</b></p> |       |                                                                                     |

|           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|           | <p><b>拡充が必要である。</b>これらの課題に対し、これまでの安全研究は一部の条件での検討に留まっており、継続して知見を蓄積する必要がある。</p> <p>これらの耐震、耐衝撃評価に関する現状を踏まえ、以下に本プロジェクトで対象とする各分野における研究課題を示す。</p> <p>(1) 耐震評価</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉建屋等については、三次元有限要素解析モデルを用いた解析手法による設計、地震リスク評価等への適用を念頭に、基準地震動のような大きな地震力が作用した際の原子炉建屋等の基礎版の評価における弾塑性解析手法の適用性、地震応答解析における減衰の設定として、既往の審査等、質点系モデルで用いられている「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987」（以下「JEAG4601-1987」という。）に基づく減衰定数の三次元有限要素解析モデルへの適用性についての知見を蓄積する必要がある。</li> <li>屋外重要土木構造物については、構造物周辺地盤の地震時の変状に大きく影響されることを踏まえ、敷地地盤の材料や締固めの程度、地下水の状況等の地盤条件や構造条件等に応じて適切な解析手法を選定するための根拠となる知見を拡充する必要がある。</li> </ul> <p>(2) 耐衝撃評価</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>建物・構築物への飛翔体衝突について、衝突時に建物・構築物の損傷状態に影響を及ぼしうる飛翔体の先端形状や剛性等の差異によるアーチ構造の構造物に対する損傷評価及び地中構造物周辺の岩盤等への飛翔体貫入による影響評価に関する知見を拡充する必要がある。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 4. 目的     | <p>本プロジェクトでは、耐震及び耐衝撃評価において、近年採用されつつある新たな評価手法の適用性等に関する技術的知見を拡充し、当該手法を適用する際の考え方を整理することを目的とする。</p> <p>(1) 建物・構築物等の耐震評価における非線形性を考慮した有限要素解析手法の適用性に関する研究</p> <p>基準地震動に対する原子炉建屋等の設計、基準地震動を超える地震動に対する建物・構築物の地震リスク評価等における原子炉建屋等の非線形性を考慮した三次元有限要素解析手法の適用性、屋外重要土木構造物等の構造物及び周辺地盤の非線形性を考慮した有限要素解析手法の適用性を確認する。</p> <p>(2) 建物・構築物等への飛翔体衝突における耐衝撃評価手法の適用性に関する研究</p> <p>先端形状や剛性等が異なる飛翔体の衝突によるアーチ構造等の特殊形状構造物の損傷及び地中構造物周辺の岩盤等への貫入に対する安全性評価手法の適用性を確認する。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 5. 知見の活用先 | <p><del>本プロジェクトでは、耐震及び耐衝撃評価において、近年採用されつつある新たな評価手法の適用性等に関する技術的知見を拡充し、当該手法を適用する際の考え方を整理することを目的とする。</del>により、規制に反映すべき新たな知見が得られた場合には、<del>現行の規制基準等への反映の検討に活用される。</del>具体的には、以下の関連する審査ガイド等への反映の要否の検討に活用される。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>(1) で得られた成果は、基準地震動に対する建物・構築物、屋外重要土木構造物等の耐震設計に係る適合性審査における解析評価手法の適用性及び妥当性の判断に資する技術的<b>知見根拠</b>として活用される（設置許可基準規則解釈別記2第4条及び耐震設工認審査ガイド）。また、地震リスク評価や安全性向上評価（原子炉等規制法第43条の3の29）の内容を確認する際の技術基盤として活用される。</li> <li>(2) で得られた成果は、安全上重要な原子力施設等への竜巻飛来物、大型航空機等による衝突影響評価に係る適合性審査における妥当性判断に資する技術的<b>知見根拠</b>として活用される（設置許可基準規則解釈第6条及び<b>原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（原規技発第13061911号（平成25年6月19日原子力規制委員会決定）</b>、設置許可基準規則解釈第42条<b>及び</b>に<b>実用発電用原子炉に係る特定重大事故等対処施設に関する審査ガイド（原規技発第1409177号（平成26年9月17日原子力規制委員会決定）</b>）<b>並びに</b>実用発電用原子炉に係る航空機衝突影響評価に関する審査ガイド（原規技発第1409178号（平成26年9月17日原子力規制委員会決定）））。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 6. 安全研究概要 | <p>本プロジェクトの研究は、「原子力規制委員会における安全研究の基本方針」（令和元年5月29日原子力規制委員会決定）における安全研究の目的のうち以下の分類に基づき実施する。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① 規制基準等の整備に活用するための知見の収集・整備（以下「分類①」という。）</li> <li>② 審査等の際の判断に必要な新たな知見の収集・整備（以下「分類②」という。）</li> <li>④ 技術基盤の構築・維持（以下「分類④」という。）</li> </ol> <p>(1) 建物・構築物等の耐震評価における非線形性を考慮した有限要素解析手法の適用性に関する研究</p> <p>a. 原子炉建屋等の基礎版や耐震壁等の面部材のせん断評価手法の適用性に関する研究【分類①及び分類②】</p> <p>耐震設計に係る設工認審査ガイドでは、建物・構築物に関する構造解析手法及び構造解析モデルに対する審査における確認事項として、「建物・構築物の耐震設計においては、適切な構造解析手法及び構造解析モデルを設定していることを確認する。」とし、適切な手法や解析モデルの設定の際に適用可能な「規格及び基準等」を示している。</p> <p>これらの規格及び基準等に基づき、これまで、原子炉建屋等の基礎版や耐震壁等の面部材を線形弾性体とみなした弾性解析による応力評価が行われてきた。しかしながら、<b>新</b>規制基準に基づく基準地震動による地震荷重の増大等から、適合性審査では、弾性解析だけではなく、鉄筋コンクリート部材に生じるひび割れ等の影響を材料の非線形特性として考慮した弾塑性解析に基づく評価結果が示されつつある。さらに、原子炉建屋基礎版の耐震評価においては、地震荷重の増大により建屋の浮き上がりに伴う基礎版の発生応力が大きくなったことから、これまで弾性解析において適用されてきた応力平均化を考慮した評価が、三次元有限要素法に基づく弾塑性解析においても適用されるようになってきている。応力平均化は、鉄筋コンクリートに生じる局部的なひび割れの発生による応力再配分を考慮し、ひび割れ領域の周辺部の応力を含めて平均化した上で部材断面の評価を行うものである。応力平均化については、評価対象部位の周辺における弾塑性解析結果による応力やひずみの発生状況等を確認した上で、その応力平均化の範囲を判断する必要があるため、今後も弾塑性解析を用いた検討は増えることが予想されることから、弾性解析との違いを踏まえた上</p> |

で、審査で採用される三次元有限要素法に基づく弾塑性解析モデルの妥当性、適用性、適用範囲を明確にし、審査において確認すべき事項を整理する必要がある。

これまで、安全研究プロジェクト「地震・津波及びその他の外部事象等に係る施設・設備のフラジリティ評価に関する研究」（平成29年度～令和2年度）において、建物・構築物等の三次元の地震応答に係る評価手法を精緻化した<sup>(17)</sup>。また、前プロジェクトにおいて、基準地震動の増大に伴い接地率が小さい状態となる建物・構築物の応答評価及び、高温状態等の影響を受けた原子炉建屋の地震荷重作用時に弾塑性挙動を示す建屋の耐震安全性評価手法の適用性に係る知見を拡充した。これまでの知見も踏まえ、本プロジェクトでは原子炉建屋の主要な構造部材である耐震壁、基礎版等の面部材のせん断評価手法に着目し、まず文献調査により、耐震壁、基礎版等の面部材のせん断評価手法に関する研究事例、課題等を調査する。そして、委託研究により解析的検討を実施し、実機を踏まえた複雑な構造や応力状態における面部材のせん断応力等の発生状況を分析する。当該委託研究成果から、規制の観点で三次元有限要素法に基づく弾塑性解析で用いられるモデル化及びせん断評価における応力平均化の妥当性、適用性、適用範囲等を明確にし、当該評価における留意事項を取りまとめる（図1）。

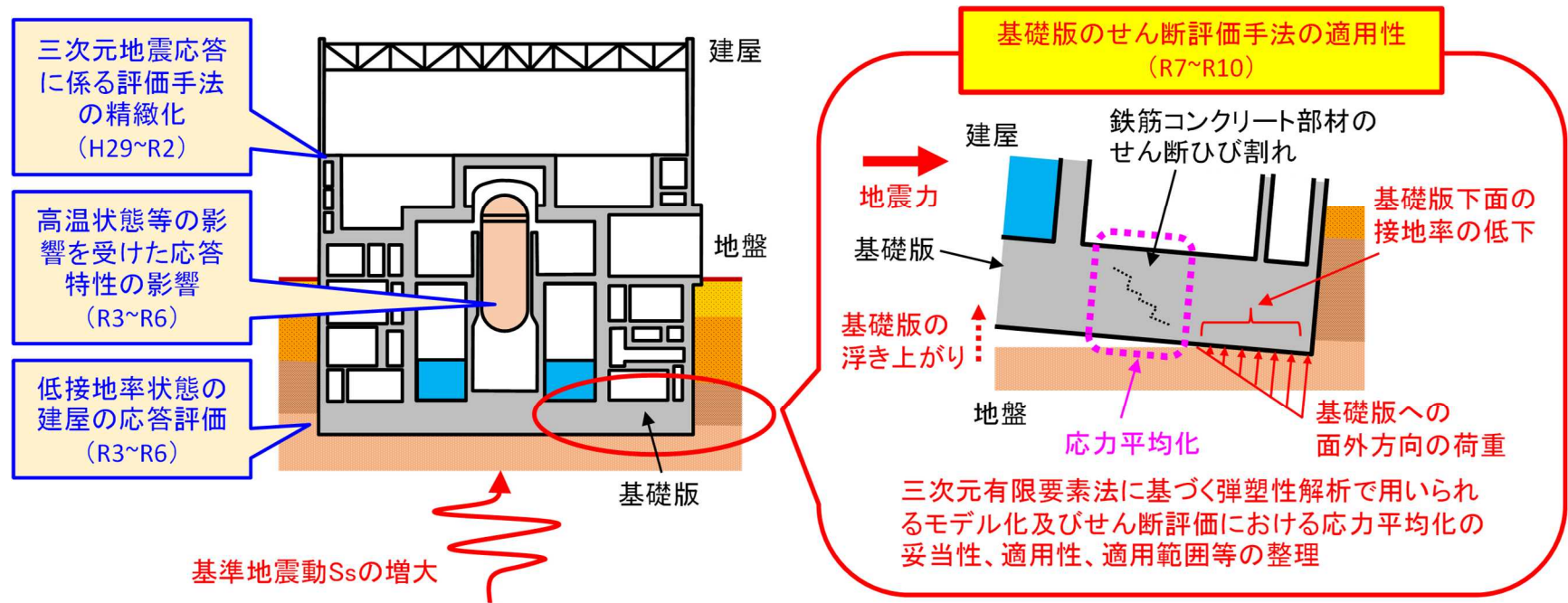


図1 三次元有限要素法に基づく弾塑性解析に係る研究概要イメージ

b. 建物・構築物の地震時動的挙動を考慮した三次元有限要素解析モデルにおける減衰の設定に関する基礎的研究【分類②及び分類④】

建物・構築物の減衰定数については、耐震設工認審査ガイドにおいて「鉄筋コンクリート造や鉄骨造等の構造形式等に応じた値を適切に設定していること」を確認することとしている。これに対し、これまでの建物・構築物の設計においては、建設工認当時から適用実績のあるJEAG4601-1987の記載（鉄筋コンクリート構造物の減衰定数の慣用値を5%として示している）を踏まえ、一般的には、鉄筋コンクリート構造物の質点系モデルによる地震応答解析において減衰定数の慣用値（5%）が用いられている。

前プロジェクトにおいては、主に、比較的構造が単純な建物・構築物を対象に、既往知見の整理・分析を行うとともに、既往の構造実験の再現解析等を実施して質点系モデルの減衰の設定に関する知見を蓄積してきた。今後、建物・構築物のフラジリティ評価における現実的な応答評価や、既設の実用炉と構造形式や設置条件が異なり、構造の複雑さや大型機器設備と建屋の一体性が増すことが想定される新型炉の耐震評価等においては、非線形性を考慮した三次元有限要素解析の活用が見込まれる一方で、その適用にあたっては、三次元有限要素解析モデルの構造物自体が有する減衰（構造減衰）の設定に関する考え方を整理する必要がある。

そこで、本プロジェクトでは、主に実験を委託研究として実施し、その成果から規制の観点で解析的検討を実施し知見を整理する。具体的には、まず、振動エネルギーの一部が地盤へ逸散することの影響を小さくした単純な構造物模型を用い、動的加力を作ることにより生じる自由振動や定常振動の実験、解析及び分析により建物自体が有する構造減衰を評価する。つぎに、上述の模型に構造部材又は重量を付加した模型を作成し、付加前後の減衰を比較することで、構造の複雑さ等の要因が減衰に与える影響について分析する。なお、一般的に自由振動を発生させる方法としては、人力加振、起振機による加振、ハンマーによる打撃や重錘落下等が挙げられる。これらの実験及び解析結果から構造の複雑さ等の要因を踏まえ、規制の観点で三次元有限要素解析モデルにおける構造減衰の設定の考え方を明確にする。

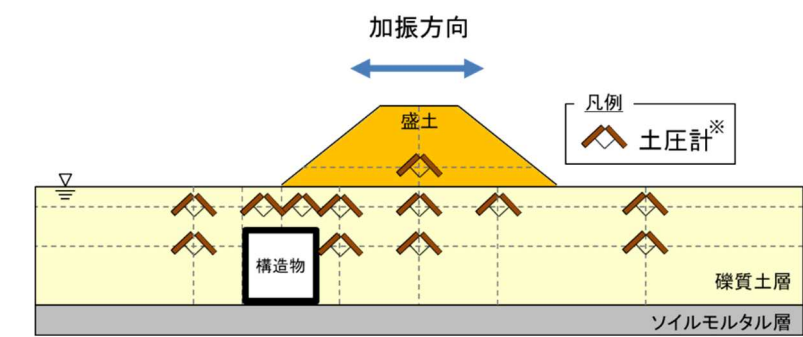
c. 屋外重要土木構造物の地震応答解析手法の適用性に関する研究【分類②】

耐震設工認審査ガイドでは、屋外重要土木構造物の耐震評価に用いる地震応答解析手法について、「地震時の非線形挙動の程度に応じた応答性状を表現できるものを設定していること」を確認することとしている。また、屋外重要土木構造物は、主に地中に埋設された構造物であり周辺地盤状況の影響を大きく受けることから、地盤状況を踏まえた解析手法を選定している。このため、砂質土や礫質土等の表層地盤において、地下水が無い場合は全応力解析手法（地盤（土粒子）の応力と地盤内の地下水圧（間隙水圧）を足し合わせた（分離しない）解析）を用い、地下水が有る場合は液状化の発生を考慮して有効応力解析手法（地震時の地盤内の地下水圧の変動（過剰間隙水圧）を考慮した解析）が用いられている。しかし、地下水の有無や変動が明らかでない場合、液状化の可能性を踏まえ地下水が高い位置にあるものとして、液状化の発生を考慮した有効応力解析を用いて、地盤の変形をより大きく保守的に評価するとともに、地盤条件や地盤応答等の不確かさ、ばらつきを考慮して液状化しない場合として全応力解析も合わせて検討されている<sup>(18)</sup>。また、屋外重要土木構造物は、取水構造物のように、非常時において海水を取水する役割（取水機能）の他に、安全上重要な機器や配管を間接的に支持する役割（間接支持機能）を有することから、これらの構造物は基準地震動Ssに対して機能維持が求められ、自身の耐震性に加え、機器配管の間接支持機能、機器配管の設計用加速度応答等の評価も必要となる。しかし、この加速度応答は構造物の特性だけではなく、周辺地盤の特性にも影響され、例えば、液状化する事で地盤剛性が低下し、より変形が大きくなることから、変形の観点では保守的となることが想定されるものの、構造物内の加速度応答は、構造物と地盤

の相互作用等の影響により、その保守性は明確ではない。このような場合の解析手法の選定については、学協会の指針類においても具体的に明示されているものはない。さらに、令和6年能登半島地震において大きな被害をもたらした液状化による側方流動が発生するような地盤についても保守性の観点で解析手法の選定に関して、学協会の指針類で具体的な記載はない。

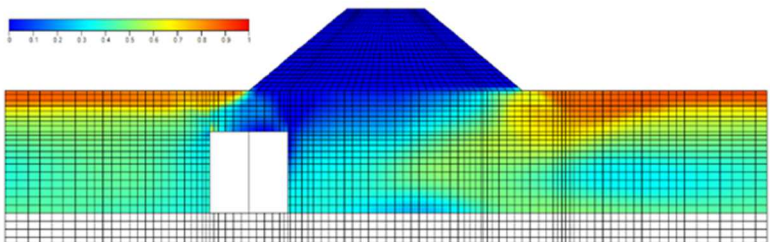
前プロジェクトにおいては、比較的密な礫質土地盤を対象に、原子力発電所特有の条件として地震動、敷地地盤材料、地形等の特性を踏まえた遠心模型実験（模型地盤を高速回転させ重力加速度の数十倍の遠心加速度を載荷することによって実物相当の応力状態を再現できる実験）やシミュレーション解析等を実施し、液状化（過剰間隙水圧の蓄積）により構造物へ作用する土圧や構造物の変形、加速度応答等を把握し、構造物への影響評価に係る技術的知見を蓄積してきた。遠心模型実験では、図2に示す模型実験モデルの地形効果、構造物の有無による複雑な地盤内応力、当応力性状における構造物応答の特徴等を把握するとともに、図3に示すシミュレーション解析により地盤内応力や過剰間隙水圧等の傾向から実験の再現性等を把握した。しかし、主に構造物へ作用する土圧計測の信頼性を確認することに主眼をおいたことから、礫質土地盤の液状化時の変状や構造物の変形、加速度応答は把握できたものの、構造物に発生する応力や周辺地盤の地盤種別や地形条件による構造物への影響の確認はできなかった。

そこで、本プロジェクトでは、発電所敷地において想定される種々の地盤種別、地形条件等の周辺地盤の状態を踏まえ屋外重要土木構造物の地震応答解析手法の適切な選定のため、屋外重要土木構造物を想定した模型を用いた振動実験により、地盤の状態に応じた構造物の変形や発生応力、加速度応答等の性状を確認し、規制の観点で有効応力解析及び全応力解析の適用性、適用範囲、入力パラメータの設定の妥当性等に関する考え方を明確にし、当該評価における留意事項を抽出する。



※ 前プロジェクトで適用性を確認した地盤内応力の計測方法<sup>(7)</sup>

図2 遠心模型実験モデルの例



（過剰間隙水圧比コンターの例）

図3 遠心模型実験のシミュレーション解析の例

(2) 建物・構築物等への飛翔体衝突における耐衝撃評価手法の適用性に関する研究

a. 構造物の設置状況及び形状特性を考慮した飛翔体衝撃作用に対する安全性評価に関する研究【分類②】

津波漂流物、竜巻飛来物、火山噴石、大型航空機等の衝突については、東北地方太平洋沖地震を踏まえて制定された規制基準で大幅に評価内容が強化された項目である。新規規制基準制定後、約10年が経ち多くの審査実績を通じて知見が拡充されるとともに、課題も見つかってきた。また、昨今の社会情勢から、学協会においても多くの衝撃評価に関する委員会の設置や研究がなされてきており、社会的ニーズが高まっている。国内の原子力発電所においては狭隘な立地条件から、地盤（岩盤）中に設置された重要構造物も存在し、上載層の地盤への飛翔体の貫入評価が求められる。また、既往研究の多くは平板構造を対象にした研究であるが、原子力発電所の建物・構築物には平板だけでなく、アーチ構造のような形状の構造形式が存在するため構造形式に応じた衝撃評価が求められる。

このため、前プロジェクトにおいては、**実現現象を想定した飛翔体の衝突速度で**、飛翔体先端が半球型の飛翔体衝突に伴う岩石等への貫入状況を明確にする（図4）<sup>(9)</sup>とともに既往の貫入評価式の適用性を確認した。また、剛な飛翔体衝突に伴うアーチ構造試験体の損傷状況を明確にした（図5）<sup>(10)</sup>。本プロジェクトにおいては、これまでに確認できていない衝突条件の研究を実施する。具体的には、構造物の設置状況を考慮した安全性評価に関する研究では、種々の先端形状及び直径の飛翔体による複数の強度及び材料の岩盤等試験体への衝突実験（飛翔体が試験体に貫入する実験）を実施し、貫入事象について整理し、既往の実験式、理論的評価手法及び数値解析手法の適用性を確認する。また、構造物の形状特性を考慮した安全性評価に関する研究では、飛翔体自体が衝突で変形する柔な飛翔体を用いた**実験を実施する。柔な飛翔体の衝突に関する既往の知見**<sup>例えば 19)、20)</sup>**を参考に実験条件を設定して**、平板及びアーチ構造試験体への衝突実験を委託研究として実施し、委託研究の成果から規制の観点で試験体形状の違いによる損傷状況（裏面剥離状況、貫通状況等）の差異について整理し、既往の評価式等各種評価手法の適用性に係る知見を取りまとめる。



図4 半球型飛翔体貫入実験状況  
（来待石、衝突速度 160m/s）<sup>(9)</sup>

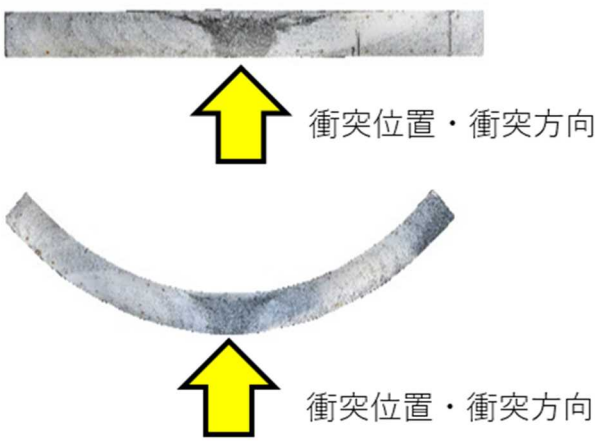


図5 剛な飛翔体衝突に伴う平板（上段）及びアーチ形状（下段）  
の損傷状況（衝突速度：約 65m/s）<sup>(10)</sup>

|                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>7. 成果目標と実施計画</p> | <p>(1) 建物・構築物等の耐震評価における非線形性を考慮した有限要素解析手法の適用性に関する研究</p> <p>a. 原子炉建屋等の基礎版や耐震壁等の面部材のせん断評価手法の適用性に関する研究</p> <p>成果目標：原子炉建屋等の主要な構造部材である耐震壁、基礎版等の面部材に着目し、実機を踏まえた複雑な構造や応力状態における面部材のせん断応力等の発生状況を調査し、三次元有限要素法に基づく弾塑性解析で用いられるモデル化手法及びせん断評価における応力平均化の妥当性、適用性、適用範囲等を明確にする。</p> <p>実施計画：令和7年度は、耐震壁、基礎版等の面部材のせん断評価手法における研究事例、課題等に関する文献調査を行い、三次元有限要素法に基づく弾塑性解析におけるモデル化上の課題及びモデル化の妥当性確認に資する試験データ等を収集する。令和8年度は、前年度収集した試験データを対象に、モデル化上の課題を踏まえてシミュレーション解析及び感度解析を行い、弾塑性解析で用いられるモデル化及びせん断評価における応力平均化の妥当性、適用性、適用範囲等を確認する。令和9年度は、実機建屋の基礎版を想定模擬した解析モデルを作成し、実機建屋基礎版における妥当性、適用性、適用範囲及び課題を確認する。そして、令和10年度は、得られた成果を整理するとともに必要に応じて追加解析を行う。規制庁は令和10年度までに、これらの委託研究の成果を基に規制の観点で三次元有限要素法に基づく弾塑性解析で用いられるモデル化及びせん断評価における応力平均化の妥当性、適用性、適用範囲等を明確にする。また、令和11年度以降に、これらの成果はNRA技術ノート等として取りまとめる。</p> <p>b. 建物・構築物の地震時動的挙動を考慮した三次元有限要素解析モデルにおける減衰の設定に関する基礎的研究</p> <p>成果目標：比較的単純な構造の建物・構築物の試験体、当該試験体に壁や床等を追加した構造の試験体による実験及び解析を行い、規制の観点で建物・構築物の地震応答解析における構造減衰の設定に係る考え方を明確にする。</p> <p>実施計画：原子力施設のうち比較的単純な構造の建物・構築物を模擬した鉄筋コンクリート造の試験体、当該試験体に床や壁等を追加することで構造の複雑さを模擬した試験体による振動実験（動的加力実験、振動台実験等）及びシミュレーション解析を実施する。本研究では、主に実験を委託研究として実施し、規制庁において、これらの委託研究の成果を基に、規制の観点で解析的検討を実施し知見を整理する。令和7年度は、実験計画の策定、実験に用いる単純な試験体の設計及び製作を行うとともに、実験の予備解析を行う。令和8年度は、単純な試験体を用いて、令和9年度は、構造の複雑さを模擬した試験体を用いて、振動実験及び実験のシミュレーション解析を行うとともに、次年度の試験体の設計・製作を行う。令和10年度は、令和9年度に引き続き、単純な試験体に重量物を付加した試験体による振動実験及び実験のシミュレーション解析を行う。これらの実験及び解析により、令和10年度までに、単純な構造形式の建物・構築物の構造減衰を把握するとともに、構造の複雑さや重量物の付加が減衰に与える影響を把握し、三次元有限要素解析モデルを用いた地震応答解析における構造減衰の設定の考え方を明確にする。また、令和11年度以降に、これらの成果は論文等として取りまとめる。</p> <p>c. 屋外重要土木構造物の地震応答解析手法の適用性に関する研究</p> <p>成果目標：周辺地盤の状態に応じた土木構造物の変形や発生応力、加速度応答等の性状を確認するとともに、規制の観点で有効応力解析等の地震応答解析手法の適用性、適用範囲、入力パラメータの設定の考え方を明確にする。</p> <p>実施計画：液状化、非液状化、側方流動等を想定した地盤内に土木構造物を配置した模型を作成し、振動実験及びシミュレーション解析を実施する。令和7年度は、実験計画の立案、実験に用いる構造物模型の設計に係る予備解析及び構造物模型の設計・製作を行う。令和8年度は礫質土を用いて、水平成層地盤モデルによる振動実験及びシミュレーション解析を実施し、令和9年度は砂質土を用いて、水平成層地盤モデル及び傾斜地盤モデルによる振動実験及びシミュレーション解析を実施する。これらにより、各地盤モデルにおける構造物及び構造物周辺地盤の応答加速度、応答変位、発生応力等を計測し、構造物と周辺地盤の応答性状等の関係性を整理する。令和10年度は、前年度までと異なる液状化強度等の地盤条件による振動実験及びシミュレーション解析を実施して構造物や地盤の応答への影響を把握し、土木構造物の地震応答解析手法としての有効応力解析や全応力解析の適用性、適用範囲、入力パラメータの設定の考え方を明確にする。また、令和11年度以降に、これらの成果は論文等として取りまとめる。</p> <p>(2) 建物・構築物等への飛翔体衝突における耐衝撃評価手法の適用性に関する研究</p> <p>a. 構造物の設置状況及び形状特性を考慮した飛翔体衝撃作用に対する安全性評価に関する研究</p> <p>成果目標：構造物の設置状況及び形状特性を考慮した建物・構築物等への飛翔体衝突に伴う貫入、裏面剥離等の損傷状況を把握するとともに、規制の観点で解析評価手法、既往の評価式等の適用性を明確にする。</p> <p>実施計画：設置状況を考慮した安全性評価に関する研究として、種々の先端形状等を有する飛翔体を用いた岩盤等試験体への衝突（貫入）実験を実施し、貫入状況を整理するとともに、既往の評価式等の適用性を確認する。令和7年度及び令和8年度は円錐型飛翔体が高速で貫入する衝突実験を、令和9年度及び10年度は平坦型飛翔体が高速で貫入する衝突実験を実施し、これらの結果に対する既往実験式及び理論的評価手法の適用性を確認する。また、令和9年度まで及び令和11年度以降に、それぞれ過年度までの成果を論文等として取りまとめる。さらに、形状特性を考慮した安全性評価に関する研究として、委託研究により衝突で変形する柔な飛翔体を用いた平板及びアーチ構造試験体への衝突実験を実施し、アーチ構造試験体等の損傷状況を把握するとともに、解析的検討を実施し、委託研究の成果から規制の観点で既往の評価式等の適用性を確認する。令和7年度は小型の平板及びアーチ構造試験体への柔な飛翔体の衝突実験を実施し裏面剥離事象について把握するとともに、模型の大きさの違いによるスケール効果の確認として中型の試験体の製作等準備を行う。令和8年度は小型の平板及びアーチ構造試験体への柔な飛翔体の衝突実験を実施して貫通事象について把握するとともに、中型の平板及びアーチ構造試験体への柔な飛翔体の衝突実験を実施して曲げ変形及び裏面剥離事象について把握する。令和9年度は板厚等の形状を変数とした小型の平板及びアーチ構造試験体への柔な飛翔体の衝突実験を実施して裏面剥離事象について把握するとともに、中型の平板及びアーチ構造試験体への柔な飛翔体の衝突実験を実施して貫通事象について把握する。令和10年度は、令和9年度に引き続き小型の平板及びアーチ試験体への柔な飛翔体の衝突</p> |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

実験を実施する。また、当該実験の再現解析を実施し数値解析評価手法の適用性について確認する。規制庁は、これらの委託研究による成果を基に、規制の観点で各種評価手法の適用性を明確にする。

行程表

|                                                            | R 7 年度                                              | R 8 年度                                       | R 9 年度                                              | R10 年度                                  | R11 年度以降                                             |
|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------|
| ( 1 ) a. 原子炉建屋等の基礎版や耐震壁等の面部材のせん断評価手法の適用性に関する研究             | 〈せん断評価に係る解析検討（委託）〉                                  |                                              |                                                     |                                         | ▽NRA 技術ノート等作成※ <sup>1</sup><br><br>→ 現行の規制基準類への反映の検討 |
|                                                            | 文献調査（既往試験の調査）<br>解析検討計画立案                           | 既往試験の再現・感度解析                                 | 仮想実機モデルの作成及び感度解析                                    | 仮想実機の感度解析                               |                                                      |
|                                                            |                                                     | 〈せん断評価に係る解析検討（規制庁）〉                          |                                                     |                                         |                                                      |
|                                                            |                                                     | 既往試験の再現解析の検証                                 | 仮想実機モデルの感度解析の検証                                     | 仮想実機モデルの感度解析の検証<br>取りまとめ                |                                                      |
| ( 1 ) b. 建物・構築物の地震時動的挙動を考慮した三次元有限要素解析モデルにおける減衰の設定に関する基礎的研究 | 〈解析検討（規制庁）〉                                         |                                              |                                                     | 学会発表※ <sup>2</sup> ▽                    | ▽論文投稿※ <sup>2</sup><br><br>→ 現行の規制基準類への反映の検討         |
|                                                            | 実験計画立案<br>予備解析                                      |                                              |                                                     |                                         |                                                      |
|                                                            | 〈試験体の設計製作・実験（委託）〉                                   |                                              |                                                     |                                         |                                                      |
|                                                            | 実験実施計画<br>試験体設計・製作                                  | 単純な試験体の設計・製作<br>振動実験                         | 構造の複雑さを模擬した試験体の設計・製作<br>振動実験                        | 重量物を付加した試験体の振動実験                        |                                                      |
|                                                            |                                                     | 〈解析検討（規制庁）〉                                  |                                                     |                                         |                                                      |
|                                                            |                                                     | 再現・感度解析                                      | 再現・感度解析                                             | 再現・感度解析<br>取りまとめ                        |                                                      |
| ( 1 ) c. 屋外重要土木構造物の地震応答解析手法の適用性に関する研究                      | 〈模型実験・解析検討（規制庁）〉                                    |                                              |                                                     | 学会発表▽                                   | ▽論文投稿<br><br>→ 現行の規制基準類への反映の検討                       |
|                                                            | 実験計画立案<br>予備解析<br>構造物模型の設計・製作                       | 水平地盤（礫質土）モデルによる模型実験<br>再現・感度解析               | 水平・傾斜地盤（砂質土）モデルによる模型実験<br>再現・感度解析                   | 地盤条件等のばらつきを考慮した模型実験<br>再現・感度解析<br>取りまとめ |                                                      |
|                                                            |                                                     |                                              |                                                     |                                         |                                                      |
| ( 2 ) a. 構造物の設置状況及び形状特性を考慮した飛翔体衝撃作用に対する安全性評価に関する研究         |                                                     | 学会発表※ <sup>3</sup> ▽                         | 論文投稿※ <sup>3</sup> ▽                                |                                         | ▽論文投稿※ <sup>3</sup><br><br>→ 現行の規制基準類への反映の検討         |
|                                                            | 〈①設置状況を考慮した評価（規制庁）〉                                 |                                              |                                                     |                                         |                                                      |
|                                                            | 円錐貫入実験<br>再現解析                                      | 円錐貫入実験<br>再現解析                               | 平坦貫入実験<br>再現解析                                      | 平坦貫入実験<br>再現解析<br>取りまとめ                 |                                                      |
|                                                            |                                                     | 〈②形状特性を考慮した評価（委託）〉                           |                                                     |                                         |                                                      |
|                                                            | 小型試験体（平板・アーチ）への衝突実験（裏面剥離）<br>再現解析<br>中型試験（平板・アーチ）準備 | 小型試験体への衝突実験（貫通）<br>中型試験体への衝突実験（裏面剥離）<br>再現解析 | 板厚等を変えた小型試験体への衝突実験（裏面剥離）<br>中型試験体への衝突実験（貫通）<br>再現解析 | 板厚等を変えた小型試験体への衝突実験<br>再現解析<br>取りまとめ     |                                                      |
|                                                            |                                                     |                                              |                                                     |                                         |                                                      |

※1 委託先の解析結果を踏まえ規制の観点で取りまとめた結果を NRA 技術ノート等として公表

※2 委託先の実験結果を踏まえ規制庁による解析的検討の成果を発表又は投稿

※3 ①設置状況に関する研究成果を発表又は投稿

|                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>8. 実施体制</p> | <p>【地震・津波研究部門における実施者（実施項目ごとに主担当者に○を記載）】</p> <p>山崎宏晃 上席技術研究調査官</p> <p>○ 平松昌子 主任技術研究調査官（実施項目（１）a、（１）b 関係）</p> <p>○ 太田良巳 主任技術研究調査官（実施項目（１）c、（２）a 関係）</p> <p>○ 森谷 寛 副主任技術研究調査官（実施項目（１）a 関係）</p> <p>○ 山川光稀 技術研究調査官（実施項目（１）b 関係）</p> <p>○ 土屋 隆 技術研究調査官（実施項目（１）c 関係）</p> <p>大橋守人 技術計画専門職</p> <p>高野雅美 技術計画専門職</p> <p>飯場正紀 技術参与</p> <p>小林恒一 技術参与</p> <p>中村尚弘 技術参与</p> <p>【委託研究先】</p> <p>未定（実施項目（１）a の一部解析、（１）b の実験、（２）a の小型・中型試験体への衝突実験・解析を委託研究として実施する。）</p> <p>【共同研究先】</p> <p>未定（実施項目（１）c）</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <p>9. 備考</p>   | <p>文 献</p> <p>(1) B., Choi, A., Nishida, T., Shiomi, M., Kawata, Y., Li, “Analytical study for low ground contact ratio of buildings due to the basemat uplift using a three-dimensional finite element model”, Proceedings of the 2022, 29th International Conference on Nuclear Engineering, ICON29, August 8-12, 2022.</p> <p>(2) S., Ito, A., Ota, H., Sonobe, S., Ino, B., Choi, A., Nishida, T., Shiomi, “Nonlinear Dynamic Analysis by Three-Dimensional Finite Elements Model Considering Uplift of Foundation”, 27th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT27), 2024.</p> <p>(3) Y., Katayama, O., Kontani, Y., Mihara, J., Yasukochi, Y., Inaba, D., Kambayashi, “Physical Material Properties of Normal Concrete Subjected to High Temperature”, 27th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT27), 2024.</p> <p>(4) K., Yamakawa, H., Moritani, M., Saruta, M., Iiba, A., Nishida, M., Kawata and K., Iigaki, “A Study on Improvement of Three-dimensional Seismic Analysis Method of Nuclear Building Using a Large-Scale Observation System (Part1: Analysis of entire response of the reactor building based on seismic observation records)”, 27th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT27), 2024.</p> <p>(5) 山川光稀、土屋隆、平松昌子、森谷寛、猿田正明、飯場正紀、西田明美、川田学、飯垣和彦、「原子炉施設の三次元耐震解析手法の高度化に関する研究（その８：同時刻での変位モードの分析）」、2024 年度日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 961-962、令和 6 年</p> <p>(6) T., Kawai, “Measuring stress conditions in the embankment model during a shaking event of the centrifuge test -Towards a validation of effective stress analysis”, Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Sydney 2021.</p> <p>(7) T., Kawai, “A prospective method to estimate shear stress in the ground by using two earth pressure cells”, Soils and Foundations, 2024.</p> <p>(8) 太田良巳、松澤遼、「岩盤材料に対する尖頭型飛翔体の理論的貫入量に関する一考察」、土木学会第 50 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集、pp. 74-79、令和 6 年</p> <p>(9) 太田良巳、二階堂雄司、藪内耕一、山田和彦、「衝撃作用を受けるアーチ構造の裏面剥離特性に関する実験的研究（その１：実験概要及び簡易評価）」、公益社団法人土木学会、令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会、I-394、令和 6 年</p> <p>(10) 二階堂雄司、太田良巳、川上綾太、相馬和貴、山田和彦、「衝撃作用を受けるアーチ構造の裏面剥離特性に関する実験的研究（その２：実験結果及び考察）」、令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会、I-395、令和 6 年</p> <p>(11) 東京電力 HD 株式会社、「柏崎刈羽原子力発電所第 7 号機 工事計画認可申請に係る論点整理について」、第 870 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合、資料 3、令和 2 年、<a href="https://www2.nra.go.jp/data/000316175.pdf">https://www2.nra.go.jp/data/000316175.pdf</a>（2024 年 8 月 1 日確認）</p> <p>(12) 中国電力株式会社、「島根原子力発電所 2 号機審査資料「原子炉建物基礎スラブの耐震性についての計算書に関する補足資料（NS2-補-025-11、2022 年 12 月 19 日）」、<a href="https://www2.nra.go.jp/data/000417568.pdf">https://www2.nra.go.jp/data/000417568.pdf</a>（2024 年 8 月 1 日確認）</p> <p>(13) 原子力規制庁 原子力規制部 検査監督総括課、「原子力規制検査において使用する事業者 PRA モデルの適切性確認ガイド（GI0010_r1）」、<a href="https://www2.nsr.go.jp/data/000360587.pdf">https://www2.nsr.go.jp/data/000360587.pdf</a>（2024 年 8 月 1 日確認）</p> <p>(14) 関西電力株式会社、「安全性向上評価の継続的な改善に係る取り組み状況について（大飯 4 号機第 1 回提出）」、2020 年 6 月 19 日、<a href="https://www2.nra.go.jp/data/000318016.pdf">https://www2.nra.go.jp/data/000318016.pdf</a>（2024 年 8 月 1 日確認）</p> <p>(15) International Atomic Energy Agency (IAEA), “Attributes of Full Scope Level 1 Probabilistic Safety Assessment (PSA) for Applications in Nuclear Power Plants”, IAEA-TECDOC-1804, 2016.</p> <p>(16) U.S. Nuclear Regulatory Commission, “The Significance Determination Process for Findings At-Power,” Inspection</p> |

|      |                                                                                                                                                                                                                     |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|      | Manual Chapter 609 Appendix A, November 2020., <a href="https://www.nrc.gov/docs/ML2114/ML21148A149.pdf">https://www.nrc.gov/docs/ML2114/ML21148A149.pdf</a> (2024 年 8 月 1 日確認)                                     |
| (17) | 原子力規制委員会、「NRA 技術報告 原子炉施設の建屋三次元地震時挙動の精緻な推定に資する影響因子の分析とそのモデル化に関する検討」、NTEC-2021-4002、令和 3 年 3 月                                                                                                                        |
| (18) | 東北電力株式会社、「女川原子力発電所第 2 号機 工事計画審査資料、補足-600-1【地盤の支持性能について】(02-補-E-19-06000-1_改 1、2020 年 10 月 5 日)」、 <a href="https://www.nra.go.jp/data/000330837.pdf">https://www.nra.go.jp/data/000330837.pdf</a> (2024 年 8 月 1 日確認) |
| (19) | 大沼博志、伊藤千浩、白井孝治、「剛・柔飛来物の衝突に対する鉄筋コンクリート構造物の局部損傷評価」、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 20、No. 3、pp. 1063-1068、1998.                                                                                                                  |
| (20) | 二階堂雄司、山田和彦、澤田祥平、金子貴司、安本宏、日向大樹、 <u>太田良巳</u> 、「飛翔体衝突による構造物内の衝撃伝播に関する基礎的研究 (その 3: ステンレス製模型柔飛翔体の衝突実験)」、日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸)、pp. 251-252、令和元年                                                                            |

研究計画（案）

|                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |       |                                                                                            |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. プロジェクト<br>(始期: R7年度<br>終期: R10年度) | 6. 地震荷重を受ける容器・配管溶接部の損傷形態等に関する研究                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 担当部署  | 技術基盤グループ<br>地震・津波研究部門                                                                      |
|                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 担当責任者 | 山崎 宏晃 上席技術研究調査官                                                                            |
| 2. カテゴリー・研究分野                        | 【横断的原子力安全】 A)外部事象(地震、津波、火山等) A-2<フラジリティ関連>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 主担当者  | 日比野憲太 総括技術研究調査官<br>東 喜三郎 主任技術研究調査官<br>鳥山 拓也 副主任技術研究調査官<br>永井 穰 副主任技術研究調査官<br>藤原 啓太 技術研究調査官 |
| 3. 背景                                | <p>「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和 32 年法律第 166 号）」等に基づき実施される定期事業者検査では、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則（平成 25 年原子力規制委員会第 6 号）」（以下「技術基準規則」という。）に適合していることが確認される。また、上記法律等に基づき実施される規制基準適合性審査では、例えば設置（変更）許可関係においては、「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（平成 25 年原子力規制委員会規則第 5 号）」（以下「設置許可基準規則」という。）に適合していることが確認される。これらの検査・審査での上述の規則への適合性の確認は、常に最新の科学的・技術的知見に基づいて行う必要があるため、最新の研究動向等を踏まえて外部事象に対する設備のフラジリティ（設備の応答、耐力、それらに基づく損傷度合い）評価手法の信頼性向上を図り、上述に関連する<b>規制基準等への反映の検討規則・解釈や審査ガイドの改正の要否判断</b>、個々の審査での技術的判断及び民間規格の<b>技術的</b>妥当性の確認に資する知見を蓄積することが重要である。</p> <p>令和 2 年 4 月に「原子力規制検査等に関する規則（令和 2 年原子力規制委員会規則第 1 号）」が施行され、原子炉施設内の設備の故障等で発生する事故及びトラブル（内部事象）を対象としたリスク情報を活用した検査や検査指摘事項の重要度評価が開始された。また、リスク情報を活用した供用期間中検査や運転中保守等の見直しが検討されている。しかしながら、自然災害に関する日本の地域特性を勘案すると、上述の検査や検討の際には、地震等のハザード情報や地震等に対する施設・設備のフラジリティ情報に基づき評価される外的事象を対象としたリスク情報を活用する必要がある。</p> <p>以下、地震、津波及び衝撃に対する設備のフラジリティ評価についての研究課題をまとめる。</p> <p>（１）応力腐食割れと地震時の疲労亀裂進展の重畳による容器・配管の損傷</p> <p>原子炉圧力容器及び配管が技術基準規則第 18 条に適合するように維持されていることを判断するため、事業者は供用期間中検査において「実用発電用原子炉及びその附属施設における破壊を引き起こす亀裂その他の欠陥の解釈（原規技発第 1408063 号（平成 26 年 8 月 6 日原子力規制委員会決定））」（以下「亀裂の解釈」という。）別紙 1 に定める試験の範囲、程度及び試験方法で非破壊試験を行わなければならない。<b>一般社団法人日本機械学会</b>の「発電用原子力設備規格 維持規格（2012 年版）」の技術評価<sup>(1)</sup>では、この亀裂解釈で定める試験範囲及び試験程度が改正され、従来、原子炉圧力容器は溶接線の 7.5%を試験対象としていたが、試験可能な全ての範囲（原則 100%）に強化された。そこで、国内では確率論的破壊力学（以下「PFM」という。）評価の結果に基づき、検査内容を変更することが検討されており、原子力規制委員会においても「事業者の被ばく線量の低減に向けた検査の変更の申し出については、その技術的妥当性の評価を優先的に行うこと」としている。これを受けて、シビアアクシデント研究部門では、令和 4 年度から PFM 評価に関する知見を拡充するための研究を継続しているが、評価対象事象として主に原子炉圧力容器の内的事象（加圧熱衝撃）を想定しており、原子炉圧力容器及び配管に作用する地震等の外的事象によって溶接部に発生した亀裂が進展し、損傷に至る事象については考慮していない<sup>(2)</sup>。過去の容器・配管等のクラス 1 構造物を模擬した振動試験においても、実際に溶接部で損傷した事例は極めて限られており、容器・配管等が地震荷重で損傷する確率は低いと考えられるが、応力腐食割れ（SCC）によって溶接部に亀裂が発生する場合に、地震荷重による疲労亀裂進展が重畳して損傷に至る確率を定量評価する手法は確立されていない。したがって、供用期間中検査の変更において、外的事象の影響を考慮する必要性の有無を判断するためには、地震荷重下の溶接部の損傷形態を把握し、損傷確率を定量評価するための技術的知見を拡充する必要がある。</p> <p>（２）地震 PRA で用いる設備の同時損傷確率の算定手法</p> <p>令和 2 年 4 月に「原子力規制検査等に関する規則」が施行され、新たな原子力規制検査が開始された。原子力規制検査の実施方法を定めた「原子力規制検査等実施要領（令和元年 12 月原子力規制庁）」では、検査指摘事項（検査の結果、事業者の活動目的の達成状況が十分でない事項で、事業者に指摘する必要があると判断したもの）が確認された場合は、追加検査の要否等を判断するために検査指摘事項の重要度を評価することとしており、重要度評価におけるリスク情報の活用については、可能な範囲で確率論的リスク評価（以下「PRA」という。）による計算結果等の定量的な情報を活用することを定めている。また、原子力規制検査で用いるリスク情報を取得する際、事業者が作成した PRA モデルについて原子力規制庁がその適切性を確認し、必要に応じそのモデルに修正を加えた PRA モデルを用いることとしているため、「原子力規制検査において使用する事業者 PRA モデルの適切性確認ガイド」（以下「PRA 確認ガイド」という。）に出力運転時内部事象 PRA を対象とした事業者 PRA モデルの確認方法が示されている。しかしながら、自然災害に関する日本の地域特性を勘案すると、地震等の外部事象を対象としたリスク情報の活用が必要であるが、地震等の外部事象の事業者 PRA モデルの確認方法は示されていない。このため、地震 PRA モデルの適切性を確認するための知見を拡充することが重要である。地震時において特有な現象として、建屋内に設置される設備には同時に地震動が入力されることから、それらが同時に損傷する可能性も考慮する必要がある。そのため、設備の設置条件を踏まえた「応答の相関性を考慮した同時損傷確率」（以下「同時損傷確率」という。）を算定し、炉心損傷頻度の定量化に適用することが重要である。設備の同時損傷確率に関する既往</p> |       |                                                                                            |

の算定手法として、一般社団法人日本原子力学会の学会標準「原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準：2015」<sup>(3)</sup>では、「損傷の相関係数を用いる評価手法<sup>(4)</sup>」及び「モンテカルロ法を用いた損傷相関の評価手法<sup>(5)</sup>」を例示している。しかしながら、これらの手法に用いられる相関係数の設定条件等は明示的には検討されておらず、これらの手法の適用時の留意点は明確にされていない。このため、地震PRAにおける設備の同時損傷確率に関する既往の算定手法の適用性を確認するための技術的知見を拡充する必要がある。

（３）粒径の細かい土砂等が多く混入した津波の波力・波圧の密度増加以上の増加

~~設置許可基準規則別記３では、津波による損傷の防止のため、防潮堤等の津波防護施設により基準津波による遡上波の流入の防止が求められている。また、重要な施設については、水密扉等の浸水防止設備により津波による影響等から隔離することが求められている。そのため、津波による損傷に関して、防潮堤や水密扉等の津波防護施設及び浸水防止設備に関わる研究は重要と言える。防潮堤に対しては、後述する粒径の細かい土砂等が多く混入した津波が波力・波圧に影響を与えうることが示されている<sup>(6)</sup>。また、水密扉等に対しては、浸水防止機能が喪失する条件や損傷後の挙動に係る知見は十分ではない。特に津波の影響を第一に受ける、外郭防護に係る津波防護施設（防潮堤）の安全性評価が重要である。設置許可基準規則別記３では、Ｓクラスに属する施設の設置された敷地等に対して、基準津波による遡上波を地上部から到達又は流入させないこと、取水路及び放水路等の経路から流入させないこと等に加え、上記施設については、浸水防護をすることにより津波による影響等から隔離することを求めている。さらに、非常用海水冷却系については、水位低下時にも冷却海水が確保できること等に加え、砂の移動・堆積等に対して取水口及び取水路の通水性が確保でき、かつ、取水口からの砂の混入に対して海水ポンプが機能を保持できる設計であることを求めている。ここで、津波の敷地への到達・流入を防ぐ防潮堤等の津波防護施設に対しては、後述する粒径の細かい土砂等が多く混入した津波が波力・波圧に影響を与えうることが示されている<sup>(6)</sup>。浸水防護に係る水密扉等の浸水防止設備に対しては、浸水防止機能が喪失する条件や損傷後の挙動に係る知見は十分ではない。非常用海水冷却系に関連する海水取水設備等に対しては、砂の混入による影響評価は既にされているが、砂よりも粒径の細かい土砂による影響に係る知見は十分ではない。これらの中でも津波の影響を最も大きく受ける、防潮堤等の津波防護施設を対象とした粒径の細かい土砂等が多く混入した津波に対する影響評価が重要である。~~

