

令和6年度から開始する安全研究プロジェクトに係る事前評価

令和6年1月17日
原子力規制庁

1. 趣旨

本議題は、令和6年度から開始する安全研究プロジェクトに係る原子力規制庁が実施した事前評価の了承について諮るものである。

2. 概要

原子力規制庁は、「原子力規制委員会における安全研究の基本方針」（改正 令和元年5月29日 原子力規制委員会決定）及び「安全研究プロジェクトの評価実施要領」（改正 令和3年8月26日 原子力規制庁長官決定 [参考1](#)）に基づき、長官官房技術基盤グループで行う安全研究プロジェクトのうち、令和6年度から開始する3件の安全研究プロジェクトについて事前評価に係る自己評価を実施した。

これらの自己評価を基に、事前評価結果の案を作成した。

3. 事前評価結果（委員会了承事項）

令和6年度から研究を開始する3件の安全研究プロジェクトに対する事前評価結果の案を[別紙](#)のとおり了承いただきたい。

[別紙](#)：令和6年度から開始する安全研究プロジェクトに係る事前評価結果（案）

<別紙、参考等>

別紙 令和6年度から開始する安全研究プロジェクトに係る事前評価結果（案）

別添 令和6年度から開始する安全研究プロジェクトに係る事前評価結果（自己評価）

参考1 「安全研究プロジェクトの評価実施要領」（令和3年8月26日原子力規制庁長官決定）（抜粋）

参考2 技術評価検討会名簿

参考3-1 安全研究のプロジェクトごとの自己評価結果

（事故耐性燃料等の事故時挙動研究（R6～R10））

別添 事前評価対象安全研究プロジェクトの研究計画

（技術評価検討会での議論を踏まえ朱記修正）

参考3-2 安全研究のプロジェクトごとの自己評価結果

（地震動評価手法の信頼性向上に関する研究（R6～R10））

別添 事前評価対象安全研究プロジェクトの研究計画

（技術評価検討会での議論を踏まえ朱記修正）

参考3-3 安全研究のプロジェクトごとの自己評価結果

（断層の活動性評価手法に関する研究（R6～R10））

別添 事前評価対象安全研究プロジェクトの研究計画

（技術評価検討会での議論を踏まえ朱記修正）

令和6年度から開始する安全研究プロジェクト に係る事前評価結果（案）

令和6年1月17日
原子力規制委員会

1. 評価の対象

原子力規制庁長官官房技術基盤グループで実施する安全研究プロジェクトとして、事前評価の対象となるプロジェクトは次に示す3件である。

事前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	事故耐性燃料等の事故時挙動研究	R6 - R10 (2024 - 2028)
2	地震動評価手法の信頼性向上に関する研究	R6 - R10 (2024 - 2028)
3	断層の活動性評価手法に関する研究	R6 - R10 (2024 - 2028)

2. 事前評価結果

上記の安全研究プロジェクトについて原子力規制庁が実施した事前評価に係る自己評価（別添）は妥当である。

令和 6 年度から開始する安全研究プロジェクト に係る事前評価結果（自己評価）

令和 6 年 1 月 12 日
原子力規制庁

1. 評価対象プロジェクト

今回の事前評価の対象は、令和 6 年度に研究を開始する安全研究プロジェクト「事故耐性燃料等の事故時挙動研究」、「地震動評価手法の信頼性向上に関する研究」及び「断層の活動性評価手法に関する研究」の 3 件である。

2. 評価の方法

「原子力規制委員会における安全研究の基本方針」（改正令和元年 5 月 29 日原子力規制委員会決定）及び「安全研究プロジェクトの評価実施要領」（改正令和 3 年 8 月 26 日原子力規制庁長官決定）に基づき、原子力規制庁技術基盤グループは、安全研究プロジェクトの研究内容（成果目標、計画、研究手法等）の技術的妥当性及び研究計画の適否を評価した。評価に当たっては、研究手法、成果の取りまとめ方法等の技術的妥当性の評価に客観性を加味する観点から、技術評価検討会を開催し外部の専門家の意見を聴取した。

3. 評価結果

安全研究プロジェクトの評価実施要領に基づき行った、研究内容の技術的妥当性と研究計画への反映に関する確認、研究計画に対する自己評価の結果は以下のとおりである。

I. 事故耐性燃料等の事故時挙動研究（R6-R10）

（1）「研究内容の技術的妥当性」について

本研究では、実績のある手法を取り入れて研究を進めつつ、国際共同研究プロジェクト等における最新知見を収集して研究へ反映することとしている等、技術評価検討会の指摘事項を満足していることを踏まえ、研究内容は技術的に妥当であると判断する。

（2）「研究計画案への反映」について

技術評価検討会での意見を踏まえ、供試体の状態、評価項目等を明確にし、研究計画の具体性を高めた。

（3）結論

技術評価検討会では研究内容の技術的妥当性を確認した。外部専門家等から受けた指摘については研究計画に反映した上で令和 6 年度から安全研究プロジェクトを開始することとする。

II. 地震動評価手法の信頼性向上に関する研究 (R6-R10)

(1) 「研究内容の技術的妥当性」について

本プロジェクトは、実施内容及び手法についても適切とする評価を受けていることから、技術的に妥当と判断する。ただし、研究の遂行に当たり、最新の知見を継続調査し、必要に応じて研究計画に適宜反映していくこととする。

(2) 「研究計画案への反映」について

技術評価検討会での意見を踏まえ、研究の実施方法を明確にし、研究計画の具体性を高めた。また、本プロジェクトの名称については、研究計画の実施内容に即したものに修正することとした。

(3) 結論

技術評価検討会では研究内容の技術的妥当性を確認した。外部専門家等から受けた指摘については研究計画に反映した上で令和 6 年度から安全研究プロジェクトを開始することとする。

III. 断層の活動性評価手法に関する研究 (R6-R10)

(1) 「研究内容の技術的妥当性」について

研究内容は、国内外の過去の研究及び最新の研究、知見を踏まえており、また、実施内容及び手法についても適切とする評価を受けていることから、技術的に妥当と判断する。

(2) 「研究計画案への反映」について

技術評価検討会での意見を踏まえ、測定方法、成果の取りまとめの方法を明確にし、研究計画の具体性を高めた。

(3) 結論

技術評価検討会では研究内容の技術的妥当性を確認した。外部専門家等から受けた指摘については研究計画に反映した上で令和 6 年度から安全研究プロジェクトを開始することとする。

安全研究プロジェクトの評価実施要領（抜粋）

平成 31 年 4 月 16 日 制定

令和 3 年 8 月 26 日 改正

原子力規制庁

（前略）

3. 安全研究プロジェクトの評価

安全研究プロジェクトの評価は、事前評価（3. 1）、中間評価（3. 2）及び事後評価（3. 3）についてそれぞれ行う。この際、これらの評価に連続性と一貫性を持たせるため、以下の視点から一貫した評価を行う。

- ・ 目標・成果の適切性
- ・ 技術的妥当性
- ・ 研究の管理の適切性

3. 1 事前評価

（1）事前評価の目的

事前評価は、基本方針に基づき原則として毎年度作成する「今後推進すべき安全研究の分野及びその実施方針」（以下「実施方針」という。）に従い計画された新規の安全研究プロジェクト（後継の安全研究プロジェクトも含む。）について、その計画、成果目標及び研究手法の技術的妥当性等を確認することを目的とする。

なお、事前評価に先立ち、実施方針策定時に、新規安全研究プロジェクトの目的、研究計画の概要、成果の活用の見通し等を確認し、計画の適切性について確認する。

（2）事前評価結果の活用

事前評価の結果は、安全研究プロジェクトの開始前に策定する研究計画（研究の背景、目的、知見の活用先、研究概要、実施計画（成果の公表計画も含む。）等を定めたものをいう。以下同じ。）の変更の要否の判断等に活用する。

（3）事前評価の実施時期

事前評価は、安全研究プロジェクト開始の前年度の 12 月以降に行う。また、事前評価は、研究手法、成果の取りまとめ方法等の技術的妥当性の評価について客観性を確保するため、技術評価検討会（外部専門家の評価及び意見並びに産業界等の専門的な技術的知見を有する者（専門技術者）の意見を聴取するための公開会合をいう。以

下同じ。) ¹での議論を経た上で行うものとする。

(4) 事前評価の手法及び評価項目

事前評価は、様式 1 による当該安全研究プロジェクトを実施するための研究計画を作成した上で、研究内容の技術的妥当性について確認し、研究計画の変更の要否を評価する。

(5) 事前評価の手続

安全研究プロジェクトを担当する安全技術管理官等（安全技術管理官又はその代理として技術基盤グループ長が指名する者をいう。）（以下「担当安全技術管理官等」という。）は、技術評価検討会での意見等を踏まえ、評価項目ごとに研究計画の適否について評価を事前評価結果取りまとめ表（様式 2）に記載して評価案を作成し、それを原子力規制委員会へ諮るものとする。

（以下略）

¹技術評価検討会における外部専門家については、公正性及び中立性確保の観点から、利害関係者が評価に加わらないよう十分に配慮する。なお、評価の視点は、①国内外の過去の研究及び最新知見を踏まえているか、②解析実施手法、実験方法が適切か、③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か、並びに④重大な見落とし（観点の欠落）がないかの 4 点とする。

研究計画

1. プロジェクト	担当部署		
	担当責任者		
2. カテゴリー・研究分野	主担当者		
3. 背景			
4. 目的			
5. 知見の活用先			
6. 安全研究概要	実施行程表		
	実施項目	〇〇年度	〇〇年度
	(1) 〇〇〇〇	〇〇 (実施内容)	〇〇 (実施内容)
		〇〇年度	成果の公表
7. 実施計画			
8. 実施体制			
9. 備考			

事前評価結果取りまとめ表

評価項目	評価結果	
	担当安全技術管理官等による評価コメント	評価（案） （適・否）
研究内容の技術的妥当性		
研究計画案への反映	【担当安全技術管理官等による評価結果】	

・評価結果は、技術評価検討会で受けたコメント等を踏まえ記載する。

技術評価検討会 名簿

燃料技術評価検討会

(五十音順)

外部専門家

- 有馬 立身 国立大学法人 九州大学大学院 工学研究院
エネルギー量子工学部門 助教
- 黒崎 健 国立大学法人 京都大学 複合原子力科学研究所 所長・教授

専門技術者

- 大塚 康介 東京電力ホールディングス株式会社 原子力立地・本部
廃止措置室 部長
- 坂本 寛 日本核燃料開発株式会社 研究部 主幹研究員
- 高畠 勇人 関西電力株式会社
執行役常務／原子力事業本部長代理（原子力安全・技術、原子力発電、原子燃料）／原子燃料サイクル室担当（原燃契約）

地震・津波技術評価検討会

(五十音順)

外部専門家

- 糸井 達哉 国立大学法人 東京大学大学院 工学系研究科 准教授
- 鎌滝 孝信 学校法人加計学園 岡山理科大学 理学部 基礎理学科 教授
- 酒井 直樹 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部門
副部門長

専門技術者

- 梅木 芳人 中部電力株式会社 原子力本部 原子力土建部 設計管理グループ
専任課長
- 土志田 潔 一般財団法人 電力中央研究所 原子力リスク研究センター
自然外部事象研究チーム 研究推進マネジャー
- 松山 昌史 一般財団法人 電力中央研究所 原子力リスク研究センター
自然外部事象研究チーム チームリーダー

安全研究のプロジェクトごとの自己評価結果（事前評価） （事故耐性燃料等の事故時挙動研究（R6～R10））

令和 6 年 1 月 12 日
原子力規制庁

1. 技術評価検討会における主な意見及びその対応

- 本プロジェクトで実施する試験及び解析については、実績のある手法を用いて行うこととしており、また、国際共同研究プロジェクトを本プロジェクトの補完として位置づけ、引き続き参画して最新知見を収集することから、プロジェクトの実施内容及び方法は適切であると評価された。
- 供試体（ペレット、被覆管、燃料棒）が未照射材か照射材かを明記する必要があるとの指摘があった。供試体の状態については、研究計画（案）に明記することとする。
- 事故模擬試験の条件について実機条件を踏まえ過度に保守的にならないことが重要との意見があった。試験実施に当たっては、実機条件及び規制基準を踏まえつつ、燃料許容設計限界、損傷限界等を把握することも目的として、試験条件を設定する。
- Cr コーティング Zr 合金被覆管に対する LOCA 試験等の評価項目に、「水素」が陽に現れていないが、水素吸収の影響は評価するのかの質問があった。水素吸収の影響については評価実施予定であるため、「被覆管の機械特性に及ぼす水素吸収の影響」を評価項目として設けることとする。
- 詳細は別表参照

2. 事前評価結果

(1) 研究内容の技術的妥当性: 適 否

- 本研究では、実績のある手法を取り入れて研究を進めつつ、国際共同研究プロジェクト等における最新知見を収集して研究へ反映することとしている等、技術評価検討会の指摘事項を満足していることを踏まえ、研究内容は技術的に妥当であると判断する。

(2) 研究計画案への反映

- 研究計画（案）に供試体の状態を明記する。また、成果公表の際は、供試体の製造情報、照射履歴等を可能な限り示すこととする。
- Cr コーティング Zr 合金被覆管（未照射）に対する LOCA 試験等の評価項目の一つとして「被覆管の機械特性に及ぼす水素吸収の影響」を設け、その評価を実施することとする。
- 詳細は別表参照
- 上記を踏まえた研究計画（案）は別添参照

事故耐性燃料等の事故時挙動研究に対する外部専門家
の評価意見及び専門技術者の御意見並びに回答

(外部専門家から頂いた評価意見及び回答)

No.	評価項目	評価意見	回答
有馬 立身 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>課題(1):ATF の燃料損傷挙動等に関する研究(Crコーティング Zr 合金被覆管の事故時挙動の把握)は、最終的には現行被覆管に対する規制基準が適用できるか否かを判定するものであり、したがって、過去の研究を参考にせざる得ないものであり、よく踏まえていると評価します。</p> <p>課題(2):現行基準で考慮されていない事故時燃料損傷挙動に関する研究では、特に MOX 燃料の FFRD 挙動など参考にする知見が少ないかもしれないが、むしろ本プロジェクトでデータを積み重ねて独自に挙動を明らかにしたいといった意欲を強く評価します。</p>	過去の研究を踏まえているとの評価をいただきありがとうございました。MOX 燃料の FFRD 挙動につきましては、試験回数に限られるため、試験条件をよく検討した上で実施したいと考えます。
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	スライド 10、15 ページ:試験炉を用いた RIA 試験が想定されています。JAEA の NSRR を使用することですが、実施できなかった場合の対応も検討しておいて下さい。	何らかの理由により、NSRR による RIA 試験が実施できない場合は、RIA 試験が可能な類似の海外の試験施設での試験実施や RIA 試験に代わる要素試験等での代替の可能性を検討することを考えます。
3	③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	<p>スライド 5 ページ: Cr コーティング Zr 合金被覆管に対して、「従来の指針類で規定される LOCA 等の事象における具体的判断基準が適用できるか…」とあります。可能性は小さいと思いますが、基準から外れた場合、新たに基準を策定するのですか。</p> <p>スライド 13 ページ:MOX 燃料の FFRD 挙動の確認について、国際共同研究プロジェクト等の成果と合わせて知見を取得することですが、国際プロジェクトと本プロジェクトとの区別を明確にして下さい。</p>	<p>そのような被覆管について、事業者より申請があった場合は、別途原子力規制委員会がその対応を判断することになります。</p> <p>国際共同研究プロジェクトでは、UO₂ 燃料の FFRD に関する試験データを取得しており、MOX 燃料の FFRD に関する試験データはこれまではなく、今後のプロジェクトにおいてもほぼ見込めない状況です。そのた</p>

No.	評価項目	評価意見	回答
		<p>スライド 13 ページ:Pu スポットと RIA 時のペレット細片化の因果関係のモデルが既にあるのなら例示して下さい。FFRD 挙動に Pu スポットが問題になる可能性があるのであれば、今後新しい燃料には Pu が均一に混ざった燃料を使えばよいと思うが、どうか。</p>	<p>め、本プロジェクトでは MOX 燃料の FFRD に関するデータを取得することを考えています。</p> <p>Pu スポット近傍では核分裂が進み、核分裂生成物による希ガス生成、照射欠陥の集積及び亜粒界生成による結晶組織の微細化のため、LOCA 時にペレットが高温になり希ガスの体積が増加することによるペレット細片化に寄与する可能性があります。Pu スポットの影響について本プロジェクトで確認していきたいと考えます。</p> <p>現状、MOX 燃料の製造には、MIMAS 法が採用されており、Pu スポット生成は避けられないと考えられますが、Pu スポットを小さくするような製造方法の改良やどのような MOX 燃料を採用するかは事業者側の判断となります。</p>
4	④重大な見落とし(観測点の欠落)がないか。	<p>スライド 4 ページ:Zr 合金と Cr コーティング層の密着性などの品質管理・テストは、製造メーカーにまかせるということでもいいのですか。</p> <p>スライド 10 ページ:Cr コーティング Zr 合金被覆管に対する LOCA 試験等で、評価項目に「水素」が陽に現れておりませんが、考察では当然考慮するとの理解でいいですか。</p>	<p>燃料の健全性・安全性が確保できれば、Zr 合金と Cr コーティング層の密着性などは問いません。従って、事業者(製造メーカー)が燃料の健全性・安全性が確保できるよう品質管理等を行うこととなります。</p> <p>ご指摘のとおり、水素ガスの発生状況及び発生した水素ガスが被覆管に吸収される状況や吸収された水素の被覆管性能への影響等も検討・考察いたします。</p>
5	その他		
黒崎 健 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>国外の最新知見という意味では説明が乏しいと感じた。</p>	<p>Cr コーティング Zr 合金被覆管などは、様々な製法(コールドスプレイ、様々な物理蒸着法)で作成されたものが試験されていることなどは我々も把握しておりますが、そのあたりの詳細な説明をしなかったため、説明が乏しい印象を与えてしまったと推察します。引き続き、国際共同研究プロジェクトに</p>

No.	評価項目	評価意見	回答
			参加し、海外の最新知見を収集するとともに、海外の最新の論文等からも情報を収集していきます。
2	②解析実施手法、実験方法が適切か。	これまでに実績のある手法であり、適切である。	着実に実験データの取得及び解析を進めていきたいと思いをします。
3	③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	これまでに実績のある手法であり、適切である。	着実に実験データの取得及び解析を進めていきたいと思いをします。
4	④重大な見落とし(観測点の欠落)がないか。	特になさそうにみえる。	プロジェクトの途中で新たな課題等が判明した場合は研究内容を柔軟に修正して対応したいと思いをします。
5	その他	<p>ATFとCrコーティング被覆管は一対一対応するものではない。また、FFRD等ATFとは異なる研究も実施することになっている。プロジェクト名が「事故体制燃料等の・・・」ということで、一応、等についてはいるが、タイトルと内容が一致していない(タイトルでATFが強調されすぎている、あるいは誤解を招く可能性がある)ように感じる。</p> <p>研究に用いるCrコーティング被覆管の素性は確かなものなのかどうか気にかかる。きちんとしたところがきちんとした方法で作ったものなのかどうか。</p> <p>照射済燃料ペレットを使った試験をたくさんすることになっている。そういったペレットの素性をきちんとおさえておくことが重要。要は、製造条件や照射条件と今回得られる実験結果をきちんと紐づけることが重要。</p>	<p>規制庁は「今後推進すべき安全研究の分野及びその実施方針(令和6年度以降の安全研究に向けて)」(令和5年7月12日)の中で、事故耐性燃料の安全性に関する研究を最も重要な研究課題として位置づけており、そのため、タイトルでATFを強調いたしました。また、今後の状況により、柔軟に、Crコーティング被覆管以外のATFにも対応することも念頭においています。</p> <p>研究に用いるCrコーティング被覆管試料については、事業者が先行照射体に用いる被覆管に相当するものを用いる予定です。</p> <p>照射済燃料については、過去に当時の保安院プロジェクトとして、燃料試験用に海外から国内に輸送した海外商用炉照射燃料等を使用する計画のため、素性は良く把握されているものです。その上で、製造条件</p>

No.	評価項目	評価意見	回答
		<p>試験は誰がどこですか？論文は誰が書くのか？規制庁が主体的に取り組むことが重要。</p>	<p>や照射条件を考慮して、実験結果の考察を行っていきます。</p> <p>試験は照射済燃料に対する LOCA 及び RIA 等の試験設備を持つ研究機関で行います。規制庁としては、試験内容や試験条件等、さらに、試験結果の解釈・考察、解析手法の検討等について試験実施先と検討・協議の上で実施することとしております。論文につきましては、規制庁職員が主体的に取り組んで作成・公表することに加えて、委託先の研究機関においても作成・公表されます。</p>

(専門技術者から頂いた御意見及び回答)

No.	評価項目	御意見	回答
大塚 康介 氏			
1	① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか	最新の状況が踏まえられていると考えます。関連する国際プロジェクトと本研究との位置づけを明確にすること、国際プロジェクトと適切に連携していくことについて、引き続き検討をお願いします。	最新の状況が踏まえられているとの評価をいただき、ありがとうございます。本研究と国際共同研究プロジェクトの位置づけですが、本研究では、国内導入見込みの Cr コーティング Zr 合金被覆管や MOX 燃料に関する知見の取得を目指すところが主なところと考えておりますが、国際共同研究プロジェクトも活用して、最大限の成果を出せるよう引き続き検討していきたいと思えます。
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	実験装置や各種条件等の実験方法の詳細は今後決定されるものですが、実機条件を踏まえたものとなることが重要と考えます。事故条件ではありますが、過度に保守的な条件とならないこと等について、検討をお願いします。	実機条件及び規制基準を踏まえた上で、燃料使用可能限界、損傷限界を調べるためには厳しい条件を設定することも必要なので、試験実施に当たっては十分な検討のうえ実験条件を設定していきたいと思えます。
3	③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	研究計画段階の現時点において、結果の評価手法の適切性について意見することは難しいですが、データのばらつきの大きさ等の、データの特性に依拠して評価することが重要と考えます。	ご意見拝承いたしました。データの特性を考慮して評価したいと思えます。
4	④ 重大な見落とし(観点の欠落)がないか。	特にありません。	-
5	その他	-	-
坂本 寛 氏			
1	① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか	最新知見が適切に踏まえられています。提案資料は定性的な説明が多いですが、試験実施時、報告時には定量的解説を積極的に追加下さい。	最新知見が適切に踏まえられていると評価いただきありがとうございました。試験実施時、報告時には定量的な解説をしていきたいと思えます。
2	② 解析実施手法、実	これまで計画的に準備されてきた装置類が本格的に稼働することになりますので、試	ご意見拝承いたしました。試験結果だけでなく、試験の準備、装置についての説明や

