

令和元年度安全研究計画

H31 番号	プロジェクト名	実施期間	頁
1	地震ハザード評価の信頼性向上に関する研究	H29-R1	2
2	津波ハザード評価の信頼性向上に関する研究	H29-R2	6
3	地震の活動履歴評価手法に関する研究	H29-R1	10
4	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	H25-R1	14
5	大規模噴火プロセス等の知見の蓄積に係る研究	R1-R5	19
6	地震・津波及びその他の外部事象等に係る施設・設備のフラジリティ評価に関する研究	H29-R2	26
7	火災防護に係る影響評価に関する研究	H29-R2	33
8	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	R1-R4	37
9	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	40
10	軽水炉の重大事故の重要物理化学現象に係る実験	H27-R1	46
11	軽水炉の重大事故時における不確実さの大きな物理化学現象に係る解析コードの開発	H29-R4	54
12	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	60
13	重大事故の事故シーケンスグループに係る事故進展解析	H29-R1	67
14	原子力プラントの熱流動最適評価に関する安全研究	R1-R4	71
15	燃料健全性に関する規制高度化研究	H19-R2	76
16	事故時炉心冷却性に対する燃料破損影響評価研究	R1-R5	79
17	軽水炉照射材料健全性評価研究	H18-R1	84
18	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	H29-R3	88
19	電気・計装設備用高分子材料の長期健全性評価に係る研究	H29-R1	95
20	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	H26-R3	98
21	加工施設及び再処理施設の内部火災等に関するリスク評価手法に関する研究	H29-R2	104
22	廃棄物埋設に影響する長期自然事象の調査方法及びバリア特性長期変遷の評価方法に関する研究	H29-R2	111
23	放射性廃棄物等の放射能濃度評価技術に関する研究	H29-R2	119
24	緊急時活動レベル（EAL）に係るリスク情報活用等の研究	H29-R1	126

研究計画

1. プロジェクト	1. 地震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
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	飯島亨 首席技術研究調査官
		主担当者	呉 長江 主任技術研究調査官
3. 背景	<p>「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」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評価すること」とされている。平成7年兵庫県南部地震を契機に地震観測網が整備されたことから、平成28年熊本地震を含め国内の内陸地殻内地震に関する詳細な強震動記録が得られ、それらに基づく震源特性に係る多くの研究報告がなされている。このため、最新の研究動向を踏まえつつ地震の規模やその不確かさを適切に評価するために震源特性に関わる知見を継続的に蓄積していくとともに、震源と活断層を関連付けることが困難な内陸地殻内地震等による強震動記録を活用し、震源を特定せず策定する地震動のレベルを把握することが重要である。また、過去の地震動特性に関するデータが少ないプレート間地震等についても、国内外のデータを合わせ震源断層パラメータの精緻化及び不確かさについて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。</p> <p>地震PRAに用いられる地震ハザード曲線は、一般的に距離減衰式に基づき作成されているが、震源が敷地に近い場合、地震動の影響をより精緻に評価するために断層モデルに基づく地震ハザード曲線を用いることが適切である。しかしながら、断層モデルに基づく地震ハザード曲線については具体的な適用例が少なく、震源断層パラメータ及びその不確かさの取扱方法を明確にすることが重要である。また、地震PRAにおいては、構造物及び設備の応答を評価するためのより現実的な入力地震動の評価が重要である。</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。新規基準では、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、当基準では、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、特に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) 断層モデルを用いた地震動評価手法の整備 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震源断層パラメータ及び不確かさについて検討し、それぞれの地震による地震動評価手法を整備する。</p> <p>(2) 震源を特定せず策定する地震動に関する検討 震源を特定せず策定する地震動に関する検討を行い、地震動の応答スペクトルレベルを把握する。</p> <p>(3) 確率論的地震ハザード評価手法の整備 地震ハザード曲線作成における震源断層パラメータ及びその不確かさの取扱い方法を検討し、断層モデルによる確率論的地震ハザード評価手法を整備する。また、サイト特性に基づく現実的な入力地震動の評価手法を検討し地盤の伝播特性に係る応答係数の精緻化を図る。</p> <p>(4) 断層変位評価手法の検討 断層変位として特に識別可能な副断層に着目し、数値解析に基づく決定論的な断層変位評価手法及び断層変位距離減衰式に基づく確率論的な断層変位評価手法を検討する。</p>		
5. 知見の活用先	<p>本プロジェクトの項目(1)断層モデルを用いた地震動評価手法の整備、(2)震源を特定せず策定する地震動に関する検討及び(3)確率論的地震ハザード評価手法の整備で得られた成果は、「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。項目(4)断層変位評価手法の検討は、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」（平成28年7月6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) 断層モデルを用いた地震動評価手法の整備【分類①】

a. 内陸地殻内地震による地震動の評価手法の整備

平成28年度までの国内の内陸地殻内地震に関する分析結果から、アスペリティの面積割合やライズタイムなどの震源断層パラメータの更なる検討及び地震発生層以浅の断層破壊の影響等の検討が重要である。本研究では、熊本地震をはじめ近年得られた内陸地殻内地震の強震動記録を解析し、地震の特性及び不確かさに関する検討を行い、断層モデル法の精度向上を図ること、及び熊本地震を踏まえた震源断層長さに係る調査の適用性を検討することを目的に、関係機関と協力して以下を行う（図1参照）。

(a) 国内の内陸地殻内地震による地震動解析及び観測記録による検証を行うとともに、震源断層パラメータの不確かさの評価及び不確かさの地震動評価への影響を検討し、基準地震動を評価する上で、不確かさのより適切な反映方法について検討する。（平成29年度～令和元年度）

(b) 変動地形学、地質学、地球物理学及び地震学の多分野の調査データに基づく活断層の既往の検討事例を蓄積するとともに、熊本地震を含め震源断層に係る分析データを有する既往地震を対象に、地球物理学的調査を実施し、震源断層長さの把握に係る調査の適用性について検討する。（平成29年度～令和元年度）

b. プレート間巨大地震等による地震動の評価手法の整備

「プレート間地震及び海洋プレート内地震に関しては、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」が新規規制基準で規定されている。地震調査研究推進本部のプレート間地震の特性化震源モデルの設定手法は、東北地方太平洋沖地震以前の知見に基づいたものであり、世界で起きたプレート間巨大地震に関する研究で得られた知見を反映することが重要である。平成28年度までは、東北地方太平洋沖地震に対する震源逆解析、地震動再現解析等を実施し、強震動生成メカニズムの解明を検討したが、一般化した特性化震源モデルの設定手法には至っていない。また、地震調査研究推進本部は、海洋プレート内地震のうち、沈み込んだ海洋プレート内地震（以下「スラブ内地震」という。）の震源特性に関する近年の研究成果を基に、スラブ内地震の特性化震源モデルの設定手法を新たに追加し、「震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ）」を更新した。ただし、国内で起きたスラブ内地震に関する研究事例が限られているため、海外で起きた地震を含めてより数多くの地震を調査し、地域的な特性及び沈み込むプレートの特性を明確にすることが重要である。本研究では、プレート間巨大地震を含む沈み込み帯巨大地震による地震動評価手法を整備することを目的に、関係機関と協力して以下を行う。

(a) 国内外で発生した沈み込み帯巨大地震に対する地震動再現解析を行い、特性化震源モデルの設定手法及び不確かさの扱いについて検討する。（平成29年度～令和元年度）

(b) (a)で構築した特性化震源モデルの設定手法に対する検証解析を実施する。（令和元年度）

(2) 震源を特定せず策定する地震動に関する検討【分類①】

震源と活断層を関連付けることが困難な内陸地殻内地震等による強震動記録の解析を行い、震源を特定せず策定する地震動の応答スペクトルレベルを把握する。

(3) 確率論的地震ハザード評価手法の整備【分類①】

a. 断層モデルを用いた地震ハザード評価に関する不確かさの検討

震源が敷地に近い場合に地震動の影響をより精緻に評価することで、地震PRAに用いる確率論的地震ハザード評価の信頼性の向上を図るために、断層モデル法を用いた地震ハザード曲線の算定法について検討する。この中で断層モデルの不確かさの取扱いとして専門家意見を反映した確率論的地震ハザード評価手法を整備することを目的に以下を行う（図2）。

(a) 断層モデル法に基づく地震ハザード解析事例調査及び感度解析を行い、震源断層パラメータのうち確率論的ハザード解析結果への影響が大きな支配的パラメータを特定し、その不確かさがハザード解析結果に与える影響を定量的に把握する。

(b) 不確かさの要因を偶然的な不確かさ及び認識論的不確かさに分類するための基準を明確にし、認識論的不確かさに分類される要因についてはロジックツリーに基づくハザード評価法を想定し専門家意見の反映方法について検討する。

b. 現実的入力地震動の評価手法の整備

地震PRAにおいて構造物・設備の現実的な応答を評価するための手法として、応答係数による方法がある。本研究では、応答係数のうち地盤の伝播特性に係る応答係数の精緻化を図るため、地震動観測、地質調査、物理探査等に基づき、敷地内における観測地震動の空間変動、地盤物性のばらつき等を考慮した現実的な入力地震動の評価手法を検討する。得られた入力地震動を用い、伝播特性に係る応答係数の大きさ及びばらつきの評価を行う。

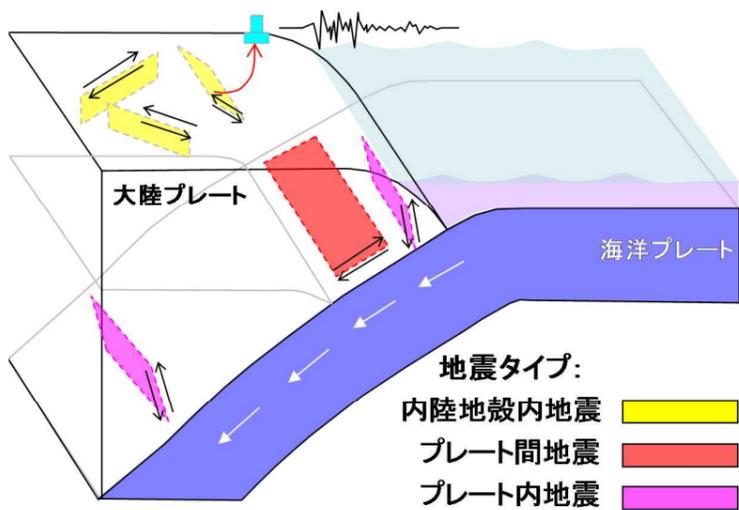
(4) 断層変位評価手法の検討【分類④】

地震活動に伴って地盤に生じる永久変位を評価するため、特に主断層トレスから外れている場所で連続性が乏しく副次的に新たに生じる断層（以下「副断層」という。）に着目し、敷地内の副断層の発生の可能性について数値解析に基づく決定論的な断層変位評価手法及び断層変位の不確かさを勘案した確率論的な断層変位評価手法の検討を目的とする（図3）。平成28年度までは、集集地震（台湾）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断層変位距離減衰式を得た。本研究では、熊本地震を含めた国内の内陸地殻内地震への断層変位評価手法の適用性確認のため、関係機関と協力して国内の横ずれ断層及び逆断層地震を対象に以下を行い、断層変位評価手法を検討する。

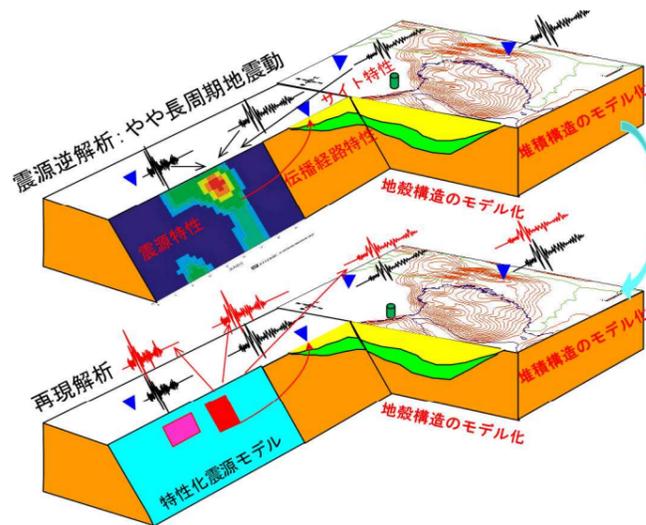
(a) 地表に断層変位が現れた地震を対象として、深部地盤から地表まで進展する断層破壊をシミュレーションする数値解析手法等を用いた検証を行い、より一般性の高い断層変位評価の数値解析手法を検討する。（平成29年度～令和元年度）

6. 安全研究概要
（始期：平成29年度）
（終期：令和元年度）

(b) 国内の内陸地殻内地震による断層変位データの拡充により断層変位距離減衰式の改良を図るとともに、確率論的断層変位ハザード解析を実施し、確率論的な断層変位評価手法を検討する。(平成 29 年度～令和元年度)



(a) 地震発生様式分類



(b) 特性化震源モデル構築の概念図

図 1 断層モデルを用いた地震動評価手法の整備

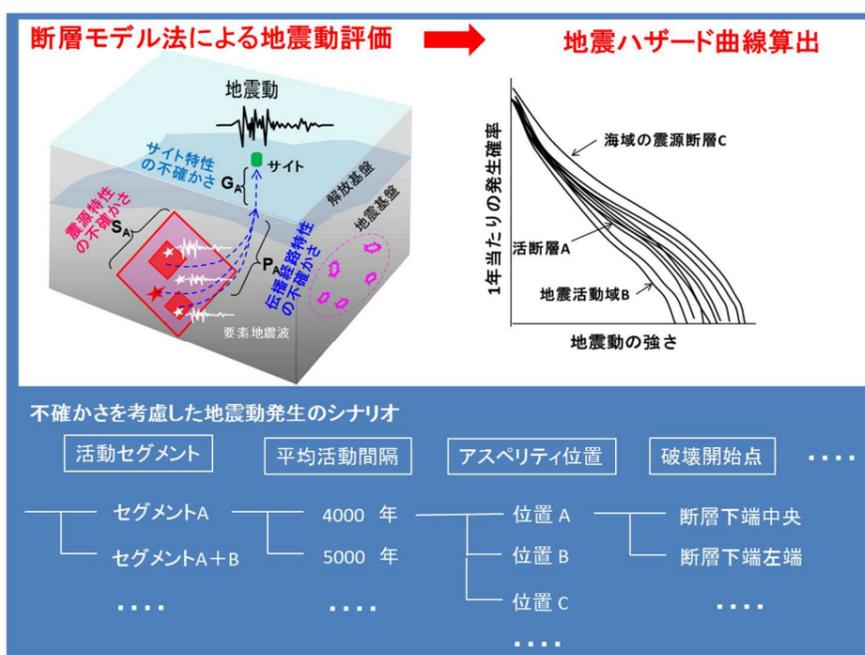


図 2 確率論的地震ハザード評価手法の整備

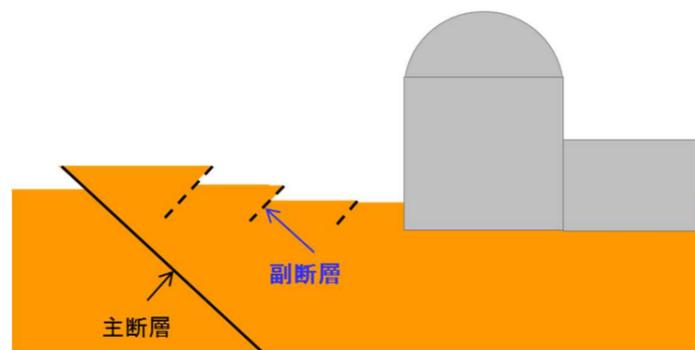


図 3 断層変位評価手法の検討

実施行程表

項目	平成 29 年度	平成 30 年度	令和元年度	令和 2 年度
(1)a. 内陸地殻内地震による地震動の評価手法の整備	震源逆解析・地震動再現解析	地震動再現解析・結果分析 ▽国際 WS 公表	検証解析・手法まとめ	NRA 技術報告
(1)b. プレート間巨大地震等による地震動の評価手法の整備	データ収集・震源逆解析	国内外地震の地震動再現解析	国内外地震の地震動再現解析、特性化震源モデルの設定手法の検討	
(2) 震源を特定せず策定する地震動に関する検討	予備解析	地震動解析・標準応答スペクトル策定	地震動追加解析	▽論文投稿 NRA 技術報告
(3)a. 断層モデル法に基づく確率論的ハザード評価	断層モデル法によるハザード評価の調査	不確かさ要因調査・寄与度分析 学会公表▽	地震ハザード解析、留意事項の整理 ▽論文公表	
(3)b. 現実的入力地震動の評価手法の整備	観測記録による地震動空間変動評価			▽論文投稿
(4) 断層変位評価手法の検討	国内(横ずれ)地震の検証解析	国内(逆断層)地震の検証解析	検証解析・手法検討・まとめ	▽学会発表

(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。

	<p>【平成 29 年度の実施内容】</p> <p>(1) a. : 内陸地殻内地震による地震動の評価手法の整備【分類①】 内陸地殻内地震を対象とし、震源断層パラメータ設定の検討事例を蓄積するとともに、特性化震源モデル設定の精緻化を検討する。また、熊本地震震源域において物理探査等を行い地下構造に関する情報の分析を行う。さらに鳥取硬岩サイトにおける深部地震動観測記録を用いた地震動伝播解析を実施し、鳥取県中部地震(H28/10)の震源特性を評価する。</p> <p>b. : プレート間巨大地震等による地震動の評価手法の整備【分類①】 国内外で発生した沈み込み帯巨大地震について地震動データを収集し震源過程逆解析等を行い、特性化震源モデルの設定手法に関する基礎データを蓄積する。</p> <p>(2) 震源を特定せず策定する地震動に関する検討【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予備解析を行う。</p> <p>(3) a. : 断層モデルを用いた地震ハザード評価に関する不確かさの検討【分類①】 断層モデル法を用いた地震ハザード解析の文献調査を行い、課題を整理する。また、断層パラメータのばらつきのモデル化を試み、感度解析により不確かさ要因のハザード結果への影響について整理する。</p> <p>b. : 現実的入力地震動の評価手法の整備【分類①】 実観測記録（「第四紀地盤サイト（つくば）における地表 10 点の水平アレー地震動観測」等）に基づき地震動の空間変動（相関係数及びばらつき）を評価し、地盤の不均質・不整形性が地震時の地盤応答（入力地震動の不確かさ）に与える影響を検討する。</p> <p>(4) 断層変位評価手法の検討【分類④】 平成 28 年度までに検討した手法を用いて、地表に断層変位が現れた国内の内陸地殻内地震（横ずれ断層）を対象に、検証解析を実施する。</p>
7. 実施計画	<p>【平成 30 年度の実施内容】</p> <p>(1) a. : 内陸地殻内地震による地震動の評価手法の整備【分類①】 内陸地殻内地震を対象とし、震源断層パラメータ設定の検討事例を蓄積するとともに、特性化震源モデル設定の精緻化を検討する。また、熊本地震震源域において物理探査等を行い地下構造に関する情報の分析を行う。</p> <p>b. : プレート間巨大地震等による地震動の評価手法の整備【分類①】 国内外で発生した沈み込み帯巨大地震に対する地震動再現解析等を行い、特性化震源モデルの設定手法を検討する。</p> <p>(2) 震源を特定せず策定する地震動に関する検討【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を解析し、標準応答スペクトルを策定する。</p> <p>(3) a. : 断層モデルを用いた地震ハザード評価に関する不確かさの検討【分類①】 主要な断層パラメータの不確かさを考慮した地震動解析を実施し、解析と観測地震動のばらつきの比較を行うとともに、断層パラメータの不確かさが地震ハザード評価へ及ぼす影響を評価する。</p> <p>(4) 断層変位評価手法の検討【分類④】 平成 28 年度までに検討した手法を用いて、地表に断層変位が現れた国内の内陸地殻内地震（逆断層）を対象に、検証解析を実施する。</p>
	<p>【令和元年度の実施内容】</p> <p>(1) a. : 内陸地殻内地震による地震動の評価手法の整備【分類①】 内陸地殻内地震を対象とし、検証解析等の実施により、特性化震源モデル設定の精緻化による地震動評価への影響を検討する。また、震源断層の大きさの事前評価手法の高度化を図る。</p> <p>b. : プレート間巨大地震等による地震動の評価手法の整備【分類①】 国内外で発生した沈み込み帯巨大地震（プレート間地震及び海洋プレート内地震）の地震動解析を行い、それぞれの評価手法の現状及び課題についてまとめる。</p> <p>(2) 震源を特定せず策定する地震動に関する検討【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を追加収集し解析を行う。</p> <p>(3) a. : 断層モデルを用いた地震ハザード評価に関する不確かさの検討【分類①】 距離減衰式に係る既往研究を調査し、それらのばらつきを分析するとともに、断層パラメータ不確かさのモデル化や取扱いの違いによる地震ハザード評価に及ぼす影響の評価を行い、地震ハザード評価実施における各不確かさ要因の取扱いの留意点について整理する。</p> <p>(4) 断層変位評価手法の検討【分類④】 平成 29 年度及び平成 30 年度において課題となった事項について検証解析を行い、決定論的及び確率論的断層変位評価手法の適用性及び課題をまとめる。</p>
8. 実施体制	<p>【地震・津波研究部門における実施者】</p> <p>○ 吳 長江 主任技術研究調査官 内田 淳一 主任技術研究調査官 儘田 豊 主任技術研究調査官 小林源裕 主任技術研究調査官 菅谷勝則 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 佐津川貴子 技術研究調査官</p> <p>【平成 30 年度の委託先】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 一般財団法人地域地盤環境研究所・・・実施項目(1)aの内陸地殻内地震に係る部分 ・ 株式会社大崎総合研究所・・・実施項目(1)bのプレート間巨大地震等に係る部分 ・ 国立研究法人産業技術総合研究所・・・実施項目(3)aの地震ハザード評価の要因分析に係る部分 ・ 株式会社構造計画研究所・・・実施項目(4)の断層変位に係る部分
9. 備考	

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	飯島亨 首席技術研究調査官
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制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。</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 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。</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」（平成28年7月6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。）

(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①】

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。

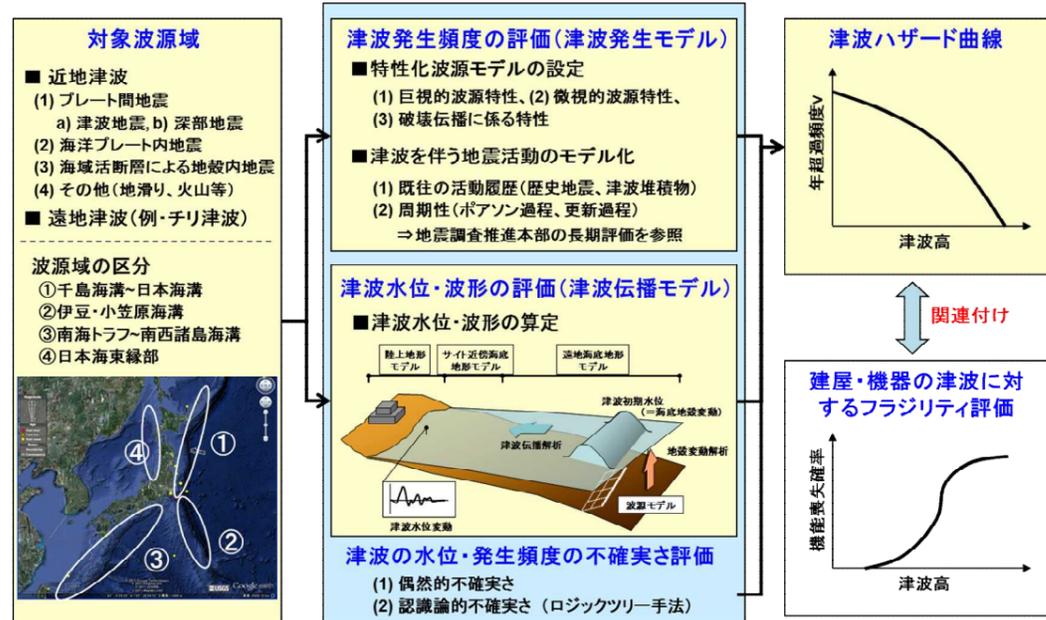


図1 確率論的津波ハザード評価手法の概要(杉野他、2015)

6. 安全研究概要
 (始期：平成29年度)
 (終期：令和2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①】

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。

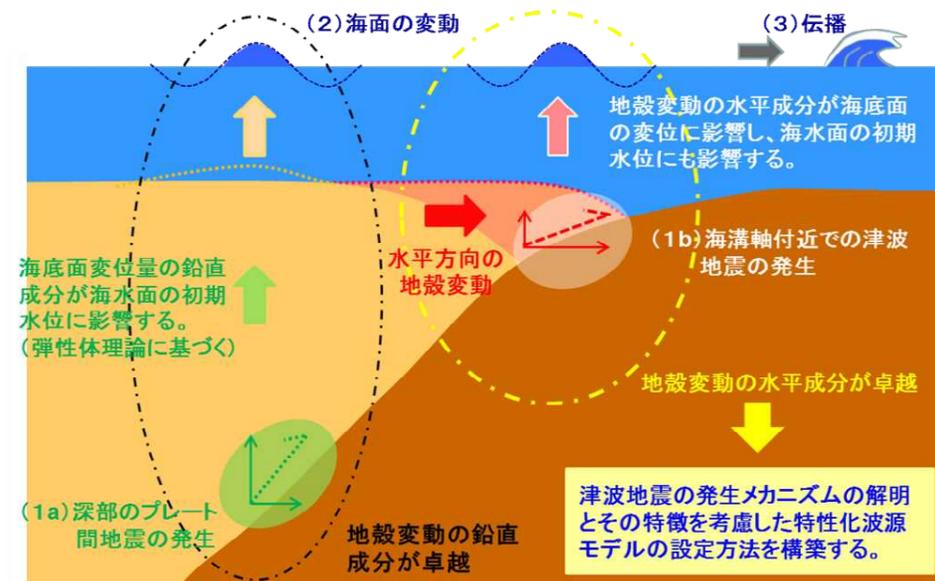


図2 津波地震による地殻変動のイメージ

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①】

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。

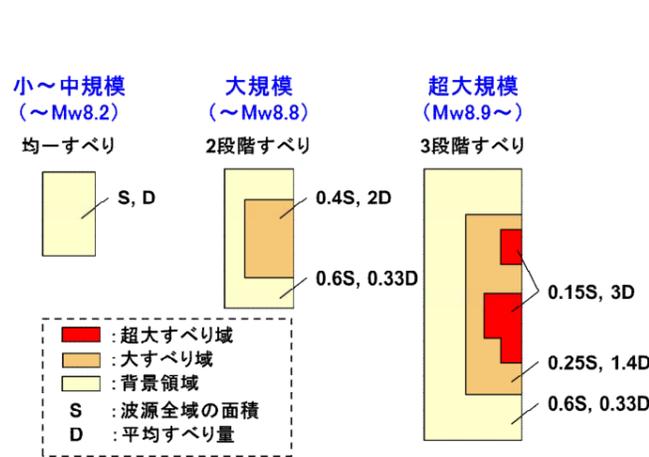


図3 特性化波源モデルの不均一すべり分布の概念図（杉野他 2014）

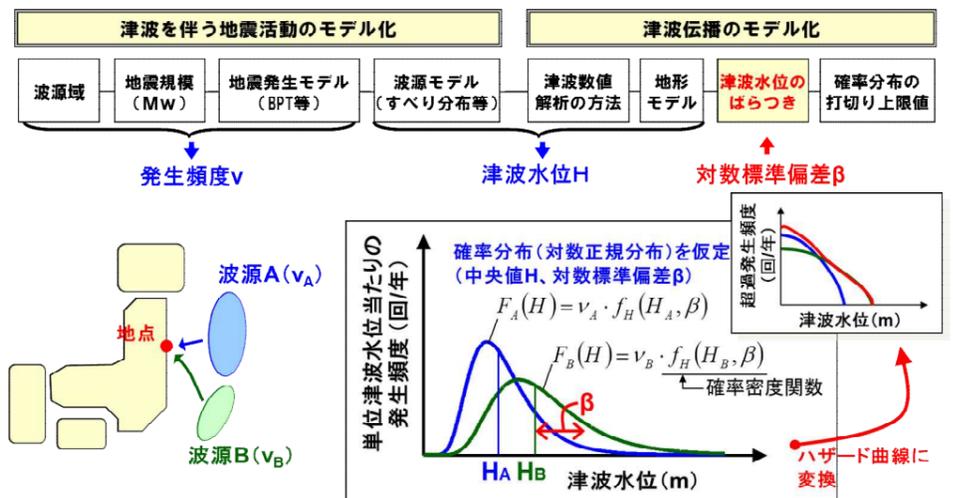


図4 確率論的津波ハザード評価における津波水位のばらつき β の取扱方法の概念図（原子力安全基盤機構 2014）

(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①】

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。

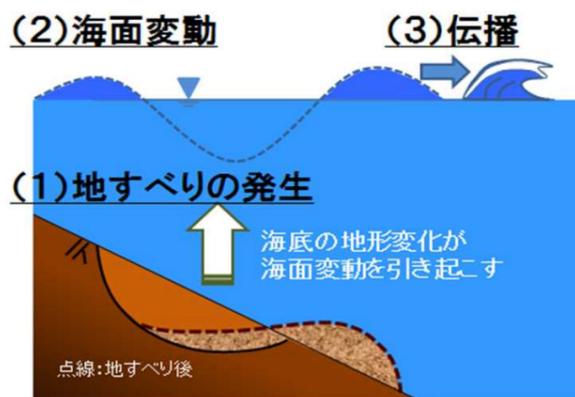


図5 海底地すべりによる津波発生のイメージ

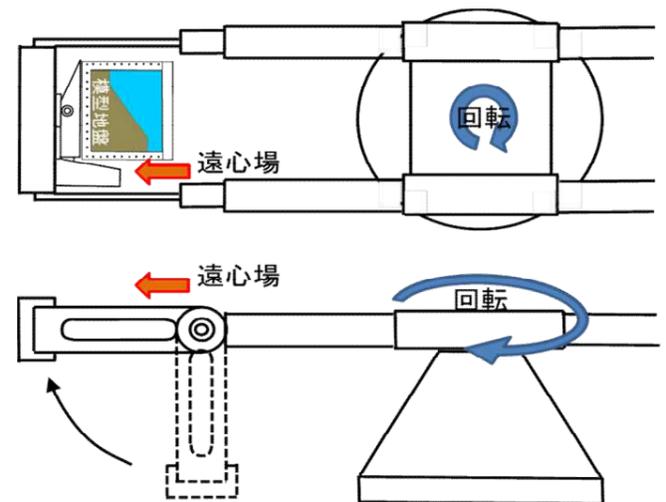


図6 遠心力模型実験のイメージ

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	論文公表
(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	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。

	<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①】 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①】 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①】 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①】 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>
7. 実施計画	<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①】 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①】 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①】 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①】 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①】 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①】 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①】 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①】 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①】 平成 31 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①】 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 岩淵洋子 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>【共同研究】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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>【平成 30 年度の委託先】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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
9. 備考	

研究計画

1. プロジェクト	3. 地震の活動履歴評価手法に関する研究	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	飯島亨 首席技術研究調査官
		主担当者	内田淳一 主任技術研究調査官
3. 背景	<p>「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」とされており、断層の活動性評価に係る知見を継続的に蓄積していくことが重要である。</p> <p>さらに、リスク評価における確率論的地震ハザード評価及び確率論的津波ハザード評価では、地震履歴（活動時期、活動間隔等）の情報が評価結果に大きく影響するため、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。</p> <p>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。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。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。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。断層の活動性に関し、「審査ガイド」では、「起震断層及び活動区間や震源領域の活動性は、既存文献の調査、変動地形学的調査、地質調査、地球物理学的調査の結果に基づく平均変位速度、変位量及び活動間隔等により推定されていることを確認する。」とされている。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として整備していくことが重要である。</p> <p>一方、プレート間地震の履歴については、これまで主として歴史地震の情報が利用されてきた。しかしながら、平成23年東北地方太平洋沖地震から得られた教訓を踏まえると、活動間隔が長い地震も対象にした先史時代における地震履歴の情報を整理し、その扱い方を検討することが重要である。「審査ガイド」では、津波の発生履歴に関し、「津波堆積物の調査においては、地形の形成過程や周辺の堆積物の分布条件に応じて適切な手法を組み合わせで行われていることを確認する。また、深海底の崩壊堆積物（地震性タービダイト）についても資料等の調査が行われていることを確認する。」とされている。平成28年までに津波堆積物データベースを構築したが、先史時代におけるプレート間地震の履歴評価として、津波堆積物データベースと深海底の堆積物の情報を統合的に活用することが有効であると考えられる。</p>		
4. 目的	<p>本プロジェクトでは、関連評価ガイドの策定に資するため断層の活動性評価に係る知見を蓄積する。</p> <p>(1) 活断層に起因する内陸地殻内地震の履歴に関する評価手法の整備</p> <p>a. 地表に明瞭な痕跡を残す活断層の活動性評価手法の検討 活断層の活動性評価に有用な古環境学的イベントに係る地質情報を整理し、地震履歴の情報としての適用性を検討する。</p> <p>b. 地表に明瞭な痕跡を残さない活断層の活動性評価手法の検討 地域的火山灰を用い、地表に明瞭な痕跡を残さない活断層の活動性評価手法を整備する。</p> <p>(2) プレート間地震の履歴に関する評価手法の整備 深海底の地震性タービダイト等の地質情報を整理し、プレート間地震の履歴の情報としての適用性を検討する。</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。</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」（平成28年7月6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) 活断層に起因する内陸地殻内地震の履歴に関する評価手法の整備

a. 地表に明瞭な痕跡を残す活断層の活動性評価手法の検討【分類④】

海域における内陸地殻内地震で、海底表面に明瞭な痕跡を残す活断層であっても、断層変位指標(特徴的な地層、地形及び火山灰)が少ない場合又は年代測定試料が少ない場合には、その活動性の評価が困難となる。このような場合には、群列ボーリング調査等を通じ、微化石分析による古気候学的調査等が有効と考えられる(図1)。そこで、海域における内陸地殻内地震の履歴を評価するため、断層変位指標となる古環境学的イベント(古環境変動に鋭敏に反応する生物群集変化、堆積物の物理・化学的変化、沿岸隆起に起因する離水海岸地形・離水生物群集等*)に関連する情報を整理する。そして、海域における内陸地殻内地震の履歴評価に有効な情報を抽出し、地震履歴の情報としての適用性を検討する。

