

令和 2 年度安全研究計画

R 2 番号	プロジェクト名	実施期間	頁
1	震源近傍の地震ハザード評価手法の高度化に関する研究	R 2 - R 5	2
2	津波ハザード評価の信頼性向上に関する研究	H 2 9 - R 2	8
3	断層の活動性評価に関する研究	R 2 - R 5	1 2
4	大規模噴火プロセス等の知見の蓄積に係る研究	R 1 - R 5	2 0
5	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	H 2 9 - R 2	2 8
6	火災防護に係る影響評価に関する研究	H 2 9 - R 2	3 5
7	人間工学に基づく人的組織的要因の体系的な分析に係る規制研究	R 1 - R 4	3 9
8	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	H 2 9 - R 3	4 2
9	重大事故時における重要物理化学現象の不確実さ低減に係る実験	R 2 - R 7	4 8
1 0	軽水炉の重大事故時における不確実さの大きな物理化学現象に係る解析コードの開発	H 2 9 - R 4	5 6
1 1	軽水炉の重大事故における格納容器機能喪失及び確率論的リスク評価に係る解析手法の整備	H 2 9 - R 4	6 2
1 2	原子力プラントの熱流動最適評価に関する安全研究	R 1 - R 4	6 9
1 3	燃料健全性に関する規制高度化研究	H 1 9 - R 2	7 4
1 4	事故時炉心冷却性に対する燃料破損影響評価研究	R 1 - R 5	7 7
1 5	重大事故時等の原子炉格納容器の終局的耐力評価に関する研究	H 2 9 - R 3	8 1
1 6	実機材料等を活用した経年劣化評価・検証に係る研究	R 2 - R 6	8 6
1 7	福島第一原子力発電所燃料デブリの臨界評価手法の整備	H 2 6 - R 3	9 3
1 8	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	H 2 9 - R 2	9 8
1 9	使用済燃料等の輸送・貯蔵の分野における最新解析手法に係る評価手法の研究	R 2 - R 5	1 0 5
2 0	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	H 2 9 - R 2	1 0 7
2 1	放射性廃棄物等の放射能濃度評価技術に関する研究	H 2 9 - R 2	1 1 6

研究計画

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

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

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

(1) 断層モデル法の精度向上に係る検討【分類①】

a. 内陸型地震の特性化震源モデルに係る知見の蓄積

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

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

b. 海溝型地震の特性化震源モデルに係る知見の蓄積

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

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

6. 安全研究概要

（始期：R2年度）

（終期：R5年度）

(2) 震源を特定せず策定する地震動の検討【分類①】

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

(3) 確率論的地震ハザード評価に係る不確かさの検討【分類①】

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

a. 地震規模等の不確かさを考慮した確率論的地震ハザード評価手法の検討

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

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

b. 確率論的地震ハザード評価における地震動の不確かさの検討

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

(4) 断層変位評価に係る知見の蓄積【分類④】

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

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

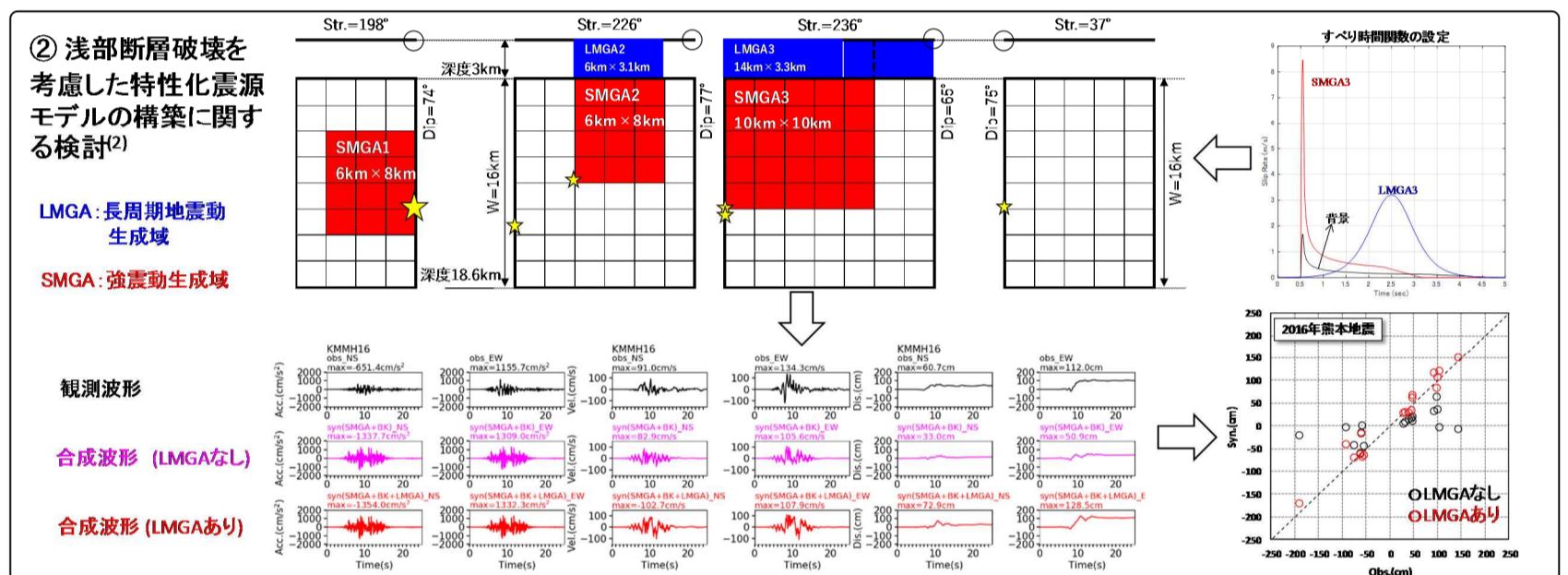
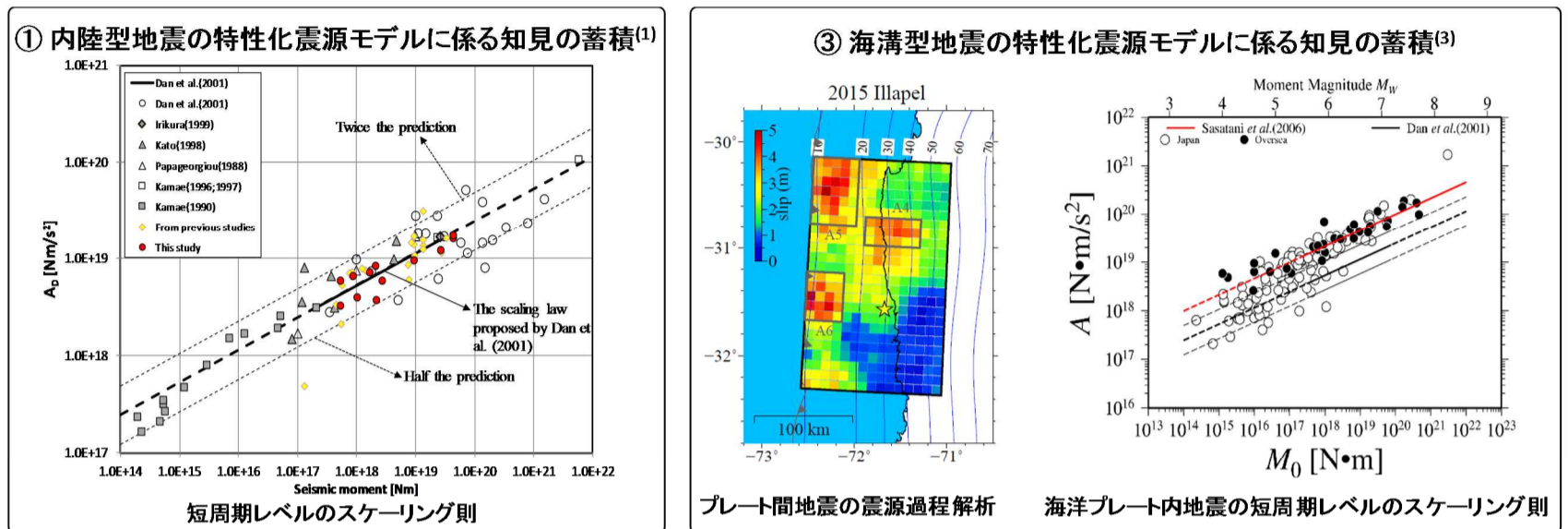


図1 断層モデル法の精度向上に係る検討

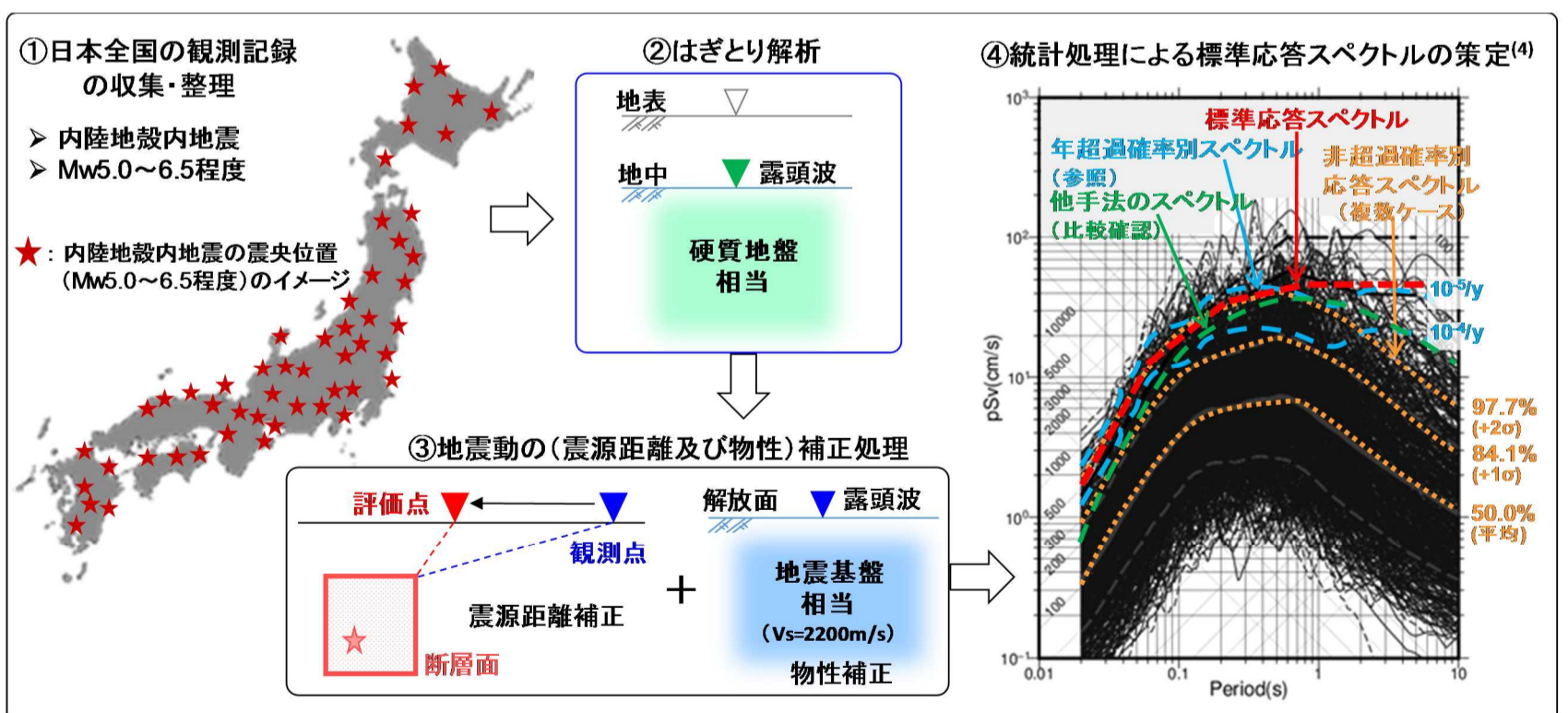


図2 震源を特定せず策定する地震動の検討

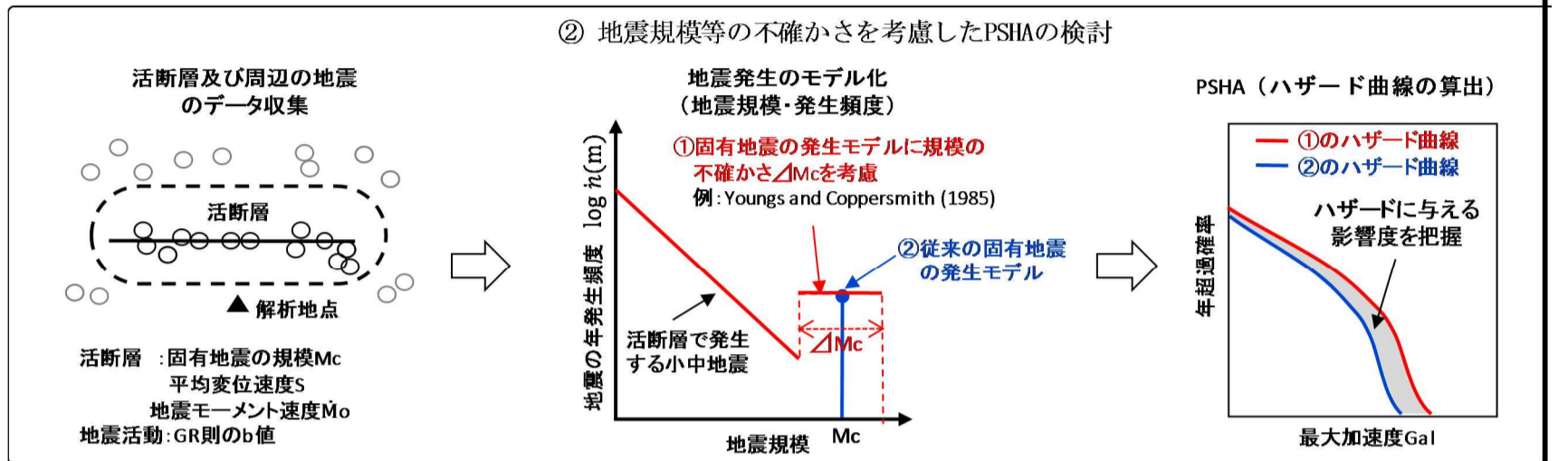
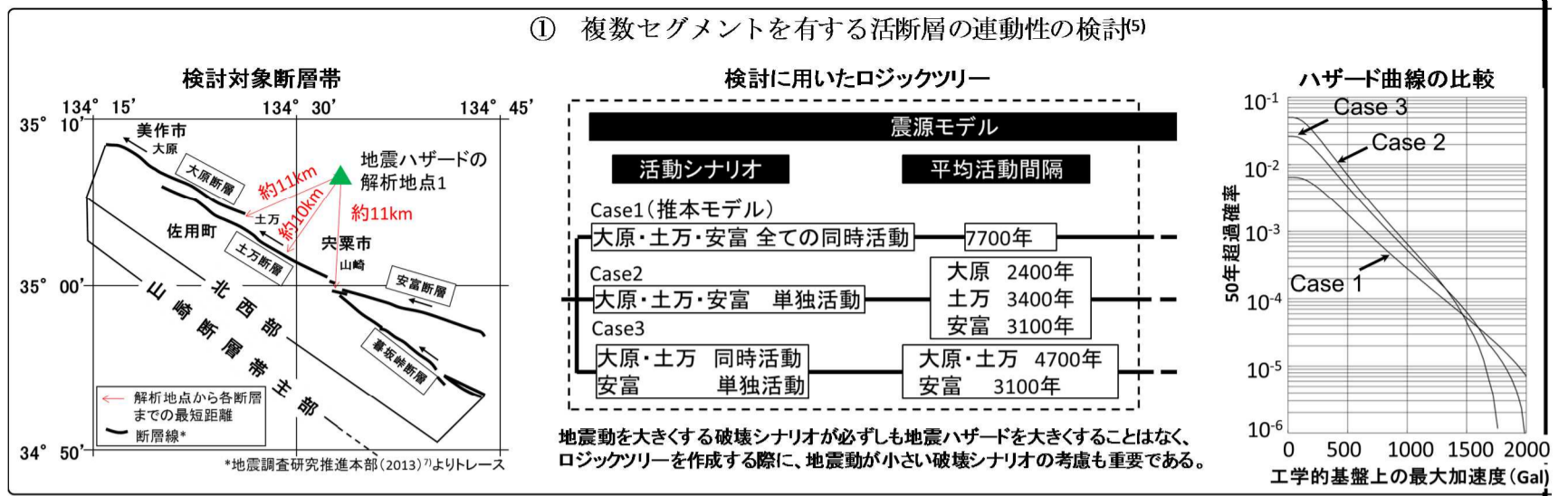


図3 確率論的地震ハザード評価に係る不確かさの検討

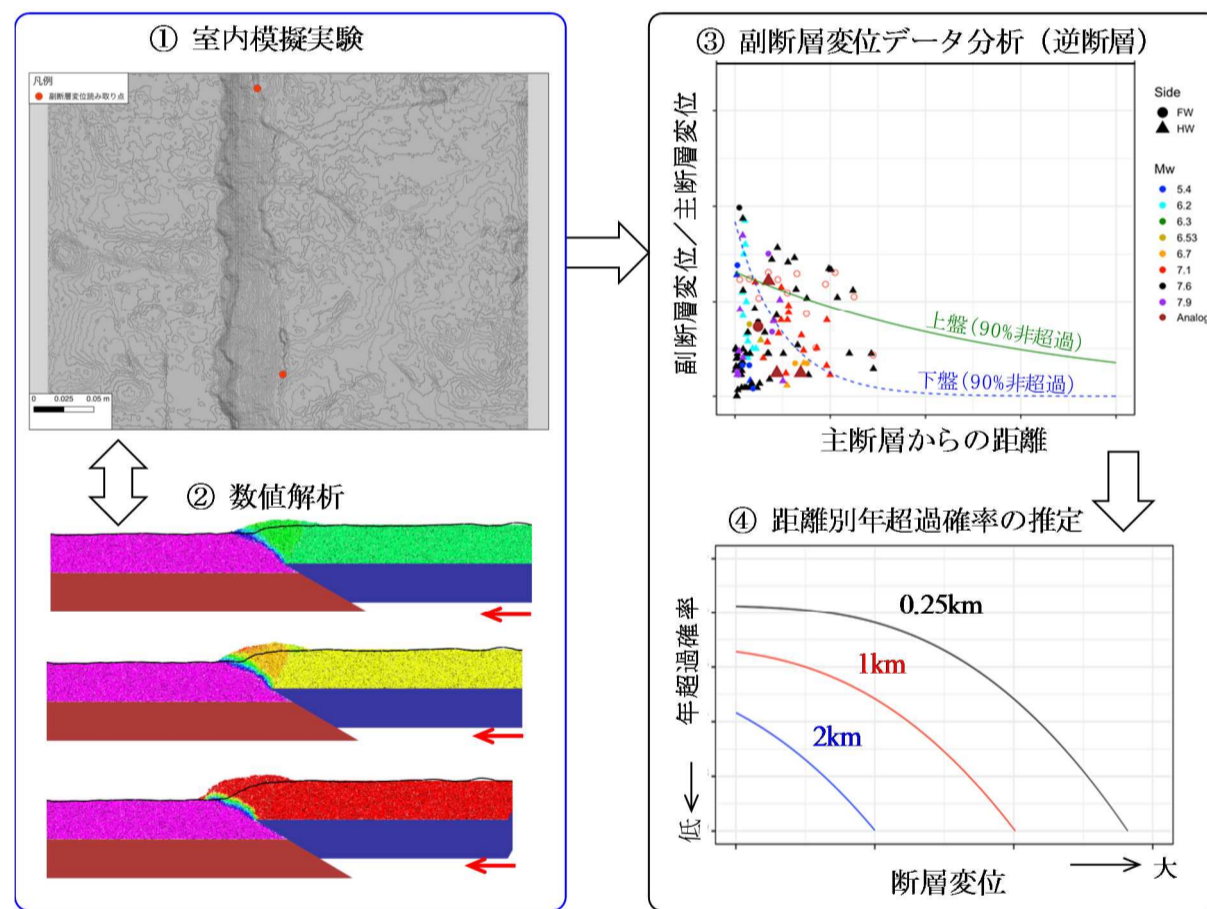


図4 断層変位評価に係る知見の蓄積⁶⁾

実施行程表

項目	R2 年度	R3 年度	R4 年度	R5 年度
(1)a. 内陸型地震の特性化震源モデルに係る知見の蓄積	浅部断層破壊の考慮 ← パラメータ相関性分析	浅部断層破壊の考慮 → パラメータ相関性の考慮	相関性を考慮した地震動解析	検証解析・手法まとめ NRA 技報作成
(1)b. 海溝型地震の特性化震源モデルに係る知見の蓄積	地域性調査・再現解析	検証解析・距離減衰式との比較	不確かさの考慮 巨大地震への適用検討	検証解析・手法まとめ ▽論文投稿
(2) 震源を特定せず策定する地震動の検討	地震動追加解析 課題調査	地震動追加解析・手法向上の調査解析	地震動追加解析 手法向上結果の分析	検証解析・手法まとめ ▽論文投稿

(3)a. 地震規模等の不確かさを考慮した確率論的地震ハザード評価手法の検討	地震規模と発生頻度の不確かさの調査	PSHA 試解析 課題抽出	不確かさ評価の向上 PSHA 解析・影響度分析	適用条件・課題の整理・ 手法まとめ ▽論文投稿
(3)b. 確率論的地震ハザード評価における地震動の不確かさの検討	不確かさ評価手法の調査・試解析	地点ごとの不確かさの評価・GMPE と比較	PSHA 解析、従来手法による結果と比較 ▽論文投稿	不確かさの取り扱いの整理・手法まとめ
(4) 断層変位評価に係る知見の蓄積	断層変位データ整理	断層変位のモデル化	実験データ等の活用	ハザード解析・まとめ ▽論文投稿
	数値解析・実験調査	模擬実験・数値解析	模擬実験・数値解析	

(注1) 有用な研究成果は、研究期間中においても適宜論文として公表する。

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

	<p>b. : 海溝型地震の特性化震源モデルに係る知見の蓄積【分類①】 国内外で発生した海溝型地震を対象に、断層モデル法による地震動又は（プレート間巨大地震における）津波の検証解析を実施し、解析結果のとりまとめを行う。</p> <p>(2) 震源を特定せず策定する地震動の検討【分類①】 震源を特定せず策定する地震動に関連する観測記録の追加解析、最新知見を反映した評価手法による検証解析を実施し、解析結果のとりまとめを行う。</p> <p>(3) a. : 地震規模等の不確かさを考慮した確率論的地震ハザード評価手法の検討【分類①】 地震本部の結果等と比較してハザードに与える影響度を確認するとともに、日本の活断層で適用する際の具体的な条件及び課題を整理しとりまとめる。</p> <p>b. : 確率論的地震ハザード評価における地震動の不確かさの検討【分類①】 PSHAにおける地震動不確かさの取り扱いに関して知見及び課題を整理しとりまとめる。</p> <p>(4) 断層変位評価に係る知見の蓄積【分類④】 前年度の実験及び解析データを用いて断層変位モデル化への活用について検討し、断層変位ハザード解析を行い、断層変位評価における不確かさの取り扱いについてとりまとめる。</p>
8. 実施体制	<p>【地震・津波研究部門における実施者】</p> <p>○呉 長江 主任技術研究調査官 儘田 豊 主任技術研究調査官 藤田雅俊 技術研究調査官 田島礼子 技術研究調査官</p>
9. 備考	<p style="text-align: center;">文献</p> <p>(1) Wu Changjiang, Uncertainty analysis relevant to the fault rupture modeling method, The Second IAEA Workshop on Best Practices in Physics-based Fault Rupture Models for Seismic Hazard Assessment of Nuclear Installations (2nd Workshop on Best PSHANI), Cadarache, France, 2018.</p> <p>(2) 一般財団法人地域地盤環境研究所、平成 30 年度原子力施設等防災対策等委託費（内陸型地震による地震動の評価手法の検討）事業 成果報告書、1444p、2019 年</p> <p>(3) 株式会社大崎総合研究所、平成 30 年度原子力施設等防災対策等委託費（海溝型地震による地震動の評価手法の検討）事業 成果報告書、476p、2019 年.</p> <p>(4) 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：標準応答スペクトルに係る検討について（参考資料）、164p、2019 年、 https://www.nsr.go.jp/disclosure/committee/youshikisya/tokuteisezu_jishindo/houkoku.html（令和 2 年 1 月 30 日確認）.</p> <p>(5) 儘田 豊、内田淳一、藤田雅俊、確率論的地震ハザード解析におけるロジックツリーの分岐項目の設定に関する検討ー内陸の活断層を対象としてー、日本活断層学会 2015 年度秋季学術大会 講演予稿集、P-13、2015 年</p> <p>(6) 株式会社構造計画研究所、平成 30 年度原子力規制庁委託成果報告書：断層変位評価に係る知見の整備、224p、2019 年.</p>

研究計画

1. プロジェクト	2. 津波ハザード評価の信頼性向上に関する研究	担当部署	技術基盤グループ 地震・津波研究部門
		担当責任者	杉野英治 上席技術研究調査官
2. カテゴリー・研究分野	【横断的原子力安全】 A) 外部事象（地震、津波、火山等）	主担当者	杉野英治 上席技術研究調査官
3. 背景	<p>平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震による津波（以下「東北地震津波」という。）は、福島第一原子力発電所に襲来し、重大な事故を引き起こした。この津波は、同発電所の設計津波水位を上回り、設計津波水位を超える津波の発生に備えることの重要性を示した。更には、原子力発電所の津波リスクに対する認識の重要性を改めて示した。この事故を踏まえた政府報告書^{*1}でも、設計津波高を上回る津波が施設に及ぶことによるリスクの存在を認識し、敷地の冠水や遡上津波の破壊力を考慮しても施設の重要な安全機能を維持できるよう対策を講じることや、確率論的リスク評価（Probabilistic Risk Assessment、以下「PRA」という。）手法を活用したリスク管理を実施することなどが教訓として示された。</p> <p>東北地震津波後、平成 25 年に福島第一原子力発電所の事故を教訓に新規基準及び審査ガイドを施行し、これに基づき既設原子力発電所の適合性審査が行われてきた。特に本プロジェクトに関連する規定としては、新たに「基準津波の策定」が明記され、また、これを補足するガイドとして「基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド」が策定された。一方、これまでの津波ハザードに係る安全研究としては、平成 23 年に東北地震津波の発生メカニズムを推定、平成 24 年にプレート間地震による津波水位予測のための津波波源モデルの設定方法を構築、そして、平成 25 年には確率論的津波ハザード評価手法にこの津波波源モデルを適用し、影響を評価した。このほかにも、平成 28 年までに津波痕跡高及び津波堆積物に関するデータベースや津波堆積物に基づく津波波源推定手法を整備してきた。これらの成果の一部は、上記の審査ガイドに反映され、既設発電所の適合性審査においても有用な知見の一つとして活用されてきた。</p> <p>平成 25 年に改正された「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」により、事業者に対する「安全性の向上のための評価」の実施が規定され、今後、適合性審査を終えた既設発電所から順次、安全性向上評価の定期的な実施が見込まれる。</p> <p>この安全性向上評価では、津波に対する確率論的リスク評価（以下「津波 PRA」という。）手法の活用が見込まれる。特に津波 PRA 手法の構成要素である確率論的津波ハザード評価手法については、種々の津波発生要因とその不確かさを適切に評価し同評価手法の信頼性向上を図り、将来的な「実用発電用原子炉施設の安全性向上評価に関する運用ガイド」の改定による安全性に係る評価の高度化に資することが重要である。</p> <p>これまでに上述のとおり、プレート間地震に伴う津波を対象に津波波源モデルの改良等を実施してきたが、そのほかの地震発生様式の違い、地震規模設定に係る不確かさの取扱い方法及び、地震以外の発生要因の特性も踏まえて、確率論的津波ハザード評価手法に反映していくことが必要である。</p> <p>^{*1} 「原子力安全に関する IAEA 閣僚会議に対する日本国政府の報告書-東京電力福島原子力発電所の事故について」（平成 23 年 6 月原子力対策本部）</p>		
4. 目的	<p>本プロジェクトでは、関連評価ガイドの策定及び安全性に係る評価の高度化に資するため、確率論的津波ハザード評価手法の信頼性向上を図る。</p> <p>(1) 地震起因の津波の確率論的ハザード評価手法の信頼性向上</p> <p>a. 津波発生モデルの不確かさ評価手法の整備</p> <p>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、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整備する。</p> <p>b. 津波地震による津波の特性化波源モデルの構築</p> <p>津波地震の観測事例及び水理実験を踏まえた津波地震の発生メカニズムの解明とその特徴を考慮した津波波源モデルの設定方法を構築する。</p> <p>c. 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>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波源モデルの設定方法の適用性を検証する。</p> <p>(2) 地震以外の発生要因の津波の確率論的ハザード評価手法の整備</p> <p>a. 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</p> <p>実験等により、海底での斜面安定性に関する既往モデルの適用性及び不確かさを把握し、海底地すべり起因の津波を考慮した確率論的津波ハザード評価手法を整備する。</p>		
5. 知見の活用先	<p>本プロジェクトの実施項目で得られた成果等は、「基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド」に関連する技術的知見としてまとめ、論文として公表していくとともに、基準津波に係る適合性審査への活用を検討する。また、「実用発電用原子炉施設の安全性向上評価に関する運用ガイド」に関連する技術的知見としてまとめ、安全性に係る評価への活用を検討する。</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目的のうち以下の分類に基づき実施する。

②審査等の際の判断に必要な新たな知見の収集・整備（以下「分類②」という。）

(1) 地震起因の津波の確率論的ハザード評価手法の信頼性向上

a. 津波発生モデルの不確かさ評価手法の整備【分類②】

確率論的津波ハザード評価手法では、津波波源の位置、規模、地震発生頻度等の津波発生に関するモデル化並びに津波伝播及び遡上に関するモデル化を行い、それに伴う各種モデル化による不確かさを考慮する（図1）。平成23年東北地震津波の発生以降、主に津波波源のモデル化のうち、発生位置及び断層すべり分布の不均一さ並びに断層破壊伝播特性について検討を進めてきた。しかし、地震規模及び地震発生頻度に係るモデル化上の不確かさは、確率論的津波ハザード評価結果に大きく影響することが予想され、より詳細に検討を行い、影響を評価しておくことが重要である。本研究では、津波発生に係る地震規模及び地震発生頻度の不確かさの影響を適切に評価するため、これらのモデル化上の不確かさを定量評価し、確率論的津波ハザード評価手法への反映方法を構築する。

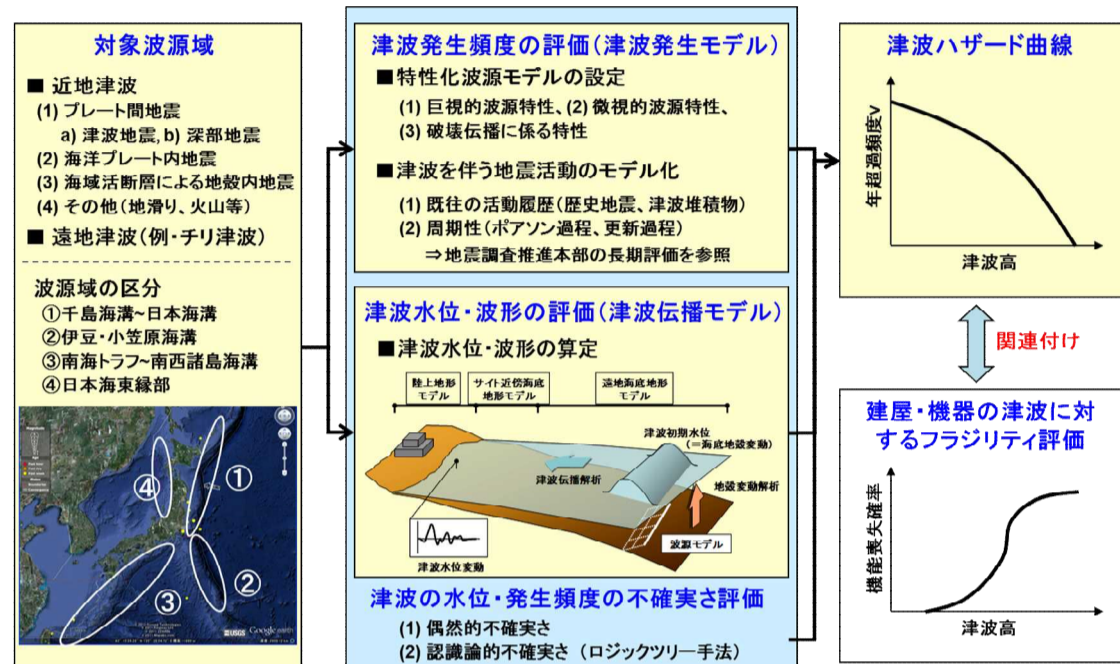


図1 確率論的津波ハザード評価手法の概要(杉野他、2015)

6. 安全研究概要
(始期：H29年度)
(終期：R2年度)

b. 津波地震による津波の特性化波源モデルの構築【分類②】

津波地震の波源のモデル化手法は、深部のプレート間地震と同様に、従来の弾性体理論に基づく地殻変動解析による海底面変位量の鉛直成分を海水面に与えて評価される。しかし、Tanioka & Satake(1996)は、地殻変動の水平成分も津波の発生に寄与することを海外の既往津波(1994 Java earthquake, Indonesia, 1994 Mindoro earthquake, Philippines)の再現により確認している。プレート間の海溝軸付近で発生する津波地震でも地殻変動の水平成分の影響が考えられる。津波地震単独又は深部プレート間地震との連動発生は、今後も、南海トラフ、日本海溝及び千島海溝でも可能性がある。本研究では、海溝軸付近における地殻変動の水平成分の効果を把握し評価方法を構築するために国内外の関係機関と協力して以下を行う（図2）。

- (a) 海底面の地殻変動の水平成分と海水面の水位変動との関係を明らかにするために、海底面の水平方向の地形変化を模擬した水理実験を行い、海水面の水位変動に関するデータを取得する。
- (b) 津波地震における地殻変動の水平成分を考慮した津波想定を可能にするために、上記の水理実験の結果を踏まえた特性化波源モデルの設定方法を構築し、既往津波による検証を行う。

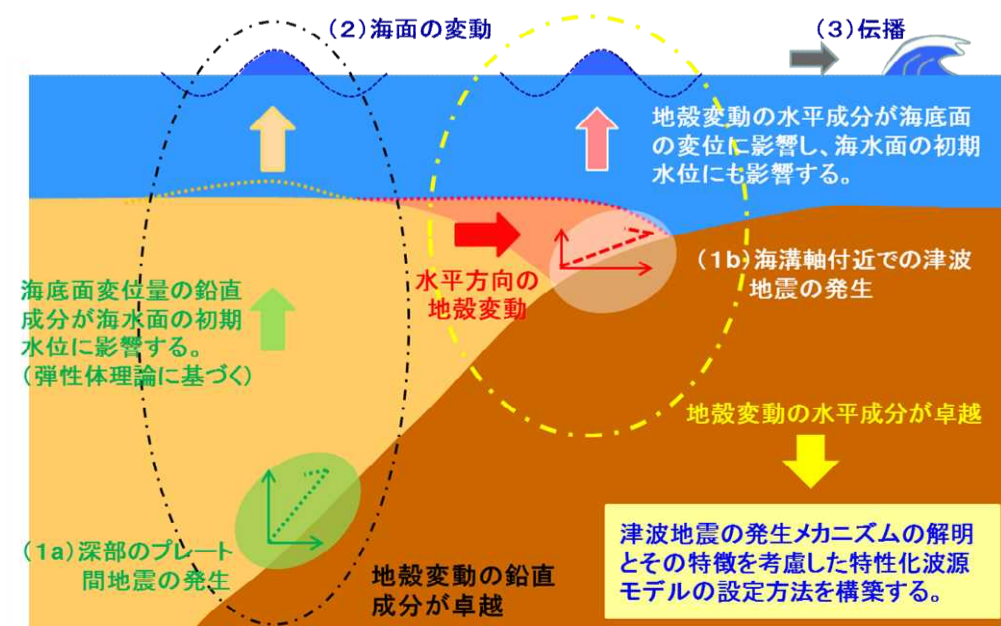


図2 津波地震による地殻変動のイメージ

c. 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【分類②】

東北地震津波の知見を基に構築したプレート間地震による津波の特性化波源モデル（図3）は、Mw8.9以上については東北地震津波の痕跡記録に対して適用性の検証が行われた。しかし、中小規模（～Mw8.2）及び大規模（Mw8.3～8.8）の特性化波源モデルについては、適用性の検証が課題として残されている。中小規模及び大規模の特性化波源モデルの検証を行うことで、その適用性が明確となり、また、巨大規模の検証結果と合わせ確率論的津波ハザード解析におけるばらつき β を評価するに当たって

重要な情報として活用できる（図4）。本研究では、中小規模及び大規模の特性化波源モデルの適用性を検証することを目的に以下を行う。

- (a) これまでに整備してきた津波痕跡データベースを活用し、プレート間地震による既往津波の再現解析を行い、再現性の程度を評価する。
- (b) 内陸地殻内地震についても既往津波の再現解析を行い、再現性の程度を評価する。

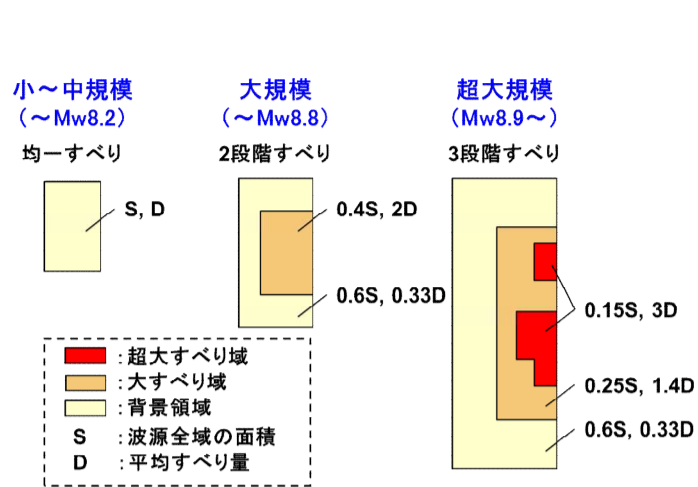


図3 特性化波源モデルの不均一すべり分布の概念図 (杉野他 2014)

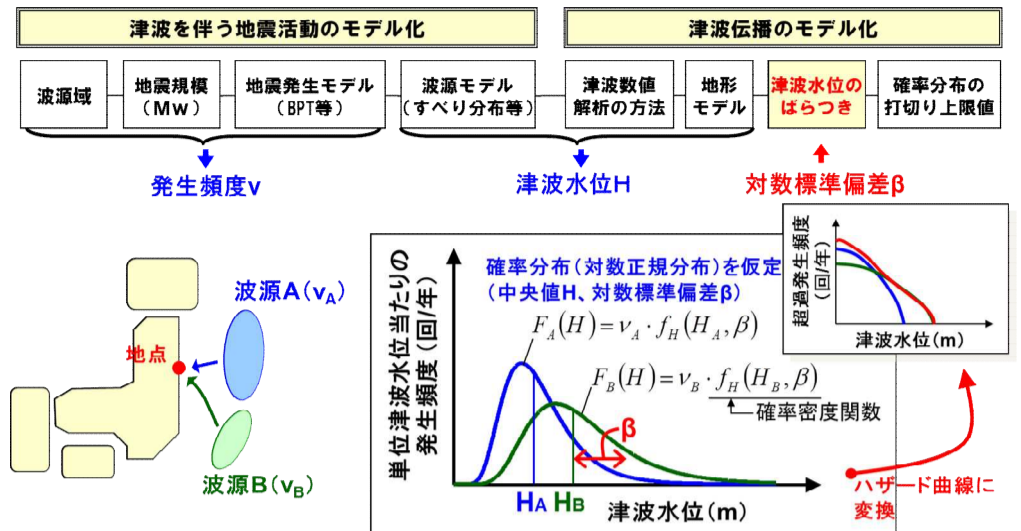


図4 確率論的津波ハザード評価における津波水位のばらつき β の取扱方法の概念図 (原子力安全基盤機構 2014)

(2) 地震以外の発生要因の津波の確率論的ハザード評価手法の整備

a. 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【分類②】

地震による断層運動のほかに津波の発生要因として、海底及び海岸付近の地すべりが挙げられる。これまでの海底地すべり起因津波に関する安全研究では、既往研究を基にして地すべり起因の津波解析コードを作成し、地すべりの継続時間や崩壊土量によって沿岸部に到達する津波の波形や津波高への影響を定量的に示した。また、海底における将来の地すべり発生の可能性に着目し、海底地すべり発生危険度判定方法（暫定版）を整備し、モデル海域における海底地すべりマップを作成している。本研究では、これまでの研究成果を踏まえつつ、海底地すべり発生危険度判定方法の精緻化と確率論的津波ハザード解析手法の整備のため国内外の関係機関と協力して以下を行う（図5）。

- (a) 複数の斜面勾配を模擬した海底地すべりの遠心力模型実験を行い、海底地すべりの安定性評価モデルを検証する（図6）。
- (b) 海底地すべり起因の津波解析コード及び海底地すべり発生危険度判定方法を組み合わせた、確率論的津波ハザード解析手法を整備する。

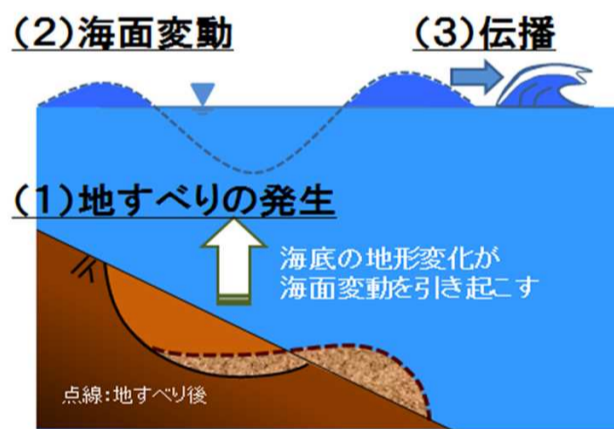


図5 海底地すべりによる津波発生のイメージ

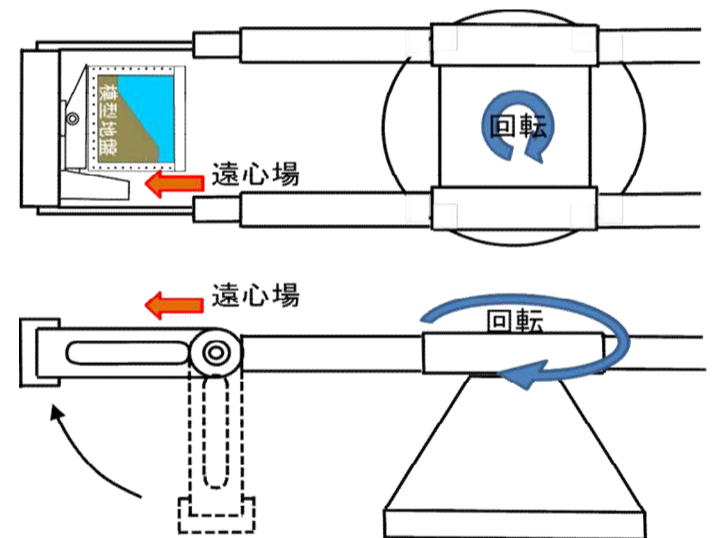


図6 遠心力模型実験のイメージ

行程表

	平成 29 年度	平成 30 年度	令和元年度	令和 2 年度
(1) a. 津波発生モデルの不確かさ評価手法の整備	既往研究の調査分析	不確かさ要因の確率モデル構築とハザード解析への適用	評価手法のまとめ・公表	論文投稿 ▽ 公表 ▽
(1) b. 津波地震による津波の特性化波源モデルの構築	既往研究の調査分析	水理模型実験と検証解析	特性化波源モデルの構築 論文投稿 ▽ 論文公表 ▽	実地形への適用・評価手法のまとめ・公表 論文投稿 ▽
(1) c. 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	既往津波の再現解析（大規模津波）	既往津波の再現解析（中小規模津波）	ハザード解析への適用とまとめ・公表 論文投稿 ▽	論文公表 ▽
(2) a. 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	海底地すべり模型実験のための斜面設計	海底地すべり模型実験（緩急勾配斜面）	海底地すべり模型実験（追加、大型）、検証解析、ハザード試解析	海底地すべり模型実験（小型）、手法のまとめ・公表 論文投稿 ▽

(注1) 有用な研究成果は、研究期間中においても適宜論文として公表する。

7. 実施計画	<p>【平成 29 年度の実施内容】</p> <p>(1) a. 津波発生モデルの不確かさ評価手法の整備【分類②】 平成 30 年度以降の各種不確かさ要因の確率モデルの構築のために、津波発生に係る地震規模及び地震発生頻度に係るモデル化に関する既往研究を調査する。</p> <p>b. 津波地震による津波の特性化波源モデルの構築【分類②】 過去にプレート間の海溝軸付近で発生した津波地震を対象に、波源域、地殻変動の鉛直及び水平成分挙動、津波高さ等に関する既往研究を調査し、津波地震の発生メカニズムに関する知見を整備する。また、既往研究を踏まえて、地殻変動の水平成分を考慮した津波初期水位解析機能を津波解析コード SANNAMI (+TUNAMI) に追加整備する。さらに、平成 30 年度以降に地殻変動の水平成分挙動が海水面に与える影響について水理模型を用いて確認するため、水理模型を製作する。</p> <p>c. 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【分類②】 大規模津波 (Mw8.3~8.8) を対象に、特性化波源モデルを用いた津波伝播モデルによる津波高のばらつき β の検討を行い、同波源モデルの適用性を検証する。</p> <p>(2) a. 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【分類②】 既往の斜面安定性モデルの適用性を検証するために、海底環境下における急勾配・緩勾配の斜面崩壊挙動及び斜面安定性(動的)に関する遠心力模型実験に用いる斜面模型を設計する。</p>
	<p>【平成 30 年度の実施内容】</p> <p>(1) a. 津波発生モデルの不確かさ評価手法の整備【分類②】 津波発生に係る地震規模及び地震発生頻度の不確かさを定量化し、確率モデルを構築する。また、これらの不確かさ要因についてモンテカルロ法を利用した確率論的津波ハザード解析コードを整備し、試解析を行って、これらの影響を評価する。</p> <p>b. 津波地震による津波の特性化波源モデルの構築【分類②】 海溝軸付近での地殻変動の水平成分挙動が海水面に与える影響を確認するための水理模型実験装置を開発・製作し、実験を行う。津波解析コード SANNAMI (+TUNAMI) の津波初期水位解析機能を用いて実験条件に合わせた解析を行い、再現性を確認する。</p> <p>c. 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【分類②】 中小規模 (Mw8.2 以下) クラスの既往津波を対象に、特性化波源モデルの設定方法を用いて津波波源モデルを作成する。上記の津波波源モデルを用いて津波伝播解析を行い、津波高のばらつき β を算定し、同波源モデルの適用性を検証する。</p> <p>(2) a. 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【分類②】 海底環境下における急勾配・緩勾配の斜面崩壊挙動及び斜面安定性に関する動的加振条件下での遠心力模型実験を行い、斜面強度に関するデータを取得する。上記の実験データを用いて既往の斜面安定性モデルの適用性を検証する。</p>
	<p>【令和元年度の実施内容】</p> <p>(1) a. 津波発生モデルの不確かさ評価手法の整備【分類②】 平成 30 年度までに実施した既往研究の調査及び各種不確かさ要因の定量化評価、更には確率論的津波ハザード評価手法における影響評価の結果を取りまとめる。</p> <p>b. 津波地震による津波の特性化波源モデルの構築【分類②】 地殻変動の水平成分を考慮した津波想定を可能にするために、観測事例、水理実験、再現解析、インバージョン解析等の結果を踏まえた特性化波源モデルの設定方法を構築する。</p> <p>c. 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【分類②】 平成 30 年度までに津波規模ごとに算定された特性化波源モデルのばらつき β を用いて確率論的津波ハザード解析を行い、解析結果に及ぼす影響を把握するとともに、中小規模及び大規模津波の特性化波源モデルの適用性を検証する。</p> <p>(2) a. 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【分類②】 平成 30 年度の実験結果を踏まえ、異なる実験条件下での遠心力模型実験を実施し、取得したデータを用いて既往の斜面安定性モデルの適用性の検証を行う。また、遠心力模型実験(大型)を実施し、スケールの違いによる既往モデルの適用性への影響を確認する。加えて、既往の斜面安定性モデルの適用性を踏まえ海底地すべり起因津波の確率論的津波ハザード評価の試解析を実施する。</p>
	<p>【令和 2 年度の実施内容】</p> <p>(1) b. 津波地震による津波の特性化波源モデルの構築【分類②】 令和元年度までに構築した特性化波源モデルの設定方法を用いて実地形に適用し、海溝軸付近の海底地形の地域性が沿岸部の津波水位に及ぼす影響を評価する。</p> <p>(2) a. 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【分類②】 既往の斜面安定性モデルによる解析値のばらつきを算定するため、小型の遠心力模型実験を追加実施する。さらに、このばらつきの値を考慮した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として取りまとめる。</p>
8. 実施体制	<p>【地震・津波研究部門における実施者】</p> <p>○杉野英治 上席技術研究調査官 道口陽子 技術研究調査官 佐藤太一 技術研究調査官</p> <p>【前年度までの委託先】</p> <p>・学校法人日本大学工学部・・・実施項目(2)aの遠心力模型実験に係る部分</p> <p>【共同研究先】</p> <p>・国立大学法人東北大学及び東北学院大学・・・実施項目(1)b</p>
9. 備考	

研究計画

1. プロジェクト	3. 断層の活動性評価に関する研究	担当部署	技術基盤グループ 地震・津波研究部門
		担当責任者	杉野英治 上席技術研究調査官
2. カテゴリー・研究分野	【横断的原子力安全】 A) 外部事象（地震、津波、火山等）	主担当者	松浦旅人 技術研究調査官

「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「審査ガイド」という。）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。

断層の活動年代は通常、断層の上部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を考え方が示されている。しかし、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り、断層本体の性状や物質（断層破碎物質）から活動性を判断することになる（図1の②）。

断層破碎物質を用いた活動性評価の具体例として、「審査ガイド」では、「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。」とされている（以下「鉱物脈法」という。）。鉱物脈法については「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、すでに知見を蓄積した。また、より定量的な評価を行うために、断層破碎物質から直接年代を測定する手法に関する知見も蓄積した。ただし、審査ガイドでは、「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。」ともされており、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、複数の手法による総合的な評価を行うことが求められるが、鉱物脈法以外の活動性評価に関する知見については、具体例に乏しいという課題がある。さらに、断層の認定にあたっては、陸上またはかつての海底地すべりの痕跡、岩盤の膨張、地震動による受動的な変位・変形等と、地震を生じさせる断層との識別という課題も残されている（図1の③）。

核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律により、事業者に対する「安全性の向上のための評価の実施」が規定され、これに関連する「実用発電用原子炉の安全性向上評価に関する運用ガイド」では、確率論的地震ハザード評価の実施が挙げられている。確率論的地震ハザード評価の実施には地震の履歴（最新活動時期、活動間隔）に関する地質学的な基礎データが必要であるが、技術的な制約から、海域等における地震の履歴が得られにくく、これらの情報に係る技術的根拠を明確にすることが重要である。

内陸地殻内地震のうち、地表に明瞭な痕跡を残す活断層について、陸域では基本的にトレンチ調査により活動性が評価されているが、海域ではトレンチ調査が実施できない（図2の①）。そのため、統計的に推定された活動間隔が用いられることが多く、評価結果に与える不確かさの幅が大きくなることが課題である。「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、海域・沿岸域の地震履歴調査手法に関する知見を収集した。ただし、海底堆積物、離水地形面の年代評価に関する精度を向上させることが課題として残されている。また、地表に明瞭な痕跡を残さない活断層については、広域的に変形した地形面及び地層の形成年代を火山灰を用いて推定し、それを基に活動性を評価する方法があるが、火山灰の年代誤差が活動性評価の結果に大きく影響することが課題である（図2の②）。この課題は、地表に明瞭な痕跡を残さない活断層の認定にも直結している。中期更新世以降の断層の活動性に関し、「審査ガイド」では、「中期更新世以降の断層等の評価には、この時代の地形面や地層の変位・変形に注目することが一般的である。中でも酸素同位体ステージ7、9、11の温暖期（高海水準期）に対応づけられる段丘面や地層の利用が有効である。」とされている。さらに、「審査ガイド」では、断層等の評価方法として「火山灰を利用する方法」や、「微化石分析（花粉、珪藻、有孔虫、貝形虫等）や化学分析から古環境変遷を明らかにし、上記の温暖期（高海水準期）と対応づける方法」が挙げられており、これらの方法を具体化し、断層の活動性評価手法に関する知見を蓄積していくことが重要である。「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、東北日本の過去40万年間の火山灰年代に関する知見を収集したが、審査への知見の活用を踏まえ、同様の知見を西南日本にも拡充することが重要である。

3. 背景

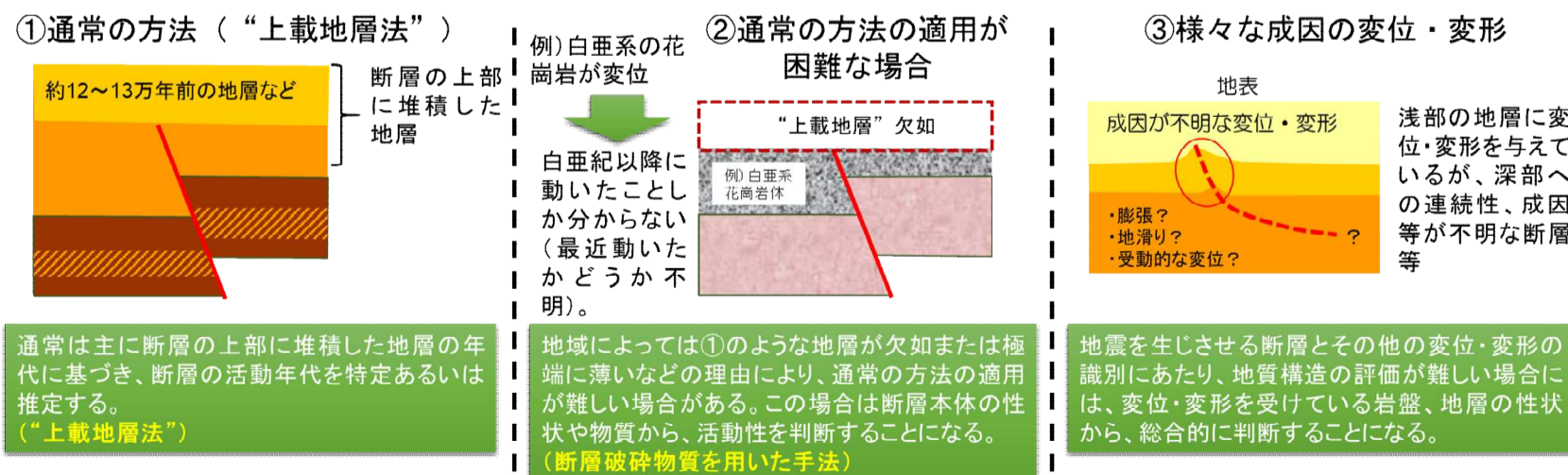
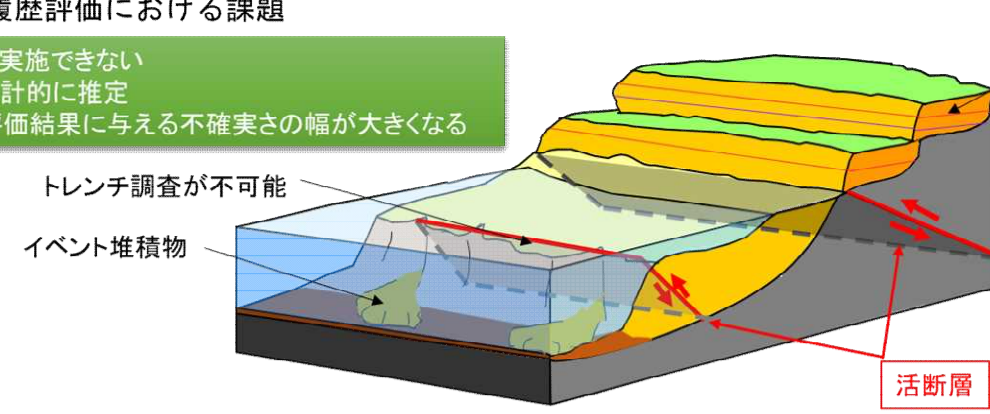
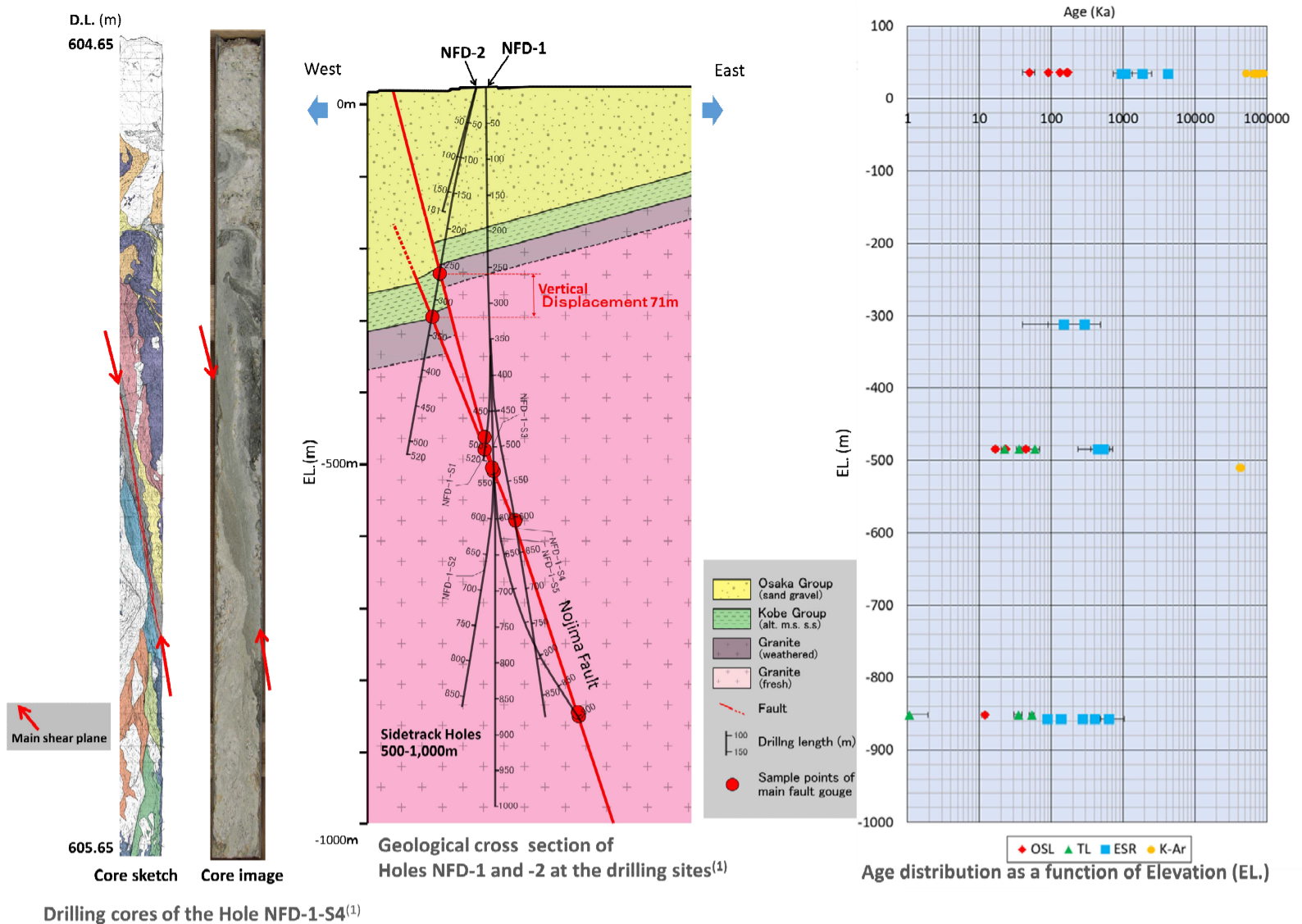


図1 本プロジェクトで扱う断層の識別及び活動性の評価に関する主要課題

	<p>①海域の地震履歴評価における課題</p> <ul style="list-style-type: none"> ・トレンチ調査が実施できない ⇒活動間隔を統計的に推定 ⇒地震履歴の評価結果に与える不確かさの幅が大きくなる <p>トレンチ調査が不可能 イベント堆積物</p>  <p>火山灰の年代が不明 ⇒地層や段丘面の年代が不明</p> <p>②広域変形をもたらす断層の活動性評価における課題</p> <ul style="list-style-type: none"> ・広域的に変形した地形面及び地層の形成年代を火山灰を用いて推定 ⇒年代誤差が活動性評価の結果に大きく影響する <p>活断層</p> <p>図2 本プロジェクトで扱う地震の活動履歴評価に関する主要課題</p>
4. 目的	<p>本プロジェクトでは、「活断層の認定及び変位・変形の成因の評価」及び「活断層の活動履歴の評価」について、その技術的根拠となる分析データを取得し、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。</p> <p>(1) 活断層の認定及び変位・変形の成因の評価</p> <p>a. 断層破碎物質の性状に基づく断層の活動性評価手法の検討 採取した断層破碎物質を用いて、活断層の認定に有用な定量的及び定性的な断層の活動性評価手法に関する知見を蓄積する。</p> <p>b. 地震以外に起因する断層の成因評価手法の検討 地震を生じさせる断層と受動的な変位・変形及び、地震以外に起因した変位・変形に係る地質情報を整理し、活断層の認定に有用な断層の成因評価手法に関する知見を蓄積する。</p> <p>(2) 活断層の活動履歴の評価</p> <p>a. 離水海岸地形の形成年代評価手法の検討 隆起した地形等の形成年代を分析し、活断層の活動履歴の評価に有用な知見を拡充する。</p> <p>b. 海域の古地震履歴評価手法の検討 海域の震源域近傍において採取された海洋堆積物コアを用いてイベント堆積物を抽出し、活断層の活動履歴の評価に有用な知見を拡充する。</p> <p>c. 中期更新世以降の火山灰年代評価手法の検討 西南日本近海の信頼性の高い「年代モデル」を陸域の地域的火山灰に付帯させ、海域・陸域の地域的火山灰を対比する手順に関する知見を蓄積する。</p>
5. 知見の活用先	<p>本プロジェクトの実施項目で得られた成果等は、「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」に関連する技術的知見としてまとめ、論文として公表していくとともに、審査への活用を検討する。</p>
6. 安全研究概要 (始期：R2年度) (終期：R5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うち以下の分類に基づき実施する。</p> <ul style="list-style-type: none"> 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。） ④ 技術基盤の構築・維持（以下「分類④」という。） <p>(1) 活断層の認定及び変位・変形の成因の評価</p> <p>a. 断層破碎物質の性状に基づく断層の活動性評価手法の検討【分類②】 上載地層法の適用が難しい場合、断層本体の性状や物質（断層破碎物質）から活動性を判断することが重要である。「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、断層破碎物質から直接年代を測定する手法として、活動的な断層である野島断層において Electron Spin Resonance 信号、Optically Stimulated Luminescence 信号及び Thermoluminescence 信号検出（いずれも、断層活動時以降に蓄積した原子レベルの傷の量を信号として検出すること）等を適用し、試料を採取した深度が深くなるほど断層活動による摩擦熱により年代がリセットされる傾向があることを明らかにした（図3）。また、鉱物脈法について、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られていること、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、これらの具体例を示した。令和2年度以降は、活断層及び長期間にわたり活動していない断層において物理探査、ボーリング調査等を実施し、鉱物脈法以外の手法を適応した事例を拡充させるべく、引き続き断層破碎物質を採取する（定性的評価）。採取した試料について内部の粘土鉱物、炭酸塩鉱物等の結晶構造解析、粒子の破壊状況の観察、化学分析、ビトゥリナイト反射率測定を実施する（定性的評価）。また、これまでに野島断層において蓄積した年代測定等の手法を、活動性の異なる断層に適用する（定量的評価）。これらの活断層及び長期間にわたり活動していない断層の断層破碎物質の特徴の違いを総合的に把握することにより、断層の活動性の評価に有用な知見を拡充する（図4）。</p>



Drilling cores of the Hole NFD-1-S4⁽¹⁾

図3 断層破碎物質の性状に基づく断層の活動性評価手法の検討に関するこれまでの主な成果^(5,6)

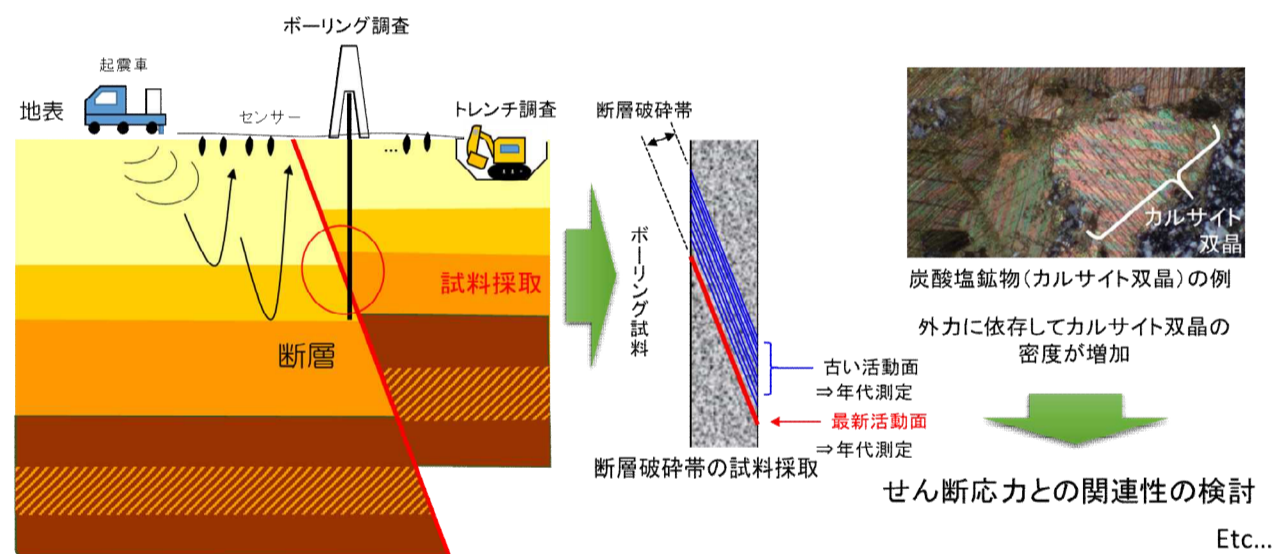


図4 断層破碎物質の性状に基づく断層の活動性評価手法の検討イメージ

b. 地震以外に起因する断層の成因評価手法の検討【分類②】

断層の認定にあたっては、陸上またはかつての海底地すべりの痕跡、岩盤の膨張、地震動による受動的な変位・変形等と、地震を生じさせる断層とを識別することが重要である。そこで、新たな課題として対応すべく、これらの地震以外に起因した変位・変形及び受動的な変位・変形について、文献調査等により関連する地質情報を整理する。さらに、調査のための候補地を選定し、地表踏査や物理探査等を実施する。そして、トレンチ調査等により試料を採取し、室内試験、室内化学分析、年代測定等によりそれらの試料の物理・化学的な性質及び活動性を把握する。その上で、受動的な変位・変形、古地すべりについては地震を生じさせる断層との比較も行う。これらの情報に基づいて断層の成因評価に有用な知見を拡充する(図5)。

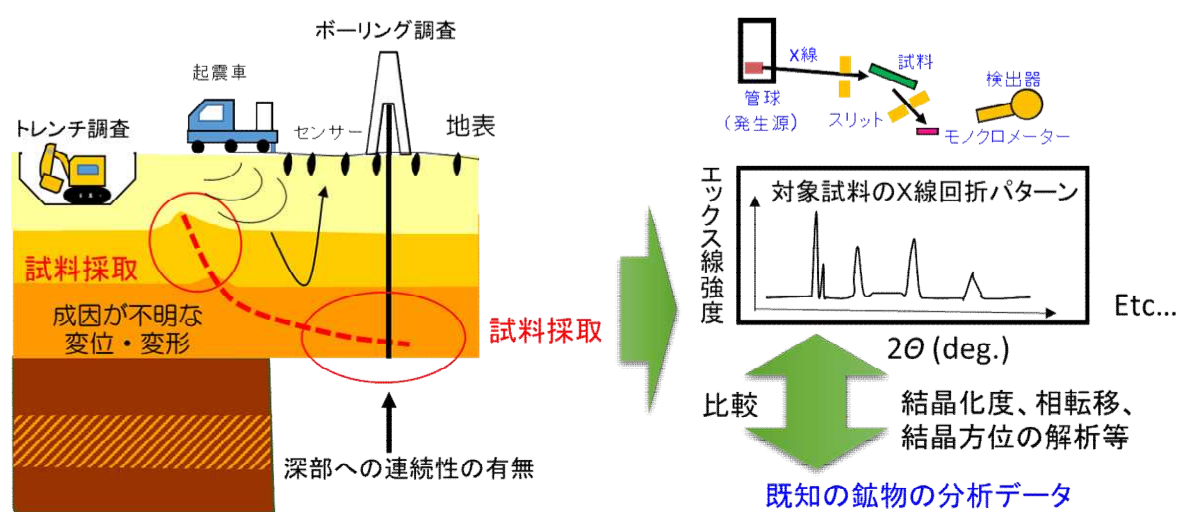


図5 地震以外に起因する断層の成因評価手法の検討イメージ

(2) 活断層の活動履歴の評価

a. 離水海岸地形の形成年代評価手法の検討【分類④】

沿岸域における活断層等についてはトレンチ調査が実施できない等の技術的理由から、活動履歴に関する情報が得られにくい。離水海岸地形の形成年代を調査することにより、沿岸域における地震履歴の情報を得ることができる(図6)。「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)」においては、離水生物遺骸群集による¹⁴C年代が適用できることに加え、年代測定の不確かさに関する知見(図7)を得ることができ、酸処理濃度及び試料の対象の違いが年代測定結果に与える影響について明らかにした。また、隆起した地形には、年代評価に有効な堆積物、離水生物遺骸群集が十分に存在しない場合があるため、足摺岬において花崗岩中の石英に蓄積される宇宙線生成核種¹⁰Beの適用可能性について検討し、完新世での年代幅においても適用できる可能性が示された(図8)。そこで、離水生物遺骸群集が十分に存在しない場合における離水海岸地形の形成年代の評価手法を具体化するため、令和2年度以降は、従来広く用いられている¹⁴C年代測定法と併せて、¹⁰Beや²⁶Al等の宇宙線生成核種を用いた年代測定を、花崗岩以外の岩種や、完新世の離水海岸地形のみならずより年代の古い段丘面を対象に実施し、その適用性を検討することにより、活断層の活動履歴の評価に有用な知見を拡充する(図6、図8)。

