

2023 年度廃炉研究開発計画について

1. 基本的な考え方

福島第一原子力発電所の廃炉・汚染水・処理水対策については、炉の設置者である東京電力ホールディングス（以下「東京電力HD」という。）が、実施主体としての責任をしっかりと果たし続けていくことが大原則である。

他方、これまで世界にも前例のない困難な取組であるため、「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（2019年12月改訂）」（以下「中長期ロードマップ」という）に基づく対策の進捗管理や技術的難易度が高い研究開発に対する支援を行うなど国も前面に立って取り組むこととしている。

技術的難度が高く、国が支援する研究開発の対象については、中長期ロードマップ、原子力損害賠償・廃炉等支援機構（以下「NDF」という。）の「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炉のための技術戦略プラン」（以下「技術戦略プラン」という。）、東京電力HDによる廃炉作業やエンジニアリング、文部科学省の「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」を含む既存の研究開発プロジェクトの進捗状況、各事業者等からの福島第一原子力発電所の廃炉に向けて解決すべき技術的な課題、その課題解決に向けた研究開発の実施内容、研究開発の規模等についての情報提供（RFI）等を踏まえ、廃炉技術に関する司令塔であるNDFからの助言を得て、廃炉研究開発計画としてまとめている。

なお、本廃炉研究開発計画に基づく研究開発プロジェクトは東京電力HDと連携して実施し、成果は東京電力HDの実施するエンジニアリングに活用される。

一方で、燃料デブリ取り出しや廃棄物対策については、燃料デブリやその取り出しのためのアクセスルート等の原子炉格納容器内状況に関する情報等が未だ限定的であり、大きな不確実性が存在するのが現状である。

このため、今後の東京電力HDによるエンジニアリング、調査・分析や現場の作業等を通じて得られる知見を踏まえ、新たに必要となる研究開発課題が抽出されることが想定され、廃炉研究開発計画は鋭意、不断の見直しを図っていくことが重要である。

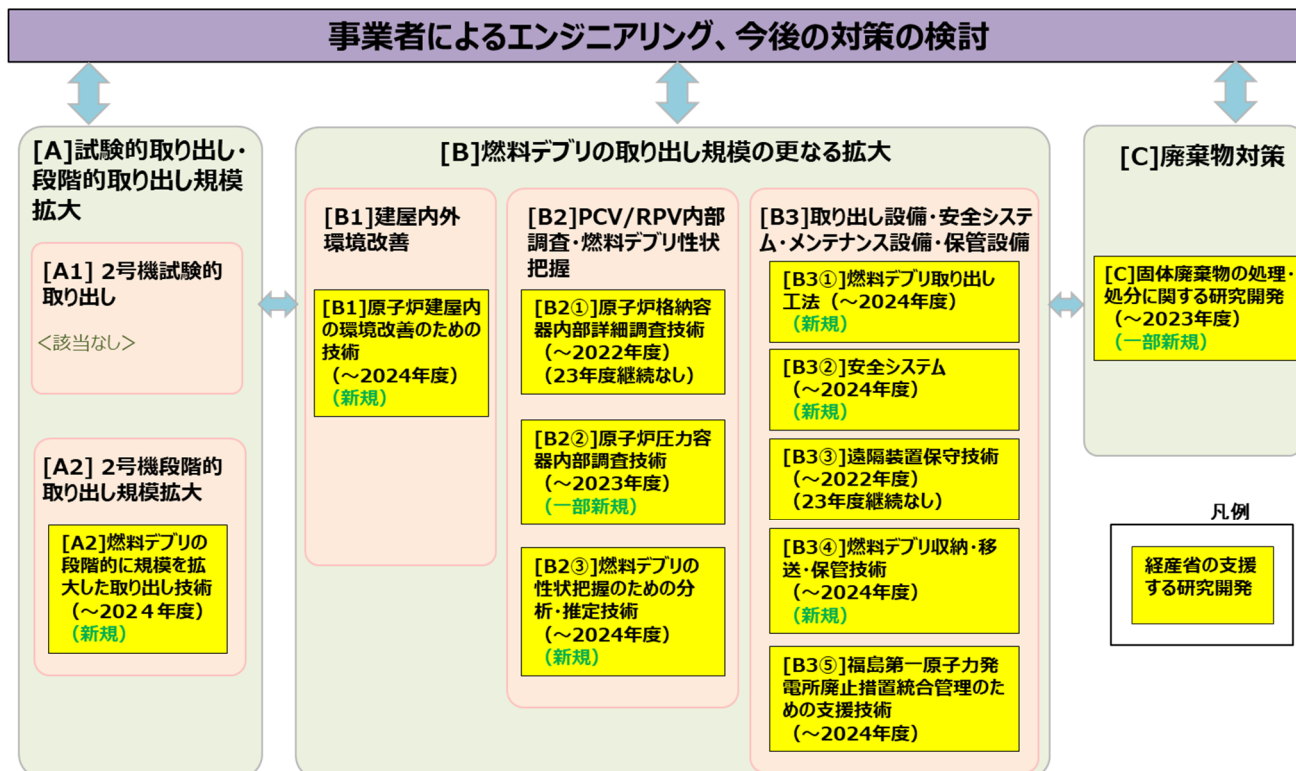


図1 研究開発の全体像

※これまでの計画については、「2022年度廃炉研究開発計画」（廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合／事務局会議（第98回 資料4））を参照。

A2: 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術の開発

目的

取り出しによる燃料デブリのリスク低減及び燃料デブリ取り出し工事に係る臨界管理や装置設計、工事要領の合理化に資することを目的に、燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術を開発する。

実施内容

- 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術の開発計画を策定、更新する。また、取り出しのための燃料デブリのアクセス装置等の開発を行い、実機状況を模擬したモックアップ試験にて適用性を確認する。
- 本研究開発は事業者エンジニアリングと連携するとともに事業者のオペレータ視点を反映し、成果は事業者の実施するエンジニアリングに活用される。

1. 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術の開発

(1) 取り出し技術の開発計画の更新

試験的取り出し・PCV内部調査のモックアップ試験結果や現地調査準備実績等から燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術（取り出し用の装置、システム等）へ反映すべき課題が抽出されることが想定されることから、これらの改善を図ることができるような開発計画に更新する。

③ モックアップ試験

実機を模擬したモックアップ設備を用いたモックアップ試験を行い、現場適用性を確認する。

※試験的取り出し・PCV内部調査のモックアップ試験等の進捗状況を踏まえて、本事業の開始時期を判断する。

(2) 取り出しのための装置、システムの開発

① アームの機能確認試験

アームとアーム先端ツール（燃料デブリ切削・回収装置、中性子モニタ、等）のアーム全体での試験を行い、必要な機能を有していることを確認する。なおアームの基本的な機能（伸縮、X-6ペネ通過性、等）に加えて、先行している試験的取り出し・PCV内部調査用アクセス装置での知見を適宜反映して、改良を行う。

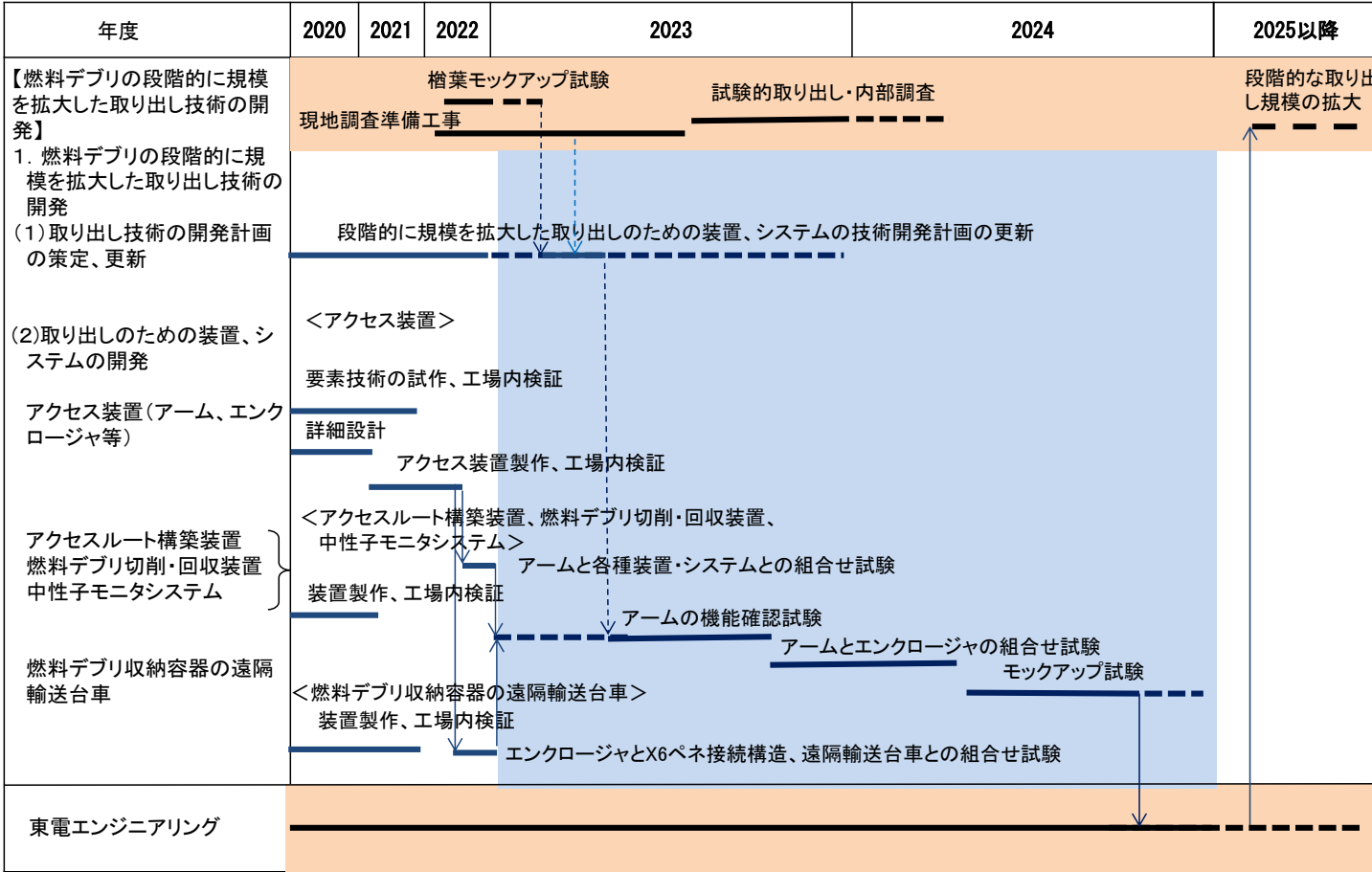
② アームとエンクロージャの組合せ試験

エンクロージャ（保守用双腕マニピュレータ含む）とアーム（アーム先端ツール含む）とを合わせた組合せ試験を行い、ペDESTAL内からの燃料デブリの採取、エンクロージャからの搬出までの一連の作業への適用性を確認する。

目標達成を判断する主な指標の設定

- ・燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術の開発計画の更新（2023年度～2024年度）
- ・アームの機能確認試験（2023年度～2024年度）
- ・アームとエンクロージャとの組合せ試験、モックアップ試験による現場適用性の確認（2024年度）

(目標工程) A2: 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術の開発



B1: 原子炉建屋内の環境改善のための技術開発

目的
燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けて、事故による損傷状態が不明な場所が残り、未だに線量率が高い原子炉建屋内において、作業を安全、効率的に行うために必要となる環境改善に関わる技術開発を実施する。

実施内容
○燃料デブリの取り出しに先立って、事故による損傷状態が不明な場所が残り、未だに線量率が高い原子炉建屋内でのアクセスルート構築準備作業を安全、効率的に行なうための環境改善が必要である。環境改善の重要な技術要素としては、作業環境と線量・線源分布の把握、環境変化に対応した被ばく低減計画の策定が必要である。これらに関連する技術・装置について、燃料デブリ取り出し期間に随時必要となる環境改善作業も考慮し、現場適用を可能とするための、調査、検討、要素試験による開発を行う。
○本研究開発は事業者エンジニアリングと連携するとともに事業者のオペレータ視点を反映し、成果は事業者の実施するエンジニアリングに活用される。

1. 原子炉建屋内の環境改善のための技術開発
・被ばく低減のための環境・線源分布のデジタル化技術の高機能化開発

燃料デブリ取り出しのアクセスルート構築準備等の原子炉建屋内での作業を行うためには、可能な限り作業員の被ばく低減を図り、安全かつ効率的な作業計画を策定することが必要である。そのためには、原子炉建屋内の構造物、機器の損傷の状況、放射線量等の環境を適切に把握することが必要である。特に、高線量の放射線源を特定し、線源となる機器等の撤去、遮へい体の設置による線量変化等への対処を適切に計画することが重要である。
そこで、原子炉建屋内の環境データ(機器、構造物の位置、形状、放射線量の分布等)をデジタルモデルに変換することにより、線量低減の対象とすべき放射線源の分布を逆推定解析によって評価するシステムの開発を行う。また、放射線量及び放射線源の分布をサイバー空間上に可視化することで原子炉建屋内の作業による環境変化に対応した的確な作業計画の策定及び現場での作業員の動線、滞在時間、遠隔装置による作業有無等を考慮することができる被ばく線量の推定評価システムを開発する。
これまで、逆推定解析技術、可視化技術等の要素技術開発を進め、それを組み込んだ環境・線源分布のプロトタイプシステムを開発、検証し有効性を確認できたが、現場適用のためには、更なるシステム機能の向上、合理化が課題である。

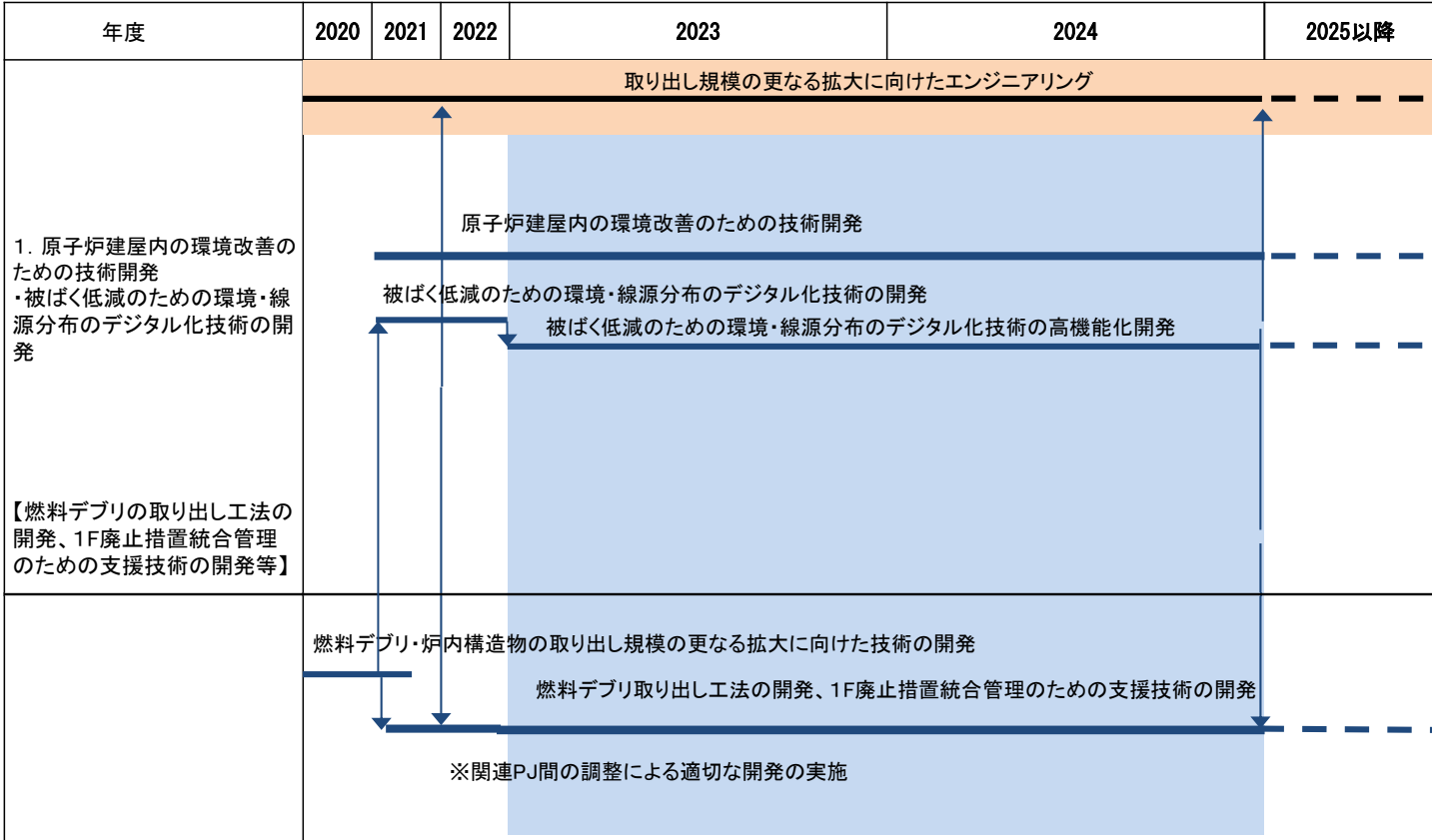
そのため、特に、デジタルモデル作成の効率化、線源逆推定解析の合理化、システム操作の省力化等を図って現場適用性を向上するとともに、環境改善作業期間に必要なシステムの維持、保守管理を踏まえて開発を行う。

(注記)
本開発においては、以下について取り扱い性、保守方法を考慮した開発を行う。
・高線量エリアで活用することから、遠隔操作が原則となる。
・装置の汚染と必要な除染に配慮する必要がある。
・保守を行うための作業エリアが限られる。
・保守作業によって発生する廃棄物を極力抑える必要がある。

目標達成を判断する主な指標の設定

・被ばく低減のための環境・線源分布のデジタル化システムの高機能化概念検討(2023年度)、現場適用性の評価(2024年度)

(目標工程)B1: 原子炉建屋内の環境改善のための技術開発



— : 実施済又は今回の計画

— : 想定される計画

— : 東電エンジニアリング

: 現場作業(エンジニアリングを含む)

: 対象となる研究開発計画の期間

B2②: 原子炉圧力容器内部調査技術の開発

目的
原子炉圧力容器 (RPV) 内部の燃料デブリ取り出しの検討に資するため、RPV内部の燃料デブリ等の状況を把握するための調査技術を開発する。

実施内容
○RPV内の状況や線量等の内部状態を確認するため、高線量下、高汚染下等の環境条件での遠隔操作による閉じ込め機能を確保しつつアクセスルート構築(新規の開口作業等)を行う穴開け装置やRPV内部へ調査用機器類を送り込むための装置・システムを開発する。
○本研究開発は事業者エンジニアリングと連携するとともに事業者のオペレータ視点を反映し、成果は事業者の実施するエンジニアリングに活用される。

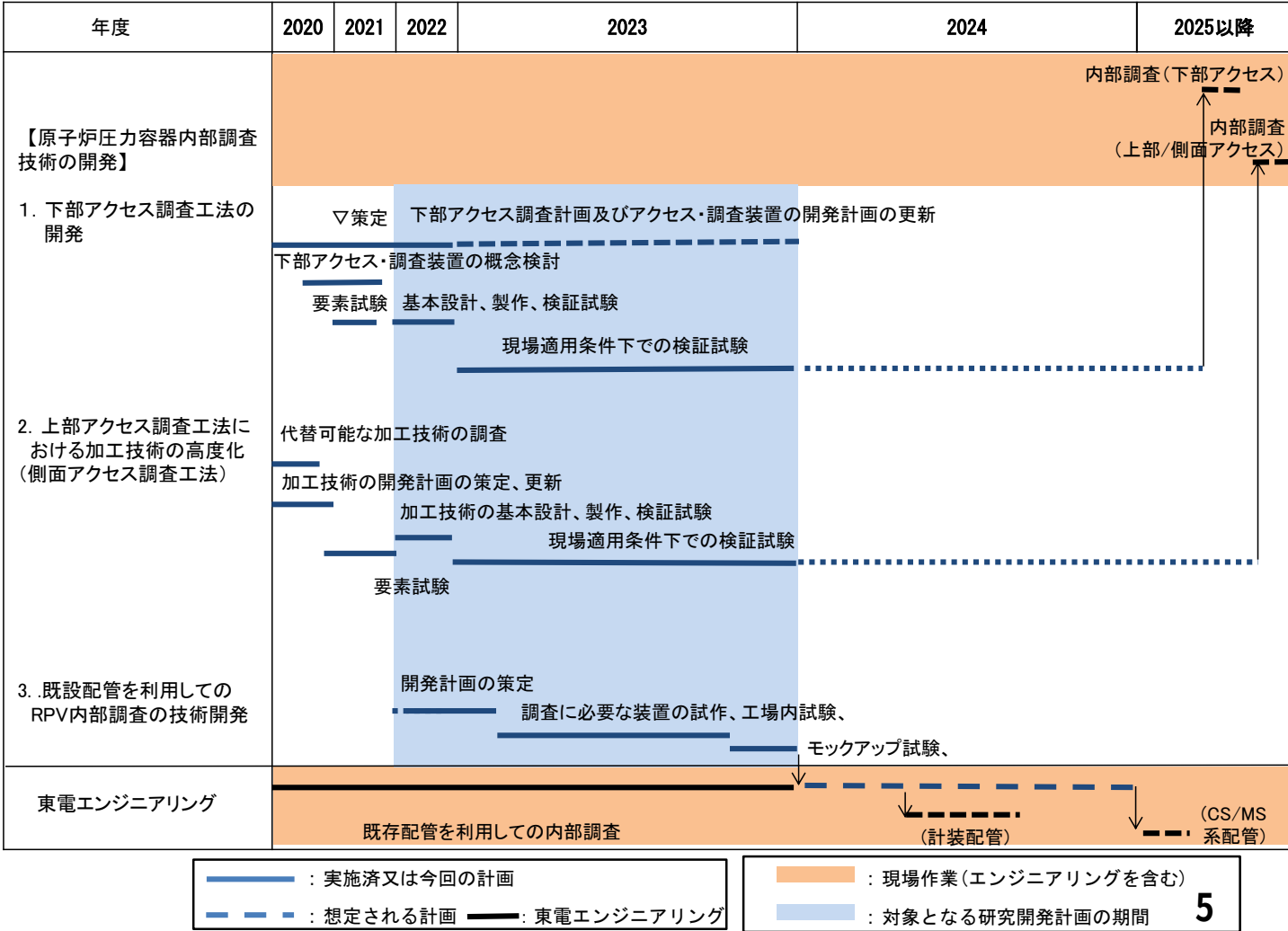
1. 下部アクセス調査工法の開発
①下部アクセス・調査計画及びアクセス・調査装置の開発計画の更新
RPVの下側からRPV底部の開口部の有無等の状態を調査し、開口部が確認できた場合には、開口部から調査装置をRPV内に挿入し、RPV内側底部の状況を調査する下部アクセス調査工法に関して、2021年度までに策定した調査計画及び下部アクセス・調査装置の開発計画を、必要に応じて更新する。
②下部アクセス・調査装置の基本設計、製作、検証試験
2021年度までに実施した下部アクセス・調査装置の概念検討結果に基づき、基本設計、製作を行い、工場内検証試験で装置単体で必要な機能を確認する。
さらに、実機適用状態を模擬した検証試験を行い、現場適用性を確認する。

2. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化
炉内構造物を切断、穿孔してアクセスルートを構築する加工技術として、2021年度までに切断性能、二次廃棄物等から選定した加工技術(AWJ、レーザー切断)について、実機適用条件(遠隔、寸法制約等)下における試験を行い、加工装置の必要な機能を確認する。
さらに、実機適用状態を模擬した検証試験を行い、現場適用性を確認する。

3. 既存配管を利用してのRPV内部調査の技術開発
高い耐放射線性の小型ファイバースコープを用いて、既存配管(炉心スプレイ(CS)系、主蒸気(MS)系等)からRPV内部にアクセスして内部調査を行う上で課題となっている以下の技術について、開発計画を策定する。
開発計画に基づき、装置を試作し、モックアップ試験で現場適用性を確認する。
・RPVへのアクセスを妨げる機器(弁、オリフィス、ティーズ等)を通過するための技術
・配管部(垂直部、エルボ部等)を通過し、RPVまで到達するための技術

目標達成を判断する主な指標の設定
・下部アクセス・調査装置の試作・試験による現場適用性の確認(2023年度)
・上部アクセス調査の炉内構造物加工技術の試験による現場適用性の確認(2023年度)
・既存配管を利用する内部調査用装置のモックアップ試験による現場適用性の確認(2023年度)

(目標工程)B2②: 原子炉圧力容器内部調査技術の開発



B2③: 燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発

目的

燃料デブリ・炉内構造物の取り出し方法、燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発等に資するため、燃料デブリの性状を分析・推定するために必要な技術の開発等を行う。

実施内容

- これまで前例のないBWRの炉心溶融事故により生成された燃料デブリは、コンクリートとの反応、海水注入等の影響を受けて不均一組成を有し、難溶性及び多くの同重体・核分裂生成物を含んでいる。そのため、生成過程等、不確定要素を多く含む燃料デブリの性状把握に向けて分析・推定技術の開発を実施する。
- 現場試料の分析・評価を活用して、その性状の推定技術を開発し、燃料デブリ性状推定及び原子炉格納容器内部の損傷状況の表示手法を高度化するとともに、分析精度を向上する。
- 安全かつ効率的な燃料デブリ取り出し及び保管を実現するため、燃料成分の有無を簡易的に分析する技術及び非破壊で燃料デブリ中の燃料の含有量を把握する技術の開発を実施する。
- 本研究開発は事業者エンジニアリングと連携して実施し、成果は事業者の実施するエンジニアリングに活用される。

1. 燃料デブリ性状の分析・推定に必要な技術開発

- ① 燃料デブリの取り出しにおける臨界管理、保管管理等の安全評価を行う上で燃料デブリの性状を把握することは必須であるが、BWRの事故で生成した燃料デブリはこれまで前例がない。生成過程でのコンクリートとの反応、海水注入、温度履歴が不明であることに加え、難溶性及び多くの同重体・核分裂生成物を含み、困難を伴う分析となる。燃料デブリの分析技術の開発のため、今後、原子炉格納容器内から得られる、燃料デブリ及び堆積物等について、ホットラボ施設を有する研究機関において分析を行う。また、燃料デブリ及び堆積物等の分析結果、各号機の燃料デブリの生成メカニズム等を基に「燃料デブリ性状推定」を高度化し、燃料デブリ取り出しに係る各種の工程に情報を提供する。
- ② これまで原子炉格納容器の内部調査が行われてきたが、画像及び空間線量率のデータが主であり、視認されたどの部位に核燃料が含まれているかは不明である。効率的な燃料デブリ取り出しへと繋げるために、これまで得られた堆積物・付着物の分析や現場調査の結果を参考とし、材料間の溶融・破損試験と事故進展解析、溶融物の移行挙動の評価等を行い、燃料溶融、原子炉圧力容器の破損、溶融燃料のペDESTAL内への流下等の一連の過程を把握するとともに燃料の分布状況を推定する。また、原子炉格納容器内部調査で確認されたペDESTALの損傷を生じた主な事象とその進展過程の調査及び解析手法を検討する。得られた成果を効率的に表示、理解するために、3次元CGでの原子炉格納容器内の推定図を作成する。
- ③ 燃料デブリは不均一組成を有し、難溶性及び多くの同重体・核分裂生成物を含むことに加え、分析時には、前処理、各ホットラボ施設の装置等の影響を受けて、分析結果の分散の程度が大きくなりやすい。これまで、同一組成の模擬デブリを用いて、化学組成、構造解析等を行い、分析結果の信頼性や分析精度の向上に関する検討を実施してきたが、核分裂生成物の含有率、燃料の同位体組成等の核分裂後の燃料に起因する性状までは検討が進んでいない。スリーマイル原子力発電所2号機の事故で発生した燃料デブリを試料として用い、各ホットラボ施設において、これまでの模擬デブリの分析で培った分析工程、前処理手法が燃料デブリに対して有効であることを確認し、分析工程の効率化に反映する。また、今後取得する福島第一原子力発電所の燃料デブリとの比較データの取得し、双方の燃料デブリの共通点と相違点を参照しながら、燃料デブリの生成過程及び事故進展の推定、安全対策及び保管管理の検討に反映する。模擬デブリ分析の国際的なラウンドロビン試験にも参加し、我が国が燃料デブリの分析能力を十分に有していることを確認するとともに、海外研究機関の分析評価の知見を吸収する。
- ・ 上記、①～③については、国内及び世界の専門家との議論を行い、その知見も取り入れながら進める。

