

# 安全研究に係る事後評価結果

令和 7 年 6 月 1 8 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、事後評価の対象となるプロジェクトは、以下に示す 8 件である。

事後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	津波評価手法及び既往津波の波源推定に関する研究	R3 - R6 (2021 - 2024)
2	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	R3 - R6 (2021 - 2024)
3	火災防護に係る影響評価に関する研究（フェーズ 2）	R3 - R6 (2021 - 2024)
4	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	R3 - R6 (2021 - 2024)
5	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 (2020 - 2024)
6	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	H26 - R6 (2014 - 2024)
7	廃棄物埋設における長期性能評価に関する研究	R3 - R6 (2021 - 2024)
8	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	R3 - R6 (2021 - 2024)

## 2. 事後評価結果

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後評価に係る自己評価（別添）は妥当である。

## 安全研究に係る事後評価結果

令和7年6月18日  
原子力規制庁

### 1 評価対象プロジェクト

今回の事後評価の対象は、令和6年度に終了した以下の安全研究プロジェクト8件である。

- 1 津波評価手法及び既往津波の波源推定に関する研究（以下「津波PJ」という。）
- 2 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（以下「フラジリティPJ」という。）
- 3 火災防護に係る影響評価に関する研究（フェーズ2）（以下「火災防護PJ」という。）
- 4 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（以下「核特性PJ」という。）
- 5 実機材料等を活用した経年劣化評価・検証に係る研究（以下「実機材PJ」という。）
- 6 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（以下「デブリPJ」という。）
- 7 廃棄物埋設における長期性能評価に関する研究（以下「廃棄物埋設PJ」という。）
- 8 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（以下「放射能濃度評価PJ」という。）

### 2 評価の方法

事後評価は、安全研究プロジェクトの実施期間に行った活動内容・成果を取りまとめた「安全研究成果報告」<sup>1</sup>に基づき、「①成果目標の達成状況」、「②成果の公表等の状況」、「③研究の進め方に関する技術的適切性」、「④研究マネジメント及び予算・契約管理の適切性」及び「⑤成果の規制への活用の状況・見通し」の各評価項目について評価を行い、その結果を基に総合評価を付した。

なお、「③研究の進め方に関する技術的適切性」の評価においては、評価に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）の意見を聴取し参考とした。

### 3 評価結果

評価結果の全体概要を別表に示す。各評価項目についての評価は以下のとおりである。

#### 3.1 項目別評価

(1) 「①成果目標の達成状況」について

8件の安全研究プロジェクトはいずれも、研究計画において設定した成果目標を達成したことから、「A」評価とした。

<sup>1</sup> 令和6年度（2024年度）に終了した安全研究プロジェクトの成果報告書として原子力規制委員会のホームページに掲載済（[https://www.nra.go.jp/activity/anzen/seika/anzen\\_houkoku.html](https://www.nra.go.jp/activity/anzen/seika/anzen_houkoku.html)）。

(2) 「②成果の公表等の状況」について

各プロジェクトの技術文書の公表数を表 1 に示す。フラジリティ PJ、核特性 PJ、実機材 PJ 及びデブリ PJ 並びに火災防護 PJ については、質の高い査読付の論文を複数公表したこと並びに規制の現場で活用されやすい NRA 技術報告及び NRA 技術ノートを公表したから「S」評価とした。

廃棄物埋設 PJ 及び放射能濃度評価 PJ については、査読付論文及び査読付プロシーディングスとして成果を公表したことから「A」評価とした。

一方、津波 PJ については、現時点では未公表であるものの、査読付論文 1 件を投稿済みであり、公表が見込まれる状況と判断できることから「B」評価とした。

表 1 各プロジェクトの成果の公表実績

公表した 技術文書	津波 PJ	フラジ リティ PJ	火災 防護 PJ	核特性 PJ	実機材 PJ	デブリ PJ	廃棄物 埋設 PJ	放射能 濃度評 価 PJ
NRA 技術報告	0	0	1	0	0	0	0	0
NRA 技術ノート	0	0	2	0	0	0	0	0
査読付論文	0(0)	7(4)	0(0)	6(0)	8(6)	20(13)	8(2)	5(0)
査読付プロシー ディングス	0(0)	14(5)	2(1)	2(0)	5(5)	34(29)	8(4)	0(0)

※括弧内は、委託先による公表数（内数）を示す。

(3) 「③研究の進め方に関する技術的適切性」について

8 件の安全研究プロジェクトはいずれも、外部専門家による評価意見及び専門技術者の意見を踏まえ、その研究手法、成果の取りまとめ方法等が技術的に適切であると判断し、「A」評価とした。

(4) 「④研究マネジメント及び予算・契約管理の適切性」について

8 件の安全研究プロジェクトはいずれも、委託先を含め適切な実施体制を構築し、規制動向等を基に柔軟に研究を進めたことから、適切な研究マネジメントが行われたと判断した。また、いずれも、適切な予算及び契約管理が行われたと判断した。

以上より、8 件の安全研究プロジェクトはいずれも、「A」評価とした。

(5) 「⑤成果の規制への活用の状況・見直し」について

火災防護 PJ、廃棄物埋設 PJ 及び放射能濃度評価 PJ については、得られた成果がそれぞれ、ガイド等の改正の要否の検討等、将来の埋設処分の許認可に係る審査等及びクリアランス認可に係る審査等に大きく貢献した又は今後大きく貢献することが見込まれていることから、「S」評価とした。

また、津波 PJ、フラジリティ PJ、核特性 PJ 及び実機材 PJ については、得られた成果がそれぞれ、審査ガイドの見直しの要否の判断等、地震による損傷の防

止に係る基準の見直しの要否の判断等、軽水炉の審査における炉心特性解析方法の妥当性判断及び長期施設管理計画等の審査等に貢献したことから、「A」評価とした。

一方、デブリ PJ については、将来的な燃料デブリの臨界防止に関する実施計画の審査において活用が期待されるが、現時点ではその見通しが立っていないことから規制活動への貢献は限定的であると判断し、「B」評価とした。

### 3.2 総合評価

火災防護 PJ については、適切に管理されたことに加え、NRA 技術報告及び NRA 技術ノートとして研究成果の公表を積極的に進めたこと、それらが規制に大きく貢献したことから、「S」評価とした。

廃棄物埋設 PJ 及び放射能濃度評価 PJ については、適切に管理され、成果を着実に公表したことに加え、得られた成果が今後の審査等に大きく貢献することが見込まれていることから、「A」評価とした。

フラジリティ PJ、核特性 PJ 及び実機材 PJ については、適切に管理され、当初計画どおりに規制に活用される成果が得られたことに加え、査読付論文等として研究成果の公表を積極的に進めたことから、「A」評価とした。

デブリ PJ については、適切に管理され、当初計画どおりに成果が得られたことに加え、査読付論文等として研究成果の公表を積極的に進めたが、成果の規制活動への貢献が限定的だったことから、「A」評価とした。

津波 PJ については、適切に管理され、当初計画どおりに規制に活用される成果が得られたが、成果の公表には至っていないことから、「B」評価とした。

## 4 評価結果の今後の活用

技術評価検討会における外部専門家及び専門技術者の意見を含めた評価結果については今後の安全研究の実施内容の検討等に活用していくとともに、論文、NRA 技術報告等として未公表の成果の公表を進める。なお、成果の公表状況及び成果の規制への活用状況については、追跡評価の中で確認していく。

別表 安全研究に係る事後評価結果の全体概要

評価項目		津波 PJ	フラジリティ PJ	火災防護 PJ	核特性 PJ	実機材 PJ	デブリ PJ	廃棄物埋設 PJ	放射能濃度評価 PJ
項目別評価※1	① 成果目標の達成状況	A (3)	A (3)	A (3)	A (3)	A (3)	A (3)	A (3)	A (3)
	② 成果の公表等の状況	B (2)	S (4)	S (4)	S (4)	S (4)	S (4)	A (3)	A (3)
	③ 研究の進め方に関する技術的適切性	A (3)	A (3)	A (3)	A (3)	A (3)	A (3)	A (3)	A (3)
	④ 研究マネジメント及び予算・契約管理の適切性	A (3)	A (3)	A (3)	A (3)	A (3)	A (3)	A (3)	A (3)
	⑤ 成果の規制への活用の状況・見通し	A (3)	A (3)	S (4)	A (3)	A (3)	B (2)	S (4)	S (4)
総合評価	総合点及び基礎評語※2	B (2.8)	A (3.2)	S (3.4)	A (3.2)	A (3.2)	A (3.0)	A (3.2)	A (3.2)
	評価結果 (全体評語)	B	A	S	A	A	A	A	A

※1 括弧内に項目別評価結果の評語 (SABC) を数字に換算 (Sを4点、Aを3点、Bを2点、Cを1点) したものを示す。

※2 総合評価の基礎評語は、項目別評価結果の平均点 (総合点) が3.3点以上をS、3.0点以上~3.3点未満をA、2.0点以上~3.0点未満をB、2.0点未満をCとする。

## 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な科学的・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・協力を積極的に取り組む。

### 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、見直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）

（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。

（中略）

### 3. 3 事後評価

#### （1）事後評価の目的

事後評価は、安全研究の成果を確認するとともに、成果目標の達成状況、成果の規制への活用状況・見通し等について評価することを目的とする。

#### （2）事後評価結果の活用

事後評価の結果は、目的及び成果目標の達成状況の確認、後継安全研究プロジェクトの企画や研究計画の見直し等（実施方針の策定、後継安全研究プロジェクトの中間評価、予算等の資源配分を行う際の意味決定等への反映を含む。）、今後の安全研究業務のマネジメントの改善、国民への説明等に活用する。なお、事後評価結果の活用にあたっては、評語のみを参照するのではなく、その根拠や評価コメント、当該安全研究プロジェクトの性質もふまえ、活用につなげていくことが重要である。

#### （3）事後評価の実施時期

事後評価は、安全研究プロジェクトの終了後、かつ、実施方針策定前に行う。

#### （4）事後評価の方法

事後評価は、安全研究プロジェクトの活動内容、成果等を取りまとめた資料<sup>1</sup>を用い

<sup>1</sup> 当該資料は、技術基盤グループ長が別に定める「報告書作成要領」（平成30年9月25日技術基盤グループ長決定）

て実施する。

事後評価では、評価項目ごとに別記3の基準及び別記4の方法により評価を行い、その結果を表示する評語（別記4及び別記5において「項目別評語」という。）を付す（3.3、別記3、別記4、別記5及び様式4において「項目別評価」という。）。

次に、別記5の方法により事後評価の結果を総括的に表示する評語（別記5において「全体評語」という。）を付す（3.3、別記5及び様式4において「総合評価」という。）。

項目別評価における評価項目は以下とする。ただし、安全研究プロジェクトの特性を踏まえて、必要に応じて評価項目を追加することを可能とする。

- ① 成果目標の達成状況
- ② 成果の公表等の状況
- ③ 研究の進め方に関する技術的適切性
- ④ 研究マネジメント及び予算・契約管理の適切性
- ⑤ 成果の規制への活用の状況・見通し

項目③の評価は、事前評価及び中間評価と同様に技術評価検討会<sup>2</sup>での議論を経た上で行うものとする。

#### （5）事後評価の手続

担当安全技術管理官等は、評価項目（項目⑤に係るものを除く。）ごとの評価を様式4（事後評価書）に記載するとともに、項目⑤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関係する課等の長に評価を求めた上で、別記4の方法により決定した評価結果を様式4に記載する。その後、項目別評価の結果を基に様式4に総合評価を記載し、安全研究プロジェクトごとの評価結果についてばらつきが生じないように、担当安全技術管理官等間で相互にレビュー・調整を行った上で、最終的な評価案を原子力規制委員会へ諮る。

（後略）

---

における「安全研究成果報告」の構成によることを原則とする。ただし、研究計画の変更など評価において特に記載すべき事項があれば、その記載事項を適宜追加又は変更することができるものとする。

<sup>2</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。

## 事後評価における項目別評価基準

事後評価のうち項目別評価における評価項目ごとの評価基準について、以下のとおり定める。

なお、安全研究プロジェクトの特性を踏まえて評価項目を追加するときの評価基準については、担当安全技術管理官等が別途定めることを可能とする。

### ① 成果目標の達成状況

研究計画で示される成果目標に対する達成状況を以下の区分に基づき評価する。

S：設定した目標を大きく超える成果が得られている

A：設定した目標を達成した成果が得られている

B：設定した目標をおおむね達成した成果が得られているが、一部十分ではない

C：設定した目標を達成した成果が得られていない

### ② 成果の公表等の状況

NRA技術報告若しくはNRA技術ノート（以下「NRA技術報告等」という。）又は国内外の査読付の論文若しくはそれらと同等と考えられる公表活動<sup>3</sup>（下記のS、A、Bに該当するもの）を対象として、安全研究プロジェクト終了時点における公表の有無及び内容を以下の区分に基づき評価する。ここでは、著者に原子力規制庁職員を含むか否かを問わず、安全研究プロジェクトの中で行われた成果公表を評価対象とする。

S：NRA技術報告等（2件以上）を公表した、学会から表彰を受けるなど学術的価値が対外的に認められる査読付の論文等を公表した、原子力の安全に資する質の高い査読付の論文等を複数公表した、その他原子力の安全に大きく貢献する成果を公表した

A：NRA技術報告等又は査読付の論文等を公表した（論文の場合、投稿先から受理される等発行が確実な場合を含む）

B：NRA技術報告等又は査読付の論文等の公表には至っていないが、公表に向けて手続中であり、NRA技術報告等又は査読付の論文等の公表が見込まれる状況である

C：NRA技術報告等又は査読付の論文等を公表しなかった上に、今後の公表の見込みが不透明である

### ③ 研究の進め方に関する技術的適切性

研究手法（最新の知見が取り入れられていたか、適切な研究実施手法が採られていたか）、成果の取りまとめ方法等についての技術的適切性を以下の区分に基づき評価する。

<sup>3</sup> 論文投稿で行われる査読と同等以上のレベルで行われる査読付の予稿を伴う国際会議の口頭発表等が対象となる。

なお、評価に当たっては、技術評価検討会における技術的な意見等を参考とすること。

S：技術的に優れている

A：技術的に適切である

B：おおむね技術的に妥当であるが、一部十分ではない

C：技術的に適切ではない

#### ④ 研究マネジメント及び予算・契約管理の適切性

安全研究プロジェクトの実施に当たり、計画管理（国内外の技術動向、規制動向等を把握し、それらを踏まえた優先度を勘案しながら柔軟に対応できたか）、研究体制（研究体制が有効に機能したか、研究者が能力を発揮できたか、技術基盤の構築に向けた適切な体制となっていたか）、進捗管理（研究の遅れが生じた場合に適切に対応できたか）等の研究マネジメントの適切性並びに予算及び契約管理の適切性を以下の区分に基づき評価する。

S：模範となる管理の水準である

A：適切に管理されている

B：おおむね適切に管理されているが一部十分ではない

C：管理に問題がある

#### ⑤ 成果の規制への活用の状況・見直し

得られた研究成果が、研究計画で示される知見の活用先において活用（基準類の整備・見直しやその要否の判断、規制活動（審査、検査等）への活用等）が可能な状態へと整理され、規制に活用されたか又は活用が見込まれるかについて、以下の区分に基づき評価する。

S：得られた成果が規制に大きく貢献した又は今後大きく貢献することが見込まれている

A：得られた成果が規制に貢献した又は今後貢献することが見込まれている

B：得られた成果の規制への貢献は現時点では限定的であるが、今後貢献する可能性がある

C：得られた成果が規制に貢献する可能性はない

##### 【具体例】

S：得られた成果が反映される形で基準類が整備・見直しされる、得られた成果によって規制活動における判断の重要な根拠となるなど、得られた成果によって規制が大きく前進した又は前進が見込まれる（成果が活用先において利用可能な状態へと文書化されているなど）場合

A：得られた成果が基準類の整備・見直しの要否の判断や規制活動における根拠や参考となるなど、得られた成果による規制への貢献があった又は貢献が見込まれる（成果が活用先において利用可能な状態へと文書化されているなど）場合

B：得られた成果が規制において有用な可能性があるが、現時点では基準類の整備・見直しの要否の判断や規制活動で利用可能な状態へと整理されていない場合

C：研究が大幅に遅延する等の理由により、期待していた成果が全く得られず、規制に貢献する見込みがない場合

## 事後評価における「⑤成果の規制への活用の状況・見通し」 の項目別評語の決定方法

項目別評価の項目のうち、「⑤成果の規制への活用の状況・見通し」に関する評価は、関係する課等の長が行う。1つの安全研究プロジェクトに関係する課等が1つである場合は、当該課等の長が評価した評語（S、A、B又はC）を項目⑤の項目別評語とする。また、1つの安全研究プロジェクトに関係する課等が複数あり、各課等の長が評価した評語が同一の場合は、当該評語を項目⑤の項目別評語とする。一方、1つの安全研究プロジェクトに関係する課等が複数あり、各課等の長が評価した評語が異なる場合は、以下の考え方にに基づき、各課等の長が評価した評語のうち最も上位の評語を項目⑤の項目別評語とする。

安全研究の成果の規制への活用は、規制基準、審査、検査等といった規制分野や、実用炉、試験研究炉、核燃料サイクル施設等といった規制対象の施設の違いなどによって、活用される時期や必要性について差が生じると考えられる。安全研究の大きな目的の一つは規制への貢献であり、いずれの規制分野、施設等であっても、そのうち一つにでも研究成果が活用されれば、規制への活用という目的は達成されたと言える。

## 事後評価における総合評価の方法及び評価基準

### (1) 項目別評価による評価の基礎の決定

総合評価における全体評語は、項目別評価における5つの評価項目の項目別評語（S、A、B又はC）を数字に換算（Sを4点、Aを3点、Bを2点、Cを1点）した上で、その平均をとったもの（別記5及び様式4において「総合点」という。）及びそれを再度評語に変換（3.3点以上をS、3.0点以上～3.3点未満をA、2.0点以上～3.0点未満をB、2.0点未満をC）したもの（別記5において「基礎評語」という。）を基礎とする。

なお、特に留意すべき評価項目である「②成果の公表等の状況」及び「⑤成果の規制への活用の状況・見通し」に対して良好な成果が得られた場合には、1点又は2点をその評価項目に加算した上で総合点及び基礎評語を決定することができる。ただし、基礎評語がSとなる条件は、項目別評語のSが2つ以上あることとする。

一方、項目②又は⑤で最下位の評語（C）がある場合には、基礎評語がS又はAのときはBへ、BのときはCへそれぞれ下げるものとする。

### (2) 評価の基礎に基づく総合評価の方法及び評価基準

最終的な総合評価は、総合点及び基礎評語を基にして、以下の評価基準により担当安全技術管理官等が実施する。この際、担当安全技術管理官等は、全体評語とともに、評価コメントを付すものとする。

#### 【総合評価の評価基準】

S：模範となる水準で管理され、期待以上の成果があった

A：適切に管理され、期待どおりの成果があった

B：おおむね適切に管理され、期待どおりの成果があったが、一部十分ではなかった

C：管理が不十分であり、期待された成果が得られなかった

## 事後評価書

### 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. 研究成果

4. 事後評価結果

(1) 項目別評価

① 成果目標の達成状況：SABC

- 担当安全技術管理官等によるコメント

② 成果の公表等の状況：SABC

- 担当安全技術管理官等によるコメント

③ 研究の進め方に関する技術的適切性：SABC

- 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)

➤

➤

④ 研究マネジメント及び予算・契約管理の適切性：SABC

- 担当安全技術管理官等によるコメント

(計画管理、研究体制、進捗管理等の研究マネジメントの適切性について記載)

(予算及び契約管理の適切性について記載)

⑤ 成果の規制への活用の状況・見通し：SABC

- 関係する課等の長によるコメント (SABC、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) 総合評価：SABC（総合点：    ）

- 担当安全技術管理官等による評価コメント

## 技術評価検討会 名簿

(五十音順)

## 1. 第 15 回プラント安全技術評価検討会 (令和 7 年 4 月 10 日開催)

## 外部専門家

北田 孝典 国立大学法人大阪大学 大学院工学研究科 教授  
 五福 明夫 公立大学法人岡山県立大学 理事長 (学長)  
 山路 哲史 学校法人早稲田大学 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  
 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 担当部長  
 井村 諭 三菱重工業株式会社 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 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 部長

## 2. 第 17 回地震・津波技術評価検討会 (令和 7 年 4 月 18 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  
 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  
 シニアアドバイザー

3. 第8回材料技術評価検討会（令和7年4月21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 大学院工学研究科 准教授  
黒田 雅利 国立大学法人熊本大学 大学院先端科学研究部 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  
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  
技術システム研究所 高経年化研究グループ リーダー  
橋本 将視 関西電力株式会社 原子力事業本部 原子力発電部門  
電気技術グループ マネジャー

4. 第18回地震・津波技術評価検討会（令和7年4月24日開催）

外部専門家

糸井 達哉 国立大学法人東京大学 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 理学部基礎理学科 教授  
馬場 俊孝 国立大学法人徳島大学 大学院社会産業理工学研究部 教授

専門技術者

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  
シニアアドバイザー

5. 第7回バックエンド技術評価検討会（令和7年4月24日開催）

外部専門家

井口 哲夫 名古屋大学名誉教授  
小崎 完 国立大学法人北海道大学 大学院工学研究院  
工学系教育研究センター長 教授  
新堀 雄一 国立大学法人東北大学 研究推進部 特任教授

専門技術者

佐々木 泰 日本原燃株式会社 埋設事業部 副事業部長  
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

## 安全研究プロジェクトごとの事後評価書

令和 7 年 6 月 1 8 日  
原子力規制庁

### 1 津波評価手法及び既往津波の波源推定に関する研究 (R3 年度～R6 年度)

#### 1. 研究プロジェクトの目的

本プロジェクトでは「海溝軸付近で発生する津波の初期水位設定方法の改良」及び「既往の巨大津波の波源推定」の研究を行い、基準津波に関する規制要求に係る適合性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

- 海溝軸付近で発生する津波を模擬した水理実験結果等に基づいて、津波の初期水位の生成過程の解明と、その特徴を考慮した津波の初期水位設定方法の改良に関する知見を拡充した。
- 津波波源が明確に定まっていない 1611 年慶長三陸地震津波を対象に、現地調査を行い、津波堆積物を認定した。それらの津波堆積物情報に基づき、過年度の安全研究プロジェクトで構築された土砂移動モデルによる津波波源推定手法に津波堆積物の不確かさの情報を取り入れて、具体的な津波波源を推定するとともに、津波堆積物の不確かさと推定津波波源の関係性について知見を拡充した。

#### 3. 研究成果

- 国立大学法人東北大学及び東北学院大学との共同研究において、水理実験、津波伝播解析及び流体解析の結果から、津波の初期水位設定方法については、地殻変動の鉛直変位に加え、地殻変動の水平変位による鉛直成分への寄与（以下「水平変位の寄与分」という。）から求める Tanioka and Satake (1996)<sup>\*</sup>の方法（以下「TS 法」という。）で十分な精度を確保できることが分かった。この結果を踏まえ、TS 法を適用して津波の初期水位を設定する場合の特性化波源断層モデルを作成した。
- 学校法人関西大学、国立大学法人東北大学災害科学国際研究所及び国立大学法人東京大学との共同研究において、1611 年慶長三陸地震津波の可能性のある津波波源を複数推定した。また、津波堆積物の情報量や信頼度を変化させたデータセットに基づき、津波堆積物の不確かさと推定津波波源の関係性を調査した結果、津波波源推定に用いる現地情報の位置、量等は、津波波源推定に使用される地域の前面海域の推定津波波源への寄与が大きく、津波波源の位置・規模等の推定に影響を及ぼすことを具体的に示すことができた。

※Tanioka, Y., Satake, K., “Tsunami generation by horizontal displacement of ocean bottom”, *Geophysical Research Letters*, Vol. 23, No. 8, pp. 861–864, 1996. <https://doi.org/10.1029/96GL00736>

#### 4. 事後評価結果

##### (1) 項目別評価

###### ① 成果目標の達成状況 : A

津波の初期水位の生成過程として TS 法の妥当性を確認するとともに、TS 法を適用した場合の特性化波源断層モデルを作成した。また、津波堆積物の不確かさの情報を取り入れて 1611 年慶長三陸地震津波の津波波源を複数推定するとともに、津波堆積物の不確かさと推定される津波波源の関係性を示すことができた。よって目標を達成したと考える。

###### ② 成果の公表等の状況 : B

- 原子力規制庁から査読付論文 1 件を投稿した。まだ公表には至っていないが、公表が見込まれる状況であると判断とした。

###### ③ 研究の進め方に関する技術的適切性 : A

- 国内外の過去の研究及び最新知見を踏まえた上で、適切な手法にて研究を実施している。技術評価検討会での外部専門家からの意見も踏まえ、技術的適切性をもって研究が進められたと判断した。

(技術評価検討会における主な意見及びその対応)

- TS 法は津波計算で広く使われているものの、その理論的、実験的検証が十分ではなかったが、「海溝軸付近で発生する津波の初期水位設定方法の改良」は、この課題に対して正面から扱ったものであり、水理実験と数値実験を組み合わせて適切に実施されている、との意見があった。また、水理実験の不確かさを適切にモデル化して数値実験を行い、正しい結論に到達できたことは評価でき、更に発展させるとすれば、実観測の津波データを用いて TS 法の妥当性を検証できると良い、との意見があった。東北地方太平洋沖地震津波に対して TS 法を適用した再現解析を実施し、その再現性の程度は確認しているが、今後更なる発展に取り組む際には、他の地震津波への適用を検討することとする。
- 「既往の巨大津波の波源推定」について、研究内容の必要性は研究コミュニティにおいても強く認識されており、研究手順も妥当であると判断されること、不確かさを明示的に考慮した波源推定手法について研究を実施したことは、大変良い方向性である、との意見があった。また、今後、地形や津波が侵食・運搬する堆積物の量等の項目についての解析・評価を加えることによ

り、不確かさを一つずつ解決していくこと、海溝型地震のみでなく沿岸の活断層の地震に伴う津波も検討することが必要、との意見があった。令和7年度から開始する安全研究では、本研究の結果に基づき、津波堆積物に対する地形の影響や、堆積総量と津波規模との関係等を分析することを計画している。

➤ 詳細は別表 1-1 参照。

④ 研究マネジメント及び予算・契約管理の適切性：A

- 適切な研究体制を構築し、計画どおりに進捗させ目標を達成していることから、研究マネジメントは適切であると評価する。予算執行、進捗管理及び検収を含めた契約業務を、法令等を遵守して実施しており、適切に業務管理が行われたと判断した。

⑤ 成果の規制への活用の状況・見通し：A

- 本プロジェクトで実施された「海溝軸付近で発生する津波の初期水位設定方法の改良」は、津波の初期水位の設定について、津波審査ガイドに記載されている従来法の妥当性を確認したものであり、直ちに規制に反映する事項がない確認として活用された。また、「既往の巨大津波の波源推定」で推定された1611年慶長三陸地震津波の波源は、基準津波の策定において参照すべき既往津波の一例であり、また、設定された基準津波の波源規模の妥当性確認に資する知見として活用する。（A、技術基盤課）
- 従来法に保守性があることから従来法の評価手法の妥当性が確認できたとしたことは、本研究「海溝軸付近で発生する津波の初期水位設定方法の改良」の成果と考える。一方で、TS法の適用可能範囲等の整理までは至っていない状況であると認識している。本研究の成果及びTS法を用いる場合のメリット、デメリットを整理したうえで、津波評価手法として活用できる状態に整理（ガイド等に反映）されることにより、TS法を用いた津波評価に対して適切な審査を行うことが出来るようになることが、審査を実施する側から期待していることである。（B、地震・津波審査部門）

(2) 総合評価：B（総合点：2.8）

- 担当安全技術管理官等による評価コメント

計画どおりに調査・研究が進められ、津波の初期水位設定においてTS法の妥当性を確認し、TS法を適用して津波の初期水位を設定する場合の新たな特性化波源断層モデルを作成した。また、1611年慶長三陸地震津波を複数推定するとともに、津波堆積物の不確かさと推定波源の関係性を具体的に示すことができた。ただし、成果の公表状況が、査読付論文一編の投稿にとどまったことから、安全研究プロジェクト全体としては上記評価とする。

## 5. 評価結果の今後の活用

- 本研究プロジェクトで得た成果のうち未公表の内容については、規制活動における活用を促進するため、論文等による公表を今後も進める。また、外部専門家・専門技術者による、津波堆積物や沿岸活断層による地震津波に関する意見については、令和7年度から開始する安全研究において適宜計画して進める。さらに、関係課室からのコメントを踏まえ、審査での活用を念頭に研究成果を整理する。

### (主な成果の公表)

#### (1) 原子力規制庁の職員が著者に含まれる公表

- 論文 (査読付)
  1. Yamashita, K., Sugawara, D., Goto, K., Ishizawa, T., Takahashi, T., “A similarity law for sandy tsunami deposits –Feasibility of integration of inverse and forward approaches–”, Journal of Geophysical Research: Earth Surface. (submitted in March 2024)

津波評価手法及び既往津波の波源推定に関する研究  
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
系井 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られる。	—
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。	—
3	③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	「既往の巨大津波の波源推定」について、不確かさを陽な形で考慮した波源推定手法を実施していることについて、方向性としては大変よいと考える。一方で、手法としては、本来は、津波堆積物が存在しないとする情報を用いて確からしさの評価をすることまで行うことができている方が望ましい（そのような手法を用いなかった今回の結果では、M が大きいほうが確からしいという結果が出てくることは当たり前と考えられる）。また、津波痕跡高に関する相田の指標 K などを含めて多面的に確からしさの評価をする定量的評価手法を併せて開発する方が望ましい。	前者「津波堆積物が存在しないとする情報」について、本研究では「未発見情報」として複数地点での未発見情報をデータベースに登録しています。このうち北海道釧路市の春採湖では当該津波の津波堆積物は形成されていないとする既往研究の知見を踏まえ、数値解析によって津波堆積物を形成する波源を推定波源より除外しています。その他多数の未発見情報は、人工改変に起因する等、津波堆積物が存在しない理由の特定が困難であることから、それらを活用した波源推定は今後の課題です。また、後者「相田の指標 K など」について、本研究における「総合評価」では、津波堆積物の層厚に対する指標及び津波痕跡高に対する相田の指標 $K-k$ に関して、両者を同時に考慮するために考案した定量的評価指標を用い、これに未発見情報を加味しています。ただし、その指標の特性及び妥当性の確認は今後の課題であり、分析を追加した上で今後の論文化を予定しているため、指標の詳細を安全研究成果報告へ記載することは控えていました。しかしな

No.	評価項目	評価意見	回答
			がら、ご指摘を受け、現状の記載では評価手法が不明であることに加え、本推定結果には課題があることを明記するのが良いと考え、上記の総合評価手法の概略と課題を安全研究成果報告へ追記します。
4	④重大な見落とし(観点の欠落)がないか。	大きな見落としはないと考えられる。	—
5	その他	<p>「海溝軸付近で発生する津波の初期水位設定方法の改良」について、本来であれば、水理実験の試験体の改良を行うことで結果の確認をするべきものであり、現状の結論は推測のうえ、成立するだろうとしているに過ぎない(極論としては、現状の結論は数値解析のみで研究を行った場合と得られるものに大差がないともいえる)。試験体の改良と再実験を行わなかった理由とその妥当性について、少し説明が追加されることが望ましい。</p> <p>「堆積面積」の定義(例えば、どの程度以上堆積すると堆積面積としてカウントされるのでしょうか)が報告書に記載されておらず、追記することが望ましい。また、図 2.2.9 についても、報告書としては読みやすさを考えると、どの領域において堆積面積を求めたのか明記したほうがよい。</p>	<p>斜面模型の振動を低減させるため、固定治具の締め直しや法先付近の斜面模型内部に重りを付ける等を施し、水理実験を実施しましたが、効果はほとんどありませんでした。振動を無くすためには水理実験装置の根本的な設計変更及び改良が必要となり、技術的困難が予想されたので、今後の課題としました。その旨を安全研究成果報告の方にも説明を追加します。</p> <p>「堆積面積」の評価では、5 mm 以上の堆積厚を有する面積をカウントしている旨を安全研究成果報告へ追記します。また、堆積面積を評価した地域の範囲を明示するために対象地域(地域名は記載済み)の地形図を追加します。</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	適切と判断します。	—
2	②解析実施手法、実	適切と判断しますが、今後事業者が同様の解析・評価していくことを想定すると、今	<p>拝承いたします。</p> <p>また、他の地域や地震津波については、過年度の成果において、すべり分布等につい</p>

No.	評価項目	評価意見	回答
	① 研究方法が適切か。	① 回のケースを他の地域や地震津波に展開しておくことも必要と考えます。	① 調査しています。それらの結果を踏まえながら、TS法を適用した場合の特性化波源断層モデルを整備したいと思います。
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 適切と判断します。	—
4	④ 重大な見落とし(観点の欠落)がないか。	④ 適切と判断します。	—
5	その他	<p>・既往の巨大津波の波源推定</p> <p>津波堆積物の不確かさについて、本研究では粒径に着目して解析を進めたことがユニークな点と評価できる。今後は、評価地域の前面海域の浅海地形や陸上の微地形、津波が侵食、運搬する堆積物の量、粒径の違いによる氾濫水の密度などの項目についての解析、評価を加えることにより、不確実性をひとつずつ解決していけるものと期待します。また、海溝型地震のみでなく沿岸の活断層の地震に伴う津波の検討なども必要かと考えます。</p>	<p>令和7年度より実施中の安全研究では、本研究で得られた結果に基づき、津波堆積物に対する地形の影響や、堆積総量と津波規模との関係等を分析することを計画しています。また、粒径の違いによる氾濫水密度への影響に関しては、当部門のフラジリティ分野との連携研究において研究を実施中であるため、有用な成果が得られましたら論文等により公表したいと思います。さらに、津波発生様式の違いは津波の周期の違いに帰着すると考えられ、津波堆積物の産状への影響も有意であると予想されます。したがって、今後の研究において、周期の影響に着目したいと思います。</p>
馬場 俊孝 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>① 踏まえている。</p> <p>課題(1)について、津波波源に水平変位の寄与分を考慮する方法(TS法)は津波計算で広く使われているが、その理論的、実験的検証が十分ではなかった。本研究ではこの課題に対して、正面から扱ったものである。国内外の過去の研究、最新の知見を</p>	① 拝承いたします。