No.	評価項目	御意見	回答
	試験方法が適切か。	試験結果のみならず、試験準備や試験方法なども学会等で丁寧に説明下さい。	試験方法について、成果を公表する際には丁寧に説明していきたいと考えております。
3	③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	各試験評価項目については適切だと考えます。ATF など全く新しい課題も含まれており、時期的にも適切だと思います。一方で各評価結果をどの様に結びつけるかについては、まだこれからの取り組みだとも思いますので、試験実施時からこの結びつけを意識して取り組んで頂けると、より総合的価値が向上すると期待致します。特にATF などデータ蓄積に差が生じるものも含まれるため、ある程度まとまった結果が得られたところで、今後のまとめ方を示して頂けると良いと思います。(一つ一つの取り組みが孤立しないようにご注意下さいという意味です)	ご意見いただいたとおり、試験の実施時から、試験結果を総合的に結びつけ、燃料・炉心の事故時安全性に反映できることを意識しながらプロジェクトを進めていきたいと思っております。今後のまとめ方につきましては、プロジェクト開始後 3 年目に予定される中間評価などで、また議論させていただき、ご意見を伺いながら進めていきたいと思えます。
4	④重大な見落とし(観測点の欠落)がないか。	FFRD などはデータのばらつきが比較的大きいと予想される一方で、取得機会に限られると思われます。最終的にどの様な取り組みが必要かなどを考察する取り組みも独立した取り組みとしても良いかもしれません。	ご指摘のとおりデータの取得機会に限られますので、得られたデータについては、データ数が限られること及びばらつきが大きくなることを踏まえ、十分検討した上で実施したいと考えております。
5	その他	-	-
高畠 勇人 氏			
1	①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか	SCIP、FIDES、ALPS等をはじめとする過去や現在の研究結果を踏まえた計画となっている。	プロジェクト開始後も国内外の最新知見を収集しつつ、プロジェクトを進めていきたいと思っております。
2	②解析実施手法、実験方法が適切か。	DBAやBDDBAにおける挙動把握のための試験については、その試験条件によって試験結果が大きく変わるため、今後検討される(現時点の計画では確認できていない)試験方法、特に機械試験における引張荷重と速度、疲労試験の曲げ方等について、実機で想定される条件から適度な保守性をもった設定をすべき。(過度に保守的な条件設定を避ける必要がある。)	試験条件につきましては、実機で起こるであろう条件を念頭に、過度に保守的な条件とならないように設定して行きたいと思っております。一方で、実機条件及び規制基準を踏まえた上で、研究として燃料損傷条件等、燃料が使用できる限界条件についての知見を得るため、厳しい条件を設定することも必要なので、試験実施に当たっては十分な検討のうえ実験条件を設定していきたいと思

No.	評価項目	御意見	回答
		<p>照射済燃料ペレットの加熱試験についても、被覆管による拘束がない条件下での試験となるため、実機でのペレットの挙動とは異なるものであることを評価で補正する必要がある。</p>	<p>います。</p> <p>照射済燃料ペレットの加熱試験につきましては、ペレット片単体の試験となりますので、実機との差異を考慮して、試験結果の考察・評価を行いたいと思います。</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>FFRDとPuスポットの関係に係る調査を計画されているが、UO₂燃料に係るデータでもばらつきが大きい事象であるため、今回の試験で得られるであろう供試体のふるまいの違いがPuスポットの有無に起因するものか、UO₂でも見られたばらつきの範囲なのかに留意して評価する必要がある。</p> <p>Crコーティング材の 1200℃超え時の機械特性や損傷条件についての知見取得については、どのような損傷モードを想定されているのか、具体的な試験計画立案と評価において適切に吟味する必要がある。例えば、仮に厳しい条件下でCrコーティングの酸化が起きたとしても、1200℃超えの継続時間や到達温度によって剥がれなどの挙動が異なることが想定されるし、仮に剥がれたとしても、ただちに、強度メンバーである母材の機械的特性に影響が出るとも考えにくいので、慎重に試験と評価を進めていく必要がある。</p> <p>FFRDに関する解析手法の整備において、ペレットリロケーションによる線出力の増加や炉内放出量等を評価する計画となっているが、局所的な挙動が炉内全体の安全性、特に冷却可能性にマクロにどの程度影響を及ぼす可能性があるのか、という視点を忘れてはならず、局所的な検討に終始することがないように留意することが必要。</p>	<p>ご意見拝承いたしました。MOX 燃料につきましては、試料数が限られるため、多くのデータを取得することが難しいと考えられますので、UO₂ 燃料で見られたデータのばらつきも念頭に試験結果を評価していきます。</p> <p>Crコーティング材の 1200℃超えの温度領域では、高温酸化による脆化損傷が優位であるのか、高温での被覆管の強度低下による折損もしくは自重での崩落が優位であるのか等を検証したいと考えています。材料の破損に至る限界を調べるために厳しい条件までを実験条件として設定し、損傷モード、使用限界条件を念頭に実験結果を評価したいと思います。</p> <p>FFRDに関する解析手法の整備につきましては、リロケーション後の線出力増加による被覆管最高温度への影響並びに燃料棒破損本数及び細片化したペレットの炉内への放出量の推定を行いたいと考えております。ご意見いただいたとおり、局所的な検討に終始することなく、炉内全体の冷却性にどの程度影響を及ぼす可能性があるのか、という視点を持ちつつ検討を進めてい</p>

No.	評価項目	御意見	回答
			きたいと思います。
4	④重大な見落とし(観点の欠落)がないか。	今後の試験計画の具体化に応じて、都度、専門家の確認が必要。	プロジェクト開始3年後に予定される中間評価等の機会を通じて、外部専門家の方々の意見を伺いながら進めていきたいと考えます。
5	その他	<p>供試体(ペレット、被覆管、燃料棒)が未照射材か照射材かを明確に、明確に決められないところは検討中とでもして、区別して記載する必要がある。加えて、未照射材であればどこでどのように作られた供試体か、照射材であれば、それに加えて、照射炉と燃焼度、最大線出力などの履歴を示すことが必要になる。</p> <p>「現行基準で考慮されていない挙動に関する研究」という表現は、これまでの知見により、現行基準で判断しても当該挙動がすぐに原子炉の安全性(燃料の冷却性など)に大きな影響を与えるものではないという判断がなされて、原子炉の運転が許可されているものなので、一般の方や裁判等において無用の不安を与える恐れがあるため、違う表現をご検討された方が良い。もちろん、過去の知見においてエンジニアリングジャッジをしてきたことが、昨今の技術の進歩や供試体が得られるようになったなどの環境変化により試験が可能となれば、当該試験を行って実証を進めていくという姿勢は大事であり、研究を行うこと自体に意義は大きいので、表現の問題。</p>	<p>研究計画(案)に、現時点で計画している供試体について、未照射材か照射材かを明記しました。研究成果を外部に発表する際には、供試体の製造情報、照射履歴等、可能な限り公開していきます。</p> <p>ご指摘の点を踏まえまして、項目名について再検討し、「高燃焼度燃料事故時挙動等に関する研究」に変更いたしました。</p>

別添

**事前評価対象安全研究プロジェクトの研究計画
(技術評価検討会での議論を踏まえ朱記修正)**

研究計画(案)

1. プロジェクト (始期: R6年度 終期: R10年度)	10 事故耐性燃料等の事故時挙動研究	担当部署	技術基盤グループ システム安全研究部門
		担当責任者	江口裕 主任技術研究調査官
2. カテゴリー・ 研究分野	【原子炉施設】G)核燃料	主担当者	福田拓司 主任技術研究調査官 山内紹裕 副主任技術研究調査官
3. 背景	<p>(1)規制課題</p> <p>原子炉は安全性確保の観点から、異常な過渡事象や事故が発生した場合でもそれらが拡大せず収束できるよう設計されており、事業者は安全評価を通して、設計の妥当性を確認している。適合性審査においては、事業者が行った評価をもとに、当該原子炉施設が規制基準に適合するものであるかを審査している。現行の規制基準*では、燃料に対して、通常運転時及び異常な過渡変化時において燃料被覆材が破損しないものであること、また、異常な過渡変化時及び設計基準事故(Design Basis Accident、以下「DBA」という。)時において、原子炉を安全に停止し、かつ、停止後に炉心の冷却機能を維持できるものであることを求めており、審査において、これら規制基準への適合性を判断するためには、原子炉の通常運転時、異常な過渡変化時及びDBA時の燃料挙動を十分把握しておく必要がある。</p> <p>現在、事故時の炉心溶融や燃料被覆材と水蒸気との酸化反応による水素発生を開始を遅らせることを目的とした事故耐性燃料(Accident Tolerant Fuel、以下「ATF」という。)の開発が世界的に進められている。代表的なATFとして、従来のZr合金被覆管の外側表面にCrを薄くコーティングしたCrコーティングZr合金被覆管(図1)、改良ステンレス鋼(FeCrAl)被覆管、炭化ケイ素(SiC)被覆管等がある。我が国においてはCrコーティングZr合金被覆管を用いたATFについて、令和7年に少数体の先行的な導入を開始し、その後令和12年以降に本格的な導入を行う計画が事業者により示されている^{[1],[2]}。ATFは、使用する材料や設計の変更により事故時の安全性の向上が見込まれるものの、通常運転時からDBA時、さらに、DBAを上回る事故(Beyond DBA、以下「BDBA」という。)条件下の燃料挙動が従来型燃料と異なることが想定される。従って、事業者によるCrコーティングZr合金被覆管の導入申請に備え、各事象において規制基準へ適合することを確認するための知見を取得することが必要である。なお、現行の規制基準では、重大事故への拡大防止として炉心の著しい損傷の防止、また、想定される重大事故等が生じた場合には原子炉格納容器の破損の防止を求めているが、この炉心の著しい損傷対策の有効性判断の基準として、LOCA基準(被覆管最高温度$\leq 1200^{\circ}\text{C}$、被覆管酸化量$\leq 15\%$化学量論的酸化量)を用いている。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)における検討の結果から、従来型燃料については、1200°Cを越える温度では被覆管の酸化速度が速く、1200°Cを著しい損傷開始の判断基準とすることは過度に保守的ではないとの見込みが得られつつあるが、ただし、ATFについては上述のように1200°Cを越える温度での損傷挙動が従来型燃料と比べて異なる可能性があるため、損傷挙動の従来型燃料との違いについて知見を取得し、安全性を損なうような想定外の反応や事象が発生しないことを確認する必要がある。</p> <p>従来型燃料については、DBAの一つとして想定される冷却材喪失事故(Loss Of Coolant Accident、以下「LOCA」という。)において、燃料ペレットの破碎・細片化、発生したペレット細片の被覆管膨れ部への移動・集積及び破裂部からの放出(Fuel Fragmentation, Relocation, and Dispersal、以下「FFRD」という。)等のように、原子炉の安全性に影響を及ぼし得るが現行基準では考慮されていない燃料損傷挙動が事故模擬試験等から確認されている。それら挙動のうち、知見の蓄積が十分でないものについては、引き続き試験研究を進め、必要に応じて規制基準等の見直しの検討を行うことが重要である。</p> <p>(2)研究課題</p> <p>CrコーティングZr合金被覆管については、安全性が向上すること及び規制基準へ適合することを確認するための知見を取得することが研究課題となる。CrコーティングZr合金被覆管は、従来のZr合金被覆管に比べ事故時の変形・酸化に耐性があり、また水素発生が抑えられることにより事象進展を遅らせることが期待される一方で、高温においてはCr-Zr共晶反応により液相が生じること^[3]、Cr層へのZr拡散により保護効果が喪失すること^[4]、Cr層の剥がれが生じた場合にはCr-Zr界面で応力集中が生じること^[5]、電池形成により腐食が生じ得ること^[6]等が知られている。そのため、DBAやBDBA時の燃料挙動に対するCrコーティングの影響を明らかにする必要がある。なお、BDBA条件における燃料挙動については、従来型燃料の研究も少ないため、著しい炉心損傷(燃料溶融)に至るまでの燃料損傷過程が明らかとなっておらず、ATFの比較対象となるデータがない。ATF単独で試験した場合はATFの安全性向上の程度を確認できないことから、従来型燃料及びATFの両方についてBDBAを模擬した高温試験等を実施して知見を拡充し、ATFの安全性向上を確認する必要がある。</p> <p>現行基準で考慮されていない燃料損傷挙動のうち、FFRDが発生するしきい燃焼度については国際共同研究プロジェクト^[7]等において明らかになりつつあるが、燃焼度以外の発生条件が未だ明らかになっていないため、引き続き発生条件解明のための研究を進める必要がある。特に、我が国で用いられる混合酸化物(Mixed Oxide、以下「MOX」という。)燃料は、Pu濃度が局所的に高い部分(以下「Puスポット」という。)があり、LOCA時のFFRD挙動がUO_2燃料と異なる可能性が指摘されているものの、世界的にもごく限られた試験データしか存在しない。そのため、試験データを拡充し、MOX燃料のFFRD発生条件を明らかにする必要がある。また、MOX燃料については反応度投入事故(Reactivity Initiated Accident、以下「RIA」という。)を模擬した試験において、従来見られなかった内圧の上昇による燃料破損が確認されており^[8]、内圧上昇の原因となる核分裂生成物の希ガス(Fission product gas、以下「FPガス」という。)の放出挙動を調べる必要がある。さらに、LOCA後の炉心冷却性維持の評価に資するため、LOCAによる高温酸化・荷重負荷を経験した燃料被覆管を対象として、地震時に燃料棒に負荷されると考えられる繰り返し荷重に対する破損限界を調べる必要がある。</p> <p>*「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」</p>		

4. 目的	<p>以下を目的として本プロジェクトを実施する。</p> <p>(1) 今後導入が想定される ATF について、従来型燃料とは異なる燃料材料や燃料設計が燃料挙動や破損メカニズム等に与える影響を明らかにし、基準適合性の判断根拠に資する知見を取得する。</p> <p>(2) 現行基準では考慮されていない燃料損傷挙動が原子炉安全性・炉心冷却性等に与える影響を評価するために必要な技術知見を拡充し、LOCA、RIA 等に関する指針類の見直しの検討に資する。</p>
5. 知見の活用先	<p>本プロジェクトで得られた知見は、将来事業者により ATF 導入の申請があった際に、適合性審査において事業者が実施する安全性評価の妥当性を確認するための技術的根拠として活用する。また、最新知見の規制への反映として、必要に応じて現行の LOCA、RIA 等に関する指針類の見直し要否の検討に活用する。さらに、本プロジェクトにおける研究活動は、中長期的な規制課題に備え、職員の解析技術の向上及び燃料試験施設の維持につながる。</p>
6. 安全研究概要	<p>本プロジェクトの研究は、「原子力規制委員会における安全研究の基本方針」(令和元年5月29日原子力規制委員会決定)における安全研究のうち以下の分類に基づき実施する。</p> <p>①規制基準等の整備に活用するための知見の収集・整備(以下「分類①」という。)</p> <p>②審査等の際の判断に必要な知見の収集・整備(以下「分類②」という。)</p> <p>④技術基盤の構築・維持(以下「分類④」という。)</p> <p>(1)ATF 等の燃料損傷挙動等に関する研究【分類①②④】</p> <p>現在、ATF は種々の設計概念が提案され、開発が進められている。それらの中で、事業者により早期の導入が想定される ATF である Cr コーティング Zr 合金被覆管について、安全性評価の妥当性確認に資する知見を取得し、また、従来型燃料も含め BDBA 模擬条件における燃料棒損傷状態に関する知見を取得するため、以下の項目を実施する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ Cr コーティング Zr 合金被覆管(未照射材)を用いて LOCA(図 2)及び RIA(図 3)等の事故条件(温度、雰囲気、燃料棒内圧、熱・機械荷重)を模擬した試験を実施し、燃料の変形、破裂、高温酸化、水素吸収ガス発生及び被覆管への吸収、Cr-Zr 共晶、脆化挙動、損傷限界等についての知見を取得する。 ・ Cr コーティング Zr 合金被覆管及び通常の Zr 合金被覆管(共に未照射材)を用いて BDBA 模擬条件を含む高温下における、被覆管の強度や延性等機械特性及び損傷条件についての知見を取得する。 ・ BDBA 模擬条件における燃料棒損傷条件の評価、特に被覆管に作用する機械的負荷の種別及び程度の把握のため、照射済燃料ペレットの 1200℃超での加熱試験を実施し、高温での燃料ペレットの状態、膨張量、FP ガス放出量に関するデータを取得する。 ・ 上記で得られた被覆管及びペレット挙動の試験結果より、ペレット-被覆管の力学的相互作用の有無等を検討し、BDBA 模擬条件での燃料棒損傷状態を評価する。 ・ 上記で得られた被覆管挙動の試験結果を用いて被覆管高温挙動モデルを検証するとともに、同試験結果やペレット試験結果を用いて被覆管の破断・崩落モデル及びペレットのスウェリングモデル等を作成し、これらを用いることにより、BDBA 模擬条件での著しい炉心損傷状態を把握する手法を整備する。 <p>(2)高燃焼度燃料事故時挙動等に関する研究現行基準で考慮されていない事故時燃料損傷挙動に関する研究【分類①②④】</p> <p>FFRD 等の現行基準で考慮されていない燃料損傷挙動のうち、知見の蓄積が十分ではなく、かつ、原子炉の安全性に影響を与える懸念がある挙動について、データを拡充するため以下を実施する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 照射済 MOX 燃料を用いて LOCA 時の温度条件を模擬した加熱試験等を実施し、Pu の添加が LOCA 時の FFRD 挙動に与える影響、特にペレット細片化の度合いや FP ガス放出挙動との相関について調査する。さらに、Pu スポットが点在する MOX 燃料及び Pu スポットのない均一組織を持つ MOX 燃料の結果を比較し、Pu スポットの影響について把握する。 ・ 照射済燃料を用いて LOCA 時の温度、雰囲気、燃料棒内圧等条件を模擬した加熱試験等によりペレット細片化や被覆管膨れ部への移動・集積、放出量等のデータを取得し、また、国際共同研究プロジェクト(SCIP-4 等)で実施されている照射済燃料を用いた LOCA 模擬試験等で得られるデータと合わせることで、LOCA 時の被覆管到達温度、温度上昇速度等が FFRD 挙動に与える影響についての知見を取得する。 ・ 上記項目で取得した燃料試験データを用いて、FFRD に関わる挙動、特に被覆管の変形・破裂、ペレット細片化発生、被覆管膨れ部への移動・集積による局所温度増、その高温酸化への影響、ペレットの燃料棒外放出量を評価可能なモデルを実装した燃料挙動解析コードを検証するとともに、実機プラントの LOCA 解析を実施し、FFRD 発生の有無及び発生した場合の影響(特に、ペレット細片の再配置による線出力の増加及び炉内放出量等)を評価する。 ・ Pu スポットの点在する照射済 MOX 燃料を用いて RIA 時の急峻な核加熱と温度上昇を模擬した条件の実験を行い、UO₂ 燃料との比較により FP ガス放出挙動における MOX 燃料の特性を評価する。 ・ RIA 試験後における Pu スポットの状態を観察し、FP ガス放出挙動データと合わせて、Pu スポット内の微小 FP ガス気泡が RIA 時のペレット細片化に与える影響を検討する。 ・ LOCA 模擬試験により破裂及び高温酸化した被覆管試料(未照射材)を用いて繰り返し曲げ試験を行い、LOCA 後の地震に対する被覆管の折損強度を評価する。

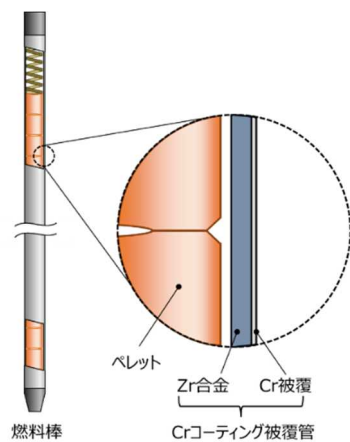


図1 Crコーティング Zr 合金被覆管の概念図

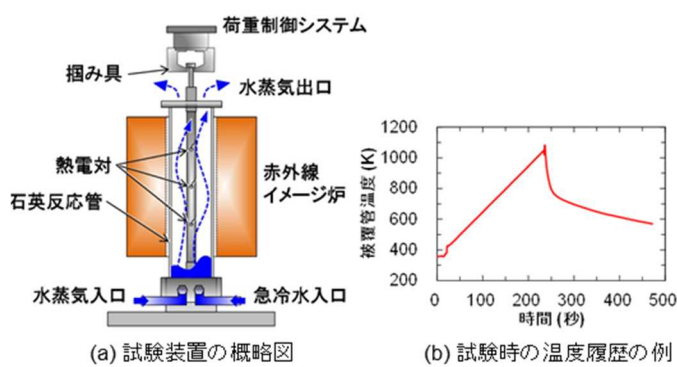


図2 LOCA 模擬試験の概要^[9]

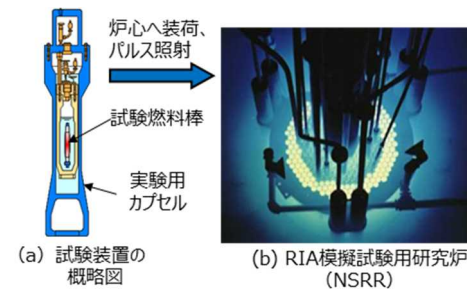


図3 RIA 模擬試験の概要^{[10],[11]}

7. 成果目標と実施計画

(1) ATF 等の燃料損傷挙動等に関する研究

成果目標: Crコーティング Zr 合金被覆管について、DBA からbdba 模擬条件の範囲において、燃料挙動や被覆管の損傷挙動に関する知見を取得する。特に、Cr-Zr 共晶反応等に注目して各種試験を実施し、Crコーティングの影響について知見を取得する。また、従来型燃料も含め、bdba 模擬条件における燃料棒損傷状態に関する知見を取得する。得られた成果は論文等にまとめ公表する。

実施計画: Crコーティング Zr 合金被覆管(未照射材)について、令和6年度から令和9年度にかけて、DBALOGA及びRIAの事故条件及びbdba 模擬試験を実施し、条件におけるCrコーティングの耐性及びCrとZrとの共晶反応、水素吸収がCrコーティング Zr 合金被覆管の安全性に及ぼす等の影響を調べる。また、1200℃超において被覆管の機械特性を測定する試験装置を製作し、bdba 模擬条件における被覆管の破損挙動に係るデータを取得する。さらに、1200℃超における照射済みペレットの膨張量、FPガス放出量等のデータを取得する。令和10年度に、それまで得られたDBAからbdba 模擬条件の範囲における燃料挙動や被覆管の損傷挙動についての試験結果から、審査における基準適合性の判断根拠とするための技術的知見を取りまとめる。また、解析コードに実装されている現行のbdba 条件での被覆管高温挙動モデルを検証するとともに、被覆管の破断・崩落モデル等を作成する。

(2) 高燃焼度燃料事故時挙動等に関する研究現行基準で考慮されていない事故時燃料損傷挙動に関する研究

成果目標: UO₂ 燃料及びMOX燃料のFFRD発生条件及びMOX燃料のPuスポットがFFRD及びRIA時燃料挙動に及ぼす影響に係る知見を取得する。また、FFRDを考慮した実機LOCA解析手法を整備する。さらに、LOCA後の地震に対する被覆管の折損強度を評価する。得られた成果は論文等にまとめ公表する。