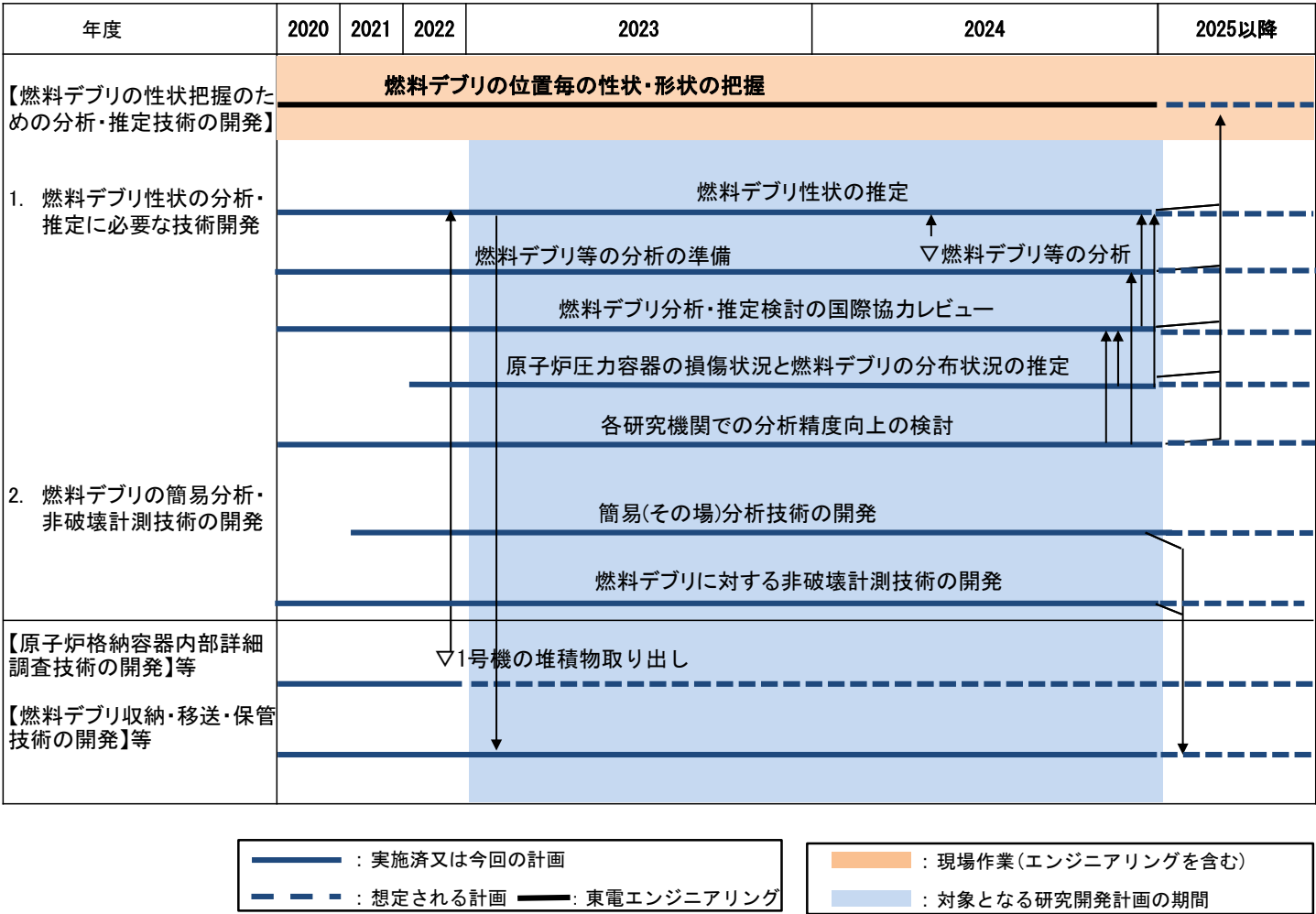
B2③: 燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発

2. 燃料デブリの簡易分析・非破壊計測技術の開発

- ① これまでの内部調査により、原子炉格納容器内の構造物に溶融物の付着を確認している。燃料デブリ取り出し作業時に溶融物に燃料が含まれていることを確認するためには、その都度、ホットラボ施設へ輸送して分析しなければならない。ホットラボ施設への輸送は時間とリソースを要し、迅速な取り出し作業を阻害することになる。ホットラボ施設への燃料デブリの輸送負担を低減するため、原子炉格納容器内の構造物に付着・侵入した燃料成分の有無を迅速に確認する簡易(その場)分析技術を開発する。具体的には、使用済燃料等を用いて、放射線レベルが高い試料に対する分析の実績・知見を蓄積するとともに、検出効率の向上、測定時の汚染対策等の燃料成分検出のための高度化を行う。また、湿度、粉じん等の影響を受ける現場環境において長期間安定的に作動するための高度化を行う。
- ② 燃料デブリは溶融時に中性子吸収材を含有しているため、外部から中性子を入射し、核分裂反応を誘起させて放出する放射線を計測する手法では、入射した中性子が中性子吸収材に吸収されてしまい、十分な核分裂反応を生じない可能性がある。また、溶融時にセシウムを放出しているため、セシウムからのガンマ線を基に燃焼度を推定する手法の適用が困難である。このような燃料デブリ固有の特徴のために、再処理施設等で用いられている非破壊計測の手法をそのまま適用することに懸念がある。そこで、燃料デブリの臨界管理、保管管理等に資するデータを取得し、原子炉格納容器より取り出される物質を燃料の含有量に応じて迅速に仕分けを行うため、燃料の質量を非破壊で計測可能な技術の現場適用を目指して研究開発を実施する。具体的には、非破壊計測技術を燃料デブリに対して適用する場合の仕分けシナリオ及び計測システムの概念の構築、評価手法を検討する。さらに、燃料デブリの計測をシミュレーション再現する計算モデルを作成するとともに、燃料デブリへの適用性を確認するため、既存装置あるいは小型装置、及び計測を阻害する要因を含んだ模擬燃料デブリを用いた計測試験を実施する。

目標達成を判断する主な指標の設定

- ・ 燃料デブリの分析の準備及び分析評価(2024年度)
- ・ 最新の情報を踏まえた「原子炉格納容器内の損傷状況の推定」及び「燃料デブリ性状推定」の高度化(2024年度)
- ・ スリーマイル2号機デブリの分析評価(2024年度)
- ・ 簡易分析手法による測定実績の拡充と実現性の評価(2024年度)
- ・ 非破壊計測の技術開発でのシミュレーション結果、計測試験結果、及び計測装置の概念検討結果のとりまとめ(2024年度)



B3①: 燃料デブリ取り出し工法の開発

目的

燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けて、取り出し工法について作業の成立性に関し必要となる要素技術開発及び試験を実施し、現場適用性を評価する。

実施内容

○気中工法では燃料デブリ取り出しが高線量下・高汚染下、不確定要素を含む環境条件での遠隔作業となることを前提に、長期間の燃料デブリ取り出しの作業継続性に重要となる技術要素の課題を検証するため、大型搬送装置等のオペフロ上部設備の開発、充填安定化技術、加工時落下対策技術等の技術開発を行う。

○燃料デブリ取り出し工法検討において埒上に上がった冠水工法（船殻工法）を含めその他の工法について、課題の検討を進め、必要な技術課題の開発を実施する。

○本研究開発は事業者エンジニアリングと連携して実施するとともにオペレータ視点を反映し、成果は事業者の実施するエンジニアリングに活用される。

1. 気中上取り出し工法の開発

(1) 大型搬送装置

炉内から取り出した大型の構造物を搬送するには、高線量、高汚染の重量物を遮へいし、汚染の拡散防止を図って運搬することが必要となる。これまで、従来の大型搬送技術の調査検討、搬送方式の選定、装置の構造検討等を行ってきた。今後は、閉じ込めを考慮した大型搬送機構、隔離境界となる連絡通路ゲート部等について概念検討を実施し、試作による検証を行い、現場適用性を評価する。

(2) 充填安定化技術

損傷した炉内構造物を充填安定化させることにより解体作業時の安全性、効率を向上する方法を検討する。これまで基礎試験による充填材の特性把握等を行ってきた。今後は、損傷状況・炉底部開口等に有効な充填安定化方法、装置構成、充填手順などについて概念検討を実施し、模擬体による要素試験を行い現場適用性を評価する。

(3) 落下対策技術

デブリ加工時の破片や、振動等により重量物がペDESTAL底部へ落下する可能性があることから、落下による再臨界防止及びダスト飛散抑制、機器損傷等防止のため、落下対策を実施する必要がある。落下対策の概念検討を実施し、要素試験により成立性の検証と現場適用性を評価する。

(注記)

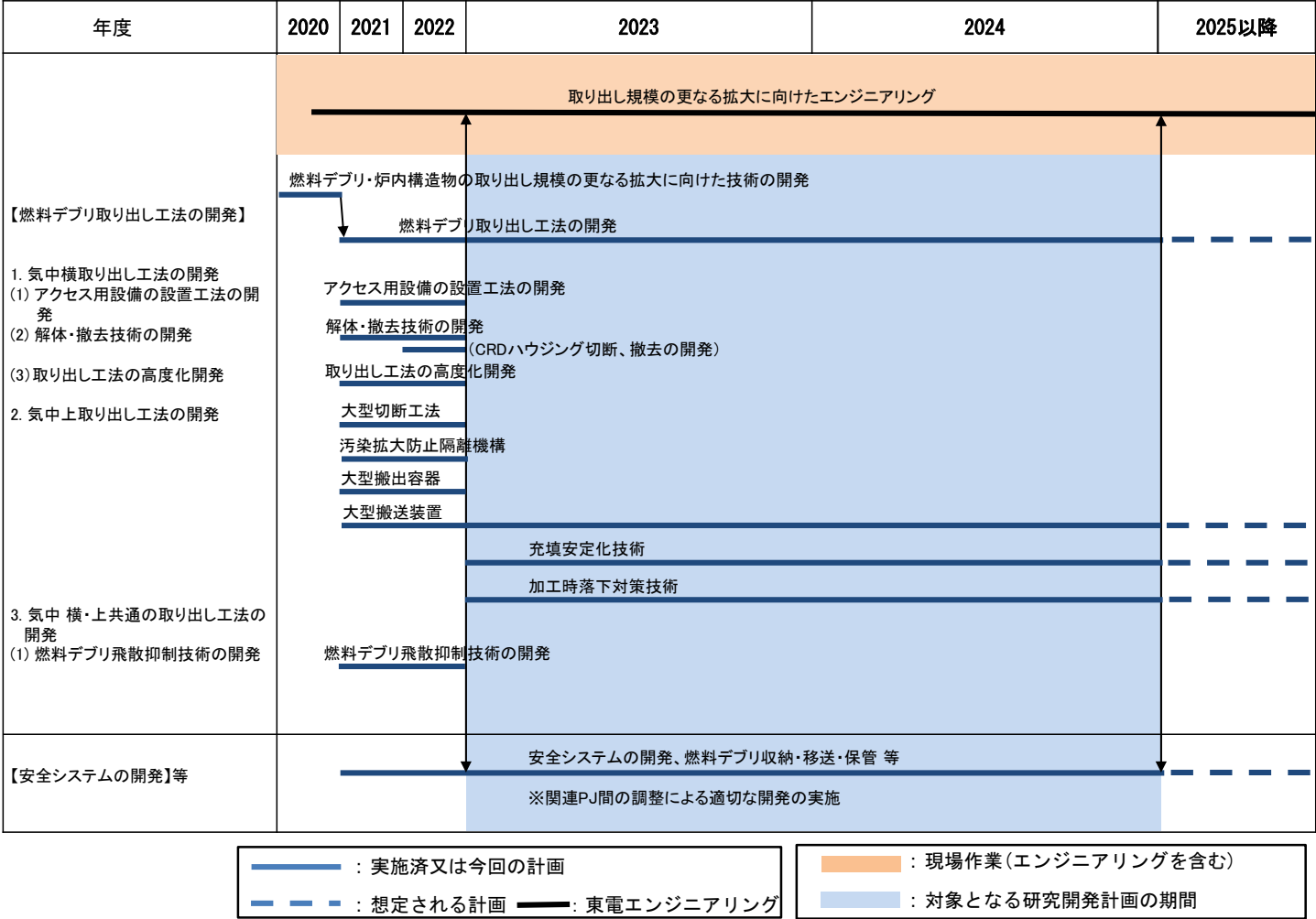
気中工法の開発においては、以下について取り扱い性、保守方法を考慮した開発を行う。

- ・高線量エリアに設置することから、遠隔での保守が原則となる。
- ・装置の汚染と必要な除染に配慮する必要がある。
- ・保守を行うための作業エリアが限られる。
- ・保守作業によって発生する廃棄物を極力抑える必要がある。
- ・臨界監視装置の設置、取扱いに配慮する必要がある。

目標達成を判断する主な指標の設定

- ・大型搬送装置の概念設計(2023年度)、試作による検証と現場適用性の評価(2024年度)
- ・充填安定化技術の概念検討、試験計画(2023年度)、試験による検証と現場適用性の評価(2024年度)
- ・落下対策技術の概念検討(2023年度)、試験による検証と現場適用性の評価(2024年度)

(目標工程)B3①: 燃料デブリ取り出し工法の開発



B3②: 安全システム(1/2)

目的

燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けて、作業時の安全を確保するために必要となる要素技術開発及び試験を実施する。

実施内容

- 燃料デブリ取り出しは、高線量下・高汚染下であることに加え、環境条件についても不確定要素を含む作業である。取り出し規模の更なる拡大に向け、安全システム及び安全監視・評価に必要なデータ取得と分析手法の開発を行う。
 - 本研究開発は事業者エンジニアリングと連携するとともに事業者のオペレータ視点を反映し、成果は事業者の実施するエンジニアリングに活用される。
 - 1. 安全システムの開発(液体処理システム)
 - 1. 1 α核種除去技術の開発
燃料デブリから循環冷却水中に溶出すると考えられる溶解性α核種の除去技術について、これまで、模擬液を用いた要素試験を行い、実機への適用性を評価してきた。今後は、要素試験等を行い、溶解性α核種に加えてコロイド状α核種にも対応し得る、より合理的な処理方法の開発を行う。
また、液体処理システムの実機への適用性に係わるリスク低減のため実液(原子炉建屋内滞留水)を使用する試験の準備を行う。
 - 1. 2 二次廃棄物処理技術の開発
液体処理システムで発生する二次廃棄物(スラッジ等)で想定される性状や取扱いを踏まえ、燃料デブリ収納・移送・保管プロジェクトや固体廃棄物処理・処分プロジェクトと連携し、実際の運用及び収納缶への収納を考慮した前処理方法の検討を行って来た。今後は、要素試験等を行い、液体処理システムで発生するスラッジに対応し得る、より合理的な処理方法の技術開発を行う。
 - 2. ダスト飛散率データ取得
燃料デブリ取り出し作業にあたり、燃料デブリの切削時のダスト飛散に関連した安全評価技術の開発のため、これまで乾燥条件下でのダスト飛散率データを複数の工法について取得してきた。このデータ取得成果を踏まえ、燃料デブリ切削時に想定される環境下でのダストの発生と移行に着目したデータを更に取得・整備し、その挙動に関する知見を拡充する。
通常作業時および事故時の安全評価に資するため、想定される環境(湿潤条件等)に適用可能なダスト飛散率データ取得試験を複数の工法について行い、ダスト飛散挙動の把握を進める。試験は、評価条件を追加し、燃料デブリを模擬した試験体(コールド材※及びウラン含有模擬MCCIデブリ等)を用い実施する。得られた試験データは、将来の燃料デブリ切削時の安全評価の技術的根拠として体系的に整備する。
- ※コールド材: ウランを含有しない試験体。燃料デブリと物性が類似するものを選定しており、広範な切削条件の試験の実施を可能とするために用いる。

B3②: 安全システム (2/2)

3. 被ばく線量評価のための分析手法の技術開発

廃炉作業においては多様な核種を対象とした多数の作業者のモニタリングが必要となることから、十分な精度と迅速性のある内部被ばく線量評価のための手法として、これまで内部被ばく線量評価プログラムの概念の検討及びバイオアッセイ迅速化、ろ紙試料測定精度向上等の技術開発を進めてきた。

燃料デブリ取り出し等の廃炉作業時の、 $\alpha \cdot \beta$ 核種の内部とりにみリスクに備えるために、今後は、バイオアッセイや体外計測(肺モニタリング等)を用いた総合的な内部被ばく線量評価体系の整備及び標準の開発、並びに内部被ばく線量の測定・評価に係わる技術開発の継続により、内部被ばく線量評価プログラムの開発を進める。

目標達成を判断する主な指標の設定

- ・コロイド状も含めた α 核種除去技術合理化のための要素試験等の実施及び実機適用性評価、並びに実液を用いた試験の準備(2024年度)
- ・二次廃棄物(スラッジ等)処理システム合理化のための要素試験等の実施及び実機適用性評価(2024年度)
- ・燃料デブリ切削時の湿潤条件を含むダスト飛散率データ取得試験の実施と評価技術の開発(2024年度)
- ・廃炉プロセスを考慮した内部被ばく線量評価プログラムの開発(2024年度)

(目標工程)B3②: 安全システム

年度	2020	2021	2022	2023	2024	2025以降
【安全システム】 1. 安全システムの開発(液体処理システム) 1. 1 α 核種除去技術の開発 1. 2 二次廃棄物処理技術の開発 2. ダスト飛散率データ取得 3. 被ばく線量評価のための分析手法の技術開発 【燃料デブリ取り出し工法の開発】 【燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発】等	取り出し規模の更なる拡大に向けたエンジニアリング					
	燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発					
	安全システムの開発(液体処理システム)					
	要素試験の実施、 α 核種除去技術の合理化検討、実液試験の準備					
	要素試験の実施、処理技術の合理化検討					
	燃料デブリ切削時のダスト飛散率データ取得試験の実施					
	被ばく線量評価のための分析手法の技術開発					
	燃料デブリ取り出し工法の開発、燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発 等					

— : 実施済又は今回の計画

- - - : 想定される計画

— : 東電エンジニアリング

— : 現場作業(エンジニアリングを含む)

— : 対象となる研究開発計画の期間

B3④： 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発

目的
燃料デブリの取り出しから保管に関わるシナリオを確立するために、取り出した燃料デブリを安全、確実かつ合理的に収納、移送、保管するためのシステムを開発する。

実施内容
○不均一組成を有する燃料デブリの種々の回収形態(塊～粉体、スラリー・スラッジ状)に対応でき、放射線分解で発生する可能性のある水素や核燃料物質による臨界性を踏まえ安全、確実、合理的に収納、移送を行い、長期保管できるシステムを構築するための技術開発を行う。なお、関連PJと調整を図りながら開発を行うものとする。
○本研究開発は事業者エンジニアリングと連携するとともに事業者のオペレータ視点を反映し、成果は事業者の実施するエンジニアリングに活用される。

1. 粉状及びスラリー・スラッジ状燃料デブリの取り扱い技術の開発

①水素発生予測法の高度化

- ・2022年度実施の机上検討で得られた粉状及びスラリー・スラッジ状燃料デブリ(以下、粉状デブリ)からの水素発生に影響を及ぼす因子の影響度合の評価結果、及び水素ガス発生速度予測法の検証のため、検証実験を行う。その結果を踏まえて水素ガス発生予測法の高度化を行う。
- ・水素ガスだまりの発生挙動やその放出時の影響等の放出特性に関する2022年度の机上検討結果について、燃料デブリの種々の混合物の影響も踏まえて実験による検証を行う。

②収納缶のフィルタ寿命評価

- ・2020/2021年度に実施した収納缶フィルタの性能に影響する故障シナリオの選定と、評価に必要な試験方法の検討、2022年度の実施した収納缶のフィルタに蓄積する粉状デブリ量の検討の成果を基に、保管までのプロセスと保管中における収納缶フィルタの劣化事象や、故障シナリオの発生の可能性や安全機能に対する影響の詳細な評価を行う。
- 更に、劣化及び故障事象を模擬したフィルタの試験を行い、フィルタ劣化及び故障が収納缶の安全機能(例えば水素放出

性、閉じ込め機能等)への影響を検証するとともに、劣化、故障の緩和/回避策を検討する。

③収納方法・収納容器の再評価

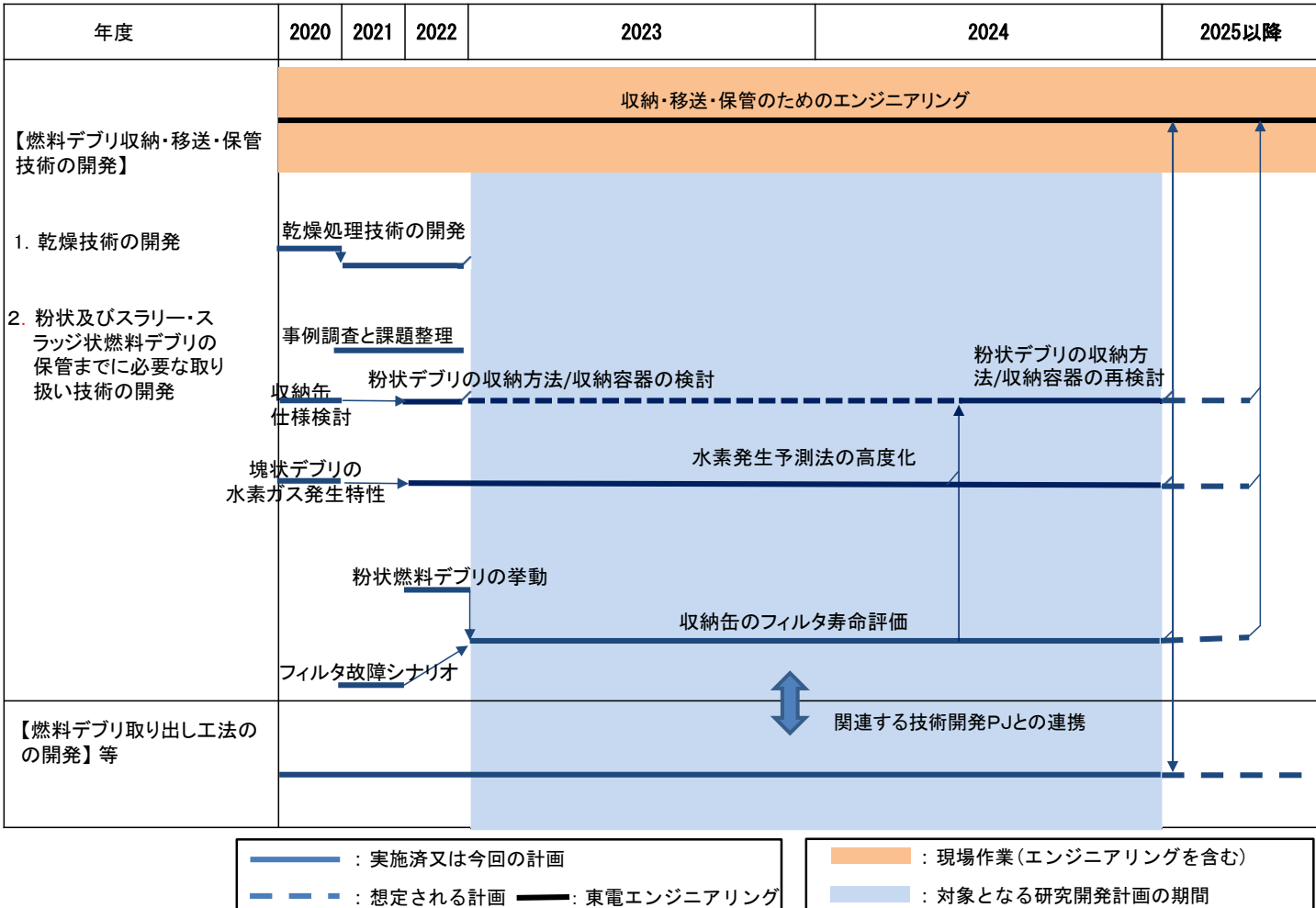
- ・上記①、②の成果を踏まえ、2021年度の粉状燃料デブリの収納方法・収納容器の検討結果を再評価する。

※関連する技術開発PJ
「燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発」、「燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発」及び「固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発」

目標達成を判断する主な指標の設定

- ・水素ガス発生予測法、及び水素ガス発生挙動の高度化の検討と、検証試験計画の立案および試験準備(2023年度)、試験の実施とそれを踏まえた予測法の高度化(2024年度)
- ・収納缶フィルタの劣化、故障シナリオと影響の詳細評価と、検証試験計画の立案/準備(2023年度)、試験による影響の検証と劣化、故障の緩和/回避策の検討(2024年度)
- ・上記成果を踏まえた収納方法/収納容器再評価(2024年度)

(目標工程)B3④： 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発



B3⑤：福島第一原子力発電所廃止措置統合管理のための支援技術の開発

燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大を含む福島第一原子力発電所廃止措置の統合管理を円滑に実施するのに必要な支援システムに関わる技術開発を行う。

実施内容

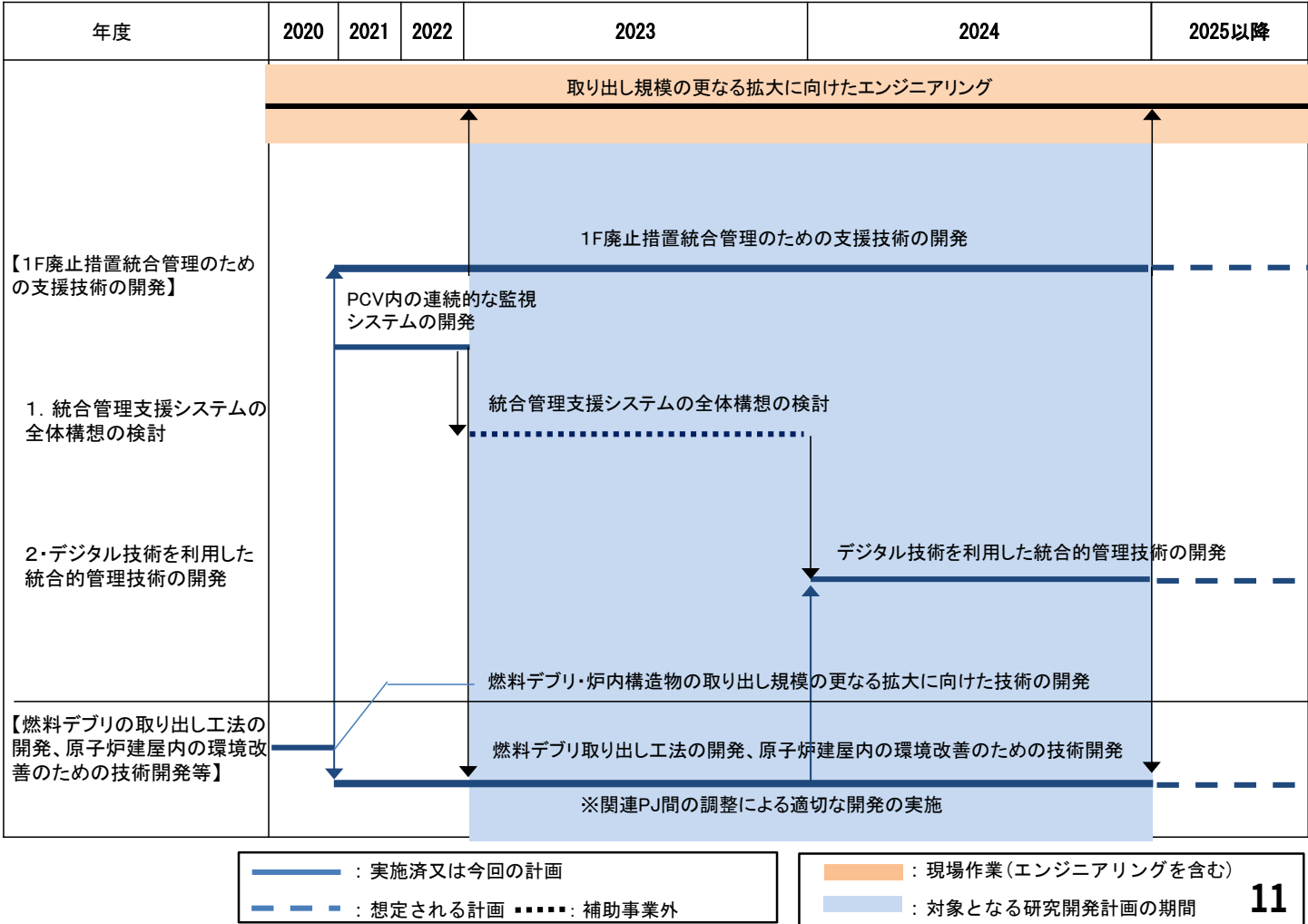
- 燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の拡大を含む福島第一原子力発電所（1F）廃止措置には、高線量・高汚染下、不確定要素を含む環境条件での遠隔作業でスループットを確保する必要がある。そのため、取り出し期間における環境変化を長期的、且つ連続的に監視しつつ、取得した監視データと遠隔装置の実際の操作で得られるトラブルなどを含む運転データを統合し共有化することで、的確、迅速な現場対応を可能とする情報管理システムについてデジタル技術を利用した技術開発が有効である。1F廃止措置の長期における安全で、効率的、継続的な統合管理を支援するための要素技術として「燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発」の成果を踏まえ、デジタル技術を利用した統合的管理技術の開発を実施する。
- 本研究開発は事業者エンジニアリングと連携するとともに事業者のオペレータ視点を反映し、成果は事業者の実施するエンジニアリングに活用される。