平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震では、粒径の細かい土砂等が多く混入した津波（以下「黒津波」という。）が発生した。黒津波の密度、粘性係数等の特性は清水とは異なり、沿岸に設置された防潮堤等の施設・設備に黒津波が作用した場合、密度の増加以上に波力・波圧が増加する可能性が指摘されている<sup>(6)</sup>。設置許可基準規則第5条（津波による損傷の防止）は、設計基準対象施設は基準津波に対して、安全機能が損なわれないことを求めている。また「耐津波設計に係る設工認審査ガイド（原管地発第1306196号（平成25年6月19日原子力規制委員会決定））」では、「4.5 荷重評価」において「津波作用（波力・波圧、洗掘力<sup>1</sup>、浮力等）として、最も安全側となる津波荷重が評価されていること。」を求めている。現状、海域や陸域の特性を踏まえた黒津波の発生可能性評価及び黒津波が施設・設備に作用した際の波力・波圧に与える影響評価（以下「黒津波の影響評価」という。）等に係る既往の知見は限られており十分ではない。黒津波の発生可能性評価に係る知見として、都市部の運河奥部の細い水路では海底堆積物の粒径が細かく、流速が大きくなりやすいことが示されている<sup>(7)</sup>。また、黒津波の影響評価に係る知見として、粒径の細かい土砂等が含まれることで波面角度が切り立ち、衝撃波圧が増大する可能性が指摘されている<sup>(6)</sup>。原子力規制庁は、令和6年度までに、黒津波の発生可能性評価に係る知見として、東北地方太平洋沖地震後の津波堆積物調査<sup>(8)</sup>の結果を整理し、粒径の細かい土砂の含有率を意味する細粒分含有率は、人口密度及び港湾形状等に基づく閉鎖度指標（港湾の海水交換の効率を意味する指標）と因果関係があることを示し、粒径の細かい土砂の蓄積率や人口密集地からの排水等に含まれる有機物質の排出量が黒津波の発生に寄与しうることを示した<sup>(9)</sup>。また、黒津波の影響評価に係る知見として、粒径の細かい土砂等を含む濁水を用いた波力・波圧試験を実施し、清水と比べて密度の大きい濁水は、砕波<sup>2</sup>発生の有無及び砕波位置が清水とは異なった<sup>(10)</sup>。~~さらにまた、~~実施した条件において着水による荷重で最大波力が発生したこと、密度増加により水深係数<sup>3</sup>が増加し得ることを示した<sup>(10)</sup>。しかしながら、黒津波の発生可能性を精度よく推定することは難しく、発生可能性に係る条件の絞り込みには至らなかった。また、波力・波圧の評価手法の策定にも至らなかった。これらを受けて、黒津波の発生可能性評価としては発生条件の絞り込み等を踏まえた評価手法に係る技術的知見を、黒津波の影響評価としては密度変化及び波形変化等を踏まえた波力・波圧の評価手法に係る技術的知見をそれぞれ拡充する必要がある。

（４）既往の設備の耐震試験で観察される損傷モードとは異なる衝撃振動による損傷モードの発生

設置許可基準規則第42条（特定重大事故等対処施設）では、特定重大事故等対処施設において、原子炉建屋への故意による大型航空機の衝突その他のテロリズムに対してその重大事故等に対処するために必要な機能が損なわれるおそれがないことを求めている。原子力施設へ大型航空機が衝突する場合を想定すると、衝撃荷重が建屋を伝播し、これによって建屋内の設備が衝撃振動を受けると考えられる。この衝撃振動によって建屋内の設備が損傷するおそれがあることから、「実用発電用原子炉に係る航空機衝突影響評価に関する審査ガイド（原規技発第1409178号（平成26年9月17日原子力規制委員会決定））」（以下「航空機ガイド」という。）は、評価対象設備に対して、衝撃荷重による振動により必要な機能を喪失しないかどうかを評価することを求めている。しかしながら、航空機の衝突に対する設備の安全性評価手法に関する海外の既往知見<sup>(11)</sup>は、主として設備の衝撃耐力に着目したものに限られるとともに、ここで示される衝撃耐力の日本国内の設備への適用性は明確にされていない。また、衝撃応答評価手法に係る知見もほとんど存在しないことから、~~評価精度の向上に資する根拠知見の拡充が必要である~~。そのため、原子力規制庁は令和6年度までに、航空機衝突による衝撃振動に対する設備の衝撃耐力及び衝撃応答特性を把握するため、衝撃加振試験を実施した。そして、試験時に得た技術的知見に基づいて、設備の衝撃加振試験実施時の留意事項を取りまとめた<sup>(12)</sup>。また、衝撃振動と地震動の差異を考慮した設備の衝撃応答評価手法の適用性に着目した研究を実施し、設備の衝撃応答評価への地震応答解析手法の適用条件、適用可能範囲を把握した。しかしながら、上述の設備の衝撃加振試験の一環として実施した電動弁駆動部の試験では、このような設備を対象とした既往の

<sup>1</sup> 洗掘は波や流れの作用により防潮堤基部の砂等が持ち去られることであり、洗掘力は洗掘を引き起こす荷重を表す。

<sup>2</sup> 砕波は波が波形の安定性を失って砕けていく現象を表す。

<sup>3</sup> 遡上水深に相当する静水圧分布の倍率である水深係数。朝倉ら<sup>(13)</sup>は水深係数を3.0とすると、非分裂波による水平波力の実験値を包絡できたことを示した。

|           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|           | <p>耐震試験の知見から想定された損傷モードとは異なった衝撃振動による損傷モードが観察された。大型航空機の衝突時にこの損傷モードが発生した<del>場合</del>、設備の耐衝撃性能がは従来想定されていた性能よりも低下する可能性がある<del>場合は、その影響を考慮する必要</del><br/><del>がある</del>ことから、この発生原因を明らかにし、大型航空機の衝突に対する設備の安全性評価手法に係る技術的知見を拡充する必要がある。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 4. 目的     | <p>本研究プロジェクトでは、地震、津波及び衝撃に対する設備のフラジリティ評価手法の信頼性を向上することを目的に、以下の研究を行う。</p> <p>(1) 地震荷重を受ける容器・配管溶接部の損傷形態に係る技術的知見の拡充<br/> <del>今後、産業界にて整備予定の P F M に基づくリスク情報</del>を活用した供用期間中検査<del>について、亀裂の解釈に定める供用期間中検査の要件の妥当性確認改正の要否判断</del>のため、内的事象のみならず地震荷重によって容器・配管の溶接部が損傷に至る確率及びその損傷形態について、技術的知見を拡充する。</p> <p>(2) 地震時の設備の同時損傷確率の算定手法に係る技術的知見の拡充<br/> 原子力規制検査で用いる地震 P R A の信頼性向上のため、地震時の設備の同時損傷現象を把握し、その発生確率に関する既往の算定手法<del>で用いられる相関係数の適切な算出条件等を整理の適用性を確認するための技術的知見を拡充</del>する。</p> <p>(3) 黒津波の発生可能性評価及び影響評価に係る技術的知見の拡充<br/> <del>津波防護施設等を対象とした耐津波設計に関する規則・解釈や審査ガイドの改正の要否判断のため、</del>黒津波の発生可能性評価として、堆積土砂の汀線からの距離及び量とそれが汀線に到達した時の津波の密度の関係を整理するとともに、黒津波の及び影響評価として、密度の増加による水深係数の変化を考慮した津波波圧評価手法を提案し、<del>に関する各評価手法に係る津波防護施設等を対象とした耐津波設計に係る技術的知見を整備拡充</del>する。</p> <p>(4) 既往の設備の耐震試験で観察される損傷モードとは異なる衝撃振動による損傷モードに係る技術的知見の拡充<br/> <del>大型航空機の衝突に対する設備の安全評価に関連する規則・解釈や審査ガイドの改正の要否判断のため、</del>既往の設備の耐震試験で観察される損傷モードとは異なる衝撃振動による損傷モードの発生原因を明らかにし、大型航空機の衝突に対する設備の安全評価手法に係る<del>留意事項等を整理し、大型航空機の衝突に対する設備の安全評価に係る技術的知見を整備拡充</del>する。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 5. 知見の活用先 | <p>(1) ～ (4) で得られた技術的知見は、学術論文等として取りまとめるとともに、<del>規制に反映すべき新たな知見が得られた場合には、現行の規制基準等への反映の検討に活用される。以下に活用されることが期待できる。</del></p> <p>(1) で得られた成果は、<del>今後、P F M を活用した供用期間中検査が亀裂の解釈の改正の要否判断において、地震荷重の影響を評価するための技術的知見として活用されることが期待できる。また、一般社団法人日本機械学会の「発電用原子力設備規格 維持規格」に取り入れられた際に、その技術評価における技術的妥当性の確認に資する技術的根拠知見として活用されることが期待できる。</del><br/> なお、当該規格は亀裂の解釈で引用されている。</p> <p>(2) で得られた成果は、P R A 確認ガイドへの反映の検討に活用されるとともに、事業者 P R A モデルの適切性確認における妥当性判断に資する技術的根拠として活用される。<del>の改正の要否判断において、地震時の設備の同時損傷確率の算定手法の適切性を確認するための技術的知見として活用されることが期待できる。また、改正がなされた場合には、それに基づき実施される事業者 P R A モデルの適切性確認において、地震時の設備の同時損傷確率の算定手法の適切性確認に資する技術的知見として活用されることが期待できる。</del></p> <p>(3) で得られた成果は、「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈（原規技発第 1306193 号（平成 25 年 6 月 19 日原子力規制委員会決定））」（以下「設置許可基準規則解釈」という。）第 5 条、「基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド（原管地発第 1306193 号（平成 25 年 6 月 19 日原子力規制委員会決定））」及び「耐津波設計に係る設工認審査ガイド」への反映の検討に活用されるとともに、適合性審査における妥当性判断に資する技術的根拠として活用される。<del>の改正の要否判断に資する技術的知見として活用されることが期待できる。また、改正がなされた場合には、それらに基づき実施される津波防護施設等を対象とした耐津波設計に係る規制基準適合性審査において、事業者の申請内容の妥当性判断に資する技術的知見として活用されることが期待できる。</del></p> <p>(4) で得られた成果は、設置許可基準規則解釈第 42 条、「実用発電用原子炉に係る特定重大事故等対処施設に関する審査ガイド（原規技発第 1409177 号（平成 26 年 9 月 17 日原子力規制委員会決定））」及び航空機ガイドへの反映の検討に活用されるとともに、適合性審査における妥当性判断に資する技術的根拠として活用される。<del>の改正の要否判断に資する技術的知見として活用されることが期待できる。また、改正がなされた場合には、それらに基づき実施される特定重大事故等対処施設への航空機衝突による影響評価に係る規制基準適合性審査において、事業者の申請内容の妥当性判断に資する技術的知見として活用されることが期待できる。</del></p> |
| 6. 安全研究概要 | <p>本プロジェクトの研究は、「原子力規制委員会における安全研究の基本方針」（令和元年 5 月 2 9 日原子力規制委員会決定）におけ</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |

る安全研究のうち以下の分類に基づき実施する。

① 規制基準等の整備に活用するための知見の収集・整備（以下「分類①」という。）

② 審査等の際の判断に必要な知見の収集・整備（以下「分類②」という。）

（１）地震荷重を受ける容器・配管溶接部の損傷形態に係る技術的知見の拡充【分類①及び分類②】

地震荷重によって容器や配管の溶接部が損傷する確率を評価するためには、地震荷重特有の荷重形態によって生じる応力レベル及び応力分布に関する技術的知見を拡充し、地震以外の機械荷重と比べた場合のその影響の度合いを分析する必要がある。

本研究では、はじめに地震荷重下で容器及び配管に発生する応力レベル及び応力分布を既往研究から調査し、溶接部を対象としたP F M評価において地震荷重の考慮の要否を検証する（１次スクリーニング、図１参照）。続いて、地震荷重下で溶接部近傍に大きな応力が発生する条件について、過去の振動試験やF E M解析の結果<sup>例えば(14)</sup>を参照するとともに、必要に応じて新たに試験や解析を実施し、詳細評価を行う（２次スクリーニング）。最後に、２次スクリーニングの結果に基づき、地震荷重を考慮する必要があると判定されたケースについては、P F M評価を実施し、地震起因の容器・配管の破損確率を分析する。分析した結果に基づき、地震荷重を考慮した場合に供用期間中検査の頻度及び検査箇所について留意すべき事項を取りまとめる。

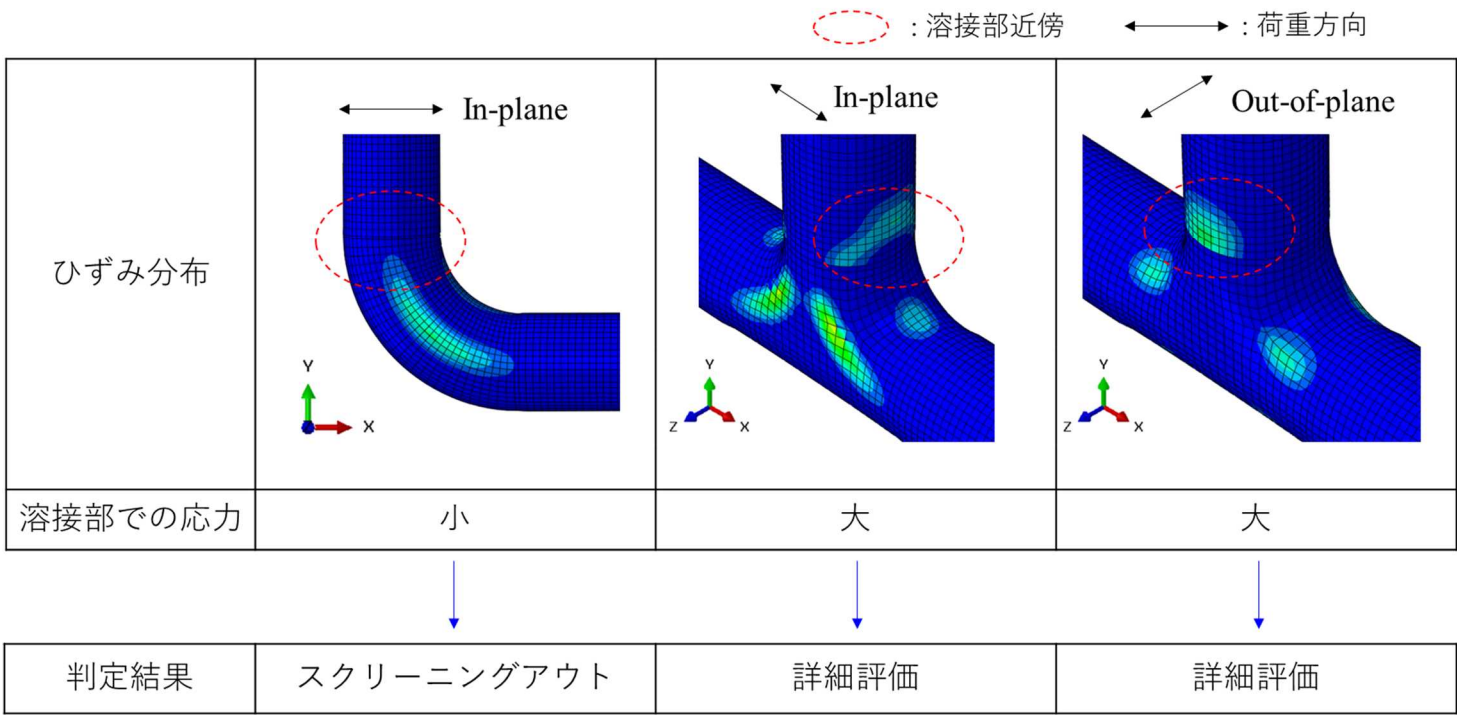


図１ 既往研究に基づく１次スクリーニングの概念図

（２）地震時の設備の同時損傷確率の算定手法に係る技術的知見の拡充【分類①、②】

設備の同時損傷確率に関する既往の算定手法として、一般社団法人日本原子力学会の学会標準「原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準：2015」では、「損傷の相関係数を用いる評価手法」及び「モンテカルロ法を用いた損傷相関の評価手法」を例示している。しかしながら、これらの手法に用いられる相関係数の設定条件等は明示的には検討されておらず、これらの手法の適用時の留意点は明確にされていない。

先行研究において、現実的応答の確率分布、相関係数等の仮定が必要となる既往の設備の同時損傷確率の算定手法（以下「既往手法」という。）に比べ適用性を拡張した手法として、設計情報を用いずに現実的なパラメータを用いた地震応答解析の結果からモンテカルロ法を用い、直接的に設備の同時損傷確率を算定する手法（図２参照、以下「提案手法」という。）を提案した<sup>(153)</sup>。本研究では、提案手法の実施手順や用いるパラメータ等を取りまとめるとともに、既往手法及び提案手法を用いて設備の同時損傷確率及びシステムの機能喪失確率の試算を行う。これらの結果を比較・分析し、既往手法を適用する場合の留意点を明確にする。

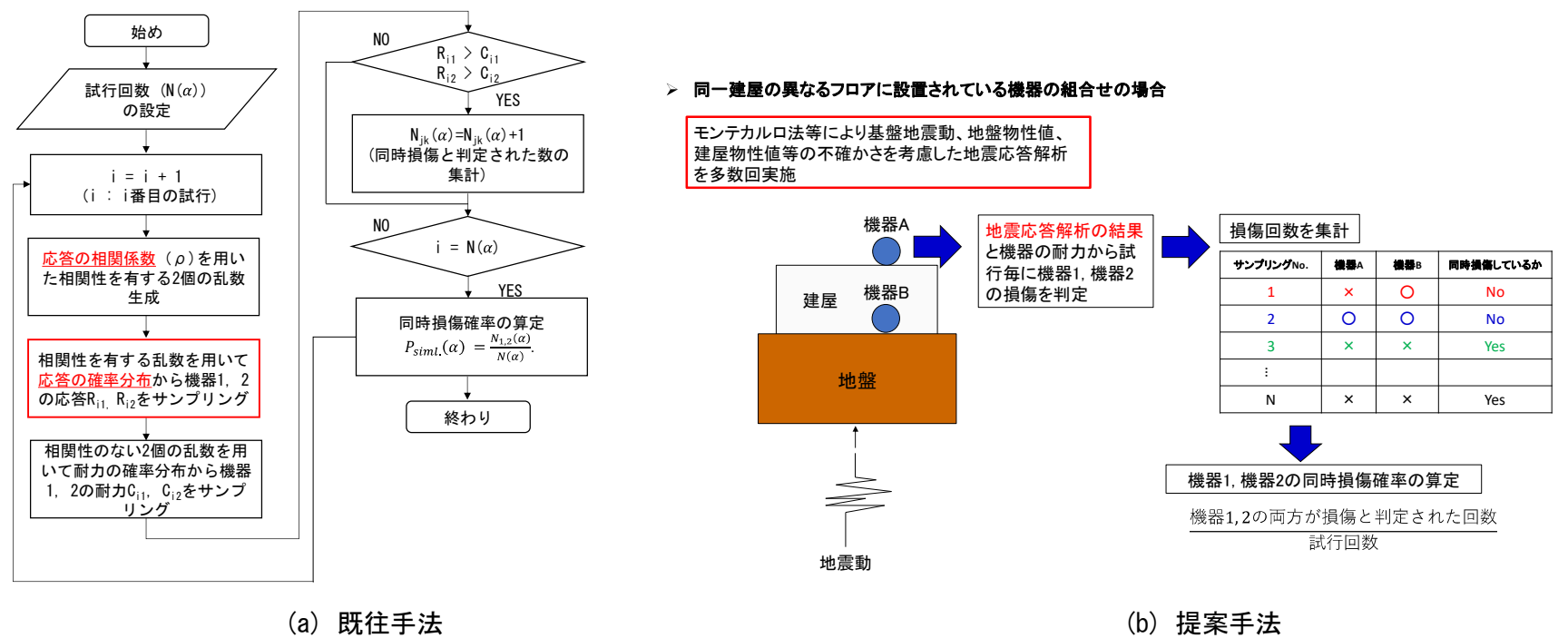


図２ 既往手法<sup>(5)</sup>及び提案手法<sup>(153)</sup>による同時損傷確率算定の流れ

（３）黒津波の発生可能性評価及び影響評価に係る技術的知見の拡充【分類①、②】

黒津波の発生可能性評価として、対象地域周辺における海域の堆積土砂の粒径や堆積分布等の特性の把握が重要である。例えば、港湾の平面形状は堆積土砂の移動に複雑な影響を与え、港口幅が小さいほど浮遊砂堆積量が増加し土砂が遠くまで到達しうることが示されている<sup>(164)</sup>。粒径の細かい土砂等は、複雑な堆積分布を呈することが想定されるものの、既往の知見は限られている。また、海域における粒径の細かい土砂等の堆積分布と陸域に到達する津波の密度・粘性等との関係についても十分な知見はない。そのため、土砂の堆積位置を変化させた場合の、陸域に到達する津波の密度・粘性等の特性を把握する水理試験を実施し、その関係について分析・整理する（図3参照）。当該水理試験については、委託研究等で実施することを予定している。あわせて、粒径の細かい土砂等を対象とした堆積土砂の移動に係る数値解析を実施し、実施した水理試験の再現を行うとともに、実スケールのモデルを用いてデータを取得する。これらを踏まえ、黒津波の発生可能性の評価に係る技術的知見を整理する。

黒津波の影響評価として、密度・粘性変化に伴う波形変化（図4参照）を考慮した、波力・波圧の評価手法に係る技術的な知見を拡充する必要がある。そのため、波形変化の要因となる粒径の細かい土砂等を含む濁水を用い、堤体位置・海底勾配等の諸条件を考慮した波力・波圧試験及び数値解析を実施する。それとともに、令和6年度までに取得した波力・波圧試験及び数値解析データを基に、黒津波の影響評価のための津波波圧評価手法を提案する。波力・波圧試験については、委託研究等で実施することを予定している。さらに、密度の増加による水深係数の増加にも関連した着水による荷重にも着目する。

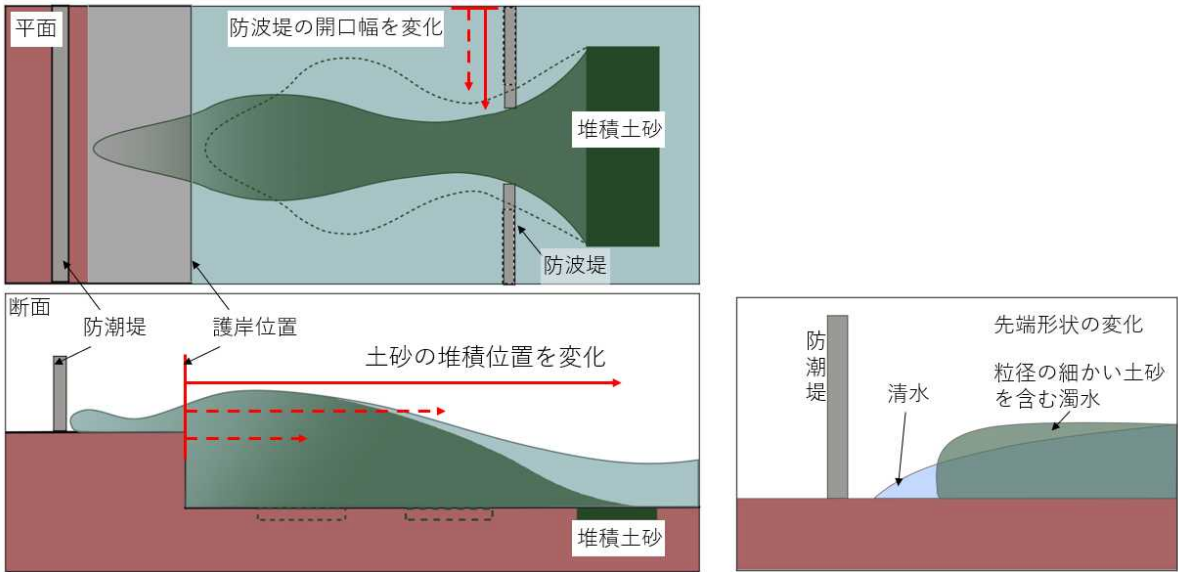


図3 黒津波の発生可能性評価に係る水理試験の概念図 図4 黒津波の影響評価に関する波形変形の概念図

（4）既往の設備の耐震試験で観察される損傷モードとは異なる衝撃振動による損傷モードに係る技術的知見の拡充【分類①及び分類②】

令和6年度までに実施してきた電動弁等の衝撃加振試験において、モータフレーム部のフランジが破断したことによって機能喪失が発生した<sup>(12)</sup>（電動弁駆動部の全景は図5の左図のとおり、衝撃加振試験により図5の中央図のとおりモータフレーム部のフランジが破断し、モータが脱落した。図5の右図は破断したモータフレーム部フランジの拡大であり、取り付けボルトは残存し、フランジ部が破断したことがわかる。）。既往の設備の耐震試験の知見<sup>(176)</sup>では、モータフレームの取り付けボルトが先に損傷し、フランジの破断は発生しないと考えられており、同試験では既往の耐震試験の知見とは異なる衝撃振動による損傷モードが生じた。

本研究では、電動弁駆動部の衝撃加振試験で損傷した電動弁のモータフレーム部のフランジに着目し、耐震試験と衝撃加振試験の入力振動数及び加速度の差異、減衰の差異、材料特性、振動性状の変化、破断面の破壊力学的分析等の観点でフランジ損傷の詳細な分析を行う。また、衝撃加振試験においてモータフレーム部のフランジに発生した応力を増加させた要因の一つと考えられる衝撃振動によるボルト緩み等に係る文献調査、必要に応じて材料試験及びボルト緩みに関するモデル試験を実施することで、ボルト緩みの観点でフランジ損傷の詳細な分析を行う。そして、衝撃振動に対する電動弁の振動性状を反映した応答解析モデルを用いた解析等により、モータフレーム部のフランジに発生した応力等を評価する。上述の分析結果と解析結果を整理することで、既往の設備の耐震試験で観察される損傷モードとは異なる衝撃振動による損傷モードの発生原因を究明し、大型航空機の衝突に対する設備の安全性評価手法に係る留意事項等を整理する。

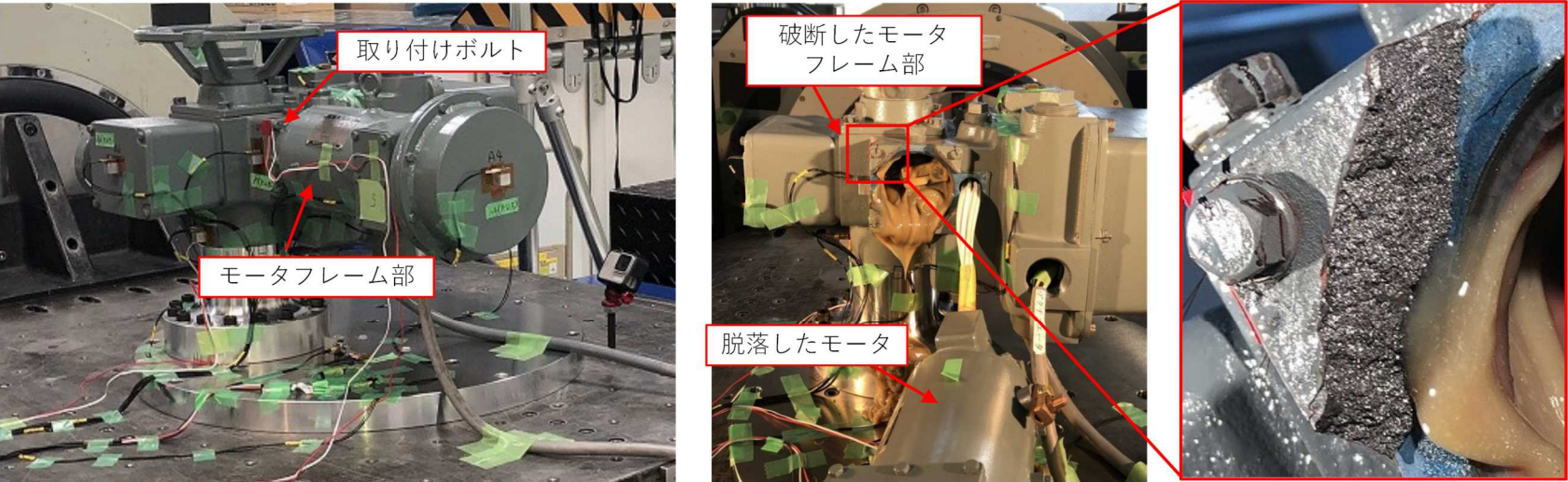


図5 電動弁モータフレーム部のフランジ破断状況

7. 成果目標と実施計画

（1）地震荷重を受ける容器・配管溶接部の損傷形態に係る技術的知見の拡充

|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>成果目標：地震を起因とした容器・配管の溶接部の損傷形態及びその損傷確率を分析し、<b>P F Mを活用した供用期間中検査が取り入れられた一般社団法人日本機械学会の「発電用原子力設備規格 維持規格」亀裂解釈の技術評価における妥当性確認改正の要否判断</b>に用いる技術的根拠を取りまとめる。</p> <p>実施計画：令和 7 年度は、溶接部への地震荷重の影響に着目し、地震荷重下で容器及び配管に発生する応力レベル及び応力分布を既往研究から調査する。令和 8 年度は、令和 7 年度の分析結果を基に溶接部近傍で地震荷重が厳しくなる条件（配管要素の形状、荷重条件等）を分析する。既往の振動試験又は有限要素解析のデータが不足する場合には、令和 8 年度に試験体の製作を開始し、令和 9 年度に追加の試験・解析を実施する。令和 10 年度には、令和 9 年度までの分析結果に基づき、溶接部近傍で地震荷重によって損傷することが否定できないケースについて、P F Mによる損傷確率の評価を実施する。また、地震荷重を受ける容器・配管の溶接部での損傷確率の評価結果に基づき、供用期間中検査において留意すべき事項を取りまとめる。令和 11 年度以降に、これらの成果を論文として取りまとめる。</p> <p>（２）地震時の設備の同時損傷確率の算定手法に係る技術的知見の拡充</p> <p>成果目標：地震による設備の同時損傷確率に係る既往の算定手法の適切性を確認するため、既往手法で用いられる相関係数の適切な算出条件等を整理する。</p> <p>実施計画：令和 7 年度は、提案手法の実施手順や用いるパラメータ等を取りまとめる。続いて、令和 8 年度及び令和 9 年度は、既往手法及び提案手法を用いて、設備の同時損傷確率及びシステムの機能喪失確率の試算を行う。これらの結果を比較・分析し、令和 10 年度までに既往手法の適切性及び既往手法を適用する場合の留意点を整理する。令和 11 年度以降に、これらの成果を論文として取りまとめる。</p> <p>（３）黒津波の発生可能性評価及び影響評価に係る技術的知見の拡充</p> <p>成果目標：黒津波の発生可能性評価として、堆積土砂の汀線からの距離及び量とそれが汀線に到達した時の津波の密度の関係を整理する。また、黒津波の影響評価として、密度の増加による水深係数の変化を考慮した津波波圧評価手法を提案する。</p> <p>実施計画：令和 7 年度は、黒津波の発生可能性評価及び黒津波の影響評価に係る知見収集及び関連する基礎的検討を行う。また、黒津波の影響評価に関しては、令和 6 年度までに取得した波力・波圧試験及び数値解析データを踏まえ、必要な波力・波圧試験及び数値解析を整理する。黒津波の発生可能性評価については、委託研究において、土砂の堆積位置を変化させた場合の陸域に到達する津波の密度・粘性等の特性の変化について、縦断方向及び平面方向の水理試験を計画し実施する（令和 7 年度～令和 9 年度）。あわせて、粒径の細かい土砂等の移動に係る数値解析を実施する。また、黒津波の影響評価については、密度変化・波形変化等の影響について、波力・波圧試験及び数値解析を計画し実施する（令和 8 年度～令和 9 年度）。さらに、密度の増加による水深係数の増加にも関連した着水による荷重にも着目する。また、黒津波の発生可能性評価及び影響評価の成果を論文として取りまとめる。令和 10 年度までに、黒津波の発生可能性評価に係る技術的知見を整理するとともに、黒津波の影響評価のための津波波圧評価手法を提案する。</p> <p>（４）既往の設備の耐震試験で観察される損傷モードとは異なる衝撃振動による損傷モードに係る技術的知見の拡充</p> <p>成果目標：電動弁駆動部等の既往の設備の耐震試験で観察される損傷モードとは異なる衝撃振動による損傷モードの発生原因を明らかにし、これに基づいて大型航空機の衝突に対する設備の安全性評価手法に係る留意事項等を整理する。</p> <p>実施計画：令和 7 年度は、電動弁駆動部の衝撃加振試験で観察された電動弁のモータフレーム部のフランジ損傷に着目し、耐震試験と衝撃加振試験の入力振動数及び加速度の差異、減衰の差異、材料特性、振動性状の変化、破断面の破壊力学的分析等の観点でフランジ損傷の詳細な分析を実施する。また、これらの分析に加えて、モータフレーム部のフランジに発生した応力を増加させた要因の一つと考えられる衝撃振動によるボルト緩み等についても文献調査を行う。さらに、令和 8 年度は、必要に応じて材料試験及びボルト緩みに関するモデル試験等を実施し、フランジ損傷に係る知見を拡充する。令和 9 年度には、これらの分析及び試験結果を踏まえて、衝撃振動に対する電動弁の振動性状を反映した応答解析モデルを用いた解析等を実施することで、モータフレーム部のフランジに発生した応力等を評価する。令和 10 年度までに、上述の分析結果と解析結果を整理することで、既往の設備の耐震試験で観察される損傷モードとは異なる衝撃振動による損傷モードの発生原因を究明する。また、大型航空機の衝突に対する設備の安全性評価手法に係る留意事項等を抽出・整理する。令和 11 年度以降に、これらの成果を論文として取りまとめる。</p> |
|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

| 行程表                                                     |                                                             |                                                  |                                                  |                                                 |                                                                                                                                                |
|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                         | R 7 年度                                                      | R 8 年度                                           | R 9 年度                                           | R 1 0 年度                                        | R 1 1 年度以降                                                                                                                                     |
| ( 1 ) 地震荷重を受ける容器・配管溶接部の損傷形態に係る技術的知見の拡充                  |                                                             |                                                  |                                                  |                                                 | 論文投稿* <sup>1</sup> ▽<br><br>-----<br><div><div></div><p>・民間規格の妥当性<br/>確認関連する基準<br/>等への技術的知見<br/>の反映の要否を検討</p></div>                            |
|                                                         | ・文献調査、事前解析の実施、配管要素試験体の設計・製作                                 | ・配管要素試験体の製作、配管要素試験体の振動試験及び試験データの取得、事後解析の実施       | ・配管要素試験体の振動試験及び試験データの取得、事後解析の実施                  | ・ P F M 解析の実施、供用期間中検査において留意すべき事項の取りまとめ          |                                                                                                                                                |
| ( 2 ) 地震時の設備の同時損傷確率の算定手法に係る技術的知見の拡充                     |                                                             |                                                  |                                                  |                                                 | 論文投稿* <sup>1</sup> ▽<br><br>-----<br><div><div></div><p>・規制に反映すべき<br/>新たな知見が得られた場合には、関連する現行の規制基準等への反映を検討<br/>関連する基準等への技術的知見の反映の要否を検討</p></div> |
|                                                         | ・提案手法の取りまとめ                                                 | ・評価対象の選定、既往手法及び提案手法を用いた設備の同時損傷確率及びシステムの機能喪失確率の試算 | ・既往手法及び提案手法を用いた設備の同時損傷確率及びシステムの機能喪失確率の試算         | ・既往手法の適切性及び既往手法を適用する場合の留意点の整理                   |                                                                                                                                                |
| ( 3 ) 黒津波の発生可能性評価及び影響評価に係る技術的知見の拡充                      |                                                             |                                                  | 論文投稿* <sup>2</sup> ▽                             |                                                 | 論文投稿* <sup>2</sup> ▽                                                                                                                           |
|                                                         | ＜黒津波の発生可能性評価に係る水理試験（委託）＞                                    |                                                  |                                                  |                                                 |                                                                                                                                                |
|                                                         | ・黒津波の発生可能性評価に係る水理試験の準備・実施                                   | ・黒津波の発生可能性評価に係る水理試験の実施                           | ・黒津波の発生可能性評価に係る水理試験の実施                           |                                                 |                                                                                                                                                |
|                                                         | ＜黒津波の発生可能性評価に係る数値解析及び黒津波の影響評価の水理試験・数値解析（規制庁）＞               |                                                  |                                                  |                                                 |                                                                                                                                                |
|                                                         | ・黒津波の発生可能性評価及び影響評価に係る知見収集及び関連する基礎的検討<br>・令和6年度までに取得したデータの整理 | ・黒津波の発生可能性評価に係る数値解析及び影響評価に係る水理試験の準備・実施           | ・黒津波の発生可能性評価に係る数値解析及び影響評価に係る水理試験の実施<br>・上記の結果の整理 | ・黒津波の発生可能性評価に係る技術的知見の整理、黒津波の影響評価のための津波波圧評価手法の提案 | -----<br><div><div></div><p>・規制に反映すべき<br/>新たな知見が得られた場合には、関連する現行の規制基準等への反映を検討<br/>関連する基準等への技術的知見の反映の要否を検討</p></div>                             |
| ( 4 ) 既往の設備の耐震試験で観察される損傷モードとは異なる衝撃振動による損傷モードに係る技術的知見の拡充 |                                                             |                                                  |                                                  |                                                 | 論文投稿* <sup>1</sup> ▽                                                                                                                           |
|                                                         | ・フランジ損傷の詳細分析<br>・衝撃振動によるボルト緩み等に関する文献調査                      | ・材料試験及びボルト緩みに関するモデル試験                            | ・材料特性等を反映した応答解析モデルの構築、応答解析の実施、応力評価、結果の整理         | ・衝撃振動による損傷モードの発生原因の究明、安全評価手法に係る留意事項等の整理         | -----<br><div><div></div><p>・規制に反映すべき<br/>新たな知見が得られた場合には、関連する現行の規制基準等への反映を検討</p></div>                                                         |



|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | Keita Fujiwara, Toshio Teragaki, Kenta Hibino and Kotaro Kubo, Study on a Method for Evaluating the Seismic<br>(153) Fragilities Considering the Response Correlation for Seismic PRA, 17th International Conference on Probabilistic<br>Safety Assessment and Management & Asian Symposium on Risk Assessment and Management (PSAM17&ASRAM2024), 2024.<br>(164) 灘岡和夫、田村仁、飯塚広泰、中小港湾港口部に発生する水平大規模渦による浮遊砂流入特性に関する数値解析、海岸工学論<br>文集、Vol. 51、No. 1、pp. 451-455、令和 2 年<br>(175) 独立行政法人 原子力安全基盤機構、平成 19 年度 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査機器耐力その 4 (弁)<br>に係る報告書 (JNNES/SSD08-17 08 耐部報-0017)、平成 21 年 |
|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

研究計画（案）

|                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |       |                                                     |
|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-----------------------------------------------------|
| 1. プロジェクト<br>(始期：R7年度<br>終期：R10年度) | 7. 原子力施設の経年劣化等を考慮した火災影響評価手法の整備に関する研究                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 担当部署  | 技術基盤グループ<br>システム安全研究部門                              |
|                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 担当責任者 | 皆川 武史 主任技術研究調査官                                     |
| 2. カテゴリー・研究分野                      | 【横断的原子力安全】B) 火災防護                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 主担当者  | 宮崎 利行 主任技術研究調査官<br>瀧澤 真 副主任技術研究調査官<br>櫻井 智明 技術研究調査官 |
| 3. 背景                              | <p>火災は、原子力施設における共通原因故障を引き起こす起因事象の中でも重要な事象の一つであることから、火災事象について継続的に知見を拡充する必要がある。本プロジェクトでは、「電気ケーブル等の経年劣化影響を考慮した火災時・事故時・通常運転時の絶縁低下現象の評価」として、原子力施設の実機材の入手機会も活用して長期運転に伴い生じる電気ケーブル等の経年劣化評価に係る知見を拡充するとともに、これらの知見を踏まえて電気ケーブルの火災時の熱劣化による絶縁低下の評価手法を策定する。また、「火災影響評価手法・解析コード等の整備」として、ケーブルや可燃性液体などの様々な可燃物の火災試験データ、火災バリアの試験データ等を取得するとともに解析を行い、火災影響評価手法・解析コード等の整備を進める。</p> <p>&lt;電気ケーブル等の経年劣化影響を考慮した火災時・事故時・通常運転時の絶縁低下現象の評価&gt;</p> <p>(1) 規制課題</p> <p>1) 火災源近傍又は高温ガス中に存在する電気ケーブル（以下「ケーブル」という。）は、その熱により絶縁体の絶縁抵抗が急激に低下し、特に計装・制御ケーブルの場合には誤信号を発信する可能性がある<sup>(1,2)</sup>。また、熱が加え続けられると熱劣化が進み、それにより絶縁体の絶縁抵抗は更に低下し、短絡・地絡・ホットショートが発生するおそれがある。このようにケーブルの熱劣化に係る事象は、原子力施設の安全に対する阻害要因と成り得る。「実用発電用原子炉及びその附属施設の火災防護に係る審査基準（原規技発第1306195号（平成25年6月19日原子力規制委員会決定）」（以下「火災防護審査基準」という。）には、火災時の安全停止（高温停止、低温停止）を維持することとの要求がある。また、「原子力発電所の内部火災影響評価ガイド（原規技発第13061914号（平成25年6月19日原子力規制委員会決定）」（以下「内部火災ガイド」という。）では、火災時の<b>原子炉の安全停止を確認するために実施する内部火災影響評価の手法の例が示されており、この中で火災防護対象ケーブルの損傷と機能喪失が考慮されているが、電気ケーブルは火災時に損傷し完全に機能喪失に至る以前であっても熱影響により絶縁抵抗が低下し接続機器の誤動作等が生じる可能性も考えられるが、これらに関する対応は記載されていない。また、内部火災ガイドではケーブルの損傷基準は一部を除き米国で取得されたデータを参照している。したがって、これらの点について規制基準類の妥当性確認に資する技術基盤を整備するため、ケーブルの熱劣化試験データを取得すること及びその評価手法を整備することが必要である。</b>また、火災防護審査基準では、ケーブルは難燃ケーブル（火災により着火し難く、著しい燃焼をせず、また、加熱源を除去した場合はその燃焼部が広がらない性質を有するケーブル）を使用することとされている。今後、原子力施設の長期運転に伴い、ケーブルの構成材料の高分子材料等が温度等の使用環境条件により経年劣化し、難燃性が変化する可能性が考えられることから、ケーブル難燃性の経年影響について調査するとともに、調査の結果、難燃性の経年影響が有意である場合には<b>その評価手法を整備する必要がある。</b></p> <p>2) 原子力規制委員会は、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和32年法律第166号）」及び「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則（昭和53年通商産業省令第77号）」に基づき、運転開始後30年以降の長期施設管理計画の認可の申請に係る経年劣化に関する技術的な評価の技術的妥当性の確認を行っており、この確認は、常に最新の科学的・技術的知見に基づいて行う必要がある。ケーブル、原子炉格納容器電線貫通部（以下「電気ペネトレーション」という。）、電動弁駆動部等に係る「電気・計装品の絶縁低下」は、「実用発電用原子炉の長期施設管理計画の審査基準（原規規発第2308304号（令和5年8月30日原子力規制委員会決定）」）において機器・構造物における経年劣化事象として必ず抽出して評価すべき主要6事象の1つとされている。これまで、電気・計装品の絶縁低下に係る健全性評価は、主に加速劣化試験により模擬的に経年劣化を付与した機器の特性を評価することにより行われてきたが、今後更に原子力発電所の高経年化が進むことが想定される状況において、電気・計装品の実機における劣化挙動やこれが性能に与える影響を調査し、審査に対応するための知見を拡充する必要がある。<b>また、1)で述べたケーブル難燃性の経年影響の有無も含め、新たな知見が得られた場合はこれらを踏まえた技術的妥当性の確認が必要となる。</b></p> <p>(2) 研究課題</p> <p>1) 先行安全研究プロジェクト（火災防護に係る影響評価に関する研究（フェーズ2）（R3～R6年度））では、火災時のケーブルの熱劣化による絶縁低下の評価手法を策定するため、国内の原子力発電所で使用されている数種類のケーブル（主に原子炉格納容器内で使用される難燃エチレンプロピレンゴム絶縁体を使用したケーブルの新品ケーブル及び長期使用に伴う経年劣化（熱劣化）を模擬的に付与した供試体（以下「経年劣化模擬ケーブル」という。）について火災時を模擬した熱劣化試験を行い、加熱温度がケーブルの絶縁低下に及ぼす影響を評価した。また、熱によるケーブル絶縁体の損傷速度を評価し、その速度から絶縁抵抗の低下予測式を得た。さらに、実際の火災時に想定される状況（火災源近傍、煙プルーム中、高温ガス中、ケーブルが過熱しているトレイ内）を模擬した熱劣化試験を行い、基礎データを取得した。しかしながら、国内の原子力施設では様々な仕様のケーブルが使用されていることから、先行研究で試験対象としていないケーブルについて、使用材料や構造を踏まえた代表的なケーブルについてデータを取得するとともに、絶縁性能に寄与するケーブル構成材料の熱的特性等を評価する必要がある。また、長期使用に伴う経年劣化による難燃性及び絶縁性能への影響を評価する必要がある。</p> <p>2) 先行安全研究プロジェクト（実機材料等を活用した経年劣化評価・検証に係る研究（R2～R6年度））では、長期間使用され、</p> |       |                                                     |

|           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|           | <p>かつ、原子炉格納容器内の設計基準事故又は重大事故等(重大事故に至るおそれがある事故又は重大事故)の事故時環境で機能要求がある個別の電気・計装設備について、原子力発電所の実機材等を活用して劣化状態の分析等を進めるとともに事故時環境における絶縁性能に係る研究を行ってきた。引き続き実機材の入手機会を活用し、新たに電気・計装設備の系統機器の組合せや設置状況も踏まえた試験等を行い、実機状況を反映した知見拡充を行う必要がある。また、屋外に敷設されている一部の高圧ケーブルは、降雨等による高湿度環境にさらされる可能性があり、水トリ（外部から侵入した水分が絶縁体中を拡散して樹枝状に伸展する現象）による絶縁性能の低下の可能性もある。現状の保守管理では、定期的に絶縁診断を行って管理基準値内にあること及び劣化傾向を確認し、必要に応じ取替等が検討されているが、実機ケーブルでの水トリ発生状況等を調査し、現在適用されている保守管理方法の妥当性確認のための知見を取得する必要がある。</p> <p>＜火災影響評価手法・解析コード等の整備＞</p> <p>（１）規制課題</p> <p>「内部火災ガイド」では、火災による影響を考慮しても、原子炉を安全停止するための火災防護対策が妥当であるかどうかを評価する例が示されているが、これらの手法を継続的に見直していくことが必要であるとされている。また、「実用発電用原子炉の安全性向上評価に関する運用ガイド（原規技発第 1311273 号（平成 25 年 11 月 27 日原子力規制委員会決定）」では、確率論的リスク評価（以下「PRA」という。）は、実施手法の成熟状況に応じて、段階的に拡張していくものとされており、PRA を行う内部事象の例として内部火災(原子炉施設の内部で発生する火災)が挙げられている。事業者が行う PRA の妥当性を確認するためには、火災影響評価手法・解析コード等の継続的な整備が必要である。</p> <p>（２）研究課題</p> <p>先行安全研究プロジェクト（火災防護に係る影響評価に関する研究（フェーズ 2）（R3～R6 年度））では、火災時におけるケーブルの挙動に係る解析、可燃性液体火災に係る解析、火災バリアの機能喪失に係る解析及び火災解析手法の体系的な整備に係る研究を行った。火災時におけるケーブルの挙動に係る解析については、開放ケーブルトレイにおける火災伝播解析を実施したが、精度が十分ではないという課題がある。また、海外の先行研究では火災時における熱劣化に係る解析モデルを整備されているが、国内のケーブルへの適用性について検討する必要がある。可燃性液体火災に係る解析については、文献調査結果及び一部試験データに基づいて解析モデルを構築したが、モデルの妥当性については検討の余地があることから、今後は海外で取得されたより実規模の火災に近い試験データ<sup>(3)</sup>を含む多様な試験データと比較を行い解析モデルの妥当性確認を進めるとともに、燃焼時の周囲の設備への熱的影響をより精緻に評価できるよう、既存の解析モデルを改良・整備する必要がある。火災バリアの機能喪失に係る解析については、火災時の影響緩和機能を担う火災区画の構成要素のうち防火扉を対象として代表 1 ケースについて耐火試験を行ったが、火災シナリオの検討には複数ケースの防火扉(異なる加熱曲線、扉の材質、種類)、防火ダンパ、貫通部シールなどの試験を行い、評価モデルを整備する必要がある。火災解析手法の体系的な整備については、これまで個別現象や単一もしくは数個の部屋における火災解析を対象としてきたが、今後は海外規制機関等における研究成果等<sup>(4)</sup>を参考として、複数の火災源や複数個の部屋に広がる火災などのより複雑な現象の解析手法を検討するとともに、より詳細な解析モデルに係る最新知見を既存の火災解析手法に反映し、火災影響評価手法・解析コード等のさらなる高度化を行う必要がある。</p> |
| 4. 目的     | <p>（１）電気ケーブル等の経年劣化影響を考慮した火災時・事故時・通常運転時の絶縁低下現象の評価</p> <p>「1) 電気ケーブルの熱劣化評価に係る研究」として、「経年劣化によるケーブルの難燃性への影響評価に係る研究」及び「火災時の熱によるケーブルの熱劣化影響評価に係る研究」を行うことにより、<b>火災防護に係る規制基準類の妥当性確認に資するため</b>に必要な技術的知見を取得することを目的とする。また、「2) 電気・計装設備の健全性評価に係る研究」として、「事故時環境で機能要求のある電気・計装設備に係る研究」及び「高圧ケーブルの水トリ劣化に係る研究」を行うことにより、運転開始後 30 年以降の<b>特に今後想定されるより長期間の原子炉の運転に係る</b>長期施設管理計画の認可申請における経年劣化の技術的な評価の妥当性の確認に必要な電気・計装品の絶縁低下に係る知見を取得することを目的とする。</p> <p>（２）火災影響評価手法・解析コード等の整備</p> <p>ケーブルや可燃性液体などの可燃物の火災試験データ等を取得して解析コードの妥当性確認を行うとともに、海外規制機関等の火災解析手法も参考とし、火災影響評価手法・解析コードの信頼性の向上を行うことを目的とする。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 5. 知見の活用先 | <p><b>本プロジェクトにより、規制に反映すべき新たな知見が得られた場合には、規制基準等への反映の検討に活用される。</b>また、長期施設管理計画の認可申請の審査の技術基盤としての活用並びに事業者が行う火災解析等の妥当性を確認するためのツールとしての活用が期待される。</p> <p>（１）電気ケーブル等の経年劣化影響を考慮した火災時・事故時・通常運転時の絶縁低下現象の評価</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・火災防護審査基準</li> <li>・内部火災ガイド</li> <li>・原子力発電所の長期施設管理計画の認可の申請の審査の技術的判断根拠</li> </ul> <p>（２）火災影響評価手法・解析コード等の整備</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・内部火災ガイド</li> <li>・事業者が行う火災解析等の妥当性を確認するためのツール</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 6. 安全研究概要 | <p>本プロジェクトの研究は、「原子力規制委員会における安全研究の基本方針」（令和元年 5 月 2 9 日原子力規制委員会決定）における安全研究のうち以下の分類に基づき実施する。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

- ① 規制基準等の整備に活用するための知見の収集・整備（以下「分類①」という。）
- ② 審査等の際の判断に必要な新たな知見の収集・整備（以下「分類②」という。）
- ③ 規制活動に必要な手段の整備（以下「分類③」という。）
- ④ 技術基盤の構築・維持（以下「分類④」という。）

（１）電気ケーブル等の経年劣化影響を考慮した火災時・事故時・通常運転時の絶縁低下現象の評価【分類①及び分類②】

1) 電気ケーブルの熱劣化評価に係る研究

a. 火災時の熱によるケーブルの熱劣化影響評価に係る研究

本研究では、国内の原子力施設で使用されているケーブルの使用材料や構造を考慮して選定した代表的なケーブルを対象とし、新品ケーブル及び経年劣化模擬ケーブルを用いて、実際の火災時に想定される状況を含む火災時を模擬した熱劣化試験・解析を行い、加熱温度と絶縁抵抗低下の関係等を評価する。また、ケーブルの絶縁性能に寄与するケーブル構成材料の熱的特性等を評価する。これらを踏まえて、ケーブルの火災時の熱劣化による回路故障等に関する評価手法を整備する。また、長期間使用された実機材の入手機会を活用し、実機ケーブルの熱劣化試験を行い、試験データ及び知見を取得する。さらに、実機ケーブルと経年劣化模擬ケーブルの試験データを比較し、両者の劣化状態の違いが熱劣化時の絶縁性能に及ぼす影響について評価する。

b. 経年劣化によるケーブルの難燃性への影響評価に係る研究

本研究では、原子力施設で使用されているケーブルの使用場所、使用材料、熱劣化特性等を考慮して代表的なケーブル選定し、経年劣化模擬ケーブルを用いて、ケーブル難燃性評価に係る試験（燃焼試験、酸素指数試験、発熱量の測定等）を行うこと等により、経年劣化によるケーブルの難燃性への影響を確認する。なお、通常ケーブルの経年劣化評価ではケーブルの使用場所に応じて熱及び/又は放射線が考慮されるが、本研究においては、主に原子炉格納容器外のケーブルを対象とすることから熱による経年劣化のみを考慮する。また、原子力発電所で長期間使用された実機材の入手機会を活用し、実機ケーブルの燃焼性試験を行い、試験データ及び知見を取得する。さらに、実機ケーブルと経年劣化模擬ケーブルの試験データを比較し、両者の劣化状態の違いを踏まえた上で経年劣化による難燃性への影響の違いについて評価する。