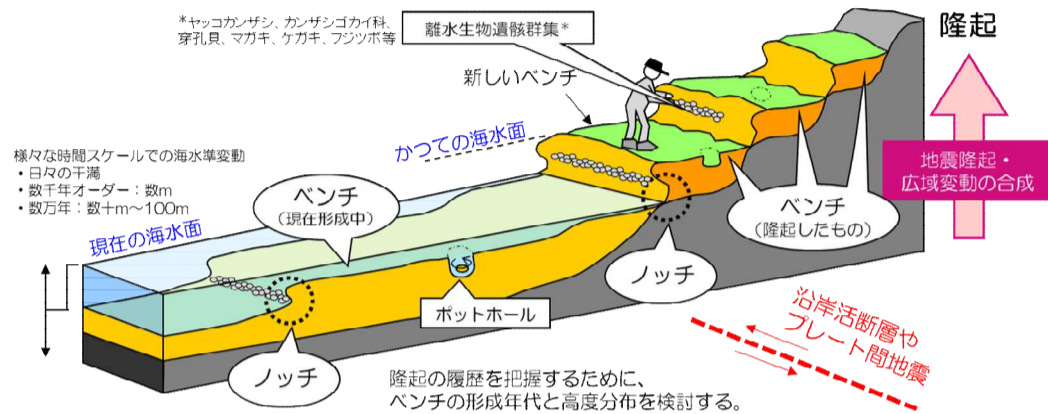


図6 離水海岸地形(隆起ベンチ等)の例

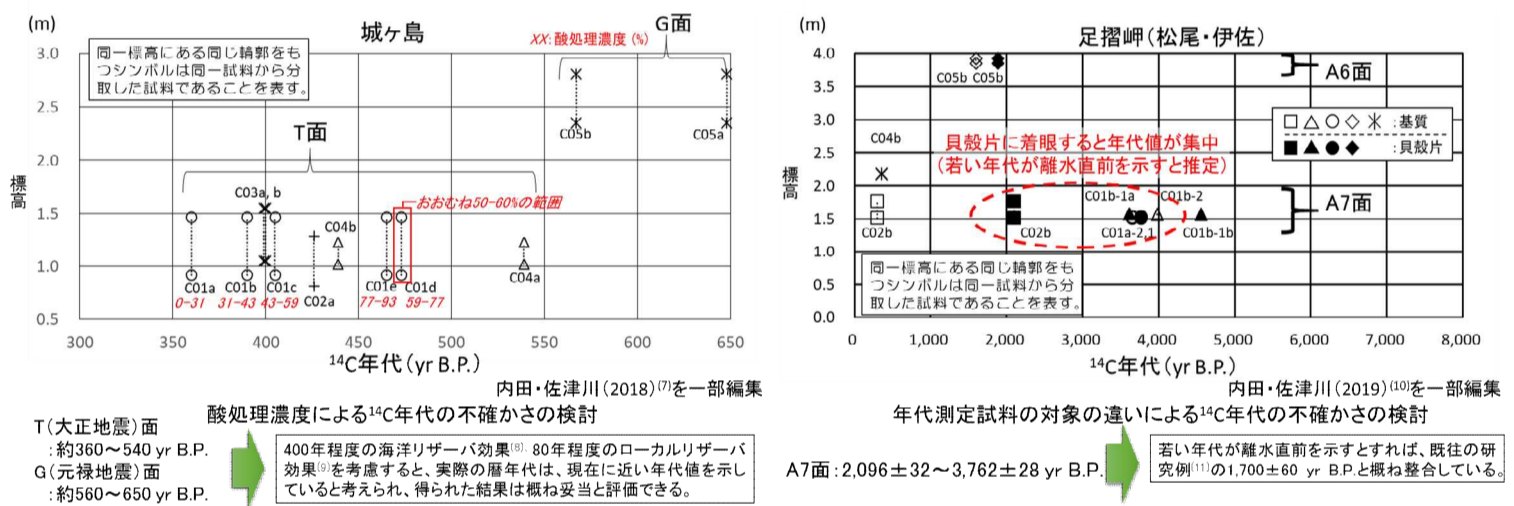


図7 離水海岸地形の形成年代評価手法の検討に関するこれまでの主な成果(離水生物遺骸群集による年代測定の不確かさ)

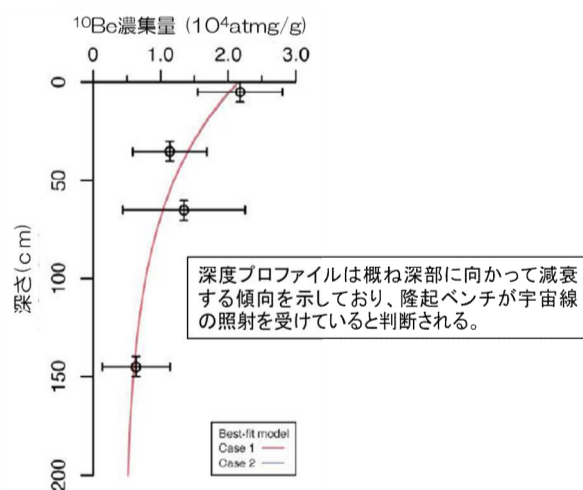


図8 離水海岸地形の形成年代評価手法の検討に関するこれまでの主な成果(宇宙線生成核種¹⁰Beの適用可能性の検討)⁽¹²⁾

b. 海域の古地震履歴評価手法の検討【分類④】

海域における活断層等についてはトレンチ調査が実施できない等の技術的理由から、活動履歴に関する情報が得られにくい。断層を挟んだ2地点間の海洋堆積物コアにより地層のずれを認識する方法及びイベント堆積物の枚数や堆積年代を調査することにより、海域における地震履歴の情報を得ることができる。「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)」においては、海域・沿岸域の地震履歴調査手法として、主として前者の方法の適用性を検討した。その結果、広く用いられている帯磁率、微化石分析等による手法によっても、断層活動の変位を検出できることが示された(図9)。ただし、このような情報を断層活動の履歴評価に用いるためには、変位の検出に用いられている微化石分析等の各イベントの年代評価が精緻に求められている海洋堆積物コアが別途必要になる。そこで、令和2年度以降は海域活断層等の活動履歴のうち、年代評価に関する情報の拡充を行うため、震源域近傍において採取された利用可能な海洋堆積物コアを用いてイベント堆積物を抽出し、微化石分析等の対比イベントも含めた年代評価の精緻化を図る(図10)。その際、従来あまり対象とされてこなかった全有機炭素等の年代を連続的に測定し、統計的手法を適用することにより、再堆積した相対的に古い堆積年代を示すイベント

堆積物を認定する。また、微化石層序と海洋堆積物コア全体の年代を精緻化することにより、イベント堆積物の堆積年代を高精度に決定し、近傍の活断層等の活動履歴を評価する。

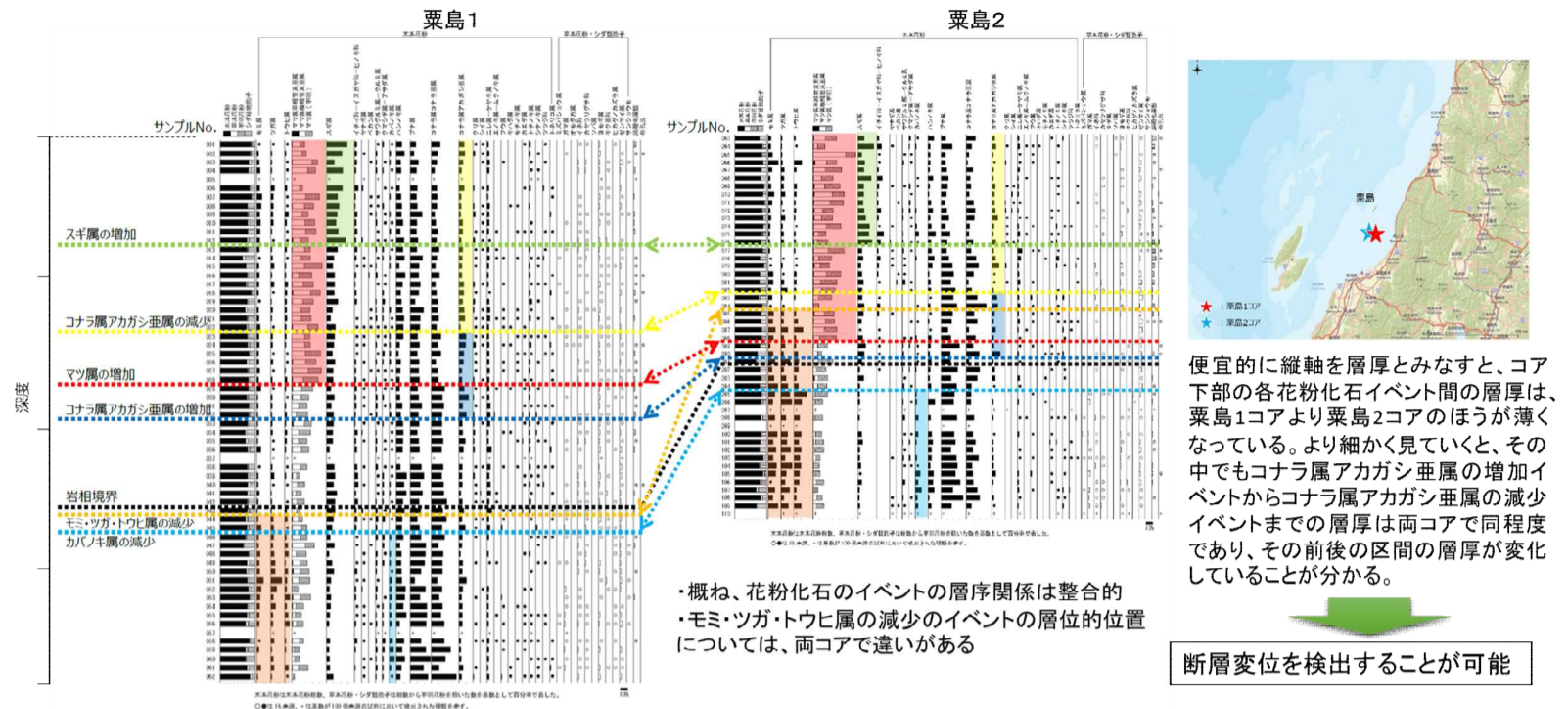


図9 海域の古地震履歴評価手法の検討に関するこれまでの主な成果

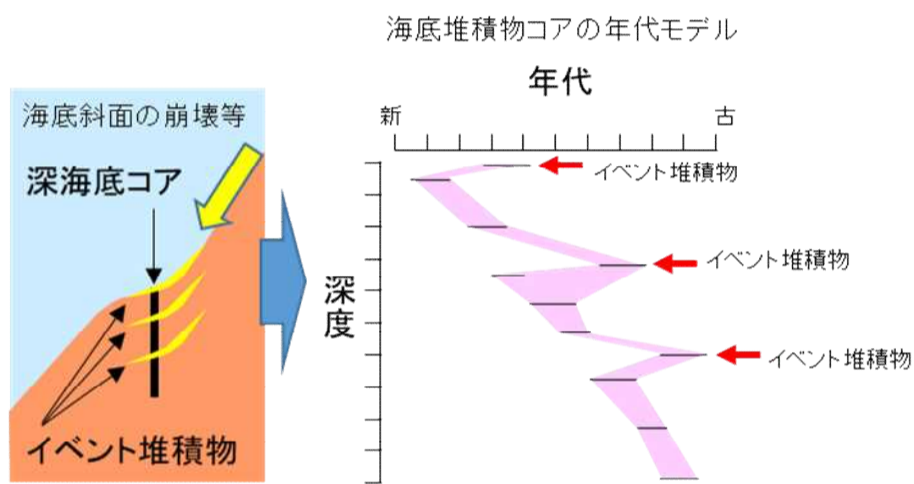


図10 イベント堆積物の年代評価の精緻化に関する検討イメージ

c. 中期更新世以降の火山灰年代評価手法の検討【分類②】

地表に明瞭な痕跡を残さない活断層では、トレンチ調査等により断層変位を直接確認することができないため、広域的に変形した地形面及び地層の年代並びに累積変位量を利用して活動性を把握することが重要である。しかし、後期更新世の地形面及び地層は広域変形の累積が乏しいため、地表に明瞭な痕跡を残さない活断層の活動期間及び変位速度の推定が困難なことが多い(図11)。一方、中期更新世の地形面及び地層は、広域変形の累積が明瞭で、有効な断層変位指標になることが期待されるが、年代評価に用いられる中期更新世以降の地域的火山灰の年代誤差によって、活動性評価の信頼性が大きく損なわれる。そこで、「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)」においては東北日本を対象に、深海底コア(堆積物)中に挟まれる年代決定精度の高い広域火山灰を指標にして、コア深度を年代に変換する「年代モデル」の信頼性を向上させ(図12)、陸域の地域的火山灰の年代を高精度で決定した(図13)。令和2年度以降は同様の知見を西南日本へ拡充し、断層変位指標(地形面・地層)を編年するために、西南日本近海の信頼性の高い「年代モデル」を陸域の地域的火山灰に付帯させ、海域・陸域の地域的火山灰を対比する手順に関する知見を蓄積する。

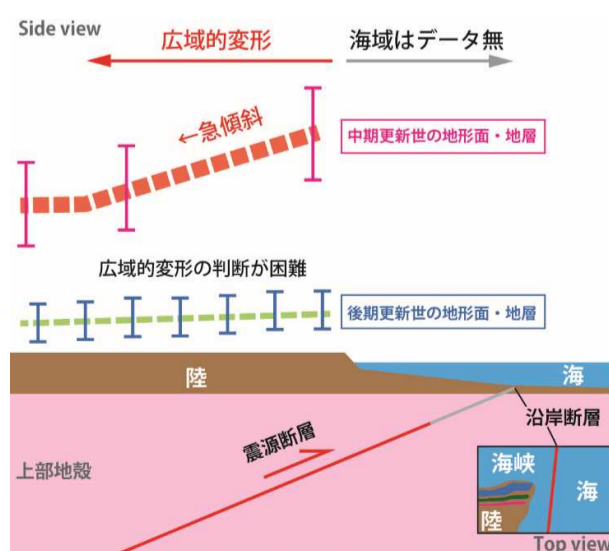


図11 断層変位指標である地形面の広域変形の例

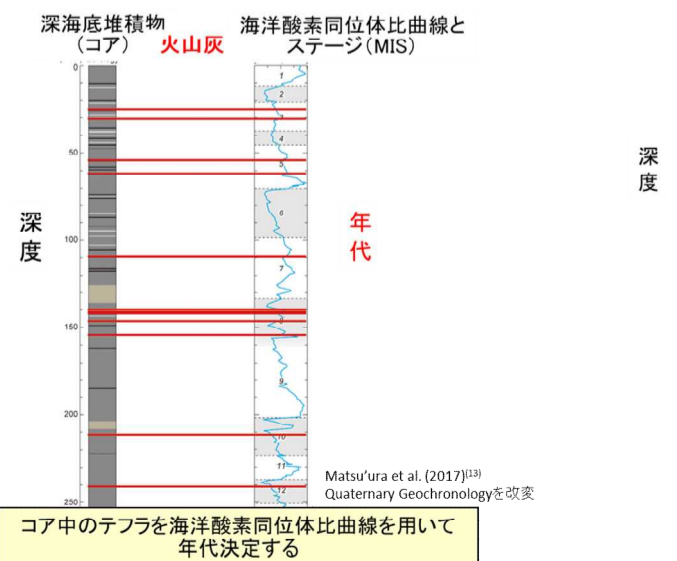


図12 海洋酸素同位体比曲線に基づく深海底コア(堆積物)中における火山灰年代決定の検討イメージ

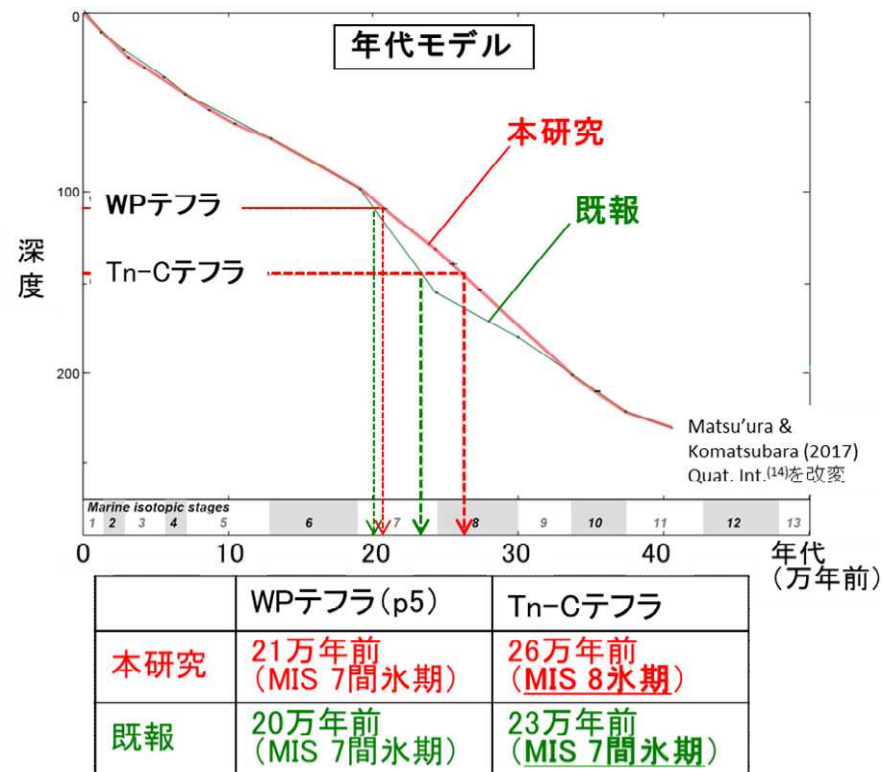


図 13 深海底コア（堆積物）中の火山灰の定量的な年代決定の例

実施行程表

実施項目番号	R2 年度	R3 年度	R4 年度	R5 年度
(1) a. 断層破碎物質の性状に基づく活動性評価手法の検討	・断層破碎物質の性状の把握のための予備調査	・断層試料の採取 物理探査、トレンチ調査・ボーリング調査等	▽学会発表 ・追加の断層試料の採取、ボーリング調査等	▽論文投稿
		・断層試料の室内試験・室内分析	・断層試料の室内試験・室内分析	・総合解析 ↓ ・断層破碎帯の性状に基づく活動性評価指標の提示
(1) b. 地震以外に起因する断層の成因評価手法の検討	・文献調査 ・物理探査、トレンチ調査等（予備調査）	・物理探査、トレンチ調査等（本調査）	▽学会発表	▽論文投稿
	・変位・変形を受けた岩石・堆積物試料の採取	・変位・変形を受けた岩石・堆積物試料の室内試験及び室内分析	・変位・変形を受けた岩石・堆積物試料の室内試験及び室内分析	・総合解析 ↓ ・地震以外に起因する断層の成因に関する評価指標の提示
(2) a. 離水海岸地形の形成年代評価手法の検討	・宇宙線生成核種による離水海岸地形の年代評価手法の多岩種への適用可能性調査	・現世の隆起ベンチ及び高位段丘間の、宇宙線生成核種による形成年代の比較	▽学会発表	▽論文投稿
			・複数の核種による離水海岸地形の形成年代のクロスチェック、測定精度及び精度の評価	・複数の核種、複数岩種を用いた離水海岸地形の年代評価事例の提示 ↓ ・適用可能範囲等の条件の整理

(2) b. 海域の古地震履歴評価手法の検討	・有機物、微古生物学的分析に基づく古環境学的イベントの抽出（概査）	・海底堆積物の全有機炭素の放射性炭素年代測定の実施	▽学会発表 ・R3年度の継続調査	▽論文投稿 ・R2～R4の補足調査、分析
		・年代測定結果とイベント層との比較	・全有機炭素の年代と、微古生物の放射性炭素年代及び火山灰年代との比較	
(2) c. 中期更新世以降の火山灰年代評価手法の検討	・海底コア中の火山灰、陸域火山灰の試料採取	・R2年度の継続調査	▽学会発表 ・R2～R3年度の継続調査	▽論文投稿 ・R2～R4の補足調査、分析
	・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	・火山灰粒子の主成分化学組成に基づく海域・陸域の火山灰の特徴化	・火山灰粒子の主成分及び微量成分化学組成に基づく海域・陸域の火山灰の特徴化	

(注1) 有用な研究成果は、研究期間中においても適宜論文として公表する。

7. 実施計画

<p>【R2年度の実施内容】</p> <p>(1) a. : 断層破碎帯の性状に基づく活動性評価手法の検討【分類②】 活断層と最近活動していない断層においてボーリング調査（予備調査）等を実施し、断層破碎物質を採取する。物理・化学的特徴の把握のための予備調査を実施する。</p> <p>b. : 地震以外に起因する断層の成因評価手法の検討【分類②】 陸上またはかつての海底地すべりの痕跡、岩盤の膨張、地震動による受動的な変位・変形等の地震以外に起因した変位・変形について、文献調査等により関連する情報を整理する。さらに、調査のための候補地を選定し、反射法地震探査等の物理探査を実施する。そして、トレンチ調査（予備調査）等によりせん断面や変形構造を呈する試料を採取する。</p> <p>(2) a. : 離水海岸地形の形成年代評価手法の検討【分類④】 宇宙線生成核種である ^{10}Be 表面照射を用いた離水海岸地形の編年手法を花崗岩以外の岩種（例えばデイサイト等）への適用可能性を検討する。そのための適した研究地域、地質条件の選定、それに付随するフィールド調査と、新たな岩種への ^{10}Be の分析手法の最適化を行う。</p> <p>b. : 海域の古地震履歴評価手法の検討【分類④】 古環境学的イベントの抽出に有望な調査海域を選定し、利用可能な海底堆積物の有機物分析、微古生物学的分析を実施し、概査として古環境学的イベントの候補を抽出する。</p> <p>c. : 中期更新世以降の火山灰年代評価手法の検討【分類②】 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。また、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。</p>
<p>【R3年度の実施内容】</p> <p>(1) a. : 断層破碎帯の性状に基づく活動性評価手法の検討【分類②】 典型的な活断層において物理探査、トレンチ調査、ボーリング調査等を本調査として実施し、断層破碎物質を採取する。採取試料を用いて内部の粘土鉱物、炭酸塩鉱物等の結晶構造解析等を実施する。</p> <p>b. : 地震以外に起因する断層の成因評価手法の検討【分類②】 地震以外に起因した変位・変形について、地下浅部及び深部の地質構造を明らかにするための、反射法地震探査等の物理探査を実施する。トレンチ調査等（本調査）により、せん断面や変形構造を呈する試料を必要数採取し、構造解析を実施する。</p> <p>(2) a. : 離水海岸地形の形成年代評価手法の検討【分類④】 ^{10}Be 表面照射を用いた離水海岸地形の編年手法を高位段丘に適用する。隆起ベンチで想定される地殻変動量を高位段丘で得られた結果と比較することで隆起ベンチの年代測定の高精度化を行う。</p> <p>b. : 海域の古地震履歴評価手法の検討【分類④】 前年度の概査の結果を考慮し、海底堆積物の全有機炭素の放射性炭素年代測定を実施し、年代測定結果とイベント堆積物との比較を行う。</p> <p>c. : 中期更新世以降の火山灰年代評価手法の検討【分類②】 R2年度の継続調査を行い、中期更新世に対応する海底コアの火山灰層序を整理する。また、海域・陸域で採取された火山灰の主成分化学組成を分析して、火山灰特徴化のためのデータを収集する。</p>
<p>【R4年度の実施内容】</p> <p>(1) a. : 断層破碎帯の性状に基づく活動性評価手法の検討【分類②】 前年度までの調査を踏まえ、追加の断層破碎物質の採取を検討する。また、昨年度の分析に加え、粒子の破壊状況の観察、ビトゥリナイト反射率測定、年代測定等を実施する。</p> <p>b. : 地震以外に起因する断層の成因評価手法の検討【分類②】 地震以外に起因したせん断面や変形構造を呈する試料について引き続き構造解析を実施するとともに、内部の粘土鉱物、炭酸塩鉱物等の結晶構造解析、粒子の破壊状況の観察、室内試験、室内化学分析等を実施する。</p> <p>(2) a. : 離水海岸地形の形成年代評価手法の検討【分類④】 バックグラウンドのために ^{10}Be 表面照射を用いた離水海岸地形の編年手法では高精度分析が困難な若い年代サンプルを高精度に分析する手法を検討する。具体的には Be 以外の核種（例えば ^{26}Al 表面照射年代）の導入をした精度向上を実施し、^{10}Be 表</p>

	<p>面照射年代とのクロスチェックを行い、測定精度と確度を確認する。</p> <p>b. : 海域の古地震履歴評価手法の検討【分類④】 前年度に引き続き、海底堆積物の全有機炭素の放射性炭素年代測定を実施し、年代測定結果とイベント堆積物との比較を行うとともに、全有機炭素の年代と、微古生物の放射性炭素年代及び火山灰年代との比較を行う。</p> <p>c. : 中期更新世以降の火山灰年代評価手法の検討【分類②】 R2~R3 年度の継続調査を行う。火山灰の主成分化学組成分析と並行して、微量化学組成分析にも着手し、火山灰特徴化のためのデータを収集する。</p>
	<p>【R5 年度の実施内容】</p> <p>(1) a. : 断層破砕帯の性状に基づく活動性評価手法の検討【分類②】 典型的な断層破砕物質内部の粘土鉱物、炭酸塩鉱物等の結晶構造解析、粒子の破壊状況の観察、ビトゥリナイト反射率測定、年代測定等の特徴を総合的に評価し、断層破砕物質の性状に基づく断層の活動性評価にとって有用な評価指標を提示する。</p> <p>b. : 地震以外に起因する断層の成因評価手法の検討【分類②】 地震以外に起因したせん断面や変形構造に関し、地質構造、内部の粘土鉱物、炭酸塩鉱物等の結晶構造解析、粒子の破壊状況の観察、物理的・化学的な性質等の特徴を総合的に評価し、地震を引き起こす断層と地震以外に起因する断層との識別にとって有用な評価指標を提示する。</p> <p>(2) a. : 離水海岸地形の形成年代評価手法の検討【分類④】 複数の核種、複数の岩種、広い編年範囲で利用可能な宇宙線生成核種を用いた年代測定手法の適用可能範囲等の条件を整理し、これまで編年が困難であった地域への適用例を提示する。</p> <p>b. : 海域の古地震履歴評価手法の検討【分類④】 これまでの調査結果を考慮し、調査・分析の不足の有無を検討し、補足的な調査・分析を実施する。そして、これまでに実施した全有機炭素の放射性炭素年代測定の結果及びこれとは別の独立した手法での年代評価結果を総合的に分析し、手法の適用性を評価するとともに、イベント堆積物による地震履歴評価のための本手法の適用事例を提示する。</p> <p>c. : 中期更新世以降の火山灰年代評価手法の検討【分類②】 R2~R4 の補足調査を行う。取得された化学組成結果を基に火山灰を対比し、海陸統合火山灰層序を構築する。続いて、年代既知の火山灰（主に広域火山灰）を基に、海底コアの年代モデルを作成し、年代未知の地域的火山灰に対して年代評価を行う。</p>
8. 実施体制	<p>【地震・津波研究部門における実施者】</p> <p>○松浦旅人 技術研究調査官 内田淳一 主任技術研究調査官 佐藤勇輝 技術研究調査官 林 宏樹 技術研究調査官 林茉莉花 技術研究調査官 宮脇昌弘 技術研究調査官</p>
9. 備考	<p style="text-align: center;">文 献</p> <p>(1) 国立大学法人京都大学, 2018, 平成 29 年度原子力規制庁委託成果報告書「追加ボーリングコアを用いた断層破砕物質の分析（ボーリングコア等を用いた各種分析）」, 132 pages.</p> <p>(2) 国立大学法人京都大学, 2019, 平成 30 年度原子力規制庁委託成果報告書「断層破砕物質を用いた断層活動性評価手法に係る総合解析」, 374 pages.</p> <p>(3) 国立大学法人京都大学, 2017, 平成 27 年度原子力規制庁委託成果報告書「野島断層における深部ボーリング調査」, 6 分冊.</p> <p>(4) 福地龍郎, 2003, ESR 法による断層活動年代測定—その原理と実践—. 深田研ライブラリー, No. 63, 財団法人深田地質研究所, 45 pages.</p> <p>(5) Miyawaki, M. and Uchida, J., 2018, Towards understanding the direct dating of co-seismic fault slip events, 2018 AGU Fall Meeting, T23D-0401.</p> <p>(6) Miyawaki, M. and Uchida, J., 2020, Validation of the direct dating of coseismic fault slip events along the Nojima Fault, Hokudan 2020 International Symposium on Active Faulting, pp.60-70.</p> <p>(7) 内田淳一・佐津川貴子, 2018, 三浦半島城ヶ島及び荒崎に分布する離水生物遺骸群集から得られた放射性炭素年代の特徴. 日本活断層学会 2018 年度秋季学術大会 講演要旨集, P-23.</p> <p>(8) Alves, E. Q., Macario K., Ascough, P. and Ramsey, C. B., 2018, The Worldwide Marine Radiocarbon Reservoir Effect: Definitions, Mechanisms, and Prospects, Reviews of Geophysics, Vol. 56, pp.278-305.</p> <p>(9) 宍倉正展・越後智雄・金田平太郎, 2006, 歴史地震で隆起した貝化石を用いた三浦半島南部における海洋リザーバー効果の評価. 日本第四紀学会 2006 年度 講演要旨集, P-066.</p> <p>(10) 内田淳一・佐津川貴子, 2019, 足摺岬及び屋久島に分布する離水生物遺骸群集から得られた放射性炭素年代の特徴. 日本活断層学会 2019 年度秋季学術大会 講演要旨集, P-9.</p> <p>(11) 前杵秀明, 1988, 足摺岬周辺の離水波食地形と完新世地殻変動. 地理科学, Vol. 43, pp.231-240.</p> <p>(12) 国立大学法人東京大学, 2019, 平成 30 年度原子力規制庁委託成果報告書「宇宙線生成核種を用いた隆起海岸地形の離水年代評価に関する検討」, 59 pages.</p> <p>(13) Matsu'ura, T., Kimura, J., Chang, Q. and Komatsubara, J., 2017, Using tephrostratigraphy and cryptotephrostratigraphy to re-evaluate and improve the Middle Pleistocene age model for marine sequences in northeast Japan (Chikyu C9001C), Quaternary Geochronology, Vol. 40, pp.129-145.</p> <p>(14) Matsu'ura, T. and Komatsubara, J., 2017, Use of amphibole chemistry for detecting tephras in deep-sea sequences (Chikyu C9001C cores) and developing a middle Pleistocene tephrochronology for NE Japan, Quaternary International, Vol. 456, pp.163-179.</p>

研究計画

1. プロジェクト	4. 大規模噴火プロセス等の知見の蓄積に係る研究	担当部署	技術基盤グループ 地震・津波研究部門
		担当責任者	杉野英治 上席技術研究調査官
2. カテゴリー・研究分野	【横断的原子力安全】 A) 外部事象（地震、津波、火山等）	主担当者	安池由幸 専門職
3. 背景	<p>平成 25 年 7 月に施行された「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」（平成 25 年原子力規制委員会規則第 5 号）において、地震・津波以外の「外部からの衝撃による損傷の防止」（第六条）が明記された。その中で安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならないとしており、敷地周辺の自然環境を基に想定される自然現象の一つとして、火山の影響を挙げている。火山影響を適切に評価する一例を示した「原子力発電所の火山影響評価ガイド」（以下「評価ガイド」という。）が作成されているが、巨大噴火のメカニズムや前駆活動を把握するための国内のカルデラ火山について調査例が少ないこと等から、海外の研究事例等を基に総合的な評価を行っているため、巨大噴火を伴う火山の活動に関する長期的な活動評価の手法には不確定性を伴う。</p> <p>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索する手法について知見が蓄積されつつある。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。</p> <p>原子力規制庁で求めている火山モニタリングは、評価時の状態からの変化を検知しようとするものであり、モニタリングにより火山活動の兆候を把握した場合には、原子炉の停止を含めた対処方針を事業者事前に決めておくこととされている。施設の安全は継続的改善が求められていることから、引き続き、国内外の火山研究の最新動向や最新知見を収集するとともに、これまでに得られた研究成果を踏まえつつ、低頻度の自然現象である巨大噴火のプロセスに関する知見の拡充を図ることが重要である。</p> <p>なお、本研究プロジェクトでは、巨大噴火とは、噴出量が数十 km³ 以上かつ大型のカルデラを形成した噴火で、大規模噴火とは、噴出量が 1km³ 以上の噴火を示す。</p>		
4. 目的	<p>本研究プロジェクトでは、巨大噴火を起こした火山を対象に、過去の巨大噴火に至るまでの準備・開始プロセスについての知見を蓄積し、過去のカルデラ火山の長期的な活動を評価すると共にマグマ・火山活動に関するデータを蓄積し、火山活動を捕らえる観測項目の検討及びそれらの関係についての考え方を検討する。</p> <p>(1) 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</p> <p>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。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、降灰時のプロセス等の知見を蓄積する。</p> <p>(2) 岩石学的手法によるマグマプロセスに関する調査・研究</p> <p>過去に大規模な噴火（カルデラ形成噴火）を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の岩石学的な調査として、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。</p> <p>(3) 地球物理及び地球化学的手法による観測手法に関する調査・研究</p> <p>地球物理及び地球化学的手法に基づくカルデラ火山の観測手法に関する知見を蓄積する。具体的には、地震波トモグラフィやネットワーク MT 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索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。さらには、海底下や湖底下の地下構造を観測する手法、地殻変動を観測する手法を確立する。</p> <p>(4) 観測項目の検討及びそれらの関係についての考え方の検討</p> <p>上記の(1)～(3)の知見に基づいて、過去のカルデラ火山の長期的な活動を評価すると共に観測項目の検討及びそれらの関係についての考え方を検討する。</p>		
5. 知見の活用先	本研究プロジェクトの実施項目で得られた成果は、評価ガイド等の知見拡充に資する技術資料作成に活用する。		

本研究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、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。）の分類に基づき実施する。

本プロジェクトの具体的な実施内容は、火山噴出物の物質科学的な調査、地球物理学的及び地球化学的調査等、最新の調査手法に基づく火山活動に起因する事象に関する知見を蓄積するため、以下に示す(1)～(3)の項目について調査・研究を行う。巨大噴火を起こした火山（屈斜路、洞爺、始良、鬼界、十和田）について、巨大噴火の準備・開始プロセスに関する調査・研究として、過去の巨大噴火及びその前後の火山噴出物の層序や岩石学的な調査を行う。また、火山活動を観測するための調査・研究として、カルデラ火山の地下構造の調査（地震波トモグラフィやMT法）、カルデラ火山周辺の地殻変動調査、地下水等の深部流体の調査を行う。そして、得られた知見に基づいて、過去のカルデラ火山の長期的な活動を評価すると共にマグマ・火山活動に関するデータを蓄積し、火山活動を捕らえる観測の検討及びそれらの関係についての考え方を検討する。

(1) 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【分類①】

a. 大規模噴火の噴火準備・進展過程に関する調査・研究

平成30年度までの調査で、洞爺-支笏火山エリアや阿蘇、始良カルデラにおいて火山活動の変遷（図1参照）が明らかになりつつある。例えば、洞爺-支笏火山エリアは、約12万年前頃に洞爺火山で珪長質なマグマを噴出する火山活動が始まり、その後活動域は次第に東方へ移動し、クツラ火山、支笏火山、羊蹄火山の活動へと変遷していき、約4万年前頃に支笏火山でカルデラが形成された。その後は、後カルデラ火山の活動として、中島火山や有珠火山（洞爺）、不風死火山、恵庭火山、樽前火山（支笏）がVEI=3-4程度の噴火を繰り返して現在に至っている。阿蘇カルデラでも、阿蘇4噴火に先行して珪長質マグマが準備されていたことが明らかになった。また、これまで、大規模なカルデラを形成する噴火は、噴火開始からカルデラ陥没により活動が収束するまで一連の活動であると考えられていたが、古地磁気学的調査により数年～数十年の時間間隙の存在を示唆する調査結果が得られている（図2参照）。

本調査・研究では、平成30年度までの調査結果を踏まえて、始良カルデラ等について、大規模噴火の長期的・短期的推移の具体的な時間スケールを制約するため、大規模噴火及びその前後の主要な噴火について、複数の年代測定手法を組み合わせる噴火年代を与える。また、カルデラ近傍でのボーリング調査、巨大噴火及びその前後の噴出物の分布や層序関係、斑晶や組成の特性、古地磁気方位測定等の地質学的手法を用いて調査し、噴出物の時間的及び空間的な分布と噴火史に基づく噴火の準備・進展過程を検討する。

b. 降灰プロセス等に関する地質調査及び観測

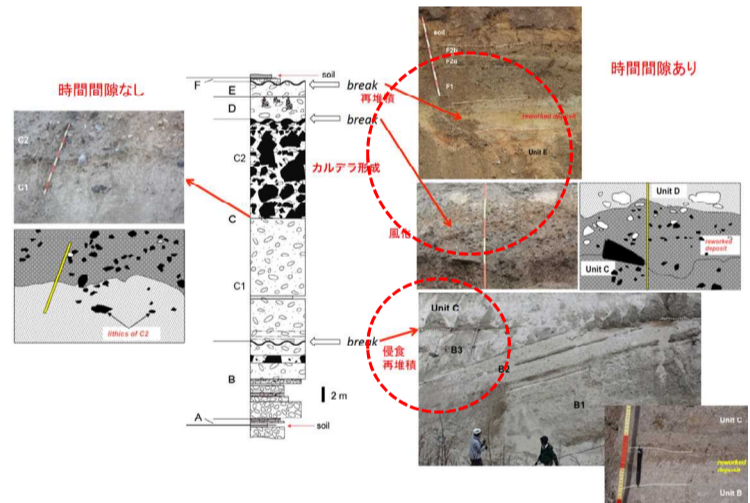
本調査・研究では、平成30年度までの調査及び検討結果を踏まえて、降下火砕物による影響評価に資するため、降灰中の火山灰の量、粒子の数及び粒子の落下速度をリアルタイムで観測し、降灰量と降灰時の気中火山灰濃度の関係を調査するとともに、地質調査から得られる粒径等のデータを踏まえ、過去の噴火における降灰時のプロセスを検討する。

6. 安全研究概要
(始期: R2年度)
(終期: R5年度)

噴火サイクル	年代	サブユニット	本質物	全岩化学組成(SiO ₂)
阿蘇中央火口丘	<90 ka	溶岩、降下火砕物	溶岩、スコリア>軽石	49-72%
阿蘇4	90 ka	阿蘇4B火砕流堆積物	軽石>>スコリア	64-70, 54%
		阿蘇4KS火砕流堆積物(丸ノ峰スコリア流)	スコリア	50-52%
		阿蘇4T火砕流堆積物	軽石	67-69%
		阿蘇4BS火砕流堆積物(弁利スコリア流)	スコリア>軽石	51-67%
		阿蘇4M火砕流堆積物(用木軽石流)	軽石	67-70%
		阿蘇4Y火砕流堆積物(八女軽石流)	軽石	67-70%
		阿蘇4H火砕流堆積物(鳩平軽石流)	軽石	67-70%
		阿蘇4O火砕流堆積物(肥猪火山灰流)	軽石>>スコリア	64-66, 52%
		阿蘇4A火砕流堆積物(小谷軽石流)	軽石>>スコリア	67-70, 52%
		阿蘇4Ti火砕流堆積物(高尾野火砕流)*	軽石>>スコリア	50, 60%
		阿蘇4S火砕流堆積物(猿丸火砕流)*	軽石	67-71%
		阿蘇4L降下火山灰*	火山灰	68-69%
大峰火山	90 ka	大峰火砕丘、高道原溶岩	溶岩、軽石、スコリア	63-65%
		Y降下軽石層	軽石	68%
		ABCD降下軽石層	軽石	62-65%
		EF降下軽石層	軽石	67-71%
		G降下軽石層	軽石	66%
		HI降下軽石層	軽石	65-66%
		JKL降下軽石層	軽石	64-66%
		MN降下軽石層	軽石	66%
		Z2降下軽石層	軽石	69%
		Z6降下軽石層	軽石	65%
		Z15降下スコリア層	スコリア	51%
		Z20降下スコリア層	スコリア	56%
Z27降下スコリア層	スコリア	56%		
Z28降下スコリア層	スコリア	51%		
Z29降下スコリア層	スコリア	53%		

阿蘇4に向かって珪長質マグマが噴出

図1 阿蘇4噴火に至るマグマの変遷



古地磁気学的な検討 (Unit BとC1: 0~数十年, Unit CとD, Unit EとF: 数百年の時間間隙があることを示唆) この結果は、層序学的な所見と整合

図2 支笏カルデラ噴出物の模式柱状図とユニット境界の産状

(2) 岩石学的手法によるマグマプロセスに関する調査・研究

【分類①】

平成30年度までの調査により、阿蘇、鬼界カルデラ等の火山において巨大噴火直前のマグマの温度・圧力条件が推定されている。阿蘇カルデラでは、最大の噴火である阿蘇4噴火のマグマ溜まりは、実験岩石学的手法及びマグマ化学組成の熱力学的平衡条件検討から、深さ4~8 kmにあったと推測された。また、鬼界カルデラを形成した鬼界アカホヤ噴火のマグマ溜まりの主体は、メルト包有物の揮発成分分析結果から深さ3~7 kmにあったと推定された。これらのマグマ溜まりの定置条件及び準備過程の情報は、カルデラ噴火に至るシナリオ推定及びカルデラ火山の活動性を評価する一つの指標として整備されつつある。さらに、支笏カルデラのマグマ蓄積時間スケールについて、支笏カルデラ噴出物の斑晶鉱物の累帯構造の拡散組織から、斑晶鉱物がマグマ溜まり中に滞留していた時間スケールについての予察的な検討結果が得られている（図3参照）。

本調査・研究では、(1)の地質学的調査に基づく大規模噴火の長期的・短期的推移の復元結果と合わせて、噴出物の岩石学的検討による過去の巨大噴火に至る過程のマグマ供給系の時間・空間発達過程の検討を行う。具体的には(1)で復元された噴火活動の推移

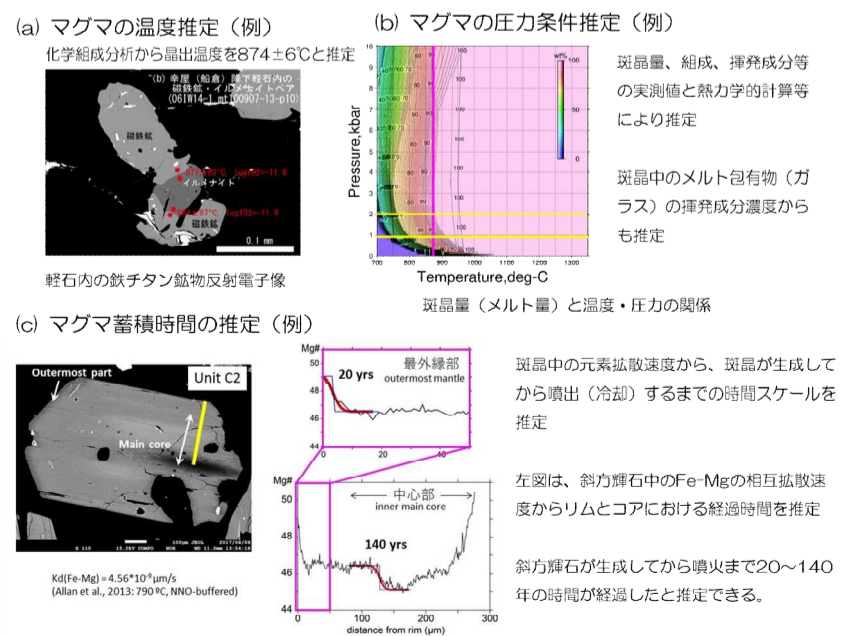


図3 マグマの時空間変化の調査事例

に沿って、噴出物の岩石学的解析を行い、大規模噴火を引き起こすマグマ溜まりの温度・圧力・マグマ組成等の時間変化を追跡する。

(3) 地球物理及び地球化学的手法による観測手法に関する調査・研究【分類①】

本調査・研究では、既存の物理探査手法による過去にカルデラ形成噴火を起こしたカルデラ火山直下の地下構造を調べるとともに、地球物理及び地球化学的な手法の観測手法としての適応性について検討を行う。また、現時点でカルデラ火山の観測手法として有効と考えられる火山性地殻変動を解釈するためのシミュレーションモデルによる数値実験と実際に変動が生じているカルデラの地殻変動観測を実施し、シミュレーションモデルによる再現検討を行う。

a. カルデラ火山の地下構造調査

平成 30 年度までの調査で、始良カルデラの地震波観測による地下構造探査や MT 法による阿蘇カルデラの地下構造探査が行われた。その結果、阿蘇カルデラにおいてはカルデラ周辺を高密度で MT 法による観測を行うことで、概ね地下 10km 付近の領域までは、マグマを示唆する流体の蓄積の有無を評価することが可能な解像度で地下構造を調べることができていることが明らかになった。一方、10km 以深では十分な解像度が得られなかった。また、始良カルデラでの観測では有効な地震波が十分に得られなかったため、解像度の高い地下構造を把握するためには、観測を継続する必要があることも明らかになった（図 4、5 参照）。

本調査は、カルデラの地下構造の調査として、始良カルデラについて、カルデラ内の無人島や岩礁等への地震計の設置を検討し、観測点を増やすとともに、地震波観測を引き続き実施する。また、地下 15km 付近（図 5 参照）に観測された低速度領域の反射面を定常的に捕らえる長期連続反射法探査について検討し、その結果、有効な反射波が得られた場合、低速度領域の変化を捕らえる観測手法としての有効性を検討する。また、10km 以深の地下構造を把握するため長周期のシグナルを安定して長期間観測できるネットワーク MT 法による観測を行う。

b. カルデラ火山の地球化学的調査

前述のように、地球物理学的な探査や観測では、地下に存在する流体を低速度領域や低比抵抗領域として捕らえることは可能であるが、その流体がマグマか否かについて明確にすることは難しい。平成 30 年度までの調査で、カルデラ火山の深部流体（地下水やガス）の化学組成や同位体分析を実施し、マグマの揮発成分（水、二酸化炭素、塩素、硫黄等の成分）の化学形態や同位体濃度比等とマグマの種類（溶融過程 or 固化過程）を判別する指標となり得ることを示唆する調査結果が得られた（図 6 参照）。

本調査は、国内のカルデラ火山について上記の深部流体の分析に加えて、地下水の希土類元素組成及び重元素同位体組成の分析を行い、マグマの種類及び熱水上昇過程の推定を試みる。

また、(1)の調査においてボーリング掘削を予定しているカルデラ火山での長期の地下水採取等の分析結果と(2)の調査結果から、火山活動の変化を捕らえる観測項目としての適応性についても検討を行う。

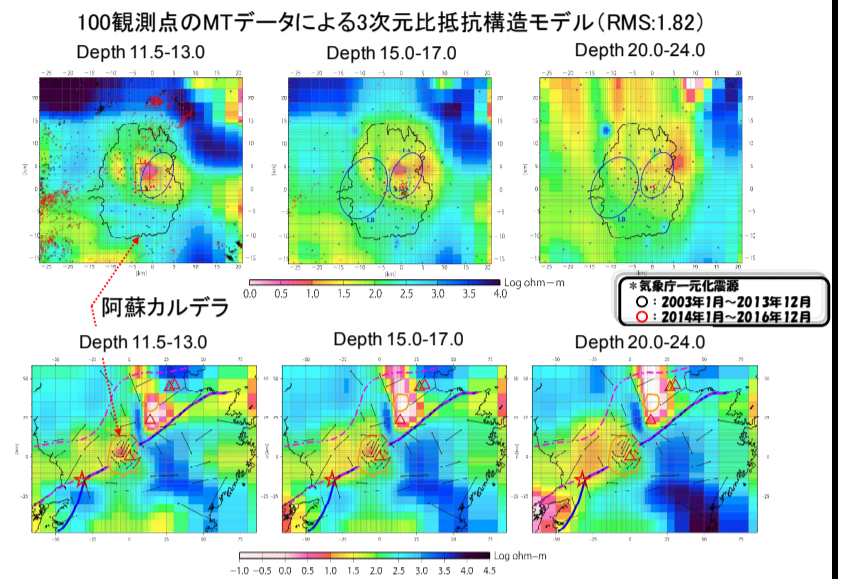
c. 火山性地殻変動とマグマ活動に関する調査

一般に、カルデラ火山の深部には、過去又は現在の火山活動（ポストカルデラ火山活動）に関与するマグマが存在すると考えられている。実際の観測結果による地震波トモグラフィ解析でもカルデラ火山の下に低速度領域の存在している例が報告されている。

本調査では、カルデラ火山において地殻変動観測を実施するとともに、地殻変動とマグマの時空間変化の関係を検討するについて調べるためシミュレーションモデルによる数値実験を行い、地表面で観測される火山性地殻変動をカルデラ火山の地下構造と合わせて解釈するためのモデルを構築する。

c1. シミュレーションモデルによる検討

平成 30 年度までに、地殻変動の観点からマグマの蓄積を理解していくために粘弾性地殻変動モデルを構築し、地下に存在するマグマの消長と地殻変動の関係について数値実験を行った。そして、実際の観測事例としてアトサヌプリ火山周辺で観測された火山性地殻変動に粘弾性地殻変動モデルを適用した結果、低粘性領域の粘性率及びその大きさ、位置関係を適切に設定することで、観測データと整合する隆起と沈降を再現でき、粘弾性地殻変動モデルの適用性を示すことができた（図 7 参照）。



既存Network-MTデータによる3次元比抵抗構造モデル(RMS:1.45)

図4 阿蘇カルデラ周辺の3次元比抵抗構造

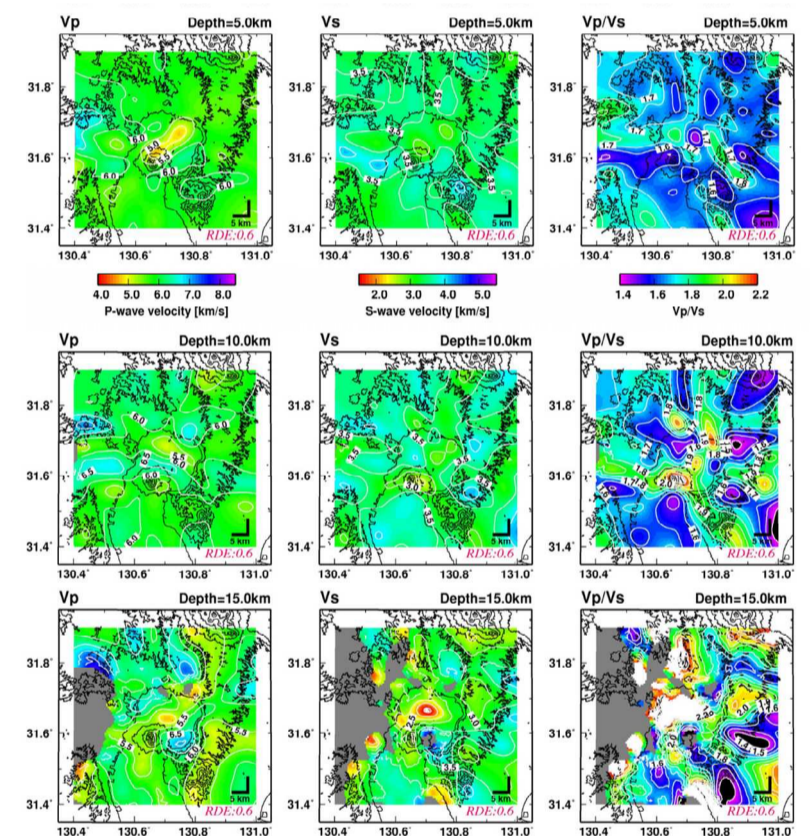


図5 始良カルデラ周辺の地震波速度構造 (深さ5~15km)

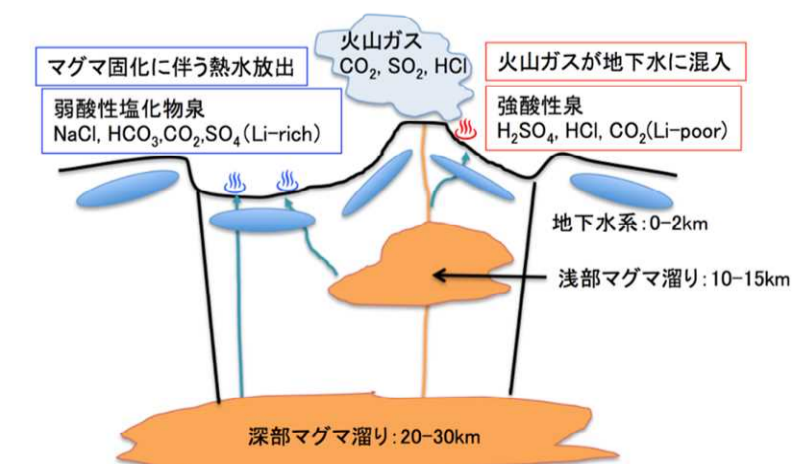
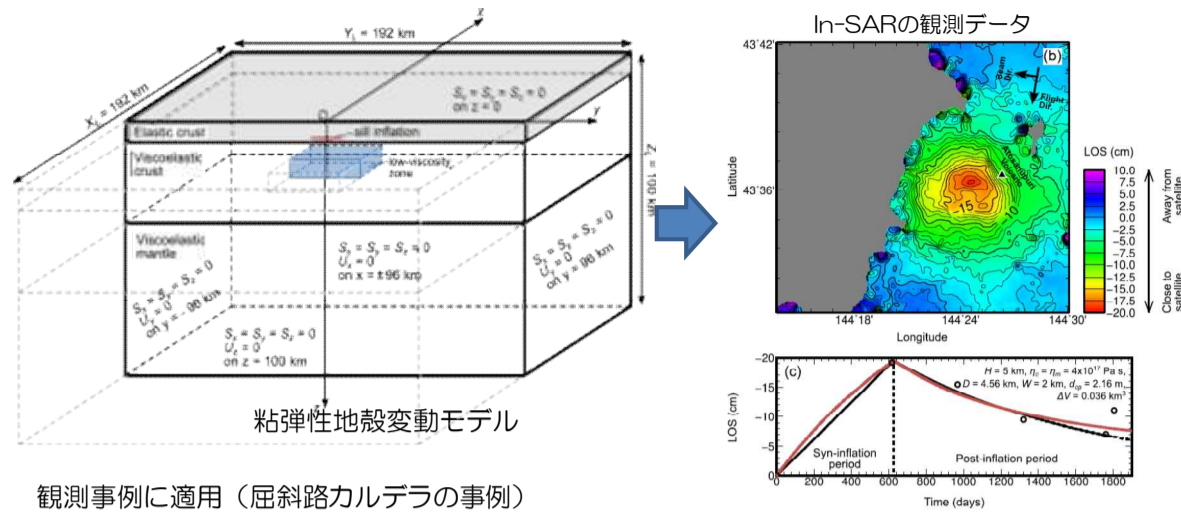


図6 マグマ溜りから放出される熱水流体の組成

本検討では、モデルで予測される地表面変動の振る舞いから地殻内のどの深さにどの程度のマグマが存在しているのかを捕らえていく方法を検討する。具体的には、粘弾性地殻変動モデルをマグマの時空間変化に適用し、マグマ蓄積量を推定する科学的知見を蓄積する。



観測事例に適用（屈斜路カルデラの事例）

地盤変動（上下変動）を構築したモデルで解析すると、実際の変動を最も良く再現するケースは、局所的な低粘性領域（LVZ）の粘性率は $4\sim 5 \times 10^{17} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 、水平幅 Ω ： $> 20 \text{ km}$ 、厚さ θ ： $> 15 \text{ km}$ となる。これらの結果は探査された地下構造と整合する。

図7 粘弾性緩和の効果を考慮したモデルとの適用事例

c2. 地殻変動観測

平成30年度に引き続き始良カルデラの周辺において地殻変動の観測を継続する。一方、最も変動幅が大きいと考えられているカルデラ内は、海底にあるため地殻変動の観測が難しい。そこで、本検討では、錦江湾内に点在する岩礁や無人島へのGNSS設置を検討しカルデラ内の観測点拡充を図る。さらには、水没したカルデラ内での地殻変動を観測する手法としてイタリア国立地球物理学火山学研究所（以下INGVとする）が行っている海底地殻変動観測手法について調査するとともに、始良カルデラに適応させ観測を開始する。得られる観測データ（GNSS、地震計）をカルデラ周辺に設置された地殻変動データと合わせて地下構造の解析や地下のマグマ溜まりの蓄積量の解析を行う。

(4) 観測項目の検討及びそれらの関係についての考え方の検討【分類①】

上記の(1)～(3)の知見を基に、カルデラ火山の噴火の準備段階から噴火に至るまでのマグマプロセスのモデル・シナリオを作成する。具体的には、過去の火山活動の変遷、噴出物の組成変化からマグマの蓄積過程（定置位置及び定置時間の変化）、噴火直前のマグマ定置位置及び最小定置時間等の情報から、巨大噴火マグマのプロセス、噴火に至るシナリオを作成する。また、カルデラの火山性地殻変動と地下構造の関係を基礎とする地殻変動モデルに基づき、地殻変動に対する地下のマグマの上昇や貫入、蓄積速度の大幅な変化等に関する解釈を示し、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や地球化学的な観測手法も含めた観測項目を検討する。そして、噴火に至るシナリオと観測項目と合わせて現状評価の考え方を提案する。

表1. 実施行程表

実施内容	R1	R2	R3	R4	R5
(1) 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 a. 大規模噴火の噴火準備・進展過程に関する調査・研究	▽ボーリング（洞爺、始良）		コア&噴出物サンプル（始良、洞爺）		
	洞爺、始良等の地質学的調査				
	古地磁気学的検討（屈斜路、洞爺、始良）				
b. 降灰プロセス等に関する地質調査及び観測				▽論文投稿	
	降灰プロセス等の検討				
(2) 岩石学的手法によるマグマプロセスに関する調査・研究	▽ラマン、FE-SEM導入	岩石学的検討（屈斜路、洞爺、始良、鬼界、十和田）			
	鉱物分析、高温高圧実験				
	マグマの定置位置、滞留時間の情報				
(3) 地球物理及び地球化学的手法による観測手法に関する調査・研究 a. カルデラ火山の地下構造調査	▽ネットワークMT設置（阿蘇）				
	地震波、MT法による地下構造探査（始良、鬼界、十和田）				
b. カルデラ火山の地球化学的調査	▽ICP-MS導入				
	マグマ起源の流体分析による地下構造の調査				
c. 火山性地殻変動とマグマ活動に関する調査			▽製作・施工	▽海底地殻変動観測開始	
	マグマ、地下構造に関する情報に基づく数値実験				
	海底地殻変動観測手法検討 基本設計、詳細設計検討				
(4) 観測項目の検討及びそれらの関係についての考え方の検討				▽NRA技報 指標の提案	

【令和元年度の実施内容】

(1) 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【分類①】

a. 大規模噴火に関する地質学的調査

洞爺及び始良カルデラについて、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に着手する。具体的には、カルデラ火山周辺の地表踏査を行い、巨大噴火及びその前後の噴火の噴出物の層序や噴出物の全岩組成等の変化から火山活動の時間的変遷を明らかにする。また、巨大噴火前後に発生したより小規模な噴火を探索するためカルデラ近傍でのボーリング調査や噴出物の時間及び空間的な分布を地質調査により明らかにする。また、中小規模の噴火についても噴火の準備・進展過程に関する文献調査を行う。

巨大噴火直前の噴出物は、直後の膨大な噴出物で埋没していることが多く、これまでその実態は明らかにされていない。そこで、過去の巨大噴火とその直前の噴出物の有無を調査することを目的としたボーリング掘削のための調査を実施する。さらに、大規模噴火進展プロセスを調査するため、始良カルデラ等の大規模噴火進展プロセスにおける時間スケールを古地磁気学的手法により検討する。

b. 降灰プロセス等に関する地質調査及び観測

平成 30 年度までに、降灰中の火山灰の量、粒子の数及び粒子の落下速度をリアルタイムで観測することが可能になったが、実際に回収された火山灰粒子と観測データに違いがあり、その要因の一つが粒子の凝集効果であることが示唆された。そこで、令和元年度も観測を継続し、凝集効果について検討するとともに、観測データを蓄積し降灰中の火山灰濃度を調査する。

過去に噴出した大規模噴出物について、地質学的手法による降灰プロセスに関する調査に着手する。具体的には、噴出源から降灰軸方向に地表踏査を行い、噴出物の粒径及び構成比等の変化から噴出物の移送過程を明らかにする。また、降灰軸と直交する方向にも地表踏査を行い、分布特性も明らかにする。

(2) 岩石学的手法によるマグマプロセスに関する調査・研究【分類①】

洞爺、始良、鬼界、十和田について(1)の地質学的な調査結果と合わせて、噴出物の岩石学的検討により巨大噴火に至るまでのマグマの時空間変化の検討に着手する。具体的には、巨大噴火とその前後の噴出物の全岩化学組成（主要元素・微量元素・同位体化学組成）と含有される鉱物の化学組成を用い、含水量等を考慮した相平衡関係を解明し、噴火を起こしたマグマについてその定置条件である温度圧力等の物理条件を制約する。全岩組成分析には波長分散形蛍光 X 線装置を導入する。また、熱力学的モデル計算と、高温高圧実験を併用して相平衡関係の制約を与えると同時に精度の向上を図る。また、ガラス包有物の分析には、従来の二次イオン質量分析計（Secondary Ion Mass Spectrometry : SIMS）による分析に加え、レーザーラマン分光計を用いる手法について検討する。マグマ滞留時間の検討では、結晶中の元素拡散法を中心に、晶出条件の異なる石英、輝石、斜長石等の各種結晶について分析し、マグマ滞留時間を検討する。

(3) 地球物理及び地球化学的手法による観測手法に関する調査・研究【分類①】

a. カルデラ火山の地下構造調査

本調査は、カルデラ火山の地下構造の調査を行うため、始良、阿蘇カルデラで地震波及び電磁探査を行う。また、湖底下に水没したカルデラ内の地下構造探査手法の調査に着手する。

始良カルデラについては、平成 27 年度に設置した地震計に加え、新たにカルデラ内の島に地震計を設置して地震波の観測を継続する。得られた地震波を解析し地震波トモグラフィ及びレシーバー関数解析による地下深部の構造境界の検討を行う。また、反射法によるカルデラ中心付近の深さ 15km 付近に存在する低速度領域の反射面の探査に着手する。

新たに十和田カルデラについても探査手法の検討に着手するとともに、阿蘇カルデラではネットワーク MT 法による長期間探査を実施するための観測網を整備し、本格的な観測に向けた準備観測を開始する。

b. カルデラ火山の地球化学的調査

本調査は、地下のマグマ溜まりの状態（活性度）を把握する手法を確立するため、カルデラ火山の深部流体（地下水やガス）の化学組成や同位体分析を実施する。具体的には、図 6 に示す火山性流体に多く含まれる硫酸イオン (SO_4^{2-}) や塩素イオン (Cl^-) 濃度や He 同位体比に加え、流体に含まれる微量の希土類元素やアルカリ金属の同位体比についても質量分析計 (ICP-MS) を導入し分析する。調査対象とする火山は、始良、鬼界及び十和田カルデラを対象として、カルデラ内外の流出分布や長期間のサンプル採取・分析を行い、湖水あるいは海水で満たされた火山における熱水フラックス評価手法確立のために水中ラドン測定を行う。

c. 火山性地殻変動とマグマ活動に関する調査

一般に、カルデラ火山の深部には、過去又は現在の火山活動（ポストカルデラ火山活動）に関与するマグマが存在すると考えられている。実際、既往の地震波トモグラフィ解析でも低速度領域の存在が報告されている。本調査では、カルデラ火山において地殻変動観測を実施するとともに、地殻変動とマグマの時空間変化の関係について調べるためシミュレーションモデルによる数値実験を行う。

c1. シミュレーションモデルによる検討

平成 30 年度までに、地殻変動の観点からマグマの蓄積を理解していくために粘弾性地殻変動モデルを構築した。本検討では、モデルで予測される地表面変動の振る舞いから地殻内のどの深さにどの程度のマグマが存在しているのかをとらえていく方法を検討する。具体的には、始良カルデラ及びその周辺の地殻変動を対象とし、その時間スケールは GPS や水準のデータといった 10～100 年オーダーの地殻変動データだけでなく、鹿児島湾周辺の堆積物や海岸の汀線変化を用いた 1,000～10,000 年オーダーの変動解析を組み合わせることで、中長期的なカルデラの地盤変動を明らかにすることを旨とする。

c2. 地殻変動観測

これまで始良カルデラ周辺に設置した GNSS において地殻変動の観測を継続していくが、最も変動幅が大きいと考えられているカルデラ内には観測機器が設置できていない。そこで、INGV が行っている海底地殻変動観測技術を調査するとともに、当該技術を始良カルデラに導入するための基礎的な調査を行う。また、カルデラ内にある無人島や岩礁に地震計や GNSS 等の観測機器の設置準備等を行う。

7. 実施計画

【令和2年度の実施内容】

(1) 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【分類①】

a. 大規模噴火に関する地質学的調査

洞爺、阿蘇及び始良カルデラ火山について、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を継続する。本年度は、複数の噴火活動の噴火推移、噴火規模、噴火した場所等を明らかにするため、地表踏査等を実施し、噴出物の層序等を整理したうえで巨大噴火に至った活動推移を明らかにするための調査を行う。また、洞爺カルデラについては、カルデラ形成噴火の噴出量や噴火構成物の時間変化を検討する。

過去の巨大噴火とその直前の噴出物の有無の調査及び大規模噴火進展プロセスの調査では、堆積状態が良く熱残留磁化を保持かつ複数枚の地質ユニットのコアを得ることが期待できるエリアでのボーリング調査等を行い、古地磁気学的検討を行う。

b. 降灰プロセス等に関する地質調査及び観測

観測を継続し、凝集効果について検討するとともに、観測データを蓄積し降灰中の火山灰濃度を調査する。

令和元年度に引き続き、過去に噴出した大規模噴出物について、地質学的手法による降灰プロセスに関する調査を実施する。具体的には、令和元年度に実施した噴出物とは異なる噴出物を対象とし、噴出物間の類似点や相違点についての検討を行う。

(2) 岩石学的手法によるマグマプロセスに関する調査・研究【分類①】

屈斜路、洞爺、始良、十和田について(1)の地質学的な調査結果と合わせて、噴出物の岩石学的検討により巨大噴火に至るまでのマグマの時空間変化の検討を継続する。具体的には、巨大噴火およびその前後の噴出物について網羅的な試料採取を行い、鉱物化学分析等の岩石学的分析を実施し、マグマ溜まりの温度・圧力・マグマ組成等の時間変化から巨大噴火に至る過程での温度・圧力・化学組成・結晶度等の条件の時間変化を明らかにする。また、マグマ溜まりの時間スケール（滞留時間）を元素拡散法及び放射非平衡法により検討する。

(3) 地球物理及び地球化学的手法による観測手法に関する調査・研究【分類①】

a. カルデラ火山の地下構造調査

始良での地震波探査及び阿蘇における電磁探査を継続する。始良カルデラについては新たにカルデラ内の無人島や岩礁に設置した地震計のデータを含めた解析を行うとともに、反射法による長期の地震波観測のため、エアガン及びアレイ観測のための地震計を設置し、基礎実験を実施する。

阿蘇カルデラについては長周期のシグナルを安定して長期間観測できるネットワーク MT 法による観測を実施する。また、既存データを用いて、地殻深部に低比抵抗異常を想定したレスポンスを確認することによって、阿蘇カルデラの地殻下部までの3次元比抵抗構造を高い解像度で得るためのシミュレーション解析を含めた検証作業を進める。さらに、火山活動が活発な阿蘇中岳周辺で、繰り返し定点観測を行い、噴火活動の盛衰にともなう低比抵抗体の変化の有無を検討するとともに、自然電位を制約条件とした熱水系の数値シミュレーションによるマグマ性流体流動の検討を行う。

十和田カルデラについては、令和元年度に引き続き探査手法の検討を行う。

b. カルデラ火山の地球化学的調査

始良、鬼界及び十和田カルデラを対象としたカルデラの深部流体（地下水やガス）の化学組成や同位体分析を実施し、カルデラ内外の流出分布や長期間のサンプル採取・分析を行い統計学的な解析を行う。具体的には、深部流体起源の成分が溶け込んだ地下水を採取し、トリプル四重極誘導プラズマ質量分析計を用いた希土類元素定量分析を行う。また、C/Cl 比、放射性塩素同位体を用いた手法の適用性の検討を行う。さらには、前年度までに阿蘇カルデラで採取した地下水の定量分析を行い、希土類元素組成を用いたマグマの種別判定の検討を行う。同時に、重元素同位体組成の分析を行うための試料選定基準や高次元データに対する解析手法の検討を開始する。

カルデラ火山での長期的な地下水の採取等、火山活動の変化を捕えるための観測手法としての適応性についても検討を行う。

c. 火山性地殻変動とマグマ活動に関する調査

c1. シミュレーションモデルによる検討

始良カルデラ及びその周辺の地殻変動について構築したシミュレーションモデルによる数値実験を継続する。具体的には、3次元有限要素モデルを用いて、地殻内におけるマグマの供給・排出に対する粘弾性応答としての上下変動を予測し、その予測量と観測量との比較を通して、静的及び動的なマグマ蓄積の状態を把握するための科学的知見の整備を継続する。

c2. 地殻変動観測

これまで始良カルデラ周辺に設置した GNSS において地殻変動の観測を継続する。また、海底地殻変動観測のための設備の詳細設計を行うとともに、地殻変動観測施設設置のための準備を行う。

【令和3年度の実施内容】

(1) 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【分類①】

a. 大規模噴火に関する地質学的調査

洞爺及び始良カルデラ火山について、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を継続する。また、中小規模の噴火についても噴火の準備・進展過程に関する文献調査を継続し取りまとめる。本年度は、過去の巨大噴火とその直前の噴出物の有無を調査することを目的としたボーリング掘削を始良カルデラについて実施する。大規模噴火進展プロセスの調査においては、令和元年度の調査結果に基づいて、始良カルデラ等の古地磁気学的調査を継続する。

b. 降灰時のプロセスに関する調査・研究

観測を継続し、凝集効果について検討するとともに、観測データを蓄積し降灰中の火山灰濃度を調査し取りまとめる。令和2年度までに実施した検討内容を基に、地質学的手法から得られた降灰プロセスについてとりまとめるとともに、過去の噴出物に基づく火山灰濃度の設定に資する評価指標を策定する。

(2) 岩石学的手法によるマグマプロセスに関する調査・研究【分類①】

屈斜路、洞爺、始良、鬼界、十和田について(1)の地質学的な調査結果と合わせて、噴出物の岩石学的検討により巨大噴火に至るまでのマグマの時空間変化の検討を継続する。なお、本年度は鬼界及び十和田について取りまとめる。

また、令和2年度の結果を踏まえた高温高圧実験装置による相平衡実験による再現実験を継続する。

(3) 地球物理及び地球化学的手法による観測手法に関する調査・研究【分類①】

a. カルデラ火山の地下構造調査

始良、阿蘇で地震波及び電磁探査を継続する。始良カルデラについては反射法による長期の地震波観測を開始する。阿蘇カルデラについてはネットワークMT法による観測データを基に解析を継続して実施する。

b. カルデラ火山の地球化学的調査

始良、鬼界、十和田及び屈斜路カルデラを対象としたカルデラの深部流体（地下水やガス）の化学組成や同位体分析を継続し、令和2年度に掘削した井戸における採水データも含めた、カルデラ内外の流出分布や長期間のサンプル採取・分析を行い統計学的な解析を行う。

c. 火山性地殻変動とマグマ活動に関する調査

c1. シミュレーションモデルによる検討

地殻変動シミュレーションモデルとカルデラ火山への適応について取りまとめる。

c2. 地殻変動観測

海底地殻変動観測のための施設を設置し、観測を開始する。

【令和4年度の実施内容】

(1) 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【分類①】

a. 大規模噴火に関する地質学的調査

屈斜路、洞爺及び始良カルデラ火山について、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を継続する。

(2) 岩石学的手法によるマグマプロセスに関する調査・研究【分類①】

屈斜路、洞爺、始良カルデラについて(1)の地質学的な調査結果と合わせて、噴出物の岩石学的検討により巨大噴火に至るまでのマグマの時空間変化の検討を継続する。また、令和3年度の結果を踏まえた高温高圧実験装置による相平衡実験による再現実験を継続する。

(3) 地球物理及び地球化学的手法による観測手法に関する調査・研究【分類①】

a. カルデラ火山の地下構造調査

始良及び鬼界カルデラで地震波及び電磁探査を継続する。始良カルデラについては反射法による長期の地震波観測を継続する。また、始良カルデラにおけるネットワークMT法による調査を検討する。

b. カルデラ火山の地球化学的調査

始良、阿寒及び屈斜路カルデラを対象としたカルデラの深部流体（地下水やガス）の化学組成や同位体分析を継続し、令和2年度に掘削した井戸における採水データも含めた、カルデラ内外の流出分布や長期間のサンプル採取・分析を行い統計学的な解析を行う。

c. 火山性地殻変動とマグマ活動に関する調査

c2. 地殻変動観測

海底地殻変動観測を継続する

(4) 観測項目の検討及びそれらの関係についての考え方の検討【分類①】

マグマの時空間変化に関する知見と(1)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・研究の成果と合わせて、研究対象のカルデラのひとつをモデルケースとした噴火の準備過程におけるマグマプロセスのモデル・シナリオを作成する。また、地球化学的な観測手法による観測の有効性を検討する。

【令和5年度の実施内容】

(1) 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【分類①】

a. 大規模噴火に関する地質学的調査

屈斜路、洞爺及び始良カルデラについて、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結果を取りまとめる。

(2) 岩石学的手法によるマグマプロセスに関する調査・研究【分類①】

屈斜路、洞爺、始良カルデラについて(1)の地質学的な調査結果と合わせて、噴出物の岩石学的検討により巨大噴火に至るまでのマグマの時空間変化の検討結果を取りまとめる。