1. 統合管理支援システムの全体構想の検討
燃料デブリ取り出しは、「試験的取り出し・PCV内部調査」、「段階的に規模を拡大する取り出し」、「取り出し規模の更なる拡大」の段階で得られる様々な情報を共有し、統一された認識のもとに安全確保を第一として進めることが重要である。そのためには、情報を認識しやすい手段に統合し、データ管理、運転等を支援するシステムの整備が必要となる。
これまで、安全要求と作業継続性を考慮したリスク検討による監視項目の整理、現場適用性を考慮した監視方法の概念検討、課題整理を行ってきた。1F廃止措置を効率的に進めていく上では、監視情報に加えて、設計、開発、据付、運転等のあらゆる段階で情報を統合化、共有化するデジタル技術の導入が効果的と考えられる。
そのため、デジタル技術導入による効率化等の改善効果について現場ニーズ及び事例調査等を踏まえた検討を行い、システムへの要求事項を整理し、統合管理支援システムの全体構想を検討して統合的な管理技術の導入に向けた課題整理を行う。

2. デジタル技術を利用した統合的管理技術の開発
1F廃止措置を効率的に進めていく上で、情報を統合化、共有化するデジタル技術の導入が効果的と考えられる。
1F廃止措置に必要な作業計画、遠隔操作、状態監視、設備保全など様々なタスクに対する支援システムの開発が必要である。また、長期間の運用中に必要となる新たな種類のデータ、システムに対応する拡張性を有し、柔軟な更新に対応するプラットフォームの開発も重要である。さらには、収集した膨大な情報・データを処理、変換して、プラットフォームに接続する種々の支援システムで利用するためのデータ管理システムの開発も重要である。
まず、現場ニーズの優先度に応じたタスク支援システムの開発を行い、次に、それに係るプラットフォーム、データ管理システムを含む統合管理支援システム構築について具体的な検討、試作を行うことにより、対象としたタスクに対する適用性を評価することで、全体システムを構築するための方法及び課題の整理を行う。

目標達成を判断する主な指標の設定
・統合管理支援システムの全体構想の検討を踏まえて2024年度に指標を設定する

（目標工程）B3⑤：福島第一原子力発電所廃止措置統合管理のための支援技術の開発



C: 固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発(1/2)

目的

2021年度に示した処理・処分方策とその安全性に関する技術的見通しを踏まえ、物量低減の更なる可能性を検討するとともに、固体廃棄物^{*1}の特徴に応じた廃棄物ストリームの抽出のため、性状把握の進展を反映しつつ、処理・処分方策の選択肢の創出とその比較・評価を行い、固体廃棄物の管理全体での適切な対処方策の提示に向けた検討を進める。

実施内容(全体像)

- I. 固体廃棄物管理全体へ反映するため、分析データの取得・管理をさらに進めるとともに、性状把握の効率化に取り組む。
 - II. 安全かつ合理的な保管・管理のため、物量低減のための減容・再利用技術に関する開発を行う。
 - III. 固体廃棄物の特徴に応じた廃棄物ストリームの抽出に必要な技術的な知見を得るため、処理・処分に関する技術開発を行う。処理技術に関し、低温処理の適用性に関する課題の検討、各種処理技術により作製された固化体の安定性に関する検討、低温処理技術の適用範囲の拡大に資するための中間処理技術に関する検討を行う。処分技術に関し、処分概念構築に必要な情報・知識を調査するとともに、処分施設における重要事象進展のストーリーボードの構築及び安全評価手法の改良を開始する。
- 本研究開発は事業者エンジニアリングと連携して実施し、成果は事業者の実施するエンジニアリングに活用される。

I. 性状把握

1. 分析データの取得・管理等

廃棄物分類に応じた分析核種と必要な分析精度を検討し、保管管理の適正化等を目的とした東京電力による固体廃棄物の分析計画を考慮の上、中長期の分析計画の見直し・年間分析計画作成を行い、それに従って分析データの取得・評価・管理等を行う。

燃料デブリ取り出しに伴い発生する廃棄物等の放射線量等の簡易評価技術及びC-14、I-129等の分析が困難でかつ処分の安全評価上の重要核種の分析技術の開発を行う。

試料前処理の合理化・自動化等により簡易・迅速化された分析技術を用いた分析法の福島第一原子力発電所で発生した廃棄物への適用性を評価した上で、その標準化を検討する。

セシウム吸着塔の実機から採取した吸着材について、高線量による制約を考慮して、その分析方法を検討する。

得られた分析データ及びその試料情報についてのデータベースの整備・運用を行う。

2. 性状把握の効率化

Data Quality Objectives (DQO) プロセス^{*2}と統計論的方法を組み合わせた分析計画法の試行を継続・適用例を蓄積し、手法の改良に取り組む。

統計論的インベントリ推定方法について、新たに得られる分析データを反映し、移行モデルの改良、核種移行パラメータの不確かさの低減に取り組む。また、震災前廃棄物の事故に伴う性状変化について検討を行う。本手法を用いて、廃棄物分類ごとに、処分安全評価に必要な廃棄物インベントリのデータベースを整備する。また、デブリ取り出しに伴い発生する廃棄物のインベントリの推定方法について検討する。

代表的な廃棄物についての廃棄体確認までに想定されるパラメータとその不確かさについて検討する。

II. 保管・管理

減容・再利用のため汚染金属を溶融・除染する際の核種分配挙動及び溶融処理後の検認手法について検討を行う。

C: 固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発(2/2)

III. 処理・処分

1. 処理技術

低温処理技術の適用に関し、処理時の安全性を含めて廃棄物ごとの課題を評価・整理し、その解決策について検討する。固化可能性を判断するスクリーニング手法について、2021年度までの成果を踏まえ、様々な固体廃棄物への一般化に向けて適用範囲の拡張を検討する。また、フェロシアン化合物を含む固体廃棄物について、低温処理技術の適用性を検討する。炭酸塩スラリーを対象に、低温処理の実処理(200リットル規模)への適用性を評価する。

高線量ガレキ類を一括固化する技術及び脱水処理後のスラリーを保管容器ごと処理する技術等、柔軟かつ合理的な処理技術の可能性について検討する。

各種処理技術により作製された固化体について、その安定性(浸出特性、長期安定性、放射線影響等)について検討・評価を行う。

汚染金属を溶融処理した際に発生するスラグについて、その処分の検討に必要な、核種の浸出率等のデータを収集する。

低温処理技術の適用範囲の拡大に資するため、熱分解処理等の中間処理技術について、適用可能な技術を検討する。

2. 処分技術

① 処分概念提示に必要な情報・知識の調査

処分概念に求められるニーズへの対応策構築のため、廃棄物ストリームの検討が進んでいる廃棄物について、必要な情報・知識を調査する。

② 固体廃棄物処分の安全評価技術の信頼性向上の試行

固体廃棄物処分に関して重要なシナリオ抽出のために、固体廃棄物の特性を踏まえ、処分施設における重要事象進展のストーリーボード構築に着手する。また、①で創出される処分概念に適用するため、評価手法の改良を開始する。

目標達成を判断する主な指標の設定

I. 性状把握

- ・ 年間の分析計画の作成と得られた分析データ及び試料情報のデータベースへの蓄積(2023年度)
- ・ 燃料デブリ取り出しに伴い発生する廃棄物等の非破壊測定技術及び分析困難かつ処分安全評価上の重要核種の分析技術の開発成果の提示(2023年度)
- ・ 簡易・迅速化された分析技術を用いた分析法の標準化に関する検討成果の提示(2023年度)
- ・ セシウム吸着塔実機から採取した吸着材の分析方法の検討結果の提示(2023年度)
- ・ DQOプロセスに基づく分析計画法の試行結果と改善すべき課題の提示(2023年度)
- ・ 統計論的インベントリ推定方法に関する検討結果(不確かさの低減結果、震災前廃棄物の事故に伴う性状変化等廃棄物分類ごとのインベントリ推算値等)の提示(2023年度)
- ・ 代表的な固体廃棄物に対する廃棄体確認までの想定されるパラメータの不確かさの提示(2023年度)

II. 保管・管理

- ・ 汚染金属溶融時の核種分配挙動に関する知見及び検認手法に関する課題の提示(2023年度)

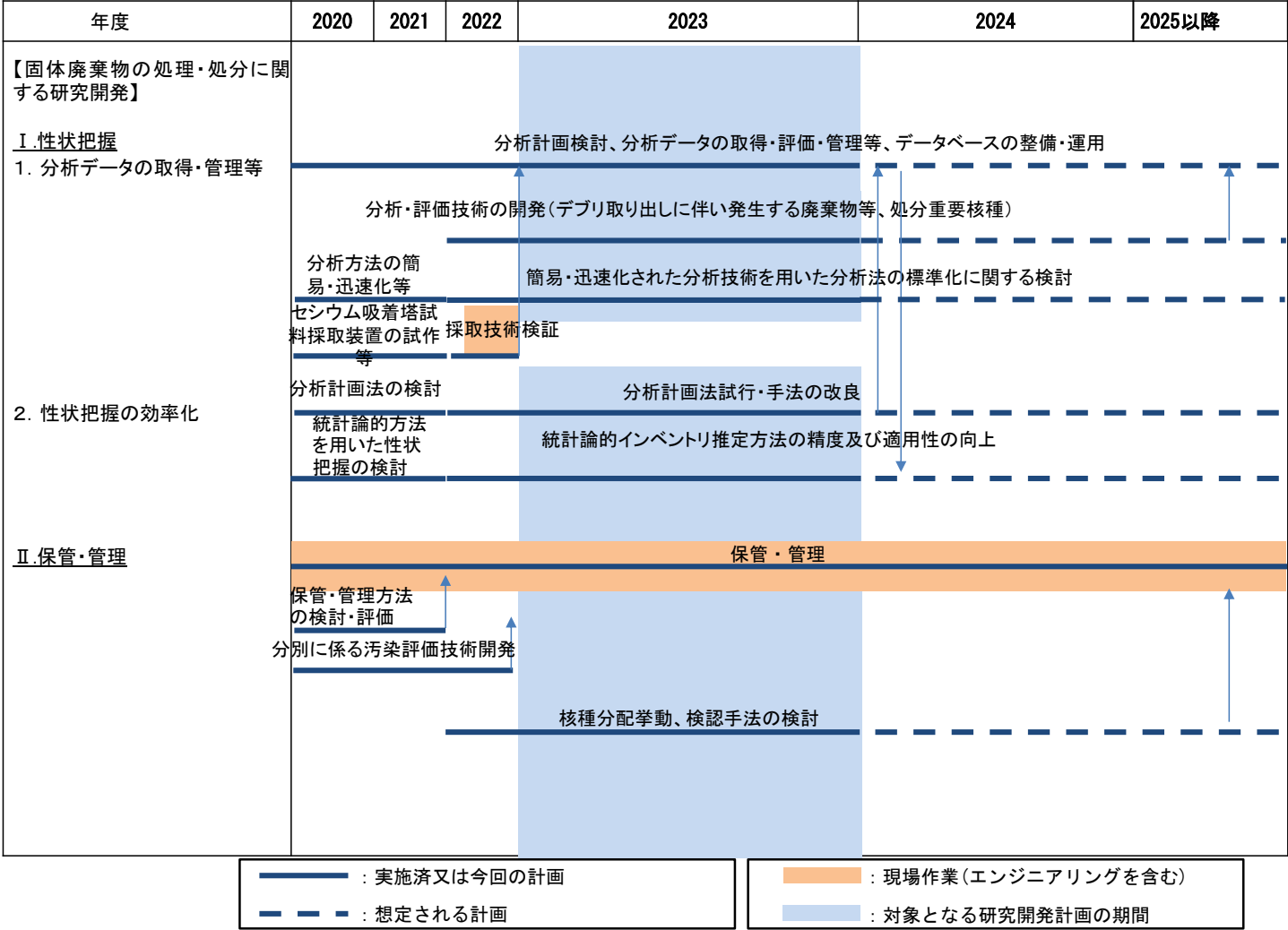
III. 処理・処分

- ・ 低温処理の適用性に関する検討結果の提示(2023年度)
- ・ 炭酸塩スラリーを対象とした低温処理の実処理への適用性評価結果(2024年度)
- ・ 固化体の安定性に関する検討・評価結果の提示(2023年度)
- ・ 柔軟かつ合理的な処理技術の可能性についての検討結果の提示(2023年度)
- ・ 溶融処理時に発生するスラグの処分に必要なデータの収集結果の提示(2023年度)
- ・ 中間処理技術の候補の提示(2023年度)
- ・ 処分概念に求められるニーズへの対応策構築のため、適切な処分概念の要件案、及びその要件案充足に必要な情報・知識の優先順位に応じた提示(2023年度)
- ・ 固体廃棄物の処分施設での重要事象の進展を記述するストーリーボードのプロトタイプ構築、及び上記で創出される固体廃棄物に適した処分概念についての評価方針案の立案、評価方針案に基づく評価モデル構築及び評価パラメータ設定の試行(2023年度)

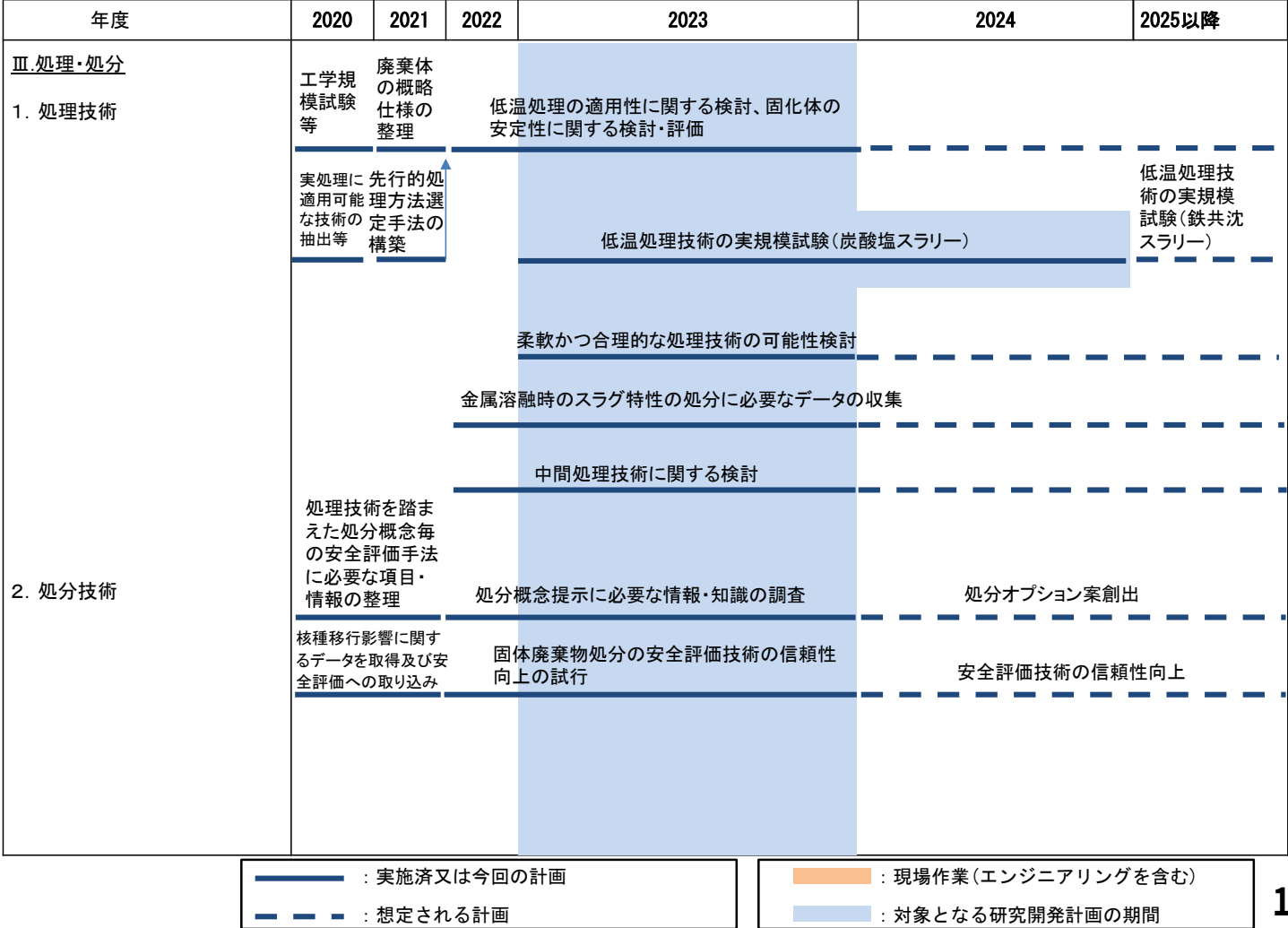
^{*1} 固体廃棄物: 事故後に発生したガレキ等や水処理二次廃棄物及び事故以前から福島第一原子力発電所に保管されていた放射性固体廃棄物を含めて、「固体廃棄物」という。

^{*2} 米環境保護庁により開発された、意思決定のために分析試料のサンプリングを計画する方法を用いた手法

(目標工程)C: 固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発(1/2)



(目標工程)C: 固体廃棄物の処理・処分にに関する研究開発(2/2)

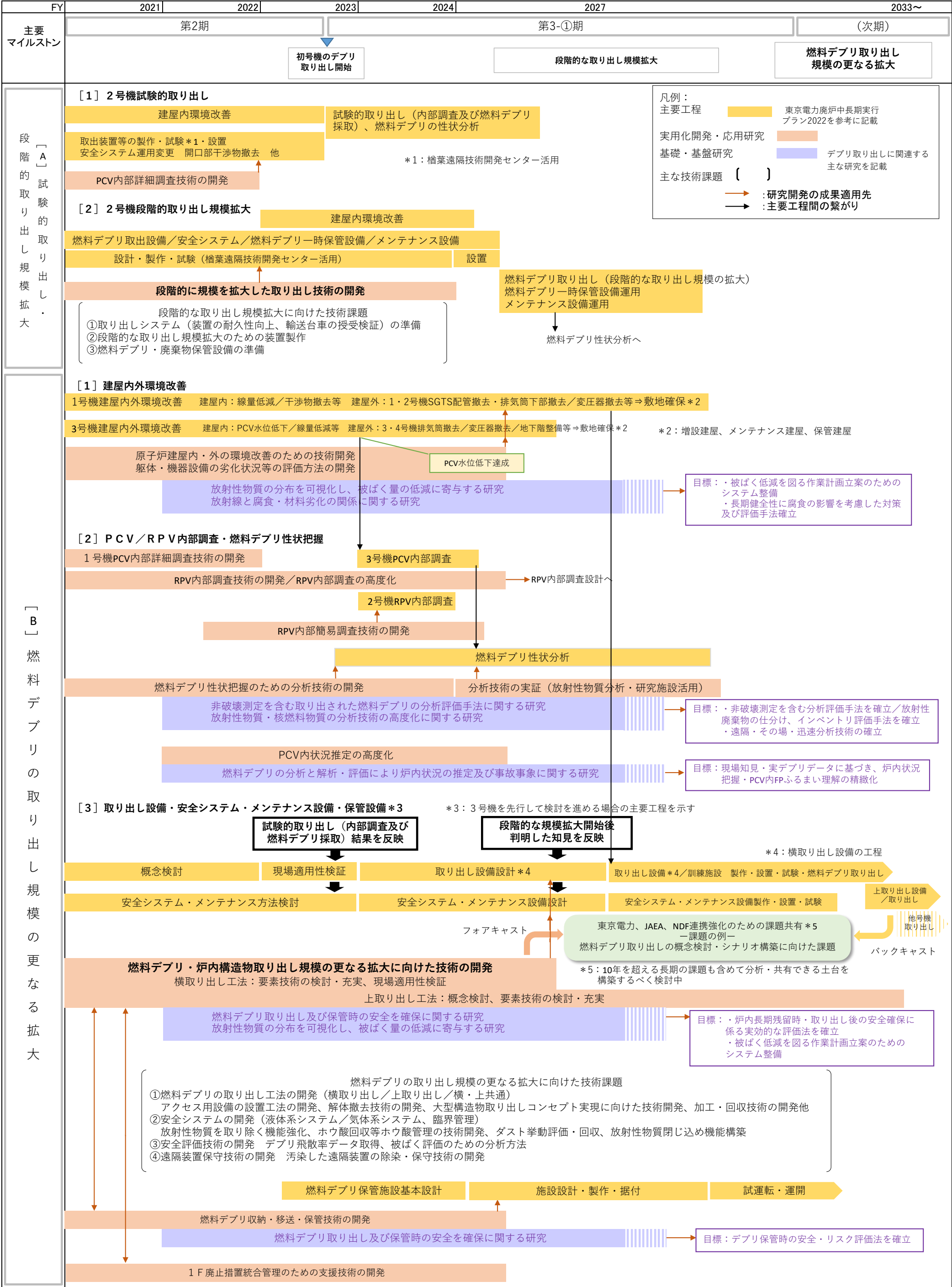


(参考 1)

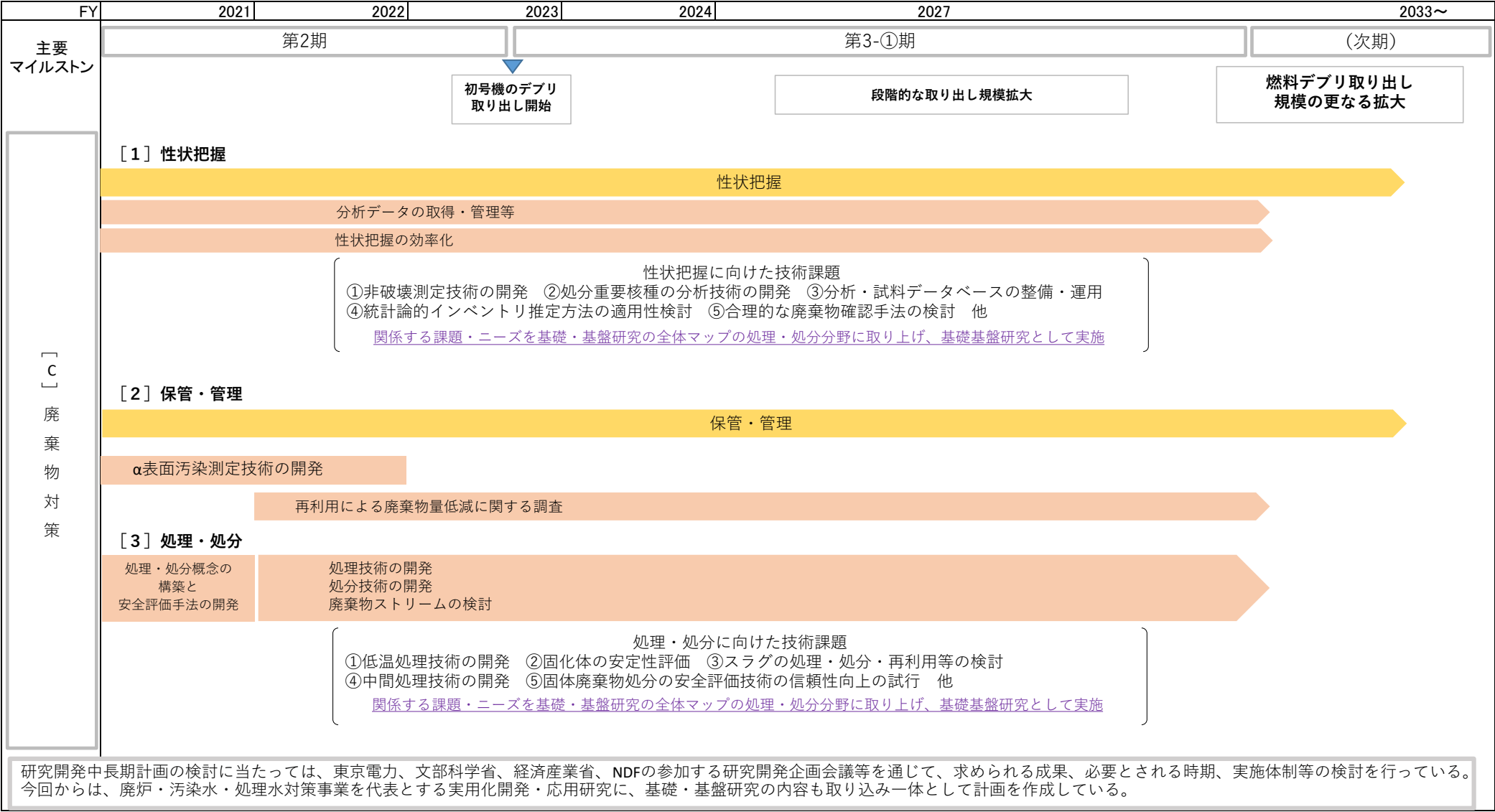
研究開発中長期計画

※研究開発中長期計画は、NDFが「中長期ロードマップ」及び「技術戦略プラン」並びに東京電力HDの「廃炉中長期実行プラン」に基づき、今後 10 年程度を見通して必要となる研究開発項目・技術課題を抽出し、さらに研究開発の達成時期を設定し、東京電力HDと共同で計画としてまとめたもの。2022 年度の技術戦略プランに掲載。

研究開発中長期計画
一東京電力福島第一原発の廃止措置【燃料デブリ取り出し】等に向けた主要工程と主な研究開発の取組み



研究開発中長期計画
一東京電力福島第一原発の廃止措置【燃料デブリ取り出し】等に向けた主要工程と主な研究開発の取組み一



(参考 2)

2022 年度研究開発プロジェクトの進捗状況

燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術の開発 (2023年2月末時点における進捗状況)

【IRID・MHI】

福島第一原子力発電所の原子炉格納容器内の燃料デブリの取り出しを実現するための取り出しシステムおよび装置を開発中。そのうち、取り出し用アクセス装置のアーム(前半部、後半部)、エンクロージャは試作機を製作。燃料デブリ回収装置、ダブルドア、アクセスルート構築装置及び遠隔輸送台車は試作機の検証試験を完了し、アームやエンクロージャとの組合せ検証を実施中。

実施内容及び成果

1. 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術の開発計画、取り出し計画の策定

- ① 2020年度までに策定した燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術(取り出し用の装置、システム等)の開発計画に対して、コロナ禍の影響による開発の遅延をスケジュールに反映した。
- ② PCV内部詳細調査・試験的取り出し用アクセス装置の製作・組合せ試験で得られる情報を踏まえて、本事業の開発計画への反映時期、反映事項、具体的な内容を整理した。

2. 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

以下の装置、システムを開発中。

① 取り出し用アクセス装置(アーム・エンクロージャ等)

- a. アーム前半部は、取り出し用アームに搭載する要素技術として「水平オフセット機構を備えたテレスコアーム」の製作を完了(図1)。工場検証試験にて、ほぼ目標通りの動作範囲、速度、機能が得られていることを確認した。
- b. アーム後半部は、英国でキャリッジ(図2)、日本でブームリンク(図3)を製作し、英国にて組立完了。検証試験準備中。
- c. 取り出し用エンクロージャ本体を国内で製作し、2021年度に完成したダブルドアシステムを取り付けた(図4)。また双腕マニピュレータのケーブル一括着脱機構を製作し、単体での性能を確認した(図5)。