2) 電気・計装設備の健全性評価に係る研究

a. 事故時環境で機能要求のある電気・計装設備に係る研究

先行研究では、原子炉格納容器内の事故時環境で機能要求がある機器（低圧ケーブル、電気ペネトレーション、電動弁駆動部）に係る研究を行ってきた<sup>(5)</sup>。一方、過去には、個別機器の健全性評価試験では問題が見られなかったものの、系統機器を組み合わせさせて試験した結果、不具合が発生した事例<sup>(6)</sup>が報告されており、系統機器の組み合わせを考慮した試験・評価を実施することの重要性を示唆している。本研究では、引き続き長期間使用された実機材の入手機会も活用して個々の機器について、機械特性、熱的特性、構造的特性等を調べて劣化状態を評価するとともに、事故時環境下における性能を評価し、経年劣化模擬を行った供試体の結果との比較評価等により知見を拡充する。さらに、事故時環境で機能要求のある電気・計装設備の系統機器の実機における組合せや設置状況を考慮した試験を行う。具体的には、国内の原子力発電所で重大事故等対処設備として使用されている計装設備における代表的な設置状況を踏まえて検出器（温度計、圧力計など）・ケーブル・コネクタなどを接続した試験体を作製し、事故模擬環境下における絶縁性能等を調査する。

b. 高圧ケーブルの水トリー劣化に係る研究

海水ポンプ等の屋外高圧機器の動力ケーブルとして使用される高圧架橋ポリエチレン絶縁ケーブル（以下「高圧 CV ケーブル」という。）は、降雨時等の高湿度環境にさらされる可能性があるため、水トリー劣化による絶縁性能の低下の可能性がある。このため、「高圧 CV ケーブルの保守・点検指針」<sup>(7)</sup>などを踏まえて絶縁診断（絶縁抵抗測定、直流漏れ電流試験、シース絶縁抵抗測定、遮へい層抵抗測定など）を適用して、管理基準値内にあること及び劣化傾向を確認し、必要に応じ取替等を行うことにより健全性が維持されている。これまで、一般の電力系統で使用されている高圧 CV ケーブルの水トリー劣化の調査・研究<sup>(7,8)</sup>が行われているが、原子力発電所で使用されている高圧 CV ケーブル（一般の電力系統で使用されているケーブルと基本的構造等は同等）の水トリー研究の報告例はない。また、原子力発電所において製造時期が古く水トリー耐性の低いとされる構造・材料を使用している高圧 CV ケーブルで水トリーによる劣化事象発生が確認されている。高圧 CV ケーブルの耐水トリー性は、製造方法・構造・材料（外部半導電層の種類等）により異なることが知られており<sup>(9)</sup>、また、耐用年数は敷設環境（水環境の有無）や使用状況（電界の有無）により大きく変化するとされている<sup>(10)</sup>。

このため、本研究では、先行安全研究プロジェクト（実機材料等を活用した経年劣化評価・検証に係る研究（R2～R6 年度））で入手した実機高圧 CV ケーブル及び本プロジェクト実施期間中に入手予定のケーブルを用いて、原子力発電所で実際に使用されている高圧 CV ケーブルの水トリーによる劣化状況を分析し、製造方法・構造・材料、敷設環境及び使用状況との関係性を評価する。また、高圧 CV ケーブルの劣化状況と現在実機適用されている絶縁診断技術による測定結果との関係を調査し、絶縁診断による劣化評価の保守性を確認する。

（２）火災影響評価手法・解析コード等の整備【分類③及び分類④】

火災防護に係る規制の高度化等に資するため、ケーブルや可燃性液体などの様々な可燃物の火災試験データ、火災バリアの試験データ等を取得して解析コードの妥当性確認を行う。あわせて、海外規制機関等の火災解析手法も参考にして、解析コードの信頼性の向上を図る。

a. 火災時におけるケーブルの燃焼及び熱劣化挙動に係る解析モデル等に関する研究

ケーブルは、原子力施設における主要な可燃性物質であるとともに、火災時の熱劣化により絶縁性能が低下し誤信号発生等の可能性があることから、火災時におけるケーブルの燃焼及び熱劣化の挙動に係る解析手法を整備することは重要である。火災時

|              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|              | <p>におけるケーブルの挙動に係る解析手法については、先行安全研究プロジェクト及び米国原子力規制委員会（以下「NRC」という。）における先行研究において解析モデル等が整備された<sup>(11)</sup>が、解析精度や国内で使用されているケーブルへの適用性等について課題がある。このため本研究では、先行研究等におけるケーブルの燃焼及び熱劣化に係るデータ等を整理するとともに、火災時におけるケーブルの燃焼及び熱劣化挙動に係る解析モデルを改良・整備し、解析手法を検討する。</p> <p>b. 可燃性液体火災に係る解析モデル等に関する研究</p> <p>原子力施設の内部及び外部には潤滑油等の可燃性の液体が多く存在しており、内部火災ガイド及び「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド（原規技発第 13061912 号（平成 25 年 6 月 19 日原子力規制委員会決定）」においても火災源として可燃性液体を挙げている。可燃性液体の火災においては液漏れ等により可燃性液体が床に溜まり、液面燃焼が生じる。液面燃焼時には浮力による高温空気の流れが生じ、周辺の設備へ熱的な影響を与える。火災解析で広く使われているフィールドモデル解析コード FDS (Fire Dynamics Simulator) では燃料液体内部の流動まで考慮したモデルを構築することは困難であり、それが実際の火災と火災解析との乖離の原因の一つとなっている。このため、先行安全研究では、燃料液体内部流動を考慮したモデル構築が可能なオープンソースの解析コード OpenFOAM で使用するためのモデルを作成した。本研究では、炭化水素（ヘプタン）等の可燃性液体火災を模擬した試験結果や海外で取得されたより実規模の火災に近い試験データ<sup>(3)</sup>と比較することにより、OpenFOAM による可燃性液体火災モデルを高度化し、可燃性液体火災時の熱的影響に係る解析手法を検討する。</p> <p>c. 火災バリアの機能喪失や電気機器等の回路故障に係る解析モデル等に関する研究</p> <p>原子力施設内の火災は区画化により火災の影響を緩和する方策がとられている。区画は防火扉、防火ダンパ、貫通部シール等の静的な防護対策によって構成されるが、人的要因や開閉装置の故障、シールの劣化等によって複数区画に亘って火災影響が拡大するシナリオも考慮する必要がある。先行安全研究では、火災区画の構成要素のうち防火扉を対象として代表 1 ケースについて耐火試験を行った。本研究では、火災シナリオの検討には複数ケースの防火扉（異なる加熱曲線、扉の材質、種類）、防火ダンパ、貫通部シールなどの試験を行い、防護バリアの機能喪失に係る評価モデルを整備する。また、火災時における電気機器等の回路故障に係る評価モデル等も検討する。</p> <p>d. 火災解析手法の体系的な評価研究</p> <p>NRC の NUREG-1824（2007、2017 年）<sup>(4)</sup>では手計算モデル、ゾーンモデル（火災区画を上下 2 層に分割してモデル化するもので、一般に単純な火災については精度が高い）及びフィールドモデル（火災区画/区域を細かいメッシュでモデル化するもので、複雑な火災も精度よく取り扱うことが可能とされる）を複数の火災試験に適用し、原子力発電所内外の複数の火災シナリオについて解析手法の妥当性を確認している。本研究では NUREG-1824 以降の知見（a～c で得られた知見を含む）及び新規の火災試験（必要に応じて実施）で得られた知見を、原子力規制庁で整備している既存の火災解析手法に取り入れ、ゾーンモデル及びフィールドモデルについて複数シナリオで解析手法の妥当性を検討する。<b>検討に当たっては、先行知見<sup>(4, 12)</sup>を踏まえて必要かつ適切な解析精度目標を設定し火災解析を進める。</b></p> |
| 7. 成果目標と実施計画 | <p>（１）電気ケーブル等の経年劣化影響を考慮した火災時・事故時・通常運転時の絶縁低下現象の評価【分類①及び分類②】</p> <p>1) 電気ケーブルの熱劣化評価に係る研究</p> <p>成果目標：国内の原子力施設で使用されている代表的なケーブルを対象としてケーブル難燃性評価に係る試験を行うとともに、火災時を模擬した絶縁性能評価に係る試験・解析を行い、知見を拡充することにより、ケーブルの火災時の熱劣化による回路故障等に関する評価手法を整備する。</p> <p>実施計画：以下のとおり、各年度の研究を実施する。a. は、委託研究を活用することとし、委託先機関の専門的知見に基づく試験等を実施し、原子力規制庁ではこれらの結果を総合的に踏まえて分析・評価するとともに規制への活用の観点から考察を行い、成果を論文等として取りまとめる。</p> <p>【R 7 年度の実施内容】</p> <p>a. 電気ケーブルの熱劣化評価に係る研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・未劣化ケーブルを用いた敷設環境を模擬した熱劣化試験を行う。</li> <li>・経年劣化模擬の条件の検討を行う。</li> <li>・経年劣化模擬ケーブルの作製を行う。</li> </ul> <p>b. 経年劣化によるケーブルの難燃性への影響評価に係る研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・経年劣化模擬の条件の検討を行う。（（１）１）a. と共通）</li> <li>・経年劣化模擬ケーブルの作製を行う。（（１）１）a. と共通）</li> <li>・未劣化ケーブルを用いた規格に基づく燃焼性試験を行う。</li> <li>・未劣化ケーブルの加熱時における熱分解ガス等の評価を行う。</li> </ul> <p>【R 8 年度の実施内容】</p> <p>a. 電気ケーブルの熱劣化評価に係る研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・経年劣化模擬ケーブルを用いた敷設環境を模擬した熱劣化試験を行う。</li> <li>・経年劣化模擬ケーブルの作製を行う。</li> </ul> <p>b. 経年劣化によるケーブルの難燃性への影響評価に係る研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・経年劣化模擬ケーブルの作製を行う。（（１）１）a. と共通）</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

- ・経年劣化模擬ケーブルを用いた規格に基づく燃焼性試験を行う。
- ・経年劣化模擬ケーブルの加熱時における熱分解ガス等の評価を行う。

【R 9 年度の実施内容】

a. 電気ケーブルの熱劣化評価に係る研究

- ・経年劣化模擬ケーブル及び実機ケーブルを用いた敷設環境を模擬した熱劣化試験を行う。

b. 経年劣化によるケーブルの難燃性への影響評価に係る研究

- ・経年劣化模擬ケーブル及び実機ケーブルを用いた規格に基づく燃焼性試験を行う。
- ・経年劣化模擬ケーブル及び実機ケーブルの加熱時における熱分解ガス等の評価を行う。

【R 1 0 年度の実施計画】

a. 電気ケーブルの熱劣化評価に係る研究

- ・ケーブルの熱劣化に関する試験データ及び知見を取りまとめる。
- ・ケーブルの熱劣化に係る評価手法を整備する。

b. 経年劣化によるケーブルの難燃性への影響評価に係る研究

- ・経年劣化がケーブルの難燃性に及ぼす影響に関する試験データ及び知見を取りまとめる。

2) 電気・計装設備の健全性評価に係る研究

成果目標：実機材を活用して劣化状態及び事故時環境下における性能を評価するとともに、実機の設置状況を踏まえた試験データを取得し、知見を拡充し、系統機器の実機における組合せや設置状況を考慮することによる実機状況をより反映した電気・計装設備の長期健全性評価手法を整備する。高圧 CV ケーブルの水トリー劣化については、実機高圧 CV ケーブルの劣化状況を分析し、製造方法・構造・材料、敷設環境及び使用状況との関係性を評価することにより、適用されている絶縁診断による劣化評価の保守性を確認する。

実施計画：以下のとおり、各年度の研究を実施する。a. 及び b. は、委託研究を活用することとし、委託先機関の専門的知見に基づく試験等を実施し、原子力規制庁ではこれらの結果を総合的に踏まえて分析・評価するとともに規制への活用の観点から考察を行い、成果を論文等として取りまとめる。

【R 7 年度の実施内容】

a. 事故時環境で機能要求のある電気・計装設備に係る研究

- ・実機状況を踏まえ試験対象とする代表的な系統機器(検出器・ケーブル・コネクタ・電気ペネトレーション等)を選定し、調達する。
- ・試験体への模擬的な経年劣化の付与に必要な基礎的な劣化特性データの取得を行う。
- ・実機ケーブル等の入手状況に応じ、各種分析(手法は表面観察、密度測定、フーリエ変換赤外分法(FT-IR)、示差熱-熱重量測定(TG-DTA)、破断時伸びなどから実機ケーブル等の材料・構造等を踏まえて決定。以下同様。)により劣化状態を評価するとともに事故時環境下における性能を評価する。

b. 高圧ケーブルの水トリー劣化に係る研究

- ・実機高圧 CV ケーブルの絶縁体について、水トリー発生状況を観察するとともに、各種分析により劣化状態を評価する。
- ・実機で屋外敷設されている高圧ケーブルに適用されている絶縁診断技術(直流漏れ電流試験等)により劣化状態を評価する。
- ・実機高圧 CV ケーブルの絶縁破壊電圧を測定する。

【R 8 年度の実施内容】

a. 事故時環境で機能要求のある電気・計装設備に係る研究

- ・前年度に選定した機器を調達する。
- ・試験体への模擬的な経年劣化の付与に必要な基礎的な劣化特性データの取得を行う。
- ・試験体への模擬的な経年劣化の付与(熱、放射線による加速劣化)を行う。
- ・代表的な系統機器の一部又は全部を組み合わせた試験体を用いて事故時環境下における性能試験を行う。
- ・実機ケーブル等の入手状況に応じ、各種分析により劣化状態を評価するとともに事故時環境下における性能を評価する。

b. 高圧ケーブルの水トリー劣化に係る研究

- ・実機高圧 CV ケーブルの入手状況に応じ、過年度と同様の試験等(劣化状況分析、絶縁診断技術による評価、絶縁破壊電圧測定)を行う。
- ・高分子材料の誘電・絶縁現象の解析手法(電流積分法(Q-t 法)等)による評価を行う。

【R 9 年度の実施内容】

a. 事故時環境で機能要求のある電気・計装設備に係る研究

- ・試験体への模擬的な経年劣化の付与(熱、放射線による加速劣化)を行う。
- ・代表的な系統機器の一部又は全部を組み合わせた試験体を用いて事故時環境下における性能試験を行う。
- ・事故時環境試験終了後の試験体を用いて劣化状態等の分析を行う。

|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・実機ケーブル等の入手状況に応じ、<b>各種</b>分析により劣化状態を評価するとともに事故時環境下における性能を評価する。</li> </ul> <p>b. 高圧ケーブルの水トリー劣化に係る研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・実機高圧 CV ケーブルの入手状況に応じ、過年度と同様の試験等（劣化状況分析、絶縁診断技術による評価、絶縁破壊電圧測定）を行う。</li> <li>・過年度の取得データを踏まえて、水トリー発生状況と絶縁破壊電圧の関係、絶縁診断技術による測定結果等の関係を評価し、絶縁診断による劣化評価の保守性を確認する。</li> </ul> <p>【R 1 0 年度の実施計画】</p> <p>a. 事故時環境で機能要求のある電気・計装設備に係る研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・代表的な系統機器の一部又は全部を組み合わせた試験体を用いて事故時環境下における性能試験を行う。</li> <li>・事故時環境試験終了後の試験体を用いて劣化状態等の分析を行う。</li> <li>・実機ケーブル等の入手状況に応じ、<b>各種</b>分析により劣化状態を評価するとともに事故時環境下における性能を評価する。</li> </ul> <p>b. 高圧ケーブルの水トリー劣化に係る研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・実機高圧 CV ケーブルの入手状況に応じ、過年度と同様の試験等（劣化状況分析、絶縁診断技術による評価、絶縁破壊電圧測定）を行う。</li> <li>・過年度の取得データを踏まえて、水トリー発生状況と絶縁破壊電圧の関係、絶縁診断技術による測定結果等の関係を評価し、絶縁診断による劣化評価の保守性を確認する。</li> </ul> <p>（２）火災影響評価手法・解析コード等の整備【分類③及び分類④】</p> <p>成果目標：火災防護に係る規制の高度化等に資する評価手法等を整備するため、既往の知見の調査、必要に応じた火災試験を行い、その成果をゾーンモデル及びフィールドモデルによる火災影響評価手法に反映することにより高精度化を図る。また、代表的な火災シナリオについて、ゾーンモデルの適用可否を明らかにするとともに、フィールドモデルは代表的な火災解析コードである FDS の適用可否を明らかにし、必要であれば改良について検討を行う。</p> <p>実施計画：以下のとおり、各年度の研究を実施する。b. は、委託研究を活用することとし、委託先機関の専門的知見に基づく試験等を実施し、原子力規制庁ではこれらの結果を総合的に踏まえて分析・評価するとともに規制への活用の観点から考察を行い、成果を論文等として取りまとめる。</p> <p>【R 7 年度の実施内容】</p> <p>a. 火災時におけるケーブルの燃焼及び熱劣化挙動に係る解析モデル等に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・過年度まで行ったケーブル燃焼・熱劣化試験のデータを整理する。</li> <li>・ケーブル燃焼挙動に関し CHRISTIFIRE（NUREG/CR-7010）のデータ及びケーブル熱劣化挙動に関し NRC の CAROLFIRE（NUREG/CR-6931）のデータを整理する。</li> </ul> <p>b. 可燃性液体火災に係る解析モデル等に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・可燃性液体火災試験を行い、燃料液体内部及び空気の流動、輻射等の解析モデル開発に必要なパラメーターを取得する。</li> <li>・過年度に作成したオープンソースの解析コード OpenFOAM による火災解析モデルを可燃性液体火災試験結果及び PRISME 試験データ<sup>(3)</sup>と比較し、モデルの高度化を行う。</li> </ul> <p>c. 火災バリアの機能喪失や電気機器等の回路故障に係る解析モデル等に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・過年度の火災バリア試験を踏まえて防火扉、ダンパ等の火災バリア試験を複数ケースで行う。</li> <li>・電気機器等の回路故障に関し、実施設における電気回路の設計等に関する情報を整理する。</li> </ul> <p>d. 火災解析手法の体系的な評価研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・NUREG-1824 の Supplement に記載されている火災試験のデータ整理を行う。</li> <li>・PRISME（2006-2011）、及び PRISME-2（2011-2016）試験のデータ整理を行う。</li> <li>・NUREG-1824 の Supplement 等に記載された各種火災について、ゾーンモデルに分類される解析コードであるアメリカ国立標準技術研究所（National Institute of Standards and Technology: NIST）の CFAST とフランス放射線防護・原子力安全研究所（Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire: IRSN）の Sylvia で火災解析を行い、比較する。</li> <li>・FDS による火災解析をスーパーコンピュータで行い計算時間の短縮を行うための計算手法を検討する。</li> </ul> <p>【R 8 年度の実施内容】</p> <p>a. 火災時におけるケーブルの燃焼及び熱劣化挙動に係る解析モデル等に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ケーブル燃焼挙動に関し、過年度に整理した CHRISTIFIRE（NUREG/CR-7010）のデータ等を基に、燃焼に係る解析モデルを検討し、その妥当性を<b>確認</b>する。また、モデル改良に当たっての具体的な課題を抽出する。</li> <li>・ケーブル熱劣化挙動に関し、過年度に整理したケーブルの熱劣化試験のデータ等を基に、熱劣化に係る解析モデルの国内ケーブルへの適用性について検討するとともに、モデル改良に当たっての具体的な課題を抽出する。</li> </ul> <p>b. 可燃性液体火災に係る解析モデル等に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・引き続き可燃性液体火災試験を行い、燃料液体内部及び空気の流動、輻射等のモデル開発に必要なパラメーターを取得する。</li> </ul> |
|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

- ・過年度行った可燃性液体火災試験結果等と比較し、OpenFOAM による可燃性液体火災モデルを高度化する。

c. 火災バリアの機能喪失や電気機器等の回路故障に係る解析モデル等に関する研究

- ・過年度の火災バリア試験を踏まえて防火扉、ダンパ等の火災バリア試験を複数ケースで行う。
- ・過年度までの火災バリア試験の結果とゾーンモデルによる予測を比較し、ゾーンモデルによる火災解析を改良する。
- ・電気機器等の回路故障に関し、過年度に整理した電気回路に関する情報を踏まえ、火災時の回路故障により発生しうる事象について検討する。また、回路故障を模擬した試験における電気回路の構成及びパラメーターの検討を行い、当該試験の具体的な実施内容を策定する。

d. 火災解析手法の体系的な評価研究

- ・過年度に整理した PRISME 試験のデータを用いて、ゾーンモデルによる火災解析の検証を行う。
- ・過年度に整理した NUREG-1824 の Supplement の試験結果と FDS による解析結果を比較し、フィールドモデルによる火災解析の検証を行う。過年度の検討を参考に、スーパーコンピュータ上で解析を行い、解析時間を短縮する。

【R 9 年度の実施内容】

a. 火災時におけるケーブルの燃焼及び熱劣化挙動に係る解析モデル等に関する研究

- ・前年度の検討結果を踏まえ、ケーブルの燃焼及び熱劣化挙動に係る解析モデルの改良を行う。

b. 可燃性液体火災に係る解析モデル等に関する研究

- ・引き続き可燃性液体火災試験を行い、燃料液体内部及び空気の流動、輻射等のモデル開発に必要なパラメーターを取得する。
- ・過年度行った可燃性液体火災試験結果等と比較し、OpenFOAM による可燃性液体火災モデルを高度化する。

c. 火災バリアの機能喪失や電気機器等の回路故障に係る解析モデル等に関する研究

- ・過年度の火災バリア試験を踏まえて防火扉、ダンパ等の火災バリア試験を複数ケースで行う。
- ・過年度までの火災バリア試験の結果をフィールドモデルで検証する。
- ・回路故障を模擬した試験を実施し、回路故障時の電流等のデータを取得する。

d. 火災解析手法の体系的な評価研究

- ・過年度まで行った、ゾーンモデルによる火災解析の結果及び知見を整理し取りまとめる。
- ・スーパーコンピュータによる解析手法を、過年度に整理した PRISME 試験のデータに適用し、フィールドモデルによる火災解析の検証を行う。

【R 10 年度の実施計画】

a. 火災時におけるケーブルの燃焼及び熱劣化挙動に係る解析モデル等に関する研究

- ・ケーブル火災解析についてのまとめを作成する。

b. 可燃性液体火災に係る解析モデル等に関する研究

- ・拡充が必要な可燃性液体火災試験データを特定して必要な試験を行うとともに、これまでの試験結果をまとめる。
- ・過年度までの OpenFOAM による可燃性液体火災モデルについて、モデルを高度化するために行った改良点を整理する。
- ・開発したフィールドモデルコードの公開について検討する。

c. 火災バリアの機能喪失や電気機器等の回路故障に係る解析モデル等に関する研究

- ・過年度まで行った火災バリア試験、及び解析結果について結果をまとめる。
- ・回路故障を模擬した試験で取得したデータを踏まえ、火災時における電気機器等の回路故障に係る評価モデルを作成する。

d. 火災解析手法の体系的な評価研究

- ・過年度まで行った、フィールドモデルによる火災解析の結果及び知見を整理し取りまとめる。

|                                                                              |                                                                   |                                                                                                               |                                                           |                                                       |                         |
|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------|
| 行程表                                                                          |                                                                   |                                                                                                               |                                                           |                                                       |                         |
|                                                                              |                                                                   | R 7 年度                                                                                                        | R 8 年度                                                    | R 9 年度                                                | R 1 0 年度                |
| ( 1 ) 電気<br>ケーブル等の<br>経年劣化影響<br>を考慮した火<br>災時・事故<br>時・通常運転<br>時の絶縁低下<br>現象の評価 | 1) 電気ケーブルの熱劣<br>化評価に係る研究<br>a. 火災時の熱によるケー<br>ブル熱劣化影響に係る研究         | ・経年劣化模擬条件検討<br>・経年劣化模擬ケーブルの作製<br>・敷設環境模擬試験実施<br>・実機ケーブルの入手状況に応じ、分析評価等                                         |                                                           |                                                       | ・知見等とりまとめ<br>・学会発表・論文公表 |
|                                                                              |                                                                   | ・経年劣化模擬条件検討<br>・経年劣化処理ケーブルの作製<br>・規格試験実施<br>・熱分解ガス等の評価<br>・実機ケーブルの入手状況に応じ、分析評価等                               |                                                           |                                                       | ・知見等とりまとめ<br>・学会発表・論文公表 |
|                                                                              |                                                                   |                                                                                                               |                                                           |                                                       |                         |
|                                                                              |                                                                   |                                                                                                               |                                                           |                                                       |                         |
|                                                                              |                                                                   |                                                                                                               |                                                           |                                                       |                         |
|                                                                              |                                                                   |                                                                                                               |                                                           |                                                       |                         |
|                                                                              | 2) 電気・計装設備の健<br>全性評価に係る研究<br>a. 事故時環境で機能要求<br>のある電気・計装設備に<br>係る研究 | ・試験対象とする代表的な系統機器の選定・調達<br>・劣化特性データの取得・模擬的な経年劣化の付与<br>・事故時環境下における性能試験・試験後供試体の分析<br>・実機ケーブル等の入手状況に応じ、劣化状態の分析評価等 |                                                           |                                                       | ・知見等とりまとめ<br>・学会発表・論文公表 |
|                                                                              |                                                                   | ・実機高圧ケーブルの入手状況に応じ、水トリー発生状況の<br>観察、機器分析による劣化状態の評価、絶縁破壊電圧の測定<br>・絶縁診断技術（直流漏れ電流試験等）等により劣化状態を評価                   |                                                           | ・取得データを総合的に踏まえた絶縁診断<br>による劣化評価手法の保守性の評価               | ・知見等とりまとめ<br>・学会発表・論文公表 |
|                                                                              |                                                                   |                                                                                                               |                                                           |                                                       |                         |
|                                                                              |                                                                   |                                                                                                               |                                                           |                                                       |                         |
|                                                                              |                                                                   |                                                                                                               |                                                           |                                                       |                         |
|                                                                              |                                                                   |                                                                                                               |                                                           |                                                       |                         |
| ( 2 ) 火災影<br>響評価手法・<br>解析コード等<br>の整備                                         | a. 火災時におけるケー<br>ブルの燃焼及び熱劣化挙<br>動に係る解析モデル等に<br>関する研究               | ・過去のケーブル試験結果の整理<br>・米国NRCによる試験データの整理<br>・解析モデルの適用性の検討等<br>・解析モデルの改良                                           |                                                           | ・知見等とりまとめ<br>・学会発表・論文公表                               |                         |
|                                                                              |                                                                   | ・可燃性液体火災試験<br>・OpenFOAMIによる可燃性液体火災モデルの高度化                                                                     |                                                           | ・試験結果のまとめ<br>・高度化の改良点の整理                              |                         |
|                                                                              |                                                                   | ・火災バリア試験の実施                                                                                                   |                                                           | ・火災バリア試験と<br>解析結果のまとめ                                 |                         |
|                                                                              |                                                                   | ・ゾーンモデルとの比較<br>・電気回路及び回路故障に関する情報整理<br>・回路故障試験の詳細検討                                                            | ・フィールドモデルとの比較                                             | ・回路故障試験によるデータ取得<br>・回路故障に係る評価モデル<br>の作成               |                         |
|                                                                              |                                                                   | ・既往火災試験のデータ整理<br>・スパコンによるフィー<br>ルドモデル（FDS）検討<br>・ゾーンモデルによる解析<br>（NUREG-1824等）                                 | ・フィールドモデル解析<br>（NUREG-1824）<br>・ゾーンモデルによる解析<br>（PRISME試験） | ・フィールドモデル解析<br>（PRISME試験）<br>・ゾーンモデルによる解析<br>の、整理、まとめ |                         |
|                                                                              |                                                                   |                                                                                                               |                                                           |                                                       |                         |
|                                                                              | b. 可燃性液体火災に係<br>る解析モデル等に関する<br>研究                                 |                                                                                                               |                                                           |                                                       |                         |
|                                                                              |                                                                   |                                                                                                               |                                                           |                                                       |                         |
|                                                                              |                                                                   |                                                                                                               |                                                           |                                                       |                         |
|                                                                              |                                                                   |                                                                                                               |                                                           |                                                       |                         |
|                                                                              |                                                                   |                                                                                                               |                                                           |                                                       |                         |
|                                                                              |                                                                   |                                                                                                               |                                                           |                                                       |                         |
| c. 火災バリアの機能喪<br>失や電気機器等の回路故<br>障に係る解析モデル等に<br>関する研究                          |                                                                   |                                                                                                               |                                                           |                                                       |                         |
|                                                                              |                                                                   |                                                                                                               |                                                           |                                                       |                         |
|                                                                              |                                                                   |                                                                                                               |                                                           |                                                       |                         |
|                                                                              |                                                                   |                                                                                                               |                                                           |                                                       |                         |
|                                                                              |                                                                   |                                                                                                               |                                                           |                                                       |                         |
|                                                                              |                                                                   |                                                                                                               |                                                           |                                                       |                         |
| d. 火災解析手法の体系<br>的な評価研究                                                       |                                                                   |                                                                                                               |                                                           |                                                       |                         |
|                                                                              |                                                                   |                                                                                                               |                                                           |                                                       |                         |
|                                                                              |                                                                   |                                                                                                               |                                                           |                                                       |                         |
|                                                                              |                                                                   |                                                                                                               |                                                           |                                                       |                         |
|                                                                              |                                                                   |                                                                                                               |                                                           |                                                       |                         |
|                                                                              |                                                                   |                                                                                                               |                                                           |                                                       |                         |

|         |                                                                                                                                                                                                                                                  |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 8. 実施体制 | <p>【システム安全研究部門における実施者（主担当者には○を記載）】</p> <p>皆川 武史 主任技術研究調査官（実施項目（1）2）関係）</p> <p>○ 宮崎 利行 主任技術研究調査官（実施項目（2）関係）</p> <p>○ 瀧澤 真 副主任技術研究調査官（実施項目（1）1）関係）</p> <p>○ 櫻井 智明 技術研究調査官（実施項目（2）関係）</p> <p>梶島 一 首席技術研究調査官</p> <p>【委託研究先】</p> <p>実施項目（1）1）a 未定</p> |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|              | <p>実施項目（１）２）a, b 未定</p> <p>実施項目（２）b 未定</p> <p>【共同研究先】</p> <p>なし</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <p>9. 備考</p> | <p style="text-align: center;">文 献</p> <p>(1) 松田昭博、梶島一、石橋隆、笠原文雄、「原子力発電所用電力・制御ケーブルの火災時燃焼特性の実験的評価」、日本原子力学会誌「アトモス」、60 巻 7 号、pp.15-19、2018</p> <p>(2) 笠原文雄、松田航輔、加藤敬輝、梶島一、「米国における火災時安全停止回路解析の調査」、NRA 技術ノート、NTEN-2021-1001、2021 年 6 月</p> <p>(3) L. Audouin, L. Rigollet, H. Prêtre, W. Le Saux, M. Röwekamp, “OECD PRISME project: Fires in confined and ventilated nuclear-type multi-compartments - Overview and main experimental results”, Fire Safety Journal, 2013.</p> <p>(4) U. S. NRC, “Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications - Final Report (NUREG-1824, Supplement 1)”, 2016.</p> <p>(5) 皆川武史、池田雅昭、田口清貴、「重大事故環境下におけるケーブルの絶縁特性の分析」、NRA 技術報告、NTEC-2019-1002、2019 年 11 月</p> <p>(6) Information Notice No. 97-45: Environmental Qualification Deficiency for Cables and Containment Penetration Pigtailes, 1997</p> <p>(7) 日本電線工業会、「高圧 CV ケーブルの保守・点検指針」、技術資料、技資第 116 号 D、平成 24 年 2 月改正</p> <p>(8) 栗原隆史他、「乾式架橋・三層同時押出(E-E 方式)の 6.6kV 撤去 CV ケーブルの水トリー劣化調査」、電気学会論文誌 B、136 巻、3 号、pp.333-343、2016</p> <p>(9) 経済産業省電力安全課、「更新推奨時期に満たない高圧ケーブルにおける水トリー現象に係る注意喚起」に関する補足的周知、令和 5 年 12 月 1 日<br/> <a href="https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/oshirase/2023/12/20231201.pdf">https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/oshirase/2023/12/20231201.pdf</a>（2024 年 9 月 2 日確認）</p> <p>(10) 日本電線工業会、「電線・ケーブルの耐用年数について」、技術資料、技資第 107 号、平成元年 6 月</p> <p>(11) National Institute of Standards and Technology and U. S. NRC, “Cable Response to Live Fire (CAROLFIRE) Volume 3: Thermally-Induced Electrical Failure (THIEF) Model (NUREG/CR-6931, Vol. 3)”, 2008.</p> <p>(12) U. S. NRC, “Nuclear Power Plant Fire Modeling Analysis Guidelines (NPP FIRE MAG)”, 2012.</p> |

研究計画（案）

|                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |       |                                 |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|---------------------------------|
| 1. プロジェクト<br>（始期：R 7 年度<br>終期：R 1 0 年度） | 11. 改良型燃料炉心核特性評価技術に関する高度化研究                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 担当部署  | 技術基盤グループ<br>システム安全研究部門          |
|                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 担当責任者 | 後神 進史 主任技術研究調査官                 |
| 2. カテゴリー・研究分野                           | 【原子炉施設】 E) 熱流動・炉物理                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 主担当者  | 柴 茂樹 主任技術研究調査官<br>岩橋 大希 技術研究調査官 |
| 3. 背景                                   | <p>（１）規制課題</p> <p>東京電力福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえ、平成 25 年 7 月に実用発電用原子炉に係る規制基準（以下「新規制基準」という。）<sup>(1)</sup>が施行された。新規制基準では、これまでの通常運転、運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故事象に加えて、重大事故等（設計基準を超える事故）発生時の炉心損傷防止対策等を事業者に要求している。</p> <p>通常運転、運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故事象の安全解析にあつては、米国原子力事業者において、従来の保守的な条件を仮定した安全評価に代わって原子炉の詳細な体系や原子炉内での複雑な現象を現実的に予測する手法（以下「最適評価手法」という。）に基づく解析コード（以下「最適評価コード」という。）の適用に加え、解析モデルに起因する不確かさの伝播を考慮して評価対象となるパラメータが現実的に取り得る幅を評価する手法（以下「不確かさ評価手法」という。）を適用した BEPU（Best Estimate Plus Uncertainty）手法を導入する動き<sup>(2)</sup>がある。国内産業界においては最適評価コードの開発が進められるとともに、大学・研究機関を中心に不確かさ評価に関する研究が進められ、一般社団法人日本原子力学会によって、BEPU に属する入力データの不確かさの伝播を統計的に取り扱う統計的安全評価手法の適用に係る実施基準<sup>(3)</sup>が策定されている。沸騰水型原子炉（以下「BWR」という。）用 10 行 10 列燃料については、型式証明の申請<sup>(4)</sup>があり、適合性審査が進められているが、原子力エネルギー協議会（ATENA）から、10 行 10 列燃料を適用した原子炉の運転時の異常な過渡変化事象及び設計基準事故事象の評価に対して最適評価コードを適用すること、また、一部の過渡変化事象に対して安全裕度を定量化する統計的安全評価手法を適用することについて説明があった<sup>(5)</sup>。10 行 10 列燃料装荷炉心では、平均取出燃焼度の増加が見込まれる<sup>(5)</sup>ことから、軸方向出力分布が上部ピーク化し、BWR の加圧事象においては、制御棒挿入による原子炉緊急停止時に一時的に軸方向出力分布のピークが上方にひずむ（TVAPS:Time Varying Axial Power Shape）効果が顕在化すると考えられているため、10 行 10 列燃料装荷炉心への最適評価コードの適用性や炉心特性などの適合性審査に必要な技術的知見の取得が求められる。</p> <p>一方、重大事故等（設計基準を超える事故）発生時の炉心損傷防止対策等の有効性評価については、新規制基準<sup>エラー! 参照元が見つかりません。</sup>において、標準評価手法として最適評価手法を適用し、有効性評価の共通解析条件及び事故シーケンスグループの主要解析条件等を適用すること（ただし、保守的な仮定及び条件の適用を否定するものではない。）が規定されている。これにより、プラント安全対策の有効性評価では、最適評価コードが利用されている。したがって、適合性審査においては、最適評価コードの適用性の確認が重要となるため、最適評価コードに関する知見の取得が必要である。</p> <p>（２）研究課題</p> <p>既往の安全研究プロジェクト<sup>(6) (7)</sup>では、米国原子力規制委員会の CAMP（Code Applications and Maintenance Program）に参画し、最適評価コードである 3 次元核熱結合解析コード TRACE/PARCS<sup>(8) (9)</sup>（図 1 参照）を導入し、実機模擬炉心体系を対象にしたベンチマーク問題（BWR タービントリップ試験<sup>(10)</sup>、BWR 炉心安定性<sup>(11)</sup>、加圧水型炉（以下「PWR」という。）主蒸気管破断<sup>(12)</sup>など）の解析を実施することで、炉心特性に係る評価機能の欠落などの技術的課題を抽出した。また、実機炉心の燃焼追跡解析を行うことで、安全解析への最適評価コードの適用性を確認した。しかしながら、既往のプロジェクトでは、国内で運用実績のある 8 行 8 列及び 9 行 9 列燃料装荷 BWR 炉心を対象としており、10 行 10 列燃料装荷炉心燃焼追跡データの整備や 10 行 10 列燃料装荷炉心の安全解析を実施していない。</p> <p>本プロジェクトの実施期間中に、安全審査において事業者が提出してくることが想定される 10 行 10 列燃料装荷 BWR 炉心における原子炉の運転時の異常な過渡変化事象及び設計基準事故事象に係る安全解析の妥当性を確認するために、本プロジェクトの実施期間中に 10 行 10 列燃料のデータの整備を実施するとともに、BWR 炉心挙動を取り扱うことが可能な最適評価コードを整備することが必要である。</p> <p>また、運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故のうち反応度投入事象（RIA: Reactivity-Initiated Accident）の適合性審査では、保守的な投入反応度及び出力分布等を設定した炉心の最大燃料エンタルピー及びピーク出力部断熱燃料エンタルピー増分を評価し、それらが原子力安全委員会指針集の「発電用軽水型原子炉施設の反応度投入事象に関する評価指針」（以下「旧指針」という。）<sup>(13)</sup>の制限値を超えないことなどを確認していたが、近年の計算機能力の向上などに伴い、最適評価手法の適用が検討されつつある。このため、反応度投入事象に対しては、あらゆる運転状態を想定して、10 行 10 列燃料単一炉心だけでなく、異なる燃料集合体タイプが混在する炉心体系に対しても評価が可能となるような最適評価コードの整備が求められる。</p> <p>一方で、炉心解析技術の高度化の一環として、既往の安全研究プロジェクト<sup>(7)</sup>では、近似モデルが含まれる TRACE/PARCS コードなどの最適コードに対して参照解となる解析結果を得るために、運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故事象の炉心特性をより精緻に把握できる 3 次元詳細炉心動特性解析コードの開発（図 1 参照）を実施してきたが、実機炉心レベルへの適用に対して計算負荷などの技術的課題を抱えており、詳細動特性解析コードの改良整備を実施する必要がある。また、最適評価コードの高度化や信頼性確保の観点から、最新知見が反映された JENDL-5<sup>(14)</sup>などの評価済み核データライブラリや照射後試験データを活用して、最適評価コードの検証を実施する必要がある。さらに、近年、最適評価コードによる解析結果（出力パラメータである中性子増倍率、出力分布、核分裂生成核種インベントリ、反応度係数等）が取り得る不確かさを適切に定量化する試み<sup>(15)</sup>が、合理的な保守性を議論する観点で注目されており、核特性解析の入力パラメータとなる核データ（核反応断面積、核分裂収率、遅発中性子割合等）の不確かさ、解析対象の幾何形状や材料組成などの不確かさによる影響に関する技術的知見を蓄積することが必要である。</p> |       |                                 |

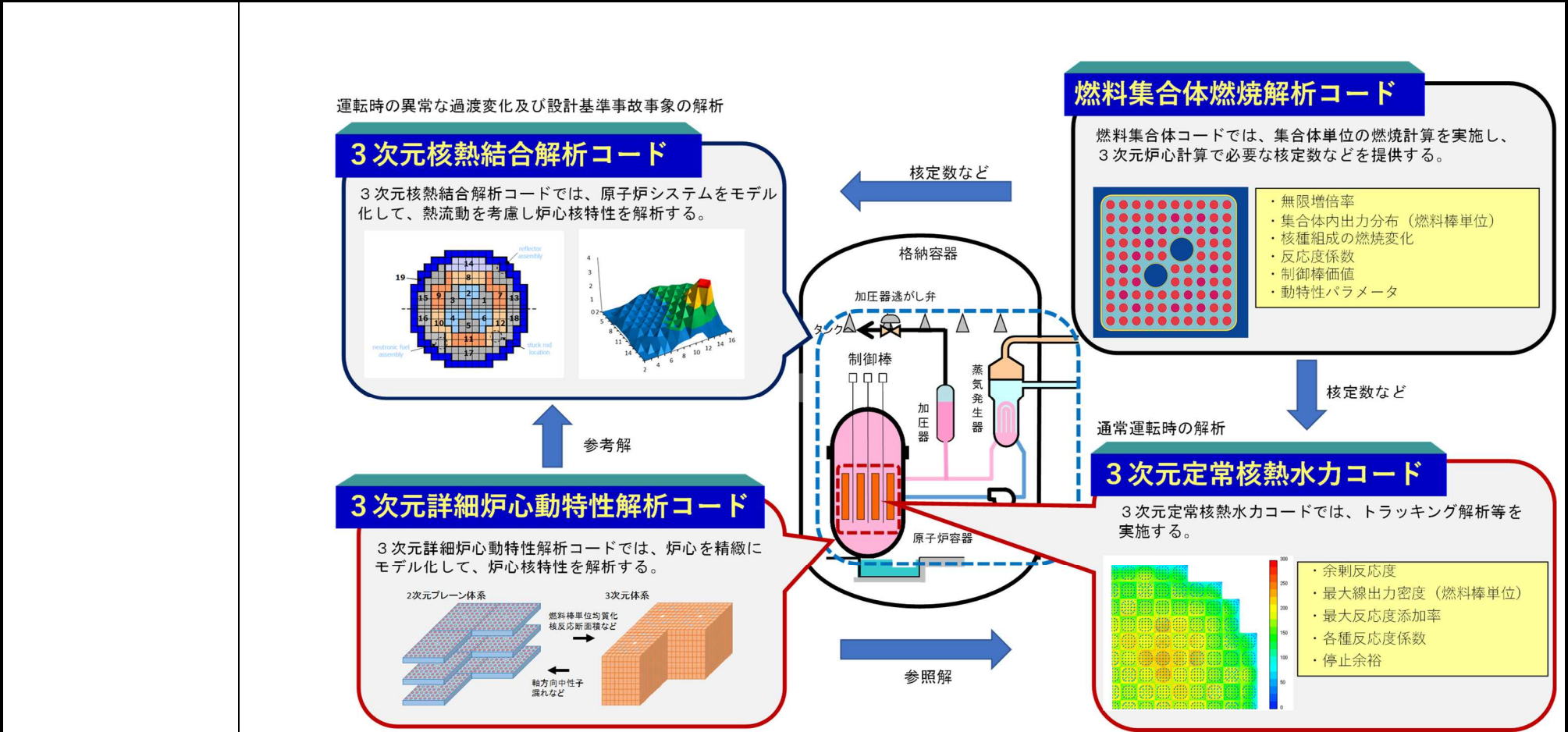


図 1 炉心核特性解析コードの全体概要

|           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4. 目的     | <p>本プロジェクトでは、10 行 10 列燃料集合体装荷炉心に関する安全規制に資する技術基盤の整備を進めるために、技術基盤整備の一環として以下の核特性解析に係る安全評価手法を構築する。</p> <p>(1) 10 行 10 列新型燃料炉心に対する評価技術の高度化</p> <p>(2) 炉心解析基盤技術の高度化整備</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 5. 知見の活用先 | <p>本プロジェクトの研究を通して得られた知見は、事業者の 10 行 10 列燃料<b>集合体装荷炉心</b>に関する設置変更許可申請の適合性審査において、<b>その過渡解析及び設計基準事故解析の妥当性を確認するための技術的根拠の一環</b>として活用する。また、炉心解析への最新の核データライブラリの適用や核特性評価手法の高度化等を実施することにより、最新知見を反映した安全規制の実現が可能となる。さらには、今後の事業者の安全性向上評価の<b>妥当性判断内容を確認する際に技術的根拠となる可能性がある。に資するとともに、本プロジェクトは、炉心解析に係る技術基盤を維持するために必要であるが期待できる。</b></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 6. 安全研究概要 | <p>本プロジェクトの研究は、「原子力規制委員会における安全研究の基本方針」（令和元年 5 月 29 日原子力規制委員会決定）における安全研究の目的のうち以下の分類に基づき実施する。</p> <p>② 審査等の際の判断に必要な知見の収集・整備（以下「分類②」という。）</p> <p>③ 規制活動に必要な手段の整備（以下「分類③」という。）</p> <p>④ 技術基盤の構築・維持（以下「分類④」という。）</p> <p>(1) 10 行 10 列新型燃料炉心に対する評価技術の高度化【分類②、分類③及び分類④】</p> <p>原子炉の通常運転、運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故に係る解析及び評価を行うために必要な 10 行 10 列新型燃料装荷炉心データの整備を実施する。また、10 行 10 列燃料単一炉心だけでなく、9 行 9 列燃料装荷炉心から 10 行 10 列燃料装荷炉心への移行段階で生じる異なる燃料集合体タイプが混在する炉心での出力運転中における制御棒の異常な引抜き及び制御棒落下事故の解析が実施可能となるように 3 次元核熱結合解析コード TRACE/PARCS を改良する。さらに、当該燃料に関する適合性審査では、最適評価手法を用いた安全解析が一部、適用される可能性が高いことから、最適評価手法における入力条件の保守性の考え方なども含め、知見を拡充する。</p> <p>a. 10 行 10 列新型燃料炉心データの整備</p> <p>図 2 に示すような 10 行 10 列燃料装荷炉心<sup>(16)</sup>における通常運転、運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故に係る解析及び評価が可能となるように、燃料棒の幾何形状や濃縮度分布などの設計情報を含む 10 行 10 列新型燃料データを整備し、平衡炉心モデルを作成する。</p> <p>b. 10 行 10 列新型燃料炉心への 3 次元核熱結合解析コード TRACE/PARCS の適用</p> <p>10 行 10 列燃料単一炉心だけでなく、異なる燃料集合体タイプが混在する炉心において反応度投入事象の燃料棒破損の判断基準である燃料エンタルピ等の評価が必要となる。このため、3 次元核熱結合解析コード TRACE/PARCS について、以下の改良・整備を実施する。</p> <ul style="list-style-type: none"><li>・混在炉心を対象とした集合体内燃料棒出力分布再構成モデルの機能拡張</li><li>・燃料エンタルピ評価機能、破損燃料棒数評価機能などの改良整備</li></ul> <p>原子炉起動時及び出力運転中における制御棒の異常な引抜き及び制御棒落下事故については、従来の保守的評価に代わって 3 次元核熱結合解析コード TRACE/PARCS による現実の炉心状態を反映した解析を実施する。また、安全研究プロジェクト「核</p> |

特性解析における最適評価手法及び不確か評価手法に関する研究」（令和３年度～令和６年度）<sup>(13)</sup>で得られた不確かさ評価に関する成果（ランダムサンプリング手法に基づく不確かさ評価手法）を炉心解析に取り入れていく。

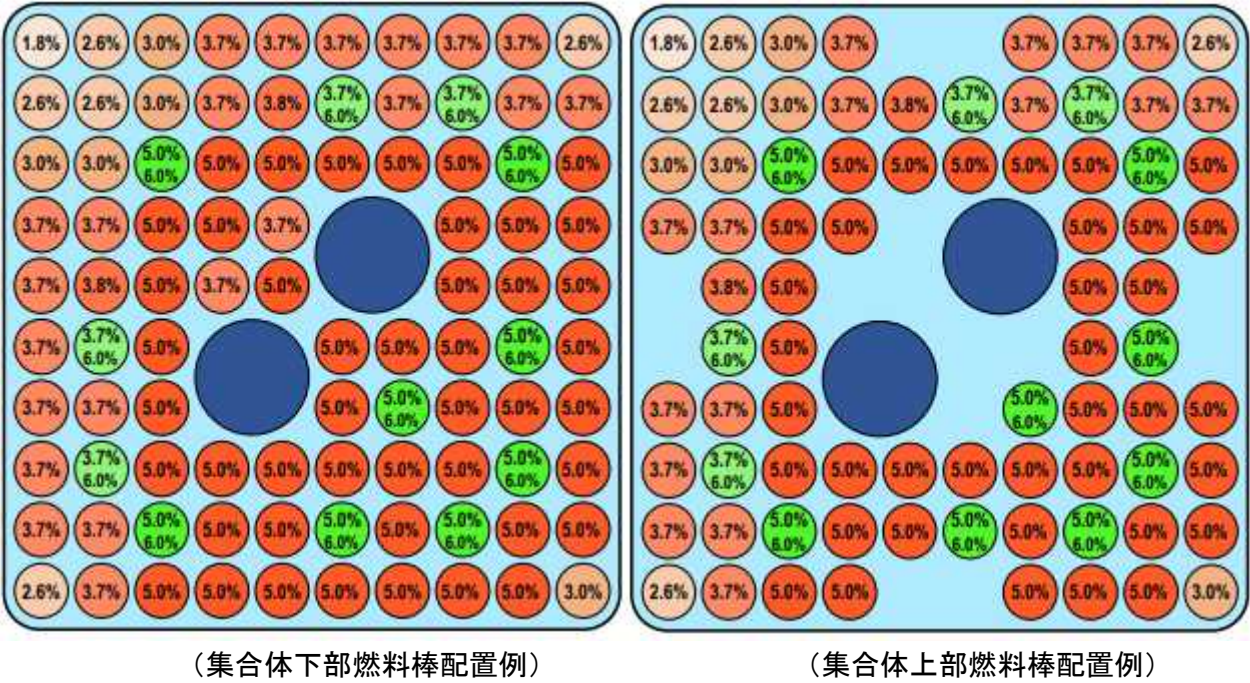


図２ 10 行 10 列新型燃料集合体の代表例<sup>(16)</sup>

（２）炉心解析基盤技術の高度化整備【分類②、分類③及び分類④】

運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故時の事象において精緻な参照解を得るために、ベンチマーク問題などの解析をとおり、BWR と PWR への本格導入において解決すべき技術的課題に取り組むとともに、３次元詳細炉心動特性解析コードの改良整備を実施する。また、国内外の最新の核特性解析手法や最新の核データライブラリに関する最新知見を収集し、適宜、（１）に反映する。

a. ３次元詳細炉心動特性解析コードの改良整備

運転時の異常な過渡変化及び事故時の事象における炉心挙動を精緻に把握するため、燃料棒単位の空間スケールで詳細な炉心挙動を解析することが可能なプレナーキャラクタースティックス法（以下「プレナーMOC」という。）<sup>(17), (18)</sup>に基づく３次元詳細炉心動特性解析コードの改良整備を実施する。プレナーMOC は、図３に示すとおり、炉心を軸方向に対して分割した２次元プレーン体系（燃料、被覆管、減速材などから構成される非均質断面）を計算し、その体系を燃料棒単位で均質にした上で積み重ねた３次元体系の計算を行うことで、炉心全体を対象とした核特性解析を実施する。