*沿岸隆起に起因する離水海岸地形・離水生物群集等に基づき抽出した古環境学的イベントの一部については、「(2) プレート間地震の履歴に関する評価手法の整備」に位置づける。

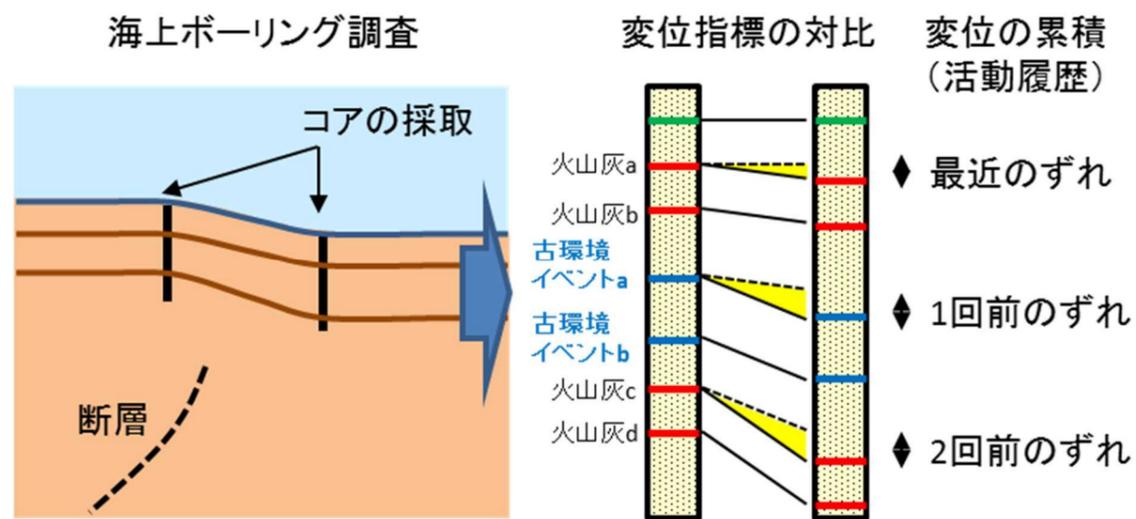


図1 海域における内陸地殻内地震の履歴評価に古環境学的イベントを適用するイメージ

6. 安全研究概要
(始期：平成29年度)
(終期：令和元年度)

b. 地表に明瞭な痕跡を残さない活断層の活動性評価手法の検討【分類①】

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の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2)。一方、中期更新世の地形面及び地層は、広域の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、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る(図3)。次に海域の「年代モデル」による精度の高い年代を、陸域の地域的火山灰に付帯させ、断層変位指標(地形面・地層)を編年するために、海域・陸域の地域的火山灰を対比する手順を整備する。

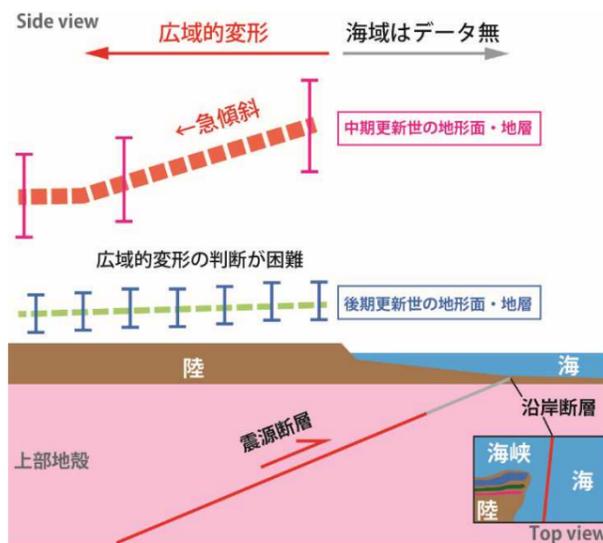


図2 断層変位指標である地形面の広域的変形の例

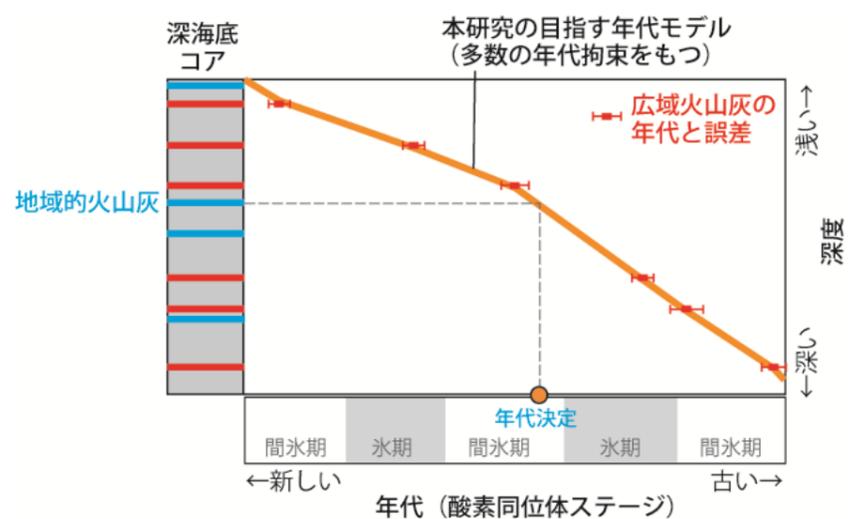


図3 深海底コア(堆積物)中の火山灰の定量的な年代決定の例

(2) プレート間地震の履歴に関する評価手法の整備【分類④】

プレート間地震のうち活動間隔が長い地震の履歴評価については、主として深海底コア(堆積物)中のイベント堆積物の情報を利用する方法、沿岸隆起に起因する離水海岸地形・離水生物群集に基づいた方法がある。

前者については、イベント堆積物をもたらした可能性のある要因が整理されていることが重要である。そこで、先史時代のプレート間地震の履歴を評価するため、海域における古地震学的調査に基づいた地震性タービダイト等の地震イベント情報の候補を検出し、地震履歴の情報としての適用性を検討する(図4)。

後者については、離水海岸地形の認定、隆起年代を評価する際の結果のばらつきと手法の制限に課題があることから、すでに隆起したことが明らかな地域において離水海岸地形**を認定し、高度分布及びその地形面が形成された年代を評価する（図5）。

**古地震学的調査によって得られた地震イベントが活断層に起因したイベントである可能性が高い場合には、「(1)a. 地表に明瞭な痕跡を残す活断層の活動性評価手法の検討」に位置づける。

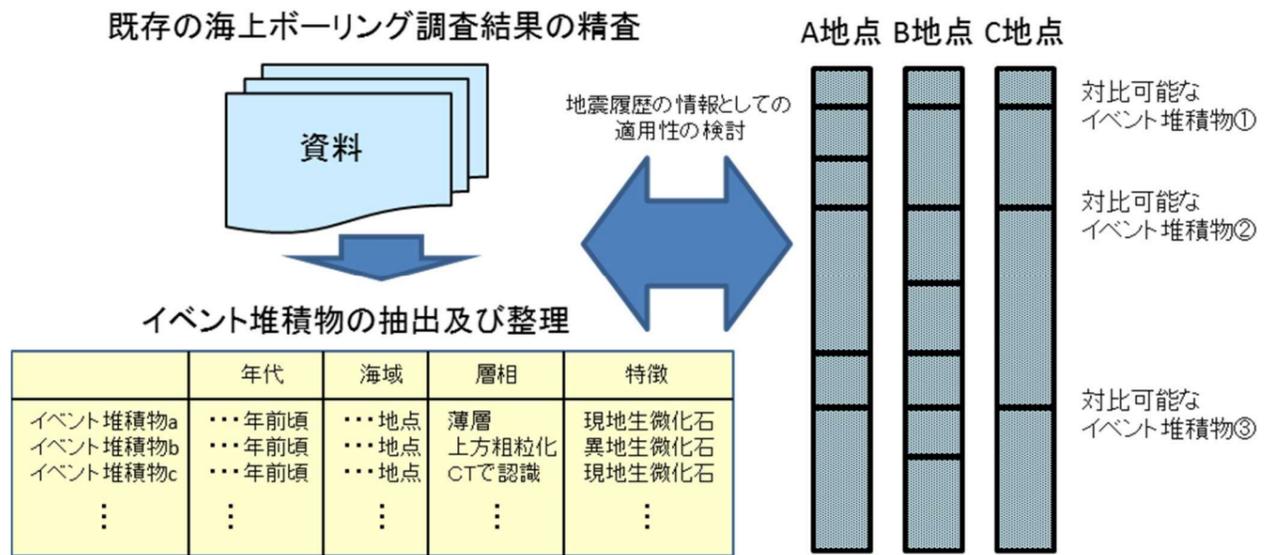


図4 海域におけるプレート間地震等の活動履歴として有効な情報の抽出手順の例

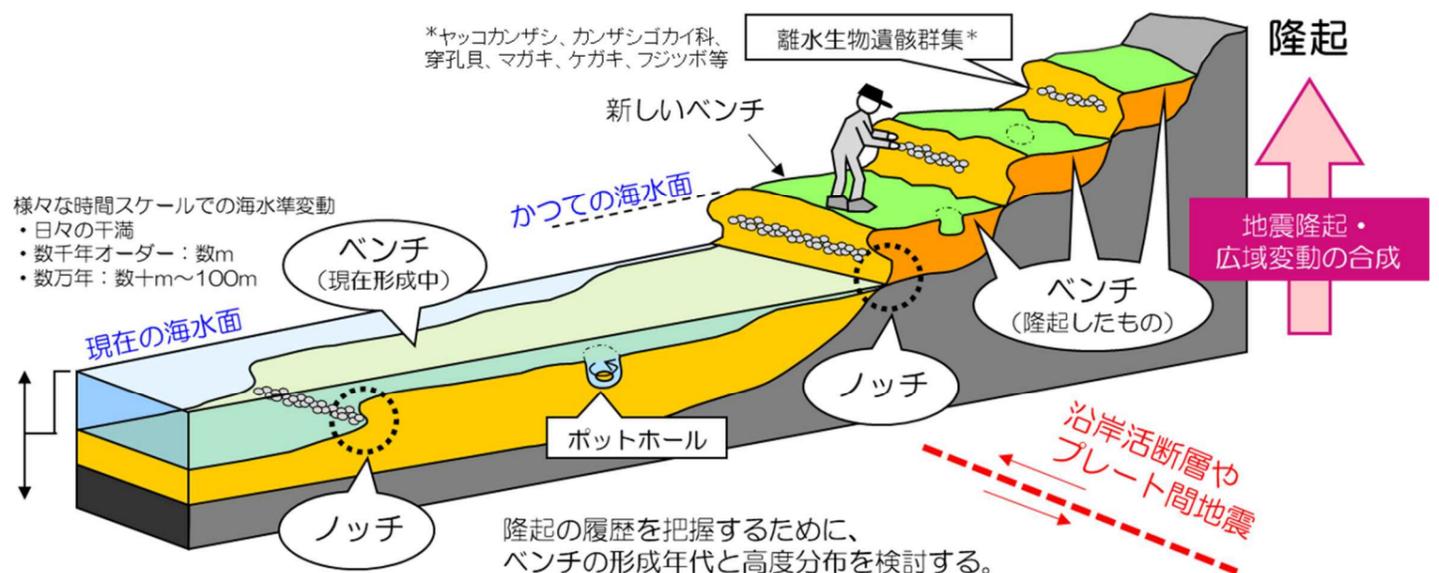


図5 離水海岸地形（隆起ベンチ等）の例

実施行程表

実施項目番号	平成 29 年度	平成 30 年度	令和元年度	令和 2 年度
(1)a. 地表に明瞭な痕跡を残す活断層の活動性評価手法の検討	<ul style="list-style-type: none"> 利用可能な資料及び試料の調査 断層変位指標（特徴的な地層、地形及び火山灰）の検討 	<ul style="list-style-type: none"> 古環境学的イベントの候補の抽出 	<ul style="list-style-type: none"> 地震履歴の情報としての適用性検討 古環境学的イベントを利用した地震履歴評価の取りまとめ 	▽論文の投稿
(1)b. 地表に明瞭な痕跡を残さない活断層の活動性評価手法の検討	<ul style="list-style-type: none"> 陸域の風化した地域的火山灰の層序構築 ▽論文の公表 ▽論文の公表 ▽論文の公表 ▽論文の公表 	<ul style="list-style-type: none"> 風化に抵抗性のある火山灰粒子（鉱物）の化学特性確認 ▽論文の公表 	<ul style="list-style-type: none"> 風化に抵抗性のある鉱物の化学組成を指標にした火山灰対比の精度把握及び評価の取りまとめ 	▽論文の投稿
(2) プレート間地震の履歴評価手法の整備	<ul style="list-style-type: none"> 利用可能な資料及び試料の調査 対象海域の検討 	<ul style="list-style-type: none"> 地震イベントの候補の抽出 ▽学会発表 	<ul style="list-style-type: none"> 地震履歴の情報としての適用性検討 地震イベントを利用した地震履歴評価の取りまとめ 	▽論文の投稿

(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. : 地表に明瞭な痕跡を残す活断層の活動性評価手法の検討【分類④】 利用可能な資料及び大陸棚上で得られた海洋コア試料の調査を行う。その中で、最新知見を踏まえ、特徴的な地層、火山灰、微化石（放散虫、有孔虫等）の産出量の変動パターン、物理化学的特徴等（古地磁気等）に関する情報を整理し、断層変位指標となり得る項目を検討する。</p> <p>b. : 地表に明瞭な痕跡を残さない活断層の活動性評価手法の検討【分類①】 コア中の地域的火山灰に含まれる火山ガラスの化学特性を把握し、その化学特性を既存の調査結果と参照することで、火山灰の給源火山と噴出時代を推定する。また、推定された火山の近傍及び風下地域で、地域的火山灰の層序を構築する。</p> <p>(2) : プレート間地震の履歴評価手法の整備【分類④】 利用可能な資料及びイベント堆積物が挟まれている深海底コア試料の調査を行う。その中で、最新知見を踏まえ、イベント堆積物の堆積構造の特徴及び物理化学的特徴等を整理する。また、実際に本手法の適用が可能な海域を検討する。</p> <p>【平成 30 年度の実施内容】</p> <p>(1) a. : 地表に明瞭な痕跡を残す活断層の活動性評価手法の検討【分類④】 平成 29 年度に取得した断層変位指標となり得る項目の情報から、古環境学的イベント（古環境変動に鋭敏に反応する生物群集変化、堆積物の物理・化学的变化、沿岸隆起に起因する離水海岸地形・離水生物群集等）との関連性を調査し、広域的または地域的に利用可能な古環境学的イベントの候補を抽出する。また、最新知見を踏まえた追加分析の必要性を検討する。</p> <p>b. : 地表に明瞭な痕跡を残さない活断層の活動性評価手法の検討【分類①】 前年度に引き続き火山灰試料を採取するとともに前年度までに採取した火山灰試料の分析を行う。分析の結果から陸域の長期的な風化に対する火山灰粒子の抵抗性を把握する。特に火山灰粒子の種類別残存度、化学組成範囲の均質性又は不均質性に基づく風化程度、並びに粒子中の累帯構造の存否及び化学組成変化の有無を確認する。これらの成果を用いて、地表に明瞭な痕跡を残さない活断層の活動性評価に有用な層序学的年代を推定する。</p> <p>(2) プレート間地震の履歴評価手法の整備【分類④】 平成 29 年度に取得したイベント堆積物に関する情報と、最新知見を踏まえた既往の地震性タービダイトの特徴とを比較し、地震イベントの候補を抽出する。その際、相互に対比可能なイベント堆積物であることが重要となるため、イベント堆積物を認定するための年代測定、化学分析、微化石群集解析等を行う。</p> <p>【令和元年度の実施内容】</p> <p>(1) a. : 地表に明瞭な痕跡を残す活断層の活動性評価手法の検討【分類④】 平成 30 年度までの検討状況を踏まえ、微化石（放散虫、有孔虫等）の産出量の変動パターン、物理化学的特徴等（古地磁気等）の分析、断層変位指標として有用な古環境学的イベントの認定手順及び地震履歴の情報としての適用性を検討する。また、内陸地殻内地震に起因する可能性がある離水海岸地形を認定し、高度分布及びその地形面が形成された年代を把握し、評価結果を取りまとめる。</p> <p>b. : 地表に明瞭な痕跡を残さない活断層の活動性評価手法の検討【分類①】 平成 30 年度の結果に基づき、風化に抵抗性のある鉱物の化学組成を指標にした海域・陸域の火山灰対比の可能性及び精度を把握し、評価結果を取りまとめる。</p> <p>(2) : プレート間地震の履歴評価手法の整備【分類④】 平成 30 年度までの検討状況を踏まえ、年代測定、化学分析、微化石群集解析等を通じ、地震性タービダイトを用いた地震イベントの認定手順及び地震履歴の情報としての適用性を検討する。また、すでに隆起したことが明らかな地域において、離水海岸地形を認定し、高度分布及びその地形面が形成された年代を把握し、評価結果を取りまとめる。</p>
8. 実施体制	<p>【地震・津波研究部門における実施者】</p> <p>○内田淳一 主任技術研究調査官 松浦旅人 技術研究調査官 佐藤勇輝 技術研究調査官</p> <p>【平成 30 年度までの主な委託先】</p> <p>・ 国立大学法人東京大学 ・ ・ ・ 実施項目(1)a</p>
9. 備考	

研究計画

1. プロジェクト	4. 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 (「原子力施設における地質構造等に係る調査・研究」から名称変更)	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	飯島亨 首席技術研究調査官
		主担当者	内田淳一 主任技術研究調査官

3. 背景

「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。これらの手法は具体的な年代値に基づいた評価ではなく、断層破碎物質の性状に基づいた定性的な評価手法(以下「定性的評価手法」という。)であるが、より確度の高い評価を行うためには、個別の手法の信頼性を考慮し、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。

一方、断層破碎物質から具体的な年代値を求める定量的な評価手法(以下「定量的評価手法」という。)については、検討事例が少ない。特に「将来活動する可能性のある断層等」の認定に当たって重要な後期更新世(約12~13万年前)以降の年代を検討した事例はこれまでほとんど無かった。近年これに対応できる手法として、断層活動時以降に地中の自然放射線により蓄積した原子レベルの傷の量を信号として検出するESR法及びルミネッセンス法が期待されている。これらの手法は、考古学分野において、例えば摩擦熱により年代がリセットされた土器等を用いた年代測定手法として既に活用されており、確立されたものである。ただし、これらの年代測定手法を断層破碎物質に適用した際の信頼性については、知見が乏しい。また、これらの手法は、「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)においても例示されているが、「これらの年代測定法は、炭素同位体年代測定に比べるとまだ分析例が少なく、分析結果の信頼性について引き続き検証が必要と思われる。しかし、炭素試料が得られない地層の年代の推定に対して、今後有効に利用されることが期待される。」とされている。

以上のような背景もあり、「審査ガイド」においては、「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。」とされている。今後、個別の手法の信頼性を評価するとともに留意点を具体化し、上載地層法によらない断層の活動性評価手法として、複数の手法による総合的な評価手順を整備していくことが重要である。

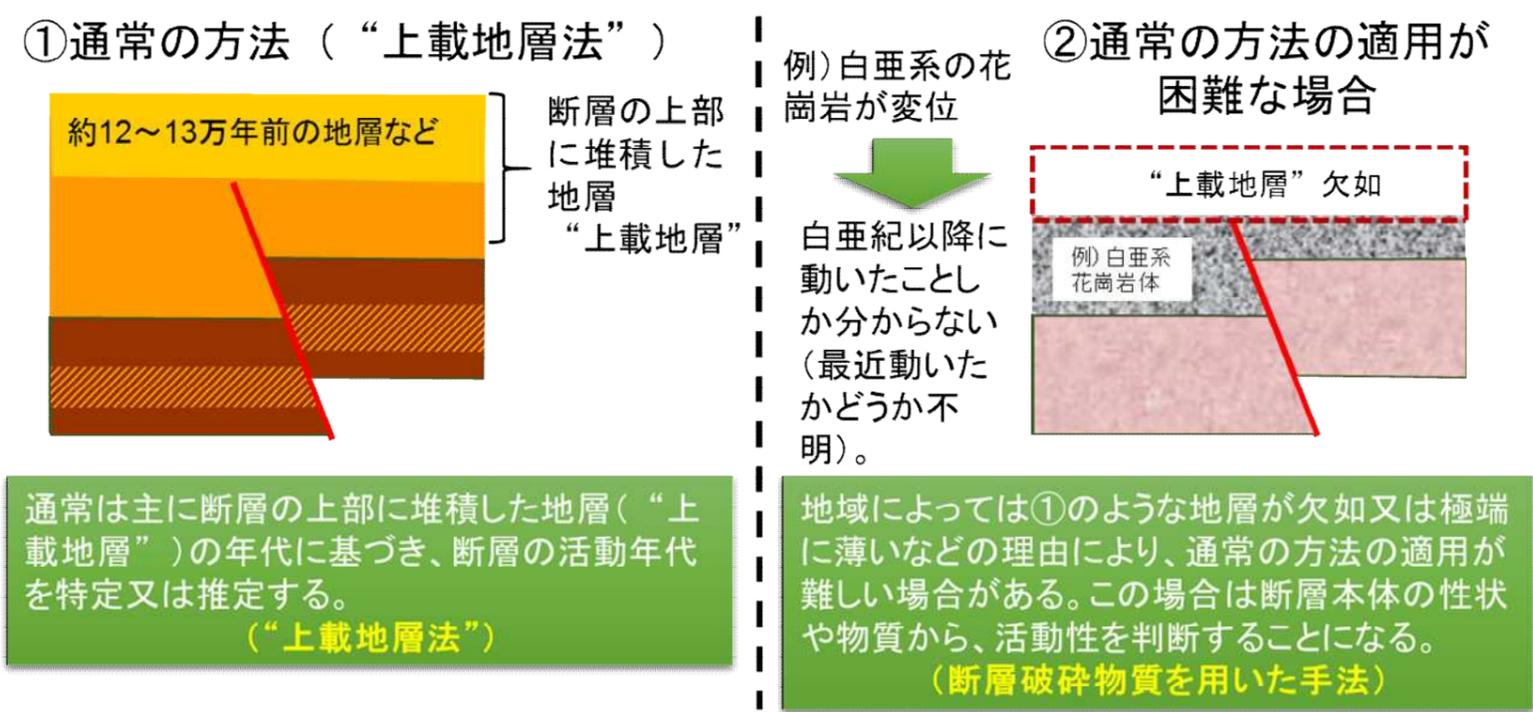


図1 断層の活動年代の評価

4. 目的

本プロジェクトでは、関連評価ガイドの策定に資するため、上載地層が欠如している場合の断層の活動性評価に係る知見を蓄積し、断層本体の性状や物質から活動性評価手法を整備する。

(1)地球物理学的調査、深部ボーリング調査等に基づく地質構造の把握(平成27年度終了)

地球物理学的調査や深部ボーリング調査を実施し、既存の浅部地質構造調査の結果を踏まえて、活断層も含めた深部の地質構造を三次元的に把握する。

(2)断層破碎物質を用いた断層の活動性評価手法の整備

a. 深部ボーリング調査、トレンチ調査等による断層破碎物質の採取

	<p>活動時期が既知の断層を対象として深部ボーリング調査、トレンチ調査等を行い、断層破碎物質を採取する。</p> <p>b. 断層破碎物質を用いた断層の活動性評価手法の整備</p> <p>採取した断層破碎物質を用いて断層の定量的及び定性的な活動性評価手法を整備する。</p>
5. 知見の活用先	<p>本プロジェクトの項目(1)地球物理学的調査、深部ボーリング調査等に基づく地質構造の把握、及び本プロジェクトの項目(2)断層破碎物質を用いた断層の活動性評価手法の整備は、「審査ガイド」のうち断層破碎帯の評価事例及び参考資料の提示に活用する。</p>
6. 安全研究概要 (始期：平成25年度) (終期：令和元年度)	<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」（平成28年7月6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新たな知見の収集・整備（以下「分類②」という。）</p> <p>(1)地球物理学的調査、深部ボーリング調査等に基づく地質構造の把握【分類②】（平成27年度終了）</p> <p>反射法地震探査、重力探査等の地球物理学的調査及び深部ボーリング調査を実施し、既存の浅部地質構造調査の結果を踏まえて、活断層も含めた深部の地質構造を三次元的に把握する。また、これらの調査結果に基づいて地質構造の形成過程の解釈を行う。これらをまとめ、断層を含む地質構造を対象とした効果的な調査手法の組合せ及び解析プロセスを構築する。</p> <p>(2)断層破碎物質を用いた断層の活動性評価手法の整備【分類①】</p> <p>a. 深部ボーリング調査、トレンチ調査等による断層破碎物質の採取</p> <p>活動時期が既知の断層を対象として深部ボーリング調査、トレンチ調査等を行い、断層破碎物質を採取する。</p> <p>b. 断層破碎物質を用いた断層の活動性評価手法の整備</p> <p>① 定性的評価手法の整備</p> <p>トレンチ調査等により得られた断層破碎物質から、断層面に記録されている過去の活動による傷（条線等）に関するデータを取得し、過去の応力場と現在の応力場を比較することにより、断層の活動性を評価する手法を高度化する（応力場の比較による活動性評価：図2）。また、断層面と鉱物脈等との接触・切断関係等を用いる手法についても適用し、評価に当たっての留意点を整理する（断層と鉱物の切断関係による活動性評価：図2）。これらの個別の手法で用いられるデータ及びその取得手順が内包する不確かさ等から信頼性を考慮し、複数の手法による総合的な評価を行う。</p> <p>② 定量的評価手法の整備</p> <p>定量的な年代測定手法として深部ボーリング調査、トレンチ調査等で採取した断層破碎物質を用い、ESR 信号検出（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。）等により、断層が活動してからの経過時間を推定する手法を整備する。このためには、（ア）断層活動による摩擦熱により年代がリセットされる断層破碎物質の適切な深度を把握すること、及び（イ）採取した断層破碎物質の試料から最新の活動面を把握することが重要となる（断層破碎帯における年代測定試料の採取：図2）。</p> <p style="text-align: center;">図2 断層破碎物質を用いた断層の活動性評価に係る調査及び分析の概要</p> <p>（ア）に関しては、摩擦熱を支配する要因には深度に依存する応力のほか、断層の性状、岩石の種類等が挙げられる。そこで、断層の活動から発生する摩擦熱を再現できる室内力学試験による検討を行い、摩擦熱と応力状態等との関係を検討し、摩擦熱により年代がリセットされる適切な試料採取深度を求めるためのプロセスを構築する。</p> <p>（イ）に関しては、深部ボーリング調査によって得られた断層破碎物質を更に微小間隔のサンプルに分けて ESR、OSL 等の年代測定を実施し、年代がリセットする条件との比較を行い、（ア）の結果の適用性について検証を行うとともに、断層の活動履歴を評価する。特に「審査ガイド」の「将来活動する可能性のある断層等」の定義を踏まえ、最近活動したことが明らかな断層に対し、最近数万年以内の活動年代が得られるかどうかを主要な着眼点とする。その際、誤差の幅及び信頼性並びにそれらを制約する要因について分析を行う。</p> <p>これらの複数の手法から得られた結果を比較及び検証し、上載地層法の適用が困難な場合における断層の活動性に関する総合的な評価手順を提示する（図3）。</p>

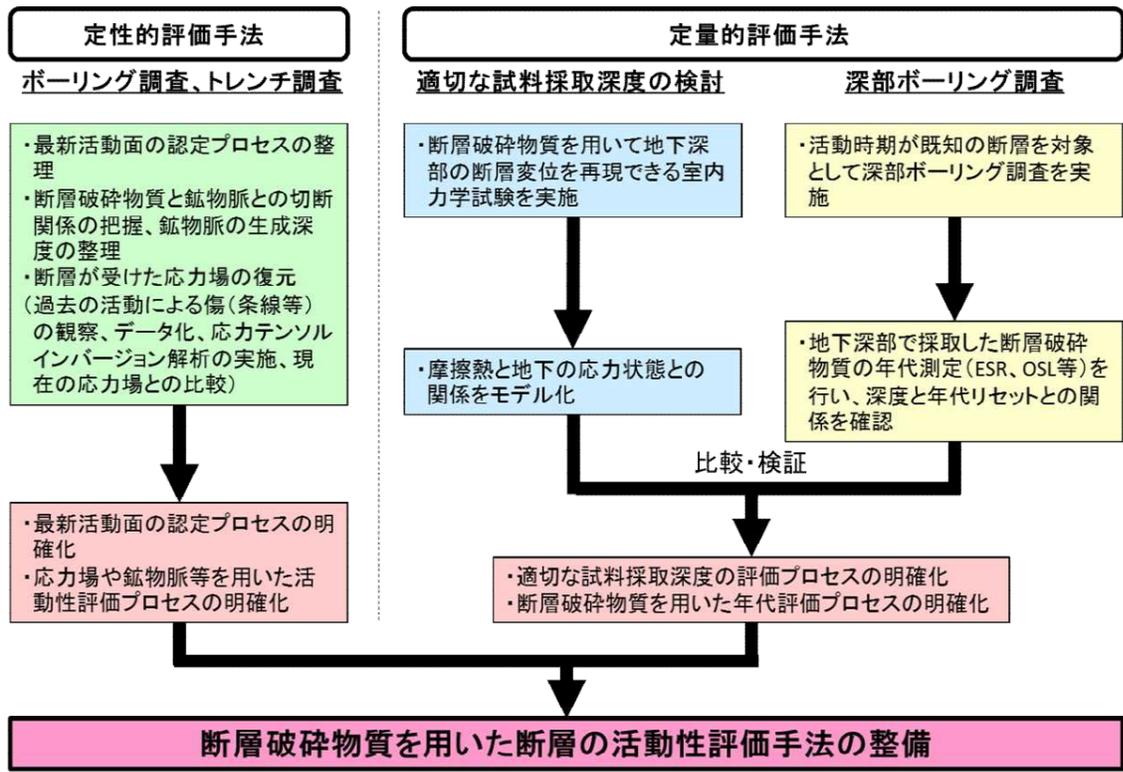


図3 断層破砕物質を用いた断層の活動性評価の流れ

実施行程表

実施項目 番号	平成 25～ 26 年度	平成 2 7 年度	平成 2 8 年度	平成 2 9 年度	平成 3 0 年度	令和元年度	令和 2 年度
(1) 地球物理学的調査、深部ボーリング調査等に基づく地質構造の把握	<ul style="list-style-type: none"> 下北地域における物理探査、深部ボーリング調査の実施 既存試料を用いた断層の三次元構造分析、データ分析 予備ボーリング調査の実施 						
	<ul style="list-style-type: none"> 若狭地域における物理探査の実施と取得したデータの分析 						
(2)a. 深部ボーリング調査、トレンチ調査による断層破砕物質の採取		<ul style="list-style-type: none"> 野島断層等における深部ボーリング調査の位置決定 野島断層等におけるトレンチ調査 	<ul style="list-style-type: none"> 野島断層等における深部ボーリング調査の実施と取得したデータの分析 	<ul style="list-style-type: none"> ボーリング調査等の実施と取得したデータの分析 	<ul style="list-style-type: none"> 鉱物脈等に基づいた活動性評価のためのボーリング調査等の実施 	<ul style="list-style-type: none"> 鉱物脈等に基づいた活動性評価のためのボーリング調査等の実施 	
(2)b. 断層破砕物質を用いた断層の活動性評価手法の整備	<ul style="list-style-type: none"> 文献調査による断層等活動性評価手法の収集・整理 		<ul style="list-style-type: none"> 野島断層地域等で取得した試料について、応力に関するデータ取得と応力解析の実施 	<ul style="list-style-type: none"> 取得した断層試料について、応力に関するデータ取得と応力解析の実施 	<ul style="list-style-type: none"> 応力解析結果の取りまとめ 鉱物脈等の微細構造解析等の実施 ▽学会発表 	<ul style="list-style-type: none"> 鉱物脈等の微細構造解析等の実施 鉱物脈等に基づいた活動性評価の取りまとめ ▽学会発表 	▽論文投稿
			<ul style="list-style-type: none"> 野島断層地域等におけるトレンチ調査で取得した試料について、年代分析、室内化学分析等を実施 ▽学会発表 	<ul style="list-style-type: none"> 野島断層地域等におけるトレンチ調査で取得した試料について、年代分析、室内化学分析等を実施 ▽学会発表 	<ul style="list-style-type: none"> 野島断層地域等における深部ボーリング調査で取得した試料について、年代分析、室内化学分析等を実施 ▽学会発表 ▽学会発表 	<ul style="list-style-type: none"> 年代分析、室内化学分析等の取りまとめと年代評価手法の整備 ▽学会発表 	▽NRA 技術報告
		<ul style="list-style-type: none"> 室内力学試験機の改良 	<ul style="list-style-type: none"> 室内力学試験の実施 	<ul style="list-style-type: none"> 室内力学試験の取りまとめと年代リセット条件の検討 			

