

廃炉・汚染水対策事業費補助金
「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)」

2021年度実施分成果

- (1) 液体系・気体系システム
- (2) 臨界管理技術

2022年8月

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID)

廃炉・汚染水対策事業費補助金
「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)」

2021年度実施分成果

(1)液体系・気体系システム

2022年8月

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID)

目次

1. 補助事業の目的と目標
2. 補助事業の概要
3. 前年度までに実施した事業の実績と残された課題
4. インプット・アウトプット情報
5. 実施スケジュール
6. 実施体制
7. 実施内容
 - ① 溶解性 α 核種除去技術の開発
 - ② RO濃縮水の処理技術の開発
 - ③ 二次廃棄物処理技術の開発
 - 1) 粒子除去システムから発生する廃液の性状把握
 - 2) 沈殿スラッジの脱水技術の選定
8. 実施目的を達成するための具体的目標

1. 補助事業の目的と目標

【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)の目的】

東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所(1F)では、核燃料が炉内構造物とともに溶融し、燃料デブリとして原子炉圧力容器(RPV)内及び原子炉格納容器(PCV)内に存在していると考えられる。

RPV及びPCV内部の燃料デブリは、現在未臨界状態にあると考えられるが、事故によって原子炉建屋(R/B)、RPV、PCV等が損傷している等、プラント自体が当初設計とは異なる不安定な状態に置かれているため、燃料デブリを取り出して燃料デブリの未臨界状態を維持し、放射性物質の拡散を防止して安定な状態にする必要がある。

上記の背景のもと、本事業は、「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」(以降、中長期ロードマップ)に基づき、東京電力ホールディングス(株)(東京電力)が実施するエンジニアリングやプロジェクト管理の下で、大規模な燃料デブリ取り出し作業を実現することを目標に検討を実施する。本事業での開発成果は、東京電力が行うエンジニアリングに活用する。

本事業は、1Fの廃炉・汚染水対策に資する技術の開発を支援する事業を、中長期ロードマップ及び「2021年度廃炉研究開発計画」(廃炉・汚染水チーム会合／事務局連絡会議(第86回))に基づき行うことで、1Fの廃炉・汚染水対策を円滑に進めるとともに、我が国の科学技術の水準の向上を図ることを目的とする。

具体的には、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 核種除去技術、RO濃縮水(*)の処理技術、二次廃棄物処理技術、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について、開発を実施する。

* 逆浸透膜(RO(Reverse Osmosis)膜)により不純物を含む冷却水から不純物を取り除いた際に発生する不純物濃度が高い廃液

【開発全体の目標】

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。

1. 補助事業の目的と目標

本報告資料では、下記の項目について報告する。
それぞれの項目の実施目標を示す。

(1) 液体系・気体系システム

① 溶解性 α 核種除去技術の開発

・燃料デブリ取り出し作業時を想定した要素試験

燃料デブリ取り出し作業時のPCV内気相環境(窒素雰囲気)を考慮した条件において、除去対象である α 核種(Pu, U等)を除去可能な吸着材の候補を選定する。

② RO濃縮水の処理技術の開発

・吸着材および凝縮剤の選定

RO濃縮水を処理するために必要な粉末吸着材および凝集剤を要素試験により選定し、RO濃縮水の処理方法を立案する。

③ 二次廃棄物処理技術の開発

・前処理技術の調査

1) 粒子除去システムから発生する廃液の性状把握

粒子除去システムのフィルタ機器の性能評価試験を実施する。そして、スラッジ回収システムに払い出されるフィルタ廃液の性状を整理する。

2) 沈殿スラッジの脱水技術の選定

スラッジ回収設備より発生する沈殿スラッジの減容化処理のため、適用可能な脱水技術を文献調査等により選定する。そして、文献調査結果、要素試験結果を基に、スラッジ処理方法を立案する。

2. 補助事業の概要

補助事業にて検討中の液体系・気体系システムの系統構成図を示す。

今期補助事業では、溶解性核種除去設備およびスラッジの脱水・安定化処理設備の開発を実施する。

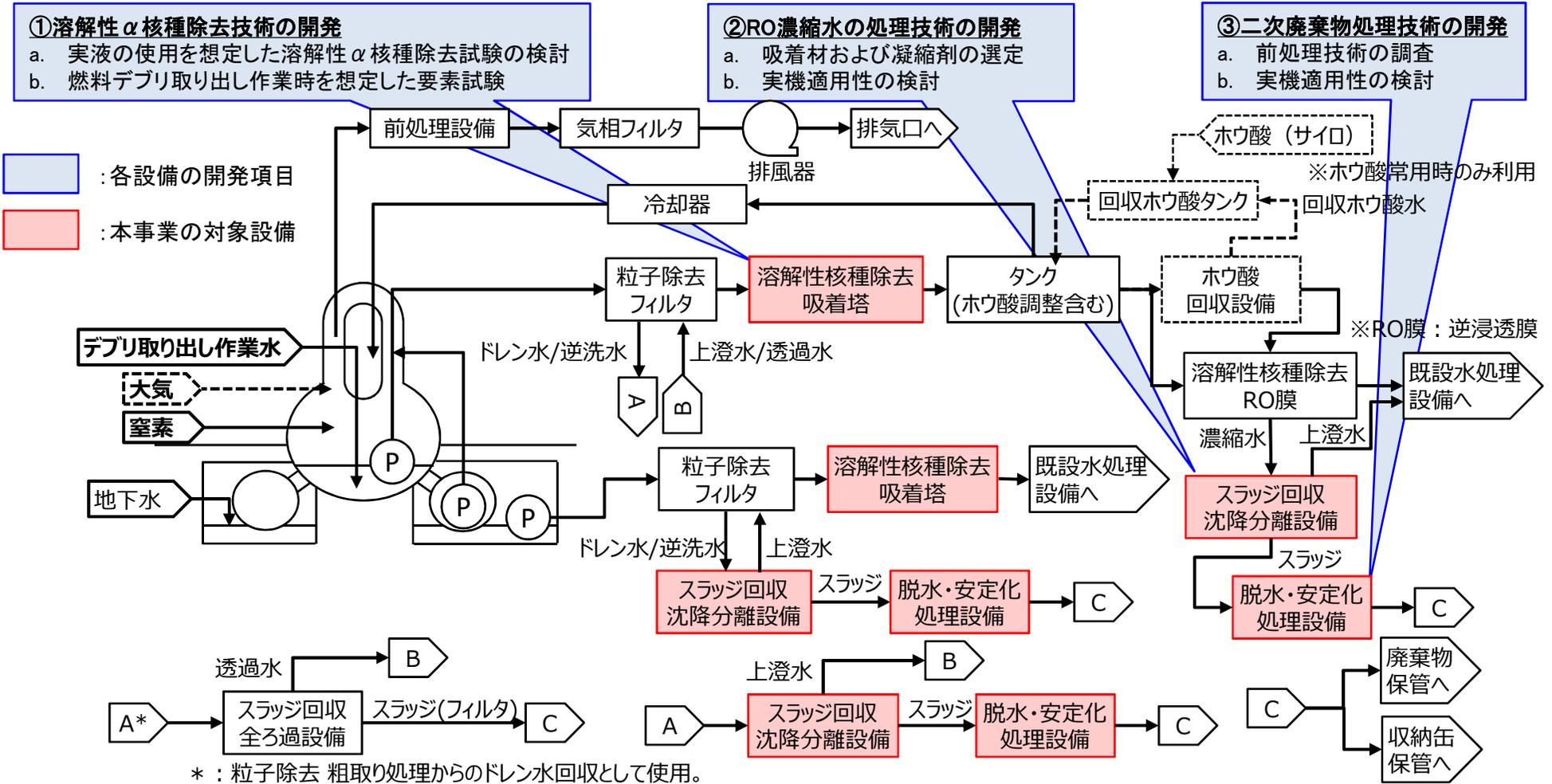


図. 燃料デブリ取り出し時の液体系・気体系システム (補助事業ベース)

注: 本概念図は設備構成の例(PCVからの漏えいの無い場合)

3. 前年度までに実施した事業の実績と残された課題

①溶解性 α 核種除去技術の開発

: 本PJでの検討対象

No.	項目	前PJ※における取り組みと成果	残された課題
1	除去対象核種	U、Np、Pu、Am、Cmの5元素・15核種について、微粒子生成影響を試験にて確認し、Uについては、大気雰囲気下でpH5~9の中性付近の溶解度およびPCV内滞留水に含まれる濃度が告示濃度に対して2ケタ程度低いため、吸着除去の必要性が低いことを確認した。	U、Np、Pu、Am、Cmそれぞれについて、PCV内の窒素環境を想定した場合の α 核種の溶解挙動、吸着挙動
2	処理対象水の水質	海水成分の溶出、コンクリート成分の溶出、臨界防止剤である五ホウ酸ナトリウムの注入を想定した評価を行った。	油分、塗装成分、防錆剤成分、非溶解性臨界防止剤成分の影響
3	処理流量	PCV内滞留水を循環冷却させる設備の中に吸着除去システムを設ける場合には、10m ³ /hの処理流量を設定することで α 核種濃度をより低い状態に保つことができる。PCV内滞留水を循環冷却させる設備の外に吸着除去システムを設ける場合には、燃料デブリ取り出し作業にて増加する水量のみ処理するため、3.5m ³ /h以上の処理流量があれば水バランスを保つことができる。	設備の運転スケジュールを考慮した処理流量の設定
4	想定水質における α 核種濃度	海水成分の溶出、臨界防止剤である五ホウ酸ナトリウムの注入を想定した水質にて評価を行い、各 α 核種の溶解挙動を把握した。コンクリート溶出影響については大気環境では炭酸カルシウムの生成に伴い α 核種が共沈するため、PCV環境に近い窒素雰囲気での評価が必要となることを確認した。	コンクリート成分の溶出を想定した高pHでの α 核種の溶解挙動、吸着挙動
5	濃度低減要求	公衆被ばく影響低減のための目標DFを100、水処理設備に移送するための濃度低減目標を告示濃度とする。(進捗なし)	粒子状の α 核種濃度を考慮した必要DFの設定 個別の核種の濃度低減目標の設定

※ 平成30年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金「燃料デブリ・炉内構造物の取り出しに向けた技術の開発」

(2) (ii)燃料デブリ・堆積物の処理に関わる技術開発

① 循環冷却水中の溶解性核種の除去技術

② PCV内から回収された堆積物等の処理技術

以降、前PJと記載する。

3. 前年度までに実施した事業の実績と残された課題

①溶解性 α 核種除去技術の開発

No.	項目	前PJにおける取り組みと成果	残された課題
6	適用吸着材	浸漬試験による α 核種吸着性能を評価した結果、活性炭、リン酸ジルコニウム、チタン酸が適用候補吸着材として選定された。浸漬試験により平衡吸着量の大きい吸着材を選定できた段階のため、通水処理に適用した場合の性能確認が課題である。なお、ラボ試験にて多量の α 核種を取り扱う流通試験が実施できないことから、評価方法が課題となる。	通水処理に適用した場合の吸着除去性能の評価方法
7	吸着塔構成	コロイド状の α 核種を除去するための活性炭を先頭にして、Pu、Am、Cm、Npを吸着するためのリン酸ジルコニウム、Np等を吸着するためのチタン酸を直列に並べた塔構成とし、メリーゴーランド運用を想定して各塔2塔を仮定した。それぞれの核種が同時に溶液中に存在する場合の影響評価や、通水処理時の除去性能・交換頻度をもとに、塔構成は適切に見直す必要がある。	複数の α 核種の相互影響
			吸着阻害成分の影響
			通水処理時の除去性能・交換頻度をもとにした塔構成の見直し
8	交換タイミング ／交換頻度	適用候補として選定した吸着材はいずれもCs吸着性能が低いため、塔表面線量の上昇による交換の発生リスクは低い。吸着性能低下による交換頻度を求めるには、流通試験による評価を行うことが一般的だが、ラボ試験にて多量の α 核種を取り扱う流通試験が実施できないことから、評価方法が課題となる。	吸着材交換頻度の評価方法
9	交換方法	吸着塔ごと交換する場合、吸着材のみ交換する場合、いずれも使用済み吸着材の処理方針(当面長期保管)に合わせて設備設計が必要となる。	交換時のオペレーション
			使用済み吸着材の取扱い
10	塔サイズ	処理流量10m ³ /hの場合、多核種除去設備の吸着塔と同程度のサイズ(外形約1m、高さ約2.5m)となる。	遮蔽方針、交換方法等をインプットとした吸着塔の設計

3. 前年度までに実施した事業の実績と残された課題

②RO濃縮水の処理技術の開発

③二次廃棄物処理技術の開発

本PJでの検討対象

No.	項目	前PJにおける取り組みと成果	残された課題
1	処理対象水 水質	<p>燃料デブリ取り出し工法PJの要素試験結果やフィルタ試験結果を基に、スラッジ回収システムへのインプット水である粒子除去システムから払い出されるドレン水・逆洗水の想定水質を整理した。</p> <p>しかし、粒子除去設備のうち中取りフィルタが未選定であるため、候補機器を選定し、発生廃液性状を評価する必要がある。また、前年度までの要素試験では球形粒子を通水した場合しか評価できておらず、非球形粒子を通水した場合のフィルタ挙動、発生廃液の性状評価を実施する必要がある。</p>	<p>文献調査により中取りフィルタの候補機器を選定する。要素試験により適用性を確認し、発生廃液性状を取得する。</p>
			<p>非球形粒子を処理する場合の粒子除去システムへの影響評価を要素試験により実施する。</p> <p>機器差圧の上昇挙動や回復率、発生廃液量に優位な影響があると評価された場合は、スラッジ回収システムの想定インプット水質へ反映する。</p>
2	処理流量	<p>燃料デブリ取り出し工法の運用スケジュールおよび、フィルタ試験結果や液体システムの流れを基に、スラッジ回収システムの処理流量要求を評価した。</p>	<p>今後の検討により、液体システムの流れの想定インプット水質が変更された場合、スラッジ回収システムの処理流量要求に反映する。</p>
3	処理方法	<p>フィルタ廃液およびRO濃縮水の処理方法として、凝集沈殿処理を選定し、使用可能な凝集剤を要素試験により選定した。また、沈降分離槽を用いた凝集沈殿処理手順のプロセスを検討した。沈降分離槽を用いたRO濃縮水の凝集沈殿処理について、実機適用性を検討する必要がある。また、処理手順について、発生スラッジ量低減やオペレーションの簡易化などの検討が必要である。</p>	<p>RO濃縮水の処理方法として、粉末吸着材を用いた吸着処理と凝集剤を用いた凝集沈殿処理を選定し、使用可能な粉末吸着材や凝集剤の選定を実施する。</p>
4	沈殿スラッジの 性状と発生量	<p>凝集沈殿試験を基に沈殿スラッジの発生量を試算した。その結果、処理流量が大きいこと、沈殿スラッジの含水率が大きいことなどが原因で、RO濃縮水沈殿スラッジの発生量が大きいと評価され、払出し処理の煩雑化や払出し先の負荷増大などが懸念されるため、沈殿スラッジの減容化を図る必要がある。</p>	<p>沈殿スラッジ発生量の低減のため、RO濃縮水処理手順の各プロセスを見直す検討を実施する。粉末吸着材添加量の低減、凝集剤添加量の低減、攪拌条件などの適正化を要素試験により検討する。</p>
			<p>沈殿スラッジに対して脱水処理を適用することを検討し、文献調査などにより適用可能な脱水技術を選定し、要素試験による実機適用性を評価する。</p>

3. 前年度までに実施した事業の実績と残された課題

②RO濃縮水の処理技術の開発

③二次廃棄物処理技術の開発

No.	項目	前PJにおける取り組みと成果	残された課題
5	上澄液性状	固液分離後に上澄液に残留する成分やSS(suspended solids ; 浮遊物質)量などを整理した。	払出し先である溶解性核種除去設備や既設水処理設備の受入要件を整理し、中和処理や中和塩除去、微量に残留するSS成分の除去などの要否について検討する。
6	運用方法	燃料デブリ取り出し工法の運用スケジュールおよび、要素試験結果を基に、沈降分離槽を用いたフィルタ廃液およびRO濃縮水の凝集沈殿処理のプロセスを検討した。1日で1バッチ処理が完了する運用サイクルを検討した。	今期実施の要素試験結果を前PJまでに検討した凝集沈殿処理プロセスへ反映する。
7	設備仕様	装置試験により沈降分離槽および各構成要素の動作性について検証した。 ゲート弁の開閉の際に大粒子が噛み込む事象が発生したため、ゲート弁の仕様について再検討が必要である。	今年度以降に実施するRO濃縮水処理の試験装置を用いた要素試験において、沈降分離槽の各機構を再度評価する。 また、沈降分離槽に適用可能な弁について調査を実施する。
8	沈殿スラッジの払出方法	スラッジ回収容器を用いた沈殿スラッジの払出し方法を検討し、装置試験により実機適用可能なことを確認した。 沈降分離槽上部より配管を挿入し、沈殿スラッジをポンプ吸引により抜き出すことが可能なことを確認した。 今後、沈殿スラッジ払出し先の受入要件を整理し、スラッジ収納容器の大きさや脱水処理の適用について検討する。	沈殿スラッジを廃棄物として処理・処分する場合は、廃棄物ラインへ払い出されるため、沈殿スラッジの最終処分を考慮し、前処理を適用する必要がある。今後スラッジの最終処分方式の方針が示された場合、液体システム内で必要な前処理を検討し、沈殿スラッジの払出し方法に反映する。 沈殿スラッジを収納缶保管する場合は、収納缶ラインへ払い出されるため、長期保管のための要件を満足するように前処理を適用する必要がある。沈殿スラッジの長期保管のための要件を整理し、スラッジ回収容器の形状や含水率について検討する。
9	沈殿スラッジの取り扱い	沈殿スラッジの想定性状、発生量を要素試験結果および液体システム要件を基に整理した。	沈殿スラッジの想定性状を廃棄物PJと収納缶PJへ共有し、それぞれのラインにおける課題の抽出を行う。

4. インプット・アウトプット情報

本PJは、燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発PJ、
 固体廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発PJなどの関連PJと連携して実施する。

ID	要求側事業	提供側事業	内容(概要)	情報の用途
1	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)	燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発	収納缶の受入条件	二次廃棄物の安定化処理技術の検討
2	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)	固体廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発	廃棄物保管容器の受入条件	二次廃棄物の安定化処理技術の検討
3	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)	燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発	燃料デブリ微粒子の生成挙動の検討成果	循環冷却水中に含まれる粒子の性状の検討
4	燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発	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)	液体系システムより発生する沈殿スラッジの性状	スラリー・スラッジ状燃料デブリの取扱いにおける課題の抽出
5	固体廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発	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)	液体系システムより発生する沈殿スラッジの性状	スラリー・スラッジ状放射性廃棄物の処理・処分における課題の抽出

※東京電力殿との連携についても今後協議予定。

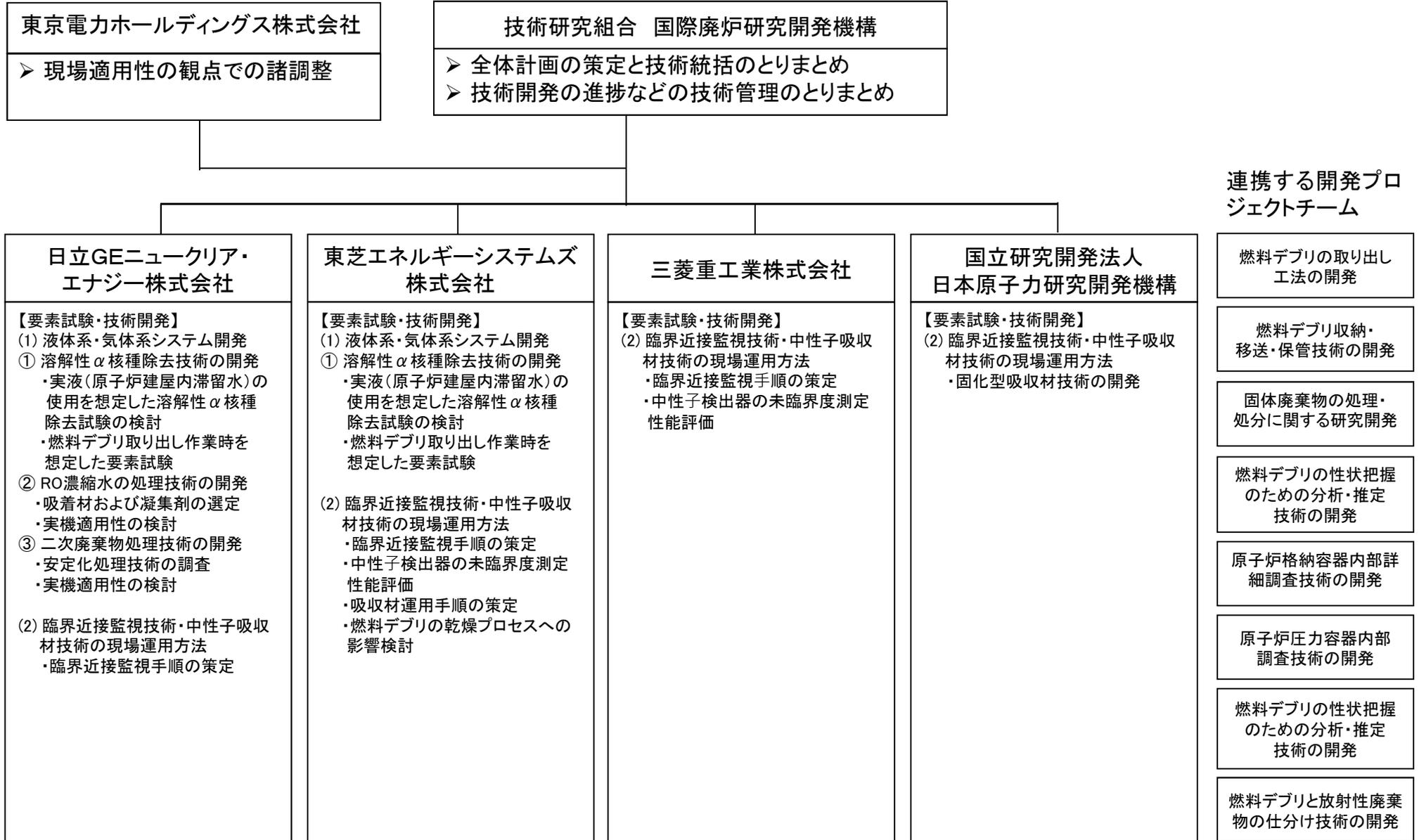
5. 実施スケジュール

大分類	小分類	実施事業者 (外注先・試験場所がある場合は併記)	令和3年度												令和4年度																																																											
			4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月																																																
主要なマイルストーン						▲			▲			▲			△			△			△			△																																																		
			プロジェクトステアリング会議												中間報告												プロジェクトステアリング会議												中間報告												中間報告												最終報告											
① 溶解性α核種除去技術の開発	a. 概念検討/試験計画	(1) 日立GE 外注先: なし 試験場所: 日立研究所	概念検討/試験計画												試験準備・手配												予備試験												要素試験												中間まとめ												まとめ											
	b. 試験準備・手配		試験準備・手配												予備試験												要素試験												中間まとめ												まとめ																							
<div style="border: 1px solid red; padding: 5px; display: inline-block;"> ① 溶解性α核種除去技術の開発 日立GE/東芝ESSにて同様の試験を実施。 核種や吸着材ごとに試験を分担。 </div>																																																																										
	a. 概念検討/試験計画	(2) 東芝ESS 外注先: NFD 試験場所: 東芝ESS研究所	概念検討/試験計画												試験準備・手配												予備試験												要素試験												中間まとめ												まとめ											
	b. 試験準備・手配		試験準備・手配												予備試験												要素試験												中間まとめ												まとめ																							
② RO濃縮水の処理技術の開発	a. 概念検討/試験計画	(1) 日立GE 外注先: 日立プラントコンストラクション 試験場所: 臨海工場	概念検討/試験計画												試験準備・試験装置試作												予備試験												要素試験												中間まとめ												まとめ											
	b. 試験準備・試験装置試作		試験準備・試験装置試作												予備試験												要素試験												中間まとめ												まとめ																							
③ 二次廃棄物処理技術の開発	a. 概念検討	(1) 日立GE 外注先: 日立プラントコンストラクション 試験場所: 臨海工場	概念検討												技術調査/試験計画												試験準備/試験体製作												要素試験												中間まとめ												まとめ											
	b. 技術調査/試験計画		技術調査/試験計画												試験準備/試験体製作												要素試験												中間まとめ												まとめ																							

■ : 計画線
■ : 実績線

※日立GE: 日立GEニュークリア・エネルギー株式会社
 東芝ESS: 東芝エネルギーシステムズ株式会社

6. 実施体制



7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発(燃料デブリ取り出し作業時を想定した要素試験)

・ 開発経緯

- 平成28年度補助事業「燃料デブリ・炉内構造物取り出し工法・システムの高度化事業」において、暫定的な条件を用いた液体システムの通常時・事故時の敷地境界被ばく線量の評価が行われている。通常時・事故時ともに敷地境界被ばく線量はしきい値を下回る値であったが、いずれもPu系及び娘核種(Pu-238、Pu-241、Am-241)の影響が大きいという結果が得られている。
- 既設原子力施設において α 線放出核種(以下、 α 核種)は環境に放出される核種ではなく、 α 核種による被ばくは合理的に達成可能な限り低くする必要があることから、平成29・30年度補助事業「燃料デブリ・炉内構造物取り出し工法・システムの高度化」より液体システムにおける α 核種除去の有効性の検討・評価を開始しており、 α 核種の形態(非溶解性 α 核種、溶解性 α 核種)ごとに適用候補技術を選定し、選定した技術の成り立ち評価のための要素試験を行っている。
- 溶解性 α 核種の除去技術としては、吸着除去とRO膜が適用候補として選定されており、RO膜は原理的に α 核種を除去可能である。一方、吸着除去は1F汚染水処理にて実績のある技術であるものの、 α 核種の溶液中の存在形態や選定される吸着材によっては適用が見込めない可能性がある。
- 前PJ(令和元年～2年度の補助事業)においては、吸着除去技術の開発に取り組み、除去対象 α 核種であるPu、U、Am、Cm、Npの5核種について、大気開放条件下における吸着試験を実施し、候補吸着材を選定したが、実機(PCV)環境下で水質が変動した場合の適用性が未評価である。
- また、吸着除去技術を適用した場合の α 核種除去性能を確認するためには、実汚染水を用いた検証試験が必要となるが、実汚染水を用いた試験の計画は未検討である。

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発(燃料デブリ取り出し作業時を想定した要素試験)

・本PJの位置づけ

2021年度末 報告対象

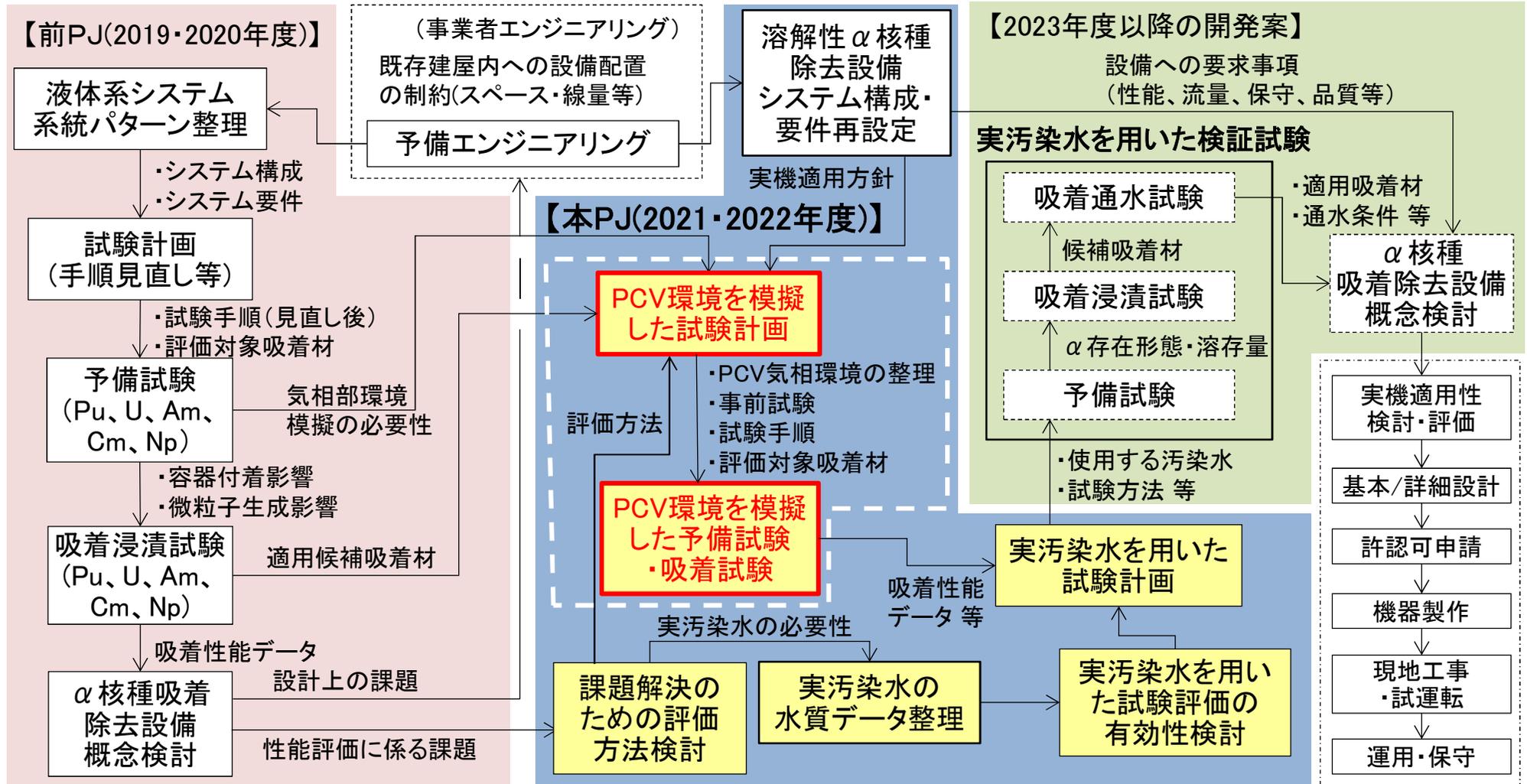


図 溶解性 α 核種除去技術開発 全体フロー

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発(燃料デブリ取り出し作業時を想定した要素試験)

- ・ 本PJにて取り組む課題と実施内容及び目標

【課題】

- ・ 燃料デブリ取り出し作業時のPCV内の環境を模擬した条件での溶液中の α 核種の挙動が未確認である。
- ・ 溶液の水質が変動した場合の溶解性 α 核種除去性能への影響が未評価である。

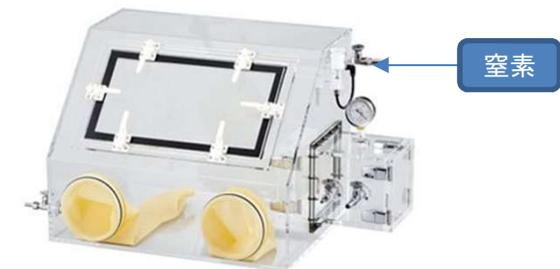
【実施内容】

- ・ 燃料デブリ取り出し作業時の環境を模擬するための試験装置の作製する。
- ・ 燃料デブリ取り出し作業時の環境を模擬した条件での α 核種の溶解挙動を確認するための予備試験を実施する。
- ・ 燃料デブリ取り出し作業時の環境を模擬した条件での α 核種除去性能を確認するための吸着試験を行い、適用吸着材を選定する。

【目標】

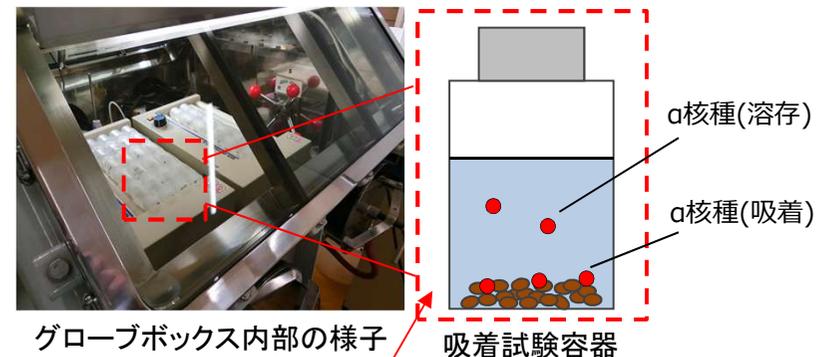
- ・ 燃料デブリ取り出し作業時を想定した環境での α 核種吸着性能データを取得し、候補吸着材を選定する。
- ・ 溶解性 α 核種除去設備の水質調整方針を設定する。

<燃料デブリ取り出し作業時の窒素封入環境を模擬するための試験装置イメージ>



簡易グローブボックス

<吸着試験>



グローブボックス内部の様子

吸着試験容器

試験前後で液中の核種濃度を測定し、吸着量を評価

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発(燃料デブリ取り出し作業時を想定した要素試験)

・前提とするシステムの設定(液体系・気体系システム)

- 液体系システムでは、PCV内に汚染水を閉じ込めるために、D/W(ドライウェル)あるいはS/C(PCV圧力抑制室)から取水を行い、水位管理を行う他、燃料デブリ冷却のためにD/WあるいはS/Cから取水した水を冷却後に注水する循環冷却を行う。
- 気体系システムでは、PCV内にダスト等を閉じ込めるための負圧管理、水素掃気等のための窒素封入を行う。
- PCV内の気相部は、負圧管理により大気は流入するが、大半は窒素より構成される窒素環境となる。
- 2020年まで実施されてきた α 核種吸着試験は大気環境で行われており、実機適用を見据えた窒素環境での評価が必要である。

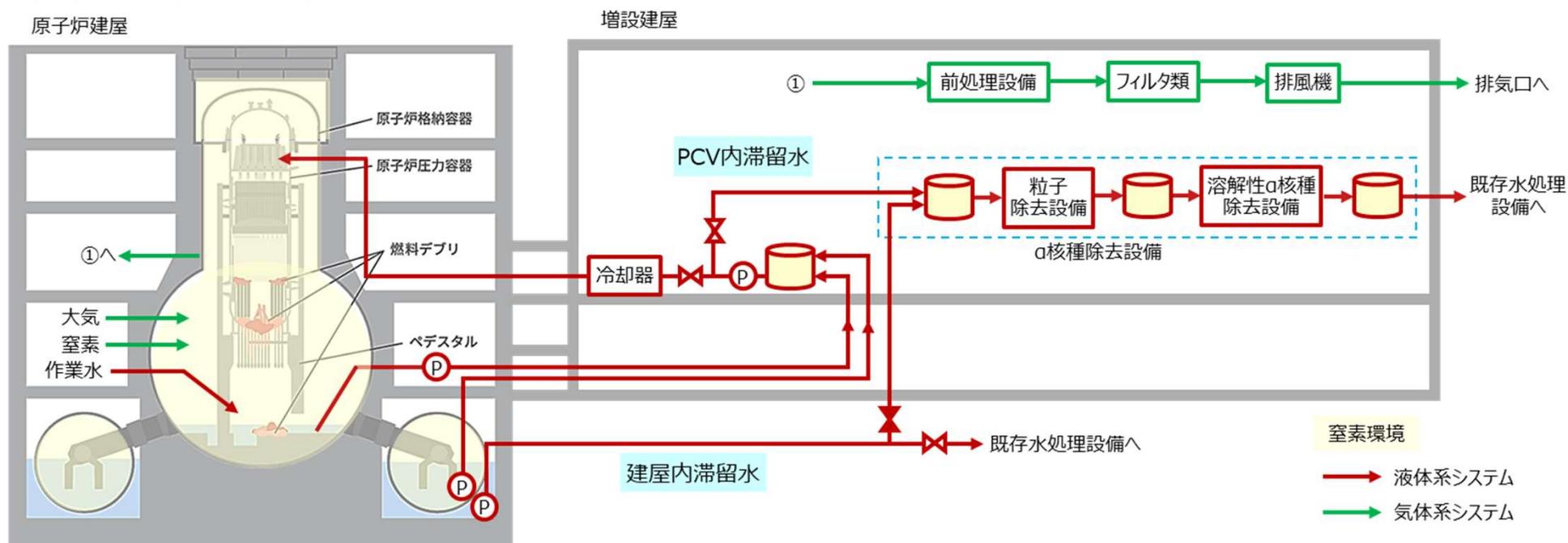


図 燃料デブリ取り出し時の液体系・気体系システム概略系統図(エンジニアリングベース)

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発(燃料デブリ取り出し作業時を想定した要素試験)

・前提とするシステムの設定(溶解性 α 核種除去システム)

- 前PJでは、吸着除去を適用した場合の溶解性 α 核種除去システムとして、受入タンク、吸着塔、モニタタンク、サンプリング設備等から構成される設備構成を検討した。
- また、大気雰囲気下にて除去対象核種となる α 核種元素を用いた吸着試験を実施し、主としてコロイド状 α 核種の除去効果を期待した添着活性炭を先頭に設置し、後段に溶解状態 α 核種の除去効果を期待したリン酸ジルコニウム/チタン酸、とした吸着塔構成案をまとめた。
- 本PJでは、PCV内気相環境を模擬した窒素雰囲気下において同様の吸着試験を実施し、 α 核種の溶解度や吸着性能への影響を評価することで、前PJにて設定した塔構成・適用吸着材の見直し要否を確認する。

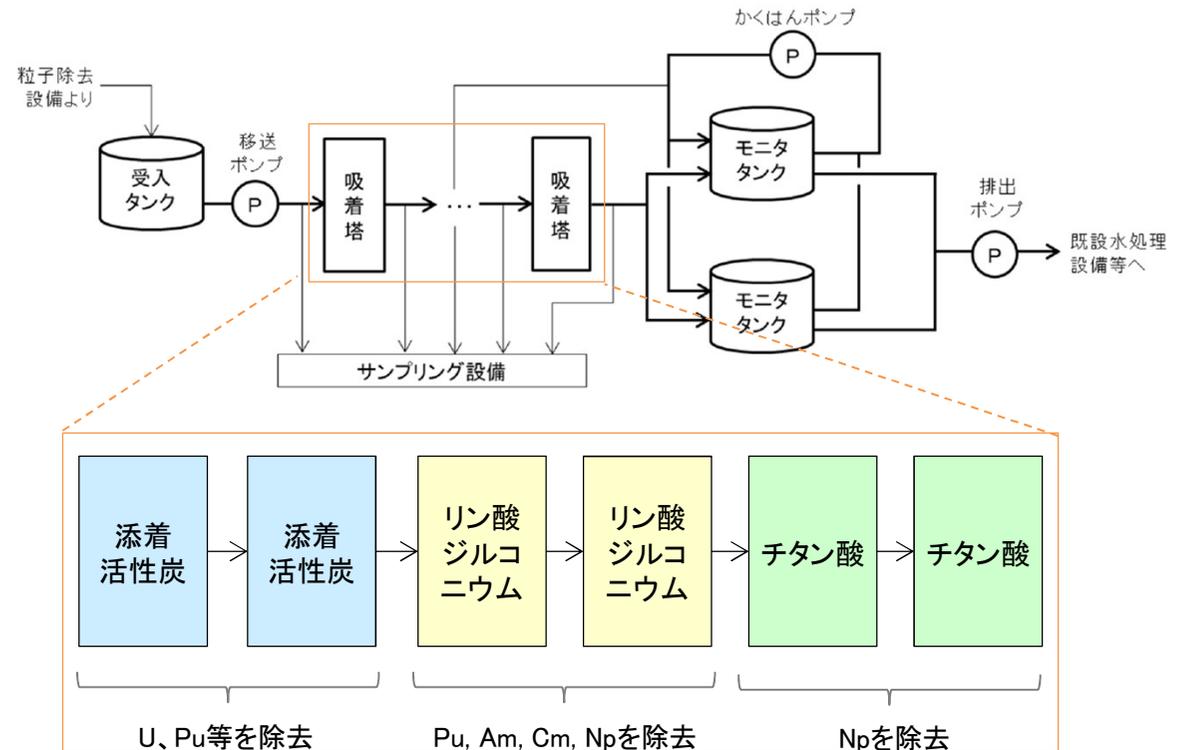


図 溶解性 α 核種除去システムの概略系統図と塔構成案※

※塔構成に関する補足

- 各吸着塔の塔数2はメーゴーランド運用を可能とするための仮設定。各吸着塔の必要塔数については、今後評価が必要。
- 吸着塔数を可能な範囲で減らすために、溶解性 α 核種に加えコロイド状 α 核種の除去性能も高い添着活性炭の吸着塔、複数の溶解性 α 核種に対する吸着性能の高いリン酸ジルコニウムの吸着塔を設置する。ただし、添着活性炭とリン酸ジルコニウムのNp吸着性能は比較的高い程度であり、通水処理時の濃度低減が不十分である可能性があるため、リン酸ジルコニウムの後段にチタン酸吸着塔を設ける。

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発(燃料デブリ取り出し作業時を想定した要素試験)

・実機環境条件の検討と試験環境条件への反映方針

- PCVの気相部環境に係る管理方針案および管理値案について、事業者エンジニアリングにおける検討状況を踏まえて下表に整理した。
- 大気の流れ程度に係る項目としては酸素濃度があり、4%未満を管理値とすることが検討されていることから、試験評価における条件に反映する。(ただし4%という数値は仮設定値であり、確定値ではない)
- なお、大気中の酸素濃度は約20%であることから、PCV内気相部における大気成分は、大気の1/5以下の濃度で存在すると推定される。(PCV内の二酸化炭素濃度は70～80ppm以下と想定される)

表 燃料デブリ取り出し時の環境項目の管理方針案・管理値案(気体系システム)

No.	環境項目	管理要求	管理方針案	管理値案	備考	
1	気相部 環境	PCV気相部圧力	気相閉じ込め (漏えい防止)	排気流量の管理により 負圧に管理	未定	負圧管理が成立しない場合の選択肢として、 正圧管理、均圧管理という方針がある。
2		窒素濃度	なし	(窒素供給量管理)	—	窒素濃度自体は管理対象ではない。
3		水素濃度	気相閉じ込め (火災・爆発防止)	窒素供給量、排気流量 の管理により水素の爆 発下限界未満に管理	2%未満	仮設定値のため、確定値ではない。
4		酸素濃度	気相閉じ込め (火災・爆発防止)	窒素供給量、排気流量 の管理によりZr火災の 発生条件未満に管理	4%未満	負圧管理時の大気流入により濃度上昇。 仮設定値のため、確定値ではない。
5		二酸化炭素濃度	なし	成り行き	—	負圧管理時の大気流入により濃度上昇。
6		ダスト濃度	気相閉じ込め (漏えい防止)	排気流量の管理により 所定の放射能濃度以 下に管理	未定	全量放出時の公衆被ばく量5mSvに相当する 濃度以下。

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発(燃料デブリ取り出し作業時を想定した要素試験)

・実機想定水質条件の検討と試験液条件への反映方針(1/3)

- 燃料デブリ取り出し作業開始までには、液体系システムでの循環冷却運用、気体系システムでのPCV負圧管理により、段階的な水質変化の発生が想定される。
- 燃料デブリ取り出し作業を開始すると、切削時のコンクリート成分の溶出によって、液相のpH上昇が発生することが想定される。
- またpH上昇によって、気相中の二酸化炭素が、液相中に溶解する量が増えることも想定される。

表 液体系・気体系システムおよび燃料デブリ取り出しの運用状態におけるPCV内滞留水の水質と α 核種吸着性能評価状況

運用状態		STEP1	STEP2	STEP3	STEP4
循環冷却		×	○	○	○
PCV負圧管理		×	×	○	○
燃料デブリ取り出し作業		×	×	×	○
PCV内滞留水の水質	概要	RO処理水を外部から注水し、注水した水はPCV外に漏えいするため、基本水質はRO処理水と同等。	RO処理水を循環することでコンクリート成分等が溶出する可能性がある。気相部は窒素雰囲気のため、大気影響はない。	PCVを負圧管理とすることで、PCV内への大気流入により気相部の二酸化炭素濃度が増加することで、水中の炭酸濃度が増加。	燃料デブリ取り出し作業によりコンクリート成分の溶出量が増加することで、pHが上昇。pH上昇に伴い、炭酸濃度が増加。臨界発生防止のためにホウ酸水を注入することも想定される。
	推定pH	7程度	7~9	5~9	5~12
	無機炭素*濃度(推定)	1ppm程度	1ppm程度	数ppm (大気流入影響)	数十ppm (大気流入+pH上昇影響)
α 核種吸着性能評価状況		(対象外)	(対象外)	2020年度までの吸着試験により候補吸着材を選定	未評価

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発(燃料デブリ取り出し作業時を想定した要素試験)

・実機想定水質条件の検討と試験液条件への反映方針(2/3)

- 燃料デブリ取り出し時にはコンクリート成分の溶出によるpH上昇および二酸化炭素の液相への溶出量増加が想定されるため、想定に必要なpH範囲の検討を行った。
- コンクリート由来のカルシウムが溶出した場合、水酸化カルシウムの飽和溶液のpHは12.4程度だが、高pHの領域になると気相中の二酸化炭素がより溶けやすい環境となるため、時間が経つと炭酸溶解によりpHは9～10程度に低下する。
- 炭酸溶解によるpH低下時には、炭酸カルシウムの沈殿が発生し、 α 核種は共沈により溶液中の濃度が低下することが予想され、この場合には吸着除去の必要性が低下する。
- 本PJでは、溶解状態で存在する α 核種の吸着性能を確認するため、液相の α 核種濃度が著しく低下しないと想定されるアルカリ条件(pH8～10程度)にて吸着試験を実施する方針である。

