

安全研究の評価結果（案）について（中間評価及び事前評価）

令和2年1月29日
原子力規制庁

1. 評価の概要

「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決定。以下「基本方針」という。）及び「安全研究プロジェクトの評価実施要領」（平成31年4月16日原子力規制庁長官決定。以下「評価実施要領」という。）に基づき、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を対象に、事前、中間評価及び事後評価を行うこととなっている。

長官官房技術基盤グループで実施している安全研究プロジェクトのうち、令和4年度（2022年度）に研究が終了する2件について長官官房技術基盤グループにおいて中間評価を実施した¹。また、令和2年度から実施予定の新規の安全研究プロジェクト5件について事前評価を実施した。それぞれの評価結果（案）を別紙1及び2のとおり取りまとめた。

2. 評価方法

基本方針及び評価実施要領に基づき、下記のとおり評価を実施した。なお、評価においては、研究手法、成果の取りまとめ方法等の技術的妥当性の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、外部の専門家の意見を聴取した。

2.1 中間評価

中間評価は、当該研究プロジェクトのこれまでの成果を取りまとめた資料²に基づき、技術動向、規制動向等の情勢の変化も踏まえ、当初計画の適切性や見直し（研究期間の短縮、研究の中断、中止等を含む。）の要否を判断した。

評価項目は、①当初計画の適切性に関する評価、②研究の実施状況の評価とし、それぞれの項目ごとに評価を行い、その結果を基に総合評価を実施した。①の評価においては、評価実施要領に従い、当該安全研究プロジェクトに関係する原子力規制部の評価も受けた。

2.2 事前評価

事前評価は「「今後推進すべき安全研究の分野及びその実施方針」について」（令和元年7月3日原子力規制委員会了承。以下「実施方針」という。）に従って計画さ

¹ 令和3年度（2021年度）に研究の終期を迎える3件の安全研究プロジェクト（「福島第一原子力発電所燃料デブリの臨界評価手法の整備（H26-R3（2014-2020）」、「重大事故時等の原子炉格納容器の終局的耐力評価に関する研究（H29-R3（2017-2021）」及び「規制へのPRAの活用のための手法開発及び適用に関する研究（H29-R3（2017-2021）」）については、令和元年6月に中間評価を実施済

² 安全研究成果報告（中間）を示す。「軽水炉の重大事故時における不確かさの大きな物理化学現象に係る解析コードの開発」は第6回シビアアクシデント技術評価検討会 資料5-1として、「軽水炉の重大事故における格納容器機能喪失及び確率論的リスク評価に係る解析手法の整備」は第6回シビアアクシデント技術評価検討会 資料5-2として原子力規制委員会のホームページに掲載済

れた新規の安全研究プロジェクトについて、研究計画（研究の背景、目的、知見の活用先、研究概要、実施計画（成果の公表計画も含む。）等を含めたもの。）を取りまとめた資料（参考2-2～2-6）に基づき、計画の妥当性を判断した。

評価項目は①研究計画の適切性、②研究内容の技術的妥当性とし、それぞれの項目の適否を評価した。

<別紙、別添及び参考>

別紙1 安全研究に係る中間評価結果（案）

別紙1-1 「軽水炉の重大事故時における不確実さの大きな物理化学現象に係る解析コードの開発」の中間評価結果

別紙1-2 「軽水炉の重大事故における格納容器機能喪失及び確率論的リスク評価に係る解析手法の整備」の中間評価結果

参考1-1 技術評価検討会名簿

参考1-2 「軽水炉の重大事故時における不確実さの大きな物理化学現象に係る解析コードの開発」の研究計画

参考1-3 「軽水炉の重大事故における格納容器機能喪失及び確率論的リスク評価に係る解析手法の整備」の研究計画

別紙2 安全研究に係る事前評価結果（案）

別紙2-1 「震源近傍の地震ハザード評価手法の高度化に関する研究」の事前評価結果

別紙2-2 「断層の活動性評価に関する研究」の事前評価結果

別紙2-3 「重大事故時における重要物理化学現象の不確実さ低減に係る実験」の事前評価結果

別紙2-4 「実機材料等を活用した経年劣化評価・検証に係る研究」の事前評価結果

別紙2-5 「使用済燃料等の輸送・貯蔵の分野における最新解析手法に係る評価手法の研究」の事前評価結果

参考2-1 技術評価検討会名簿

参考2-2 「震源近傍の地震ハザード評価手法の高度化に関する研究」の研究計画（案）

参考2-3 「断層の活動性評価に関する研究」の研究計画（案）

参考2-4 「重大事故時における重要物理化学現象の不確実さ低減に係る実験」の研究計画（案）

参考2-5 「実機材料等を活用した経年劣化評価・検証に係る研究」の研究計画（案）

参考2-6 「使用済燃料等の輸送・貯蔵の分野における最新解析手法に係る評価手法の研究」の研究計画（案）

- 別添 1 「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決定）
- 別添 2 「安全研究プロジェクトの評価実施要領」（平成 31 年 4 月 16 日原子力規制庁長官決定）
- 別添 3 「今後推進すべき安全研究の分野及びその実施方針」（令和 2 年度以降の安全研究に向けて）（令和元年 7 月 3 日原子力規制委員会了承）（抜粋）

安全研究に係る中間評価結果（案）

別紙 1

令和 2 年 1 月 2 9 日
原子力規制委員会

1. 中間評価の進め方

1.1 評価の対象

長官官房技術基盤グループで実施している安全研究プロジェクトのうち、中間評価の対象となるプロジェクトは表 1 に示す 2 件である。

表 1 中間評価対象プロジェクト

	プロジェクト名	実施期間（年度）
1	軽水炉の重大事故時における不確実さの大きな物理化学現象に係る解析コードの開発	H29 - R4 (2017 - 2022)
2	軽水炉の重大事故における格納容器機能喪失及び確率論的リスク評価に係る解析手法の整備	H29 - R4 (2017 - 2022)

1.2 評価方法

基本方針及び評価実施要領に基づき長官官房技術基盤グループが実施した。評価に当たり、技術評価検討会の委員及び専門技術者（参考 1-1）の意見を聴取した。

2. 中間評価結果

中間評価の対象となる 2 件の安全研究プロジェクトは、適切に管理され、研究が行われていることを確認し、いずれも計画どおりに行うことが適切であると評価した。

当初計画の適切性及び研究の実施状況に対する評価結果の概要は表 2 のとおりである。各プロジェクトの中間評価結果は、別紙 1-1 及び 1-2 のとおり。なお、当初計画の適切性（研究の必要性）については、評価実施要領に従い、当該安全研究プロジェクトに係る原子力規制部の評価を含んでいる。

表2 中間評価結果

評価項目		軽水炉の重大事故時における不確実さの大きな物理化学現象に係る解析コードの開発	軽水炉の重大事故における格納容器機能喪失及び確率論的リスク評価に係る解析手法の整備	
当初計画の適切性		計画どおりに行うことが適切である	計画どおりに行うことが適切である	
研究の実施状況	項目別評価	①研究の進め方に対する技術的適切性	A(3)	A(3)
		②研究マネジメントの適切性	A(3)	A(3)
		③業務管理の適切性	A(3)	A(3)
	総合評価	項目別評価結果の総合点	9	9
		項目別評価結果の平均点	3	3
		評価結果(全体評語)	A	A

※ 項目別評価に示す括弧内の数字は、SABCによる項目別評価結果を数字に換算（Sを4点、Aを3点、Bを2点、Cを1点）したものを示す。

※ 総合評価の評価結果は、項目別評価結果の平均点が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。

**軽水炉の重大事故時における不確かさの大きな物理化学現象に係る解析コードの開発
(H29～R4 (2017～2022)) 中間評価結果**

1. 研究プロジェクトの目的

- 重大事故時において、格納容器の機能維持に大きな影響を及ぼすと考えられる物理化学現象のうち、解析による予測に大きな不確かさを伴う4つの現象（溶融燃料 - 冷却材相互作用、溶融炉心 - コンクリート相互作用、キャビティ注水時のデブリ冷却性挙動及び放射性物質生成・移行・除去挙動）に対する解析コードの開発を進め、実機プラントの安全性評価手法の高度化を図る。

2. 研究概要

- 溶融燃料 - 冷却材相互作用では、OECD/NEA SERENA2 実験から得られた知見等を活用し、実規模スケールにおける現象予測の精度を向上させる手法を開発する（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を含む。）。
- 溶融炉心 - コンクリート相互作用では、OECD/NEA MCCI 実験で得られたコンクリート異方性侵食挙動等の現象等を三次元解析できる手法を開発する。
- キャビティ注水時のデブリ冷却性挙動では、デブリ冷却に関する個別現象ごとの解析コードを開発する。さらに、これらの解析コードを連成し、格納容器キャビティ内でのデブリ冷却性に関する種々のシナリオを扱う手法を開発する（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を含む。）。
- 放射性物質生成・移行・除去挙動については、国際共同実験等で得られるデータ及び知見を活用し、原子炉冷却系内における放射性物質の化学組成を推定する手法を開発する（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を含む。）。

3. 現状の研究成果

- 溶融燃料 - 冷却材相互作用については、溶融物落下時の挙動を三次元体系で解析するために、溶融物が水中に落下する際に粒子化する現象をモデル化した。
- 溶融炉心 - コンクリート相互作用については、コンクリート浸食の挙動を三次元体系で解析するためのアルゴリズムを構築するとともに、クラスト成長モデル等の基本的な解析モデルを開発した。
- キャビティ注水時のデブリ冷却性挙動については、デブリベッド形成と冷却に関連する現象を溶融ジェットの分裂、床面拡がり等の5挙動に分類し、各挙動に関する解析コードの開発を進めた。さらに、これらの解析コードを連成するためのインターフェイスの開発を進めた。
- 放射性物質生成・移行・除去挙動については、化学反応を考慮した解析を行うため、時間的に変化せず平衡状態として取り扱うモデル、事故の進展につれて化学反応の進み具合を考慮したモデル等の開発を進めた。
- 論文投稿3件及び口頭発表2件を行った。

4. シビアアクシデント技術評価検討会における主な意見及びその対応

- 国内外の最新の技術知見を取り込み、かつ先行研究からの流れを踏まえて着実に進めているとの評価を受けた。
- 様々な現象のモデル化に当たり最新知見を踏まえているが、個別現象のモデル化だけでなく、モデル間の相互作用や従属的な影響等も考慮していくべきとの意見があった。本プロジェクトで開発したこれらの解析コードは、総合 SA 解析コード（以下「MELCOR」という。）に組み込み、事故進展解析を行うことを予定している。MELCOR への組み込みに当たっては、モデル間の相互作用や従属的な影響等を十分に検討しつつ進めていく。
- シビアアクシデント現象の詳細なモデル化等を通して得られる知見を PRA へ適用する際の考え方に関して、継続して議論を進めることが重要との意見があった。このため、今後、PRA の専門家との十分な議論を行い、これらの知見を PRA に適用する際に検討が必要となる課題等を整理していく。

5. 中間評価結果

(1) 当初計画の適切性（研究の必要性）： 計画どおりに行うことが適切である

- 重大事故時に格納容器内で生じる物理化学現象を対象とした研究が、国内外において継続的に進められている。解析の不確かさを低減させるために、これらの研究成果から得られた最新知見を踏まえて解析コードを整備していくことが重要であることから、計画どおりに行うことが適切である。
- 本プロジェクトの重大事故時の不確かさの大きな物理化学現象に係る解析コード開発で得られる事故時の現象理解の精緻化のための技術的知見は、例えば、事業者の申請内容の技術的論点抽出や論点对応整理の際に参照できるなど、将来、実用炉審査の有効性向上につながる可能性はある。したがって、本プロジェクトを継続し、技術的知見を蓄積することが望まれる。（原子力規制部による評価）

(2) 項目別評価

① 研究の進め方に対する技術的適切性： A

- 発表や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ている。また、国内外の研究動向や最新知見を踏まえて、詳細モデル化に必要な現象を特定しているとともに、モデル化の際にも最新知見を取り込んで進められており、技術的適切性が確保されていると判断する。

② 研究マネジメントの適切性： A

- 委託先を含め適切な研究体制を整えて進めている。また、口頭発表や論文投稿を計画的に行い、国内外の専門家の意見を取り入れつつ研究が進捗しておりマネジメントが適切に行われていると判断する。

③ 業務管理の適切性： A

- 予算執行、進捗管理や検収業務を含めた契約業務を、法令等を遵守して行っており、適切に事業管理が行われたと判断する。

(3) 総合評価

- 評価結果： A
- 評価コメント：

委託先も含めた適切な研究体制の下、国内外の研究動向や最新知見を踏まえてコード開発が進められている。研究マネジメント及び事業管理も適切に行われていることから、当初の計画どおりに研究を進めることが適切である。

6. 評価結果の今後の活用

- 技術評価検討会で頂いた意見等を十分に考慮しつつ、計画どおりに研究を進め、目標の達成に努める。

(主な成果の公表)

● 論文

- ・ Hotta, A., Akiba, M., Konovalenko, A., Villanueva, W., Bechta, S., Matsumoto, T., Sugiyama, T., and Buck, M., “Experimental and Analytical Investigation of Formation and Cooling Phenomena”, J. Nucl. Sci. Technol., 2019. (11月20日オンライン掲載)
- ・ Hotta, A., Akiba, M., Doi, Y., and Morita, A., “Development of debris bed cooling evaluation code, DPCOOL, based on heating porous media submerged in two-phase pool”, J. Nucl. Sci. Technol., 56(1), 2019, p. 55.
- ・ 秋葉美幸、堀田亮年、阿部豊、孫昊旻、「粒子状放射性物質のプールスクラビングに関する実験的研究」、日本原子力学会和文誌、2019. (掲載決定)

● 口頭発表

- ・ 堀田亮年、秋葉美幸、森田彰伸、「MSPREAD コードによる溶融デブリの非等方的拡がりモデル化と ECOKATS 実験解析」、日本原子力学会秋の大会 富山大学、2019年9月.
- ・ 森田彰伸、堀田亮年、「多次元溶融炉心 - コンクリート相互作用解析手法の開発」、日本原子力学会秋の大会 富山大学、2019年9月.

軽水炉の重大事故における格納容器機能喪失及び確率論的リスク評価に係る解析手法の整備 (H29～R4 (2017～2022)) 中間評価結果

1. 研究プロジェクトの目的

- 格納容器機能喪失に至るような事故の進展とその頻度、事故時に環境に放出される放射性物質の種類・量とそれらが環境に及ぼす影響などを評価するために、最新知見を取り入れた評価手法を整備する。

2. 研究概要

- 軽水炉の重大事故に対する評価手法を高度化するために、MELCOR を用いた事故進展解析手法及び格納容器破損要因となる個別現象（水素挙動など）を評価する解析手法を整備する。
- レベル 2PRA 手法の整備に向けて、レベル 1PRA との一貫解析等の評価手法の整備を進める。また、サイト外のリスク評価を行うために、レベル 3PRA 手法を活用したリスク評価に向けた検討を進める。

3. 現状の研究成果

- MELCOR による事故進展解析を実施し、ソースタームの類型化を行うために必要なモデル、解析の自動化ツール等を作成した。また、使用済燃料プールの重大事故時に想定される解析モデルを検討した。さらに、水素燃焼及び格納容器過温破損等の評価手法について、それぞれの現象の詳細を考慮した解析手法の検討を進めた。解析手法の検討に当たっては、OECD/NEA/CSNI が主催する国際共同研究プロジェクトに参加し、実験データ等を取得しつつ研究を進めた。
- レベル 1PRA/レベル 2PRA の一貫解析に向けた格納容器イベントツリーの定量化の検討を進めた。また、レベル 3PRA 手法については、運用上の介入レベルに基づく防護措置モデルを導入した。
- 論文投稿 1 件及び口頭発表 11 件を行った。

4. シビアアクシデント技術評価検討会における主な意見及びその対応

- 国内外の既往の研究、評価手法等に関する最新の知見をレビューした結果が踏まえられており、最新技術を取り込んだ評価手法の整備が進められているとの評価を受けた。
- 事故進展解析においては、解析コードが検証された実験条件範囲と実機条件との違いを考慮し、事故進展における不確実さを検討することが必要であるとの意見があった。今後、実験条件範囲と実機条件との差異に起因する不確実さを整理する進め方について検討していく。
- 研究対象のレベル 1PRA とレベル 2PRA の接続部分に加えて、レベル 2PRA とレベル 3PRA の接続部分の適切性が重要と考えられるとの意見があった。レベル 3PRA

との接続を今後、検討していく。

5. 中間評価結果

(1) 当初計画の適切性（研究の必要性）： 計画どおりに行うことが適切である

- 重大事故時における解析では、幅広い事故シナリオに対応した評価手法の整備を行い、レベル 2PRA 及びレベル 3PRA に最新知見を継続的に反映していくことが重要であることから、計画どおりに行うことが適切である。
- 本プロジェクトの重大事故時の原子炉格納容器機能喪失及び確率論的リスク評価に係る解析手法に関する研究で得られる事故時の現象理解の精緻化のための技術的知見は、例えば、事業者の申請内容の技術的論点抽出や論点对応整理の際に参照できるなど、将来、実用炉審査の有効性向上につながる可能性はある。したがって、本プロジェクトを継続し、技術的知見を蓄積することが望まれる。（原子力規制部による評価）
- 格納容器機能喪失頻度の評価手法については、令和元年度に策定した「原子力規制検査における個別事項の安全重要度評価プロセスに関するガイド（試運用版）」の附属書 7 バリア健全性に関する安全重要度評価ガイドに本プロジェクトの成果を反映した。格納容器機能喪失に対する機器の重要度についての研究結果は、検査計画を立案する際に、その重要度に応じた適切な検査頻度等を定めるなどに活用できるよう本安全研究プロジェクトを進めていく必要がある。（原子力規制部による評価）

