

令和3年度開始廃炉・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)

最終報告

(1) 液体系・気体系システム

(2) 臨界管理技術

2023年6月

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID)

令和3年度開始廃炉・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)

最終報告

(1) 液体系・気体系システム

2023年6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. 前期PJまでの開発成果と残された課題
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
 - ③-1 非溶解性核種除去技術の開発
 - ③-2 スラッジ脱水処理技術の開発
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。

* 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。

2. 補助事業の概要

補助事業にて検討した液体系・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した。

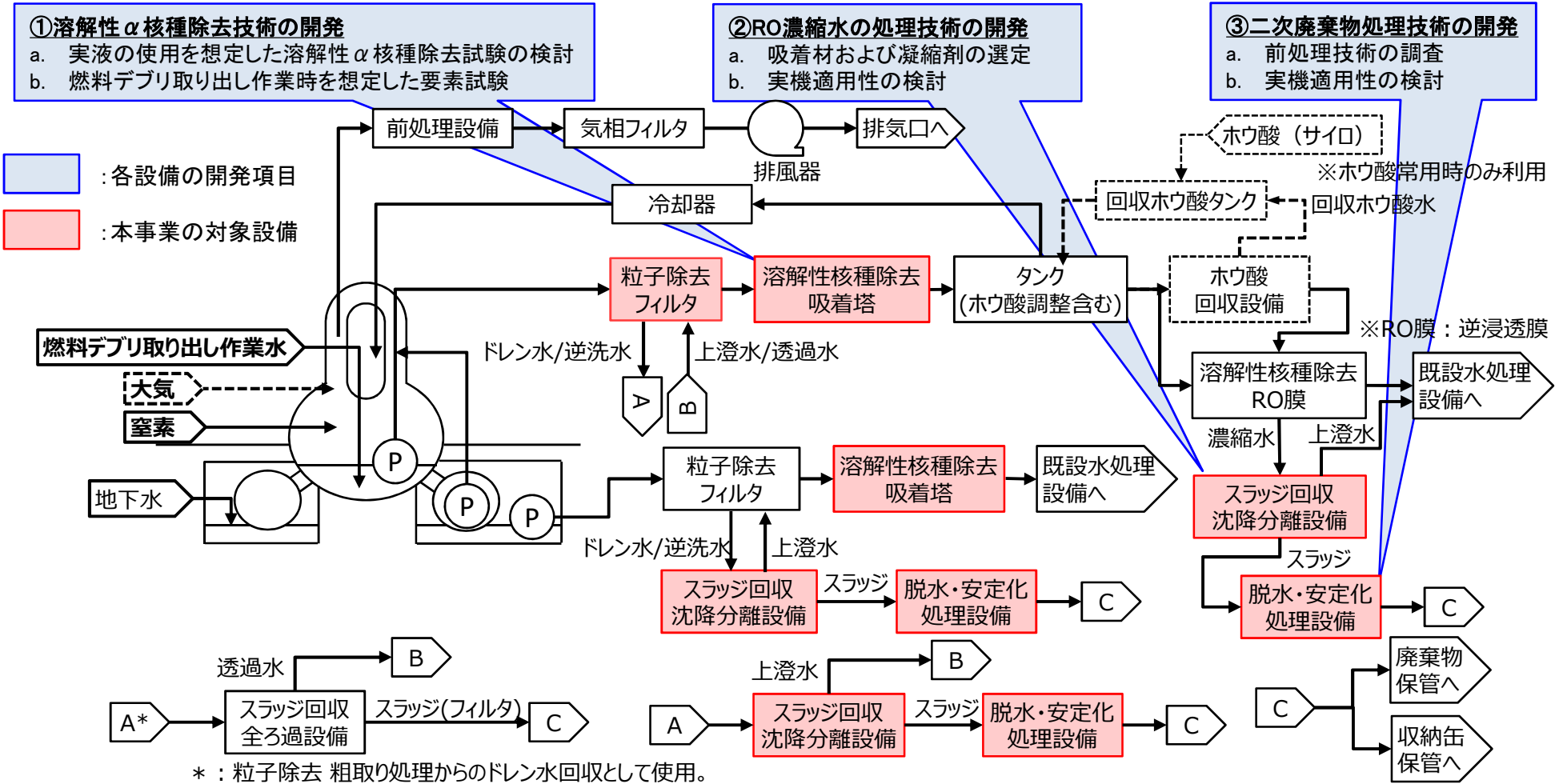


図. 燃料デブリ取り出し時の液体系・気体系システム (補助事業ベース)

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. 前期PJ※までの開発成果と残された課題

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	前期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の処理流量条件や、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の処理流量条件を仮設定した。	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

前期PJ※で整理された課題のうち、窒素雰囲気の影響を想定した際に取り組み必要がある課題として、No.1およびNo.4を選定した。窒素雰囲気下では除去対象である各 α 核種の形態が異なる可能性が示唆された。そのため、溶解度や吸着現象に影響が生じることが考えられるため本PJにて評価し、窒素雰囲気においても α 核種を除去可能な溶解性核種除去システムを検討する。

※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)」(2019, 2020年度実施)

3. 前期PJまでの開発成果と残された課題

①溶解性 α 核種除去技術の開発

No.	項目	前期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. 前期PJまでの開発成果と残された課題

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	前期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	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。 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。	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。 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。 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。
2	処理流量	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。	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。
3	処理方法	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。	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。
4	沈殿スラッジの性状と発生量	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。	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。 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。

前期PJにおいて、RO濃縮水処理により発生する沈殿スラッジの発生量が大きい可能性が示唆された。そのため、処理方法の適正化(No.3)およびスラッジ脱水(No.4)など、スラッジ量の低減・減容化に資する検討を本PJにおいて実施する。また、前期PJでは球形粒子を使用したフィルタ試験のみを実施しており、粒子形状のフィルタへの依存性(No.1)を未評価であったため、本PJにおいて評価する。

3. 前期PJまでの開発成果と残された課題

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	前期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期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。	今期以降に実施する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と連携して実施した。

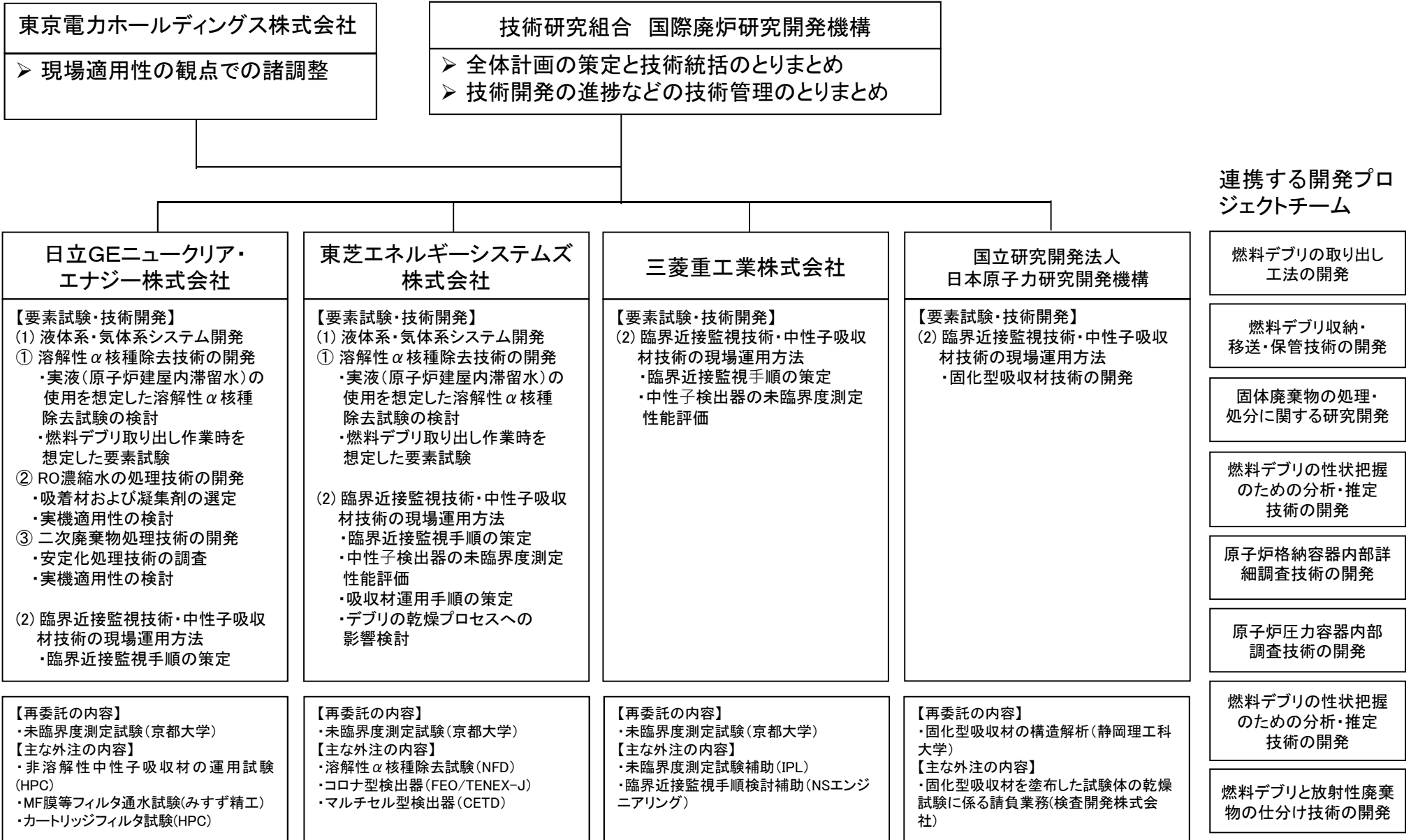
ID	要求側事業	提供側事業	内容(概要)	情報の用途
1	安全システムの開発(液体系・気体系システム、臨界管理技術)	燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発	収納缶の受入条件	二次廃棄物の安定化処理技術の検討
2	安全システムの開発(液体系・気体系システム、臨界管理技術)	固体廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発	廃棄物保管容器の受入条件	二次廃棄物の安定化処理技術の検討
3	安全システムの開発(液体系・気体系システム、臨界管理技術)	燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発	燃料デブリ微粒子の生成挙動の検討成果	循環冷却水中に含まれる粒子の性状の検討
4	燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発	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

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 ▲ プロジェクトステアリング会議 ▲ 中間報告 ▲ ▲ 最終報告 ▲																							
(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	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												▲											
	b. 試験準備・手配		試験準備・手配												▲											
	c. 予備試験		予備試験												▲											
	d. 要素試験		要素試験												▲											
	e. まとめ		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	(2) 東芝ESS 外注先: NFD 試験場所: 東芝ESS研究所、NFD	概念検討/試験計画												▲											
	b. 試験準備・手配		試験準備・手配												▲											
	c. 予備試験		予備試験												▲											
	d. 要素試験		要素試験												▲											
	e. まとめ		中間まとめ												▲											
			まとめ												▲											
②RO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(日立市)	概念検討/試験計画												▲											
	b. 試験準備・試験装置試作		試験準備・試験装置試作												▲											
	c. 予備試験		予備試験												▲											
	d. 要素試験		要素試験												▲											
	e. まとめ		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(日立市)	概念検討												▲											
	b. 技術調査/試験計画		技術調査/試験計画												▲											
	c. 試験準備/試験体製作		試験準備/試験装置試作												▲											
	d. 要素試験	外注先: みずず精工 試験場所: みずず精工研究所	要素試験												▲											
	e. まとめ		中間まとめ												▲											
			まとめ												▲											

■ : 計画線
■ : 実績線

6. 実施体制



7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発

・開発経緯

- 燃料デブリ取り出し時の安全システムとして液体系システムを構築する計画がある。暫定的な条件を用いた液体系システムの被ばく線量評価が行われ、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が、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 核種は環境に放出される核種ではないことから、 α 核種による被ばくを合理的に達成可能な限り低くするというALARAの観点から、燃料デブリ取り出し時に発生する汚染水に含まれる α 核種除去技術の有効性の検討・評価を2017年度より開始している。
- 溶解性 α 核種の除去技術としては、「吸着」と「RO膜」を適用候補技術として選定している。「吸着」は α 核種を吸着材で捕捉するため二次廃棄物処理が不要となるが、「RO膜」は α 核種を分離して発生する濃縮水の処理を要する。本PJでは、必要とする設備規模の小さい「吸着」を対象とした技術開発を行った。
- 2020年度までの補助事業では、候補吸着材に対し、除去対象 α 核種であるPu、U、Am、Cm、Npの5種類の元素を用いた吸着性能評価が行われている。この評価は、多くの吸着材を評価対象としたスクリーニングを行うために大気開放条件下での評価となっている。
- 実機環境における吸着性能への影響の把握が未実施である。また、2020年度までは浸漬試験による吸着性能評価を行っており、実機検討に向けた通水処理時の性能の把握が未実施である。
- そこで本PJでは、実機環境を模擬することによる吸着性能への影響把握、実機検討に向けた通水処理時の性能を把握するための評価方法の検討を行った。

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発

・本PJの位置づけ

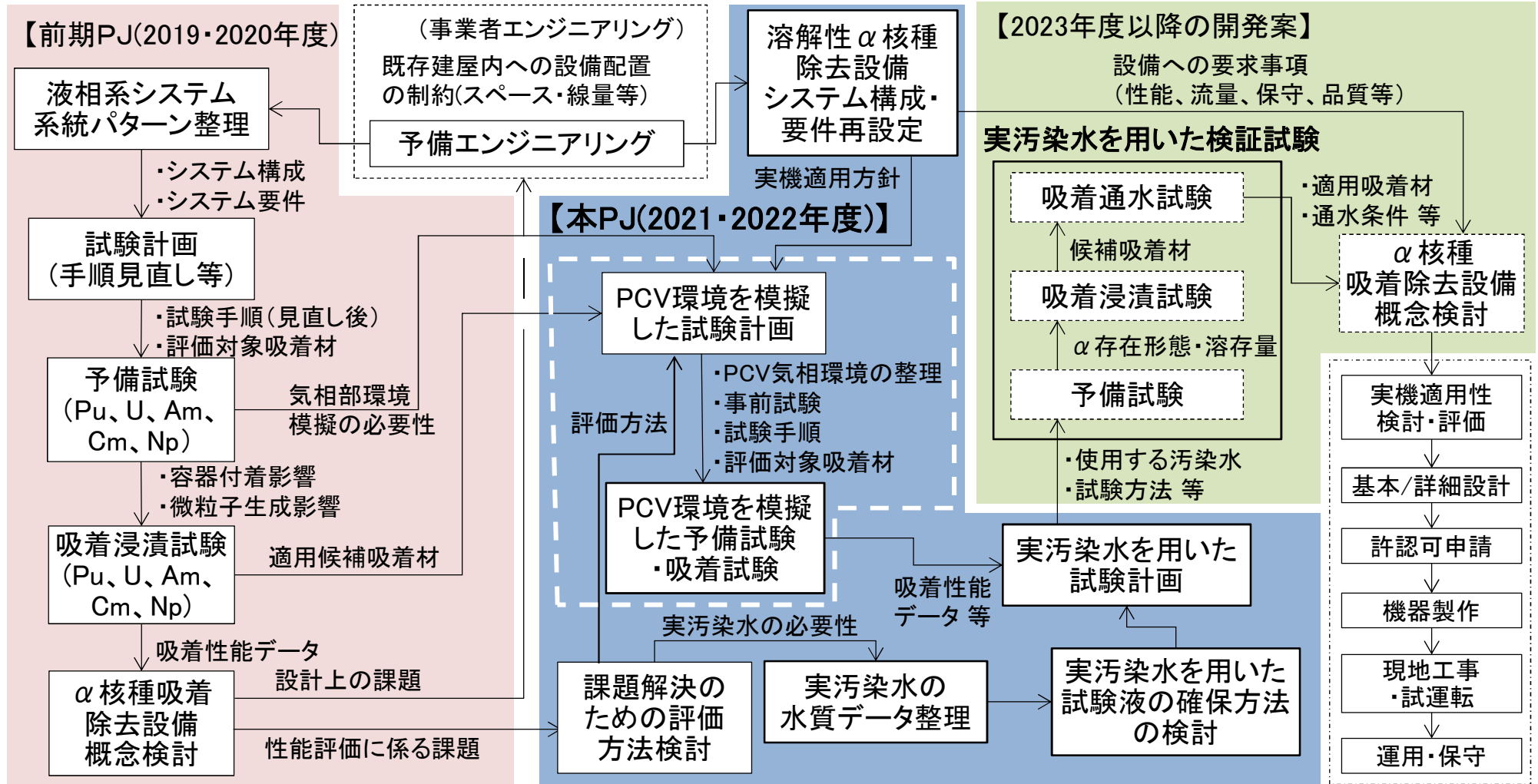


図 溶解性 α 核種除去技術開発 全体フロー

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発

- ・本PJにて取り組む課題と実施内容及び目標

a.実液の使用を想定した溶解性 α 核種除去試験の検討

【課題】

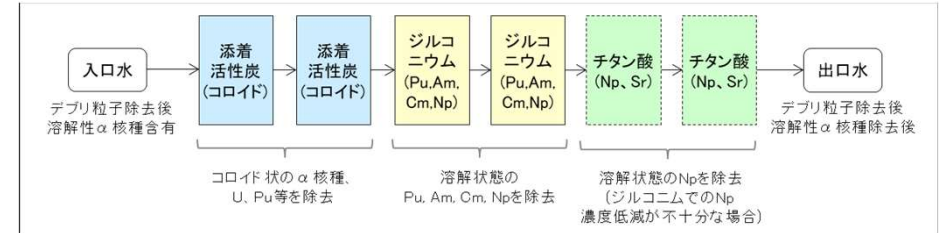
- ・前年度(令和元年～2年度)実施した補助事業において選定された α 核種吸着材について、吸着材寿命、競合イオン影響などのデータが不足。
- ・実液(原子炉建屋内滞留水)を使用した吸着材候補の性能評価試験の方法が未確立。

【実施内容】

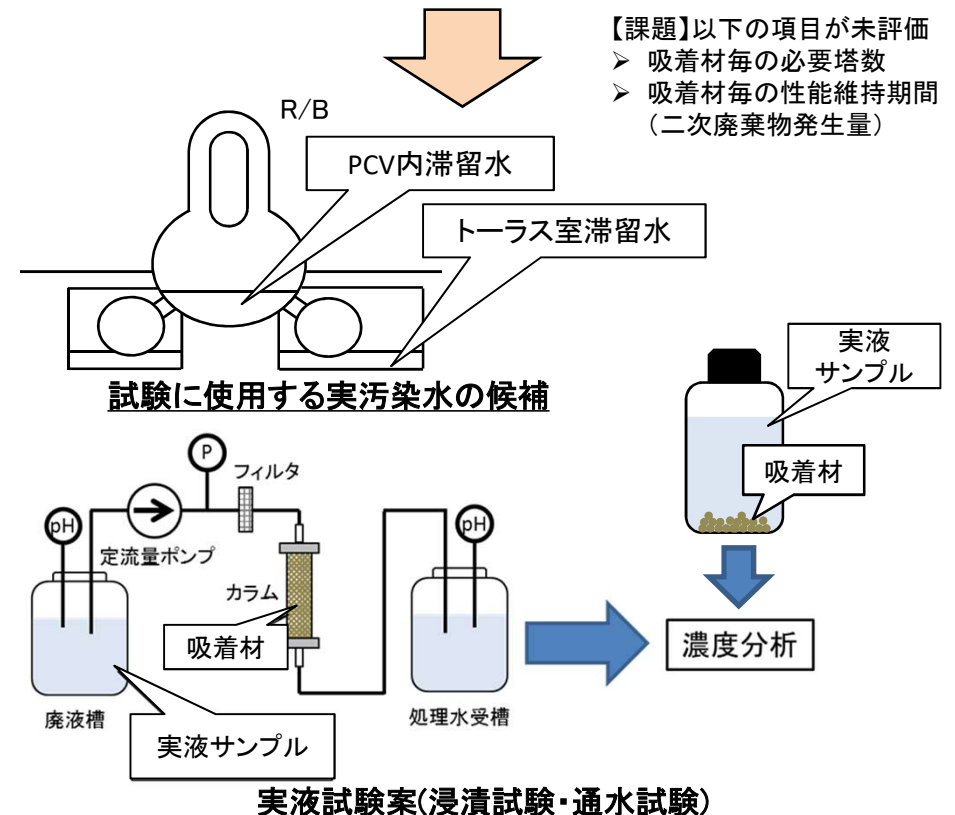
- ・溶解性 α 核種除去設備の設計・運用に必要なデータの整理。
- ・実液(原子炉建屋内滞留水)の使用を想定した試験方法の検討。
- ・実機においてカラム通水試験を実施することを想定した試験装置、計画の検討。

【目標】

- ・実液(原子炉建屋内滞留水)の使用を想定した試験方法の具体化。
- ・実液(原子炉建屋内滞留水)の使用を想定した試験装置、試験計画の具体化。



候補吸着材を用いた吸着塔構成の例



実液試験案(浸漬試験・通水試験)

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発

- ・本PJにて取り組む課題と実施内容及び目標

b.燃料デブリ取り出し作業時を想定した要素試験

【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。
- ・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。

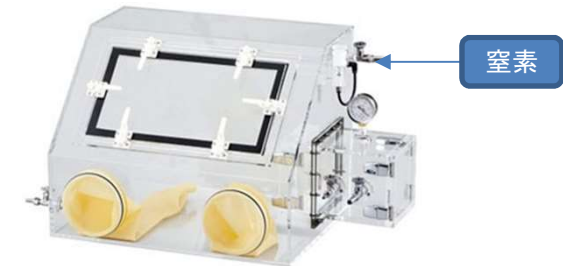
【実施内容】

- ・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。
- ・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。
- ・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。この際、水質変化する場合についても考慮。

【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。
- ・溶解性 α 核種除去設備の水質調整方針の設定。

