

# 安全研究に係る中間評価結果

令和 3 年 7 月 7 日  
原子力規制委員会

## 1. 中間評価の進め方

### 1.1 評価の対象

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

中間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	大規模噴火プロセス等の知見の蓄積に係る研究	R1 - R5 (2019 - 2023)
2	事故時炉心冷却性に対する燃料破損影響評価研究	R1 - R5 (2019 - 2023)

### 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. 中間評価結果

上記 2 件の安全研究プロジェクトは、適切に管理され、研究が行われていることを確認した。また、これまでの研究により一定の成果が得られ、成果の公表も適宜行われていることを確認した。今後の研究の進め方に関する技術的妥当性も確認できた。これらのことから、いずれも計画どおりに行うことが適切である。

## 安全研究に係る中間評価結果（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

今回中間評価の対象としたのは、令和 5 年度に終了する安全研究プロジェクト 2 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）「当初計画の適切性」

「大規模噴火プロセス等の知見の蓄積に係る研究」（別表の No. 1）については、火山ガイド等の改定の要否の判断に資する知見や火山の活動性評価の考え方に関する知見が得られつつある。また、「事故時炉心冷却性に対する燃料破損影響評価研究」（別表の No. 2）については、規制基準見直しの要否の検討等に活用できるデータが取得できている。これらのことから、いずれのプロジェクトについても継続し、計画どおり研究を行うことが適切であると評価している。

#### （2）「①研究の進め方に対する技術的適切性」、「②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、研究管理及び業務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ている。

#### （3）結論

以上のことから、令和 5 年度に終了する安全研究プロジェクトについては、いずれも計画的に実施され、計画どおりに行うことが適切であることの評価が得られている。

別表 安全研究に係る中間評価結果（自己評価概要）

評価項目		1. 大規模噴火プロセス等の知見の蓄積に係る研究	2. 事故時炉心冷却性に対する燃料破損影響評価研究
当初計画の適切性		計画どおりに行うことが適切である	計画どおりに行うことが適切である
研究の 実施状況	項目別評価 ※1	①研究の進め方に対する技術的適切性	A(3)
		②研究マネジメント及び予算・契約管理の適切性	A(3)
	総合評価 ※2	項目別評価結果の総合点	6
		項目別評価結果の平均点	3
		評価結果(全体評語)	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。

## 安全研究に係る中間評価結果（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. 大規模噴火プロセス等の知見の蓄積に係る研究（R1～R5（2019～2023））

#### 1. 研究プロジェクトの目的

- 本研究プロジェクトでは、巨大噴火を起こした火山を中心に、過去の大規模噴火に至るまでの準備・開始プロセス、現在までの活動の詳細な活動履歴や噴火シーケンス及びマグマの変遷について調査し、過去のマグマ・火山活動に関するデータを蓄積する。さらに、国内の活動的なカルデラ火山の現在の地下構造やマグマ活動に伴う種々の事象を観測し、現状の火山活動を捉えるための観測項目及び過去の火山活動に関する蓄積された知見との関係についての考え方の整理・提案を行うことを目的としている。

#### 2. 研究概要

- 地質学的手法による火山噴火準備及び進展過程に関する調査・研究として、過去の火山活動に関する詳細な噴火履歴を調べるため、噴出物の分布や層序を地質調査やボーリング調査から詳細に解析し、噴火進展プロセス等の火山の特性について知見を蓄積する（国立研究開発法人産業技術総合研究所及び国立大学法人茨城大学への委託研究を含む）。また、降灰時の火山灰の空間密度、凝集効果と粒径に関する特性を地質調査や観測から詳細に解析し（国立研究開発法人産業技術総合研究所及び国立大学法人京都大学防災研究所との共同研究を含む）、降灰時のプロセス等の知見を蓄積する。
- 岩石学的手法によるマグマプロセスに関する調査・研究として、過去に大規模な噴火（カルデラ形成噴火）を起こした火山が噴火に至るまでのマグマプロセスを解明するため、マグマの温度・圧力条件や組成の変化からマグマの時空間変化を調べ、噴火の準備段階におけるマグマ状態の変化（深さ、滞留時間）に関する知見を蓄積する（国立研究開発法人産業技術総合研究所への委託研究及び国立大学法人東北大学との共同研究を含む）。
- 地球物理学及び地球化学的手法による観測手法に関する調査・研究として、カルデラ火山の観測手法に関する知見を蓄積する（国立大学法人京都大学防災研究所及び国立研究開発法人産業技術総合研究所への委託研究）。具体的には、地震波トモグラフィやネットワーク MT（Magnetotelluric）法による地球物理学的手法と、深部流体等の分析手法に基づく地球化学的手法に関する調査・研究を実施し、カルデラ火山の観測に有効な探査手法に関する知見を蓄積する。また、地表で観測される地殻変動からマグマの状態変化を評価するためのシミュレーションモ

デルを構築する。さらに、海底下や湖底下の地下構造を観測する手法を検討する。

- 観測項目及び過去の火山活動に関する蓄積された知見との関係についての考え方の検討として、上記の知見に基づいて、過去に巨大噴火を起こしたカルデラ火山の長期的な活動を評価するとともに観測項目の検討及び火山活動に関する蓄積された知見との関係についての考え方の検討を行う。