(2) 項目別評価

① 研究の進め方に対する技術的適切性： A

- 発表や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ている。また、各種国際協力プロジェクトに参加することで関連する最新知見を収集し、研究に取り込みつつ、解析手法等の整備を進めており、技術的適切性を有していると判断する。

② 研究マネジメントの適切性： A

- 多岐にわたる評価手法を整備する内容であるが、適切な実施体制で進めているとともに、状況変化に応じて使用済燃料プールの事故進展解析の項目を取り込む等、必要な知見が得られるよう適切にマネジメントしていると判断する。

③ 業務管理の適切性： A

- 予算執行、進捗管理や検収業務を含めた契約業務を、法令等を遵守し行っており、適切に事業管理が行われたと判断する。

(3) 総合評価

- 評価結果： A

- 評価コメント：
研究内容が広範なプロジェクトではあるが、研究項目の見直し等を行い適切にマネジメントがなされている。国内外の動向を踏まえ研究が進められている。

6. 評価結果の今後の活用

- 技術評価検討会で頂いた意見や国内外の最新知見等の情報を参考にし、また格納容器機能喪失に対する機器の重要度に応じた適切な検査等での活用を考慮し、必要に応じて研究項目の見直しを行いながら研究を進め、目標の達成に努める。

(主な成果の公表)

- 論文
 - ・ Andreani, M., Nishimura, T., et al., “Synthesis of a CFD benchmark exercise based on a test in the PANDA facility addressing the stratification erosion by a vertical jet in presence of a flow obstruction”, Nuclear Engineering and Design, 354, 2019, Article 110177.
- 口頭発表
 - ・ 西村健、堀田亮年、「東京電力福島第一原子力発電所 4 号機における水素爆発の感度解析」、日本原子力学会 2019 春の年会 茨城大学、2019 年 3 月。（第 53 回日本原子力学会熱流動部会優秀講演賞を受賞）
 - ・ ほか 10 件

技術評価検討会名簿(シビアアクシデント技術評価検討会)

(五十音順)

委員

糸井 達哉	東京大学大学院工学系研究科建築学専攻准教授
牟田 仁	東京都市大学大学院総合理工学研究科共同原子力専攻准教授
守田 幸路	九州大学大学院工学研究院エネルギー量子工学部門教授

専門技術者

倉本 孝弘	株式会社原子力エンジニアリング解析サービス本部リスク評価グループ担当部長
高橋 浩道	三菱重工業株式会社原子力事業部炉心・安全技術部主幹プロジェクト統括
田原 美香	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安全システム技術第二担当主幹
宮田 浩一	原子力エネルギー協議会部長

1. プロジェクト	11. 軽水炉の重大事故時における不確実さの大きな物理化学現象に係る解析コードの開発	担当部署	技術基盤グループ シビアアクシデント研究部門
2. カテゴリー・研究分野	【原子炉施設】E) シビアアクシデント（軽水炉）	担当責任者	秋葉美幸 統括技術研究調査官
3. 背景	<p>重大事故時の格納容器機能維持に係る物理化学現象については、現在の解析コードによる予測には不確実さが大きな領域が存在し、これらに関して継続的研究が国内外において進められている。ここから得られる知見を反映した解析コードを開発し、その過程で得られた技術知見を適合性審査において活用し、さらに、コード開発及び妥当性確認の成果の公表を通じて専門家との情報交換を促進する。こうした活動を通じて、現状の知見とのギャップ分析に基づきガイドの改定等の要否の検討を行い、安全性に係る評価の高度化に資する知見を継続的に拡充していくことが重要である。</p> <p>原子炉圧力容器外の熔融燃料 - 冷却材相互作用及び熔融炉心 - コンクリート相互作用（以下「MCCI」という。）については、国際協力実験等を通じて知見が得られているが、現象解明及び実機プラント予測における不確実さは大きい。このため、国内外の動向、最新の文献、国際協力プロジェクトへの参加等を通じて得た知見により、解析モデルの改良を進め、精度を向上していくことが重要である。</p> <p>キャビティへの先行注水時のデブリベッド冷却性に着目し、デブリベッド形成及びデブリベッド内伝熱流動に関連する諸現象に関する実験的研究が近年国内外で活発化しており、ここから得られる知見に基づき、デブリベッド冷却性に対する解析モデルの精度を向上させることが重要である。</p> <p>エアロゾル状又はガス状の放射性物質は、種々の物理化学的現象を含む除去現象を経たのちに環境に移行する。こうした除去及び移行プロセスについては、経済協力開発機構原子力機関原子力施設安全委員会（以下「OECD/NEA/GSNI」という。）、欧州共同体等、国内外において継続的に実験的研究が進められている。ここから得られる知見に基づき詳細な化学反応を含む解析モデルを開発し、MELCOR等の総合重大事故解析コードに反映することは、ソースターム評価における精度を向上する観点から重要である。</p>		
4. 目的	<p>(1) 解析コードの開発</p> <p>新たに導入された重大事故対策及びリスク低減の視点から重要であり、かつ既存コードによる評価の不確実さが大きい熔融燃料 - 冷却材相互作用、熔融炉心 - コンクリート相互作用、キャビティ注水時のデブリ冷却性及び放射性物質生成・移行・除去挙動の4つの物理化学現象を対象として、不確実さの幅を温度、圧力等の状態変数で定式化することによって、実規模スケールの解析に適用できる解析コードを開発する。</p> <p>(2) 解析コードの検証及び妥当性確認</p> <p>国際協力プロジェクト実験、公開された実験及び別プロジェクトにおいて取得した実験データベースに基づき、解析コードの予測性を確認し解析結果の精度の向上を図る。</p>		
5. 知見の活用先	<p>最新知見が得られた場合には、実用炉の安全審査へ適切に活用する。将来的な安全性に係る評価の高度化に資するため、成功基準の検討、事故進展解析及び分岐確率等の確率論的リスク評価技術の向上、さらには別途実施する代表プラントの確率論的リスク評価技術の改良等に活用する。</p>		

本プロジェクトの研究は、「原子力規制委員会における安全研究の基本方針」（平成 28 年 7 月 6 日原子力規制委員会決定）における安全研究の目的のうち以下の分類に基づき実施する。

- 規制活動に必要な手段の整備（以下「分類③」という。）

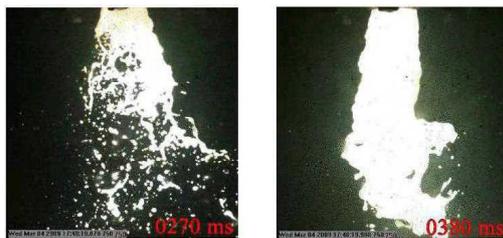
これまでに、デブリベッド形成及び冷却性等に係る解析コードの開発を進めてきたが、平成 29 年度からは、実機プラントにおける重大事故評価の精度向上の観点から課題の優先順位を検討した結果、溶融燃料 - 冷却材相互作用、MCCI、キャビティ内デブリベッド形成及び冷却性並びに燃料デブリからの放射性物質放出の 4 分野を対象として、これらに関する解析コードの開発を進める。解析コードの開発に当たっては、国内外の研究の成果及び評価技術の現状を踏まえて、軽水炉の重大事故の重要物理化学現象に係る実験等で取得した最新の試験結果を活用し、実験条件から実機プラント条件への外挿における不確かさの評価を含めた評価手法の整備を図る。

(1) 溶融燃料 - 冷却材相互作用解析コードの開発【分類③】

OECD/NEA/CSNI が実施した二酸化ウラン-金属混合物を用いた SERENA2 実験シリーズ（図 1 (a)）によって、二酸化ウラン溶融物の挙動及びこれに関する多次元コード JASMINE コードのモデルの不確かさを含む予測性に関する知見（溶融ジェットブレイクアップ、粗混合液滴の分布、細粒化と二相流動場の相互効果等）が得られている（図 1 (b)）。

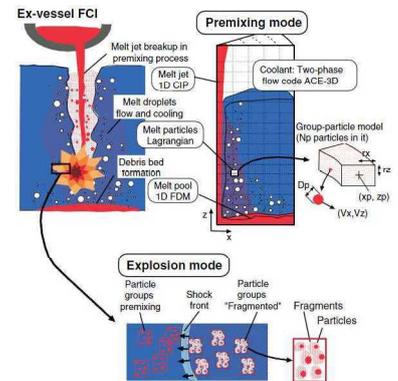
これらの知見を活用し、実規模スケールにおける現象予測の精度を向上する手法を整備する。まず、実験と実機プラントにおける条件の相違が発生する機械的エネルギーに及ぼす影響度から、多段階の溶融物落下及び大量な溶融物落下時の水中での二相挙動及び二酸化ウランにおける機械的エネルギー変換に関する現象を同定し、これらに関する国内外の研究動向、解析モデルについて調査し、数値モデルを開発する。また、空中でのデブリ粒子化、水中での粒子化デブリの集積挙動等の同伴現象に関する解析モデルは、より現実的な予測のために必要な要素であり、これらの同伴現象に関する解析モデルを備えたコードの開発を進める。JBREAK 及び JASMINE において、実験を反映した粒径分布及び集積デブリモデルを取扱うための改良を行い予測精度の向上を図る。

6. 安全研究概要
(始期：平成 29 年度)
(終期：令和 4 年度)



出典：NKS-34, M. Strandberg, Analyzing Steam Explosions with MC3D (2015).

(a) 溶融物落下状況 (TROI TS-3 ケース)



出典：JAEA・Data/Code 2008-014 K. Moiriyama et al., Steam Explosion Simulation Code JASMINE v.3 User's Guide (2008).

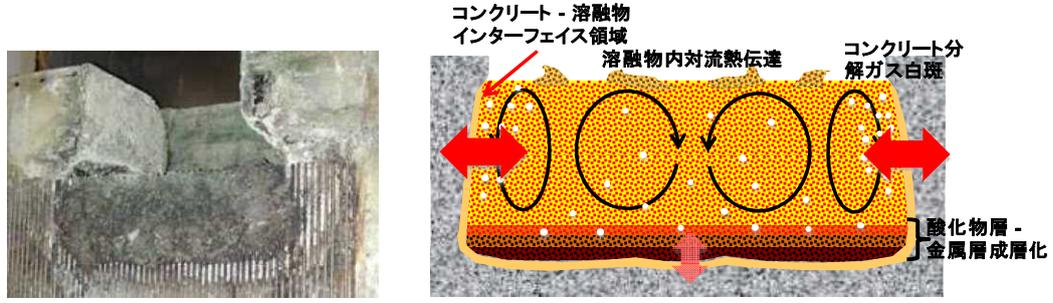
(b) 溶融燃料 - 冷却材相互作用モデル

図 1 OECD/NEA/CSNI-SERENA2 における TROI 実験における溶融燃料 - 冷却材相互作用解析例

(2) 溶融炉心 - コンクリート相互作用解析コードの開発【分類③】

OECD/NEA/CSNI が実施した二酸化ウランを用いた MCCI 実験により、珪質岩系コンクリートに関する異方性侵食挙動、上部注水時の上面クラストを介した除熱挙動に関する系統的なデータが得られている（図 2(a)）。また、注水時の上面クラスト除熱現象については、亀裂発生、水の侵入、溶融物の噴出等による除熱メカニズムについての定性的挙動は知られているものの、実験装置においてはクラストが装置側壁に固着し溶融物とクラストの間にギャップが生成される等の効果が存在することも分かっており、実験結果を解釈するには、こうした効果に対する考慮も必要である。これらの現象を扱うため、これまで 2 次元解析コードの開発を進めてきたが、実規模スケールへの外挿評価における不確かさについては課題として残っている。

今後専門家との情報交換及び公開された文献等に基づき異方性侵食を含む数値モデルを開発し、キャビティ周辺位置へ堆積したデブリによる侵食などの現実的問題を扱うことができる三次元解析コードを開発する（図 2(b)）。また、開発した解析コードについては、OECD/NEA/CSNI-MCCI、SURC 等、これまで取得している実験データベースに基づき不確かさを含めた予測性の評価を行う。さらに、実験から実機プラントに外挿する上で、コンクリート侵食の観点から影響度の大きな溶融物 - コンクリートインターフェイス挙動、上面クラスト伝熱挙動、落下直後のコンクリート壁との接触による初期クラスト生成（侵食における潜伏期）等について、解析モデルに基づく評価により精度の向上を図る。



出典： OECD/MCCI-2005-TR06, M.T.Farmer et al., OECD MCCI Project Final Report(2008).

(a) OECD/MCCI-CCI3における異方性侵食 (b) MCCI モデル

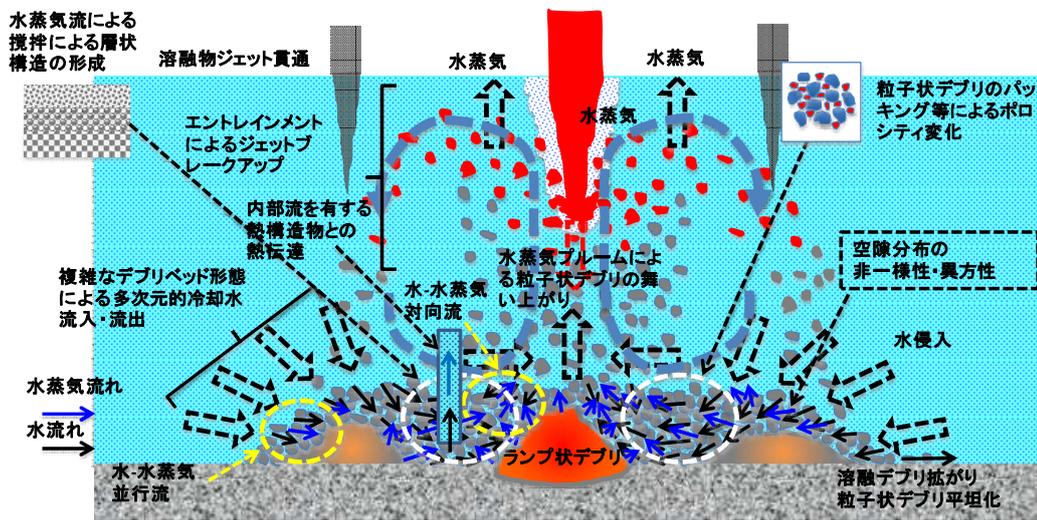
図2 OECD/NEA/GSNI-MCCIにおけるコンクリート侵食解析例

(3) キャビティ注水時のデブリ冷却性解析コードの開発【分類③】

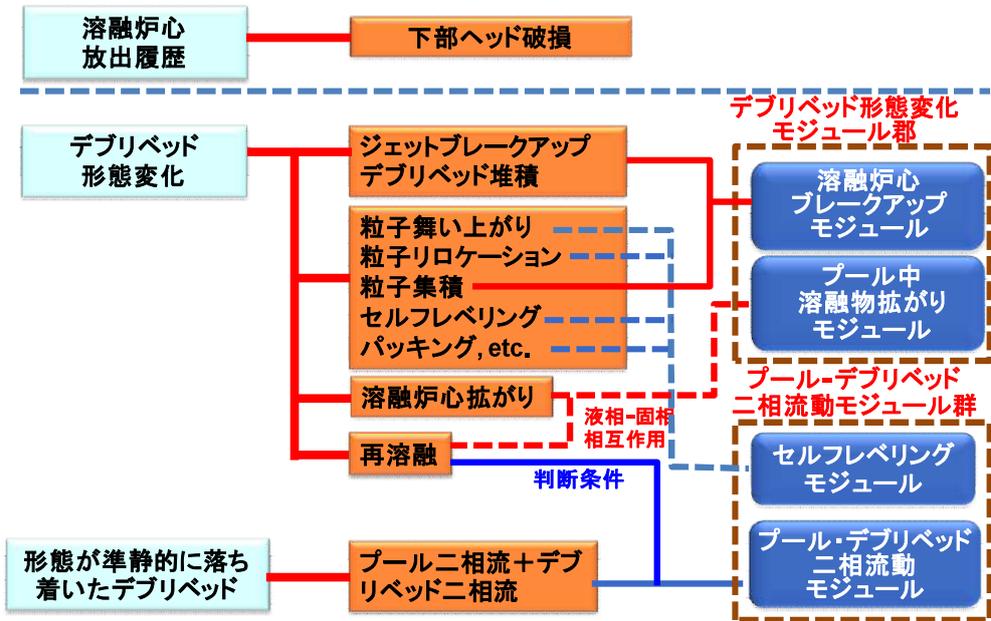
我が国の軽水炉において事業者が採用するキャビティへの先行注水では、プール水中に高温の発熱溶融デブリが落下する場合には、溶融デブリの一部は水との相互作用によって一部は細粒化し、その他は塊のまま床面に堆積する（図3 (a)）。このようなデブリベッド形成の詳細な過程を個別現象に分解した（図3 (b)）。これまでに複雑な多孔質体であるデブリベッド内の熱流動に係る数値モデルを開発している。ここでは、国内機関との協力を含めてこの解析コードの開発を更に進め、複数箇所からの多段階溶融物放出への対応、水中における溶融物のジェットブレイクアップモデル、水中の床面上における溶融物の拡がり等、非定常かつ非一様なデブリベッド形成に関するモジュールを開発し、これを堆積したデブリベッド-プール体系の冷却を扱うモジュールと結合し、格納容器キャビティ内でのデブリ冷却性に関する種々のシナリオを扱うことができる解析コード体系を開発する。