実施計画: FFRD発生条件に係る知見の取得のため、令和6年度から令和9年度にかけて、照射済みUO₂燃料及び照射済みMOX燃料(Puスポットを持つ燃料及び持たない燃料)を用いてLOCA及びRIAを模擬した試験を行い、FFRD及びRIA時のFPガス放出挙動におけるPuスポットの影響等のデータを取得する。また、令和6年度から令和10年度にかけて、照射済みMOX燃料を対象とした各種事故模擬試験データを用いてLOCA・FFRDモデルを備えた燃料挙動解析コードを検証するとともに、実機プラントのLOCA解析に適用し、FFRD及びFFRD発生条件下におけるMOX燃料の介在が炉心冷却性に及ぼす影響を評価する。さらに、令和6年度及び令和7年度に、LOCA模擬試験により破裂及び高温酸化した被覆管試料(未照射材)を用いて、くり返し曲げ試験を行い、LOCA後の地震に対する被覆管の折損強度を評価する。令和10年度に、本プロジェクトにおいて得られたデータを取りまとめ、既存のデータと併せて現行基準の見直しの要否を検討する。

行程表

	令和6年度	令和7年度	令和8年度	令和9年度	令和10年度
(1) ATF 等の燃料損傷挙動等に関する研究	LOCA試験条件の検討及び資料の調達	LOCA試験の実施	LOCA,RIA試験の実施	LOCA,RIA試験の実施	試験後分析
	高温機械試験装置設計・一部製作	高温機械試験装置設計・一部製作	高温機械試験装置製作・試験実施	高温機械試験実施	照射後試験
		ペレット加熱試験調査・検討	ペレット加熱試験実施	ペレット加熱試験実施	コード検証、モデル化、総合評価
	▽論文投稿	▽論文投稿			▽論文投稿
(2) 高燃焼度燃料事故時挙動等に関する研究現	LOCA試験の実施(照射材)	LOCA試験の実施(照射材)	照射後試験	照射後試験	

	<p>行基準で考慮されていない事故時燃料損傷挙動に関する研究</p>	FGD 試験の実施	FGD 試験の実施	照射後試験	照射後試験	
		曲げ試験の実施	曲げ試験の実施	MOX ペレット加熱試験実施	MOX ペレット加熱試験実施	照射後試験
		実機 LOCA 解析手法の整備	実機 LOCA 解析手法の整備	実機 LOCA 解析手法の整備	実機 LOCA 時 FFRD 影響の検討	コード検証、モデル化、総合評価
8. 実施体制	<p>【システム安全研究部門における実施者(実施項目ごとに主担当者に○を記載)】</p> <p>江口 裕 主任技術研究調査官</p> <p>○福田 拓司 主任技術研究調査官(実施項目(2)関係)</p> <p>○山内 紹裕 副主任技術研究調査官(実施項目(1)、(2)関係)</p> <p>小澤 正明 技術参与</p> <p>秋山 英俊 技術参与</p>					
9. 備考	<p>文 献</p> <p>[1] 原子力エネルギー協議会、「事故耐性燃料(ATF)導入に向けた対応」、2022年12月12日、https://www.nra.go.jp/data/000413504.pdf</p> <p>[2] 山下真一郎、「原子力の安全性向上に資する技術開発事業での事故耐性燃料の開発」、事故耐性燃料開発に関するワークショップ、2022年12月21日 https://nsec.jaea.go.jp/ATFWS/pdf/2022w/atfws_material_5.pdf</p> <p>[3] Geelhood, K.G.; Luscher, W.G., "Degradation and Failure Phenomena of Accident Tolerant Fuel Concepts: Chromium Coated Zirconium Alloy Cladding", PNNL-28437, January 2019.</p> <p>[4] J. C. Brachet et al., "High Temperature Steam Oxidation of Chromium-Coated Zirconium-Based Alloys: Kinetics and Process" Corrosion Science 167, 108537 (2020).</p> <p>[5] J. Kim. et. al., "Effect of Cr coating on the mechanical integrity of Accident Tolerant Fuel cladding under ring compression test", Jour. Nucl. Mater. 585 (2023) 154603</p> <p>[6] US. NRC, "Supplemental Guidance Regarding the Chromium-Coated Zirconium Alloy Fuel Cladding Accident Tolerant Fuel Concept", ATF-ISG-2020-01</p> <p>[7] OECD/NEA, "Studsvik Cladding Integrity Project (SCIP)", https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_25445/studsvik-cladding-integrity-project-scip</p> <p>[8] Y. Taniguchi et al., "Behavior of High-burnup LWR-MOX Fuel under a Reactivity-Initiated Accident Condition", TopFuel2019, p551-558.</p> <p>[9] 成川隆文、「冷却材喪失事故時及び事故後の燃料被覆管の破損挙動に関する研究」、平成 29 年度 安全研究センター報告会、平成 29 年 11 月、https://www.jaea.go.jp/04/anzen/archives_seikahoukoku/h29/pre3_Narukawa.pdf</p> <p>[10] T. Mihara, K. Kakiuchi, Y. Taniguchi and Y. Udagawa, "Behavior of high-burnup BWR UO₂ fuel with additives under reactivity-initiated accident conditions", J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 60, No. 5, 2023.</p> <p>[11] 燃料安全研究グループ: 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 安全研究センター 燃料安全グループ研究内容、https://www.jaea.go.jp/04/anzen/group/fsrg/index.html</p>					

安全研究のプロジェクトごとの自己評価結果（事前評価） 地震動評価手法の信頼性向上に関する研究（R6～R10）

令和6年1月12日
原子力規制庁

1. 技術評価検討会における主な意見及びその対応

- 本プロジェクトは国内外の過去の研究、最新知見を踏まえて計画されており、また、実施内容方法についても適切とする意見があった。その一方、最新知見の参照が十分ではないとの意見もあった。そのため、今後も国内外の最新の研究動向を継続して調査した上で必要に応じて研究計画に反映していくこととする。
- 断層パラメータの不確かさを考慮した確率論的な地震動評価については評価誤差と物理的なばらつきとの区分が困難な点があるとの意見があった。解析手法の評価誤差の影響を確認し、認識論的不確かさの取り扱いを調査することとする。
- 震源を特定せず策定する地震動評価の精度向上において、距離減衰式（地震動予測式）の地盤補正項等の高精度化を行う意図を明確にする必要があるとの意見があった。「震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム」が課題として掲げた最近の観測記録の反映等に向けて研究を実施することとする。
- 距離減衰式におけるサイト特性等の不確かさの分析について、具体的な手法を明確にする必要があるとの意見があった。本研究では、国内外の研究動向を踏まえた最新の方法を検討し適切な評価方法を選定することとする。
- 詳細は別表参照

2. 事前評価結果

（1）研究内容の技術的妥当性：適 否

本プロジェクトは、実施内容及び手法についても適切とする評価を受けていることから、技術的に妥当と判断する。ただし、研究の遂行にあたり、最新の知見を継続調査し、必要に応じて研究計画に適宜反映していくこととする。

（2）研究計画案への反映

- 断層パラメータの不確かさを考慮した確率論的な地震動評価では、解析手法の評価誤差の影響を確認し、認識論的不確かさの取り扱いを調査することとした。
- 地盤補正項等の具体的な課題について明記することとした。
- 距離減衰式におけるサイト特性等の不確かさの分析では、国内外の研究動向を踏まえた最新の方法を参照することとした。
- 本プロジェクトの名称については、研究計画の実施内容により即した「手法の信頼性向上」に変更するとともに、関連する記載を修正した。
- 詳細は別表参照
- 上記を踏まえた研究計画（案）は別添参照

地震動評価の精度向上に関する研究¹に対する外部専門家の
評価意見及び専門技術者の御意見並びに回答

(外部専門家から頂いた評価意見及び回答)

No.	評価項目	評価意見	回答
糸井 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	断層モデルを用いた確率論的な地震動シミュレーションについては、米国の SCEC の事例などもありますが、現状参照されておらず、最新知見を踏まえているとは言いきれないと考えます。	米国の SCEC の PSHA Platform では、最初は南カリフォルニアを対象とした 3 次元速度構造モデルに基づく 2 秒までの長周期地震動を理論計算し (Graves et al., 2010)、その後、理論計算には周期 1 秒までに改善するとともに、周期 1 秒以下の短周期地震動について統計的グリーン関数法に基づいた Graves & Pitarka(2004) 手法を用いて計算しています (Callaghan et al., 2022)。ただし、Graves & Pitarka(2004) 手法を始め海外で提案した手法は基準地震動策定に用いた断層モデル法に比べて特に震源モデルの設定について顕著に異なっているため、前フェーズのプロジェクトでは、Graves & Pitarka(2004) 手法の提案者から協力を得て、日本の断層モデル法と融合し地震動評価を実施したことがあります。 ご指摘を踏まえ、「 <u>国内外の研究動向を踏まえつつ</u> 」旨、研究計画 (案) の背景に追記し、上記 SCEC 関連の国外文献を 2 編追記しました。また、最新知見の参照に当たっては、今後も、国内外の最新の研究動向を継続して調査した上で必要に応じて研究計画に反映していくと考えています。
2	② 解析実施手法、実	震源を特定せず策定する地震動評価の精度向上において、地震動予測式の地盤補正項などの高精度化を行う意図がわかり	「震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム」では、地中地震計位置におけるはざとり波の応答スペクトルを、

¹ 自己評価に基づき、安全研究プロジェクトの名称は「地震動評価手法の信頼性向上に関する研究」に修正している。

No.	評価項目	評価意見	回答
	<p>験方法が適切か。</p>	<p>ません。意図を明確にすることが必要と 考えます。</p>	<p>地震基盤相当面の大きさに補正するために、Noda et al. (2002)の距離減衰式の地盤補正項を用いて「地盤物性補正」を行いました（研究計画（案）の図1③右）。同検討チームでは、このNoda et al. (2002)の地盤補正項では最近の観測記録が使用されていないことが課題であるため、最新知見を考慮した中長期的な調査・研究を行い、補正方法の妥当性を確認することが重要であるとされました。また、「震源距離補正」（図1③左）、「標準応答スペクトルの妥当性確認」（図1④）等においても距離減衰式を用いており、中長期的に距離減衰式に係る調査・確認を行うことが課題とされました。</p> <p>以上の経緯及び高精度化の意図を明確にするために、以下とおり「研究計画（案）」に下線部分を追記しました。</p> <ul style="list-style-type: none"> - 「3. 背景」（1）8-10行目：「…補正処理等に用いる距離減衰式の最新知見を考慮した精度向上について、技術基盤グループの安全研究として取り組むべきとの整理がなされた⁽¹⁾。」 - 「6. 安全研究概要」（1）3-4行目：「…距離減衰式を用いた補正処理手法の最新知見を考慮した精度向上については中長期課題として整理された。」 <p>令和5年度までのプロジェクトでは、上記課題を踏まえて、文献調査を行い、最近の観測記録を用いて、応答スペクトルの補正処理等に利用可能な「地盤補正項を考慮した距離減衰式」を試作して従来手法の妥当性確認を試みましたが、大量データ（はぎとり波）の整備に時間を要し課題も多く残るため、令和6年度以降のプロジェクトにて継続して研究する計画としています。このことを明確にす</p>

No.	評価項目	評価意見	回答
		<p>課題 3-2 の一回り小さい地震については、図 13 の①で固有規模の地震とされている部分について認識は正しいでしょうか。連動を考えると、固有地震という考え方が適切かどうかも吟味が必要と思います。また、連動から一回り小さい地震まで含めてモデル化を行う方が、海溝型地震のモデル化とも整合するようと思います。一例ですが、一回り小さい地震という限られた検討を行うのではなく、活断層における震源のモデル化全体に対する研究として取り組まれる方がより適切と考えます。</p> <p>「【課題 3-2】原子力サイトの地盤に適用可能な距離減衰式におけるサイト特性等の不確かさの分析を行う（図5②）」と書かれていますが、どのような手法を用いるのか書かれていませんので、適切かは評価不能です。</p>	<p>るために「研究計画（案）」の「6. 安全研究概要」(1)の該当箇所に「<u>はざとり解析手法及び距離減衰式に係る調査・試験等</u>」（下線部分）を追記しました。</p> <p>固有規模の地震としている部分は、地震本部と同様に、個々の断層またはそのセグメントからはほぼ同じ（最大もしくはそれに近い）規模の地震を繰り返し発生させる地震を想定しています。地震本部で評価された主要活断層帯は、起震断層を活動単位とした地震を固有地震としてモデル化しているため、複数のセグメントで構成される主要活断層帯で発生する最大規模を固有地震と呼称しています。本研究では、地震本部の主要活断層帯を基本にしつつ、複数のセグメントが連動する以外に個別に活動する場合の地震規模と発生頻度の関係も調査を進めたいと思います。また、ご指摘のとおり、一回り小さい地震だけに着目するのではなく、活断層の震源モデルの全体に対して研究に取り組む予定であり、研究計画案「6. 安全研究概要」の中に、「固有規模よりも一回り小さい地震も発生しており、地震活動全体のモデル化に課題がある」に修正しました。</p> <p>【課題 3-2】について、令和 5 年度までは文献調査により距離減衰式のある特定地点への補正方法として国内で適用例のある手法（Morikawa et al., 2008）を参考として KiK-net 観測点を対象に分析を試みました。サイト特性等の不確かさを分析する方法として、近年では観測点毎に距離減衰式の中央値の補正值と標準偏差をそれらの観測データから推定する方法（Rodriguez-Marek et al, 2011）、観</p>

No.	評価項目	評価意見	回答
			<p>測記録のない地点においても距離減衰式の中央値と標準偏差を変動係数モデルにて予測する方法 (Landwehr et al, 2016) 等に係る多くの文献が公表されているため、本プロジェクトではこうした国内外の研究動向を調査した上で、使用する記録の性質なども考慮して原子力サイトの地盤に適用可能な距離減衰式におけるサイト特性等の不確かさの分析方法を決定する必要があると考えています。以上を踏まえ、「研究計画(案)」の「6. 安全研究概要」(3)に「<u>令和5年度までに、KiK-net の記録を対象に国内での適用例がある手法⁽¹⁶⁾を参考に、既往の距離減衰式のある特定の単一地点に補正することを試みたが、</u>」及び「<u>国内外の研究動向を踏まえつつ^(17,18)、</u>」を追記しました。</p>
3	<p>③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。</p>	<p>検討会中にも申し上げましたが、課題2-1の震源パラメータの不確かさの評価について、どのように取り組むのか計画には書かれていませんので、評価手法が適切かは判断できませんが、評価誤差と物理的なばらつきを区別するのは大変困難ではないかと考えます。</p>	<p>震源パラメータの不確かさを考慮した断層モデル法に基づいた計算地震動に対して、パラメータの選定及びそれらの確率分布モデルの設定、並びにパラメータ間の相関の有無を含めて各条件での計算結果を観測地震動のばらつきと比較・検証し、観測と整合的な設定方法を整備したいと考えています。</p> <p>ご指摘の通り、解析手法の評価誤差(認識論的不確かさ)と元の地震動に内在する物理的ばらつきを区別するのは困難であるため、こうした認識論的不確かさの存在を意識しつつ、例えば、統一した解析手法によるデータのばらつき、複数手法によるばらつき、両者の間の系統的な相違の有無を確認した上で、ハザード評価の際にこのような認識論的不確かさの取り扱いについても検討する必要があると考えています。</p> <p>ご指摘を踏まえ、「研究計画(案)」の「7. 成果目標と実施計画」の「(2) 敷地ごと</p>

No.	評価項目	評価意見	回答
			<p>に震源を特定して策定する地震動評価の精度向上」の中の該当部分について、「国内外の研究動向を踏まえつつ、解析手法による影響の調査」及び「認識論的不確かさの取り扱いを含めて震源パラメータの確率分布モデルを検証し」を追記しました。</p>
4	④ 重大な見落とし（観点の欠落）がないか。	<p>断層モデルを用いた断層パラメータの不確かさを考慮した確率論的な地震動評価に取り組むにあたっての問題意識（課題2-1）は、2007年新潟県中越沖地震などの教訓を踏まえてパッチワーク的に精緻化が進められてきた従来の手法に対する説明性を向上する（合理的なモデル設定を実現する）ために重要と考えます。一方で、説明資料のP10にあるばらつきの分析については、図がergodicなばらつきの分布の検討をするように見え、もしそうであれば適切ではないと考えます。</p>	<p>説明資料のP10の図では、震源特性による地震動のばらつきについて調査の流れを表していますが、実際の地震動計算では、共通の水平成層速度構造モデルを用いるため、(3次元速度モデルによる)伝播経路特性やサイトごとの地盤増幅特性に起因するばらつきが対象にされず、ergodicなばらつきの分布の検討をするものではありません。</p> <p>また、図中の「③評価地点の設定」のように、複数地点において同じ地下構造速度を用いて評価する場合は、単一観測点での異なる方位や距離に対応する複数震源からの地震動評価に相当すると考え、地震動計算の効率化を図ります。</p> <p>なお、ばらつきの非エルゴド性の分離度合いにもよりますが、例えば、方位別の震源影響について観測事実があれば、上記の計算結果を方位別に整理し比較することも可能であると考えています。</p>
5	その他	<p>パワーポイント P3 に誤記（応答スペクトル）がありますので、修正ください。</p> <p>「距離減衰式」という表現は「地震動予測式」あるいは「地震動(予測)モデル」といった表現を用いるほうが適切ですので、資料を修正いただいた方がよいと思います。</p>	<p>ご指摘頂いた説明資料(参考資料1)における誤記を修正し、HP上の資料を修正版に差し替えます。</p> <p>「距離減衰式」という表現は、現行の「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」等における表現に合わせていますが、最近のご指摘の表現で呼ばれることも多いため、説明資料(参考資料1)のP3(1)7行目及び「研究計画(案)」の「3.背景」(1)に「(「地震動予測式」及び「地</p>

No.	評価項目	評価意見	回答
		震源を特定せず策定する地震動については、応答スペクトルベースで統計処理検討されており、多くの研究が、地震動予測としてしての研究にとどまっていますが、実際に例えば、M6 程度以下の地震が直下で発生した際に、原子力施設にどのように安全上重要な被害が起こりうるのかについての検討についてあまり検討されていません。地震動予測に関する研究に加えて、そのような原子力安全の観点からの研究を行っていただくと、安全への影響の全体像が把握できるのではないかと思います。	「 <u>震動モデル</u> 」とも呼ばれる。)」を追記し、説明資料は HP 上の資料を修正版に差し替えます。 地震動に対する原子力施設の安全上重要な被害に係る検討については、別のプロジェクトが分担しています。将来的には、別プロジェクトとの連携も含め、検討したいと思います。
鎌滝 孝信 氏			
1	① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか	参考文献等により、国内外の過去の研究、最新知見を踏まえた研究計画と考えられます。また、以前（原子力安全基盤機構の頃）、国内外の最新知見を収集されていたと記憶しておりますが、現在もそれを継続しているようでしたら問題はないと思います。	技術基盤グループ最新知見等の反映プログラムに沿って、国内外の最新知見の収集を継続しています。
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	現段階では解析実施手法等適切と考えます。	—
3	③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	現段階では適切と考えます。	—
4	④ 重大な見落とし（観点の	配付資料および研究計画をご説明いただいた限りでは、現時点で重大な見落としや観点の欠落はないように思います。	—

No.	評価項目	評価意見	回答
	欠落)がないか。		
5	その他	—	—
酒井 直樹 氏			
1	① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか	地震調査研究推進本部や土木学会等の第三者機関の指摘も踏まえて計画をしており、問題ないと評価できる。	—
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	「地域性を考慮する地震動」として特定の地域において精度の高い地盤特性を評価しようとしているが、そこで用いる各観測点のデータは地震計が設置されている地形の影響等も受けることが考えられることから、そのような観点もいれて評価する必要があるのではないか。	研究計画案の「1. 背景」に書いたように、地盤の非線形のほか、地震計の設置場所によって地震動が地形の影響も受けていることを認識しており、ご指摘の地形の影響評価について、本研究の対象課題の1つとして検討することを考えています。
3	③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	確率論的地震ハザード評価のところでは、地震モデルの設定や補正した距離減衰式を使って計算するので、影響の度合いを把握するとともに、各パラメータの感度を分析評価をすることも重要ではないか。	ご指摘のとおり、主要パラメータのハザード解析結果への感度の把握が重要であることは認識しています。それらのパラメータの感度分析を行い、ハザードへの影響度を把握したいと考えています。
4	④ 重大な見落とし(観点の欠落)がないか。	特にないと考えられる。	—
5	その他	5年間続く研究計画の年表では、定量的な「指標」や定性的でも「こういうことを段階的に明らかにする」というような各段階での具体的な目標が必要でないか。	拝承します。 行程表には、「地域性を考慮する地震動」を例に、R6 記録精査・手法調査、R7 適用解析・整理、R8 地震動評価・整理、R9 比較検証・整理、R10 手法まとめ・課題整理、というように段階的に実施することにします。また、研究計画は年度ごとに更新する予定であり、各段階で得た成果を含めて最新知見を研究計画に適時に反映するよう努めます。

(専門技術者から頂いた御意見及び回答)

No.	評価項目	御意見	回答
梅木 芳人 氏			
1	① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか	—	—
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	「(2) 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動の制度向上」について、『不確かさの考慮＝確率論』と手法を限定しているように見えます。既往の事例をしっかりと分析したうえで、統計的な検討など幅広く検討した方が良いと思います。	「研究計画(案)」の「1. 背景」に記載の通り、決定論においても不確かさの考慮を行っているとは認識しています。また、本課題では、統計処理に基づく断層パラメータの確率分布モデルの作成と個々の断層パラメータ間の相関を考慮したパラメータ設定手法の適用を計画しており、これら知見は決定論的手法においても参考になると考えています。
3	③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	—	—
4	④ 重大な見落とし(観点の欠落)がないか。	—	—
5	その他	全体的に、目的が「精度向上を図る」となっていますが、NRA 研究の最終目標は「成果の規制審査への活用」と認識しています。個別研究目的と最終目標との関係性を明確にされた方が良いと思います。	ご認識のとおりです。研究計画(案)では、「4. 目的」欄に個別研究目的を、「5. 知見の活用先」欄に最終目標との関係を記載しています。

No.	評価項目	御意見	回答
土志田 潔 氏			
1	① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか	<p>全般への意見として、本プロジェクトでは、複数の項目において、地震 PSHA や PRA への適用も視野に計画が立案されており、成果が多方面に活用される事が期待できる。</p> <p>「課題 2-1)について、震源モデルの偶発的な不確かさに加え、モデル設定の違いも比較する事が計画されており、挑戦的な内容となっていると考えられる。</p>	—
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	—	—
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>課題 3-1、固有規模地震より一回り小さい地震については、固有規模地震との重複を避ける必要がある。詳細な検討を行う事により、結果として PSHA に至るのではないか。</p>	<p>ご指摘のとおり、活断層で発生する地震を対象に、固有地震、固有地震より一回り小さい地震、中小地震の地震規模と発生頻度の関係を調査した上で、それぞれ重複することなく震源をモデル化し、PSHA を行う予定です。</p>
4	④ 重大な見落とし（観点の欠落）がないか。	<p>全般への意見として、地震 PRA や地震と他の事象が重畳する PRA における寄与率が高い事項を選定し、研究項目を設定することが考えられる。</p>	<p>地震 PRA などに係る研究を実施している部門と連携を図った上で、将来的な展開として検討したいと思います。</p>
5	その他	—	—
松山 昌史 氏			
1	① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか	—	—
2	② 解析実施手法、実	—	—

