

2021年度廃炉研究開発計画について

1. 2021年度廃炉研究開発計画のポイント

（1）基本的な考え方

福島第一原子力発電所の廃炉・汚染水対策については、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）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、「中長期ロードマップ（2019年12月改訂）」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。

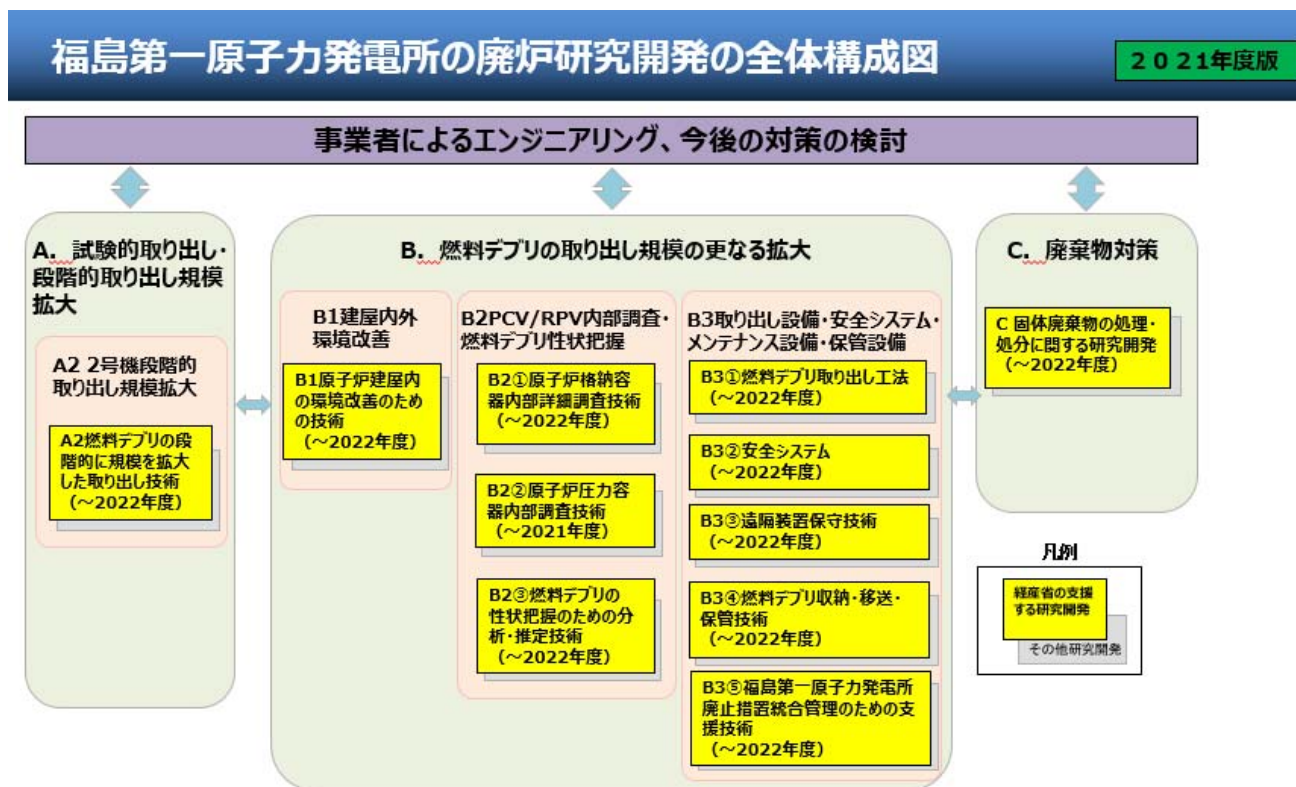
技術的難度が高く、国が支援する研究開発の対象については、中長期ロードマップ、原子力損害賠償・廃炉等支援機構の技術戦略プラン、東京電力HDによる廃炉作業やエンジニアリング、既存の研究開発プロジェクトの進捗状況等を踏まえ、廃炉技術に関する司令塔である原子力損害賠償・廃炉等支援機構からの助言を得て、廃炉研究開発計画としてまとめている。

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によるエンジニアリングと連携して実施し、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、燃料デブリ取り出しに必要な研究開発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。

(2) 研究開発の全体像



※これまでの計画については、「2020年度廃炉研究開発計画」（廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議（第75回 資料4））を参照のこと。

※A1 試験的取り出し技術については、一定の成果が得られたことから、以後は民間事業者による事業として実施

2. 2021年度における各プロジェクトの計画

A. 試験的取り出し・段階的取り出し規模拡大

A2 2号機段階的取り出し規模拡大

A2 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術

【目的】

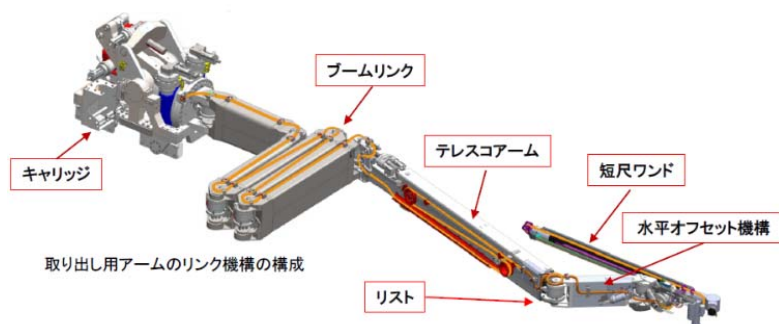
- 取り出しによる燃料デブリのリスク低減及び取り出し工事に係る臨界管理や装置設計、工事要領の合理化に資することを目的に、燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術の開発を行う。

【技術開発のポイント】

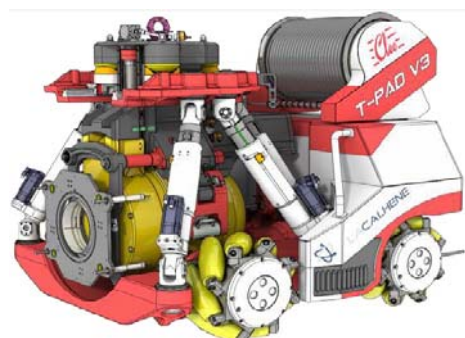
- 原子炉格納容器（PCV）内・原子炉圧力容器（RPV）内は、線量が高く、放射性物質で汚染されており、情報が限定的で不確実性が高い中、燃料デブリの試験的取り出しより、さらに長期期間の作業、かつ、取り出し量の拡大といった条件の基で、取り出し装置・システムの成立性を確認するための開発・試験を行う。

<開発する技術>

- ①アクセス装置（アーム、エンクロージャ等）
- ②燃料デブリ収納容器の遠隔輸送台車



図：取り出し用アームのイメージ



図：燃料デブリ収納容器の遠隔輸送台車のイメージ

B. 燃料デブリの取り出し規模の更なる拡大

B1 建屋内外環境改善

B1 原子炉建屋内の環境改善のための技術

【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箇所が残り、未だに線量が高い原子炉建屋内における作業が安全、効率的に行えるために必要となる環境改善に関わる技術の開発を行う。

【技術開発のポイント】

- 原子炉建屋内で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ることが重要であることから、建屋内の構造物や放射線量などのデータを精密に収集し、デジタル技術によりサイバー空間上に可視化するための技術を開発する。
- 燃料デブリの取り出しに向けた現場環境改善や干渉物撤去のために、高線量下で重量物、放射線源、水素等の危険物質を取扱い、かつ、長時間の作業に対応できる遠隔技術の開発を行う。

<開発する技術>

- ①被ばく低減のための環境・線源分布のデジタル化技術
- ②環境改善・干渉物撤去のための遠隔技術

B2 PCV/RPV 内部調査・燃料デブリ性状把握

B2①原子炉格納容器内部詳細調査技術

【目的】

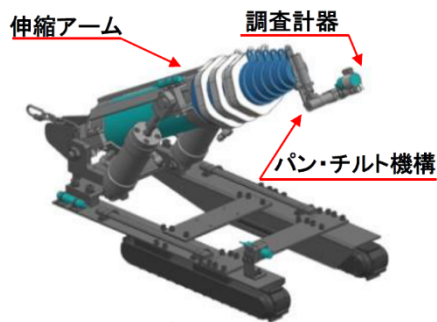
- 原子炉格納容器（PCV）内の燃料デブリの分布、ペDESTAL内外の状況を従来よりも広範囲に精度良く調査するために、装置やより高度な調査技術の開発を行う。

【技術開発のポイント】

- PCV 内は、線量が高く、放射性物質で汚染されており、情報が限定的で不確実性が高い中、PCV 貫通部（X-2 ペネトレーション等）から PCV 内に入り、制御棒駆動装置（CRD）搬出入用開口からペDESTAL内を詳細調査するためのクローラ型アクセス・調査装置及び調査技術の開発を行い、実機を模擬したモックアップ試験にて適用性を確認する。

<開発する技術>

- ①クローラ型アクセス・調査装置の詳細設計、製作



図：クローラ型アクセス・調査装置のイメージ

B2②原子炉圧力容器内部調査技術

【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の開発を行う。

【技術開発のポイント】

- RPV 内は、線量が非常に高く、放射性物質で汚染されており、内部情報が限定的で不確実性が高い中、閉じ込め性を確保した上で RPV 内の燃料デブリの分布や構造物の状況等を把握するための調査技術の開発を行う。
- これまでの技術開発の成果を踏まえ、RPV 上方から内部にアクセスする調査方法は、アクセスルートの構築に長期間を要し、かつ、掘削時の二次廃棄物が大量に発生することが想定されるため、従来のアブレッシブウォータージェットよりも二次廃棄物の少ない加工技術の開発を行う。また、RPV 下方からアクセスし、RPV 底部に想定される開口部から内部に装置を入れて調査を行う調査技術の開発を行う。

<開発する技術>

- ①上部アクセス調査工法における加工技術の高度化
- ②下部アクセス調査工法の開発

B2③燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術

【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。

【技術開発のポイント】

- 福島第一原子力発電所の燃料デブリは世界初の沸騰水型の原子炉の炉心溶融事故で生成したものであり、不均一な組成を有し、難溶性かつ多種多様な核種を含む燃料デブリの分析を可能とするため、燃料デブリの分析技術の開発を実施する。

- 現場試料の分析・評価を活用して、燃料デブリの熱挙動、経年変化特性や微粒子挙動など、その性状の推定技術を開発し、燃料デブリ性状推定を高度化する。

＜開発する技術＞

- ①燃料デブリ性状の分析・推定に必要な技術開発
- ②燃料デブリの熱挙動の推定技術
- ③燃料デブリの経年変化特性（粉体化するか等）の推定技術
- ④燃料デブリの微粒子挙動の推定技術

B3 取り出し設備・安全システム・メンテナンス設備・保管設備

B3①燃料デブリ取り出し工法

【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必要な機器・装置及びシステムに関わる技術やスループット確保のための取り出し作業エリアの確保について、これまでに得られた研究開発成果に基づき、必要となる要素技術開発及び試験を実施する。

【技術開発のポイント】

- 原子炉格納容器内（PCV）・原子炉圧力容器内（RPV）は、線量が高く、放射性物質で汚染されており、情報が限定的で不確実性が高い中、燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大するための装置・システムの成立性の確認するための開発・試験を行う。
- PCV の側方から内部の燃料デブリにアクセスし、取り出しを行う工法（以下「横取り出し工法」という）の開発として、アクセス用設備の設置工法の開発及び解体・撤去技術の開発を行う。PCV の上方から内部の燃料デブリにアクセスし、取り出しを行う工法（以下「上取り出し工法」という）の開発として、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を行う。また、横・上共通の取り出し工法の開発として、燃料デブリ飛散抑制技術の開発を行う。

＜開発する技術＞

- ①横取り出し工法の開発（アクセス用設備の設置工法の開発、解体・撤去技術の開発）
- ②上取り出し工法の開発（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）
- ③横・上共通の取り出し工法の開発（燃料デブリ飛散抑制技術の開発）

B3②安全システム

【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必要なシステム及び安全確保に関わる技術について、これまでに得られた研究開発成果に基づき、必要となる要素技術開発及び試験を実施する。

【技術開発のポイント】

- 液体系・気体系システムに係る安全システムの開発、臨界近接監視技術・中性子吸収材技術の現場運用方法、燃料デブリ切削時のダスト飛散率データ取得及び被ばく線量評価のための分析手法の技術開発を行う。

<開発する技術>

- ①安全システムの開発（溶解性 α 核種除去技術の開発、逆浸透膜（RO）濃縮水の処理技術の開発、二次廃棄物処理技術の開発）
- 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
- ③デブリ飛散率評価技術の開発
- ④被ばく線量評価のための分析手法の技術開発

B3③遠隔装置保守技術

【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おいて、長期にわたる安全で確実な運転継続性を確保するため、また、取り出し工法に関わる遠隔装置の合理的な設計及び廃棄物発生量の低減等の観点も含めて、必要となる遠隔装置の保守技術の開発を行う。

【技術開発のポイント】

- 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、取り出し作業を行う遠隔装置は、高線量・高汚染下かつ長期間の運転が求められ、さらに、多様な遠隔装置の除染・保守技術が必要になることから、保守を行うための作業エリアの合理的な設定及び保守作業による廃棄物の発生量の低減の観点も含め、汚染した装置の遠隔除染・保守技術の開発を行う。

<開発する技術>

- ①汚染した装置の遠隔除染・保守技術の開発

B3④燃料デブリ収納・移送・保管技術

【目的】

- 燃料デブリの取り出しから保管に関す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の開発を行う。

【技術開発のポイント】

- これまでの技術開発の成果により、粒状の燃料デブリを想定した収納・移送・保管技術の開発は進んだものの、更に取り出し作業を進めた際に発生する粉状及びスラリー・スラッジ状の燃料デブリを想定した収納・移送・保管技術の開発を行う必要がある。
- 取り出し規模の更なる拡大における燃料デブリ取り出し工法に適合した収納・移送・保管システムの概念を確立するため、収納技術に必要な収納缶のフィルタの性能に影響する故障シナリオの選定と必要な試験条件の検討、移送・保管技術に必要な乾燥技術の開発、粉状及びスラリー・スラッジ状放射性物質取り扱い事例の調査を踏まえた今後の技術開発課題の抽出を行う。
- 燃料デブリに含まれる水分からの水素ガス発生量の低減を目指して燃料デブリの乾燥技術の開発を継続してきたが、燃料デブリ性状、乾燥形態等の乾燥処理方法、運転上のパラメータの拡充と乾燥装置に必要なデータの拡充を行う。

＜開発する技術＞

- ①収納技術の開発
- ②乾燥技術の開発

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

【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を含む福島第一原子力発電所（1F）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の開発を行う。

【技術開発のポイント】

- 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1F廃止措置には、高線量・高汚染下かつ不確定要素を含む環境条件での遠隔操作になるため、取り出し期間におけるPCV内の環境変化を長期的、かつ連続的に監視する技術の開発を行う。また、廃止措置を安全かつ効率的に進めていくためにデジタル技術を利用した統合的管理技術の開発を行う。

＜開発する技術＞

- ①PCV内の連続的な監視システムの開発
- ②デジタル技術を利用した統合的管理技術の開発

C. 廃棄物対策

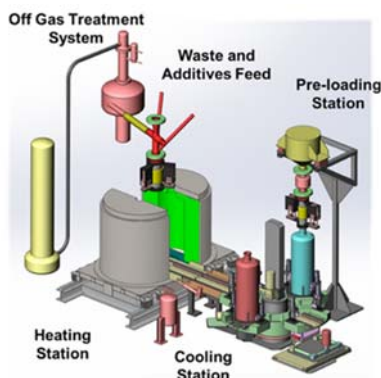
C 固体廃棄物の処理・処分にに関する研究開発

【目的】

- 2021年度頃までを目途に、処理・処分方策とその安全性に関する技術的見通しを得ることを目標として、固体廃棄物の保管・管理技術、安定化・固定化するための処理（先行的処理）技術、処理・処分概念の構築とその安全評価手法の開発を行う。また、これらの実施にあたって必要となる性状把握技術の開発を行う。

【技術開発のポイント】

- 燃料デブリ取り出しに伴い発生する廃棄物等の高線量廃棄物について、種類・物量を評価した上で、その安全かつ合理的な保管方法を検討する。その際、放射線分解で発生・蓄積する可能性のある水素への対策も考慮する。
- 汚染水の浄化に伴い発生する水処理二次廃棄物等の固体廃棄物について、安定化・固定化するための処理（先行的処理）技術の工学規模の装置等を用いた試験を行う（高温処理技術及び低温処理技術）。
- 国内外の調査結果等を踏まえ、一部の廃棄物を対象に、適用可能な処理技術を踏まえた処分概念とその安全評価手法の構築に必要な情報を整理する。
- 福島第一原子力発電所の固体廃棄物は、事故により多量かつ核種組成及び放射能濃度が多様なため、性状把握を効率的に進めるため以下の技術の開発を行う。
 - ①分析データと移行モデルに基づく評価データを組み合わせて性状を把握する方法の構築
 - ②分析前の前処理の合理化・自動化等により簡易化・迅速化された分析法の標準化の検討
 - ③高線量廃棄物（セシウム吸着材等）の採取技術の開発 等



In-Can ガラス固化



GeoMelt ICV



コールドクルーシブル
誘導加熱炉 (CCIM)

図：高温処理技術の例

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

○燃料デブリの取り出しは、高線量下・高汚染下、不確定要素を含む環境条件下での遠隔作業となる。段階的に規模拡大した取り出し技術開発計画を策定、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

内部調査等で得られた情報を踏まえて、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)の開発計画を必要に応じて更新する。

(2) 取り出しのための装置、システムの開発

① 取り出し用アクセス装置(アーム、エンクロージャ等)

取り出し用アクセス装置として、アーム先端の燃料デブリへの押付け力の確保、供用期間を考慮したアームの耐久性、メンテナンス性の向上、燃料デブリ取り出し時の閉じ込め性能向上等をはかるための要素技術(取り出し装置を保持・動作するアーム先端部、ダブルドアシステム等)を試作し、工場内検証で適用性を確認する。

また、2020年度までに実施した詳細設計に基づき、取り出し用アクセス装置を製作し、工場内検証試験で適用性を確認する。なお詳細設計、製作においては、先行している内部調査用アクセス装置での知見を適宜反映して、必要に応じて、改良を行う。

さらに、エンクロージャには作業用マニピュレータの保守・交換を可能とする機構を含めること。

② 燃料デブリ収納容器の遠隔輸送台車

2020年度に実施した詳細設計に基づき、燃料デブリ収納容器(重量物)の遠隔輸送台車を製作し、高い位置合せ精度が要求される収納容器のエンクロージャへの遠隔での据付等、適用性を工場内検証試験で確認する。