<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>



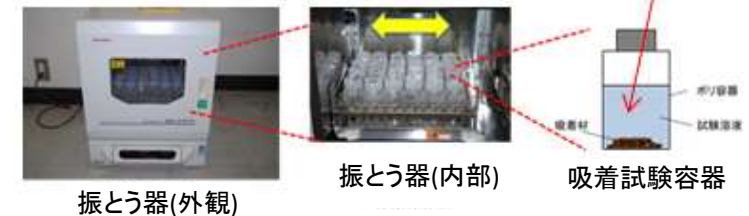
簡易グローブボックス

<吸着試験の例>

①浸漬試験

- ・精度の高い試験手順確立
- ・Pu、Uなどの試験実施

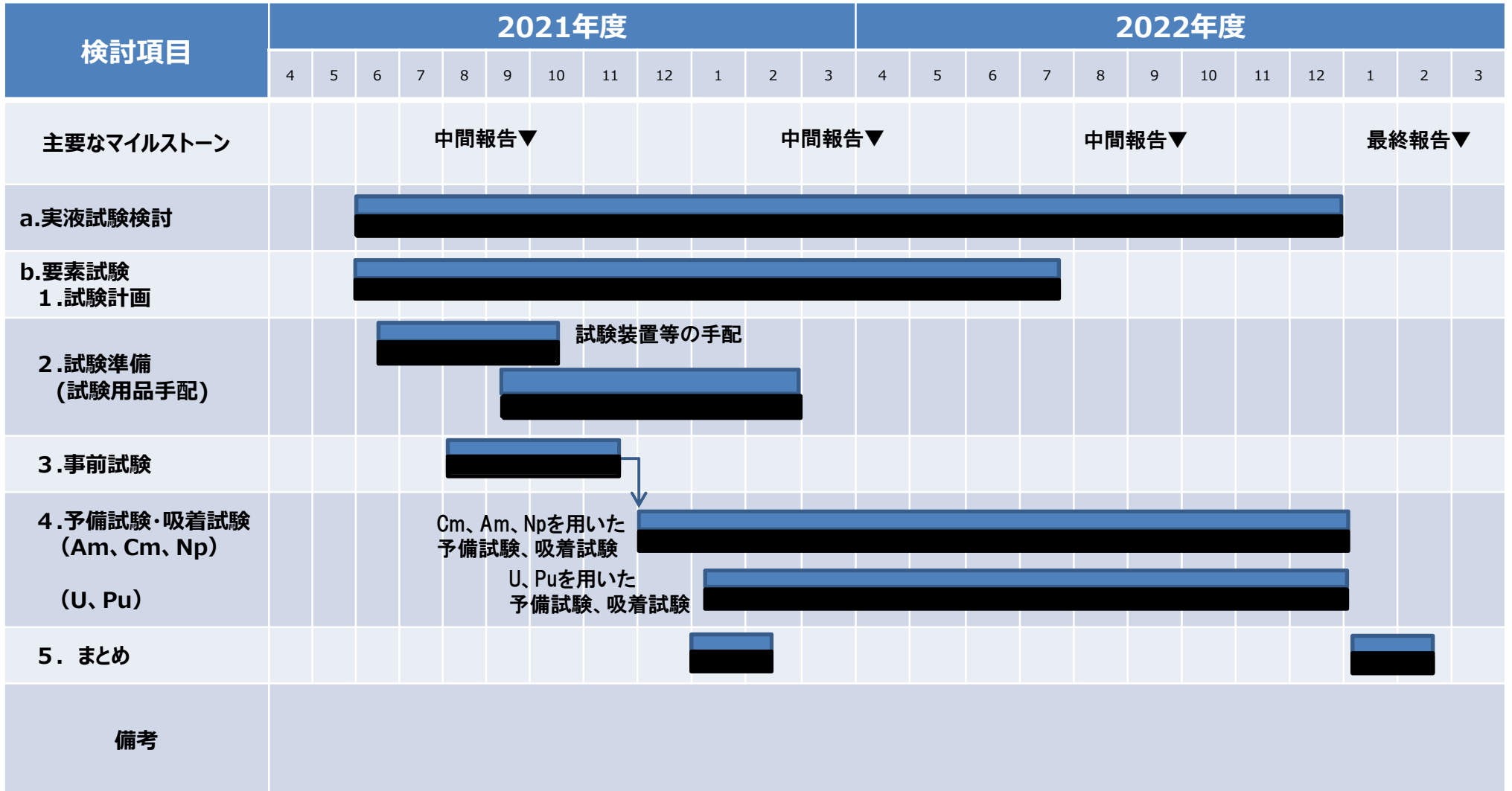
試験終了時の吸着材あり/なしの物質濃度を測定し、吸着量を測定



7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発

・本PJの開発工程



7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発

・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(サブプレッションチェンバ)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。
- 燃料デブリから液相へ移行する α 核種の存在範囲を極力限定するために、PCVおよび原子炉建屋地下から取水する水に対し、 α 核種の存在形態に応じた除去(粒子除去フィルタ・溶解性核種除去吸着塔)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。

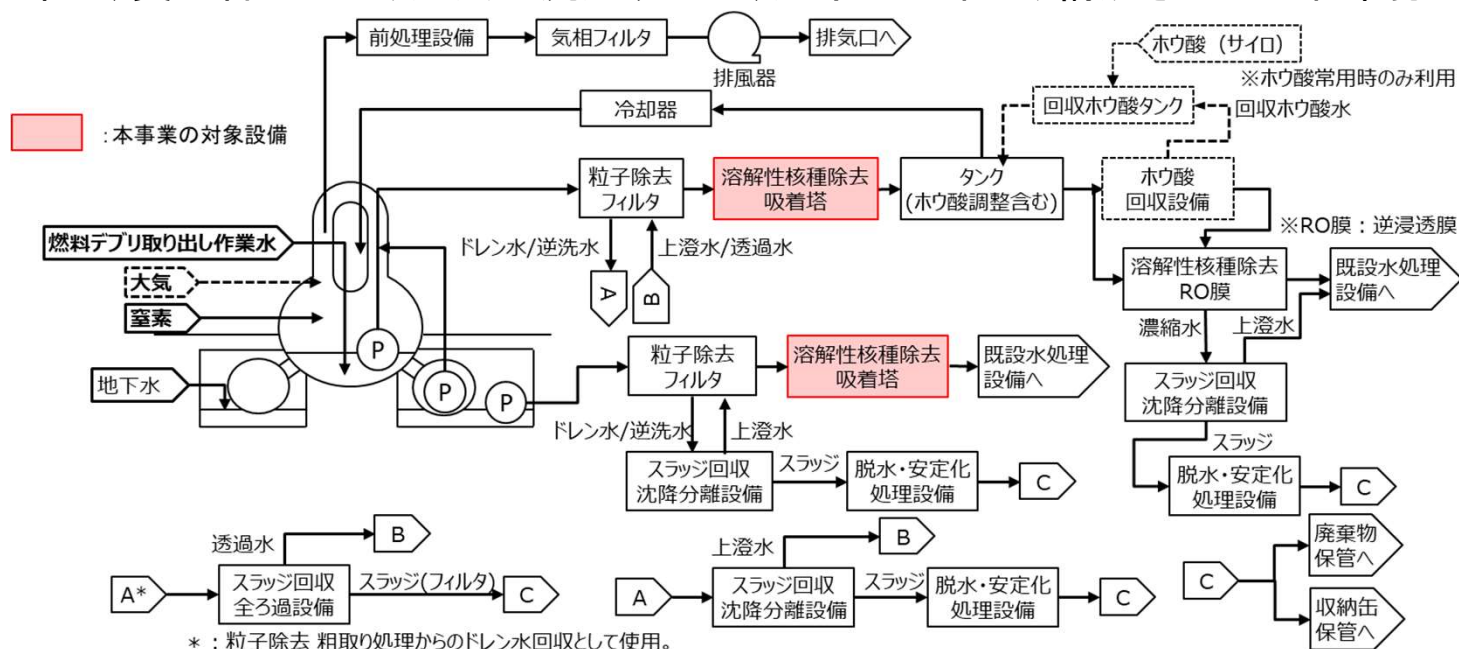


図 燃料デブリ取り出し時の液体系・気体系システム (補助事業ベース)

注：本概念図は設備構成の例(PCVからの漏えいの無い場合)

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発

・溶解性 α 核種除去システム構成の前提と対応方針

- 前期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、前期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。

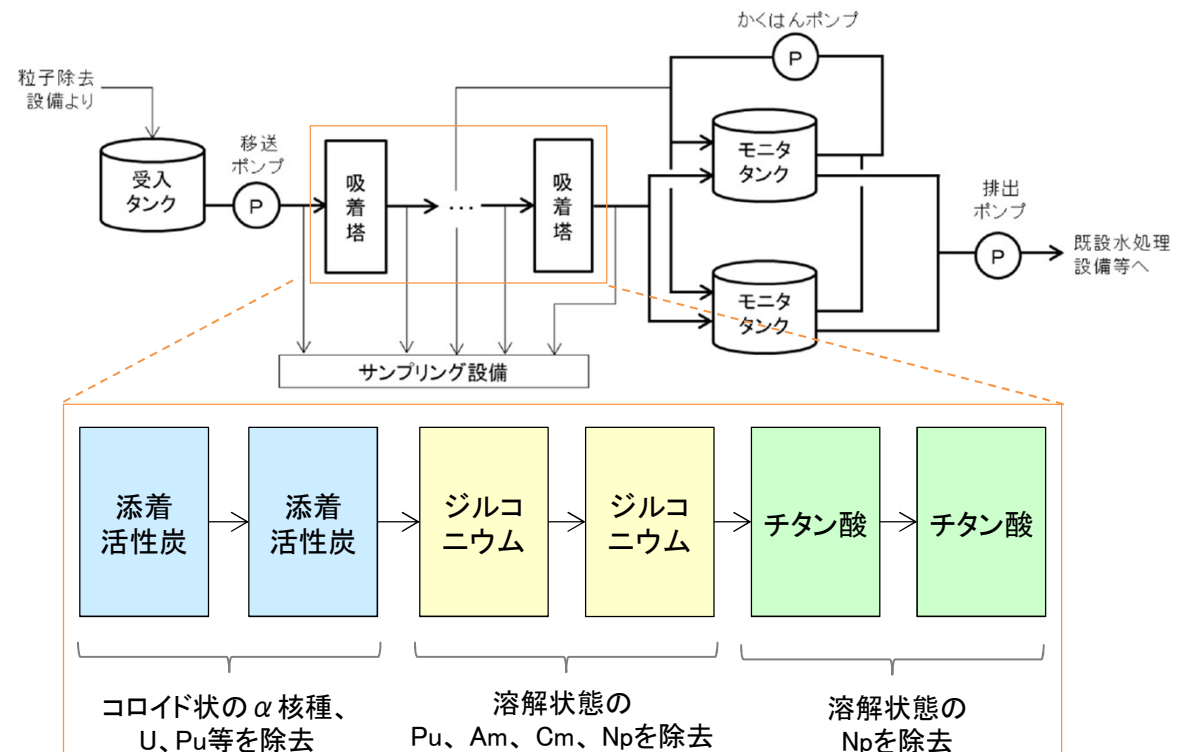


図 溶解性 α 核種除去システムの概略系統図と塔構成案※

※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 核種の除去性能が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ジルコニウムの吸着塔を設置する。ただし、添着活性炭とジルコニウムの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、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(b. 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以下程度の濃度で存在すると推定される。

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 ※1	※1: 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 ※2	※2: 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 ※3	負圧管理時の大気流入により濃度上昇 ※3: 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 ※4	※4: 全量放出時の公衆被ばく量5mSvに相当 する濃度以下を想定

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発(b. 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

- 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、液相中のpH上昇が想定される。
- 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	淡水を外部から注水し、注水した水はPCV外に漏れいするため、基本水質は淡水と同等。	淡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し、水中の無機炭酸濃度が増加。	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、無機炭酸濃度が増加。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程度	6～9程度	6～11程度
	無機炭素*濃度(推定)	1ppm程度	1ppm程度	数ppm (大気流入影響)	数～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(b. 燃料デブリ取り出し作業時を想定した要素試験)

・α核種の溶存形態に係る調査・評価

- 前期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、中性条件と比較してα核種の溶存形態として炭酸イオン配位・水酸化物イオン配位する形態の存在割合が増加することを評価している。
- 窒素環境と大気環境では、二酸化炭素濃度が変化することから、アルカリ条件でのα核種の化学形態に影響がある可能性がある。
- また、酸性条件では、中性、アルカリ条件と比較してα核種の溶存形態として金属イオン形態(Pu³⁺など)の存在割合が増加する可能性がある。

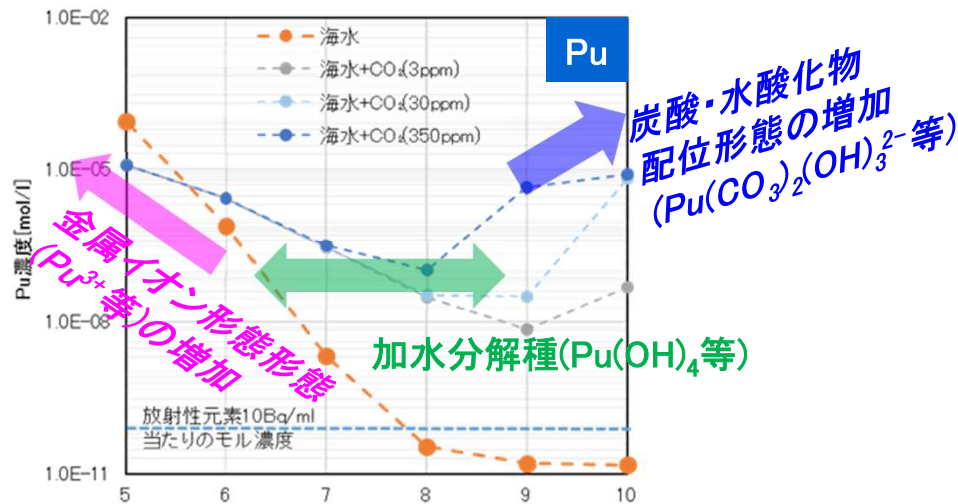
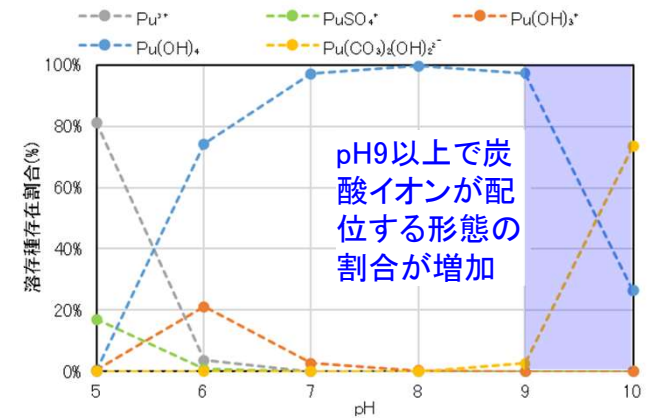


図1 気相中の二酸化炭素濃度条件をパラメータとした熱力学平衡計算によるPu溶解度評価結果 (50倍希釈海水)
(前期PJの熱力学平衡計算結果)

(1) 気相中の二酸化炭素濃度: 3ppm (窒素環境模擬)



(2) 気相中の二酸化炭素濃度: 350ppm (大気環境模擬)

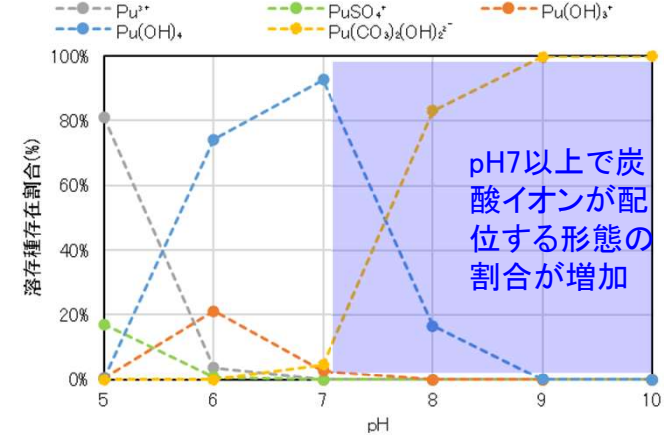


図2 気相中の二酸化炭素濃度条件をパラメータとした熱力学平衡計算によるPu溶存形態評価結果 (50倍希釈海水)
(前期PJの熱力学平衡計算結果)

7. 実施内容

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

・要素試験条件の設定

- ①燃料デブリ取り出し時の各環境項目の管理方針、②燃料デブリ加工により優位に変化すると考えられる水質条件の検討結果、③現時点までに実施されたPCV内滞留水の分析結果の3つの視点で、PCV内滞留水の想定水質条件をパターン分けし、下記表に整理した。
- コンクリート成分の溶出によるpH上昇を想定した評価として、炭酸の溶解によるpH低下影響が軽微かつ、炭酸塩沈殿が生成しないと想定される、pH9、10程度にて実施した。
- また、実機にて処理対象水の水質変動が生じた場合、吸着性能が低下する可能性があるため、水質調整(pH調整)を想定した評価も実施した。

表 本PJにおける要素試験条件

 本PJで実施した範囲

No.	目的	液条件	pH*	気相条件	備考
1		1000倍希釈海水	6~7	大気/ 窒素	前期PJまでに実施済みの条件については、前期PJの結果を流用する方針とし、未取得の条件を実施。
2		200倍希釈海水	6~7		
3	実機想定 水質条件	1000倍希釈海水 +Ca(OH) ₂	9程度	窒素	・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		
6			10程度		
7		五ホウ酸ナトリウム水 (7000ppm as B)	8~9	大気/ 窒素	五ホウ酸ナトリウム注入時の影響評価用に実施。
8	水質調整 を想定し た条件	1000倍希釈海水 +HCl	3程度	大気/ 窒素	・中性・アルカリ性・酸性のどの領域に調整するのが適切か、傾向を把握するために、これまでデータ未取得の酸性条件(pH3、5)での評価を実施。 ・pH調整剤としては、後段設備への影響を考慮し、暫定的に塩酸を設定。
9			5程度		

※: 初期pHで設定

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発(b. 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

- 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図1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、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。定期的に簡易GB内の酸素濃度を確認し、酸素濃度4%を超えないように適宜窒素封入操作を行う。
- 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。
- 吸着試験手順のイメージを図2に示す。吸着材と α 核種トレーサ入りの試験液(試験容器はPP(ポリプロピレン)容器)を簡易GB内(窒素雰囲気)中で振とうさせ(21日間)、 $0.1\mu\text{m}$ ろ過後溶液中の α 核種濃度を分析することで吸着材への吸着量を評価した。

