

安全研究に係る中間評価結果

令和2年2月19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自己評価（別添1）に基づき、評価プロセス及び評価結果の妥当性を確認した。

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た。また、これまでの研究により一定の成果が得られ、成果の公表も適宜行われていることを確認した。今後の研究の進め方に関する技術的妥当性も確認できた。これらのことから、いずれも計画どおりに行うことが適切である。

安全研究に係る自己評価結果（中間）

別添 1

令和 2 年 2 月 1 9 日
原 子 力 規 制 庁

I. 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））

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実さを伴う 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、総合 SA 解析コード（以下「MELCOR」という。）による圧力容器内デブリ挙動解析結果を初期条件として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ースの開発を進めた。

- 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解析コードの一部は、安全研究プロジェクト「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」の中で MELCOR に組み込むことにしている。その際に、主要な現象を対象にモデル間の相互作用や従属的な影響等を十分に考慮し、MELCOR への組み込みを行う。
- 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。解析の不確実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実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。なお、安全研究プロジェクト「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」で得られたレベル 2PRA の結果等により、リスクに大きな影響を及ぼし、不確かさが大きな現象を新たに特定した場合には、研究計画を見直すことが適切である。

② 研究マネジメントの適切性： A

- 委託先を含め適切な人員配置等の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。

6. 研究計画（案）への反映

- モデル間の相互作用等の影響、PRA に適用する際の課題など技術評価検討会で頂いた主な意見等を適切に研究計画（案）に反映する。なお、リスクに大きな影響を及ぼし、不確かさが大きな現象を新たに特定した場合には、研究計画の見直しを行うこととする。

(主な成果の公表)

● 論文

- ・ Hotta, A., Akiba, M., Morita, A., et al., “Experimental and Analytical Investigation of Formation and Cooling Phenomena in High Temperature Debris Bed”, J. Nucl. Sci. Technol. (17 pages), 2019. (11月20日オンライン掲載) doi:10.1080/00223131.2019.1691078
- ・ 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), pp.55~69, 2019.
- ・ 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.

II. 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. 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、濃度、線量等のリスク指標を検討するとともに、防護措置のモデル化等を行い、レベル 3PRA 手法の高度化を進める。

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する。
- 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。今後、レベ

ル 2PRA とレベル 3PRA とのインターフェイスに係る研究を実施する。

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。加えて、重大事故等対処設備を考慮したレベル 1PRA からレベル 3PRA までの一貫解析結果から得られる知見等の重要性を鑑み、計画に反映させることが適切である。
- 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。なお、研究の実施にあたっては、重大事故等対処設備を考慮したレベル 1PRA からレベル 3PRA までの一貫解析手法の整備を早期に進めることが重要である。特に、レベル 3PRA については、一貫解析手法の整備に先立ち、希ガスの放出を前提とする等の放射性物質の放出を仮定した環境への影響評価手法を整備することが適切である。

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. 研究計画（案）への反映

- 実験条件範囲と実機条件との差異に起因する不確かさ、レベル 2 とレベル 3PRA の接続部分の適切性など技術評価検討会で頂いた主な意見を参考にし、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の観点から、研究計画（案）に適切に反映する。特に、重大事故等対処設備を考慮したレベル 1PRA からレベル 3PRA までの一貫解析手法の整備及び希ガスの放出を前提する等の放射性物質の放出を仮定としたレベル 3PRA 評価手法の整備については、研究計画（案）の具体化をはかる。
- 関連する安全研究プロジェクトと連携して研究を進めることが分かるように、研究計画（案）に反映する。

(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, Article 110177, (31 pages), 2019.

● 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

表 1 自己評価結果（中間）取りまとめ表

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。

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 |