③ 組合せ試験、モックアップ試験

取り出し用アクセス装置を、各種の取り出し装置、システム・(注1)及び燃料デブリ収納容器の遠隔輸送台車と合わせて、組合せ試験、実機を模擬したモックアップ試験を行う。

(注1) 取り出し用アクセスルート構築装置(X-6ベネ接続構造等)、燃料デブリ切削・回収装置、中性子モニタシステム(2020年度までに製作、工場内検証を実施)

※燃料デブリの構内輸送容器、受入・払出し設備(セル等)は、事業者が準備することになるので、取り合い等について十分調整、協力して行うこととする。

目標達成を判断する主な指標の設定(2021年度/2022年度)

- ・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(2021年度)
- ・取り出し用アクセス装置の要素技術の製作、工場内検証(2021年度)
- ・燃料デブリ収納容器の遠隔輸送台車の製作、工場内検証(2021年度)
- ・取り出し用アクセス装置の製作、工場内検証(2022年度)
- ・取り出しのための装置、システムとしての組合せ試験、実機を模擬したモックアップ試験の実施((2022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

年度	2018	2019	2020	2021	2022	2023以降
【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】	初号機の試験的取り出し・内部調査					段階的に取り出し規模を拡大
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策定、更新	段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの技術開発計画の策定、更新					
(2) 取り出しのための装置、システムの開発						
アクセス装置(アーム、エンクロージャ等)	<アクセス装置> 概念検討 要素技術の試作、工場内検証 詳細設計 アクセス装置製作、工場内検証					
アクセスルート構築装置 燃料デブリ切削・回収装置 中性子モニタシステム	<アクセスルート構築装置、燃料デブリ切削・回収装置、中性子モニタシステム> 概念検討・要素試験 装置製作、工場内検証					
燃料デブリ収納容器の遠隔輸送台車	<燃料デブリ収納容器の遠隔輸送台車> 設計(要素試験含む) 装置製作、工場内検証					
組合せ試験、モックアップ試験						
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)

次期研究開発

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ける作業が安全、効率的に行える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、作業の障害になる干渉物や汚染機器の撤去を遠隔操作で実施できる技術、装置が必要である。これらについて、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、要素試験による技術開発を行う。

○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. 被ばく低減のための環境・線源分布のデジタル化技術の開発

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。

原子炉建屋内の環境データ(構造物の状態、放射線量等)を調査により精密に収集し、これらデータを用いた放射線量の推定を行い、デジタル技術によってサイバー空間上に可視化することで環境変化に対応した作業計画の策定に利用できるようにする。さらに、作業員、解体機器、遠隔装置等の現場での作業性の確認をデジタル上でを行い、被ばく線量の推定評価を行うシステムを開発する。

2. 環境改善・干渉物撤去のための遠隔技術の開発

燃料デブリ取り出しに関連する現場環境改善・干渉物撤去のための遠隔作業は、取り出し規模の更なる拡大に向けて原子炉建屋内の随所で必要となる可能性があり、個別の状態に対応した方法ではなく汎用性を有する方法の開発が効率的であると考えられる。

2. (続き)

既開発技術及び市場の重作業用遠隔装置等の適用性について調査し、改造を含む有望な遠隔装置の適用性を確認する要素試験を行う。高線量下で重量物、放射線源、水素等の危険物質を扱うため、作業場所での安全を維持し、長時間の作業に対応できる遠隔技術について検討を行い、現場適用性を評価する。市場遠隔装置では機能・性能が不足する場合には、新規に開発するリスクの高い遠隔装置の仕様を策定する。

(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概念構築(2021年度)
- ・環境改善・干渉物撤去の遠隔技術の現場適用性評価(2021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

年度	2018	2019	2020	2021	2022	2023以降
【原子炉建屋内の環境改善のための技術開発】	取り出し規模の更なる拡大に向けたエンジニアリング					
	基盤技術の高度化、工法・システムの高度化					
	原子炉建屋内の環境改善のための技術開発					
1.被ばく低減のための環境・線源分布のデジタル化技術の開発						
2.環境改善・干渉物撤去のための遠隔技術の開発						
【燃料デブリの取り出し工法の開発、1F廃止措置統合管理のための支援技術の開発等】	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					
	燃料デブリ取り出し工法の開発、1F廃止措置統合管理のための支援技術の開発					
	※関連PJ間の調整による適切な開発の実施					

：現場作業（エンジニアリングを含む）：次期研究開発

B2①: 原子炉格納容器内部詳細調査技術の開発

目的

原子炉格納容器(PCV)内の燃料デブリの分布、ペDESTAL内外の状況を従来よりも広範囲に精度良く調査するために、装置やより高度な調査技術の開発を行い、実証する。

実施内容

○PCV内のペDESTAL内外の燃料デブリの分布・形態、PCV内の構造物等の状況を、従来より確度高く把握するために、調査のためのアクセス・調査装置の規模を閉じ込め機能を確認しつつ大型化し、視覚や計測に関する調査技術適用を高度化して、実プラントでの高線量下、高汚染下、不確定要素を多分に含む環境条件下での遠隔作業となる技術的難度の高い現場調査(現地実証)に向けた開発を行う。
○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. ペDESTAL CRD開口部からのペDESTAL内部詳細調査技術の開発

(1) ペDESTAL内部詳細調査計画・開発計画の策定、更新
各種調査装置を搭載した水中ROV型のアクセス・調査装置を用いたPCV内部詳細調査の現場実証において構築されたX-2ベネレーションのアクセスルートからPCV内部に入り、1階のグレーチング上を移動して、ペDESTAL CRD開口部からペDESTAL内に進入し、ペDESTAL内の底部及び上方の調査を行う。特に原子炉圧力容器内部調査の下部アクセス調査工法の成立性を検討する上で重要となるCRD開口部からペDESTAL中心付近までのペDESTAL上方(CRDハウジング、RPV底部、等)の情報(画像、線量率、形状データ、等)を得ることとする。

そのため、2020年度に策定されたクローラ型のアクセス・調査装置の開発計画とそれを用いた調査計画を元に、必要な機能を追加したアクセス・調査装置の開発計画とそれを用いた詳細調査計画を策定する。さらに、最新の現場情報や内部調査結果等も考慮して、これら計画の継続的な見直しを行い、必要に応じて更新する。

(2) ペDESTAL内部詳細調査のためのアクセス・調査装置及び調査技術の開発

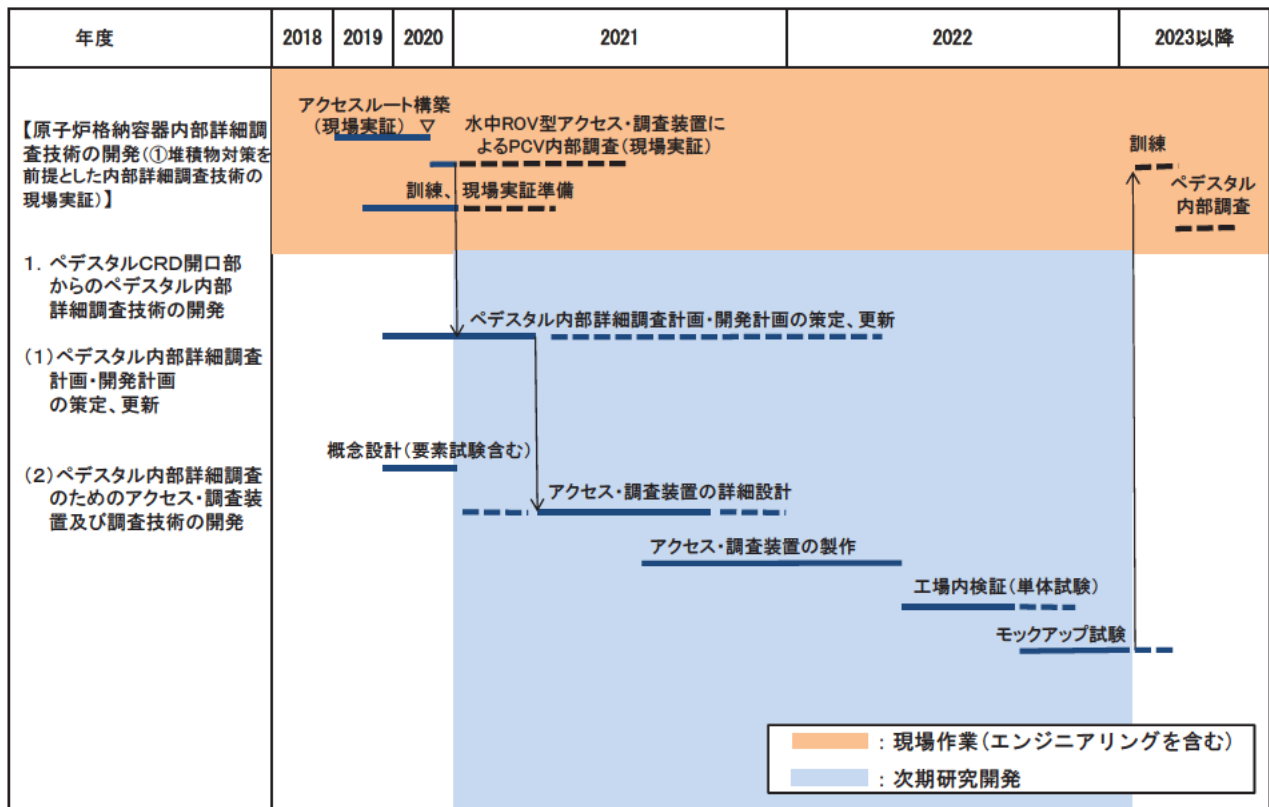
(1)で策定したクローラ型のアクセス・調査装置の開発計画に基づいて、2020年度までに検討した概念設計も参考にして、詳細設計、製作、工場内検証(単体試験)を行い、適用性を確認する。さらに実機を模擬したモックアップ試験を行い、現場適用性を確認する。

※本事業では、2020年度まで実施された「原子炉格納容器内部詳細調査技術の開発(堆積物対策を前提としたPCV内部詳細調査(現場実証))」の成果を踏まえて、行うこととする。

目標達成を判断する主な指標の設定(2021年度/2022年度)

- ・ ペDESTAL CRD開口部からのペDESTAL内部詳細調査計画・開発計画の策定(2021年度)
- ・ ペDESTAL内部への詳細調査用アクセス・調査装置の詳細設計(2021年度)
- ・ ペDESTAL内部への詳細調査用アクセス・調査装置の製作、工場内検証、モックアップ試験(2022年度)

(目標工程)B2①: 原子炉格納容器内部詳細調査技術の開発



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
ORPV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。

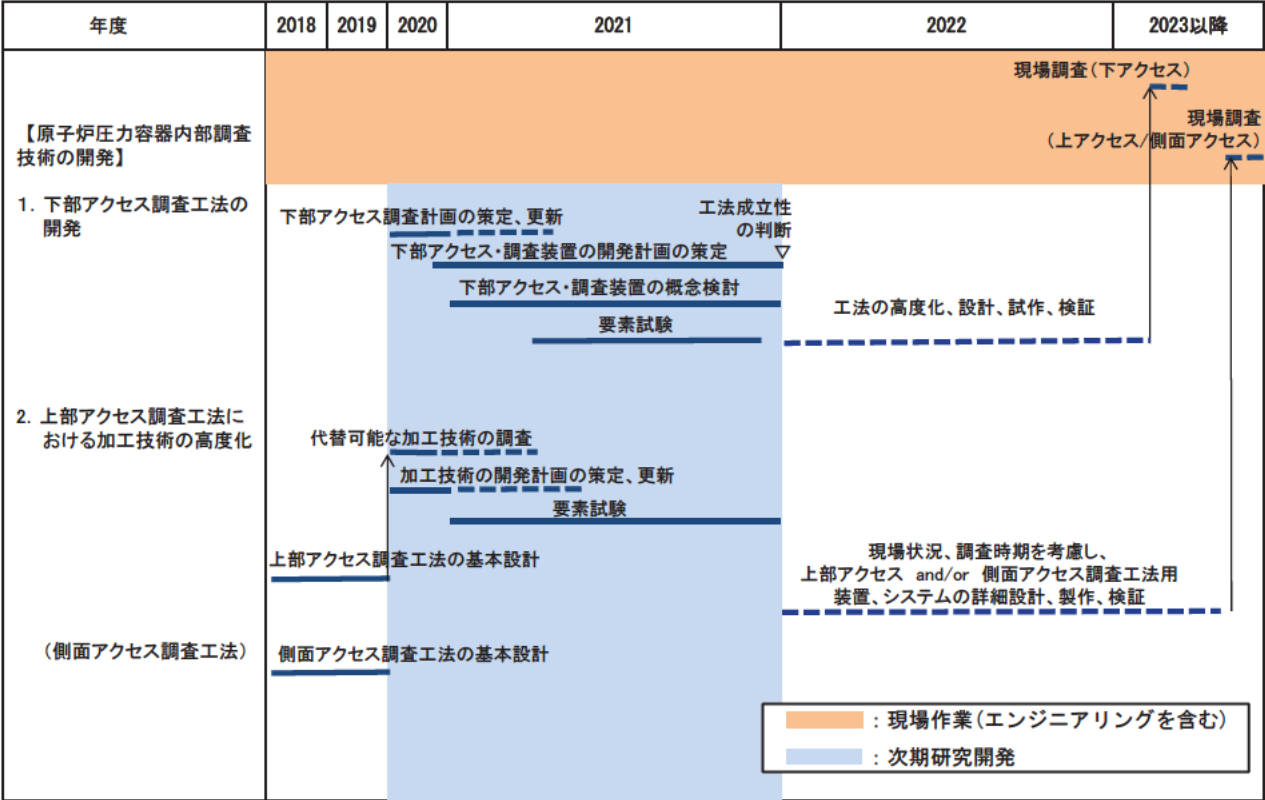
1. 下部アクセス調査工法の開発
①下部アクセス・調査計画及びアクセス・調査装置の開発計画の策定、更新
RPVの下側からRPV底部の開口部の有無等の状態を調査し、開口部が確認できた場合には、開口部から調査装置をRPV内に挿入し、RPV内側底部の状況を調査する調査計画を策定し、調査に用いる下部アクセス・調査装置の開発計画を策定し、必要に応じて更新する。
なお、RPV底部へのアクセスルートとしては、原子炉格納容器 (PCV) 内部調査のために構築されたPCV内部へのアクセスルート等も参考にする。

②下部アクセス・調査装置の概念検討
①で策定した調査及び開発計画に基づき、下部アクセス・調査装置の概念検討を行う。なお必要に応じて、概念検討に必要な要素試験を行うこととする。

2. 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化
2019年度までに開発した上部アクセス調査工法の実機適用性向上を図るため、アクセスルート構築のための新規の開口作業を行う加工方法として、従来のアブレッシブウォータージェット(AWJ)よりも二次廃棄物の少ない加工技術を開発する。(既存技術を応用することも可能)
なお、加工時の放射性ダスト飛散抑制方法についても考慮すること。
具体的には、代替可能な加工技術を調査し、その結果に基づいて、代替可能な加工技術(複数可)の開発計画を策定し、必要に応じて更新する。
さらに、代替可能な加工技術(複数可)の要素試験を行い、成立性を確認する。

- 目標達成を判断する主な指標の設定(2021年度)**
- ・ 下部アクセス・調査装置の概念検討(2021年度)
 - ・ 代替可能な加工技術の要素試験、成立性確認(2021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

○世界最初のBWRの炉心溶融事故であり、BWR特有の構造・組成、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を含む燃料デブリの分析を可能とするため、燃料デブリの分析技術の開発を実施する。

○現場試料の分析・評価を活用して、燃料デブリの熱挙動、経年変化特性や微粒子挙動など、その性状の推定技術を開発し、燃料デブリ性状推定を高度化する。

○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等

- 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、ホット施設を有する研究機関において分析を行う。
- 燃料デブリ及び堆積物等分析結果、各号機の燃料デブリの生成メカニズム等を基に、国内及び世界の専門家の知見を取り入れ、「燃料デブリ性状推定」を高度化する。これらの結果は燃料デブリ取り出し方法、収納・移送・保管技術の開発、臨界管理はもとより、事業者の行う事故時の評価・分析にも活用される。
- 分析精度の向上のため、事業者と共同して、既知の結晶・非晶質相が混合された試料を用い、各研究機関における熔融固化物に対する分析技術を把握し、分析工程の検証を行う。
- 分析施設へ燃料デブリの輸送負担を低減するため、既存の構造材に付着・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。
- 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技術の開発を目標として、物体に含まれている核燃料物質量を計測できる可能性がある技術の計測誤差に影響を及ぼす因子について解析的な分析・評価を行う。さらにその結果を踏まえて仕分け技術の実機適用を目指すうえで必要な今後の研究開発計画を検討する。

2. 燃料デブリ熱挙動の推定技術の開発

- 崩壊熱を発している燃料デブリ取り出しの進捗に伴い、注水量低減、間欠注水、空冷といった多様な冷却方法を検討するため、PCV内の燃料デブリ・核分裂生成物の分布を踏まえ、場所による

燃料デブリの熱挙動の違いを推定できる技術を開発する。

3. 燃料デブリの経年変化特性の推定技術の開発

- 燃料デブリ取り出し、収納・移送・保管方法を検討する上で必要となる燃料デブリの経年変化による影響を明らかにするため、溶融炉心-コンクリート反応(MCCI)生成物を対象とした化学的経年変化特性及び発生条件を推定するための試験等を行い、経年変化が生じるしきい条件の評価を行う。燃料デブリの収納・移送・保管、廃棄物の処理・処分等の関連する研究開発と連携を取りながら進める。

4. 燃料デブリ微粒子挙動の推定技術の開発

- 放射性微粒子による燃料デブリ取り出しシステムへの影響を検討するため、放射性飛散微粒子が生成される加工試験等を行い、結果の検討・評価を行う。試験は取り扱いに注意を要する燃料成分の実データの取得を図る。また、燃料デブリ取り出しシステムの検討に資するように関連プロジェクトと連携を取りながら進める。

目標達成を判断する主な指標の設定(2021-2022年度)

- 燃料デブリの分析の準備(2021年度)
- 最新の情報を踏まえた「燃料デブリ性状推定」の高度化(2021年度)
- 簡易(その場)分析手法による模擬サンプル測定データの収集と実現性の評価(2022年度)
- 燃料デブリの熱挙動に係る推定結果等のとりまとめ(2022年度)
- 燃料デブリ経年変化特性に係る推定結果等のとりまとめ(2022年度)
- 放射性飛散微粒子挙動に係る推定結果等のとりまとめ(2021年度)