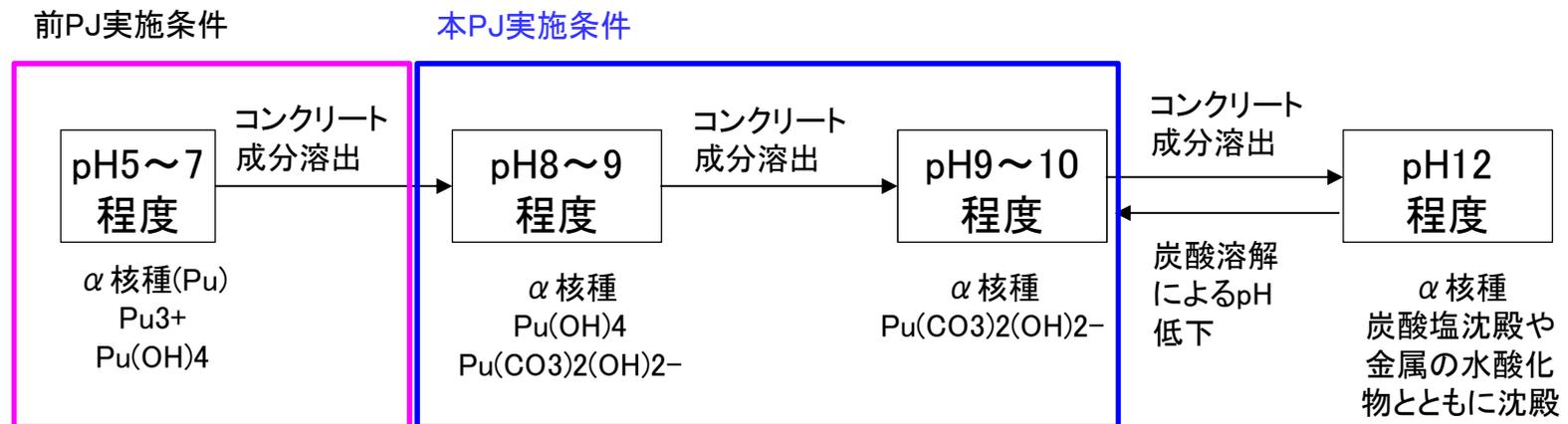


図 コンクリート成分が溶出した場合の水質変動シナリオ

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発(燃料デブリ取り出し作業時を想定した要素試験)

・実機想定水質条件の検討と試験液条件への反映方針 (3 / 3)

- PCV内滞留水の水質変化に寄与する要因としては、海水成分の溶出、コンクリート成分の溶出、ホウ酸水(五ホウ酸ナトリウム)の注入の3つがあるため、各条件をパラメータとした実機想定水質条件を以下に整理した。
- コンクリート成分の溶出によるpH上昇は、pHによって α 核種の存在形態が変化することが想定され、pHの違いによる吸着性能への影響を把握する必要があることから、2条件での実施を計画する。

表 PCV内滞留水の実機想定水質条件一覧

水質	想定状況	海水成分	コンクリート成分	ホウ酸水成分	条件						
					温度 [°C]	Clイオン濃度 [ppm]	Caイオン濃度 [ppm]	ホウ素濃度 [ppm]	pH	無機炭素濃度 [ppm]	SS濃度 [ppm]
1	RO処理水に近い水質のまま循環	なし	なし	なし	10~40	0	<1	<1	6~7	1程度	<1
2-1	循環冷却水に海水成分が少量溶出	あり	なし	なし	10~40	20	<1	<1	6~7	1程度	<1
2-2	循環冷却水に海水成分が多量に溶出	あり	なし	なし	10~40	100	1程度	<1	6~7	1程度	<1
3-1	水質2-1にコンクリート成分が少量溶出	あり	あり	なし	10~40	20	低	<1	8~9	低	<1
3-2	水質2-1にコンクリート成分が多量に溶出	あり	あり	なし	10~40	20	高	<1	9~10	高	<1
4-1	水質2-2にコンクリート成分が少量溶出	あり	あり	なし	10~40	100	低	<1	8~9	低	<1
4-2	水質2-2にコンクリート成分が多量に溶出	あり	あり	なし	10~40	100	高	<1	9~10	高	<1
5	水質2-1に臨界防止のためホウ酸水を注入	あり	あり	あり	10~40	20	低	7000	8~9	高	<1

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発(燃料デブリ取り出し作業時を想定した要素試験)

・溶解状態に係る調査・評価

- 前PJにて、気相中に二酸化炭素が存在する系での熱力学平衡計算を行い、アルカリ条件では、 α 核種の溶存形態として炭酸イオンの配位する形態(炭酸錯体)の溶解度が上昇することを評価している。
- pH上昇に伴う炭酸イオン濃度上昇は、コンクリート成分であるCaとの沈殿生成(炭酸Ca)を発生させ、 α 核種の共沈に伴う濃度低下を伴う可能性があるが、共沈現象は平衡計算では評価できないため、実機環境を模擬したうえでの試験評価による確認が必要となる。

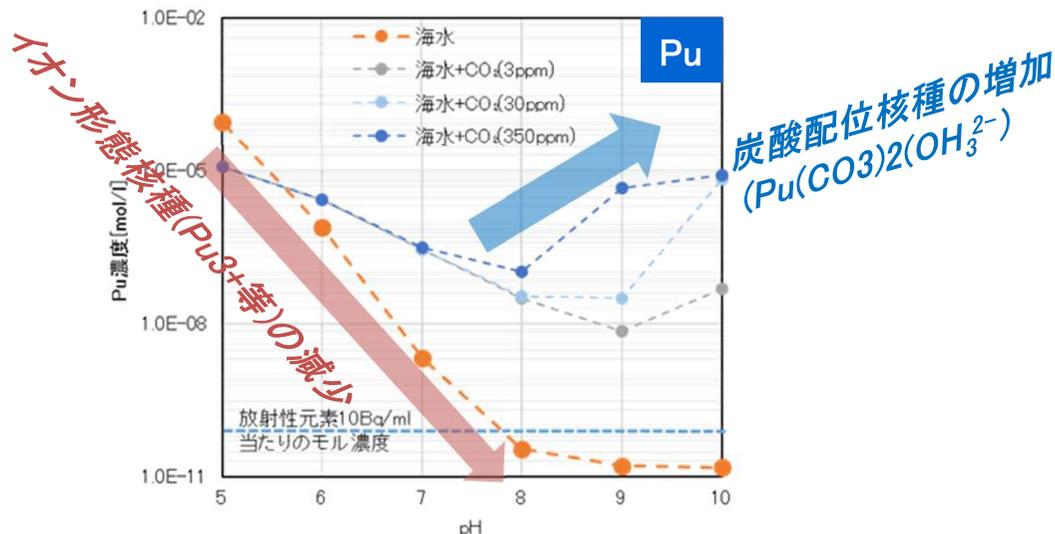
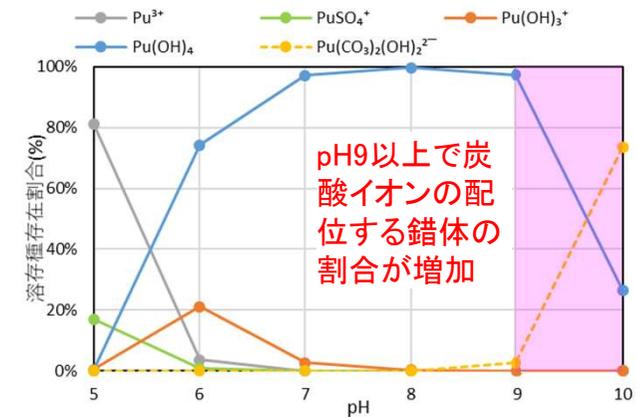


図 気相中の二酸化炭素濃度条件をパラメータとした熱力学平衡計算によるPu溶解度評価結果(50倍希釈海水)

(1) 気相中の二酸化炭素濃度: 3ppm



(2) 気相中の二酸化炭素濃度: 350ppm

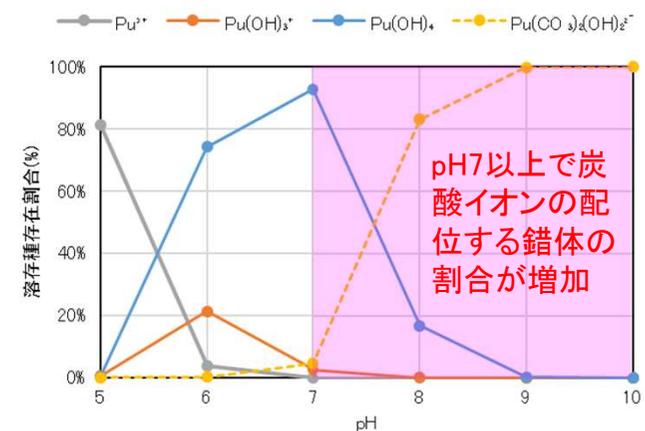


図 気相中の二酸化炭素濃度条件をパラメータとした熱力学平衡計算によるPu溶存形態評価結果(50倍希釈海水)

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発(燃料デブリ取り出し作業時を想定した要素試験)

・試験全体計画

- 前PJはR/B内環境(大気雰囲気)を模擬した環境で溶解性 α 除去試験を実施したことに対し、本PJではPCV内環境(窒素雰囲気)を模擬した試験を実施する。
- 事前試験および予備試験を実施したうえで吸着試験を行う。各試験の概要・目的は以下である。
 - ①事前試験:簡易グローブボックス内の窒素雰囲気制御可否確認(酸素濃度4%以下の維持可否確認)
 - ②予備試験:液相中 α 核種の容器付着影響および沈殿生成影響の確認(吸着材以外の濃度低減要因の確認)
 - ③吸着試験:浸漬試験による吸着材の溶解性 α 核種吸着性能の確認

【本PJ】PCV内環境模擬(窒素雰囲気)

【前PJ】R/B内環境模擬(大気雰囲気)



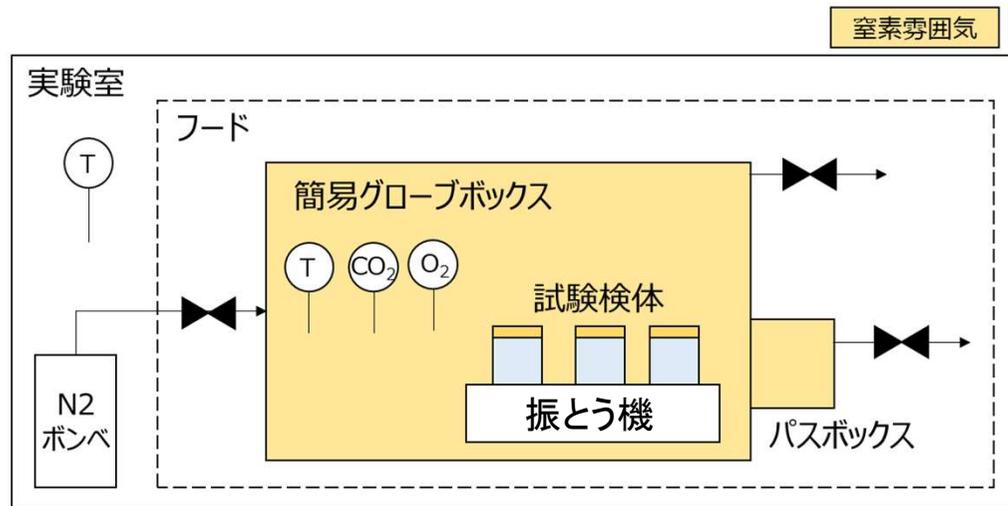
図 試験全体の実施フロー

7. 実施内容

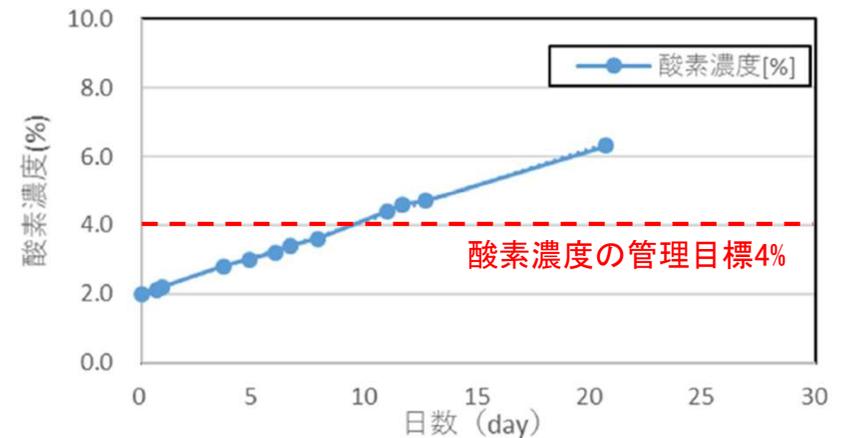
①溶解性 α 核種除去技術の開発(燃料デブリ取り出し作業時を想定した要素試験)

・試験体系と事前試験結果

- PCV内環境(窒素雰囲気)を模擬した評価を行うための試験体系を下図(図A)に示す。
- 放射線管理の観点より、実験室のフード内に簡易グローブボックス(簡易GB)を設け、簡易GB内を窒素雰囲気とするためにN2ボンベからの窒素封入ラインを接続する。
- 簡易GB内への大気流入影響を確認した結果、管理目標である酸素濃度4%を超過するまでの期間が10日程度であり、夜間・休日の作業できない期間も雰囲気維持が可能であることを確認した(図B)。
- 定期的に簡易GB内の酸素濃度を確認し、適宜窒素封入操作を行う他、試験検体の容器のふたを開けると雰囲気影響を強く受けることから、試験検体から液採取等を行う前にも窒素封入操作を行う方針とした。
- 温度については簡易GB内での温度制御はスペース上の制約から難しい。そこで、試験時の温度測定・記録を行い、温度の違いによる影響が出た場合に、考察するためのデータ取得を行う。



図A 窒素雰囲気を模擬した試験体系



図B 簡易GB内の酸素濃度変化確認結果

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発(燃料デブリ取り出し作業時を想定した要素試験)

・予備試験手順

事前試験結果をもとに設定した予備試験手順を以下に示す。

試験手順は前PJと同様に実施し、試験環境を窒素雰囲気下で実施する。

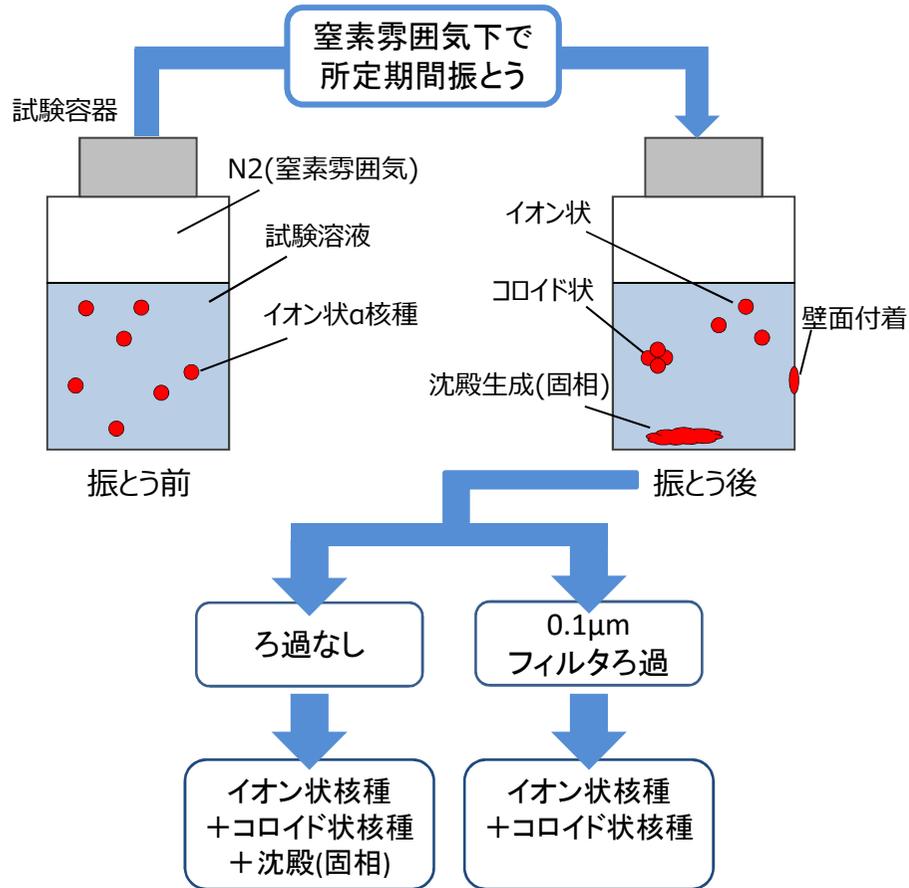


図 予備試験イメージ図

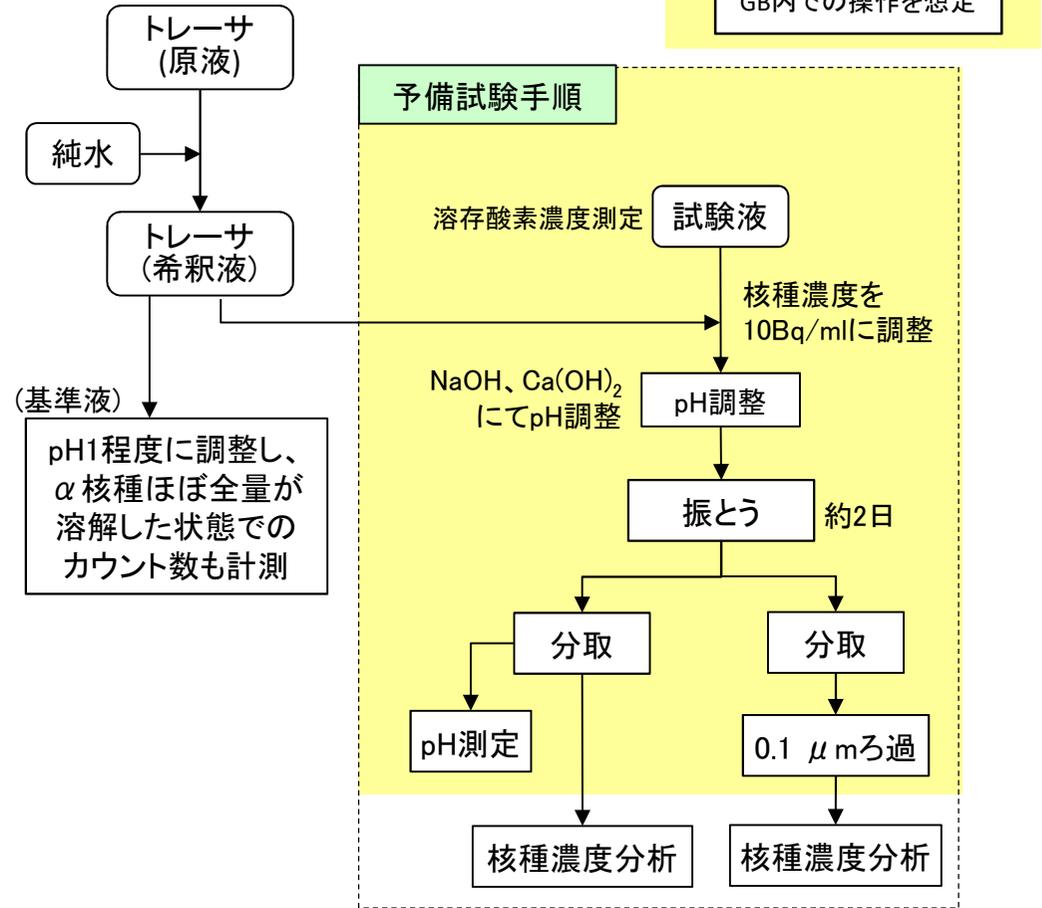


図 予備試験手順

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発(燃料デブリ取り出し作業時を想定した要素試験)

・吸着試験手順

事前試験結果をもとに設定した吸着試験手順を以下に示す。

試験手順は前PJと同様に実施し、試験環境を窒素雰囲気下で実施する。

窒素雰囲気下の簡易GB内での操作を想定

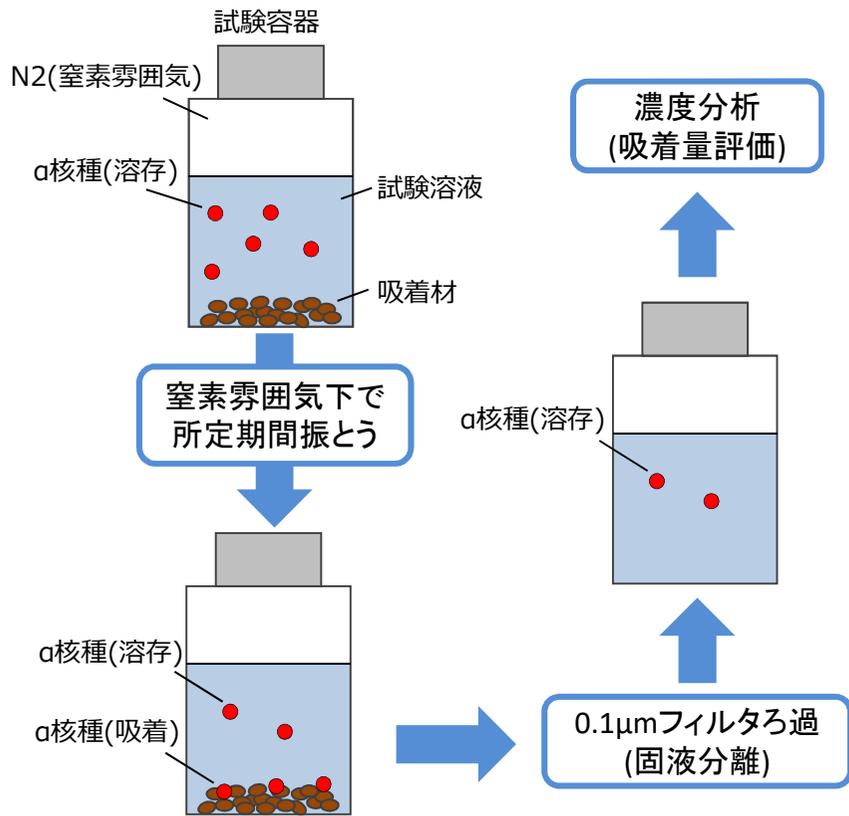
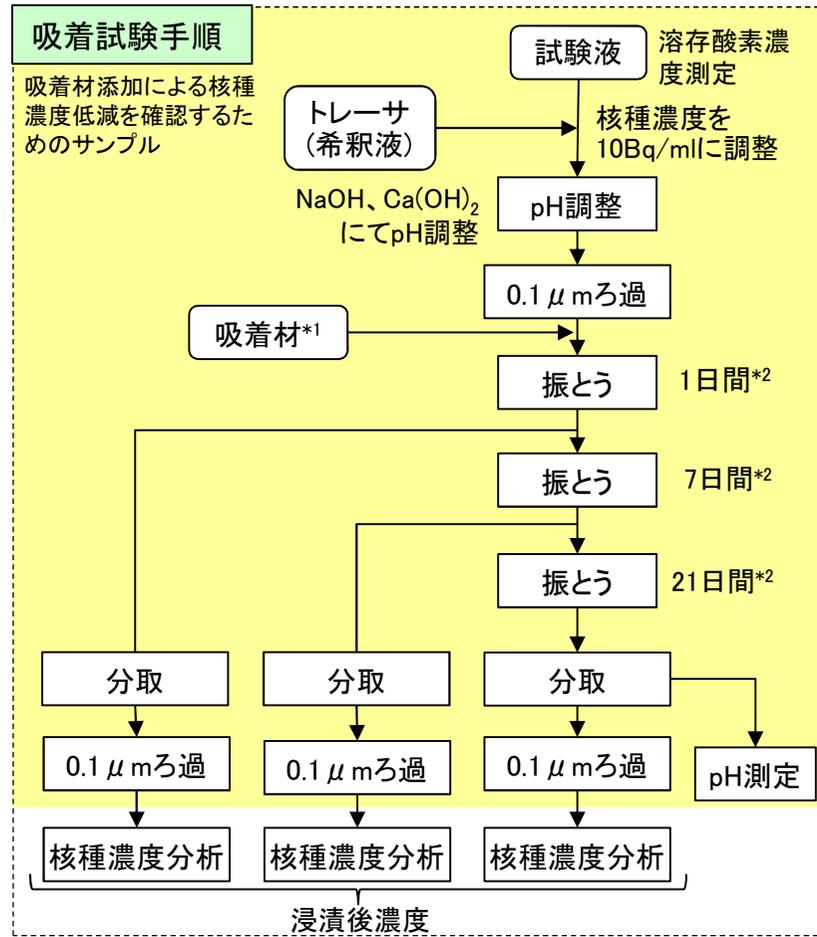


図 吸着試験イメージ図



*1: 吸着材の添加によるpH変動を抑制するために、一部の吸着材は事前洗浄を行う。

*2: 3パターンの振とう期間を設定することで平衡に至っていることを確認する。

図 吸着試験手順

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発(燃料デブリ取り出し作業時を想定した要素試験)

・予備試験パラメータ

PCV気相環境条件(窒素環境)およびコンクリート切削時のアルカリ条件を考慮し、以下の試験条件を設定した。

表 予備試験の試験パラメータ

No.	試験パラメータ	設定条件	備考
1	核種	Am, Cm, Pu, Np, U	敷地境界における被ばく評価結果より、除去の必要性が大きいと判断された α 核種を設定
2	核種濃度	10 Bq/ml	試験設備にて取り扱い可能な濃度、また、分析により除去率を適切に評価可能な濃度を設定
3	気相環境	窒素雰囲気	燃料デブリ取り出し時のPCV内気相環境を想定し条件設定 事前試験結果より、酸素濃度4%を基準値として、簡易GBを用いて雰囲気制御
4	試験容器材質	PP、PFA	2条件で実施し、容器付着の影響が少ない容器を吸着試験で使用する PP:ポリプロピレン、PFA:フッ素樹脂。
5	水質条件	下表参照	

表 予備試験の水質条件

No.	水質条件	pH	備考
1	1000倍希釈海水	6~7	前PJまでに実施済みの条件については、前PJの結果を流用する方針とし、未取得の条件を用いて実施する。
2	200倍希釈海水	6~7	
3	1000倍希釈海水 +Ca(OH) ₂	9程度	・海水成分の溶出が少ない状態により、現在までの滞留水中の塩化物イオン濃度分析値(19ppm)近傍で運用する場合を想定 ・コンクリート成分の溶出によるpHの上昇を想定
4		10程度	
5	200倍希釈海水 +Ca(OH) ₂	9程度	・海水成分の溶出が多い状態により、管理上限値(100ppm)近傍で運用する場合を想定 ・コンクリート成分の溶出によるpHの上昇を想定
6		10程度	
7	五ホウ酸ナトリウム水 (7000ppm as B)	8~9	五ホウ酸ナトリウム注入時の影響評価用の条件

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発(燃料デブリ取り出し作業時を想定した要素試験)

・吸着試験パラメータ

吸着試験条件案を下表に示す。今後進める予備試験の結果を受けて、実施する水質条件、吸着材条件、振とう期間条件について選定予定。

表 吸着試験の試験パラメータ

No.	試験パラメータ	設定条件	備考
1	核種	Am, Cm, Pu, Np, U	敷地境界における被ばく評価結果より、除去の必要性が大きいと判断された α 核種を設定
2	核種濃度	10 Bq/ml	試験設備にて取り扱い可能な濃度、また、分析により除去率を適切に評価可能な濃度を設定
3	気相環境	窒素雰囲気	燃料デブリ取り出し時のPCV内気相環境を想定し条件設定 事前試験結果より、酸素濃度4%を基準値として、簡易GBを用いて雰囲気制御
4	振とう期間	1日、7日、21日	7日、21日の振とうにて平衡に近い状態を評価。短時間振とうにて吸着速度が著しく低い吸着材であるかどうか判断。
5	試験容器材質	PPあるいはPFA	予備試験結果を受けて、使用する容器種類を選定。 PP: ポリプロピレン、PFA: フッ素樹脂。
6	吸着材	備考参照	前PJまでの大気環境条件での評価にて、高い吸着性能が得られている吸着材(添着活性炭、活性炭、チタン酸、ケイチタン酸、リン酸ジルコニウム)を対象とする。
7	水質条件	下表参照	

表 吸着試験の水質条件※

No.	水質条件	pH	備考
1	1000倍希釈海水 +Ca(OH) ₂	9程度	・海水成分の溶出が少ない状態により、現在までの滞留水中の塩化物イオン濃度分析値(19ppm)近傍で運用する場合を想定 ・コンクリート成分の溶出によるpHの上昇を想定
2		10程度	
3	200倍希釈海水 +Ca(OH) ₂	9程度	・海水成分の溶出が多い状態により、管理上限値(100ppm)近傍で運用する場合を想定 ・コンクリート成分の溶出によるpHの上昇を想定
4		10程度	
5	五ホウ酸ナトリウム水 (7000ppm as B)	8~9	五ホウ酸ナトリウム注入時の影響評価用の条件

※試験工程の制約より全条件は実施できないため、予備試験結果を受けて、実施する水質条件の絞り込みを行う計画。

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発(燃料デブリ取り出し作業時を想定した要素試験)

・予備試験進捗

- Cmを用い、1000倍希釈海水、200倍希釈海水をもとに、水酸化カルシウムにてpHを9および10に調整した液を、2種類の容器(PP、PFA)にて2日間の振とうを行った。
- ろ過なしの条件でカウント数が1~3割低減することから、Cmの一部は容器に付着していると推定される。
- また、0.1 μ mろ過後のカウント数の低減より、Cmの一部は粒子の形態に変化したと推定される。
- 容器付着、粒子生成の影響は確認されたものの、Cmはある程度溶解状態で存在するため、吸着試験が必要となることを確認した。PPとPFAで結果に大きな差異はないため、吸着試験時はPP容器を使用予定。

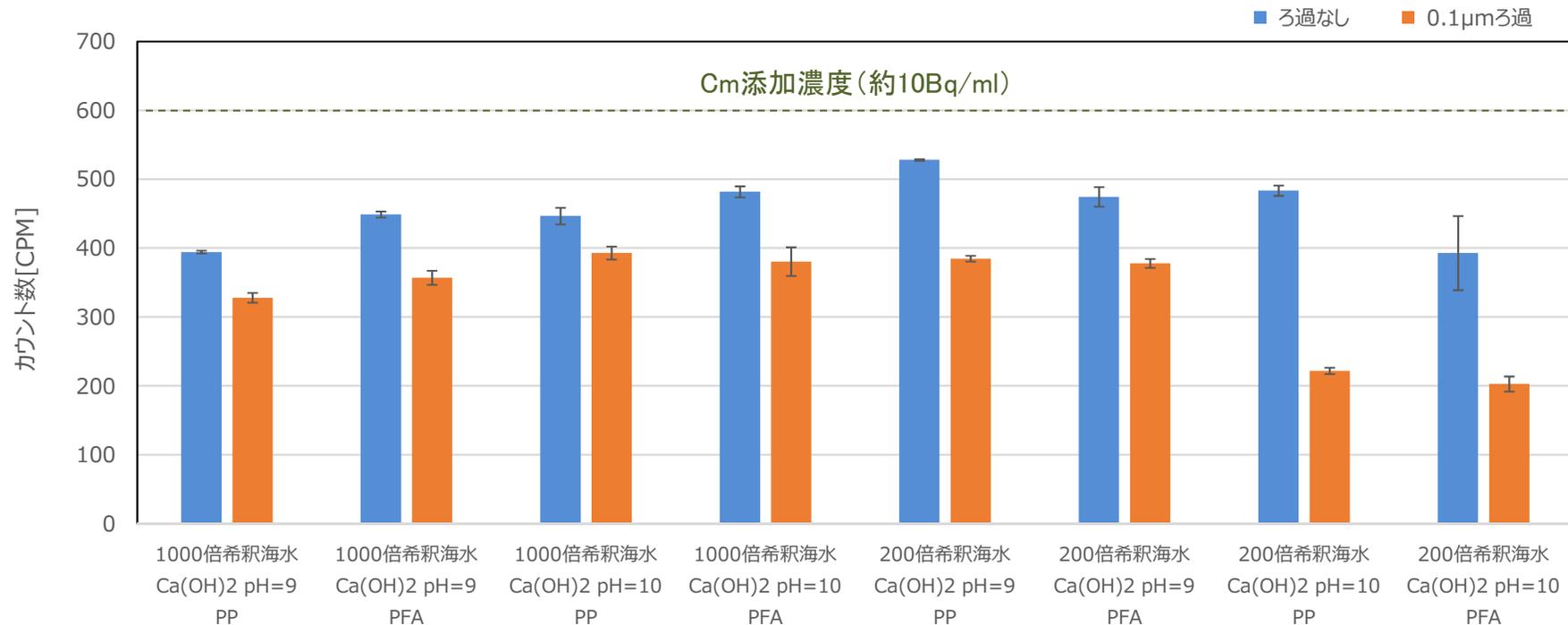


図 Cmを用いた予備試験結果

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発(燃料デブリ取り出し作業時を想定した要素試験)

・予備試験進捗 (2)

- Amを用い、1000倍希釈海水、200倍希釈海水をもとに、水酸化カルシウムにてpHを9および10に調整した液、および五ホウ酸ナトリウムにてB=7000ppmに調整した液を作製し、2日間の振とうを行った。
- 1000倍希釈海水pH9,10および200倍希釈海水pH10のろ過なしの条件でカウント数が基準液に対して低下しており、Amの一部は容器に付着していると推定される。また、0.1 μ mろ過後のカウント数の低下より、Amの一部は粒子の形態に変化したと推定される。
- 一部の液性で容器付着、粒子生成が確認されたものの、Amはある程度溶解状態で存在するため、吸着試験が必要となることを確認した。

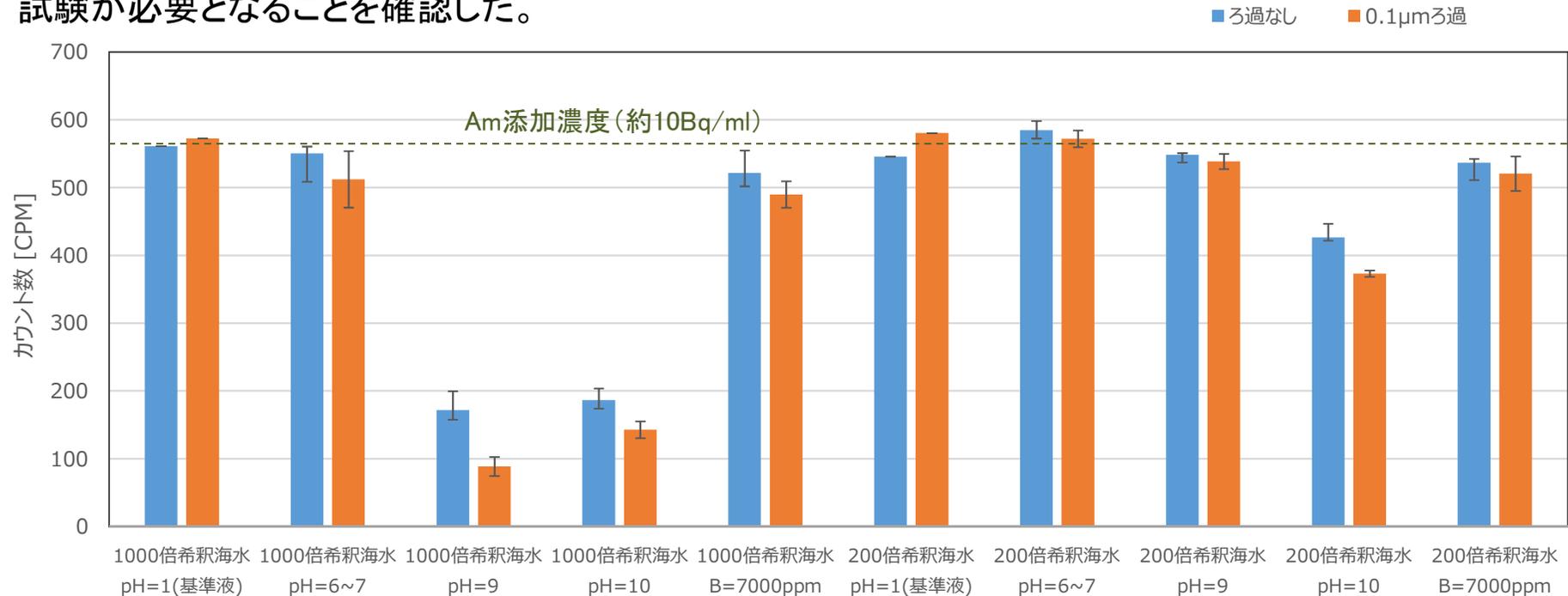


図 Amを用いた予備試験結果

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発(燃料デブリ取り出し作業時を想定した要素試験)

・まとめ

【今年度成果】

- ✓ 燃料デブリ取り出し時のPCV内気相環境の管理方針を基に、試験環境の模擬として酸素濃度4%以下に管理する方針を策定し、事前試験にて簡易グローブボックス内の雰囲気制御が可能であることを確認した。
- ✓ 事前試験にて確認した気相雰囲気の管理方針をもとに、簡易グローブボックスにて窒素雰囲気を維持した状態での予備試験および吸着試験の試験手順を立案した。
- ✓ 一部の予備試験を開始し、窒素雰囲気かつアルカリ条件(pH9、10)において、Am, Cmはある程度溶解状態で存在するため、核種除去の必要性が高く、吸着試験の必要性が高いことを確認した。

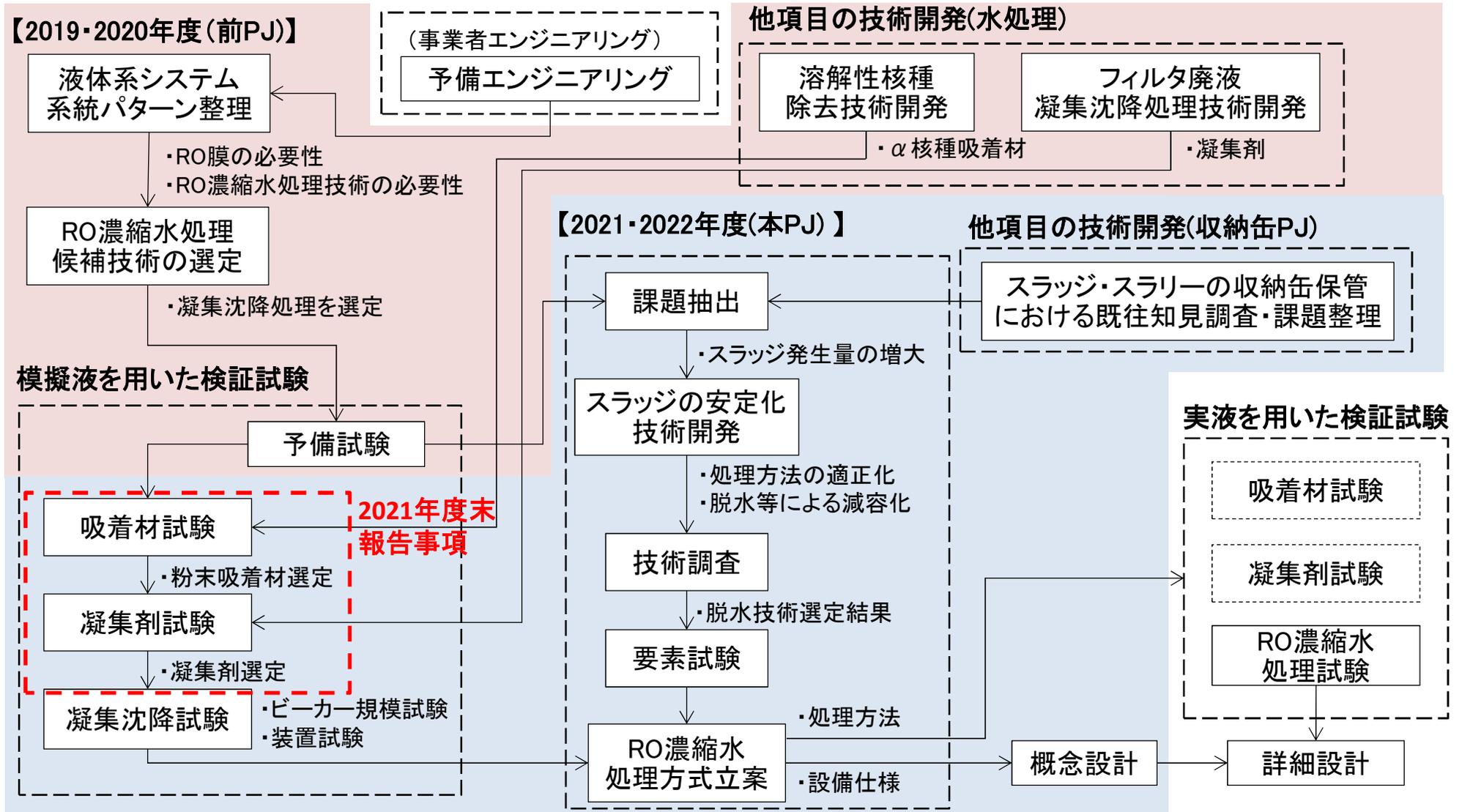
【今後の計画】

- ✓ 立案した試験手順にてPu、U、Np予備試験を実施し、各水質条件における α 核種の挙動を確認する。
- ✓ 事前試験・予備試験の結果を基に、吸着試験の条件を検討する。
- ✓ 吸着試験を実施し、各吸着材候補の α 核種に対する吸着性能を評価する。
- ✓ 吸着試験結果をもとに、概念システム設計の見直し、実汚染水を用いた試験計画の立案を行う。

7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

➤ 検討フロー



7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

【課題】

- RO膜より発生するRO濃縮水の処理方式として、凝集沈降が検討されており、処理手順を確立する必要がある。
- RO濃縮水処理に使用可能な粉末吸着材および凝集剤を未選定であり、それらの核種吸着性能や凝集沈降性能のデータが不足している。

【実施内容】

- 文献調査や既設水処理設備での使用実績などより、粉末吸着材および凝集剤の候補を選定する。
- 吸着試験により粉末吸着材の核種除去性能を評価する。
- ビーカー規模凝集沈降試験により、粉末吸着材に対する凝集剤の凝集性能を評価する。