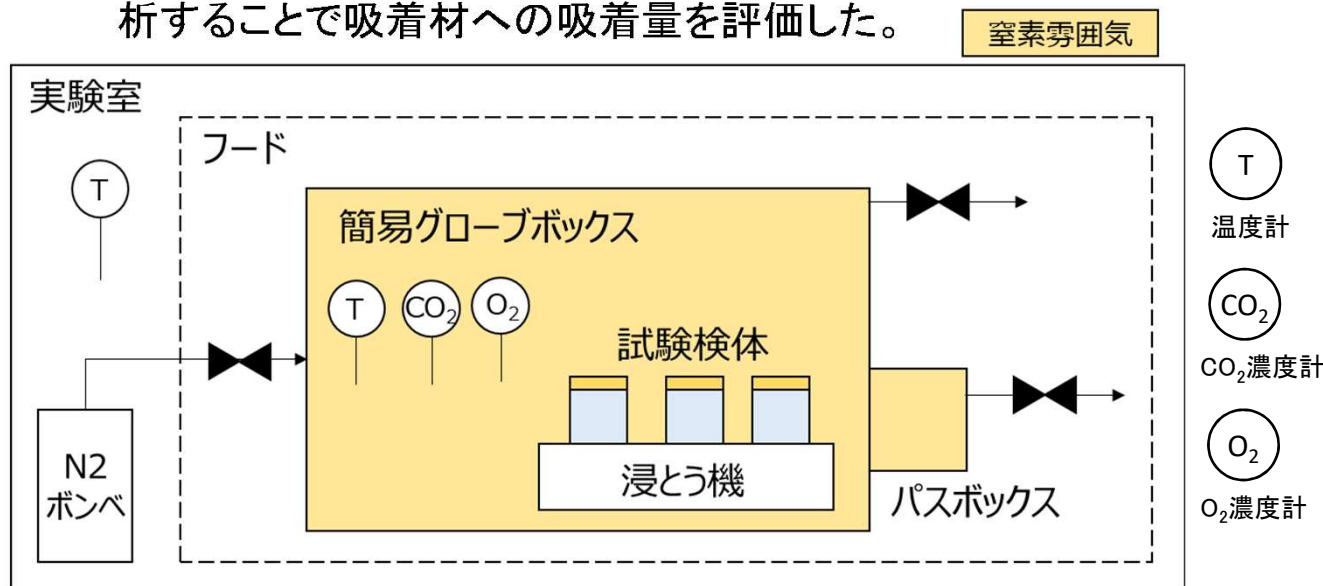


図1 窒素雰囲気を模擬した試験体系

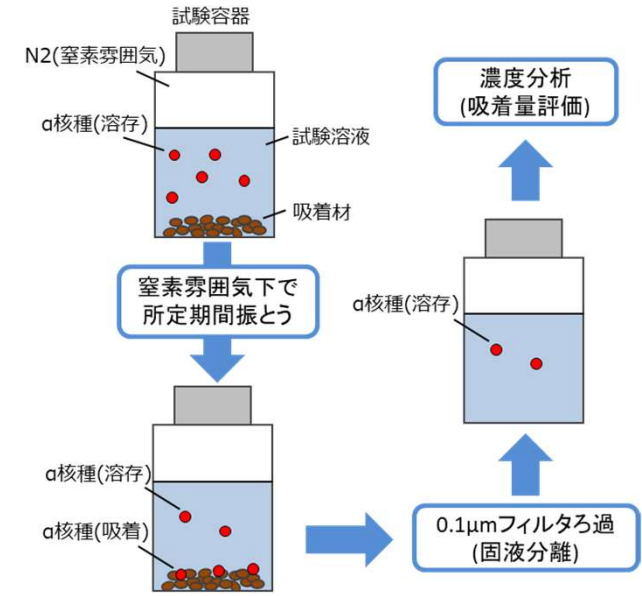


図2 吸着試験イメージ図

7. 実施内容

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

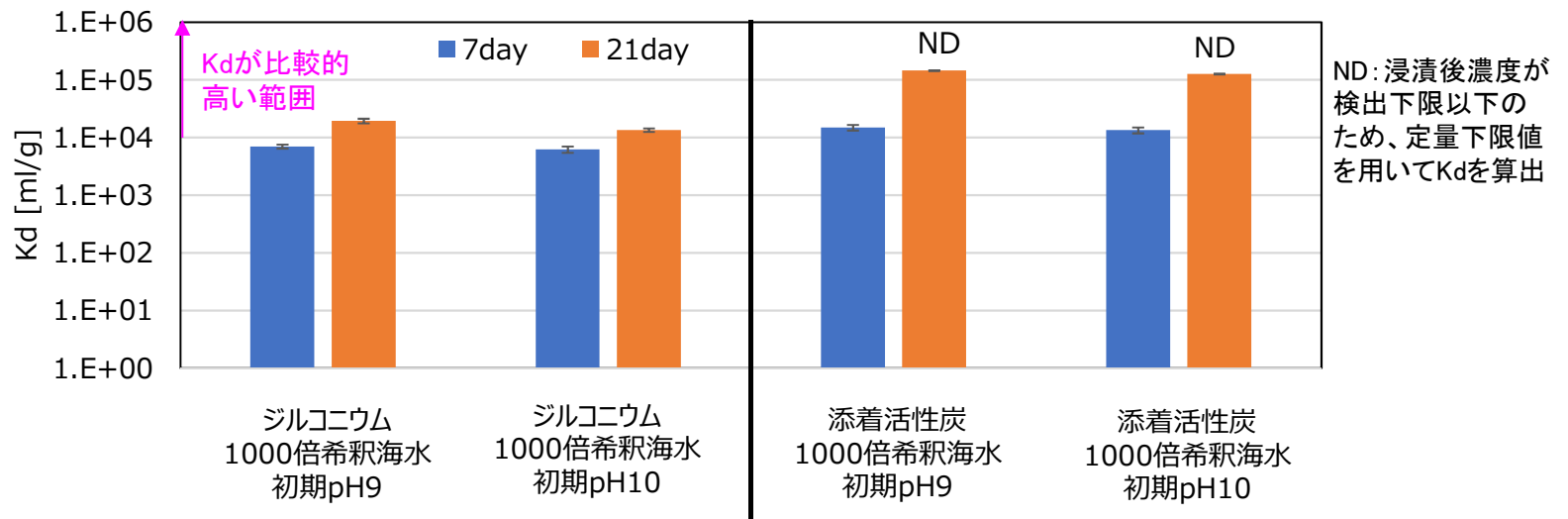
・吸着試験結果：コンクリート溶出成分を模擬したアルカリ条件

- ジルコニウムと添着活性炭について、アルカリ条件(1000倍希釈海水に対し初期pHを9、10に調整)、窒素環境条件にてPuを用いた浸漬試験を行った。
- ジルコニウムは比較的高い分配係数(Kd)が得られたものの、添着活性炭と比較すると低く、アルカリ性にて適用可能な吸着材と判断が付きにくい結果である。アルカリ条件では吸着性能が低下する可能性が考えられる。
- 添着活性炭の21日浸漬後のKdは前期PJ(液相:pHを6~7程度・1000倍希釈海水、気相:大気環境)と同程度であり、pHに対するロバスト性を有すると考えられる。しかし浸漬後のpHが7程度まで低下しており、アルカリ条件液での通水処理時には吸着性能が低下する可能性がある。
- これらの結果より、**実機にて処理対象水の水質が変動した場合にも安定した除去性能を発揮するための設備とするためには、吸着塔上流でpHを一定に調整するための前処理が有効となる可能性がある。**

分配係数 [ml/g] $K_d = \frac{C_i - C_f}{C_f} \times \frac{V}{m}$ ※1

C_i : 浸漬期間経過後の吸着材添加有の試料中核種濃度
 C_f : 浸漬期間経過後の吸着材添加無の試料中核種濃度
 V : 浸漬液相の体積 [ml]
 m : 吸着材重量 [g]

※1: Puの濃度低下がすべて吸着によるものと仮定して、分配係数(Kd)を算出。分配係数が高いと平衡吸着量が高いと評価され、吸着性能が高いと判断。



ND: 浸漬後濃度が検出下限以下のため、定量下限値を用いてKdを算出

21日後浸漬pH (カッコ内は試験開始時のpH) pH調整剤: 水酸化カルシウム	7.8 (9.2)	8.3 (10.0)	6.8 (9.3)	7.2 (10.2)
---	-----------	------------	-----------	------------

7. 実施内容

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

・吸着試験結果：吸着塔上流でのpH調整範囲

- 吸着塔上流でpHを一定に調整するうえで(図1)、適切なpH領域を把握するために、各pHでのPu、Cmのジルコニウム吸着材に対する窒素環境での分配係数(Kd)結果を図2に示す。
- 初期pH3、5の液(1000倍希釈海水に塩酸を添加)での吸着試験(浸漬試験)を行った結果、初期pH9、10とした条件よりもKdが1桁程度低下したため、酸性側へ水質調整することで吸着性能が低下する可能性がある。
- これまでの初期pHに対する浸漬試験結果をまとめると、初期pHから浸漬後pHがpH6.5~9程度の範囲で、比較的高いKdが得られた(赤枠範囲)。pH6以下になると、Cm吸着性能が低下が懸念されるため**暫定的にpH7~9程度をpH調整範囲として設定した。**

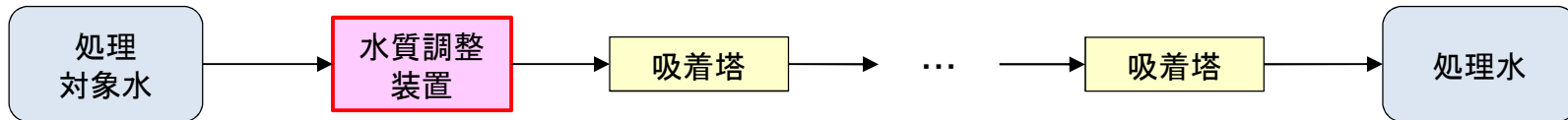
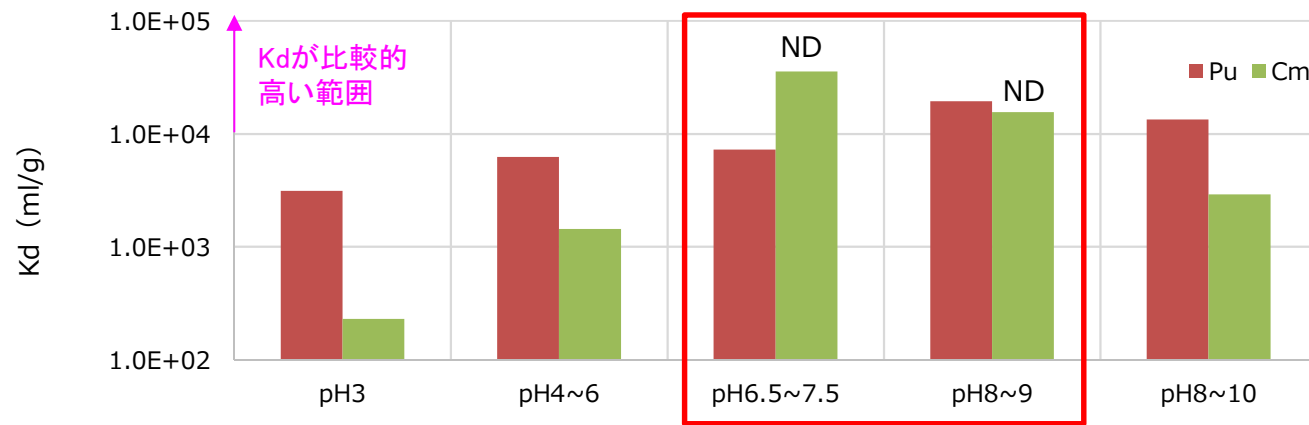


図1 水質調整を前提とした α 核種吸着除去の処理フロー



ND: 浸漬後濃度が検出下限以下のため、定量下限値を用いてKdを算出

※: pHに幅があるのは、試験環境や吸着材により、初期pHと浸漬後のpHで変動があるため。

図2 Pu、Cmのジルコニウム吸着材に対するpH※ごとのKd (窒素環境)

7. 実施内容

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

・候補吸着材の選定

- 本PJにて評価対象とした候補吸着材(チタン酸、ケイチタン酸、ジルコニウム、添着活性炭)について、窒素雰囲気下かつ、初期pH6~9程度での、Np、Pu、Am、Cmを用いた吸着試験(浸漬試験)により得られた候補吸着材の分配係数(Kd)を下図にまとめた。
- 実機処理対象水中に多く含まれると考えられるPu、Am、Cmについて、チタン酸やジルコニウムや添着活性炭は高い分配係数(Kd)を示した。一方でケイチタン酸はPuの吸着性能が低い可能性があるため、候補から外した。
- 以上から、**チタン酸、ジルコニウム、添着活性炭**を候補吸着材とし、処理対象水の α 核種濃度を低減するために、Np、Pu、Am、Cmはチタン酸、ジルコニウム、添着活性炭の組合せにて除去する。

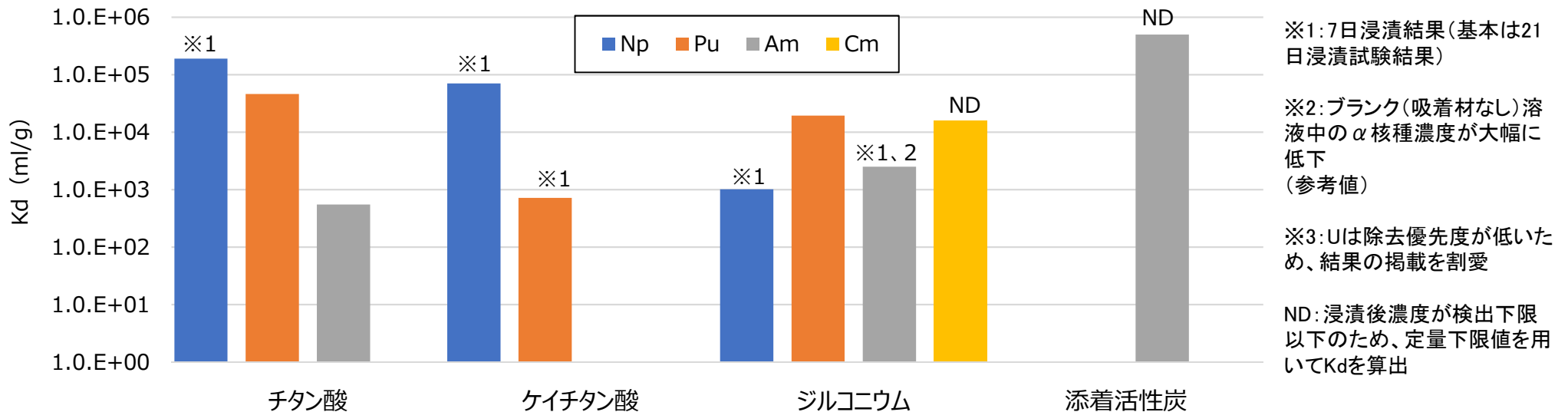


図 除去対象 α 核種の各候補吸着材に対するKd ※3
(窒素雰囲気・初期pH6~9程度・1000倍希釈海水)

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発(b. 燃料デブリ取り出し作業時を想定した要素試験) ・概略システム検討結果と実機適用に向けた課題抽出

- 従来の吸着塔方式のシステム構成の他に新たに開発目標に加えた、吸着塔上流にて水質調整を想定した場合の概略系統構成案を下図に示す(前期PJから見直した箇所は青色で示す)。処理対象水のpH(pH5.5~11と想定)を事前に測定し、アルカリ性(pH10以上)に変動した場合、pH調整槽にてpH7~9に調整し、吸着塔へ通水するシステムを想定する。
- 吸着塔上流にて水質調整を想定したシステムの実機適用までの課題を以下3点抽出した。
 - 課題①:pH調整剤の選定(試験上は塩酸を仮設定したが、その他手段を含め選定)
 - 課題②:pH調整範囲の設定(薬液注入により調整する目標pHの設定・目標pH逸脱時の対応方針設定)
 - 課題③:pH調整による析出物の生成有無(フィルタ要否の判断)

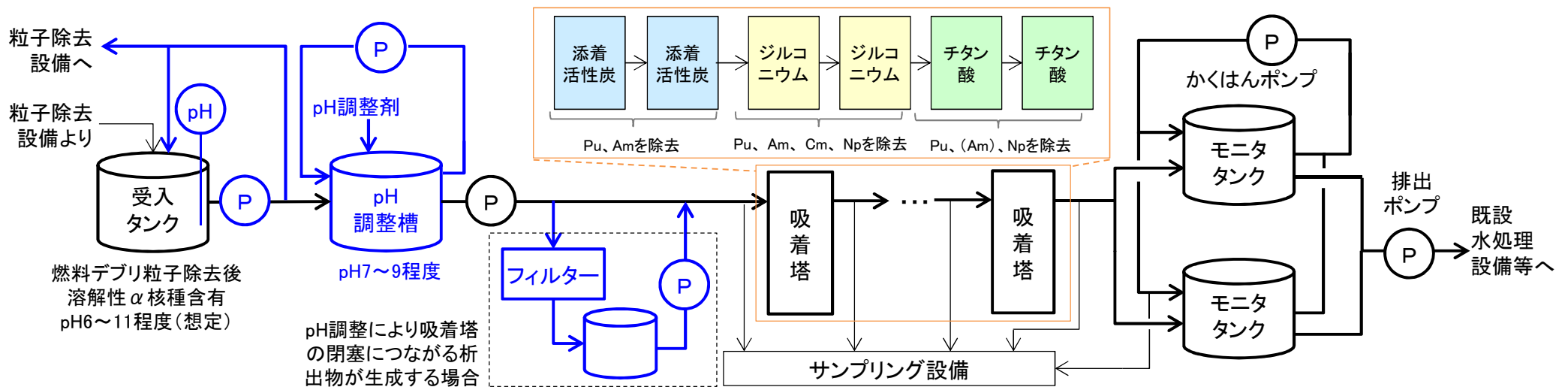
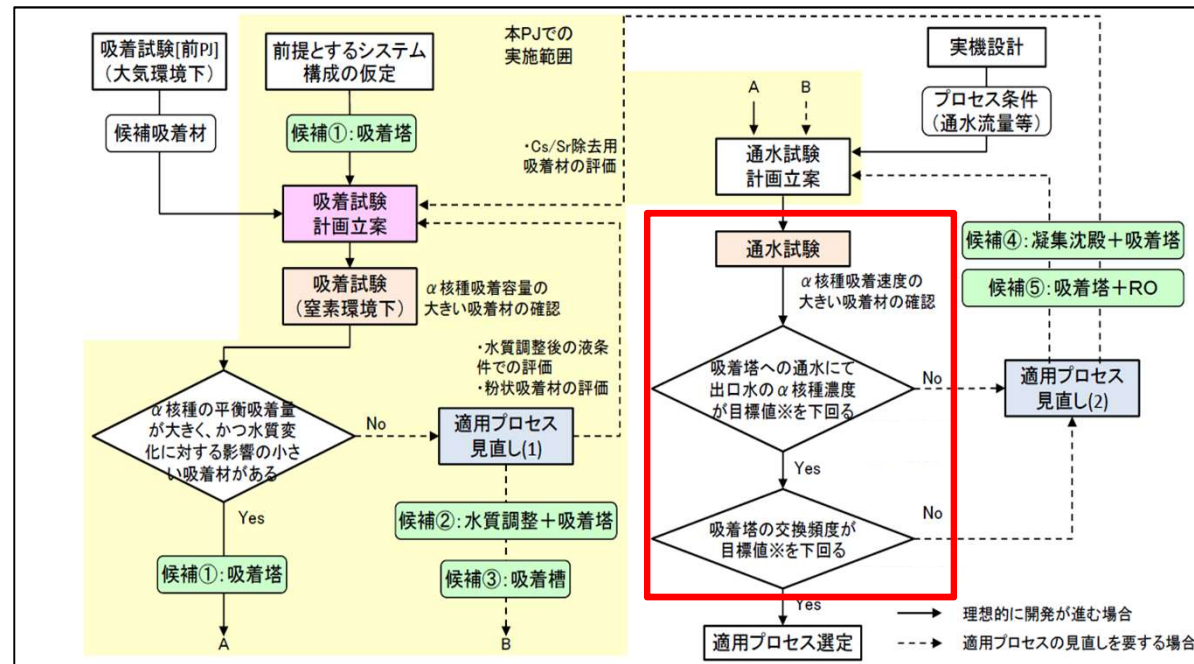


図 溶解性核種除去概略系統構成案 (水質調整を想定した場合)

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発(a. 実液の使用を想定した溶解性 α 核種除去試験の検討) ・実液を用いた通水試験の必要性

- 燃料デブリ取り出し時の水質変化を想定した条件にて浸漬試験を行うことで、 α 核種に対する平衡吸着量の大きい吸着材を評価し、添着活性炭やジルコニウムなどを候補吸着材として選定している。しかし、候補吸着材に対する通水時の性能が未評価であるため、プロセスの実機適用性評価、設計・運用に必要なデータの取得のために、通水試験が必要である(下図)。
- 通水試験には多量の α 核種が必要となるが、ラボで取り扱うことのできる α 核種トレーサ量の制限より、実液(以降、実汚染水)を用いた通水試験の実施が現実的である。そこで、実汚染水を用いた通水試験を行うまでの計画を検討した。



※ 出口水の α 核種濃度目標値: 事業者エンジニアリングにて、4Bq/L、40Bq/L、400Bq/Lの3条件(暫定)を設定

吸着塔の交換頻度目標値: 既存水処理設備の交換頻度から、1か月(30日)を仮設定

図 実機適用プロセス選定までの対応フロー

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発(a. 実液の使用を想定した溶解性 α 核種除去試験の検討)

・通水試験の進め方

- 実機運用開始までには、吸着塔通水処理時の除去性能や、吸着性能維持期間を検証する必要があり、これらの検証には、文献調査等により、実機1/10規模程度の通水試験(検証試験)が必要となることを確認した。
- 検証試験装置の仕様を設定するためには、吸着塔構成を設定する必要があるため、通水条件(SV^{※1}またはLV^{※2})を実機条件と合わせた実機長カラムを用いた通水試験を行い、設定した吸着塔にて目標となる除去性能と性能維持期間を満足する見込みを確認する。
- 実機長カラム試験は通水条件を実機と揃えられる一方、多量の試験液量を必要とするため、本PIにて選定した吸着塔構成の成立性を確認する目的で、通水条件のうちSVを実機条件と合わせ、必要となる試験液量の少ない、ミニカラムを用いた通水試験を行う。
- 以上より、実機適用までの通水試験の進め方として、ミニカラム通水試験、実機長カラム通水試験、1/10規模通水試験(検証試験)という順序で進めていく計画を立案した。
- 次葉以降では、最初のステップで実施するミニカラム通水試験について、試験計画の具体化検討を行った。

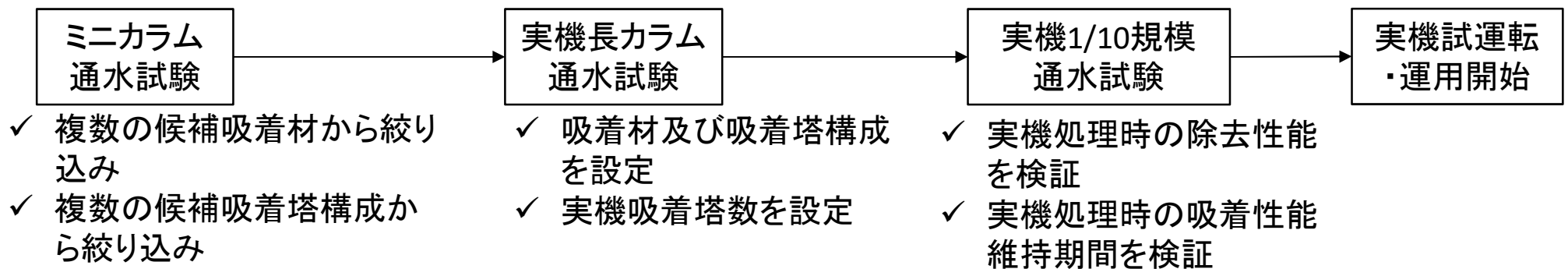


図 実機適用までの通水試験の進め方案

※1 SV:空間速度 ※2 LV:線速度

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発(a. 実液の使用を想定した溶解性 α 核種除去試験の検討)

・ミニカラム通水試験装置構成・試験条件の検討

- ミニカラム通水試験の試験装置構成、試験条件について検討した。
- 入口タンクにて通水試験液を調製し、試験カラムへ通水する。カラムの前段には固形分を捕捉するためのフィルターを設置する。また、試料採取箇所を確保し、通水前後の濃度変化やpH変化などを評価可能とする。
- ある程度の通水期間を確保するために、数千BV※分の試験液として数十L程度(目標)確保する。
- 通水試験液の全 α 濃度として $1E+03Bq/L$ (現在の実汚染水と同程度)、 $1E+05Bq/L$ (現在の実汚染水よりも2桁程度濃度が上昇することを想定)の2ケースを設定し、通水試験でも同程度含まれた試験液を準備する。
- 現状、フィルターろ過後に全 α 濃度が $1E+05Bq/L$ を超える実汚染水は確認されていないことから、通水試験に適した濃度を確保するための液調製方法について検討する必要がある。

