

# 安全研究に係る事後評価結果

令和 3 年 7 月 7 日  
原子力規制委員会

## 1. 事後評価の進め方

### 1.1 評価の対象

原子力規制庁長官官房技術基盤グループの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次に示す 7 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   | 津波ハザード評価の信頼性向上に関する研究                        | H29 - R2<br>(2017 - 2020) |
| 2   | 地震・津波及びその他の外部事象等に係る施設・設備のフラジリティ評価に関する研究     | H29 - R2<br>(2017 - 2020) |
| 3   | 火災防護に係る影響評価に関する研究                           | H29 - R2<br>(2017 - 2020) |
| 4   | 燃料健全性に関する規制高度化研究                            | H19 - R2<br>(2007 - 2020) |
| 5   | 加工施設及び再処理施設の内部火災等に関するリスク評価手法に関する研究          | H29 - R2<br>(2017 - 2020) |
| 6   | 廃棄物埋設に影響する長期自然事象の調査方法及びバリア特性長期変遷の評価方法に関する研究 | H29 - R2<br>(2017 - 2020) |
| 7   | 放射性廃棄物等の放射能濃度評価技術に関する研究                     | H29 - R2<br>(2017 - 2020) |

### 1.2 評価方法

原子力規制庁が実施した自己評価（別添 1 及び 2）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. 事後評価結果

上記 7 件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は妥当である。

## 安全研究に係る事後評価結果（自己評価概要）

令和 3 年 7 月 7 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 2 年度に終了した安全研究プロジェクト 7 件である。自己評価の全体概要を以下に、安全研究プロジェクトごとの評価結果を別添 2 に示す。

### 2. 評価結果（自己評価概要）

（1）「①成果目標の達成状況」、「③研究の進め方に対する技術的適切性」及び「④研究マネジメント及び予算・契約管理の適切性」

いずれのプロジェクトにおいても、適切な研究体制を構築する等により、研究マネジメント及び予算・契約管理が行われるとともに、最新知見や外部専門家の意見を踏まえて技術的適切性をもって研究が実施され、設定した成果目標が達成された。

（2）「②成果の公表等の状況」

いずれのプロジェクトにおいても、プロジェクト実施期間中に、原子力規制庁職員又は委託先から学術論文等による積極的な研究成果の公表を行った。

（3）「⑤成果の規制への活用の状況・見通し」

「火災防護に係る影響評価に関する研究」（別表の No. 3）の成果を基に、火災関係の各ガイドの見直しが予定されており、今後の審査支援における申請内容の妥当性の判断や火災防護の検査にも活用できることが見込まれている。また、「放射性廃棄物等の放射能濃度評価技術に関する研究」（別表の No. 7）の成果が、「放射能濃度についての確認を受けようとする物に含まれる放射性物質の放射能濃度の測定及び評価の方法に係る審査基準」（令和元年 9 月 11 日原子力規制委員会決定）の策定に当たり活用された。その他のプロジェクトについても、成果が活用されているか又は成果の活用が見込まれている。

（4）結論

以上のことから、令和 2 年度に終了したプロジェクトについては、いずれも計画的に実施され、規制活動に貢献できる成果が得られている。

別表 安全研究に係る事後評価結果（自己評価概要）

| 評価項目               |                         | 1. 津波ハザード評価の信頼性向上に関する研究 | 2. 地震・津波及びその他の外部事象等に係る施設・設備のフラジリティ評価に関する研究 | 3. 火災防護に係る影響評価に関する研究 | 4. 燃料健全性に関する規制高度化研究 | 5. 加工施設及び再処理施設の内部火災等に関するリスク評価手法に関する研究 | 6. 廃棄物物理設に影響する長期自然事象の調査方法及びバリア特性長期変遷の評価方法に関する研究 | 7. 放射性廃棄物等の放射能濃度評価技術に関する研究 |      |
|--------------------|-------------------------|-------------------------|--|----------------------|---------------------|---------------------------------------|---|----------------------------|------|
| 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)                       |      |
|                    | ② 成果の公表等の状況             | A(3)                    | A(3)                                       | A(3)                 | S(4)                | A(3)                                  | A(3)  | A(3)                       |      |
|                    | 職員                      | NRA 技術報告                | 0  | 1                    | 0                   | 0                                     | 0   | 0                          | 0    |
|                    |                         | 論文(査読付)                 | 2  | 4                    | 1                   | 3                                     | 0   | 0                          | 3    |
|                    |                         | 国際会議のプレゼンテーション(査読付)     | 0  | 1                    | 1                   | 7                                     | 0   | 0                          | 0    |
|                    | 委託先                     | 論文(査読付)                 | 1  | 1                    | 3                   | 1                                     | 3   | 2                          | 0    |
|                    |                         | 国際会議のプレゼンテーション(査読付)     | 0  | 2                    | 0                   | 1                                     | 0   | 0                          | 0    |
|                    | ③ 研究の進め方に対する技術的適切性      | 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 | B(2)                    | A(3)                    | A(3)                                       | B(2)                 | B(2)                | A(3)                                  | A(3)  |                            |      |
| 総合評価※2             | 項目別評価結果の総合点             | 14                      | 15   | 15                   | 15                  | 14                                    | 15  | 15                         |      |
|                    | 項目別評価結果の平均点             | 2.8                     | 3.0  | 3.0                  | 3.0                 | 2.8                                   | 3.0   | 3.0                        |      |
|                    | 評価結果(全体評語)              | B                       | A  | A                    | A                   | B                                     | A   | A                          |      |

※1 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。

※2 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。ただし、②又は⑤が最下位の評語（C）である場合は、S又はAのときはBへ、BのときはCへそれぞれ下げる。

## 安全研究に係る事後評価結果（プロジェクトごとの自己評価）

令和 3 年 7 月 7 日  
原子力規制庁

### I. 津波ハザード評価の信頼性向上に関する研究（H29～R2（2017～2020））

#### 1. 研究プロジェクトの目的

- 原子力規制の継続的な高度化のためには、これらの要求事項に係る種々の評価手法を継続的に改善していくことが重要である。これまでの安全研究では、主にプレート間地震を対象に津波波源モデルの改良等を実施してきたが、本研究プロジェクトでは、地震の規模や発生頻度のモデル化に係る不確かさの取扱い、及び内陸地殻内地震や地震以外の津波発生要因の特性も踏まえて、確率論的津波ハザード評価（以下「PTHA」という。）手法に反映していくことにより、関連審査ガイド及び安全評価の高度化に資すること、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ことが目的である。

#### 2. 研究概要

- 津波波源の特性化、地震活動のモデル化等に係る不確かさ解析の検討を行い、PTHAにおいて、津波の規模、発生頻度等に係る不確かさをより適切に評価するための手法を検討した。
- 津波地震の観測事例及び水理実験を踏まえた津波発生メカニズムの解明とその特徴を考慮した特性化波源モデルの設定方法を検討した（国立大学法人東北大学及び東北学院大学との共同研究）。
- 平成 28 年度までに整備してきた津波痕跡データベースを活用し、中小規模及び大規模のプレート間地震による津波を対象とした従来の特性化波源モデルの設定方法について、その適用性を検討した。
- 海底斜面を模擬した模型実験等により、海底斜面の地震時安定性に関する既往モデルの適用性を検討し、不確かさを定量的に評価した。また、海底地すべり起因の津波を考慮した PTHA 手法を検討した（学校法人日本大学工学部工学研究所への委託研究を含む）。

#### 3. 研究成果

- プレート間地震による津波を対象に、地震規模に係るスケーリング則、地震発生頻度に係るゲーテンベルグ・リヒター則の各モデル化上の不確かさを定量的に評価して確率モデルを設定した。また、これらの確率モデルを取り入れた PTHA 手法を提案した。さらに、福島県沖をモデルサイトとして提案手法を適用し、PTHA 結果に及ぼす不確かさ要因の影響を分析し、今回検討した不確かさ要因の中では、

- 地震規模に係るスケーリング則の不確かさの影響が最も大きいことを確認した。
- 海底の地殻変動の水平変位を模擬した水理実験の結果、水平変位は津波初期水位に影響すること及び地殻変動の速度が速いほどその影響が大きいことを確認した。また、Tanioka and Satake (1996)の解析手法による水平変位の寄与分を考慮した場合の特性化波源モデルの設定方法を提案し、東北地方太平洋沖地震津波に適用したところ、痕跡高を良好に再現することができた。
  - 中小規模及び大規模 (Mw8.8 以下) のプレート間地震による津波について、南海トラフで発生した4つの地震 (1854年安政東海地震、1854年安政南海地震、1707年宝永地震及び1944年昭和東南海地震) を対象に、杉野ら (2014) の特性化波源モデルを作成し、各津波の痕跡高の再現性を定量的に示した。
  - 海底地すべりを模擬した遠心模型実験等により、従来の陸上斜面の安定解析に用いられてきた修正フェレニウス法が海底環境でも適用可能であることを確認した上で、モデル化上の不確かさを定量的に把握した。そして、佐藤ら (2019) の「海底地すべり危険度判定手法」と組み合わせ、海底地すべり起因の津波を対象とした PTHA 手法を提案した。提案手法をモデル海域に適用したところ、地震起因津波に比べて過大な結果となり、提案手法の課題とともに改良の必要性を示した。

#### 4. 技術評価検討会における主な意見及びその対応

- 津波ハザード評価として、不確かさの幅を適切に把握しようという方向性は適切と考えるが、確率論的地震動ハザード評価で用いられている専門家意見をはじめとした地震ハザード解析専門家委員会 (Senior Seismic Hazard Analysis Committee、以下「SSHAC」という。) 手法を参考に、改善の必要があるとの意見があった。本研究プロジェクトでは、従来の確率論的津波ハザード評価では取り扱っていなかった不確かさの項目を示し、それらの項目がハザード解析結果に及ぼす影響の程度を感度解析的に把握しようとするものである。今後、これらの不確かさの項目が広く認知され、SSHAC手法による確率論的津波ハザード評価に取り込まれるよう、研究成果を論文で公表していく。
- 「津波地震による津波の特性化モデルの構築」において、同じインバージョン解析手法で、津波の入力条件となる海底地殻変動について、水平変位の効果の考慮方法の違いによるすべり量分布を比較した内容は、津波波源の評価における研究として非常に興味深く、良い成果が得られたものと考えられると評価された。また、海底勾配と水平効果の大きさの関係が整理されると津波波源設定に有用な知見を与えるものと期待されるとの意見があった。令和3年度からの後継プロジェクトにおいて、引き続き検討していく。
- 詳細は別表1参照。

## 5. 事後評価結果

### (1) 項目別評価

#### ① 成果目標の達成状況： A

- PTHA 手法における津波発生モデルの不確かさ評価手法、地殻変動の水平変位を考慮したプレート間地震津波の特性化波源モデルの設定方法、中小規模及び大規模プレート間地震津波の特性化波源モデルの適用性、並びに海底地すべり起因津波の PTHA 手法に関する知見を蓄積することができたことから目標を達成した。

#### ② 成果の公表等の状況： A

- 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 1 件を公表した。

#### ③ 研究の進め方に対する技術的適切性： A

- 国内外の過去の研究や技術評価検討会の専門家意見を踏まえた上で、適切な実施手法により必要な実験データや解析結果が得られていることから、技術的適切性をもって研究が進められたと判断した。

#### ④ 研究マネジメント及び予算・契約管理の適切性： A

- 共同研究及び委託研究の相手も含め適切な実施体制を構築し、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： B

- 「津波地震による津波の特性化波源モデルの構築」及び「海底地すべり起因要因の津波の確率論的ハザード評価手法の整備」は、今後の規制活動の参考知見となるものの、規制への活用は限定的である。なお、今後、水理実験で得られた知見についての適用範囲等がより明確に示されれば、規制へ活用できると考えられる。  
(地震・津波審査部門)

### (2) 総合評価

- 評価結果： B
- 評価コメント：

計画どおりに調査・研究が進められ、確率論的津波ハザード評価における不確かさ要因の取り扱いや地殻変動の水平変位を考慮したプレート間地震津波の特性化波源モデルの設定方法等に係る知見を目標どおりに取得するとともに、研究成果の一部については査読付論文として公表された。また、その他の研究成果について、今後、査読付論文の公表が予定されており、規制活動への成果の活用も期待される。

## 6. 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、技術評価検討会でいただいた意見を踏まえて、関連の既往論文のレビューを適切に行い、また、必要に応じて追加検討を行って、論文等にまとめる。
- 技術評価検討会でいただいた意見や内外の研究及び規制の動向を十分に考慮し、後継の安全研究プロジェクト「津波評価手法及び既往津波の波源推定に関する研究」(R3～R6年度)において、津波の初期水位の設定方法を精緻化し、関連審査ガイドの改訂を検討する。

(主な成果の公表)<sup>注1</sup>

### (1) 原子力規制庁の職員による公表

- 論文(査読付)
  - ① 道口陽子、三戸部佑太、杉野英治、田中仁、地殻変動の水平変位による津波初期水位への影響に関する実験的検討、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol. 75、No. 2、pp. I\_343-I\_348、2019.
  - ② 佐藤太一、杉野英治、Mw8.8 以下のプレート間地震津波に対する特性化波源モデルの再現性、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol. 76、No. 2、pp. I\_337-I\_342、2020.

### (2) 委託先による公表

- 論文(査読付)
  - ① 齋藤和寿、仙頭紀明、中村晋、動的な遠心載荷実験に基づく海底斜面の地震時安定性評価、土木学会論文集 B3 (海洋開発)、Vol. 76、No. 2、pp. I\_1043-I\_1048、2020.

---

<sup>注1</sup> 下線部は原子力規制庁職員。以降のプロジェクトについても同様。

## II. 地震・津波及びその他の外部事象等に係る施設・設備のフラジリティ評価に関する研究 (H29～R2 (2017～2020))

### 1. 研究プロジェクトの目的

- 地震、津波及び衝撃等の外部事象に係る施設・設備のフラジリティの確率論的リスク評価 (PRA) に関する科学的・技術的知見及び関連評価ガイド策定のための知見の拡充を行う。また、将来の規制活動への反映に向けた知見を蓄積する。

### 2. 研究概要

- 地震に対するフラジリティ評価については、建屋耐震評価に関して、原子炉建屋の三次元有限要素法 (FEM) 解析を用いたパラメータスタディ及び地震観測記録の再現解析による建屋解析の精緻化に係る検討を行った (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を含む)。また、地盤の液状化評価に関して、礫質土地盤を対象に遠心載荷模型実験及び再現解析による液状化挙動の検討を行った (国立大学法人東北大学への委託研究を含む)。さらに、設備の耐震耐力評価に関して、既往試験に基づき設備の現実的耐力を整理するとともに、鋼製格納容器を対象として、FEM 解析を用いた現実的な座屈評価耐力を求めた。また、経年配管の地震時亀裂進展評価の既往評価手法の適用性について検討を行った (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を含む)。
- 津波に対する防潮堤のフラジリティ評価については、漂流物の衝突による荷重の評価、防潮堤前面の砂丘が津波によって侵食された場合の津波波圧の評価及び越波時も含めた最大持続波力評価の体系化に関して、防潮堤を模擬した実験及び再現解析による検討を行った (大成建設株式会社及び国立大学法人京都大学への委託研究を含む)。
- 衝撃に対するフラジリティ評価については、建屋耐衝撃評価に関して、大型衝突実験及び再現解析に基づき衝撃挙動の把握や解析の再現性の検討を行った (鹿島建設株式会社への委託研究を含む)。また、設備の耐力評価に関して、衝撃振動試験を行い設備の衝撃損傷特性の検討を行った。さらに、核燃料輸送容器のスラップダウン落下試験を行い落下時の挙動を把握するとともに、既往の評価手法の適用性の検討を行った。

### 3. 研究成果

- 地震に対するフラジリティ評価については、建屋耐震評価に関して、建屋―地盤間の接触・剥離、減衰等のモデル化が建屋応答に比較的大きな影響を及ぼすことの知見を得た。また地震観測記録の再現解析では、水平方向の建屋応答について観測記録との整合性がとれていることを確認した。地盤の液状化評価に関しては、礫質地盤の場合は砂質地盤よりも過剰間隙水圧の上昇及び消散が速く、全体の蓄積量も小さいという知見を得た。さらに設備の耐力評価に関して、設計耐力と現実的耐力の関係を整理するとともに格納容器の FEM 解析を用いた座屈評価に



よる現実的耐力を把握した。また経年配管の地震時亀裂進展に係る評価方法に関して、既往評価式の適用性を確認した。

- 津波に対する防潮堤のフラジリティ評価については、漂流物衝突荷重影響に関して、既往評価式の適用性を整理した。また砂移動荷重影響に関して、流体密度を用いた評価の考え方を整理した。さらに最大持続波力評価に関して、越波時も含めて防潮堤に生じる最大波力を評価する手法についての体系的な考え方を整理した。
- 衝撃に対するフラジリティ評価については、建屋衝撃評価に関して、衝撃力の伝播応答の挙動を把握し、解析の再現性を確認した。また周辺地盤への逸散効果を確認した。さらに機器衝撃評価に関して、衝撃振動試験を行い電気品の衝撃損傷特性を把握するとともに、衝撃振動に係る加振試験を行う上での留意事項を整理した。輸送容器の落下による衝撃挙動に関しては、スラップダウン落下の応答が大きいことを確認するとともに、既往の評価方法が当該実験よりも保守的な結果であることを確認した。

#### 4. 技術評価検討会における主な意見及びその対応

- 耐津波・耐地震・耐衝撃研究全般については、おおむね適切であるとの評価を受けた。その中で耐津波研究については、漂流物衝突荷重の評価における衝突位置や、砂移動の評価における堤体前面水深や最大波力発生時刻等に係る考察が必要ではないかとの意見があった。今後の論文化を進める中で、必要に応じて検討を行う。
- 詳細は別表 2 参照。

#### 5. 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・地震・衝撃に対するフラジリティ評価に関する研究において、それぞれの分野で新たな知見を蓄積できたことから目標を達成した。

##### ② 成果の公表等の状況： A

- 原子力規制庁から、NRA 技術報告 1 件、査読付論文 4 件及び国際会議のプロシーディング 1 件の公表を行った。
- 委託先から査読付論文 1 件、国際会議のプロシーディング 2 件を公表した。

##### ③ 研究の進め方に対する技術的適切性： A

- 国内外の最新知見を踏まえた上で、適切な実施手法により実験結果や解析結果が得られていることから、技術的適切性をもって研究が進められたと判断した。

④ 研究マネジメント及び予算・契約管理の適切性： A

- 委託先を含め適切な研究体制を構築し、部門内及び庁内外の関連部署や有識者に意見照会を行いながら研究を実施して目標を達成しており、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

- 津波に対するフラジリティ評価手法の検討については、適合性審査において防潮堤に作用する漂流物の衝突荷重及び津波波力を評価するための技術的な知見として活用され、今後とも活用される可能性が高い。地震に対するフラジリティ評価手法の検討については、今後、適合性審査において建屋等の三次元地震挙動及び埋立地盤の液状化の評価に関する技術的な知見として活用が期待される。(地震・津波審査部門)
- 本研究により、飛翔体等衝突時に建屋・設備に生じる衝撃現象に関する知見が蓄積された。それらの知見は、実用炉審査に直ちに参照可能な状態には至っていないが、衝撃試験の追加実施等により技術的な知見が拡充されれば、今後の審査において、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に活用される見込みがある。(実用炉審査部門)
- 本研究により、耐震及び耐津波に係る設計情報を用いて設計裕度の大きさにより施設、設備に対する検査の優先度を評価する手法が検討されており、耐震及び耐津波に係るリスク情報について、個別プラントの検査の現場で活用できる形で整理、提供されれば、検査対象の選定等において活用される見込みがある。(検査監督総括課)
- 飛翔体等の衝突による衝撃に対する設備のフラジリティ評価については、再処理施設及び MOX 燃料加工施設の審査において直ちに参照可能な状態には至っていないが、設備の耐力を評価するための技術的な知見として活用される可能性がある。(核燃料施設審査部門)
- 本研究では、約 15 年前に海外で実施された兼用キャスク実機大の試験体によるスラップダウン落下試験と同様のものを一つの設計事例について実験を行っている。本研究の成果から、審査において注視すべき事象が追認されるとともに審査で考慮すべき新たな事項がないことが確認された。(核燃料施設審査部門)

(2) 総合評価

- 評価結果： A
- 評価コメント：

計画どおりに調査・研究が進められ、津波・地震・衝撃に対するフラジリティ評価手法に関する知見を目標どおりに取得するとともに、研究成果をまとめた新知見情報及び NRA 技術報告や査読付論文の公表も行われた。また、本安全研

究プロジェクトの成果の一部は規制に取り入れられることが検討中であり、その他の成果も、今後、規制活動における活用も見込まれている。

## 6. 評価結果の今後の活用

- 本安全研究プロジェクトで得た成果のうち未公表の内容の取りまとめ及び後続の安全研究プロジェクト「外部事象に係る施設・設備のフラジリティ評価手法の高度化に関する研究」（R3～R6年度）において、技術評価検討会でいただいた意見、国内外の研究及び規制の動向を十分に考慮し、規制活動での活用を念頭に研究の実施及び論文等への取りまとめを行う。

（主な成果の公表）

### （1）原子力規制庁の職員による公表

- NRA 技術報告

- ① 市原義孝、森谷寛、小林恒一ほか、原子炉施設の建屋三次元地震時挙動の精緻な推定に資する影響因子の分析とそのモデル化に関する検討、NTEC-2021-4002、令和3年3月。

- 論文（査読付）

- ① Y. Li, K. Azuma, K. Hasegawa, Failure bending moment of pipes containing multiple circumferential flaws with complex shape, International Journal of Pressure Vessels and Piping 171, pp. 305-310, 2019.
- ② K. Azuma, S. Hidaka, Y. Yamazaki, Effects of crack closure on the fatigue crack growth rates of ferritic steels subjected to severe reversing loads, J. Pressure Vessel Technol., 142(6): 061503, 2020.
- ③ 太田良巳、松澤遼、鈴木哲夫、吉田匡佑、国際ベンチマーク解析プロジェクト IRIS3 フェーズAに係る鉄筋コンクリート構造物の衝撃評価に関する基礎的研究、土木学会、第12回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集、2019.
- ④ 太田良巳、澤田祥平、山田和彦ほか、衝撃作用を受ける構造物の衝撃挙動評価に関する取り組み、日本建築学会シンポジウム「耐衝撃設計の合理化に向けて—現状と新しい流れ、今後の課題—」、pp. 135-144、2019.

- 国際会議のプロシーディング（査読付）

- ① T. Toriyama, N. Ishida, A method for evaluating tsunami loading on seawalls during overflow, Proceedings of 37th Conference on Coastal Engineering, 2020.

### （2）委託先による公表

- 論文（査読付）

- ① 相馬和貴、山田和彦、澤田祥平ほか、Rieraの方法による柔飛翔体衝突時の強度分布推定、土木学会、第12回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集、2019.

- 国際会議のプロシーディング（査読付）

- ① Y. Oda, T. Honda, T. Omata, Experimental study on tsunami forces acting on vertical seawalls under overflow, Proceedings of 36th Conference on Coastal Engineering, structures. 37, 2018.
- ② Y. Yamaguchi, J. Katsuyama, Y. Li, Crack growth prediction for cracked dissimilar metal weld joint in pipe under large seismic cyclic loading, Proceedings of the ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference, 2018.

### III. 火災防護に係る影響評価に関する研究 (H29～R2 (2017～2020))

#### 1. 研究プロジェクトの目的

- これまでの火災防護に係る安全研究の成果を活用し制定された審査基準及びガイドの見直しの要否の検討に必要な知見を得るため、まだ十分に知見が得られていない高エネルギーアーク損傷（以下「HEAF」という。）の爆発現象に係る知見を拡充する。また、電気ケーブルが加熱されることにより誤信号や短絡が発生する可能性があることを踏まえ、電気ケーブルの熱劣化に関する知見等を拡充する。さらに、今後の火災防護に係る規制の高度化等に資する火災影響評価手法・解析コード等を整備する。

#### 2. 研究概要

- HEAF の爆発現象については、電気盤を模擬した筐体を用いた HEAF 試験を実施し、爆発メカニズムに係る知見を取得した。
- 電気ケーブルの熱劣化については、コーンカロリメータ試験装置を用いた熱劣化試験を実施し、電気ケーブルの絶縁低下に係る知見を取得した（国立大学法人筑波大学への委託研究を含む）。
- 多段のケーブルトレイに敷設されたケーブル束の火災及び HEAF の爆発現象に係る解析モデルの検証と妥当性確認を実施し、火災影響評価手法・解析コード等に関する知見を取得した（国立大学法人山口大学及び金沢大学への委託研究を含む）。

#### 3. 研究成果

- HEAF の影響評価については、影響評価手法の整備に資する HEAF の爆発メカニズムに係る知見を取得した。また、HEAF の爆発圧力には、空気の熱膨張による初期のスパイク的な圧力上昇とその後の金属ヒュームの発生による圧力の 2 種類が存在することを明らかにした。
- 電気ケーブルの熱劣化評価については、熱劣化評価手法の整備に資する電気ケーブルの絶縁低下に係る知見を取得した。
- 火災影響評価手法・解析コード等については、多段のケーブルトレイに敷設されたケーブル束の火災及び HEAF の爆発現象に係る解析モデルに関する知見を取得して、同事象による影響を評価するための事象進展評価モデルを改良・整備した。

#### 4. 技術評価検討会における主な意見及びその対応

- 電気ケーブルの熱劣化評価において、200℃以上の温度の結果だけで十分であるかとの意見があった。本研究では、4つの火災シナリオ及び電気ケーブルの破損温度（NUREG/CR-6931）を参考に熱劣化温度を 200℃以上に設定しているが、評価温度に関しては、今後、後継研究プロジェクトで検討する。
- HEAF に係る解析モデルにおいて、空気加熱割合（kp）を時間変化させると試験結

果と一致する原因・物理現象について詳細に考察すべきとの意見があった。試験及び解析結果から、原因・物理現象としては、経過時間に伴い筐体内の空気密度が下がり、空気への伝熱が起こりにくくなるためと考えているが、今後、後継研究プロジェクトで  $k_p$  が時間変化する原因・物理現象について詳細に検討する。

- 実際に原子炉施設で発生した事象に基づいて実験や解析などを実施しており、研究成果は、原子炉施設の安全規格やガイドラインの制定・改訂に資するとの意見があった。今後も国内外の火災防護規制/火災防護研究の現状把握、経済協力開発機構/原子力機関（OECD/NEA）プロジェクト・仏国放射線防護・原子力安全研究所（IRSN）等との情報交換等により情報を得て、それらの情報を後継研究プロジェクトに反映させる。
- 詳細は別表 3 参照。

## 5. 事後評価結果

### (1) 項目別評価

#### ① 成果目標の達成状況： A

- 火災防護に係るガイド類の見直しの要否の検討に必要な情報として、「HEAF の影響評価」、「電気ケーブルの熱劣化評価」及び「火災影響評価手法・解析コード等」に関する知見を取得したことから、設定した目標を達成した。

#### ② 成果の公表等の状況： A

- 原子力規制庁から、査読付論文 1 件及び国際会議のプロシーディング 1 件を公表した。
- 委託先から査読付論文 3 件<sup>注2</sup>を公表した。

#### ③ 研究の進め方に対する技術的適切性： A

- 取得すべきデータに対して先進的かつ適切な試験を実施するとともに、詳細な試験後分析、解析評価を実施しており、技術的適切性をもって研究が進められた。また、OECD/NEA や米国原子力規制委員会（NRC）の研究動向等も踏まえるなど、最新知見を踏まえて研究を進めた。

#### 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、研究マネジメントが適切に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たと判断した。

<sup>注2</sup> 3 件のうち 1 件は、原子力規制庁の職員が共著者として含まれる。

⑤ 成果の規制への活用の状況・見通し： A

- 本研究では HEAF の影響評価、電気ケーブルの熱劣化評価及び火災時の隣接区画への熱・煙の影響の解析がされてきたが、これら技術的知見を基に火災関係の各ガイドの見直しが予定されている。また、今後の審査支援における申請内容の妥当性の判断や火災防護の検査にも活用することができる。(火災対策室)
- HEAF 及び電気ケーブルの研究によるガイド類の見直し要否の検討を行うことを予定していることから、今後、本知見がガイド改正等に活用されることが期待される。(技術基盤課)
- 本研究により、電気ケーブルの熱劣化に係る影響及び防火扉の損傷解析等に係る火災影響評価手法等が整備され、得られた技術的知見について、検査官向けの手引として、検査・研修に関する技術資料が作成、提供されれば、検査官が火災防護に係る検査において活用できる見込みがある。(検査監督総括課)

(2) 総合評価

- 評価結果： A
- 評価コメント：

火災防護に係る「HEAF の影響評価」、「電気ケーブルの熱劣化評価」及び「火災影響評価手法・解析コード等」に関する知見を目標どおりに取得するとともに、査読付論文や査読付プロシーディングによる成果の公表を行っている。また、今後、規制活動への成果の活用が見込まれている。

6. 評価結果の今後の活用

- 技術評価検討会で頂いた御意見については、安全研究プロジェクト「火災防護に係る影響評価に関する研究(フェーズ2)」(R3~R6年度)において活用していく。

(主な成果の公表)

(1) 原子力規制庁の職員による公表

- 論文(査読付)
  - ① H. Kabashima, F. Kasahara, Experimental Study of High Energy Arcing Faults Using Medium Voltage Metalclad Switchgears, Nuclear Technology, Vol. 205, pp. 694-707, 2019.
- 国際会議のプロシーディング(査読付)
  - ① H. Kabashima, Fire Safety Regulation on High Energy Arcing Faults (HEAF), Proceedings of the Technical and Scientific Support Organizations (TSOs) in Enhancing Nuclear Safety and Security: Ensuring Effective and Sustainable Expertise Challenges Faced by Technical and Scientific Support Organizations Conference 2018, Brussels, Belgium, Paper ID No. 93, 2018.