7. 実施計画	<p>【平成 25 年度の実施内容】</p> <p>(1) : 地球物理学的調査、深部ボーリング調査等に基づく地質構造の把握【分類②】</p> <p>逆断層地域である下北半島及び周辺海域を対象に、地下 10 km 程度までの地下深部構造、地下 6 km 程度までの速度構造（地震波伝播速度）、地下 3 km 程度までの詳細な地下浅部構造及び速度構造の把握のため、陸奥湾～下北半島横断～東通沖の測線全長約 55 km の区間について、起震車（陸域）やエアガン（海域）を用いた物理探査を実施する。</p>
	<p>【平成 26～平成 27 年度の実施内容】</p> <p>(1) : 地球物理学的調査、深部ボーリング調査等に基づく地質構造の把握【分類②】</p> <p>逆断層地域及び横ずれ断層地域において、活断層も含めた深部の地質構造を把握する目的で地球物理学的調査及び深部ボーリング調査を実施する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・逆断層地域である下北地域を対象に地下の地質・地質構造の精度向上を図るため、深度約 1,500m 程度までボーリングを掘削して地質層序区分を明確にし、反射法地震探査及び屈折法地震探査により推定された地質構造と対応させることで、地下の詳細な地質構造を把握する。掘削したボーリング孔を利用して、PS 検層などの物理検層を行い、地層物性を詳細に調査する。さらに、平成 25 年度に取得した反射法地震探査記録の解釈及び速度構造評価を目的として、オフセット VSP を実施し、地下の地質構造を高精度で把握する。 ・横ずれ断層地域において、活断層も含めた浅部～中深部の地質構造を把握する目的で地球物理学的調査を実施する。 ・これらをまとめ、逆断層地域及び横ずれ断層地域における断層を含む地質構造を対象とした効果的な調査手法の組合せ及び解析プロセスを構築する。
	<p>【平成 27～平成 28 年度の実施内容】</p> <p>(2) a. : 深部ボーリング調査、トレンチ調査等による断層破碎物質の採取【分類①】</p> <p>平成 27 年度から継続して断層破碎物質を採取する。採取した断層破碎物質を用いて以下の分析及び調査を実施する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・深部ボーリング調査、トレンチ調査等により採取した試料から断層破碎物質の薄片を作成し、偏光顕微鏡、電子顕微鏡等により構成鉱物、鉱物脈、せん断面等の微細組織構造を観察する。これらの観察結果等により地質層序区分を明確にし、既往の物理探査やボーリング調査結果等により推定された地質構造と対応させることで、地下の地質構造を把握する。 ・掘削した深部ボーリング孔を利用して、物理検層や孔内試験を行い、温度構造、速度構造、比抵抗構造等の地盤物性を調査する。 <p>(2) b. : 断層破碎物質を用いた断層の活動性評価手法の整備【分類①】</p> <p>総合的な評価手法構築の一環として、以下の分析や試験、応力場の解析等を実施する。</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 定性的評価手法の整備【分類①】 <ul style="list-style-type: none"> ・トレンチ調査等により得られた試料から、断層面に記録されている過去の活動による傷（条線等）に関するデータを取得する。これらのデータを用いた応力場解析から過去の応力場を確認する。 ② 定量的評価手法の整備【分類①】 <ul style="list-style-type: none"> ・年代のリセットされる条件を把握するため、岩石試料を用いた高速せん断摩擦試験を行い、一部の条件下での ESR 信号のリセット状況を把握する。 ・トレンチ調査等で採取した断層破碎物質を用いて、年代分析、室内化学分析等を実施する。
	<p>【平成 29 年度の実施内容】</p> <p>(2) a. : 深部ボーリング調査、トレンチ調査等による断層破碎物質の採取【分類①】</p> <p>断層破碎物質を用いて以下の分析及び調査を実施する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・深部ボーリング孔から得られた断層破碎物質及び地盤物性（温度構造、速度構造、比抵抗構造等）を対比する。対比に当たっては、空間分解能等を考慮し、留意点について整理する。 ・深部ボーリング孔を用いて断層周辺の原位置応力試験を実施する。 ・平成 28 年度までに実施した深部ボーリング調査の結果を踏まえ、補足的な断層破碎物質の採取の必要性を判断する。 <p>(2) b. : 断層破碎物質を用いた断層の活動性評価手法の整備【分類①】</p> <p>総合的な評価手法構築の一環として、以下の分析や試験、応力場の解析等を実施する。試験及び解析結果の整理に当たっては、結果の誤差とその要因を考慮する。</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 定性的評価手法の整備【分類①】 <ul style="list-style-type: none"> ・条線等に基づいた応力場解析の結果と断層周辺で実施した原位置応力試験の結果を比較する。 ・異なる地質条件及び活動性を示す断層破碎物質を露頭から複数採取する。 ② 定量的評価手法の整備【分類①】 <ul style="list-style-type: none"> ・深部ボーリング調査等で取得した試料について、年代分析、室内化学分析等を実施する。 ・岩石試料を用いた高速せん断摩擦試験結果の取りまとめ及び年代リセット条件を検討する。
	<p>【平成 30 年度の実施内容】</p> <p>(2) a. : 深部ボーリング調査、トレンチ調査等による断層破碎物質の採取【分類①】</p> <p>断層の活動性に関する定性的評価手法の構築に資する分析試料を得るため、以下の調査を実施する。</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 定性的評価手法の整備【分類①】 <ul style="list-style-type: none"> ・異なる地質条件及び活動性を示す断層破碎物質を地下から複数採取する。 <p>(2) b. : 断層破碎物質を用いた断層の活動性評価手法の整備【分類①】</p> <p>断層の活動性に関する定性的評価手法の構築に資するデータの拡充及び定量的評価手法を取りまとめるため、以下の分析及び取りまとめを実施する。</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 定性的評価手法の整備【分類①】 <ul style="list-style-type: none"> ・鉱物脈等の微細構造解析等を実施し、断層破碎物質との相互関係を把握する。 ② 定量的評価手法の整備【分類①】 <ul style="list-style-type: none"> ・平成 29 年度までに実施した深部ボーリング調査等で取得した試料の定量的な年代分析、室内化学分析等、個別の結果が示す誤差とその要因を分析し、これらの信頼性を踏まえた年代評価手法を整備する。
	<p>【令和元年度の実施内容】</p> <p>(2) a. : 深部ボーリング調査、トレンチ調査等による断層破碎物質の採取【分類①】</p> <p>断層の活動性に関する定性的評価手法の構築に資する分析試料を得るため、以下の調査を実施する。</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 定性的評価手法の整備【分類①】 <ul style="list-style-type: none"> ・異なる地質条件及び活動性を示す断層破碎物質を地下から複数採取する。 <p>(2) b. : 断層破碎物質を用いた断層の活動性評価手法の整備【分類①】</p> <p>断層の活動性に関する定性的評価手法を取りまとめるため、以下の分析及び取りまとめを実施する。</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 定性的評価手法の整備【分類①】 <ul style="list-style-type: none"> ・鉱物脈等の化学分析を実施し、断層面と鉱物脈等との接触・切断関係、微細構造の特徴に基づく断層の活動時期を評価する方法を整備する。

8. 実施体制	<p>【地震・津波研究部門における実施者】</p> <p>○内田淳一 主任技術研究調査官 宮脇昌弘 技術研究調査官</p> <p>【平成30年度までの委託先】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 株式会社地球科学総合研究所・・・実施項目(1) ・ 国立大学法人東北大学・・・実施項目(1) ・ 株式会社フグロジャパン・・・実施項目(1) ・ 国立大学法人京都大学・・・実施項目(2)a、(2)b
9. 備考	

研究計画

1. プロジェクト	5. 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	飯島 亨 首席技術研究調査官
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定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査手法に関する知見を蓄積する。また、地表で観測される地殻変動からマグマの状態変化を評価するためのシミュレーションモデルを構築する。さらには、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」（平成28年7月6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。

本研究プロジェクトの研究は、平成31年度以降の実施方針（平成30年7月18日原子力規制委員会決定）における中長期的課題として、過去に大規模噴火を起こした火山を対象に、マグマ溜まりの深さやマグマ滞留時間等の噴火に至る準備過程に関する知見の蓄積等を行う（課題A-1-4）ことが承認されている。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、クッタラ火山、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

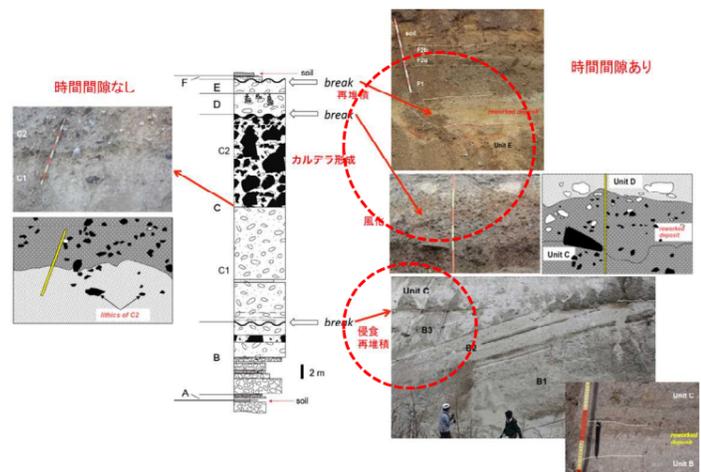
本調査・研究では、平成30年度までの調査及び検討結果を踏まえて、降下火砕物による影響評価に資するため、降灰中の火山灰の量、粒子の数及び粒子の落下速度をリアルタイムで観測し、降灰量と降灰時の気中火山灰濃度の関係を調査するとともに、地質調査から得られる粒径等のデータを踏まえ、過去の噴火における降灰時のプロセスを検討する。

6. 安全研究概要
(始期：R1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、スコリア	溶岩、スコリア	49-72%
		阿蘇4B火砕流堆積物	軽石>>スコリア	64-70, 64%
		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(井科スコリア流)	スコリア	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	
		阿蘇4K火砕流堆積物(肥猪火山灰流)	軽石	
		阿蘇4O火砕流堆積物(小谷軽石流)	軽石>>スコリア	64-69, 52%
		阿蘇4A火砕流堆積物	軽石>>スコリア	67-70, 52%
		阿蘇4T ₁ 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	
阿蘇4X火砕流堆積物*/降下軽石層	軽石	68-69%		
大峰火山 90 ka		大峰火砕丘、高遊原溶岩	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%
阿蘇4/3		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%

図1 阿蘇4噴火に至るマグマの変遷

阿蘇4に向かって珪長質マグマが噴出



古地磁気学的な検討 (UnitBとC1：0～数十年、UnitCとD、UnitE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4～8km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3～7km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）。

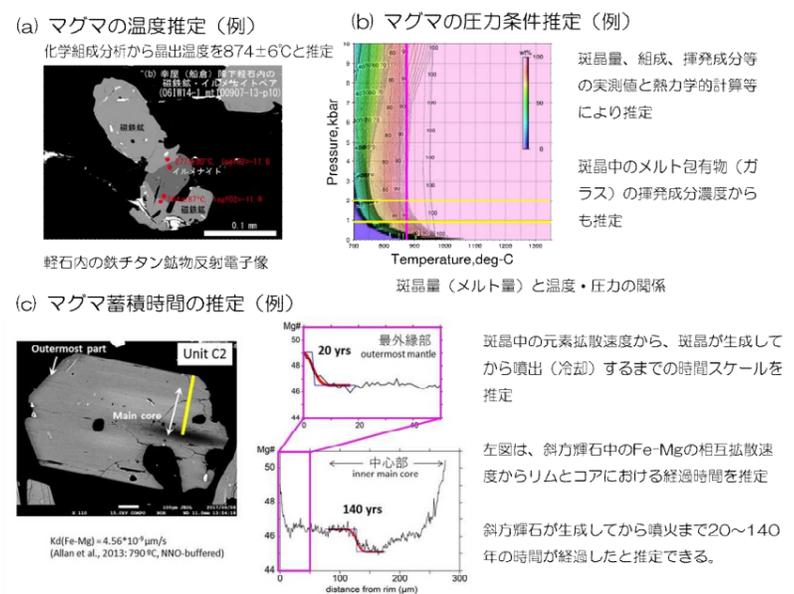


図3 マグマの時空間変化の調査事例

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。

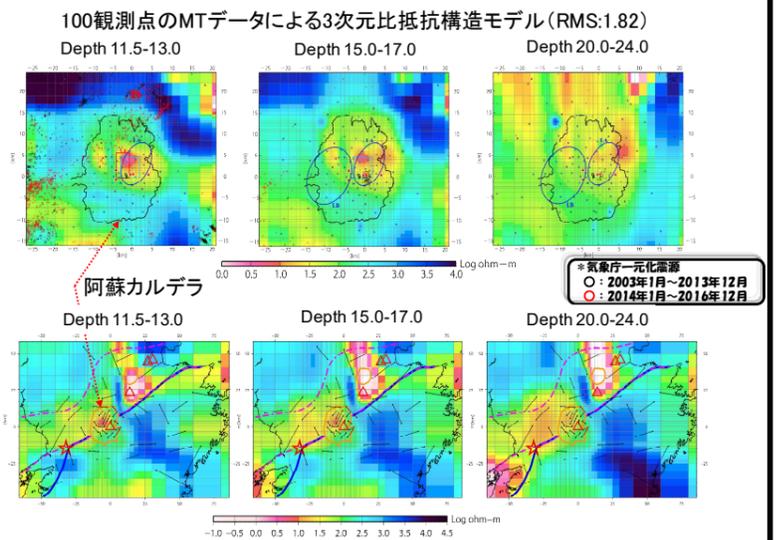
c. 火山性地殻変動とマグマ活動に関する調査

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。

c.1. 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



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

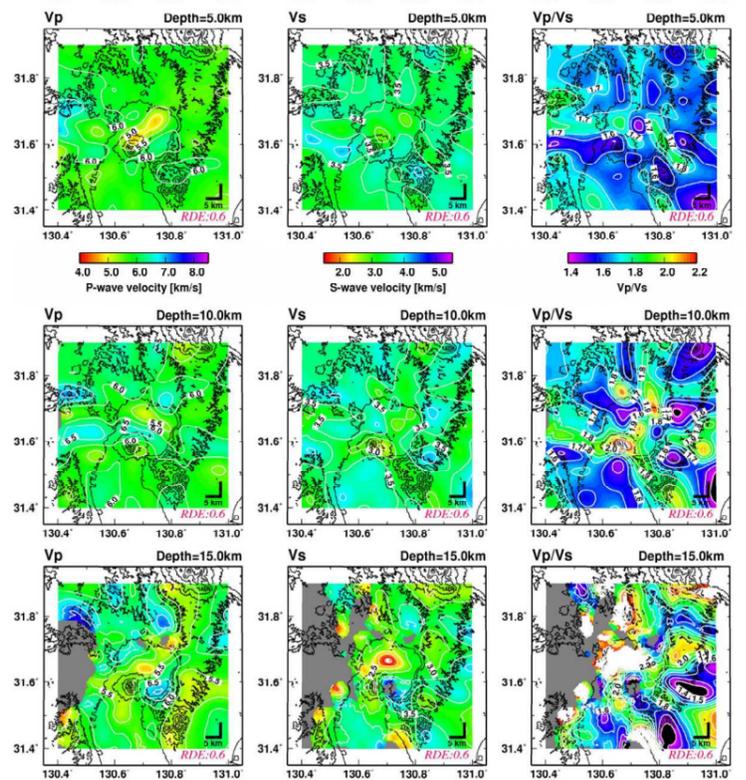


図5 始良カルデラ周辺の地震波速度構造(深さ5~15km)

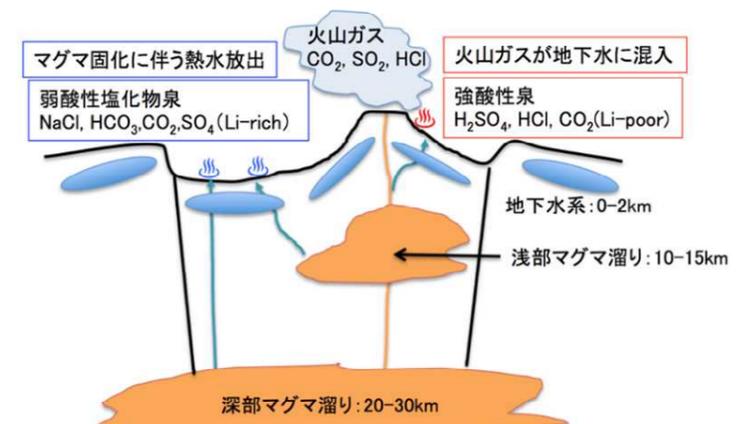
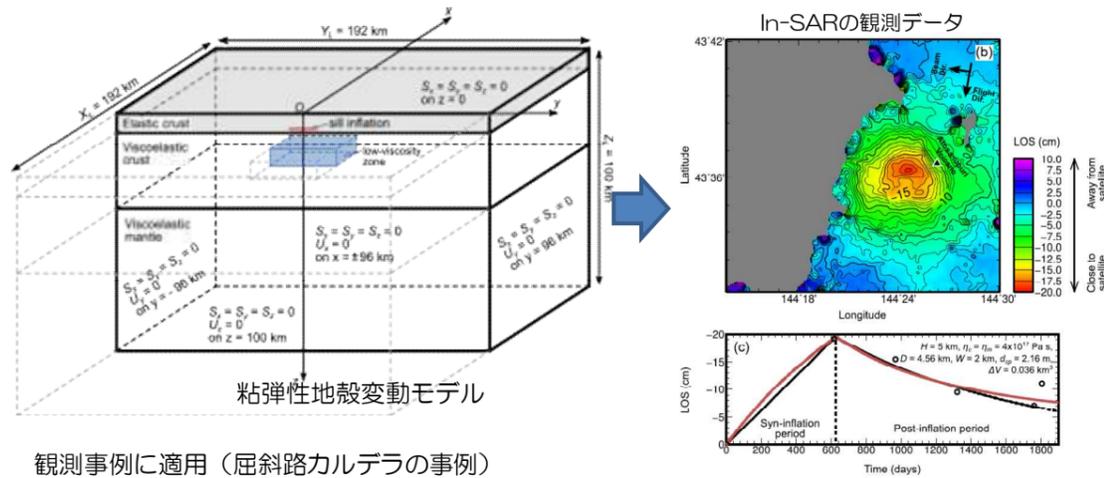


図6 マグマ溜りから放出される熱水流体の組成

火山性の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)。

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

c 2. 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、始良カルデラに適應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)			
	鉍物分析、高温高压実験		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	←				
	マグマ、地下構造に関する情報に基づく数値実験				
		▽製作・施工		▽海底地殻変動観測開始	
	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。さらには、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とともに、分析ノウハウについて情報収集を行う。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関する分析、及び海外の研究機関との意見交換を行う。

(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。

c 1. 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。

c 2. 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する。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洞爺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、引き続き始良カルデラ等の古地磁気学的調査を行う。

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。また、令和元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、阿蘇及び十和田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する。阿蘇カルデラについては令和元年度に設置したネットワークMT法による観測データを基に解析を行う。

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。また、(1)(2)の調査結果を踏まえカルデラ内にボーリング抗を掘削し定常的な採水観測を行うための井戸の掘削を始良カルデラにおいて行う。また、前年度に引き続き始良カルデラ内の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

c 1. 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。

c 2. 地殻変動観測

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

c 1. 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。

c 2. 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。

	<p>【令和4年度の実施内容】</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【分類①】</p> <p>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。</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【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。</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【分類①】</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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</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【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。</p>
	<p>【令和5年度の実施内容】</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【分類①】</p> <p>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。</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【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。</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【分類①】</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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> <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】 (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。 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。 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>
9. 備考	

研究計画

1. プロジェクト	6. 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 上席技術研究調査官
		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> <ul 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> <ul 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> <ul 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> <ul 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」（平成28年7月6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【分類①】

a. 防潮堤の津波に対する応答評価

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

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)

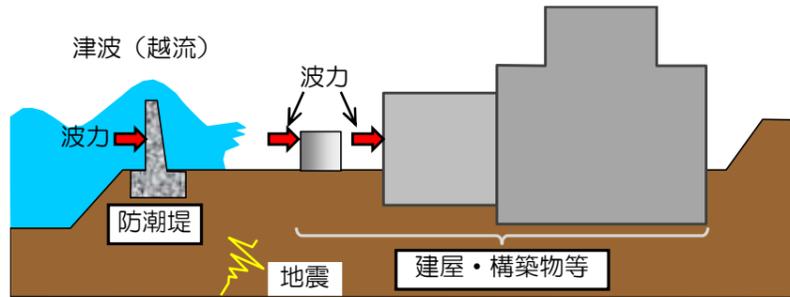


図1-1 津波に対するフラジリティ評価の概要

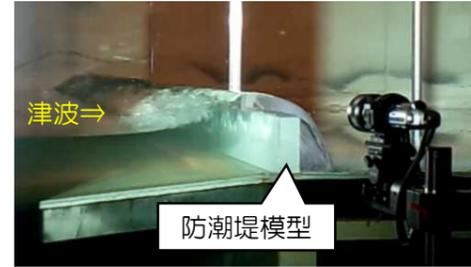


図1-2 津波越流試験の例

(2) 地震に対するフラジリティ評価手法の検討【分類①】

a. 地震時の建屋・構築物等の三次元挙動評価

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

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

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)

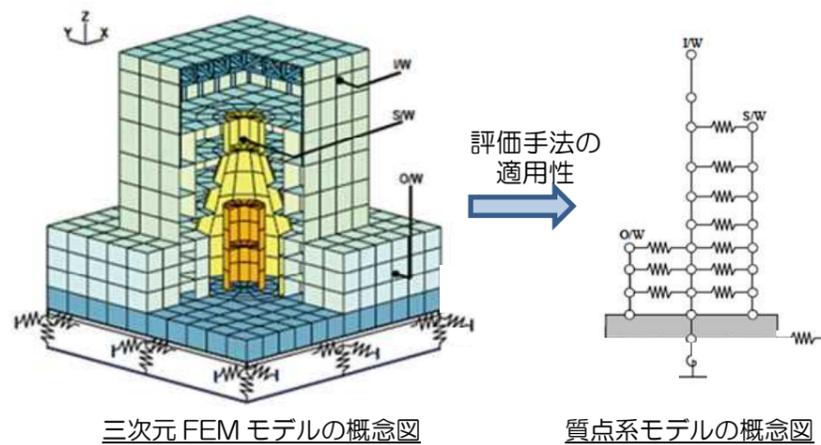


図2-1 建屋・構築物等の三次元評価の概要

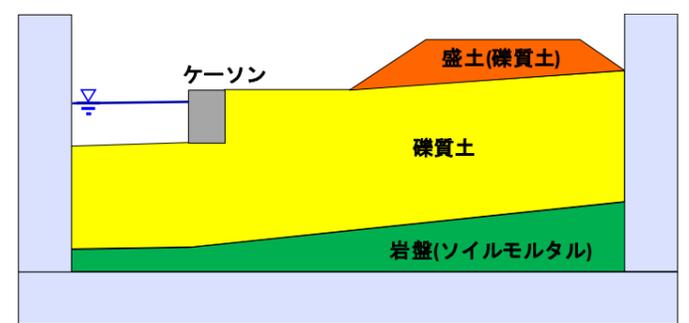


図2-2 液状化試験体の概念図

6. 安全研究概要
(始期：平成29年度)
(終期：令和2年度)

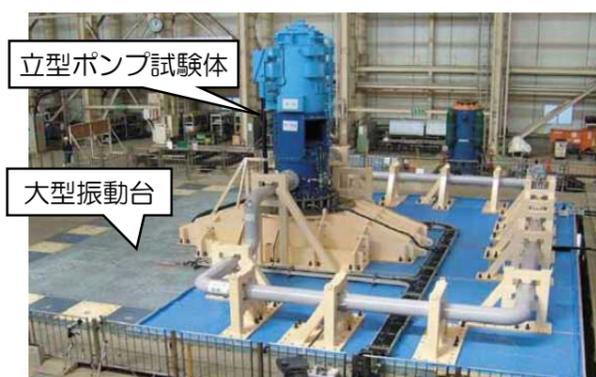


図2-3 振動台加振試験の例

(3) 外部事象等による衝突・衝撃に対する評価手法の検討【分類①】

a. 飛翔体等による衝突・衝撃挙動に係る応答・耐力評価

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

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)

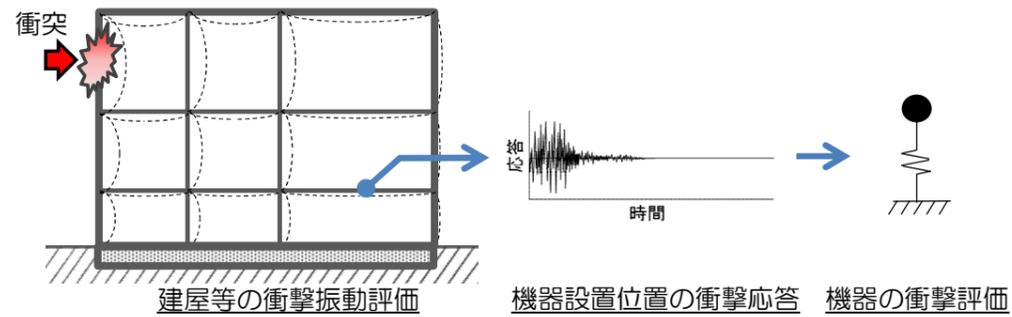


図3-1 飛翔体等による衝突・衝撃挙動評価の概要

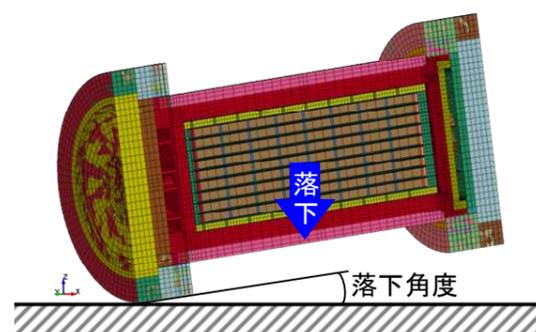


図3-2 輸送容器スラップダウン落下解析モデルの概念図

(4) 地震時亀裂進展評価手法の検討【分類④】

a. 地震時亀裂進展評価

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)

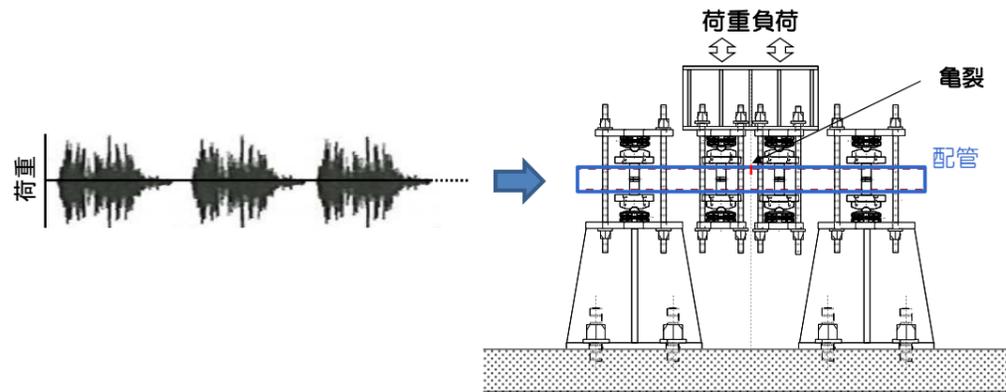


図4 亀裂配管の繰返し荷重試験の概念図

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手法取りまとめ ↓ 成果の公表	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係る検討				
(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	三次元応答の機器への影響に係る知見の整理 ↓ 成果の公表	技術報告案等の検討
(2) b.		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	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	液状化試験及び解析に基づく技術的知見の整理 ↓ 成果の公表	
(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評価の取りまとめ ↓ 成果の公表	
(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	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 ↓ 衝突・衝撃に対する事業者評価手法の確認	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	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評価手法の適用性確認 ↓ 成果の公表	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 ↓ 衝撃に対する事業者評価手法の確認	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 ↓ 衝撃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 ↓ 衝撃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に対する構造健全性評価手法の適用性確認 ↓ 成果の公表	技術報告案等の検討
(4) a.	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	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	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	↓ 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【分類①】</p> <p>a. 防潮堤の津波に対する応答評価 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 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【分類①】</p> <p>a. 地震時の建屋・構築物等の三次元挙動評価 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 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【分類①】</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 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 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【分類④】</p> <p>a. 地震時亀裂進展評価 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【分類①】</p> <p>a. 防潮堤の津波に対する応答評価 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【分類①】</p> <p>a. 地震時の建屋・構築物等の三次元挙動評価 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 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 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【分類①】</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 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 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【分類④】</p> <p>a. 地震時亀裂進展評価 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【分類①】</p> <p>a. 防潮堤の津波に対する応答評価</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。

(2)地震に対するフラジリティ評価手法の検討【分類①】

a. 地震時の建屋・構築物等の三次元挙動評価

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。

b. 地震時の埋立地盤の液状化評価

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。

c. 地震に対する耐震重要設備の耐力評価

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。

(3)外部事象等による衝突・衝撃に対する評価手法の検討【分類①】

a. 飛翔体等による衝突・衝撃挙動に係る応答・耐力評価

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。

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

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。

(4)地震時亀裂進展評価手法の検討【分類④】

a. 地震時亀裂進展評価

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。

【令和 2 年度の実施内容】

(1)津波に対するフラジリティ評価手法の検討【分類①】

a. 防潮堤の津波に対する応答評価

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、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並びに地震荷重との組合せに対するフラジリティ評価手法を取りまとめる。

(2)地震に対するフラジリティ評価手法の検討【分類①】

a. 地震時の建屋・構築物等の三次元挙動評価

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、機器への水平二方向入力等の応答影響に係る技術的知見を整理する。

b. 地震時の埋立地盤の液状化評価

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、ここでの成果を国際基準の策定等に反映する。

c. 地震に対する耐震重要設備の耐力評価

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評価について取りまとめる。

(3)外部事象等による衝突・衝撃に対する評価手法の検討【分類①】

a. 飛翔体等による衝突・衝撃挙動に係る応答・耐力評価

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の評価手法の適用性を確認する。

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

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。

8. 実施体制

【地震・津波研究部門における実施者】

- 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
- 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
- 日高慎士郎 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
- 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

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

【平成30年度の委託先】

- ・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)a
- ・学校法人東京電機大学 . . . 実施項目(2)b
- ・鹿島建設株式会社 . . . 実施項目(3)a

【平成30年度の共同研究先】

- ・国立研究開発法人原子力研究開発機構 . . . 実施項目(4)a

9. 備考

研究計画

1. プロジェクト	7. 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、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 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し、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 これまでの電気ケーブルの火災試験では、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、火災源近傍における電気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、電気ケーブルの熱劣化（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電気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電気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 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。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（運用ガイド）において PRA 対象事象は段階的に拡張していくこととしており、その一つとして火災 PRA を挙げているなど、規制活動において火災防護対策を検討する上で、火災 PRA 手法の整備は重要である。また、HEAF の爆発事象等に関する評価モデル等を検討することは重要である。</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。また、安全性向上評価等の高度化にも資する火災影響評価手法等を整備する。</p> <p>(1) HEAF の影響評価 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 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 火災 PRA 手法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」(平成28年7月6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 data-bbox="520 1187 1932 1676"> </div> <p>(a) 筐体を用いたHEAF試験の一例</p> <p>(b) HEAFの爆発現象における爆発圧力のイメージ図</p> <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>誤動作や原子炉停止の失敗に係るケーブルの熱劣化によるホットショート(図2(a)、(b))の発生確率については、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して取得データを解析するとともにホットショートの発生確率評価のためのケーブルの熱劣化評価の技術的知見を拡充する。この他に新品と経年化した電気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 data-bbox="525 2077 1806 2522"> </div> <p>(a) ケーブル内ホットショートの一例</p> <p>(b) ケーブル間ホットショートの一例</p> <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>平成29年度以降に届出が見込まれている安全性向上評価については、運用ガイドにおいて示すPRA対象事象は段階的に拡張していくこととしている。今後拡張を検討している対象事象の一つとして、火災PRAで必要となる火災解析コードに対して、国際的な火災試験プロジェクト(OECD/NEA/PRISME等)の試験による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</p>

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。

実施行程表（例）

	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 試験の実施及び取得データから得られた知見を取りまとめ、解析実施 ↓ ----- 基準類の見直し等
	(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)
		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
(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 ↓ ----- 火災影響評価手法の整備
	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	

【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。

7. 実施計画

	<p>(2) 電気ケーブルの熱劣化評価</p> <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"> ・HEAF試験の実施（熱変換率の確認）及び取得データから得られた知見を取りまとめる。 ・基準類の見直し等を検討する。 <p>(2) 電気ケーブルの熱劣化評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・電気ケーブルの熱劣化評価試験（海外ケーブルとの比較）の実施及びホットショート発生確率等を検討する。 ・電気ケーブルの熱劣化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"> ・試験及び解析モデルの整備結果に基づき火災影響評価手法を整備する。 ・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>梶島 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>
9. 備考	

研究計画

1. プロジェクト	8. 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 堀内 友翔 技術研究調査官
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、令和元年には正式発行される予定となっている。</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：令和元年度) (終期：令和 4 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」（平成 28 年 7 月 6 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>		

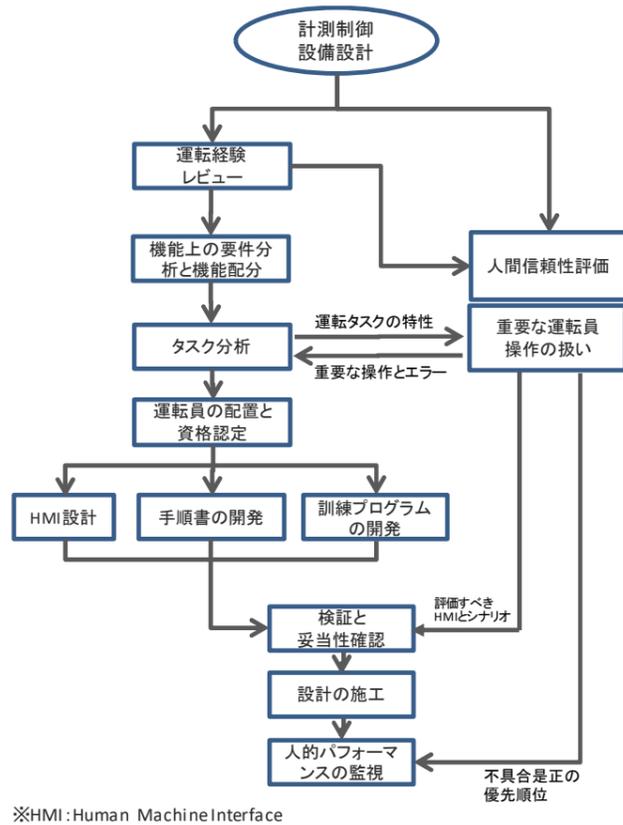


図1 人間工学設計の基本的なプロセス

(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。

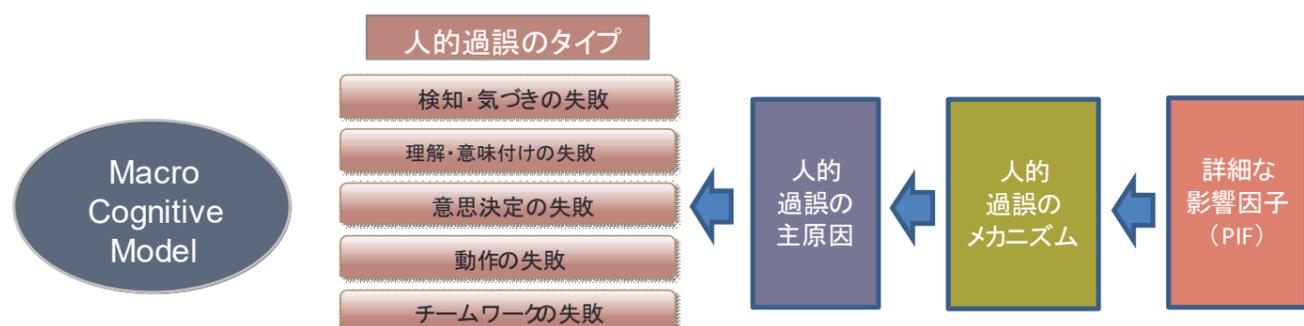
同様に、特定された人的過誤について後段の「設計（ヒューマンマシンインタフェース設計、手順書の開発、訓練プログラムの開発）」において適切な対処がなされていることや、その結果、「検証と妥当性確認」、「人的パフォーマンスの監視」において実際に人的過誤の低減が実現していることを確認するための方法論の具体化を検討する。