No.	評価項目	御意見	回答
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>(3) 確率論的地震ハザード評価の精度向上【分類①④】</p> <p>固有地震より一回り小さな地震における、小さいという基準はどう量化されるのか。その点に言及した上で研究を進める必要がある。</p> <p>一回り小さな地震を考慮することにより、考慮前の固有地震の考え方による確率論的地震ハザード評価において、地震規模や発生頻度の不確かさについてダブルカウントにならないように注意すべきである。不確かさを整理した上で、この研究による不確かさの定量的な変化を示すべきである。</p>	<p>本研究で扱う「固有地震より一回り小さい地震」は、伊方 SSHAC プロジェクトで検討されたように、地震本部の「地表の証拠からは活動の痕跡を認めにくい地震」として扱い、地震規模 Mw6.4 前後と考えています。</p> <p>ご指摘のとおり、活断層で発生する地震を対象に、固有地震、固有地震より一回り小さい地震、中小地震の地震規模と発生頻度の関係を調査した上で、それぞれ重複することなく震源をモデル化した PSHA を行い、一回り小さな地震の考慮の有無を定量的に把握したいと思います。</p>
4	<p>④ 重大な見落とし（観点の欠落）がないか。</p>	<p>別添「今後推進すべき安全研究の分野及びその実施方針」においてリスク情報の活用が記載されています。これまでの基準地震動や基準津波等の決定論的な設計基準（これもリスク情報）に加えて、PRA などの確率論的な評価（リスク情報）を加えることにより、多くのシナリオを踏まえた定量的リスク評価が加わり、原子力発電所の安全性を高めて運用するための意思決定に重要な役割を担います。</p> <p>リスク情報の活用において、事業者が実施したレベル 1PRA の妥当性の判断を行うためのレビューが規制側には必要になる。その中にレベル 1 地震 PRA も含まれる。そのために、必要な研究項目が入っているのか精査すべきではないか。例えば、地震動評価の精度向上のみならず、評価された地震動を基にフラジリティ評価に活用するための入力地震動の妥当性</p>	<p>ご指摘のとおり、地震動評価では決定論的な評価に加えて、確率論的な評価への応用も目的としているため、レベル 1PRA に係る研究を実施している部門と連携を図った上で、将来的な展開として検討したいと思います。</p>

No.	評価項目	御意見	回答
		の確認技術などが挙げられる。このように地震 PRA における地震ハザード評価関係技術のレビューに必要で、現在欠けているもしくは不十分な技術に関する研究を抽出して、取り組む必要がある。	
5	その他	—	—

別添

**事前評価対象安全研究プロジェクトの研究計画
(技術評価検討会での議論を踏まえ朱記修正)**

研究計画（案）

<p>1. プロジェクト (始期：R6年度 終期：R10年度)</p>	<p>1. 地震動評価手法の信頼性の精度向上に関する研究</p>	<p>担当部署</p>	<p>技術基盤グループ 地震・津波研究部門</p>
<p>2. カテゴリー・研究分野</p>	<p>【横断的原子力安全】 A) 外部事象（地震、津波、火山等）</p>	<p>担当責任者</p>	<p>内田淳一 統括技術研究調査官 呉 長江 上席技術研究調査官 儘田 豊 主任技術研究調査官 田島礼子 主任技術研究調査官 藤田雅俊 副主任技術研究調査官</p>
<p>3. 背景</p>	<p>「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」（以下「規則解釈」という。）では、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動」をそれぞれ評価し、超過確率を参照した上で、基準地震動を策定することを求めており、最新の研究動向等を踏まえて地震動評価手法の信頼性精度向上を図り、規則解釈等の改正に資する知見を蓄積することが重要である。また、原子力規制検査においてはリスク情報の活用が進みつつあるため、確率論的リスク評価の構成要素の1つである確率論的地震ハザード評価（以下「PSHA」という。）手法の信頼性精度向上が重要となる。上記の「震源を特定せず策定する地震動」、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及びPSHAの3項目について、以下のとおり原子力規制に係る背景及び研究課題を述べる。</p> <p>(1) 震源を特定せず策定する地震動の評価 規則解釈では、「震源を特定せず策定する地震動」について、「震源と活断層を関連づけることが困難な過去の内陸地殻内の地震について得られた震源近傍における観測記録を収集し、これらを基に、各種の不確かさを考慮して敷地の地盤物性に応じた応答スペクトルを設定し策定すること」とし、その中で「全国共通に考慮すべき地震動」（モーメントマグニチュード(Mw) 6.5程度未満）及び「地域性を考慮する地震動」（Mw6.5程度以上）の2種類を検討対象とすることを求めている。 前者の「全国共通に考慮すべき地震動」については、原子力規制委員会が設置した「震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム」（以下「検討チーム」という。）において、震源近傍の内陸地殻内地震の観測記録に基づき標準応答スペクトルが策定され⁽¹⁾、⁽²⁾、令和3年に規制に取り入れられた。一方、検討チームでは、標準応答スペクトルに係る中長期課題として、新たな観測記録の蓄積並びに解放基盤面上の地震動算出（以下「はぎとり解析」という。）の手法及び補正処理等に用いる距離減衰式（「地震動予測式」及び「地震動モデル」とも呼ばれる。）の最新知見を考慮した精度向上について、技術基盤グループの安全研究として取り組むべきとの整理がなされた⁽¹⁾。安全研究プロジェクト「震源近傍の地震ハザード評価手法の高度化に関する研究」（令和2年度～令和5年度）では、新たに起きた地震の観測記録（5年間分）の収集・追加解析を行い標準応答スペクトルへの影響を確認するとともに、はぎとり解析手法及び距離減衰式に係る調査、試検討等を実施し、それらの結果と残された課題を整理した。今後、これらの検討を踏まえて継続的に最新知見の蓄積・反映を行うことが重要である。 後者の「地域性を考慮する地震動」については、「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」で、平成12年鳥取県西部地震及び平成20年岩手・宮城内陸地震を検討対象地震として例示している。ただし、これら2つの地震の一部の観測点において、特に地表の観測記録に地形、地盤の非線形等による影響が含まれているため、原子力施設の立地サイトのような硬質地盤の解放面における地震動の算定が困難である等の課題があり、事業者は課題の解決に時間を要している。</p> <p>(2) 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動の評価 「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の評価に関して、断層モデルを用いた手法（以下「断層モデル法」という。）及び応答スペクトルに基づく手法の2つの手法がある。断層モデル法は、強震動を再現するために必要な震源の特性を主要なパラメータで表した震源モデルを「特性化震源モデル」として設定することにより、震源を特定して策定する地震動を詳細に評価できる手法である。規則解釈では、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」として策定する基準地震動に対し、内陸地殻内地震、プレート間地震及び海洋プレート内地震を検討用地震とした地震動評価について、「敷地における地震動評価に大きな影響を与えると考えられる支配的なパラメータについて分析した上で、必要に応じて不確かさを組み合わせるなどの適切な手法を用いて考慮すること」とされている。一方で、断層モデル法の方法論である地震調査研究推進本部の「震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）」⁽³⁾は、最新の知見に基づき最もあり得る地震と地震動を評価するためのものであり、上記のパラメータの不確かさの分析や組み合わせの考慮については定めていないため、技術基盤グループの安全研究として取り組むことが重要である。 安全研究プロジェクト「震源近傍の地震ハザード評価手法の高度化に関する研究」（令和2年度～令和5年度）では、近年、国内で起きた内陸地殻内地震並びに海外で起きたプレート間地震及び海洋プレート内地震に係る地震動解析⁽⁴⁾、⁽⁵⁾を行い、震源断層パラメータの不確かさや震源断層パラメータの既往の経験式との整合性等に関する知見を蓄積してきた⁽⁶⁾、⁽⁷⁾。ただし、震源モデルの不確かさの取扱いについては、主要パラメータの不確かさを考慮したモデルを構築して地震動解析を行い現行手法の保守性を検証する決定論的な解析に留まっており、全体を俯瞰したモデル設定の合理的な説明が不足しているとの課題がある。そのため、確率論的な視点から、国内外の研究動向を踏まえつつ、パラメータ間の相関性等を合理的に考慮することにより、観測地震動のばらつきと調和させた地震動評価を行うことが重要である⁽⁸⁾、⁽⁹⁾、⁽¹⁰⁾、⁽¹¹⁾。また、断層極近傍の地震動評価において、地震調査研究推進本部で公表した2016年熊本地震の観測記録に基づく断層モデル法の検証の中間報告⁽¹²⁾では、浅部断層破壊のモデル化を含めて断層極近傍へ適用可能な地震動評価手法の検討が課題として挙げられており、関連の研究動向を反映した評価手法を適時に検討することが重要である。</p> <p>(3) 確率論的地震ハザード評価 原子力規制庁が策定した「原子力規制検査において使用する事業者 PRA モデルの適切性確認ガイド」（以下「確認ガイド」という。）では、原子力規制検査で用いるリスク情報を取得する際、事業者が「発電用原子炉施設の安全性の向上のための評価」のために作成した確率論的リスク評価（以下「PRA」という。）モデルの適切性を確認することとしている。PRA から得られるリスク情報は、様々な内部事象及び外部事象（地震を含む）におけるリスクを考慮すべきであるものの、これら事象の PRA 手法が実用に資する</p>		

	<p>レベルに必ずしも到達していないことから、確認ガイドでは、これら事象を確認項目にせず、今後これら実施手法の成熟度の進捗に応じ、段階的に確認範囲を拡張していくこととしている。地震に対する PRA 実施手法の構成要素である PSHA 手法について、特に他機関や事業者が検討していないような原子力規制に係る観点に着目し、地震発生モデル、地震動特性等における不確かさを適切に評価して同手法の信頼性向上を図り、将来的に原子力規制検査の確認ガイドの改正、「発電用原子炉施設の安全性の向上のための評価」に係る事業者届出書の確認方法の向上等に資する知見を蓄積することが重要である。</p> <p>安全研究プロジェクト「震源近傍の地震ハザード評価手法の高度化に関する研究」（令和2年度～令和5年度）では、活断層による地震を対象に、従来の同じ規模の地震が繰り返し発生する固有地震モデルではなく、固有規模に不確かさを考慮した地震発生モデルについて調査・解析を実施した。その中で、活断層における固有の地震規模よりも一回り小さい地震（地震規模 Mw6.4 前後）のモデル化上の取扱い、震源を予め特定しにくい地震等のような領域震源として扱う地震のモデル化方法等についても課題があることが分かった⁽¹³⁾。</p> <p>また、PSHA に影響を及ぼす各種不確かさの中では、地震動を推定する距離減衰式のばらつきの寄与が最も顕著であることが知られている⁽¹⁴⁾。特に現行の距離減衰式は広域かつ複数観測点のデータから回帰しており、単一サイトの地震動のばらつきが評価されていないため、原子力施設のような特定地点の PSHA への適用性について課題がある。この課題は国際的に注目され、IAEA の個別安全指針「原子炉等施設の立地評価における地震ハザード」（SSG-9）⁽¹⁵⁾においても取り上げられている。令和5年度までは、既存の距離減衰式を対象に単一サイトのばらつき評価について調査、比較検討等を実施した。今後、原子力施設の立地サイトに適用する距離減衰式の精緻化の一環として、上記「震源を特定せず策定する地震動」で検討したはざとり解析結果等の活用を含めて単一サイトのばらつき評価を実施することが重要である。</p>
4. 目的	<p>本プロジェクトでは、「震源を特定せず策定する地震動」及び「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の評価手法の調査を行って技術的知見を蓄積するとともに、確率論的地震ハザード評価手法の改善を行い、地震動評価手法の信頼性精度を向上することを目的とする。</p> <p>(1) 震源を特定せず策定する地震動評価手法の信頼性精度向上</p> <p>震源を特定せず策定する地震動のうち、全国共通に考慮すべき地震動（Mw6.5 程度未満）の標準応答スペクトルに関する新たな観測記録の追加解析、最新知見を反映した手法に係る分析等を行うとともに、地域性を考慮する地震動（Mw6.5 程度以上）の評価手法を調査・整備し、地震動評価手法の信頼性精度向上を図る。</p> <p>(2) 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動評価手法の信頼性精度向上</p> <p>確率論的手法を用いた断層モデル法を調査し、震源パラメータの設定における不確かさの取扱いに係る知見を蓄積するとともに、地表に地震断層が現れた内陸地殻内地震の地震動検証解析等を実施することにより、敷地ごとに震源を特定して策定する地震動評価手法の信頼性精度向上を図る。</p> <p>(3) 確率論的地震ハザード評価手法の信頼性精度向上</p> <p>活断層で発生する地震及び領域震源として扱うような地震の規模・発生頻度等のモデルの設定手法、及び地震動におけるサイト特性等の不確かさの適切な評価方法を調査・分析し、確率論的地震ハザード評価手法の信頼性精度向上を図る。</p>
5. 知見の活用先	<p>本プロジェクトの項目(1)、(2)及び(3)で得られた成果は、NRA 技術ノート、論文等を作成することより、「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」別記2第4条第5項、「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」及び「原子力規制検査において使用する事業者 PRA モデルの適切性確認ガイド」の改正に資するとともに、「発電用原子炉施設の安全性の向上のための評価」（核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第43条の3の29）に対応した事業者届出書の確認に活用される。</p>
6. 安全研究概要 (始期：R6 年度) (終期：R10 年度)	<p>本プロジェクトの研究は、「原子力規制委員会における安全研究の基本方針」（令和元年5月29日原子力規制委員会決定）における安全研究の目的のうち以下の分類に基づき実施する。</p> <p>① 規制基準等の整備に活用するための知見の収集・整備（以下「分類①」という。）</p> <p>④ 技術基盤の構築・維持（以下「分類④」という。）</p> <p>(1) 震源を特定せず策定する地震動評価手法の信頼性精度向上【分類①】</p> <p>「震源を特定せず策定する地震動」のうち「全国共通に考慮すべき地震動」（Mw6.5 程度未満）については、令和元年に検討チームにおいて、震源近傍の多数の記録の統計処理結果に基づいて地震基盤相当面における標準応答スペクトルを策定したが（図1）、新たな観測記録の蓄積及びはざとり解析・距離減衰式を用いた補正処理手法の最新知見を考慮した精度向上については中長期課題として整理された。令和5年度までに、新たな記録の収集・追加解析（5年間分）、最新知見等を考慮したはざとり解析手法及び距離減衰式に係る調査・試検討等を実施し、更なる観測記録の蓄積及び検討手法に係る残された課題の解決が重要であることが分かった。そこで、本研究では、これまでに対象とした平成12年から令和4年までの期間よりも後に起きた内陸地殻内地震の観測記録の収集・追加解析を継続的に実施して定期的に標準応答スペクトルへの影響確認を行うとともに、はざとり解析手法及び距離減衰式（補正処理等に使用）に対して最新知見等を反映するための調査、分析、適用解析等を実施し、標準応答スペクトル評価の精度向上を図る（図2）。また、「地域性を考慮する地震動」（Mw6.5 程度以上）については、対象地震の地震動観測記録を精査・解析するとともに、適切な観測記録のない地域にも適用可能な確率論的手法等に基づいた地震動評価結果と比較検討を行うことにより、地域性を考慮する地震動の評価手法の適用性を確認する。以上により、震源を特定せず策定する地震動評価手法の信頼性精度向上を図る。</p> <p>(2) 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動評価手法の信頼性精度向上【分類①】</p> <p>断層モデル法は、「特性化震源モデル」を用いて観測地震動を詳細に再現できる手法であり、各サイトの基準地震動を策定する際、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の評価に採用されている。令和5年度までは、近年、国内外で起きた地震の地震動解析を行い、震源断層パラメータの不確かさや既往の経験式との整合性等に関する知見を蓄積してきた。ただし、震源モデルの不確かさの取扱いについて、主要パラメータの不確かさを考慮したモデルを構築して地震動解析を行うことにより現行手法の保守性を検証する決定論的な解析に留まっている。そこで、本研究では、震源断層パラメータの設定における不確かさの取扱い等におい</p>

て、断層モデル法の PSHA への適用手法を整備し、全体を俯瞰した上でモデル設定の合理的な方法の提示を図る（図3）。また、断層極近傍の地震動評価手法の信頼性精度向上のため、特に浅部断層破壊のモデル化について、地震調査研究推進本部の動向等を踏まえつつ、地表に震源断層が現れた内陸地殻内地震の地震動の検証解析等を実施する（図4）。

(3) 確率論的地震ハザード評価手法の信頼性精度向上【分類①④】

PSHA は基準地震動策定において超過確率を参照するために実施され、対象サイトで生じる地震・地震動の不確かさが適切に考慮されていることが重要となる。従来は、活断層で発生する地震に対しては、想定される固有規模を主な対象としてその規模と発生確率がモデル化されてきたが、近年、固有規模よりも一回り小さい地震も発生しており、地震活動全体のモデル化に課題がある。また、震源を予め特定しにくい地震等の領域震源のモデル化方法についても対象地震や規模の設定等について課題がある。一方、地震動を推定する距離減衰式については、令和5年度までに、KiK-net 観測点を対象に国内での適用例がある手法⁽¹⁶⁾を参考に、既往の距離減衰式をある特定の単一地点に補正することを試みたが、原子力サイトのような硬質な地盤を対象としたサイト特性等に関する研究事例が十分とは言えず、更なる知見の蓄積が重要である。以上を踏まえ、本研究では、活断層で発生する地震及び領域震源として扱うような地震を対象に地震発生モデルや震源モデルの設定手法を整備するとともに、国内外の研究動向を踏まえつつ^(17,18)、原子力サイトの地盤に適用可能な距離減衰式におけるサイト特性等の不確かさの分析を行う。また、本研究での分析結果を反映した PSHA を行い、その影響度合いを分析する（図5）。