(2) 委託先による公表

● 論文 (査読付)

- ① T. Takeshima, Y. Tanaka, Y. Uesugi, et al., Numerical Thermofluid Simulation of High Current Air Arcs at Fault Point Contaminated with Metal Vapor from Evaporation of Metal Electrode in Open Air, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol. 14, Issue 11, 2018.
- ② T. Takeshima, Y. Tanaka, Y. Nakano, et al., Numerical Thermofluid Simulation 10kA-class High Current Fault Arcs in Air Contaminated with Metal Vapor from Evaporation of Metal Electrodes in Open Air, 2019 5th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST), 2019.
- ③ 松田昭博、椛島一、石橋隆、笠原文雄、原子力発電所用電力・制御ケーブルの火災時燃焼特性の実験的評価、日本原子力学会誌「アトモス」、60 巻 7 号、pp. 15-19、平成 30 年。



## IV. 燃料健全性に関する規制高度化研究 (H19～R2 (2007～2020))

### 1. 研究プロジェクトの目的

- 燃料被覆管の外面割れ破損が運転時の異常な過渡変化時に系統的に起こり得るかどうかを検討するため、その発生条件を明らかにする。また、高温における水素化物による巨視的な被覆管の延性—脆性遷移の発生条件を明らかにする。
- 改良合金被覆管について、合金元素含有量等が照射成長挙動に及ぼす影響に関して技術的知見を拡充する。
- 上記の研究を実施することで、燃料健全性に係る判断基準の技術的妥当性の確認及び適合性審査における判断の技術的根拠としての活用に資する。

### 2. 研究概要

- 外面割れ破損に関する研究においては、使用済燃料被覆管を対象とした個別効果試験を実施し、その発生条件について調べた。また、出力急昇時に発生する応力緩和の影響を有限要素法 (FEM) により解析的に評価した。
- 被覆管の巨視的な延性—脆性遷移に関する研究においては、水素吸収及び水素化物再配向処理を施した高燃焼度 BWR 燃料被覆管を用いて内圧破裂試験を実施し、被覆管の機械的性質を水素化物の析出状態と関連づけて整理した。
- 改良合金燃料被覆管の照射成長に関する研究においては、種々の改良合金燃料被覆管を対象として試験炉での照射試験を実施し、照射成長挙動や水素吸収に関する基礎的な知見を拡充した (国立研究開発法人日本原子力研究開発機構等への委託研究を含む)。

### 3. 研究成果

- 外面割れ破損の発生条件を明らかにするとともに、既存の過渡解析との比較を行うことで、外面割れ破損が運転時の異常な過渡変化時に系統的には発生しないと考え得る成果を得た。
- 高温における巨視的な延性—脆性遷移が、被覆管破損時周方向塑性歪約 1%を境に発生することを明らかにした。
- 合金元素含有量等が照射成長挙動に及ぼす影響を明らかにするとともに、改良合金被覆管の照射成長は、ジルカロイ-4 被覆管より小さいことを確認した。

### 4. 技術評価検討会における主な意見及びその対応

- 各々の試験は系統的に行われており、また試験手法及び結果の評価方法についても妥当であるとの意見が複数あった。
- 一連の研究においてこれまでに得られた貴重なデータを整理・分類し、そのデータを最新の情報科学技術に基づいて解析するなどといった新しい方向性を考えても良いとの意見があった。
- 蓄積したデータについては、今後、別の安全研究プロジェクトにおける活用も検

討していく。

- 詳細は別表 4 参照

## 5. 事後評価結果

### (1) 項目別評価

#### ① 成果目標の達成状況： A

- 本研究の成果により、これまで破損モードとして検討されていなかった外面割れ破損を考慮してもなお現行の燃料健全性判断基準が適用可能であることを確認することができた。
- 被覆管破損の判断基準である 1%塑性歪基準について、策定当時より大幅に燃料体の取出最大燃焼度が増大してもなお、当該基準が技術的に妥当であることを確認することができた。
- 以上により現行の燃料健全性に係る判断基準の技術的妥当性を確認できたとともに、改良合金被覆管の照射成長挙動について適合性審査における判断の技術的根拠の一つとして活用可能な技術的知見を拡充することができており、設定した目標を達成した。

#### ② 成果の公表等の状況： S

- 原子力規制庁の職員が著者に含まれる査読付論文 3 件を公表し、うち 1 件が第 53 回日本原子力学会賞 論文賞を受賞した。また、国際会議のプロシーディング 7 件の公表を行った。
- 委託先から査読付論文 1 件、国際会議のプロシーディング 1 件を公表した。

#### ③ 研究の進め方に対する技術的適切性： A

- 目的及び取得すべきデータに対応して独創的かつ適切な試験手法を開発するとともに、詳細な試験後分析、解析評価を実施しており、技術的適切性をもって研究が進められた。

#### ④ 研究マネジメント及び予算・契約管理の適切性： A

- 委託先を含め適切な研究体制を構築し、また、外的要因による研究計画修正にも柔軟に対応し目標を達成していることから、研究マネジメントが適切に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たと判断した。

#### ⑤ 成果の規制への活用の状況・見通し： B

- 本研究により蓄積された外面割れ破損及び被覆管の巨視的な延性—脆性遷移に関する知見により、現在の審査の妥当性を示す技術的根拠が拡充された。また、本研究により蓄積された、改良合金被覆管の照射成長に関する知見は、実用炉審

査に直ちに参照可能な状態には至っていないが、照射試験の追加実施等により技術的知見が拡充されれば、改良合金被覆管燃料導入時の審査において、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するなど、審査の有効性向上等に活用される見込みがある。(実用炉審査部門)

## (2) 総合評価

- 評価結果： A
- 評価コメント：

燃料被覆管の外表面割れ破損の発生条件、水素化物による高温での脆性-延性遷移及び改良合金被覆管の照射成長挙動に係る技術的知見を目標どおり取得・拡充するとともに、査読付論文の公表や国際会議等における成果の発表を積極的に行った。また、得られた成果により現行の燃料健全性判断基準の技術的妥当性を確認することができた。

## 6. 評価結果の今後の活用

- 技術評価検討会で頂いた燃料研究実施において有用な御意見については、安全研究プロジェクト「事故時炉心冷却性に対する燃料破損影響評価研究」(R1~R5年度)において活用していく。

### (主な成果の公表)

#### (1) 原子力規制庁の職員による公表

- 論文 (査読付)
  - ① K. Une, K. Ogata, T. Baba, et al., The Terminal Solid Solubility of Hydrogen in Irradiated Zircaloy-2 and Microscopic Modelling of Hydrogen Behavior, Journal of Nuclear Materials, 389, pp. 127-136, 2009.
  - ② T. Kubo, S. Yamanaka, K. Ogata, et al., In-Situ Scanning Electron Microscope Observation and Finite Element Method Analysis of Delayed Hydride Cracking Propagation in Zircaloy-2 Fuel Cladding Tubes, Journal of ASTM International, Vol. 8, No. 3, 2011.
  - ③ A. Yamauchi, K. Ogata, A study on macroscopic fuel cladding ductile-to-brittle transition at 300oC induced by radial hydrides, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 57, No. 3, pp. 301-311, 2020. (第53回日本原子力学会賞 論文賞受賞)
- 国際会議のプロシーディング (査読付)
  - ① K. Ogata, M. Aomi, T. Baba, et al., Progress in the Research Programs to Elucidate Axial Cracking Fuel Failure at High Burnup, Proc. 2007 International LWR Fuel Performance Meeting, San Francisco, Sep. 30-Oct. 3, 2007.
  - ② K. Ogata, T. Baba, K. Kamimura, et al., Separate Effects of Factors Affecting

Outside-in Cracking of High Burnup Fuel Cladding, Proc. 2008 Water Reactor Fuel Performance Meeting, Seoul, Korea, Oct. 19-23, 2008.

- ③ K. Ogata, T. Baba, K. Kamimura, et al., Effects of Heat Flux on Hydrogen Diffusion and Hydride Induced Crack Propagation in Zr-lined Zircaloy-2 Cladding Tube, Proc. Top Fuel 2009, Paris, France, Sep. 6-10, 2009.
- ④ K. Ogata, T. Baba, K. Kamimura, et al., Hydrogen Thermal Diffusion and Crack Propagation Behaviors in Irradiated Zircaloy-2 Cladding Tubes, Proc. 2010 LWR Fuel Performance Meeting, Orlando, USA, Sep. 26-29, 2010.
- ⑤ K. Ogata, T. Baba, K. Kamimura, et al., Hydrogen-Induced Crack Initiation and Propagation in Zr-Lined Zircaloy-2 Cladding Tubes, 2011 Water Reactor Fuel Performance Meeting, Chengdu, China, Sep. 11-14, 2011.
- ⑥ K. Ogata, T. Baba, K. Kamimura, et al., Effect of Increased Hydrogen Content on the Mechanical Performance of Irradiated Cladding Tubes, Proc. Top Fuel 2012, Manchester, UK, Sep. 2-6, 2012.
- ⑦ K. Ogata, T. Baba, K. Kamimura, et al., Conditions to Cause Cladding Failure by Hydrogen-Induced Cracking, Proc. 2013 LWR Fuel Performance Meeting, Charlotte, USA, Sep. 15-19, 2013.

## (2) 委託先による公表

- 論文 (査読付)

- ① 垣内一雄、天谷政樹、燃料被覆管用改良合金の照射成長挙動、日本原子力学会和文論文誌、Vol. 19、No. 1、pp. 24-33、2020.

- 国際会議のプロシーディング (査読付)

- ① M. Amaya, T. Mihara, K. Kakiuchi, Irradiation Growth Behavior of Improved Zr-Based Alloys for Fuel Cladding, Top Fuel 2019, Seattle, USA, September 2019.

## V. 加工施設及び再処理施設の内部火災等に関するリスク評価手法に関する研究 (H29～R2 (2017～2020))

### 1. 研究プロジェクトの目的

- MOX 燃料加工施設及び再処理施設に係るリスク評価手法は現在その手法が必ずしも成熟しておらず、順次適切なリスク評価手法を検討しておくことが重要である。加工施設及び再処理施設において重要な事象である内部火災を起因とするリスク評価実施手法の整備のため、当該評価手順の素案を検討する。リスク評価では、事故シナリオをより適切なものとするとともに評価に伴う不確かさを低減するため、火災又は爆発、蒸発乾固事象及び機器の経年劣化の各事象について評価手法の整備又は関係するデータ取得を行う。

### 2. 研究概要

- MOX 燃料加工施設及び再処理施設の内部火災リスク評価手順を検討した。
- MOX 燃料加工施設のグローブボックス（以下「GB」という。）火災に関するデータを取得した（国立研究開発法人日本原子力研究開発機構への委託研究を含む。）ほか、火災影響評価を行う上での留意点・着眼点及び課題を抽出した。また、再処理施設の有機溶媒火災について、ばい煙によるフィルタの目詰まりに関するデータを取得した（国立研究開発法人日本原子力研究開発機構への委託研究）。
- 再処理施設の高レベル濃縮廃液の蒸発乾固事象について、揮発性 Ru の気相への移行挙動及び乾固物への注水による影響に関する知見を得た（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）。
- 再処理施設における機器の経年劣化に関し、同施設の Ta を用いた異材接合継手について、保全活動の除染作業時に適用されるアルカリ洗浄による機械特性及び耐食性への影響について知見を得た（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）。

### 3. 研究成果

- MOX 燃料加工施設及び再処理施設の内部火災リスク評価手順の素案を作成した。
- MOX 燃料加工施設のグローブボックス火災について、GB パネル材等の熱分解及び燃焼特性データ、ばい煙によるフィルタへの目詰まりデータ等を得たほか、仮想的な GB 火災シナリオに対する火災解析コード及び上述のデータを用いた火災進展解析により、GB 火災影響評価を行う上での留意点・着眼点及び課題点を抽出した。また、再処理施設の有機溶媒火災について、ばい煙負荷量に対するフィルタの差圧上昇の関係について知見を得た。
- 再処理施設の高レベル濃縮廃液の蒸発乾固事象について、NO<sub>x</sub> を含む様々な気相条件下での揮発性 Ru の熱分解、水蒸気の凝縮等による揮発性 Ru の液相への移行挙動、高レベル濃縮廃液中の共存物質が影響を及ぼす Ru の気相への移行挙動に係る知見を取得した。また、乾固物への注水時における放射性物質（Ru、Cs 及び

その他のFP物質)の移行挙動及び昇温特性に関する知見を得た。

- Taを用いた異材接合継手に及ぼすNaOH溶液の影響について、NaOH溶液による腐食の状況、腐食に伴って発生する水素の吸収量及び水素吸収量が機械的特性に及ぼす影響について知見を得た。

#### 4. 技術評価検討会における主な意見及びその対応

- 本安全研究で得た基礎データは大変価値の高いものと評価を受けた一方、その成果は、試験及び解析の前提条件等の情報も含めて公開する努力をすべきであるとの意見があった。本安全研究の成果は論文等による公表を予定しているほか、試験委託先へも論文等による公表を促している。これらの公表の際には、技術評価検討会で得た意見を踏まえていく。
- 本安全研究で得られたデータは小・中規模の試験によるものであるため、実体系への適用に際しては解析コードによるシミュレーション等を用いた検討が必要であるとの意見があった。指摘された検討については、解析コードを含め、様々な手段を用いて検討を行っていく。
- 本安全研究で得られた知見は、規制への応用及び事業者の保安活動への活用の観点から系統的な整理が必要であるほか、本安全研究で対象としなかった事象も含めて、継続的に核燃料施設のリスク情報の収集と分析が必要との意見があった。本研究で得られた知見は、具体的な規制活動に活用できるリスク情報として整理していく予定である。また、本研究で対象とした事象に限らず、施設全体のリスクについては、今後、分析を実施していく予定である。
- 詳細は別表5参照

#### 5. 事後評価結果

##### (1) 項目別評価

###### ① 成果目標の達成状況： A

- MOX燃料加工施設及び再処理施設の内部火災を起因とするリスク評価の実施手法の検討を行い、内部火災リスク評価の手順案を作成し目標を達成した。
- GB火災に関しては、目的としていた試験データの取得、火災影響評価を実施する上での留意点・着眼点及び課題点の抽出及び有機溶媒火災によるフィルタの目詰まりに関する知見の取得を行ったことから目標を達成した。
- 再処理施設の高レベル濃縮廃液の蒸発乾固事象について、揮発性Ruの気相への移行挙動及び乾固物への注水による影響に関する知見を取得し、目標を達成した。
- 再処理施設で用いられているTaを用いた異材接合継手について、アルカリ洗浄による機械特性及び耐食性への影響について知見の取得により目標を達成した。

###### ② 成果の公表等の状況： A

- 原子力規制庁においては、プロジェクト終了時点において、査読付論文等の公表の手続きに至っていないが、蒸発乾固事象及び経年劣化について得られた成果を

論文として取りまとめて令和3年度中の公表に向けて準備を進めている。

- 委託先から査読付論文3件を公表した。

③ 研究の進め方に対する技術的適切性： A

- 研究に必要な試験の実施においては、委託先において有識者による専門委員会を設置し、実施内容及び進捗に関してレビューを受けながら試験を実施した。また、解析を含め、国内外の最新知見及び海外研究機関との意見交換から得られた知見を踏まえて研究を進めた。以上より、技術的適切性をもって研究が進められたと判断した。

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。

⑤ 成果の規制への活用の状況・見通し： B

- 本研究の成果の一部を、日本原燃株式会社再処理事業所再処理施設及び同事業所 MOX 燃料加工施設の新規制基準適合性に係る審査のための技術的な判断材料として活用した。また、再処理施設及び MOX 燃料加工施設を対象に実施される原子力規制検査等における確認のための技術的根拠の一部として活用できるものと考えられる。(核燃料施設審査部門)
- 本研究により得られる加工施設及び再処理施設の内部火災等を対象としたリスク評価に係る技術的知見、情報について、検査官用資料として整理、提供されれば、リスク情報を活用した検査の実施及び検査指摘事項の重要度評価手法の検討に必要なリスクの抽出と定性的な評価基準の設定等において活用される見込みがある。(検査監督総括課)

(2) 総合評価

- 評価結果： B

- 評価コメント：

計画どおりに試験及び解析を実施して、目的とした知見を取得し、目標を達成している。

6. 評価結果の今後の活用

- 本研究で得られた科学的・技術的知見は、再処理施設及び MOX 燃料加工施設を対象に実施される原子力規制検査等に活用されるよう関係部門と共有していく。
- 今後の研究に当たっては、本研究で抽出された課題について知見の拡充を図る一方、本研究における知見の取得状況や、再処理施設及び MOX 燃料加工施設の新規制基準適合性に係る審査の知見を踏まえた上で、施設全体でのリスクの所在等を

考慮した知見の取得について、更なる検討を進めていく。

(主な成果の公表)

(1) 原子力規制庁の職員による公表

● 論文 (査読付)

なし

(2) 委託先による公表

● 論文 (査読付)

- ① 吉田一雄、玉置等史、吉田尚生ほか、再処理施設の高レベル廃液蒸発乾固事故でのFP硝酸塩の脱硝に伴い発生するNO<sub>x</sub>の化学的挙動解析、日本原子力学会和文論文誌、Vol. 18、No. 2、pp. 69-80、2019.
- ② N. Yoshida, T. Ono, R. Yoshida, et al., Decomposition behavior of gaseous ruthenium tetroxide under atmospheric conditions assuming evaporation to dryness accident of high-level liquid waste, Journal of Nuclear Science and Technology, 2020.
- ③ R. Yoshida, Y. Amano, N. Yoshida, H. Abe, Restraint effect of coexisting nitrite ion in simulated high level liquid waste on releasing volatile ruthenium under boiling condition, Journal of Nuclear Science and Technology, 2020.



## VI. 廃棄物埋設に影響する長期自然事象の調査方法及びバリア特性長期変遷の評価方法に関する研究 (H29～R2 (2017～2020))

### 1. 研究プロジェクトの目的

- 中深度処分規制基準等の整備、適合性審査及び後続規制の確認の際の判断に必要な知見の収集・整備のため、廃棄物埋設地の位置に係る自然事象の長期評価、廃棄物埋設におけるバリアの性能評価手法及び地質環境及び水理環境のモニタリングに係る科学的・技術的知見の蓄積を行う。

### 2. 研究概要

- 自然事象の長期評価については、隆起・侵食、断層、地下水流動に関する評価手法、岩盤の力学・水理学的特性及び核種の収着・移行現象を検討した（国立研究開発法人産業技術総合研究所への委託研究並びに国立大学法人埼玉大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構及び国立大学法人東京大学との共同研究を含む）。
- 廃棄物埋設の性能評価手法については、人工バリアの長期性能及び天然バリアの水理特性の評価手法を検討した（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を含む）。
- 地質環境及び水理環境モニタリングに関する研究では、モニタリング施設の閉鎖措置及びその確認の手法等を検討した（国立研究開発法人日本原子力研究開発機構及び産業技術総合研究所への委託研究並びに公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターへの委託調査）。

### 3. 研究成果

- 本研究では、中深度処分の基準作りに活用する科学的・技術的知見のみならず、中深度処分、ピット処分及びトレンチ処分の認可申請の審査において妥当性を判断するための科学的・技術的知見を取得し、以下のような成果を得た。
- 隆起・侵食量評価手法の廃棄物処分への適用性について整理し、青森県東部地域において、適用し、傾向を確認した。
- 物理探査を使った断層の長さの評価手法を比較、検討し、適切な断層長判定のための認定フロー（案）を作成した。
- 地下水流動評価のために必要となる地下水年代をボーリングコアの間隙水試料から把握する手法を構築した。
- 掘削影響領域（EDZ）における透水性の判定において、孔観察、透水試験、弾性波探査試験等の手法の組合せの重要性が明らかとなった。
- 岩石中の空隙が微小なほど放射性核種の収着量が増加することが示唆された。
- ベントナイト系人工バリアの物質移行-変質連成解析のため、見かけの拡散係数データベースの作成及び設定すべき二次鉱物の抽出を行った。セメント系人工バリアの長期の漏出抑制性能を評価するため、①細孔構造の変遷と物質移行性、②

セメント結晶（非晶質含む）の変遷と物質移行性についての試験法の整理を行った。

- 地形変化評価手法を整理し、典型的な集水域を対象とした過去から将来の地形変化の評価を行うとともに、非定常三次元地下水流動・核種移行評価を行った。
- モニタリングに関する諸外国の規制制度等の整理、モニタリング装置の配置及びモニタリング項目・期間等の設定のための知見を取得した。また、モニタリング孔閉鎖時に、孔自体及びその周辺が水みちとならないよう閉鎖すること並びにその確認に資する科学的・技術的視点を整理した。

#### 4. 技術評価検討会における主な意見及びその対応

- セメント硬化体に対する研究は空隙構造の基礎的な特性の試験であり、人工バリアの長期性能評価につながるよう検討することが望まれるとの意見があった。今後、拡散場、移流場及び吸着の検討を組み合わせ、移行性を体系的に評価する。
- 瑞浪深地層研究所が埋戻しとなり試験の実施が困難となることから、代替試験法の検討が必要との意見があった。共同研究で、岩石試料の力学特性と水理学的特性を同時に取得する室内試験を進めており、原位置試験と合わせて検討を進める。
- 長期の地形変化を伴う地下水流動・核種移行について、継続的検討が望まれるとの意見があった。この評価手法には解決困難な仮定があるため、現象理解の一方、不確かさを含む現在の理解を評価へ反映するロジックの構築等を検討する。
- 評価に用いているモデル、バックデータについて論文として積極的に公表すべきとの意見があった。研究成果を規制へ反映する立場で取りまとめること、規制庁の職員自身が技術的検討を行うことを進めており、今後公表を行っていく。
- 詳細は別表 6 参照

#### 5. 事後評価結果

##### (1) 項目別評価

##### ① 成果目標の達成状況： A

- 廃棄物埋設地の位置に係る自然事象の長期評価に関する研究については、隆起及び侵食、断層、地下水流動、岩盤の力学・水理特性等の現象における評価の視点に関する科学的・技術的知見を抽出し、当初の目的を達成した。
- 廃棄物埋設における性能評価手法に関する研究については、ベントナイト系人工バリアの淡水—塩水混合系地下水環境の廃棄物埋設地が位置する環境における長期評価手法の妥当性及びセメント系人工バリアの長期性能評価手法に関連する細孔構造の計測法、結晶安定性評価の手法に関する科学的・技術的妥当性を抽出し、当初の目的を達成した。
- 地質環境及び水理環境モニタリングに関する研究では、諸外国及び国内における地下水モニタリング技術の現状及び問題点を明確にした。また、ボーリング孔の閉鎖確認について、原位置試験及び室内試験を行い、漏えい等の確認における問題点の抽出を行い、当初の目的を達成した。

② 成果の公表等の状況： A

- 原子力規制庁においては、プロジェクト終了時点において、査読付論文等の公表の手続きに至っていないが、得られた成果を論文として取りまとめて公表に向けて準備を進めている。
- 委託先から査読付論文2件を公表した。

③ 研究の進め方に対する技術的適切性： A

- 取得すべき知見に対応して調査、各種試験（室内試験、原位置試験）及び解析を組み合わせて、技術的適切性をもって研究が進められた。

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、目標達成に向けて研究を着実に実施し目標を達成した。
- 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。

⑤ 成果の規制への活用の状況・見通し： A

- 廃棄物埋設に係る自然事象の長期評価に関する研究成果は、中深度処分に係る規制基準等における要求事項（令和2年度第17回原子力規制委員会資料2及び同年第55回原子力規制委員会資料3）を策定するに当たり、中深度処分の自然条件等（火山等、深度、鉱物資源等及び断層等）に関する技術的情報として活用された。（研究炉等審査部門）
- 既に申請されたピット処分の事業変更許可の審査において、本研究により蓄積された科学的・技術的知見を用いた基盤Gの技術支援を受けた。  
また、将来の中深度処分の事業許可及び今後のトレンチ処分の事業許可等において、本研究により蓄積された科学的・技術的知見を用いて行われる技術支援等を審査に活用する見込みである。（核燃料施設審査部門）
- 廃棄物埋設に係る自然事象の長期評価に関する研究により得られる技術的知見について、検査官用資料として整理、提供されれば、廃棄物埋設施設及び廃棄物を対象に実施される原子力規制検査等における確認のための技術的根拠の一部として活用できるものと考えられる。（検査監督総括課）

(2) 総合評価

- 評価結果： A
- 評価コメント：

計画どおりに調査・研究が進められ、中深度処分の規制基準等の整備、適合性審査及び後続規制の確認の際の判断に必要な知見の収集・整備における自然事象の長期評価、性能評価手法及びモニタリングに係る科学的・技術的知見の蓄積

が行われた。これらの知見を反映した規則の改正が令和 3 年度に予定されている。また、現在行われているトレンチ処分及びピット処分の事業許可の審査において、既にこれらの知見が反映されている。

#### 6. 評価結果の今後の活用

- 今後の研究プロジェクトでは計画的に成果を論文等により公表していく。
- 技術評価検討会でいただいた意見や内外の研究及び規制の動向を十分に考慮し、後継の安全研究プロジェクト「廃棄物埋設における長期性能評価に関する研究」(R3～R6 年度)において、より具体的に中深度処分の条件を設定し、審査における判断に適用できる検討を進める。

(主な成果の公表)

(1) 原子力規制庁の職員による公表

- 論文(査読付)  
なし

(2) 委託先による公表

- 論文(査読付)
  - ① M. Takeda, M. Manaka, K. Ito, A Method for Estimating Geologic Pressure in Argillaceous Formations Based on the State of Dynamic Equilibrium between Chemical Osmosis and Advection, Journal of Hydrology, Vol. 579, 2019.
  - ② 村上裕晃、岩月輝希、竹内竜史、西山成哲、放射性廃棄物の処分分野における地下水モニタリングの方法、原子力バックエンド研究、27、1、pp. 22-33、令和 2 年.