また、開発したコードについては、ドイツ シュトゥットガルト大学（以下「IKE」という。）等が実施したデブリベッド実験との比較及び「10. 軽水炉の重大事故の重要物理化学現象に係る実験」において取得するスウェーデン王立工科大学（以下「KTH」という。）が行うデブリ形成過程に関する実験データベースに基づき不確実さを含めた予測性の評価を行う。さらに、既往の実験にこれらの実験を併せた実験データベースと、ここで開発する解析コード体系に基づき、実機において想定される種々のシナリオに対応したデブリベッド形態に対応し、不確実さの評価を含めた評価手法を構築することができる。

加えて、確率的アプローチによるデブリ冷却性評価手法を開発する。JASMINE コードに溶融物の水中床面上での拡がり挙動及び冷却固化による拡がり停止を扱うモデル、ブレイクアップで生じた溶融物液滴の床面上における結合（アグロメレーション）挙動を扱うモデル等を導入することで、キャビティ床面上におけるデブリ堆積状態（拡がり面積、堆積高さ等）の予測機能を追加する。事故条件の不確実さを考慮するために入力パラメータの確率分布を仮定し、これに基づき抽出した多数の入力ケースについて JASMINE 解析を実施する。得られたデブリ堆積高さの確率分布を冷却可能なデブリ最大堆積高さと比較することで、MCCI に至ることなくデブリを冷却できる確率を評価する。



(a) デブリベッド形成概念図



(b) デブリベッド形成に係る現象の分解

図3 溶融デブリ落下後のデブリベッド形成及び冷却性モデル

(4) 放射性物質生成・移行・除去解析コードの開発【分類③】

重大事故時のソースタームの評価では、放射性物質の燃料からの放出、原子炉冷却系から格納容器への移行、環境への放出等のそれぞれの移行挙動の考慮が課題として残っている。環境への移行量の不確かさには、発生、放射性物質の形態（ガス状、エアロゾル状等）、格納容器内での除去メカニズム（重力沈降、泳動等）、緩和設備の効果（スプレー、プールスクラビング等）等が複合的に影響するため、精度の向上のためには、国内機関との協力を含めたこれらの移行挙動に対する解析モデルの開発が重要である。

図4に示すように、ソースターム評価に関連する種々の実験が国際共同実験等で実施されており、これらで得られたデータ及び知見を取り入れ、ソースターム評価モデルを開発する。ただし、これらの実験には個別効果実験等も含まれており、実規模スケールの評価に適用する場合には不確かさを評価する必要がある。最終的に、これらの評価モデルは、計算効率やシステムレベル解析において得られる変数のスケールに合わせて縮約し、MELCORに組み込むことを目的として開発する。MELCORへの組み込みは「11. 軽水炉の重大事故における格納容器機能喪失及び確率論的リスク評価に係る解析手法の整備」において実施する。

放射性物質の化学挙動はその移行挙動に特に大きな影響を及ぼすため、重点的に評価手法の開発を進める。主にヨウ素やセシウムを対象として熱力学平衡論等に基づき原子炉冷却系内の化学組成を推定する手法を開発するが、最終的にシビアアクシデント総合解析コードに導入することを考慮して計算負荷の増大が少ない代替統計モデル等の導入を検討する。モデルの開発においてはシビアアクシデント総合解析コード THALES2 をプラットフォームとして活用し、代表的な事故シナリオに対する解析により化学挙動の考慮がソースタームに及ぼす影響を確認する。

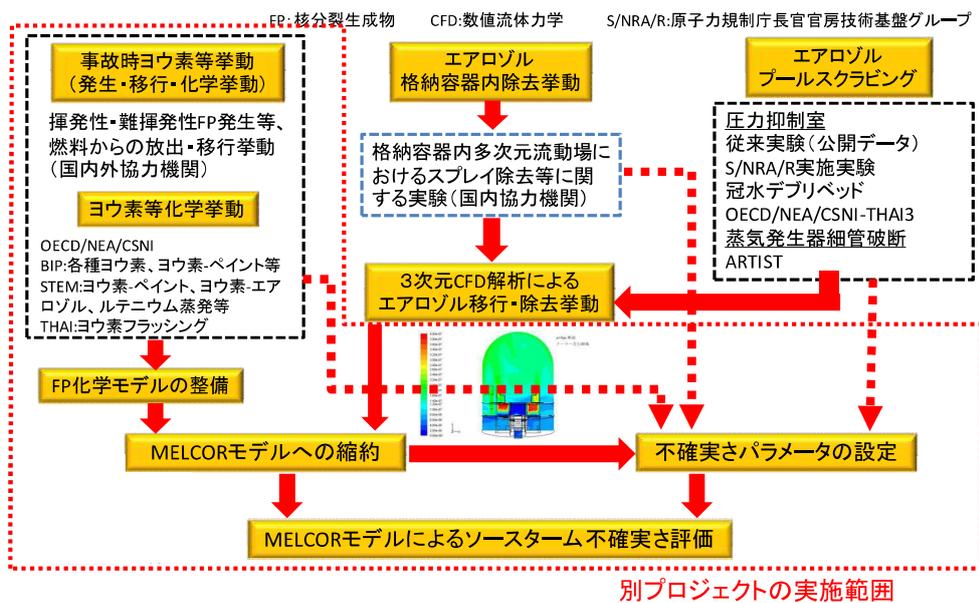


図4 放射性物質生成・移行・除去モデル開発

実施行程表

	平成 29 年度	平成 30 年度	令和元年度	令和 2 年度	令和 3 年度	令和 4 年度
(1)	溶融燃料 - 冷却材相互作用解析コードの開発 数値モデル検討 既往コード改良 単体検証	JBREAK 開発 既往コード改良 妥当性確認	JBREAK 開発 既往コード改良 妥当性確認 学会公表	JBREAK プロトタイプ 既往コード改良 妥当性確認	既存コード改良 論文公表	既存コード改良
(2)	数値モデル検討 コード開発 単体検証	数値モデル検討 CORCAAB 開発 単体検証 妥当性確認	CORCAAB プロトタイプ 妥当性確認 学会公表	論文公表		
(3)	数値モデル検討 コード開発 単体検証 学会公表	DPCOOL MSPREAD プロトタイプ完成 REMELT モデル 既往コード改良 妥当性確認 論文公表	モジュール 間結合 既往コード改良 妥当性確認 論文公表	モジュール 間結合 REMELT 開発 既往コード改良 妥当性確認	モジュール 間結合 REMELT 開発 既往コード改良 妥当性確認 論文公表	モジュール 間結合 REMELT プロトタイプ 既往コード改良 妥当性確認
(4)	放射線物質生成・移行・除去解析コードの開発 数値モデル検討 コード開発	化学熱平衡コード 整備、FP 発生・移行 実験データ取得 分析	化学熱平衡コード 整備、FP 発生・移行 実験データ取得 分析 妥当性確認	化学熱平衡コード 整備、FP 発生・移行 実験データ取得 分析 妥当性確認	化学熱平衡コード 整備、FP 発生・移行 実験データ取得 分析 妥当性確認	化学熱平衡コード 整備、FP 発生・移行 実験データ取得 分析 妥当性確認 論文公表
	随時反映	安全性向上評価等のガイドの改定等の検討を通じた安全性に係る評価の高度化			随時反映	随時反映

7. 実施計画

<p>【平成 29 年度の実施内容】</p> <p>(1) 溶融燃料 - 冷却材相互作用解析コードの開発【分類③】</p> <p>a. 数値モデル検討：MC3D 等による SERENA2 多次元流動現象データの分析結果、KTH における PULIMS 実験結果等を調査し、新知見としてモデルに取り入れるべき項目を抽出する。さらに、JASMINE の改良を念頭に必要な現象モデルの数値化を開始する。</p> <p>b. 既往コード改良：既往コードの構造を調査し、上記数値モデルの組み込みを実施する。</p> <p>c. 単体検証：組込んだ数値モデルの機能を単体検証する。</p> <p>(2) 溶融炉心 - コンクリート相互作用解析コードの開発【分類③】</p> <p>a. 数値モデル検討：CORQUENCH コード等の公開されている MCCI コードにおける上面クラスト熱伝達モデル、異方性侵食に関する欧州を中心としたモデル化に関する文献を調査し、コードの仕様を検討する。実施計画を立案して目標を設定し、このために必要な現象モデルの数値化を実施する。</p> <p>b. コード開発：上記数値モデルの組み込みを実施する。</p> <p>c. 単体検証：組込んだ数値モデルの機能を単体検証する。</p> <p>(3) キャピティ注水時のデブリ冷却性解析コードの開発【分類③】</p> <p>a. 数値モデル検討：IVMR (In-Vessel Melt Retention) 及び EVDC (Ex-Vessel Debris Cooling) に関する文献を調査し、圧力容器貫通、デブリベッド形成等に関するモデル化に関する情報を整理する。実施計画を立案して目標を設定し、このために必要な現象モデルの数値化を実施する。</p> <p>b. コード開発：上記数値モデルの組み込みを実施する。</p> <p>c. 単体検証：組込んだ数値モデルの機能を単体検証する。</p> <p>d. 妥当性確認：実験の存在する現象について予測計算を実施する。</p> <p>(4) 放射性物質生成・移行・除去解析コードの開発【分類③】</p> <p>a. 数値モデル検討：酸化雰囲気でのルテニウム酸化学動、燃料からの放出挙動及び原子炉冷却系での移行挙動を調査し、モデル化に関する情報を整理する。実施計画を立案して目標を設定し、このために必要な現象モデルの数値化を実施する。</p> <p>b. コード開発：上記数値モデルの組み込みを実施する。</p>
<p>【平成 30 年度の実施内容】</p> <p>(1) 溶融燃料 - 冷却材相互作用解析コードの開発【分類③】</p> <p>a. 3次元溶融ジェット分裂挙動解析コード JBREAK を開発する。</p> <p>b. JASMINE コードの溶融ジェット分裂モデルに粒子集積挙動を扱える機能を追加する。</p> <p>(2) 溶融炉心 - コンクリート相互作用解析コードの開発【分類③】</p> <p>a. 3次元 MCCI 解析コード CORCAAB 開発し、溶融炉心-コンクリート/プール間の熱伝達モデルを確認する。</p> <p>(3) キャピティ注水時のデブリ冷却性解析コードの開発【分類③】</p> <p>a. 3次元発熱多孔質体伝熱解析コード DPCOOL に、実機評価において必要となる構造体との熱伝達を考慮する。</p> <p>b. 多次元溶融物拡がり解析コード MSPREAD に、実機評価において必要となるコンクリート及びプールとの熱伝達を考慮する。</p> <p>c. デブリベッド中の溶融金属-固化酸化物の相互作用のモデル化に関する知見を調査する。</p> <p>d. JASMINE コードに追加した溶融物拡がりモデルの改良を行う。</p> <p>(4) 放射性物質生成・移行・除去解析コードの開発【分類③】</p> <p>a. 原子炉プラントの熱流動及び化学平衡を詳細に扱える VICTORIA2.0 コードをサンディア国立研究所より導入し、コードの機能拡張及び検証を実施する。</p> <p>b. FP 移行実験国際プロジェクトに参加しデータを入力し、その分析結果に基づき補完実験を実施する。これらの知見に基づき熱化学平衡計算機能を有するシビアアクシデント時 FP 挙動解析コードを整備する。</p>
<p>【令和元年度の実施内容】</p> <p>(1) 溶融燃料 - 冷却材相互作用解析コードの開発【分類③】</p> <p>a. 3次元溶融ジェット分裂挙動解析コード JBREAK を開発し妥当性確認を実施する。</p> <p>b. JASMINE コードの溶融ジェット分裂モデルに粒子集積挙動を扱える機能を追加する。</p>

	<p>(2) 溶融炉心 - コンクリート相互作用解析コードの開発【分類③】</p> <p>a. 3次元 MCCI 解析コード CORCAAB プロトタイプを整備し妥当性確認を実施する。</p> <p>(3) キャビティ注水時のデブリ冷却性解析コードの開発【分類③】</p> <p>a. DPCOOL 及び MSPREAD 間のモジュール間カップリングし妥当性確認を実施する。</p> <p>b. JASMINE コードに追加した溶融物拡がりモデルの改良を行うとともに、確率論的アプローチによる試解析を実施する。</p> <p>(4) 放射性物質生成・移行・除去解析コードの開発【分類③】</p> <p>a. FP 移行実験国際プロジェクトに参加しデータを入力し、その分析結果に基づき補完実験を実施する。これらの知見に基づき熱化学平衡計算機能を有するシビアアクシデント時 FP 挙動解析コードを整備し、妥当性を確認する。</p>
	<p>【令和2年度の実施内容】</p> <p>(1) 溶融燃料 - 冷却材相互作用解析コードの開発【分類③】</p> <p>a. 3次元溶融ジェット分裂挙動解析コード JBREAK プロトタイプを整備し妥当性確認を実施する。</p> <p>b. JASMINE コードの溶融ジェット分裂モデルに粒子集積挙動を扱える機能を追加する。</p> <p>(2) 溶融炉心 - コンクリート相互作用解析コードの開発【分類③】</p> <p>a. モジュール間結合の作業の中で CORCAAB の機能拡充を実施する。</p> <p>(3) キャビティ注水時のデブリ冷却性解析コードの開発【分類③】</p> <p>a. DPCOOL、MSPREAD 及び CORCAAB 間のモジュール間カップリングを実施し妥当性確認を実施する。</p> <p>b. 物質相互作用・再溶融解析コード REMELT を開発する。</p> <p>c. JASMINE コードの溶融物固化モデルの改良を行い、実験解析により妥当性確認を実施する。</p> <p>(4) 放射性物質生成・移行・除去解析コードの開発【分類③】</p> <p>a. FP 移行実験で取得した知見に基づき化学反応データベースを構築し、反応速度モデルの妥当性確認を実施する。</p>
	<p>【令和3年度の実施内容】</p> <p>(1) 溶融燃料 - 冷却材相互作用解析コードの開発【分類③】</p> <p>a. モジュール間結合の作業の中で JBREAK の機能拡充を実施する。</p> <p>b. JASMINE コードの溶融ジェット分裂モデルに粒子集積挙動を扱える機能を追加する。</p> <p>(2) 溶融炉心 - コンクリート相互作用解析コードの開発【分類③】</p> <p>a. モジュール間結合の作業の中で CORCAAB の機能拡充を実施する。</p> <p>(3) キャビティ注水時のデブリ冷却性解析コードの開発【分類③】</p> <p>a. DPCOOL、MSPREAD、JBREAK 及び CORCAAB 間のモジュール間カップリングを実施し妥当性確認を実施する。</p> <p>b. 物質相互作用・再溶融解析コード REMELT を開発する。</p> <p>c. 不確実さを考慮したシビアアクシデント解析と JASMINE 解析を組み合わせた確率論的冷却性評価手法を開発する。</p> <p>(4) 放射性物質生成・移行・除去解析コードの開発【分類③】</p> <p>a. FP 移行実験で取得した知見に基づき熱力学平衡論及び反応速度論の混合モデルを構築し、妥当性確認を実施する。</p>
	<p>【令和4年度の実施内容】</p> <p>(1) 溶融燃料 - 冷却材相互作用解析コードの開発【分類③】</p> <p>a. モジュール間結合の作業の中で JBREAK の機能拡充を実施する。</p> <p>b. JASMINE コードの溶融ジェット分裂モデルに粒子集積挙動を扱える機能を追加する。</p> <p>(2) 溶融炉心 - コンクリート相互作用解析コードの開発【分類③】</p> <p>a. モジュール間結合の作業の中で CORCAAB の機能拡充を実施する。</p> <p>(3) キャビティ注水時のデブリ冷却性解析コードの開発【分類③】</p> <p>a. 物質相互作用・再溶融解析コード REMELT プロトタイプを整備し妥当性確認を実施する</p> <p>b. DPCOOL、MSPREAD、REMELT、JBREAK 及び CORCAAB 間のモジュール間カップリングを実施する。</p> <p>c. 不確実さを考慮したシビアアクシデント解析と JASMINE 解析を組み合わせた確率論的冷却性評価手法を改良する。</p> <p>(4) 放射性物質生成・移行・除去解析コードの開発【分類③】</p> <p>a. FP 移行実験で取得した知見に基づき熱力学平衡論及び反応速度論の混合モデルを備えた FP 移行挙動解析コードを開発し、各モデルの誤差を検証する。</p>
8. 実施体制	<p>【シビアアクシデント研究部門における実施者】</p> <p>○堀田亮年 主任技術研究調査官 森田彰伸 技術研究調査官</p> <p>【平成30年度の委託先】</p> <p>・国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・・・実施項目(1)、(3)、(4)</p>
9. 備考	<p>以下の研究プロジェクトと協力する。</p> <p>10. 軽水炉の重大事故の重要物理化学現象に係る実験</p> <p>コード開発の進捗に応じて、以下の妥当性確認のための実験計画に適切なフィードバックを与える。</p> <p>(1) 及び (3) については「燃料デブリ形成過程個別現象実験」</p> <p>(4) については「ブルスクラビング実験」及び「ソースターム実験」</p> <p>12. 軽水炉の重大事故における格納容器機能喪失及び確率論的リスク評価に係る解析手法の整備</p> <p>コード開発の進捗に応じて、以下の妥当性確認のための実験計画に適切なフィードバックを与える。</p> <p>(1) 及び (3) については「格納容器破損防止対策の評価手法の整備」の「国際協力実験等への参加」</p>