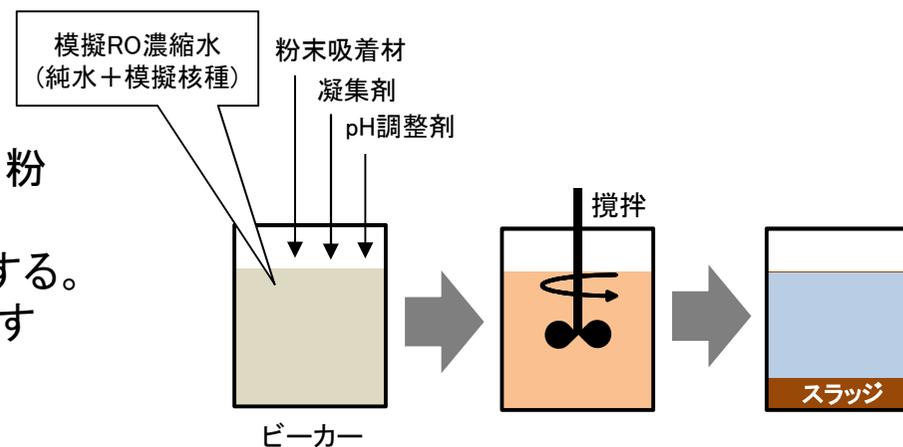


図 RO濃縮水処理要素試験イメージ

【目標】

- 粉末吸着材の核種除去性能および、凝集剤の凝集沈降性能を評価する。
- 適用可能な粉末吸着材、凝集剤の候補を選定する。
- RO濃縮水の処理手順を立案する。

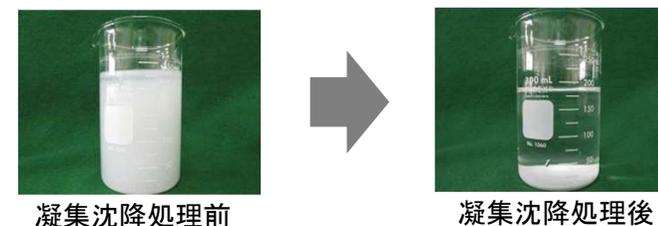


図 RO濃縮水処理要素試験の様子

7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

➤ スラッジ回収システム系統構成

非溶解性核種除去設備およびRO膜設備より発生する廃液から固形成分を回収する

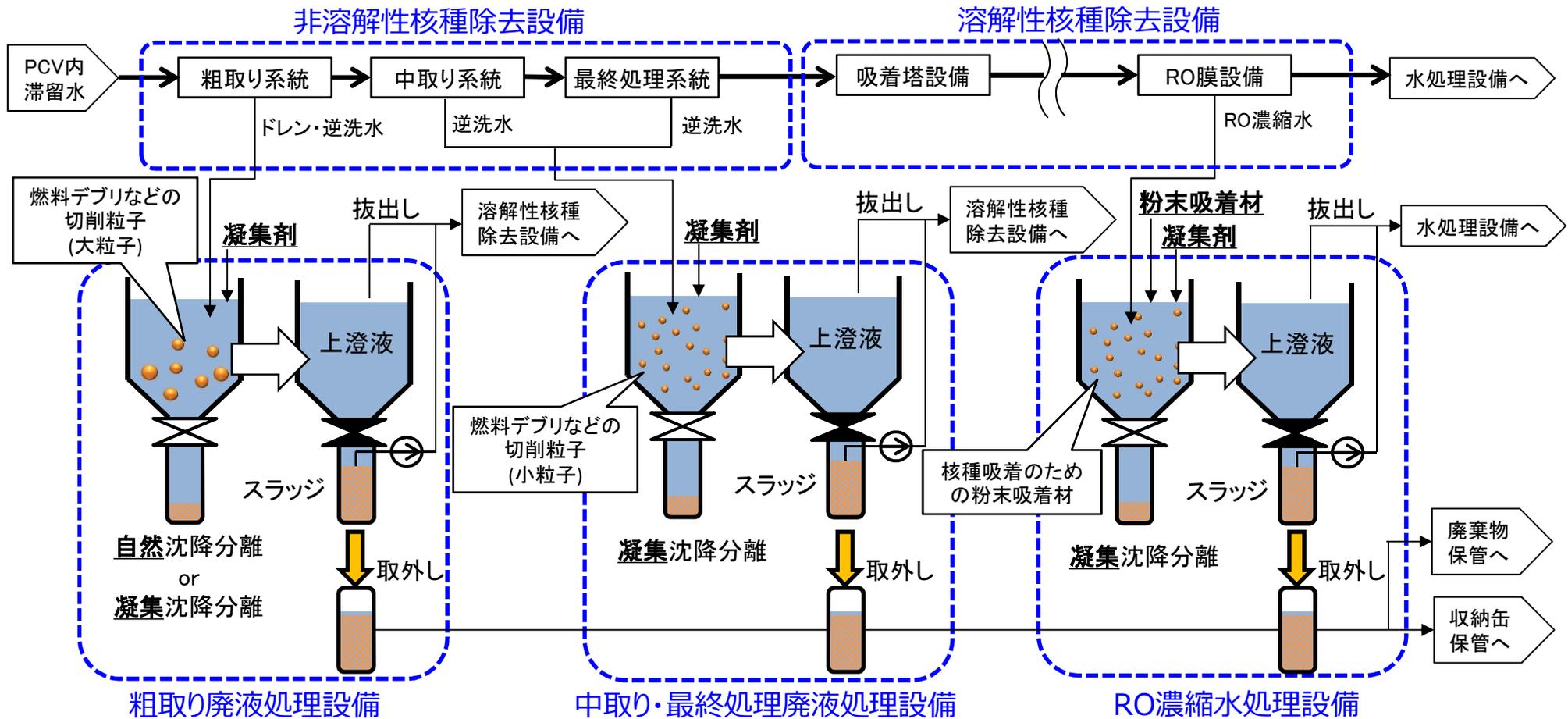


図 スラッジ回収システムの系統構成概念

7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

➤ スラッジ回収システムの要件

各沈降分離設備における処理対象液と処理要求を以下に示す。

表 各沈降分離設備におけるシステム要件

※補助事業で設定している水質条件で試算

No.	項目	粗取り廃液処理設備	中取り・最終処理廃液処理設備	RO濃縮水処理設備
1	処理対象水	粗取り機器より発生する ドレン水・逆洗水	中取り機器・最終処理機器より 発生する逆洗水 (燃料デブリ取り出し作業時は中取り系統 はバイパス運転を仮定)	RO膜装置より発生するRO濃縮水
2	含有粒子成分 (凝集沈降対象)	溶融燃料、炉心構造物、コンク リート成分、その他固形分 (粒径100～数十 μm)	溶融燃料、炉心構造物、コンクリート成 分、その他固形分 (粒径数十～0.1 μm)	核種吸着用の粉末吸着材
3	粒子濃度	数千～10000 ppm フィルタ要素試験結果より	数千～10000 ppm フィルタ要素試験結果より	数百～10000 ppm 吸着材要素試験結果より
4	処理流量	間欠ドレン: 100 m ³ /year 常時ドレン: 1300 m ³ /year フィルタ要素試験結果より	0.1 μm UF膜: 10 m ³ /year 0.05 μm UF膜: 100 m ³ /year フィルタ要素試験結果より	8～11 m ³ /day 燃料デブリ取り出し作業水 (22 m ³ /日)にRO膜濃縮倍率を2～3 倍と仮定し算出
5	処理流量要求	間欠ドレン: 1.0 m ³ /day以上 常時ドレン: 8.2 m ³ /day以上 設備稼働率80%で処理可能とする ための流量	0.1 μm UF膜: 0.063 m ³ /day以上 0.05 μm UF膜: 0.63 m ³ /day以上 設備稼働率80%で処理可能とするための 流量	14 m ³ /day以上 設備稼働率を80%で処理可能とする ための流量
6	稼働方式	バッチ処理 1日で1バッチ処理完了を想定		

7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

【課題】 沈降分離槽より発生する凝集沈殿物(以下、沈殿スラッジ)の発生量が多い。

スラッジ回収容器をユニット缶サイズ(φ200×H400mm)と仮定した場合、必要な払出し回数は下表のように試算される

表 スラッジ回収容器の払出し回数

処理対象廃液	回収容器員数 [個/day]
粗取り廃液	1
最終処理廃液	8
RO濃縮水	111



RO濃縮水処理試験

※マグネタイト 1000ppm



フィルタ廃液凝集沈降試験

※SiO₂ 10000ppm

沈殿スラッジ性状
 ・発生量は初期液量に対して約10～15Vol%
 ・含水率は90%程度
 ・流動性が高い

図 凝集沈降処理後の廃液の外観

- フィルタ廃液処理用の沈降分離槽より発生する沈殿スラッジは比較的発生量が小さく、払出し回数も実機適用可能なオーダーであると推定
- RO濃縮水処理用の沈降分離槽より発生する沈殿スラッジは発生量が膨大であり、払出し回数も膨大なため改善が必要

検討案

- ① より除去性能の高い吸着材の選定
- ② 粉末吸着材添加量の適正化検討
- ③ 凝集剤添加量の適正化検討
- ④ 沈降分離処理手順および装置の見直し
- ⑤ 脱水による沈殿スラッジの減容化処理の検討

- ①～④ ⇒ 要素試験により検討
- ⑤ ⇒ 文献調査・机上検討後に要素試験を実施
※項目③にて検討

7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

➤ 吸着材試験

【目的】RO濃縮水処理に適用可能な吸着材の選定を実施する

【実施内容】攪拌式のバッチ試験にて粉末吸着材の吸着性能を評価する

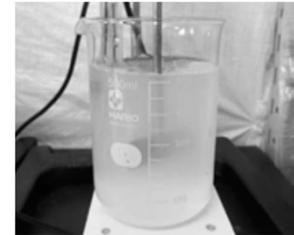


図 吸着材試験(チタン酸)の様子

試験体系の検討

吸着材の吸着性能を評価する場合、浸漬式のバッチ試験を実施することが一般的であるが、RO濃縮水は沈降槽にて攪拌処理されるため、実機体系を模した試験体系とした。

粉末吸着材の選定

文献調査結果、1F使用実績、2020年度までの試験にて取得した吸着率データなどを参考として、本試験に使用する吸着材を下表のように選定した。除去対象である α 核種(Pu, Am等)に対して、高い除去性能が報告されている吸着材を選定した。

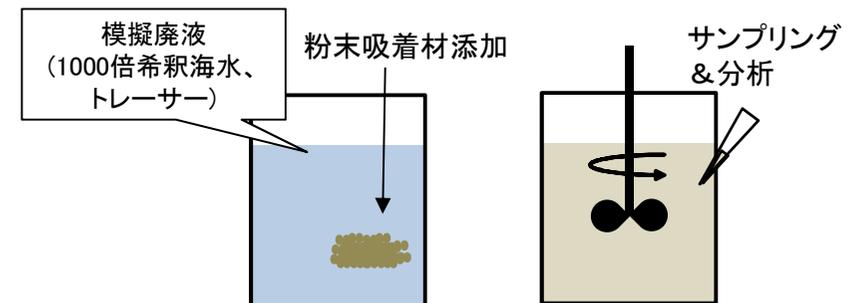


図 攪拌式の吸着試験 イメージ図

表 粉末吸着材の選定結果※

No.	吸着材種類	粒径	備考
1	チタン酸	4.08 μm	米国サバンナリバーサイトにて使用実績あり(バッチ処理)
2	チタンケイ酸塩	8.55 μm	1Fでの使用実績あり
3	活性炭	数 μm	1Fでの使用実績あり
4	ヘマタイト	1.32 μm	鉄酸化物系の吸着材。Pu等の α 核種に対して高いKd(分配係数)の報告がある。
5	マグネタイト	1.96 μm	ヘマタイトと同様の鉄酸化物系の吸着材。

※本試験方式ではHOT試験が困難なため全てCOLD試験にて実施する。
 なお、COLDトレーサでの模擬が困難である α 核種(Pu等)については、項目①溶解性の吸着率データを参照することとする。

※ α 核種吸着材から選定
 顆粒状に成形することができず、
 吸着塔充填が困難な吸着材からも選定

※活性炭は粒径未測定(今後実施)

7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

➤ 吸着材試験結果

試験条件

試験液: 1000倍希釈海水、pH: 7
 トレーサー: Cs(0.1ppm), Sr(0.1ppm), Eu(0.5ppm)
 吸着材: 右図(粒径: 数十~数 μ m)
 吸着材添加濃度: 20~500ppm
 攪拌条件: 150rpm × 30, 60, 120min

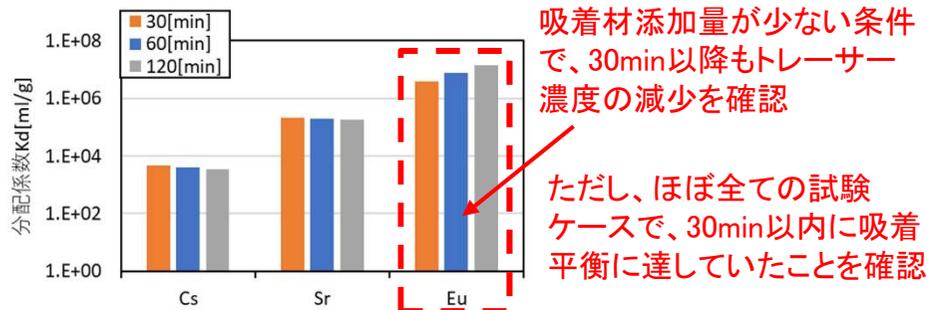


図 吸着材試験結果(チタン酸20ppm) 分配係数の経時変化

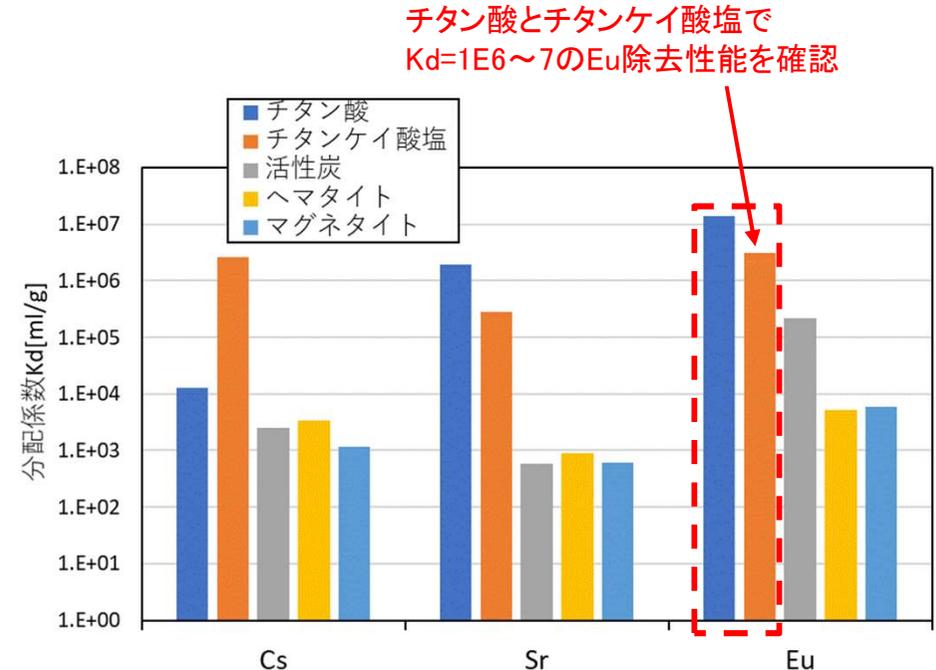


図 吸着材試験結果 分配係数

チタン酸のKdが約1E+7であり最もEu除去性能が高い。

チタンケイ酸塩のKdが1E+6~7でありチタン酸に次いでEu除去性能が高い。

活性炭はKdが約1E+5~6、ヘマタイトとマグネタイトは、Kdが約1E+3~4と比較的低い。

また、チタン酸はSr、チタンケイ酸塩はCs,Srに対するKdは(EuのKdと比較して)同程度であり、活性炭、ヘマタイト、マグネタイトはCs,Srに対するKdは比較的低い。

吸着速度が速く、30min以内に吸着平衡に達すると想定される。

7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

➤ 吸着材試験結果

除去要求(DF100)を満足するために必要な添加量を評価した。

表 粉末吸着材の必要添加量の評価

No.	吸着材	分配係数[ml/g] ^{※1}			添加量 ^{※2}	処理時間 ^{※3}
		Cs	Sr	Eu(Am)		
1	チタン酸	1.3.E+04	1.9.E+06	1.4.E+07	<50ppm	<30min
2	チタンケイ酸塩	2.6.E+06	2.8.E+05	3.2.E+06	50ppm	
3	活性炭	2.5.E+03	5.8.E+02	2.2.E+05	200ppm<	
4	ヘマタイト	3.5.E+03	9.1.E+02	5.2.E+03	1000ppm<	
5	マグネタイト	1.1.E+03	6.0.E+02	5.9.E+03	1000ppm<	

※1 除去性能が比較的高い結果は赤塗りで示した。No.3は比較的高い結果であるが、No1, 2と比較して劣るため、薄い赤塗りで示した。

※2 本試験では、実際の水質よりも高濃度と想定されるトレーサー濃度を設定したため、より低濃度の廃液に対しては、吸着材の添加量はより少なくできる可能性がある。別途吸着等温線の評価し、各濃度領域における分配係数を評価する必要がある。

※3 溶液を一樣攪拌できていれば、初期段階の吸着速度が速いため、処理時間は短い(約30min)と想定される。

チタン酸(No.1)やチタンケイ酸塩(No.2)がEuに対する除去性能が高く、必要な添加量は数十ppmと評価した。従来想定していた1000ppmよりも削減可能であるため、スラッジ発生量もそれに依じて低減可能と考えられる。

鉄酸化物系(No.4, 5)は、Eu除去率が比較的低いことを確認した。

→チタン酸などと比較して、添加量をより大きくしなければならない(数千ppm以上)。

Cs, Srに対する除去率が低いため、α核種のみを選択的に除去することが可能

α核種のみを選択的に除去する場合 → 活性炭、(マグネタイト)を選定

α核種を含む全放射能を除去する場合 → チタン酸、チタンケイ酸塩を選定

7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

➤ 吸着材の選定方針

α 核種の除去性能に加えて、Cs, Srの除去性能も考慮し、吸着材を選定する

液体システム構成案1

液体システムは、 α 核種のみを選択的に除去し、Cs, Srは可能な限り除去しないシステムとする

- α 放射能濃度を既設水処理設備に払出し可能なレベルまで低減する
- Cs, Srなどの β, γ 核種は既設水処理設備で除去する
- α 核種のみスラッジ化し捕集すれば、スラッジの線量は低く抑えられる
- 沈降分離設備や沈殿スラッジの処理設備に要求される遮蔽機能が低く抑えられ、作業員被ばくの低減にも寄与する

粉末吸着材候補：活性炭、(チタン酸、マグネタイト)

α 核種(Eu)の除去率が高く、Cs, Srの除去率が低い吸着材を選定
Eu除去率を考慮すると、添加量を大きくしなければならない(数百ppm)ことが懸念
→スラッジ発生量が増大する

燃料デブリ取り出し時においても、Cs, Sr濃度は既設水処理設備にて処理可能な水準である場合、液体システムにて濃度低減が必要な放射能としては α 核種のみとなる。Cs, Srを吸着除去可能な粉末吸着材をRO濃縮水処理に使用した場合、強固な遮蔽機能が設備自体に要求されるため設備規模の増大に繋がる。以上の理由より、 α 核種のみを選択的に除去可能な粉末吸着材の選定が必要と想定される。 α 核種選択除去用の粉末吸着材として、Euに対する除去性能が高く、Cs, Srに対する吸着性能が低い粉末吸着材を選定する。

7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

➤ 吸着材の選定方針

α 核種の除去性能に加えて、Cs, Srの除去性能も考慮し、吸着材を選定する

液体系システム構成案2

液体系システムは、 α 放射能を含む全放射能の濃度低減が可能なシステムとする

- α 放射能濃度を含む全放射能濃度を既設水処理設備へ払出し可能なレベルまで低減する
- 放射能として支配的なCs, Srもスラッジ化し捕集するため、沈殿スラッジの線量が高くなる
- 作業員被ばく防止の観点から、沈降分離設備や沈殿スラッジの処理設備に要求される遮蔽機能のレベルが高くなる

粉末吸着材候補：チタン酸※、チタンケイ酸塩

α 核種(Eu), Cs, Srいずれの除去率も高い吸着材を選定

※チタン酸はCs除去率は低い

Eu除去率が高いため、添加量は比較的少量(<数十ppm)と評価

既設水処理設備へ払い出すためのシステム要件として全放射能濃度が設定された場合、 α 核種に加え放射能が支配的と想定されるCsおよびSrの濃度低減が必要と考えられる。そのため、全放射能の低減が可能な粉末吸着材の選定が必要と想定される。全放射能除去用の粉末吸着材として、Cs, Sr, Euのいずれに対しても除去性能が高い粉末吸着材を選定する。

7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

➤ 凝集剤試験

【目的】RO濃縮水処理に適用可能な凝集剤の選定を実施する

【実施内容】粉末吸着材を添加した模擬液に対して凝集沈降処理を実施する

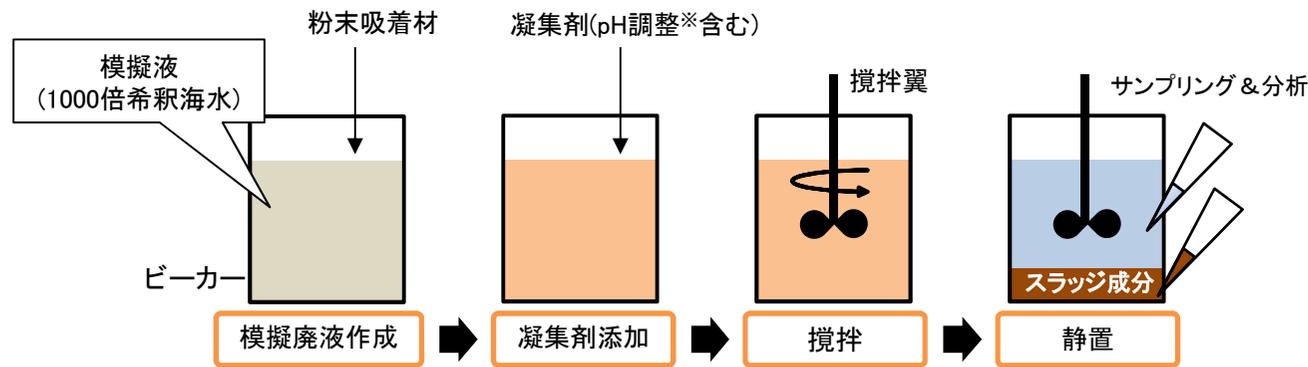


図 凝集剤試験 イメージ図

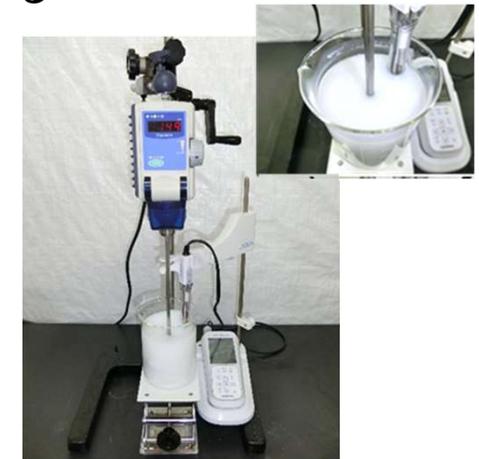


図 凝集剤試験 装置外観

※粉末吸着材の凝集沈降の可否が主な確認事項であるため、トレーサー除去率は評価しない。そのためトレーサーは無添加とする。

※今回選定した凝集剤はいずれも酸性試薬であり、添加後は中性領域に調整する必要があるため、水酸化ナトリウム溶液を使用する。

試験体系の検討

吸着材試験と同様の攪拌式のジャーテストを採用する。
実機の凝集沈降槽での処理をスケールダウンした体系を模擬する。

凝集剤の選定

文献調査結果および2020年度試験結果を基に右表のように選定した。
凝集沈降性能に加えて、廃液のイオン強度に対する冗長性も考慮した。

表 凝集剤の選定結果

No.	凝集剤	備考
1	高塩基PAC	低イオン強度の廃液にて高い処理性能の報告あり
2	硫酸アルミ	ホウ酸含有廃液に対して高い処理性能を前PJ試験にて確認

7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

➤ 凝集剤試験結果

凝集沈降処理後に発生する沈殿スラッジ量は、凝集剤種類の依存性は低く、粉末吸着材種類に大きく依存する結果であった。

沈殿スラッジ発生量

従来は粉末吸着材添加量1000ppmのとき、スラッジ発生量は約10Vol.%と想定

チタン酸、活性炭、マグネタイト → いずれも0.2~0.3Vol.%となった

チタンケイ酸塩、ヘマタイト → 数Vol.%オーダーの結果が多い(試験条件によりばらつきあり)

表 凝集剤試験条件(吸着材/凝集剤)

粉末吸着材※1		凝集剤※2			
種類	濃度 [ppm]	種類	濃度 [ppm]	種類	濃度 [ppm]
チタン酸	50	高塩基 PAC	100	硫酸アルミ	20
チタンケイ酸塩	50		1000		200
活性炭	200		1000		50
ヘマタイト	500		1000		1000
マグネタイト	500		1000		50

※1 吸着材試験結果より条件設定

※2 事前試験により条件設定

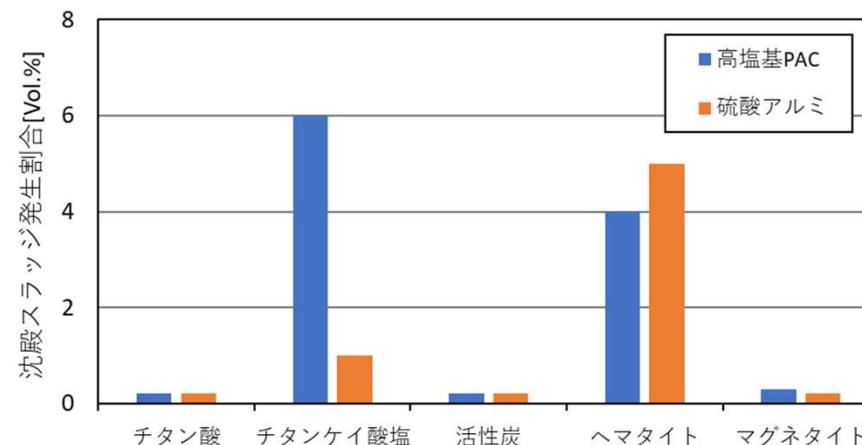


図 凝集剤試験結果 沈殿スラッジ容積

高塩基PACと硫酸アルミで、沈殿スラッジ発生量の観点からは優位な差異は確認されなかった。

7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

▶ 凝集剤試験結果

- 凝集沈降処理後10min以内に沈降する粒子の割合が大きい
- 凝集剤添加により、SS濃度を約10ppmまで低減することが可能と評価された。
- 粉末吸着材の添加量に依存せず、SS濃度1ppm以下まで低減することは困難であった。
※濁度の測定結果をSS濃度に換算したため、10ppm以下の領域は適切に評価できていない可能性がある
- SS成分が少ないほど、凝集剤濃度の調整範囲が狭まる傾向を確認した。
→実機運用において、凝集剤添加量の調整が困難となる。

表 凝集剤試験条件(吸着材/凝集剤)

粉末吸着材※1		凝集剤※2			
種類	濃度 [ppm]	種類	濃度 [ppm]	種類	濃度 [ppm]
チタン酸	50		100		20
チタンケイ酸塩	50		1000		200
活性炭	200	高塩基 PAC	1000	硫酸 アルミ	50
ヘマタイト	500		1000		1000
マグネタイト	500		1000		50

※1 吸着材試験結果より条件設定

※2 事前試験により条件設定

右図にSS濃度推移を示す

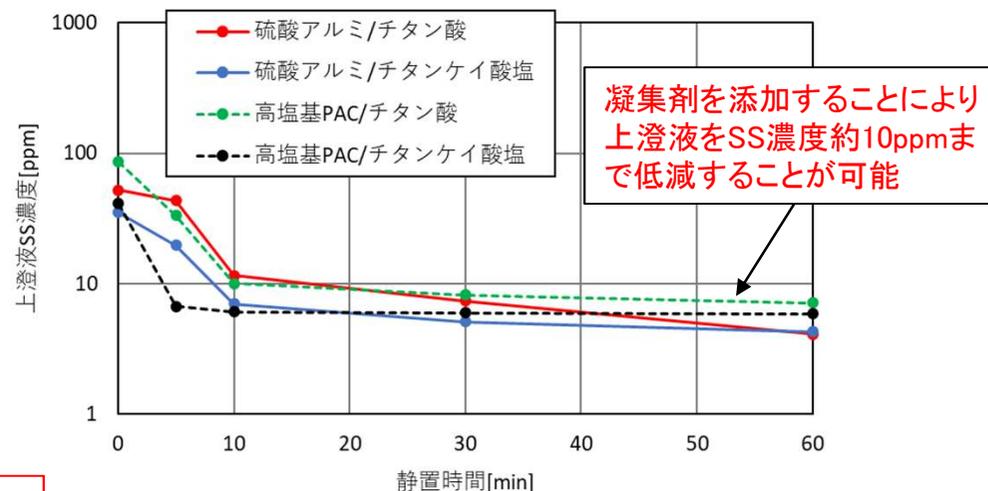


図 凝集剤試験結果 SS濃度推移(チタン酸、チタンケイ酸塩)

高塩基PACと硫酸アルミでは、粒子の沈降挙動に差異は確認されなかった。硫酸アルミは前PJにおいて、ホウ酸水条件等に水質変動した場合においても高い凝集沈降性を確認したため、硫酸アルミを凝集剤として選定した。

7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

➤ 上澄液の既設水処理設備への払出しに関する検討

既設水処理設備の受入要件について、
主に過去のプロセス主建屋(PMB)滞留水の受入れ実績を基に検討した。

※ 主に2018年度PMB滞留水受入実績から設定。
燃料デブリ取り出し作業期間における既設水処理設備の受入要件については今後の検討課題

表 既設水処理設備受入要件の仮設定値※

項目	設定値	試験結果	備考
Cl	<700 ppm	<17 ppm	循環冷却水の各イオン濃度が想定水質条件以下であれば、上澄水は本項目以上の濃度とはならないと想定。
Ca	<50 ppm	-	ただし、Cl濃度については、トーラス室水などの高Cl濃度の滞留水を処理する必要があるため検討が必要。
Mg	<30 ppm	-	
SO ₄	-	データ取得予定	硫酸アルミを使用した場合、硫酸イオンの大部分が上澄液中に残留する。
pH	7~8.5	6.7~7.2	凝集沈降処理の過程で、上澄液のpHはpH7程度に調整するため、本項目を満足すると想定される。
SS濃度	<20 ppm	<10 ppm	凝集沈降処理によりSS濃度は約10ppm以下まで低減可能と想定されるため、SS濃度基準では受入要件を満足すると想定される。 しかし、上澄液に残留する粒子は放射エネルギーが高いため、放射能濃度基準での受入要件を満足するかを別途評価する必要がある。
全α濃度	<7.4E+0 Bq/L	初期濃度に対して 除去率99% (0.45μmろ過後)	既設水処理設備の入口水の最大α濃度より設定。 今後の検討課題。インプット水の全α濃度および、粉末吸着材の除去性能と添加量より評価可能と想定。公衆被ばく量(DF100)や告示濃度の観点でも評価が必要。

凝集沈降処理後の上澄水は、想定される既設水処理設備の処理実績を考慮すると
既設水処理設備へ払出し可能と想定される。

しかし、フィルトレーションなどによる上澄水中の残留粒子の除去が必要な可能性がある。

7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

▶ 添加量が少ない場合の粉末吸着材の固液分離について検討

粉末吸着材添加量は従来の設定値(1000ppm)よりも低減可能である可能性が示唆された。凝集剤はSS量が少ない廃液の処理への適用性が低いため、[前処理としてSS成分の濃縮処理を行うシステムを検討した](#)。

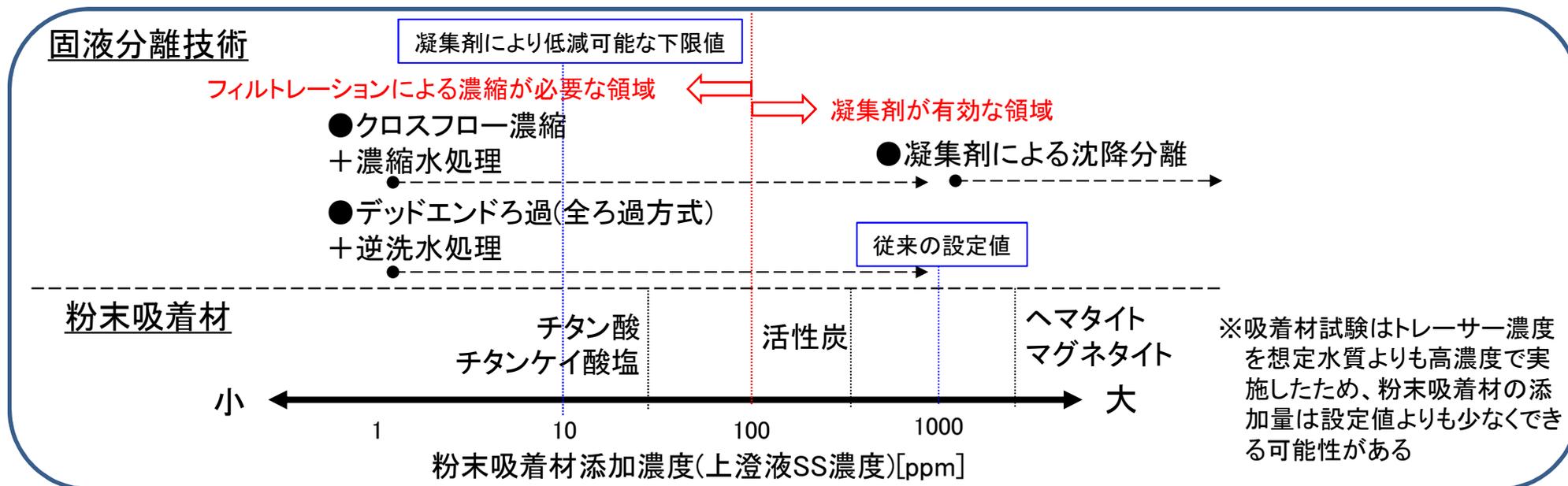
粉末吸着材添加濃度 固液分離技術

数千～数百ppm → 凝集剤による固液分離が有効

数百～数十ppm → 凝集剤により固液分離(必要に応じて濃縮処理)

数十ppm以下 → **濃縮処理+凝集剤**

※濃縮処理はクロスフローろ過やデッドエンドろ過などが有効と想定



濃縮処理によりSS成分を濃縮することにより、廃液量を低減しつつ、凝集剤による固液分離が可能

7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

- 添加量が少ない場合の粉末吸着材の固液分離について検討

RO濃縮水処理への濃縮処理の適用

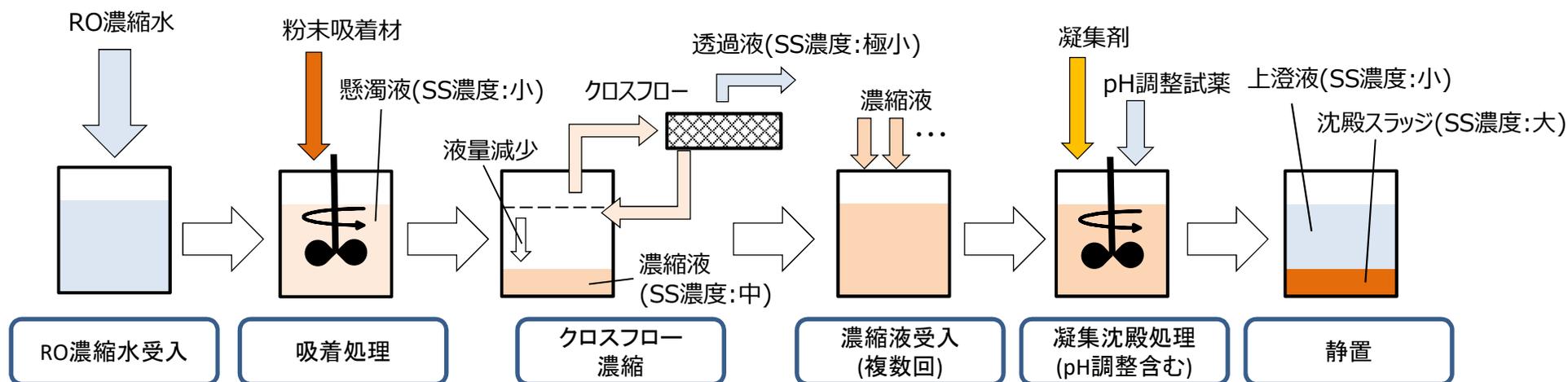
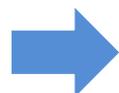


図 クロスフロー濃縮を適用した場合のRO濃縮水処理方法の手順案

粉末吸着材の添加濃度が低濃度(数十ppm以下)の場合、吸着処理後にクロスフローろ過を実施し、水分を分離することにより、液量の低減とSS成分の濃縮(約1000ppm以上)を行う。

その後、濃縮液に対して凝集沈殿処理を実施し、上澄液と沈殿スラッジに分離する。

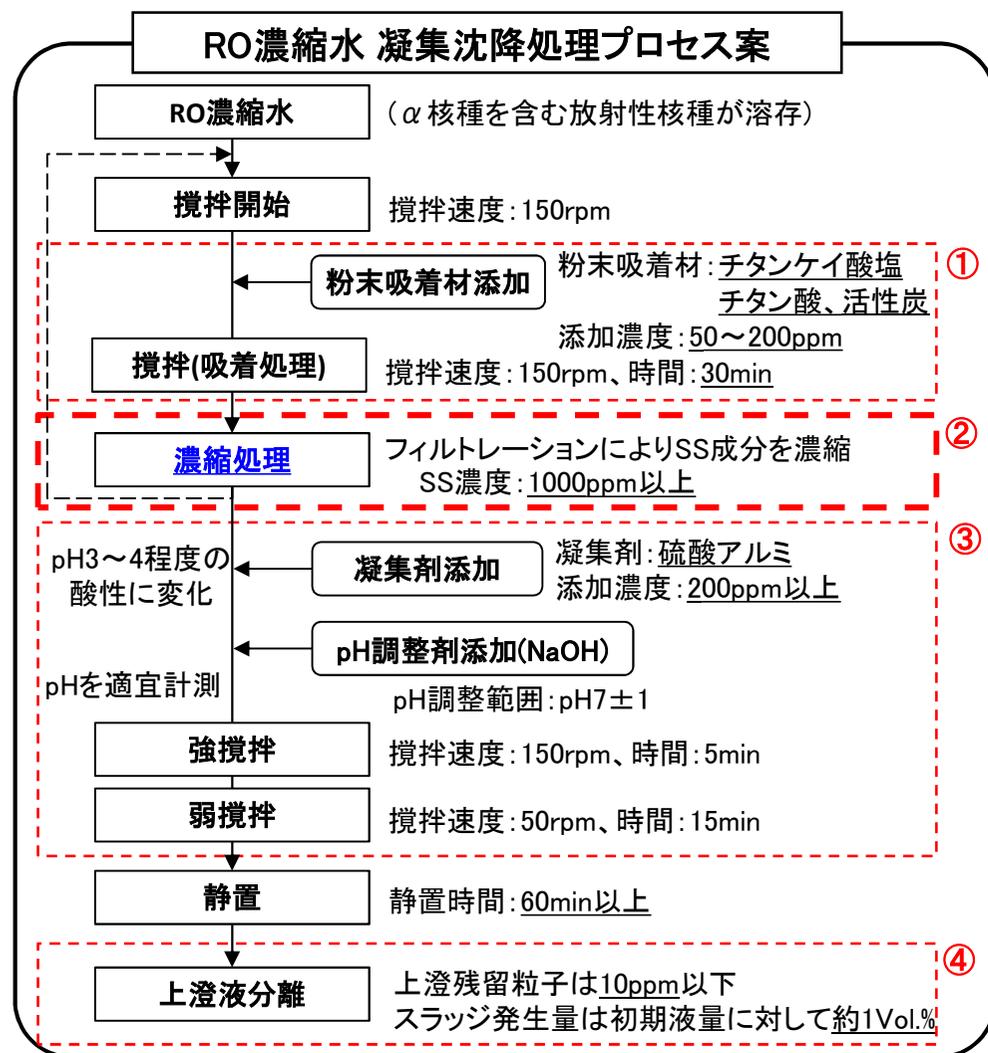
なお、濃縮処理により液量が減少するため、複数回分の濃縮液を一度に凝集沈殿処理することが可能となることを期待できる。そのため、濃縮液を凝集沈殿処理用のタンクへ払出し、ある程度の液量を確保してから処理する。



各濃縮処理を採用したシステムにおけるマスバランス(水量、スラッジ量)を今後評価予定

7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発



(1)吸着処理

粉末吸着材を添加し、一定時間攪拌することにより、溶解性核種を吸着する。

(2)濃縮処理(検討成果を反映し追加)

クロスフローろ過やデッドエンドろ過などにより、粉末吸着材を濃縮する。

※RO濃縮水受入→①→②の工程は繰り返し実施し、濃縮液の液量のある程度確保する。

(3)凝集沈降処理

濃縮液に凝集剤を添加、pH調整試薬により中性領域に調整、一定時間攪拌することにより、粉末吸着材を凝集沈降させる。(RO濃縮水沈殿スラッジ発生)

(4)上澄液と沈殿スラッジの払出し

上澄液: 払出し後に残留粒子をろ過除去。

沈殿スラッジ: ポンプにより抜き出し or 回収容器で払出し。

脱水処理の適用による沈殿スラッジの減容化については、開発項目③「二次廃棄物処理技術の開発」で検討する。

7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

・まとめ

【今年度成果】

- ✓ 吸着材試験を実施し、 α 核種に対する除去性能の高い粉末吸着材を選定した。 α 核種を選択的に除去する場合は活性炭、 α 核種を含む全放射能を除去する場合はチタン酸やチタンケイ酸塩が適用性が高いと評価した。
- ✓ 凝集剤試験を実施し、粉末吸着材を凝集沈降するための凝集剤として硫酸アルミを選定した。また、上澄液や沈殿スラッジの発生量や性状のデータを取得した。
- ✓ 凝集剤による固液分離が有効な水質条件について整理した。凝集剤による固液分離が困難である低SS濃度廃液の処理方法として、濃縮処理を適用したシステムを立案した。
- ✓ 今年度成果を基にRO濃縮水の処理手順を立案した。

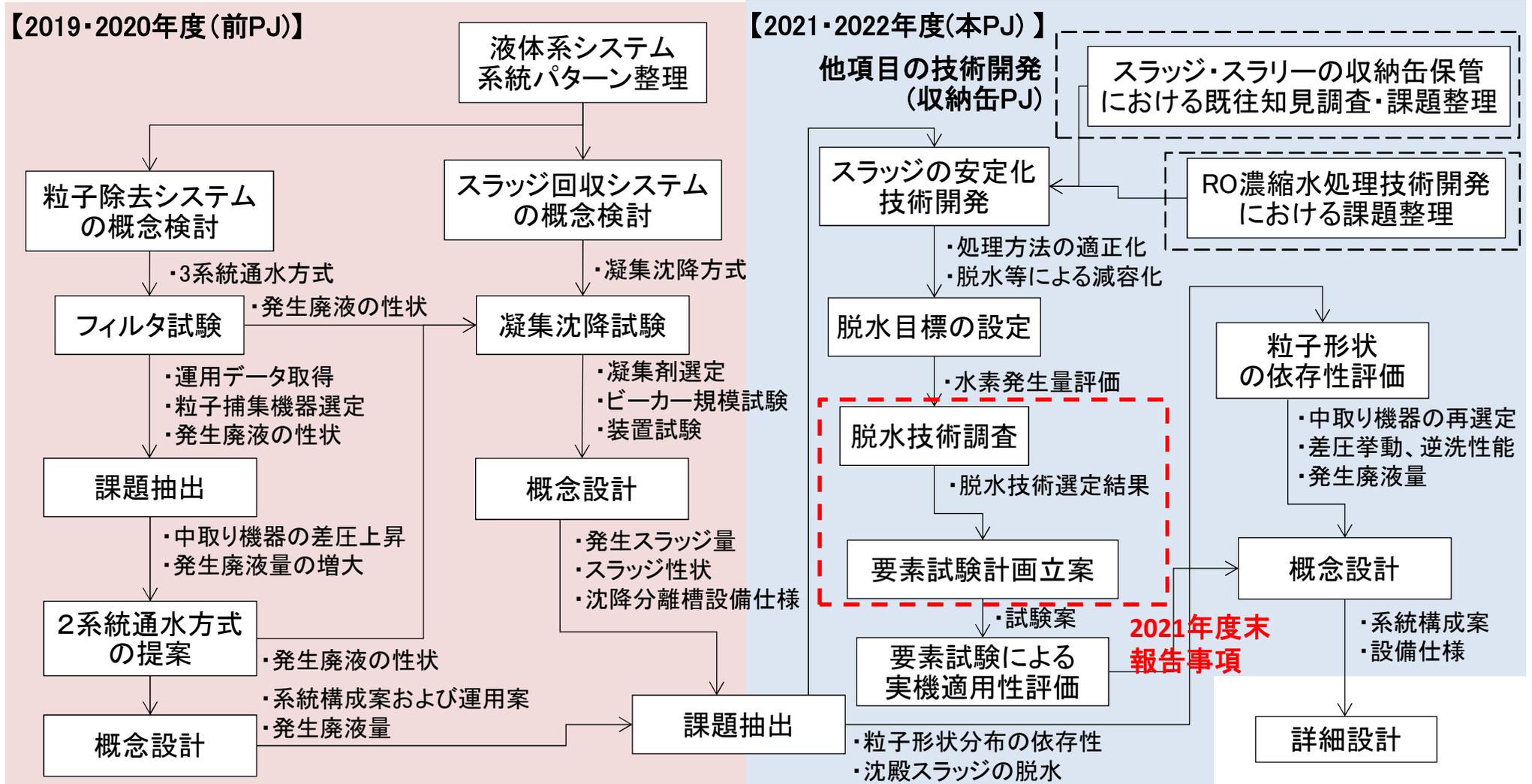
【今後の計画】

- ✓ ビーカー規模のRO濃縮水処理試験および装置試験を実施し、試験データを取得する。
- ✓ 各試験結果を基に、RO濃縮水の処理方法を立案し、同システムの概念システム設計を実施する。

7. 実施内容

③二次廃棄物処理技術の開発

➤ 検討フロー



7. 実施内容

③二次廃棄物処理技術の開発

1) 粒子除去システムから発生する廃液の性状把握

➤ 粒子除去システム系統構成

現時点までの開発成果等を基に、粒子除去システムの系統構成を検討した。

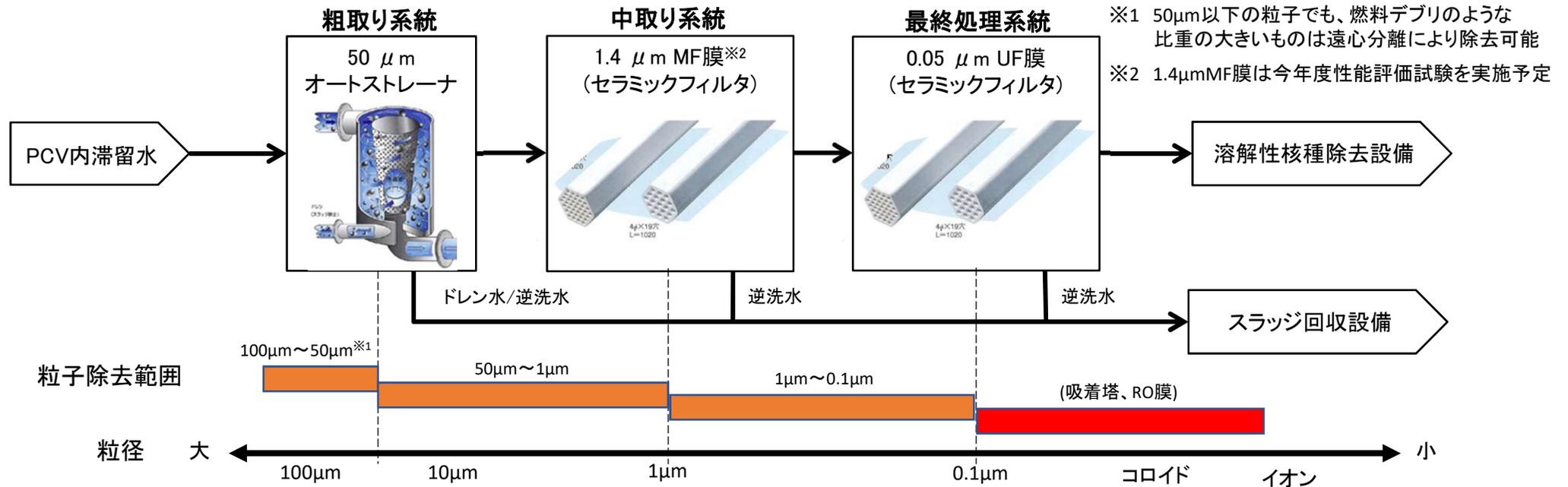


図 粒子除去設備系統構成の概念図

PCV内で行われる燃料デブリの加工作業により被加工物が微粒子化し、概ね100 μ m以下の粒子は液中浮遊し液体システムまで移行すると想定される。

50 μ m以上の粒子は、粗取り系統のオートストレーナにより除去される。また、遠心分離効果が大きく働く、高比重粒子(燃料デブリ、炉心構造物など)も除去される。粗取り系統を通過した小粒子は、中取り系統・最終処理系統のMF膜・UF膜により除去され、システム全体としては0.1 μ mの粒子までを除去する。