② 取り出し用アクセス装置と他の装置、システムとの組合せ試験

- a. アーム前半部と燃料デブリ切削・回収装置、中性子モニタの組合せ試験を実施した。
- b. エンクロージャとX-6ペネ接続構造、燃料デブリ収納容器の遠隔輸送台車や双腕マニピュレータを用いた組合せ試験を実施した。

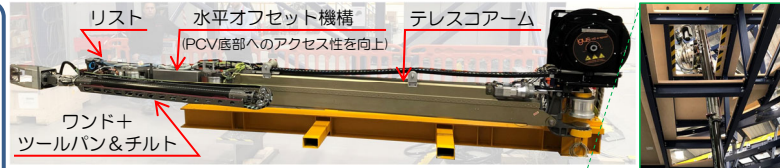


図1 完成したアーム前半部と試験状況



図2 キャリッジ



図3 ブームリンク

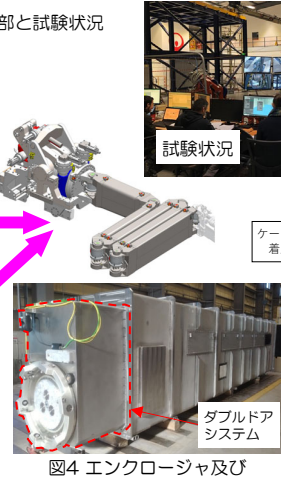


図4 エンクロージャ及びダブルドアシステム

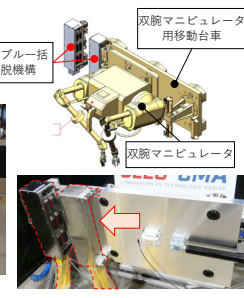


図5 ケーブル一括着脱機構

今後の方向性

- ・単体での検証を終えた装置について、取り出し装置全体の組合せ試験について検討すると共に、機器等の改良を加えていく。

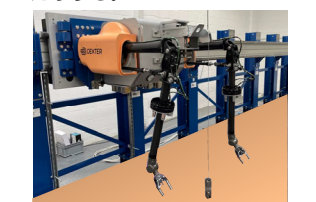
燃料デブリ収納容器の遠隔輸送台車

- ・収納容器に回収した燃料デブリを、エンクロージャから原子炉建屋の出入口近傍まで運び出すための遠隔輸送台車。



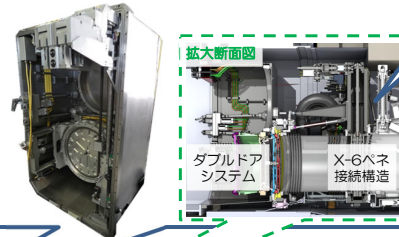
双腕マニピュレータ

- ・エンクロージャ内に設置され、各種ツールを取り出し用アクセス装置に付け外したり、デブリを運んだりする。



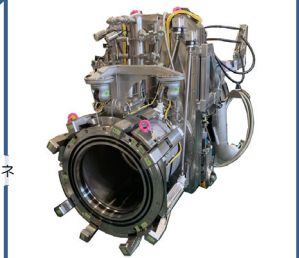
ダブルドアシステム

- ・エンクロージャの前方に搭載され、X-6ペネ接続構造との連結や、エンクロージャとPCV内雰囲気との隔離などを行う



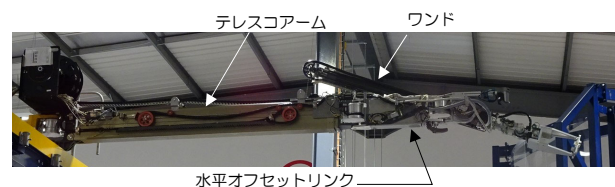
X-6ペネ接続構造

- ・X-6ペネに遠隔で接続し、X-6ペネとエンクロージャ間のアクセスルートを構成する



取り出し用アクセス装置(アーム前半部)

- ・X-6ペネを介してPCV内部にアクセスする装置。
- ・先端に燃料デブリ切削・回収装置や中性子モニタを搭載し、目的に応じて先端のツールを交換できる構造。
- ・テレスコアーム、水平オフセットリンク、ワンド等から構成され、これらが伸縮・屈折することで、周辺構造物の干渉を回避しながらPCV内部へアクセスする。



中性子モニタ(臨界近接監視用)

- ・デブリ取り出しに伴う切削中の臨界事故を防止するための中性子モニタ。切削前に使用する予測監視用と、切削中も使用する常時監視用がある。

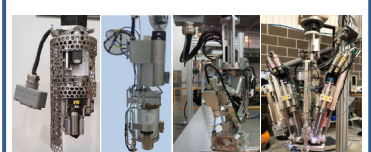
予測監視用



常時監視用



燃料デブリ切削・回収装置



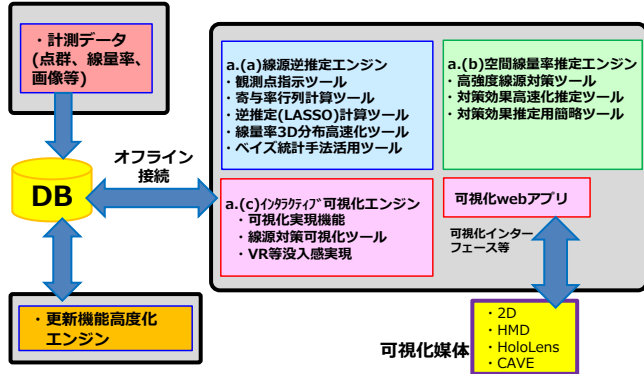
- ・様々なデブリの性状に対応できるように、小石や砂状のデブリや、堆積しているデブリを切削して回収する装置。アームの先端部に付け替えて使用する。

燃料デブリの取り出しに先立って、事故による損傷状態が不明な場所が残り、未だに線量率が高い原子炉建屋(R/B)内でのアクセスルート構築準備作業を安全、効率的に行うための環境改善が必要である。環境改善の重要な技術要素は、作業環境と線量・線源分布の把握、環境変化に対応した被ばく低減計画の策定であり、これに資する技術開発が求められている。このため、R/B内でのアクセスルート構築準備作業等において、作業員の高線量下での被ばく低減をサイバー空間上で被ばくを伴わずに検討できるシステムの構築を目標とする。

実施内容及び成果

＜開発するシステムに対する要求事項＞

本プロジェクトで開発した線源・線量率推定システムのプロトタイプについて、観測点指示ツールに基づき計測された線量率データ等を用いて逆推定計算ツール等により線源位置等を推定し、その結果から高強度線源対策ツール等を用いて高強度線源対策（除染・遮へい・移動・撤去）等が問題なく出来ること。さらに、これら結果を可視化実現機能等により表示出来ること。



線源・線量率推定システムのプロトタイプの全体像

1. 線源逆推定・線量率推定技術開発

(a)線源逆推定エンジンの開発

逆推定手法の精度を向上させる観測点指示ツールの効果的な適用方法を検討した。また、福島第一原発R/B内の線量率分布の推定精度を向上するため、ベイズ統計手法活用ツールを用い、線量率分布の不確かさの低減を目的とした再観測点指示、及びその結果を含めて線源分布情報を更新する方法を検討した。これらについてJMTRのデータを用いて検証を行い、機能が正しく動作することを確認した。

(b)空間線量率推定エンジンの開発

高強度線源対策である除染・遮へい・移動・撤去をサイバー空間上で行い、線量率分布変化をシミュレートする機能をプロトタイプに実装した。

(c)インタラクティブ可視化エンジンの開発

逆推定結果等をサイバー空間（VR/AR）で可視化表示する機能を開発し、JMTRのデータを用いて検証を行い、機能が正しく動作することを確認した。

2. 実環境データのデジタル化基盤技術の開発

(a)線源逆推定のためのデータ整備・蓄積・活用環境構築のための技術開発

計測データや線源逆推定等の各エンジンのI/Oを格納するデータベースシステムのプロトタイプを開発し、データ入出力機能を含め安定動作することを確認した。

(b)実環境データ計測に関する基盤技術の研究開発

放射線データ計測技術について、γ線イメージャ・γ線スペクトルメータを用いた照射試験結果に基づいて適用可能な環境条件を整理した。

データ収集技術について、開発した作業員搬送型ユニット及び遠隔操作型ユニットを用いたデータ収集の検証実験をコールド試験場及びJMTRで実施し、機能することを確認した。

高所データ計測技術について、UAVの一つである小型マルチコプタの福島第一原発での実装可能性を検討するため、粉塵巻上性能試験を実施し、評価結果を整理した。また、UAVの高さ方向位置決めのためのデザイ（つなぎ綱）長制御機構について、開発したプロトタイプを用いた実験で制御性能の確認を行った。さらに、核種弁別技術は、開発した小型ホスウィッチ検出器で核種弁別と到来方向推定が行えることを実験で確認した。

3. 現場適用のための技術開発

(a)検証試験

プロトタイプが要求事項を満足すること等の確認に向けた線源逆推定計算手法のJMTR及び福島第一原発における検証試験、JMTR及びコールド試験場における有効性評価を完了した。

(b)環境データの更新機能の高度化に関する研究開発

環境変化の差分情報更新機能の高度化エンジンの試作モデル開発を完了した。

(c)福島第一原発における他システムとの接続性・拡張性の基礎検討

福島第一原発の現状分析・調査及び先行事例の調査結果より、現場適用性のあるデジタルシステムの構造、特に接続性や拡張性に関する要求事項を整理し課題の抽出を完了した。

今後の方向性

線源・線量率推定システムのプロトタイプの完成を目指すとともに、福島第一原発現場適用に向けた検証試験を行い、本プロジェクトの目的を達成する。事業実施の過程で明らかとなった課題（大規模・複雑な構造への適用、放射線計算の簡略化等）については、プロトタイプシステムの高度化とともに、東京電力のニーズを踏まえつつ、事業実施と並行して本事業後の取り扱いを検討していく。

原子炉建屋内の環境改善のための技術開発（サプレッションチェンバ脚部の電気防食による腐食抑制技術の開発） （2023年2月末時点における進捗状況）

福島第一原子力発電所(1F)の燃料デブリ取出等の廃炉作業において、サプレッションチェンバ(S/C)は放射性物質を閉じ込める構造物となる可能性がある。S/Cのあるトラス室には、塩化物イオンを含む滞留水があり、S/C脚部の腐食による耐震強度低下が懸念されるため、電気防食によりS/C脚部の腐食を抑制する技術について、装置設置の概念検討及び電気化学的試験を行い、装置設置可能性及び防食技術の成立性を評価。

実施内容及び成果

1. 電気防食設備の実機適用性の概念検討

外部電源方式の電気防食設備を用いた場合、2.の基礎試験よりS/C脚部に電極を各2個設置（2/3台機の場合、S/C脚部40カ所）する必要がある、電極をケーブルで電源に接続、排流端子や照合電極の設置も必要と評価した。本事業では、電気防食設備設置に向けたアクセスルートのケーススタディ、電極・ケーブル設置ルート(図1)、直流電源装置(図2)及び排流端子の設置方法を検討し、設置方法の実現可能性を評価して、設置方法毎に課題と対応策を検討した。

2. 実機適用性評価のための基礎試験

外部電源方式による電気防食工法を海水環境下の鋼材等に適用している実績は多い。しかし、1Fの特殊な環境（事故時の加熱、放射線、海水・水流入等による塗装の劣化や発錆）が電気防食効果に及ぼす影響は不明であり、S/C脚部に対する電気防食の効果や範囲を確認する必要がある。本事業では、S/C脚部の塗装の劣化や発錆等が電気防食効果に及ぼす影響を電気化学試験により評価した（図3）。また、実機S/C形状の3Dモデルでの電気防食FEM解析を行い、電気防食設備設置時のトラス室の想定滞留水質下での、S/C脚部の防食に必要な電極設置位置・数及び電位分布を評価した。さらに、電気防食適用上の問題である水素発生等、電気防食設備設置による副次的影響を評価した。

3. 実機適用に向けた着眼点の評価

1. による電極、ケーブル、電源等の設置方法の概念検討結果及び設置方法の実現可能性の評価、2. による必要な電極設置位置及び数、電位分布等の評価結果から、設置可能な電極配置での防食効果を評価するとともに電気防食装置設置に対する課題や対応策を整理した。

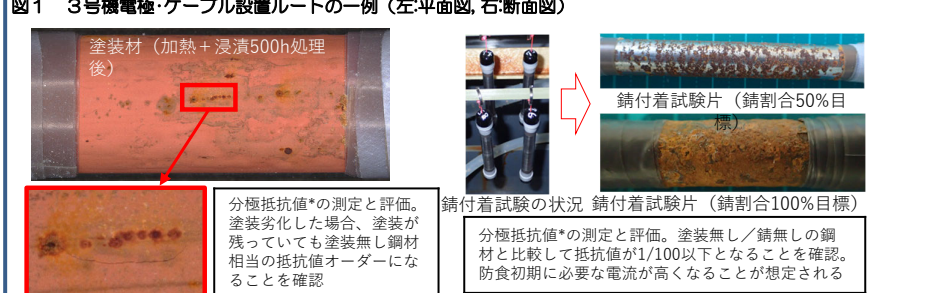
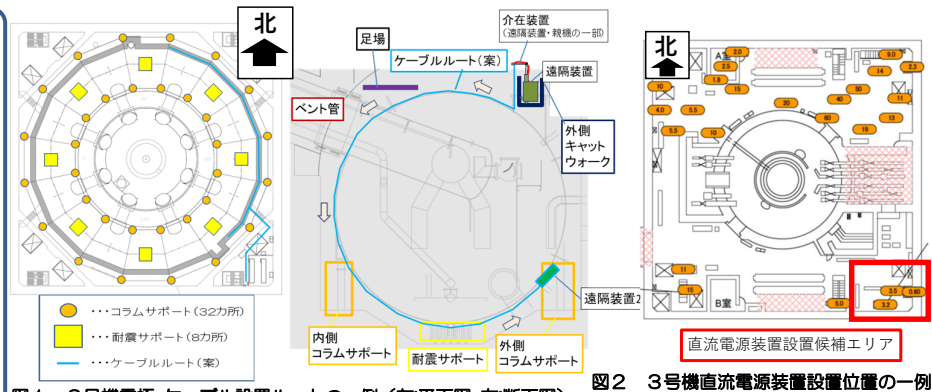


図3 1Fの特殊な環境を想定した試験片による抵抗値の測定結果と評価の一例

今後の方向性 サプレッションチェンバの耐震性維持・補強に関する対策の1つとして、本成果に関連する補助事業や1F現場に情報提供する。

*：電流の流れ易さを示す物理量

原子炉格納容器内部詳細調査技術の開発 (2023年2月末時点における進捗状況)

【IRID・日立GE】

ペDESTル内調査の詳細計画・開発計画の策定・更新、調査のためのアクセス・調査装置及び調査技術の開発を実施している。

実施内容及び成果

1. 調査計画・開発計画の策定

ペDESTル内部詳細調査の調査目標、要求条件を設定し、調査計画、装置の開発計画を策定。調査・開発計画として、調査装置がペDESTルCRD開口まで走行し、伸長ロッドを伸長し、ロッド先端のカメラ(センサ)でペDESTル内の情報(映像、放射線量、点群データ)を調査できるアクセス・調査装置の開発を進めている。

2. アクセス・調査装置及び調査技術の開発

(1) アクセス・調査装置の開発

- アクセス・調査装置を線量測定用と点群データ計測用の2式製作(複合ケーブル・ケーブルドラム含)を行い、実機環境を模擬した試験設備にて、一連作業(装置インストール・走行・調査・回収)のモックアップ試験を実施。(図1~4)
- 関連付帯装置(穴カバー設置装置、インストール装置、ケーブル送り装置)も試作を行い、上記アクセス・調査装置と組み合わせてモックアップ試験を実施。(図5)

(2) 調査技術の開発

- アクセス・調査装置の伸長ロッド先端に搭載するセンサのうち、放射線センサは実機搭載時のノイズ試験、放射線環境下での検出性能試験を実施。点群データセンサは、実機環境模擬(暗闇、水滴落下)でのモックアップ試験を行い、点群画像再構成性能を評価。

今後の方向性

- モックアップ試験で抽出した課題への対策を実施し、調査装置、調査技術を完成させる。
- 現地適用に向けた計画(作業手順を含む)を策定する。

【各機共通】伸長ロッド(内部にロッド用チューブ内包)

点群データセンサ(デプスカメラ)



放射線センサ(線量計)

【各機共通】複合ケーブル

【各機共通】複合ケーブル



【各機共通】カメラ(パン・チルト機構付)

【各機共通】クロー(フリップ式)

図1 調査装置の外観
(1機目:放射線センサ搭載)

図2 調査装置の外観
(2機目:点群データセンサ搭載)

調査装置用 ケーブル送り装置用



図3 シーレスックス・ケーブルドラム

点群データセンサでの計測例(ペDESTル内)

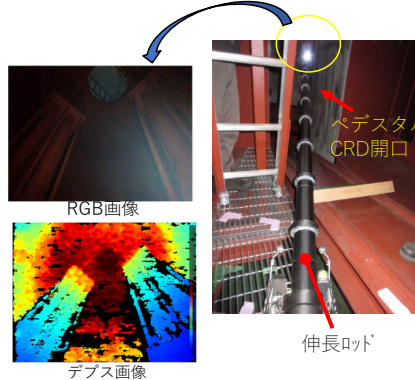


図4 ペDESTル内の調査状況

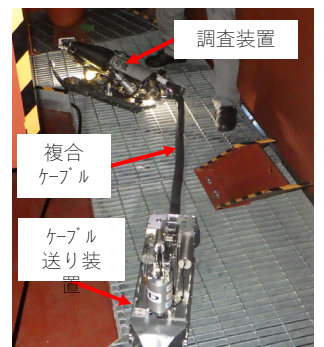


図5 ケーブル送り装置での送り状況

原子炉圧力容器内部調査技術の開発 (2023年2月末時点における進捗状況)

【IRID・東芝ESS/日立GE】

燃料デブリ取出しに先立ち原子炉内部の情報取得のため、原子炉圧力容器(RPV)内部調査において、上部アクセス調査工法の実機適用に向けた炉内開口加工方法として、2021年度までに開発された加工技術を現場適用するための装置を試作し、試験で単体性能を確認中。また、下部アクセス調査工法(ドローン、テレスコピック)については、2021年度までに得られた概念検討結果に基づき装置を試作し、現場適用に必要な機能を試験にて確認中。

実施内容及び成果

1. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化(図1)

- 過年度実施の試験にて加工技術として絞り込んだレーザ切断およびAWJ(Abrasive Water Jet; アブレシブ ウォーター ジェット)切断の課題を抽出し、開発計画を策定。
- レーザ切断については、実機を考慮した遠隔装置の成立性を確認する目的で、レーザ切断装置(試作機)(図1-1参照)を設計・製作し、単体性能確認のための試験を実施中。
- AWJ切断については、アブレシブ*)供給量安定化を図ること(図1-2参照)、およびメンテナンスの成立性を確認することを目的として各試作機を設計・製作し、単体性能確認のための試験を実施中。*)研磨剤

2. 下部アクセス調査工法の開発

【1号機:ドローン(図2)】

- 過年度に実施した要素試験結果より、有線ドローン、無線ドローンそれぞれの課題を抽出し課題解決のための対策案を検討。
- 他事業で開発中のアクセス装置をカスタマイズし、それとの組合せを考慮した、調査計画・開発計画を策定。

- ドローンによるアクセス装置全体を構成する装置(試作機)の仕様を検討し、装置の設計・製作を行い、単体性能確認のための試験を実施中。

【2/3号機:テレスコピック(図3)】

- 過年度に実施した14段テレスコピックによる簡易試験結果を踏まえ、調査計画・開発課題を策定。

- テレスコピックの伸展に伴い、一定方向に傾く事象に対し、再現性試験、対策案検討を実施し、対策案の有効性を確認するための試験を実施中。
- テレスコの傾き、位置を調整するための姿勢制御機構の仕様を検討し、設計・製作を行い、性能確認のための試験を、14段テレスコピックを用いた試験と合わせて実施中。

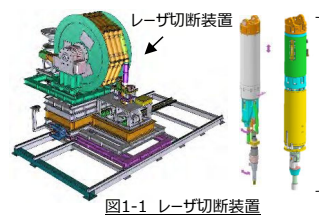


図1-1 レーザ切断装置

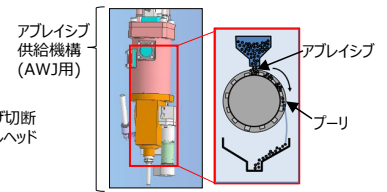


図1-2 アブレシブ供給機構

図1 実施内容イメージ(レーザ切断、AWJ切断)

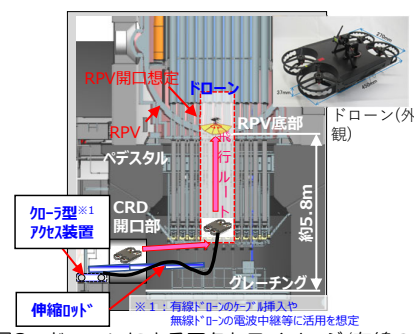


図2 ドローンによるアクセスイメージ(有線の例)

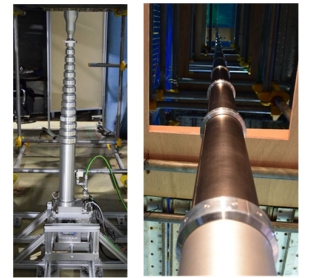


図3 14段テレスコピックによる簡易試験

今後の方向性

- 上部アクセス調査工法:
各試作機の単体性能を確認後、更なる課題解決に取り組む。
- 下部アクセス調査工法(ドローン):
各試作機の単体性能を確認し、構成要素の仕様を確定。
- 下部アクセス調査工法(テレスコ):
14段テレスコの機能確認試験を実施。単体性能を確認する。

原子炉圧力容器（RPV）内部に存在すると推定される燃料デブリ取り出しの検討に資する情報を取得するため、既存の大口径配管を利用したRPV内部調査に必要な技術開発を行っている。

実施内容及び成果

1. 既存配管を利用したRPV内部調査計画と装置類の開発計画の策定

以下の観点で調査計画と装置類の開発計画を検討。

① アクセスルートの抽出

RPV内部の確認可能な範囲、原子炉格納容器（PCV）からRPVへのアクセス性、現場状況（主に2号機に関し調査）を踏まえ、炉心スプレイ系（図1）、主蒸気系（図2）、再循環系（図3）配管を利用したアクセスルート抽出。

② 調査計画の策定

各アクセスルートに対し、現場作業、調査シナリオを策定。調査ルートの特徴からRPV内部調査を実現するための主要課題を抽出。（表1）

③ 機器類の開発計画の策定

主要課題を解決するために必要な装置類を抽出し、装置の開発課題、対応方針案を策定。

2. 既存配管を利用したRPV内部調査技術に関する装置類の開発

以下の調査装置類を開発中。

① 炉心スプレイ系配管ルートの調査装置

- 仕切弁1に接続したスプールから調査装置を挿入方法を策定。
- 調査、加工、ケーブル送りなどのツールを換装する移動機構の構想設計中。（図4）
- 調査ルート上の逆止弁、ティアーA/B部を穿孔する方法の検証中。

② 主蒸気系配管ルートの調査装置

- タービン建屋から原子炉建屋内の主蒸気系配管に穿孔して調査装置を挿入する方法を策定。
- 水噴射式による水平および斜め上りの大口径配管内の移動方法を検証中。
- 調査ルート上の閉状態の主蒸気隔離弁を穿孔する技術を検証中。

③ 再循環系配管ルートの調査装置

- 配管径の変化に適応しながら、垂直方向の移動と回頭運動を実現する機構を構想設計中。

今後の方向性

開発計画の検討、概念設計等に基づき、要素試験を実施することにより、その実現性を確認していく。

表1 抽出したアクセスルートの特徴と主要課題

系統	PCVベネ	RPVノズル	配管径	配管長さ	配管高さ	ルートの特徴	主要課題
炉心スプレイ系	X-16A	N5A	250A	13m	7m	・閉状態の逆止弁がある ・RPV内への調査にはティアーAもしくはティアーBの穿孔が必要	・配管内の移動方法 ・RPV内部の調査方法 ・逆止弁の通過方法 ・ティアーA、Bの穿孔方法
主蒸気系	X-7A	N3A	600A	45m	15m	・閉状態の主蒸気隔離弁（2台）がある ・ルート長さが長い ・ルートの上り方向の距離が長い	・配管内の移動方法 ・配管内部の調査方法 ・主蒸気隔離弁の通過方法
再循環系	X-14	N1A	150A 500A 600A	35m	9m	・ルート長さが長い ・ルート上で上り下り有 ・ルート上の配管径の変化が大きい	・配管内の移動方法 ・RPV内部の調査方法

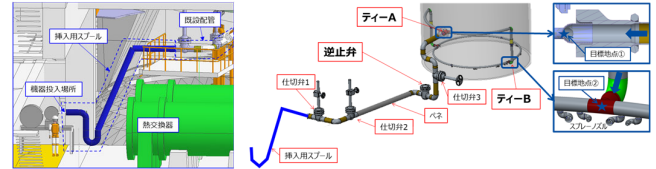


図1 炉心スプレイ系配管アクセスルート

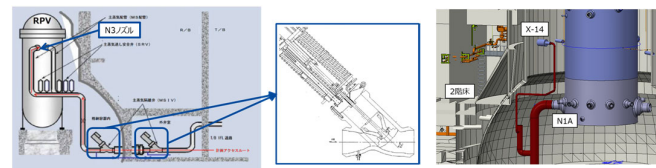


図2 主蒸気系配管アクセスルート

図3 再循環系配管アクセスルート

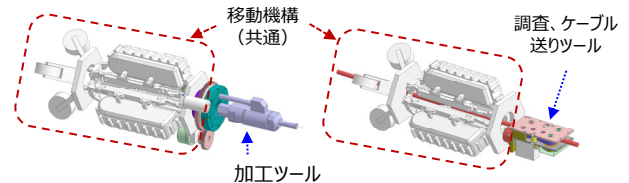


図4 調査装置の構想

燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発 (2023年2月末時点における進捗状況)

福島第一原子力発電所（以下、1F）の原子炉建屋内で採取された堆積物等のサンプルを、茨城地区の分析施設（日本原子力研究開発機構：JAEA、日本核燃料開発株：NFD）にて分析する。組成や性状に係る予備情報を伴わない1Fサンプル特有の分析・評価技術を蓄積するとともに、燃料デブリ特性リストにまとめ、他の研究開発実施者等へ共有可能とする。

実施内容及び成果

○ 燃料デブリ性状の分析に必要な技術開発等

- 燃料デブリサンプルが採取されていない段階において、原子炉建屋や原子炉格納容器の内部調査等で採取された堆積物や付着物のサンプル分析を実施した。
- これらのサンプル中に含まれるウラン（U）やジルコニウム（Zr）を含有する微粒子は、燃料に由来するものであり、その相状態や伴する元素の状態から、生成条件に関する情報（経験温度や雰囲気）を得ることができる。このような分析データを収集し、炉内状況を把握するとともに事故進展の観点から評価をすることにより、生成した燃料デブリの性状推定に資する。
- 本事業は、(a) サンプル選定、(b) 分析計画の策定、(c) 分析及び評価、の3つのステップで進めている。(a)は、1Fの内部調査等で得られた装置の付着物等から選定した（表1）。(b)は、①各サンプルに係る関心事項の整理、②想定される含有微粒子の起源や形成過程などに係る仮説の設定、③仮説の立証に必要な分析計画の検討、のステップで行った。(c)はJAEA大洗とNFDの施設で実施した。分析結果は、分析タスクフォース（JAEAと東京電力HDのメンバーから構成）において評価し、既存のサンプル分析データや、内部調査及び事故進展解析の情報との比較・検討を経て最新の知見を得ることができた。分析結果に基づいた評価の一例を図1に示す。
- これらの作業を通じて、燃料デブリの性状推定に必要な情報を取得するだけでなく、組成や性状に係る予備情報を伴わない1Fサンプル特有の分析・評価の経験の蓄積を図るとともに、幅広いユーザーの利用に供するため、上記の成果を燃料デブリ特性リスト（debrisWikiと称するコンテンツ管理システムを用いたデータベース）にまとめた。