(3) 地球物理及び地球化学的手法による観測手法に関する調査・研究【分類①】

a. カルデラ火山の地下構造調査

始良及び鬼界カルデラで地震波及び電磁探査、反射法による長期の地震波観測結果を取りまとめる。

b. カルデラ火山の地球化学的調査

始良、屈斜路及び阿寒カルデラを対象としたカルデラの深部流体（地下水やガス）の化学組成や同位体分析結果、令和2年度に掘削した井戸における採水データも含めた、カルデラ内外の流出分布や長期間のサンプル採取・分析を行い統計学的な解析について取りまとめる。

c. 火山性地殻変動とマグマ活動に関する調査

c2. 地殻変動観測

海底地殻変動観測の観測結果を取りまとめる。

	<p>(4) 観測項目の検討及びそれらの関係についての考え方の検討【分類①】</p> <p>(2)の研究により得られたマグマの時空間変化に関する知見と(1)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・研究の成果と合わせて、噴火の準備過程における調査対象としたカルデラ火山についてマグマプロセスのモデル・シナリオを作成する。</p> <p>また、(3)の研究成果として地殻変動観測手法及び反射法による長期地震波観測手法の有効性を評価するとともに、カルデラの火山性地殻変動と地下構造の関係を基礎とする地殻変動モデルに基づき、地殻変動に対する地下のマグマの上昇や貫入、蓄積速度の大幅な変化等について考え得る解釈を示し、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や地球化学的な観測手法も含めた観測項目を検討する。</p> <p>そして、噴火に至ると考えられる事象と観測項目と合わせて現状の火山活動を評価する考え方を検討する。</p>
8. 実施体制	<p>【地震・津波研究部門における実施者（主担当者には○を記載）】</p> <p>○ 安池由幸 専門職 西来邦章 技術研究調査官 廣井良美 技術研究調査官 佐藤勇輝 技術研究調査官</p> <p>【前年度までの委託先】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 国立研究開発法人産業技術総合研究所・・・実施項目(1)a、(2)、(3)a ・ 国立大学法人京都大学・・・・・・・・・・実施項目(3)a、c <p>【共同研究先】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 国立大学法人京都大学・・・・・・・・・・実施項目(1)b ・ 国立研究開発法人産業技術総合研究所・・・実施項目(1)b ・ 国立大学法人東北大学・・・・・・・・・・実施項目(2)
9. 備考	

研究計画

1. プロジェクト	5. 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	担当部署	技術基盤グループ 地震・津波研究部門
2. カテゴリー・研究分野	【横断的原子力安全】 A) 外部事象（地震、津波、火山等）	担当責任者	大橋守人 首席技術研究調査官
		主担当者	山崎宏晃 統括技術研究調査官
3. 背景	<p>平成 25 年 7 月に施行された「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」（平成 25 年原子力規制委員会規則第 5 号）において、「地震による損傷の防止」（第四条）のみならず「津波による損傷の防止」（第五条）が強化されるとともに、地震・津波以外の「外部からの衝撃による損傷の防止」（第六条）が明記された。また、「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則」（昭和五十三年十二月二十八日総理府令第五十七号）において、特別の試験条件として「核燃料輸送物が最大の破損を受けるよう」落下試験を実施した場合の要件が規定されている。</p> <p>一方、平成 25 年に改正された「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」により、事業者に対する安全性の向上のための評価の実施が規定された。安全性向上評価においては、外部事象に係る確率論的リスク評価(PRA)の活用が見込まれる。</p> <p>このため、地震・津波等の外部事象に関するリスク評価の精度向上の観点から、施設・設備のフラジリティに係る評価手法を精緻化することが重要である。また、地震・津波以外の外部事象に対しても、解析精度の向上のための新たな技術的知見の収集を行い、衝突・衝撃に対する構造健全性評価手法に反映していくことが重要である。</p> <p>(1) 津波に対するフラジリティ評価手法の検討</p> <p>津波に関する前プロジェクトでは、防潮堤の耐津波設計手法のうち、持続波に対する既往の設計手法の適用範囲を明らかにするとともに、適用範囲を超える場合の評価手法及び段波が防潮堤の構造健全性に与える影響について研究を実施し、その成果を公表した。今後は、設計条件範囲内及び設計を超える津波を対象とし、津波 PRA における施設・設備のフラジリティ評価の精度向上を目的に、防潮堤を越流する津波に対する防潮堤の応答及び耐力の評価を行う。さらに、津波漂流物の衝突及び津波による砂移動に係る評価や地震との組合せを考慮した防潮堤等の構築物の津波フラジリティ評価に係る影響検討を行う。</p> <p>(2) 地震に対するフラジリティ評価手法の検討</p> <p>地震に対する前プロジェクトにおいて、斜面崩壊・設備のフラジリティ評価手法に関する整備を終了した。今後は、地震 PRA における施設・設備のフラジリティ評価の精度向上を目的に、設計を超える地震等に対する建屋・構築物等の三次元挙動に係る評価手法を検討し、これによる機器設備の現実的な応答への影響を評価する。また、防潮堤等が設置される海岸線付近の埋立地盤を対象とした、液状化の評価手法を検討する。さらに、これまで実施してきた耐震重要設備の限界加振試験データを活用して耐震重要設備の現実的な耐力の分析・評価を行う。</p> <p>(3) 外部事象等による衝突・衝撃に対する評価手法の検討</p> <p>地震・津波以外の外部事象に対する構造健全性評価のため、飛翔体等の衝突・衝撃時の構造物の健全性評価手法の整備を目的として、前プロジェクトでは平板等の比較的単純な構造物を対象に、局部損傷に係る試験を実施して既往評価手法の適用性を検討した。今後は、建屋・構築物等の複雑構造物を対象に、飛翔体等の衝突時における衝撃波伝播特性等の評価に係る知見を拡充するとともに、機器等の応答・耐力への影響を評価する。また、輸送容器を対象に、落下時の衝撃挙動に関する知見を拡充し、構造健全性への影響を評価する。</p> <p>(4) 地震時亀裂進展評価手法の検討</p> <p>技術基盤の維持として、亀裂を有する配管等に複数回の設計を超える地震動が作用する場合の累積影響を考慮した亀裂進展評価手法の精緻化に係る検討を行う。</p>		
4. 目的	<p>本プロジェクトでは、外部事象に係る確率論的リスク評(PRA)に関する科学的・技術的知見の蓄積及び関連評価ガイド策定のための知見の拡充に資するため、また、将来の規制活動への反映に向けて地震時亀裂進展に係る知見を蓄積することを目的に以下の研究を行う。</p> <p>(1) 津波に対するフラジリティ評価手法の検討</p> <ol style="list-style-type: none"> a. 防潮堤の津波に対する応答評価 b. 地震との組合せを考慮した構築物等の津波フラジリティ評価 <p>(2) 地震に対するフラジリティ評価手法の検討</p> <ol style="list-style-type: none"> a. 地震時の建屋・構築物等の三次元挙動評価 b. 地震時の埋立地盤の液状化評価 c. 地震に対する耐震重要設備の耐力評価 <p>(3) 外部事象等による衝突・衝撃に対する評価手法の検討</p> <ol style="list-style-type: none"> a. 飛翔体等による衝突・衝撃挙動に係る応答・耐力評価 b. 輸送容器の落下による衝撃挙動に係る構造健全性評価 <p>(4) 地震時亀裂進展評価手法の検討</p> <ol style="list-style-type: none"> a. 地震時亀裂進展評価 		
5. 知見の活用先	<p>本プロジェクトの項目(1)津波に対するフラジリティ評価手法の検討及び(2)地震に対するフラジリティ評価手法の検討で得られた成果は、地震・津波に対する応答及び耐力の評価に関連する NRA 技術報告等の作成及び必要に応じて将来的な安全性向上評価等のガイドの改正等の要否の検討を含めた安全性に係る評価の高度化に資する。また、項目(3)外部事象等による衝突・衝撃に対する評価手法の検討で得られた成果は、衝突・衝撃に対する構造健全性に関連する NRA 技術報告等の作成及び事業者の評価手法等の妥当性判断に資する。項目(4)地震時亀裂進展評価手法の検討については、検討状況の進展に応じて、技術的知見をまとめて公表していく。</p>		

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

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

(1) 津波に対するフラジリティ評価手法の検討

a. 防潮堤の津波に対する応答評価【分類①】

設計条件範囲内及び設計条件を超えて防潮堤を越流する津波によって防潮堤に作用する波力の評価を行うとともに、漂流物による衝突荷重に関する水理試験等を関係機関と協力して実施し、波力の変動や漂流物による影響等を把握し、津波に対する防潮堤のフラジリティ評価の精緻化に向けた知見を拡充する。(図1-1、図1-2)

b. 地震との組合せを考慮した構築物等の津波フラジリティ評価【分類①】

設計条件を超える地震によって弾塑性領域を経験した構築物等に対して、津波が来襲した場合の構築物等の応答及び耐力に係る調査・検討を行い、津波フラジリティへの影響を整理する。(図1-1)

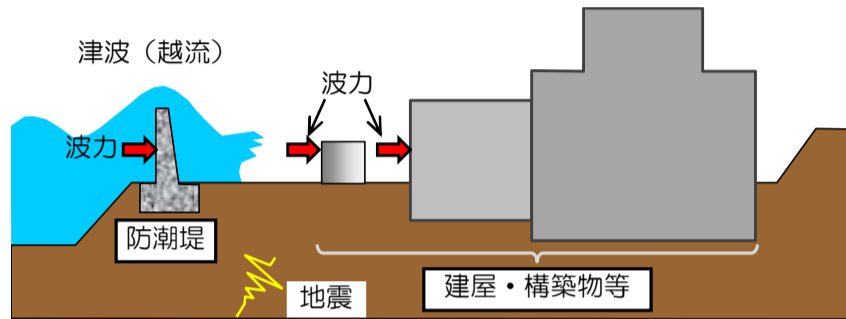


図1-1 津波に対するフラジリティ評価の概要

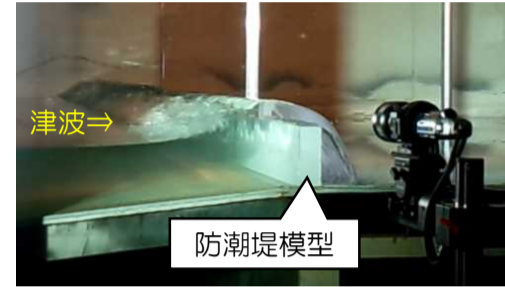


図1-2 津波越流試験の例

(2) 地震に対するフラジリティ評価手法の検討

a. 地震時の建屋・構築物等の三次元挙動評価【分類①】及び【分類④】

地震力が設計条件を超える場合等に建屋・構築物内に設置された耐震重要設備の精緻な地震応答を評価し、地震フラジリティの精度向上に資するため、地震動レベルに応じた非線形性を考慮することにより、建屋・構築物等の三次元の地震応答に係る評価手法を精緻化する。また、ここでの検討結果に基づいて、簡易な質点系モデル等への適用に関する技術的知見を蓄積し整理する。

b. 地震時の埋立地盤の液状化評価【分類①】

原子力発電所の津波対策として海岸線付近に設置された防潮堤の周辺地盤は、砂や礫等の材料で埋め立てられていることが多いが、基準地震動の様に大きな地震力に対する液状化評価が必要となる。そのため、原子力発電所特有の条件（地震動、地盤、地形等）を踏まえた液状化試験や再現シミュレーション解析等を実施するとともに、既往の液状化評価に係る規準類や手法等の適用性に関する技術的知見の蓄積を行う。(図2-2)

c. 地震に対する耐震重要設備の耐力評価【分類④】

地震フラジリティの精度向上のため、機器耐力の既往試験データ（旧財団法人原子力発電技術機構及び旧独立行政法人原子力安全基盤機構）を再整理してデータベースを構築し、試験時に実施したシミュレーション解析データ等を活用して耐震重要設備の現実的な耐力の分析・評価を行う。(図2-3)

6. 安全研究概要
(始期：H29年度)
(終期：R2年度)

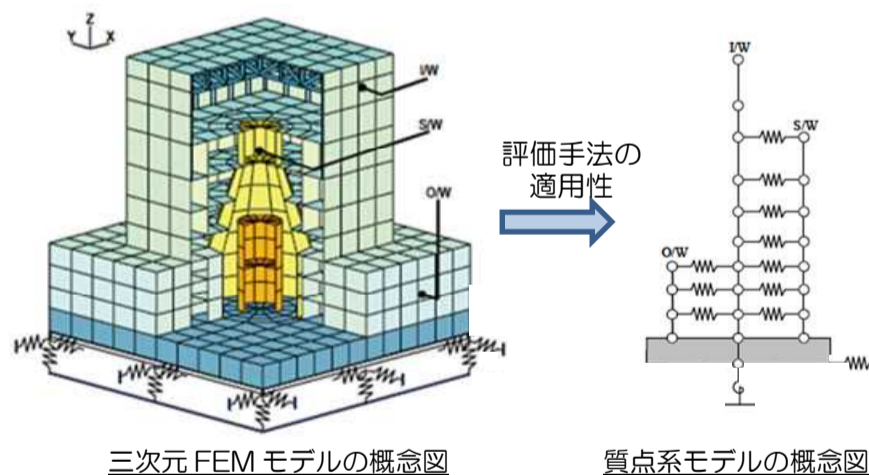


図2-1 建屋・構築物等の三次元評価の概要

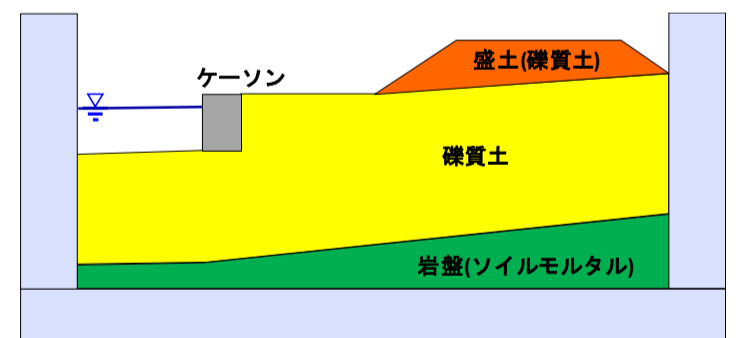


図2-2 液状化試験体の概念図

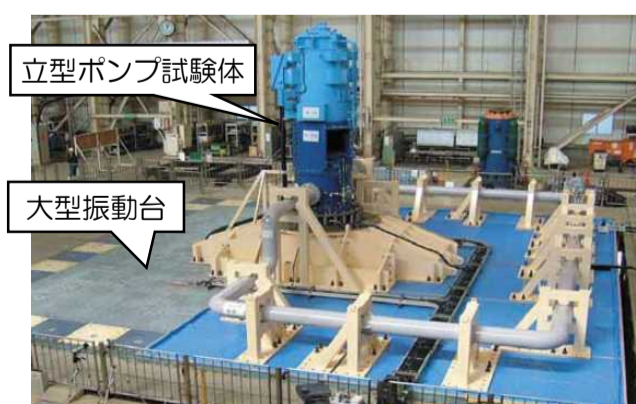


図2-3 振動台加振試験の例

(3) 外部事象等による衝突・衝撃に対する評価手法の検討

a. 飛翔体等による衝突・衝撃挙動に係る応答・耐力評価【分類①】及び【分類④】

飛翔体等による建屋・構築物の全体損傷、衝撃波伝播等に係る調査及び試験を関係機関と協力して実施し、評価モデル及び評価手法の適用性に係る検討を実施する。また、建物・構築物を伝播した衝撃波による機器設備の応答及び耐力への影響に係る調査及び試験を実施し、既往知見の適用性を確認する。(図3-1)

b. 輸送容器の落下による衝撃挙動に係る構造健全性評価【分類①】

スラップダウン落下(水平に近い浅い傾斜角度での落下)時の衝撃挙動に関する知見を拡充するための調査及び試験を実施するとともに、スラップダウン落下に対する構造健全性評価手法の適用性を確認する。(図3-2)

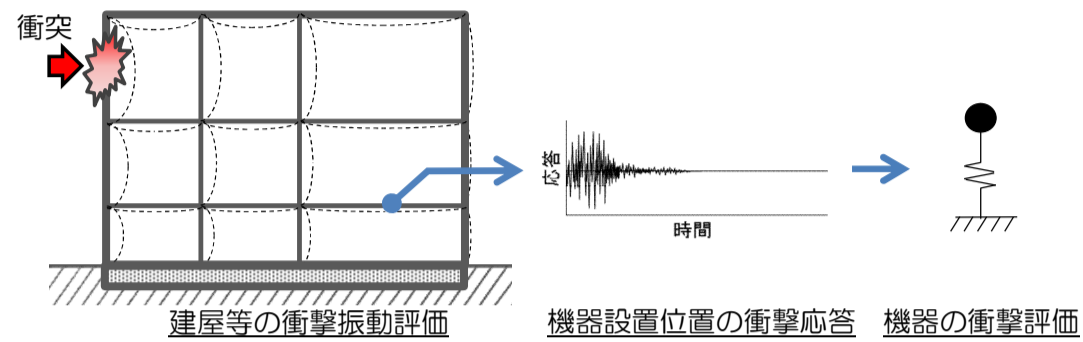


図3-1 飛翔体等による衝突・衝撃挙動評価の概要

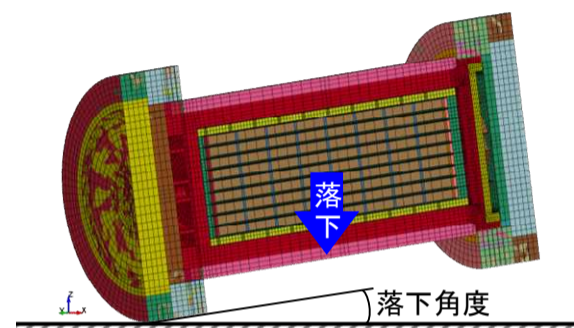


図3-2 輸送容器スラップダウン落下解析モデルの概念図

(4) 地震時亀裂進展評価手法の検討

a. 地震時亀裂進展評価【分類④】

亀裂を有する配管等に複数回の設計を超える地震力が作用する場合の累積影響を考慮した亀裂進展に対する評価手法に関し、関係機関と協力して調査及び試験を実施し、既往の亀裂進展速度に係る適用性を検証する。(図4)

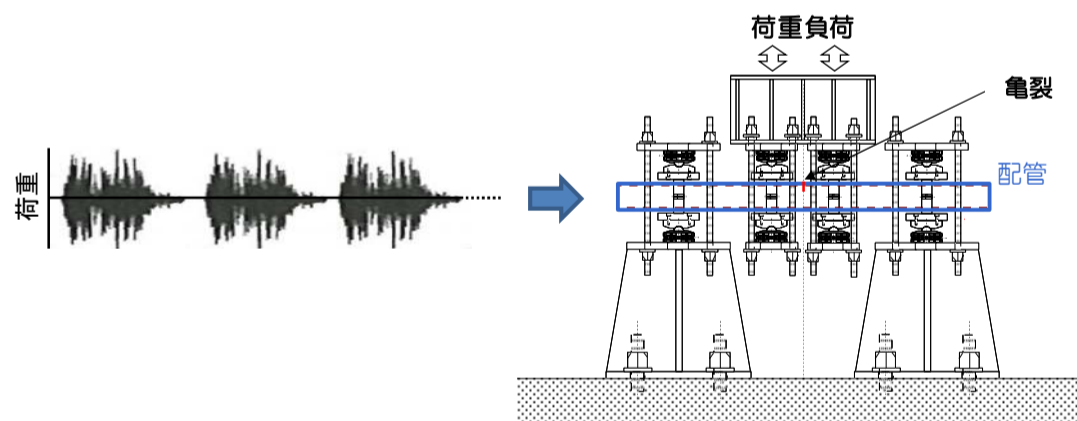


図4 亀裂配管の繰返し荷重試験の概念図

実施行程表

	平成 29 年度	平成 30 年度	令和元年度	令和 2 年度	令和 3 年度
(1) a.	津波越流時の防潮堤作用荷重、洗掘挙動及び津波漂流物に関する試験	津波越流時の防潮堤作用荷重評価並びに津波漂流物及び砂移動に関する試験及びシミュレーション解析 ↓ 津波フラジリティ算定に関する将来的な安全性に係る評価の高度化	津波漂流物及び砂移動に関する試験・解析結果の整理・分析並びに砂性状の条件を拡張した解析等	防潮堤の津波に対するフラジリティ評価に係る知見の取りまとめ ↓ 津波フラジリティ算定に関する将来的な安全性に係る評価の高度化	▽論文公表 ▽成果の公表 NRA 技術報告案等の検討
(1) b.	設計を超える地震後の津波フラジリティ評価の適用性に関する検討				
(2) a.	地震観測記録に基づく建屋・構築物等の三次元挙動評価解析に用いるモデル化手法の検討	建屋・構築物等の三次元挙動に係るパラメトリック解析及び機器設備への影響評価 ↓ 地震フラジリティ算定に関する将来的な安全性に係る評価の高度化	建屋・構築物等の三次元挙動を考慮した応答評価手法に係る技術的知見の整理 建屋等の応答精緻化	建屋・構築物等の三次元挙動を考慮した応答評価手法に係る知見の取りまとめ ↓ 地震フラジリティ算定に関する将来的な安全性に係る評価の高度化	▽論文公表 ▽成果の公表 NRA 技術報告案等の検討
(2) b.		論文公表▽ 液状化試験及び再現シミュレーション解析 ↓ 地震フラジリティ算定に関する将来的な安全性に係る評価の高度化	論文公表▽ 条件を変更した液状化試験及び再現シミュレーション解析	論文公表▽ 液状化試験及び解析に基づく技術的知見の取りまとめ ↓ 地震フラジリティ算定に関する将来的な安全性に係る評価の高度化	▽論文公表 ▽成果の公表 NRA 技術報告案等の検討
(2) c.	動的機器耐力に係る既往試験データの再整理及び耐力評価手法の検討	静的設備の現実的な耐力評価に係る分析・整理 ↓ 地震フラジリティ算定に関する将来的な安全性に係る評価の高度化	静的設備及び動的設備の現実的な耐力評価に係る分析・整理 機器設備の耐力	分析・整理結果を踏まえた、現実的な耐力に係る知見の取りまとめ ↓ 地震フラジリティ算定に関する将来的な安全性に係る評価の高度化	▽論文公表 ▽成果の公表 NRA 技術報告案等の検討
(3) a.	建屋を模擬した衝撃に係る試験体の設計・製作及び予備試験 機器設備の試験・解析に係る実施計画の立案及び要素試験 電機品等の応答・耐力 ↓ 衝突・衝撃に対する事業者評価手法の確認	▽論文公表 衝撃に係る試験データ取得及びシミュレーション解析 機器設備試験体の設計・製作及び確認試験	論文公表▽ 衝撃に係るデータの拡充及び解析評価手法の適用性確認、地盤に係る予備検討 機器設備の応答・耐力に係る試験データ取得 機器設備の応答・耐力	▽論文公表 ▽成果の公表 周辺地盤の影響に係る衝撃試験及び全体取りまとめ 飛翔体等の衝撃に対する機器設備の既往知見の適用性確認	▽論文公表 ▽成果の公表 NRA 技術報告案等の検討
(3) b.	輸送容器のスラップダウン落下試験に係る試験体の設計・事前解析及び要素試験	輸送容器試験体の製作及びスラップダウン落下試験に係る試験データ取得 ↓ 衝突に対する事業者評価手法の確認	輸送容器のスラップダウン落下試験に係るシミュレーション解析	輸送容器のスラップダウン落下に対する構造健全性評価手法の適用性確認	▽論文公表 ▽成果の公表 NRA 技術報告案等の検討
(4) a.	論文公表▽ 設計を超える複数回の地震による累積影響を考慮した亀裂進展に係る試験データの取得	▽論文公表 設計を超える複数回の地震による累積影響を考慮した亀裂進展に係るシミュレーション解析	▽論文公表 設計を超える複数回の地震による累積影響を考慮した亀裂進展評価手法の検証	▽論文公表 ▽成果の公表	

7. 実施計画	<p>【平成 29 年度の実施内容】</p> <p>(1) 津波に対するフラジリティ評価手法の検討</p> <p>a. 防潮堤の津波に対する応答評価【分類①】 設計条件を超えて防潮堤を越流する津波を模擬した水理試験を実施し、防潮堤への作用荷重、洗掘の影響及び津波漂流物の衝突荷重に係るデータを取得する。</p> <p>b. 地震との組合せを考慮した構築物等の津波フラジリティ評価【分類①】 設計を超える地震に対する防潮堤の弾塑性解析を実施して防潮堤の剛性低下等の程度を把握するとともに、設計を超える津波が作用する場合の津波フラジリティ評価手法の適用性に関する検討を実施する。</p> <p>(2) 地震に対するフラジリティ評価手法の検討</p> <p>a. 地震時の建屋・構築物等の三次元挙動評価【分類①】 地震観測記録に基づく現実的な建屋・構築物等の応答を模擬できる三次元 FEM 解析に用いるモデル化手法（地盤との相互作用に係る検討を含む。）について検討する。</p> <p>c. 地震に対する耐震重要設備の耐力評価【分類④】 既往研究等により動的機器設備の耐力評価を実施した際の試験データ（旧財団法人原子力発電技術機構及び旧独立行政法人原子力安全基盤機構）を分析・評価してデータベースを構築するとともに、試験のシミュレーション解析に基づいて耐力評価手法の検討を実施する。</p> <p>(3) 外部事象等による衝突・衝撃に対する評価手法の検討</p> <p>a. 飛翔体等による衝突・衝撃挙動に係る応答・耐力評価【分類①】 飛翔体衝突時の建屋の全体損傷及び衝撃波伝播に係る特性を把握することを目的として、関連する調査を行うとともに、建屋を模擬したボックス構造の試験体を設計・製作し、試験装置、計測装置等の確認を含めた予備試験を実施する。 また、機器設備の衝撃に対する応答及び耐力評価手法に係る調査・分析結果を踏まえ、試験及び解析に係る実施計画を立案するとともに、構成部品等を対象とした要素試験を実施する。</p> <p>b. 輸送容器の落下による衝撃挙動に係る構造健全性評価【分類①】 輸送容器のスラップダウン落下時の衝撃特性を把握することを目的として、輸送容器を模擬した試験体の設計及び事前解析を行うとともに、輸送容器の主要な評価部位を模擬した要素試験を実施する。</p> <p>(4) 地震時亀裂進展評価手法の検討</p> <p>a. 地震時亀裂進展評価【分類④】 設計を超える複数回の地震が作用する配管の亀裂進展特性を把握することを目的として、亀裂進展に係る試験データを取得する。</p>
---------	---

	<p>【平成 30 年度の実施内容】</p> <p>(1) 津波に対するフラジリティ評価手法の検討</p> <p>a. 防潮堤の津波に対する応答評価【分類①】 防潮堤に作用する津波に係る水理試験及びシミュレーション解析を実施し、設計条件範囲内及び津波越流時の防潮堤作用荷重の評価手法に係る技術的知見を収集するとともに、津波漂流物の衝突及び津波による砂移動に係る影響を評価する。</p> <p>(2) 地震に対するフラジリティ評価手法の検討</p> <p>a. 地震時の建屋・構築物等の三次元挙動評価【分類①】 平成 29 年度に整備した建屋・構築物等の三次元 FEM 解析モデルを用いて、モデル化手法や物性値等をパラメータとした解析を実施し、質点系モデルへの適用を検討するとともに、ここでの建屋・構築物等の応答を入力条件とする機器設備の応答評価への影響を検討する。</p> <p>b. 地震時の埋立地盤の液状化評価【分類①】 原子力発電所特有の条件（地震動、地盤、地形等）を踏まえた液状化試験や再現シミュレーション解析等を実施し、液状化評価に関する知見を蓄積する。</p> <p>c. 地震に対する耐震重要設備の耐力評価【分類④】 平成 29 年度の検討に基づき、静的設備の現実的な耐力評価に係る分析・整理を実施する。</p> <p>(3) 外部事象等による衝突・衝撃に対する評価手法の検討</p> <p>a. 飛翔体等による衝突・衝撃挙動に係る応答・耐力評価【分類①】 建屋構造、飛翔体形状、衝突速度等をパラメータとした試験を行い、衝撃波伝播挙動に係る試験データを取得するとともに、シミュレーション解析を行って、全体損傷及び衝撃波伝播に係る分析を実施する。 平成 29 年度に策定した実施計画に基づき、機器設備に係る試験環境の確認、試験体設計・製作及び事前解析を実施し、機器設備の衝撃に対する確認試験を行う。</p> <p>b. 輸送容器の落下による衝撃挙動に係る構造健全性評価【分類①】 輸送容器の試験体を製作してスラップダウン落下試験を行い、落下時の衝撃挙動に係る試験データを取得する。</p> <p>(4) 地震時亀裂進展評価手法の検討</p> <p>a. 地震時亀裂進展評価【分類④】 設計を超える複数回の地震が作用する場合の試験結果に基づいて、亀裂を有する配管の亀裂進展に係るシミュレーション解析を実施し、亀裂進展速度について既往知見との比較検討を実施する。</p>
--	--

	<p>【令和元年度の実施内容】</p> <p>(1) 津波に対するフラジリティ評価手法の検討</p> <p>a. 防潮堤の津波に対する応答評価【分類①】</p>
--	---

	<p>平成 30 年度までに実施した津波漂流物の衝突及び津波による砂移動に係る試験・解析結果の整理・分析を実施するとともに、砂性状に係る条件を拡張した解析等を実施し、これらの評価手法を精緻化する。</p> <p>(2)地震に対するフラジリティ評価手法の検討</p> <p>a. 地震時の建屋・構築物等の三次元挙動評価【分類①】及び【分類④】 平成 30 年度までに実施した検討結果に基づいて観測記録のシミュレーション解析を行い、建屋・構築物等の三次元挙動を考慮した応答評価手法に係る技術的知見を整理する。</p> <p>b. 地震時の埋立地盤の液状化評価【分類①】 原子力発電所特有の条件（地震動、地盤、地形等）を変えた液状化試験や再現シミュレーション解析等を実施し、液状化の評価手法に係る技術的知見を整理する。</p> <p>c. 地震に対する耐震重要設備の耐力評価【分類④】 平成 30 年度の検討に基づき、静的設備及び動的設備の現実的な耐力評価に係る分析・整理を実施する。</p> <p>(3)外部事象等による衝突・衝撃に対する評価手法の検討</p> <p>a. 飛翔体等による衝突・衝撃挙動に係る応答・耐力評価【分類①】 平成 30 年度に実施した試験及びシミュレーション解析に加えて追加試験を実施し、建屋の全体損傷及び衝撃波伝播に係る解析手法の適用性を確認する。また周辺地盤が衝撃応答に与える影響に関する予備検討を実施する。 衝撃に対する機器設備の応答及び耐力に係る試験を実施してデータを取得するとともに、平成 30 年度までの試験に対する分析を実施する。</p> <p>b. 輸送容器の落下による衝撃挙動に係る構造健全性評価【分類①】 平成 30 年度までに実施した輸送容器のスラップダウン落下試験結果に基づいてシミュレーション解析を実施し、各評価部位での衝撃による影響を検討する。</p> <p>(4)地震時亀裂進展評価手法の検討</p> <p>a. 地震時亀裂進展評価【分類④】 平成 30 年度までに実施した試験及びシミュレーション解析に基づいて、設計を超える複数回の地震による累積影響を考慮した地震時亀裂進展評価手法に係る検証及び取りまとめを実施する。</p>
	<p>【令和 2 年度の実施内容】</p> <p>(1)津波に対するフラジリティ評価手法の検討</p> <p>a. 防潮堤の津波に対する応答評価【分類①】 令和元年度までに実施した、津波越流時の防潮堤作用荷重、津波漂流物の衝突及び津波による砂移動に係る評価結果を踏まえ、防潮堤に対するフラジリティ評価手法に係る知見を取りまとめる。</p> <p>(2)地震に対するフラジリティ評価手法の検討</p> <p>a. 地震時の建屋・構築物等の三次元挙動評価【分類①】及び【分類④】 令和元年度までに実施した建屋・構築物等の三次元挙動を考慮した建屋応答に関する検討を踏まえ、建屋・構築物等の応答評価手法に係る知見を取りまとめる。また、実建屋における地震観測記録等を用いてシミュレーション解析手法の妥当性に関する検討を行う。</p> <p>b. 地震時の埋立地盤の液状化評価【分類①】 地盤の液状化の評価手法に関するシミュレーション解析等の検討を行い、技術的知見を整理する。また、ここでの成果を踏まえ国際基準の策定等に向けた準備を行う。</p> <p>c. 地震に対する耐震重要設備の耐力評価【分類④】 令和元年度までに実施した分析・整理結果を踏まえ、現実的な耐力に係る知見について取りまとめる。また、課題を整理するとともに、過去に大きな地震を経験した既設プラントの設備の耐震性評価に係るフィジビリティ・スタディを行う。</p> <p>(3)外部事象等による衝突・衝撃に対する評価手法の検討</p> <p>a. 飛翔体等による衝突・衝撃挙動に係る応答・耐力評価【分類①】及び【分類④】 令和元年度までに実施した検討に加えて、周辺地盤による影響に関する試験を実施し、建屋の全体損傷及び衝撃波伝播の解析手法検討の全体取りまとめを行う。 令和元年度までの機器設備の試験に基づいて、飛翔体等による衝撃に対する機器設備に係る既往知見の適用性を確認する。また、課題を整理し、機器設備の耐力・応答解析手法に係るフィジビリティ・スタディを実施するとともに、衝撃振動試験設備の整備を行う。</p> <p>b. 輸送容器の落下による衝撃挙動に係る構造健全性評価【分類①】 令和元年度までに実施したスラップダウン落下試験及びシミュレーション解析に基づいて、輸送容器のスラップダウン落下に対する構造健全性評価手法の適用性を確認する。</p>
8. 実施体制	<p>【地震・津波研究部門における実施者】</p> <p>○山崎宏晃 統括技術研究調査官 日比野憲太 統括技術研究調査官 猿田正明 主任技術研究調査官 北村俊也 主任技術研究調査官 日高慎士郎 主任技術研究調査官 田岡英斗 技術研究調査官 森 和成 技術研究調査官 森谷 寛 技術研究調査官 太田良巳 技術研究調査官 市原義孝 技術研究調査官</p>

東喜三郎 技術研究調査官
 鳥山拓也 技術研究調査官
 永井 穰 技術研究調査官
 高松直丘 技術計画専門職
 石田暢生 技術計画専門職
 小林恒一 技術計画専門職
 堀野知志 技術参与
 澁谷 陽 技術参与
 鈴木謙一 技術参与
 伊東 守 技術参与
 土居博昭 技術参与

【前年度までの委託先】

- ・大成建設株式会社 . . . 実施項目(1)a
- ・国立大学法人京都大学 . . . 実施項目(1)a
- ・国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 . . . 実施項目(2)a
- ・国立大学法人東北大学 . . . 実施項目(2)b
- ・学校法人東京電機大学 . . . 実施項目(2)c
- ・鹿島建設株式会社 . . . 実施項目(3)a
- ・国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 . . . 実施項目(4)a


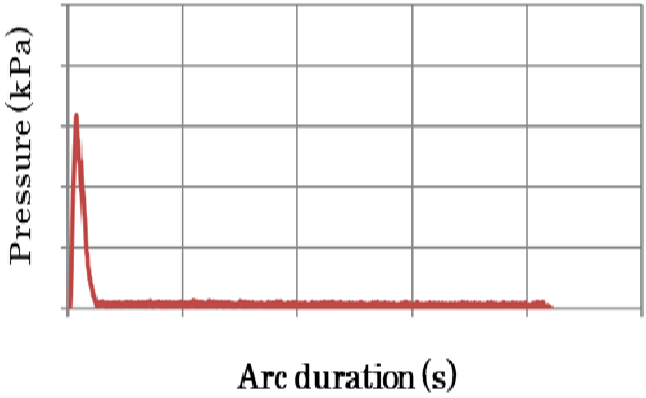
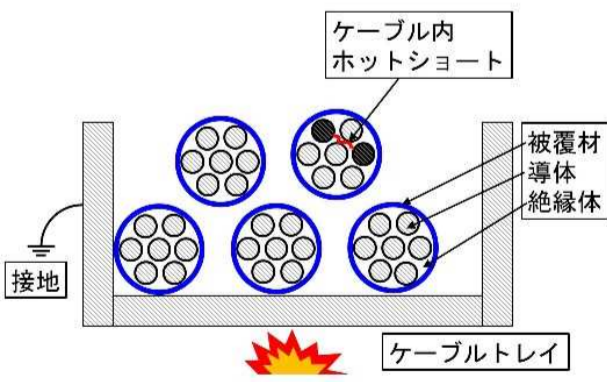
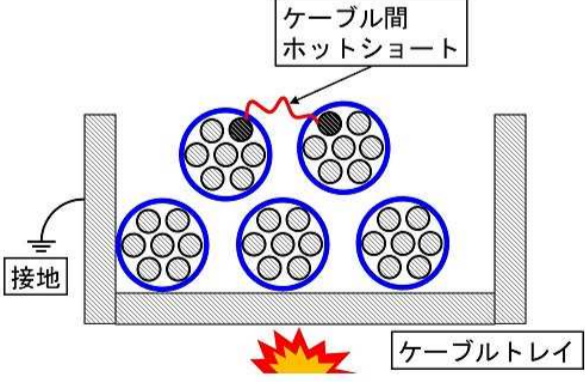
【共同研究先】

- ・国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 . . . 実施項目(2)a
- ・学校法人東京電機大学 . . . 実施項目(2)c、(3)a

9. 備考

研究計画

1. プロジェクト	6. 火災防護に係る影響評価に関する研究	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	梶島 一 主任技術研究調査官
2. カテゴリー・研究分野	【横断的原子力安全】 B) 火災防護	主担当者	加藤敬輝 技術研究調査官
3. 背景	<p>火災は共通原因故障を引き起こす起因事象の中でも重要な事象の一つであることから、様々な火災事象（火災起因の事象も含む）について一層のリスク低減を図るための研究を継続的に行うことが重要である。</p> <p>これまで、東日本大震災時の東北電力株式会社女川原子力発電所で発生したアーク火災に着目し、高エネルギーアーク損傷（HEAF）試験を実施し、対策の検討に向けたデータを取得するとともに、電気ケーブル等の可燃物について火災データの取得と解析コードの整備を行ってきた。</p> <p>今後は、これら成果のリスク評価手法への活用を目指すとともに、平成 25 年度に制定された「実用発電用原子炉及びその附属施設の火災防護に係る審査基準」、「原子力発電所の内部火災影響評価ガイド」、「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド」及び平成 29 年度に制定された「高エネルギーアーク損傷（HEAF）に係る電気盤の設計に関する審査ガイド」の見直しの要否の検討に向けた火災・爆発試験によるデータの取得、火災影響評価手法・解析コードの整備及び火災防護に係る情報の収集・分析を行う。本研究で実施する項目の背景は以下のとおりである。</p> <p>(1) HEAF の影響評価</p> <p>国際的な火災事象を取りまとめている OECD/NEA/FIRE データベースプロジェクトでは炉心損傷に至る可能性の高い火災事象の一つとして、HEAF を抽出している。HEAF はその現象の複雑さ及び影響の重大さから国際的に注目されており、OECD/NEA では国際共同研究プロジェクトが進行中である。</p> <p>HEAF には第一段階における爆発現象と第二段階におけるアーク火災がある。第二段階におけるアーク火災への対応については、原子力規制庁長官官房技術基盤グループ及び OECD/NEA プロジェクトの試験研究を基にその発生メカニズムの解明等が進んだことで、第 25 回原子力規制委員会（平成 29 年 7 月 19 日）において、アーク火災の発生防止に関する規則等の改正と審査ガイドの新規制定が決定され、同年 8 月 8 日付けで公布（施行）された。一方、第一段階における爆発現象への対応については、今後研究が進み有効な対応策が確認された時点でさらなる規制基準の見直しの要否の検討を行うこととされている。したがって、まだ十分な知見が得られていない HEAF の爆発現象における圧力の急激な発生や伝播等に係る定量的評価手法を整備するために試験研究を実施し知見を拡充することとした。</p> <p>(2) 電気ケーブルの熱劣化評価</p> <p>これまでの電気ケーブル（以下「ケーブル」という。）の火災試験では、主に発火したケーブルあるいは隣接ケーブルへの延焼性の確認等を行ってきた。一方、火災源近傍あるいは高温ガス中に存在するケーブルの外部被覆ではその熱により絶縁抵抗が急激に低下し、特に計装・制御ケーブルの場合には誤信号を発信する可能性がある。また、ケーブルの熱劣化（損傷）により外部被覆の絶縁抵抗は更に低下し短絡・地絡・混触（ホットショート）するおそれがある。さらに、熱が加え続けられるとケーブル自体が難燃性であっても発火し火災源になり得る。以上から、ケーブル火災に至る前までのケーブルの熱劣化に伴う異常な挙動は、原子炉施設の安全にとって脅威の一つと成り得る。このため、火災に至る前までのケーブルの熱劣化に係る評価手法を整備することとした。</p> <p>(3) 火災影響評価手法・解析コード等の整備</p> <p>火災影響評価手法・解析コード等は、今後の火災防護に係る規制の高度化等に役立つと考えられることから継続的な整備が必要である。特に国内原子力発電所での火災事象に関しては、事象進展の分析・把握による火災防護対策の検討、火災リスクの高い区域（区画）での火災影響（火災防護対象機器の損傷可能性等）の詳細解析等に有効なツールになると考えられる。また、HEAF の第一段階の爆発現象の詳細解析にも有用であると考えられる。</p>		
4. 目的	<p>火災防護に係る安全研究の成果を活用し制定された「実用発電用原子炉及びその附属施設の火災防護に係る審査基準」、「原子力発電所の内部火災影響評価ガイド」、「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド」及び「高エネルギーアーク損傷（HEAF）に係る電気盤の設計に関する審査ガイド」の見直しの要否の検討に必要な技術的知見を取得する。</p> <p>(1) HEAF の影響評価</p> <p>HEAF の爆発現象に係る技術的知見を拡充する。</p> <p>(2) 電気ケーブルの熱劣化評価</p> <p>加熱による計装・制御ケーブルの誤信号及び電気ケーブルの外部被覆が損傷することによる短絡・地絡・混触（ホットショート）等に係る火災時熱劣化評価のための技術的知見を拡充する。</p> <p>(3) 火災影響評価手法・解析コード等の整備</p> <p>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。</p>		

<p>5. 知見の活用先</p>	<p>(1) HEAF の影響評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 高エネルギーアーク損傷 (HEAF) に係る電気盤の設計に関する審査ガイド <p>(2) 電気ケーブルの熱劣化評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 実用発電用原子炉及びその附属施設の火災防護に係る審査基準 ・ 原子力発電所の内部火災影響評価ガイド <p>(3) 火災影響評価手法・解析コード等の整備</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 原子力発電所の内部火災影響評価ガイド ・ 原子力発電所の外部火災影響評価ガイド ・ 高エネルギーアーク損傷 (HEAF) に係る電気盤の設計に関する審査ガイド
<p>6. 安全研究概要 (始期: H29 年度) (終期: R2 年度)</p>	<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>③規制活動に必要な手段の整備 (以下「分類③」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>本プロジェクトの研究においては、火災防護に係る規制をより高度化するため、以下の(1)、(2)及び(3)を実施する。なお、試験については、必要な試験装置を保有する関係機関で実施する。</p> <p>(1) HEAFの影響評価 (【分類①】)</p> <p>爆発現象等の現象解明を行うためHEAFに係る要素試験(図1(a))を実施する。要素試験によって、爆発現象等により圧力が急激に発生・解放される現象等(図1(b))を把握する。取得データから得られた知見を取りまとめ、HEAFの爆発現象の解析を実施し、その技術的知見を拡充する。最終的にはその技術的知見に基づき基準類の見直しの可否等を検討する。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>(a) 筐体を用いたHEAF試験の一例</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>(b) HEAFの爆発現象における爆発圧力のイメージ図</p> </div> </div> <p>図1 HEAFに係る要素試験</p> <p>(2) 電気ケーブルの熱劣化評価 (【分類①】)</p> <p>原子炉安全停止の失敗に係るケーブルの火災時熱劣化によるホットショート(図2(a), (b))の発生可能性については、ケーブルの種類やトレイ内外のケーブル配置等で異なることが知られており、米国等でデータが蓄積されつつある。これらのデータを活用しつつ評価に必要な知見を拡充するため、我が国で使用されているケーブルについて、ケーブルの外部被覆の熱による損傷速度を把握し、その速度から加熱による絶縁抵抗の低下予測式等を整備するとともに、ケーブルの熱劣化に係る技術的知見を取得する。この他に新品と長期間使用したケーブルの熱劣化における差異についても確認する。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>(a) ケーブル内ホットショートの一例</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>(b) ケーブル間ホットショートの一例</p> </div> </div> <p>図2 ケーブルの熱劣化によるホットショートのイメージ</p> <p>(3) 火災影響評価手法・解析コード等の整備 (【分類③④】)</p> <p>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。特にケーブル火災、電気盤火災等の火災試験データを火災試験プロジェクト等から取得して、検証と妥当性確認を行い解析コードの信頼性の向上を図る。また、HEAFについては爆発現象等のモデル化を進めるとともに、HEAFに係る解析コードを整備する。</p>

実施行程表

	平成 29 年度	平成 30 年度	令和元年度	令和 2 年度
(1) HEAF の影響評価	▽学会発表 HEAF 試験の実施 (爆発現象の圧力把握、筐体内容積の影響)	▽学会発表、 HEAF 試験の実施 (爆発現象の圧力把握、筐体開口部(閉じ込め性)の影響)	▽論文投稿 HEAF 試験の実施 (爆発現象の圧力把握、筐体開口位置の影響)	▽論文投稿等 HEAF 試験の実施 (爆発現象の圧力把握、母線材質等の影響) 取得データから得られた知見を取りまとめる
				▽論文投稿等
(2) 電気ケーブルの熱劣化評価	電気ケーブルの種類を変えた熱劣化試験の実施 (絶縁抵抗測定)	トレイ内での電気ケーブルの配置を考慮した熱劣化試験の実施 (絶縁抵抗測定)	新品と経年化した電気ケーブルの熱劣化評価試験 (絶縁抵抗測定)	経年度合いを変えた電気ケーブルの熱劣化評価試験 (絶縁抵抗測定)
	電気ケーブルの熱劣化特性等の調査	電気ケーブルの絶縁低下予測式等の整備	電気ケーブルの絶縁低下予測式等の高度化	電気ケーブルの熱劣化に係る評価手法の整備
(3) 火災影響評価手法・解析コード等の整備		▽学会発表		▽論文投稿等
	火災試験プロジェクトの試験による煙濃度評価モデルの検証と妥当性確認	火災試験プロジェクトの試験によるケーブル延焼モデルの検証と妥当性確認	火災試験プロジェクトの試験によるケーブル延焼モデルの検証と妥当性確認	火災試験プロジェクト試験等によるケーブル延焼モデルの検証と妥当性確認
	HEAF 爆発解析モデルの検討	HEAF 爆発解析モデルの検証と妥当性確認	HEAF 爆発解析モデルの改良・整備	火災影響評価手法の整備 HEAF 爆発解析モデルの改良・整備

7. 実施計画

【平成 29 年度の実施内容】

(1) HEAF の影響評価

- ・爆発現象の最大圧力・圧力上昇速度把握のために筐体の内容積等を変えた HEAF 試験を実施する。

(2) 電気ケーブルの熱劣化評価

- ・原子力施設で使用されている電気ケーブルの種類を変えた熱劣化試験を実施し、絶縁抵抗を測定する。
- ・電気ケーブルの熱劣化特性等を調査する。

(3) 火災影響評価手法・解析コード等の整備

- ・火災試験プロジェクトの試験及び電気盤の火災試験結果により、解析モデルの検証と妥当性確認を実施する。
- ・HEAF に係る爆発解析モデルを検討する。

【平成 30 年度の実施内容】

(1) HEAF の影響評価

- ・爆発現象の最大圧力・圧力上昇速度把握のために筐体の開口部(閉じ込め性)等を変えた HEAF 試験を実施する。

(2) 電気ケーブルの熱劣化評価

- ・トレイ内での電気ケーブルの配置を考慮した熱劣化試験を実施し、絶縁抵抗を測定する。
- ・電気ケーブルの絶縁低下予測式等を整備する。

(3) 火災影響評価手法・解析コード等の整備

- ・火災試験プロジェクトの試験及び電気盤の火災試験結果により、解析モデルの検証と妥当性確認を実施する。
- ・HEAF に係る爆発解析モデルの検証と妥当性確認を実施する。

【令和元年度の実施内容】

(1) HEAF の影響評価

- ・爆発現象の最大圧力・圧力上昇速度把握のために筐体の開口位置等を変えた HEAF 試験を実施する。

(2) 電気ケーブルの熱劣化評価

	<ul style="list-style-type: none"> ・新品と経年化した電気ケーブルの熱劣化評価試験を実施し、絶縁抵抗を測定する。 ・電気ケーブルの絶縁低下予測式に係る技術的知見を拡充する。 <p>(3) 火災影響評価手法・解析コード等の整備</p> <ul style="list-style-type: none"> ・火災試験プロジェクト等の火災試験結果により、解析モデルの検証と妥当性確認を実施する。 ・HEAFに係る爆発解析モデルの改良・整備等を実施する。 <p>【令和2年度の実施内容】</p> <p>(1) HEAFの影響評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・爆発現象の最大圧力・圧力上昇速度把握のために筐体の母線材質等を変えた HEAF 試験を実施する。 ・これまでに実施した HEAF 試験から得られた知見を取りまとめる。 <p>(2) 電気ケーブルの熱劣化評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・経年度合いを変えた電気ケーブルの熱劣化評価試験を実施し、絶縁抵抗を測定する。 ・電気ケーブルの熱劣化に係る評価手法を整備する。 <p>(3) 火災影響評価手法・解析コード等の整備</p> <ul style="list-style-type: none"> ・火災試験プロジェクト等の火災試験結果により、解析モデルの検証と妥当性確認を実施する。 ・HEAFに係る爆発解析モデルの改良・整備等を実施する。
8. 実施体制	<p>【システム安全研究部門における実施者（主担当者には○を記載）】</p> <p> 柊島 一 主任技術研究調査官</p> <p>○加藤敬輝 技術研究調査官</p> <p> 松田航輔 技術研究調査官</p> <p> 笠原文雄 技術参与</p> <p>【前年度までの委託先】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・国立大学法人筑波大学・・・実施項目(2) ・国立大学法人金沢大学・・・実施項目(3) ・国立大学法人山口大学・・・実施項目(3) <p>【共同研究先】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・国立大学法人筑波大学・・・実施項目(3)
9. 備考	

研究計画

1. プロジェクト	7. 人間工学に基づく人的組織的要因の体系的な分析に係る規制研究	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	河合 潤 原子力規制専門職
2. カテゴリー・研究分野	【横断的原子力安全】C) 人的組織的要因	主担当者	河合 潤 原子力規制専門職
3. 背景	<p>機械系と人間系で構成される原子力施設において、機械系と比較すると、人間系（運転員、保守作業員等）は、自律性や柔軟性、緊急時の対応能力等に優れる一方、そのパフォーマンスにはばらつきが大きく不安定な面がある。原子力施設の高い安全性及び信頼性を確保していくためには、そうした人間や組織の特性を踏まえて人的過誤の発生を抑制し、人間系の信頼度を向上させることが重要である。人的過誤の発生の抑制の手段として、ヒューマンマシンインタフェース、手順書、訓練等の改良が挙げられる。</p> <p>人間系に関する規制の国内外の動向として、原子力施設に関する我が国の規制に対して IAEA（国際原子力機関）が平成 28 年に行った総合規制評価サービス（Integrated Regulatory Review Service、以下「IRRS」という。）では“人的組織的要因を設計段階で体系的に考慮すること”が提言されている。これは IAEA の安全要件 SSR-2/1「原子力プラントの設計」の中の要件 32「運転員の最適な操作のための設計」において、「ヒューマンマシンインタフェースを含む人間工学の体系的な検討は、原子力発電プラントの設計プロセスの初期の段階に含まれ、また全体の設計プロセスを通して継続していなければならない」とされていることに対応するものである。また、この要件のもとに人間工学的設計に関する安全指針として、DS492「Human Factors Engineering in the Design of Nuclear Power Plants（原子力発電プラントの設計における人間工学）」が平成 30 年 11 月に IAEA の CSS（Commission on Safety Standards）会議で承認され、令和元年には識別番号を SSG-51 と付されて正式発行された。</p> <p>このため原子力規制庁は、IAEA の安全要件及び安全指針を参考とし、人的組織的要因に関し人間工学に視点をおいて設計段階より体系的に考慮するべく規制要件を高度化するための検討を行ってきた。</p> <p>またガイド類の作成に資するため、関連する規制や技術の最新動向の調査を実施した結果、人間とプラントの相互作用を扱う人間工学では、重大事故時等において、不確実な状況に対応する人間の複雑な認知行動を評価する方法論等が研究課題であることが見いだされた。</p>		
4. 目的	<p>本プロジェクトでは、人間工学を体系的に考慮して原子炉制御室等の設計を評価するための技術的根拠を取得し、原子力安全の一層の向上を図ることを目的とする。研究課題としては、重大事故時等における不確実な状況に対応する人間の複雑な認知行動を評価する方法論について、以下の 2 件を設定する。</p> <p>(1) 重大事故時等の対応における原子炉制御室等の人間工学設計を評価するための技術的根拠の取得</p> <p>(2) 重大事故時等の対応において人間工学設計の評価に適用する人間信頼性解析手法の整備</p>		
5. 知見の活用先	研究成果は、人間工学設計を評価するガイド類を検討するための技術的根拠として活用する。		
6. 安全研究概要 (始期：R1 年度) (終期：R4 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>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>③ 規制活動に必要な手段の整備（以下「分類③」という。）</p> <p>本プロジェクトの研究においては、人的組織的要因を設計段階より体系的に考慮する我が国の規制をより高度化するため、重大事故時等における不確実な状況に対応する人間の複雑な認知行動を評価する方法論について、以下の(1)及び(2)を実施する。</p> <p>人間工学設計は基本的に、分析（運転経験レビュー、機能上の要件分析と機能配分、重要な運転員操作の扱い、タスク分析、運転員の配置と資格認定）、設計（ヒューマンマシンインタフェース設計、手順書の開発、訓練プログラムの開発）、検証と妥当性確認、設計の施工、人的パフォーマンスの監視というプロセスで行われる（図 1）。</p>		

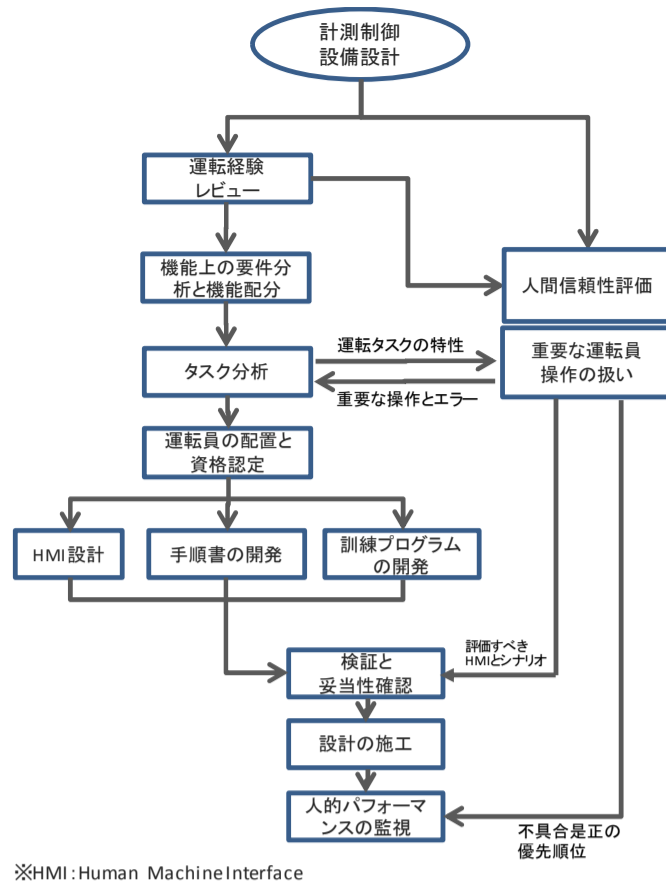


図1 人間工学設計の基本的なプロセス

(1) 重大事故時等の対応における原子炉制御室等の人間工学設計を評価するための技術的根拠の取得（分類①、②）

重大事故時等においては、プラント状況の不確実性が増し事故の進展推移も多様化するとともに、人間の対応にも複雑な認知的能力が求められる。このため重大事故時等の人間工学設計プロセスの評価においても、「重要な運転員操作の扱い」において多様な人的タスクの中から安全上重要なタスクを抽出すること、「タスク分析」において人的過誤を認知的モデルに基づいて予測的に特定すること、特定された人的過誤について後段の「設計（ヒューマンマシンインタフェース設計、手順書の開発、訓練プログラムの開発）」、「検証と妥当性確認」、「人的パフォーマンスの監視」において適切な対処がなされていることを確認すること等の、設計プロセス評価の高度化が必要となる。ここでは設計プロセス評価の高度化のフレームワークを検討しその実現可能性を確認する。

これらの高度化フレームワークについては、さらに、「重要な運転員操作の扱い」において重大事故時等の対応に必要な多様な人的タスクの中から、Fussell-Vesely 指標、Risk Achievement Worth 指標等を用いて安全上重要なタスクを抽出する方法論の具体化を検討する。

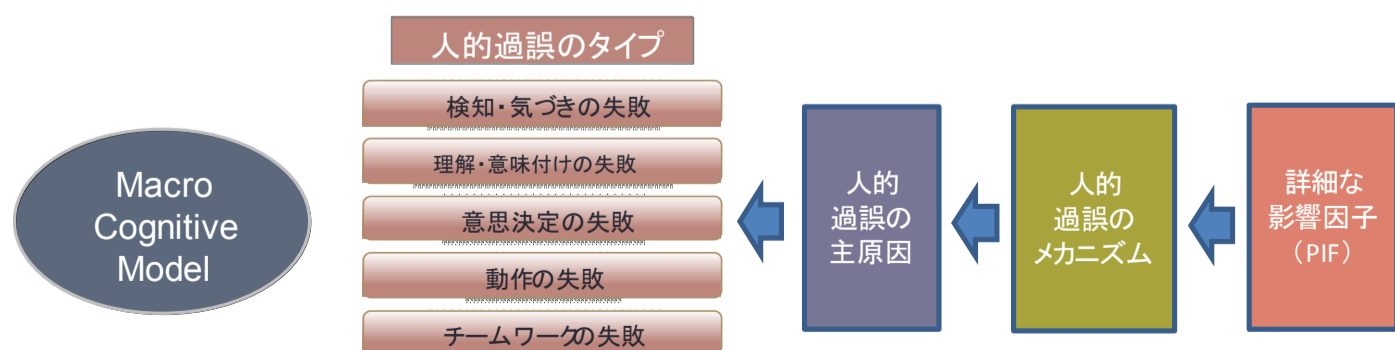
同様に、特定された人的過誤について後段の「設計（ヒューマンマシンインタフェース設計、手順書の開発、訓練プログラムの開発）」において適切な対処がなされていることや、その結果、「検証と妥当性確認」、「人的パフォーマンスの監視」において実際に人的過誤の低減が実現していることを確認するための方法論の具体化を検討する。

(2) 重大事故時等の対応において人間工学設計の評価に適用する人間信頼性解析手法の整備（分類①、②、③）

人的過誤を認知的モデルに基づいて予測的に特定するための要素技術となる人間信頼性解析手法については、解析ツールを開発する。解析ツールは(1)において検討する「設計プロセス評価の高度化のフレームワーク」への適用を主目的とする。解析のための方法論は、人的過誤に至る認知的な要因やメカニズムを明示的に構造化したモデルに基づいている必要がある。最新の人間信頼性解析手法の中では、例えば米国 NRC（原子力規制委員会）が規制への適用を進めている IDHEAS（Integrated Human Event Analysis System）手法等がこの目的において有望と考えられるので、こうした手法を参考に具体的な方法論や解析ツールの開発を進める。なお、IDHEAS 手法は Macro Cognitive Model（図2）と呼ばれる認知的モデルに基づいている。

IDHEAS 手法をはじめとする最新の人間信頼性解析手法の研究においては、手順書を逸脱する場合や、手順書の記載に自由度が大きい場合の運転員の対応への適用可能性について研究課題が認識されている。例えば、コミッションエラー（プラントの状態を誤って認識し余計な操作をしてしまった結果、プラントに悪影響を及ぼしてしまうエラー）や、火災、地震、津波対応、可搬型機器操作等の場合がある。これらの課題についても適用可能性を検討したうえ、解析ツールに適宜反映する。

専門家判断に依存する部分が多い人間信頼性解析手法において、解析者の主観的な判断に依らない再現性のある解析結果を得るため、また多種多様にわたる運転員対応を網羅的に考慮するために、人的過誤に至る認知的な要因やメカニズムとその結果発生する人的過誤のタイプとを定性的、定量的に関連付ける基礎データ等を体系的に取得する。



※出典 NUREG-2114, Cognitive Basis for Human Reliability Analysis, NRC, 2016

図2 構造化された認知的モデルの例 (Macro Cognitive Model)

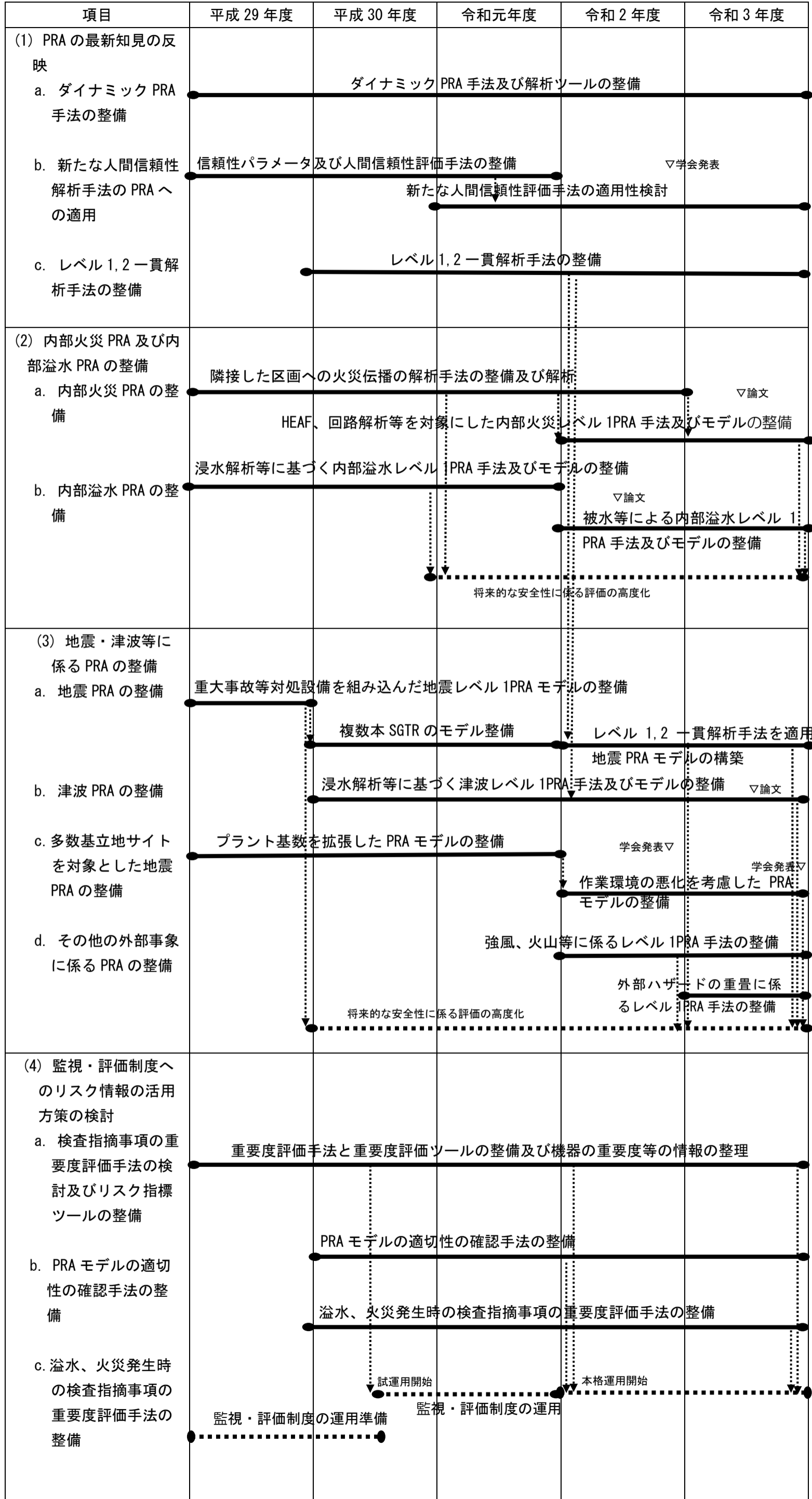
		実施行程表				
		項目	令和元年度	令和2年度	令和3年度	令和4年度
	(1) 重大事故時等の対応における原子炉制御室等の人間工学設計を評価するための技術的根拠の取得		高度化フレームワーク 実現可能性の検討	重要タスク抽出方法	人的過誤低減策	高度化フレームワークの 技術的根拠の整備
		[期待される成果]	学会発表▽	学会発表▽	学会発表▽	論文の投稿▽ NRA 技報の公表▽
	(2) 重大事故時等の対応において人間工学設計の評価に適用する人間信頼性解析手法の整備	人間工学設計に適用する人間 信頼性解析ツールの開発	人間信頼性解析手法 (内的事象)の具体化	人間信頼性解析手法 (火災、外的事象、 可搬型機器操作等)の 具体化	人間信頼性解析手法 (コミッションエラー、 支援組織等)の具体化	人間信頼性解析ツール 及び適用する人的過誤 関連データ
		人的過誤基礎データの取得			基礎データ取得	解析ツールに適用する 人的過誤関連データ取得
		[期待される成果]	学会発表▽	学会発表▽	学会発表▽	論文の投稿▽ NRA 技報の公表▽
7. 実施計画	【令和元年度の実施内容】					
	(1) 重大事故時等の対応における原子炉制御室等の人間工学設計を評価するための技術的根拠の取得 (分類①、②)					
	<ul style="list-style-type: none"> 設計プロセス評価の高度化フレームワークの検討及びその実現可能性の確認 「重要な運転員操作の扱い」における安全上重要なタスクの抽出方法の具体化 想定する成果： 高度化フレームワークの実現可能性の確認結果、適用対象・範囲の明確化					
	(2) 重大事故時等の対応において人間工学設計の評価に適用する人間信頼性解析手法の整備 (分類①、②、③)					
<ul style="list-style-type: none"> 人間工学設計に適用する人間信頼性解析ツールの開発 想定する成果： 認知的モデルに基づいた人間信頼性解析手法 (内的事象) の具体化、適用事例						
【令和2年度の実施内容】						
(1) 重大事故時等の対応における原子炉制御室等の人間工学設計を評価するための技術的根拠の取得 (分類①、②)						
<ul style="list-style-type: none"> 「重要な運転員操作の扱い」における安全上重要なタスクの抽出方法の具体化 特定された人的過誤に対する人間工学設計における低減策の確認 想定する成果： 安全上重要なタスクの抽出方法の具体化、確率論的リスク評価手法の適用方法の明確化、抽出事例						
(2) 重大事故時等の対応において人間工学設計の評価に適用する人間信頼性解析手法の整備 (分類①、②、③)						
<ul style="list-style-type: none"> 人間工学設計に適用する人間信頼性解析ツールの開発 想定する成果： 認知的モデルに基づいた人間信頼性解析手法 (火災、外的事象、現場機器・可搬型機器操作等) の可能性検討、適用事例						
【令和3年度の実施内容】						
(1) 重大事故時等の対応における原子炉制御室等の人間工学設計を評価するための技術的根拠の取得 (分類①、②)						
<ul style="list-style-type: none"> 「重要な運転員操作の扱い」における安全上重要なタスクの抽出方法の具体化 特定された人的過誤に対する人間工学設計における低減策の確認 想定する成果： 人的過誤に対する人間工学設計における低減策の具体化、適用事例						
(2) 重大事故時等の対応において人間工学設計の評価に適用する人間信頼性解析手法の整備						
<ul style="list-style-type: none"> 人間工学設計に適用する人間信頼性解析ツールの開発 人的過誤基礎データの取得 想定する成果： <ul style="list-style-type: none"> 認知的モデルに基づいた人間信頼性解析手法 (コミッションエラー、支援組織等) の可能性検討、適用事例 解析ツール 						
【令和4年度の実施内容】						
(1) 重大事故時等の対応における原子炉制御室等の人間工学設計を評価するための技術的根拠の取得 (分類①、②)						
<ul style="list-style-type: none"> 特定された人的過誤に対する人間工学設計における低減策の確認 想定する成果： 高度化フレームワークの技術的根拠の取得						
(2) 重大事故時等の対応において人間工学設計の評価に適用する人間信頼性解析手法の整備 (分類①、②、③)						
<ul style="list-style-type: none"> 人間工学設計に適用する人間信頼性解析ツールの開発 人的過誤基礎データの整備 想定する成果： <ul style="list-style-type: none"> 解析ツールに適用する人的過誤関連データ (人的過誤のタイプと人間工学設計要求との対応関係等) 認知的モデルに基づいた人間信頼性解析手法に関する技術的根拠の整備 						
8. 実施体制	【システム安全研究部門における実施者】					
	○河合 潤 原子力規制専門職					
	高田 博子 技術研究調査官					
	瀧田 雅美 技術研究調査官					
9. 備考	本テーマは非常に幅広い分野を研究対象とするものであるため、人的組織的要因に係る規制の全体像の把握とその中での外的環境の変化を踏まえた優先順位付けの明確化を図り、適宜計画の見直しを実施するものとする。					

研究計画

1. プロジェクト	8. 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	担当部署	技術基盤グループ シビアアクシデント研究部門
2. カテゴリー・ 研究分野	【原子炉施設】D) リスク評価	担当責任者	青野 健二郎 統括技術研究調査官
		主担当者	濱口 義兼 技術研究調査官 出井 千善 技術研究調査官
3. 背景	<p>新規制基準では重大事故対策の規制要件化が一つの柱となっており、重大事故対策の有効性を評価する際の事故シーケンスグループの選定のために確率論的リスク評価（以下「PRA」という。）が活用されている。また、平成 25 年に改正された「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」（以下「原子炉等規制法」という。）により、事業者に対する「安全性向上のための評価」の実施が規定された。これまでに、内部事象レベル 1PRA 及び地震レベル 1PRA を対象にした評価手法を整備し、新規制基準、審査ガイド、安全性向上評価の運用ガイド等に反映してきた。また、将来的に事業者による安全性向上評価等において実施が見込まれる内部火災 PRA 及び内部溢水 PRA について評価手法の整備を行ってきた。今後も最新知見の導入を含めて PRA の技術基盤の整備を継続していく必要がある。さらに、運用ガイドでは、PRA の評価手法の成熟状況に応じて段階的に拡張していく対象事象の例として、地震及び津波の重畳事象並びに地震及び津波以外の外部事象、多数基で同時に発生する事象等が挙げられている。このため、これらの外部事象 PRA についても手法を整備することが重要である。</p> <p>原子力規制委員会では、IAEA の総合規制評価サービス（IRRS）の勧告等を踏まえて、原子炉等規制法における検査制度の見直しの方向性や内容について検討を進めるとしている。新たな検査制度では、事業者の保安活動全てを対象にその実施状況、継続的改善の取組について実効的な監視・評価制度を設けることが検討されている。この監視・評価制度では、リスク情報の活用（リスク・インフォームド）及び事業者の保安活動の実績の反映（パフォーマンス・ベース）の考え方を取り入れたものとし、保安活動を監視・評価した結果を踏まえ、機動的かつ柔軟に行政上の措置を適用する方法が検討されている。これまで、保安検査等にリスク情報から得た指標を活用する方法を検討してきたが、今後は、新たな検査制度に採用される可能性のある保安活動の監視・評価にこれらの指標を活用できるよう、検査指摘事項の重要度の評価手法及び重要度の評価ツールを実用に向けて整備する必要がある。</p>		
4. 目的	<ul style="list-style-type: none"> ● レベル 1PRA の技術基盤への最新知見の反映を行い、将来的な安全性向上評価等のガイドの改定等による安全性に係る評価の高度化に資するレベル 1PRA 手法の技術的知見を得る。さらに、将来の規制活動に役立つ新たな知見の創出として、新たな PRA 評価手法の導入を進める。 ● 内部火災及び内部溢水、地震及び津波以外の外部事象 PRA 並びに多数基で同時に発生する事象を対象とした PRA の手法の技術的知見を整備し、将来的に安全性向上評価等の対象となるレベル 1PRA 手法の技術的知見を得る。 ● 新たな検査制度にリスク情報を活用するための技術的知見を得る。 		
5. 知見の活用先	<p>将来的な安全性向上評価等のガイドの策定・改定等のため、PRA の手法及びその技術的根拠を整備し、安全性に係る評価の高度化に資する。</p> <p>新たな検査制度の構築の一環として、リスク情報を活用した監視・評価制度の導入に資する（リスク情報ハンドブック、ガイド類の策定等）。</p>		