## VII. 放射性廃棄物等の放射能濃度評価技術に関する研究（H29～R2（2017～2020））

### 1. 研究プロジェクトの目的

- 原子力規制委員会による種々の放射性廃棄物等の放射能濃度評価の確認において事業者の申請の妥当性を判断するために、測定装置の特性及び対象物の性状に応じた放射能濃度評価精度に影響するパラメータ等を把握する。

### 2. 研究概要

- 廃棄物確認に関して、今後埋設処分が想定される廃棄体等について、非破壊測定  
の精度に影響を与える因子及びその影響の度合いを定量的に評価した（公益財団  
法人原子力環境整備促進・資金管理センターへの委託研究を含む）。
- クリアランスの確認に関して、従来の放射能濃度確認対象物以外の対象物の極め  
て低い放射能を性状に応じて適切に測定・評価する技術及び複数の材料から構成  
される対象物中の放射能を適切に評価する技術を整理した（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及び学校法人五島育英会東京都市大学との  
共同研究を含む）。
- 廃止措置終了確認に関して、サイト解放後の公衆の被ばく線量の評価コードを整  
備するとともに評価条件の具体的設定方法を整理した（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を含む）。
- 長半減期放射性核種等の分析における信頼性確保に資する科学的・技術的知見を  
蓄積した（国立大学法人東京大学、国立大学法人東京工業大学、国立研究開発法  
人量子科学技術研究開発機構及び国立研究開発法人日本原子力研究開発機構と  
の共同研究）。

### 3. 研究成果

- 廃棄物確認に関して、トレンチ処分対象廃棄物については、今後発生が見込まれ  
る新たな廃棄体等を対象に、非破壊測定による放射能濃度評価に対して、現実的  
な廃棄物配置モデルを作成し、シミュレーション計算により放射能濃度評価に影  
響を与える要因を整理した。中深度処分対象廃棄体については、放射化計算等  
に基づく放射能濃度評価手法の適用が想定されることから、放射化前の微量な親元  
素濃度の評価方法について検討するとともに、放射化計算の妥当性を確認するた  
めの放射化核種の分析において留意すべき事項を整理した。
- クリアランスの確認に関して、新規クリアランス対象物の放射能濃度設定の妥当  
性及びその測定可能性の評価を行った。また、低濃度の放射能測定において考  
慮が必要な測定の不確かさをを用いた適合性評価の導入の妥当性の評価を行  
った。
- 廃止措置終了確認に関して、廃止措置終了後の公衆の被ばく線量を評価するた  
めに必要となるフォールアウトを考慮した BG の設定方法及び評価対象エリアの放  
射能濃度分布に基づくサイト固有条件を考慮した被ばく線量評価方法を検討し、  
廃止措置被ばく評価コードシステム CDecom を整備した。また、廃止措置終了確

認の一連の手順を整備した。

- 長半減期放射性核種等の分析における信頼性確保に関して、放射性核種分析方法の妥当性を確認するために必要な広範な要素技術、すなわち試料の採取、試料からの対象核種の抽出、溶解等の前処理、化学分離、測定等に係る基礎データを取得するために  $^{93}\text{Zr}$ 、 $^{129}\text{I}$ 、 $^{135}\text{Cs}$ 、ウラン同位体などの長半減期放射性核種等の分析方法に関する科学的・技術的知見を蓄積した。

#### 4. 技術評価検討会における主な意見及びその対応

- 廃棄物確認に関して、ドラム缶や角型容器に収納された廃棄物の放射能濃度の保守的評価手法について具体的な手順とともに評価における留意事項が適切に示されていると評価を受けた一方、実廃棄物に応じたモデル設定の方法等について、もう少し幅広の検討が必要であるとの意見があった。今後は、実廃棄物の状態を踏まえたより詳細な検討を進めていく。
- クリアランスの確認に関して、新規対象物の測定評価手法の整備は規制側の確認だけでなく、事業者側にとっても有益な成果であると評価された一方、不確かさの扱いについて、必要に応じて国際的な考え方との整合性の観点から、継続的な改善を期待したいとの意見があった。今後は、国際的な動向を踏まえ、適宜後継の安全研究にて必要な検討を進めていく。
- 廃止措置終了確認に関して、整備された廃止措置終了確認フローの統合システムは素晴らしい成果であると評価を受けた一方、数学的に高度な内容を含んでおり、実際の運用を念頭に置いた検討が必要であるとの意見があった。今後は、規制プロセスにおける実際の運用を念頭に置いた取りまとめを進めていく。
- 長半減期放射性核種等の分析における信頼性確保に関して、取り扱われている長半減期核種や分析手法の選定は妥当であると評価を受けた一方、これまでに蓄積した知見やノウハウを活用するために、化学分離に影響を及ぼすメカニズムの整理等が必要との意見があった。今後は、化学形態、吸脱着機構、溶出機構等の化学的現象の理解も考慮した上で検討を進めていく。
- 詳細は別表7参照

#### 5. 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種々の放射性廃棄物等の放射能濃度評価の確認において事業者の申請の妥当性を判断するために、測定装置の特性及び対象物の性状に応じた放射能濃度評価精度に影響するパラメータ等を把握することに関連する科学的・技術的知見等を整備したことから、設定した目標を達成した。

##### ② 成果の公表等の状況： A

- 原子力規制庁職員を著者とする査読付論文3件を公表し、積極的かつ速やかな研

究成果の発信に努めた。

- 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、先行して学会で口頭発表を複数回行った内容も含め、得られた成果を論文等として取りまとめて公表の準備を進めている。

③ 研究の進め方に対する技術的適切性： A

- 取得すべきデータに対応して調査、各種試験及び統計解析を組み合わせた的確なデータを取得して評価を行い、技術的適切性をもって研究が進められた。

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するとともに、研究を取り巻く環境の変化にも対応し、研究内容及び研究スケジュールを随時見直すなど、目標達成に向けて研究を柔軟にかつ着実に実施し目標を達成していることから、研究マネジメントが適切に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たと判断した。

⑤ 成果の規制への活用の状況・見通し： A

- クリアランスの確認に関する研究成果は、放射能濃度についての確認を受けようとする物に含まれる放射性物質の放射能濃度の測定及び評価の方法に係る審査基準（原規規発第 1909112 号）の策定に当たり、不確かさを考慮した放射能濃度の決定に活用された。（研究炉等審査部門）
- 既に申請されたクリアランス認可の審査において、本研究による放射線測定の不確かさの考慮に関する科学的・技術的知見を用いた基盤 G の技術支援を受けた。また、将来の新規クリアランス対象物に関する認可等において、本研究により蓄積された科学的・技術的知見を用いて行われる技術支援等を審査に活用する見込みである。（核燃料施設審査部門）

(2) 総合評価

- 評価結果： A
- 評価コメント：

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既に規制へ反映されており、その他の成果は、今後、規制活動への成果の活用も見込まれている。

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内外の研究及び規制の動向を十分に考慮し、後継の安全研究プロジェクト「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~R7年度)において、放射性廃棄物等の放射能濃度評価の定量化に係る知見の蓄積を進める。

(主な成果の公表)

(1) 原子力規制庁の職員による公表

● 論文(査読付)

- ① H. Sakai, T. Yoshii, F. Takasaki, J. Kawarabayashi, Evaluation of the detection limit of net count in peak for the energy spectrum of CZT detector, Applied Radiation and Isotopes, Vol. 169, 109569, 2021.
- ② H. Sakai, T. Yoshii, S. Kawasaki, Derivation of uncertainty propagation for clearance measurement, Applied Radiation and Isotopes, Vol. 170, 106930, 2021.
- ③ K. Yamamoto, H. Asanuma, H. Takahashi, T. Hirata, In situ isotopic analysis of uranium using a new data acquisition protocol for  $10^{13}$  ohm Faraday amplifiers, Journal of Analytical Atomic Spectrometry, Vol. 36, pp. 668-675, 2021.

(2) 委託先による公表

● 論文(査読付)

なし



## 津波ハザード評価の信頼性向上に関する研究に対する外部専門家及び専門技術者の評価意見並びにその回答

| 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。②解析実施手法、実験方法が適切か。③解析 | 報告書の P5 について、S の標準偏差と書かれているが、S の標準偏差は M0 に依存し、logS の標準偏差は M0 に依存しないと仮定することが一般的ではないでしょうか。そのあたりが不明瞭な記載になっていますので、誤解のない記載に報告書を修正することが必要かと思えます。   | 拝承いたします。ご指摘を踏まえ、報告書の該当箇所の記載を以下のように修正します。<br>「原論文中では、log(S)の標準偏差 $\sigma_{\log(S)}$ が Mo に依存しないと仮定して $\sigma_{\log(S)}$ は 1.54 と示されている。ここでは S の関数とし、log(Mo)の標準偏差 $\sigma_{\log(Mo)}$ が S に依存しないと仮定することで $\sigma_{\log(Mo)}$ は 1.91 となる。」  |
| 2       | 結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。④重大な見落とし(観点の欠          | 報告書の P18 について、ロジックツリー(図 2.1.7a,b)で、対数正規分布とロジックツリーとして書かれていますが、対数標準偏差の値をロジックツリーの分岐として記載するのが適切なロジックツリーの書き方ではないでしょうか。  | ご指摘のように、対数標準偏差の値をロジックツリーの分岐とすることも考えられますが、本研究では、各スケール則が固有の値を持つと考え、それぞれ 1 つ設定することとしました。そのため、分岐のないロジックツリーとして表現することにしました。  |
| 3       | 落)がないか。                                      | 報告書の P60 について、技術的にそれほど難しくなく最大加速度に対する確率論的地震ハザード評価をなぜ実施せず、式 2.4.10 の式変換を用いた評価としているかが理解できません。研究計画として委託先等の能力に起因する手法の選択でしょうか。具体的には、海底の堆積物による地盤の増幅を考えた後に、その波が正弦波に近似できるとして、式 2.4.10 を適用することは、近似的には成り立つかもしれませんが、工学的基盤の最大速度に式 2.4.10 を適用することは適切ではないと思われます。また、加えて、海底の堆積物による地盤増幅率が考えられていないことの妥当性についても懸念があります。 | ご指摘ありがとうございます。本研究では、海底地すべり起因の確率論的津波ハザード評価手法の整備を目的としています。その中で、同手法の可用性を確認するためにモデル海域として駿河湾を対象としましたが、実際の地盤物性値の情報を入手することが困難な状況であることを踏まえ、地震加速度も含めて、評価に必要なデータを仮定することでモデル海域での試解析としました。ご指摘のように最大加速度を指標とした確率論的地震ハザード解析を実施することは、技術的に困難ではありませんが、モデル海域での試解析のための仮定のデータを得るために人的・費用的リソースを投入することの効果は小さいと判断しました。その代わりに、公的機関の公表データ(最大速度のハザード曲線) |

| No. | 評価項目 | 評価意見  | 回答   |
|-----|------|---|--|
|     |      |   | <p>の利用を考えました。</p> <p>しかし、ご指摘を踏まえまして、手法の精緻化のためには海底の堆積物を含めた地盤増幅率を考慮する必要があると考え、地盤物性値の取得や地盤モデルの設定と合わせて、今後の課題とさせていただきます。報告書には、その旨を記載いたします。</p>  |
| 4   |      | <p>津波ハザード評価として、不確かさの幅を適切に把握しようという方向性は適切と考えます。一方、確率論的地震動ハザード評価では、諸外国では専門家意見をはじめとした SSHAC 手法により、技術的な妥当な範囲の中心や分布、範囲を評価することが標準的になっています。これは、評価者によって不確かさの評価幅を異なることを避けるためです。確率論的津波ハザード評価も不確かさの特徴は、地震動ハザードと同じであることから、同様な枠組みを志向することが、国際的な整合性等の観点から適切ではないかと考えられます。一方、本プロジェクトでは、不確かさを適切にとらえようという試みも含まれていますが、従前の <b>best estimate</b> のハザード評価を行う枠組みを暗黙の前提としているように感じます。実際、求められた平均ハザード曲線が、適切であることを示すことができていません。以上より、「不確かさ」の取り扱いの改善という研究背景を踏まえると、必ずしも十分ではない部分もあり、今後の改善が必要であると考えられます。</p> | <p>確率論的地震ハザード評価における SSHAC 手法の複数専門家意見を取り入れる枠組みを確率論的津波ハザード評価にも志向することが適切であるのご意見、拝承いたします。</p> <p>しかしながら、本研究のスコープは、従来（土木学会の津波評価技術など）の確率論的津波ハザード評価では取り扱っていなかった不確かさの項目を示し、その反映方法を提案するとともに、それらの項目がハザード解析結果に及ぼす影響の程度を感度解析的に把握しようとするものです。ご指摘のありました <b>best estimate</b> を志向したというよりも、一専門家としての意見を具体化したものになります。</p> <p>まずは、本研究の知見を論文等により公表し、これらの不確かさの項目が広く認知され、そして将来的には SSHAC 手法による確率論的津波ハザード評価において、一専門家の意見として本研究で上げた不確かさ項目が認識論的あるいは偶然的な不確かさの項目として組み込まれることを期待します。</p> |
| 5   |      | <p>委託研究を規制庁の研究の成果とすることについて、規制庁側がそれを受けてどのような技術的解釈を加えてまとめたのかについて、明確化が必要かと考えられます。</p>  | <p>本研究プロジェクトのうち、「2.4 海底地すべり起因津波の確率論的津波ハザード評価手法の整備」の一部（2.4.2 項）を委託研究による実施体制で進めてきました。</p>  |

| No.   | 評価項目                      | 評価意見   | 回答   |
|---|---------------------------|--|--|
|   |                           |  | <p>規制庁の委託研究では、規制庁が研究課題、目的、大まかな仕様を提示して、委託先を公募によって決定し、研究を進めてきました。その際、規制庁職員も目的を共有し、定期的な打合せを行い、研究に関わることで、成果を共有しています。</p> <p>ただし、本報告書の中では、委託先が実施主体であることに配慮して、研究結果を記載しましたが、ご指摘を踏まえて、2.4.2項のまとめとして、新たに「(3)海底斜面の地震時安定性評価における修正フェレニウス法の適用性について」を立て、委託先による実験及び解析結果を踏まえた規制庁の考えを記載するよう修正いたします。</p> |
| (以下 No. 6～9 は、上記 No. 1～5 の評価意見と回答を踏まえ、糸井達哉氏よりいただいた再評価。) |                           |  |  |
| 6   | ①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。  | おおむね踏まえているものと考えられる。                          | 拝承いたします。   |
| 7   | ②解析実施手法、実験方法が適切か。         | 細かい部分で必ずしも適切でないものも見られるが、今後の課題として整理されており問題ない。 | 拝承いたします。   |
| 8   | ③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | 今後の課題として明記されており、問題ない。                        | 拝承いたします。   |
| 9   | ④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。      | ないものと考えられる。                                  | 拝承いたします。   |

| No.     | 評価項目                     | 評価意見                                     | 回答   |
|---------|--------------------------|--|--|
| 岩田 知孝 氏 |                          |  |  |
| 1       | ①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。 | 報告書からは本内容に関して読み取ることが困難であるが、そうされているのであろう。 | <p>評価項目の①「国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。」について、読み取り難いとのこと、大変失礼いたしました。各研究課題の実施にあたって踏まえた既往研究を以下のとおり整理いたします。</p> <p>「2.1 津波発生・伝播モデルの不確かさ評価手法の整備」では、確率論的津波ハザード評価手法に関する既往研究の主なものとして、杉野ら(2015)<sup>2.1.2</sup>、土木学会(2016)<sup>2.1.1</sup>、地震本部(2020)<sup>2.1.3</sup>を取り上げました。これらの既往研究では考慮されていなかった不確かさ項目を指摘し、さらに、これらの不確かさ項目に関わる既往研究 (Murotani et al.2013<sup>2.1.5</sup>, 田島ら 2013<sup>2.1.6</sup>, 藤原ら 2015<sup>2.1.7</sup>, Gutenberg and Richter1944<sup>2.1.10</sup>, Kagan2002<sup>2.1.11</sup> など) について調査・分析し、確率論的津波ハザード評価手法への導入方法を提案しました。</p> <p>「2.2 津波地震による津波の特性化波源モデルの構築」では、津波評価に関する最近の動向として地震本部の津波レシピ(2017)<sup>2.2.1</sup> とその中で導入された Tanioka and Satake(1996)<sup>2.2.2</sup> の方法 (地殻の水平変位の寄与分を考慮した津波初期水位の設定方法) に着目し、この方法を採用したときの特性化波源モデルの設定方法はどうか、という点に研究課題を見出して研究に取り組みました。</p> <p>「2.3 中小規模及び大規模津波の特性化波源モデルの適用性検証」では、既往研究として著者らの論文(杉野ら 2014<sup>2.3.1</sup>)</p> |

| No. | 評価項目              | 評価意見                                | 回答  |
|-----|-------------------|-------------------------------------|---|
|     |                   |                                     | <p>を取り上げて、この論文中で提案したプレート間地震津波の特性化波源モデルのうち、Mw8.8以下の特性化波源モデルを対象に実津波の痕跡高の再現性を定量的に評価しました。</p> <p>「2.4 海底地すべり起因津波の確率論的津波ハザード評価手法の整備」では、既往研究として、Grilli ら(2009)<sup>2.4.3</sup> や嶋原・Horrillo(2014)<sup>2.4.4</sup>を踏まえ、既往研究では考慮されていなかった不確かさ項目の導入及び、陸域斜面で実績のある斜面安定性評価手法の海底環境下での適用性把握を研究課題として設定し、研究に取り組みました。</p> <p>上述のとおり、各研究課題に関連する既往研究を踏まえて研究を遂行するとともに、報告書の各節において、その旨を記載しております。</p> |
| 2   | ②解析実施手法、実験方法が適切か。 | 適切性についての自己評価がないため正確にはわからないが、そうであろう。 | <p>評価項目の②「解析実施手法、実験方法が適切か。」について、適切性に関する自己評価がないため正確には分からないとのこと、大変失礼いたしました。各研究課題について、当該評価項目に関する自己評価を以下のとおり整理いたします。</p> <p>「2.1 津波発生・伝播モデルの不確かさ評価手法の整備」では、一例ですが、地震規模と断層面積に関するスケーリング則の確率モデルを設定し確率論的津波ハザード評価手法に導入しました。上記の確率モデルの設定においては、原論文の結果をトレースした上で、元の地震データを精査し、必要に応じて一部訂正した。確率論的津波ハザード解析コードでは、上記の確率モデルの導入に必要と</p>  |

| No. | 評価項目 | 評価意見 | 回答   |
|-----|------|------|--|
|     |      |      | <p>なる乱数生成には、科学技術分野で実績のある MATLAB のライブラリーを使用し、適切な確率分布が生成されていることを確認すること、サンプリング数の多寡や乱数の種の影響を考慮してサンプリング数を決定したことから、解析方法は適切であると考えます。</p> <p>「2.2 津波地震による津波の特性化波源モデルの構築」では、プレート間地震による地殻変動の水平変位による津波初期水位の生成を模擬した水理模型実験を実施し、初期水位に関するデータを取得しました。模型作成に際し、水槽と可動式斜面模型の間には低摩擦シート、模型の動作には PC 制御による電動アクチュエーターを採用し、極めて再現性の高い実験装置であることを確認しています。また、実験方法及び結果については、土木学会論文集 B2 (道口ら 2019<sup>2.2.4</sup>) に掲載されており、技術的査読を経たものであることから、実験方法は適切であると考えます。また、東北地方太平洋沖地震津波の波源推定に用いたインバージョン解析手法及び津波伝播解析についても既発表論文 (杉野ら 2013<sup>2.2.10</sup>) で用いた手法と同様であることから、適切であると考えます。</p> <p>「2.3 中小規模及び大規模津波の特性化波源モデルの適用性検証」では、既往津波の再現のための津波伝播解析を実施しており、前述の 2.2 節と同様であり、適切であると考えます。</p> <p>「2.4 海底地すべり起因津波の確率論的津波ハザード評価手法の整備」では、海底斜面を模擬した遠心模型実験を実施</p> |

| No. | 評価項目                 | 評価意見  | 回答   |
|-----|----------------------|---|--|
|     |                      |   | <p>しました。この実験は、類似の実験を行った経験のある日本大学への委託で実施し、実験結果及び解析結果は、委託先から日本地震工学会論文集に発表し、技術的査読を経たものであることから、実験方法及び解析方法は適切であると考えます。また、本研究で使用した確率論的津波ハザード解析手法の基本モジュールは、既発表論文（杉野ら 2015<sup>2.1.2</sup>）のものを使用していることから、同解析手法についても適切であると考えます。</p>  |
| 3   | ②解析実施手法、実験方法が適切か。    | <p>ご質問させていただいたように、これまでと異なる津波評価手法での震源モデリングでは、幾何平均、幾何標準偏差が向上したというご説明をうけたが、波形や観測量に戻って何がよくなったかということを示していただかないと、こういった高度なモデルの優越性や結果に意味があるかどうかはわからないと考えるが如何か。もちろんそれらも見ておられての結果の導出とは考えるが、</p> | <p>拝承いたします。本研究で推定した 2 つの津波波源モデル（TS 法モデルと従来法モデル）による解析値と観測値の比較図を追記させていただきます。比較図は、遡上高や浸水高などの津波高さと沖合の津波水位波形といたします。</p> <p>なお、誤解されている可能性があるので、念のため、本研究の目的を補足説明いたします。本研究では、上記 2 つのモデルの再現性について、優劣を判定することが目的ではありません。むしろ、どちらも同程度の再現性であることを確認した上で、TS 法を導入したことにより推定される津波波源モデルのすべり分布がどのように変化するかを確認することが目的です。</p> |
| 4   | ④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。 | <p>東北地方太平洋沖地震の津波に関しては海底じすべりの可能性は完全に否定されたのか？</p>   | <p>小平ほか(2012)の論文によれば、東北地方太平洋沖地震の後の海底地形の調査により、海溝軸沿いの一部で海底地すべり跡が発見されており、海底地すべりが発生していた可能性は高いと考えます。</p> <p>本研究（項目 2.2）では、海底地すべりが発生していた可能性を指摘する報告があるものの海溝軸沿いの全容が判明していないことから、津波初期水位の生成が全てプレート間地震による海底の地</p>  |

| No.            | 評価項目  | 評価意見  | 回答   |
|----------------|---|---|--|
|                |   |   | <p>形変化によると仮定して検討を進めました。本報告書では、その旨を記載していなかったため、誤解を招くことになりました。上記の内容を報告書に記載させていただきます。</p> <p><b>【参考文献として追加】</b></p> <p>・小平ほか、2011年東北地方太平洋沖地震：海底地形データから明らかにされた海底変動、地質学雑誌、110、9、530-534、2012.</p>   |
| <b>梅木 芳人 氏</b> |   |   |  |
| 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>②解析実施手法、実験方法が適切か。</p> <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>④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。</p> | <p>2.3 中小規模及び大規模津波の特性化波源モデルの適用性検証</p> <p>今回検討された既往地震再現モデルの<math>(K, \kappa)</math>を、東北地震津波の<math>(K, \kappa)</math>と比較するためには、痕跡データの精度等による影響の程度を考察することに加えて、最適な既往地震再現モデルを追求することが重要と考える。そのことなしに、「PTHAの計算津波高の不確かさを地震規模に応じて変化させることの必要性が示唆された。」(p.74)との結論には、少し飛躍があるように思う。</p> | <p>本研究(2.3節)の目的は、著者らの既発表論文(杉野ら2014<sup>2.3.1</sup>)で提案したプレート間地震津波の特性化波源モデルのうち、<math>M_w 8.8</math>以下の特性化波源モデルの設定方法について実津波の痕跡高の再現性を定量的に評価することです。そのため、設定方法を固定した上で、許容される範囲で、波源の位置や不均一すべりの配置を変化させて、複数の特性化波源モデルを設定し、できるだけ最適な再現モデルを探求する、という方法を取りました。</p> <p>ご指摘の主旨は、杉野ら(2014)<sup>2.3.1</sup>の方法に固執するのではなく、新たな設定方法を追求する必要がある、と解釈いたしますが、これは上述した本研究の目的を超えていると考えます。ただし、結論には飛躍があるとのこと指摘を踏まえ、以下のように修正いたします。</p> <p>「今回得られた<math>(K, \kappa)</math>は、確率論的津波ハザード評価(PTHA)の不確かさの設定パラメータ<math>\beta = \ln(\kappa)</math>として利用できるものの、杉野ら(2014)<sup>2.3.1</sup>の特性化波源モデルを採用する場合には、計算</p> |



| No.            | 評価項目   | 評価意見   | 回答  |
|----------------|--|--|---|
|                |  |  | 津波高の不確かさを地震規模に応じて変化させることの必要性が示唆された。」(下線付きが追記した箇所です。)  |
| 2              |  | 海底地すべり起因津波の確率論的津波ハザード評価手法の整備において、「海底地すべり起因津波の確率論的ハザード手法が提案できた」という結論になっているが、提案というには、本当にその方法が最適なのかという検証が不十分と考えられるため、実用化のための精度向上だけではなく、手法そのものの再検討も課題として挙げられた方が良く思う。   | 拝承いたします。本プロジェクト期間内での検討では、ご指摘のとおり、提案した手法では不十分な点がありますので、確率論的津波ハザード解析手法を構成する各種要素の手法についてさらなる検討が必要であることを追記いたします。   |
| 3              |  | 今後に向けての課題抽出はされているが、「津波ハザードの信頼性向上」の(現時点での)最終目標を想定したうえで、そのための課題、検討の優先順位、というような、理想像でも良いので今後の研究計画も含めた全体像を示していただけるとよいと思う。   | プロジェクト期間を終えた現時点において、開始時点の目標は達成したと考えている。ただし、研究を遂行したこと各研究課題において新たな課題が見つかったため、これらの解決が最終目標と考えます。ただし、費用対効果や人的リソースを考慮して、次期プロジェクトで優先的に解決すべき課題として 2.2 節の課題 (p.76) を選定しました。今後 4 年間で解決を目指します。   |
| <b>土志田 潔 氏</b> |  |  |   |
| 1              | 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。 | 7.今後の展開について、②・③の観点からコメントする。2020年10月に開催された前回の検討会にて、松山専門技術者からコメントがあったとおり、波の伝播速度と、試験設備で模擬されている海底地形の変形速度との関係に依存して、波高は大幅に変化し得ると考えられる。この点を考慮した試験条件の設定と、解析結果の評価を行う必要があると考えられる。<br>また、図面の説明資料では、Tanioka and Satake 論文の著者名について、誤記(Sateke)が混在している。<br>以上 | ご指摘いただいたように、本研究(項目 2.2)の水理実験によって生じる水位は、波の伝播速度(波速)と斜面模型の移動速度との関係に依存すると考えます。そのため、表 2.2.1 に示した実験条件のとおり、波速を変えるため 2 種の水深を設定し、また、斜面模型の移動速度も数ケース設定して、実験データを取得しました。<br>図 2.2.12 の縦軸の数値が 1.0 を超えた Case6 の例では、斜面模型の中央位置での水深 15.5cm から波速は 123cm/s、斜面模型の移動平均速度は約 11.1cm/s であり、その比 0.09 となる。このように移 |