表1 2022年度に分析したサンプルと分析の狙い

サンプル	分析項目（注）	分析の狙い
1号機 1号機SGTS室スミア 2号機SGTS室スミア PCV底部堆積物（2017年度採取）	・外観観察 ・イメージングプレート（放射能分布測定） ・FE-SEM/WDX、 FE-SEM/EDX、TEM （各種電子顕微鏡観察） ・ICP-MS（質量分析） ・放射線測定（α、γ）	・既存の分析・評価手法の塊状試料への適用性評価 ・UやZrを含む粒子の詳細な性状データ（結晶構造や局所組成等）に基づいた、事故時の炉内環境、及び生成した燃料デブリ性状等の推定 ・堆積物等の由来の推定
2号機 PCV貫通部（X-53）付着物 FHM遠隔操作室スミア シールドプラグ穿孔内堆積物		
3号機 RHR熱交換器残水		

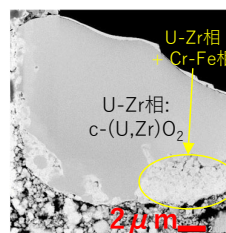


図1 分析結果の評価の例：TEM分析によるU-Zr粒子の詳細観察

サンプル：2号機X-6ベネ調査装置付着物
※分析実施：2021年度

- 一つの粒子中にU-Zr相とFe-Cr相が混在
⇒ 事故進展時に、燃料成分（U、Zrを含む）と構成材成分（Fe、Crを含む）の混合過程が存在
- 構成相と各相の元素組成から、粒子生成時の到達温度、雰囲気条件を類推可能。

（注）表1の主な分析項目：FE-SEM：Field Emission Scanning Electron Microscope、電界放出形走査電子顕微鏡、WDX：Wavelength Dispersive X-ray Spectroscopy、波長分散型X線分析装置、EDX：Energy Dispersive X-ray Spectroscopy、エネルギー分散型X線分析装置、TEM：Transmission Electron Microscopy、透過電子顕微鏡、ICP-MS：Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry、誘導結合プラズマ質量分析

今後の方向性

- 堆積物等の分析データの更なる拡張及び1Fサンプルの分析・評価技術の蓄積により、燃料デブリ特性リストの充実化を図りつつ、今後の試験的取出しの際の燃料デブリサンプルの分析に備える。

廃炉工程においては、燃料デブリの性状や長期安定性の把握が重要である。本事業では、気中環境や水中環境において時間とともに微粒子化が生じる可能性がある材質を対象に、模擬燃料デブリを用いた試験データを取得し、経年変化が発生する材質条件や環境条件を定量的に把握するとともに、微粒子化の長期予測性の向上を図り、燃料デブリ取り出しや移送・収納・保管方法に及ぼす影響を検討する。

実施内容

気中及び水中試験を行い、燃料デブリの微粒子発生量のデータ取得と予測式設定、実機環境下での発生量の推定を実施した。

得られた成果の概要

- 微粒子化が生じる燃料デブリとして、試験により次の4種を特定した。① Zr(O)を含む(U,Zr)O₂ ② (U,Zr)O₂を含むガラス状燃料デブリ ③ FeやFeOを含むガラス状燃料デブリ ④ FeOを含む(U,Zr)O₂
- 微粒子発生量は環境条件に依存し、酸素濃度の増加とともに増加(図1a)、また燃料デブリ中の介在物の存在比率に依存することを確認(図1b)。これを踏まえ酸素濃度や介在物の影響を把握し、微粒子化する条件範囲を明確にした。
- 長期予測性を向上するために最長3000時間の加速試験を行い、得られた結果から任意の材質や環境・年数における微粒子発生量の予測式を設定し、各号機の燃料デブリの推定存在位置と廃炉工程における環境条件や期間を考慮した微粒子発生量について推定を実施している。図2はその一例を示す3号機の模式図であり、ベスタル下部に存在すると推定される(U,Zr)O₂を含むガラス状燃料デブリが取り出し工程を経て収納・保管に至る過程で経験する環境条件を設定し、予測式に基づいて評価した微粒子発生量の時間変化の予測イメージである。

今後の方向性

微粒子化が生じる燃料デブリを対象に微粒子発生量の推定を行うとともに、残された技術課題を展望としてまとめる。

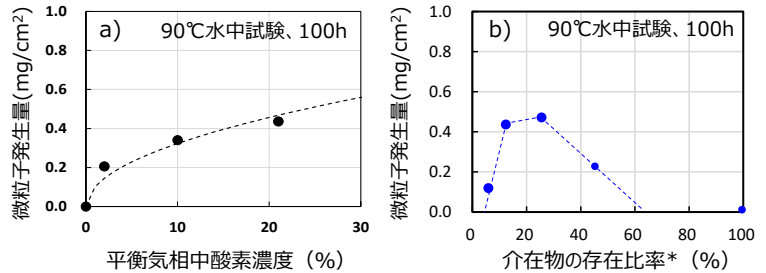


図1 (U,Zr)O₂を含むガラス状燃料デブリの水中試験後の微粒子発生量測定結果
a) 酸素濃度依存性 b) 介在物の存在比率*依存性

*:ガラス状燃料デブリ中に存在する(U,Zr)O₂の割合

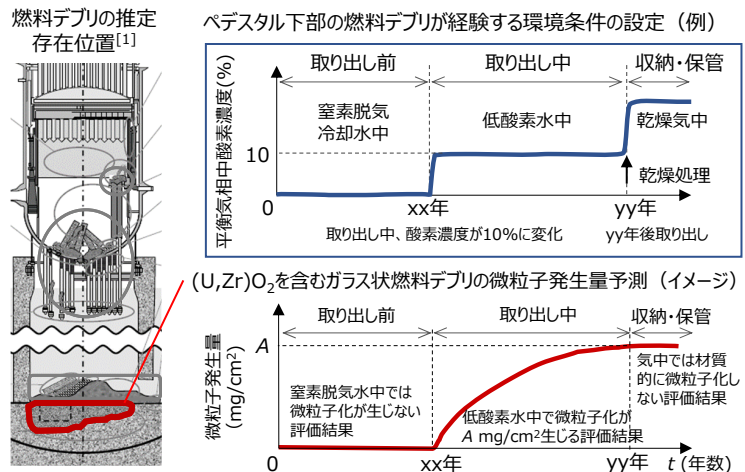


図2 燃料デブリの廃炉工程における微粒子発生量の推定例

燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発（燃料デブリの分析精度の向上、熱挙動の推定及び簡易分析のための技術開発） （2023年2月末までの進捗状況）

【JAEA】

- (1) 分析精度の向上のための技術開発：性状が不明、分析が容易ではない燃料デブリの特徴を評価できる技術・体制を構築するため、模擬燃料デブリを調製し、相状態、核種・元素量等の基本量について、複数の機関で分析し、精度の高いミクロ組織の同定技術とそれらの基本量の推定手法を開発する。(2) 燃料デブリ熱挙動の推定技術の開発：燃料デブリ取り出し作業の進捗、汚染水の蓄積・処理状況等に応じた冷却方法の検討に資するため、2号機を対象に原子炉格納容器(PCV)内の燃料デブリの熱挙動を推定する手法を開発する。(3) 簡易分析のための技術開発：ウランあるいは核燃料が含まれることを簡易的にあるいは作業現場(その場)で迅速に検出する分析技術の1Fの現場への適用を目指した技術開発を行う。

(1) 分析精度の向上のための技術開発：実施内容及び成果

東北大、JAEA原子研において、模擬燃料デブリ(共晶反応、高温溶融・凝固を考慮)を調製し、これらを各分析機関(JAEA大洗、JAEA原子研、NFD*1、NDC*2)に輸送して分析を行った。

分析では、X線CT測定、光顕観察、SEMやTEM観察データ等から、ミクロ組織の同定を行い(図1参照)、これらの情報を用いて燃料デブリの基本量(分析試料の形態、核種・元素量、相状態・分布、密度等)の推定手法を開発した。また、この過程で、分析手法、手順、誤差、課題について、分析関係者間の共通認識を得た。

*1: 日本核燃料開発株式会社、*2: MHI原子力研究開発株式会社

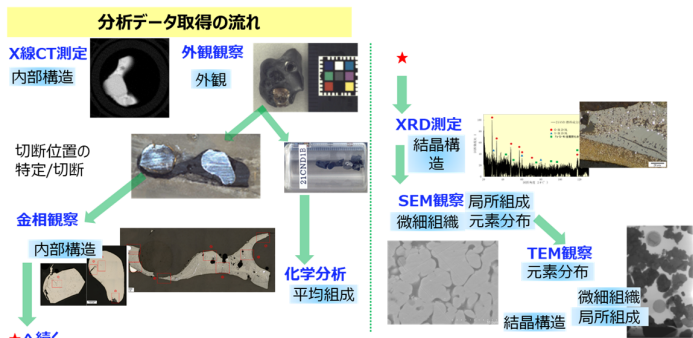


図1 燃料デブリの分析プロセスの概要

今後の方向性

- 不均一なミクロ組織観察からマクロ特性を評価する方法について、各機関の考え方を整理し、共有する。
- 本評価手法を、1Fサンプル(試験的取出し燃料デブリ、内部調査で得られた堆積物等)等の分析・評価へ適用する。

(2) 燃料デブリ熱挙動の推定技術の開発：実施内容及び成果

- 注水時を含む燃料デブリ熱挙動推定のため、3次元二相流解析が可能な数値流体力学コードACE-3Dに対して必要な改良を実施。
- 多孔体を含む自然対流に対する適用性を確認。
- 実機自然対流条件を模擬できる装置、多孔体による流れの影響を把握できる装置を用いてデータを取得し妥当性を確認(図2)。
- 試験では取得が困難な条件の評価及び複雑な形状を有するPCVへの適用性を確認するため、複雑形状内の詳細計算が可能な多相多成分詳細熱流動解析コードJUPITERによる解析結果と比較。
- 格納容器内の状況把握が最も進んでおり、検証が実施しやすい1F2号機を対象に注水時などの燃料デブリ熱挙動を評価中(図3)。

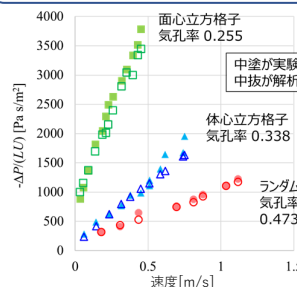


図2 多孔体モデルを用いた解析の妥当性確認の一例(速度による圧力差 ΔP を含むパラメータ(縦軸)の変化が、気孔率によらず再現されることを確認)

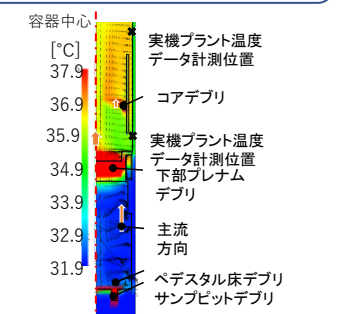


図3 実機解析結果の一例(注水時格納容器内を対象とし、速度や水の分布を考慮して燃料デブリを含む温度分布を評価)

今後の方向性

- 実機プラントデータ(温度の推移)を用いてACE-3Dによる解析が妥当な結果を与えることを確認
- 空冷、間欠注水状態などを想定した実機解析を実施

(3) 簡易（その場）分析のための技術開発：実施内容及び成果

空間的（その場）・時間的（迅速性）観点から、簡易（その場）分析手法として光ファイバーを利用したレーザー誘起ブレイクダウン分光法（LIBS）による遠隔その場分析法（光ファイバー-LIBS）を選定し、技術開発を行うとともに、簡易分析手法である蛍光X線分析法（XRF）について、核燃料物質や使用済み燃料による動作確認を行った。技術開発の全体像を図4に、事業終了時の目標指針に対する成果と評価を表1に示す。このうち、使用済み燃料を用いた測定では、XRFは少量試料に限ることが確認された（図5）。一方、LIBSでは強いガンマ線環境下でも検量線に変化がなく放射線環境に強いことが示された（図6）。また、機器供給の試行では、実機試作機として壁面回転型光コネクタ等を実装した可搬型光ファイバーLIBS装置を完成させた（図7）。

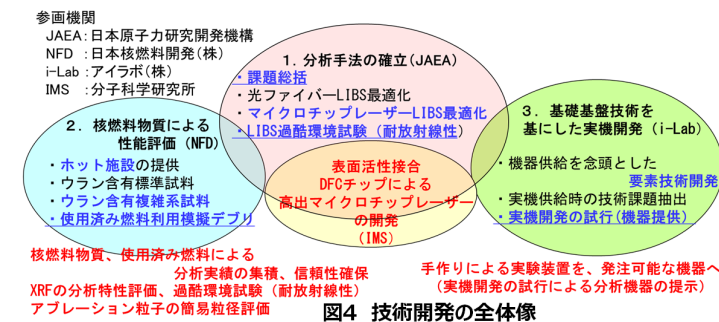


図4 技術開発の全体像

携帯型XRFの使用済み燃料での動作試験

- ・15mSv/hから0.9Sv/hまでの線量率の異なる照射済み燃料試料を準備。
- ・試料作製・使用セルを準備。ホットセル内に設置し、遠隔操作するための試験を実施。
(セル外のPCからセル内のXRF装置にUSB接続し、PCからの遠隔操作でデータを取得)

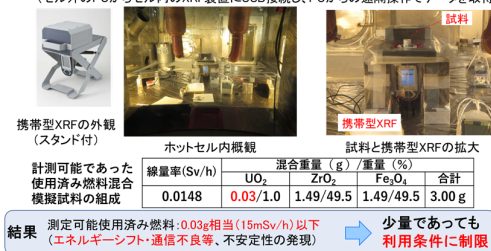


図5 使用済み燃料でのXRF動作制限状況

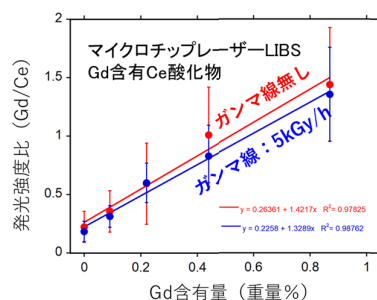


図6 ガンマ線環境でも変化のない検量線例

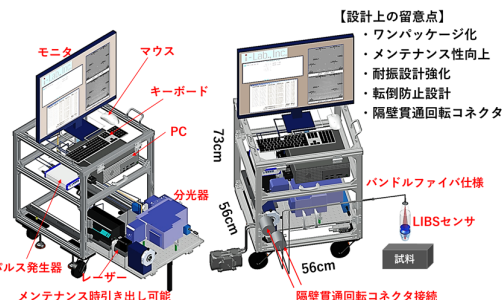


図7 基礎基盤技術を基にした実機開発状況

今後の方向性

- ・高線量場や使用済み燃料、TMIデブリ等による分析実績の蓄積を図るとともに、福島第一原子力発電所構内（1F）で活用し、技術検証を進める。
- ・マイクロ波技術や高出力化マイクロチップレーザーを活用し、高性能化（数十倍の信号強度、元素選択性の更なる向上）を図る。
- ・含水デブリ試料に対しても有効な手法の確立と、1Fで利用可能な、汚染防護対策を施した可搬型LIBS装置の提供を図る。

**燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発（原子炉圧力容器の損傷状況等の推定のための技術開発）
（2023年2月末時点における進捗状況）**

【JAEA】

福島第一原子力発電所の事故現場から得られる情報を考慮し、事故進展における原子炉圧力容器(RPV)バウンダリーの損傷、溶融した燃料デブリの流出・拡大等の過程を推定し、炉内状況推定図へ反映する。炉内状況推定図は、設計情報及び事故後の現場情報等を考慮したWeb3Dで作成し、燃料デブリ取り出し方法の効率的な検討に資する。

実施内容及び成果

(a)事故進展評估

シビアアクシデント(SA)解析コード(MAAP)を用い、2号機、3号機について、RPVバウンダリー損傷への影響が大きい燃料挙動を把握する観点から、以下の原子炉内での詳細な状況変化を評価した。

- 2号機： 炉心溶融が発生した時間帯における3つのRPV圧力ピーク
その後の原子炉格納容器（PCV）圧力の急低下と圧力上昇
- 3号機： RPV減圧前のRPV圧力低下挙動
RPV減圧以降のドライウェル水位履歴

(b) 原子炉圧力容器損傷状況の把握

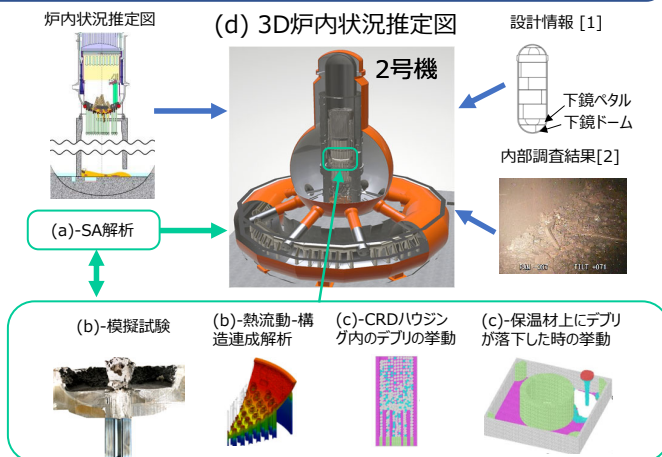
RPV母材及びその溶接継手部の高温（700～1400℃）での強度を把握する試験を実施し、強度特性を評価した。得られた強度特性を用いて、熱流動・構造連成解析により2号機のRPVバウンダリー損傷位置を推定した。RPV下部へ移行した炉心物質と構造材との反応による損傷については、2号機を模擬した試験体に模擬金属デブリを充填し、加熱・熔融することにより検証した。

(c) 炉心物質移行挙動評価

比較的短時間で計算可能なグラフィックスプロセッシングユニット(GPU)対応改良粒子法(MPS法)解析コードを整備し、これを用いて、2号機のRPVバウンダリーの損傷が疑われる部位から流出した炉心物質の移行挙動を解析し、RPV底部直下の領域に燃料デブリが存在する可能性や、その領域からさらに炉心物質が移行した可能性を示した。

(d) 3D炉内状況推定図

上記(a)(b)(c)の実施項目から得られた成果を総合的に評価し、得られたRPV損傷状況の推定情報を3D炉内状況推定図に反映する。作成した3D炉内状況推定図は、debrisWiki等に掲載し、燃料デブリ取り出し方法の検討に携わる研究者・技術者が使用できるようにする。



- ・ **CRDハウジングの破損に伴い、その内部に溶融金属や燃料デブリが侵入している可能性。**内部に移行した燃料デブリは、**大規模にCRDハウジングを損傷させていないと推定。**
- ・ **RPV破損時に直下にある保温層上に燃料デブリが堆積している可能性。****RPV外周部近傍には局所的な破損孔があり、一部の燃料デブリがベドスタル領域に移行したと推定。**

[1]:原子炉容器等における製造方法及び製造メーカーの調査結果 <https://www.da.nsr.go.jp/file/NR000033407/000169903.pdf>
 [2]:福島第一原子力発電所2号機 原子炉格納容器内部調査～19日調査速報～<https://photo.tepco.co.jp/date/2018/201801-j/180119-01j.html>

[Z]:福島第一原子力発電所2号機 原子炉格納容器内部調査～19日調査速報～<https://photo.tepco.co.jp/date/2018/201801-j/180119-01/>.html

今後の方向性

- (a) 原子炉内での詳細な状況変化がどのようなものだったのかを、実測データとの比較を基に引き続き検討を実施する。
- (b) 1号機、3号機についてもRPV損傷位置の推定を行う。
- (c) 1号機、3号機についても炉心物質移行挙動を把握する。
- (d) 内部情報の写真・動画のテキストチャを用いて、よりリアルなWeb3D図に反映する。

燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発（仕分けに必要な燃料デブリ等の非破壊計測技術の開発）（2023年2月末時点における進捗状況）

【IRID・MHI/東芝ESS/日立GE/JAEA】

燃料デブリの取り出しに伴い原子炉格納容器より取り出される物体を、燃料デブリと放射性廃棄物に仕分けするために必要な非破壊計測技術の開発を目的として、先行事業(*)で検討された開発課題のうち、重要度・優先度が高いものの検討を行った。

*令和2年度開始補助事業「燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発（燃料デブリと放射性廃棄物の仕分け技術の開発）」

実施内容及び成果

1. 検出器などを模擬した非破壊計測技術の解析的評価と計測装置概念の検討

①仕分けに必要な性能目標値の検討：仕分け技術の成立性判断に資する性能指標を整理し、目標値を検討した。目標性能と本事業成果を比較して現時点の課題を確認し、今後の開発計画に反映した。

②検出器応答解析による計測装置概念の構築：候補となる計測技術(*)について、検出器など計測装置構造を模擬したシミュレーション解析を実施した。得られた検出器応答データを利用し、仕分けに適用可能な装置概念を設定した。

*アクティブ中性子法、パッシブ中性子法、ミュオン散乱法、X線CT法、パッシブガンマ線法

2. 核燃料物質などの評価手法と仕分けシナリオの検討

①計測に基づく核燃料物質等の評価手法の検討：設定した計測装置概念による直接的な測定量から評価したい量または特性を推定評価する手法を検討した。さらに、検出器応答データを利用して暫定的な推定評価性能を検討した。

②仕分けシナリオの検討：燃料デブリおよび廃棄物の管理方針と候補となっている計測技術の特性／実現性を考慮し、ベースとなる仕分けの全体フロー案を検討した(図1)。さらに、取出時期および仕分け場所によって使用するフローを選定し、仕分けシナリオの候補を設定した。

3. 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討：各計測技術の仕分けへの適用性評価のため、シミュレーションや簡易試験を行い、今後、実験的に確認する必要がある課題に対して試験方法、試験計画を策定した(図2)。

今後の方向性

- ・ 今後は、上記の各項目の検討を詳細に進める必要がある。各項目は相互に関連するため、互いの結果を反映して検討内容を深化させることが必要。
- ・ 開発進捗により得た新発見・課題をその後の開発計画に反映することが必要。

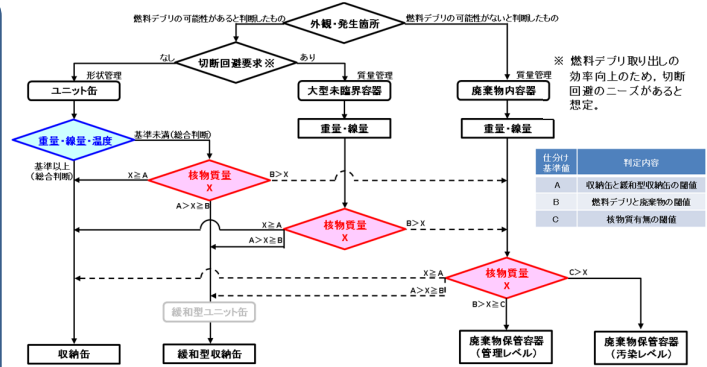


図1 燃料デブリと廃棄物との仕分けフロー案

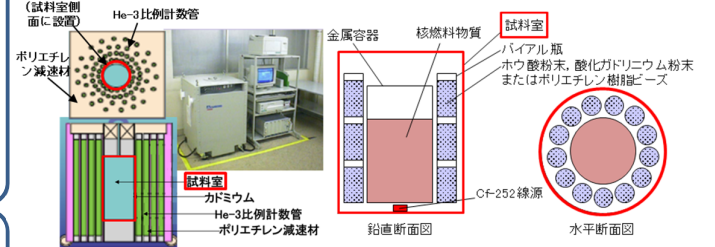


図2 PSMC(*1)を利用したDSDSI(*2)適用性の検討（パッシブ中性子線計測法）

*1：プルトニウムスクラップ測定装置

*2：中性子消滅時間差自己問いかけ法（Differential Die-away Self-Interrogation technique）

燃料デブリの取り出し工法の開発（1/2）（2023年2月末時点における進捗状況）

【IRID・日立GE/MHI】

燃料デブリ・炉内構造物取り出しのためのアクセス用構造物の遠隔設置工法、原子炉格納容器(PCV;Primary Containment Vessel)接続部の閉じ込め技術、炉内構造物の解体方法、PCV内干渉物解体技術、大型搬出容器・搬送台車等の各要素技術について、開発計画の検討、概念設計等を実施し、要素試験を実施した。

実施内容及び成果

1. 横取り出し工法の開発

(1) アクセス用設備の設置工法の開発

- ・ PCVと接続するアクセス用設備（セルアダプタ、遮へい扉、セル）の具体化・据付工法の実現性検討・検証を実施。(図1) アクセス用設備の設置における重要工程であるバウンダリ構築については、要素試験を実施し(図2)、課題抽出と対策案を整理中。
- ・ アクセストンネル(図3)のスリーブ遠隔設置について、前提条件、送り出し工法および装置の検討結果を整理し、遠隔で原子炉建屋外からPCV側に送り出して設置する「全体送り出し方式」（アクセストンネル本体と同じ送り出し方式）を選定。課題および試験等で確認が必要な項目について整理し、要素試験計画を立案し、要素試験を実施。結果および課題を整理中。
- ・ アクセストンネルのスリーブ遠隔溶接について、課題および試験等で確認が必要な項目について整理した。課題の1つである酸化物発生への対策として、溶接ヘッドのシールド性改善設計を実施。他の課題への対策検討も行き、要素試験計画を立案し、要素試験を実施(図4)。結果および課題を整理中。
- ・ アクセストンネル遮蔽体追設方法として球状遮蔽充填案を検討。要素試験計画を立案し、要素試験を実施。結果および課題を整理中。
- ・ アクセストンネル設置のためのシールドブロック解体について、解体手順を検討。要素試験計画を立案し、要素試験を実施。結果および課題を整理中。

(2) 解体・撤去技術の開発

- ・ HVH(Heating Ventilating Handling Unit)解体について、前提条件を整理し、解体作業ステップを検討。作業ステップの詳細検討および大型ロボット、揚重装置の仕様整理と概略構造検討を実施した。要素試験を実施し、結果および課題を整理中。(図5)

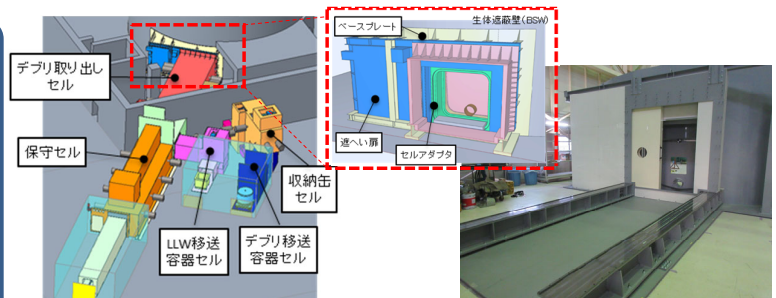


図1 アクセス用設備イメージ

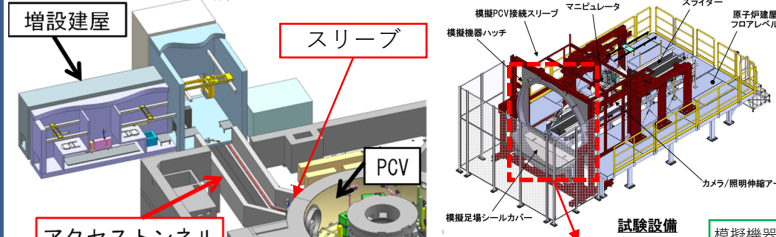


図2 バウンダリ部試験状況

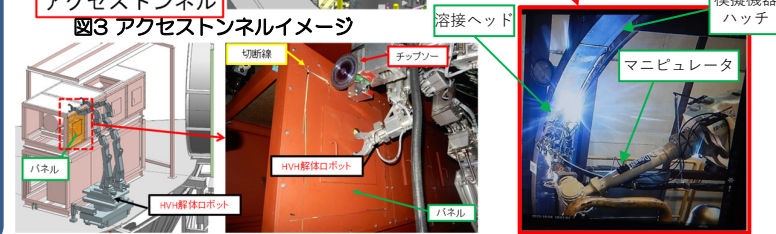


図3 アクセストンネルイメージ



図4 溶接試験状況



図5 HVH解体要素試験状況

燃料デブリの取り出し工法の開発（2/2） （2023年2月末時点における進捗状況）

実施内容及び成果

1. 横取り出し工法の開発

(2) 解体・撤去技術の開発（続き）

- 制御棒駆動機構(CRD:Control Rod Drive)交換機解体について、前提条件を整理し、解体作業ステップを検討。作業ステップの詳細検討を行い、装置の仕様整理と概略構造検討を実施。落下防止と切断片搬出に関する基礎試験を実施し、要素試験計画を立案し、要素試験を実施。結果および課題を整理中。(図6)
- ポンプビット内干渉物撤去について、前提条件を整理し、作業ステップを検討。試験に使用するポンプ模擬体(図7)の検討および実機で使用する揚重装置の仕様整理と概略構造検討を実施し、要素試験を実施。結果および課題を整理中。