現状の３次元詳細炉心動特性解析コードでは、実運用面の技術的課題を抱えており、実機炉心レベルへの適用が困難であるため、以下の検討及び改良・整備を実施する。

- ・計算時間、計算メモリといった計算コストの低減（メッシュサイズが異なる解析条件の組合方法及び効率的な並列化）
- ・制御棒位置の変化を伴う事象の解析精度の向上（制御棒キャスピングモデル<sup>(19), (20)</sup>の検討）
- ・３次元詳細炉心動特性解析コードで使用する核反応断面積の取扱いの検討（集合体核特性解析コード CASMO5<sup>(21)</sup>からの受渡し）

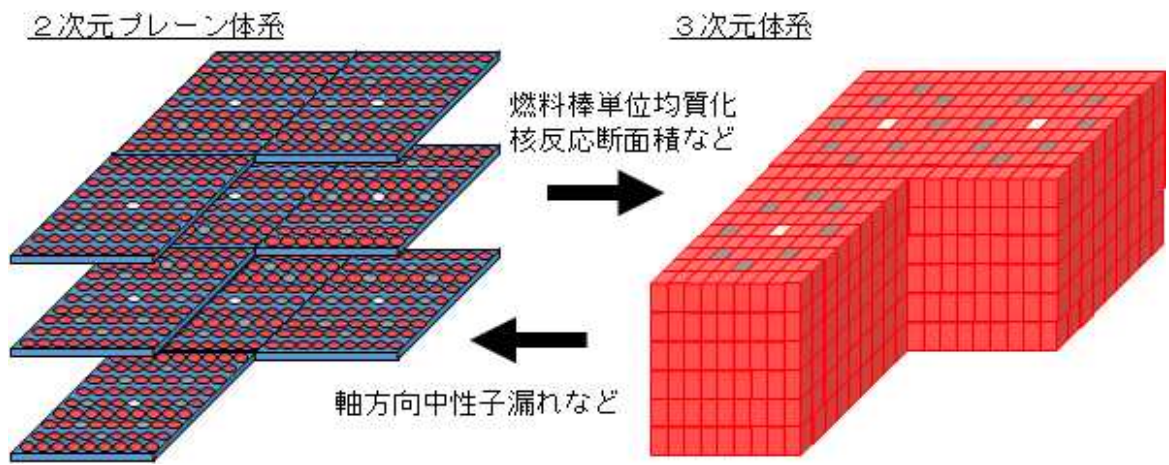


図３ プレナーMOC の概略図

３次元詳細炉心動特性解析コードの実機体系への本格適用を実施するとともに、近年 OECD/NEA において提案されている動特性解析の検証に係るベンチマーク問題（C5G7-TD ベンチマーク問題）<sup>(22), (23)</sup>などの実機模擬炉心体系への適用の解析等をとおり、解析精度を評価する。また、（１）で整備した最適コードによる解析結果との比較により、核特性解析手法や評価モデルの違いが評価結果に与える影響に関する知見を取得する。

b. 核データライブラリ、照射後試験データを活用した BEPU 手法の検証

これまでの安全研究において、主軸として使用している国産の評価済み核データライブラリ（JENDL）だけでなく、国外の評価済み核データライブラリ及び共分散データに関する最新知見を継続的に収集し、核データ及びその不確かさの改訂・拡充の内容を確認する。また、Studsvik 社の LAGER プロジェクト（Gd 燃焼計算モデルの検証のための照射後試験データ取得プロジェクト）で実施されている健全 Gd 燃料棒（Vattenfall AB 社所有の BWR の 11 ヶ月照射（9MWd/kgU）燃料棒）の照射後試験デー

|              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|              | <p>タを取得し、最適評価コードの予測精度などを確認する。さらに、核データライブラリの反応断面積、核分裂収率などの不確かさに加え、動特性パラメータの不確かさを考慮し、実機体系の解析などをとおして、炉心特性への影響評価を実施する。</p> <p>c. 核特性解析手法等における最新知見の活用</p> <p>国内メーカーが開発を進めている革新軽水炉の炉心設計に関する情報、革新的軽水炉シミュレーション（CASL）<sup>(25)</sup>、原子炉システムの科学的問題及び不確かさ解析に関するワーキングパーティ（以下「WPRS」という。）のベンチマーク問題<sup>(26)</sup>などで得られた技術的知見を、適宜、本プロジェクトへ反映する。さらに、国内外の最新の炉心解析手法や不確かさ評価手法を収集し、炉心解析上の技術的な課題を検討する。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 7. 成果目標と実施計画 | <p>（1）10 行 10 列新型燃料炉心に対する評価技術の高度化【分類②、分類③及び分類④】</p> <p>成果目標：</p> <p>10 行 10 列新型燃料装荷炉心における原子炉の通常運転、運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故に係る解析及び評価を行うために、10 行 10 列新型燃料装荷炉心データの整備を行う。また、3 次元核熱結合解析コード TRACE/PARCS の改良を R8 年度までに完了し、実機模擬炉心体系を対象とした BWR の加圧事象を対象とした原子炉緊急停止時の TVAPS 効果の検討及び制御棒落下事故の解析を実施することで炉心核特性などの確認を行う。</p> <p>実施計画：</p> <p>a. 10 行 10 列新型燃料炉心データの整備</p> <p>R7 年度は、燃料棒の幾何形状や濃縮度分布などの設計情報を含む 10 行 10 列新型燃料装荷炉心データの整備を実施する。R8 年度は、R7 年度に整備したデータを用いて、平衡炉心モデルの作成を完了する。</p> <p>b. 10 行 10 列新型燃料炉心への 3 次元核熱結合解析コード TRACE/PARCS の適用</p> <p>R7～R8 年度には、10 行 10 列新型燃料装荷平衡炉心モデルにおける運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故に係る解析が可能となるように TRACE/PARCS の改良整備を完了する。並行して、3 次元核動特性解析コード PARCS の機能検証として、OECD/NEA 及び U. S. NRC の PWR MOX/UO<sub>2</sub> 炉心ベンチマーク問題<sup>(24)</sup>などの解析を実施し、燃料棒単位の出力変動等の解析精度の評価を完了する。R9 年度から R10 年度では、上記、10 行 10 列新型燃料装荷炉心モデルを用いた運転時の制御棒の異常な引き抜き並びに、異常な過渡変化及び設計基準事故時の燃料集合体内燃料棒出力変動の評価を完了する。同様に、上記、10 行 10 列新型燃料装荷炉心モデルを用いた BWR 加圧事象及び設計基準事故時の燃料集合体内燃料棒出力変動の評価を R10 年度までに完了する。</p> <p>（2）炉心解析基盤技術の高度化整備【分類②、分類③及び分類④】</p> <p>成果目標：</p> <p>炉心内の燃料棒を非均質で扱うことのできる 3 次元詳細炉心動特性解析コードを実機模擬炉心体系に適用するために解決すべき技術的課題（計算資源の効率化、断面積の扱い）に取り組み、改良整備を実施する。また、炉心解析技術の高度化や信頼性向上に努めるために核データ、照射後試験データ、国内外の最新の炉心解析手法や不確かさ評価手法を中心に収集する。さらに、核データライブラリの反応断面積、核分裂収率などの不確かさに加え、動特性計算で動特性パラメータの不確かさを考慮し、実機体系の解析などをとおして、炉心特性に係る不確かさが解析結果に与える影響を評価する。不確かさ評価にあたっては、評価済み核データライブラリなどの最新知見を考慮する。さらに、革新軽水炉の炉心設計に関する情報、革新的軽水炉シミュレーション（CASL）<sup>(25)</sup>、原子炉システムの科学的問題及び WPRS のベンチマーク問題<sup>(26)</sup>などで得られた技術的知見を、適宜、本プロジェクトへ反映する。</p> <p>実施計画：</p> <p>a. 3 次元詳細炉心動特性解析コードの改良整備</p> <p>R7～R8 年度は、3 次元詳細炉心動特性解析コードにおける、効率的な並列化方法及び制御棒キャスピングモデル<sup>(19), (20)</sup>の検討を進める。また、3 次元詳細炉心動特性解析コードを用いて、OECD/NEA の非均質炉心体系における静特性解析の検証に係るベンチマーク問題（C5G7 ベンチマーク問題）<sup>(22), (23)</sup>の解析を実施し、解析精度の評価を完了する。さらに、集合体核特性解析コード CASM05 によって作成された核反応断面積を 3 次元詳細炉心動特性解析コードで使用するための、核反応断面積再構築手法の検討を完了し、これに基づく処理コードの整備を完了する。</p> <p>R9 年度～R10 年度は、3 次元詳細炉心動特性解析コードを用いて、実機炉心を非均質炉心体系として取り扱い、制御棒位置及び減速材密度が時間変化する事象に対する解析 <u>を実施し、モンテカルロコードで得られた計算結果などと比較することにより解析</u>精度の評価を完了する。また、3 次元核熱結合解析コード TRACE/PARCS の結果と比較し、評価モデルの違いにおける影響評価を完了する。</p> <p>b. 核データライブラリ、照射後試験データを活用した BEPU 手法の検証</p> <p>R7～R10 年度は、LAGER プロジェクトで得られた 10×10 燃料の照射後試験データを取得し、最適評価コードの予測精度等を確認する。JENDL-5 において改訂・拡充された核データ及びその不確かさを確認するとともに、これまでの安全研究において取得した解析データを用いて、JENDL-5 の再評価を実施する。また、国外の評価済み核データライブラリ（ENDF/B、JEFF など）の適用事例、次期バージョンの整備状況を中心に最新知見を R10 年度までに収集する。</p> <p>c. 核特性解析手法等における最新知見の活用</p> <p>R7～10 年度は、革新軽水炉の炉心設計に関する情報や CASL プロジェクトなどで得られた技術的知見を収集し、適宜、本プロジェクトへ反映する。また、国内外の最新の炉心解析手法や不確かさ評価手法を収集し、炉心解析上の技術的な課題を検討</p> |

|                                | <p>する。それらの情報を踏まえ、本プロジェクトで整備している 3 次元核熱結合解析コードへの反映の要否や不確かさ評価手法に関する機能拡張、分散低減手法の整備等に適宜、取り組む。</p> <p>行程表</p> <table><tr><th></th><th></th><th>R7 年度</th><th>R8 年度</th><th>R9 年度</th><th>R10 年度</th></tr><tr><td rowspan="2">（１）10 行 10 列新型燃料炉心に対する評価技術の高度化</td><td>a. 10 行 10 列新型燃料装荷炉心データの整備</td><td><div>→学会発表▽</div><div>・10 行 10 列新型燃料装荷炉心データの整備<br/>・ 平衡炉心モデルの作成</div></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>b. 10 行 10 列新型燃料炉心への 3 次元核熱結合解析コード TRACE/PARCS の適用</td><td><div>→学会発表▽</div><div>・ 3 次元核熱結合解析コード TRACE/PARCS の改良整備</div></td><td></td><td><div>→論文投稿▽</div><div>・ 原子炉起動時及び出力運転中における制御棒の異常な引抜き時並びに制御棒落下事故時の解析</div></td><td></td></tr><tr><td rowspan="3">（２）炉心解析基盤技術の高度化整備</td><td>a. 3 次元詳細炉心動特性解析コードの改良整備</td><td><div>→論文投稿▽</div><div>・ 並列化計算の検討<br/>・ 制御棒キャスピングモデルの検討<br/>・ 核反応断面積処理コードの整備</div></td><td></td><td><div>→論文投稿▽</div><div>・ 実機炉心レベルへの適用</div></td><td></td></tr><tr><td>b. 核データライブラリ、照射後試験データを活用した BEPU 手法の検証</td><td><div>→論文投稿▽</div><div>・ 10×10 燃料の照射後試験データを用いた最適評価コードの検証<br/>・ 評価済み核データライブラリに関する最新知見の活用</div></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>c. 核特性解析手法等における最新知見の活用</td><td><div>→論文投稿▽</div><div>・ 国際プロジェクトで得られた技術的知見の収集<br/>・ 不確かさ評価の機能拡張<br/>・ サンプルング手法における分散低減手法の検討</div></td><td></td><td></td><td></td></tr></table> |                                                                                                    |       | R7 年度                                                                     | R8 年度  | R9 年度 | R10 年度 | （１）10 行 10 列新型燃料炉心に対する評価技術の高度化 | a. 10 行 10 列新型燃料装荷炉心データの整備 | <div>→学会発表▽</div> <div>・10 行 10 列新型燃料装荷炉心データの整備<br/>・ 平衡炉心モデルの作成</div> |  |  |  | b. 10 行 10 列新型燃料炉心への 3 次元核熱結合解析コード TRACE/PARCS の適用 | <div>→学会発表▽</div> <div>・ 3 次元核熱結合解析コード TRACE/PARCS の改良整備</div> |  | <div>→論文投稿▽</div> <div>・ 原子炉起動時及び出力運転中における制御棒の異常な引抜き時並びに制御棒落下事故時の解析</div> |  | （２）炉心解析基盤技術の高度化整備 | a. 3 次元詳細炉心動特性解析コードの改良整備 | <div>→論文投稿▽</div> <div>・ 並列化計算の検討<br/>・ 制御棒キャスピングモデルの検討<br/>・ 核反応断面積処理コードの整備</div> |  | <div>→論文投稿▽</div> <div>・ 実機炉心レベルへの適用</div> |  | b. 核データライブラリ、照射後試験データを活用した BEPU 手法の検証 | <div>→論文投稿▽</div> <div>・ 10×10 燃料の照射後試験データを用いた最適評価コードの検証<br/>・ 評価済み核データライブラリに関する最新知見の活用</div> |  |  |  | c. 核特性解析手法等における最新知見の活用 | <div>→論文投稿▽</div> <div>・ 国際プロジェクトで得られた技術的知見の収集<br/>・ 不確かさ評価の機能拡張<br/>・ サンプルング手法における分散低減手法の検討</div> |  |  |  |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|---------------------------------------------------------------------------|--------|-------|--------|--------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------------------------------|--|--|--|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--|---------------------------------------------------------------------------|--|-------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--|--------------------------------------------|--|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|
|                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | R7 年度                                                                                              | R8 年度 | R9 年度                                                                     | R10 年度 |       |        |                                |                            |                                                                        |  |  |  |                                                    |                                                                |  |                                                                           |  |                   |                          |                                                                                    |  |                                            |  |                                       |                                                                                               |  |  |  |                        |                                                                                                    |  |  |  |
| （１）10 行 10 列新型燃料炉心に対する評価技術の高度化 | a. 10 行 10 列新型燃料装荷炉心データの整備                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <div>→学会発表▽</div> <div>・10 行 10 列新型燃料装荷炉心データの整備<br/>・ 平衡炉心モデルの作成</div>                             |       |                                                                           |        |       |        |                                |                            |                                                                        |  |  |  |                                                    |                                                                |  |                                                                           |  |                   |                          |                                                                                    |  |                                            |  |                                       |                                                                                               |  |  |  |                        |                                                                                                    |  |  |  |
|                                | b. 10 行 10 列新型燃料炉心への 3 次元核熱結合解析コード TRACE/PARCS の適用                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | <div>→学会発表▽</div> <div>・ 3 次元核熱結合解析コード TRACE/PARCS の改良整備</div>                                     |       | <div>→論文投稿▽</div> <div>・ 原子炉起動時及び出力運転中における制御棒の異常な引抜き時並びに制御棒落下事故時の解析</div> |        |       |        |                                |                            |                                                                        |  |  |  |                                                    |                                                                |  |                                                                           |  |                   |                          |                                                                                    |  |                                            |  |                                       |                                                                                               |  |  |  |                        |                                                                                                    |  |  |  |
| （２）炉心解析基盤技術の高度化整備              | a. 3 次元詳細炉心動特性解析コードの改良整備                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | <div>→論文投稿▽</div> <div>・ 並列化計算の検討<br/>・ 制御棒キャスピングモデルの検討<br/>・ 核反応断面積処理コードの整備</div>                 |       | <div>→論文投稿▽</div> <div>・ 実機炉心レベルへの適用</div>                                |        |       |        |                                |                            |                                                                        |  |  |  |                                                    |                                                                |  |                                                                           |  |                   |                          |                                                                                    |  |                                            |  |                                       |                                                                                               |  |  |  |                        |                                                                                                    |  |  |  |
|                                | b. 核データライブラリ、照射後試験データを活用した BEPU 手法の検証                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <div>→論文投稿▽</div> <div>・ 10×10 燃料の照射後試験データを用いた最適評価コードの検証<br/>・ 評価済み核データライブラリに関する最新知見の活用</div>      |       |                                                                           |        |       |        |                                |                            |                                                                        |  |  |  |                                                    |                                                                |  |                                                                           |  |                   |                          |                                                                                    |  |                                            |  |                                       |                                                                                               |  |  |  |                        |                                                                                                    |  |  |  |
|                                | c. 核特性解析手法等における最新知見の活用                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <div>→論文投稿▽</div> <div>・ 国際プロジェクトで得られた技術的知見の収集<br/>・ 不確かさ評価の機能拡張<br/>・ サンプルング手法における分散低減手法の検討</div> |       |                                                                           |        |       |        |                                |                            |                                                                        |  |  |  |                                                    |                                                                |  |                                                                           |  |                   |                          |                                                                                    |  |                                            |  |                                       |                                                                                               |  |  |  |                        |                                                                                                    |  |  |  |
| 8. 実施体制                        | <p>【システム安全研究部門における実施者（主担当者には○を記載）】</p> <p>後神 進史 主任技術研究調査官</p> <p>○ 柴 茂樹 主任技術研究調査官 （実施項目（１）、（２）担当）</p> <p>○ 岩橋 大希 技術研究調査官 （実施項目（２）担当）</p> <p>酒井 友宏 技術参与</p> <p>【委託研究先】</p> <p>なし</p> <p>【共同研究先】</p> <p>なし</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                    |       |                                                                           |        |       |        |                                |                            |                                                                        |  |  |  |                                                    |                                                                |  |                                                                           |  |                   |                          |                                                                                    |  |                                            |  |                                       |                                                                                               |  |  |  |                        |                                                                                                    |  |  |  |
| 9. 備考                          | <p>文 献</p> <p>(1) 実用発電用原子炉に係る炉心損傷防止対策及び格納容器は損防止対策の有効性評価に関する審査ガイド、原子力規制委員会、平成 2 5 年 6 月 1 9 日付け原規技発第 13061915 号、（平成 25 年）.</p> <p>(2) B. Boyack, “Quantifying Reactor Safety Margins, Application of Code Scaling, Applicability, and Uncertainty Evaluation Methodology to a Large Break Loss-of-coolant Accident,” NUREG/CR-5249, (1989).</p> <p>(3) 日本原子力学会基準 統計的安全評価の実施基準：2021、社団法人日本原子力学会、AESJ-SC-S001:2021、（令和 4 年）.</p> <p>(4) 発 電 用 原 子 炉 施 設 に 係 る 特 定 機 器 の 設 計 の 型 式 証 明 に 係 る 申 請 に つ い て （ 2023/01/12 ） ；<br/>https://www.gnfjapan.com/news/important.html</p> <p>(5) 10×10 燃料導入に向けた対応；https://www2.nra.go.jp/data/000412197.pdf</p> <p>(6) 安全研究成果報告 詳細解析手法の導入に向けた熱流動・核特性安全解析手法の整備（Phase-2）、原子力規制庁長官官房技術基盤グループ、RREP-2019-1005、（令和元年）.</p> <p>(7) 核特性解析における最適評価手法及び不確かさ評価手法に関する研究，原子力規制庁長官官房技術基盤グループ.</p> <p>(8) A. Arbor and N. Hudson, “PARCS v3.0 U.S.NRC Core Neutronics Simulator User Manual, University of Michigan,” UMNERS-09-0001, (2013).</p> <p>(9) “TRACE V5.0. Patch 5 User’ s Manual,” U. S. NRC, (2017).</p>                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                    |       |                                                                           |        |       |        |                                |                            |                                                                        |  |  |  |                                                    |                                                                |  |                                                                           |  |                   |                          |                                                                                    |  |                                            |  |                                       |                                                                                               |  |  |  |                        |                                                                                                    |  |  |  |

|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>(10) J. Solis, K. Ivanov and B. Sarikaya, “Boiling Water Reactor Turbine Trip (TT) Benchmark - Volume I Benchmark Specification,” OECD/NEA, NEA/NSC/DOC(2001)1, (2001).</p> <p>(11) T. Lefvert, “Ringhals-1 Stability Benchmark Final Report,” OECD/NEA, NEA/NSC/DOC(96)22, (1996).</p> <p>(12) K. Ivanov, T. Beam and A. Baratta, “Pressurised Water Reactor Main Steam Line Break (MSLB) Benchmark Volume I Final Specifications,” OECD/NEA, NEA/NSC/DOC(99)8, (1999).</p> <p>(13) 科学技術庁原子力安全局原子力安全調査室（監修）：改訂8版 原子力安全委員会 安全審査指針集、大成出版（平成6年）</p> <p>(14) O. Iwamoto, N. Iwamoto, S. Kunieda, F. Minato, S. Nakayama, Y. Abe, et al., “Japanese evaluated nuclear data library version 5: JENDL-5”, J. Nucl. Sci. Technol., 60(1), 1-60 (2023).</p> <p>(15) I. Pasichnyk, M. Klein, K. Velkov, W. Zwermann, and A. Pautz, “Effects of Nuclear Data Uncertainties on the NEA/OECD PWR MOX/UO<sub>2</sub> Core Rod Ejection Benchmark”, Nucl. Technol., 183 (3), 464-472 (2013).</p> <p>(16) C. Lawing, S. Palmtag and M. Asgari, “BWR Progression Problems,” ORNL/TM-2020/1792, (2021).</p> <p>(17) H. Joo, J. Choi, K. Kim, C. Lee and S. Zee, “Methods and Performance of a Three-Dimensional Whole-Core Transport Code DeCART,” Proc. PHYSOR2004, Chicago, Illinois, April 25-29, 2004, (2004).</p> <p>(18) A. Zhu, Y. Xu and T. Downar, “A Multilevel Quasi-Static Kinetics Method for Pin-Resolved Transport Transient Reactor Analysis,” Nucl. Sci. Eng., 182, pp.435-451, (2016).</p> <p>(19) A. Yamamoto, “A Simple and Efficient Control Rod Cusping Model for Three-Dimensional Pin-by-Pin Core Calculations,” Nucl. Technol., 145, pp.11-17, (2017).</p> <p>(20) Y. Wang, H. Wu and Y. Li, “Comparison of Two-Dimensional Heterogeneous Variational Nodal Methods for PWR Control Rod Cusping Effect and Pin-by-Pin Calculation,” Progress in Nucl. Energy, 101, pp.370-380, (2017).</p> <p>(21) Studsvik Scandpower, “CASMO5 User’s Manual, Studsvik Scandpower, Inc.,” SSP-07/431, (2012).</p> <p>(22) OECD Nuclear Energy Agency, “Benchmark on Deterministic Transport Calculations Without Spatial Homogenisation – A 2-D/3-D MOX Fuel Assembly Benchmark -,” NEA/NSC/DOC(2003)16, (2003).</p> <p>(23) OECD Nuclear Energy Agency, “Benchmark on Deterministic Transport Calculations Without Spatial Homogenisation – MOX Fuel Assembly 3-D Extension Case -,” NEA/NSC/DOC(2005)16, (2005).</p> <p>(24) T. Kozlowski, Thomas J. Downar, “PWR MOX/UO<sub>2</sub> Core Transient Benchmark – Final Report,” OECD/NEA, NEA/NSC/DOC(2006)20, (2006).</p> <p>(25) The Consortium For Advanced Simulation Of Light Water Reactorss: <a href="https://www.casl.gov/">https://www.casl.gov/</a> (2024年7月1日確認)</p> <p>(26) Working Party on Scientific Issues and Uncertainty Analysis of Reactor Systems (WPRS): <a href="https://www.oecd-neo.org/jcms/c_12832/working-party-on-scientific-issues-and-uncertainty-analysis-of-reactor-systems-wprs">https://www.oecd-neo.org/jcms/c_12832/working-party-on-scientific-issues-and-uncertainty-analysis-of-reactor-systems-wprs</a> (2024年7月1日確認)</p> |
|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

研究計画（案）

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                |       |                                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-------|-----------------------------------------------------|
| 1. プロジェクト<br>(始期：R7年度<br>終期：R10年度)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 12. 次世代炉の事故解析に必要な基盤技術の構築に関する研究 | 担当部署  | 技術基盤グループ<br>システム安全研究部門                              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                | 担当責任者 | 後神進史 主任技術研究調査官                                      |
| 2. カテゴリー・<br>研究分野                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 【原子炉施設】 F) 新型炉                 | 主担当者  | 石津朋子 上席技術研究調査官<br>藤田哲史 主任技術研究調査官<br>園田大貴 副主任技術研究調査官 |
| <p>次世代炉に関わる動向として、GX 実行会議※で審議された「GX 実現に向けた基本方針」[1]が令和5年2月に閣議決定された。ここでは、次世代革新炉の開発・建設に取り組むこと、核燃料サイクル推進などを含む基本方針や、その参考資料[2]として次世代革新炉開発から運転開始までのロードマップが示された。(図1参照)次世代炉のうち、革新軽水炉及び小型軽水炉については、既存の規制の考え方や安全評価手法が適用できると考えられるが、ナトリウム冷却高速炉（以下「高速炉」という。図1における「高速炉」もこれに該当する。）及び高温ガス炉の導入にあたっては、規制及び審査に必要な技術的知見を新たに収集・整備する必要がある。そこで、本プロジェクトでは、高速炉の概念設計の終了時期及び高温ガス炉の詳細設計の進展状況を考慮して、令和7年度から令和10年度の間、高速炉及び高温ガス炉を対象として設計情報等の収集・整理を行うとともに、事故解析・評価手法を整備する。</p> <p>※GX 実行会議： 産業革命以来の化石燃料中心の経済・社会、産業構造をクリーンエネルギー中心に移行させ、経済社会システム全体の変革、すなわち、GX（グリーン・トランスフォーメーション）を実行するべく、必要な施策を検討するための会議。</p> <div><div><div>令和（年）</div><div>5</div><div>6</div><div>7</div><div>8</div><div>9</div><div>10</div><div>11</div><div>12</div><div>12～21</div><div>22～31</div><div>2040</div><div>2050</div></div><div><div>2023</div><div>2024</div><div>2025</div><div>2026</div><div>2027</div><div>2028</div><div>2029</div><div>2030</div><div>2030年代</div><div>2040年代</div></div><div><div>技術熟度に合わせて開発の加速</div><div>※事業者等からの個別のヒアリングを踏まえて、「研究開発を進めていく上での目標時期」として策定したもの。<br/>(実際に建設を行う場合の運転開始時期等は、立地地域の理解確保を前提に、事業者の策定する計画に基づいて決定されることとなる。)</div></div><div><div>革新<br/>軽水炉</div><div>※商用炉</div><div>基本設計</div><div>詳細設計</div><div>製作・建設</div><div>運転</div></div><div><div>小型<br/>軽水炉</div><div>※実証炉</div><div>概念設計</div><div>基本設計</div><div>詳細設計</div><div>製作・建設</div><div>運転</div></div><div><div>高速炉</div><div>※実証炉</div><div>概念設計</div><div>基本設計</div><div>詳細設計</div><div>製作・建設</div><div>運転</div></div><div><div>高温<br/>ガス炉</div><div>※実証炉</div><div>基本設計</div><div>詳細設計</div><div>製作・建設</div><div>運転</div></div><div><div>核融合</div><div>※原型炉</div><div>概念設計</div><div>詳細設計</div><div>製作・建設</div></div></div> |                                |       |                                                     |
| <p>図1 次世代革新炉開発に関するロードマップ ([2]より抜粋、一部加筆)</p> <p>3. 背景</p> <p>&lt;高速炉の事故解析・評価手法の検討&gt;</p> <p>(1) 規制課題</p> <p>GX 実現に向けた基本方針によれば、戦略ロードマップ(令和4年12月23日原子力関係閣僚会議決定)に基づき、高速炉実証炉の建設を2030年代(令和12～21年)に開始し、運転を2040年代(令和22～31年)に開始することを目標としている。これを受けて、経済産業省資源エネルギー庁(以下「エネ庁」という。)は高速炉実証炉の開発事業を担う中核企業を選定し、概念設計の検討が進められている[3]。</p> <p>一方で、発電を行う高速炉に関する法令として、研究開発段階発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則(平成25年原子力規制委員会規則第9号。以下「研開炉設置許可基準規則」という。)及び研究開発段階発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈(原管P発第1306192号(平成25年6月19日原子力規制委員会決定)。以下「研開炉設置許可基準規則解釈」という。)が定められている。研開炉設置許可基準規則及び研開炉設置許可基準規則解釈は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(以下「JAEA」という。)高速増殖原型炉もんじゅ(以下「もんじゅ」という。)への適用を想定していたものの、パブリックコメントを踏まえ、もんじゅの適合性審査に際しては、見直しを行うこととした(平成25年6月12日第10回原子力規制委員会)。しかしながら、同基準及び解釈は見直されることなく現在に至っているため、もんじゅの次の段階である高速炉実証炉の適合性審査にあっては、研開炉設置許可基準規則及び研開炉設置許可基準規則解釈の検討及び見直しが必要となる。</p> <p>上記のエネ庁が選定した高速炉実証炉の炉概念には、JAEA 高速実験炉常陽(以下「常陽」という。)及びもんじゅで採用されているループ型炉とは異なるタンク型炉が採用されている[3]。また、近年の技術開発動向においては、既存の高速炉(常陽・もんじゅ)にはない新規技術として、以下のi～iiiに示すとおり、ボイド反応度低減方策、炉心損傷事故時の再臨界回避のための燃料再配置促進による格納容器破損防止策を取り込んだ設計が国内外で検討されている[4,5]。これらの新規技術が安全性に及ぼす影響の確認のため、新規技術に関する知見を取得する必要がある。</p> <p>i. ボイド反応度低減方策については、非均質炉心や扁平炉心などの採用が検討されている。これらは、ブランケット燃料の炉心領域への配置、あるいは炉心を扁平化させることにより炉心からの中性子漏えいを高める工夫を行った設計であり、計画中止となったもののASTRID(仏国)では採用が検討された[4]。いずれも、高速炉炉心のボイド反応度が正であるために生じる著しい炉心損傷の発生頻度を低減する対策である。</p> <p>ii. 炉心損傷防止策として、<del>GEM(Gas Expansion Module: ガス膨張機構)</del>が検討されている。<del>GEMは、炉心流量減少時スクラム失</del></p>                                                                                                                                                                                                                                  |                                |       |                                                     |

図1 次世代革新炉開発に関するロードマップ([2]より抜粋、一部加筆)

~~敗事象（以下「ULOF 事象」という）時に冷却材入口圧力が低下するのに伴い、ラップ管内に充填したガスが膨張することで、中性子の漏えいが増え負の反応度フィードバックを得ることを目的とした機器である。米国高速中性子束試験施設（FFTF（Fast Flux Test Facility））での実験データがあり、国際原子力機関（IAEA）の共同研究プロジェクトとしてベンチマーク解析が実施された自己作動型炉停止機構（以下「SASS」という。）（SASS: Self Actuated Shutdown System）が検討されている。SASS は、冷却材温度が上昇すると、制御棒頂部に設置した温度感知合金の磁性が変化することによって、人的操作によらず制御棒を落下させて炉停止する受動的機構である。常陽において SASS の炉内実証試験を実施しており、実験データが得られている[6]。~~

また、格納容器破損防止のための再臨界回避策については、FAIDUS（Fuel Assembly with Inner Duct Structure：集合体内側に溶融燃料排出孔を設けた集合体）等が検討されている[5]。FAIDUS は、炉心燃料集合体内にあらかじめ炉心燃料溶融時に再配置するための流路を設けておくことで、炉心損傷事故時に効果的に溶融燃料を炉心領域外へ排出し、未臨界状態に移行させることを狙った方策である。また、高速炉実証炉炉心の主概念では既設炉と同様に酸化物燃料を採用しているが、副概念として、金属燃料炉心の採用が検討されている。金属燃料炉心の炉心損傷事故を含む事故シナリオについては、原子力規制庁においてこれまでに検討実績がなく、知見収集が必要である。

- iii. 我が国の既設高速炉（常陽・もんじゅ）はループ型炉であり、タンク型炉の建設・運転実績はないが、世界的にはタンク型炉が主流である。例として、Phenix, Super-Phenix（仏）、ASTRID-SMART, ESFR（欧）、BN シリーズ（露）、PFBR（印）、Natrium（米）などが挙げられる。これまで地震影響に対する炉容器健全性確保の観点から、我が国ではタンク型炉の採用は困難とされてきたが、近年の技術開発により成立する見通しが報告されている[7]。タンク型炉は、1 次冷却系の機器が全て原子炉容器内に格納されているため、格納容器へのナトリウム漏えいの確率を低減できる。また、タンク型炉に適した崩壊熱除去システムとして、直接炉心冷却系などの設計研究が進められている[7]。

産学界の動向として、一般社団法人日本原子力学会新型炉部会において「次世代ナトリウム冷却高速炉の安全設計評価方針検討会」が発足（2023 年 10 月～2026 年 12 月）し、高速炉の安全基準類に関する検討、次世代革新炉の安全関連技術に関する最新開発動向等に係る議論が開始されている[8]。

また、新規技術にはあたらなないが、以下の課題も存在する。

- iv. 燃料から放出される核分裂生成物（以下「FP」という。）は、冷却材にアルカリ金属であるナトリウムを用いていることから、軽水炉とは異なる物理・化学的な現象等に伴って移行する。環境影響評価のためには、高速炉の事故時の特徴を踏まえた FP 移行挙動を把握する必要がある。なお、米国においては、FP 移行挙動をリスク情報活用と関連付けて規制を行うことを目的とした手法開発を推進している[9]。
- v. 高速炉実証炉は発電能力を有する設計となると見込まれることから、水・蒸気系を有するプラント設計となる。ナトリウムと水は激しく反応することから、蒸気発生器の伝熱管破損等起因する事故評価については特段の調査・整理が必要である。
- vi. もんじゅのアクシデントマネジメント策の妥当性評価や常陽の適合性審査においては、確率論的リスク評価（以下「PRA」という。）に基づいて評価事故シーケンスの選定が行われていることを踏まえると、リスク評価に関する最新知見の収集とデータベースの構築が必要である。なお、米国原子力規制委員会（NRC）や第 4 世代原子力システムに関する国際フォーラム（GIF）ではリスク情報の積極的な活用を推進している[10]。

これらの課題に対し、適合性審査時の安全評価に必要となる事故解析・評価手法を整備して、解析評価を行うことにより技術的知見を収集・整備する必要がある。

## (2) 研究課題

先行研究[11]及びその後の継続研究において、既設のループ型炉（常陽・もんじゅ）のレベル 1PRA で選定される主要な評価事故シーケンスに対しては、一通りの解析評価に対応できる手法の整備を完了している。しかしながら、今後の高速炉実証炉の安全評価に向けては、常陽の安全審査における審議内容を踏まえるとともに、高速炉実証炉の設計及び新規の安全対策を考慮し評価する必要がある。そのためには、決定論及び確率論的評価手法の改良整備と技術的知見の収集・整備が必要である。具体的には、以下のとおり。

- ボイド反応度低減のための方策に対応した解析手法の開発（背景 i.）
- 炉心損傷の防止策及び影響緩和策の評価手法の開発・整備（背景 ii.）
- タンク型炉採用に伴う過渡時及び事故時熱流動のモデル化と手法の整備（背景 iii.）
- FP 移行挙動解析コードの整備（背景 iv.）
- 蒸気発生器伝熱管破損（水リーク）事故時の解析・評価手法の整備（背景 v.）
- PRA 手法の整備（背景 vi.）
- 高速炉開発動向、規制動向及び高速炉の事故解析・評価手法に係る情報収集とデータベース化（背景 vii.）

## <高温ガス炉の事故解析手法の検討>

### (1) 規制課題

高温ガス炉についても、「GX 実現に向けた基本方針」[1]及びその参考資料[2]により次世代炉開発の基本方針及び運転開始までのロードマップが示されており、実証炉の運転を 2030 年代（令和 12～21 年）に開始する目標が掲げられている。これを受けて、エネ庁は高温ガス炉実証炉の中核企業を選定し、基本設計の検討が開始された[12]。

上記を踏まえ、日本原子力学会研究専門委員会「ブロック型高温ガス炉の安全基準の調査研究」が発足（2023 年 4 月 1 日～2025 年末）し、学識経験者や事業者等により高温ガス炉実証炉の安全要件・水素製造施設の適用法規案、安全評価方針等に係る議論が開始されている[13]。

これまでの高温ガス炉を対象とした審査としては、試験研究炉である JAEA 高温工学試験研究炉 HTTR（High Temperature Engineering Test Reactor。以下「HTTR」という。）の審査がある。HTTR の適合性審査は、試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則（平成 25 年原子力規制委員会規則第 21 号）及び試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈（原規研発第 1311271 号（平成 25 年 11 月 27 日原子力規制委員会決定））に基づいて行われた。一方、

|           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|           | <p>高温ガス炉実証炉については、原子炉熱出力の増大、炉停止系の合理化、機能的閉じ込め概念の採用などの新規技術や考え方が盛り込まれる見通しであり[14, 15]、それらの安全性への影響を新たに確認する必要がある。その確認にあたり、軽水炉や高速炉とは異なる高温ガス炉の特徴を踏まえた事故解析が必要になるが、これまでのところ原子力規制庁ではそのような事故解析手法は整備されておらず、新たに構築する必要がある。海外の状況については、英国では HTTR と同系統のブロック型実証炉の基本設計、米国やカナダではそれとは異なる系統のペブルベッド型実証炉の事前審査が実施中である。また、米国 NRC や国際機関である IAEA、GIF にて設計基準の検討が進められている。なお、中国ではペブルベッド型実証炉が既に稼働中である。</p> <p>(2) 研究課題</p> <p>高温ガス炉については新規の研究テーマとなるため、以下の a. 及び b. に示すように、最初に既往研究成果、国内外の研究開発動向等を調査し、炉型に特有な安全上の特徴について整理を行い、さらにその結果を踏まえて、高温ガス炉の事故状態に対する安全設計の妥当性を評価する事故解析手法を整備する必要がある。</p> <p>a. 高温ガス炉の安全上の特徴の整理</p> <p>b. 高温ガス炉の特徴を踏まえた事故解析手法の整備</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 4. 目的     | <p>高速炉実証炉及び高温ガス炉実証炉の適合性審査において事業者側評価の妥当性を判断するために必要となる技術的知見の取得を目的として、高速炉及び高温ガス炉の国内外開発動向及び海外規制動向を調査するとともに、実証炉に関する設計情報等を収集・整理する。また、高速炉及び高温ガス炉のそれぞれの特徴を考慮した事故解析手法を整備し、予備解析を行う。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 5. 知見の活用先 | <p>本研究において得られる技術情報や事故解析評価等により蓄積した知見は、高速炉及び高温ガス炉の実証炉の適合性審査において、事業者の重大事故対策等の妥当性の判断根拠として活用することができる。また、事故解析手法を整備することで、事業者の評価条件やモデル等の妥当性確認についても活用することができる。規制・開発動向及び評価手法等の技術情報についてデータベース化し、今後の次世代炉規制活動に活用できるように技術基盤を構築する。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 6. 安全研究概要 | <p>本プロジェクトの研究は、「原子力規制委員会における安全研究の基本方針」（令和元年 5 月 2 9 日原子力規制委員会決定）における安全研究のうち以下の分類に基づき実施する。</p> <p>②審査等の際の判断に必要な知見の収集・整備（以下「分類②」という。）</p> <p>③規制活動に必要な手段の整備（以下「分類③」という。）</p> <p>④技術基盤の構築・維持（以下「分類④」という。）</p> <p>(1) 高速炉の事故解析・評価手法の検討【分類②、分類③及び分類④】</p> <p>これまで既存炉の主要な評価事故シーケンスを対象に、図 2 に示す事故解析手法を整備してきた。本プロジェクトでは、これら手法を高速炉実証炉に適用できるよう改良整備を進める。整備した評価手法を用いた実機解析を行って、技術的知見を収集・整備する。高速炉実証炉と同じタンク型炉のプラント概念図の例を図 3 [16] に示す。</p> <p>a. ボイド反応度低減のための方策に対応した解析手法の開発・・ ASTERIA-SFR</p> <p>高速炉実証炉では、炉心の大型化に対するボイド反応度の低減方策として非均質炉心や扁平炉心などの採用が検討されている。高速炉炉心損傷挙動解析コード ASTERIA-SFR の採用している空間依存動特性解析手法(改良型準静近似手法)は、原理的にはそのような核的カップリングの弱い体系にも適用可能であるが、中性子束分布に基本モード以外の高周波が生じるため、精度又は計算効率上の問題が発生する可能性がある。したがって、このような体系でも精度及び計算効率を確保できる手法を開発し、ASTERIA-SFR に組み込む。</p> <p>b. 炉心損傷の防止策及び影響緩和策の評価手法の開発・整備・・ ADYTUM、ASTERIA-SFR、ISAAC</p> <p>炉心損傷防止対策については、GEMSASS が検討されている。GEMSASS による<b>フィードバックスクラム</b>反応度を適切に評価するため、<b>核特性評価手法及び核熱結合プラント動特性</b>解析コードを整備する。また、高速炉は最大反応度体系にないことから、特に<b>炉心流量減少時スクラム失敗事象</b>（以下「ULOF 事象」という。）<b>ULOF 事象</b>などによって炉心損傷事故が発生すると、厳しい再臨界の発生と機械的エネルギーの放出の可能性があることが課題となっている。図 4 は、炉心領域及び原子炉容器の軸方向断面図により、ULOF 事象推移を概念図で表したものである[d-4]。ポンプトリップ後に何らかの理由によりスクラムに失敗すると、炉出力と炉心流量の mismatch により冷却材の沸騰が生じ、集合体内での燃料破損が起こる（起因過程）。燃料破損が進展して炉心内で局所的な崩壊炉心プール、全炉心プールが形成されると、燃料の凝集によって即発臨界超過に至る可能性がある（遷移過程）。即発臨界超過により炉心物質が急激に膨張すると、燃料-冷却材相互作用 FCI (Fuel-Coolant Interaction) によって大気泡が形成され、上部プレナムナトリウムを上方へ駆動することにより原子炉容器へ機械的負荷を与える恐れがある（炉心膨張過程）。また即発臨界を超過しない場合でも、損傷炉心の下部構造への落下により、構造材へ熱的・機械的負荷を与える可能性がある（再配置過程）。このような炉心崩壊挙動及び放出エネルギーを評価するため、ASTERIA-SFR コードの整備と妥当性確認を進めてきた[b-1～11]（図 5）。高速炉実証炉では、この課題に対応するため、再臨界回避方策として FAIDUS や燃料排出管を備えた低ボイド反応度炉心等の採用が検討されている。その影響評価を行うためには核熱結合解析コードが必須であるため、ASTERIA-SFR の整備を進める。また、海外での既往研究の調査及び炉心損傷挙動解析に必要な情報取得等を行い、金属燃料炉心の事故シナリオを検討する。</p> <p>さらに、熔融炉心物質の炉容器内保持の成立性評価に必要な解析コードの整備として、再配置した熔融炉心物質の冷却についても解析コードの開発・整備も併せて行う。炉心の著しい損傷後の熔融燃料の炉容器内保持の成立性を評価するためには、再配置した後の炉心燃料の冷却、冷却材ナトリウムの伝熱流動挙動が重要である[b-12～13]。高速炉総合シビアアクシデント解析コードとして整備している ISAAC における現行の熔融燃料冷却モデルは、ループ型炉を対象にしたものであり、上述の再臨界回避方策への対応を含め、タンク型炉の事故時の原子炉容器内流動に対応した解析・評価モデルの整備を進める。</p> <p>c. タンク型炉採用に伴う過渡時及び事故時熱流動のモデル化と手法の整備・・ ADYTUM, CFD</p> |

高速炉のプラント動特性解析コード ADYTUM は、これまでループ型炉を対象として、妥当性確認及び実機適用解析を進めてきた[c-1]。しかしながら、高速炉実証炉の炉型は、実験炉及び原型炉で採用されたループ型とは異なるタンク型（炉心及び1次系機器が同じ原子炉容器内に収納される）となる。また、崩壊熱除去系として直接炉心冷却系（DRACS:Direct Reactor Auxiliary Cooling System）の採用が検討されており、プラントトリップ後の崩壊熱除去特性を含め過渡時の熱流動挙動が大きく異なると予測される。原子炉容器内の熱流動挙動を模擬するため、ADYTUM に CFD（Computational Fluid Dynamics：数値流体力学）等の詳細解析手法と連携させるなどの方法を含め、事象に応じた適切な評価手法を検討し整備を行う。

#### d. FP 移行挙動解析コードの整備・ISAAC（ADYTUM, ACTOR, AZORES）, ASTERIA-SFR

新規規制基準で規制要件化されたシビアアクシデント対策は、安全目標の指標とされている「過酷事故における原子炉からの FP 最大放出量の限度が 100TBq を超える Cs-137 の放出頻度が  $10^{-6}/\text{ry}$  以下」（平成 25 年 4 月 10 日第 2 回原子力規制委員会資料 5）に直接関係するため、重要である。さらに、高速炉の原子炉停止機能喪失事象では、炉心の著しい損傷が生じた場合でも炉心物質の周囲には冷却材ナトリウムが液相単相で存在するため、FP の移行挙動は軽水炉の場合と大きく異なる（図 6、図 7）。したがってこのような特徴に配慮した研究が必要である。ここでは、高速炉特有の原子炉容器内の物理的・化学的な FP 移行挙動を適切に模擬できるよう、解析コードを開発、整備する。これまでに、ULOF 事象の即発臨界超過シナリオにおける FP 移行挙動の把握を目的として、ASTERIA-SFR にセシウム移行モデルを導入した[d-1～6]。本研究では、ASTERIA-SFR に導入したセシウム移行モデルの妥当性確認を進めるとともに、同モデルを用いた実機解析により、事故時の FP 移行に関する技術的知見を取得する。

また、崩壊熱除去機能喪失事象のような事故進展が緩慢かつ長時間にわたる事故シナリオでは、プラント応答、燃料破損、原子炉冷却材バウナリ等の破損条件に応じて、破損燃料から放出された FP は複雑な経路をたどってプラント内に移行する。このため、ADYTUM に加えて、高速炉 1 次系内 FP 移行挙動解析コード ACTOR 及び高速炉格納容器応答解析コード AZORES を結合することにより、プラント全体を対象として事象発生から収束までの FP 移行を一貫して解析可能な ISAAC を整備する。さらに、FP がナトリウムとともに原子炉容器外へ放出された場合に、コンクリートから水蒸気が発生する可能性があることに鑑み、水蒸気を含む雰囲気でのセシウム化合物及びナトリウム化合物の混合エアロゾルの挙動について検討する。これまで実施した定性的挙動に係る試験[d-7～12]の次の段階として、定量的なパラメータを取得する試験を実施する。この結果を踏まえ、ISAAC の FP 移行モデルの改良を実施する。

#### e. 蒸気発生器伝熱管破損（水リーク）事故時の解析・評価手法の整備

蒸気発生器（以下「SG」という。）の伝熱管破損事故（水リーク事故）は、その規模に応じて、運転時の異常な過渡変化、設計基準事故、設計基準事故を超える事故のいずれにも該当するため、高速炉の安全規制上、重要な評価項目である。

原型炉では分離貫流型（蒸発器と過熱器の 2 種類を設置）が採用されたのに対し、高速炉実証炉では一体貫流型（1 基でサブクール水から過熱蒸気を発生）が検討されている。事故時の挙動は、伝熱管材料、SG 型式及び水/蒸気側条件に大きく依存する。このため、原型炉を対象に整備した解析手法に基づき[e-1]、小リーク、中/大リーク時の挙動（2 次系ナトリウム中の水素濃度上昇挙動、水素発生に伴う圧力上昇、圧力伝播挙動）の高速炉実証炉体系に合わせた解析・評価手法及び解析モデルの整備を行う。

#### f. PRA 手法の整備

高速炉のレベル 2PRA におけるシナリオ定量化については、連続マルコフモンテカルロ法や現象相関ダイアグラムを用いて手法の実機適用性を検討してきた[f-1～3]。軽水炉及び既存の高速炉の PRA 活用状況を整理し、高速炉実証炉の特徴を踏まえた PRA 手法の整備に着手する。レベル 1 及びレベル 2PRA に対して適切な手法を検討するとともに、その課題を抽出する。

#### g. 情報収集とデータベース化

高速炉実証炉の設計情報及び国内外の研究動向等を調査して、本研究に係る情報データベースを構築する。

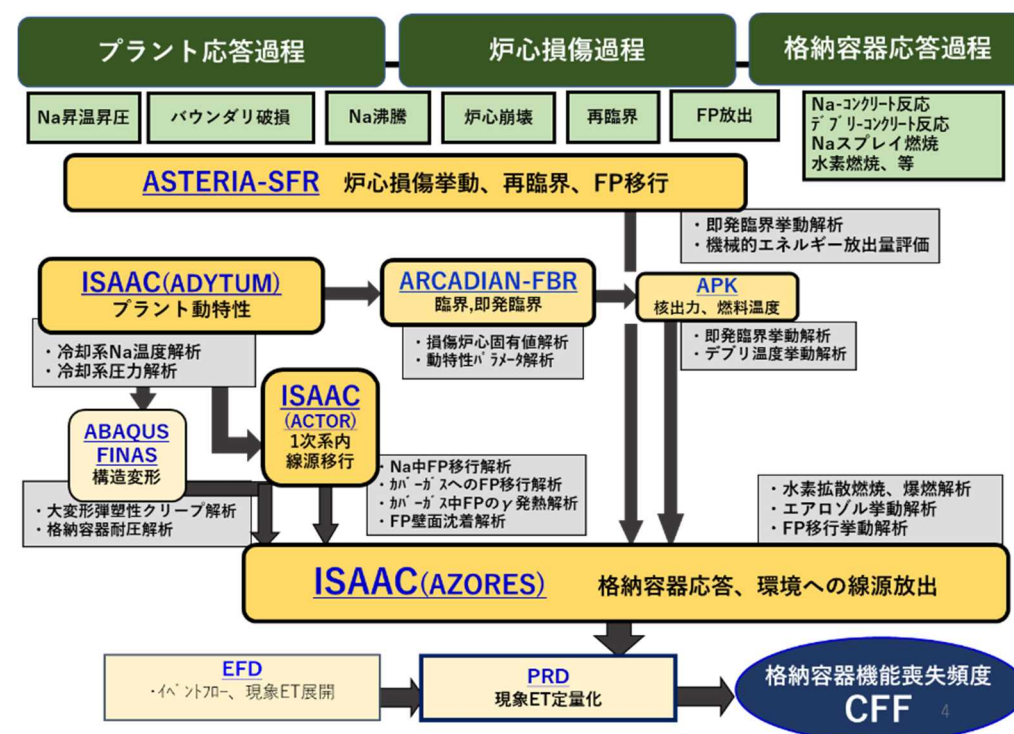


図 2 高速炉事故解析手法

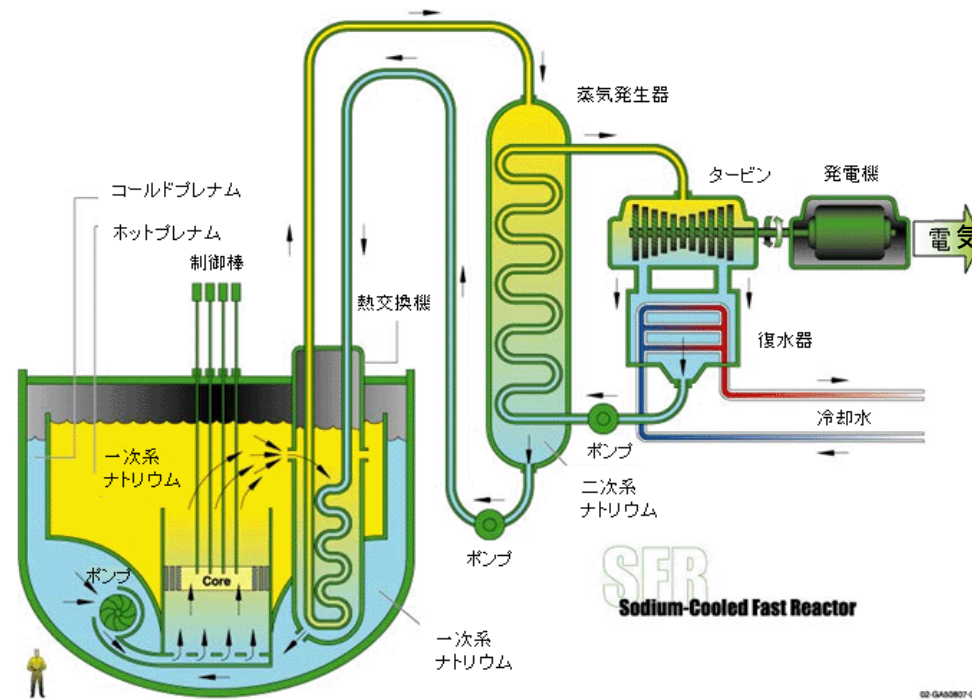


図3 タンク型高速炉のプラント概念図の例 ([16]を一部変更)