捕集粒子はドレン/逆洗により払い出され、廃液はスラッジ回収設備にて処理される。

7. 実施内容

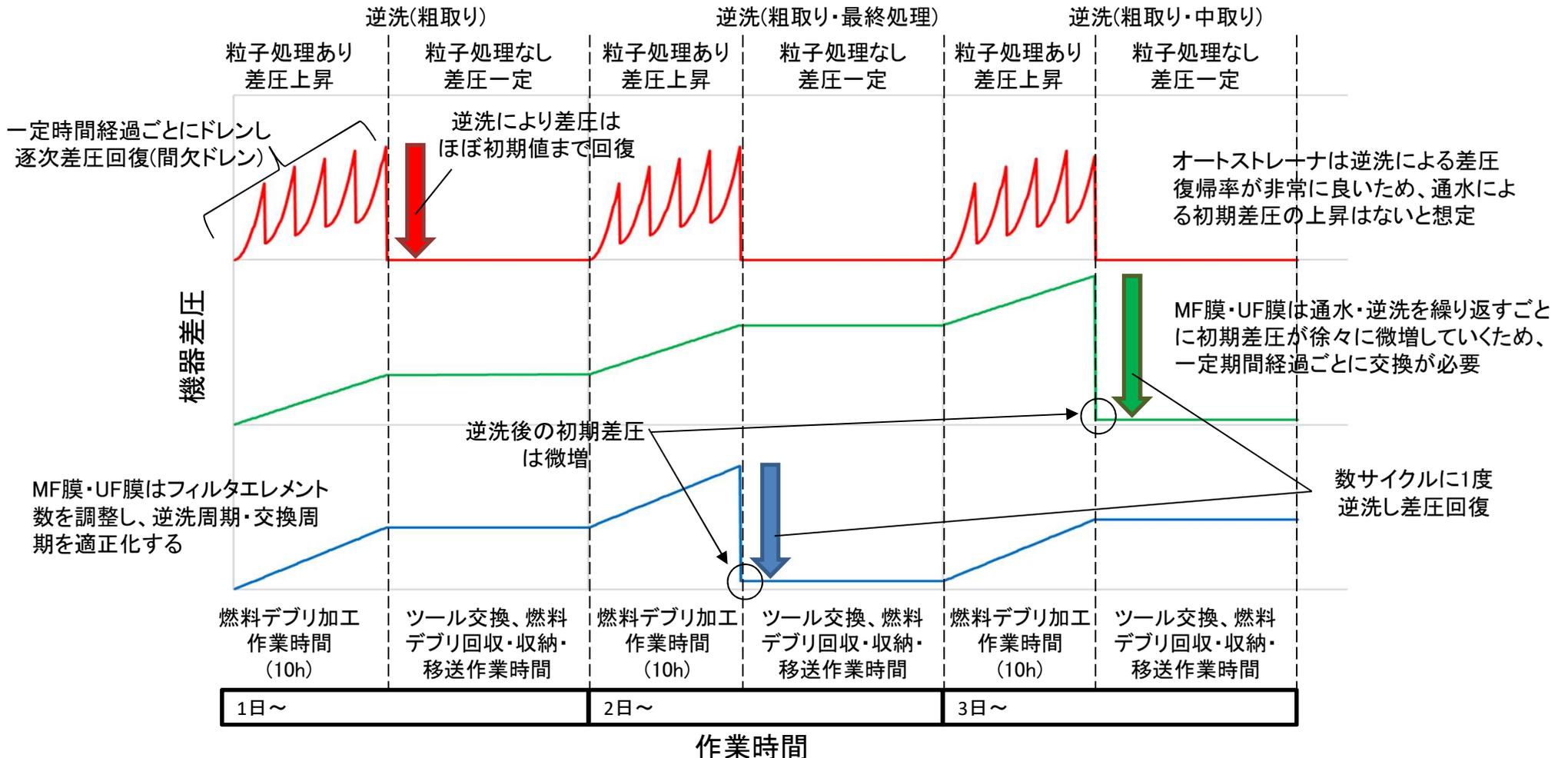
③二次廃棄物処理技術の開発

1) 粒子除去システムから発生する廃液の性状把握

➤ 燃料デブリ取り出し作業期間の通水サイクルの検討

3系統構成(粗取り→中取り→最終処理)の場合

- : 粗取り; 50 μ mオートストレーナ
- : 中取り; 1.4 μ mMF膜
- : 最終処理; 0.05 μ mUF膜



7. 実施内容

③二次廃棄物処理技術の開発

1) 粒子除去システムから発生する廃液の性状把握

➤ MF膜通水試験

【課題】

中取りフィルタとしてオートストレーナ、金属焼結フィルタ、バグフィルタを選定し、フィルタ試験によりその適用性を評価した。しかし、いずれも有効ろ過面積が小さいこと、数 μm 粒子に対して遠心分離効果の寄与が小さいことなどが原因で通水時の機器差圧の上昇が顕著である結果となった。そのため、現時点で適用性の高い中取りフィルタ機器を選定できていない。

【目的】

目開き $1.4\mu\text{m}$ のMF膜(セラミックフィルタ)について、中取りフィルタとしての適用性を評価する。

【実施内容】

$1.4\mu\text{m}$ MF膜を使用したフィルタ通水試験を実施し、運用データを取得する。

1.4 μm MF膜

- 最終処理フィルタとして選定したUF膜は有効ろ過面積が非常に大きく、差圧上昇が緩やかであることを確認
- 同型式のセラミックフィルタで目開き $1.4\mu\text{m}$ までは既製品の取扱いがあり、中取り系統で捕集する範囲の粒子を除去可能であると想定
- 調査の結果、目開き $1.4\mu\text{m}$ 以上のセラミックフィルタは取扱いがないか、ろ過面積の小さいチューブタイプなどしか取扱いがないことを確認

7. 実施内容

③二次廃棄物処理技術の開発

1) 粒子除去システムから発生する廃液の性状把握

➤ 粒子形状依存性評価試験

【課題】

各系統において選定されたフィルタ機器について、フィルタ性能の粒子形状の影響を未評価である。前PJまでに実施したフィルタ試験は全て球状粒子を使用しており、フィルタ性能を非保守的に評価している可能性がある。

【目的】

各系統において選定されたフィルタ機器について、フィルタ性能の粒子形状依存性を評価する。

【実施内容】

球形粒子および非球形粒子を使用したフィルタ通水試験を実施し、比較検討により粒径依存性を評価する。

また、スラッジ回収設備へのインプット条件である逆洗水性状について整理する。

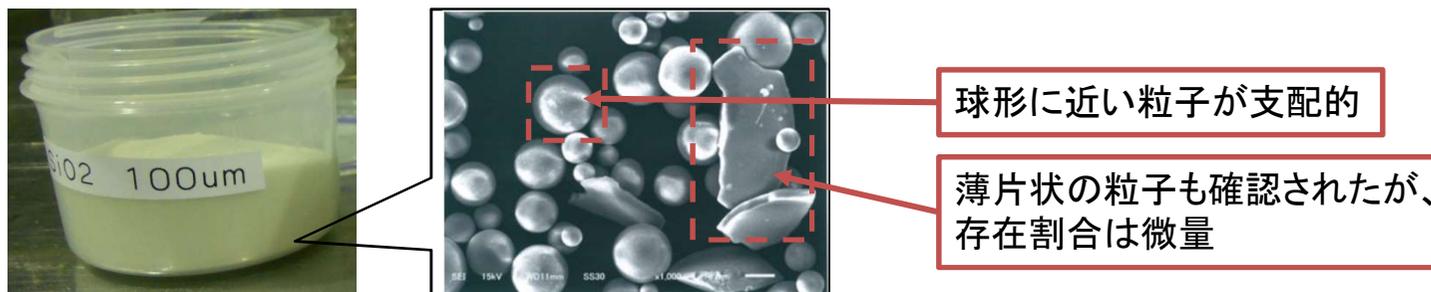


図 前PJのフィルタ試験で使用した粒子

7. 実施内容

③二次廃棄物処理技術の開発

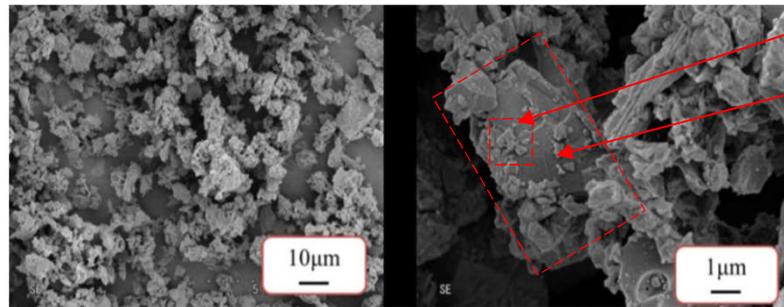
1) 粒子除去システムから発生する廃液の性状把握

➤ フィルタ試験で使用する非球形粒子

機械加工により発生する切削粉をフィルタ通水した場合を想定し、模擬粒子を選定した。

性状把握PJ実施の模擬燃料デブリの機械加工試験※により発生した微粒子

模擬対象



比較的小さい粒子: 1µm>

比較的大きな粒子: 数µm

粒径分布

10～数µmオーダーの大粒子の表面に
1µm未満の微粒子が付着した凝集物を形成

粒子形状

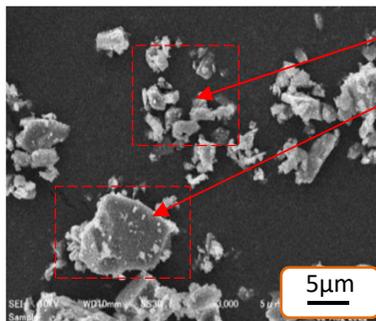
ブロック状の粒子が支配的

図 性状把握PJ実施の燃料デブリ模擬物切断試験
切断後試料 SEM画像(抜粋)

※H30 年度補助事業「燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発」

本試験で使用する非球形粒子

模擬粒子



比較的小さい粒子: 1µm>

比較的大きな粒子: 数µm

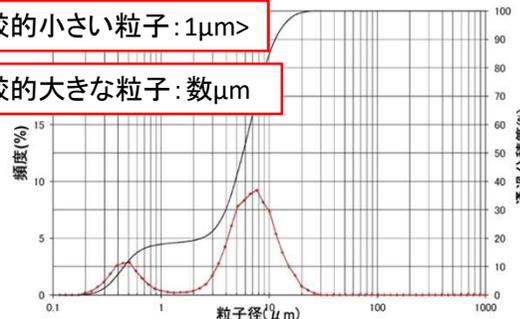


図 模擬粒子 SEM画像

図 模擬粒子 粒径分布

性状把握PJの試験報告を基に、
粒子の粒径分布と形状を模擬する

粒子メーカー取扱いの比較的近い形
状・粒径のケイ砂粒子を使用する

必要に応じて分粒など実施する

7. 実施内容

③二次廃棄物処理技術の開発

1) 粒子除去システムから発生する廃液の性状把握

➤ 通水試験の試験系統

フィルタ機器は前PJまでに選定した各系統の粒子捕集機器を使用する。
中取りフィルタのみは文献調査により適用性が高いと評価された1.4 μm MF膜とする。

表 使用する粒子捕集機器一覧

No.	系統	粒子捕集機器	フィルタメッシュサイズ
1	粗取り	オートストレーナ	50 μm
2	中取り	MF膜(セラミックフィルタ)	1.4 μm
3	最終処理	UF膜(セラミックフィルタ)	0.05 μm

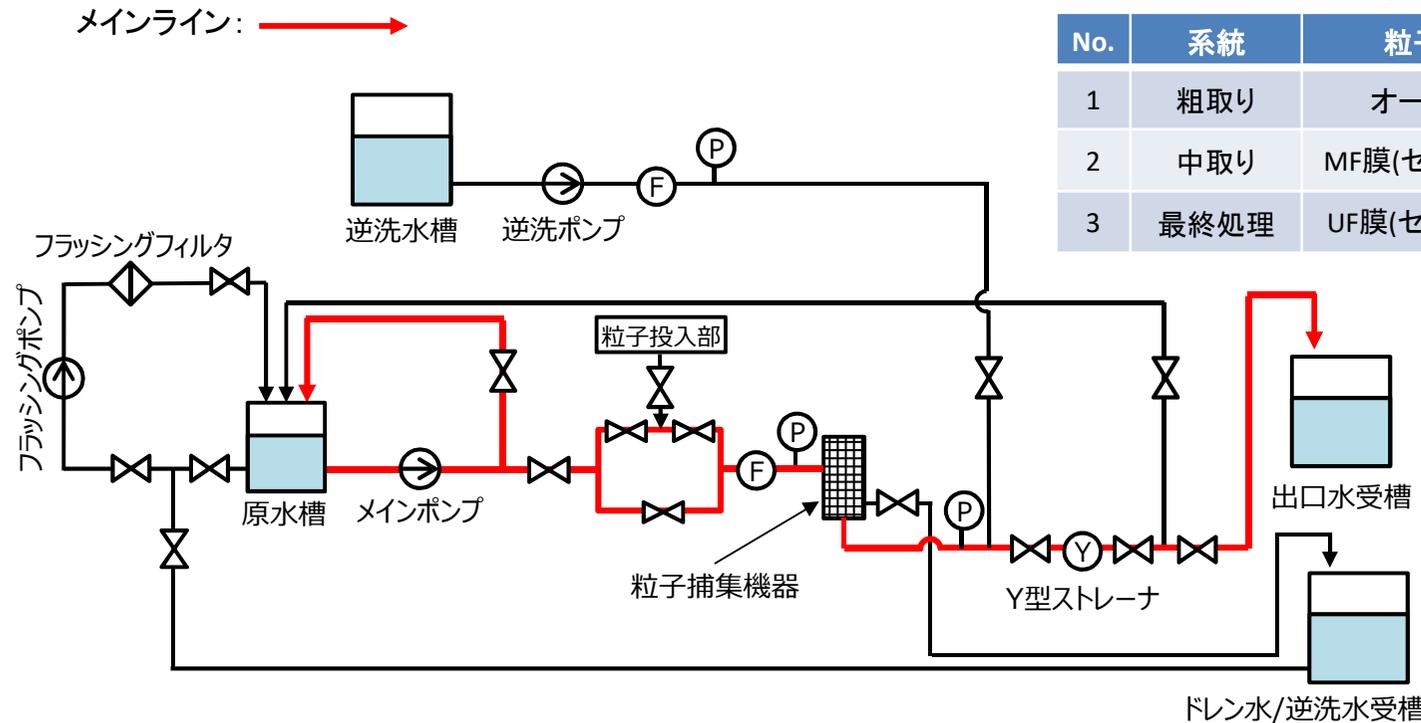


図 フィルタ試験試験系統構成図

表 評価項目

No.	項目
1	粒子捕集率
2	逆洗圧力到達までの通水時間 (差圧上昇傾向)
3	逆洗性能 (差圧回復性能)
4	逆洗水性状



本試験により、各フィルタ性能を評価するとともに、フィルタ廃液の性状データを取得する。

7. 実施内容

③二次廃棄物処理技術の開発

1) 粒子除去システムから発生する廃液の性状把握

➤ フィルタエレメント交換周期

粒子捕集機器の交換周期は下記の通りと想定

粗取り系統機器: 2回/年 → 塩素による材の腐食が律速

中取り系統機器: 今期評価※ → 初期差圧の上昇が律速

最終処理系統機器: 5~8回/年 → 初期差圧の上昇が律速

※最終処理系統機器より目開きが大きいため、より長期間運用可能と想定

➤ フィルタエレメント交換作業

交換作業時のハウジング内の残留粒子による、作業員被ばく量の評価が必要

基本的にはカートリッジ方式を採用し、ハウジングごと交換することを想定。

ハウジングには十分に遮蔽を施し、作業員被ばく防止する。

また、遠隔操作によりエレメントを交換する方式も考えられるが、完全遠隔操作の成立性について検討が必要。

➤ フィルタ廃液・2次廃棄物発生量の検討

2020年度までの試験結果を基に評価した、フィルタの仕様および廃液・2次廃棄物の発生量の概算結果を示す

過去に実施した要素試験結果を基にしたフィルタ性能評価結果まとめ

系統	粒子捕集機器		必要基数	必要エレメント数	定格流量	ろ過精度	除去効率	概略寸法 (1基あたり)	必要エリア寸法 (1基あたり)	交換頻度	2次廃棄物 発生量	ドレン・ 逆洗回数	廃液 発生量
			基/1系統	個	m ³ /h	μm以上	%以上	φ__m×__mH	__mL×__mW	回/year	kg/year	回/day	m ³ /year
粗取り	オートストレーナ	間欠ドレン	1	1	10~30	50	99	φ0.5m×1.0mH	1.4mL×1.4mW	2	11	2.5	167
		常時ドレン	1	1	10~30	50	99	φ0.5m×1.0mH	1.4mL×1.4mW	2	11	常時ドレン	1300
	液体サイクロン		1	1	10	40	80	φ0.4m×1.1mH	1.6mL×1.6mW	-	-	常時ドレン	2000
中取り	MF膜	1.4μm					2022年度試験予定						
最終処理	UF膜	0.1μm	2	33	6.5	0.1	99	φ0.21m×1.3mH	3.0mL×1.6mW	8	314	0.34	11
		0.05μm	3	46	<23	0.05	99	φ0.3m×1.4mH	1.4mL×1.4mW	5	253	0.23	98.6

7. 実施内容

③二次廃棄物処理技術の開発

2) 沈殿スラッジの脱水技術の選定

【課題】

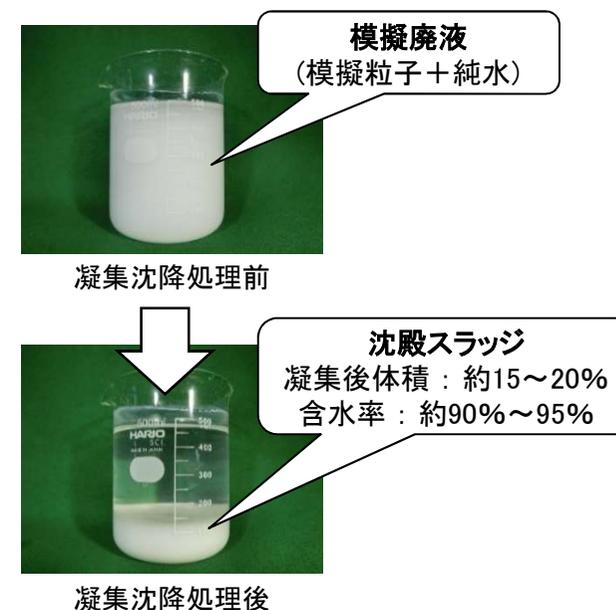
- スラッジ回収設備より発生する沈殿スラッジは、含水率が高いことなどに起因し発生量が大いいため、脱水処理などによる減容化処理が必要である。
- 沈殿スラッジに対して適用可能な脱水技術が未選定であるため、候補技術を選定する必要がある。

【実施内容】

- 沈殿スラッジおよび上澄液の想定性状を整理し、適用可能な脱水処理技術を文献調査などにより選定する。
- 選定された候補技術について、実機適用性を評価するための要素試験計画を立案する。

【目標】

- 沈殿スラッジの脱水処理技術候補を選定する。
- 実機適用性評価のための要素試験案を立案する。



模擬ドレン水・逆洗水凝集沈降試験の様子

7. 実施内容

③二次廃棄物処理技術の開発

2) 沈殿スラッジの脱水技術の選定

【実施内容】 文献調査および要素試験等により、沈殿スラッジに適用可能な脱水技術を選定する。
選定された脱水技術について、要素試験により実機適用性を検討する。

脱水技術の開発対象とする沈殿スラッジは、発生量が膨大であるRO濃縮水処理用の沈降分離槽より発生する沈殿スラッジを主とする。

実施項目

1. 収納缶PJとの調整(取合い条件など)
2. 前PJ成果を基にした、沈殿スラッジの想定性状の整理
3. 沈殿スラッジ性状を基にした水素発生量の評価
4. 脱水目標(脱水後の含水率)の設定
5. 既往脱水技術の調査および適用性の机上評価
6. 実機適用性を評価可能な試験案の立案
7. 実機適用性評価試験の実施

収納缶PJ-安全システム(液体系・気体系)PJ間にて下記を調整

○液体系システム-収納缶保管ラインの取合い条件

○開発成果の共有

※収納缶PJ: 収納、移送、保管時の管理方針

安全システム(液体系・気体系)PJ: 沈殿スラッジの払出し時の性状等

○両PJの今後の開発内容の区分け

7. 実施内容

③二次廃棄物処理技術の開発

2) 沈殿スラッジの脱水技術の選定

【実施内容】 脱水による沈殿スラッジの体積減少について評価した。

沈殿スラッジの想定含水率約90%から、水分を除去した場合の体積減少挙動を評価した。

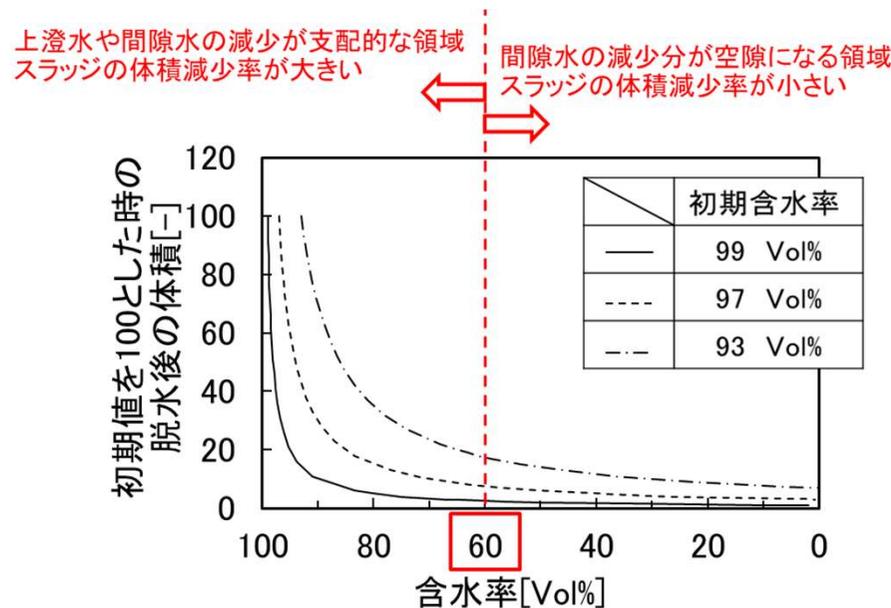


図 スラッジの含水率と体積の関係



沈殿スラッジの外観

含水率60%以下は水分が占有していた空間が空隙となるため、スラッジの体積減少としては寄与しにくい

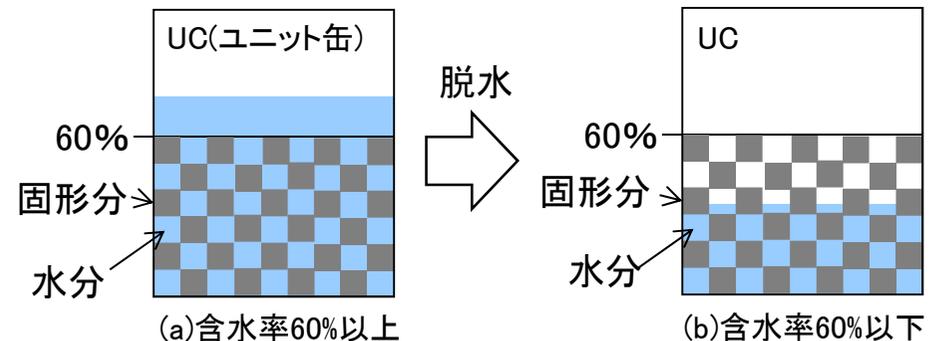


図 スラッジ体積の減少挙動のイメージ

初期含水率が90Vol%以上の場合、含水率60Vol%までの脱水処理で体積は20Vol%近くまで減容可能。含水率60Vol%以下の領域では体積減少が頭打ちとなるため、脱水による減容化は効果が小さい。

➡ 脱水処理後の含水率の目標値を60Vol%と仮設定※し、脱水処理技術を検討する。

※スラッジ含有率40Vol%

7. 実施内容

③二次廃棄物処理技術の開発

2) 沈殿スラッジの脱水技術の選定

【実施内容】 移送期間における沈殿スラッジの水素発生量について評価した。

収納缶PJ設定の収納、移送、保管条件を基に水素発生量を評価した。

⇒結果は次ページに記載

■ 収納、移送、保管条件

- (1) 燃料デブリ: 1F1の最高燃焼度のUO₂ 100%
- (2) 廃棄物充填率: 燃料デブリ 30Vol%
- (3) 移送時
 - ・移送期間: 1週間
 - ・ガスのベント(収納缶のカプラを開ける)
 - Case1 収納缶: ベント、移送容器: 密封
 - Case2 収納缶: 密閉、移送容器: 密封
- (4) 保管時
 - ・ガスのベント 収納缶: ベント

■ 沈殿スラッジの想定性状

- (a) フィルタ廃液処理用の沈降分離槽より発生する沈殿スラッジ: 燃料デブリ含有率100%
- (b) RO濃縮水処理用の沈降分離槽より発生する沈殿スラッジ: 燃料デブリ含有率0.1%※

※粒子除去設備、溶解性核種除去設備での核種除去率(DF100)、RO膜での濃縮率の想定値(2~4倍)等から設定

7. 実施内容

③二次廃棄物処理技術の開発

2) 沈殿スラッジの脱水技術の選定

【実施内容】 移送期間における沈殿スラッジの水素発生量について評価した。

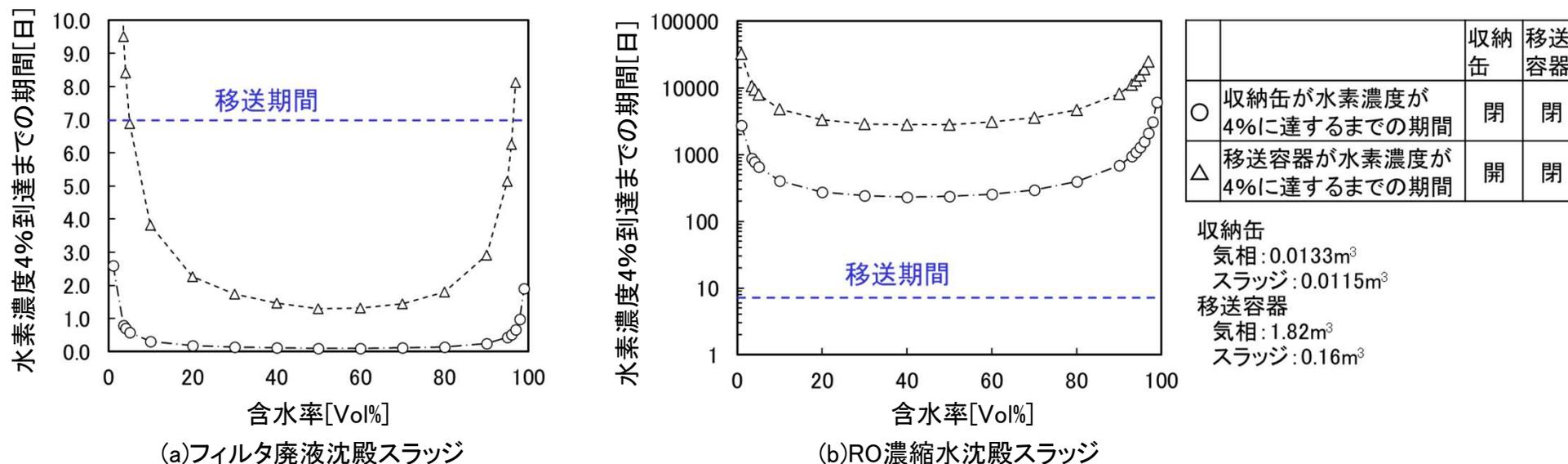
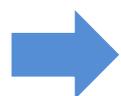


図 スラッジの含水率と水素発生量の評価

いずれも、水分量と燃料デブリ含有量が40～60%程度の領域が水素発生量が最も大きくなることを確認。フィルタ廃液沈殿スラッジは、初期含水率約90%の状態から脱水すると、数%以下にしない限り水素爆発の危険性を上昇させる懸念がある。

RO濃縮水沈殿スラッジは、含水率に依らず移送期間中に水素濃度が爆発限界に達する可能性は低い。



RO濃縮水沈殿スラッジは長期間保管しても、水素発生量が爆発限界に達しないため、水素発生量の観点では、脱水処理の必要性が低い。

7. 実施内容

③二次廃棄物処理技術の開発

2) 沈殿スラッジの脱水技術の選定

【実施内容】 海外原子力施設のスラッジ回収処理技術として、実績を有する技術を選定した。

表 海外原子力サイトにおけるスラッジ脱水技術調査結果

No.	処理方法	メリット	デメリット	事例・既製品
1	MF、UF膜(DE)ろ過	DF高、安価。	逆洗と逆洗水処理が必要。	-
2	クロスフロー(CF)ろ過	放射性コロイド除去に好適。	ファウリングによる目詰まり。濃縮水処理が必要。	最近のPWR液体廃棄物処理で利用。300GPMで処理できる装置有
3	RO濃縮	CFろ過水の濃縮に好適。	ファウリングによる目詰まり。	最近のPWR液体廃棄物処理で利用。
4	エバポレーター	DF高。	スケール処理要、設備コスト高。	-
5	カートリッジフィルタ	省スペース、安価。	廃棄物収納効率低。	大容量を処理でき、遮蔽機能付きのSCF(Solids Collection Filter)を、S/Pプールスラッジ除去等で利用。
6	減圧・加熱脱水(In-Drum dryer)	廃棄物を85-95%低減可能。	処理速度は乾燥レベルに依存。	モバイル装置

➡ 沈殿スラッジの脱水技術として、目標値である含水率60%まで脱水処理可能と期待されるカートリッジフィルタと減圧、加熱脱水を選定する。

➡ その他の候補技術については、技術ごとに適用性が高いと想定される濃縮処理技術や2次核種除去技術としての適用性を検討する。

7. 実施内容

③二次廃棄物処理技術の開発

2) 沈殿スラッジの脱水技術の選定

【実施内容】 海外原子力施設のスラッジ回収処理技術として、実績を有する技術を選定した。

事故炉、兵器レガシーでのスラッジ回収では、スラッジ含有量に応じて使用技術が選定されている。

※英国: Atomic Weapons Establishment (AWE)、米国: TMI、Hanford Siteなど

表 スラッジ含有率ごとに適用される脱水技術の事例調査

No.	スラッジ量	対象例	スラッジ除去、脱水、乾燥方法
1	極少量	SNFプール水	カートリッジフィルターろ過
2	極少量	放射性廃液	カートリッジフィルターろ過 + エバポレーター、RO濃縮
3	少量(サブ%)	再処理時スラッジ、 saltcake	クロスフローフィルターろ過
4	中量(数%)	長期腐食した SNFプール	フィルターを介した脱水
5	大量(数十%)	研究炉廃棄物 No.2~4の濃縮物	(そのまま固化)

スラッジ含有量が少ない場合、カートリッジフィルタによるろ過を採用している事例が多い。スラッジ含有量がやや少ない場合、クロスフローろ過を採用し数%まで濃縮している。しかし、数十%までの濃縮は困難。

スラッジ含有量が大きい場合の処理は、脱水処理ではなく、放射能レベルや最終処分形式に応じて、セメント固化やガラス固化などの固化処理が採用されている。処理・処分方法が未定の場合は、水中保管などで長期保管されている。

海外サイトの事例は、クロスフロー濃縮や乾燥処理などでスラッジ含有量を大きくし、その後固化処理している事例が多い。

7. 実施内容

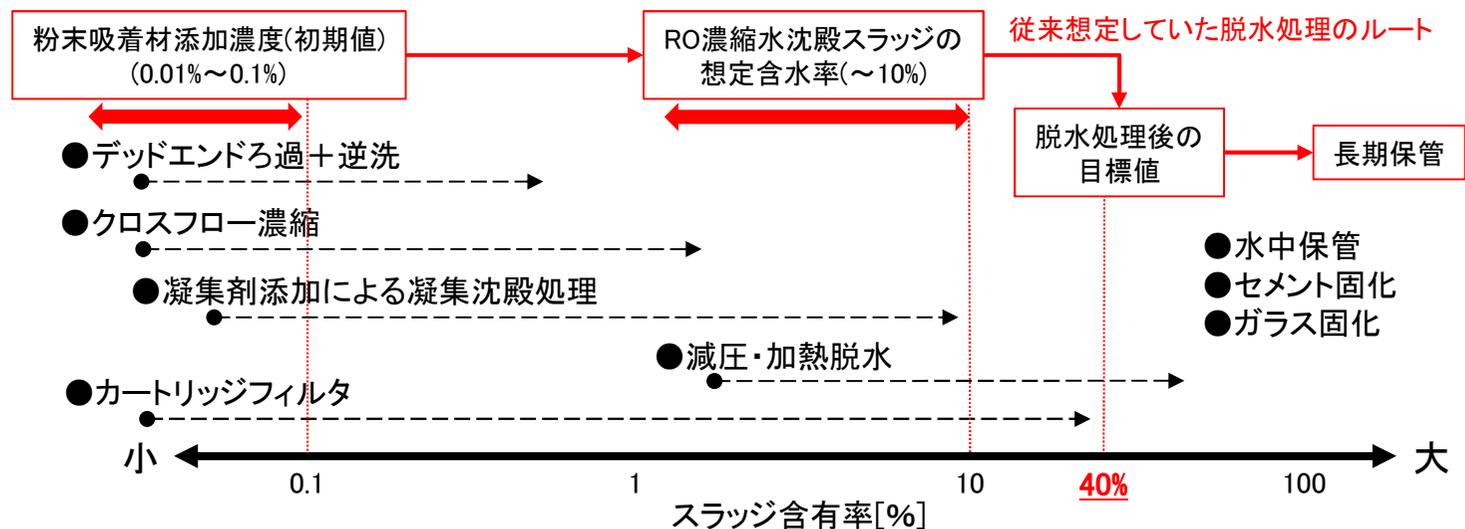
③二次廃棄物処理技術の開発

2) 沈殿スラッジの脱水技術の選定

➤ RO濃縮水の処理システムの検討

事例調査の結果、各スラッジ含有率の領域に応じた適切な脱水方法を採用し、目標とするスラッジ含有率まで濃縮している事例が多い。

RO濃縮水沈殿スラッジ脱水技術の選定



RO濃縮水の処理プロセスとして、下記2案を検討することとした。

案1: ①凝集沈殿処理 → ②カートリッジフィルタろ過 → ③長期保管

案2: ①凝集沈殿処理 → ②減圧・加熱脱水 → ③長期保管

※案2については、減圧・加熱脱水設備にて大容量の処理が困難であることから、前処理として濃縮処理(クロスフロー等)による液量低減を図るシステムについても検討した。

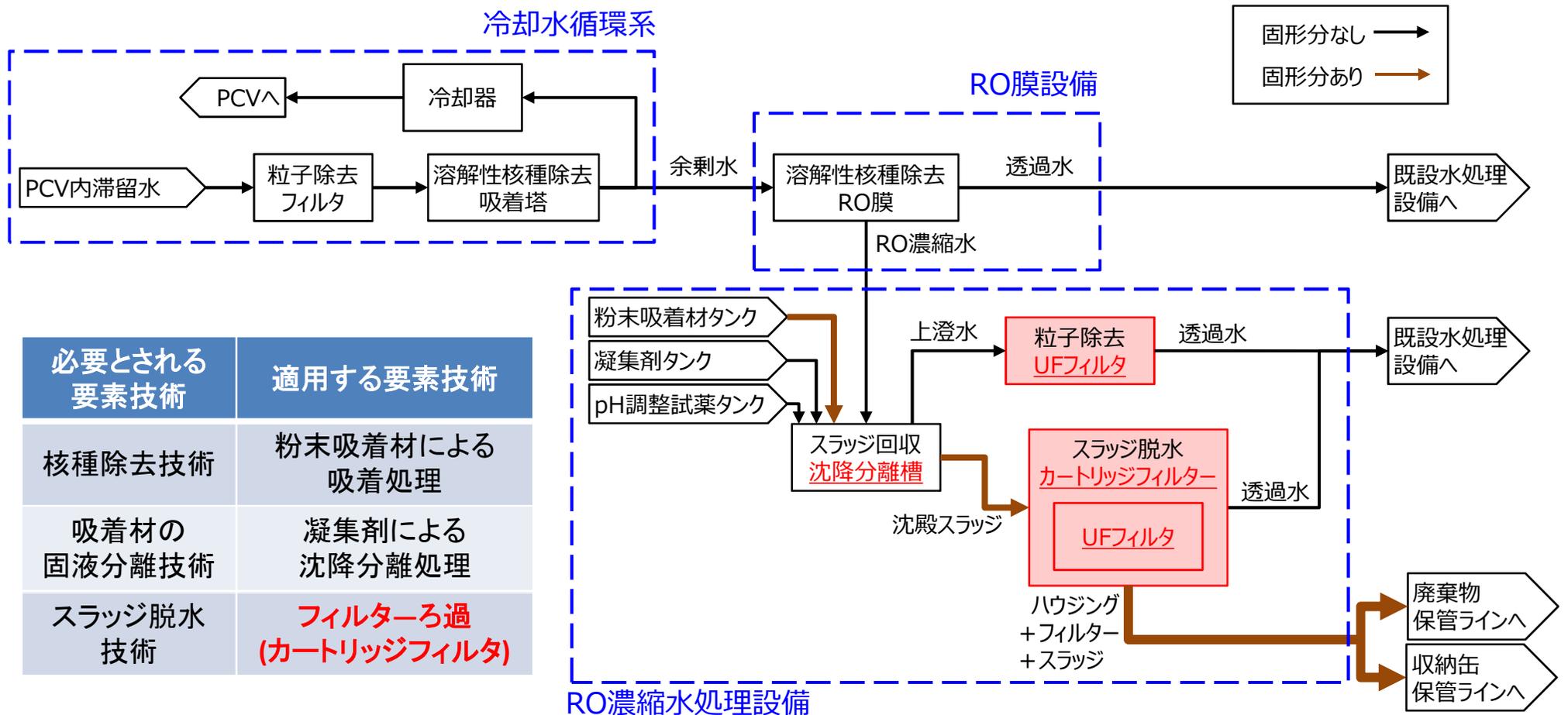
7. 実施内容

③二次廃棄物処理技術の開発

2) 沈殿スラッジの脱水技術の選定

➤ RO濃縮水の処理システムの検討

案1: ①凝集沈殿処理 → ②カートリッジフィルタろ過 → ③長期保管



必要とされる要素技術	適用する要素技術
核種除去技術	粉末吸着材による吸着処理
吸着材の固液分離技術	凝集剤による沈降分離処理
スラッジ脱水技術	フィルターろ過 (カートリッジフィルタ)

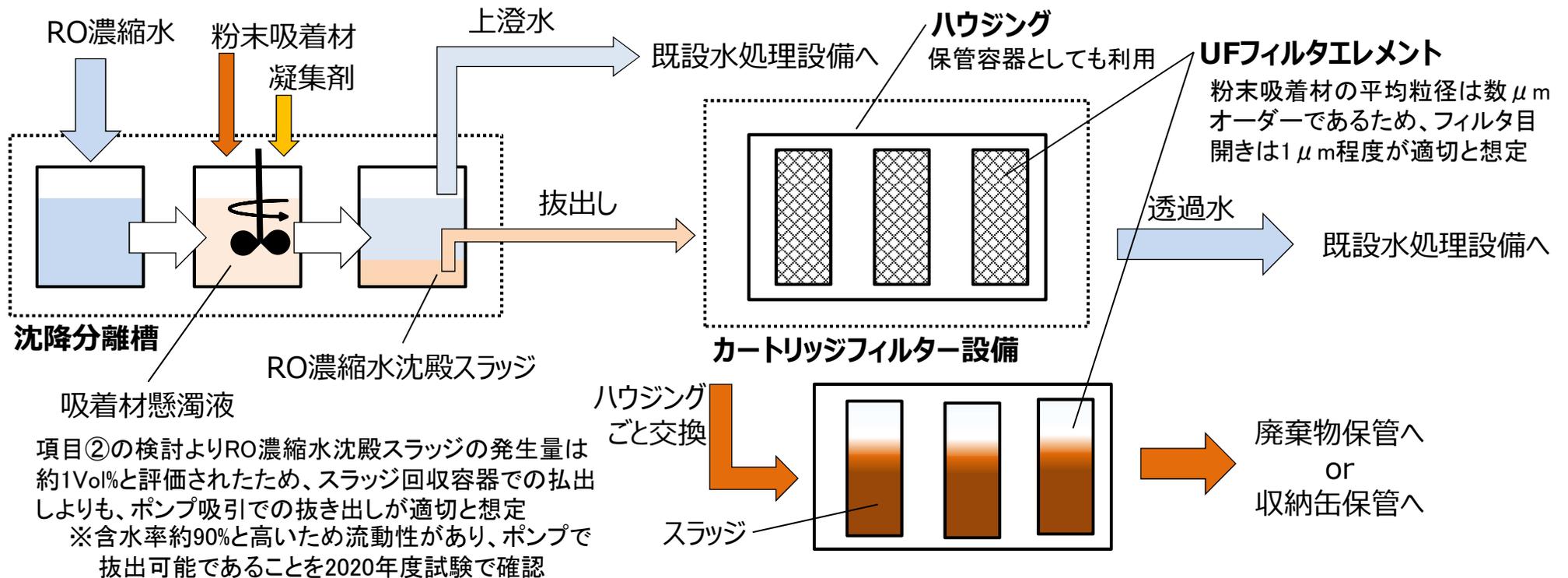
7. 実施内容

③二次廃棄物処理技術の開発

2) 沈殿スラッジの脱水技術の選定

➤ RO濃縮水の処理システムの検討

案1: ①凝集沈殿処理 → ②カートリッジフィルタろ過 → ③長期保管



カートリッジフィルタは構造的に、ハウジングをモジュールとして交換可能なように設計することが可能である。

ハウジングを保管容器として扱うことで、そのまま長期保管が可能となる。

エレメントの取り出しが不要であるため、ハウジングに遮蔽機能を持たせれば作業員被ばくが抑えられる。

また、エレメント交換よりも操作が簡便であるため、遠隔操作での作業も期待できる。

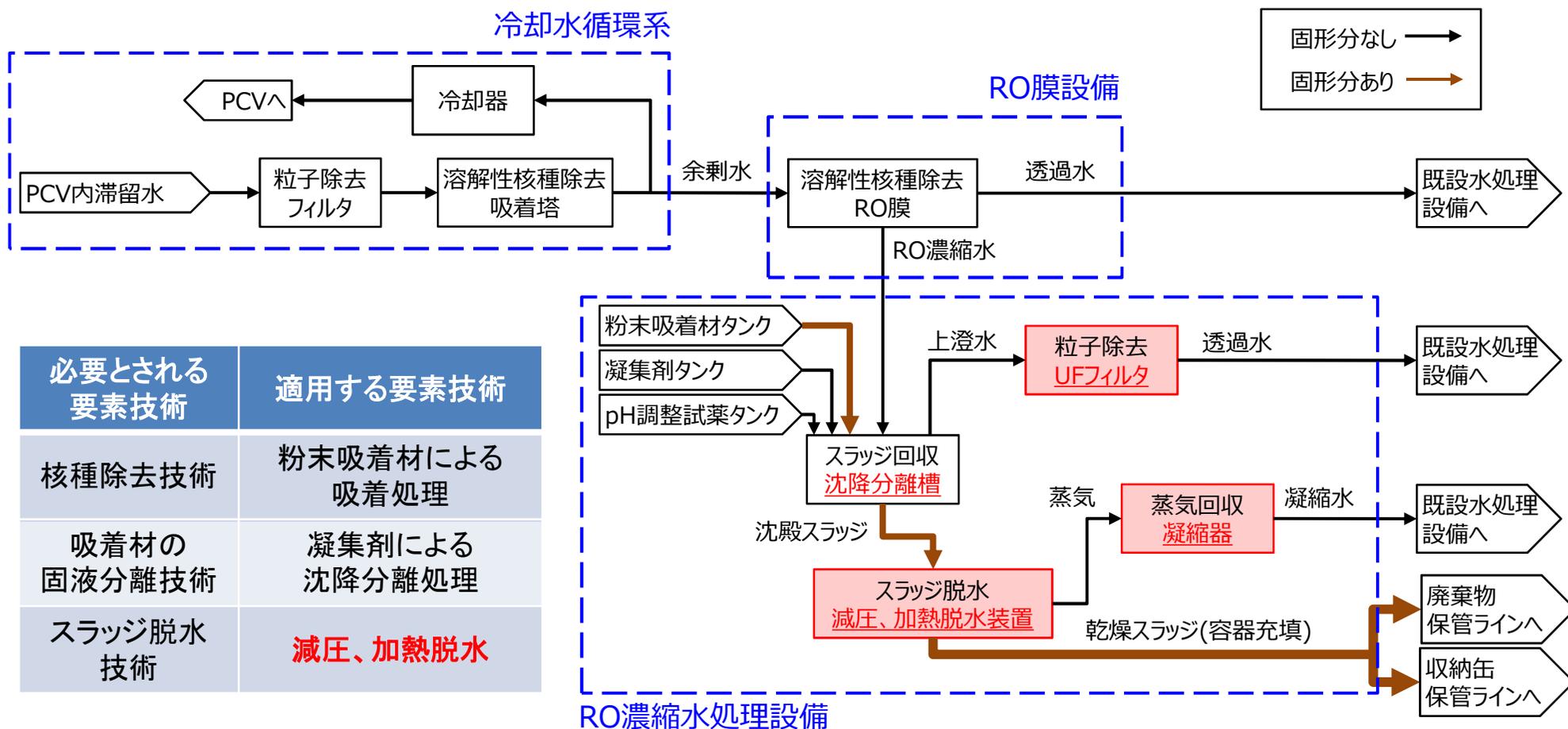
7. 実施内容

③二次廃棄物処理技術の開発

2) 沈殿スラッジの脱水技術の選定

➤ RO濃縮水の処理システムの検討

案2: ①凝集沈殿処理 → ②減圧・加熱脱水 → ③長期保管



必要とされる要素技術	適用する要素技術
核種除去技術	粉末吸着材による吸着処理
吸着材の固液分離技術	凝集剤による沈降分離処理
スラッジ脱水技術	減圧、加熱脱水

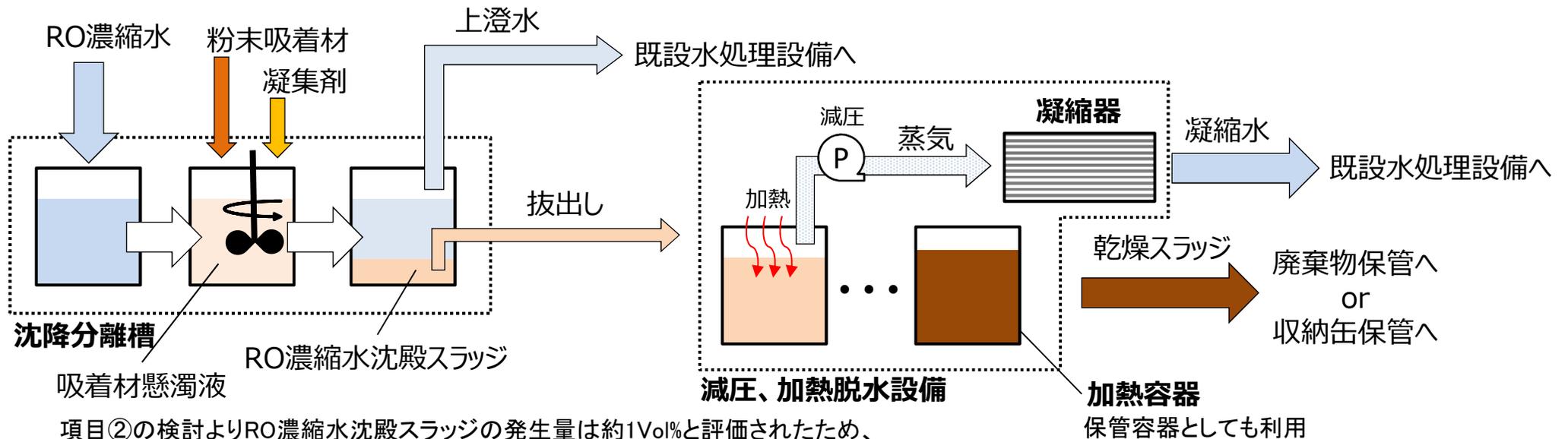
7. 実施内容

③二次廃棄物処理技術の開発

2) 沈殿スラッジの脱水技術の選定

➤ RO濃縮水の処理システムの検討

案2: ①凝集沈殿処理 → ②減圧・加熱脱水 → ③長期保管



項目②の検討よりRO濃縮水沈殿スラッジの発生量は約1Vol%と評価されたため、スラッジ回収容器での払出しよりも、ポンプ吸引での抜き出しが適切と想定

※含水率約90%と高いため流動性があり、ポンプで抽出可能であることを2020年度試験で確認

RO濃縮水沈殿スラッジは、脱水処理用の容器へ移送し、減圧、加熱により水分を蒸発させる。

発生した蒸気は凝縮器で回収、凝縮され、既設水処理設備へ払い出される。

容器側には乾燥スラッジが残るが、減容化されたことによる容器内のデッドスペースが大きいと想定される。

そのため、沈殿スラッジ受入→脱水処理→乾燥スラッジの残留のサイクルを繰り返し、容器内の乾燥スラッジの充填率を上げ、ある程度まで充填されたら容器ごと払出し、長期保管する。容器に遮蔽機能を持たせることにより、作業員被ばくを抑制する。