研究計画

1. プロジェクト	12. 軽水炉の重大事故における格納容器機能喪失及び確率論的リスク評価に係る解析手法の整備	担当部署	技術基盤グループ シビアアクシデント研究部門
2. カテゴリー・研究分野	【原子炉施設】E) シビアアクシデント（軽水炉）	担当責任者	舟山京子 安全技術管理官 秋葉美幸 統括技術研究調査官
		主担当者	西村 健 技術研究調査官 市川竜平 技術研究調査官
3. 背景	<p>重大事故における格納容器破損防止に係る実機解析においては、事故の影響が及ぶ広範な領域における幅広い事故シナリオに対する既存解析コードの改良及びこれらを用いた評価手法の整備を進め、レベル2及びレベル3の確率論的リスク評価（以下「PRA」という。）等の安全評価手法に対して最新知見を継続的に反映していくことが重要である。</p> <p>(1) 格納容器破損防止対策の評価手法の整備 実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈（平成25年6月19日原子力規制委員会決定）では、重大事故時の格納容器破損防止対策の有効性確認について、沸騰水型原子炉（以下「BWR」という。）及び加圧水型原子炉（以下「PWR」という。）に対して6つの「必ず想定する格納容器破損モード」を定め格納容器破損防止対策の有効性を確認している。加えてPRAを実施し、「有意な頻度又は影響をもたらす格納容器破損モード」があれば新たに追加することが求められている。</p> <p>重大事故時の格納容器内事故進展の解析では、プラント全体を考慮し、幅広いスケールに及ぶ多数の物理化学現象の相互作用を扱う総合重大事故現象解析コード（Integral Code）を用いるアプローチにより基本的な格納容器負荷を評価する。同時に、特定の複雑な物理化学現象の相互作用については、空間及び時間的に高い解像度を有する個別現象解析コード（Dedicated Code）を用いるアプローチを併用している。格納容器破損に係る物理化学現象及びこれらに対するプラント応答の解析コードによる予測の不確かさを低減するため国内外において研究活動が活発に継続している。ここでは、国際協力実験等への参加による実験データの取得並びに解析コード及びその用法に関する最新の知見を反映し、上記2種類のアプローチを併用した解析手法の整備を進めていくことは、広いスケールに及ぶ物理化学現象を適切に扱う必要がある重大事故解析において重要である。</p> <p>(2) 確率論的リスク評価に関連する評価技術の整備 平成25年に改正された「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」により、事業者に対する「安全性の向上のための評価」（以下「安全性向上評価」という。）の実施が規定され、安全性向上評価において個別プラントのリスクプロファイルを明確化するために、レベル2PRAまで実施されている。また、新検査制度の運用に向けて検査指摘事項の重要度評価に活用するPRAとして、内部事象のレベル1PRAから1.5PRAまでを一貫して扱う評価が実施される見込みである。レベル2PRA評価手法の整備を進めることにより、将来的な安全性向上評価等のガイドの改定等による安全性に係る評価の高度化、新検査制度的な運用等に資することが重要である。</p> <p>東京電力福島第一原子力発電所事故（以下「1F事故」という。）後の国際的な動向を踏まえて、これまでにレベル3PRA手法の整備を進めてきた。今後、確率論的リスク評価（PRA）の成熟状況に応じて、将来的に実用発電用原子炉施設においてサイト特性評価を踏まえたサイト外に対するリスクの評価を実施するため、レベル3PRAを活用したリスク評価に向けた検討を開始する。</p> <p>(3) 環境影響評価手法の整備 1F事故では、1号機から3号機までが炉心損傷し、大量の放射性物質が環境に放出され、大気中及び海洋に拡散した。ソースターム評価の精度向上のために、敷地境界近傍等の計測値及び数値解析を組み合わせた放射性物質の環境への放出量を推定する評価手法の整備が重要である。</p> <p>また、緊急時対策所等の居住性に係る被ばく評価の精度向上のため、直接線及びスカイシャインによる被ばく評価の不確かさ等について知見を得ることが重要である。</p>		
4. 目的	<p>(1) 格納容器破損防止対策評価手法の整備 基準類策定、安全性向上評価、重大事故対策の有効性判断、1F事故の分析等に適用できる総合現象解析コード及び個別現象解析コードによる評価手法を整備し、必要な場合にはモデル改良を実施する。また、実機相当レベルのデータを含む妥当性確認用データの取得を行い不確かさの定量評価手法を整備する。</p> <p>1) 総合現象解析コードによる評価手法の整備 重大事故総合解析コードMELCORにより国内PWR及びBWRを対象とした事故進展解析を実施し、ソースタームの類型化を行うために必要な手法を整備する。また、使用済燃料プール（以下「SFP」という。）の重大事故時に想定される特有の現象や事故進展に着目してMELCORにより解析するための手法の整備する。</p> <p>2) 個別現象解析コードによる評価手法の整備 水素燃焼、メルトスプレッド/溶融炉心-コンクリート相互作用の重畳現象及び静的・動的負荷に対する格納容器閉じ込め機能に関する詳細解析手法及び不確かさの低減のためのモデル整備を行う。個別現象に関する経済協力開発機構原子力機関原子力施設安全委員会（以下「OECD/NEA/CSNI」という。）が主催する実験等に参加し、実験データ等の成果を取得する。</p> <p>(2) 確率論的リスク評価に関連する評価手法の整備</p> <p>1) レベル2PRA手法の整備 レベル2PRA評価においては、物理化学現象に加えて、格納容器イベントツリー上にレベル1PRAで取り扱うシステムとの従属性を適切に考慮し、一括して非信頼性解析モデルを扱う手法を整備し、安全性向上評価、新検査制度での検査指摘事項の重要度評価に活用するPRA手法等の確認に資する知見の蓄積及び整備を実施する。また、外部事象を考慮した格納容器機能喪失頻度及び環境への放射性物質放出量評価手法、複数基立地評価手法等を整備する。</p> <p>2) レベル3PRA手法の整備</p>		

	<p>重大事故等対処設備を考慮したレベル1からレベル3までのPRA結果から、濃度、線量等のリスクの指標を検討するとともに、リスク指標を評価するためのレベル3PRA手法を整備する。また、代表プラントのリスク評価を行い、防護措置の効果等に係る技術的知見を取得する。</p> <p>(3) 環境影響評価手法の整備</p> <p>1) 放射性物質の環境拡散評価手法の整備</p> <p>IF事故における環境への放射性物質の放出量の推定のために、地形影響等を考慮した大気拡散モデル、海洋拡散モデル及び陸上動態モデルを統合した環境拡散評価手法を整備する。</p> <p>2) 遮蔽解析に係る技術的知見の整備</p> <p>緊急時対策所等の居住性等に係る被ばく評価について、直接線及びスカイシャイン線に対する建屋等による遮蔽評価の確認に資する技術的知見を取得し被ばく評価手法を整備する。</p>
5. 知見の活用先	<p>解析コードによる評価及びPRAは、新規基準における事故シーケンス選定、有効性評価等の適合性審査に係る確認のより一層の向上に資する。また、事故進展解析、分岐確率、放射性物質放出挙動評価等について、将来的な安全性向上評価等のガイドの改定等の要否の検討を含めた安全性に係る評価の高度化、新検査制度での検査指摘事項の重要度評価に活用されるPRAの確認に資する。さらに、代表プラントのPRAの信頼性の継続的な改善等に資する。</p> <p>また、原子力災害対策指針の防護措置に係る参考情報に資する。</p>
6. 安全研究概要 (始期：平成29年度) (終期：令和4年度)	<p>本プロジェクトの研究は、「原子力規制委員会における安全研究の基本方針」（平成28年7月6日原子力規制委員会決定）における安全研究うち以下の分類に基づき実施する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 規制活動に必要な手段の整備（以下「分類③」という。） <p>格納容器破損防止対策評価手法、PRA及び環境影響評価に関する評価手法を整備するとともに、OECD/NEA/CSNIが行う国際共同プロジェクトに参加し、評価手法の妥当性確認のための実験データベース等の取得を行う。</p> <p>(1) 格納容器破損防止対策評価手法の整備【分類③】</p> <p>1) 総合現象解析手法の整備</p> <p>MELCORを用い、国内BWR及びPWRプラントの事故進展解析を実施し、これに基づき実機規模の解析評価モデル及び評価手法を整備する。さらに、米国SOARCAプロジェクトを参考に、最適評価を実施するための詳細なMELCOR入力デッキの整備を進め、ソースターム解析を実施するとともに、事故進展解析の結果に対する事故シーケンスグループの類型化ツールを整備する</p> <p>SFPについては、燃料露出を伴う冷却材喪失事故に対する主要な事故進展に関して、燃料被覆管酸化、自然対流冷却等の物理化学現象を考慮した解析評価手法を整備し、ソースターム評価を行う。</p> <p>2) 個別現象解析手法の整備</p> <p>① 格納容器破損モード（水素燃焼）評価の整備</p> <p>詳細数値流体力学（以下「CFD」という。）解析による水素燃焼解析手法は研究途上の段階にあるが、遅い火炎から中速度の火炎については均一水素濃度場を中心とした実用的なCFD解析モデルが提案されている。こうしたモデルにより、格納容器破損のみならず、水素が停留する可能性のある安全系の機能に関する詳細な評価手法を整備する。「④ OECD/NEA/CSNI 主催の実験、解析及び調査プロジェクトからの情報収集」の一環として参加する水素リスク関連国際実験プロジェクトTHAI3、HYMERES等で得られた実験データに基づき、噴流による成層崩壊に対する予測性を確認した乱流モデルを適用して、クーラー、スプレー等の安全機器による格納容器雰囲気気流れ場への影響をCFD解析により評価し、格納容器内の局所的な温度及び濃度等を定量的に評価する手法を整備する。</p> <p>a. 水素混合解析の整備</p> <p>汎用CFD解析コード及び原子力専用詳細解析コードを用い、比較的詳細なメッシュに基づき、安全上重要な水素の大局的流動現象（対流、成層化等）とその形成・崩壊過程及び局所的流動現象（区画内の滞留等）に関する解析手法を整備する。また、構造体表面での凝縮熱伝達、スプレー、クーラ等複数の安全機器の作動時に生じる熱流動上の相互作用、静的触媒式水素再結合器(PAR)、イグナイターのモデルパラメータはメッシュサイズによる影響を受けることが考えられる。</p> <p>こうしたメッシュ詳細化によるモデル適用法の課題が存在することを踏まえて、格納容器内の多次元空間熱流動に及ぼす影響を把握するため、国際協カプロジェクト(OECD/NEA/CSNI-HYMERES計画等)及び「軽水炉の重大事故の重要物理化学現象に係る実験」にて国内協力機関が実施する「重大事故時格納容器熱流動実験(CIGMA)」等にて得られるデータに基づく実験解析を行い、実機評価のための技術的知見を整備する。さらに、PARに関するTHAI実験シリーズのデータを利用し、その起動、配置、処理能力、設置数等に関する評価手法を整備する。次のb.の水素燃焼解析手法を併用し、重大事故時に想定される水素漏えいモードに対する水素濃度制御を評価する。</p> <p>b. 水素燃焼解析の整備</p> <p>国際協カプロジェクト実験(OECD/NEA/CSNI-THAI計画等)として実施された既往水素燃焼実験及び同THAI3で実施される燃焼区間伝播実験に対してCFD解析を実施し、非均一水素濃度場及び水蒸気混合気場における水素燃焼モデルの適用性拡大を図るとともに、火炎加速領域に適用できる水素燃焼解析評価手法を整備する。本評価により、実装可能な水素濃度制御によって局在化する可能性がある水素の燃焼についての影響等を評価する。</p> <p>② 格納容器破損モード（メルトスプレッド/溶融炉心-コンクリート相互作用の重畳現象）評価手法の整備</p> <p>溶融炉心が落下後キャビティ床面上を拡がり、更に溶融炉心-コンクリート相互作用によりコンクリートが侵食する総合的挙動を評価する。別プロジェクトにおいて開発している三次元溶融炉心のキャビティ床面拡がり解析コードに基づき、MELCOR内蔵のCORCONを制御する関数の導入及びモデルパラメータの調整を実施する。</p>

③ 格納容器破損モード（静的・動的負荷）評価手法の整備

既往の国内外の静的・動的負荷に対する格納容器閉じ込め機能の維持に関する実験結果及び解析結果に基づき、特に格納容器機能喪失に係る物理化学現象に伴って発生する動的荷重に対する格納容器機能の維持に関する評価手法を整備する。

④ OECD/NEA/CSNI 主催の実験、解析及び調査プロジェクトからの情報収集

以下のプロジェクトに参加し、関係機関と協力して解析コードの妥当性確認のためのデータ取得及び専門家との情報交換を通じての現象理解及び解析手法に関する知見を取得する。

プロジェクト	取得対象	活用先
BIP3	ヨウ素の化学的挙動に関する実験データ	別プロジェクトの「軽水炉の重大事故時における不確実さの大きな物理化学現象に係る解析コードの開発」で実施する「放射性物質生成・移行・除去解析コードの開発」において活用。
STEM2	ヨウ素及びルテニウムの化学的挙動に関する実験データ	同上
THAI3	水素混合、水素燃焼、ヨウ素移行、プールのスクラビング等に関する実験データ	本プロジェクトの「水素混合・燃焼解析の整備」において活用。
HYMERES2	水素混合に関する実験データ	同上
PreADES	IF 事故の教訓に基づく安全研究に関する知見	総合現象レベル及び個別現象レベルにおける優先順位を本プロジェクトに適切にフィードバック。
ARC-F	同上	同上

(2) 確率論的リスク評価に関連する評価技術の整備【分類③】

1) レベル 2PRA 手法の整備

重大事故等対処設備の信頼性評価モデルを格納容器イベントツリーに組み込むことにより、設備間の相互依存性等を考慮したレベル 1.5PRA モデルを整備する。また、安全性向上評価、新検査制度等で取り扱われる PRA の状況に鑑み、起因事象から格納容器機能喪失までを一貫して評価することを考慮した、格納容器イベントツリーの定量化を行うためのツールの機能改良を実施する。その後、本評価手法を拡張しレベル 2 地震 PRA 及び複数基立地を含む代表プラントの評価を行う。

2) レベル 3PRA 手法の整備

重大事故等対処設備を考慮したレベル 1 からレベル 3 までの PRA 結果から、濃度、線量等のリスクの指標を検討するとともに、リスク指標を評価するための手法を検討する。また、代表プラントのリスク評価を行い、防護措置による被ばく低減効果、複数基立地の影響等に係る技術的知見をとりまとめる。

(3) 環境影響評価手法の整備【分類③】

1) 放射性物質の環境拡散評価手法の整備

地形影響等を考慮した詳細評価手法を用いた大気拡散モデル、海洋拡散モデル及び陸上動態モデルを統合した評価手法を検討し、国内の代表プラントに対する環境影響解析に適用する。

2) 遮蔽解析に係る技術的知見の整備

点減衰核法、 S_N 法及びモンテカルロ法を用いて原子力発電所を対象とした解析を行い、原子炉建屋、放射性雲等からの直接線及びスカイシャイン線に対する建屋等による遮蔽評価の確認に資する技術的知見をとりまとめる。

実施行程表

		平成 29 年度	平成 30 年度	令和元年度	令和 2 年度	令和 3 年度	令和 4 年度	
(1)	1)	○MELCOR による実機規模解析技術の整備 国内 BWR 及び PWR プラントの事故進展解析		解析手法の妥当性確認				
		SFP の事故進展解析						▽論文投稿
(1)	2)	○格納容器破損モード（水素燃焼）評価手法の整備 水素混合解析手法の整備		水素燃焼解析手法の整備、水素発生に関する知見整備				
		CIGMA 試験（JAEA）						
		○格納容器破損モード（溶融炉心・コンクリート相互作用） 溶融物のキャビティ床面拡がり（ドライ） 別プロジェクトのコード開発で実施		溶融物のキャビティ床面拡がり（ウェット） 別プロジェクトのコード開発で実施		炉外デブリの冷却性		
		○格納容器破損モード（雰囲気圧力・温度による静的負荷） 格納容器等の静的・動的負荷に対する構造応答		評価手法の整備				
		○OECD/NEA/CSNI 主催の実験、解析及び調査プロジェクトからの情報収集 BIP3（事故時ヨウ素挙動） STEM2（放射性物質放出挙動に関する実験） THAI3（格納容器内水素挙動） HYMERS2（水素成層化等の解析評価） PreADES（IF 事故に関する研究） ARC-F（IF 事故に関する研究）						
		↓ 随時反映 ↓		↓ 随時反映 ↓		↓ 随時反映 ↓		
		新規規制基準に基づく重大事故等対処設備の有効性評価手法の妥当性確認等						
		▽論文投稿						
		○レベル 2PRA 手法の整備 一貫解析を考慮した格納容器イベントツリー定量化ツールの機能改良		外部事象の緩和策への影響評価 複数基立地の影響評価				
		(2)	1)	↓ 随時反映 ↓		↓ 随時反映 ↓		↓ 随時反映 ↓
安全性向上評価の届出に係る確認、新検査制度での検査指摘事項の重要度評価に係る確認等に資する技術的知見 将来的な安全性向上評価等のガイドの改定等の要否の検討を含めた安全性に係る評価の高度化				放射性物質放出挙動評価				
(2)	2)	○レベル 3PRA 手法の整備 リスク指標の検討		代表プラントにおけるリスク評価			▽論文投稿	
		リスク評価手法の整備		適切な時期にガイド等への反映の要否を検討				
(3)	1)	○放射性物質の環境拡散評価手法の整備 大気拡散モデル及び海洋拡散モデルの整備		陸上動態モデルの整備		モデル統合化及び解析		
						▽論文投稿		
(3)	2)	○遮蔽解析に係る技術的知見の整備 モンテカルロ法を用いた遮蔽解析手法及びその適用事例に関する調査		モンテカルロ法を用いた遮蔽解析に係る技術的知見の整備			▽論文投稿	
		↓ 随時反映 ↓		↓ 随時反映 ↓		↓ 随時反映 ↓		
		原子炉制御室等居住性に係る被ばく評価に関する新規規制基準への適合性評価						