<p>6. 安全研究概要 (始期：H29 年度) (終期：R3 年度)</p>	<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> <ul style="list-style-type: none"> ● 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。） ● 規制活動に必要な手段の整備（以下「分類③」という。） ● 技術基盤の構築（以下「分類④」という。） <p>(1) PRA の最新知見の反映</p> <p>a. ダイナミック PRA 手法の整備</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ レベル 1PRA に係る最新知見として、関係機関と協力して、時間に依存して変化するプラント状態を考慮できるダイナミック PRA 手法及びプラント挙動解析コードを組み込んだ解析ツールを整備する。また、PWR プラント及び BWR プラントを対象に炉心損傷頻度の試解析を実施し、リスク情報を活用した規制活動へのダイナミック PRA 手法及び解析ツールの適用性を検討する。【分類④】 <p>b. 新たな人間信頼性解析手法の PRA への適用</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 重大事故等対処設備の信頼性評価に必要な信頼性パラメータ及び重大事故等対処設備の操作に係る人間信頼性評価手法を検討し、検討した人間信頼性解析手法を PRA に適用する。【分類①】 <p>c. レベル 1, 2PRA 一貫解析手法の整備</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ レベル 1PRA 及びレベル 2PRA の一貫解析から、炉心損傷頻度と格納容器機能喪失頻度を同時に算出する解析手法を開発する。【分類①】 <p>(2) 内部火災 PRA 及び内部溢水 PRA の整備</p> <p>a. 内部火災 PRA の整備</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 隣接した区画への火災伝播の解析を実施するとともに、高エネルギーアーク損傷（以下「HEAF」という。）及び回路解析等に伴う火災事象を対象に内部火災の原因を拡充して、内部火災レベル 1PRA 手法及びモデルを整備する。【分類③】 <p>b. 内部溢水 PRA の整備</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 隣接した区画への溢水伝播の解析を実施するとともに、溢水に伴って発生する蒸気についての挙動解析を行う。また、没水、被水の溢水モードの影響を考慮した内部溢水レベル 1PRA 手法及びモデルを整備する。【分類③】 <p>(3) 地震・津波等に係る PRA の整備</p> <p>a. 地震 PRA の整備</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 重大事故等対処設備を組み込んだ地震レベル 1PRA モデルを整備する。【分類③】 ・ 地震時に想定される複数本 SGTR 等について、事故進展挙動に基づく事故シナリオの詳細検討を行い、地震レベル 1PRA モデルを整備する。【分類③】 ・ レベル 1, 2 一貫解析手法で整備した PRA モデルをベースとした新たな地震レベル 1PRA モデルを整備する。【分類③】 <p>b. 津波 PRA の整備</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 津波による建屋への浸水量、浸水経路及び浸水による影響を評価する手法を検討して、建屋内の浸水量を定量的に評価するための津波レベル 1PRA モデルを整備する。【分類③】 <p>c. 多数基立地サイトを対象とした地震 PRA の整備</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 複数のプラントで異なる炉心損傷状態を組合せた頻度を算出できる多数基の地震レベル 1PRA モデルを整備し、PWR プラントが 2 基立地されているサイトを対象とした地震レベル 1PRA を実施する。【分類③】 ・ 複数プラントの同時発災時における作業環境の悪化を考慮したレベル 1PRA 手法を整備する。【分類③】 <p>d. その他の外部事象に係る PRA の整備</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 強風等の外部事象に対するレベル 1PRA 手法及びモデルを整備する。【分類③】 ・ 地震・津波等の外部ハザードが重畳する事象について、発生頻度及び機器の損傷確率に関するデータ、レベル 1PRA 手法及びモデルを整備する。【分類③】 <p>(4) 監視・評価制度へのリスク情報の活用方策の検討</p> <p>a. 検査指摘事項の重要度評価手法の検討及びリスク指標ツール整備</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 検査指摘事項等の重要度を決定する手法を検討し、検査官が重要度評価を行う際に使用するリスク指標ツールを整備する。【分類①】 <p>b. PRA モデルの適切性の確認手法の整備</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ パイロットプラントに対する PRA モデルの適切性を確認する手法を整備する。【分類①】 <p>c. 溢水、火災発生時の検査指摘事項の重要度評価手法の整備</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 溢水、火災発生時における定性評価手法の考え方を検討し、検査指摘事項の重要度評価フローを作成するとともに、評価に必要な条件を整理する。【分類①】
---	--

実施行程表



【平成 29 年度の実施内容】

- (1) PRA の最新知見の反映【分類③及び分類④】
重大事故等対処設備の操作に係る人間信頼性解析手法を調査する。また、ダイナミック PRA 解析ツールのプロトタイプを構築する。
- (2) 内部火災 PRA 及び内部溢水 PRA の整備
 - a. 内部火災 PRA の整備【分類③】
隣接した区画への火災伝播の解析手法等を整備する。また、HEAF 等に伴う機器の損傷程度と影響範囲を定性的に評価する。
 - b. 内部溢水 PRA の整備【分類③】
隣接した区画への溢水の伝播現象の解析を実施し、この結果を基に PRA モデルを整備する。また、溢水に伴う蒸気による機器損傷の程度と影響範囲を解析する手法を検討する。
- (3) 地震・津波等に係る PRA の整備
 - a. 地震 PRA 及び津波 PRA の整備【分類③】
重大事故等対処設備を組み込んだ地震レベル 1PRA モデルを整備する。
 - c. 多数基立地サイトを対象とした地震 PRA の整備【分類③】
PWR プラントが 2 基立地されているサイトを対象とした地震レベル 1PRA モデルを整備する。
- (4) 監視・評価制度へのリスク情報の活用方策の検討【分類①】
保安活動の監視・評価にリスク情報を活用するために PRA モデル（4 プラント）を整備するとともに、重要度評価手法と重要度評価ツールの整備及び機器の重要度等の情報（2 プラント）を整理する。

【平成 30 年度の実施内容】

- (1) PRA の最新知見の反映
 - a. ダイナミック PRA 手法の整備【分類④】
動的なイベントツリーを詳細化した解析を行う手法を検討し、これを解析ツールに組み込むための基本設計を行う。
 - b. 新たな人間信頼性解析手法の PRA への適用【分類①】
重大事故等対処設備の操作に係る人間信頼性解析を実施するとともに、人間信頼性解析手法及びその実施例をまとめる。
 - c. レベル 1, 2 一貫解析手法の開発【分類①】
レベル 1 とレベル 2 の一貫解析から、炉心損傷頻度と格納容器機能喪失頻度を同時に算出する一貫解析の基本設計を行う。
- (2) 内部火災 PRA 及び内部溢水 PRA の整備
 - a. 内部火災 PRA の整備【分類③】
隣接した区画への火災伝播の評価モデルを検討し試解析を実施して、試験結果との比較から適用性を確認する。
 - b. 内部溢水 PRA の整備【分類③】
溢水に伴う蒸気の影響を反映した溢水 PRA モデルを整備する。
- (3) 地震・津波等に係る PRA の整備
 - a. 地震 PRA の整備【分類③】
地震による複数本 SGTR の事故シナリオ及び成功基準を検討してイベントツリーを構築する。
 - b. 津波 PRA の整備【分類③】
建屋内の浸水量に基づいた浸水経路及び浸水による影響を評価する浸水評価用の解析ツールを構築する。
 - c. 多数基立地サイトを対象とした地震 PRA の整備【分類③】
プラント基数を拡張する手法及び PRA モデルを検討し、モデル改良を行うとともに解析を実施してモデルの適用性を検討し課題を抽出する。
- (4) 監視・評価制度へのリスク情報の活用方策の検討
 - a. 検査指摘事項の重要度評価手法の検討及びリスク指標ツール整備【分類①】
試運用の結果を反映して、検査指摘事項等の重要度を決定する手法を検討し、検査官が重要度評価を行う際に使用する指摘評価ツールを整備する。
 - b. PRA モデルの適切性の確認手法の整備【分類①】
パイロットプラントに対する PRA モデルの適切性を確認する手法を整備する。
 - c. 溢水、火災発生時の検査指摘事項の重要度評価手法の整備【分類①】
溢水、火災発生時における定性評価手法の考え方を検討し、検査指摘事項の重要度評価フローを作成するとともに、評価に必要な条件を整理する。

【令和元年度の実施内容】

- (1) PRA の最新知見の反映
 - a. ダイナミック PRA 手法の整備【分類④】
詳細化したイベントツリーの基本設計をもとに、PRA 解析ツールを開発する。
 - b. 新たな人間信頼性解析手法の PRA への適用【分類①】
種々の人間信頼性解析手法及びその実施例を比較し、PRA に導入する人間信頼性解析手法を決定する。
 - c. レベル 1, 2 一貫解析手法の開発【分類①】
レベル 1 とレベル 2 の一貫解析の基本設計から、代表的なプラントを対象に一貫解析のドラフト版評価モデルを作成する。
- (2) 内部火災 PRA 及び内部溢水 PRA の整備
 - a. 内部火災 PRA の整備【分類③】
試験結果により適用性を確認したコードを用いて、隣接した区画への火災伝播解析等を実施する。
 - b. 内部溢水 PRA の整備【分類③】
溢水に伴う蒸気の影響を反映した溢水 PRA モデルを継続して整備する。

7. 実施計画

- (3) 地震・津波等に係る PRA の整備
 - a. 地震 PRA の整備【分類③】
地震による複数本 SGTR の事故シナリオを対象に地震レベル 1PRA モデルを整備する。
 - b. 津波 PRA の整備【分類③】
津波浸水解析ツールにより、建屋内の浸水量に基づいた浸水経路及び浸水影響を評価して、津波 PRA の事故シナリオを検討する。
 - c. 多数基立地サイトを対象とした地震 PRA の整備【分類③】
PWR プラントが 4 基立地されているサイトを対象とした地震レベル 1PRA モデルを整備する。
- (4) 監視評価制度へのリスク情報の活用方策の検討
 - a. 検査指摘事項の重要度評価手法の検討及びリスク指標ツール整備【分類①】
リスク指標ツールの試運用結果から、検査官が検査指摘事項の重要度評価を行う際に使用する指摘評価ツールを改良する。
 - b. PRA モデルの適切性の確認手法の整備【分類①】
パイロットプラントに対する PRA モデルの適切性を確認する手法を整備する。
 - c. 溢水、火災発生時の検査指摘事項の重要度評価手法の整備【分類①】
溢水、火災発生時における検査指摘事項の重要度評価フローを適用して、重要度定性評価の試運用を行う。

【令和 2 年度の実施内容】

- (1) PRA の最新知見の反映
 - a. ダイナミック PRA 手法の整備【分類④】
ダイナミック PRA 解析ツールを用い、過渡事象及び LOCA を対象にした試解析を行う。
 - b. 新たな人間信頼性解析手法の PRA への適用【分類①】
新たな人間信頼性解析手法を用いて、内部事象 PRA で対象としている運転員等の人的過誤確率を再評価し、人間信頼性解析手法の妥当性を確認する。
 - c. レベル 1, 2 一貫解析手法の開発【分類①】
代表的なプラントに対する内部事象レベル 1PRA とレベル 2PRA の一貫解析の評価モデルを作成する。
- (2) 内部火災 PRA 及び内部溢水 PRA の整備
 - a. 内部火災 PRA の整備【分類③】
隣接した区画への火災伝播解析を継続して実施する。また、HEAF 及び回路解析の評価から機器の損傷の程度と影響範囲について評価する。
 - b. 内部溢水 PRA の整備【分類③】
蒸気を含む溢水伝播解析を行うとともに、被水により影響を受ける機器の評価方法の検討を行う。得られた結果をレベル 1PRA モデルに組み込み、試解析する。
- (3) 地震・津波等に係る PRA の整備
 - a. 地震 PRA の整備【分類③】
レベル 1, 2 一貫解析のために作成した PRA モデルをベースに、重大事故等対処設備を含めた地震 PRA モデルを作成する。
 - b. 津波 PRA の整備
レベル 1, 2 一貫解析のために作成した PRA モデルをベースに、重大事故等対処設備を含めた津波レベル 1PRA モデルを検討する。【分類③】
 - c. 多数基立地サイトを対象とした地震 PRA の整備【分類③】
複数プラントの同時発災時における作業環境の悪化を考慮したレベル 1PRA 手法を検討する。
 - d. その他の外部事象に係る PRA の整備【分類③】
強風時における機器等への影響を考慮し、強風を対象にしたレベル 1PRA 手法を検討するとともに、降灰等による電気機器への影響、フィルター交換等の人的過誤を検討し、火山を対象としたレベル 1PRA 手法を検討する。
- (4) 監視・評価制度へのリスク情報の活用方策の検討
 - a. 検査指摘事項の重要度評価手法の検討及びリスク指標ツール整備【分類①】
検査指摘事項の重要度評価を行う際に使用する評価ツールを対象に、入力等の機能を高度化する。
 - b. PRA モデルの適切性の確認手法の整備【分類①】
パイロットプラントに対する PRA モデルの適切性を確認する手法を整備する。
 - c. 溢水、火災発生時の検査指摘事項の重要度評価手法の整備【分類①】
溢水や火災の発生に係る検査指摘事項の重要度評価の試解析から、問題点を抽出し、重要度評価フローを改良する。

【令和 3 年度の実施内容】

- (1) PRA の最新知見の反映
 - a. ダイナミック PRA 手法の整備【分類④】
ダイナミック PRA 解析ツールを用いて PWR プラント及び BWR プラントを対象に炉心損傷頻度の試解析を実施し、ダイナミック PRA の手法を整備する。
 - b. 新たな人間信頼性解析手法の PRA への適用【分類①】
簡易的に人的過誤が評価できる人間信頼性解析ツールを用いて、内部溢水 PRA 等に用いている人的過誤確率を再評価し、人間信頼性解析手法の妥当性を確認する。
 - c. レベル 1, 2 一貫解析手法の開発【分類①】
レベル 1 とレベル 2 の一貫解析の評価モデルを用いて、代表的なプラントに対する評価を実施する。
- (2) 内部火災 PRA 及び内部溢水 PRA の整備

	<p>a. 内部火災 PRA の整備【分類③】 HEAF 等に伴う火災原因を拡充した内部火災 PRA モデルを作成し、火災に係る炉心損傷頻度を算出する。</p> <p>b. 内部溢水 PRA の整備【分類③】 被水により影響を受ける機器の評価方法を継続して検討し、この結果を内部溢水レベル 1PRA モデルに反映し、溢水に係る炉心損傷頻度を算出する。</p> <p>(3) 地震・津波等に係る PRA の整備</p> <p>a. 地震 PRA の整備【分類③】 レベル 1, 2 一貫解析のために作成した PRA モデルをベースに、重大事故等対処設備を含めた地震レベル 1PRA モデルを作成する。</p> <p>b. 津波 PRA の整備【分類③】 レベル 1, 2 一貫解析のために作成した PRA モデルをベースに、重大事故等対処設備を含めた津波レベル 1PRA モデルを作成する。</p> <p>c. 多数基立地サイトを対象とした地震 PRA の整備【分類③】 複数プラントの同時発災時における作業環境の悪化を考慮したレベル 1PRA モデルを作成し、プラント損傷状態の見直し及びレベル 2PRA へのインターフェイスを検討する。</p> <p>d. その他の外部事象に係る PRA の整備【分類③】 強風、火山等の外部事象を対象にしたレベル 1PRA モデルを試作し課題を整理するとともに、外部ハザードの重畳事象に関するレベル 1PRA 手法を検討する。</p> <p>(4) 検査制度へのリスク情報の活用方策の検討</p> <p>a. 検査指摘事項の重要度評価手法の検討及びリスク指標ツール整備【分類①】 継続して評価ツールの問題点を抽出し、リスク指標ツールの改良を行う。</p> <p>b. PRA モデルの適切性の確認手法の整備【分類①】 PRA モデルの適切性確認の知見をデータベース化し、適切性の確認手法を規格化する。</p> <p>c. 溢水、火災発生時の検査指摘事項の重要度評価手法の整備【分類①】 溢水や火災の発生に係る検査指摘事項の重要度評価フローを継続して改良する。</p>
8. 実施体制	<p>【シビアアクシデント研究部門における実施者】</p> <p>○濱口 義兼 技術研究調査官 ○出井 千善 技術研究調査官 伊東 智道 技術研究調査官 下崎 敬明 安全技術専門職 上田 治明 技術研究調査官 城島 洋紀 技術研究調査官 川口 秀雄 技術研究調査官</p> <p>【前年度までの委託先】</p> <p>・ 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・・・実施項目(1)a</p>
9. 備考	

研究計画

1. プロジェクト	9. 重大事故時における重要物理化学現象の不確実さ低減に係る実験	担当部署	技術基盤グループ シビアアクシデント研究部門
		担当責任者	秋葉美幸 統括技術研究調査官
2. カテゴリー・研究分野	【原子炉施設】E) シビアアクシデント（軽水炉）	主担当者	森田彰伸 技術研究調査官
3. 背景	<p>「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」第四十九条、五十条、五十一条では、原子炉格納容器内の冷却等のための設備、原子炉格納容器の過圧破損を防止するための設備、原子炉格納容器下部の溶融炉心を冷却するための設備を設けることを必須としている。これを受け、「実用発電用原子炉に係る炉心損傷防止対策及び格納容器破損防止対策の有効性評価に関する審査ガイド」では、格納容器破損防止対策の有効性を確認することとしている。</p> <p>重大事故時の格納容器機能維持に係る物理化学現象には、解析上の不確実さが大きな現象が存在し、これらに関する実験研究は国内外において継続的に進められている。現在の規制基準はこれら国内外で得られた最新知見を継続的に反映することとしている。加えて、新検査制度への確率論的リスク評価の活用を踏まえ、ソースターム挙動や格納容器機能喪失に関する現象についてのリスク評価の精度向上に向けた不確実さの低減が重要である。</p> <p>格納容器機能維持に係る物理化学現象のうち、解析上の不確実さが大きな現象の一つとして、プールスクラビング現象がある。平成26年度～令和元年度に実施した「軽水炉の重大事故時の重要物理化学現象に係る実験」プロジェクト（前プロジェクト）において、既往知見を基に各種実験を行い、プールスクラビング効果に関する不確実さの大きなパラメータを特定した⁽¹⁾。それら不確実さを低減するためには、メカニズムを含めて現象を明確化する必要がある。実機のプールスクラビング現象を評価するスクラビング解析コードでは、現象の推定によってモデルが作成されており、調整パラメータ等によりプールスクラビング効果を保守的に評価可能としてきたが、メカニズムを含めた現象の明確化によって現象に則したモデルを開発することにより、様々な現象が重畳した複雑な条件でも不確実さを低減させた評価が可能となる。</p> <p>ソースタームは、格納容器機能喪失時における環境への放射性物質放出の観点から重要であり、確率論的リスク評価や実効的な原子力防災計画の立案等における不可欠な技術的情報である。ソースターム評価の不確実さ低減には、実験や解析を通じて、放射性物質の移行経路において生じる多様な現象に係わる理解を深化し、解析モデルの構築・改善を進めるとともに、不確実さ解析を実施して不確実さの低減効果を定量的に示す必要がある。不確実さの大きな要因には、放射性物質同士や制御材等との化学反応、原子炉冷却系や格納容器内に保持された放射性物質の再移行、燃料からの放射性物質の放出速度及び気体状放射性物質の気液間の移行がある。制御棒等の構造材や放射性物質同士の化学反応に関しては、前プロジェクトで実施したホウ素含有系の実験において、ホウ素がヨウ素化学形態に大きな影響を及ぼす結果が得られ、速度論を含めた放射性物質化学反応モデルの必要性が示された⁽²⁾⁽³⁾。また、再移行挙動は、重大事故時における長期的なソースタームに影響を与え得るものの、近年のソースターム研究から得られた放射性物質の化学形態等に係わる成果が従来モデルに十分に反映されていないと同時に、解析モデルの予測精度を向上するために不可欠な実験データベースの整備も不十分である。燃料からの放射性物質の放出速度に関しても化学形態を考慮した予測精度向上、気体状放射性物質の気液間移行に関しては物質移行モデルの精緻化による予測精度向上が望まれている。</p> <p>また、東京電力福島第一原子力発電所(1F)の事故において、格納容器上部フランジの過温破損により格納容器外へ水素や放射性物質を含む気体が漏れ出したと考えられることから、フランジシールの材質の高度化とともにウェル注水（格納容器外面冷却）によって格納容器上部を外側から冷却する手段が原子炉設置事業者の自主的な対策として取り入れられている。この対策による緩和効果や時間的余裕への影響を調査し、他の対策への影響を評価可能とすることが望まれている。特に重大事故時に想定される300℃超の高温雰囲気条件での格納容器上部フランジ周囲の熱流動に着目した大規模実験は実施された例がほとんどなく、1F事故の反省を踏まえて知見を拡充していくことが重要である。このため、前プロジェクトで格納容器外面冷却によるフランジ構造の冷却及び外面冷却時の格納容器内熱流動に関する知見を取得することを目的に、格納容器内雰囲気温度、成分濃度等を支配的なパラメータとした格納容器外面冷却に関する総合伝熱流動実験を開始した⁽⁴⁾。これらの実験は、実験装置を運転する際の安全性も考慮し、重大事故時に想定される雰囲気温度より低温の条件から段階的に昇温することによって格納容器上部フランジ周囲の熱流動を観測したものであるため、上記の重大事故時に想定される超高温条件ではない^{(4)~(6)}。そのため、今後過熱蒸気の設定温度を昇温することにより、実機において想定される超高温条件下での様々な重大事故条件での格納容器上部フランジの冷却や関連する格納容器内部の熱流動挙動の詳細を計測してデータベースを拡充することが必要である。</p> <p>格納容器機能喪失へと繋がる溶融炉心-コンクリート相互反応の不確実さを低減させるためには、溶融燃料が事前注水された格納容器底部へ落下する際の、水中での溶融デブリ挙動とそれに伴う冷却挙動を明確にすることが重要である。不確実さの低減の観点から、既往知見の少ないデブリ挙動としては、①圧力容器から放出された溶融デブリジェットからの微粒化粒子の集積挙動、②水中床面での溶融デブリの拡がり挙動、③高温溶融物のデブリベッドへの浸透挙動等の溶融物-デブリベッド相互作用、及び④床面に堆積している粒子状デブリから接触している構造物への伝熱等がある。前プロジェクトでは①~③までを実験により明らかにした⁽⁷⁾。しかし、④の評価に関する知見は、今後、データベースの拡充が必要である。</p>		
4. 目的	<p>重大事故の発生防止、拡大防止及び環境影響緩和の各段階において生じる重大事故時の物理化学現象及び総合重大事故解析コードでモデルの高度化が必要な個別現象について、国内外の施設を用いた実験を行い、詳細なデータを拡充する。</p>		
5. 知見の活用先	<p>これら実験で得た各現象に関する知見は、外部有識者との情報交換も行いながら必要に応じてガイドの記載拡充の検討に用いる等、実用発電炉の規制基準適合性審査に資する。また、重大事故時における解析上の不確実さの低減は、新検査制度で活用される確率論的リスク評価に資するとともに、得られた最新知見をモデル化し解析コードの開発を進めていくことにより、安全性に係る評価の将来的な継続的な高度化に資する。</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目的のうち以下の分類に基づき実施する。

- 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。）
- ③規制活動に必要な手段の整備（以下「分類③」という。）

次の物理化学現象を対象に不確かさを低減させる実験的知見の拡充を行う。

(1) プールスクラビング実験【分類②及び③】

図1(a)にプールスクラビングによるエアロゾル状放射性物質のプール水への捕獲に関する主な想定メカニズムを記載したプールスクラビングの概念、図1(b)に本研究の全体の流れを示す。前プロジェクトでは、実機相当の大規模実験により、1F事故時に懸念されたプール水の減圧沸騰が及ぼすエアロゾル粒子の捕獲効果への影響とともに、既往実験では明確化されていなかったプール水温度による影響を明らかにした⁽¹⁾。また、小規模実験により、気泡内エアロゾル粒子の液相への移行挙動の明確化を目的とし、屈折率の関係で計測困難な気泡内でのエアロゾル挙動について、気泡を模擬した油滴内におけるエアロゾル粒子の挙動を最新機器により計測可能とするとともに、気泡での実験で気泡界面におけるエアロゾル濃度を計測可能とした⁽¹⁾⁽⁸⁾。しかし、大規模実験で得られた結果はそのメカニズムが明確ではないこと、また、気泡内におけるエアロゾル挙動が明確ではないことから、得られた傾向を実機評価に適用することが困難となっている。そのため、小規模及び中規模実験により以下を実施する。

- a. 小規模実験では、単一気泡内のエアロゾル挙動を明らかにするため、油滴中エアロゾル挙動計測技術及び気泡界面におけるエアロゾル濃度計測技術を確立するとともにデータを拡充し、CFD解析等と組み合わせ、気泡内エアロゾル挙動を明らかにする。加えて、単一気泡で得られた結果の実機評価への適用のために、気泡群として存在する場合の影響についても実験により明らかにする。(図2)
- b. 中規模実験では、プール水温の変化によるエアロゾル粒子の捕獲率に関するメカニズムの検討を行う。プール水温度が影響すると考えられる、気泡内蒸気量やそのエアロゾル粒子表面への凝縮等の各種パラメータについて検討し、エアロゾル捕獲率のプール水温度依存性についてメカニズムを明らかにする。(図3)

6. 安全研究概要
(始期：R2年度)
(終期：R7年度)

上記a及びbの実験を並行して実施し、両実験で得られた知見を合わせて考慮し、様々な条件における気泡内でのエアロゾルの液相への移行挙動を明らかにすることでスクラビング時における影響の大きい個別現象のモデル化を検討する。

以上の実験を通じて得られたデータ及び知見は、「軽水炉の重大事故時における不確かさの大きな物理化学現象に係る解析コードの開発」（H29～R4年度）における「(4)放射性物質生成・移行・除去解析コードの開発」において、スクラビング解析コードの改良に活用する。

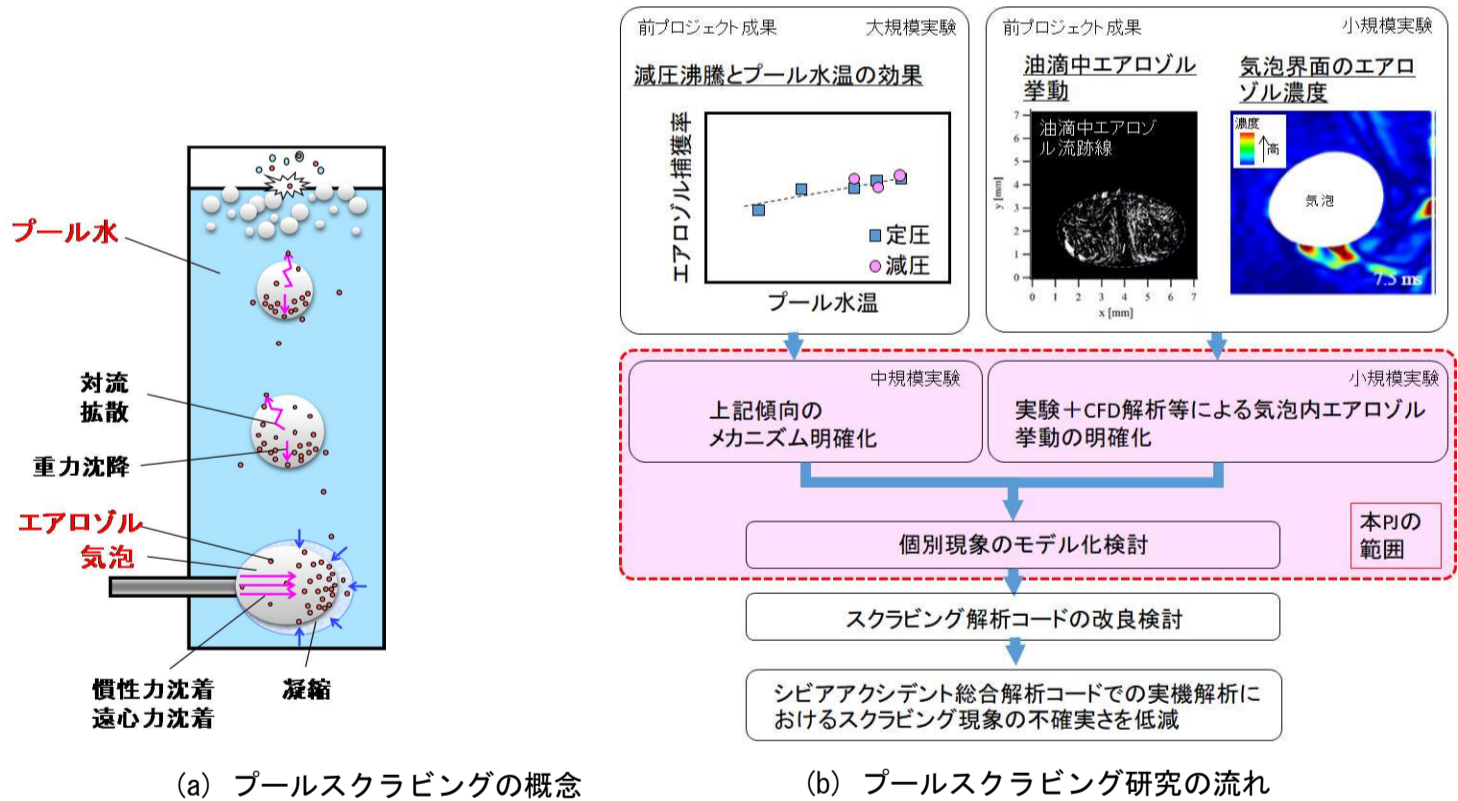


図1 プールスクラビング実験の概要

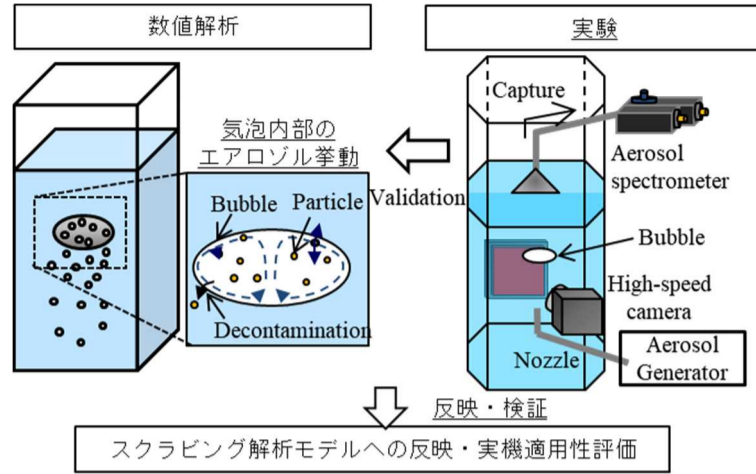


図2 小規模実験とCFD解析の概略図

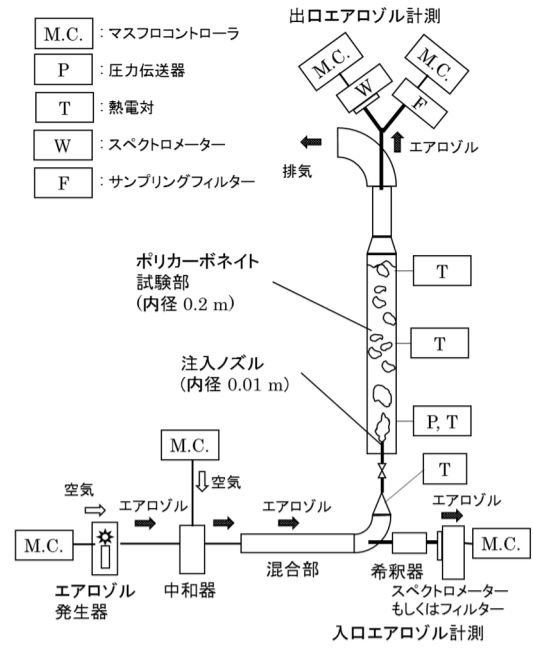


図3 中規模実験

(2) ソースターム実験【分類②及び③】

重大事故時には、揮発性の高い希ガス、ヨウ素、セシウム等の放射性物質が燃料から放出され、格納容器の閉じ込め機能の状況に依りそれらが環境中に移行する。環境への移行挙動は、事故時の雰囲気、制御材等の構造材や他の放射性物質との化学反応により変化する放射性物質の化学形態に大きく依存する。放射性物質の化学形態は大きな不確かさを有しており、その不確かさがソースターム評価における不確かさに影響を及ぼす。したがって、ソースターム評価の不確かさを低減するためには、事故進展に応じて変化する化学的環境を考慮した、合理的な放射性物質の原子炉冷却系内及び格納容器内移行挙動モデルの整備が必要である。また、種々の構造材表面や液相中に保持された放射性物質が多様なメカニズムにより再移行する現象（図4）は、重大事故時における継続的あるいは断続的な放射性物質の環境放出に寄与するという点で重要である。

以上を踏まえて、本ソースターム実験では、図5に示すような a. 化学反応実験と b. 再移行実験を実施する。前者に関しては、多様な雰囲気条件、多成分系の実験を実施し、ホウ素の影響に加え、他の模擬放射性物質や構造材成分（モリブデン等）がヨウ素及びセシウムの化学形態に及ぼす影響等に係わる実験データを取得する。後者については、最も不確かさの大きいと考えられる再蒸発特性に着目し、前者で同定された化学形態を中心に実験を実施する。その他の再移行（再浮遊、再揮発及び再飛散（飛沫同伴））に対しては、既往研究の調査を進め、ソースターム評価上の課題を抽出する。加えて、燃料からの放射性物質の放出に関して、各種化学形態についての放出速度を計測し、データベースを構築する。さらに、気体状放射性物質の気液間移行についても化学形態ごとの物質移行係数を物性値等から導出可能とするモデル構築のための実験を実施する。

これらの実験及び調査に基づいて、速度論を考慮可能な放射性物質化学反応モデル、再移行モデル、放出速度モデル及び気液間の物質移行モデルを構築・改良し、「軽水炉の重大事故時における不確かさの大きな物理化学現象に係る解析コードの開発」（H29～R4年度）における「(4) 放射性物質生成・移行・除去解析コードの開発」に活用するとともに、同コードを用いた不確かさ解析を実施する。

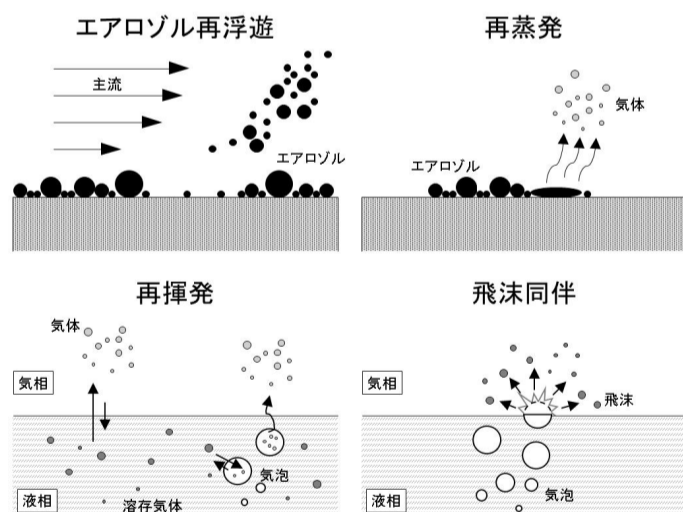


図4 再移行挙動

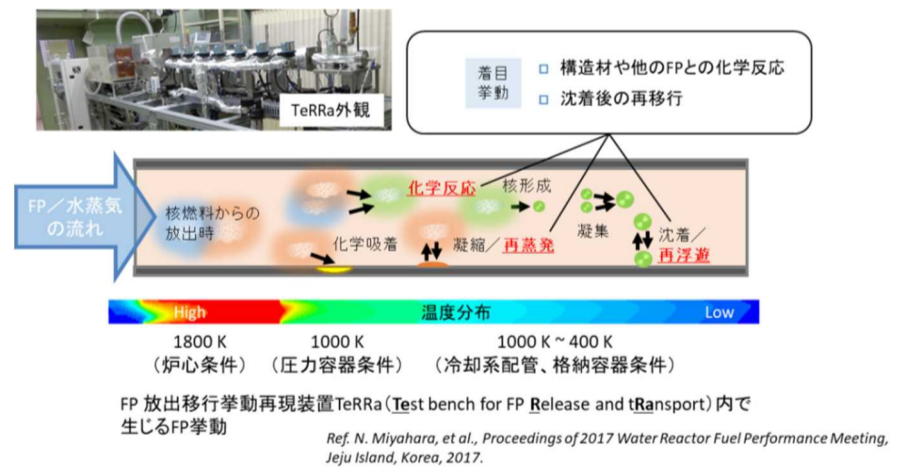


図5 化学反応実験/再移行実験で使用する装置

(3) 重大事故時格納容器熱流動実験【分類②及び③】

本事業では、前プロジェクトでの成果を踏まえ、重大事故時に想定される 300℃～700℃程度の高温過熱蒸気により格納容器内が曝されている条件での実験データベースの拡充を進める。実験項目は、高温条件において①格納容器外面冷却時の容器内雰囲気対流を含む多次元的な格納容器フランジ部の伝熱挙動の観測、②多成分気体で構成される格納容器雰囲気の熱流動挙動の観測、③格納容器ベントによる減圧と雰囲気挙動の観測、④格納容器スプレイの冷却効果の観測を行い、重大事故進展時の格納容器熱流動と格納容器構造への伝熱特性に関する知見を拡充する。図6に使用する大型格納容器模擬装置と実験の概要を示す。

①及び②については、高温の過熱蒸気によって直接的な熱伝達で格納容器フランジ部が昇温されることが、格納容器内部の対流や気体組成によって変化すると考えられる熱伝達の時間特性に関して、その不確かさを低減するための実験を行う。これらの実験パラメータには、多次元的な伝熱流動を考慮して、局所混合による気体の温度分布、格納容器壁の局所的な相変化を考慮した熱伝達、水素等の非凝縮性気体の影響、構造体の温度挙動等を想定する。

③については、前プロジェクトで得られた障害物の無い単純体系での定格ベント流量条件での知見を、さらに実機条件を想定した条件でのデータに拡張する。前プロジェクトでは、比較的静止した雰囲気場において上部に水素が成層化しているような状態を

想定して、格納容器下部からベントした場合の雰囲気流動を観測した。本プロジェクトでは、より重大事故時の条件を想定して高温蒸気存在、格納容器内雰囲気での熱的成層化の考慮等に加えて、さらに軽密度気体である水素を模擬したヘリウムが存在する場合の条件などを想定して、格納容器ベントに関する総合的な熱流動挙動の観測を実施する。

④については、前プロジェクトで実施した定格スプレイ流量時の格納容器冷却や雰囲気混合に着目した実験と既往研究との比較に加えて、高温雰囲気によるスプレイ液滴に対する影響の観測等を含めて実験データベースを拡充する。重大事故時に十分なスプレイ流量が確保できない場合には、スプレイ水が過熱蒸気によって相変化し格納容器内の冷却が滞る場合が考えられる。また、液相が十分に細粒化されない場合に伝熱面積が減少することによるスプレイ冷却の効果等に着目した実験を行い、データベースを拡充する。

なお、これらの実験及び解析の最新知見の拡充にあたっては、OECD/NEA/GSNI が実施する国際共同研究プロジェクトも活用して実施する。

以上の実験を通じて得られたデータは、「軽水炉の重大事故における格納容器機能喪失及び確率論的リスク評価に係る解析手法の整備」(H29～R4年度)における「(1) 格納容器破損防止対策評価手法の整備 2) 個別現象解析手法の整備①格納容器破損モード(水素燃焼) 評価の整備」に活用する。

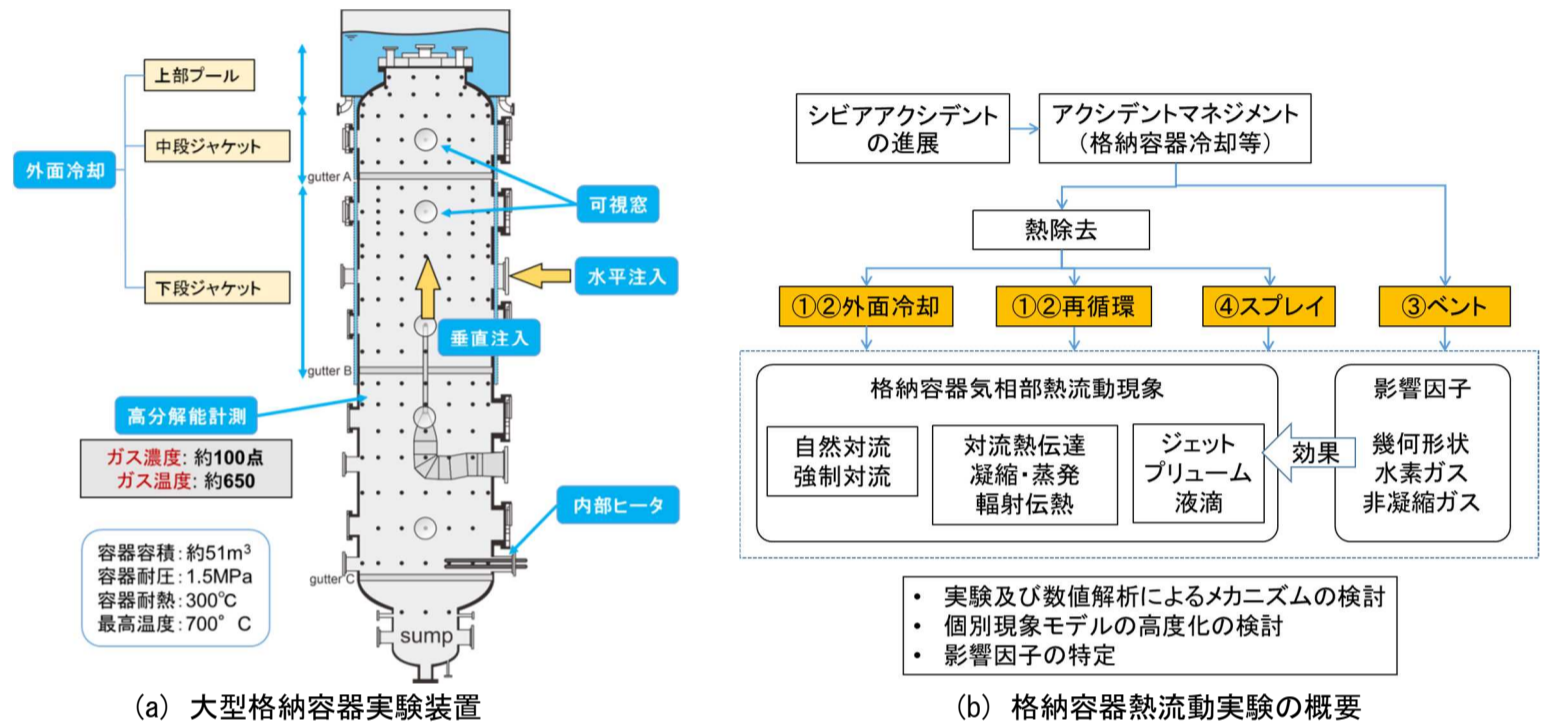


図6 大型格納容器模擬装置と実験の概要

(4) 燃料デブリ冷却性実験【分類②及び③】

プール水中に高温の発熱溶融デブリが落下する場合には、溶融デブリは水との相互作用によって一部は細粒化し、残りは大きな塊のまま床面に堆積する。溶融炉心-コンクリート相互作用の現実的な評価のためには、このようなデブリベッド形成の詳細な過程を個別現象に分解し、複数の解析モデルにより、キャビティ内において冠水したデブリベッド内の複雑な熱流動現象を解析し、デブリベッドにおいて発生する崩壊熱の除熱特性を定量的に評価することが重要である。図7にプール水中への溶融デブリ落下時における主要な現象を示す。知見の不足している現象は、①プール水中溶融デブリジェットの粒子化挙動、②プール水中床面拡がり挙動、③高温溶融物-デブリベッド相互作用、④粒子状デブリの冷却性の4つに大きく分けられ、これまでに①～③の挙動については海外設備を用いた実験によりデータベースを拡充するとともにその挙動を明らかにし、解析モデル開発に活用してきた。しかし、④についてはデブリに接触する構造材等との相互作用に関する知見が少なく、解析モデルの検討及び検証に活用できる実験データの取得が課題となっている。

粒子状デブリは構造材壁面と点接触し、周囲の状態によっては粒子が荷重を受け、構造材壁面へ押しつけられる状態等も想定される。粒子の壁面への接触状態、粒子や壁面材質、加熱量等を変化させるパラメトリックな実験により、様々な状態での壁面への伝熱量等の粒子状デブリと構造材との相互作用に関する特性を把握する。(図8)

なお、本実験を通じて得られたデータは、「軽水炉の重大事故時における不確かさの大きな物理化学現象に係る解析コードの開発」(H29～R4年度)における「(3) キャビティ注水時のデブリ冷却性解析コードの開発」に活用する。

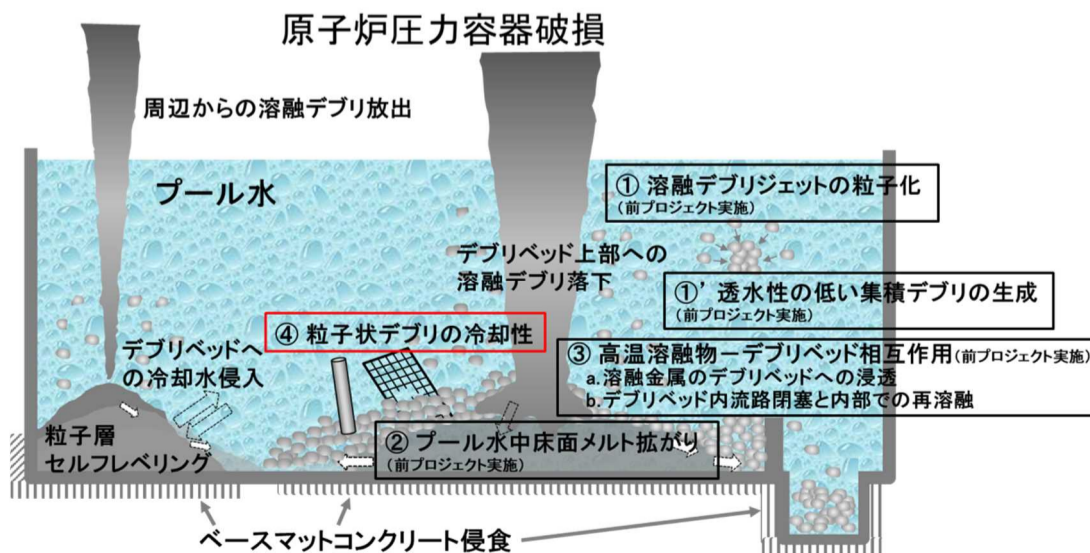


図7 プール水中デブリ冷却に関する主な現象

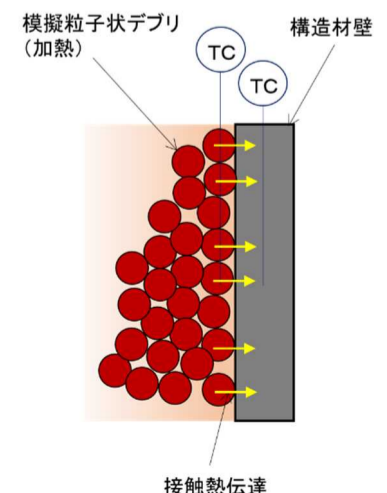


図8 粒子状デブリ冷却性実験の概要

行程表

	R 2 年度	R 3 年度	R 4 年度	R 5 年度	R 6 年度	R 7 年度
(1) プールスクラビング実験	○小規模実験 装置整備・計測技術確立				▽論文投稿	
		データ拡充				
(2) ソースターム実験	○中規模実験 装置整備	計測技術確立	データ取得			
			他プロジェクトに反映*			
(3) 重大事故時格納容器熱流動実験	○化学反応実験 パラメータ実験（雰囲気、他物質影響評価）				パラメータ実験（雰囲気ガス流量）	論文投稿▽
	○再移行実験 再蒸発実験系の検討		他プロジェクトに反映**			
	○放出速度実験 放出速度計測	実験装置整備	予備実験		データ取得	
	○物質移行係数に関する実験 モデル構築			他プロジェクトに反映**		
(4) 燃料デブリ冷却性実験	○外面冷却、再循環実験 重要パラメータ選定実験	選定パラメータの単独効果実験		選定パラメータの複合効果実験		論文投稿▽
	○ベント実験 初期気体分布	水素を含む気体供給条件	スプレイ条件	複合パラメータ	形状効果	
	○スプレイ実験 スプレイ特性検証	単独パラメータ実験	単独及び複合パラメータ実験	複合パラメータ実験		
	装置設計製作		他プロジェクトに反映**			
	予備実験	データ取得			▽論文投稿	
				他プロジェクトに反映*		

* 安全研究プロジェクト「軽水炉の重大事故時における不確かさの大きな物理化学現象に係る解析コードの開発」(H29～R4 年度)へのデータ等の受け渡し
 **安全研究プロジェクト「軽水炉の重大事故における格納容器機能喪失及び確率論的リスク評価に係る解析手法の整備」(H29～R4 年度)プロジェクトへのデータ等の受け渡し

7. 実施計画

【R 2 年度の実施内容】
 (1) プールスクラビング実験【分類②及び③】
 1) 小規模実験
 ・各種物理量を取得するための実験装置整備、計測技術の開発
 ・微粒子除去現象を評価することの可能な CFD 解析コードの開発準備
 2) 中規模実験
 ・プール水深及び水温をパラメータとした除染係数計測及び蒸気を混入した条件での除染係数変化の特性把握
 (2) ソースターム実験【分類②及び③】
 1) 化学反応実験
 FP 放出移行挙動再現装置を用いて、前プロジェクトで実施したホウ素に加え、ヨウ素及びセシウムの化学反応に影響を与える模擬放射性物質や構造材成分（モリブデン等）を対象に、高温領域から低温領域までの移行時におけるヨウ素及びセシウムとの化学反応実験を実施する。雰囲気、反応物質の種類等をパラメータとし、各因子の影響を評価するために沈着物量や化学形態とそれらの分布に係わる実験データを取得する。
 2) 再移行実験
 既往研究の調査により従来の再蒸発モデルを調査し、移行化学形態が変化した場合に影響し得るパラメータ因子を推定する。また、推定されたパラメータを効果的に評価し得る実験系を検討する。さらに、エアロゾル再浮遊、再揮発、飛沫同伴について既往研究を調査し、従来モデル改良による不確かさ低減の余地を検討する。
 3) 放出速度実験
 ・模擬燃料試料の作成及び質量分析装置による放出速度データの測定
 ・試料データ分析
 4) 物質移行係数に関する実験

<ul style="list-style-type: none"> ・データ取得 ・モデル検討 <p>(3) 重大事故時格納容器熱流動実験【分類②及び③】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・外面冷却及び過温破損実験：重要パラメータ選定 ・ベント実験：単独パラメータ調査(気体組成、気体温度分布、ベント及びパージ流量) ・スプレイ実験：スプレイ特性の検証(粒径、流量、ノズル選定) <p>(4) 燃料デブリ冷却性実験【分類②及び③】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・粒子状デブリの加熱方法や実験条件の詳細等の検討及び実験装置の設計製作 ・予備実験による実験装置の妥当性確認
<p>【R3年度の実施内容】</p> <p>(1) プールスクラビング実験【分類②及び③】</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 小規模実験 <ul style="list-style-type: none"> ・実験装置の整備及び計測技術の開発 ・微粒子除去現象の評価に資するパラメータに関するデータの拡充 ・実験データをもとに単一気泡における微粒子除去現象を評価するCFD解析を実施 2) 中規模実験 <p>粒子表面性状(親水・疎水)の除染係数への影響調査実験(水温及び蒸気の効果パラメータとする)</p> <p>(2) ソースターム実験【分類②及び③】</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 化学反応実験 <p>引き続き、FP放出移行挙動再現装置を用いて、ヨウ素及びセシウムの化学反応に影響を与える模擬放射性物質や構造材成分(モリブデン等)を対象に、高温領域から低温領域までの移行時におけるヨウ素及びセシウムとの化学反応実験を継続して実施する。雰囲気、反応物質の種類等をパラメータとし、沈着物量や化学形態とそれらの分布に係わる実験データを取得する。</p> 2) 再移行実験 <p>再蒸発現象について令和2年度に検討された実験系の整備を行う。エアロゾル再浮遊、再揮発、飛沫同伴について引き続き既往研究を調査するとともに従来モデルの課題の抽出を行い、改良余地がある場合は実験系を検討する。</p> 3) 放出速度実験 <ul style="list-style-type: none"> ・放出速度データの分析、モデル構築 4) 物質移行係数に関する実験 <ul style="list-style-type: none"> ・データ取得 ・モデル構築 <p>(3) 重大事故時格納容器熱流動実験【分類②及び③】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・外面冷却及び過温破損実験：単独パラメータ調査(容器内初期気体組成、注入気体条件) ・ベント実験：複合パラメータ調査(初期気体条件と供給気体の組合せ) ・スプレイ実験：単独パラメータ調査(気体組成、注入蒸気供給) <p>(4) 燃料デブリ冷却性実験【分類②及び③】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・粒子条件を変化させた実験データの取得
<p>【R4年度の実施内容】</p> <p>(1) プールスクラビング実験【分類②及び③】</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 小規模実験 <ul style="list-style-type: none"> ・実験データの拡充 ・実験データを基にCFDコードの妥当性を検証し、各種パラメータにおける微粒子除去量を評価する。 ・スクラビング時における影響の大きい個別現象のモデル化を検討する。 2) 中規模実験 <p>粒子表面性状及びプール水温、エアロゾル条件のパラメータ拡充を行う。必要に応じて注入の向きや気泡上昇領域(液相循環や気泡滞在時間)の除染係数に対する影響を調査する。</p> <p>(2) ソースターム実験【分類②及び③】</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 化学反応実験 <p>令和3年度に引き続き、FP放出移行挙動再現装置を用いて、ヨウ素及びセシウムの化学反応に影響を与える模擬放射性物質や構造材成分(モリブデン等)を対象に、高温領域から低温領域までの移行時におけるヨウ素及びセシウムとの化学反応実験を継続して実施する。雰囲気、反応物質の種類等をパラメータとし、沈着物量や化学形態とそれらの分布に係わる実験データを取得するとともに、令和2年度から実施した結果のレビューを行い、各反応体系の重要度を検討する。</p> 2) 再移行実験 <p>再蒸発現象について、各パラメータの影響度について予備実験を実施し影響度の大きなパラメータより順次パラメータ実験を行い、モデル改良に必要なデータを取得する。エアロゾル再浮遊、再揮発、飛沫同伴について実験を実施する場合、検討された実験系の整備及び予備実験を実施し各パラメータの影響を調査する。</p> <p>(3) 重大事故時格納容器熱流動実験【分類②及び③】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・外面冷却及び過温破損実験：単独パラメータ調査(条件範囲拡充)、複合パラメータ調査(初期気体組成と気体注入の組合せ) ・ベント実験：複合パラメータ調査(初期気体条件・供給気体・スプレイ)、形状効果調査(内部構造物、ベント位置) ・スプレイ実験：単独パラメータ調査(条件範囲拡充)、複合パラメータ調査(初期気体組成と蒸気注入の組合せ) <p>(4) 燃料デブリ冷却性実験【分類②及び③】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・雰囲気条件を変化させた実験データの取得

	<p>【R5年度の実施内容】</p> <p>(1) ソースターム実験【分類②及び③】</p> <p>1) 化学反応実験 令和4年度のレビューにより選定された重要な反応体系を対象として、放射性物質化学反応モデルを構築・改良するために、FP 放出移行挙動再現装置を用いて高温領域から低温領域までの移行時におけるヨウ素及びセシウムとの化学反応実験を実施する。雰囲気ガス流量（反応時間）等をパラメータとし、速度論を考慮可能な化学反応モデルによる解析結果と比較できる沈着物量や化学形態とそれらの分布に係わる実験データを取得する。</p> <p>2) 再移行実験 再蒸発現象について、引き続き影響度の大きなパラメータより順次パラメータ実験を実施し、モデル改良に必要なデータを取得する。さらに、改良されたモデルを導入したソースターム評価コードを用いた不確かさ解析を行い、改良モデルによる不確かさの低減効果とモデル課題の有無を評価する。ソースターム評価コードの改良モデルのエアロゾル再浮遊、再揮発、飛沫同伴について実験を実施する場合、整備した実験装置を用いパラメータ実験を実施し、モデル改良に必要なデータを取得する。</p> <p>(2) 重大事故時格納容器熱流動実験【分類②及び③】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・外面冷却及び過温破損実験：複合パラメータ調査(条件範囲拡充)、形状効果調査(内部構造物、ジェット向き) ・ベント実験：複合パラメータ及び形状効果の組合せ実験 ・スプレイ実験：複合パラメータ調査(条件範囲拡充)、形状効果調査
	<p>【R6年度の実施内容】</p> <p>(1) ソースターム実験【分類②及び③】</p> <p>1) 化学反応実験 引き続き、放射性物質化学反応モデルを構築・改良するために、FP 放出移行挙動再現装置を用いて高温領域から低温領域までの移行時におけるヨウ素及びセシウムとの化学反応実験を継続して実施する。雰囲気ガス流量（反応時間）等をパラメータとし、速度論を考慮可能な化学反応モデルによる解析結果と比較できる沈着物量や化学形態とそれらの分布に係わる実験データを取得する。</p> <p>2) 再移行実験 再蒸発現象について、改良モデルの検証に必要な実験を実施し、改良モデルの信頼性を確認する。エアロゾル再浮遊、再揮発、飛沫同伴について実験を実施する場合、整備した実験装置を用いパラメータ実験を引き続き実施し、モデル改良に必要なデータを取得する。</p> <p>(2) 重大事故時格納容器熱流動実験【分類②及び③】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・外面冷却及び過温破損実験：複合パラメータ調査(条件範囲拡充)、形状効果調査の拡充 ・ベント実験：複合パラメータ及び形状効果の組合せ実験の拡充
	<p>【R7年度の実施内容】</p> <p>(1) ソースターム実験【分類②及び③】</p> <p>1) 化学反応実験 引き続き、放射性物質化学反応モデルを構築・改良するために、FP 放出移行挙動再現装置を用いて高温領域から低温領域までの移行時におけるヨウ素及びセシウムとの化学反応実験を継続して実施する。雰囲気ガス流量（反応時間）等をパラメータとし、速度論を考慮可能な化学反応モデルによる解析結果と比較できる沈着物量や化学形態とそれらの分布に係わる実験データを取得する。</p> <p>2) 再移行実験 再蒸発現象について、改良モデルの検証に必要な実験を実施し、改良モデルの信頼性を確認する。エアロゾル再浮遊、再揮発、飛沫同伴について実験を実施する場合、整備した実験装置を用いパラメータ実験を引き続き実施し、モデル改良に必要なデータを取得する。</p> <p>(2) 重大事故時格納容器熱流動実験【分類②及び③】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ベント実験：複合パラメータ及び形状効果の組合せ実験の拡充
8. 実施体制	<p>【シビアアクシデント研究部門における実施者（主担当者には○を記載）】</p> <p>○森田 彰伸 技術研究調査官 西村 健 技術研究調査官 平等 雅巳 技術研究調査官 菊池 航 技術研究調査官 堀田 亮年 主任技術研究調査官</p>
9. 備考	<p style="text-align: center;">文 献</p> <p>(1) 秋葉美幸、堀田亮年、阿部豊、孫昊旻、「粒子状放射性物質のプールスクラビングに関する実験的研究」、日本原子力学会和文誌、2020.</p> <p>(2) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、「平成 29 年度原子力施設等防災対策等委託費（シビアアクシデント時ソースターム評価技術高度化）事業 成果報告書」、2018.</p> <p>(3) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、「平成 30 年度原子力施設等防災対策等委託費（シビアアクシデント時ソースターム評価技術高度化）事業 成果報告書」、2019.</p> <p>(4) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、「平成 28 年度原子力施設等防災対策等委託費（シビアアクシデント時格納容器熱流動調査）事業に関する報告書」、2017.</p> <p>(5) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、「平成 29 年度原子力施設等防災対策等委託費（シビアアクシデント時格納容器熱流動調査）事業に関する報告書」、2018.</p> <p>(6) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、「平成 30 年度原子力施設等防災対策等委託費（シビアアクシデント時格納容器熱流動調査）事業に関する報告書」、2019.</p> <p>(7) Hotta, A., Akiba, M., Konvalenko, A., Villanueva, W., Bechta, S., Matsumoto, T., Sugiyama, T., and Buck, M.,</p>

<p>“Experimental and Analytical Investigation of Formation and Cooling Phenomena”, J. Nucl. Sci. Technol., 2019. (2019年11月20日オンライン掲載)</p> <p>(8) 国立大学法人筑波大学、「平成30年度原子力施設等防災対策等委託費（スクラビング個別効果試験）事業 成果報告書」、2019.</p> <p>本プロジェクトの成果は、次のプロジェクトに活用する。</p> <p>「軽水炉の重大事故時における不確かさの大きな物理化学現象に係る解析コードの開発」（H29～R4年度）における「（3）キャビティ注水時のデブリ冷却性解析コードの開発」及び「（4）放射性物質生成・移行・除去解析コードの開発」</p> <p>「軽水炉の重大事故における格納容器機能喪失及び確率論的リスク評価に係る解析手法の整備」（H29～R4年度）における「（1）格納容器破損防止対策評価手法の整備 2）個別現象解析手法の整備①格納容器破損モード（水素燃焼）評価の整備」</p> <p>また、次のプロジェクトの成果から、本プロジェクトの全体計画を見直す。</p> <p>「軽水炉の重大事故における格納容器機能喪失及び確率論的リスク評価に係る解析手法の整備」（H29～R4年度）における「（2）確率論的リスク評価に関連する評価技術の整備」</p>

研究計画

1. プロジェクト	10. 軽水炉の重大事故時における不確かさの大きな物理化学現象に係る解析コードの開発	担当部署	技術基盤グループ シビアアクシデント研究部門
		担当責任者	秋葉美幸 統括技術研究調査官
2. カテゴリー・研究分野	【原子炉施設】E) シビアアクシデント（軽水炉）	主担当者	堀田亮年 主任技術研究調査官 森田彰伸 技術研究調査官 菊池航 技術研究調査官
3. 背景	<p>重大事故時の格納容器機能維持に係る物理化学現象については、現在の解析コードによる予測には不確かさが大きな領域が存在し、これらに関して継続的研究が国内外において進められている。ここから得られる知見を反映した解析コードを開発し、その過程で得られた技術知見を適合性審査において活用し、さらに、コード開発及び妥当性確認の成果の公表を通じて専門家との情報交換を促進する。こうした活動を通じて、現状の知見とのギャップ分析に基づきガイドの改定等の要否の検討を行い、安全性に係る評価の高度化に資する知見を継続的に拡充していくことが重要である。</p> <p>原子炉圧力容器外の溶融燃料 - 冷却材相互作用及び溶融炉心 - コンクリート相互作用（以下「MCCI」という。）については、国際協力実験等を通じて知見が得られているが、現象解明及び実機プラント予測における不確かさは大きい。このため、国内外の動向、最新の文献、国際協力プロジェクトへの参加等を通じて得た知見により、解析モデルの改良を進め、精度を向上していくことが重要である。</p> <p>キャビティへの先行注水時のデブリベッド冷却性に着目し、デブリベッド形成及びデブリベッド内伝熱流動に関連する諸現象に関する実験的研究が近年国内外で活発化しており、ここから得られる知見に基づき、デブリベッド冷却性に対する解析モデルの精度を向上させることが重要である。</p> <p>エアロゾル状又はガス状の放射性物質は、種々の物理化学的現象を含む除去現象を経たのちに環境に移行する。こうした除去及び移行プロセスについては、経済協力開発機構原子力機関原子力施設安全委員会（以下「OECD/NEA/GSNI」という。）、欧州共同体等、国内外において継続的に実験的研究が進められている。ここから得られる知見に基づき詳細な化学反応を含む解析モデルを開発し、MELCOR等の総合重大事故解析コードに反映することは、ソースターム評価における精度を向上する観点から重要である。</p>		
4. 目的	<p>(1) 解析コードの開発</p> <p>新たに導入された重大事故対策及びリスク低減の視点から重要であり、かつ既存コードによる評価の不確かさが大きい溶融燃料 - 冷却材相互作用、溶融炉心 - コンクリート相互作用、キャビティ注水時のデブリ冷却性及び放射性物質生成・移行・除去挙動の4つの物理化学現象を対象として、不確かさの幅を温度、圧力等の状態変数で定式化することによって、実規模スケールの解析に適用できる解析コードを開発する。</p> <p>(2) 解析コードの検証及び妥当性確認</p> <p>国際協力プロジェクト実験、公開された実験及び別プロジェクトにおいて取得した実験データベースに基づき、解析コードの予測性を確認し解析結果の精度の向上を図る。</p>		
5. 知見の活用先	<p>最新知見が得られた場合には、実用炉の安全審査へ適切に活用する。将来的な安全性に係る評価の高度化に資するため、成功基準の検討、事故進展解析及び分岐確率等の確率論的リスク評価技術の向上、さらには別途実施する代表プラントの確率論的リスク評価技術の改良等に活用する。</p>		

本プロジェクトの研究は、「原子力規制委員会における安全研究の基本方針」（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。

- 規制活動に必要な手段の整備（以下「分類③」という。）

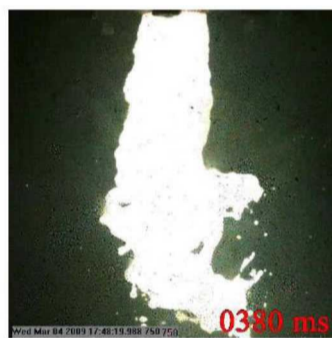
これまでに、デブリベッド形成及び冷却性等に係る解析コードの開発を進めてきたが、平成29年度からは、実機プラントにおける重大事故評価の精度向上の観点から課題の優先順位を検討した結果、溶融燃料 - 冷却材相互作用、MCCI、キャビティ内デブリベッド形成及び冷却性並びに燃料デブリからの放射性物質放出の4分野を対象として、これらに関する解析コードの開発を進める。解析コードの開発に当たっては、国内外の研究の成果及び評価技術の現状を踏まえて、軽水炉の重大事故の重要物理化学現象に係る実験等で取得した最新の試験結果を活用し、実験条件から実機プラント条件への外挿における不確かさの評価を含めた評価手法の整備を図る。

(1) 溶融燃料 - 冷却材相互作用解析コードの開発【分類③】

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

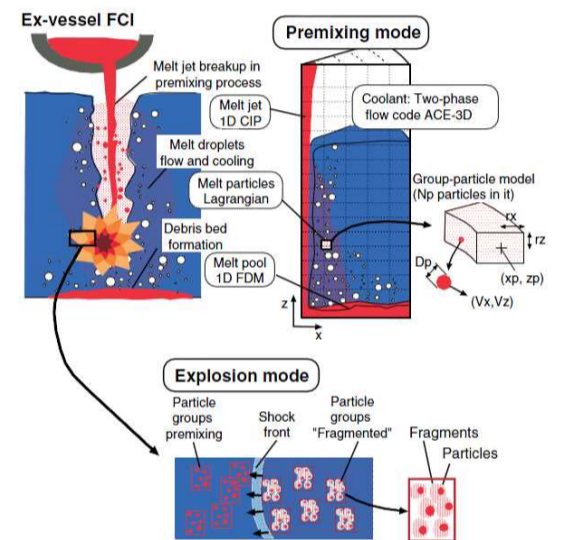
これらの知見を活用し、実規模スケールにおける現象予測の精度を向上する手法を整備する。まず、実験と実機プラントにおける条件の相違が発生する機械的エネルギーに及ぼす影響度から、多段階の溶融物落下及び大量な溶融物落下時の水中での二相挙動及び二酸化ウランにおける機械的エネルギー変換に関する現象を同定し、これらに関する国内外の研究動向、解析モデルについて調査し、数値モデルを開発する。また、空中でのデブリ粒子化、水中での粒子化デブリの集積挙動等の同伴現象に関する解析モデルは、より現実的な予測のために必要な要素であり、これらの同伴現象に関する解析モデルを備えたコードの開発を進める。JBREAK 及び JASMINE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

6. 安全研究概要
 (始期：H29年度)
 (終期：R4年度)



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

(a) 溶融物落下状況 (TRO1 TS-3 ケース)



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

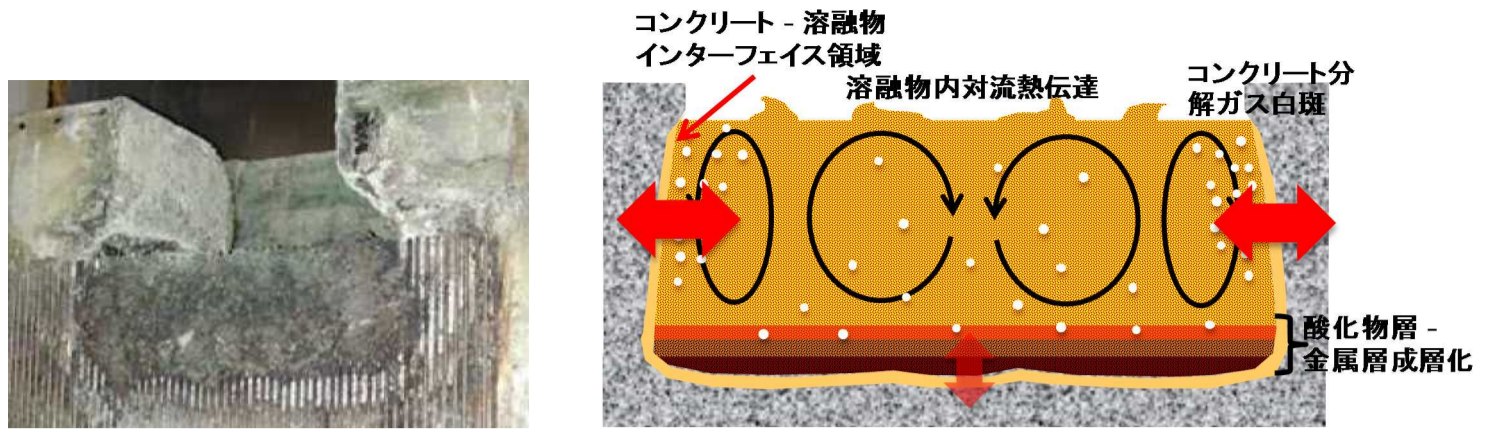
(b) 溶融燃料 - 冷却材相互作用モデル

図1 OECD/NEA/CSNI-SERENA2 における TRO1 実験における溶融燃料 - 冷却材相互作用解析例

(2) 溶融炉心 - コンクリート相互作用解析コードの開発【分類③】

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

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



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

(a) OECD/MCCI-CC13における異方性侵食

(b) MCCI モデル

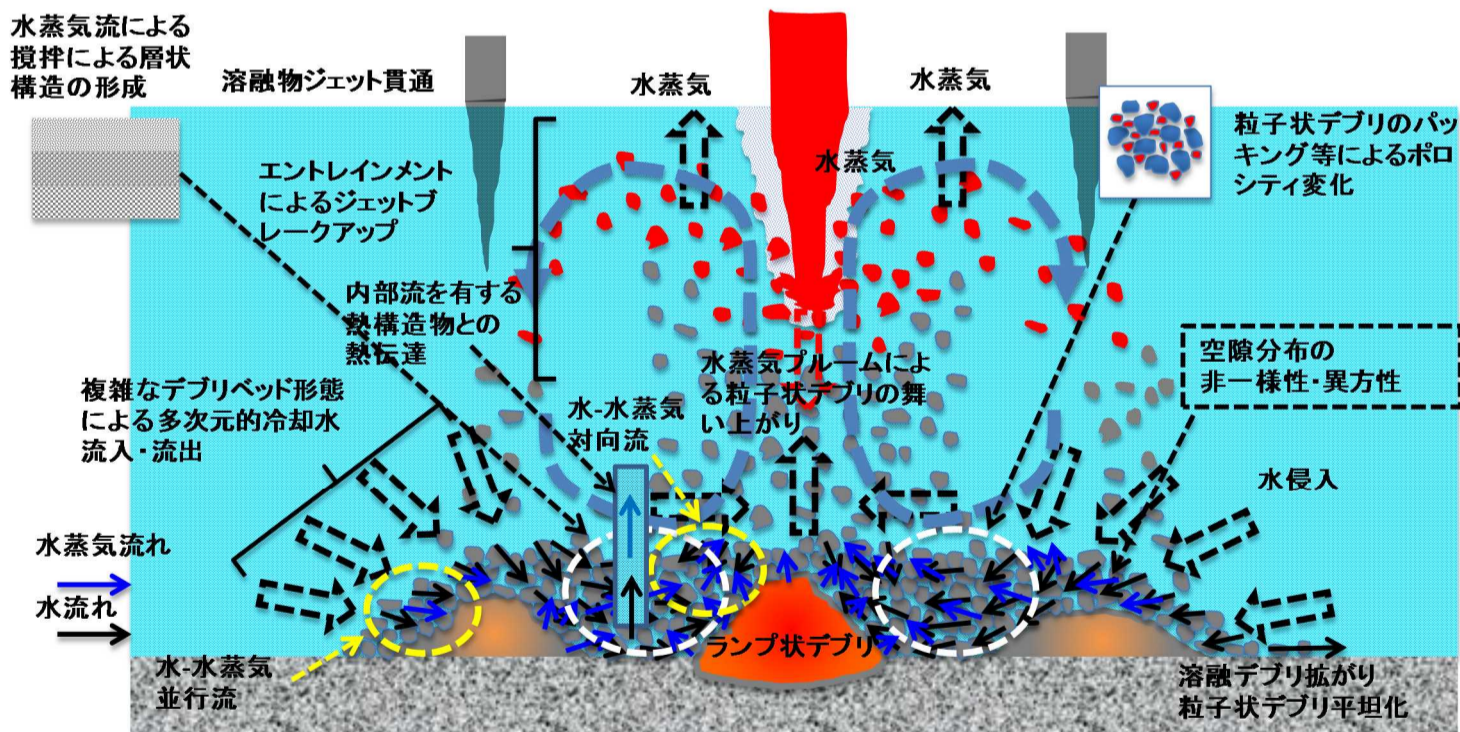
図2 OECD/NEA/CSNI-MCCIにおけるコンクリート侵食解析例

(3) キャビティ注水時のデブリ冷却性解析コードの開発【分類③】

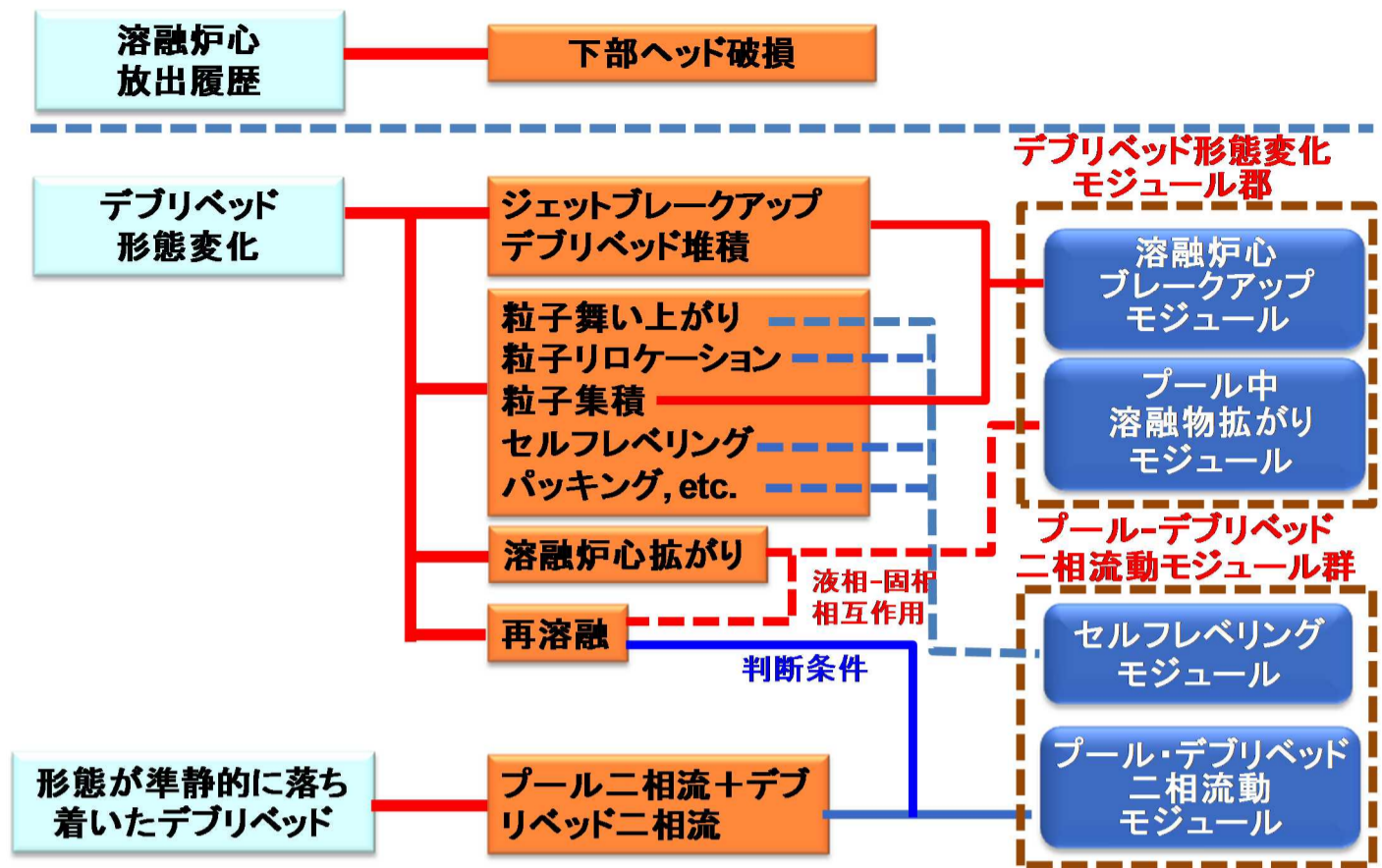
我が国の軽水炉において事業者が採用するキャビティへの先行注水では、プール水中に高温の発熱溶融デブリが落下する場合には、溶融デブリの一部は水との相互作用によって一部は細粒化し、その他は塊のまま床面に堆積する（図3 (a)）。このようなデブリベッド形成の詳細な過程を個別現象に分解した（図3 (b)）。これまでに複雑な多孔質体であるデブリベッド内の熱流動に係る数値モデルを開発している。ここでは、国内機関との協力を含めてこの解析コードの開発を更に進め、複数箇所からの多段階溶融物放出への対応、水中における溶融物のジェットブレイクアップモデル、水中の床面上における溶融物の拡がり等、非定常かつ非一様なデブリ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