| No.     | 評価項目   | 評価意見  | 回答  |
|---------|--|---|---|
|         |  |   | <p>動速度が波速に比べて遅いケースでも縦軸の数値が 1.0 を超えるため、やはり波速と移動速度との関係だけでは実験の現象を説明することができません。</p> <p>そこで、地殻（実験では斜面模型）の移動速度に係る運動エネルギーが関係しているのではと考えており、R3年度から開始する研究 PJ の中でその効果を解明していく予定です。その際、ご指摘を踏まえて、幅広く実験条件を設定し、現象を解明して、津波初期水位の設定方法の改良につなげていきたいと考えております。</p> <p>説明資料中で誤記がありましたこと、失礼いたしました。訂正させていただきます。</p> |
| 松山 昌史 氏 |  |   |   |
| 1       | <p>①国内外の過去の研究、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。</p> | <p>2.1.1(3)砕波指標に基づく限界波高モデル<br/>沿岸の津波高に一定の限界的なものがあるのではないという観点の研究は津波リスクを評価する上で重要であり、この観点の必要性は十分にありと考えられます。しかし、研究の内容には書き示すように複数の疑問があります。<br/>[観点①②]<br/>ここで引用している合田の限界波高モデルは、通常の波浪や台風時の高波浪を対象としたものである。実験や観測で対象とした波動の周期は、現地換算(実規模)で 10 秒から 20 秒である。よって、津波の主たる周期と考えられる周期数分から 60 分といった長い周期の水面波動を対象としていない。この点にきちんと言及した上で、津波のような長周期波に適用する上で、考え方や課題を記載した上で研究をすすめるべきであるが、そのような記載が本報告書では見られな</p> | <p>拝承いたします。</p> <p>本研究(2.1節)では、地震規模と断層面積のスケーリング則のモデル化上の不確かさを考慮したとき、現実的ではないと考えられる極めて高い津波高を推定することが予想されたので、なんらかの限界値を設定することができないか検討しました。そこで、合田の限界波高モデルの採用を試みました。ご指摘のとおり、このモデルは津波を対象としたものではなく、波浪等を対象とした実験式です。それでも、このモデルが水深波長</p>   |

| No. | 評価項目     | 評価意見  | 回答  |
|-----|----------|---|---|
|     |          | <p>い。是非に追記していただきたい。</p> <p><b>【観点①】</b></p> <p>また、津波のような長周期波が沿岸の到達した場合には、遠浅海岸では砕波現象が発生するが、例えば三陸沿岸などの遠浅ではない沿岸では水面の盛り上がり時間が数分かかるため砕波現象は発生しないことがある。例えば、2011年東北地方太平洋沖地震による津波について、女川原子力発電所の港湾で得られた水位記録によると水位上昇開始から最大水位上昇(約13.8mの津波高)まで数分かかっており、このような長時間では砕波現象は発生しない。このような沿岸地形の特徴と砕波についても触れるである。</p> <p><b>【観点②】</b></p> <p>さらに、遠浅海岸では津波の前面波形が発達して、水の壁のような状況で押し寄せている状態では、その水面波形の連続性が失われており、砕波現象が起きていると考えられる。しかし、前面波形の背後には数kmに及ぶ水塊も押し寄せているので、砕波による波高の減衰は期待できないのではないのでしょうか。そのような観点で限界波高という考え方は沿岸の津波高には適用は難しいと考えております。</p> | <p>比をパラメータとしていることから、本研究では試行的に適用範囲を超えて外挿した形での導入となりました。ご指摘を踏まえ、津波の限界波高と砕波を関連づけることに無理があり、さらなる検討が必要であるとの認識に至り、2.1.1(3)に係る検討項目を報告書から削除いたします。</p> |
| 2   |          | <p>それから、報告書の17ページの下から2行目で、「砕波現象を適切に取り入れた研究」が「極めて高い津波高を推定する結果」に対して必要と書かれていますが、上記の3点の課題などもあるので、「砕波現象を適切に取り入れた研究」がこの観点で必要という記載は不適當ではないのでしょうか。</p>  | <p>拝承いたします。</p> <p>津波高の限界と砕波現象を関連付けた表現を修正いたします。</p>   |
| 3   | ①国内外の過去の | 2.2 津波地震による津波の特性化モデルの構築   |   |

| No. | 評価項目             | 評価意見  | 回答  |
|-----|------------------|---|---|
|     | 研究、最新知見を踏まえているか。 | <p><b>【観点①】</b></p> <p>本研究では「プレート間地震の津波の特性化モデルの構築」のタイトルが適切と考えます。タイトルにあります「津波地震」の用語は誤解を生む可能性があるため不適当です。「津波地震」は金森先生の論文などにあるよう、「地震のマグニチュードに対して津波のマグニチュードが大きい地震」や1894年明治三陸地震津波のように“地震による震度が2、3程度と小さいが沿岸で数m以上の津波高となる大きな津波となる地震”のことを指します。渡辺偉夫著の日本被害津波総覧第2版などを参照してください。津波地震は「海溝軸付近で発生するプレート間地震の一つ」ではありますが、定義とはかけ離れた表現です。</p> | <p>ご指摘いただきありがとうございます。研究開始時点では水平変位の寄与分の効果が出るのは海溝軸沿いのプレート間地震と想定しており、地震本部等でも「海溝寄りのプレート間地震（津波地震等）」との記載があることから対象を分かりやすくするために「津波地震」をタイトルに使用しました。しかし、ご指摘いただいたように、「津波地震」とは“地震のマグニチュードから期待される津波発生地震と異なり、異常に大きな津波を発生させる地震”であり、また、発生メカニズムも地震だけではありません。ご指摘を踏まえ、「プレート間地震津波の特性化波源モデルの改良」に修正いたします。</p> |
| 4   |                  | <p><b>2.2.3 津波地震による津波の特性化モデルの構築</b></p> <p>同じインバージョン解析手法で、津波の入力条件となる海底地殻変動について、水平変位の効果の考慮の有無の違いによるすべり量分布の違いを比較された内容は、津波波源の評価における研究として非常に興味深く、良い成果を得られたものと考えます。報告書でも言及されていますが、海底勾配と水平効果の大きさの関係が整理されると今後の津波波源設定に有用な知見を与えるものと期待されます。</p>   | <p>コメントいただき、ありがとうございます。今後、海底勾配と水平変位の寄与分の効果の大きさの関係も整理していきたいと思えます。</p>  |
| 5   |                  | <p><b>2.3.2 内陸地殻内地震による津波の特性化波源モデルの再現性</b></p> <p>53 ページに以下の文書があります。「今回得られた (<math>K, \kappa</math>) は、PTHA の不確かさの設定パラメータ <math>\beta = \ln(\kappa)</math> として利用できる。」は、この特性化モデルの特徴を踏まえて記載すべきです。この <math>\beta</math> は既往津波記録について最適と考え</p>  | <p>本研究 (2.3 節) の目的は、著者らの既発表論文 (杉野ら 2014<sup>2.3.1</sup>) で提案したプレート間地震津波の特性化波源モデルのうち、<math>M_w 8.8</math> 以下の特性化波源モデルの設定方法について実津波の痕跡高の再現性を定量的に評価することです。そのため、設定方法を固定した上で、許</p>  |

| No. | 評価項目                | 評価意見   | 回答   |
|-----|---------------------|--|--|
|     |                     | <p>られる波源モデルによる津波高における不確かさで、波源モデルは最適であるが数値計算や使用する地形データ、実測データ等に関する不確かさを反映したものです。よって、特性化モデルを複数試した中で最も実測津波記録と調和的な特性化モデルは、最適モデルとはまだ言えないのではないのでしょうか。よって、特性化モデルに関する<math>\beta</math>を<math>\beta_t</math>とすれば、最適モデルにおける不確かさ<math>\beta_s</math>より<math>\beta_t</math>は少なくとも大きい。言い換えれば<math>\beta_t</math>は、<math>\beta_s</math>の上限値として使えるということではないのでしょうか。「利用できる」という点は同意しますが、最適モデルにおける<math>\beta</math>と同等に扱うことはできないと考えます。</p> <p>なお、<math>\beta_s</math>を探索する試みとすれば、対応する既往津波についてインバージョン解析による波源モデル(断層モデル)を構築して、その最適と考えられる断層モデルを分析するアプローチも有力ではないのでしょうか。</p> | <p>容される範囲で、波源の位置や不均一すべりの配置を変化させて、複数の特性化波源モデルを設定し、できるだけ最適な再現モデルを探求する、という方法を取りました。</p> <p>ご指摘にあるように、本報告書のBは、波源モデルや地形モデル、数値計算モデル、実測データなど数多くの不確かさに依存しており、いずれも最適な、あるいは精緻なモデルやデータを用いることによって小さくなるものであると考えられます。もちろん、地形モデルを津波発生時のものに精緻化する方法や、インバージョン解析を用いてより最適な波源モデルを探索する方法も考えられますが、前述のとおり、本研究の目的に沿って、特性化波源モデルの設定方法を固定し、プロジェクト期間内で実施可能な範囲の検討結果であると考えます。</p> <p>従いまして、ご指摘も踏まえ、当該文章については、以下のように修正いたします。</p> <p>「今回得られた(<math>K, \kappa</math>)は、確率論的津波ハザード評価(PTHA)の不確かさの設定パラメータ<math>\beta = \ln(\kappa)</math>として利用できるものの、<u>杉野ら(2014)<sup>2.3.1</sup>の特性化波源モデルを採用する場合には、計算津波高の不確かさを地震規模に応じて変化させることの必要性が示唆された。</u>」<br/>(下線付きが追記した箇所です。)</p> |
| 6   | ② 解析 実施手法、実験方法が適切か。 | <p>2.4.1 海底地すべり起因津波の確率論的津波ハザード評価手法の提案とモデル解析での試解析</p> <p>[観点②]</p> <p>「②津波初期水位の算定」において、Watts, et. al.の手法を用いています。この方法で断面2次元的な設定は可能ですが、幅方向の設定はどのようにされてい</p>   | <p>Watts, et. al.の手法には、断面2次元の設定を3次元の設定に拡張する手法も示されています。本研究ではその手法を採用しました。具体的には、地すべり幅<math>w</math>は、Slide型では<math>w=0.25 \times</math>斜面長、</p>   |

| No.   | 評価項目  | 評価意見  | 回答   |
|---|---|---|--|
|   |   | るのか記載が必要と考えます。東北地方太平洋沖地震の津波に関しては海底じすべりの可能性は完全に否定されたのか？  | Slump 型では $w=1.0 \times$ 斜面長としました。ご指摘を踏まえ、上記の内容を報告書に追記いたします。   |
| (以下 No. 7 は、上記 No. 1~6 の評価意見と回答を踏まえ、松山昌史氏よりいただいた再評価。) |   |   |  |
| 7   | ①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。<br>②解析実施手法、実験方法が適切か。 | コメントに対して、p.12「2.1.1(3)に係る検討項目を報告書から削除いたします。」とあります。しかし、削除ではなく、このような検討の動機と、今回の検討内容に限界があることがわかった旨を記載しておくことを希望します。<br>この研究の動機として回答欄に記載いただいた「自身規模と断層面積のスケールリング則のモデル化上の不確かさを考慮したとき、現実的ではないと考えられる極めて高い津波高を推定することが予想されたので、なんらかの限界値を設定することができないか」は、重要な観点と私は認識しております。よって、今後も同様の動機を基にした研究が行われる可能性があります。今回の検討内容と考察は、このような今後の研究には有用な内容であり、今後の原子力発電所の安全研究の成果の一つとしてふさわしいと考えます。<br>削除してしまうと、このような観点での研究活動がなかったものとなるのは、安全研究の知見の蓄積の観点からもったいないことではないでしょうか。 | 拝承いたします。<br>ご指摘を踏まえ、「検討項目を報告書から削除」する方針を改めることとし、本研究における動機と、合田の限界波高モデルを導入することの前提条件、検討内容及び考察を適宜、追加補強して、報告書にまとめることとします。<br>ご指摘いただきまして、ありがとうございました。 |

地震・津波及びその他の外部事象等に係る施設・設備のフラジリティ評価に関する研究に対する外部専門家及び専門技術者の評価意見並びにその回答

| 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。<br>②解析実施手法、実験方法が適切か。<br>③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。<br>④重大な見落とし(観点の欠落)がないか。 | <p>誤記や不明瞭な記載が多く報告書として体裁が整っていない部分が散見されます。以下に適切でない例を示します。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・報告書に誤記(鹿島建設の略称の誤記、「確率論的リスク評」など)があります。</li> <li>・2.1.2のz、d、<math>\xi</math>、hなどの文字が定義されていません。</li> <li>・文章中で変数がイタリックになっている、全角と半角が混在しているものが多くみられます。</li> <li>・表 2.14 など表の字がつぶれていて読めません表が多くみられます。</li> <li>・2.1.2 エネルギーEと漂流物E、ヤング率Eが同じ文字が使われており、報告書の理解の妨げになります。</li> <li>・式 2.1.2 およびその周辺:<math>E\xi</math>の<math>\xi</math>は下付き文字でしょうか。<math>\xi</math>をかけているのでしょうか。前者かと思いますが、その場合、このような記載は適切ではありません。</li> <li>・報告書 P20「<math>\Delta t=1</math>」、「<math>1/\sqrt{80}</math>」など単位がありません。</li> <li>・表 2.1.9 などの防潮堤位置ですが、原点、座標軸の記載がなく、数字から位置が特定できないのではと思います。</li> <li>・報告書 P35、<math>\rho</math>に単位がありません。</li> <li>・報告書 P35 で、「今回の試験結果では、ばらつきの定量評価まではできなかったものの、最大持続波荷重の比率は最大でも 1.11 であり、1.15 倍程度の余裕を見込めば保守的に評価できると考えられる。」と記したうえで、「1.2 倍程度(<math>\rho=1.2</math>)の余裕を含めることで、保守的に</li> </ul> | <p>コメントありがとうございます。</p> <p>誤記や脱字は、改めて全章について確認をいたします。</p> <p>御指摘の箇所については、分かりやすい表記となるように見直します。特に、津波波力(水の密度)の評価については、実験で得られた事実を述べる様に記載を見直します。また、委託事業の液化化実験について規制庁が考察した部分を明確にし、設備耐震の評価については JEAG4601 の位置付けを記載いたします</p> |

| No.   | 評価項目                     | 評価意見   | 回答  |
|---|--------------------------|--|---|
|   |                          | <p>評価可能であることが分かった。」と記載がありますが、ばらつきの定量評価できないのに、1.2 倍で保守的であると結論づけるのはやや乱暴な論理に感じます。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・報告書 P44「上式は、フルード数 (FrE) 及び最大比エネルギー (E<sub>max</sub>) の 2 つの変数を有する式となっている。」とありますが、上式がどの式を指すのかわかりません。</li> <li>・報告書 P71 結果示す→結果を示す</li> <li>・報告書 2.3.2 の冒頭に「本節では、委託事業において実施した実験概要について示すとともに、実験結果に対する規制庁の考察を示す。」と記載されていますが、本節内は実験に関する客観的な事実の記載にとどまっており、規制庁の考察に相当するものがどの部分に相当するのか、明確にさせていただくことが必要かと思われまます。</li> <li>・報告書中に JEAG4601 と記載する場合には、発行年を常に併記することが必要かと思えます。基準地震動が S2 と記載されている箇所もありますが、古い JEAG をしているためと思われまます。なぜ、古い JEAG を参照するのか理由を記載する必要があるように思えます。</li> </ul> |   |
| (以下 No. 2~5 は、上記 No. 1 の評価意見と回答を踏まえ、糸井達哉氏よりいただいた再評価。) |                          |  |   |
| 2   | ①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。 | 一部項目で特に海外の文献について、調査がされていないのではないかとと思われる。  | コメントありがとうございます。今後研究を進めるにあたっては、国内外の知見を幅広く収集して進める様にいたします。 |
| 3   | ②解析実施手法、実験方法が適切か。        | おおむね適切ではないかと思われる。  | 拝承いたします。  |



| No.            | 評価項目                      | 評価意見                                     | 回答  |
|----------------|---------------------------|--|---|
| 4              | ③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | おおむね適切ではないかと思われる。                        | 拝承いたします。  |
| 5              | ④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。      | おおむね適切ではないかと思われる。                        | 拝承いたします。  |
| <b>岩田 知孝 氏</b> |                           |  |   |
| 1              | ①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。  | 報告書からは本内容に関して読み取ることが困難であるが、そうされているのであろう。 | <p>コメントありがとうございます。わかり難い資料で申し訳ありませんでした。</p> <p>1. 津波に対する防潮堤のフラジリティ評価</p> <p>防潮堤は、津波防護施設の一つであり、原子力発電所敷地内への津波の浸水を抑制する重要な構造物である。そのため、津波の波圧特性等を適切に把握し、防潮堤の津波に対する構造健全性を評価する必要があることから、防潮堤に作用する(1)漂流物衝突荷重影響、(2)砂移動荷重影響、(3)最大持続波力評価の体系化に係る水理試験を基に検討を実施した。</p> <p>(1) 漂流物の衝突により生じる荷重評価については、これまで複数の評価式が提案されており、運動方程式に基づくFEMA(2012) 2.1.3 の式や、河川の橋脚を被衝突物とする道路橋示方書(2002) 2.1.4 の式等が、比較的よく知られている。また、漂流物の剛性 <math>x.x.x</math> や、既往の評価式の適用性 <math>y.y.y</math>、津波波力と衝突力の重畳 <math>z.z.z</math> に着目した既往研究も行われている。</p> <p>一方、特に被衝突物近傍海域における津波の特性を踏まえた、各評価式の適用条件や適用範囲についての知見は十分には得られていない。</p> |

| No. | 評価項目 | 評価意見 | 回答  |
|-----|------|------|---|
|     |      |      | <p>これより本研究では、原子力発電所の防潮堤に作用する漂流物衝突荷重について、近傍海域における津波の特性も考慮した既往評価式の適用条件や適用範囲に係る、体系的な漂流物衝突荷重評価の考え方を整理した。</p> <p>(2) 砂を含む津波が防潮堤に作用した際の作用波圧は、真水の場合の算出値に流体密度を乗じて評価するのが一般的である。流体密度としては複数の値が提示されており、例えば、FEMA(2008)<sup>2.1.5</sup>及びFEMA(2019)<sup>2.1.6</sup>では、設定した浮遊砂濃度を踏まえ、それぞれ真水密度の1.2倍及び1.128倍を使うこととされている。</p> <p>一方、防潮堤前面の砂丘等の砂が、津波によって移動した際の防潮堤に対する作用荷重の評価に係る知見は十分には得られていない。</p> <p>これより本研究では、前面に砂丘等を有する原子力発電所の防潮堤に作用する砂移動荷重について、一般的な流体密度を用いた評価の適用性をはじめとした考え方を整理した。</p> <p>(3) 防潮堤に作用する津波波圧には段波波圧と持続波圧があり、設計条件範囲内（防潮堤を津波は越流しない）における両者の防潮堤の構造健全性に与える影響については、概して持続波圧による影響の方が大きいことを、NRA技術報告(2015)<sup>2.1.7</sup>にて報告している。</p> <p>一方、設計条件から設計条件を超え防潮堤を越流する津波までを対象とした場合の、防潮堤の構造健全性に与える影響についての知見は十分には得られていない。</p> <p>これより本研究では、防潮堤のフラジリティ評価に必要となる設計条件から</p> |

| No. | 評価項目 | 評価意見 | 回答   |
|-----|------|------|--|
|     |      |      | <p>設計条件を超え防潮堤を越流する津波までを対象に、防潮堤に生じる現実的な最大波力/波圧を評価する手法についての体系的な考え方を整理した。</p> <p>2. 地震に対する建屋のフラジリティ評価</p> <p>規制部門から要望があった研究課題、現在実施されている新規制基準適合性に係る審査状況等から、建屋の三次元挙動に係る評価手法に関する技術的知見の更なる蓄積が必要という課題を抽出した。その課題に対して、三次元 FEM 解析による原子炉施設の地震応答解析に関する最新の国内外の文献を調査・分析し、地震時の建屋の三次元挙動に係る評価において留意すべきモデル化因子の候補を選定し 2.2.4 JAEA 委託報告書、2.2.5 NRA 技報、それら因子に対して、原子炉建屋の三次元 FEM モデルを用いた感度解析を実施し、各因子が地震時の建屋応答に与える影響を整理した。</p> <p>3. 地震に対する地盤の液状化に係るフラジリティ評価</p> <p>液状化に関する既往の研究では、主に飽和した砂質土を対象に、学協会を中心に多くの研究、開発が進められている。また、1995 年兵庫県南部地震では、人工埋立地における大粒径の礫を含む地盤の液状化や液状化に伴う沿岸地盤の流動現象等が発生し、これらを踏まえ関係する指針類において、礫分に対する考え方を踏まえた見直しも行われている 2.3.1 松尾、2.3.2 土木研究所。</p> <p>これら既往の研究においては、材料挙動に関する検討例はあるものの、原子力発電所敷地沿岸部の様な複雑な地盤条</p> |

| No. | 評価項目 | 評価意見 | 回答   |
|-----|------|------|--|
|     |      |      | <p>件における礫質土地盤の詳細挙動を対象とした検討例は少なく、特に、発電所の地盤のような密に締め固められた礫質土地盤の液状化に伴う変形挙動等に関する知見は十分に得られていない。</p> <p>そこで、既往の研究状況を踏まえ、発電所敷地沿岸部を想定し密な礫質土地盤を対象とした研究を計画し、遠心模型実験及びその結果を対象とした数値シミュレーション解析による礫質土地盤の過剰間隙水圧の蓄積や変形挙動等を確認した。</p> <p>4. 地震に対する設備の耐力評価に係るフラジリティ評価</p> <p>放射性物質の拡散を防護する観点より選定した設備の現実的耐力値については、外部の有識者で構成された委員会にて検討して原子力工学試験センター及び原子力安全基盤機構が実施した耐震試験に基づいた。さらに、耐力の余裕が最も小さい設備について、既往の知見 2.4.1～2.4.7 高速増殖炉の座屈設計に係る研究<sup>2.4.1～2.4.7</sup>を踏まえて詳細評価を実施した。</p> <p>5. 地震に対する設備の亀裂進展に係るフラジリティ評価</p> <p>米国機械学会規格委員会において、地震等の交番荷重下におけるフェライト鋼の疲労亀裂進展則の妥当性が議論されていることを踏まえ 2.5.2ASME、国内の鋼材を用いた試験計画を立案した。試験条件の設定の際には、米国機械学会が疲労亀裂進展則を策定した当時の試験条件を確認し、本研究の試験結果と比較が出来るように設定した。また、フラジリティ評価においては、国内の規制基準で規定される維持管理及び亀裂評価の手</p> |

| No. | 評価項目 | 評価意見 | 回答   |
|-----|------|------|--|
|     |      |      | <p>法に準じて、解析条件を設定した。</p> <p>6. 飛翔体等の衝突による衝撃に対する建屋のフラジリティ評価</p> <p>新規制基準では、原子力施設に対して竜巻飛来物や火山噴石等の衝突に係る評価が追加され、衝突に伴う構築物の構造評価および衝撃評価が必要となった。原子力分野においては、古くからトルネードミサイルやタービンミサイル等の衝突に係る研究が行われ、構築物の局部損傷（貫入・貫通・裏面剥離）に係る知見は多数報告されており、様々な局部損傷評価式が既往研究で整理されている</p> <p>2.6.5 Q.M.Li</p> <p>一方、衝撃評価に必要なとなる衝撃荷重の作用により構築物内を伝播する応力波に関する研究はあまり無いが、規制庁が参加している国際ベンチマークプロジェクトでは、再現解析における境界条件や減衰等が課題となっている</p> <p>2.6.8 OECD/NEA。</p> <p>本研究では当該プロジェクトで得られた知見を反映しつつ、様々な床を有する構築物が衝撃作用を受けた際の挙動を明確にするための大型衝突実験を実施するとともに、その実験結果の再現解析から解析手法を確認した。さらに、衝撃挙動に対する構築物の周辺地盤の影響についても検討を行うものとした。</p> <p>7. 飛翔体等の衝突による衝撃に対する設備のフラジリティ評価</p> <p>原子力施設で使用されている設備について、建屋への航空機衝突による衝撃振動に対する耐力評価の先行研究としては、米国原子力エネルギー協会 (NEI) によるものが、ほぼ唯一の事例である</p> |

| No. | 評価項目              | 評価意見                                | 回答  |
|-----|-------------------|-------------------------------------|---|
|     |                   |                                     | <p>2.7.2 NEI。上記に加えて、米国電力研究所（EPRI）による高周波地震動に対する設備の耐力評価の研究を、衝撃振動に対する評価対象設備の選定や、設備の弱部を検討する上で参考とした 2.7.4 EPRI。以上の先行研究を踏まえて研究計画を立案した。</p> <p>8. 落下による衝撃に対する核燃料輸送容器のフラジリティ評価</p> <p>過去 20 年間に実施された核燃料輸送容器の落下試験及び解析に係る文献調査を行い、ドイツ連邦材料研究所(BAM)のスラップダウン落下試験に係る文献 2.8.4 B.Droste に着目し、試験・解析の実施状況を整理した。</p> <p>※本回答欄において、添字は、報告書本文で参照としている文献番号（なお xxx,yyy,zzz は、今後本文に追記する文献）</p> |
| 2   | ②解析実施手法、実験方法が適切か。 | 適切性についての自己評価がないため正確にはわからないが、そうであろう。 | <p>コメントありがとうございます。わかり難い資料で申し訳ありませんでした。</p> <p>1. 津波に対する防潮堤のフラジリティ評価</p> <p>(1) 漂流物の衝突荷重に係る水理試験では、測定結果に津波による荷重と漂流物衝突による荷重の両者が含まれることから、防潮堤を試験水路の横断方向に短冊状の部位に分割し、衝突が生じた部位の荷重と衝突が生じなかった部位の荷重を比較し、衝突荷重成分を特定した。</p> <p>(2) 砂移動荷重影響に係る水理試験では、防潮堤の前面に砂を用いた砂丘形状の移動床と、木製の砂丘形状の固定床を同一水路内に並べて設け、両者の防潮堤</p>  |

| No. | 評価項目 | 評価意見 | 回答  |
|-----|------|------|---|
|     |      |      | <p>へ作用する荷重を比較することで、移動床における砂移動に伴う津波波力荷重の増分を求めた。</p> <p>(3) 最大持続波力評価の体系化に係る水理試験では、設計条件を超える津波として、入力津波高さを大幅を超える津波までを模擬し、入力津波高さを超えると越流が生じる防潮堤及び越流が生じない防潮堤を用いて両者に作用する最大波力/波圧を比較し、越流に係る試験結果の整理を行った。</p> <p>2. 地震に対する建屋のフラジリティ評価</p> <p>研究及び実務で実績のある複数の解析コードを用いて解析的検討を実施した。また、採用した解析手法は、原子炉建屋で計測された地震観測記録のシミュレーション解析等を行うことで妥当性を検証した。</p> <p>3. 地震に対する地盤の液状化に係るフラジリティ評価</p> <p>本研究では、地形条件や地盤条件等に対する模型寸法の影響を極力抑えるために、国内で最大規模の遠心載荷試験装置を用いて遠心模型実験を実施した。また、遠心模型実験では計測が難しい地盤内のひずみ性状について、遠心模型実験による応力状態を模擬した中空ねじり試験の結果により確認した。実験結果に対する再現解析においては、複数の解析コードを用いて解析を実施することで、解析結果の信頼性を高めた。</p> <p>4. 地震に対する設備の耐力評価に係るフラジリティ評価</p> <p>FEM を用いた容器の詳細座屈評価手</p> |

| No. | 評価項目 | 評価意見 | 回答  |
|-----|------|------|---|
|     |      |      | <p>法の適用性については、国より委託された高速増殖炉の座屈設計に基づく既往研究で確認されている。また研究に用いた FEM モデルは、座屈変形を適切に表現するために、既往研究に基づき座屈モードの波長に対して十分に小さいメッシュサイズとなるように設定した。</p> <p>5. 地震に対する設備の亀裂進展に係るフラジリティ評価</p> <p>既往研究により、交番荷重下の疲労亀裂進展速度には亀裂の開閉口挙動が大きく影響することが知られている 2.5.5 J.M.Bloom。そのため、本研究では試験片として、亀裂の開閉口挙動を精度良く観測することが出来る中央切り欠き平板試験片を採用した。また、比較のため、試験片に載荷する交番荷重は、既往研究で用いられている負荷レベルと同程度となるように設定した。</p> <p>6. 飛翔体等の衝突による衝撃に対する建屋のフラジリティ評価</p> <p>本研究では、衝撃挙動の伝播特性をとらえるため、試験体は可能な限り大きなものとし、構造部材は様々な固有周期を有する床となるように設計した。衝突物である飛翔体は、剛飛翔体と柔飛翔体（ステンレス製・樹脂製）を製作し、衝突物の剛性の差異による影響を検討した。</p> <p>実験の実施場所については、国内外の様々な実験場について調査し、実験目的に応じて試験場を選定した。計測機器については、衝撃挙動が一般の計測機器では対象としない高周波成分の振動であるため、複数社の機器を用いた予備実験を実施し、実験に最適な機器選定を行っ</p> |