(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	人間工学設計低減策	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	<p>【令和元年度の実施内容】</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（分類①、②）</p> <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 <p>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</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（分類①、②、③）</p> <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 <p>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</p> <p>【令和2年度の実施内容】</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（分類①、②）</p> <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 <p>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</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（分類①、②、③）</p> <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 <p>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</p> <p>【令和3年度の実施内容】</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（分類①、②）</p> <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 <p>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</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> <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 <p>想定する成果：</p> <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 <p>【令和4年度の実施内容】</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（分類①、②）</p> <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 <p>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、評価ガイドへの反映</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（分類①、②、③）</p> <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 <p>想定する成果：</p> <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取得、評価ガイドへの反映 					
8. 実施体制	<p>【システム安全研究部門における実施者】</p> <ul style="list-style-type: none"> ○河合 潤 原子力規制専門職 ○堀内 友翔 技術研究調査官 今瀬 正博 原子力規制専門職 高田 博子 技術研究調査官 					
9. 備考	<p>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。</p>					

研究計画

1. プロジェクト	9. 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
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>		

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」（平成 28 年 7 月 6 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。）

(1) PRA の最新知見の反映

a. ダイナミック PRA 手法の整備

- ・ 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】

b. 新たな人間信頼性解析手法の PRA への適用

- ・ 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】

c. レベル 1, 2PRA 一貫解析手法の整備

- ・ 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】

(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

- ・ 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】

b. 内部溢水 PRA の整備

- ・ 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】

(3) 地震・津波等に係る PRA の整備

a. 地震 PRA の整備

- ・ 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】

b. 津波 PRA の整備

- ・ 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】

c. 多数基立地サイトを対象とした地震 PRA の整備

- ・ 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】

d. その他の外部事象に係る PRA の整備

- ・ 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】

(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

- ・ 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】

b. PRA モデルの適切性の確認手法の整備

- ・ 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】

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

- ・ 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】

6. 安全研究概要

（始期：平成 29 年度）

（終期：令和 3 年度）

実施行程表

項目	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) PRA の最新知見の反映					
a. ダイナミック PRA 手法の整備	ダイナミック PRA 手法及び解析ツールの整備				
b. 新たな人間信頼性解析手法の PRA への適用	信頼性パラメータ及び人間信頼性評価手法の整備		新たな人間信頼性評価手法の適用性検討	▽学会発表	
c. レベル 1, 2 一貫解析手法の整備		レベル 1, 2 一貫解析手法の整備			
(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	隣接した区画への火災伝播の解析手法の整備及び解析				▽論文
b. 内部溢水 PRA の整備	浸水解析等に基づく内部溢水レベル 1 PRA 手法及びモデルの整備	HEAF、回路解析等を対象にした内部火災レベル 1 PRA 手法及びモデルの整備		▽論文 被水等による内部溢水レベル 1 PRA 手法及びモデルの整備	
				将来的な安全性に係る評価の高度化	
(3) 地震・津波等に係る PRA の整備					
a. 地震 PRA の整備	重大事故等対処設備を組み込んだ地震レベル 1 PRA モデルの整備 複数本 SGTR のモデル整備			▽学会発表 レベル 1, 2 一貫解析手法を適用した地震 PRA モデルの構築	▽論文
b. 多数基立地サイトを対象とした地震 PRA の整備	プラント基数を拡張した PRA モデルの整備		作業環境の悪化を考慮した PRA モデルの整備	学会発表▽	学会発表▽
c. 津波 PRA の整備		浸水解析等に基づく津波レベル 1 PRA 手法及びモデルの整備			▽論文
d. その他の外部事象に係る PRA の整備			強風、火山等に係るレベル 1 PRA 手法の整備	外部ハザードの重畳に係るレベル 1 PRA 手法の整備	
				将来的な安全性に係る評価の高度化	
(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の整備	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の整理				
b. PRA モデルの適切性の確認手法の整備		PRA モデルの適切性の確認手法の整備			
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		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			
			試運用開始	本格運用開始	
	監視・評価制度の運用準備		監視・評価制度の運用		

7. 実施計画

<p>【平成 29 年度の実施内容】</p> <p>(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。</p> <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【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。</p> <p>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。</p> <p>(3) 地震・津波等に係る PRA の整備</p> <p>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。</p> <p>b. 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。</p> <p>(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。</p>
<p>【平成 30 年度の実施内容】</p> <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【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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <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【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。</p> <p>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。</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】 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。</p> <p>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。</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】 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。</p> <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【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。</p> <p>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。</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、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。</p>
<p>【令和元年度の実施内容】</p> <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【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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <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【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。</p> <p>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。</p>

- (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 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 の一貫解析のドラフト版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し、一貫解析手法の妥当性を確認する。
- (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】
被水により影響を受ける機器の評価方法を検討し、この結果をもとにレベル 1PRA 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】
レベル 1, 2 一貫解析手法で整備した PRA モデルをベースに、新たな地震 PRA モデルを検討する。
 - b. 津波 PRA の整備
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 手法を整備する。
 - 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 手法及びモデルを整備するとともに、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 手法及びモデルを整備する。
- (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】
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に、定性的スクリーニング、入力マニュアルを組み込み高度化する。
 - 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、火災発生時における検査指摘事項の重要度定性評価の試運用から、問題点を抽出し、重要度定性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 の一貫解析のドラフト版を用いて、代表的なプラントに対する評価を実施し、一貫解析手法の妥当性を確

	<p>認する。</p> <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【分類③】 HEAF 等に伴う火災原因を拡充した内部火災 PRA モデルを整備し、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、この結果をもとにレベル 1PRA モデルを整備する。</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 一貫解析手法で整備した PRA モデルをベースに、新たな地震レベル 1PRA モデルを構築する。</p> <p>b. 津波 PRA の整備 レベル 1, 2 一貫解析手法で整備した PRA モデルをベースに、新たな津波レベル 1PRA モデルを整備する。【分類③】</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 を実施し、プラント損傷状態の見直し並びにレベル 2PRA へのインターフェイスを構築する。</p> <p>d. その他の外部事象に係る PRA の整備【分類③】 外部ハザードの重畳事象に関するレベル 1PRA 手法を整備する。</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】 指摘評価ツールの実運用の結果から、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 モデル妥当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、火災発生時における検査指摘事項の重要度定性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 伊東 智道 技術研究調査官 下崎 敬明 安全技術専門職 出井 千善 技術研究調査官 上田 治明 技術研究調査官 城島 洋紀 技術研究調査官 平等 雅巳 技術研究調査官 藤本 春夫 技術参与 大類 馨 技術参与</p> <p>【平成 30 年度の委託先】</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	10. 軽水炉の重大事故の重要物理化学現象に係る実験	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
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	森田彰伸 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は、解析上の不確か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。重大事故等対処設備の有効性評価に係る適合性審査、ガイドの改訂等の要否の検討、安全性に係る評価の継続的な高度化及び緊急時対応計画立案に資する最新知見を継続的に拡充していくことが重要である。</p> <p>東京電力福島第一原子力発電所事故では、ウェットウェルベントの際、圧力抑制プールの減圧沸騰によるエアロゾル状放射性物質のスクラビング除去効果の低減が懸念された。また、スクラビングにおける気泡内エアロゾル挙動等は明らかとなっておらず、現行解析モデルは不確かさが大きい。重大事故時におけるプール水中の放射性物質除去に関する知見を拡充するため、減圧時の除去率評価のための大規模実験及び機構論的モデル構築のための個別効果・可視化実験が重要である。また、燃料から放出される放射性物質はその環境により様々な化学形態をとることから、これを考慮した解析モデルの改良のためデータ拡充が課題とされている。これらの実施による新たな知見は、解析コードの整備及び審査等に資することが期待される。</p> <p>さらに、格納容器の過温破損の評価では、高温雰囲気下における水素 - 空気 - 水蒸気混合気の実規模大環境下の詳細熱流動挙動データの拡充は、格納容器限界温度・圧力の評価の解析上の不確かさを低減させるために重要であり、解析コードの整備及び審査等に資することが見込まれる。</p> <p>加えて、格納容器内キャビティへの事前注水による水中での熔融燃料の微粒化及び床面への拡がり挙動、それに伴う除熱特性に関しては、解析上の不確かさを低減させるために、実験的知見の拡充が重要である。これらの知見は、注水影響評価に関する解析コードの整備及び審査等に資することが見込まれる。</p> <p>なお、これら実験で得た各現象に関する知見は適合性審査において活用するとともに、成果の公表による専門家との情報交換を行い、現状の知見とのギャップが明らかとなった場合、ガイドの改訂等の要否を検討する。</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化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、最新知見を継続的に拡充する。</p>		
5. 知見の活用先	<p>個別現象に係る実験的知見の拡充は、重大事故等対処設備の有効性評価等に係る適合性審査等に資する。また、重大事故時における解析上の不確か性の低減に向けて、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>		
6. 安全研究概要 (始期：平成27年度) (終期：令和元年度)	<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」（平成28年7月6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>③規制活動に必要な手段の整備（以下「分類③」という。）</p> <p>次の物理化学現象を対象に実験的知見の拡充を行う。</p> <p>(1) プールスクラビング実験【分類③】</p> <p>広範囲の事故時熱流動条件で適用可能なプール水中のエアロゾル除去挙動に関する機構論的モデルを開発するために、図1に示す個別要素実験（小規模実験及び中規模実験）及び大規模積分実験を実施する。このうち、2種類の個別要素実験では、機構論的モデル開発のために必要とされる二相界面挙動及びエアロゾルの相互作用を可視化技術等により計測する。また、大規模積分実験では、実機相当の減圧を含む重大事故時の除去率に関するデータベースを構築する。</p> <p>a. 小規模実験では、単一気泡内の気泡界面変化とエアロゾル挙動の関係及び液滴・同伴エアロゾルの水面での飛散を詳細に観察し、各現象の除去係数への寄与を定量的に把握する（図2(a)）。</p> <p>b. 中規模実験では、大規模積分実験では困難な気泡群内の気泡分裂・合体を伴う複雑な二相界面挙動及びエアロゾル挙動の関係を詳細観察し、大規模積分実験で得られる除去挙動を複数のメカニズムに分解し、各メカニズムの除去係数への寄与を定量的に把握する（図2(b)）。</p> <p>c. 大規模積分実験では、減圧時の除去率に有意な影響が現れるしきい条件及びスクラビング現象のメカニズム検討を視野に入れたパラメータ試験を実施し、除去率を定量的に把握する（図2(c)）。</p> <p>上記a及びbの実験により、スクラビングにおける二相流動挙動及びエアロゾル挙動について、個別及び相互関係を詳細に計測評価し、cの実験で得られるベント時の放射性物質除去に関するデータとともにスクラビング解析モデル SPARC90 に反映する。</p>		

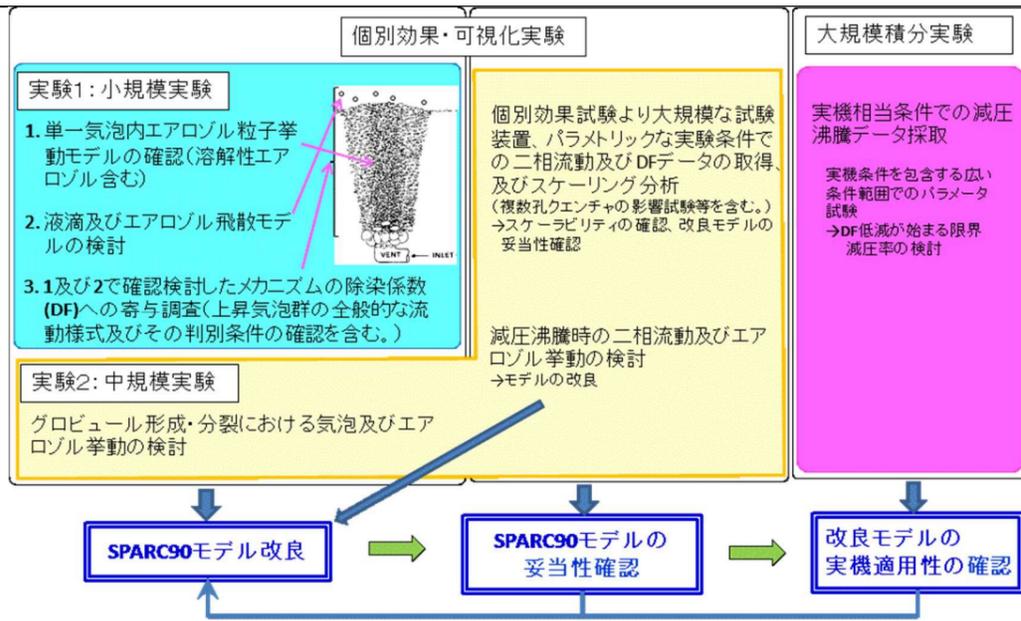
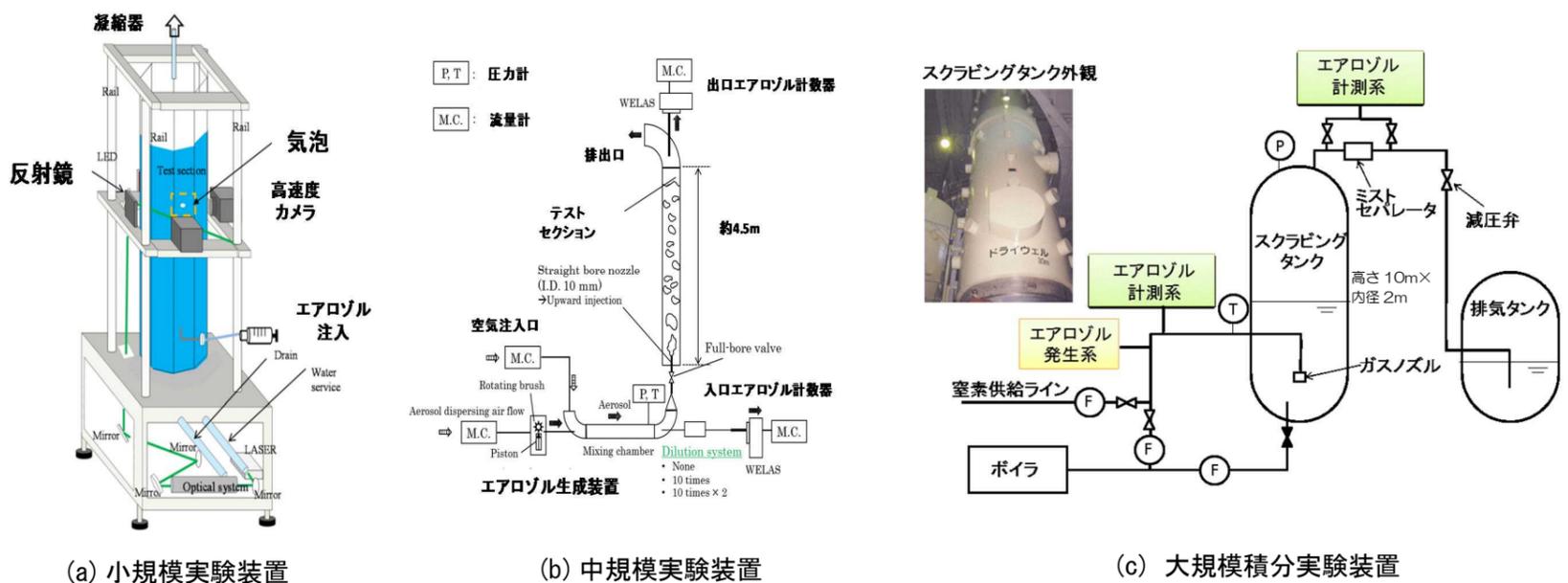


図1 プールスクラビング実験体系

以上の実験を通じて得られたデータは、「11. 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」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。

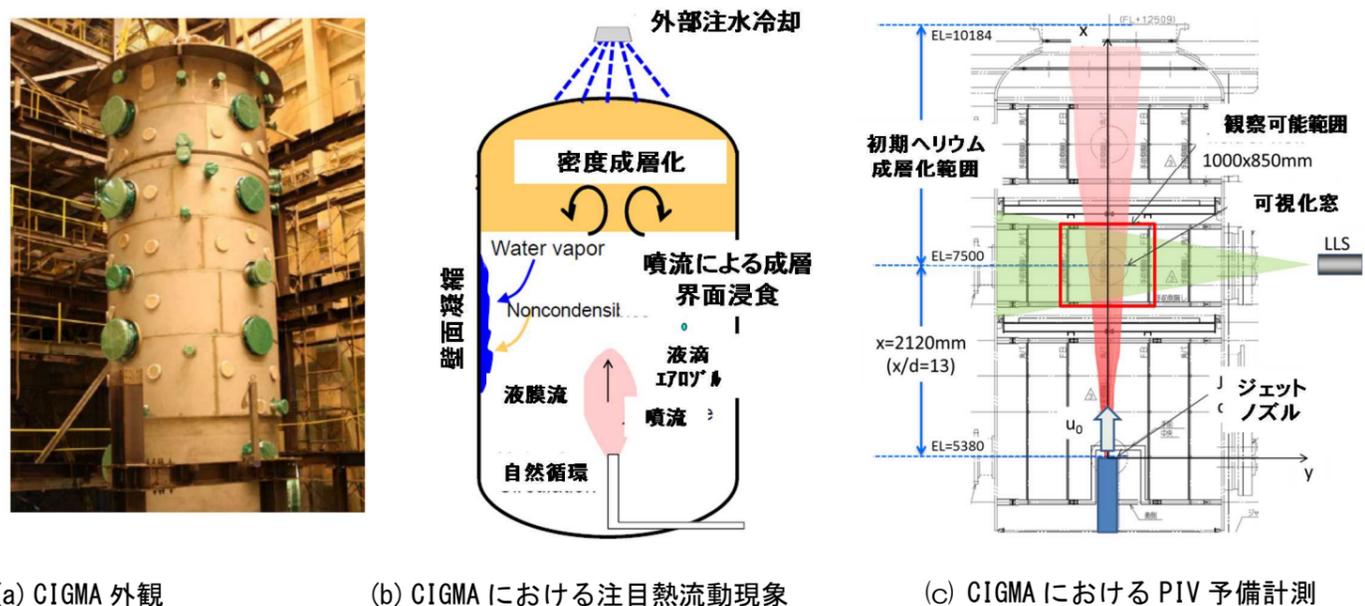


出典：H. Sun et al., Development of error reduction methods in aerosol measurement for pool scrubbing experiment, ICONE-24 (2016).

図2 プールスクラビング実験装置

(2) 重大事故時格納容器熱流動実験【分類③】

大型の格納容器模擬装置（以下「CIGMA」という。）（図3（a））により、格納容器の過温破損が生じる可能性のある高温雰囲気でのヘリウム - 空気 - 水蒸気混合気の詳細測定を実施する。同装置は、密度成層化、噴流による成層境界浸食及び壁面凝縮熱伝達の計測に加えて、格納容器上蓋及びフランジ部を外部冠水できる設計としている（図3（b））。また、高温雰囲気条件において、流体速度場を空間解像度の高いサンプリング格子を用いた Particle Image Velocimetry（以下「PIV」という。）法により測定（図3（c））するとともに、温度及び混合ガス組成分布も測定する。さらに、壁面には凝縮により形成される液膜流量を測定するための装置が設置されている。



出典：Current Severe Accident Research Activities in S/NRA/R Japan, IAEA Training Meeting on Post-Fukushima Research and Development (2015).

出典：柴本ら、大型装置 CIGMA を用いた格納容器熱水力安全研究-重大事故の評価手法と安全対策の高度化を目指して-, 日本原子力学会誌 (2016).

図3 大型の格納容器模擬装置

この実験により、重大事故条件下での格納容器内の非凝縮気体における大局的挙動（対流、成層化、スプレイ攪拌、壁面凝縮等）及び局所的挙動（噴流による成層崩壊等）に関する数値流体解析（CFD）コードのモデル化等に必要となる実験データ及びスプレイ等の重大事故等対処設備の効果に関する最新知見等を拡充することができる。

また、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/CSNI 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。

なお、格納容器内部や沸騰水型炉の圧力抑制室のように、対流及び相変化を伴う雰囲気中でのエアロゾルの除去メカニズムに関するデータの整備を検討する。

以上の実験を通じて得られたデータは、「12. 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」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。

(3) ソースターム実験【分類③】

重大事故時には、揮発性の高い希ガス、ヨウ素、セシウム等が燃料から放出されやすくなり、環境に移行しやすくなる。ただし、放出される放射性物質は、事故時の雰囲気や制御棒の材質等により様々な化学形態を取ることから、その移行挙動が変化する可能性がある。重大事故時のソースタームを精度よく評価するためには、個々の化学形態に応じた燃料からの放出、原子炉冷却系での移行挙動、格納容器内での移行挙動等を評価するモデルの整備が重要である。

重大事故時に燃料から放出された後の放射性物質の化学形態を調べるために、国際共同実験 VERDON5、OECD/NEA/CSNI が実施する国際共同研究プロジェクト等に参加し、燃料から放出された放射性物質の放射能・化学分析のデータを取得する。また、国際共同実験に加え、図 4(a)に示すように重大事故時を模した温度・雰囲気ガス等の異なる条件下における放射性物質の移行挙動を確認する。なお、実施可能な場合は使用済燃料を用いて、照射済み燃料からの放射性物質の放出及び移行挙動を確認する。また、図 4(b)に示すように、フィルターに付着した放射性物質を分析し、燃料から放出された放射性物質の化学形態に関するデータを拡充する。得られたデータは、「11. 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」における「(4) 放射性物質生成・移行・除去解析コードの開発」の事故時のソースタームの解析モデルに反映する。

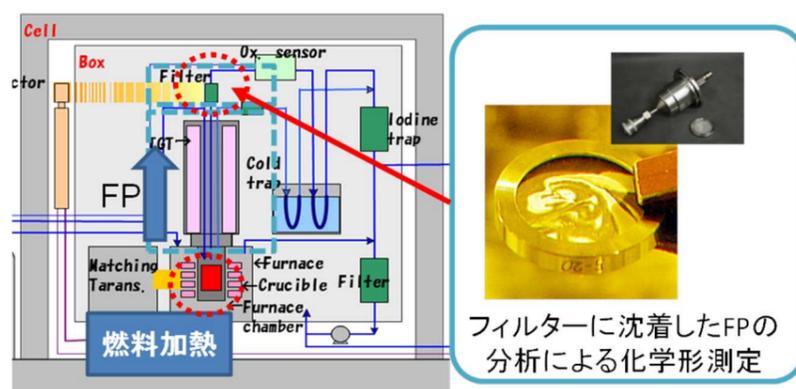


図 4 (a) 重大事故時格納容器熱流動実験 (b) 化学形態測定実験

(4) 燃料デブリ形成過程個別現象実験

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。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。

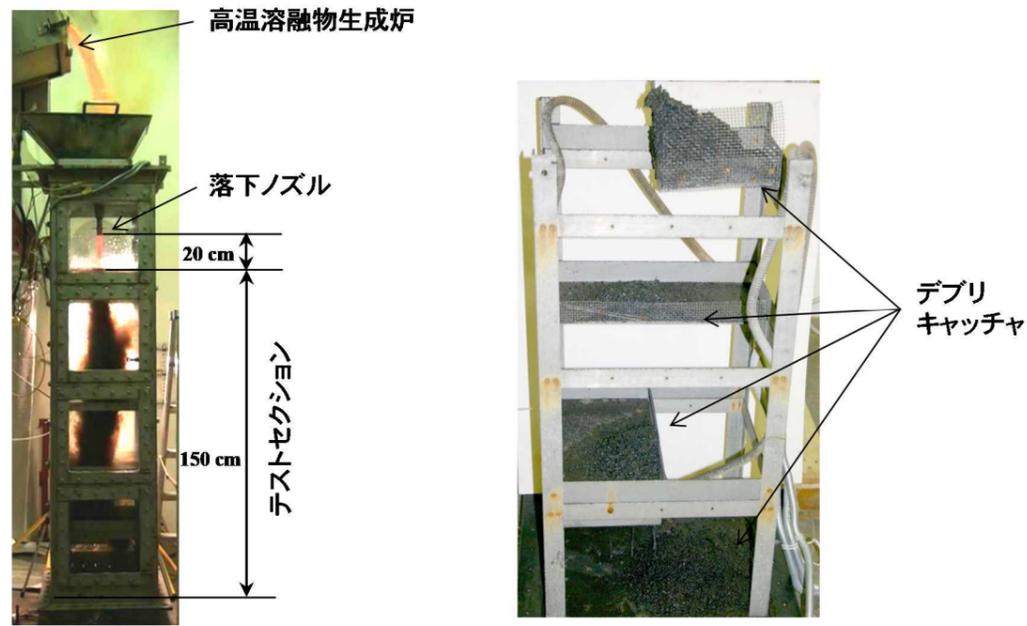
ここでは、欧州等を中心にこれまでに実施されたデブリ冷却実験例の調査を踏まえて、実験的知見を拡充すべき以下の3項目の個別現象について、海外設備を用いた実験を実施する。

1) プール落下高温溶融物の粒子化挙動実験

高温溶融物の水中落下時の粒子化挙動は、デブリベッドの伝熱面積に影響し、堆積後の冷却性を大きく左右する。この現象はジェットブレイクアップと呼ばれ、これまで日本を含む各国において研究されてきた。スウェーデン王立工科大学（以下「KTH」という。）が実施した DEFOR-A 装置（図 5(a)）によるジェットブレイクアップ実験では、落下中に固化しきれない粒子が集積しポロシティの小さな集積状態になることが観測されている。この現象によって、デブリベッドには局所的に冷却水が通りにくいホットスポットが形成される可能性があることが確認されている。

これまでのジェットブレイクアップに関する実験結果では、数センチの小口径ジェットに対応しており、沸騰水型原子炉（以下「BWR」という。）等で想定される大口径ジェットにおけるデータの拡充が重要である。大口径ジェットでは、プール水深が比較的浅い場合には、集積状態になる割合が増加することが考えられる。そこで、DEFOR-A 装置を用いて、流出口径を拡大した条件下でプール水深等をパラメータとしたブレイクアップ実験を実施し、大口径ジェットによる高温溶融物の水中落下時の粒子化挙動に関する最新知見を拡充する。

本実験を通じて得られたデータは、「11. 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」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。



(a) DEFOR-A 装置外観

(b) DEFOR-A テストセクション構造

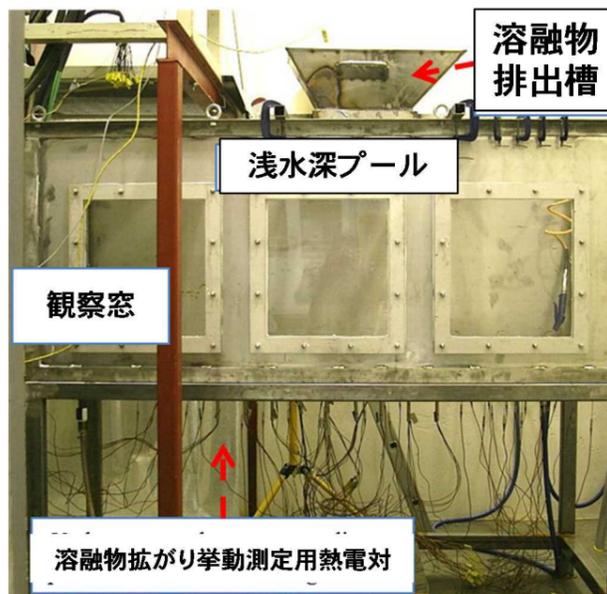
出典：A. Konovalenko et al., Experimental Results on Pouring and underwater Liquid Melt Spreading and Energetic Melt-coolant Interaction, NUTHOS-9, N9P0303 (2012).

図5 DEFOR-A 高温溶融物ジェットブレイクアップ実験装置

2) プール内床面上高温溶融物の拡がり挙動実験

粒子化せずにキャビティプール内床面に到達した高温溶融物は、床面上を拡がり、やがて除熱により溶融物表面にクラストが形成されることから拡がり停止する。この拡がり面積は、溶融物の伝熱面積を支配することから、デブリの冷却性において重要な因子となる。KTHが実施したPULiMS装置（図6(a)）による水中高温溶融物拡がり実験では、水中において除熱によるクラスト形成が進むため、ドライ状態よりも拡がり面積が小さくなることが知られている。解析モデルを開発するためには、水中における高温溶融物の拡がりに関する実験データの拡充が重要である。そこで、PULiMS装置を用いて、プール水深、デブリ過熱度等をパラメータとした水中高温溶融物拡がり実験により、最新知見を拡充する（図6(b)）。

本実験を通じて得られたデータは、「11. 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」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。



(a) PULiMS 装置外観



(b) 実験後溶融物拡がり例

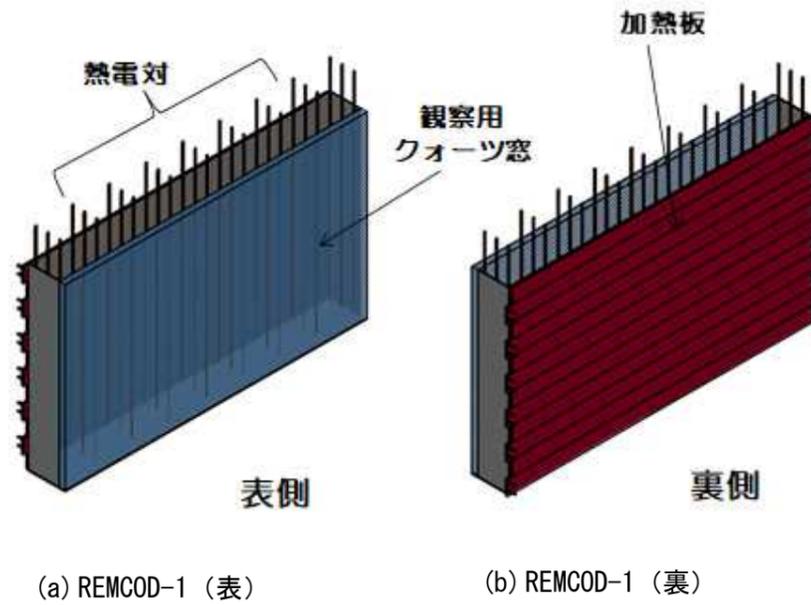
出典：P. Kunidov et al., Agglomeration and size distribution of debris in DEFOR-A experiments with Bi203-WO3 corium simulant melt, NED 263, 284-295 (2013).

図6 PULiMS 高温溶融物プール内拡がり実験装置

3) 高温溶融物-デブリベッド相互作用実験

キャビティに堆積したデブリベッド内を十分な冷却水が流れない場合、デブリベッド内で局所的にドライアウトが発生し、場合によっては固化したデブリの再溶融が発生する可能性がある。同様に、固化しているデブリベッド上に高温溶融物が落下した場合、特に、酸化溶融物と金属溶融物が十分に混合していない場合、金属溶融物がデブリベッド内に浸透し流路を閉塞する等して局所的に再溶融が発生する可能性がある。

酸化溶融物-金属混合溶融物の流動に対する詳細なモデル化のためのデータを拡充することが重要である。ここではKTHにおいてREMCODと呼ぶ装置を製作し（図7）、比較的高密度の熱電対及び高温に耐えられるクォーツ窓を介した可視化により、固化デブリベッド内での高温溶融物の浸透挙動及び再溶融挙動に関する最新知見を拡充する。



出典：Current Severe Accident Research Activities in S/NRA/R Japan , IAEA Training Meeting on Post-Fukushima Research and Development (2015).