※BV: Bed Volume, 吸着材充填量当たりの通水量

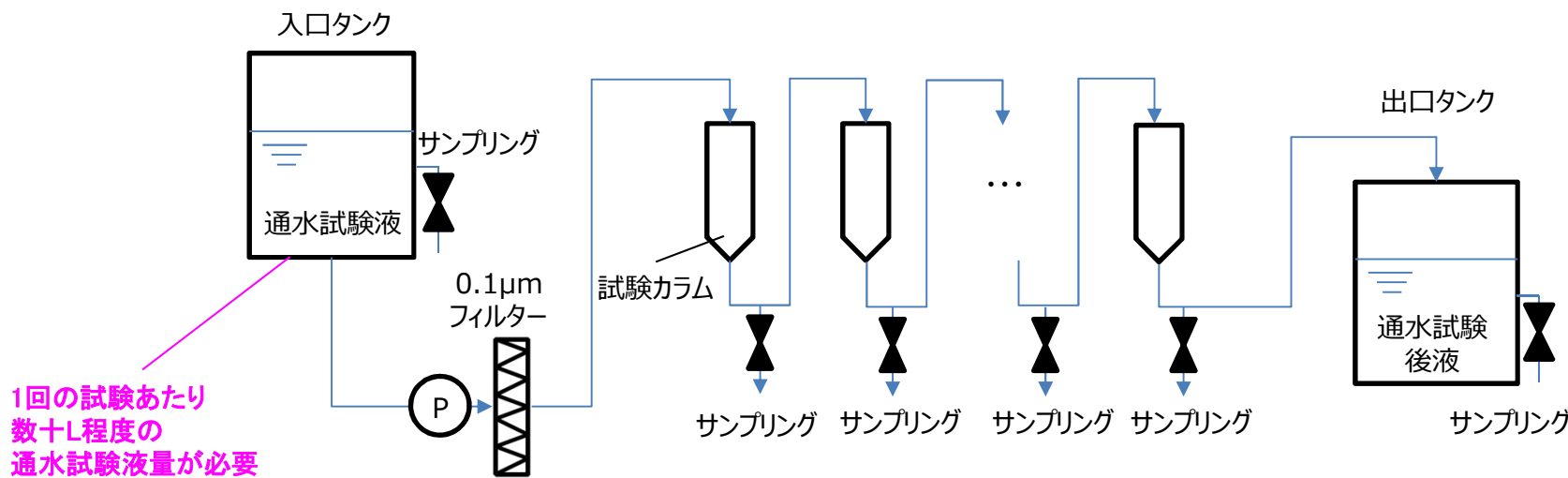


図 ミニカラム通水試験装置の概略系統構成 (案)

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発(a. 実液の使用を想定した溶解性 α 核種除去試験の検討)

・試験液における溶解性 α 核種濃度の確保方法の検討

- 公開されている実汚染水の分析結果から、汚染水に含まれる α 核種の大半は非溶解性で存在し、溶解性で存在する割合は少ないことが確認されているため、イオン状の α 核種濃度を確保するには、非溶解性で存在する α 核種を酸溶解する必要がある。また、実機想定水質へ調整した際の溶解挙動も確認する。(下図No.3~8)
- しかし酸溶解や水質調整を行うと、溶液中のイオン量が実機処理時の液条件と大幅に異なる可能性や、調製操作自体が困難な可能性もあるため、酸溶解および水質調整を行わない液調製方法も想定する。(下図No.1~2)
- 実汚染水を用いてこれらの液調製方法を試し、液中の溶解性 α 核種濃度を確保することで、通水試験液に適した液調製方法の設定を行う。

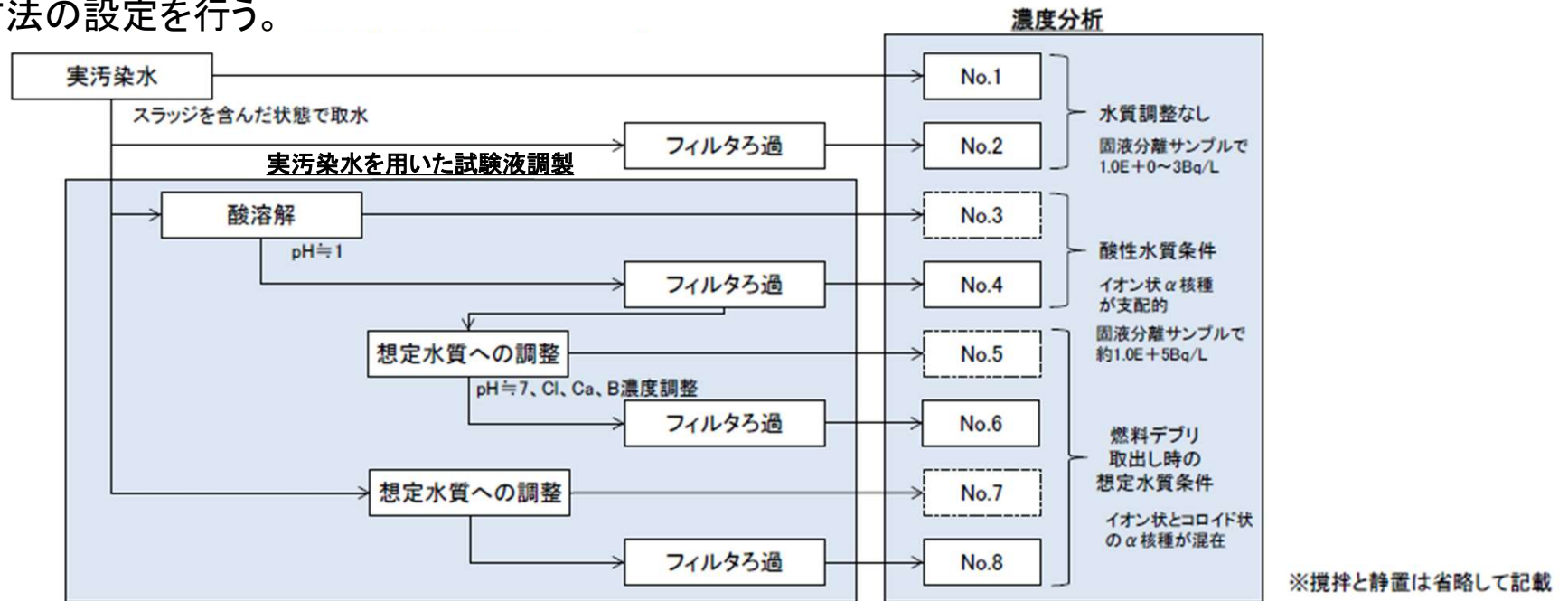


図 通水試験液の確保案

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発(a. 実液の使用を想定した溶解性 α 核種除去試験の検討)

・実汚染水を用いた通水試験に向けた課題の抽出

- これまでの検討結果から、吸着塔方式を想定した溶解性 α 核種除去システムの実機運用までの通水試験の進め方を下図にまとめた。
- 実機運用までには模擬実証が必要であり、実機1/10規模での通水試験装置が必要である。吸着材/吸着塔構成や吸着塔数を設定するための応用化フェーズとして、実機長カラムやミニカラム通水試験を実施するが、試験液確保が課題であり、確保可否を確認したうえで通水試験を実施する。
- 実汚染水を用いた通水試験に関する今後の課題を以下に整理した。
 - 課題①: 実機運用条件設定のためのデータ取得方針の設定
 - 課題②: 実汚染水の採取仕様(対象、場所、方法など)の設定
 - 課題③: 実汚染水の水質調製方法の具体化(サイトでの実施可否含め)
 - 課題④: 通水試験に適した α 核種濃度を安定して確保できない場合の代替手段の検討
 - 課題⑤: 通水試験装置の具体化検討
 - 課題⑥: 通水試験の実施エリアの選定
 - 課題⑦: 通水試験液の分析仕様(測定・分析項目、分析体制)の設定

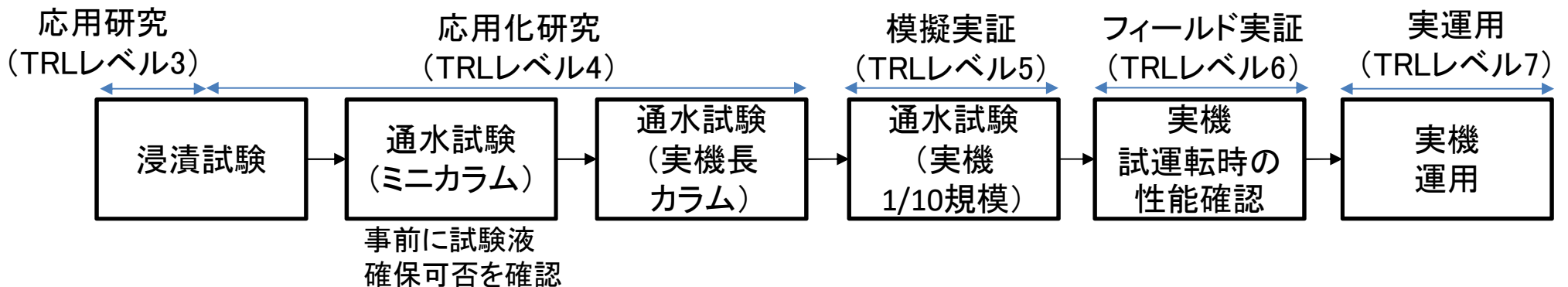


図 溶解性 α 核種除去設備の実機運用までの通水試験実施フロー (吸着塔方式)

TRL: 技術成熟度

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発

・吸着塔方式による溶解性 α 核種除去設備の課題まとめ

- ・吸着塔方式を適用した溶解性 α 核種除去設備の実機適用に向け、本PJ開始段階で抽出していた課題に対する、取り組み・進捗状況、残された課題を下表に示す。(試験評価を要する課題は赤字で示す)

表 溶解性 α 核種吸着除去システムの実機適用に向けた課題への取り組み状況(1/3)

No.	項目	課題への取り組み・進捗状況	残された課題
1	除去対象核種	本PJ初期の段階では、被ばく評価に用いる核種、多核種除去設備の除去対象核種に挙がっている核種として、U、Np、Pu、Am、Cmの5元素・15核種を仮設定していた。 別PJにおける汚染水の分析結果を確認し、建屋内滞留水は溶解性 α 核種がほとんど存在しないこと、PCV内滞留水には溶解性 α 核種が存在し、大半がPu-238、239、240、Am-241で構成されることが明らかとなってきた。 また、本PJにて実施した実機環境・実機水質を模擬した試験の結果、0.1 μ mろ過後のろ液にUはほとんど含まれず、除去対象核種から除外できる可能性が高いことを確認した。	・U (U-234、U-235、U-236、U-238) の除去対象元素からの除外可否
2	処理対象水の 水質	本PJ初期の段階では、処理対象水の水質として、塩化物イオン濃度100ppm以下の範囲での海水成分の溶出、コンクリート成分の溶出によるCa濃度およびpHの上昇を想定していた。 本PJにて実施した実機環境を模擬した試験にて、実機を想定した窒素環境では、pHがある程度高い状態を維持すること、大気の流れによりpHが低下していく傾向にあることを確認した。また、極端な酸化還元電位の低下は見られないことを確認した。	・これまで検討対象とされていない水質条件（二次廃棄物処理設備から液が返送された場合など）での影響評価
3	処理流量	実機の運用を想定し、2～10m ³ /hの範囲を処理流量範囲として仮設定した。 ・2m ³ /h：循環冷却設備外に設備を設置し、22m ³ /日の処理を行うことを想定 ・10m ³ /h：循環冷却設備内への設備設置を想定	・核種除去効率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	本PJの初期段階では処理対象水の α 核種濃度条件は定めず、試験における分析精度の観点から10Bq/mlの濃度条件での吸着試験を行う方針としていた。 事業者エンジニアリングにおける条件の仮定が協議され、全 α にて100Bq/mlを濃度条件の最大値とする方針が設定されたため、検討・計画に反映した。	・核種ごとの濃度条件の設定 ・通水試験液調製手順案による α 核種濃度の確認 (実汚染水を用いた試験)

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発

・吸着塔方式による溶解性 α 核種除去設備の課題まとめ

- 各課題への取り組み・進捗状況、残された課題を下表に示す。(試験評価を要する課題は赤字で示す)

表 溶解性 α 核種吸着除去システムの実機適用に向けた課題への取り組み状況(2/3)

No.	項目	課題への取り組み・進捗状況	残された課題
5	濃度低減要求	本PJの初期段階では、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していた。エンジニアリングにおける条件の仮定が協議され、入口条件に応じて全 α のDFを10、100、1000とする方針が設定されたため、検討・計画に反映した。また、DFの検証のためには実汚染水を用いた通水試験を要することから、試験の計画を検討した。	<ul style="list-style-type: none"> 核種ごとの除去要求の設定 実汚染水を用いた試験計画の具体化
6	適用吸着材	除去対象元素であるU、Np、Pu、Am、Cmを用いた浸漬試験を行い、候補吸着材における平衡吸着量の評価を進め、平衡吸着量が大きく適用見込みの高い吸着材として、添着活性炭、ジルコニウム、チタン酸などを選定した。 これらの吸着材は、中性条件では平衡吸着量が大きい、コンクリート溶出成分を想定したアルカリ条件下では平衡吸着量は比較的低下したため、適切な水質調整が必要であると推察した。	<ul style="list-style-type: none"> 除去要求を満足する吸着材の設定(新規候補吸着材含め) 試験期間中の水質変動影響を低減した試験方法の設定 二次廃棄物発生量の評価 使用済み吸着材の処分影響の調査/評価
7	吸着塔構成	吸着塔構成を設定するためには、通水試験による確認が必要となり、ラボでの小規模な試験では十分な確認ができないことから、実汚染水を用いた通水試験による確認方法を検討した。	<ul style="list-style-type: none"> 実汚染水を用いた試験計画の具体化
8	交換タイミング／交換頻度	目標とする交換頻度を1カ月に1回と設定し、実汚染水を用いた通水試験にて1カ月の処理に相当する通水を行った後に除去性能が維持することを確認する方針を検討した。	<ul style="list-style-type: none"> 除去性能維持期間の評価 実汚染水を用いた試験計画の具体化
9	交換方法	閉じ込めの観点より、吸着塔ごと交換する方針が設定した。	なし
10	塔サイズ	処理流量は2～10m ³ /hを想定した吸着塔として、系統流量250m ³ /日の多核種除去設備の吸着塔と同程度のサイズを、実汚染水を用いた通水試験の検討条件として仮設定した。	なし

7. 実施内容

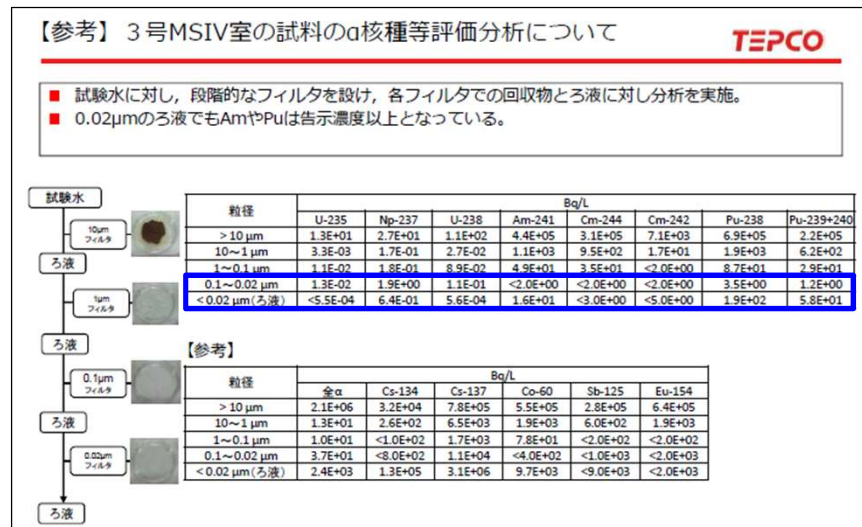
①溶解性α核種除去技術の開発

・吸着塔方式以外の処理プロセスを見据えた溶解性α核種除去設備の課題まとめ

- 本PJにおける検討結果等から、追加の課題を整理した。

表 溶解性α核種吸着除去システムの実機適用に向けた課題への取り組み状況(3/3)

No.	項目	課題への取り組み・進捗状況	残された課題
11	水質調整	前期PJまで中性での吸着性能評価を実施してきた。本PJにて窒素環境下で酸性、アルカリ性での吸着試験を実施したところ、一部の条件にて中性条件と比較して平衡吸着量が低下傾向を示した。中性付近で吸着塔入口水のpHを一定とするよう前処理を行うのが効果的であると推察された。これに伴い、水質調整を前提としたシステム構成を検討した。	<ul style="list-style-type: none"> ・pH調整剤の選定 ・pH調整範囲の設定 ・pH調整による析出物の有無確認
12	コロイド対策	2021年7月に、3号機にてPCV滞留水由来のMSIV漏えい水の採取分析が行われており、汚染水中のα核種はイオン状の形態だけでなく、フィルタろ過後に残留する粒子・コロイド状の形態を含むことが確認された(下図の青枠部)。量や水質次第では、吸着塔方式にてコロイド状のα核種が除去されない可能性があるため、コロイドを除去するための対策の設定(水質調整、凝集沈殿、バッチ処理等)が必要と判断した。	<ul style="list-style-type: none"> ・コロイド状α核種の除去方針設定



出典: 東京電力HD「建屋滞留水処理等の進捗状況について 2022年3月31日」

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発

・まとめ

【これまでの成果】

No.	実施項目	目標	開発成果
a-1	実液の使用を想定した溶解性 α 核種除去試験の検討	実液(原子炉建屋内滞留水)の使用を想定した試験方法の具体化	開発目標である吸着塔方式を用いた溶解性 α 核種除去設備について、実機適用までに α 核種の吸着除去性能および性能維持期間を評価するステップを検討し、ミニカラム通水試験、実機長カラム通水試験、1/10規模通水試験と進めていく計画を立案した。
a-2		実液(原子炉建屋内滞留水)の使用を想定した試験装置、試験計画の具体化	実機適用までに進める通水試験のうち、ミニカラム試験について、試験装置構成を具体化するとともに、実汚染水を用いた試験液の調製方法を検討した。通水試験に必要な溶解性 α 核種濃度を確保するための液調製方法は実汚染水を使用した確認が必要となるため、実汚染水を用いた試験内容を検討し、通水試験を開始するまでの試験計画を具体化した。
b-1	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	前期PJで抽出された候補吸着材(添着活性炭、ジルコニウム等)に対して窒素環境・アルカリ条件にて吸着試験(浸漬試験)を実施した。添着活性炭はアルカリ条件においても前期PJの中性条件と同様のPu除去率となることを確認した。一方でジルコニウムはアルカリ条件においてPu、Cmの除去率がやや低下し、一部の吸着材でアルカリ性にて吸着性能が低下する傾向を確認した。そこで、pH調整+吸着塔システム構成を想定した吸着試験を実施し、これまで選定している候補吸着材と同様の吸着材を候補として選定した。
b-2		溶解性 α 核種除去設備の水質調整方針の設定	吸着塔の前段でpH調整を行うにあたり、適切なpH領域を選定するための評価として、酸性条件での吸着試験を実施した。酸性条件では α 核種吸着性能は低くなることを確認し、中性付近に調整する方針を暫定で設定した。

7. 実施内容

①溶解性 α 核種除去技術の開発

・まとめ

【今後の検討課題】

- ✓ 他PJで進めている検討をもとに、これまで十分に検討されていない水質条件(二次廃棄物処理設備からの返送水による影響評価等)での吸着評価を実施する。
- ✓ 今後通水試験にて、プロセスの実機適用性評価、設計・運用に必要なデータ(通水時の候補吸着材の除去性能や吸着性能維持期間)を取得していく必要があり、所定の α 核種濃度を確保しつつ、多量な試験液の準備が課題である。現在の1F実汚染水を用いることで通水試験液に必要な要件を満足することができるかを今後評価する。
- ✓ また、実汚染水を用いた試験計画の具体化検討をしていくと共に、実汚染水を使用した試験が成立しない場合に備えて、実汚染水を使用せずに、必要なデータが取得できるかも検討する。
- ✓ これまで未評価の新規候補吸着材の評価を実施すると共に、候補吸着材について、使用済み吸着材の処分影響を調査・評価する。
- ✓ 従来開発目標としてきた、吸着塔方式での技術開発に加えて、水質変動による処理性能低下への対策や吸着除去では除去しきれないコロイド成分への対策として、水質調整、凝集沈殿、バッチ処理等の処理プロセスの適用可否を評価する。