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

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



(a) デブリベッド形成概念図



(b) デブリベッド形成に係る現象の分解

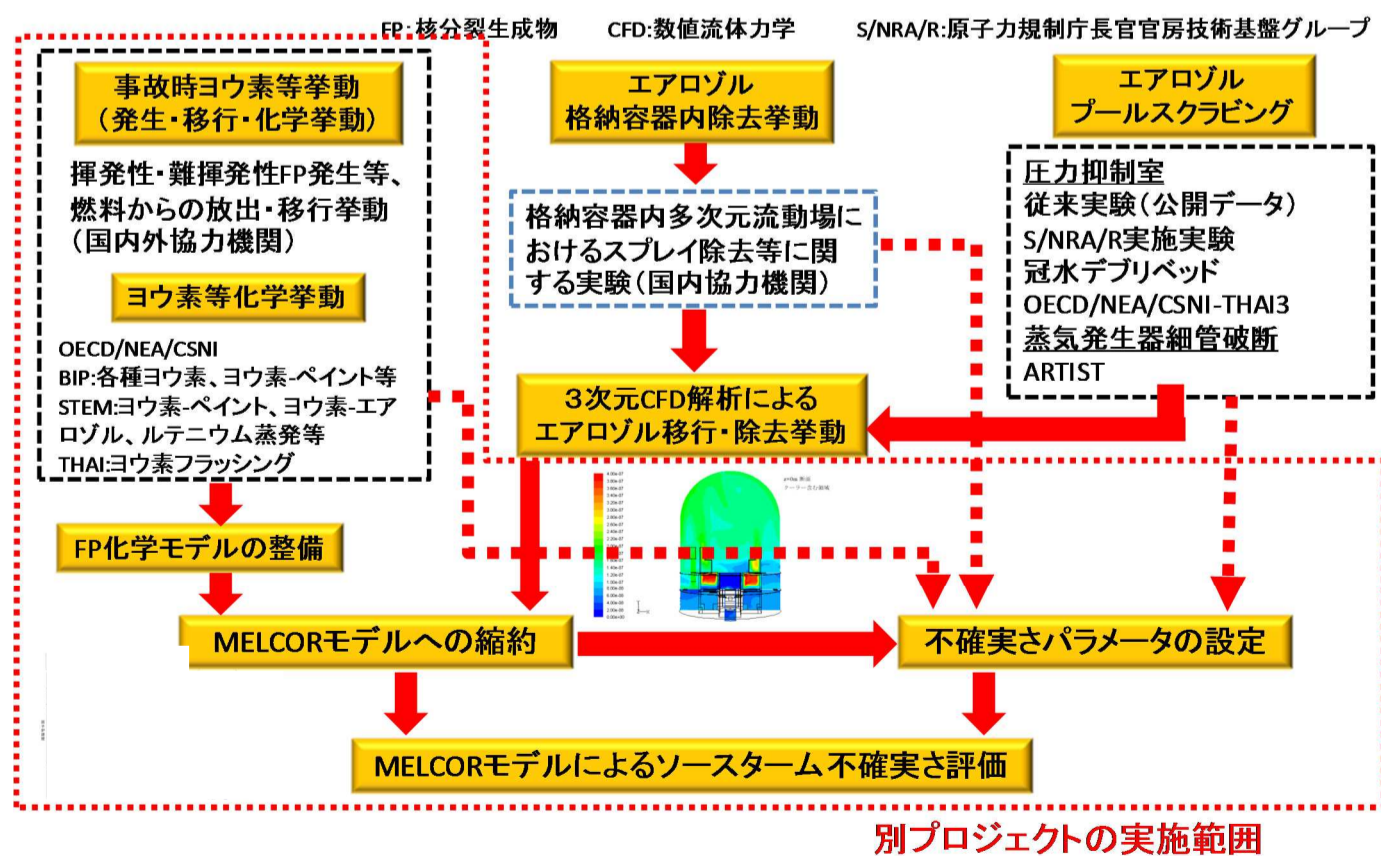
図3 溶融デブリ落下後のデブリベッド形成及び冷却性モデル

(4) 放射性物質生成・移行・除去解析コードの開発【分類③】

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

図4に示すように、ソースターム評価に関連する種々の実験が国際共同実験等で実施されており、これらで得られたデータ及び知見を取り入れ、ソースターム評価モデルを開発する。ただし、これらの実験には個別効果実験等も含まれており、実規模スケールの評価に適用する場合には不確実さを評価する必要がある。最終的に、これらの評価モデルは、計算効率やシステムレベル解析において得られる変数のスケールに合わせて縮約し、MELCORに組み込むことを目的として開発する。MELCORへの組み込みは「軽水炉の重大事故における格納容器機能喪失及び確率論的リスク評価に係る解析手法の整備」（H29～R4年度）において実施する。

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



別プロジェクトの実施範囲

図4 放射性物質生成・移行・除去モデル開発

実施行程表

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

7. 実施計画

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

	<p>(2) 溶融炉心 - コンクリート相互作用解析コードの開発【分類③】 a. 3次元 MCCI 解析コード CORCAAB プロトタイプを整備し妥当性確認を実施する。</p> <p>(3) キャビティ注水時のデブリ冷却性解析コードの開発【分類③】 a. DPCOOL 及び MSPREAD 間のモジュール間カップリングし妥当性確認を実施する。 b. JASMINE コードに追加した溶融物拡がりモデルの改良を行うとともに、確率論的アプローチによる試解析を実施する。</p> <p>(4) 放射性物質生成・移行・除去解析コードの開発【分類③】 a. FP 移行実験国際プロジェクトに参加しデータを入手し、その分析結果に基づき補完実験を実施する。これらの知見に基づき熱化学平衡計算機能を有するシビアアクシデント時 FP 挙動解析コードを整備し、妥当性を確認する。</p>
	<p>【令和2年度の実施内容】</p> <p>(1) 溶融燃料 - 冷却材相互作用解析コードの開発【分類③】 a. 3次元溶融ジェット分裂挙動解析コード JBREAK プロトタイプを整備し妥当性確認を実施する。 b. JASMINE コードの溶融ジェット分裂モデルに粒子集積挙動を扱える機能を追加する。</p> <p>(2) 溶融炉心 - コンクリート相互作用解析コードの開発【分類③】 a. CORCAAB に溶融デブリ内多次元熱流動挙動を扱える機能を追加し妥当性確認を実施する。</p> <p>(3) キャビティ注水時のデブリ冷却性解析コードの開発【分類③】 a. モジュール間カップリングと共に JBREAK、DPCOOL、MSPREAD の改良を実施し妥当性確認を実施する。 b. 物質相互作用・再溶融解析コード REMELT を開発する。 c. JASMINE コードの溶融物固化モデルの改良を行い、実験解析により妥当性確認を実施する。</p> <p>(4) 放射性物質生成・移行・除去解析コードの開発【分類③】 a. FP 移行実験で取得した知見に基づき化学反応データベースを構築し、反応速度モデルの妥当性確認を実施する。</p>
	<p>【令和3年度の実施内容】</p> <p>(1) 溶融燃料 - 冷却材相互作用解析コードの開発【分類③】 a. モジュール間結合の作業の中で JBREAK の機能拡充を実施する。 b. JASMINE コードの溶融ジェット分裂モデルに粒子集積挙動を扱える機能を追加する。</p> <p>(2) 溶融炉心 - コンクリート相互作用解析コードの開発【分類③】 a. モジュール間結合の作業の中で CORCAAB の機能拡充を実施する。</p> <p>(3) キャビティ注水時のデブリ冷却性解析コードの開発【分類③】 a. DPCOOL、MSPREAD、JBREAK 及び CORCAAB 間のモジュール間カップリングを実施し妥当性確認を実施する。 b. 物質相互作用・再溶融解析コード REMELT を開発する。 c. 不確実さを考慮したシビアアクシデント解析と JASMINE 解析を組み合わせた確率論的冷却性評価手法を開発する。</p> <p>(4) 放射性物質生成・移行・除去解析コードの開発【分類③】 a. FP 移行実験で取得した知見に基づき熱力学平衡論及び反応速度論の混合モデルを構築し、妥当性確認を実施する。</p>
	<p>【令和4年度の実施内容】</p> <p>(1) 溶融燃料 - 冷却材相互作用解析コードの開発【分類③】 a. モジュール間結合の作業の中で JBREAK の機能拡充を実施する。 b. JASMINE コードの溶融ジェット分裂モデルに粒子集積挙動を扱える機能を追加する。</p> <p>(2) 溶融炉心 - コンクリート相互作用解析コードの開発【分類③】 a. モジュール間結合の作業の中で CORCAAB の機能拡充を実施する。</p> <p>(3) キャビティ注水時のデブリ冷却性解析コードの開発【分類③】 a. 物質相互作用・再溶融解析コード REMELT プロトタイプを整備し妥当性確認を実施する。 b. DPCOOL、MSPREAD、REMELT、JBREAK 及び CORCAAB 間のモジュール間カップリングを実施する。 c. 不確実さを考慮したシビアアクシデント解析と JASMINE 解析を組み合わせた確率論的冷却性評価手法を改良する。</p> <p>(4) 放射性物質生成・移行・除去解析コードの開発【分類③】 a. FP 移行実験で取得した知見に基づき熱力学平衡論及び反応速度論の混合モデルを備えた FP 移行挙動解析コードを開発し、各モデルの誤差を検証する。</p>
8. 実施体制	<p>【シビアアクシデント研究部門における実施者】</p> <ul style="list-style-type: none"> ○堀田亮年 主任技術研究調査官 ○森田彰伸 技術研究調査官 ○平等雅巳 技術研究調査官 ○菊池航 技術研究調査官 <p>【前年度までの委託先】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・・・実施項目（1）、（3）、（4）
9. 備考	<p>以下の安全研究プロジェクトと協力する。</p> <p>重大事故時における重要物理化学現象の不確実さ低減に係る実験（R2～R7 年度）</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本プロジェクトの「（1）溶融燃料 - 冷却材相互作用解析コードの開発」及び「（3）キャビティ注水時のデブリ冷却性解析コードの開発」の進捗に応じて、当該プロジェクトの「（4）燃料デブリ形成過程個別現象実験」の実験計画に適切にフィードバックを与える。 ・本プロジェクトの「（4）放射性物質生成・移行・除去解析コードの開発」の進捗に応じて、当該プロジェクトの「（1）ブルスクラビング実験」及び「（3）ソースターム実験」の実験計画に適切にフィードバックを与える。 <p>軽水炉の重大事故における格納容器機能喪失及び確率論的リスク評価に係る解析手法の整備（H29～R4 年度）</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本プロジェクトの「（1）溶融燃料 - 冷却材相互作用解析コードの開発」及び「（3）キャビティ注水時のデブリ冷却性解析コードの開発」の進捗に応じて、当該プロジェクトの「（1）格納容器破損防止対策の評価手法の整備」の「国際協力実験等への参加」における実験計画に適切なフィードバックを与える。 ・当該プロジェクトの「（2）確率論的リスク評価に関連する評価技術の整備」の「1）レベル 2PRA 手法の整備」の成果に応じて、本プロジェクトの全体計画を見直す。

研究計画

1. プロジェクト	11. 軽水炉の重大事故における格納容器機能喪失及び確率論的リスク評価に係る解析手法の整備	担当部署	技術基盤グループ シビアアクシデント研究部門
2. カテゴリー・研究分野	【原子炉施設】E) シビアアクシデント（軽水炉）	担当責任者	舟山京子 安全技術管理官 秋葉美幸 統括技術研究調査官
		主担当者	西村 健 技術研究調査官 市川竜平 技術研究調査官
3. 背景	<p>重大事故における格納容器破損防止に係る実機解析においては、事故の影響が及ぶ広範な領域における幅広い事故シナリオに対する既存解析コードの改良及びこれらを用いた評価手法の整備を進め、レベル2及びレベル3の確率論的リスク評価（以下「PRA」という。）等の安全評価手法に対して最新知見を継続的に反映していくことが重要である。</p> <p>(1) 格納容器破損防止対策の評価手法の整備 「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈（平成25年6月19日原子力規制委員会決定）」では、重大事故時の格納容器破損防止対策の有効性確認について、沸騰水型原子炉（以下「BWR」という。）及び加圧水型原子炉（以下「PWR」という。）に対して6つの「必ず想定する格納容器破損モード」を定め、格納容器破損防止対策の有効性を確認している。加えてPRAを実施し、「有意な頻度又は影響をもたらす格納容器破損モード」があれば新たに追加することが求められている。重大事故時の格納容器内事故進展の解析では、プラント全体を考慮し、幅広いスケールに及ぶ多数の物理化学現象の相互作用を扱う総合重大事故現象解析コード（Integral Code）を用いるアプローチにより基本的な格納容器負荷を評価する。同時に、特定の複雑な物理化学現象の相互作用については、空間及び時間的に高い解像度を有する個別現象解析コード（Dedicated Code）を用いるアプローチを併用している。格納容器破損に係る物理化学現象及びこれらに対するプラント応答の解析コードによる予測の不確実さを低減するため国内外において研究活動が活発に継続している。ここでは、国際協力実験等への参加による実験データの取得並びに解析コード及びその用法に関する最新の知見を反映し、上記2種類のアプローチを併用した解析手法の整備を進めていくことは、広いスケールに及ぶ物理化学現象を適切に扱う必要がある重大事故解析において重要である。</p> <p>(2) 確率論的リスク評価に関連する評価技術の整備 平成25年に改正された「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」により、事業者に対する「安全性の向上のための評価」（以下「安全性向上評価」という。）の実施が規定され、安全性向上評価において個別プラントのリスクプロファイルを明確化するために、レベル2PRAまで実施されている。また、新検査制度の運用に向けて検査指摘事項の重要度評価に活用するPRAとして、内部事象のレベル1PRAから1.5PRAまでを一貫して扱う評価が実施される見込みである。レベル2PRA評価手法の整備を進めることにより、将来的な安全性向上評価等のガイドの改定等による安全性に係る評価の高度化、新検査制度の的確な運用等に資することが重要である。 東京電力福島第一原子力発電所事故（以下「1F事故」という。）後の国際的な動向を踏まえて、これまでにレベル3PRA手法の整備を進めてきた。今後、確率論的リスク評価（PRA）の成熟状況に応じて、将来的に実用発電用原子炉施設においてサイト特性評価を踏まえたサイト外に対するリスクの評価を実施するため、レベル3PRAを活用したリスク評価に向けた検討を開始する。</p> <p>(3) 環境影響評価手法の整備 1F事故では、1号機から3号機までが炉心損傷し、大量の放射性物質が環境に放出され、大気中及び海洋に拡散した。ソースターム評価の精度向上のために、敷地境界近傍等の計測値及び数値解析を組み合わせた放射性物質の環境への放出量を推定する評価手法の整備が重要である。 また、緊急時対策所等の居住性に係る被ばく評価の精度向上のため、直接線及びスカイシャインによる被ばく評価の不確実さ等について知見を得ることが重要である。</p>		
4. 目的	<p>(1) 格納容器破損防止対策評価手法の整備 基準類策定、安全性向上評価、重大事故対策の有効性判断、1F事故の分析等に適用できる総合現象解析コード及び個別現象解析コードによる評価手法を整備し、必要な場合にはモデル改良を実施する。また、実機相当レベルのデータを含む妥当性確認用データの取得を行い不確実さの定量評価手法を整備する。 1) 総合現象解析コードによる評価手法の整備 重大事故総合解析コードMELCORにより国内PWR及びBWRを対象とした事故進展解析を実施し、ソースタームの類型化を行うために必要な手法を整備する。また、使用済燃料プール（以下「SFP」という。）の重大事故時に想定される特有の現象や事故進展に着目してMELCORにより解析するための手法の整備する。 2) 個別現象解析コードによる評価手法の整備 水素燃焼、メルトスプレッド/溶融炉心-コンクリート相互作用の重畳現象及び静的・動的負荷に対する格納容器閉じ込め機能に関する詳細解析手法及び不確実さの低減のためのモデル整備を行う。個別現象に関する経済協力開発機構原子力機関原子力施設安全委員会（以下「OECD/NEA/CSNI」という。）が主催する実験等に参加し、実験データ等の成果を取得する。</p> <p>(2) 確率論的リスク評価に関連する評価手法の整備 1) レベル2PRA手法の整備 レベル2PRA評価においては、物理化学現象に加えて、格納容器イベントツリー上にレベル1PRAで取り扱うシステムとの従属性を適切に考慮し、一括して非信頼性解析モデルを扱う手法を整備し、安全性向上評価、新検査制度での検査指摘事項の重要度評価に活用するPRA手法等の確認に資する知見の蓄積及び整備を実施する。また、レベル3PRAへのリスク情報の受け渡しの手段を検討し、レベル1からレベル3まで一貫したモデルにより評価できる手法整備を進める。さらに、外部事象を考慮した格納容器機能喪失頻度及び環境への放射性物質放出量評価手法等の整備を進める。</p>		

	<p>2) レベル 3PRA 手法の整備 サイト外のリスク評価を行うため、濃度、線量等のリスクの指標を検討するとともに、リスク指標を評価するためのレベル 3PRA 手法を整備する。また、代表プラントのリスク評価を行い、希ガス放出等の影響、防護措置の効果等に係る技術的知見を取得する。さらに、レベル1からレベル3PRAまで一貫したモデルでリスク評価を行うためのレベル3PRA手法を整備する。</p> <p>(3) 環境影響評価手法の整備 1) 放射性物質の環境拡散評価手法の整備 1F事故における環境への放射性物質の放出量の推定のために、地形影響等を考慮した大気拡散モデル、海洋拡散モデル及び陸上動態モデルを統合した環境拡散評価手法を整備する。 2) 遮蔽解析に係る技術的知見の整備 緊急時対策所等の居住性等に係る被ばく評価について、直接線及びスカイシャイン線に対する建屋等による遮蔽評価の確認に資する技術的知見を取得し被ばく評価手法を整備する。</p>
5. 知見の活用先	<p>解析コードによる評価及びPRAは、新規基準における事故シーケンス選定、有効性評価等の適合性審査に係る確認のより一層の向上に資する。また、事故進展解析、分岐確率、放射性物質放出挙動評価等について、将来的な安全性向上評価等のガイドの改定等の要否の検討を含めた安全性に係る評価の高度化、新検査制度での検査指摘事項の重要度評価に活用されるPRAの確認に資する。さらに、代表プラントのPRAの信頼性の継続的な改善等に資する。 また、原子力災害対策指針の防護措置に係る参考情報に資する。</p>
6. 安全研究概要 (始期：H29年度) (終期：R4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）における安全研究うち以下の分類に基づき実施する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 規制活動に必要な手段の整備（以下「分類③」という。） <p>格納容器破損防止対策評価手法、PRA及び環境影響評価に関する評価手法を整備するとともに、OECD/NEA/GSNIが行う国際共同プロジェクトに参加し、評価手法の妥当性確認のための実験データベース等の取得を行う。</p> <p>(1) 格納容器破損防止対策評価手法の整備【分類③】</p> <p>1) 総合現象解析手法の整備 MELCORを用い、国内BWR及びPWRプラントの事故進展解析を実施し、これに基づき実機規模の解析評価モデル及び評価手法を整備する。さらに、米国SOARCAプロジェクトを参考に、最適評価を実施するための詳細なMELCOR入力デッキの整備を進め、ソースターム解析を実施するとともに、事故進展解析の結果に対する事故シーケンスグループの類型化ツールを整備する SFPについては、燃料露出を伴う冷却材喪失事故に対する主要な事故進展に関して、燃料被覆管酸化、自然対流冷却等の物理化学現象を考慮した解析評価手法を整備し、ソースターム評価を行う。</p> <p>2) 個別現象解析手法の整備 ① 格納容器破損モード（水素燃焼）評価の整備 詳細数値流体力学（以下「CFD」という。）解析による水素燃焼解析手法は研究途上の段階にあるが、遅い火炎から中速度の火炎については均一水素濃度場を中心とした実用的なCFD解析モデルが提案されている。こうしたモデルにより、格納容器破損のみならず、水素が停留する可能性のある安全系の機能に関する詳細な評価手法を整備する。「④ OECD/NEA/GSNI 主催の実験、解析及び調査プロジェクトからの情報収集」の一環として参加する水素リスク関連国際実験プロジェクトTHAI3、HYMERES等で得られた実験データに基づき、噴流による成層崩壊に対する予測性を確認した乱流モデルを適用して、クーラー、スプレイ等の安全機器による格納容器雰囲気流れ場への影響をCFD解析により評価し、格納容器内の局所的な温度及び濃度等を定量的に評価する手法を整備する。</p> <p>a. 水素混合解析の整備 汎用CFD解析コード及び原子力専用詳細解析コードを用い、比較的詳細なメッシュに基づき、安全上重要な水素の大局的流動現象（対流、成層化等）とその形成・崩壊過程及び局所的流動現象（区画内の滞留等）に関する解析手法を整備する。また、構造体表面での凝縮熱伝達、スプレイ、クーラ等複数の安全機器の作動時に生じる熱流動上の相互作用、静的触媒式水素再結合器(PAR)、イグナイターのモデルパラメータはメッシュサイズによる影響を受けることが考えられる。 こうしたメッシュ詳細化によるモデル適用法の課題が存在することを踏まえて、格納容器内の多次元空間熱流動に及ぼす影響を把握するため、国際協力プロジェクト(OECD/NEA/GSNI-HYMERES計画等)及び「重大事故時における重要物理化学現象の不確実さ低減に係る実験」(R2年度～R7年度)にて国内協力機関が実施する「重大事故時格納容器熱流動実験(CIGMA)」等にて得られるデータに基づく実験解析を行い、実機評価のための技術的知見を整備する。さらに、PARに関するTHAI実験シリーズのデータを利用し、その起動、配置、処理能力、設置数等に関する評価手法を整備する。次のb.の水素燃焼解析手法を併用し、重大事故時に想定される水素漏えいモードに対する水素濃度制御を評価する。</p> <p>b. 水素燃焼解析の整備 国際協力プロジェクト実験(OECD/NEA/GSNI-THAI計画等)として実施された既往水素燃焼実験及び同THAI3で実施される燃焼区間伝播実験に対してCFD解析を実施し、非均一水素濃度場及び水蒸気混合気場における水素燃焼モデルの適用性拡大を図るとともに、火炎加速領域に適用できる水素燃焼解析評価手法を整備する。本評価により、実装可能な水素濃度制御によって局在化する可能性がある水素の燃焼についての影響等を評価する。</p> <p>② 格納容器破損モード（メルトスプレッド/溶融炉心-コンクリート相互作用の重畳現象）評価手法の整備 溶融炉心が落下後キャビティ床面上を拡がり、更に溶融炉心-コンクリート相互作用によりコンクリートが侵食する総合的挙動を評価する。「軽水炉の重大事故時における不確実さの大きな物理化学現象に係る解析コードの開発」（H29年度～R4年度）において開</p>

発している三次元溶融炉心のキャビティ床面拡がり解析コードに基づき、MELCOR 内蔵の CORCON を制御する関数の導入及びモデルパラメータの調整を実施する。

③ 格納容器破損モード（静的・動的負荷）評価手法の整備

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

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

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

プロジェクト	取得対象	活用先
BIP3 (H30 終了)	ヨウ素の化学的挙動に関する実験データ	「軽水炉の重大事故時における不確実さの大きな物理化学現象に係る解析コードの開発」（H29 年度～R4 年度）で実施する「放射性物質生成・移行・除去解析コードの開発」において活用。
STEM2 (R1 終了)	ヨウ素及びルテニウムの化学的挙動に関する実験データ	同上
THAI3 (R1 終了)	水素混合、水素燃焼、ヨウ素移行、プールスクラビング等に関する実験データ	本プロジェクトの「水素混合・燃焼解析の整備」において活用。
HYMERES2	水素混合に関する実験データ	同上
PreADES	1F 事故の教訓に基づく安全研究に関する知見	総合現象レベル及び個別現象レベルにおける優先順位を本プロジェクトに適切にフィードバック。
ARC-F	同上	同上

(2) 確率論的リスク評価に関連する評価技術の整備【分類③】

1) レベル 2PRA 手法の整備

重大事故等対処設備の信頼性評価モデルを格納容器イベントツリーに組み込むことにより、設備間の相互依存性等を考慮したレベル 1.5PRA モデルを整備する。また、安全性向上評価、新検査制度等で取り扱われる PRA の状況に鑑み、起因事象から格納容器機能喪失までを一貫して評価することを考慮した、格納容器イベントツリーの定量化を行うためのツールの機能改良を実施する。また、レベル 2PRA で得られたリスク情報を引き継いだレベル 3PRA 実施のためのインターフェイスの検討を進め、レベル 1 からレベル 3PRA まで一貫したモデルによる代表プラントの評価に必要な手法の整備を行う。

2) レベル 3PRA 手法の整備

サイト外のリスク評価を行うため、濃度、線量等のリスクの指標を検討するとともに、リスク指標を評価するための手法を検討する。また、代表プラントのリスク評価を行い、希ガスの放出を前提とする等の放射性物質の放出を仮定した場合の環境への影響、防護措置による被ばく低減効果等に係る技術的知見をとりまとめる。さらに、レベル 1 及びレベル 2PRA から引き継いだリスク情報を基に、レベル 1 からレベル 3PRA まで一貫したモデルでリスク評価を行うためのレベル 3PRA 手法を整備する。

(3) 環境影響評価手法の整備【分類③】

1) 放射性物質の環境拡散評価手法の整備

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

2) 遮蔽解析に係る技術的知見の整備

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

実施行程表

	平成 29 年度	平成 30 年度	令和元年度	令和 2 年度	令和 3 年度	令和 4 年度
(1) 1)	○MELCOR による実機規模解析技術の整備 国内 BWR 及び PWR プラントの事故進展解析					
	SFP の事故進展解析					
(1) 2)	○格納容器破損モード（水素燃焼）評価手法の整備 水素混合解析手法の整備					
	水素燃焼解析手法の整備、水素発生に関する知見整備					
(1) 2)	○格納容器破損モード（溶融炉心・コンクリート相互作用）総合評価手法の整備 溶融物のキャビティ床面拡がり（ドライ） 別プロジェクトのコード開発で実施					
	溶融物のキャビティ床面拡がり（ウェット） 別プロジェクトのコード開発で実施					
(1) 2)	○格納容器破損モード（雰囲気圧力・温度による静的負荷）評価手法の整備 格納容器等の静的・動的負荷に対する構造応答					
	○OECD/NEA/CSNI 主催の実験、解析及び調査プロジェクトからの情報収集 BIP3（事故時ヨウ素挙動） STEM2（放射性物質放出挙動に関する実験） THAI3（格納容器内水素挙動） HYMERS2（水素成層化等の解析評価） PreADES（1F 事故に関する研究） ARC-F（1F 事故に関する研究）					
(2) 1)	○レベル 2PRA 手法の整備 一貫解析を考慮した格納容器イベントツリー定量化ツールの機能改良					
	外部事象の緩和策への影響評価 レベル 2-3PRA のインターフェイスの検討 レベル 1-3PRA の一貫した試解析の実施					
(2) 2)	○レベル 3PRA 手法の整備 リスク指標の検討					
	リスク評価手法の整備 代表プラントにおけるリスク評価 適切な時期にガイド等への反映の可否を検討					
(3) 1)	○放射性物質の環境拡散評価手法の整備 大気拡散モデル及び海洋拡散モデルの整備					
	陸上動態モデルの整備 モデル統合化及び解析					
(3) 2)	○遮蔽解析に係る技術的知見の整備 モンテカルロ法を用いた遮蔽解析手法及びその適用事例に関する調査					
	モンテカルロ法を用いた遮蔽解析に係る技術的知見の整備 点減衰核法及び S _N 法を用いた遮蔽解析に係る技術的知見の整備					
	原子炉制御室等居住性に係る被ばく評価に関する新規制基準への適合性評価					

7. 実施計画

<p>【平成 29 年度の実施内容】</p> <p>(1) 格納容器破損防止対策の評価手法の整備【分類③】</p> <p>1) 総合現象解析手法の整備 MELCOR を用いた 1F 事故進展解析及び無機ヨウ素の詳細評価モデルを整備する。</p> <p>2) 個別現象解析手法の整備 格納容器破損モードに係る水素混合解析手法の整備 (CFD)、鋼補強及び鉄筋コンクリートに関する構造応答解析モデルの検討。 国際共同プロジェクト (ヨウ素挙動 : BIP3、放射性物質放出挙動 : STEM2、水素挙動 : THAI3) に参加して、データを蓄積する。</p> <p>(2) 確率論的リスク評価に関連する評価技術の整備【分類③】</p> <p>1) 外部事象に係るレベル 2PRA 手法の整備 代表的な原子炉施設を対象にして重大事故等対処設備を考慮した格納容器イベントツリーを構築する。</p> <p>2) レベル 3PRA 手法の整備 国内 3 ループ PWR プラントを対象に、重大事故等対処設備を考慮したソースタームによるレベル 3PRA を行い、濃度、線量等のリスク指標を検討する。</p> <p>(3) 環境影響評価手法の整備【分類③】</p> <p>1) 放射性物質の環境拡散評価手法の整備 公開モデルを用いた三次元大気拡散モデル及び海洋拡散モデルを作成する。</p>
<p>【平成 30 年度の実施内容】</p> <p>(1) 格納容器破損防止対策の評価手法の整備【分類③】</p> <p>1) 総合現象解析手法の整備 MELCOR を用いたプラントの事故進展解析及びソースターム評価モデルを整備する。</p> <p>2) 個別現象解析手法の整備 水素混合解析手法の整備 (CFD)、格納容器等の静的・動的負荷に対する構造応答解析手法の整備を進める。 国際共同プロジェクト (BIP3、STEM2 及び THAI3) に参加して、データを蓄積する。</p> <p>(2) 確率論的リスク評価に関連する評価技術の整備【分類③】</p> <p>1) レベル 2PRA 手法の整備 前年度に引き続き、格納容器イベントツリーの見直しを行うとともに、格納容器イベントツリーの定量化ツールの機能改良を進める。</p> <p>2) レベル 3PRA 手法の整備 国内プラントを対象とした重大事故等対処設備を考慮したソースタームによるレベル 3PRA を行い、濃度、線量等のリスク指標を検討する。また、リスク指標を評価するためのレベル 3PRA 手法を検討する。</p> <p>(3) 環境影響評価手法の整備【分類③】</p> <p>1) 放射性物質の環境拡散評価手法の整備 前年度に引き続き、公開モデルを用いた三次元大気拡散モデル及び海洋拡散モデルの作成を進める。</p> <p>2) 遮蔽解析に係る技術的知見の整備 モンテカルロ法を用いた遮蔽解析手法及びその適用事例に関する調査結果を整理し、原子力発電所を対象にモンテカルロ法を用いた解析を行い、分散低減手法等の妥当性確認に係る技術的知見をとりまとめる。</p>
<p>【令和元年度の実施内容】</p> <p>(1) 格納容器破損防止対策の評価手法の整備【分類③】</p> <p>1) 総合現象解析手法の整備 MELCOR による国内 BWR 及び PWR プラントの事故進展解析及びソースターム評価を進めるとともに、SFP に関する事故進展に着目した解析評価手法の整備を進める。</p> <p>2) 個別現象解析手法の整備 水素燃焼解析手法の整備を進め、水素発生に関する知見の整備を開始するとともに、格納容器等の静的・動的負荷に対する構造応答解析の整備を進める。 国際共同プロジェクト (STEM2、THAI3、HYMERES2、PreADES 及び ARC-F) に参加して、データを蓄積する。</p> <p>(2) 確率論的リスク評価に関連する評価技術の整備【分類③】</p> <p>1) レベル 2PRA 手法の整備 前年度に改良した格納容器イベントツリーの定量化機能の確認のために、一貫解析の基本設計に基づくモデルにより条件付き格納容器機能喪失確率等のパイロット計算を行うとともに、地震時のレベル 2PRA 手法についての検討に着手する。</p> <p>2) レベル 3PRA 手法の整備 前年度に引き続き、リスク指標を評価するためのレベル 3PRA 手法を検討する。</p> <p>(3) 環境影響評価手法の整備【分類③】</p> <p>1) 放射性物質の環境拡散評価手法の整備 前年度に引き続き、公開モデルを用いた三次元大気拡散モデル及び海洋拡散モデルの作成を進めるとともに、陸上動態モデルの作成に着手する。</p> <p>2) 遮蔽解析に係る技術的知見の整備 原子力発電所を対象にモンテカルロ法を用いた解析を行い、モンテカルロ法を用いた遮蔽解析手法を原子炉施設に適用するための妥当性確認手法を検討する。</p>
<p>【令和 2 年度の実施内容】</p> <p>(1) 格納容器破損防止対策の評価手法の整備【分類③】</p> <p>1) 総合現象解析手法の整備 前年度に引き続き、MELCOR による国内 BWR 及び PWR プラントの事故進展解析及びソースターム評価を進めるとともに、SFP に関する事故進展に着目した解析評価手法の整備を進める。</p> <p>2) 個別現象解析手法の整備 水素燃焼解析手法の整備及び水素発生に関する知見の整備を進める。 国際共同プロジェクト (HYMERES2 及び ARC-F) に参加して、データを蓄積する。</p>

<p>(2) 確率論的リスク評価に関連する評価技術の整備【分類③】</p> <p>1) レベル 2PRA 手法の整備 前年度に引き続き、改良した格納容器イベントツリーの定量化機能を使って一貫解析のドラフト版評価モデルにより条件付き格納容器機能喪失確率等の計算を進めるとともに、内部事象に関するレベル 2-3PRA 間のインターフェイスの検討に着手する。また、外部事象として地震時のレベル 2PRA 手法の検討を進める。</p> <p>2) レベル 3PRA 手法の整備 前年度までに検討したリスク評価手法及び被ばく解析手法を用いて、代表プラントにおけるリスク評価を行い、希ガスの放出を前提とする等の放射性物質の放出を仮定した場合の環境への影響、防護措置による被ばく低減効果等に係る技術的知見をとりまとめる。</p> <p>(3) 環境影響評価手法の整備【分類③】</p> <p>1) 放射性物質の環境拡散評価手法の整備 前年度に引き続き、公開モデルを用いた陸上動態モデルの作成を進める。</p> <p>2) 遮蔽解析に係る技術的知見の整備 軽水炉を対象に点減衰核法を用いた解析を行い、遮蔽解析手法を原子炉施設に適用するための妥当性確認手法をとりまとめる。</p>
<p>【令和 3 年度の実施内容】</p> <p>(1) 格納容器破損防止対策の評価手法の整備【分類③】</p> <p>1) 総合現象解析手法の整備 前年度に引き続き、MELCOR による国内 BWR 及び PWR プラントの事故進展解析及びソースターム評価を進めるとともに、SFP に関する事故進展に着目した解析評価手法の整備を進める。</p> <p>2) 個別現象解析手法の整備 水素燃焼解析手法の整備を進めるとともに、「軽水炉の重大事故時における不確実さの大きな物理化学現象に係る解析コードの開発」(H29 年度～R4 年度)の成果に基づき炉外デブリの冷却性評価手法を整備する。 国際共同プロジェクト (ARC-F) に参加して、データを蓄積する。</p> <p>(2) 確率論的リスク評価に関連する評価技術の整備【分類③】</p> <p>1) レベル 2PRA 手法の整備 前年度に引き続き、レベル 2-3PRA 間のインターフェイスの検討を進めるとともに、レベル 1-3PRA まで一貫したモデルによる試解析に着手する。また、地震時のレベル 2PRA 手法の整備を進める。</p> <p>2) レベル 3PRA 手法の整備 前年度に引き続き、代表プラントにおけるリスク評価を行い、防護措置による被ばく低減効果等に係る技術的知見をとりまとめる。また、レベル 1 からレベル 3PRA までの一貫したモデルによるリスク評価を行うためのレベル 3PRA 手法を検討し、代表プラントにおける内部事象を対象としたレベル 3PRA 試解析に着手する。</p> <p>(3) 環境影響評価手法の整備【分類③】</p> <p>1) 放射性物質の環境拡散評価手法の整備 大気拡散、海洋拡散及び陸上動態の各モデルを一体化し、統合的評価手法をとりまとめるとともに、1F 事故を対象に解析を行い、環境への放射性物質の放出量を推定する。</p> <p>2) 遮蔽解析に係る技術的知見の整備 前年度に引き続き、原子力発電所を対象に S_N法を用いた解析を行い、遮蔽解析手法を原子炉施設に適用するための妥当性確認手法をとりまとめる。</p>
<p>【令和 4 年度の実施内容】</p> <p>(1) 格納容器破損防止対策の評価手法の整備【分類③】</p> <p>1) 総合現象解析手法の整備 前年度に引き続き、MELCOR による国内 BWR 及び PWR プラントの事故進展解析及びソースターム評価を進めるとともに、SFP に関する特有の事象に着目した事故進展解析を行う。</p> <p>2) 個別現象解析手法の整備 前年度に引き続き、水素燃焼解析手法の整備、炉外デブリの冷却性評価手法の整備を進める。</p> <p>(2) 確率論的リスク評価に関連する評価技術の整備【分類③】</p> <p>1) レベル 2PRA 手法の整備 前年度に引き続き、レベル 2-3PRA 間のインターフェイスの検討を進めるとともに、レベル 1-3PRA まで一貫したモデルによる試解析を実施し、放射性物質放出挙動評価の結果をとりまとめるとともに、格納容器機能喪失頻度、放射性物質の放出頻度及び放出量を整理する。</p> <p>2) レベル 3PRA 手法の整備 前年度に引き続き、代表プラントにおける内部事象を対象としたレベル 3PRA 試解析を実施し、リスクに及ぼす影響をとりまとめる。</p>
<p>8. 実施体制</p> <p>【シビアアクシデント研究部門における実施者】</p> <p>○西村 健 技術研究調査官 ○市川竜平 技術研究調査官 堀田亮年 主任技術研究調査官 森田彰伸 技術研究調査官 平等雅巳 技術研究調査官 新添多聞 技術研究調査官 宇津野英明 技術研究調査官 鈴木ちひろ 技術研究調査官 小城 烈 技術研究調査官 林田芳久 技術参与</p> <p>【前年度までの委託先】</p> <p>・ 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・・・実施項目 (1) 2)、(2)、(3)</p>

<p>9. 備考</p>	<p>レベル 2PRA 及びレベル 3PRA に係る研究を進める上で、次のレベル 1PRA 研究プロジェクトからの成果を反映する。 「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」(H29～R3 年度)</p> <p>格納容器等の静的・動的負荷に対する構造応答に係る評価手法の整備を進めるうえで、次のプロジェクトからの成果を反映する。 「軽水炉の重大事故の重要物理化学現象に係る実験」(H22～R1 年度)</p> <p>本プロジェクトのレベル 2PRA 手法の分析を通じて抽出された不確かさ要因等の研究課題に応じて、次のプロジェクトの計画を見直す。また、炉外デブリの冷却性評価手法の整備を進めるうえで、次のプロジェクトからの成果を引き継ぐ。 「軽水炉の重大事故時における不確かさの大きな物理化学現象に係る解析コードの開発」(H29～R4 年度)</p> <p>屋内退避などの防護措置による被ばく低減解析手法については、次のプロジェクトからの成果を反映する。 「緊急時対応レベル (EAL) に係るリスク情報活用等の研究」(H29～R1 年度)のうち、(2) 被ばく解析手法の整備</p>
--------------	--

研究計画

1. プロジェクト	12 原子力プラントの熱流動最適評価に関する安全研究	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	北野 剛司 主任技術研究調査官
2. カテゴリー・研究分野	【 原子炉施設 】 F) 熱流動・核特性	主担当者	小野 寛 技術研究調査官 金子 順一 技術研究調査官 江口 裕 技術研究調査官
3. 背景	<p>現行の規制制度においては、原子炉施設の安全設計が設置許可基準に適合していることを確認するため「運転時の異常な過渡変化」(A00)、「設計基準事故」(DBA)及び「重大事故に至るおそれがある事故」(BDBA)における原子炉の安全性の評価を要求している。BDBAについては最適評価手法を用いた評価が行われているのに対し、A00及びDBAの評価においては実炉の詳細な体系や複雑な現象を単純化した物理モデル及び仮想的な想定を用いているため、実炉の現実的な挙動を模擬しておらず、原子炉施設が有する安全余裕の定量評価及び改善点の検討につながりにくい。これらの課題を解決するためには、実炉の詳細な体系、複雑な現象等を現実的に予測できる最適評価コードを用いた最適評価手法及び不確かさを考慮した最適評価(BEPU: Best Estimate Plus Uncertainty)手法が不可欠である。近年の国内外の動向*を考慮すると、今後はA00及びDBAについてはBEPU手法、BDBAについては最適評価手法に関する知見を蓄積していくことが重要である。</p> <p>適合性審査において事業者が最適評価手法を適用してきた場合には、事業者が実施する安全性の評価手法の妥当性を確認する必要がある。そのためには、原子力規制庁としても確認のための視点を知見として蓄積しておく必要がある。すなわち、これまで原子力規制庁において整備した最適評価手法及びBEPU手法に加えて、これまで取得した知見に基づく事故時の重要な物理現象のモデル化、近年整備された最適評価コードへの要件を踏まえた系統的な検証及び妥当性確認(Verification and Validation: V&V)、BEPUにおける個々のモデルの不確かさ(幅、分布等)の正確な定量化等の課題を解決する必要がある。これらの課題解決により最適評価手法及びBEPU手法を高度化することで、事故等における実炉の安全余裕を定量的に評価して、さらに手法の改善点を検討することが期待できる。</p> <p>*IAEA 安全指針 SSG-2「原子力発電所に対する決定論的安全解析」、日本原子力学会標準「統計的安全評価の実施基準：2008」等</p>		
4. 目的	<p>最適評価手法及びBEPU手法における上記課題を解決し、安全解析における実炉の安全余裕の定量的な評価及び手法の改善点の検討を継続的に実施し、今後事業者が適合性審査等にBEPU手法を用いた際に備えて、知見を蓄積する。</p>		
5. 知見の活用先	<p>最適評価手法及びBEPU手法並びに整備した最適評価コードを用いた原子炉の安全解析に関して、将来的な規制の高度化(安全解析における実炉の安全余裕の定量的な評価及び手法の改善点の検討)への適用の要否の検討に資する。</p>		
6. 安全研究概要 (始期：R1年度) (終期：R4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うち以下の分類に基づき実施する。</p> <p>②審査等の際の判断に必要な新たな知見の収集・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) 事故時の物理現象に係る物理モデルの高度化【分類②④】</p> <p>事故等において重要であり、詳細な機構の把握及びモデル化が必要な以下の物理現象について、実験データ等に基づいて物理モデルを高度化する。高度化したモデルについて妥当性確認を行うとともに、実機を対象とした解析を実施して適用性を確認する。</p> <p>本プロジェクトでモデル高度化の対象とする物理現象は、前プロジェクト「事故時等の熱流動評価に係る実験的研究(H24～H30)」において、PIRT(Phenomena Identification and Ranking Table; 現象重要度ランク表)を作成し、PWR及びBWRの運転時の異常な過渡変化から重大事故に至るおそれがある事故までにおいて原子炉の各領域で想定される熱流動現象について、その重要度及び詳細機構のモデル化の充実度に従って抽出したものである。前プロジェクトにおいては、各現象について更に細分化した素過程の現象を把握できる詳細実験を実施しており、取得した実験データを本プロジェクトにおけるモデル高度化に活用する。</p> <p>モデルの高度化及び妥当性確認に必要な実験は、国内外の関係機関と協力して実施する。</p> <p>(a) 原子炉停止機能喪失(ATWS)時等における液膜ドライアウト及びリウエットに係る現象把握及びモデルの高度化</p> <p>ATWS等において燃料被覆管の熱伝達に影響することから重要な液膜の喪失(液膜ドライアウト)及びその後の液膜の再進展(リウエット)について、スパーサによる液滴附着効果及びリウエット時の先行冷却に係る詳細モデルの高度化を実施する。前プロジェクトでは、大気圧条件下で種々のスパーサを設置した試験体に液滴を注入した実験を実施して、スパーサ近傍の液膜厚さ分布、液滴の径及び速度分布、気相の速度分布等の詳細データを取得するとともに、大気圧条件下でリウエット先端の可視化実験を実施して、先行冷却機構に係る詳細データを取得した。これらの詳細データをモデル高度化に活用する。</p> <p>前プロジェクトにおいて整備した高圧高温の炉心熱伝達実験装置HIDRA(High pressure thermal hyDRAulic loop)を用いてATWS事象を模擬した過渡実験等を実施し、その実験データを用いて高度化モデルの妥当性を確認する。</p> <p>(b) 反応度投入事象(RIA)で想定されるボイド挙動に係る現象把握及びモデルの高度化</p>		

RIA（特に低圧サブクール条件）において核熱結合挙動（ボイド反応度フィードバック）に影響することから重要な出力急昇時の局所的なボイドの発生、横方向への伝播、凝縮について、前プロジェクトで取得した実験データに基づいた詳細解析手法を整備する。前プロジェクトでは、低圧サブクール沸騰についての実験を実施し、沸騰開始点、沸騰核密度、気泡離脱等に係る詳細データを取得した。また、RIAを想定した局所的な出力急昇による気泡の発生及びその横方向伝播挙動等について詳細データを取得した。引き続き実験データを拡充するとともに、これらの詳細データを活用してモデル高度化を行う。

(c) LOCA 等における現象に係る現象把握及びモデルの高度化

近年明らかになった LOCA 等発生時の高燃焼度燃料ペレットの細片化、その被覆管膨れ部への移動及び破裂部からの放出現象（FFRD）の燃料冷却性への影響を評価する。前プロジェクトで作成した簡易なモデルに代わる、FFRD 現象を機構論的に扱うモデルを燃料解析コードに組み込み、燃料被覆管の膨れ・破裂で生じる流路閉塞による燃料冷却性への影響を考慮できるようにモデルを高度化する。また、再冠水時（特に代替冷却水注入設備を想定した低速度の再冠水時）の液滴挙動、気液 3 次元挙動等の詳細現象についての知見を拡充するとともに、取得した知見に基づいて再冠水モデルを高度化する。なお、モデル高度化にあたっては、OECD/NEA/CSNI において予定されている再冠水実験に係るプロジェクトへ参加し、取得した詳細な実験データ等をモデル高度化に活用することを検討する。

(d) 蒸気発生器伝熱管複数破損（マルチ SGTR）及び重大事故に至るおそれのある事故時のプラント挙動の把握

地震による共通要因故障に伴って想定されるマルチ SGTR について、事象進展に影響を与える現象、事象収束のための機器、運転員操作等を把握する必要がある。前プロジェクトではマルチ SGTR の実験を実施したが、炉心の露出に至るようなより厳しいシナリオの実験データが不足している。また、重大事故に至るおそれのある事故の事象進展に影響を与える重要な現象について実験データを拡充する必要がある。これらの事象について、総合効果試験装置を用いた PWR のプラント挙動を模擬した総合効果実験を実施し、解析コードの妥当性を確認する。なお、本項目においては、OECD/NEA の国際共同研究プロジェクト（PKL）に参画して取得した、重大事故に至るおそれがある事象の安全解析手法に関する海外の最新知見及び実験データを活用する。

(e) プール内の温度成層化に係る現象把握及びモデルの高度化

BWR のサブプレッション・プール（S/C）へ長時間蒸気が流入した場合や使用済燃料プール（SFP）の冷却機能等が喪失した場合には、各プール内において温度成層化の発生が考えられる。一方、多くの安全評価では、単純化したモデル及び保守的な設定をして評価しており、プール内の温度成層化を考慮した詳細な評価は行われていない。本研究では、温度成層化を考慮して、プール内の水位低下、プール内の温度分布等への影響を把握するために、実験的な知見を取得し、温度成層化に係る熱流動現象を把握し、三次元熱流動を考慮したモデルの高度化を行う。

(2) 解析コードの V&V【分類④】

日本原子力学会の標準^{※※}等において整備されている系統的な V&V の方法論を参考に、平成 30 年度までに基盤部分（既存コード相当）を開発した AMAGI コード（国産システム解析コード）の V&V を実施する。検証においては、個別現象を対象とする解析により網羅的な機能確認を実施する。妥当性確認では、PIRT（Phenomena Identification and Ranking Table）及び評価マトリクスに基づいた実験解析により、解析コードの不確かさを評価する。また、V&V を通じて、AMAGI の計算速度、ロバスト性等について改良を実施する。なお、AMAGI の開発に当たっては、学会発表や本プロジェクトにおいて設置している産・学の専門家から構成する技術検討グループ等において専門家の意見を聴取し参考とする。

※※日本原子力学会標準「統計的安全評価の実施基準：2008」及び「シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン：2015」

(3) BEPU 手法の高度化及び安全解析への適用【分類②】

これまでに実施した PWR プラントの大破断 LOCA への BEPU 手法の適用等を通して、以下の項目について BEPU 手法を高度化する必要があることを抽出した。

- ・ 個々のモデルの不確かさ（幅、分布等）についての正確な定量化。
- ・ 特定パラメータに不確かさを考慮した場合の他パラメータへの影響の把握。

これらの課題について検討し、PWR プラントの大破断 LOCA、BWR プラントの発電機負荷遮断等を対象に BEPU を適用した安全解析を実施し、技術的知見を取りまとめる。

実施行程表

	R1年度	R2年度	R3年度	R4年度
(1) 事故時の物理現象に係る物理モデルの高度化	各物理モデル、解析手法等の高度化			▽論文投稿等「各物理モデルの開発」
	妥当性確認のための実験データ取得			-----
(2) 解析コードのV&V	V&VのためのPIRT等作成		AMAGI(国産システム解析コード)のV&V	
			▽論文投稿等 解析コードのV&V、 コード設計書等	
(3) BEPU手法の高度化及び安全解析への適用	BEPU手法の高度化		安全解析へのBEPU適用	
			▽論文投稿等 実プラントへの適用	

【R1年度の実施内容】

(1) 事故時の物理現象に係る物理モデルの高度化【分類②④】

(a) ATWS時等における液膜ドライアウト及びリウエットに係る現象把握及びモデルの高度化

- 前プロジェクトで取得した実験データに基づき、液膜ドライアウト/リウエットに係るモデルの高度化を検討する。
- HIDRAを用いて、スぺーサ無し試験体を対象に出力変動、流量変動等のATWS時に想定される熱流動挙動を模擬した過渡実験を実施し、高度化モデルの妥当性確認のための実験データを取得する。

(b) RIAで想定されるボイド挙動に係る現象把握及びモデルの高度化

- 前プロジェクトで実施したRIA時横方向ボイド挙動実験を対象に試解析を実施して、その適用性について課題を抽出する。

(c) LOCA等における現象に係る現象把握及びモデルの高度化

- FFRD現象を機構論的に扱うモデル及び流路閉塞による燃料冷却性への影響の評価手法について検討する。
- 国内又は国外で実施された再冠水実験の結果に基づいて燃料集合体内再冠水における液滴挙動、気液3次元挙動等の詳細現象の知見を拡充する。

(d) マルチSGTR及び重大事故に至るおそれのある事故時のプラント挙動の把握

- PWRのマルチSGTR時のプラント挙動に係る現象把握のため、炉心露出を想定した事象シナリオを模擬した総合効果実験を実施する。

(2) 解析コードのV&V【分類④】

AMAGIのV&Vに向けて、PIRT及び評価マトリクスを見直すとともに、AMAGIの基本性能の向上を図る。

(3) BEPU手法の高度化及び安全解析への適用【分類②】

モデルの不確かさ(幅、分布等)及びパラメータの不確かさの他パラメータへの影響について検討する。

【R2年度の実施内容】

(1) 事故時の物理現象に係る物理モデルの高度化【分類②④】

(a) ATWS時等における液膜ドライアウト及びリウエットに係る現象把握及びモデルの高度化

- R1年度に引き続き、液滴挙動モデル、リウエット時の先行冷却モデル等の高度化を継続する。
- HIDRAを用いて、丸セル形状のスぺーサを設定した試験体等を対象にATWS時に想定される熱流動挙動を模擬した過渡実験を実施し、高度化モデルの妥当性確認のための実験データを取得する。

(b) RIAで想定されるボイド挙動に係る現象把握及びモデルの高度化

- R1年度に実施した解析により抽出した課題を踏まえて、低圧時サブクール沸騰モデルの高度化を行う。また、燃料棒間クロスフロー、界面せん断力、界面熱伝達、スぺーサによる気泡の攪拌効果等の横方向ボイド挙動に係るモデル(以下、

7. 実施計画

- 「ボイド挙動モデル」という。)の開発及び高度化を検討する。
- ・ 強制対流サブクール沸騰の現象解明及びモデル高度化に向けて、素過程の詳細データ取得のための実験を行う。また、それら実験的知見を反映して、システム解析コード等を用いたRIA解析手法の高度化を検討する。
- (c) LOCA等における現象に係る現象把握及びモデルの高度化
- ・ R1年度に検討したFFRDモデルを燃料挙動解析コードに実装し、実験データ(ハルデン、スタズビック実験等)による妥当性確認を実施するとともに、流路閉塞による燃料冷却性への影響の評価手法について検討する。
 - ・ R1年度に引き続き、燃料集合体内再冠水挙動に係る知見の拡充及び既存モデルの課題抽出を継続する。
- (d) マルチSGTR及び重大事故に至るおそれのある事故時のプラント挙動の把握
- ・ PWRのマルチSGTR時のプラント挙動に係る現象把握のため、R1年度に実施した実験から事象想定を一部変更した総合効果実験を実施する。
- (e) プール内の温度成層化に係る現象把握及びモデルの高度化
- ・ 温度成層化に係る現象把握のため、プール内の温度場・速度場の情報を取得する計測器等を検討する。

(2) 解析コードのV&V【分類④】

AMAGIのV&Vとして以下を実施する。

- ・ R1年度において作成した評価マトリクスに基づいて抽出された、界面せん断力、壁面せん断力、界面熱伝達、壁面熱伝達等に係る個別効果実験を対象に試解析を実施する。ここでは対象とする実験の入力データ等を整備して解析を実施し、個々のモデルに係る不確かさを評価する。
- ・ AMAGIの機能確認及び解検証に向けて、個別現象を対象とする単純な体系の解析について入力データ等を整備して試解析を実施する。
- ・ 上記の解析結果に応じて、AMAGIの構成式を見直す。

(3) BEPU手法の高度化及び安全解析への適用【分類②】

モデルの不確かさ(幅、分布等)及びパラメータの不確かさの他パラメータへの影響について検討する。

【R3年度の実施内容】

(1) 事故時の物理現象に係る物理モデルの高度化【分類②④】

- (a) ATWS時等における液膜ドライアウト及びリウエットに係る現象把握及びモデルの高度化
- ・ 高度化した液滴挙動モデルおよび先行冷却モデルを燃料集合体内の熱流動挙動を評価できる詳細解析コードに実装して試解析を実施する。
 - ・ HIDRAを用いて、旋回羽形状のスペーサを設定した試験体等を対象にATWS時に想定される熱流動挙動を模擬した過渡実験を実施し、高度化モデルの妥当性確認に用いる実験データを取得する。
- (b) RIAで想定されるボイド挙動に係る現象把握及びモデルの高度化
- ・ R2年度に高度化した低圧時サブクール沸騰モデル及びボイド挙動モデルを詳細解析コードに実装してRIA時横方向ボイド挙動実験を対象に試解析を実施する。
 - ・ 強制対流サブクール沸騰の現象解明及び素過程のモデル化のための実験を継続するとともに、モデル高度化及び妥当性確認に向けて反応度事故時の過渡ボイド挙動試験等の模擬解析を実施する。
- (c) LOCA等における現象に係る現象把握及びモデルの高度化のため以下を実施する。
- ・ FFRDモデルの妥当性確認を継続するとともに、流路閉塞による燃料冷却性への影響の評価手法を整備する。
 - ・ 前年度までに取得した燃料集合体内再冠水挙動に係る知見に基づいて再冠水モデルを高度化する。
- (d) マルチSGTR及び重大事故に至るおそれのある事故時のプラント挙動の把握
- ・ PWRのECCS再循環機能喪失時のプラント挙動に係る現象把握のため、大破断LOCA及びECCS作動の状態からECCSを停止させたシナリオを模擬した総合効果実験を実施する。また、国際共同研究プロジェクトでの最新知見や実験データを活用して、原子炉システム解析コードの妥当性確認を実施する。
- (e) プール内の温度成層化に係る現象把握及びモデルの高度化
- ・ R2年度に検討した温度場・速度場の情報を取得する計測器等を用いて、二次元温度成層化実験を行い、温度成層化発生メカニズムについて検討を行う。

(2) 解析コードのV&V【分類④】

AMAGIのV&Vとして以下を実施する。

- ・ R1年度において作成した評価マトリクスに基づいて抽出された、PWR及びBWRにおけるA00、DBAを対象とした総合効果実験を対象に試解析を実施する。ここでは対象とする実験の入力データ等を整備して解析を実施し、当該事象に係るAMAGIの不確かさを評価する。また、解析結果に応じて、AMAGIの構成式を見直す。
- ・ 総合評価として、V&Vにおいて定量化したAMAGIの不確かさを整理し、各事象に対するAMAGIの適用性をまとめる。

(3) BEPU手法の高度化及び安全解析への適用【分類②】

実機プラントのA00、DBA事象に対してBEPU手法を適用した安全解析を実施する。

	<p>【R4年度の実施内容】</p> <p>(1) 事故時の物理現象に係る物理モデルの高度化【分類②④】</p> <p>(a) ATWS 時等における液膜ドライアウト及びリウエットに係る現象把握及びモデルの高度化</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ ATWS を模擬した過渡実験を対象とした解析による高度化モデルの妥当性確認を継続する。 ・ 実機の ATWS 解析を実施して、高度化モデルの適用性を確認する。 <p>(b) RIA で想定されるボイド挙動に係る現象把握及びモデルの高度化</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ これまでに整備した解析手法を用いて実機の RIA 事象を対象に解析を実施し、その適用性を確認する。 <p>(c) LOCA 等における現象に係る現象把握及びモデルの高度化のため以下を実施する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 高度化した FFRD モデル及び再冠水モデルを用いて、LOCA に係る総合効果実験及び実機を対象に解析を実施し、その適用性を確認する。 <p>(d) マルチ SGTR 及び重大事故に至るおそれのある事故時のプラント挙動の把握</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ PWR の ECCS 再循環機能喪失時のプラント挙動に係る現象把握のため、R3 年度に実施した実験より厳しい事象シナリオを模擬した総合効果実験を実施する。また、国際共同研究プロジェクトでの最新知見や実験データを活用して、原子炉システム解析コードの妥当性確認を実施する。 <p>(e) プール内の温度成層化に係る現象把握及びモデルの高度化</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 三次元温度成層化実験を行い、取得した実験データを用いて温度成層化モデルの検討を行う。 <p>(3) BEPU 手法の高度化及び安全解析への適用【分類②】</p> <p>実機プラントの AOO、DBA 事象に対して BEPU 手法を適用した安全解析を実施し、成果を取りまとめる。</p>
8. 実施体制	<p>【システム安全研究部門における実施者（主担当者には○を記載）】</p> <p>○小野 寛 技術研究調査官 ○金子 順一 技術研究調査官 ○江口 裕 技術研究調査官 塚本 直史 技術研究調査官 関根 将史 技術研究調査官</p> <p>【前年度までの委託先】</p> <p>・ 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 …… 実施項目 (1) a, d</p>
9. 備考	

研究計画

1. プロジェクト	13. 燃料健全性に関する規制高度化研究	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	北野 剛司 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	山内 紹裕 技術研究調査官
3. 背景	<p>(1) 外面割れ破損限界に関する技術的知見の拡充 過去に実施した、試験炉において試験燃料棒に出力過渡を与える試験（以下「出力急昇試験」という。）により、高燃焼度燃料被覆管の外面側に析出した水素化物を起点として初期亀裂が発生し、その後内側に向かって進展することにより生じる燃料破損（以下「外面割れ破損」という。）が観察された。現行の燃料健全性に関する判断根拠整備時には、外面割れ破損は観察されておらず、損傷モードに係る検討では考慮されていない。外面割れ破損が運転時の異常な過渡変化時に系統的に発生する損傷モードであるか否かについて検討するためには、その発生メカニズム・発生条件を明らかにする必要がある。そこで、平成 28 年度までに照射済燃料被覆管単体を用いた炉外試験を実施し、被覆管外面水素化物析出条件、初期亀裂発生応力、亀裂進展速度等に関するデータを取得した。炉内条件ではクリープによる被覆管応力緩和が生じるため、被覆管に作用する応力の経時変化等を解析し、上記炉外試験結果も踏まえ、炉内での外面割れ破損の発生条件を評価する。</p> <p>(2) 改良合金被覆管の照射成長試験 安全性向上の観点から、耐食性の改善を目的として、現行燃料から被覆管の合金元素含有量等を調整した PWR 及び BWR 改良型燃料^(*)の開発が国内外で進められている。海外では、その一部が既に実用化され、商業炉において利用が進んでおり、国内においても改良型燃料の導入が見込まれている。しかし、国内導入が見込まれる改良合金被覆管の照射に伴う伸び（照射成長）に関する知見の取得が十分ではない。海外においては、改良合金被覆管の異常な照射成長が報告されたことがあり、照射成長が大きい場合は燃料棒及び燃料集合体が過度に変形し、制御棒挿入性等に影響する可能性があるため、導入の際の適合性審査に向け、合金成分や被覆管の加工及び熱処理条件が照射成長挙動に及ぼす影響に関して技術的知見を取得することが必要である。そこで、海外での試験炉において、平成 30 年度まで改良合金被覆管試料の照射試験を実施し、照射成長に関するデータを取得した。改良合金被覆管の種類により、照射成長に違いが見られたために、その原因を調査するため、材料組織観察等を実施する。</p> <p>(*) 「実用発電用原子炉に使用する燃料体の技術基準に関する規則」（平成 25 年 6 月 28 日）第 8 条に被覆管合金元素含有量に関する JIS 規格が引用されているが、この JIS 規格の範囲を超えて合金元素含有量を変更した新合金被覆管の採用により、主に通常運転時の燃料被覆管の腐食や水素吸収による劣化、燃料棒内圧の上昇等の抑制を図った燃料</p>		
4. 目的	<p>(1) 外面割れ破損限界に関する技術的知見の拡充 現行の燃料健全性に関する当該判断根拠の技術的妥当性の確認に資するため、外面割れ破損の発生メカニズム・発生条件等に関する技術的知見を拡充する。</p> <p>(2) 改良合金被覆管の照射成長試験 適合性審査における判断の技術的根拠として活用するため、合金成分や被覆管の加工及び熱処理条件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。</p>		
5. 知見の活用先	<p>(1) 外面割れ破損限界に関する技術的知見の拡充 得られた成果は、必要に応じて適合性審査、現行の燃料健全性に関する当該判断根拠の技術的妥当性の確認に資する。</p> <p>(2) 改良合金被覆管の照射成長試験 得られた知見は、適合性審査における判断の技術的根拠として活用する。</p>		
6. 安全研究概要 (始期：H19 年度) (終期：R2 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。） 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>(1) 外面割れ破損限界に関する技術的知見の拡充【分類①】 ・出力急昇試験 これまで、照射済燃料被覆管単体を用いた炉外での過渡模擬試験により、被覆管外面水素化物析出条件、初期亀裂発生応力、亀裂進展速度等に関するデータを取得した。これら被覆管単体での炉外試験結果に基づき、過渡時燃料棒線出力と被覆管に発生する応力、外面割れ破損に至るまでの時間等を解析的に評価し、外面割れ発生条件に関する技術的知見を拡充する。なお、照射済燃料棒を用い、燃料棒体系で試験炉（ハルデン炉、ノルウェー）における出力急昇試験を行うこととしていたが、ハルデン炉の廃止を受けて試験は中断した。</p>		

(2) 改良合金被覆管の照射成長試験【分類②】

米国や仏国で既に導入されている改良燃料被覆管であるM5合金被覆管等を試験研究炉においてPWR被覆管温度条件（300～320℃）を模擬した環境で約7年間（12照射サイクル）照射し（高速中性子照射量約 $8 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ ）、試料の長さ、重量、外観等の変化と照射量との関係性を評価することによって、M5合金被覆管等の照射成長に関するデータを取得する。

実施行程表

	平成29年度	平成30年度	令和元年度	令和2年度
(1) 外面割れ破損限界に関する技術的知見の拡充	出力急昇試験準備		出力過渡時の被覆管応力、外面割れ破損に至るまでの時間等の解析的評価	論文投稿 得られた成果の総合評価
(2) 改良合金被覆管の照射成長試験	試験炉における照射試験 ▼ 中間試験による照射成長データ取得		論文投稿	論文投稿 得られた成果の総合評価

【平成19～23年度の実施内容】

(1) 外面割れ破損限界に関する技術的知見の拡充【分類①】

- 照射済燃料被覆管単体を用いた炉外での過渡模擬試験により以下の知見を得た。
 - 燃料被覆管の外面近傍に水素化合物が析出する線出力と時間の関係
 - 初期亀裂発生応力
 - 発生した初期亀裂の進展速度
- 外面割れ破損の発生機構をモデル化した。
- 試験燃料棒をハルデン炉に輸送し、平成23年度に出力急昇試験を実施する計画としていたが、試験燃料棒を海外に輸送するための船積み港が東北地方太平洋沖地震で被災したため計画を中断した。

【平成24年度の実施内容】

(1) 外面割れ破損限界に関する技術的知見の拡充【分類①】

東北地方太平洋沖地震で被災した船積み港が復旧途上であったため、出力急昇試験計画の中断を継続した。

【平成25年度の実施内容】

(1) 外面割れ破損限界に関する技術的知見の拡充【分類①】

東北地方太平洋沖地震で被災した船積み港が復旧途上であったため、出力急昇試験計画の中断を継続した。

(2) 改良合金被覆管の照射成長試験【分類②】

試験研究炉（ハルデン炉（ノルウェー））において、M5合金被覆管等の改良燃料被覆管を対象として照射成長試験を継続し、照射成長データを取得した。

【平成26年度の実施内容】

(1) 外面割れ破損限界に関する技術的知見の拡充【分類①】

出力急昇試験再開を目指し、国内試験炉での実施も含め、試験可能な試験炉の状況及び試験燃料棒輸送上の制約等を調査、検討した。

(2) 改良合金被覆管の照射成長試験【分類②】

試験研究炉（ハルデン炉（ノルウェー））において、M5合金被覆管等の改良燃料被覆管を対象として照射成長試験を継続し、照射成長データを取得した。

【平成27年度の実施内容】

(1) 外面割れ破損限界に関する技術的知見の拡充【分類①】

試験炉の状況及び試験燃料棒輸送上の制約等の調査及び検討を継続するとともに、試験燃料棒の輸送準備として、粗切断済みの照射済燃料棒の定尺切断、乾燥処理、収納容器への装荷、収納容器内のHeガス置換及び密封溶接等を行った。