図7 REMCOD 高温溶融物-デブリベッド相互作用浸実験装置概念図

実験は複数の体系から構成する。REMCOD-1 (図7 (a) 及び (b)) では、平板上のテストセクション内において、一方の側面よりデブリベッドを加熱し、固化したデブリベッド内の高温溶融物の浸透状況を格子状に配された熱電対及び可視化窓によって観察する。熱電対指示値及び可視化情報に基づき、溶融物の到達領域及びデブリベッドの再溶融の可能性に関する情報を取得する。REMCOD-2以降では、REMCOD-1の体系を三次元体系に拡張し計測系を増強する等により、詳細な高温溶融物-デブリベッド相互作用に関するデータが得られる。

本実験を通じて得られたデータは、「11. 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」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。REMCOD-1 及び REMCOD-2 以降から得られるデータは、キャビティ内及び原子炉压力容器下部プレナム内のデブリベッドにおける高温溶融物-デブリベッド相互作用の解析モデル開発に活用する。また、これらのデータについては、将来的には原子炉压力容器下部ヘッドの貫通に関する現実的評価のための解析コードの開発に活用する。

4) 粒子状デブリの冷却性実験

粒子状デブリの冷却性の現実的な評価のためには床面に堆積している粒子状デブリからコンクリート壁面あるいは金属ライナーへの熱伝達量のデータ拡充が重要である。そのため、粒子状デブリの壁面との接触面積や周囲流体の影響等も含め、パラメトリックな実験により、その特性を把握することを検討する。本実験を通じて得られたデータは、「11. 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」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。

(5) 海水注入影響評価実験【分類③】

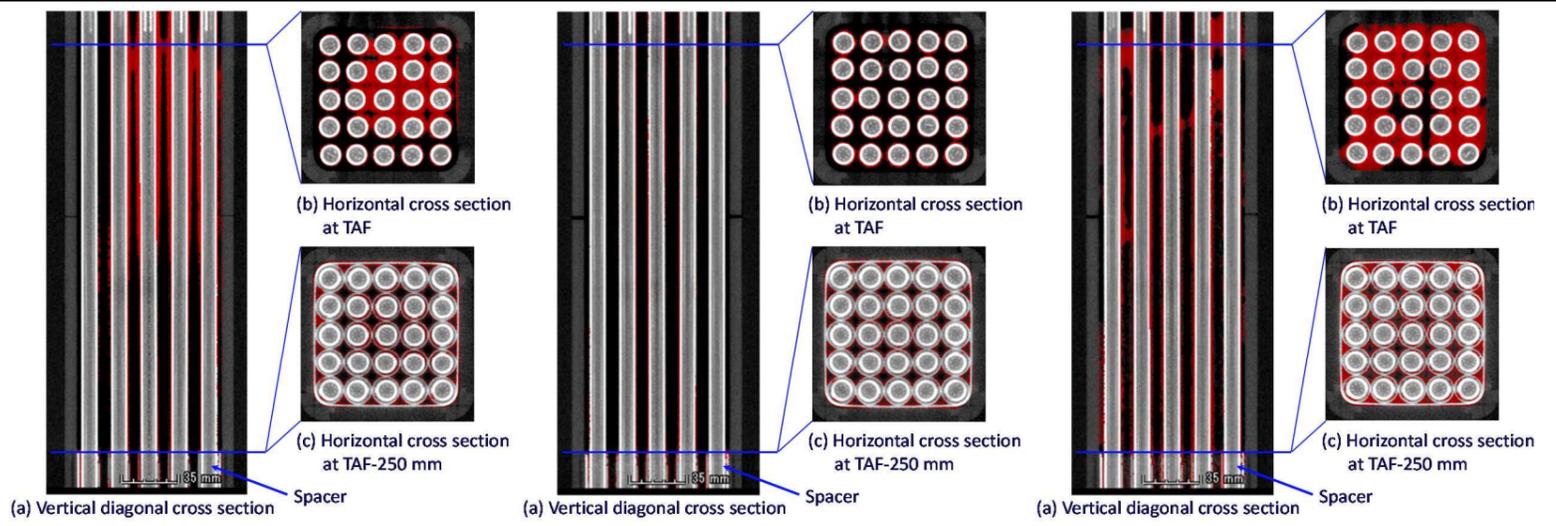
BWR 及び加圧水型原子炉 (PWR) では、重大事故対策として海水を代替水源として位置付けている。海水注入が長期化すると、炉内での崩壊熱による蒸発によって塩分濃度が上昇し、炉心、下部プレナム等、压力容器の各所に析出物が形成され、これらが局所的に集積し、流路狭隘部を閉塞して除熱性能を劣化させる可能性がある。そのため、沸騰濃縮などによる塩分析出が燃料及び溶融炉心の除熱に及ぼす影響についての知見を拡充する。なお、本実験は平成 28 年度で終了している。

1) 燃料バンドル除熱性能実験

燃料を対象とした実験では、5×5 バンドル体系で、初期塩分濃度、バンドル出力、設定液位、溶液種類 (模擬海水及び海水ホウ酸混合溶液)、加熱時間等をパラメータとして、析出位置や析出量の時間変化を X 線 CT スキャナで計測し定量的に評価した (図 8)。さらに、模擬燃料棒に設置した熱電対により模擬燃料棒の表面温度挙動を計測し、析出挙動との関係を調査した。取得したデータから析出メカニズム及び表面温度上昇メカニズムを分析し、実機における析出挙動及び除熱性能予測に繋げるための解析手法を構築した。(図 8))

2) デブリベッド

溶融炉心を対象とした実験では、除熱性能に大きく影響するデブリベッド表面クラストを緻密に模擬し、クラック、クラスト粒径及び溶液種類 (水、模擬海水及び海水ホウ酸混合溶液) をパラメータとして沸騰曲線を計測した。その結果、クラックがある方が、また、水よりも海水の方が、熱伝達率が向上する結果が得られた。これらのデータは「11. 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」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。



(a) 模擬海水 (加熱時間 17000 秒) (b) 海水・硫酸混合溶液 (加熱時間 17000 秒) (c) 海水・硫酸混合溶液 (加熱時間 28000 秒)

出典：軽水炉のシビアアクシデント下の海水・硫酸注入時の影響に関する試験(4) 5×5バンドル流路で沸騰濃縮された海水と硫酸水との混合液の塩析挙動，原子力学会 2016 年春の年会

図8 塩析挙動のX線CTスキャナ計測結果

実施行程表

		平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度	令和元年度
(1) プールスクラビング実験	○大規模実験 定常実験	▽学会公表	▽学会公表	▽学会公表		
	○小規模実験 装置整備		減圧実験	減圧実験	気泡界面とエアロゾル 相互挙動実験	気泡界面とエアロゾル 相互挙動実験
(2) 重大事故時格納容器熱流動実験	装置検証		予備実験	格納容器挙動実験	温度影響実験	冷却挙動実験
	○コールド実験 予備実験		制御材影響実験	雰困気影響実験	雰困気、制御材 影響実験	模擬 FP 組成影響実験
(3) ソースターム実験	○ホット実験 装置性能確認		照射済燃料実験	沈着試料化学分析、 照射済燃料実験	沈着試料化学分析	沈着試料化学分析、 化学形態分析
	1) プール内落下高 温溶融物の粒子化学 挙動実験	実験条件検討・装置改造	予備実験	ノズル径影響実験	デブリ過熱度影響実験	
(4) 燃料デ ブリ形成過 程個別現象 実験	2) プール内床面上 高温溶融物の拡がり 挙動実験	実験条件検討 予備実験	▽学会公表 プール水サブクール 影響実験	デブリ過熱度影響実験	ノズル径影響実験	論文公表▽
	3) 高温溶融物-デ ブリベッド相互作用 実験	装置設計	装置製作	予備実験	学会公表▽ 均一単一材料実験	新規装置による 浸透挙動詳細計測
	4) 粒子状デブリの冷 却性実験					装置・条件検討
	(5) 海水注入影響評価実験	○短尺実験 ボイド率計測実験				
	○長尺実験 装置整備		析出挙動実験			
	析出挙動解析手法の構築	▽学会公表		▽学会公表 論文公表		
	随時反映			随時反映		随時反映
	将来的な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) プールスクラビング実験【分類③】</p> <p>1) 小規模実験</p> <p>a. プール内上昇時における単一気泡の界面変動挙動及びその内部のエアロゾル挙動を高速度カメラにより計測して、相互の関係を調査し、現行のエアロゾル捕獲モデルと比較評価し、改良点を検討する。</p> <p>2) 中規模実験</p> <p>a. ノズル出口から液面到達までの気泡群をワイヤメッシュセンサーにより3次元詳細計測して、各位置における流動様式等の評価し、現行スクラビングモデルと比較検討する。</p> <p>b. プールスクラビング槽出入口におけるエアロゾル計測により、除染係数を支配するメカニズムを調査する。</p> <p>3) 大規模積分実験</p> <p>a. 減圧時のエアロゾル放射性物質除去率について、減圧率及びサブマージェンスのパラメータを変化させた実験を行い、各パラメータの減圧時除染係数への影響を調査し、データベースを構築する。</p> <p>(2) 重大事故時格納容器熱流動実験【分類③】</p> <p>a. 可燃性ガス等混合分布挙動実験：空気環境下での空気ジェット挙動及び空気＋ヘリウム環境下での空気ジェットによる密度成層浸食挙動を、PIV等を用いて計測し、密度成層浸食実験のベースデータを取得する。</p> <p>b. 格納容器冷却効果実験：飽和蒸気体系及び飽和蒸気＋空気体系において、格納容器外面冷却のベースケース実験を行い、容器内圧力変化及び温度分布計測により、冷却効果を評価する。</p> <p>(3) ソースターム実験【分類③】</p> <p>a. 国際共同実験 VERDON5 の化学分析に参加し、燃料から放出された後の放射性物質の化学形態に関する解析モデル作成を目的としたデータを拡充する。</p> <p>b. 前述の VERDON5 実験を補完するため、温度・雰囲気ガス等の条件を変更した実験を実施し、データを取得する。</p> <p>c. 前年度のコールド実験に基づき、ホット実験を実施する。</p> <p>(4) 燃料デブリ形成過程個別現象実験【分類③】</p> <p>1) プール落下高温熔融物の粒子化挙動実験</p> <p>a. KTH の DEFOR-A 装置を用いた高温熔融物ジェットブレイクアップ実験でノズル径を変化させた実験を行う。その他のパラメータは既往実験と同等とし、各高さ位置でデブリ粒子を採取し、その径のデータを評価する。既往データ等との比較評価により、プール水サブクール度のジェット微粒化への影響を評価する。</p> <p>2) プール内床面上高温熔融物の拡がり挙動実験</p> <p>a. KTH の PULiMS 装置を用いた床上高温熔融物スプレッド実験のデブリ過熱度を変化させた実験を行う。文献及び前年度のデータ分析から、その条件範囲を決定し、床上拡がり時の温度データの取得及び高速度カメラ撮影により挙動を評価する。</p> <p>3) 高温熔融物－デブリベッド相互作用実験</p> <p>a. 前年度に KTH において製作した REMCOD-1 装置の試運転を行い、改良改善点を洗い出し、装置を完成させる。加えて、相互作用に影響の大きいと考えられる模擬材料に関して親水性等を考慮して検討し、実験条件を決定する。</p>
	<p>【平成30年度の実施内容】</p> <p>(1) プールスクラビング実験【分類③】</p> <p>大規模装置において減圧沸騰条件下でのスクラビング実験を実施するとともに、中規模装置においてガス注入領域の除染係数の計測と蒸気混入用設備を整備する。また、小規模装置において、最新の計測技術を用い、気液二相流とエアロゾルの相互関係に関する実験を実施する。</p> <p>(2) 重大事故時格納容器熱流動実験【分類③】</p> <p>大型格納容器実験装置(CIGMA)を用い、重大事故時の格納容器内の気相部における自然循環、密度成層、外面冷却、ベント挙動等に着目した実験を実施する。</p> <p>(3) ソースターム実験【分類③】</p> <p>VERDON-2,5 実験を補完する実験を実施する。これら実験データを用いて原子炉冷却系内におけるソースターム解析を実施する。</p> <p>(4) 燃料デブリ形成過程個別現象実験【分類③】</p> <p>H29 年度までに実施した DEFOR 及び PULiMS 実験について、その詳細を調査整理し、データベースとして構築する。加えて、粒子状デブリの冷却性実験についての計画・実験条件等を検討する。</p>
	<p>【令和元年度の実施内容】</p> <p>(1) プールスクラビング実験【分類③】</p> <p>中規模実験では、前年度整備した蒸気設備等を用い、蒸気混入時の実験データを取得する。小規模実験では、前年度に引き続き、気泡界面とエアロゾルの相互関係に関するデータを拡充する。</p> <p>(2) 重大事故時格納容器熱流動実験【分類③】</p> <p>前年度に引き続き、格納容器内のガス挙動に関するデータの拡充を行う。特に冷却ループを用いた定常自然循環熱伝達に関する熱伝達効果のデータを取得する。</p>

	<p>(3) ソースターム実験【分類③】 VERDON-2,5 実験の詳細データ入手及び分析と、前年度に引き続き、それらを補完する実験を実施する。加えて、放射性物質化学反応モデルを導入したシビアアクシデント解析コードを用いて、代表的なシビアアクシデントシナリオのソースタームを評価する。</p> <p>(4) 燃料デブリ形成過程個別現象実験【分類③】 前年度設計製作した詳細計測実験装置を用いた高温溶融物—デブリベッド相互作用に関する実験を行い、データの拡充を行う。加えて、粒子状デブリの冷却性実験に関する実験装置の設計検討を行う。</p>
8. 実施方針	<p>【シビアアクシデント研究部門における実施者】 ○森田彰伸 技術研究調査官 西村 健 技術研究調査官 堀田 亮年 主任技術研究調査官</p> <p>【平成30年度までの委託先】 ・国立大学法人筑波大学・・・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(1)b、(2)、(3) ・一般財団法人電力中央研究所・・・実施項目(5)</p>
9. 備考	<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>「11. 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」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>「12. 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」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>

研究計画

1. プロジェクト	11. 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	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
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実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実さは大きい。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/CSNI」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実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、不確実さの幅を温度、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」（平成 28 年 7 月 6 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。）

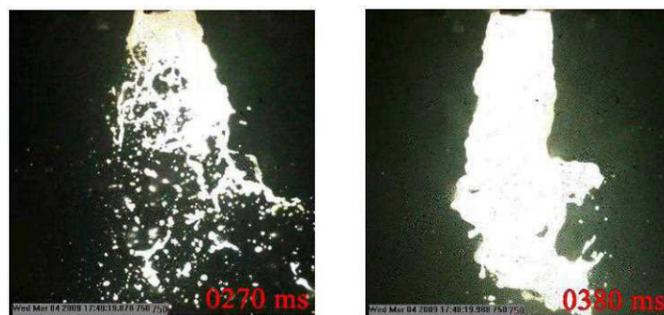
これまでに、デブリベッド形成及び冷却性等に係る解析コードの開発を進めてきたが、平成 29 年度からは、実機プラントにおける重大事故評価の精度向上の観点から課題の優先順位を検討した結果、溶融燃料 - 冷却材相互作用、MCCI、キャビティ内デブリベッド形成及び冷却性並びに燃料デブリからの放射性物質放出の 4 分野を対象として、これらに関する解析コードの開発を進める。解析コードの開発に当たっては、国内外の研究の成果及び評価技術の現状を踏まえて、軽水炉の重大事故の重要物理化学現象に係る実験等で取得した最新の試験結果を活用し、実験条件から実機プラント条件への外挿における不確かさの評価を含めた評価手法の整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

(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/GSNI 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)）。

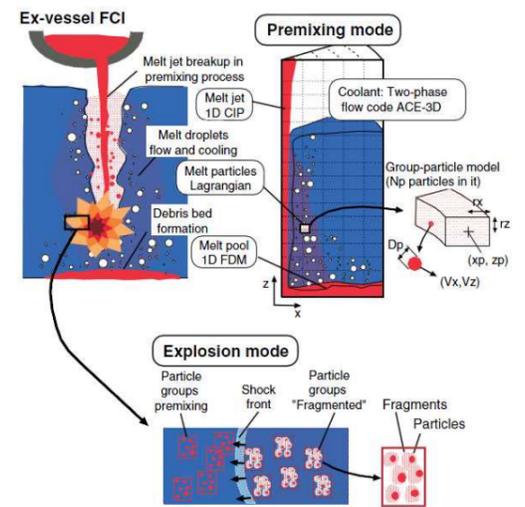
これらの知見を活用し、実規模スケールにおける現象予測の精度を向上する手法を整備する。まず、実験と実機プラントにおける条件の相違が発生する機械的エネルギーに及ぼす影響度から、多段階の溶融物落下及び大量な溶融物落下時の水中での二相挙動及び二酸化ウランにおける機械的エネルギー変換に関する現象を同定し、これらに関する国内外の研究動向、解析モデルについて調査し、数値モデルを開発する。また、空中でのデブリ粒子化、水中での粒子化デブリの集積挙動等の同伴現象に関する解析モデルは、より現実的な予測のために必要な要素であり、これらの同伴現象に関する解析モデルを備えたコードの開発を進める。JBREAK 及び JASMINE 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：平成 29 年度)
 (終期：令和 4 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).

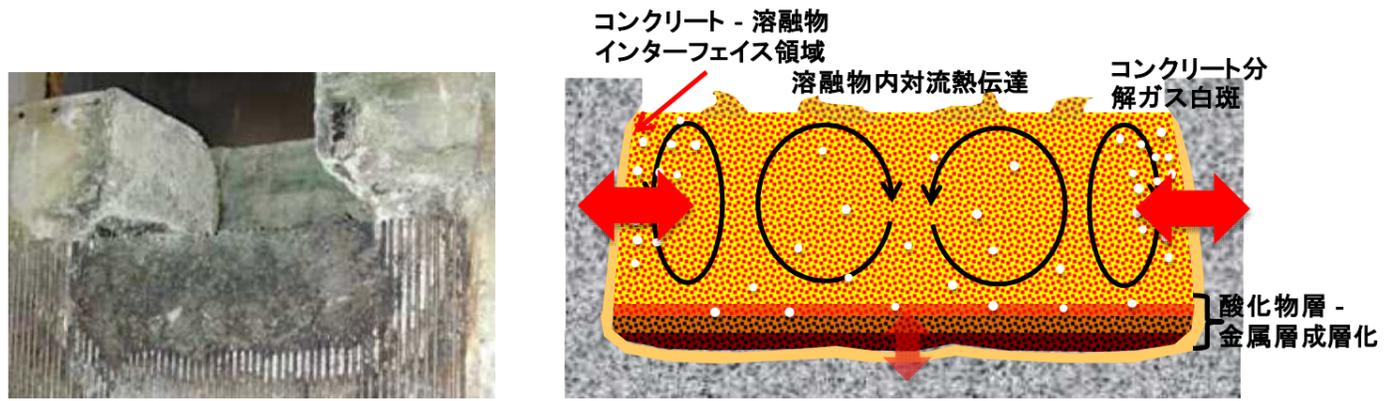
(b) 溶融燃料 - 冷却材相互作用モデル

図 1 OECD/NEA/GSNI-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/GSNI 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/GSNI-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

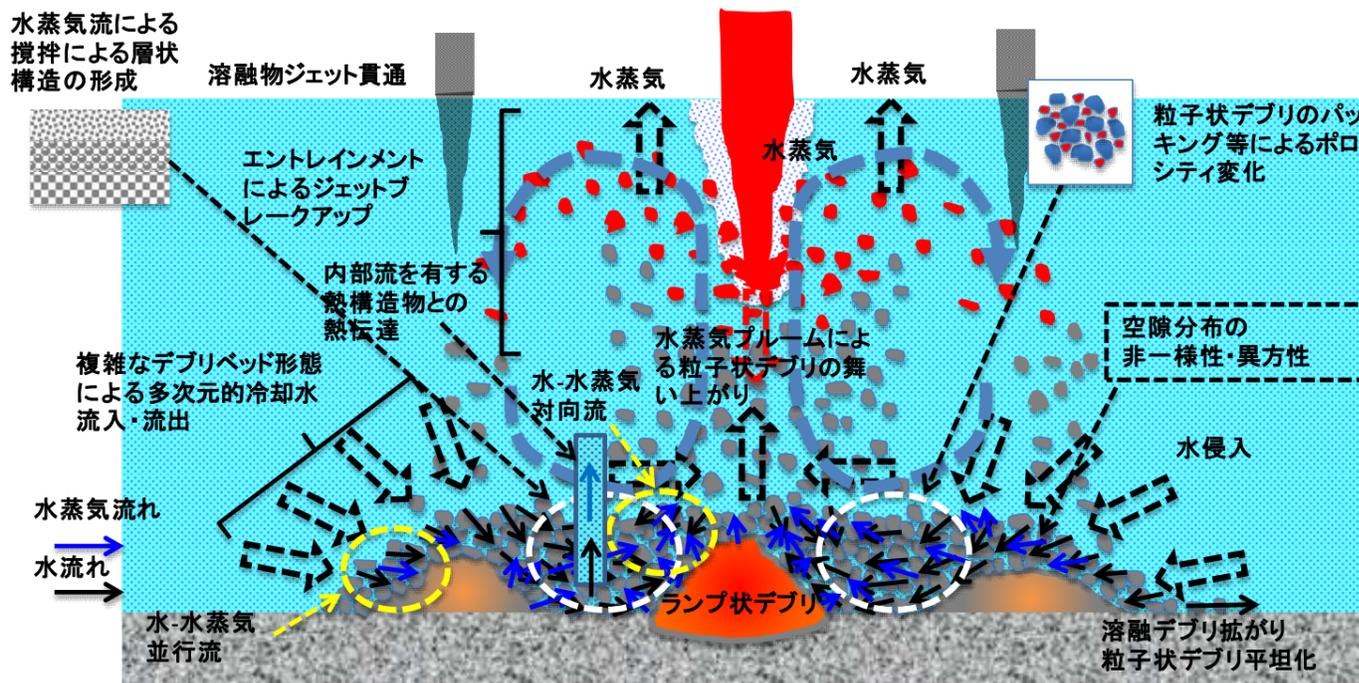
図2 OECD/NEA/CSNI-MCCIにおけるコンクリート侵食解析例

(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】

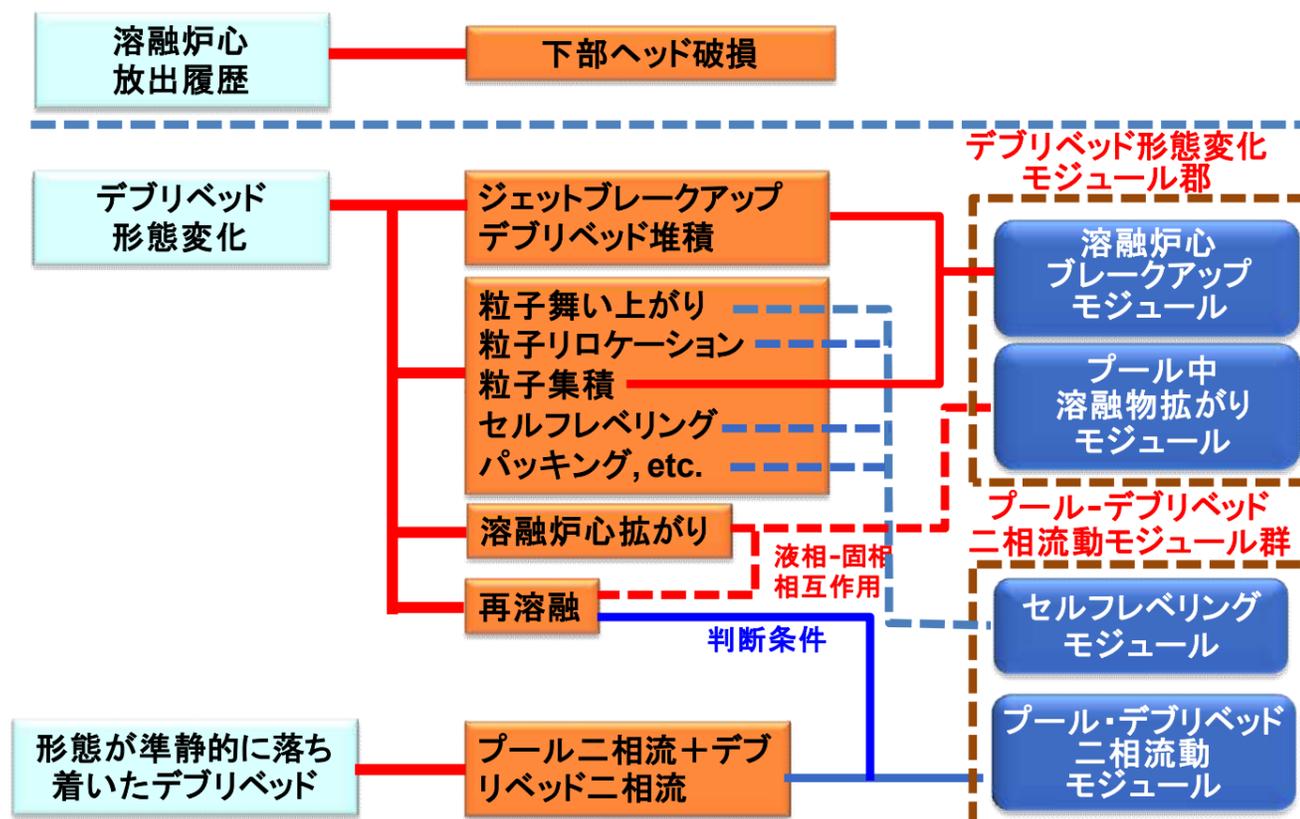
我が国の軽水炉において事業者が採用するキャビティへの先行注水では、プール水中に高温の発熱溶融デブリが落下する場合には、溶融デブリの一部は水との相互作用によって一部は細粒化し、その他は塊のまま床面に堆積する（図3 (a)）。このようなデブリベッド形成の詳細な過程を個別現象に分解した（図3 (b)）。これまでに複雑な多孔質体であるデブリベッド内の熱流動に係る数値モデルを開発している。ここでは、国内機関との協力を含めてこの解析コードの開発を更に進め、複数箇所からの多段階溶融物放出への対応、水中における溶融物のジェットブレイクアップモデル、水中の床面上における溶融物の拡がり等、非定常かつ非一様なデブリ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

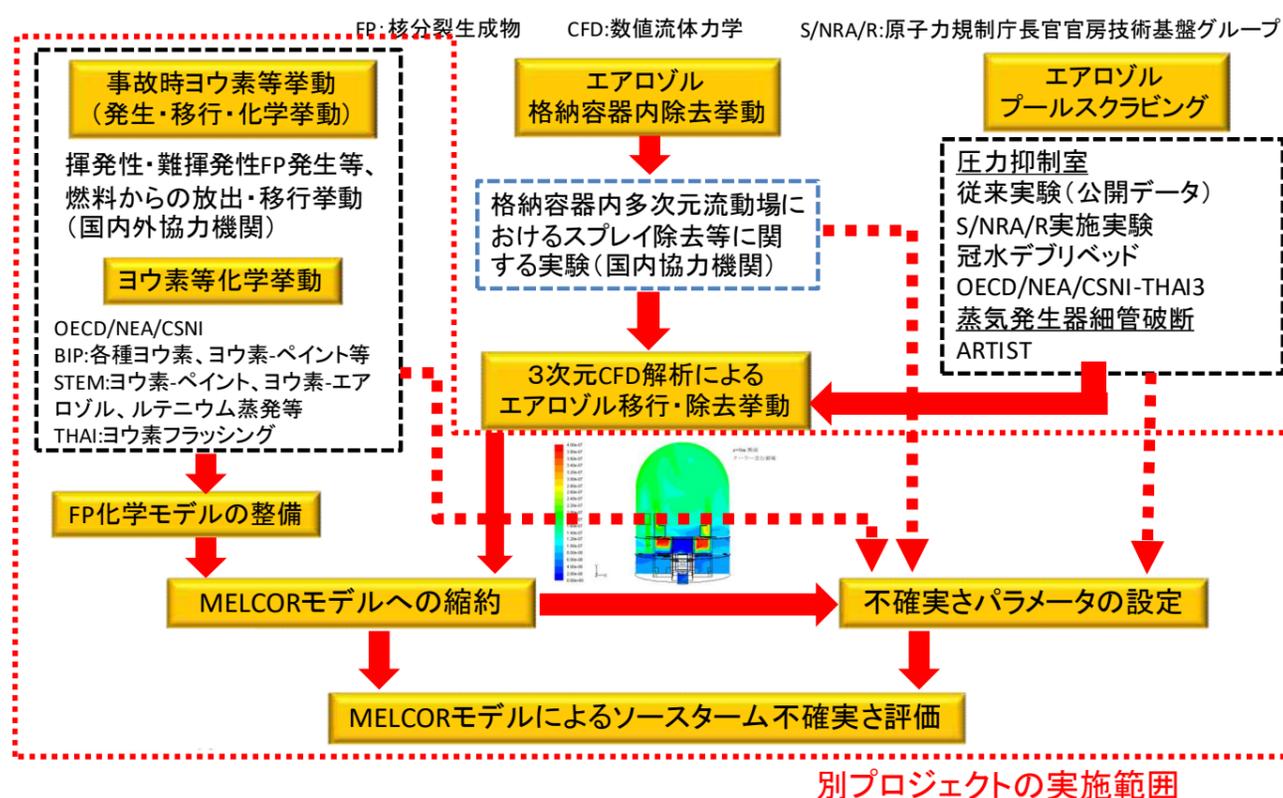


図4 放射性物質生成・移行・除去モデル開発

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	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	
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

- 【平成 29 年度の実施内容】
- (1) 溶融燃料 - 冷却材相互作用解析コードの開発【分類③】
- 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、新発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。
 - 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。
 - 単体検証：組込んだ数値モデルの機能を単体検証する。
- (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】
- 数値モデル検討：CORQUENCH コード等の公開されている MCC1 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。
 - コード開発：上記数値モデルの組込みを実施する。
 - 単体検証：組込んだ数値モデルの機能を単体検証する。
- (3) キャビティ注水時のデブリ冷却性解析コードの開発【分類③】
- 数値モデル検討：IVMR (In-Vessel Melt Retention) 及び EVDC (Ex-Vessel Debris Cooling) に関する文献を調査し、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。
 - コード開発：上記数値モデルの組み込みを実施する。
 - 単体検証：組込んだ数値モデルの機能を単体検証する。
 - 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。
- (4) 放射性物質生成・移行・除去解析コードの開発【分類③】
- 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。
 - コード開発：上記数値モデルの組込みを実施する。
- 【平成 30 年度の実施内容】
- (1) 溶融燃料 - 冷却材相互作用解析コードの開発【分類③】
- 3次元溶融ジェット分裂挙動解析コード JBREAK を開発する。
 - 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。
- (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】
- 3次元 MCC1 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。
- (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】
- 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。
 - 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。
 - 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。
 - JASMINE コードに追加した溶融物拡がりモデルの改良を行う。
- (4) 放射性物質生成・移行・除去解析コードの開発【分類③】
- 原子炉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。
 - 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する。
- 【令和元年度の実施内容】
- (1) 溶融燃料 - 冷却材相互作用解析コードの開発【分類③】
- 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。
 - 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>(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 MCC1 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. 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 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. 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> <p>○堀田亮年 主任技術研究調査官 森田彰伸 技術研究調査官</p> <p>【平成30年度の委託先】</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)、(3)、(4)</p>
9. 備考	<p>以下の研究プロジェクトと協力する。</p> <p>10. 軽水炉の重大事故の重要物理化学現象に係る実験 コード開発の進捗に応じて、以下の妥当性確認のための実験計画に適切なフィードバックを与える。 (1) 及び (3) については「燃料デブリ形成過程個別現象実験」 (4) については「プールスクラビング実験」及び「ソースターム実験」</p> <p>12. 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 コード開発の進捗に応じて、以下の妥当性確認のための実験計画に適切なフィードバックを与える。 (1) 及び (3) については「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」</p>

研究計画

1. プロジェクト	12. 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
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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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、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、複数基立地評価手法等を整備する。</p> <p>2) レベル3PRA手法の整備</p>		

	<p>重大事故等対処設備を考慮したレベル1からレベル3までのPRA結果から、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、防護措置の効果等に係る技術的知見を取得する。</p> <p>(3) 環境影響評価手法の整備</p> <p>1) 放射性物質の環境拡散評価手法の整備</p> <p>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。</p> <p>2) 遮蔽解析に係る技術的知見の整備</p> <p>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。</p> <p>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：平成29年度) (終期：令和4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」（平成28年7月6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</p> <p>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</p> <p>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</p> <p>① 格納容器破損モード（水素燃焼）評価の整備</p> <p>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、スプレー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</p> <p>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、スプレー、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。</p> <p>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「軽水炉の重大事故の重要物理化学現象に係る実験」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</p> <p>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</p> <p>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。別プロジェクトにおいて開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。</p>

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	ヨウ素の化学的挙動に関する実験データ	別プロジェクトの「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」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	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
THA13	水素混合、水素燃焼、ヨウ素移行、プールの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。その後、本評価手法を拡張しレベル 2 地震 PRA 及び複数基立地を含む代表プラントの評価を行う。

2) レベル 3PRA 手法の整備

重大事故等対処設備を考慮したレベル 1 からレベル 3 までの PRA 結果から、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、防護措置による被ばく低減効果、複数基立地の影響等に係る技術的知見をとりまとめる。

(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		解析手法の妥当性確認			
			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			
	CIGMA 試験（JAEA）					
(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		炉外デブリの冷却性	
	○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					
(1) 2)	○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）		新規規制基準に基づく重大事故等対処設備の有効性評価手法の妥当性確認等			
	↓ 随時反映		↓ 随時反映		↓ 随時反映	
(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 複数基立地の影響評価 放射性物質放出挙動評価			
	↓ 随時反映		↓ 随時反映		↓ 随時反映	
(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		▽論文投稿	
(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	
					▽論文投稿	
(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			
	↓ 随時反映		↓ 随時反映		↓ 随時反映	
			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及び地震時のレベル 2PRA 手法の整備を進めるとともに、複数基立地の影響評価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、防護措置による被ばく低減効果、複数基立地の影響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、水素発生に関する知見のまとめるとともに、別プロジェクト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、地震時のレベル 2PRA 手法の整備を進めるとともに、複数基立地の影響評価についての検討を進める。また、格納容器イベントツリー及び放出カテゴリーに沿って、放射性物質放出頻度の計算に必要な放射性物質放出挙動評価を実施する。</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リスク評価を行い、防護措置による被ばく低減効果、複数基立地の影響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 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 に関する事故進展に着目した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 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 放射性物質放出挙動評価の結果を取りまとめ、事故シーケンスごとの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明らかにする。</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>○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 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 星野光保 技術研究調査官 川口秀雄 技術研究調査官 薄井晴男 技術参与 林田芳久 技術参与</p>
9. 備考	<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 研究プロジェクトと協力する。</p> <p>9. 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 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。</p> <p>10. 軽水炉の重大事故の重要物理化学現象に係る実験 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。</p> <p>11. 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</p>

レベル 2PRA から抽出される事故シーケンス及び総合現象解析手法の整備により得られた成果を次のプロジェクトに活用する 13. 重大事故の事故シーケンスグループに係る事故進展解析 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。 24. 緊急時対応レベル（EAL）に係るリスク情報活用等の研究のうち、(2) 被ばく解析手法の整備