(目標工程)B2③：燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発

年度	2018	2019	2020	2021	2022	2023以降
【燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発】	燃料デブリの位置毎の性状・形状の把握					
	燃料デブリ性状の推定			↑		
	燃料デブリ等の分析の準備			↑		
	燃料デブリ分析・推定検討の国際協力レビュー			↓		
	各研究機関での分析精度向上の検討					
	簡易(その場)分析技術の開発					
	燃料デブリと放射性廃棄物の仕分け技術の開発					
	燃料デブリ・FPの分布を踏まえた熱挙動の推定					
	MCCI生成物を対象とした経年変化特性の推定					
微粒子生成挙動と輸送移行挙動の推定						
1. 燃料デブリ性状の分析・推定に必要な技術開発等						
2. 燃料デブリ熱挙動の推定技術の開発						
3. 燃料デブリの経年変化特性の推定技術の開発						
4. 燃料デブリ微粒子挙動の推定技術の開発						
【原子炉格納容器内部詳細調査技術の開発】				▽1号機の堆積物取り出し		
【燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発】						
現場作業(エンジニアリングを含む) 次期研究開発						

現場作業(エンジニアリングを含む)

次期研究開発

B3①: 燃料デブリ取り出し工法の開発(1/3)

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必要な機器・装置及びシステムに関わる技術やスループット確保のための取り出し作業エリアの確保について、これまでに得られた研究開発成果に基づき、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、不確定要素を含む環境条件での遠隔作業となる。取り出し規模の更なる拡大に向け、燃料デブリ・炉内構造物の取り出しに関するこれまでの研究開発成果等を踏まえ、開発している取り出し工法を構築する上で、重要な技術要素であるアクセス用構造物の遠隔設置工法、PCV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・搬送台車の開発、ダスト等の飛散抑制技術の開発等の燃料デブリ取り出し期間の継続的な作業を考慮した技術開発を行う

○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. 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

① 大型重量構造物の設置及び地震変位吸収構造

大型重量構造物をPCV接続部に取り付けるためには、R/B内の床荷重制限を満足しつつ、大型重量構造物を精度よくPCVとの接続部に位置出しする必要がある。R/B内にアクセス用設備を設置するため、それらの設置工法の確認試験を行い、工法全体の効率化や手順の実現性を確認する。

また、PCVに接続するアクセス用設備は、接続部に閉じ込め機能を保持すると共に地震時の変位に対応するための吸収機能が必要である。変位吸収構造の検討及び実現性確認のための要素試験を実施する。

② PCV接続スリーブ遠隔設置・溶接

PCVに接続するスリーブ等設備のPCVへの取り付けは、遠隔で精度よく設置し、接続部の閉じ込め機能を確保できる技術の開発が課題である。PCVに接続するスリーブ等の遠隔設置方法、手順の検討を行い、要素試験を実施して、精度評価など実現性の確認を行う。接続部の閉じ込め技術として、溶接方法について、溶接前の磨きなどの前処理を含む一連の溶接作業、検査、保守を遠隔で実施する手順の検討を行い、成立性を確認するための検証試験を実施する。

③ 遮へい体設置

取り出した燃料デブリ等を一時的に収納するアクセス用設備は、構造物の周囲を作業環境として使用するために、線量低減が必要であり、重量物である遮蔽体の合理的な設置が課題である。効率的、且つ作業安全を踏まえた遮へい体構築のため、R/B構造強度と現地施工性を考慮した構造、設置方法の検討を行い、製作性等の実現性確認のための検証試験を実施する。

④ シールドプラグの解体

アクセス用設備をPCV接続部に取り付けるに先立って、既設の機器ハッチ前のシールドプラグ等の撤去を行う必要がある。R/B内の限られたスペースで安全確実に、切断、解体し、廃棄物容器に収納する方法について、実現性を確認するための要素試験を実施する。

B3①: 燃料デブリ取り出し工法の開発(2/3)

(2) 解体・撤去技術の開発

① HVH解体

PCV内において水循環システム構築作業やデブリ取り出し作業を実施する上で、PCV内にあるHVHの撤去は作業エリアを確保し、デブリ取り出しのスループットを向上させるために必要である。HVHを模擬した試験体を製作し、具体的な切断／回収方法の検討と要素試験による実現性の確認を実施する。

② CRD交換機の解体

ペDESTAL内においてデブリ取り出し作業を実施する上で、大型構造物であるCRD交換装置の撤去はペDESTAL内のアクセス性を確保するために必要である。解体をペDESTAL内の限られたスペースで行うことを考慮した解体、撤去方法の検討が必要となる。CRD交換装置を模擬した試験体を製作し、具体的な切断／回収方法の検討と要素試験による実現性の確認を実施する。

③ ポンプピット内干渉物撤去

PCV内の水位低下を行うための工法の一つとして、ポンプピット内への水中ポンプの設置が必要である。そのために配管等の干渉物を撤去してポンプピット内を整備する方法の詳細検討および要素試験による実現性の確認を実施する。

(3) 取り出し工法の高度化開発

① 取り出し用遠隔先端ツール

燃料デブリの取り出し及び炉内構造物の解体・撤去を行う遠隔装置の先端ツールに関して市場技術の調査・整理を行う。現場に適用するための要求事項に基づいて、選定した先端ツールについて、現場適用のための改造、試作を行い、作業手順、ユニット缶への移送手順等を確認し、一連の作業成立性の確認を行う。また、作業手順の実績データを取得し、スループット評価用データを作成する。

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

① 大型切断工法

RPV内に固定されている炉内構造物は、切断して搬出することになる。炉内構造物を細断する方法では搬出作業が頻繁になり、スループットの向上が困難である。そこで、RPV内に固定されている炉内構造物を、大型に切断して切り離す方法について検討し、要素試験を実施する。また、大型切断後のRPV内からの搬出方法について検討し現場適用性を評価する。

② 大型搬出容器

上アクセス工法のスループットを向上する方法として、大型に切断した構造物を搬出するための大型搬出容器には、二重蓋構造のような汚染拡大防止機能と高線量の収納物に対する遮へい機能が必要である。大型搬出容器の気密・遮へい構造に関する詳細検討を実施し、実規模での試作を行い、成立性の検証と現場適用の課題抽出を実施する。

③ 大型搬送装置

上アクセス工法において、大型一体搬出工法、遮へいを必要とする搬送用通路はオペロ荷重低減のために小型軽量化すること、重量物を搭載した搬送装置の変形等による走行機能への影響がないこと等が必要である。搬送方法、装置について、自走式、牽引式等の比較検討による方式選定、構造検討を行い、要素試験を実施し、成立性の検証と現場適用の課題抽出を実施する。

B3①：燃料デブリ取り出し工法の開発(3/3)

3. 横・上共通の取り出し工法の開発

(1) 燃料デブリ飛散抑制技術の開発

燃料デブリの加工時のダスト飛散抑制については局所カバー/吸引、水スプレー等が検討されている。加工前後に塗布、散布等を行うことでダスト飛散抑制効果を高める材料の適用が期待される。材料の適用可能性やダスト飛散抑制効果について調査を行う。候補材料を選定し、効果、取り扱い性について要素試験を行い、現場適用性に資する各種データを取得、整理し、燃料デブリの部位および環境に応じた適用方法を検討する。

(注記)

燃料デブリ取り出し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(2021年度)

1. 横取り出し工法の開発
 - ・アクセス用設備の設置工法の概念検討(2021年度)
 - ・解体・撤去技術の開発の試験計画策定(2021年度)
 - ・取り出し工法の先端ツールの調査検討(2021年度)
2. 上取り出し工法の開発
 - ・大型構造物の取り出し要素技術(大型切断工法、大型搬出容器、大型搬送装置)の概念構築(2021年度)
3. 横・上共通の取り出し工法の開発
 - ・ダスト等の飛散抑制技術の材料候補と特性整理(2021年度)

(目標工程)B3①：燃料デブリ取り出し工法の開発

年度	2018	2019	2020	2021	2022	2023以降
【燃料デブリ取り出し工法の開発】	取り出し規模の更なる拡大に向けたエンジニアリング					
	基盤技術の高度化、工法・システムの高度化 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 燃料デブリ取り出し工法の開発					
	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					
	(2) 解体・撤去技術の開発					
	(3) 取り出し工法の高度化開発					
	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					
	3. 横・上共通の取り出し工法の開発					
	(1) 燃料デブリ飛散抑制技術の開発					
【安全システムの開発】【遠隔装置保守技術の開発】等	安全システムの開発、遠隔装置保守技術の開発 等					
	※関連PJ間の調整による適切な開発の実施					

: 現場作業(エンジニアリングを含む)
 : 次期研究開発

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必要なシステム及び安全確保に関わる技術について、これまでに得られた研究開発成果に基づき、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、燃料デブリ・炉内構造物の取り出しに関するこれまでの研究開発成果等を踏まえ、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(液体系・気体系システム)

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、これまでの成果を踏まえ、実液での適用性評価にむけた、合理的な分離技術の開発・検証を行う。

1. 1 溶解性 α 核種除去技術の開発

補助事業「取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発」のうち、溶解性 α 核種除去に係る要素試験は模擬液で実施してきた。今後、実液(原子炉建屋内滞留水)を使用して行うことを想定した検討や予備試験を実施し、実機への適用性の計画・評価を行う。

1. 2 RO※1濃縮水の処理技術の開発

溶解性 α 核種除去設備の吸着塔単体で、十分かつ効率的な核種除去性能を担保出来ない可能性に備え、吸着塔の一部をRO膜で代替することが検討されている。この場合においてRO濃縮水に溶存している放射性核種の分離技術を開発※2する。

1. 3 二次廃棄物処理技術の開発

液体系システムや気体系システム等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、実際の運用を考慮した収納缶への収納を考慮した前処理方法の検討を行う。特に、液体系システムの沈降分離槽で発生するスラッジ、上澄液については、要素試験等を行い、処理方法の技術開発を行う。

※1 RO:Reverse Osmosisの略。逆浸透現象を利用したろ過手法。

※2 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(2019-2020補助事業)では、粒子除去設備のドレン水・逆洗水処理水を対象として開発したが、今回対象としているRO濃縮水とは粒子の性状が異なる。

B3②: 安全システム (2/2)

2. 臨界近接監視技術・中性子吸収材技術の現場運用方法

中性子検出器や非溶解性中性子吸収材は、デブリ加工・回収作業の一環として運用することになる。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燃料デブリ取り出し工法の開発プロジェクトの検討状況を踏まえ、デブリ加工・回収作業の手順に対応した中性子検出器と非溶解性中性子吸収材の設置、散布等の運用方法について検討し、現場適用性を評価する。また、水ガラス(非溶解性中性子吸収材)については燃料デブリの乾燥への影響も評価する。

3. デブリ飛散率データ取得

取り出し規模の更なる拡大に先立ち、燃料デブリのダスト飛散に関連した安全評価技術の開発が求められる。

燃料デブリの性状や加工方法などのデブリのダスト飛散に影響するパラメータを把握することにより、ダスト飛散影響を装置設計や安全評価を含むエンジニアリングに適切に反映することができる。デブリ性状把握等の関連プロジェクトの状況も踏まえ、通常作業時および事故時の燃料デブリのダスト飛散の安全評価に必要なパラメータを検討、選定、取得する。データ取得に当たっては、ダスト飛散に影響するパラメータと関連付けて、ダスト飛散挙動を把握することを目標とする。成果は燃料デブリ取り出しに係る安全評価の技術的根拠として体系的に整備する。

4. 被ばく線量評価のための分析手法の技術開発

取り出し規模の更なる拡大に向けて、 α ・ β 核種の内部とこみリスクに備えた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を行う。

現行のバイオアッセイでは、分析に時間がかかること、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・速度を担保した内部被ばく線量評価のための手法を開発する。

目標達成を判断する主な指標の設定(2021/2022年度)

- ・溶解性 α 核種除去技術の開発の予備試験の実施(2021年度)
- ・実際の供用を踏まえてのRO濃縮水処理の運用検討、沈降分離試験の実施によるRO濃縮水処理技術の開発(2022年度)
- ・二次廃棄物処理技術の開発方針及び試験計画の策定並びにシステム概念検討の実施(2021年度)
- ・燃料デブリ加工条件を考慮した臨界監視技術の現場運用条件と対策の提案(2022年度)
- ・燃料デブリ飛散率データ取得試験計画策定・実施(2021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提案(2022年度)

(目標工程)B3②:安全システム

年度	2018	2019	2020	2021	2022	2023以降
【安全システム】 1. 安全システムの開発(液体系・気体系システム) 1. 1 溶解性α核種除去技術の開発 1. 2 RO濃縮水の処理技術の開発 1. 3 二次廃棄物処理技術の開発 2. 臨界近接監視技術・中性子吸収材技術の現場運用方法 3. デブリ飛散率データ取得 4. 被ばく線量評価のための分析手法の技術開発	取り出し規模の更なる拡大に向けたエンジニアリング					
	基盤技術の高度化、工法・システムの高度化					
	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・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)					
	溶解性α核種除去技術の開発					
	RO濃縮水処理の運用検討、沈降分離試験の実施によるRO濃縮水処理技術の開発					
	開発方針、試験計画の策定					
	システム概念検討、要素試験の実施、二次廃棄物処理技術の開発					
	臨界近接監視技術・中性子吸収材技術の現場運用					
	デブリの飛散率データ取得試験の実施					
	デブリの飛散率評価技術開発検討					
	被ばく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	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					
: 現場作業(エンジニアリングを含む) : 次期研究開発						

B3③: 遠隔装置保守技術の開発

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おいて、長期にわたる安全で確実な運転継続性を確保するため、また、取り出し工法に関わる遠隔装置の合理的な設計及び廃棄物発生量の低減等の観点も含めて、必要となる装置の遠隔保守技術の開発を行う。

実施内容

- 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燃料デブリ取り出しには、長期の運転継続を安全、確実に維持し、また、取り出し工法に関わる遠隔装置の合理的な設計へ反映すること、さらには廃棄物発生量の低減に資する観点で、PCV内等の作業に使用して汚染した種々の装置の遠隔保守を行う技術、施設が必要である。「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、必要な技術要素として、汚染した装置の遠隔除染・保守技術に関わる技術開発を行う。
- 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. 汚染した装置の遠隔除染・保守技術の開発

段階的に規模を拡大する取り出しの段階ではPCVIに侵入して作業を行う遠隔装置の種類は限られている。取り出し規模の更なる拡大の段階では取り出しを行う号機によって、種々の遠隔装置が導入され、種類が増加する可能性があり、現場投入した遠隔装置の点検、保守、故障時の補修を行う専用の施設が必要になることを考える必要がある。保守作業は線量が低い場合には人的に対応できるが、線量が高い場合には遠隔装置で行うことが必要になり、種類が多いと難易度が高くなる。

そのため、汚染した高線量の装置・機器類の遠隔による除染・保守に関して国内外の類似事例の調査を行い、教訓、反映事項を抽出し、多種類の遠隔装置に対して除染・保守を行う汎用性のある遠隔除染・保守システムに関する要求事項の検討、整理を行う。また、除染・保守の対象になる取り出し装置・機器類について保守性の観点からの反映事項、設計思想を整理する。さらに、これらの要求事項等について関係者で議論した上で、遠隔除染・保守施設の概念検討及び遠隔装置による除染・保守技術に関する基本的な技術課題及び開発要素の検討、抽出を行う。

(注記)

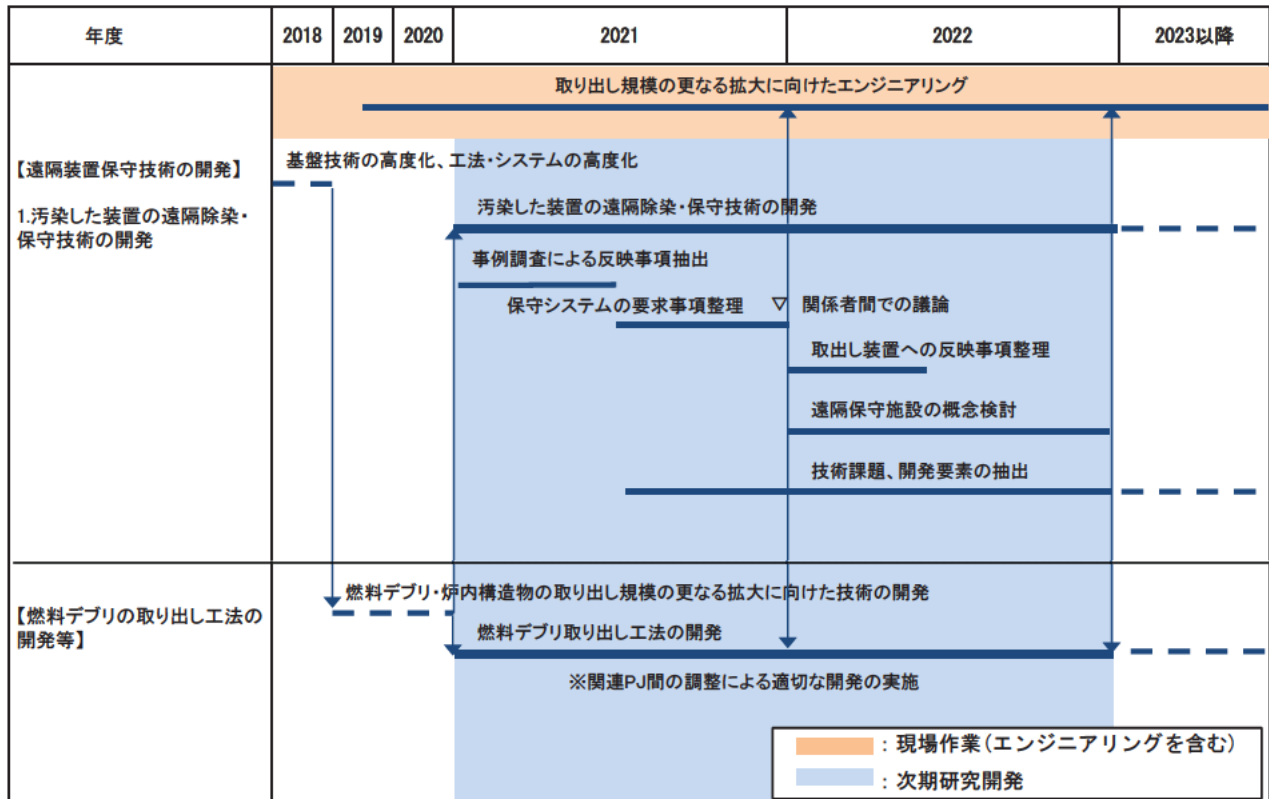
本開発においては、以下について取り扱い性、保守方法を考慮した開発を行う。

- ・遠隔での保守が原則となる。
- ・装置の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を合理的に設定する必要がある。
- ・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

- ・汚染した装置の遠隔除染・保守技術の要求事項の整理(2021年度)