(2) 改良合金被覆管の照射成長試験【分類②】

試験研究炉（ハルデン炉（ノルウェー））において、M5合金被覆管等の改良燃料被覆管を対象として照射成長試験を継続し、照射成長データを取得した。

【平成28年度の実施内容】

(1) 外面割れ破損限界に関する技術的知見の拡充【分類①】

出力急昇試験をハルデン炉で実施することとし、試験に用いる燃料棒の輸送準備として、輸送船の手配、必要な許認可手続き等を行った。

(2) 改良合金被覆管の照射成長試験【分類②】

試験研究炉（ハルデン炉（ノルウェー））において、M5合金被覆管等の改良燃料被覆管を対象として照射成長試験を継続し、照

7. 実施計画

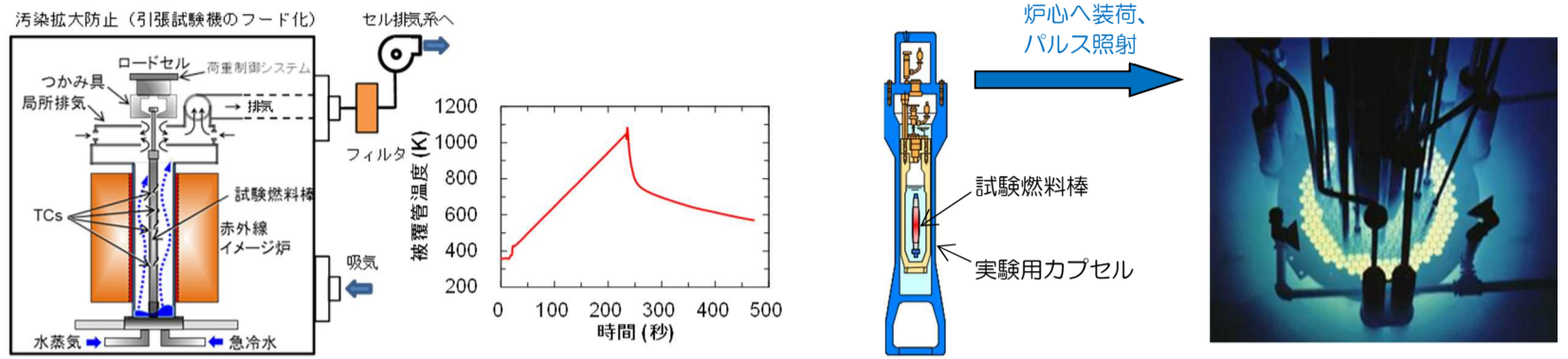
	<p>射成長データを取得した。</p> <p>【平成 29 年度の実施内容】</p> <p>(1) 外面割れ破損限界に関する技術的知見の拡充【分類①】 ハルデン炉までの燃料棒の輸送の準備として、輸送船の手配、必要な許認可手続き等を継続した。</p> <p>(2) 改良合金被覆管の照射成長試験【分類②】 試験研究炉（ハルデン炉（ノルウェー））において、M5 合金被覆管等の改良燃料被覆管を対象として照射成長試験を継続し、照射成長データを取得した。</p> <p>【平成 30 年度の実施内容】</p> <p>(1) 外面割れ破損限界に関する技術的知見の拡充【分類①】 炉外試験で得られたデータを取りまとめる。また、出力過渡時の被覆管応力、外面割れ破損に至るまでの時間等の解析的評価に着手した。</p> <p>(2) 改良合金被覆管の照射成長試験【分類②】 照射成長試験後の M5 合金被覆管等の改良燃料被覆管を対象として、照射成長挙動を評価した。</p> <p>【令和元年度の実施内容】</p> <p>(1) 外面割れ破損限界に関する技術的知見の拡充【分類①】 出力過渡時の被覆管応力、外面割れ破損に至るまでの時間等の解析的評価を継続した。</p> <p>(2) 改良合金被覆管の照射成長試験【分類②】 照射成長試験後の M5 合金被覆管等の改良燃料被覆管を対象として、照射成長挙動を評価した。 さらに、照射後試験を実施するために、照射成長試験片を国内研究機関へ輸送した。</p> <p>【令和 2 年度の実施内容】</p> <p>(1) 外面割れ破損限界に関する技術的知見の拡充【分類①】 プロジェクトで得られた結果を取りまとめ、総合評価を実施する。</p> <p>(2) 改良合金被覆管の照射成長試験【分類②】 国内へ輸送された照射成長試験片に対して照射後試験を実施し、プロジェクトで得られた結果を取りまとめ、総合評価を実施する。</p>
8. 実施体制	<p>【システム安全研究部門における実施者】</p> <p>北野 剛司 主任技術研究調査官 ○山内 紹裕 技術研究調査官 秋山 英俊 技術研究調査官 小澤 正明 技術研究調査官</p> <p>【前年度までの委託先】</p> <p>・国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・・・実施項目（2）</p>
9. 備考	

研究計画

1. プロジェクト	14. 事故時炉心冷却性に対する燃料破損影響評価研究	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	北野 剛司 主任技術研究調査官
2. カテゴリー・研究分野	【原子力施設】G)核燃料	主担当者	山内 紹裕 技術研究調査官
3. 背景	<p>改良型燃料が国内に導入される際の適合性審査の判断根拠となる技術的知見の取得及び高燃焼度で顕在化する事故時燃料挙動の有無の確認のため、海外商業炉において高燃焼度まで照射された改良型燃料を用いて、平成30年度までに試験研究を実施してきた。そこで実施した反応度事故（RIA）模擬試験及び国際共同プロジェクトとして海外で実施された冷却材喪失事故（LOCA）模擬試験において、炉心冷却性に対する影響が懸念される、従来とは異なる燃料破損挙動が観察された。「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（平成二十五年原子力規制委員会規則第五号）」（以下「規則」という。）の「解釈」において引用され、適合性審査に用いられている燃料に関する判断基準を示した指針類は、旧原子力安全委員会が策定当時の知見に基づき、決定あるいは了承したものである。そのため、指針類策定時には観察されていなかった燃料破損挙動や現在まで十分に検討が進められていない燃料損傷挙動について調べ、審査等の際の判断に必要な知見を取得する必要がある。</p>		
4. 目的	<p>設計基準事故（以下「事故」という。）時及びその後の炉心の冷却性等の安全性維持に関して、現行指針類策定時には観察されていなかった燃料破損挙動等の新しい知見を取り込んだより確かな規制のために、事故時の燃料ペレットの細片化挙動、被覆管破損挙動、被覆管破損に伴う燃料ペレット片の燃料棒外放出挙動などに係る知見を取得する。また、事故であるLOCAの基準は、被覆管の著しい脆化の防止を目的としたものであるが、現在はこのLOCA基準を炉心の著しい損傷開始の判断基準として、炉心損傷拡大防止策の有効性確認に用いている。しかし、実際に炉心の著しい損傷が開始する条件は明確にされておらず、また、LOCA基準より高温であると考えられるため、LOCA基準を超えるような高温条件での燃料損傷挙動について知見を取得する。</p>		
5. 知見の活用先	<p>本プロジェクトで得られた知見は、高燃焼度燃料を含む炉心の事故時の安全性に関して規制判断を行う際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及びRIA等に関する指針類の見直しの要否の検討に活用する。</p>		
6. 安全研究概要 (始期：R1年度) (終期：R5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うち以下の分類に基づき実施する。</p> <ul style="list-style-type: none"> 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。） ④ 技術基盤の構築・維持（以下「分類④」という。） <p>(1) 冷却材喪失事故(LOCA)時燃料破損が炉心冷却性に与える影響に関する研究（分類①②④）</p> <p>指針類に基づく現行のLOCA安全評価では、被覆管の膨れ破裂に伴う燃料棒内の燃料ペレット片の集積及び燃料棒外への燃料ペレット片の放出を想定していない。また、規則では、事故収束後も炉心冷却機能の維持を求めているが、LOCA後長期冷却中の燃料形状維持に関する研究はほとんど実施されておらず、地震に対する燃料形状維持の判断基準が明確となっていない。そこで、LOCA時の燃料ペレット片の燃料棒外への放出等の影響やLOCAを経験した燃料の機械特性を明らかにするために、以下の研究を実施し、得られた結果をもとにLOCA時及びLOCA後の炉心冷却性維持等に関する基準改定や基準制定の要否について検討する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・LOCA時の燃料ペレット細片化による燃料棒内再配置及び燃料ペレットの棒外放出に関するデータを取得するために、欧州の商用炉にて高燃焼度まで使用された改良型燃料のLOCA模擬試験等を実施する。 ・LOCA後の燃料の耐震性等に関して評価を行うために、LOCA時の温度履歴を経験した燃料被覆管及び燃料集合体部材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。 <p>(2) 反応度投入事故(RIA)時燃料破損が炉心安全性に与える影響に関する研究（分類①②④）</p> <p>RIA評価に関する指針類では、策定当時の知見に基づき、燃料棒の内外圧差に応じて燃料の許容設計限界を、また、燃焼度に応じて、ペレット-被覆管機械的相互作用(PCMI)破損しきい値の目安を定め、運転時の異常な過渡変化時には許容設計限界及びPCMI破損しきい値を越えないこと、また、事故時にはそれらを用いて破損する燃料棒の本数を算定し、原子炉の停止能力及び冷却性並びに原子炉圧力容器の健全性を損なわないことを確認することを求めている。現行指針類においてはPCMI破損しきい値を燃料の燃焼度に着目して定めているが、平成30年度までに実施した高燃焼度燃料を対象とした一部のRIA模擬試験において、単に燃焼度だけでなく被覆管の状態や燃料ペレットの種類に依存すると考えられる破損形態の変化及び破損限界の低下が観察されていることから、それらの原因を明らかにして、必要に応じて、指針類に反映させる必要がある。このため、以下の研究を実施する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・燃料破損形態の変化及び破損限界低下への寄与が推測される因子（製造仕様、ベース照射条件、添加物やPuスポットの介在によるペレットのFPガス挙動の変化、燃焼度、試験時温度）について、それぞれの影響の有無が個別に確認可能となるよう、欧州の商用炉にて高燃焼度まで使用された改良型燃料から試験燃料を選定するとともに、適切に試験条件を設定して原子炉安全性研究炉(NSRR)において試験を行い、破損挙動に生じた変化の原因解明及び各因子の影響評価を行う。 ・NSRRでのRIA試験時の燃料挙動と商用炉で想定されるRIA時の燃料挙動とを比較し、NSRRで取得された試験結果の商用炉への適用性について解析評価する。 ・RIA時の燃料変形を模擬した被覆管の多軸引張試験等を実施し、応力条件に依存した破損形態の変化等に関する知見を得て、NSRR実験での応力条件の把握や燃料特性に依存した破損挙動の評価等を行う。 <p>(3) 事故時の燃料損傷状態変化に関する研究（分類①②④）</p> <p>規則では、重大事故等への拡大防止として炉心の著しい損傷の防止、並びに、著しい炉心損傷に至った場合には原子炉格納容器の破損の防止を求めている。また、規則の解釈では、炉心の著しい損傷防止の要件として、LOCA基準（被覆管最高温度$\leq 1200^{\circ}\text{C}$、被覆管酸化量$\leq 15\%\text{ECR}$）を示している。すなわち、現状の規則では、設計基準事故に関する基準を炉心の著しい損傷が開始する条件とし</p>		

ているが、これは燃料の著しい損傷が開始する条件が十分に把握されていないためである。そこで、以下に示す試験研究を実施して、LOCA 基準を越えるような高温条件での燃料損傷挙動について知見を拡充する。

- ・ 事故時に想定される高温での燃料ペレットや被覆管の状態（燃料棒の損傷状態等）を確認するために試験炉での加熱実験を行い、燃料・材料間で生じた反応物の分析等を行う。また、試験炉での実験に必要な実験技術開発を実施する。
- ・ 上記の実験結果及び計算コードを利用した燃料挙動解析を実施し、事故時に燃料棒が形状喪失する温度等の条件を評価する。



(a) 試験装置の概略図 (b) 試験時の温度履歴の例 (a) 試験装置の概略図 (b) RIA 模擬試験用研究炉 (NSRR)

LOCA 模擬試験の概要

RIA 模擬試験の概要

実施行程表

	令和元年度	令和2年度	令和3年度	令和4年度	令和5年度
(1) 冷却材喪失事故(LOCA)時燃料破損が炉心冷却性に与える影響に関する研究			LOCA 模擬試験の実施		論文投稿▽
	LOCA 模擬試験装置のホットセル内設置		LOCA 模擬試験後の分析・評価		
	LOCA 模擬試験用燃料棒の製作		LOCA 模擬試験により得られたデータを入力情報とし、計算コードによる解析実施		
	燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験の実施				
	燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験後の分析・評価				
被覆管曲げ疲労試験装置の整備	水素添加被覆管の製作				
		LOCA 時の温度履歴を経験した燃料被覆管の機械試験			
			機械試験後の分析・評価		総合評価
(2) 反応度投入事故(RIA)時燃料破損が炉心安全性に与える影響に関する研究			▽学会発表 論文発表▽	▽論文発表	論文投稿▽
	RIA 模擬試験の実施及び準備	RIA 模擬試験、試験前後の照射後試験			
	被覆管多軸引張試験準備	被覆管多軸引張試験	被覆管多軸引張試験及び試験片分析		
		被覆管中に析出した水素化物の機械的性質の測定			
RIA 予備解析により試験条件を決定	RIA 解析実施			総合評価	
(3) 事故時の燃料損傷状態変化に関する研究					論文投稿▽
	試験炉を用いた試験条件の検討及び試験準備	燃料ペレットや被覆管の状態（燃料棒の損傷状態等）を確認するための試験準備及び実験技術開発			
			燃料ペレットや被覆管の状態（燃料棒の損傷状態等）を確認するための照射試験、照射後試験		
	計算コードを利用した燃料挙動解析評価の検討	計算コードを利用した燃料挙動解析評価の検討			総合評価

7. 実施計画	<p>【令和元年度の実施内容】</p> <p>(1) 冷却材喪失事故 (LOCA) 時燃料破損が炉心冷却性に与える影響に関する研究 (分類①②④)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ LOCA 模擬試験の準備として、LOCA 模擬試験装置をホットセルに設置する。並行して LOCA 模擬試験に供する試験燃料棒を製作する。 ・ 燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験を実施し、細片化発生しきい値の評価に必要なデータを取得する。 ・ LOCA 時の昇温及び急冷を経験した燃料被覆管に対し、地震時に燃料棒に加わる荷重を適切に模擬し、繰り返し荷重負荷できる曲げ試験装置を整備する。 <p>(2) 反応度投入事故 (RIA) 時燃料破損が炉心安全性に与える影響に関する研究 (分類①②④)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ RIA 模擬試験及びその照射後試験を実施し、燃料破損条件を確認する。また計算コードを用いた解析を実施し、実験結果を分析及び次年度以降の試験条件を検討する。 ・ RIA 模擬機械特性試験の準備として、水素吸収した試料の作製を進める。 <p>(3) 事故時の燃料損傷状態変化に関する研究 (分類①②④)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 事故時に想定される高温での燃料ペレットや被覆管の状態 (燃料棒の損傷状態等) を確認するための試験炉を用いた試験条件の検討及び試験準備を実施する。
	<p>【令和2年度の実施内容】</p> <p>(1) 冷却材喪失事故 (LOCA) 時燃料破損が炉心冷却性に与える影響に関する研究 (分類①②④)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 高燃焼度燃料被覆管を対象に LOCA 模擬試験を実施する。燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験で取得した細片化しきい値に関するデータを入力情報として LOCA 模擬試験の試験条件を設定する。 ・ 令和元年度に引き続き、燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験を実施する。また、当該試験後の燃料ペレットについてミクロ組織観察等の分析・評価を実施する。 ・ LOCA 時の温度履歴を経験した非照射の燃料被覆管を対象に、曲げ試験装置を用いた機械試験を実施する。また、急冷によって被覆管中に新しく析出した相の機械的性質を評価するための試験を実施する。さらに、高燃焼度燃料を模擬した水素添加被覆管を製作する。 <p>(2) 反応度投入事故 (RIA) 時燃料破損が炉心安全性に与える影響に関する研究 (分類①②④)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ RIA 模擬試験及びその照射後試験を実施し、従来と異なる燃料破損挙動が生じる原因についてデータを取得する。また計算コードを用いた解析を実施し、FP ガス挙動と燃料破損の相関を分析する。 ・ 水素吸収した試料を対象とした RIA 模擬機械特性試験を実施し、破損限界に関するデータを取得する。また、被覆管中に析出した水素化物の機械的性質を評価するための試験を実施する。 <p>(3) 事故時の燃料損傷状態変化に関する研究 (分類①②④)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 事故時に想定される高温での燃料ペレットや被覆管の状態 (燃料棒の損傷状態等) を確認するための試験準備及び実験技術開発を実施する。 ・ 計算コードを利用した燃料挙動解析評価の検討を実施する。
	<p>【令和3年度の実施内容】</p> <p>(1) 冷却材喪失事故 (LOCA) 時燃料破損が炉心冷却性に与える影響に関する研究 (分類①②④)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 令和2年度に引き続き、高燃焼度燃料被覆管を対象とした LOCA 模擬試験を実施する。また、同試験後の燃料被覆管を対象にミクロ組織観察等の分析・評価を実施する。 ・ 令和2年度に引き続き、燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験及び同試験後の分析・評価を実施する。 ・ LOCA 模擬試験により得られた細片化ペレットの膨れ部における充填率等のデータを入力情報として、事故時燃料挙動解析コードを利用した LOCA 時の燃料棒の熱過渡解析に着手する。 ・ LOCA 時の温度履歴を経験した非照射の燃料被覆管 (水素添加被覆管を含む) を対象に、曲げ試験装置を用いた機械試験を実施する。また、同機械試験後の被覆管を対象にミクロ組織観察等の分析・評価を実施する。さらに急冷によって被覆管中に析出した相の機械的性質を評価するための試験を実施する。 <p>(2) 反応度投入事故 (RIA) 時燃料破損が炉心安全性に与える影響に関する研究 (分類①②④)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 令和2年度に引き続き、RIA 模擬試験及びその照射後試験を実施し、従来と異なる燃料破損挙動が生じる原因についてデータを取得する。過年度に実施した試験との比較及び計算コードを用いた解析を実施し、破損メカニズムを検討する。 ・ 令和2年度に引き続き、水素吸収した試料を対象とした RIA 模擬機械特性試験を実施し、破損限界に関するデータを取得する。また、試験後試料について外観観察及び断面金相観察等により破損形態に関するデータを取得する。さらに、被覆管中に析出した水素化物の機械的性質を評価するための試験を実施する。 <p>(3) 事故時の燃料損傷状態変化に関する研究 (分類①②④)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 事故時に想定される高温での燃料ペレットや被覆管の状態 (燃料棒の損傷状態等) を確認するための実験技術開発を実施する。 ・ 事故時に想定される高温での燃料ペレットや被覆管の状態 (燃料棒の損傷状態等) を確認するための照射試験、照射後試験を実施する。 ・ 計算コードを利用した燃料挙動解析評価の検討を実施する。
	<p>【令和4年度の実施内容】</p> <p>(1) 冷却材喪失事故 (LOCA) 時燃料破損が炉心冷却性に与える影響に関する研究 (分類①②④)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 令和3年度に引き続き、高燃焼度燃料被覆管を対象とした LOCA 模擬試験及び同試験後の分析・評価を実施する。 ・ 令和3年度に引き続き、燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験及び同試験後の分析・評価を実施する。 ・ 令和3年度に引き続き、事故時燃料挙動解析コードを利用した LOCA 時の燃料棒の熱過渡解析を実施する。 ・ 令和3年度に引き続き、LOCA 時の温度履歴を経験した非照射の燃料被覆管 (水素添加被覆管を含む) を対象とした機械試験及び同機械試験後の分析・評価を実施する。

	<p>(2) 反応度投入事故 (RIA) 時燃料破損が炉心安全性に与える影響に関する研究 (分類①②④)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・令和3年度に引き続き、RIA 模擬試験及びその照射後試験並びに計算コードによる解析を実施し、従来と異なる燃料破損のメカニズムを検討する。 ・令和4年度までの試験で取得したデータを用いて NSRR での RIA 試験時の燃料挙動と商用炉で想定される RIA 時の燃料挙動との違いについて評価を行う。 ・令和3年度に引き続き、水素吸収した試料を対象とした RIA 模擬機械特性試験を実施し、破損限界・形態に関するデータを取得する。また、得られたデータを評価し、解析コードに組み込む。 <p>(3) 事故時の燃料損傷状態変化に関する研究 (分類①②④)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・令和3年度に引き続き、事故時に想定される高温での燃料ペレットや被覆管の状態 (燃料棒の損傷状態等) を確認するための照射試験、照射後試験を実施する。 ・令和3年度に引き続き、計算コードを利用した燃料挙動解析評価の検討を実施する。
	<p>【令和5年度の実施内容】</p> <p>(1) 冷却材喪失事故 (LOCA) 時燃料破損が炉心冷却性に与える影響に関する研究 (分類①②④)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・令和4年度までに取得した試験データ、及び解析データ等を基に、LOCA 時の燃料破損が燃料棒の冷却可能形状の維持に及ぼす影響に関する総合評価を実施する。 ・令和4年度までに取得した試験データを基に、LOCA 時及び LOCA 後の燃料集合体冷却性維持に係る総合評価を実施する。 <p>(2) 反応度投入事故 (RIA) 時燃料破損が炉心安全性に与える影響に関する研究 (分類①②④)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・令和4年度に引き続き、RIA 模擬試験、試験前後の照射後試験及び解析を実施し、これまでに取得した試験データ及び解析データ等とあわせて、燃料材料条件等が RIA 時の燃料被覆管破損限界・形態に及ぼす影響に関して総合評価を実施する。 <p>(3) 事故時の燃料損傷状態変化に関する研究 (分類①②④)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・令和4年度までに取得した試験データ、及び解析データ等を基に、LOCA 基準を越えるような高温条件において形状喪失する温度等の条件を評価する。
8. 実施体制	<p>【システム安全研究部門における実施者 (主担当者には○を記載)】</p> <p>北野 剛司 主任技術研究調査官 ○山内 紹裕 技術研究調査官 秋山 英俊 技術研究調査官 小澤 正明 技術研究調査官</p> <p>【前年度までの委託先】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・・・実施項目 (1)、(2)、(3) <p>【共同研究先】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・・・実施項目 (1)、(2)
9. 備考	

研究計画

1. プロジェクト	15. 重大事故時の原子炉格納容器の終局的耐力評価に関する研究	担当部署	技術基盤グループ システム安全研究部門、シビアアクシデント研究部門、地震・津波研究部門
		担当責任者	小嶋 正義 主任技術研究調査官
2. カテゴリー・研究分野	【原子炉施設】 H) 材料・構造	主担当者	中村 均 技術研究調査官 堀田 亮年 主任技術研究調査官 森谷 寛 技術研究調査官
3. 背景	<p>実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（平成 25 年原子力規制委員会規則第 5 号）では、重大事故等の拡大の防止として、原子炉格納容器（以下「格納容器」という。）の破損を防止するために必要な措置を要求し、その解釈の中で、格納容器の破損防止対策の有効性評価として、重大事故時の圧力・温度が、格納容器の機能を維持できる限界圧力・温度を下回ることを確認を求めている。</p> <p>これまでに、重大事故時の格納容器機能喪失を想定した格納容器の終局的耐力^{*1}に係る主要な試験としては、財団法人原子力発電技術機構による一連の縮尺試験体の実証試験^{*2}（以下「NUPEC 構造挙動試験」という。）があり、代表的な型の格納容器の終局的耐力に係る基礎データを提供している。これらの試験結果は、格納容器の終局的耐力に余裕があることを示しているが、溶接部を含む構造不連続部、金属ライナ等の破損に関する試験データを拡充することにより、局部破損を含む終局的耐力評価の信頼性をより高めることができる。</p> <p>また、近年になって、海外の規制機関、国内の学会等で、格納容器の重大事故時の終局的耐力評価のための指針や標準^{*3}が整備されつつある。これらの指針・標準では、弾性構造解析に基づく建設時の設計解析法とは異なり、非線形構造解析により大ひずみ域の構造挙動を予測するとともに、局部的な破損モードを考慮した評価手法が導入されている。</p> <p>今後、格納容器の安全裕度評価に係る技術的知見を拡充するために、局部破損等の試験データの取得を進めるとともに、大ひずみ域の構造挙動や破損評価法、電気ペネトレーションやフランジ等機械接合部の閉じ込め性等に係る終局的耐力評価手法の検討が重要である。</p> <p>*1) ここでは、評価対象が所定の機能を保つことができる最終的な耐力をいう。 *2) 財団法人原子力発電技術機構「原子炉格納容器信頼性実証事業」（昭和 62 年度～平成 14 年度） *3) Regulatory Guide 1.216 “Containment Structural Integrity Evaluation for Internal Pressure Loadings above Design-Basis Pressure”，2010. 等</p>		
4. 目的	重大事故時の格納容器の構造不連続部の局部破損及び電気ペネトレーション・機械接合部等からの漏えい等に対する終局的耐力の評価手法の検討と限界条件の把握を行う。		
5. 知見の活用先	<p>本研究の成果によって、局部破損、局所環境等の影響が明らかになった場合には、局部破損の評価手法や局所環境の影響評価手法等を提示し、将来的なガイド類の改訂に資する。</p> <p>なお、格納容器の終局的耐力評価手法は、上記に加えて、重大事故時の格納容器の破損防止対策の有効性評価の妥当性確認だけでなく、確率論的リスク評価の格納容器機能喪失モードの設定等にも資することができる。</p>		
6. 安全研究概要 (始期: H29 年度) (終期: R3 年度)	<p>本研究は、「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。） ② 審査等の際の判断に必要な新たな知見の収集・整備（以下「分類②」という。）</p> <p>(1) 評価手法の検討・解析【分類①②】</p> <p>実機相当モデルの終局的耐力評価に先立ち、評価部位を抽出し、適切な評価手法を検討する。また要素試験の計画立案及び結果の分析のための解析を行うとともに、要素試験及び解析の結果をもとに、評価手法を改良する。</p> <p>a) 評価部位の抽出・関連技術知見の取得</p> <p>国内 BWR 及び PWR の代表的な格納容器において相対的に弱い部位を評価部位として抽出する。評価部位には、重大事故時の過圧・過温下で、応力・ひずみが集中する構造不連続部とフランジや機器ハッチのような機械接合部が含まれる。想定される評価部位と破損モードの例を BWR MARK-II 型格納容器及び PWR のプレストレストコンクリート製格納容器（以下「PCCV」という。）について、図 1 に示す。また格納容器の終局的耐力評価・試験に係る技術資料、局部破損等に関わる技術資料を収集・分析し、技術知見を取得する。</p>		

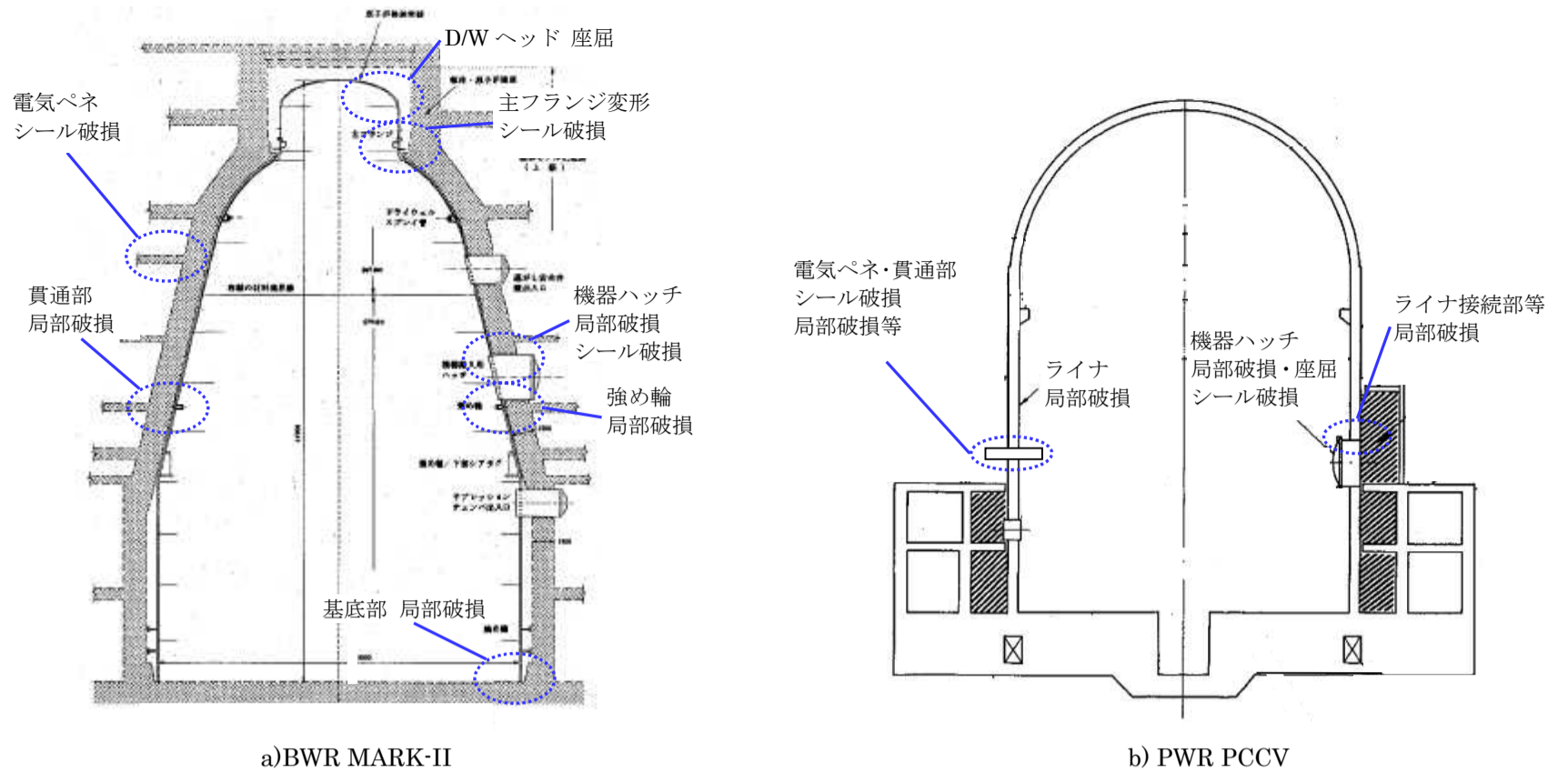


図1 格納容器に想定される評価部位の例

b) 終局的耐力評価手法の検討

格納容器の終局的耐力評価では、設計条件を超える高圧・高温下における構造の変形挙動を有限要素法(以下「FEM」という。)による非線形構造解析により追跡し、想定される破損モードに適した破損クライテリア(破損の決定条件)を用いて、構造の局所的な破損挙動及び閉じ込め性を予測する。破損クライテリアとしては、応力三軸度に基づく局部破損評価法、損傷力学に基づく方法等を検討し、これら破損クライテリアに基づく破損解析コードを作成する。これを用いて、NUPEC 構造挙動試験の BWR の鋼製格納容器(以下「SCV」という。)等の解析・評価を実施して、適切な破損クライテリアを用いた評価手法を選定・検討する。

c) 要素試験の解析

要素試験の試験体形状及び試験条件を検討するために、非線形構造解析及び破損評価を含む事前解析を行う。構造不連続部の破損試験では、非線形構造解析によりひずみ集中が生じる場所や限界荷重を事前に推測した上で、試験体の形状・寸法及び試験条件を決定する必要がある。さらに要素試験結果を追跡する事後解析を実施することにより、破損クライテリアの適用性を分析・評価する。

(2) 要素試験【分類①②】

局部破損の破損クライテリア検討のために基礎的な材料特性を取得する材料試験を実施するとともに、実機の構造不連続部を模擬した要素試験体の破損試験を実施して、評価手法の実証のための試験データを取得する。また電気ペネトレーションの耐熱性等の終局特性を取得するための試験を実施する。

a) 破損クライテリアに係る材料試験

局部破損を評価するのに必要になる三軸応力下の材料の破壊特性を取得するために、切欠付丸棒及び平板試験片を用いた引張試験を行う。試験温度は室温及び重大事故を想定した温度とし、母材及び溶接部から切り出した試験片により引張試験を実施して、応力三軸度と限界ひずみ・応力の関係を整理する。

b) 構造不連続部の破損試験

格納容器の想定される破損形態を考慮し、実験的な知見を拡充する必要があるものについて、破損試験を実施する。破損試験と共に非線形構造解析を行い、試験結果と比較することにより解析手法の妥当性を確認した上で、実機相当モデルの終局的耐力評価に適用する。破損試験の検討例を以下に示す。

- ・ SCV 相当部材の引張試験：格納容器の胴部の内圧による破損を想定して、実厚に近い切欠付平板試験体の引張試験を実施し、局部破損に至る挙動を把握する。
- ・ PCCV 及び RCCV の金属ライナ部材の引張試験：金属ライナは閉じ込め機能維持に対して特に重要な部位であり、実機相当のライナ試験体の引張試験を実施し、局部破損に至る挙動を把握する。

c) 電気ペネトレーション等のシール挙動試験

格納容器の閉じ込め機能維持の観点から、重要性の高い電気ペネトレーション等のシール挙動試験を実施し、樹脂材料の耐熱性やシール性に係る限界特性を取得する。

(3) 実機相当モデルの終局的耐力評価【分類①②】

a) 局所環境を考慮した終局的耐力評価

格納容器が局所的に高温にさらされるような事象の発生可能性(シナリオ)について分析し、想定事象の熱過渡解析結果に基づい

て格納容器の終局的耐力評価を行う。局所環境を考慮した終局的耐力評価の例として、図2に、想定される起回事象に対して、熱過渡解析を実施し、局所的な過熱状態を求め、シール材の温度解析・構造解析等によりフランジ部の閉じ込め性を評価する手順(イメージ)を示す。これらの解析により、局所的に高温になるような事故事象における格納容器の閉じ込め性を評価する。

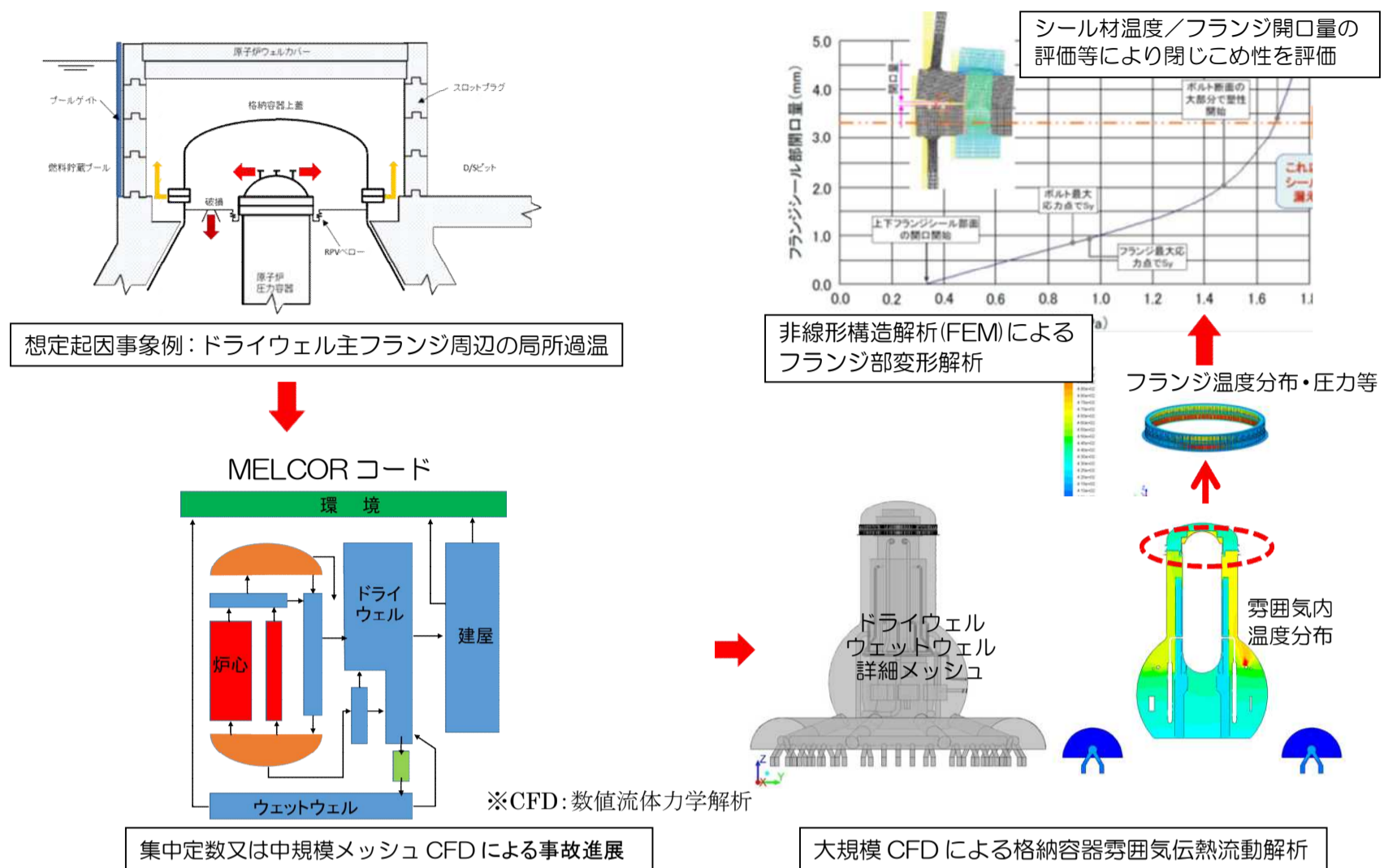


図2 局所環境を考慮した終局的耐力評価の手順(イメージ)

実施行程表

	平成 29 年度	平成 30 年度	令和元年度	令和 2 年度	令和 3 年度
(1) 評価手法の検討・解析	a) 評価部位抽出				
		b) 評価手法の検討			
	NUPEC(SCV) 試験解析	解析コード試作 NUPEC 試験等の解析	解析コード作成 NUPEC・EPRi 試験等の解析	解析コード作成	解析コード評価・まとめ
		c) 要素試験の解析			
	材料試験の解析	材料試験の解析	材料試験・破損試験の解析	材料試験・不連続部試験の解析	不連続部試験の解析・まとめ
		▽論文投稿	▽論文投稿	▽論文投稿	▽論文投稿
(2) 要素試験		a) 破損クライテリアに係る材料試験			
	予備試験(市中材)	切欠材引張試験(母材)	切欠材引張試験(母材・溶接部)	切欠材引張試験(高温等)	追加試験・まとめ
		b) 構造不連続部の破損試験			
		試験体等設計	試験体試作・試験	試験・まとめ	
		c) 電気ペネトレーション等のシール挙動試験			
					まとめ
(3) 実機相当モデルの終局的耐力評価		a) 局所環境を考慮した終局的耐力評価			
		予備解析	熱過渡解析	熱過渡・構造解析	熱過渡・構造解析・まとめ

7. 実施計画

<p>【平成29年度の実施内容】</p> <p>(1)a) 評価部位抽出【分類①②】 国内 BWR 及び PWR の代表的な格納容器型について、技術資料・文献等に基づき、評価部位を抽出する。</p> <p>(1)b) 評価手法の検討【分類①②】 局部破損挙動を評価するための破損クライテリアの適用性を一次評価することを目的に、NUPEC 構造挙動試験のうち、SCV 試験体の非線形構造解析及び破損解析を実施する。</p> <p>(1)c) 要素試験の解析【分類①②】 三軸破壊特性を取得するための、切欠付丸棒試験片の非線形構造解析及び損傷力学解析を行い、破損クライテリアを取得するための材料試験の試験条件を事前検討する。</p> <p>(2)a) 破損クライテリアに係る材料試験【分類①②】 予備試験として、市中材を用いて切欠付丸棒試験片の引張試験を行い、試験方法の適切性を評価・確認する。</p>
<p>【平成30年度の実施内容】</p> <p>(1)b) 評価手法の検討【分類①②】 局部破損挙動を予測するために、損傷力学解析コード及び限界ひずみ等に基づく破損解析コードを試作する。さらに NUPEC 構造挙動試験（SCV 試験体等）等の非線形構造解析及び破損評価を行い、解析コード及びモデル化手法の有効性を評価する。</p> <p>(1)c) 要素試験の解析【分類①②】 切欠付丸棒試験片及び平板試験片の非線形構造解析及び損傷力学解析を行い、材料試験の試験条件を検討する。</p> <p>(2)a) 破損クライテリアに係る材料試験【分類①②】 格納容器材料の母材に対して、切欠付丸棒試験片及び平板試験片の試験を実施し、室温における引張型の三軸破壊特性を取得する。</p> <p>(2)c) 電気ペネトレーション等のシール挙動試験【分類①②】 電気ペネトレーション（モジュール）の試験体を製作する。</p> <p>(3)b) 局所環境を考慮した終局的耐力評価【分類①②】 BWR 格納容器を対象として、代表シナリオにおける熱過渡解析の試解析を行う。</p>
<p>【令和元年度の実施内容】</p> <p>(1)b) 評価手法の検討【分類①②】 材料試験（母材）により得られた材料パラメータを用いて、損傷力学解析コード・破損解析コードを作成する。NUPEC 構造挙動試験及び EPRI*の試験（ライナ等）の非線形構造解析及び破損評価を行い、解析コード及びモデル化手法の有効性を評価する。 *) 米国電力研究所</p> <p>(1)c) 要素試験の解析【分類①②】 切欠付丸棒試験片及び平板試験片の非線形構造解析及び損傷力学解析を行い、材料試験の試験結果を分析する。</p> <p>(2)a) 破損クライテリアに係る材料試験【分類①②】 格納容器材料の母材・溶接部に対して、切欠付丸棒試験片及び平板試験片の引張試験を実施し、引張型の三軸破壊特性（室温）を取得する。</p> <p>(2)b) 構造不連続部の破損試験【分類①②】 試験体、防護構造体等の設計を行う。</p> <p>(2)c) 電気ペネトレーション等のシール挙動試験 電気ペネトレーションの試験装置を設計する。</p> <p>(3)b) 局所環境を考慮した終局的耐力評価【分類①②】 想定される起因事象における格納容器内の局所的な環境に係る熱過渡解析を実施する。</p>
<p>【令和2年度の実施内容】</p> <p>(1) b) 評価手法の検討【分類①②】 材料試験（溶接部等）により得られた材料パラメータを用いて、損傷力学解析コード・破損解析コードを作成する。構造不連続部の破損試験の結果に基づき、解析コード及びモデル化手法の有効性を評価し、改良を加える。EPRI の試験等の非線形構造解析及び破損評価のまとめを行う。</p> <p>(1)c) 要素試験の解析【分類①②】 切欠付丸棒試験片及び平板試験片の非線形構造解析及び損傷力学解析を行い、材料試験の試験結果を分析する。</p> <p>(2)a) 破損クライテリアに係る材料試験【分類①②】 格納容器材料の母材・溶接部に対して、切欠付丸棒試験片及び平板試験片等の引張試験を実施し、三軸破壊特性（室温、高温）を取得する。</p> <p>(2)b) 構造不連続部の破損試験【分類①②】 実厚に近い切欠付平板試験体及びライナ試験体の引張試験の予備試験を実施する。</p> <p>(2)c) 電気ペネトレーション等のシール挙動試験【分類①②】 電気ペネトレーション試験体の環境試験装置を製作する。</p> <p>(3)a) 局所環境を考慮した終局的耐力評価【分類①②】 格納容器内の局所的な環境に係る熱過渡解析を実施するとともに、シール材温度解析・構造解析等を行う。</p>

	<p>【令和3年度の実施内容】</p> <p>(1) b) 評価手法の検討【分類①②】 材料試験及び構造不連続部の破損試験の結果に基づき、解析コード及びモデル化手法の有効性を評価し、知見を取りまとめる。</p> <p>(1) c) 要素試験の解析【分類①②】 材料試験及び構造不連続部の試験体の非線形構造解析及び損傷力学解析を行い、試験結果を分析し、知見を取りまとめる</p> <p>(2) a) 破損クライテリアに係る材料試験【分類①②】 母材、溶接部について必要な追加試験を実施し、これまでの試験結果を取りまとめる。</p> <p>(2) b) 構造不連続部の破損試験【分類①②】 実厚に近い切欠付平板試験体及びライナ試験体の引張試験を実施し、これまでの試験結果を取りまとめる。</p> <p>(2) c) 電気ペネトレーション等のシール挙動試験【分類①②】 電気ペネトレーション試験体の環境試験を実施し、耐熱性やシール性に係る限界条件を取得する。</p> <p>(3) a) 局所環境を考慮した終局的耐力評価【分類①②】 格納容器内の局所的な環境に係る熱過渡解析及びシール材温度解析・構造解析等を行い、知見をとりまとめる</p>
8. 実施体制	<p>【システム安全研究部門における実施者】</p> <p>小嶋 正義 主任技術研究調査官 ○中村 均 技術研究調査官 荒井 健作 技術研究調査官 菊池 正明 技術参与</p> <p>【シビアアクシデント研究部門における実施者】</p> <p>○堀田 亮年 主任技術研究調査官 小城 烈 技術研究調査官</p> <p>【地震・津波研究部門における実施者】</p> <p>○森谷 寛 技術研究調査官 堀野 知志 技術参与</p>
9. 備考	<p>・ 当初計画の「(3)実機相当モデルの終局的耐力評価 a) 一様温度・荷重における終局的耐力評価」を取りやめた。これは、令和元年度までの材料試験・解析により、局部破損に対して、当初想定していなかったせん断型の延性破壊等の考慮が必要であること等が明らかになった*ためである。なお、今後、引張型の局部破損を中心に評価法を取りまとめることとするが、せん断型の局部破損等についても検討を進める。</p> <p>* 第2回材料技術評価検討会（平成31年4月17日）、資料3 安全研究成果報告（中間）（案）、pp.30-21 及び 37</p>

研究計画

1. プロジェクト	16. 実機材料等を活用した経年劣化評価・検証に係る研究	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	小嶋 正義 主任技術研究調査官
2. カテゴリー・研究分野	(2) 原子炉施設 ⑤材料・構造	主担当者	池田 雅昭 技術研究調査官 橋倉 靖明 技術研究調査官 北條 智博 技術研究調査官
3. 背景	<p>原子力規制委員会は「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」及び「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則」に基づき、高経年化技術評価に係り事業者が実施する安全機能を有する機器・構造物を対象とした着目すべき経年劣化事象の抽出、健全性評価及び保守管理の技術的妥当性を確認している。さらに、運転の期間の延長の審査（以下「運転期間延長の審査」という。）においては、原子炉その他の設備が延長しようとする期間の運転に伴う劣化を考慮した上で実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則（以下「技術基準規則」という。）に定める基準に適合することを確認している。</p> <p>これらの確認は、常に最新の科学的・技術的知見に基づいて行う必要があり、そのため、常に関連する技術基準及び民間規格の技術的妥当性を確認していく必要がある。</p> <p>これまで、高経年化技術評価及び運転期間延長の審査における技術的妥当性確認のための材料研究は、原子炉圧力容器の低合金鋼、炉内構造物等のステンレス鋼等及びケーブル等の高分子材料に対する経年劣化予測等について、主に加速劣化試験により模擬的に経年劣化を付与した材料の特性を評価する⁽¹⁻¹¹⁾ことで進められてきた。</p> <p>国内で廃止措置中の原子力発電所等から採取した長期間使用した実機材料を用いて試験・分析を行い、加速劣化試験結果に基づく材料の経年劣化予測評価の実機環境における経年劣化挙動に対する保守性等を検証することが望まれる。</p>		
4. 目的	<p>長期間運転した原子力発電所の経年劣化を模擬的に付与するために行っている加速劣化試験結果に基づく材料の経年劣化予測評価の実機環境における経年劣化挙動に対する保守性の検証等を実施し、以下の代表的な機器、構造物の健全性評価に関する知見を拡充する。</p> <p>(1) 原子炉圧力容器 (2) 電気・計装設備 (3) 炉内構造物 (4) ステンレス鋼製機器</p>		
5. 知見の活用先	<p>本研究の成果については、高経年化技術評価及び運転期間延長認可制度に係る劣化状況評価の審査に関する技術基盤として活用できる。また、民間規格の技術評価の技術的判断根拠としての活用が期待される。</p>		
6. 安全研究概要 (始期：R2年度) (終期：R6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。） 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。） ④ 技術基盤の構築・維持（以下「分類④」という。）</p> <p>(1) 原子炉圧力容器の健全性評価に係る研究（分類①、②及び④） 原子力発電所機器の中で最も重要な機器の一つである原子炉圧力容器（以下「RPV」という。）において、原子力発電所の高経年化に伴い中性子照射脆化（以下「照射脆化」という。）が進行することが知られている。本研究では、現状の評価方法の保守性及びRPV健全性評価対象部位の代表性の確認を行い、RPVの健全性評価に関する知見を拡充する。</p> <p>照射脆化は、RPVが長期間中性子照射を受けることによって脆くなる現象である。RPVの照射脆化の程度は、運転期間中RPV内に設置された母材、溶接金属及び溶接継手の熱影響部（以下「HAZ」という。）の監視試験片を用いて実施するシャルピー衝撃試験結果から求めたシャルピー遷移温度（原子炉容器材料のねばり強さを表す指標（以下「T_{41J}」という。））から予測される。T_{41J}は照射脆化の進行により上昇し、照射前後での遷移温度の変化量を移行量と呼んでいる（以下「ΔT_{41J}」という。）。</p> <p>a. RPV健全性評価方法の保守性に係る研究 RPVの健全性評価では、事故時に、加圧状態のまま原子炉圧力容器内壁が急冷される事象（加圧熱衝撃事象（以下「PTS事象」という。））を想定した条件において、RPVの破壊が生じないことを確認している。具体的には、RPV内面に亀裂を想定（以下「仮想欠陥」という。）し、まず、①亀裂先端位置におけるRPVの照射脆化を予測した破壊靱性値の温度依存性を示す曲線（以下「破壊靱性遷移曲線」という。）を設定し、次いで、②破壊を発生させようとする力を、PTS時の温度分布に起因する仮想欠陥先端の応力拡大係数（亀裂先端に掛かる力の強さを表す物理量）で表して、①と②を比較し、①が②より常に大きいこと、即ち、RPVが破壊しないことを確認する。破壊靱性遷移曲線は、監視試験片で実施する破壊靱性試験で得られた破壊靱性値を評価時期に相当するΔT_{41J}だけ移動させて設定される。この際、照射脆化の予測を考慮しているΔT_{41J}は、「ΔT_{41J}が中性子照射による破壊靱性の遷移温度の変化量に等しい」という考え方に基づいて設定される。また、仮想欠陥の形状は半楕円亀裂であり、実際のRPVにおいては、PTS時に軸方向と周方向での2軸方向の力が加わることから、1軸方向に力が加わる監視試験片とは、亀裂先端に掛かる力の状態が異なる。</p> <p>本研究では、実機材料等を用いてΔT_{41J}と破壊靱性遷移温度を比較することで、現状の評価方法が保守的であることを評価する。また、実機と同様に2軸方向の力が加わる破壊試験の破壊挙動と、1軸方向に力が加わる破壊靱性試験結果を比較することで、現状の評価方法の保守性を検証する。</p> <p>b. RPV健全性評価対象部位の代表性に係る研究 RPVの健全性評価は、母材及び溶接金属で行われている。溶接熱影響部（以下「HAZ」という。）の破壊靱性（未照射材）は母材と比較しても同等以上であり、また、シャルピー遷移温度移行量も母材と同等であると考えられているため、供用中のHAZの破壊靱性は確認されていない。</p>		

本研究では、RPV 健全性評価対象部位として HAZ を母材で代表させることの技術的妥当性を確認するため、実機材料や試験炉照射材料等を活用し、RPV の溶接部及びステンレスオーバーレイクラッド（以下「クラッド」という。）施工に伴い形成される HAZ の照射前後の破壊靱性と T_{41J} の相関について確認し、母材データの代表性について評価することで、現状の評価方法の保守性を検証する。

(2) 電気・計装設備の健全性評価に係る研究（分類①、②及び④）

安全上重要な電気・計装設備には、供用期間末期でも設計基準事故（以下「DBA」という。）時に原子炉を安全に停止し、外部に放射能が漏れないように対処するための安全機能が要求されている。さらに常設重大事故等対処設備に属する電気・計装設備については、重大事故（以下「SA」という。）時において要求される機能を維持することが必要である。これに対し、DBA 又は SA 時の事故環境下において機能要求のある電気・計装設備の長期健全性は、供用期間中の通常運転時の経年劣化と事故環境を模擬する耐環境性能試験により検証されてきた。

本研究では、実機で長期間使用された低圧ケーブル等の安全系電気・計装設備等を供試体として、絶縁体の機械的特性や絶縁性能に係るデータを取得し、実機使用環境における実機材料の劣化状態を調べる。この結果に基づき、耐環境性能試験において通常運転時の経年劣化を模擬的に付与するために行っている現状の加速劣化試験の結果⁽⁷⁻¹¹⁾に基づく現状の健全性評価の保守性を検証する。また、実機材料を用いて事故時環境下における絶縁性能に係るデータを取得する。さらに、高圧ケーブルについては、実機材料における劣化状況を分析し、劣化評価のために過去に実施された絶縁診断の結果と比較し、現状の絶縁診断の劣化評価の保守性を検証する。これらにより、電気・計装設備の健全性評価に関する知見の拡充を図る。

a. 評価対象設備の選定、使用絶縁体及び環境条件調査

高圧・低圧ケーブル、電気ペネトレーション、弁駆動部を本研究の評価対象とし、国内の加圧水型原子力発電所（以下「PWR プラント」という。）と沸騰水型原子力発電所（以下「BWR プラント」という。）から実機材料を採取する。得られた実機材料について、その絶縁体に用いられている高分子材料（以下「高分子絶縁体」という。）を特定するとともに、実機材料が使われていた通常運転時の環境条件及び事故時の環境条件を調査する。通常運転時の環境条件の調査に当たっては、環境測定で用いられている温度計等の通常運転時の環境条件下における性能についても確認する。

b. 実機材料及び高分子絶縁体の劣化特性評価試験

・実機材料について、設備としての絶縁特性を評価するとともに、高分子絶縁体の構造変化、機械的特性及び電気特性を状態監視技術等により評価する。高圧ケーブルの実機材料については、劣化状況の分析として、絶縁破壊電圧等の絶縁性能の評価を行う。

・評価用実機材料と同等の仕様の電気・計装設備供試体の新品（以下「新品供試体」という。）を作製する。また、この新品供試体に対し、a. で調査した環境条件を基に熱と放射線の逐次劣化又は熱・放射線同時照射による加速劣化手法により、評価用実機材料と同等と考えられる劣化を付与した供試体（以下「加速劣化供試体」という。）を作製する。

・新品供試体、加速劣化供試体及び実機材料について、電気特性及び機械的特性からそれぞれの劣化状態を評価し、経年劣化を模擬的に付与するための現状の加速劣化評価手法による評価の保守性を検証する。

c. 事故時環境模擬試験

実機材料及び加速劣化供試体を用いて、DBA 時又は SA 時環境模擬試験を実施し、事故時模擬環境下における絶縁性能の評価を行う。また、試験前後の高分子絶縁体の劣化状態を機器分析及び状態監視手法により評価する。ケーブルについては、化学スプレー噴霧条件下での絶縁性能についても評価する。

(3) 炉内構造物の健全性評価に係る研究（分類①、②及び④）

a. 靱性低下に係る研究

炉内構造物は、中性子の照射を受けて破壊靱性が低下することが知られている。一部の原子力発電所では靱性低下があっても健全性が保たれることを確認するために、（一社）日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格（JSME S NA1 -2012）（以下「維持規格」という。）に基づく破壊力学的評価手法によりその長期健全性評価を実施している。ここで、事業者が用いた破壊力学的評価手法に係る評価式は、主に加速劣化試験等に基づき得られた国内外の破壊靱性試験データの下限により策定されている。本研究では、実機材料を用いて破壊靱性試験を行い、評価式の保守性を検証する。

なお、本研究で使用する実機材料の採取は事業者の廃炉工程に併せて実施するため、本研究期間においては、実機材料の発電所から研究施設への移送及び研究施設における試験の準備までを実施する。

b. 予防保全対策技術の保守性に係る研究

これまでに国内外の多数の BWR プラントにおいて応力腐食割れ（以下「SCC」という。）の発生が報告されている⁽⁵⁾。SCC 等の破壊を引き起こす亀裂については、「実用発電用原子炉及びその附属施設における破壊を引き起こすき裂その他の欠陥の解釈（原規技発第 1408063 号（平成 26 年 8 月 6 日原子力規制委員会決定）、改正 原規技発第 1906051 号（令和元年 6 月 5 日原子力規制委員会決定）」（以下「亀裂の解釈」という。）において、維持規格の規定に基づく検査を実施することが要求されている。事業者は SCC 発生を低減するための予防保全対策技術を適用しているが、維持規格で規定された検査においては、予防保全対策を実施した場合には、「予防保全実施時期を供用開始時期」とすることができ、その結果として、予防保全対策技術施工部位は検査頻度が緩和されることになる。本研究では実機材料を用いて残留応力評価を行い、事業者が実施した予防保全対策技術施工箇所に対する亀裂の解釈の考え方の保守性を検証する。

なお、本研究で使用する実機材料の採取は事業者の廃炉工程に併せて実施するため、本研究期間においては、実機材料の発電所から研究施設への移送及び研究施設における試験の準備までを実施する。

(4) ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究（分類②及び④）

再循環ポンプ等に用いられているステンレス鋼等には、長時間高温に曝される（熱時効）ことにより材料の組織が変化して靱性が低下する。高経年化技術評価等においては、ステンレス鋼の熱時効による靱性の低下挙動評価は（一財）発電設備技術検査協会において実施された「プラント長寿命化技術開発」研究より開発された靱性予測モデル⁽⁴⁾（以下「H3T モデル」という。）

を用いて実施されている。H3Tモデルは、主に加速劣化試験等の結果に基づいて主にPWRプラントの環境を考慮して開発され、PWRプラント及びBWRプラントの評価に用いられている。

本研究では、実機材料（再循環ポンプから採取）等を用いて組織観察、破壊靱性試験等を実施し、実機環境でのH3Tモデルによる熱時効による靱性の低下挙動評価手法の保守性を検証する。

なお、本研究は、事業者の廃炉工程に併せて実施するため、本研究期間においては、破壊靱性試験等の試験片作製及び研究施設における試験の準備を実施する。

行程表

	R 2 年度	R 3 年度	R 4 年度	R 5 年度	R 6 年度
(1) 原子炉圧力容器の健全性評価に係る研究 a. RPV 健全性評価方法の保守性に係る研究	・詳細試験計画策定 ・照射材料機械試験 ・実機材料調達準備	・照射材料機械試験 ・実機材料調達及び機械試験 ・破壊靱性試験	・照射材料組織観察 ・実機材料機械試験 ・破壊靱性試験	・実機材料組織観察 ・破壊靱性試験	・破壊靱性試験 ・RPV 健全性評価法の保守性検証
				▽学会発表	▽学会発表 ▽論文投稿
b. RPV 健全性評価対象部位の代表性に係る研究	・詳細試験計画策定 ・照射材料機械試験 ・実機材料調達準備	・照射材料機械試験 ・照射材料組織観察 ・実機材料調達及び機械試験	・照射材料機械試験 ・照射材料組織観察 ・実機材料調達及び機械試験	・実機材料組織観察	・RPV 健全性評価法の保守性検証
(2) 電気・計装設備の健全性評価に係る研究 a. 評価対象設備の選定、使用絶縁体及び環境条件調査	・実機材料の調査 ・実機材料試験計画策定 ・通常運転時環境調査 ・事故時環境調査				
b. 実機材料及び高分子絶縁体の劣化特性評価試験		・実機材料の各種特性評価 ・新品供試体作製 ・加速劣化供試体作製 ・実機材料の調査			・実機材料の各種特性評価 ・加速劣化手法による評価の保守性検証
c. 事故時環境模擬試験		・電気ペネの実機材料及び加速劣化供試体の事故時模擬環境下の絶縁性能評価 ・ケーブル供試体の化学スプレー噴霧下絶縁性能の評価			事故時環境時の電気・計装設備の絶縁性能評価
				▽学会発表	▽学会発表 ▽論文投稿
(3) 炉内構造物の健全性評価に係る研究 a. 靱性低下に係る研究	詳細計画の検討	実機材料の試験方法検討	試験装置の整備	実機材料の移送方法の調査	・実機材料の研究施設への移送 ・試験準備
b. 予防保全対策技術の保守性に係る研究	・評価方法確立のための非照射材料試験の詳細計画検討 ・実機材料の調査/試験詳細計画検討	・非照射材料試験の試験体作製 ・実機材料試験準備	・非照射材料試験 ・実機材料採取方法検討 ・実機材料試験準備	・実機材料採取方法検討 ・実機材料の移送計画策定	・実機材料移送 ・試験準備
				▽学会発表	▽論文投稿
(4) ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究	・現行の評価手法の保守性に関する検討	・現行の評価手法の保守性に関する検討 ・詳細試験計画策定 ・実機材料の調査	・現行の評価手法の保守性に関する検討 ・実機材料の試験方法及び移送方法調査及び検討	・現行の評価手法の保守性に関する検討 ・実機材料移送	・現行の評価手法の保守性に関する検討 ・試験片作製 ・試験の準備
			▽学会発表	▽論文投稿	

7. 実施計画

【R 2 年度の実施内容】

(1) 原子炉圧力容器の健全性評価に係る研究【分類①、②及び④】

a. RPV 健全性評価法の保守性に係る研究

- ・詳細な研究計画を策定するとともに、試験条件及び供試材の詳細仕様を検討する。
- ・長期間中性子照射を受けた RPV 鋼の母材を想定して既往事業で作製された試験炉照射材料について、作業施設への輸送及び試験片加工を行い、機械試験を開始する。
- ・入手可能な実機材料の調査及び調達準備を行う。
- ・破壊靱性遷移曲線の保守性を確認するため及び実際の原子炉で想定されている 2 軸の引張応力による破壊靱性値が一般的に行われている 1 軸の引張応力による破壊靱性値と同程度であることを確認するため、供試材を調達する。また、2 軸の引張応力による破壊靱性試験準備を行う。

b. RPV 健全性評価対象部位の代表性に係る研究

- ・詳細な研究計画を策定するとともに、試験条件及び供試材の詳細仕様を検討する。
- ・機械試験の試験片を作製する。
- ・既往事業で作製された照射材料について、作業施設への輸送及び試験片加工を行い、機械試験を開始する。

- ・実機材料と試験炉照射材料の機械的特性や材料組織を比較するため、入手可能な実機材料の調査を行う。
- (2) 電気・計装設備の健全性評価に係る研究【分類①、②及び④】
- a. 評価対象設備の選定、使用絶縁体及び環境条件調査
- ・入手可能な実機材料の調査を行い、評価対象を選定し、実機材料試験計画を取りまとめる。
 - ・実機材料の絶縁体に用いられている高分子材料を特定するとともに、実機材料が使われている通常運転時の環境条件及び事故時の環境条件を調査する。
- b. 実機材料及び高分子絶縁体の劣化特性評価試験
- ・実機材料について、設備としての絶縁特性を評価するとともに、高分子絶縁体の構造変化、機械的特性及び電気特性を状態監視技術等により評価する。
 - ・実機材料試験計画を基に、実機材料と比較するために、新品供試体を作製する。
 - ・a. で調査した環境条件を基に加速劣化手法による劣化条件を設定し、加速劣化供試体を作製する。
- c. 事故時環境模擬試験
- ・実機材料及び加速劣化供試体を用いて、DBA 時又は SA 時環境模擬試験を実施し、事故時模擬環境下における絶縁性能の評価を実施する。また、試験前後の高分子絶縁体の劣化状態の変化を機器分析及び状態監視手法により評価する。
 - ・ケーブル供試体について、化学スプレー噴霧下での絶縁性能の変化を評価する。
- (3) 炉内構造物の健全性評価に係る研究【分類①、②及び④】
- a. 靱性低下に係る研究
- 炉内構造物で使用されたステンレス鋼の靱性低下に関する知見を拡充するため、調査及び試験の詳細計画を検討する。
- b. 予防保全対策技術の保守性に係る研究
- 評価方法を確立するための非照射材料試験方法について調査及び試験の詳細計画を検討する。主に各種ピーニング工法、表面残留応力評価方法等の調査を実施するとともに、非照射材料試験の準備を実施する。
- また、実機材料を用いた研究を実施するための調査及び試験の詳細計画を検討する。主に炉心シュラウド等の実機環境の調査を実施し、試験の準備を実施する。

- 【R3年度の実施内容】
- (1) 原子炉圧力容器の健全性評価に係る研究【分類①、②及び④】
- a. RPV 健全性評価法の保守性に係る研究
- ・令和2年度に引き続き、試験炉照射材料を用いた機械試験を行う。
 - ・令和2年度の調査により選定した実機材料を作業施設への輸送を行い、機械試験を開始する。
 - ・破壊靱性遷移曲線の保守性を確認するため、実際の原子炉で想定されている2軸の引張応力による破壊靱性値が一般的に行われている1軸の引張応力による破壊靱性値と同程度であることを確認するため、機械試験を行う。
- b. RPV 健全性評価対象部位の代表性に係る研究
- ・令和2年度に引き続き、既往事業で作製された試験炉照射材料の機械試験を行う。また、既往事業で作製された試験炉照射材料の微細組織観察を開始する。
 - ・令和2年度の調査により選定した実機材料を作業施設への輸送を行い、機械試験を開始する。
- (2) 電気・計装設備の健全性評価に係る研究【分類①、②及び④】
- a. 評価対象設備の選定、使用絶縁体及び環境条件調査
- ・令和2年度に引き続き、さらに入手可能な実機材料の調査を行い、実機材料試験計画を修正する。
 - ・追加された実機材料の絶縁体に用いられている高分子材料を特定し、当該の実機材料が使われている通常運転時の環境条件及び事故時の環境条件を調査する。
- b. 実機材料及び高分子絶縁体の劣化特性評価試験
- ・令和2年度に引き続き、実機材料について、設備としての絶縁特性を評価するとともに、高分子絶縁体の構造変化、機械的特性及び電気特性を状態監視技術等により評価する。
 - ・修正された実機材料試験計画を基に、実機材料と比較するために、新品供試体を作製する。
 - ・a. で調査した環境条件を基に加速劣化方法で劣化する条件を設定し、加速劣化供試体を作成する。
- c. 事故時環境模擬試験
- ・令和2年度に引き続き、実機材料及び加速劣化供試体を用いて、DBA 時又は SA 時環境模擬試験を実施し、事故時模擬環境下における絶縁性能の評価を実施する。また、試験前後の高分子絶縁体の劣化状態の変化を機器分析及び状態監視手法により評価する。
 - ・ケーブル供試体について、化学スプレー噴霧下での絶縁性能の変化を評価する。
- (3) 炉内構造物の健全性評価に係る研究【分類①、②及び④】
- a. 靱性低下に係る研究
- 令和2年度の調査・検討結果に基づき、実機材料を用いた試験方法について検討する。
- b. 予防保全対策技術の保守性に係る研究
- 令和2年度の調査結果に基づき、非照射材の試験体の作製を開始する。
- また、廃炉工程に基づき事業者が実施しているシュラウド解体作業に関する情報収集を行い、実機材料を用いた試験の準備を実施する。
- (4) ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究【分類①、②及び④】

実機材料の熱時効評価を実施するための調査及び試験の詳細計画を検討する。

【R4年度の実施内容】

(1) 原子炉圧力容器の健全性評価に係る研究【分類①、②及び④】

a. RPV 健全性評価法の保守性に係る研究

- ・試験炉照射材料を用いた微細組織観察を行う。
- ・令和3年度に引き続き、実機材料を用いた機械試験を行うとともに、微細組織観察の準備を行う。
- ・破壊靱性遷移曲線の保守性を確認するため、実際の原子炉で想定されている2軸の引張応力を加えた場合の破壊靱性値が一般的に行われている1軸の引張応力を加えた場合の破壊靱性と同程度であることを確認するため、機械試験を行う。

b. RPV 健全性評価対象部位の代表性に係る研究

- ・令和3年度に引き続き、過去行われた事業で作製された試験炉照射材料の機械試験及び微細組織観察を継続して行う。
- ・令和3年度に引き続き、実機材料を用いた機械試験を行うとともに、微細組織観察の準備を行う。

(2) 電気・計装設備の健全性評価に係る研究【分類①、②及び④】

a. 評価対象設備の選定、使用絶縁体及び環境条件調査

- ・令和3年度に引き続き、さらに入手可能な実機材料の調査を行い、実機材料試験計画を修正する。
- ・追加された実機材料の絶縁体に用いられている高分子材料を特定し、当該の実機材料が使われている通常運転時の環境条件及び事故時の環境条件を調査する。

b. 実機材料及び高分子絶縁体の劣化特性評価試験

- ・令和3年度に引き続き、実機材料について、設備としての絶縁特性を評価するとともに、高分子絶縁体の構造変化、機械的特性及び電気特性を状態監視技術等により評価する。
- ・修正された実機材料試験計画を基に、実機材料と比較するために、新品供試体を作製する。
- ・a. で調査した環境条件を基に加速劣化方法で劣化する条件を設定し、加速劣化供試体を作成する。

c. 事故時環境模擬試験

- ・令和3年度に引き続き、実機材料及び加速劣化供試体を用いて、DBA 時又は SA 時環境模擬試験を実施し、事故時模擬環境下における絶縁性能の評価を実施する。また、試験前後の高分子絶縁体の劣化状態の変化を機器分析及び状態監視手法により評価する。

(3) 炉内構造物の健全性評価に係る研究【分類①、②及び④】

a. 靱性低下に係る研究

令和3年度の検討結果に基づき、試験装置の整備を行う。

b. 予防保全対策技術の保守性に係る研究

令和3年度に作製した試験体を用いて、予防保全対策技術施工による試験体表面の応力状態を確認する。また、試験体の切断等に伴う試験体表面の応力変化の測定等により、実機からの供試材採取方法を検討する。

また、令和3年度に引き続き、事業者が実施しているシュラウド解体作業に関する情報収集を行い、実機材料を用いた試験の準備を実施する。

(4) ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究【分類①、②及び④】

令和3年度に実施した調査及び研究計画を検討の結果を受け、主に BWR プラント環境中で使用された実機材料を用いた試験片作製方法、試験方法及び試験片の発電所から研究施設への移送方法に関する調査・検討する。

【R5年度の実施内容】

(1) 原子炉圧力容器の健全性評価に係る研究【分類①、②及び④】

a. RPV 健全性評価法の保守性に係る研究

- ・実機材料を用いた微細組織観察を行う。
- ・破壊靱性遷移曲線の保守性を確認するため、実際の原子炉で想定されている2軸の引張応力を加えた場合の破壊靱性値が一般的に行われている1軸の引張応力を加えた場合の破壊靱性と同程度であることを確認するため、2軸の引張応力を加えた実験を行う。

b. RPV 健全性評価対象部位の代表性に係る研究

- ・実機材料の微細組織観察を行う。

(2) 電気・計装設備の健全性評価に係る研究【分類①、②及び④】

b. 実機材料及び高分子絶縁体の劣化特性評価試験

令和4年度に引き続き、実機材料について、設備としての絶縁特性を評価するとともに、高分子絶縁体の構造変化、機械的特性及び電気特性を状態監視技術等により評価する。また、加速劣化供試体を作成する。

c. 事故時環境模擬試験

令和4年度に引き続き、実機材料及び加速劣化供試体を用いて、DBA 時又は SA 時環境模擬試験を実施し、事故時模擬環境下における絶縁性能の評価を実施する。また、試験前後の高分子絶縁体の劣化状態の変化を機器分析及び状態監視手法により評価する。

(3) 炉内構造物の健全性評価に係る研究【分類①、②及び④】

a. 靱性低下に係る研究

実機材料の採取方法及び実機材料を発電所から研究施設への移送方法に関する調査を実施する。

b. 予防保全対策技術の保守性に係る研究

令和4年度までの成果を基に、実機材料の採取方法を含めた試験方法を検討する。

	<p>また、令和4年度に引き続き、事業者が実施している炉心シュラウド解体作業に関する情報収集を実施するとともに、実機材料の試験体を作製するために発電所から研究施設への移送等に関する試験計画を策定し、試験の準備を実施する。</p> <p>(4) ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究【分類①、②及び④】 令和4年度に実施した検討結果に基づき、発電所からの研究施設への実機材料（ステンレス鋼鋳鋼）の移送を実施。</p> <p>【R6年度の実施内容】</p> <p>(1) 原子炉圧力容器の健全性評価に係る研究【分類①、②及び④】</p> <p>a. RPV 健全性評価法の保守性に係る研究</p> <ul style="list-style-type: none"> 破壊靱性遷移曲線の保守性を確認するため、実際の原子炉で想定されている2軸の引張応力を加えた場合の破壊靱性値が一般的に行われている1軸の引張応力を加えた場合の破壊靱性と同程度であることを確認するため、引き続き2軸の引張応力を加えた実験を行う。 令和5年度までに得られた知見により、RPV 健全性評価法の保守性について評価する。また、監視試験片を用いた破壊靱性遷移曲線と実際の原子炉で想定されている2軸の引張応力による破壊靱性遷移曲線について評価し、現状の評価方法の保守性を検証する。 <p>b. RPV 健全性評価対象部位の代表性に係る研究</p> <p>令和5年度までに得られた知見により RPV の溶接部及び HAZ の T41J と破壊靱性の相関、並びに母材データの代表性について評価し、現状の評価方法の保守性を検証する。</p> <p>(2) 電気・計装設備の健全性評価に係る研究【分類①、②及び④】</p> <p>b. 実機材料及び高分子絶縁体の劣化特性評価試験</p> <p>令和5年度に引き続き、実機材料について、設備としての絶縁特性を評価するとともに、高分子絶縁体の構造変化、機械的特性及び電気特性を状態監視技術等により評価する。また、令和5年度までに得られた試験結果と併せて、経年劣化を模擬的に付与するための現状の加速劣化評価手法による評価の保守性を検証する。</p> <p>c. 事故時環境模擬試験</p> <ul style="list-style-type: none"> 令和5年度に引き続き、実機材料及び加速劣化供試体を用いて、DBA 時又は SA 時環境模擬試験を実施し、事故時模擬環境下における絶縁性能の評価を実施する。また、試験前後の高分子絶縁体の劣化状態の変化を機器分析及び状態監視手法により評価する。 令和5年度までに得られた試験結果と併せて、事故時環境時の電気・計装設備の絶縁性能及び高分子絶縁体の劣化評価をとりまとめる。 <p>(3) 炉内構造物の健全性評価に係る研究【分類①、②及び④】</p> <p>a. 靱性低下に係る研究</p> <p>実機材料を発電所から採取し、研究施設へ移送する。また、研究施設における試験の準備を実施する。</p> <p>b. 予防保全対策技術の保守性に係る研究</p> <p>令和5年度の成果を基に、実機材料を発電所から研究施設へ移送する。また、研究施設における試験の準備を実施する。</p> <p>(4) ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究【分類①、②及び④】</p> <p>令和4年度に実施した検討結果に基づき、実機材料（ステンレス鋼鋳鋼）より試験片を作製する。また、研究施設における試験の準備を実施する。</p>
8. 実施体制	<p>【システム安全研究部門における実施者（主担当者には○を記載）】</p> <p>小嶋 正義 主任技術研究調査官</p> <p>○ 池田 雅昭 技術研究調査官</p> <p>○ 橋倉 靖明 技術研究調査官</p> <p>○ 北條 智博 技術研究調査官</p> <p>渡辺 藍己 技術研究調査官</p> <p>船田 立夫 技術参与</p> <p>菊池 正明 技術参与</p> <p>高倉 賢一 技術参与</p> <p>【前年度までの委託先】</p> <p>なし</p>
9. 備考	<p>文 献</p> <p>(1) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、平成30年度原子力規制庁委託成果報告書報告書 軽水炉照射材料健全性評価研究、平成31年3月。</p> <p>(2) 福谷耕司、大野勝巳、中田早人、原子炉容器鋼の照射組織変化、INSS MONOGRAPHS No.1、2001。</p> <p>(3) K. Takakura, et al., “Crack growth behavior of neutron irradiated L-grade austenitic stainless steels in simulated BWR conditions”, Proc. 14th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems - Water Reactors, pp. 1192-1203, 2009.</p> <p>(4) (財)発電設備検査技術協会「プラント長寿命化技術開発 2相ステンレス鋼熱時効試験(PWR)」、平成6年3月</p> <p>(5) 笠原茂樹、福谷耕司、越石正人、藤井克彦、知見康弘、沸騰水型軽水炉炉内構造物用オーステナイト系ステンレス鋼の照射データに関する文献調査とデータ集の作成（受託研究）、JAEA-Review 2018-012、2018年。</p>