研究計画

1. プロジェクト	13. 重大事故の事故シーケンスグループに係る事故進展解析	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	青野 健二郎 統括技術研究調査官 秋葉 美幸 統括技術研究調査官
		主担当者	濱口 義兼 技術研究調査官 星野 光保 技術研究調査官
3. 背景	<p>(1) 事故シーケンスグループの検討</p> <p>実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（平成 25 年原子力規制委員会規則第 5 号。以下「設置許可基準規則」という。）では、炉心の著しい損傷を防止するための必要な措置を要求しており、その解釈の中で、炉心の著しい損傷の防止対策の有効性評価において想定する事故シーケンスグループを示している。</p> <p>発電用原子炉設置者は、設置許可基準規則の要求を満たすため、炉心の著しい損傷を防止するための必要な措置等である重大事故等対処設備を追加している。追加した重大事故等対処設備を考慮したレベル 1 確率論的リスク評価（以下「PRA」という。）モデル及びレベル 2PRA モデルから、重大事故等対処設備の作動及び不作為を組み合わせた事故シーケンスを抽出することができる。さらに、これらの事故シーケンスの特徴等から、重大事故等対処設備の作動及び不作為を組み合わせた事故シーケンスグループを特定することができる。</p> <p>今後、重大事故等対処設備の作動及び不作為を組み合わせた事故シーケンスごとの格納容器内の事故の進展及びソースタームに係る知見を用いて、設置許可基準規則の解釈における事故シーケンスグループへの影響を確認することは、継続して種々の事故シーケンスに対する安全性を確認するために重要である。</p> <p>(2) 安全性に係る評価の高度化</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、その運用ガイドでは、発電用原子炉設置者は「原子炉等規制法第 43 条 3 の 6 及び第 43 条の 3 の 14 の基準その他関係法令を踏まえ、レベル 1PRA 及びレベル 2PRA を内部事象及び外部事象を対象に実施する」こと、そして原子力規制委員会は、「発電用原子炉設置者が採用した評価手法及びその技術的根拠を確認」することとしている。</p> <p>これまでは、加圧水型原子炉施設（以下「PWR プラント」という。）は代表的な 3 ループ PWR プラントについて、沸騰水型原子炉施設（以下「BWR プラント」という。）は代表的な BWR5 プラントについて、レベル 1PRA から得られた主要な事故シーケンスを対象に、事故の進展に係る知見を整備してきた。</p> <p>今後、種々のプラントにおける重大事故等対処設備の作動及び不作為を組み合わせた事故シーケンスを対象にした事故の進展に係る知見を整備し、必要に応じて将来的な「実用発電用原子炉の安全性向上評価等のガイドに関する運用ガイド」の改訂等の要否を含めた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>		
4. 目的	<p>安全性に係る評価の高度化に資するため、種々の重大事故等対処設備の作動及び不作為を考慮した事故シーケンスにおける事故の進展に係る知見を整備する。</p> <p>また、PRA で使用する緩和設備の台数等の条件、緩和操作開始までの余裕時間の変化等を整理する。</p>		
5. 知見の活用先	<ul style="list-style-type: none"> ● 設置許可基準規則の解釈における事故シーケンスグループの検討に用いる。 ● 種々の事故シーケンスにおける事故進展解析の方法及びその技術的根拠について、必要に応じて将来的な「実用発電用原子炉の安全性向上評価等のガイドに関する運用ガイド」の改訂等の要否を含めた安全性に係る評価の高度化に資する。 ● レベル 1PRA モデル及びレベル 2PRA モデルの整備に用いる。 		
6. 安全研究概要 (始期：平成 29 年度) (終期：令和元年度)	<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」（平成 28 年 7 月 6 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"> ● 規制活動に必要な手段の整備（以下「分類③」という。） <p>(1) 事故進展解析【分類③】</p> <p>代表的なプラントについて、重大事故等対処設備を考慮した PRA のイベントツリーを分析し、LOCA 及び過渡事象の炉心注水失敗（高圧系機能喪失及び低圧系機能喪失）、崩壊熱除去機能喪失、補機冷却系機能喪失、格納容器バイパス等から解析対象とする事故シーケンスを選定する。選定した事故シーケンスについて、事故発生から格納容器破損までの事故進展解析を実施する（図 1）【分類③】。また、選定した各事故シーケンスの事故進展の現象を支配する主要なパラメータを抽出し、事故発生から格納容器破損までの事故進展に係る感度解析を実施する。【分類③】</p>		

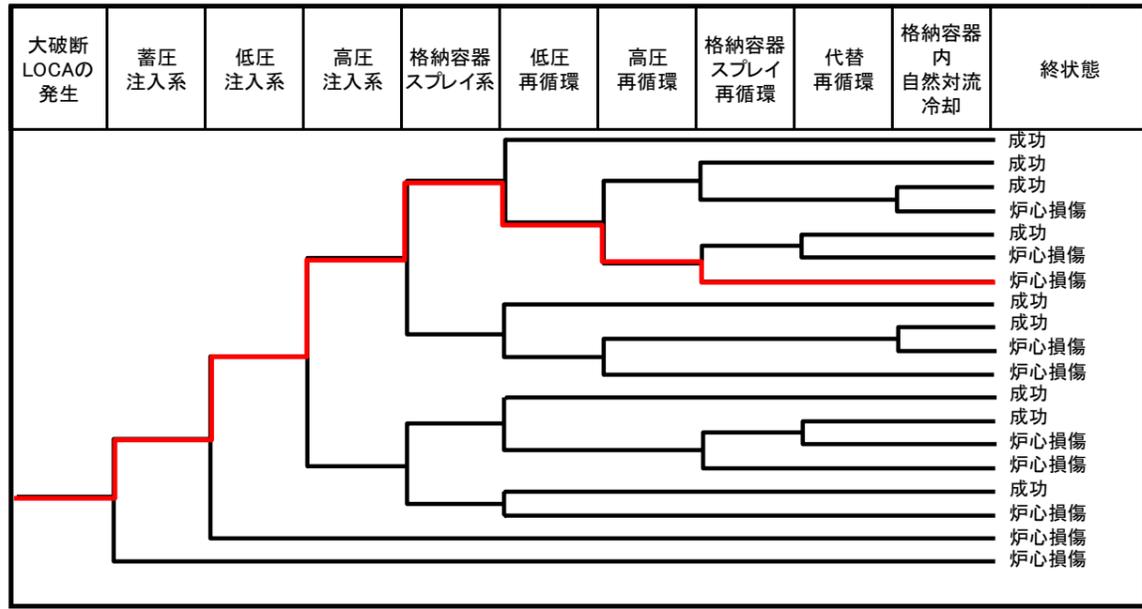
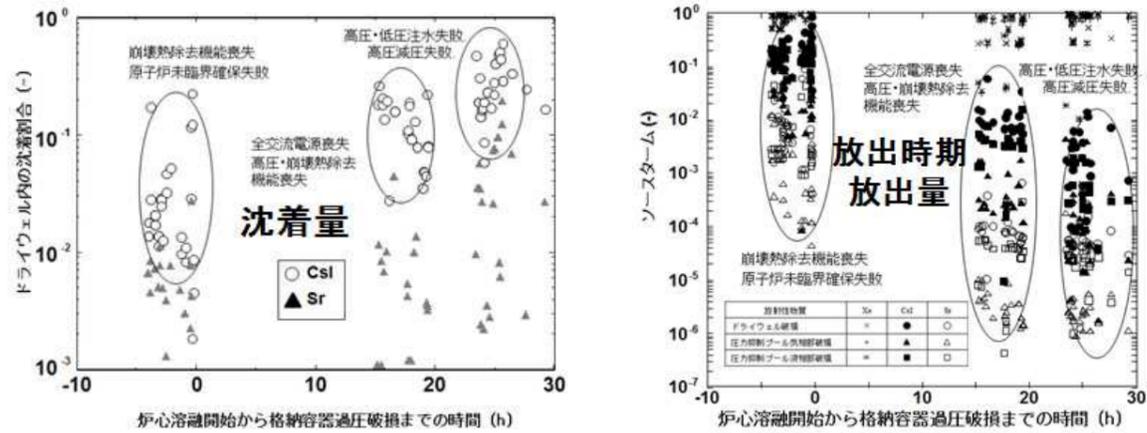


図1. イベントツリーを用いて選定した事故シーケンスの例

(2) PRAの定量化に係る知見の整備【分類③】

上記の(1)の結果に基づいて、炉心損傷若しくは格納容器破損に至る時間が早い事故シーケンス又は炉心損傷発生頻度若しくは格納容器機能喪失頻度の高い事故シーケンスの事故進展解析結果から、原子炉（圧力）容器及び格納容器の破損の発生時期、水素発生量、放射性物質の沈着量等の解析結果を整理する（図2）【分類③】。また、感度解析の結果から、PRAで使用する緩和設備の台数等の条件、緩和操作開始までの余裕時間の変化等を整理する。【分類③】

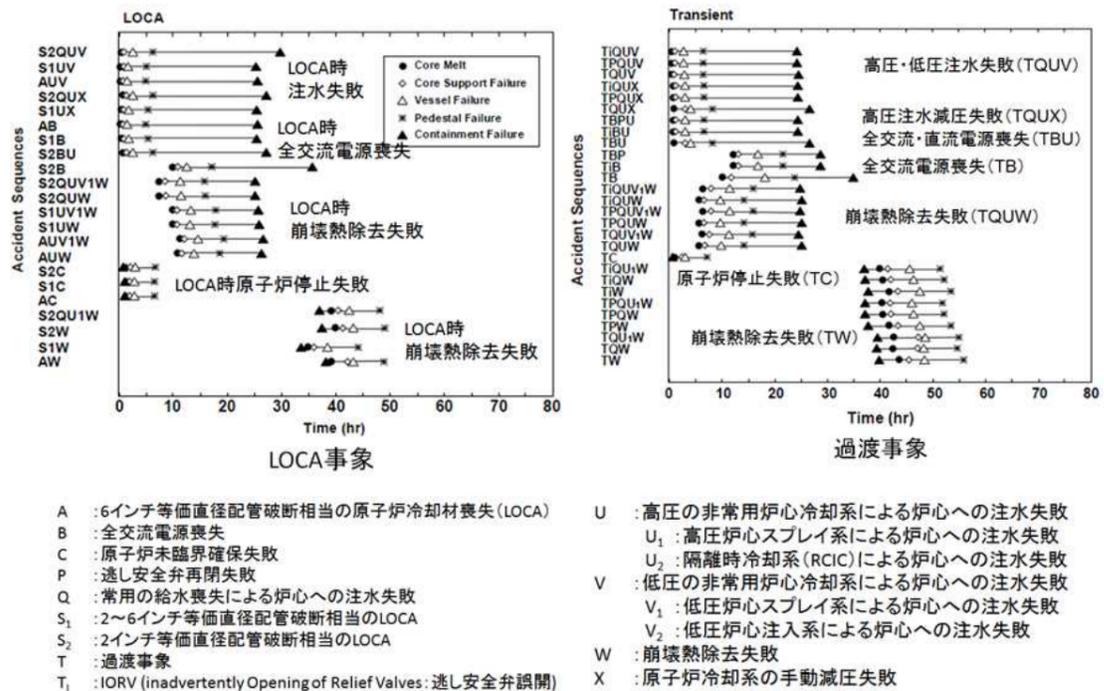


Ref. OECD/NEA/CSNI Report No. 176 (1990)に修正加筆

図2. 放射性物質の沈着量分布（イメージ図）

(3) 事故シーケンスのグループ化に係る検討【分類③】

上記の(1)及び(2)の結果に基づいて、図3に示すようにプラント挙動、格納容器の状態及びソースタームの類似性から事故シーケンスをグループ化し、重大事故等対処設備を考慮した事故シーケンスグループの特徴に係る知見を整理する。また、整理した事故シーケンスから重要な事故シーケンスを抽出する。【分類③】



Ref. OECD/NEA/CSNI Report No. 176 (1990)に修正加筆

図3. 事故シーケンスグループの整理の例（イメージ図）

		実施行程表		
		平成 29 年度	平成 30年度	令和元 年度
	(1) 事故進展解析	解析対象事故 事故シーケンスの選定 事故進展解析、感度解析 (炉心注水機能喪失)	(LOCA)	(過渡事象) 論文 ▽
	(2) PRA の定量化に係る知見の整備		上記事故シーケンスの事象発生時期、 水素、放射性物質等の結果を集約 緩和設備の台数の条件等の知見の整備	PRA モデル へ反映
	(3) 事故シーケンスのグループ化に係る検討		事故シーケンスグループの 結果を集約 (重要事故シーケンスの抽出) 事故シーケンスグループの検討	事故シーケンスのグループ化 及び事故シーケンスのグループ に係る知見の整備
7. 実施計画	【平成 29 年度の実施内容】			
	(1) 事故進展解析	<ul style="list-style-type: none"> 代表的なプラントについて、非常用炉心冷却系による事故シーケンスを対象に、炉心損傷に至るイベントツリー及び炉心損傷後のイベントツリーを基に、解析対象とする事故シーケンスを選定する。【分類③】 代表的なプラントの冷却材喪失事故（以下「LOCA」という。）及び過渡事象について、非常用炉心冷却系による事故シーケンスを対象に、シビアアクシデント総合解析コード（以下「MELCOR 等」という。）を用いて事故シーケンスの事故進展を解析する。【分類③】 また、これらの事故シーケンスについて、LOCA 時の破断口径等の想定事故の規模や緩和設備の動作開始時間等を対象にして、MELCOR 等を用いて感度解析を実施し、事故進展への影響をまとめる。【分類③】 		
	【平成 30 年度の実施内容】			
8. 実施体制	(1) 事故進展解析	<ul style="list-style-type: none"> 代表的な PWR プラントの重要な事故シーケンス（LOCA）を選定し、事故進展解析を行う。 		
	(2) PRA の定量化に係る知見の整備	<ul style="list-style-type: none"> 事故進展の解析結果から、原子炉（圧力）容器及び格納容器の破損の発生時期、水素発生量等の解析結果を事故シーケンスごとに整理する。【分類③】 感度解析の結果から、PRA で使用する緩和設備の台数等の条件、緩和操作開始までの余裕時間の変化等を事故シーケンスごとに整理する。【分類③】 		
	(3) 事故シーケンスのグループ化に係る検討	<ul style="list-style-type: none"> 上述の(1)及び(2)の結果からプラント挙動、格納容器の状態及びソースタームの類似性の観点から事故シーケンスグループの特徴をまとめる。【分類③】 平成 29 年度、平成 30 年度及び令和元年度の解析結果を取りまとめ、重大事故等対処設備を考慮した事故シーケンスグループの炉心損傷、圧力容器破損、格納容器破損等の事象発生時期、水素発生量分布、放射性物質の放出量、ソースターム、等の特徴を明らかにする。各事故シーケンスのグループから重要な事故シーケンスを抽出する。【分類③】 		
	【シビアアクシデント研究部門における実施者】	<ul style="list-style-type: none"> ○濱口 義兼 技術研究調査官 ○星野 光保 技術研究調査官 小城 烈 技術研究調査官 城島 洋紀 技術研究調査官 下崎 敬明 安全技術専門職 		
	【平成 30 年度の委託先】	なし		

9. 備考	12. 軽水炉の重大事故における格納容器機能喪失及び確率論的リスク評価に係る解析手法の整備の成果を活用する。
-------	--

研究計画

1. プロジェクト	14. 原子炉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	山本 敏久 上席技術研究調査官
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 主任技術研究調査官 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>これまで原子力規制庁において最適評価手法及びBEPU手法の整備を実施してきたが、審査において事業者が実施する安全性の評価に対する妥当性の判断に活用するためには、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できるように、最適評価手法に関する知見を蓄積する。</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」(平成28年7月6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付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、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した。また、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> <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</p>		

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。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/GSNI 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) 及び非常用炉心冷却系 (ECCS) 再循環機能喪失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一つである非常用炉心冷却系 (ECCS) 再循環機能喪失において重要となる炉心から SG にかけての複合的な現象についての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。

(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 を通して、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 の開発にあたっては、産・学の専門家から構成する技術検討グループを設立して専門家の意見等を参考にする。

※※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	
			実験解析による解析コードの妥当性確認	
(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 -----	
				BDBAのプラント挙動に係る解析論文投稿等▽ 「解析コードの妥当性確認」 -----
				▽論文投稿等 解析コードのV&V、 コード設計書等 -----

7. 実施計画

【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、スパ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験解析を実施して、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ECCS再循環機能喪失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、液滴挙動モデルの高度化を継続する。
- ・ R1年度に引き続き、リウエット時の先行冷却モデルの高度化を継続する。
- ・ HIDRAを用いて、丸セル形状のスパ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、「ボイド挙動モデル」という。）の開発及び高度化を検討する。
- (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 ECCS 再循環機能喪失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、H31 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。

(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。
- (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 ECCS 再循環機能喪失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。

(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 AOO、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 AOO、DBA 事象に対して BEPU 手法を適用した安全解析を実施する。

【R4 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
 - 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。
- (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
 - 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。
- (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。
 - 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

	<p>性を確認する。</p> <p>(d) マルチ SGTR 及び ECCS 再循環機能喪失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>(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 主任技術研究調査官</p> <p>○金子 順一 技術研究調査官</p> <p>○江口 裕 技術研究調査官</p> <p>塚本 直史 技術研究調査官</p> <p>関根 将史 技術研究調査官</p>
9. 備考	

研究計画

1. プロジェクト	15. 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肉厚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。）という破損形態が観察された。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いなかったため、当該判断根拠の見直しの可否を検討するため、外面割れ破損の発生メカニズム・発生条件を明らかにする必要がある。</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、通常運転中の照射に伴う燃料棒の伸び（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重要である。</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見直し可否検討に資するため、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見直し可否検討に資する。</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：平成 19 年度) (終期：令和 2 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」（平成 28 年 7 月 6 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> <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 6 年程度照射し（高速中性子照射量 1.2×10^{22} n/cm² 程度、燃焼度 60 GWd/t 相当を目標）、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。</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) 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		照射後試験	論文投稿 ▼ 得られた成果の 総合評価

7. 実施計画

<p>【平成 19～23 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】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 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。 <ul style="list-style-type: none"> ▶ 燃料被覆管の外面近傍に水素化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。
<p>【平成 24 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】</p> <p>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。</p>
<p>【平成 25 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】</p> <p>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。</p> <p>(2) 改良合金被覆管の照射成長試験【分類②】</p> <p>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 26 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】</p> <p>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。</p> <p>(2) 改良合金被覆管の照射成長試験【分類②】</p> <p>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 27 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】</p> <p>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。</p> <p>(2) 改良合金被覆管の照射成長試験【分類②】</p> <p>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 28 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】</p> <p>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。</p> <p>(2) 改良合金被覆管の照射成長試験【分類②】</p> <p>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 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】</p> <p>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】</p>

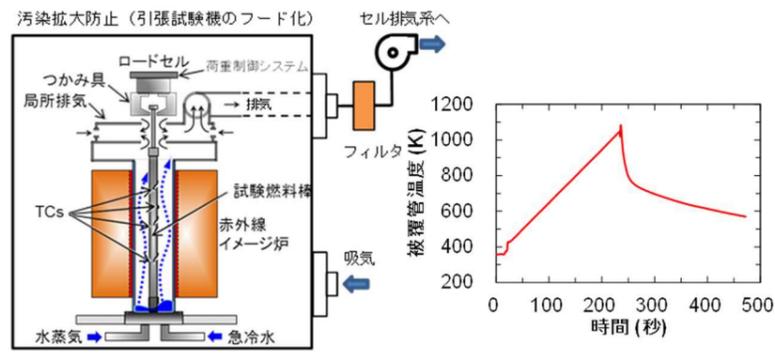
	<p>試験研究炉（ハルデン炉（ノルウェー））において、M5 合金被覆管等の改良燃料被覆管を対象として照射成長試験を継続し、照射成長データを取得した。</p> <p>【平成 30 年度の実施内容】</p> <p>(1) 外面割れ破損限界に関する技術的知見の拡充【分類①】 炉外試験で得られたデータを取りまとめる。また、出力過渡時の被覆管応力、外面割れ破損に至るまでの時間等の解析的評価に着手する。</p> <p>(2) 改良合金被覆管の照射成長試験【分類②】 照射成長試験後の M5 合金被覆管等の改良燃料被覆管を対象として照射後試験を実施し、照射成長挙動を評価する。</p> <p>【令和元年度の実施内容】</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する。</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後試験を継続し、照射成長挙動を評価する。</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】 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 緒方 恵造 技術参与</p>
9. 備考	

研究計画

1. プロジェクト	16. 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>平成 30 年度までに、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、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、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、設計基準事故である 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：令和元年度) (終期：令和5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」（平成28年7月6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 PCMI 破損しきい値を越えないこと、及び事故時には PCMI 破損しきい値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及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てい</p>		

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。

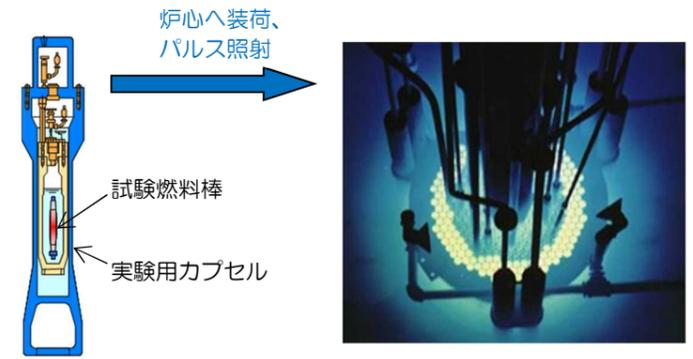
- ・ 事故時に想定される高温での燃料ペレットや被覆管の状態（燃料棒の損傷状態等）を確認するために試験炉での加熱実験を行い、燃料・材料間で生じた反応物の分析等を行う。また、試験炉での実験に必要な実験技術開発を実施する。
- ・ 上記の実験結果及び計算コードを利用した燃料挙動解析を実施し、事故時に燃料棒が形状喪失する温度等の条件を評価する。



(a) 試験装置の概略図

(b) 試験時の温度履歴の例

LOCA 模擬試験の概要



(a) 試験装置の概略図

(b) RIA 模擬試験用研究炉 (NSRR)

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 模擬試験装置のホットセル内設置 LOCA 模擬試験用燃料棒の製作	LOCA 模擬試験の実施	LOCA 模擬試験後の分析・評価		論文投稿▽
	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	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	▽学会発表	▽論文発表	▽論文投稿
	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		
	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	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			▽論文投稿
			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		総合評価

7. 実施計画

【令和元年度の実施内容】

- (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）
- ・ 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 時の温度履歴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。
- (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）
- ・ 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。
- (3) 事故時の燃料損傷状態変化に関する研究（分類①②④）
- ・ 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。

【令和2年度の実施内容】

- (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）

- ・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、高燃焼度燃料を模擬した水素添加被覆管を製作する。
- (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)
- ・RIA 模擬試験及びその照射後試験を実施し、RIA 時のペレット内 FP ガス挙動の燃料破損に及ぼす影響に関するデータを取得する。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。
- (3) 事故時の燃料損傷状態変化に関する研究 (分類①②④)
- ・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。

【令和3年度の実施内容】

- (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)
- ・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。
- (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)
- ・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、燃料材料条件の違いによる燃料被覆管破損挙動、及び RIA 時のペレット内 FP ガス挙動の燃料破損に及ぼす影響に関するデータを取得する。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。さらに、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。
- (3) 事故時の燃料損傷状態変化に関する研究 (分類①②④)
- ・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。

【令和4年度の実施内容】

- (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)
- ・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。
- (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)
- ・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、燃料材料条件と FP ガス挙動の変化との関連性についてデータを取得し、破損メカニズムを検証する。
 - ・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。
- (3) 事故時の燃料損傷状態変化に関する研究 (分類①②④)
- ・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。

【令和5年度の実施内容】

- (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)
- ・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。
- (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)
- ・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を基に、燃料材料条件及び RIA 時のペレット内 FP ガス挙動が RIA 時の燃料被覆管破損限界・形態に及ぼす影響に関する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</p> <p>○山内 紹裕 技術研究調査官</p> <p>秋山 英俊 技術研究調査官</p> <p>小澤 正明 技術研究調査官</p> <p>緒方 恵造 技術参与</p>
9. 備考	

研究計画

1. プロジェクト	17. 軽水炉照射材料健全性評価研究	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	小澤 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	北條 智博 技術研究調査官
3. 背景	<p>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。）は、プラント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おり、事業者が行う健全性評価手法の技術的妥当性を確認する必要がある。その際、技術基準及び民間規格の健全性評価手法の安全裕度を最新の知見で継続的に確認していくことが重要である。現在の課題として、高照射量領域の照射データ（破壊じん性、参照温度等のデータ及び予測法）の拡充、民間規格や海外の規格に採用されているRPV内面クラッド溶接及び負荷履歴を考慮した評価の反映が挙げられる。</p> <p>また、炉内構造物の照射誘起型応力腐食割れ（以下「IASCC」という。）については、機器の健全性評価を実施する際に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亀裂その他の欠陥の解釈（平成26年8月6日原子力規制委員会。以下「亀裂の解釈」という。）において適用を要求している亀裂進展速度よりも速い亀裂進展データが実験室レベルで得られており、より実機に近い環境での亀裂進展に関する知見を拡充することが重要である。</p>		
4. 目的	<p>以下の知見を拡充する。</p> <p>①RPVの照射脆化については、破壊力学的評価手法及び脆化予測手法の妥当性確認のための知見</p> <p>②IASCCについては、照射材における亀裂進展挙動等に関する知見</p>		
5. 知見の活用先	<p>運転期間延長認可申請に係る劣化状況評価及び高経年化技術評価の妥当性確認並びに民間規格の技術評価に資する技術的知見の継続的な拡充を図る。また、必要に応じて亀裂の解釈等の規制要求事項の更新の検討に資する。</p>		
6. 安全研究概要 (始期：平成18年度) (終期：令和元年度)	<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」（平成28年7月6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>④ 技術基盤の構築・維持（以下「分類④」という。）</p> <p>(1) 照射脆化（分類①、②及び④）</p> <p>安全上最も重要で交換が困難な機器であるRPVの健全性を評価するには、最も厳しい条件として加圧熱衝撃事象（以下「PTS事象」という。）を想定している。PTS事象とは、冷却材喪失事故等の際に非常用炉心冷却水が注入され、RPVの内面が急冷されて引張応力が発生する過渡事象であり、健全性評価においてはRPVの内面に欠陥があることを想定した上で、PTS事象が生じても破壊しないことを確認している。原子炉の高経年化に伴いRPVの照射脆化が進行することから、照射材の破壊じん性値等のデータを拡充する。</p> <p>a. 破壊力学的評価手法</p> <p>全体イメージを図1に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・破壊じん性評価に係る試験等 <p>中性子照射したRPV鋼を用いて破壊じん性試験等を実施し、破壊じん性値に及ぼす試験片形状・板厚の効果を明らかにすることにより、小型試験片から参照温度*（以下「T_0」という。）を評価できることを確認する。</p> ・健全性判定に係る試験等 <p>荷重-温度履歴を変化させる破壊じん性試験を実施し、一般社団法人日本電気協会電気技術規格「原子炉圧力容器に対する供用期間中の破壊靱性の確認方法」（以下「JEAC4206」という。）の最新版に取り入れられる高温予荷重効果（以下「WPS効果」という。）を確認する。また、T_0と亀裂伝播停止破壊じん性（以下「K_{Ia}」という。）の相関の確認や計装シャルピーデータを利用したK_{Ia}評価法を整備し、同じくJEAC4206の最新版に取り入れられるK_{Ia}遷移曲線との比較検討を行う。</p> ・破壊力学評価に係る試験等 <p>低じん性のRPV鋼材にステンレスクラッド（以下「クラッド」という。）を溶接した材料を用いて、クラッド溶接下欠陥及び母材表面欠陥を付与した平板曲げ試験を実施する。また、欠陥を付与した十字型試験体を用いて加圧熱衝撃を模擬する試験を実施し、亀裂に対する拘束効果、クラッド溶接の影響等を含めた破壊評価を実施し、RPVの破壊力学評価に係る知見を拡充する。</p> <p>*: 温度により値が変化する材料の破壊に対する抵抗力は破壊じん性曲線として与えられる。この曲線が温度軸のどの位置にあるかを示す指標を参照温度という。一般にこの曲線は多数の破壊じん性試験データの下限となるように設定されたり、データの95%信頼限界を示すように設定される。</p> 		

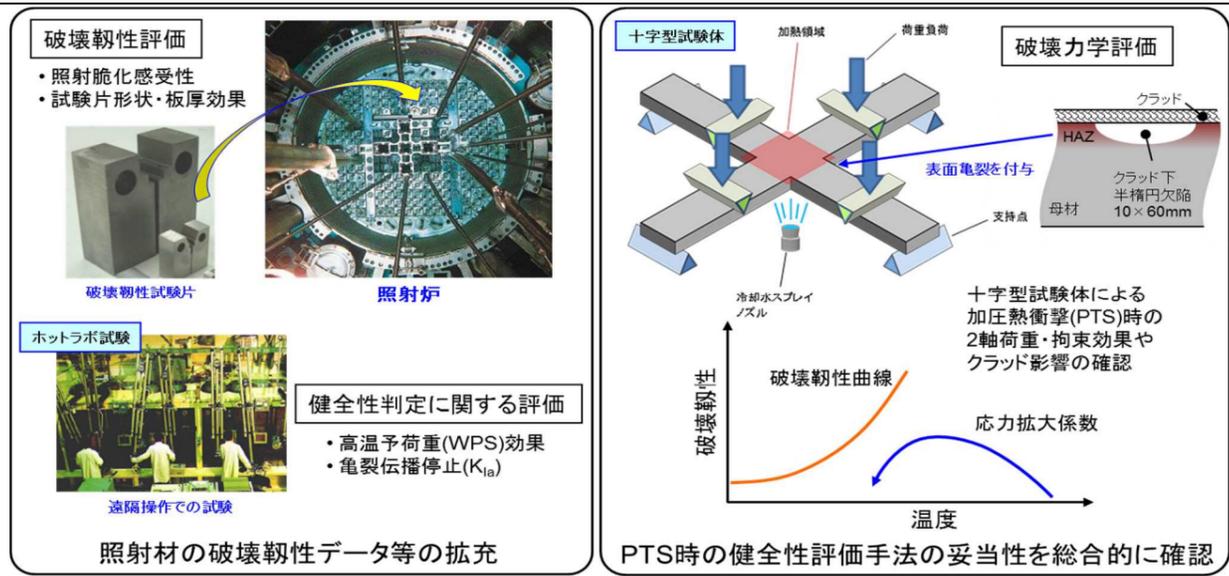


図1 RPVの照射脆化に係る破壊力学的評価手法の全体イメージ

b. 脆化予測手法

監視試験データの統計解析、中性子照射された材料の三次元アトムプローブ法等による微細組織分析及び破壊じん性移行量評価を実施し、高照射量領域における脆化予測に影響を及ぼす因子を把握する。また、関連温度移行量の実測値は監視試験（シャルピー衝撃試験）により求められることから、板厚内の破壊じん性分布に係るデータを取得し、RPV鋼材の板厚の1/4位置から採取される監視試験片の妥当性を確認する。

(2) IASCC（分類②及び④）

・照射材亀裂進展速度評価

公開されている中性子照射したステンレス鋼の材料特性データを収集・整理し、炉内構造物の健全性評価に活用できる知見を拡充する。また、中性子照射したステンレス鋼の亀裂進展試験等で取得するデータ及び整備した知見を基に、照射材に対する亀裂進展速度の評価手法の改良を検討する。

・照射下亀裂進展試験等

照射が材料と水環境に与える影響を考慮し、BWR炉心シュラウドに使用されている低炭素ステンレス鋼を用いて、照射炉を使用した照射下亀裂進展試験を実施するとともに、亀裂先端近傍の酸化皮膜、変形組織の観察・分析等により、亀裂進展挙動に及ぼす照射下水環境の影響に関する知見を拡充する。その知見により、前項で検討した照射材亀裂進展速度評価手法の健全性評価への適用性を確認する。

実施行程表

	H26年度	H27年度	H28年度	H29年度	H30年度	R元年度	R2年度以降
①照射脆化 a. 破壊力学的評価手法	破壊じん性評価に係る試験等						
	健全性判定に係る試験等						
				破壊力学評価に係る試験等			
b. 脆化予測手法				監視試験データの統計解析等			▽論文投稿 △学会発表 民間規格の技術評価、 高経年化技術評価等
②IASCC	照射材亀裂進展速度評価						
	照射下亀裂進展試験等						

【平成26年度の実施内容】

(1) 照射脆化（分類①、②及び④）

a. 破壊力学的評価手法

・破壊じん性評価に係る試験等

破壊じん性試験片を用いた試験を実施し T_0 を評価する。

・健全性判定に係る試験等

未照射材を用いて WPS 効果に及ぼす試験片寸法の影響を評価するとともに、解析による WPS 効果の評価手法の整備に着手する。また、未照射材について K_{Ia} を取得し、 T_0 との相関及び計装シャルピー試験結果との相関について検討する。

(2) IASCC（分類②及び④）

・照射下亀裂進展試験等

既存照射材等を用いて応力付与による変形組織と酸化皮膜形成の関係に着目した微細組織分析を実施し、亀裂進展の機構論的な検討に資する知見を取得する。また、照射下亀裂進展試験に用いる荷重負荷ユニットの特性試験を実施し、試験荷重の定量評価に必要なデータを取得する。

7. 実施計画

【平成27年度の実施内容】

(1) 照射脆化（分類①、②及び④）

a. 破壊力学的評価手法

・破壊じん性評価に係る試験等

既存照射材を用いて、照射材の破壊じん性試験データを取得する。また、照射試験に用いる鋼材、溶接継手及びクラッド用材料の仕様を検討する。

・健全性判定に係る試験等

小型試験片を用いた WPS 試験を実施し、試験片寸法の WPS 効果への影響について検討するとともに、WPS 効果の解析手法を検討する。また、平成26年度に引き続き、計装シャルピー試験結果と K_{Ia} の相関に関するデータを拡充する。

・破壊力学評価に係る試験等

クラッド付き試験体の形状及び低じん性の鋼材の仕様を検討するとともに、試験設備を整備する。また、クラッド溶接の残留応力結果を大型の構造物の解析に適用する手法を整備する。

(2) IASCC（分類②及び④）

・照射材亀裂進展速度評価

中性子照射ステンレス鋼の亀裂進展速度等の材料特性に関する公開データを収集・整理する。

・照射下亀裂進展試験等

既存照射材等の亀裂進展速度データを取得して照射下亀裂進展試験の比較データを拡充するとともに、亀裂先端の微細組織観察を実施し、変形と酸化の関係についての知見を取得する。

【平成28年度の実施内容】

(1) 照射脆化（分類①、②及び④）

a. 破壊力学的評価手法

・破壊じん性評価に係る試験等

既存照射材から試験片を加工するとともに、引張試験、破壊じん性試験等を行い、破壊じん性参照温度とシャルピー延性脆性遷移温度の中性子照射による移行量について両者の相関を確認する。また、照射試験に用いる鋼材及び溶接継手を製作する。

・健全性判定に係る試験等

未照射材を用いた WPS 効果に関する試験を実施し、WPS 効果に及ぼす試験片の寸法、亀裂の形状及び荷重-温度履歴の影響について検討する。また、平成27年度までに取得した試験データも用いて WPS 効果の解析手法の整備作業を実施する。

・破壊力学評価に係る試験等

クラッド溶接を考慮した破壊力学評価に関する試験を行うため、既往の研究成果や課題を踏まえて、試験設備の整備を継続するとともに、低じん性の鋼材の製作に着手する。

b. 脆化予測手法

脆化メカニズム等に関する最新情報に基づいて、監視試験データに対して統計的解析手法を用いた評価及び RPV 鋼の微細組織観察を実施する。また、材料中の結晶粒界に偏析した元素を分析するための装置を整備する。