(3) 取り出し工法の高度化開発

- 取り出し用遠隔先端ツールについて、加工試験(要素試験)を実施し、干渉物・デブリ加工性能等のスループット精緻化に資するデータを取得。取得データの整理を行うとともに、干渉物・デブリ加工に係る課題抽出と対処策を整理中。(図8)
- オペレータの遠隔操作を支援する操作システムにおいて、モックアップを用いた試験を実施。PCV内狭隙部における障害物回避等性能等のスループット精緻化に資するデータを取得するとともに、操作システムによる操作負荷低減効果を確認。取得データの整理を行うとともに、操作システムの課題抽出と対処策を整理中。(図9)

2. 上取り出し工法の開発

(1) 大型構造物の取り出しコンセプト実現に向けた技術開発（図10）

- 大型一体搬出工法について前提条件を整理。RPVヘッド解体方法について、スタッドボルトをアプレシブウォータージェット(AWJ)で切断する方法を検討し、要素試験により実現性を確認して課題を抽出した。炉心部等の充填固化方法および炉内構造物切断方法について概念検討実施。炉内構造物切断の要素試験計画を立案し、要素試験を実施。結果および課題を整理中。(図11)
- 大型構造物を一体で収納する大型搬出容器について、前提条件を整理し、開発方針を検討。大型搬出容器の製作手順を考慮し、試験での模擬範囲について検討し、課題を整理して要素試験計画を立案し、要素試験を実施。結果および課題を整理中。また、大型搬出容器の実機運用方法について概念検討を実施し、結果を整理中。
- 大型構造物を搬送するための大型搬送装置構造について前提条件を整理。連絡通路・増設建屋での取り扱いを考慮した場合、駆動部と気密ゲートの干渉が課題になるため、開発課題について検討。要素試験を実施し、結果および課題を整理中。

注) 研磨材を混合した超高压水を噴射し切断する方法

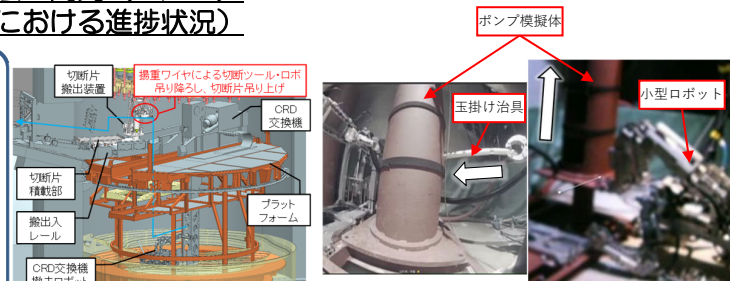


図6 CRD交換機解体イメージ

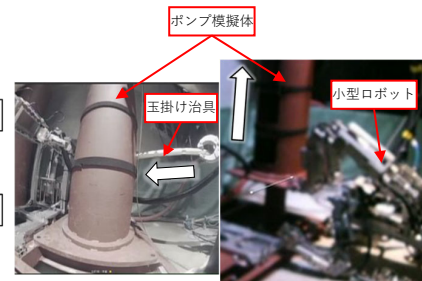


図7 ポンプ吊り上げ試験状況

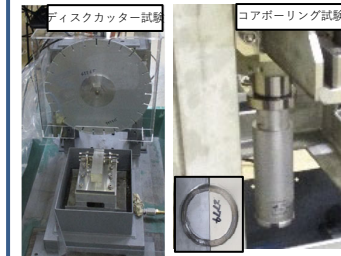


図8 先端ツールによる加工試験状況

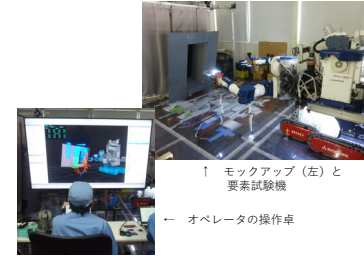


図9 モックアップ試験状況

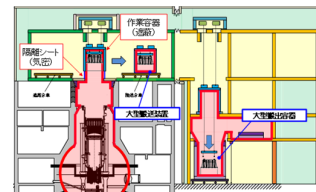


図10 大型一体搬出工法イメージ

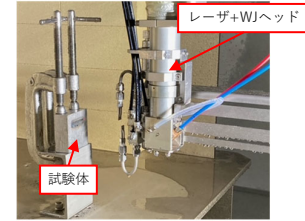


図11 切断要素試験状況

今後の方向性

- 要素試験において抽出した課題から、開発計画を策定し工法の実現性に資する検討を具体化していく予定。

Development of Fuel Debris Retrieval Method - (Progress by End of 02/2023) [ONET]

Development of technologies allowing the application of coating onto Fuel Debris (FD) and internal elements of PCV with remote control system in order to prevent the dust dispersion of Fuel Debris during Fuel Debris processing and/or retrieval operations

Project Outline and Outcomes

(1) Input data and selection of coating candidates (07/2021 - 06/2022):

- Functional analysis vs input data of situation on site
- Market survey and first choice of coating candidates (45)
- Technical analysis & lab tests in order to selection best candidates for the future application on site (4 coatings)
- Manufacturing of Fuel Debris simulants as representative as possible of the situation on site for tests

(2) Tests to prove the efficiency of coating in terms of dust dispersion suppression (11/2021 - 12/2022):

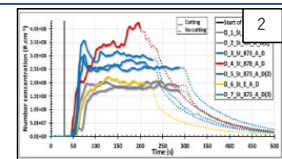
- During Fuel Debris Processing (laser cutting, disk cutting, core boring) with monitoring of airborne particles production (Figures (1) & (2))
- Due to the fall of an object & aerodynamic and hydraulic stress (Figure (3))

(3) Tests to qualify and prove the applicability of the coating system (11/2021 - 11/2022)

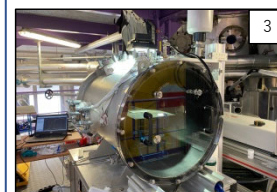
- Lab tests have been carried out in order to ensure that the coatings have the expected properties vs situation on site (resistance to irradiation, pot life, innocuity inside PCV, etc.)
- Tests of spray and injection with remote controlled system on representative mock-up to verify the applicability (Figure (4))

(4) Impact study for application on site (11/2021 - 03/2023)

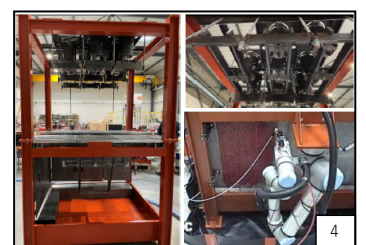
- Impacts are studied considering the cooling of Fuel Debris on site, waste management, impact on existing systems (filtration systems in air and underwater, etc.)



1. Coatings have been implemented on FD simulants (1) before laser cutting in a specific airtight cell. Airborne particles production is monitored in order to assess the efficiency of the coating in terms of dust resuspension suppression (2)



Dust resuspension due to mechanical, aerodynamic and hydraulic stress will be tested in dedicated facilities (3)



Representative mock-up in order to test the applicability of the coating system (4)

Future directions

- Synthesis of results must be established in order to give a full vision of applicability inside the PCV
- Improvement of operability on site to cover the remaining issues: vision, control of coating quality and coating thickness
- Additional properties for coatings may be developed to solve the remaining issues
- First operational prototype to be designed, manufactured and tested before implementation on site

燃料デブリの加工及び取り出し作業時のダスト飛散抑制を目的とした燃料デブリへの飛散抑制材塗布技術及び遠隔制御システムの開発を実施。

実施内容及び成果

(1)インプットデータ及び飛散抑制材候補の選定（2021年7月～2022年6月完了）：

- ・飛散抑制材選定の評価基準決定のための機能分析、現場状況とシナリオの研究を実施。
- ・市場調査及び飛散抑制材候補を一次選定（候補数：45）。
- ・次の開発段階に向けた現場に最適な飛散抑制材候補選定のための技術分析及びラボ試験を実施（最終候補数：4）。
- ・今後の試験に向けた現場状況を可能な限り網羅した模擬燃料デブリを作成。

(2)選定した飛散抑制材の飛散抑制効果実証試験（2021年11月～2022年12月完了）：

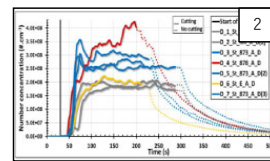
- ・燃料デブリ加工時（レーザー切削、グラインダー切削、コアボーリング）の気中飛散粒子生成物を観察（写真①、②）。
- ・構造物落下時、空力及び水圧による応力等、デブリ加工時以外のダスト飛散事象を想定した試験を実施（写真③）。

(3)飛散抑制材塗布システムの現場適用性確認試験（2021年11月～2022年11月完了）：

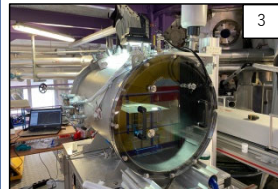
- ・飛散抑制材の現場状況に対する特性確保を目的としたラボ試験を実施（照射耐性、ポットライフ、原子炉格納容器（PCV）内での無害性等）。
- ・現場適用性実証のためのモックアップを用いた遠隔操作による塗布・注入試験を実施（写真④）。

(4)現場での飛散抑制材使用による影響の検討（2021年11月～2023年3月完了予定）：

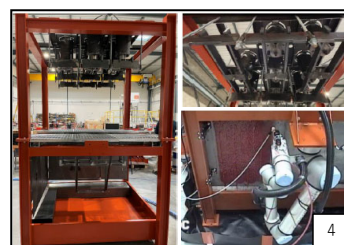
- ・現場での燃料デブリ冷却、廃棄物管理、既存システム（気中・水中フィルタリングシステム等）を考慮した影響を検討。



レーザー切削前の模擬燃料デブリへの飛散抑制材塗布(写真①)。
塗布材の飛散抑制効果評価のための気中飛散粒子生成物の監視(写真②)。



専用施設での空力及び水圧による応力、機械的切削によるダスト再浮遊試験実施(写真③)。



飛散抑制材適用性確認試験のためのモックアップ設備(写真④)。

今後の方向性

- ・PCV内部における適用性の展望の全体像を明らかにするため、事業実施結果のまとめを作成する。
- ・今後の事業展望や飛散抑制材塗布品質・塗膜厚管理といった、残された課題に取り組むため、現場における操作性向上について検討する。
- ・残された課題解決のため、飛散抑制剤の追加的な特性について検証する。
- ・現場導入前に、操作可能プロトタイプ初号機の設計、製造、試験を実施する。

大型構造物取り出し及び搬送時における汚染拡大防止隔離技術の開発 （2023年2月末時点における進捗状況）

【IRID・日立GE】

燃料デブリ・炉内構造物の取り出し時の放射性物質の閉じ込め、作業員の被ばく線量の低減のため、炉内から取り出した構造物による連絡通路内の汚染範囲を低減するために、遮蔽機能を有する作業容器と隔離シートを用いた隔離技術を開発中。

開発課題と実施項目

【開発課題】

- ・燃料デブリ取り出し工事の現地施工性を向上するには、可能な範囲で汚染エリアの限定していく必要がある。
- ・現状では連絡通路でバウンダリを確保しようとする場合、連絡通路内全体に汚染が拡散するリスクがある。

【実施内容】

- ・汚染エリア区分の明確化：燃料デブリ取り出し作業により発生する汚染物質、その拡大する経路などを整理し、目標とする連絡通路の汚染エリア区分を明確化する（図1）。
- ・汚染物質の閉じ込め方法：大型構造物取り出し及び搬送時における汚染物の閉じ込め方法、および手順の検討を行う（図2）。
- ・隔離機構の選定：汚染拡大防止のための隔離機構について、閉じ込め性、遠隔作業の確実性・容易性、頑強性・耐久性、点検・保守性などの観点で評価、選定し、最適な技術について検討する。
- ・現場適用性評価：検討した技術について、模擬試験体による要素試験を実施し、製作性・装置への収納性・気密性等の確認を行い、現場適用性を評価する。

得られた成果

- ・目標とする汚染エリア区分を明確化した。
- ・隔離機構として、閉じ込め性や取り扱い性から接合方式(隔離シート)を選定した。
- ・隔離シートを用いた大型構造物取り出し時や搬送時における汚染物の閉じ込め(隔離機構)方法の具体化を検討し、結果を整理中。
- ・隔離シートの接合・切断方法を具体化し、実現性を確認するための試験計画を立案し、試験を実施して結果および課題を整理中。(図3)

【注記】色で以下の汚染レベルを表記
R(赤色):レッド(高汚染)区域, Y(黄色):イエロー(中汚染)区域, G(緑色):グリーン(低汚染)区域
(汚染エリア区分等は検討中のため今後変更する可能性がある)

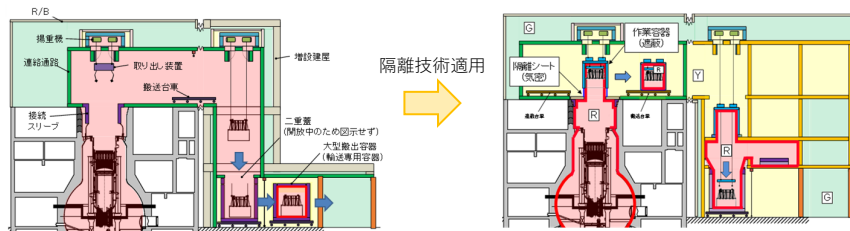


図1 目標とする汚染エリア区分の明確化

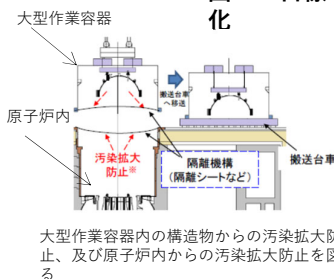


図2 汚染物の閉じ込め方法概念図

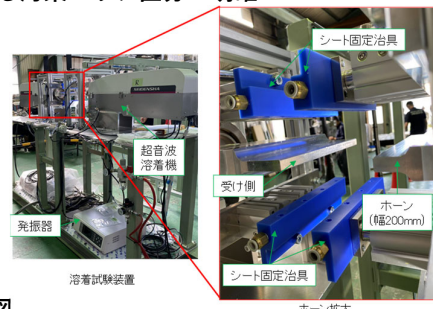


図3 隔離シート接合に関する試験
(隔離シートをクランプし、超音波溶着)

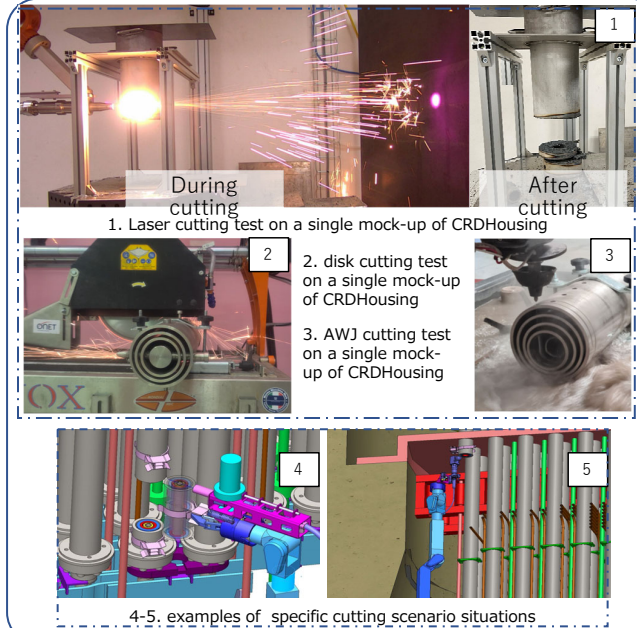
今後の方向性

- ・要素試験にて抽出した課題も含め、隔離シートの実機適用に向けた課題への対応方針を具体化し、開発計画を策定して隔離技術の実現性に資する検討を進めていく予定。

Development of technologies allowing the cutting of CRDHousing and the prevention of falling objects during their cutting.

Project Outline and Outcomes

- (1) Analysis of input data & Functional analysis (05/2022 – 06/2022):
 - Gather input datas to clarify CRDHousing environment and CRDHousing states
 - Functional analysis : functions identified and compulsory are :
 - o The system must cut the CRD-Housing
 - o The system must retrieve the cut pieces of CRDHousing
 - o The system must prevent the fall of objects locally and globally
- (2) Essential Tests, and, preliminary and implementation studies (06/22 – 12/2022):
 - Perform comparative tests on a single mock-up of CRDHousing with 3 different cutting tools : laser, disk cutting and AWJ (Figure (1), (2), (3))
 - Disk cutting abandoned due to blocking and fast wear
 - Successful cutting with AWJ and laser
 - Challenge on implementation in congested area of the pedestal
- (3) Laser operationnal Tests on bottom vessel's mock-up (09/2022 – 03/2023)
 - Assess the cutting performance
 - Confirm the reachability
 - Additional tests on HCU and grid system
- (4) Conceptual studies (12/2022 – 03/2023)
 - This study will establish a framework for the final onsite realistic scenario, with a solution to each case that could be encountered onsite (Figure (4), (5)).



Future directions

- Develop a higher power bent laser head to improve access to congested zone
- Make a safety and criticality approach/analysis on the prevent fall topic to define preliminary safety orientations
- Extend the scenario study to HCU outside the PCV
- Drive a Conceptual study of the platform

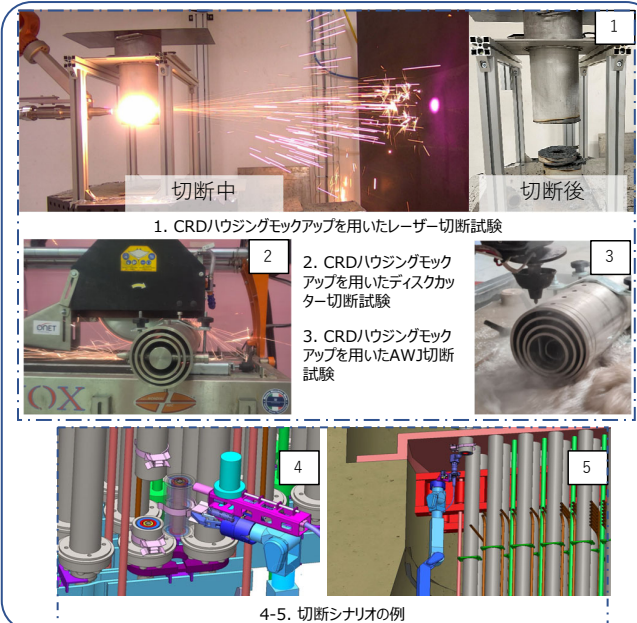
燃料デブリの取り出し工法の開発（CRDハウジング切断、撤去技術の開発） (2023年2月末までの進捗状況)

【ONET】

CRDハウジング切断に適した技術及び切断時の落下物防止技術の開発を実施。

実施内容及び成果

- 1.インプットデータ分析及び機能分析（2022年5～6月）**
 - CRDハウジングの環境及び状態を明確化するためのインプットデータ収集・分析。
 - 機能分析：必須と特定された機能は以下の通り。
 - o CRDハウジングを切断する機能
 - o CRDハウジングの切断片を除去する機能
 - o 局所的及び広域的に構造物の落下を防止する機能
- 2.要素試験及び予備検討・開発の実施（2022年6～12月）**
 - CRDハウジング単独モックアップにおける3種の切断技術（レーザー、ディスクカッター、AWJ）の比較試験の実施（写真①、②、③）。
 - 切断時の噛みこみによる停止と刃の摩耗でのディスク交換多発により、ディスクカッター切断技術の適用候補から除外の方向。
 - AWJ及びレーザー切削による切断成功。
 - ベDESTAL内狭隘エリアにおける切断技術及び切断位置の予備検討の実施。
- 3.モックアップ下部におけるレーザー切断操作性確認試験の実施（2022年9月～2023年3月予定）**
 - レーザーの切断性能評価。
 - 到達可能性の確認。
 - HCU（制御棒駆動水圧制御ユニット）及びグリッド系の追加試験の実施。
- 4.概念検討の実施（2022年12月～2023年3月予定）**
 - 現場で想定される対応策を考慮した、最終的な現場適用に向けた現実的シナリオ検討のためのフレームワークの確立。（画像④、⑤）



今後の方向性

- 狭隘ゾーンにおけるアクセス改善を目的とした高出力屈折レーザーヘッドの開発を実施する。
- 予備的安全性適応を明確化するための安全性及び信用性のある手法/分析方法を検討する。
- シナリオ検討をPCV（原子炉格納容器）外部HCUまで拡張する。
- 概念検討プラットフォームを運用する。

安全システムの開発（液体系・気体系システム、臨界管理技術） （2023年2月末時点における進捗状況）

【IRID・日立GE/東芝ESS/MHI/JAEA】

燃料デブリ・炉内構造物の取り出し中における安全システムの開発として、燃料デブリから循環水中に溶出すると考えられる溶解性 α 核種の除去技術の開発、RO濃縮水（*）の処理技術の開発及び二次廃棄物処理技術の開発並びに臨界近接監視技術・中性子吸収材技術の現場運用方法に関する技術の開発を実施した。* 逆浸透膜（RO(Reverse Osmosis)膜）によって不純物を除去する場合、除去後に残る不純物濃度の高い溶液。

実施内容及び成果

1. 液体系・気体系システム開発

①溶解性 α 核種除去技術の開発

- 原子炉格納容器への窒素封入の影響を考慮した環境下においても、循環冷却水中の α 核種を除去可能な吸着材を選定するため、吸着試験を実施し、試験結果より除去性能の高い α 核種吸着材を選定した（図1）。

②RO濃縮水の処理技術の開発

- RO膜装置で発生する濃縮水の処理方式として、粉末吸着材および凝集剤を併用した手法を検討し、適用可能な吸着材、凝集剤の候補を要素試験により選定し、処理方式を立案した。

③二次廃棄物処理技術の開発

- RO濃縮水処理により発生する沈殿スラッジの脱水技術として、カートリッジフィルタによる脱水を選定し、要素試験により適用性確認を実施。脱水性能やろ過速度などのデータを取得した。（図2）

2. 臨界近接監視技術・中性子吸収材技術の現場運用方法の開発

①現場運用手順の開発

- 大規模取り出し時の中性子検出器を用いた臨界近接監視について、現場運用イメージを具体化し、燃料デブリ取り出し工法検討側と共有した。
- 新型中性子検出器（コロナ放電利用型、SiC半導体型）について臨界実験装置での試験及びガンマ線との弁別性能試験（図3）を実施し、高ガンマ線環境での未臨界度測定が可能であることを確認した。
- 大規模取り出し時に、いずれのデブリ取り出し工法においても守るべき臨界管理の基本的要求事項をまとめた。

②固化型吸収材技術の開発

- 水ガラス/Gd₂O₃を主成分とする中性子吸収材が付着した燃料デブリを模擬して試験を実施し、乾燥データ（乾燥特性曲線）を取得して、デブリ乾燥プロセスに特段の悪影響が生じないことを明らかにした（図4）。

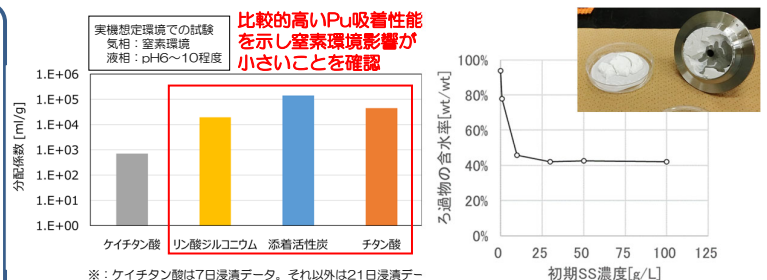


図1 α 核種吸着試験結果（Pu吸着試験の例）

図2 カートリッジフィルタ試験結果（ろ過物含水率-SS濃度）

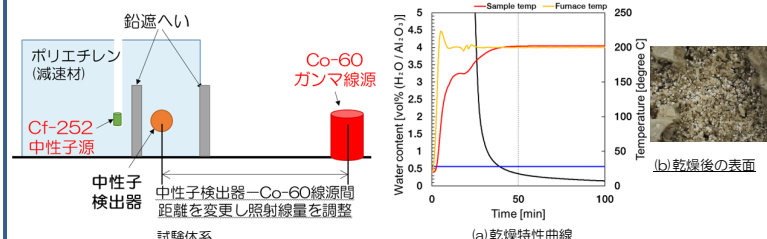


図3 ガンマ線と中性子線の弁別性能試験

図4 乾燥試験結果（水ガラス塗布多孔質体）

今後の方向性

- 各水処理設備における要素技術の実機適用性を評価し、概念設計を実施する必要がある。
- 今後具体化されるデブリ取り出し工法に基本的要求事項を照らして臨界管理の種々の手段を実装し、中性子検出器や吸収材投入装置の詳細設計とモックアップ試験による検証に移る。

安全システムの開発（ダスト飛散率データ取得） （2023年2月末時点における進捗状況）

【電中研】

燃料デブリ取り出しにおける燃料デブリ切削時のダスト飛散に関連した安全評価技術開発を目的に、実用候補の4切削工法について、非被水環境で金属、セラミックス、(U,Zr)O₂等の均質供試体を乾式切削し、ダスト飛散率データを材料物性と切削条件に対し系統的に取得した。さらに模擬性の高い非均質なウラン含有模擬燃料デブリと比較するとともに、切削法に応じた粒形状ダストの飛散挙動を模擬できる解析手法を構築した。取得したデータを用いて通常時と事故時の被ばく線量を評価する方法を検討し、安全評価に必要な課題を整理した。

実施内容及び成果

1. 燃料デブリ取り出しに必要とされるダスト飛散率の調査・検討

- 燃料デブリ取り出し作業において、放射性ダストが発生する作業や場所、放射性ダストの移行経路等を検討し（図1）、さらに安全評価の対象とすべき放射性核種の候補を抽出し、下記により取得したデータを用いて通常時と事故時の被ばく線量を評価する方法を検討し、安全評価に必要な課題を整理した。

2. ダスト飛散率測定試験

- 気流条件や微粒子計測法を統一した試験体系を複数構築し（図2左）、非被水環境で、燃料デブリと類似する物性を持つ均質な供試体（金属：SS400/SUS304、酸化物：Al₂O₃（図3）、MCCI: ZrSiO₄/モルタル）を、ディスクカッター、チゼル、コアボーリング、レーザーの4工法について様々な切削条件で乾式切削し（図4）、系統的なダスト飛散率データを取得した。

- 得られた粒径分布や飛散率は、図5のように回転速度等の切削条件や供試体に依存し、ディスクカッターでは図6のように重回帰分析による予測式が実測値と良く一致した。

3. ダスト飛散挙動評価試験

- 【2】と同等な試験体系を国内管理区域に構築し、均質なウラン含有酸化物供試体（図3：(U,Zr)O₂, (Zr,U)O₂, (U,Zr)O₂-(Zr,U)O₂二相共存）を作製して、ディスクカッター切削によるダスト飛散率データを測定した。

- この結果を【2】のデータと総合し、ウラン含有酸化物のダスト飛散率のディスクカッターによる切削条件依存性を評価した。さらに、加算則を想定して、金属が共存する任意組成の非均質デブリのダスト飛散率の推算法を検討した。

- 他工法についても工法間の相対評価によりウラン含有酸化物データを推定した。
- 【2】と同等な試験体系（図2右）を国外管理区域に構築し、模擬性の高い非均質なウラン含有模擬燃料デブリ（図3）を調達して、ディスクカッター切削によるダスト飛散率データを取得し、上記の推算法による飛散率と比較検討した。

4. ダスト飛散挙動の解析

- 非球形の粒子挙動評価モデルで【2】の試験体系を評価した結果、機械的切削で見られた平板状の粒子は排気口まで飛散し（図7）、試験結果を説明できた。
- 飛散率の文献値を数値解析により本事業の共通条件に修正しデータ整備した。