【平成 29 年度の実施内容】

(1) 格納容器破損防止対策の評価手法の整備【分類③】

1) 総合現象解析手法の整備

MELCOR を用いた 1F 事故進展解析及び無機ヨウ素の詳細評価モデルを整備する。

2) 個別現象解析手法の整備

格納容器破損モードに係る水素混合解析手法の整備 (CFD)、鋼補強及び鉄筋コンクリートに関する構造応答解析モデルの検討。
国際共同プロジェクト (ヨウ素挙動 : BIP3、放射性物質放出挙動 : STEM2、水素挙動 : THAI3) に参加して、データを蓄積する。

(2) 確率論的リスク評価に関連する評価技術の整備【分類③】

1) 外部事象に係るレベル 2PRA 手法の整備

代表的な原子炉施設を対象にして重大事故等対処設備を考慮した格納容器イベントツリーを構築する。

2) レベル 3PRA 手法の整備

国内 3 ループ PWR プラントを対象に、重大事故等対処設備を考慮したソースタームによるレベル 3PRA を行い、濃度、線量等のリスク指標を検討する。

(3) 環境影響評価手法の整備【分類③】

1) 放射性物質の環境拡散評価手法の整備

公開モデルを用いた三次元大気拡散モデル及び海洋拡散モデルを作成する。

【平成 30 年度の実施内容】

(1) 格納容器破損防止対策の評価手法の整備【分類③】

1) 総合現象解析手法の整備

MELCOR を用いたプラントの事故進展解析及びソースターム評価モデルを整備する。

2) 個別現象解析手法の整備

水素混合解析手法の整備 (CFD)、格納容器等の静的・動的負荷に対する構造応答解析手法の整備を進める。

国際共同プロジェクト (BIP3、STEM2 及び THAI3) に参加して、データを蓄積する。

(2) 確率論的リスク評価に関連する評価技術の整備【分類③】

1) レベル 2PRA 手法の整備

前年度に引き続き、格納容器イベントツリーの見直しを行うとともに、格納容器イベントツリーの定量化ツールの機能改良を進める。

2) レベル 3PRA 手法の整備

国内プラントを対象とした重大事故等対処設備を考慮したソースタームによるレベル 3PRA を行い、濃度、線量等のリスク指標を検討する。また、リスク指標を評価するためのレベル 3PRA 手法を検討する。

(3) 環境影響評価手法の整備【分類③】

1) 放射性物質の環境拡散評価手法の整備

前年度に引き続き、公開モデルを用いた三次元大気拡散モデル及び海洋拡散モデルの作成を進める。

2) 遮蔽解析に係る技術的知見の整備

モンテカルロ法を用いた遮蔽解析手法及びその適用事例に関する調査結果を整理し、原子力発電所を対象にモンテカルロ法を用いた解析を行い、分散低減手法等の妥当性確認に係る技術的知見をとりまとめる。

【令和元年度の実施内容】

(1) 格納容器破損防止対策の評価手法の整備【分類③】

1) 総合現象解析手法の整備

MELCOR による国内 BWR 及び PWR プラントの事故進展解析及びソースターム評価を進めるとともに、SFP に関する事故進展に着目した解析評価手法の整備を進める。

2) 個別現象解析手法の整備

水素燃焼解析手法の整備を進め、水素発生に関する知見の整備を開始するとともに、格納容器等の静的・動的負荷に対する構造応答解析の整備を進める。

国際共同プロジェクト (STEM2、THAI3、HYMERES2、PreADES 及び ARC-F) に参加して、データを蓄積する。

(2) 確率論的リスク評価に関連する評価技術の整備【分類③】

1) レベル 2PRA 手法の整備

前年度に改良した格納容器イベントツリーの定量化機能の確認のために、一貫解析の基本設計に基づくモデルにより条件付き格納容器機能喪失確率等のパイロット計算を行うとともに、地震時のレベル 2PRA 手法についての検討に着手する。

2) レベル 3PRA 手法の整備

前年度に引き続き、リスク指標を評価するためのレベル 3PRA 手法を検討する。

(3) 環境影響評価手法の整備【分類③】

1) 放射性物質の環境拡散評価手法の整備

前年度に引き続き、公開モデルを用いた三次元大気拡散モデル及び海洋拡散モデルの作成を進めるとともに、陸上動態モデルの作成に着手する。

2) 遮蔽解析に係る技術的知見の整備

原子力発電所を対象にモンテカルロ法を用いた解析を行い、モンテカルロ法を用いた遮蔽解析手法を原子炉施設に適用するための妥当性確認手法を検討する。

【令和 2 年度の実施内容】

(1) 格納容器破損防止対策の評価手法の整備【分類③】

1) 総合現象解析手法の整備

前年度に引き続き、MELCOR による国内 BWR 及び PWR プラントの事故進展解析及びソースターム評価を進めるとともに、SFP に関する事故進展に着目した解析評価手法の整備を進める。

2) 個別現象解析手法の整備

水素燃焼解析手法の整備及び水素発生に関する知見の整備を進める。

国際共同プロジェクト (HYMERES2 及び ARC-F) に参加して、データを蓄積する。

	<p>(2) 確率論的リスク評価に関連する評価技術の整備【分類③】</p> <p>1) レベル 2PRA 手法の整備 前年度に引き続き、改良した格納容器イベントツリーの定量化機能を使って一貫解析のドラフト版評価モデルにより条件付き格納容器機能喪失確率等の計算及び地震時のレベル 2PRA 手法の整備を進めるとともに、複数基立地の影響評価についての検討に着手する。</p> <p>2) レベル 3PRA 手法の整備 前年度までに検討したリスク評価手法及び被ばく解析手法を用いて、代表プラントにおけるリスク評価を行い、防護措置による被ばく低減効果、複数基立地の影響等に係る技術的知見をとりまとめる。</p> <p>(3) 環境影響評価手法の整備【分類③】</p> <p>1) 放射性物質の環境拡散評価手法の整備 前年度に引き続き、公開モデルを用いた陸上動態モデルの作成を進める。</p> <p>2) 遮蔽解析に係る技術的知見の整備 軽水炉を対象に点減衰核法を用いた解析を行い、遮蔽解析手法を原子炉施設に適用するための妥当性確認手法をとりまとめる。</p> <p>【令和 3 年度の実施内容】</p> <p>(1) 格納容器破損防止対策の評価手法の整備【分類③】</p> <p>1) 総合現象解析手法の整備 前年度に引き続き、MELCOR による国内 BWR 及び PWR プラントの事故進展解析及びソースターム評価を進めるとともに、SFP に関する事故進展に着目した解析評価手法の整備を進める。</p> <p>2) 個別現象解析手法の整備 水素燃焼解析手法の整備を進め、水素発生に関する知見のまとめるとともに、別プロジェクトの成果に基づき炉外デブリの冷却性評価手法を整備する。 国際共同プロジェクト (ARC-F) に参加して、データを蓄積する。</p> <p>(2) 確率論的リスク評価に関連する評価技術の整備【分類③】</p> <p>1) レベル 2PRA 手法の整備 前年度に引き続き、地震時のレベル 2PRA 手法の整備を進めるとともに、複数基立地の影響評価についての検討を進める。また、格納容器イベントツリー及び放出カテゴリーに沿って、放射性物質放出頻度の計算に必要な放射性物質放出挙動評価を実施する。</p> <p>2) レベル 3PRA 手法の整備 前年度に引き続き、代表プラントにおけるリスク評価を行い、防護措置による被ばく低減効果、複数基立地の影響等に係る技術的知見をとりまとめる。</p> <p>(3) 環境影響評価手法の整備【分類③】</p> <p>1) 放射性物質の環境拡散評価手法の整備 大気拡散、海洋拡散及び陸上動態の各モデルを一体化し、統合的評価手法をとりまとめるとともに、1F 事故を対象に解析を行い、環境への放射性物質の放出量を推定する。</p> <p>2) 遮蔽解析に係る技術的知見の整備 前年度に引き続き、原子力発電所を対象に S_N 法を用いた解析を行い、遮蔽解析手法を原子炉施設に適用するための妥当性確認手法をとりまとめる。</p> <p>【令和 4 年度の実施内容】</p> <p>(1) 格納容器破損防止対策の評価手法の整備【分類③】</p> <p>1) 総合現象解析手法の整備 前年度に引き続き、MELCOR による国内 BWR 及び PWR プラントの事故進展解析及びソースターム評価を進めるとともに、SFP に関する事故進展に着目したソースターム評価を行う。</p> <p>2) 個別現象解析手法の整備 前年度に引き続き、水素燃焼解析手法の整備、炉外デブリの冷却性評価手法の整備を進める。</p> <p>(2) 確率論的リスク評価に関連する評価技術の整備【分類③】</p> <p>1) レベル 2PRA 手法の整備 放射性物質放出挙動評価の結果を取りまとめ、事故シーケンスごとの格納容器機能喪失頻度、放射性物質の放出頻度及び放出量を明らかにする。</p>
8. 実施体制	<p>【シビアアクシデント研究部門における実施者】</p> <p>○西村 健 技術研究調査官 ○市川竜平 技術研究調査官 堀田亮年 主任技術研究調査官 新添多聞 技術研究調査官 宇津野英明 技術研究調査官 鈴木ちひろ 技術研究調査官 小城 烈 技術研究調査官 星野光保 技術研究調査官 川口秀雄 技術研究調査官 薄井晴男 技術参与 林田芳久 技術参与</p>
9. 備考	<p>レベル 2PRA 及びレベル 3PRA に係る研究を進める上で、次のレベル 1PRA 研究プロジェクトと協力する。</p> <p>9. 規制への PRA の活用のための手法開発及び適用に関する研究 格納容器等の静的・動的負荷に対する構造応答に係る評価手法の整備を進めるうえで、次のプロジェクトからの成果を反映する。</p> <p>10. 軽水炉の重大事故の重要物理化学現象に係る実験 炉外デブリの冷却性評価手法の整備を進めるうえで、次のプロジェクトからの成果を引き継ぐ。</p> <p>11. 軽水炉の重大事故時における不確かさの大きな物理化学現象に係る解析コードの開発</p>

<p>レベル 2PRA から抽出される事故シーケンス及び総合現象解析手法の整備により得られた成果を次のプロジェクトに活用する</p> <p>13. 重大事故の事故シーケンスグループに係る事故進展解析</p> <p>屋内退避などの防護措置による被ばく低減解析手法については、次のプロジェクトからの成果を反映する。</p> <p>24. 緊急時対応レベル（EAL）に係るリスク情報活用等の研究のうち、(2) 被ばく解析手法の整備</p>
--

安全研究に係る事前評価結果（案）

別紙 2

令和 2 年 1 月 2 9 日
原子力規制委員会

1. 事前評価の進め方

1.1 評価の対象

長官官房技術基盤グループで実施している安全研究プロジェクトのうち、事前評価の対象となるプロジェクトは表 1 に示す 5 件である。これらは、実施方針に基づいて計画されたものである。

表 1 事前評価対象プロジェクト

	プロジェクト名	実施期間（年度）
1	震源近傍の地震ハザード評価手法の高度化に関する研究	R2 - R5 (2020 - 2023)
2	断層の活動性評価に関する研究	R2 - R5 (2020 - 2023)
3	重大事故時における重要物理化学現象の不確実さ低減に係る実験	R2 - R7 (2020 - 2025)
4	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)
5	使用済燃料等の輸送・貯蔵の分野における最新解析手法に係る評価手法の研究	R2 - R5 (2020 - 2023)

1.2 評価方法

基本方針及び評価実施要領に基づき実施した。評価に当たり、技術評価検討会の委員及び専門技術者（参考 2-1）の意見を聴取した。

2. 事前評価結果

各安全研究プロジェクトについては、実施方針と整合していることを確認した。また研究の実施に当たり、技術評価検討会の際の指摘や意見を踏まえた対応を行うことが適当であるとした。

当初研究計画案の適切性及び研究内容の技術的妥当性に対する評価結果の概要は表 2 のとおりである。各プロジェクトの事前評価結果は、別紙 2-1～2-5 のとおり。

表2 事前評価結果

評価項目	震源近傍の地震ハザード評価手法の高度化に関する研究	断層の活動性評価に関する研究	重大事故時における重要物理化学現象の不確実さ低減に係る実験	実機材料等を活用した経年劣化評価・検証に係る研究	使用済燃料等の輸送・貯蔵の分野における最新解析手法に係る評価手法の研究
研究計画案の適切性	適	適	適	適	適
研究内容の技術的妥当性	適	適	適	適	適

震源近傍の地震ハザード評価手法の高度化に関する研究 (R2~R5 (2020~2023))**事前評価結果**

1. 先行する研究プロジェクトの成果と課題（新規PJが後継PJである場合）

- 内陸地殻内地震等に係る地震動解析を行い、震源断層パラメータの不確かさ、既往の経験式との整合性等に関する知見を蓄積した。ただし、地震発生層以浅の震源断層モデルの設定や震源近傍の地震動評価への影響分析等の課題がある。
- 震源を特定せず策定する地震動における標準的な応答スペクトルを検討した。ただし、検討に用いた波形解析の精度向上、新たな地震動記録の収集・分析による影響確認等は課題として残されている。
- 断層モデル法を用いた確率論的地震ハザード評価を試行し、震源断層パラメータの不確かさの取扱いに関する知見を得た。ただし、活断層の地震活動のモデル化等における不確かさの検討の課題がある。

2. 研究プロジェクトの目的

- 基準地震動策定における、震源を特定して策定する地震動及び震源を特定せず策定する地震動、それぞれの評価手法の精度向上に係る検討を行う。また、活断層の地震活動のモデル化等の不確かさを考慮した確率論的地震ハザード評価を検討する。以上の検討をもとに、震源近傍の地震ハザード評価手法の高度化を行うことを目的とする。

3. 研究概要

- 新規基準では、基準地震動策定を行うに当たって、震源を特定して策定する地震動及び震源を特定せず策定する地震動に対して、各種の不確かさを考慮して適切に評価することを求めている。本研究では、内陸地殻内地震の地震発生層以浅の断層破壊を考慮した特性化震源モデル及び海溝型地震の設定手法を検討し、震源近傍の地震動評価への影響分析を行う。
- 震源を特定せず策定する地震動に関して観測記録の追加解析や波形解析精度等に係る知見の蓄積に基づく分析・検討を行い、地震動評価の精度向上を図る。
- 確率論的地震ハザード評価の高度化の観点から、国際的な研究動向を踏まえ、活断層による地震の規模と発生頻度及び地震動不確かさの取扱方法を検討する。また、断層変位評価手法に係る知見を蓄積する。

4. 地震・津波技術評価検討会における主な意見及びその対応

- 震源近傍の地震動評価に関して、国内に限らず、震源近傍強震動の研究動向を明らかにしながら、適切な方法で研究を進めていくべきとの意見があった。本研究では、国内外の学会大会等へ参加し情報収集を行い、海外の強震動記録の活用、又は研究事例を参照しつつ、震源近傍強震動の研究動向を踏まえて研究を進める

こととする。

- 震源を特定せず策定する地震動の検討に関して、はぎ取り解析の高度化は重要であり、モデルのばらつきによる影響等を考慮した手法の高度化を進めるべきとの意見があった。本研究では、地下構造モデルの設定や解析方法等に起因するはぎ取り解析結果の違い等を精査し、ばらつきに留意した分析等も含めて研究を進めることとする。
- 確率論的地震ハザード評価の高度化に関して、単一評価点における地震動の不確かさの検討は重要であり、合理的な方法で進めるべきとの意見があった。本研究では、国内の強震動データを用いて、距離減衰式における震源・経路・サイト特性に関する各種の不確かさの内、認識論的不確かさと偶然的な不確かさを分離することにより、単一評価点における地震動の不確かさを検討することとする。
- 研究計画では、新たな知見を常に取り入れ、必要であれば適切な検討が進められるよう計画を大幅に変更するべきとの意見があった。本研究では、常に、研究動向を踏まえて、最新知見と課題を整理しながら、次年度の研究計画に反映していくこととする。

5. 事前評価結果

(1) 研究計画（案）の適切性： 適

- 研究計画（案）は実施方針と整合している。地震に係る震源断層パラメータ、その不確かさの取扱方法等における課題、特に熊本地震を踏まえた震源極近傍の地震動の評価手法及び確率論的地震ハザード評価の高度化に関する課題に対応するため、地震動評価手法に関する知見を蓄積するものであり、必要性の観点から適切である。成果の活用先について、「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の運用等に活用することが考えられ、適切である。