| No. | 評価項目 | 評価意見 | 回答  |
|-----|------|------|---|
|     |      |      | <p>た。</p> <p>解析手法の確認における再現解析には、衝撃解析で一般的に用いられる LS-DYNA と Abaqus の二つのコードを用いて様々な検討を実施した。主な検討項目としては、構造物の境界条件、地盤剛性、摩擦係数、減衰モデル、衝撃荷重曲線等とした。</p> <p>7. 飛翔体等の衝突による衝撃に対する設備のフラジリティ評価</p> <p>NEI の事例では、衝撃振動として考慮すべき卓越周期帯、設備耐力に関する記述はあるものの、具体的な耐力の評価方法は明らかにされていない。そこで、設備の衝撃振動に対する耐力評価の方法としては、EPRI の事例と同様に、既往の耐震試験に倣った設備の振動試験を実施することで、対象設備の機能維持・機能損傷する加速度レベルを確認することとした。</p> <p>設備の加振条件としては、入力波の加速度レベル、卓越周波数、加速度時刻歴波形を考慮して、設備の状態、動作を確認した。振動試験における振動台上の入力波の加速度レベル、卓越周波数の設定に関しては、NEI の知見を参照した。加速度時刻歴波形については、衝撃振動の伝播における極初期の振動を想定した作用時間の極めて短いショック波、それ以降の建屋の自由振動を想定した作用時間の長いランダム波を使用した。</p> <p>8. 落下による衝撃に対する核燃料輸送容器のフラジリティ評価</p> <p>落下試験は、IAEA の技術助言文書 2.8.5 IAEA が定める落下高さや落下地盤の剛性等に係る要件を満足する条件を用いた。</p> |

| No. | 評価項目                             | 評価意見            | 回答  |
|-----|----------------------------------|-----------------|---|
|     |                                  |                 | <p>また、落下姿勢についても事前解析によって保守的となる落下角度を求めて試験を実施した。なお、事前解析では、過去の類似事例において用いられている動的解析コードLS-DYNAによる有限要素解析を用いた。</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>適切なであろう。</p> | <p>コメントありがとうございます。わかり難い資料で申し訳ありませんでした。</p> <p>1. 津波に対する防潮堤のフラジリティ評価</p> <p>本研究で得られた成果は、外部専門家や課内におけるレビュー及び規制部説明会等から意見をいただく等の確認を行った上で、査読論文等として公開し、妥当性の評価がされている。</p> <p>2. 地震に対する建屋のフラジリティ評価</p> <p>解析的検討は複数の解析コードを用いて実施しており、互いの結果を比較することで妥当性を検証した。また、それらの評価手法は外部専門家会合や課内レビュー、規制部説明会等から意見をいただく等の確認を行った。</p> <p>3. 地震に対する地盤の液状化に係るフラジリティ評価</p> <p>毎年度の研究成果については、委託先において専門家会合を実施し、実験・解析に係る方針および整理についてコメントを受け、そのコメントを踏まえた成果の取りまとめ、次年度以降の研究計画へフィードバック等を行ってきた。また、成果が纏まった段階で学会発表等を行い、広く専門家からの意見をいただいた。さらに、課内レビューや規制部への説明会を実施して、意見をいただいた。</p> |

| No. | 評価項目 | 評価意見 | 回答  |
|-----|------|------|---|
|     |      |      | <p>4. 地震に対する設備の耐力評価に係る<br/>フラジリティ評価</p> <p>研究の実施過程において、外部専門家<br/>会合や課内レビュー及び規制部への説<br/>明会を行って意見をいただくことで、研<br/>究成果の信頼性向上を図った。</p> <p>5. 地震に対する設備の亀裂進展に係る<br/>フラジリティ評価</p> <p>研究の実施過程において、外部専門家<br/>を招聘した検討会や課内レビュー及び<br/>規制部への説明会を行って意見をいた<br/>だくことで、研究成果の信頼性向上を図<br/>った。また、研究成果を学術論文やプロ<br/>シーディングス等として投稿し、外部査<br/>読を受けることで、結果の妥当性を担保<br/>するよう努めた。</p> <p>6. 飛翔体等の衝突による衝撃に対する<br/>建屋のフラジリティ評価</p> <p>研究の実施に際しては、委託先におい<br/>て専門家会合（土木分野1名、建築分野<br/>1名、機械分野2名）を年2回実施し、<br/>実験・解析に係る方針および整理につい<br/>てレビューを受けた。さらに、課内レビ<br/>ューや規制部への説明会を開催して意<br/>見をいただいた。また、研究成果は学会<br/>発表等に諮り、専門家の意見を受けた。</p> <p>7. 飛翔体等の衝突による衝撃に対する<br/>設備のフラジリティ評価</p> <p>研究の実施にあたり、試験計画の立案<br/>から試験の実施、結果の確認に至る研究<br/>の各ステップで、地震・津波研究部門内<br/>の設備の耐震設計、耐震試験の経験者<br/>を中心としたレビューを実施することで、<br/>一連の実施内容を確認した。また、外部</p> |

| No. | 評価項目                  | 評価意見   | 回答  |
|-----|-----------------------|--------|---|
|     |                       |        | <p>有識者を複数名招聘して、試験計画、詳細手順、試験実施時のデータ計測の観点及び試験結果等に関して意見をいただき、試験の実施、試験結果のまとめに反映した。さらに、課内レビューを行うと共に、設備の衝撃評価等に関係している原子力規制庁内の関係者に試験の実施内容やその結果について適宜説明して意見をいただいた。</p> <p>8. 落下による衝撃に対する核燃料輸送容器のフラジリティ評価</p> <p>事前解析や試験計画の立案時、供試体の設計時、落下試験実施時及び事後解析実施時等の各過程において外部専門家会合を実施し、コメント等をいただき研究を実施した。最終成果に対しても同様に外部専門家会合において評価を受けた。また、ドイツ連邦材料研究所 (BAM) の専門家とも研究成果の妥当性について、議論を行った。</p> <p>さらに、課内レビュー及び規制部への説明会を行い、意見をいただいた。</p> |
| 4   | ④重大な見落とし（観測点の欠落）がないか。 | わからない。 | <p>コメントありがとうございます。わかり難い資料で申し訳ありませんでした。</p> <p>1. 津波に対する防潮堤のフラジリティ評価</p> <p>①～③を実施したことで研究を確実に進めており、重大な見落としは無いものとする。今後の課題として、東北地方太平洋沖地震で発生が報告されたヘドロ状の堆積物が混入した津波（「黒津波」という）の発生条件等について検討する必要があると考えられる。</p> <p>2. 地震に対する建屋のフラジリティ評価</p>   |

| No. | 評価項目 | 評価意見 | 回答   |
|-----|------|------|--|
|     |      |      | <p>①～③を実施したことで研究を確実に進めており、重大な見落としは無いと考えている。今後の課題として、建屋の三次元 FEM モデルを用いた地震応答解析では、建屋－地盤間の接触・剥離現象に係るモデル化手法、原子炉建屋の RC 造耐震壁の非線形特性に関するモデル化手法について、より多くの観測記録を分析する等、技術的知見を更に蓄積する必要があると考えられる。</p> <p>3. 地震に対する地盤の液状化に係るフラジリティ評価</p> <p>①～③を踏まえた研究を遂行し、密な礫質土地盤の液状化時の変形挙動等に関する技術的知見が得られたことから、重大な見落としは無いものとする。ただし、礫質土地盤の解析結果においては、特に、水平変位や過剰間隙水圧で実験結果と差異がみられたことから、有効応力解析の礫質土への適用にあたっては、更なる検討が必要と考えられる。</p> <p>4. 地震に対する設備の耐力評価に係るフラジリティ評価</p> <p>①～③を踏まえて研究を実施しており、重大な見落としは無いものとする。今後は、新規制基準への対応より新たに導入された設備に対する耐力を整理することが必要となる。</p> <p>5. 地震に対する設備の亀裂進展に係るフラジリティ評価</p> <p>①～③を踏まえて研究を実施しており、重大な見落としは無いものとする。今後の研究では、上記のような試験片で観測される疲労亀裂進展挙動と、実機を想定した設備の耐震裕度との関係</p> |

| No.     | 評価項目           | 評価意見                                      | 回答   |
|---------|----------------|---|--|
|         |                |   | <p>を整理することが必要となる。</p> <p>6. 飛翔体等の衝突による衝撃に対する建屋のフラジリティ評価<br/> ①～③を踏まえた研究を遂行し、衝撃作用を受ける構造物の挙動を確認した。本研究の成果は、論文等で公表済みであり、本研究に対して重大な見落としは無いものとする。</p> <p>今後の課題として、原子力施設には、様々な設置状況の構造物が存在する。また、構造物は複雑な形状を有している。その様な原子力施設の状況を踏まえ、設置状況や形状特性を考慮したより現実的な耐衝撃評価に係る技術的知見を蓄積していく必要があると考えられる。</p> <p>7. 飛翔体等の衝突による衝撃に対する設備のフラジリティ評価<br/> ①～③を実施したことで研究を確実に進めており、重大な見落としは無いものとする。</p> <p>今後の課題としては、(a)設備の設置状況を踏まえた、設備への入力と設備の応答の関係に着目した各々の評価方法について既往評価手法の適用性を検討、(b)衝撃振動と部材の材質の関係に着目した検討、がある。</p> <p>8. 落下による衝撃に対する核燃料輸送容器のフラジリティ評価<br/> ①～③を実施したことで研究を確実に進めており、重大な見落としは無いものとする。</p> |
| 梅木 芳人 氏 |                |   |  |
| 1       | ①国内外の過去の研究、最新知 | 2.1 津波に対する防潮堤のフラジリティ評価<br>2.1.2 漂流物衝突荷重影響 | コメントありがとうございます。<br>・漂流物の衝突位置については、各サイト固有の海岸地形や防潮堤形状等の条   |

| No. | 評価項目  | 評価意見   | 回答   |
|-----|---|--|--|
|     | <p>見を踏まえているか。</p> <p>②解析実施手法、実験方法が適切か。</p> <p>③解析</p>     | <p>漂流物衝突荷重に対して、今回のレポートでは衝突荷重に対する評価が中心となっているが、実際の施設に対する荷重評価では衝突位置との関係が重要になるため、衝突位置について何らかの言及（今後の検討課題等）したほうが良い。</p>  | <p>件に左右されるため、事業者が検討するのが妥当と思われますので、本研究では研究の対象外とさせていただきました。</p>  |
| 2   | <p>結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。</p> <p>④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。</p> | <p><b>2.1.2 砂移動荷重影響</b></p> <p><b>P25</b>：試験装置について、移動床と固定床の幅が異なっているが、中央で仕切らなかった理由、およびそれが試験結果に与える影響の有無について考察を加えたほうが良い。</p> <p><b>P32,34,35</b>：荷重比（移動床/固定床）を算出しているが、代表で時刻歴を示しているケース（図 2.1.15 および図 2.1.16）を見ると堤体前面浸水深の大きさが固定床と移動床では異なっている。また、表 2.1.14 にて最大密度と荷重比の整理をしているが、図 2.1.16 と図 2.1.17 との比較において波力最大と密度最大の時刻が一致しておらず、両者の関係について丁寧な考察を加えたほうが良い。例えば、最大堤体前面浸水深で無次元化するなどして、波力を比較すれば、浮遊砂による密度増分の影響がより明確になると考えられる。</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・砂移動の試験装置の仕切りの位置を、左右非対称とした理由を報告書に記載いたします。</li> <li>・固定床と移動床の代表時間の差異や密度の寄与率の考察等については、今後の論文化を進める中で検討したいと考えております。</li> <li>・感想をいただきありがとうございます。今後研究を進める上で参考にさせていただきます。</li> </ul> |
| 3   | <p>その他</p>  | <p>事前説明時に、設計と PRA 等の設計超過の両方を考慮したフラジリティ評価を検討したとのご説明がありました。設計に用いる場合と PRA 評価に用いる場合とでは、用いる評価手法の観点が異なると考えられるため、その点を意識した報告書のまとめ方をされると良いと思う。</p> <p>今後に向けての課題抽出はされているが、各研究項目の（現時点での）最終目標を想定したうえで、そのための課題、検討の優先順位、というような、理</p>   |  |

| No.            | 評価項目                     | 評価意見  | 回答  |
|----------------|--------------------------|---|---|
|                |                          | <p>想像でも良いので今後の研究計画も含めた全体像を示していただくとよいと思う。</p> <p>「2.1.2 砂移動荷重影響」の試験に関して、実スケールで16mmの粒径となるとの記載があるが、砂の粒径に対する実験スケールの設定の考え方や設計に落とし込むときの留意点があるとよいと思う。</p>  |   |
| <b>土志田 潔 氏</b> |                          |   |   |
| 1              | ②解析実施手法、実験方法が適切か。        | <p>7.今後の展開について、②の観点からコメントする。(1)津波に対する脆弱性評価手法の検討では、「黒津波」を対象とした検討が計画されており、数値解析の実施が挙げられている。多量の堆積物を巻き込んだ津波を対象に解析を計画されている場合には、今回終了するフェーズで防潮堤前面に砂丘がある条件での数値解析を実施されており、その知見を活用することが可能と考えられる。</p>   | <p>コメントありがとうございます。今回得られた知見は、今後の研究の参考にしたいと考えております。</p>                           |
| <b>松山 昌史 氏</b> |                          |   |   |
| 1              | ①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。 | <p>津波漂流物の研究成果については、電中研で大型実験などに取り組んでおります。その成果も踏まえていただくことが必要と考えます。</p> <p>大規模水理実験による津波脆弱性評価手法の高度化(その2)ー津波漂流物の衝突力評価手法の適用性検証ー、高島ほか、O15003、2015.</p> <p>原子力発電所における津波漂流物の影響評価技術-現状調査とその適用に関する考察-、甲斐田他、O16010、2017.</p> <p>津波波力と漂流物衝突力を受けるコンクリート壁の応答評価法の提案、柴山ほか、O17002、2018.</p> | <p>コメントありがとうございます。御提示いただいた文献は、本研究に係る既往の知見として参考としておりますので、参考文献一覧に加えさせていただきます。</p> |



火災防護に係る影響評価に関する研究に対する外部専門家及び専門技術者の評価意見並びにその回答

| No.     | 評価項目                       | 評価意見  | 回答  |
|---------|----------------------------|---|---|
| 北田 孝典 氏 |                            |   |   |
| 1       | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。         | <p>ケーブルの熱劣化評価において、200℃以上の温度だけの結果だけで十分であるのか不明。また経年劣化の模擬にあたり、可燃物の量が減少していることが経年劣化に相当するのか、ということも含めて、130℃以下での加熱を用いていることの妥当性が不明。</p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>電気ケーブルの熱劣化評価につきましては、火災源近傍、煙プルーム中、高温ガス中、トレイ内火災の4つの火災シナリオの条件に設定しているため、また、一般的に火災時に加熱される電気ケーブルの破損温度は200℃以上とされているため(NUREG/CR-6931)、本試験の熱劣化温度を200℃以上としました。火災時に加熱される電気ケーブルの温度につきましては適時見直して参ります。</li> <li>経年劣化の模擬の電気ケーブルにおいて、総発熱量が低下した原因は、主に絶縁体等の有機物が部分的に酸化したためと考えています。また、通常運転時の温度範囲(20℃～60℃)を踏まえた加速試験の実績(120℃前後)から経年劣化模擬の温度範囲を設定しています。</li> </ul> |
| 2       | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | <p>ケーブルの熱劣化評価において、アレニウスの式で整理できることは新たな知見であるが、200℃以上であることを踏まえるべき。繰り返し疲労と同様に、熱劣化が実質的に進まない加減温度が存在するのではないか。関連して、経年劣化したケーブルの絶縁抵抗の低下温度が低い、という記述は正しいか疑問が残る(温度測定ではなく加熱時間の違いで温度に換算されているが、経年劣化模擬ケーブルが新品ケーブルと同じ温度で上昇しているか不明である)。</p> <p>解析コード等の整備において、空気加熱割合 <math>k_p</math> を経時変化させることで実測結果に一致することは一つの知見であるが、<math>k_p</math> を細かく経時変化させれば実験結果に合う結果と出来ることは当然である</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>200℃以下の熱劣化温度でもアレニウスの式で整理できる知見を得ております。</li> <li>新品と熱劣化模擬の電気ケーブルは、同じ製品であり、同じ寸法のものになります。試験では、電気ケーブルの温度とともに絶縁抵抗を同時に測定しており、経年劣化模擬ケーブルは新品ケーブルよりも、低い温度で早期に絶縁抵抗が低下しております。</li> <li>空気加熱割合 <math>k_p</math> を経時変化とともに小さくする場合に解析値と試験値が一致する理由としては、経時変化に伴い空気密度が下がり、空気への伝熱が起こりに</li> </ul>  |

| No.            | 評価項目                  | 評価意見   | 回答  |
|----------------|-----------------------|--|---|
|                |                       | と考える。むしろ、そのような調整を必要とする原因・物理現象を考え、そのような事象を考慮に入れることを考えるべきではないか。  | くくなるためと考えております。空気加熱に係る物理現象に関しましては、後継研究プロジェクトで検討して参ります。  |
| 3              | ④ 重大な見落とし（観点の欠落）がないか。 | 先行研究プロジェクト成果の活用で作成された基準・ガイド類の見直しの要否に必要な技術知見の取得として、HEAF、ケーブルの熱劣化、解析コード等の整備、が必要であることはわかるが十分であるか、またその他がある場合の優先順位が判断できない。  | ・国内外の火災防護規制、火災防護研究の現状については、IAEA 標準作成のWG、OECD/NEA プロジェクトへの参画、米国 NRC/仏国 IRSN 等との情報交換・共同研究等により情報を得ており、それらを踏まえて本プロジェクトの研究計画を策定していますので、基準・ガイド類の見直しの要否に必要な技術的知見の取得として、十分だと考えております。  |
| 4              | その他                   | <p>質疑の中で回答がありました。成果の活用における「熱劣化評価の知見」の「ケーブルの系統分離対策の確認」への活用が良くわかりませんでした（どのケーブルが劣化しやすいかは評価できると思いますが、この評価結果が系統分離対策の確認につながる活用方法が良くわかりませんでした。</p> <p>後継研究プロジェクトにおける HEAF 評価に関して、電気故障の一つである HEAF は避けられないため「爆発現象緩和」に関して進められるとのことだが、深層防護を踏まえれば「爆発現象緩和」だけでなく「爆発現象発生防止」についても進めるべきではないか、と考えます。</p> <p>後継研究プロジェクトにおけるケーブルの熱劣化評価に関して、熱劣化評価結果とケーブル火災の関連を定量的に明らかにするべきであると考えます。(例えば熱劣化の程度とケーブル火災の発生確率の関連など)</p> | <p>・ケーブルの系統分離対策について、事業者は延焼防止の観点から対策を実施していますが、施工不良等により熱影響の防護の不適合箇所が多数見つかっており、その箇所ではケーブルは熱の影響を受け、その熱によって絶縁低下が起こり誤信号発生等の原因になります。そのため「熱劣化評価の知見」は、そこに敷設されているケーブルの熱劣化が原子炉の安全停止に直接又は間接的に影響を及ぼすか否かの判断材料になります。</p> <p>・後継研究プロジェクトにおいて「爆発発生防止」についても検討いたします。</p> <p>・後継研究プロジェクトにおいて、熱劣化評価結果とケーブル火災の関連を定量的に評価いたします。</p> |
| <b>五福 明夫 氏</b> |                       |  |   |
| 1              | ① 国内外の過去の             | 本研究プロジェクトでは、実際に原子力施設で発生した事象に基づいて実験や  | ・拝承   |

| No. | 評価項目                | 評価意見   | 回答   |
|-----|---------------------|--|--|
|     | 研究、最新知見を踏まえているか     | 解析などを実施しており、原子力施設の安全規格やガイドラインの制定・改訂に資する重要かつ地道な研究と理解致します。本研究プロジェクトに関連するOECD/NEAのプロジェクトの取り組みや成果の情報収集を行っていることから、これらのプロジェクトの動向も踏まえていると推察され、国内外の過去の研究や原子力分野での最新知見を踏まえていると評価される。なお、既に参考にされているかもしれませんが、HEAFは一般産業の電気設備でも発生し得ることから、電気設備関連業界の情報も参考にするより良いと思われれます。  |  |
| 2   | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。  | 実際に発生した事象を出発点として実験や解析の体系や方法を設定しており、その意味では手法や方法は妥当と評価されます。その一方で、規格やガイドラインの観点で明らかにすべき点や実験や解析の精度がどの程度であるべきかの規制側の要求事項と手法や方法の対応が、報告書等でもあまり説明されておらずやや不明確です。今回の研究プロジェクトの場合では、HEAFの爆発メカニズム、ケーブルの熱劣化の詳細や知見が不明な段階での規格やガイドラインでは、保守的に規定されている部分があると想像しますが、そのような部分を意識した解析や実験の計画の立て方もあると考えます。また、得られたデータや知見により改訂や補足が必要となる部分が出てきた場合には、ベンダーやユーティリティへの迅速な情報提供として報告書で言及いただくことも必要と考えます。 | ・ 拝承   |
| 3   | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価 | 実験結果の解釈においていくつか質問があります。1) HEAFにおいて爆発後数秒間の安定的な圧力は金属ヒュームの発生によるとされていますが、金属ヒュー   | 以下回答いたします。<br>1) 金属ヒュームの発生量に関しましては、ほぼ一定に推移すると考えています。その理由といたしましては、アーク放電 |

| No. | 評価項目                  | 評価意見   | 回答  |
|-----|-----------------------|--|---|
|     | 評価手法が適切か。             | <p>ムの発生量は爆発後数秒間にわたって同程度で推移するのでしょうか？ 2) また、今回の実験では被覆のあるケーブルは使用されていないのかもしれませんが、実際の電源盤では被覆ケーブルが用いられていることから、被覆部分も燃焼あるいは昇華すると思いますが、その影響も加味されて安定的な圧力となっているのではないのでしょうか？ 3) 空気加熱割合を時間的に変化させることにより解析結果が実験結果と良く一致したとのことですが、何故時間的に変化させると良いかの背景となる物理メカニズムまで考察いただくと、予測（実験結果の無い）解析の精度が上がると考えます。多分、爆発と燃焼による筐体内圧力上昇により爆発前の空気が排出されたことや、温度上昇による空気の熱膨張により、見かけの空気加熱割合が変化していると思われる。</p> | <p>時間に応じて金属母線の損失量（溶融・蒸発による）が直線的に変化することが試験的に確認されたためです。</p> <p>2) 今回の試験では、爆発現象にフォーカスしているため、筐体内外にケーブルは設置しておりません。そのため実電源盤におきましても圧力スパイク以外の部分におきましては、安定的な圧力となっているものと考えられます。</p> <p>3) 挿入、圧力上昇によって筐体内の空気が排出されるため、また、加熱によって空気が熱膨張するために空気の希薄化が起こり、空気加熱割合を変化させる必要があるものと考えております。今後、空気の排出による希薄化と熱膨張による希薄化について整理し、見かけの空気加熱割合が変化していることについて考察して参ります。</p> |
| 4   | ④ 重大な見落とし（観点の欠落）がないか。 | <p>特に大きな点は無いと考えます。なお、ケーブルの劣化に関しては、熱による劣化だけではなく、ケーブル材料の熱や燃焼による化学変化による劣化もあると考えられ、今後の研究プロジェクトでは是非取り上げていただきたい。</p>   | <p>・燃焼に伴う化学変化によるケーブル劣化は NRC や OECD/NEA の試験研究で多くのデータが得られておりますので、それらを活用した後継研究プロジェクトの「火災影響評価手法・解析コード等の整備」にて研究実施中です。</p>  |
| 5   | その他                   | <p>報告書にはグラフから求めたデータ（例えば、ケーブル劣化の TR）の求め方が明記されていませので、結果が正しく解釈されて活用されない場合が出てくるのが予想されます。将来にわたって貴重な実験データを有効活用するには、データの求め方（計算方法）は報告書あるいは内部詳細資料で正確に記述しておくことが肝要と思います。</p> <p>ケーブル被覆の材料は年々進歩しますが、そのデータ収集と規格やガイドラインへの反映の仕組みを構築しておくこと</p>   | <p>・挿入</p>  |

| No.            | 評価項目                     | 評価意見   | 回答  |
|----------------|--------------------------|--|---|
|                |                          | <p>も必要と考えます。</p> <p>蛇足かもしれませんが、いくつかの実験や解析は外部に委託されていますが、外部委託による成果に関しては、詳細な情報（実験方法や実験結果の整理方法など）を十分に引き継いでおくようにして下さい。</p>  |   |
| <b>山路 哲史 氏</b> |                          |  |   |
| 1              | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか | <p>これまでに日本が OECD/NEA の HEAF プロジェクトの活動等を国際的にもリードしており、米国 NRC の動向等も踏まえて規制に必要な研究開発に取り組んでいるとの説明があり、最新知見が反映されていることが確認できた。尚、系統分離対策が徹底されている日本では米国が実施しているような回路解析は不要との説明があったが、これに限らず、従来前提としていた条件や考え方等に将来、変化があった場合には必要に応じて速やかに新たな課題を抽出できるようにしておくのが望ましい。</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 拝承</li> <li>・ 日本では米国が実施しているような回路解析は不要とは考えておりませんが、系統分離の徹底が行われていることを踏まえて、現在の規制基準の中では回路解析までは要求しておりません。</li> </ul> |
| 2              | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。       | <p>HEAF の爆発現象の把握及びメカニズム解明、ケーブル熱劣化試験方法の検討及びブレ試験、ケーブルトレイ火災評価のケーブル束のモデル化、空気の爆発現象のモデル化についての解析・実験方法はいずれも適切であったと評価できる。尚、空気の爆発現象のモデル化に用いられている空気加熱割合は解析結果に対する感度が高いため、今後、さらにモデルの精緻化・妥当性の検討が進むこと（物理的な現象の理解との対応が進むこと）が期待される。</p>                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 拝承</li> </ul>  |
| 3              | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価      | <p>HEAF の爆発現象の把握及びメカニズム解明、ケーブル熱劣化試験方法の検討及びブレ試験、ケーブルトレイ火災評価のケーブル束のモデル化、空気の爆発現象のモデル化についての解析・実験結</p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 拝承</li> </ul>  |

| No.            | 評価項目                       | 評価意見   | 回答   |
|----------------|----------------------------|--|--|
|                | 評価手法が適切か。                  | 果の評価はいずれも適切であったと評価できる。電気ケーブルの熱劣化評価については、絶縁低下速度など熱劣化に関する基礎的な知見等が得られているが、後継研究プロジェクトでさらにそれらの理解が深まることが期待される。                               |  |
| 4              | その他                        | プロジェクト期間中に多くの外部発表があり、評価できる。プロジェクト終了後も成果を積極的に学術論文誌等で発表されることが期待される。  | ・ 拝承   |
| <b>新井 健司 氏</b> |                            |  |  |
| 1              | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | 火災防護に関しては国際的に共通の課題として研究が進められている分野であり、今回得られた技術成果やその規制上の意義について海外の規制機関や火災防護専門家とも議論を重ねていただきたいと考えます。また、これらの議論の経緯、内容については適宜公開していただくことを希望します。 | ・ 拝承   |
| 2              | ③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | HEAF に係る爆発解析モデル整備改良：空気加熱割合を変更することで試験結果との一致が改良していますが、この知見が一般性のある知見かどうか、現象のメカニズム検討やその他の試験条件における解析など実施も含めて検討を深めるべきと考えます。                  | <p>・ 一般的には空気加熱割合(kp)を一定にして解析が行われています。従いまして、kp を経時変化させながら解析を実施する手法は新しい解析手法になります。</p> <p>・ これまでの HEAF 試験では、爆発圧力データのバラツキが大きいため、試験値と解析値の差違にはあまり着目されてこなかったと存じております。一方で、規制庁の HEAF 試験は爆発現象にフォーカスした要素試験であるため、また、電気盤ではなく筐体を用いた HEAF 試験であるため、バラツキが少ないのはもちろんのこと、種々のパラメータを変化させた場合の爆発圧力データの取得が可能になっております。</p> <p>上記のことを踏まえて、後継研究プロジェクトでは kp 可変解析の妥当性について、爆発メカニズムの検討やその他の試験条件における解析など実施して参りま</p> |