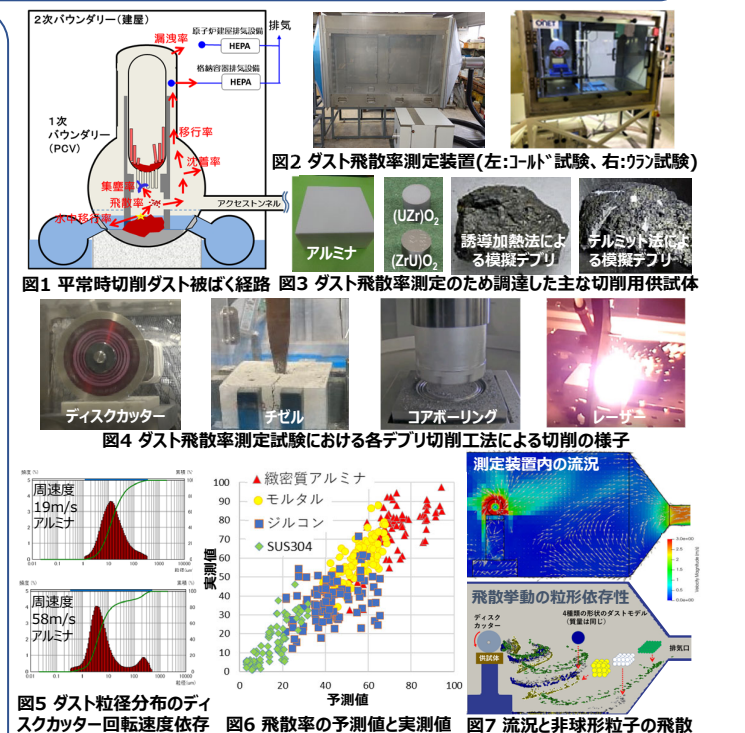


図5 ダスト粒径分布のディスクカッター回転速度依存

図6 飛散率の予測値と実測値

図7 流況と非球形粒子の飛散

今後の方向性

通常時と事故時の安全評価に向け、MCCIを含むデブリの乾式切削条件でのウランデータ取得を進めるとともに、ダスト飛散が抑制される湿式切削条件での飛散率データの取得と解析技術開発を進める。

福島第一原子力発電所の廃止措置において、放射性物質の内部取り込みに対する防護（発生防止又は被ばく低減）、被ばく線量の測定・評価及び被ばく時の医療介入等を含めた、内部被ばく事象に対応するための管理システムを包括した内部被ばく線量評価プログラム全体の概念及び詳細を検討し、燃料デブリ等取り出しの安全実施に向けた課題の解決のための検討・技術開発を実施する。

実施内容及び成果

1. バイオアッセイの迅速化等に向けた調査・検討

- 放射性物質の内部取り込みリスクに備えたバイオアッセイの迅速化に向け、国内外のラボの実態及び文献を対象とした調査から廃止措置を進めるうえで必要となるバイオアッセイに関する情報を総合的に整理した。また、新たな試料採取キットの試作・試験等も行い、バイオアッセイを迅速かつ効率的に実現する採取・分析・測定方法及び分析設備の検討を進めている。

2. ろ紙試料（鼻スミヤ等）を用いた放射能測定、核種分析の精度確認及び向上

- 実際の廃止措置現場で採取されるろ紙試料（空気ろ紙、スミヤろ紙等）に付着したα核種やβ核種の放射能測定に係る精度（不確かさの幅など）を把握するため、模擬試料を様々な手法で測定し、評価を行った。
- 測定の容易さ及び迅速性に重点を置いた新たな鼻スミヤを試作し性能評価を行った。

3. 体外計測法による体内残留量測定の品質確認

- 体外計測に係る装置及び手法を対象とした国内外の規格等を調査し、装置の性能を評価するための試験方法、解析方法等を現場に適用するにあたっての課題を抽出し、体外計測器の運用に必要な情報を整理した。
- 肺モニタの計算モデルを構築し（図1）、シミュレーションにより体内に残留する核種の種類・強度・数・位置等のパラメータを変化させて体内残留量測定の不確かさを評価した。

4. 作業環境中汚染（空気及び表面）に対する防護措置及び防護装備の最適化

- 作業環境中の汚染（空気、表面）に対する防護と身体負荷軽減を実現する新たな防護装備を試作し、性能評価試験を行った（図2）。
- 汚染が付着した防護装備の脱装手順について、迅速化とクロスコンタミネーション防止を踏まえた最適化を検討した。

5. 身体汚染に対する除染剤及び除染方法の改良

- 身体（防護装備表面及び身体）の汚染に対する除染剤や除染方法の評価・改良のため、コールド試験（放射性物質を用いない予備試験）を行う試験環境を整備し、現在運用されている手法の効果の定性・定量評価を実施した。
- コールド試験で効果が認められた除染方法について、放射性物質及び豚皮（薬剤の浸透性等が人体皮膚に近いとするデータあり）を用いた試験を行い効果を検証した。

6. 放射性核種の摂取に伴う医療介入の実態調査及び対応システムの開発

- 近年の国内での被ばく事象に係る対応状況や社会情勢、海外のPu同位体による内部被ばく（創傷汚染含む）の事例に係る対応実績の調査結果等を踏まえた対応プロトコルの原案を検討するとともに、コンセンサスの取得が困難な課題等の抽出を行った。

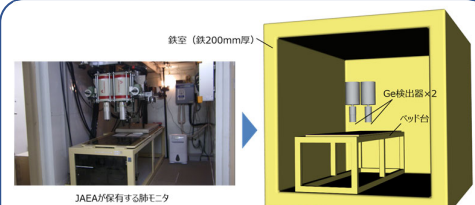


図1 肺モニタの外観と放射線輸送シミュレーション計算用3Dモデル



図2 試作した防護服の防水性能試験の様子

今後の方向性

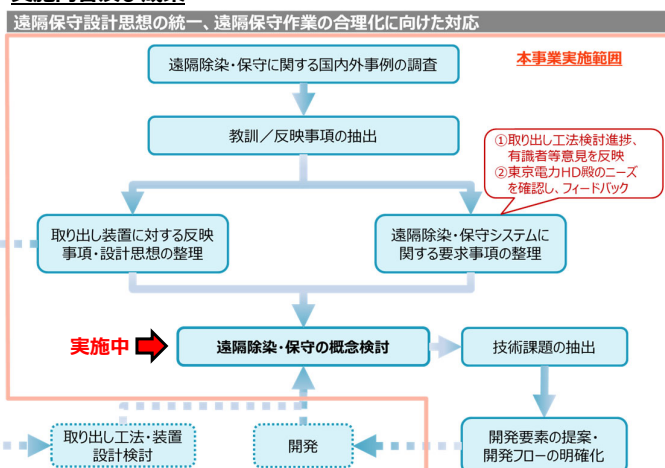
今後の技術課題を整理するため、以下を行う。

- 各テーマの成果を俯瞰・横断的に整理・評価する。
- 廃炉進捗・現場ニーズと現状での技術成熟度を比較する。必要に応じて現状の管理に対する見直し提案を検討する。
- 有識者等からの意見を聴取する。

遠隔装置保守技術の開発 （2023年2月末までの進捗状況）

燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大において、安全確実な取り出しの継続、及び廃棄物発生量の低減に資する遠隔装置保守技術を確立するため、燃料デブリの取り出し～移送・処理～保管に係る一連のプロセスを考慮した全体最適での遠隔除染・保守の概念を明確化する。保守内容に応じた保守計画の提示と、遠隔除染・保守施設概念の提示を行い、具体的な開発要素とその優先順位の立案を行う。

実施内容及び成果



遠隔除染・保守に関する国内外事例の調査、教訓/反映事項の抽出

- 国内外の高線量かつ高汚染環境での運転を前提とした遠隔操作・保守施設の事例調査を行い、福島第一原子力発電所（1F）への教訓/反映事項として整理した。
- 高放射性物質取扱施設設計ガイドライン等の文献調査も実施。

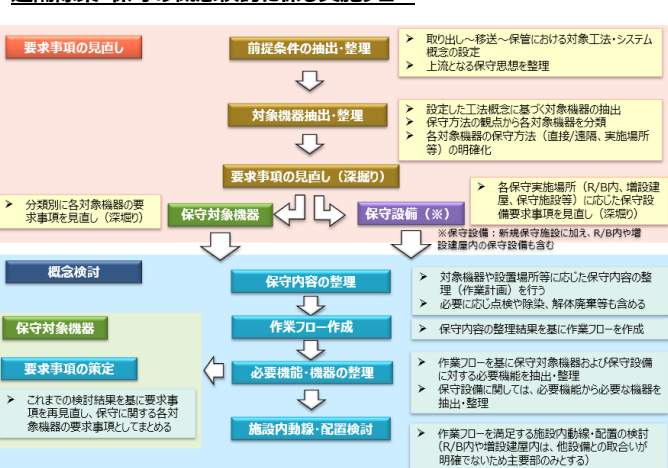
遠隔除染・保守システムに関する要求事項の整理

- 1Fの燃料デブリ取り出し（取り出し規模の更なる拡大）を対象とした遠隔保守システムについて、以下の項目ごとに要求事項を整理した。
 - ① 保守施設 ② 保守エリア ③ 保守用機器 ④ 除染システム
 - ⑤ 移送機器 ⑥ 遮蔽・閉じ込め

取り出し装置に対する反映事項・設計思想の整理

- 1Fの燃料デブリ取り出し（取り出し規模の更なる拡大）を対象とした取り出し装置について、以下の項目ごとに要求事項を整理した。
- ① 遠隔保守を行うための要求事項 ② 直接保守を行うための要求事項

遠隔除染・保守の概念検討に係る実施フロー



遠隔除染・保守の概念検討

- 前段で整理した要求事項に対して、具体的な保守対象機器を抽出・分類した上で、要求事項の見直し（深掘り）を実施した。
- 遠隔保守システムの概念検討として、保守施設に必要な機能・機器を整理した上で、施設内動線及び機器配置を検討する。

技術課題の抽出

- 概念検討結果に基づき、今後の技術課題を抽出する。

今後の方向性

- 概念検討～課題抽出にあたっては、有識者等からの意見及び廃炉進捗を踏まえ、検討の方向性を協議した上で設計思想の具現化及び今後の技術課題について整理する。

燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発（燃料デブリの乾燥技術）

（2023年2月末時点における進捗状況）

【IRID・MHI/東芝ESS/日立GE】

燃料デブリの収納缶開発に向け、供試体種類／形態、乾燥形態等に対する乾燥処理方法や運転上のパラメータの拡充・充実のため、乾燥特性を把握するための要素試験及び実規模試験を実施。

実施内容及び成果

1. 乾燥対象の種類、乾燥形態等の乾燥処理方法及び運転上のパラメータの拡充

燃料デブリやその加工物の性状やサイズが多様であることを踏まえ、候補となる乾燥対象物を表1のとおり整理。試験は図1を使用し、データ未取得であるコンクリート等の難乾燥物を中心として、乾燥特性を把握するための試験を実施し、各対象の乾燥処理の適用性を整理。

表1 乾燥候補対象物に対するデータ取得状況

分類	発生源	概要	イメージ	データ取得状況(～2020年度)
				Zeol. SUS スラッジ Conc.
切替燃料デブリ		燃料集合体の一部が溶融せずに残留したもの		○ — — —
塊状燃料デブリ、MCCI		ゆっくりと冷却されて塊状となったもの		○ — — 未
小石状燃料デブリ		溶融した炉心材料が急冷され、小片化したもの		○ ○ — —
燃料デブリの付着した構造材		溶融せず残存した構造物に燃料デブリが付着したもの		○ ○ — —
スラリー・スラッジ		粉状、細かい粒子状燃料デブリ		— — 1条件(20%) 未
水処理フィルタ		粉状、細かい粒子状燃料デブリが付着したフィルタ		— — 未 未
ガス処理フィルタ		乾燥燃料デブリ粉が付着したフィルタ		— — 未 —

表中の□：2021～2022年度でデータ拡充。注1：2020年度までに1条件取得済。
(略称説明) MCCI: Molten Core Concrete Interaction (溶融炉心・コンクリート相互作用)
Zeol.: ゼオライト Conc.: コンクリート

2. 乾燥装置の概念や運転条件の設定に必要なデータの拡充

2020年度まで乾燥専用装置を用いた試験を実施し、移送可能な乾燥レベル、スループットを達成できる乾燥装置概念を構築。2021～2022年度では、より合理的に乾燥処理が可能と考えられる収納缶形態での処理を想定し、図3の試験装置を用いた実規模試験を実施し、収納缶での乾燥処理概念や乾燥処理に適する収納缶仕様を検討。

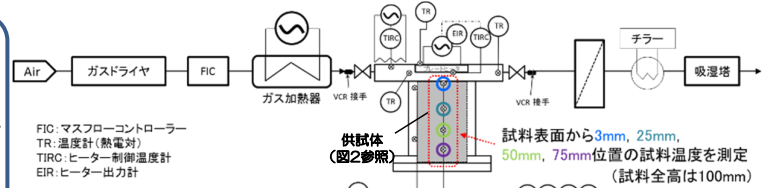


図1 要素試験イメージ

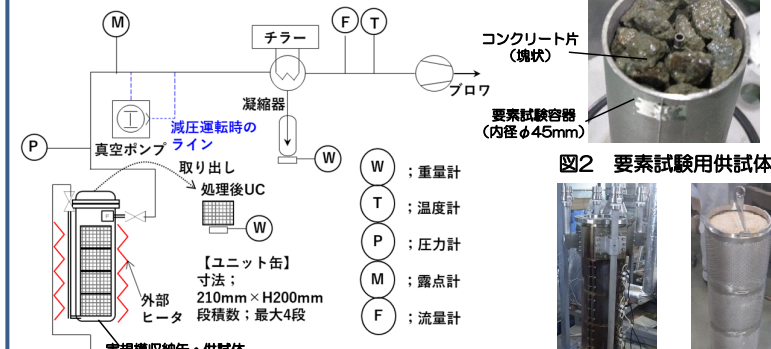


図2 要素試験用供試体

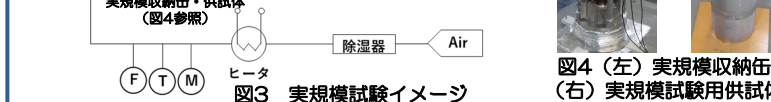


図3 実規模試験イメージ

図4 (左) 実規模収納缶 (右) 実規模試験用供試体

今後の方向性

要素試験および実規模試験の結果から、各対象物の乾燥処理適用範囲を明確にするとともに、収納缶での乾燥処理概念を構築し、乾燥の観点での収納缶仕様への要求・要望事項を整理する。

燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発（粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管までに必要な技術の開発）

（2023年2月末時点における進捗状況）

【IRID・MHI/日立GE】

粉状、スラリー・スラッジ状の燃料デブリ（以下、「粉状燃料デブリ」という。）を安全、確実かつ合理的に収納・移送・保管できるシステムの開発に向けて粉状の放射性物質の取り扱い事例の調査、水素ガス対策、粉状燃料デブリ及び随伴物の挙動の解明、保管様式の検討を実施。

実施内容及び成果

1. 粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの放射性物質の取り扱い事例の調査、分析

仏・アーク再処理工場等を対象として欧米での粉状、スラリー・スラッジ状の核物質や放射性廃棄物の取り扱い事例、保管方法、設備規模等の調査を実施。また、国内についても同様に、類似の施設の調査を実施。これらの調査より、粉状燃料デブリの取り扱いにおける注意点、安全確保のための考え方や設計への反映方法等、収納・移送・保管システムの確立に必要な経験、知見及び情報の分析、整理を実施。

2. 水素ガス発生特性、放出特性の検討

粒状、塊状燃料デブリと粉状燃料デブリの違いにより、水素発生に影響する因子の特定および各因子の影響度合いの調査を実施（図1）。各因子の影響度合いを考慮した、粉状燃料デブリに適用できる水素ガス発生予測法の検討と、水素ガス放出特性の影響評価により、粉状燃料デブリの課題である水素だまりの影響評価を実施。

3. 粉状燃料デブリの挙動の評価

粉状燃料デブリの舞い上がり等の挙動を評価するため、スラッジの飛散挙動、拡散沈降、重力沈着および凝集に関する文献調査を実施（図2）。文献調査に基づき、スラッジ層からの飛散速度、壁面への沈着速度、重力沈着速度および排気速度など、収納缶内のスラッジマスを評価する計算モデルの検討を実施。また、流動解析ではスラッジ層での挙動粒子飛散、形状変化等の詳細評価ができないため、スラッジ表面からガス相に飛散するスラッジ飛散速度及び平均粒径等の飛散データの取得試験を実施（図3）。取得データに基づく流動解析を実施。

4. 保管様式の検討

評価対象とする粉状燃料デブリの性状、安全要求事項等の検討条件の整理を実施。また、粉状燃料デブリの安全な取り扱いおよび保管状態に持ち込むための収納方法の概念に対する比較評価を実施。

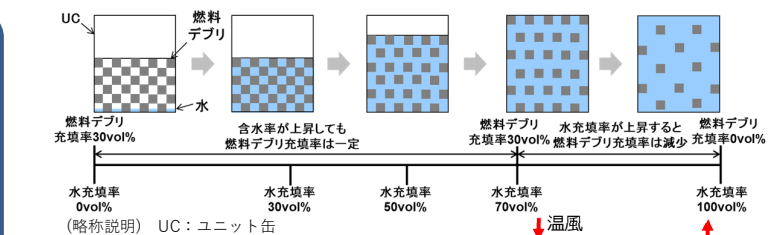


図1 UC内の水充填率と燃料デブリ充填率の関係（イメージ）

$$\text{掃流限界速度: } u_c^* = A_0 \sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd}$$

A_0 : 定数、 σ : 粒子密度、 ρ : 流体密度、 d : 粒子直径、 g : 重力加速度

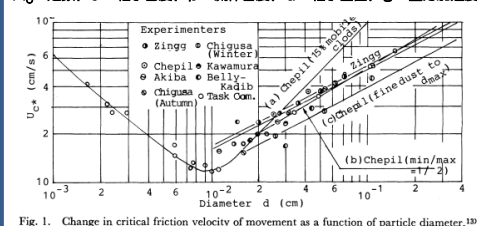


Fig. 1. Change in critical friction velocity of movement as a function of particle diameter.¹³⁾



図2 ガス横流れによる粒子飛砂（文献調査例） 図3 飛散データ取得試験装置（イメージ）

今後の方向性

- ・粉状燃料デブリの取り扱いにおける注意点、課題等の抽出、整理を行う。
- ・粉状燃料デブリの水素ガス発生予測法の実機適用に向けた評価を行う。
- ・粉状燃料デブリの挙動評価に基づく安全機能への影響評価を行う。
- ・粉状燃料デブリの収納方法の提案および絞り込みを行う。

燃料デブリ取り出し規模の更なる拡大において、設備運転員が日々の確・迅速な現場対応を行い、安全状態を維持しつつスループット（※1）を確保していくため、原子炉格納容器（PCV）内環境の連続的な監視技術について、重要な監視項目を抽出し、現場での監視方法およびデータ活用方法を検討した。

実施内容

1. PCV内監視項目の調査

一次バウンダリ内（図1に示すPCVとセル（※2）（R）（Y）（G））における安全機能を付加したデブリ取り出し・搬出プロセスを、安全設備と作業設備を用いてモデル化（デブリ取り出しモデル）し、リスク評価を行うことで監視システムが目すべき重要監視項目と監視要求仕様を設定する。

2. 監視方法の検討

重要監視項目の実行難易度が高いものは代替監視方法を検討する。その後、現場への計器設置および運用方法を検討し、技術課題を整理する。

3. 統合管理支援技術の運用方針検討

設備の運転員が、日々、的確迅速に現場対応するため、重要監視項目をデジタル監視データとして活用する方策、および実現のためのデータ処理工程の要求条件を検討する。

成果

- 重要監視項目を201件抽出（図1の青枠に一例を示す）し、それぞれに監視要求仕様（検出場所、検出箇所数、物理量単位、対腐食性要求、測定レンジ、測定環境条件、検出精度）を設定した。
- 代替監視方法の検討後に監視難易度が高いものを30件抽出した。想定する計器に対する現場での監視失敗要因をフィッシュボーンチャート形式などで抽出し、対策するための技術課題を整理した。
- デジタル監視データを活用する3つの支援技術（図2）を設定。これらに求めるタイムライン上のデータ蓄積・処理・出力要件ならびに、それを達成するシステムのハード構成・運用条件・保守方針を設定した。

今後の方向性 デブリ取り出し各工法設計者が監視システムを導入するための初期検討に資するよう、本成果を他の補助事業へ展開する。

※1：単位時間当りの処理量
※2：ここではPCV内の雰囲気気を閉じ込め、人間を被ばくから防護する設備を指す

※3：本モデルは表現の都合上、上取り出し工法を連想する内容だが、横取り出し工法も検討対象である。評価は両工法共通条件に基づく。

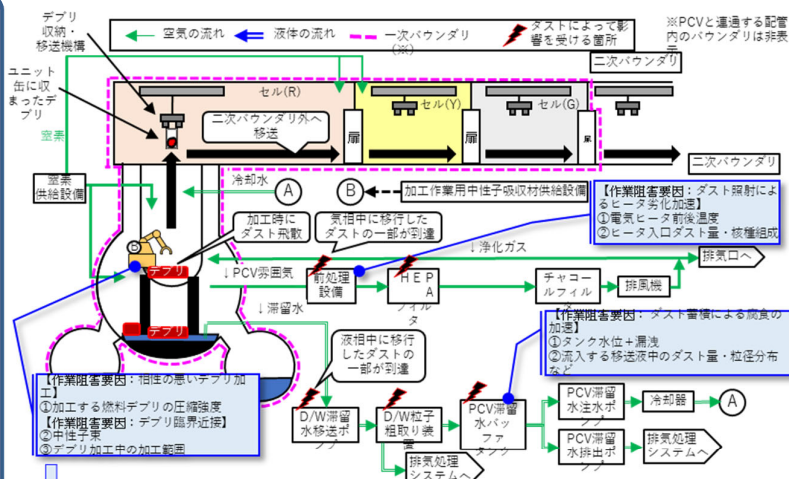


図1 デブリ取り出しモデルと各設備の重要監視項目の一例（※3）

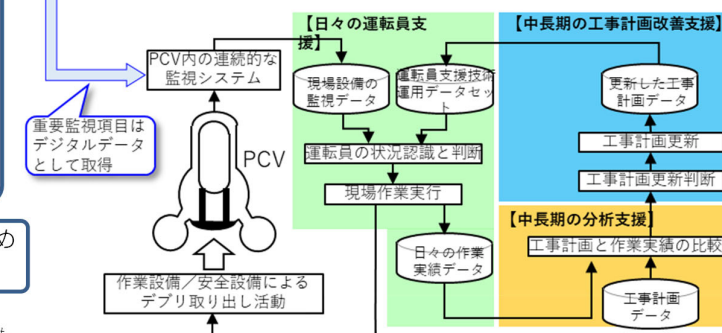


図2 3つの支援技術による監視データ活用概念案

固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発 （2023年2月末時点における進捗状況） 1/4

【JAEA】

- 固体廃棄物管理全体へ反映するため、分析データの取得・管理を行うとともに、効率的な性状把握のための取組を進める（1）。
- 安全かつ合理的な保管・管理のため分別に必要な汚染評価技術の開発を行い、物量低減のための減容・再利用技術に関する開発を行う（2）。
- 処理技術に関し、低温処理の適用性に関する課題の検討及び各種処理技術により作製された固化体の安定性を検討する（3）(a)。処分技術に関し、処分概念構築に必要な情報・知識を調査するとともに、処分施設における重要事象進展のストーリーボードの構築及び安全評価手法の改良を開始する（3）(b)。

実施内容及び成果

(1) 性状把握

(a) 分析データの取得・管理等

- ・2022年度の分析計画を作成し、1Fから茨城地区への輸送を9月に実施し、次回2023年3月の準備を進めている。瓦礫等の試料を採取するとともに、種々の試料を分析し、次のような結果を得た。
- ・原子炉建屋地下滞留水等に含まれる固体（スラッジ）は、10μm フィルタでほとんどの粒子が回収され、α核種を含有することが分かった（図1）。
- ・汚染水処理の蒸発濃縮操作で発生したスラリーは、Mg と Ca からなる塩を主成分とし、数 μm の大きさが主体となる粒子であり、主な放射性核種は⁹⁰Sr であることが分かった。
- ・硝酸溶液系に適合した分析法を開発し、汚染水等の⁶³Ni 濃度を分析し、炉心付近の汚染物中の⁶⁰Coと⁶³Niが相関することが分かった（図2）。
- ・上記を含めて分析の結果を分析データベースに収録した。分析試料の多様化に対応する分析データベースの改良とともに、新たに分析試料データベースの整備を進めた。
- ・高線量であるセシウム吸着材の採取が別途進められており、その分析方法の予備検討を進めた（図3）。処分安全において重要と考えられる¹⁴C、¹²⁹I分析法を検討した。
- ・燃料デブリ取り出しの際に発生する高線量廃棄物のインベントリ（含有放射エネルギー）を推定する手法に関して、γ核種であり難測定核種との相関が期待される¹³⁷Cs、⁶⁰Co と¹⁵⁴Eu を測定の対象に設定し、これらのデータに基づく手法の検討を進めた。

(b) 性状把握の効率化

- ・英国で実績のあるフィンガープリント^{※1}法の適用に関して、DQOプロセス^{※2}を利用して、フィンガープリントを決定するための分析を効率的に実施する計画法を検討している。
- ・廃棄物インベントリの推定において、廃棄物の母集団を決定する手法に関して、分析データを基にして分布を決定するために必要な試料数を統計的に求める方法を検討した（図4）。
- ・事故が発生したときに保管されていた廃棄物を対象として、事故の影響を考慮すべき対象の抽出を検討した。

※1 廃棄物が含有する放射性核種の組成。

※2 米国で開発された Data Quality Objectives（サンプリング計画の意思決定支援手法）。

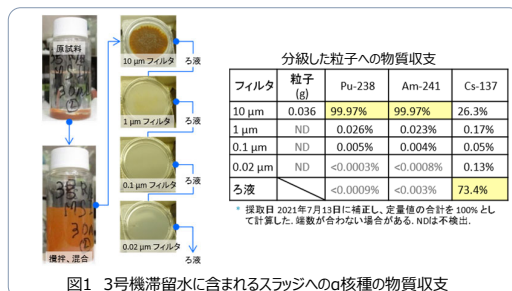


図1 3号機滞留水に含まれるスラッジへのα核種の物質収支

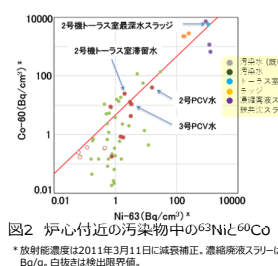


図2 炉心付近の汚染物中の⁶³Niと⁶⁰Co
*放射能濃度は2011年3月11日に減衰補正、濃縮廃液スラリーはBq/g、白抜は検出限界値。

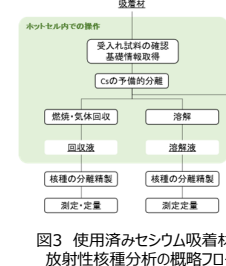


図3 使用済みセシウム吸着材の放射性核種分析の概略フロー

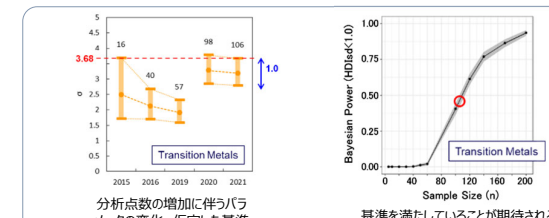


図4 放射性核種濃度の分布（パラメータ）を決定するために必要な分析試料数の検討例

(2) 保管管理

(a) 減容・再利用技術に関する技術開発

- 金属廃棄物のインベントリ推算に関わる検討
- ・既存のクリアランス規則などを参考に、半減期を考慮し181核種を推算の対象とした。
- ・炉内インベントリの解析値から移行経路、移行率等を設定のうえ、統計処理等により汚染組成（震災前汚染（2種）、震災後汚染（5種））を導出するとともに、対象廃棄物の管理状況、表面線量率や除染時の測定データなどの実情報をもとに汚染の重畳を考慮した推算評価モデル（図1）を構築し、78ケースの汚染インベントリを導出した。
- 溶融処理時の核種移行挙動の調査
- ・他産業を含む、溶融時における核種移行挙動に係る国内外の文献調査を実施し、溶融方式や運転時の各条件（温度、雰囲気、加熱時間、組成など）の関係と合わせて整理するとともに、溶融後金属中のインベントリ評価に資する各核種の移行率分布を仮定した。