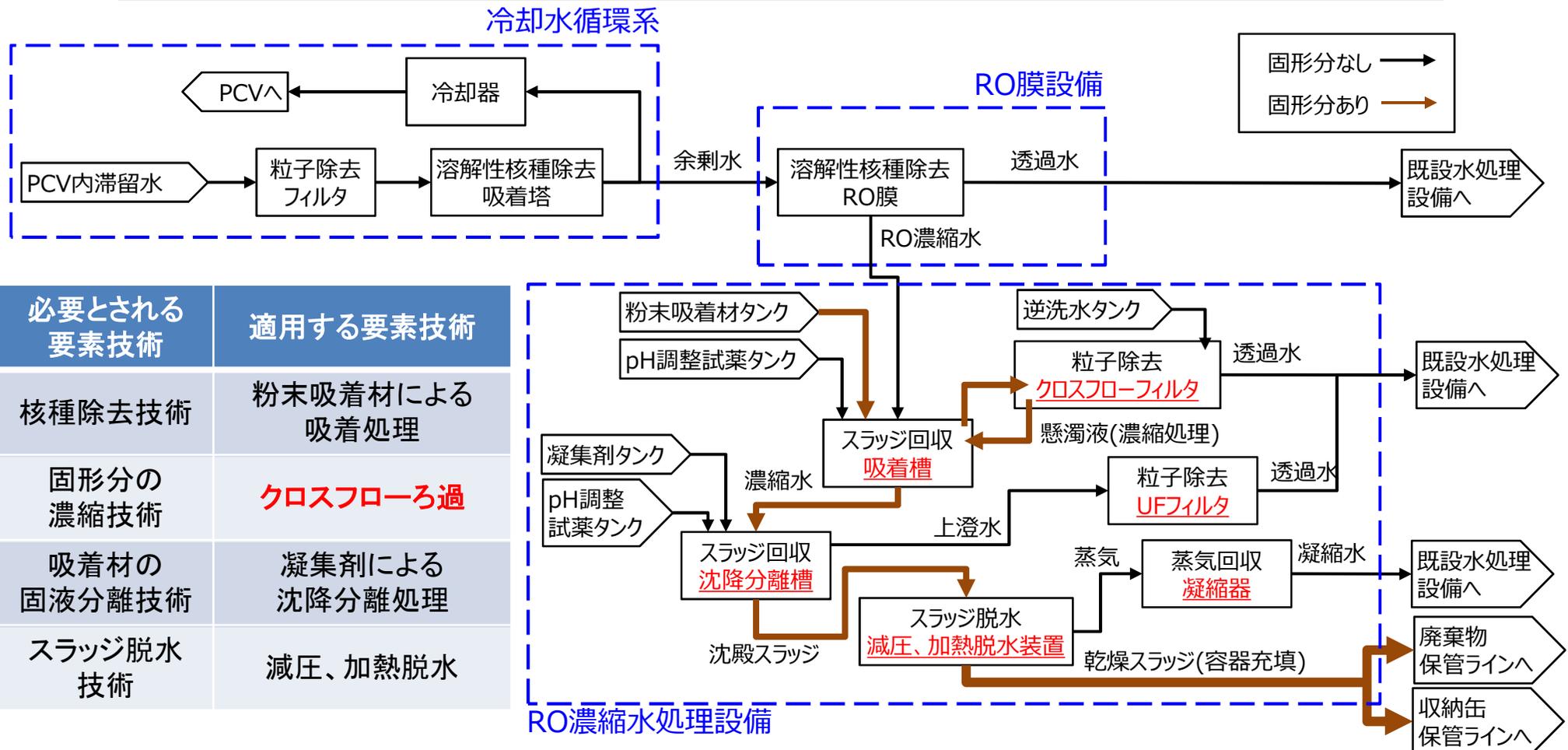
7. 実施内容

③二次廃棄物処理技術の開発

2) 沈殿スラッジの脱水技術の選定

➤ RO濃縮水の処理システムの検討(クロスフロー濃縮を採用する場合)

①クロスフロー濃縮 → ②凝集沈殿処理 → ③減圧、加熱脱水 → ④長期保管



7. 実施内容

③二次廃棄物処理技術の開発

2) 沈殿スラッジの脱水技術の選定

➤ スラッジ脱水技術の要素試験に関する検討

文献調査の結果選定された候補技術について、要素試験により適用性を検証する。

スラッジ脱水技術	考え方	要素試験での確認事項	目標値60%までの脱水可否	要素試験要否
カートリッジフィルタ	スラッジ性状(粒径分布、含水率等)に応じて、適切なフィルタエレメント(目開き、ろ過面積)やろ過条件など選定する必要がある	・ろ過方法や条件の選定 ・沈殿スラッジ性状に対する脱水性能の依存性	○	○
減圧、加熱脱水	スラッジ性状(粒径分布、粒子性状)に大きく依存せず、目標値まで脱水処理可能と想定	—	○	×
(固化処理)	固化処理はスラッジ系廃棄物の安定化という観点で有効と考えられるが、1F廃棄物の最終処分概念は現在検討中である。固化処理は埋設体要件に応じて実施することが望ましいため、本開発では検討せず、脱水処理後に長期保管することを前提とする。	—	—	—



カートリッジフィルタについて要素試験を実施し、運用データを取得する。

※減圧、加熱脱水を用いたシステムについても、文献データ等を参考に検討する

➤ 小規模試験(0.1-1L規模を想定)

脱水処理後の沈殿スラッジ含水率が目標値60Vol.%を満たし、かつ、発生量が後段設備への払出しが可能な水準となるろ過方法を選定する。

RO濃縮水沈殿スラッジの模擬物を使用し、真空ろ過試験および加圧ろ過試験を実施する。平均ケーキ抵抗、潤乾質量比などを取得し、処理量や脱水効果の要求を満足可能かを評価する。(試験内容検討中)

7. 実施内容

③二次廃棄物処理技術の開発

・まとめ

1) 粒子除去システムから発生する廃液の性状把握

【今年度成果】

- ✓ 中取りフィルタとして1.4 μ m MF膜を選定した。各系統のフィルタ機器について、粒子形状依存性を評価するための非球形粒子を選定した。各フィルタ性能を評価するためのフィルタ試験の試験方法を立案した。

【今後の予定】

- ✓ フィルタ通水試験(いずれも2022年度予定)を実施し、1.4 μ m MF膜(中取り機器)の適用性、各フィルタ機器の粒子形状依存性を評価する。

2) 沈殿スラッジの脱水技術の選定

【今年度成果】

- ✓ 水素発生量や減容化の観点から、要求される脱水性能を検討し、スラッジ脱水目標を含水率60Vol.%と仮設定した。
- ✓ 文献調査により、沈殿スラッジに適用可能な脱水処理方法として、カートリッジフィルタと減圧、加熱脱水を選定した。

【今後の予定】

- ✓ カートリッジフィルタの適用性検討のための要素試験を立案・実施する。
- ✓ 文献調査により選定した候補技術(カートリッジフィルタ、減圧、加熱脱水)を使用したスラッジ脱水処理システムの検討を実施する。

8. 実施目的を達成するための具体的目標

(1)液体系・気体系システム	
①溶解性 α 核種除去技術の開発 ・実液の使用を想定した溶解性 α 核種除去試験の検討	溶解性 α 核種除去設備の有効性及び成立性を検証するため、実液の使用を想定した試験方法、試験装置および試験計画について具体化されていること。 (終了時目標TRL:レベル3)
・燃料デブリ取り出し作業時を想定した要素試験	溶解性 α 核種除去設備について、燃料デブリ取り出し作業時を想定した環境での α 核種吸着性能データを取得し、候補吸着材が選定されていること。その際、水質調整方針の設定がなされていること。 (終了時目標TRL:レベル4)
②RO濃縮水の処理技術の開発 ・吸着材および凝縮剤の選定	RO濃縮水処理設備について、粉末吸着材の核種除去性能および凝集剤の凝集沈降性能が評価され、粉末吸着材および凝集剤が選定されていること。 (終了時目標TRL:レベル4)
・実機適用性の検討	RO濃縮水処理設備について、沈降分離槽を用いた試験から処理方式および設備の概念設計が実施されていること。 (終了時目標TRL:レベル4)
③二次廃棄物処理技術の開発 ・前処理技術の調査	凝集沈降槽より発生するスラッジについて、安定化処理技術候補が選定されていること。その際、上澄水など廃液の前処理技術についても選定されていること。 (終了時目標TRL:レベル3)
・実機適用性の検討	前処理技術について、要素試験結果などから実機適用性の検証がなされていること。また、前処理設備の概念設計が確立されていること。 (終了時目標TRL:レベル4)

※TRL:技術成熟度

以上

廃炉・汚染水対策事業費補助金
「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)」

2021年度実施分成果

(2)臨界管理技術

2022年8月

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID)

目次

- 1 補助事業の目的と目標
- 2 補助事業の概要
- 3 前年度までに実施した事業の実績と残された課題
- 4 インプットアウトプット
- 5 実施スケジュール
- 6 実施体制
- 7 実施内容
 - 7.1 現場運用手順の開発
 - 7.1.1 臨界近接監視の運用手順
 - 7.1.2 中性子検出器の未臨界度測定への適用性確認
 - 7.1.3 中性子吸収材の運用手順
 - 7.2 固化型吸収材技術(水ガラス)の開発
- 8 実施目的を達成するための具体的目標

1. 「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**)」の目的と目標 No.2

【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**)の目的】

東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所(1F)では、核燃料が炉内構造物とともに溶融し、燃料デブリとして原子炉圧力容器(RPV)内及び原子炉格納容器(PCV)内に存在していると考えられる。

RPV及びPCV内部の燃料デブリは、現在未臨界状態にあると考えられるが、事故によって原子炉建屋(R/B)、RPV、PCV等が損傷している等、プラント自体が当初設計とは異なる不安定な状態に置かれているため、燃料デブリを取り出して燃料デブリの未臨界状態を維持し、放射性物質の拡散を防止して安定な状態にする必要がある。

上記の背景のもと、本事業は、「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」(以降、中長期ロードマップ)に基づき、東京電力ホールディングス(株)(東京電力)が実施するエンジニアリングやプロジェクト管理の下で、大規模な燃料デブリ取り出し作業を実現することを目標に検討を実施する。本事業での開発成果は、東京電力が行うエンジニアリングに活用する。

本事業は、1Fの廃炉・汚染水対策に資する技術の開発を支援する事業を、中長期ロードマップ及び「2021年度廃炉研究開発計画」(廃炉・汚染水チーム会合／事務局連絡会議(第86回))に基づき行うことで、1Fの廃炉・汚染水対策を円滑に進めるとともに、我が国の科学技術の水準の向上を図ることを目的とする。

具体的には、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 核種除去技術、RO濃縮水の処理技術、二次廃棄物処理技術、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**について、開発を実施する。

1. 「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**)」の目的と目標 No.3

【開発全体の目標】

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。

【開発項目の具体的な目標】

①現場運用手順の開発

- 中性子検出器による臨界近接監視の現場運用手順を策定して、燃料デブリ取り出し工法チームと共有する。
- 新型3種類の中性子検出器の未臨界度測定性能を評価して、現場運用手順に反映する。
- 非溶解性中性子吸収材の現場運用手順を策定して、燃料デブリ取り出し工法チームと共有する。

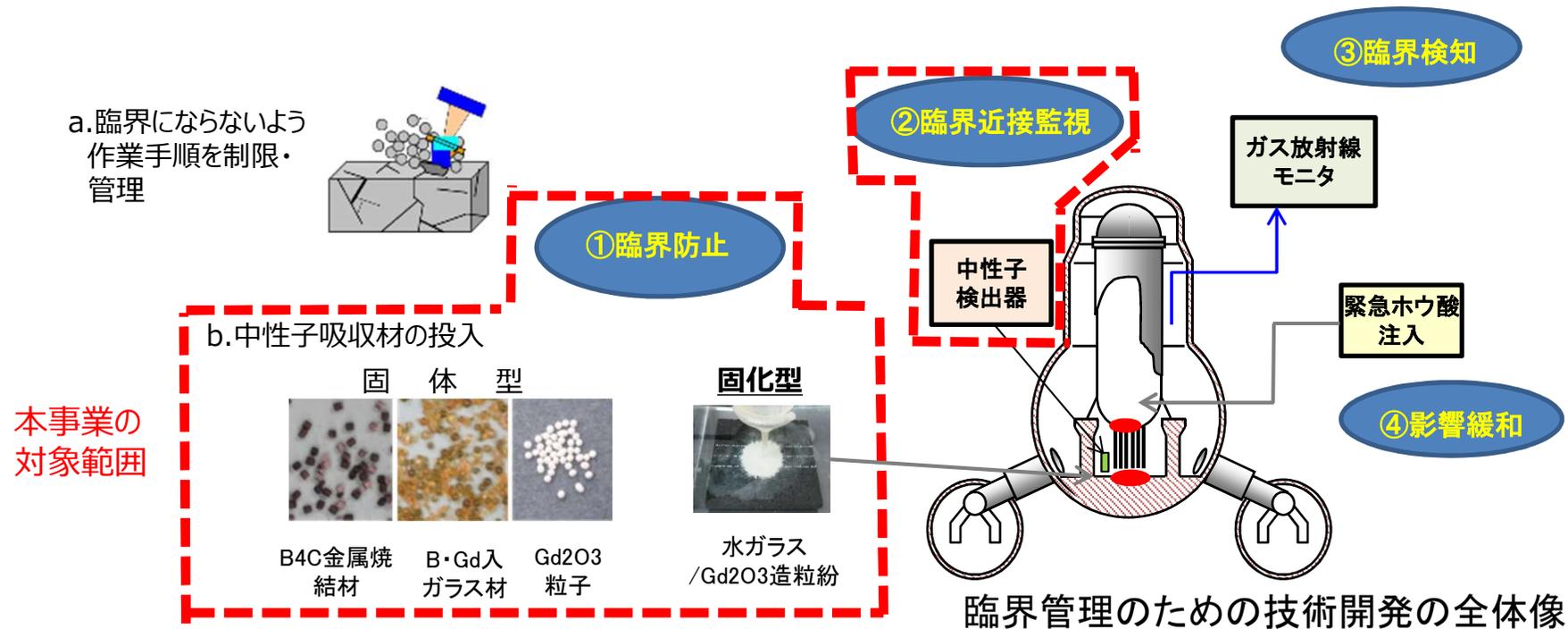
②固化型吸収材技術の開発

- 固化型吸収材(水ガラス)が付着した燃料デブリの乾燥プロセスへの影響に関するデータを取得して、①現場運用手順の開発や燃料デブリの乾燥時間等の設備運転検討に活用する。

2. 補助事業の概要

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

臨界管理技術については、前年度までに廃炉・汚染水対策事業において、臨界防止、臨界近接監視、臨界検知、影響緩和の各要素が開発されてきた。このうち、**課題が残されている臨界防止、臨界近接監視について**、前年度までの技術開発成果を踏まえて、検討を具体化していくものとする。



3. 前年度までに実施した事業の実績と残された課題

No.5

臨界近接監視技術の開発成果と本事業の内容

最終目標	実機適用までの達成目標	達成状況	残された課題 / 本事業の内容
未臨界度測定技術の確立	① 測定手法の確立	<ul style="list-style-type: none"> ・炉雑音法と中性子源増倍法を組み合わせた手法を選定 ・測定誤差低減のための検出器感度・配置を検討 	
	② システム仕様策定	<ul style="list-style-type: none"> ・検出器、測定回路等のシステム仕様を策定 	
	③ 中性子検出器の仕様	<ul style="list-style-type: none"> ・中性子検出器の仕様策定と試作機用の検出器選定 	
	④ システム設計・試作	<ul style="list-style-type: none"> ・試験用システムとして中性子検出器と測定回路と分析用PCで構成されるシステムを試作 	
	⑤ 未臨界度測定の成立性確認	<ul style="list-style-type: none"> ・均一燃料デブリ模擬条件で確認(KUCA試験#1/#2) ・大型燃料デブリ模擬条件で確認(KUCA試験#3) ・不均一燃料デブリ/中性子吸収材模擬条件で確認(KUCA試験#4) 	代替中性子検出器(コロナ型、SiC型、マルチセルHe-3型)の適用性確認試験(KUCA試験#5)(→7.1.2項) KUCA; 京都大学臨界実験装置
燃料デブリ取り出しシステムへの組み込み	① 中性子検出器の現場への適用性確認	<ul style="list-style-type: none"> ・ロボットアームで移送するための中性子検出器ユニットの仕様項目を整理 ・ケーブルハンドリング概念を策定 ・代替中性子検出器(コロナ型、SiC型、マルチセルHe-3型)の試作と基本性能確認 ・中性子検出器ユニットの設計試作 ・プリアンプの耐放射線性の評価 	
	② 電磁ノイズ対策	<ul style="list-style-type: none"> ・模擬ノイズによる影響を評価、対策案を整理 	
	③ 臨界近接管理手順の検討	<ul style="list-style-type: none"> ・測定に要する時間を評価 ・燃料デブリ取り出し工法の各ステップでの臨界近接監視の手順 	加工前後の測定手順、測定対象の判断、測定時間、日々の未臨界維持管理の作業手順、補修・メンテ要求、加工側への要求整理(→7.1.1項)

3. 前年度までに実施した事業の実績と残された課題

No.6

非溶解性中性子吸収材の開発成果と本事業の内容

最終目標	実機適用までの達成目標	達成状況	残された課題/本事業の内容
臨界防止技術の確立	① 候補材の選定	・基礎特性、照射特性、核的特性の確認により非溶解性中性子吸収材の候補材を選定(4種類の候補材を選定)	
	② 施工性の確認と未臨界維持条件の仕様	・想定した使用法による投入必要量を試算 ・チゼルによる破碎燃料デブリでの施工性確認、および吸収材分布確認と未臨界維持評価(固体型吸収材)	
	③ 腐食影響の評価	・長期照射試験から、水素発生G値(*)は設計値未満 および吸収材成分が溶出した希釈海水はpH6以上 ・照射下での防錆剤効果に及ぼす影響の評価	
	③ 副次的影響の評価	・収納缶本数および廃棄量は固体型吸収材で最大約10%、固化型吸収材で最大約40%増加	水ガラスによる燃料デブリ乾燥への影響(→7.2項)
燃料デブリ取り出しシステムへの組み込み	① 非溶解性中性子吸収材の投入装置、運用方法の検討	・吸収材の投入方法を策定 ・チゼル加工による影響の確認 ・水中投入できることの確認	固化型吸収材の使用量 加工シーンに対する適用条件 レベル2→レベル1復帰手順 事前投入の有効性 (→7.1.3項)
	② 吸収材投入装置の設計	・吸収材投入装置の重量・寸法制約、吸収材搬送経路制約を踏まえて吸収材投入装置概念を策定	装置の小型軽量化(→7.1.3項)
	③ 取り出し装置との組み合わせ検証	・燃料デブリ位置毎の燃料デブリ加工方法に対する適用吸収材を整理	

(*)水素発生G値:100eVのエネルギーを吸収した際に発生する水素の数

4. インプットアウトプット

燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発PJ、燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発PJ、と連携して実施する。

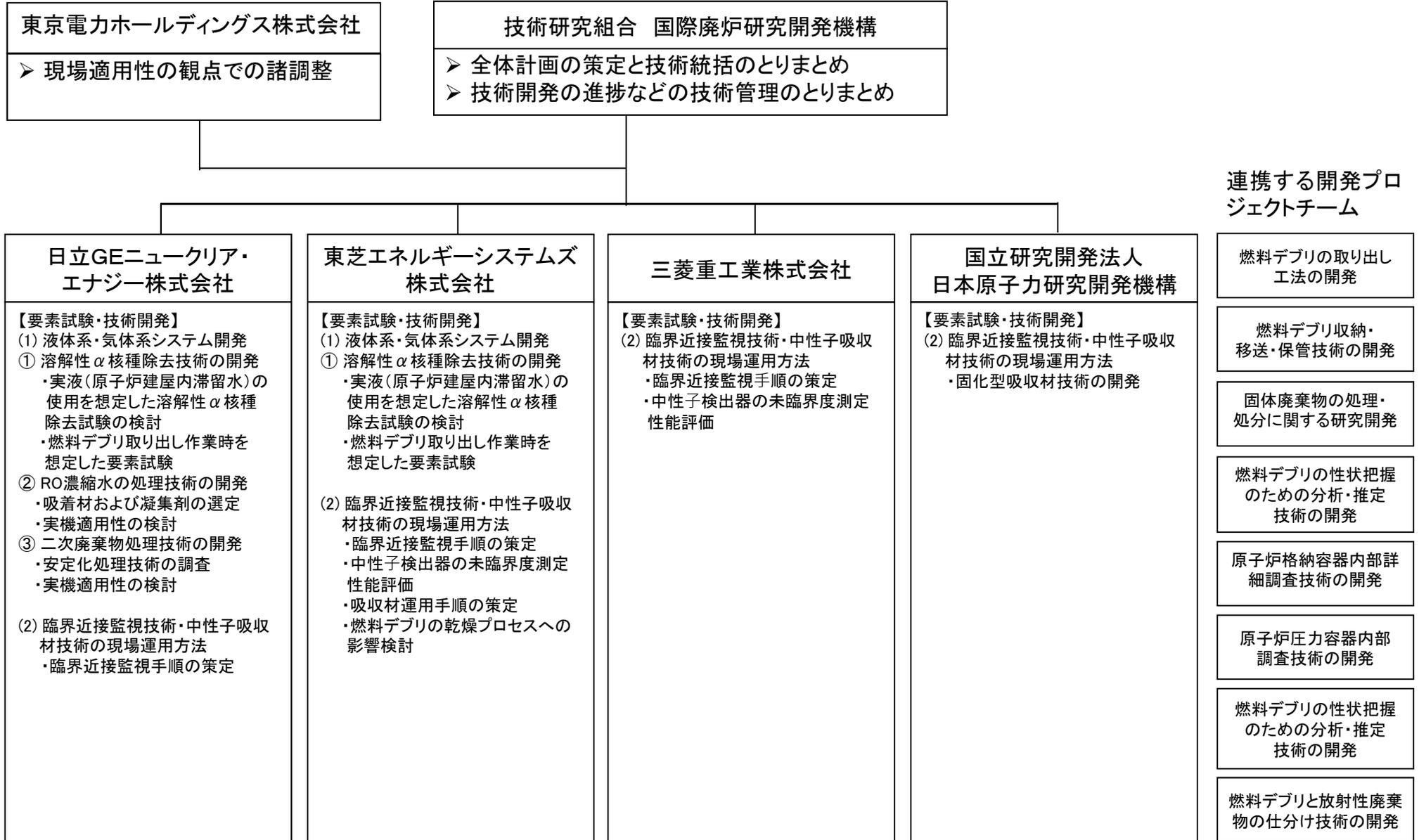
ID	要求側事業	提供側事業	内容(概要)	時期	情報の用途
1	安全システムの開発 (液体系・気体システム、臨界管理技術)	燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発	干渉物撤去の方法、燃料デブリへのアクセス方法、燃料デブリや炉内構造物の加工・回収方法	2021年 6月	臨界近接監視や吸収材散布の現場運用手順の検討
2	燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発	安全システムの開発 (液体系・気体システム、臨界管理技術)	中性子検出器による臨界近接監視の現場運用手順、非溶解性中性子吸収材の現場運用手順	2023年 3月	燃料デブリ取り出し工法のスループットの検討
3	燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発	安全システムの開発 (液体系・気体システム、臨界管理技術)	水ガラス(非溶解性中性子吸収材)が付着した燃料デブリの乾燥プロセスへの影響に関するデータ	2023年 3月	収納缶の乾燥プロセスの検討

5. 実施スケジュール

臨界管理技術

大分類	小分類	実施事業者 (外注先、試験場所がある場合は併記)	令和3年度												令和4年度																																															
			4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月																																				
主要なマイルストーン						▲			▲			△						△			△																																									
			プロジェクトステアリング会議												中間報告												中間報告												中間報告												最終報告											
(2) 臨界近接監視技術・中性子吸収材技術の現場運用方法 ①現場運用手順の開発 (i) 臨界近接監視の運用手順の策定	a. 前提条件の整理	(1) 日立GE	前提条件の整理																																																											
	b. 手順の検討	(2) 東芝ESS				手順の検討																																																								
	c. 評価・見直し	(3) 三菱重工													評価・見直し																																															
	d. まとめ																							まとめ																																						
(ii) 中性子検出器の未臨界度測定試験	a. 試験計画	(1) 東芝ESS 外注先: FEO/CETD	試験計画																																																											
	b. 試験準備・手配	試験場所: KUCA 名古屋大学	試験準備・手配																																																											
	c. 要素試験	(2) 三菱重工 外注先: IPL	KUCA試験			要素試験																																																								
	d. まとめ	試験場所: KUCA																																																												
(iii) 非溶解性吸収材の運用手順の策定	a. 前提条件の整理	(1) 日立GE	前提条件の整理																																																											
	b. 手順の検討	(2) 東芝ESS				手順の検討																																																								
	c. 評価・見直し	(3) 三菱重工													評価・見直し																																															
	d. まとめ																							まとめ																																						
② 固化型吸収材技術の開発	a. 試験計画	(1) JAEA	試験計画																																																											
	b. 試験準備・資材調達	外注先: 検査開発株式会社	試験準備・調達																																																											
	c. 要素試験	試験場所: JAEA				基礎試験																																																								
	d. まとめ																	パラメータ基礎試験									まとめ																																			

6. 実施体制



7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

7.1.1 臨界近接監視の運用手順

【課題】

関連事業(*)において、上/横アクセス工法の大まかな作業ステップにおける臨界近接監視の方法が検討されている。(図1)燃料デブリ取り出し工法チームと運用手順やスループットを協議するためには、さらに作業ステップを詳細化して臨界近接監視の手順を具体化する必要がある。

【実施内容】

- 関連事業(*)で検討された燃料デブリ取り出し工法と加工・回収装置に対して、中性子検出器を用いた臨界近接監視の手順をステップ図に整理する。
- 燃料デブリ加工時に臨界近接する際の中性子応答を検討して、臨界近接と判断する対応の手順を検討する。
- 加工前後の測定手順、測定対象の判断、測定時間、日々の未臨界維持管理の作業手順、補修・メンテ要求、加工側への要求整理、について検討する。

【目標】

- 中性子検出器による臨界近接監視の現場運用手順を策定し、燃料デブリ取り出し工法チームと共有する。

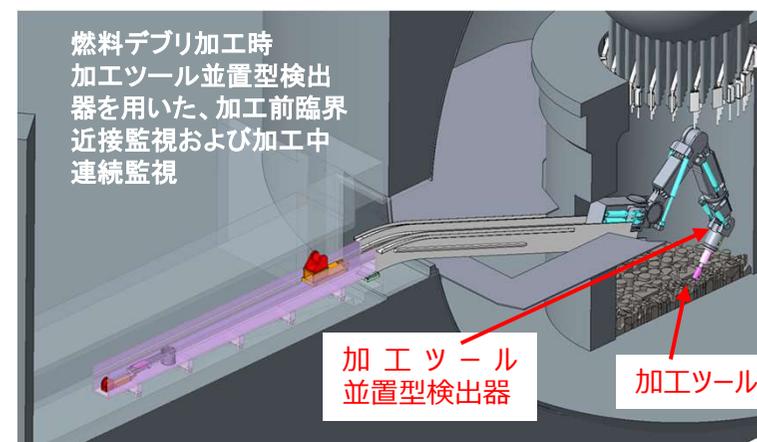


図1 燃料デブリ取り出し時臨界近接監視(横アクセスの例)

(*)関連事業「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」(2019・2020年度)

7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

7.1.1 臨界近接監視の運用手順

a. 前提条件の整理

取り出しステップへの臨界管理の展開

ステップ	サブステップ	アーム最大搭載重量	加工制限・臨界管理方法	吸収材事前投入可能性	臨界近接監視			その他の臨界防止対策	備考(*2)
					未臨界度測定	一定量加工毎の臨界近接監視	加工中連続監視		
2. PCV内干渉物撤去・燃料デブリ取り出し準備									
③PCV内干渉物撤去	4)干渉物の加工・切削	(PCV内への搬入)~100kg (アーム搭載)~30kg	燃料デブリと推定される付着物なし: 制約なし	—(*1)	—	—	—	<ul style="list-style-type: none"> ・ペDESTアル内堆積物への切断片の落下防止 ・ペDESTアル内堆積物への上部の重量物の落下防止(CRD等への接触防止対策) ・切断ツール落下防止対策 	変形量の判断基準は最小臨界重量(30~60kg)
			付着物あり(変形量小): 下部堆積物上への切削粉落下量制限	—	—	—	—		
			付着物あり(変形量大): ・臨界近接監視をしながらの加工 ・下部堆積物上への切削粉落下量の制限	○ 臨界近接時	—	加工・切削の前後で中性子束測定・臨界近接監視	バックアップとして加工中の連続監視を求められる可能性あり		

*1 “—”は非該当を意味する。
*2 特記事項ない場合はブランクにしている。

どのような臨界近接監視を行うか、具体的な手順を検討する。

取り出し工法のステップ区分(臨界側でサブステップを挿入)

臨界管理法の方法、加工制限など

検出器や非溶解性吸収材投入装置の制約条件

非溶解性吸収材を適用する可能性のあるステップ

臨界管理からの注意点(主に付随事象の発生防止対策)

7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

7.1.1 臨界近接監視の運用手順

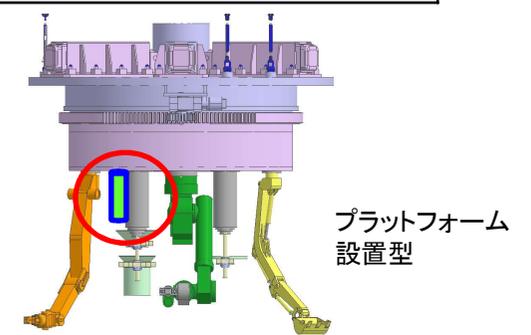
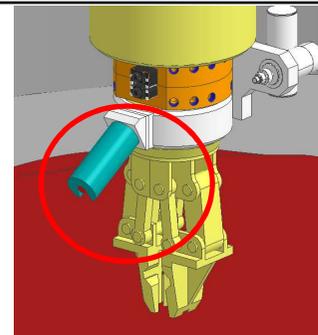
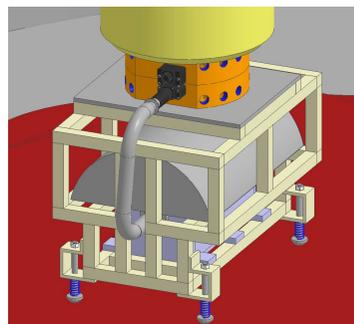
a.前提条件の整理

臨界近接監視を構成する機能

名称	未臨界度測定用検出器	臨界近接監視用検出器 ^(注1)	連続監視用検出器 ^(注1)
使用目的	作業前状態の把握	加工着手判断	予期せぬ変化の検知
機能	未臨界度測定	加工前後の 臨界近接監視	加工中の 中性子束連続監視
	中性子増倍率の 絶対値測定	中性子増倍率の相対変化測定	
形態	アーム搭載型	加工ツール並置型	プラットフォーム設置型 /加工ツール並置型
重量	30kg～100kg	30～50kg	30kg以下
計測時間	数時間から1週間 (現場環境に依存)	10分程度	連続
測定位置 ^(注2)	取り出し位置近傍 の1点	加工位置に応じて 適宜移動	同左/加工位置を俯瞰できる場所

(注1)現場のガンマ線が弱く、燃料デブリの中性子が強いといった条件によっては、「臨界近接監視用」と「連続監視用」は兼用できる可能性がある。

(注2)固定されておらず、都度変更される可能性がある。



7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

7.1.1 臨界近接監視の運用手順

b. 手順の検討

7.1.1.bの実施内容の概要

--- 上取り出し工法 ---

----- 横取り出し工法 -----

-- 一体搬出工法 --

燃料デブリ取り出し工法チームと運用手順やスループットを協議する中で、課題として挙げられた10項目の検討を実施した。

①上取り出し時の臨界監視方法
(→No.14)

②横取り出し時の臨界監視方法
(→No.15)

③横アクセスPLAN-B工法の臨界監視方法
(→No.16~18)

③上アクセス一体搬出案の臨界監視方法(→No.16~18)

④三種類の臨界近接監視の監視範囲(→No.19)

⑤燃料デブリ加工・取り出し作業中の測定手順の整理(→No.20)

⑥臨界近接監視の役割の整理(→No.21)

⑦気中加工・水中加工での環境条件整理に基づく臨界監視の基本的考え方
(→No.22)

⑧水中加工での臨界リスクの整理(→No.23,24)

⑨代表加工例(レーザー加工)での監視手順(→No.25)

⑩監視システムの保守
(→No.26)

7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

7.1.1 臨界近接監視の運用手順

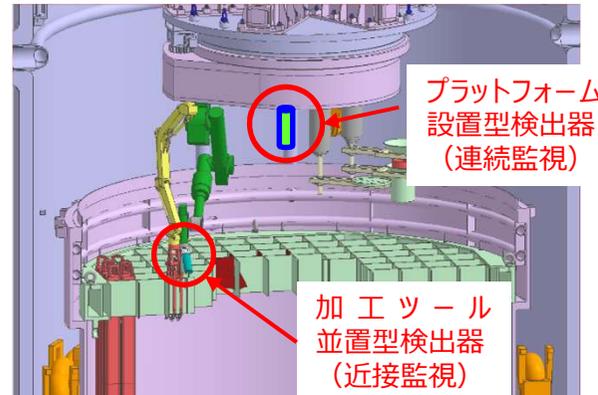
b. 手順の検討 ①上取り出し時の臨界監視方法

【これまでの検討成果】

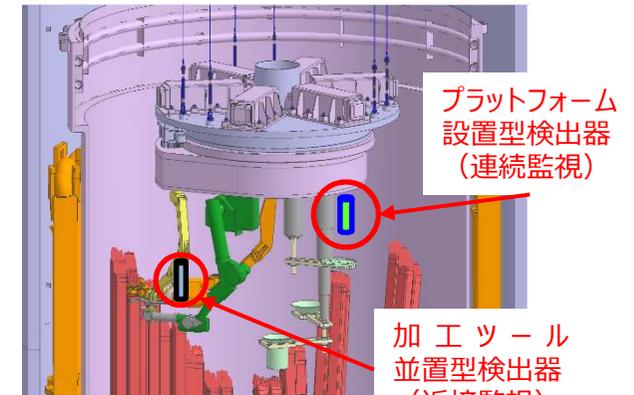
上取り出し工法を代表例として燃料デブリ取り出しステップにおける臨界近接監視の方法を検討した。

臨界近接監視は3種類の中性子計測で構成されるが(←No.12)、全ての作業ステップにおいて3種類の監視を行う必要は無い。(←No.11)

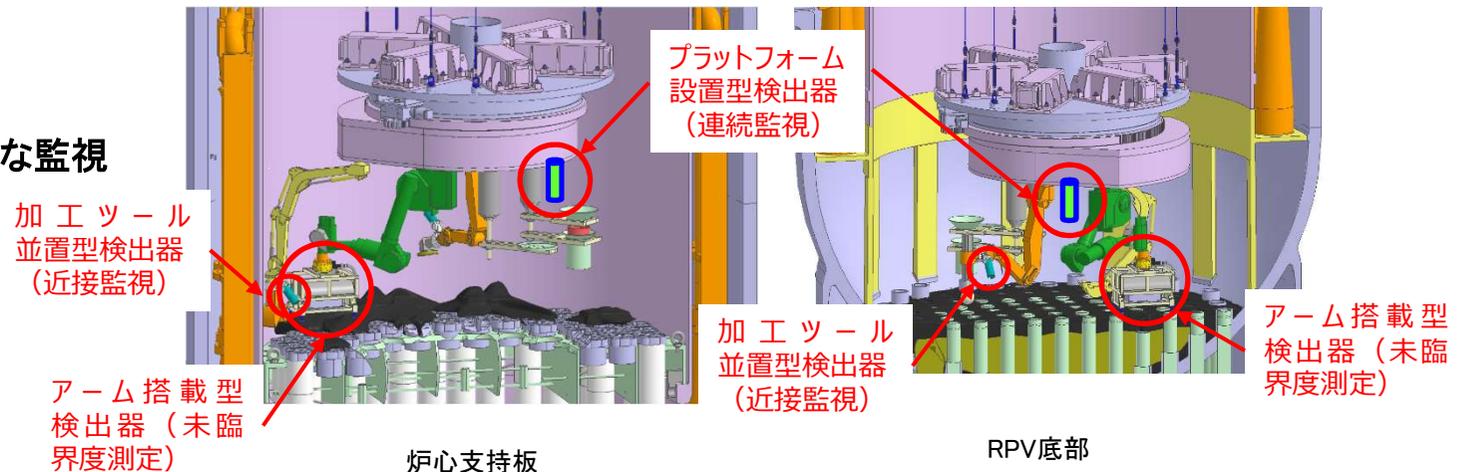
想定される臨界リスクに応じて必要な監視の機能を使い分ける。
(3種類 or 2種類;)



上部格子板



炉心部残存燃料



炉心支持板

RPV底部

7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

7.1.1 臨界近接監視の運用手順

b. 手順の検討 ②横取り出し時の臨界監視方法

【これまでの検討成果】

横取り出し工法を対象として臨界近接監視の方法を検討した。

臨界監視の3機能のうち、未臨界度測定をアーム搭載型検出器で、臨界近接監視および加工中連続監視を加工ツール並置型検出器で行うことにより、加工ツールと検出器の交換頻度を低減し、燃料デブリ取り出し作業スループットへの影響を最小限とする。

横取り出し時の臨界監視方法

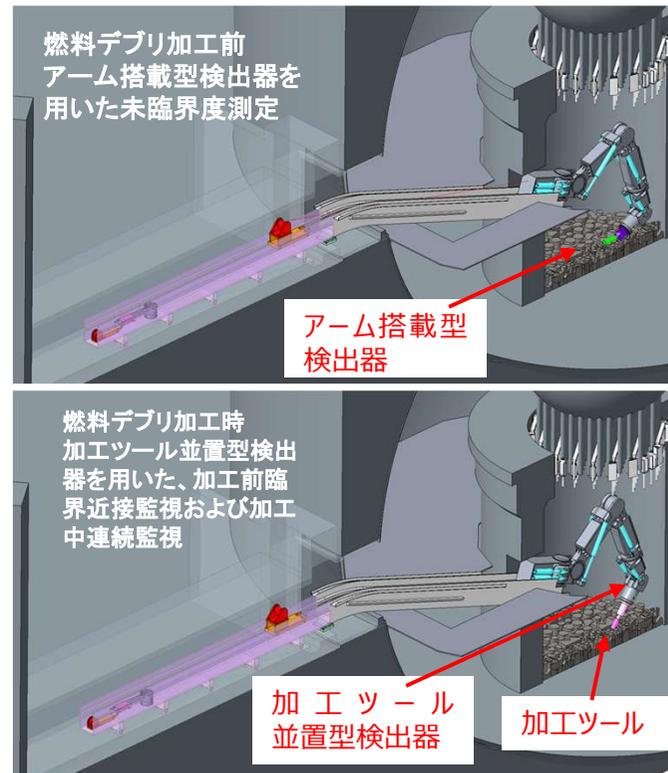


図 燃料デブリ取り出し時臨界監視(抜粋)

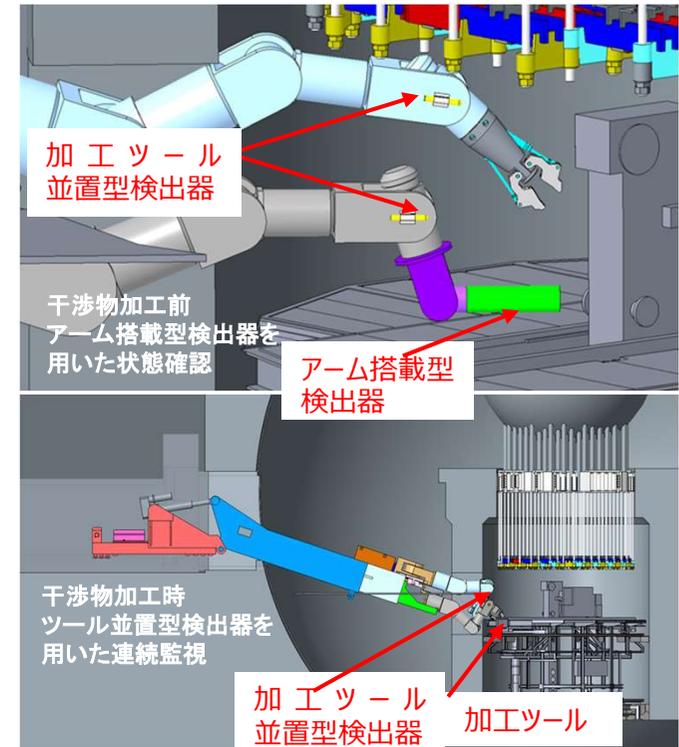


図 干渉物撤去時臨界監視(抜粋)