No.	評価項目	評価意見	回答
		踏まえて適切に計画され、研究が実施された。 課題(2)で扱われた内容は、その必要性が研究コミュニティにおいて強く認識されている。国内外の過去の研究、最新知見を踏まえて実施された。	
2	②解析実 施手法、実 験方法が 適切か。	適切である。 課題(1)は、水理実験と数値実験を組み合わせ て適切に実施されていると認められる。水理実験の不完全さをうまくモデル化し、数値実験を行い、正しい結論に到達できたことは評価できる。 課題(2)は、既存データの拡充、解析手法の高度化しながら研究を進めており、適切な手順であると判断される。	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。	適切である。 課題(1)は、水理実験と数値実験が定量的に比較されており、評価手法は適切である。 課題(2)については、現状で実現可能な定量的評価が実施されており、特に問題は見当たらない。提案された「推定波源の確からしさを表す評価式」は現段階では妥当なものであるが、より普遍的な指標の開発が必要であると思われる。	拝承いたします。 課題(2)について、提案した3つの指標の妥当性を確認し、より普遍的な指標の構築に向けて現指標の課題の具体化を図りたいと思います。
4	④重大な見 落とし(観 点の欠落) がないか。	重大な見落としはない。 さらに発展させるとすれば次のような観点 があげられる。 課題(1)について、実観測の津波データを用いてTS法の妥当性を検証できるとさら によいと思われる。 課題(2)について、ある意味離散化された 波源に対して評価を行ったものだが、最適 解がある波源モデルとある波源モデルの 間に存在する可能性もある。これに対する	拝承いたします。 課題(1)について、東北地方太平洋沖地震 津波に対してですが、TS法を適用したジョ イント・インバージョン解析を実施していま す(道口他、2019)*。解析結果は、観測さ れた水位波形や地殻変動量を良好に再現 していることを確認しており、また、相田の 指標による再現性の程度は $K=1.01$ 、 $\kappa=$ $1.23$ であり、従来法を適用した場合 ( $K=$ $1.04$ 、 $\kappa=1.30$ ) より良い結果が得られまし

No.	評価項目	評価意見	回答
		<p>手法の開発や、得られた最適すべり分布の空間的信頼度が示せるとよいと思われる。</p>	<p>た。今後、更なる発展に取り組む際には、他の地震津波に対しても適用・確認したいと思います。</p> <p>課題(2)について、今後の研究を進める上で非常に有益なご指摘をいただきました。頂いた観点を持って本研究の結果整理又は進展に努めたいと思います。</p> <p>※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、22巻、5号、pp.25-42、令和4年</p>
5	その他	<p>本研究で得られた成果は学術的にも重要なものであると認められる。波及効果が期待されるので、論文発表として成果の公表をぜひお願いしたい。</p>	<p>本研究で得られた成果は、速やかに取りまとめ、論文等での公表に務めたいと思います。</p>

(専門技術者の意見及び回答)

No.	評価項目	意見	回答
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	<p>・既往の巨大津波の波源推定</p> <p>1611 年津波の波源推定に関する文献として、高橋潤・安中正・今村文彦 (2024; 自然災害科学, 42-4, 275-292.)では海溝型地震と津波地震を組み合わせた検討が行われている。</p>	<p>シナリオ波源の設定において、①地震津波と津波地震の組合せのほか、②時間差による連動、③超大すべり域が 2 つ以上ある場合等、組合せ方が膨大になるため、本研究では海溝型地震(超大すべり域は 1 つ)及び既往波源に絞って評価しました。このうち①及び②については、本研究で対象としたシナリオ波源による結果の組合せとして波源推定に活用できる可能性があると考えています。ただし、ご指摘の文献の波源や幾つかの既往波源をシナリオ波源として考慮できておらず、今後、更なる発展に取り組む際には、追加波源に含めたく思います。</p>
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	<p>・既往の巨大津波の波源推定</p> <p>逆解析の不確かさの定量化について、リスク評価においても重要な技術であり、研究を発展されることが望ましい。</p> <p>本研究では海溝沿いの地震を中心に解析を実施されたが、1611 年津波堆積物の波源については諸説があるため、海溝型地震と津波地震を組み合わせ(高橋他 2024 論文)や、多様な規模のアウトサイズ地震を解析する等の評価手法も考えられる。</p>	<p>シナリオ波源として地震発生様式や波源域の違いによる組合せを考慮した様々な波源が考えられます。本研究では、日本海溝～千島海溝でのプレート間地震の特性化波源 193 通りと、対象海域における既往波源 16 通り(アウトサイズ地震断層波源 14 通りを含む)を対象としましたが、今後、更なる発展に取り組む際には上記の組合せを考慮した波源を追加したく思います。</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>・海溝軸付近で発生する津波の初期水位設定</p> <p>TS 法の妥当性検証について、実用上も重要な内容と考えられる。</p> <p>・既往の巨大津波の波源推定</p> <p>砂質津波堆積物の相似則の提案は、今後の活用が見込まれる重要な成果と考えられる。</p>	<p>拝承いたします。</p> <p>拝承いたします。本相似則の実用への活用性を高めるため、本相似則の現地適用性等を調査したく思います。</p>

No.	評価項目	意見	回答
		<p>参考資料 3;2.2.2(3)②において、本研究では多数の波源に対し解析を行い、総じて高い津波高分布が得られたと記されている。これに対し、図 2.2.4 では東北地震津波波源モデル(文献 2.2.9)を用い、亘理地域の津波堆積物分布が良好に再現されている。本研究の解析手法の特性や使用上の留意点を整理していただくと良い。</p>	<p>前者は、全シナリオ波源の特徴把握、後者は、津波及び土砂移動の解析ツールの検証に相当します。</p> <p>前者のシナリオ波源は、平均津波高分布や最高津波高分布が総じて高くなる傾向を有することがわかりました。これは、波源モデルの設定方法に起因して、M9 級の巨大地震のシナリオ波源の数が増えるためです。一方、後者の 2011 年東北津波を対象とした検証により解析ツールの精度が確認されました。</p> <p>以上より、本手法の特性として、前者のシナリオ波源による津波の多くは規模が大きいことには留意する必要があるものの、同海域において網羅的な中小規模の津波も含まれており、それら様々な規模のシナリオ波源を候補とする中から、信頼できる解析ツールに基づいて波源を推定することが可能です。上記特性や留意点を安全研究成果報告に追記します。</p>
4	④重大な見落とし(観測の欠落)がないか。	<p>・全体          今後はフラジリティ分野の研究と連携し、プラント応答への寄与が大きい事象を中心に、ハザード評価の不確かさを検討されることが望ましい。</p>	<p>フラジリティ分野とは、当分野の担当者がフラジリティ分野側の研究に参加して方法やデータ等について議論等を行うとともに、連携を図っているところです。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。</p>
5	その他	コメントなし。	—
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	コメントなし。	—

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。	[海溝軸付近で発生する津波の初期水位設定方法の改良] 水理実験において、実験結果と数値解析の比較結果の考察に端を発して、水理実験における課題を明らかにし、その点を考慮して数値解析モデルを検証した点は適切と考える。	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。	[海溝軸付近で発生する津波の初期水位設定方法の改良] 水理実験の再現において、振動を考慮した流体解析結果を示す上で、その入力条件となる振動の実測結果もしくは模擬した流体解析上の入力条件に関する説明は、研究内容の説得性の観点(及び読者が自分でも検証できる材料)として必要である。今後、検討いただきたい。	水理実験において、高速カメラを用いて斜面模型が動いている間の底面変動を測定し、画像の解析結果から、斜面模型全体の振動と斜面部分のたわみによる振動のデータを取得しました。この振動を正弦波型の振動及び指数関数的な減衰を仮定した振動モデル式として導き、その振動成分を斜面模型底面粒子の振動として与え、粒子法による流体解析を実施しています。今後、論文公表を予定しているため、振動モデル式の詳細については安全研究成果報告への記載を控えることにしますが、どのように振動を与えて流体解析を実施したかについては説明を追加しました。
4	④重大な見落とし(観点の欠落)がないか。	コメントなし。	—
5	その他	[海溝軸付近で発生する津波の初期水位設定方法の改良] 過年度の成果であるので、今回の検討会の範疇外ではありますが、水理実験における造波時の振動の影響について、過去に実施した令和2年度の研究成果における実験についても振動による造波した津波高・造波効率への影響がないのか気になりましたので記載させていただきます。	過年度(令和2年度)に取得した実験結果と津波伝播解析結果が合わないことから、本研究においてその要因を分析し、斜面模型の振動の影響が大きいことが分かりました。水平変位の寄与分の効果について実験と津波伝播解析で評価した論文*を過年度に公表していますが、本研究で改めて調査した論文を、今後出す予定です。

No.	評価項目	意見	回答
		<p>[既往の巨大津波の波源推定]</p> <p>津波堆積物の調査結果を踏まえた波源評価については不確実さを考慮した点、津波堆積物が発見されない地点の情報を反映した波源推定に関する試評価等大変興味深く拝見しました。</p>	<p>※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)、75 巻、2 号、pp.I_343-I_348、令和元年</p> <p>拝承いたします。</p>

## 2 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 (R3年度～R6年度)

### 1. 研究プロジェクトの目的

本プロジェクトでは、外部事象として地震、津波、飛翔体衝突に対する建物・構築物、設備等のリスク評価における応答及び耐力に基づく損傷度合い（フラジリティ）等に関する評価手法の高度化に係る研究を行い、耐震、耐津波及び耐衝撃評価に係る規制基準等の整備や適合性審査等の判断に資する技術的知見を拡充することを目的とする。

### 2. 研究概要

#### (1) 地震に対するフラジリティ評価手法の高度化の検討

- 低接地率状態となる建屋の既往実験のシミュレーション解析や高温状態の影響を受けた鉄筋コンクリート構造の試験体等を用いた実験及び解析を実施し基準地震動に対して非線形挙動を示す建屋の耐震安全性評価手法の適用性を確認した。また、礫質土等の地盤を用いた遠心模型実験及び解析を実施し、地盤の液状化による施設への影響を確認した。また、大きな地震を経験した設備を模擬した試験体の加振試験等を行い、耐震安全性評価手法の適用性を確認した。さらに、制振装置及び制振装置を適用した設備の新規制基準適合性に係る審査において耐震安全性を確認するための留意点を取りまとめた。

#### (2) 津波に対するフラジリティ評価手法の高度化の検討

- 海水の条件よりも大きな波力を与え得るヘドロ等の細粒子を多く含む津波（以下「黒津波」という。）について、その発生条件及び防潮堤の波力に与える影響を確認した。

#### (3) 飛翔体等の衝突に対する衝撃評価手法の高度化の検討

- 現実的に想定される複雑な設置状態・形状をした建物・構築物の衝撃評価や、衝撃力に対するガタ系等を含む設備の応答評価への既往の評価手法の適用性を確認した。

### 3. 研究成果

#### (1) 地震に対するフラジリティ評価手法の高度化の検討

- 低接地率状態となる建屋の応答評価に関する知見を蓄積して、低接地率の挙動や動的な鉛直地震動の影響に着目した評価手法の適用性を確認することを目的に、日本原子力研究開発機構（以下「JAEA」という。）への委託研究により文献調査、既往実験のシミュレーション解析等を行い、今回用いた解析コードによる基礎浮き上りに係る非線形地震応答解析は概ね既往の実験結果を再現できることを確認した。また、基礎底面の付着力によって応答が異なる傾向が見られたこと等の技術的知見を収集し、低接地率の挙動や動的な鉛直地震動の影響に着目したモデル化方法も適用できることを確認した。当該成果を原子力規制庁において審査に資する技術的知見

として取りまとめた。

- 高温状態等の影響が建屋の応答特性へ与える影響に関する知見を蓄積して、重大事故後の状態を対象とした建屋の地震時応力解析手法の適用性を確認することを目的に、鹿島建設株式会社（以下「鹿島建設」という。）への委託研究により文献調査、材料試験、構造実験、仮想実機建屋を対象とした感度解析等を行った。その結果、高温影響によるコンクリート材料の弾性係数の低下により建屋の剛性も低下する一方で、圧縮強度の低下が建屋の耐力へ与える影響は小さいこと等、RC 部材の材料非線形性を考慮した弾塑性解析手法の適用性に関する技術的知見を拡充し、事故後の状態を対象とした建屋の地震時応力解析手法が適用できることを確認した。また、当該成果を原子力規制庁において審査に資する知見として取りまとめた。
- 大規模観測システムを用いて建屋及び周辺地盤の詳細な振動特性を分析し、三次元有限要素モデルを用いた再現解析をとおして、三次元耐震解析手法を高度化することを目的に、JAEA との共同研究を実施した。実測データに基づく建屋及び周辺地盤の振動特性の分析では、周辺地盤の振動特性、建屋の三次元的な応答挙動を把握した。特に、建屋の代表的な振動モードの分析から、構造的特徴（形状の非対称性、構造種別の違い等）に起因する応答加速度の差異を確認した。また、実測データを活用した三次元耐震解析手法の高度化では、建屋の積載重量物等を実建屋に合わせてモデル化し、各要素が応答結果の再現性に与える影響の程度を確認した。
- 原子力発電所施設のうち鉄筋コンクリート造の建物・構築物を対象に株式会社篠塚研究所及び大成建設株式会社（以下「大成建設」という。）への委託研究により減衰定数に関する文献調査結果から知見の整理・分析、既往の試験結果を対象としたシミュレーション解析を実施し、地震応答解析における減衰定数は、ひずみ依存性、構造の複雑さ等の減衰性能に与える影響を考慮し、適切に設定する必要があることを確認した。なお、今回の研究では、限られた文献調査結果と、一つの既往実験例のシミュレーション解析という条件での調査・分析であることから、今後、更なる知見の蓄積が必要である。
- 国立大学法人東北大学及び学校法人東北工業大学への委託研究により遠心模型実験を行い、盛土や構造物の設置による複雑な地盤内応力、応力性状における構造物への作用荷重、構造物の応答加速度、変形挙動の特徴を把握した。また、原子力規制庁において実験結果に対するシミュレーション解析を実施し、地盤内応力や過剰間隙水圧等、実験の全体的な傾向を再現できることは確認したが、構造物の耐震性評価にあたっては、これらの応答挙動の再現性を向上させる必要があることを確認した。
- 基準地震動レベルの入力波が繰返し入力された場合の配管系の疲労損傷裕度を確認することを目的に、学校法人東京電機大学（以下「東京電機大学」という。）との共同研究として、既往の試験事例が少ない異径ティを含む 3 種類の配管要素の振動試験を実施し、いずれの試験体も、設計レベルの荷重に対して十分な裕度を持つことを確認した。また、弾塑性有限要素解析に基づく疲労評価手法の適用性を検証することを目的に、上述の配管要素の振動試験結果とその疲労評価結果を比較し、

当該手法を用いることで、設計を超えるレベルに対しても、保守性を持って累積疲労損傷係数の評価が可能であることを確認した。

- 繰り返し入力される地震力が原子炉本体基礎の復元力特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的に、その構造的特徴を模擬した1/10スケールの試験体を製作し、加力回数をパラメータとした正負交番載荷試験を実施した。その結果、5回程度の繰り返し載荷では、原子炉本体基礎の顕著な剛性低下は生じないことが分かった。また、既往の復元力特性評価法がそのせん断剛性を過大評価する可能性が示唆された。
- 設備の地震応答低減のために既設プラントに新たに導入された制振装置を対象として、審査における留意点の整理とその参考となる事例集の作成を目的に、制振装置の調査、制振装置適用に当たっての留意点の分析、制振装置の振動試験等を実施した。その結果を、制振装置に係る耐震安全性を確認するための「審査における留意点」として整理した。

#### (2) 津波に対するフラジリティ評価手法の高度化の検討

- 黒津波が発生する可能性の評価手法を構築することを目的に、東北地方太平洋沖地震後の津波堆積物調査の結果を整理し、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と因果関係があることを示した。また、黒津波が防潮堤の作用荷重に与える影響を定量評価することを目的に、大成建設への委託研究として細粒子を含む泥水を用いた水理試験及び数値解析を実施し、淡水と比べて密度の大きい泥水の最大波力は、流体密度の増分の範囲内におおむね収まることを示した。

#### (3) 飛翔体等の衝突に対する衝撃評価手法の高度化の検討

- 設置状況を考慮した建物・構築物の衝撃評価として、原子力規制庁に加え、一部の特殊ケースを分担した鹿島建設への委託研究により半球型の先端形状を有する剛飛翔体を用いた衝突実験を実施し、衝突速度に対する試験体の損傷状況を把握するとともに、貫入量評価に関する幾つかの既往貫入評価式が当該実験結果を良く評価できることを確認した。また、形状特性を考慮した建物・構築物の衝撃評価として、鹿島建設への委託研究により剛飛翔体衝突に対する平板及びアーチ構造に関する衝突実験を実施し、平板とアーチ構造の損傷状況の比較から形状の差異による影響を把握するとともに、当該実験範囲においては平板構造に対する既往局部損傷評価式をアーチ構造に対しても適用できることを確認した。
- 衝撃力に対するガタ系等を含む設備の応答評価について、既往知見に基づく応答解析手法の適用性を確認することを目的に、東京電機大学及びJAEAとの共同研究として、電気盤を模擬した試験体の衝撃加振試験及びその再現解析、並びにガタ系を有する設備の衝撃応答解析を実施した。その結果、地震応答解析のような既知の振動論に基づいた応答解析手法によって、試験体の筐体の衝撃応答及び内蔵機器の主要な衝撃応答は再現できたものの、内蔵機器で生じた高振動数の応答は再現できなかった。また、ガタ系を有する設備については、その最大応答加速度は再現できたものの、ガタ部における繰り返しの衝突を再現することは困難であった。

## 4. 事後評価結果

### (1) 項目別評価

#### ① 成果目標の達成状況 : A

- 研究計画に記載された実施項目を完了し、高温影響を受けた建屋の地震時応答挙動、地盤の液状化による施設への影響、代表的な配管要素の繰り返し荷重に対する耐震性等に係る知見を拡充できた。また、黒津波の発生可能性や防潮堤の作用荷重に与える影響に係る知見を取得した。さらに、飛翔体衝突に対して、アーチ構造等の損傷状況やガタ系等を含む設備の衝撃応答評価手法に係る知見を取得することができた。

#### ② 成果の公表等の状況 : S

- 原子力規制庁から、査読付論文 3 件及び査読付プロシーディングス 9 件を公表した。また、NRA 技術報告 1 件が公表に向け手続中である。
- 委託先から、査読付論文 4 件、査読付プロシーディングス 5 件を公表した。
- 上記の成果のうち、衝突に伴う局部損傷に係る研究成果の内容は、一般社団法人防衛施設学会において発刊予定の衝突に対する構造物の局部損傷に係るガイドラインへの記載が予定されており、学術的価値が対外的に認められたと判断した。

#### ③ 研究の進め方に関する技術的適切性 : A

- 国内外の専門家との議論を通して、研究の進め方の妥当性を確認した。また、国内外の過去の研究及び最新知見を踏まえた上で、適切な手法にて研究を実施しており、技術評価検討会での外部専門家からの意見も踏まえ、技術的に適切であると判断した。

#### (技術評価検討会における主な意見及びその対応)

- 「礫質土等の地盤の液状化による施設への影響評価」について、国内外の過去の知見の参照、解析結果の評価の補足等に関する意見があり、安全研究成果報告の該当箇所への追記等を行うことで技術的に適切であるとの回答を得た。また、シミュレーション解析の再現性向上に向け、今後の研究における大ひずみ領域での動的特性、密な地盤の液状化時の応答挙動等を考慮した検討の必要性に関する意見があった。これらについては、令和 7 年度から開始している安全研究プロジェクトにおいて、解析モデル設定時に必要な要素試験の拡充、液状化時の応答挙動に影響する要因に着目したパラメータの設定等によりシミュレーション解析の再現性向上に資する知見を取得する予定である。
- 「大きな地震を経験した配管系の耐震性の把握」について、有限要素解析において、重錘部の慣性モーメントの影響を明らかにしておく必要があるとの意見があった。今後、その影響を確認するための研究を計画することとした。

- 「高温時における原子炉建屋の地震時応答挙動に関する検討」について、研究成果が有益であるとの意見があった。また、解析モデルの説明の補足等に関する意見があり、安全研究成果報告の該当箇所への追記等を行うことで技術的に適切であるとの回答を得た。
- 「高密度に配置した地震計による建屋の精緻な三次元挙動の把握」について、実機を用いた検討は大変有効であるとの意見があった。
- 「制振装置を適用した設備の耐震性の把握」について、本研究の成果である「審査における留意点」の今後の高度化の予定について質問があった。今後、審査等を通じて得られた知見を、必要に応じて反映していく予定である。
- 「黒津波の発生条件等の検討」について、本研究で実施した実験に有益な工夫があり、本研究の新規性を高めるものであるとの意見があった。
- 「衝撃力に対する設備の応答解析手法の検討」について、パルス的な衝撃振動による応答影響についての検討は大変有益であるため、継続的な検討を期待するとの意見があった。令和7年度から開始の安全研究にて継続予定である。
- 詳細は別表 1-2 参照。

#### ④ 研究マネジメント及び予算・契約管理の適切性：A

- 委託先も含め適切な研究体制を構築し、計画どおりに進捗させ目標を達成していることから、研究マネジメントは適切であると評価する。予算執行、進捗管理及び検収を含めた契約業務を、法令等を遵守して実施しており、適切に業務管理が行われたと判断した。

#### ⑤ 成果の規制への活用の状況・見通し：A

- 本プロジェクトで実施された「大きな地震を経験した配管系の耐震性の把握」は、地震による損傷の防止に係る規制要求に基づいて設計された配管系が基準地震動による地震力に対して安全機能が損なわれるおそれがないことを確認したものであり、直ちに規制に反映する事項がない確認として活用された。また、「制振装置を適用した設備の耐震性の把握」から得られた知見は、日本電気協会電気技術規程「原子力発電所耐震設計技術規程（JEAC4601）」2021年版の技術評価に活用する。（A、技術基盤課）
- 非線形挙動を示す建屋の耐震安全性評価手法の適用性評価は、低接地率又は高温時の建屋の地震応答挙動やその評価手法について、審査における視点を含めて整理されているが、低接地率評価手法に関しては現状の審査に直接的に反映する内容はなく、また、高温時の建屋の地震応答挙動は、将来的に極端な温度荷重と地震荷重を組み合わせた弾塑性解析の審査を行う場合に役立つと考えられるものの、現時点で審査の判断に利用する予定はない。減衰定数の設定に係る検討は、従来の審査内容で確認してきた建物の減衰定数の妥当性を補強するものであり、現行の審査に影響を与えるものではなかった。礫質土等の地盤の液状化に係る検

討は、従来の審査内容が実験及び解析結果から妥当であると裏付けされたものであり、今後、本検討結果を技術報告等へ整理し公表されることを期待する。黒津波の発生条件等の検討は、黒津波の波力の影響は従来の審査内容におおむね包含されるとの実験結果が得られているが、その影響検討の手法や適用条件が明確化されておらず、審査に活用できるような整理には至っていない。全般として、様々な知見が得られたと理解するものの、得られた知見が審査ガイド等の明確化やその要否を判断できる程度の成果に至っていないものが多く、実際の審査における判断に用いた事例もなかった。（B、地震・津波審査部門）

- 本プロジェクトで得られた飛翔体等衝突時に建屋・設備に生じる衝撃現象に関する技術的知見は、事業者が講じる衝撃破損防止対策等の妥当性を確認する際の技術基盤を拡充するものであるが、現時点では実機の設置条件や想定環境等との比較など、適用範囲が明確になっておらず、審査官が利用できる状態に整理されていないと考える。本プロジェクトで得られた制振装置を組み合わせたSクラス設備の地震応答特性、地震応答解析手法等に関する知見は、現時点においてSクラス設備に制震装置を適用する申請がなく、成果の活用には至っていない。今後、審査における確認事項等が適切に文書化され、また、Sクラス設備に制震装置を適用する申請がなされた場合は、審査において制震装置を適用する設備の耐震性評価の妥当性を確認する際の参考情報として活用できると考えられる。（B、実用炉審査部門）
- 本プロジェクトで実施した「制振装置を適用した設備の耐震性の把握」は、現在審査中の日本原燃再処理施設の新規制基準適合性審査（原燃設工認審査）において、耐震ダンパーが設置される構築物（排気筒、竜巻防護対策施設）があり、本研究の中で整理されている内容は、当該構築物に係る耐震審査において参考になる。また、「衝撃力に対する設備の応答評価手法の検討」は、本研究の中で実施している「ガタ系を有する設備の応答評価手法」の内容は航空機衝突を想定したもので、対象の振動数領域は異なるものの、原燃設工認審査で申請されているガタを考慮した地震応答解析結果を用いる機器の耐震審査において参考になると考えられる。（A、核燃料施設審査部門）
- 得られた知見は、「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」に今後追加される地震 PRA のフラジリティ評価項目「経年変化の影響評価」において、過去に大きな地震動を経験した原子炉本体等の現実的応答の評価に貢献する可能性がある。（B、検査監督総括課）

## （2）総合評価：A（総合点：3.2）

- 担当安全技術管理官等による評価コメント

研究を適切に遂行して、目標とした知見の取得を達成するとともに、原子力規制庁及び委託先から多数の査読付論文等が公表され、その一部で、学術的価値が対外的に認められた。また、1件の NRA 技術報告が公表に向けた手続中である。さらに、得られた研究成果は、日本原燃再処理施設の耐震ダンパーが設置される

構築物などの各種施設の審査において活用できる見通しである。以上より、安全研究プロジェクト全体としては上記評価とする。

## 5. 評価結果の今後の活用

- 外部専門家・専門技術者から得られた評価手法の更なる精緻化等の意見については、令和7年度からも継続する安全研究において留意して進める。また、関係課室からのコメントを踏まえ、審査等での活用を念頭に研究成果を再整理し、NRA技術報告等の取りまとめを進める。

### (主な成果の公表)

#### (1) 原子力規制庁の職員が著者に含まれる公表

- NRA 技術報告
  1. 原子力規制委員会、NRA 技術報告、「実用発電用原子炉施設への制振装置適用に係る調査・分析及び留意点の整理(案)」、令和7年(令和7年10月頃公表予定)
- 論文(査読付)
  1. 日比野憲太、橋本紀彦、藤原啓太、高松直丘、「水平加力を受ける隔壁方式の鋼板コンクリート構造製の基礎構造物の三次元非線形有限要素法解析」、コンクリート工学年次論文集、44巻、2号、pp.655-660、令和4年
  2. 鳥山拓也、山下啓、石田暢生、「シルト性堆積物の含有割合と採取地域の関係分析の試み」、土木学会論文集特集号(海岸工学)、80巻、17号、令和6年、doi:10.2208/jscej.24-17229
  3. 太田良巳、松澤遼、「弾頭型剛飛翔体の理論的貫入評価に関する一考察」、土木学会構造工学論文集、71A巻、pp.825-861、令和7年、doi:10.11532/structcivil.71A.852
- 学術会議のプロシーディングス(査読付)
  1. Azuma, K., Fujiwara, K., Kai, S., Otani, A., Furuya, O., “Uncertain factors in elastic-plastic finite element analysis for elbows and tees”, Proceedings of the ASME Pressure Vessels & Piping Conference 2023, PVP2023-106166, 2023.
  2. Azuma, K., Fujiwara, K., Kai, S., Otani, A., Furuya, O., “Design Margins of Fatigue Life of Carbon Steel Elbows and Tees Subjected to Reversing Dynamic Loads”, Proceedings of the ASME Pressure Vessels & Piping Conference 2024, PVP2024-123304, 2024.
  3. 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評価に関する一考察」、土木学会第50回岩盤力学に関するシンポジウム、pp.74-79、令和6年
  4. Yamakawa, K., Moritani, H., Saruta, M., Iiba, M., Nishida, A., Kawata, M., Iigaki, K., “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)”, Transactions of the SMiRT 27, 2024.
5. Nishida, A., Kawata, M., Choi, B., Shiomi, T., Iigaki, K., Yamakawa, K., “A Study on Improvement of Three-Dimensional Seismic Analysis Method of Nuclear Building Using A Large-Scale Observation System (Part2: Analysis of Local Response of The Reactor Building Based on Artificial Waves)”, Transactions of the SMiRT 27, 2024.
  6. Choi, B., Nishida, A., Shiomi, T., Kawata, M., Iigaki, K., Yamakawa, K., “A Study on Improvement of Three-Dimensional Seismic Analysis Method of Nuclear Building Using A Large-Scale Observation System (Part3: Improvement and Validation of Three-Dimensional Seismic Analysis Method)”, Transactions of the SMiRT 27, 2024.
  7. Hibino, K., Hashimoto, N., Fujiwara, K., Takamatsu, N., “FEM Analysis of Partition-Type Steel Plate Concrete Foundation Focusing on Bond Characteristics between Steel Plate and Concrete”, Transactions of the SMiRT 27, 2024.
  8. Nagai, M., Minakawa, Y., Hibino, K., Takamatsu, N., Ishida, N., Yoshimura, E., Maruyama, N., Furuya, O., “Shaking Table Test of Electrical Cabinet Considering Shock Vibration”, Transactions of the SMiRT 27, 2024.
  9. 太田良巳、二階堂雄司、阿部大希、山崎宏晃、「来待石に対する半球型剛飛翔体の貫入事象に関する実験的研究」、岩の力学連合会第 16 回岩の力学国内シンポジウム、pp. 316-321、令和 7 年

## (2) 委託先による公表

### ● 論文 (査読付)

1. 橋本貴之、本田隆英、織田幸伸、「底泥を対象とした底質の移動に関する実験的研究」、土木学会論文集 B2(海岸工学)、78 巻、2 号、pp. I\_187-I\_192、令和 4 年、doi:10.2208/kaigan.78.2\_I\_187
2. 橋本貴之、本田隆英、織田幸伸、「圧力勾配を考慮した底泥移動と津波波力に関する実験的研究」、土木学会論文集特集号 (海岸工学)、79 巻、17 号、令和 5 年、doi:10.2208/jscej.23-17026
3. 橋本貴之、本田隆英、織田幸伸、「泥水密度の違いによる津波波形および波力の変化特性に関する実験的研究」、土木学会論文集特集号 (海岸工学)、80 巻、17 号、令和 6 年、doi:10.2208/jscej.24-17061
4. Kawai, T., “Prospective method to estimate shear stress in the ground using two earth pressure cells”, Soils and Foundations, Vol. 64, Issue 6, 2024. doi:10.1016/j.sandf.2024.101504

● 学術会議のプロシーディングス（査読付）

1. Choi, B., Nishida, A., Shiomi, T., Kawata, M., Li, Y., “Analytical study for low ground contact ratio of buildings due to the basemat uplift using a three-dimensional finite element model”, Proceedings of the 29th International Conference on Nuclear Engineering (ICON29), ICONE29-93870, 2022.
2. Hashimoto, T., Honda, T., Oda, Y., “Study on the Effect of Density Change due to Suspended Fine Sediment on Tsunami Force”, The Proceedings of the 33rd (2023) International Ocean and Polar Engineering Conference, 2022.
3. Hashimoto, T., Honda, T., Oda, Y., “Experimental Study on Tsunami Wave Forces Considering Density Change of Turbid Water Containing Sediment”, The Proceedings of the 34th (2024) International Ocean and Polar Engineering Conference, 2024.
4. Ito, S., Ota, A., Sonobe, H., Ino, S., Choi, B., Nishida, A., Shiomi, T., “Nonlinear Dynamic Analysis by Three-Dimensional Finite Elements Model Considering Uplift of Foundation”, Transactions of the SMiRT 27, 2024.
5. Katayama, Y., Kontani, O., Mihara, Y., Yasukochi, J., Inaba, Y., Kambayashi, D., “Physical Material Properties of Normal Concrete Subjected to High Temperature”, Transactions of the SMiRT 27, 2024.