| No.            | 評価項目                     | 評価意見   | 回答  |
|----------------|--------------------------|--|---|
| 3              | その他                      | 次フェーズの開始に当たっては、「基準及びガイド類の見直し要否の検討に必要な技術的知見を取得する」という研究目的に照らして、どこまでの知見が得られれば研究が完了するのか、火災解析モデルの整備ではどこまでの整備をもって完了とするのか、定量的なゴールの設定が望ましいと考えます。これにより達成度評価が可能となります。  | す。<br>・拝承、後継研究プロジェクトでは、各項目に対して定量的なゴールを設定し、達成度を確認しながら進めて参ります。  |
| <b>溝上 伸也 氏</b> |                          |  |   |
| 1              | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか | HEAF については、我が国が国外に比較して先行している状況であり、最先端の取り組みとして評価できる。また、ケーブルの熱劣化に対しては OECD/NEA の枠組みを活用して国際協調により過去知見も含め進めていると考える。   | ・拝承   |
| 2              | ② 解析実施手法、実験方法が適切か。       | HEAF の実験については、爆発現象が閉空間の体積、開口部からの流出のしやすさの影響を受けることから試験体の体積、開口部の面積を変更できる実験を実施したことは適切であったと考える。一方で、実験結果として示されたのは1ケースのみであったため、実験自体が適切であったかに若干の疑問が残る。特に、爆発のように進展にランダム性が伴う事象に対しては、同一条件であっても完全な同一結果となるとは限らないため、1実験条件に対する不確かさの確認が必要。<br><br>また、爆発実験の初期の圧力スパイクがアーク放電の熱によって生じた空気熱膨張のためとあるが、この現象理解は適切か？アーク放電に伴う局所的かつ急激な空気膨張（爆発）の下で生じた圧力波の伝播による圧力の急昇、そしてその後の圧力波の反射／吸収／拡散による減衰が、空気流出による減圧に重なること | ・拝承<br>・論文投稿等も控えておりますので、代表的な HEAF 試験の結果1ケースのみの説明とさせていただきました。<br>・HEAF 試験に関しましては、種々のパラメータを系統的に変化させてデータを取得し、それらを基に解析を行っております。また、再現性を確認する試験も別途実施しておりますが、規制庁の管体を用いた要素試験ではデータのバラツキが小さいものとなっておりますので適切な試験を実施したものと考えております。<br>・爆発の形態としては物理的爆発と化学的爆発に区分されます。これまでの規制庁の要素試験から爆発現象は、アーク放電に起因する空気熱膨張と金属ヒュームの発生であることが解析結果から示唆されており、それらは2つとも物理的爆発であるといえます。加熱による気体等の急速な熱膨張等は、その速度が音速を超えるものではないと考えておりますの |

| No. | 評価項目                              | 評価意見   | 回答  |
|-----|-----------------------------------|--|---|
|     |                                   | <p>で、圧力スパイクとして現れたのではないか？</p> <p>ケーブルの熱劣化の実験については、OECD/NEA の PJ で実施されたものを活用しているとの事であり、実験方法の適切性評価の対象外との認識である。</p>  | <p>で、衝撃波が発生するものではないと整理しております。また、規制庁の要素試験では衝撃波の測定も行って参りましたが、これまでに衝撃波が観測されたケースはございませんでした。</p> <p>・ケーブルの熱劣化につきましては、規制庁の研究になります。多段ケーブルトレイ火災の試験に関しましては、解析は規制庁ですが、試験自体は OECD/NEA の PJ で実施されたものになります。</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>実験結果の評価に対しては、②に述べた通り実験結果の代表性に関する評価が不足しており、また、2.2.4 に記載されたメカニズムについては、定性的な評価にとどまっているものの、実験の観測結果からすれば、おおむね爆発現象を説明できるものとする。</p> <p>ただし、解析結果については、圧力挙動への感度の大きい空気加熱割合 <math>k_p</math> を時間変化させることで再現が可能との結論であるが、現象理解に即したメカニズムに従った機構論的なモデルを構築し、その適用性に係る検討を行ったうえで丁寧に結論付けることが望ましい。このような検討を通じて様々な試験条件に対してモデルの適用性を確認できるようにする必要がある。現状のままでは、<math>k_p</math> は単なる調整パラメータに過ぎないことになり、再現解析ごとに再調整しなければならないだけでなく、予測解析における <math>k_p</math> も実施前に設定できなくなることが懸念される。</p> | <p>・種々のパラメータを系統的に変化させた試験及び再現性を確認する試験を複数回実施しておりますので、試験結果の代表性に関しましては、問題ないと考えております。</p> <p>・一般的には空気加熱割合(<math>k_p</math>)を一定にして解析が行われていますので、<math>k_p</math> を経時変化させながら解析を実施する手法につきましては、その妥当性や物理現象につきまして、丁寧に説明して参ります。</p> <p>・爆発現象の解析には、種々の爆発解析が可能な商用コードである AUTODYN を使用しております。</p> |
| 4   | <p>④ 重大な見落とし（観点の欠落）がないか。</p>      | <p>②③に述べた点は観点の欠落に相当するが、最終的な結論を大きく覆すほどのものではないため、重大な見落としはないと考える。</p>   | <p>・拝承</p>  |



燃料健全性に関する規制高度化研究に対する外部専門家及び専門技術者の評価意見並びにその回答

| No.     | 評価項目                 | 評価意見   | 回答   |
|---------|----------------------|--|--|
| 有馬 立身 氏 |                      |  |  |
| 1       | ②解析実施手法、実験方法が適切か。    | ・被覆管外面割れに至るプロセス①水素の拡散・析出、②亀裂進展の個別効果試験の統合試験として、ハルデン炉の試験に替えて FEM 数値解析を行っているが、その妥当性、数値解析による評価の定量性、信頼性について言及してほしい。                                 | 本研究で用いた FEM 解析手法の予測性能については、2.1.2(1)で検討しており、2.1.1(2)で実施した試験における破損時間と比較し、当該モデルが一定の予測性能を有することを示しております。  |
| 2       | ④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。 | ・被覆管外面割れ破損に関して、BWR 被覆管では割れは見られたが、PWR 被覆管では見られなかった、という結果に対する検討として、温度を主たる原因としているが、それ以外の要因、例えば被覆管自体の性質、冷却水の性質などが主たる原因としては排除できる理由を整理していただければと思います。 | <p>系統的に調べられたわけではありませんが、IAEA により、再結晶焼鈍処理（主に BWR 被覆管に適用されている）材の遅れ水素化物割れ（以下「DHC」という。）亀裂進展速度は、バラツキがあるものの、応力除去焼鈍処理（主に PWR 被覆管に適用されている）材のそれより小さい傾向があるというデータが報告されています。</p> <p>これは、材料的観点では PWR 被覆管の方が亀裂進展性が高いことを示唆するデータであり、材料自体の機械的性質に起因して、PWR 被覆管において外面割れ破損（DHC 破損）が見られなかったわけではないと考えられます。</p> <p>また、外面割れ破損のメカニズムである DHC は、化学的な相互作用に起因する応力腐食割れとは対照的に、物理的な相互作用に起因する亀裂進展現象であり、その点を踏まえると冷却水中の微量な化学成分組成が与える影響は小さいと考えております。</p> |
| 3       | その他                  | ・初期亀裂の発生メカニズムに対しては、FEM ソフトウェアとして ANSYS、統合試験の模擬試験としては、ABAQUS が数値解析に使用されています。それらを選定した理由があれば  | それぞれの検討時期が平成 22 年度、令和元年度と期間が空いていることが背景としては大きく、それぞれの検討の際に、汎用ソフトウェアの中から最適なものを選択したというのが理由です。  |

| No.           | 評価項目                      | 評価意見   | 回答  |
|---------------|---------------------------|--|---|
|               |                           | <p>簡単で結構ですのでお示してください。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・各々の試験は系統的に行われており、試験条件も十分網羅されている。また、規制基準との整合性・関係性も明確に示されていると感じました。</li> </ul>                           | <p>拝承</p>   |
| <b>黒崎 健 氏</b> |                           |  |   |
| 1             | ①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。  | <p>踏まえているといえる。しいて言う<br/>と、海外における同様の研究の最新知見を十分に確認しているかという点では、若干物足りなさを感じる。</p>   | <p>拝承、水素化物による被覆管脆化に関しては先行研究について十分確認し、代表的と考えられる文献を報告書の序論等で引用しております。</p> <p>外面割れ及び改良合金の照射成長に関しては海外での先行研究の報告例が限られていたため、引用という形で明確には現れていませんが、既往研究及び最新知見は逐次確認しながら研究を進めて参りました。</p> |
| 2             | ②解析実施手法、実験方法が適切か。         | <p>適切であるといえる。とくに、外面割れ破損に関する研究では、照射試験が実施できないという状況下で、個別の要素試験と計算機シミュレーション（FEM解析）を組み合わせることで、うまく総合的な評価につなげている。FEM解析に際して、妥当な物性データが用いられている。</p>                                 | <p>拝承</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>適切であるといえる。例えば、外面割れ破損に関する研究で行われた FEM解析に際して、妥当な物性データが用いられている。一方、改良合金被覆管の照射成長に関する研究では、試験方法や試験結果は妥当なように見えるが、結論（例えば、従来材被覆管と比べて改良合金被覆管の照射成長量は小さい）を導くにはデータ数が若干少ないようにも思う。</p> | <p>拝承</p> <p>照射成長に関しては、ハルデン炉が閉鎖されたことを受けデータ数が限られておりますが、主要な改良合金被覆管材料について約 <math>8 \times 10^{25} \text{ n/m}^2</math> までのデータを取得できたことが今回の研究の一つの重要な成果であると考えております。</p>           |
| 4             | その他                       | <p>この一連の研究において、これまで非常にたくさんの実験データ・解析結果等が得られているものと思われる。それらの貴重なデータをきちんと整</p>  | <p>蓄積されたデータを今回一度まとめたわけですが、ご指摘のようにこれで終わりというわけではなく、それらを踏まえ、例えば別の安全研究プロジェクトで活用</p>   |

| No.            | 評価項目                      | 評価意見  | 回答  |
|----------------|---------------------------|---|---|
|                |                           | 理・分類・有効活用することが重要である。近年、情報科学やデータ科学の分野が大きな発展を遂げている。整理・分類された膨大なデータを、そういった最新の技術で解析するというような、新しい方向性を今後考えてもよいのではないか。<br>委託先だけでなく、規制庁が主体的に論文発表していることは高く評価できる。発表されている論文の学術的な質も高いように思われる。 | する等に繋げるということもあり得ると考えており、検討致します。<br><br>拝承。  |
| <b>大塚 康介 氏</b> |                           |   |   |
| 1              | ③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | 出力急昇試験は実施できなかったわけだが、解析などによって補完することによって、本研究の目的を達成できたことや本研究で導き出された結論に問題ないことをきちんと論理だてして説明した方がよいと考えます。  | ご指摘ありがとうございます。本研究では、出力急昇試験で確認できなかった応力緩和の効果について FEM 解析により補完しました。<br>報告書においては、本研究で用いた FEM 解析手法の予測性能について 2.1.2(1)で一定の予測性能を有すること、その手法を用いた検討(2.1.2(2))により、応力緩和を踏まえても個別効果試験の結果が十分保守的であるということを確認し、示しております。<br>また、これを踏まえ、保守的なデータである個別効果試験の結果と設置変更許可申請における過渡解析の結果を比較し、外面割れ破損が系統的には起こらないだろうという結論に繋げております。 |
| 2              | その他                       | 外面割れ破損が発生する時間については、亀裂が生じるまでの時間と亀裂が進展する時間に分解して整理した方がよいと考えます。   | ご指摘ありがとうございます。個別効果試験においては、亀裂が生じるまでの時間と亀裂が進展する時間に分解して試験結果を整理しております。<br><br>FEM 解析についても、同様に分解して検討致しました。   |
| <b>高島 勇人 氏</b> |                           |   |   |
| 1              | その他                       | ①ppt 9 ページ：左図の曲線は引用文献にあるモデルで計算されたものと考えるので、試験データをプロットするな   | ご指摘を踏まえ、図に試験データを合わせてプロットする修正を行いました。   |

| No.    | 評価項目              | 評価意見  | 回答   |
|--------|-------------------|---|--|
|        |                   | <p>ど、45kW/mでも20分程度を要するという結論が試験結果から導出される過程がわかるようにするべき。(右図はその点、わかりやすい。)</p> <p>②同上：ppt 8 ページを見るとヒーター到達出力は 25kW/m～45kW/m で設定されたように見えるが、9 ページの左図の曲線は 60kW/m まで描かれている。60kW/m 相当まで試験をされているのであれば、その旨、8 ページにも記載された方が良く考えるし、BWR の過渡条件は承知していませんが、45kW/m で十分であれば、その先は試験で検証されていないので曲線を止めておくべきではないか。</p> | <p>9 ページ左図の曲線は、解析的な評価の結果であり、過渡条件を包絡する観点で 60 kW/m まで表示しております。</p> <p>試験については、ご推察のとおり、25kW/m～45kW/m で設定しております。</p> |
| 平井 睦 氏 |                   |   |  |
| 1      | ②解析実施手法、実験方法が適切か。 | <p>ペレットの熱膨張による歪支配の現象と考えられる水素化物外面割れを理解・評価するにあたり、BWR 燃料で実施したような現象をモデル化しメカニズム理解を行う目的の内圧支配試験と PWR 燃料で実施したような発生を調べる目的の歪支配試験を目的に応じて適切に選択して実施していると思われる。</p>  | <p>拝承。</p>   |

## 加工施設及び再処理施設の内部火災等に関するリスク評価手法に関する研究に対する外部専門家及び専門技術者の評価意見並びにその回答

| No.     | 評価項目                      | 評価意見   | 回答   |
|---------|---------------------------|--|--|
| 榎田 洋一 氏 |                           |  |  |
| 1       | ①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | これまでに技術的専門分野で知りえた範囲において、国内外の過去の研究、最新知見を十分に踏まえていると評価します。  |  |
| 2       | ②解析実施手法、実験方法が適切か。         | これまでに技術的専門分野で知りえた範囲において、解析実施手法と実験方法が適切であると評価します。   |  |
| 3       | ③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | 基盤研究で得られた基礎データは安全研究企画段階で想定された水準と量を満足し、大変価値が高いと認めますが、規制庁が担当すべき規制への応用並びに事業者が利用すべき保安活動への適用性の観点からは、より系統的な整理が行われるべきであり、今後の安全研究活動での更なる評価と利用促進の工夫が必要であると評価します。特に、GB 火災における発生ガス種に係る基礎データのモデル・シミュレーション評価における活用や高レベル放射性廃液蒸発乾固事象に係る四酸化ルテニウムの分解性・安定性の知見の放出量評価における活用について、今後の更なる活用に係る進展が国民の期待する原子力安全向上の観点から期待されます。 | 本安全研究で得られた成果は、今後の安全研究等において、具体的な規制活動に活用できるようなリスク情報として整理する予定です。GB 火災においては、一連の事象進展（熱分解における可燃性ガスの発生を含む。）について、本安全研究の基礎データから得られたモデル及び解析コードを用いたシミュレーションによる事象進展解析の手順を整備し、この手順を踏まえることで、必要なリスク情報を得ることができるよう検討を進めます。同様に高レベル放射性廃液蒸発乾固事象に係る四酸化ルテニウムの分解性・安定性の知見を、同事象の放出量評価に活用することにより、必要なリスク情報を得ることができるよう検討を進めます。 |
| 4       | ④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。      | 当該安全研究に係る基礎・基盤データの十分性や貴重性については優れているが、対象プロジェクトは「リスク評価手法」に関するものであるため、現時点での成果として、評価手法の高度化または核燃料サイクル施設への適用に対して、より明確で具体的なアウトプ   | 本安全研究で得られた成果は、評価手法の高度化又は核燃料サイクル施設への適用について検討し、今後、論文又は規制庁の NRA 技術報告書等により公表する予定です。  |

| No.           | 評価項目                    | 評価意見   | 回答 |
|---------------|-------------------------|--|----|
|               |                         | ットの姿が明示されるとよりよいものと評価します。   |    |
| <b>村松 健 氏</b> |                         |  |    |
| 1             | ①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか | 本研究を進めるに当たっては、再処理施設の溶媒火災に関する試験研究、再処理施設の蒸発乾固事象に関する解析及び実験研究等に関する先駆的な試験研究、再処理施設の配管等材料の腐食研究に豊富な実績・経験を有するJAEA等のスタッフ及び施設を活用していること、グローブボックスを含め原子力施設の火災研究を幅広く行っている仏国 IRSN との密接な協力関係を構築し、計算コード等を入手して活用していることなど、国内外の過去の研究、最新知見を採り入れる体制を構築している。また、研究成果報告書(案)に示された内容からも、この研究は、国内外の過去の研究及び最新知見を適切に踏まえて計画/実施されたことについて、特に不足と考える事項はない。 |    |
| 2             | ②解析実施手法、実験方法が適切か。       | 核燃料施設の火災リスク評価手法整備については、核燃料施設に関する内的事象等のリスク評価手法、軽水炉の火災リスク評価手法等をベースに行っている。GB火災については、国内の状況を調査の上対象材料を選定するとともに、試験方法等については経験のある手法をベースとして用いている。蒸発乾固試験については、本研究開始前までに行ってきた基礎的試験の経験をベースに、試験方法を構築している。研究成果報告書(案)についても特に不適切と考える事項はない。なお、水素による材料劣化については、学会等で多数の発表を行っており、手法の適切さや結果についてタイムリーに専門家のレビューを受ける努力をしていると評価                   |    |

| 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>できる（この点は③への回答でもある。）</p> <p>火災リスク評価手法検討、GB 火災試験、蒸発乾固試験、水素による材料劣化試験の各研究のいずれにおいても、原子力規制委員会が事業者による重大事故対策、継続的安全性向上、検査等をレビューする際に参考となる多数の知見が得られており、全体として大きい成果が得られている。その意味で、解析結果、実験結果は全体として適切に評価されているものとする。</p> <p>ただし、得られた結果を現実の意思決定に参考とする際には、実験条件と現実の条件との相違や現実の条件のばらつき、研究成果としての定量的情報の不確実さなどを、対象とする現実問題の条件に応じて見直しつつ適用することが肝要である。その意味では、研究の委託を受けた実施機関には、行った実験や解析の前提条件、実施方法、実施結果、結果を活用する際に注意すべき事項などを明確かつ丁寧に記録し、公開文献として残す努力を期待したい。また、原子力規制庁においては、そのような公開報告書や論文が作成されるような可能な方法で奨励していただきたい。</p> | <p>本安全研究で得られた成果について、試験委託先へは、論文等による公表を促してまいります。その際、御指摘いただいた左記留意点につきまして委託先とも共有いたします。</p> <p>また、規制庁においても、論文又は NRA 技術報告書等により公表を行っていく予定です。</p> |
| 4   | ④重大な見落とし（観測点の欠落）がないか。     | <p>重大な欠陥と見なすような気づき事項はない。以下は欠陥の指摘ではなく、適切にまとめられているという意味での補足である。</p> <p>火災リスク評価手法の整備においては、電源盤や制御盤の火災のように一つの機器等から多岐に渡る設備に影響が波及するようなシナリオなど、まだ十分な検討がなされていない課題が残されているが、それらについては、報告</p>   |   |

| No. | 評価項目 | 評価意見   | 回答  |
|-----|------|--|---|
|     |      | <p>書案でも明確に断っており、さらにスクリーニングを行って最終結果への影響が顕著となる可能性のあるものに絞って詳細に検討すべきであることなど、対応への基本的考え方が示されており、手順書案としては適切な取り扱いである。</p> <p>また、GB 火災や蒸発乾固試験については得られた試験結果や解析モデルを用いて、実プラントで想定される具体的なシナリオに関する事故影響評価を試みることにより、さまざまな現象の定量的な影響を理解しておくことが望ましいが、これらについては、それぞれに関する研究を今後も継続し、解析手法やデータを従実しつつ検討されるものと考えられる。</p> <p>さらに、水素による材料劣化については、重大事故の起因事象を発生させる要因の一つとして位置付けて実施され、良い成果が得られている。しかしながら、起因事象となる現象は他にも多数存在する。この研究は、今回で終了するとのことであるが、起因事象となる事象/現象の発生要因や発生頻度に関する知見を引き続き収集し、分析しておくことは、施設の安全を評価する上で極めて重要である。今後もそのような意味での情報収集と分析を何らかの形で継続し、現実のトラブル事象に対する専門的な分析能力を維持/向上させていくことが重要である。</p> | <p>GB 火災及び蒸発乾固試験については、これらの事象の定量的な影響を理解するため、引き続き新しい安全研究プロジェクトで研究を継続します。</p> <p>水素による材料劣化も含め、機器の経年劣化につきましては、引き続き、継続的に情報や知見を収集します。</p> <p>また、施設全体のリスクについて、今後も継続して分析を実施していく予定であり、その分析の中で起因事象となる事象/現象の発生要因や発生頻度に関する知見を収集するほか、トラブル事象に対する専門的な分析能力を維持/向上させてまいります。</p> |
| 5   | その他  | <p>安全研究の実施方針（配布された資料1）に述べられているように「知見の共有と情報の発信」は重要である。これは成果が国民の共有財産であるためばかりでなく、③に書いたように、安全規制の場で成果を適切に活用するために</p>  | <p>今後、蒸発乾固事象のほか、機器の経年劣化及び GB 火災につきましても、論文又は NRA 技術報告書等により公表を行っていく予定です。</p> <p>なお、本研究の中で委託した試験については、その結果を取りまとめた委託報</p>   |



| No.            | 評価項目                    | 評価意見  | 回答  |
|----------------|-------------------------|---|---|
|                |                         | <p>も重要である。本研究では査読付き論文が蒸発乾固関連に限られている。成果の詳細情報が長く保存され、かつ一般の技術者／研究者／公衆からのアクセスが容易な、研究機関の公開報告書やジャーナル論文の形で公開されるよう一層の努力をお願いしたい。</p> <p>火災リスク評価手法の整備については、今回で終了するが、作成された実施手順案は、学会等におけるリスク評価手法に関する標準の策定においても参考となると期待できる。規制庁においても、事業者によるリスク評価やリスク情報活用のレビューなどの規制実務の中で活用し、実務から得られる知見を随時反映して改良を継続するとともに、手順案の改良版も順次公開していただきたい。</p>               | <p>告書として公開しているほか、昨年度実施分につきましては今後公開する予定です。</p> <p>内部火災リスク評価手法の整備につきましては、上述の御指摘にもありましたように、課題も抽出されていますので、対象施設の新規制基準適合性に係る審査の結果等を踏まえ、引き続き、その内容について検討していく予定です。</p> |
| <b>浅沼 徳子 氏</b> |                         |   |   |
| 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. 内部火災等を起因としたリスク評価手法の検討について</p> <p>文献調査を踏まえてこれまでの経緯を十分に把握したうえで、参考となる発電炉のリスク評価手法に基づいてMOX燃料加工施設と再処理施設の評価手順案を作成しており、十分妥当である。</p> <p>2. リスク評価に向けた重大事故等に関する技術的検討について</p> <p>①火災又は爆発のGB火災解析では、過去の試験研究や調査に基づき試解析がなされている。②蒸発乾固事象や③機器の経年劣化に関する研究については、国内外においても情報が少ない、すなわち本質的な研究があまり行われていない状況であったと思われる。そのような中で、独自の取り組みがなされていると評価する。</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。         | <p>2. リスク評価に向けた重大事故等に関する技術的検討について</p> <p>①火災又は爆発の GB 火災評価試験や有機溶媒火災に関する試験では、基礎的なデータに加えて実際の燃焼環境を想定した試験も行われており、特に事象進展にかかる時間の情報が得られていることは大きな成果であると考ええる。②蒸発乾固事象では、ルテニウムを中心とした放射性物質の移行挙動について、系統的に詳細な検討が行われており、得られた情報の価値は高いと考ええる。③機器の経年劣化では、実際の除染条件を模擬した材料を用いて、電気化学的データや材料試験データを取得しており、得られた結果から実際に即した判断が可能と考えられる。</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>2. リスク評価に向けた重大事故等に関する技術的検討について</p> <p>①火災又は爆発の GB 火災解析では、具体的な条件を設定した試験が行われている。ただし、得られた知見として、影響評価を実施する際の留意点や着眼点、課題点をまとめたところがあるが、具体的に読み取れない。より明確に示されているとなお良い。②蒸発乾固事象では、MERCOR による熱流動解析や SCHERN による化学挙動解析が行われ、ルテニウム吸収速度と亜硝酸濃度の相間関係を把握すると共に、実規模の仮想施設におけるルテニウム移行挙動の試験が行われており、実試験と解析を組み合わせた評価検討が着実になされている。③機器の経年劣化では、インサート材として使用されるタンタルの水素吸収脆化に関する本質的なデータが取得され、機械的特性に影響する要因も評価されており、除染作業や</p> | <p>GB 火災解析で得られた留意点や着眼点、課題点につきましては、今後、NRA 技術報告書等で公表する予定です。</p> |

| No.            | 評価項目                    | 評価意見  | 回答  |
|----------------|-------------------------|---|---|
|                |                         | 計画に影響する重要な結果を得ている。  |   |
| 4              | ④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。    | 全体を通して見落としや観点の欠落は無いと思われる。一方、実際の試験を行った際の様々な経験や気づきなどは、担当者の経験値として蓄積されるものの、報告書や成果発表などの公表資料では明らかにならないこともある。火災や蒸発乾固のように過酷な事象を扱う試験では、技術や経験の継承を目的として映像資料の保存なども重要ではないか。                          | 技術伝承の観点からも重要と考え、いただいた具体的な継承の方法も含めて検討します。  |
| 5              | その他                     | 内部火災等を起因としたリスク評価手法の検討のところで課題として上げられているように、MOX加工施設や再処理施設に関する発生頻度などの不足情報について、今後どのように情報を収集し整備していくのか。また、蒸発乾固事象における解析手法についても、課題点や今後整備すべき情報などを整理しておく必要がある。リスク評価手法の信頼性を上げるためにも継続的な取り組みが必要と考える。 | MOX加工施設や再処理施設に関する発生頻度などの不足情報につきましては、調査、研究による蓄積が必要ですが、これが困難な場合として、海外からの情報の入手や一般産業の類似した機器のデータを活用していくことを考えております。<br>蒸発乾固事象につきましては、まず現象面について、網羅性の観点から今後必要な研究項目を抽出しており、新規の安全研究プロジェクトで実施してまいります。また、解析手法についても、研究の中で、課題点や今後整備すべき情報などを整理します。 |
| <b>本間 俊司 氏</b> |                         |   |   |
| 1              | ①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか | これまでの研究を適切にレビューしており、国内外の過去の研究、最新知見を踏まえていると認められる。  |   |
| 2              | ②解析実施手法、実験方法が適切か。       | 解析実施手法および実験方法に関して特に不適切な点はない。温度等の実験条件も概ね適切であると考えられる。   |   |
| 3              | ③解析結果の評価手法              | 解析結果の評価手法および実験結果の評価手法に関して特に不適切な点は   | 実規模事象については、海外からの試験データを入手する予定であり、新規の   |