### 3. 現状の研究成果

- 過去に巨大噴火を起こした火山について、噴出物の分布や層序を地質調査やボーリング調査から詳細に解析し、始良カルデラ、洞爺・支笏火山エリア及び阿蘇カルデラでの調査・研究を行った結果、巨大噴火に至る過程で、珪長質マグマが巨大噴火の数千年前から断続的に噴出するパターン（入戸火砕流噴火）、巨大噴火の直前に断続的に噴出するパターン（阿蘇4噴火）、巨大噴火直前には噴出しないようなパターン（洞爺噴火）について、先行研究での知見と併せて検討したことで整理することができた。
- 過去に巨大噴火を起こした火山のマグマの温度・圧力条件や組成の変化から噴火の準備段階におけるマグマ状態の変化（深さ、滞留時間）として、始良カルデラ、洞爺・支笏火山エリア、十和田カルデラ、阿蘇カルデラ及び鬼界カルデラでの調査・研究の結果、巨大噴火に関連するマグマ溜まりの温度は、740~770℃（始良）、810℃以上ないし890℃以上（鬼界）、圧力条件は、50-150 MPa（始良）、100-230 MPa ないし110-190 MPa（鬼界）が得られ、マグマ溜まりの深さとしてはいずれも深さ10 kmより浅い位置に形成していたことが示唆された。
- 地球物理学的手法による地下構造探査、地殻変動シミュレーション及び深部流体等の分析手法について調査・研究を実施した結果、始良カルデラでの地震波観測データから地震波低速度領域の体積推定の精度が向上した。また、始良カルデラにおける長期の地殻変動データから、変動力源の時空間変化をシミュレーションモデルにより体積変化率について検討した。地球化学的手法については、これまでマグマの種別判別方法の一つとして提案されているマグマ起源の炭素・塩素比法（C/Cl法）に、希土類元素組成分析等を組み合わせた方法を検討した。
- 令和2年度までに得られた知見に基づいて、過去に巨大噴火を起こした火山の噴火に至る準備過程の検討、過去に巨大噴火を起こした火山の現状評価の検討、カルデラ火山の静穏な状態からの変化の有無を判断するための観測項目及び単成火山群の活動評価に関する考え方の検討を行い、現時点での巨大噴火の準備過程シナリオ、始良カルデラを事例とした現状評価、観測項目及び単成火山群の活動評価に関する考え方を示した。

### 4. 技術評価検討会における主な意見及びその対応

- 巨大噴火に至る準備過程の検討では、単純化せずに多様なシナリオを提示することが必要であるとの意見があった。本研究では、巨大噴火に至る活動履歴についてはいくつかのパターンを示した。一方で、巨大噴火を起こす火山には特徴があ

ることを示唆する知見が蓄積されつつあることから、本研究を継続することにより巨大噴火に至る共通の事象を抽出し、評価のための考え方を検討していく。

- 種々の制約条件がある中でカルデラ火山の地下構造探査や観測は、難度が高く時間を要すると考えられるため、本研究フェーズで得られる知見とさらに必要となる知見を得るための方策を本研究フェーズから検討してほしいとの意見があった。現在は、本研究フェーズの2/5を経過した段階であるが、巨大噴火に至る準備過程に関する知見や活動的なカルデラ火山において10~15 kmの深度のマグマ溜まりを捉えうる地下構造探査の事例が示されつつある。本研究の継続により、観測項目及び過去の火山活動に関する蓄積された知見との関係についての考え方をとりまとめることが期待できる。今後、さらに必要となる知見とそれらを得るための方策を検討していく。
- 詳細は別表1参照

## 5. 中間評価結果

### (1) 当初計画の適切性に関する評価

#### ① 技術動向の観点からの評価

- 巨大噴火に至る準備過程に関する知見や活動的なカルデラ火山において100 km<sup>3</sup>程度のマグマ溜まりを捉えうる地下構造探査の事例が示され、当初計画の目標を着実に達成しつつある。研究を継続することにより、巨大噴火に至る準備過程(マグマプロセス)のより詳細な知見やカルデラ火山での観測項目に関する知見が得られ、観測項目及び過去の火山活動に関する蓄積された知見との関係についての考え方をとりまとめることが期待できると判断した。

#### ② 規制動向の観点からの評価

- 現状では規制に反映できる研究成果は極めて限定的であることから、個々の研究項目について、当該安全研究で扱うべき研究であるかどうかという観点から再確認を行うとともに研究の最終的な成果を明確化した上で原子力規制にどのように結びつくのか検討をされたい。(関係する規制部門(地震・津波審査部門)による評価)

#### ③ 上記評価を踏まえた当初計画の見直し等の要否に係る評価

- 評価結果：計画どおりに行うことが適切である
- 評価コメント：

本研究でこれまでに得られた知見については、直ちに規制に活用できる状態には至っていないが、火山ガイド等の改定の要否の判断に資する知見や火山の活動性評価の考え方に関する知見が得られつつあることから、計画どおり研究を行うことが適切である。

## (2) 研究の実施状況の評価（項目別評価）

### ① 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調査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。

### ② 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ている。

## (3) 総合評価

- 評価結果： A

- 評価コメント：

おおむね計画どおりの成果が得られていると評価できる。また、研究マネジメント及び業務管理も適切に行われている。

## 6. 研究計画（案）への反映

- プラントの安全評価に資する知見を求める意見が出されており、降灰現象等の火山事象に関する知見に基づいて次の研究フェーズでの計画を検討する。
- 現時点では、当初目標とする知見が得られる予定であるが、今後、さらに必要となる知見とそれらを得るための方策を検討していく。

## （主な成果の公表）

- 論文

① K. Nishiki, N. Nagata, Y. Hiroi, A Test of Methods for Estimating the Total Grain Size Distribution of Tephra-fall Deposits Using the Isopach Map, Journal of Volcanology and Geothermal Research (投稿中)

- 口頭発表

① 広井良美、安池由幸、「十和田火山八戸噴火のマグマ溜まりの温度圧力条件の推定」、日本火山学会 2019 年秋季大会 神戸大学、令和元年 9 月（一部前フェーズの成果を含む）