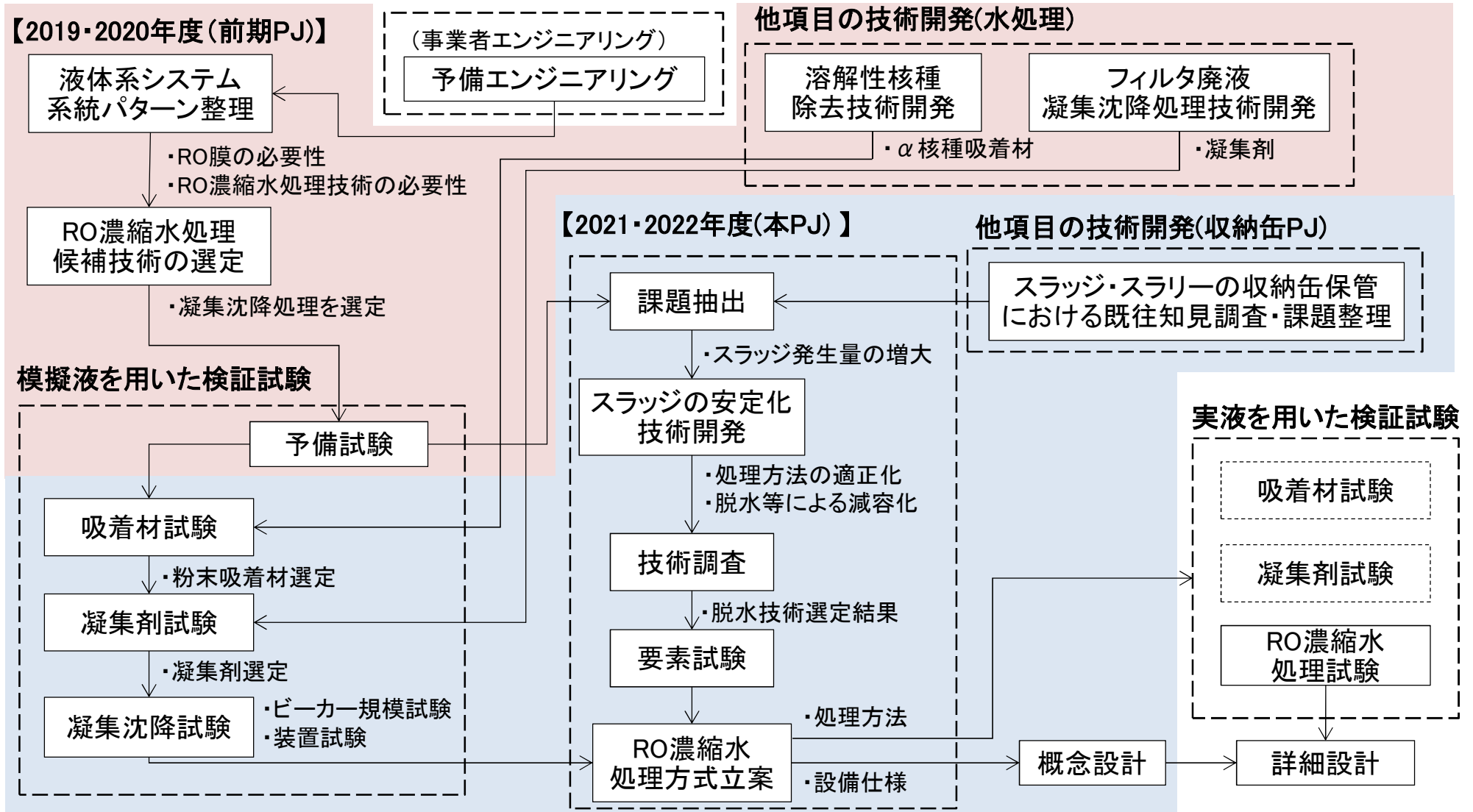
【まとめ】

要素試験結果から、水質変動によって処理性能が変化する可能性が示唆されたため、水質調整設備を想定した場合の評価を行い、pH調整を行う前提での候補吸着材を選定、概略系統構成を暫定で設定した。今後プロセスの実機適用性評価、設計・運用に必要なデータの取得のために、小規模から実機検証規模への段階的な通水試験計画を具体化していく。

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、凝集沈降による核種除去が検討されており、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が未選定であり、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。
- 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。
- ビーカー規模および装置規模のRO濃縮水模擬試験により、立案したRO濃縮水処理手順の適用性を評価する。

【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。

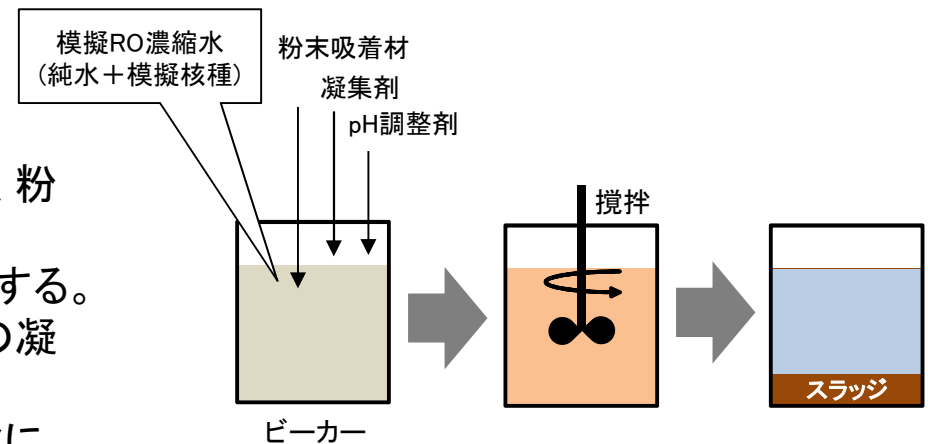


図 RO濃縮水処理要素試験イメージ

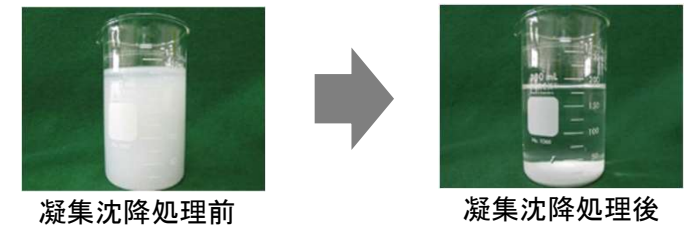


図 RO濃縮水処理要素試験の様子

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

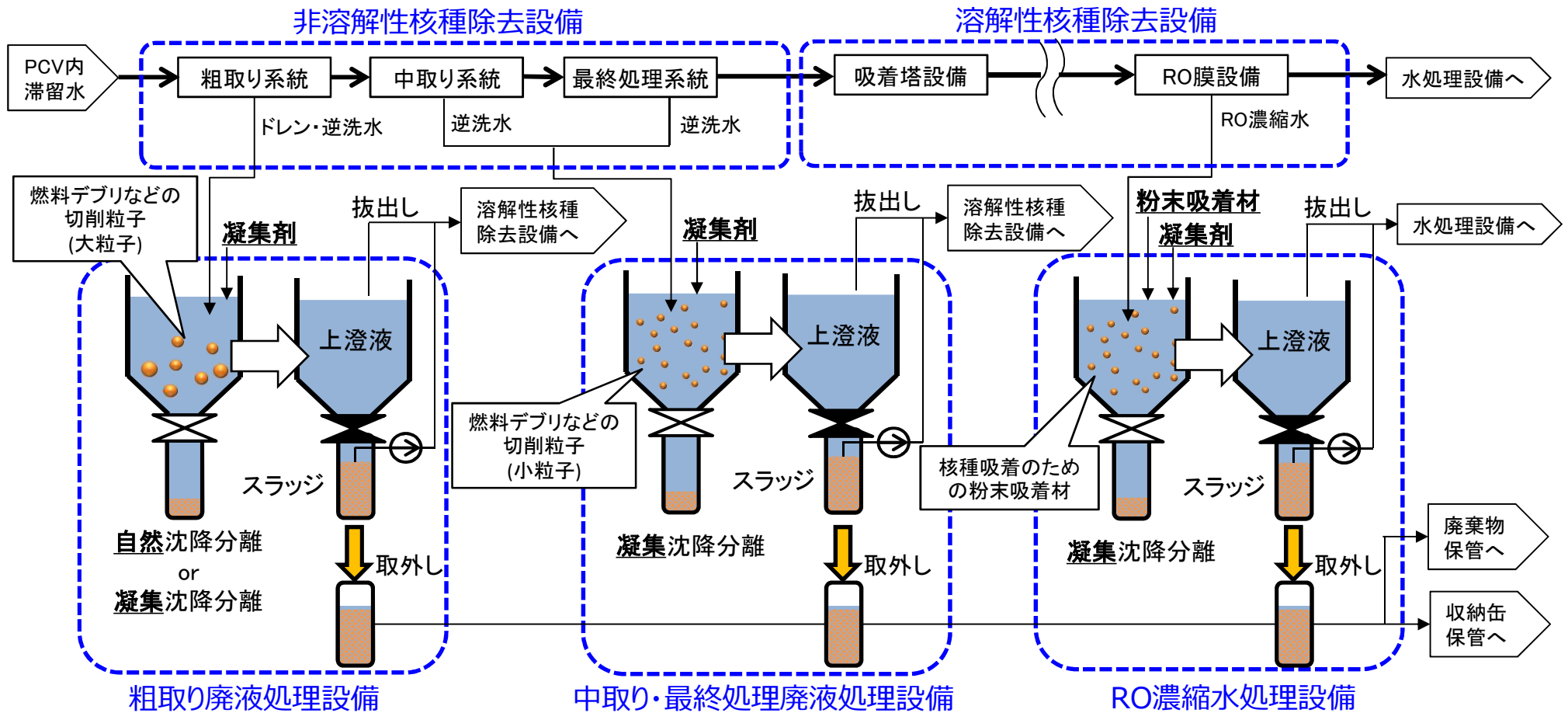


図 スラッジ回収システムの系統構成概念

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。

※補助事業で設定している水質条件で試算。
下線部は今期PJ成果を反映し見直した。

表 各沈降分離設備におけるシステム要件

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	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 μ m)	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 μ m)	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	数千～20000 ppm フィルタ要素試験結果より	吸着材添加時：数百ppm CF濃縮後：約10000 ppm 吸着材要素試験結果より
4	処理流量	間欠ドレン： <u>100 m³/year</u> フィルタ要素試験結果より	1.4 μ mMF膜： <u>30 m³/year</u> 0.1 μ mUF膜： <u>10 m³/year</u> 0.05 μ mUF膜： <u>50 m³/year</u> フィルタ要素試験結果より	8～11 m ³ /day 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： <u>0.7 m³/day以上</u> 設備稼働率80%で処理可能とする ための流量	1.4 μ mMF膜： <u>0.2 m³/day以上</u> 0.1 μ mUF膜： <u>0.063 m³/day以上</u> 0.05 μ mUF膜： <u>0.4 m³/day以上</u> 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～数日で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。

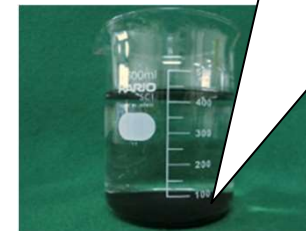
スラッジ回収容器をユニット缶サイズ(φ200×H400mm)と仮定した場合、必要な払い出し回数は下表のように試算される

表 スラッジ回収容器の払い出し回数

処理対象廃液	回収容器員数	沈殿スラッジ発生量
粗取り廃液	1個/day	3m ³ /year
最終処理廃液	<10個/day	<30m ³ /year
RO濃縮水	<120個/day	<300m³/year

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



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

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、払い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、払い出し回数も膨大なため改善が必要

検討項目

- 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

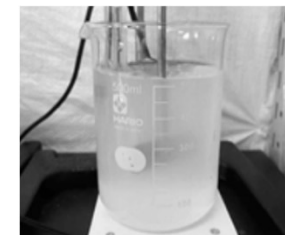


図 吸着材試験(チタン酸)の様子

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※¹。

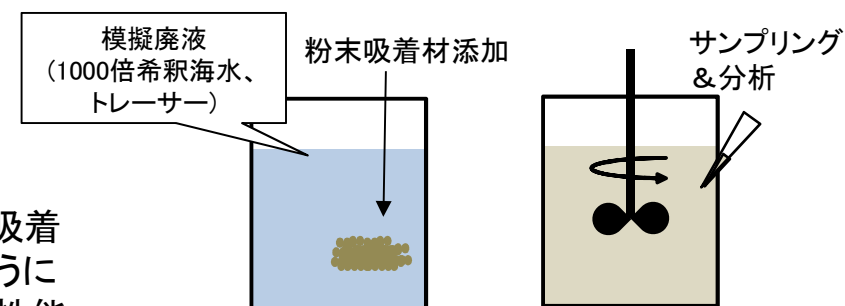


図 攪拌式の吸着試験 イメージ図

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。

表 粉末吸着材の選定結果※²

No.	吸着材種類	粒径(平均)	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	48.5 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の報告がある
5	マグネイト	1.96 μm	ヘマタイトと同様の鉄酸化物系の吸着材。

※¹ 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。
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考とした。

※² 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した。

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を使用した凝集沈降試験を実施する

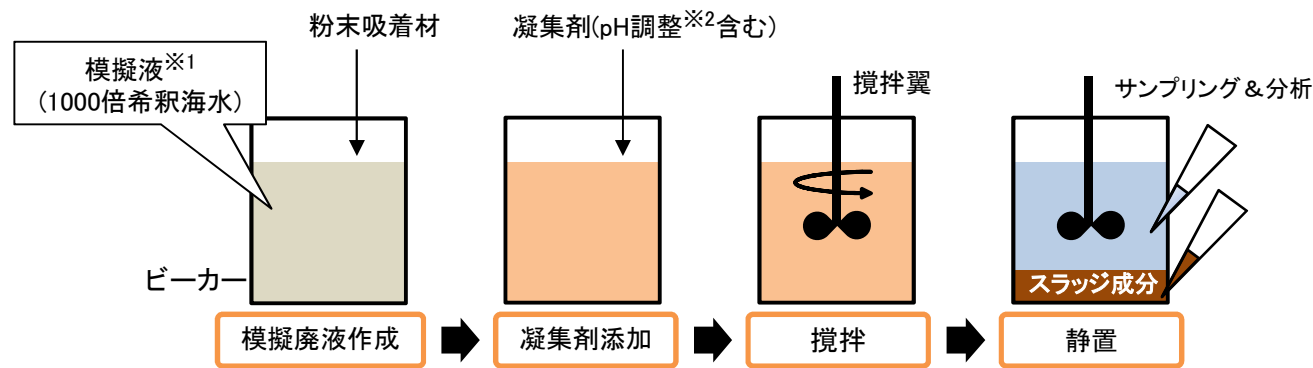


図 凝集剤試験 イメージ図



図 凝集剤試験 装置外観

※1 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。

※2 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※3	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期PJ試験にて確認

※3 PAC: ポリ塩化アルミニウム

7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

➤ 吸着材および凝集剤の選定結果

吸着材試験および凝集剤試験の試験結果より、各試薬を選定した。

RO濃縮水処理試験では、下記の選定結果を基に使用する試薬を設定した。

粉末吸着材

チタンケイ酸塩、添着活性炭、(チタン酸)

試験する粉末吸着材は、 α 核種除去性能が高いと評価された材のうちチタンケイ酸塩と活性炭とする。 α 核種選択除去用吸着材と全放射能除去用吸着材より各1種類選定した。

※チタン酸も高い α 核種除去性能が確認されたが、試験に使用可能なサンプル量が少ないため、本試験では使用しない。

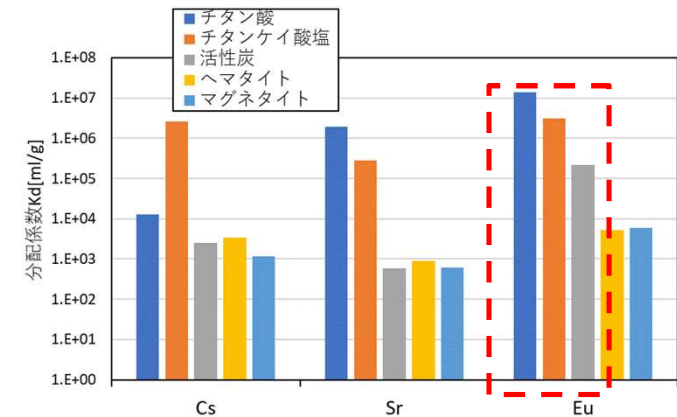


図 吸着材試験結果 分配係数

凝集剤

硫酸アルミニウム、(高塩基PAC)

凝集剤試験結果より、水質に対する冗長性や凝集沈殿物の発生量が比較的少なく、良好な結果が得られた硫酸アルミニウムを選定する。なお、高塩基PACを使用した試験も代表条件のみ実施した。

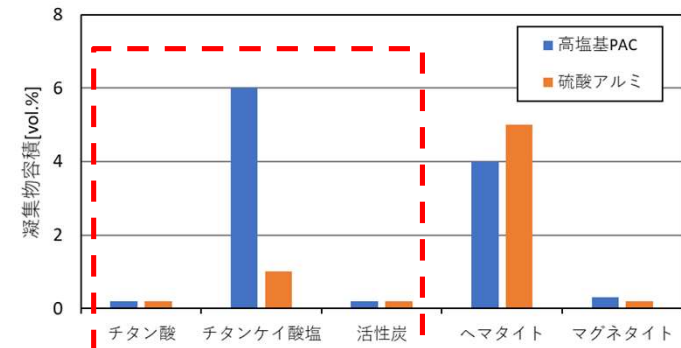


図 凝集剤試験結果 沈殿スラッジ容積

7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

➤ 粉末吸着材および凝集剤の選定

各粉末吸着材および凝集剤の添加量(濃度)を下記のように設定した。

粉末吸着材

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]			吸着材 添加濃度
		Cs	Sr	Eu(Am)	
1	チタン酸	9.2.E+03	1.0.E+06	6.0.E+06	<50ppm
2	チタンケイ酸塩	1.6.E+06	1.3.E+05	1.1.E+06	50ppm
3	添着活性炭	1.2.E+03	2.6.E+02	5.9.E+04	200ppm

吸着材添加濃度の設定

吸着材試験より取得した分配係数より、DF100を満足する値を設定した。なお、試験の都合上分析において検出下限以下とならない程度の余裕を考慮した。

凝集剤

表 凝集剤の必要添加量の評価

No.	凝集剤\吸着材	凝集剤添加濃度[ppm]		
		チタン酸	チタンケイ酸塩	活性炭
1	高塩基PAC	100	1000	1000
2	硫酸アルミ	20	200	50

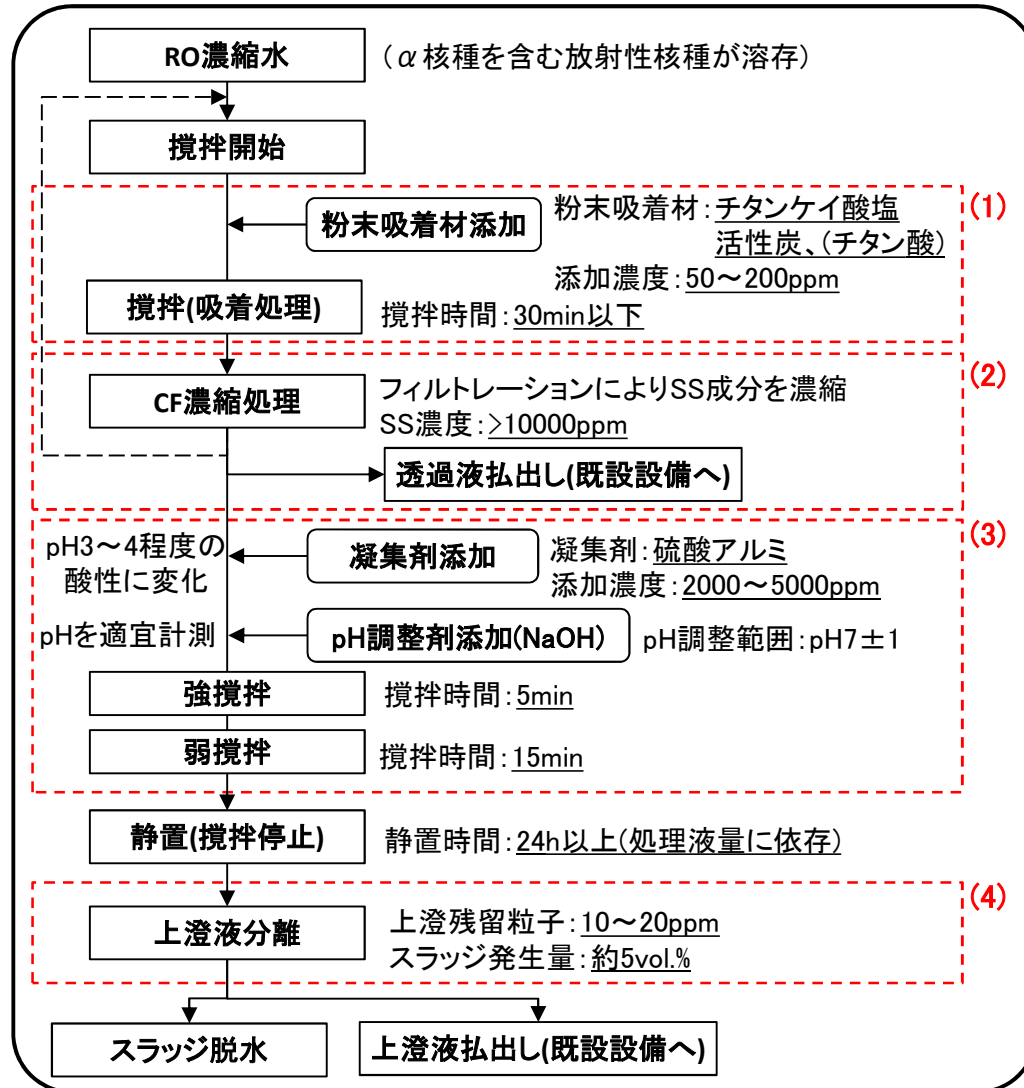
凝集剤添加濃度の設定

凝集剤試験において、上澄液のSS濃度を20ppm以下まで低減可能なことを確認した添加濃度を設定した。

7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

➤ RO濃縮水処理手順案



(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、溶存核種を吸着する。

(2)濃縮処理

クロスフローフィルタ(CF)などにより、吸着処理後の廃液の固形分を濃縮する。
 ※RO濃縮水受入→(1)→(2)の工程は繰り返し実施し、CF濃縮液の液量のある程度確保する。