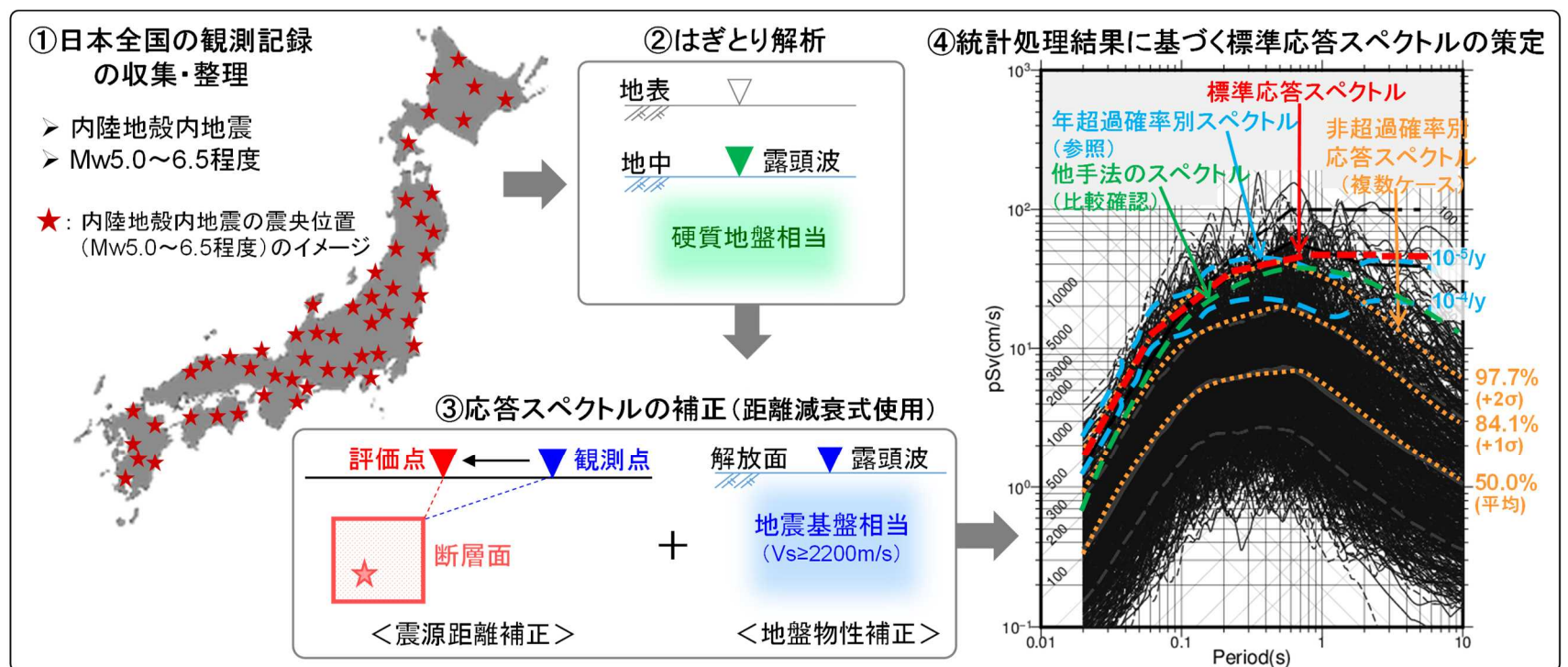


図1 震源を特定せず策定する地震動の標準応答スペクトルの検討

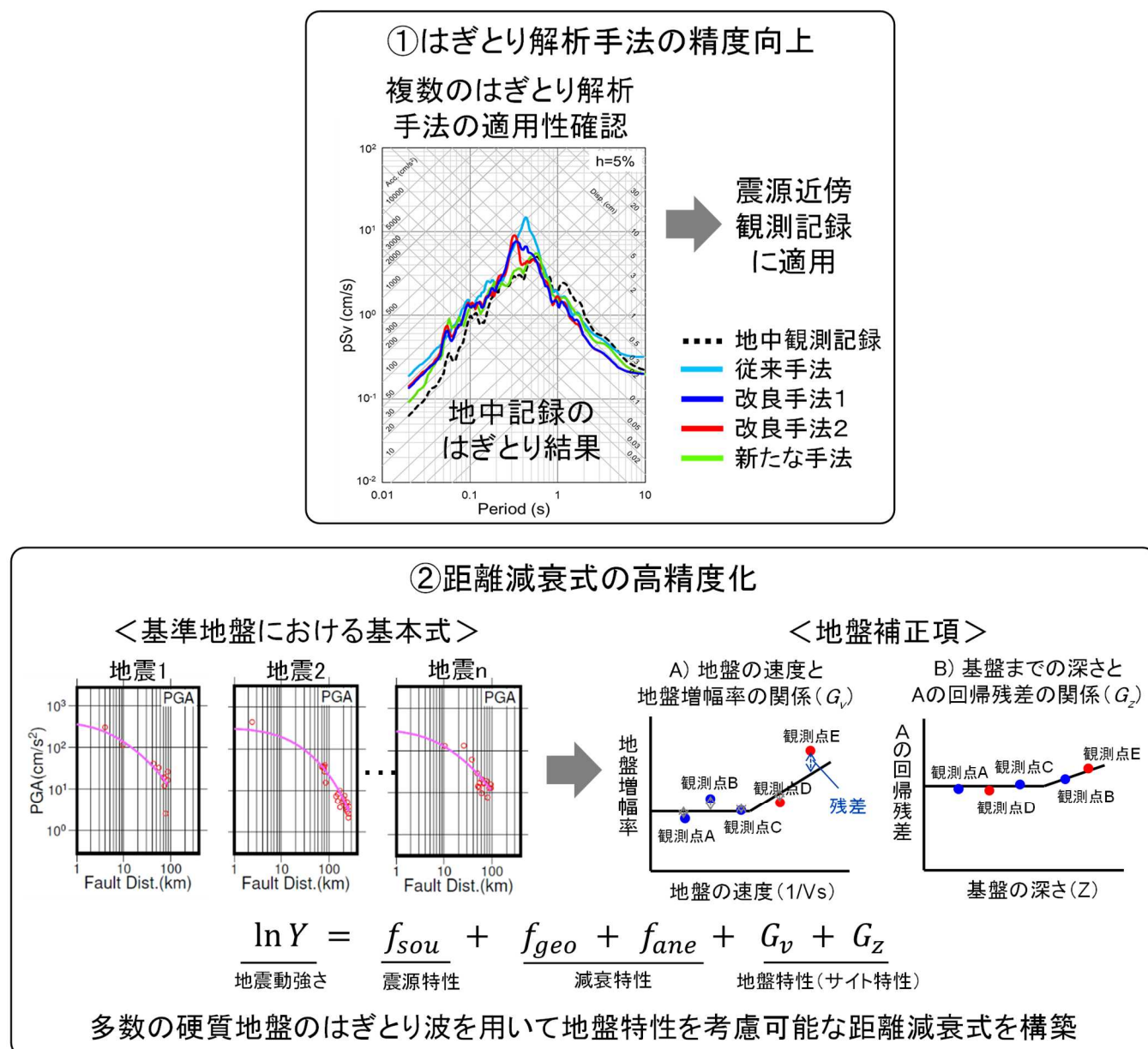


図2 震源を特定せず策定する地震動評価手法の信頼性精度向上

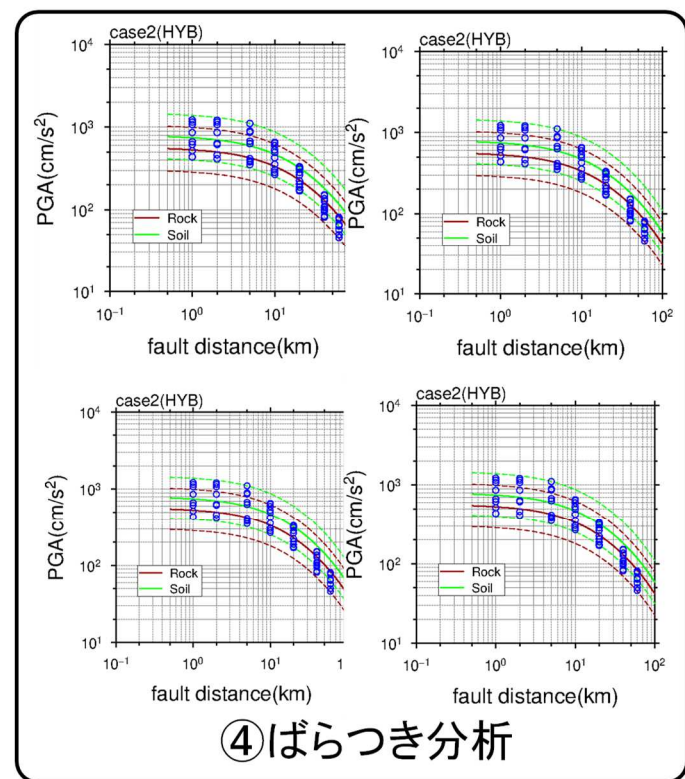
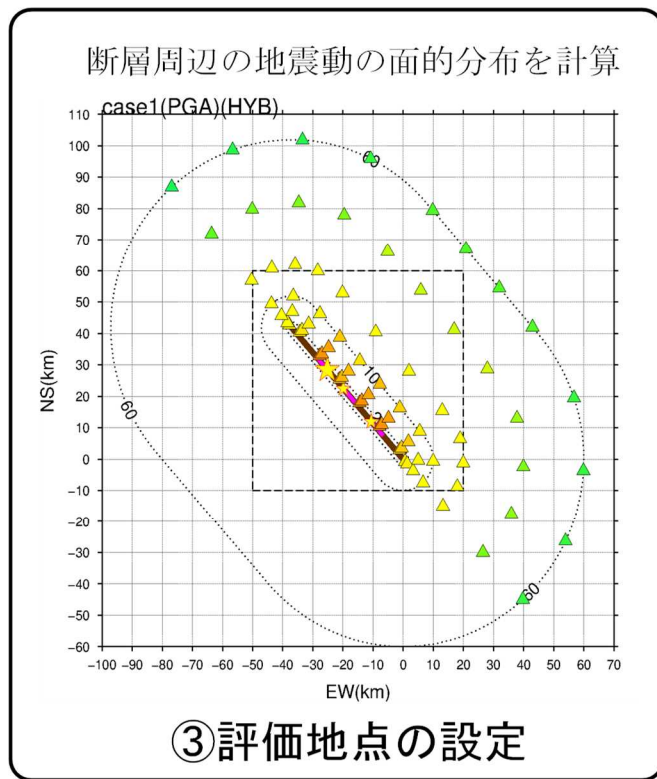
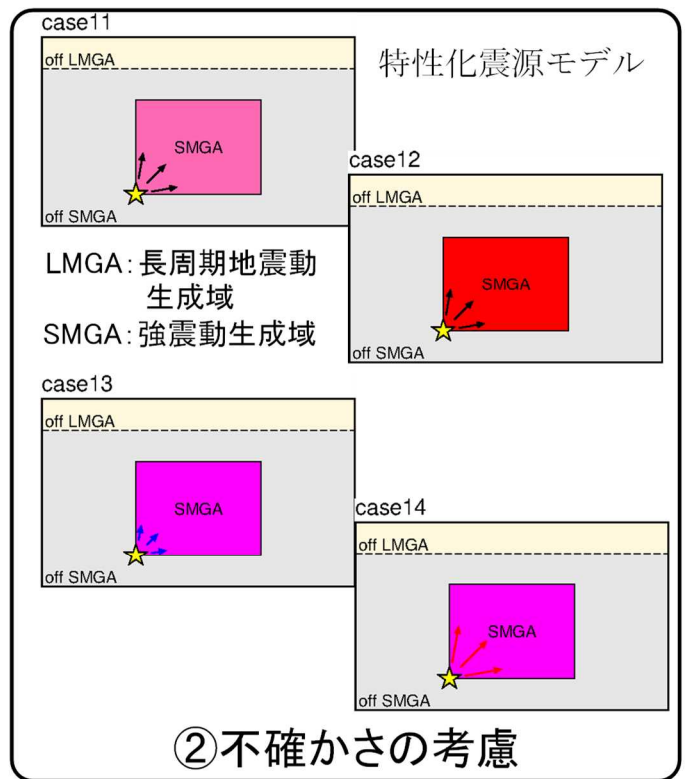
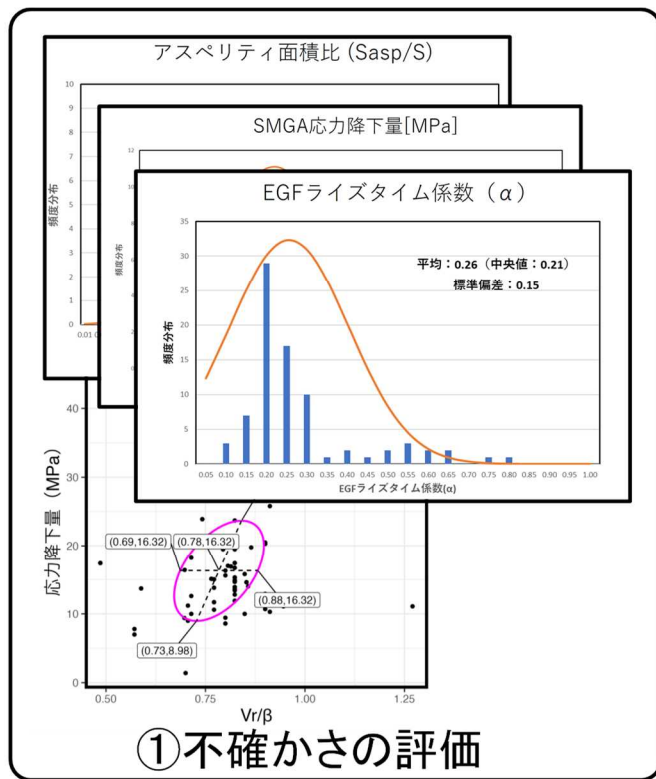


図3 震源パラメータの不確かさの取扱いに係る調査の流れ

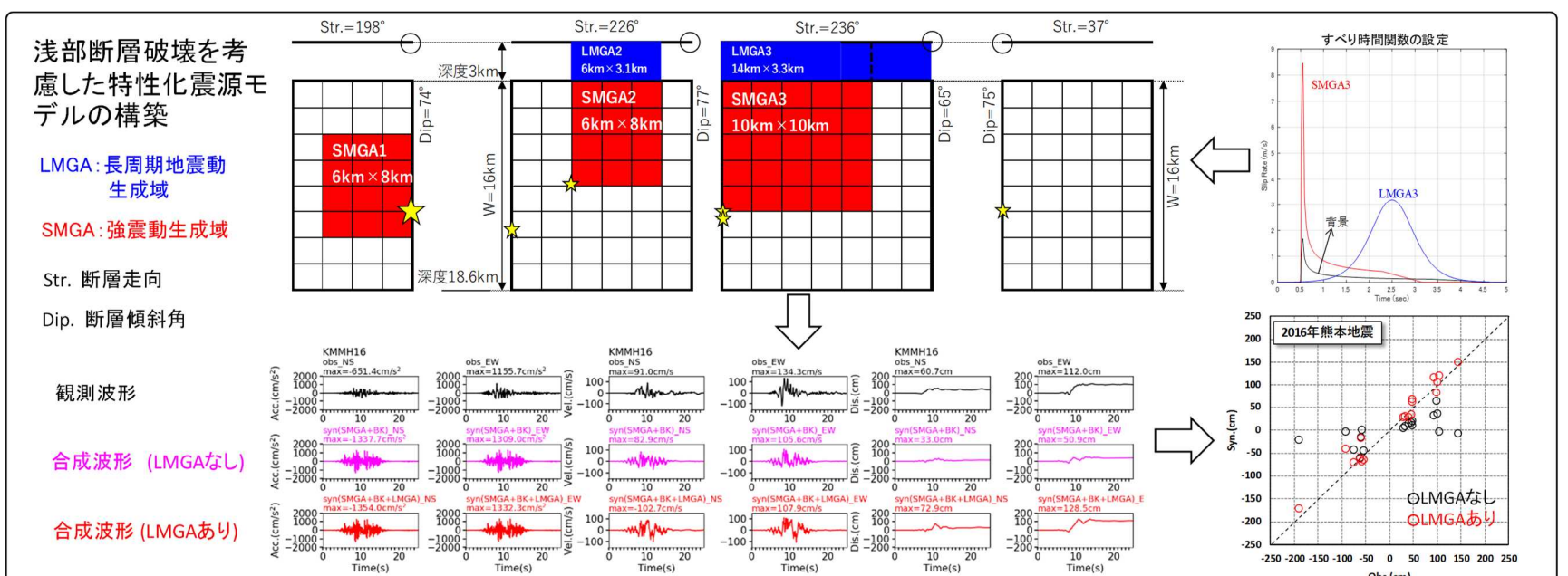


図4 震源極近傍の地震動評価のスキーム

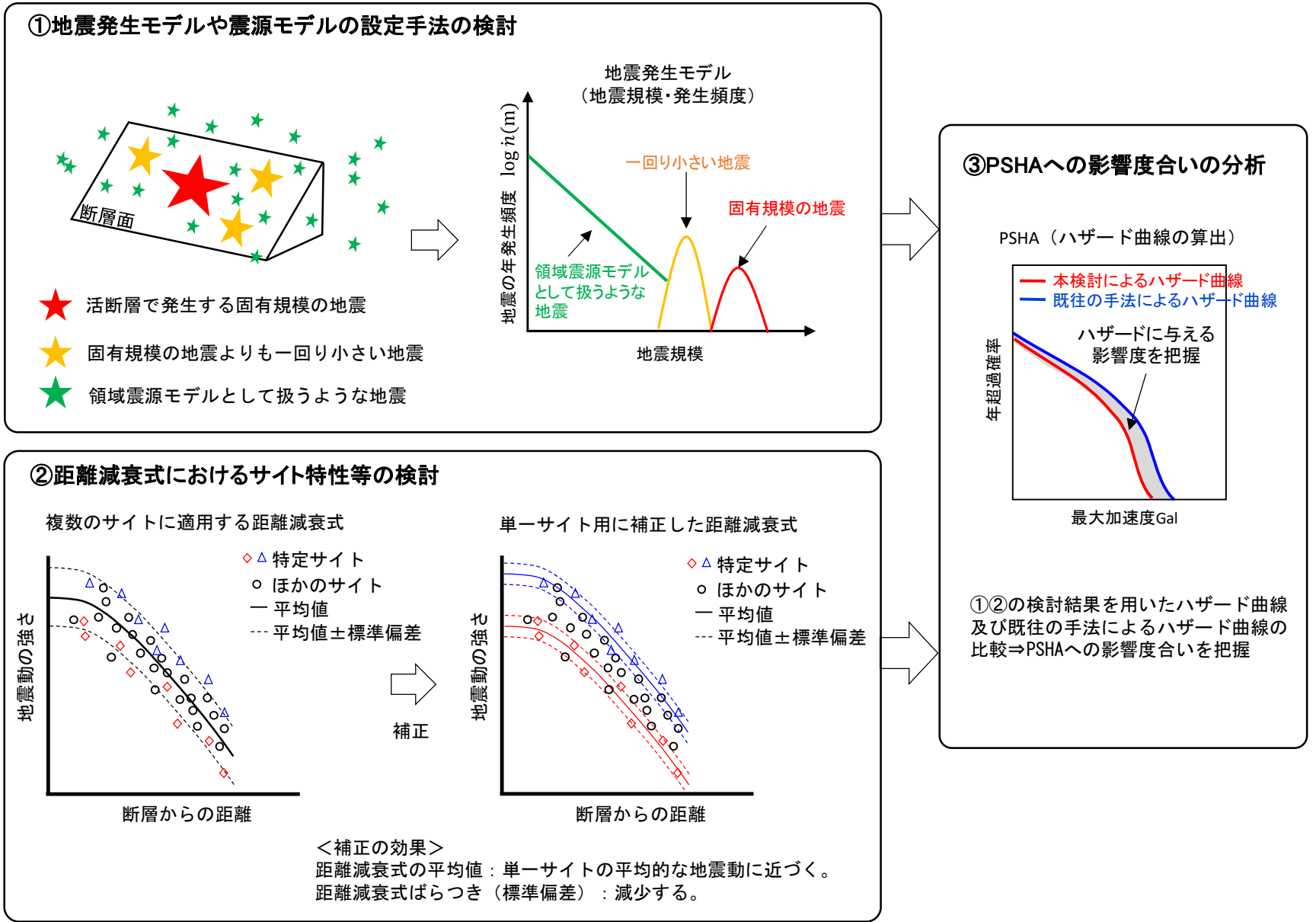


図5 確率論的地震ハザード評価手法の信頼性精度向上

7. 成果目標と実施計画

(1) 震源を特定せず策定する地震動評価手法の信頼性精度向上

成果目標：「震源を特定せず策定する地震動」のうち「全国共通に考慮すべき地震動」について、標準応答スペクトルに関する新たな観測記録の追加解析、最新知見を反映した手法等に係る知見を蓄積し、従来の評価結果への影響を確認するとともに評価手法の信頼性精度向上を図る。また、「地域性を考慮する地震動」の解析データ及び評価手法に係る知見を蓄積し、地震動評価手法の信頼性精度向上に資する。得られた成果は NRA 技術ノート、論文等として公表する。

実施計画：「全国共通に考慮すべき地震動」については、震源近傍の多数の記録の統計処理結果に基づいて策定した標準応答スペクトルについて、原則令和 5 年以降に起きた内陸地殻内地震の震源近傍の観測記録を収集して追加解析を毎年度実施し、従来結果と比較して新たな観測記録の影響を定期的に確認する。さらに、最新知見を反映したはぎとり解析手法を適用するための調査・分析等を令和 7 年度までに実施した上で、当該手法を令和 9 年度までに標準応答スペクトル策定に用いた観測記録に適用するとともに、令和 5 年度までに試作した地盤増幅特性を考慮可能な応答スペクトルの距離減衰式を高精度化するためのデータ追加・分析等を令和 9 年度までに実施し、令和 10 年度までに結果・課題を整理する。また、「地域性を考慮する地震動」については、対象地震の地震動観測記録を令和 8 年度までに精査・解析し、確率論的手法等に基づいた地震動評価結果との比較検討を令和 10 年度までに行うことにより、地域性を考慮する地震動の評価手法を整備し、課題を整理する。

(2) 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動評価手法の信頼性精度向上

成果目標：震源パラメータの設定における不確かさの取扱い、浅部断層破壊のモデル化等に係る知見を蓄積し、全体を俯瞰した上で震源断層モデル設定の合理的な方法の提示を図る。得られた成果は論文等として公表する。

実施計画：断層モデルの震源パラメータの設定における不確かさの評価について、国内外の研究動向を踏まえつつ、解析手法による影響の調査を含めて震源モデル等を調査・分析し、相関性を考慮した複数パラメータの不確かさの確率分布に基づき、不確かさを考慮した断層モデル法による地震動評価を行い、その結果を観測地震動のばらつきと比較・分析することにより、認識論的不確かさの取り扱いを含めて震源パラメータの確率分布モデルを検証し、断層モデル法の確率論的地震動ハザード評価への適用手法を令和 10 年度までに整備する。また、断層極近傍の地震動評価について、特に浅部断層破壊のモデル化に関し、地震調査研究推進本部の動向等を踏まえつつ、地表に地震断層が現れた内陸地殻内地震の地震動検証解析等を令和 10 年度までに実施する。

(3) 確率論的地震ハザード評価手法の信頼性精度向上

成果目標：活断層で発生する地震及び領域震源として扱うような地震に関する地震発生モデル・震源モデルの設定手法、並びに距離減衰式におけるサイト特性等の不確かさに係る知見を蓄積し、それぞれの不確かさが確率論的地震ハザードの評価精度に与える影響度合いを把握することにより確率論的地震ハザード評価手法の信頼性精度向上に資する。得られた成果は論文等として公表する。

実施計画：活断層で発生する固有規模の地震及び一回り小さい地震並びに領域震源として扱うような地震を対象に、発生頻度等の地震発生モデルの設定方法並びに震源モデルを特定震源及び領域震源としてモデル化する際の設定方法について令和7年度までに調査・分析を行い、令和9年度までに課題抽出、モデルの改善、試解析等を実施する。また、原子力サイトの地盤に適用可能な距離減衰式におけるサイト特性を把握するために、令和7年度までに最新知見を調査するとともに、令和9年度までに(1)におけるはぎとり解析結果、距離減衰式等を活用して単一サイトのばらつきを分析する。その上で、令和10年度までに本研究での分析結果を反映した地震発生モデル・震源モデルの設定手法及び距離減衰式におけるサイト特性等の不確かさを考慮してPSHAを行い、その影響度合いを分析し、結果・課題を整理する。

行程表

項目	R6 年度	R7 年度	R8 年度	R9 年度	R10 年度
(1) 震源を特定せず策定する地震動評価手法の信頼性向上	<p><全国共通に考慮すべき地震動 (Mw6.5 程度未満)></p> <p>新記録追加解析、適用課題の調査、データ追加整理</p>	<p>新記録追加解析、適用課題の分析、データ整備・分析</p>	<p>新記録追加解析、適用解析・整理、式の高精度化検討</p>	<p>新記録追加解析、影響確認・整理、比較分析・整理</p>	<p>新記録追加解析、まとめ、課題整理 ▽論文投稿、NRA 技術ノート作成</p>
	<p><地域性を考慮する地震動 (Mw6.5 程度以上)></p> <p>記録精査・手法調査</p>	<p>適用解析・整理</p>	<p>地震動評価・整理</p>	<p>比較検証・整理</p>	<p>手法まとめ、課題整理、 ▽論文投稿</p>
(2) 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動評価手法の信頼性向上	<p><震源パラメータの不確かさ></p> <p>不確かさの分析</p>	<p>相関性の分析・整理</p>	<p>地震動解析・整理</p>	<p>ばらつき分析・整理</p>	<p>手法まとめ、課題整理、 ▽論文投稿</p>
	<p><断層極近傍の地震動評価></p> <p>再現解析</p>	<p>再現解析・整理</p>	<p>再現又は検証解析</p>	<p>検証解析・整理</p>	
(3) 確率論的地震ハザード評価手法の信頼性向上	<p><地震発生モデルや震源モデルの設定手法の検討></p> <p>地震規模と発生頻度の不確かさ調査</p>	<p>初期モデルの設定、分析・課題抽出</p>	<p>モデルの設定、PSHA の試解析</p>	<p>モデルの改善、PSHA の解析・整理</p>	<p>影響度合い分析、まとめ、課題整理 ▽論文投稿</p>
		<p><距離減衰式のサイト特性等の不確かさ検討></p> <p>最新知見の調査</p>	<p>手法適用・整理</p>	<p>精度検討、適用</p>	

8. 実施体制

【地震・津波研究部門における実施者】

- 呉 長江 上席技術研究調査官 (実施項目 (1)Mw6.5 以上地震、(2)関係)
- 儘田 豊 主任技術研究調査官 (実施項目 (3)地震動不確かさ関係)
- 田島礼子 主任技術研究調査官 (実施項目 (1)Mw6.5 未満地震関係)
- 藤田雅俊 副主任技術研究調査官 (実施項目 (3)地震発生モデル関係)
- 森木ひかる 技術研究調査官 (実施項目 (3)地震発生モデル関係)

9. 備考

文 献

- (1) 震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム、「全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」に関する検討報告書」、令和元年
- (2) Tajima, R., Tanaka, H., Wu, C., “An Empirical Method for Estimating Source Vicinity Ground-Motion Levels on Hard Bedrock and Annual Exceedance Probabilities for Inland Crustal Earthquakes with Sources Difficult to Identify in Advance”, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 111, No. 5, pp.2408-2425, 2021.
- (3) 地震調査研究推進本部地震調査委員会、「震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)」、令和2年
- (4) 一般財団法人地域地盤環境研究所、「令和4年度原子力施設等防災対策等委託費(内陸型地震の特性化震源モデルに係る検討)事業成果報告書」、令和5年
- (5) 株式会社大崎総合研究所、「令和4年度原子力施設等防災対策等委託費(海溝型地震の特性化震源モデルに係る検討)事業成果報告書」、令和5年

- (6) Galvez, P., Petukhin, A., Somerville, P., Ampuero J. P., Miyakoshi, K., Peter, D., Irikura, K., “Multicycle Simulation of Strike-Slip Earthquake Rupture for Use in Near-Source Ground-Motion Simulations”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 111, No. 5, pp.2463-2485, 2021.
- (7) 入江紀嘉、宮腰研、ドルジャパラム・サロル、岡田康男、鳥田晴彦、佐藤俊明、田島礼子、「マルチスケール・アスペリティを考慮したM9クラスのプレート間地震の特性化震源モデル -2011年東北地方太平洋沖地震の既往震源モデルに基づいた検討-」、第16回日本地震工学シンポジウム論文集、10 p.、令和5年
- (8) Graves, R., Jordan, T.H., Callaghan, S. et al. CyberShake, “A Physics-Based Seismic Hazard Model for Southern California,” *Pure Appl. Geophys.*, 168, 367-381, 2011.
- (9) Callaghan, S., Maechling, P. J., Silva, F., Goulet, C. A., Milner, K. R., Shaw, B. E., Olsen, K. B., Yeh, T., Graves, R. W., Vahi, K., Deelman, E., Kottke, A. R., Jordan, T. H., & Ben-Zion, Y., “Updates to the CyberShake PSHA Platform,” *Poster Presentation at 2022 SCEC Annual Meeting*, 2022.
- (10) Cotton, F., Archuleta, R., Causse, M., “What is Sigma of the Stress Drop?”, *Seismological Research Letters*, Vol. 84, No. 1, pp.42-48, 2013.
- (11) 引田智樹、瀨藤一起、三宅弘恵、「震源特性の偶然的不確かさに起因する地震動シミュレーションのばらつきに関する検討」、*日本地震工学会論文集*、20巻、3号、pp.21-34、令和2年
- (12) 地震調査研究推進本部地震調査委員会強震動評価部会、「2016年熊本地震(Mj7.3)の観測記録に基づく強震動評価手法の検証について(中間報告)」、令和4年
- (13) 隈元崇、奥村晃史、佃栄吉、堤英明、堤浩之、遠田晋次、徳山英一、大西耕造、西坂直樹、大野裕記、酒井俊朗、亀田弘行、「SSHACレベル3ガイドラインに基づく伊方サイトでの震源特性モデルの構築」、*日本地震工学会論文集*、22巻、2号、pp.37-60、令和4年
- (14) Atkinson, G. M., “Single-station sigma”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 96, No. 2, pp.446-455, 2006.
- (15) International Atomic Energy Agency, “Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations”, *Specific Safety Guide*, IAEA Safety Standards Series No. SSG-9 (Rev. 1), 2022.
- (16) Morikawa, N., Kanno, T., Narita, A., Fujiwara, H., Okumura, T., Fukushima, Y., and Guerpinar, A., “Strong motion uncertainty determined from observed records by dense network in Japan”, *Journal of Seismology*, Vol. 12, pp.529-546, 2008.
- (17) Rodriguez-Marek, A., Montalva, G., Cotton, F., and Bonilla, F., “Analysis of single-station standard deviation using the KiK-net data”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 101, No. 3, pp.1242-1258, 2011.
- (18) Landwehr, N., Kuehn N., Scheffer, T., and Abrahamson, N., “A nonergodic ground-motion model for California with spatially varying coefficients”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 106, No. 6, pp.2574-2583, 2016.