② 西来邦章、永田直己、広井良美、「等層厚線図を利用したテフラの初生粒径分布の推定手法の検討」、日本火山学会 2019 年秋季大会 神戸大学、令和元年 9 月（一部前フェーズの成果を含む）

③ 佐藤勇輝、広井良美、宮本毅、「十和田火山におけるマグマ活動史：その 1 カルデラ形成期の岩石学的検討」、日本火山学会 2020 年秋季大会 オンライン、令和 2 年

10 月

- ④ 広井良美、佐藤勇輝、宮本毅、「十和田火山におけるマグマ活動史：その2 カルデラ形成期中規模噴火」、日本火山学会 2020 年秋季大会 オンライン、令和 2 年 10 月



## II. 事故時炉心冷却性に対する燃料破損影響評価研究 (R1～R5 (2019～2023))

### 1. 研究プロジェクトの目的

- 事故時及びその後の炉心冷却性維持の評価をより確かなものとするを目的として、近年、事故模擬試験にて確認されている、現行指針類策定当時には観察されていなかった燃料破損挙動について知見を取得するとともに、事故後の長期冷却性等、研究事例が少ない状況下での燃料特性・挙動についても知見を取得する。

### 2. 研究概要

- 冷却材喪失事故 (Loss of Coolant Accident: LOCA) 時の燃料ペレット細片化による燃料ペレットの燃料棒内再配置及び棒外放出 (Fuel Fragmentation Relocation Dispersal: FFRD) に関するデータを取得するために、高燃焼度まで使用された燃料の LOCA 模擬試験等を実施する (国立研究開発法人日本原子力研究開発機構への委託研究)。
- LOCA 後長期冷却中の燃料耐震性を評価するために、LOCA 時の温度履歴を経験した燃料被覆管を対象とした機械試験を実施する。また、地震を想定した燃料の振動解析を実施する (国立研究開発法人日本原子力研究開発機構への委託研究及び同機構との共同研究を含む)。
- 従来と異なる破損の発生原因を調べるために、原子炉安全性研究炉 (NSRR) での反応度事故 (Reactivity Initiated Accident: RIA) 模擬試験を行う。また、RIA 模擬試験時及びベース照射時の燃料挙動解析を行う (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)。
- NSRR 実験での被覆管応力条件の把握や破損挙動の評価のために、RIA 時の被覆管応力を模擬した被覆管多軸引張試験を実施する (国立研究開発法人日本原子力研究開発機構への委託研究。一部、同機構との共同研究を含む)。
- LOCA 基準の 1200°C を超えた温度条件での燃料損傷状態について、既往研究等を調査するとともに、調査結果に基づき、NSRR を用いた燃料高温試験の条件等を検討する (国立研究開発法人日本原子力研究開発機構への委託研究)。

### 3. 現状の研究成果

- FFRD を調べるための LOCA 模擬試験装置をホットセルに設置し、性能確認試験を実施した。今後、試験を継続し、データを取得していく。
- 地震時の振動を模擬した変形を被覆管試料に負荷する試験装置を製作し、コールドの実験室に設置した。また、地震を想定した振動時に、LOCA 後被覆管に発生する応力を解析した。今後、解析結果を基に、試験条件を設定して、試験を実施、データを取得していく。
- NSRR での RIA 模擬試験及び試験後観察を実施した。今後も試験を継続し、データを取得していく。

- 高燃焼度被覆管を模擬した被覆管試料を作成し、多軸引張試験を実施した。試験結果を基に、RIA 模擬試験での燃料破損原因を考察した。
- 既往研究の調査を行い、1200°Cを超えた温度条件での燃料挙動について整理した。

#### 4. 技術評価検討会における主な意見及びその対応

- LOCA 時のペレットの細粒化については、FP ガス放出との関係を把握することが重要との意見があった。本研究では、細粒化と FP ガス放出の関係に着目し、FP ガス放出に関わるデータも取得していることから、引き続き、考察を進めていく。
- 海外知見の確認が若干物足りないとの意見があった。ペレットの細粒化については、海外の研究プロジェクトでも同様の試験が実施されており、それらの結果と比較し、FP ガス放出の他、被覆管拘束等の影響についても考察していく。
- プロジェクト名が「事故時炉心冷却性に対する燃料破損影響評価研究」となっているが、炉心冷却性への影響評価が分かりにくいとの意見があった。現在までは、従来観察されていなかった燃料破損形態の発生原因等を中心に調べ、データを蓄積したが、今後は、燃料破損形態の変化が炉心冷却性にどのような影響を与えるかについても考察していく。
- 被覆管破損の原因である半径方向水素化物について、その生成原因及び定量化方法について、さらに検討を進めるようコメントがあった。生成原因については、ベース照射中の応力が一因と考えられるが、今後、被覆管断面金相観察も進むことから、それらの結果と併せて考察していく。定量化方法については、いくつか異なる方法があるため、被覆管破損の評価に最適な定量化について、検討していく。
- 詳細は別表 2 参照

#### 5. 中間評価結果

##### (1) 当初計画の適切性に関する評価

###### ① 技術動向の観点からの評価

- 平成 30 年度に実施した RIA 模擬試験において 10×10 型 BWR 燃料(OS-1)が PCMI 破損しきい値未満で破損した原因に関して、計画どおり、知見を取得できており、今後得られる観察結果等と併せて、その原因を明らかにできる見込みである。
- FFRD については、個別試験として実施している加熱試験から、細粒化メカニズムに関するデータが得られている。今後、ホットセルに設置した LOCA 模擬試験装置を用いた試験を実施してデータを取得することにより、計画どおり、FFRD 発生条件や原因を明らかにできる見込みである。
- 上記以外の試験の準備や解析も計画どおりに進捗し、試験装置の設置完了や試験結果を考察する上で有用な解析結果等、成果を得ている。