(2) IASCC（分類②及び④）

・照射材亀裂進展速度評価

中性子照射ステンレス鋼の材料特性に関する公開データの収集・整理を継続して取りまとめ、総合評価を実施する。さらに、これらの成果に基づいて、照射材に対する亀裂進展速度の評価手法を検討する。

・照射下亀裂進展試験等

既存照射材等を用いた亀裂進展試験を継続して実施し、比較データの拡充と亀裂先端の微細組織観察を実施する。これまでに取得した知見を踏まえ、既存の中性子照射済ステンレス鋼試験片を用いた海外炉での照射下亀裂進展試験の具体化検討を実施する。

【平成29年度の実施内容】

(1) 照射脆化（分類①、②及び④）

a. 破壊力学的評価手法

・破壊力学評価に係る試験等

低じん性の RPV 鋼を製作し破壊じん性等基礎的な機械的特性データを取得するとともに、クラッド溶接下に半楕円欠陥を付与した平板曲げ試験を実施し、破壊じん性に及ぼす亀裂に対する拘束効果及び応力拡大係数評価手法の保守性に関するデータを取得する。

b. 脆化予測手法

監視試験データに対して統計的解析手法を用いた評価を実施し、鋼材の化学成分、中性子照射条件が脆化に及ぼす影響について検討を実施する。また、中性子照射された RPV 鋼の微細組織観察等を実施する。

【平成30年度の実施内容】

(1) 照射脆化（分類①、②及び④）

a. 破壊力学的評価手法

・破壊力学評価に係る試験等

低じん性の RPV 鋼を用いてクラッド溶接下に半楕円欠陥を付与した平板曲げ試験を継続し、破壊じん性に及ぼす亀裂の拘束効果等に関するデータを取得するとともに、PTS 模擬試験条件の検討を行う。また、PTS 模擬試験を開始し、負荷-温度履歴、亀裂

	<p>に対する拘束効果、2軸荷重、クラッド溶接の影響等を含めた破壊評価に係るデータを取得する。</p> <p>b. 脆化予測手法 平成29年度に引き続き、監視試験データに対する統計的解析手法を用いた評価及び中性子照射されたRPV鋼の微細組織観察等を実施する。</p> <p>【令和元年度の実施内容】 (1) 照射脆化（分類①、②及び④）</p> <p>a. 破壊力学的評価手法 ・破壊力学評価に係る試験等 PTS模擬試験を継続し、負荷-温度履歴、亀裂に対する拘束効果、クラッド溶接の影響等を含めた破壊評価に係るデータを取得し、RPVの破壊力学評価に係る知見を拡充する。</p> <p>b. 脆化予測手法 平成30年度に引き続き、監視試験データに対する統計的解析手法を用いた評価及び中性子照射されたRPV鋼の微細組織観察等を実施する。また、高照射量領域の脆化因子及び脆化予測手法に関する知見を取りまとめる。</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>○ 北條 智博 技術研究調査官 船田 立夫 技術参与 高倉 賢一 技術参与</p>
9. 備考	

研究計画

1. プロジェクト	18. 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	小澤 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>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、その運用ガイドでは、設計上の想定を超える事象の発生を仮定し、評価対象の発電用原子炉施設が、どの程度の事象まで燃料体等の著しい損傷を発生させることなく、また、格納容器機能喪失及び放射性物質の異常放出をさせることなく耐えることができるか、安全裕度評価の実施手法を参考として例示している。</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	<p>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。</p>		
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、局所破損の評価手法や局所環境の影響評価手法等を提示し、必要に応じて将来的なガイド類の改訂の検討に資する。</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や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：平成 29 年度) (終期：令和 3 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」(平成 28 年 7 月 6 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】 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 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>		

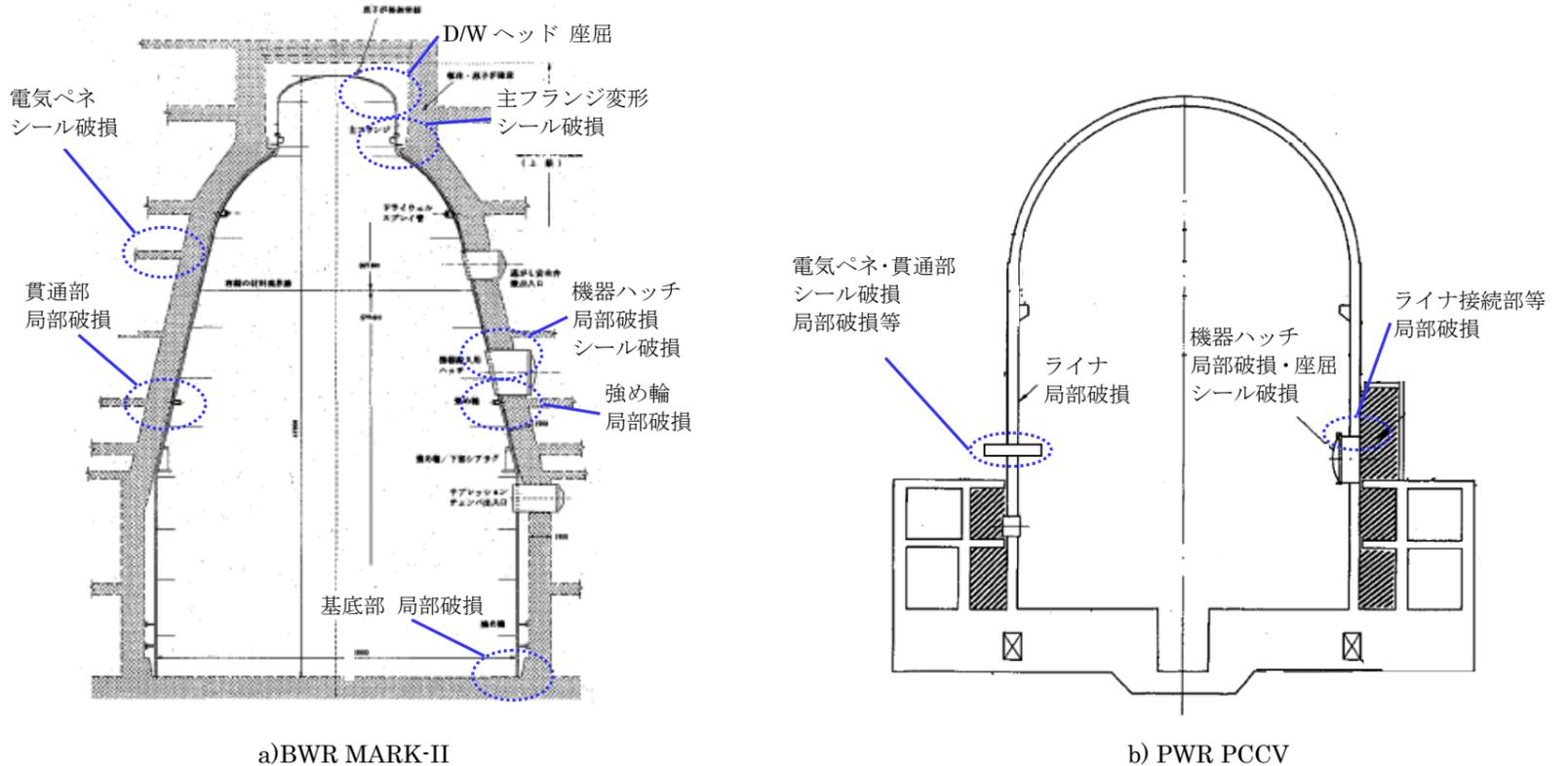


図1 格納容器に想定される評価部位の例

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。)、PWR の PCCV の縮尺試験体の加圧試験、ABWR の鉄筋コンクリート製格納容器(以下「RCCV」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

局破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 相当部材の水圧破壊試験：格納容器の胴部の内圧による破損を想定して、図2に概念図を示す、実機相当部材の円筒型試験体を用いて水圧破壊試験を行う。母材及び溶接部に、切欠きを与えた試験体を加圧し、局部破損に至る挙動を把握する。
- ・ PCCV 及び RCCV の金属ライナの破損試験：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二軸引張試験または水圧破壊試験により、局部破損に至る挙動を把握する。

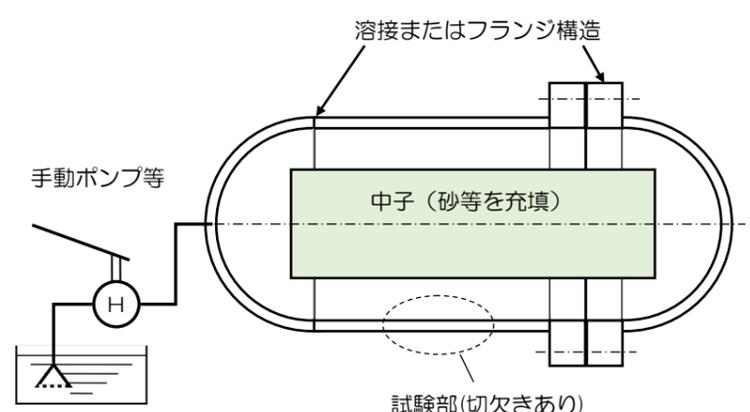


図2 水圧破壊試験の概念図

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、ドライウェル主フランジ、機器ハッチ等の機械接合部等のシール挙動試験を実施し、樹脂材料の耐熱特性や変形特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) 一様温度・圧力条件における終局的耐力評価

基礎検討の結果を踏まえ、実機相当の格納容器の構造モデルを用いて、格納容器の終局的耐力評価を行う。評価対象は、BWR 及び PWR の主要な格納容器型 (SCV、PCCV、RCCV 等) とし、圧力・温度を一様とした上で、順次加圧・加温して格納容器全体の構造の変形挙動を追跡する非線形構造解析を行う。次に想定される評価部位について局部解析用の FEM モデルを作成し、考慮すべき破壊モードに対する破損評価を行う。またハッチ等の接合部に対しては、シール部を含む局部モデルを用いて閉じ込め性を評価する。

b) 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 3 に、想定される起因事象に対して、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。

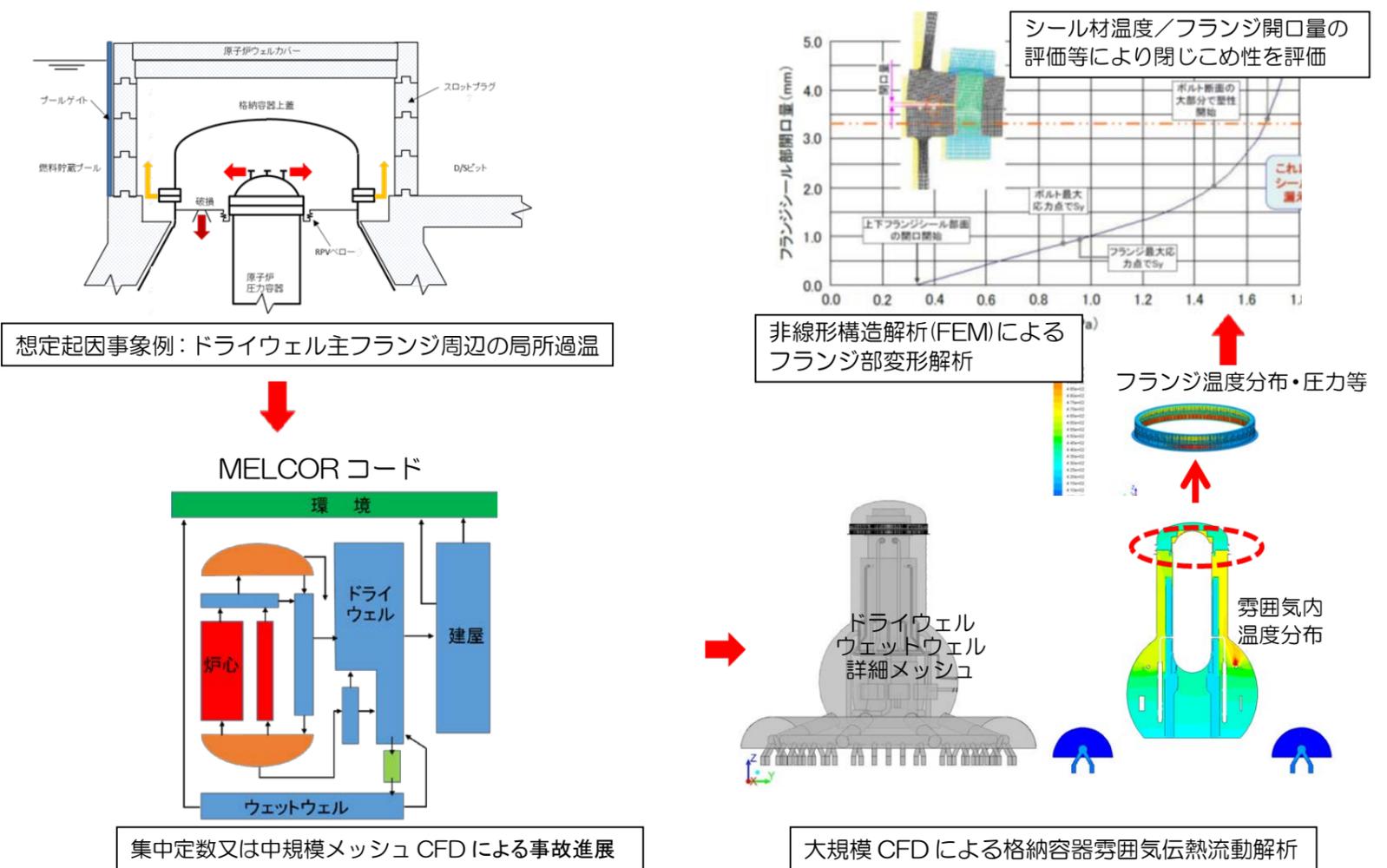


図 3 局所環境を考慮した終局的耐力評価の手順 (イメージ)

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
	材料試験の解析	材料試験の解析 ▽ 論文投稿	材料試験・水圧破壊試験の解析 ▽ 論文投稿	材料試験・不連続部試験の解析 ▽ 論文投稿	不連続部試験の解析・まとめ ▽ 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)	追加試験・まとめ整理・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・予備試験	試験体製作・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				
	試験体製作	予備試験	試験	整理・まとめ	
(3) 実機相当モデルの終局的耐力評価				a) 一様温度・圧力条件における終局的耐力評価	
				全体挙動解析	局部・損傷解析
		b) 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

- 【平成 29 年度の実施内容】
- (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。
- (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。
- (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。
- 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。
- 【平成 30 年度の実施内容】
- (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。
- (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。
- (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。
- (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。
- (3) b) 局所環境を考慮した終局的耐力評価【分類①②】

	<p>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。また水圧破壊試験等の非線形構造解析を実施して、試験体の設計のための情報を取得する。</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】 水圧破壊試験体、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製作し、予備試験を実施する。</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。</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。また水圧破壊試験、ライナ部の不連続部の試験体の非線形構造解析を実施して、試験体の設計のための情報を取得する。</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】 水圧破壊試験体を試作し、破損試験を実施する。</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】 試験体の環境試験を実施し、樹脂材料の耐熱特性や変形特性に係る終局特性を取得する。</p> <p>(3)a) 一様温度・圧力条件における終局的耐力評価【分類①②】 実機相当の格納容器の全体構造モデルを作成し、非線形構造解析を行う。</p> <p>(3)b) 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共に、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】 水圧破壊試験体及びライナの不連続部の試験体を製作し、破損試験を実施する。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】 試験結果を整理し、知見を取りまとめる。</p> <p>(3)a) 一様温度・圧力条件における終局的耐力評価【分類①②】 実機相当の格納容器の局部構造モデルを作成し、非線形構造解析及び破損評価を行い、知見を取りまとめる。</p> <p>(3)b) 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>
<p>8. 実施体制</p>	<p>【システム安全研究部門における実施者】</p> <p>小澤 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>

	○堀田 亮年 主任技術研究調査官 小城 烈 技術研究調査官 【地震・津波研究部門における実施者】 ○森谷 寛 技術研究調査官 堀野 知志 技術参与
9. 備考	

研究計画

1. プロジェクト	19. 電気・計装設備用高分子材料の長期健全性評価に係る研究	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	池田 雅昭 上席技術研究調査官
2. カテゴリー・研究分野	【原子力炉施設】 H) 材料・構造	主担当者	皆川 武史 技術研究調査官
3. 背景	<p>原子力発電所で使用されている安全系電気・計装設備（ケーブル、電気ペネトレーション（以下「電気ペネ」という。）等）には、設計基準事故（以下「DBA」という。）時に原子炉を安全に停止し、事故を収束するために必要な安全機能が要求されている。これらの電気・計装設備で使用される高分子材料は、通常運転時の熱・放射線等により徐々に劣化が進行し、さらに、DBA 環境下で高放射線量及び高温水蒸気にさらされると急激に劣化が進行する。このため、供用期間中の通常運転時の経年劣化と DBA の環境を模擬した耐環境性能試験により、電気・計装設備の長期健全性が検証されており、高経年化技術評価及び運転期間延長認可申請に係る劣化状況評価において、長期健全性が評価されている。</p> <p>平成 25 年に新規規制基準が施行され、新たに常設重大事故等対処設備に属する機器に対する要求事項が追加となった。これにより、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、通常運転時の経年劣化を受けた後であっても、重大事故（以下「SA」という。）時環境下において必要な機能を維持することが必要となったことから、高経年化技術評価及び運転期間延長認可申請に係る劣化状況評価においても、通常運転時の経年劣化と SA を考慮した長期健全性評価が行われている。これに対し原子力規制庁は、国内外の試験研究、規格基準類の制定・改訂、運転経験等の最新の技術動向を踏まえた安全研究を実施し、現在適用されている手法の確認を行うとともに必要に応じ見直しを行い、高度化を図っていくこととする。</p> <p>これまでに、安全系電気・計装設備のうち特に長期の供用が想定される主要な機器としてケーブル及び電気ペネについて先行研究において検討を実施してきた。絶縁性能については、「原子力プラントのケーブル経年変化評価技術調査研究」（平成 14 年度～平成 20 年度）、「電気・計装設備の健全性評価技術調査研究」（平成 20 年度～平成 24 年度）及び「運転期間延長認可制度及び高経年化対策制度に係る技術的知見の整備に関する研究」のうち「常設重大事故等対処設備のうち、ケーブルの健全性評価手法の策定」（平成 25 年度～平成 28 年度）において、DBA 時及び SA 時のケーブル、DBA 時の電気ペネを対象とした研究を行った。また、高温・高圧下での電気ペネのシール材からの漏えい発生については、過去に財団法人原子力発電技術機構において研究が行われた。</p> <p>電気ペネについては、今後、SA 時環境下における絶縁性能の限界条件等の裕度を評価するためのデータを取得し、同データを用いて現在適用されている電気ペネの長期健全性評価手法の確認を行うとともに、必要に応じ見直しを図っていくことが重要である。</p>		
4. 目的	<p>常設重大事故等対処設備に属する電気・計装設備のうち電気ペネについて、高経年化技術評価等における長期健全性評価の確認に活用できるよう、通常運転時相当の劣化を付与した状態における SA 時環境下での絶縁性能に係るデータを取得し、限界条件等の裕度を評価するための手法を整備する。</p>		
5. 知見の活用先	<p>電気ペネについて、供用期間中の経年劣化及び SA 環境を考慮した健全性評価手法に係る取りまとめを令和 2 年度に実施し、電気・計装設備に関する高経年化技術評価及び運転期間延長認可申請の審査における確認に資する。</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」（平成28年7月6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。

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。）

安全系電気・計装設備（図1参照）のうち常設重大事故等対処設備に属する電気ペネ（図2参照）について、これを構成する高分子材料の絶縁性能に係る試験データを関係機関と協力して取得する。試験結果は、電気ペネの健全性の確認を行うための手法として取りまとめる。

(1) 評価対象電気ペネの選定、SA時の環境調査及びSA時環境模擬試験条件の設定（分類②）

- ・国内の原子力発電所においてSA時環境下で機能維持が求められる機器として使用されている電気ペネから主要な複数の型式の電気ペネを評価対象として選定し、これを構成する電気ペネ内部の絶縁体（ポットイング材）及び電気ペネに接続しているケーブルの絶縁体（ケーブル絶縁材）に用いられている高分子材料を特定する。（図3参照）
- ・評価対象とする電気ペネが使われている通常運転時の環境条件及びSA時の環境条件を調査する。通常運転時の環境条件については、電気ペネに使われている高分子材料の劣化要因として考えられる熱と放射線を考慮することとし、これらの条件を調査する。SA時の環境条件については、先行実施しているケーブル研究（DBA・SAを考慮）及び電気ペネの研究（DBAを考慮）の試験条件・試験結果、新規制基準適合性審査資料、国内外のSAを想定した試験事例等を調査し、これらを踏まえて試験条件を複数設定する。

(2) 高分子材料劣化特性調査・試験（関係機関等において実施）（分類②）

- ・ポットイング材及びケーブル絶縁材の高分子材料の熱及び放射線劣化特性を調査・試験し、劣化機構を明らかにする。ここでは過去に実施した電気ペネの研究（DBAを考慮）で取得したデータについても参考とする。また、高分子の熱・放射線劣化特性に関する既往の研究を調査する。この結果を基に、電気ペネに60年運転時相当の劣化を付与するための熱・放射線同時照射による加速劣化の条件を設定する。試験条件は、高分子材料の曲げ弾性率あるいは破断時伸び率等の物性を考慮し、実機環境における経年劣化を反映して的確に模擬できるように設定する。
- ・電気ペネに接続されているケーブルについて、ケーブル単独で絶縁機能を維持できる環境（高温、高圧の蒸気環境）の限界条件を試験により求める。
- ・ケーブルの限界条件の試験結果と(1)のSA時の環境調査結果を基に、電気ペネのSA時環境模擬試験の環境条件を設定する。

(3) 電気ペネ（供試体）の作製（関係機関等において実施）（分類②）

評価試験に供する電気ペネ（供試体）の作製を行う。

(4) 電気ペネの熱・放射線同時劣化（関係機関等において実施）（分類②）

(1)及び(2)の調査結果を基に、60年運転期間相当の経年劣化を、熱・放射線同時照射によりSA時模擬環境試験に供する電気ペネに付与する。

6. 安全研究概要
(始期：H29年度)
(終期：R1年度)

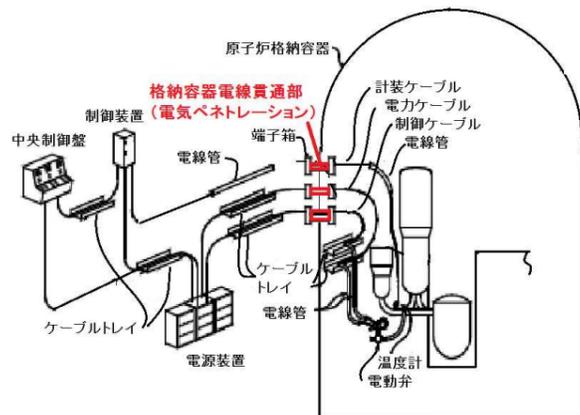


図1 安全系電気・計装設備



図2 電気ペネトレーション

(5) SA時環境模擬試験（関係機関等において実施）（分類②）

経年劣化を付与した電気ペネを用いて、SA時環境模擬試験を実施し、SA時模擬環境下における絶縁性能の評価を実施する（図4参照）。また、試験前後の高分子材料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。これらより、電気ペネが絶縁機能を維持できる環境の限界条件を評価する。

(6) 評価まとめ（分類②）

(1)～(5)の試験結果を踏まえ、電気ペネの供用期間中の経年劣化及びSA環境を考慮した健全性評価手法を取りまとめる。また、得られた成果は、適宜論文等で公表する。

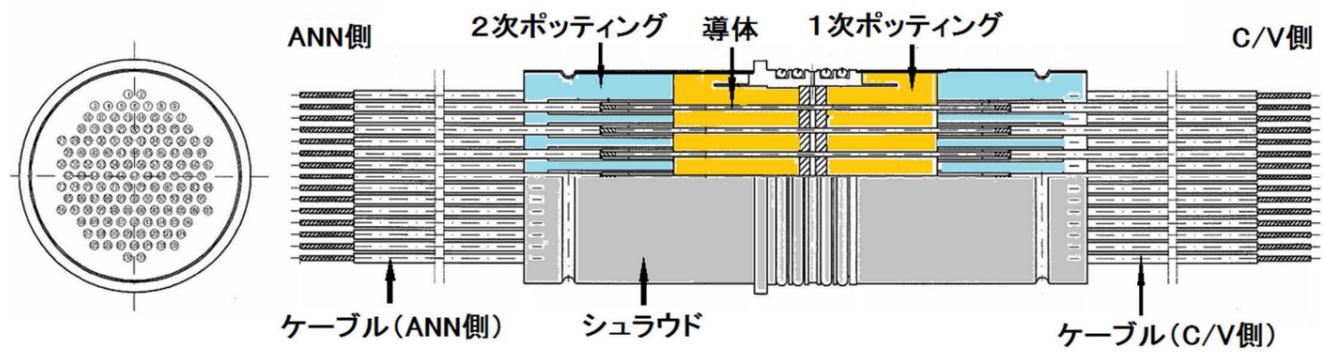


図3 電気ペネトレーションの構造



(a) 試験装置全景

(b) ケーブル試験状況

図4 SA時環境模擬試験（平成27年度ケーブル試験の例。関係機関等において実施。）

実施行程表

項目	平成29年度	平成30年度	令和元年度
(1) 評価対象電気ペネの選定、SA時環境調査及びSA時環境模擬試験条件設定	選定	調査	試験条件設定
(2) 高分子材料劣化特性調査・試験			
(3) 電気ペネ（供試体）の作製	劣化付与用供試体作製	未劣化用供試体の作製	
(4) 電気ペネの熱・放射線同時劣化			
(5) SA時環境模擬試験			
(6) 評価まとめ			<ul style="list-style-type: none"> 絶縁性能の評価 劣化状態の分析 限界条件の評価 論文（成果まとめ）の作成
		▽学会発表 ▽学会発表 ▽学会発表 ▽論文投稿	▽学会発表 ▽論文投稿

7. 実施計画

【平成29年度の実施内容】

(1) 評価対象電気ペネの選定、SA時の環境調査及びSA時環境模擬試験条件の設定（分類②）

- ・評価試験に供する電気ペネを選定し、これを構成するポッティング材とケーブル絶縁材に用いられている高分子材料を特定する。
- ・それぞれの高分子材料について、その組成を調査・試験する。
- ・SA時環境模擬試験の条件設定のため、電気ペネが使われている通常運転時の環境条件及びSA時の環境条件に関する情報を収集する。

(2) 高分子材料劣化特性調査・試験（関係機関等において実施）（分類②）

- ・ポッティング材及びケーブル絶縁材に使用されている高分子材料の熱及び放射線劣化特性を調査・試験し、劣化機構を検討する。
- ・ケーブル単独で熱・放射線同時照射により60年運転期間相当の劣化を付与し、劣化付与したケーブルについて、高温・高圧蒸気下における絶縁抵抗の温度特性を試験する。

(3) 電気ペネ（供試体）の作製（関係機関等において実施）（分類②）

試験に供する経年劣化付与用電気ペネ（供試体）の作製を行う。

	<p>【平成30年度の実施内容】</p> <p>(1) 評価対象電気ペネの選定、SA時の環境調査及びSA時環境模擬試験条件の設定（分類②） SA時環境模擬試験の条件設定のため、平成29年度に引き続き情報収集を行う。</p> <p>(2) 高分子材料劣化特性調査・試験（関係機関等において実施）（分類②） ・平成29年度に引き続き、高分子材料の熱及び放射線劣化特性を試験・調査し、劣化機構を検討する。この結果を基に、60年運転期間相当の劣化を付与するための熱・放射線同時照射による加速劣化の条件を設定する。 ・平成29年度に引き続き、60年運転期間相当の劣化を付与したケーブルの限界条件を試験する。この調査結果は、(1)の電気ペネのSA時環境模擬試験の条件設定のために使用する。</p> <p>(3) 電気ペネ（供試体）の作製（関係機関等において実施）（分類②） 試験に供する未劣化電気ペネ（供試体）の作製を行う。</p> <p>(4) 熱・放射線同時劣化（関係機関等において実施）（分類②） 試験に供する電気ペネに熱・放射線同時照射により劣化を付与する。</p>
	<p>【令和元年度の実施内容】</p> <p>(1) 評価対象電気ペネの選定、SA時の環境調査及びSA時環境模擬試験条件の設定（分類②） 平成29年度から平成30年度までの調査結果を基にSA時環境模擬試験条件を確定する。</p> <p>(2) 高分子材料劣化特性調査・試験（関係機関等において実施）（分類②） 平成30年度に引き続き、高分子材料の熱及び放射線劣化特性を試験・調査し、平成30年度までの調査結果と併せて、試験に供する電気ペネに使用されている高分子材料の熱及び放射線による劣化機構をまとめる。</p> <p>(4) 熱・放射線同時劣化（関係機関等において実施）（分類②） 平成30年度に引き続き、試験に供する電気ペネに熱・放射線同時照射により劣化を付与する。</p> <p>(5) SA時環境模擬試験（関係機関等において実施）（分類②） 劣化を付与した電気ペネを用い、SA時を模擬した環境下における絶縁性能の評価試験を実施する。また、試験前後の高分子材料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。</p> <p>(6) 評価まとめ（分類②） (1)、(2)、(4)、(5)の試験結果を踏まえ、電気ペネの供用期間中の経年劣化及びSA環境を考慮した健全性評価手法を取りまとめる。</p>
8. 実施体制	<p>【システム安全研究部門における実施者】</p> <p>池田 雅昭 上席技術研究調査官 ○ 皆川 武史 技術研究調査官</p>
9. 備考	

研究計画（案）

1. プロジェクト	20. 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	山本 敏久 上席技術研究調査官
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年下期以降に燃料デブリ（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）の取出しを開始し、開始後20～30年で燃料デブリの取出しを完了するとされている。</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」（平成29年9月26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」（平成28年7月6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する核データ起因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。

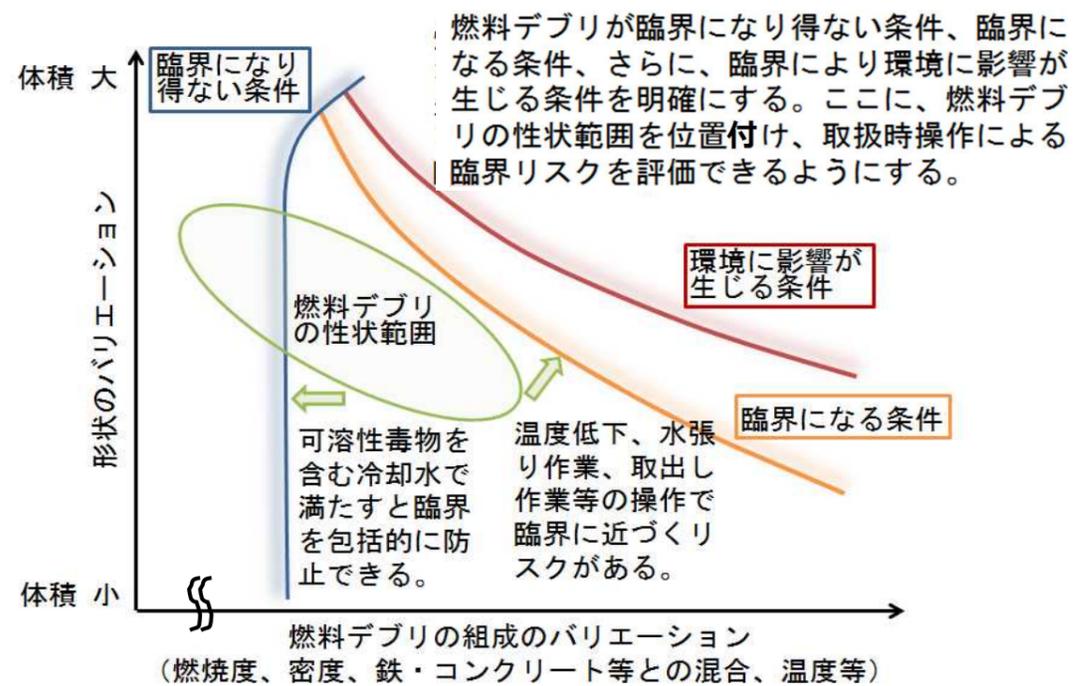


図1 臨界リスク基礎データの概念図

(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）)