安全研究のプロジェクトごとの自己評価結果（事前評価） 断層の活動性評価手法に関する研究（R6～R10）

令和 6 年 1 月 12 日
原子力規制庁

1. 技術評価検討会における主な意見及びその対応
 - 本プロジェクトは国内外の過去の研究、最新知見を踏まえて計画されており、また、実施内容方法についても適切とされた。
 - 断層活動性評価について、活断層の定義の違いが評価結果に与える影響、複数の手法の組み合わせ、多様な岩種、鉱物への適用事例の提示を期待するとの意見があった。個別の手法及び評価対象にとらわれすぎないように、広い視野をもって、適用事例を蓄積していくこととする。
 - 断層岩の物質科学的指標等を用いた断層活動性評価に関する研究については、将来的には岩種に特化されない一般化を視野に入れ、他の研究のレビューによる整理とともに、多様な地質環境及び地史を有する地域への適用事例を増やすべきとの意見があった。当該手法の適用性を判断した上で、次期研究フェーズで取り組むか検討を進めていくこととする。
 - 年代測定については、手法を事前に選定すべきとの意見があった。年代測定に関しては、ルミネッセンス及び ESR 年代測定法を優先して実施することとする。
 - 詳細は別表参照
2. 事前評価結果
 - (1) 研究内容の技術的妥当性： 適 否
 - 本プロジェクトは、国内外の過去の研究及び最新の研究、知見を踏まえており、また、実施内容及び手法についても適切とする評価を受けていることから、技術的に妥当と判断する。
 - (2) 研究計画案への反映
 - 断層活動性評価手法に関する成果を取りまとめるに当たっては、個別の評価手法を組み合わせることとし、それらを適用するときの留意点を整理して成果を取りまとめていくこととする。
 - 年代測定については、中期更新世以降（約 40 万年前以降）の年代範囲を測定することが可能なルミネッセンス及び ESR 年代測定法を優先して実施していくこととする。
 - 詳細は別表参照
 - 上記を踏まえた研究計画（案）は別添参照

断層の活動性評価手法に関する研究に対する外部専門家の
評価意見及び専門技術者の御意見並びにその回答

(外部専門家から頂いた評価意見及び回答)

No.	評価項目	評価意見	回答
糸井 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	適切と考えます。	—
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	概ね適切と考えますが、評価誤差が与える影響、活断層の定義の違いが評価結果に与える影響などにも着目してまとめていただけるとよりよいと考えます。	二次断層あるいは副断層を意図したご意見と捉えています。これらは調査を実施する中で徐々に判明していく性質でもありますので、頂いたご意見を念頭に置きつつ進め、比較に足るデータが十分に得られるかどうかを考慮したうえで、判断したいと思います。
3	③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	適切と考えます。	—
4	④ 重大な見落とし（観点の欠落）がないか。	大きな見落としはないと考えます。	—
5	その他	長期的に、活断層の活動性の評価への適用だけでなく、確率論的断層変位ハザード評価や確率論的地震動ハザード評価、さらに確率論的リスク評価にも活用し、原子力安全に関わる知見へも反映できる成果となることを期待します。	「断層岩の物質科学（地球化学）的指標等を用いた断層活動性評価に関する研究」を例にとると、最終的に、活断層と非活断層とを明確に区別することは難しい場合であっても、確率論的断層変位ハザード評価や確率論的地震動ハザード評価におけるロジックツリーを用いた認識

No.	評価項目	評価意見	回答
			論的不確かさを扱う中での判断材料としては有用となる可能性もあると考えています。反映先としての視野を広く持ちたいと考えています。
鎌滝 孝信 氏			
1	① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか	参考文献等により、国内外の過去の研究、最新知見を踏まえた研究計画と考えられます。また、以前（原子力安全基盤機構の頃）、国内外の最新知見を収集されていたと記憶しておりますが、現在もそれを継続しているようでしたら問題はないと思います。	技術基盤グループ最新知見等の反映プログラムに沿って、国内外の最新知見の収集を継続しています。
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	現段階では適切と考えます。「断層破砕物質等を用いた断層活動性評価」について、「鉱物脈法等を用いた断層活動性評価に関する研究」と「断層岩の物質科学（地球化学）的指標等を用いた断層活動性評価に関する研究」の両方で解析、実験方法を研究を進めながら検討、取捨選択していく部分が大きいように感じました。断層活動性評価に関しては重要な研究なので、より幅広い分野を横断した情報収集をおこなうなど、新しい手法を確立していただけることを期待しております。「断層活動時期を示す地形・地層の年代評価」については、着実に基礎データを積み上げていただけることを期待しております。	分野横断的な情報収集に務めます。新しい手法の確立の側面も一部に含まれますが、審査ガイド等、規制への反映の目的から、規制庁の安全研究としてはむしろ適用性の確認が主なタスクとなりますので、そのためにも着実な基礎データの蓄積に努めていきます。
3	③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	解析手法や実験手法について今後の試行錯誤があると思いますが、現段階では適切と考えます。「鉱物脈法等を用いた断層活動性評価に関する研究」については、時間はかかると思いますが評価手法を確立できるよう着実に研究を進め、成果を積み上げていただけることを期待しております。また、その成果を積極的に公表していただき、多くの研究者からの評価、意見等を得られるよう期待します。	拝承いたします。

No.	評価項目	評価意見	回答
4	④ 重大な見落とし（観点の欠落）がないか。	配付資料および研究計画をご説明いただいた限りでは、現時点で重大な見落としや観点の欠落はないように思います。	—
5	その他	—	—
酒井 直樹 氏			
1	① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか	過去の研究の背景はわかりやすく書かれ、それらを踏まえて計画されていると考えられる。 年代評価については、この分野では過去の積み重ねが重要であるので、各学会や大学などで得られたデータをデータベースにして客観性を持たせることができるとよい。	—
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	鉱物脈法は、比較的均質な花崗岩体で見つけやすいが地すべり構造や熱水変質などと違いを判断できることが重要である。各種方法の組み合わせで判断できるように体系化することが望ましい。（スライド9枚目） また別の地質になった時に同じ手法でデータを集めることは重要である。その収集されたデータの分析では統計解析だけでなく機械学習を使って指標の分析をすることも新たな視点からの評価として有効であると考えられる。（スライド9枚目）	年代測定法というよりは、断層の活動性評価を判断する際の指標についてのご意見と思慮いたします。まさに「断層岩の物質科学（地球化学）的指標等」のテーマでは、各学会や大学などで得られた結果や考え方等をデータベースとして整理し、適用性判断の一助として利用する予定です。 ・拝承いたします。各種方法の組み合わせが重要と考えており、それをイメージしています。 御意見について拝承いたします。統一的手法を用いることは、異なる地質における断層活動性を評価する際の結果のばらつき等の要因を検討することができる可能性があると考えております。また、機械学習については、不確実さを伴う自然現象に対してどこまで適用可能であるのかは未知の所も多いものの、将来的に取り組んでいきます。
3	③ 解析結果の評価手法、実験	鉱物学、地球化学的な手法はミクロな点からの評価になるので、各種分析手法や他の物理的、地質的な点から得られた定	頂いたご意見については、まさに計画している内容でしたが、研究計画（案）では「評価手法の組み合わせ」の文言が欠

No.	評価項目	評価意見	回答
	結果の評価手法が適切か。	量的な評価手法と組み合わせて評価方法を体系化することが重要である。また現地の評価では、限られたデータから断層の活動性を評価する必要があり、各種手法の有効な組み合わせなどを評価方法と合わせてまとめることも必要である。(スライド 10 枚目)	けていましたので、研究計画（案）の 6. (1) a 及び b 末尾に明示しました。
4	④ 重大な見落とし（観点の欠落）がないか。	特にないと考えられる。	—
5	その他	5 年間続く研究計画の年表では、定量的な「指標」や定性的でも「こういうことを段階的に明らかにする」というような各段階での具体的な目標が必要でないか？	頂いたご意見について拝承いたします。研究計画（案）の行程表に、各年度における取りまとめ又は整理事項を記載しました。また、研究計画は年度ごとに更新する予定であり、各段階で得た成果を含めて最新知見を研究計画に適時に反映するよう努めます。

(専門技術者から頂いた御意見及び回答)

No.	評価項目	御意見	回答
梅木 芳人 氏			
1	① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか	—	—
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	—	—
3	③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	—	—
4	④ 重大な見落とし（観点の欠落）がないか。	—	—
5	その他	<p>上載地層法の代替として、過去には断層内物質から直接年代を測定する方法も研究していたようですが、今回の物質科学的指標や鉱物鉱脈法も含め、複数のメニューが提示できるような研究を進めることを期待します。</p> <p>今回の物質科学的指標は花崗岩を主体に検討されるようですが、将来的には岩種に特化されない一般化も視野に入れた研究ができると良いと思います。</p>	<p>断層内物質から直接年代を測定する方法も合わせて検討する計画であり、複数のメニューとそれらを適用する際の留意点を整理したいと考えています。</p> <p>データを統一的に比較する観点からまずは花崗岩に着目しますが、頂いたご意見については、手法の適用性も考慮し、将来的な展開として検討したいと思えます。</p>

No.	評価項目	御意見	回答
土志田 潔 氏			
1	① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか	<p>(1)a. 鉱物脈法、断層物質の年代測定とも、事例研究を積み重ねる段階にあると考えられ、本プロジェクトを通じて多様な岩種、鉱物への適用事例が増加する事が期待される。</p> <p>(1)b. 先行研究がいずれも敦賀地域の花崗岩体を対象としており、他地域での評価への活用を可能とするためには、多様な地質環境、地史を有する地域への適用事例を増やしていく必要がある。</p> <p>(2)a. 断層だけでなく、火山の評価に対しても有用な研究計画と考えられる。</p>	<p>拝承いたします。多様な岩種、鉱物への適用事例の蓄積を目指します。</p> <p>先行研究の検証から開始する観点から、敦賀地域の花崗岩体を対象としていますが、手法の適用性を見据えた上で、将来的な展開として検討したいと思います。</p> <p>すでに火山の審査会合においても当該研究の成果が引用されています。</p>
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	<p>(1)a. 年代測定について、現時点では測定手法を決定されていないとのご説明であったが、適切な手順で試料を採取するために、年代測定手法を事前に選定する必要があると考えられる。</p> <p>(1)b. 当初は敦賀地域での研究が計画されているが、将来的には岩種、地史が異なる他の地域でも事例研究を行う事が期待される。</p>	<p>柔軟性をもって対応していきたいため、研究計画案では手法を限定しないものの、中期更新世以降の年代を評価する観点から、まずは OSL、TL、ESR を用いた年代測定手法を優先したいと思います。</p> <p>上記1で回答済みです。</p>
3	③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	<p>(1)b. 国内の一部の地域では、調査地域の周辺で複数の地質時代に生じた火山活動に付随して、複数回の化学組成が異なる熱水変質を被っている場合があるため、評価に際し留意されたい。</p>	<p>貴重なご意見ありがとうございます。拝承いたします。</p>
4	④ 重大な見落とし（観点の欠落）がないか。	—	—
5	その他	—	—

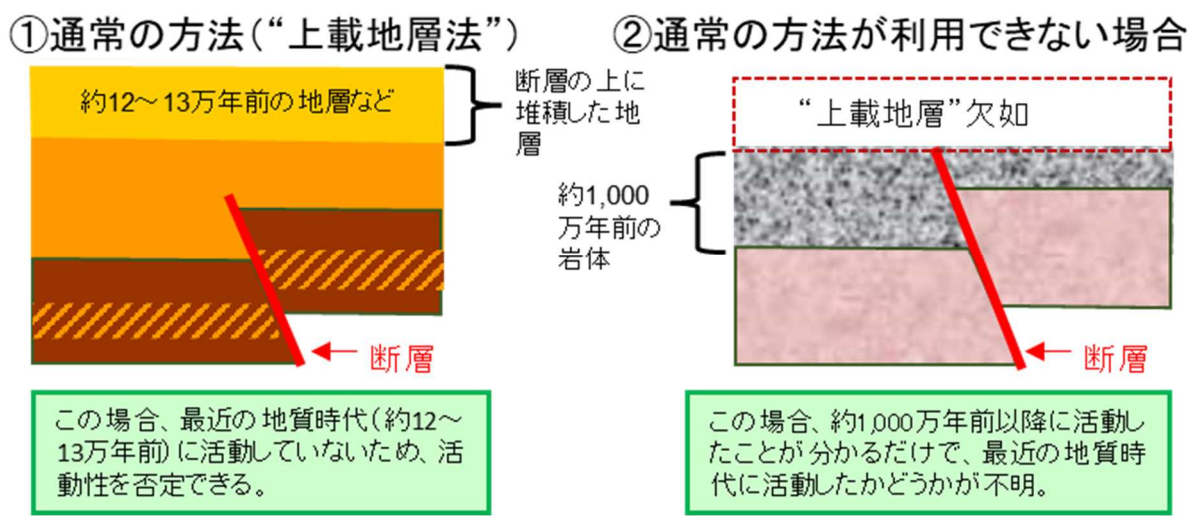
No.	評価項目	御意見	回答
松山 昌史 氏			
1	① 国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか	—	—
2	② 解析実施手法、実験方法が適切か。	—	—
3	③ 解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	—	—
4	④ 重大な見落とし（観点の欠落）がないか。	<p>断層は活断層か非活断層かであるかに関わらず、断層活動が起きる可能性とその影響に着目した研究が必要であると考える。いわゆる断層活動に関するリスク評価研究である。</p> <p>断層活動性に関する研究は、その活動履歴の解明が目的の一つであり、活断層であるか否かの判定に重要な役割を果たすことは理解できる。一方で、福島第一原子力発電所の事故の自然災害に関する教訓としては2つあると考えている、設計対象の自然災害規模の不確かさを強化するということと、設計対象の自然災害規模を超える可能性は0ではなく、超えるケースも考えられるということである。その点で、非活断層であってもそれが活動する場合に影響を評価する研究が必要である。例えば、断層の活動履歴などのデータを基に断層が活動する可能性の定量化の研究や断層が活</p>	<p>いただいたご意見について、直接的な研究テーマとして考えられるのは、「確率論的地震ハザード評価」及び「確率論的断層変位ハザード評価」かと思われます。これらの研究テーマは別の研究プロジェクト「震源近傍の地震ハザード評価手法の高度化に関する研究 (R2~R5)」において取り扱ってきましたが、「原子力規制委員会における安全研究の基本方針」を踏まえると、後者については規制上の位置づけが定まっていないため、優先順位は高くない状況です。したがって、学協会における研究成果の公表及び不足している情報の有無、利用法も含めた規制上の位置づけに関する議論の成熟を見据え、規制への反映可能性の見通しが立った時点で、改めて研究テーマとしての立ち上げの必要性を検討したいと考えます。そのため、当該評価は、今回計画している断層の活動性に関する研究にとって、将来的な成果の活用先として整理させてい</p>

No.	評価項目	御意見	回答
		<p>動した場合に原子力施設にどのような影響を与えるかの研究である。</p> <p>これらの研究成果は、設計基準的な自然災害規模を超えた場合に表出するリスク情報として、原子力発電所の安全性の確認において大きな役割を果たすもので、重要な研究テーマとして必要と考える。</p>	<p>ただきます。</p>
5	その他	—	—

**事前評価対象安全研究プロジェクトの研究計画
(技術評価検討会での議論を踏まえ朱記修正)**

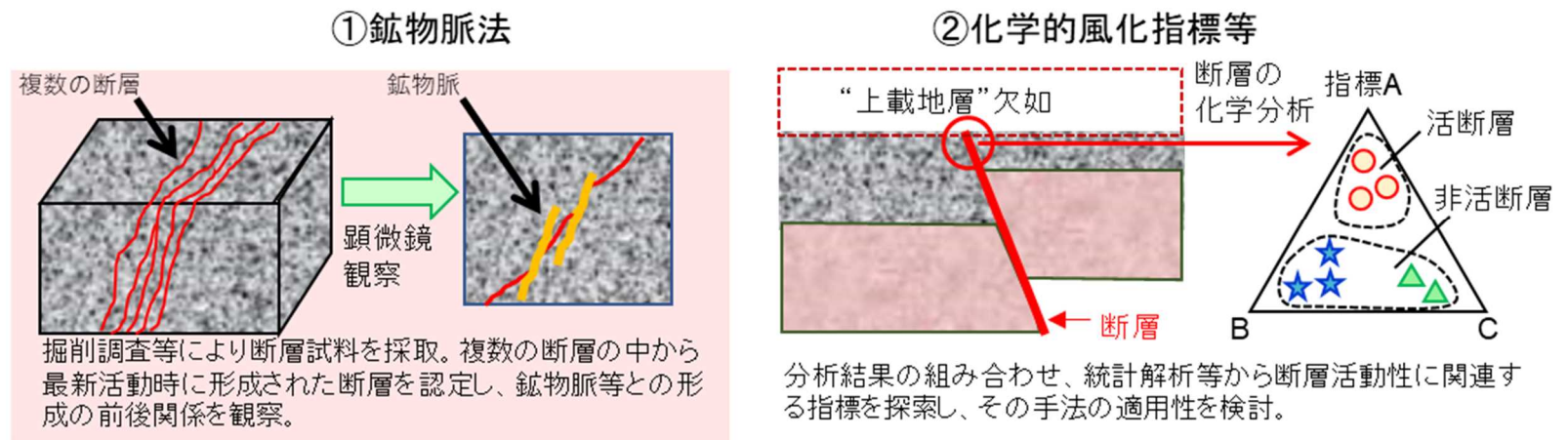
研究計画（案）

<p>1. プロジェクト (始期：R6年度 終期：R10年 度)</p>	<p>2. 断層の活動性評価手法に関する研究</p>	<p>担当部署</p>	<p>技術基盤グループ 地震・津波研究部門</p>
<p>2. カテゴリー・ 研究分野</p>	<p>【横断的原子力安全】 A) 外部事象（地震、津波、火山等）</p>	<p>担当責任者</p>	<p>内田淳一 統括技術研究調査官</p>
<p>3. 背景</p>	<p>「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」（以下「規則の解釈」という。）別記1第3条第3項では、「将来活動する可能性のある断層等」が定義されている。また、「その認定に当たって、後期更新世（約12～13万年前）の地形面又は地層が欠如する等、後期更新世以降の活動性が明確に判断できない場合には、中期更新世以降（約40万年前以降）まで遡って地形、地質・地質構造及び応力場等を総合的に検討した上で活動性を評価すること。」とされている。</p> <p>断層の活動年代は通常、断層の上位に堆積した地層の年代に基づき特定又は推定する（以下「上載地層法」という。）（図1の①）。例えば「活断層の長期評価手法 報告書（暫定版）」（地震調査研究推進本部、平成22年）では、上載地層法に基づいた年代測定を基本としており、主として上載地層に含まれる有機物の放射性炭素同位体年代に基づいた数十年～数百年オーダーの測定精度と結果に対するばらつきの考え方が示されている。しかし、放射性炭素同位体年代の適用限界は約5万年程度であり、規則の解釈別記1第3条第3項で示されている「将来活動する可能性のある断層等」の定義に照らして十分な年代幅をカバーできないこと、地域によっては、そのような地層が欠如している等の理由により、上載地層法の適用が難しい場合があることから（図1の②）、断層本体の性状や断層破碎物質から活動性を判断するケースが多くなる。</p> <p>平成26年に制定された「敷地内及び敷地周辺の地質・地質構造調査に係る審査ガイド」（以下「地質審査ガイド」という。）では、断層破碎物質を用いた活動性評価の具体例として、「断層の活動性評価に対し、断層活動に関連した微細なずれの方向（正断層、逆断層、右横ずれ断層、左横ずれ断層等）や鉱物脈又は貫入岩等との接触関係を解析することが有効な場合がある。」とされ、さらに「断層破碎物質を用いた活動性評価に関しては、信頼性の高い活動年代の評価手法が確立されていない。断層破碎物質の性状から断層の活動性評価を評価する場合には、このことを十分に考慮する必要がある。」との留意点が示されている。この留意点を課題として捉え、検討対象である断層と鉱物脈との接触関係を解析して断層の活動性を評価する手法（以下「鉱物脈法」という。）⁽¹⁾について安全研究プロジェクト「断層破碎物質を用いた断層の活動性評価手法に関する研究」（平成25年度～令和元年度）の一環として限定的ではあるが知見を蓄積した（図2の①）。一方、基準適合性審査においては既に鉱物脈法が利用されており、審査での実績が増えつつある。ただし、その原理は断層の変位とそれを横切る鉱物脈の形成時期との前後関係に則った単純なものであるが、適用対象とするサイトごとに地質環境が異なるために事業者による試行錯誤が繰り返されること、学協会における適用事例が少ないこと、評価手法が一定の手順として示されていないこと等の課題が残されている。そのため、鉱物脈法の適用事例を追加し、鉱物脈を用いた断層活動性評価手法を体系的に研究することに加え、他の手法を含めた総合的な評価手法を構築するために、鉱物脈の年代評価手法に関する知見、古応力場を利用する方法等に関する知見を蓄積することが重要である。</p> <p>断層破碎物質を用いたより確度の高い断層活動性評価を行うためには、鉱物脈法を含め、複数の手法による総合的な評価を行うことが有効な場合がある。近年、全岩化学組成等を用いた断層の活動性評価に関する研究（図2の②）も行われつつあるが^(2,3)、入力データである断層岩断層破碎物質の化学組成データが乏しく、十分な信頼性が確保されていないほか、それらの化学的差異を生じさせるメカニズム、判別手法の適用性等に関する知見もほとんど得られていない。このような手法が審査に適用されることを予見し、データの客観性及び評価の妥当性を判断するための留意点を整理しておくことが重要である。</p> <p>後期更新世以降の活動性が明確に判断できない断層の活動性評価又は活動性の低い断層活動の評価を行うための手段として、規則の解釈別記1第3条第3項に記載されている約40万年前まで遡って上載地層法を適用すること、断層活動によって変位・変形を受けている段丘堆積物の年代を決定すること等が挙げられる（図3）。このような堆積物の年代を決定するには、通常、地質学的に“一瞬”で広域に降り積もったと考えられる、噴出年代が既知の火山灰が利用されるが、火山灰を同定するに足る鉱物の化学組成及び噴出年代に関するデータが乏しいとの課題がある。安全研究プロジェクト「地震の活動履歴評価手法に関する研究」（平成29年度～令和元年度）及び「断層の活動性評価に関する研究」（令和2年度～令和5年度）ではそれぞれ東北日本及び西南日本を主に対象とし、約40万年前まで遡って火山灰層序を明らかにするとともに、コア中の火山灰の深度と年代の関係を明示する「年代モデル」の信頼性を向上させるための手順を整備してきた。このようなデータを西南日本～中部日本及び周辺海域にも拡充し、火山灰層序学的な年代決定手法・手順を整備することが重要である。</p>	<p>主担当者</p>	<p>松浦旅人 主任技術研究調査官 宮脇昌弘 副主任技術研究調査官 林 宏樹 副主任技術研究調査官</p>