(目標工程)B3③: 遠隔装置保守技術の開発



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

- 取出し規模の更なる拡大における燃料デブリ取り出し工法に適合した収納・移送・保管システムの概念を確立する。
- 世界最初のBWRの炉心溶融事故であり、BWR特有の構造・組成、海水注入等の影響を受けて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開発し調整を図りながら構築するための技術開発を行う。
- 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. 収納技術に必要なフィルタの故障シナリオの選定と影響評価

- ・ 燃料デブリの収納・移送・保管時の想定環境や取り扱い及び処理による収納缶のフィルタの流量低下及び性能に影響する故障シナリオを検討する。さらに追加試験が必要となる場合はその試験方法を検討する。

2. 移送・保管技術に必要な乾燥技術の開発

- ・ 2020年度までの乾燥技術（供試体種類、乾燥形態、方法、装置等）の概念検討結果を踏まえ、供試体種類、乾燥形態（燃料デブリの収納形態等）等の乾燥処理方法や運転上のパラメータの拡大・充実を行い、乾燥装置概念や運転条件の設定に必要なデータの拡充を図る。

3. 粉状及びスラリー・スラッジ状放射性物質取り扱い事例の基礎調査

- ・ 燃料デブリの切削加工などで発生する粉状・スラリー・スラッジ状（以下粉状）の保管までの取り扱いについては検討が行われてこなかった。粉状の放射性物質の取り扱いや保管の国内外の事例

を調査し、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・整理を行い、それらの比較評価を行う。その調査の結果と関連する技術開発を踏まえて、粉状燃料デブリを現方式で保管（現在の収納缶による乾式保管）する場合の課題の抽出をする。さらに、解決すべき技術課題に対しては、技術開発計画案を立案する。

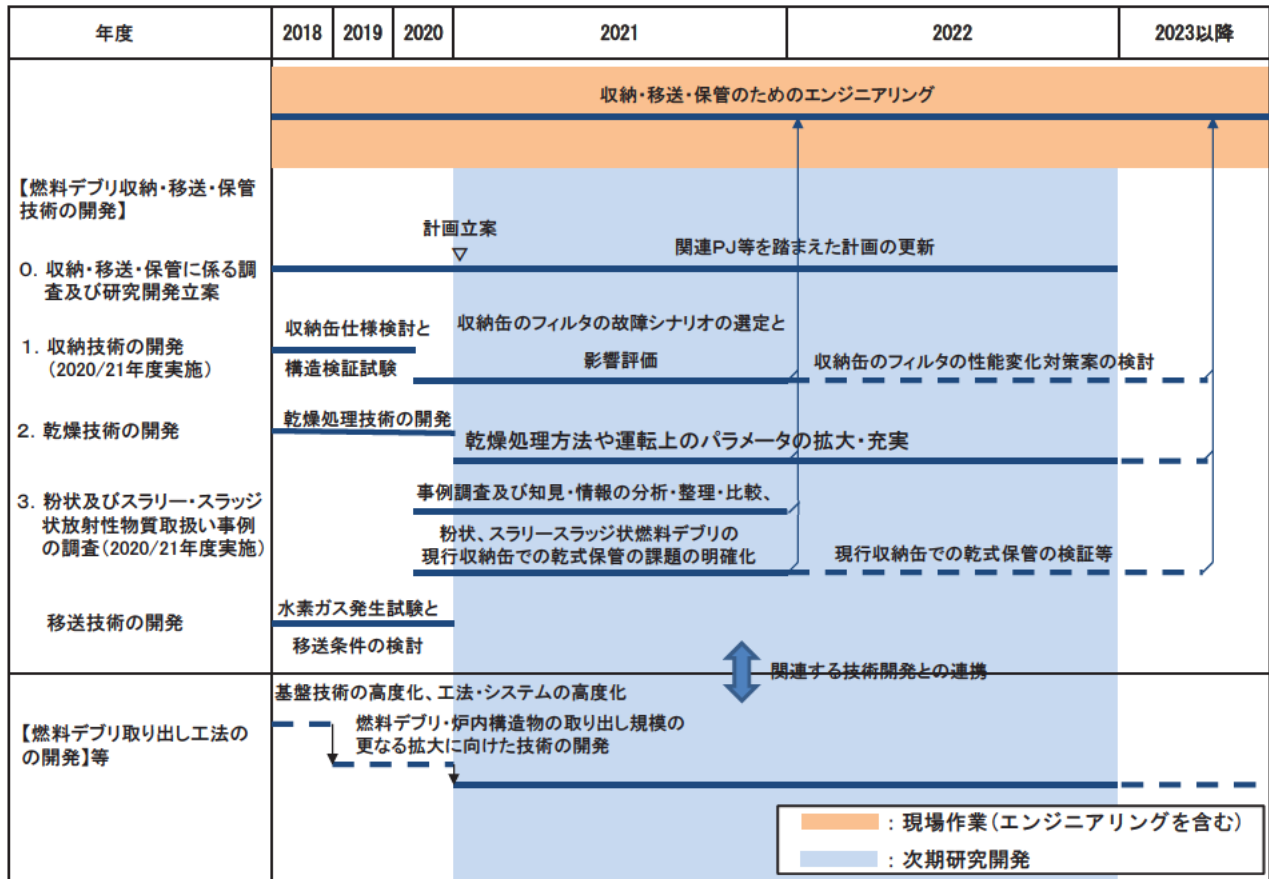
※関連する技術開発

「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（2021年度/2022年度）

- ・ 事例調査に基づく粉状デブリの移送・保管方法の検討及び現方式による粉状デブリの保管の課題の明確化（2021年度）
- ・ フィルタ流量低下試験の実施と故障シナリオの検討（2021年度）
- ・ 乾燥技術に関する必要データの拡大・充実による乾燥装置概念や運転条件への反映（2022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

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ため、取り出し期間におけるPCV内の環境変化を長期的、且つ連続的に監視する技術が必要である。加えて、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デジタルツイン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、PCV内の連続的な監視システムの開発及び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. PCV内の連続的な監視システムの開発

PCV内の調査及び段階的に規模を拡大する取り出しの段階では、PCV内に侵入する遠隔装置自体に取り付けた照明、カメラ、計測装置で対応する方法が検討されている。一方、取り出し規模の更なる拡大の段階ではスループットを向上し、取り出し作業を行うPCV内の環境変化を連続的に把握して安全に作業を継続するための難易度の高い監視システムが必要になる。

更なる規模を拡大したデブリ取り出し作業に伴うPCV内の環境変化を連続的に監視するために、安全要求と作業継続性を考慮した監視項目の整理、設定、現場適用性を考慮した監視方法の概念検討、整理を実施する。さらに、これらの概念検討等について関係者で議論した上で、ベネ使用計画の検討及びPCV内の計測器設置など、監視システム成立に必要な基本的な技術課題及び開発要素の検討、抽出を行う。

(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に限られる。
- ・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。

(2. デジタル技術を利用した統合的管理技術の開発

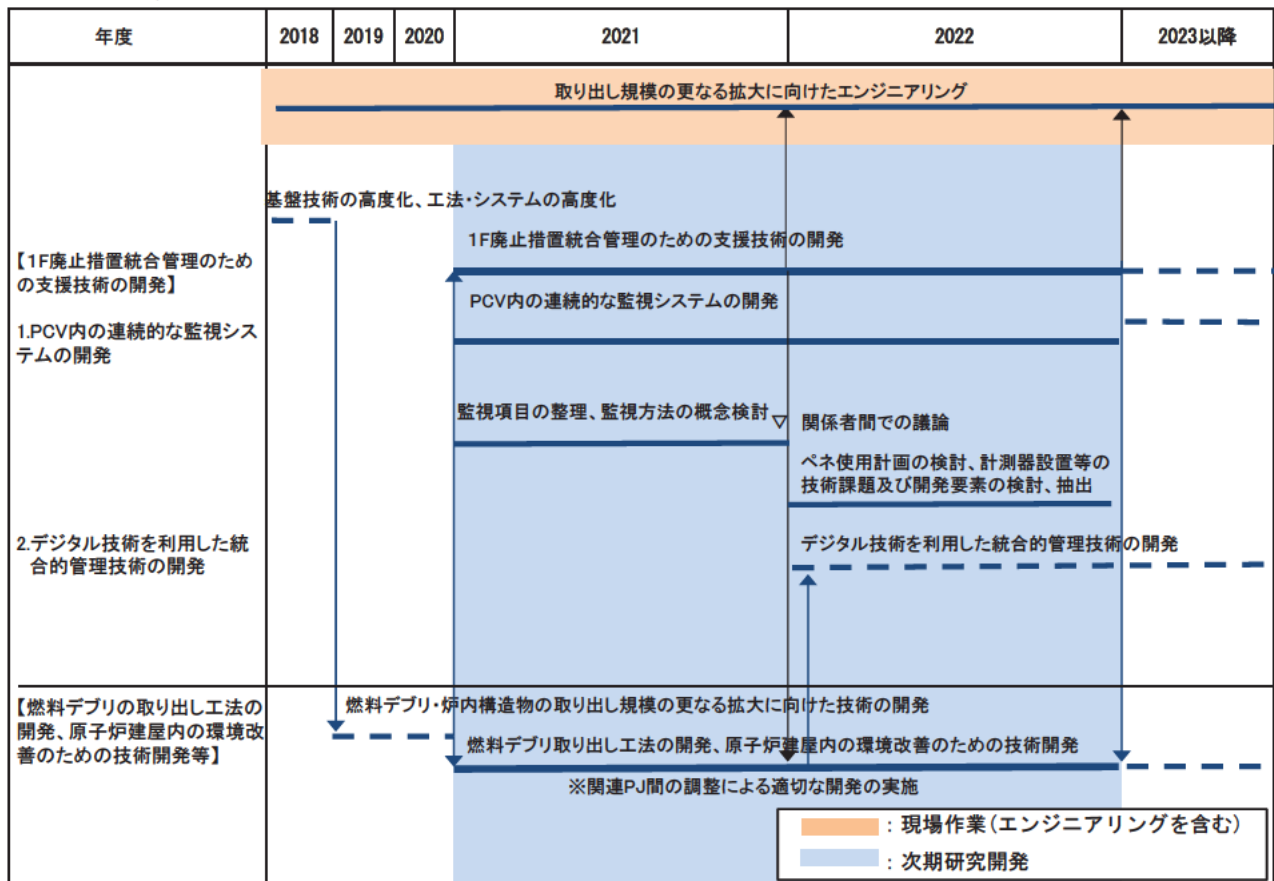
1Fの燃料デブリ取り出しは、高線量下・高汚染下、不確定要素を含む環境条件での遠隔作業であり、内部調査段階、段階的に規模を拡大する取り出しの段階、取り出し規模の更なる拡大の段階で得られる様々な種類の情報を共有し、統一された認識のもとに安全確保を第一として進める必要がある。そのためには、認識しやすい手段に統合したデータ管理、運転システムの整備が重要であるが、難易度が高い開発になると考えられる。

廃止措置を効率的に進めていく上で、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ツインの導入は効果的と考えられる。1F廃止措置業務におけるデジタルツイン導入による効率化等の改善について検討し、要求事項を整理する。また、デジタル技術の利用例の調査、デジタルプラットフォームの調査、検討を行い、要求事項に対する評価と導入に向けての課題整理を行う。

目標達成を判断する主な指標の設定

- ・PCV内連続監視システムの監視項目の整理と監視方法の概念検討(2021年度)
- ・デジタル導入による1F廃止措置改善事項の整理(2022年度以降)

(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年度頃までを目処に、処理・処分方策とその安全性に関する技術的見通しを得ることを目標として、事故廃棄物の特徴を考慮し、固体廃棄物*1の保管・管理方法の検討・評価、処理・処分概念の構築とその安全評価手法の開発を行う。また、これらの実施にあたって必要となる性状把握に関する検討を行う。

実施内容(全体像)

- I. 固体廃棄物の保管管理の更なる安全性向上を目的として、水処理二次廃棄物の保管・管理対策の検討及びデブリ取り出しに際して発生する固体廃棄物の保管・管理方法の検討を行う。また、 α 核種による表面汚染がある廃棄物の測定システムの開発を行う。
- II. 先行的処理方法*2の選定に資するため、工学規模の試験装置等を用い、実処理に適用できる見通しのある安定化・固定化に関わる処理方法の研究開発を行う。また、処分に係る国内外の調査等に基づき、固体廃棄物に適用可能な処理技術を踏まえた処分概念の構築及び安全評価手法を開発するために必要な項目・情報を収集・整理する。
- III. 限られた分析データに基づいて性状把握が可能となるよう、分析データの代表性についての評価方法の検討等を行う。また廃棄物管理全体のニーズや整合性等に資する分析データの取得・評価・管理、高線量試料採取に関する開発を進める。
- IV. 廃棄物ストリームに対し、I～IIIの研究で得られた成果を反映し、進捗、成果の整合性、及び残された課題を統合的に評価する。
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. 保管・管理

1. 保管・管理方法の検討・評価

燃料デブリ取り出しに伴い発生する廃棄物等の高線量廃棄物に関し、保管方法、容器、収納方法を水素ガスの対策も含めて検討する。

処理技術を抽出するため、必要な項目・情報を収集・整理し、固体廃棄物の性状に関する情報を踏まえ、各技術の多角的な比較・検討を行う。

2. 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発

α 核種による表面汚染測定システムについて、モックアップ試験の結果に基づいて改良を行う。

2. 処分概念の提示及び安全評価手法の開発

国内外の処分概念及び安全評価手法の調査並びに固体廃棄物の性状に関する情報を踏まえ、一部の代表的な廃棄物ストリームを対象に複数の処分概念の検討を試行する。その上で、固体廃棄物に適用可能な処理技術を踏まえた処分概念及び処分概念毎の安全評価手法を構築するため、必要な項目・情報を収集・整理する。

また、処分時の安全性に影響を与える物質による核種移行影響に関するデータを取得するとともに安全評価に取り込めるようにする。

II. 処理・処分概念の構築と安全評価手法の開発

1. 先行的処理方法の選定手法の構築

先行的処理方法の選定手法構築に資するため、高温処理技術及び低温処理技術について、工学規模の試験装置等を用いて、実処理に適用できる見通しのある安定化・固定化技術の抽出に必要なデータの取得・評価を行う。

C: 固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発 (2/2)

III. 性状把握

1. 性状把握の効率化

限られた分析データに基づいて性状把握が可能となるよう、分析データの代表性について評価する方法を検討する。また、インベントリ評価の精度向上のために、廃棄物の発生や管理の方法や汚染メカニズムを検討し、その結果に基づいて改良の方策を検討する。

処理・処分を含めた廃棄物管理全体のニーズや整合性、分析対象核種の見直し、分析試料数の最適化に資するため、分析データの取得・評価・管理等を行う。

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標準化を検討する。

2. サンプルング技術の開発

固体廃棄物の処理・処分に係る研究開発のための分析ニーズ等を踏まえ、高線量試料の採取技術の開発を行う。

セシウム吸着塔の実機から吸着材を採取するため、現場状況を考慮した採取計画を策定する。また、採取に必要な吸着塔の穿孔・閉止等の要素技術を適用した試料採取装置及び必要な付帯設備の検討・設計・試作を行い、性能確認等を行う。

IV. 研究開発成果の統合(廃棄物ストリームの検討)

I～IIIの研究で得られた成果を反映して、廃棄物ストリームのケーススタディを数例提示し、それらの絞り込みに必要な視点を整理する。また絞り込みに必要な情報の優先度を検討する。

目標達成を判断する主な指標の設定(2021年度)

I. 保管管理

- ・燃料デブリ取り出しに際して発生する廃棄物等の水素対策を含めた保管・管理方法の提示
- ・表面 α 汚染測定システムの現地適用に向けたモックアップ試験結果に基づいた課題と対策の提示

II. 処理・処分概念の構築と安全評価手法の開発

- ・工学規模の試験装置等を用いて取得した実規模の処理に適用可能な技術の抽出に必要なデータ及びその評価結果の提示
- ・一部の廃棄物に対して技術的観点から実処理に適用可能な技術の抽出
- ・処理技術を踏まえた処分概念案及びその安全評価手法に必要な項目・情報の整理
- ・人工バリア材への核種収着への影響評価に必要なデータの提示と安全評価手法への反映

III. 性状把握

- ・インベントリ評価の精度向上のために、インベントリ推算手法へ適用すべき方策の抽出
- ・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標準分析手法の提示
- ・試料採取装置及び付帯設備の試作、性能の確認

IV. 研究開発成果の統合

- ・廃棄物ストリームの絞り込みに必要な視点及び絞り込みに必要な情報の優先度の提示

*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 先行的処理方法: 処分の技術的要件が決まる前に行う、処分を念頭に置いた、安定化、固定化のための処理方法。

(目標工程)C:固体廃棄物の処理・処分にに関する研究開発(1/2)

[illegible]

(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)