(3)凝集沈降処理

CF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: スラッジ回収容器で回収。

(5)スラッジ脱水処理

カートリッジフィルタなどで沈殿スラッジを脱水処理。60%程度まで含水率を低減する。

7. 実施内容

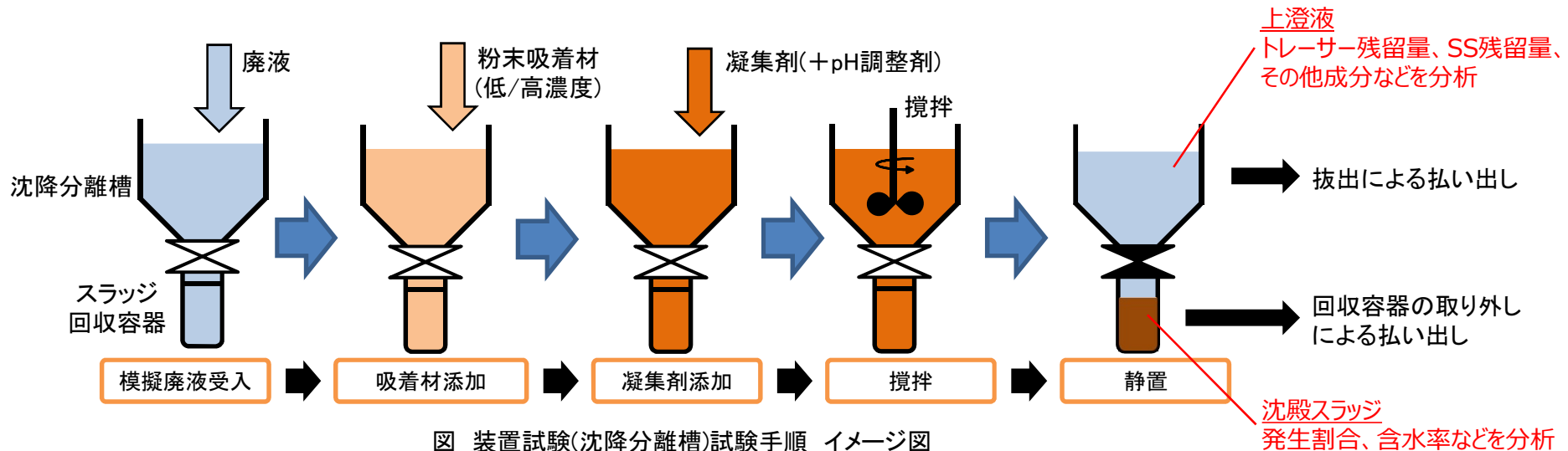
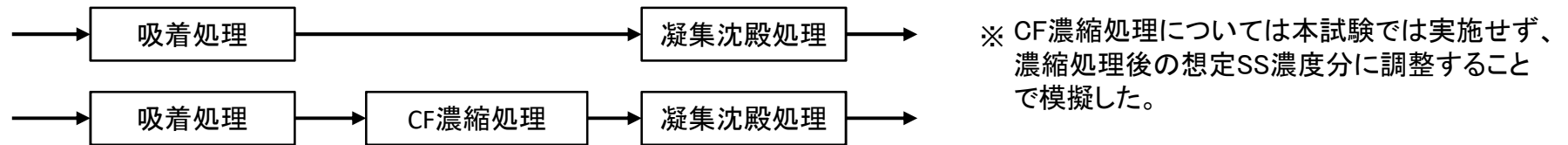
②RO濃縮水の処理技術の開発

➤ RO濃縮水処理試験

沈降分離槽を使用し、RO濃縮水の模擬液の処理試験を実施した。各試験条件は、ビーカー規模試験結果を基に設定した。本試験により、立案したRO濃縮水処理方式の成立性を確認した。

模擬対象とした処理プロセス

濃縮処理の有無を考慮し、粉末吸着材添加濃度は低濃度と高濃度の2パターンを設定した。



本処理方法による核種除去性能とともに、沈降分離槽の各機構の動作性や各プロセスに要する処理時間などのデータも取得し、実機オペレーションの検討に反映する。

7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

➤ 試験パラメータの設定

RO濃縮水処理試験のパラメータを下記のように設定した。

表 RO濃縮水処理結果 試験パラメータ

No.	項目	設定	検討方針	
1	核種濃度 (トレーサ濃度)	Cs	0.1 ppm	循環冷却水に含まれる代表核種として、Cs, Sr, Amを選定。 トレーサ濃度はDF100を評価可能な初期濃度を設定(検出下限:1ppb)。ただし、Euはある程度高濃度でないと安定性が低く、析出による減少が大きいいため、事前試験での評価により0.5ppmと設定。 Amはα核種であり取扱いが困難であるため、化学的相似性のあるEuで代替し試験を実施。
		Sr	0.1 ppm	
		Eu(Am)	0.5 ppm	
2	模擬液性	1000倍希釈海水相当	PCV内滞留水相当の塩素濃度を設定。	
3	pH	7(中性領域)	初期値は中性とし、凝集沈殿処理におけるpH調整では、それぞれの凝集剤で推奨されているpHに調整(NaOH, HClを使用)。	
4	水温	25℃	実機では10~40℃程度の四季変動が想定されるが、前期補助事業の予備試験結果より、温度依存性は小さいことが確認されたため、代表条件として常温25℃で試験を実施。	
5	種類	① チタンケイ酸塩(8.55 μm) ② 活性炭(48.5 μm)	吸着材試験よりα核種除去性能が高いと評価された吸着材を選定。 粒径はレーザー回折法により測定。 ※チタン酸は入手可能であったものが試験用の少量サンプルのみであり、多量の工業用品は入手不可であったため未実施。海外サイトで工業用に使用されている実績はあり。	
6	添加濃度	50~100ppm(濃縮処理なし)、 10000ppm(濃縮処理あり)	フィルタろ過による濃縮処理を実施する場合と実施しない場合の2パターンを想定し、低濃度と高濃度の2条件を設定。	
7	種類	① 高塩基PAC ② 硫酸アルミ	対象粒子に対する凝集性能、イオン強度に対する冗長性の観点から選定。 有機系凝集剤は、凝集沈殿物に有機物が含有した場合、処理処分のプロセスに悪影響があることが懸念されるため、検討対象外とし無機系凝集剤を選定。	
8	添加濃度	20~1000ppm(濃縮処理なし)、 <5000ppm(濃縮処理あり)	追加試験結果より、SS濃度10000ppm程度の廃液に対しては、凝集剤濃度2000~5000ppm程度が必要と評価し設定。	
9	攪拌速度/時間	強攪拌: 157rpm/5min 弱攪拌: 52rpm/15min	500mLビーカー規模試験の攪拌条件で得られた攪拌能力を装置規模(600L)で得るために必要な攪拌速度を換算評価し設定。攪拌翼はパドル型の2段構造を採用。	
10	静置時間	60min~24h	1日で1バッチ処理を基本として検討しているため最長24hと設定	

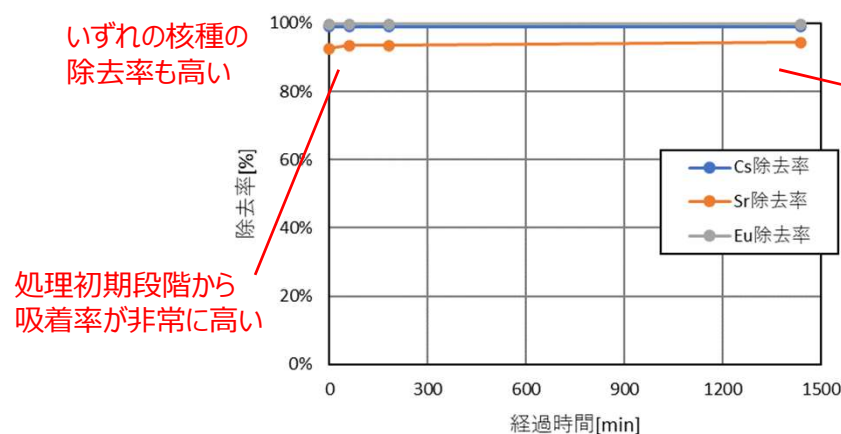
7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

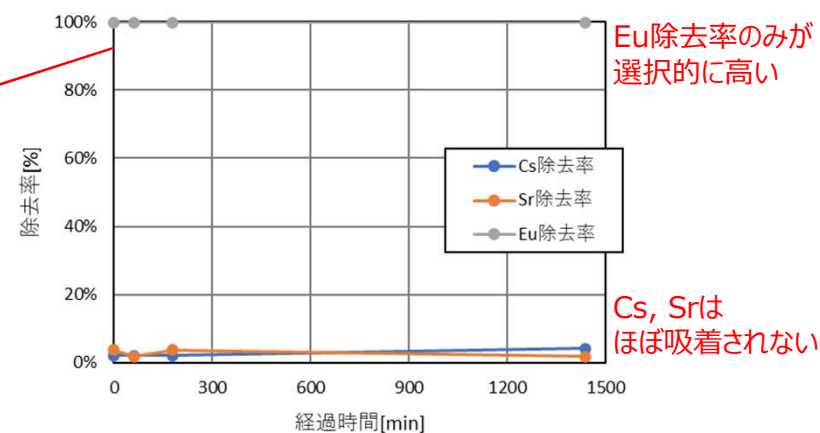
➤ 吸着材性能評価結果

試験条件

試験液：1000倍希釈海水、pH：7、トレーサー：0.1ppm(Cs, Sr), 0.5ppm(Eu)、液量：600L、攪拌条件：157rpm × 10～120min
凝集剤：硫酸アルミ(200ppm/50ppm)、吸着材：チタンケイ酸塩(50ppm)、添着活性炭(200ppm)



(a)チタンケイ酸塩(50ppm)



(b)添着活性炭(200ppm)

図 吸着性能評価結果トレーサー(除去率)

- チタンケイ酸塩はCs, Sr, Euいずれも除去可能であり、全放射能濃度の低減に優位である。
- 添着活性炭はCs, Srを除去せず、Euを選択的に除去可能であり、 α 放射能濃度のみの低減に優位である。
- いずれのトレーサーについても吸着速度が速く、ごく短時間の処理で所定の除去性能(DF100)を満足することが可能と考えられる。ただし、吸着材試験結果より、添加量が少なくなるほど吸着速度が遅くなる傾向があり、必要処理時間が長くなる傾向を確認した。
- 凝集沈殿処理により、吸着材粒子に吸着されたトレーサーが脱離する等の影響は確認されなかった。

吸着材の除去性能や適正添加量について、平衡吸着量や吸着等温線の観点から考察。

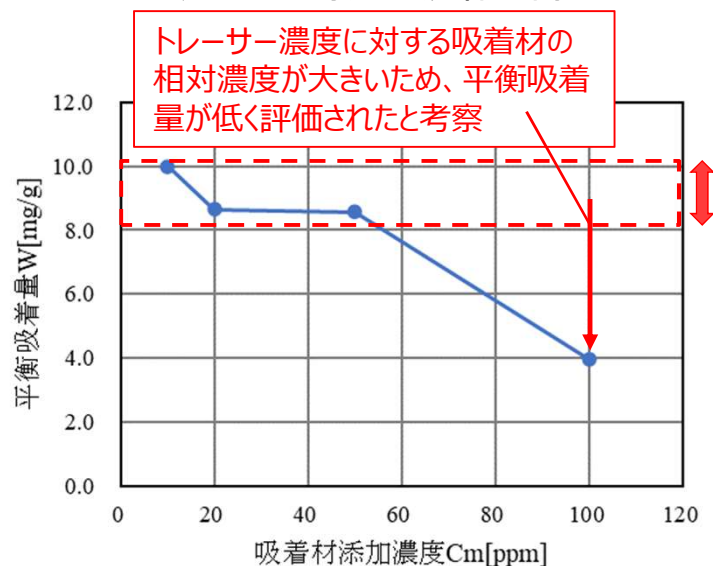
7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

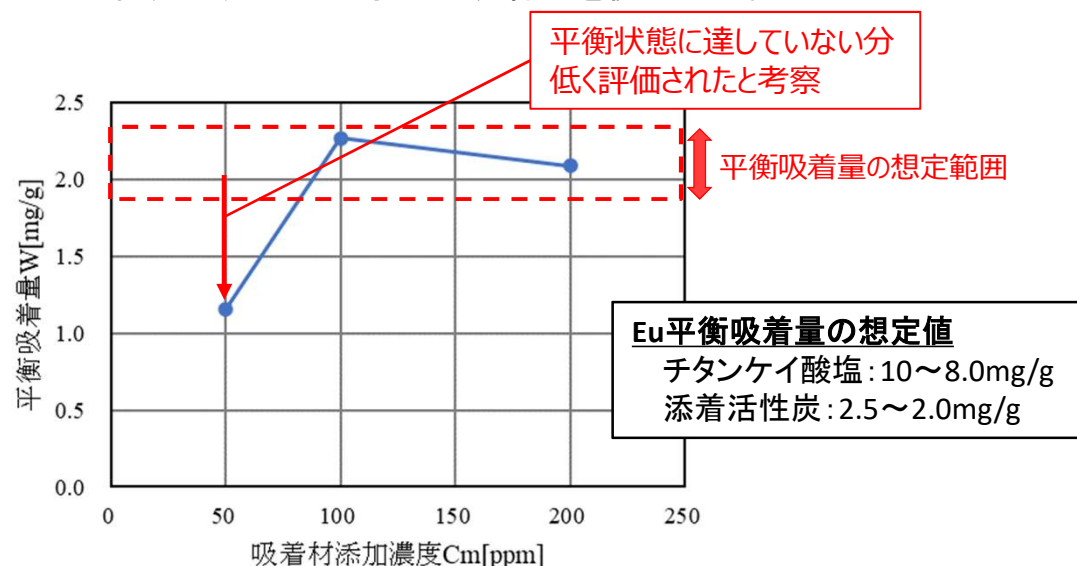
➤ 平衡吸着量評価

吸着試験結果より、各吸着材のEu平衡吸着量を評価した。

なお、120min時点で吸着平衡状態に達していると仮定し、120min時点の吸着量を使用した。



(a)チタンケイ酸塩



(b)添着活性炭

図 Eu平衡吸着量の添加濃度依存性

- 各吸着材の平衡吸着量は、赤枠で示した範囲であると考えられる。しかし、本試験では、吸着速度や添加濃度などに依存して低い値が算出された可能性がある。
- 平衡吸着量は吸着材濃度による依存性は小さく、幅広い濃度領域でほぼ一定である可能性が示唆された。
- 吸着等温線による評価結果より、核種濃度が変動した場合でも吸着性能は保たれる可能性が示された。

➡ 各吸着材の飽和吸着量は、本試験結果で確認された平衡吸着量と同程度である可能性が示唆された。

7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

➤ 吸着材性能評価結果まとめ

本試験結果より、下表のように各吸着材のEu除去性能を評価した。

表 各吸着材のEu除去性能の評価結果

吸着材	Eu分配係数 ^{※1}	必要添加濃度 ^{※2}	Eu平衡吸着量	処理時間 ^{※3}
チタンケイ酸塩	8.4E+04～3.8E+06ml/g	26mg/L (<50 mg/L)	10～8.0mg/g	<30 min
添着活性炭	2.7E+03～5.3E+05ml/g	190mg/L (<200mg/L)	2.5～2.0mg/g	<30 min

※1 下限値は吸着平衡に達していない可能性があるケースでの評価結果。

※2 上限側のKdを用いて評価。

※3 ただし、吸着材添加量が小さくなるほど処理時間は長時間必要。

- Eu分配係数は、チタンケイ酸塩は1.0+E04～06、添着活性炭は1.0+E03～05と評価された。 Eu分配係数より、DF100を満足するためには、チタンケイ酸塩：50ppm、添着活性炭：200ppm以上の添加量が必要であると評価された。
- また、吸着材添加量が十分に大きい場合、吸着速度は非常に速く、短時間の処理でDF100以上を満たすと考えられる。その場合、吸着処理に必要な時間は30min以内であると考えられる。
- ただし、予備試験により、吸着材添加濃度が小さいほど、吸着平衡に達するまでの所要時間が長い傾向を確認した。特に添着活性炭については、添加濃度が小さい場合、120min以上の処理時間が必要となる可能性が示唆された。
 - ※粒径が小さい粉末材を使用したため、表面積が大きく、吸着速度が速いと考えられる。
- 本試験条件の濃度範囲では、平衡吸着量はほぼ一定である可能性が示唆された。ただし、実液相当の希薄な濃度領域においては、平衡吸着量が低下する可能性があるため、別途評価が必要である。

7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

➤ 凝集剤性能評価結果(低SS濃度条件)

吸着処理後の廃液を凝集沈殿処理した時の凝集剤の性能評価結果を示す。

試験条件(共通)

試験液: 1000倍希釈海水、pH: 7、トレーサー: 0.1ppm(Cs, Sr), 0.5ppm(Eu)、液量: 600L、攪拌条件: 157rpm × 10~120min

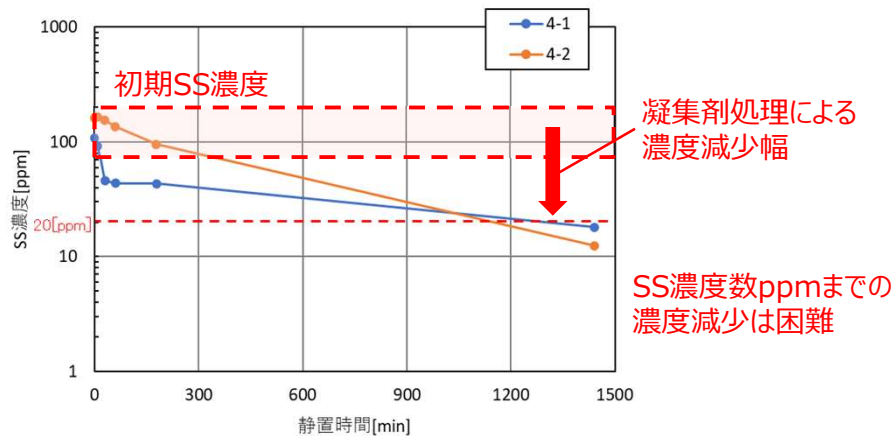


図 凝集剤性能評価 上澄液SS濃度の推移

表 試験条件(低SS濃度条件)

No.	吸着材		凝集剤	
	種類	添加濃度	種類	添加濃度
4-1	チタンケイ酸塩	50ppm	硫酸アルミ	200ppm
4-2	添着活性炭	200ppm	硫酸アルミ	50ppm

表 試験結果(低SS濃度条件)

No.	処理後SS濃度	スラッジ発生量	SS除去率	スラッジ含水率
4-1	18.1ppm	0.4 vol.%	63.8%	97.3 wt.%
4-2	12.5ppm	0.1 vol.%	93.8%	91.1 wt.%

※ビーカー規模試験で確認した傾向とほぼ同様

- 吸着材の初期SS濃度が50~200ppmの液を、凝集剤を用いた処理により10~20ppmまで濃度低減したことを確認した。SS濃度の減少率から、処理後の上澄中に数ppm程度粒子が残留する可能性が示唆された。
- SS濃度についてもDF100(除去率99%)以上が必要である場合、フィルトレーションなどにより上澄液中の残留粒子を除去する必要がある。
- 凝集沈殿処理により発生するスラッジ(沈殿物)は、含水率が90%以上、発生量が0.1~0.4%程度であることを確認した。多量の水が含まれているため、スラッジ量が増大していると考えられる。

7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

➤ 凝集剤性能評価結果(高SS濃度条件)

CF濃縮処理後に高SS濃度となった廃液に対して、凝集沈殿処理した時の凝集剤の性能評価結果を示す。

試験条件(共通)

試験液: 1000倍希釈海水、pH: 7、トレーサー: 無添加、液量: 600L、攪拌条件: 157rpm × 10~120min

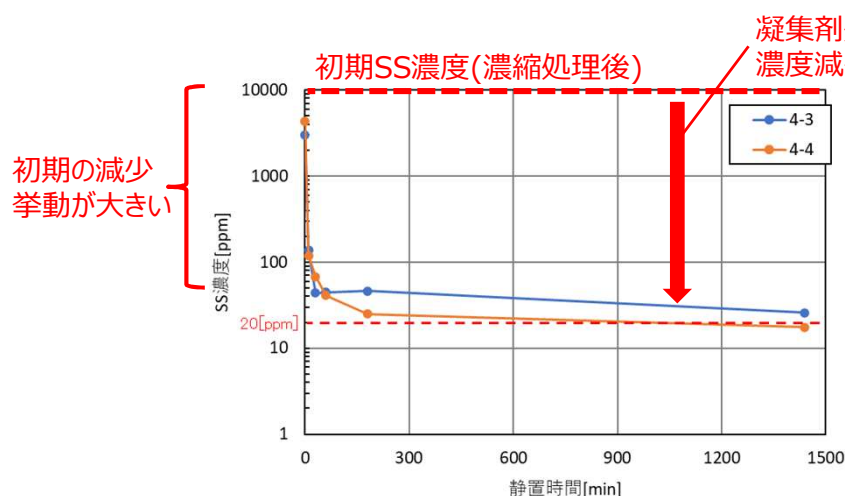


図 凝集剤性能評価 上澄液SS濃度の推移

表 試験条件(高SS濃度条件)

No.	吸着材		凝集剤	
	種類	添加濃度	種類	添加濃度
4-3	チタンケイ酸塩	10000ppm	硫酸アルミ	5000ppm
4-4	添着活性炭	10000ppm	硫酸アルミ	2000ppm

表 試験結果(高SS濃度条件)

No.	処理後SS濃度	スラッジ発生量	SS除去率	スラッジ含水率
4-3	25.9ppm	4.1 vol.%	99.7%	83.9 wt.%
4-4	36.6ppm	3.8 vol.%	99.8%	81.3 wt.%

※ビーカー規模試験で確認した傾向とほぼ同様

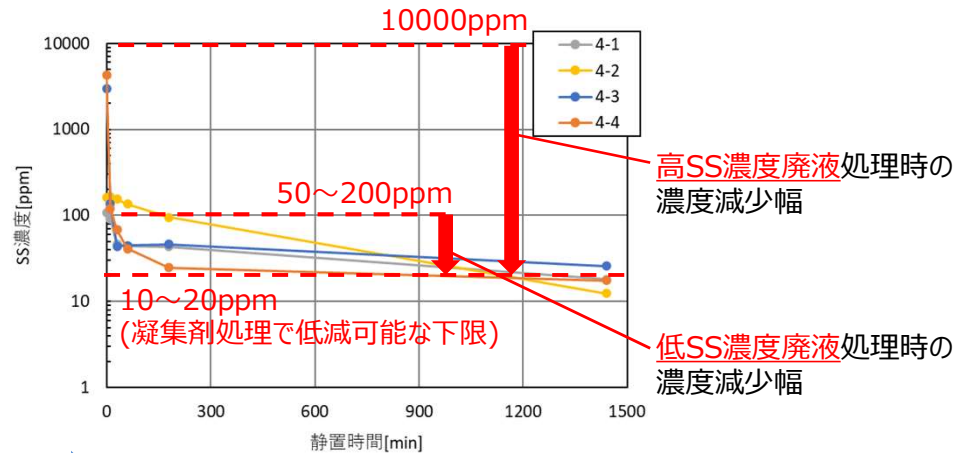
- 吸着材の初期SS濃度が10000ppmの液を、凝集剤を用いた処理により20ppm付近まで濃度低減したことを確認した。特に処理開始直後の沈降挙動が顕著であり、60min以内に50ppm以下まで減少した。その後は、沈降挙動が頭打ちとなり、10ppm付近に漸近していく挙動を確認した。
- 低SS濃度条件の試験と同様に、上澄中に粒子が10~20ppm程度残留することを確認した。初期SS濃度に依存せず、凝集剤ではSS濃度数ppm以下まで濃度低減させることは困難である可能性が示唆された。
- 凝集沈殿処理により発生するスラッジ(沈殿物)は、含水率が80%以上、発生量が4%程度であることを確認した。圧密効果が働くことにより、低SS濃度条件の処理により発生するスラッジより含水率が多少低くなったと考えられる。