7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

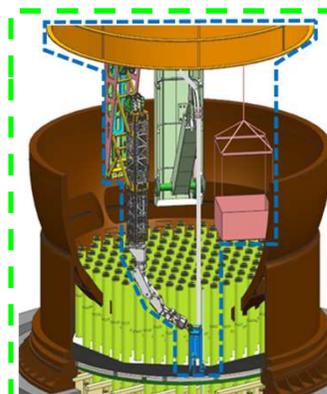
7.1.1 臨界近接監視の運用手順 b.手順の検討 ③横アクセスPLAN-B工法/ 上アクセス一体搬出案の臨界監視方法

【検討内容】

- 横アクセスPLAN-B工法および上アクセス一体搬出案B改2工法の作業ステップについて、以下の装置を用いた加工回収方法適用時の臨界近接監視手順を検討し、課題およびリスクを抽出した。



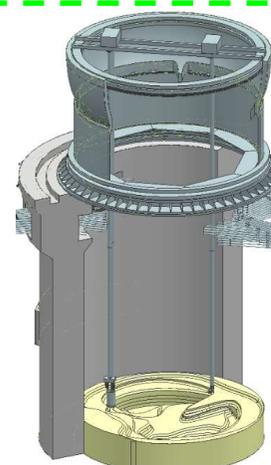
重量物運搬装置による中性子検出器ユニット(模擬体)の搭載および移動
(横アクセスPLAN-B工法)



炉底部干渉物撤去作業のイメージ
(上アクセス一体搬出案B改2工法)



重量物運搬装置による破碎吸引装置の搭載および移動
(横アクセスPLAN-B工法)



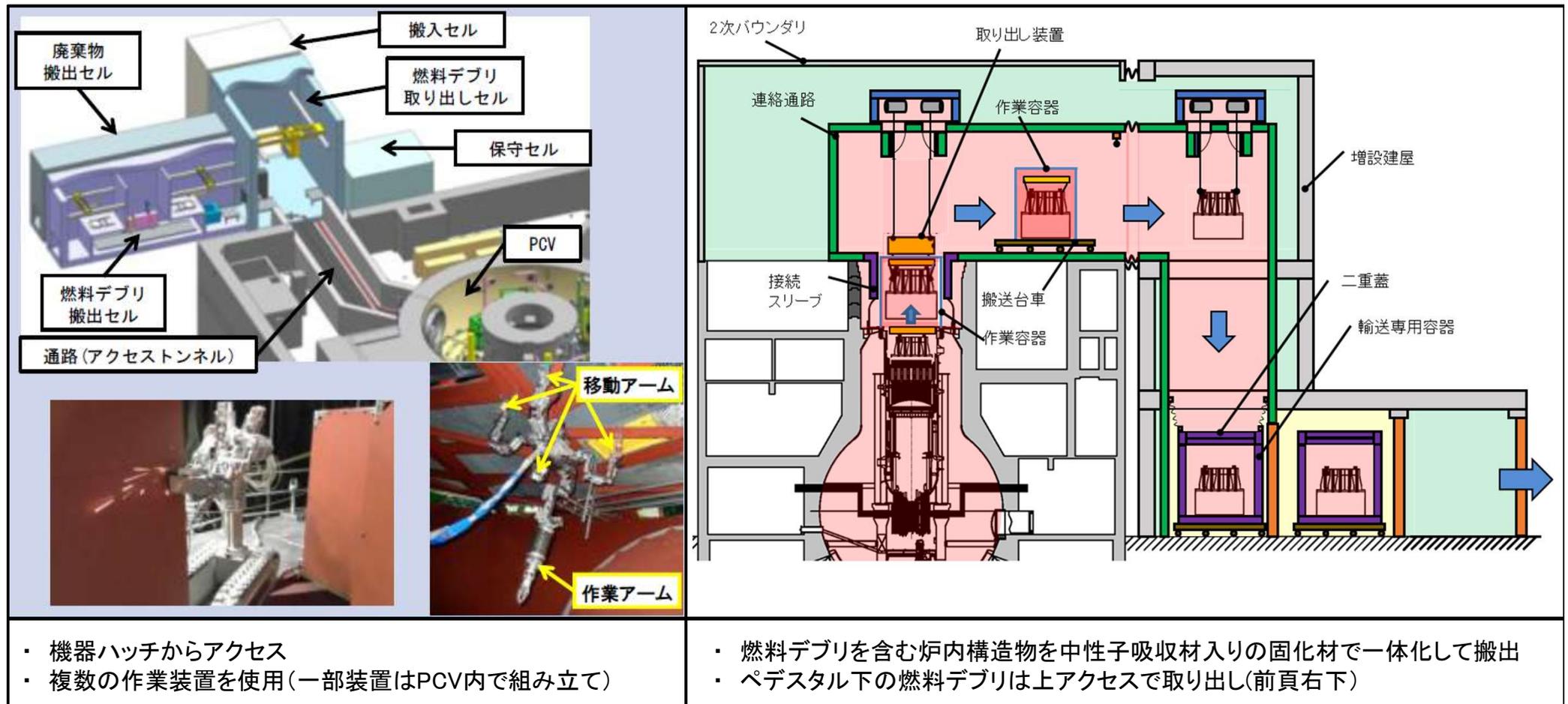
RPV下鏡およびCRDハウジング搬出後のペDESTAL下部で燃料デブリ取り出しイメージ
(上アクセス一体搬出案B改2工法)

7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

7.1.1 臨界近接監視の運用手順 b.手順の検討 ③横アクセスPLAN-B工法/ 上アクセス一体搬出案の臨界監視方法

● 横アクセスPLAN-B工法および上アクセス一体搬出案B改2工法の概要



- ・ 機器ハッチからアクセス
- ・ 複数の作業装置を使用(一部装置はPCV内で組み立て)

- ・ 燃料デブリを含む炉内構造物を中性子吸収材入りの固化材で一体化して搬出
- ・ ペデスタル下の燃料デブリは上アクセスで取り出し(前頁右下)

7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

7.1.1 臨界近接監視の運用手順

b.手順の検討 ③横アクセスPLAN-B工法/ 上アクセス一体搬出案の臨界監視方法

【検討結果】

- 横アクセスPLAN-B工法および上アクセス一体搬出案B改2工法の作業ステップについて、右表に課題とリスクを抽出した。

【今後の検討】

- 抽出した課題およびリスクについて工法プロジェクトと連携し、最適な臨界監視手順を検討していく。

No.	課題
1	カメラ映像、中性子束分布、特性ガンマ線分布から燃料デブリの有無や量を確認できるか。
2	中性子検出器の運搬に使用する重量物運搬装置にて適切な位置関係と距離で中性子検出器を設置できるか。
3	臨界質量以上の燃料デブリかつ数10kg程度で未臨界度を測定できるか。
4	燃料デブリに傾斜面がある場合に中性子検出器を設置できるか。
5	プラットフォーム上に中性子検出器を運搬して、適切な位置関係と距離で中性子検出器を設置できるか。
6	燃料デブリ上に装置を直接設置することで亀裂進展、水の侵入による反応度投入されることはないか。
7	水位を低下させて堆積物を加工・回収する際、回収しきれない塊や、窪みに水溜まりが生じた場合をどのように管理するか。
8	底部コンクリート混合燃料デブリの撤去においては、切削面がペDESTAL底部よりも低くなることが予想される。このため、作業員アクセストンネルから排出されていた冷却水の滞留対策が必要と考えられる。
9	中性子検出器をシュラウド外周部とRPVの間に運搬し、適切な位置関係と距離に設置できるか。
10	充填固化剤の流出防止対策によって、冷却水の排出が妨げられることで、反応度投入される可能性がある(固化剤注入までの過渡的な状態)。
No.	リスク
1	燃料デブリ上への機材落下、衝撃による亀裂進展、亀裂への水の侵入による反応度投入。
2	加工中、燃料デブリ等の落下による亀裂進展、臨界質量の超過。
3	固化部分からの燃料デブリの剥離、落下、衝撃による亀裂進展、亀裂への水の侵入による反応度投入。

7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

7.1.1 臨界近接監視の運用手順

b. 手順の検討 ④ 三種類の臨界近接監視の監視範囲

- 三種類の臨界近接監視の機能について、それぞれの監視範囲を整理した。(図は上取り出しの例)

機能: 未臨界度測定

測定点: 取り出し開始点近傍の1点

使用目的: 作業前状態の把握

機能: 加工前後の臨界近接監視

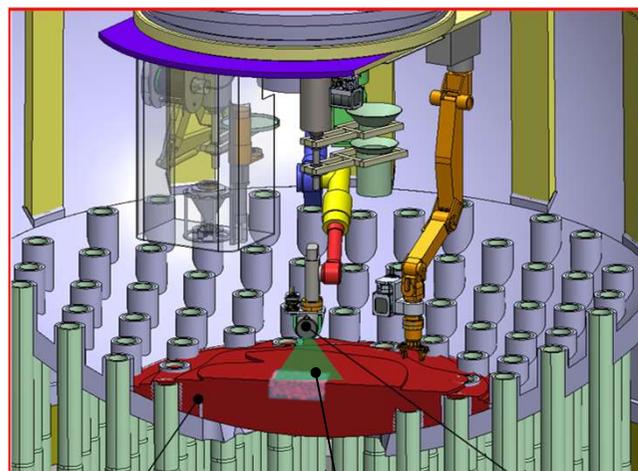
測定点: 加工位置に応じて適宜移動

使用目的: 加工着手判断

機能: 加工中の中性子束連続監視

測定点: 加工位置から離れて俯瞰できる場所

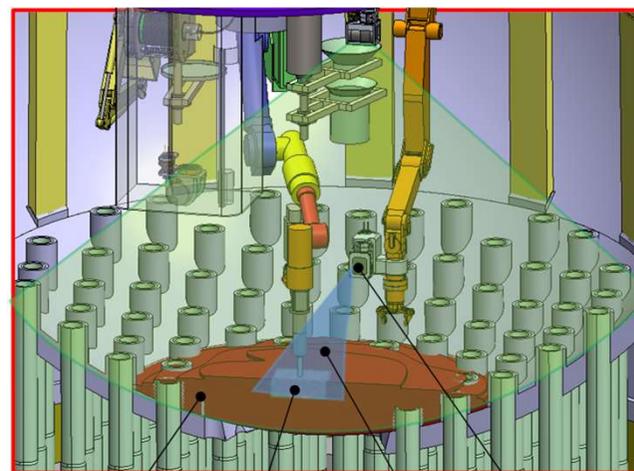
使用目的: 予期せぬ変化の検知



燃料デブリ

監視エリア

未臨界度測定

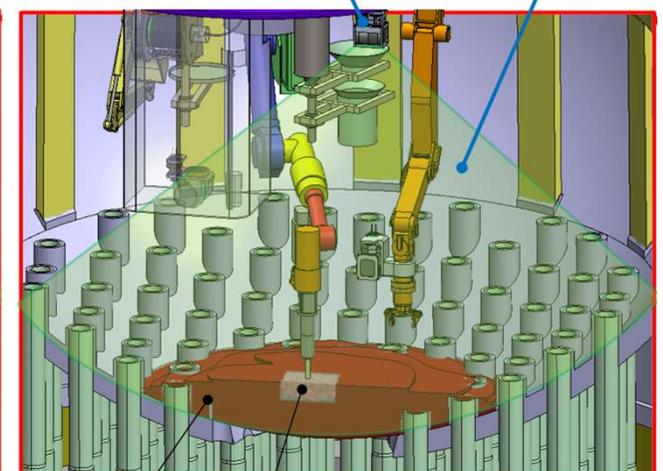


燃料デブリ

加工予定場所

臨界近接監視

監視エリア



燃料デブリ

加工予定場所

連続監視

監視エリア

7. 実施内容

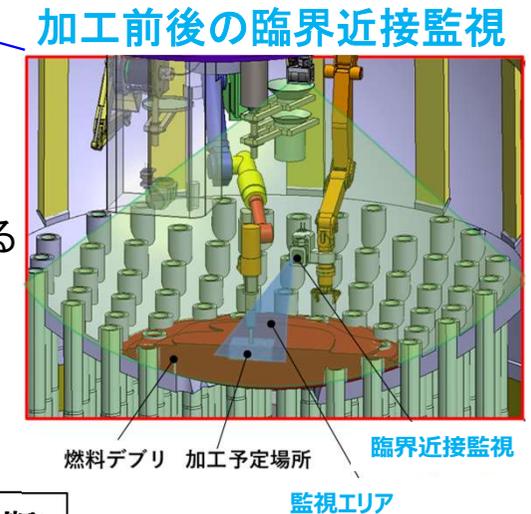
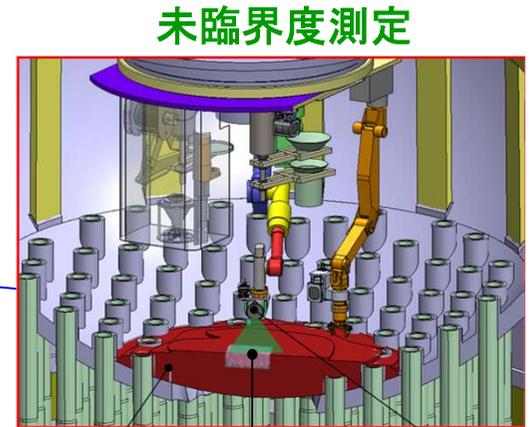
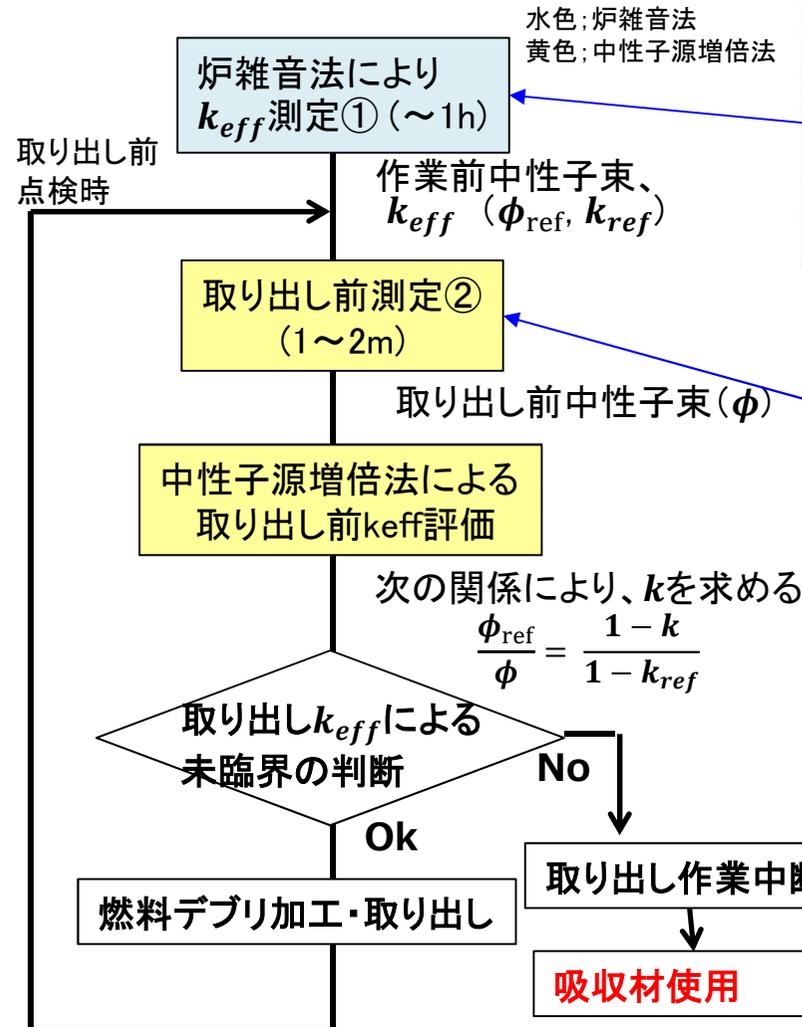
7.1 現場運用手順の開発

7.1.1 臨界近接監視の運用手順

b. 手順の検討 ⑤ 燃料デブリ加工・取り出し作業中の測定手順の整理

● 燃料デブリ加工・取り出し作業中における測定の手順を整理した。

- ・燃料デブリ取り出し作業開始前に炉雑音法により中性子増倍率 (k_{eff}) を測定①
これが中性子源増倍法の基準になる。
- ・燃料デブリ加工の前後は中性子計数率を測定②
- ・燃料デブリ取り出し加工中は中性子計数率を連続監視
- ・中性子計数率が変化したら中性子源増倍法で中性子増倍率 (k_{eff}) を評価
- ・中性子増倍率が判断基準に達したら作業中断
- ・吸収材を使用
- ・吸収材使用後に炉雑音法により中性子増倍率 (k_{eff}) を測定①
これは中性子源増倍法の基準の再測定になる。



加工中の中性子束連続監視 (上図とは別に常時稼働)

7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

7.1.1 臨界近接監視の運用手順

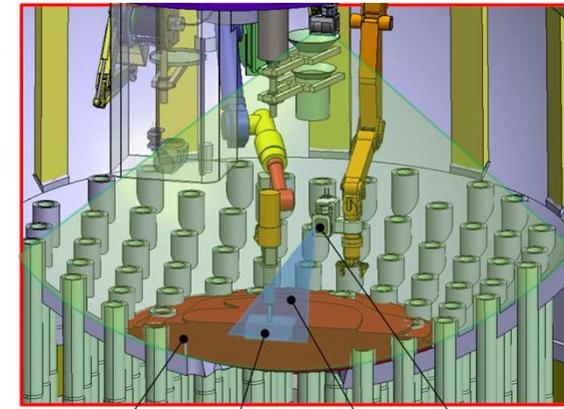
b. 手順の検討 ⑥臨界近接監視の役割の整理

● 臨界近接時の三種類の監視機能の役割を整理した。

- ・燃料デブリ取り出し作業開始前に炉雑音法により中性子増倍率(k_{eff})を測定①
これが中性子源増倍法の基準になる。
- ・燃料デブリ加工の前後は中性子計数率を測定②
- ・燃料デブリ取り出し加工中は中性子計数率を連続監視
- ・中性子計数率が変化したら中性子源増倍法で中性子増倍率(k_{eff})を評価
- ・中性子増倍率が判断基準に達したら作業中断
- ・吸収材を使用
- ・吸収材使用後に炉雑音法により中性子増倍率(k_{eff})を測定①
- ・作業再開判断～作業再開

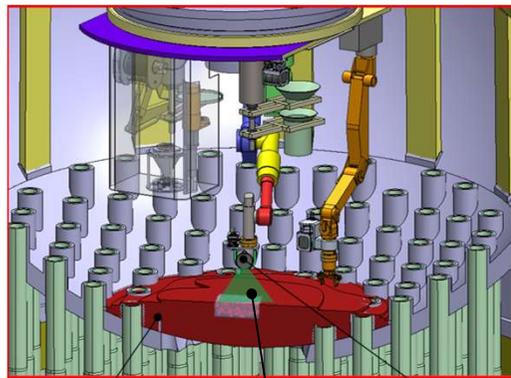
以上の監視機能は、No.14～15シートに記載のとおり、現場の状況に応じ監視機能を使い分ける。

加工前後の臨界近接監視

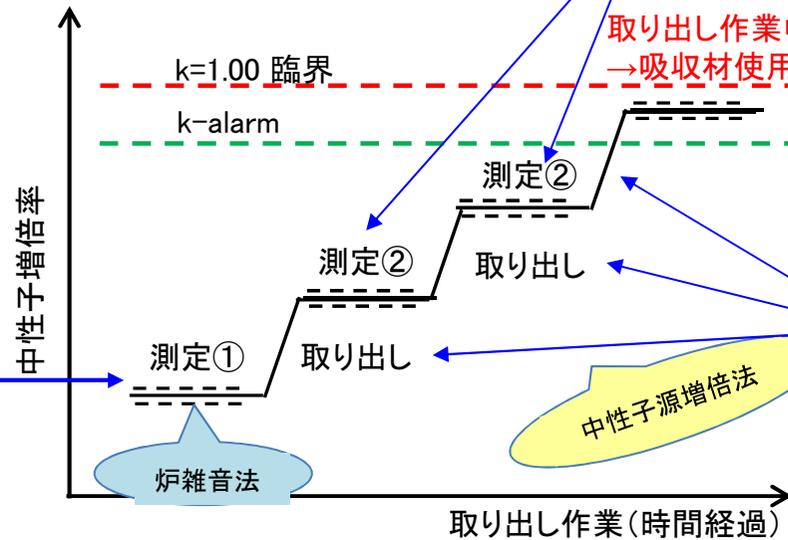


燃料デブリ 加工予定場所 臨界近接監視 監視エリア

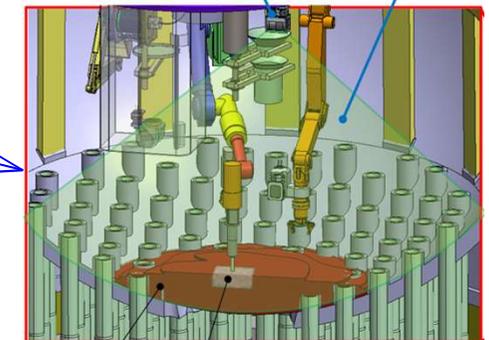
未臨界度測定



燃料デブリ 監視エリア 未臨界度測定



取り出し作業中断 → 吸収材使用 加工中の中性子束連続監視
連続監視 監視エリア



燃料デブリ 加工予定場所

7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

7.1.1 臨界近接監視の運用手順

b. 手順の検討 ⑦ 気中加工・水中加工での環境条件整理に基づく臨界監視の基本的考え方

- 臨界管理の前提となる気中加工と水中加工の環境条件を整理した。
- 気中の臨界リスクは小さく、水中と同じ管理は不要であるが、水溜まりなど局所的に注意が必要となる。

気中加工

- ・燃料デブリの上に水位は形成されていない。
- ・燃料デブリの下方に水溜まりの可能性あり。
- ・冷却水はかけ流し。
- ・水滴が落下している。
- ・ダスト飛散防止のために、加工箇所周辺に散水しながら、加工が行われる。

水中加工

- ・燃料デブリの上に水位が形成されている。
- ・加工開始から回収まで水中で行われる。

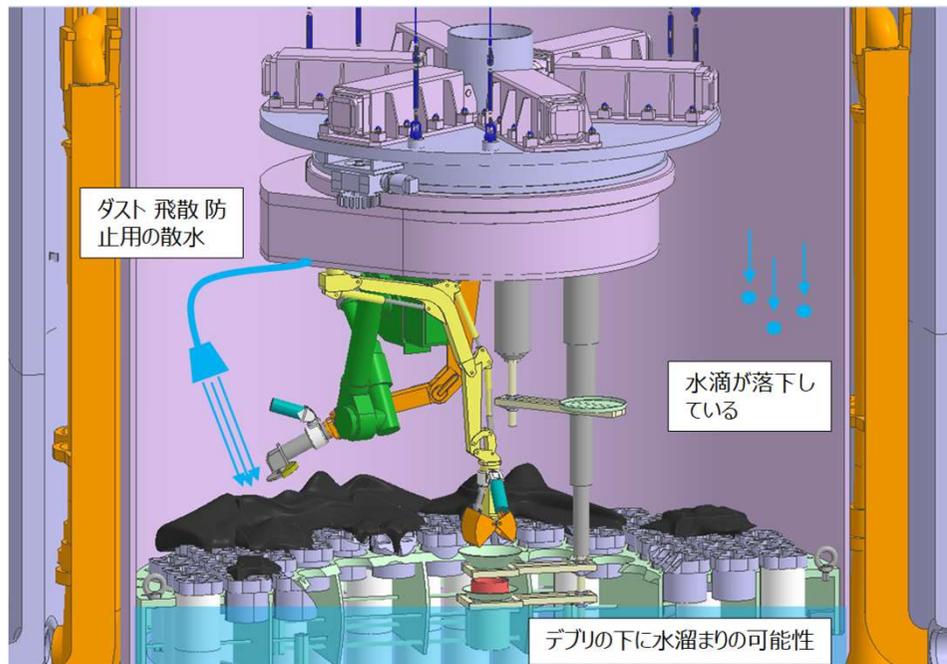


図1 気中加工の環境条件

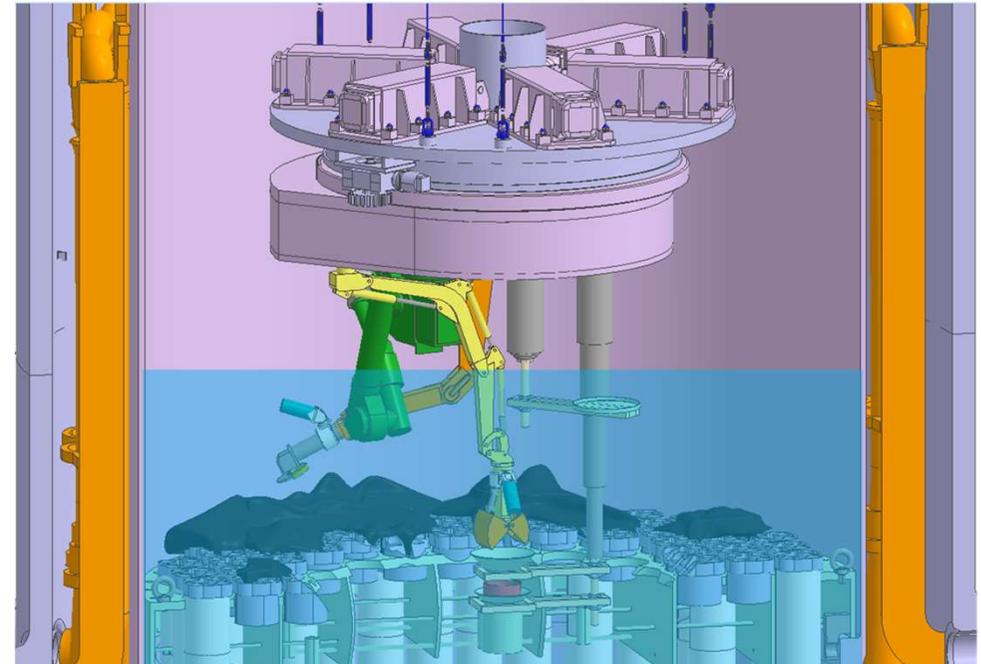


図2 水中加工の環境条件

7. 実施内容

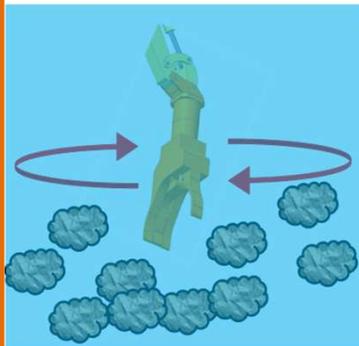
7.1 現場運用手順の開発

7.1.1 臨界近接監視の運用手順

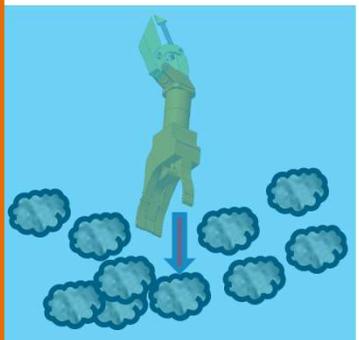
b. 手順の検討 ⑧水中加工での臨界リスクの整理

- 関連事業(*)で検討された加工方法の臨界リスクを解析等に基づき評価した。

本来の使用法とは異なる使用

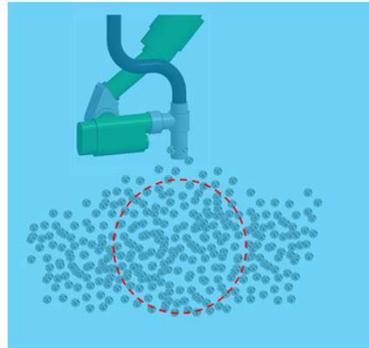


～200mmの大きさの燃料デブリ小片(収納缶に入るサイズ)を水中でつまみあげる作業自体に臨界リスクは**ない**。しかし、ロボットアームで燃料デブリ小片をかき回したり、崩す作業には**注意**が必要。



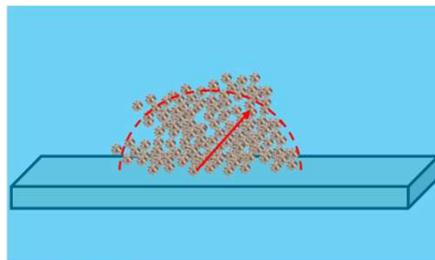
燃料デブリ小片を落下させて、堆積している燃料デブリ小片を崩落させると**注意**が必要。

最適減速状態での最小臨界量の大きさを超える可能性がある加工

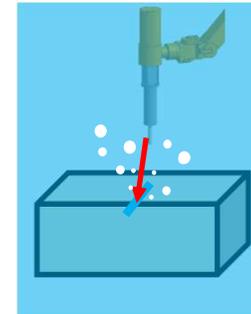


燃料デブリ細粉を水中で広い範囲で巻き上げる場合、**注意**が必要。
(目安: 直径46cm以上、重量71kg以上)

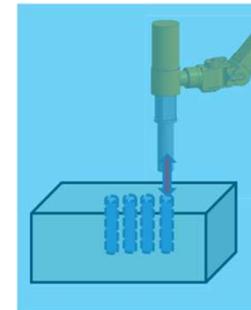
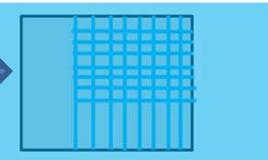
燃料デブリ細粉が水中で多量に堆積する場合、**注意**が必要。(目安: 半径35cm以上、重量499kg以上)



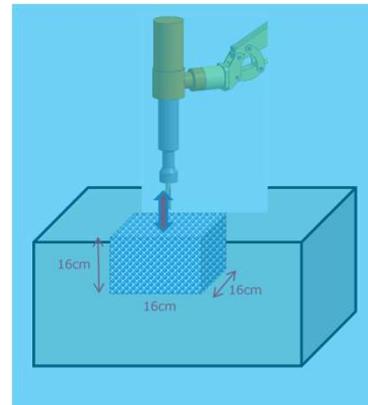
投入反応度が0.5%dkを超える可能性がある加工



切断する際に、短い間隔(～数cm程度)で複数の切断を行うと**注意**が必要。



コアボーリングで穴と穴の間隔が短いピッチ(～100mm程度)で複数の穴をあけると**注意**が必要。



チゼルで燃料デブリを破砕する際に、加工範囲が16×16×16cmを超えると、**臨界リスク**あり。

7. 実施内容

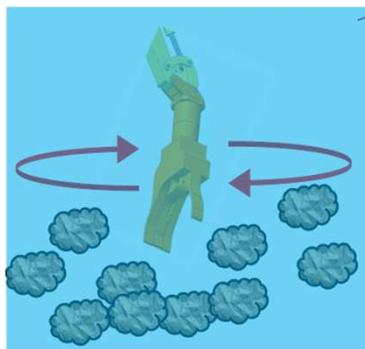
7.1 現場運用手順の開発

7.1.1 臨界近接監視の運用手順

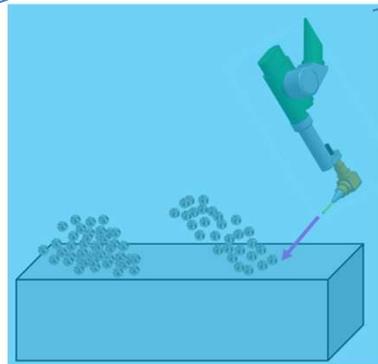
b. 手順の検討

⑧ 水中加工での臨界リスクの整理

- 加工方法毎の臨界リスクを気中加工と水中加工の別に整理した。
- 加工方法自体に臨界リスクが考えられない場合でも、予期せぬ使い方や、加工点以外の二次的な作用について注意が必要となることがわかった。



予期せぬ使い方の例



二次的な作用の例

前シートNo.23より

表 加工方法毎の臨界リスク

分類	加工方法	特徴・概要(*)	臨界リスク	
			気中加工	水中加工
拾い上げ	把持	燃料デブリ小片をつまむ	なし	注意
	バケツ	燃料デブリ小片をすくいあげる	なし	注意
吸引	吸引	燃料デブリ細粉の吸引・回収	なし	注意
切削	レーザーガウジング	レーザーによる燃料デブリ表面の切削	なし	注意
穿孔	コアボーリング	ホールソーによる抜き取り加工 ・別途コアの切断が必要 ・切粉排出、刃物冷却の水が必要	水溜まりがある場合は注意	注意
	超音波コアドリル	セラミックス、金属を同時に加工可能		注意
切断	丸鋸	セラミックスを加工可能だが工具損傷が激しい。刃先がギザギザになっている。		注意
	切断砥石	セラミックス、金属を同時に加工可能		注意
	油圧カッター	油圧駆動のハサミ		注意
	AWJ	研磨材を混ぜた高圧水による切断 切断幅分が周辺環境へ飛散		注意
	レーザー切断	レーザーの熱による熱切断		注意
	破碎	ハンマー(チゼル)	チゼルを対象物に押付、ピストンの上下運動で打撃を与えて破碎	

7. 実施内容

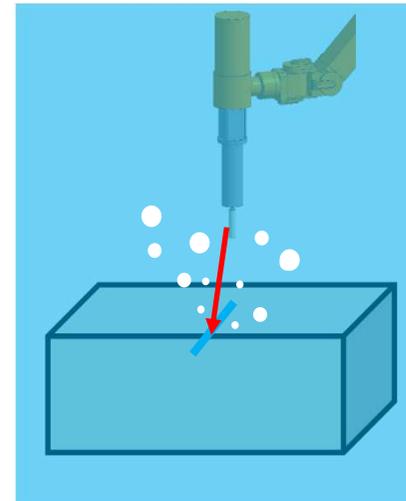
7.1 現場運用手順の開発

7.1.1 臨界近接監視の運用手順

b. 手順の検討

⑨代表加工例(レーザー加工)での監視手順

- 燃料デブリ加工中における測定の手順について、理解しやすいレーザー切断を代表例として、検討した。
- 燃料デブリに直線状の切断線が生じて、そこに水が浸入して臨界近接する状態を仮定した。
- 加工前の燃料デブリの中性子増倍率は $k_{eff}=0.95$ 近傍で、判断基準をぎりぎり超えない状態と仮定する。
- **加工前に中性子計数率を測定する。**
- 加工を開始すると、10分間の加工で、 $\Delta k=0.016$ の反応度が加わり、燃料デブリから放出される中中性子は1.5倍に増加する。(図)
- **加工後に中性子計数率を測定して、中性子計数率が1.5倍に増加したことが観測され、中性子源増倍法により、中性子増倍率が $0.95 \rightarrow 0.967$ になったと推定される。(→シートNo.20)**
- 中性子増倍率が判断基準を超過したと判定され、取り出し作業を中断する(シートNo.21)。
- 今後、他の加工方法についても手順を検討する。



【評価条件】

燃料デブリ組成：濃縮度4wt%ウラン
構造材、FP,Gdなし
燃料デブリ内の気孔に水が入っており、加工前の初期状態の $k_{eff}=0.95$ とする。
幅2cm,深さ~60cm、長さ~60cmの切断線を入れる加工を想定する。(注)
レーザー切断の加工速度は1[mm/sec]であり、10分間の加工を行うものとする。
MVPコードで実効増倍率を計算し、1点炉動特性解析で中性子応答を計算した。
中性子源強度1[n/sec]
中性子検出器の検出効率100[%]

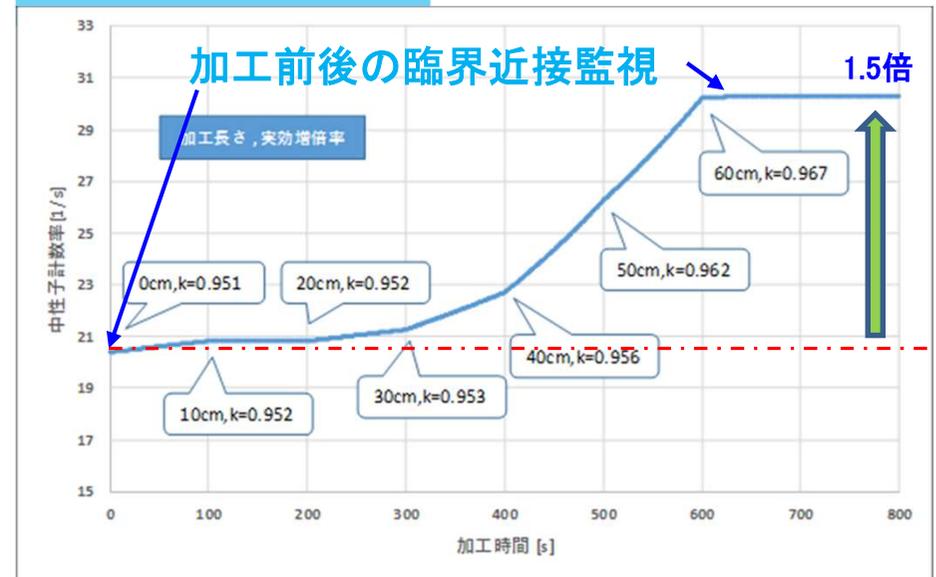


図 レーザー切断加工を想定した中性子応答のシミュレーション

(注)1本の切断で臨界になるリスクは無いが、理解しやすい例として極端な条件を設定した。

7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

7.1.1 臨界近接監視の運用手順

b. 手順の検討

⑩ 監視システムの保守

- 臨界近接監視システムの保守について、日常点検、定期点検、事後保全の考え方を整理した(表)。
- 日常点検は、検出器ユニットを建屋内のメンテナンスエリア(SFP等を想定^(*))に移動させて^(注1)、遠隔操作^(注2)で行う。(図)
- 定期点検の一部や不具合発生時の事後保全は、除染して建屋外に搬出して、作業員が作業を行う。

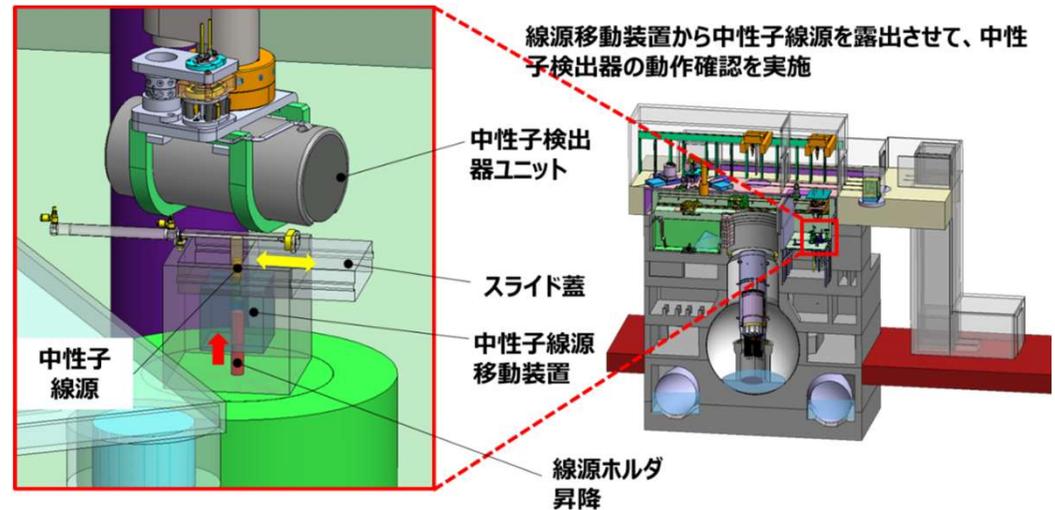


図 建屋内のメンテナンスエリア

表 臨界近接監視システムの保守内容

目的	頻度	点検内容	点検項目	方法
予防保全 (注1) 検出器ユニットを搭載した燃料デブリ取り出し装置がメンテナンスエリアに移動して待機するのは、日常的な動作である。	日常点検	システム健全性、ノイズ影響	中性子線源による動作確認、バックグラウンド測定	検出器ユニットを遠隔メンテナンスエリアに移動させて、そこに設置された中性子線源装置を使って、燃料デブリ加工・回収装置の遠隔操作で間接保守を行う。(要する時間は1時間程度)
	定期点検 1~2回/年	検出器/コネクタ/ケーブルの健全性、検出器感度	ディスクリプター、絶縁抵抗、静電容量、ケーブル特性、線源校正	メンテナンスエリアでの遠隔保守が困難な場合は、検出器ユニットを燃料デブリ加工・回収装置から外し、PCV内から引き上げ、除染後、直接保守を行う。(要する時間は数日程度)
事後保全 (注2) 中性子線源を用いた中性子検出器の校正を遠隔操作で行う方法について開発が必要。	不定期	分解点検、修理、交換、	ガスリーク、絶縁低下、接触不良、断線、回路診断、他	システムに不具合が生じて、検出器がPCV内で復旧できない事態となった場合には、検出器ユニットを燃料デブリ加工・回収装置から外し、PCV内から引き上げ、除染後、直接保守により点検を行う。(分解・組立が必要になる場合は1週間以上)

7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

7.1.1 臨界近接監視の運用手順

d. 中間まとめ

【今年度の成果】

燃料デブリ取り出し工法チーム(上取り出し/横取り出し/一体搬出)と運用手順やスループットを協議しつつ、下記の項目を具体化して共有した。

- 三種類の臨界近接監視の役割と監視範囲
- 燃料デブリ加工・取り出し作業中の測定手順
- 気中加工と水中加工における臨界監視の考え方
- 水中加工での臨界リスク
- レーザー加工を代表例として、臨界近接する場合の監視手順
- 監視システムの保守

これらは今後、燃料デブリ取り出し工法を具体化する際に考慮すべき前提条件となる。

【今後の計画】

上記手順に基づき、レーザー以外の加工方法に展開する等検討を拡充して、燃料デブリ取り出しのスループットへの影響を評価し、運用手順の最適化を目指す。

令和4年3月中間時点

7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

7.1.2 中性子検出器の未臨界度測定への適用性確認

【課題】

関連事業(*)において未臨界度測定の観点から候補となる3種類の中性子検出器(コロナ型、SiC型、マルチセルHe-3型)が開発されている(図1)。これらの検出器が現場に適用できることを確認するために、未臨界度を測定できることを実証して、臨界近接監視の性能を評価する必要がある。

【実施内容】

京都大学臨界実験装置(KUCA)において燃料デブリを模擬した未臨界体系を構築し、開発した中性子検出器を用いて未臨界度測定試験を行う。(図2)

また、ガンマ線環境下における中性子測定性能を試験により評価する。

【目標】

- 中性子検出器の未臨界度測定性能の評価
- 現場を想定した中性子検出器の運用手順への反映



図1 Corona型検出器 (^{10}B) の外観



図2 京都大学臨界実験装置

(*) 関連事業「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」(2019・2020年度)

7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

7.1.2 中性子検出器の未臨界度測定への適用性確認

a. 試験計画

表 前年度までの関連事業で実施したKUCA試験のまとめと今回の試験内容

試験6	中性子検出器	目的	成果
KUCA試験 (1回目、2回目)	B10比例計数管	ウラン燃料による、小型の体系で未臨界度を測れることを確認する	<ul style="list-style-type: none"> ・ 中性子増倍率=0.95の臨界近傍から、0.7の深い未臨界まで、異なる未臨界度に対する測定誤差（2%～10%） ・ 燃料デブリと水の混合状態の不確かさ（中性子エネルギースペクトル）による測定誤差への影響は小さい ・ 測定可能な燃料デブリと検出器の距離は水中20cm以内、気中35cm以内
KUCA試験 (3回目)	B10比例計数管	ウラン燃料による、大型(均一)の体系で未臨界度を測れることを確認する	検出器近傍の局所的な未臨界度を監視できることを確認（体系全体の監視は困難）
KUCA試験 (4回目)	B10比例計数管	大型で不均一の体系、および中性子吸収材の配置による影響を確認する	不均一な燃料デブリを模擬した体系で未臨界度測定を行い、位置依存性を確認した。非溶解性の中性子吸収材の表面塗布を模擬した状態で試験を行い、未臨界度測定が可能であることを確認した。（-15～+14%）
KUCA試験 (5回目)	コロナ型 SiC型 マルチセルHe-3型	中性子検出器の代替候補が未臨界度測定できることの確認	2021年6月28日～7月9日 実施済 今回の試験対象

7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

7.1.2 中性子検出器の未臨界度測定への適用性確認

a. 試験計画

表 未臨界度測定のための中性子検出器の候補

No.	検出器名称	提供元	分類	備考
1	核分裂電離箱	Photonis	核分裂電離箱	PCV内部調査で採用が検討されている中性子検出器
2	改良小型B-10比例計数管	IRID／Hitachi-GE	ガス検出器	(関連事業(*)で検討されているもの)
3	B-10比例計数管	CETD		臨界Pjで検討を進めてきている中性子検出器(ファインマンα法による未臨界度測定に使えることが確認されているもの)
4	He-3比例計数管(マルチセル型He-3比例計数管)	CETD		
5	B-10コロナ検出器	RosRAO	半導体検出器	PCV内部調査で採用が検討されている中性子検出器
6	He-3コロナ検出器	RosRAO		(関連事業*で検討されている、耐放射線性の高い中性子検出器)
7	SiC検出器	IPL		
8	CMOS検出器	IRID／Hitachi-GE		