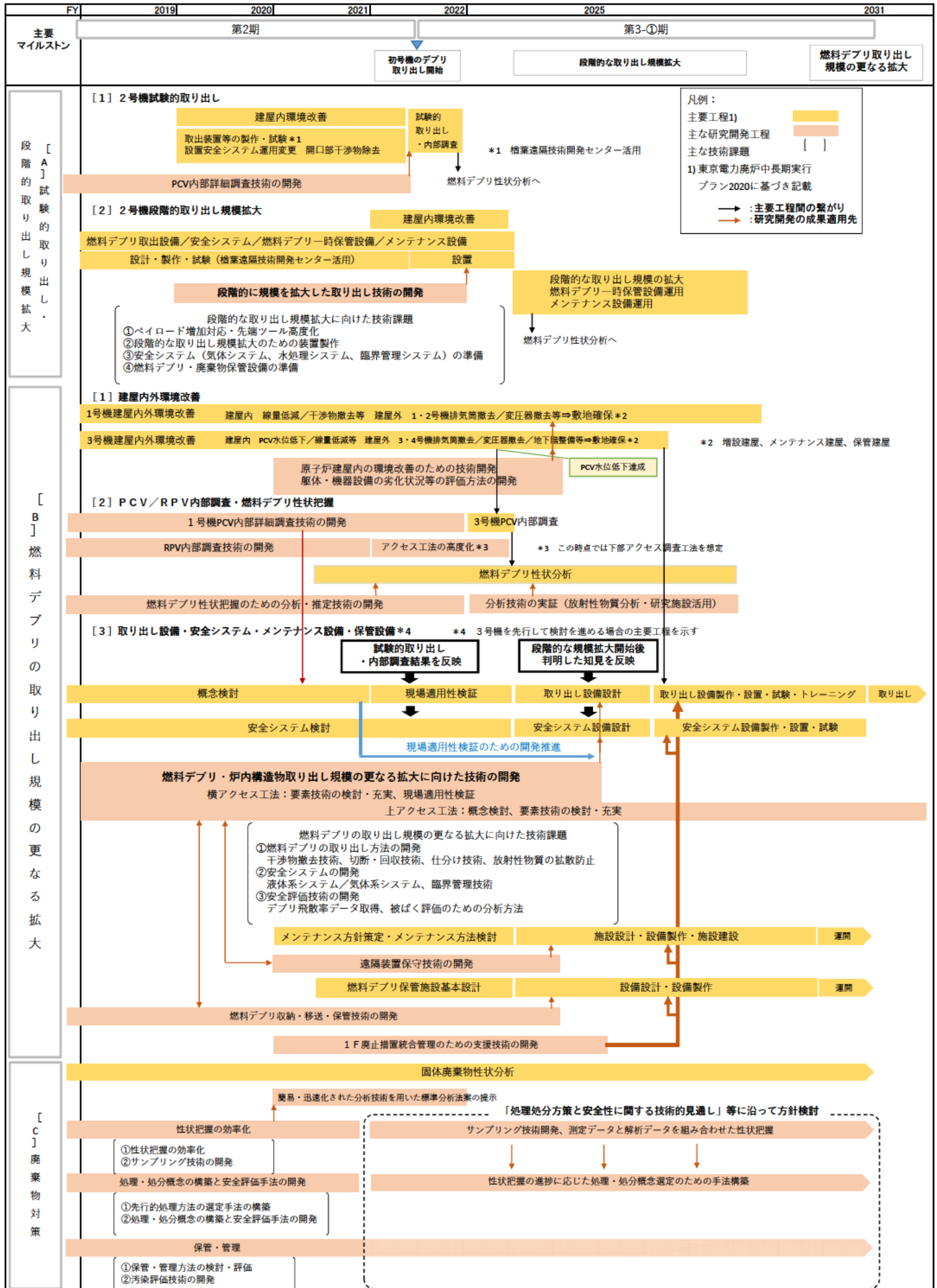
年度	2018	2019	2020	2021	2022	2023以降
Ⅲ. 性状把握						
1. 性状把握の効率化	分析データの組み合わせで性状を反映	分析データと移行モデルに基づく評価データの組み合わせで性状を把握する方法の構築		必要な精度を有する効率的な性状把握方法の確立		
	分析方法の簡易・迅速化、マニュアル整備に向けた手法提案、廃棄物管理全体のニーズ等に資する分析データの取得・評価・管理等			簡易・迅速化された分析技術を用いた標準分析法案の提示		
2. サンプルング技術の開発	モックアップ装置設計に必要な要素試験・評価			試料採取装置及び付帯設備の試作、性能の確認	採取試験	
Ⅳ. 研究開発成果の統合						
廃棄物ストリームの検討	原案作成、成果的な進捗、整合性の反映、見直し	研究開発の統合的な進捗、整合性、課題評価		廃棄物ストリームの絞り込みに必要な視点及び絞り込みに必要な情報の優先度の提示	研究開発の進捗を踏まえた評価	

: 現場作業(エンジニアリングを含む)
 : 次期研究開発

(参考 1)

研究開発中長期計画

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)

2020 年度研究開発プロジェクトの進捗状況

原子炉格納容器内部詳細調査技術の開発(堆積物対策を前提とした内部詳細調査技術の現場実証) (2021年1月末時点における進捗状況)

堆積物を前提とした原子炉格納容器(PCV)内部詳細調査のうちアクセスルート構築は、現場実証として、X-2ペネ内扉の穿孔を完了、PCV内干渉物の撤去を開始し、一方、PCV内部詳細調査は、作業訓練を実施した。ペDESTALのCRD開口部からのペDESTAL内調査については、概念設計を実施した。

実施内容及び成果

1. 調査計画・開発計画の策定

アクセスルート構築の現場実証状況により、切断計画の見直しを実施した。ペDESTAL内調査は調査目標、要求条件を設定し、調査計画、装置の開発計画を策定した。

2. アクセス・調査装置及び調査技術の現場実証

(1) 堆積物を前提としたPCV内部詳細調査

・PCV内アクセスルート構築について、X-2ペネ外扉に3箇所設置した隔離弁をバウンダリとし、内扉の貫通穿孔を完了し、PCV内干渉物の除去を開始した。干渉物除去の過程で干渉物の情報を取得した(図1)。

・PCV内部詳細調査について、継続して作業訓練を実施した。

(2) ペDESTALのCRD開口部からのペDESTAL内調査

試作したペDESTAL内調査装置(図2)を用いて検証試験を実施し、技術の機能検証、追加検討項目の抽出を実施した(図3)。

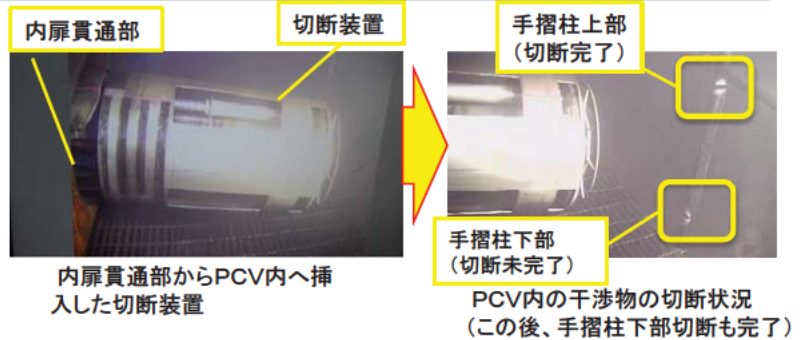


図1 PCV内干渉物(手摺)の除去状況

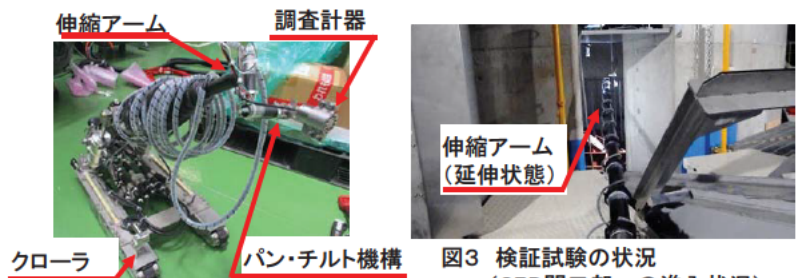


図2 試作したペDESTAL内調査装置



図3 検証試験の状況 (CRD開口部への進入状況)

今後の展開

アクセスルート構築の現場実証を継続し、水中遊泳型調査装置による調査に向けて準備を進める。ペDESTAL内調査は、抽出された追加検討項目の検討を進める。

IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

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※ (2021年1月末時点における進捗状況)

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である。その内、取り出し用アクセス装置のアーム(テレスコアーム)、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を製作中である。又、中性子モニタは試作機の検証試験を、燃料デブリ回収装置は試作機の改良検証を実施している。

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、取出し計画の策定

以下の観点でサンプリングシナリオを検討・更新した。

①段階的に規模を拡大したデブリ取り出しの設備要求を検討し、取り出し用アームの耐久性確認や双腕マニピュレータ交換方法に関する開発項目を纏めた。

②小石・砂状デブリ、切削粉状デブリ、切削円柱状デブリ回収の3通りのデブリ回収作業に関する全体シナリオを具体化した。又、回収したデブリを遠隔操作にて、分析施設へ搬出するためのシナリオを具体化し、関連PJと協議を開始した。

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)

- エンクロージャ内での遠隔作業の検証を行うため、双腕マニピュレータ(図1)を製作した。アームとエンクロージャの模擬品と組み合わせ、遠隔作業の検証を開始する。
- 取り出し用エンクロージャに搭載するダブルドアシステムの耐久性や動作信頼性を確保するための要素試験(図2)を実施。得られた知見を試作機製作に反映する。
- 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(図3)」の設計を纏め、その製作に着手した。
- 取り出し用アームに求められる設計要求に基づき、設計仕様を纏めた。又、将来の小規模取り出し技術への拡張性を考慮し、エンクロージャ内の機器レイアウトを検討。

②取り出し用アクセスルート構築装置(X-6ペネ接続構造等)

- デブリ閉じ込め性向上を目的としたダブルドアを搭載したX-6ペネ接続構造(図4)の試作機を製作し、工場内検証を行う予定。

③燃料デブリ切削・回収装置

昨年度製作した燃料デブリ回収装置試作機(フレキシブルグリップ型燃料デブリ回収装置(図5)、他3種)の改良および工場内検証を実施中

④中性子モニタシステム(臨界近接監視用)

臨界近接監視用の中性子モニタ(予測監視用、常時監視用の2種)を試作・設計検証を実施中。

⑤燃料デブリ収納容器の遠隔輸送台車

燃料デブリ収納容器の遠隔輸送台車(図6)は詳細設計を完了し、試作機の製作に着手した。



図1 双腕マニピュレータ (右は製作中のもの)

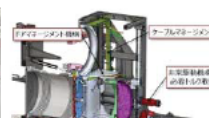


図2 ダブルドア要素試験装置



図3 テレスコアーム



図4 X-6ペネ接続構造



図5 燃料デブリ回収装置 (フレキシブルグリップ型)



図6 燃料デブリ収納容器の遠隔輸送台車

課題及び今後の方向性

- 各装置、システムとも詳細設計、試作機製作の段階に入った。今後、それらについて工場内検証を行い遠隔での操作性や、信頼性を確認し、必要により、試作機の改良・改善を進めていく。

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

IRID

※ 事業開始時の事業名称は「燃料デブリ・炉内構造物の取り出しに向けたサンプリング技術の開発」であるが、廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議(第75回)において公開された2020年度研究開発計画に合わせ、「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」と変更した。

原子炉压力容器内部調査技術の開発 (2021年1月末時点における進捗状況)

燃料デブリ取出し装置の詳細設計に資する情報取得のための原子炉压力容器(RPV)内部調査において、上部アクセス調査工法の実機適用性向上を図るため、炉内構造物に対する開口加工方法として、二次廃棄物(アブレイシブ等)の少ない加工技術・工法の検討を実施した。また、下部アクセス調査工法については適用する技術の選定・抽出を行い、簡易的な要素試験にて成立性を確認予定。

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

- 代替可能な加工技術の調査・評価を行い、二次廃棄物を少なくする加工技術としてホールソー/ディスクソー切断、レーザ切断をアブレイシブウォータージェット(AWJ)に加えて適用加工技術の候補として抽出した。
- AWJでは噴射角度や切断位置等の加工パラメータの最適化検討を行った(図1)。加えてホールソー/ディスクソー切断、レーザ切断については適用した場合の装置・ツールを検討した。
- 加工対象物に対して切断方向の可否や得手・不得手を評価し、組み合わせでの切断工法の検討を実施すると共に、各加工技術について、切断性能を確認する簡易試験の機材を準備中である。

2. 下部アクセス調査工法の開発

- 下部アクセスによる調査のニーズを整理し、早期に情報入手すべく極力既存の技術開発成果を流用し、画像データと線量率を取得する方針とした。また、PCV内部調査等の結果から想定される環境条件やこれまでの他事業での開発済・開発中の技術を整理し、号機毎に開発の必要がある技術を抽出した。
- 1号機は、RPV下部の開口径が大きいと想定されるため、PCV内部詳細調査PJで開発中のクローラ型アクセス装置を活用し、ドローンによりRPV内部へアクセスする工法を開発する事とした。ドローンによるRPV内部へのアクセス実現性評価のため、簡易的な飛行試験を準備中である(図2)。
- 2/3号機は、RPV下部の開口径が小さいと想定されるため、段階的に規模を拡大した燃料デブリ取出しで使用するアーム型アクセス装置にテレスコパパイプを搭載し、RPV内部へアクセス工法を開発する方針とした(図3)。実現性評価のため簡易要素試験を実施中である。

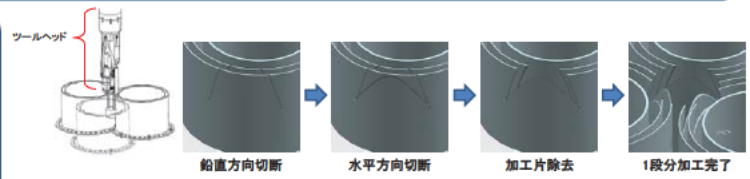


図1 AWJによる気水分離器(中間部)の切断イメージ

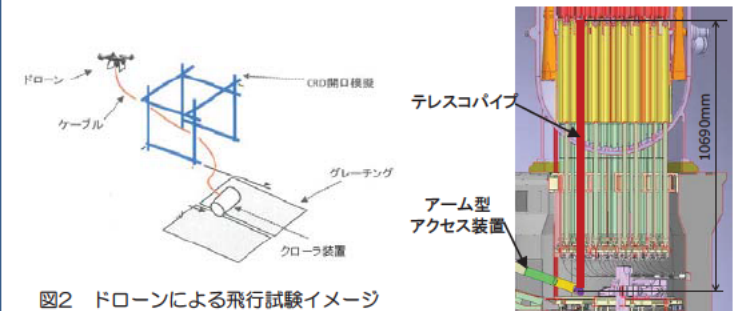


図2 ドローンによる飛行試験イメージ

図3 テレスコパパイプによるアクセスイメージ

課題及び今後の方向性

- 上部アクセス調査工法における加工技術の高度化については、二次廃棄物の影響を考慮した環境制御システム等への成立性評価を行い、試作機による試験を実施する。
- 下部アクセス調査工法については、簡易的な要素試験結果を踏まえた実現性評価を基に概念設計を実施する。

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発 (2021年1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)の原子炉建屋において取得された付着物等試料の輸送を終了し、試料の分析に着手しており、得られた分析結果に基づく炉内の燃料デブリの性状推定についても実施中である。また、燃料デブリの取り出し加工の際に生成する放射性微粒子の生成挙動やその後の移行挙動について、模擬物質を用いた試験を継続実施するとともに、得られた結果に関する評価モデルの構築を継続中である。

実施内容及び成果

1. 燃料デブリ性状の分析に必要な技術開発等

1Fの原子炉格納容器内調査において取得された付着物などに含まれるU含有粒子を分析し、総合的に評価することで、その発生元である燃料デブリ特性を推定している。今年度の輸送試料については、サンプリング対象範囲の拡大やデータ拡充の観点で東京電力HD(株)と協議の上、表1のとおり選定し、輸送し、分析中である。得られた分析データについては、昨年度同様、JAEAと東京電力HD(株)による検討タスクフォースにより解析を進めており、最近の1F内部調査や事故進展解析結果等と関連させて、1〜3号機の領域ごとの燃料デブリ特性についてとりまとめを実施中である。とりまとめにあたっては、従来の燃料デブリ特性リストと、本事業で新たに得られた知見をwikiと呼ばれるコンテンツ管理システムを用いてリンクさせ、ユーザーの使い勝手が良いデータベースとしてデブリ特性リストを提示する計画である。燃料デブリの分析効率化については、昨年度から継続してケーススタディを実施しており、燃料デブリの取り出し方法や分析装置の最新情報などを考慮した分析フローを検討している。

2. 燃料デブリ微粒子挙動の推定技術の開発

仏国で実施するウラン含有模擬燃料デブリを用いた微粒子の生成挙動試験については、昨年度整備した試験装置及び試験に供する模擬燃料デブリ試験体を用いた試験を実施中である。しかし、仏国におけるコロナウィルスの影響により今年度の試験開始が遅延したため、関係機関と協議の結果、本試験については事業期間を1年延長することとなっている。

放射性粒子の生成時におけるプルトニウムとウランの挙動の類似点・相違点を確認する試験については、(U, Pu, Zr) O₂試料を作成し、機械的加工試験を実施した。生成した微粒子についてX線回折測定を行い、生成した微粒子の組成が加工前の試験体組成と変化がないことを確認した。

放射性微粒子生成後の移行挙動については、模擬物質を用いた微粒子の移行挙動試験を2018年度から継続して実施中であり、データの拡充を図っている(図1)。また、データの評価に向け、数値流体力学(CFD)シミュレーションを用いた評価モデルを構築中であり、試計算に着手した。

表1 2020年度に輸送した分析対象試料

分析対象試料	分析項目	分析目的
1/2号機SGTS配管内部拭き取りスミア 1号機PCV内部調査アクセスルート構築関連サンプル(ガス管理設備) 1号機PCV内部調査アクセスルート構築関連サンプル(AWJ装置)	- 外観測定 - イメージングプレートによる放射能分布測定 - FE-SEM/EDX、SEM/EDXおよびTEM、ICP-MSによる元素、核種分析	- 堆積物の特徴のばらつき把握 - ウラン粒子の建屋内分布把握 - ウラン粒子の形成メカニズム⇒デブリ特性の推定

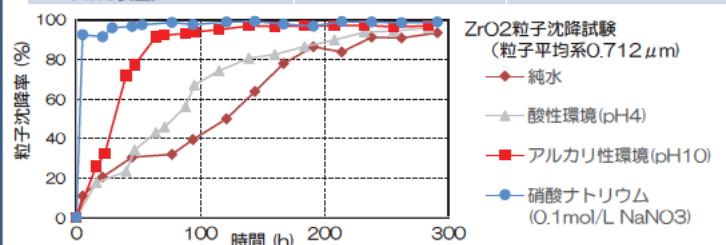


図1 微粒子沈降試験結果例

課題及び今後の方向性

燃料デブリの性状把握については、付着物等サンプルの分析及びデータの評価解析を継続し、得られた知見を高度化した燃料デブリの特性リストに集約する。また、分析の効率化については、最新情報に基づく分析フローを取りまとめる。燃料デブリ微粒子挙動の開発については、模擬物質を用いた試験を継続し、生成移行挙動データを拡充するとともに、CFDシミュレーションに基づく評価モデルを構築し、移行挙動を評価する。また、微粒子の生成挙動試験は、欧州におけるコロナ禍の影響により事業を1年間延長し、次年度末を目途に、微粒子挙動や燃料デブリ取り出しシステムに対する影響評価を計画的に取りまとめる。

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

1 F燃料デブリの取り出しや保管工程において、燃料デブリの性状や長期間の安定性を把握することが重要である。本プロジェクトでは、燃料デブリの長期的な経年変化挙動を予測するため、原子炉格納容器内等で想定される環境における経年変化要因を踏まえた評価方法を立案し、模擬燃料デブリを用いた試験データの取得により化学的経年変化が生じる条件範囲を明らかにし、経年変化の推定を行う。

実施内容及び成果

今後の廃炉工程に影響する経年変化事象として燃料デブリの微粒子化に着目して、第1～3期試験を行い、経年変化の推定を進めている。

1) 第1期試験(～2020年3月)で得られた成果の概要

微粒子化の発生要因として、燃料デブリに含まれる成分 (UO_2 , Zr, Fe等) の酸化や水中での成分溶出に着目し、これらを発現する模擬燃料デブリを作製、気中及び水中の加速暴露試験を行い、主に以下の3ケースにおいて微粒子化の発生が確認された。