| No.     | 評価項目                    | 評価意見   | 回答   |
|---------|-------------------------|--|--|
|         | 法、実験結果の評価手法が適切か。        | ない。ただし、GB火災については小規模ならびに中規模試験の結果を実規模事象へ適用できるかどうか火災解析コードの利用等により検討する必要があると考えられる。  | 安全研究の中で、これを踏まえたベンチマーク解析等により知見を取得する予定です。その際、御指摘のような適用性について検討します。                                  |
| 4       | ④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。    | 重大な見落としや観点の欠落は特にない。  |  |
| 5       | その他                     | <p>蒸発乾固事象および機器の経年劣化に関する成果については、論文および講演による外部発表が行われており、高く評価できる。</p> <p>火災または爆発事象に関する研究は、その重要性の高さからGB火災を中心に扱っているが、今後は爆発事象に関する研究成果も期待したい。</p>  | 水素爆発、レッドオイル爆発、その他の爆発等については、国外の研究機関との情報交換や文献調査等により情報を収集しており、今後も継続して情報収集を図り、その結果を踏まえて研究の必要性を検討します。 |
| 中林 弘樹 氏 |                         |  |  |
| 1       | ①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか | <p>加工施設及び再処理施設を対象とした内部火災リスク評価手法の検討においては、先行している国内発電炉の動向について事業者が実施している内容も踏まえた検討となっており、さらに米国や仏国などの海外の知見についても参考とするなど、十分に最新知見を踏まえたものとなっている。</p> <p>なお、加工施設の重大事故（火災）を対象としたリスク評価において重要な技術情報となるグローブボックス火災に関する基礎データの拡充のためにGB構成材料（アクリルやポリカーボネート）の火災試験を行っているが、これらについては一般にも広く用いられている材料であることから、一般品の特性と原子力仕様品との差違の有無・比</p> | グローブボックス火災に関するコメントでいただいた材料の特性について、整理し成果の公表の際に記載いたします。  |

| No. | 評価項目                             | 評価意見  | 回答   |
|-----|----------------------------------|---|--|
|     |                                  | <p>較についても記載しておくことが望ましい。</p>   |  |
| 2   | <p>②解析実施手法、実験方法が適切か。</p>         | <p>GB 構成材料（アクリルやポリカーボネート）の火災評価試験においては、火災時に想定される現象に基づき、熱分解による重量減少・ガスの発生速度・組成分析を行い、燃焼経過による酸素濃度の変化の影響を理解するために試験手法を改良するなど適切な実験方法が用いられている。</p> <p>蒸発乾固時に放出される Ru の挙動については、その複雑な化学的挙動を把握するために、共存する化学種の影響や移行経路の物理的特性を考慮できるように試験方法が工夫されており、適切な試験方法となっている。なお、実際の系に比べてスケールが小さいことにより得られた収支の誤差が大きくなっているものも認められることから、シミュレーション等との比較評価を進めることが望まれる。</p> | <p>御指摘のとおり、こうした小規模な試験のデータを実プラントの評価に使用するには、スケールの相違について十分な検討が必要と考えています。そのような検討の手段として解析コードを使用することも考えられますが、それに限定せず、様々な対応を検討していく予定です。</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>GB 火災、蒸発乾固について実施された実験結果として、目的としている事象進展の解析のために必要な基礎データを適切に取得・評価している。蒸発乾固の挙動を模擬した試験において、亜硝酸による Ru の気相への移行挙動や蒸発乾固後の注水を模擬した試験における Ru/Cs の挙動などは定性的な解釈とも合致するものであることが示されており、その妥当性が認められる。</p> <p>なお、バラツキによる影響は決定論的手法では保守側に内包して扱うが、リスク評価においては陽に扱うため、目的としている事象進展解析において感度の高い因子は何か、その因子が持つバラツキはどのような確率モデルに従うかについての考察について今後の</p>                  | <p>いずれも新規の安全研究の中で確認してまいります。GB 火災については解析コード等を用いた感度解析、蒸発乾固事象についてはあらかじめ重要と考えるパラメータに着目して、試験の中でその感</p>                                    |

| No. | 評価項目                 | 評価意見   | 回答   |
|-----|----------------------|--|--|
|     |                      | 研究に組み入れられることを期待する。   | 度を確認してまいります。   |
| 4   | ④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。 | 当該研究は目的に対して慎重に計画され、段階的に展開されてきたものであり、実施事項や結果の考察において重大な見落としはないものと考えられる。  |  |
| 5   | その他                  | 機器の経年劣化の研究において、再処理施設特有の Zr 異材継手の材料信頼性に関して、Zr 固有の水素吸収脆化と異材との界面挙動を併せてその高経年化への影響を定量的に示した成果は有意義なものである。着目している除染作業時に発生する水素以外に、プロセス中に微量に発生する放射線分解水素の影響も考慮することで、今後の施設の保全や高経年化影響評価といった再処理施設の長期的な安全性に貢献することが期待される。 | 放射線分解による水素の影響につきましては、平成 28 年度までに実施した安全研究「商用再処理施設の経年変化に関する研究」にて知見を取得済みです。 |

廃棄物埋設に影響する長期自然事象の調査方法及びバリア特性長期変遷の評価方法に関する研究に対する外部専門家及び専門技術者の評価意見並びにその回答

| No.    | 評価項目                      | 評価意見  | 回答  |
|--------|---------------------------|---|---|
| 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を丁寧に調査し、最新知見を踏まえた研究が実施されていると評価できます。ただし、成果報告書 37 ページにおいて「(セメント中の)物質移行性能に関する研究は、水密コンクリート等の特殊構造物の設計において拡散性等を実験等で計測して品質確認する程度で、メカニズム解明等の研究は行われていないことが既往の研究調査から判明した」と述べているのに対し、38 ページの「①細孔構造の変遷と物質移行性」において移行メカニズムの概要が説明されています。評価対象核種ではありませんが、HTO の拡散メカニズムを考察した論文等が過去にあることなどから、37 ページでは「詳細なメカニズムの解明には至っていない」程度の記述が妥当ではないでしょうか。いずれにせよ、今後のご研究の成果に期待しております。 | ご指摘のとおり廃棄物分野で HTO による拡散試験等に関する論文等が存在することは認識しておりますが、材種や空隙構造等を考慮したメカニズム解明までは至っていないと考えていますので。「詳細なメカニズムの解明には至っていない」の表現に改めます。  |
| 2      | ②解析実施手法、実験方法が適切か。         | 解析実施手法、実験方法は適切であったと評価できます。  |   |
| 3      | ③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | 概ね適切と評価できます。ただし、セメント試料に対する水銀圧入法、ガス吸着は基礎的な実験であり、この結果のみで、目標とした人工バリアの長期性能評価（物質移行性との関連）を議論することにはやや無理があると思います。今後、体系立てた物質移行データの取得などで、セメント試料の内   | セメント硬化体の物質移行は、内部微細構造に大きく影響すると考えており、また、どの空隙形態に寄与するかも含めて移行性を評価することを行います。内部微細構造の把握に関しては主に水蒸気吸着等を用いて、CSH 等の層間空隙から毛細管空隙、AE 空隙等まで計測して移行性を評価します。なお、これらの空隙構造は、使用材料や配合、更に練混ぜ締め固め |

| No.            | 評価項目                    | 評価意見   | 回答  |
|----------------|-------------------------|--|---|
|                |                         | 部微細構造と移行性との関連を詳細に検討されることが望まれます。  | <p>に大きく影響を受けるので、空隙形成のメカニズムに立脚した検討を行って、検証として実際に供試体を作成して評価します。</p> <p>また、300年を超える長期評価が必要であることを踏まえ、CSHゲル等の構造が時間経過や水分の存在等により形態を変化させますので、この変化により層間空隙の変化との移行性も評価対象としております。</p> <p>一方、セメント硬化体は、体積変化により拡散場から移流場へ移行することも踏まえ、体積変化と移行性についても評価します。</p> <p>このような背景から、拡散場、移流場及び吸着について移行性を体系的に評価することを考えています。</p> |
| 4              | ④重大な見落とし（観測点の欠落）がないか。   | <p>重大な見落としは見当たりません。</p> <p>ただし、瑞浪深地層研究所にて結晶質岩を対象に実施された研究において今後の課題とされたものについては、瑞浪が埋め戻しとなり試験の実施が困難となったことから、代替試験法などの検討が必要と思われます。</p> | <p>埼玉大学、産総研と原子力規制庁の共同研究で、岩石試料に3軸で応力を掛けながら力学特性と水理学的特性を取得する室内試験を進めており、原位置での試験と合わせて検討を進めていく予定でございます。</p>   |
| 5              | その他                     | <p>人工バリア（ベントナイト）中のカリウムの拡散係数はこれまでに報告例がない、新規の貴重なデータと思いますが、まだ委託先においても成果が発表されていないようですので、今後、積極的に公表されますことを期待しています。</p>                 | <p>拝承いたします。</p>   |
| <b>新堀 雄一 氏</b> |                         |  |   |
| 1              | ①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか | <p>これまでの国内外の研究成果を踏まえた研究を展開している。なお、岩石中の微小な空隙での特異的な収着反応のメカニズムについては、得られたメソポーラスシリカの結果の知見に加え、さらなる検討が必要になる。また、</p>                     | <p>核種の岩石への収着現象につきましては、多くの収着試験が行われている岩石試料を粉砕し大きな液固比で接液したときの特性値から、将来想定される水質、鉱物相等の環境条件の幅と、液固比が小さい岩盤中の条件における特性値に変換し</p>   |



| No. | 評価項目              | 評価意見  | 回答   |
|-----|-------------------|---|--|
|     |                   | <p>地形変化を伴う地下水流動・核種移行評価について、規制の観点から今後の継続的な検討が望まれる。</p>   | <p>て評価する必要があります。このため、収着現象の化学的理解や、環境条件の長期的な変化の予測が必要であり、これまで多くの検討がなされてきていると理解しております。今回着目しているのは、このうちの最初の収着特性の妥当性に関するものであると考えていますが、試験に用いている空隙が均質な人工材料ですので、これが重要な感度があるということになれば、更に天然の岩石の空隙構造の把握と、それを考慮した収着特性の理解を進める必要があると考えております。</p> <p>地形変化を伴う地下水流動・核種移行評価につきましては、特に深度が大きくなる処分概念において重要と考えておりますが、報告書で提示しました評価手法には、まだ、多くの仮定が含まれており、容易に解決しないものも多いと考えております。このため、現象の理解の一方で、現在の理解の範囲でどこまで使うことが可能であるか（地下水の移行経路は変わらなさそうである、侵食は廃棄物埋設地に至ることはない等）のロジックの構築を検討したいと考えております。</p> |
| 2   | ②解析実施手法、実験方法が適切か。 | <p>解析手法および実験方法は適切である。また、一連の研究では、解析および実験手法自体の整理も行い、何れも規制の観点から有用な成果を得ている。たとえば、中深度処分に関連して、隆起速度の評価手法の比較・検討では、既往の何れの手法でも概ね同程度の結果を得ることを確認している。また、地下水流動に関する評価手法の研究では、採取可能な間隙水の同位体比分析から地下水年代の推定手法について、実フィールド試験に基づいた検討を進め、有用な手法を提示している。加えて、細孔構造の変遷と物質移行性に関</p> |  |

| No.            | 評価項目                      | 評価意見   | 回答                                 |
|----------------|---------------------------|--|------------------------------------|
|                |                           | 連した間隙の定量化に関して、マトリックスの強度が小さい試料の間隙径等の測定の適切な手法を確認している。  |                                    |
| 3              | ③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | 評価手法は適切である。なお、地形変化を伴う地下水流動・核種移行評価については、地形の変化と地下水流動や核種移行の速度との違いを整理し、実効性のある評価手法を把握する必要がある。前述のように、今後も継続した検討が必要になる。  | No.1 参照                            |
| 4              | ④重大な見落とし（観測点の欠落）がないか。     | 重大な見落としはない。但し、前述のように、岩石中の微小な空隙での特異的な収着反応のメカニズムについては、多角的な視点から、さらに丁寧な検討が必要と考えられる。  | No.2 参照                            |
| 5              | その他                       | 国内外の研究機関の活用は有用である。重要なことは、それらの知見を規制の観点から自らの洞察力（技術力）として取り入れることにある。一連の研究はそのような観点からも着実に成果を挙げている。今後も技術力の更なる向上を目指すことを期待する。他方、本安全研究では、成果の公表も積極に行い、若手の育成にも大きく寄与している。 | 拝承いたします。                           |
| <b>山元 孝広 氏</b> |                           |  |                                    |
| 1              | ①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか   | 長期間の侵食量評価に宇宙線生成核種を用いた測年技術、地下水流動評価に同位体水文学的手法を適用するなど、比較的新しい手法が取り入れられている。   |                                    |
| 2              | ②解析実施手法、実験手法が適切か。         | 解析手法、実験手法の詳細は報告書にしめされていないものの、適切な手法が採用されているものと考えられる。  |                                    |
| 3              | ③解析結果の評価手法、実験結果           | ・「物理探査による断層長さの認定フロー」等が作成されているが、具体的な適用例も提示されないと、これが評  | 具体的な適用については、今後の安全研究での課題とさせていただきます。 |

| No.     | 評価項目                    | 評価意見  | 回答  |
|---------|-------------------------|---|---|
|         | 果の評価手法が適切か。             | <p>価に適切なフローなのかどうか判断できない。</p> <p>・「不確かさを考慮した地形変化の評価モデル」は、特に中深度処分では必須の評価であろう。ただし、多様な現象の「不確かさ」を具体的にどのように取り扱っているのかの詳細記述がないため、評価手法が適切かどうか判断できない。特に「将来の海水準変動の不確かさ」の影響が大きいとの結論が示されているが、そもそも「海水準変動」自体がかなりの不確かさを内在した現象である。これをどのように数値化して評価したのか中身を示す必要がある。</p>   | <p>地形変化を伴う地下水流動・核種移行評価につきましては、特に深度が大きくなる処分概念において重要と考えておりますが、報告書で提示しました評価手法には、まだ、多くの仮定が含まれており、容易に解決しないものも多いと考えております。このため、現象の理解の一方で、現在の理解の範囲でどこまで使うことが可能であるか（地下水の移行経路は変わらなさそうである、侵食は廃棄物埋設地に至ることはない等）のロジックの構築を検討したいと考えております。</p>   |
| 4       | その他                     | <p>・規制当局として「人工バリア劣化評価モデル」や「地形変化評価モデル」を整備することは良いと考えるが、そのモデル骨子やバックデータについては論文として積極的に公表し、科学的な正当性を担保していく努力が必要ではないか？そのような過程を経たモデルでないと、評価結果を正当に扱うことが出来ず、使えないものになってしまうことを危惧する。</p> <p>・安全研究成果をどのように中深度処分の審査ガイドに落とし込んでいくのか、展開が見えない。個々の研究項目はまだまだ道半ばの印象がある中で、担当からは早い時期でのガイドライン作成の目標が示され、若干、違和感がある。</p> | <p>従来、規制当局としての整理の発表が足りていないことは御指摘のとおりでございます。原子力規制庁の方針といたしまして、研究の技術的成果を規制へ反映する立場で再整理して公表していくこと、また、規制庁の職員自身が技術的検討を行い成果として取りまとめることを進めることとしておりますので、今後、公表を進めていきたいと考えております。</p> <p>規則、審査ガイドにどこまで記述し、それに対する適合性を判断する根拠をどこまで積み上げないといけないか、検討を行っております。科学的に全てが解明されないと審査できないわけではなく、実用的な理解の範囲もあります。やはりその基礎となる科学的な理解が重要であると考えております。</p> |
| 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 | 引用されている参考文献等から、一般的に国内外の関連既往研究の成果を踏まえて研究計画・内容が設定されており、最新知見が反映されていると評価する  |   |

| 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。 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・中深度処分における隆起・浸食に関する評価手法の研究では、既往研究の調査レビューをもとに、隆起／浸食の評価手法の適用性が対象と時間スケールごとによく整理されている。また、断層等に関する評価手法の研究では、物理探査の手法が網羅的に調査され、段階ごとの適用性評価が適切になされている。</li> <li>・中深度処分における地下水流動に関する評価手法の研究では、同位体水文学的評価手法の有用性および妥当性が示されている。</li> <li>・中深度処分における岩盤の力学・水理特性に関する研究では、一般的なBPI試験によるEDZ評価の妥当性が、透水試験と弾性波探査試験を併用することで多角的に検討されている。</li> <li>・人工バリアの長期性能評価手法の研究では、ベントナイト系人工バリアの劣化モデルと解析に資する見かけの拡散係数のデータベースの整備・拡充が適切になされている。また、セメント系人工バリアの長期性能評価に関して、細孔構造やセメント結晶変遷に伴う物質移行性を計測する有効な手法の検討がなされている。</li> <li>・天然バリアの自然現象を考慮した水理特性の評価研究では、不確かさを考慮した時系列的地形変化評価モデルと手法が提示され、ケーススタディながら、過去から将来にわたる地形変化と地下水流動／核種移行の大変興味深い評価結果例が提示されている。</li> <li>・地質環境及び水理環境モニタリングに関する研究では、国内外の事例調査により課題が明確化されており、長期に渡る適切な地下水モニタリング法や</li> </ul> |    |

| 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>モニタリング孔の扱いが検討されている。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・中深度処分における隆起及び浸食に関する評価手法の研究において、各評価手法の留意事項が適切に指摘されているものの、適否の判断根拠がやや漠然としている感がある。</li> <li>・中深度処分における断層等に関する評価手法の研究で、反射法地震探査法の有効性を示し、断層長さの認定フローが示されたことは大きな成果と評価するが、探査領域の設定法や探査精度（観測地点からの位置依存性など）の評価法についても、高度な専門的知識が必要と逃げを打つのではなくて、一般論でもよいから具体的な言及が欲しいところ。</li> <li>・中深度処分における地下水流動に関する評価手法の研究において、地域依存ではあるものの、天水線から深度 13 m 以深で 10 万年間地下水流動が見られないという知見は重要な成果と評価する。今後、亀裂性媒体／多孔質媒体の地下水流動モデルへの反映を期待する。</li> <li>・中深度処分の岩盤坑道の EDZ 評価に関して、透水試験と弾性波探査試験との比較から、BPI 試験の開口割れ目観測による水みち評価の問題点が指摘されているが、各試験法で見ている領域の違いなど、結果の差異についてももう少し説明が欲しいところ。</li> <li>・セメント系人工バリアの細孔構造やセメント結晶変遷に伴う物質移行性の計測手法は予備的な研究ながら有効な</li> </ul> | <p>御指摘ありがとうございます。隆起及び浸食の研究は、地質学の分野で主に行われており、放射性廃棄物処分想定した研究は少ないのが現状です。地質学分野の研究者の力をかりて得られた成果を処分に適用する際どのような判断が必要となるかについては、別途、規制庁の研究としてもまとめます。</p> <p>御指摘ありがとうございます。可能な範囲で、評価手法についても、具体的に示すべきと考えます。今後の断層研究を進める中でご期待に沿えるように対応いたします。</p> <p>拝承いたします。</p> <p>ご指摘ありがとうございます。EDZ の研究に関しましては、詳細な説明を、論文発表の形で行いたいと考えております。令和 3 年度中の公表を目標として執筆中ですので、もう少しお時間をいただければと思います。</p> <p>細孔構造の評価では、水和反応の進展</p> |

| No. | 評価項目 | 評価意見   | 回答  |
|-----|------|--|---|
|     |      | <p>手法の提示がなされているが、まずは手法の適否を判断するための要求事項等（例えば、層間空隙やゲル空隙の何をどの程度の精度で測る必要があるのかなど）を明確に示していただきたい。</p> <p>・天然バリアに関して過去の地形変化の再現性を基にした地下水流動／核種移行の将来予測のケーススタディで定性的な説明と妥当性判断の留意点は納得のいくものであるが、もう少し定量的に入力パラメータの依存性（何が最終結果に効いてくるのか）の感度解析的な検討があるとよい。</p> <p>・地下水モニタリングに関する研究で、廃棄物埋設施設のサイト周辺の3D地下水流動シミュレーションが例示されているが、この結果をもとに、モニタリング孔の設置場所や数を定めることになるので、その精度をどの程度担保する必要があるのかの評価・検証が気になるところ。</p> | <p>等により変遷するCSHゲルの層間空隙及びゲル空隙について、使用材料や配合等によりどのように形成され、それがどのような外部環境によりどのように変遷するかを整理することにしております。したがって、これらの空隙を間接手法として主に水蒸気吸着装置、直接手法として中性子小角散乱を用いることしております。また、セメント結晶の変遷は、CSHゲルの構造安定性を評価するために、TMS法とNMRを用いて評価することにしております。</p> <p>地形変化を伴う地下水流動・核種移行評価につきましては、特に深度が大きくなる処分概念において重要と考えておりますが、報告書で提示しました評価手法には、まだ、多くの仮定が含まれており、容易に解決しないものも多いと考えております。このため、現象の理解の一方で、現在の理解の範囲でどこまで使うことが可能であるか（地下水の移行経路は変わらなさそうである、侵食は廃棄物埋設地に至ることはない等）のロジックの構築を検討したいと考えております。</p> <p>拝承いたします。</p> <p>モニタリング孔の設置場所や数は、予測全体の検証、変動の検知、処分システムが特に避けるべき流動方向の状態の確認など、幾つかの観点があり、それに応じた精度も決めていく必要があると考えております。</p> |
| 4   | その他  | <p>成果公表として、規制庁職員の方が全くなしというのはいかがなものか？規制業務が多忙と思うが、委託研究先を含め、公的に研究投資された成果は、途中段階であっても、世の中に成果発</p>   | <p>従来、規制当局としての整理の発表が足りていないことは御指摘のとおりでございます。原子力規制庁の方針といたしまして、研究の技術的成果を規制へ反映する立場で再整理して公表していくこと、また、規制庁の職員自身が技術的検討</p>  |

| No.     | 評価項目                      | 評価意見   | 回答  |
|---------|---------------------------|--|---|
|         |                           | 表や情報発信する積極的な姿勢が必要ではないか？  | を行い成果として取りまとめることを進めることとしておりますので、今後、公表を進めていきたいと考えております。  |
| 中居 邦浩 氏 |                           |  |   |
| 1       | ②解析実施手法、実験方法が適切か。         | <p>2.1 廃棄物埋設に係る自然事象の長期評価に関する研究<br/>中深度処分で考慮すべき深度、断層、地下水、力学・水理について、幅広く評価手法が調査されていると思います。</p> <p>2.2 廃棄物埋設における性能評価手法に関する研究<br/>ベントナイトの変質、拡散係数、細孔構造、塩分濃度等、性能評価に必要な項目に対してモデル化、データ整理、解析が行われていると思います。</p>  | 拝承いたします。  |
| 2       | ③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | <p>2.1 廃棄物埋設に係る自然事象の長期評価に関する研究<br/>中深度処分で考慮すべき深度、断層、地下水、力学・水理について、適切な評価手法が抽出されていると思います。</p> <p>2.3 地質環境及び水理環境モニタリングに関する研究<br/>2.3.2 地下水モニタリングに関する研究 (2) 掘削制限区域設定に関する地下水モニタリング(p.48)に関して、「幾分低め (-1 m から-2 m まで) の値で落ち着くこと」について、解析時の収束条件が影響している可能性があります。</p> | <p>拝承いたします。</p> <p>拝承いたします。<br/>解析の収束条件、解析メッシュの適切性等は重要ですので、注意いたします。また、処分場の性能との関係で、どの程度までの影響を見る必要があるかも考慮して検討したいと考えております。</p> |
| 3       | その他                       | 廃棄物処分の性能評価手法の発展につながるこれらの各研究成果と評価手法の詳細について、広く公開されることを期待します。   | 原子力規制庁の方針といたしまして、研究の技術的成果を規制へ反映する立場で再整理して公表していくこと、また、規制庁の職員自身が技術的検討を行い成果として取りまとめることを進めることとしておりますので、今後、公表を進めていきたいと考えております。   |

| No.     | 評価項目                     | 評価意見  | 回答  |
|---------|--------------------------|---|---|
| 井口 幸弘 氏 |                          |   |   |
| 1       | ① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか | 本研究分野については、当方に十分な知見がないため判断できないが、国内外の中深度処分の知見について、規制についての言及はあるが、研究に関する国外の事例の言及が少ないように見受けられる。それだけ、国内の地質は特殊なものということなのか。  | 個々の技術に関しては、関連するものが多くあります。具体的の中深度処分に相当する処分場は、スウェーデン及びフィンランドで操業しています。これらは、いずれも花崗岩地域です。また、日本の花崗岩地域と異なり地下水の湧出量が少ない特性があります。  |
| 2       | ②解析実施手法、実験方法が適切か。        | 本研究分野については、当方に十分な知見がないため判断できないが、地下水流動履歴の指標となる地球化学的評価手法の整備で、瀬戸内海沿岸地域が選定されている理由がよくわからない。花崗岩主体の地域として代表的なものとして選定されているのか。  | 花崗岩主体の地域であることも選定理由の一つです。加えて、瀬戸内海は氷期には陸化して海岸線が大幅に後退します。このように、海水準変動の大きい地域においては地下水流動場の変化がおおきいと考えました。また、調査のしやすさという観点から、既存坑井が多く、地下水の採取がやりやすいというのも選定理由です。   |
| 佐々木 泰 氏 |                          |   |   |
| 1       | ②解析実施手法、実験方法が適切か。        | <p>◆38 ページ 細孔構造の変遷と物質移行性</p> <p>水蒸気吸着法では試料の前処理により結果が異なるため、前処理の状況についての記載があると良いと思います。</p> <p>◆39 ページ セメント結晶(非晶質含む)の変遷による物質移行性</p> <p>NMR と TMS を組み合わせて解析されているようですが、具体的にどのように組み合わせたのかの記載があると良いと思います。</p> | <p>御指摘のとおり、従来の前処理法では、細孔構造が変化することは十分に認識しております。そこで、空隙構造の計測手法の選定も重要ですが、前処理方法の選定がより高い重要性を持っておりますので、前処理による影響も踏まえて適切な手法の評価を行います。また、MIP のように破壊サンプルでは、空隙の方向性が特定できませんので、そうした空隙の向き等も踏まえて評価することを考えております。</p> <p>セメント結晶の変遷は、主に NMR での評価が主流かと思いますが、NMR は、マクロ的結合状態(単量体から○量体の平均値)の評価しかできませんので、実際の結合状態をミクロ的に評価することはできません。そこで単量体から6量体までの個々の結合を明確に示せる TMS 手法を用いて NMR との関係性を含めて評価することを考えております。</p> |



| No. | 評価項目                      | 評価意見   | 回答  |
|-----|---------------------------|--|---|
|     |                           | <p>◆39 ページ 31 行目、41 ページ 27 行目 地下水流動・核種移行評価</p> <p>地形変化評価は、過去におけるその変動を外挿することで、将来の推論が可能であるとしています。同様に、地下水流動においても、将来の推定をする前に、過去の海水準変動等を考慮して現在の塩分濃度分布や地下水年代の説明が可能かを検討し、その上で将来の推定をしていただく方が良いと思います。</p> | <p>また、Ca の溶脱について、TMS 手法はその原因の特定に寄与すると考えており、こうした理由から TMS 手法の採用を行っております。</p> <p>現在までの研究成果では、NMR と TSM の関係性が明瞭に出せるところまで研究が進んでいます。</p> <p>また、結晶構造の分析では、中性子小角散乱等の手法も取り入れて自由水や結晶水及びそれらの動き等を分析して総合的に評価することを考えております。</p> <p>地形変化を伴う地下水流動・核種移行評価につきましては、特に深度が大きくなる処分概念において重要と考えておりますが、報告書で提示しました評価手法には、まだ、多くの仮定が含まれており、容易に解決しないものも多いと考えております。このため、現象の理解の一方で、現在の理解の範囲でどこまで使うことが可能であるか（地下水の移行経路は変わらないさそうである、侵食は廃棄物埋設地に至ることはない等）のロジックの構築を検討したいと考えております。</p> <p>地下水流動につきましては、御指摘のような、過去の履歴の情報を用いて、現在の観測を説明することによって、場の理解をすることが主であると考えております。</p> |
| 2   | ③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | <p>◆18 ページ、6 行目 地球化学的評価 Cl 濃度の高い深層地下水が縄文海進時のものとされていますが、図 2.1.8 では、最終氷期以前の Cl 濃度の高い深層地下水があるように見えます。同じ試料によるものであるなら、18 ページの縄文海進時という説明は適切ではないように思います。</p> <p>◆28 ページ、4-6 行目 岩盤の力学的</p>               | <p>P18 ページ 6 行目は縄文海進時の海水もあるという意味であります。図 2.1.8 は全てのデータをプロットしているわけではないので、齟齬はないのですが、誤解を招きかねないので、記載を修正します。</p>  |