(*)関連事業「燃料デブリ・炉内構造物取り出しの基盤技術開発事業(小型中性子検出器の開発)」

7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

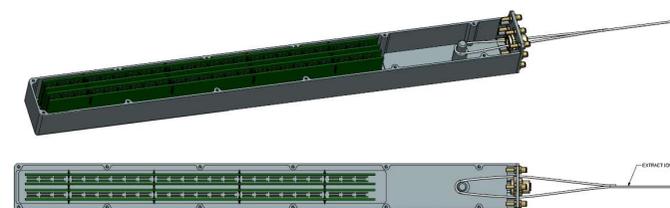
7.1.2 中性子検出器の未臨界度測定への適用性確認

b. 試験準備・手配

今回のKUCA試験で性能評価した中性子検出器の外観

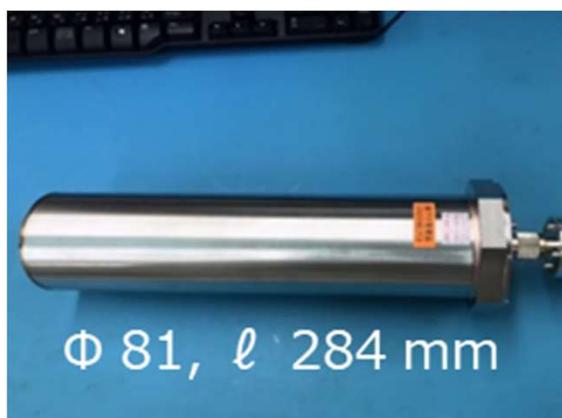


コロナ型 中性子検出器 (B-10/He-3)

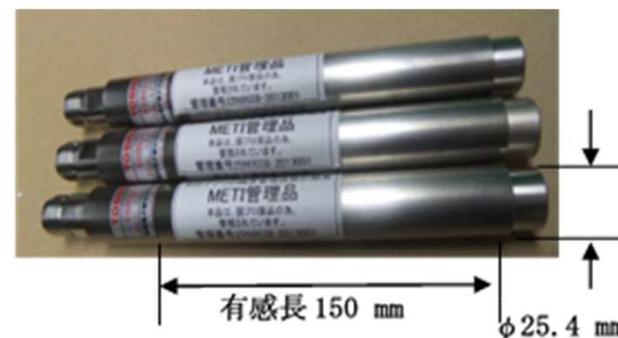


50 × 50 × 540 mm

SiC半導体型 中性子検出器



マルチセル型He-3比例計数管



従来型B-10比例計数管
(参考;今回は試験に用いていない)

7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

7.1.2 中性子検出器の未臨界度測定への適用性確認

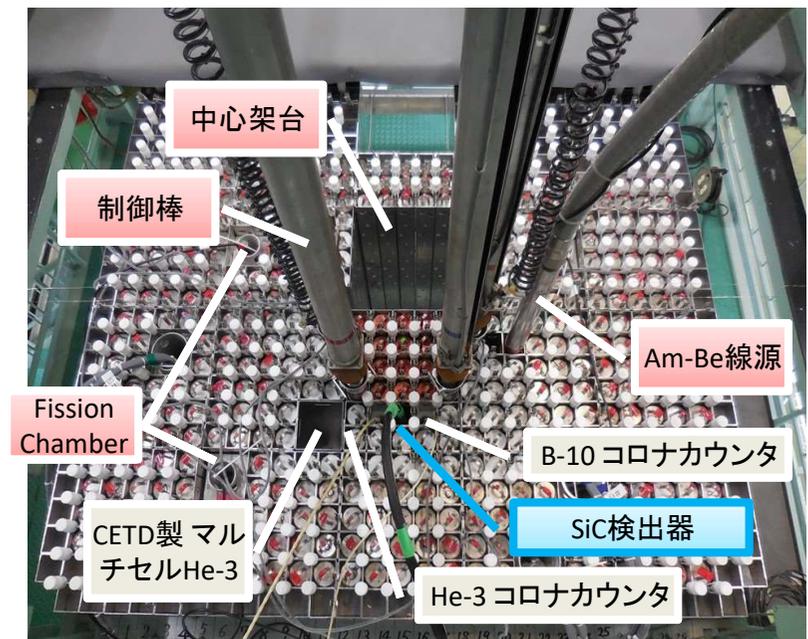
c. 要素試験

今回のKUCA試験体系

- 濃縮ウランとポリエチレン(固体減速材)を組み合わせた燃料体により、試験炉心を構成
- 試験対象の中性子検出器を燃料体に隣接して配置し、中性子カウントの時系列データを採取して、Feynman- α 法による分析を実施

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	ID	説明
り	9	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	1	3/8"p32EU燃料体
ぬ	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	2	1/8"p72EU燃料体
る	9	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	8	8	6	6	6	6	6	6	6	6	3	1/8"p54EUEU燃料体
を	9	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	8	8	6	6	6	6	6	6	6	6	4	3/8"p10EU燃料体
わ	9	6	6	6	8	8	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5	吸収材サンプルセル
か	9	6	6	6	8	8	6	6	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	6	6	6	6	旧PEブロックセル
よ	9	6	6	6	6	6	6	6	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	6	6	6	7	新PEブロックセル
た	9	6	6	6	6	6	6	6	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	6	6	6	8	ポイド, KUCA計装セル
れ	9	6	6	6	6	6	6	6	6	7	7	D	7	7	1	7	7	E	7	7	6	6	6	9	黒鉛セル
そ	9	6	6	6	6	6	6	6	6	7	7	7	1	1	1	1	1	7	7	7	6	6	6	A	制御棒フルストローク
つ	9	6	6	6	6	6	6	6	6	7	7	E	1	1	1	1	1	B	8	10	6	6	6	B	C1ロードセル(調整棒)
ね	9	6	6	6	6	6	6	6	6	7	7	7	1	1	1	1	1	7	7	7	6	6	6	C	C2ロードセル(調整棒)
な	9	6	6	6	6	6	6	6	6	7	7	7	C	1	1	1	E	7	7	7	6	6	6	D	C3ロードセル(調整棒)
ら	9	6	6	8	8	6	6	6	6	7	K	K	7	F	G	H	7	7	7	7	6	6	6	E	安全棒セル(S4~S5)
む	9	6	6	8	8	6	6	6	6	7	K	K	7	7	7	7	7	7	7	7	6	6	6	F	He-3 コロナカウンタ
う	9	6	6	6	6	6	6	6	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	6	6	6	G	IPL製SiC検出器
ぬ	9	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	H	B-10 コロナカウンタ
の	9	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	K	CETD製 マルチセルHe-3
お	9	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6		
く	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9		
や	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	10	AmBe線源

KUCA試験炉心と検出器の配置図 (keff=0.95)



実際の試験の様子

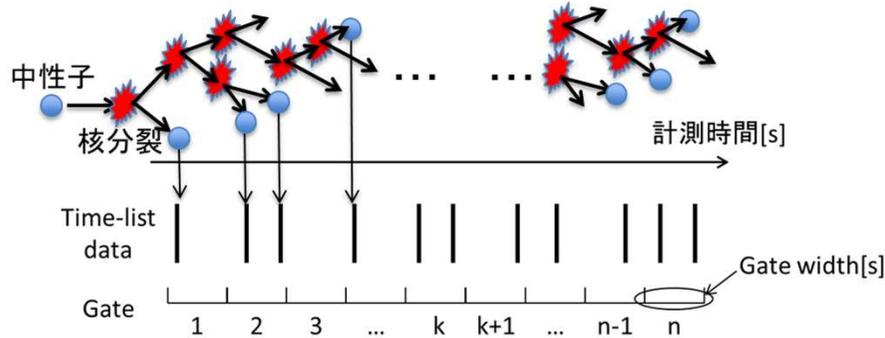
7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

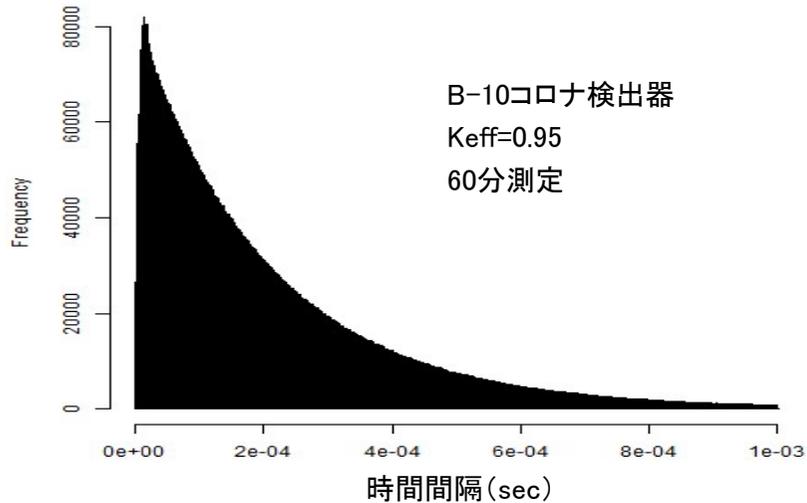
7.1.2 中性子検出器の未臨界度測定への適用性確認

c. 要素試験

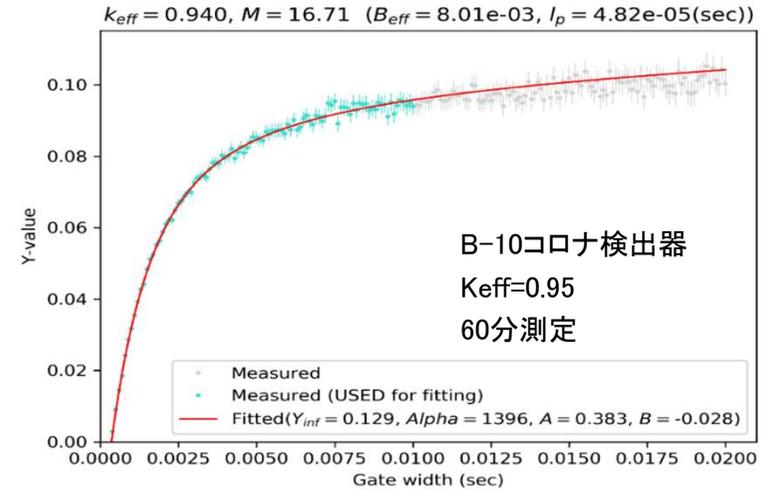
未臨界度測定 (Feynman- α 法) の評価の手順



取得するデータ(タイムリストデータ)のイメージ



タイムリストデータの頻度分布



分散対平均比(Y値)をプロット

$$Y(\Delta T) = Y_{\infty} \left(1 - \frac{1 - \exp(-\alpha \Delta T)}{\alpha \Delta T} \right)$$

理論式でフィッティング(赤線)して α (即発中性子減衰定数)を求める。

$$k_{eff} = \frac{1 - \alpha l}{1 - \beta}$$

測定された α と事前に計算した l 、 β より k_{eff} を求める。

上記で得られた k_{eff} と、解析コードで計算した k_{eff} (参照解)を比較した。

7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

7.1.2 中性子検出器の未臨界度測定への適用性確認

c. 要素試験

今回のKUCA試験結果(コロナ型、マルチセル型)

- コロナ型、マルチセルHe-3型検出器について、従来のB-10比例計数管と同程度の精度で未臨界度測定できることを確認した(図、表)。
- マルチセルHe-3型検出器については、計数指示値が変動して動作不安定となる事象が確認された。

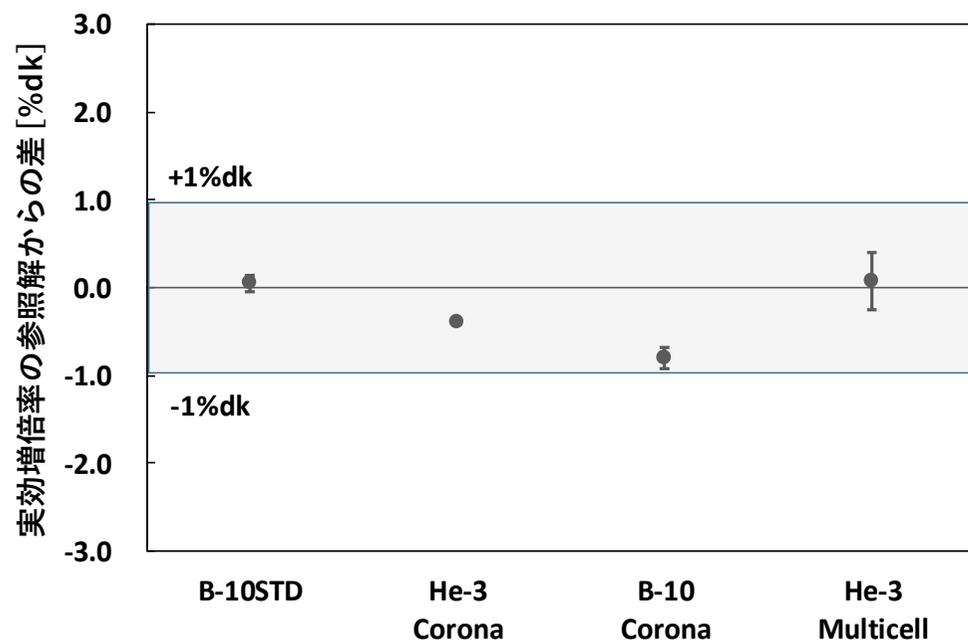


図 測定値と参照解の差 (keff=0.95)

	B-10 比例計数 管	He-3 コロ ナ検出器	B-10 コロ ナ検出器	マルチセ ル型He-3 比例計数 管
参照解か らの差	+0.05%dk	-0.39%dk	-0.80%dk	+0.08%dk
不確かさ	± 0.09%dk	± 0.03%dk	± 0.12%dk	± 0.32%dk
測定時間 (分)	30, 30	10, 10, 12, 33, 60	10, 10, 12, 30, 60	10
データ数	2	5	5	1

表 各検出器の測定結果(keff=0.95)

MVPコードによるKUCA試験体系のkeff計算は臨界状態で0.5%dk程度過大評価する傾向があるので、これを補正している

7. 実施内容

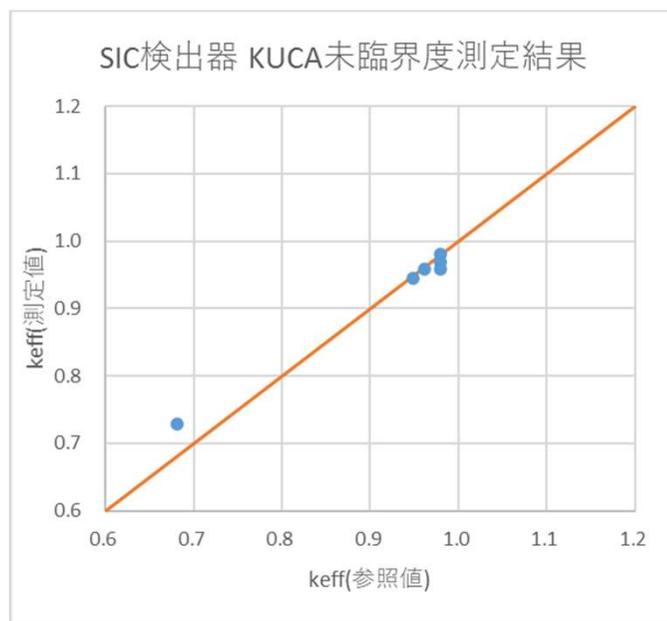
7.1 現場運用手順の開発

7.1.2 中性子検出器の未臨界度測定への適用性確認

c. 要素試験

今回のKUCA試験結果(SiC半導体型)

- SiC半導体型検出器で取得されたデータをファインマン α 法で処理し、未臨界度を評価した。下図表に示す通り、 k_{eff} が0.9近傍であれば、概ね1%程度の差で未臨界度を測定可能であることを確認した。未臨界度が深い場合には、参照値との差が7%程度まで拡大するが、従来のB-10比例計数管と同程度の精度で未臨界度測定できることを確認した。



参照値: MVPによる炉心解析値

図 測定値と参照値の差 (SiC半導体型 中性子検出器)

表 各試験体系での測定結果

試験炉心	参照値	測定値	差(%)	備考
Case1-1 (keff=0.95)	0.948	0.944	-0.4	
Case1-2 (keff=0.97)	0.962	0.958	-0.4	
Case1-3 (keff=0.98)	0.979	0.968	-1.1	パルス弁別 パラメータを 変えた測定
	0.979	0.958	-2.1	
	0.979	0.981	0.2	
Case1-4 (keff=0.70)	0.681	0.729	7.0	

7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

7.1.2 中性子検出器の未臨界度測定への適用性確認 成果まとめ

【今年度の成果】

- ✓ 3種類の新型中性子検出器(コロナ型、SiC型、マルチセルHe-3型)について、KUC Aにて未臨界度測定試験を実施した。
- ✓ コロナ型、マルチセルHe-3型、SiC半導体型検出器について、従来のB-10比例計数管と同程度の精度で未臨界度測定できることを確認した。

【今後の計画】

- ✓ コロナ型、マルチセルHe-3型検出器についてはガンマ線環境下の中性子測定試験を行う。
- ✓ 現場で想定されるガンマ線環境下における影響を考慮して、総合的に未臨界度測定性能を評価する。

令和4年3月中間時点

7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

7.1.3 中性子吸収材の運用手順

【課題】

関連事業^(*)において、非溶解性中性子吸収材を燃料デブリに投入する方法が検討されている。(図1)デブリ取り出し工法チームと運用手順やスループットを協議するためには、中性子吸収材散布や投入装置運用の手順を具体化する必要がある。

【実施内容】

- 関連事業^(*)で検討された燃料デブリ取り出し工法と加工・回収装置に対して、非溶解性中性子吸収材を燃料デブリに散布する手順をステップ図に整理する。
- 燃料デブリ加工シーンに対する適用条件、吸収材の使い分け、事前投入の有効性、投入装置の小型軽量化、について検討する。
- 臨界近接監視の運用手順(項目7.1.1)と併せて、全体の手順の運用性、成立性を評価する。

【目標】

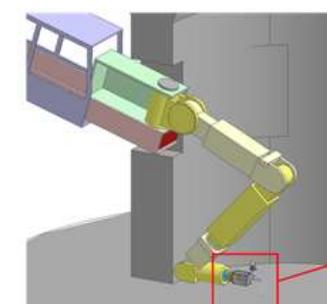
- 非溶解性中性子吸収材の現場運用手順を策定し、燃料デブリ取り出し工法チームと共有する。



B・Gd入
ガラス材

Gd₂O₃
粒子

水ガラス/
Gd₂O₃造粒粉



固体(粉体)向け投入装置の例



図1 燃料デブリへの吸収材投入のイメージ

(*)関連事業「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」(2019・2020年度)

7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

7.1.3 中性子吸収材の運用手順

a. 前提条件の整理

吸収材の使い分け方法

- 燃料デブリの形状は、棒状、粒状など、様々な形状が想定される。様々な燃料デブリ形状に対応して、中性子吸収材も最適なタイプを使い分ける方針がこれまでに示されている。
- 非溶解性中性子吸収材は、固体タイプと、時間経過により液体から固体へ固化するタイプ（水ガラスタイプ）に分けられる。水ガラスタイプは、投入直後に流動性・粘性を有するため、残存燃料（切株燃料）が垂直に林立するような場合（図5）、燃料デブリの間隙が小さい場合（図3,4）、燃料デブリ表面の凹凸が大きい場合（図6）には有効である。

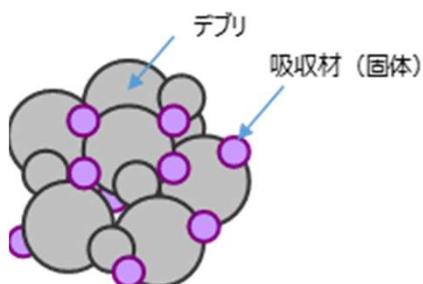


図1 小石状の燃料デブリに固体タイプの吸収材を使用

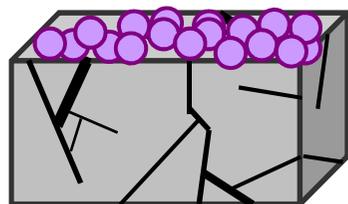


図2 岩盤状の燃料デブリに固体タイプの吸収材を使用



図3 小石状の燃料デブリに液体→固化タイプの吸収材を使用

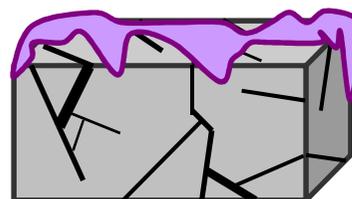


図4 岩盤状の燃料デブリに液体→固化タイプの吸収材を使用

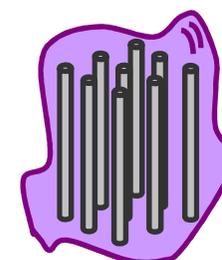


図5 棒状の燃料デブリに液体→固化タイプの吸収材を使用



図6 凹凸の大きな燃料デブリに液体→固化タイプの吸収材を使用

7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

7.1.3 中性子吸収材の運用手順

a. 前提条件の整理 深層防護の位置づけ

- 非溶解性中性子吸収材の使用は燃料デブリ取り出しのスループットに影響するため、取り出し加工位置においてはレベル2で使用する方針。

(注)この表は、常時ホウ酸水を使用しない場合で、燃料デブリ取り出し作業に起因して臨界となる事象を対象としている。燃料デブリ等落下に起因する事象については、No.46参照

レベル1(通常状態)	レベル2(逸脱状態)	レベル3(異常状態)	機能要求
<p>取り出し作業制限(注)</p>	<p>失敗 ↓ (臨界近接発生)</p>		<p>中性子吸収材による臨界発生防止及び臨界近接監視による取り出し作業の停止ができること</p>
	<p>臨界近接監視</p> <p>↓</p> <p>取り出し作業中止</p> <p>↓</p> <p>事象進展は止まる</p> <p>↓</p> <p>非溶解性中性子吸収材</p>	<p>失敗(臨界発生)</p>	
<p>成功 (臨界到達前の臨界近接終了・状態復帰)</p>		<p>臨界検知 中性子検出器／ ガスサンプリング系システム</p> <p>↓</p> <p>緊急ホウ酸水注入</p>	<p>臨界発生時に核反応を停止できること。臨界時に発生した放射性物質の影響を低減できること</p>
	<p>成功(臨界終息)</p>	<p>失敗(臨界継続)</p> <p>↓</p> <p>ホウ酸水追加注入 給水停止による水位低下 放射性ガス放出抑制</p>	
	<p>成功(臨界終息・外部への放射性物質放出抑制)</p>		<p>一般公衆・作業員過剰被ばく防止</p>

7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

7.1.3 中性子吸収材の運用手順

b.手順の検討

7.1.3.bの実施内容の概要

燃料デブリ取り出し工法チームと運用手順やスループットを協議する中で、課題として挙げられた6項目について、検討を実施した。

--- 上取り出し工法 --- ----- 横取り出し工法 ----- - 一体搬出工法 - -

①吸収材使用の判断、レベル1への復帰手順(→No.41)

②吸収材の供給装置の仕様(→No.42)

③吸収材の運用プロセス(→No.43)

④吸収材の搬入出のプロセス(→No.44)

⑤固化型吸収材の硬化時間(→No.45)

⑥吸収材の事前散布の有効性評価(→No.46)

7. 実施内容

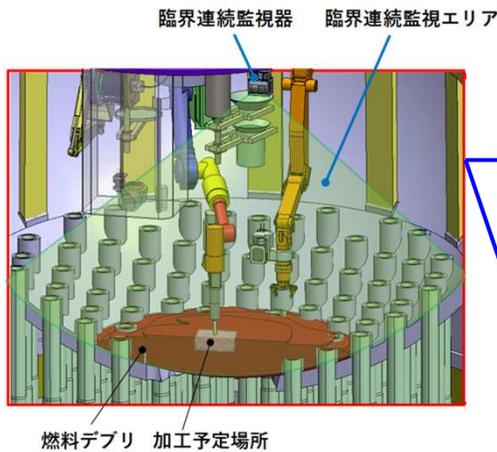
7.1 現場運用手順の開発

7.1.3 中性子吸収材の運用手順

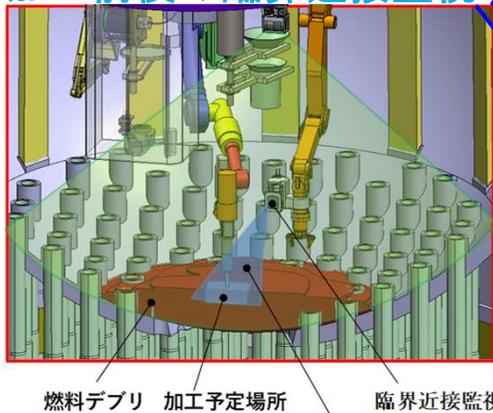
b. 手順の検討 ①吸収材使用の判断、レベル1への復帰手順

- 吸収材使用の判断と、レベル1への復帰の手順を整理した

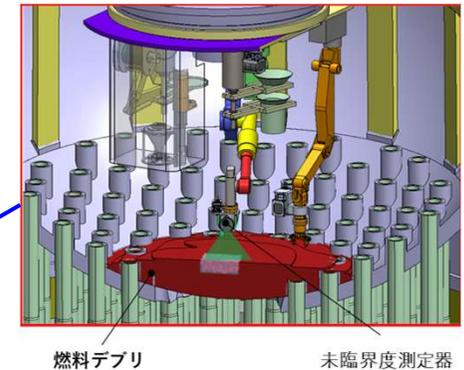
加工中の中性子束連続監視



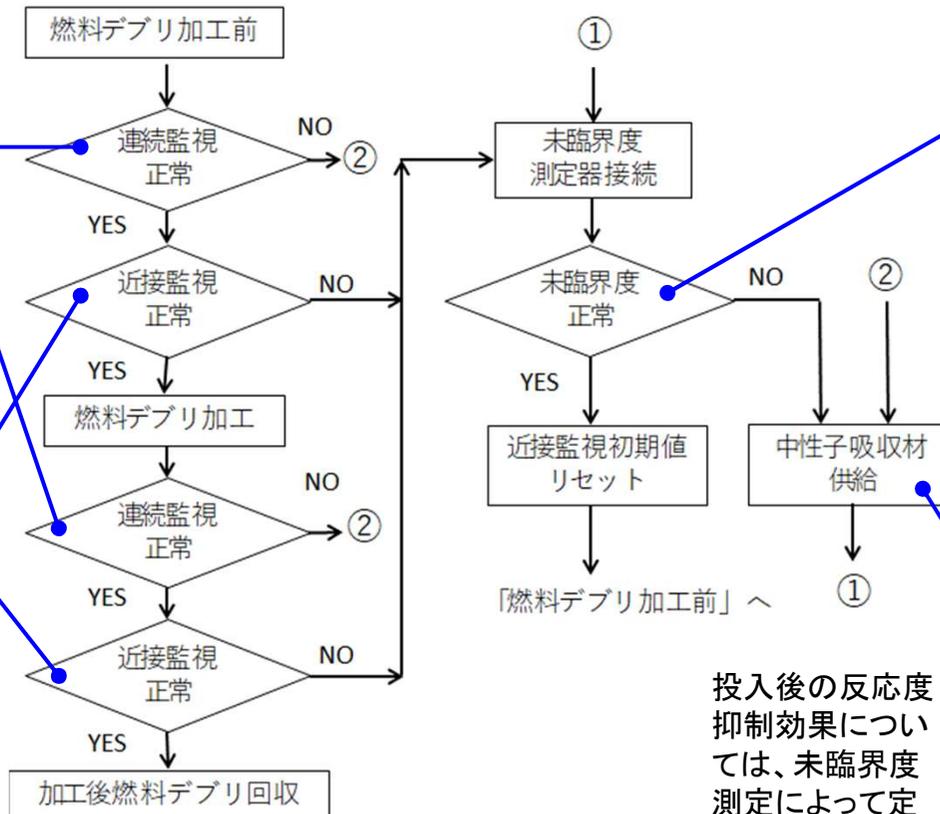
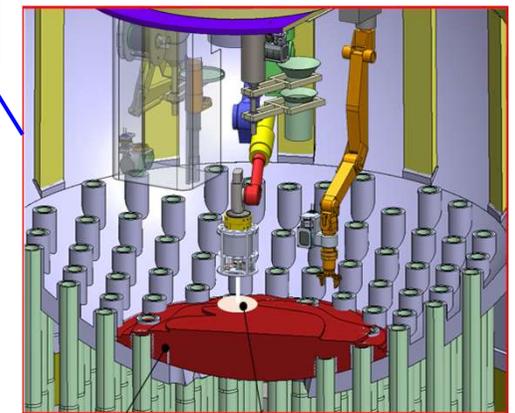
加工前後の臨界近接監視



未臨界度測定



中性子吸収材投入



投入後の反応度抑制効果については、未臨界度測定によって定量・確認する。

7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

7.1.3 中性子吸収材の運用手順

b. 手順の検討 ②吸収材の供給装置の仕様

- 関連事業(*)において見直された吸収材の必要量(表)に基づき、吸収材の供給装置の仕様を見直して、体積を約半分に小型化した。(図1, 2)

表 吸収材の必要量

非溶解性中性子吸収材	吸収材重量(注1) (kg/日)	吸収材容量 (リットル/日)
Gd ₂ O ₃ 粒子	6.4	1.5
水ガラス/Gd ₂ O ₃ 造粒粉材	6.3	3.0

注1: 1日あたりの燃料デブリ取り出し目標を300 kgと仮定する。
投入された吸収材の50%が有効に機能するものと仮定する(安全率2倍)

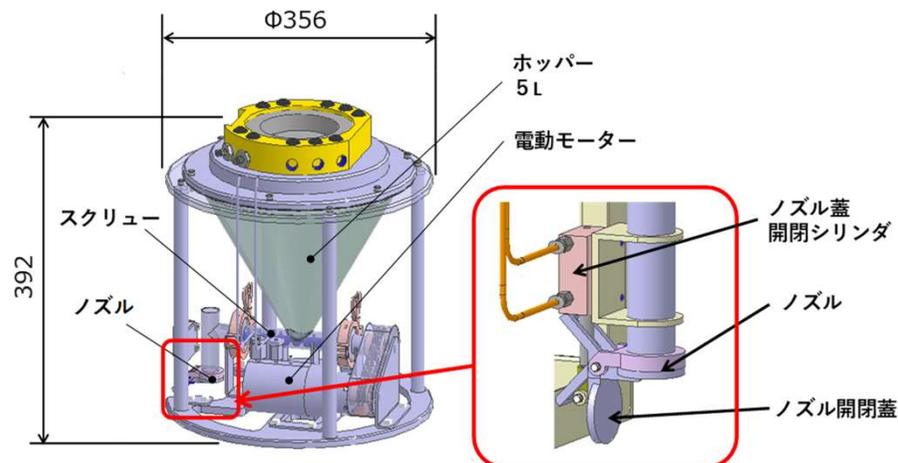


図1 固体タイプ(Gd₂O₃粒子)用の供給装置

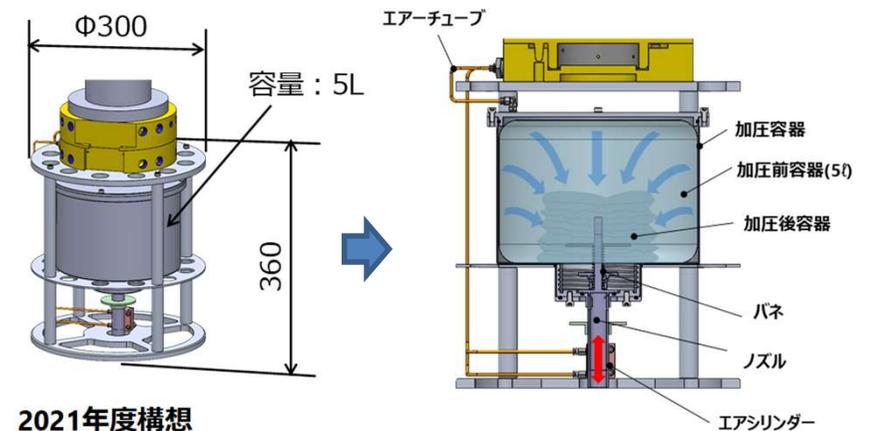


図2 固化体タイプ(水ガラス/Gd₂O₃造粒粉材)用の供給装置

7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

7.1.3 中性子吸収材の運用手順

b. 手順の検討 ③吸収材の運用プロセス

- 吸収材の現場運用において想定されるプロセスを検討した(表1、2)。
- 固化体タイプ吸収材(水ガラス)の場合には、原材料の混錬が必要になること、また、使用後の投入装置の水洗浄が必要になるため、固体タイプよりも運用プロセスが多くなる。

表1 固体タイプ(Gd₂O₃粒子、B・Gd入ガラス材)の運用プロセス

No.	運用プロセス	説明
1	吸収材の保管貯蔵	B・Gd入ガラス材、またはGd ₂ O ₃ 粒子は、吸収材として直ちに使用できる状態で保管されている。
2	吸収材の計量	作業に必要な吸収材の量を計量する。
3	投入装置に吸収材を装填	吸収材を投入装置のホッパーに装填する。
4	現場へ投入装置を移送	吸収材を装填した投入装置をマニピュレータに接続し、燃料デブリ取り出し現場の直上まで移送する。
5	燃料デブリへ吸収材を投入	燃料デブリ取り出し現場の直上から吸収材を投下し、燃料デブリ表面に散布する。
6	投入装置の帰還	投入終了後、投入装置を燃料デブリ取り出し現場から所定位置に帰還させる。

表2 固化体タイプ(水ガラス/Gd₂O₃造粒粉材)の運用プロセス

No.	運用プロセス	説明
1	原材料の保管貯蔵	水ガラス中性子吸収材の原材料は、①水ガラス、②ガドリニア造粒粉、③セメント、④第一リン酸Na、⑤水の5種。これらを作製場所に一時保管する。④と⑤は混ぜ合わせて水溶液として保管可能。
2	原材料の計量	吸収材の塗布量に必要な原材料をそれぞれ計量する。タンク保管する原材料を専用のスクイーズフィーダで混錬機に所定量投入する方法もある。
3	原材料の混錬(*)	混錬機で原材料を混錬し、水ガラス中性子吸収材を作製する。
4	投入装置に吸収材を装填	混錬機で作製した水ガラス中性子吸収材を投入装置のホッパーに装填する。
5	現場へ投入装置を移送	水ガラス中性子吸収材を装填した投入装置をマニピュレータに接続し、燃料デブリ取り出し現場の直上まで移送する。
6	燃料デブリへ吸収材を投入	燃料デブリ取り出し現場の直上から水ガラス吸収材を投下し、燃料デブリ表面に塗布する。
7	投入装置の帰還	塗布終了後、投入装置を燃料デブリ取り出し現場から所定位置に帰還させる。
8	投入装置の洗浄(*)	使用した混錬機および投入装置を水で洗浄し、付着した水ガラス吸収材を洗浄する。洗浄水を回収保管する。

(*)赤字は固化体タイプに特有のプロセスであり、固体タイプでは不要である

7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

7.1.3 中性子吸収材の運用手順

b. 手順の検討 ④吸収材の搬入出のプロセス

上取り出し工法(モバイルセル方式)の固化体タイプ(水ガラス/Gd₂O₃造粒粉材)の例

- 運用プロセスの多い固化体タイプについて、保管から使用、回収に至る搬送手順を検討した(図1,2)
- R/Bの限られたスペースを節約するため、吸収材は別の保守用建屋で保管、準備する。汚染された吸収材投入装置を建屋間移送するために、関連事業(*)で開発された搬送装置(モバイルセル)を利用する。モバイルセルは、燃料デブリを収納したユニット缶を移送するためのものである。
- 水ガラス吸収材を準備してから、燃料デブリに投入して、投入装置を回収するまでの搬送に要する時間は、往路2時間+帰路4時間程度(洗浄、搬出エリアの空気入替のため)=合計6時間程度と見積もった。
- 投入後の反応度抑制効果については、中性子検出器による未臨界度測定によって確認する。(No.41)

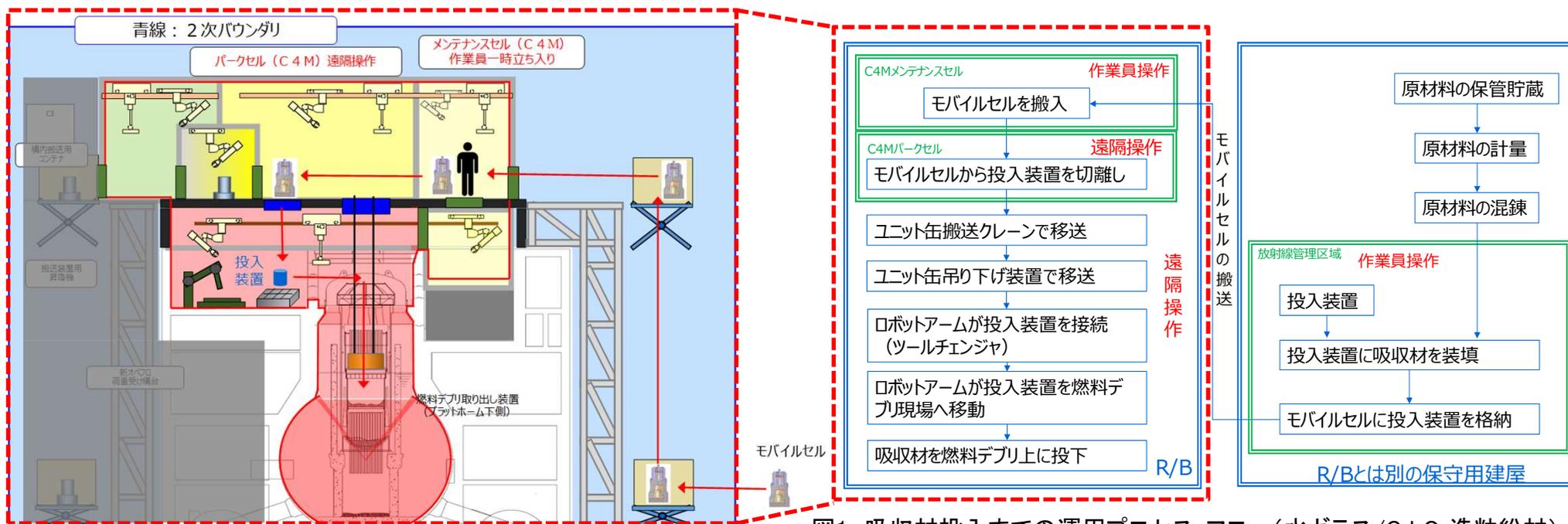


図2 供給装置の搬入経路

図1 吸収材投入までの運用プロセス・フロー(水ガラス/Gd₂O₃造粒粉材)

(投入後に投入装置およびモバイルセルを回収するプロセスは別)

7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

7.1.3 中性子吸収材の運用手順

b. 手順の検討 ⑤ 固化型吸収材の硬化時間

- 搬送時間に対して、固化体タイプ吸収材(水ガラス/Gd₂O₃造粒粉材)の課題が明らかになった。
- 投入までに固まらないように水ガラス吸収材を調整する必要がある(～2時間)。また、投入後に容器内部に残った残渣を洗浄するまでに固まらないように調整する必要がある。(ドライヤ・セパレータ・ピット(DSP)で洗浄する場合3時間程度、保守建屋で洗浄する場合6時間程度)
- 投入および洗浄が可能な粘度の範囲は0～5000[mPa・s]である。
- 硬化遅延材(表)の濃度を変えて(0.95～1.87wt%)試験を行い、5000[mPa・s]に到達するまでの時間を測定した。
- 試験の結果、硬化時間を5時間以上遅らせられる見通しが得られた(図)。6時間には少し不足しているが、今後搬送プロセスを詳細検討すれば、成立する見込みはあると考えられる。

表 水ガラス/Gd₂O₃造粒粉材の原料

原料	分類
主材	1号ケイ酸ソーダ(ボーマ比重55)
硬化剤	普通ポルトランドセメント
硬化遅延材	第一リン酸ナトリウム
水	イオン交換水
中性子吸収材	酸化ガドリニウム

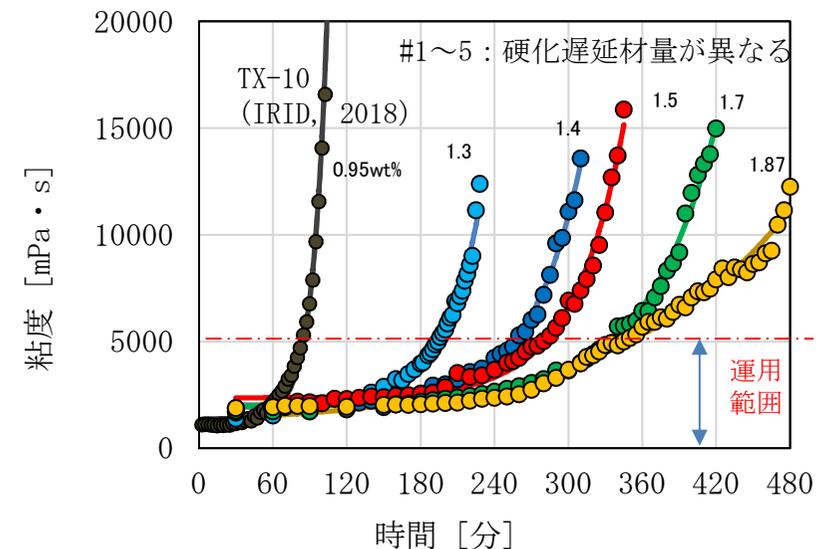


図 水ガラス/Gd₂O₃造粒粉材の混合後の経過時間と粘度の試験結果

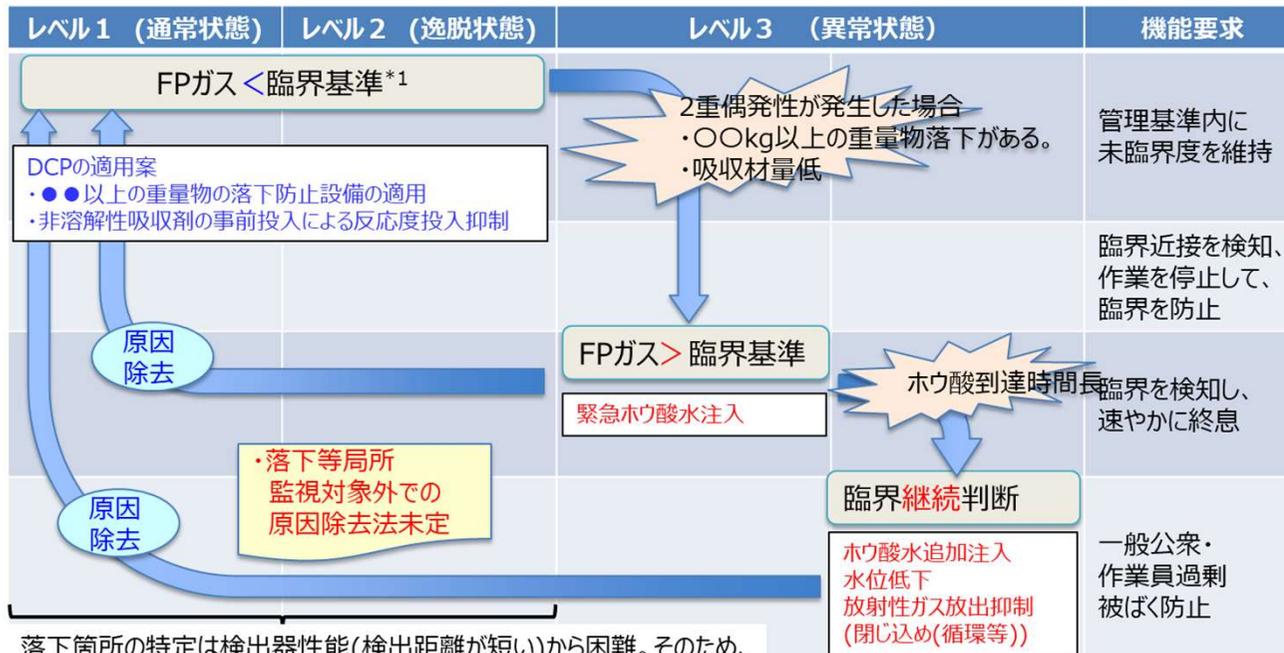
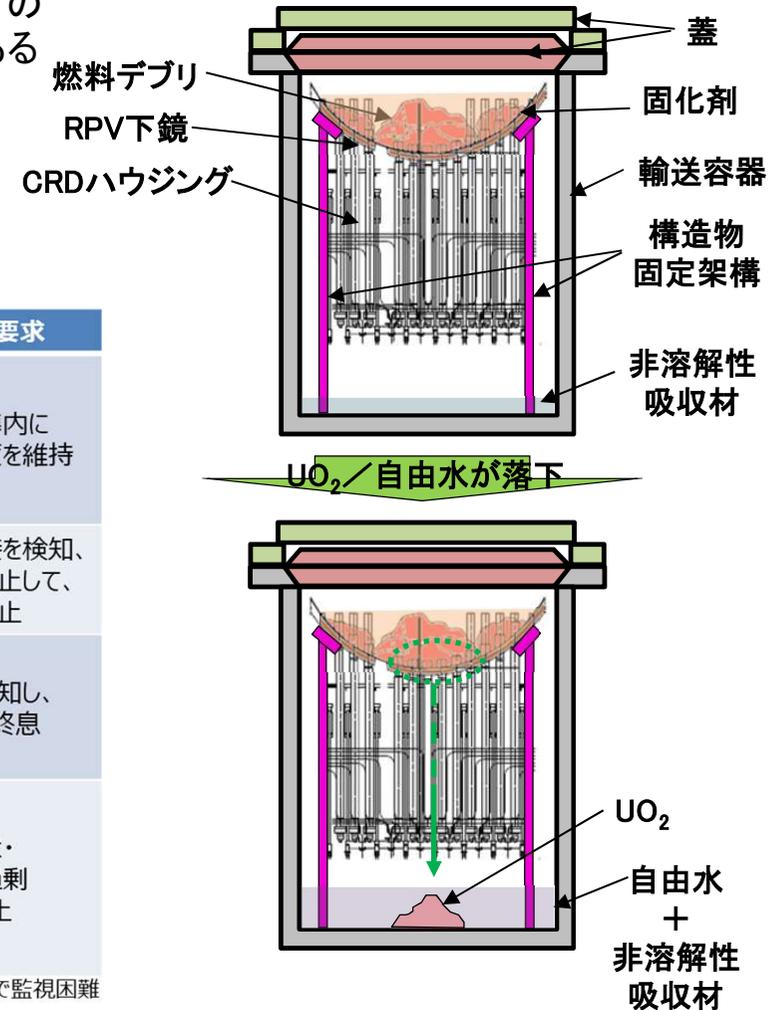
7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