7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

➤ 凝集剤の除去性能に関する考察

- ①初期SS濃度に依存せず、SS濃度は約10ppmまで低減可能である。
- ②SS濃度が高くなるほど凝集剤の沈降性能が安定し、添加濃度がある程度広い領域で適切な処理が可能である。



凝集剤によるSS除去率は、下式のように簡易評価できる。

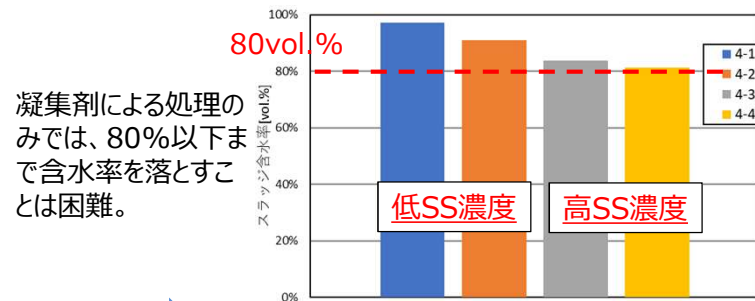
$$\text{SS除去率}[\%] = \frac{\text{初期SS濃度} - \text{低減可能な下限値}10\text{ppm}}{\text{初期SS濃度}} \times 100$$

吸着材濃度は50~200ppm程度で核種除去要求を満足するが、その後の凝集沈殿処理による粒子除去の効率が低いため、SS濃度を十分に上昇させる処理が必要と考えられる。

CFフィルタ等による事前濃縮処理の必要性が高い。
(今後の開発課題として整理)

凝集沈殿処理の事前に、固形分の濃縮処理を実施するシステムがより合理的と考えられる。

- ③凝集沈殿処理により発生するスラッジは、含水率が非常に高いことに起因し、発生量が増大する傾向にある。



凝集剤による凝集沈殿処理により、スラッジ含水率を低減することが可能であるが、80%程度が下限と考えられ、また、払い出し時には上澄水がある程度随伴すると考えられる。

スラッジ脱水処理の必要性が高い。
(開発項目③(二次廃棄物処理技術の開発)で開発を実施)

スラッジの脱水処理を実施し、減容化を図ることが必要と考えられる。

7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

➤ 凝集剤の除去性能に関する考察

凝集沈降処理の結果、初期SS濃度に依存せずSS濃度10～20ppm程度に収束する原因について考察した。なお、明確なメカニズムは不明であるため、検討した仮説を下記に示す。

凝集する粒子数と自然分散する粒子数が釣り合うようになった時点で、凝集体の成長が見かけ上なくなり、凝集沈降によるSS濃度の減少が起こらなくなる。

凝集剤は粒子表面の電荷を中和し、粒子同士に働く静電的斥力をキャンセルすることにより、粒子同士を凝集させる。しかし、一度形成された凝集体は強い力で結びついているわけではなく、時間経過とともに一定の粒子は分散すると考えられる。すなわち、凝集作用と分散作用は並行して発生しており、凝集作用の方が寄率が大きい場合は、凝集体が大きく成長し沈降する。

粒子の凝集は、粒子同士が液中で衝突する際に発生し、粒子同士が衝突する確率は液中に存在する粒子の個数、すなわちSS濃度に依存する。そのため、SS濃度が減少していくとともに、凝集作用の寄与率は小さくなっていき、最終的には凝集作用と分散作用が釣り合う状態(平衡状態)に落ち着くと想定される。

上述の凝集と分散が釣り合った状態が、本試験で確認された低減可能なSS濃度の下限値である10～20ppmであると考えられる。

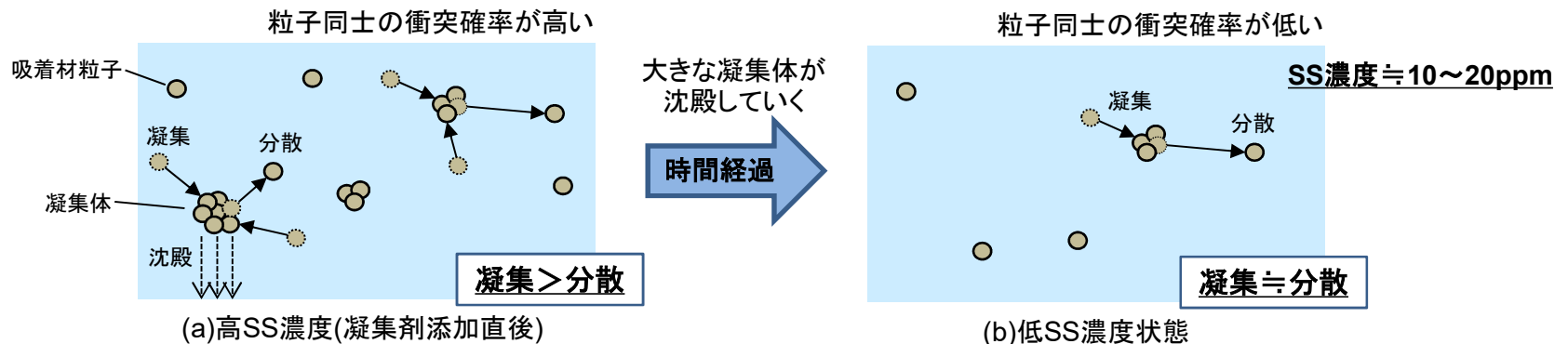


図 凝集剤による粒子の凝集と自然分散のイメージ図

7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

➤ 処理後の残留成分の性状分析

各試験の分析データより、RO濃縮水処理後に発生する上澄液と沈殿スラッジの想定性状を整理した。

表 RO濃縮水処理後に発生する上澄液/沈殿スラッジの想定性状

上澄液	含有成分/水質項目	初期濃度[ppm]	処理後濃度[ppm]	残留率[%]	備考
	Cl	17	17	—	海水成分。試験では未測定。ほぼ全量が液中に残留すると想定。
	Al	9.21	0.067	0.7%	凝集剤成分。ほぼ全量が水酸化アルミニウムとして沈殿すると想定され、液中のAl濃度は0.1ppm以下となった。
	SO ₄	53	45	85%	凝集剤成分。硫酸成分は液中に残留する傾向にあるが、10～20%の濃度減少が発生する。
	Ca	2.72	2.32	85%	コンクリート溶出成分。析出や共沈により10～20%の濃度減少があるが、ほぼ初期濃度から変動しない。
	B	201	199	99%	ホウ酸水成分。ほぼ全量が液中に残留すると推定される。 (7000ppmasBの場合は最大5%が沈殿; 2019年度要素試験結果)
	SS濃度	<200	<20	<10%	初期SS濃度に依存せず、約20ppmまで濃度低減可能なことを確認した。
	pH	(5～9)	7±0.5	—	凝集沈降処理後のpH調整領域(pH7)から大きく変化しないことを確認。
沈殿スラッジ	項目	想定性状			備考
	発生量	低SS濃度の場合: 約1vol.% 高SS濃度の場合: 約4vol.%			処理液量に対して1vol.%前後のスラッジが発生すると想定される。ただし、高SS濃度廃液の場合、約4vol.%と想定される。
	含水率	90～99% (下限値約80%)			処理方法や水質条件に大きく依存せず、80～90%以上の含水率となる試験結果が多く、実機においても同様と想定される。
	含有成分	粉末吸着材、Al成分(凝集剤)			粉末吸着材が支配的であり、凝集剤由来の水酸化アルミが含まれる。処理液に含まれている共存イオンは液中に残留すると想定される。

CaやBは析出や共沈により濃度減少するが減少量は小さく、ほぼ全量が後段へ払い出される。また、凝集剤添加により、沈殿スラッジにはAl成分、上澄液には硫酸成分が残留し、SS濃度20ppm程度は液中に残留すると想定される。

7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

➤ 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[※]と上澄液の想定性状

項目	設定値	試験結果	備考
Cl	<700 ppm	<20 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。 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。
Ca	<50 ppm	2.3 ppm	
Mg	<30 ppm	—	
SO ₄	<100 ppm	45 ppm	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。ただし、既設水処理設備は、硫酸イオンを平均約50ppm、最大約100ppmで受入実績あり。
B	—	200 ppm	受け入れ実績はなし。なお、環境放出上限値は10mg/Lである。そのため、ホウ酸水が使用される場合、前段のホウ酸回収設備で十分な濃度低減を図る必要がある。
pH	7～8.5	7±0.5	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	10～20 ppm	凝集沈降処理によりSS濃度は10～20ppm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が、保守的により数ppm程度まで除去することが望ましい。そして、上澄液に残留する粒子は放射エネルギーが高いため、粒子成分に対してもDF100以上の除去が要求される。そのため、UF(Ultra-Filtration)膜などによる残留粒子の除去が必要と想定される。
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。今後の検討課題として整理。 インプット水の想定全α濃度および、粉末吸着材の核種除去性能、添加量、残留量より評価する必要がある。また、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、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、SS濃度の既設水処理設備の受入実績および、粉末材に吸着した状態の放射能の除去という観点より、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であると考えられる。

7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

➤ RO濃縮水の処理手順の検討

本開発成果を基にRO濃縮水の処理方法について検討した。

なお、下表の各処理の頻度は評価の簡易化のために仮置きした値であり、実際の処理頻度はシステム全体の運用性を考慮して設定する必要がある。

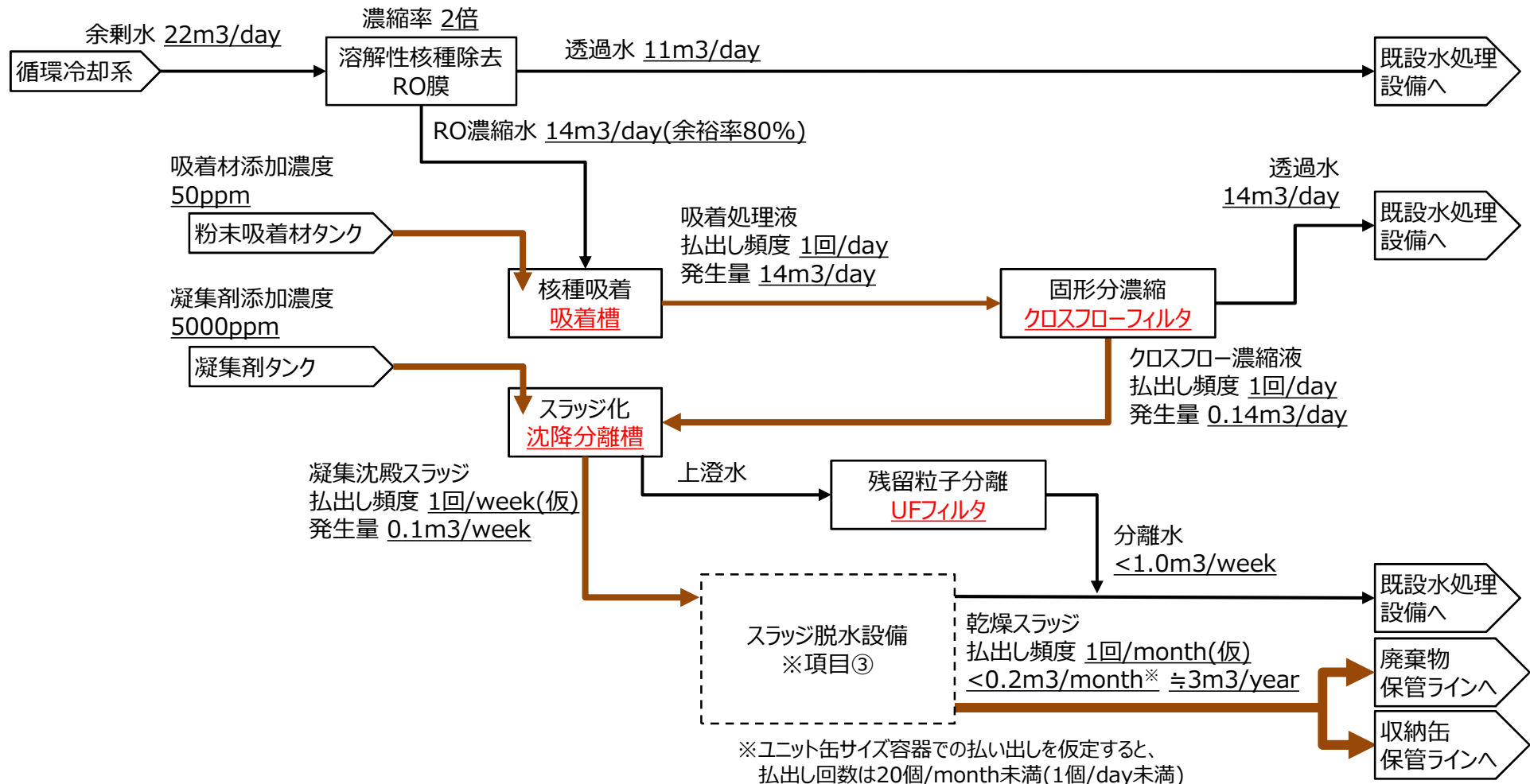
No.	処理手順	処理頻度	発生 スラリー/スラッジ	発生量	スラッジ 含有量	備考
1	RO濃縮水受入	—	RO濃縮水	14 m ³ /day	0%	前段の粒子除去設備により固形分はほぼ除去され、RO膜処理時には固形分はほぼ含まれないと想定した。
2	核種吸着処理 (粉末吸着材添加)	1バッチ /1day	吸着処理液	14 m ³ /day	0.005% (50ppm)	今期補助事業の試験結果より、粉末吸着材添加量は50ppm(0.005%; チタン酸やチタンケイ酸塩の場合)と想定した。
3	クロスフローろ過 による濃縮処理	1バッチ /1day	透過液	<14m ³ /day	微小	濃縮倍率は100倍と仮定。クロスフローフィルタを透過する粒子はごく微量であると想定される。
			クロスフロー 濃縮液	0.14 m ³ /day	約1% (10000ppm)	クロスフローろ過により、約1% までスラッジ量を濃縮させると仮定した。(濃縮水が発生)
4	凝集沈殿処理	1バッチ /1week	上澄液	<1.0 m ³ /week	0.002~0.005% (20~50ppm)	残留粒子濃度は凝集沈降試験結果より、20~50ppmと想定した。残留粒子はUF膜で除去する。
			凝集沈殿スラッジ	0.1 m ³ /week	<10wt.%	前処理で発生したCF濃縮液に対して凝集沈殿処理し、核種をスラッジ化させる。スラッジ含有率は10wt.%以下、発生量は10vol.%以下となると想定する。
5	スラッジ脱水処理 ※項目③	1バッチ /1month	分離水	<0.4 m ³ /month	微小	カートリッジフィルタろ過を適用する場合、分離水に含まれるSS量は微量となると想定する。
			乾燥スラッジ	0.2 m ³ /month	約40wt.%	カートリッジフィルタ通水により、沈殿スラッジを目標値である含水率60wt.%(スラッジ量40wt.%)まで脱水する。ただし、使用する粉末吸着材によっては水分量が大きくなり、スラッジ含有量は約20~30wt.%程度となる。
6	長期保管	—	乾燥スラッジ	0.2 m ³ /month	約40wt.%	スラッジ含有量が40wt.%以上の状態で長期保管する。ただし、固化等の安定化処理についても別途検討要。

7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

➤ RO濃縮水処理フローの検討

本開発成果を基に検討したRO濃縮水の処理フローを示す。



7. 実施内容

②RO濃縮水の処理技術の開発

【これまでの成果】

- ✓ α 核種除去用の粉末吸着材候補として、 α 核種を選択的に除去する場合は添着活性炭、 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を選定した。
- ✓ 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、凝集沈殿処理の結果発生する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。また、高SS濃度廃液に対する凝集沈殿処理の有効性から、CF濃縮処理を適用したシステムを立案した。
- ✓ 試験成果を基に、RO濃縮水の処理手順および処理プロセスを立案した。また、装置規模試験により、立案した処理手順の成立性を確認した。

【今後の検討課題】

- ✓ 今期PJでは、Cs/Sr/EuのCOLDTレーサーを用いて除去性能を評価した。他の除去対象核種についても、立案した処理方法で所定の除去性能を満足するかを評価する必要がある(実液水質における全放射能および全 α 放射能の除去性能の評価)。
- ✓ CF濃縮処理について、今期PJでは開発対象とはせず、事例調査や文献値などを参考としてシステムを検討した。CFフィルタ試験を実施し、濃縮倍率等が所定の要求性能を満足するかを評価することが今後の課題である。

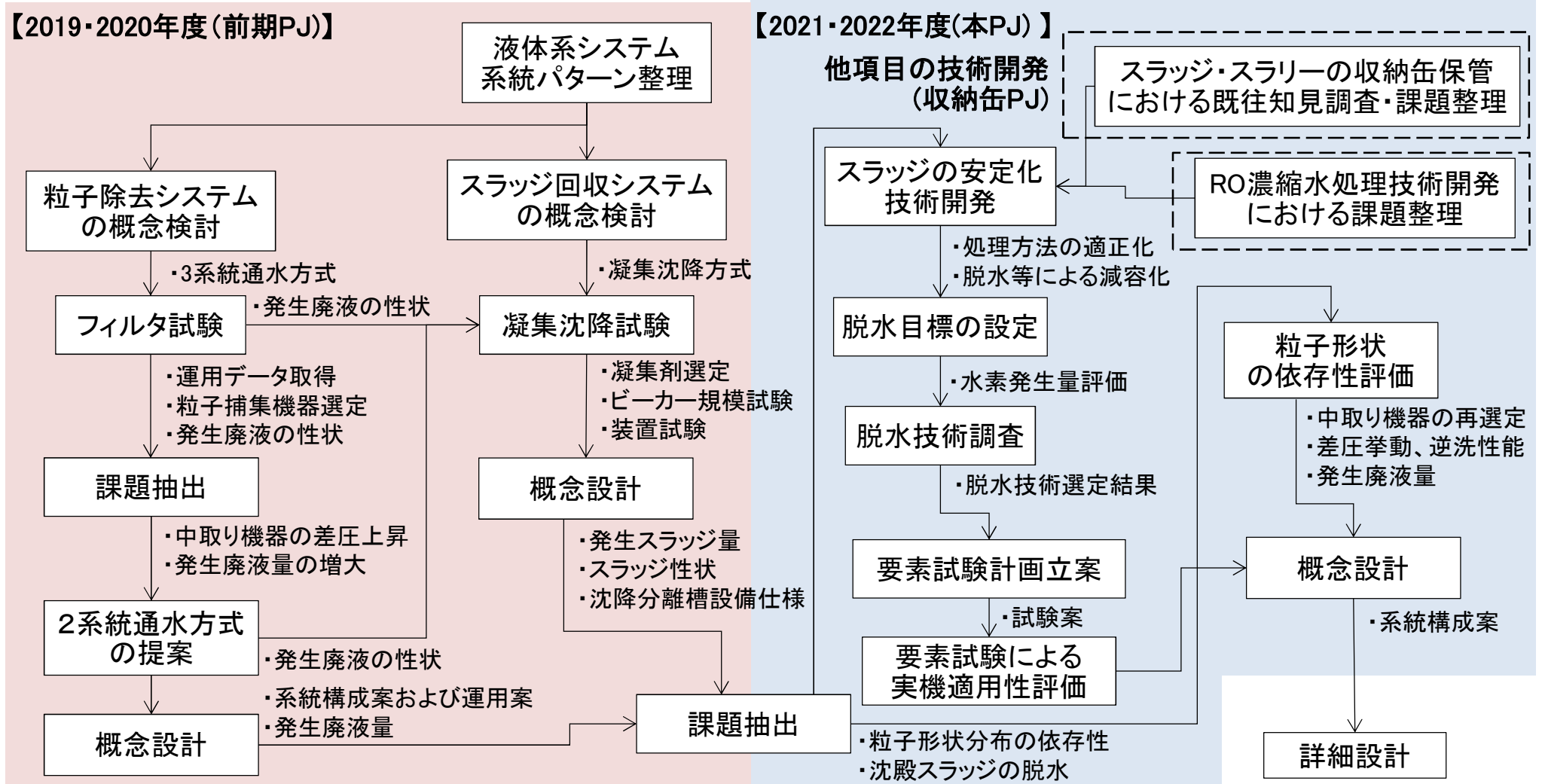
【まとめ】

吸着材と凝集剤を用いた処理により、RO濃縮水中の核種をスラッジ化し分離する手法について検討した。要素試験により各試薬の選定、必要添加量などを評価し、RO濃縮水の処理手順を立案した。そして、本処理方式の成立性を確認し、処理プロセスについて概念検討を実施した。