- ① 金属Zrを含むU-Zr-O燃料デブリで、Uを含む微粒子が発生。
- ② Uを過剰に含むガラス状デブリでU含有ガラス質の微粒子が発生。
- ③ Feを過剰に含むガラス状デブリで、Feを含む微粒子が発生。

2) 第2期試験(～2020年9月)で得られた成果の概要

①～③の微粒子発生機構を明らかにするため、模擬燃料デブリ組成等を調整し、長期変化予測を行うための温度パラメータ試験や、窒素下での微粒子発生変化を試験した。それぞれの発生機構は、

- ① : Zr(O)部の酸化に起因する亀裂発生と、(U,Zr) O_2 相への亀裂進展や剥離に起因。窒素雰囲気では発生が少なく、大気中では長期にわたり微粒子生成速度を維持するとみられる。(図1)
- ② : 空気平衡水中へのU溶出に伴うU含有ガラス質と介在物(U,Zr) O_2 相双方の亀裂生成と剥離が要因。(図2)
- ③ : Feの酸化に起因。

3) 第3期試験の進捗状況及び成果の見込み(～2021年3月)

微粒子化の発生するデブリ組成範囲の予測、廃炉工程環境の影響、長期予測の確認を目的に、模擬燃料デブリによる加速暴露試験を実施中である。微粒子の影響を検討するために必要な発生量の物量レベル、予測される微粒子の形態、微粒子化が想定される燃料デブリの組成範囲等の知見を、関連プロジェクトに提示する予定。

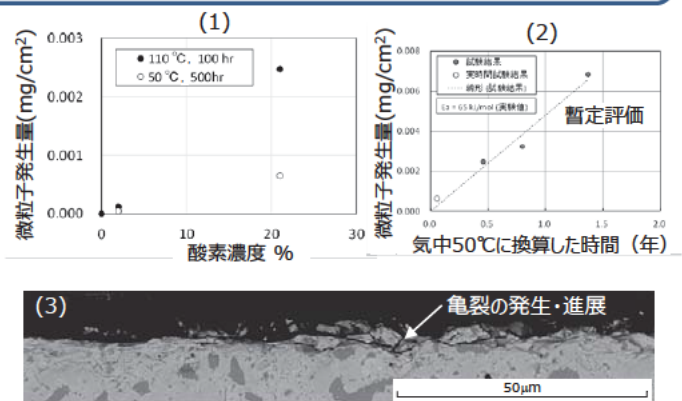


図1 Zr(O)と(U,Zr) O_2 の2相にミクロに分離した模擬燃料デブリの気中酸化試験結果 (1)微粒子発生量の雰囲気依存性、(2)大気中の微粒子発生量の時間変化予測、(3)断面電子顕微鏡写真

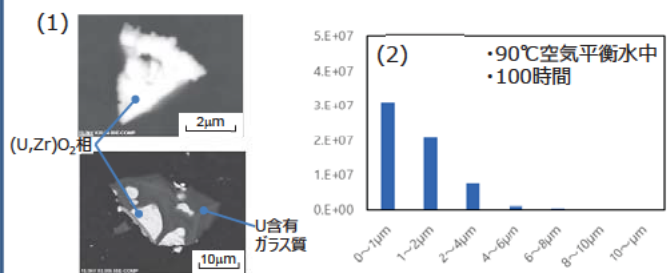


図2 (U,Zr) O_2 介在物を含むガラス状模擬燃料デブリの空気平衡水溶出試験で発生した微粒子の(1)電子顕微鏡写真、(2)粒度分布

燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発（燃料デブリの経年変化特性の推定技術の開発）（TENEX） （2021年1月末までの進捗状況）

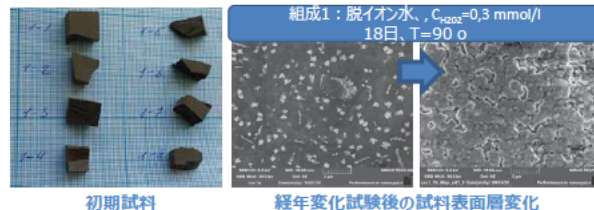
燃料デブリの経年変化に起因する微粒化や形態変化、水中及び気中への移行挙動等に関する知見を取得し、燃料デブリの長期的な経年変化挙動の予測を行った。

事業概要、得られた成果

平成27 28年度補正予算「廃炉 汚染水対策事業」に関する「燃料デブリの性状把握 分析技術の開発（燃料デブリの経年変化特性の推定）」に係る補助事業では、Cm含有試料を利用して燃料デブリの経年変化の要因として放射線による影響等の研究を行った。その結果、放射線により予測モデルの50年の範囲内に燃料デブリの表面において化学反応（U-Zr-Fe-Si-O系における成分の溶解及び酸化）が起こり、経年変化が加速される可能性があることが明らかになった。	
第1段階	研究プログラム開発（2019年第3四半期～2020年第1四半期） ・水溶液との長期接触後の高レベル放射性廃棄物ガラス固化体の化学的安定性に関する研究の分析。 ・スリーマイル島原子力発電所2号機（TMI-2）及びチェルノブイリ原子力発電所（ChNPP）における事故進展過程での燃料デブリ特性変化に係る研究の分析。 ・経年変化の要因の解明及び経年変化の方法論の開発。
第2段階	試料の作製（2019年第3四半期～2020年第1四半期） ・コールド/ホット試料の作製 特性評価 ・実験インフラの準備
第3段階	実験の実施及び分析（2020年第1四半期～2020年第4四半期） 実験データ解析 ・成分の溶解、U（IV）→U（VI）への酸化 ・X線回折法（XRD）、走査電子顕微鏡（SEM）、酸化還元電位、密度、気孔率等 ・水環境中の溶解酸素濃度、空気 窒素雰囲気、 H_2O_2 、pH及び温度の依存性 ・劣化率変化の依存関係
第4段階	経年変化予測の数式モデルの開発（2020年第2四半期～2021年第1四半期） ・選定した二つの経年変化のメカニズム：U（IV）→U（VI）への酸化及び模擬燃料デブリの成分の接触溶液への放出

実施済みの作業一覧（主要な成果）

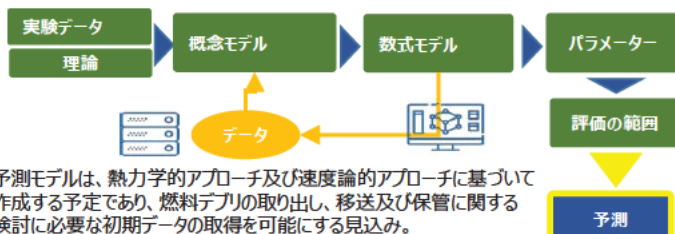
- ロシア国内・海外における高レベル放射性廃棄物のガラス固化体及び燃料デブリに関する既存の研究の調査を行った。
- 試料作製のテストプログラムが開発された。基本となる数式モデルを構築した。
- 様々な段階のコリウム・コンクリート相互作用を反映する全組成の試料（コールド試料、Pu添加ホット試料）を作製し、その特性評価を実施した。
- 経年変化試験を実施した。
- 実験データの検討及び予測モデルへの反映を行った。



加速経年変化による溶解及び乾式貯蔵試験は、微小表面変化、層の形成、ダスト形成速度という予測モデルに不可欠なパラメータを与えた。二次相形成調査のために粉末試料の試験を実施した。pH、温度、比表面積等の経年変化の要因を同定した。予測モデルの結果は実験に相関している。

課題及び今後の方向性

- 表面層溶解を模擬する目的として拡散モデルのパラメータの計算
- 各種環境下での1F燃料デブリの経年変化可能性評価
- 予測数式モデルの完成
- 燃料デブリが発生した時点から10年、20年、30年、50年後に推定される経年変化の包括的な予測
- 燃料デブリの取り出し、移送及び保管に関する調査

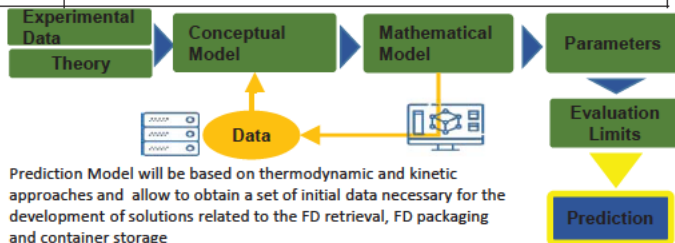


Development of Analysis and Estimation Technology for Characterization of Fuel Debris (Development of Estimation Technology of Aging Properties of Fuel Debris) (TENEX) (Progress by End of 01/21)

Obtaining knowledge regarding micronization, morphological change and migration behavior into water and air due to aging of fuel debris and predict long-term aging behavior of fuel debris.

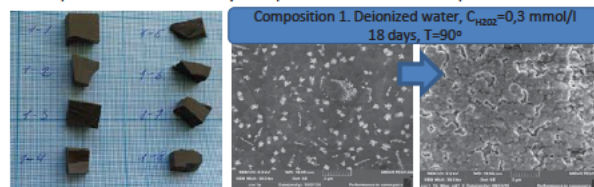
Project Outline and Outcomes

Past FY2017-FY2018 works studied radiation aging factor of FD with Cm-containing model samples. Project showed that radiation factor can accelerate aging by inducing chemical reactions on FD surface within prediction model limits of 50 years: dissolution of components and oxidation in U-Zr-Fe-Si-O system	
1 Stage	Research program development (Q3 2019-Q1 2020) ・ Analyze studies of vitrified HLW matrices chemical stability after prolonged contact with aqueous solutions ・ Analyze experience of studying real fuel debris properties changes ・ Determine aging factors and develop aging methodology
2 Stage	Model samples manufacturing (Q3 2019-Q1 2020) ・ Cold / hot samples initial manufacturing & characterization ・ Experiments infrastructure preparation
3 Stage	Tests implementation and analysis (Q1 2020-Q4 2020) Experimental data analysis: ・ Components dissolution, U (IV)→U(VI) oxidation ・ XRD, SEM, Oxidation-Reduction Potential (ORP), density, porosity, etc. ・ Dependence of dissolved oxygen concentration in aqueous environment, air and nitrogen atmosphere, H_2O_2 , pH, T ・ Degradation rates changes dependences
4 Stage	Development of the mathematical prediction aging model (Q2 2020-Q1 2021) ・ Two selected mechanisms of aging: oxidation of U (IV)→U(VI) & simulant Fuel Debris components release into a contact solution



The list of implemented works (main results)

- Review of the Russian and international experience in the field of vitrified HLW and FD studies completed;
- Test program of samples manufacturing developed. Base mathematical model described;
- All sample compositions (cold samples, hot samples including Pu) reflecting different stages of Corium-Concrete interaction prepared and characterized
- Aging test program implemented
- Experimental data study and prediction model data processed



Accelerated aging dissolution and dry storage tests showed minor surface change, layer formation, dust formation rates parameters essential for prediction model. Powdered samples tests performed for secondary phases formation study. Major aging factors such as pH, T, specific surface area identified. Prediction model results correlate with lab experiments

Remaining issues/challenges and what to do in future

- Diffusion model parameters calculation to simulate surface layer dissolution
- Evaluation of aging possibility of 1F debris under respective environments
- Finalizing of mathematical prediction model
- Comprehensive forecasting on aging for respective periods 10, 20, 30, 50 years
- Investigation on FD retrieval, transportation, and storage

燃料と制御棒以外に、構造材、コンクリートなどの酸に不溶解な成分を含むため分析が容易でない燃料デブリの分析及び評価技術・体制の構築に向けて、JAEA、NFD及びNDCによる模擬燃料デブリの元素組成分析を行い、相互に比較・評価することにより、現状の技術と課題を明らかにする。また、燃料デブリの熱挙動をより精緻に推定するため、PCV内の状態を模擬した発熱挙動と冷却状態を計算評価する手法を開発する。

（期間：2020年6月～2021年3月）

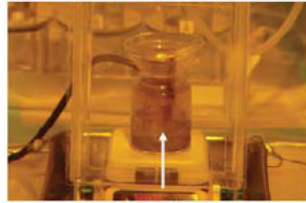
実施内容及び成果

(1) 分析精度の向上のための技術開発

東北大において、燃料を模擬した焼成酸化物固溶体（U, Zr, Gd）、制御棒を模擬したホウ化鉄（Fe, B）及び構造材とコンクリートを模擬した材料（Fe, Cr, Ni, Si）の粉末を混合し、本事業の分析を目的とした模擬燃料デブリを調製した。焼成酸化物固溶体のXRD結果より、硝酸に溶解する立方晶（ $Zr(U)O_2$ 相）、不溶解性の正方晶（ $Zr(U)O_2$ 相）の存在を確認し、目的とする固溶体を得た。SEM/EDS分析により、分析視野毎に組成のばらつきの小さい、均質な試料であることを確認し、分析試料とした。各分析機関に配布した試料（図1）は、SEM等の機器分析による観察や溶解試験等のデータ取得に供され、分析を継続中である（図2）。並行して、分析フローに則った不確かさの要因検討、評価法に係る議論を実施中である。



図1 作製した模擬燃料デブリ

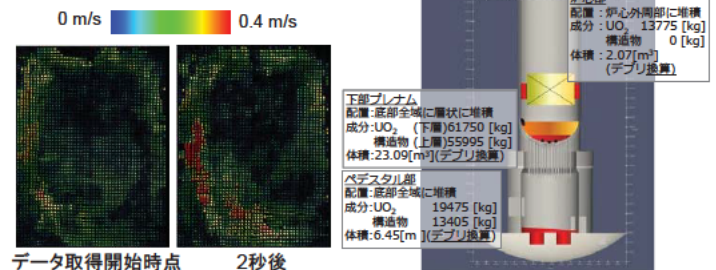


加熱直後
（FeB溶解に伴うガス発生）
図2 硝酸による溶解の状況
（コンクリートセル内）

実施内容及び成果

(2) 燃料デブリ熱挙動の推定技術の開発

1F2号機を対象として燃料デブリの熱挙動を精緻に推定するため、JAEAが開発した二相流CFDコードACE-3Dに対して必要な改良を実施した。燃料デブリの熱挙動において重要となる、自然対流及び気孔率が与える影響に対する適用性を確認するため、既存小型試験装置によるデータ取得を進めるとともに（図3）、実機自然対流条件を模擬できる装置を製作した。また、試験装置では難しい詳細なデータの取得、複雑な形状を有するPCVへの模擬性の確認のため、より詳細な計算が可能なJUPITERによる解析を実施中である。燃料デブリの配置などについて、より妥当な配置についての議論を行うとともに（図4）、これらをパラメータとした解析の準備を進めている。



データ取得開始時点 2秒後

図3 小型試験装置内自然対流速度分布 図4 実機解析条件の検討結果(概略)

課題及び今後の方向性

- ・ 模擬燃料デブリの溶解、分析作業を着実に進める。
- ・ 不溶解残渣が評価に与える影響、分析フローに基づく各作業の不確かさを評価する。

課題及び今後の方向性

- ・ 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する。
- ・ 空冷状態を想定した解析を実施する。

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（1/2） （2021年1月末時点における進捗状況）

燃料デブリ・炉内構造物の取り出し時の原子格納容器（PCV）内に存在する干渉物の撤去技術、燃料デブリの集塵・回収等の各種技術や安全確保のシステムに関わる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た。

実施内容及び成果

1. 燃料デブリ取り出し工法の開発

(1) 干渉物撤去技術の開発

- ・上アクセスによる撤去作業の工程短縮方法として、構造物を大型状態で取り出す工法について整理した（図1）。要素試験により実現性確認中。
- ・横アクセスについては、ベデスタル外周部への装置駆動用ユーティリティ敷設工法を検討し、要素試験により実現性を確認した。ベデスタル内干渉物撤去に関する実現性確認のための要素試験を実施中（図2）。

(2) 干渉物撤去以外の技術の開発

- ・マニピュレータの干渉回避動作の半自動化により、オペレータの作業負担を軽減できる仕組みを構築し、要素試験検証により有効性を確認した（図3）。
- ・セルの小型軽量化を意図した固定レール方式のアクセス装置を考案した。今後、取り出し設備としての成立性を評価、検証する（図4）。
- ・燃料デブリをユニット缶状態で移送するシステムの搬出手順および設備を立案。作業時間を評価し、通常/保守作業時のリスク・対応を検討（図5）。
- ・折り畳み式の型枠とドライモルタルを用いた堰によるS/Cへの拡散防止方法を考案し、要素試験により、実現性を確認した。

2. 燃料デブリ取り扱い技術の開発

(1) 燃料デブリ回収・収納システムの技術開発

- ・要素試験にて粒状燃料デブリ吸引回収システムの性能（粒子の吸引回収速度、セパレータ捕集量）を確認。今後は実機を見据えた具体化検討（装備、保守、運用等）を行う（図6）。
- ・燃料デブリの分布状態を推定分類。状態ごとに加工回収法を立案（図8）。

(2) 燃料デブリ・堆積物の処理に関わる技術開発（図7）

- ・溶解性核種除去技術として、吸着処理の適用可能性を確認し、吸着材選定のための要素試験を実施中である。

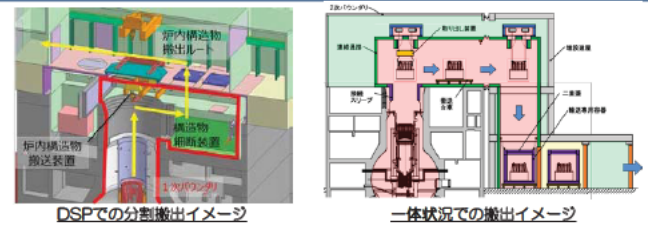


図1 大型状態で構造物取り出し概念

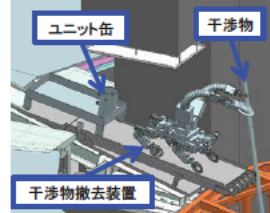


図2 ベデスタル内干渉物撤去



図3 遠隔操作支援ツール

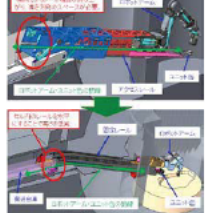


図4 固定レール方式のアクセス装置概念図

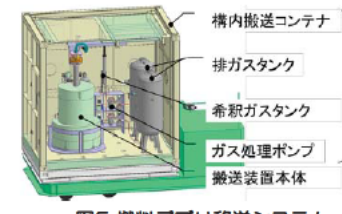


図5 燃料デブリ移送システム

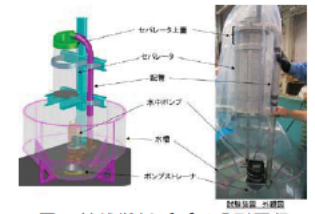


図6 粒状燃料デブリ吸引回収システム要素試験

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

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（2/2） （2021年1月末時点における進捗状況）

実施内容及び成果

2. 燃料デブリ取り扱い技術の開発

(2) 燃料デブリ・堆積物の処理に関わる技術開発（続き）（図7）

- ・ほう酸調整設備等について、析出対策を踏まえた運転調整範囲や廃液からのほう酸回収の可能性を文献及び試験で確認し、設備概念を整理した。
- ・PCV内底部等の堆積物や循環冷却水中の非溶解性核種（粒子やスラッジと想定）の分離・収納技術として、フィルタ分離や沈降分離などを選定し、適用性確認のための要素試験を実施中である。