###### ② 規制動向の観点からの評価

- 規制基準の見直し要否検討等に活用できるデータが得られており、本プロジェク

トを継続して、OS-1の破損原因とともに、国内で使用されている燃料への影響を技術情報検討会に報告することが望まれる。また、LOCA後の長期炉心冷却及び炉心損傷判断に関係する研究結果についても、適宜共有することが望まれる。（基準を所管する主管課（技術基盤課）による評価）

③ 上記評価を踏まえた当初計画の見直し等の要否に係る評価

● 評価結果：計画どおりに行うことが適切である

● 評価コメント：

現行指針類策定当時には観察されていなかった燃料破損挙動及び規制基準値より低い条件での燃料破損について知見を取得できており、規制基準等の見直し要否を検討するためには、研究事例の少ない、事故後の長期冷却性に関する研究等も含め、計画どおりに行うことが適切である。

(2) 研究の実施状況の評価（項目別評価）

① 研究の進め方に対する技術的適切性： A

- 従来から実施している信頼性の高い試験、新たな試験装置を用いた試験及び解析を実施して、多面的に課題解決に取り組んでおり、技術的観点から適切に研究を進めている。

② 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ている。また、コロナ禍の影響によりホットセル試験では一部遅れが生じたが、今後の工程調整等を行い、全体当初計画の5ヶ年以内で完了できる見込みを得ており、適切にマネジメントを行っている。
- 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ている。

(3) 総合評価

● 評価結果：A

● 評価コメント：

試験及び解析を通して、目標とした知見が得られつつあり、また、新たな試験装置の設置も進んでいる。コロナ禍の影響により一部遅れが生じているが、全体当初計画の5ヶ年以内で完了できる見込みを得ている。以上のことから、技術的観点及びマネジメントの観点から適切に研究が進められ、成果が得られていると評価できる。

6. 研究計画（案）への反映

- 実施内容については、評価委員等のコメントを参考にし、試験、解析及び結果の考察において不足がないように研究を進めるようにする。工程については、今後も、コロナ禍の影響があり得るので、委託先と緊密に連携して事業管理を行い、

当初計画の5ヶ年内で完了できるよう努める。

(主な成果の公表)

- なし

## 大規模噴火プロセス等の知見の蓄積に係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（観点の欠落）がないか。	報告書の1.1背景の記載が理解できません。特に、原子力安全規制に関する研究という意味での位置づけを明確にする必要があるように考えます。例えば、審査ガイドにおける課題認識、長期的な規制の改善への貢献、及び、安全研究として実施されている「規制へのPRAの活用のための手法開発及び適用に関する研究」へどのような情報が提供されるのかなどを明確にすることが必要と考えます。	<p>背景の記載を以下のように修正します。</p> <p>火山影響評価ガイドでは、「巨大噴火が差し迫っていない」と評価できることを求めており、過去に巨大噴火を起こした火山の地下において大規模なマグマ溜まりを示唆する領域の有無が一つの評価指標となる。これまでに、過去に長期の休止期間があり大規模噴火を起こした火山の活動評価手法を整備するための知見や国内外の巨大噴火を起こした火山の噴火直前のマグマ溜まりの深度、当該深度領域の地下構造を探查する手法について知見が蓄積されつつある。</p> <p>一方、巨大噴火を起こすソースとなる巨大なマグマ溜まり生成のプロセスやマグマが蓄積する時間的なスケールについての知見は海外の研究事例が基本となっている。例えば、Costa(1)は、鉱物生成年代を推定し、噴火年代と対比することによりマグマ滞留時間を推定する手法を解説し、Allan(2)ら、Druitt(3)ら、Gualda(4)らは斑晶中元素の固体内拡散速度から斑晶が高温のマグマに曝されていた時間を推定している。</p> <p>過去に巨大噴火を起こした火山の地下構造の探查については、主に自然地震観測に基づく地震波速度構造やMT法による低比抵抗構造の探查領域の空間的な広がり把握しうる解像度で探查した海外での報告例(5),(6)ある。解像度の高い構造を探查するためには、広</p>

No.	評価項目	評価意見	回答
			<p>域で周密な観測点を配置する必要があるが、巨大噴火を起こした火山の多くはカルデラ地形大半が水没している等、探査を行う際の障害となることから事例は少ない（本当は無いと書きたい）。</p>
2		<p>報告書の 1.1 の背景において、巨大マグマだまりの生成プロセスなどについて、海外の研究事例に基づく点が問題という指摘に対して、個別事例の調査をしたという報告のみで、得られた成果が海外の研究事例と比較してどうだったかという点に関する記載がありません。</p>	<p>No.1 と同様</p>
3		<p>報告書 2.1.2 ①「今回提案する手法は、偏りがあるようなケースにおいての活用が期待される」とありますが、規制庁としては、「今後の検討で用いるべきである」とするか、「手法としてさらなる改良が必要である」等の結論を定量的に示すか等の記述にすべきで、一般的な記述を結論とするのは適切ではないのではないのでしょうか。</p>	<p>いわゆる天然のものを用いて検討する場合、多かれ少なかれ不確実性を持ってしまいます。本検討対象の場合、火山灰が落下した数百km×数十km以上の領域からサンプリングできる試料数は、地理的要因や人為的要因等により大きく左右されます。その上で、今回、試料側にバラつきがあっても、既往の手法と比べバラつきの少ない計算結果が得られる手法を考案したということになります。従いまして、試料採取側での課題を包含できたという書きぶりとしております。</p>
4		<p>報告書 2.1.2 ②で「5cm 程度以下では、・・・コンタミネーションが多くなる傾向にあった。ゆえに、これらの点を留意し、調査を実施する必要がある」と記載がありますが、ここでいう「調査」とは何を指すのでしょうか。「次年度以降の調査」でしょうか？</p>	<p>ここでの「調査」は、事業者が実施する「降下火砕物に関する火山影響評価に資する調査」を指します。</p>
5		<p>報告書 2.1.3 について、文献調査が網羅的であることが理解できるような報告書の記載とすることが望ましいと考えられます。</p>	<p>拝承いたします。なお、本文献調査では東伊豆単成火山群や阿武単成火山群など、日本国内の単成火山群に関する文献を網羅的に調査したほか、海外で</p>