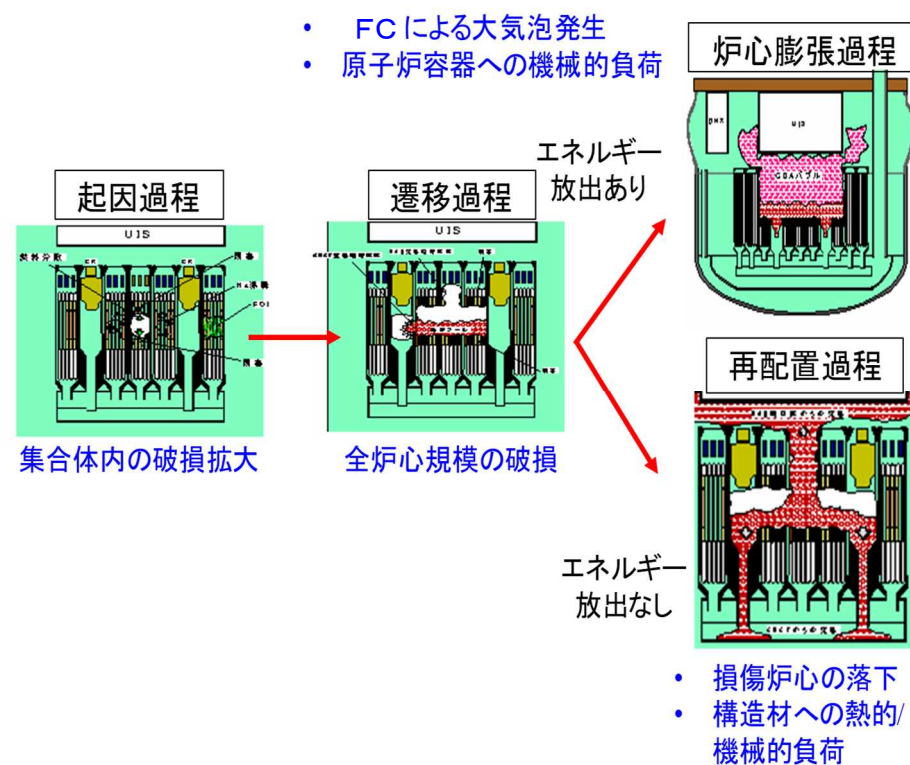


図4 典型的な ULOF 事象シナリオ [d-4]

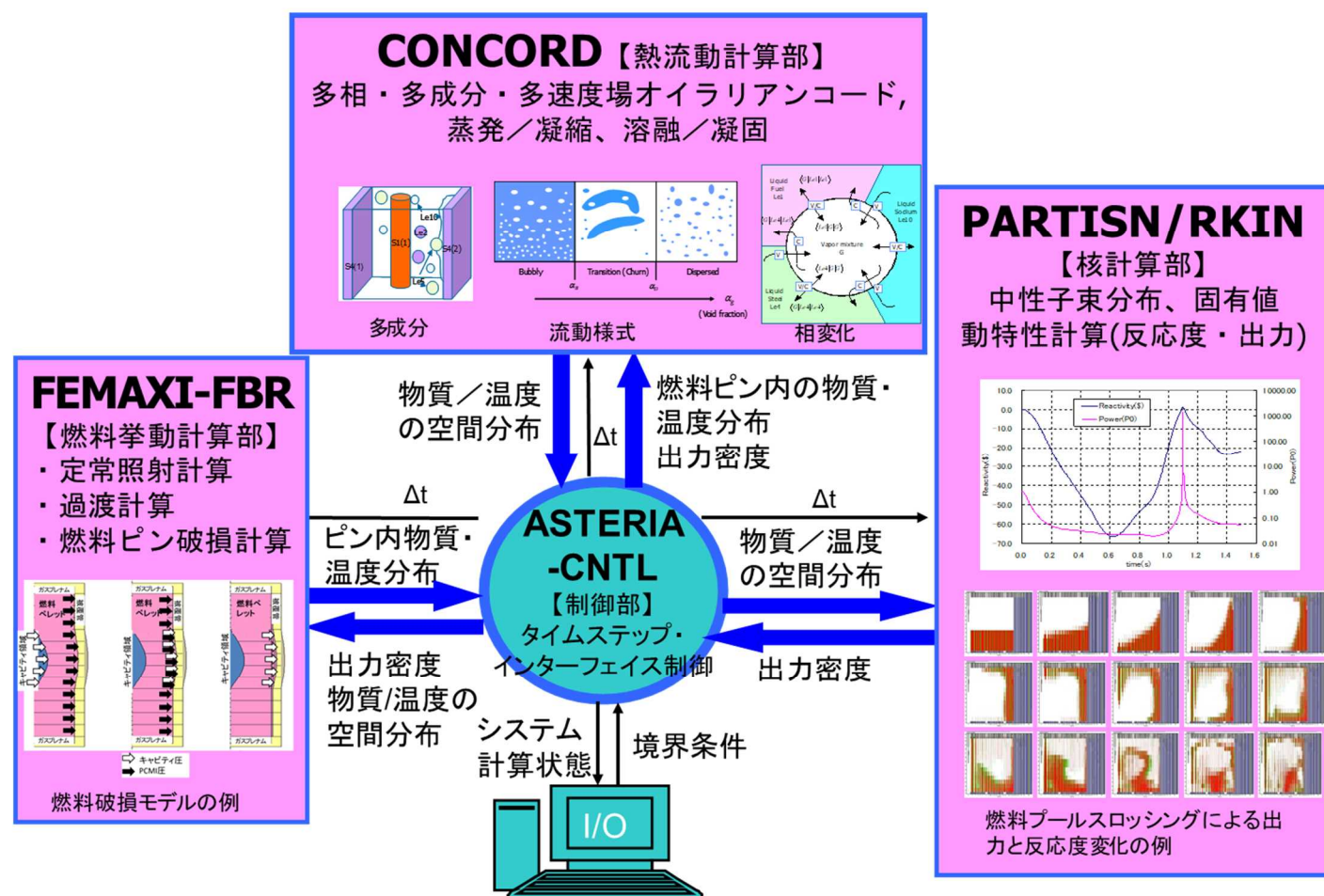


図5 高速炉炉心損傷挙動解析コード ASTERIA-SFR

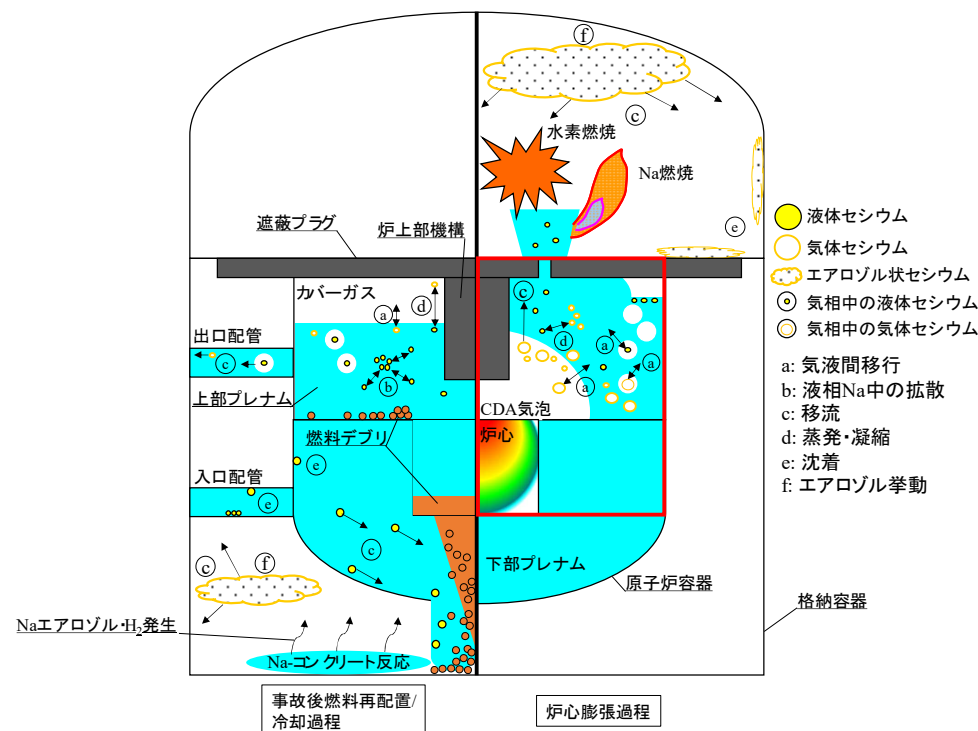


図6 FP移行シナリオ

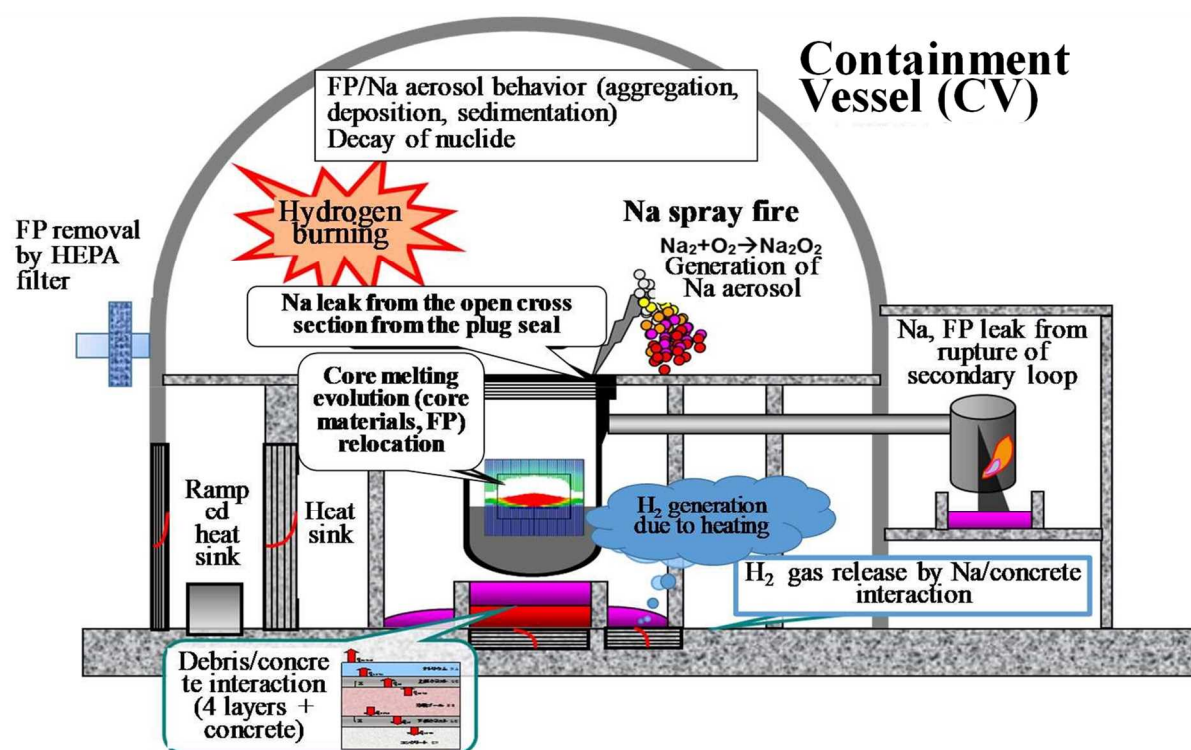


図7 高速炉総合シビアアクシデント解析コードISAACで取り扱う現象の概念図

## (2) 高温ガス炉の事故解析手法の検討【分類②、分類③及び分類④】

最初に高温ガス炉特有の安全上の特徴の整理を行い、その結果を踏まえて事故解析手法の整備項目をアップデート・拡充していくこととする。その際、必要に応じて体制の強化も行う。ただし、計画立案時点で既に整備が必要であると判明しているものについては、先行して整備を進めていくこととする。整備した評価手法を用いた実機解析を行って、技術的知見を収集・整備する。高温ガス炉実証炉に類似すると考えられるプラント概念図の例を図8[17]に示す。

### a. 高温ガス炉の安全上の特徴の整理

高温ガス炉は、放射性物質の閉じ込め機能に優れたセラミックス被覆燃料粒子、熱容量が大きくかつ熱伝導に優れた黒鉛を用いた炉心構造材、高温でも安定なヘリウムガスの冷却材等を備えているため、軽水炉や高速炉とは異なる安全上の特徴を有する。高温ガス炉炉心の概念図（HTTRの炉心の例）を図9[18]に示す。高温ガス炉実証炉ではこれらの特徴を踏まえて固有の安全特性を生かした安全設計をすると想定されるため、それに対応した形で評価事故シーケンスを選定して安全評価を行っているかを確認する必要がある。このため、以下のような項目について調査・分析を実施し、情報データベースを構築する。

- ・ HTTRに係る情報の収集、審査実績の整理及び審査時の論点の分析
- ・ 国内の高温ガス炉実証炉に係る開発動向及び設計情報の調査
- ・ 海外の高温ガス炉の規制動向・開発動向・研究動向の調査
- ・ 高温ガス炉の安全上の特徴等に係る学協会での検討状況の調査
- ・ 高温ガス炉の安全上の特徴等に係る海外及び国際機関での検討状況の調査
- ・ 高温ガス炉に係る国内外での事故解析手法の開発状況の調査

本件での調査・分析の結果を適宜、b.に反映しつつ、最終的に、安全上重要となる論点の整理を行う。

### b. 高温ガス炉の特徴を踏まえた事故解析手法の整備

a.で整理した高温ガス炉の特徴及び事故解析手法を基に、典型的な評価事故シーケンスに対応する事故解析コードを整備する。上述の高温ガス炉の設計上の特徴の効果を適切に評価する手法を整備することが必要になる。詳細については、a.及びb.の結果を踏まえて決定されるものではあるが、計画立案時点では、少なくとも高温ガス炉用事故解析コードの整備が必要になると考えられる。整備方針としては、作業の効率化に向け、国内外の研究成果を活用するとともに、(1)で実施する高速炉の事故解析コードと可能な

限りフレームワークの共通化を図ることとする。

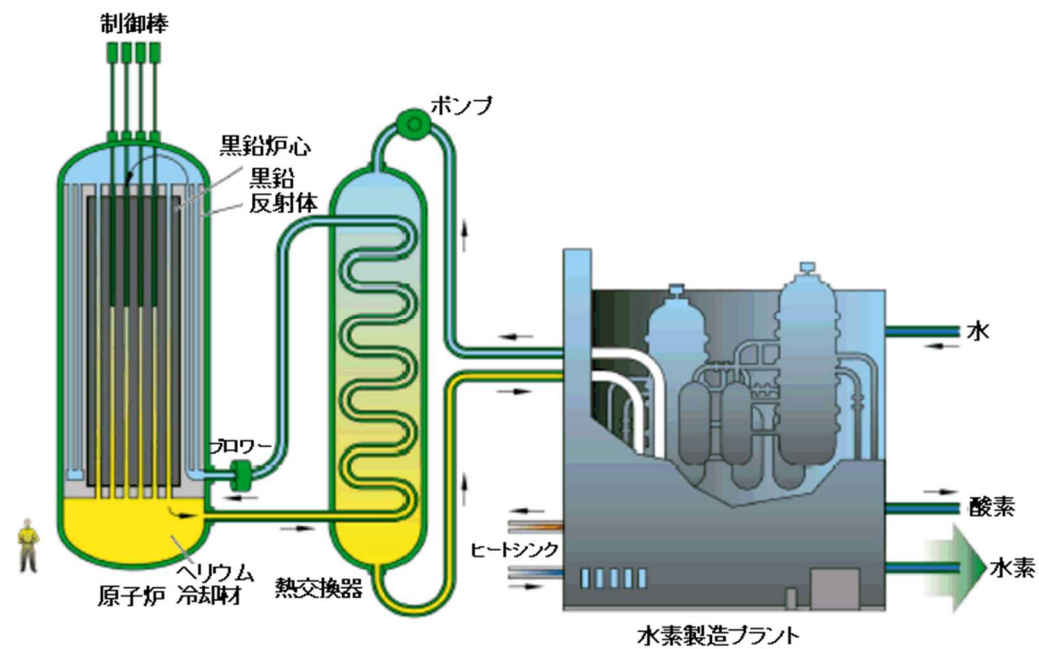


図 8 高温ガス炉実証炉に類似のプラント概念図の例[17]

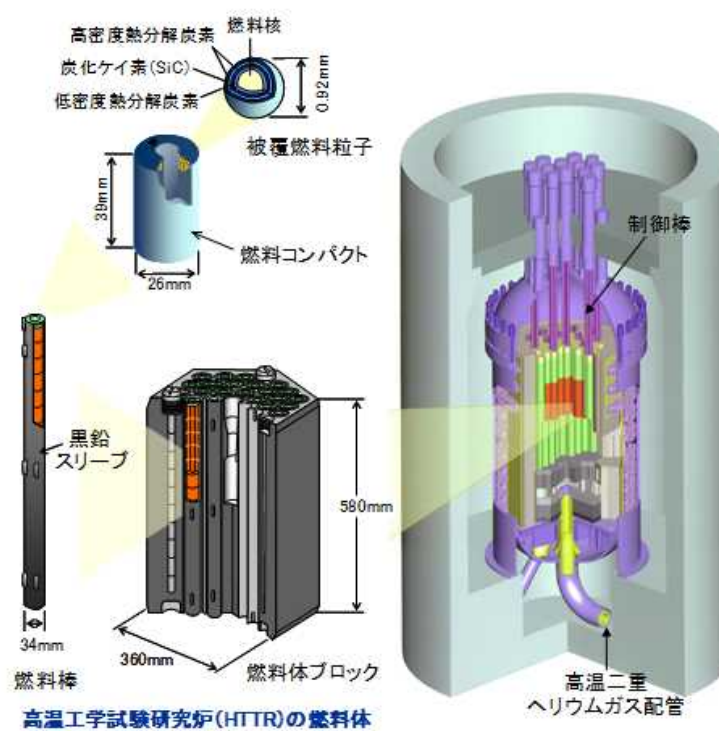


図 9 高温ガス炉炉心の概念図（HTTR 炉心の例）[18]

## 7. 成果目標と実施計画

### (1) 高速炉の事故解析・評価手法の検討

成果目標：高速炉実証炉の事故解析及び評価に必要な基本的な手法を整備する。あわせて、安全要求・評価基準の参考となる知見を収集・整備する。

#### 【R7 年度】

- ボイド反応度低減のための方策に対応した解析手法の開発
  - 核的カップリングの弱い高速炉体系に適用可能な空間依存動特性解析手法の調査
- 炉心損傷の防止策及び影響緩和策の評価手法の開発・整備
  - GEMSASS 等による反応度低減効果のモデル化検討
  - FAIDUS 等による溶融燃料排出挙動及び冷却挙動のモデル化検討
  - 金属燃料炉心及び金属燃料物性に関する既往研究調査
  - コアキャッチャ上の溶融燃料の冷却挙動のモデル化検討
- タンク型炉採用に伴う過渡時及び事故時熱流動のモデル化と手法の整備
  - タンク型炉の崩壊熱除去系の設計・課題等の調査と分析
- FP 移行挙動解析コードの整備
  - ASTERIA-SFR のセシウム移行モデルの妥当性確認
  - ISAAC の炉内 FP 移行モデルの検討
  - セシウム化合物及びナトリウム化合物の蒸発挙動に係る試験の実施（委託）
- 蒸気発生器伝熱管破損（水リーク）事故時の解析・評価手法の整備
  - 水リーク解析コード QUARK-LP 及び SWINS-II 等の高速炉実証炉への適用性調査・検討と整備計画の策定
- PRA 手法の整備
  - 安全設計と PRA の関係整理（委託を含む）
- 情報収集とデータベース化
  - 高速炉実証炉の設計情報及び国内外の研究動向等の調査と情報データベースの構築に着手

【R8 年度】

- a. ボイド反応度低減のための方策に対応した解析手法の開発
  - ・空間依存動特性解析手法の絞り込みと ASTERIA-SFR への実装に係る概念設計
- b. 炉心損傷の防止策及び影響緩和策の評価手法の開発・整備
  - ・ **GEMSASS** 等による反応度低減効果のモデル化検討
  - ・ FAIDUS 等による溶融燃料排出挙動及び冷却挙動のモデル化検討
  - ・ 金属燃料炉心の事故解析に必要なモデル調査
  - ・ コアキャッチャ上の溶融燃料の冷却挙動のモデル化検討
- c. タンク型炉採用に伴う過渡時及び事故時熱流動のモデル化と手法の整備
  - ・ DRACS 等の崩壊熱除去系の熱流動模擬の検討（CFD による検討含む）
- d. FP 移行挙動解析コードの整備
  - ・ ASTERIA-SFR による ULOF 事象解析
  - ・ ISAAC の炉内/炉外 FP 移行モデルの検討
  - ・ セシウム化合物及びナトリウム化合物の混合エアロゾルの凝縮及び成長過程に係る試験の実施（委託）
- e. 蒸気発生器伝熱管破損（水リーク）事故時の解析・評価手法の整備
  - ・ 水リーク解析コードの改良・整備（伝熱管材料、SG 型式に対応した改良を含む）
- f. PRA 手法の整備
  - ・ リスク情報活用の利点と課題の分析（委託を含む）
- g. 情報収集とデータベース化
  - ・ 高速炉実証炉の設計情報及び国内外の研究動向等の調査と情報データベースの構築

【R9 年度】

- a. ボイド反応度低減のための方策に対応した解析手法の開発
  - ・ ASTERIA-SFR の空間依存動特性解析手法の高度化に係る詳細設計
- b. 炉心損傷の防止策及び影響緩和策の評価手法の開発・整備
  - ・ **GEMSASS**、FAIDUS 等モデルの妥当性確認解析
  - ・ 金属燃料炉心の事故解析のためのモデル化検討
  - ・ 事故時炉内熱流動特性に基づく溶融燃料、燃料デブリ冷却挙動の評価手法整備
- c. タンク型炉採用に伴う過渡時及び事故時熱流動のモデル化と手法の整備
  - ・ 1 次主循環ポンプトリップ後の原子炉容器内の熱流動挙動の詳細検討（CFD による検討を含む）
- d. FP 移行挙動解析コードの整備
  - ・ ASTERIA-SFR による ULOF 事象解析
  - ・ ISAAC の炉内/炉外 FP 移行モデルの検証及び実機解析
  - ・ セシウム化合物及びナトリウム化合物の混合エアロゾルの凝集及び沈着過程に係る試験の実施（委託）
- e. 蒸気発生器伝熱管破損（水リーク）事故時の解析・評価手法の整備
  - ・ 水リーク解析コードの改良・整備（伝熱管材料、SG 型式に対応した改良を含む）
- f. PRA 手法の整備
  - ・ リスクレベルの検討とレベル 1/2PRA 手法の選定（委託を含む）
- g. 情報収集とデータベース化
  - ・ 高速炉実証炉の設計情報及び国内外の研究動向等の調査と情報データベースの構築

【R10 年度】

- a. ボイド反応度低減のための方策に対応した解析手法の開発
  - ・ ASTERIA-SFR の空間依存動特性解析手法の実装（コーディング）と動作確認
- b. 炉心損傷の防止策及び影響緩和策の評価手法の開発・整備
  - ・ 典型的プラントを想定した実機適用性解析
  - ・ 金属燃料炉心の事故解析手法整備
  - ・ 事故時炉内熱流動特性に基づく溶融燃料、燃料デブリ冷却挙動の評価手法整備
- c. タンク型炉採用に伴う過渡時及び事故時熱流動のモデル化と手法の整備
  - ・ 過渡時及び事故時の原子炉容器内フローネットワークモデルの構築（CFD による検討結果の反映等によるモデルの詳細化）
- d. FP 移行挙動解析コードの整備
  - ・ ASTERIA-SFR による ULOF 事象解析
  - ・ ISAAC の炉内/炉外 FP 移行モデルの実機解析
  - ・ エアロゾル挙動試験結果を踏まえた ISAAC の FP 移行モデルの改良（委託）
- e. 蒸気発生器伝熱管破損（水リーク）事故時の解析・評価手法の整備
  - ・ 水リーク解析コードの改良・整備（伝熱管材料、SG 型式に対応した改良を含む）
- f. PRA 手法の整備
  - ・ レベル 1 及びレベル 2PRA 手法の整備（委託を含む）
- g. 情報収集とデータベース化
  - ・ 高速炉実証炉の設計情報及び国内外の研究動向等の調査と情報データベースの構築

|  |                                                                                              |                                                                                                                                                                           |                                                                                                                    |                                                                                                        |                                                                                          |
|--|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | 行程表                                                                                          |                                                                                                                                                                           |                                                                                                                    |                                                                                                        |                                                                                          |
|  |                                                                                              | R7年度(2025)                                                                                                                                                                | R8年度(2026)                                                                                                         | R9年度(2027)                                                                                             | R10年度(2028)                                                                              |
|  | a. ボイド反応度低減のための方策に対応した解析手法の開発                                                                | (ASTERIA-SFR)<br>←<br>・核的カップリングの弱い高速炉体系に適用可能な空間依存動特性解析手法の調査<br>→                                                                                                          | ・空間依存動特性解析手法の絞り込みとASTERIA-SFRへの実装に係る概念設計                                                                           | ・ASTERIA-SFRの空間依存動特性解析手法の高度化に係る詳細設計<br>▽学会発表                                                           | ・ASTERIA-SFRの空間依存動特性解析手法の実装(コーディング)と動作確認<br>▽論文公表等                                       |
|  | b. 炉心損傷の防止策及び影響緩和策の評価手法の開発・整備                                                                | (ADYTUM, ASTERIA-SFR, ISAAC)<br>▽学会発表<br>←<br>・SASS等による反応度低減効果のモデル化検討<br>・FAIDUS等による溶融燃料排出挙動及び冷却挙動のモデル化検討<br>・コアキャッチャ上の溶融燃料の冷却挙動のモデル化検討<br>・金属燃料炉心及び金属燃料物性に関する既往研究調査<br>→ | ・SASS等による反応度低減効果のモデル化検討<br>・FAIDUS等による溶融燃料排出挙動及び冷却挙動のモデル化検討<br>・コアキャッチャ上の溶融燃料の冷却挙動のモデル化検討<br>・金属燃料炉心の事故解析に必要なモデル調査 | ・SASS、FAIDUS等モデルの妥当性確認解析<br>・事故時炉内熱流動特性に基づく溶融燃料、燃料デブリ冷却挙動の評価手法整備<br>・金属燃料炉心の事故解析のためのモデル化検討             | ・典型的プラントを想定した適用性解析<br>・事故時炉内熱流動特性に基づく溶融燃料、燃料デブリ冷却挙動の評価手法整備<br>・金属燃料炉心の事故解析手法整備           |
|  | c. タンク型炉採用に伴う過渡時及び事故時熱流動モデル化と手法の整備                                                           | (ADYTUM, CFD)<br>←<br>・タンク型炉の崩壊熱除去系の設計・課題等の調査と分析<br>→                                                                                                                     | ・DRACS等の崩壊熱除去系の熱流動模擬の検討(CFDによる検討含む)                                                                                | ・1次主循環ポンプトリップ後の原子炉容器内の熱流動挙動の詳細検討(CFDによる検討含む)<br>▽学会発表                                                  | ・過渡時及び事故時の原子炉容器内フローネットワークモデルの構築(CFD結果の反映等によるモデルの詳細化)<br>▽論文公表等                           |
|  | d. FP移行挙動解析コードの整備                                                                            | (ASTERIA-SFR, ISAAC(試験データ取得を含む。))<br>▽学会発表<br>←<br>・ASTERIA-SFRのセシウム移行モデルの妥当性確認<br>・ISAACの炉内FP移行モデルの検討<br>・セシウム化合物及びナトリウム化合物の蒸発挙動に係る試験の実施<br>→                            | ・ASTERIA-SFRによるULOF事象解析<br>・ISAACの炉内/炉外FP移行モデルの検討<br>・セシウム化合物及びナトリウム化合物の混合エアロゾルの凝縮及び成長過程に係る試験の実施                   | ・ASTERIA-SFRによるULOF事象解析<br>・ISAACの炉内/炉外FP移行モデルの検証及び実機解析<br>・セシウム化合物及びナトリウム化合物の混合エアロゾルの凝集及び沈着過程に係る試験の実施 | ・ASTERIA-SFRによるULOF事象解析<br>・ISAACの炉内/炉外FP移行モデルの実機解析<br>・エアロゾル挙動試験結果を踏まえたISAACのFP移行モデルの改良 |
|  | e. 蒸気発生器伝熱管破損(水リーク)事故時の解析・評価手法の整備                                                            | (QUARK-LP, SWINS等)<br>←<br>・水リーク解析コードの高速炉実証炉への適用性調査・検討と整備計画の策定<br>→                                                                                                       | ・水リーク解析コードの改良・整備(伝熱管材料、SG型式に対応した改良を含む)                                                                             | ・水リーク解析コードの改良・整備(伝熱管材料、SG型式に対応した改良を含む)                                                                 | ・水リーク解析コードの改良・整備(伝熱管材料、SG型式に対応した改良を含む)                                                   |
|  | f. PRA手法の整備                                                                                  | ←<br>・安全設計とPRAの関係整理<br>→                                                                                                                                                  | ・リスク情報活用の利点と課題の分析                                                                                                  | ・リスクレベルの検討とレベル1/2PRA手法の選定                                                                              | ・レベル1及びレベル2PRA手法の整備                                                                      |
|  | g. 情報収集とデータベース化                                                                              | ←<br>・高速炉実証炉の設計情報及び国内外の研究動向等の調査と情報データベースの構築<br>→                                                                                                                          |                                                                                                                    |                                                                                                        |                                                                                          |
|  | (2) 高温ガス炉の事故解析手法の検討                                                                          |                                                                                                                                                                           |                                                                                                                    |                                                                                                        |                                                                                          |
|  | 成果目標：高温ガス炉の安全上の特徴として、実証炉の安全上重要となる論点を整理する。それを踏まえ、高温ガス炉に係る評価事故シーケンスの選定手法及びその評価に必要な事故解析手法を確立する。 |                                                                                                                                                                           |                                                                                                                    |                                                                                                        |                                                                                          |
|  | 【R7 年度】                                                                                      |                                                                                                                                                                           |                                                                                                                    |                                                                                                        |                                                                                          |
|  | a. 高温ガス炉の安全上の特徴の整理                                                                           |                                                                                                                                                                           |                                                                                                                    |                                                                                                        |                                                                                          |
|  | ・情報の収集、調査及びそれを踏まえたデータベースへの整理                                                                 |                                                                                                                                                                           |                                                                                                                    |                                                                                                        |                                                                                          |
|  | ・評価事故シーケンスの選定に係る国内外の研究動向の調査(委託)                                                              |                                                                                                                                                                           |                                                                                                                    |                                                                                                        |                                                                                          |
|  | ・高温ガス炉のPRAに係る既往研究の調査                                                                         |                                                                                                                                                                           |                                                                                                                    |                                                                                                        |                                                                                          |
|  | b. 高温ガス炉の特徴を踏まえた事故解析手法の整備                                                                    |                                                                                                                                                                           |                                                                                                                    |                                                                                                        |                                                                                          |

|                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                         |                                                                                                                                       |                                                                                                                                            |            |               |                    |                                                                                                                                               |                                                                                                                                         |                                                                                                                                       |                                                                                                                                            |                           |                                                                                       |                                                                     |                                                                                         |                                                                                          |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|---------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
|                           | <ul style="list-style-type: none"><li>・高温ガス炉用事故解析コードに必要な仕様の選定、モデル化に向けた方針の決定</li></ul> <p>【R8 年度】</p> <ul style="list-style-type: none"><li>a. 高温ガス炉の安全上の特徴の整理<ul style="list-style-type: none"><li>・情報の収集、調査及びそれを踏まえたデータベースへの整理</li><li>・高温ガス炉の安全上の特徴を踏まえたに適したPRA 手法の検討（委託）</li></ul></li><li>・b. へ反映すべき事項の整理</li><li>b. 高温ガス炉の特徴を踏まえた事故解析手法の整備<ul style="list-style-type: none"><li>・高温ガス炉用事故解析コードの整備作業</li></ul></li></ul> <p>【R9 年度】</p> <ul style="list-style-type: none"><li>a. 高温ガス炉の安全上の特徴の整理<ul style="list-style-type: none"><li>・情報の収集、調査及びそれを踏まえたデータベースへの整理</li><li>・安全上重要となる論点の取りまとめ（委託を含む）</li><li>・高温ガス炉の評価事故シーケンスの特徴の整理</li></ul></li><li>b. 高温ガス炉の特徴を踏まえた事故解析手法の整備<ul style="list-style-type: none"><li>・高温ガス炉用事故解析コードの試解析による機能確認</li></ul></li></ul> <p>【R10 年度】</p> <ul style="list-style-type: none"><li>a. 高温ガス炉の安全上の特徴の整理<ul style="list-style-type: none"><li>・情報の収集、調査及びそれを踏まえたデータベースへの整理</li><li>・安全上重要となる論点の取りまとめ結果の更新（R10 年終了予定の基本設計に係る情報等の反映）（委託を含む）</li><li>・高温ガス炉の評価事故シーケンスの特徴の整理</li></ul></li><li>b. 高温ガス炉の特徴を踏まえた事故解析手法の整備<ul style="list-style-type: none"><li>・高温ガス炉用事故解析コードの試解析による機能確認</li></ul></li></ul>                                                                              |                                                                                                                                         |                                                                                                                                       |                                                                                                                                            |            |               |                    |                                                                                                                                               |                                                                                                                                         |                                                                                                                                       |                                                                                                                                            |                           |                                                                                       |                                                                     |                                                                                         |                                                                                          |
|                           | <p style="text-align: center;">行程表</p> <table><tr><td></td><td>← R7年度(2025)</td><td>R8年度(2026)</td><td>R9年度(2027)</td><td>R10年度(2028) →</td></tr><tr><td>a. 高温ガス炉の安全上の特徴の整理</td><td><ul style="list-style-type: none"><li>・情報の収集、調査及びそれを踏まえたデータベースへの整理</li><li>・評価事故シーケンスの選定に係る国内外の研究動向の調査</li><li>・高温ガス炉のPRAに係る既往研究の調査</li></ul></td><td><ul style="list-style-type: none"><li>・情報の収集、調査及びそれを踏まえたデータベースへの整理</li><li>・高温ガス炉の安全上の特徴を踏まえたPRA手法の検討</li><li>・b. へ反映すべき事項の整理</li></ul></td><td><ul style="list-style-type: none"><li>・情報の収集、調査及びそれを踏まえたデータベースへの整理</li><li>・安全上重要となる論点の取りまとめ</li><li>・高温ガス炉の評価事故シーケンスの特徴の整理</li></ul></td><td><ul style="list-style-type: none"><li>・情報の収集、調査及びそれを踏まえたデータベースへの整理</li><li>・安全上重要となる論点の取りまとめ結果の更新</li><li>・高温ガス炉の評価事故シーケンスの特徴の整理</li></ul></td></tr><tr><td>b. 高温ガス炉の特徴を踏まえた事故解析手法の整備</td><td><ul style="list-style-type: none"><li>・高温ガス炉用事故解析コードに必要な仕様の選定、モデル化に向けた方針の決定</li></ul></td><td><ul style="list-style-type: none"><li>・高温ガス炉用事故解析コードの整備作業</li></ul></td><td><ul style="list-style-type: none"><li>▽学会発表</li><li>・高温ガス炉用事故解析コードの試解析による機能確認</li></ul></td><td><ul style="list-style-type: none"><li>▽論文公表等</li><li>・高温ガス炉用事故解析コードの試解析による機能確認</li></ul></td></tr></table> |                                                                                                                                         | ← R7年度(2025)                                                                                                                          | R8年度(2026)                                                                                                                                 | R9年度(2027) | R10年度(2028) → | a. 高温ガス炉の安全上の特徴の整理 | <ul style="list-style-type: none"><li>・情報の収集、調査及びそれを踏まえたデータベースへの整理</li><li>・評価事故シーケンスの選定に係る国内外の研究動向の調査</li><li>・高温ガス炉のPRAに係る既往研究の調査</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>・情報の収集、調査及びそれを踏まえたデータベースへの整理</li><li>・高温ガス炉の安全上の特徴を踏まえたPRA手法の検討</li><li>・b. へ反映すべき事項の整理</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>・情報の収集、調査及びそれを踏まえたデータベースへの整理</li><li>・安全上重要となる論点の取りまとめ</li><li>・高温ガス炉の評価事故シーケンスの特徴の整理</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>・情報の収集、調査及びそれを踏まえたデータベースへの整理</li><li>・安全上重要となる論点の取りまとめ結果の更新</li><li>・高温ガス炉の評価事故シーケンスの特徴の整理</li></ul> | b. 高温ガス炉の特徴を踏まえた事故解析手法の整備 | <ul style="list-style-type: none"><li>・高温ガス炉用事故解析コードに必要な仕様の選定、モデル化に向けた方針の決定</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>・高温ガス炉用事故解析コードの整備作業</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>▽学会発表</li><li>・高温ガス炉用事故解析コードの試解析による機能確認</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>▽論文公表等</li><li>・高温ガス炉用事故解析コードの試解析による機能確認</li></ul> |
|                           | ← R7年度(2025)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | R8年度(2026)                                                                                                                              | R9年度(2027)                                                                                                                            | R10年度(2028) →                                                                                                                              |            |               |                    |                                                                                                                                               |                                                                                                                                         |                                                                                                                                       |                                                                                                                                            |                           |                                                                                       |                                                                     |                                                                                         |                                                                                          |
| a. 高温ガス炉の安全上の特徴の整理        | <ul style="list-style-type: none"><li>・情報の収集、調査及びそれを踏まえたデータベースへの整理</li><li>・評価事故シーケンスの選定に係る国内外の研究動向の調査</li><li>・高温ガス炉のPRAに係る既往研究の調査</li></ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <ul style="list-style-type: none"><li>・情報の収集、調査及びそれを踏まえたデータベースへの整理</li><li>・高温ガス炉の安全上の特徴を踏まえたPRA手法の検討</li><li>・b. へ反映すべき事項の整理</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>・情報の収集、調査及びそれを踏まえたデータベースへの整理</li><li>・安全上重要となる論点の取りまとめ</li><li>・高温ガス炉の評価事故シーケンスの特徴の整理</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>・情報の収集、調査及びそれを踏まえたデータベースへの整理</li><li>・安全上重要となる論点の取りまとめ結果の更新</li><li>・高温ガス炉の評価事故シーケンスの特徴の整理</li></ul> |            |               |                    |                                                                                                                                               |                                                                                                                                         |                                                                                                                                       |                                                                                                                                            |                           |                                                                                       |                                                                     |                                                                                         |                                                                                          |
| b. 高温ガス炉の特徴を踏まえた事故解析手法の整備 | <ul style="list-style-type: none"><li>・高温ガス炉用事故解析コードに必要な仕様の選定、モデル化に向けた方針の決定</li></ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | <ul style="list-style-type: none"><li>・高温ガス炉用事故解析コードの整備作業</li></ul>                                                                     | <ul style="list-style-type: none"><li>▽学会発表</li><li>・高温ガス炉用事故解析コードの試解析による機能確認</li></ul>                                               | <ul style="list-style-type: none"><li>▽論文公表等</li><li>・高温ガス炉用事故解析コードの試解析による機能確認</li></ul>                                                   |            |               |                    |                                                                                                                                               |                                                                                                                                         |                                                                                                                                       |                                                                                                                                            |                           |                                                                                       |                                                                     |                                                                                         |                                                                                          |
| 8. 実施体制                   | <p>【システム安全研究部門における実施者（実施項目ごとに主担当者に○を記載）】</p> <p>後神 進史 主任技術研究調査官</p> <p>○ 石津 朋子 上席技術研究調査官（実施項目（１）、（２）関係）</p> <p>○ 藤田 哲史 主任技術研究調査官（実施項目（１）、（２）関係）</p> <p>○ 園田 大貴 副主任技術研究調査官（実施項目（１）、（２）関係）</p> <p>井上 正明 技術参与</p> <p>【委託研究先】</p> <p>実施項目（１）dのうち混合エアロゾルの挙動に関する定量的パラメータを取得する試験の実施： 未定</p> <p>実施項目（１）fのうち PRA の活用状況の整理、適切な手法検討と課題抽出に係る部分： 未定</p> <p>実施項目（２）aのうち学協会、海外及び国際機関での検討状況の調査に係る部分： 未定</p> <p>【共同研究先】</p> <p>なし</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                         |                                                                                                                                       |                                                                                                                                            |            |               |                    |                                                                                                                                               |                                                                                                                                         |                                                                                                                                       |                                                                                                                                            |                           |                                                                                       |                                                                     |                                                                                         |                                                                                          |

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 9. 備考 | <p style="text-align: center;">文 献</p> <p>[1] 閣議決定、「GX 実現に向けた基本方針～今後 10 年を見据えたロードマップ～」(令和 5 年 2 月 10 日)、<a href="#">kihon.pdf (cas.go.jp)</a>、(令和 6 年 8 月 1 日確認)</p> <p>[2] 内閣官房、GX 会議、「GX 実現に向けた基本方針 参考資料」(令和 5 年 2 月 10 日)、<a href="#">20230210002_3.pdf (meti.go.jp)</a>、(令和 6 年 8 月 1 日確認)</p> <p>[3] 経済産業省、第 21 回高速炉開発会議 戦略ワーキンググループ、資料 1「高速炉実証炉の概念設計対象となる炉概念仕様と中核企業の評価結果」、令和 5 年 7 月 12 日 <a href="#">021_01_00.pdf (meti.go.jp)</a> (令和 6 年 8 月 1 日確認)</p> <p>[4] 例えば、Venard, C., Coquelet-Pascal, C., Conti, A., Gentet, D., Lamagnère, P., Lavastre, R., Gauthé, P., Bernardin, B., Beck, T., Lorenzo, D., Scholer, A., Perrin, B., Verrier, D., “The ASTRID core at the end of the conceptual design phase,” Proceedings of International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: FR17, Yekaterinburg, Russia, June 26–29, IAEA-CN245–288, 2017.</p> <p>[5] 例えば、<a href="#">7-3 高速炉の炉心燃料集合体の解析評価手法の構築   原子力機構の研究開発成果 2020–21 (jaea.go.jp)</a> (令和 6 年 8 月 1 日確認)</p> <p>[6] <del>Sumner, Moisseytsev, A., Heidet, F., Wootan, D. W., Casella, A. M., Nelson, J. V., “Benchmark specification for FFTF LOFWOS Test #13,” ANL-ART-102-Rev. 2, Argonne National Laboratory, USA, 2022. DOI:<a href="https://doi.org/10.2172/1877878">https://doi.org/10.2172/1877878</a>.</del> Takamatsu, M., Sekine, T., Uchida, M., Harada, K., “Component function test of self actuated shutdown system in the experimental fast reactor JOYO,” Proceedings of 13<sup>th</sup> International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-13), Beijing, China, May 16–20<sup>th</sup>, ICONE13–50159, 2005.</p> <p>[7] Kubo, S., Chikazawa, Y., Ohshima, H., Uchita, M., Miyagawa, T., Eto, M., Suzuno, T., Matoba, I., Endo, J., Watanabe, O., and Higurashi, K., ” A conceptual design study of pool-type sodium-cooled fast reactor with enhanced anti-seismic capability,” Mechanical Engineering Journal, Vol .7, No.3, 2020.</p> <p>[8] 「次世代ナトリウム冷却高速炉の安全設計評価方針検討会」の設置について」、日本原子力学会新型炉部会、2023 年 9 月 7 日、<a href="#">aesj.or.jp/division/ard/documents/20230907-Prospectus.pdf</a> (令和 6 年 8 月 1 日確認)</p> <p>[9] “NRC Non-Light Water Reactor (NonLWR) Vision and Strategy, Volume 3 -Computer Code Development Plans for Severe Accident Progression, Source Term, and Consequence Analysis,” REVISION 1, January 31, 2020.</p> <p>[10] 例えば、RG 1.233 “GUIDANCE FOR A TECHNOLOGY-INCLUSIVE, RISK-INFORMED, AND PERFORMANCE-BASED METHODOLOGY TO INFORM THE LICENSING BASIS AND CONTENT OF APPLICATIONS FOR LICENSES, CERTIFICATIONS, AND APPROVALS FOR NON-LIGHT-WATER REACTORS ”, U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION REGULATORY GUIDE 1.233 REVISION 0, June 2020.</p> <p>[11] <a href="#">石津朋子、渡辺大貴、大川剛、井上正明、「高速炉に対する SA 対策の評価に関する研究」、安全研究成果報告、RREP-2019-1003、平成 31 年 3 月</a></p> <p>[12] 経済産業省、「高温ガス炉実証炉開発事業を担う中核企業の選定に係る公募結果について」、令和 5 年 7 月 25 日、<a href="#">高温ガス炉実証炉開発事業を担う中核企業の選定に係る公募結果について   資源エネルギー庁 (meti.go.jp)</a>、(令和 6 年 8 月 1 日確認)</p> <p>[13] 日本原子力学会、<a href="#">ブロック型高温ガス炉の安全基準の調査研究   日本原子力学会 (aesj.net)</a>、(令和 6 年 8 月 1 日確認)</p> <p>[14] 例えば、文部科学省、次世代革新炉の開発に必要な研究開発基盤の整備に関する検討会（第 2 回）配付資料 3, 令和 4 年 10 月 28 日.</p> <p>[15] 例えば、“SAFETY DESIGN CRITERIA FOR GENERATION IV VERY HIGH TEMPERATURE REACTOR SYSTEM,” GIF/VHTR-SDC/2023/001, JUNE 2023, GEN-IV INTERNATIONAL FORUM.</p> <p>[16] ナトリウム冷却高速炉 (SFR)、Sodium-Cooled Fast Reactor   第 4 世代原子力システムに関する国際フォーラム (GIF) (<a href="#">jaea.go.jp</a>) (令和 6 年 8 月 1 日確認)</p> <p>[17] 超高温ガス炉 (VHTR)、<a href="#">超高温ガス炉   第 4 世代原子力システムに関する国際フォーラム (GIF) (jaea.go.jp)</a>、(令和 6 年 8 月 1 日確認)</p> <p>[18] <a href="#">高温ガス炉の構造 (jaea.go.jp)</a>、(令和 6 年 8 月 1 日確認)</p> <p>[b-1] <a href="#">Ishizu, T., Sonoda, H., Fujita, S., ” THEFIS test simulation to validate a freezing model of ASTERIA-SFR core-disruptive-accident analysis code,” Journal of Nuclear Engineering, 2023, 4, 154-164, 2023. <a href="https://doi.org/10.3390/jne4010012">https://doi.org/10.3390/jne4010012</a></a></p> <p>[b-2] <a href="#">Ishizu, T., Watanabe, H., “Model validation of the ASTERIA-FBR code related to core expansion phase based on THINA experimental results,” Proceedings of FR17, IAEA-CN245–006, Yekaterinburg, Russia, 2017.</a></p> <p>[b-3] <a href="#">Ishizu, T., Tatewaki, I., “Validation of Fuel Pin Failure Model of Core Disruptive Accident Analysis Code,” ASTERIA-FBR, Proceedings of NTHAS9, N9P0099, Buyeo, Korea, 2014.</a></p> <p>[b-4] <a href="#">藤田哲史、石津朋子、守田幸路、「溶融燃料プールのスロッシング運動に伴う即発臨界挙動」、日本原子力学会 2022 年春の年会、1G04、オンライン開催、令和 4 年 3 月</a></p> <p>[b-5] <a href="#">渡辺大貴、石津朋子、「高速炉炉心損傷挙動解析コード ASTERIA-FBR を用いた CABRI-1 AH3 試験解析」、日本原子力学会 2017 年春の年会、2M14、神奈川、平成 29 年 3 月</a></p> <p>[b-6] <a href="#">渡辺大貴、石津朋子、「高速炉炉心損傷挙動解析コード ASTERIA-FBR の開発 (9) CABRI-BI3 試験の解析」、日本原子力学会 2016 年春の年会、1F20、仙台、平成 28 年 3 月</a></p> <p>[b-7] <a href="#">石津朋子、遠藤寛、山本敏久、帯刀勲、大川剛、北村修、宇野隼平、鈴木広一、白川典幸、山本雄一、井上英明、齋藤裕明、</a></p> |

大枝伸、「高速炉炉心損傷事故解析コード ASTERIA-FBR の開発(1)～(7)」(シリーズ発表)、原子力学会 2014 年春の年会、N01～07、東京、平成 26 年 3 月

[b-8] Tatewaki, T., Morita, K., Endo, H., “A Study on Characteristics of Molten Pool Sloshing in Core Disruptive Accidents of Fast Reactors,” Proceedings of ICONE23, 23rd International Conference on Nuclear Engineering, May 17-21, 2015, Chiba, Japan.

[b-9] 守田幸路、福田真之、劉維、帶刀勲、「熔融炉心プールのスロッシング運動に伴うエナジェティックスに関する検討」、日本原子力学会 2018 年春の年会、1K16、大阪、平成 30 年 3 月

[b-10] Morita, K., Matsumoto, T., Tatewaki, I., Fuchita, S., “Sloshing of Molten Fuel Pool and the Recriticality,” A Topical Expert Meeting on Re-criticality Free SFR Concepts during HCDA, Tokyo City Univ., Japan, 2016.

[b-11] Morita, K., Matsumoto, T., Emura, Y., Abe, T. Tatewaki, I., Endo, H., “Investigation on Sloshing Response of Liquid in a 2D Pool against Hydraulic Disturbance,” Proceedings of NTHAS9, N9P0033, Buyeo, Korea, 2014.

[b-12] Sonoda, H., Fujita, S., Inoue, M., Okawa, T., “Preliminary analysis focusing on in-vessel thermal hydraulics in loss-of-heat removal systems in a sodium-cooled fast reactor,” Annals of Nuclear Energy 192 (2023) 109992, 2023.