(3) 燃料デブリと放射性廃棄物の仕分けに関わる技術の調査

- ・仕分けに必要な技術の調査を行い、適用可能性の評価結果を基に仕分けシナリオの技術的な実現性を評価した。

3. 燃料デブリ取り出し作業時の安全確保に関わる技術開発

(1) 閉じ込め機能に関わる要素技術開発

- ・原子炉建屋モデルを構築し、PCV漏洩、建屋内状況に応じた建屋内の気流の特性やダスト沈着量の傾向を把握した。
- ・アクセストンネルとPCVの接続方法について、接続作業ステップの詳細化を実施した。溶接接続の実現性確認のための要素試験を実施中。

(2) 臨界防止・監視に関わる要素技術開発

①臨界監視の管理方法の技術開発

- ・加工・取り出し対象となる燃料デブリの近傍で未臨界度測定を行うため、中性子検出器の要求仕様を整理し、現場適用性の確認試験用に検出器を製作中。
- ・上取り出し工法または横取り出し工法において、未臨界度測定と中性子計数率測定を組み合わせるための作業手順を整理（図8）。

②臨界防止技術の開発

- ・粘性体タイプ及び粉粒体タイプのそれぞれの非溶解性中性子吸収材について、ホッパーとポンプで構成される投入装置（図9）を試作し、水深5m相当の水中で投入できることを要素試験で確認した。
- ・QST高崎研で照射試験を行い、非溶解性中性子吸収材は防錆剤と共に使用できることを確認した。

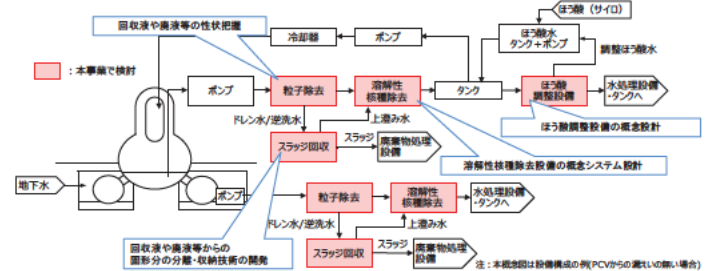


図7 燃料デブリ・堆積物の処理システムの概念図

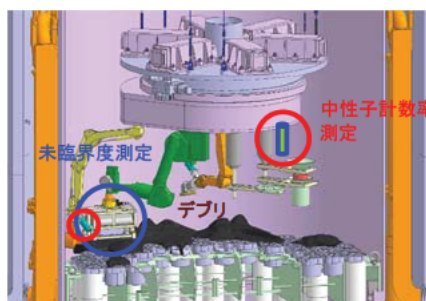


図8 上取り出し工法の臨界近接監視の作業手順を伴う燃料デブリ加工・回収の例

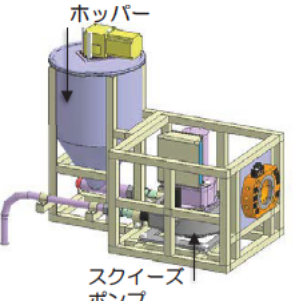


図9 非溶解性中性子吸収材投入装置（試作機）

課題及び今後の方向性

- ・開発計画の検討、概念設計等に基づき、必要により要素試験を実施することにより、その実現性を確認中。
- ・ダストの挙動予測及び臨界防止技術については、得られた成果が事業者のエンジニアリングに活用されるよう図っていく。

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

**燃料デブリ・炉内構造物の取り出しに向けた技術の開発（燃料デブリのダスト集塵システムの技術開発）（ONET）
（2021年1月末までの進捗状況）**

水中・気中における燃料デブリのレーザー切削・機械的切削で発生するダストの集塵技術の開発を行う。

本プロジェクトの概要及び成果

(1) 各切削方法により発生するダストデータ

- ・ 模擬燃料デブリ(in-vessel, ex-vessel)を新たに作成した(図1)。
- ・ 異なる機械的切削ツール（グラインダー、レシプロケイティングソー、コアボーリング）及びレーザー切削による各種データ（ダストの粒子サイズ、分布、形態、電荷分布）を取得した。機械的切削でも微細なエアロゾルが発生することを確認した。物質収支やデータの整理を実施する（図2）。

(2) スプレイスクラビング技術の開発

- ・ 複数の切削ツールにより発生する模擬エアロゾルを用いてスプレイスクラビング（グローバルスプレー及び局所スプレー）の検討・試験を実施した。ラボ施設にてスプレイスクラビングの効果を確認した。
- ・ レーザー切削中の局所スプレイスクラビング試験を行い、エアロゾル濃度が減少することを確認した（図3）。
- ・ 工程効率化のためスプレイスクラビングによる他のパラメータ（水滴の特性、PCV内での数値シミュレーション）取得のための試験を実施している。

(3) 気中局所回収技術とエアロゾル集塵技術の開発

- ・ 集塵システムにより補足されたダスト・エアロゾルの移送・回収装置（図4）の試験及びレーザー切削時の集塵システム試作機試験を実施している。試験は実際に近い物質を用いて実施され、装置の集塵効率データを取得している。

(4) 福島第一原子力発電所への現場適用性の確認

- ・ 現場での最適設計解のための数値シミュレーション



図1 模擬燃料デブリの作成

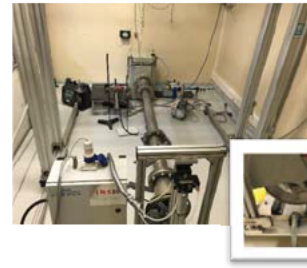


図2 グラインダー切削試験



図3 レーザー切削におけるスプレイスクラビングテスト



図4 ダスト集塵システム試作機での試験

課題及び今後の方向性

- (1) プラズマ切削を含む複数の燃料デブリ切削ツールによる比較データテーブルの作成（性能、操作性、発生するエアロゾル・ダスト特性）。
- (2) 暫定的なスプレイスクラビング手順の効率化。
- (3) 集塵システムの現場的適用性検討（操作性、保守性、リスク軽減等に関する暫定的な実規模システム設計）。
- (4) 数値シミュレーションによる現場適用性に関する検討評価。

Development of Technologies for Scaling Up Retrieval of Fuel Debris and Internal Structures (Development for Dust Collection System of Fuel Debris) (ONET) (Progress by End of 01/2021)

Development of the technologies for a collection system of the dust generated at the time of processing fuel debris in-air and underwater by laser cutting and mechanical cutting

Project Outline and Outcomes

(1) Data on dust emission with different cutting methods

- ・ New fuel debris simulants (in-vessel, ex-vessel) have been manufactured (fig. 1)
- ・ Data have been obtained and being processed (particles size and distribution, morphology, charges distribution) for different mechanical processing tools (grinder, reciprocating saw, core boring) and laser cutting. Presence of ultrafine aerosols even with mechanical tools has been demonstrated. Mass balances and data tables are being established (fig. 2)

(2) Development of spray scrubbing technology

- ・ Strategies of spray scrubbing (global & local spray scrubbing) have been studied and tested with simulated aerosols for various fuel debris processing tools. Efficiency of spray scrubbing has been demonstrated in lab facility
- ・ Tests of local spray scrubbing have been implemented during laser cutting (small scale and high renewal rate (45h⁻¹, 1F2 site ~ 1h⁻¹)) demonstrating a decrease of aerosols number concentration in close volume (fig. 3)
- ・ Studies are still on-going to test other parameters for spray scrubbing (water droplets characteristics, numerical simulations in PCV) in order to optimize the process

(3) Development of local collection in air and aerosols extraction

- ・ Tests of transportation/filtration technologies (fig. 4) for the dust and aerosols captured by the collection system and tests of prototypes of collection systems with laser cutting are on-going. Tests are performed on realistic materials. Efficiencies of the devices are monitored

(4) Application to Fukushima site (on-going)

- ・ Numerical simulations to better design solutions on site



Fig. 1 simulant manufacturing

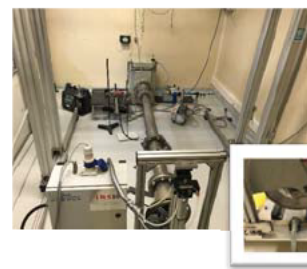


Fig. 2 Grinder cutting tests



Fig. 3 Spray scrubbing test with laser cutting



Fig. 4 Tests with dust collection devices prototypes

Remaining issues/challenges and what to do in future

- (1) Complete data tables to compare different fuel debris processing means (performance, operability, aerosols and dust characteristics) including data with plasma torch
- (2) Optimization of spray scrubbing strategies (tentative)
- (3) Complete study of collection systems implementation on site (tentative of real scale system design with regards of operability, maintainability, risks mitigation, safety, etc.)
- (4) Strategies evaluation with numerical simulations

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 (燃料デブリのダスト集塵システムの技術開発) (TENEX) (2021年1月末までの進捗状況)

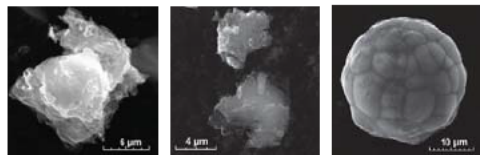
事業の主な目標は、①切削の方法や条件によるダストの挙動の推定、②燃料デブリの取り出しの際、原子力安全、放射線安全及び火災安全に影響を与える要因の推定、また、気中・液中のダスト除染に影響を与える要因の推定、③実規模スケールのダスト集塵システム及びその個別の部品の保守的な初期要件を策定すること。

事業概要、得られた成果

- ✓ ダストの挙動の相違を評価し、最も保守的なダスト発生条件を特定するため、4種類の試料をホットセルにて切削する。

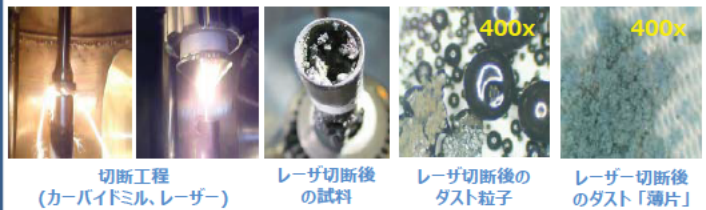


- ✓ 空気中及び水中での機械的及びレーザー切断を実施する。
- ✓ ダスト沈殿率を評価する。
- ✓ 空間におけるダスト発生規則性及び分布を評価する。
- ✓ ダスト粒子の粒度組成を評価する。
- ✓ α 、 γ ダストの比放射能を評価する。
- ✓ ダスト粒子の元素組成 (U、Pu、Zr、Cs、Am含有量) を評価する。
- ✓ ダスト物質収支を評価する。
- ✓ ダスト粒子の形状を評価する。
- ✓ フィルター素材、エレメント及びダスト集塵システムの全体効率を評価する。
- ✓ ガス・エアロソルの処理工程における爆発及び火災の発生要因を分析する。
- ✓ 実規模スケールのダスト集塵システムを開発するための初期要件を策定する。
- ✓ 実規模スケールのダスト集塵システムの予備的概念設計を作成する。



実施済みの作業一覧 (主要な成果) :

- ラボスケールのダスト集塵システムの組立及び試験を完了した。
- 切削試験のために必要な試料の選択及び準備を完了した。
- 切断試験を実施した。



課題及び今後の方向性

実規模スケールのダスト集塵システムの全要素に関する初期技術要件定義	開始時期：2020年11月 完成時期：2021年2月
実規模スケールのダスト集塵システムの予備的概念設計の開発	開始時期：2020年1月 完成時期：2021年2月

Development of Technologies for Scaling Up Retrieval of Fuel Debris and Internal Structures (Development for Dust Collection System of Fuel Debris) (TENEX) (Progress by End of 01/21)

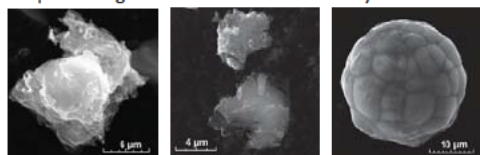
The main project goals are: to estimate dust behavior dependency on cutting methods and conditions; to estimate factors exerting influence on nuclear, radiation and fire safety during the debris removal, on gas and water decontamination from dust; to form conservative initial requirements for full scale dust collection system and its separate elements.

Project Outline and Outcomes

- ✓ Four types of samples are cut in the hot cell to assess the difference in dust behavior and provide the most conservative dust generation conditions.

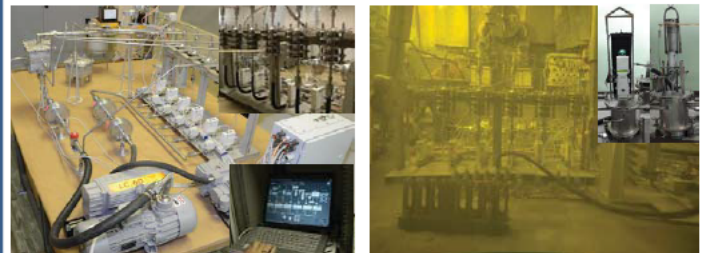


- ✓ Mechanical and laser cutting on-air and in-water are provided;
- ✓ Dust precipitation percentage to be assessed;
- ✓ Dust regularity and distribution in space to be assessed;
- ✓ Dust particles granulometric composition to be assessed;
- ✓ α 、 γ -dust specific activity to be assessed;
- ✓ Dust particles elements composition (U, Pu, Zr, Cs, Am content) to be assessed;
- ✓ Dust mass balance to be assessed;
- ✓ Dust particles shape to be assessed;
- ✓ The filtering materials, elements and integrate dust collection system efficiency to be assessed;
- ✓ Causes of the formation of explosive and fire hazardous situations in the gas-aerosol treatment processes to be analyzed;
- ✓ Initial requirements for full scale dust collections system to be developed;
- ✓ Preliminary conceptual design of full scale dust collection system to be developed.



The list of implemented works (main results):

- Laboratory scale dust collection system manufactured and tested;
- All necessary samples selected and prepared for cutting tests;
- Cutting tests implemented;



Remaining issues/challenges and what to do in future

Initial technical requirements for all elements of full scale dust collection system	Start in November 2020 Completed in February 2021
Development of the preliminary conceptual design of full scale dust collection system	Start in January 2020 Completed in February 2021

燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発 (2021年1月末時点における進捗状況)

燃料デブリ収納缶開発のため、収納缶の構造健全性の検証に向けた実機大構造検証試験、移送条件案の提案に向けた水素発生量予測、触媒の有効性確認、水分量低減のための乾燥システム開発に向けた乾燥試験および水素濃度測定技術の調査を行った。

実施内容及び成果

1. 収納・移送・保管に係る調査及び研究計画立案

福島第一原子力発電所の現場の最新状況の入手および2018年度までに仮構築した燃料デブリの取り出しから保管までの工程や作業ステップ、燃料デブリの物性に関わる知見を最新化し、下記2から4に示す項目の実施に必要となる調査、解析や分析、試験などを研究計画に反映した。

2. 収納技術の開発

収納缶の構造健全性を検証するための各種検討を実施した。例えば、2018年度に仮設定した収納缶の仕様案や構造案に対して、シール構造およびバント機構などの設計方針を決定し、実機大構造検証試験用の収納缶（試験体）を設計（図1参照）して試作を行った。また、実機大構造検証試験の検証項目および試験計画の立案（図2参照）し、収納缶（試験体）を用いた構造検証試験（図3参照）を行った。

3. 移送技術の開発

燃料デブリの移送中における水素ガス対策を立案するための各種検討、試験を実施した。例えば、過去の研究成果の調査や専門家の意見聴取に基づく、移送条件案の提案に必要な検討項目および実施内容の検討、水素発生予測法の検討に向けた評価手法の検討および水素発生試験を行った。また、触媒による水素対策の有効性を確認するための触媒の性能確認試験を行った。

4. 乾燥技術／システムの開発

燃料デブリの移送、乾式保管中における水素発生量の抑制を図る観点から水分量を低減するための乾燥システムの各種検討、試験を実施した。例えば、乾燥装置の運転条件を検討するための乾燥試験を行った（図4、図5参照）。また、乾燥処理完了を確認するための水素濃度測定技術について、要求技術仕様等を整理したうえで、調査を行った。

5. 評価まとめ

上記1から4に関わる燃料デブリと放射性廃棄物を仕分けする技術の調査に対し、収納・移送・保管の条件について関連PJに提示した。

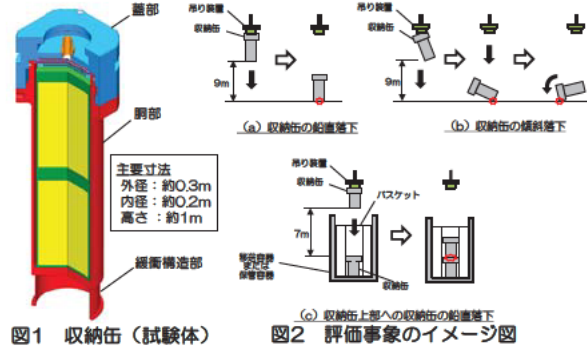


図1 収納缶（試験体）の構造案

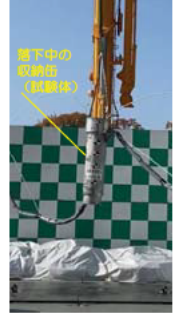


図3 構造検証試験（鉛直落下）



図4 乾燥試験用供試体



図5 乾燥試験装置

課題及び今後の方向性

事例調査に基づく粉状デブリの移送・保管方法の検討、収納缶での粉状デブリ保管に係る課題の明確化、収納缶のフィルタ性能検討を行うと共に乾燥技術に関する必要データの拡大・充実に伴う乾燥装置概念や運転条件への反映を行う。

固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発 (2021年1月末時点における進捗状況 1/4)

2021年度頃までを目処に、処理・処分策とその安全性に関する技術的見通しを得ることを目標として、事故廃棄物の特徴を考慮し、固体廃棄物の保管・管理方法の検討・評価、処理・処分概念の構築とその安全評価手法の開発を行った。また、これらの実施にあたって必要となる性状把握に関する検討を行うと共に、検討・開発により得られた成果を反映し、進捗、成果の整合性及び残された課題を統合的に評価した。