(2) 研究内容の技術的妥当性： 適

- 技術評価検討会において確認されたように、国内外の最新の研究、知見を踏まえたものとなっており、調査・研究方法は妥当と考えられる。

(3) 研究計画（案）への反映

- 技術評価検討会において、研究計画（案）の見直しが必要となるコメントは無かったことから、研究計画（案）に従い研究を進める。研究の遂行に当たっては、新たな知見や研究成果等を踏まえ、必要に応じて研究計画を適宜見直すことを努める。

断層の活動性評価に関する研究 (R2~R5 (2020~2023))事前評価結果

1. 先行する研究プロジェクトの成果と課題（新規PJが後継PJである場合）
 - 断層の活動性評価手法の整備のために、深部ボーリングにより採取した断層破碎物質の分析結果から、断層の定量的な年代評価に関する知見、断層面と鉱物脈等との接触・切断関係の判断材料及び鉱物脈の生成深度評価に関する知見を取得した。ただし、より確度の高い評価を行うためには複数の手法による総合的な評価が求められるが、具体例に乏しいという課題がある。
 - 新規基準で示されている断層の活動性評価の対象年代を踏まえ、東北日本の過去 40 万年間の火山灰年代に関する知見を蓄積したが、審査への知見の活用を踏まえ、同様の知見を西南日本にも拡充することが課題である。
 - 確率論的地震ハザード評価の実施には地震履歴（最新活動時期、活動間隔）に関するデータが必要であるが、海域の活断層等ではデータが得られにくい。このため、古環境イベント（微化石の産出変動パターン、離水海岸地形等）を利用した海域・沿岸域の地震履歴調査手法に関する知見を蓄積した。ただし、古環境イベントの年代評価に関する精度向上が課題として残されている。
2. 研究プロジェクトの目的
 - 断層の活動性に関する知見は、地震動及び津波の評価の最も基礎となる情報であり、変位・変形の成因に関する知見は、重要施設の立地評価上重要な情報となる。そこで、断層の活動性評価に基づく活断層の認定手法（断層破碎物質を用いた手法、火山灰年代を用いた手法）及び変位・変形の成因を評価する手法（ノンテクトニック断層の評価手法）を蓄積する。
 - 確率論的地震ハザード評価の実施には地震履歴に関するデータが必要であるが、海域の活断層等ではデータが得られ難い。そこで、古環境イベント（微化石の産出変動パターン、離水海岸地形等）の年代評価に関する精度を向上させるため、その技術的根拠となる分析データを取得し、評価を行う過程で得られた具体的な留意点及び知見を蓄積する。
3. 研究概要
 - 断層破碎物質から断層の活動性を判断する手法を用いて、より確度の高い断層活動性評価を行うため、粘土鉱物、炭酸塩鉱物等の結晶構造解析等を用いた総合的な評価手法を検討するとともに、地すべり等（ノンテクトニック断層）と地震を生じさせる断層とを識別するため、各種の手法の検討を新たに開始し、その適用性を確認する。
 - 西日本を対象に中期更新世以降の火山灰年代評価手法を検討する。これらの手法を適用することにより具体的な知見を拡充し、審査または安全性向上評価におけ

る留意点を明確にする。

- 確率論的地震ハザード評価に資する、海域の活断層等による地震の履歴に関するデータ取得のため、古環境イベント（微化石の産出変動パターン、離水海岸地形等）の年代評価に関し、全有機炭素、宇宙線生成核種等による年代測定手法を用いて、その精度を向上させる。

4. 地震・津波技術評価検討会における主な意見及びその対応

- 活断層の年代評価では、科学的根拠に基づいた誤差の範囲や、手法の組み合わせ等を検討し客観的評価ができるようにすべきであるとのコメントがあった。対象とする活断層を構成する地質及び地下の環境条件の多様性を踏まえ、採取した試料の最新活動面の認定、試料（測定鉱物）の性状、年代測定手法に起因した結果の誤差範囲等を考慮し、活動性評価を客観的に実施するための一定の考え方をまとめることとする。
- 海底のイベント堆積物の研究については、不確かさを洗い出した上で進めていくことが重要であるとのコメントがあった。イベント堆積物には様々な成因があることから、年代評価のみならず堆積物の性状等の評価も実施し、不確かさを考慮することにより、震源断層の評価にとって有用な情報として整理することとする。
- 断層の定量的な活動性評価に関しては、作業仮説の見直しやノイズの影響の程度も含め、基盤的研究としてしっかりした成果を出して欲しいとのコメントがあった。先行する研究プロジェクトでは手法間の年代測定結果の違いと適用性を把握した。これらの成果は作業仮説の妥当性やノイズの影響を含め、NRA 技術報告としてまとめる予定である。本プロジェクトでは他の定性的な評価と合わせて、手法の限界を考慮した年代評価を実施することとする。
- 評価を実施するうえでの詳細な技術的情報を報告書の中に記載していただくと、今後の規制活動に向けた情報として役立つとのコメントがあった。先行する研究プロジェクトにおいて断層破砕物質を用いて直接活動性を評価する研究のほか、本プロジェクトにおける他の新規テーマの実施内容についても、実際の事例等が少ない中で研究事例を蓄積するものであり、審査等に活用できるよう、知見を蓄積していくこととする。
- 確率論的評価は、個々の要素技術だけでは不完全であり、それを総合的に実施する必要があるとのコメントがあった。信頼性を向上させる事が重要と考え、離水海岸地形の形成年代評価手法、海域の古地震履歴評価手法等に対象を絞り込んでいるが、地震動評価の海外のトレンド等を踏まえ、総合的に評価して規制に反映できるよう知見を蓄積していくこととする。

5. 事前評価結果

(1) 研究計画（案）の適切性： 適

- 研究計画（案）は実施方針と整合している。断層破砕物質を用いた断層の活動性評価や非地震性の変位・変形等と地震を生じさせる断層との識別に関する具体例、

西南日本を中心とした過去 40 万年間の火山灰年代評価の高精度化及び海域・沿岸域における地震の履歴（最新活動時期、活動間隔）に関する地質学的な基礎データの拡充に対応するため、調査・評価手法に関する知見を蓄積するものであり、新規基準に則った技術情報の必要性の観点から適切である。成果の活用先について、「敷地内及び敷地周辺の地質・地質構造調査に係る審査ガイド」の運用等に活用することが考えられ、適切である。

(2) 研究内容の技術的妥当性： 適

- 技術評価検討会において確認されたように、国内外の最新の研究、知見を踏まえたものとなっており、調査・研究方法は妥当と考えられる。

(3) 研究計画（案）への反映

- 地震・津波技術評価検討会において研究計画の見直しが必要となるコメントは無かったことから、基本的に研究計画（案）に従い研究を進めるが、断層の定量的な活動性評価に関しては、技術評価検討会での指摘を踏まえ、定性的評価と合わせて手法の限界を考慮した年代評価を実施する。

重大事故時における重要物理化学現象の不確実さ低減に係る実験
(R2～R7 (2020～2025)) 事前評価結果

1. 先行する研究プロジェクトの成果と課題（新規PJが後継PJである場合）
 - 先行プロジェクトでは、重大事故時の格納容器機能維持に係る物理化学現象のうち、解析上の不確実さが大きな現象について実験を進め、不確実さに大きく影響する要因を明らかにした。しかし、解析コードの改良により不確実さを低減させるためには、現象のメカニズム、現象が複合する場合の影響などについて明らかにすることが課題である。
2. 研究プロジェクトの目的
 - 重大事故の発生防止、拡大防止及び環境影響緩和の各段階において生じる重大事故時の物理化学現象のうち、解析上の不確実さを低減する必要がある個別現象について、国内外の施設を用いた実験を行い、詳細な実験データを取得することを目的とする。
3. 研究概要
 - 解析上の不確実さが大きな現象である放射性物質の除去あるいは移行挙動、格納容器熱流動挙動及びデブリ冷却挙動について、解析コードの改良に必要となる実験データを取得する。
 - 放射性物質の除去効果については、先行プロジェクト成果であるプール水の減圧沸騰や水温がエアロゾル粒子の捕獲効果に及ぼす影響のメカニズムを検討するための実験を、また、放射性物質の移行挙動については主に再蒸発に関する実験を行う。格納容器熱流動挙動については、事故時に想定される 300℃以上の過熱蒸気による影響及びデブリ冷却挙動については、デブリの構造物への熱伝達に関する実験データを取得する。これらのデータにより、解析モデルの高度化を検討する。
4. シビアアクシデント技術評価検討会における主な意見及びその対応
 - 放射性物質の除去効果に関する研究に関し、蒸気発生器伝熱管破損事故（SGTR）のスクラビング効果もスコープに入れるべきとの意見があった。本研究で予定している気泡内エアロゾル粒子挙動に対する解析モデルの改良を行うことにより、SGTRにおけるスクラビング効果にも応用できると考えられる。
 - 現状の実施計画は最新の知見を踏まえたものであるが、今後も常に最新知見を確認していくべきであるとの意見があった。国内外の研究等に関する情報収集を常に行いながら研究を進めることとする。
 - 重大事故時の現象に関する実験は不確実さが大きく当初想定した成果が出ない場合があり得るが、成功例だけを報告することがないようにすべきとの意見があ

った。想定外の結果となった場合においても、それらの結果をまとめ、報告することとする。

5. 事前評価結果

(1) 研究計画(案)の適切性： 適

- 研究計画(案)は実施方針と整合している。成果も適時公表する予定としており、最終目標に向けた適切な実施計画である。また、研究で得られる知見は、重大事故時における解析上の不確実さの低減に寄与するものである。

(2) 研究内容の技術的妥当性： 適

- 技術評価検討会において確認されたように、研究内容は技術的におおむね妥当である。研究内容は、国内外の先行研究等で得られた最新知見を踏まえて計画しており、技術的に妥当であると判断する。

(3) 研究計画(案)への反映

- 研究の実施にあたっては技術評価検討会で出された意見を参考に、今後も常に国際協力を積極的に活用するなど、国内外の研究動向をキャッチアップし、研究計画(案)に適切に反映するように努める。

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))事前評価結果

1. 先行する研究プロジェクトの成果と課題（新規PJが後継PJである場合）
 - 原子炉圧力容器を対象として、経年劣化模擬材料を用いた破壊試験により、経年劣化した材料の強度や変形挙動に関する知見及び設計基準事故を模擬した試験による破壊に関する知見を取得した。また、監視試験データの解析等により中性子照射ぜい化に影響を及ぼす化学成分の影響に関する知見を取得した。
 - 電気・計装設備（原子炉格納容器電線貫通部等）について、経年劣化模擬材料を用いて重大事故環境条件下における絶縁性能等に関する知見を取得した。
 - 課題は上記成果の実機環境における経年劣化挙動に対する保守性等の確認である。

2. 研究プロジェクトの目的
 - 長期間運転した原子力発電所の経年劣化を模擬的に付与するために行っている加速劣化手法の技術的妥当性の確認を廃止措置中の原子力発電所等から取り出した実機材料等を活用して実施し、代表的な機器・構造物である電気・計装設備、原子炉圧力容器、ポンプ等のステンレス鋼製機器及び炉内構造物の健全性評価に関する知見を拡充する。

3. 研究概要
 - 電気・計装設備の事故時環境下における絶縁低下並びに原子炉圧力容器の中性子照射、ステンレス構成機器の熱時効及び炉内構造物の中性子照射による靱性低下を対象として、国内で廃止措置中の原子力発電所等から長期間使用した実機材料や原子炉圧力容器の監視試験片を採取し、当該材料等を供して試験・分析を行い、長期間運転した原子力発電所の経年劣化を模擬的に付与するために行っている加速劣化手法の技術的妥当性の確認等を行う。

4. 材料技術評価検討会における主な意見及びその対応
 - 廃止措置のみならず、取替工事等により得られた実機材料を活用できるのではないかとのコメントがあった。関連する情報を収集し幅広く試験対象の入手に努め、適宜研究計画に反映する。
 - 加速試験等の既往の知見を実機材料の調査に基づき検証する試みは、極めて重要な知見をもたらすため、この機会をしっかりとした成果につなげるとともに、適切な形で情報発信するようにとの意見があった。研究成果の質を高めるためにも、学会等の専門家の議論の場に適切な時期に情報を発信することとする。
 - 原子力発電所のケーブル等の電気・計装設備の実機材料と一般電気設備用材料との比較を実施することにより原子力発電所特有の材料特性を明らかにできるこ

と、また、加速試験等のパラメータ設定についても考え方を整理しておくことは学術的に重要であるとの意見があった。各種電気物性を調査し、適切に劣化評価を実施し、また、加速劣化パラメータについても、考え方を整理していくこととする。

- 実機材料という意味での制約条件が多々あることが想定されるので、できるだけ関係者と密に議論を深めて行程を作っていただきたいとのコメントがあった。関係者と協議を行い、適切な試験行程を策定する。

5. 事前評価結果

(1) 研究計画（案）の適切性： 適

- 研究計画（案）は実施方針と整合した内容となっており、論文公表も含め、最終目標を明確に設定している。また、研究を実施するに当たっては、安全対策、研究成果の取り扱い等の課題、懸案事項について事前に検討していることから研究計画（案）は適切である。

(2) 研究内容の技術的妥当性： 適

- 技術評価検討会において確認されたように、研究内容はおおむね妥当である。なお、実施に当たっては技術評価検討会で出された意見を参考に、国内外で同様の研究を実施している機関との協力や情報交換に努め、常に技術的妥当性を確認しながら進める。

(3) 研究計画（案）への反映

- 本評価を受けて研究計画（案）を修正する必要はないが、廃止措置中の原子力発電所からの材料取り出し時期や試験に使用できる材料の範囲については廃止措置行程等に左右されることから、必要に応じて臨機応変に研究計画を修正する。また、国内外との協力及び情報交換を行って技術的妥当性を確認しつつ研究を進める。

使用済燃料等の輸送・貯蔵の分野における最新解析手法に係る評価手法の研究
(R2～R5 (2020～2023)) 事前評価結果

1. 先行する研究プロジェクトの成果と課題（新規PJが後継PJである場合）
 - 先行する研究プロジェクトはなし。
2. 研究プロジェクトの目的
 - 事業者が最新知見に基づき輸送・貯蔵の分野における遮蔽解析をモンテカルロコード及び専用の連続エネルギー断面積ライブラリを用いて実施した際、許認可審査において、評価結果に対する妥当性確認を適切に実施するため、当該コードのV&V手法及び評価結果の妥当性確認手法の知見を拡充する。
3. 研究概要
 - 解析コード検証（V&V）に係る知見を拡充するためにV&V実施手順案を策定し、国産のモンテカルロコードを対象として実際にV&V作業（ベンチマーク実験の実施も想定。）を試行した後、一連の作業より得られた知見を踏まえてV&V実施手順を確立する。
 - 既存研究結果や上記V&V作業でのベンチマーク解析作業に対する考察等を基に、評価結果の妥当性確認手法に係る知見を整備する。
 - 最終的なアウトプットとして、上記2件の成果を基に許認可申請に遮蔽解析としてモンテカルロコードが用いられた際に規制側が確認すべき項目及びその内容を明確にし、文書化する。
4. 核燃料サイクル技術評価検討会における主な意見及びその対応
 - 解析コードの妥当性を確認するためにはベンチマーク実験等が不可欠になるため、既存の実験結果の参照、国内では困難な実験の海外での実施や代替実験の立案、また、解析の確からしさ確認等の具体的な検討をしっかりと行ってほしいとの意見があった。既存の実験結果を可能な範囲で活用しつつ、不足しているデータについては実験実施も含めて広く検討する。また、解析の確からしさの確認は重要な検討項目と位置付ける。これらにより価値の高い研究成果としてまとめられるよう研究を進めることとする。
 - 解析コードのV&V手法だけでなく、評価作業の品質保証を含めた評価結果の妥当性確認手法に係る知見拡充も重要であり、後者の観点の比重を現状より大きくすることで研究効率が上がるのではないかとの意見があった。先行研究例の乏しい解析コードのV&V手法に係る知見拡充を中心とした研究計画となっているが、評価結果の妥当性確認手法（評価作業の品質保証を含む部分）に係る知見拡充の重要性を念頭に置いて研究を進めることとする。
 - 解析コードの評価結果に伴う不確実さの分析が重要と考えられ、専門的知見を適

切に集約し、不確実さの情報を意思決定で考慮するための考え方の明確化に留意すべきであるとの意見があった。評価結果に伴う不確実さの分析及び明確化が重要であることを承知しており、国内の専門家の知見を適切に集約するとともに、より価値の高い研究成果としてまとめられるよう研究を進めることとする。

5. 事前評価結果

(1) 研究計画（案）の適切性： 適

- 研究計画（案）は実施方針と整合している。また、先行調査の成果を踏まえた研究計画（案）となっており、論文公表も含め最終目標も明確に設定していることから適切である。さらに、成果の活用先についても、審査での活用を明確に示した研究計画（案）となっている。

(2) 研究内容の技術的妥当性： 適

- 技術評価検討会において確認されたように、研究内容は技術的におおむね妥当である。なお、実施に当たっては技術評価検討会で出された意見を参考に、国内外の最新の知見を継続的に収集するとともに外部専門家の意見を聴取しつつ、技術的妥当性を高めることに努める。

(3) 研究計画（案）への反映

- 本評価を受けて研究計画（案）を修正する必要はないが、解析コードの評価結果の妥当性確認における評価作業の品質保証や不確実さの分析等は重要な項目であるとの指摘に留意しつつ、研究を進める。