| No. | 評価項目                  | 評価意見   | 回答  |
|-----|-----------------------|--|---|
|     |                       | <p>状態と水理的特性</p> <p>No.1 孔は、浅部では透水係数が低かったが、弾性波速度は遅かったと解釈しました。 そうであれば、No,1 と No2の透水係数の違いの考察が必要と思います。また、浅部で弾性波速度がどの程度低下したかの記載もあると良いと思います。</p> <p>◆52 ページ 6 行目 ボーリング孔閉塞</p> <p>ボーリング孔周辺のゆるみ域が影響したとありますが、そのゆるみは、ボーリング孔の掘削に伴うものと確認出来ているのであれば、その根拠の記載があると良いと思います。</p> | <p>御指摘ありがとうございます。透水性の記述は特に No.1 孔について不十分だったので報告書において追記しました。また、弾性波速度についても定量的な詳細を述べるべきだとは思いますが、報告書完成後に、別に投稿論文として発表することを予定しているため、この程度の記載にとどめました。</p> <p>「ボーリング孔周辺のゆるみ域が影響した」につきまして、不正確な表現でございました。申し訳ございません。以下のように、修正させていただきます。「測定精度の範囲で、周囲の岩盤と同程度以下の透水係数であると評価されたが、要求性能に対して測定精度が十分であるか、ボーリング孔周辺の緩み域の影響を把握できているか等について更に検討が必要である。」</p> <p>閉塞部の奥側を加圧して圧力降下を測定することができないことから（測定後に、加圧及び測定ラインを撤去する必要があり、その孔の閉塞が再度必要になるため）、閉塞部の手前側の情報しか得ることができません。非定常の圧力応答など、どのような観測とデータの整理をすればよいか、検討しております。</p> |
| 3   | ④重大な見落とし（観測点の欠落）がないか。 | <p>◆46 ページ 19 行目 掘削制限区域設定</p> <p>掘削制限区域の妥当性の評価において、埋設地周辺に掘削された井戸等の影響範囲を考慮し評価方法を検討することは理解できますが、その前に、掘削制限区域外での人為事象に対して、どの程度の事象に対して、どのような評価基準を適用するかを検討を先にして頂いた方が良いと考えます。この評価基準とサイトの状況に応じ掘削制限</p>  | <p>人の生活環境の状態設定は、当該地域において、現在、一般的に行われている生活習慣に基づくことが基本でございます。その上で、掘削制限区域においては、深いボーリングなどの、必ずしも一般的ではない生活習慣によって、廃棄物埋設地が直接又は間接的に擾乱される行為までを含めて制限がされます。</p>  |

| No. | 評価項目 | 評価意見   | 回答  |
|-----|------|--|---|
|     |      | <p>区域の範囲や、必要な調査方法等が決まるものと考えます。</p>   |   |
| 4   | その他  | <p>◆31 ページ、7-10 行目 人工バリアの長期性能評価</p> <p>ベントナイトの変質に伴い生成する二次的鉱物の物質移行特性への影響に関しては、一次鉱物の溶解と二次的鉱物の沈殿の影響度合いにもよりますが、多くの場合、拡散性や透水性を低下させるので、それを明らかにして頂けることは、出来るだけ確からしい状態設定につながることから、引き続き検討を進めて頂けることを要望いたします。</p> <p>◆36 ページ、図 2.2-1 人工バリアの長期性能評価</p> <p>De をベースとしたベントナイト系人工バリア中の拡散モデルの出力は、確率論的安全評価の入力情報として使用されるようにも読めますが、確率論的検討についての考え方があるのであれば、記載いただきたいと思えます。</p> <p>◆誤字等</p> <p>1 ページ 審査ガイド等 (→審査ガイド等、12 ページ 場所であることとされている→場所であることとされている、21 ページ 小河原湖→小川原湖、23 ページ ボーリング坑→ボーリング孔、29 ページ 建設しときに→建設したときに、46 ページ 掘削せいては→掘削しては、49 ページ 水経→水径</p> | <p>ナチュラルアナログ研究や室内実験により、二次鉱物の沈殿により拡散性、透水性が低下する場合は報告されております。一方、どのような条件であれば、拡散性、透水性の低下が引き起こるのかという点については、まだまだ不明な点があるため、検討を進めていきたいと思えます。</p> <p>人工バリア中のイオン等の拡散は、空隙水中の拡散と固相への収着が合わさった現象です。それぞれの現象を実効拡散係数と収着特性に分解して把握しこれを統合する考え方がありますが、その統合の仕方についてまだ議論があります。そこで、両者の特性を合わせたものとして測定された Da (見掛けの拡散係数) で整理できれば、拡散現象の評価の扱いを簡易化かつ適切化することができるのではないかという問題意識で整理を行ってきたものです。御指摘のような「確率論的安全評価」を意図したものではありません。</p> <p>御指摘いただきましてありがとうございます。修正いたします。</p> |

放射性廃棄物等の放射能濃度評価技術に関する研究に対する外部専門家及び専門技術者の  
評価意見並びにその回答

| No.    | 評価項目                      | 評価意見  | 回答  |
|--------|---------------------------|---|---|
| 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。  | いずれのテーマにおいても、国内外の過去の研究事例を調査し、成果報告書において参考資料として明示しており、最新知見を踏まえた内容になっていると評価できます。   |   |
| 2      | ②解析実施手法、実験方法が適切か。         | 解析実施手法、実験方法は適切になされていると評価できます。ただし、「2.4 長半減期放射性核種の分析における信頼性確保」において、樹皮に付着した放射性セシウムマイクロ粒子のみを対象とした理由が報告書からは読み取れませんでした。福島第一原子力発電所の事故由来の放射性セシウムのうち Cs-135 を分析対象とするのであれば、樹皮に付着したマイクロ粒子よりは、汚染土壌や汚染コンクリートの方がより多くの放射性物質を入手できると思いますし、分析のニーズとしても多いのではと思いました。今後、分析対象を広げられることを期待しています。 | 樹皮に付着した放射性セシウムマイクロ粒子は、いくつかある分析対象の一つであり、同一箇所において採取した土壌についても分析するための前処理を実施しているところです。汚染コンクリートについては、環境試料として扱える試料を採取できないため、実験室で調製した模擬汚染コンクリート試料を用いて検討する計画としていましたが、今後、当該試料の採取等についても検討したいと思います。   |
| 3      | ③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法は適切になされていると評価できます。ただし、成果報告書 14 ページにおいて、「塩素の回収率は安定した結果が得られないものの、60%程度は確保されていることから、動燃報告書を基に作成した分析方法および分析操作は妥当であると考えられる。」と結論した根拠が報告書からは読み取れませんでした。ここでは、どの程度の安定性および回収率が妥当なのでしょう。難しい極微量分析であることはわかりますが、今後、回収率の安定化および                                       | CI-36 に係る「日本原燃(株)六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センターにおける低レベル放射性廃棄物の線量評価と今後の対応の報告について」に対する評価と事業者に求める対応(平成24年3月30日 原子力安全・保安院 放射性廃棄物規制課)において、回収率が50%未満となる分析方法は妥当ではないとの議論がなされており、これを踏まえております。ただ、御指摘のとおり回収率の向上等の余地があり、今後の研究の中で引き続き検討を進めていく予定でおりますので、ここでは、検討した方法で検出下限値の |

| No.            | 評価項目                     | 評価意見  | 回答  |
|----------------|--------------------------|---|---|
|                |                          | 回収率の向上の余地がないのか、など今後の研究の方向性についても言及頂けば、今回のご研究の成果がより明確になると思います。  | 分析に移ったという事実の記載として「動燃報告書を基に作成した分析方法及び分析操作による検討を進めた。」と修正いたしました。 |
| 4              | その他                      | 目的が明確に定められ、適切な手法によって、着実に成果をあげられていることは高く評価できると感じました。   |   |
| <b>新堀 雄一 氏</b> |                          |   |   |
| 1              | ①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。 | これまで研究による最新知見を踏まえ、研究が展開されている。特に、トレンチ処分対象廃棄体について、廃棄体内容物を個別要素法によりモデル化し、非破壊測定による放射能濃度評価について留意すべき点を現実的な観点から整理しており、今後の更なる研究の進展が期待できる。なお、クリアランス対象物の制限が撤廃されたことに、適切に対応して研究を進めていることも高く評価できる。   |   |
| 2              | ②解析実施手法、実験方法が適切か。        | 解析および実験手法は、これまでの関連研究を踏まえ適切に設定されている。たとえば、廃止措置終了確認に関連した公衆被ばくの線量評価では、既存のコードを活用し、室内実験等に基づくモデルを加えるなど、適切な手法がとられている。今後さらに進めるグレーデッドアプローチの考え方の導入やいくつかの廃止措置の形態に対応した検討にもこれらの成果が適用できると考える。また、クリアランス評価のモデル化についても高い成果を挙げており、これらを基盤として、今後も、不確かさの考慮について、国際的な議論および国による運用の違いの背景を踏まえ、想定されるいくつかの対象物について規制の観点からの留意事項等が更に整理されることが期待される。 | 頂いたコメントを基に、後継の安全研究において検討を進めてまいります。                            |

| 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。 | 研究を通じた結果についての評価手法は適切と言える。なお、長半減期放射性核種等の分析における信頼性確保に係る研究では、今後展開を考えている核燃料物質等によって汚染された試料の分析においても、これまでの手法に関する知見およびノウハウが適切に活用されることが望まれる。そのためには、これまでに得られた化学分離に及ぼすフッ化水素酸の影響などのデータについて、各元素（核種）の化学形態に依存するメカニズムの整理に加え、プロセスによっては速度論的な観点からの考察も必要になる。これらへの取り組みも汚染された多様な試料の分析の信頼性の更なる向上に今後寄与すると考える。 | 核燃料物質等によって汚染された試料の分析に知見を活用するために、分析対象核種や試料に含まれる元素等の化学形態、吸脱着機構、溶出機構等の科学的現象の理解も考慮した上で検討を進めていきたいと思います。 |
| 4              | ④重大な見落とし（観測点の欠落）がないか。     | 一連の研究において重大な見落としはない。なお、長半減期放射性核種等の分析については、国内外の協力を得つつ、効果的に科学的・技術的な知見の更なる蓄積を期待したい。  | 長半減期放射性核種等の分析については、共同研究等を通じて国内外の協力を得つつ進めていきたいと思います。  |
| 5              | その他                       | 規制に資する成果が確実に得られている。そこでは、本研究に携わる若手研究者による積極的な成果の公表も行われ、人材の着実な育成にも配慮された取り組みとなっている。   |  |
| <b>山元 孝広 氏</b> |                           |   |  |
| 1              | その他                       | 当初目的が予定通りに達成され、研究成果が着実に公表されていることは非常に評価できる。  |  |
| <b>井口 哲夫 氏</b> |                           |   |  |
| 1              | ①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。  | 4項目の研究課題について、国内外の関連既往研究の成果が適切に引用・活用されており、最新知見が反映されていると評価する。   |  |
| 2              | ②解析実施                     | ・廃棄物確認の研究では、ドラム缶や   |  |

| No. | 評価項目         | 評価意見  | 回答 |
|-----|--------------|---|----|
|     | 手法、実験方法が適切か。 | <p>角型容器に収納されたトレンチ処分対象廃棄物の放射能濃度の非破壊測定手法や自己吸収補正が困難な場合の保守的評価法について、具体的な手順とともに留意事項が適切に示されている。</p> <p>また、中深度処分対象廃棄物の放射能濃度については、海外での実績調査をもとに、Cl-36, Zr-93, Sn-126 など長半減期の難分析核種の測定法に関する有用な知見が適切にまとめられている。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・クリアランス確認について、マイナーな物量ながら、一般廃棄物としても取り扱いの厄介なアスベストや PCB 使用物品および形状の複雑なケーブル／配電盤等の新規クリアランス対象物の濃度上限や測定評価手法が適切に提示されている。また、クリアランス検認における放射線測定の不確かさの考慮については、クリアランスレベル自体が被ばく安全に関して十分な保守性を有している観点からやや異論のあるところながら、ISO 等の規定や（一部の）諸外国の実例に則った妥当な手法の提示がなされている。</li> <li>・廃止措置終了確認の研究では、サイト開放のための一連の実施及び確認の手順案が、具体的な計算コード群の統合システムの形で、適切に整備されている。</li> <li>・長半減期放射性核種等の分析における信頼性確保の研究について、規制の観点から、主に環境試料中の微量長半減期核種の分析に用いることが可能な要素技術を概ね包括的に調査及び共同研究を実施しており、分析精度や適用限界などの知見と課題が適切に抽出されている。</li> </ul> |    |

| 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>・廃棄物確認の研究において、トレンチ処分対象廃棄物の放射能濃度の非破壊測定で導入される粒状体挙動解析コード PFC3D を用いる場合、廃棄物封入状態の近似度が向上することは理解できるが、粒状モデルの設定によって後段の QUAD 計算に大きく影響するように思われ、実廃棄物に応じたモデル設定の仕方やロバスト的な検出器配置の指針について、もう少し丁寧な(幅広い)検討が必要ではないか?また、中深度処分対象廃棄物における Cl-36, Zr-93, Sn-126 など長半減期の難分析核種の放射能濃度評価は、長期的な安全評価(長半減期核種の濃度上限を満たしていることの確認)において特に重要であるので、合理的な分析プロセスにおける回収率や検出限界の改善に繋がるさらなる知見の探索と集約に期待したい。</p> <p>・クリアランス確認の研究において、新規対象物の測定評価手法の整備は、規制側の確認ためだけでなく、事業者側にとっても有益な成果と評価する。ただ、クリアランス検認における不確定性の考慮に関しては、当面現行の考え方を踏襲するにしても、IAEA の DS500 が発刊された暁には、必要に応じて、国際的な考え方との整合性の観点から見直しを期待したい。</p> <p>・廃止措置終了確認の研究において整備された終了確認フローの統合システムは素晴らしい成果であるが、数学的に高度な内容を含んでおり、固有のサイト現場への適用において使いこなすには、未だこなれていない感が強い。今後、実際の運用を念頭において、保守性を担保できるシステム入力パラメ</p> | <p>ご指摘のとおり、廃棄物封入状態をはじめとする設定条件については様々な条件での検討が必要と考え、引き続き検討を実施しております。得られた成果については適切なタイミングで公開いたします。</p> <p>同じく、微量元素の分析につきましても、回収率及びそれに伴う検出限界値の向上に係る検討、その他の分析方法による検討を引き続き行って参ります。</p> <p>クリアランス確認については、DS500 の審議内容を踏まえ、必要な検討を適宜後継の安全研究にて実施していきます。</p> <p>・ご指摘のとおり、委託事業の成果としては研究開発的要素が強いものとなっております。本成果の規制への適用に当たり、ご指摘の点も踏まえて取りまとめる予定です。</p> |



| No. | 評価項目                  | 評価意見  | 回答   |
|-----|-----------------------|---|--|
|     |                       | <p>一々の合理化や評価結果の信頼性の検証などのさらなる研究展開を期待する。</p> <p>・長半減期放射性核種等の分析における信頼性確保の研究において、取り扱われている長半減期核種や共研に基づく分析手法の選定は妥当と思うが、その成果（科学的・技術的知見）が規制研究として、具体的にどのように活かされるのか補足説明が欲しいところ。</p> | <p>長半減期放射性核種等の分析における信頼性確保の研究では、特定の規制活動に直接的に活かすのではなく、「3.4 成果の活用等」において記載した（下記参照）ように、規制に資するために必要な技術基盤の構築及び維持に活用することとしています。</p> <p>「3.4 成果の活用等（抜粋）<br/>今後、特に、燃料破損が生じた又は1F事故のような事象を経験した原子力施設等における廃棄物確認、クリアランスの確認及び廃止措置終了確認における規制に資するために必要な技術基盤の構築及び維持に活用する」</p> <p>なお、この取組は、原子力規制に必要な知見の整備及び研究職員の人材育成により研究体制の充実化を図るため、令和元年度より研究の在り方を見直して取り組んでいる事業の一環です。</p> |
| 4   | ④重大な見落とし（観測点の欠落）がないか。 | <p>本研究の実施内容において、重大な見落としは特に見当たらないと判断する。</p> <p>ただ、あえて言うと、長半減期放射性核種等の分析核種として、I-129 や U 同位体も対象とするなら、AMS や RIMS の調査も含めるべきではないか？</p>   | <p>今後、AMS 及び RIMS に係る既往研究の調査等を踏まえて研究を進めてまいります。</p>   |
| 5   | その他                   | <p>成果公表として、査読付き論文3報ということは、規制業務の中でまずまずの実績と思うが、国内外の学会発表等でも成果の発表を積極的に行い、専門家との議論等により、研究内容のよ</p>   | <p>今後、国内外の学会発表等を通じた専門家との議論を進めてまいります。</p>   |

| No.     | 評価項目                      | 評価意見  | 回答  |
|---------|---------------------------|---|---|
|         |                           | り深化や洗練化を図っていただきたい。  |   |
| 中居 邦浩 氏 |                           |   |   |
| 1       | ②解析実施手法、実験方法が適切か。         | <p>2.1 廃棄物確認</p> <p>2.1.2 トレンチ処分対象廃棄物の放射能濃度評価に係る検討 (2) 放射能濃度評価に影響を与える要因の検討 ①計算条件 b 容器高さ方向に設置する検出器位置 で容器高さ方向に 1 段から 5 段の評価点を評価し、段数に応じた変化がないのかかわらず、検討した最大の段数とした理由は何でしょうか。</p>   | <p>別の検討(コリメーション等)につなげることを念頭に、便宜的に検出器段数を多くして検討を進めていました。そのため本文中で「大きな変化は見られなかったが、本検討では検出器段数を 5 段とした。」と限定して記載いたします。</p>   |
| 2       | ③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。 | <p>2.1 廃棄物確認</p> <p>2.1.3 (2) ジルカロイ-4 に含まれる微量元素に係る分析試験 ①塩素分析 b 分析結果 (b) 検出限界値 (p.14) において、試験の検出限界値と目標値が 2 桁程度異なることに対して、塩素の回収率だけではギャップを埋められそうにならないので、それ以外の改善案も記載されれば良いと思います。</p> <p>2.2 クリアランスの確認</p> <p>2.2.4 放射線測定の不確かさの考慮 において、ISO11929 の考え方が欧州のクリアランス制度で運用されていると記載されていますが、測定の不確かさ以外の核種組成比のばらつきなどの扱いについても、国ごとに考慮している不確かさの項目と考慮の方法について具体的な記述があればわかりやすいと思います。</p> | <p>測定溶液の最終液量の設定などの測定条件も工夫しなければ目標値に到達しませんが、分析手法で改善すべきものとして回収率が挙げられるので、代表して記載しています。</p> <p>御指摘のとおり、回収率だけではないので「回収率を向上させる”等”」としております。</p> <p>本項で「測定値」としているものは項目のはじめの部分に記載したように、「測定を通じて得られた評価値」の意味で使用しており、測定の不確かさについても単なる測定行為から直接的に得られる値の不確かさのみを考慮するものではありません。</p> <p>また、今回確認したクリアランスに係る測定の不確かさの考慮はその測定結果を用いて行った各核種の放射能濃度の評価値に対するものであり、御指摘のよう</p> |

| No.     | 評価項目                      | 評価意見  | 回答  |
|---------|---------------------------|---|---|
|         |                           |   | <p>な狭義な「測定の不確かさ」のみを示すものではありません。</p> <p>こうした意味をより明確にするため、本項で「測定値」としていたものを、「測定を通じて得られた評価値」と変更いたします。</p>                         |
| 3       | その他                       | <p>2.1 廃棄物確認</p> <p>2.1.2 の最後の a 小領域数 b 対象物のかさ密度で、影響の検討を継続するとまとめられていますので、今後、定量的な数値も含めてまとめられることを期待します。</p> <p>2.3 廃止措置終了確認</p> <p>整備した廃止措置被ばくコードシステム CDecom 等が公開コードとして登録されることを期待します。</p> | <p>引き続き検討を進めて成果を公表いたします。</p> <p>委託先とのバイドール契約、また、その適用性の検証の必要性から直ちに公開コードとして登録することは難しいと考えておりますが、将来の公開の可能性について委託先と検討したいと思います。</p> |
| 井口 幸弘 氏 |                           |   |   |
| 1       | ①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。  | ①クリアランスの確認における不確かさの検討においては、国際基準の動向や各国の状況を詳細に調査し、現行の判断基準が妥当であることを確認しており、評価できる。   |   |
| 2       | ②解析実施手法、実験方法が適切か。         | クリアランスにおいて、新規クリアランス対象物について、シミュレーション及びモデルとチェックソースを組み合わせた方法で評価、測定試験を行っており、その実施方法は妥当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。 | <p>廃止措置終了確認の検討において、BG 参照エリアとして、1 km以内の地点から選定するとあるが、この妥当性についての根拠が明確に示されていない。近傍であればむしろ当該施設の直接の影響が考えられる。適切な離隔距</p>   | <p>廃止措置終了確認に関する記載ぶりは将来の論文化、技術文書公表等において二重投稿とならないよう、概要のみにとどめております。御指摘頂いた1 kmの根拠は技術文書として公表する際に明確化する予定です。</p>                     |

| No. | 評価項目                  | 評価意見  | 回答   |
|-----|-----------------------|---|--|
|     |                       | <p>離があり得るのではないかと。過年度の報告で示されていればよいが。</p> <p>終了確認の核種移行評価手法の検討について、現状はシミュレーションコードによる評価、および室内試験によるモデルの検証に止まっている。福島第一の事故における環境での放射性核種の移行における多様なデータとの比較検証などは行うことはできないのか。これは既往研究を踏まえたものという点で、妥当なのか。</p> <p>終了確認の検討で、カナダの処分場の事例解析が挙げられているが、米国などの実際の原子力サイトでの汚染例、評価例とも直接比較検討することはできないのか。本報告書では、具体的に触れられていないので、判断できない。</p> | <p>御指摘の点については、本研究を立ち上げた時点で、福島第一の事故後の放射性物質の環境動態の研究状況を踏まえた上で、従来の放射性廃棄物処分の核種移行評価では考慮してこなかった地表面流による土砂移行の影響を廃止措置の評価にも取り込むべく研究を行ったものです。検討会の委員には、福島第一の事故後の放射性物質の環境動態の研究に尽力されている恩田先生に委員として御参画頂いており、御助言を受けております。</p> <p>汚染事例との比較については、データの利用可能性の観点からカナダの処分場の事例を選定したものです。選定理由については、委託の報告書では正確に述べられておりますが、先述のとおり、二重投稿を避ける観点で本安全研究成果報告書は概要にとどめております。</p> |
| 4   | ④ 重大な見落とし（観点の欠落）がないか。 | <p>新規クリアランス対象物として、配電盤や安定器を用いたシミュレーションや測定試験を実施している。個別のニーズに基づいた設定については理解できるが、実機の対象はより複雑かつ多様であることが考えられる。この点については、次年度以降の課題として、取り上げるべきものと考えられる。</p> <p>実際の機器のクリアランスを行う際には、対象物の汚染の調査と汚染部分の分離作業が行われる場合が多いと考えられる。この検討は汚染の分離が不可能な場合を想定していると考えられるが、今後はより現実的なシナリオも考慮した、クリアランス及びNRの手順も含めた考察が必要ではないか。</p>                    | <p>後継のプロジェクトで検討を行っていく計画となっています。</p>  |
| 5   | その他                   | <p>今後の課題として、廃止措置工程のリスク評価手法が挙げられている。規制リソースの適切な配分を考えれば、時宜にかなった適切な設定と考えられ</p>  | <p>クリアランスにおけるリスクレベルに応じた合理的な取扱いについては、共通的な条件下で線量基準を満たすものとして規定された放射能濃度の基準値に対す</p>   |

| No.            | 評価項目                     | 評価意見  | 回答  |
|----------------|--------------------------|---|---|
|                |                          | <p>る。また、記載されている廃止措置工程そのものだけでなく、クリアランスの検認手法についてもリスクレベルを考慮した規制関与の最適化が必要と考えられる。</p>  | <p>る放射能濃度評価値の適合性評価という、計測・計量分野で取られている標準的な手段から外れることを許容するというようなことではなく、個別のケースにおいてその条件下での線量基準を満たすことを確認した上でのケースバイケースのクリアランスとして共通的な条件とは異なる放射能濃度の基準値を個別に設定することを考えることが妥当であろうということが現在の国際的な場で議論されています。こうした国際的な議論も参考としつつ今後必要な検討を進めてまいります。</p> |
| <b>佐々木 泰 氏</b> |                          |   |   |
| 1              | <p>②解析実施手法、実験方法が適切か。</p> | <p>◆49 ページ 被ばく評価コード<br/>「各コードの入出力情報を ArcGIS 上で統合し、被ばく線量評価コードシステム CDecom として整備（右下図）」とありますが、独自に種々の解析を一体化するシステム化によって、他との比較などが難しくなり、そのシステムの中の解析の妥当性の評価が難しくなるという懸念があります。また、使用している計算コードは、公開コードであれば、多くのユーザーに使用され信頼性が高まるとともに、第三者による検証が可能になると思います。</p> | <p>CDecom で使用するコードは市販のコード又は過去に JAEA が開発したコードを使用しています。</p> <p>一連のシステム化をすることで妥当性の評価が難しくなるという御懸念はごもっともであり、個々の入出力情報の受け渡し時のマスバランスの維持が適切に扱えているか等の観点で、検討会等を通じて確認しております。</p>  |

| No. | 評価項目 | 評価意見   | 回答   |
|-----|------|--|--|
| 2   | その他  | <p>◆18 ページ、22 行目 クリアランス<br/>「濃度上限値を試算し、クリアランスレベルと比較した」の“クリアランスレベル”は、現行のクリアランスレベルを意味することを、自明であるとしても明記いただきたい。3 ページ 9-11 行目「新規クリアランス対象物のクリアランスの線量基準である 10 マイクロシーベルト／年に相当する放射能濃度（以下「濃度上限値」という。）」との用語の対応が明確ではないとの懸念があります。</p> <p>また、「濃度上限値」の用語について、低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能“濃度上限値”との混同による誤解を避けるため、見直しを検討いただきたいと思います。</p> <p>◆34 ページ、18-20 行目 クリアランス<br/>「クリアランス制度が実際に運用され資材の再利用が進められているヨーロッパにおいて、不確かさを用いた適合性評価の考え方の下でクリアランス制度が運用されている事例があることを確認した。」について、具体的に、どの国の、どのような運用事例だったのか、事業者の自主的な運用なのか、規制者による制度としての運用なのか、等の情報を明記いただきたいと思います。</p> | <p>御意見を取り入れ、以下の対応を取らせて頂きます。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・「クリアランスレベル」は「現行のクリアランスレベル」と追記します。</li> <li>・「濃度上限値」は「クリアランス相当濃度」に改めます。</li> </ul> <p>直前の個所に書かれているとおり国名はスウェーデン、イギリス、ドイツで、対応する事例を表す文書も明示してありますので、この部分はこの記載のままとさせていただきます。</p> |