[b-13] Okawa, T., Ariyoshi, M., Ishizu, T., Watanabe H., Yamamoto T., “Modelling and capability of severe accident simulation code, AZORES to analyze In-Vessel Retention for a loop-type sodium-cooled fast reactor,” Progress in Nuclear Energy 113 (2019) 156-165, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2019.01.011>

[c-1] Tatewaki, T., Endo, H., Shindo, Y., Ishizu, T., “Improvement of the Fast Breeder Reactor Plant Dynamic Analysis Code ADYTUM,” Proceedings of ICONE20, ICONE20POWER2012-54725, Anaheim, California, USA, 2012.

[d-1] Sonoda, H., Inoue, M., Ishizu, T., “Development of in-vessel Source Term Evaluation Method for ULOF Event in Sodium-cooled Fast Reactor,” Proceedings of FR22, IAEA-CN291-180, Vienna, Austria, 2022.

[d-2] 園田大貴、石津朋子、「ナトリウムプールからカバーガスへの Cs 移行量に関する妥当性確認解析」、日本原子力学会 2023 年秋の大会、1010、名古屋、令和 5 年 9 月

[d-3] 園田大貴、石津朋子、守田幸路、「FP 移行挙動に着目した高速炉炉心損傷挙動解析コード ASTERIA-SFR による FAUST 試験解析、日本原子力学会 2022 年春の年会、2E09、オンライン開催、令和 4 年 3 月

[d-4] 園田大貴、「FP 移行挙動に着目した高速炉炉心損傷挙動解析コード ASTERIA-SFR による FAUST 試験解析」、令和 4 年度原子力規制庁技術基盤グループ-原子力機構安全研究・防災支援部門合同研究成果報告会、令和 4 年 11 月 22 日

[d-5] Zou, Z., Liu, W., Morita, K., “Development of a Source Terms Migration Model for CDA Bubble”, 14th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-14), 2024. (公表準備中)

[d-6] Zou, Z., Liu, W., Morita, K., “Development of a simplified one-dimensional CDA bubble model”, Annals of Nuclear Energy 110567, 2024.

[d-7] 松井将都、中山達也、服部亮平、前島颯人、佐藤勇、「ナトリウム化合物エアロゾルとセシウム化合物エアロゾルの相互作用評価試験」、平成 30 年度日本原子力学会北関東支部若手研究者発表会、平成 30 年 4 月

[d-8] 樽見直樹、佐藤勇、内田昇吾、「Na 冷却高速炉のシビアアクシデント時における Cs エアロゾル挙動に関する研究 (4) 熱力学平衡計算及びエアロゾル発生試験による検討と課題」、日本原子力学会 2021 年秋の大会、学生連絡会ポスターセッション、オンライン開催、令和 3 年 9 月

[d-9] 岡野匠真、樽見直樹、近藤幸祐、佐藤洸宇、佐藤勇、「高速炉シビアアクシデント時のセシウムエアロゾル挙動に関する研究 -熱力学平衡計算によるカバーガス上の固相成分の分析-」、日本原子力学会 2024 年春の年会、2E19、東大阪、令和 6 年 3 月

[d-10] 岡野匠真、佐藤洸宇、佐藤勇、「高速炉シビアアクシデント時のセシウムエアロゾル挙動に関する研究 -構造物へのエアロゾル沈着浸透評価-」、日本原子力学会 2024 年秋の大会、2N13、仙台、令和 6 年 9 月

[d-11] 佐藤洸宇、岡野匠真、佐藤勇、「高速炉シビアアクシデント時における Cs エアロゾル成長過程に関する検討」、日本原子力学会 2024 年秋の大会、学生ポスターセッション、仙台、令和 6 年 9 月

[d-12] Okano, S., Sato, K., Sato, I., “Study on cesium aerosol behavior during sodium-cooled fast reactor severe accident,” GLOBAL2024, Tokyo, Japan, 2024.

[e-1] Shindo, Y., and Haga, K., “Analysis of Tube Failure Propagation due to Overheating in a Prototype LMFBR Steam-Generator Geometry by Using QUALK-LP Ver.4,” Proceedings of ICAPP ‘04, 4039, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2004.

[f-1] Jang, S., Yamaguchi, A., “Dynamic scenario quantification for level 2 PRA of Sodium-cooled fast reactor based on continuous Markov chain and Monte Carlo method coupled with meta-model of thermal-hydraulic analysis,” Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 55, pp. 850-858, 2018. DOI: 10.1080/00223131.2018.1445564

[f-2] 石津朋子、渡辺大貴、藤田哲史、井上正明、「現象相関ダイアグラムを用いた高速炉レベル 2PRA 評価手法の検討(1)ULOF 事象への適用性検討」、日本原子力学会 2019 年秋の大会、1K07、富山、令和元年 9 月

[f-3] 「平成 25 年度もんじゅアクシデントマネジメント策の妥当性に関する検討」、JNES 報告書 09 原熱報-0010、平成 26 年 1 月

研究計画（案）

|                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |       |                                    |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|------------------------------------|
| 1. プロジェクト<br>(始期：R 7 年度<br>終期：R 1 1 年度) | 14. 実機材料等を活用した経年劣化評価・検証に係る研究（フェーズ2）                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 担当部署  | 技術基盤グループ<br>システム安全研究部門             |
|                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 担当責任者 | 橋倉 靖明  上席技術研究調査官                   |
| 2. カテゴリー・研究分野                           | 【原子炉施設】   H) 材料・構造                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 主担当者  | 渡辺  藍己  技術研究調査官<br>水田  航平  技術研究調査官 |
| 3. 背景                                   | <p>（1）規制課題</p> <p>原子力規制委員会は「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和 32 年法律第 166 号）」及び「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則（昭和 53 年通商産業省令第 77 号）」（以下「実用炉規則」という。）に基づき、事業者が実施する安全機能を有する機器・構造物を対象とした着目すべき経年劣化事象の抽出、健全性評価及び保守管理の技術的妥当性を確認している。また、長期施設管理計画認可申請の審査においては、原子炉その他設備が長期供用期間の運転に伴う劣化を考慮した上で「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則（平成 25 年原子力規制委員会規則第 6 号）」（以下「技術基準規則」という。）に定める基準に適合することを確認している。</p> <p>また、脱炭素社会の実現に向けた電気供給体制の確立を図るための電気事業法等の一部を改正する法律（令和5年法律第44号）の一部施行に伴い、運転開始から現行法上の上限である60年を超えても運転ができるようになった。</p> <p>このため、長期運転の安全性に係る技術的な確認は、最新の科学的・技術的知見に基づいて行う必要があり、そのため、常に関連する技術基準規則及び民間規格の技術的妥当性を確認していく必要がある。</p> <p>（2）研究課題</p> <p>これまで、長期施設管理計画認可申請の審査に活用するために実施してきた材料研究では、主に加速劣化試験により模擬的に経年劣化を付与した材料の特性を評価し<sup>(1-13)</sup>、原子炉容器（以下「RV」という。）の低合金鋼、炉内構造物などのステンレス鋼及びケーブルなどの高分子材料の経年劣化予測等を行ってきた。</p> <p>一方、原子炉施設の廃止措置が進み、実際の原子炉環境で使用され劣化した実機材料を用いた試験が可能となってきたため、実機材料試験を実施して、加速劣化試験の結果と比較し、これまでの経年劣化評価手法が適切な保守性を有していることを確認することが重要な研究課題となっている。また、海外においても、OECD/NEA のジョイントプロジェクトである SMILE プロジェクトでも実機材料を活用し、経年劣化事象の技術的知見を取得することを目的に実施されている。</p> <p>このような背景の下、R2～R6 年度の 5 か年において「実機材料等を活用した経年劣化評価・検証に係る研究」を実施し、各研究テーマにおいて、以下の成果と課題を抽出した。</p> <p>【原子炉容器の中性子照射脆化評価に係る研究】</p> <p>RV は、実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈第 14 条に記載される規制要求に基づき、健全性評価が行われている<sup>(14)</sup>。この健全性評価では、最大仮想欠陥最深部における加圧熱衝撃（以下「PTS」という。）状態遷移曲線及びプラント評価時期に対応する破壊靱性遷移曲線を最大仮想欠陥最深部の温度で比較し、両者が交差しなければ PTS 評価事象に対して RV の炉心領域部は健全であることが示される（以下「PTS 評価」という。）。RV の PTS 評価にあたっては、対象とする RV 炉心領域材料の破壊靱性データを温度軸に対して平行に破壊靱性の温度移行量（以下「<math>\Delta T_{KIC}</math>」という。）だけ移行させ、プラント評価時期における破壊靱性を予測し、これらのデータを下限包絡する式を設定する。これがプラント評価時期に対応する破壊靱性遷移曲線となる<sup>(15)</sup>。プラント評価時期における破壊靱性を予測するにあたっては、シャルピー衝撃試験によって得られる遷移温度の移行量（以下「<math>\Delta_v T_{r30}</math>」という。）が用いられている。この PTS 評価の考え方は、財団法人発電設備技術検査協会の原子炉圧力容器加圧熱衝撃実証試験（以下「国プロ」という。）で開発された手法<sup>(16)</sup>がベースとなっている。国プロでは、研究施設で照射し、加速劣化させた試験炉照射材を用いて試験が実施され、材料に生じたき裂または欠陥がどのくらいの負荷荷重を加えたらき裂が進展するのか、または破壊するのかという材料に対する靱性を評価する破壊靱性試験によって得られる <math>\Delta T_{KIC}</math> の方が試験片に衝撃荷重を与えることで破壊したときのエネルギーから衝撃値を求め材料の靱性を評価するシャルピー衝撃試験によって得られる <math>\Delta_v T_{r30}</math> よりも若干小さくなる傾向が見られるものの、<math>\Delta T_{KIC} = \Delta_v T_{r30}</math> の関係がほぼ成立することが認められるとしている。このことから、破壊靱性遷移曲線の移行量の予測に <math>\Delta_v T_{r30}</math> の予測式を用いることの妥当性が確認されたと報告されている<sup>(16)</sup>。</p> <p>一方、長期施設管理計画認可申請において事業者から提出された PTS 評価に関するデータを用いて、<math>\Delta T_{KIC} = \Delta_v T_{r30}</math> の関係について分析した結果、国プロの結果とは大きな方向性は共有するものの、前者が後者より若干小さくなるという傾向とはやや異なる傾向を示すことが分かった<sup>(17)</sup>。</p> <p>R2～R6 年度に実施した RV 研究では、研究施設で照射して加速劣化させた試験炉照射材を用いて試験を行ってきたが、破壊靱性参照温度（<math>\Delta T_0</math>）と <math>\Delta_v T_{r30}</math> を比較分析した結果、国プロの結果と同様、ほぼ等しい関係を示しているものの、監視試験片を用いた結果とはやや異なる傾向を示していることがわかった。</p> <p>監視試験の結果は、国プロや試験炉照射材の結果とやや異なる傾向を示すが、この原因は明らかになっていない。また、RV の健全性評価では、監視試験の結果を用いて、RV の将来の状態を確認しているが、実機 RV 本体を用いて <math>\Delta T_{KIC}</math> と <math>\Delta_v T_{r30}</math> との相関について調査された例は少ない。このため、実機材料を用いて各種試験（破壊靱性試験、シャルピー衝撃試験、機械試験、組織分析等）を実施することにより <math>\Delta T_{KIC}</math> と <math>\Delta_v T_{r30}</math> の相関について確認する必要がある。</p> <p>【炉内構造物の中性子照射による靱性低下に係る研究】</p> <p>炉内構造物は、中性子の照射を受けて破壊靱性が低下することが知られている。一部の原子力発電所では、靱性低下があった場</p> |       |                                    |
|                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |       |                                    |

|           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|           | <p>合でも炉内構造物の健全性が保たれることを確認するために、一般社団法人日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格 (JSME S NA1 -2012。以下「維持規格」という。)に基づく破壊力学的評価手法によりその長期健全性の評価を行っている。ここで、事業者が用いている破壊力学的評価手法に係る評価式は、主に加速劣化試験等から得られた国内外の破壊靱性試験データのばらつきの下限データを参照して評価式が策定されている。そこで、本研究では、加速劣化試験等の下限データから策定された評価式の保守性を確認するために、実機材料を用いて破壊靱性試験等を行う。</p> <p>R2～R6 年度に実施した研究では、実機材料を活用した試験の全体計画、発電所構内での実機材料取得工法及び取得後の研究施設での試験研究計画に関する検討を実施してきた。本研究の目的である評価式の保守性の確認は、これまで検討してきた計画に基づき、R9 年頃に取得可能な実機材料を的確に取得して試験を実施し、データを取得する必要がある。</p> <p>【予防保全対策施工箇所に対する長期健全性評価に係る研究】</p> <p>これまでに国内外の多数の沸騰水型原子炉 (BWR) において応力腐食割れ (以下「SCC」という。)の発生が報告されている<sup>(5)</sup>。SCC 等の破壊を引き起こす亀裂については、「実用発電用原子炉及びその附属施設における破壊を引き起こす亀裂その他の欠陥の解釈 (原規技発第 1408063 号 (平成 26 年 8 月 6 日原子力規制委員会決定)、改正 原規技発第 2107219 号 (令和 3 年 7 月 2 1 日原子力規制委員会決定))」(以下「亀裂の解釈」という。)において、維持規格の規定に基づく検査を実施し、亀裂発生の有無を確認することが要求されている。事業者は、SCC 発生を低減するための予防保全対策を行っており、予防保全対策を実施した場合には、維持規格で規定された検査において、予防保全実施時期を供用開始時期とすることができ、その結果として、予防保全対策施工箇所は検査頻度が緩和されることになる。長期施設管理計画認可申請の審査において、予防保全対策の施工状況及び施工後の SCC 発生の有無を検査記録で確認しているものの、予防保全対策により付与された圧縮残留応力が長期供用運転中も適切に維持されていることを直接実機で確認した例は無い。そこで、本研究では予防保全対策施工箇所の長期供用期間における圧縮残留応力の維持を確認することを目的に、実機材料を用いた圧縮残留応力測定を実施する。</p> <p>R2～R6 年度に実施した研究では、実機材料を活用した予防保全対策施工箇所の長期健全性を確認するための問題点 (除染及び切断等による圧縮残留応力への影響) 及び予防保全対策施工箇所の残留応力を測定するための工法 (cos <math>\alpha</math> 法による X 線残留応力測定装置を使用) を検討してきた。R7 年度以降については、これまでの検討に基づき、R9 年頃に取得可能な実機材料を活用して残留応力測定試験 (現地測定等) を実施し、予防保全対策施工箇所の長期健全性を確認する必要がある。</p> <p>【PWR 炉内構造物の長期健全性評価に係る研究】</p> <p>長期施設管理計画認可申請の中で確認する加圧水型軽水炉 (以下「PWR」という。)の炉内構造物の経年劣化状況評価において着目すべき経年劣化事象である照射誘起型応力腐食割れ (以下「IASCC」という。)事象については、これまでの国プロの成果<sup>(176)</sup>を基に作成された IASCC による割れ発生しきい応力線図を用いた評価を実施しているものの、国内の実機材料 (バップルフォーマボルト) から得られる高照射領域でのデータと比較したことはなく、高照射領域における IASCC による割れ発生と照射量の相関が明確になっていない。このため、実機材料 (バップルフォーマボルト等) を用いて試験を行い、IASCC による割れ発生に対する照射量の影響、特に、これまでの評価手法の保守性を確認する必要がある。</p> |
| 4. 目的     | <p>国内外の廃止措置中の原子力発電所から長期間使用した実機材料を採取して試験・分析を行い、原子炉容器及び炉内構造物の健全性に関する知見を拡充し、これまでに実施してきた加速劣化試験結果に基づく経年劣化評価手法の保守性を確認する。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 5. 知見の活用先 | <p>本研究の成果については、長期施設管理計画認可申請に係る経年劣化状況評価の審査に関する技術基盤として活用できる。また、民間規格の技術評価の技術的判断根拠としての活用が期待できる。</p> <p>【規制要求事項との関連】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・発電用原子炉の運転の期間の延長に係る認可の基準 (実用炉規則 114 条) 及び発電用原子炉施設の経年劣化に関する技術的な評価 (実用炉規則 82 条)</li> <li>・安全設備 (技術基準規則第 14 条)、材料及び構造 (技術基準規則第 17 条)、使用中の亀裂等による破壊の防止 (技術基準規則第 18 条) 及び監視試験片 (技術基準規則第 22 条)</li> <li>・亀裂の解釈 (第 1 項～第 3 項)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 6. 安全研究概要 | <p>本プロジェクトの研究は、「原子力規制委員会における安全研究の基本方針」(令和元年 5 月 29 日原子力規制委員会決定)における安全研究のうち以下の分類に基づき実施する。</p> <p>①規制基準等の整備に活用するための知見の収集・整備 (以下「分類①」という。)</p> <p>②審査等の際の判断に必要な知見の収集・整備 (以下「分類②」という。)</p> <p>④技術基盤の構築・維持 (以下「分類④」という。)</p> <p>(1) 原子炉容器の中性子照射脆化評価に係る研究 (分類①、分類②及び分類④)</p> <p>長期施設管理計画認可申請において事業者から提出された監視試験の結果と研究施設において照射された試験炉照射材を用いて算出された結果を比較するため、実機材料 (RV 本体、監視試験片及び RV 製造時に作製された材料 (以下「アーカイブ材」という。)) を調達する。委託先において、調達した実機材料から試験片を製作し、各種試験 (破壊靱性試験、シャルピー衝撃試験、機械試験、組織分析等) を実施し、データを取得する。</p> <p>各種試験後、規制庁において、RV 本体、アーカイブ材及び監視試験片、並びにアーカイブ材から取得した <math>\Delta T_{K1c}</math> と <math>\Delta_v T_{r30}</math> の相関</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |

|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|--|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>等を比較し、実機材料における脆化傾向を確認する。また、中性子照射による脆化傾向を把握するため、金属破面観察結果を確認する。なお、国内プラントは、廃炉行程の関係から実機材料（原子炉容器）を早期に取得することが困難であるため、海外において、現在廃炉作業中である、スウェーデンのリングハルス 2 号機（PWR：ウェスチングハウス社製 3 ループ型）の原子炉容器から実機材料を取得して試験を実施する予定である。得られたデータを基に実機材料を用いた中性子照射による破壊靱性低下について分析し、これまで実施された国プロや試験炉照射材の加速劣化試験の結果との違いを確認する。</p> <p>以下に、試験実施内容の概要を示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>① 実機材料の取得先であるスウェーデンの関係機関との交渉・調整を実施する。</li> <li>② RV 本体、監視試験片及びアーカイブ材を用いた研究計画の立案及び試験詳細計画を策定する。</li> <li>③ RV 本体からの供試材切り出し工事を実施する。</li> <li>④ RV 本体からの供試材、アーカイブ材から製作した試験片及び監視試験片を用いた各種試験を実施する。</li> <li>⑤ 試験後、リングハルス 2 号機における <math>\Delta T_{KIC}</math> と <math>\Delta_v T_{r30}</math> の相関を分析する。</li> <li>⑥ 国内のデータと比較し、実機材料を用いた中性子照射脆化評価に関する考察を実施する。</li> </ul> <p>(2) 炉内構造物の中性子照射による靱性低下に係る研究（分類①、分類②及び分類④）</p> <p>加速劣化試験等に基づき得られた国内外の破壊靱性試験データの下限により策定されている評価式の保守性を確認するため、委託先において、実機材料（炉内構造物（上部格子板等））を用いた破壊靱性試験等の各種試験を実施し、データを取得する。規制庁において、取得したデータから中性子照射量と中性子照射による破壊靱性低下量を定量的に評価し、評価式の保守性を確認する。</p> <p>以下に、試験実施内容の概要を示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>① 実機材料取得のための工事詳細計画の検討及び要領書を策定する。</li> <li>② 実機材料取得装置を製作し、原子力発電所から実機材料（炉内構造物）を切り出す。</li> <li>③ 切断後の供試材を輸送容器に詰め込み、研究施設まで輸送する。</li> <li>④ 輸送後、供試材から試験片を製作する。</li> <li>⑤ 製作後の試験片を用いた破壊靱性試験等の各種試験を実施する。</li> <li>⑥ 試験実施後、実機材料を用いた中性子照射による破壊靱性低下について分析し、評価式の保守性を確認する。</li> </ul> <p>(3) 予防保全対策施工箇所に対する長期健全性評価に係る研究（分類①、分類②及び分類④）</p> <p>事業者が SCG 対策として実施した予防保全対策に関し、施工部位の長期供用期間における圧縮残留応力の維持を確認するため、委託先において、発電所構内の放射線環境等の状況を調査した後、実機材料（炉内構造物）を用いた応力測定を実施し、規制庁において、圧縮残留応力の維持を確認する。</p> <p>以下に、試験実施内容の概要を示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>① 放射線環境下における実機材料を用いた測定試験の研究計画の立案及び試験詳細計画を策定する。</li> <li>② 発電所構内に測定装置を搬入し、測定の準備を実施する。</li> <li>③ 放射線環境下での実機材料の応力測定を実施する。</li> <li>④ 測定後のデータを基に分析し、予防保全対策施工箇所に対する長期健全性（圧縮残留応力維持）を確認する。</li> </ul> <p>(4) PWR 炉内構造物の長期健全性評価に係る研究【分類①、分類②及び分類④】</p> <p>実機材料（バップルフォーマボルト等）の対象となる炉内構造物の取替工事は R11 年頃を目途に実施するとのことであるため、当面は事業者の工程状況を確認しながら、規制庁において研究計画を立案する。</p> |
|--|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7. 成果目標と実施計画 | <p>(1) 原子炉容器の中性子照射脆化評価に係る研究【分類①、分類②及び分類④】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 成果目標</li> </ul> <p>委託先において、実機材料（RV 本体、アーカイブ材及び監視試験片）を使用した各種試験を実施し、その結果を用いて規制庁では、<math>\Delta T_{KIc}</math>と<math>\Delta_v T_{r30}</math>の相関を確認・分析する。併せて、取得したデータと国内のデータを比較・分析し評価する。評価した結果を、RV の中性子照射脆化の技術的知見としてまとめる。</p> <p>【R7 年度の実施計画】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ リングハルス 2 号機から実機材料を取得するため、Studsvik などの関係研究機関との交渉・調整を実施する。</li> <li>・ 詳細な研究計画を策定するとともに、試験条件の検討及び供試材の詳細仕様を調査する。</li> <li>・ RV 本体から供試材を切り出すための工事要領の検討及び工事要領書を策定する。</li> </ul> <p>【R8 年度の実施計画】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ RV 本体及びアーカイブ材から供試材の取得対象箇所の選定を検討する。特に RV 本体について、我が国で取得している監視試験データとの比較検討を行いながら供試材取得位置を選定する。</li> <li>・ RV 本体からの供試材切り出し工事を実施する。</li> </ul> <p>【R9 年度の実施計画】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ RV 本体の供試材から破壊靱性試験片などの各種試験片を製作する。</li> <li>・ アーカイブ材から破壊靱性試験片などの各種試験片を製作する。</li> <li>・ アーカイブ材から製作した試験片及び監視試験片を用いて各種試験（破壊靱性試験、シャルピー衝撃試験、機械試験等）を実施する。</li> </ul> <p>【R10 年度の実施計画】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ RV 本体の供試材から製作した試験片を用いた各種（破壊靱性試験、シャルピー衝撃試験、機械試験等）を実施する。</li> <li>・ R9 年度に引き続き、アーカイブ材から製作した試験片及び監視試験片を用いて各種試験（破壊靱性試験、シャルピー衝撃試験、機械試験等）を実施する。</li> <li>・ 試験後の試験片の金属破面の分析を実施する。</li> </ul> <p>【R11 年度の実施計画】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ R10 年度に引き続き、RV 本体の供試材、アーカイブ材から製作した試験片及び監視試験片を用いて各種試験（破壊靱性試験、シャルピー衝撃試験、機械試験等）を実施する。</li> <li>・ リングハルス 2 号機における<math>\Delta T_{KIc}</math>と<math>\Delta_v T_{r30}</math>の相関を分析する。</li> <li>・ 我が国の監視試験の結果と比較し、実機材料を用いた中性子照射脆化評価に関する考察を実施する。</li> <li>・ これまで実施された国プロや試験炉照射材の加速劣化試験の結果との違いを確認する。また、得られた成果を NRA 技術ノート等で公表する。</li> </ul> <p>(2) 炉内構造物の中性子照射による靱性低下に係る研究【分類①、分類②及び分類④】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 成果目標</li> </ul> <p>委託先において、実機材料を使用した破壊靱性試験等の各種試験を実施し、その結果を用いて規制庁では、事業者が長期施設管理計画認可申請で用いた評価手法（評価式）の保守性を確認する。確認した結果は、炉内構造物の中性子照射による靱性低下に係る技術知見としてまとめる。</p> <p>【R7 年度の実施計画】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 廃炉工程状況に応じて、発電所構内における実機材料取得のための工事詳細計画書及び試験要領書を策定する。</li> <li>・ 上記、廃炉工程状況により、現場を想定した、実機材料取得装置の設計及び採取工事の準備を実施する。</li> </ul> <p>【R8 年度実施計画】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ R7 年度に検討した装置設計に基づき、実機材料取得装置の製作を実施する。</li> <li>・ 製作した取得装置を用いて、発電所構内における実機材料取得を確実にするため訓練を実施する。</li> </ul> <p>【R9 年度実施計画】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 工事訓練後、実機材料取得装置を用いて対象となる実機材料（炉内構造物）から供試材を切り出す。</li> <li>・ 切断後に供試材を輸送容器に詰め込み、研究施設まで輸送する。</li> <li>・ 輸送後、研究施設において、供試材から試験片を製作する。</li> <li>・ 製作後の試験片を用いて各種試験（破壊靱性試験、引張試験等）を実施する。</li> </ul> <p>【R10 年度実施計画】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ R9 年度に引き続き、製作後の試験片を用いて各種試験（破壊靱性試験、引張試験等）を実施する。</li> <li>・ 試験後の試験片の金属破面の分析を実施する。</li> </ul> |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>【R11 年度実施計画】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・試験後のデータを用いて、実機材料の中性子照射による破壊靱性低下に係る分析を実施する。</li> <li>・中性子照射量に対する破壊靱性値の低下量を分析し、評価式の保守性を定量的に評価する。</li> <li>・また、得られた成果を NRA 技術ノート等で公表する。</li> </ul> <p>(3) 予防保全対策施工箇所に対する長期健全性に係る研究【分類①、分類②及び分類④】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・成果目標</li> </ul> <p>委託先において、実機材料（炉内構造物）を用いた測定を実施し、その結果を用いて規制庁では、放射線環境下における予防保全対策施工箇所の圧縮残留応力の維持を確認する。確認した結果は、予防保全対策施工箇所に対する長期健全性に係る技術的知見としてまとめる。</p> <p>【R7 年度の実施計画】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・放射線環境下における実機材料を用いた測定試験の研究計画の立案及び試験詳細計画を策定する。</li> <li>・測定対象箇所の選定及び事業者との現場調整を実施する。</li> </ul> <p>【R8 年度の実施計画】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・発電所構内で実施した場合の放射線環境状況を調査する。</li> <li>・発電所構内で測定を実施する場合の測定装置への影響、施工性等の適用性調査を実施する。</li> </ul> <p>【R9 年度の実施計画】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・R8 年度の成果を基に、残留応力測定装置を発電所構内に搬入し、測定試験の準備（試測定等）を実施する。</li> </ul> <p>【R10 年度の実施計画】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・発電所構内の放射線環境下での実機材料を用いた応力測定を実施する。</li> <li>・測定後、データ解析を行い、放射線環境下での応力測定分析を実施する。</li> </ul> <p>【R11 年度の実施計画】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・実機材料における、放射線環境下での予防保全対策箇所に対する圧縮残留応力の維持を確認する。</li> <li>・また、得られた成果を NRA 技術ノート等で公表する。</li> </ul> <p>(4) PWR 炉内構造物の長期健全性評価に係る研究【分類①、分類②及び分類④】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・成果目標</li> </ul> <p>実機材料を用いた試験を実施し、これまでに確立されている IASCC に係る評価手法の保守性（精緻化）を確認するための技術的知見を取得する。</p> <p>【R7 年度から R11 年度までの実施計画】</p> <p>対象となる実機材料の取替工事が R11 年頃を目途としているため、当面は事業者の状況を確認し、研究計画を立案する。</p> |
|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                              |                                                                      |                                                                                                          |                                                        |                                                                                                                                                    |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         | 行程表                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                              |                                                                      |                                                                                                          |                                                        |                                                                                                                                                    |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | R 7 年度                                                                       | R 8 年度                                                               | R 9 年度                                                                                                   | R 1 0 年度                                               | R 1 1 年度                                                                                                                                           |
|         | (1) 原子炉容器の中性子照射脆化評価に係る研究                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | <div>・ 詳細試験計画及び工事計画の策定</div> <div>・ 実機材料取得に関する交渉等</div> <div></div>          | <div>・ 実機材料取得対象箇所の選定</div> <div>・ RPV からの供試材切り出し工事</div> <div></div> | <div>・ 各種試験片の製作</div> <div>・ 各種試験の実施</div> <div></div>                                                   | <div>・ 各種試験の実施</div> <div>・ 試験後の破面分析</div> <div></div> | <div>・ 各種試験の実施</div> <div>・ 各種材料による <math>\Delta T_{KIC}</math> と <math>\Delta RT_{NDT}</math> との分</div> <div>成果とりまとめ</div> <div>▽NRA 技術ノート等</div> |
|         | (2) 炉内構造物の中性子照射による塑性低下に係る研究                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <div>・ 工事詳細計画書及び試験要領書の策定</div> <div>・ 実機材料取得装置の設計及び採取工事の準備</div> <div></div> | <div>・ 実機材料取得装置の製作</div> <div>・ 実機材料取得を確実にするための訓練</div> <div></div>  | <div>・ 炉内構造物からの実機材料取り出し</div> <div>・ 研究施設までの輸送</div> <div>・ 試験片製作</div> <div>・ 各種試験の開始</div> <div></div> | <div>・ 各種試験の実施</div> <div>・ 試験後の破面分析</div> <div></div> | <div>・ 評価式の保守性確認</div> <div>成果とりまとめ</div> <div>▽NRA 技術ノート等</div>                                                                                   |
|         | (3) 予防保全対策施工箇所に対する長期健全性に係る研究                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | <div>・ 研究計画及び試験詳細計画の策定</div> <div>・ 事業者との現場調整</div> <div></div>              | <div>・ 発電所構内の現場環境調査</div> <div>・ 装置適用性調査</div> <div></div>           | <div>・ 発電所構内への装置持ち込み</div> <div>・ 測定準備</div> <div></div>                                                 | <div>・ 実機材料測定</div> <div>・ 測定データの分析</div> <div></div>  | <div>・ 予防保全対策箇所の長期健全性確認</div> <div>成果とりまとめ▽</div> <div>NRA 技術ノート等</div>                                                                            |
|         | (4) PWR 炉内構造物の長期健全性評価に係る研究                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                              | 事業者の動向を確認しながら、研究計画を立案                                                |                                                                                                          |                                                        | ▽炉内構造物の取替実施予定                                                                                                                                      |
| 8. 実施体制 | <div>【システム安全研究部門における実施者（実施項目ごとに主担当者には○を記載）】</div> <div>小嶋 正義 統括技術研究調査官</div> <div>橋倉 靖明 上席技術研究調査官</div> <div>田口 清貴 主任技術研究調査官</div> <div>○ 渡辺 藍己 技術研究調査官（実施項目(1)関係）</div> <div>○ 水田 航平 技術研究調査官（実施項目(2), (3)関係）</div> <div>船田 立夫 技術参与</div> <div>高倉 賢一 技術参与</div> <div>河野 克己 技術参与</div> <div>【委託研究先】</div> <div>実施項目(1)～(4) 未定</div> <div>【共同研究先】</div> <div>なし</div> |                                                                              |                                                                      |                                                                                                          |                                                        |                                                                                                                                                    |
| 9. 備考   | 7. 実施計画については、事業者の廃炉工程等を踏まえ、適宜適切な見直しを行う。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                              |                                                                      |                                                                                                          |                                                        |                                                                                                                                                    |

文 献

- (1) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、「平成 30 年度原子力規制庁委託成果報告書報告書 軽水炉照射材料健全性評価研究」、平成 31 年.
- (2) 福谷耕司、大野勝巳、中田早人、「原子炉容器鋼の照射組織変化」、INSS MONOGRAPHS No.1、2001.
- (3) K. Takakura, et al., “Crack growth behavior of neutron irradiated L-grade austenitic stainless steels in simulated BWR conditions”, Proc. 14th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems - Water Reactors, pp.1192-1203, 2009.
- (4) 財団法人発電設備検査技術協会、「プラント長寿命化技術開発 2 相ステンレス鋼熱時効試験 (PWR) 報告書」、平成 6 年 3 月.
- (5) 笠原茂樹、福谷耕司、越石正人、藤井克彦、知見康弘、「沸騰水型軽水炉炉内構造物用オーステナイト系ステンレス鋼の照射データに関する文献調査とデータ集の作成 (受託研究)」、JAEA-Review 2018-012、2018.
- (6) 西川聡、中田志津雄、堀井行彦、古村一朗、山口篤憲、「圧縮残留応力付与部の熱時効による応力緩和挙動」、一般財団法人発電設備技術検査協会溶接・非破壊検査技術センター 技術レビュー Vol.4、 pp.28-32、2008.
- (7) 皆川武史、池田雅昭、「原子力発電所用安全系低圧ケーブルの難燃性に対する経年劣化処理の影響」、電気学会論文誌 A、第 137 巻、第 11 号、pp. 620-625、2017.
- (8) T. Minakawa, M. Ikeda, N. Hirai, and Y. Ohki, “Aging State Analysis of Safety-related Cables for Nuclear Power Plants Exposed to Simulated Accident Conditions” Proceedings of 2018 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP 2018, pp.602-605, 2018.
- (9) T. Minakawa, M. Ikeda, N. Hirai, and Y. Ohki, “Insulation Performance of Safety-related Cables for Nuclear Power Plants under Simulated Severe Accident Conditions”, IEEJ Trans. Fandam. Mater., Vol.139, No.2, pp.54-59, 2019.
- (10) 皆川武史、池田雅昭、平井直志、大木義路、「重大事故模擬環境に暴露したエチレンプロピレンジエンゴム絶縁ケーブルの劣化状態分析」、電気学会論文誌 A、第 139 巻、第 9 号、pp.380-386、2019.
- (11) 皆川武史、池田雅昭、田口清貴、「重大事故環境下におけるケーブルの絶縁特性の分析」、NRA 技術報告、NTEC-2019-1002、2019.
- (12) 渡辺藍己、芳賀明日香、皆川武史、池田雅昭、平井直志、大木義路、「原子力発電所から撤去された FR-EPDM ケーブルの重大事故環境下における絶縁性能」、電気学会論文誌 A、2022.
- (13) 芳賀明日香、渡辺藍己、皆川武史、池田雅昭、平井直志、大木義路、「重大事故環境下での原子力発電所用安全系低圧ケーブルの絶縁特性に及ぼす酸素の影響」、電気学会論文誌 A、2023.
- (14) 「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈第 14 条.
- (15) 一般社団法人日本電気協会、原子力発電所用機器に対する破壊靱性の確認試験方法 JEAC4206-2007.
- (16) 財団法人発電設備技術検査協会、「溶接部等熱影響部信頼性実証試験に関する調査報告書〔原子炉圧力容器加圧熱衝撃試験〕総まとめ版」、平成 4 年.
- (17) 第 60 回技術情報検討会、[第 60 回技術情報検討会 | 原子力規制委員会 \(nra.go.jp\)](#)、令和 5 年 7 月.
- (18) 独立行政法人原子力安全基盤機構、「平成 20 年度照射誘起応力腐食割れ (IASCC) 評価技術に関する報告書」、平成 20 年.

研究計画（案）

|                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |       |                        |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|------------------------|
| 1. プロジェクト<br>(始期：R7 年度<br>終期：R11 年度) | 15. 東京電力福島第一原子力発電所燃料デブリ分布の放射線計測に基づく推定方法に関する研究                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 担当部署  | 技術基盤グループ<br>システム安全研究部門 |
|                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 担当責任者 | 後神進史 主任技術研究調査官         |
| 2. カテゴリー・研究分野                        | 【原子炉施設】 I) 特定原子力施設                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 主担当者  | 後神進史 主任技術研究調査官         |
| 3. 背景                                | <p>(1) 規制課題</p> <p>原子力規制委員会は、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和 32 年法律第 166 号）第 64 条の 3 に基づき、東京電力福島第一原子力発電所（以下「1F」という。）の燃料デブリ（核燃料と炉内構造物やコンクリート等が溶融し再度固化した状態のもの）の取出し作業などの廃炉作業に係る技術的妥当性を確認している。原子力損害賠償・廃炉等支援機構（以下「NDF」という。）が、東京電力ホールディングス株式会社（以下「東電」という。）による廃炉計画に対する支援の一環として取りまとめている技術戦略プラン<sup>(1)</sup>における廃炉の基本方針において、事故により損傷を受けた建物の中に燃料デブリ等が残されていることを大きなリスクと位置づけ、これらのリスクを可及的速やかに低減させることが強く求められると言及されている。それらに基づいて東電が令和 6 年度に 2 号機から燃料デブリの試験的な取出しを開始し、段階的に取出し規模を拡大していくとされている。また、ほかにも炉内構造物の健全性調査等を含めた廃炉作業全体における炉内環境の管理・監視のためにも燃料デブリの更なる情報が求められる。以上のように、これからの 1F の廃炉作業を進めるに当たり、炉内堆積物に対する燃料デブリ含有の有無や多寡などといった燃料デブリの分布情報を把握することは重要な要素となることから、東電の実施する作業<del>計画</del>については、最新の科学的・技術的知見に基づいて安全性、確実性、合理性等の観点で燃料デブリ分布情報の取得方法に係る妥当性を確認していく必要がある。さらに、燃料デブリ分布情報は原子力規制庁（以下「規制庁」という。）も含めて多数の機関が取り組んでいる事故分析に役立つものである。</p> <p>(2) 研究課題</p> <p>1F では、平成 23 年 3 月の東北地方太平洋沖地震の際に発生した過酷事故時に、1～3 号機においては原子炉の冷却機能喪失に伴い溶融した核燃料が原子炉圧力容器から格納容器下部に落下して燃料デブリを形成している。令和 6 年 9 月に東電による燃料デブリの試験的取出し作業が開始されており、取り出されたサンプルの性状分析の結果等を考慮しつつ、令和 10 年度以降に段階的な取出し規模の拡大が計画されている<sup>(2)</sup>。燃料デブリ取出しの課題としては作業中の臨界管理が挙げられており、既に規制庁の安全研究<sup>(3)</sup>においても検討が進められている。また、NDF の技術戦略プラン<sup>(1)</sup>では主要な課題として取出し工法の検討、作業員の被ばく低減や長期の人材確保、炉内調査による情報取得等が挙げられている。前述 3 点目の炉内調査については、格納容器下部の燃料デブリの分布に関する情報を事前に得ることで、燃料デブリ取出し戦略の方向性を確認することができ、燃料デブリの本格的な取出し作業に当たっては被ばく管理等の安全性や作業の効率性を高めてリスクを低減できることから、規制庁の視点としても重要である。また、燃料デブリの分布に関する情報は、ほかの廃炉作業全体においても安全性や効率性等に資するものとして重要である。格納容器下部の状況は、これまでの光学カメラを使った画像撮影等により調査が進められ、様々な物質が混在した堆積物が広範囲に広がっている状況は確認できたが、その中に混入している核燃料物質及び核分裂生成物を多量に含んだ燃料デブリの空間分布に関する明確な情報は得られていない。格納容器下部のペデスタル部外側においては国際廃炉研究開発機構及び東電により燃料デブリからの熱中性子束の測定やガンマ線測定による核種分析が実施されたが、燃料デブリ分布の把握にまでは至っておらず<sup>(4)</sup>、詳細な情報の取得方法は今後の課題の一つとなっている。</p> <p>燃料デブリが形成された同種の事案としては、昭和 54 年に米国のスリーマイル島原子力発電所で発生した事故及び昭和 61 年に旧ソ連（現ウクライナ共和国）のチョルノービリ原子力発電所で発生した事故があるが、前者は燃料デブリが圧力容器内に留まり、後者は閉じ込め構造物の設置により取出し作業は実施されていない。1F では格納容器下部に落下したものも含めて、燃料デブリの大部分を回収する方針に則り、既存技術による現地計測が行われているが、現時点では主に空間線量の把握や臨界監視を目的とした事例<sup>(5)</sup>が多い。一方で、放射線計測による燃料デブリ分布の推定を目的として、炉内の過酷な放射線環境下において目的の放射線のみを高精度で計測する技術の開発が進んでおり、基盤技術の構築や最適な測定器の研究開発も進められている<sup>(6)(7)</sup>が、1F での実用化には至っていない。そのため、格納容器下部に広がった燃料デブリ分布情報の取得作業は国内外に有効な前例がなく、規制庁としても<del>実施計画の審査等安全確保及び技術的妥当性の評価</del>に向けて新規に知見を取得する必要がある。</p> |       |                        |
| 4. 目的                                | <p>1F 廃炉作業において規制庁として知見が不足している燃料デブリ分布を推定する方法に関して、放射線計測に基づいて線源分布を推定する既存技術や類似研究の調査により情報を収集、整理するとともに、当該課題への適用性の高い技術について実験及び解析により成立性や特性を検証した結果を整理し、得られた知見を事業者の廃炉作業に係る<del>実施計画の変更許可申請に係る審査安全確保及び技術的妥当性の評価、並びにや</del>事故分析等に資する。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |       |                        |
| 5. 知見の活用先                            | <p>東電による廃炉作業の一環として実施される燃料デブリ取出し作業や炉内環境の管理・監視に係る<del>実施計画の審査に対して、</del>安全確保及び技術的妥当性の評価において知見を活用する。また、同施設の事故時における燃料デブリ生成プロセス等の分析に対しても活用が見込まれる。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |       |                        |
| 6. 安全研究概要                            | <p>本プロジェクトの研究は、「原子力規制委員会における安全研究の基本方針」（令和元年 5 月 29 日原子力規制委員会決定）における安全研究のうち以下の分類に基づき実施する。</p> <p>②審査等の際の判断に必要な知見の収集・整備（以下「分類②」という。）</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |       |                        |

燃料デブリの位置情報を取得する際、光学カメラの画像や映像により観測される外観からは核燃料由来の物質を含まない一般的な堆積物との区別が困難であるため、燃料デブリが発する固有の信号である発熱や放射線を観測する必要がある。放射性物質を含む燃料デブリから放出されるガンマ線や中性子等の放射線は物質に対する透過力や直進性が強いいため、これらを利用し、放射線源の位置を推定する方法が有効であると考えられる。事故により損壊した 1F 炉内の放射線環境を考慮すると、ガンマ線については、燃料デブリ以外にも炉内に拡散した核分裂生成物や、放射化した原子炉、燃料集合体の構造材等からも大量に放出されるため、ガンマ線計測による方法では各放射線源の特定が困難であるとする予想される。一方で、中性子を放出するウラン等の核燃料物質の大部分が燃料デブリ内に存在すると考えられるため、中性子計測による燃料デブリ位置情報の推定は現実的な選択肢である。従って、本プロジェクトでは中性子計測に基づいて燃料デブリ分布を推定する方法に係る知見の取得に主眼を置き、研究を実施する。

中性子計測には様々な方法が存在するが、NDF の技術戦略プラン<sup>(1)</sup>ではリスク低減における基本的考え方の一つとして、「確実性：信頼性が高く、柔軟性のある技術の採用」を挙げており、現時点において確実性を備えた代表的な中性子計測法としては、使用実績が豊富な検出器によって中性子を直接計測する方法と、中性子が物質を放射化しやすい特徴を利用して間接的に計測する方法があり、これらを本プロジェクトでの研究対象とする。一方で、参考文献(6)、(7)のように様々な機関で研究開発が進められている 1F の活用を目的とした最先端の計測技術については、短期間で現場に投入できるだけの確実性を備えることは非常に困難と考えられることから、本プロジェクト以降で知見取得の対応を検討する。

(1) 中性子検出器による計測に基づく燃料デブリ分布の推定方法に係る知見取得【分類②】(委託研究により実施)

燃料デブリから放出される中性子は、数[MeV]にピークを持つエネルギー分布を示し、比較的高エネルギーかつ直進性の強い高速中性子<sup>※1</sup>の成分が最も多い。しかし、格納容器下部に落下した燃料デブリの多くは事故後に形成されてから現在に至るまで、冷却や放射線遮蔽等を目的とした炉内注水により水没した状態が維持されており、解析コードを用いた事前のシミュレーション評価等によれば、燃料デブリから放出された中性子は水による減速効果を受け、水面上では熱中性子<sup>※2</sup>等の低エネルギー成分が支配的であると予想される。減速された低エネルギー中性子は、多重散乱によりエネルギーを損失する過程で何度も飛行方向が変化した後の状態であり、検出器への入射方向を同時に測定したとしても、その情報から線源である燃料デブリの位置情報を推定することは極めて困難である(図1の左図を参照。)。したがって、中性子検出器による計測法を用いる際には燃料デブリを水から露出させ、放出される高速中性子をその飛行方向と共に検出することが現実的であると考えられる(図1の右図を参照。)。また、検出器を水没させて燃料デブリ近傍で中性子を測定する選択肢もあり、その際には検出する中性子のエネルギー領域や、燃料デブリ表面の凹凸に応じた走査方法等についても検討する必要がある。本プロジェクトでは、上記の状況に適した検出器を選定した上で、中性子の入射方向を特定する機能を検出器に付与し、1F 炉内の燃料デブリの状況を概念的に模擬できる実験施設において機能検証の実験を実施する。また、解析コードによる評価結果等と合わせて、中性子源の位置情報を推定し画像化する方法を検討し、その有効性についての知見を整理する。

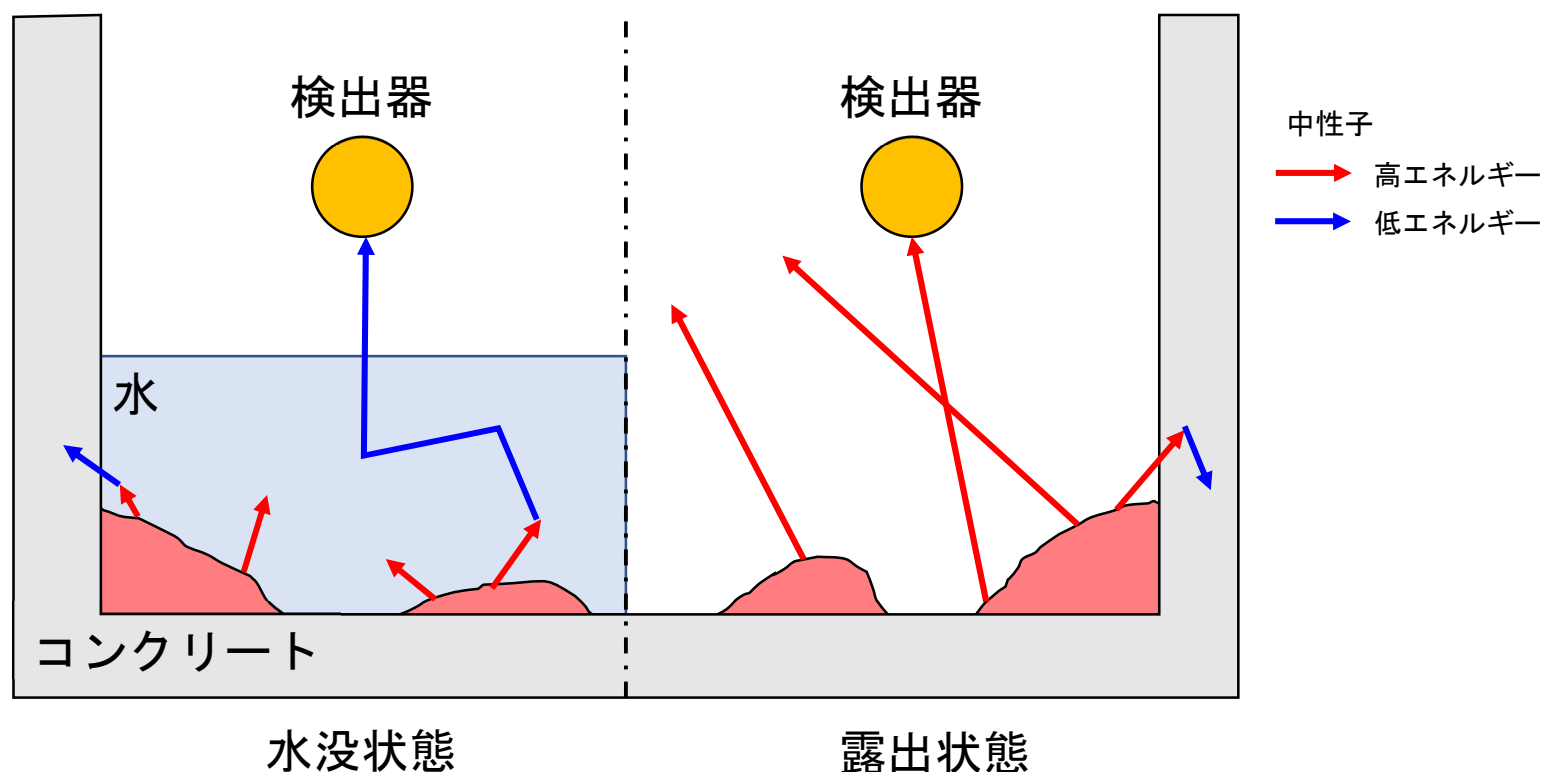


図1 中性子検出器による計測に基づく燃料デブリ分布の推定方法の概念図

(2) 中性子による放射化の計測に基づく燃料デブリ分布の推定方法に係る知見取得【分類②】(実験を実施する際は委託を検討)

中性子による放射化<sup>※3</sup>の計測法(以下「放射化法」という。)は、中性子吸収反応により放射性の子孫核種が生成される核種(標的核種)を含む「放射化試験片」を用意して中性子を照射し、生成された子孫核種の崩壊により放射されるベータ線等を測定することにより、間接的に入射中性子や誘起される核反応等の情報を得る計測手法である(図2参照。)。本プロジェクトの目的に対しては、燃料デブリ近傍に放射化試験片を設置し、燃料デブリからの中性子照射を受けて放射化した試験片を取り出した後に測定室に移送し、試験片からのベータ線等の強弱を計測することにより、燃料デブリ分布を推定するための情報が取得できる。放射化法の長所は、中性子照射環境(最終的には 1F の炉内環境)に放射化試験片のみを設置するため、検出器やデータ処理装置等の精密電子機器を高放射線環境下にさらす必要が無い点である。また、燃料デブリが水没した状態でも計測に大きな支障が無いと考えられる点も長所の一つである。一方で短所としては、最終的な検出効率が放射化試験片に含まれる標的核種の中性子吸収断面積、子孫核種の半減期、子孫核種からの放射線に対する検出効率等に依存することから非常に効率が悪くなることであり、放射化試験片に入射する中性

子束の強弱により適用の可否が判断される。1F 炉内での中性子強度はガンマ線強度と比較して非常に弱いことが判明しているため、本プロジェクトでは、部分的な活用も視野に入れた適用の可能性について検討を行い、適用の見込みが確認されれば、活用法に応じた適用性検証実験を実施する。また、解析コードによる評価結果等と合わせて、中性子源の位置情報を推定し画像化する方法の有効性についての知見を整理する。