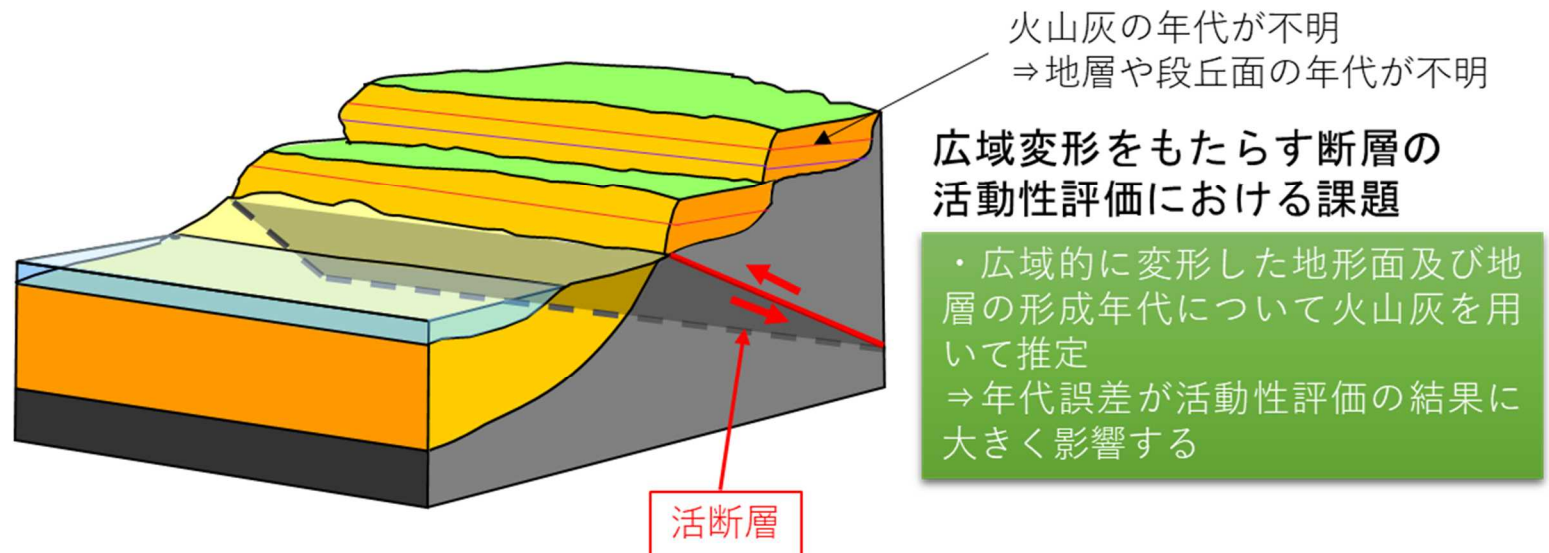
（図はオリジナル）

図1 「将来活動する可能性のある断層等」の識別に当たり適用される上載地層法とその課題



(図はオリジナル)

図2 本研究で扱う断層破碎物質等を用いた断層活動性評価



(図はオリジナル)

図3 断層活動時期を示す地形・地層の年代評価における火山灰の位置づけと主要課題

<p>4. 目的</p>	<p>本プロジェクトでは、「断層破碎物質等を用いた断層活動性評価」及び「断層活動時期を示す地形・地層の年代評価」について、その技術的根拠となる分析データを取得し、断層の活動性評価及び活動年代評価を行う過程で得られた具体的な留意点及び知見を蓄積することを目的とする。</p> <p>(1) 断層破碎物質等を用いた断層活動性評価</p> <p>a. 鉱物脈法等を用いた断層活動性評価に関する研究 年代評価手法に関する知見と併せて、鉱物脈法の適用事例を拡充し、鉱物脈を用いた断層活動性評価手法を体系的に整備する。</p> <p>b. 断層岩断層破碎物質の物質科学（地球化学）的指標等を用いた断層活動性評価に関する研究 断層岩断層破碎物質の化学組成を用いた断層の活動性評価について、評価に有用な指標を検討しその妥当性を評価するために、分析データを蓄積するとともに、解析手法等の違いによる評価結果への影響を整理する。</p> <p>(2) 断層活動時期を示す地形・地層の年代評価</p> <p>a. 中期更新世以降の火山灰年代評価手法に関する研究 「将来活動する可能性のある断層等」の活動時期（中期更新世以降（約40万年前以降））に対応した断層の活動性評価ができるよう、特に西南日本～中部日本を中心とした火山灰の鉱物化学組成、噴出年代に関するデータ等を蓄積する。</p>
<p>5. 知見の活用先</p>	<p>(1) で得られた知見は、地質・地質構造に関する審査において、「将来活動する可能性のある断層等」の評価（規則の解釈別記1第3条第3項）、断層の活動性評価（地質審査ガイドI 4.1.2.3）に係る技術基盤として活用される。</p> <p>(2) a. で得られた知見は、地質・地質構造に関する審査において、「将来活動する可能性のある断層等」の評価（規則の解釈別記1第3条第3項）「活断層の位置・形状・活動性等」の把握及び評価（規則の解釈別記2 第四条の5 二）、「中期更新世以降の断層等の評価指標である段丘面や地層の形成年代推定に利用する火山灰」の対比及び年代決定（地質審査ガイドI 2.2 [解説](2)）に係る技術基盤として活用される。</p> <p>さらに、本プロジェクトの実施項目で得られた成果等は、NRA 技術報告等にまとめるとともに技術的確認等を行い、基準や地質審査ガイドの改正に資する。</p>

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

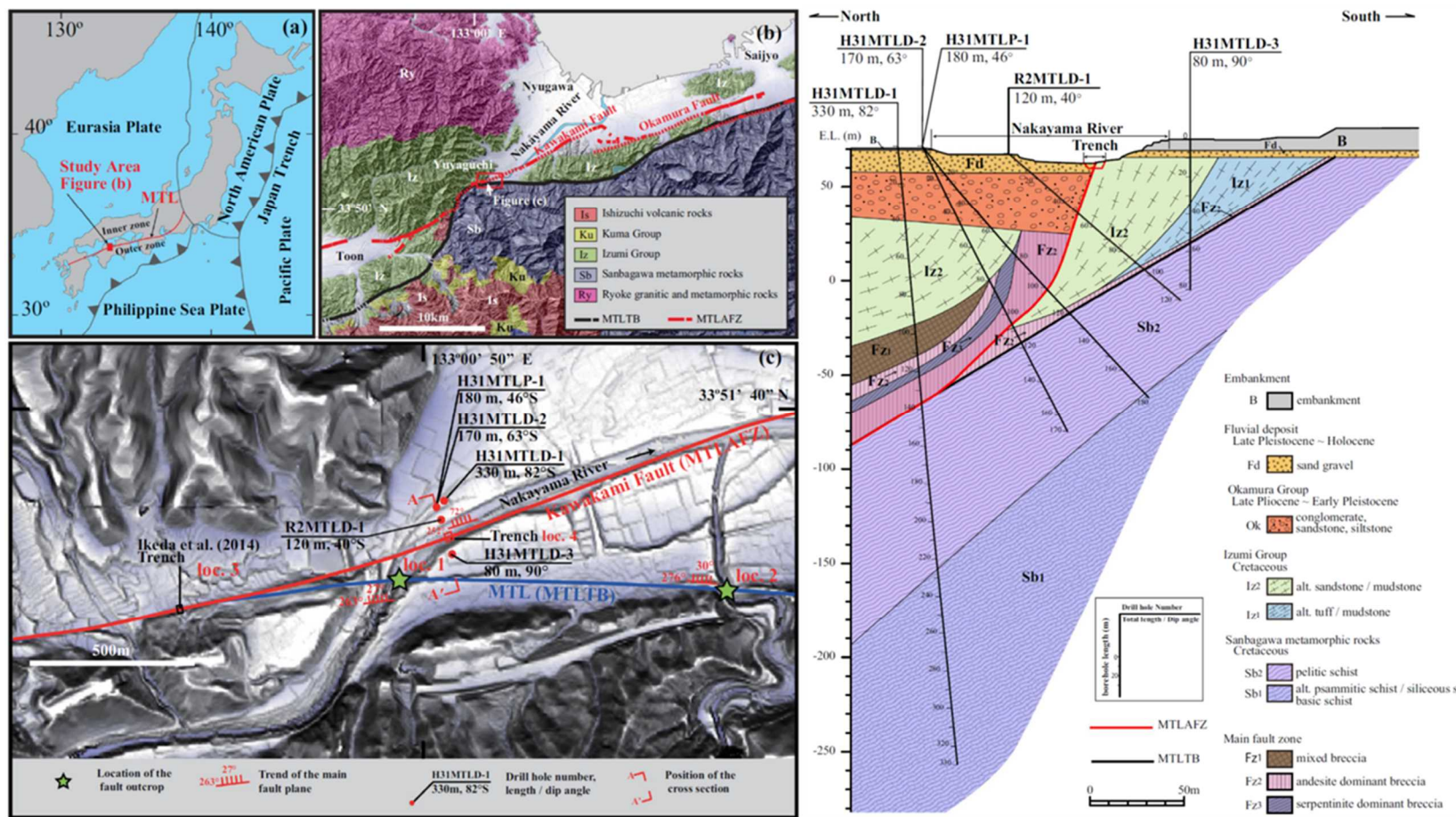
- ① 規制基準等の整備に活用するための知見の収集・整備（以下「分類①」という。）
- ② 審査等の際の判断に必要な知見の収集・整備（以下「分類②」という。）

(1) 断層破碎物質等を用いた断層活動性評価

a. 鉱物脈法等を用いた断層活動性評価に関する研究【分類①、分類②】

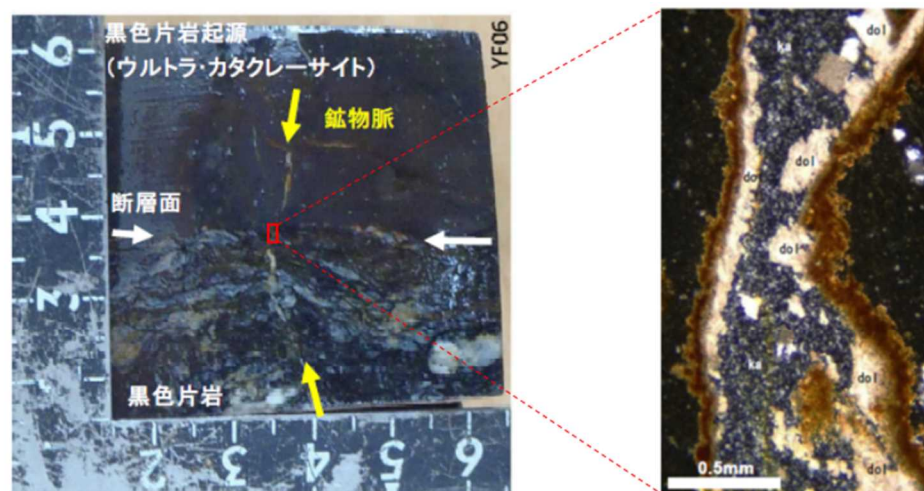
上載地層法の適用が難しい場合、断層本体の性状や断層破碎物質から断層の活動性を判断することが重要である。安全研究プロジェクト「断層破碎物質を用いた断層の活動性評価手法に関する研究」（平成25年度～令和元年度）においては、審査に適用されつつあることを踏まえ、鉱物脈法の適用事例の蓄積を開始した。その一環として中央構造線を例にして実施した研究⁽⁴⁾では、地質構造の把握（図4）とともに、活断層では高温条件で晶出する鉱物脈が断層によって切断されていること、最近活動していない断層では高温条件で晶出する鉱物脈が断層を横断していることが確認され、本手法の一つの適用事例を示した⁽⁵⁾（図5）。安全研究プロジェクト「断層の活動性評価に関する研究」（令和2年度～令和5年度）においては、断層破碎物質等を用いた断層活動性を総合的に評価するための手法として、中央構造線及び根尾谷断層等において古応力解析を用いた断層活動性評価手法の事例も蓄積している。令和6年度以降は、断層破碎物質の性状に基づいて断層の活動性評価を行うことを目的として、地質の異なる複数の断層を対象としてトレンチ調査、露頭調査等を行い、鉱物脈法を適用する（図6）。具体的には、断層の最新活動面の認定、鉱物脈（岩脈も含む）の同定及びその生成環境との比較を行うことで、断層活動と鉱物脈等との新旧関係を評価する。また、断層活動に伴って断層面上に生じた傷（条線）から断層活動時の古応力を復元し、その結果と現在の応力場とを比較することで間接的に断層活動の時期を推定し、鉱物脈法による断層活動性評価の補強データとするほか、鉱物脈法に用いた鉱物脈又は岩脈の年代測定、化学分析等を実施し、断層活動性評価に対して年代的根拠を示す。これらの成果をもとに各種の評価手法の適切な組み合わせ及び留意点をまとめ、鉱物脈を用いた断層活動性評価手法を体系的に整備する。

6. 安全研究概要



Miyawaki & Sakaguchi (2021)⁽⁴⁾より

図4 中央構造線において実施した物理探査、掘削調査から作成した地質断面図

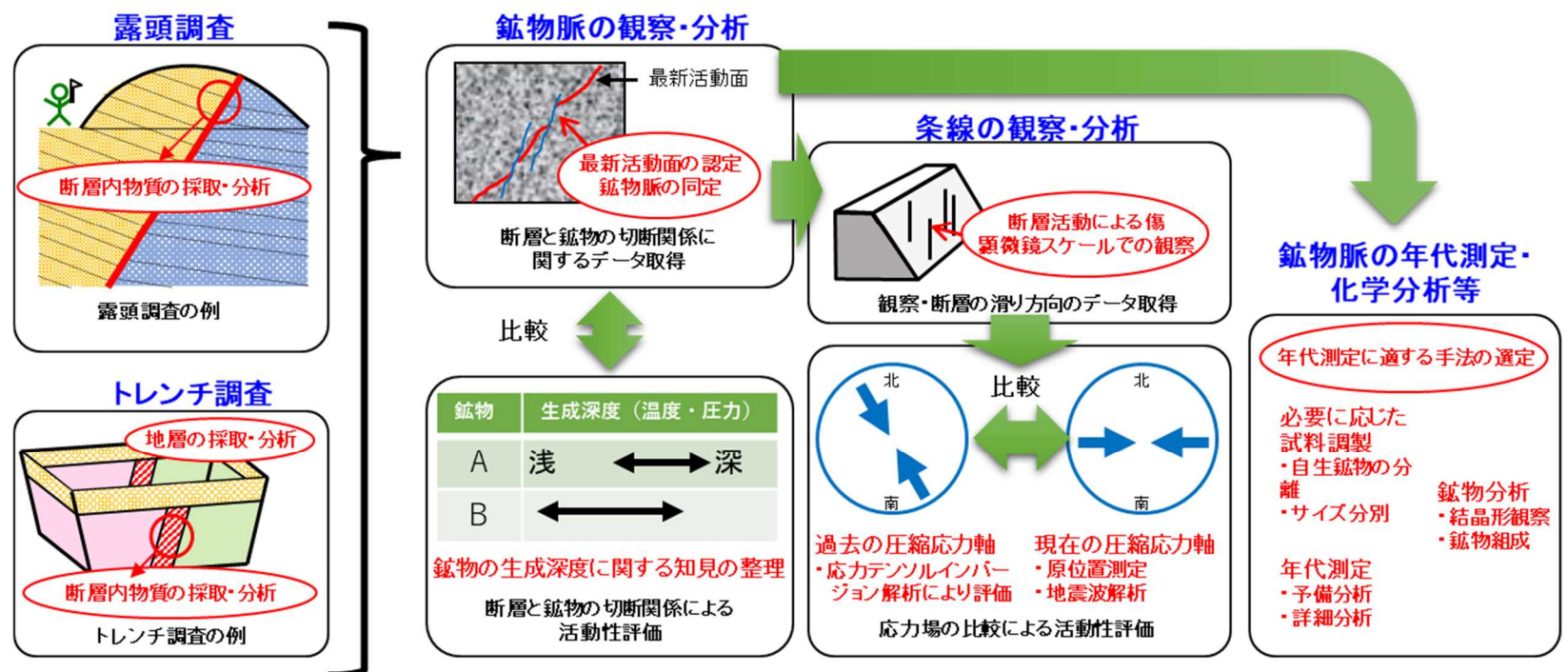


断層面を横断する鉱物脈の岩石研磨片の写真

断層面を横断する鉱物脈の岩石薄片の写真（左図赤枠の範囲）

宮脇ほか (2020)⁽⁵⁾より

図5 中央構造線において実施した鉱物脈法の結果の例

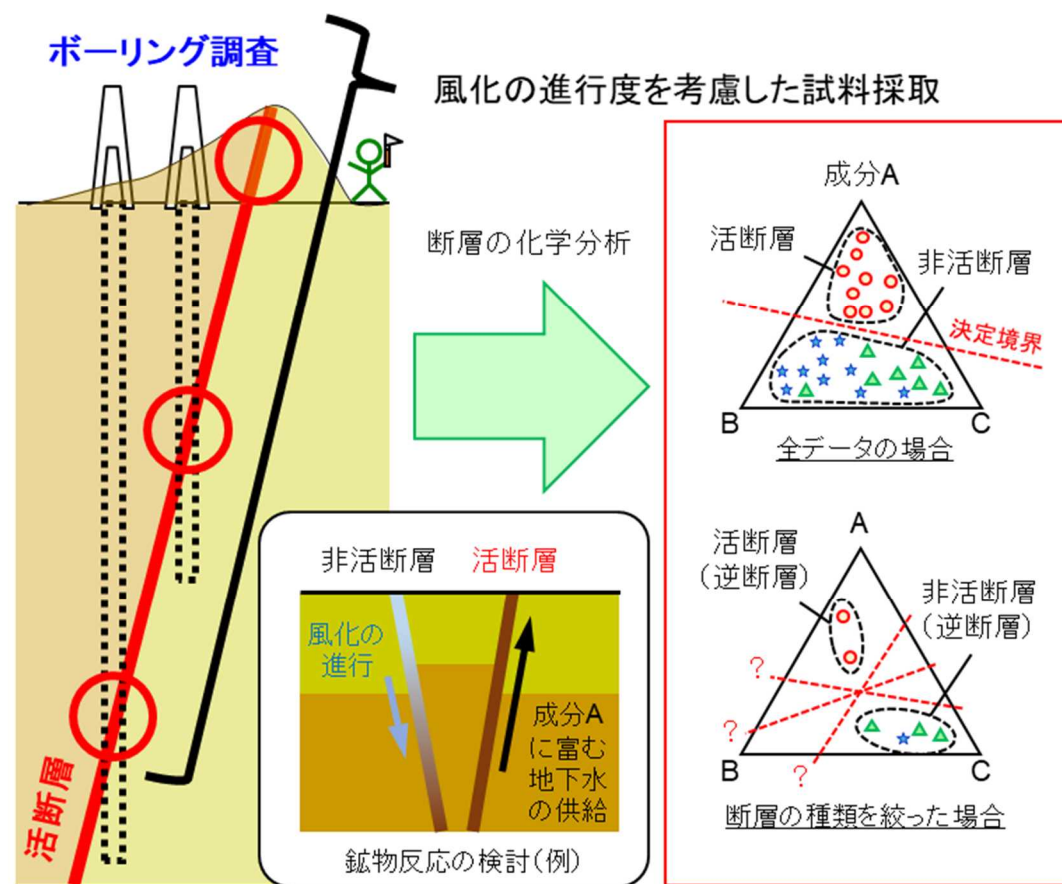


(図はオリジナル)

図 6 鉱物脈法等を用いた断層活動性評価に関する研究の概要

b. 断層岩断層破碎物質の物質科学 (地球化学) 的指標等を用いた断層活動性評価に関する研究【分類②】

断層岩断層破碎物質の化学組成を用いた断層の活動性評価手法について、現在利用可能な化学組成データは敦賀半島江若花崗岩体 (敦賀岩体) を中心とした少数の調査・分析例に留まる^(2,3)。したがって、十分な量の化学組成データに基づく評価手法の妥当性検討を行うため、原岩の化学組成及び断層の発達史の観点から既往研究と比較可能と考えられる江若花崗岩体 (江若岩体) を対象に、野外調査、試料採取及び断層岩断層破碎物質等の化学組成分析を行う。得られた化学組成データは敦賀岩体の値と比較した上で、既往の評価手法等を用いて活断層と非活断層の判別を目的とした試解析に用いる。また、断層岩断層破碎物質等の化学組成データ (文献値及び本研究の分析値) を用いて複数種の統計解析 (線形判別分析等) を行い、入力データ、解析手法等の違いによる評価結果への影響を把握する。これに加え、断層岩断層破碎物質の化学組成に差異が生じるメカニズム (風化変質、熱水変質等) についても考察し、それらの差異を体系的に説明することができる地球化学的モデルを検討する (図 7)。以上の検討結果は適切な手法の組み合わせ、活断層と非活断層の判別手法としての有効性、適用範囲及びその統計解析上の留意点として取りまとめる。