実施内容及び成果

1. 保管管理

(1) 保管・管理方法の検討・評価

- ・昨年度に引き続き、燃料デブリ取り出しに伴い発生する高線量廃棄物の種類、形状、物量等の最新情報を整理すると共に、その情報に基づいて高線量廃棄物の保管までのプロセスを検討した。具体的には、高線量廃棄物の形状と保管容器への収納状態等を考慮し、水素発生量の再評価を行うと共に、国内外の長期保管の考え方を整理し、高線量廃棄物の保管までのプロセス検討に反映した（図1）。
- ・高線量廃棄物の収納・移送・保管に必要な容器及び保管設備に関して、フィルタバント付き保管容器、移送容器、及び乾燥処理等の設備概念について検討を行い、要求事項を整理した。また、高線量廃棄物の保管までに必要な測定項目、測定方法と測定設備について検討した。

(2) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発

- ・これまでに実施した予備試験結果を反映し、アルファカメラの測定システムの製作を行った。実験室でのシステム機能確認試験を経て、福島第一原子力発電所の現場環境下での性能確認試験を実施し、今後の適用性について評価を行った（図2）。

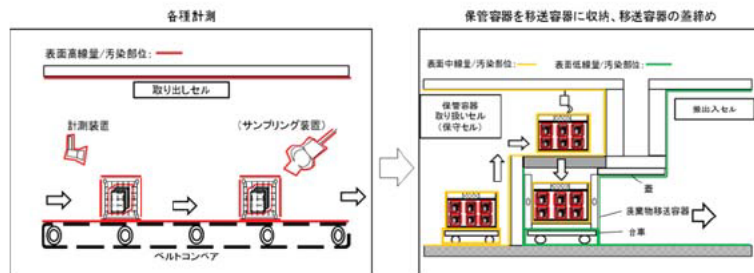


図1 燃料デブリ取り出しに伴い発生する高線量廃棄物の保管までのプロセスフロー（容器収納～構内移送までのプロセスのうち、一部を例示）

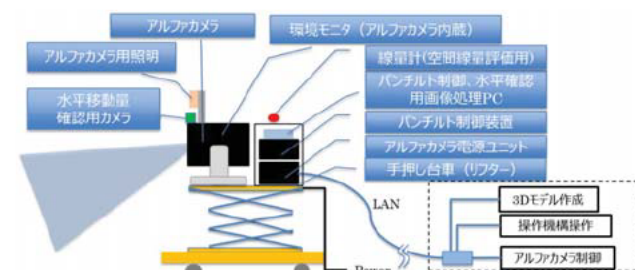


図2 アルファカメラのシステム構成図

IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発 (2021年1月末時点における進捗状況 2/4)

2. 処理処分概念の構築と安全評価手法の開発

(1) 先行的処理方法の選定手法の構築

○低温処理技術

- ・低温処理技術（セメント固化、AAM固化）について、廃棄物の吸水性等の特性測定方法並びに作成した固化体の性能を簡易に確認する方法を構築し、各種測定値から低温処理技術による固化の可能性と作成した固化体の性能判定が可能となる検査手法案を構築した（図3）。
- ・模擬スラリー（炭酸塩、鉄共沈）を混合したセメント、AAM固化体を作成し、固化処理時の流動性（図4）、固化処理後の強度、溶出性などの特性と固化過程の現象理解を深め、低温処理技術の適用性評価に資する情報を収集した。
- ・長期的な保管や処分時における固化体の変質を調査するため、様々な加熱、乾燥環境下での固化体特性データの取得を行うとともに（図5）、長期的に取りうる固化体の構成相を推定するための実験的データや評価方法を整理した。

○処理技術の適用性評価アプローチの検討

- ・上記各項目で取得したデータ並びにガラスデータベースを用いた固化体の物性解析結果、各処理技術の既往データなどから各処理技術が適用可能な固体廃棄物の化学形態や組成等の範囲を評価した。また各処理技術の設備・運転に係る情報等を収集し、適用可能性検査手法案を構築した（図6）。

一次スクリーニングフロー案				
Step	目的（評価項目）	操作	使用器具	判断基準
1	形状、かさばり	適量（一定量の材料）を投入し、形状中大きさを把握し、20分間待機し、かさばり具合を評価	電子天秤、炭酸塩	基準値判定
2	吸水性、膨張性、水漏れの影響、吸水性、ガス発生	Step1の操作を行った後、適量の水を注ぎ、吸水性、膨張性、水漏れ、ガス発生を評価。吸水性、膨張性、水漏れ、ガス発生を評価。吸水性、膨張性、水漏れ、ガス発生を評価。	ビーカー、乾燥計、ガス発生計	過大な膨張性、ガス発生、水漏れがないこと
3	水中での分散性、重量減少	Step2の操作を行った後、適量の水を注ぎ、水中での分散性、重量減少を評価。水中での分散性、重量減少を評価。水中での分散性、重量減少を評価。	乾燥計、重量計	基準値判定
4	凍結・融解後の影響（膨張性、ガス発生性）	Step3の操作を行った後、凍結・融解後の影響（膨張性、ガス発生性）を評価。凍結・融解後の影響（膨張性、ガス発生性）を評価。凍結・融解後の影響（膨張性、ガス発生性）を評価。	乾燥計、重量計	過大な膨張性と膨張性がないこと
5	凍結・融解後の影響（膨張性、ガス発生性）	Step4の操作を行った後、凍結・融解後の影響（膨張性、ガス発生性）を評価。凍結・融解後の影響（膨張性、ガス発生性）を評価。凍結・融解後の影響（膨張性、ガス発生性）を評価。	乾燥計、重量計	過大な膨張性と膨張性がないこと
6	凍結・融解後の影響（膨張性、ガス発生性）	Step5の操作を行った後、凍結・融解後の影響（膨張性、ガス発生性）を評価。凍結・融解後の影響（膨張性、ガス発生性）を評価。凍結・融解後の影響（膨張性、ガス発生性）を評価。	乾燥計、重量計	過大な膨張性と膨張性がないこと

図3 セメント、AAM固化の検査手法案（一次スクリーニング）

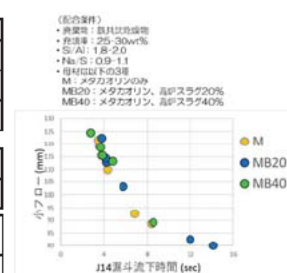


図4 小フロー値とJ14漏斗流下時間の関係（AAM流動性評価）

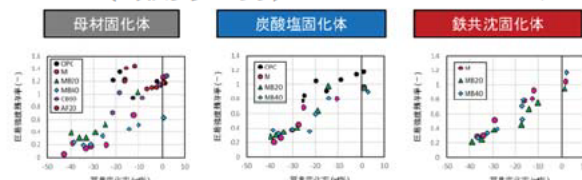


図5 加熱・乾燥による影響評価＜質量変化率と強度残存率（材齢28日）＞

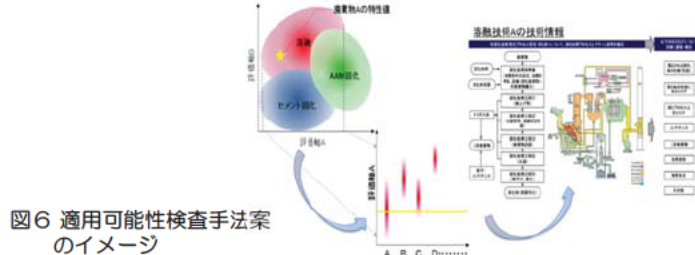


図6 適用可能性検査手法案のイメージ

IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発 (2021年1月末時点における進捗状況 3/4)

(2) 処分方法の提示及び安全評価手法の開発

○固体廃棄物の分類に応じた処分方法案及びその安全評価に必要なデータ項目の整理

・廃棄物の特徴に基づく分類を考慮した処分方法及び安全評価手法の開発に向け、各パラメータの線量に対する感度構造(各パラメータの不確かさ・影響度)を理解するため追加の評価(図7中の⑧)を含め、線量評価を実施することとした(図7)。

・網羅的に27種類の固体廃棄物を対象に、予備的な線量評価を実施した。さらに安全評価技術を提示するため、評価の困難性の高い廃棄物を27種類の廃棄物の中から選定し、詳細な線量評価を実施した。また、廃棄物化までのオプションを検討し、それぞれの廃棄物化オプション(図8)について、処分区分を線量評価に基づき示した。

○処分への影響物質等の影響評価手法の開発

・埋設後の核種の挙動に影響を与える物質に関し、処分における人工バリアへの核種収着を低減する効果を定量的に示すため、継続してホウ酸、フェロシアン化合物を中心にデータ取得・整備を行った。また、既往情報より地下水等の環境変化や固相変遷等による核種収着への影響について例示的に整理し、安全評価に資する収着低減効果に係るパラメータ等を整備した(図9)。

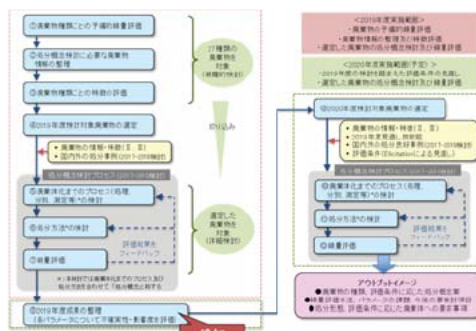
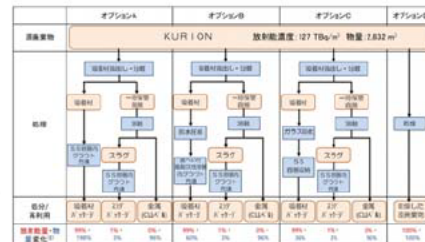


図7 処分方法と安全評価手法の開発に向けた2020年度検討の進め方

図8 廃棄物化までのプロセス検討(KURIONを例示)



元素	代表元素	影響係数(しきい値)				影響係数(しきい値)			
		有機物(TSA)	海水	SRF	SRF ²	有機物(TSA)	海水	SRF	SRF ²
アルカリ金属	Cs	—	1	2	—	—	—	—	—
アルカリ土類金属	Sr	$1 \times 10^{-3} M$	10	8	—	—	—	—	—
II 族遷移金属	Ni	—	1	1	—	—	—	—	—
IV 族遷移金属	Su	$1 \times 10^{-4} M$	100	10	—	—	—	—	—
V 族遷移金属	Nb	$1 \times 10^{-4} M$	100	10	—	—	—	—	—
III 族アクチノイド	Am	$1 \times 10^{-4} M$	10	10	—	—	—	—	—
IV 族アクチノイド	Th	$1 \times 10^{-4} M$	100	10	—	—	—	—	—
V 族アクチノイド	Np	$1 \times 10^{-4} M$	10	10	—	—	—	—	—
VI 族アクチノイド	U	$5 \times 10^{-4} M$	10	10	—	—	—	—	—
ハロゲン	I	—	1	—	—	—	—	—	—
陰イオン種	Se	—	1	—	—	—	—	—	—

図9 設定したセメント系材質に対する収着低減係数と関連

IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発 (2021年1月末時点における進捗状況 4/4)

3. 性状把握の効率化

(1) 性状把握の効率化

○分析データと移行モデルに基づく評価データを組み合わせて性状を把握する方法の構築

・分析試料の採取を継続し、採取した試料の中から瓦礫や汚染水処理二次廃棄物等を茨城地区の分析施設にて分析し、分析データは分析データベース(FRAnDLi)に蓄積した(図10)。

・分析データを用いて、廃棄物の放射線量(インベントリ)推定のために解析的な核種移行モデルの改良に取り組み、データの増加に伴い濃度分布の不確かさが減少することを確かめた(図11)。核種による汚染メカニズム、汚染分布の特徴、分析計画法についてそれぞれ検討した。

○分析方法の簡易迅速化

・難測定核種分析の効率化を図るため、長半減期核種の分析に効果的であるICP-MS分析を適用するための試験検討を実施すると共に(図12)、化学分離操作自動化システムの成立性を検討した。また、原試料から分析試料を分取するモックアップ機の製作、試験を行った。

(2) サンプルング技術の開発

・セシウム吸着材の採取に関して、KURION並びにSARRY吸着塔の両方に対応するサンプルング要素試験装置を製作し、モックアップ装置の設計に必要な要素技術の試験を行った(図13)。

4. 研究開発成果の統合

・性状把握、処理及び処分の研究成果を廃棄物ストリームに反映するとともに、処理方法の選択肢を整備した。

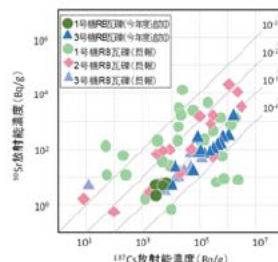


図10 1~3号機原子炉建屋内外の瓦礫分析データの蓄積(^{90}Sr と ^{137}Cs 濃度の相関)

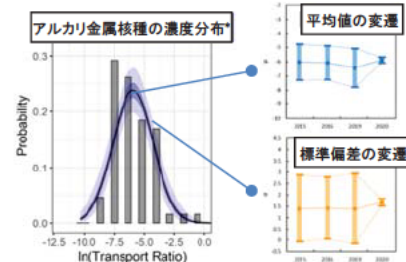


図11 分析データの蓄積に伴う濃度分布の不確かさ低減(輸送比にて表示)

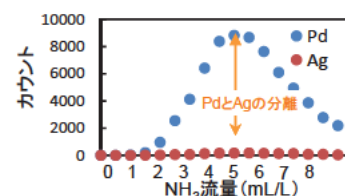


図12 ICP-MS分析によるPdとAgの分離(アンモニア NH_3 との反応の利用)

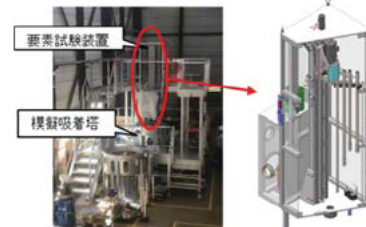


図13 サンプルング要素試験装置

課題及び今後の方向性

保管管理の更なる安全性向上を目的として、水処理二次廃棄物及びデブリ取り出しに際して発生する高線量廃棄物の保管・管理方法の検討、及び限られた分析データに基づいて性状把握が可能となるよう、分析データの代表性に係る評価方法の検討等を継続して行う。更に廃棄物ストリームに対しても、研究で得られた成果を反映し、進捗、成果の整合性、及び残された課題の統合的評価を行う。

IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

福島第一原子力発電所(1F)水処理二次廃棄物(以下廃棄物とする)へのGeoMelt®ICV™技術の適用性を評価・実証することを目的とし、工学規模試験により作製される固化体へのセシウム(Cs)及びストロンチウム(Sr)保持性能の検証を行い、Cs保持性能の更なる改善を図ってきた。更に、工学規模試験の検討結果をインプット情報としてGeoMelt®ICV™施設の予備概念設計(PCD)を行い、施設の運転性と保守性等について検討を終了した。

実施内容及び成果

1. GeoMelt®ICV™の工学規模試験

本事業でGeoMelt®ICV™の工学規模試験（溶融試験4～8）を計画し、溶融試験4～7では作製された固化体のCs及びSr保持性能の評価、溶融試験8ではガラス形成剤の代替物の検証及び溶融停止後の再開・復旧シナリオの成立性を実証した。これらの評価の結果は、PCD(Pre-Conceptual Design)への重要なプロセスパラメータとして反映した。

①Cs保持性能及びその改善に係る評価

溶融試験5～7では2電極炉による溶融を実施し、同じ配合の廃棄物を処理した4電極炉による溶融試験1～3(2018年度実施)と比較した結果、4電極炉よりも2電極炉の方が、コールドキャップ(C.C)管理の充実によりCsの固化体への保持が良好で安定していた(表1)。また、廃棄物供給を終了した後、トップオフフリット(TOF)の供給を開始するまでCs放出量はほぼ0gであるが、TOF供給開始以降のCs放出量が大きい傾向にある(図1)ことを確認した。

②Cs保持性能の改善効果の評価

2電極炉（溶融表面積を小さくし、炉の深さを深くすることにより作製される固化体中のCs保持改善を期待）、Cs放出を抑制する廃棄物の供給システムの改善、及び廃棄物の含水率をパラメータに試験を行った結果、溶融表面積の縮小等の明確な効果は確認できなかった。

③運転中に停止した溶融の再起動の実証

溶融試験8では電源喪失を想定して一旦停止させた溶融を、遠隔で炉内に設置したスターターバスにより再起動できることを実証した(図2)。また、ガラス形成剤として使用するゼオライトの代わりに1F土壌が使用できることを確認した。

2. PCD

廃棄物の大部分を安全かつ迅速に処理することを目的としたGeoMelt®ICV™施設のPCDを検討した(図3)。提案した施設は、10トンの4電極炉(図4)2ステーションから構成され、固化体を77.5時間ごとに、年間で93体を製造できる。本施設では、乾式または湿式で廃棄物を取り出し(図5)、廃棄物の含水率の調整と混合、供給槽への移送及び炉への供給が行われる。溶融処理(図6)のオフガス中のCs放出を抑えるため、オフガス系には焼結金属フィルタ(SMF)等を採用した。PCDでは、それ以降の湿式スクラバーによる有機物等の処理、そこで発生する汚染水及びHEPAフィルタ等を施設内リサイクルにより二次廃棄物発生量の低減等も含めて技術評価した。

表1 各溶融試験において作製された固化体のトレーサ保持結果

Melt-	1	2	3	4	5	6	7
Cs (%)	91.46	99.30	93.79	99.44	97.72	98.77	98.47
Sr (%)	99.76	99.99	100	99.99	100	100	100

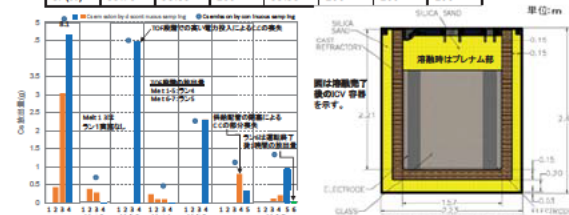


図1 各溶融におけるCs放出量(試験1-6:サンプリング番号、Melt:溶融試験)



図2 遮断による溶融再起動の実証

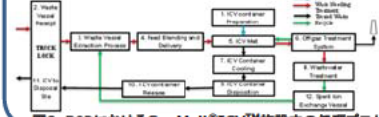


図3 PCDにおけるGeoMelt®ICV™施設内の処理プロセス

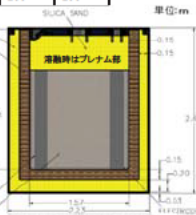


図4 10トンの4電極炉でのICV容器と接続口



図6 供給及び溶融処理

課題及び今後の方向性

溶融試験により作製された固化体のCs保持性能評価を行い、Cs放出抑制へのC.C管理の高い効果を確認したが、TOF供給開始以降は、C.C管理が十分ではなく、プロセス改善による放出低減が今後の課題である。このためにも現在実施中のCsの放出を抑えるメカニズムの定量的な解明が期待される。更に、作製された固化体の二次相や耐久性の評価試験を整理して1FへのGeoMelt®ICV™適用性の総合評価を実施する。