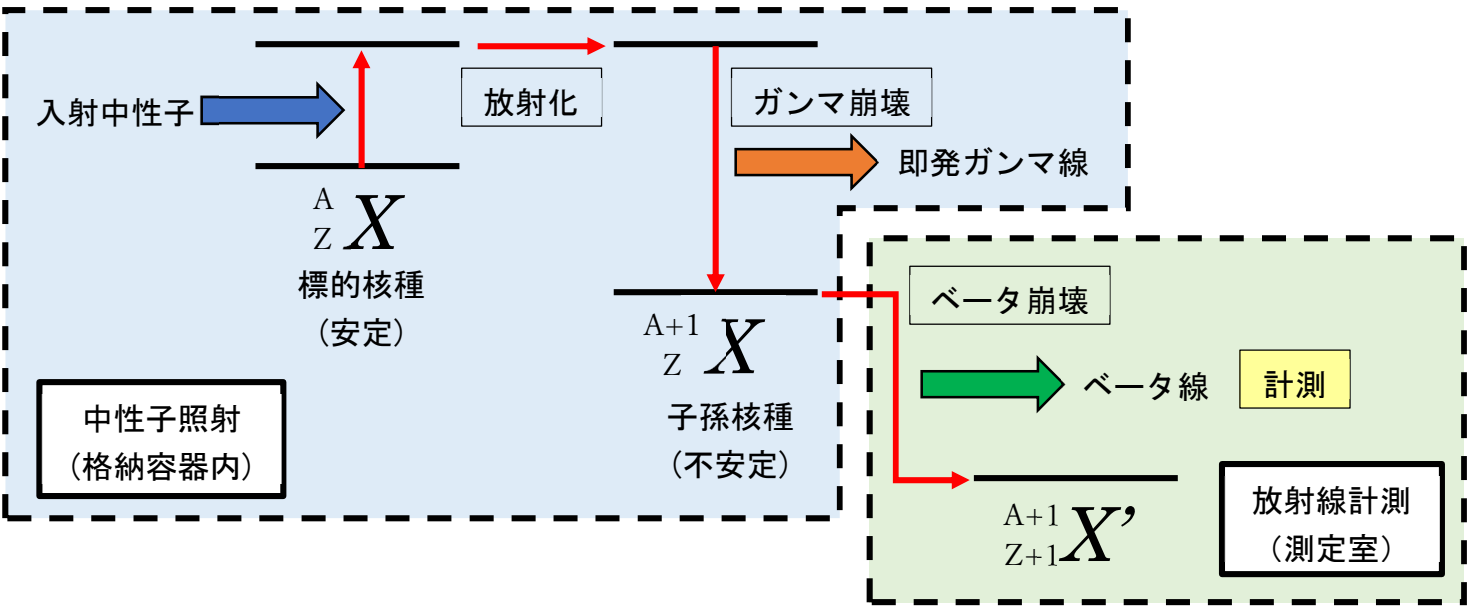


図 2 放射化法の概念の一例

- ※1（高速中性子）：0.5[MeV]程度以上の比較的高いエネルギーを持つ中性子
- ※2（熱中性子）：周辺物質の熱エネルギーと同等となる0.5[eV]程度以下の低エネルギー中性子
- ※3（放射化）：安定核種が放射線との相互作用を起こした結果、不安定な放射性核種に変換される現象

7. 成果目標と実施計画

（1）中性子検出器による計測に基づく燃料デブリ分布の推定方法に係る知見取得【分類②】

成果目標：中性子検出器による計測に基づく燃料デブリ分布の推定方法について、目的に適した検出器、その使用方法、得られた測定データや解析結果に基づいて線源分布を推定する方法等について特徴を整理する。それらの中で当該課題への適用性の高い技術について実験施設における機能検証実験及び解析をとおして、事業者による燃料デブリ取り出し計画廃炉作業の妥当性評価等を適切に実施するための知見を取得し、整理する。

実施計画：本内容については、実験施設による機能検証実験の実施を前提としているため、委託研究を主体として実施する。令和7年度は、線源情報の取得を目的とした中性子計測法及び取得データから線源の位置情報を推定する方法（アンフォールディング法、画像化技術等）についての既存技術及び類似研究成果の調査を行い、得られた結果等に基づいて本プロジェクトの目的に即した測定方法及び測定器の候補を検討するとともに、実験を実施する施設を選定する。さらに、機能検証実験に向けて測定器のセットアップに必要な付属機器の設計を行い（本プロジェクトでは検出器開発は実施しない）、想定する実験体系に関する予備解析を実施する。

令和8年度は、予備的な機能検証実験を実施し、測定データの処理や補正等に必要な情報を得るための解析を実施する。それらの作業より得られた成果を基に、次年度以降に実施する本格的な機能検証実験に向けて、測定方法の改善点を検討、抽出し、測定データ及び解析結果を基に線源の位置情報を推定する方法についても検討、試行作業を実施する。また、本プロジェクトの予備的検討状況については規制庁から、本格的な検討作業計画等については委託先から学会等での発表を行い、外部専門家等からの評価意見を集める。

令和9年度から10年度にかけては、予備的な実験で得られた成果を基に測定方法を改善し、本格的な機能検証実験及び解析を実施するとともに、それらの結果に基づいて線源の位置情報を推定する方法の検証を実施する。

令和11年度は、前年度までに得られたデータや知見等を整理して取りまとめるとともに、実験結果を中心とした研究成果を委託先から、規制での活用の視点より研究成果を整理した結果を規制庁から論文等により公表する。

（2）中性子による放射化の計測に基づく燃料デブリ分布の推定方法に係る知見取得【分類②】

成果目標：中性子による放射化の計測（放射化法）に基づく燃料デブリ分布の推定方法について、目的に適した放射化試験片、その照射方法や解析結果に基づいて線源分布を推定する方法等について特徴を整理し、放射化法の適用可否について判断する。適用可能と判断されれば、実験施設における適用性検証実験及び解析をとおして、事業者による燃料デブリ取り出し計画廃炉作業の妥当性評価等を適切に実施するための知見を取得し、整理する。

実施計画：令和7年度は、線源の位置情報を推定することへの応用の可能性がある放射化法に係る技術（イメージング技術等）について既存技術及び類似研究成果の調査を行う。また、1F炉内の放射線環境に係る先行研究や測定結果等を調査し、放射化法の適用可能性判断に資するための情報を収集し、解析による予備的な評価を実施する。

令和8年度は、前年度に実施した放射化法に係る調査結果に基づき、線源の位置情報を推定することへの応用方法を検討、整理する。また、1F炉内環境の調査結果を基に、解析によって放射化法の適用可能性や効率等を検討し、適用可否を判断する。また、放射化法の応用方法や適用可能性について学会等での発表を行い、外部専門家等からの評価意見を集め

|                                        | <p>る。</p> <p>令和 9 年度は、前年度の適用可能性判断において「可」となった場合は以降の作業は委託研究を主体とし、適用性検証実験に向けて簡易体系による予備的な実験及び解析を実施し、次年度の本格的な実験に向けての準備を実施する。一方で適用可能性判断において「不可」となった場合は、調査結果、検討内容、判断根拠などを成果として取りまとめ、本作業項目を終了する。</p> <p>令和 10 年度は、本格的な適用性検証実験及び解析を実施するとともに、それらの結果に基づいて線源の位置情報を推定する方法の検証を実施する。</p> <p>令和 11 年度は、前年度までに得られたデータや知見等を整理して取りまとめるとともに、実験結果を中心とした研究成果を委託先から、規制での活用の視点より研究成果を整理した結果を規制庁から論文等により公表する。</p> <p>なお、燃料デブリの試験的な取出し作業は令和 6 年 9 月から開始され、取り出された燃料デブリの性状分析や、1F 炉内環境の更なる調査結果等から本プロジェクト内容に影響を及ぼす知見が得られれば、上記（１）及び（２）ともに適宜方針の見直しを実施する。</p> <p style="text-align: center;">行程表</p> <table><tr><th></th><th>R7 年度</th><th>R8 年度</th><th>R9 年度</th><th>R10 年度</th><th>R11 年度</th></tr><tr><td rowspan="2">（１）中性子検出器による計測に基づく燃料デブリ分布の推定方法に係る知見取得</td><td></td><td>▽学会等発表<br/>▼学会等発表</td><td></td><td></td><td>▽論文公表<br/>論文公表▼</td></tr><tr><td>・類似研究の調査<br/>・測定方法の検討<br/>・測定機器の設計<br/>・予備解析の実施</td><td>・予備実験の実施<br/>・予備解析の実施<br/>・測定方法の改善<br/>・線源推定方法の検討</td><td>・測定実験の実施<br/>・実験解析の実施<br/>・測定方法の改善<br/>・線源推定方法の検討</td><td>・測定実験の実施<br/>・実験解析の実施<br/>・線源推定方法の検討</td><td>・実験、解析データの整理<br/>・線源推定方法の整理<br/>・成果取りまとめ</td></tr><tr><td rowspan="2">（２）中性子による放射化の計測に基づく燃料デブリ分布の推定方法に係る知見取得</td><td></td><td>▼学会等発表</td><td></td><td></td><td>▽論文公表<br/>論文公表▼</td></tr><tr><td>・類似研究の調査<br/>・1F 炉内の放射線環境の調査<br/>・予備解析の実施</td><td>・線源推定方法の検討<br/>・予備解析の実施<br/>・放射化法適用可否の判断</td><td>→【適用可】<br/>・予備実験の実施<br/>・予備解析の実施<br/>・測定方法の改善<br/>→【適用不可】<br/>・成果取りまとめ</td><td>【適用可】<br/>・測定実験の実施<br/>・実験解析の実施</td><td>【適用可】<br/>・実験、解析データの整理<br/>・線源推定方法の整理<br/>・成果取りまとめ</td></tr></table> <p style="text-align: right;">▼規制庁による成果公表<br/>▽委託先による成果公表</p> |                                                | R7 年度                                                             | R8 年度                              | R9 年度                                           | R10 年度 | R11 年度 | （１）中性子検出器による計測に基づく燃料デブリ分布の推定方法に係る知見取得 |  | ▽学会等発表<br>▼学会等発表 |  |  | ▽論文公表<br>論文公表▼ | ・類似研究の調査<br>・測定方法の検討<br>・測定機器の設計<br>・予備解析の実施 | ・予備実験の実施<br>・予備解析の実施<br>・測定方法の改善<br>・線源推定方法の検討 | ・測定実験の実施<br>・実験解析の実施<br>・測定方法の改善<br>・線源推定方法の検討 | ・測定実験の実施<br>・実験解析の実施<br>・線源推定方法の検討 | ・実験、解析データの整理<br>・線源推定方法の整理<br>・成果取りまとめ | （２）中性子による放射化の計測に基づく燃料デブリ分布の推定方法に係る知見取得 |  | ▼学会等発表 |  |  | ▽論文公表<br>論文公表▼ | ・類似研究の調査<br>・1F 炉内の放射線環境の調査<br>・予備解析の実施 | ・線源推定方法の検討<br>・予備解析の実施<br>・放射化法適用可否の判断 | →【適用可】<br>・予備実験の実施<br>・予備解析の実施<br>・測定方法の改善<br>→【適用不可】<br>・成果取りまとめ | 【適用可】<br>・測定実験の実施<br>・実験解析の実施 | 【適用可】<br>・実験、解析データの整理<br>・線源推定方法の整理<br>・成果取りまとめ |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------|--------|--------|---------------------------------------|--|------------------|--|--|----------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|--|--------|--|--|----------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------|
|                                        | R7 年度                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | R8 年度                                          | R9 年度                                                             | R10 年度                             | R11 年度                                          |        |        |                                       |  |                  |  |  |                |                                              |                                                |                                                |                                    |                                        |                                        |  |        |  |  |                |                                         |                                        |                                                                   |                               |                                                 |
| （１）中性子検出器による計測に基づく燃料デブリ分布の推定方法に係る知見取得  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | ▽学会等発表<br>▼学会等発表                               |                                                                   |                                    | ▽論文公表<br>論文公表▼                                  |        |        |                                       |  |                  |  |  |                |                                              |                                                |                                                |                                    |                                        |                                        |  |        |  |  |                |                                         |                                        |                                                                   |                               |                                                 |
|                                        | ・類似研究の調査<br>・測定方法の検討<br>・測定機器の設計<br>・予備解析の実施                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | ・予備実験の実施<br>・予備解析の実施<br>・測定方法の改善<br>・線源推定方法の検討 | ・測定実験の実施<br>・実験解析の実施<br>・測定方法の改善<br>・線源推定方法の検討                    | ・測定実験の実施<br>・実験解析の実施<br>・線源推定方法の検討 | ・実験、解析データの整理<br>・線源推定方法の整理<br>・成果取りまとめ          |        |        |                                       |  |                  |  |  |                |                                              |                                                |                                                |                                    |                                        |                                        |  |        |  |  |                |                                         |                                        |                                                                   |                               |                                                 |
| （２）中性子による放射化の計測に基づく燃料デブリ分布の推定方法に係る知見取得 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | ▼学会等発表                                         |                                                                   |                                    | ▽論文公表<br>論文公表▼                                  |        |        |                                       |  |                  |  |  |                |                                              |                                                |                                                |                                    |                                        |                                        |  |        |  |  |                |                                         |                                        |                                                                   |                               |                                                 |
|                                        | ・類似研究の調査<br>・1F 炉内の放射線環境の調査<br>・予備解析の実施                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | ・線源推定方法の検討<br>・予備解析の実施<br>・放射化法適用可否の判断         | →【適用可】<br>・予備実験の実施<br>・予備解析の実施<br>・測定方法の改善<br>→【適用不可】<br>・成果取りまとめ | 【適用可】<br>・測定実験の実施<br>・実験解析の実施      | 【適用可】<br>・実験、解析データの整理<br>・線源推定方法の整理<br>・成果取りまとめ |        |        |                                       |  |                  |  |  |                |                                              |                                                |                                                |                                    |                                        |                                        |  |        |  |  |                |                                         |                                        |                                                                   |                               |                                                 |
| 8. 実施体制                                | <p>【システム安全研究部門における実施者（実施項目ごとに主担当者に○を記載）】</p> <p>○ 後神 進史 主任技術研究調査官（実施項目（１）、（２）関係）<br/>野口 法秀 技術研究調査官</p> <p>【委託研究先】<br/>未定</p> <p>【共同研究先】<br/>なし</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                |                                                                   |                                    |                                                 |        |        |                                       |  |                  |  |  |                |                                              |                                                |                                                |                                    |                                        |                                        |  |        |  |  |                |                                         |                                        |                                                                   |                               |                                                 |
| 9. 備考                                  | <p style="text-align: center;">文 献</p> <p>(1) 原子力損害賠償・廃炉等支援機構、「東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン 2023」、令和 5 年 10 月<br/><a href="https://www.dd.ndf.go.jp/files/user/pdf/strategic-plan/book/20231018_SP2023FT.pdf">https://www.dd.ndf.go.jp/files/user/pdf/strategic-plan/book/20231018_SP2023FT.pdf</a>（令和 6 年 8 月 27 日確認）</p> <p>(2) 経済産業省、「廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合／事務局会議（第 127 回）」、令和 6 年 6 月 27 日<br/>資料 3-3 工程表（燃料デブリ取り出し準備）<br/><a href="https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2023/12/index.html">https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2023/12/index.html</a>（令和 6 年 8 月 27 日確認）</p> <p>(3) 原子力規制委員会、安全研究「福島第一原子力発電所燃料デブリの臨界評価手法の整備」、平成 26 年度～令和 6 年度<br/><a href="https://www.nra.go.jp/activity/anzen/bunya/tokutei_hukushima.html">https://www.nra.go.jp/activity/anzen/bunya/tokutei_hukushima.html</a>（令和 6 年 8 月 27 日確認）</p> <p>(4) 原子力規制委員会「東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会（第 36 回）」、令和 5 年 3 月 7 日<br/>資料 3 国際廃炉研究開発機構・東京電力ホールディングス株式会社「1 号炉 PCV 内部調査（後半）について」<br/><a href="https://www.da.nra.go.jp/view/NRA022010300?contents=NRA022010300-002-009#pdf=NRA022010300-002-009">https://www.da.nra.go.jp/view/NRA022010300?contents=NRA022010300-002-009#pdf=NRA022010300-002-009</a>（令和 6 年 8 月 27 日確認）</p> <p>(5) 国際廃炉研究開発機構、廃炉・汚染水対策事業費補助金「燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術の開発」令和 2</p>                                                                                                                                                                                                                   |                                                |                                                                   |                                    |                                                 |        |        |                                       |  |                  |  |  |                |                                              |                                                |                                                |                                    |                                        |                                        |  |        |  |  |                |                                         |                                        |                                                                   |                               |                                                 |

年度実施分報告、令和 3 年 8 月

<https://irid.or.jp/research/20200000-2/>（令和 6 年 8 月 27 日確認）

- (6) 日本原子力研究開発機構、「無人航走体を用いた燃料デブリサンプルリターン技術の研究開発」、JAEA-Review 2021-049  
<https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2021-049.pdf>（令和 6 年 8 月 27 日確認）
- (7) 文部科学省、英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業、令和 6 年度 課題解決型廃炉研究プログラム「デブリ取り出しの安全性確保を目的とした中性子源等のイメージング手法の研究」  
[https://www.kenkyu.jp/nuclear/field/r6/sol\\_kadai.html](https://www.kenkyu.jp/nuclear/field/r6/sol_kadai.html)（令和 6 年 8 月 27 日確認）

研究計画（案）

|                                         |                                 |       |                                                                           |
|-----------------------------------------|---------------------------------|-------|---------------------------------------------------------------------------|
| 1. プロジェクト<br>（始期：R 7 年度<br>終期：R 1 1 年度） | 17. 第一種廃棄物埋設施設の性能評価及び線量評価に関する研究 | 担当部署  | 技術基盤グループ<br>放射線・廃棄物研究部門                                                   |
|                                         |                                 | 担当責任者 | 大塚 楓 上席技術研究調査官                                                            |
| 2. カテゴリー・研究分野                           | 【核燃料サイクル・廃棄物】K) 放射性廃棄物埋設施設      | 主担当者  | 廣田 明成 主任技術研究調査官<br>市末 高彦 主任技術研究調査官<br>鏡 健太 副主任技術研究調査官<br>木嶋 達也 副主任技術研究調査官 |

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3. 背景 | <p>我が国では、長期的なエネルギーの安定確保や放射性廃棄物の適切な処理・処分の観点から使用済燃料を再処理し、回収したウラン及びプルトニウムを再び燃料に加工して利用する核燃料サイクルを原子力政策の基本としている。再処理工程では、ウラン及びプルトニウムが抽出されたのちに残存する核分裂生成物や超ウラン元素を含む高レベル放射性廃液をガラス原料に混ぜて固型化処理することで、ガラス固化体が発生する。また、再処理工程や MOX（ウラン・プルトニウム混合酸化物）燃料加工工場の操業によって長半減期低発熱性放射性廃棄物（以下「TRU 等廃棄物」という。）が発生する。核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和32年法律第166号）では、対象とする廃棄物について、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律施行令（昭和32年政令第324号。以下「施行令」という。）第31条に定める放射能濃度の基準に応じて埋設方法が区分されており、ガラス固化体は当該基準に応じて第一種廃棄物埋設で廃棄される。TRU 等廃棄物は施行令第31条に定める放射能濃度を超える廃棄物と超えない廃棄物が含まれるが、ガラス固化体と併置処分することが検討されている。しかしながら、第一種廃棄物埋設に関する規制基準等は整備されていない。</p> <p>なお、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（平成12年法律第117号。以下「最終処分法」という。）では、「「最終処分」とは、地下300メートル以上の政令で定める深さの地層において、特定放射性廃棄物及びこれによって汚染された物が飛散し、流出し、又は地下に浸透することがないように必要な措置を講じて安全かつ確実に埋設することにより、特定放射性廃棄物を最終的に処分することをいう。」とされており、一般に「地層処分」と呼ばれている（図1）。</p> <div></div> <p>（出典：資源エネルギー庁 Web サイト）<br/><a href="https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/hlw/hlw01.html#h02">https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/hlw/hlw01.html#h02</a></p> |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

図1 地層処分の概念図

地層処分対象となる特定放射性廃棄物（ガラス固化体及び TRU 等廃棄物）には、長半減期核種が有意に、かつ多量に含まれるため、そのリスクから人と環境を守るためには、長期にわたり生活環境から隔離するとともに、人工バリア及び天然バリアの組み合わせにより第一種廃棄物埋設施設から漏出する放射性物質の影響を合理的に達成可能な限り小さくする必要がある。このため、単一のバリアに過度に依存することなく安全を達成可能なように設計する（多重安全機能）だけでなく、将来世代への負担の最小化、現状技術での実現性等の観点を踏まえて処分場が設計されるとともに、その機能が想定されたとおりに発揮されることが立証される必要がある。

我が国では、地層処分は最終処分法に基づき原子力発電環境整備機構（以下「NUMO」という。）が事業を行うこととされており、令和2年より北海道寿都町及び神恵内村において、最終処分法に基づく三段階の立地選定プロセスの第一段階である文献調査を行っている。文献調査結果は NUMO によって取りまとめられ、令和6年2月に文献調査報告書（案）として公表された。また、経済産業省総合資源エネルギー調査会特定放射性廃棄物小委員会（以下「特定放射性廃棄物小委員会」という。）において、「文献調査段階の評価の考え方」（資源エネルギー庁、令和5年11月）が取りまとめられ、文献調査報告書（案）への反映について、特定放射性廃棄物小委員会において評価が行われている。さらに、令和6年5月に佐賀県玄海町が文献調査の受け入れを表明し、同年6月より文献調査が開始された。

研究開発に関しては、資源エネルギー庁の地層処分研究開発調整会議において定めた「地層処分研究開発に関する全体計画（令和5年度～令和9年度）」（令和5年3月）に基づき、NUMO 等の関係機関が地層処分事業の安全確保に向けた研究開発を行っている。

他方、原子力規制委員会における地層処分の安全確保に関する研究はこれまで行われていないが、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」（平成27年5月22日閣議決定）には、「原子力規制委員会は、最終処分に関する安全の確保のための規制に関する事項について、順次整備し、それを厳正に運用することが必要である。原子力規制委員会は、概要調査地区等の選定が合理的に進められるよう、その進捗に応じ、将来の安全規制の具体的な審査等に予断を与えないとの大前提の下、概要調査地区等の選定時に安全確保上少なくとも考慮されるべき事項を順次示すことが適当である。」とされており、これに基づき、概要調査地区等の選定時に安全確保上少なくとも考慮されるべき事項について、特定放射性廃棄物の特性と、令和3年に整備した中深度処分の規制基準の検討を通して得られた知見を踏まえた検討を行い、「特定放射性廃棄物の最終処分における概要調査地区等の選定時に安全確保上少なく

|          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|          | <p>とも考慮されるべき事項」（以下「考慮事項」という。）を令和４年８月に決定した。また、規制に必要な事項を順次整備するための科学的・技術的知見を蓄積するために、令和５年１月に改正された原子力規制委員会第２期中期目標に、最終処分<span style="color: red;">の安全確保に関する研究を進めることが盛り込まれた。</span>これを受けて原子力規制庁では、「今後推進すべき安全研究の分野及びその実施方針」（令和５年７月１２日、原子力規制委員会了承）において、令和６年度には、最終処分の安全確保に係る技術的課題の抽出・整理を新たに実施し、これを踏まえて令和７年度以降に最終処分の安全確保に関する安全研究プロジェクトを企画して研究を進めることを定めた。</p> <p>これまで、廃棄物埋設施設の安全性は、専ら概念設計に基づく状態設定を行い、パラメータ（例えば透水係数）の保守的な設定に基づく線量評価によって論じられる傾向にあった。しかしながら、今後は「概念設計に基づく処分システムの保守的パラメータによる線量評価(assessment)手法」のみでは無く、「詳細設計に基づく個別要素技術の安全機能を踏まえた性能を評価する性能照査(verification)手法」（以下「性能評価」という。）を導入し、処分場の構成部材性能の実力値を把握する。そうすることで、保守的パラメータの妥当性を評価すると共に、処分システムが有する潜在的な弱点の回避やクリフエッジが無いことを構造ロバスト性として見極めた上で、科学的合理性をもって性能評価をすることができない長期については、性能評価結果を踏まえて長期の状態設定を行い、線量評価によって廃棄物埋設施設全体のパフォーマンスが評価されていることを確認する必要がある（図２）。</p> <div data-bbox="621 682 1661 991"> <pre> graph LR     subgraph 従来         C1[概念設計] --&gt; C2[概念設計に基づく状態設定]         C2 --&gt; C3[保守的パラメータ設定]         C3 --&gt; C4[線量評価]     end     subgraph 新規         N1[概念設計] --&gt; N2[概念設計に基づく状態設定]         N2 --&gt; N3[保守的パラメータ設定]         N3 --&gt; N4[線量評価]         N1 -.-&gt; N5[安全確保に必要な性能の明確化]         N5 --&gt; N6[性能評価&lt;br/&gt;実力値の評価]         N6 --&gt; N7[設定したパラメータの保守性に&lt;br/&gt;係る妥当性の評価]         N7 -.-&gt; N3     end </pre> </div> <p style="text-align: center;">図２ 性能評価と線量評価</p> <p>特定放射性廃棄物は放射能濃度が高く、多くの長半減期核種を含むことから、長期の安全確保が必要となり、そのために複数の人工構築物及び母岩による多重安全機能が求められる。第一種廃棄物埋設施設（ここでは施設そのものに加えて、施設の周辺母岩も含めたものを指すこととする。）に係る安全性の立証責任は一義的に事業者にあるため、NUMO 及び関連機関は地層処分研究開発に関する全体計画に基づき研究開発を継続することで、線量評価モデル等の高度化及び精緻化を進めているところである。一方、規制当局は、第一種廃棄物埋設施設の位置・構造・設備等のうち重要なものについての基準を許可基準規則等に定めること、審査において第一種廃棄物埋設施設の安全機能及びそれらに係る部材性能の長期的な変遷の評価方法に関する申請内容の技術的妥当性を判断すること、後続規制（施設確認、廃棄物確認等）において設計に基づく性能が発揮される見通しがあることを確認すること等が求められるため、これらに必要な知見を取得するための研究を進める必要がある。そのため、第一種廃棄物埋設に係る安全確保の考え方を整理した上で、第一種廃棄物埋設施設が具備すべき安全機能及びそれらに係る構成部材の性能を体系的に整理した。さらに、その性能を評価するために必要な研究課題を網羅的に抽出した。その上で、上記の規制側の研究の位置づけ、研究課題の重要性（＊１）及び緊急性（＊２）を踏まえた優先順位付けを行い、第一期目の研究として令和７年度から１１年度にかけて行う研究を本安全研究プロジェクトとして取りまとめた。</p> <p>なお、研究計画は立地選定、事業者の研究動向、国際的な規制動向等を踏まえて柔軟に見直すとともに、令和１２年度以降の研究については、第一期の成果を踏まえて新たに検討する。</p> <p>＊１：例えば、許可基準規則、審査ガイド、後続規制のガイド等、規制ツールの整備に必要な知見を得るための研究課題は重要度が高い課題とした。</p> <p>＊２：例えば、研究課題が明確で、かつ、知見の取得に時間を要することがわかっているものは早期に着手が必要であることから緊急性が高い課題とした。</p> |
| ４．目的     | <p>本研究プロジェクトでは、第一種廃棄物埋設の安全確保に必要な事項の体系的な整理に基づき、第一種廃棄物埋設施設の性能評価及び線量評価の観点から、<span style="color: red;">第一種廃棄物埋設当該施設</span>の安全確保に求められる規制基準等の整備及び審査等に必要な科学的・技術的知見を取得することで、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」で述べられている、最終処分に関する安全の確保のための規制に関する事項の順次整備に資することを目的とする。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| ５．知見の活用先 | <p>本研究プロジェクトで得られた成果は、第一種廃棄物埋設施設の安全確保に係る許可基準規則、審査ガイド、審査における判断根拠、後続規制のガイド等に反映することを想定している。具体的には以下のとおり。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>①許可基準規則等の整備における要求事項等の検討に資する科学的・技術的知見の取得 <ul style="list-style-type: none"> <li>・立地選定において考慮事項を満足していることを判断するための知見</li> <li>・許可基準規則において排除要件を具体化するための知見</li> <li>・地層処分における審査ガイドに資するため、廃棄物埋設施設の長期性能として特に着目すべき現象に係る知見</li> </ul> </li> <li>②地層処分の審査において基準適合性を判断するための知見</li> <li>④処分分野に必要な、地質評価、地下水流動評価、セメント性能評価、緩衝材性能評価等、<span style="color: red;">並びに核種移行解析等</span>に係る技術基盤の構築及び人材維持・育成</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| ６．安全研究概要 | <p>本プロジェクトの研究は、「原子力規制委員会における安全研究の基本方針」（令和元年５月２９日原子力規制委員会決定）における安全研究のうち以下の分類に基づき実施する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>①規制基準等の整備に活用するための知見の収集・整備（以下「分類①」という。）</li> <li>②審査等の際の判断に必要な知見の収集・整備（以下「分類②」という。）</li> <li>④技術基盤の構築・維持（以下「分類④」という。）</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

(1) 性能評価【分類①、分類②及び分類④】

性能評価に係る研究としては、文献調査の状況、NUMOの包括的技術報告書、資源エネルギー庁を中心とした研究開発動向、**諸外国における最新知見**等を踏まえ、3. で述べた優先順位付けの結果として、現時点で取り組むべき研究課題を抽出した。

天然バリアについては、岩盤が具備すべき安全機能を操業中における事故の発生防止として落盤防止機能並びに閉鎖後期間における隔離機能、移行抑制機能及び分散機能と分類し、これらに対する要求性能を評価するための研究課題を抽出した上で優先順位付けを行った。優先順位付けの結果、隔離機能に関する研究課題として、許可基準規則及び審査ガイドに反映する知見を取得する必要性からその重要性が非常に高く、かつ解決に時間を要するため早期に着手する必要がある課題として、「a. 隔離性能に関する研究」を抽出した。また、移行抑制機能に関する研究課題として、審査ガイドに反映する知見を取得する必要性からその重要性が非常に高く、かつ求める性能要求が明確で、解決に時間を要するためその緊急性が非常に高いといった理由より、「b. 地下水流動性能に関する研究」及び「c. 核種移行性能に関する研究」を抽出した。

セメント系部材については、従来の土木構造物よりも長期間の評価が求められるところ、低透水性及び低拡散性に係る長期物質安定性能及びセメント系部材を貫通するひび割れの影響が重要である。これらは、審査ガイド及び後続規制のガイドに反映される知見であり、かつ、従来の土木構造物の評価では考慮されていない長期を対象とすることから、重要性及び緊急性の高い課題として「d. セメント系部材の長期物質安定性能及び透水性に関する研究」を抽出した。

ベントナイト系部材については、長期透水性性能とその前提となる初期状態との関係の解明及び廃棄体の閉じ込め機能の維持に係る緩衝材の応力緩衝性能の評価が重要である。これらは、主に審査ガイドに反映されることが想定され、知見の取得に時間を要することから重要性及び緊急性の高い課題として「e. ベントナイトの長期透水性性能及び初期状態の評価に関する研究」及び「f. 緩衝材の力学的緩衝性能の評価に関する研究」を抽出した。

a. 隔離性能に関する研究（委託にて実施）

安全確保に必要な機能の一つとしては岩盤による隔離機能が挙げられ、放射性廃棄物は地下深くに埋設することにより人間の生活環境や地上の自然環境から隔離される必要がある。このため、侵食、火山現象、断層活動等の自然事象及び鉱物資源等の採掘といった人間侵入によって擾乱が生じる場所への施設の設置を避ける必要がある。また、地層処分では、超長半減期核種を含む等の理由により考慮期間が中深度処分よりも長いこと等から、考慮事項において、「中深度処分より更に深い深度を確保すること。」が適切に考慮されるべきとされている(1)。地形に関しては、隆起、沈降、侵食及び堆積の影響を受けるため、深度の確保に当たっては、特に隆起・侵食作用の評価が重要であり、これまでも研究が行われてきた(例えば 2, 3)。地層処分においては、これまで隆起・侵食評価の主な研究対象となってきた陸域に限らず、沿岸海底下を含む沿岸域を地層処分の対象にすることも検討されている(4)。しかしながら沿岸域では、海退期の侵食の後の海進期に侵食面に堆積物が上載すること等が、隆起・侵食作用の評価を難しくする。

以上を踏まえて、隔離機能として深度の確保が行われていることの妥当性確認に必要な、隆起・侵食に関する知見を収集するため、沿岸域を対象に、陸域と海域間の外挿法等を用いた隆起評価手法、海水準低下等によって陸化する海域の侵食量評価手法に関する調査及び検討を行い、科学的・技術的知見を取得する。

b. 地下水流動性能に関する研究（一部委託にて実施）

第一種廃棄物埋設施設から漏えいした放射性物質は地下水によって生活環境に運ばれるため、この移行を抑制するために地下水の流動が緩慢な地下深部の岩盤中に第一種廃棄物埋設施設は設置される。岩盤の移行抑制機能に係る地下水流動性能の指標として地下水の流速、流量、流向等の評価が重要となり、原子力規制庁は申請段階において、事業者が実施した涵養域から第一種廃棄物埋設施設、湧出域までの地下水流動評価を確認する必要がある。地下水流動性能を評価する際には、岩盤の地質、水理特性及び水質に加え地下深部や沿岸域において想定される地下水流動性能に影響を及ぼす事象等を考慮する必要があるが、特に透水性が高いことが想定される岩盤中の亀裂、断層及び坑道掘削により地下水流動性能に影響を受けた領域等を適切に評価することが重要となる。これらの地下深部の情報は、その取得が深いほど容易でない上に可能な限り非擾乱的であることが望ましいことから質・量ともに制約が多い。したがって、そこから構築されるモデルには多くの認識論的不確実性を伴うが、これらの不確実性の評価が規制側に求められる。

以上のことから、地下水流動評価において、事業者が構築する地下水流動モデルの妥当性を評価するために必要な知見を収集するための研究を実施する。具体的には、第一種廃棄物埋設施設が建設されることが想定される透水性の低い岩盤が広がる地域において、地層処分深度を想定して構築された事業者の地下水流動モデルの妥当性を確認するために必要な知見を、地下水流動モデルの検証に用いることができる、地質構造情報が取得可能な地域（以下「モデルフィールド」という。）を用いた調査及び地下水流動解析により取得し、整理する。また、地下水流動性能に影響を及ぼす事象や地下水流動評価を行う上で必要となる知見を拡充するため、断層の透水性と地下水流動に与える影響を評価するために関連する試験及び解析並びに深部流体等の深層地下水が地下水水質に与える影響を評価するため地下水試料の化学分析を実施する。さらに、坑道掘削による影響を受けた領域の地下水流動性が適切に評価されていることの妥当性確認に必要な知見を取得するため、力学水理連成試験機等を用い、岩盤の力学状態と水理特性との関係を実験的に明らかとする。加えて、第一種廃棄物埋設施設周辺部の現地から得られる地質・地下水データに基づき周辺岩盤中における不均質な水理地質構造を定量的に推定するための手法について検討する。

なお、上記研究課題のうち、モデルフィールドを用いた調査及び地下水流動解析、地下水試料の化学分析並びに不均質な水理地質構造の定量的推定については、委託にて実施する。

c. 核種移行性能に関する研究

最終処分システムに係る核種移行において、岩盤への収着・脱離、溶解・沈殿、拡散等の現象は場の化学的環境影響を受ける。第一種廃棄物埋設施設の化学的環境は建設から廃止後までの間に変化することから、どのような時期にどのような化学的な変化があり、その結果として核種移行性能にどのような影響があるかについては不確かさが大きい。核種移行を促進する可能性がある要素として、~~コロイドによる輸送~~、移行経路の孔径の縮小に伴う電気二重層の寄与、外部からの酸素の侵入や微生物影響等による酸化的環境への変化、変質作用による鉱物組成の変化、**コロイドによる輸送**等が考えられている。個別の現象について、特定の岩石・材料や

化学条件を対象とした研究は進められているものの、空間的・時間的に多様な条件を取り得る処分環境においてこれらの現象が核種移行をどの程度促進し得るかが体系的に整理されておらず、これらの現象の核種移行への影響評価の妥当性を確認するための知見を拡充することが規制の観点から求められている。そこで、天然試料の分析やモデル化等を通じて、**天然環境に存在するコロイドへ収着する核種の化学的特性や移行への影響、さらに岩盤中における移行経路の孔径や酸化還元状態等の変化が核種移行に及ぼす影響や、天然環境に存在するコロイドへ収着する核種の化学的特性や移行への影響**について検討を行い、核種移行を促進する可能性のある現象の影響評価の妥当性を判断するために必要となる科学的・技術的知見を取得する。



図3 核種移行を促進する可能性のある要素の例

#### d. セメント系部材の長期物質安定性能及び透水性能に関する研究

第一種廃棄物埋設施設のうち、TRU等廃棄物の埋設施設において、NUMOが示している概念では、埋設終了後の放射性物質の移行が生じてから現在の地質環境の特性が大きく変化しないと考えられるまでの期間におけるセメント系部材の人工バリア性能の維持を期待している(5)。緻密な空隙構造を持ち、**TRU等廃棄物の埋設施設において**低透水性及び低拡散性の安全機能を有するセメント系部材の人工バリアは、第一種廃棄物埋設施設から漏出する放射性物質のフラックスを低減する機能が期待されており、これまでの土木建築構造物よりも長期間（少なくとも放射性物質の閉じ込め機能を求める300年程度の期間）の評価が求められるが、湿潤環境において**溶出溶脱**による変質が起こりやすいこと、外環境により劣化等で変質しやすいことが一般的に知られている。低透水性及び低拡散性を長期的に維持するためには、長期物質安定性能を評価する必要がある。この長期物質安定性能の評価には、水和反応によって形成されるカルシウムシリケート水和物のナノ構造、外環境要因によって変化する水和物構造等を第一原理等を用いた解析的評価及び検証試験から明らかにする必要がある。

一方で、外部拘束による応力状態及び内部変質によりセメント系部材を貫通するひび割れを生じると、その部分が際立って大きい透水係数と拡散係数を示す特性を持つ可能性がある。このセメント系部材は、**一般的には表面から確認可能なひび割れ幅の大きさによって防水性の観点から修復の必要性の有無が判断されており、の人工バリア**の透水性能について、ひび割れの発生状態と水和生成物の変質による空隙構造の変化及びそれに伴う物質移動特性の変化についての現象論的な理解は進んでいない。また、ひび割れ部の内部形状は表面から確認することは難しく、この内部構造と透水性能との関係が明確になっていない。しかしながら、閉じ込め機能において、ひび割れ幅の内部形状、開口幅の変動及び閉塞に伴う透水性を把握しておくことは安全評価の妥当性を確認する上で規制の観点において重要である。

以上のことから、**操業期間を想定した乾燥状態と湿潤状態が混在した環境における**セメント系部材**において、種々の**ひび割れ発生要因（外部拘束と内部変質）**における**ひび割れ幅、ひび割れ深さ及び頻度等**により、のひび割れ形状が**透水性へ及ぼす影響、並びに地下水の浸潤後にセメント水和生成物等がひび割れ形状及び透水性へ与える影響について、X線CTスキャン等の試験、解析等により科学的・技術的知見の取得を行うとともに、**また、セメント系部材の長期物質安定性能の評価として、カルシウムシリケート水和物のナノ構造及び溶出溶脱等による構造変化について、第一原理計算等の解析手法の選定及び評価方法の整理を行う。**

#### e. ベントナイトの長期透水性及び初期状態の評価に関する研究

ベントナイトは、緩衝材や埋戻し材として使用されることが想定され、その役割に応じて力学的緩衝性能や透水性能が必要となる。力学的緩衝性能については次項 f. で述べる**ため、本項での記載は割愛する**。透水性能については、**ベントナイト中の放射性物質の移動は拡散支配となるとされているが、その前提として、透水性能が非常に小さいことが必要である**。これまでに原子力規制庁及びその他機関において検討が実施されており(6, 7)、ベントナイトの種類、粘土成分の含有率、化学的な反応等が影響することが知られている。長期的な透水性能の評価に関しては室内試験等で得られた結果を基に数万年後以上の期間に及ぶシミュレーションが必要となり、考慮する現象、使用する計算式等によって評価結果が変わることから、これらの不確かさを考慮した妥当性を検証することは規制の観点において重要である。しかしながら、不確かさの扱いを含めた評価結果の妥当性を検証する方法は確立されていない。この理由の一つとして、室内試験等で確認できる緩衝材の変化が微小であり、その変化を捉え切れていないため、使用する計算モデル等を特定できないことが考えられる。そこで、長期的な性能に影響を与える要因に着目し、実験で確認することのできる変化及び長期的な透水性能評価に適用する際に必要な視点を整理するとともに、必要に応じて、実験的手法と解析的手法を組み合わせ、評価時の留意点を整理する。また、初期状態においても、例えば接触する溶液のイオン組成といった晒される環境によって性能に違いが生じることから、これらの環境による性能の違いについて実験的手法と解析的手法を組み合わせ、初期状態の性能に関する知見を整理する。**なお、ここでの初期状態とは、核種移行が始まる緩衝材全体が冠水した状態を主に想定する**。実験的手法では、化学的な反応に伴うベントナイトの微小構造の変化を観察する。この観察にはX線**回折、ナノ CT**等を用いることを想定しているが、文献調査の結果、より適切な手法があれば、その手法を選択する。また、実験的手法で得られた短期的な変化の結果を長期的な評価へ反映する際の留意点について、解析的手法を用いて整理する。

#### f. 緩衝材の力学的緩衝性能の評価に関する研究

廃棄体が力学的に損傷すると閉じ込め性能が維持されず、放射性物質の漏えいが生じる。緩衝材は、周囲の岩盤割れ目のせん断ず

|                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                     | <p>れのような廃棄体に力学的な損傷を与える事象の影響を緩和するために必要であり、諸外国でも廃棄体を岩盤からのせん断荷重や圧力荷重から守ることを期待している（例えば、8）。また、緩衝材は地下水の流れを抑制する機能も有しているが、力学的な損傷によりこのような緩衝材自体の機能が損なわれることも懸念される。このように廃棄体及び緩衝材への力学的な損傷に関する評価は、放射性物質の閉じ込め性能を担保するために重要な要素であり、この評価の妥当性を確認することは規制の観点からも重要であるが、原子力規制庁ではこれまで当該分野に関する安全研究を行ってきていなかった。そこで、新たな課題として対応すべく、緩衝材の変形並びに変形に伴う廃棄体及び緩衝材の性能の変化について、文献調査等により関連する情報を整理する。<b>この際、長期の状態に対する課題のみならず、操業中や初期の不飽和状態から冠水に至る過渡状態に特徴的に起こり得る偏膨潤、流出等の事象に対する課題も指摘されていることから、これらにも着目して整理する。</b>また、情報整理の結果を踏まえ、必要に応じて解析等を実施し、緩衝材の変形及び性能の変化に関する評価手法に関する知見を蓄積する。</p> <p>（２）線量評価【分類①、分類②及び分類④】</p> <p>線量評価は、（１）の性能評価結果を踏まえた長期状態設定に基づいて行うため第一期の研究では線量評価に係る課題は多くはない。しかしながら、核種移行解析において、放射性核種の種類及び放射性核種の移行開始からの時間経過に応じて各構成部材の性能がどのように、どの程度効くのか、また、構成部材の性能の相互補完の関係を定量的に把握しておくことは重要である。そのため、線量評価に関して予察的な検討として、第一種廃棄物埋設施設を構成する人工バリア及び天然バリアを考慮した線量評価に関する a. の研究課題を抽出した。</p> <p>a. 地層処分システムの性能の不確かさが線量評価に与える影響についての研究（委託にて実施）</p> <p>地層処分に係る安全確保においては、異なる安全機能を有する複数のバリアにより達成されることが想定されており、各バリアを構成する部材はそれぞれが求められる安全機能を達成するための性能を有することが必要となる。各部材について確保すべき性能についての定量的な指標を示すことや処分システム全体における各性能の重要度を把握することは安全確保の観点から重要であり、これらを判断するための手法の一つとして最終処分システムを想定した線量評価による定量化が考えられる。しかし、各部材によって求められる役割や時間スケールが異なり、核種によっても移行経路中での挙動が異なることから、処分システム全体を通じた評価による最終的な線量だけでは、線量への影響の大きな部材のみが支配的となるため、部材ごとの性能要件について適切に検討することが困難になることが課題として考えられる。また、各部材の性能についてどの程度の不確かさや設計の裕度を有しているのかといった観点だけで無く、長期的に想定され得るシナリオも含めた幅広い検討を通じて安全機能の確保が困難となる条件を把握することも重要であると考ええる。</p> <p>以上の課題を踏まえて、<b>構成</b>部材ごとの設計の裕度や経年変化に着目した核種移行及び線量評価を通じて、性能の不確かさが線量へ与える影響について系統的に整理する。</p>                                                                                     |
| <p>7. 成果目標と実施計画</p> | <p>（１）性能評価</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・成果目標</li> </ul> <p>地層処分における地下水流動性能、放射性物質の移行性能、セメント系部材及びベントナイトの長期性能等に関する研究を実施し、審査における申請内容の妥当性確認および基準の整備に必要な科学的・技術的知見を取得する。なお、委託研究の成果については、委託先から論文等により公表し、規制庁は研究プロジェクト終了後にそれらを基に規制としての留意点をまとめる。</p> <p>【令和 7 年度の実施内容】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. 隔離性能に関する研究 <ul style="list-style-type: none"> <li>・<b>沿岸域陸域及び海域を対象とした既存の隆起、侵食評価手法の整理（令和 8 年度から実施）</b></li> </ul> </li> <li>b. 地下水流動性能に関する研究 <ul style="list-style-type: none"> <li>・力学水理連成試験機の高機能化のための設計・製作（改良）</li> <li>・力学水理連成試験機における試験に関する解析</li> <li>・<b>水理地質構造の推定手法の整理</b></li> </ul> </li> <li>c. 核種移行性能に関する研究 <ul style="list-style-type: none"> <li>・コロイドを介した核種移行の課題整理及び分析手法の検討</li> <li>・酸化還元状態の影響についての評価手法検討</li> <li>・経路孔径の影響に関する既往研究の整理</li> </ul> </li> <li>d. セメント系部材の長期物質安定性能及び透水性能に関する研究 <ul style="list-style-type: none"> <li>・単一ひび割れ内の透水性に関する試験</li> </ul> </li> <li>e. ベントナイトの長期透水性能及び初期状態の評価に関する研究 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ベントナイトの長期的な透水性能に影響を与える要因に着目した、長期的な性能評価を検証する際の課題点等の抽出</li> <li>・初期性能に関する、膨潤と透水の性能を整理するため X 線回折等の試験の実施</li> </ul> </li> <li>f. 緩衝材の力学的緩衝性能の評価に関する研究 <ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材の変形並びに変形に伴う廃棄体及び緩衝材の性能の変化に関する文献調査を実施</li> </ul> </li> </ul> <p>【令和 8 年度の実施内容】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. 隔離性能に関する研究 <ul style="list-style-type: none"> <li>・沿岸域における隆起、侵食評価手法の<b>整理及び適用</b>に向けた検討</li> </ul> </li> <li>b. 地下水流動性能に関する研究 <ul style="list-style-type: none"> <li>・力学水理連成試験機の高機能化のための設計・製作（改良）</li> <li>・試験の実施による坑道周辺の力学状態と水理特性の関係性の整理</li> </ul> </li> </ul> |

|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・水理地質構造の<b>推定手法の整理及び</b>評価手法の開発</li> </ul> <p>c. 核種移行性能に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・コロイドへの核種収着特性に関する既往知見の整理、実験、分析</li> <li>・酸化還元状態の影響についての評価</li> <li>・経路孔径の影響に関する移行モデルの検討</li> </ul> <p>d. セメント系部材の長期物質安定性能及び透水性能に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・単一ひび割れ内の透水性に関する分析及び解析</li> <li>・第一原理等の解析手法のセメント系部材への適用に関する調査</li> </ul> <p>e. ベントナイトの長期透水性能及び初期状態の評価に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・令和 7 年度に抽出した課題の解決に向けた、必要となる解析手法の検討</li> <li>・ベントナイトの微小構造の変化を観察するための試験の実施</li> <li>・令和 7 年度に引き続き、初期性能に関する膨潤と透水の性能を整理するため X 線回折等の試験の実施</li> </ul> <p>f. 緩衝材の力学的緩衝性能の評価に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・令和 7 年度の調査結果を踏まえ、緩衝材の変形並びに変形に伴う廃棄体及び緩衝材の性能の変化に関する評価の課題点等を抽出し、それに対する解析手法等を整理</li> </ul> <p>【令和 9 年度の実施内容】</p> <p>a. 隔離性能に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・沿岸域における隆起・侵食評価手法の適用及び留意点の抽出</li> </ul> <p>b. 地下水流動性能に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・試験の実施による坑道周辺の力学状態と水理特性の関係性の整理</li> <li>・試験結果に基づく構成モデルの構築と坑道周辺の地下水流動解析の実施</li> <li>・水理地質構造の評価手法の開発・適用性検証</li> </ul> <p>c. 核種移行性能に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・コロイドへの核種収着特性に関する実験、分析</li> <li>・酸化還元状態の影響についての評価</li> <li>・経路孔径の影響に関する移行モデルの検討、試計算</li> </ul> <p>d. セメント系部材の長期物質安定性能及び透水性能に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・分布ひび割れ内部の透水性に関する試験</li> <li>・第一原理等の解析手法の選定方法の整理</li> </ul> <p>e. ベントナイトの長期透水性能及び初期状態の評価に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・令和 8 年度に検討した解析手法の実施及び、令和 8 年度に引き続き試験の実施</li> </ul> <p>f. 緩衝材の力学的緩衝性能の評価に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・令和 8 年度に整理した手法による解析等を実施</li> </ul> <p>【令和 1 0 年度の実施内容】</p> <p>a. 隔離性能に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・沿岸域における隆起・侵食評価手法の適用及び留意点の抽出</li> </ul> <p>b. 地下水流動性能に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・試験の実施による坑道周辺の力学状態と水理特性の関係性の整理</li> <li>・試験結果に基づく構成モデルの構築と坑道周辺の地下水流動解析の実施</li> <li>・水理地質構造の評価手法の適用性検証</li> </ul> <p>c. 核種移行性能に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・コロイドへの核種収着特性に関する実験、分析</li> <li>・酸化還元状態の影響についての評価</li> <li>・経路孔径の影響に関する試計算結果の分析</li> </ul> <p>d. セメント系部材の長期物質安定性能及び透水性能に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・分布ひび割れ内の透水性に関する分析及び解析</li> <li>・第一原理等の解析手法の評価方法の取りまとめ</li> </ul> <p>e. ベントナイトの長期透水性能及び初期状態の評価に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・令和 9 年度に検討した解析手法の実施及び、令和 9 年度に引き続き試験の実施</li> </ul> <p>f. 緩衝材の力学的緩衝性能の評価に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・令和 9 年度に引き続き解析等を実施</li> </ul> <p>【令和 1 1 年度の実施内容】</p> <p>a. 隔離性能に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・沿岸域陸域及び海域における、有効な隆起・侵食評価手法の留意点についての整理</li> </ul> <p>b. 地下水流動性能に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・坑道周辺の水理特性評価に関する取りまとめ</li> <li>・水理地質構造の評価手法に関する取りまとめ</li> </ul> <p>c. 核種移行性能に関する研究</p> |
|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

- ・コロイドへの核種収着特性に関する取りまとめ
- ・酸化還元状態の影響についての取りまとめ
- ・経路孔径の影響に関するモデル化の留意点の整理
- d. セメント系部材の長期物質安定性能及び透水性能に関する研究
  - ・ひび割れ内の透水性に関する取りまとめ
- e. ベントナイトの長期透水性能及び初期状態の評価に関する研究
  - ・令和 9 年度に引き続き解析及び試験の実施並びに長期透水性能及び初期状態の評価の際の留意点の取りまとめ
- f. 緩衝材の力学的緩衝性能の評価に関する研究
  - ・令和 10 年度に引き続き解析等を実施し、力学的緩衝性能に関する評価手法を整理