<p>(6) 西川聡、中田志津雄、堀井行彦、古村一朗、山口篤憲、(財)発電設備技術検査協会溶接・非破壊検査技術センター 技術レビュー Vol.4, pp.28-32、2008.</p> <p>(7) 皆川武史、池田雅昭、「原子力発電所用安全系低圧ケーブルの難燃性に対する経年劣化処理の影響」、電気学会論文誌 A、第 137 巻、第 11 号、pp.620-625、2017.</p> <p>(8) T. Minakawa, M. Ikeda, N. Hirai, and Y. Ohki, Aging State Analysis of Safety-related Cables for Nuclear Power Plants Exposed to Simulated Accident Conditions, Proceedings of 2018 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP 2018, pp.602-605, 2018.</p> <p>(9) T. Minakawa, M. Ikeda, N. Hirai, and Y. Ohki, Insulation Performance of Safety-related Cables for Nuclear Power Plants under Simulated Severe Accident Conditions, IEEJ Trans. Fundam. Mater., Vol.139, No.2, pp.54-59, 2019.</p> <p>(10) 皆川武史、池田雅昭、平井直志、大木義路、「重大事故模擬環境に暴露したエチレンプロピレンジエンゴム絶縁ケーブルの劣化状態分析」、電気学会論文誌 A、第 139 巻、第 9 号、pp.380-386、2019.</p> <p>(11) 皆川武史、池田雅昭、田口清貴、「重大事故環境下におけるケーブルの絶縁特性の分析」、NRA 技術報告、NTEC-2019-1002、2019.</p>
--

研究計画

1. プロジェクト	17. 福島第一原子力発電所燃料デブリの臨界評価手法の整備	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	北野 剛司 主任技術研究調査官
2. カテゴリー・研究分野	【原子炉施設】1) 特定原子力施設	主担当者	大川 剛 主任技術研究調査官 藤田 達也 技術研究調査官
3. 背景	<p>・ 廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議が策定した廃止措置等に向けた中長期ロードマップ*では、令和3年以内に燃料デブリ（核燃料と炉内構造物やコンクリート等が溶融し再度固化した状態のもの）の取出しを2号機から開始し、段階的に取出し規模を拡大していくとされている。</p> <p>・ 局所的に多様な性状を持つと考えられる燃料デブリの取出し作業、取出し後の収納・輸送・保管に至るまで、性状（燃料デブリの組成、ウラン含有率、水分含有率、不均一性、形状等）の不確かさも考慮した燃料デブリの臨界管理を行うことが重要である。</p> <p>・ このため、燃料デブリの取出し作業、取出し後の収納・輸送・保管における臨界管理の適否の判断に資するため、性状の不確かさを考慮した燃料デブリの臨界リスク（臨界に至る条件及び臨界超過時の挙動）を評価する手法の整備を進めることが重要である。</p> <p>*「東京電力ホールディングス（株）福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」（令和元年12月27日、廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議）</p>		
4. 目的	<p>燃料デブリの取出しに係る様々な局面で、事業者が行う臨界管理に関して、規制機関として安全性の確認に資する以下の評価手法を整備する。</p> <ul style="list-style-type: none"> －燃料デブリの性状を踏まえた臨界条件評価手法 －燃料デブリが臨界を超過した際の臨界挙動評価手法 		
5. 知見の活用先	<p>燃料デブリの性状を踏まえた臨界条件評価手法及び燃料デブリが臨界を超過した際の臨界挙動評価手法を整備することによって、臨界管理の妥当性確認に資する。</p>		
6. 安全研究概要 (始期：H26年度) (終期：R3年度)	<p>本プロジェクトは、「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> <ul style="list-style-type: none"> ③ 規制活動に必要な手段の整備（以下「分類③」という。） ④ 技術基盤の構築・維持（以下「分類④」という。） <p>本プロジェクトは、燃料デブリの取出しに係る様々な局面における臨界管理の適否の判断に資する評価手法を整備するため、以下の(1)及び(2)を実施する。なお、本プロジェクトの実施に当たっては、米国スリーマイルアイランド原子力発電所2号炉の事故により生じた燃料デブリ取出しに関する知見を参考にするとともに、東京電力福島第一原子力発電所における燃料デブリに関する最新知見（燃料デブリの組成、性状等の情報及び事業者が検討している臨界管理手法）を速やかに反映する。</p> <p>(1) 臨界条件評価手法の整備【分類③及び分類④】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 燃料デブリの性状（核燃料の燃焼度、炉内構造物の混合割合等）をパラメータとして、臨界条件の判断及び臨界超過時の臨界挙動の評価に使用する臨界リスク評価の基礎となるデータを整理した「臨界リスク基礎データ」を、臨界安全研究で実績のある解析コードを用いた解析により整備する（図1）。また、燃料デブリの不均一組成及び体系を取り扱うことが可能な新規のモンテカルロコードの開発を目指して、モンテカルロ計算ソルバーを開発する。さらに、臨界リスク基礎データとして整理される解析データに対して、核データ（核反応断面積、核分裂生成核種の収率など）の不確かさを考慮するため、放射性核種生成量評価に係る不確かさ評価に関する基礎検討を実施する。 ・ 燃料デブリの性状、その分布等を詳細に把握するため、炉心損傷・溶融進展解析コードの開発・整備を実施し、燃料デブリが取り得る性状などを推定する。 ・ 上記の成果を、上記の臨界リスク基礎データとして整理される解析データの精緻化、後述の臨界実験の実施計画の策定、燃料デブリ取出しに係る臨界管理の妥当性確認に資する技術的知見の蓄積などに活用する。 ・ 上記の臨界リスク基礎データを整備するために用いる解析コードに対して、臨界実験装置を用いた実験により取得されるデータを用いて、その妥当性を確認する。妥当性確認のための臨界実験については、委託事業の一部として、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下「JAEA」という。）が保有する燃料サイクル安全工学研究施設（NUCEF）の定常臨界実験装置（STACY）を用いて実施する。既存のSTACYは、溶液燃料を使用する臨界実験装置であるため、燃料デブリを模擬した臨界実験を実施できるよう、ウラン燃料棒を使用する炉心設備にSTACYを改造する（図2）。また、核燃料と構造材を混合した試料（デブリ模擬体）を調製・分析する設備をNUCEF内に整備し、効率的な実験データの取得を図る。なお、デブリ模擬体の組成等については、調査情報を適宜活用し、現場の状況に合わせて柔軟に運用していく予定である。改造したSTACYを用いて、デブリ模擬体の反応度値測定、ウラン燃料棒と構造材棒を組み合わせた体系の臨界量測定等の臨界実験を実施し、取得した実験データを用いて臨界リスク基礎データを整備するために用いる解析コードの妥当性を確認する。 		

(2) 臨界挙動評価手法の整備【分類③】

燃料デブリの臨界リスクを評価する手法の整備の一環として、臨界超過時の臨界挙動（燃料デブリが臨界を超過するシナリオ（臨界超過シナリオ）及びその際の放射線・放射性物質による作業被ばく等）を評価する手法を整備する。

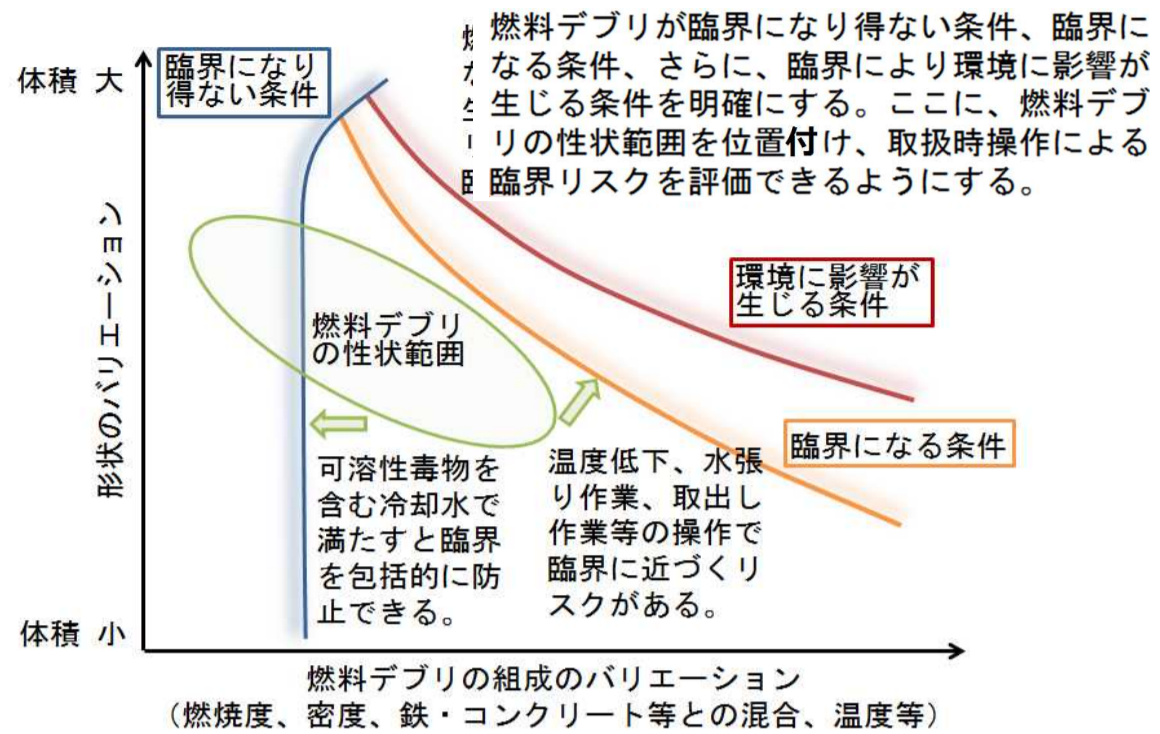


図1 臨界リスク基礎データの概念図

(出典：東京電力福島第一原子力発電所燃料デブリの臨界評価手法の整備事業報告書（平成26年度）（ただし、一部説明を追記）)

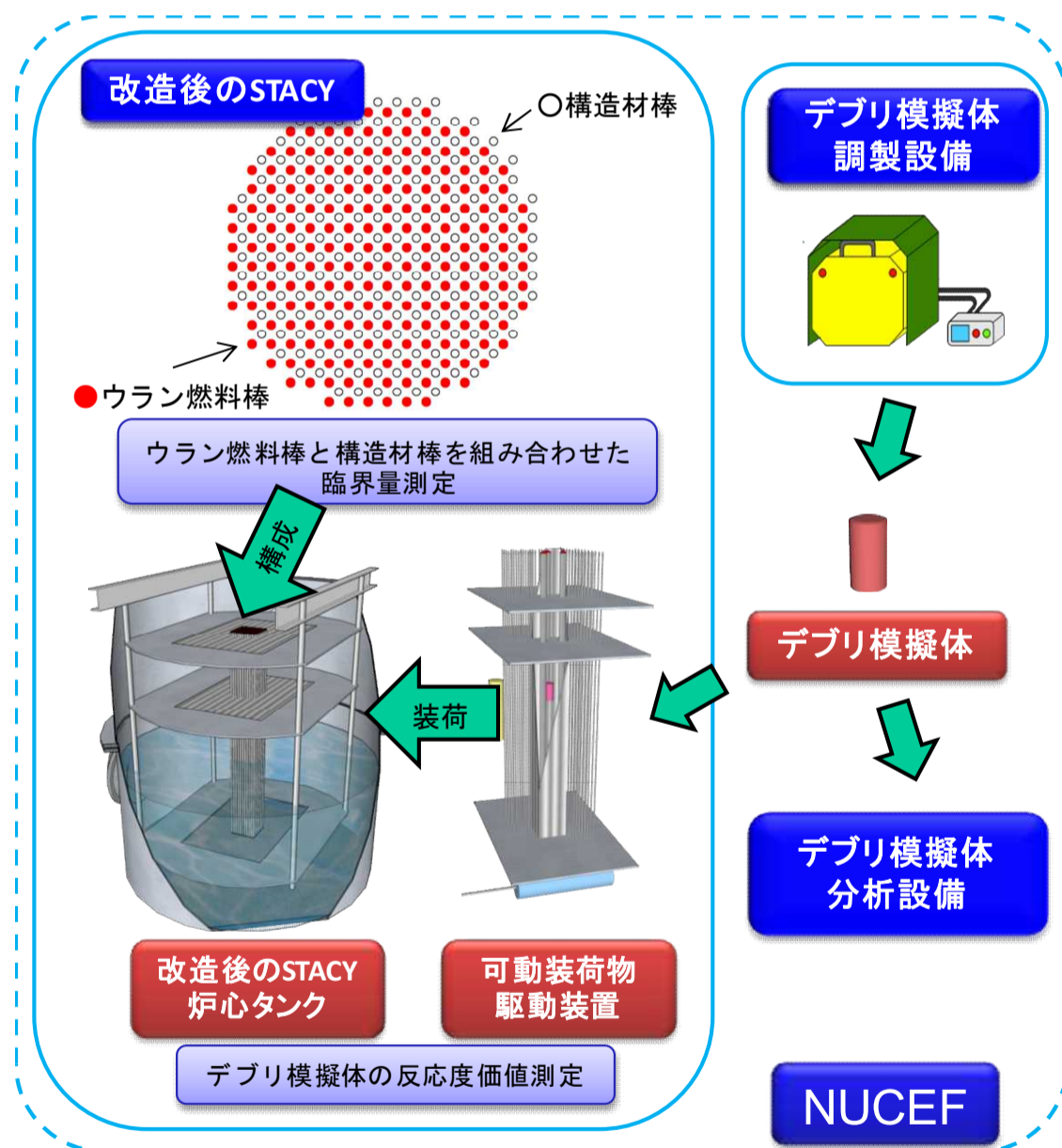
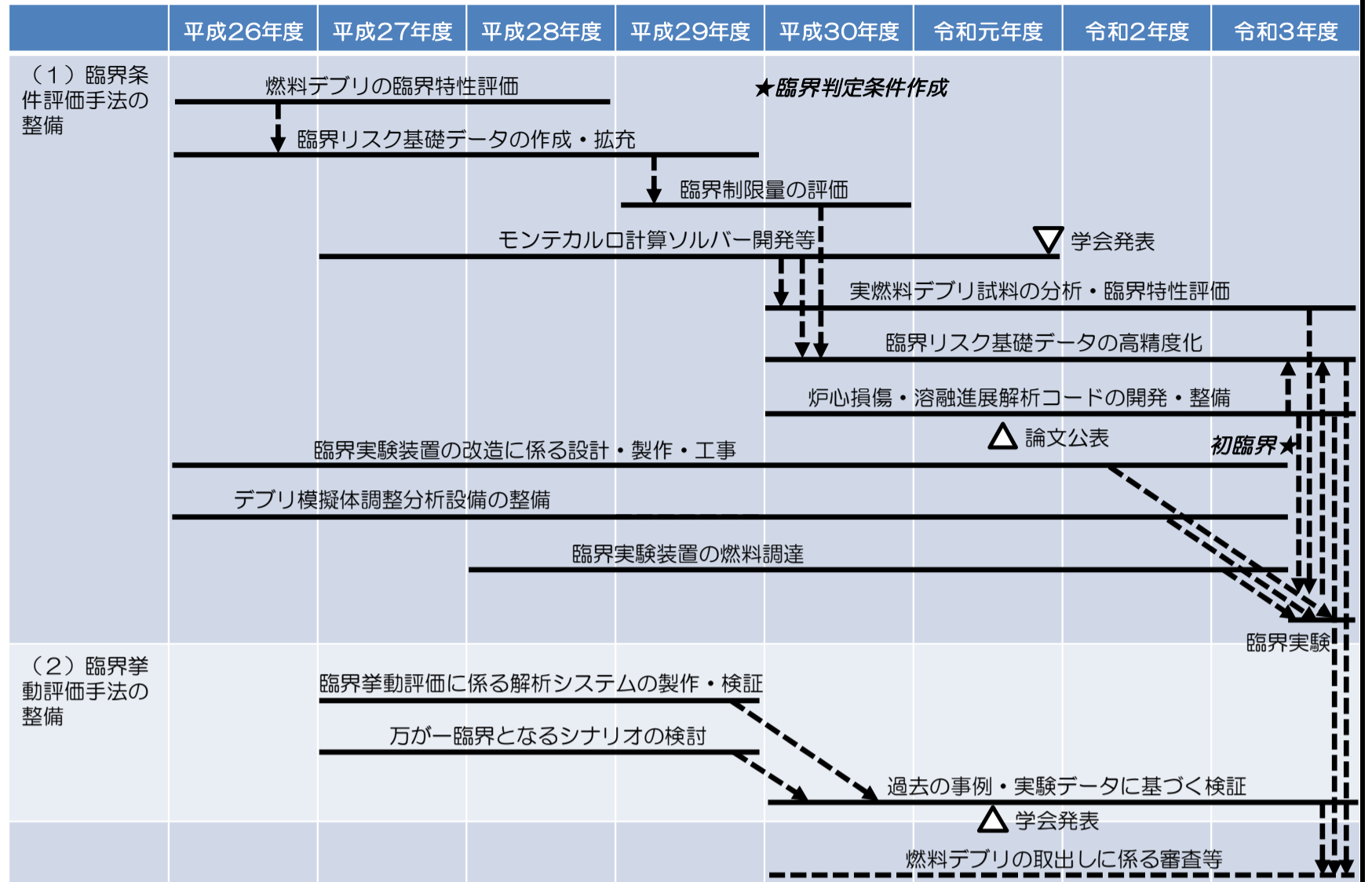


図2 STACYにおける臨界実験の概念図

(出典：東京電力福島第一原子力発電所燃料デブリの臨界評価手法の整備事業報告書（平成26年度）（ただし、一部表記を修正）)

研究計画は以下のとおりであり、平成30年度までに臨界リスク基礎データの作成、臨界挙動評価ツールの構築及び臨界超過シナリオの検討を実施する。また、平成30年度から、燃料デブリの性状、その分布等を詳細に把握するための炉心損傷・溶融進展解析コードの開発・整備を実施する。STACYの改造・核燃料の調達については、令和3年度前半の達成を目指す。さらに、令和3年度後半はSTACYを用いて臨界実験を実施するとともに、取得した実験データを用いて臨界リスク基礎データを整備するために用いる解析コードの妥当性確認を実施する。あわせて、臨界超過シナリオ及び過去の事例を用いた評価により、臨界挙動評価手法の検証を実施する。

実施行程表



7. 実施計画

【平成26年度の実施内容】

(1) 臨界条件評価手法の整備

(a) 臨界リスク基礎データベースの作成

溶融炉心-コンクリート相互作用(MCCI)により生じた燃料デブリについて、MCCI過程に係る既存の知見をMCCI模擬実験に係る文献調査等により収集するとともに、臨界特性の解析を行い、臨界リスク基礎データベースを作成する。

(b) 臨界実験装置の改造

臨界実験装置について、上記(a)において検討した燃料デブリが取り得る性状範囲に関する知見に基づき、実験炉心の構成を検討する。臨界実験装置の設計を行い、整備する設備の性能確認に資するモックアップ試験を実施する。

(c) デブリ模擬体調製・分析設備の整備

臨界実験に用いるデブリ模擬体を調製及び分析する設備について、設計・製作を進める。

【平成27年度の実施内容】

(1) 臨界条件評価手法の整備

(a) 臨界リスク基礎データベースの拡充

炉心溶融時に、原子炉炉内構造物、原子炉圧力容器等の主な構造物材である鉄を取り込んだと考えられる燃料デブリについて、臨界特性の解析を行い、臨界リスク基礎データベースを拡充する。

(b) 臨界リスク基礎データベースの高精度化

燃焼計算コードの妥当性確認に資する軽水炉燃焼燃料の燃焼度及び核分裂生成物濃度測定に当たっての準備を進める。

(c) 臨界実験装置の改造

臨界実験装置について、上記(a)において検討した燃料デブリが取り得る性状範囲に関する知見に基づき、実験炉心の構成を検討する。臨界実験装置の設計を行い、パイルオシレータ等、整備する設備の性能確認に資するモックアップ試験を実施する。

(d) デブリ模擬体調製・分析設備の整備

臨界実験に用いるデブリ模擬体を調製及び分析する設備について、設計・製作を進める。

(2) 臨界挙動評価手法の整備

(a) 臨界挙動評価に係る技術整備

燃料デブリ取出しに向けた準備作業及び取出し作業を想定した臨界挙動評価に使用する核分裂性核種生成量・放射性物質移行計算モデル(以下「評価モデル」という。)を整備するための技術課題を検討する。

(b) 臨界挙動評価の検証

上記(a)で整備した放射性物質移行計算モデルを取り入れた臨界挙動評価の支援ツールを作成する。

【平成28年度の実施内容】

(1) 臨界条件評価手法の整備

(a) 臨界リスク基礎データベースの拡充

<p>炉心溶融時の集合体同士の混合の影響を明らかにするため、燃料デブリの燃焼度を変数として臨界特性の解析を行い、臨界リスク基礎データベースを拡充する。</p> <p>(b) 臨界リスク基礎データベースの高精度化 燃料デブリの不均一組成及び体系を取り扱うことが可能な新規モンテカルロ計算ソルバーの基本設計及びプロトタイプ作成を進める。また、燃焼計算コードの妥当性確認に資する軽水炉燃焼燃料の燃焼度及び核分裂生成物濃度測定を実施する。</p> <p>(c) 臨界実験装置の改造 臨界実験装置について、上記(a)において検討した燃料デブリが取り得る性状範囲に関する知見に基づき、実験炉心の構成を検討する。また、平成26年度及び平成27年度に実施したモックアップ試験と合わせて、臨界実験装置の設計を確定し、解体・製作・取付けの工事及び燃料の製作を順次進める。</p> <p>(d) デブリ模擬体調製・分析設備の整備 臨界実験に用いるデブリ模擬体を調製及び分析する設備について、平成27年度に実施した詳細設計に基づき、製作・据付けの工事を順次進める。また、当該設備の試運転に着手し、性能を確認する。</p> <p>(2) 臨界挙動評価手法の整備 (a) 臨界挙動評価に係る技術整備 平成27年度に検討した放射性物質環境放出等の臨界挙動評価の技術課題の一部に対して検討を行い、燃料デブリ取出しに向けた準備作業及び取出し作業を想定した評価モデルを整備する。また、燃料デブリ取出しを想定した臨界超過シナリオを検討する。</p> <p>(b) 臨界挙動評価の検証 上記(a)で整備した評価モデルを取り入れた支援ツールを作成し、当該支援ツールを用いて、作成部分の検証を目的とした典型的な事象に対する評価を試みる。</p>
<p>【平成29年度の実施内容】</p> <p>(1) 臨界条件評価手法の整備 (a) 臨界制限量の評価 平成26年度から平成28年度までに拡充した臨界リスク基礎データベースを用いて、燃料デブリ取出し時の臨界制限量の評価を実施する。また、燃料デブリが取り得る性状範囲について幅広くパラメータサーベイを行う。</p> <p>(b) 臨界リスク基礎データベースの高精度化 平成28年度に引き続き、燃料デブリの不均一組成及び体系を取り扱うことが可能な新規モンテカルロ計算ソルバーを作成する。また、燃焼計算コードの妥当性確認に資する軽水炉燃焼燃料の燃焼度及び核分裂生成物濃度測定を継続して実施する。</p> <p>(c) 臨界実験装置の改造 平成28年度に引き続き、臨界実験装置の改造に係る解体・製作・取付けの工事及び燃料の製作を順次進める。</p> <p>(2) 臨界挙動評価手法の整備 (a) 臨界挙動評価に係る技術整備 平成27年度に検討した放射性物質環境放出等の臨界挙動評価の技術課題のうち、平成28年度に検討したもの以外の項目に対して検討を行い、燃料デブリ取出しに向けた準備作業及び取出し作業を想定した評価モデルを改良する。また、平成28年度に引き続き、燃料デブリ取出しを想定した臨界超過シナリオを検討する。</p> <p>(b) 臨界挙動評価の検証 平成28年度に引き続き、上記(a)で整備した評価モデルを取り入れた支援ツールを拡張し、拡張部分の検証を目的とした典型的な事象に対する評価を試みる。</p>
<p>【平成30年度の実施内容】</p> <p>(1) 臨界条件評価手法の整備 (a) 臨界リスク基礎データベースの拡充 平成29年度に引き続き、平成26年度から平成28年度までに拡充した臨界リスク基礎データベースを用いて、燃料デブリ取出し時の臨界制限量の評価を実施する。</p> <p>(b) 臨界リスク基礎データベースの高精度化 平成29年度に引き続き、燃料デブリの不均一組成及び体系を取り扱うことが可能な新規モンテカルロ計算ソルバーの作成を継続する。また、当該モンテカルロ計算ソルバーの検証を実施する。</p> <p>(c) 炉心損傷・溶融進展解析モデルの開発・整備 燃料デブリの性状、その分布等を詳細に把握するための炉心損傷・溶融進展解析モデルの開発・整備として、原子炉圧力容器内の詳細幾何形状モデルの整備・検証を実施する。</p> <p>(d) 臨界実験装置の改造 平成29年度に引き続き、臨界実験装置の改造に係る解体・製作・取付けの工事及び燃料の製作を順次進め、臨界実験装置の改造を完了する。</p>
<p>【平成31年度（令和元年度）の実施内容】</p> <p>(1) 臨界条件評価手法の整備 (a) 臨界リスク基礎データの高精度化【分類③】 平成30年度までに整備した燃料デブリの不均一組成及び体系を取り扱うことが可能な新規モンテカルロ計算ソルバーの開</p>

	<p>発を完了する。また、放射性核種生成量評価において核データ（核反応断面積、核分裂生成核種の収率など）の不確かさを考慮し、ベンチマーク問題を対象に当該不確かさの定量化及びその要因別分析に関する検討を実施し、不確かさ評価手法を整備する。</p> <p>(b) 炉心損傷・溶融進展解析コードの開発・整備【分類③】 平成 30 年度に検討した炉心損傷・溶融進展解析コードの原子炉圧力容器外まで外挿した詳細幾何形状モデルについて、水平方向への領域拡張を行い、より現実的な溶融コリウム移行挙動解析を検討する。また、燃焼燃料及び中性子吸収材の移行挙動に係わるモデリングの整備・検証を実施する。</p> <p>(c) 臨界実験の実施【分類③、④】 平成 30 年度に引き続き、臨界実験装置の改造に係る解体・製作・取付けの工事及び燃料の製作を順次進める。</p> <p>(2) 臨界挙動評価手法の整備 (a) 臨界挙動評価の検証【分類③】 平成 30 年度の評価結果を踏まえ、評価モデルの伝熱計算機能を改良し、過去の臨界事故事例等の解析をとおして、冷却水の部分沸騰による臨界特性への影響評価を実施する。また、燃料デブリ片の分離中に変化する反応度の挙動について解析的検討を行う。</p>
	<p>【令和 2 年度の実施内容】</p> <p>(1) 臨界条件評価手法の整備 (a) 臨界リスク基礎データの高精度化【分類③】 平成 31 年度（令和元年度）に作成を完了した燃料デブリの不均一組成及び体系を取り扱うことが可能な新規モンテカルロ計算ソルバーを用いて解析を実施し、臨界リスク基礎データの高精度化を図るとともに、燃料デブリ取出し時の臨界制限量の再評価・見直しを実施する。平成 31 年度（令和元年度）に整備した放射性核種生成量の不確かさ評価手法について、照射後試験データとの比較等を実施するとともに、燃料デブリ中の放射性核種組成の不確かさ評価に資する基礎データを整備する。</p> <p>(b) 炉心損傷・溶融進展解析コードの開発・整備【分類③】 平成 31 年度（令和元年度）に引き続き、炉心損傷・溶融進展解析コードの開発・整備として、原子炉圧力容器外まで外挿した詳細幾何形状モデルの計算不安定性の改善・計算の高速化を図る。また、生成する燃料デブリの性状に応じた臨界・遮蔽計算を行い、燃料デブリ取出の予備検討を行う。また、解析結果の GUI 化を進め、より視覚的に理解可能なツールの整備を検討する。</p> <p>(c) 臨界実験の実施【分類③、④】 平成 31 年度（令和元年度）に引き続き、臨界実験装置の改造に係る製作・取付けの工事及び燃料の調達を順次進める。</p> <p>(2) 臨界挙動評価手法の整備 (a) 臨界挙動評価の検証【分類③】 平成 31 年度（令和元年度）に引き続き、過去の臨界事故事例等の解析をとおして抽出された評価モデルの技術的課題を解決するとともに、臨界超過シナリオに基づく燃料デブリの取出し作業を想定した事象に対する評価を実施する。</p>
	<p>【令和 3 年度の実施内容】</p> <p>(1) 臨界条件評価手法の整備 (a) 臨界リスク基礎データの高精度化【分類③】 令和 2 年度に引き続き、新規モンテカルロ計算ソルバーを用いて臨界リスク基礎データの高精度化を図る。また、燃料デブリ中の放射性核種組成の不確かさ評価に資する基礎データを引き続き整備するとともに、これを用いて臨界リスク基礎データの高精度化を図る。</p> <p>(b) 炉心損傷・溶融進展解析コードの開発・整備【分類③】 令和 2 年度に整備した炉心損傷・溶融進展解析コードを用いて評価した燃料デブリの組成・性状を、臨界リスク基礎データに格納される解析データの精緻化、臨界実験の実施計画の策定などに活用する。</p> <p>(c) 臨界実験の実施【分類③、④】 令和 2 年度に引き続き、臨界実験装置の改造に係る製作・取付けの工事及び燃料の調達を順次進め、臨界実験装置の改造を完了する。改造した臨界実験装置を用いて、様々な燃料デブリの臨界特性を評価するための臨界実験を実施し、臨界特性に係る実験データを取得する。また、取得した実験データを用いて、上記(a)で整備・高精度化している臨界リスク基礎データを整備するために用いる解析コードの妥当性を確認する。</p> <p>(2) 臨界挙動評価手法の整備 (a) 臨界挙動評価の検証【分類③】 令和 2 年度に引き続き、過去の臨界事故事例等の解析をとおして抽出された評価モデルの技術的課題を解決するとともに、臨界超過シナリオに基づく燃料デブリの取出し作業を想定した事象に対する評価を実施する。</p>
8. 実施体制	<p>【システム安全研究部門における実施者（主担当者には○を記載）】</p> <p>○ 大川 剛 主任技術研究調査官 岩橋 大希 技術研究調査官 酒井 友宏 技術研究調査官 ○ 藤田 達也 技術研究調査官</p>
9. 備考	

研究計画

<p>1. プロジェクト</p>	<p>18. 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</p>	<p>担当部署</p>	<p>技術基盤グループ 核燃料廃棄物研究部門</p>
		<p>担当責任者</p>	<p>森 憲治 主任技術研究調査官</p>
<p>2. カテゴリー・研究分野</p>	<p>【核燃料サイクル・廃棄物】 J) 核燃料サイクル施設</p>	<p>主担当者</p>	<p>横塚 宗之 技術研究調査官</p>
<p>3. 背景</p>	<p>核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和32年法律第166号。以下「原子炉等規制法」という。）第22条の7の2第1項では、「加工事業者は、原子力規制委員会規則で定めるところにより、当該加工施設における安全性の向上を図るため、原子力規制委員会規則で定める時期ごとに、当該加工施設の安全性について自ら評価をしなければならない。」（ここで、安全性の向上を図るため事業者が自ら行う評価を以下「安全性向上評価」という。）としており、加工事業者に対し安全性向上評価の実施を要求している。また、同法第50条の4の2第1項では、再処理事業者に対しても同様の要求をしている。</p> <p>この安全性向上評価を運用するガイドとして、原子力規制委員会が策定した「加工施設及び再処理施設の安全性向上評価に関する運用ガイド」（平成25年11月27日原子力規制委員会決定。以下「運用ガイド」という。）では、安全性向上評価において実施する「事故の発生及び拡大の防止措置を講じたにもかかわらず、重大事故の発生に至る可能性がある場合、その可能性」に関する調査及び分析の方法として、「適切な評価方法」によりリスク評価を行うこととされている*。</p> <p>しかしながら、この運用ガイドでは、加工施設及び再処理施設に係るリスク評価手法については、現在その手法が必ずしも成熟していないと記されていることから、順次適切なリスク評価手法を整備しておくことが重要である。</p> <p>このような状況を踏まえ、加工施設及び再処理施設に関して、内部事象及び地震を対象として実用発電用原子炉の運用ガイドの参考資料を参考に、リスク評価を実施するに当たっての必要事項を例示する「安全性向上評価に関するリスク評価実施手法の例」の素案を、H28年度までの安全研究の成果を活用して作成した。</p> <p>一方で、H28年度までの安全研究で得られた技術的知見、施設の特徴等を踏まえ、H29年度以降、以下の検討を実施し、将来的なリスク情報の活用に資することが重要である。リスク評価手法の検討に際しては、これまでも、国内外のリスク評価手法について調査し、参考として実施している。例えば、ウラン加工施設の内部事象を対象とした総合安全解析（以下「ISA」という。）実施手順の取りまとめに当たっては、米国ISAを参考に、再処理施設のリスク評価実施手順の検討に当たっては、国内の実用発電用原子炉に対する実施手順を参考にしている。さらに、米国で提唱されている簡易ハイブリッド法に関する検討も実施している。</p> <p>また、日本原子力学会核燃料施設リスク評価分科会における検討状況に関する情報収集を実施している。</p> <p>*：H30年11月14日に開催された第41回原子力規制委員会において、ウラン加工施設は、実用発電用原子炉等に比して潜在的な危険性は低く、重大事故の発生は想定されていないことから、安全性向上評価において、リスク評価は適用しないことが決定され、H31年3月6日に開催された第65回原子力規制委員会において、この決定を踏まえた「ウラン加工施設の安全性向上評価に関する運用ガイド」が制定された。</p> <p>(1) 内部火災等を起因としたリスク評価手法の検討</p> <p>a) H28年度までに得られた知見</p> <p>加工施設及び再処理施設の内部事象（機器のランダム故障等）及び地震に関するリスク評価試解析を実施し、それらの事象を対象としたリスク評価手法等の適切性確認のための着眼点及び留意点を整理した。</p> <p>上記検討結果を反映して、加工施設及び再処理施設の「安全性向上評価に関するリスク評価実施手法の例」の素案を作成した。</p> <p>b) H29年度以降に検討が必要な事項</p> <p>H28年度まで得られた知見には、内部火災等の事象は含まれておらず、段階的に拡張する必要がある。本プロジェクトにおいては、加工施設及び再処理施設において重要な事象であり、かつ、先行して実施されている実用発電用原子炉における検討が参考になることから、内部火災を起因としたリスク評価実施手法を整備することを優先的に進めることが重要である。</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</p> <p>加工施設及び再処理施設における主な重大事故としては、臨界、蒸発乾固、水素爆発、火災、爆発などがある。</p> <p>それぞれの事象に関するリスク評価を実施するためには、それぞれの事象の進展及び影響を過度に保守的な評価となることなく適切に評価するとともに、それぞれの事象の発生頻度を評価し、それらに基づきリスクを評価することが重要である。そのうち、本プロジェクトでは以下の重大事故に係る事象の影響評価等に関する解析コードの整備又はデータの取得を行い、事象進展及び影響評価をより適切に行うとともに、将来的には事象の発生及び進展のための条件を把握し、最終的に頻度評価及びリスク評価に資することが重要である。</p> <p>① 火災</p> <p>a) H28年度までに得られた知見</p> <p>再処理施設のセル内での有機溶媒火災、混合酸化燃料（以下「MOX燃料」という。）加工施設におけるグローブボックス火災等の施設内で発生する火災事象について、関連する換気システムへの影響を含めた解析コードの整備に着手した。これまでの安全研究では、フランス放射線防護原子力安全研究所が開発したSYLVIAコードを用いて試解析を行い、加工施設及び再処理施設の火災影響評価に用いるデータ及び留意点を収集した。</p> <p>b) H29年度以降に検討が必要な事項</p> <p>内部火災リスク評価においては、火災影響評価又は火災時の放射性物質の漏えい量評価の不確かさの低減のため、SYLVIAコードに加え、同コードでは扱わない詳細な条件を考慮し、火災の発生及び対象領域の熱流動についての解析が可能なコード（CFD</p>		

	<p>(Computational Fluid Dynamics))を用いた評価を行うことが重要である。また、このような詳細解析コードを用いる際には、加工施設及び再処理施設での特徴的な火災(グローブボックス火災等)に対する解析コード適用の妥当性を確認することが重要である。</p> <p>また、重大事故時の火災影響評価に係る技術的知見の整備のため、これまでの試験を通して得られた技術的知見を踏まえ、有機溶媒火災について実機相当のフィルタを対象とした閉じ込め性に関する知見を拡充するとともに、グローブボックス火災について対象可燃物(グローブボックス等の材質である高分子材料)の核燃料物質等を閉じ込める機能の喪失に係る技術的知見を整備することが重要である。</p> <p>② 蒸発乾固</p> <p>a) H28年度までに得られた知見</p> <p>高レベル濃縮廃液の蒸発乾固事象を対象に、事象進展の把握並びに核種の液相から気相への移行及び放出経路中での気相から液相への移行に伴う放射性物質(難揮発性物質及び揮発性ルテニウム(Ru))の放出量を評価するための基礎的なデータ(例:難揮発性物質の移行率、揮発性Ruの移行率、水蒸気の凝縮等による揮発性Ruの気相から液相への移行挙動等)を取得・分析し、技術的知見を収集・蓄積した。</p> <p>b) H29年度以降に検討が必要な事項</p> <p>これまでに得られたデータを適切に使用することにより、蒸発乾固事象時の放射性物質放出量を保守的に評価することは可能ではあるが、蒸発乾固事象全体にわたり事象の進展に沿ってより精緻な評価を行うためには、NOxを含む様々の気相条件を対象とした際の揮発性Ruの熱分解、水蒸気の凝縮等による揮発性Ruの気相から液相への移行挙動、高レベル濃縮廃液中に共存しRuの挙動に影響を与える可能性のある物質等を考慮したデータが重要である。</p> <p>③ 機器の経年劣化</p> <p>a) H28年度までに得られた知見</p> <p>機器の経年劣化に伴う放射性溶液(溶解液、プルトニウム溶液等)の漏えいについて、安全上重要な施設に該当する異材接合継ぎ手に使用されているジルコニウム及びタンタルにおける水素吸収ぜい化割れの可能性に関する技術的知見を整備した。しかし、これらは、通常運転時の硝酸環境中における水素吸収ぜい化割れに関する知見である。</p> <p>b) H29年度以降に検討が必要な事項</p> <p>機器の点検や補修等の保全活動を行うための除染作業時にアルカリ溶液(水酸化ナトリウム)が使用される。アルカリ溶液はタンタルの表面皮膜を腐食させ、除染作業後の表面皮膜には不純物が含まれることから、通常運転(硝酸環境中)において耐食性が低下する可能性がある。また、最新知見によれば水素を吸収させたタンタルは時間の経過とともに機械的特性が低下(水素吸収ぜい化)することから、アルカリ腐食によって発生した水素を吸収したタンタルについても同様の可能性が否定はできない。本事象は、重大事故に位置付けられるものではないが、放射性溶液の漏えいの起因となり得るこれらの事象に係る技術的知見を整備することが重要である。</p>
4. 目的	<p>内部火災を起因とするリスク評価の実施手法整備のため、当該評価手順の素案を作成する。また、内部事象を含めたリスク評価の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ことを目的として以下の項目の技術的検討を行う。</p> <p>① 火災又は爆発</p> <p>② 蒸発乾固</p> <p>③ 機器の経年劣化</p>
5. 知見の活用先	<p>本プロジェクトで得られた知見は、将来的なリスク情報の活用資する。</p>

将来的なリスク情報の活用に資するため、以下の研究を実施する。本プロジェクトの研究は、「原子力規制委員会における安全研究の基本方針」（令和元年5月29日原子力規制委員会決定）における安全研究の目的のうち以下の分類に基づき実施する。

- ① 規制基準等の整備に活用するための知見の収集・整備
- ② 審査等の際の判断に必要な新たな知見の収集・整備

(1) 内部火災等を起因としたリスク評価手法の検討

① 加工施設及び再処理施設の内部火災リスク評価手法の検討【分類①】

内部火災のリスク評価を実施するために代表的な事故シナリオの選定等を行い、選定した代表事故シナリオを対象に、国内外の実用発電用原子炉施設に対する評価手法を参考に、施設の構成、重大事故の同時発生等の施設の特徴を考慮した加工施設及び再処理施設の内部火災を対象としたリスク評価実施手順の素案の検討及びその適用に当たっての課題を整理する。

(2) リスク評価に向けた重大事故等に関する技術的検討

① 火災又は爆発【分類①】

文献調査等を実施し、解析に必要なデータを取得し、解析コード（ゾーンモデルコード及びCFDコード）によるベンチマーク解析により、解析モデル及び解析コードの適用範囲及び特性について確認する。また、MOX燃料加工施設の代表的な火災シナリオに対して、火災影響評価解析を実施し、上記と合わせて火災事象評価方法に関する技術的知見を整備する。

なお、使用する解析コードは、(i) 対象現象の評価について実績のあるコードを使用し、(ii) ベンチマーク解析によりその適用性を確認した上で試解析を実施する。必要と判断された場合には更に解析コードの調査などを実施する。

また、関係機関と協力して核燃料施設の想定火災における対象可燃物（有機溶媒）、核燃料物質等を閉じ込める機能の喪失に影響を与える構成部材等の火災試験によりデータを取得するとともに、核燃料物質等を閉じ込める機能の喪失に係る技術的知見を整備する。

② 蒸発乾固【分類①】

沸騰晩期及び乾固段階で発生が想定される揮発性Ru等について、NOxが共存した際の揮発性Ruの熱分解反応等に着目した試験データを取得し、蒸発乾固事象に関する技術的知見を整備する。試験概要は以下のとおり。なお、これらの試験は関係機関と協力して実施する。

- ・ NOxが共存した際の揮発性Ruの熱分解反応等を把握するための試験を実施する。
- ・ 高レベル濃縮廃液（模擬廃液）中の共存物質の影響等を踏まえた揮発性Ruの移行挙動を把握するための試験を実施する。
- ・ 高レベル濃縮廃液（模擬廃液）の沸騰晩期及び乾固状態での注水時における放射性物質の移行挙動を把握するための試験を実施する。

③ 機器の経年劣化【分類①及び分類②】

機器の経年劣化に伴う放射性溶液（溶解液、プルトニウム溶液等）の漏えいについて、その原因となり得る異材接合継ぎ手で使用されているタンタルの経年劣化事象（腐食及び水素ぜい化）に関する試験を行い、放射性溶液の漏えい事象の発生の可能性を確認するための技術的知見を整備する。試験概要は以下のとおり。なお、これらの試験は関係機関と協力して実施する。

a) 腐食

- ・ アルカリ腐食がタンタルの表面皮膜に及ぼす影響を確認するために、水酸化ナトリウムによりアルカリ腐食させた試験片の表面皮膜の性状をX線を利用した方法及び電気化学インピーダンス法により確認する。
- ・ 一旦アルカリ腐食を受けたタンタルの硝酸溶液中における耐食性に及ぼす影響を確認するために、水酸化ナトリウムによりアルカリ腐食させた試験片を用いて硝酸溶液（通常運転中環境下模擬）における電気化学特性を確認するとともに腐食試験を実施する。

b) 水素ぜい化

- ・ 水酸化ナトリウム溶液濃度とタンタルに吸収される水素量との相関を確認するために、水酸化ナトリウム溶液中でタンタルの試験片をアルカリ腐食させ吸収水素量を測定する。
- ・ 水素吸収及び時効が機械的特性低下に及ぼす影響を確認するために、アルカリ腐食に伴い水素吸収した試験片及び電気化学的に水素を吸収させた試験片を更に時効処理し引張試験を行う。

6. 安全研究概要
(始期：H29年度)
(終期：R2年度)

実施行程表

	H29年度	H30年度	R1年度	R2年度
(1) 内部火災等を起因としたリスク評価手法の検討	① 加工施設及び再処理施設の内部火災リスク評価手法の検討 代表事故シナリオの検討	施設の特徴の再整理、前年度に得られた課題の抽出	解析実施に当たっての課題の検討	リスク評価実施手順の素案作成
				将来的なリスク情報の活用 (R3年度以降)
(2) リスク評価に向けた重大事故等に関する技術的検討	① 火災又は爆発調査 対象可燃物火災の試験の実施(有機溶媒火災、グローブボックス火災等)	解析データの整備、ベンチマーク解析 対象可燃物火災の試験の実施(グローブボックス火災等)	取得データから得られた知見を取りまとめ、解析実施	委託先論文投稿 学会発表 将来的なリスク情報の活用 (R3年度以降)
				R3年度以降論文投稿
	② 蒸発乾固 予備試験	熱分解・凝縮試験、共存物質を踏まえた移行挙動試験、注水時の移行挙動試験		取得データの整理 委託先論文投稿 将来的なリスク情報の活用 (R3年度以降)
	③ 機器の経年劣化 a) 腐食 試験装置整備	表面皮膜確認試験、電気化学特性確認試験、腐食試験		
	b) 水素ぜい化 試験装置整備	吸収水素量測定試験、機械的特性確認試験		
			委託先論文投稿 将来的なリスク情報の活用 (R3年度以降)	
				R3年度論文投稿

	<p>【H29年度の実施内容】</p> <p>(1) 内部火災等を起因としたリスク評価手法の検討</p> <p>① 加工施設及び再処理施設の内部火災リスク評価手法の検討【分類①】</p> <p>再処理施設及びMOX燃料加工施設における火災源、火災が影響する区画、火災の影響を受ける可能性のある安全機能等を整理し、次年度以降の試験解析対象となる代表的な事故シナリオを選定する。また、MOX燃料加工施設を対象に、実用発電用原子炉の内部火災PRA等の手法を用いて試験解析を行い、内部火災における事故シナリオを体系的に抽出する手順を検討する。</p> <p>(2) リスク評価に向けた重大事故等に関する検討</p> <p>① 火災又は爆発【分類①】</p> <p>過去に行われた火災試験を調査し、グローブボックス火災を解析する際に必要となる試験（文献）データを収集する。</p> <p>② 蒸発乾固【分類①】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 高レベル濃縮廃液の蒸発乾固時に発生が想定される揮発性Ruについて、NOxが共存した際の揮発性Ruの熱分解反応等を同定するための試験条件等を検討した上で、予備試験を実施する。 ・ 高レベル濃縮廃液（模擬廃液）中の共存物質の影響等を踏まえた揮発性Ruの移行挙動を把握するための試験条件等を検討した上で、予備試験を実施する。 ・ 高レベル濃縮廃液（模擬廃液）の沸騰晩期及び乾固状態での注水時における放射性物質の移行挙動を把握するための試験条件等を検討した上で、予備試験を実施する。 <p>③ 機器の経年劣化【分類①及び分類②】</p> <p>a) 腐食</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ アルカリ腐食による影響を確認するための試験として、表面皮膜確認試験、電気化学特性確認試験及び腐食試験に関する試験片製作及び試験装置の整備を行い、予備試験を実施する。 <p>b) 水素ぜい化</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 吸収した水素の影響を確認するための試験として、吸収水素量測定試験及び機械的特性確認試験に関する試験片製作及び試験装置の整備を行い、予備試験を実施する。
7. 実施計画	<p>【H30年度の実施内容】</p> <p>(1) 内部火災等を起因としたリスク評価手法の検討</p> <p>① 加工施設及び再処理施設の内部火災リスク評価手法の検討【分類①】</p> <p>内部火災リスク評価の観点から発電炉と加工施設及び再処理施設における施設の特徴を整理し、H29年度に実施した検討（空間相互作用解析を対象とした検討）から得られた課題（MOX燃料加工施設では、グローブボックスの特徴を踏まえた火災区画の設定及びスクリーニングアウトの考え方等）に対する検討を行う。また、実用発電用原子炉施設の内部火災PRA手法におけるスクリーニング解析及び詳細解析をMOX燃料加工施設及び再処理施設に対して用いる場合の課題の抽出を行う。</p> <p>(2) リスク評価に向けた重大事故等に関する検討</p> <p>① 火災又は爆発【分類①】</p> <p>文献調査で入手したデータを用いた解析コード（ゾーンモデルコード及びCFDコード）によるベンチマーク解析を実施し、解析モデル及び解析コードの適用範囲及び特性について確認し、火災事象評価方法に関する技術的知見を整備する。</p> <p>また、グローブボックス火災に関し、グローブボックス構成材料の熱分解特性に関する試験及び換気系フィルタに対する影響に関する火災試験を実施し、熱分解進展・分解ガス放出挙動及びHEPAフィルタ目詰まりに関する技術的知見を整備する。</p> <p>② 蒸発乾固【分類①】</p> <p>H29年度に実施した予備試験結果を踏まえ、下記の試験を実施し、技術的知見を整備する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ NOxが共存した際の揮発性Ruの熱分解反応等を把握するための試験（H30年度は沸騰晩期に想定される状態を中心にデータを取得） ・ 高レベル濃縮廃液（模擬廃液）中の共存物質の影響等を踏まえた揮発性Ruの移行挙動を把握するための試験 ・ 高レベル濃縮廃液（模擬廃液）の沸騰晩期及び乾固状態での注水時における放射性物質の移行挙動を把握するための試験（H30年度は沸騰晩期に想定される状態を中心にデータを取得） <p>③ 機器の経年劣化【分類①及び分類②】</p> <p>a) 腐食</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 水酸化ナトリウム浸漬後の皮膜の性状を確認するため、X線を利用した方法及び電気化学インピーダンス法により表面皮膜確認試験を実施する（パラメータ：水酸化ナトリウム濃度、溶液温度及び浸漬時間）。 ・ アルカリ腐食が、タンタルの電気化学特性に及ぼす影響を確認するため、アルカリ腐食試験及びアルカリ溶液中での電気化学特性確認試験を実施する（パラメータ：水酸化ナトリウム濃度及び浸漬時間）。 ・ アルカリ溶液中でのタンタルの耐食性を確認するために水酸化ナトリウムの濃度、温度及び試験時間を変えて腐食試験を実施する。 <p>b) 水素ぜい化</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 水酸化ナトリウム溶液濃度と水素吸収量との相関を確認するため吸収水素量測定試験を実施する（パラメータ：水酸化ナトリウ

ムの濃度)。

- ・水酸化ナトリウム溶液中で水素吸収させた試験片及び電気化学的に水素を吸収させた試験片を用いて、時効中温度及び時効時間が機械的特性低下への影響を確認するため機械的特性確認試験(引張試験)を実施する(パラメータ:時効中温度及び時効時間)。

【R1年度の実施内容】

(1) 内部火災等を起因としたリスク評価手法の検討

① 加工施設及び再処理施設の内部火災リスク評価手法の検討【分類①】

H30年度に抽出されたMOX燃料加工施設及び再処理施設におけるスクリーニング解析及び詳細解析の課題について、対応策を検討する。

(2) リスク評価に向けた重大事故等に関する検討

① 火災又は爆発【分類①】

文献調査で入手したデータを用いた解析コード(ゾーンモデルコード及びCFDコード)によるベンチマーク解析を実施し、解析モデル及び解析コードの適用範囲及び特性について確認し、火災事象評価方法に関する技術的知見を整備する(前年度からの継続)。

また、グローブボックス火災に関し、換気系フィルタに対する影響に関する火災試験を実施し、HEPAフィルタ目詰まりに関する事象進展評価モデルの構築をするとともに、グローブボックス構成材料の熱分解特性に関する火災試験を実施し、前年度得られたデータと併せ、熱分解進展・分解ガス放出挙動に関する技術的知見を整備する(前年度からの継続)。

② 蒸発乾固【分類①】

H30年度に引き続き、以下の試験を実施し、技術的知見を整備する。

- ・NO_xが共存した際の揮発性Ruの熱分解反応等を把握するための試験(R1年度は乾固時に想定される状態を中心にデータを取得)
- ・模擬廃液の乾固後の注水時への放射性物質の移行挙動を把握するための試験(R1年度は乾固時に想定される状態を中心にデータを取得)

③ 機器の経年劣化【分類①及び分類②】

H30年度に引き続き、前述のパラメータから実施項目を抽出し、以下の試験を実施することにより技術的知見を整備する。

a) 腐食

- ・水酸化ナトリウムと硝酸を交互に浸漬(除染作業環境下模擬)した後の皮膜の性状を確認するためX線を利用した方法及び電気化学インピーダンス法により表面皮膜確認試験を実施する(パラメータ:水酸化ナトリウム濃度及び硝酸濃度)。
- ・水酸化ナトリウムと硝酸溶液との交互浸漬がタンタルの電気化学特性及び耐食性に及ぼす影響を確認するため交互浸漬試験及び浸漬試験後の硝酸溶液中での電気化学特性確認試験及び腐食試験を実施する(パラメータ:水酸化ナトリウム濃度及び硝酸濃度)。

b) 水素ぜい化

- ・水酸化ナトリウム溶液濃度と水素吸収量との相関を確認するため吸収水素量測定試験を実施する(パラメータ:溶液温度)。
- ・電気化学的に水素を吸収させた試験片を用いて機械的特性低下への影響を確認するため機械的特性確認試験(引張試験)を実施する(パラメータ:吸収水素量、ひずみ及び時効時間)。

【R2年度の実施内容】

(1) 内部火災等を起因としたリスク評価手法の検討

① 加工施設及び再処理施設の内部火災リスク評価手法の検討【分類①】

これまでの検討結果を踏まえてMOX燃料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順の素案を作成する。

(2) リスク評価に向けた重大事故等に関する検討

① 火災又は爆発【分類①】

MOX燃料加工施設の代表的な火災シナリオに対して、火災影響評価解析を実施し、評価結果について検討する。

② 蒸発乾固【分類①】

R1年度までに取得した試験データについて、リスク情報への活用といった観点から整理をする。

③ 機器の経年劣化【分類①及び分類②】

R1年度に引き続き、前述のパラメータから実施項目を抽出し、以下の試験を実施することにより技術的知見を整備する。

a) 腐食

- ・水酸化ナトリウムと硝酸の交互浸漬(除染作業環境下模擬)が金属イオンを含む硝酸溶液(通常運転中環境下模擬)中におけるタンタルの電気化学特性及び耐食性に及ぼす影響を確認するため電気化学特性確認試験及び腐食試験を実施する(パラメータ:金属イオン濃度)。

b) 水素ぜい化

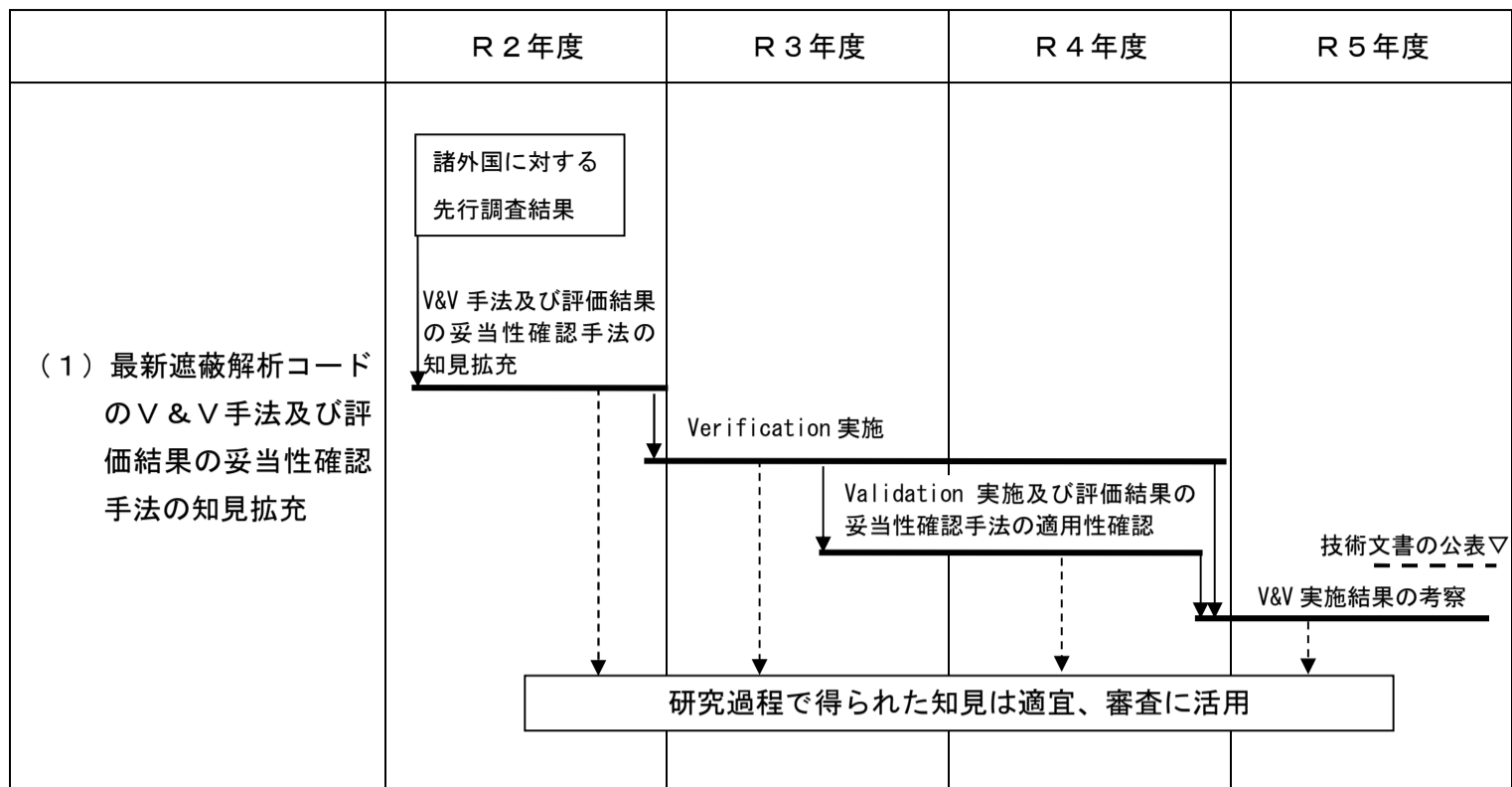
- ・水酸化ナトリウム溶液濃度と水素吸収量との相関を確認するため吸収水素量測定試験を実施する(パラメータ:浸漬時間)。

	<p>・電気化学的に水素を吸収させた試験片を用いて機械的特性低下への影響を確認するため機械的特性確認試験（引張試験）を実施する（パラメータ：時効時間及びひずみ）。</p>
8. 実施体制	<p>【核燃料廃棄物研究部門における実施者（主担当者には○を記載）】</p> <p>○横塚 宗之 技術研究調査官 寺垣 俊男 技術研究調査官 古田 昌代 技術研究調査官 瀧澤 真 技術研究調査官 山口 晃範 技術研究調査官 櫻井 智明 技術研究調査官 久保田 和雄 統括技術研究調査官 野島 康夫 技術参与 山手 一記 技術参与 山田 隆 技術参与 藤根 幸雄 技術参与</p> <p>【前年度までの委託先】</p> <p>・国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・・・実施項目（2）の一部</p>
9. 備考	

研究計画

1. プロジェクト	19. 使用済燃料等の輸送・貯蔵の分野における最新解析手法に係る評価手法の研究	担当部署	技術基盤グループ 核燃料廃棄物研究部門
		担当責任者	森憲治主任技術研究調査官
2. カテゴリー・研究分野	【核燃料サイクル・廃棄物】 J) 核燃料サイクル施設	主担当者	後神進史 技術研究調査官
3. 背景	<p>核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和 32 年法律第 166 号）第五十九条第二項に基づき確認及び第五十九条第三項に基づき輸送容器について承認を受けようとする事業者は、「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則」（昭和 53 年総理府令第 57 号）第五条七、八及び九のロ、第六条一及び三のイに規定する線量基準^{※1}を満足することを遮蔽解析の結果等に基づく説明を行わなければならない。また、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第四十三条の三の五に基づき原子炉を設置しようとする者及び同法第四十三条の四に基づき貯蔵の事業を行おうとする事業者は、「実用発電用原子炉及びその付属設備の位置、構造及び設備の基準に関する規則」第十六条 4 の一、「実用発電用原子炉及びその付属施設の技術基準に関する規則」第二十六条の 2 の六のロ及び「使用済燃料貯蔵施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」第 4 条に規定する線量基準^{※2}を満足することを、遮蔽解析の結果等に基づき説明を行わなければならない。これらの申請が実施されれば原子力規制委員会はその妥当性を評価する必要がある。</p> <p>我が国においては、当該分野の申請に係る遮蔽解析ではこれまで主に離散座標 Sn コードが使用されてきたが、近年では申請内容の妥当性説明等のために最新知見に基づく遮蔽解析コードであるモンテカルロコードが補助的に使用されるケースが増加しており、今後許認可コードとしてもモンテカルロコードの使用頻度増加が予想される。また、事前の調査^(1,2,3)では米国を始めとする諸外国では許認可コードとして自国開発のモンテカルロコードが主体となっており、それらの解析コードに対する検証等も精力的に実施されていることも確認されている。許認可において新規、あるいは使用実績の少ない解析コードが使用された際の審査においては、解析コード固有の評価手法（解析手法）に係る知見が必要になるとともに、解析コード自体の解析精度や信頼性等を確認するための検証（Verification）と妥当性確認（Validation）（以下「V&V」という。）⁽⁴⁾に係る知見も不可欠である。一方で、Sn コードにおいては専用の断面積ライブラリ（遮蔽群定数ライブラリ）に考慮すべき特性が確認されており⁽⁵⁾、解析結果の妥当性確認のためにモンテカルロコード等による比較解析に頼っている現状を受け、申請者による新規技術活用が徐々に進行している傾向にある。</p> <p>※1 輸送容器表面及び表面から 1 メートル離れた位置における最大線量当量率が、各状況に対して以下の基準を超えないこと。</p> <ul style="list-style-type: none"> • 通常輸送時の表面において 2 ミリシーベルト毎時 • 通常輸送時の表面から 1 メートルにおいて 100 マイクロシーベルト毎時 • 一般の試験条件下の表面において通常輸送時から著しく増加せず、且つ、2 ミリシーベルト毎時 • 特別の試験条件下の表面から 1 メートルにおいて 10 ミリシーベルト毎時 <p>※2 平常時における使用済燃料貯蔵施設からの直接線及びスカイシャイン線により公衆の受ける線量が、事業所内他施設からの寄与との合算として、実効線量で 50 マイクロシーベルト／年以下を達成できること。</p>		
4. 目的	許認可審査において、最新知見に基づく遮蔽解析コードであるモンテカルロコード及び専用の連続エネルギー断面積ライブラリを用いた遮蔽評価結果に対する妥当性確認を適切に実施するために、当該コードの V&V 手法及び評価結果の妥当性確認手法の知見拡充を実施する。		
5. 知見の活用先	使用済燃料等の輸送・貯蔵の分野における遮蔽の安全評価について、事業者から最新解析ツールを用いて申請がなされた際、その使用に係る妥当性審査に資する。		
6. 安全研究概要 (始期：R2 年度) (終期：R5 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うち以下の分類に基づき実施する。</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>（1）最新遮蔽解析コードの V&V 手法及び評価結果の妥当性確認手法の知見拡充【分類②】</p> <p>最新知見に基づく遮蔽解析コードによる評価結果を用いた許認可申請が提出された際に、的確かつ迅速な基準適合性審査を実施するために、遮蔽解析コードの V&V 手法及び評価結果の妥当性確認手法の知見拡充を実施する。遮蔽解析コードの V&V 手法の知見拡充については、諸外国の動向や国内有識者の意見等を考慮し、許認可の場面での使用を想定した V&V 実施手順案を作成する。手順案の適用性を確認するために、対象解析コードを選定し、手順案に沿ってコードの検証（Verification）作業を行い、その進捗も考慮しながらコードの妥当性確認（Validation）作業を行う。一連の作業結果を基に手順案の検証・考察を実施し、国内有識者の意見等を考慮しながら、V&V 実施手順として確定させる。また、評価結果の妥当性確認手法の知見拡充については、前者でのコードの妥当性確認作業等を利用して検討を進め、V&V 手法と併せて、審査に活用するための技術文書として整備する。</p>		

行程表



Verification：解析コードの基礎となる物理モデル、方程式等が妥当であることを確認し、それらの数値解をデジタル計算機が許容範囲内で導出できることを確認する実施プロセス。

Validation：対象とする実現象を満足できる範囲内で予測できることを確認する実施プロセス。（ベンチマーク解析により実験データの再現性を確認する。）

7. 実施計画

【R 2 年度の実施内容】

(1) 最新遮蔽解析コードのV & V手法及び評価結果の妥当性確認手法の知見拡充【分類②】

先行調査及び検討結果を基に、外部有識者による意見を聴取しながら、モンテカルロコードのV & V手法及び評価結果の妥当性確認手法を検討し、V & V実施手順案を作成する。

【R 3 年度の実施内容】

(1) 最新遮蔽解析コードのV & V手法及び評価結果の妥当性確認手法の知見拡充【分類②】

V & V実施手順案に基づいて、コード開発に知見を有する者によるコード検証（Verification）作業を開始するとともに、コードの妥当性確認（Validation）のための計画立案及び準備を行う。

【R 4 年度の実施内容】

(1) 最新遮蔽解析コードのV & V手法及び評価結果の妥当性確認手法の知見拡充【分類②】

R 3年度の作業に引き続き Verification 作業を実施し完了させるとともに、Validation のための試験及びベンチマーク解析を行い、V & V実施結果をまとめる。また、前述のベンチマーク解析にて、評価結果の妥当性確認手法の適用性確認を行う。

【R 5 年度の実施内容】

(1) 最新遮蔽解析コードのV & V手法及び評価結果の妥当性確認手法の知見拡充【分類②】

外部有識者による意見を聴取しながらV & V実施結果の考察を行い、V & V実施手順を確定させる。評価結果の妥当性確認手法についても考察を行い、V & V手法と合わせて審査における遮蔽評価結果に対する妥当性確認のために必要な知見としてまとめる。また、本研究の成果を技術文書として公表する。

8. 実施体制

【核燃料廃棄物研究部門における実施者（主担当者には○を記載）】

- 後神 進史 技術研究調査官
- 菱田 政清 技術研究調査官（安全技術専門職）
- 奥田 泰久 技術研究調査官

9. 備考

文 献

- (1) トランスニュークリア株式会社, 2018, 平成 29 年度原子力規制庁請負成果報告書「遮蔽解析コードに係る動向調査」
- (2) エム・アール・アイ リサーチアソシエイツ株式会社, 2019, 平成 30 年度原子力規制庁請負成果報告書「使用済燃料等の輸送・貯蔵に係る最新安全解析手法の動向調査（遮蔽解析）」
- (3) エム・アール・アイ リサーチアソシエイツ株式会社, 2020, 令和元年度原子力規制庁請負成果報告書「使用済燃料等の輸送・貯蔵に係る最新解析手法の動向調査（遮蔽解析）」
- (4) 日本原子力学会標準 シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン：2015
- (5) 株式会社ナイス, 2017, 平成 28 年度原子力規制庁請負成果報告書「断面積ライブラリによる遮蔽評価結果への影響比較」

研究計画

1. プロジェクト	20. 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	担当部署	技術基盤グループ 核燃料廃棄物研究部門
		担当責任者	山田 憲和 首席技術研究調査官
2. カテゴリー・研究分野	【核燃料サイクル・廃棄物】 K) 放射性廃棄物埋設施設	主担当者	廣田 明成 技術研究調査官 入江 正明 技術研究調査官
3. 背景	<p>廃棄物埋設に係る規制基準等の整備状況は、第二種廃棄物埋設のうち、中深度処分の規制基準等の整備に向けて安全確保の考え方の策定に続き事業規則及び許可基準規則等の整備が進められている。またトレンチ処分及びピット処分に関する規則等については、令和1年12月に中深度処分の規制基準等の検討に合わせ対象拡大及び廃棄体・埋設施設の性能規定化の改正が行われた。一方、第一種廃棄物埋設については、今後規制側として安全確保上少なくとも考慮すべき事項を順次示すことが適当であるとされているが時期は未定である。</p> <p>現在検討されている中深度処分の位置に係る要件として廃棄物埋設地は、10万年間にわたり火山活動及び断層活動がない区域に設置すること、さらに、隆起・侵食の影響を考慮したとしても深度70mを確保することが求められている。また、放射性物質の環境への漏えいをできる限り抑制する設計の施設に埋設する概念とし、対象となる廃棄物は、10万年後の時点で直接人と接触することがあっても大きな影響を与えない濃度まで放射性物質が減衰するものに制限されるものとしている。これらを要件とした許可基準規則及びその解釈、位置に係る審査ガイド、地質地盤等ガイド、設計プロセス・線量評価ガイド等を整備し、さらに審査に向けてこれらの判断基準の整備及び後続規制に向けて廃棄物確認、施設確認、モニタリング等の基準を整備する必要がある。</p> <p>中深度処分の安全機能は、埋設施設と埋設施設が設置される地質環境に依存し、適切な場所の選定と選ばれた場所でのそれらの長期間にわたる機能の発揮を要求する考え方は、今後整備が必要な第一種廃棄物埋設とも、対象とする期間の長さ以外は共通する点が多い。したがって、まず安全研究の成果及び現在までの知見を用いて中深度処分に係る規則、規則の解釈、ガイド等を整備しつつ、今後、第一種廃棄物埋設についても、必要な部分の検討を加えることにより同様の整備を行うことが適切であると考えられる。また、これらの埋設事業はその事業期間が300～400年程度にわたることが予想されているため、継続した検討を行い、新知見を反映していくことになる。</p> <p>最終処分関係閣僚会議（平成27年12月）において、国により特定放射性廃棄物の最終処分に関する科学的有望地の提示し、その後文献調査、概要調査、精密調査を経て最終処分建設地が選定され、事業許可の申請が行われることとされている。これに対する規制の関わりとしては、特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針（平成27年5月閣議決定）において、「原子力規制委員会は、最終処分に関する安全確保のための規制に関する事項について、順次整備し、それを厳正に運用することが必要である」と及び「原子力規制委員会は、概要調査地区等の選定が合理的に進められるよう、その進捗に応じ、将来の安全規制の具体的な審査等に予断を与えないとの大前提の下、概要調査地区等の選定時に安全確保上少なくとも考慮すべき事項を順次示すことが適当である」とされている。このため、事業の進捗に応じ、立地要件及びその調査の適切性の判断指標を中心として、安全研究の成果を反映して、これらを示していくことになる。</p> <p>第二種廃棄物埋設については、廃炉の計画が進むに従い、トレンチ処分及びピット処分の事業化が進み、更に炉心の解体が進むに従って中深度処分の事業化も具体化されることが予想される。また、研究施設等廃棄物の埋設については、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が実施主体となることが法律で定められており、その実施計画ではトレンチ処分及びピット処分から事業化するとされている。</p> <p>諸外国における我が国の第一種廃棄物埋設に相当するガラス固化体等の地層処分に関しては、フィンランド、スウェーデン、フランス等において、国ごとの進捗の相違はあるものの、許可基準及びガイドが策定され、フィンランドでは平成27年に建設許可が交付され、今後操業許可申請がされる見込みである。諸外国における地層処分の規制基準のポイントとしては、サイト選定における水理地質条件、地球化学環境条件等の地質環境特性とその長期的安定性、天然バリア機能の安定性と調査手法の適切性、人工バリアの閉じ込め機能の立証、安全評価手法と閉鎖後の線量拘束値、低頻度事象の定義、発生確率及び線量との関連性等が示されていることである。また、諸外国、特にフランスにおいては、規制当局が実施主体の立地調査結果に対する意見を求められ、調査の品質及び評価の妥当性等に関する意見書を提出しており調査段階での規制の関与がある。我が国における規制の関与は、特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（平成12年法律第117号）で定められた、経済産業大臣が最終処分に関する基本方針及び最終処分計画を定めようとするときに、最終処分の実施に関する事項及び最終処分に係る技術の開発に関する事項の安全確保のための規制に関するものについて、原子力規制委員会の意見を聴かなければならない」とされている時点及び事業許可申請以降の段階である。一方、水圧、水質等の調査のように、擾乱を受けていない調査段階の初期状態から継続的に実施し、調査や建設に伴う擾乱の程度を把握する必要のある調査もある。事業許可申請は適切な項目と品質に裏付けられたものである必要があり、そのためには、あらかじめ、申請に必要となる地質環境及び長期の変動予測を行うための調査・評価手法とその品質保証に関する知見の整理と妥当性を評価する指標を提示することが必要となる。</p> <p>我が国の事業者等における研究としては、総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子力小委員会地層処分技術WGにおいて、地層処分施設の立地に適切な科学的有望地の要件と基準に関する検討結果が平成28年8月に公開され、そこでは断層、火山、隆起、侵食、地熱、熱水活動及び鉱物資源に関しては、回避すべき範囲及び回避が好ましい範囲の基準が提示され、さらに輸送などの観点から、港湾（海岸）から20km程度の範囲の沿岸域及び海岸線より15km程度以内の海底下が好ましい範囲として提示された。しかしながら、事業者等においては、将来10万年までの自然事象の予測可能性に関しての研究開発は行われているが、10万年を超える期間に関しては、起因事象となるプレート運動の変動パターンを幾つか仮定した上での定性的分析が主な評価手段であり、実際の予測可能期間の検討及び10万年を超える予測可能期間内の自然事象、地下水流動場等の地質環境変動の予測に関する検討は行われていない。</p> <p>平成26年度までに行われた第一種廃棄物埋設に係る安全研究では、立地基準の整備に活用可能な活断層、第四紀火山などの地質</p>		