○溶融試験による核種移行挙動の調査

- 異なる4つの炉型の試験炉（図2）を用い、導入が予定されている溶融設備の運転条件などを基に、各種運転パラメータを設定し（表1）、再利用検認時に主要な核種になると推定される代表元素を対象に、溶融試験を実施し、次年度の検討への反映を目指し、金属、スラグ、気相への移行率に係るデータ取得を継続している（図3）。
- 併せて分析が困難な元素などを中心に、熱力学計算による移行評価も実施している。

○溶融後金属再利用における重要核種の抽出と戦略立案

- ・ 上記検討において整理された汚染インベントリと移行率分布を基に、統計的手法を用いて溶融処理後の金属中のインベントリの算出方法を検討するとともに、検認時における重要核種を予備的に選定する。評価結果を解析し、次年度検討すべき課題を抽出している。

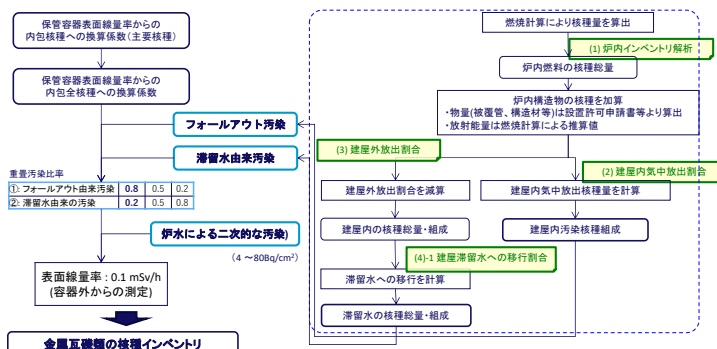


図1 構築した評価モデルの計算フロー例
3つの汚染（震災前汚染：炉水による二次的汚染、震災後汚染：建屋内
フォールアウト汚染、滞留水由来汚染）重畳時の金属瓦礫類の計算フロー



図2 試験に用いる溶融炉の例

表1 主な試験パラメータ

試験パラメータ	ケース数等
金属試料	2 (SS400, SUS304)
初期スラグ組成	2: 製鋼スラグ分析結果及び文獻値から設定
金属/スラグ重量比	実炉設計条件に基づく
溶融温度	3 (1500~1600°C)
雰囲気	2 (空気、Ar)
添加 (評価) 元素	Cs, Sr, Co, Fe, Sb, (C, Mn)

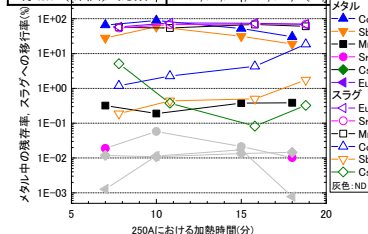


図3 取得した移行率データ例
(プラズマ炉, SS400, 基本スラグ条件における移行率)

**固体廃棄物の処理・処分にに関する研究開発
(2023年2月末時点における進捗状況) 3/4**

(3) 处理·処分

(a) 処理技術

①低温固化可能性に関する調査

- 除染装置スラッジに対する低温処理の適用性検討
 - ・スラッジへの低温処理（セメント固化、AAM固化）の適用性検討として、分析結果を基にスラッジ模擬物を選定し、強度、流動性など基本的な性能基準を満足する固化可能範囲を確認した（図1）。現在は固化可能範囲内の代表組成で作製した模擬固化体の水素発生、核種浸出などの性能に関するデータを取得している。
- 固化処理環境におけるフェロシアン化合物の安定性調査
 - ・スラッジに含まれるフェロシアン化合物について、低温処理を想定したアルカリ環境での安定性調査のため、電気化学分析（図2）により水溶液系での分解特性を調査した。引き続き固化体系での分解特性評価に関してデータ取得を実施している。

②固化体の安定性評価

i. 固化体等の浸出特性等の調査

- 固化体の浸出特性の試験方法等の調査、整理
- 材料の異なる**固化体の浸出特性試験方法と埋設深さによる周囲環境の情報**を調査し整理した（表1）。調査結果に基づき、**浸出試験方法と条件を定め、代表的な固化体（セメント、ガラス、スラグ）を対象とした浸出試験を継続している。**

ii. 固化体の長期的な安定性の検討

○加速試験による長期変質挙動の評価

- ・ 固体化変質に係る加熱、通過水分、中性化の3つの加速因子の影響定量化に向け、加速因子の測定方法を構築し、標準及び加速試験試料の構成相変質量と各因子の経時データを取得している（図3）。

○非晶質相の変化及び変化速度に関する検討

- 固化体中の不安定相である非晶質相の結晶化速度を把握するため、試薬により非晶質相を合成し、加熱等の加速因子と生成する結晶質の種類と量の相関性に係るデータ取得を継続している。

○放射線による長期変質現象の評価

- 放射線で生成するラジカルによる化学的影響について、過酸化水素を模擬ラジカルとした固化体浸漬試験により、表面変化を確認した。継続して構成相の変質データ取得している（図4）。

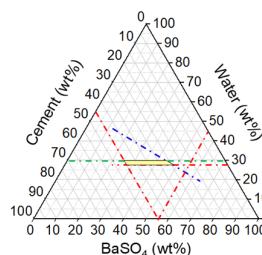


図1 模擬スラッジセメント固化体の固化可能範囲（黄色部）検討結果

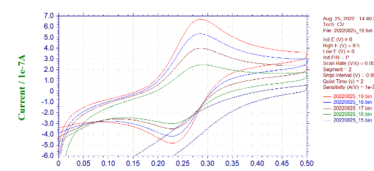


図2 フェロシアン化ニッケルの
分解に関する電気化学分析データ
(濃度依存性)

表1 浸出特性試験方法の調査結果

発出剤の出入り 品目別品名	closed: 液交換なし						open: 液交換あり					
	静置			通流			無し			通水		
	粒/粉	モノリス		粒/粉	モノリス		粒/粉	モノリス		粒/粉	モノリス	
試験体の形状												
手法名(非規格)		MCC-1 MCC-2		MCC-3	SRCA法		MCC-5 VHT法		IAEA法 ISO6891 ANS法			
手法名(規格)	C1285 EN-12457	C1220		EPA-1313 D3897			C1663 D5369 EPA-1314 ISO16797 JIS A4907		C1308 ANSI 16.1 EPA-1315 EN-15863			C1662 C1662a PUF法 SPPT法 MCF法

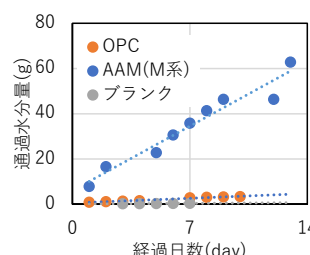


図3 白華※試験における通過水分量の経時変化

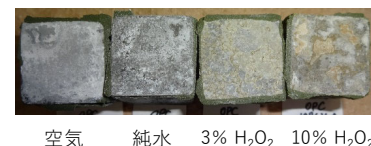


図4 過酸化水素水浸漬試験における
固化体表面の変化
(セメント、浸漬期間28日)

(b) 処分概念の提示及び安全評価手法の開発

・1F廃棄物の処分安全評価においては、廃棄物性状をはじめ、様々なインプット条件に不確実性が存在する中で、安全に処分できる処分概念構築のための要件案を、廃棄物ストリーム全体の最適化の根拠情報として、適宜提示する必要がある。

・そこで、1) 1F廃棄物の特徴や不確実性を踏まえた処分概念に要求されるニーズの明確化と、安全に処分できることを示す論証構造の構築、2) 現時点での不確実性の取り扱いを含め、ストーリーボード等の安全評価の科学的根拠の整理、3) 安全評価の方針の明確化と、条件・結果、感度解析結果の解釈などの追跡可能性確保のための品質保証体系の構築、に留意した安全評価手法の開発を進めた。

① 処分概念提示に必要な情報・知識の調査

・検討が進んでいる廃棄物を対象に、廃棄物の特徴に基づくニーズの整理と、ニーズに基づく処分概念の提示を進めるため、ボウタイモデル^{*1}、ESL^{*2}などのリスクマネジメント手法を活用した透明性・追跡可能性の高い統合的なリスクマネジメントの方法論を検討した。

^{*1} 想定される有害事象を中心に、様々な原因・結果を左右に配置し、原因を断ち切る予防策と結果の低減策を分かりやすく視覚化した図

^{*2} Evidential Support Logic. 意思決定問題の論理構造を構成する各仮説が、どのような証拠にどの程度支持されるのかを階層的に示した図

② 安全評価手法開発の試行

○ ストーリーボードのプロトタイプ構築と重要シナリオ・モデル等の検討

・検討が進んでいる廃棄物を対象とした処分概念のストーリーボードを構築するため、既存の検討事例の調査を行った。また、1F廃棄物の特徴に基づき、考慮が必要なシナリオや、現時点での不確実性を把握し、その取り扱いを検討するための実験・調査を実施した。このうち、ヒット処分において、これまで検討していなかった亀裂性母岩を考慮すると、処分条件としては良好な低透水量係数のケースで分散が大きくなり、この条件において感度が大きい他のパラメータの存在が示唆された(図1)。

○ 1F廃棄物の特徴を考慮した品質管理下における安全評価検討

・検討が進んでいる廃棄物のこれまでの安全評価結果を整理し、安全評価の方針案を検討した。昨年度の検討で、セメントの廃棄物や埋め戻し材について、吸着のみを期待した保守的モデルに比べて、マトリクス部から亀裂部までの拡散と吸着を考慮した現実的モデルでは、線量率の評価結果が約3桁低減した(図2)。このような現実的なモデルを導入する際の考え方などを明らかにするため、国内外の事例調査を行った。

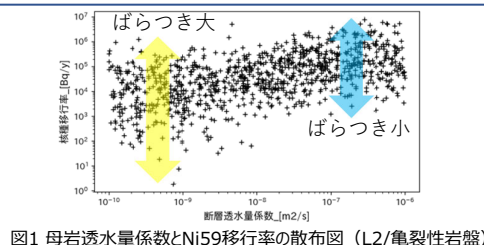


図1 母岩透水量係数とNi59移行率の散布図 (L2/亀裂性岩盤)

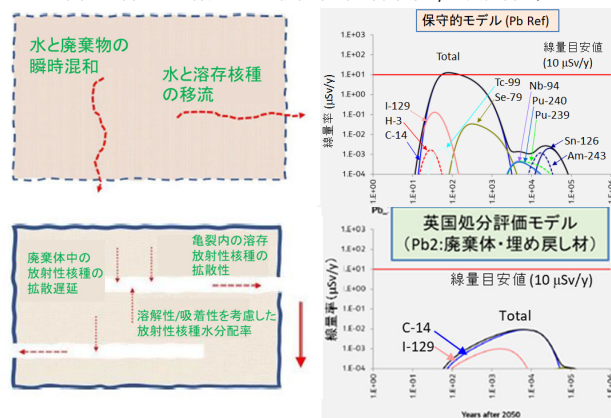


図2 吸着のみ考慮した保守的モデル(上)とマトリクス部から亀裂部までの拡散・吸着を考慮した現実的モデル(下)の安全評価結果の比較 (鉄共沈スラリー/L2鉛直浸透/河川水シナリオ)

今後の方向性

固体廃棄物の特徴に応じた廃棄物ストリームの抽出のため、固体廃棄物の管理全体での適切な対処方策の提示に向け、着実に分析を進めつつ合理的な性状把握手法を充実させるとともに、熔融金属の再利用に向けた検認手法の検討戦略を構築する。また、低温処理の適用性と固化体の安定性に係る検討を進めるとともに、処分に係るストーリーボードと安全評価手法の改良を目指す。これら取り組みを統合し、成立し得る条件等を各々の検討にフィードバックしつつ進める。

固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発

(2023年2月末までの進捗状況)

[IH]

福島第一原子力発電所(1F)の放射性固体廃棄物の内、震災影響を受けた運転廃棄物および汚染水処理にて発生する廃棄物(水処理二次廃棄物)(*)を対象とし、保管時の潜在的リスクを低減するとともに、保管容量を低減するため、これら対象廃棄物に中間処理技術を適用することを検討した。廃樹脂等の樹脂系の廃棄物に対して、雰囲気制御を実施した条件での熱分解温度等の基礎データを取得するとともに、実規模試験にて、熱分解処理性能を確認中である。今後、中間処理技術として熱分解処理を適用できる見通しについて検討を実施する計画である。

(*)：廃樹脂(運転廃棄物)、樹脂系廃棄物、キレート樹脂、炭酸塩スラリー、鉄共沈スラリー、除染装置スラッジ、フェロシアン化合物、活性炭

実施内容及び成果

1. 対象廃棄物の調査、候補選定

➢ 廃棄物の化学組成、核種組成、保管形態等を調査し、中間処理が有効であり、熱分解処理技術にて効果が期待できる廃棄物を選定した。

2. 中間処理技術の調査、選定

➢ 対象廃棄物の中間処理技術(乾燥、圧縮、焼却、熱分解等)として、技術調査を実施し、特徴(対象廃棄物、装置構成、減容率等)を整理した。中間処理に適した技術評価を実施し、対象廃棄物に対する熱分解技術の優位性を確認した。

3. 熱分析データの取得(熱分析測定による熱分解反応時の基礎データの取得)

➢ 廃棄物の構成成分等の情報を基に、熱分解処理時の基礎的な分解及び移行挙動を推定するとともに、廃樹脂等樹脂系廃棄物を中心に、不活性環境下及び水蒸気環境下にて示差熱分析(*)等による熱分解反応時の基礎データ(反応温度、重量減少)を取得した。

(*) 加熱時の測定試料と基準物質の温度差の変化から、温度変化に伴う反応挙動を調査する方法

➢ 熱分解処理前後の残渣に対して、X線回折や局所構造の分析を実施中。本結果を基に、熱分解時の反応機構の推察を実施する予定。

4. 熱分解試験データの取得(小規模装置による熱分解基礎試験)

➢ 廃樹脂等樹脂系廃棄物に対して、バッチ式試験装置(数kg規模)で基礎試験を行い、異なる雰囲気における処理性能(減重率等)、処理後の処理残渣の性状を確認した。

5. 処理残渣の保管・安定化の検討

➢ 中間保管後の処理残渣の固型化を想定して、対象廃棄物をセメント固化する場合の固化条件を検討中。

6. 実規模試験装置を用いた運転データの取得

➢ 廃樹脂に対して、減重率、核種移行率等を取得し、熱分解処理の適用性を評価するため、実規模の熱分解試験装置(ボール型熱分解試験装置(約1dry-kg/h規模)を用いた熱分解処理性能の確認実施中。

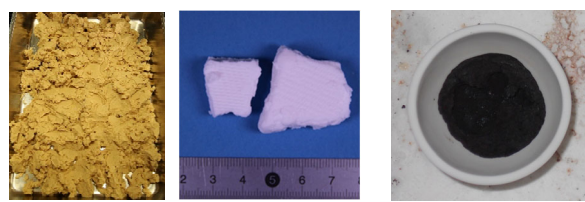


図1 模擬廃棄物の外観
*代表廃棄物のみ掲載

図2 熱分解処理後の処理残渣の状態
*④熱分解試験(バッチ式試験装置)後

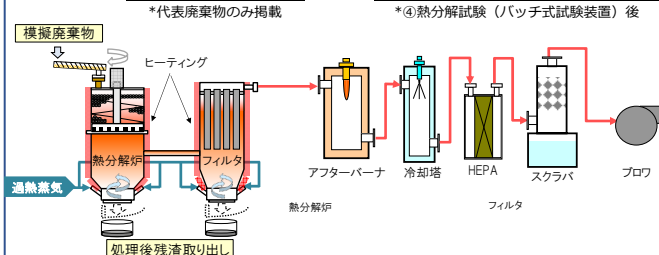


図3 熱分解処理プロセス概要：ボール型熱分解処理装置(実規模試験装置)

今後の方向性

➢ 熱分析や熱分解処理試験で得られた基礎データを基に、熱分解時の反応機構の推察を実施する。

➢ 中間保管後の処理残渣の固型化を想定したセメント固化試験を実施し、処理残渣の安定化等観点の評価を実施する。

➢ 実規模の熱分解試験装置を用いた試験結果を基に、廃樹脂に対する処理性能の評価および熱分解処理技術の適用性の評価を実施する。

固体廃棄物の処理・処分にに関する研究開発（セシウム吸着塔からの吸着材採取 技術及び固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術の開発） （2023年2月末時点における進捗状況）

【IRID・ATOX/東芝ESS】

2021年度に示された処理・処分方策とその安全性に関する技術的見通し※を踏まえ、固体廃棄物管理全体へ反映する分析データの取得・管理をさらに進めるための高線量試料採取技術の開発を行う。また、安全かつ合理的な保管・管理のため、分別に必要な汚染評価技術の開発を行う。※東京電力ホールディングス㈱福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン2021（原子力損害賠償・廃炉等支援機構、2021.10.29公表）

実施内容及び成果

1. セシウム吸着塔からの吸着材採取技術の開発

(1) 吸着材の採取に必要な付帯機器の設計・製作

セシウム吸着塔の穿孔・吸着材試料の採取・閉止等の要素技術を適用して開発した試料採取装置を用い、セシウム吸着塔の実機から吸着材を採取する際に必要となる付帯機器の設計・製作を行った。試料採取装置の全体構成イメージと製作した付帯機器の一部を図1に示す。

(2) サンプルング技術の検証

試料採取装置と製作した付帯機器を用いて、コールドでのセシウム吸着塔実機の穿孔、セシウム吸着塔穿孔部の閉止等の検証試験を行った。今後、実吸着材試料の採取を含めたオンサイトでの検証試験を行う。

2. 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術の開発

(1) 測定に影響を与えるパラメータの整理

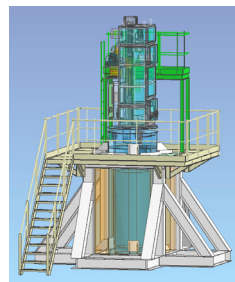
環境条件を模擬するためのパラメータの検討・整理を行った。

(2) 測定システム性能の確認

汚染に対する検出シグナルと環境放射線などによって生じるノイズとの大小関係をシミュレーションにより導出した。シミュレーションは面状に分布するβ（γ）汚染源や、発光源となる材質（養生シートなど）をモデル化することで、現場の環境条件を模擬した。図2に面状に分布するβ汚染を模擬したシミュレーションモデルを示す。

(3) 表面汚染測定システムの適用範囲の確認

福島第一原子力発電所廃炉におけるアルファ核種表面汚染測定システムの適用範囲と制約条件の確認を行った。



付帯機器（サンプリングヘッド）

図1 試料採取装置全体構成イメージと製作した付帯機器

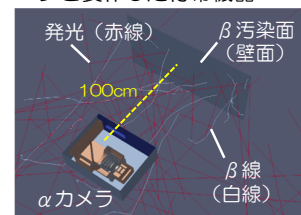
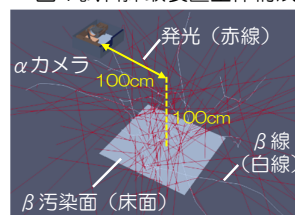


図2 面状のβ汚染分布を模擬したシミュレーションモデル

今後の方向性

- セシウム吸着塔からの吸着材採取技術開発の検証試験を通じて、実作業への適用性を評価し、課題の抽出及び改善に向けた検討を実施する。
- 汚染評価技術の開発に関して、測定システム性能及び適用範囲を確認したこと試作レベルの研究は収束とし、今後は実運用に向けた対応とする。

固体廃棄物の処理・処分にに関する研究開発 （簡易・迅速化された分析技術を用いた標準的な分析法の検討）（1 / 2） （2023年2月末時点における進捗状況）

【JAEA】

2022年6月に竣工した放射性物質分析・研究施設第1棟（以下「第1棟」という。）で、多量かつ多様という固体廃棄物の特徴に対応しつつ、信頼性のある分析データを適時的に取得し提供するために、分析設備及び装置の準備、標準的な分析法の評価基準の検討と技能認定マニュアルの整備、簡易・迅速化分析法の標準的な分析法としての実証を行い、分析能力の獲得・維持を行う（図1参照）。

実施内容及び成果

(a)分析設備及び装置の準備

第1棟は新規施設であるため、(b)及び(c)に示す事業内容を行うために、まず、分析設備及び装置の運用に向けた準備を行っている。維持管理作業を繰り返し実施し、分析員の技術力の習熟を図っている。

【分析設備の主な維持管理作業】

対象設備	維持管理作業
設備全体	外観点検を含め日常点検や定期点検
パネルハウス	フィルタ交換、作業エリアの養生等
鉄セル	マニピレータの動作確認、把持部爪及びブーツ交換作業、パデラックの確認等
グローブボックス	フィルタ、グローブ、ビニルバッグ交換作業、作業エリアの養生、試料採取装置の動作確認等
ヒュームフード	面風速測定、作業エリアの養生等
放射性廃棄物処理設備	福島第一原子力発電所への抽出しや搬出作業等

【分析装置の主な維持管理作業】

対象設備	維持管理作業
分析装置※1	日常及び定期点検
	外観確認、動作状況確認、作動確認、備品の交換等の保守作業
	標準線源（RI）や標準試料を用いた必要な校正を実施
	“模擬試料”、“放射性同位体（RI）”を用いた確認分析等の分析に関する習熟作業

※1 分析装置

γ線スペクトロメータ、液体シンチレーションカウンタ、α線スペクトロメータ、ZnS（Ag）シンチレーション検出器、低バックグラウンドガスフローカウンタ、イオンクロマトグラフ装置、ICP-MS/MS、ICP-AES

(b)標準的な分析法の評価基準の検討と技術認定マニュアルの整備

標準的な分析法の妥当性評価方法の確立を目的に、検討項目の具体的な基準や国内外の実績のある妥当性評価ガイドライン等に基づき、妥当性評価方法における評価基準の明確化に取り組んでいる。また、図2に示すような手順で、分析員の分析技能を確保するための技能認定マニュアルを整備中である。

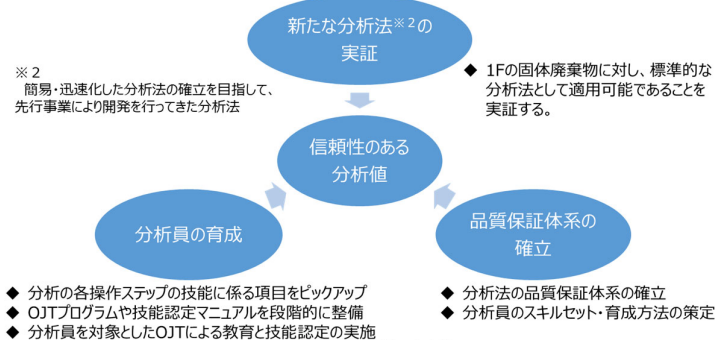


図1 本事業の目的

分析技能認定マニュアルの構成（例）

- 目的
- 対象分析法
- 対象とする人員
- 組織（分析技能認定委員会）
- 用語の定義
- 認定制度の内容
 - 概要
 - 必要となる知識・技能
 - 認定試験
 - 資格、有効期限、筆記試験、実技試験
- 評価（認定するための評価基準）
- 記録・認定証の発行

分析技能認定マニュアルの整備手順

- マニュアルの1. ～ 5. 6. ①までの項目についての内容を決定し、その後、以下の項目について順次検討し整備する。
 - 必要となる知識・技能
 - 知識・技能を明確化（次項参照）
 - 必要なカリキュラムの整備
 - 教育
 - ☆テキスト学習
 - ☆外部講習会
 - 訓練
 - ☆模擬セル・GB
 - ☆OJT（補助作業等）
- ③認定試験
 - ペーパー試験及び実技試験の実施内容の明確化
- 評価
 - 認定するための評価基準の制定
- 記録・認定証の発行
 - 分析技能の認定の手続きの明確化

分析技能認定マニュアル

図2 分析技能認定マニュアルの整備手順

(C)簡易・迅速化分析法の標準的な分析法としての実証

①誘導結合プラズマタンデム質量分析装置(ICP-MS/MS)による難測定核種Se-79、U-236(234)の分析法の成立性と妥当性評価及び標準分析法としての実証

- ・文献調査等によりICP-MS/MSでの測定を前提とした塩酸を用いないSe-79及びU核種の化学分離フロー案を立案した(図3はSe-79のフロー案)。
- ・ICP-MS/MSによるSe-79及びU核種の測定に最適なりアクションガス及び測定条件を見出した(図4はICP-MS/MSによるSe-79の最適な測定条件)。
- ・今後、検討した分析手法を用いて妥当性評価試験を実施予定

②ICP-MS/MSによる難測定核種Zr-93、Mo-93、Pd-107、Sn-126の分析法の妥当性評価及び標準分析法としての実証

- ・国内外の実績のある妥当性評価ガイドライン等(※)に基づき妥当性評価のための具体的な検討項目及び評価基準を明確化した(表1)。
- ※:「IAEA-TEL-2021-04 ALMERA Proficiency Test Exercise, Pie-charts, S-Shapes and Reported Results with Scores」(IAEA, 2021)、日本薬局法、米国薬局法およびEU薬局法等

- ・表1の評価基準に基づき妥当性評価試験を実施中

③前処理操作合理化及び塩酸(HCl)フリー化した放射能分析法の成立性と妥当性評価及び標準分析法としての実証

- ・従来は塩酸を使用し、一核種ごとに処理をしていたNi-63、Sr-90及びCa-41分析法について、一つの分離フローの中で逐次的に分離を行うことが可能な(合理化した)手法を開発した。現在、表1の評価基準に基づき妥当性評価試験を実施中。
- ・一核種ごとに、従来は処理をしていたCl-36及びI-129分析法について、分離フローを合理化した手法を立案した。現在成立性について試験中。
- ・従来は塩酸を使用し、一核種ごとに処理をしていたPu核種、Am(Cm)核種及びNp-237分析法について、分離フローを合理化した手法を立案した。表1に基づきRI標準溶液を用いた妥当性評価試験(相対添加回収率、併行精度)を実施した結果、基準を満足する結果が得られ、手法の妥当性を確認した(表2)。

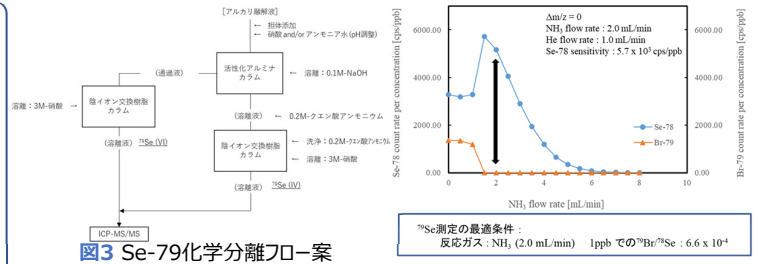


図3 Se-79化学分離フロー案

図4 ICP-MS/MSによるSe-79からのBr-79の分離

表1 妥当性評価基準の検討結果

① 評価項目	② 検討項目	③ 評価基準(抜粋)
選択性	除染係数(β核種) 分離操作の回収率	DF ≥ 1,000 回収率70% ~ 110%(安定元素) 60% ~ 115%(トレーサー)
直線性	トレーサビリティ 検量線、校正式の確認	標準物質証明 相関係数: 0.99以上
真度	認証標準物質を用いた試験	相対添加回収率: 60% ~ 140%
精度	同一試料の繰り返し試験	併行精度: 25%以下
適用範囲	主成分の影響 妨害元素の影響(β核種)	回収率への影響評価 検出限界への影響評価
検出限界/定量下限	マトリックスブランクの繰り返し測定 の標準偏差	L1基準の1/100 ~ 1/10

表2 Pu核種、Am(Cm)核種及びNp-237分析法の妥当性評価結果
(各核種の標準添加濃度: 0.04Bq)

評価項目 (N=6)	Pu-242	Am-243	Np-237
回収率	69%	91%	77%
併行精度	16%	7.0%	5.4%

今後の方向性

- 分析設備及び装置の習熟を進め、手順書の修正を適宜実施していく。
- 標準的な分析法の実証における妥当性評価試験の結果を考慮、反映しながら、評価基準の検討を行っていく。
- 分析技能認定マニュアルの整備を進め、認定試験を順次実施していく。
- 標準的な分析法の実証を行うため、標準試料を用いた妥当性評価試験と、当該分析法による実試料の分析試験を実施していく。