No.	評価項目	評価意見	回答
			研究が進んでいる Southwest Nevada volcanic field や Eifel volcanic field などの代表的な単成火山群に関する文献を調査しています。
6		報告書 2.4.1 の準備過程に関する結論（巨大噴火を起こす火山では、・・・、巨大噴火に至ると考えられる）については、自然現象の記述としてはいささか単純化されすぎている印象を覚えます。特に、発電所の安全性を検討する上では、より多様なシナリオを提示することが求められるのではないかと思います。	これまでの巨大噴火に関する審査では火山ごとに個別評価が行われています。本研究でも、活動履歴についてはいくつかのパターンを示すことができたと考えています。一方で、巨大噴火を起こす火山には特徴があることを示唆する知見が得られつつあることも事実です。本研究では巨大噴火に至る共通の事象を見出し、評価のための基準とすることを目指しています。
7		報告書 2.4.2 で「・・・考えられている。」、「していることにある。」等の記述が散見されますが、それぞれ根拠となる参考文献の記載がなく散文的ですので、もう少し客観的な記載にすることが望ましいと考えられます。	表現を修正するとともに、参考文献を引用し以下のように修正しました。  始良カルデラでは、地下 11～15 km 付近に推定体積 100 km <sup>3</sup> 程度のマグマ溜まりが定置していると推定される。始良カルデラで観測されている広域な地殻変動データを基に、変動力源の解析が行われ、カルデラの中心エリア内の地下 11～14km の深さに変動力源の存在が示されている。これまでは、始良カルデラの広域地殻変動は、1914 年の大正噴火や 1946 年の昭和溶岩の噴火等桜島火山で起こったイベントと地殻変動が関連付けられ解釈 71,74,75 されているが、推定体積 100 km <sup>3</sup> 程度マグマ溜まりの体積変化と解釈することもできる。
8		報告書 2.4.3 の結論（最終的には地下のマグマの状態を把握し評価することが重要である）は、研究をする以前からわかっていることではないかと推察されます。	ご指摘のとおりであるのですが、「単成火山」という専門用語は、「1 回の噴火輪廻で形成された火山」という意味です。つまり、富士山のような何度も噴火を繰り返して成長する「複成火山」とは異なります。他方、火山影響評価ガイ

No.	評価項目	評価意見	回答
			ドでは、完新世に活動のない第四紀火山に対して、過去の噴火履歴から活動評価を行う方法を記載しています。このような背景から、本節は、一回の噴火輪廻しかない単成火山に対して、過去の噴火履歴からどのように活動評価できるのかという観点で取りまとめております。
9		報告書 3.1(1)の「検討したことで認識できた」という主観的な記載は、研究のまとめとしては適切ではないように感じます。	「認識できた。」を「整理することができた。」と修正しました。
10		報告書 3.1(4)の結論が、規制研究としては重要と思いますが、具体的な成果が記載されていません。明確な記載が必要かと思えます。	以下のように修正しました。 令和2年度までに得られた上記の(1)～(3)の知見に基づいて、過去に巨大噴火を起こした火山の噴火に至る準備過程の検討、過去に巨大噴火を起こした火山の現状評価の検討及び単成火山群の活動評価に関する考え方の検討を行い、現時点での巨大噴火の準備過程シナリオ、始良カルデラを事例とした現状評価及び単成火山群の活動評価の考え方を示した。
11		報告書 3.2 については、当初目標と対比した記載が望ましいと考えられます。	本研究は5カ年計画の内2カ年分の成果をとりまとめています。令和3年度に一部計画を見直すことを想定しており、現時点ではこの見直しに向けて得られた知見を整理した状況です。
12		<p>その他、報告書に誤記等不適切な記載が散見されます。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ P8 Uint → Unit</li> <li>・ 図 2.1.6 図の字が見えません。</li> <li>・ 図 2.1.7 字が見えません。</li> <li>・ 図 2.1.10 縦軸に単位がありません</li> </ul> <p>・ P8 「地質学的にも古地磁気学的検討においても短時間に形成された可能性がある」は、「地質学的検討、および、古地磁気</p>	<p>ご指摘ありがとうございます。誤字および文字サイズにつきましては修正いたします。</p> <p>図 2.1.10 につきましては、軸タイトルの最後に付してございます[φ]が単位でございます。</p> <p>そのような意味で記載しております。</p>