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  
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	<p>[(1)b. 礫質土等の地盤の液状化による施設への影響評価]</p> <p>・礫質土の室内液状化試験や模型実験、動的変形特性(剛性や減衰のひずみ依存性)に関する研究は、古くから電力中央研究所や土木研究所等の機関で行われているので、実験結果や解析結果を評価するための基礎的な知見という意味でも、今後の研究の際にレビューされるとよいかと思えます。</p>	<p>・地盤の液状化による構造物への影響に関する既往の知見として、過去に電力中央研究所で行われた実験的検討に関する論文を引用し、本研究の課題設定に係る背景として安全研究成果報告に追記します。また、今後の研究においても、引き続き、既往の知見とともに最新の研究動向を把握し必要に応じてレビューして進めたいと思います。</p> <p>「2.4.1 はじめに」2段落目に以下の下線部を追加(安全研究成果報告 p.39)</p> <p>「耐震設計に係る設工認審査ガイド<sup>2.4.5</sup>では、土木構造物等の耐震評価に用いる地震応答解析手法において、構造物や周辺地盤の非線形挙動を踏まえ適切に解析手法を選定していることを確認することとしている。砂質土に比べて礫質土地盤の液状化に関する過去の事例は多くはないが、一例として、1993年北海道南西沖地震の液状化被害があり、比較的ゆるい地盤での被害であることが報告されている<sup>2.4.6</sup>。」「また、液状化による構造物への影響を対象にした既往の知見として、大友らによる実験的検討<sup>2.4.8</sup>があるが、砂質土を用いた実験であり、礫質土地盤の液状化による施設への影響に関して実験等により評価した事例は少なく審査に資する知見を蓄積することが重要である。」</p> <p>「参考文献」に以下を追加(安全研究成果</p>

No.	評価項目	評価意見	回答
		<p>[(2)a. 黒津波の発生条件等の検討]</p> <p>・黒津波に関する過去の研究は殆どなく、最新知見も少ないことは理解していますが、湾内の底泥の組成や物性に関する研究は数多く行われているので、基礎的なデータを得るといった観点からも、今後の研究ではレビューが求められます。</p>	<p>報告 p.133)</p> <p>2.4.6 一般財団法人電力中央研究所、「1993年北海道南西沖地震における礫地盤液状化の原因解明(その1)ー地盤調査・試験と液状化判定ー」、電力中央研究報告、研究報告:U94007、平成6年</p> <p>2.4.8 大友敬三、末広俊夫、河井正、金谷賢生、「強震時における鉄筋コンクリート製地中構造物横断面の塑性変形に関する実証研究」、土木学会論文集、2003 巻、724号、pp.157-175、平成5年、doi:10.2208/jscej.2003.724_157</p> <p>・ご指摘のとおり、例えば仙台湾では、古くから底泥の分布調査<sup>*1), *2)</sup>が行われております。これらの文献では、底泥の組成や物性が広範に調査されており、海底堆積物に関する知見として、参考にしました。仙台湾以外の各地域における底泥に関する知見等、引き続き既往知見・最新知見の調査を継続したいと考えております。下記文献を安全研究成果報告の参考文献に追記いたします。(安全研究成果報告 p.76)</p> <p>*1) 菅野, 仙台湾の底質とアカガイ漁場について, 東北区水産研究所研究報告, 26号, pp. 55-75, 1996</p> <p>*2) 田邊, 鈴木, 山崎, 東日本大震災後の仙台湾南部海域における底質の変化, 宮城水産研究報告, 22号, 2022</p>
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	<p>[(1)b. 礫質土等の地盤の液状化による施設への影響評価]</p> <p>・シミュレーション解析での再現性に影響を与える要因でもあるため、今後の研究の際</p>	<p>・遠心模型実験及びそのシミュレーション解析において、初期せん断応力の影響は把握できたものの、解析による再現性として</p>

No.	評価項目	評価意見	回答
		<p>には、初期せん断の影響を切り分けて検討・評価を行うことを期待します。</p> <p>・シミュレーション解析では一般的な FLIP が用いられていますが、飽和地盤(液状化発生時)の挙動については、まだ再現性が十分とはいえません。遠心模型実験を再現するという視点ではなく、1g場の実現象をシミュレーションするという視点で、パラスタだけでなく、解析手法(要素モデル、構成則や解析コードも含めた)の向上を含めた研究が求められます。</p>	<p>は課題が残されており、いただきましたご意見を考慮して今後の研究を進めたいと思います。</p> <p>・飽和地盤の再現性には課題が残されており、特に、要素シミュレーションによる地盤の液状化強度、応力ひずみ関係の条件設定が結果に大きく影響していると考えています。また、遠心模型実験における寸法効果や入力特性等の特有の課題もあり、ご指摘を踏まえ、今後の研究では、重力場での液状化特性等も考慮し、解析手法等の精度向上を含め検討していきたいと思ます。</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>	<p>[(1)b. 礫質土等の地盤の液状化による施設への影響評価]</p> <p>・報告書のボリュームの制限もあるかと思いますが、解析と実験を比較して、周面せん断応力や作用土圧がそれぞれ、「大きい」、「小さい」といった表現に留めず、過剰間隙水圧の上昇(有効応力の低下)に対応した周面せん断応力の低下、泥水化による土圧増加と関連付けて記載していただいた方が解析結果を理解しやすいと思います。</p>	<p>・解析モデルの要素シミュレーションに基づく条件設定による影響で、解析は実験よりも早い段階で液状化していることが、周面せん断力や作用土圧の相違に影響しております。この旨、安全研究成果報告へ反映します。</p> <p>安全研究成果報告の「2.4.3 遠心模型実験のシミュレーション解析、(2)解析結果、②構造物への作用土圧等の性状と構造物への影響」の1段落目に以下の下線部を追加(安全研究成果報告 p.47)</p> <p>「飽和地盤については、解析の過剰間隙水圧の上昇が早く、<u>構造物周辺の地盤が液状化したことから、周面せん断力が加振 2 波目程度から、ほぼゼロ値となっている。水平土圧は、解析結果に位相の相違が見られるとともに、<u>液状化により泥水化し、土と水が一体となって構造物に作用したことから加振中の振幅が実験よりも大きめの結果となっている。</u></u>」</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。	<p>[(2)a. 黒津波の発生条件等の検討]</p> <p>・津波堆積物の細粒分含有率(FC)の多くが FC=10~20(%)という調査結果について、津波によって浸水した陸域で採取された津波堆積物の細粒分含有率だとすると、この値と一般的な湾内の底泥の細粒含有率とを比較検討しておくことが必要と思われる。</p>	<p>・津波堆積物の細粒分含有率(FC)と湾内の底泥の細粒含有率の比較検討については、紙面の関係から文献*1) に預けました。以下、検討結果について概説いたします。湾内の底泥の細粒含有率は 70%以上となる場合*2)もあり、底泥の細粒分含有率と比較すると、今回評価に用いた津波堆積物の細粒分含有率(FC)は、全体的に過小な値と言えます。差異が生じた理由として、計測前の有機物除去の有無、風雨、人間活動等の影響が考えられます。</p> <p>なお、採取者による目視判定では、FC=10~20(%) でも泥と判定された試料が多数ありました。計測値どおり FC=10~20(%) では砂のように見えると考えられますので、有機物除去の有無により、過小に計測した影響が大きいと考えております。</p> <p>*1) 鳥山, 山下, 石田, シルト性堆積物の含有割合と採取地域の関係分析の試み, 土木学会論文集特集号(海岸工学), Vol. 80, No. 17, 2024</p> <p>*2) 菅野, 仙台湾の底質とアカガイ漁場について, 東北区水産研究所研究報告, 26号, pp. 55-75, 1996</p>
5	その他	<p>[(1)b. 礫質土等の地盤の液状化による施設への影響評価]</p> <p>・シミュレーション解析に用いた動的特性は、ひずみレベルで<math>\gamma=0.4\%</math>辺りまでの試験結果をもとに H-D モデルを適用しているが、密な地盤だから大変形は生じないとする一方で、過剰間隙水圧が発生する程度のひずみは生じていることから、今後の研究では、<math>\gamma=1\%</math>以降の大ひずみ領域についても意識していただければと思います。</p>	<p>・今回の解析モデルの設定においては、一般的な動的変形特性試験に基づいて設定しており、せん断ひずみ<math>\gamma</math>は最大でも 1.0%程度となっておりますが、ご指摘を踏まえ、今後の研究においては、実験及び解析結果における変形状況を踏まえ、大ひずみ領域に留意して研究を進めたいと思います。</p>

No.	評価項目	評価意見	回答
		<p>・飽和地盤の過剰間隙水圧の上昇過程(特に載荷初期)が再現できていないことから、その後の加速度応答や変位、せん断応力についても再現性が低く、定性的にも説明が十分とはいえません。不飽和地盤では概ね一致していることから、実験で見られるような、密の地盤特有の正のダイレタンシー挙動やサイクリックモビリティの類する挙動の再現性の向上が求められます。</p> <p>[(2)a. 黒津波の発生条件等の検討]</p> <p>・同じ細粒土(75<math>\mu</math>m以下)であっても、有機物質の付着しやすさは粒径によってかなり異なるのではないのでしょうか。より細粒の粘土粒子はそもそも高含水比であることが多いが、比較的遠くまで流れて堆積します。一方で粒径の比較的大きなシルトは、粘土に比べれば低含水比ではあるが、河口に近いところに堆積することを考えると、細粒分含有率だけでなく、粘土分含有率(PC)や粒度分布での評価を加えることも考えられます。</p>	<p>・先にいただきましたご指摘同様、解析モデルの要素シミュレーションに基づく条件設定による影響で、解析は実験よりも早い段階で液状化していることが、サイクリックモビリティの再現性にも影響していると考えています。引き続き、これらの課題については検討していきたいと思います。</p> <p>・同じ細粒子(75<math>\mu</math>m以下)の括りの中でも粒径の違い等によって堆積の特性に違いが生じる可能性についてご指摘いただきありがとうございます。大変興味のあるところではございますが、今回評価に用いたデータ群は、粘土分含有率や粒度分布に関するデータはありませんでした。また、本研究では、同じ細粒子(75<math>\mu</math>m以下)のデータ群を対象にこれらの全体傾向の把握を目的とした検討を実施したものです。したがって、粘土分含有率や粒度分布での評価までは本研究の範囲に含めておりません。</p>
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	「C-1-1 大きな地震を経験した配管系の耐震性の把握」について、日本機械学会事例規格 NC-008 の策定においてなされた研究との違いや本研究の特徴を明確にする必要があると思われます。	<p>・ご指摘のとおり、本研究で採用している解析手法の多くは事例規格 NC-008 を参照しています。本研究の特徴は、NC-008 では対象としていない異径ティに対し、弾塑性 FEM の適用性を検証するため、試験及び解析を実施した点にあります。</p> <p>本研究により、異径ティの場合、幾何形状のモデル化によって、ひずみ範囲のみならず、最大ひずみ発生位置も大きく異なること、そして条件によっては溶接部で疲労損傷が発生する可能性があることが明らかになりました。溶接部での損傷を再現するた</p>

No.	評価項目	評価意見	回答
			<p>めのモデル化の方針は、事例規格 NC-008 では議論されていない内容であるため、今回得られた結果は弾塑性 FEM の適用性を議論する上で重要な知見になるものと考えています。</p> <p>異径ティが既往の試験例が少ない形状であること、異径ティ特有の損傷挙動に留意する必要があることは、安全研究成果報告の「2.5.1 はじめに」及び「2.5.4 まとめ」に記載いたします。(安全研究成果報告 p.53、p.61)</p>
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	<p>「a-1-2 高温時における原子炉建屋の地震時応答挙動に関する検討」で、格納容器の高温状態が建屋全体へ及ぼす影響は限られると結論しているが、解析を実施しなくてもある程度予測できる結果ではないでしょうか。本結論が、本検討で期待していた内容であるのであれば、計画段階での解析手法が適切だったのかを検討する必要があります。</p> <p>「C-1-1 大きな地震を経験した配管系の耐震性の把握」の有限要素解析において、重錘部の慣性モーメントの影響は明らかにしておく必要があります。</p>	<p>・本結論は、本検討で期待していた内容となります。本検討では、審査で確認済みの解析手法の妥当性を確認する意味から、原則として、設計で用いられる解析手法を採用しております。実機相当の原子炉建屋の解析モデルを対象に、設計で用いられる解析手法により、具体的な影響を確認し審査に資する知見を拡充する計画としており、計画段階で選択した手法は適切であったと考えております。</p> <p>・拝承です。弾塑性 FEM で重錘部の 3 次元モデルを作成して感度解析を行い、時刻歴応答への影響を確認するための研究を、今後計画いたします。</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。	<p>「C-1-1 大きな地震を経験した配管系の耐震性の把握」について、設計上の許容繰返し回数に対する裕度は N=1000 で破損が起きなかったことを基準として裕度が算出されていますが、学術的に適切な評価手法ではないと思います。設計上の許容応力に相当するレベルの正弦波では、破損が生じないためであるとのことですが、その場合現在の報告書では裕度は無限大になりま</p>	<p>・拝承です。ご指摘を踏まえ見直しを検討し、N=1000 で破損が起きなかったことを基準として算出した裕度に係る記載を安全研究成果報告から削除することといたします。(安全研究成果報告 p.58)</p>

No.	評価項目	評価意見	回答
		す。無限大に発散する値を有限の値以上であると評価するのは適切な評価手法ではないと思われますので、見直しをご検討ください。	
4	④重大な見落とし(観 点の欠落) がないか。	特になし。	-
5	その他	コメントなし。	-

(専門技術者の意見及び回答)

No.	評価項目	評価意見	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	コメントなし。	-
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	<p>[(1)a-1-2 高温時における原子炉建屋の地震時応答挙動に関する検討]</p> <p>・実大ブロック試験の壁周方向の境界条件を記載した方が良いと思います(面内方向の熱伝達の考え方が判らない)。</p> <p>[(2)a. 黒津波の発生条件等の検討]</p> <p>・実スケールの数値解析において、流体密度を 1.2g/cm<sup>3</sup>を想定した根拠が判りません(今回の検討から 1.2g/cm<sup>3</sup>は推定されないのではないのでしょうか)。</p>	<p>・実大ブロック試験では、ライナー面及びその反対面以外の 4 面を断熱材で保温した状態で、ライナー面を加熱しております。この旨、安全研究成果報告に記載いたします。(安全研究成果報告 p.19)</p> <p>・流体密度として 1.2g/cm<sup>3</sup>を想定した根拠の一つとして、松富ら<sup>*1)</sup>の土砂を対象とした氾濫水の密度が最大で 1.2 g/cm<sup>3</sup>に達するという知見を参考にしました。加えて、高濃度のサスペンション粒子を含む泥質流体である Fluid mud については、浮遊物質濃度が最高で 300 g/L 程度であり<sup>*2), *3)</sup>、密度 2.27 g/cm<sup>3</sup>のシリカフュームでは最大密度が 1.2 g/cm<sup>3</sup>程度となると考えられます。そのため、流体密度の上限値として 1.2 g/cm<sup>3</sup>を想定しました。この内容について、安全研究成果報告に記載します。(安全研究成果報告 p.82)</p> <p>*1) 松富英夫, 川島峻:津波氾濫流の密度に関する基礎実験, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.71, No.2, I_355-I_360, 2015.</p> <p>*2) W. Van Leussen and J. Dronkers : Physical processes in estuaries: An introduction, Springer Berlin, Heidelberg, 1988.</p>

No.	評価項目	評価意見	回答
		<p>[(3)a. 建物・構築物の設置状況及び形状特性を考慮した衝撃評価]</p> <p>・実験に来待石を用いていますが、この石を用いた理由と、一般的な岩盤やマンメイドロックの硬さや強さと比較してどのような位置づけとなるかを明記した方が良いと思います。</p>	<p>*3) 西田尚央, 伊藤慎: Fluid mud の特徴とその地層解析における役割, 地質学雑誌, Vol.115, No.4, pp.149-167, 2009.</p> <p>・来待石につきましては、発電所施設で想定される岩盤強度であることに加え、入手が容易で比較的均質であることから採用しました。安全研究成果報告では、来待石の結果のみ掲載しておりますが、マンメイドロックを想定して材料強度を調整したモルタル試験体(想定圧縮強度: 1、5、20MPa)への貫入実験を実施して検討しております。上記について、安全研究成果報告に反映します。</p> <p>「2.9.2」の(1)の1段落目に以下の下線部を追加(安全研究成果報告 p.87)</p> <p>「来待石は入手が容易で品質が比較的均一であることから採用した。また、強度調整モルタルは想定一軸圧縮強さ 1・5・20MPa とし、様々な圧縮強さに対する衝突実験を実施した。」</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>	<p>[(1)a-1-1 地震時に低接地率状態となる建屋の応答挙動に関する検討]</p> <p>・解析特有にみられる事象については、その物理的意味、実現象との関係、構造物等に与える影響など、より掘り下げた検討を実施した方が良いと思います。</p>	<p>・ご指摘有難うございました。本検討では、既往文献から読み取った試験条件、結果等を用いて、試験結果の再現解析等を行い、解析特有にみられる事象、その物理的意味等について検討いたしました。より掘り下げた検討を実施した方が良いとのご意見について、本プロジェクトは一旦終了するため、将来的なプロジェクトでの実施を含め、課題として検討させていただきます。</p>

No.	評価項目	評価意見	回答
		<p>[(1)a-1-2 高温時における原子炉建屋の地震時応答挙動に関する検討]</p> <p>・プッシュオーバー解析を選択した理由を明記した方が良いと思います(繰り返し荷重による影響の考え方が判らない)。</p> <p>・前提条件(温度圧力など)の設定根拠を明記した方が良いと思います。</p> <p>[(1)c-1-2 大きな地震を経験した鋼板コンクリート製の原子炉本体基礎の耐震性の把握]</p> <p>・せん断力が卓越する場合には注意が必要となりますが、原子炉本体基礎の構造上、曲げが卓越するのではないのでしょうか。</p>	<p>・本検討では、原子炉建屋の最大耐力への影響を把握するため、プッシュオーバー解析を選択いたしました。なお、構造試験結果のプッシュオーバー解析により、最大耐力を再現出来ていることから、プッシュオーバー解析による最大耐力の評価に繰返し荷重による影響は考慮出来ていると考えております。この旨、安全研究成果報告にも記載いたします。(安全研究成果報告 p.22)</p> <p>・本検討では、事業者が、重大事故等対策の有効性評価の審査資料において、原子炉格納容器の限界温度・圧力を<math>200^{\circ}\text{C}\cdot 2\text{Pd}</math>(Pd: 最高使用圧力)としていること等を踏まえ、それらを包含する条件として、試験及び解析検討における条件を設定いたしました。この旨、安全研究成果報告に記載いたします。(安全研究成果報告 p.17)</p> <p>・本研究では BWR Mark-II 型の原子炉本体基礎を対象といたしましたが、BWR Mark-I 型は Mark-II 型に比べて高さ/外径が小さくなるため、Mark-II 型に比べてせん断力の影響が大きくなり、全体変形に占めるせん断変形の割合が大きくなると考えられます。ご指摘を踏まえ、安全研究成果報告の記載のうち、「原子炉本体基礎のせん断力が卓越する場合には」を「原子炉本体基礎に作用するせん断力の影響が大きい場合には」に修正いたします。(安全研究成果報告 p.67、p.111)</p>

No.	評価項目	評価意見	回答
		<p>[(2)a. 黒津波の発生条件等の検討]</p> <p>・黒津波の発生可能性を簡易評価する提案モデルは、東北地方の限られた調査結果を元に検討されているため、全国展開する際の適用範囲を示した方が良いと思います。</p> <p>・「条件によっては」流体密度の増分以上に波力が増加する可能性があるということですが、密度増分以外にも、実験のばらつきなども含めて要因を分析する、という理解でよろしいでしょうか。</p> <p>[(3)a. 建物・構築物の設置状況及び形状特性を考慮した衝撃評価]</p> <p>・岩盤等試験体への高速貫入実験結果において、Young 式の保守性が確認されたとありますが、実験結果とは 2 倍程度の差が見られることに対する考察も必要と思います。</p>	<p>・ご指摘ありがとうございます。安全研究成果報告に「ただし、太平洋側の限られた地域における採取結果に基づく評価であり、他地域への適用性は未確認であることに留意する。」を追記いたします。(安全研究成果報告 p77)</p> <p>・ご理解のとおりです。同条件で 5 回繰り返した平均値を用いた結果を示しました。最大波力の増加条件については、実験のばらつきの影響を定量化し、要因分析を行う予定です。</p> <p>・今回の研究では、当該研究で実施した実験結果に対して既往評価式の適用性を確認したものであり、既往評価式の優劣を示すものではありません。既往評価式毎に対象にした岩石が異なりますので、別の岩石を用いた貫入実験結果に対しては適用性が良い場合も考えられます。</p>
4	④重大な見落とし(観測点の欠落)がないか。	コメントなし。	-
5	その他	<p>[(1)a-1-2 高温時における原子炉建屋の地震時応答挙動に関する検討]</p> <p>・今回の研究成果から規制としての確認事項に至った経緯が理解しにくいので、もう少し丁寧な説明が必要と思います。</p>	<p>・ご意見有難うございます。確認事項については、構造技術者に広く認識されている事項を改めて記載した形と考えております。1点目の確認事項は、実験結果のシミュレーション解析における試行錯誤等から、材料モデルの妥当性に関する確認事項</p>

No.	評価項目	評価意見	回答
		<p>[(1)a-2 高密度に配置した地震計による建屋の精緻な三次元挙動の把握]</p> <p>・実機を用いた検討は大変有効であると思えます。今後は実設計への反映方法の検討など、継続的な検討を期待します。</p> <p>[(1)a-3 建物・構築物の地震応答解析における減衰定数の設定に係る検討]</p> <p>・「比較的単純な構造物への適用」とする目的と、「構造の複雑さを考慮して設定する必要がある」とする結論との関係が理解しにくいです。対象とした比較的単純な構造物は、地震応答解析が必要な程の重要施設なのでしょうか。</p>	<p>として挙げました。2点目の確認事項は、審査において、各荷重条件での境界条件を確認していることはご承知のとおりと思えますが、本検討では、床スラブの材料特性を変えた建屋一体モデルによる感度解析により、入力荷重が大きい場合、RCCV に取り付く床スラブが塑性化するため RCCV 部の負担荷重に影響を与えることを確認しました。特に、RCCV 設計用モデルでは、RCCV 部に接続する床スラブ等の周辺部材の影響を境界条件として設定するため、それら境界条件の妥当性に関する確認事項として挙げました。3点目の確認事項は、2点目のとおり、入力荷重が大きくなると、各荷重載荷で部材に塑性化が生じるため、各部材が塑性化する順序が着目部材の評価に影響を与える可能性があることから、荷重組合せに係る確認事項として挙げました。これらの旨、安全研究成果報告に記載いたします。(安全研究成果報告 p.23)</p> <p>・拝承いたします。</p> <p>・「比較的単純な構造物」として、原子力施設、一般建築物での観測記録等による減衰の分析事例に加え、耐震壁の振動実験による減衰の分析事例等の知見、当該実験のシミュレーション解析によると、実験及び解析結果と観測記録での相違が見られ、渡り廊下のような比較的単純な構造物であっても実構造物には、構造物部材が有する</p>

No.	評価項目	評価意見	回答
		<p>[(1)b. 礫質土等の地盤の液状化による施設への影響評価]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・飽和土については解析と実験結果に差異が見られるとの結論と思われませんが、今後も解析の高度化を進めていくのでしょうか。</li> <li>・礫質土だからといって不飽和だけ検討しておけば良いということではなく、地盤条件を適切に踏まえて、不飽和条件で評価するとともに、飽和条件で保守的な条件で表すことが妥当、という結論との理解でよろしいでしょうか。</li> </ul> <p>[(1)c-1-1 大きな地震を経験した配管系の耐震性の把握]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・規制庁の研究成果は、民間規格を策定する上で重要な知見となります。結果を公知</li> </ul>	<p>減衰に加えて何らかの要因により実物の減衰が大きくなっているものと考えられ、今回の検討結果からは「構造の複雑さ」が一要因としています。これらの旨、安全研究成果報告に記載いたします。(安全研究成果報告 p.38)なお、今回は、既往文献の限られた情報による結果であり、今後の研究では引き続き「構造の複雑さ」に関する知見を拡充していく予定です。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・今回対象としました「比較的単純な構造物」は、緊急時対策所や渡り廊下のような建物を想定しており、他重要施設と同様、地震応答解析を実施しております。また、比較的重要度の低い建物の場合であっても、近隣の重要施設への波及的影響を確認するために、地震応答解析を行う場合があります。</li> <li>・飽和土の実験と解析の差異については、解析モデルの設定における要素シミュレーションの精度が起因していると考えており、今後の研究において再現性を向上していきたいと考えています。</li> <li>・礫質土の評価については、遠心模型実験の結果より飽和・不飽和の場合のどちらかの地盤での評価が必ずしも保守的であるとは限らないため、液状化が否定出来ないような地盤においては、飽和・不飽和の両者の検討により評価することが妥当であるとと考えております。</li> <li>・拝承です。節目節目で安全研究の成果を取りまとめ、安全研究成果報告や学術論文</li> </ul>

No.	評価項目	評価意見	回答
		<p>化するだけでなく、関連する団体と直接議論するなど、接点を持った活動をすることでより良い成果が得られると思います。</p> <p>[(1)c-2 制振装置を適用した設備の耐震性の把握]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・アンケートと聞き取り調査のみで留意点を作成したとありますが、今後高度化する予定はあるのでしょうか。</li> </ul> <p>[(3)b. 衝撃力に対する設備の応答解析手法の検討]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・パルス的な衝撃振動による応答影響についての検討は大変有益であると考えため、継続的な検討を期待します。</li> </ul> <p>[共通]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・成果の活用における「～審査において…活用されることが期待される。」との記載は他人事のように見えます。自らが活用するような表現が望ましいと思います。</li> </ul>	<p>等の公表を行うとともに、学会等での議論を通じて、関連団体の関係者との情報共有を行います。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・今後審査等を通じて得られた知見を、必要に応じて本研究の成果である「審査における留意点」に反映する予定です。</li> <li>・パルス的な衝撃振動については、令和7年度以降も継続して研究を実施いたします。</li> <li>・安全研究成果報告における当該記載の意図はご指摘のとおり規制庁自らが活用するものとなります。一方、研究部門での成果の活用は最終的に審査部門等において行われるものであるため、このような記載とさせていただきます。</li> </ul>
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	<p>[礫質土等の地盤の液状化による施設への影響評価]</p> <p>礫質土に関する液状化に関する研究に関する既往研究については、1990年代以降から研究例もあるので、この①の観点としては、過去の研究レビュー内容の充実が必要である。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・安全研究成果報告の文章及び参考文献に、礫質土地盤の液状化に関する被害事例と過去の類似研究に関する既往の知見として以下を追加します。(安全研究成果報告 p.39、p.133)</li> <li>2.4.6 一般財団法人電力中央研究所、「1993年北海道南西沖地震における礫地盤液状化の原因解明(その1)－地盤調査・試験と液状化判定－」、電力中央研究所報告、研究報告:U94007、平成6年</li> </ul>

No.	評価項目	評価意見	回答
			2.4.8 大友敬三、末広俊夫、河井正、金谷賢生、「強震時における鉄筋コンクリート製地中構造物横断面の塑性変形に関する実証研究」、土木学会論文集、2003 巻、724号、pp.157-175、平成5年、doi:10.2208/jscej.2003.724_157
2	②解析実施手法、実験方法が適切か。	コメントなし。	—
3	③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	<p>[非線形挙動を示す建屋の耐震安全性評価手法の適用性評価]</p> <p>資料1のスライド17において、仮想実機建屋の解析モデルイメージとして、建屋一体型モデルと設計モデルの2種類を実施している図面をいれているが、この2つのモデルのそれぞれの位置づけについて理解しやすいように記述すべき。設計モデルという言葉のみでは説明が足りていないように感じた。</p> <p>[黒津波の発生条件等の検討]</p> <p>スライド46における流体密度の異なる水に、同じエネルギーを持つ入射津波を与えるこの実験方法は、研究結果を評価する上で有益な工夫であり、本研究の新規性を高めるものである。</p>	<p>・設計モデルは、RCCV の設計時に応力解析モデルとして採用される解析モデルを想定したものになります。「設計モデル」を「RCCV 設計用モデル」との表現に修正し、安全研究成果報告にて「RCCV 設計用モデルは、RCCV の設計時に応力解析モデルとして採用される解析モデルを想定したものである。」と記載いたします。(安全研究成果報告 p.22)</p> <p>・実験方法の新規性を評価いただき、有り難く存じます。</p>
4	④重大な見落とし(観測点の欠落)がないか。	<p>[礫質土等の地盤の液状化による施設への影響評価]</p> <p>スライド29で「解析は過剰間隙水圧が大きいことから、土圧は実験より大きい結果となった」となるが、スライド29の図面に置ける③頂版左や④頂版右の鉛直土圧では実験結果(青)が解析結果(黒)より大きい。</p>	<p>・スライドでは、構造物の変形挙動への影響が大きい水平土圧の結果を代表して説明しておりました。安全研究成果報告について、水平土圧及び鉛直土圧の両者に対して、解析結果の傾向を明記します。</p>

No.	評価項目	評価意見	回答
		<p>評価対象の着眼点との関係もあるが、正確に記載すべきである。</p> <p>[黒津波の発生条件等の検討]</p> <p>スライド 47 において、流体密度と最大波力の増減率を示しているが、この図面のみで衝突時の水位時刻歴データ等の津波挙動に関する情報がないので、最大波力の増減率が 1.0 を超えた場合のその考察に至る過程の情報を充実する必要がある。</p> <p>なお、参考資料 3 において、最大波力の増減率が 1.0 を超えた場合(W3 塩水)の津波衝突時の津波挙動に関する記載はあるものの、それを裏付ける図面などの情報を追加することが望ましい。</p>	<p>安全研究成果報告の「2.4.3 遠心模型実験のシミュレーション解析、(2)解析結果、②構造物への作用土圧等の性状と構造物への影響」の 1 段落目に以下の下線部を追加(安全研究成果報告 p.47)</p> <p>「<u>水平土圧及び周面せん断力</u>」、「<u>水平土圧は、解析結果</u>」、「<u>一方で、鉛直土圧については位相の相違が見られ、加振中の振幅は実験結果と同レベルであるものの、解析結果の方が小さい結果となった。</u>」、「<u>水平土圧の相違により</u>」</p> <p>・安全研究成果報告に、最大波力の増減率が 1.0 を超えたケースについて、衝突時の津波挙動を示す時刻歴データを追記します。(安全研究成果報告 p.81、82)</p>
5	その他	コメントなし。	-

### 3 火災防護に係る影響評価に関する研究（フェーズ2）（R3年度～R6年度）

#### 1. 研究プロジェクトの目的

高エネルギーアーク損傷（以下「HEAF」という。）の爆発現象の影響評価、火災時の熱による電気ケーブルの絶縁性能劣化の評価及び火災影響評価手法・解析コードの整備に関する研究を行い、「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」、「原子力発電所の内部火災影響評価ガイド」、「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド」及び「高エネルギーアーク損傷（HEAF）に係る電気盤の設計に関する審査ガイド（以下「HEAF 審査ガイド」という。）」について、見直しの要否の検討に必要な技術的知見を取得することを目的とする。

#### 2. 研究概要

- 「HEAF の影響評価」に関する研究では、実電気盤を想定した試験・解析を行い、HEAF 審査ガイドの見直しの要否の検討及び HEAF の影響範囲を明確にするための爆発現象の熱・圧力に係る知見を取得した。
- 「電気ケーブルの火災時の熱劣化評価」に関する研究では、近傍の火災源からの入熱及びトレイ内の別のケーブルからの入熱を模擬した電気ケーブルの熱劣化試験及び分析を行い、電気ケーブルの熱劣化評価手法を整備した。また、米国における火災時安全停止評価で実施されている回路解析の調査を行った。
- 「火災影響評価手法・解析コード等の整備」に関する研究では、原子力施設における主要な可燃物等を対象として、解析及び試験により火災時の燃焼挙動等のデータを取得して知見を拡充し、実機解析への適用を想定した解析コード等を検討した。

#### 3. 研究成果

- 「HEAF の影響評価」に関する研究では、HEAF 審査ガイドに基づきアークエネルギーが火災発生防止のしきい値の最大値 25 MJ 以下に設定された電気盤を想定した試験から、爆発圧力の影響は小さいと考えられること、また、熱影響を与える可能性のある金属蒸気の発生源の金属母線の損耗量はアークエネルギーと共に増加するが、母線の材料や断面積に依存することなどを示した。
- 「電気ケーブルの火災時の熱劣化評価」に関する研究では、火災時環境を模擬したケーブルの加熱試験から、ケーブルの絶縁抵抗が顕著に低下する温度は、絶縁体及びシースの種類と組合せに依存することを示すとともに、研究対象のケーブルの絶縁低下速度はアレニウス則で評価できることを示した（国立大学法人筑波大学への委託研究）。また、米国の回路解析に関する規制状況、事業者の対応事例等の情報を整理した。
- 「火災影響評価手法・解析コード等の整備」に関する研究では、HEAF 爆発時に発生する金属蒸気の噴出・酸化を考慮した解析から、電気盤から外部空間へと及ぼされる放射の傾向は、母線種類により異なることを示した。また、実施設を想定した液体燃焼試験の発熱速度の解析結果は、燃焼の初期と定常状態では試験結果とおおむね整合するが、

燃焼終了期に乖離が生じることを示した。小規模の可燃性液体燃焼試験（国立大学法人山口大学への委託研究で実施）結果から、燃焼末期の液体内部の対流は液体の蒸発を促進する効果があり、これを火災解析で考慮する必要があることを示した。

#### 4. 事後評価結果

##### (1) 項目別評価

###### ① 成果目標の達成状況：A

- 「HEAF の影響評価」に関する研究では、実電気盤の HEAF 爆発現象発生時に想定される爆発圧力と熱影響の大きさに関するデータを取得して分析した。分析から得られた知見は、HEAF 審査ガイドに示されている HEAF の影響範囲に係る記載内容の保守性の確認に活用できることから、目標は達成したと評価する。「電気ケーブルの熱劣化評価」に関する研究では、火災時の熱による電気ケーブルの絶縁性能劣化の評価のための基礎データを拡充し、また、米国の回路解析に関する情報を整理することができた。「火災影響評価手法・解析コード等の整備」に関する研究では、原子力施設における主要な可燃物等を対象とした火災時の燃焼挙動等を解析した。また、試験データを拡充して、解析コード等の整備に活用した。

###### ② 成果の公表等の状況：S

- 原子力規制庁から、NRA 技術報告 1 件、NRA 技術ノート 2 件及び査読付プロシーディングス 1 件を公表した。
- 委託先から、査読付プロシーディングス 1 件を公表した。
- 以上より、「安全研究プロジェクトの評価実施要領」に示される評価基準（NRA 技術報告等（注：NRA 技術報告又は NRA 技術ノートを指す） 2 件以上を公表した）を満たすことから、S 評価とした。

###### ③ 研究の進め方に関する技術的適切性：A

- 国内外の専門家との議論を通して、研究の進め方の妥当性を確認した。また、国内外の過去の研究及び最新知見を踏まえた上で、適切な手法にて研究を実施しており、技術評価検討会での外部専門家からの意見も踏まえ、技術的に適切であると判断した。

##### (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、最新知見や基準が反映されている。基本的に考え得る条件を網羅的に評価して丁寧に研究が進められており、実施内容及び手法は適切である。
- 電気ケーブルの火災時の熱劣化評価について、実際の火災環境の評価に適用できる汎用性のある知見取得の必要性について意見があった。これについては、令和 7 年度から開始している安全研究プロジェクトにおいて、必要な基礎的データを拡充する等により、実際の火災環境の評価に活用できる汎用性

のある知見を取得する予定である。

- 可燃性液体の液面燃焼時の液体流動についてスケール効果の考慮の必要性について意見があった。これについては、令和7年度から開始している安全研究プロジェクトにおいて、国際協力プロジェクトで取得された中規模の可燃性液体燃焼試験の結果も参照して、スケール効果も考慮して研究を進める予定である。
- 詳細は別表 1-3 参照。

④ 研究マネジメント及び予算・契約管理の適切性：A

- 委託先も含め適切な実施体制を構築して研究を進めた。計画どおりに研究成果が得られたこと、また、原子力規制庁及び委託先から計画的に研究成果を公表できたことから、適切なマネジメントのもとに研究が行われたと評価した。
- 予算執行、進捗管理及び検収を含めた契約業務を、法令等を遵守して実施しており、適切に業務管理が行われたと判断した。

⑤ 成果の規制への活用の状況・見通し：S

- 本プロジェクトで得られた HEAF の第一段階における爆発現象に関する知見は、NRA 技術報告「原子力発電所における高エネルギーアーク損傷 (HEAF) に関する分析 (第二報)」として公表されている。今後、本知見を基に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及び HEAF 審査ガイドへの反映の要否を検討する予定である。また、本プロジェクトで実施した調査で得られた米国における火災時安全停止評価のための回路解析に関わる知見は NRA 技術ノート 2 件 (「米国における火災時安全停止回路解析の調査」及び「米国における火災防護検査に関する調査 (電気関係) 」) として公表されている。これらの知見は、技術情報検討会の要対応技術情報「回路の故障が 2 次火災又は設備の損傷を誘発させる可能性」(平成 26 年度抽出) への対応方針の検討資料 (第 49 回技術情報検討会 (令和 3 年 9 月 9 日)、第 63 回技術情報検討会 (令和 6 年 1 月 25 日)) で参照され、当該要対応技術情報をスクリーニングアウトする判断の重要な根拠として活用された。(S、技術基盤課)
- 本プロジェクトで得られた HEAF の影響評価は、火災の感知、影響軽減のための知見や火災防護に関する研修の資料として活用できる可能性がある。またケーブルの劣化評価は、ケーブルの熱による影響評価に活用が期待されるが、経年劣化による影響を踏まえ、さらなる知見の拡充の必要性があると考え。(A、火災対策室)
- 本プロジェクトで得られた火災影響評価手法等に関する技術的知見は、事業者が行う火災影響評価の妥当性を確認する際の技術的知見を拡充するものであるが、現時点では実機の火災区域・火災区画の条件との比較など、適用範囲が明確になっておらず、審査官が利用できる状態に整理されていないと考える。(B、実用炉審査部門)

- 本プロジェクトで得られた原子力施設での複数区画に渡る大規模火災解析に関する技術的知見は、今後、そのような検査指摘事項があった場合の重要度評価の判断に寄与する可能性がある。(B、検査監督総括課)
- 本プロジェクトで得られた HEAF の影響評価等に係る技術的知見は、原子力規制検査の活動に現時点で直接的な貢献をもたらすものではないものの、火災防護に関する個別の知見として共有されるべきものと考えられる。(B、核燃料施設等監視部門)

(2) 総合評価：S (総合点：3.4)

- 担当安全技術管理官等による評価コメント  
 研究を適切に遂行して、目標とした知見の取得を達成するとともに、1 件の NRA 技術報告及び 2 件の NRA 技術ノートを発表することができた。NRA 技術報告等の研究成果は、HEAF 審査ガイドに示されている HEAF の影響範囲に係る記載内容の保守性の確認に活用できる。

5. 評価結果の今後の活用

- 電気ケーブルの火災時の熱による絶縁性能劣化について、国内の原子力施設で使用されている代表的なケーブル種類の基礎データを拡充し、実機評価に汎用的に活用できる知見を取得する。
- 可燃性液体の液面燃焼時の流動について、スケール効果も考慮して研究を進める。

(主な成果の公表)

(1) 原子力規制庁の職員が著者に含まれる公表

- NRA 技術報告
  1. 原子力規制委員会、NRA 技術報告、「原子力発電所における高エネルギーアーク損傷 (HEAF) に関する分析 (第二報)」、NTEC-2025-1001、令和 7 年
- NRA 技術ノート
  1. 原子力規制委員会原子力規制庁長官官房技術基盤グループ、NRA 技術ノート、「米国における火災時安全停止回路解析の調査」、NTEN-2021-1001、令和 3 年
  2. 原子力規制委員会原子力規制庁長官官房技術基盤グループ、NRA 技術ノート、「米国における火災防護検査に関する調査 (電気関係)」、NTEN-2023-1001、令和 5 年
- 学術会議のプロシーディングス (査読付)
  1. Takizawa, M., Kabashima, H., Matsuda, A., “Electrical insulation performance of flame-retardant electrical cables with thermoplastic and thermosetting materials for nuclear power plants”, Proceedings of 4th European Symposium on Fire Safety Science (ESFSS 2024), 2024.