7.1.3 中性子吸収材の運用手順

b. 手順の検討 ⑥吸収材の事前散布の有効性評価

- 燃料デブリ加工箇所以外での臨界リスク対応方法としての非溶解性吸収材の適用性を検討した。具体的な臨界リスクには、機材や燃料デブリの落下がある
- 局所の未臨界度を測定できないため事前投入が対策案となる
- 例として大型輸送容器内での燃料落下に伴う臨界リスク防止への有効性を評価した
- 今後、ペDESTAL内作業における落下対策の要否と適用性を検討予定



落下箇所の特定は検出器性能(検出距離が短い)から困難。そのため、DCPによる防止を適用。

*1) 落下事象による局所臨界近接はガスモニタで監視困難

燃料デブリ加工箇所以外の事象による反応度投入に対する臨界管理方法

輸送容器内の収納イメージ

7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

7.1.3 中性子吸収材の運用手順

d. 中間まとめ

【今年度の成果】

燃料デブリ取り出し工法チーム(上取り出し/横取り出し/一体搬出)と運用手順やスループットを協議しつつ、下記の項目を具体化して共有した。

- 吸収材使用の要否を臨界近接監視によって判断する手順
- 吸収材を使用後にレベル1に復帰するための手順
- 吸収材供給装置の仕様を小型化
- 吸収材の炉心内への搬送手順と搬送に要する時間
- 燃料落下に起因する臨界対策として吸収材の事前散布による有効性

これらは今後、燃料デブリ取り出し工法を具体化する際に考慮すべき前提条件となる。

【今後の計画】

上記手順に基づき、検討を拡充して、燃料デブリ取り出しのスループットへの影響を評価し、運用手順の最適化を目指す。

令和4年3月中間時点

7. 実施内容

7.2 固化型吸収材技術(水ガラス)の開発

【課題】

関連事業(*1)で開発された非溶解性中性子吸収材のうち、水ガラスタイプの吸収材(以下、水ガラス材)は粘性固化体であり、**燃料デブリ表面を覆って付着**する(図1)。

- 燃料デブリ表面を水ガラス材が覆っているような場合(図2)、**燃料デブリの乾燥を阻害**する懸念が指摘されている。

【実施内容】

- 関連事業(*2)で得られた燃料デブリの乾燥プロセスにおける条件を参考に、**水ガラス材を被覆した試験体の含水率変化を測定**した。
 - 試験体には、 UO_2 と同様の乾燥挙動であった Al_2O_3 の多孔質セラミックスを採用。
 - 本年度の試験では、外気と接触する面を完全に被覆した条件で試験を実施した。
 - 乾燥状態の**目標値を含水率0.54 vol%に設定**(含水ゼオライト0.3wt%に相当)

【目標】

- 水ガラス材を被覆した燃料デブリの乾燥プロセスへの影響に関するデータの取得

主要成果:

- 水ガラス材が付着した燃料デブリの乾燥プロセスへの影響に関する、定量的なデータを取得する。
- 現状の各PJ(取り出し作業および乾燥処理関連)との調整により、取り出し作業工程の影響把握や乾燥条件の設定のために必要な、現場適用性に向けた検討に協力できる。
 - 試験体の目標を「**含水率0.3wt%(ゼオライト換算)**」することで、収納缶PJで実施している燃料デブリの乾燥試験と同等の評価となり、本研究での成果をフィードバックが可能。

(*1)関連事業「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」(2019・2020年度)

(*2)関連事業「燃料デブリの性状把握・処置技術の開発」(2014年度)、「燃料デブリの性状把握」(2015年度、2016年度)



図1 水ガラスタイプの中性子吸収材の模擬燃料デブリへの投入の様子

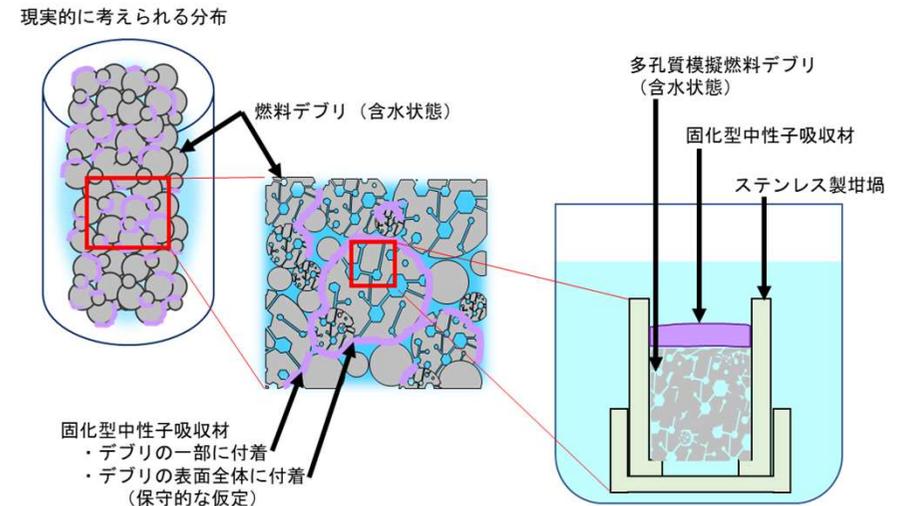


図2 収納缶における燃料デブリの状態の推定と模擬試験

7. 実施内容

7.2 固化型吸収材技術(水ガラス)の開発 a.試験計画

固化型吸収材の概要

- ・1号ケイ酸ソーダ(水ガラス)等に中性子吸収物質である Gd_2O_3 造粒粉を混ぜたもの(表1)。
- ・粘性のある液状で、時間が経過すると固化する。
- ・平面と異なる凹凸表面や斜面に対して適用できる。燃料デブリに付着させることができる。
- ・燃料デブリの形状は、棒状、粒状など、様々な形状が想定されており、中性子吸収材を使い分ける。

表1 水ガラスタイプの中性子吸収材の成分

成分	化学式
1号ケイ酸ソーダ	$Na_2O \cdot nSiO_2 \cdot xH_2O$
セメント	$SiO_2, CaO, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaSO_4$
第一リン酸ナトリウム	$NaH_2PO_4 \cdot 2H_2O$
水	H_2O
酸化ガドリニウム	Gd_2O_3



図 凹凸表面を水ガラス吸収材で覆った例

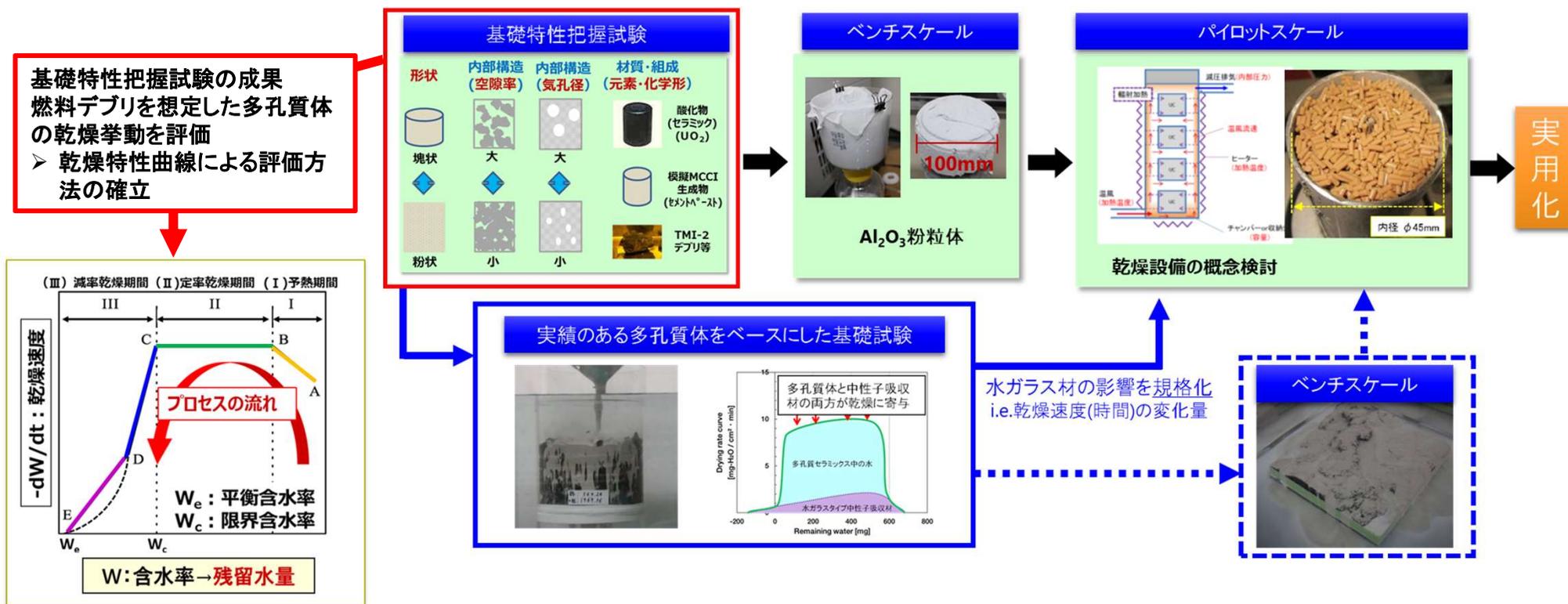


燃料デブリ表面を吸収材が覆っているような場合、**燃料デブリの乾燥を阻害する**懸念が指摘されている。

7. 実施内容

7.2 固化型吸収材技術(水ガラス)の開発 a.試験計画

固化型中性子吸収材の燃料デブリ乾燥特性への影響評価 実施概要



過去の事業(*1)の試験条件を参考として試験条件を定め、その結果と比較できる実験系で乾燥試験を実施し、乾燥挙動の違いを把握することで、水ガラス材が乾燥に与える影響を明らかにする。

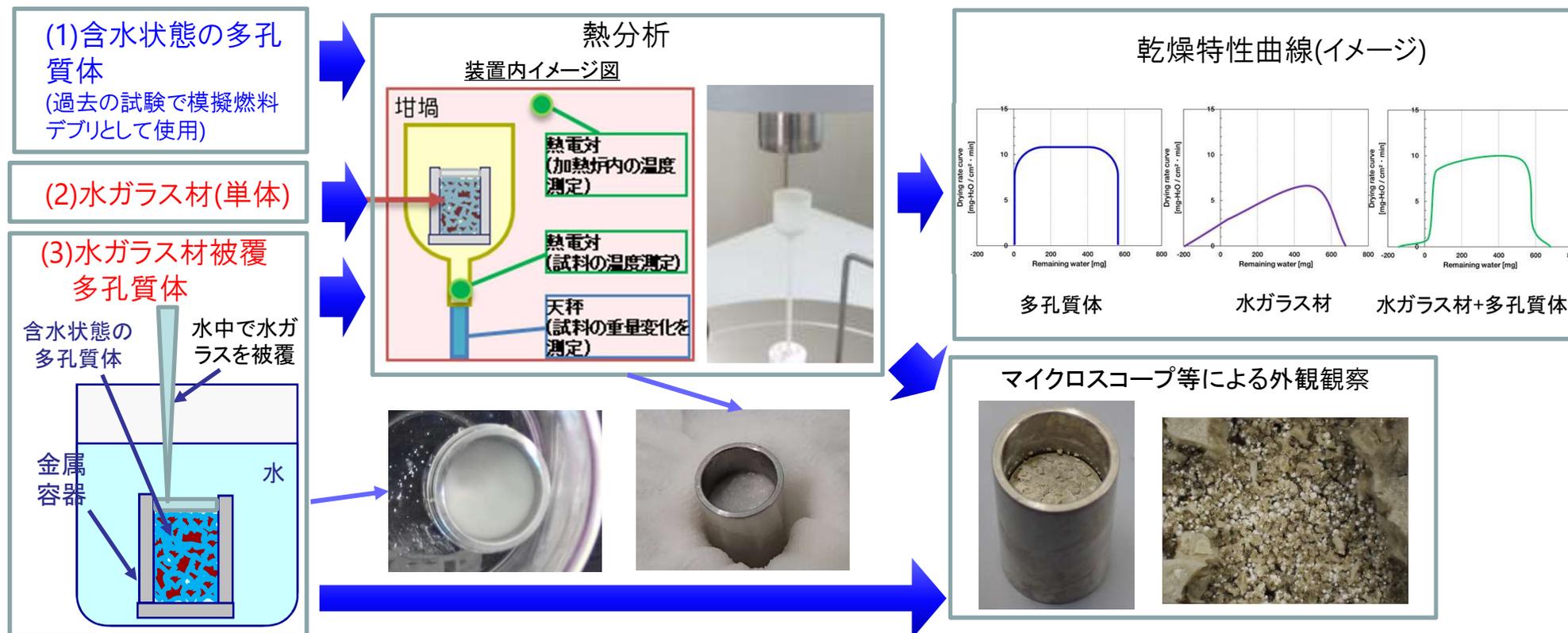
➢ 知見のある多孔質体を基材とした小規模の試験を実施

(*1) 関連事業「燃料デブリの性状把握・処置技術の開発」(2014年度)、「燃料デブリの性状把握」(2015年度, 2016年度)

7. 実施内容

7.2 固化型吸収材技術(水ガラス)の開発 b.試験準備

固化型中性子吸収材の燃料デブリ乾燥特性への影響評価 実施概要



水ガラス材を被覆した多孔質体について、含水した水分が蒸発し、乾燥に至ることを証明できる試験データを取得するため、

- ① 多孔質体由来の蒸発した水分は、水ガラス材を経由してから放出するように、水分の蒸発時のルートを一方向に制限した試験体を作製
- ② 水ガラス材の存在が乾燥挙動に与える影響を把握するため、3種の試験体の乾燥に係るデータを取得し、それぞれを比較
 - 乾燥特性曲線に必要なデータ(乾燥速度など)、試験体の含水量の経時変化
- ③ 乾燥処理前後の試験体について、水ガラス材の被覆状態の変化を観察

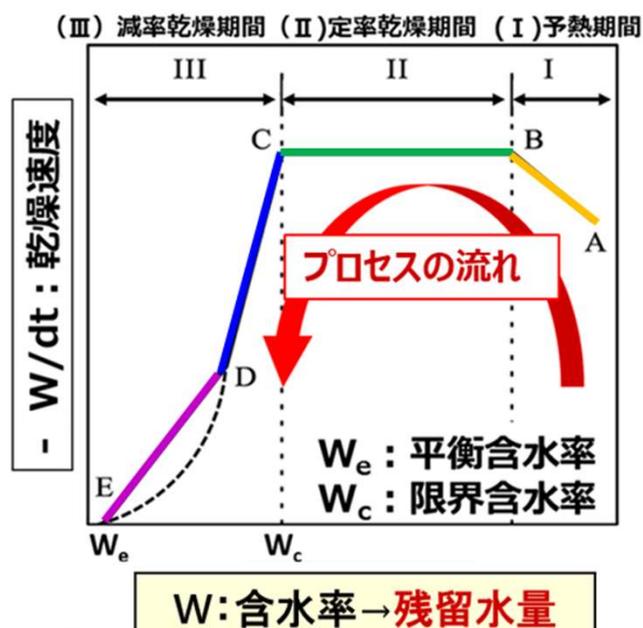
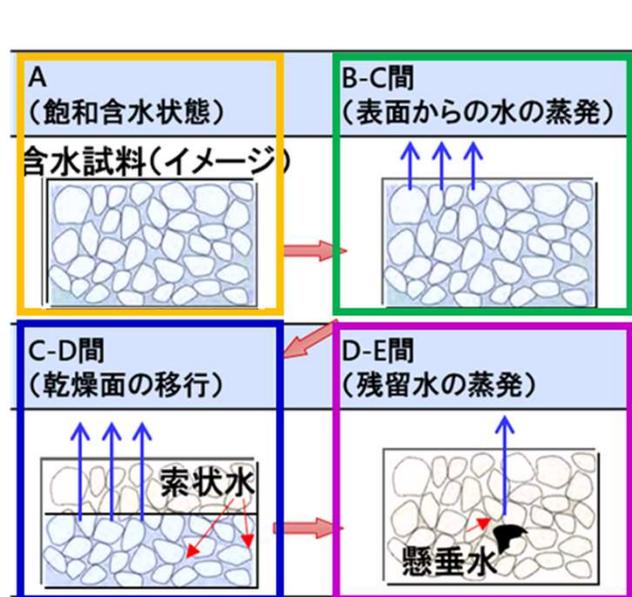
7. 実施内容

7.2 固化型吸収材技術(水ガラス)の開発

参考: 過去の知見(燃料デブリの乾燥挙動の調査) (*1)

- ▶ 過去、収納保管PJと協力して、燃料デブリの乾燥挙動の評価に関する基礎研究を実施
- ▶ 燃料デブリの場合、多くのパラメータ(形状、材質、乾燥温度等)が乾燥挙動に影響すると予想されたため、一元化した表現・比較が可能な**乾燥特性曲線**に独自に着目
- ▶ 比重が様々で含水率での比較ができない燃料デブリに適用するため、新たに乾燥速度と残留水の関係で評価する手法を考案し、最適な図示方法を検討
- ▶ 水ガラス材と多孔質体の乾燥に至るまでのメカニズムは異なるが、乾燥速度への影響度合いを明確にすることで、乾燥処理に与える影響を推察可能

◆乾燥特性曲線と乾燥の理論



含水率

$$W = \frac{(W_2 - W_1)}{W_1} \times 100 [\%]$$

乾燥重量: W_1
含水重量: W_2

平衡含水率: W_e

乾燥がそれ以上進行しない含水率

限界含水率: W_c

定率乾燥期間から減率乾燥期間に移行する時の含水率

W: 含水率 → 残留水量

7. 実施内容

7.2 固化型吸収材技術(水ガラス)の開発 b.試験準備 試験の基本条件とパラメータ

● 基本条件での試験(2021年度)

燃料デブリ性状PJにおける過去に実施した燃料デブリの乾燥試験*1を基準に設定

- ✓ 模擬材料: Al_2O_3 (過去の試験のリファレンス条件)
- ✓ 乾燥条件
 - 温度: 200°C *2 (過去の試験のリファレンス条件, 乾燥装置の基本条件)
 - 雰囲気: 不活性ガス(ガスフロー) (過去の試験のリファレンス条件)
- ✓ 含水状態: 飽和含水状態(過去の試験のリファレンス条件)
- ✓ 水ガラスの被覆方法: 固定 or 被覆無し

⇒ 上記の試験、及び水ガラス材単体についても乾燥挙動を調査し、**水ガラス材が乾燥処理に影響するか否か**判断。

● パラメータを変化させた試験(2022年度)

- ✓ 模擬材料の変更検討: **ゼオライト**(現状乾燥プロセス検討に利用しているもの)+比較のための Al_2O_3
- ✓ 水ガラス材の被覆方法
 - 被覆量を変更: 被覆量を変えることで**被覆厚みを変える**
 - 被覆面積を変更: 表面に対する**被覆割合を変える**
- ✓ その他、**他PJや廃炉事業者等の要求に応じて、乾燥温度などの処理条件を変化**

年度	模擬材料	試料寸法	水ガラス材	含水状態	乾燥条件
2021	Al_2O_3	Φ10×h10mm	被覆無し	飽和含水状態	200°C *2 Arガス雰囲気
			被覆量、被覆面積: 固定		
2022	Al_2O_3 , ゼオライト		被覆量、被覆面積: パラメータ	前年度の結果を見て検討	

*1 関連事業「燃料デブリの性状把握・処置技術の開発」(2014年度)、「燃料デブリの性状把握」(2015年度, 2016年度)

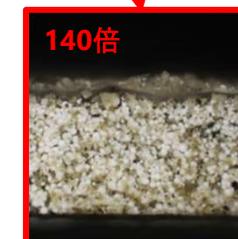
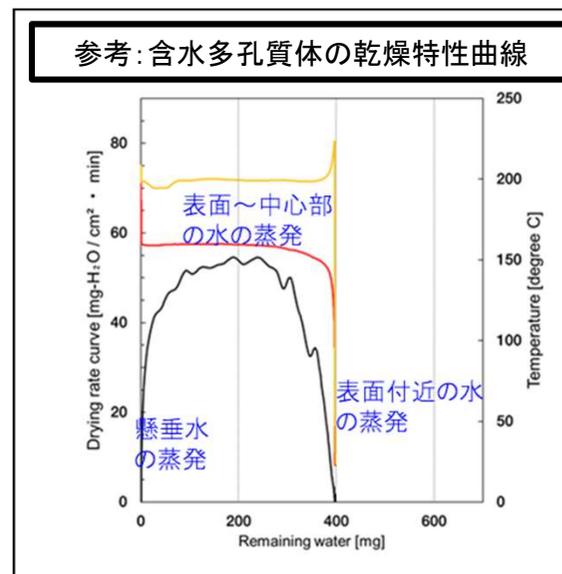
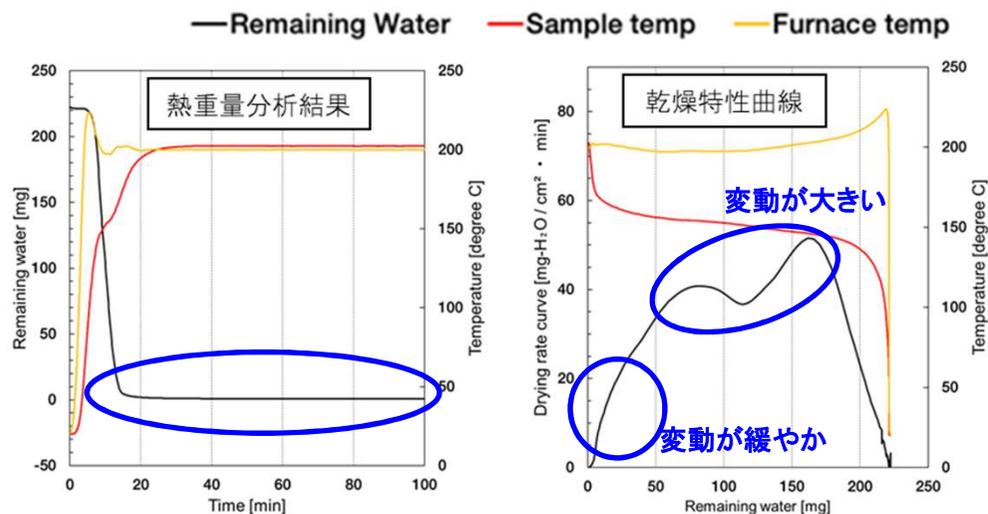
*2 収納保管PJでの乾燥プロセス検討における乾燥処理の温度

7. 実施内容

7.2 固化型吸収材技術(水ガラス)の開発 c.要素試験

水ガラス材単体の乾燥試験

水ガラス材の厚み: 1mm, 水中養生: 24時間



乾燥試験後の観察写真
(水ガラス材の側面)

- 熱重量分析の結果、水ガラス材単体でも、水ガラス材から水分が放出されない状態に至るまで乾燥が可能である。
- 乾燥試験後の外観観察から、粒子間に空間の存在を確認し、試験体中の水分が通過可能であると推察。
- 水ガラス材の乾燥速度は、多孔質体単体と同程度のオーダーであった。
- 水ガラス材の乾燥特性曲線は、全体としては含水多孔質体と類似する乾燥挙動を示したが、乾燥速度の変動は異なる傾向を示した。
 - 水ガラス材の結合水と、水ガラス材の粒子間中に存在する滞留水(自由水)では、乾燥速度が異なる可能性が示唆された。
 - 今後、水ガラス材の結晶構造の変化についても着目し、調査を進めて行く。

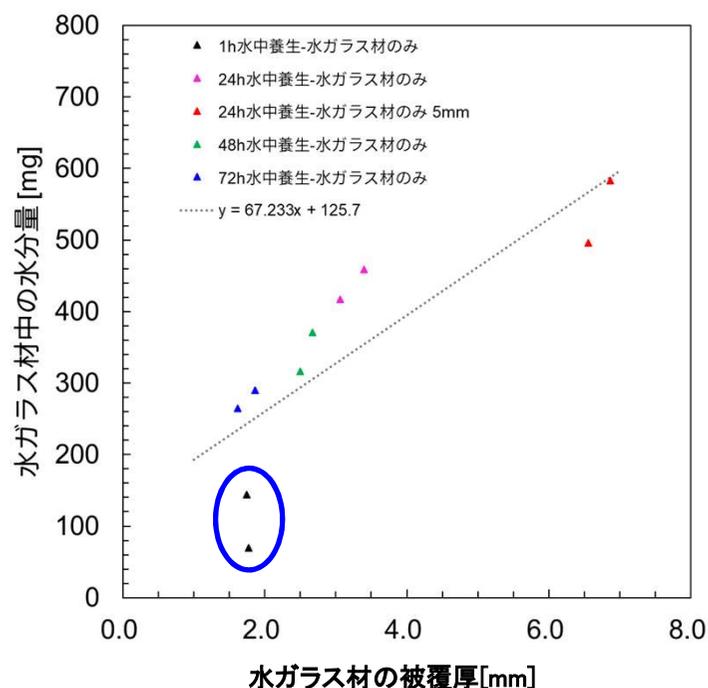
7. 実施内容

7.2 固化型吸収材技術(水ガラス)の開発 c.要素試験

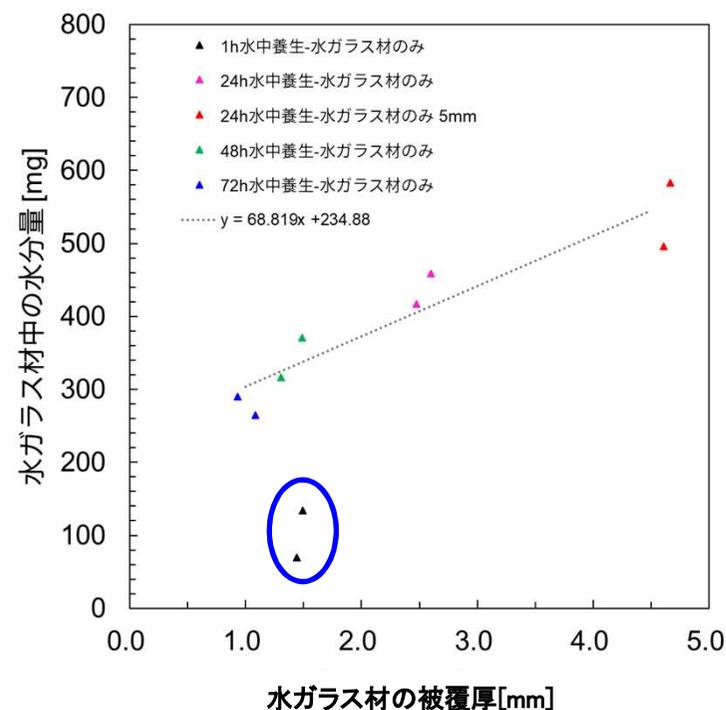
水ガラス材の厚みと水分量の相関性

- 水ガラス材の投入量と密度、坩堝径から水ガラス材の厚みを計算

(乾燥試験前での被覆厚の評価)



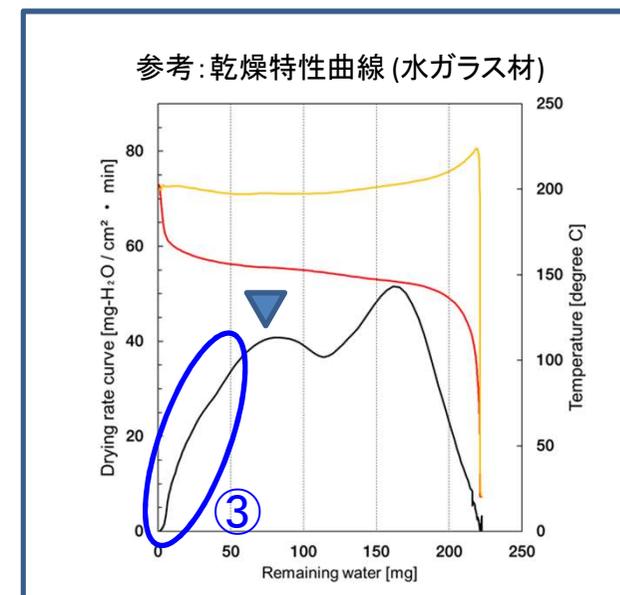
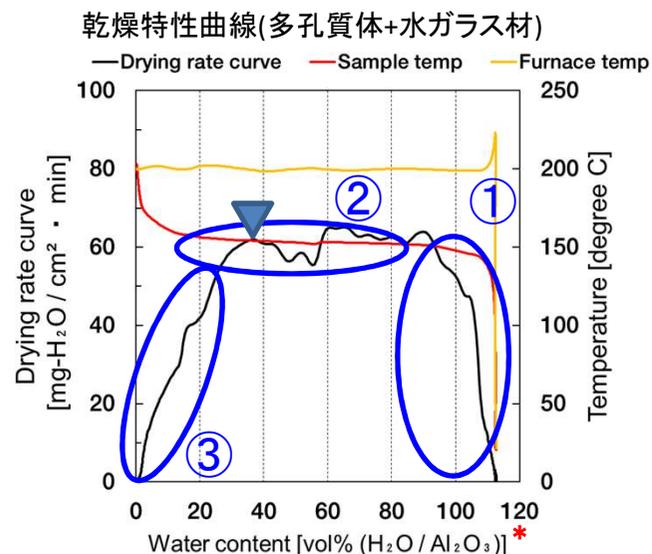
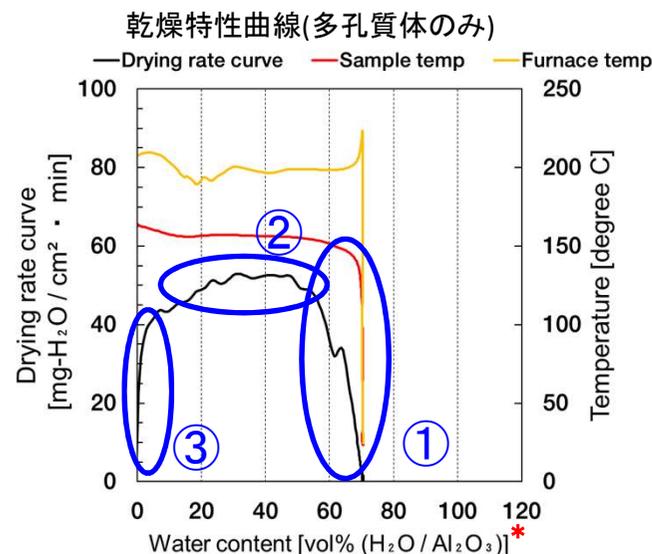
- 乾燥試験後に水ガラス材の厚みをマイクロスコープで測定 (乾燥試験後での被覆厚の評価)



- 熱分析で求めた重量変化を水分量として評価した。
- 両方法とも、被覆厚(平均値)と水分量の相関性を明らかにした。
 - データ蓄積による精度向上が必要であるが、水ガラス材の水分量の定量的な評価が可能
- 水中養生1時間においては、正確な水分量の評価が困難と判断し、定量性評価の対象外とした。

7. 実施内容

7.2 固化型吸収材技術(水ガラス)の開発 c.要素試験 乾燥特性曲線(被覆厚1mm・水中養生24時間)



● 乾燥特性曲線の比較

- ① 水ガラス材を被覆した試料は、予熱期間の乾燥速度が増加傾向にある。
- ② 水ガラス材を被覆した試料の乾燥速度は、多孔質体単体よりも、僅かに速い。
 - ①、②は、水ガラス材の水分(結合水)と、多孔質体から水ガラス材中を移動してきた自由水が、同時に蒸発していることに起因している可能性が示唆
- ③ 水ガラス材を被覆した試料は、乾燥終点付近の乾燥速度が僅かに減少する。
 - 水ガラス材の断続的な熱分解により発生した水が影響が支配的と推察

総合的には、乾燥速度の変化は多孔質体と水ガラス材が組み合わさったような挙動を示した。

*Water content: 「試験体に存在する水分量」と、「多孔質体の容積」を体積比で求めた値。
水ガラス材の水分量は、検量線にて求めた値を「試験体に存在する水分量」に加算

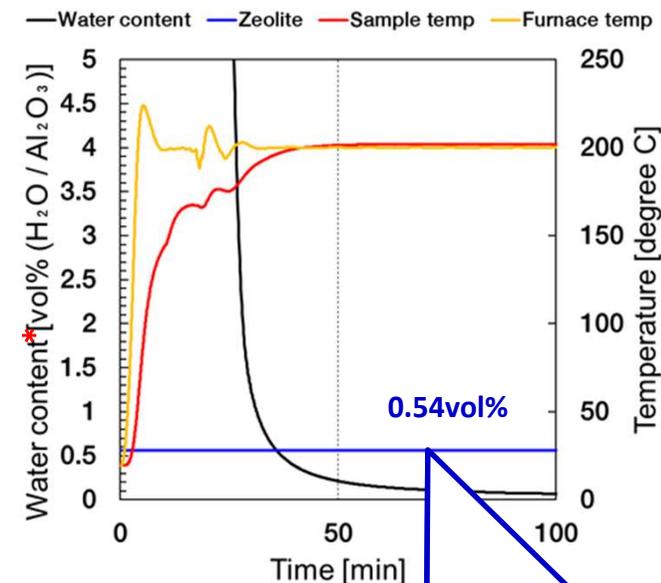
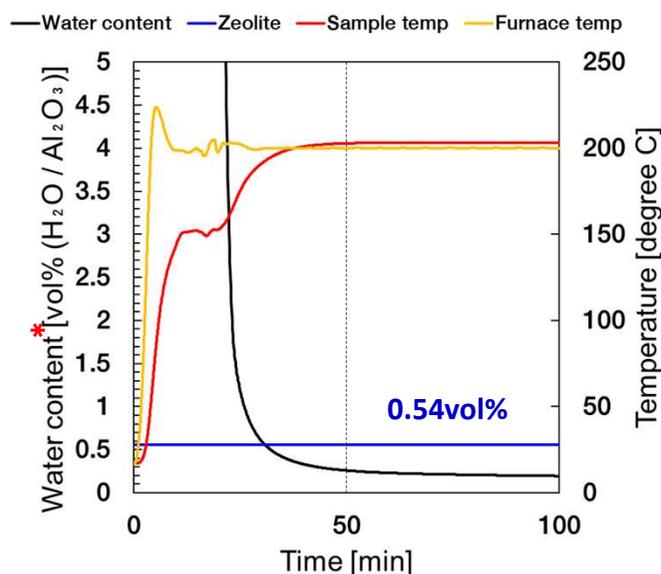
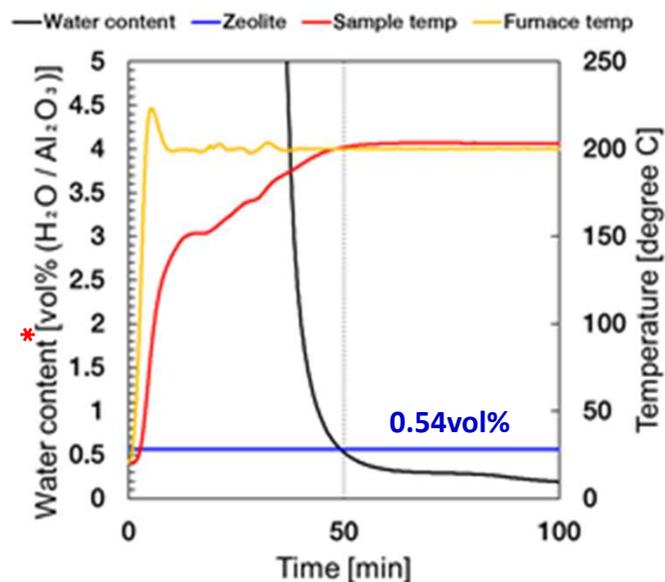
7. 実施内容

7.2 固化型吸収材技術(水ガラス)の開発 c.要素試験 含水率の経時変化曲線

多孔質体+水ガラス材
被覆厚5mm・水中養生24時間

多孔質体+水ガラス材
被覆厚1mm・水中養生24時間

多孔質体+水ガラス材
被覆厚1mm・水中養生72時間



水ガラス材の被覆厚を5mmとした試料においても、目標含水率未満となるまで、多孔質体を乾燥することが可能であった。

また、水中での養生時間は、24～72時間の範囲内においては、乾燥挙動に影響を与えないことを確認した。

収納缶Pj(実機スケールの含水ゼオライトの乾燥試験)の目標含水率
↓
ゼオライト換算で0.3wt% ≒ 0.54vol%
目標含水率: 0.54 vol%未満

*Water content: 「試験体に存在する水分量」と、「多孔質体の容積」を体積比で求めた値。
水ガラス材の水分量は、検量線にて求めた値を「試験体に存在する水分量」に加算

7. 実施内容

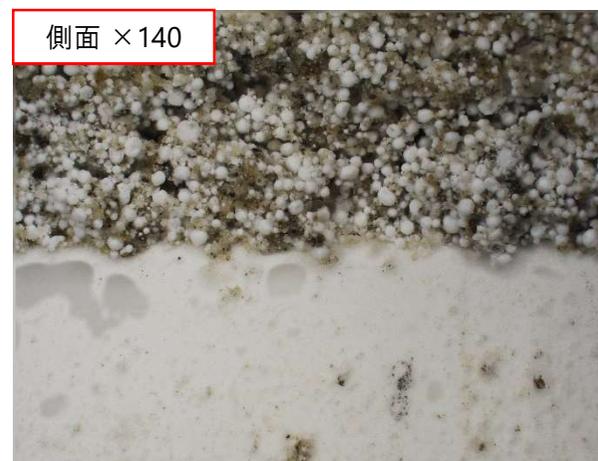
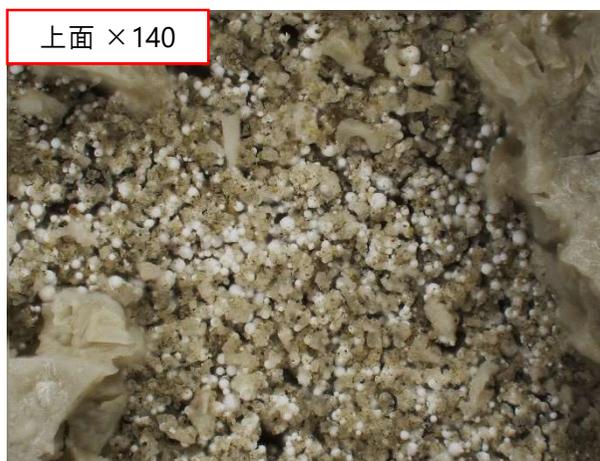
7.2 固化型吸収材技術(水ガラス)の開発 c.要素試験

試験後の水ガラス材被覆多孔質体の観察(被覆厚1mm・水中養生24時間)



上面に亀裂の発生を確認

全体的に収縮し、周囲に隙間



粒子間の隙間を確認

- 加熱により、水ガラス材自体が収縮し、亀裂を発生させている様子が観察された。
- 非結晶体に着目した組成分析など、乾燥に至るまでの変化の挙動の調査を検討中。

7. 実施内容

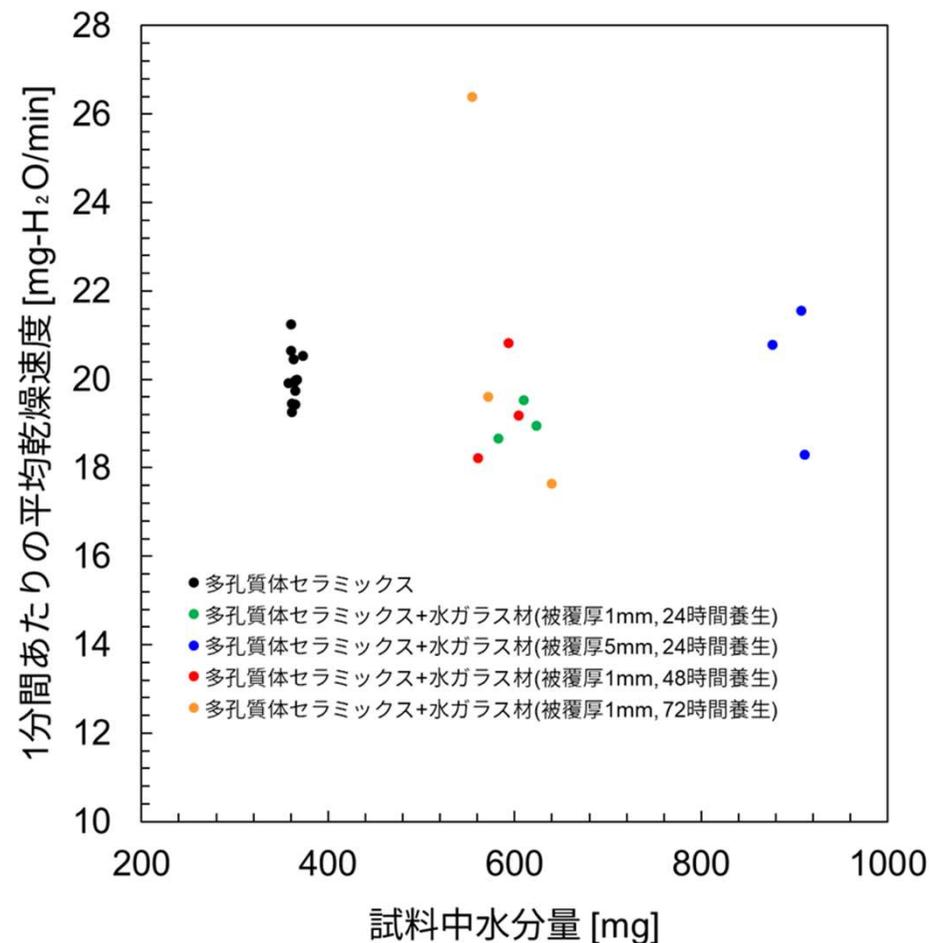
7.2 固化型吸収材技術(水ガラス)の開発 c.要素試験 各試験体の乾燥速度の比較

水ガラス材の存在が乾燥操作に与える影響を具体化するため、本試験で作成した各試験体の乾燥速度を比較した。

- 目標含水率(0.54 vol%未満)に到達した時間を乾燥終了時間と定義し、単位時間当たりの平均乾燥速度を求めた。
- 試験体の多孔質体の水分量と水ガラス材の水分量の合計量について、各試験条件における乾燥速度を比較した。

乾燥速度(単位時間当たりの蒸発量)は、水ガラス材の有無で変化していない。

- 水ガラス材の被覆厚が1～5mmの範囲では、水ガラス材中の結合水と多孔質体に保持される水分とを同等に扱うことが可能であると推察される。
- 乾燥完了までに必要な時間は、多孔質体と水ガラス材のそれぞれに由来する水分の総量に依存する傾向にある。



7. 実施内容

7.2 固化型吸収材技術(水ガラス)の開発

d. 中間まとめ

水ガラス材が付着した状態においても、多孔質体が乾燥状態に至るか、また、乾燥処理に与える影響を評価するために、多孔質体の Al_2O_3 を模擬燃料デブリとした乾燥試験を実施した。

- 試験体の作製方法、試験手順について検討を進め、水ガラス材の乾燥に係る基礎的な評価方法を確立できた。
- 水ガラス材単体の乾燥特性
温度 200°C の加熱で、水分が放出されない状態にまで乾燥することが示唆された。
- 水ガラス材被覆多孔質体の乾燥特性
水ガラス材は、乾燥の過程において亀裂等を生じており、模擬燃料デブリ内の水の蒸発を妨害する事象は確認されなかった。
 - 水ガラス材に覆われても、乾燥処理達成の目標とする体積含水率0.54[vol%]未満(≒重量含水率0.3wt%(ゼオライト換算))に到達することを確認した。
 - 模擬燃料デブリの乾燥速度は、水ガラス材の被覆前後において大きな変化は認められなかった。
 - 水ガラス材中の結合水を、多孔質体に保持される水分と同等に扱うことが可能である。

【今後の計画】

次年度は、多孔質体の材質や水ガラス材の被覆量などをパラメータとした試験を実施する。得られた結果を本年度の試験結果と比較することにより、水ガラス材の存在が乾燥に与える影響度合いの定量的な評価を試みる。

- 「燃料デブリ乾燥技術プロジェクト」側に、次年度の結果も含めて共有し、乾燥プロセス条件への反映検討に協力していく。

令和4年3月中間時点

8. 実施目的を達成するための具体的目標

(2)臨界近接監視技術・中性子吸収材技術の現場運用方法	
①現場運用手順の開発	<p>中性子検出器による臨界近接監視の現場運用手順が策定されていること。</p> <p>中性子検出器の未臨界度測定性能が評価されており、現場運用手順に反映されていること。</p> <p>非溶解性中性子吸収材の現場運用手順が策定されていること。</p> <p>(終了時目標TRL(*):レベル4)</p>
②固化型吸収材技術の開発	<p>固化型吸収材(水ガラス)が付着した燃料デブリの乾燥プロセスへの影響に関するデータが取得されていること。</p> <p>(終了時目標TRL(*):レベル4)</p>

(*):TRL;技術成熟度

以上