（２）線量評価

・成果目標

地層処分における核種移行に対して感度解析を行うことによって、主要な核種の人工バリア及び天然バリアからの移行フラックスの関係性から各バリア材の性能が核種移行抑制に寄与する時期や程度及びその限界を定量的に明らかにする。委託研究の成果については、委託先から論文等により公表し、規制庁は研究プロジェクト終了後にそれらを基に規制としての留意点をまとめる。

【令和 7 年度の実施内容】

- a. 地層処分システムの性能の不確かさが線量評価に与える影響についての研究
- ・線量評価モデルの構築及びシナリオの整理（令和 8 年度より実施）

【令和 8 年度の実施内容】

- a. 地層処分システムの性能の不確かさが線量評価に与える影響についての研究
- ・線量評価モデルの構築及びシナリオの整理
  - ・人工バリアからの流出フラックス等に影響を及ぼす人工バリア性能に係るパラメータの整理及び予備解析

【令和 9 年度の実施内容】

- a. 地層処分システムの性能の不確かさが線量評価に与える影響についての研究
- ・処分システムの状態に応じた人工バリアからの流出フラックス等への影響に関する解析的検討及びバリア機能の重要度に関する整理
  - ・天然バリアからの流出フラックス等に影響を及ぼす天然バリア性能に係るパラメータの整理及び予備解析

【令和 10 年度の実施内容】

- a. 地層処分システムの性能の不確かさが線量評価に与える影響についての研究
- ・処分システムの状態に応じた天然バリアからの流出フラックス等への影響に関する解析的検討及びバリア機能の重要度に関する整理

【令和 11 年度の実施内容】

- a. 地層処分システムの性能の不確かさが線量評価に与える影響についての研究
- ・線量評価に関する検討の取りまとめ

行程表

|             |                  | R 7 年度                                                                                                           | R 8 年度                                                                                                          | R 9 年度                                                                                                             | R 1 0 年度                                                                                                           | R 1 1 年度                                                                                               |
|-------------|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| （１）<br>性能評価 | a. 隔離性能に関する研究    | 沿岸域陸域及び海域を対象とした既存の隆起・侵食評価手法の整理                                                                                   | モデルサイトにおける隆起・侵食評価手法の整理及び適用に向けた検討                                                                                | モデルサイトにおける隆起・侵食評価手法の適用及び留意点の抽出                                                                                     | モデルサイトにおける隆起・侵食評価手法の適用及び留意点の抽出                                                                                     | 沿岸域陸域及び海域において、有効な隆起・侵食評価手法の留意点の整理                                                                      |
|             | b. 地下水流動性能に関する研究 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・連成試験機の高機能化</li> <li>・連成試験機に関する力学水理解析</li> <li>→水理地質構造の推定手法の整理</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・連成試験機の高機能化</li> <li>・連成試験機による力学水理試験</li> <li>・水理地質構造の推定手法の整理</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・連成試験機による力学水理試験</li> <li>・構成モデルの構築と坑道周辺の地下水流動評価</li> <li>・水理地質構造</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・連成試験機による力学水理試験</li> <li>・構成モデルを用いた坑道周辺の地下水流動評価</li> <li>・水理地質構造</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・坑道周辺の水理特性評価に関する取りまとめ</li> <li>・水理地質構造の評価手法に関する取りまとめ</li> </ul> |

|  |             |                                       |                                                                                                                             |                                                                                                                     |                                                                                                                                            |                                                                                                                    |                                                                                                                           |  |
|--|-------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
|  |             |                                       |                                                                                                                             |                                                                                                                     | 理及び評価手法の開発                                                                                                                                 | の評価手法の開発・適用性検証                                                                                                     | の評価手法の適用性検証                                                                                                               |  |
|  |             | c. 核種移行性能に関する研究                       | <div><div></div><div>・コロイドを介した核種移行の課題整理及び分析手法の検討</div><div>・酸化還元状態の影響についての評価手法検討</div><div>・経路サイズの影響に関する既往研究の整理</div></div> | <div><div></div><div>・コロイドへの核種収着特性に関する実験、分析</div><div>・酸化還元状態の影響についての評価</div><div>・経路サイズの影響に関する移行モデルの検討</div></div> | <div><div></div><div>・コロイドへの核種収着特性に関する実験、分析</div><div>・酸化還元状態の影響についての評価</div><div>・経路サイズの影響に関する移行モデルの検討、試算</div></div>                     | <div><div></div><div>・コロイドへの核種収着特性に関する実験、分析</div><div>・酸化還元状態の影響についての評価</div><div>・経路サイズの影響に関する試算結果の分析</div></div> | <div><div></div><div>・コロイドへの核種収着特性に関する取りまとめ</div><div>・酸化還元状態の影響についての取りまとめ</div><div>・経路サイズの影響に関するモデル化の留意点の整理</div></div> |  |
|  |             | d. セメント系部材の長期物質安定性及び透水性能に関する研究        | <div><div></div><div>単一ひび割れ内の透水特性に関する試験</div></div>                                                                         | <div><div></div><div>単一ひび割れ内の透水特性に関する分析及び解析</div><div>第一原理等の解析手法のセメント系部材への適用に関する調査</div></div>                      | <div><div></div><div>分布ひび割れ内部の透水性に関する試験</div><div>第一原理等の解析手法の選定方法の整理</div></div>                                                           | <div><div></div><div>分布ひび割れ内部の透水性に関する分析及び解析</div><div>第一原理等の解析手法の評価方法の取りまとめ</div></div>                            | <div><div></div><div>ひび割れ内の透水性に関する取りまとめ</div></div>                                                                       |  |
|  |             | e. ベントナイトの長期透水性能及び初期状態の評価に関する研究       | <div><div></div><div>文献調査</div><div>X線回折分析等の実施</div></div>                                                                  | <div><div></div><div>長期透水性能の確認試験・解析の実施</div><div>X線回折分析等の実施</div></div>                                             | <div><div></div><div>長期透水性能の確認試験・解析の実施</div></div>                                                                                         | <div><div></div><div>長期透水性能の確認試験・解析の実施</div></div>                                                                 | <div><div></div><div>長期透水性能の確認試験・解析の実施</div></div>                                                                        |  |
|  |             | f. 緩衝材の力学的緩衝性能の評価に関する研究               | <div><div></div><div>文献調査</div></div>                                                                                       | <div><div></div><div>課題点の抽出</div><div>解析手法等の検討・整理</div></div>                                                       | <div><div></div><div>解析等の実施</div></div>                                                                                                    | <div><div></div><div>解析等の実施</div></div>                                                                            | <div><div></div><div>解析等の実施</div><div>評価手法の整理</div></div>                                                                 |  |
|  | (2)<br>線量評価 | a. 地層処分システムの性能の不確かさが線量評価に与える影響についての研究 | <div><div>線量評価モデルの構築及びシナリオの整理</div></div>                                                                                   | <div><div></div><div>線量評価モデルの構築及びシナリオの整理</div><div>人工バリアからの流出フラックス等に影響を及ぼす人工バリア性能に係るパラメータの整理及び予備解析</div></div>      | <div><div></div><div>処分システムの状態に応じた人工バリアからの流出フラックス等への影響に関する解析的検討及びバリア機能の重要度に関する整理</div><div>天然バリアからの流出フラックス等に影響を及ぼす天然バリア性能に係るパラ</div></div> | <div><div></div><div>処分システムの状態に応じた天然バリアからの流出フラックス等への影響に関する解析的検討及びバリア機能の重要度に関する整理</div></div>                       | <div><div></div><div>線量評価に関する取りまとめ</div></div>                                                                            |  |

|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |  |  |  |              |  |  |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|--------------|--|--|
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |  |  |  | メータの整理及び予備解析 |  |  |
| 8. 実施体制 | <p>【放射線・廃棄物研究部門における実施者（実施項目ごとに主担当者に○を記載）】</p> <p>○廣田 明成 主任技術研究調査官（実施項目（１）関係）</p> <p>○市末 高彦 主任技術研究調査官（実施項目（１）、（２）関係）</p> <p>山田 憲和 副主任技術研究調査官</p> <p>向井 広樹 副主任技術研究調査官</p> <p>○鏡 健太 副主任技術研究調査官（実施項目（１）d. 関係）</p> <p>森田 彰伸 副主任技術研究調査官</p> <p>○木嶋 達也 副主任技術研究調査官（実施項目（１）、（２）関係）</p> <p>入江 正明 技術研究調査官</p> <p>室田 健人 技術研究調査官</p> <p>竹野 直人 技術参与</p> <p>【委託研究先】</p> <p>実施項目（１）a, b 未定</p> <p>実施項目（２） 未定</p> <p>【共同研究先】</p> <p>実施項目（１）b 未定</p> <p>実施項目（１）c 未定</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |  |  |              |  |  |
| 9. 備考   | <p style="text-align: center;">文 献</p> <p>(1) 鏡健太、木嶋達也、青木広臣、志間正和、大村哲臣、直井佑希子、「地層処分の概要調査地区等の選定時に安全確保上少なくとも考慮されるべき事項の背景及び根拠」、NRA 技術ノート NTEN-2023-3001、令和 5 年「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則」、昭和五十三年通商産業省令第七十七号</p> <p>(2) 藤原治、柳田誠、三箇智二、守屋俊文、「地層処分からみた日本列島の隆起・侵食」、原子力バックエンド研究、Vol.11、No. 2、pp.113-124、平成 17 年</p> <p>(3) 廣田明成、伊藤一充、「中深度処分における隆起と侵食の考え方」、原子力バックエンド研究、Vol. 29、No. 2、pp.119-129、令和 4 年</p> <p>(4) 資源エネルギー庁、「沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会とりまとめ」、平成 28 年</p> <p>(5) 原子力発電環境整備機構、「包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－本編、2021 年 2 月</p> <p>(6) Tatsuya Kijima, Tsuyoshi Sasagawa, Takuma Sawaguchi, Norikazu Yamada, A model for estimating the hydraulic conductivity of bentonite under various density conditions, Hydrology Research, 53(10), 1256, 2022.</p> <p>(7) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構（2005）, TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－</p> <p>(8) Posiva SKB (2017), Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository. Conclusions and recommendations from a joint SKB and Posiva working group, Posiva SKB Report 01, Posiva Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB.</p> |  |  |  |              |  |  |

研究計画（案）

|                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |       |                                                        |
|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------------------------------------------------------|
| 1. プロジェクト<br>(始期：R7年度<br>終期：R10年度) | 18. 放射性廃棄物の処分前管理及び施設の廃止措置に係る放射能濃度評価等の信頼性確保に関する研究                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 担当部署  | 技術基盤グループ<br>放射線・廃棄物研究部門                                |
|                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 担当責任者 | 酒井 宏隆 上席技術研究調査官                                        |
| 2. カテゴリー・研究分野                      | 【核燃料サイクル・廃棄物】 K) 廃止措置・クリアランス                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 主担当者  | 酒井 宏隆 上席技術研究調査官<br>高橋 宏明 主任技術研究調査官<br>佐藤 由子 副主任技術研究調査官 |
| 3. 背景                              | <p>放射性廃棄物の処分前管理及び施設の廃止措置に係る分野における事業（変更）許可申請及び後段規制においては、クリアランスの確認、廃棄物等の安全性の確認及び廃止措置の終了確認を適切に行う上で必要となる科学的・技術的知見を取得し、蓄積する必要がある。</p> <p>（１）クリアランスの確認</p> <p>放射能濃度確認規則※１により、従来規定されていたクリアランス対象物（金属くず、コンクリートの破片及びガラスくず）以外の対象物（以下「新規クリアランス対象物」という。）にクリアランス制度が適用されることになった。また、放射能濃度確認審査基準※２により、測定における不確かさを考慮して十分な保守性を持って規制基準に適合した定量的な評価を行うことが求められている。並行して、こうした測定の不確かさに関する審査基準策定段階で抽出された日本からの意見が反映された国際原子力機関（以下「IAEA」という。）のクリアランスに関する Safety Guide が No. GSG-18（文献(1)）として令和５年１１月に発行され、国際的にも測定の不確かさの取扱が明確化された。さらに、事業者において評価単位全体の放射線測定ではなくサンプリングによる測定や、溶融後にクリアランス確認を行う集中処理施設設置などの動きも見られる。具体的なクリアランス確認で用いられる放射能濃度の測定方法では、過小評価にならないような条件設定（文献(2),(3)）の上で、適切に放射能濃度を定量評価する必要がある一方で、放射能濃度の測定方法はクリアランス対象物によって異なる。</p> <p>以上のようなクリアランス対象物の多様化に対応して、同じく多様化する放射能濃度の測定及び評価の手法が適切なものであることを定量的に判断することが必要とされている。</p> <p>こうした課題に対して、これまでに、放射能濃度の測定において定量評価結果の信頼性を確保するための測定の不確かさの考慮に関する基礎検討（文献(4～10)）及び新規クリアランス対象物の測定方法の検討（文献(11～17)）を原子力規制庁では行ってきた。また、関連する内容について日本保健物理学会でも議論されている。（文献(18)）</p> <p>（２）廃棄体等の安全性確認</p> <p>第二種埋設規則※３の改正に伴い、放射性廃棄物の受け入れの基準（Waste Acceptance Criteria、以下「WAC」という。）を埋設事業者が保安規定に定めることになり、保安規定の審査及び廃棄物確認において廃棄体等の放射能濃度の評価方法及び評価値を確認する必要がある。事業者は、多様な廃棄体等及び放射能濃度評価方法の採用を検討しており、中深度処分、ピット処分及びトレンチ処分を対象に、これまでピット処分で実績のある 200 L ドラム缶の廃棄体とは異なる新たな形状の廃棄体及びコンクリート等廃棄物の発生が見込まれている。また、放射能濃度評価方法については、放射線測定に限らない放射化計算による方法が想定されているほか、ウラン廃棄物及び研究施設等廃棄物においても新たな放射能濃度評価方法の議論が進められている。</p> <p>こうした課題に対して、廃棄体等の放射能濃度を外部からの放射線測定により評価する場合について、その評価精度は対象物の性状（材質、形状、充填状態、核種組成等）に依存することがこれまでの研究から明らかとなっている（文献(19)）。また、中深度処分対象廃棄体については、日本原子力学会標準「中深度処分対象廃棄物の放射能濃度決定方法の基本手順:2019」（文献(20)）の一部について技術評価を実施した。（文献(21)）</p> <p>（３）廃止措置におけるエンドステート</p> <p>原子炉又は原子力事業を廃止するときは、原子炉等規制法※４に基づき、あらかじめ原子力規制委員会の認可を受けた廃止措置計画に従って廃止措置を実施し、廃止措置が終了したときは、その結果が「原子力規制委員会規則で定める基準」に適合していることについて、原子力規制委員会の確認を受けなければならない。原子力規制委員会は、令和４年に「廃止措置の終了確認における敷地土壌等の状況の判定に関するガイド」（令和４年３月３０日、原子力規制委員会。以下「終了確認ガイド」という。）を制定した。同ガイドでは、「汚染が地下に浸透し拡散するなどにより、放射性物質濃度が極めて低い状態にすることが困難な場合」の廃止措置対象施設は対象外としている。今後、そのような状況の下で廃止措置の終了確認が行われることが見込まれた段階で、トレンチ処分の廃棄物埋設地に対する「保全に関する措置を必要としない状態」に関する基準を参考とするなど、状況に応じた適切な基準について改めて検討を行うこととなる。</p> <p>海外では、上記と同様な状況にある原子力施設のエンドステートに関する議論が進んでおり、IAEA の国際プロジェクト（International Project on Completion of Decommissioning: COMDEC）においても中心的テーマとして議論されている。</p> <p>（４）放射性核種含有廃棄物等の特性評価</p> <p>上記（１）～（３）では、いずれも放射能濃度等の測定結果の信頼性の確保を測定の不確かさの評価を伴った定量的な評価により適切に行う必要がある。これまでの研究において、放射線計測では定量が難しい長半減期放射性核種の分析等に関する研究を行ってきた（文献(22)～(29)）が、こうした一般的な化学分析分野の技術、手法を組み合わせる分析処理においては、放射線計測分野に比べて測定の不確かさの規格・標準化が行われていないため、評価結果の妥当性確認をどのように行うかが課題となっている。</p> <p>※１：工場等において用いた資材その他の物に含まれる放射性物質の放射能濃度が放射線による障害の防止のための措置を必要と</p> |       |                                                        |

|           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|           | <p>しないものであることの確認等に関する規則（令和 2 年原子力規制委員会規則第 16 号）</p> <p>※ 2：放射能濃度についての確認を受けようとする物に含まれる放射性物質の放射能濃度の測定及び評価の方法に係る審査基準（原規発第 1909112 号（令和元年 9 月 11 日原子力規制委員会決定））</p> <p>※ 3：核燃料物質又は核燃料物質によつて汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則（昭和 63 年総理府令第 1 号）</p> <p>※ 4：核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和 32 年法律第 166 号）</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 4. 目的     | <p>（１）クリアランスの確認</p> <p>今後クリアランス対象物の多様化が予想されるため、クリアランス制度を適用する際の放射能濃度の評価手法の信頼性が確保されていることを不確かさの考慮の下で判断する手段を整備する。</p> <p>（２）廃棄体等の安全性確認</p> <p>今後新たな性状の廃棄体等の発生が予想されるため、廃棄物確認及び WAC に係る保安規定（変更）認可申請の審査における放射能濃度評価に係る科学的・技術的知見を整理する。</p> <p>（３）廃止措置におけるエンドステートに関する調査</p> <p>原子力施設のエンドステートに関する海外での事例及び IAEA での議論を踏まえた国際状況を調査し、技術的な課題を抽出するとともに、エンドステートを達成するために必要な放射能特性評価方法に係る技術的・科学的知見を整理する。</p> <p>（４）放射性核種含有廃棄物等の特性評価方法に関する研究</p> <p>性状が様々な廃棄物等の試料に含まれる長半減期放射性核種等の分析について、複雑な多段階処理等を考慮しても、十分な信頼性が確保された結果であることを確認するために、測定の不確かさが評価できるよう必要な知見を広く集め、評価手法を構築するとともに、最新分析技術を活用して放射性核種の化学形態、溶出速度解度等の定量評価に関する実験データを取得する。</p>                                                                                                                                                                        |
| 5. 知見の活用先 | <p>令和 10 年度末までに得られた成果については知見として取りまとめて以下のように活用される。</p> <p>（１）クリアランスの確認</p> <p>新規クリアランス対象物にクリアランス制度を適用する場合のクリアランスの確認に活用する。</p> <p>対象となる規制活動等：放射能濃度確認規則第 2 条（放射能濃度の基準）に基づく確認並びに第 6 条（測定及び評価の方法の認可の基準）及び放射能濃度確認審査基準に基づく審査</p> <p>（２）廃棄体等の安全性確認</p> <p>事業（変更）許可申請の審査及び WAC に係る保安規定（変更）認可申請の審査に関する技術基盤並びに原子力規制検査のうち廃棄物確認に関する技術基盤に活用する。</p> <p>対象となる規制活動等：第二種埋設規則第 8 条（放射性廃棄物等の技術上の基準）に基づく確認並びに第 20 条第 1 項第 14 号（保安規定）及び第二種廃棄物埋設事業に係る廃棄物埋設施設における保安規定の審査基準（原管廃発第 1311278 号（平成 25 年 11 月 27 日原子力規制委員会決定））に基づく審査</p> <p>（３）廃止措置におけるエンドステートに関する調査</p> <p>廃止措置の終了に係る審査に活用する。</p> <p>対象となる規制活動等：実用発電用原子炉の場合、原子炉等規制法第 43 条の 3 の 34 第 3 項において準用する同法第 12 条の 6 第 8 項及び終了確認ガイドに基づく審査</p> <p>（４）放射性核種含有廃棄物等の特性評価方法に関する研究</p> <p>クリアランスの確認、廃棄物等の安全性の確認及び廃止措置活動における審査に技術的に資するために必要な技術基盤の構築・維持に活用する。</p> |
| 6. 安全研究概要 | <p>本プロジェクトの研究は、「原子力規制委員会における安全研究の基本方針」（令和元年 5 月 29 日原子力規制委員会決定）における安全研究の目的のうち以下の分類に基づき実施する。</p> <p>②審査等の際の判断に必要な知見の収集・整備（以下「分類②」という。）</p> <p>④技術基盤の構築・維持（以下「分類④」という。）</p> <p>（１）クリアランスの確認【分類②】</p> <p>クリアランス対象物を放射線測定する際、組成・形状等が従来と異なる場合、熔融処理を行った後に測定を行う場合及び主要測定核種として従来の Co-60、Cs-137 以外の核種が選定された場合においても、放射能濃度の値を不確かさとともに信頼性を確保して定量的に導出する方法について、実験的手法も交えて知見を蓄積する。あわせて、国内外の低濃度放射能測定技術及び計量・校正制度の運用・開発動向及び国際的なクリアランスに関する規制動向に関連した技術の調査を行い、事業者が将来にわたって採用する可能性のある放射線測定・評価手段における定量評価の妥当性を合理的に確認するための手段の開発、バックデータの整備を進める。</p> <p>（２）廃棄体等の安全性確認【分類②】</p> <p>これまでに処分実績がない新たな性状の廃棄体及び廃棄物について、想定される性状を模擬した解析モデルを作成し、解析計算</p>                                                                                                                                                                  |

|                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                    | <p>にて放射能濃度評価上の課題とその評価精度を整理する。評価精度については、必要に応じて実証試験による検証を実施する。また、主に中深度処分における放射能濃度の評価を対象として、令和３年度から令和５年度にかけて技術評価を行った日本原子力学会標準「中深度処分対象廃棄物の放射能濃度決定方法」の理論計算法と同様に放射化計算を活用する場合の具体的課題を整理する。</p> <p>さらに、ウラン廃棄物及び研究施設等廃棄物を含む廃棄体等に関しては、<b>測定上留意すべき事項が発生しうるウランを含む廃棄物の崩壊系列を考慮した放射能濃度評価方法等ウランの崩壊系列を利用する等、廃棄物発生源の特徴を考慮した今後想定される新たな放射能濃度評価上の課題を調査する。</b>あわせて、廃棄体等への活用が検討されうる種々の固化材料及び固化方法について、その特性の調査を行う。</p> <p>（３）廃止措置におけるエンドステートに関する調査【分類②】</p> <p>原子力施設のエンドステートに関する海外での事例及び IAEA での議論を踏まえた国際状況を調査し、技術的な課題を抽出するとともに、エンドステートを達成するために必要な放射能特性評価方法に係る技術的・科学的知見を整理する。また、調査によって得られた放射能特性評価方法に係る技術的課題については、具体的な研究課題を設定する。</p> <p>（４）放射性核種含有廃棄物等の特性評価方法に関する研究【分類④】</p> <p>廃棄物等の被ばく線量評価上重要で、複雑な性状の試料に含まれ、放射線計測では定量が難しい長半減期核種等（<math>\alpha</math>核種、放射化核種等）を対象にそれらの原子数を計測する分析方法に係る最新の研究動向の調査及び実験的研究を実施して、一連の分析プロセスにおける科学的・技術的知見を蓄積する。上記評価手法の一連の分析プロセスにおいて、試料の採取、試料からの対象核種の溶解等の前処理、濃縮、化学分離、質量分析等の各ステップにおける測定の不確かさが評価できるよう、必要な科学的・技術的知見を取得する。分析においては、<b>分析プロセスの各ステップにおける性状が様々な廃棄物等の変質、核種溶出等の現象を対象とし、</b>各元素（核種）の化学形態、化学平衡論及び速度論的現象を考慮し、これらに依存するメカニズムを理解することで、多様な試料に対する分析の信頼性の更なる向上を目指すとともに、放射性核種の化学形態、<b>溶出速度解度</b>等の定量評価に関するデータ取得方法を検討する。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <p>７．成果目標と実施計画</p> | <p>（１）クリアランスの確認【分類②】</p> <p>今後予想されるクリアランス対象物の多様化に向けて、クリアランス制度を適用する際の放射能濃度の評価手法の信頼性が確保されていることを不確かさの考慮の下で判断する手段を整備することを目標とする。</p> <p>【Ｒ７年度の実施内容】</p> <p>a. クリアランス対象物の性状に応じた放射能濃度評価の信頼性確保のための手段の検討・構築</p> <p>クリアランス対象物を放射線測定する際、組成・形状が従来と異なる場合のうち、（１）粉碎処理等を実施しない大型のコンクリート遮蔽材の場合、（２）元素の異なる物質の混合物の場合、（３）熔融し均一化した金属の場合の３通りについて放射能濃度の値を信頼性を確保して評価し、基準値と比較する方法について、文献調査を進めると共に実験及び解析から知見を蓄積するための環境を整備する。主要測定核種として従来の Co-60, Cs-137 以外の核種が選定された場合のうち、銅の放射化による場合及び樹脂類に含まれる塩素の放射化による場合について、放射化等による生成量の評価及びその濃度の確認方法について基礎的なデータの蓄積を行うとともに具体的な評価に必要な環境の立案を行う。これらの環境整備の中で試測定等を通じて得られたデータについては学会発表等を通じて成果の公表を行う。</p> <p>b. 放射能濃度測定の信頼性確認のための測定・評価手段の検討・構築</p> <p>クリアランス確認のための測定・評価も含めた低濃度放射能測定の信頼性を確認するために必要な測定対象の抽出を行い、その中から代表的な測定対象についての測定体系の立案並びに必要な試験及び解析環境の整備を進める。また、計量・校正制度の運用・開発動向の国内外の調査を行う。</p> <p>c. 国際的な動向調査</p> <p>クリアランスに関する国際的な動向を調査する。その中で、クリアランスに関する IAEA のガイドである GSG-18(1) の中で明確化された条件付きクリアランスについて、その濃度導出における代表的なシナリオ策定についての調査を行う。</p> <p>【Ｒ８年度の実施内容】</p> <p>a. クリアランス対象物の性状に応じた放射能濃度評価の信頼性確保のための手段の検討・構築</p> <p>クリアランス対象物を放射線測定する際、組成・形状が従来と異なる場合のうち、（１）粉碎処理等を実施しない大型のコンクリート遮蔽材の場合、（２）元素の異なる物質の混合物の場合、（３）熔融し均一化した金属の場合の３通りについて放射能濃度の値を信頼性を確保して評価し、基準値と比較する方法について、令和７年度に引き続き文献調査を進めるとともに実験及び解析から知見を蓄積するための環境の整備を行う。主要測定核種として従来の Co-60, Cs-137 以外の核種が選定された場合のうち、銅の放射化による影響及び樹脂類に含まれる塩素の放射化による影響について、放射化等による生成量の評価及びその濃度の確認方法について基礎的なデータの蓄積を行うとともに具体的な評価に必要な環境の整備を行う。これらの環境整備の中で、試測定等を通じて得られたデータについては論文として取りまとめて成果の公表を行う。</p> <p>b. 放射能濃度測定の信頼性確認のための測定・評価手段の検討・構築</p> <p>クリアランス確認のための測定・評価も含めた低濃度放射能測定の信頼性を確認するために必要な測定対象の抽出を行い、その中から代表的な測定対象についての測定体系の立案並びに必要な試験及び解析環境の整備を行う。これまでの検討から実証試験が必要と判断された測定対象についての測定体系の構築を行う。また、計量・校正制度の運用・開発動向の国内外の調査を行う。</p> <p>c. 国際的な動向調査</p> |

クリアランスに関する IAEA のガイドである GSG-18 (27) の中で明確化された条件付きクリアランスについて、令和 7 年度に行った濃度導出における代表的なシナリオ策定結果に沿った濃度を試算すると共に、他に影響の大きなシナリオの抽出を行う。

【R 9 年度の実施内容】

a. クリアランス対象物の性状に応じた放射能濃度評価の信頼性確保のための手段の検討・構築

クリアランス対象物を放射線測定する際、組成・形状が従来と異なる場合のうち、(1) 粉碎処理等を実施しない大型のコンクリート遮蔽材の場合、(2) 元素の異なる物質の混合物の場合、(3) 溶融し均一化した金属の場合の 3 通りについて放射能濃度の値を信頼性を確保して評価し、基準値と比較する方法について、令和 8 年度に引き続き文献調査を進めるとともに構築した試験環境を用いた試験を行い、データを取得する。また、データの取得に伴い追加で必要なことが判明した試験環境の整備を行う。主要測定核種として従来の Co-60, Cs-137 以外の核種が選定された場合のうち、銅の放射化による影響及び樹脂類に含まれる塩素の放射化による影響について、放射化等による生成量の評価及びその濃度の確認方法についてデータの蓄積を行うとともに放射化断面積の推定及びそれに基づく対象物に生成する放射能の評価を行い、その測定手段に関する検討を行う。これらの試験等を通じて得られたデータについては学会発表等を通じて成果の公表を行う。

b. 放射能濃度測定の信頼性確認のための測定・評価手段の検討・構築

クリアランス確認のための測定・評価も含めた低濃度放射能測定の信頼性を確認するために必要な測定対象の抽出を行い、その中から代表的な測定対象について構築した測定体系による試験を行う。また、計量・校正制度の運用・開発動向の国内外の調査を行う。試験で得られたデータについては学会発表等を通じて成果の公表を行う。

c. 国際的な動向調査

クリアランスに関する IAEA のガイドである GSG-18 (27) の中で明確化された条件付きクリアランスについて、令和 8 年度に行った濃度導出における複数のシナリオ策定結果に沿った濃度を試算する。過年度の実施内容も含め、特にシナリオ選定の点を中心に学会発表等を通じた成果の公表を行う。

【R 1 0 年度の実施内容】

a. クリアランス対象物の性状に応じた放射能濃度評価の信頼性確保のための手段の検討・構築

クリアランス対象物を放射線測定する際、組成・形状が従来と異なる場合のうち、(1) 粉碎処理等を実施しない大型のコンクリート遮蔽材の場合、(2) 元素の異なる物質の混合物の場合、(3) 溶融し均一化した金属の場合の 3 通りについて放射能濃度の値を信頼性を確保して評価し、基準値と比較する方法について、これまでの文献調査結果及び試験結果を取りまとめるとともに、必要な追加試験を実施し、知見として取りまとめる。主要測定核種として従来の Co-60, Cs-137 以外の核種が選定された場合のうち、銅の放射化による影響及び樹脂類に含まれる塩素の放射化による影響について、放射化等による生成量の推定及びその濃度の確認方法についての結果から、濃度の確認方法について取りまとめる。これらの取りまとめた結果については論文として取りまとめて成果の公表を行う。

b. 放射能濃度測定の信頼性確認のための測定・評価手段の検討・構築

クリアランス確認のための測定・評価も含めた低濃度放射能測定の信頼性を確認するためにこれまでに抽出した測定対象の試験結果を取りまとめ、その過程で必要な追加試験を実施する。また、計量・校正制度の運用・開発動向の国内外の調査の結果の取りまとめを行う。試験で得られたデータについては論文として取りまとめて成果の公表を行う。

c. 国際的な動向調査

クリアランスに関する IAEA のガイドである GSG-18 (27) の中で明確化された条件付きクリアランスについて、過年度のシナリオ策定、濃度導出の結果を取りまとめ、既に条件付きクリアランスが運用されている国及び国際学会や IAEA のシンポジウム等で示された値との比較・評価を行い、条件付きクリアランスの考え方を取りまとめる。過年度の実施内容も含め、論文として取りまとめ成果の公表を行う。

(2) 廃棄体等の安全性確認【分類②】

今後発生が予想される新たな性状の廃棄体等に対応するため、廃棄物確認及び WAC に係る保安規定（変更）認可申請の審査における放射能濃度評価に係る科学的・技術的知見を整理することを目標とする。

【R 7 年度の実施内容】

- ・今後使用が想定される新たな形状の容器及び廃棄物について、想定される廃棄体等を模擬した解析モデルを作成し、解析計算にて放射能濃度評価上の課題を抽出する。得られた成果については、学会発表等を通じた成果の公表を行う。
- ・中深度処分対象廃棄物を主な対象として、放射化計算による放射能濃度評価に係る具体的課題を調査する。また、ウラン廃棄物及び研究施設等廃棄物に含まれる核種のうち、測定評価上留意すべき事項が発生しうるウラン等について、放射能濃度評価上の課題を調査する。
- ・廃棄体等への活用が想定される種々の固型化材料及び固型化方法について、その特性の調査を行う。

【R 8 年度の実施内容】

- ・廃棄体等を模擬した解析モデルを用いて引き続き解析計算を実施し、放射能濃度評価上の課題を抽出する。抽出した課題それぞれについて、解析計算でのパラメータサーベイを実施し、必要に応じて実証試験に向けた試験計画を策定する。解析計算で得られた成果については、学会発表等を通じた成果の公表を行う。
- ・引き続き放射化計算による放射能濃度評価に係る具体的課題を調査する。ウラン等の放射能濃度評価上の課題についても、引き

|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>続き調査を実施する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・引き続き、廃棄体等への活用が想定される種々の固型化材料及び固型化方法について、その特性及び適用事例の調査を行う。</li> </ul> <p>【Ｒ９年度の実施内容】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・抽出した課題について、引き続き解析計算でのパラメータサーベイを実施し、その評価精度を求める。必要に応じて実証試験を行う。得られた成果については、学会発表等を通じた成果の公表を行う。</li> <li>・放射化計算による放射能濃度評価に係る具体的課題について、課題の影響度を整理する。また、ウラン等の放射能濃度評価上の課題について、調査結果を踏まえた課題の整理を行う。</li> <li>・廃棄体等への活用が想定される種々の固型化材料及び固型化方法について、調査結果を踏まえた課題の整理を行う。</li> </ul> <p>【Ｒ１０年度の実施内容】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・過年度までに実施した解析計算の結果及び必要に応じて実施した実証試験結果から、放射能濃度評価に影響を及ぼす課題とその評価精度を処分形態ごとに整理し結果を取りまとめる。得られた成果については、論文等による成果の公表を行う。</li> <li>・廃棄体等の放射能濃度評価において、放射化計算を活用する場合の課題の影響度を整理し取りまとめる。また、ウラン等の放射能濃度評価上の課題についても、その影響度を整理し取りまとめる。</li> <li>・廃棄体等への活用が想定される種々の固型化材料及び固型化方法について、それぞれの課題と廃棄体等への適用時の留意点を取りまとめる。</li> </ul> <p>（３）廃止措置におけるエンドステートに関する調査【分類②】</p> <p>原子力施設のエンドステートに関する海外での事例及び IAEA での議論を踏まえた国際状況を調査し、技術的な課題を抽出するとともに、エンドステートを達成するために必要な放射能特性評価方法に係る技術的・科学的知見を整理することを目標とする。</p> <p>【Ｒ７年度の実施内容】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・諸外国における廃止措置におけるエンドステートに関する最新動向について調査する。</li> </ul> <p>【Ｒ８年度の実施内容】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・Ｒ３年度に引き続き、諸外国におけるエンドステートに関する最新動向について調査するとともに、放射能特性評価方法に関する技術的事項の調査を行う。その結果を受け、今後の調査項目について取りまとめる。</li> </ul> <p>【Ｒ９年度の実施内容】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・エンドステートを達成するために必要な事項を取りまとめるとともに、Ｒ８年度に抽出された放射能特性評価に関する技術的課題に対する具体的な研究課題を設定するための文献等の調査を実施する。</li> </ul> <p>【Ｒ１０年度の実施内容】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・廃止措置におけるエンドステートを達成するための海外事例及び国際機関での議論を取りまとめるとともに、放射能特性評価に関する技術的課題に対する具体的な研究課題を設定し、必要に応じて次期研究計画に反映する。</li> </ul> <p>（４）放射性核種含有廃棄物等の特性評価方法に関する研究【分類④】</p> <p>性状が様々な廃棄物等の試料に含まれる長半減期放射性核種等の分析について、複雑な多段階処理等を考慮しても、十分な信頼性が確保された結果であることを確認するために、測定の不確かさが評価できるよう必要な知見を広く集め、評価手法を構築するとともに、最新分析技術を活用して放射性核種の化学形態、溶出速度解度等の定量評価に関する実験データを取得することを目標とする。</p> <p>【Ｒ７年度の実施内容】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・無機化学分析等、先行する分野における測定の不確かさ評価手法を調査し、知見及び評価技術を蓄積した結果を用い、長半減期放射性核種測定に適用できる測定の不確かさ評価手法を整理する。また、長半減期放射性核種測定に関わる測定の不確かさ評価の海外事例を調査し、最新動向を把握する。</li> <li>・性状の異なる放射性核種含有廃棄物に含まれる放射性核種の化学形態、化学平衡論及び速度論的現象を理解するための分析手法を調査し、最新動向を把握するとともに、研究対象とする実験系を設定する。</li> <li>・得られた成果については、学会発表を通じた成果の公表を行う。</li> </ul> <p>【Ｒ８年度の実施内容】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・長半減期放射性核種測定に適用できる測定の不確かさ評価手法を整理した結果を実測定に試行的に適用し、手法の妥当性を評価する。</li> <li>・性状の異なる試料に含有する放射性核種の化学形態を分析するための実験的検討を試行的に行い、その定量評価に関するデータ取得方法を検討する。</li> <li>・得られた成果については、学会発表及び論文投稿を通じた成果の公表を行う。</li> </ul> <p>【Ｒ９年度の実施内容】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・長半減期放射性核種測定に試行的に適用した測定の不確かさ評価手法に必要な改善を加え、複数の核種に適用し、そのフィードバックにより実用化を図り、その達成状況を公表する。これまでに得られた成果を踏まえた新たな研究課題を設定し３年間の共同研究を企画する。</li> <li>・性状の異なる放射性核種含有廃棄物に含まれる放射性核種の化学形態、化学平衡論及び速度論的現象を理解するための実験的検</li> </ul> |
|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                            |                                                                 |                                                                                       |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|         | <p>討を実施し、その達成状況を公表する。これまでに得られた成果を踏まえた新たな研究課題を設定し、３年間の共同研究を企画する。</p> <p>・得られた成果については、学会発表及び論文投稿を通じた成果の公表を行う。</p> <p>【Ｒ１０年度の実施内容】</p> <p>・長半減期放射性核種測定に関わる測定の不確かさ評価及び放射性核種含有廃棄物等の特性評価方法について、前年度までに計画した共同研究計画に基づき共同研究を開始する。</p> <p>・得られた成果については、学会発表及び論文投稿を通じた成果の公表を行う。</p>        |                                                            |                                                                 |                                                                                       |
|         | <p style="text-align: center;">行程表</p>                                                                                                                                                                                                                                         |                                                            |                                                                 |                                                                                       |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                | R 7 年度                                                     | R 8 年度                                                          | R 9 年度                                                                                |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                            |                                                                 | R 1 0 年度                                                                              |
|         | ( 1 ) クリアランスの確認                                                                                                                                                                                                                                                                | 新規クリアランス対象物のクリアランス測定法の認可申請の審査支援（得られた知見を適宜反映）               |                                                                 |                                                                                       |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                | a. クリアランス対象物の性状に応じた放射能濃度評価の信頼性確保のための手段の検討・構築<br>▽学会発表      | ▽論文投稿                                                           | ▽論文投稿                                                                                 |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                | ・文献調査<br>・実験・解析環境の整備<br>・基礎的なデータの蓄積                        | ・文献調査<br>・実験・解析環境の整備<br>・基礎的なデータの蓄積                             | ・実験・解析結果の取りまとめ、追加実験・解析<br>・放射化物の濃度確認方法とりまとめ                                           |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                | b. 放射能濃度測定の信頼性確認のための測定・評価手段の検討・構築<br>▽学会発表                 | ▽論文投稿                                                           | ▽論文投稿                                                                                 |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                | ・測定体系の立案並びに必要な試験及び解析環境の整備<br>・計量・校正制度の運用・開発動向の国内外調査        | ・測定体系の立案並びに必要な試験及び解析環境の整備<br>・計量・校正制度の運用・開発動向の国内外調査             | ・実験・解析結果の取りまとめ、追加実験・解析<br>・調査結果の取りまとめ                                                 |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                | c. クリアランスに関する国際動向調査                                        |                                                                 |                                                                                       |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                | ・条件付きクリアランスシナリオ策定方法調査<br>・国際動向全般調査                         | ・条件付きクリアランス代表シナリオに対する濃度試算<br>・国際動向全般調査                          | ・条件付きクリアランス複数シナリオに対する濃度試算<br>・国際動向全般調査                                                |
|         | ( 2 ) 廃棄体等の安全性確認                                                                                                                                                                                                                                                               | 保安規定（変更）認可申請の審査並びに廃棄物確認の技術基盤（得られた知見を適宜反映）                  |                                                                 |                                                                                       |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                | 学会発表▽<br>解析モデルの作成<br>解析計算の実施                               | ▽学会発表<br>放射能濃度評価上の課題抽出                                          | ▽論文投稿<br>評価精度の導出<br>評価精度の導出<br>放射能濃度評価に影響を及ぼす課題とその評価精度を処分形態ごとに整理                      |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                | 放射化計算による放射能濃度評価の具体的課題の調査<br>ウラン廃棄物、研究施設等廃棄物の放射能濃度評価上の課題の調査 | 放射化計算による放射能濃度評価の具体的課題の調査<br>ウラン廃棄物、研究施設等廃棄物の放射能濃度評価上の課題の調査      | 放射化計算による課題の影響度を整理<br>ウラン廃棄物、研究施設等廃棄物の放射能濃度評価上の課題の整理                                   |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                | 種々の固型化材料及び固型化方法の特性調査                                       | 種々の固型化材料、固型化方法の特性及び適用事例の調査                                      | 種々の固型化材料及び固型化方法の調査結果を踏まえた課題の整理                                                        |
|         | ( 3 ) 廃止措置におけるエンドステートに関する調査                                                                                                                                                                                                                                                    | ・諸外国における廃止措置におけるエンドステートに関する最新動向調査                          | ・廃止措置におけるエンドステートに関する放射能特性評価方法に関する技術的事項の調査<br>▽今後の調査項目の取りまとめ     | ・放射能特性評価に関する技術的事項に対する具体的な研究課題を設定するための文献等の調査                                           |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                            |                                                                 | ・エンドステートを達成するために必要な事項を取りまとめ<br>・放射能特性評価に関する技術的事項に対する具体的な研究課題を設定<br>↓<br>次期研究計画に反映     |
|         | ( 4 ) 放射性核種含有廃棄物等の特性評価方法に関する研究                                                                                                                                                                                                                                                 | ▽学会発表<br>・実験装置導入・整備<br>・測定の不確かさ評価手法及び最新の分析方法の調査            | ▽学会発表▽論文投稿<br>・実験装置導入・整備<br>・測定の不確かさ評価手法検討<br>・放射性核種の化学形態分析方法検討 | ▽学会発表▽論文投稿<br>・実験装置導入・整備<br>・測定の不確かさ評価手法の改善<br>・放射性核種の化学形態、化学平衡論及び速度論的現象を理解するための実験的検討 |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                            |                                                                 | ・試験検討結果取りまとめ<br>↓<br>クリアランスの確認、廃棄物等の安全性の確認並びに廃止措置活動における審査に必要な技術基盤                     |
| 8. 実施体制 | <p>【放射線・廃棄物研究部門における実施者（実施項目ごとに主担当者には○を記載）】</p> <p>○ 酒井 宏隆 上席技術研究調査官（実施項目（１）関係）</p> <p>○ 高橋 宏明 主任技術研究調査官（実施項目（３）、（４）関係）</p> <p>森泉 純 主任技術研究調査官</p> <p>澁谷 憲悟 主任技術研究調査官</p> <p>柚木 彰 主任技術研究調査官</p> <p>○ 佐藤 由子 副主任技術研究調査官（実施項目（２）関係）</p> <p>吉居 大樹 副主任技術研究調査官</p> <p>井上 亮 技術研究調査官</p> |                                                            |                                                                 |                                                                                       |

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|       | <p>古田 美憲 技術研究調査官<br/> 深井 恵 技術研究調査官<br/> 伊豆本 幸恵 技術研究調査官<br/> 山本 康太 技術研究調査官<br/> 仲宗根 峻也 技術研究調査官<br/> 高久 侑己 技術研究調査官<br/> 川崎 智 技術参与</p> <p>【委託研究先】<br/>なし</p> <p>【共同研究先】<br/>未定</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 9. 備考 | <p style="text-align: center;">文 献</p> <p>(1) IAEA General Safety Guide No. GSG-18 Application of the Concept of Clearance, 令和5年11月<br/> (2) 吉居 大樹, 川崎 智, <math>\gamma</math>線によるウランクリアランス対象物中のウラン量測定方法に関する検討, 日本原子力学会 2016 年秋の大会 1A09, 平成 28 年 9 月<br/> (3) 仲神 元順, 三村 隆士, 川合 健太, 渡邊 将人, 浜岡 1・2 号機 解体撤去物を対象としたクリアランス測定評価手法の開発 (1) 全体概要と二次的汚染の測定評価, 日本原子力学会 2019 年秋の大会 2C20, 令和元年 9 月<br/> (4) 酒井 宏隆, 吉居 大樹, 川崎 智, 低濃度放射能測定における ISO 11929 に従った測定の不確かさと特性値の導出, RADIOISOTOPES 68(9) 659 - 673 令和元年 9 月<br/> (5) 酒井 宏隆, 吉居 大樹, 川崎 智, 放射能分布の逆問題解法でのモンテカルロ法による測定の不確かさ評価, Radiation Detectors and Their Uses, Proceedings of the 33rd Workshop on Radiation Detectors and Their Uses (2019-4) 24 - 32, 令和元年 12 月<br/> (6) Sakai, H., Yoshii, T., Takasaki, F., Kawarabayashi, J., Evaluation of the detection limit count for the energy spectrum of CZT detector, Applied Radiation and Isotopes, Vol. 169, 109569, 令和2年12月<br/> (7) Sakai, H., Yoshii, T., Kawasaki, S., Derivation of uncertainty propagation for clearance measurement, Applied Radiation and Isotopes, Vol. 170, 109630, 令和3年2月<br/> (8) Sakai, H., Uncertainty treatment for clearance measurement, News from ETSON and its members, 令和4年9月 (URL: <a href="https://www.etson.eu/node/296">https://www.etson.eu/node/296</a>, 最終アクセス日: 令和5年4月10日)<br/> (9) Sakai, H., Yoshii, T., Yunoki, A., Evaluation of the probability distribution of radioactivity estimated by inverse problem solution using Monte Carlo Method, Applied Radiation and Isotopes, Vol. 187, 110338, 令和4年6月<br/> (10) 柚木 彰, 仲宗根 峻也, 吉居 大樹, 酒井 宏隆, 放射能測定における特性限界 (ISO 11929) について, 第 84 回応用物理学会秋季学術講演会 令和5年9月<br/> (11) 吉居 大樹, 酒井 宏隆, 川崎 智, PCB 使用安定器内の残留放射能の測定に関する基礎的検討, 日本原子力学会 2019 年秋の大会 2N05, 令和元年 9 月<br/> (12) 吉居 大樹, 酒井 宏隆, 田川 裕晶, 河原林 順, 収納容器内に偏在したクリアランス対象物の放射能評価に関する検討, 日本原子力学会 2021 年春の年会 2D15, 令和3年3月<br/> (13) Yoshii, T., Sakai, H., Tagawa, H., Kawarabayashi, J., Study on the effects of heterogeneity of objects placed in storage containers on simple radioactivity evaluation, Annals of Nuclear Energy Vol.177 109313-109313 令和4年7月<br/> (14) Yoshii, T., Sakai, H., Kawarabayashi, J., Fundamental Study on the Radioactivity Evaluation of Control Panels, Proceedings of the 12th International Symposium on Release of Radioactive Materials from Regulatory Control, 令和4年10月<br/> (15) 仲宗根 峻也, 吉居 大樹, 澁谷 憲悟, 酒井 宏隆, 藤原 健, 河原林 順, 新規クリアランス対象物を想定した X 線 CT の画像再構成条件に関する検討, 日本原子力学会 2023 年春の年会 3D03, 令和5年3月<br/> (16) 澁谷 憲悟, 仲宗根 峻也, 吉居 大樹, 酒井 宏隆, 藤原 健, 河原林 順, CdTe 検出器を用いた X 線 CT 撮像におけるエネルギーしきい値を利用した金属元素の弁別, 第 60 回アイソトープ・放射線研究発表会 令和5年7月<br/> (17) Yoshii, T., Sakai, H., Kawarabayashi, J., Influence of conversion factors on the radioactivity evaluation of clearance objects consisting of several materials Applied Radiation and Isotopes Vol. 200 110984-110984 令和5年8月<br/> (18) 甲斐 倫明, 山田 崇裕, 橋本 周, 山本 正史, 山田 憲和, 酒井 宏隆, 荻野 晴之, 米原 英典, 服部 隆利, 山口 一郎, 佐々木 道也, 日本保健物理学会 2021 年度企画シンポジウム国際対応委員会セッション「IAEA DS499 (免除) 及び DS500 (クリアランス) の動向と論点—総合討論, 保健物理 56 巻 3 号, pp.156-159, 令和3年10月<br/> (19) 佐藤 由子, 古田 美憲, 川崎 智, 現実的な廃棄物封入モデルを用いた放射能濃度評価に係る検討, 第 58 回アイソトープ・放射線研究発表会 2406-06-01, 令和3年7月<br/> (20) 中深度処分対象廃棄物の放射能濃度決定方法の基本手順 (AESJ-SC-F015:2019), 令和元年 8 月<br/> (21) 日本原子力学会「中深度処分対象廃棄物の放射能濃度決定方法の基本手順 (AESJ-SC-F015:2019)」に関する技術評価書, 令和</p> |

6 年 2 月, 中深度処分対象廃棄物の放射能濃度決定方法に係る日本原子力学会標準の技術評価に関する検討チーム

- (22) Takahashi, H., Izumoto, Y., Matsuyama, T., Yoshii, H., "Trace determination of uranium preconcentrated using graphene oxide by total reflection X-ray fluorescence spectrometry", X-Ray Spectrometry, Vol.48, No.5, pp.366-374, 平成 31 年 3 月
- (23) Yamamoto, K., Asanuma, H., Takahashi, H., Hirata, T., "In situ isotopic analysis of uranium using a new data acquisition protocol for  $10^{13}$  ohm Faraday amplifiers", Journal of Analytical Atomic Spectrometry, Vol. 36, pp. 668-675, 令和 3 年 2 月
- (24) Takahashi, H., Park, K.C., Nomura, M., Shibahara, H., Miura, H., Ohishi, Y., Yuki, M., Tsukahara, T., "Influence of extraction process on Cs isotope ratios for Fukushima Daiichi nuclear power plant accident contaminated soil", Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 329, pp. 327-336, 令和 3 年 6 月
- (25) 深井 恵, 高橋宏明, ICP 質量分析計を用いたテクネチウム 99 の測定に係る検討, 日本分析化学会第 70 回年会 P3120, 令和 3 年 9 月
- (26) Yamashita, S., Yamamoto, K., Takahashi, H., Hirata, T., "Size and isotopic ratio measurements of individual nanoparticles by a continuous ion-monitoring method using Faraday detectors equipped on a multi-collector-ICP-mass spectrometer", Journal of Analytical Atomic Spectrometry, Vol. 37, pp. 178-184, 令和 4 年 1 月
- (27) Yoshii, H., Takamura, K., Uwatoko, T., Takahashi, H., Sakai, Y., "Screening of uranium contamination on waste surfaces using X-ray fluorescence analysis", Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, Vol. 189, 106368, 令和 4 年 3 月
- (28) Yoshii, H., Uwatoko, T., Takahashi, H., Sakai, Y., "Determination of trace levels of uranium in waste solutions by energy dispersive X-ray fluorescence following adsorption on graphene oxide", X-Ray Spectrometry, Vol. 51, Issue 5-6, pp. 454-463, 令和 4 年 8 月.
- (29) 栗原 かのこ, 堀越 洸, 中里 雅樹, 高橋 宏明, 平田 岳史, 飛行時間型 ICP-MS による微粒子の個別分析法の開発, 分析化学, 71 巻 4.5 号 p. 277-282, 令和 4 年 4 月