(2) 委託先による公表

● 学術会議のプロシーディングス (査読付)

1. Kobayashi, K., Mikami, M., “Characteristics of fuel vaporization, combustion and flows of air, fuel vapor and liquid during ethanol-pool fire”, Proceedings of the 14th Asia-Pacific Conference on Combustion, 2023.

火災防護に係る影響評価に関する研究(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
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	適切であると判断します	—
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	適切であると判断します	—
3	③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	電気ケーブルの熱劣化評価：典型的な状況しか実験できないと思われるので、火災環境(ケーブル入熱状態)の違いによる熱劣化の違いを明確にし、汎用性のある知見に高める必要があるのではないか。	いただいたご意見について拝承致します。本研究では、ケーブルへの入熱の大きさや入熱状態を踏まえて、代表的な火災環境を選定して試験を行いました。今後の研究においては、ケーブルの加熱試験でより精緻な温度制御を行い、必要な基礎的なデータを拡充するとともに、入熱状態の違いによる熱劣化の状態を調べることなどにより、実際の火災環境における熱劣化の評価に適用可能な汎用性のある知見を取得します。
4	④ 重大な見落とし(観点の欠落)がないか。	適切である(欠落はない)と判断します	—
5	その他	HEAF の影響評価：試験条件(23kA、エネルギー量など)を女川を踏まえて設定されているが、影響が大きい、より大きなエネルギー量を想定する必要が無いのか、が良くわかりません。	HEAF のアーク放電のエネルギーは、電圧、電流及び放電の継続時間の積により決まります。本研究では最大 25MJ のアークエネルギーの条件まで試験を実施しておりますが、この値については、国内事業者が「高エネルギーアーク損傷(HEAF)に係る電気盤の設

No.	評価項目	評価意見	回答
			計に関する審査ガイド」(以下「HEAF 審査ガイド」という。)に基づき設定したアーク火災発生防止対策のアークエネルギーのしきい値の最大値 25 MJ を踏まえて設定しております。従いまして、HEAF 審査ガイドに基づく対策済の電気盤における条件を包絡しているため、より大きなエネルギーを想定する必要はないと考えております。
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	実験条件の設定などでフェーズ1での研究成果、国内外での知見や基準を考慮していると思います。	拝承いたします。
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	現状のメタクラの設計指針を考慮しているとの説明であったので、解析や実験の実施方法は適切と判断します。なお、研究成果をガイドラインに反映するためには、試験体の大きさや開口部の大きさや数の多様性が重要と思いますので、多様性が十分かどうかを確認下さい。	いただいたご意見について拝承致します。本研究の試験は、原子力発電所の電源盤等の状況を網羅的に模擬することを目的とはしておりませんが、実際の電気盤の開口部の大きさや数の状況に対応した試験条件となっていると考えております。本研究で使用した試験体(基準試験体)の内容積は、過去の安全研究の試験で使用した高圧電源盤の内容積と同じとしています。また、開口部の大きさについては、試験体(基準試験体)の開口面積率(開口面積/試験体の表面積×100)を一般的な電気盤の開口面積率より小さく設定し、試験結果の爆発圧力が大きく、保守的になるようにしています。開口部の数については、試験結果から開口部の数が多いほど試験体内の圧力が小さくなる傾向を確認していますが、実際の電気盤は多数の開口部があるのに対して本研究の条件の開口部の数 1～3 は少なく、保守的になっていると考えています。

No.	評価項目	評価意見	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>評価委員会では金属蒸気の噴出量も計測すべきとのご指摘があったので、それを考慮した実験を追加いただきたい。例えば、試験体の内側表面や開口部付近に付着した金属母線材料の重量(質量)を計測(実験前後での試験体(あるいは試験体の養生金属薄板)の重量測定値の差として計測)できれば、金属母線損耗量との差をとることで、誤差は大きいかもしれませんが計測可能と考えます。</p>	<p>本研究では、高速度カメラを用いて試験体筐体からの金属母線由来の金属蒸気の噴出状況を観察しておりますが、金属蒸気の噴出量を定量的に測定しておりません。このため、保守的な仮定(金属母線の損耗量&gt;金属蒸気の発生量&gt;金属蒸気の噴出量)を行い、電気盤外部への金属蒸気の噴出量を実際よりも多く想定し、電気盤外部における金属蒸気が及ぼす熱影響(金属蒸気の空気中における酸化に伴う発熱量)の程度を見積もって評価しました。その結果、「HEAF の第一段階における爆発現象の ZOI は、盤内部の金属母線(アーク発生箇所)を基準として 0.5 m 以下と推定された」(※ZOI は Zone of influence(影響範囲)の略)、「HEAF 審査ガイドでは、HEAF 発生時に周囲の電気盤に影響を与えるおそれのある範囲の目安として水平距離 2.5 m が既に例示され、HEAF 対策の目安として使用されているが、この水平距離 2.5 m は、HEAF 時のアークエネルギーが 25 MJ 以下の電気盤であれば、HEAF の第一段階における爆発現象の ZOI を考慮しても保守的な値であることが確認できた」としております(「原子力発電所における高エネルギーアーク損傷(HEAF)に関する分析(第二報)」、NTEC-2025-1001 (<a href="https://www.nra.go.jp/data/000475731.pdf">https://www.nra.go.jp/data/000475731.pdf</a>)より抜粋)。このように、本研究では、HEAF の第一段階における爆発現象の観点について HEAF 審査ガイドへの反映の可否を判断するための知見を取得することを目的として、保守的な仮定を置いて、国内の HEAF 対策済の電気盤における HEAF 爆発の影響の程度を評価し、その結果、HEAF 審査ガイドへの反映は不要であるとの結論を得たことから、規制研究としては適切な内容であったと考えています。</p> <p>なお、電気盤の HEAF 爆発の熱影響につい</p>

No.	評価項目	評価意見	回答
			て、より現実的で精緻な評価を行う場合には、ご指摘のとおり金属蒸気の噴出量を測定して評価を行うことが望ましいと考えます。
4	④ 重大な見落とし(観点の欠落)がないか。	金属蒸気の噴出量の計測以外は観点の欠落は無いと思います。	拝承いたします。
5	その他	コメント無し	—
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	火災防護に係る影響評価に関する研究は諸外国に比べ我が国が先行している研究であると思いますが、フェーズ1から含めると長期間実施されてきた研究ですが、その成果が具体的にガイド類にも反映されているとの説明があり、最新知見が適切に利用・反映されているものと思います。	拝承いたします。
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	適切であると思います。尚、HEAF爆発現象の要素のうち、空気の熱膨張に伴う圧力評価の実験については、実際の体系に対して十分に保守的な体系で実験されたことをもう少し強調して頂くとさらに分かりやすくなるかと思えます。	いただいたご意見について拝承致します。HEAF 爆発現象のうち、空気の熱膨張に係る試験条件は、実際の体系に対して十分に保守的であることを安全研究成果報告において明確に致します。
3	③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	概ね適切であると思います。火災影響評価手法の研究では、小さい体系の実験とやや大きな体系の実験により、ある程度、スケール効果が考慮されているものと思いますが、一般にスケール効果の考慮は支配現象の同定等、複雑な要素もあるため本研究で得られた成果をさらに本研究で実施した範囲を大きく超えて外挿利用する場合には慎重な検討が必要かと思えます。	いただいたご意見について拝承致します。本研究では、可燃性液体が燃焼する際の現象を純粋に観察するため、小規模な体系の実験を行いました。今後、経済協力開発機構/原子力機関(OECD/NEA)の PRISME プロジェクトで行われた中規模の可燃性液体燃焼試験(可燃性液体の表面積が 0.1~0.4 m <sup>2</sup> 程度)の結果も参照するなどして、スケール効果も考慮して研究を進めていきたいと思えます。

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。	特に認められません。	—
5	その他	特にありません。	—

(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。	「高エネルギーアーク損傷(HEAF)の影響評価」: HEAF 模擬試験において金属噴出量の計測が困難で計測できておらず保守的に金属母線の損耗量で噴出量と仮定することが、HEAF 熱影響評価において、どのように意味付けられるのか、熱影響計算結果とも関連付けて言及ください。	いただいたご意見について拝承致します。金属蒸気の噴出量を精緻に評価することが難しい場合は、金属母線の損耗量を金属の噴出量と仮定することにより、金属の噴出量は実際よりも多く想定することとなるので、電気盤外部において金属蒸気が及ぼす熱影響(金属蒸気の空気中における酸化に伴う発熱量)も大きくなり、保守的な評価となると考えられます。「火災影響評価手法・解析コード等の整備」の①HEAF の爆発解析では、金属母線の損耗量を金属の噴出量と仮定した保守的な解析の結果を示しております。この解析結果に基づき、熱影響範囲(周囲の機器が熱影響で損傷する等により影響を受ける範囲)を評価すると、その範囲が大きくなるように、熱に比較的脆弱とされる熱可塑ケーブルに対して米国で採用されている損傷基準 15 MJ/m <sup>2</sup> を使用した場合であっても、熱影響範囲はダクト上端から 0.1m 程度以下であると考えられます。このような考察を安全研究成果報告に追加致します。
3	③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	「高エネルギーアーク損傷(HEAF)の影響評価」: HEAF 試験結果(説明資料 P.9、図 3, 4)において内容積比の増加に対する試験体内圧力の減少が単調な減少とならず、内容積比 0.5 から 1.0 において圧力が増加傾向となることの要因について言及ください。	いただいたご意見について拝承致します。基準試験体に対して内容積比 1.5 及び 2 の試験体では、基準試験体から縦方向の長さを延長することで内容積を変化させているため、圧力応答は単調減少となっていると考えられますが、内容積比 0.5 の試験体は基準試験体と比較して、水平断面積を小さくする

No.	評価項目	意見	回答
			ことで内容積を変化させていることから、上記単調減少とは異なる傾向が現れていると推定しています。このような考察を安全研究成果報告に追加致します。
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	特記事項なし。	—
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	コメント無し	—
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	P8 アーク放電に関する試験条件が書かれていますが、試験条件は実際の火災で起こりうる条件を包絡するようにしているのでしょうか？	アーク放電に関する試験条件は、2011年にHEAF事象が発生した東北電力女川原子力発電所1号機の高圧電源盤の設定値とおおむね同等になるように短絡電流を23kA、初期電圧値を7kVとしております。また、国内事業者がHEAF審査ガイドに基づき設定したアーク火災発生防止対策のアークエネルギーのしきい値の最大値が25MJであることを踏まえ、本研究では最大25MJのアークエネルギーの条件まで試験を実施しており、HEAF審査ガイドに基づく対策済の電気盤における条件を包絡しています。
3	③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	P16 図12(b)ケーブルの絶縁抵抗のグラフで、ヒータ設定温度が異なると絶縁抵抗の落ち着き先が異なりますが、この理由は説明できますか？	ケーブルの加熱に使用したヒータ設定温度が異なることにより、ケーブルの絶縁体への熱影響の大きさが異なることで、絶縁体の状態(熱分解の有無等)に違いが生じ、その結果として絶縁抵抗の低下挙動が異なったものと推定しております。

No.	評価項目	意見	回答
4	④ 重大な見落とし(観点の欠落)がないか。	コメント無し	—
5	その他	コメント無し	—
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	これまでの研究成果を踏まえ、また、OECD/NEA とも連携しつつ研究を進めており、最新の知見を踏まえた研究となっている。	拝承いたします。
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	基本的には、考え得る条件を網羅的に評価する形で丁寧に研究が進められていると認識している。 金属蒸気の噴出量は、(金属母線の損耗量-電気盤内に存在する固化物)からも計算できると考えられるため、実験的に実噴出量を特定する実験も考えられるのではないか。	本研究では、高速度カメラを用いて試験体筐体からの金属母線由来の金属蒸気の噴出状況を観察しておりますが、金属蒸気の噴出量を定量的に測定しておりません。このため、保守的な仮定(金属母線の損耗量>金属蒸気の発生量>金属蒸気の噴出量)を行い、電気盤外部への金属蒸気の噴出量を実際よりも多く想定し、電気盤外部における金属蒸気が及ぼす熱影響(金属蒸気の空気中における酸化に伴う発熱量)の程度を見積もって評価しました。その結果、「HEAF の第一段階における爆発現象の ZOI は、盤内部の金属母線(アーク発生箇所)を基準として 0.5 m 以下と推定された」(※ZOI は Zone of influence(影響範囲)の略)、「HEAF 審査ガイドでは、HEAF 発生時に周囲の電気盤に影響を与えるおそれのある範囲の目安として水平距離 2.5 m が既に例示され、HEAF 対策の目安として使用されているが、この水平距離 2.5 m は、HEAF 時のアークエネルギーが 25 MJ 以下の電気盤であれば、HEAF の第一段階における爆発現象の ZOI を考慮しても保守的な値であることが確認できた」としております(「原子力発電所における高エネルギーア

No.	評価項目	意見	回答
			<p>一ク損傷(HEAF)に関する分析(第二報)」、NTEC-2025-1001 (<a href="https://www.nra.go.jp/data/000475731.pdf">https://www.nra.go.jp/data/000475731.pdf</a>)より抜粋)。このように、本研究では、HEAFの第一段階における爆発現象の観点について HEAF 審査ガイドへの反映の要否を判断するための知見を取得することを目的として、保守的な仮定を置いて、国内の HEAF 対策済の電気盤における HEAF 爆発の影響の程度を評価し、その結果、HEAF 審査ガイドへの反映は不要であるとの結論を得たことから、規制研究としては適切な内容であったと考えています。</p> <p>なお、電気盤の HEAF 爆発の熱影響について、より現実的で精緻な評価を行う場合には、ご指摘のとおり金属蒸気の噴出量を測定して評価を行うことが望ましいと考えます。</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。	<p>HEAF 爆発の熱影響の評価においては、保守的であることは理解できるが、最適評価との差がどの程度あるかについては検討がなされていると良い。</p> <p>大規模火災の解析結果の前半部分はおおむね再現できているとのことであるが、データの振動の周波数が大きく異なっている。実験側におけるデータのサンプリングレートの問題である可能性はあるが、再現性についてももう一步踏み込んだ検討がなされていると良い。</p>	<p>いただいたご意見について拝承致します。なお、HEAF 爆発の熱影響評価については、実際の電気盤等の状況も踏まえた試験の結果に基づき、保守的な評価手法の例を示しており、規制研究としては適切な内容であると考えています。</p> <p>後半の大規模火災解析手法の検討に関するコメントについては、液体燃焼では、火炎からの入熱によって可燃性液体が気化し、燃焼するというフィードバックループが形成されます。そのフィードバックループの安定性により火炎の振動などの現象が見られます。例えば「火災影響評価手法・解析コード等の整備」の③可燃性液体の液面燃焼時における燃焼挙動評価の試験では 10 Hz 前後での振動が見られました。一方、ご指摘の図の試験では発熱速度のサンプリングレートは1秒程度であり、この振動を捉え切れていない可能性があります。今後の研究における試験</p>

No.	評価項目	意見	回答
			及び解析では、周期の速い燃焼の振動についても留意して検証を行います。
4	④ 重大な見落とし(観点の欠落)がないか。	特になし。	—
5	その他	コメント無し	—

## 4 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 (R3 年度～R6 年度)

### 1. 研究プロジェクトの目的

本研究プロジェクトでは、実用炉の適合性審査等における Best Estimate Plus Uncertainty (BEPU) 手法の適用状況に鑑み、核特性解析手法の高度化を進めるとともに、核特性解析に係る最適評価手法及び不確かさ評価手法の技術基盤を構築する。

### 2. 研究概要

最適評価手法の導入・整備では、運転時の異常な過渡変化及び事故時の実機炉心挙動を評価するために、これまでの安全研究で用いてきた 3 次元核熱結合解析コード TRACE/PARCS を改良し、実機炉心体系を対象とした BWR の制御棒落下事故時の燃料破損本数の評価を実施した。また、運転時の異常な過渡変化及び事故時の事象をより精緻に取り扱うことが可能な 3 次元詳細炉心動特性解析コードを本格的に開発するとともに、今後の実機炉心体系を対象とした解析に対応できるよう解決すべき技術的課題に取り組んだ。

不確かさ評価手法の導入・整備では、核分裂収率等の不確かさの伝播を考慮した燃焼解析における不確かさ評価に着手し、燃料集合体の燃焼解析をとおして核分裂収率等の不確かさが中性子増倍率の解析結果に与える影響を確認した。また、動特性解析における遅発中性子割合等の不確かさの取扱いに関して検討するとともに、燃料集合体の燃焼解析をとおして遅発中性子割合等の不確かさが解析結果に与える影響を確認した。さらに、最新の評価済み核データライブラリ等に関する最新知見を収集し、改訂・拡充の内容を確認するとともに、それらの更新等が炉心解析の核特性に与える影響を確認した。

### 3. 研究成果

最適評価手法の導入・整備では、制御棒落下事故における燃料エンタルピーや破損燃料棒本数の評価が実機炉心体系で可能となるように、3 次元核熱結合解析コード TRACE/PARCS への機能拡張を行った。また、3 次元詳細炉心動特性解析コードの開発では、PWR 及び BWR を対象とした 3 次元詳細炉心解析を実現するために、機能拡張等を実施した。

不確かさ評価手法の導入・整備では、反応断面積、核分裂収率等の不確かさや、燃焼計算で使用する核分裂収率等の不確かさの伝播を考慮した実機炉心解析が可能となるように不確かさ評価手法を整備した。これにより、燃焼に伴う反応度及び核種組成の不確かさを定量的に評価することが可能となり、それらが炉心解析に及ぼす影響を明らかにした。また、動特性解析で使用する遅発中性子割合等の不確かさについて、国内外における最新の研究動向を踏まえて、当該不確かさの伝播が考慮できるよう、ランダムサンプリング法に基づく不確かさ評価手法を拡張し、動特性パラメータと反応断面積

の不確かさが実機炉心の核特性に与える影響を明らかにした。

#### 4. 事後評価結果

##### (1) 項目別評価

###### ① 成果目標の達成状況：A

- 最適評価手法の導入・整備については、PWR 及び BWR 実機炉心体系において運転時の異常な過渡変化や設計基準事故の評価が可能になるように TRACE/PARCS の整備を完了した。さらに、3次元詳細炉心動特性解析コードの開発では、3次元詳細炉心動特性解析コードの高精度化、BWR 幾何形状の機能拡張、2次元 MOC 計算の高速化及びメッシュ不整合体系評価機能の拡張を完了した。以上のとおり、当初の成果目標を達成した。
- 不確かさ評価手法の導入・整備については、核分裂収率、遅発中性子割合等の不確かさの伝播を考慮した不確かさ評価機能の整備を完了した。さらに、当該評価機能、評価済み核データライブラリ等における不確かさが実機炉心解析に与える影響に関して技術的知見を蓄積した。以上のとおり、当初の成果目標を達成した。

###### ② 成果の公表等の状況：S

- 原子力規制庁から、炉心解析における最新の核データライブラリの適用性等に関する査読付論文 6 件及び査読付プロシーディングス 2 件を公表した。これらの論文に示された炉心解析技術高度化に関する内容は炉心の安全性向上に貢献するものであり、原子力の安全に資する質の高い論文であることから、成果の公表等の状況は優れていると評価した。

###### ③ 研究の進め方に関する技術的適切性：A

- 国内外の過去の研究及び最新知見を踏まえた上で、適切な手法にて研究を実施した。また、国内外の専門家との議論を通して、研究の進め方、成果の妥当性を確認した。技術評価検討会での外部専門家からの意見も踏まえ、技術的に適切であると判断した。

##### (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及び最新知見を踏まえた上で、適切な解析手法にて研究を実施しているとの意見があった。解析結果の評価手法についても適切であるとの意見があった。
- 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故事象に対して、最適評価コードが活用された場合には、解析結果を提示するだけでなく、その規制上の解釈も含めて検討すべきとの意見があった。このため、炉心解析等で得られた技術的知見については、研究結果の規制上の解釈も含めて検討することとした。
- 最新の核データライブラリ JENDL-5 の実機解析への適用性については、臨界ホウ素濃度の解析値と測定値との差が燃焼するにつれて大きくなったこと

から、この原因を検討すべきとの意見があった。このため、JENDL-5の実機炉心解析への適用性について引き続き確認を行うこととした。

➤ 詳細は別表1-4参照。

④ 研究マネジメント及び予算・契約管理の適切性：A

- 研究内容に関連する様々な分野の専門的知見を有する専門家等と議論し、多様な意見を踏まえて最終成果を取りまとめた。また、研究期間中の許認可審査の動向から各検討項目の重要度を検討し、研究計画に随時反映させた。これらにより適切な研究マネジメントが行われたと判断した。
- 予算執行、進捗管理及び検収を含めた契約業務を、法令等を遵守して実施しており、適切に業務管理が行われている。

⑤ 成果の規制への活用の状況・見通し：A

- 本研究プロジェクトで得られた最適評価コードに関する技術的知見及び評価済み核データライブラリ等に関する技術的知見については、“島根3号機におけるチャンネルボックス厚さ変更に伴う許認可解析”等の審査支援に活用された。(A、実用炉審査部門)

(2) 総合評価：A (総合点：3.2)

- 研究を適切に遂行して、成果目標を達成するとともに、6編の査読付論文を公表することができた。また、研究成果は、許認可解析に係る審査に活用することができ、さらには、当該プロジェクトで整備した最適評価手法及び不確かさ評価手法については、今後の改良型燃料の審査等にも活用できると考えられる。

5. 評価結果の今後の活用

- 技術評価検討会でいただいた意見を踏まえて、本研究プロジェクトで得た成果のうち JENDL-5の実機炉心解析への適用性については、実機炉心データ以外にも臨界実験データを活用する等、幅広く検証を行う。また、得られた研究結果と規制上の解釈や規制との関係についても、論文等の中で示していく。

(主な成果の公表)

(1) 原子力規制庁の職員が著者に含まれる公表

- 論文 (査読付)
  1. Shiba, S., Sakai, T., “Core Modeling and Simulation of Peach Bottom 2 Turbine Trip Test 2 Using CASMO5/TRACE/PARCS,” Nuclear Technology, Vol.208(2), pp. 371-383, 2021. doi:10.1080/00295450.2021.1913032
  2. Fujita, T., ” Influence of treatment of manufacturing uncertainty on uncertainty analysis in PWR-UO2 fuel assembly using data from the

- OECD/NEA/NSC LWR-UAM benchmark” , Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.60(12), pp. 1526–1537, 2023. doi:10.1080/00223131.2023.2224332
3. Fujita, T., ” Uncertainty analysis for fission product inventories based on covariance data of fission product yields in JENDL-4.0 and ENDF/B-VIII.0” , Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.61(3), pp. 417–427, 2024. doi:10.1080/00223131.2023.2224331
  4. Fujita, T., ” Applicability of the kernel method for macroscopic cross section tabulation to planar MOC-based core transient analysis code” , Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 61(5), pp. 679–692, 2024. doi:10.1080/00223131.2023.2252432
  5. Shiba, S., ” Nuclear Data Uncertainty Propagation in PWR MOX/UO<sub>2</sub> Core Transient Benchmark” , Nuclear Technology, Vol. 211(7), pp. 1590–1607, 2024. doi:10.1080/00295450.2024.2421671
  6. Shiba, S., “Applicability of JENDL-5 to Tihange Unit 2 Reactor Core Tracking Analysis”, Nuclear Technology, doi:10.1080/00295450.2025.2502262
- 学術会議のプロシーディングス（査読付）
1. Kawaguchi, M., Shiba, S., Iwahashi, D., Okawa, T., Gunji, S., Izawa, K., Suyama, K., “PRELIMINARY ANALYSES OF MODIFIED STACY CORE CONFIGURATION USING SERPENT WITH JENDL-5” , The 12th International Conference on Nuclear Criticality Safety (ICNC2023), 2023.
  2. Shiba, S. “Uncertainty Quantification of Critical Boron Concentration in Tihange-2 Reactor Core Tracking Analysis Using CASMO5/SIMULATE5 with JENDL-5” , 2024 ANS Annual Conference transactions, vol. 130, pp. 988–991, 2024.

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  
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	適切であると判断します	—
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	適切であると判断します	—
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次元核熱結合解析コードの導入・整備：最適評価手法の整備であるため、解析結果の妥当性についての検討が乏しいのではないか。	3次元核熱結合解析コードの導入・整備については、大型実験による実測データがなく、妥当性確認が困難であるが、国際ベンチマーク問題の「MOX ベンチマーク問題」の解析を実施し、ピン出力再構成を含めて他機関の解析結果と比較することで妥当性を確認しています。
4	④ 重大な見落とし(観点の欠落)がないか。	適切である(欠落はない)と判断します	—
5	その他	断面積などの核データの不確かさ・共分散を用いた解析結果の不確かさ評価では、評価される不確かさが(臨界実験などで得られる感覚的な大きさより)かなり大きいという状況はいまだに残っていると思います。今後はさらに核データの不確かさ・共分散の妥当性にも目を向けるべきかと思えます。	安全解析等における解析結果の不確かさの検討では、これまで、解析値と実測値の偏差基準との比較も交えながら、不確かさについて、反応断面積測定を専門とする研究者と議論を進めてきました。JENDL-5 以外の核データを用いた不確かさ評価結果との比較を実施し、不確かさの検討を進めていきたいと考えています。

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	これまでの研究において開発・整備した 3次元核熱結合解析コード TRACE/PARCS の機能拡張と、近年世界的に検討されている解析モデルのパラメータの不確かさを考慮した解析手法の検討であり、また評価済み核データライブラリの最新知見も活用しており、過去の研究や世界的な動向を踏まえた研究と考えます。	拝承いたしました。
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	TRACE/PARCS の機能拡張に対しては、参照解との比較、メッシュ幅やサブメッシュ幅を変えた場合の計算時間や計算精度の比較を行っており、解析実施方法は適切であると思われる。また、不確かさの考慮ではランダムに解析モデルのパラメータを変更した計算を実施して解析結果の評価を行っており、解析方法は適切であると考えます。	拝承いたしました。
3	③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	解析結果の妥当性評価に関して、現状では実験や実プラントの計測データとの比較は行われていない。BEPU 手法の技術基盤の確立を目指しているため、今後は精度良く計測された実験や実プラントのデータやベンチマーク問題を用いた解析結果の評価を行うことが必要と思われる。	本安全研究プロジェクトでは、一部、実機炉心データ等を用いた解析結果の妥当性を確認しました。実機炉心の運転データ等の実測値を用いた最適評価手法の妥当性確認は、重要であると考えており、引き続き、実機プラントデータ解析に努めたいと考えています。
4	④ 重大な見落とし（観測点の欠落）がないか。	今後の拡張として、以下の点があります。 3でもコメントしましたように、実験や実プラントデータを用いた解析結果の評価があると良いと考えます。 また、パラメータの不確かさの考慮に関しては、不確かさの分布形状として多次元正規分布を仮定してランダムサンプリングしていると推察しているが、パラメータによっては分布形状が異なることもあり得ると思われるので、パラメータの不確かさの分	令和 7 年 4 月から開始した新規安全研究プロジェクトにおいても実機炉心データ等を用いた解析結果の妥当性を確認します。 不確かさ評価においては、変量間の相関を考慮して評価しています。ご指摘のとおり、確率密度分布に基づいていない変量が存在する場合には、不確かさを過大若しくは過小評価するおそれがあるため、逐次、検定をおこなって確率密度関数の妥当性を確認しています。検定にて、帰無仮説が棄却

No.	評価項目	評価意見	回答
		布形状を確認と解析での考慮も必要と思います。	された場合には、適切な確率密度関数を用いることとしています。
5	その他	これまで数十年にわたって世界的に BEPU 解析コードの開発が行われ、着実にその目標に近づいていると認識していますが、BEPU 解析コードの整備には今後も継続的に研究する必要があると思います。規制の観点からは、少々の不確実性や解析誤差があっても安全性が評価できれば良い訳ですから、各異常事象に対してどの程度の精度で解析できれば良いかについて整理しておくことも有用と考えます。	安全評価において、解析評価コードの予測精度を確認し、設定された不確かさの妥当性を確認しています。このため、事象毎の不確かさを定量化し、整理することは重要であると考えていますので、不確かさを定量化できるように努めます。
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	炉心損傷防止対策の有効性を適切に評価するには最適評価手法を整備し、不確かさを評価することが重要であり、実機 PWR のデータを活用した研究から有用な知見が得られています。	拝承いたしました。
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	開発した解析手法を用いた解析ケース等は適切に設定されていると思います。	拝承いたしました。
3	③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	概ね適切に評価されていると思います。(スライド P7)制御棒落下事故時の燃料破損評価については、破損燃料棒の本数は有用な評価尺度ですが、燃料破損の状況について定性的な説明も充実して頂くとともに効果的に本研究の知見の広い利用・共有が期待できるのではないかと思います。(スライド P13)核データライブラリを最新(JENDL-5)のものに変更すると、一見すると計算精度が悪化したかのように見えてしましますが、一般に核データそのものは新しいものの方が古いものに比べ実験データの拡充等により精度は向上していると	制御棒落下事故時の燃料破損評価については、4月から開始した新しい安全研究プロジェクトの中でも実施しますので、その安全研究成果報告においては、破損燃料棒本数の尺度を含め、反応度投入事象における物理現象を丁寧に説明するようにします。また、最新の核データライブラリ(JENDL-5)の反応度劣化については、これまで、臨界実験だけでなく、高速炉、加速器駆動未臨界炉等について、十分な検証が行われておりましたが、実機軽水炉に対しては、不十分であると考えています。このため、JENDL-5のユーザーや核データの

No.	評価項目	評価意見	回答
		考えられ、見た目上の計算精度の悪化は別の要因(例:過去に実験値と合うようにパラメータがチューニングされていたことに起因する等)の可能性もあると思います。核データの研究者との情報・意見交換が重要だと思います。	研究者等との情報・意見交換を継続的に実施します。
4	④重大な見落とし(観点の欠落)がないか。	特に認められません。	—
5	その他	特にありません。	—

(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。	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。	<p>・「3次元詳細炉心動特性解析コードの開発」：種々のモデル検討とそれに付随する計算速度の検討が行われているが、実機適用という目標に対して、計算速度、計算負荷などの観点で、定量的な目標及びどこまで達成できているのかが記載されていないと思われます。この点について位置づけを明確にする必要があるものと考えます。</p> <p>・「不確かさ評価手法の導入・整備」：JENDL4/5 を用いた燃焼解析では、JENDL5 で実機測定値との差が大きくなっていることが示されており、JENDL 委員会との詳細な議論が必要と考えます。</p>	<p>3次元詳細炉心動特性解析コードの開発では、主に、実機炉心解析に最低限必要な解析機能を実装しました。今後、3次元炉心解析においては、計算負荷等が課題となることから定量的な目標値等を設定して本コードの整備を実施していきたいと考えています。</p> <p>ご指摘のとおり、JENDL5 において実機測定値との差が大きくなっていることは問題であると認識しています。このため、今後、BWR の実機解析や燃焼炉心ベンチマーク解析を実施して、同様の傾向が存在するか確認します。また、その成果については JENDL 委員会等で共有します。</p>
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	特記事項なし。	—

No.	評価項目	意見	回答
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	<p>・P6 1-③ 高温破損とはどのような破損モードですか？燃料の冷却可能形状が阻害されることはないでしょうか？</p> <p>・P10 核分裂収率および崩壊定数の不確かさを考慮した燃焼計算による原子数密度の不確かさが評価されていますが、断面積不確かさも踏まえた評価については検討されないでしょうか？</p>	<p>「高温破損モード」とは、運転時待機状態では冷却材の圧力は大気圧状態であるので、燃料内圧が外圧を上回っている状況下で RIA が生じると被覆管温度上昇による力学的強度の低下と相まって被覆管が内圧膨れ破損するモードを指します。今回の報告事例では、「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」に基づく燃料破損評価となっており、被覆管が破損して FP の放出はあるものの、燃料棒の冷却可能形状(棒形状)は維持されている状態です。安全研究成果報告では、RIA に伴う燃料棒破損モードや解析条件を明確に記載します。</p> <p>反応断面積の不確かさ評価機能はすでに完備しており、その不確かさを考慮して3次元炉心解析を実施しています。今回の安全研究成果報告では、主に、本プロジェクトで追加した不確かさ機能を中心に説明しましたが、実機炉心解析の不確かさ評価では、反応断面積の不確かさも考慮されています。</p>
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	<p>P8 図3において、「3次元炉心計算とは独立した軸方向1次元詳細計算を実行し、その結果を不連続因子として3次元解析へ反映」とありますが、3次元炉心計算から径方向均質化断面積境界条件を得るよう図示され結合されているように見えますので、「3次元炉心計算とは独立」の位置づけを丁寧に説明されると良いと考えます。</p>	<p>拝承いたしました。</p>
3	③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が	<p>コメント無し</p>	<p>—</p>

No.	評価項目	意見	回答
	適切か。		
4	④重大な見落とし(観点の欠落)がないか。	コメント無し	—
5	その他	コメント無し	—
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	最適評価コードを用いた安全評価を実施していく流れは国際的な潮流であるため、規制庁においても着実に整備を進めてほしい。 また、実プラントの炉心の特徴を把握することは、原子炉設計の基本であるため、こちらについても着実に整備を進めてほしい。	拝承いたしました。
2	②解析実施手法、実験方法が適切か。	最適評価コードを用いた場合、従来の安全評価とは異なる扱い(例えば、動特性パラメータを入力値として必要としない、燃料集合体内の燃料棒を直接取り扱う等)が適用される場合がある。解析の実施方法の検討においては、過去の評価手法との相違がどこにあるかを明確にしたうえで評価することが必要である。今回の成果では、制御棒落下中の3次元出力分布を固定するか変化させるかの評価を行っているが、固定した場合に燃料棒ごとの破損を判断することが評価の精度から適切なのかという視点を持って評価を進めることが重要である。	拝承いたしました。
3	③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	動特性パラメータの評価は、現行の設置許可の枠組みでは従来から実施されてきたものであるが、最適評価コードが活用されることになった場合もそのような評価が必要であるかの観点でも検討を行うことが適切と考える。	拝承いたしました。