No.	評価項目	評価意見	回答
		<p>学的検討のいずれからも短時間に形成された可能性があることが示唆された」という意味でしょうか？</p> <p>・ P21 で「粒度分布の結果を図 2.1.10 に示す」と書かれているが、図 2.1.10 は平均値（中央粒径）の距離依存性であり、粒度分布ではありません。</p> <p>・ 2.1.2 の可用性という言葉ですが、「availability（システムが継続して稼働できる度合いや能力）」という工学用語かと理解していましたが、本報告書に用いる用語として適切でしょうか。</p> <p>・ P61 密度を 2500kg/m<sup>3</sup>とした場合とありますが、マグマの密度であれば、そのように明記が必要かと思えます。また、マグマの供給量と密度の関係についても、教科書的な内容なので、記載をしていないのかもしれないませんが、記載が必要かと思えます。</p>	<p>ご指摘ありがとうございます。修正いたします。</p> <p>地球科学分野では「availability」について特定の意味を持つことはなく、ここでは一般的辞書にある「有用性」の意で使用しています。</p> <p>一般的に用いる岩片の密度です。報告書には 2500kg/m<sup>3</sup>（岩片密度）と記載します。</p>
(以下 No. 13～16 は、上記 No. 1～12 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。)			
13	①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。	おおむね適切なのではないかと思われる	拝承
14	②解析実施手法、実験方法が適切か。	おおむね適切なのではないかと思われる	拝承
15	③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	おおむね適切なのではないかと思われる	拝承
16	④重大な見落とし（観	研究項目ともかかわるので評価の範囲外ですが、報告書の中でプラントの安全評価に資する知見が得られていない点が欠	本研究では、原子力施設に深刻な影響を及ぼす巨大噴火（設計対応不可能な事象）の活動可能性の評価に資する

No.	評価項目	評価意見	回答
	<p>点の欠落がないか。</p>	<p>落点として挙げられる。また、自然現象を単純化して類型化しようという姿勢での研究が多い。例えば、地震の震源過程の研究を見ると、2011年より前の我が国での研究は、震源の複雑な過程を様々な調査により拘束しようという研究が志向されがちであったのに対して、東北地方太平洋沖地震以降、そのような研究は少なくとも工学的にはあまり重視されなくなった。一方、本プロジェクトは無意識的に前者を志向する傾向があるように見受けられ、観点として欠落があるのではないかと懸念を覚える。</p>	<p>知見を得ることが目的です。</p> <p>(設計対応不可能な事象とは、工学的にプラントの防護が不可能な事象)</p> <p>巨大噴火は有史に発生していないため、どのような準備過程を経て噴火に至るのか不明な点が多くあります。</p> <p>まずは過去の噴火について詳細な調査を行い、噴火に至るまでの準備段階においてどのような事象やマグマ活動があったかを知見として蓄積します。</p> <p>また、現在の状態を把握するための探査手法を調べています。</p> <p>立地の審査では巨大噴火が差し迫っていないことを、既往の火山学的知見を基に総合的に評価しています。</p> <p>最終的には、本研究で得られる知見と既往の科学的知見を合わせて評価のための指標を検討します。</p> <p>火山活動が多様であり、同じ活動履歴を繰り返すとは限らないことは多くの火山学者により認識されています。</p> <p>火山学者が目標としているような噴火を予測するためのシナリオではなく、どのような状態であれば「巨大噴火が差し迫っていない」と言えるかを示す科学的な知見が得られることが求められていると認識しています。</p>
<p><b>岩田 知孝 氏</b></p>			
<p>1</p>	<p>①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。</p>	<p>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、そうされていると考える。</p>	<p>ご確認いただきありがとうございます。より理解し易い表現を目指して善処して参ります。</p>
<p>2</p>	<p>②解析実施手法、実験方法が適切か。</p>	<p>観測においては、社会的条件下において、最大限の努力をされているのだと想像するが、地震波トモグラフィやネットワークMTによる調査は、達成目標としている分解能を十分に達成することができる</p>	<p>ご確認いただきありがとうございます。今後の報告方法、調査方法等について検討して参ります。</p>

No.	評価項目	評価意見	回答
		のであろうか？チャレンジングな課題であるので、結論を急ぐのではなく、本当にわかったことを丁寧に報告としてまとめるとともに、将来的にそれを解決するような方策を提示することが肝要と考える	
3	③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	②にも書いたが、社会的条件で限られた観測しかできないといったことも含め、このフェーズでできる（できた）ことと次のフェーズがあるとした場合に、それを解決するにはどういった方策があるのか、ということ調査項目も含め十分に検討して欲しい。	ご確認いただきありがとうございます。今後の調査方法等について検討して参ります。
4	④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。	現時点では特に気づかない。	ご確認いただきありがとうございます。
<b>土志田 潔 氏</b>			
1	②解析実施手法、実験方法が適切か。	(3)b.地化学的手法について、②の観点からコメントする。マグマの供給状況を検討する観点では、対象をカルデラ火山に限定せず、噴火間隔が長い火山や最新活動時期が古い火山、若い花崗岩体等を対象に、C/Cl比を測定し、最新噴火からの経過時間との関係を調べる、といった検討を行うことが考えられる。	ご指摘いただいた観点は本テーマの目的達成の上で重要ですので、頂いた観点も踏まえて検討したいと思います。
2	①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。③解析結果の評価手法、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	(4)「考え方の検討」について、①・③・④の観点からコメントする。  マグマ溜まりの位置や深度の推定においては、観測・推定手法に応じ、異なる結果が得られることから、慎重に議論を進める事が望ましい。これに対し、スライド資料の後半<過去に大噴火を起こした火山の現状評価の検討>では、論理の飛躍が複数の箇所に認められる。  まず、「地下 11~15km 付近のマグマ溜まり」として、S 波の低速度域(深度 15km)と変動力源(深度 11km)を同じ物として扱	ご指摘の通り、現時点では新たな解釈として位置づけ、以下のように修正します。  始良カルデラでは、地下 11~15 km 付近に推定体積 100 km <sup>3</sup> 程度のマグマ溜まりが定置していると推定される。始良カルデラで観測されている広域な地殻変動データを基に、変動力源の解析が行われ、カルデラの中心エリア内の地下 11~14km の深さに変動力源の存在が示されている。これまでは、始良カルデラの広域地殻変動は、1914 年の大正噴火や 1946 年の昭和溶岩の噴火等桜