(図はオリジナル)

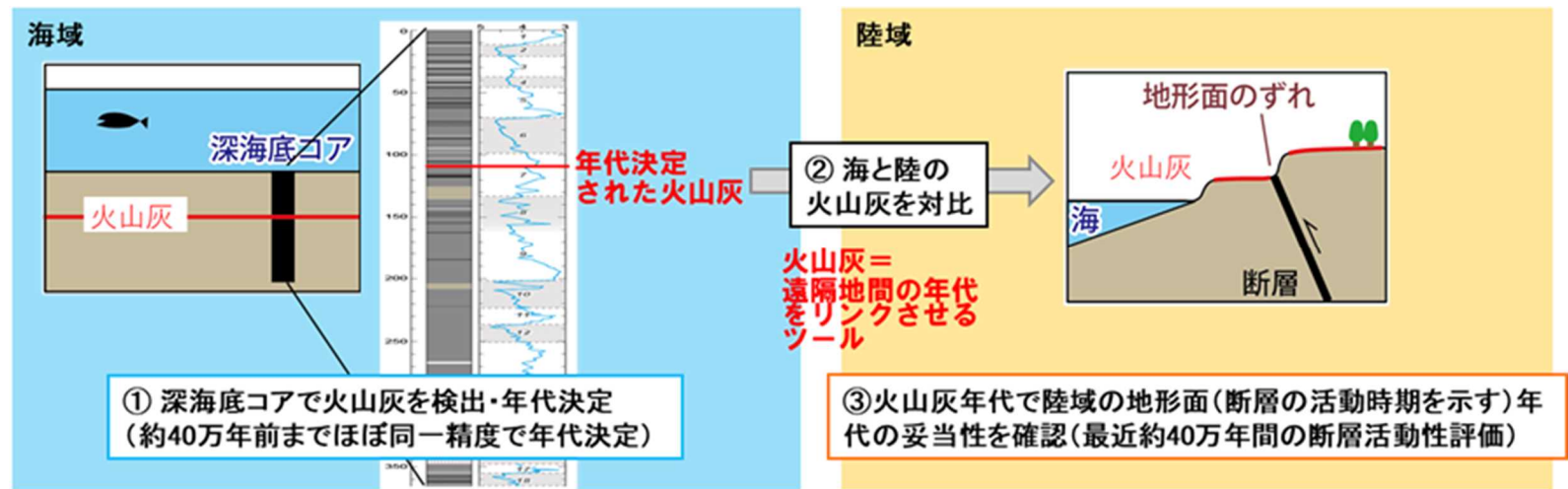
図 7 断層岩断層破碎物質の物質科学 (地球化学) 的指標等を用いた断層活動性評価に関する研究の概要

(2) 断層活動時期を示す地形・地層の年代評価

a. 中期更新世以降の火山灰年代評価手法に関する研究【分類②】

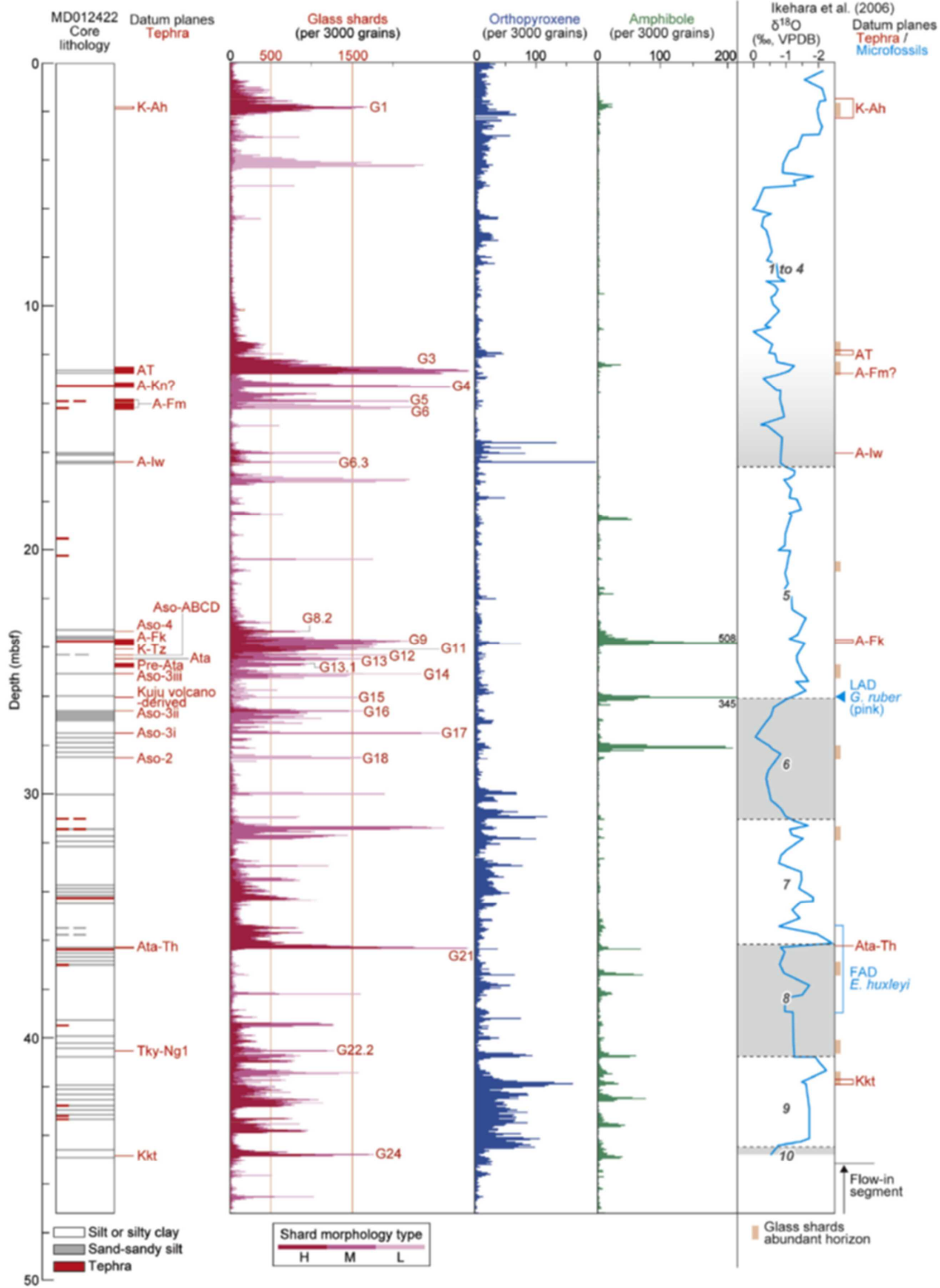
中期更新世以降 (約 40 万年前以降) における断層等の活動時期を推定するに当たり、上載地層又は地形面の年代を決定するために、噴出年代が既知の火山灰が利用される。そのため、火山灰の同定に必要な火山灰粒子の化学組成及び噴出年代に関するデータを蓄積することが重要である。これらのデータの蓄積には、深海底コアを媒介として海陸に分布する火山灰のデータを関連付けることが有効である (図 8)。火山灰の年代決定の精度は、断層の活動性評価の信頼性に直結するため、規則の解釈別記 1 第 3 条第 3 項に規定されている「将来活動する可能性のある断層等」の活動年代 (中期更新世以降 (約 40 万年前以降)) に対応した年代決定の手順を整備することを目的として、これまで深海底コアを用いた研究に取り組んできた。安全研究プロジェクト「地震の活動履歴評価手法に関する研究」 (平成 29 年度～令和元年度) では東北日本を、安全研究プロジェクト「断層の活動性評価に関する研

究」(令和2年度～令和5年度)では西南日本を主に対象とし、深海底コアが帯同する酸素同位体層序や微化石層序を用いて、最近40万年間に対応した火山灰層序を明らかにするとともに(図9)、コア中の火山灰の深度と年代の関係を明示する「年代モデル」の信頼性を向上させるための手順を整備した(図10)。令和6年度以降は、同様の知見を、九州の火山から噴出した火山灰が広く分布すると予想される西南日本～中部日本及び周辺海域へ拡充し、精度良く年代決定された海域の火山灰を陸域の火山灰と対比して年代指標の整備を行い、断層の活動時期を示す地形・地層を年代評価するための手順に関する知見を蓄積する。



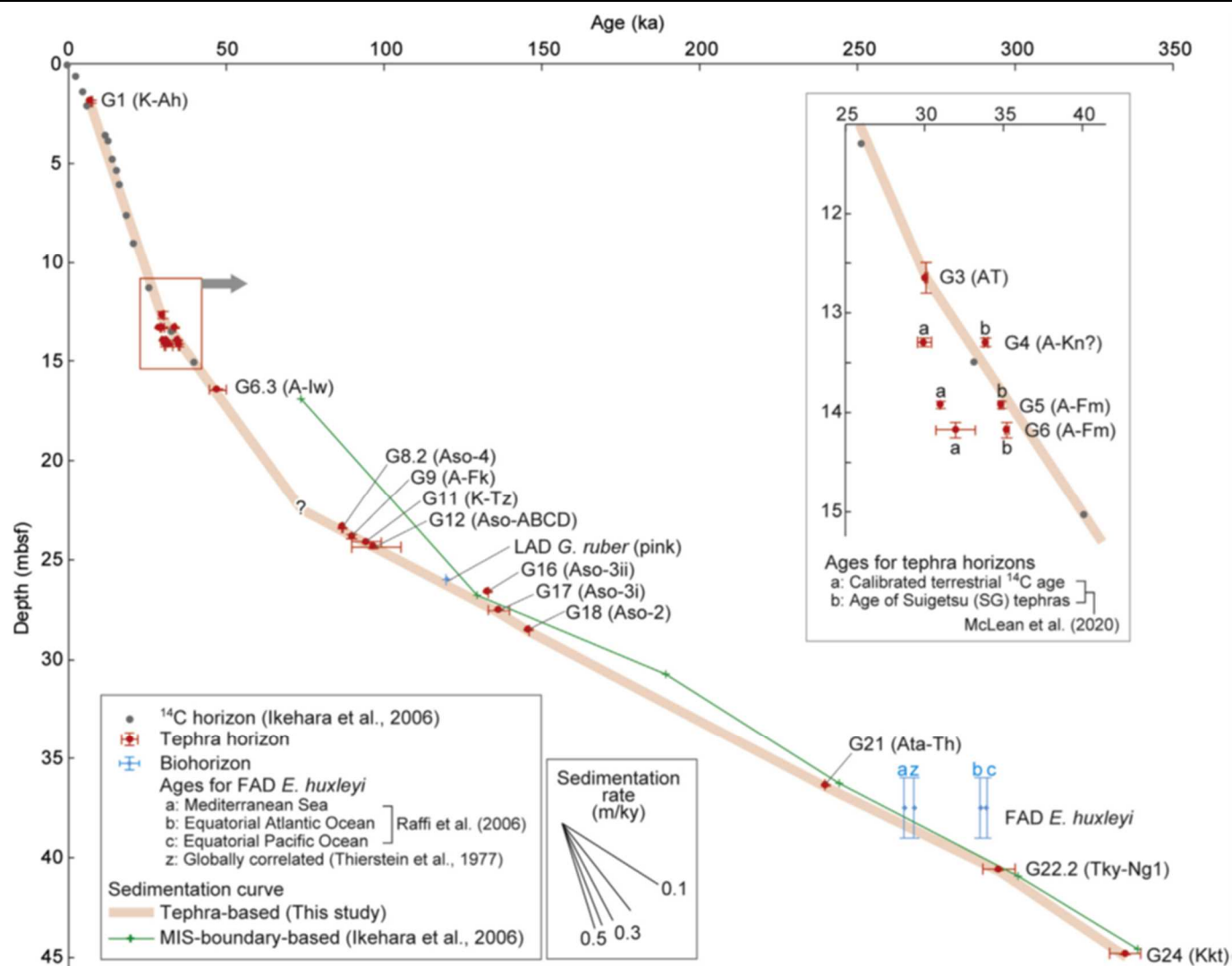
(図はオリジナル)

図8 深海底コアを媒介とした海陸に分布する火山灰の関連付け



Matsu'ura et al. (2021)⁽⁶⁾より
 図中の文献情報は末尾を参照⁽⁷⁾

図9 四国沖深海底コアにおける火山灰の層位、粒子の量比と海洋酸素同位体比曲線



Matsu'ura et al. (2021)⁽⁶⁾より
 図中の文献情報は末尾を参照^(7, 8, 9, 10)

図 10 四国沖深海底コアの火山灰、微化石及び酸素同位体層序から推定された年代モデル

7. 成果目標と実施計画

(1) 断層破碎物質等を用いた断層活動性評価

a. 鉱物脈法等を用いた断層活動性評価に関する研究

成果目標：断层面と鉱物脈との切断関係の把握、鉱物脈の方位解析による古応力場の推定（岩脈法）、鉱物脈の年代測定、化学分析による鉱物脈の生成環境及び形成年代の特定に至るプロセスについての留意点をまとめる。得られた成果は学術雑誌又は NRA 技術報告において公表する。

実施計画：・断層破碎物質の性状に基づいて断層の活動性評価を行うことを目的として、地質環境の異なる複数の断層を対象としてボーリング調査、露頭調査等を行う。

- ・採取した試料を用いて、微細構造観察による断层面と鉱物脈との切断関係の把握、鉱物脈を用いた岩脈法による応力解析、年代測定及び化学分析等による鉱物脈の生成環境及び形成年代の特定を行う。
- ・令和 10 年度までに鉱物脈法を用いた断層の活動性評価、岩脈法を用いた古応力解析に基づく断層の活動性評価及び鉱物脈の年代測定による断層の活動性評価を実施し、各種の評価手法の留意点をまとめる。

b. 断層岩断層破碎物質の物質科学（地球化学）的指標等を用いた断層活動性評価に関する研究

成果目標：断層岩断層破碎物質の化学組成を用いた活断層と非活断層の判別手法の有効性、適用範囲及びその統計解析上の留意点を学術雑誌又は NRA 技術報告にまとめる。

実施計画：・断層岩断層破碎物質の化学組成データの取得を目的として、地表露頭の調査及び試料採取を行う。また、ボーリング掘削により風化の影響の小さい地下の断層岩試料断層破碎物質を採取する。

- ・上載地層法等を用いて当該断層の活動時期を特定するとともに、断層岩試料断層破碎物質の化学組成等の分析を行う。
- ・詳細な鉱物分析を行い、断層岩断層破碎物質の化学的特徴に寄与する変質メカニズムを特定する。
- ・既往の統計解析手法を用いて、解析に用いるデータの種類の、判別手法等を変えた場合の評価結果への影響を確認する。
- ・令和 10 年度までに断層岩断層破碎物質の化学組成を用いた活断層と非活断層の判別手法の有効性、適用範囲及びその統計解析上の留意点を取りまとめる。

(2) 断層活動時期を示す地形・地層の年代評価

a. 中期更新世以降の火山灰年代評価手法に関する研究

成果目標：西南日本～中部日本及び周辺海域における深海底堆積物の「年代モデル」を整備して火山灰の年代を精度良く決定し、海域・陸域の火山灰を対比して信頼性の高い年代指標の整備を行うことによって「将来活動する可能性のある断層等」の活動時期（中期更新世以降、最近 40 万年間）に対応した年代決定手順に関する知見を蓄積する。得られた成果は学術雑誌において公表する。

実施計画：・海底コアに含まれる火山灰粒子の量比分布を把握し、火山灰層準の検出を行うとともに、中期更新世以降に対応する海底コアの火山灰層序を整理する。

- ・火山灰の噴出源と推定される火山の近傍及び風下地域で、陸成堆積物中の火山灰調査を行う。
- ・海域・陸域で採取された火山灰の主成分化学組成及び微量化学組成を分析し、火山灰特徴化のためのデータを収集する。

・令和10年度までに取得された化学組成結果を基に火山灰を対比する。

行程表

	R6年度	R7年度	R8年度	R9年度	R10年度	
(1) a. 鉱物脈法等を用いた断層活動性評価に関する研究	<ul style="list-style-type: none"> 予備調査(調査地域選定) 試料採取 化学分析(予備的分析を含む) 年代測定(予備的分析を含む) 	<ul style="list-style-type: none"> 火成岩地域における試料採取(調査地域ごとの比較検討) 化学分析(本格分析開始)、鉱物脈法及び岩脈法の検討 年代測定(測定手法の統一化) 火成岩地域において実施した鉱物脈法及び岩脈法等による分析結果を取りまとめ、断層活動性評価結果を整理する。 	<ul style="list-style-type: none"> 変成岩又は堆積岩地域における試料採取(調査地域ごとの比較検討) 化学分析(本格分析)、鉱物脈法及び岩脈法の検討 年代測定の実施 変成岩又は堆積岩地域において実施した鉱物脈法及び岩脈法等による分析結果を取りまとめ、断層活動性評価結果を整理する。 	<ul style="list-style-type: none"> 試料採取(追加調査の必要性検討) 化学分析(本格分析)、鉱物脈法及び岩脈法の検討 年代測定の実施 岩種毎の鉱物脈法及び岩脈法等による分析結果を取りまとめ、断層活動性評価結果を整理する。 	<ul style="list-style-type: none"> 論文公表 NRA技術報告公表 年代評価手法の整理 鉱物脈法、岩脈法及び古応力解析に基づく断層活動性評価手法の整理 	
	(1) b. 断層岩断層破碎物質の物質科学(地球化学)的指標等を用いた断層活動性評価に関する研究	<ul style="list-style-type: none"> 予備調査(地表踏査、ボーリング掘削) 室内分析(予備的分析:全岩化学組成分析、年代測定) 統計解析(予備解析) 	<ul style="list-style-type: none"> 試料採取(地表踏査、ボーリング掘削) 室内分析(本格分析開始:全岩化学組成分析、年代測定) 統計解析(判定手法の影響評価) 断層の分布を整理 	<ul style="list-style-type: none"> 試料採取(地表踏査、ボーリング掘削) 室内分析(本格分析:全岩化学組成分析、年代測定) 統計解析(化学指標の適用性検討) 断層タイプ毎の構造地質学的特徴の取りまとめ 断層タイプ毎の基礎的な鉱物学組成の整理 	<ul style="list-style-type: none"> 試料採取(ボーリング掘削) 室内分析(本格分析:全岩化学組成分析、鉱物化学分析、年代測定) 統計解析(断層タイプの影響検討) 断層タイプ毎の鉱物、化学的特徴を取りまとめ 統計手法の整理 	<ul style="list-style-type: none"> 論文公表 NRA技術報告公表 室内分析(補足分析:鉱物化学分析、年代測定) 統計解析手法の取りまとめ 判別指標及び地球化学的根拠の提示
		(2) a. 中期更新世以降の火山灰年代評価手法に関する研究	<ul style="list-style-type: none"> 海底コア中の火山灰、陸域火山灰の試料採取 海底コアに含まれる火山灰粒子の量比分布に基づく火山灰層準の検出 	<ul style="list-style-type: none"> 海底コア中の火山灰、陸域火山灰の試料採取 室内分析(主成分元素組成分析) 火山灰粒子の主成分元素組成データを取りまとめ 	<ul style="list-style-type: none"> 海底コア中の火山灰、陸域火山灰の試料採取 室内分析(主成分・微量成分元素組成分析) 火山灰粒子の主成分及び微量成分元素組成データを取りまとめ 	<ul style="list-style-type: none"> 海底コア中の火山灰、陸域火山灰の試料採取 室内分析(主成分・微量成分元素組成分析) 火山灰粒子の主成分及び微量成分元素組成に基づく海域・陸域の火山灰の特徴を整理

8. 実施体制

【地震・津波研究部門における実施者】
 内田淳一 統括技術研究調査官(全体管理)
 ○松浦旅人 主任技術研究調査官(実施項目(2)a関係)

	<p>○宮脇昌弘 副主任技術研究調査官（実施項目（1）a 関係） ○林 宏樹 副主任技術研究調査官（実施項目（1）b 関係） 林茉莉花 技術研究調査官（実施項目（1）b 関係） 千葉 響 技術研究調査官（実施項目（1）b 関係）</p>
9. 備考	<p style="text-align: center;">文 献</p> <p>(1) 石渡明、「鉍物脈法による断層活動性評価について」、日本地質学会第 123 年学術大会、R23-0-3、平成 28 年 (2) 立石良、島田耕史、清水麻由子、植木忠正、丹羽正和、末岡茂、石丸恒存、「断層ガウジの化学組成に基づく活断層と非活断層の判別—線形判別分析による試み」、応用地質、62 巻、pp. 104-112、令和 3 年 (3) 岩森暁如、小北康弘、島田耕史、立石良、高木秀雄、大田亨、菅野瑞穂、和田伸也、大野顕大、大塚良治、「風化度指標 W 値を用いた江若花崗岩中の断層岩の諸特性」、日本地質学会第 129 年学術大会、G6-0-1、令和 4 年 (4) Miyawaki, M., Sakaguchi, A., “Trench and drilling investigation of the Median Tectonic Line in Shikoku, southwest Japan: implications for fault geometry”, Earth Planets Space, Vol. 73, 194, 2021. (5) 宮脇昌弘、内田淳一、林茉莉花、佐藤秀幸、「断層破碎物質を用いた断層の活動性評価手法に関する研究」、安全研究報告、RREP-2020-4003、原子力規制庁、令和 2 年 (6) Matsu'ura, T., Ikehara, M., Ueno, T., “Late Quaternary tephrostratigraphy and cryptotephrostratigraphy of core MD012422: Improving marine tephrostratigraphy of the NW Pacific”, Quaternary Science Reviews, Vol. 257, 106808, 2021. (7) 池原実、村山雅史、多田井修、外西奈津美、大道修宏、川幡穂高、安田尚登、「四国沖から採取された 2 本の IMAGES コアを用いた第四紀後期におけるテフラ層序」、化石、79 号、pp. 60-76、平成 18 年 (8) McLean, D., Albert, P.G., Suzuki, T., Nakagawa, T., Kimura, J.-I., Chang, Q., Miyabuchi, Y., Manning, C.J., MacLeod, A., Blockley, S.P.E., Staff, R.A., Yamada, K., Kitaba, I., Yamasaki, A., Haraguchi, T., Kitagawa, J., SG14 Project Members, Smith, V.C., “Constraints on the timing of explosive volcanism at Aso and Aira calderas (Japan) between 50 and 30 ka: new insights from the Lake Suigetsu sedimentary record (SG14 core)”, G-cubed, 2020, https://doi.org/10.1029/2019GC008874. (9) Raffi, I., Backman, J., Fornaciari, E., Palike, H., Rio, D., Lourens, L., Hilgen, F., “A review of calcareous nannofossil astrobiochronology encompassing the past 25 million years”, Quaternary Science Reviews, Vol. 25, pp. 3113-3137, 2006. (10) Thierstein, H.R., Geitzenauer, K.R., Molino, B., Shackleton, N. J., “Global synchronicity of late Quaternary coccolith datum levels: validation by oxygen isotopes”, Geology, Vol. 5, pp. 400-404, 1977.</p>