No.	評価項目	意見	回答
		核データライブラリについては、使用する解析コードのモデルとの関係で誤差が大きくなる可能性も考えられる。専門家との議論をしながら進めているとのことだが、核データライブラリの単純比較に留まらない検討を実施すべき。	
4	④重大な見落とし(観測の欠落)がないか。	特になし。	—
5	その他	<p>P.3/24</p> <p>・“最適評価手法”がどのような手法なのか不明であり、これに基づいて定義される“最適評価コード”が何者か不明。そもそも手法として具体的に定義できるのか？</p> <p>・“最適評価手法”に基づく“最適評価コード”を用いて不確かさの伝播を取り扱う“不確かさ評価手法”は“最適評価手法”に含まれない定義となるが、なぜ“不確かさ評価手法”が“最適評価手法”に含まれないのか？そもそも、最適評価コードと不確かさの伝播の解析とは一体のものではないのか？</p> <p>・BEPU が“不確かさ評価手法”を“組み合わせる”ものと定義されているが、“組み合わせる”ものがほかに見当たらない。これが“最適評価コード”であるなら、“不確かさ評価手法”と“BEPU”とが同一のものであるか、又は論理的に意味不明なものとなるが、いったい何なのでしょう？</p> <p>P.6/24</p> <p>・BWR の反応度事故(制御棒落下事故)では減速材密度反応度フィードバックの効果</p>	<p>本プロジェクトでは、炉物理に特化した最適評価手法を提示させて頂き、最適評価コードとして TRACE/PARCS コード等の整備を示しました。</p> <p>最適評価コードと不確かさ解析は一体のものではありません。例えば、集合体解析の入力に用いる燃料棒の密度、濃縮度、燃料棒半径等は製造公差の範囲内での変動が許容されており、それに伴う無限増倍率等の不確かさは解析対象毎に変化します。</p> <p>炉物理における BEPU のうち、「Uncertainty」については、BEコード固有の不確かさのうち炉物理パラメータの不確かさに焦点を当てたものになっています。</p> <p>ポイド反応度の不確かさは非常に大きいと認識していることから、BWR の反応度事故</p>

No.	評価項目	意見	回答
		<p>が安全評価パラメータである非断熱燃料エントルピの挙動に非常に大きく影響するが、安全研究で対象とする“核熱結合解析手法の構築”にはこれが含まれていない。減速材密度反応度フィードバックの現実的な計算には、ボイド挙動を現実的に解く必要があるが、現状の TRACE コードの熱水力モデルはこれを適切に解けるものではない。このままでは TRACE/PARCS を BWR の反応度事故に適用できないと考えられるが、どのように考えているのか？</p> <p>・動的な再構築、初期状態で固定した再構築のどちらも断面内の減速材密度分布を一樣と仮定した再構築法と推察するが、この方法の適切性をどのように説明するのか？</p> <p>P7/24</p> <p>・“破損本数が増えることを確認した”とあるが、増えることは当然であり、問題はその計算結果の妥当性をどのように説明するのか、である。上述したボイド挙動の計算の不適切さも相まってこの変化の不確かさは非常に大きいものと考えられるので。</p> <p>P8/24</p> <p>・詳細メッシュで作成した軸方向粗メッシュ体系用の軸方向不連続因子は制御棒落下事故では動的に変化すると考えられるが、軸方向粗メッシュの計算と軸方向詳細メッシュの計算との反復計算を毎時刻で毎回計算するのか？間引きした反復計算とするのであれば、その間引き又は間引き方法の有効性を説明する必要がある。</p>	<p>(制御棒落下事故)では減速材密度反応度フィードバックの効果を含んでいません。</p> <p>ご指摘のとおり、断面内の減速材密度分布は一樣としてピン出力再構築計算を実施しています。断面内の減速材密度分布の影響については、今後サブチャンネル解析が可能なコードによる解析を実施して検討したいと考えています。</p> <p>今回の解析では、BWR の RIA 解析で古くから議論になっていた出力勾配の影響を確認することが目的でした。集合体内のボイド分布の影響については、上述の通りサブチャンネル解析が可能なコードでの検討を進めていきます。</p> <p>現時点では、反復計算は毎回計算する設定としており、間引きはしていません。軸方向計算は、径方向計算と比較して、計算時間が短く、間引きの効果は少ないと考えています。</p>

No.	評価項目	意見	回答
		<p>P10/24</p> <p>・このような不確かさを取り扱うことで、主要なマクロ断面積、動特性パラメータなどに有意な影響が実際に現れるものなのか？</p> <p>P13/24</p> <p>・“最新のライブラリは、旧ライブラリと比較して、実測値からの差異が拡大することを確認した”とあるが、最新ライブラリの使用が望ましくないということか？</p> <p>P14/24</p> <p>・“核データライブラリの不確かさの影響が Tihange 2号機の実機燃焼追跡解析で顕著に現れることを確認”とあるが、前ページで実測値からの差異が拡大することの原因がこの顕著な差異に影響しているのか？であるとすれば、この確認はズレの拡大の原因を見つけたということになるが、それでよいのか？でないとすれば、“顕著に現れる”ことをどのように評価しているのか、それを示すべきではないか？</p> <p>P15/24</p> <p>・“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とともに、今後の事業者の安全性向上評価の内容を確認する際の技術的根拠となる見込みである”とあるが、これまでに指摘したように課題が山積していると考え、規制、審査への適用は課題の解決後にすべきではないのか？</p>	<p>反応断面積及び動特性パラメータの不確かさについては、実機の定常解析及び過渡解析において有意な影響が確認されています。</p> <p>今回解析した PWR である Tihange2 号機では、実測値からの差異は拡大しましたが、これをもって最新ライブラリの優劣を判断するのは困難と考えています。引き続き、他の実機炉心解析へ適用する等、総合的に確認したいと考えています。</p> <p>臨界ホウ素濃度については、サイクル燃焼度に伴い、実測値との差異が大きくなるという課題が得られました。この原因については、現在、検討しています。なお、JENDL-5 用いた場合の不確かさについては、共分散が大幅に改訂されたことから、あらゆる体系で不確かさが大きくなっています。</p> <p>本安全研究プロジェクトから得られた技術的知見については、安全性向上評価の内容を確認する際のポイントや着目点の技術的根拠になるとの意図で記載させて頂きました。解決すべき課題については、引き続き、対処したいと考えています。</p>

No.	評価項目	意見	回答
		<p>P17/24</p> <p>・“これにより、PWR や BWR に対する反応度投入事象解析が可能となった”とあるが、少なくとも BWR に対してはそのレベルからは遠いと考える。TRACE のポイド挙動モデルの高度化が必須であるためである。</p> <p>・“JENDL-5 等の実機炉心解析への適用性に関する技術的知見を得た”とあるが、ズレが拡大したことをもって、どのように技術的知見を位置付けているのか？</p>	<p>BWR の反応度投入事象解析については、不確かさの大きいポイド挙動を本解析では考慮していません。ポイド反応度効果を導入する場合には、これを高度化することが必要であると考えていますので、高度化について引き続き検討してまいります。</p> <p>現行の JENDL-5 については、実機解析への適用が難しいとの技術的知見を得ました。</p>

## 5 実機材料等を活用した経年劣化評価・検証に係る研究（R2年度～R6年度）

### 1. 研究プロジェクトの目的

- 本安全研究プロジェクトでは、原子力発電所の重要機器及び構造物のうち、原子炉圧力容器、電気・計装設備、炉内構造物及びステンレス鋼製機器を対象に、実機環境における経年劣化挙動を踏まえて、現在使用されている経年劣化を模擬的に付与し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。なお、炉内構造物の健全性評価に係る研究については、令和7年度以降に採取予定の実機材料を確実に取得するための採取工法を検討する。

### 2. 研究概要

- 原子炉圧力容器の健全性評価に係る研究  
原子炉圧力容器は、高経年化に伴い中性子照射脆化が進行することから、本研究では、実機で使用された監視試験片及び試験炉照射材料等を用いた試験により現行の評価手法の保守性及び評価対象部位の代表性に関する確認を行い、原子炉圧力容器の健全性評価に関する知見を拡充した。
- 電気・計装設備の健全性評価に関する研究  
本研究では、電気・計装設備の健全性評価に関する知見を拡充するために、実機で長期間使用された低圧ケーブル等を用いて、絶縁体の機械的特性や絶縁性能に関するデータを取得するとともに、実機使用環境における実機材料の劣化状態を評価し、加速劣化手法の妥当性確認を行った。また、実機材料を用いて事故時環境下における絶縁性能に係るデータを取得した。
- 炉内構造物の健全性評価に係る研究  
炉内構造物は中性子照射を受けて破壊靱性が低下することから、本研究では、実機材料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基づき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ための試験方法等を確立した。また、実機材料を用いて、事業者が実施した予防保全対策技術の長期間における保守性を確認するため、切断による圧縮残留応力への影響に関する知見を得た。
- ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究  
ステンレス鋼は長時間高温に曝される熱時効により靱性が低下することから、本研究では、実機で長期間使用された原子炉冷却材再循環ポンプを用いた破壊靱性試験によりデータを取得し、現在使用されている靱性低下挙動予測モデル（H3Tモデル）に基づく靱性評価の保守性を確認した。

### 3. 研究成果

- 原子炉圧力容器の健全性評価に係る研究  
監視試験片、未照射材料及び試験炉照射材料を用いた各種機械的特性試験を実施し、

原子炉圧力容器の健全性評価に資するデータを取得した。また、未照射材料及び試験炉照射材料の溶接熱影響部から採取した試験片を用いて、走査透過型電子顕微鏡及び3次元アトムプローブによる溶質原子クラスタと転位ループに着目した微細組織分析及びその観察結果の定量評価を行い、本供試材の試験範囲においては、母材が溶接熱影響部を代表するという現行の評価方法の保守性を確認することができた（国立研究開発法人日本原子力研究開発機構への委託研究成果）。

- 電気・計装設備の健全性評価に関する研究

関西電力高浜発電所1号機等で使用された低圧ケーブルと加速劣化ケーブルの絶縁体の劣化状態を分析（学校法人早稲田大学への委託研究成果）して比較した結果、両者は同等の水準にあることを確認した。現状適用されているケーブル健全性評価手法は、種々の保守性が含まれるため、保守的な評価が可能であることを確認した（原子力規制庁の成果）。また、上記ケーブル及び日本原子力発電東海第二発電所で使用された電気ペネトレーションを用いて事故時環境下における絶縁性能データを取得し（学校法人早稲田大学への委託研究成果）、分析した結果、測定された絶縁抵抗低下は、原子力発電所の計装システムの信号伝送系において有意な誤差が生じないと考えられる水準であることを確認した（原子力規制庁の成果）。

- 炉内構造物の健全性評価に係る研究

既に国内外で取得されている照射ステンレス鋼の破壊靱性データを基に、令和8年度以降に取得予定の実機材料取得部位を特定し、試験片採取計画及び試験マトリックスを策定した。また、実機材料を採取する際の切断により生じる残留応力への影響を確認するための試験を実施し、付与した圧縮残留応力が100mm×100mmまで切断しても圧縮残留応力が十分維持されるという知見を得た（一般財団法人電力中央研究所及び国立大学法人金沢大学への委託研究成果）。

- ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究

中部電力浜岡発電所1号機で長期間使用された原子炉冷却材再循環ポンプを試験用の実機材料として切り出し、発電所構内から研究実施機関までの輸送後、破壊靱性試験等を実施し、現行評価手法であるH3Tモデルを用いた熱時効による靱性低下挙動評価が保守的であることを確認した（一般財団法人電力中央研究所への委託研究成果）。

#### 4. 事後評価結果

##### (1) 項目別評価

###### ① 成果目標の達成状況：A

- 研究計画策定時に予定した各項目については計画どおり達成した。原子炉圧力容器の健全性評価に資するデータを取得し、現行評価手法の保守性を確認した。また、電気・計装設備の絶縁性能等に関するデータを取得し、現状適用されているケーブル健全性評価手法の保守性を確認した。さらに、破壊靱性低下の評価及び予防保全対策技術の保守性を確認するために、令和7年度以降に採取予定の実機材料を確実に取得するための採取工法を検討した。併せて、実機BWRプラント環

境での熱時効韌性低下挙動評価手法（H3Tモデル）の保守性を確認することができた。

② 成果の公表等の状況：S

- 長期施設管理計画認可申請の審査における技術的根拠資料となる査読付き論文を以下のとおり、8件公表したためSとした。
- 原子力規制庁から、査読付論文2件を公表した。
- 委託先から、査読付論文6件、学術会議のプロシーディングス5件を公表した。

③ 研究の進め方に関する技術的適切性：A

- 国内外の過去の研究及び最新知見を踏まえた上で、適切な手法にて研究を実施しており、国内外の専門家との議論を通して、研究の進め方、成果の妥当性を確認した。技術評価検討会での外部専門家からも適切との意見をいただいております、研究の進め方は、技術的に適切であると評価した。

(技術評価検討会における主な意見及びその対応)

- 照射された実機材料を用いた研究は、放射化された試験材を取り扱う事や、廃炉工程との兼ね合いから多くの制約を受ける。取り組みは、それらの制約を考慮した上で慎重に計画が検討されており、適切に事業が進められていると判断される。検討方法に対しても、実機材料を用いた破壊韌性試験や熱時効評価等、実際の運転環境や事故時の環境などが考慮されている。また、原子炉圧力容器や炉内構造物、ステンレス鋳鋼など、対象ごとに適切な試験・解析手法が選定されているとの意見があった。
- 中性子照射を受ける溶接継手 HAZ の破壊韌性は、未照射材と加速照射材に対する結果を基に総合的に評価しているが、実機材料を用いた実験で結果を検証できるとさらに良くなるとの意見があった。これについては、次フェーズにおいて当該対象部位での試験等を検討していく予定である。
- 破壊韌性の取得計画については、照射量が広くカバーされており適切と考える。既報のデータと比較すると差異（ばらつき）が生じることが予測されるので、考察の基本となる強度特性は丁寧に取得することが望ましいとの意見があった。これについては、次フェーズにおいて試験を実施する際には、強度特性データを精度良く丁寧に取得していく予定である。
- 
- 詳細は別表 1-5 参照。

④ 研究マネジメント及び予算・契約管理の適切性：A

- 委託先も含め適切な実施体制を構築して研究を進めた。計画どおりに研究成果が得られたこと、また、原子力規制庁及び委託先から計画的に研究成果を公表できたことから、適切なマネジメントのもとに研究が行われたと評価した。

- 予算執行、進捗管理及び検収を含めた契約業務を、法令等を遵守して実施しており、適切に業務管理が行われたと評価した。

⑤ 成果の規制への活用の状況・見通し：A

- 本プロジェクトで得られた原子炉圧力容器の健全性評価に係る研究等に係る技術的知見は、長期施設管理計画等の技術評価において得られた技術的知見に基づく審査での確認や技術評価の妥当性の判断根拠として活用された。具体的には以下のとおり。

「原子炉圧力容器の健全性評価に係る研究」については、当該研究で得られた知見をもとに、高経年化技術評価の審査において、より保守的な評価方法を用いた評価の確認につながるなど、審査に活用された。本研究に関しては、産業界・学協会等とも協力して研究がより一層加速することが期待される。

「電気・計装設備の健全性評価に係る研究」及び「ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究」については、実機材での試験を行うことにより、技術評価で用いている評価手法の保守性や妥当性に係る技術的知見として審査においても活用されることが見込まれる。

「炉内構造物の健全性評価に関する評価」については、本研究で得られた成果の審査での活用は現時点では限定的であるが、今後活用される可能性がある。(A、実用炉審査部門)

- 本プロジェクトのうち、原子炉圧力容器の健全性評価研究で得られた破壊靱性試験に関する研究は、技術基準規則解釈第14条等に引用された一般社団法人日本電気協会 電気技術規程「原子炉構造材の監視試験方法(JEAC4201)」及び「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)」の技術評価に用いる技術的根拠の整備に関するものである。得られた知見は、今後、これらの規格の技術評価に活用する。また、炉内構造物の健全性評価に係る研究で得られた技術的知見については、今後、一般社団法人日本機械学会 維持規格の技術評価において活用が見込まれる。(A、技術基盤課)

(2) 総合評価：A (総合点：3.2)

- 担当安全技術管理官等による評価コメント

研究を適切に遂行して、成果目標を達成するとともに、8編の査読付論文を公表することができた。また、研究成果は、長期施設管理計画認可申請の審査及び民間規格の技術評価の技術的判断根拠として活用できると考えられる。

5. 評価結果の今後の活用

- 技術評価検討会でいただいた意見を踏まえて、炉内構造物の健全性に係る研究では、既報のデータと実機材料から取得した破壊靱性試験データの差異(ばらつき)が生じる可能性があるため、次フェーズでは破壊靱性試験のみならず、その他の

強度特性試験、例えば、ビッカース硬さ試験等により破壊靱性低下に関する考察を行うための研究を拡充して実施する。また、原子炉圧力容器の健全性に係る研究では、APT(三次元アトムプローブトモグラフィー)やTEM(透過型電子顕微鏡)等を用いて実機材料における中性子照射脆化影響を分析する研究を拡充して実施する。

#### (主な成果の公表)

##### (1) 原子力規制庁の職員が著者に含まれる公表

###### ● 論文 (査読付)

1. 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、142 巻、9 号、pp. 368-374、令和 4 年、doi:10.1541/ieejfms.142.368
2. 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、143 巻、3 号、pp. 83-90、令和 5 年、doi:10.1541/ieejfms.143.83

##### (2) 委託先による公表

###### ● 論文 (査読付)

1. Ohki, Y., Hirai, N., Okada, S., “Penetration Routes of Oxygen and Moisture into the Insulation of FR-EPDM Cables for Nuclear Power Plants”, *Polymers*, Vol. 14, No. 23, 5318, 2022. doi:10.3390/polym14235318
2. Ha, Y., Tobita, T., Takamizawa, H., Katsuyama, J., “Fracture Toughness Evaluation of the Heat-Affected Zone Under the Weld Overlay Cladding in Reactor Pressure Vessel Steel”, *J. Pressure Vessel Technol.*, Vol. 145, No. 2, pp. 021501\_1 – 021501\_9, 2023. doi:10.1115/1.4055626
3. Ohki, Y., Hirai, N., Sato, K., Tanaka, Y., “Reasons for Resistivity Increase in FR-EPDM Insulation of Cables Aged in Nuclear Power Plants”, *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 18, No. 5, pp. 656-664, 2023. doi:10.1002/tee.23767
4. Ohki, Y., Hirai, N., “Synergism of Radiation and Steam on Mechanical Properties of Cable Insulation Removed from a Nuclear Power Plant”, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 60, No. 12, pp. 1538-1547, 2023. doi:10.1080/00223131.2023.2224371
5. Ohki, Y., Hirai, N., Sato, K., Tanaka, Y., “Heating-Assisted Current Integration Method as a Tool for Evaluating the Leakage Current in Cable Insulation”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*,

- Vol. 31, No. 3, pp.1185–1192, 2024. doi:10.1109/TDEI.2024.3355871
6. Ohki, Y., Hirai, N., “Tools for Condition Monitoring of Polymeric Electrical Insulating Materials”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 31, No. 6, pp. 3294-3302, 2024. doi: 10.1109/TDEI.2024.3385350

● 学術会議のプロシーディングス（査読付）

1. Ohki, Y., Hirai, N., Sato, K., Tanaka, Y., “Degradation of a FR-EPDM Cable Removed from a Nuclear Power Plant”, Proceedings of IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 45–48, 2022.
2. Ohki, Y., Hirai, N., Sato, K., Tanaka, Y., “Current Integration Method as a Reliable Tool for Diagnosing Flame-retardant EPDM Cables Removed from Nuclear Power Plants”, Proceedings of 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis 2022, C1-3, pp. 133–137, 2022.
3. Ohki, Y., Hirai, N., Okada, S., “Superposition of Time-dependent Data for Accelerated Aging of Nuclear Power Plant Cables and Its Validity”, Proceedings of 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis 2022, P1-27, pp. 364–367, 2022.
4. Ohki, Y., Hirai, N., “Several Innovative Measurement Methods for Insulating Materials Research”, Proceedings of 9th International Symposium on Electrical Insulating Materials 2023, E1, pp. 73–76, 2023.
5. Shimodaira, M., Yamaguchi, M., Iwata, K., Katsuyama, J., Chimi, Y., “Biaxial Constraint Effect on Fracture Toughness Evaluation of Reactor Pressure Vessel Under Pressurized Thermal Shock Events”, 2024 Pressure Vessels & Piping, PVP2024-123136, 2024.

実機材料等を活用した経年劣化評価・検証に係る研究  
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
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	これまで実機環境で使用された材料の経年劣化挙動と、加速試験によって求められてきた劣化評価手法との比較検討を行う点が明確にされており、国際的に見ても有意義かつ先進的であることが認められる。	—
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	原子炉圧力容器構造材、電気計装設備、炉内構造物、ステンレス鋼製機器を対象として試料の取出し、加工、実験方法について詳細に計画されており、適切に立案されていることが認められる。	—
3	③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	原子炉圧力容器構造材でシャルピー衝撃試験および破壊靱性、多軸評価を行うことで、現行規格による脆性延性遷移温度変化の評価手法の保守性を検討することとなっている。電気計装設備については、高温高圧蒸気曝露後の絶縁電圧の低下挙動を評価する。そして、炉内構造物については中性子照射量と炉内構造物の破壊靱性値との関係が実機材料で得られている。また、予防保全対策による残留応力付与後に、それが一定程度保持されていることも確認されている。ステンレス鋼製機器についても、破壊靱性値を取得し、ばらつきを有するものの現行規格に対して十分に保守的な値を示すことが得られている。従って、解析・実験結果の双方について適切に評価されていると判断できる。	拝承いたします。
4	④ 重大な見落とし(観	ステンレス鋼製機器について破壊靱性値の取得データに一部採取位置の影響が見	拝承いたします。

No.	評価項目	評価意見	回答
	点の欠落がないか。	られるようにも見えるものが存在するが、これは試験方法との関係で材料の影響がでているように見えているものであり、特に重大な問題はないと考えられる。その他の手法についても、現行規格との比較について適切かつ十分に検討されていると判断できる。	
5	その他	実機材料と加速試験した材料で、バルクとしての特性値が同等もしくは保守的な評価となっていることを検証できたことは、非常に有意義である。一方で、同等の機械的性質を示したとしても、その微視組織の変化については不明な点も多い。学術機関との共同研究を更に広範に展開し、微視組織が変化する機構とその学理解明にも積極的に取り込むことが、より成果を展開する点で望ましいのではないかと考えられる。	微視組織の変化に関しては、可能な範囲で、専門機関とも協力し研究を実施して参りたいと思います。
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	未照射材と加速照射材の両者に対して関連する過去の研究を十分に調査しており、適切であると評価致します。	—
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	【原子炉圧力容器の健全性評価に係る研究】 破壊靱性評価においてマスターカーブ法は試験データを統計的に取り扱うことが可能なことから、当該研究において最適な手法と評価致しますが、データが 1 点しか得られないようであれば、マスターカーブ法を採用するメリットが薄れてしまうように思います。他の手法と組み合わせて今回の成果を補完することができれば、さらに良くなると思います。	ご指摘の点を踏まえ、次フェーズにおきましては、取得したデータの補完ができるように他の手法も組み合わせて検討していきたいと思います。

No.	評価項目	評価意見	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。	【原子炉圧力容器の健全性評価に係る研究】 中性子照射を受ける溶接継手 HAZ の破壊靱性は、未照射材と加速照射材に対する結果を基に総合的に評価されていますが、実機材料を用いた実験で結果を検証できると、さらに良くなると考えます。	ご指摘の点を踏まえ、実機材料を用いた研究を実施できるよう、次フェーズにおきましては、当該対象部位の試験を検討して、参りたいと思います。
4	④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。	特に見当たりません。	—
5	その他	実機材料を用いた貴重な実験データが得られていると評価致しますが、大学等と連携して当該研究で得られた結果を補完する実験や解析を実施できれば、今回の実験データを更に生かせるように思われます。	当該研究において、可能な範囲で、専門機関とも協力し研究を実施して参りたいと思います。

(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	現在問題とされている課題について適切な取り組みがされている。	—
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	<p>【原子炉圧力容器の健全性評価に係る研究】</p> <p>2軸荷重の破壊靱性試験では、Z方向負荷の意図を明確に記述し、評価のために必要な荷重の大きさを定量的に示す目的が明確になっているとよい。また、(Z方向負荷のない)等2軸荷重の試験を含めると、より試験の解釈が深まると期待できる。</p> <p>【炉内構造物の健全性評価に係る研究】</p> <p>破壊靱性の取得計画については、照射量が広くカバーされており適切と考える。既報のデータと比較すると差異(ばらつき)が生じることが予測されるので、考察の基本となる強度特性は丁寧に取得することが望ましい。</p>	<p>原子炉圧力容器の健全性評価に係る研究における2軸荷重試験はPTS事象を考慮し実施して参りました。ご指摘の点については、試験自体を今後実施することはできませんが、解析等によって補完して、試験結果の分析・解釈を進めて参りたいと思います。</p> <p>炉内構造物の健全性評価に係る研究については、ご指摘を踏まえ、次フェーズにおいて試験を実施する際には、強度特性データを丁寧に取得して参りたいと思います。</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>【原子炉圧力容器の健全性評価に係る研究】</p> <p>平面ひずみ破壊靱性試験と2軸荷重の破壊靱性試験の比較という観点での考察があればよい。</p>	<p>平面ひずみ破壊靱性試験と2軸荷重の破壊靱性試験の結果比較については、単軸試験との結果を踏まえ検討して参りました。検討においては試験の違いによる亀裂先端における破壊時のK値の妥当性をローカルアプローチ法に基づく解析を実施致しましたが、データ数が少ないため、統計的な分析によって十分考察することができませんでした。次フェーズにおいても試験荷重の形式の違いによる分析を行う予定であり</p>

No.	評価項目	意見	回答
		<p>【ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究】</p> <p>モデル策定に用いた材料や試験条件との差異など、H3T モデルが保守的な評価となった原因についても考察することが望ましい。</p> <p>靱性と強度特性は密接な関係があることから、変形特性予測モデル(TSS モデル)との比較も併せて考察するとよい。</p>	<p>ますので、引き続き検討を行って、論文等で公表する等を考えていきたいと思いません。</p> <p>ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究については、検討会当日にご説明したとおり、今後論文を投稿する予定ですので、ご指摘の点も考慮し作成して参りたいと思います。</p>
4	④重大な見落とし(観点の欠落)がないか。	見落としなど問題は見当たらない。	—
5	その他	<p>【原子炉圧力容器の健全性評価に係る研究】</p> <p>貴重な試験と思うので、今後もデータ点数を増やしていくことが望ましい。</p> <p>【炉内構造物の健全性評価に係る研究】</p> <p>破壊靱性がばらつく要因が考察できれば現状の下限の破壊靱性値の妥当性を示すことにつながると考えられる。</p>	<p>拝承いたします。</p> <p>次フェーズも原子炉圧力容器の健全性評価に係る研究は実施しますのでデータ数が増えていくこととなります。</p> <p>炉内構造物の健全性評価に係る研究についても次フェーズで本格的にデータを取得しますので、ご指摘の点を踏まえ考察を進めて参りたいと思います。</p>
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	国内外で行われている高経年化劣化の評価は、加速劣化試験の成果に基づき行われている。その妥当性を検証することの重要性は国際的にも認識されており、それら最新動向、知見を踏まえた検討内容となっている。実機で長期間使用された圧力容器	拝承いたします。

No.	評価項目	意見	回答
		鋼や炉内構造物を用いた材料劣化の評価は、世界的にも知見が少なく研究ニーズの高い項目である。それら取り組みの内容から、国内外の過去の研究を精査した上で重要性の高い項目について実施されているものと考えられる。	
2	②解析実施手法、実験方法が適切か。	照射された実機材料を用いた研究は、放射化された試験材を取り扱う事や、廃炉工程との兼ね合いから多くの制約を受ける。取り組みは、それらの制約を考慮した上で慎重に計画が検討されており、適切に事業が進められていると判断される。検討方法に対しても、実機材料を用いた破壊靱性試験や熱時効評価等、実際の運転環境や事故時の環境などが考慮されている。また、原子炉圧力容器や炉内構造物、ステンレス鑄鋼など、対象ごとに適切な試験・解析手法が選定されている。	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。	実機材料で得られたデータをもとに、加速試験等で得られた知見をベースとした既存の評価手法の保守性や妥当性の検証が行われている。事業者が用いる民間規格や評価式の技術的妥当性を確認する上で重要な知見と考えられる。	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。	実機材を用いた取り組みであることから、データ点数などの多くの制約を受けた検討内容となっているが、質疑の状況からも適切に研究が遂行されたことが伺え、重大な見落としは認められなかった。	拝承いたします。
5	その他	いずれの検討結果も、高経年化技術評価の保守性が担保されていることを示している。この保守性は安全性を担保する上で重要であるが、合理化の余地という観点で捉えることもできる。実機材の入手に際して	拝承いたします。 なお、ご指摘の点を考慮し、次フェーズでは可能な限り機構研究を拡充して実施して参りたいと思います。

No.	評価項目	意見	回答
		<p>は事業者の協力が不可欠であることから、保守性の検証に留まらず、リスクを軽減するための合理的な規制要件の確立という観点でも検討を進めることが有効と考えられる。また、保守性について定量的に評価を進めることは、想定外の事象を回避するためにも重要である。これらの観点から、機構研究の拡充にも期待したい。</p>	
橋本 将視 氏			
1	① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか	過去の研究成果や近年の動向も踏まえて研究を実施しており、妥当と考える。	—
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	<p>説明資料 19 ページにおいて、低圧ケーブルの劣化特性評価試験として、熱的特性である熱質量・示差熱測定や、電気的特性である電流積分法による測定を実施されているが、これらの指標を選択した理由を教えてください。質問の背景としては、ケーブルの劣化状態を把握する指標はこれら以外にも多く知られているが、劣化との相関や測定結果のばらつき、破壊/非破壊試験など一長一短があると考えている。例えば、原子カプラントのケーブル経年変化評価技術調査研究に関する最終報告書（JNES-SS-0903 2009 年 7 月）においては、インデンタモジュラス法は一部ケーブルを除き適用可能と評価されているが、光診断手法などその他の手法はバラツキ等の観点から改良の必要があると報告されている。参考資料3の報告書45ページを拝見するとフーリエ変換赤外分光測（FT-IR）の測定をされているようだが、そのような観点も含め、今回の指標を選択した理由やそれを踏まえた知見等があれば、今後の産</p>	<p>本研究プロジェクトにおける「電気・計装設備の健全性評価に係る研究」の「実機材料及び高分子絶縁体の劣化特性評価試験」では、高分子構造等に関して表面観察、フーリエ変換赤外分光測定（FT-IR）、熱重量・示差熱測定（TG-DTA）及びゲル分率・膨潤度測定を、機械的特性に関して引張試験を、電気的特性に関して電流積分法による測定をそれぞれ行って分析しました。これらの手法は、ケーブルが長期間使用されることで想定される高分子絶縁体における分子鎖切断や架橋等による「高分子構造」の変化並びにこれに伴う「機械的特性」及び「電気的特性」の変化を幅広く観察するために選択しました。FT-IRについては、説明資料に示した他の手法（TG-DTA 及び EAB）と同様に、難燃 PH ケーブル（T1）と難燃 PH ケーブル（加速劣化、100 °C・100 Gy/h で 1997 h）の測定結果を比較すると、酸化（分子鎖切断）に伴い生成するカルボニル基の量に大きな違いはないことを確認しています。</p>

No.	評価項目	意見	回答
		業界の取り組みにおいても参考にさせていただきたいと考えている。	
3	③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	概ね妥当と考えているが、試験結果は試験体のうち代表的なものについてまとめられているため、他の試験体の試験結果についても言及があると良いと考える。資料19ページにおいて、低圧ケーブルの試験としてT1(高浜1号機)の実機材の結果が示されており、参考資料3の安全研究成果報告書においても同様にT1(高浜1号機)の実機材の結果が示されているが、T2(高浜2号機)の実機材の結果も同様であったのか教えていただきたい。特にこれらの試験体は実機での使用年数が異なっているため(T1:29年、T2:23年)、使用年数の違いが結果にどのように現れたかについても教えて頂きたい。	難燃 PH ケーブル(T2)についての測定結果の概要を以下のとおりご回答致します。 ・熱重量・示差熱測定:難燃 PH ケーブル(T1)を代表として測定したため、難燃PHケーブル(T2)の測定は行っておりません。 ・引張試験:難燃 PH ケーブル(T2)の絶縁体の管状供試体は、難燃PHケーブル(T1)と比較してやや大きくなることを確認しています。その理由の一つとして、使用年数の違いが考えられます。 ・電流積分法:難燃 PH ケーブル(T2)の測定結果は難燃PHケーブル(T1)と同等であることを確認しています。
4	④重大な見落とし(観点の欠落)がないか。	特になし。	—
5	その他	難燃 PH ケーブルの検証において、高浜1号機と高浜2号機の試験体ではケーブルサイズ、絶縁体厚さが異なっていたと思う。絶縁体厚さに対する破断時伸びの相関性について得られた知見があれば教えて頂きたい。	研究委託先において、ケーブルの刻印等の情報から、難燃 PH ケーブル(T1)と難燃 PH ケーブル(T2)は、公称ケーブル外径と公称導体サイズは異なる一方で公称絶縁体厚さは同じであると判断して研究を進めており、絶縁体厚さの違いに関する知見は取得しておりません。

## 6 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 (H26年度～R6年度)

### 1. 研究プロジェクトの目的

・本研究プロジェクトでは、東京電力福島第一原子力発電所の燃料デブリ取出し時の臨界管理に係る審査や検査の支援等に必要な技術的知見を取得するために、臨界管理評価手法及び臨界を超過した際の線量評価手法を整備する。

### 2. 研究概要

・臨界管理評価手法の整備では、様々な性状を持つ燃料デブリを対象とした臨界マップデータベースを作成した。さらに、定常臨界実験装置 STACY 更新炉を用いて燃料棒と構造材棒を組み合わせた実験体系を構築し、燃料デブリの性状を模擬した臨界実験データを取得した。燃料デブリが臨界を超過した際の線量評価手法の整備では、敷地境界の線量を評価するために必要な臨界挙動評価ツールを構築し、燃料デブリ取出し作業時に臨界となるシナリオに基づき、敷地境界の線量を評価した。

### 3. 研究成果

臨界管理評価手法の整備では、燃料デブリの臨界安全評価を行うために必要な臨界マップデータベースを作成するとともに、燃料デブリ中の乱雑化した組成分布が臨界特性に与える影響を評価できるモンテカルロ計算ソルバーを整備し、組成分布が乱雑化した際の臨界性の揺らぎに関する技術的知見を得た。また、臨界マップデータベースの作成に用いた臨界安全評価コードの妥当性を確認するために、燃料デブリの臨界特性を模擬した臨界実験データを取得した（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。）への委託研究事業で実施）。さらに、3次元炉心損傷・溶融進展解析コードの整備を実施し、解析により損傷・溶融進展中の燃料デブリの性状に関する知見を得た。

臨界を超過した際の線量評価手法の整備では、燃料デブリ取出し時に万が一臨界となった場合の敷地境界線量を評価するためのツール等を構築した。また、燃料デブリ取出し作業時に臨界となる事故シナリオを想定し、臨界により生成した放射性物質による敷地境界線量を評価した。その結果、燃料デブリ中の構造材重量や反応度印加量が、線量に大きな影響を与えることを確認した（JAEA への委託研究事業で実施）。

### 4. 事後評価結果

#### (1) 項目別評価

##### ① 成果目標の達成状況：A

- 燃料デブリ取出し時の臨界管理に活用できるよう、様々な性状を持つ燃料デブリを対象とした臨界マップデータベースの整備を実施するとともに、燃料デブリに対する臨界安全評価コードの妥当性確認のために必要な臨界実験データを取得したことから、当初の成果目標を達成した。さらに、燃料デブリ取出し時に万が一

一臨界となった場合に発生する放射性物質による敷地境界線量を評価するためのツール等を構築し、臨界事故シナリオに基づき、敷地境界線量評価を実施したことから当初の成果目標を達成した。

② 成果の公表等の状況：S

- 原子力規制庁から査読付の論文を7件公表した。また、査読付プロシーディングス5件を公表し、そのうちの1件については臨界安全性国際会議において優秀ポスター賞を受賞した。委託先からは査読付論文13件及び査読付プロシーディングス29件を公表した。これらの論文は、燃料デブリ取出し作業の安全性向上に貢献するものであり、原子力の安全に資する質の高い論文と評価できる。また、国際会議で優秀ポスター賞を受賞しており、学術的価値も対外的に認められていることから、成果の公表等の状況は優れていると評価できる。

③ 研究の進め方に関する技術的適切性：A

- 国内外の過去の研究及び最新知見を踏まえた上で、適切な手法によって研究を実施した。また、国内外の専門家との議論を通して、研究の進め方、成果の妥当性を確認した。さらに、技術評価検討会での外部専門家からも研究の進め方について適切であると評価をされた。以上から、研究の進め方は技術的に適切であると評価した。

(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及び最新知見を踏まえた上で、適切な解析及び実験手法にて研究を実施しているとの意見があった。解析及び実験結果の評価手法についても適切であるとの意見があった。
- STACY 臨界実験が、実際の燃料デブリの特徴を踏まえ、適切な範囲で実験がなされているかとの意見があった。これについては、燃料デブリの試験的取出し等で得られた分析結果をもとに擬似燃料デブリモデルを作成し、実験体系との類似性評価を実施することで、燃料デブリの臨界特性を模擬した STACY 実験データの品質を確認していく予定である。
- 臨界を超過した際の線量評価手法の線量評価モデルについて、核分裂生成物がデブリから放出される割合をどのように決めるかが重要であるとの意見があった。これについては、燃料デブリの取出し工法次第で大きく変わると考えられることから、工法が確定したら改めて解析する予定である。
- 詳細は別表 1-6 参照。

④ 研究マネジメント及び予算・契約管理の適切性：A

- 委託先も含め適切な実施体制を構築して研究を進め、計画どおりに研究成果が得られた。また、原子力規制庁及び委託先から計画的に研究成果を公表できたことから、適切なマネジメントのもとに研究が行われたと評価した。

- 予算執行、進捗管理及び検収を含めた契約業務を、法令等を遵守して実施しており、適切に業務管理が行われたと判断した。

⑤ 成果の規制への活用の状況・見通し：B

- 本プロジェクトで得られたデブリの臨界評価手法等に係る技術的知見は、将来的な燃料デブリの臨界防止に関する実施計画審査の活動について審査支援依頼をした際に活用が期待されるものと考えられる。  
(B、東京電力福島第一原子力発電所事故対策室)

(2) 総合評価：A (総合点：3.0)

- 適切に研究を遂行して、成果目標を達成するとともに、20 編の査読付論文を公表することができた。また、研究成果は、今後の燃料デブリの臨界防止に関する審査等にも活用できると考えられる。

5. 評価結果の今後の活用

- 技術評価検討会でいただいた意見を踏まえて、本研究プロジェクトで得た燃料デブリの臨界特性を模擬した STACY 臨界実験データについては、類似性評価手法を用いて品質を確認する。また、臨界を超過した際の線量評価手法の線量評価モデルについては、燃料デブリの取出し工法が確定次第、再解析を実施し、学術論文等で示していく。

(主な成果の公表)

(1) 原子力規制庁の職員が著者に含まれる公表

- 論文 (査読付)
  1. Okawa, T., Nakajima, T., “Modeling and Verification of Three-Dimensional Simulation for BWR In-Vessel Core Degradation”, Annals of Nuclear Energy, Vol. 101, pp. 182-195, 2017.  
doi:10.1016/j.anucene.2016.09.042
  2. Okawa, T., Shiba, S., Nakajima, T., “Physical Model Features and Validation Status of Three-dimensional Simulation Model for BWR In-Vessel Core Degradation”, Annals of Nuclear Energy, Vol. 105, pp. 168-183, 2017. doi:10.1016/j.anucene.2017.03.021
  3. Okawa, T., “Validation Progress and Exploratory Analyses of Three-Dimensional Simulation Code for BWR In-Vessel Core Degradation”, Annals of Nuclear Energy, Vol. 117, pp. 73-83, 2018.  
doi:10.1016/j.anucene.2018.03.018
  4. Okawa, T., “A Three-Dimensional Approach for Simulating BWR Core Melt Progression - Validation Progress on CORA-BWR Experimental Series”, Annals of Nuclear Energy, Vol. 132, pp. 512-525, 2019.