	<p>関連の各種データベース及び10万年程度の地質事象を対象に、将来予測に活用可能な調査評価手法に関する知見の整理並びに審査に活用可能な安全評価手法の構築を行ってきた。これらの安全研究の成果は中深度処分¹の立地基準の考え方に反映されている。また、中深度処分に関連して、基準策定の検討に反映するため、諸外国の基準及び国際基準、地下利用状況等の調査を実施するとともに、将来の安全審査に関連する重要事象として、基本的な地下水流動、核種移行評価技術に加えて、ガス発生の影響、地震影響等の検討を行ってきた。</p> <p>これらを背景とし、中深度処分等の位置に係る審査ガイド等の策定においては、長期間の地質環境安定性の評価の妥当性、断層、侵食等の地質事象に関する評価が可能な期間等を整理した上で、取得可能な各種情報に基づいて、種々の地質事象に対して必要な期間中の安定性を示すための科学的・技術的知見の取得と考え方の整理が必要である。それらの情報を取得する調査に求める品質を示す調査ガイドの整備のために、必要な情報とその取得方法、それによる擾乱の範囲等を検討する必要がある。また、長期の安全評価については、海水準変動等の自然事象を考慮した沿岸域（陸側及び海側）の特性まで評価技術の適用範囲を広げる必要があるほか、埋設施設内で発生するガスの影響、バリア材料の長期性能評価の妥当性など、新規の知見を反映した継続的な検討が必要である。</p>
4. 目的	<p>中深度処分の許可基準規則及び審査ガイド等の整備及び適合性審査、後続規制の確認（以下「審査等」という。）の際の判断に必要な知見の収集・整備等における人工バリアの長期性能評価手法及び天然バリアとなる地質環境の長期安定性評価手法の整備に係る科学的・技術的知見の蓄積を行う。なお、これらの知見は第一種廃棄物埋設の立地選定において安全確保上少なくとも考慮すべき事項等の整備に対しても共通の課題として扱われる課題である。</p>
5. 知見の活用先	<p>本プロジェクトで得られた成果は、第二種廃棄物埋設における中深度処分の許可基準規則及びその解釈、位置に係る審査ガイド、地質地盤等調査ガイド、設計プロセス・線量評価ガイド等に反映するとともに、第一種廃棄物埋設に対して、概要調査地区等の選定時に示す安全確保上少なくとも考慮すべき事項等の検討に反映される。具体的には、</p> <ul style="list-style-type: none"> ①下記に示す対象規則等の整備における規制要求等の検討に関する科学的・技術的知見の収集・整備 <ul style="list-style-type: none"> ・核燃料物質又は核燃料物質によつて汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則（以下「事業規則」という。） ・第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則及びその解釈（以下「許可基準規則」という。） ・指定廃棄物埋設区域における土地の掘削の許可等に関する規則（以下「掘削制限規則」という。） ・中深度処分の廃棄物埋設地の設計プロセス及び公衆被ばく線量評価審査ガイド（以下「設計プロセスガイド」という。） ・中深度処分における廃棄物埋設地の位置に係る審査ガイド（以下「位置に係るガイド」という。） ・廃棄物埋設に関する原子力規制委員会の確認等に係る運用ガイド（廃棄物埋設確認）（以下「確認ガイド」という。） ②審査等の規制活動において、審査等の際の判断に必要な根拠となる科学的・技術的知見の収集・整備 ③審査等の規制活動において、審査等の際の判断に必要な核種移行解析等のコード作成のための科学的・技術的知見の収集・整備 ④処分分野の技術基盤の構築及び人材維持・育成のための科学的・技術的知見の収集・整備
6. 安全研究概要 (始期：H29年度) (終期：R2年度)	<p>本プロジェクトにおいては、現在進められている中深度処分の事業規則及び許可基準規則並びに審査ガイド等（以下「規制基準等」という。）の整備に必要な科学的・技術的知見の整備を行う。また、審査等の際の判断に必要な知見の収集・整備及び安全評価に使用する解析コード等の整備を行う。具体的には、地質環境及び水理環境の評価手法に関する科学的・技術的知見を整理する。また、地質環境及び水理環境のモニタリング及び閉鎖措置又は廃止措置における性能等の確認及び地下水等モニタリング（以下「性能確認モニタリング」という。）について基本的考え方の整理及び具体的判断指標等について検討を行う。これらの科学的・技術的知見の抽出のために以下に示す項目について安全研究を行い、規制基準等へ反映すべき又は適用すべき判断指標等の整備を行う。</p> <p>本プロジェクトは、「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> <ul style="list-style-type: none"> 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新たな知見の収集・整備（以下「分類②」という。） ③ 規制活動に必要な手段の整備（以下「分類③」という。） ④ 技術基盤の構築・維持（以下「分類④」という。） <p>(1) 立地に係る自然事象の長期評価に関する研究【分類①、分類②、分類③及び分類④】</p> <p>中深度処分における立地に関する規制基準等の整備では、対象となる廃棄物の特性にあった設計及び性能評価期間をそれぞれ設定する必要がある。中深度処分においては、隆起侵食、火山活動、断層等活動、天然資源の有無等の自然事象に関して少なくとも10万年にわたる評価が求められていることから、以下に示す項目を抽出し、規制基準等の整備に活用可能な知見を整備し、最終年度に成果の内容を取りまとめる。</p> <p>a. 中深度処分における隆起及び侵食に関する評価手法の研究【分類①及び分類②】</p> <p>中深度処分における隆起及び侵食の評価手法に関しては、現状において基準指標面による年代評価によって過去数十万年までの評価が可能であるが評価手法を確立するため、適用される時間スケール等が異なる複数の手法を用いた評価手法の適用性を確認する。また、一般的に用いられる隆起速度を侵食速度の指標とする考え方は地形が長期的に変化しないことを仮定しているため、複数の海水準変動サイクルを考慮すると不確実さが大きい。したがって、長期的な埋設深度の変動を評価するためには過去長期間にわたる侵食速度の評価を併用することが重要であり、現在、宇宙線生成核種等の地球化学指標を用いた評価手法の適用が進められているが、ボーリング孔等を用いた、点での評価が中心であり、また適用事例が十分得られていない。そのため、面的な侵食を評価するために、同一地域における変動地形学的手法等による隆起評価との比較検討を行い、深度の減少評価に用いられている隆起による評価の適切性を判断し、廃棄物埋設地における深度変化の評価手法を構築する。</p> <p>b. 中深度処分における断層等に関する評価手法の研究【分類①及び分類②】</p> <p>中深度処分における廃棄物埋設地は、将来10万年間にわたって断層活動による断層の著しい変動が生ずるおそれのない区域に設置しなければならない。現行の浅地中処分の許可基準規則では、後期更新世以降（約12～13万年前以降）の活動が否定できない場合中期更新世以降（約40万年前以降）まで遡って地形、地質・地質構造、応力場等を総合的に検討した上で断層の評価を行うことが必要であるが、中深度処分施設は、地下70mを超える深部に設置され直接観察による評価ができないことから、物理探査等による評価手法及びその妥当性について科学的・技術的知見の蓄積が必要である。なお、海底地すべり面の滑動可能性評価</p>

手法に係る科学的・技術的知見の整備も併せて行う必要がある。

c. 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【分類②及び分類③】

約10万年周期で起きる海水準変動は、淡水—塩水が複雑な分布で存在する沿岸域において地下水流動系の変動に影響することから、地下水流動系の長期的な変動を評価するためには、過去の海水準変動等に伴う地下水流動と水質の変動等の評価手法の整備が必要である。したがって、淡水—塩水等の混合した状況での同位体水文学的評価手法の整備とそれらの結果からの地下水流動系変動の評価手法の整備、長期的な水質履歴の指標となる地球化学的評価手法の整備を行うとともに、塩水—淡水混合系において、海水準変動や隆起・侵食の影響による地下水流動系の評価を原位置ボーリング等のデータを含めてモデル化を行い、長期地下水流動系の評価手法に関する科学的・技術的知見の蓄積を行う。

d. 中深度処分における岩盤の力学的状態と水理学的特性に関する研究【分類②及び分類④】

(i)放射性廃棄物を埋設する岩盤は、造構運動等の自然事象及び処分場の坑道掘削等の人為事象により様々な作用を受けている。この作用により岩盤が損傷又は破壊し、その結果、地下水の流動や放射性核種の移行（以下「物質移行」という。）経路となることが懸念されている。特に、放射性廃棄物を処分するための坑道等の掘削によって岩盤応力が解放された場合、物質移行経路となり得る掘削影響領域（以下「EDZ」という。）が形成されることが考えられる。こうした岩盤中における物質移行を評価するためには、岩盤の力学的状態とそれに伴う岩盤損傷等による水理学的特性の関係性を適切に把握することが必要である。そこで、岩盤の力学的状態とそれに伴う岩盤の状態を原位置試験又は室内試験により把握するとともに水理学的特性を実験的に取得して、放射性核種の移行挙動が適切に評価されていることの妥当性を確認するために必要な科学的・技術的知見を取得する。

(ii)一方、坑道の閉鎖においては、EDZの存在を考慮した上で、安全上支障を生じるような水みちが長期的に形成されないよう、適切に埋戻しが行われていることの確認が必要である。したがって、閉鎖措置の際に、坑道が安全上支障を生じることのないよう確実に閉鎖されているかを確認するためには、埋戻し材で埋め戻した坑道や閉塞部におけるベントナイト系止水材の長期的変質とそれに伴う透水性の変化について科学的・技術的知見の蓄積が必要である。

e. 中深度処分における岩盤の収着・移行現象に関する研究【分類②及び分類④】

岩盤中の放射性核種の移行を考える際、微小な空隙中での放射性核種の物質輸送とその過程での鉱物への収着が移行を遅延させる重要な機構である。この機構評価では、核種の分散系での収着反応評価、金属酸化物の集合体の評価など水分子の移動や空隙内の分布、表面の凹凸、電気二重層の影響等様々な評価がされているが、微小空間での収着に寄与する特異的な現象を統一的に考慮することで、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を明らかにし、そのような特異的な収着反応が放射性核種の移行に与える影響を検討する。岩石中の放射性核種の拡散及び収着には、岩石の固相及び液相の様々な条件が影響を与えるため、各試験の目的に合わせて空隙中の液相の化学状態、空隙のサイズ等を制御した試料を用いた試験を行う。

(2) 廃棄物埋設における性能評価手法に関する研究【分類①、分類②、分類③及び分類④】

中深度処分における規制基準等を整備するに当たっては、廃棄物埋設地における多重バリアシステムとしての人工バリア及び天然バリアの長期性能を評価するための評価手法の妥当性について科学的・技術的知見の蓄積が必要である。そこで、以下に示す項目を抽出し、規制基準等の整備に活用可能な知見を整備し、最終年度に成果の内容を取りまとめる。

a. 人工バリアの長期性能評価手法の研究【分類①、分類②、分類③及び分類④】

・ベントナイト系人工バリアの長期性能評価手法の研究

ベントナイト系人工バリアの長期変質挙動に関しては、現在まで主に淡水系地下水環境下を想定した室内実験及び解析コードが整備されている。しかしながら、淡水—塩水混合系地下水環境の立地も想定されることからこれらの環境における評価手法の妥当性について科学的・技術的知見の蓄積が必要である。そこで、淡水—塩水混合系地下水環境下における室内実験とモデル解析を中心としてベントナイト系人工バリアの変質挙動に関する評価手法の構築を行う。一方、坑道の埋戻しや閉塞材としてベントナイト系材料が用いられるが、地下水に溶存したアルカリ等によりベントナイトの溶解に加え二次的鉱物が生成・沈殿することで物質移行性能に及ぼす影響について科学的・技術的知見の整備を行う。

・セメント系人工バリアの長期性能評価手法の研究

中深度処分の廃棄物埋設地の設計におけるセメント系人工バリアについて、300年を超える長期の漏出抑制性能を評価するために必要な科学的・技術的知見を整備する。具体的には、現在国内で広く使用されているセメント系材料を中心にセメント硬化体の長期安定性に関係する結晶構造や物質移行特性、さらに、これらに関係する鉱物組成を考慮した材料設計、養生方法及び維持管理方法並びに評価モデルに関連し既往の研究の調査及び試験を実施し、300年を超えるセメント硬化体の長期性能評価を行う上での課題の整理を行う。また、これらセメント硬化体の長期安定性に関する既往の研究成果等のコンクリートの長期性能評価への適用性について検討し、人工バリアとして使用することを想定した場合の長期性能に関する課題として整理する。さらに、セメント系人工バリアについて、体積変化によるひび割れ等の発生が物質移行特性への影響について科学的・技術的知見の整備を行う。

b. 天然バリアの自然事象を考慮した水理特性の評価手法の研究【分類①、分類②及び分類③】

天然バリアとして機能する低透水性岩盤の透水特性、拡散特性等の核種移行の遅延効果に関する評価手法は、海水準変動及び隆起・侵食によって地形及び動水勾配が大きく変化する地域においては、これを考慮する必要がある、地形変化等に応じた水理特性・拡散特性等の変化に関する物理化学モデルの整備及び性能評価に必要な科学的・技術的知見の蓄積と解析コードを整備する。

(3) 地質環境及び水理環境モニタリングに関する研究【分類①及び分類②】

中深度処分においては、坑道の閉鎖後においても廃止措置の開始までの間は、廃棄物埋設地からの放射性物質の異常な漏えいを監視・測定するためのモニタリング設備の設置が必要である。この際、モニタリング設備が人工バリア及び天然バリアの機能を著しく損なうことがないこと、モニタリング施設の撤去に際して放射性物質が移行しやすい経路が生じないよう撤去及び埋戻しを行うこと等を考慮した設計がなされることが重要である。

このため、調査ボーリング孔、坑道閉鎖後における漏えいモニタリングの観測孔の設置及び漏えいモニタリングの観測孔等の閉塞・埋戻しが適切に行われていることの確認等に関する科学的・技術的知見を整理するために以下の項目を実施する。

a. 性能確認モニタリングに関する研究【分類①及び分類②】

中深度処分では、管理期間終了の300～400年間の廃棄物埋設地における漏えい抑止を求めている。廃棄物埋設地を構成する人工バリアの性能を確認するために施設及び地下水等のモニタリングにより評価する必要がある。そこで、モニタリングにより性能確認を行うための評価手法の妥当性について判断するために必要な科学的・技術的知見を蓄積する。また、これらの知見を活用し、指定廃棄物埋設区域の設定の際に必要な科学的・技術的知見として整備する。

b. 閉鎖措置に係る評価手法の整備【分類①及び分類②】

モニタリング孔等の閉塞・埋戻しに係る妥当性判断に必要な知見及び閉鎖確認に係る科学的・技術的知見を整備する観点から、室内透水試験等を実施し、水が移行しやすい経路が生じないようにモニタリング観測孔の埋戻しを行う際の閉塞材料の選定、止水性確認方法及び閉鎖方法の妥当性確認並びに閉鎖確認の妥当性判断に資する試験の実施に必要な知見を取得する。また、ボーリング孔を用いた閉鎖確認の妥当性判断に資する試験を行い、閉塞・埋戻しの技術的成立性に係る妥当性判断に必要な知見及び閉鎖確認に係る科学的・技術的知見を整備する。

実施行程表

	H29年度	H30年度	R1年度	R2年度
放射性廃棄物埋設の規制の考え方及び規制基準等の整備（基盤課）	○中深度処分 （H28年度中に規制の考え方、放射線防護の考え方を整備）			

	・許可基準規則及びその解釈の整備 ・事業規則（廃棄体、埋設施設の技術基準（性能規定化））の整備 ・位置に係る審査ガイド、設計プロセス・線量評価ガイド等の整備			

	・地質地盤調査ガイド、性能確認モニタリングガイド等の整備 ・確認要領等後続規制に資する科学的・技術的知見の整備			
○トレンチ処分、ピット処分 （H28年度中に廃棄体、埋設施設の技術基準の整備（性能規定化））				

・許可基準規則及びその解釈の改訂 ・事業規則（廃棄体、埋設施設の技術基準（性能規定化））の整備				
○研究施設等廃棄物 （H28年度中に廃棄物性状調査及び論点整理）				

・安全確保に係る技術的検討 ・許可基準規則及びその解釈の整備				
○第一種廃棄物埋設 （第一種廃棄物埋設の安全確保上少なくとも考慮すべき事項の整備）				

		<p>(1) 立地に係る自然事象の評価に関する研究</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・隆起・侵食量評価手法の適用性検討 ・断層等の評価手法の適用性検討 ・地下水流動場評価手法の沿岸域への適用性検討 	<ul style="list-style-type: none"> ・隆起・侵食評価手法の面的評価の適用性検討 ・断層等の評価手法の広域場への適用性検討 ・地下水流動場評価手法の地形変化域への適用性検討 ・海底地すべり面の滑動可能性評価手法の検討 	<ul style="list-style-type: none"> ・隆起・侵食評価手法の適用要件の整理 ・断層等の評価手法の適用要件の整理 ・地下水流動場評価手法の適用要件の検討 ・海底地すべり面の滑動可能性評価の適用要件の整理 	<ul style="list-style-type: none"> ・隆起・侵食評価手法の構築 ・断層等の評価手法の構築 ・地下水流動場評価手法の構築 ・海底地すべり面の滑動可能性評価手法の構築 ・立地に係る自然事象の評価に関する研究の取りまとめ ・EDZの室内試験機器の製作等 ・EDZの原位置試験の計画 ・岩盤の収着特性試験 	▽論文公表	
			提供				随時反映	
			中深度処分位置に係る審査ガイド等の整備				中深度処分地質地盤調査ガイドの整備及び確認等後続規制に資する科学的・技術的知見の整備	
						長期時間スケールにおける地質事象を考慮した安全確保の考え方の整理		
			随時反映				随時反映	
			第一種廃棄物埋設の安全確保上少なくとも考慮すべき事項の整備					
		<p>(2) 廃棄物埋設における性能評価手法に関する研究</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・人工バリア変質挙動に関する室内実験と天然バリアの核種移行評価のための課題整理 	<ul style="list-style-type: none"> ・人工バリア変質挙動に関するコード構築と天然バリアの核種移行に関する文献調査 	<ul style="list-style-type: none"> ・人工バリアの変質挙動評価手法の構築と天然バリアの核種移行モデル整備 	<ul style="list-style-type: none"> ・成果の取りまとめ、評価手法の構築、ガイド改訂のための論点整理 ・セメント系人工バリアの細孔構造及び体積変化の評価 	▽論文公表	
			随時反映					
			中深度処分位置に係る審査ガイド等の整備					
		<p>(3) 地質環境及び水理環境モニタリングに関する研究</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・性能確認及びモニタリングに関する諸外国の規制制度の調査分析 	<ul style="list-style-type: none"> ・モニタリング手法に関する既往の知見の調査分析 ・人工バリアの長期性能確認及び性能評価に関する既往の知見の調査分析 	<ul style="list-style-type: none"> ・フィールド試験による地下水流動場の検証技術の検討 ・人工バリアの長期性能確認の評価手法の検討 	<ul style="list-style-type: none"> ・性能確認及びモニタリング手法の評価に係る取りまとめ ・人工バリアの長期性能確認の評価手法の整備 	▽論文公表	
			随時反映					
			中深度処分の性能確認モニタリングガイド等の整備及び確認等後続規制に資する科学的・技術的知見の整備					
7. 実施計画	<p>【H29年度の実施内容】</p> <p>(1) 立地に係る自然事象の評価に関する研究【分類①及び分類②】</p> <p>中深度処分の立地審査ガイド整備において、隆起侵食、断層等活動等について立地要件が示されており、これらの立地に係る要件評価の妥当性を判断するために必要な科学的・技術的知見を蓄積する観点から、以下に示す検討を行う。</p> <p>a. 隆起及び侵食に係る評価手法に係る科学的・技術的知見の整備【分類①及び分類②】</p>							

<p>海成段丘における隆起速度を評価する光ルミネッセンス年代測定法手法の妥当性を評価するために、堆積岩地域及び花崗岩地域について実施しその適用性について整理する。</p> <p>b. 断層等の評価手法に係る科学的・技術的知見の整備【分類①及び分類②】 断層等の評価手法として、断層面の応力状態により評価する力学的評価手法について、断層タイプごとの適用性について影響因子、不確実性等を抽出しその妥当性について整理する。</p> <p>c. 地下水流動場評価手法に係る科学的・技術的知見の整備【分類②】 低透水性環境下における地下水流動場の評価手法の妥当性を評価するため、海水準変動等により塩水流入の影響による地下水流動への影響について整理する。</p> <p>(2) 廃棄物埋設における性能評価手法に関する研究【分類①及び分類②】</p> <p>a. 人工バリアの長期性能評価に係る科学的・技術的知見の整備【分類①及び分類②】 塩水-淡水混合系地下水環境下を想定した環境において、ベントナイト系人工バリアの長期変質挙動を評価するための室内実験を行い、モデル構築やコード開発に必要なデータを取得する。</p> <p>b. 天然バリアの核種移行評価に係る科学的・技術的知見の整備【分類①及び分類②】 従来の天然バリアの核種移行評価手法において、海水準変動、隆起、侵食等の地形変化によって動水勾配が大きく変化する可能性のある沿岸域に適用する際の課題を整理する。</p>
<p>【H30年度の実施内容】</p> <p>(1) 立地に係る自然事象の評価に関する研究【分類①及び分類②】 中深度処分位置に係る審査ガイド整備において、隆起侵食、断層等活動等について立地要件が示されており、これらの立地に係る要件評価の妥当性を判断するために必要な科学的・技術的知見を蓄積する観点から、以下に示す検討を行う。</p> <p>a. 隆起及び侵食に係る評価手法に係る科学的・技術的知見の整備【分類①及び分類②】 隆起及び侵食の評価手法には、時間スケール及び空間スケールの異なる複数手法があり、複数の手法を併用することによって、より確からしい評価手法とすることが重要であることから、各評価手法の単独又は組み合わせた場合の隆起・侵食評価手法の適用条件等の整理を行う。</p> <p>b. 断層等の評価手法に係る科学的・技術的知見の整備【分類①及び分類②】 断層に関する評価は、物理探査による断層の長さの認定とその連結性に関する評価の妥当性、断層活動による力学的・水理学的影響評価の妥当性に関する科学的視点について整理する。 また、海底地すべり面の滑動性に関する評価について、過去の地層堆積時又は堆積後の未固結から半固結時までに発生した海底地すべりに起因する地すべり面の再滑動性について、既存知見の整理と再滑動性評価手法の課題の抽出を行う。</p> <p>c. 地下水流動場評価手法に係る科学的・技術的知見の整備【分類②】 地下水流動場評価は、水理地質構造、地球化学環境等を踏まえて、廃棄物埋設地から生活圏に至る地下水の流動経路を考慮し、廃棄物埋設地の設置場所が選定されると考えられる。そこで、隆起・侵食等の地形変動や岩盤性状が地下水流動評価に与える影響を判断するための評価手法の適用性の検討を行う。</p> <p>(2) 廃棄物埋設における性能評価手法に関する研究【分類①及び分類②】 中深度処分においては、廃棄物埋設地からの放射性物質の漏出を合理的に達成できる限り十分に低減する人工バリアの設置が見込まれる。このため、設置される環境において技術的に施工可能なものであることに加えて、廃棄物埋設地の外への主要な放射性物質の漏出を抑制する性能（以下「漏出抑制性能」という。）が優れたものを選定する必要がある。それを踏まえ、人工バリアの長期性能評価の妥当性及び天然バリアの核種移行評価の妥当性を判断するために必要な科学的・技術的知見を蓄積する観点から、以下に示す検討を行う。</p> <p>a. 人工バリアの長期性能評価に係る科学的・技術的知見の整備【分類①及び分類②】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・人工バリアの変質を考慮した物質移行-変質連成解析に係る科学的・技術的知見の整備【分類①及び分類②】 ベントナイト系人工バリアの変質メカニズムを把握するとともに、変質に影響を及ぼすイオン種の拡散挙動を評価するに当たり、見かけの拡散係数を用いた拡散モデルと有効拡散係数を用いた拡散モデルの適応性について検討を行った上で、沿岸陸域に廃棄物埋設地が立地した場合に考慮が必要となる塩水系地下水に対応した解析コードへの改良等を行う。 ・セメント系人工バリアの長期性能評価に係る科学的・技術的知見の整備【分類①及び分類②】 中深度処分の廃棄物埋設地の設計におけるセメント系人工バリアについて、セメント硬化体の長期安定性に関係する結晶構造や物質移行特性、さらに、これらに関係する鉱物組成を考慮した材料設計、養生方法及び維持管理方法並びに評価モデルに関連する既往の研究を調査し、300年を超えるセメント硬化体の長期性能評価を行う上での課題の整理を行う。また、これらセメント硬化体の長期安定性に関する既往の研究成果等をコンクリートの長期性能評価に適用する際の課題についても整理する。 <p>b. 天然バリアの核種移行評価に係る科学的・技術的知見の整備【分類①及び分類②】 中深度処分の廃棄物埋設地に関しては、合理的に設置可能な区域から、水理地質構造、地球化学環境等を踏まえて、廃棄物埋設地から生活環境への主要な放射性物質の移行を抑制する性能が優れた地点を選定することが考えられることから、以下に示す検討を行う。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・想定される自然現象として隆起・侵食及び海水準変動を考慮し、三次元地形変化シミュレーションと三次元地下水流動・塩分濃度シミュレーションの解析コードを組み合わせた評価コードシステムに対し、各解析コードの機能や入力制約条件を踏まえた性能分析を進め、評価コードシステムとしての改良点を検討する。 ・H29年度において実施した隆起・侵食及び海水準変動による地形変化の評価結果を基に推定される地形変化の不確実性に基づき、非定常な三次元地下水流動・塩分濃度の予察的解析を実施し、地形変化の不確実性が地下水流動・水質に与える影響の傾向や重要因子について分析を行う。

(3) 地質環境及び水理環境モニタリングに関する研究【分類①及び分類②】

中深度処分の閉鎖措置における性能確認の判断指標の整備に必要な人工バリアの性能確認及び地下水等モニタリングについて、評価手法の妥当性を判断するために必要な科学的・技術的知見を蓄積する観点から、以下に示す検討を行う。

a. 地下モニタリング技術に関する既往の知見の調査分析【分類①及び分類②】

地下モニタリング、ボーリング等に係る既往情報を対象に、中深度処分で想定される深度における性能確認モニタリング技術やモニタリング機器の撤去及び観測孔の閉鎖方法に関する既往の技術的情報を収集・整理する。

b. モニタリング孔等の閉鎖確認に係る科学的・技術的知見の整備【分類①及び分類②】

- ・モニタリング孔等の閉塞・埋戻しに係る妥当性判断に必要な知見及び閉鎖確認に係る科学的・技術的知見を整備する観点から、室内透水試験等を実施し、水が移行しやすい経路が生じないようにモニタリング観測孔の埋戻しを行う際の閉塞材料の選定、止水性確認方法及び閉鎖方法の妥当性確認に必要な知見を取得する。
- ・次年度以降に計画する閉鎖確認の妥当性判断に資する試験の実施に必要な知見を取得する。
- ・ボーリング孔を用いた閉鎖確認の妥当性判断に資する試験を行うための試験装置の設計を行い、閉塞・埋戻しに係る妥当性判断に必要な知見及び閉鎖確認に係る科学的・技術的知見を整備する。

【R1年度の実施内容】

(1) 立地に係る自然事象の評価に関する研究【分類①及び分類②】

中深度処分の位置に係る審査ガイド整備において、隆起侵食、断層等について立地要件が示されており、これらの立地に係る要件評価の妥当性を判断するために必要な科学的・技術的知見を蓄積する観点から、以下に示す検討を行う。

a. 隆起・沈降及び侵食に係る評価手法に係る科学的・技術的知見の整備【分類①及び分類②】

過年度において整理・抽出した、中深度処分の評価対象とする期間及び評価対象とする地域を考慮した隆起・沈降及び侵食を評価する手法に関する課題、適用条件等を踏まえ、隆起・沈降及び侵食の性能評価手法の組合せによる評価精度の向上について検討し、深度を確保する上での性能評価手法の技術的妥当性について整理する。

b. 断層等の評価手法に係る科学的・技術的知見の整備【分類①及び分類②】

中深度処分の評価対象とする期間における断層、地すべり及び層界面の滑動による地盤の損傷、水理学特性の低下等に関する評価手法の科学的・技術的知見を取得する。また、地質構造の評価手法と岩盤損傷との関連性について科学的・技術的知見を取得する。

c. 地下水流動場評価手法に係る科学的・技術的知見の整備【分類②】

評価対象地盤の地下水流動を考える上で、必要となる広域及びニアフィールドの考え方を整理し、広域及びニアフィールドにおける地下水流動を評価する技術的指標の抽出を行う。また、物理探査等による情報に基づく広域の地下水流動評価の適用性及び限界を把握し、このような広域地下水流動の妥当性を判断するための科学的・技術的知見を取得する。

(2) 廃棄物埋設における性能評価手法に関する研究【分類①及び分類②】

中深度処分においては、廃棄物埋設地からの放射性物質の漏出を合理的に達成できる限り十分に低減する人工バリアの設置が見込まれる。このため、設置される環境において技術的に施工可能なものであることに加えて、廃棄物埋設地の外への主要な放射性物質の漏出を抑制する性能（以下「漏出抑制性能」という。）が優れたものを選定する必要がある。それを踏まえ、人工バリアの長期性能評価の妥当性及び天然バリアの核種移行評価の妥当性を判断するために必要な科学的・技術的知見を蓄積する観点から、以下に示す検討を行う。

a. 人工バリアの性能評価に係る科学的・技術的知見の整備【分類①及び分類②】

・人工バリアの核種移行に係る長期の性能評価に関する科学的・技術的知見の整備【分類①及び分類②】

セメント硬化体の細孔構造の分析法である水銀圧入法による評価に加え、ミクロレベルの細孔を分析する水蒸気吸着法等を導入し、径、形態等の細孔構造と核種移行への寄与について時間的な変化を踏まえた確認を行う。

・人工バリアの長期性能を確保する材料設計に係る科学的・技術的知見の整備【分類①及び分類②】

ベントナイト系材料とセメント系材料とが地下水を介して接触することによる鉱物の溶解や生成・沈殿がベントナイト系人工バリアの長期性能に与える影響について、その妥当性判断に必要なベントナイト系材料とセメント系材料の界面で発生する可能性がある鉱物の溶解や生成・沈殿の化学反応及びそれによる放射性核種の移行を抑制する性能への影響の程度に関する科学的・技術的知見を取得する。

b. 天然バリアの性能評価に係る科学的・技術的知見の整備【分類①及び分類②】

想定される自然現象として地殻変動による断層活動及び隆起・沈降等、気候変動における侵食等を考慮した地形の時間変化を考慮した地下水流動の評価及び核種移行の評価に係る科学的・技術的知見を取得する。特に、水理地質構造の不均一性・不均質性に加え、地形の時間変化の不確実性を考慮し、海水準変動の履歴による地下水への塩濃度の変化等を考慮した予察的評価における適用条件等の考え方、評価の妥当性についての科学的・技術的知見を取得する。

(3) 地質環境及び水理環境モニタリングに関する研究【分類①及び分類②】

中深度処分の閉鎖措置における確認の判断指標の整備に必要な人工バリアの性能確認及び地下水等モニタリングについて、評価手法の妥当性を判断するために必要な科学的・技術的知見を蓄積する観点から、以下に示す検討を行う。

b. モニタリング孔等の閉鎖確認に係る科学的・技術的知見の整備【分類①及び分類②】

廃棄物埋設に係る坑道及び地質調査等のボーリング孔について、閉塞を適切に考慮した設計がされていることの確認するために、研究用坑道における既存ボーリング孔を用いて、ボーリング孔の閉鎖確認試験を実施し科学的・技術的知見を取得する。また、これらの知見を基に、ボーリング孔を埋戻し、閉塞する際に適切に閉鎖されたことの妥当性を評価するための判断指標を抽出・整理する。

【R2年度の実施内容】

(1) 立地に係る自然事象の評価に関する研究【分類①、分類②、分類③及び分類④】

中深度処分位置に係る審査ガイド整備において、隆起侵食、断層等活動等について立地要件が示されており、これらの立地に係る要件評価の妥当性を判断するために必要な科学的・技術的知見を蓄積する観点から、以下に示す検討を行う。

a. 隆起及び侵食に係る評価手法に係る科学的・技術的知見の整備【分類①及び分類②】

隆起及び侵食の評価手法の構築として、過年度までの研究成果を踏まえ、対象地区の地形・地質構造発達史に基づく、隆起活動等の空間的・年代的な変遷について取りまとめを行う。また、中深度処分の深度・規模・評価期間等を考慮した隆起等の地質変動事象の取り扱い方等に関して取りまとめを行う。

b. 断層等の評価手法に係る科学的・技術的知見の整備【分類①及び分類②】

断層等の評価手法の構築及び海底地すべり面の滑動可能性評価手法の構築として、過年度に得られた研究成果を踏まえ、断層等の性状、間隙水圧等の状態設定が断層等の滑動性に与える影響について評価するために、これらの状態設定を変えた試験を複数実施し、断層等の周辺の力学的損傷、水理学特性の低下等に関する評価手法の妥当性を判断するために必要な科学的・技術的知見を取りまとめる。

c. 地下水流動場評価手法に係る科学的・技術的知見の整備【分類②及び分類③】

三次元地下水流動場評価手法の構築として、過年度に検討を行った広域地下水流動概念モデルの情報を組み込んだ水理地質構造モデル、パラメータを設定する。その上で、透水係数や降雨涵養量等の多孔質媒体地域を対象とした技術的指標（水理パラメータ）に関して、数パターンを設定を行い、ボーリング掘削調査及び過年度の既存孔井地点における水圧や塩分濃度等の観測データとの比較を行う。その結果を基に、技術的指標から地下水流動モデルを構築する過程における適用性の取りまとめを行うとともに、新たなデータを用いた地下水流動モデル更新における技術的指標の適用性に関する整理を行う。

d. 岩盤の力学的状態と水理学的特性に係る科学的・技術的知見の整備【分類②及び分類④】

岩盤の力学的状態と水理学的特性の関係性を実験的に明らかにするために室内試験器を製作し実験の準備を行う。また、原位置による岩盤損傷評価を行うための計測装置及び試験掘削等の計画を行う。

e. 岩盤の収着・移行現象に係る科学的・技術的知見の整備【分類②及び分類④】

微小な空隙における収着反応の特異性の評価するために吸着試験及び吸着試料の分析を行う。

(2) 廃棄物埋設における性能評価手法に関する研究【分類①、分類②、分類③及び分類④】

中深度処分においては、廃棄物埋設地からの放射性物質の漏出を合理的に達成できる限り十分に低減する人工バリアの設置が見込まれる。このため、設置される環境において技術的に施工可能なものであることに加えて、廃棄物埋設地の外への主要な放射性物質の漏出を抑制する性能（以下「漏出抑制性能」という。）が優れたものを選定する必要がある。それを踏まえ、人工バリアの長期性能評価の妥当性及び天然バリアの核種移行評価の妥当性を判断するために必要な科学的・技術的知見を蓄積する観点から、以下に示す検討を行う。

a. 人工バリアの長期性能評価に係る科学的・技術的知見の整備【分類①、分類②、分類③及び分類④】

・ベントナイト系人工バリアの変質を考慮した物質移行－変質連成解析に係る科学的・技術的知見の整備

人工バリアの変質を考慮した物質移行－変質連成解析の構築及びベントナイトの変質による性能変化に関する科学的・技術的知見の整備

・セメント系人工バリアの長期性能評価に係る科学的・技術的知見の整備

中深度処分の廃棄物埋設地の設計におけるセメント系人工バリアについて、セメント硬化体の長期安定性に関係する結晶構造や物質移行特性、さらに、これらに関係する鉱物組成を考慮した材料設計、養生方法及び維持管理方法を考慮した評価モデルを検討する。これらを踏まえて、国内で広く使用されるセメント系材料について、埋設施設を念頭に置いた長期性能における課題について取りまとめる。さらに、セメント系人工バリアについて、体積変化によるひび割れ等の発生が物質移行特性への影響について科学的・技術的知見の整備を行う。

b. 天然バリアの核種移行評価に係る科学的・技術的知見の整備【分類①及び分類②並びに分類③】

中深度処分の廃棄物埋設地に関しては、合理的に設置可能な区域から、水理地質構造、地球化学環境等を踏まえて、廃棄物埋設地から生活圏への主要な放射性物質の移行を抑制する性能が優れた地点を選定することが考えられることから、以下に示す検討を行う。

・隆起・侵食及び海水準変動を考慮し、三次元地形変化シミュレーションと三次元地下水流動・塩分濃度シミュレーションの解析コードを組み合わせ地形変化の不確実性が地下水流動・水質に与える影響の傾向や重要因子を踏まえた評価コードシステムの構築

(3) 地質環境及び水理環境モニタリングに関する研究【分類①及び分類②】

中深度処分の閉鎖措置における性能確認の判断指標の整備に必要な人工バリアの性能確認及び地下水等モニタリングについて、評価手法の妥当性を判断するために必要な科学的・技術的知見を蓄積する観点から、以下に示す検討を行う。

a. モニタリング孔等の閉鎖確認に係る科学的・技術的知見の整備【分類①及び分類②】

・閉鎖措置に係る性能確認及びモニタリング手法の評価手法の構築

8. 実施体制

【核燃料廃棄物研究部門における実施者（主担当者には○を記載）】

- 入江 正明 技術研究調査官
- 市末 高彦 技術研究調査官
- 廣田 明成 技術研究調査官
- 河原木千恵 技術研究調査官
- 鏡 健太 技術研究調査官
- 木嶋 達也 技術研究調査官

研究計画

<p>1. プロジェクト</p>	<p>21. 放射性廃棄物等の放射能濃度評価技術に関する研究</p>	<p>担当部署</p>	<p>技術基盤グループ 核燃料廃棄物研究部門</p>
<p>2. カテゴリー・研究分野</p>	<p>3) 核燃料サイクル・廃棄物 ③ 廃止措置・クリアランス</p>	<p>担当責任者</p>	<p>片山二郎 核燃料廃棄物政策研究官</p>
<p>3. 背景</p>	<p>廃棄物確認（核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和32年法律第166号）第51条の6第2項）、クリアランスの確認（同法第61条の2第1項）及び廃止措置の終了確認（同法第43条の3の33第3項）では、対象となる放射性廃棄物等の放射能濃度を原子力規制委員会が確認する必要がある（図1参照）。</p> <p>(1) 廃棄物確認 現在日本原燃株式会社が低レベル放射性廃棄物埋設センターを操業しており、同施設に埋設される廃棄体（放射性廃棄物を200Lドラム缶に封入又は固型化したもの）について、原子力規制委員会が廃棄物確認を実施しているが、今後中深度処分施設や日本原子力発電株式会社のトレンチ処分施設等の操業に伴い、200Lドラム缶の廃棄体とは異なる新たな廃棄体（遮蔽材が含まれる角形容器を用いたもの）及びコンクリート等廃棄物（容器封入又は固型化されていない放射性廃棄物。廃棄体と合わせて、以下「廃棄体等」という。）の発生が想定される。このことから、これらの新たな廃棄体等に対する具体的な確認方法を整備することが重要である。特に、放射能濃度の評価方法については、200Lドラム缶の廃棄体ではスケーリングファクタ法、原廃棄物分析法等の測定値に基づく手法が主に用いられているが、新たな廃棄体等では放射化計算等に基づく手法が用いられると考えられる。また、放射能濃度の評価精度は対象物の性状（材質、形状、充填状態、核種組成等）に依存する。以上より、新たな廃棄体等についてはその性状を踏まえて既存技術の適用性を確認するとともに、必要に応じて新たに確認手法を整備することが重要である。 ※令和元年12月に核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則（昭和63年総理府令第1号）が改正され、当該規則及び核燃料物質等の第二種廃棄物埋設に関する措置等に係る技術的細目を定める告示（昭和63年科学技術庁告示第2号）における廃棄体の技術上の基準に関する仕様規定が撤廃されるとともに、事業者が保安規定において、埋設しようとする放射性廃棄物等の受入れの基準（以下「WAC」という。）を定めることが規定された。本研究計画では、原子力規制委員会が保安規定変更認可申請の審査時に事業者が定めたWACの妥当性を確認することになると想定している。</p> <p>対象となる規制活動の根拠：核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和32年法律第166号）第51条の6第2項（廃棄物埋設に関する確認）、第51条の18第1項（保安規定）</p> <p>(2) クリアランス検認 日本原子力発電株式会社東海発電所の金属くず、中部電力株式会社浜岡原子力発電所のタービンロータを始め、これまで4施設から発生した対象物に対してクリアランスを適用した実績がある。一方で、原子炉施設の解体の進展に伴い、クリアランスレベル相当以下の放射能濃度であるものの、製錬事業者等における工場等において用いた資材その他の物に含まれる放射性物質の放射能濃度についての確認等に関する規則（平成17年経済産業省令第112号）で規定されているクリアランス対象物（金属くず、コンクリートの破片及びガラスくず）以外の対象物（アスベスト、ケーブル等）の発生が見込まれており、これら対象物にクリアランスを適用することが考えられる。放射能濃度の測定方法は対象物によって異なるほか、ケーブル等複数の材料から構成される対象物に対しても適切に放射能濃度を評価する必要がある。このような新規の対象物にクリアランスを適用する場合の国による検認※方法を整備することが重要である（※クリアランスレベルを用いて、放射性物質として扱う必要がない物であることを事業者が判断し、その判断に加えて国が適切な関与を行うことを「クリアランスレベル検認」というが、ここでは、事業者が認可申請するクリアランス対象物の測定・評価手法の妥当性を確認すること、及び事業者が実施した測定結果の妥当性を確認することを合わせて「国による検認」という。） 対象となる規制活動根拠：核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和32年法律第166号）第61条の2第1項</p> <p>(3) 廃止措置の終了確認 令和12年度に日本原子力発電株式会社東海発電所の廃止措置の終了が予定されているが、国際原子力機関（IAEA）による総合規制評価サービス（IRRS）でも指摘を受けているとおり、サイト解放の具体的な基準が規定されておらず、加えて、基準に適合していることの終了確認方法が整備されていない。サイト解放基準については、現在、原子力規制委員会において検討が進められている。年線量基準となった場合、終了確認では年線量を直接測定することはできないので、年線量基準に相当する放射能濃度を導出し、この放射能濃度を満足しているか否かを確認することになる。年線量基準に相当する放射能濃度の導出（以下「放射能濃度の導出」という。）については、日本では旧原子力安全委員会においてクリアランスレベルの検討に用いられたコードをベースとしたJAEA開発のPASCLR-Releaseコード、米国では米国規制委員会が認可するRESRAD¹⁾コード、ドイツではRESRADをベースにして開発したコード等がある。また、サイト解放時の放射能濃度の測定・評価手法として米国においてMARSSIM²⁾に示された手法があるが、それとは別の手法として限られた測定点数から広域放射能濃度分布を推定する地球統計学的手法も研究され</p>	<p>主担当者</p>	<p>大塚伊知郎 主任技術研究調査官</p>

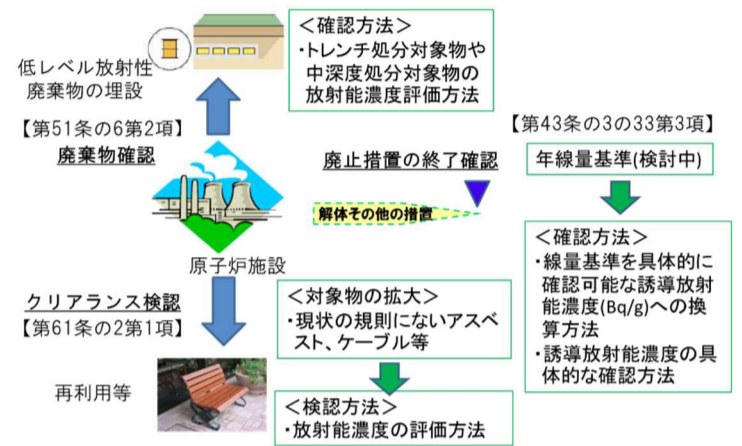


図1 本安全研究の概要

	<p>ている。この手法は、MARSSIM では評価対象領域全体をカバーするように測定点を選定するのに対して、評価対象領域内の限られた測定点での測定値の空間的な相関を用いて評価対象領域全体の放射能濃度分布を推定するものである。</p> <p>放射能濃度の導出はサイト固有の地形等の条件に依存することから、これら条件が線量評価に及ぼす影響及び広範囲でかつ微量な残留放射能濃度を合理的に確認する方法を検討し、廃止措置終了確認の具体的方法を整備することが重要である。</p> <p>対象となる規制活動根拠：核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和 32 年法律第 166 号）第 43 条の 3 の 34 第 3 項</p> <p>(4) 長半減期放射性核種等の分析における信頼性確保に関する研究</p> <p>将来の長半減期放射性核種を含む放射性廃棄物処分において、対象廃棄物の放射能特性の把握は安全性を確認する上で重要である。そのため、試料の採取、前処理、濃縮、化学分離、測定等の一連のプロセスに係る種々の技術的知見を計画的かつ効率的に蓄積する必要がある。</p> <p>1) http://www.evs.anl.gov/resrad, 2) Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual, DOE, EPA, NRC and DOD, 1997</p>
4. 目的	<p>原子力規制委員会による種々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。</p> <p>(1) 廃棄物確認</p> <p>中深度処分及びトレンチ処分の廃棄物確認における廃棄体等の放射能濃度を確保するための科学的・技術的知見を整備する。</p> <p>(2) クリアランス検認</p> <p>今後、クリアランス制度が様々な施設において様々な対象物に対して適用されることを念頭に、従来のクリアランス対象物以外の対象物について、極めて低い放射能を対象物の性状に応じて適切に測定・評価する技術について整理し、国による検認に関する科学的・技術的知見を整備する。また、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についても整理する。</p> <p>(3) 廃止措置の終了確認</p> <p>残留放射能による被ばく線量評価に及ぼすサイト固有の条件による影響を定量的に検討し、放射能濃度を導出する際の留意事項を抽出するとともに、広い敷地に分布する極微量の放射性核種濃度を効率的かつ精度よく測定・評価する技術について整理し、終了確認に関する科学的・技術的知見を整備する。</p> <p>(4) 長半減期放射性核種等の分析における信頼性確保に関する研究</p> <p>複雑な性状の試料に含まれる長半減期放射性核種等の分析について、複雑な多段階処理等を考慮しても、十分な信頼性が確保された結果であることを確認するための科学的・技術的知見を蓄積する。</p>
5. 知見の活用先	<p>(1) 廃棄物確認</p> <p>WAC に係る保安規定の審査に関する技術基盤及び原子力規制検査のうち廃棄物確認に関する技術基盤に活用する。</p> <p>対象となる規制活動等：核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和 32 年法律第 166 号）第 51 条の 6 第 2 項（廃棄物埋設に関する確認）に基づく適合性確認、第 51 条の 18 第 1 項（保安規定）に基づく審査</p> <p>(2) クリアランス検認</p> <p>従来のクリアランス対象物以外の対象物にクリアランスを適用する場合の国による検認に活用する。</p> <p>対象となる規制活動等：核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和 32 年法律第 166 号）第 61 条の 2 第 1 項に基づく審査</p> <p>(3) 廃止措置の終了確認</p> <p>廃止措置の終了に係る審査等に活用する。</p> <p>対象となる規制活動等：核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和 32 年法律第 166 号）第 43 条の 3 の 34 第 3 項（発電用原子炉の廃止に伴う措置）に基づく審査</p> <p>(4) 長半減期放射性核種等の分析における信頼性確保に関する研究</p> <p>長半減期核種を含む放射性廃棄物に係る放射能特性評価に関する審査等に活用する。</p>

本プロジェクトの研究は、「原子力規制委員会における安全研究の基本方針」（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。

- ② 審査等の際の判断に必要な新たな知見の収集・整備（以下「分類②」という。）
- ④ 技術基盤の構築・維持（以下「分類④」という。）

(1) 廃棄物確認【分類②】

現在操業中の低レベル放射性廃棄物埋設センターに埋設される 200L ドラム廃棄体は、二次的な汚染である表面汚染を対象にしたものであり、主に図 2 に示す測定値に基づく手法によって放射能濃度を評価している。今後対象となる新たな廃棄体等は二次的な汚染だけでなく放射化汚染も対象であり、図 3 に示す放射能濃度評価になることが想定される。

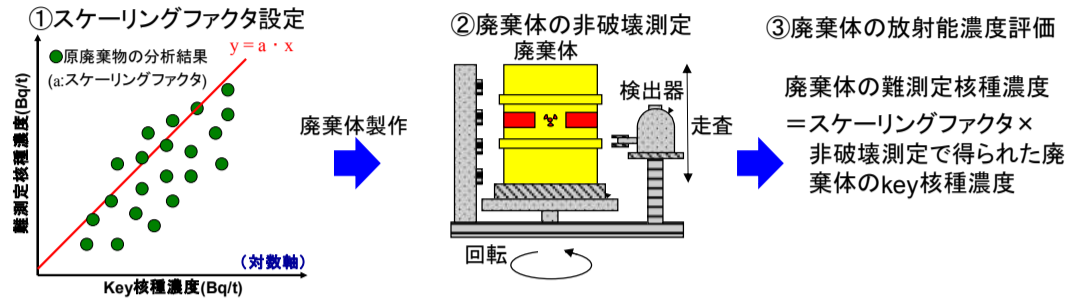


図 2 現状の廃棄体の放射能濃度評価の流れ（スケーリングファクタを用いる場合）

放射化汚染			廃棄体等の放射能濃度評価
①放射化計算条件の設定 ・親元素濃度の設定 ・中性子条件の設定	②放射化計算	③放射化計算結果の検証 ・核種の分析 ・分析結果と放射化計算結果の比較	
二次的な汚染（スケーリングファクタを用いる場合）			・廃棄体等の製作条件から算出 ・廃棄体等の非破壊測定
①スケーリングファクタの設定 ・原廃棄物の核種の分析			

図 3 新たな廃棄体等の放射能濃度評価の流れ

6. 安全研究概要
 （始期：H29 年度）
 （終期：R2 年度）

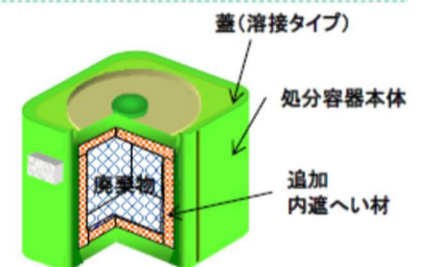
図 3 に示す放射能濃度評価の妥当性を判断するに当たっての検討項目は次のとおりである。

- ・放射化計算においては、処分上重要となる核種の炉内構造材等に含まれる親元素濃度が不明であるものがある。したがって、当該親元素の設定方法が適切であること。
- ・放射化計算結果が放射化学分析等によって検証されていること。
- ・廃棄体等の非破壊測定については、放射能濃度の評価精度は対象物の性状（材質、形状、充填状態、汚染の種類等に依存した核種組成の分布等）に依存することから、対象物の性状を考慮して測定精度や適用条件が評価されていること。

中深度処分対象の廃棄体については、諸外国の中レベル処分（中深度処分相当）における事業者の廃棄体の放射能濃度評価方法及び当該評価方法に対する規制当局の妥当性評価方法を調査・整理する。当該廃棄体の性状から（図 4）、放射化計算を主体とした放射能濃度評価になることを想定し、諸外国の調査結果を踏まえ、次に示す事項を検討し、当該対象物の放射能濃度評価方法の妥当性に係る科学的・技術的知見を取りまとめる。

- ・放射化計算に用いる炉内構造材等に含まれる微量な親元素の濃度の設定に用いられる代表値の設定方法に係る留意事項の抽出を模擬試料（炉内構造材等の原材料）を用いて検討する。
- ・Zr-93、Sn-126 等の中深度処分固有の核種の分析方法に係る留意事項の抽出を行う。
- ・対象物を非破壊測定する場合（対象核種：Co-60 等の高エネルギーの γ 線放出核種）を想定し、検出器応答シミュレーション等により測定時間と測定精度の関係を適用検出器を含めた種々の測定体系ごとに整理し、適用条件を検討する。

外容器：圧延鋼板溶接（肉厚5cm）
 外寸法：縦1.6m×横1.6m×高1.6m(or1.2m)
 外容積：約4m³ (or約3m³)
 最大重量：約28トン（内部充填要否検討中）



（第2回廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合の電気事業連合会資料より）

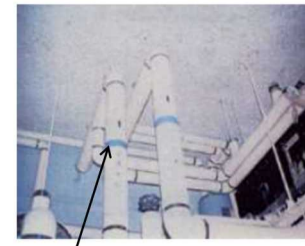
図 4 中深度処分対象廃棄体の例

トレンチ処分対象のコンクリート等廃棄物については、現状の 200L ドラム廃棄体の場合と同様に非破壊測定を適用した放射能濃度評価になることを想定し、次に示す事項を検出器応答シミュレーション等によって検討し、当該対象物の放射能濃度評価方法の妥当性に係る科学的・技術的知見を取りまとめる。

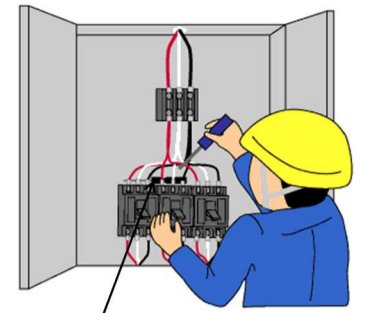
- ・現状の 200L 廃棄体より低濃度であるという特徴を踏まえ、対象物中の非破壊測定可能核種（Co-60 等）の線量率分布測定における測定性能を検討する。

(2) クリアランス検認（関係機関と協力実施）【分類②】

原子炉施設の廃止措置等に伴う廃棄物の量及び種類の増加により発生する新規の対象物（以下「新規クリアランス対象物」という。）（図5）に対する国の検認において、事業者の放射能濃度評価手法の妥当性を判断するための留意事項を整理することを目的として、検出器応答シミュレーション等により測定精度を検討し、放射能濃度の検認における科学的・技術的知見として取りまとめる。また、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についても整理する。



アスベストを含んだ保温材
「建築物の解体等に係る石綿飛散防止対策マニュアル」、2014.6. 環境省水・大気環境局大気環境課



配電盤・ケーブル
経済産業省九州産業保安監督部webサイトより

図5 新規クリアランス対象物の例

(3) 廃止措置の終了確認（関係機関と協力実施）【分類②】

サイト解放時に敷地に残留する放射能による被ばく線量は、平面及び深さ方向の放射能濃度汚染分布、地形、水理等のサイト固有条件による依存性が大きいことから、次の事項を検討し、放射能濃度を導出する際の留意事項として取りまとめる。

- ・サイトの無制限解放を想定した場合の残留放射能による被ばく線量の予察的評価（PASCLR-Releaseコード使用）を行い、放射能濃度の導出に影響するパラメータを検討する。
- ・サイト固有条件を考慮した被ばく線量評価ができるように解析コードを整備し、当該コードを用いてサイト固有条件が放射能濃度の導出に影響する度合いを定量的に把握する。

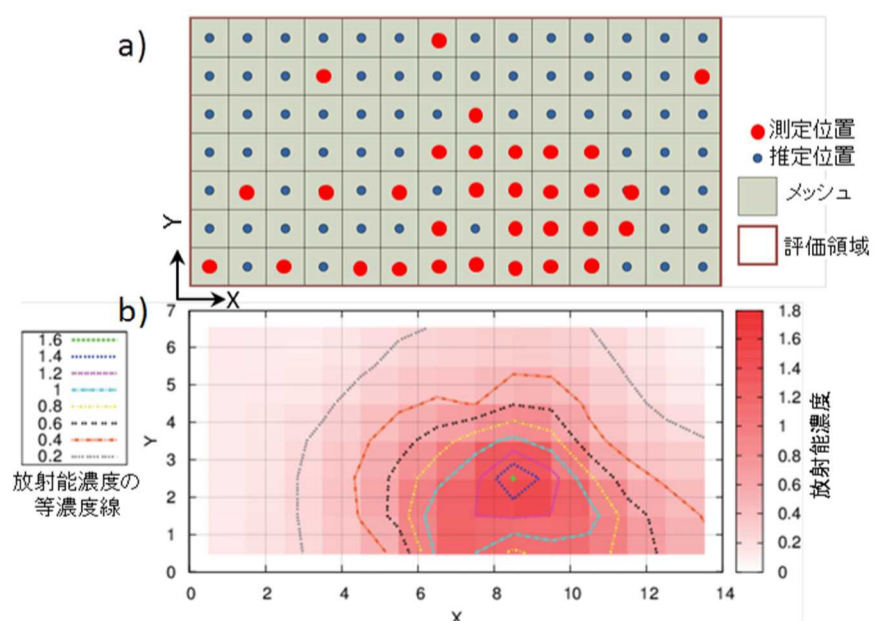
サイト解放時に放射能濃度が基準を満足することを合理的に確認する方法については、対象領域内の限られた測定値（サンプル測定又は図6のような放射線測定）から対象領域全体の主に表層土壤中の放射能濃度分布を推定する地球統計学的手法の適用が考えられる（図7）。次の事項を検討し、終了確認に係る科学的・技術的知見を取りまとめる。

- ・地球統計学的手法の適用性の検討では、対象領域内に種々の放射能濃度分布が存在する場合の放射能濃度分布の推定精度を計算機シミュレーションで評価し、放射能濃度分布状態と図7に示すようなメッシュ分割（図6に示すような放射線測定の場合には測定視野依存、サンプル測定の場合にはサンプル採取方法に依存）及び測定点の取り方との関係を整理する。検討に当たっては、統計的手法（MARSSIM）との定量的な比較を行う。
- ・廃止措置終了確認で対象となる残留放射能濃度は、汚染水の漏えいによる局所的な汚染を別にすれば、主として運転中及び廃止措置中の建屋等から排出された気体状の放射能であると想定されることから、測定対象となる放射能濃度分布は東京電力福島第一原子力発電所事故（以下「1F事故」という。）によって生じたオフサイトにおける放射性Csによるフォールアウト分布に近いと考えられる。そこで、放射性Csによるフォールアウト分布測定値を用いて、地球統計学的手法の適用性を検討する。検討に当たっては、統計的手法（MARSSIM）との定量的な比較を行う。
- ・1F事故による放射性Csフォールアウトの影響のある原子炉施設では、終了確認においてはその影響をバックグラウンドとして取り扱うことが想定されるので、バックグラウンド設定方法についても検討する。
- ・また、建屋等からの液体の漏えいが主な原因と考えられる地中の残留放射能は地表面からの放射線測定では検知が難しいことから、地中の残留放射能濃度分布を確認する方法として、原子炉施設及び地中の構造を既知情報とし、事業者が行う運転履歴の調査、建屋内側サーベイ及び建屋外側ボーリング調査で得られたデータ等に基づいて、適切な代表性を有するサンプリング位置（平面方向と深さ方向）等に関して検討する。検討に当たっては、改良したPASCLR-Releaseコードを用いた放射性核種の地中移行解析も併用する。



出典：Auler, I.; Rudolph, G.; Hackel, W.: "Unrestricted Release of Buildings and Site of NPP Versuchatomkraftwerk Kahl -VAK", IAEA Training Course on Release of Sites and Building Structures, Karlsruhe, 27. 09. - 01. 10. 2010

図6 終了確認のための放射線測定例
（コリメータ付Ge半導体検出器）



出典：JAEA-Data/Code 2012-023 中の図を加工

図7 地球統計学的手法による放射能濃度分布評価例
a) 評価領域内のメッシュ分割と測定位置の概念図
b) 放射能濃度分布推定値の表示例

(4) 長半減期放射性核種等の分析における信頼性確保に関する研究【分類④】

放射性核種分析は、試料の採取、試料からの対象核種の溶解等の前処理、濃縮、化学分離、測定等の要素技術から構成される。本研究は、これら要素技術に関する既往知見を基に、性状が様々な試料に含まれる長半減期放射性核種等の分析方法に関する実験的研究を実施し、各要素技術の信頼性確保に係る技術的留意点を抽出する。また、それぞれの要素技術の特徴を踏まえた上で、放射性核種分析方法に係る適用範囲や分析精度を整理するとともに、精度向上等のために必要な科学的・技術的課題を抽出する。

行程表				
	H29年度	H30年度	R1年度	R2年度
(1) 廃棄物確認	<ul style="list-style-type: none"> 諸外国の中レベル処分場における廃棄体の放射能濃度評価方法の調査 	<ul style="list-style-type: none"> 放射化金属の放射能濃度評価方法（親元素濃度の設定）の検討 	<ul style="list-style-type: none"> 放射化金属の放射能濃度評価方法（親元素濃度の設定）の検討 核種分析方法の検討 放射能測定性能/放射能濃度評価方法の検討 	<ul style="list-style-type: none"> 核種分析方法の追加検討 放射能測定性能/放射能濃度評価方法の検討 留意事項の抽出 WACに係る保安規定の審査に関する技術資料 原子力規制検査のうち廃棄物確認に関する技術資料
	<ul style="list-style-type: none"> 放射能測定性能/放射能濃度評価方法の検討 	<ul style="list-style-type: none"> 放射能測定性能/放射能濃度評価方法の検討 	<ul style="list-style-type: none"> 放射能測定性能/放射能濃度評価方法の検討 	<ul style="list-style-type: none"> 放射能測定性能/放射能濃度評価方法の検討 留意事項の抽出 WACに係る保安規定の審査に関する技術資料 原子力規制検査のうち廃棄物確認に関する技術資料 <p>論文公表▽ (R3年度予定)</p>
(2) クリアランス検認	<ul style="list-style-type: none"> 新規クリアランス対象物（アスベスト及びPCB）の整理（種類・物量及び払出し後の処理経路） 	<ul style="list-style-type: none"> 濃度上限値の試算（被ばくシナリオの設定、評価経路と濃度上限値の関係）及び測定性能の検討（解析等） クリアランスレベル案の検討 	<ul style="list-style-type: none"> 新規クリアランス対象物（ケーブル及び配電盤）の整理（種類・物量及び払出し後の処理経路） 	<ul style="list-style-type: none"> 測定性能の検討（解析等） 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の整理 国による検認における科学的・技術的知見の取りまとめ 放射線測定の不確かさに係る検討 <p>論文公表▽ (R3年度予定)</p>
		<ul style="list-style-type: none"> 放射線測定の信頼性確保に係る国内外の動向調査 	<ul style="list-style-type: none"> 放射線測定の不確かさに係る検討 	

		(3) 廃止措置の 終了確認	・放射能濃度の導出に係る検討 (評価コードの整備等)	・放射能濃度の導出に係る検討 (サイト固有条件の影響)	・放射能濃度の導出に係る検討 (サイト固有条件の影響)	・放射能濃度導出に係る留意事項の取りまとめ
			・終了確認手法の検討 (計算機シミュレーションによる地球統計学的手法の適用性)	・終了確認手法の検討 (1F 事故による放射性 Cs 測定値を用いた地球統計学的手法の適用性/バックグラウンド設定方法)	・終了確認手法の検討 (地中の残留放射能分布確認手法)	・終了確認に係る判断根拠の取りまとめ 論文公表▽ (R3 年度予定)
		(4) 長半減期放射性核種等の分析における信頼性確保に関する研究				・実験装置の導入・整備 ・試料の前処理方法の検討 ・化学分離方法の検討 ・分析方法の検討 ・中間取りまとめ 論文公表▽ (R4 年度予定)

7. 実施計画

【H29年度の実施内容】

(1) 廃棄物確認【分類②】

- ・トレンチ処分対象コンクリート等廃棄物

トレンチ処分対象のコンクリート等廃棄物について、廃棄物を個別測定する場合と廃棄物を埋設施設に定置した状態で一括測定する場合を想定し、検出器応答シミュレーション等により測定性能及び放射化計算を組み合わせた放射能濃度評価方法を検討する。

(2) クリアランス検認【分類①及び②】

- ・新規クリアランス対象物（アスベスト及び PCB）の整理

新規クリアランス対象物（アスベスト及び PCB）のクリアランスレベル試算のために、対象物の種類、物量及び払出し後の処理経路（再利用先等）を整理する。

また、被ばく形態の分類、シナリオにおけるパラメータ範囲の検討等の被ばく評価上留意すべき事項を整理する。

(3) 廃止措置の終了確認【分類②】

- ・放射能濃度の導出に係る検討

無制限解放を想定した場合の予察的な線量評価（PASCLR-Release コード使用）を行い、放射能濃度の導出に影響するパラメータを検討する。また、サイト固有の条件（平面及び深さ方向の汚染分布、地形、水理等の条件）を考慮した被ばく線量を評価できるような解析コードを整備する。

- ・終了確認手法の検討

対象領域内に種々の放射能濃度分布が存在する場合を想定し、地球統計学的手法による放射能濃度分布の推定精度を計算機シミュレーションで評価する。

【H30年度の実施内容】

(1) 廃棄物確認【分類②】

- ・中深度処分対象廃棄物

放射化計算に用いる炉内構造材等に含まれる微量な親元素の濃度の設定に用いられる代表値の設定方法に係る留意事項の抽出を、模擬試料を用いて検討する。

- ・トレンチ処分対象コンクリート等廃棄物

H29年度に整備したプログラムを用いて、廃棄物を個別測定する場合と廃棄物を埋設施設に定置した状態で一括測定する場合を想定し、検出器応答シミュレーションを行う。

(2) クリアランス検認【分類①及び②】

- ・濃度上限値の試算及び測定性能の評価

H29年度に得られた調査結果を基に新規クリアランス対象物（アスベスト及び PCB）を再利用・処分する場合の被ばくシナリオ（評価経路及び評価パラメータ）を設定し、核種ごとの放射能濃度上限値を計算し、評価経路と放射能濃度上限値の関係を整理する。また、規制として事業者の放射能濃度評価手法の妥当性を判断するための留意事項を整理することを目的として、新規クリアランス対象物（アスベスト及び PCB）の放射能濃度を測定することを想定した検出器応答シミュレーション等を行う。

	<p>(3) 廃止措置の終了確認【分類②】</p> <ul style="list-style-type: none"> 放射能濃度の導出に係る検討 H29年度に整備した解析コードを用いて、サイト固有の条件（平面及び深さ方向の汚染分布、地形、水理等の条件）が放射能濃度の導出に影響する度合いを定量的に把握する。 終了確認手法の検討 1F事故によって生じた放射性Csによるフォールアウト分布測定値を用いて、地球統計学的手法の適用性を検討する。また、1F事故によって生じた放射性Csフォールアウトの影響を受けた施設のバックグラウンド設定方法を検討する。
	<p>【R1年度の実施内容】</p> <p>(1) 廃棄物確認【分類②】</p> <ul style="list-style-type: none"> 中深度処分対象廃棄体 放射化計算に用いる炉内構造材等に含まれる微量な親元素の濃度の設定に用いられる代表値の設定方法に係る留意事項の抽出を、模擬試料を用いて検討する。 また、Zr-93、Sn-126等の中深度処分固有の核種の分析方法に係る留意事項の抽出を行う。 さらに、廃棄体を非破壊測定する場合を想定し、検出器応答シミュレーション等により測定性能及び放射化計算を組み合わせた放射能濃度評価方法を検討する。 トレンチ処分対象コンクリート等廃棄物 廃棄物を非破壊測定する場合を想定し、H29年度に整備したプログラムを拡張し、現実的な廃棄体モデルに対する検出器応答シミュレーションを行う。 <p>(2) クリアランス検認【分類①及び②】</p> <ul style="list-style-type: none"> 新規クリアランス対象物（ケーブル及び配電盤）の整理 新規クリアランス対象物（ケーブル及び配電盤）のクリアランスレベル試算のために、対象物の種類、物量及び払出し後の処理経路（再利用先等）を整理する。 また、被ばく形態の分類、シナリオにおけるパラメータ範囲の検討等の被ばく評価上留意すべき事項を整理する。 放射線測定の不確かさに係る検討 H30年度に実施する国内外調査の結果を基に、放射線測定に係る不確かさ評価及び校正に必要な科学的・技術的知見を整理する。（分類②） <p>(3) 廃止措置の終了確認【分類②】</p> <ul style="list-style-type: none"> 放射能濃度の導出に係る検討 H30年度に引き続き、サイト固有の条件が放射能濃度の導出に影響する度合いを定量的に把握する。 終了確認手法の検討 建屋等からの漏洩が主な原因と考えられる地中の残留放射能分布を確認する方法として、事業者が行う運転履歴の調査、建屋内側サーベイ及び建屋外側ボーリング調査で得られたデータに基づいて、適切な代表性をもつサンプリング位置等に関して検討する。また、正味の放射能分布を評価するために必要なバックグラウンド参照エリア設定等に関して検討する。
	<p>【R2年度の実施内容】</p> <p>(1) 廃棄物確認【分類②】</p> <ul style="list-style-type: none"> 中深度処分対象廃棄体 放射化計算に用いる炉内構造材等に含まれる微量な親元素の分析や、中深度処分固有の核種の評価手法の妥当性について、過年度の検討結果を踏まえた追加検討と留意事項の抽出を行う。 廃棄体を非破壊測定する場合を想定し、検出器応答シミュレーション等により廃棄体の放射能濃度確認方法の妥当性に係る留意事項を抽出する。 トレンチ処分対象コンクリート等廃棄物 拡張したプログラムを用いて、引き続き現実的な廃棄体モデルのうち大容量の廃棄物に対する検出器応答シミュレーションを行い、放射能濃度確認方法の妥当性に係る留意事項を抽出する。 <p>(2) クリアランス検認【分類②】</p> <ul style="list-style-type: none"> 濃度上限値の試算及び測定性能の評価 R1年度に得られた調査結果を基に新規クリアランス対象物（ケーブル及び配電盤）を再利用・処分する場合を想定し、規制として事業者の放射能濃度評価手法の妥当性を判断するための留意事項を整理することを目的として、新規クリアランス対象物（ケーブル及び配電盤）の放射能濃度を測定することを想定した検出器応答シミュレーション等を行う。また、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についても整理する。 放射線測定の不確かさに係る検討 放射線測定に係る不確かさ評価及び校正に必要な科学的・技術的知見を整理する。（分類②） <p>(3) 廃止措置の終了確認【分類②】</p> <ul style="list-style-type: none"> 放射能濃度の導出に係る検討 必要に応じて追加の定量的検討を実施して、放射能濃度を導出する際の留意事項として取りまとめる。 終了確認手法の検討 これまでの測定データを評価し、必要に応じて追加測定等を行い、終了確認に係る科学的・技術的知見を取りまとめる。 <p>(4) 長半減期放射性核種等の分析における信頼性確保に関する研究【分類④】</p> <ul style="list-style-type: none"> 実験装置の導入・整備を実施する。 試料の前処理方法、化学分離方法及び分析方法の検討を実施する。 検討結果に基づき課題を抽出し中間とりまとめを実施する。
8. 実施体制	<p>【核燃料廃棄物研究部門における実施者】</p> <ul style="list-style-type: none"> ○大塚伊知郎 主任技術研究調査官 高橋宏明 主任技術研究調査官 吉居大樹 技術研究調査官 酒井宏隆 技術研究調査官 佐藤由子 技術研究調査官 古田美憲 技術研究調査官

	<p>深井 恵 技術研究調査官 川崎 智 技術参与</p> <p>【前年度までの委託先】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・・・実施項目(2)及び(3) <p>【前年度までの共同研究先】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 学校法人五島育英会東京都市大学 ・ 国立大学法人東京大学 ・ 国立大学法人東京工業大学 ・ 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 ・ 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構
9. 備考	