技術評価検討会名簿(地震・津波技術評価検討会)

(五十音順)

委員

岩田 知孝	京都大学防災研究所教授
酒井 直樹	国立研究開発法人防災科学技術研究所先端的研究施設利活用センター戦略推進室長
古屋 治	東京電機大学工学部理工学科機械工学系教授

専門技術者

梅木 芳人	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研究コーディネーター（自然外部事象分野）
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上席研究員
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企画運営チーム研究副参事

技術評価検討会名簿(シビアアクシデント技術評価検討会)

(五十音順)

委員

- | | |
|-------|-----------------------------|
| 糸井 達哉 | 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻准教授 |
| 牟田 仁 | 東京都市大学大学院総合理工学研究科共同原子力専攻准教授 |
| 守田 幸路 | 九州大学大学院工学研究院エネルギー量子工学部門教授 |

専門技術者

- | | |
|-------|--|
| 倉本 孝弘 | 株式会社原子力エンジニアリング解析サービス本部リスク評価グループ担当部長 |
| 高橋 浩道 | 三菱重工業株式会社原子力事業部炉心・安全技術部主幹プロジェクト統括 |
| 田原 美香 | 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安全システム技術第二担当主幹 |
| 宮田 浩一 | 原子力エネルギー協議会部長 |

技術評価検討会名簿(材料技術評価検討会)

(五十音順)

委員

笠原 直人	東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻教授
兼松 学	東京理科大学理工学部建築学科教授
松本 聡	芝浦工業大学大学院理工学研究科電気電子情報工学専攻教授
望月 正人	大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻教授

専門技術者

新井 拓	一般財団法人電力中央研究所材料科学研究所副研究参事
岡本 達希	関東学院大学工学総合研究所研究員
坂詰 義幸	清水建設株式会社原子力・火力本部建設エンジニアリング部

技術評価検討会名簿(核燃料サイクル技術評価検討会)

(五十音順)

委員

榎田 洋一 名古屋大学大学院工学研究科マテリアル理工学専攻教授

木倉 宏成 東京工業大学先導原子力研究所准教授

村松 健 東京都市大学工学部原子力安全工学科客員教授

専門技術者

玉置 廣紀 三菱重工業株式会社原子力事業部機器設計部主幹プロジェクト統括

研究計画 (案)

1. プロジェクト	1. 震源近傍の地震ハザード評価手法の高度化に関する研究	担当部署	技術基盤グループ 地震・津波研究部門
2. カテゴリー・研究分野	【横断的原子力安全】 A) 外部事象 (地震、津波、火山等)	担当責任者	飯島 亨 首席技術研究調査官
		主担当者	呉 長江 主任技術研究調査官
3. 背景	<p>「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」では、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」に基づき策定する基準地震動に対し、内陸地殻内地震、プレート間地震及び海洋プレート内地震について、「敷地における地震動評価に大きな影響を与えると考えられる支配的なパラメータについて分析した上で、必要に応じて不確かさを組み合わせるなどの適切な手法を用いて考慮すること」とされている。昨年度までの「地震ハザード評価の信頼性向上に関する研究」プロジェクトでは、これまでに近年国内で起きた内陸地殻内地震 (以下「内陸型地震」という。) 並びに海外で起きたプレート間地震及び海洋プレート内地震 (以下「海溝型地震」という。) に係る地震動解析を行い、震源断層パラメータの不確かさや震源断層パラメータの既往の経験式との整合性等に関する知見を蓄積してきた。今後、平成 28 年熊本地震を踏まえて、震源近傍の地震動評価の高度化を図るため、断層浅部破壊を考慮した特性化震源モデルの設定手法を検討するとともに、国内外の地震に対して、断層モデルを用いた手法 (以下「断層モデル法」という。) に基づき検証解析等を行い、震源近傍の地震動評価に係る知見を拡充することが重要である。また、上記の規則の解釈で述べられている震源断層パラメータの不確かさの組み合わせを合理的に考慮するため、物理的モデル等に基づいた震源断層パラメータ同士の相関性に関する知見を蓄積することが重要である。</p> <p>上記の規則の解釈では、さらに、「震源と活断層を関連づけることが困難な過去の内陸地殻内の地震について得られた震源近傍における観測記録を収集し、これらを基に、各種の不確かさを考慮して敷地の地盤物性に応じた応答スペクトル」を、「震源を特定せず策定する地震動」として設定することを求めている。原子力規制委員会は、外部専門家を交えた、「震源を特定せず策定する地震動検討チーム」を設け、当該検討チームとして震源近傍の多数の地震動記録について統計的な処理を行い、「標準応答スペクトル」を策定し報告書にまとめた (令和元年 8 月)。本報告書では、将来的な課題として統計処理を用いた解放基盤面上の波形解析の精度向上、新たな地震動記録の収集・分析による標準応答スペクトルへの影響確認を挙げており、これらの課題について、継続的に検討することが重要である。</p> <p>平成 25 年に改正された「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」により、事業者に対する「安全性の向上のための評価」 (以下「安全性向上評価」という。) の実施が規定された。安全性向上評価においては、地震に対する確率論的リスク評価 (以下「地震 PRA」という。) 手法の活用が見込まれる。地震 PRA を実施するに当たっては、地震 PRA 手法の構成要素である確率論的地震ハザード評価手法について、地震の規模や発生頻度とその不確かさを適切に評価し同評価手法の信頼性向上を図り、将来的な安全性向上評価等のガイドの改定等による安全性に係る評価の高度化に資することが重要である。本安全研究では、これまでに断層モデル法を用いた確率論的地震ハザード評価を試行し、震源断層パラメータの不確かさの取り扱いに関する知見を得た。今後は、震源近傍の地震ハザード評価に着目し、海外の最新動向を踏まえて複数セグメントを有する活断層による地震の規模と発生頻度のモデル化等を検討するとともに、単一地点での地震動の不確かさの評価手法を調査し、確率論的地震ハザード評価の精度を向上させることが重要である。</p> <p>地震ハザード評価の観点からは、地震動に加え、地震による地盤の変位 (ずれ) の評価も重要である。規制基準では、耐震重要施設を変位が生ずるおそれがない地盤に設けることを要求している。また、同基準では、地盤に変位を与える要因として、「震源として考慮する活断層のほか、地震活動に伴って永久変位が生じる断層に加え、支持地盤まで変位及び変形が及ぶ地すべり面を含む」としており、これまで、国内外の断層変位データを収集・分析し、断層変位に係る知見を得てきた。震源が敷地に近い場合に地震活動に伴う地盤の永久変位の有無を適切に評価する必要がある。しかしながら、断層変位のデータは限られているため、引き続き、知見を蓄積していくことが重要である。</p>		
4. 目的	<p>本プロジェクトでは、関連評価ガイドの策定及び安全性に係る評価の高度化に資するため、また、将来の規制活動への反映に向けた科学的・技術的知見を蓄積するため以下の地震ハザード評価に係る研究を行う。</p> <p>(1) 断層モデル法の精度向上に係る検討 熊本地震の知見を踏まえ、断層浅部破壊を考慮した特性化震源モデルの設定手法を検討するとともに、検証解析やパラメータ分析を行い、特性化震源モデルの不確かさに係る知見を蓄積することにより、断層モデル法の精度向上を図る。</p> <p>(2) 震源を特定せず策定する地震動の検討 震源を特定せず策定する地震動に関して新たな観測記録による追加解析や知見の蓄積に基づく分析・検討を行い、地震動評価の精度向上を図る。</p> <p>(3) 確率論的地震ハザード評価に係る不確かさの検討 活断層による地震の規模と発生頻度及び地震動不確かさの取扱い方法を検討し、確率論的地震ハザード評価の高度化を図る。</p> <p>(4) 断層変位評価に係る知見の蓄積 断層変位として特に識別可能な副断層に着目し、室内模擬実験及び数値解析を実施するとともに、断層変位の観測データの分析や断層変位評価のためのモデル化を行うことにより、断層変位評価における不確かさの低減を図る。</p>		
5. 知見の活用先	<p>本プロジェクトの項目 (1) 断層モデル法の精度向上に係る検討、項目 (2) 震源を特定せず策定する地震動に関する検討及び項目 (3) 確率論的地震ハザード評価に係る不確かさの検討で得られた成果は、「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」に関連する NRA 技術報告の作成及び安全性に係る評価の高度化に資するとともに、審査への活用を検討する。項目 (4) 断層変位評価に係る知見の蓄積は、研究の進展に応じて技術的知見をまとめて公表していく。</p>		

本プロジェクトの研究は、「原子力規制委員会における安全研究の基本方針」（令和元年5月29日原子力規制委員会決定）における安全研究の目的のうち以下の分類に基づき実施する。

- ① 規制基準等の整備に活用するための知見の収集・整備（以下「分類①」という。）
- ④ 技術基盤の構築・維持（以下「分類④」という。）

(1) 断層モデル法の精度向上に係る検討【分類①】

a. 内陸型地震の特性化震源モデルに係る知見の蓄積

内陸型地震に関して、これまでは、熊本地震を含め国内地震を対象に地震動解析を行い、震源断層パラメータの既往の経験式との整合性や震源断層パラメータの不確かさ等に関する知見を蓄積してきた（図1①）。今後は、熊本地震の知見を踏まえて、地震発生層以浅の断層破壊を考慮した特性化震源モデルの設定手法を検討するとともに、地震動検証解析等により特性化震源モデルの不確かさに係る知見を蓄積することが重要である。本研究では、内陸型地震を対象として断層モデル法の精度向上を図ることを目的に関係機関と協力して以下を行う。

- (a) 令和元年度までの国内の内陸型地震に関する分析結果、特に平成28年熊本地震の知見を踏まえて、国内外の内陸型地震における地震動の検証解析を行い、地震発生層以浅の断層破壊を考慮した特性化震源モデルの構築手法について検討する（図1②）。（令和2年度～令和3年度）
- (b) 国内外の内陸型地震における地震動の検証解析や断層パラメータ相関性の分析を行い、特性化震源モデルにおける経験式の検証及びそれらの不確かさの取り扱いの精緻化について検討する。（令和2年度～令和5年度）

b. 海溝型地震の特性化震源モデルに係る知見の蓄積

海溝型地震に関しては、「国内のみならず世界で起きた大規模な地震を踏まえ、地震の発生機構及びテクトニクス的背景の類似性を考慮した上で震源領域の設定を行うこと」が規制基準で規定されており、世界で起きた海溝型地震に関する研究で得られた知見を反映することが必要である。令和元年度までは、海溝型地震を対象に調査解析を行い、震源断層パラメータの既往の経験式の妥当性に関する知見を蓄積した（図1③）。今後、断層モデル法による地震動評価の検討事例を増やしつつ、海洋プレートの沈み込み傾斜角や沈み込み速度等の物理的特性の観点から、地域ごとの震源特性と地震動特性を明確にすることが重要である。本研究では、海溝型地震を対象とした地震動評価の精度向上を目的に、関係機関と協力して以下を行う。

- (a) 国内外で発生した海溝型地震を対象に、震源及び地震動特性に関する調査、解析及び分析を行い、地域性を考慮した特性化震源モデルの設定について検討する。（令和2年度～令和4年度）
- (b) プレート間巨大地震に対して、強震動と津波の統一モデルの設定手法を調査し、検証解析を行った上で、強震動及び津波の予測解析を行う。（令和3年度～令和5年度）

6. 安全研究概要
(始期：R2年度)
(終期：R5年度)

(2) 震源を特定せず策定する地震動の検討【分類①】

「震源を特定せず策定する地震動」のうち「地表地震断層が出現しない可能性がある地震」（Mw6.5程度未満の地震）については、震源の位置も規模もわからない地震として地震学的検討から全国共通に考慮すべき地震と位置づけられているが、事業者による中長期課題の解決に時間を要していたため、原子力規制委員会として「震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム」を設け、過去の内陸地殻内地震（Mw5.0～6.5程度）の地震動観測記録を収集・分析し、震源近傍での地震基盤相当面における多数の地震動記録について統計的な処理を行い「標準応答スペクトル」を策定した（図2）。本研究では、この標準応答スペクトルについて、検討チームで対象とした期間よりも後に起きた地震の地震動記録の収集・分析を定期的に行い、標準応答スペクトルの妥当性を確認するとともに、硬質地盤面上の地震動（露頭波）算出（はぎ取り解析）、地震動の補正処理等に関する最新知見を反映した評価手法の高度化について検討し、震源を特定せず策定する地震動の精度向上を図る。

(3) 確率論的地震ハザード評価に係る不確かさの検討【分類①】

確率論的地震ハザード評価手法（以下「PSHA」という。）について、令和元年度までは、複数セグメントを有する活断層の連動性について、認識論的不確かさの観点から解析を行い、地震ハザードを適切に評価するための破壊シナリオ等の取り扱いに関する知見を得た（図3①）。また、断層モデル法を用いたPSHAを試行し、震源断層パラメータの不確かさの取り扱いに関する知見を得てきた。本研究では、より合理的な活断層の地震活動モデルの検討や観測データに基づいた地震動の不確かさ等を考慮したPSHA評価を行うことにより、震源近傍のPSHAの精度を向上させることを目的とし、下記の内容を検討する。

a. 地震規模等の不確かさを考慮した確率論的地震ハザード評価手法の検討

国内の確率論的地震ハザード評価、例えば、地震調査研究推進本部の確率論的地震動予測地図における活断層の地震活動モデルは、海外の事例に比べて地震規模及び発生頻度を単純化したモデル（所謂「固有地震モデル」）を採用する傾向が見られる。本研究は、PSHAの国際的動向を踏まえつつ、地震規模及び発生頻度の不確かさを考慮したPSHAの手法を検討する（図3②）。

- (a) 日本の活断層を対象に海外の手法等を適用し、固有地震の地震規模及び発生頻度の不確かさについて検討する。
- (b) 地震規模等の不確かさを考慮したPSHAを実施し、地震調査研究推進本部の結果等と比較してハザードに与える影響度を確認するとともに、日本の活断層で適用する際の条件及び課題を整理する。

b. 確率論的地震ハザード評価における地震動の不確かさの検討

上記の地震動活動モデルにおける不確かさの考慮によるPSHA結果への影響と同様に、地盤構造の異なる複数の観測点で得られた地震動の不確かさは大きく、PSHAへより大きな影響を与える、との既往研究成果が報告されている。本研究は、日本の原子力施設の立地環境を踏まえて、距離減衰式（以下「GMPE」という。）について、特に内陸型地震を対象に、各種要因による地震動不確かさの分類や分離について検討する。これに基づき、単一評価地点における地震動の不確かさ等を考慮したPSHAを行うため、複数地点の地震動記録を既往の距離減衰式等と比較して地点ごとの地震動の不確かさを把握し、原子力施設のPSHA精度向上について検討する。

(4) 断層変位評価に係る知見の蓄積【分類④】

主断層による地震活動に伴って地盤に生じる副断層に着目し、室内模擬実験及び数値解析を実施するとともに、断層変位の観測データの分析やモデル化を行うことにより、断層変位評価における不確かさの低減を図ることを目的とする(図4)。令和元年度までは、熊本地震など断層変位に関する観測記録が多い地震を中心にデータ収集を行い、断層変位評価のための基礎的な数値解析手法及び確率論的な断層変位評価式に係る知見を得た。本研究では、断層変位評価における不確かさを低減するため、関係機関と協力して国内外の横ずれ断層及び逆断層地震を対象に以下を行い、断層変位評価に係る知見を蓄積する。

- (a) 室内模擬実験及び数値解析により断層変位データを取得し、断層変位の生成状況を分析する(令和2年度~令和5年度)。
- (b) 断層変位の観測データの整理、分析及びモデル化を行い、断層変位評価における不確かさの取り扱いについて検討する(令和2年度~令和4年度)。