- doi:10.1016/j.anucene.2019.06.041
5. Okawa, T., “Application of Three-Dimensional Detailed Geometry to Simulation of Melt Progression in an Intricate BWR Lower Head”, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 153, 108065, 2021.  
doi:10.1016/j.anucene.2020.108065
  6. Shiba, S., Sakai, T., “Criticality evaluation considering nonuniformity effect using Monte Carlo perturbation method”, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 60, No. 8, pp. 943–954, 2023.  
doi:10.1080/00223131.2022.215989
  7. Shiba, S., Iwahashi, D., Okawa, T., “Criticality Evaluation During Fuel Debris Particle Sedimentation Using Coupled DEM-MPS Code”, *Nuclear Technology*, Vol. 209, No. 8, pp. 1154–1163, 2023.  
doi:10.1080/00295450.2023.2191588
- 学術会議のプロシーディングス（査読付）
1. Shiba, S., Iwahashi, D., Okawa, T., Gunji, S., Izawa, K., Suyama, K., “PRELIMINARY ANALYSIS OF RANDOMIZED CONFIGURATION PATTERNS IN MODIFIED STACY CORE”, *The 12th International Conference on Nuclear Criticality Safety (ICNC2023)*, 2023.
  2. Kawaguchi, M., Shiba, S., Iwahashi, D., Okawa, T., Gunji, S., Izawa, K., Suyama, K., “PRELIMINARY ANALYSES OF MODIFIED STACY CORE CONFIGURATION USING SERPENT WITH JENDL-5”, *The 12th International Conference on Nuclear Criticality Safety (ICNC2023)*, 2023.
  3. Shiba, S., Iwahashi, D., Okawa, T., Gunji, S., Izawa, K., Suyama, K., “PRELIMINARY EVALUATION OF SIMILARITY BETWEEN THE MODIFIED STACY CORE CONFIGURATIONS AND THE PSEUDO-FUEL DEBRIS MODELS”, *Proceedings of ICONE30*, 2023. doi:10.1299/jsmeicone.2023.30.1097
  4. Shiba, S., Gunji, S., Izawa, K., “Critical Experiment Analyses of the Modified STACY Core Simulating Fuel Debris”, *Nuclear Criticality Safety Division 2025 Conference (NCS2025)*, 2025. (Submitted for publication)
  5. Shiba, S., “Similarity evaluation of the STACY core to pseudo fuel debris model”, *2025 ANS Annual Conference (ANS2025)*, 2025. (Submitted for publication)
- 表彰・受賞
1. “Highly Evaluated Posters” Kawaguchi, M., Shiba, S., Iwahashi, D., Okawa, T., Gunji, S., Izawa, K., Suyama, K., “PRELIMINARY ANALYSES OF MODIFIED STACY CORE CONFIGURATION USING SERPENT WITH JENDL-5”, *The 12th International Conference on Nuclear Criticality Safety (ICNC2023)*, 2023.

(2) 委託先による公表

● 論文 (査読付)

1. Ueki, T., “Fractal dimension analysis for run length diagnosis of Monte Carlo criticality calculation”, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 53, pp. 312–322, 2016.  
doi:10.1080/00223131.2015.1039620
2. Ueki, T., “Monte Carlo criticality analysis under material distribution uncertainty”, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 54, pp. 267–279, 2017.  
doi:10.1080/00223131.2016.1260066
3. Ueki, T., “A power spectrum approach to tally convergence in Monte Carlo criticality calculation”, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 54, pp.1310–1320, 2017.  
doi:10.1080/00223131.2017.1365022
4. Gunji, S., Tonoike, K., Izawa, K., Sono, H., “Study of experimental core configuration of the modified STACY for measurement of criticality characteristics of fuel debris”, Progress in Nuclear Energy, Vol. 101, pp.321–328, 2017. doi:10.1016/j.pnucene.2017.03.002
5. Ueki, T., “Monte Carlo criticality analysis of random media under bounded fluctuation driven by normal noise”, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 55, pp.1180–1192, 2018.  
doi:10.1080/00223131.2018.1483846
6. Ueki, T., “Universal methodology for statistical error and convergence of correlated Monte Carlo tallies”, Nuclear Science and Engineering, Vol. 193:7, pp.776–789, 2019.  
doi:10.1080/00295639.2018.1562779
7. Ueki, T., “Judgment on Convergence-in-Distribution of Monte Carlo Tallies Under Autocorrelation”, Nuclear Science and Engineering, Vol. 194:6, pp.422–432, 2020.  
doi:10.1080/00295639.2019.1710418
8. Ueki, T., “Monte Carlo Criticality Calculation of Random Media Formed by Multimaterials Mixture Under Extreme Disorder”, Nuclear Science and Engineering, Vol. 195:2, pp.214–226, 2021.  
doi:10.1080/00295639.2020.1801000
9. Ueki, T., “Weierstrass function methodology for uncertainty analysis of random media criticality with spectrum range control”, Progress in Nuclear Energy, Vol.144, 2022.  
doi:10.1016/j.pnucene.2021.104099
10. Fukuda, K., Yamane, Y., “Effect of fuel particle size on consequences

- of criticality accidents in water-moderated solid fuel particle dispersion system” , Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 60, pp.1514–1525, 2023. doi:10.1080/00223131.2023.2224327
11. Gunji, S., Araki, S., Suyama, K., “Development of Experimental Core Configurations to Clarify keff Variations by Nonuniform Core Configurations” , Nuclear Science and Engineering, Vol. 197:8, pp.2017–2029, 2023. doi:10.1080/00295639.2022.2164151
  12. Ueki, T., “Generalized extreme value analysis of efficient evaluation of extreme values in random media criticality calculations” , Progress in Nuclear Energy, Vol. 173, 104630, 2024. doi:10.1016/j.pnucene.2024.105236
  13. Gunji, S., Araki, S., Izawa, K., Suyama, K., “Study on the specifications of the basic core configurations of the modified STACY” , Annals of Nuclear Energy, Vol. 209, 110783, 2024. doi:10.1016/j.anucene.2024.110783

● 学術会議のプロシーディングス（査読付）

1. Izawa, K., Tonoike, K., Sono, H., Miyoshi, Y., “Critical experiments for fuel debris using modified STACY”, Proc. of PHYSOR 2014, 2014.
2. Tonoike, K., Yamane, Y., Umeda, M., Sono, H., “Study on Criticality Control of Fuel Debris by Japan Atomic Energy Agency to Support Nuclear Regulation Authority of Japan” , Proc. of ICNC2015, 2015.
3. Izawa, K., Tonoike, K., Leclaire, N., Duhamel, I., “Design of Water-Moderated Heterogeneous Cores in New STACY Facility through JAEA/IRSN Collaboration” , Proc. of ICNC2015, 2015.
4. Tonoike, K., Okubo, K., Takada, T., “Criticality Characteristics of MCCI Products Possibly Produced in Reactors of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station” , Proc. of ICNC2015, 2015.
5. Yamane, Y., Tonoike, K., “Development of Criticality Risk Evaluation Method for Fuel Debris in Fukushima-Daiichi NPS” , Proc. of ICNC2015, 2015.
6. Gunji, S., Tonoike, K., Izawa, K., Sono, H., “Study of experimental core configuration of the modified STACY for reactivity worth measurement of MCCI products” , Proc. of PHYSOR2016, 2016.
7. Ueki, T., “Spectral Analysis for Convergence Assessment in Monte Carlo Criticality Calculation” , Proc. of M&C2017, 2017.
8. Tonoike, K., Watanabe, T., Gunji, S., Yamane, Y., Nagaya, Y., Umeda, M., Izawa, K., Ogawa, K., “Progress of Criticality Control Study on Fuel Debris by Japan Atomic Energy Agency to Support Secretariat of Nuclear

- Regulation Authority” , Proc. of ICNC2019, 2019.
9. Watanabe, T., Okubo, K., Araki, S., Tonoike, K., “Criticality characteristics of fuel debris mixed by fuels with different burnups based on fuel loading pattern” , Proc. of ICNC2019, 2019.
  10. Izawa, K., Ishikawa, J., Okubo, T., Ogawa, K., Tonoike, K., “Neutronic Design of Basic Cores of the New STACY” , Proc. of ICNC2019, 2019.
  11. Gunji, S., Clavel, J.-B., Tonoike, K., Duhamel, I., “Design Methodology for Fuel Debris Experiment in the New STACY Facility” , Proc. of ICNC2019, 2019.
  12. Ueki, T., “Continuous Energy Monte Carlo Criticality Calculation of Random Media under Power Law Spectrum” , Proc. of M&C2019, 2019.
  13. Nagaya, Y., Ueki, T., Tonoike, K., “SOLOMON: a Monte Carlo Solver for Criticality Safety Analysis” , Proc. of ICNC2019, 2019.
  14. Yamane, Y., Numata, Y., Tonoike, K., “Exploratory Investigation For Estimation of Fuel Debris Criticality Risk” , Proc. of ICNC2019, 2019.
  15. Araki, S., Gunji, S., Tonoike, K., Kobayashi, F., Izawa, K., Ogawa, K., “A New Critical Assembly: STACY” , Proc. of RRFM 2020, 2020.
  16. Araki, S., Yamane, Y., Ueki, T., Tonoike, K., “Effect of  $\beta$  on Effective Multiplication Factor in  $1/f\beta$  Spectrum Random System” , Proc. of PHYSOR2020, 2020.
  17. Gunji, S., Araki, S., Suyama, K., Izawa, K., “Evaluation of critical experimental core configurations to simulate non-uniform fuel debris” , Proc. of PHYSOR2022, 2022.
  18. Gunji, S., Yoshikawa, T., Araki, S., Izawa, K., Suyama, K., “STUDY ON THE BASIC CORE ANALYSIS OF THE NEW STACY” , Proc. of ICNC2023, 2023.
  19. Ueki, T., “RANDOM MEDIA CRITICALITY ANALYSIS METHODS IN MONTE CARLO SOLVER SOLOMON” , Proc. of ICNC2023, 2023.
  20. Gunji, S., Araki, S., Arakaki, Y., Izawa, K., Suyama, K., “PLANNING OF THE DEBRIS-SIMULATED CRITICAL EXPERIMENTS ON THE NEW STACY” , Proc. of ICNC2023, 2023.
  21. Araki, S., Gunji, S., Arakaki, Y., Watanabe, T., Yoshikawa, T., Murakami, T., Kobayashi, F., Izawa, K., Suyama, K., “DEBRIS-SIMULATED CORE ANALYSIS UNDER FUEL PROCUREMENT CONSTRAINTS IN NEW STACY EXPERIMENTS” , Proc. of ICNC2023, 2023.
  22. Izawa, K., Ishii, J., Seki, M., Kobayashi, F., Sumiya, M., Maekawa, T., Arakaki, Y., Araki, S., Sono, H., Suyama, K., “Progress of modification work of the Static Experiment Critical Facility (STACY) and preparation for first series of critical experiments under the new regulatory standards of Japan” , Proc. of ICNC2023, 2023.

23. Kobayashi, F., Fukaya, H., Izawa, K., Kida, T., Sono, H., Suyama, K.,  
“Status on the development of the fabrication and analysis equipment  
of the pseudo fuel debris”, Proc. of ICNC2023, 2023.
24. Suyama, K., Ueki, T., Gunji, S., Watanabe, T., Araki, S., Fukuda, K.,  
Yamane, Y., Izawa, K., Nagaya, Y., Kikuchi, T., Okubo, K., “STUDY ON  
CRITICALITY SAFETY CONTROL OF FUEL DEBRIS FOR VALIDATION OF METHODOLOGY  
APPLIED TO THE SAFETY REGULATION”, Proc. of ICNC2023, 2023.
25. Yamanae, Y., Suyama, K., “Sensitivity Analysis of the Parameters in  
Consequence Analysis of Postulated Fuel Debris Criticality Accident in  
Fukushima Dai-ichi NPP”, Proc. of ICNC2023, 2023.
26. Araki, S., Gunji, S., Arakaki, Y., Murakami, T., Yoshikawa, T., Hasegawa,  
K., Tada, Y., Izawa, K., Suyama, K., “Validation of Integrated Thermal  
Power Measurement using Solution fuel STACY experimental data for  
modified STACY Performance Test”, Proc. of RPHA2023, 2023.
27. Gunji, S., Araki, S., Suyama, K., Izawa, K., Suyama, K., “Critical  
Experiment Plans on the New STACY to Clarify the Criticality  
Characteristics of the Molten Core-Concrete Interaction Products”, Proc.  
of PHYSOR2024, 2024.
28. Watanabe, T., Ueki, T., Suyama, K., “Application of Monte Carlo Solver  
Solomon to Critical Mass Calculation of Fuel Randomization System”,  
Proc. of PHYSOR2024, 2024.
29. Nagaya, Y., “Review of JAEA’ s Monte Carlo Codes for Nuclear Reactor  
Core Analysis”, Proc. Of SNA+MC 2024, 2024.

福島第一原子力発電所デブリの臨界評価手法の整備  
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	適切であると判断します	—
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	STACY での臨界実験: 基本的な性能確認という観点では妥当と判断しますが、デブリ組成が不明な状態では燃料デブリ模擬臨界実験の「模擬性」が適切であるか判断が困難です。特に、形状の違いを臨界実験でどのように再現するかを検討する必要があるのではないか。	STACY 臨界実験計画を立案では、シビアアクシデントコード、炉心損傷溶融進展解析コードで得られた結果をもとに擬似燃料デブリを作成して、それらとの STACY 臨界実験との類似性評価を実施しました。燃料デブリの幾何形状についても、今後、当該評価にて確認します。
3	③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	適切であると判断します	—
4	④ 重大な見落とし(観測点の欠落)がないか。	周囲が水で覆われた均質球体系で評価された臨界マップに対して、媒質が乱雑に存在することによる偏差に加えて、水に隣接している・していないことによる実効増倍率への影響を考慮する必要があるのではないか。	「臨界マップデータベース」では、十分な厚さの水反射体付きの臨界データが格納されていますが、同システムのデータ作成機能を用いれば、裸体型や 2.5cm 厚の水反射体付き体型の入力データを生成することが可能となります。そのため、必要性に応じて反射体のない体系の臨界量を評価します。
5	その他	・STACY 更新遅延に伴う計画の 3 年延長に対して、当初の計画に対する + $\alpha$ の成果を明確にさせていただくと良いと思います。	STACY 更新炉整備の遅延に伴う計画の 3 年延長から得られた成果は、主に STACY 臨界実験装置を用いた臨界実験のデータとなります。本安全研究成果報告ではその点が明確になるように記載いたします。

No.	評価項目	評価意見	回答
		・解析体系が実際と大きく異なるため定量的な解析結果をどのように使用するかわかりませんでした。より臨界になりにくいデブリサイズ、減速材やコンクリート割合を対象とした作業とすることに適用する、という理解で良いでしょうか。	燃料デブリ取出し工法が決まっていないため、現状では、臨界安全評価の観点から臨界質量や臨界寸法という形で示しました。臨界条件は、燃料とデブリの混合割合、含水率、Gd の存在量、デブリ寸法などの多くのパラメータに依存しており、デブリの分析結果から臨界質量を推定することでデブリ取り出し時の条件の設定に活用できると考えています。
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	燃料デブリの臨界評価手法については過去の研究例はあまり無いと思われるが、米国 TMI2号機事故での調査結果や、原子力発電所の燃料集合体に対する臨界評価手法を把握して、それらと今回の臨界評価手法の相違点や特長を整理しておく、研究成果の活用には有用であると考えます。	米国 TMI2号機事故での調査結果及び原子力発電所の燃料集合体に対する臨界評価手法を参考にしつつ、本安全研究プロジェクトを推進しました。今後、臨界評価手法について論文にて公表する機会もあると思いますので、その中では相違点等に触れていきたいと思っています。
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	臨界評価のための数値シミュレーションコードの整備と、その解析性能評価を行う基礎データを生成するための STACY による臨界実験を行うアプローチは適切と考えます。なお、燃料デブリの取り出しが始まっていますので、取り出しに伴って明らかになると予想される燃料デブリの組成等の知見を早めに反映できるような体制を構築するとともに、解析コードで模擬する現象、入力パラメータの入力方法や燃料デブリの取り出し作業計画に必要なデータの出力方法の整備をしておくことが望ましいと思います。	燃料デブリの試験的取出し等で得られた分析結果をもとに、解析コードで模擬する現象、入力パラメータの入力方法や燃料デブリの取り出し作業計画に必要なデータが取得できるように整備します。また、燃料デブリの試験的取出し等で得られた知見を迅速に反映するために、国内外の研究機関との連携強化を検討しています。
3	③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が	本研究の目的は燃料デブリ取り出しにおける臨界の可能性に関する評価であるので、実験結果の整理方法や実験結果を再現できる解析となっているかの観点での解析結果の評価方法は妥当であると考えられる。	燃料デブリの取出し工法が明らかになった段階で、多数の燃料デブリ片を同時に取り出す場合等を想定し、さらに、周囲の環境の動的な変化を踏まえ、起こり得る可能性

No.	評価項目	評価意見	回答
	適切か。	<p>ただし、ガイドラインを整備することを考えると、危険性の判定基準の検討が必要かもしれません。特に、多数の燃料デブリ片を同時に取り出すことを考えると、取り出し途中で燃料デブリ片の位置関係が動的に変化することがあると思われますので、その場合の臨界可能性の評価をどうするかを考えることも必要と思います。</p> <p>なお、取り出し前に固定剤などで塊にしたり、中性子吸収率の高い材料の小型容器に入れたりしてから取り出すのであれば、そのような検討はあまり必要無いとも思います。</p>	<p>の高い臨界シナリオを検討し、臨界安全評価を実施したいと考えています。</p>
4	④重大な見落とし(観測点の欠落)がないか。	<p>燃料デブリに関してはまだまだ不明な点が多いと思いますので、燃料デブリの取り出しで判明すると予想される知見に迅速に対応できる体制の構築と起こりうる現象や事故シナリオの網羅的な事前検討が重要と考えます。</p> <p>3のコメントにも関係しますが、多数の燃料デブリ片を同時に取り出す場合や、取り出し時に周りにある物質の影響等も今後検討しておく必要があると考えます。</p>	<p>多数の燃料デブリ片を同時に取り出す場合に水対燃料比の変化に伴って反応度が増加する現象の検討は実施していますが、取り出し工法が決定した段階で、さらに周囲の環境条件の変化を踏まえて、検討を進めていきたいと考えています。</p>
5	その他	<p>実際に取り出した燃料デブリに関する知見に基づいて、継続的に研究を進めていく必要があると考えます。</p>	<p>燃料デブリの試験的取出しによる分析結果等で得られた技術的知見に基づいて、継続的に研究を進めていくように努めます。</p>
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	<p>福島第一原子力発電所(1F)の燃料デブリを想定した臨界評価手法は1Fの廃炉を進めるために重要なことであり、JAEAの臨界実験装置(STACY)の更新、実験データ取得、解析手法の構築は重要な取り組みと認められます。</p>	<p>拝承いたしました。</p>

No.	評価項目	評価意見	回答
2	②解析実施手法、実験方法が適切か。	実験、解析の方法は概ね適切と認められます。特にSTACYの更新により、燃料デブリ体系を模擬できるようになったことは重要です。今後、1Fの燃料デブリの情報が蓄積されてきたときに、その情報をどのように実験や解析に反映するかも検討課題として頂けると良いと思います。	現在、構造材と燃料が混在した燃料デブリ体系の臨界計算に対する不確かさについて、STACY 臨界実験データを用いた臨界実験解析等によって今後、確認します。現状では、運転員による臨界判定の妥当性、臨界水位測定機器の精度、製造公差、核データライブラリ等を含めて総合的に検証を実施しています。今後、試験的燃料デブリの取出しによる分析結果を踏まえて、STACY 臨界実験と燃料デブリ間の類似性評価を本格的に実施する予定です。
3	③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	実験結果、解析結果それぞれは適切に評価されていると認められます。今後、新たなプロジェクト研究を計画する際には本事業で整備された個々の解析手法間の関係性や、解析と実験との関係性について、さらに明確になると良いと思います。	今後の新たな安全研究プロジェクトを立ち上げる際には、臨界実験解析、ソフトウェアの整備、臨界実験等の実施項目を明確にするとともに、実施項目間の関係性を明確にします。
4	④重大な見落とし(観点の欠落)がないか。	特に認められません。	—
5	その他	原子炉過酷事故解析コードの国産化／国産コードの利用拡大が我が国の原子力安全研究にとって重要です。本研究で3次元炉心損傷・溶融進展解析コードが開発されましたが、その成果・知見が、関連する学会活動等も注視しながら効果的に利用されると良いと思います。	原子炉過酷事故解析コードの国産化／国産コードの利用拡大については、我が国の原子力安全研究にとって重要であるため、本研究プロジェクトで開発した3次元炉心損傷・溶融進展解析コードの活用等については、今後、検討します。

(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	「炉心損傷溶融進展解析コードの開発」: この種の解析手法を新たに開発し活用するということは、従来の同種の解析手法では得られない新たな知見が得られる、そして、その知見が規制の観点あるいはデブリ取り出しの観点で重要ということが示される必要があると考えますが、報告書等の記載では、その部分が読み取れませんので記載の補強が必要と考えます。	現状推定精度が不十分な燃料デブリの存在位置、存在量及び組成の推定を実施するために、炉心損傷溶融進展解析コードの開発し、炉心損傷溶融進展解析を実施しました。それにより、事象進展の理解を深め、臨界マップデータベースの適用性の確認、線量評価で必要となる入力条件等に活用しました。炉心損傷溶融進展解析コードの開発で得られた成果の活用先については安全研究成果報告に記載します。
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	「臨界を超過した際の線量評価手法」の線量評価モデルにおいては、総核分裂数から線量を評価していますが、核分裂によって発生する FP がデブリ固相から気相にどれだけ放出されるか、放出割合をどのように決めるか、が重要な課題と考えます。この点についての言及を検討ください。	「臨界を超過した際の線量評価手法」の線量評価モデルにおいては、現状、入力データの不確かさがあり、その影響を感度解析という形で確認します。希ガス等の大気放出割合や換気効率等については、線量評価コード RASCAL のマニュアルからこれらの放出割合は保守的な設定としていますが、燃料デブリの取出し工程が明らかになった段階で、線量に対する影響を再度、確認します。
3	③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	・「臨界実験データの整備」の最終的な成果として、デブリに対する臨界計算の不確かさ( $\Delta k_{eff}$ )をいくらにすべきか、また、それを踏まえて臨界判定基準をいくらにすべきか(例として、 $k_{eff}=0.95$ など)が示されることを期待します。	臨界安全ハンドブックでは、臨界実験と解析結果から対象となる燃料ごとに $\Delta k_{eff}$ を設定していますが、同様の評価を行うためには実験数が少ないことと、構造材を含むケースの計算結果の分析が十分ではないため、 $\Delta k_{eff}$ の設定は難しいと考えます。将来的に実験数が多くなれば、不確かさの定量化についても検討可能と考えます。現在、燃料デブリ体系を模擬した臨界計算に対する不確かさについて、STACY 臨界実験データを用いた臨界実験解析等によって確認しています。運転員による臨界判定の妥当性、臨界水位測定機器の精度、製造

No.	評価項目	意見	回答
		<p>・「臨界を超過した際の線量評価手法」の線量評価モデルにおいては、総核分裂数から線量を評価していますが、核分裂によって発生する FP がデブリ固相から気相にどれだけ放出されるか、放出割合をどのように決めるか、が重要な課題と考えます。また、評価結果の活用として、想定事故シナリオでの環境影響評価だけでなく、有意な環境影響をもたらす事故シナリオや、それに影響の大きいプロセス、もしくは計算モデル上の仮定などの抽出に活用できるものと考えます。</p>	<p>公差、核データライブラリ等を含めて総合的に検証を実施しています。最終的には、臨界判定基準への判断材料となる情報を提供することを目指しています。</p> <p>「臨界を超過した際の線量評価手法」の線量評価モデルにおいては、FP がデブリ固相から気相にどれだけ放出されるかは、燃料デブリの取出し工法次第で大きく変わると考え、STACY の設置許可申請書などに用いられた保守的な設定としています。このため、これらのパラメータについては、感度解析を実施し、今後、線量評価へのインパクトを検討します。これらの知見は線量評価における入力値の技術的根拠として活用できるのではないかと考えます。さらに、重要度の高いパラメータを抽出することで、線量低減対策にも役立つ情報と考えています。</p>
4	④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。	特記事項なし。	—
5	その他	「臨界マップデータベースの整備」の成果については、臨界安全ハンドブックのようなドキュメントとしてまとめられ、公表されることを期待します。	「臨界マップデータベースの整備」の成果については、臨界安全ハンドブックのような形で、公表するために臨界マップデータベースの拡充を行います。
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	コメント無し	—
2	②解析実施手法、実	・P7 臨界マップデータベース作成時の臨界評価において、デブリの形状は様々な形が想定されると思いますが、臨界評価にお	燃料デブリ形状は様々であるため、臨界安全評価では、臨界安全ハンドブックと同様に基本的な形状として、球、無限円柱、無

No.	評価項目	意見	回答
	<p>験方法が適切か。</p>	<p>いてどのような形状を想定しているのでしょうか？また、形状の不確かさを臨界評価においてどのように取り扱っているのでしょうか？</p> <p>・P8 燃料デブリの組成分布のバラツキを臨界評価に考慮する手法が検討されていますが、評価手法の妥当性について検証する計画は有りますでしょうか？</p>	<p>限平板の3種類を想定しています。なお、他の幾何形状を採用した場合には、球体系に比べて表面積が大きくなるため中性子の漏れが大きくなり、臨界になりにくい形状となります。</p> <p>Solomon コード(モンテカルロ計算アルゴリズム)の妥当性確認については、STACY 臨界実験データを用いた臨界実験解析により既の実施しています。乱雑化機能(デルタトラッキングアルゴリズム)については、乱雑化空間分布をボクセルでモデル化した体系をV&amp;Vが十分になされたモンテカルロ計算コードで得られた解析結果(参照解)と比較することにより今後、検証します。</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>	<p>P17 燃料デブリ取り出しに伴う臨界シナリオが検討されていますが、このシナリオの網羅性はどのようにして確認されていますか？例えば、地震等の外部事象、化学反応による組成の変化などは考えられないでしょうか？</p>	<p>臨界シナリオは燃料デブリ取出し工法に大きく依存すると考えております。取出し工法について詳細が確定していないため、現在のところ、臨界シナリオの網羅性を示すことができません。引き続き、取り出し工法別に外的事象を含めて、臨界シナリオを拡充します。</p>
4	<p>④重大な見落とし(観点の欠落)がないか。</p>	<p>コメント無し</p>	<p>—</p>
5	<p>その他</p>	<p>コメント無し</p>	<p>—</p>
<p>溝上 伸也 氏</p>			
1	<p>①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか</p>	<p>燃料デブリの内部の非均一性があることを評価して研究に望んでいる。一方で、燃料デブリの採取が始まったことから、その仮定を採用することが実際の燃料デブリの特性を考慮して妥当かどうかを確認していく必要がある。</p>	<p>燃料デブリの試験的取出し等で得られた技術的知見を収集し、本プロジェクトで整備した臨界安全管理手法の妥当性を継続的に確認します。</p>

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。	解析実施手法、実験方法については、臨界評価に追い得て実績のある手法が使用されており、適切であると考えられる。 ただし、STACY での実験については、実際の燃料デブリの特徴を踏まえて、適切な範囲で実験がなされているか確認する必要がある。研究はこれで終了とのことであるが、この点については、できる限りフォローすることが望ましい。	燃料デブリの性状について不明な点が多く存在しているため、本研究プロジェクトで開発した3次元炉心損傷・溶融進展解析コードの解析で得られた結果等の知見を基に擬似燃料デブリを作成し、それとの類似性評価を実施することで、擬似燃料デブリの核特性を模擬した STACY 実験データの品質を担保しています。引き続き、燃料デブリの試験的取出し結果を踏まえて、再評価等を検討します。
3	③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	臨界試験の実験結果のデータの適切性については、今後検討するとのことであり、本研究における臨界マップデータベース及びモンテカルロソルバーと臨界試験の関係が明確ではない。臨界試験のデータを十分活用するようにしていただきたい。	本研究プロジェクトで整備した臨界マップデータベースは、臨界安全評価コード(モンテカルロ計算ソルバーを含む。)と核データライブラリを用いて作成している。このため、当該マップデータベースの品質を確保するために模擬燃料デブリの臨界特性を模擬した STACY 臨界実験装置で取得した臨界実験データで妥当性確認を実施しています。また、擬似燃料デブリを模擬した STACY 臨界実験装置で取得した臨界実験データについては、有効活用ができるように検討します。
4	④重大な見落とし(観測点の欠落)がないか。	線量評価手法においては、臨界超過時に発生した核分裂生成物をソースタームとしているが、臨界発生により放射性物質が環境まで移行するのであれば、格納容器内に既に存在する放射性物質も環境まで移行する可能性があるため、それを考慮する必要はないか？	臨界シナリオに基づく線量評価では、格納容器内の既存の放射性物質については不確かさが大きく、モデル化が難しいため考慮しておりません。燃料デブリの取出し工法が確定的になった段階で、格納容器内に既に存在する放射性物質の取扱いも含め、忠実に再現するようなモデルで再検討したいと考えています。
5	その他	コメント無し	—

## 7 廃棄物埋設における長期性能評価に関する研究（R3年度～R6年度）

### 1. 研究プロジェクトの目的

- 本研究では、中深度処分の事業許可申請に係る新規規制基準適合性審査において、「第二種廃棄物埋設施設の位置、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30号）への適合性を具体的に判断するために必要となる科学的、技術的知見及び後続規制において処分システムの性能が設計どおりに発揮されるものであることを確認するために必要となる科学的、技術的知見の取得を目的とする。
- 具体的には、中深度処分の環境条件及び設計を想定して、地質環境及び水理環境の長期的な変動の評価手法並びに人工バリアの長期性能評価等に関する科学的・技術的知見を整理する。また、地質環境及び水理環境のモニタリング及び閉鎖措置又は廃止措置における性能等の確認等についての科学的、技術的知見の取得を目的とする。