No.	評価項目	評価意見	回答
	<p>落)がないか。</p>	<p>っている。変動力源の位置に近い深度10km付近には低速度領域が認められていない事を考慮すると、両者を同一と解釈するためには、詳細な議論が必要と思われる。</p> <p>次に、従来の研究では、鹿児島地域の広域的な地殻変動は桜島火山のマグマ供給系に起因すると解釈されてきた。地殻変動量と桜島火山の噴出量が等しいためであり、今回の報告でも項目(3)c.では同様の解析結果が得られている。これに対し、項目(4)では、見出されているマグマ溜まりについて、桜島との関連を論じることなく、始良カルデラの活動と結びつけているように読める。従来の解釈を変更するには、多角的な議論が必要と思われる。</p> <p>更に、(2)の岩石学的手法で行われた、入戸噴火直前のマグマ溜まり深度推定では、マグマが水に飽和していることを仮定した手法も用いられている。同手法では、水に不飽和な場合には推定深度が異なる可能性もある。</p>	<p>島火山で起こったイベントと地殻変動が関連付けられ解釈<sup>71,74,75</sup>されているが、推定体積100 km<sup>3</sup>程度マグマ溜まりの体積変化と解釈することもできる。</p> <p>従来の解釈では、大正噴火の噴出量(約1.5km<sup>3</sup>)と地殻変動量(噴火前の水準値はない)から推定した供給量がおおよそ等しいとの理解です。また、変動力源の位置とマグマ溜まりの位置が異なることはあり得ると考えています。始良カルデラ下の地下構造が明らかになりつつあり、このことを踏まえた解釈を今後検討していく予定です。</p> <p>深度推定については、メルト包有物の含水量だけでなく、熱力学的な検討も合わせて推定しています。</p>

事故時炉心冷却性に対する燃料破損影響評価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
<b>有馬 立身 氏</b>			
1	②解析実施手法、実験方法が適切か。	・LOCA 時燃料破損の際燃料ペレットの細粒化について、Xe や Kr の FP ガスの放出を同時に測定されているのは、細粒化と FP 放出の関係性を明確にするうえで有用と思います。試験条件の温度変化とこれらの FP ガス原子かボイドの燃料中での細粒化に至るまでの移行挙動について更に追求していただければと思います。	FP ガス測定に加えて、SEM によるペレット片表面観察も進め、細粒化メカニズムを調査していきます。
2	③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	・LOCA 時に細粒化した燃料がピン外に放出される、あるいはピン内で崩落し蓄積することによって、燃料の発熱状態は通常運転時とは全く別なものになることが予想されます。そのような状況で、炉心の事故後の冷却性能がどう変化するかについて言及が欲しい。	被覆管の膨れた箇所に細粒化したペレット片が充填され、局所的に発熱量が大きくなること等が考えられます。現在までは、ペレット片を用いた加熱試験しか実施していませんが、今後、燃料棒を用いた試験を実施しますので、放出量の検討と併せて、冷却性への影響についても言及するようにします。
3	④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。	・試験の内容が、破損事故が起きるか／起きないか、あるいはその契機となる現象については詳細に検討されていると思いました。ただし、本プロジェクトは事故時炉心冷却性に対する影響評価であるにも関わらず、冷却性との関係が見えにくいと感じます。「冷やす」という点で、どのように炉心破損が冷却性に関係するのかを整理して下さい。	ご指摘のとおり、本研究は、破損挙動に着目しておりますが、最終報告では、破損挙動への変化（従来と異なる破損）がどのように冷却性に影響するか、定性的な影響について考察するようにいたします。
4	その他	・コロナ禍の影響でプロジェクトが計画通り進められるのか懸念しておりましたが、期間内で目的は達成できるとの見通しであるとのことでしたので、鋭意進めていただければと思います。	コロナ禍の影響については、今後不透明な部分はあると思いますが、当初計画の 5 ヶ年の中で目的を達成できるように、鋭意進めて参ります。
<b>黒崎 健 氏</b>			
1	①国内外の過去の研究、最新知見	踏まえているといえる。しいて言うと、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	FFRD については、海外の研究プロジェクトでも試験が実施されていますので、関連する情報を漏れなく収集し、

No.	評価項目	評価意見	回答
	見を踏まえているか。	足りなさを感じる。	最終報告では、それらの結果と比較し、考察していきます。
2	②解析実施手法、実験方法が適切か。	適切であるといえる。ペレット加熱試験に関しては、FP ガス放出と細片化の相関を把握することが重要である。LOCA 後被覆管振動時応力解析に関しては、集合体体系に対してきちんと解析をなすことが重要である。	細粒化については、SEM でも試料表面観察も実施し、FP ガス放出との関係を考察していきます。被覆管応力解析については、集合体体系での解析条件等を確認するとともに、解析結果の妥当性についても考察していきます。
3	③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	適切であるといえる。RIA 時燃料破損に関して、破損エンタルピー低減の原因を半径方向水素化物の生成に落とし込んでいるが、今回の結果を見る限り、妥当なように見える。一方、半径方向水素化物生成の原因については、ベース照射中の引っ張り応力が候補に挙げられているが、それで必要十分なのか？さらなる調査が必要なおもう。	半径方向水素化物生成の原因については、今後、追加で RIA 模擬試験を実施した燃料棒の被覆管金相観察結果がでてきますので、ベース照射中の引張応力のみで半径方向水素化物生成を整理できるのか、考察していきます。
4	その他	Cr コーティング Zr 合金被覆管といった新しい材料について、積極的に研究を推進すべきである。 成果発表に関して、委託先だけでなく、規制庁が主体的に成果発表することが重要である。報告書の作成で終わるのではなく、論文発表までつなげるべきである。論文発表（論文執筆・査読者とのやり取り等）を通じて、研究力は大きく強化される。	Cr コーティング Zr 合金被覆管については、規制側の安全研究として、どのようなことを実施すべきか、本 5 ヶ年計画の中で検討して、必要に応じて、今後の研究プロジェクトにおいて、試験等を実施していきたいと考えています。 「燃料健全性に関する規制高度化研究」では、その成果を論文にまとめ、日本原子力学会の論文賞を受賞しましたので、本研究についても、規制庁として論文作成し、積極的に公表していきたいと思えます。
大塚 康介 氏			
1	その他	OS-2 の試験後観察等の RIA 模擬試験の今後の予定を示していただきたい。 OS-1 燃料の運転中応力評価が示されているが、この応力上昇は何に起因しているのか不明確なので言及されたい（何か特徴的な運転履歴に起因しているのか等）。また、関連して燃料棒内圧や FGR は測定さ	OS-2 の試験後観察結果等は、学会等で適宜発表していきます。 OS-1 の応力上昇については、ご説明しましたとおり、添加型ペレットの焼きしまりが小さく、PCMI が早期に開始したことが主因と考えていますが、その他にも運転履歴や添加型ペレットの