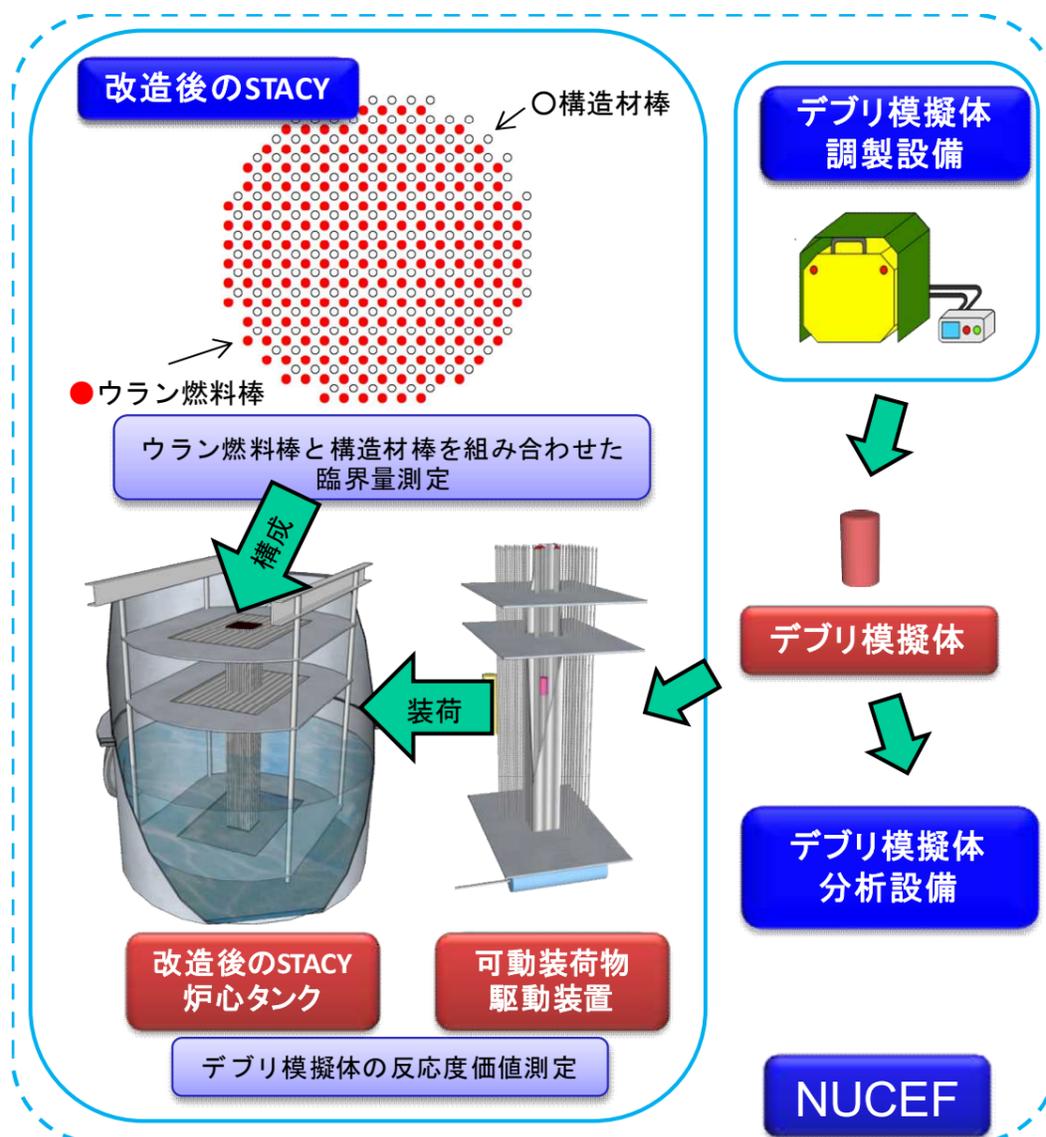
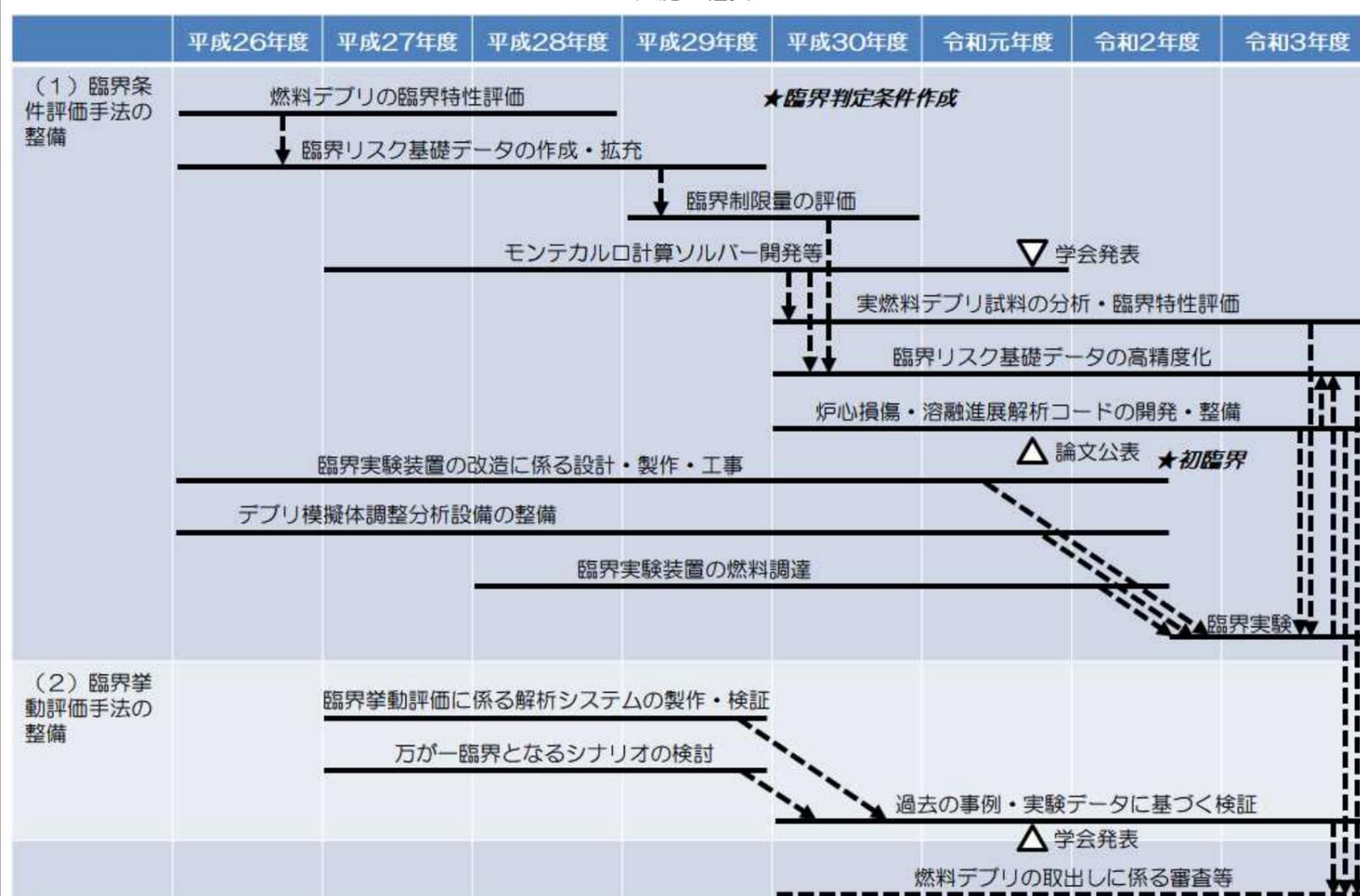


図2 STACYにおける臨界実験の概念図

(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2年度中の達成を目指す。さらに、令和2年度から、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。

実施工程表



【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

7. 実施計画

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。

(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。

(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。

(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。

(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。

(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。

【平成 29 年度の実施内容】

(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。

(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。

(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。

(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。

(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。

【平成 30 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
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。

(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。

(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。

(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。

【令和元年度の実施内容】

(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>発を完了する。また、放射性核種生成量評価における核データ起因の不確かさについて、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】</p> <p>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】</p> <p>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</p> <p>(a) 臨界挙動評価の検証【分類③】</p> <p>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</p> <p>(a) 臨界リスク基礎データの高精度化【分類③】</p> <p>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。令和元年度に整備した放射性核種生成量の核データ起因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】</p> <p>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について、本格的な水平方向への領域拡張及び臨界・遮蔽計算に必要となる燃料及び中性子吸収材の組成評価機能を整備・検証する。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】</p> <p>令和元年度に引き続き、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。また、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。</p> <p>(2) 臨界挙動評価手法の整備</p> <p>(a) 臨界挙動評価の検証【分類③】</p> <p>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</p> <p>(a) 臨界リスク基礎データの高精度化【分類③】</p> <p>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】</p> <p>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性状、その分布等を、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】</p> <p>令和 2 年度に引き続き、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</p> <p>(a) 臨界挙動評価の検証【分類③】</p> <p>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>
<p>8. 実施体制</p>	<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

1. プロジェクト	21. 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	担当部署 技術基盤グループ 核燃料廃棄物研究部門	
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	担当責任者	久保田和雄 統括技術研究調査官
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。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を含む様々な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」（平成28年7月6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。

(3) リスク評価手順の適用性、技術的根拠等に関する着眼点及び留意点の抽出（関連事項）【分類①】

上記(1)及び(2)で得られた成果を基に、施設の特徴を考慮した内部火災等に対するリスク評価の手順及びその適用性等の課題を整理するとともに、それらの検討から得られる技術的根拠等に関する着眼点及び留意点を抽出する。

6. 安全研究概要
(始期：H29年度)
(終期：R2年度)

実施行程表

	H 2 9 年度	H 3 0 年度	R 1 年度	R 2 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 (R 3 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とりまとめ、解析実施 学会発表 論文投稿 将来的なリスク情報の活用 (R 3 年度以降)
	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 将来的なリスク情報の活用 (R 3 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		NRA技術報告作成 (R 3 年度予定) 将来的なリスク情報の活用 (R 3 年度以降)

	<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>○ 森 憲治 主任技術研究調査官 横塚 宗之 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 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>【H30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	22. 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	入江 正明 主任技術研究調査官
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、平成25年12月に整備済みであるが、中深度処分策定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作業も行われている。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。現在、規制に係る基本的考え方を検討しており、これに引き続き、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そ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を目指すことを示すことを決定しており、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、フィンランド等では建設許可申請の審査が完了している。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、申請に必要な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での自然事象、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に反映される。</p>
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その解釈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。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」（平成28年7月6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 ② 審査等の際の判断に必要な新たな知見の収集・整備 <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及び分類②】</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> <ul style="list-style-type: none"> 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>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、ボーリング孔等の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、面的な侵食速度を評価するために、同一地域における変動地形学的手法等による隆起速度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速度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> 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>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活動可能性の評価を行うことが必要であるが、中深度処分施設の設置位置は、地下70mを超える深部に設置されることからトレンチ等の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。</p> 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】 <p>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変化に関するモデル化を行い、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。</p> d. 地層処分における安全確保の考え方に関する検討【分類①】 <p>地層処分と中深度処分は処分形態が異なるものの地質環境に関する規制における安全確保の考え方は共通点が存在すると考えられる一方で、評価期間については、同等又はそれ以上が必要となる可能性がある。そこで、中深度処分の規制の考え方を踏まえながら、より長期における自然事象の不確実性等、地層処分特有の課題について整理を行う。</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及び分類②】

・ベントナイト系人工バリアの長期性能評価手法の研究【分類①及び分類②】

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。

・セメント系人工バリアの長期性能評価手法の研究【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、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。

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及び分類②】

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	令和元年度	令和2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）	<p>○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）</p> <p>-----</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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 <p>-----</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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 			
	<p>○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））</p> <p>-----</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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 			
	<p>○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）</p> <p>-----</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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 			
	<p>○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> <p>-----</p>			
(1) 立地に係る自然事象の評価に関する研究				▽論文公表
	<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 <p style="text-align: center;">提供</p>	<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
	<p>中深度処分位置に係る審査ガイド等の整備</p>			<p style="text-align: center;">随時反映</p>
		<p>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</p> <p style="text-align: center;">随時反映</p>	<p>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</p> <p style="text-align: center;">随時反映</p>	
				<p>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	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	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	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	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	▽論文公表
		中深度処分の設計ガイド等の整備	プロセス線量評価	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		
	(3) 地質環境及び水理環境モニタリングに関する研究	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	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	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	性能確認及びモニタリング手法の評価 人工バリアの長期性能確認の評価手法の整備	▽論文公表
				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

【H29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。

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】

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。

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。

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。

(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】

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。

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應する際の課題を整理する。

【H30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。

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係る評価の妥当性、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。

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。

(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】

・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。

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。

・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の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、地すべり及び層理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となる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

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

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】

地下水流動場評価手法の構築

(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】

- ・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】

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

- ・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。

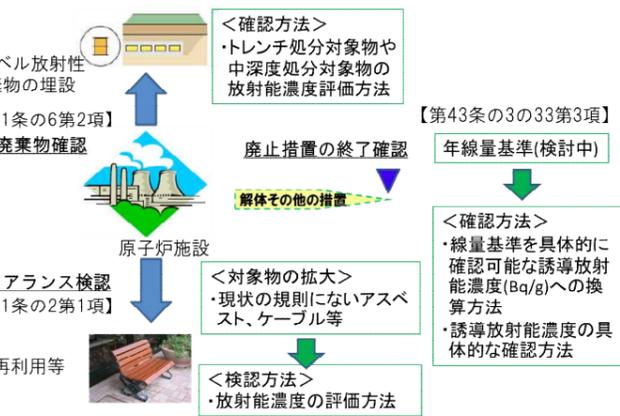
b. 天然バリアの核種移行評価に係る科学的・技術的知見の整備【分類①及び分類②】

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

	<p>(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】</p> <p>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。</p> <p>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】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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	<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>○入江 正明 主任技術研究調査官 東原 知広 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 藤田 哲史 技術研究調査官 戸崎 裕貴 技術研究調査官 鏡 健太 技術研究調査官 室田 健人 技術研究調査官 内田 雅大 技術参与</p> <p>【H30年度の委託先】</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） ・国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 . . . 実施項目（2） ・公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター . . . 実施項目（3）
9. 備考	

研究計画

<p>1. プロジェクト</p>	<p>23. 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>【核燃料サイクル・廃棄物】 L) 廃止措置・クリアランス</p>	<p>担当責任者</p>	<p>片山二郎 上席技術研究調査官</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</p> <p>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ルングファクタ法、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。</p> <p>(2) クリアランス検認</p> <p>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ため、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クリアランスレベル及び国による検認※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。）。</p> <p>(3) 廃止措置の終了確認</p> <p>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な方法を整備することが重要である。</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>	 <p>図1 本安全研究の概要</p>	
<p>4. 目的</p>	<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認するための判断根拠を整備する。</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対する濃度上限を検討するとともに、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</p>		

	<p>て整理し、国による検認に関する判断根拠を整備する。</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、終了確認に関する判断根拠を整備する。</p>
5. 知見の活用先	<p>(1) 廃棄物確認</p> <p>廃棄物確認における放射能濃度等の具体的な確認方法を定めた廃棄物確認に関する運用要領に活用する。</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クリアランスレベル（基準）及び国による検認に活用する。</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>

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」（平成 28 年 7 月 6 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。）

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) 廃棄物確認【分類②】

現在操作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。

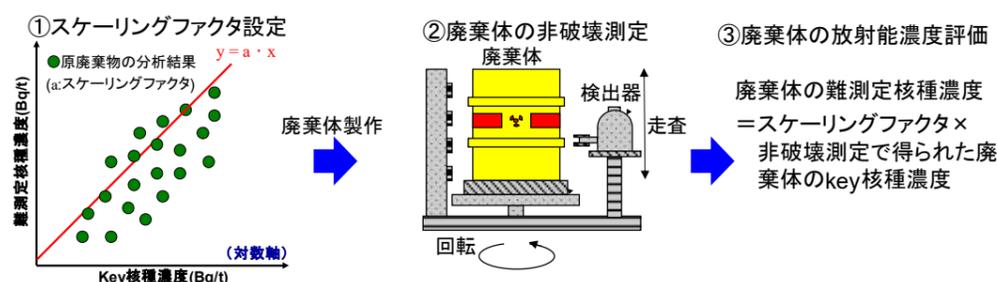


図 2 現状の廃棄体の放射能濃度評価の流れ（スケールングファクタを用いる場合）

6. 安全研究概要
（始期：H 2 9 年
度）
（終期：R 2 年度）

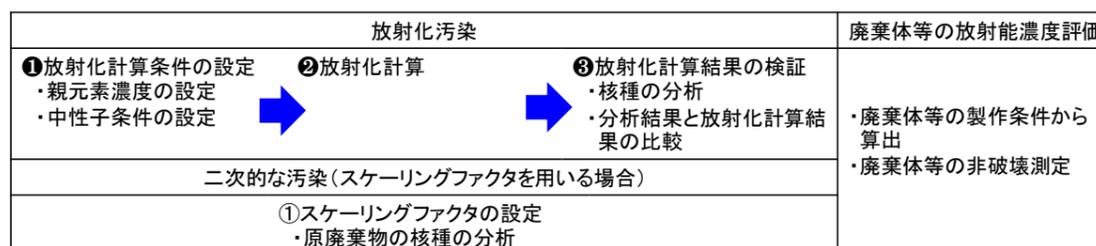


図 3 新たな廃棄体等の放射能濃度評価の流れ

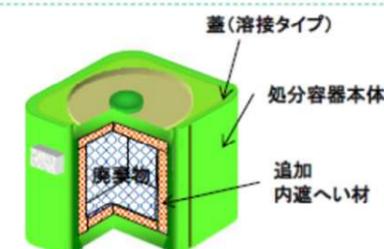
図 3 に示す放射能濃度評価の妥当性を判断するに当たっての検討項目は次のとおりである。

- ・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判断根拠を取りまとめる。

- ・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。
- ・対象物を非破壊測定する場合でも非破壊測定だけでは放射化汚染と二次的な汚染を厳密には識別できないので、放射化計

外容器：圧延鋼板溶接（肉厚 5cm）
外寸法：縦 1.6m × 横 1.6m × 高 1.6m (or 1.2m)
外容積：約 4m³ (or 約 3m³)
最大重量：約 25t (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

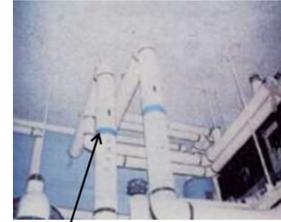
算を組み合わせた放射能濃度評価方法における評価精度（放射化汚染と二次的な汚染の分布が異なることを考慮）等の適用条件を検討する。

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判断根拠を取りまとめる。

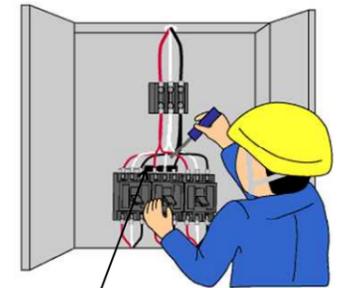
- ・現状の200L廃棄体より低濃度であるという特徴を踏まえ、対象物中の非破壊測定可能核種（Co-60等）の線量率分布測定における測定性能を検討する。
- ・非破壊測定だけでは放射化汚染と二次的な汚染を厳密には識別できないので、放射化計算を組み合わせた放射能濃度評価方法における評価精度（放射化汚染と二次的な汚染の分布が異なることを考慮）等の適用条件を検討する。検討に際しては、コンクリート中では放射性核種が拡散等で移行することも考慮する。

(2) クリアランス検認（関係機関と協力実施）【分類①及び分類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。）について（図5）、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。これらの情報を基に新規クリアランス対象物を再利用・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、現行のクリアランスレベルと比較することでクリアランス対象物の拡大の可否について整理する。



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

また、新規クリアランス対象物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判断根拠として取りまとめる。

(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。

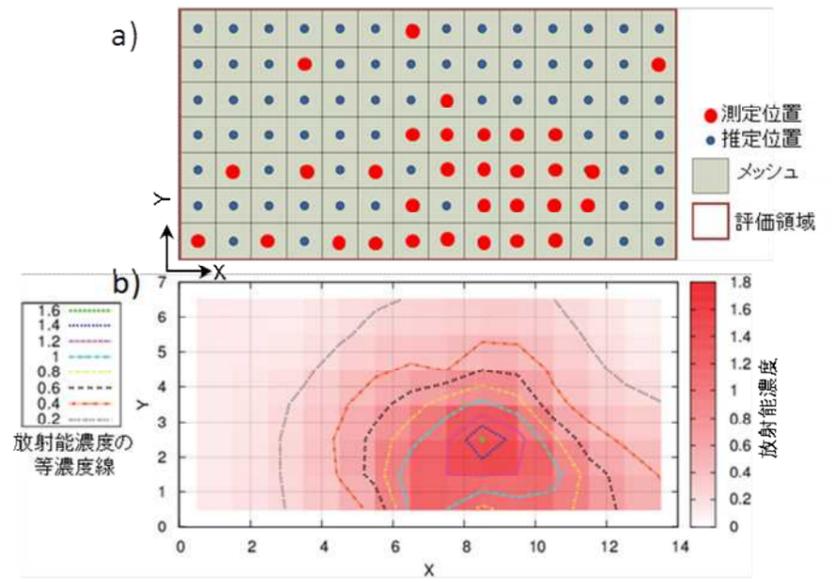
サイト解放時に放射能濃度が基準を満足することを合理的に確認する方法については、対象領域内の限られた測定値（サンプル測定又は図6のような放射線測定）から対象領域全体の主に表層土壤中の放射能濃度分布を推定する地球統計学的手法の適用が考えられる（図7）。次の事項を検討し、終了確認に係る判断根拠を取りまとめる。

- ・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

実施行程表

	H29年度	H30年度	R1年度	R2年度
(1) 廃棄物確認		中深度処分対象廃棄体		
	<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"> ・放射能測定性能/放射能濃度評価方法の検討 ・判断根拠の取りまとめ ↓ ・運用要領案の検討
	トレンチ処分対象コンクリート等廃棄物			
	<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 ・判断根拠の取りまとめ ↓ ・運用要領案の検討 	論文公表▽ (R3年度予定)
(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"> ・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） ・国による検認における判断根拠の取りまとめ ↓ ・クリアランスレベル案の検討
		<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 	<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				論文公表▽
	<ul style="list-style-type: none"> ・放射能濃度の導出に係る検討（評価コードの整備等） 	<ul style="list-style-type: none"> ・放射能濃度の導出に係る検討（サイト固有条件の影響） 	<ul style="list-style-type: none"> ・放射能濃度の導出に係る検討（サイト固有条件の影響） 	<ul style="list-style-type: none"> ・放射能濃度導出に係る留意事項の取りまとめ
	<ul style="list-style-type: none"> ・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） 	<ul style="list-style-type: none"> ・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） 	<ul style="list-style-type: none"> ・終了確認手法の検討（地中の残留放射能分布確認手法） 	<ul style="list-style-type: none"> ・終了確認に係る判断根拠の取りまとめ

	<p>【H29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"> ・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。 <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（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。 <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 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。
7. 実施計画	<p>【H30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。 ・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。 <p>(2) クリアランス検認【分類①及び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 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 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

	<p>能濃度評価方法を検討し、廃棄体の放射能濃度確認方法の妥当性に係る判断根拠を作成する。</p> <p>(2) クリアランス検認【分類①及び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（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。 ・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較正に必要な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、終了確認に係る判断根拠を取りまとめる。
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"> ○高橋宏明 主任技術研究調査官 林 宏樹 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 深井 恵 技術研究調査官 川崎 智 技術参与 <p>【H30年度の委託先】</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)
9. 備考	

研究計画

1. プロジェクト	24. 緊急時活動レベル (EAL) に係るリスク情報活用の研究	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	【原子力災害対策・放射線規制等】 M) 原子力災害対策	担当責任者	舟山京子 安全技術管理官
		主担当者	宇津野英明 技術研究調査官
3. 背景	<p>発電用原子炉施設を対象として事業者が原子力災害対策指針に基づき策定する防災業務計画のうち、原子力災害発生時のプラントの状況に応じて防護措置を適切に実施するための緊急事態区分に対する判断基準である緊急時活動レベル（以下「EAL」という。）については、これまでに発電用原子炉施設の炉型に応じた効果的な運用を確保することを目的として、事象想定、事故時のプラントパラメータ及びその指標値より構成される EAL の確認項目（安全系の作動状況、圧力、温度、放射性物質障壁の健全性等）を検討してきている。</p> <p>これまでに米国原子力規制委員会（以下「NRC」という。）などにより、確率論的リスク評価（以下「PRA」という。）の研究に基づく EAL 到達時における炉心損傷、早期大規模放出等に係るリスク情報の整理と、それに基づいた EAL により分類される緊急事態区分の評価が試行されている。一例として、米国 NRC では、PRA により EAL ごとのリスクの内容を明らかにする研究が試みられ、EAL ごとに条件付炉心損傷確率（以下「CCDP」という。）を算出し、リスクに関わる知見を集積すると同時に緊急事態区分の妥当性の評価を試行する研究が行われている。このような動向を踏まえて、リスク情報を活用することにより EAL に係る技術的知見を継続的に拡充していくことが重要である。さらに、これらの情報に基づいて、より効果的な防護措置（避難、屋内退避、安定ヨウ素剤服用等）の実施可能性を検討することが重要である。</p> <p>また、リスク情報を活用した EAL を適用した際に、防護措置（避難、屋内退避、安定ヨウ素剤服用等）への影響を把握することが重要である。これまでに、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が整備してきた安定ヨウ素剤服用による被ばく低減効果の評価手法に対して計算時間の短縮を図った。今後は、屋内退避による外部被ばく及び内部被ばく線量の低減効果に関する最新知見を基に屋内退避による低減効果を確認するために必要な評価モデルの検討が重要である。</p>		
4. 目的	<p>(1) リスク情報を活用した EAL 評価手法の整備</p> <p>効果的な防護措置の実施可能性を検討するために、炉心損傷、格納容器機能喪失、早期大規模放出等に係るリスク情報に基づいて、各 EAL におけるリスクの定量的な評価手法を検討することを目的とする。併せて事象想定、事故時のプラントパラメータ及びその指標値の技術的知見を継続的に拡充していくことを目的とする。</p> <p>(2) 被ばく解析手法の整備</p> <p>建物別の換気率、遮蔽係数等の最新知見に基づく現実的な屋内退避による被ばく低減効果を評価するための解析手法を検討することを目的とする。</p>		
5. 知見の活用先	<p>EAL ごとに整理したリスク情報の技術的なデータは、緊急時対応要員が活動する際にプラントの状況を推定しその後の事象進展を検討する際に基礎的な情報を提供することができ、規制庁としての対応強化、防護措置実施の検討を的確に実施することに資する。さらに、原子力災害対策指針に基づき事業者が策定する EAL の確認等に資する。</p>		
6. 安全研究概要 (始期：平成 29 年度) (終期：令和元年度)	<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」（平成 28 年 7 月 6 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>③ 規制活動に必要な手段の整備（以下「分類③」という。）</p> <p>(1) リスク情報を活用した EAL 評価手法の整備【分類③】</p> <p>米国等の海外における緊急時対策へのリスク情報活用状況の調査・分析結果（図 1）を参考にしつつ、既存の原子力災害発生時における事故進展解析結果、PRA 結果を用いて、EAL ごとに到達時点での CCDP、格納容器損傷確率等の確率パラメータ、想定される環境中への放射性物質の大規模放出までの時間的余裕と放出量あるいは放出速度等の被ばくに関わるパラメータを整理する。続いて、整理したパラメータに基づき、EAL ごとに放射性物質の放出量あるいは予想される被ばく線量等の影響の大きさ、放射性物質の大規模放出までの時間的余裕、格納容器損傷確率の 3 要素によりリスクの特徴を定量的に評価する（図 2）。さらに、この評価結果を用いて防護措置の実施条件を様々に変化させながら重大事故時の放射線被ばくによるリスクを試算することにより、防護措置をより効果的に実施できる可能性を検討する。</p> <p>(2) 被ばく解析手法の整備【分類③】</p> <p>令和元年度までに、建物別の換気率、遮蔽係数等の別事業で得られた最新知見を整理し、これらを活用した屋内退避による被ばく低減効果を解析できるように、関係機関と協力して屋内退避による被ばく低減効果を確認するために必要な評価モデル（例えば、強制換気等の空調運転モードに応じて被ばく低減係数等を時系列に変化させて計算できるようにする等）の検討を行う。</p>		

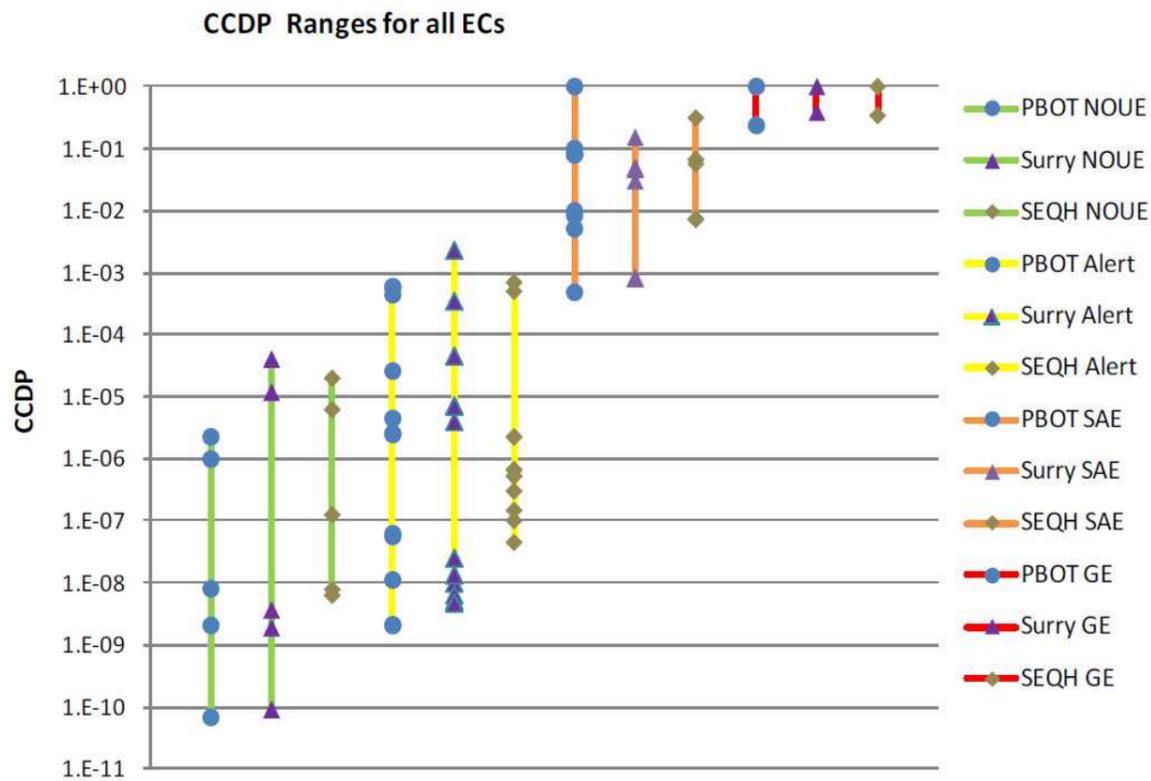


図1 米国における研究事例

NUREG/CR-7154において算出された Peach Bottom、Surry、Sequoyah のプラント及び非常事態区分別の EAL 到達時における CDDP 値の幅を示す。(NUREG/CR-7154 Figure 2-2 CDDP Range for each EC)

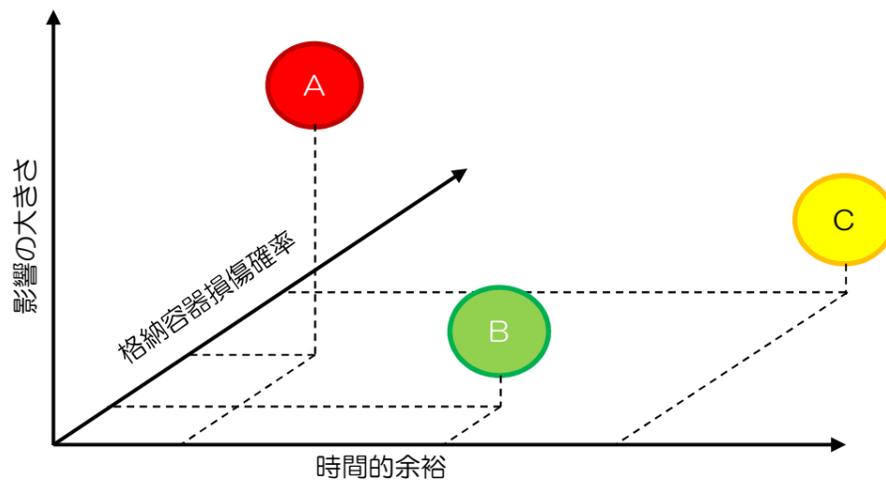


図2 リスク評価のイメージ

影響の大きさ、放射性物質の放出までの時間的余裕、格納容器損傷確率の3要素で評価を実施する。図ではA) 中程度の確率で時間的余裕が小さく影響も大きい B) 確率は小さく、一定程度の時間的余裕があり影響も小さい C) 確率が高いが時間的余裕は大きく影響も小さい、といった特徴が見られる。本研究ではこの評価を EAL ごとに定量的に実施する。

実施行程表

	平成 29 年度	平成 30 年度	令和元年度
リスク情報を活用した EAL 評価手法の整備	(緊急時対策へのリスク情報活用状況の調査・分析) EALに係るプラントパラメータとリスク情報の対応の整理	事象進展解析及びリスク情報を活用した EAL 評価の適用検討及び EAL に基づく防護措置の有効性検討 (事業者が策定する EAL の確認等に資する) (緊急時対応技術データの拡充)	論文投稿▽ EAL に対応づけられたリスク情報に基づく、防護措置実施時のリスク低減可能性の検討
被ばく解析手法の整備	被ばく低減解析モデルの検討	被ばく解析手法の整備	建物別の換気率、遮蔽係数等に係る最新知見の整理
			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

7. 実施計画

【平成 29 年度の実施内容】
(1) リスク情報を活用した EAL 評価手法の整備【分類③】
事象想定、事故時のプラントパラメータ及びその指標値より構成される EAL に該当する緊急事態と、炉心損傷、格納容器機能喪

	<p>失、早期大規模放出等に係るリスク情報との対応関係を整理する。</p> <p>(2) 被ばく解析手法の整備【分類③】 最新の建物別の換気率、遮蔽係数等を考慮するために必要な被ばく低減効果を評価するための解析モデルを検討する。</p> <p>【平成30年度の実施内容】</p> <p>(1) リスク情報を活用したEAL評価手法の整備【分類③】 代表的なPWR及びBWRの事象進展解析結果について、EALを構成するプラントパラメータ及びその指標値到達時期、事故の発生頻度を分析し、EALの緊急事態区分への割り付けの妥当性を評価するための尺度であるリスク指標との対応について検討するとともに、レベル3PRAの結果を活用してEALに基づく防護措置の有効性について検討する。</p> <p>(2) 被ばく解析手法の整備【分類③】 前年度の検討結果を基に、建物別の換気率、遮蔽係数等の別事業で得られた最新知見を活用した被ばく低減効果を評価するための解析手法の検討を進める。</p> <p>【令和元年度の実施内容】</p> <p>(1) リスク情報を活用したEAL評価手法の整備【分類③】 前年度までに整備したプラントパラメータ及びリスクに関わる諸情報に基づき、防護措置実施の判断から放射性物質の大規模放出に至る間の防護措置実施に関わる条件を様々に仮定して放射線被ばくリスクを試算し、防護措置によるリスクへの影響について検討する。</p> <p>(2) 被ばく解析手法の整備【分類③】 前年度に引き続き、建物別の換気率、遮蔽係数等の別事業で得られた最新知見を活用した被ばく低減効果を評価するための解析手法の検討を完了する。</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>○宇津野英明 技術研究調査官 柴田 敏宏 技術研究調査官 鈴木ちひろ 技術研究調査官 市川 竜平 技術研究調査官 新添 多聞 技術研究調査官 梶本 光廣 技術参与 宮木 和美 技術参与 佐藤 信秀 技術参与</p> <p>【平成30年度の委託先】</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	<p>被ばく解析手法の整備に係る成果を次のプロジェクトに反映する。</p> <p>12. 軽水炉の重大事故における格納容器機能喪失及び確率論的リスク評価に係る解析手法の整備のうち、(2) 確率論的リスク評価に関連する評価技術の整備 2) レベル3PRA手法の整備</p>