### 2. 研究概要

- 中深度処分新規規制基準適合性審査及び後続規制において重要と考えられる課題を、技術分野ごとに自然事象の長期評価手法、廃棄物埋設における性能評価及び線量評価手法、地質環境及び水理環境モニタリング、中深度処分及び浅地中処分に共通する課題の4つに分類して研究を行った。
- 自然事象の長期評価手法に関しては、断層評価手法、広域地下水流動評価手法、並びに岩盤の力学状態及び水理特性に関するフィールド調査、室内試験等を実施した。
- 廃棄物埋設における性能評価及び線量評価手法に関しては、ベントナイト系及びセメント系人工バリアの長期性能評価並びに岩盤における収着・移行現象に関する文献調査、室内試験等を実施した。
- 地質環境及び水理環境モニタリングに関しては、ボーリング孔閉塞技術、ボーリング孔の不完全な水理場への影響等に関する室内試験、解析等を実施した。
- 中深度処分と浅地中処分に共通する課題に関しては、覆土及び周辺地形の侵食評価、生活環境中における放射性物質の移行挙動、同一サイト内に複数の廃棄物埋設地がある場合の線量の重畳に関する現地試験、解析等を行った。

### 3. 研究成果

- 自然事象の長期評価手法に関しては、地下深部の断層の評価（断層の有無、再活動性及び水理学的影響）及び涵養域から流出域までの広域地下水流動評価の妥当性確認に適用可能な手法並びにその適用性に係る知見に加え、掘削影響領域の力学状態とそれに伴う岩盤の損傷及び水理特性に関する知見を得た（国立研究開発法人産業技術総合研究所（以下「AIST」という。）への委託研究の成果、国立大

学法人埼玉大学及び AIST との共同研究の成果並びに国立大学法人東京大学（以下「東京大学」という。）及び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。）との共同研究の成果を含む。）。

- 廃棄物埋設における性能評価及び線量評価手法に関しては、ベントナイト系人工バリアの長期透水係数の推定式、セメント系人工バリアの内部構造の試験方法及びひび割れが物質移行特性に与える影響並びに岩盤の収着性に係る微小空隙の影響に関する知見を得た（東京大学及び JAEA との共同研究の成果並びにジーエルサイエンス株式会社への委託研究の成果を含む。）。
- 地質環境及び水理環境モニタリングに関しては、諸外国におけるボーリング孔の閉塞技術、不十分な閉塞による水理場への影響、ボーリング孔が正しく閉塞されていることの確認方法等に関する知見を得た（JAEA への委託研究の成果を含む。）。
- 中深度処分と浅地中処分に共通する課題に関しては、長期的な降雨による覆土の侵食及びその対策、斜面崩壊等による長期的な地形変化、汽水域における懸濁粒子への放射性物質の収脱着による影響に関する知見を得るとともに、複数の廃棄物埋設地からの線量の重畳の評価を行うためのモデルを構築した（AIST への委託研究の成果及び JAEA への委託研究の成果を含む。）。

#### 4. 事後評価結果

##### （1）項目別評価

###### ① 成果目標の達成状況：A

- 4つの課題に対して検討を進め、そのすべてにおいて新規制基準適合性審査及び後続規制において申請者による申請内容の妥当性判断を行う上で必要な知見を取得することができたことから、設定した目標を達成できた。

###### ② 成果の公表等の状況：A

以下の査読付論文等を公表したことから A 評価と判断した。

- 原子力規制庁の職員により、査読付論文 6 件及び学術会議の査読付プロシーディングス 4 件を公表した。
- 委託先により査読対論文 2 件及び学術会議の査読付プロシーディングス 4 件を公表した。

###### ③ 研究の進め方に関する技術的適切性：A

- 国内外の既往研究及び最新知見を踏まえた上で研究を実施しており、国際的に評価の高い学術雑誌への掲載や国内外の専門家との議論を通じて、研究の進め方、成果の妥当性を確認している。また、技術評価検討会での外部専門家からの意見も踏まえ、技術的適切性を有していると判断した。

（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、最新知見を踏まえた研究開発がなされており、適切な

アプローチがとられたと評価されている。一部の研究成果について、安全研究成果報告（案）において研究の前提条件や成果の適用範囲が明確に示されていないとの指摘があったため、安全研究成果報告に反映する。

➤ 詳細は別表 1-7 参照。

④ 研究マネジメント及び予算・契約管理の適切性：A

- 委託研究等の相手先も含めて適切な実施体制を構築して研究を進めた。原子力規制庁及び委託先から研究成果を計画的に公表したことから、適切なマネジメントのもとに研究が行われたと判断した。
- 予算執行、進捗管理及び検収を含めた契約業務を、法令等を遵守して実施しており、適切に業務管理が行われていたと判断した。

⑤ 成果の規制への活用の状況・見通し：S

- 研究を進めるにあたり、まず最初に広範に渡る埋設処分の許認可に係る審査で必要な技術分野を自然現象の長期評価、性能評価、地質環境・水理環境モニタリング、中深度処分と浅地中処分の共通課題の区分で、抜け漏れがないように網羅的にカバーできるよう適切に分類した上で包括的に技術課題を特定した上で適切に研究開発に取り組んでいる。将来の規制課題（中深度処分、地層処分）に寄与するよう、室内試験、現場での試験、文献調査、モデル化など様々なアプローチで、課題解決に向けた取り組みを進め、着実に成果が得られており、計画的かつ説明性の高い結果が得られている。成果として、査読付論文、査読付プロシーディングス、学術会議での発表を多数行っており、特に国外での公表が顕著に多数見られ、国内で得られた知見を国外の関係者も活用できる形となっており、成果の取りまとめ方も適切と考えられる。（S、研究炉等審査部門）
- 本プロジェクトで得られたベントナイト系及びセメント系人工バリアの長期的な透水性能の妥当性評価等に係る技術的知見は、原子力規制検査の活動に現時点で直接的な貢献をもたらすものではないものの、廃棄物埋設施設の性能評価に関する個別の知見として共有されるべきものと考えられる（B、核燃料施設等監視部門）

(2) 総合評価：A（総合点：3.2）

- 研究を適切に遂行し、成果目標を達成した。また、研究成果の公表を積極的に進めたことに加え、本研究の成果により原子力規制庁職員が博士号を取得した。さらに、成果の規制への活用の見通しについて、広範に渡る埋設処分の許認可に係る審査で必要な技術分野を網羅するように包括的に技術課題を特定した上で適切に研究開発に取り組んでいる。将来の規制課題に寄与するよう着実に成果を上げた、と安全技術管理官（研究炉等審査担当）に評価された。

5. 評価結果の今後の活用

本研究成果を基に内部検討を進め、新規規制基準適合性審査及び後続規制について申請内容の妥当性を具体的に判断できるよう取りまとめる。外部専門家から、一部の研究成果について、安全研究成果報告（案）において研究の前提条件や成果の適用範囲が明確に示されていないとご意見を頂いたため、今後の取りまとめにおいて適用範囲等の明確化に留意する。

#### （主な成果の公表）

##### （１）原子力規制庁の職員が著者に含まれる公表

###### ● 論文（査読付）

1. Murota, K., Saito, T., “Pore size effects on surface charges and interfacial electrostatics of mesoporous silicas”, *Physical Chemistry Chemical Physics*, Vol. 24, pp. 18073-18082, 2022. doi:10.1039/d2cp02520e
2. 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*、29 巻、2 号、pp. 119-129、令和 4 年、doi:10.3327/jnuce.29.2\_119
3. Kijima, T., Sasagawa, T., Sawaguchi, T., Yamada, N., “A model for estimating the hydraulic conductivity of bentonite under various density conditions”, *Hydrology Research*, Vol. 53(10), pp. 1256-1270, 2022. doi:10.2166/nh.2022.021
4. Murota, K., Aoyagi, N., Mei, H., Saito, T., “Hydration states of europium(III) adsorbed on silicas with nano-sized pores”, *Applied Geochemistry*, Vol. 152, No. 105620, 2023. doi:10.1016/j.apgeochem.2023.105620
5. Murota, K., Takahashi, Y., Saito, T., “Adsorption of cesium and strontium on mesoporous silicas”, *Physical Chemistry Chemical Physics*, Vol. 25, pp. 16135-16147, 2023. doi:10.1039/D3CP01442H
6. Hirota, A., Kouduka, M., Fukuda, A., Miyakawa, K., Sakuma, K., Ozaki, Y., Ishii, E., Suzuki, Y., “Biofilm Formation on Excavation Damaged Zone Fractures in Deep Neogene Sedimentary Rock”, *Microbial Ecology*, Vol. 87, No. 132, 2024. doi:10.1007/s00248-024-02451-7

###### ● 学術会議のプロシーディングス（査読付）

1. 東原知広、市末高彦、入江正明、長田昌彦、「廃棄物埋設における掘削に伴う岩盤の力学状態と水理特性を踏まえた地下水流動評価の考え方」、公益社団法人土木学会第 49 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集、pp. 247-252、令和 5 年
2. 市末高彦、東原知広、入江正明、長田昌彦、「廃棄物埋設における岩盤の力学水理連成試験機の製作と動作確認試験」、公益社団法人土木学会第 49 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集、pp. 253-258、令和 5 年
3. 朝比奈大輔、市末高彦、青地優、竹村貴人、入江正明、「直接引張り試験治具による岩石の引張り挙動に関する研究」、公益社団法人土木学会第 50 回岩盤力学

に関するシンポジウム講演集、pp. 153-157、令和 6 年

4. 市末高彦、朝比奈大輔、東原知広、入江正明、「掘削影響領域の評価における引張り特性に関する研究」、公益社団法人土木学会第 50 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集、pp. 158-162、令和 6 年

## (2) 委託先による公表

### ● 論文（査読付）

1. Ishii, Y., Ito, K., “Luminescence dating of sand matrices within gravelly fluvial deposits: Assessing the plausibility of beta dose rate calculation”, Quaternary Science Advances, Vol. 13, No. 100160, 2024. doi:10.1016/j.qsa.2023.100160
2. Ishii, Y., “IRSL and post-IR IRSL dating of multi grains, single grains, and cobble surfaces to constrain fluvial responses to climate changes during the last glacial period in the Tokachi Plain, northern Japan”, Quaternary Geochronology, Vol. 79, No. 101486, 2024. doi:10.1016/j.quageo.2023.101486

### ● 学術会議のプロシーディングス（査読付）

1. Hosono, H., Asahina, D., “Effects of fracture damage level of granite on the hydraulic conductivity – an experimental study using fault damaged analogue sample”. ISRM International Symposium 2024 & 13th Asian Rock Mechanics Symposium, 2024.
2. Asahina, D., Hosono, H., Otsubo, M., Takeda, M., “Development of a portable permeability testing device for rock permeability measurements”, The EUROCK2024, 2024.
3. 朝比奈大輔、竹田幹郎、「岩石を対象とした簡易な透水試験方法の検討」、日本応用地質学会研究発表会における講演論文、令和 6 年
4. Sawaguchi, T., Takai, S., Sasagawa, T., Uchikoshi, E., Shima, Y., Takeda, S., “Study on Borehole Sealing Corresponding to Hydrogeological Structures by Groundwater Flow Analysis”, 2022MRS FALL MEETING&EXHIBIT, 2023.

廃棄物埋設における長期性能評価に関する研究  
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	中深度処分関連の新規制基準適合性審査や後続規制に必要な7つの研究課題が適切に分類・設定されており、内容的にこれまでの研究成果と最新知見が反映されていると判断する。	拝承いたします。
2	②解析実施手法、実験方法が適切か。	2.2.2 セメント系人工バリアの長期性能評価手法の研究で空隙径分布評価手法において、水銀圧入法に対して水蒸気吸着法の有用性が示されているが、「廃棄物処分での空隙等の計測に適している」という根拠が必ずしも明確に記述されていない。(成果報告書 p.44)	C-S-H ゲル内部のゲル空隙や層間空隙は、表面電位等に由来する電場勾配が存在する空間であり、このような空隙に対して、窒素と同様極性を持たない水銀はゲル空隙や層間空隙には入り得ず、毛細管空隙(水和物の隙間の物理的な空間)を測定していると考えられます。一方、水蒸気吸着法については、H <sub>2</sub> O 等の極性を持つ分子の場合はCSH層の表面が負の電荷を持ち、層間に Ca <sup>2+</sup> イオンが存在することで、可逆的な化学反応により侵入できることから、放射性廃棄物処分の核種移行評価においては水蒸気吸着法による空隙径分布が適していると考えております。 上記を踏まえ、安全研究成果報告 P.45 を「一方、水蒸気吸着装置は、H <sub>2</sub> O 等の極性を持つ分子の場合はCSH層の表面が負の電荷を持ち、層間に Ca <sup>2+</sup> イオンが存在することで、可逆的な化学反応により侵入できることから、層間空隙及びゲル空隙の測定には十分に適していること、放射性廃棄物処分での核種移行評価に必要な空隙等の計測に適していることが分かった。」と修文します。

No.	評価項目	評価意見	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>2.2.3 微小な空隙内での特異な核種移行特性（吸着併行定数や分配係数）の発現機構は大変興味深いやや説明不足で理解が十分できない。成果報告書 p.47に文章のみの記述があるが、図解があるとよい。</p> <p>2.4.1 成果報告書 p.69,70に光ルミネッセンス年代測定法の適用範囲と留意点が示されているが、対象となる地質の堆積物中に含まれる分析試料（長石や石英等）の起源の混在により大きな年代測定の不確かさを生じる可能性のあることを留意点として挙げておく必要はないのか？</p>	<p>ご指摘のとおり、安全研究成果報告 P. 49に図を追加します。</p> <p>光ルミネッセンス年代測定において、対象となる堆積物に含まれる分析試料（長石、石英）に起源の異なる試料が混在していた場合、問題となりえます。その意味で、これは留意すべき点ではありますが、事前の堆積相解析で評価すべき部分であるため、安全研究成果報告の表 2.4.1.1へ追記するのではなく、p74に「光ルミネッセンス年代測定法を実施する前に、対象となる地層に対して、堆積相解析を実施し、堆積物が堆積した当時の堆積環境、堆積プロセス、測定対象鉱物の起源等を推定することにより、この測定を実施するにあたり適切な堆積物であるかを確認する必要がある。」を追記します。</p>
4	④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。	コメントなし	—
5	その他	専門分野外なので、口頭説明等で気になった箇所のみ指摘させていただきました。	—
小崎 完 氏			
1	①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか	国内外の過去の研究、最新知見を踏まえた研究開発がなされており、適切なアプローチがとられたと評価できます。	—

No.	評価項目	評価意見	回答
2	②解析実施手法、実験方法が適切か。	<p>セメント系人工バリアの長期性能評価手法の研究として実施された、水蒸気吸着法による細孔径分布測定においては、試料前処理方法が測定結果に影響を及ぼすことが考えられることから、今回採用した試料前処理方法のみならず、そのような前処理方法を採用した理由・根拠を明示して頂きたい。さらに、再現性についても、実験データがあれば示して頂きたい。その上で、水蒸気吸着法が「空隙の測定には十分に適していることが分かった」と評価された根拠についても説明頂きたい。測定データが得られたことは成果と言えますが、それが「空隙の測定には十分に適している」とまで評価された根拠は、提供された資料ならびに4月24日のご説明からは十分理解できませんでした。</p> <p>「水銀圧入ポロシメーターは、セメントマトリックスの強度に依存することから、空隙を破壊することで空隙径を換算する手法であることがわかり、かつ、層間空隙等の</p>	<p>前処理により C-S-H 層間空隙の状態が変化してしまうことについて既往の報告があることは承知しており、乾燥後試料を測定した空隙が実際の試料のどこの部分を測定しているかが今回の結果により明らかになったわけではありません。</p> <p>今後の課題があることを明確にするために、安全研究成果報告 p.45 を「一方、水蒸気吸着装置は、H<sub>2</sub>O 等の極性を持つ分子の場合は CSH 層の表面が負の電荷を持ち、層間に Ca<sup>2+</sup>イオンが存在することで、可逆的な化学反応により侵入できることから、層間空隙及びゲル空隙の測定には十分に適していること、放射性廃棄物処分での核種移行評価に必要な空隙等の計測に適していることが分かった。</p> <p>しかし、試料の前処理により CSH の層間空隙の状態が変化してしまう可能性もあることから、前処理方法及び測定された空隙径分布の解釈については、今後の課題である。」と修文します。</p> <p>水銀圧測定ポロシメーターの測定結果について、これまでの既往の知見から何か明らかになったということではありません。測定原理上、範囲外であることは明確であることは理解しておりますが、測定されている数十 nm 以下のデータの信頼性について、水蒸気吸着法との測定結果の比較から、</p>

No.	評価項目	評価意見	回答
		<p>微小な空隙は計測できないことが明らかとなった。」(参考資料 3-2、p43~44)において、「空隙を破壊することで空隙径を換算する手法であることがわかり」とはどのような根拠に基づくのでしょうか。水銀圧入ポロシメーターは、測定原理上、微小な空隙は計測できないことは自明だと思います。今回「明らかになった」点があれば、明示下さい。</p>	<p>信頼性のないものであることが今回改めて確認できたという整理をしております。</p> <p>また、「空隙を破壊することで空隙径を換算する根拠」について、今回の測定結果から明確に判断できない内容であったため、削除します。</p> <p>以上を踏まえ、安全研究成果報告 p.45 を「水銀圧入ポロシメーターは、層間空隙等の微小な空隙は計測できないことが改めて確認できた」と修文します。</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>	<p>モンモリロナイト中の層間間隙幅と粒子間間隙幅の関係を整理し、新たな透水構造モデルを構築し、それが既存の実験データを再現できたことは研究成果として評価できると思います。その一方で、モンモリロナイトシートを平行平板として単純化している点、モンモリロナイトシートの積層数を低密度から高密度まで一定の値としている点は、実際のベントナイトの内部微細構造とは乖離していると思われる。また、Na 型モンモリロナイトにおいて、「<math>n=2</math> または <math>3</math> を採用」したことは、稀薄な懸濁液においてすら</p>	<p>拝承いたします。ベントナイト中の透水経路はモンモリロナイトの層間や粒子間であり、これらが均一に分布した平行平板とした仮定で、ある程度の有効モンモリロナイト密度の範囲を再現できている一方、再現できない密度の範囲もあります。この理由として、安全研究成果報告でも触れておりますが、均一の透水構造モデルを使用しているためと考えており、ご指摘のとおり、実際のベントナイトの内部微細構造とは乖離していることが透水構造モデルの課題と考えております。また、同様の課題に起因するものとして、モンモリロナイトシートの積層数についても、均一の透水構造モデルを仮定して算出しているため、過小評価している可能性があります。今後は、実際の内部微細構造を踏まえ、モデルにどのように反映させるかといった観点でモデルの高度化の検討を進めます。</p>

No.	評価項目	評価意見	回答
		<p>Na 型モンモリロナイトの n はそれ以上であるとされること、また有効モンモリロナイト密度 1.0kg/m<sup>3</sup> 以上では、XRD において3水分子層層間のピークがクリアに出現することから相当な数のシートが積層していると考えられる事実と整合しないと思います。今後のさらなるモデルの高度化に期待します。</p> <p>モルタル(コンクリート)試料の場合、骨材とセメントペーストの界面に「遷移帯」と呼ばれる界面が形成され、そこが物質移行に影響を与える可能性が指摘されています。内部のひび割れだけでなく、内部微細構造をさらに詳細に把握した上で、研究を展開されますことを期待します。</p>	<p>拝承いたします。今回測定できた結果は、粗骨材の有無により試料内部のひび割れ形状が異なるという点のみでした。ご意見いただいた遷移帯のみならず、試料の強度、空気量、拘束条件、応力状態など、様々な要因によるひび割れ状況があると理解しておりますので、まずは物理的な内部微細構造を把握の上、後続の研究においても同様のテーマを通じて検討を進めます。</p>
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。	—
5	その他	参考資料 3-2、p41 の図 2.2.1.4 の凡例に記載されている、「M&Q model」、「Parallel model」、「series model」の説明が本文中に見当たりません。引用文献か	拝承いたします。本文に「なお、図中に示す M&Q model は式 2.2.1.1 で計算した結果を表し、parallel model は層間間隙と粒子間間隙が互いに連結しないと仮定した場合の結果を表し、series model は層間間隙と粒子間間隙幅の連結が完全にランダムと仮定した場合の結果を表す。」を追記します。

No.	評価項目	評価意見	回答
		<p>ら情報は得られますが、成果報告書として、簡単な説明を添えた方が良いでしょうと思います。</p>	
<p>新堀 雄一 氏</p>			
<p>1</p>	<p>①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか</p>	<p>第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則を基盤に、国内外の過去の研究を踏まえ、適切に課題を抽出している。それらの課題について最新知見を踏まえ、長期性能評価に係る研究を進めている。</p>	<p>拝承いたします。</p>
<p>2</p>	<p>②解析実施手法、実験方法が適切か。</p>	<p>実験実施手法、実験方法はおおむね適切である。特に、「中深度処分における岩盤の力学状態と水理特性等に関する研究」では、三軸力学試験と水理試験を同時に実施することのできる試験装置を製作するなど、より現実性の近い実験系を組む取り組みがなされている。また、「中深度処分及び浅地中処分における侵食に関する評価手法の研究」も、これまでになく取り組みであり、今後、隆起と合わせ、70 m 以深の確保に関する規制に如何に活用していくかの議論の基盤となる。さらに</p>	<p>拝承いたします。</p>

No.	評価項目	評価意見	回答
		<p>「生活環境における放射性物質の移行及び代表的個人の設定」について、汽水域における懸濁粒子と核種挙動の特徴を考慮し、長期的な線量評価に着目することは、規制の観点から重要な知見を提供しており、今後の発展が期待できる。</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>	<p>解析結果の評価手法、実験結果の評価手法はおおむね適切である。但し、「中深度処分における断層等に関する評価手法の検討」におけるダイレーションテンデンスーと断層コアからの距離の関係の調査については、正断層を選んでいることから、概ね圧縮場にある日本列島において比較的多く存在する逆断層や横ずれ断層およびその周辺の評価にどのように適用していくかの言及が必要となる。</p> <p>また、「中深度処分における岩盤の力学状態と水理特性等に関する研究」における好気性微生物の繁殖がみられたことと核種移行への影</p>	<p>ダイレーションテンデンスーの研究において、正断層を対象としている理由としては、正断層の方が、開口性が透水性の観点からは高く厳しい評価になるためです。一方、我が国は、圧縮応力場が多いため、正断層はマイナーな断層となっております。上記のことに安全研究成果報告内で言及がないため、安全研究成果報告のp12を次のとおり修正します。</p> <p>「本研究は、前述の通り、沖縄県与那国島の正断層を対象としている。正断層は、その引張性の応力場から亀裂の開口性が高く、透水性の観点からは厳しい評価となるため、研究対象としたが、圧縮応力場が多い我が国においては、正断層は比較的少ない。このため、今後、埋設地の立地が決定した場合、その場において、本研究がどこまで適用可能であるかについて、留意する必要がある。」</p> <p>拝承いたします。将来実施される中深度処分事業において、必ずしも、今回の研究で明らかになった現象と同じ事が起きるわけではないため、安全研究成果報告 p33 に「本研究の成果は JAEA 幌延深地層研究センターの深度 350 m 坑道をモデルフィール</p>

No.	評価項目	評価意見	回答
		<p>響との関係については、より丁寧な考察が望まれる。</p> <p>加えて、「中深度処分における岩盤の収着・移行現象に関する研究」におけるKdの結果については妥当な結果が得られている一方、この成果をどのように規制において活かしていくかについてさらなる検討を期待したい。</p>	<p>ドとして得られた成果である。一方、我が国での中深度処分の埋設地の立地、深度等は決定しておらず、実際の埋設地と本研究の調査地点では環境条件が異なる可能性もあることから、本研究で明らかになった現象と同じことが起きるとは限らないので注意が必要である。しかし、本研究で使用した手法は、EDZの評価をする上で参考になると考えられる。」と追記します。</p> <p>「中深度処分における岩盤の収着・移行現象に関する研究」の成果については、中深度処分の審査における核種の収着の取扱い(分配係数等)に関する技術的妥当性の確認に活用されるほか、今後実施する岩盤中における移行経路の孔径が核種移行に及ぼす影響についての検討に活用していく予定です。</p>
4	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(観点の欠落)はない。	—
5	その他	当テーマの研究成果についての成果公表(学会発表、論文化)を通じて、他機関の研究者・技術者との議論を進め、当研究が更に進展することが期待できる。	拝承いたします。

(専門技術者の意見及び回答)

No.	評価項目	意見	回答
佐々木 泰 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>参考資料 3-2 P.70-71 「ベントナイトに礫や砂等を混合した場合は、覆土材料中のモンモリロナイト量が相対的に少なくなるので、20%程度以下となった場合には、配合や締固め等の要件によっては必ずしも十分な低透水性能を確保できるかの実験等のデータがほとんど存在しない。」 → 4月24日の検討会では、20%程度以下で十分な低透水性能を確保できるかの実験等のデータがないのは、礫を含まない砂とベントナイトの混合土の場合であるとの説明であったので、そうであれば正確に記載して頂く必要がある。また、ベントナイトの混合割合が20%以下の礫を混合したベントナイト混合土の透水性が<math>1E-11 \sim 1E-12 m/s</math>のオーダーとなることが報告されている(礫-砂-ベントナイト混合土の透水性と透水係数の評価方法:土木学会論文集 C Vol.64 No.1,101-110,2008.3)ので、それも踏まえて正確な記載が必要と思う。</p> <p>「文献等により礫砂混合ベントナイト覆土の問題点について調査検討した結果、ベントナイト量が少ない場合は、覆土としての物理的空隙が多くなること、さらに礫等の骨材の界面に水みちが形成される等の問題点があることが分かった」 → 文献等のエビデンスを記載して頂くことが必要と思う。</p>	<p>1点目に関しては、鹿島建設が2008年に出した論文を引用し、礫砂混合ベントナイトの場合には低透水性が発揮できるという報告はあるものの、事例が少ないこと及び小規模の室内試験に基づく試験であることから、当部門の評価として、実際の覆土施工で必要とされる透水性能が確保できるか懸念が残る、としました。</p> <p>また、2点目については、文末を断定的に書いていましたので、表現を見直すとともに、低配合の礫砂混合ベントナイトを用いた場合の懸念事項が明確になるように安全研究成果報告のp75を次のとおり修正します。</p> <p>「覆土を構成するベントナイトは、含有されるモンモリロナイトの特性により廃棄物埋設施設の長期的な低透水性能を確保する部材として評価されてきた。しかし、ベントナイトに礫や砂等を混合した場合は、覆土材料中のモンモリロナイト量が相対的に少なくなり、20%程度以下となった場合において、十分な初期低透水性能を確保できるかが懸念事項である。</p> <p>これまでに行った文献調査により、礫-砂-ベントナイト混合土(以下「礫砂混合ベントナイト」という。)の透水特性と透水係数の評価方法として、例えば低配合の礫砂混合ベントナイトで、<math>10^{-10} \sim 10^{-11} m/s</math>オーダーの透水係数が確保できるとする報告もあるが、事例が少なく、また、小規模な室内試験による結果であることを踏まえると、実際の覆土施工において必要とされる透水係数が確保されるか懸念が残る。また、仮に初期透水係数が確保されたとしても、礫間を埋めるモンモリロナイト量が相対的に少</p>

No.	評価項目	意見	回答
			<p>ない条件においても、廃棄物埋設施設安全確保上重要な長期の透水性能が確実に確保されるかについての懸念も残る。例えば、令和6年7月3日の「日本原燃(株)廃棄物埋設施設覆土の確認に係る面談(第5回)」の資料2に示されているCa型ベントナイト30wt%配合のベントナイト混合土とNa型ベントナイト20wt%配合のベントナイト混合土の等価透水係数の時間変化によると、Na型ベントナイト20wt%配合のベントナイト混合土は初期の等価透水係数が<math>10^{-11}</math> m/s オーダーであり、Ca型ベントナイト30wt%配合のベントナイト混合土の等価透水係数<math>10^{-10}</math> m/s オーダーと比べて約1桁小さな値を示す。しかし、10000年後には、Na型ベントナイト20wt%配合のベントナイト混合土の等価透水係数が、Ca型ベントナイト30wt%配合のベントナイト混合土の等価透水係数より、約1~2桁透水係数が大きくなっている。これは、Na型ベントナイトがセメント間隙水との接触によるイオン交換によってより透水係数が大きいCa型ベントナイトに変化すること及びベントナイト配合率が小さくモンモリロナイト量が少ないことにより二次鉱物に変質する等の影響が大きいことが原因であると考えられる。このことから、礫砂混合ベントナイトで、さらにベントナイト配合率を20wt%以下に下げた場合には、長期的に礫間を埋めるモンモリロナイト量が減少することで等価透水係数が大きく増加する可能性があり、礫砂混合ベントナイトで覆土を構成する場合には長期的な性能への影響を詳細に確認する必要があると考えられる。」</p>
2	②解析実施手法、実	参考資料3-2 P.21 4月24日の検討会での説明では、この解析は塩分の密度を考慮しているとの説明であったが、図	図2.1.2.6(a)におきまして、中深度処分に関係する三沢層程度の深度までは、ほぼ同一水頭となっています。これは浅部

No.	評価項目	意見	回答
	<p>験方法が適切か。</p>	<p>2.1.2.6(a) のベクトルを見ると陸側の淡水が海の方に大きく張り出しており、塩淡境界が沖合の方にあるように見える。図 2.1.2.5 の KMK-2 の水頭分布が解析と実測が合わない原因は塩分の密度が解析で適切に考慮されていない為ではないか。</p>	<p>の透水係数が高く水理水頭分布が境界条件の変化(海進海退)に追従して早くバランスすることを反映しています。つまり、浅部では陸域からの淡水のフラックスと海域からの密度流も比較的早くバランスし、その境界は汀線付近となっています。一方、深部の透水性が低い基盤岩層には山側涵養域から地下水が供給され、その流出域は海側となっています。塩淡境界については実測との比較はできておらず、海側への流出は涵養量と地層の透水構造のバランスによる可能性が考えられますが、実際には何が影響しているか不明な点が多く、今後より深い深度を対象とする調査・研究が必要と考えます。</p> <p>また塩分密度は考慮していますが、KMK-2 孔の水頭が実測と合わないのは、沖積層、洪積層、三沢層、それ以下の層の全てについて、同一層内では空間的に均一な透水係数を持つ地層だと仮定していることに起因しております。本解析の対象は 40×60 km程度の広域の堆積層ですが、その堆積環境には場所により差があり、砂層、シルト・粘土層の厚さ分布や地下構造も異なると思われるため、透水係数も実際には不均一であることが想定されます。特に、KMK-2 孔の掘削地点の地形的特徴は他の孔井の掘削地点のそれと比べて異なることから、水理水頭とマッチングさせるためには内陸とは異なる透水係数の設定が必要と考えています。</p> <p>以上を踏まえ、安全研究成果報告の p20、に「KMK-2 孔は掘削地点の地形的特徴が他と異なることから、水理水頭の再現性を高めるためには内陸とは異なる透水係数の設定が必要となる可能性がある。」と追記します。</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。	参考資料 3-2 P.62 図 2.4.1.4 谷密度が実態と合っていないように思う。課題の認識について補足が必要と思う。	<p>ご指摘のとおり、中央沢以外の段丘面の勾配の大きい箇所でのリル形成等により谷密度が大きくなる箇所が確認されています。この結果に繋がる原因の 1 つとして、今回の検討では中央沢の河床縦断形及び横断形を再現するために主に侵食に影響するパラメータを調整しましたが、実際には期間中の侵食の進展以外の要因を考慮する必要があることが考えられます。例えば、中央沢が MIS5e 以前に形成された可能性を考慮していないことや尾駁沼の埋没谷深度に不確かさがある事などがあります。このような要因の影響を適切に考慮したうえで侵食に関するパラメータを設定することが、本手法の適用性に関する課題として残されています。</p> <p>以上を踏まえ、安全研究成果報告の p66 の図 2.4.1.4 を引用した説明文に「なお、中央沢以外の谷密度が実際よりも大きくなる箇所が確認されており、この原因としては、今回の検討では中央沢の河床縦断形及び横断形を再現することを目標として主に侵食に影響するパラメータを調整したが、実際には中央沢が MIS5e 以前に形成された可能性や尾駁沼の埋没谷深度に不確かさがある事など今回想定していない条件が影響していることが考えられ、これらの影響を考慮する必要性が課題である。」という一文を追記します。</p>
4	④ 重大な見落とし（観測点の欠落）がないか。	参考資料 3-2 P.28- 350m 坑道の掘削影響に関する試験結果を示しているが、中深度処分で想定される深度等を踏まえた検討となっているか補足が必要と思う。	我が国において、中深度処分の建設地は決まっています。また、埋設地の深度に関しては、10 万年後において廃棄物埋設地を鉛直方向に投影した地表面のうち、最も高度の低い地点から廃棄物埋設地の頂部までの距離が 70 m 以上であることが求められているものの、実際の深度については決まっています。このことから、実際の

No.	評価項目	意見	回答
			<p>中深度処分施設が、本研究で調査対象とした幌延 350m坑道とは岩質、深度、等々が異なることも十分考えられます。従って、本研究成果を単純に将来の中深度処分の審査に適用できるとは考えていません。一方、EDZの形成による環境の変化並びにそれに伴う、透水性能及び核種移行性能の変化は、埋設地がどこに立地したとしても起こりえる可能性があると考えられます。また、本研究の手法は、埋設地がどこに立地したとしても、EDZ 調査を行う際に参考になる手法であると考えられます。以上のことから、深度等を踏まえたうえで、今回の成果は、審査の際に EDZ を評価するうえでのポイントとして検討すべき項目になると考えます。</p> <p>以上を踏まえ、安全研究成果報告の p33、に「本研究の成果は JAEA 幌延深地層研究センターの深度 350 m 坑道をモデルフィールドとして得られた成果である。一方、我が国での中深度処分の埋設地の立地、深度等は決定しておらず、実際の埋設地と本研究の調査地点では環境条件が異なる可能性もあることから、本研究で明らかになった現象と同じことが起きるとは限らないので注意が必要である。しかし、本研究で使用した手法は、EDZ の評価をする上で参考になると考えられる。」と追記します。</p>
5	その他	<p>参考資料 3-2 P.5 「中深度処分で想定される新第三紀の堆積岩」 → 中深度処分の場所は現時点では決定していないため、新第三紀の堆積岩に決まったと誤解を与えない記載が望ましい。</p>	<p>ご指摘を踏まえ、誤解を与えないよう、安全研究成果報告 p5 の「中深度処分想定される新第三紀の堆積岩に対し」を削除します。</p>