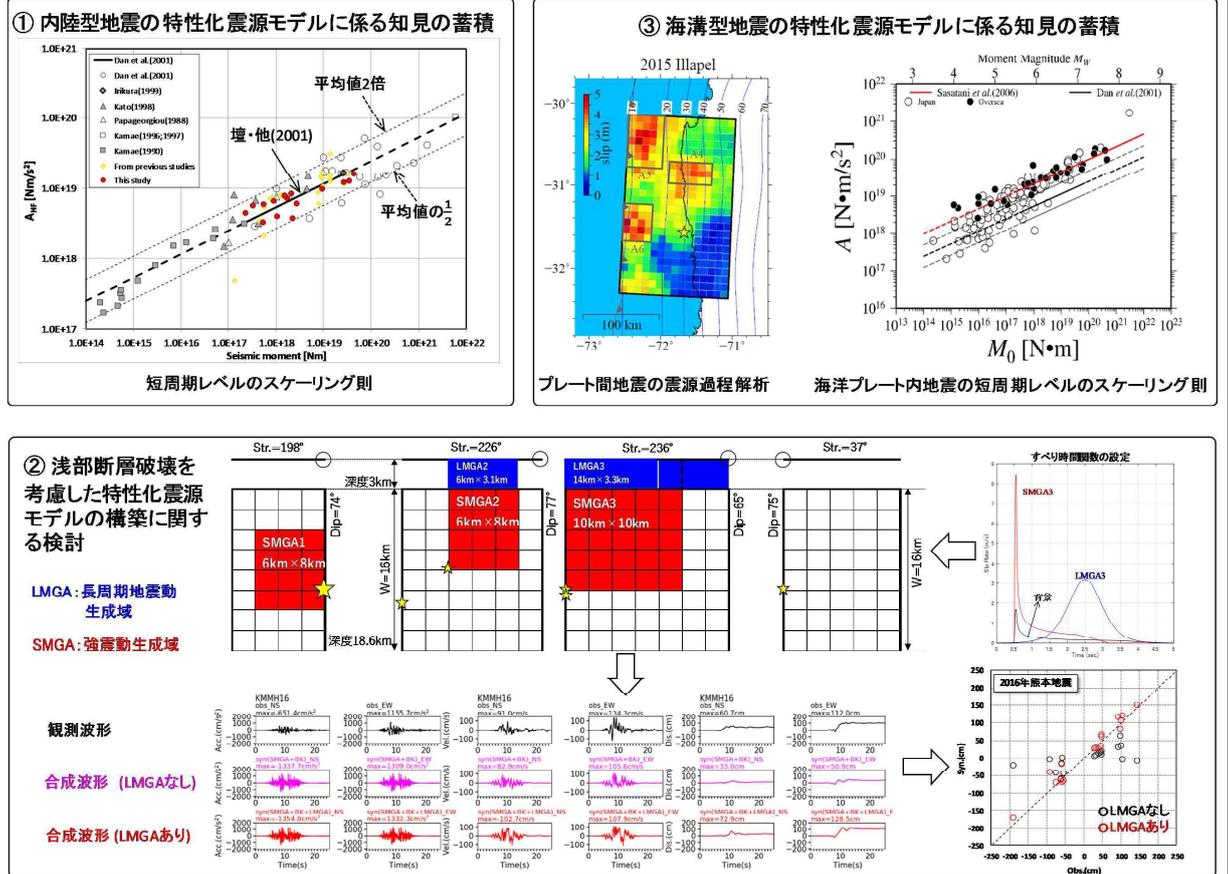


図1 断層モデル法の精度向上に係る検討

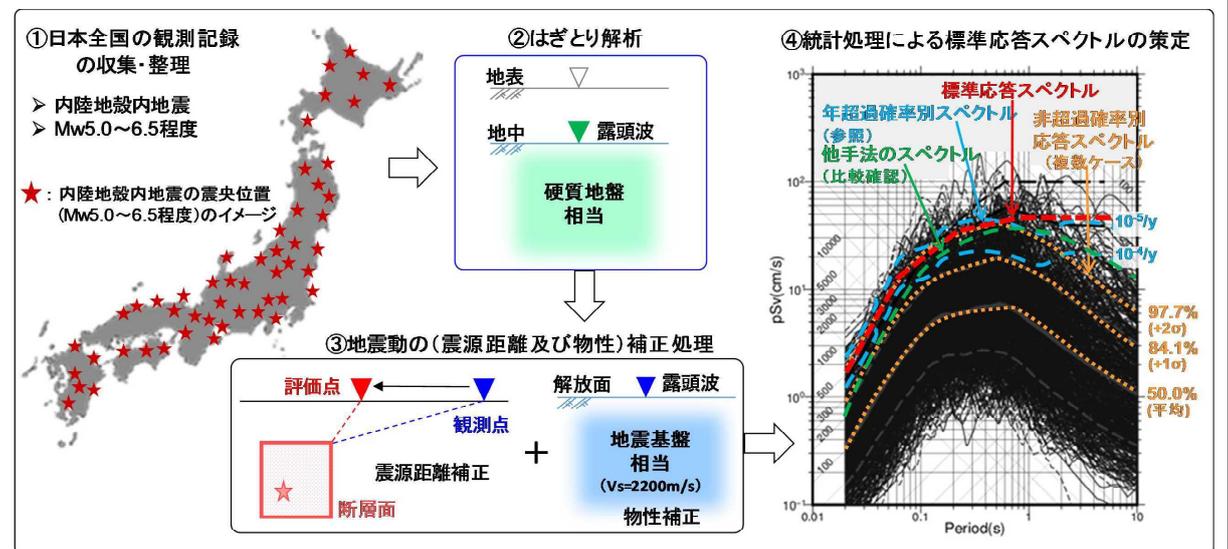


図2 震源を特定せず策定する地震動の検討

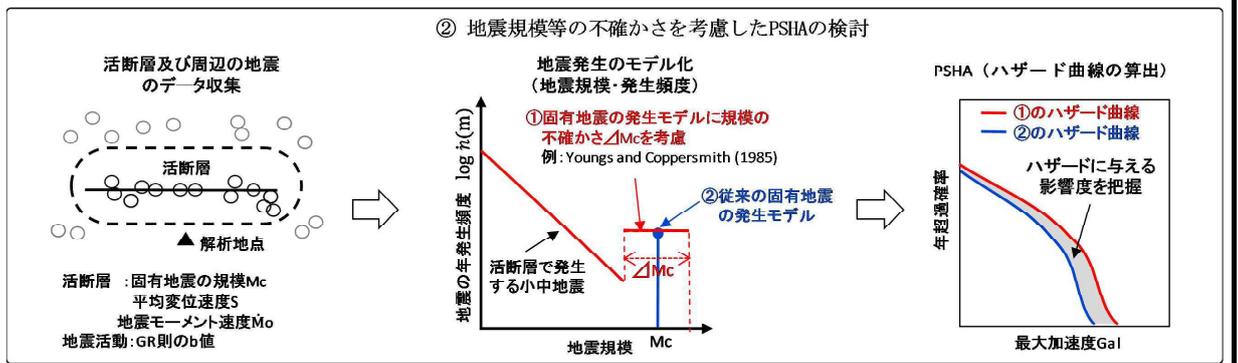
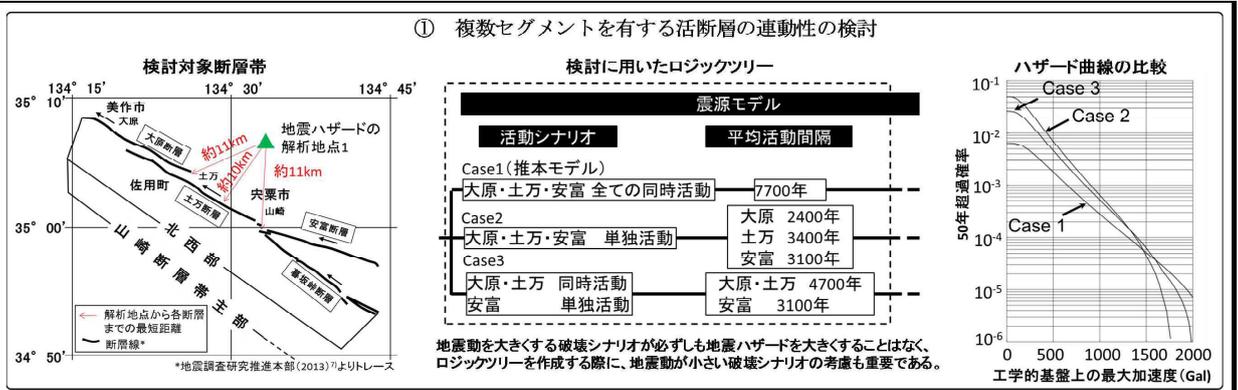


図3 確率論的地震ハザード評価に係る不確かさの検討

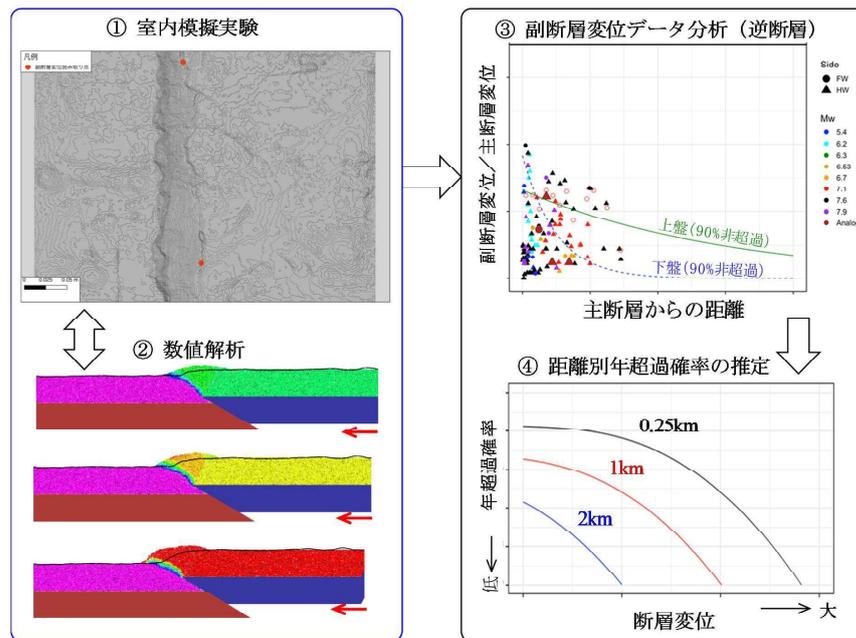


図4 断層変位評価に係る知見の蓄積

実施行程表

項目	R 2 年度	R 3 年度	R 4 年度	R 5 年度
(1) a. 内陸型地震の特性化震源モデルに係る知見の蓄積	浅部断層破壊の考慮 ← パラメータ相関性分析 ←	浅部断層破壊の考慮 → パラメータ相関性の考慮	相関性を考慮した地震動解析	検証解析・手法まとめ NRA 技報作成
(1) b. 海溝型地震の特性化震源モデルに係る知見の蓄積	地域性調査・再現解析 ←	検証解析・距離減衰式との比較	不確かさを考慮 巨大地震への適用検討	検証解析・手法まとめ ▽論文投稿
(2) 震源を特定せず策定する地震動の検討	地震動追加解析 課題調査 ←	地震動追加解析・手法向上の調査解析	地震動追加解析 手法向上結果の分析	検証解析・手法まとめ ▽論文投稿
(3) a. 地震規模等の不確かさを考慮した確率論的地震ハザード評価手法の検討	地震規模と発生頻度の不確かさの調査 ←	PSHA 試解析 課題抽出	不確かさ評価の向上 PSHA 解析・影響度分析	適用条件・課題の整理・手法まとめ ▽論文投稿

	(3)b. 確率論的地震ハザード評価における地震動の不確かさの検討	不確かさ評価手法の調査・試解析	地点ごとの不確かさの評価・GMPEと比較	PSHA解析、従来手法による結果と比較 ▽論文投稿	不確かさの取り扱いの整理・手法まとめ
	(4) 断層変位評価に係る知見の蓄積	断層変位データ整理 数値解析・実験調査	断層変位のモデル化 模擬実験・数値解析	実験データ等の活用 模擬実験・数値解析	ハザード解析・まとめ ▽論文投稿

(注1) 有用な研究成果は、研究期間中においても適宜論文として公表する。

7. 実施計画	<p>【R2年度の実施内容】</p> <p>(1)a. : 内陸型地震の特性化震源モデルに係る知見の蓄積【分類①】 内陸型地震を対象とし、浅部断層破壊を考慮した特性化震源モデルを構築し、地震動再現解析を行う。また、海外で起きた地震を含め運動学的・動力学的震源モデルから、震源モデルパラメータの相関性等について検討する。</p> <p>b. : 海溝型地震の特性化震源モデルに係る知見の蓄積【分類①】 国内外で発生した海溝型地震を対象に、震源及び地震動の地域性を調査するとともに、断層モデル法による地震動再現解析を行う。</p> <p>(2) 震源を特定せず策定する地震動の検討【分類①】 震源を特定せず策定する地震動に関連する観測記録の追加解析、「震源を特定せず策定する地震動検討チーム」で整理した技術課題の調査を行う。</p> <p>(3)a. : 地震規模等の不確かさを考慮した確率論的地震ハザード評価手法の検討【分類①】 日本の活断層を対象に海外の手法等を適用し、地震規模及び発生頻度の推定とその不確かさについて検討を行う。</p> <p>b. : 確率論的地震ハザード評価における地震動の不確かさの検討【分類①】 単一地点における地震動不確かさの評価手法を調査し、ある任意地点の地震動不確かさの試評価を行う。</p> <p>(4) 断層変位評価に係る知見の蓄積【分類④】 国内外の活断層で起きた地震から観測された断層変位データセットを整理するとともに、個別要素法等による数値解析を行い、断層変位に係る室内模擬実験の既往研究を調査する。</p>
	<p>【R3年度の実施内容】</p> <p>(1)a. : 内陸型地震の特性化震源モデルに係る知見の蓄積【分類①】 内陸型地震を対象とし、浅部断層破壊を考慮した特性化震源モデルを構築し、地震動検証解析を行う。また、海外で起きた地震を含め運動学的・動力学的震源モデルから、震源モデルパラメータの相関性等について検討するとともに、相関性を考慮した地震動評価を行う。</p> <p>b. : 海溝型地震の特性化震源モデルに係る知見の蓄積【分類①】 国内外で発生した海溝型地震を対象に、断層モデル法による地震動検証解析を実施する。また、プレート間巨大地震を対象に、地震動と津波評価の統一モデルの構築に検討する。</p> <p>(2) 震源を特定せず策定する地震動の検討【分類①】 震源を特定せず策定する地震動に関連する観測記録の追加解析、最新知見を反映した評価手法の高度化に関する調査及び解析を実施する。</p> <p>(3)a. : 地震規模等の不確かさを考慮した確率論的地震ハザード評価手法の検討【分類①】 PSHAの試解析を実施し、日本の活断層で適用する際の条件を整理して課題を抽出する。</p> <p>b. : 確率論的地震ハザード評価における地震動の不確かさの検討【分類①】 既往の地震基盤上の距離減衰式に加えて、近年に起きた地震を対象に（解放）地震基盤上の地震動解析を実施するとともに、複数任意地点の地震動不確かさを評価し比較を行う。</p> <p>(4) 断層変位評価に係る知見の蓄積【分類④】 国内外の活断層で起きた地震から観測された断層変位データの分析・モデル化について検討するとともに、断層変位（逆断層タイプ）に係る室内模擬実験を行い、個別要素法等を用いて実験結果の再現するための数値解析を実施する。</p>
	<p>【R4年度の実施内容】</p> <p>(1)a. : 内陸型地震の特性化震源モデルに係る知見の蓄積【分類①】 海外で起きた地震を含め運動学的・動力学的震源モデルから、震源モデルパラメータの相関性やスケーリング則等について検討するとともに、相関性を考慮した地震動再現解析を行う。</p> <p>b. : 海溝型地震の特性化震源モデルに係る知見の蓄積【分類①】 国内外で発生した海溝型地震を対象に、断層モデル法による地震動再現解析を実施する。また、プレート間巨大地震に対して、地震動と津波評価の統一モデルの構築について調査を行う。</p> <p>(2) 震源を特定せず策定する地震動の検討【分類①】 震源を特定せず策定する地震動に関連する観測記録の追加解析、最新知見を反映した評価手法による解析及び分析を行う。</p> <p>(3)a. : 地震規模等の不確かさを考慮した確率論的地震ハザード評価手法の検討【分類①】 前年度までの検討結果を踏まえ、地震規模と発生頻度の推定方法とPSHAでの不確かさの扱い方の改善を図る。</p> <p>b. : 確率論的地震ハザード評価における地震動の不確かさの検討【分類①】 単一地点の地震動不確かさを考慮したPSHAを実施し、既往のGMPEによる結果との比較を行う。</p> <p>(4) 断層変位評価に係る知見の蓄積【分類④】 前年度の実験及び解析データを用いて断層変位モデル化への活用について検討するとともに、断層変位（横ずれ断層タイプ）に係る室内模擬実験を行い、個別要素法等を用いて実験結果の再現するための数値解析を実施する。</p>
	<p>【R5年度の実施内容】</p> <p>(1)a. : 内陸型地震の特性化震源モデルに係る知見の蓄積【分類①】 相関性を考慮した地震動再現解析を実施し、とりまとめを行う。</p> <p>b. : 海溝型地震の特性化震源モデルに係る知見の蓄積【分類①】 国内外で発生した海溝型地震を対象に、断層モデル法による地震動又は（プレート間巨大地震における）津波の検証解析を実施し、解析結果のとりまとめを行う。</p> <p>(2) 震源を特定せず策定する地震動の検討【分類①】 震源を特定せず策定する地震動に関連する観測記録の追加解析、最新知見を反映した評価手法による検証解析を実施し、解析結果のとりまとめを行う。</p> <p>(3)a. : 地震規模等の不確かさを考慮した確率論的地震ハザード評価手法の検討【分類①】 地震本部の結果等と比較してハザードに与える影響度を確認するとともに、日本の活断層で適用する際の具体的な条件及</p>

	<p>び課題を整理しとりまとめる。</p> <p>b. : 確率論的地震ハザード評価における地震動の不確かさの検討【分類①】 PSHAにおける地震動不確かさの取り扱いに関して知見及び課題を整理しとりまとめる。</p> <p>(4)断層変位評価に係る知見の蓄積【分類④】 前年度の実験及び解析データを用いて断層変位モデル化への活用について検討し、断層変位ハザード解析を行い、断層変位評価における不確かさの取り扱いについてとりまとめる。</p>
8. 実施体制	<p>【地震・津波研究部門における実施者】</p> <p>○呉 長江 主任技術研究調査官 儘田 豊 主任技術研究調査官 小林源裕 主任技術研究調査官 藤田雅俊 技術研究調査官 田島礼子 技術研究調査官</p>
9. 備考	

技術評価検討会での評価の観点

- 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。
- 解析実施手法、データ取得手法が適切か。
- 解析評価手法、データ評価手法が適切か。
- 重大な見落とし（観点の欠落）がないか。