No.	評価項目	評価意見	回答
		れているのであれば示していただきたい。	スウェリングも関係していると考えられ、今後、さらに整理して、学会発表等で示していきたいと思います。ベース照射後のFGR等は公表可能であるか確認して、可能であれば、上記と併せて、学会等で発表していきたいと思います。
<b>高島 勇人 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。	<p>①中間評価用資料本文5ページによると、ペレット片を真空中で加熱しての試験ということで、被覆管による拘束が模擬されていないので、その点、実機での挙動評価へつなげる際には評価していただく必要があると考えます。特に、燃焼が進んだ燃料ではペレットのリロケーションや被覆管との相互作用で径方向の拘束力が大きくなっており、ペレットの細片化挙動への影響が無視できない（細片化を防ぐ方向に働くと推察）と考えます。</p> <p>②また、FPガス放出挙動についても、実機では被覆管内で飽和圧に至っている状況からの追加放出になるため、試験で得られる真空中での追加放出挙動とは異なる可能性についても評価していただく必要があると考えます。</p>	<p>①ご指摘のとおり、リロケーションや被覆管拘束の影響はあると考えており、それらについては、燃料棒で実施するLOCA模擬試験で確認します。また、海外プロジェクトのハルデン炉プロジェクトやSCIPの結果も参考にして検討していきます。</p> <p>②本研究では、真空中で試験していますが、平成30年度まで実施した事故時燃料安全性に関する規制高度化研究では、加圧環境下の加熱試験も実施しており、今後は、その結果も併せて、細粒化メカニズムについて考察していきます。なお、加圧環境下の加熱試験結果については、令和元年に開催した本評価検討会で御説明しており、また、今後、論文で公表予定です。</p>
2	その他	<p>①ppt 8 ページ：供試体の燃焼度を記載いただきたい。</p> <p>②ppt 1 3 ページ：燃料健全性評価の研究では「測定面積で規格化された水素化物の長さ」を指標として整理しているが、本研究では「径方向への投影長さの最大値」で整理されている。その方がデータ整理がうまくいったということだと思うが、前者で整理した場合はどうなるのか、整理されているのであれば、併記されてはいかがか。</p> <p>RIA時は急峻なエネルギー上昇現象なので、測定面積で規格化した値より、長さそのものの方が関連度が強い、という評価で</p>	<p>①報告書に記載しておりまとおおり、スペインVandellos-2で照射されたUO<sub>2</sub>燃料で、試料の燃焼度は81GWd/tです。</p> <p>②ご指摘のとおり、半径方向水素化物の評価について、燃料健全性評価の研究と評価方法が異なりましたが、最終報告までには、追加でRIA模擬試験を実施した燃料棒の観察が進み、データも蓄積されますので、評価方法についても比較、考察を行い、最適評価方法について提案したいと思います。</p>

No.	評価項目	評価意見	回答
		あれば、その旨、追記されてはいかがか。	
平井 睦 氏			
1	その他	<p>1) 解析結果、実験結果と炉心冷却性の評価の関連をもう少し明示的に記載したほうが、研究全体のアプローチの妥当性を、より明確に示せるのではないか。</p> <p>2) LOCA 時ペレット細片化については、通常運転時のペレット内応力状態も影響する可能性が考えられるので、細片化機構を議論する際には多面的な試験パラメータの検討が望まれる。ただし、細片化が安全性に与える影響に関する評価を先行させることが重要ではないか。</p>	<p>1) 重大事故に進展することなく、設計基準事故にとどまるための判断基準(要件)として、炉心燃料の冷却可能形状維持があり、本来は、燃料の冷却可能形状維持、さらに正確に言うと、高燃焼度化に伴う破損形態変化に着目した研究ですが、そこを炉心冷却性としたため、全体がわかりにくくなってしまいました。今後は、背景等で、炉心冷却性の中でも、燃料の形状維持や破損形態変化に着目していることを説明するようにします。破損形態の変化が炉心冷却性にどのような影響を与えるか、定性的な影響については、本研究の中で検討していきたいと思います。</p> <p>2) FFRD については、被覆管膨れ部に集積して局所的な発熱量が大きくなる等、定性的な影響評価を先行して実施していきます。また、細粒化メカニズム検討のみならず、定量的評価にも、細片の粒径や放出条件等が必要となりますので、ご指摘のとおり、可能な範囲で多面的にパラメータを設定して、試験を実施するようにします。</p>