No.	評価項目	意見	回答
		<p>P.10 図 2.1.1.3 断層コアから 100m の範囲まで DT が 0.7 以上であるということは、100m の範囲では流体の流し易さを DT で差別化出来ないと解釈。一方で、図 2.1.1.4 では、100m の範囲で流体の流し易さに差があるとなっており、DT の結果と整合していない。</p> <p>P.29 EDZ 亀裂にバイオフィームが確認されたとあるが、バイオフィームの形成に要した時間等の情報がないので、掘削してからこの調査をした時までの時間や環境条件の記載が必要。また、これを EDZ の評価にどう結び付けるかの考えが必要。</p>	<p>図 2.1.1.3 において、概ね DT は 0.7 以上になっております。DT はその場の応力で亀裂が閉じやすいのか、開きやすいのかを評価するもので、図 2.1.1.3 の結果は、いずれの範囲においても開きやすい亀裂が存在することを示しています。DT の調査において、透水性が高いことが示された 100m の範囲内では、比較的断層に近い範囲において、透水係数が高くなっていることが図 2.1.1.4 で示されております。断層近傍においては、亀裂密度が高い、連結性が高い等の理由でこのような結果になったと解釈しております。</p> <p>EDZ 亀裂における、バイオフィーム形成に要した時間等に関する情報がなく、また、それを EDZ の評価に結び付ける記載がなかったことから、安全研究成果報告の p33、を「JAEA 幌延深地層研究センターの深度 350 m 坑道は 2014 年に掘削されており、このときに EDZ 亀裂が発生し、透水性があがったと推定できる。また、本研究におけるコアの採取は 2022 年に実施されている事から、2014 年から 2022 年の間に、好気的環境の形成と好気的微生物の繁殖が起きていると予想できる。以上から、EDZ 亀裂の発生によって透水性が高く、好気的な環境が形成される可能性があり、これは核種移行を促進する要素であることから、審査の際に EDZ を評価する重要なポイントになると考えられる。」に修正します。</p>

No.	評価項目	意見	回答
		<p>P.32 「比抵抗トモグラフィ試験等の物理探査試験は一度の試験で面的な情報を得ることができる」とあるが、試験結果が示されていないので、情報が記載されることが望ましい。</p> <p>P.39 「<math>n \geq 4</math> では有効モンモリロナイト密度が大きくなったときに粒子間間隙幅が小さくなる場合がある」 → 「有効モンモリロナイト密度が小さくなったとき・・・」ではないか。</p> <p>P.43 「外観から確認できる平均ひび割れ幅と透水量との関係性が認められたが、ひび割れ幅の増大量に対し、透水量が大きく増大しなかった」 → どの程度透水量が変わったのかデータで示した方が状況が分かり易い。</p>	<p>比抵抗トモグラフィ試験等の物理探査試験は本プロジェクトにおいて実施しており、試験結果も出ているが、この結果は現在執筆中の論文にて公表予定であるため二重投稿を避けるために本安全研究成果報告においては試験結果を示していません。一方、試験結果を示していないにもかかわらず、表現が断定的であるため、本文を修正します。上記を踏まえて、安全研究成果報告 P.29 を「比抵抗トモグラフィ試験では、塩水注入によって坑壁付近において、比抵抗値が下がる傾向が確認できた。この結果は、EDZ 亀裂に塩水が注入される領域が存在する可能性を示唆している。」と修文します。</p> <p>記載の誤りでした。有効モンモリロナイト密度が大きくなっているにもかかわらず、粒子間間隙幅も大きくなる場合があることは不整合であるということに記載するものであるため、安全研究成果報告の p.40、を「<math>n \geq 4</math> では有効モンモリロナイト密度が大きくなったときに粒子間間隙幅が大きくなる場合がある」に修正します。</p> <p>平均ひび割れ幅と透水量との関係は試験結果が出ていますが、この結果は論文にて公表予定であるため二重投稿を避けるために本安全研究成果報告においては試験結果を示していません。しかし、判断に至るデータの具体的な数字について追記します。上記を踏まえ、安全研究成果報告 P.44 を「試験により求められたコンクリート試験片のひび割れの内部形状と透水性との関係を整理すると、外観から確認できる平均ひび割れ幅と透水量との関係性が認められたが、ひび割れ幅 1.2 倍の増大量に対し透水量が 10 倍程度になるケースも</p>

No.	評価項目	意見	回答
			あれば、ひび割れ幅 2.4 倍の増大量に対し透水量が 3 倍程度しか大きく増大しなかったケースも存在した。」と修文します。
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	コメントなし。	—
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	コメントなし。	—
3	③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	コメントなし。	—
4	④ 重大な見落とし(観点の欠落)がないか。	コメントなし。	—
5	その他	専門分野ではないため、意見を述べることは控えさせていただきます。	—

## 8 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（R3年度～R6年度）

### 1. 研究プロジェクトの目的

- 原子力規制委員会による、クリアランス及び廃棄体等の安全確認における放射性廃棄物の放射能濃度等の評価において事業者の申請の妥当性を判断するための知見を蓄積するために、測定装置の特徴及び対象物の性状に応じた放射能濃度の定量評価に影響するパラメータ等を把握する。
- 廃止措置中の実用発電用原子炉に対する原子力規制検査における、危険性の高い活動に着目した効果的な検査の実施に向けて、廃止措置の主要工程における放射性物質の飛散等のリスクを把握する。

### 2. 研究概要

- クリアランス確認  
放射能濃度の評価手法の妥当性を不確かさの考慮の下で判断する手段や考え方を整備した。
- 廃棄体等の安全性確認  
ソースターム設定の妥当性等を評価するための情報を整備するとともに、新規廃棄体等における放射能濃度の測定精度への影響要因について検討した。
- 廃止措置における危険性の高い活動の評価  
実用発電用原子炉の廃止措置の主要工程について、放射性物質の飛散等に関する知見、事故発生記録等を基にした危険性の高い活動の評価方法を検討した。
- 長半減期放射性核種等の特性評価方法に関する研究  
最新の放射能濃度の測定技術について広く情報を集め、長半減期放射性核種等の定量評価、測定における不確かさ等についての知見を蓄積した。

### 3. 研究成果

- クリアランス確認  
新規クリアランス対象物の放射能の評価に用いる換算係数の設定方法に係る留意事項及びフォトンカウンティング CT の元素弁別への適用可能性を明らかにした（学校法人五島育英会東京都市大学（以下「都市大」という。）、国立大学法人東京大学（以下「東大」という。）及び国立研究開発法人産業技術総合研究所（以下「AIST」という。）との共同研究の成果を含む）。また、放射線測定の不確かさの考慮に関する検討から、これまでの不確かさの評価や検出限界についての考え方を整理した。さらに、諸外国における溶融クリアランスの実施状況を調査し、溶融クリアランスにおける技術的な留意点等について整理した。
- 廃棄体等の安全性確認  
ソースターム設定の妥当性を評価するために必要な金属廃棄物の腐食挙動等の調査を行った。また、中深度処分対象廃棄物の放射能を評価する方法として、放

射エネルギーを放射化計算により評価する場合の留意点及び外部からの放射線測定により評価する場合の影響因子を抽出し、評価精度に係る知見を整理した。

- 廃止措置における危険性の高い活動の評価  
廃止措置活動中に生じうる事故・トラブル等について情報収集を行い、廃止措置活動中に考慮すべき起因事象及びその事象進展の事例を整理し、機器の解体等の主要な工程ごとに被ばくの危険性を評価する手法を整備した（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。）への委託研究の成果を含む）。
- 長半減期放射性核種等の特性評価方法に関する研究  
試料の採取・前処理方法、濃縮・化学分離方法、核種分析方法及び化学形態等の定量方法について実験的検討を行い、長半減期放射性核種等の分析方法に関する課題を抽出するとともに科学的・技術的知見を蓄積した。（東大、国立大学法人東京科学大学、国立大学法人京都大学、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構、JAEA、都市大及びAISTとの共同研究の成果を含む）。

#### 4. 事後評価結果

##### （1）項目別評価

###### ① 成果目標の達成状況：A

- 原子力規制委員会による放射性廃棄物の放射能濃度等の評価において事業者の申請の妥当性を判断するための知見を蓄積するために、測定装置の特徴及び対象物の性状に応じた放射能濃度の定量評価に影響するパラメータ等を把握することに関連し、知見を拡充した。また、原子力発電所の廃止措置におけるリスク事象に係るイベントツリーを作成し、廃止措置の確認におけるグレーデッドアプローチを実施するための知見を拡充した。以上をもって必要な知見の蓄積が実施できたので、目標を達成したと考える。

###### ② 成果の公表等の状況：A

- 原子力規制庁から、査読付の論文5件を公表した。
- 成果のうち未公表の内容については、規制活動における活用を促進するため、論文等の公表を進める。
- 委託先においては、プロジェクト終了時点において、査読付論文等の公表には至っていないものの、学会発表を複数回行った内容も含め、得られた成果を論文等に取りまとめて公表する準備を進めている。

###### ③ 研究の進め方に関する技術的適切性：A

- 国内外の専門家との議論を通して、研究の進め方、成果の妥当性を確認した。また、国内外の過去の研究及び最新知見を踏まえた上で、適切な手法にて研究を実施しており、技術評価検討会での外部専門家からの意見も踏まえ、技術的に適切であると判断した。

(技術評価検討会における主な意見及びその対応)

- フォトンカウンティング CT の活用については、挑戦的な内容と評価をいただいた。他方、実験試料のサイズと実際の廃棄体のサイズの違いを心配する意見もあった。これらの指摘のとおり、従来の最大エネルギー160 kVのX線では実際の廃棄体サイズへの適用には支障がある可能性も考えられるため、現在、共同研究において450 kVのX線源を整備中であり、継続研究においては、その費用対効果等も含めて検討する予定である旨を回答した。
- トレンチ処分対象の廃棄体等の放射濃度評価を想定したシミュレーション計算では、事業者にとっても有益な情報が含まれているとの評価を得た。また、更に多様な状況についての考察を求める意見もあったことから、今後は、順次シミュレーションの検討範囲を拡充して対応する旨を回答した。
- 廃止装置に係るグレーデッドアプローチを目指したリスクデータベースの構築や海外事例調査等については、時宜を得た研究との評価を得た。当該データベースを踏まえた計算コードから得られる一般的な知見や、海外良好事例等については、適宜、検査部門等に情報共有を行う旨を回答した。
- 長半減期核種の化学分析については、分析技術の高さを評価される一方で、規制における成果の活用先に関する意見もあった。これまでは、様々な核種を分析するための環境(装置等)整備自体も一つの目標であったが、今後は分析フローを確立するのみならず、整備した装置等を活用して廃棄物の中長期的な変性を調査する等、より実務的なテーマも拡充する旨を回答した。
- 詳細は別表1-8参照。

④ 研究マネジメント及び予算・契約管理の適切性 : A

- 委託先及び共同研究先を含め適切な研究体制を構築し、計画どおりに進捗させ目標を達成していることから、研究マネジメントは適切であると評価する。
- 予算執行、進捗管理及び検収を含めた契約業務を、法令等を遵守して実施しており、適切に業務管理が行われたと判断した。

⑤ 成果の規制への活用の状況・見通し : S

- クリアランス認可に係る審査基準として、新規に追加又は明確化された「不確かさ」を審査にて確認するために必要な基礎検討を行うとともに、廃止措置にあたり多種多様な廃棄物の発生が見込まれる中、今後事業者が新規に申請すると考えられる対象物に取り組んでいる。研究成果は、顕著に多数の国外の査読付論文として取りまとめられており、今後の審査に活用できる信頼性の足る成果が得られている。今後、申請が予定されており、規制委員会でも議論となった、溶融炉を用いた集中クリアランス事業での審査に先立ち、海外事例を中心に留意事項を取りまとめており、今後の審査に有益な知見が得られている。長半減期放射性核種等の特性評価については、性状が様々な廃棄物をターゲットとしており、今後、申請が見込まれるJAEAの埋設施設やクリアランスの審査に

活用できる有益な研究内容であり、今フェーズでは適切に課題の特定に至っている。次フェーズでは、研究成果を取りまとめ、適切に成果の公表を行うことを期待する。(S、研究炉等審査部門)

- 本研究成果は、令和3年7月から令和5年2月に実施し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基本手順：2019（AESJ-SCF015:2019）」の技術評価において、同規格の妥当性評価の技術的根拠の一つとされている。具体的には、同規格の主な論点であった「元素分析データ数が非常に少ない場合の濃度分布条件の設定方法」及び「放射化断面積の設定方法」の技術評価に本研究成果である放射化計算により放射エネルギーを評価する場合の留意点が活用されている。なお、本研究成果を活用した同規格の技術評価書は、令和5年度第65回原子力規制委員会（令和6年2月21日）に報告された。(A、技術基盤課)
- 福井県クリアランス集中処理事業に係る対応方針の検討にあたり、本プロジェクトで実施した溶融クリアランスに関する海外事例の調査の結果を基に技術的論点の検討を実施でき、令和6年度第57回原子力規制委員会で当該事業に対する対応方針の了承を得ることができた。(A、原子力規制企画課)
- 本プロジェクトで得られた新規クリアランス対象物の放射能濃度の評価等に関する技術的知見は、原子力規制検査の活動に現時点で直接的な貢献をもたらすものではないものの、クリアランスの評価に係る個別の知見として共有されるべきものであり、知見が蓄積されていくことで、将来的に規制に貢献するものと考えられる。(B、核燃料施設等監視部門)

## (2) 総合評価：A（総合点：3.2）

- 計画どおりに調査・研究が進められ、放射性廃棄物等の放射能濃度評価の確認に係る知見を目標どおりに蓄積するとともに、研究成果をまとめた査読付論文の公表も行われた。また、本安全研究成果の一部は規制に反映されていることから、上記評価とする。

## 5. 評価結果の今後の活用

- 本研究プロジェクトで得た成果のうち未公表の内容については、規制活動における活用を促進するため、論文等の公表を進める。

### (主な成果の公表)

#### (1) 原子力規制庁の職員が著者に含まれる公表

- 論文（査読付）
  1. Yoshii, T., Sakai, H., Tagawa, H., Kawarabayashi, J., “Study on the effects of heterogeneity of objects placed in storage containers on simple radioactive evaluation”, Annals of Nuclear Energy, Vol.177,

- 109313, 2022. doi:10.1016/j.anucene.2022.109313
2. 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, 2023. doi:10.1016/j.apradiso.2023.110984
  3. Yamamoto, K., Ohno, T., Kitamura, G., Takahashi, H., Hirata, T., “Deciphering the uranium isotopic signature of coastal water and sediments from Tokyo Bay using a multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometer”, Environmental Technology & Innovation, Vol.36, 103761, 2024. doi:10.1016/j.eti.2024.103761
  4. Nomura, M., Park, K. C., Takahashi, H., Tsukahara, T., “Comparative evaluation of uranium isotope ratios by peak-jumping and static multi-collector measurements in thermal ionization mass spectrometry”, International Journal of Mass Spectrometry, Vol.503, 117277, 2024. doi:10.1016/j.ijms.2024.117277
  5. Yoshii, T., Kawarabayashi, J., “Development of a practical conversion factor for evaluating radioactivity in mixed metal and plastic clearance objects”, Applied Radiation and Isotopes, Vol.217, 111670, 2025. doi:10.1016/j.apradiso.2025.111670

(2) 委託先による公表  
なし

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  
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	(1)クリアランスの確認について、現行の国際的動向を踏まえた調査・研究内容になっていると思うが、フォトンカウンティング CT の適用性評価に関しては、技術的に基礎の段階に留まっており、必ずしも最新の知見が反映されているとは言い難い。	フォトンカウンティング CT による元素弁別等については、今回の安全研究を進める中で見出された技術であるため、技術としては初歩的な段階にあります。今後の研究の中で、最新の知見を反映して参ります。
		(2)廃棄体等の安全確認について、中深度処分対象の金属廃棄物のソースタームの設定に腐食に伴う核種移行挙動の調査が行われたことには新味を感じるが、廃棄体の放射能濃度評価に係る検討はオーソドックスなアプローチで、最新の知見が踏まえられているかという点でやや物足りない。	ご指摘のとおり、今回の安全研究においては基本的な汚染の偏りに関する検討を実施いたしました。令和7年度以降の安全研究においては、多様な廃棄体等を検討対象として予定しております。
		(3)廃止措置における危険性の高い活動の評価について、廃止措置規制に対するグレーデッドアプローチの適用を定量的に実施するためのリスクデータベースと安全評価コードを整備したことや海外事例の調査を幅広く取りまとめたことは時宜を得ていると評価する。	拝承いたします。
		(4)長半減期放射性核種等の特性評価方法についてはやや発散的ではあるが、国内の共同研究により、質量分析に基づく長半減期核種の最新の分析技術とノウハウが得られている。	拝承いたします。
2	② 解析実施手法、実	(1)クリアランスの確認について、複雑な形状や物質構成の対象物に対し、できるだけ正確な線源位置を同定して放射能換算係	ご指摘のとおり、設置機器の仕様(CAD の図面等)、汚染性状・分布が十分に把握できている場合には、例えば、CT 測定をシミ

No.	評価項目	評価意見	回答
	<p>験方法が適切か。</p>	<p>数を設定すべきことはその通りであるが、クリアランス判断の基本手順として事前調査で施設内設置機器の仕様、汚染性状・分布の把握が前提である。従って、フォトンカウンティング(エネルギー弁別X線)CTで内部構造を非破壊で視るという手段の導入は、「事前調査が困難な場合」という条件付きであるべきで、どのような条件で使うのかや、その場合のCT装置に必要な性能仕様、できれば費用対効果も予め検討しておくのが良いのではないかと？</p> <p>また、放射線測定の不確かさの考慮に関する検討では、質量分析を対象としているようであるが、不確かさの議論では偶然誤差のみを扱っているように見える。(4)長半減期放射性核種等の特性評価方法の研究結果も絡めて、分析試料の前処理等を含む系統誤差の検討も重要ではないかと？</p>	<p>ュレーション計算に置き換える等の別の方法でも同じ目的を果たすことができます。同じ目的を果たす方法が複数あり得る場合には、コストの少ない方法を選択することが、事業者としては最適であると理解します。安全研究としては、設置機器の仕様、汚染性状・分布の情報が十分に把握できなかった場合の対処方法として引き続き検討して性能仕様等を調査するとともに、代替方法が用いられる申請があった場合の審査支援における対応能力についても向上を図ります。</p> <p>放射線測定の不確かさの考慮に関する検討では、従来の放射能測定における偶然誤差を用いた検出限界算出の例及び測定の不確かさを考慮したISO 11929に基づく検出限界を調査いたしました。今後、自ら実施いたします質量分析を用いた放射性核種の測定における不確かさ評価においては偶然誤差のみならず、系統誤差も含めた総合的な検討(バジェットシートの作成等)を進めてまいります。</p>
		<p>(4)長半減期放射性核種等の特性評価方法について、共同研究により規制庁職員の方が試料採取・前処理等で一部技術移転を受けていることは分かったが、</p> <p>(c) 核種分析方法の検討や</p> <p>(d) 化学形態等の定量方法の検討</p> <p>で実施されている個々の研究課題の選定や成果の活用法が今一つ判然としない。これら個々の研究課題の意義は認めるものの、規制研究としての位置付けを明確にすべきではないかと？</p>	<p>事業(変更)許可申請及び後続規制における、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といったIAEAの安全要件GSR part 5「放射性廃棄物の処分前管理」及びGSR part 6「施設の廃止措置」の対象とする分野で必要とされる評価に用いられる濃度等の信頼性の確保を適切に行う上で、必要な基盤となる科学的・技術的知見を取得し、蓄積することを目的として、共同研究といった制度を活用しています。今後共同研究の成果報告書等の執筆の際には、規制研究としての位置付けを明確に記載するように進めて参ります。</p>

No.	評価項目	評価意見	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)廃棄体等の安全確認で、放射化計算により放射能を評価する場合や多数廃棄物の一括測定に係る留意点について、最大汚染モデルの適用により保守性が担保できるという帰結は有用な成果である。ただ、そのマージン(保守性)の妥当性について、計算モデルと実際の廃棄体性状や測定体系との差異を洗い出して、その影響をさらに確認しておく必要はないか？	過度の保守性を見込むことのないような方法の一つとして、最大汚染モデル法の適用性を模索しておりますので、今後の研究で保守性の影響要因に係る検討を加えていきます。
		(3)廃止措置における危険性の高い活動の評価で、海外の廃止措置規制に対するグレーデッドアプローチの適用事例調査は有益な情報が得られていると思うが、我が国の廃止措置規制への取り込み可能性の検討・議論も欲しいところ。	御意見を踏まえ、本成果については適宜、規制担当部署等に情報提供して参ります。
4	④重大な見落とし(観測点の欠落)がないか。	本研究の個別の内容(4つの研究テーマ)に重大な見落としはないと思うが、本研究の背景と目的に鑑みて、4つのテーマの関連性やまとまりが今一つ判然としない。	化学分析における不確かさの評価など、複数のテーマ同士が重なり合う部分のエフォートを上げるように意識し始めておりますが、まだ形として現れるには至っておりませんので、継続研究では関連性やまとまりについても意識して進めて参ります。
5	その他	(1)クリアランスの確認におけるフロンカウンティング CT や(4)長半減期放射性核種の質量分析法の技術開発に関して、規制研究としての方向性をもう少し明確にすべきではないか？	フロンカウンティング CT は、本研究の中盤から取り組み始めた技術のため未熟なところがございますが(またそこが若手研究者育成の観点では利点でもありますが)、規制研究としての方向性を意識して進めて参ります。  一方、長半減期核種等の化学分析はこれまで約6年間取り組んで来たところであり、これまでは、事故を起こしたサイトの廃棄物や、研究系廃棄物など、通常の原子力発電所の廃棄物で取り扱う核種とは異なる汚染を分析するための環境(装置等)の整備自体も一つの目標でしたが、今後は整備した装置等を活用して、廃棄物の変質挙動を

No.	評価項目	評価意見	回答
			把握するなど、より実務的なテーマに拡充してまいります。今後共同研究の成果報告書等の執筆の際には、規制研究としての方向性を明確に記載するように進めて参ります。
		(3)廃止措置における危険性の高い活動の評価の今後の課題としてエンドステート達成のための技術的課題の抽出と検討が挙げられているが、本事業で整備された廃止措置リスクデータベースと安全評価コードの活用や海外の良好事例を参考に、我が国の廃止措置作業への規制グレーデッドアプローチ適用の具体化を優先すべきではないか？	当該コードにつきましては、委託先の製作者がコード信頼性を高めるための更なる情報収集に基づくパラメータ調整を実施するとともに、規制庁以外とも積極的に当該コードを利用した共同研究を行うことにより、汎用的な知見の抽出を目指す見込みです。また、得られた汎用的な知見や、海外の良好事例等につきましては、適宜、規制担当部署等に情報提供して参ります。
小崎 完 氏			
1	① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか	・国内外の過去の研究、最新知見を踏まえた研究開発がなされており、適切なアプローチがとられたと評価できます。	—
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	・フotonカウンティング CT の研究開発は挑戦的な内容であったと評価できます。しかし、その現場適用性については、まだ検討が不十分と思います。160keV 程度の X 線では、ドラム缶に詰め込まれた金属廃棄物に対して、クリアな透過画像を得ることができない(X 線はほとんど透過しない)のではないのでしょうか。大きなサイズの廃棄物容器に対しては、さらに高いエネルギーの X 線が必要になり、そのための装置も特殊なものになります。また、対象廃棄物のサイズ、測定時間、空間分解能等の観点から現場に合理的に適用できる技術であることを検討する必要があると思われま	今回の測定は、廃棄物の性状が明確でない場合を想定し、鉄ブロック 20.0mm 及び銅ブロック 20.0mm であり、X 線がその合計 40.0mm を透過しても適用可能でした。一方、JIS ドラム缶は厚さが M 級で 1.2mm、H 級で 1.6mm です。また、大型の分電盤等は、概ね板厚 2.3mm 程度であることから、多少、これらが重なり合う程度であれば、現状スペックでも十分に適用可能かと考えられます(なお、金属スクラップのような密集体は想定しておりません。)。しかし、ご指摘の懸念もあることから、産業用 CT としては一般的な 450 kV の X 線管の整備を行っておりますので、遮へいの影響がより強い状況も考慮に入れ、対象廃棄物のサイズ、測定時間、空間分解能等についてより

No.	評価項目	評価意見	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>・廃棄体等の放射能濃度を外部からの放射線計測により評価する場合の評価精度において、5面あるいは6面の測定における評価精度が整理されたことは有益な成果であると思います。1桁程度の不確かさが生じることから、今後は、1面の異なる位置に複数の検出器を置くなど、不確かさを下げ、合理的な時間内で測定が可能となる、より現実的な技術の検討が必要と思いました。</p> <p>・トレンチ処分において、埋設施設内に廃棄体がランダムにおかれる場合と、比較的線量の高い廃棄体を中央部に、比較的線量の低い廃棄体を外周部におく場合があります。多数の廃棄物の一括測定に係わる検討において、後者においても、同様の結果となるか確認が必要ではないでしょうか。</p> <p>・長半減期放射性核種等の特性評価方法に関する研究として、核種分析方法が適切に検討され、成果が得られていることは評価できます。今後は、それらを現場に適用することを想定して、分析に要する機材、分析操作性、分析に要する時間、技術者（分析者）に求められるレベルなど、高度な分析手法を導入することの合理性についても検討を進めて頂ければと思います。</p>	<p>具体的な検討を進めて参りたいと思います。</p> <p>・ご助言いただいた内容については、今後実施する種々の廃棄体等の評価精度に関するパラメータ設定に関する研究に生かして検討を進めてまいります。</p> <p>・ご指摘いただいたような観点から、線量の高い廃棄体等を評価点から遠い位置と近い位置に設置（安全研究成果報告図2.2.4.2 参照）し、線量の高い廃棄体等の位置の影響を検討しております。今後、線量の高い廃棄体等の配置が異なる場合についても検討してまいります。</p> <p>・合理的な現場への適用性の観点からは、スクリーニング分析、前処理、化学分離及び詳細分析まで、分析全体のフローを如何に構築するかが、重要であると認識しておりますので、いただいたコメントを踏まえて検討を進めて参ります。</p>
4	④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。	<p>重大な見落としは見当たりません。</p>	—

No.	評価項目	評価意見	回答
5	その他	・放射化計算により放射性廃棄物の放射能を評価する場合の留意点が整理され、これまでに指摘されていた微量元素の影響が無視できないことなどが確認されています。今後は、金属材料であれば不純物元素の混入量、コンクリート材料であれば骨材等の組成のばらつきなどに着目して、より詳細に放射化量を評価する手法が確立されますことを期待しています。	ご助言いただいた内容を踏まえ、引き続き放射化計算における具体的な課題について検討を進めてまいります。
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	成果の論文化や公表を通じ、過去の研究を整理するとともに、最新知見を的確に踏まえた成果の提示に至っている。	—
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	個々の解析手法および実験方法はおおむね適切に思われる。  但し、クリアランスの確認に関して、実際に対象となる廃棄物は実験系よりは大きいこと、また、内容物の形状と材質が概ね既知である場合も存在することから、実際に本知見を適用する際の検討も深めていただきたい。	—  今回の測定試料は、廃棄物の性状が明確でない場合を想定し、鉄ブロック 20.0mm 及び銅ブロック 20.0mm であり、X 線がその合計 40.0mm を透過しても適用可能でした。一方、JIS ドラム缶は厚さが M 級で 1.2mm、H 級で 1.6mm です。また、大型の分電盤等は、概ね板厚 2.3mm であることから、多少、これらが重なり合う程度であれば、現状でも十分に適用可能かと考えられます（なお、金属スクラップのような密集体は想定しておりません。）。しかし、ご指摘の懸念もあることから、従来よりも管電圧が高い X 線管の整備を行っているところでもありますので、遮へいの影響がより強い状況も考慮に入れた検討を進めて参りたいと思います。また、廃棄物の性状が明確な場合の例としては、比較的新しい配電盤廃棄物であれば、CAD データが事業者側で保存されている場合も想定されます。クリアランスを目的

No.	評価項目	評価意見	回答
			<p>とした放射能換算係数へ CAD データが適用できることがシミュレーションから明らかになっています。</p> <p>上述のように、廃棄物の性状が明確でない場合については実際の廃棄物の状況を考慮した実験を行っており、また、明確である場合についてもその対応方法を取りまとめています。</p> <p>引き続き、今後増加が予想される様々な種類の廃棄物に対応できるよう試験、解析を進めます。</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>個々の解析結果や実験結果の評価手法はおおむね適切に思われる。</p> <p>但し、「廃止措置における危険性の高い活動の評価」における「廃止措置におけるグレーデッドアプローチ(GA)の適用事例の調査」では、各国の取り組みは明確となっている一方、それらを選択した背景を把握し、基本的な考え方の共通点、相違点など整理した上で、日本における GA の適用について検討・整理することが期待される。</p> <p>また、「長半減期放射性核種等の特性評価方法に関する研究」における「化学形態等の定量方法の検討」では、「3 種類の鉄化合物を用いて Fe-O 結合の発光の有無を確認することができ、試料中での化学形態定量法に適用できる見込みが得られた」(報告書案 p.81)とあり、「結合の有無」から「定量法」につなげる道筋をより明確に記載する必要にある。</p>	<p>—</p> <p>御意見を踏まえ、本成果については適宜、規制担当部署等に情報提供して参ります。</p> <p>LAMIS による定量方法は、計測により、元素濃度とその元素の発光強度との相関である検量線を作成することが挙げられ、そのためには、対象となる化学形態を同定する必要があります。今回の研究では、Fe-O 結合の発光を観測することができたので、濃度の異なる標準試料の調製による検量線法により、Fe-O 結合の定量法に適用できることが期待されます。安全研究報告において、その旨を示す修文を実施します。</p>
4	④ 重大な見落とし(観	重大な見落とし(観	—

No.	評価項目	評価意見	回答
	点の欠落)がないか。		
5	その他	<p>報告書(案)では、クリアランスの確認や廃棄体等の安全性確認に比較して、後段の、特に、長半減期放射性核種等の特性評価方法に関する研究の記載が少ないように思われる。検討事項は何れも重要であり、後段の成果などについても、より詳細に言及することが望まれる。</p> <p>但し、今回の報告書(案)は、あくまでも参考資料であり、かつ(案)であることは考慮する必要がある。</p>	<p>本章は、外部機関との共同研究の成果であり、今後、共同研究相手先と共同で論文を作成し公表する計画であるため、2重投稿防止の観点から、概要の記載にとどめております。</p>

(専門技術者の意見及び回答)

No.	評価項目	意見	回答
佐々木 泰 氏			
1	① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか	コメントなし。	—
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	コメントなし。	—
3	③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	コメントなし。	—
4	④ 重大な見落とし(観点の欠落)がないか。	コメントなし。	—
5	その他	コメントなし。	—
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	前フェーズの研究結果を踏まえて研究を実施しており、国内外の過去の研究や最新知見を踏まえています。	—
d2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	査読論文等で研究成果が公開されており、解析実施手法や実験方法は適切です。  配電盤やケーブルなど事業者ニーズを踏まえた対象物が選定されており適切です。ただし、放射能評価の不確かさ(ばらつきの範囲)を求める際、容器内の極端な偏在を想定するのは、あまり現実的ではない	—  不確かさに関する御指摘の件については、容器内に極端な偏在がないことを事業者がどのようにハードもしくはソフトで担保しているか、及びその品質保証について、申請

No.	評価項目	意見	回答
		(通常はランダムに分散配置する)と思われますので、現実的な条件設定が望まれます。	で適切に説明されているかによるかと存じます。
		X線CTで内容物の密度ではなく材質を特定しようとするのは挑戦的な研究テーマであったと考えます。今後、研究が成功(容器中の銅の混入が特定できる)した場合の具体的な活用方法を検討されるとよいです。	元々は金属の種類を同定できれば、線減弱係数の文献値により精度良く吸収補正ができるという意図の研究でしたが、元素弁別の精度を上げる見通しが得られたことから、より広範な活用方法についても、今後検討を進めて参りたいと思います。
		ISO 11929に基づく検出限界値や不確かさを考慮した基準値判定は、日本国内の基準を国際標準に合わせていく上で、非常に有効と考えます。一方、日本のクリアランスレベルは、指針RS-G-1.7で定めるCo-60とCs-137とも0.1Bq/gの標準値を採用していますが、0.1Bq/gの濃度基準と不確かさを考慮をセットで導入している国は、日本だけではないかという懸念があります。	RS-G-1.7の改訂により制定されたGSG-18では、引用するGSR part 3に示された一般的なクリアランスの基準値と不確かさの考慮が示されており、各国の例としてもドイツ及びスウェーデンにおいては両者を組み合わせで運用されていることを確認しております。(なお、一般的なクリアランスの基準値以外に条件付きのクリアランスとして別の基準値を用意している場合もありますが、それはまた別の議論かと存じます。)
		長半減期放射性核種等の特性評価方法に関する研究については、大学などの学術機関を中心に取り組んでおられるので、人材育成にも貢献していると考えます。 一方、分析対象の核種の選定については、発電炉、サイクル施設、RIなどの埋設処分において被ばく評価で重要となるものを選定されているはずなので、分析対象核種の選定理由が記載されていると、研究開発に取り組んでいる意義がより明確になると思います。	分析対象核種の選定理由に関しては、「従来と性状の異なる廃棄物の管理等においては、放射線計測による定量が難しい長半減期放射性核種等の特性評価」と記載しておりました。被ばく評価上の重要性については、「廃棄物の管理等」に関連するため、今回の安全研究報告では言及しませんでした。今後論文や共同研究の成果報告書等の執筆の際には、いただいたご意見を参考と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	査読論文等で研究成果が公開されており、解析結果の評価手法や実験結果の評価手法も適切です。	—

No.	評価項目	意見	回答
	<p>価手法が適切か。</p>	<p>L3レベルの放射化した生体遮蔽コンクリートのブロック塊を一括測定した場合、測定する放射能濃度に1桁前後の大きな不確かさが生じることを明らかにできたことは有益な成果と考えます。事業者にとっても、不確かさの小さい新たな測定方法を開発するモチベーションになると思います。</p> <p>DecAccess-R コードを開発したことは今後のGA(等級別アプローチ)導入に向けた効果が期待できます。今後のパラメータ調整に時間を要すると推察しますが、BWRとPWRのモデルプラントの廃止措置においてリスクの高い作業を確率的な視点で順位付けられると、現場管理の適正化にも貢献すると思います。</p> <p>廃止措置におけるGAの導入は、事業者ニーズが高くコスト削減も期待できると考えられます。研究であるので、諸外国の事例を踏まえて、日本版のたたき台を検討するぐらゐの発展を期待したいです。</p>	<p>拝承いたします。</p> <p>拝承いたします。</p> <p>今後も国際的動向を注視しつつ、我が国の制度に活用可能な形で取りまとめてまいります。</p>
4	④重大な見落とし(観 点の欠落) がないか。	<p>重大な見落とし(観点の欠落)はないと考えます。</p>	—
5	その他	<p>報告書88Pの今後の課題において、「溶融により放射能の分布の均質さ」の確認に方法を課題としてあげておられますが、当該国(スウェーデン、ドイツ)でも課題としては共通なはずで、過去の試行錯誤で均質になる製造方法(温度管理など)を確立したので、現状では均質さを確認していないということでしょうか？</p> <p>原子力発電施設等安全技術対策委託費(廃止措置・クリアランスに関する検討)成果報告書は公開されているのでしょうか？</p>	<p>スウェーデン、ドイツでは事業者側が試行錯誤して放射能の分布をコントロールするパラメータ条件を設定したとのことから、日本において溶融クリアランスを実施する際は、実際の溶融炉のスペックに応じて、規制側としてもそのようなパラメータサーベイの結果を確認することが重要であると考えています。</p> <p>なお、左記の報告書につきましては、公開の為の準備を行っています。</p>