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

③-1 非溶解性核種除去技術の開発

➤ 粒子除去システムのインプット水質条件

粒子除去設備に移送・処理される滞留水の性状を下表のように想定した。

表 粒子除去システム インプット水の想定水質

No.	項目	条件	検討状況
1	温度	常温	0～40℃程度の四季変動範囲と想定。
2	pH	5～9	中性範囲と想定。液相系システムの基本水質条件。
3	イオン強度	海水成分、ホウ酸、その他	基本的にはイオン強度は低いと想定。しかし、海水成分の混入がある場合、ホウ酸水を使用する場合などは相対的にイオン強度が高くなると想定される。
4	粒子成分	燃料デブリ、 炉心構造物、 コンクリート	現時点ではPCV内の存在量大きい左記の3成分が支配的であると想定。ただし、それぞれの含有割合は不明。また、堆積物(土砂等)、析出物が微量に含まれる可能性がある。
5	SS濃度	<100ppm	取り出し工法PJにて実施した模擬燃料デブリの加工試験や目標スループットの評価結果から、PCVから液相系システムまで移行する微粒子のSS濃度は100ppm以下と評価した。
6	粒子径	0.1 ～ 100μm	自然沈降速度やポンプの吸い込み能力から、PCVから液相系システムまで移行する粒子は100μm以下の粒径のものであると評価した。
7	粒径分布	不明	現時点では不明であるため100～0.1μmにかけてブロードな分布であると仮定。 なお、性状把握PJの模擬燃料デブリ加工試験結果から、ダブルピークの分布である可能性が示唆された。
8	粒子形状	球形、非球形	・入熱加工される場合、球状に近い粒子が発生 ・機械加工される場合、薄片やブロック状のような粒子が発生 2020年度までの補助事業で球形粒子を使用した試験を実施。 今期PJで非球形粒子を用いたフィルタ通水試験を実施し、粒子形状の影響を評価。
9	処理流量	52 m ³ /day(補助事業)、 22 m ³ /day(エンジニアリング)	デブリ加工作業水2.2m ³ /hおよび炉注水3m ³ /hの水量で、10h/dayで作業が行われる。エンジニアリングにて検討されている系統構成では、デブリ加工作業水分のみを処理する。

7. 実施内容

③-1 非溶解性核種除去技術の開発

➤ 粒子除去システムの構成に関する検討

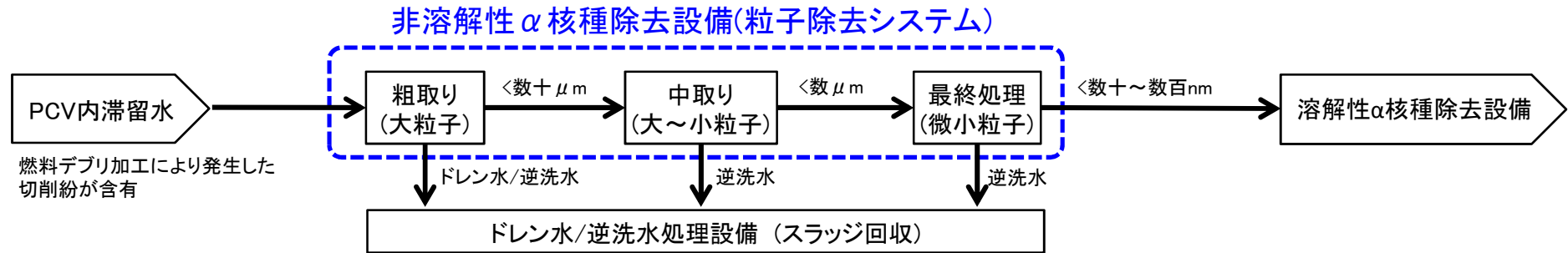


図 粒子除去設備系統構成の概念図

➤ 粒子捕集機器候補の選定結果

2022年度までの文献調査結果、試験結果を基に各系統の粒子捕集機器について適用性を評価した

表 粒子捕集機器候補の適用性評価結果

No.	系統	粒子捕集機器	フィルタメッシュサイズ	適用性評価	備考
1	粗取り	オートストレーナ	50 μm	高	ドレン操作により差圧を適宜回復させることにより、長時間の運用が可能である
		液体サイクロン	-	中	除去精度、廃液発生量の観点からオートストレーナより適用性は低いと判断
2	中取り	オートストレーナ	5、10、20 μm	低	除去精度は高いが、いずれも目詰まりによる差圧上昇が顕著であり、適用性が低いと判断
		金属焼結フィルタ	2、5、10、20 μm	低	
		バグフィルタ	3 μm	中	
		MF膜(セラミックフィルタ)*	1.4 μm	中～高	今期PJで試験実施。本資料にて結果報告。
3	最終処理	UF膜(セラミックフィルタ)*	20、50、100 nm	高	適用性は高いと評価。適切な目開きの選定が必要。

※MF膜: Micro-Filtration、UF膜: Ultra-Filtration

7. 実施内容

③-1 非溶解性核種除去技術の開発

➤ 粒子除去システムに関する開発課題

中取り系統の候補機器の選定

- 各フィルタ機器の試験結果(前期補助事業)より、下表の通りフィルタ性能を評価した。

表 フィルタ性能評価結果まとめ(2019-2020年度補助事業成果)

系統	粒子捕集機器		ろ過精度	除去効率	交換頻度 (寿命)	2次廃棄物 発生量	ドレン・ 逆洗回数	廃液発生量
			μm以上	%以上	回/year	kg/year	回/day	m3/year
粗取り	オートストレーナ	間欠ドレン	50	99	2	11	2.5	167
		常時ドレン	50	99	2	11	常時ドレン	1300
	液体サイクロン		40	80	-	-	常時ドレン	2000
中取り	オートストレーナ	間欠ドレン	20	96	2	11	502	33500
		常時ドレン	20	96	2	11	118	9200
	金属焼結フィルタ		2	99	18300	146500	25.1	815
	バグフィルタ		3	99	5	440	-	-
最終 処理	UF膜	0.1μm	0.1	99	8	314	0.17	5.5
	UF膜	0.05μm	0.05	99	3	152	0.11	48.2

廃液発生量や2次廃棄物発生量が非常に大きいと評価

- 粒子除去率はいずれの機器も非常に高く、各系統の捕集範囲の粒子を適切に除去可能と評価された。
- 粗取り系統と最終処理系統は、目詰まりによる差圧上昇が緩やかであり、選定した各フィルタ機器の実機適用性が高いと評価された。
- 中取り機器として選定したフィルタ機器はいずれも目詰まりによる差圧上昇が顕著であり、逆洗廃液発生量や2次廃棄物発生量~~が他系統と比較して大きい結果となった。~~

➡ 中取り系統に適用可能なフィルタ機器が未選定であるため、候補機器を選定する必要がある。

7. 実施内容

③-1 非溶解性核種除去技術の開発

➤ 粒子除去システムに関する開発課題

粒子形状の影響評価

前期補助事業にて実施のフィルタ通水試験に使用した粒子を示す。

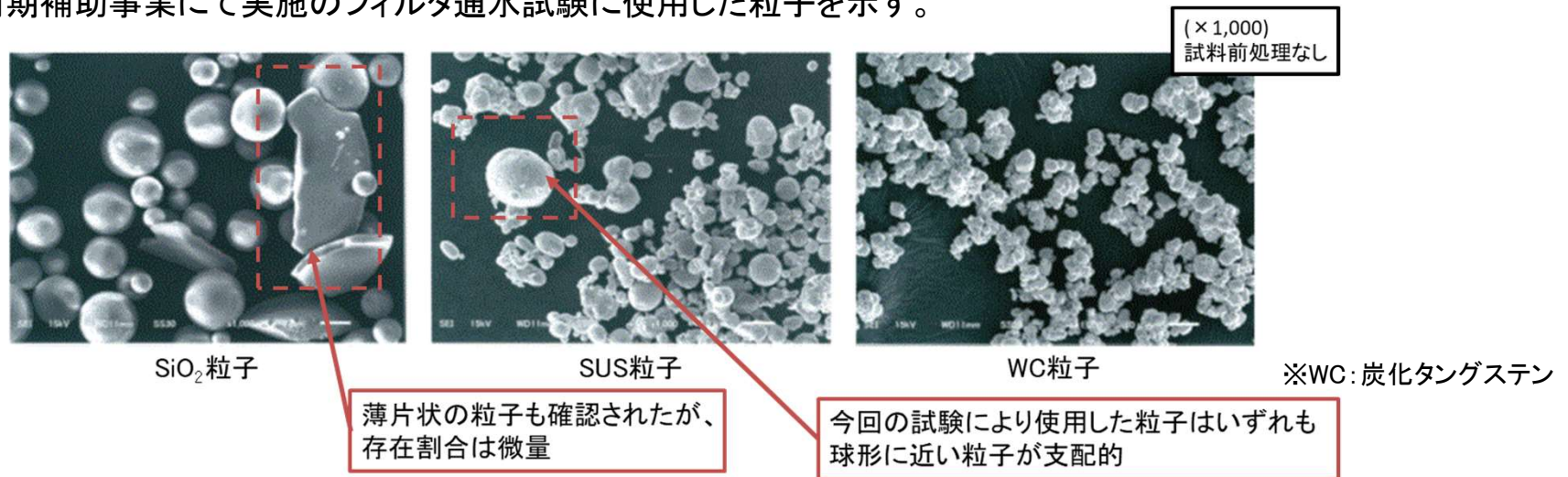


図 前期補助事業のフィルタ試験で使用した模擬粒子のSEM画像

- 前期補助事業では、いずれも真球に近い形状の粒子が支配的な模擬粉末を使用した試験を行った。
- しかし、AWJやボーリング加工などの機械工法が採用された場合、発生する切削粉は薄片状や針状が支配的となることが予想される。
- 粒子が薄片状・針状などの非球形となった場合、通水時の差圧上昇や、逆洗による差圧回復率などに影響があることが懸念される。

➡ 各フィルタ機器への粒子形状の影響について評価が必要である。

特に前期補助事業で未検証である、非球形粒子を通水した際の各フィルタ機器の運用データを取得する必要がある。

7. 実施内容

③-1 非溶解性核種除去技術の開発

➤ 要素試験(フィルタ通水試験)内容

• MF膜の中取り系統への適用性評価

前期補助事業で未選定であった中取りフィルタとして、1.4 μm MF膜の実機適用性を評価する。

1.4 μm MF膜通水試験

中取り系統の想定インプット水質の模擬液を1.4 μm MF膜で通水処理し、下記項目について評価する。

- 中取り系統の捕集範囲である数十～数 μmの範囲の粒子に対する捕集性能
- 通水時の機器差圧の上昇傾向および通水可能時間
- 差圧上昇時の逆洗による差圧回復傾向

• 各フィルタ機器の粒子形状依存性の評価

前期補助事業で未評価である粒子形状が変動した際の各フィルタへの影響を評価する。

粒子形状依存性評価試験

球形粒子および非球形粒子を通水した際のフィルタ運用データ、差圧挙動、粒子捕集率、逆洗による差圧回復率などのデータを取得する。



※試験するフィルタは、各系統で適用性が高いと評価されたフィルタを選定した。

試験により取得したフィルタ運用データより、球形/非球形粒子により形成されたケーキについて、ケーキ抵抗を評価し、粒子形状に起因するフィルタへの影響評価を実施する。

7. 実施内容

③-1 非溶解性核種除去技術の開発

➤ MF膜通水試験 試験系統

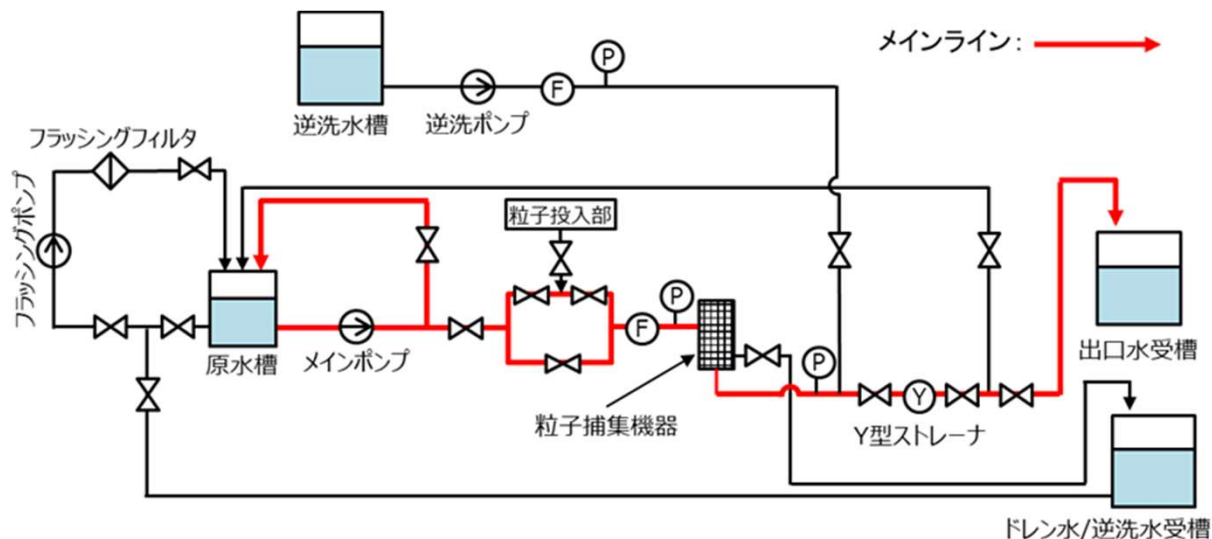


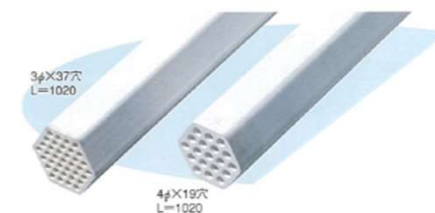
図 MF膜通水試験 試験系統構成図

➤ MF膜通水試験 試験ケース

表 MF膜フィルタ試験 試験ケース表

試験ケース	粒径[μm]	流量 [m^3/h]	SS濃度 [ppm]	粒子成分混合率[wt.%]			通水時間
				WC	SUS316	SiO_2	
1-1	0.1~10	10	100	33	33	33	許容差圧 到達まで
1-2	0.1~10		100	58	30	12	
1-3	0.1~10		500	33	33	33	
1-4	1		100	33	33	33	

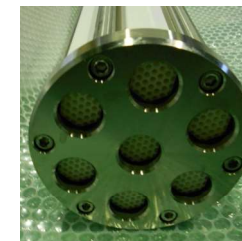
MF膜(セラミックフィルタ)



フィルタエレメント



フィルタエレメント



ハウジング

※フィルタエレメントの装填本数は7本で試験を実施した。

7. 実施内容

③-1 非溶解性核種除去技術の開発

➤ MF膜性能評価試験パラメータ

本試験パラメータは想定水質条件を基に、下表のように設定した。

表 MF膜通水試験 試験パラメータ

No.	項目	条件	備考
1	粒子捕集機器	1.4μmMF膜(セラミックフィルタ)	中取りシステムの候補機器を選定
2	SS濃度	100ppm, 500ppm	液相系システムの想定条件である100ppmを基本条件, 高負荷条件として500ppmを設定
3	粒子径	0.1 ~ 10μm, 1μm	中取りシステムに流入する可能性のある粒径範囲である0.1 ~ 10μmを基準条件、高負荷条件として1μm粒子のみを設定
4	粒子形状	球形粒子	2020年度までに実施した球形粒子を使用した試験と比較検討可能なように球形粒子を使用
5	粒子成分 (模擬対象)	炭化タングステン(燃料デブリ)、 SUS316L(炉心構造物)、 ケイ砂(コンクリート成分)	それぞれの模擬成分に対して真比重の近い粒子を選定
6	粒子混合割合	①3成分を重量基準で等量混合 ②3成分を体積基準で等量混合	・2020年度までに実施した試験と比較検討可能なように①を設定 ・3成分の粒子数が等しい条件として②を設定
7	流量	10m ³ /h	液相系システムの基本系統流量である10m ³ /hを設定
8	通水時間	逆洗設定圧力到達まで通水する。長時間通水が必要な場合はSS濃度を大きくするなどして加速試験を行った。	

表 MF膜通水試験 逆洗条件

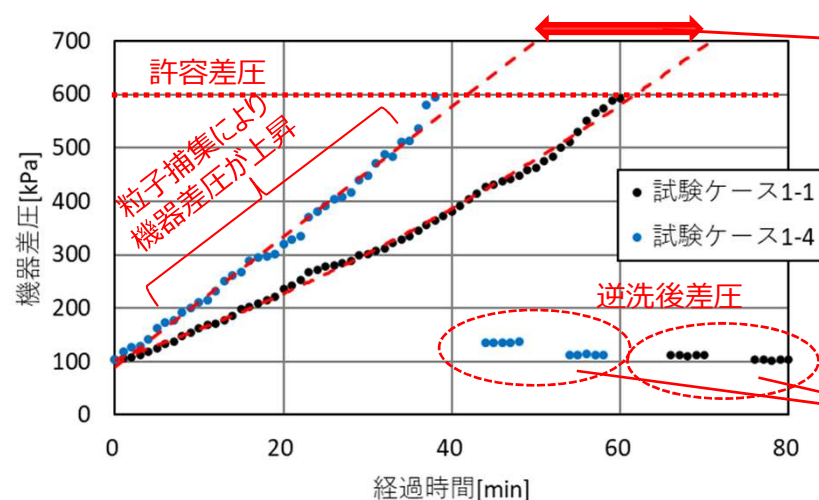
No.	項目	設定値	備考
1	逆洗流量	10 m ³ /h	試験により適切な差圧回復傾向を確認した条件を設定
2	逆洗圧力	0.10 MPa	
3	逆洗時間	1 min/回	
4	実施回数	初期差圧に回復するまで	

7. 実施内容

③-1 非溶解性核種除去技術の開発

➤ MF膜通水試験 試験結果

通水時の機器差圧の上昇挙動について代表例を用いた考察を示す。



粒子の粒径分布によって差圧上昇が変動する。フィルタ孔と粒径がほぼ同じ条件(1-4)では、基本ケースと比較して通水時間が2/3程度となった。

表 模擬粒子の粒径範囲

試験ケース	粒径[μm]
1-1	0.1~10
1-4	1

試験ケース1-4はフィルタ孔径と粒径が近い。今回試験に使用したMF膜は、メーカースペックのろ過性能が $1.4\mu\text{m}$ であるため、実質的なフィルタ孔径は $1\mu\text{m}$ 弱程度であると想定される。

逆洗により初期差圧は大きく回復した。ただし、1回のみでは2~3%程度の残留があり、低減させるためには追加逆洗が必要。

- 基本条件である試験ケース1-1では、逆洗までの通水可能時間が62minと評価された。[前期補助事業において試験した中取り候補機器と比較して、差圧上昇が遅く、適用性が高いと評価される](#)。本試験ではエレメント本数を7本と設定したが、エレメント本数を調整することにより逆洗までの通水時間は調整可能であるため、逆洗頻度と設備規模が運用上適切な本数に設計することが望ましい。
- 試験ケース1-1は粒径分布がブロードであり、試験ケース1-4は $1\mu\text{m}$ にシャープピークな粒径分布である。両者の粒径分布の差異に起因すると考えられる差圧上昇の差異が確認され、最も完全閉塞が発生しやすい条件(試験ケース1-4)では、分布がブロードな場合と比較して通水可能時間が2/3程度となると考えられる。
- 目詰まりによる差圧上昇後に[逆洗操作を実施した場合、初期差圧は大きく回復し、初期値付近まで低減することが可能であることを確認](#)した。ただし、払い出しきれない粒子がわずかに残留するため、ほぼ初期値まで回復させるには2回ないし3回の追加逆洗が必要である。実機運用では初期差圧を完全に回復させる必要性は低く、1回の逆洗により運用上十分な回復率を確保できると考える。

7. 実施内容

③-1 非溶解性核種除去技術の開発

➤ 中取り系統候補フィルタの性能比較

要素試験結果を基に中取り系統候補機器の比較評価を実施した。
(2020年度以前の補助事業成果を含む)

表 中取り系統候補機器 性能比較表

粒子捕集機器		必要 エレメント数	ろ過精度	除去効率	交換頻度	2次廃棄物 発生量	ドレン・ 逆洗回数	廃液発生量	適用性 評価結果
		個	μm以上	%以上	回/year	kg/year	回/day	m3/year	
オートストレーナ	間欠ドレン	1	20	96	2	11	502	33500	低
	常時ドレン	1	20	96	2	11	118	9200	低～中
金属焼結フィルタ		11	2	99	18300	146500	25.1	815	低
バグフィルタ		122	3	99	5	440	-	-	中
MF膜		70	1.4	99	1	77	0.05	30	高

本PJ試験結果より
評価した結果を追加

※ 評価条件: 処理流量; 65m³/day、SS濃度; 100ppm、粒子捕集率: 各系統33%
※ MF膜の交換頻度は、ガスケット等のシーリング材の耐用年数を保守的に仮定し設定

- 2次廃棄物発生量や廃液発生量(濃縮倍率)の観点では、MF膜が最も性能が良好であると評価された。
- MF膜は他の候補機器と比較して、粒子捕集による差圧の上昇速度が緩やかであり、逆洗までに捕集可能な粒子量が多い。他の中取りフィルタと比較して、有効ろ過面積が非常に大きいことが主な要因であると考えられる。
- MF膜等のセラミックフィルタ類の交換頻度については、シーリング材の交換周期より設定した。通水・逆洗を繰り返すことによる初期差圧上昇やフィルタ本体の劣化より、ガスケット等のシーリング材の劣化が速いと仮定した。

➡ 本評価結果より、中取り系統候補機器として1.4 μm MF膜を選定した。

7. 実施内容

③-1 非溶解性核種除去技術の開発

➤ 粒子形状依存性評価試験パラメータ

本試験の試験パラメータは下表のように設定した。
 なお、試験系統はMF膜通水試験と同様の装置を使用した。

表 粒子形状依存性評価試験 試験パラメータ

No.	項目	条件	備考
1	粒子捕集機器	50μmオートストレーナ 1.4μmMF膜 0.05μmUF膜	各系統で適用性が高いと評価されている粒子捕集機器を選定 ※オートストレーナは差圧上昇がほぼ確認されなかった
2	SS濃度	100ppm, 500ppm	液相系システムの想定条件である100ppmを基本条件, 高負荷条件として500ppmを設定
3	粒子径	0.1 ~ 10μm, 1μm	中取り系統に流入する可能性のある粒径範囲である0.1 ~ 10μmを基準条件、高負荷条件として1μm粒子のみを設定
4	粒子形状	球形粒子, 非球形粒子	球形粒子と非球形粒子を選定。 両者の試験結果から、フィルタ性能の及ぼす粒子形状の影響を評価。
5	粒径分布	1μm, 10μmのダブルピークの分布	性状把握PJ実施の模擬燃料デブリの切削試験を参考に設定。 ※次ページ参照
6	粒子成分 (模擬対象)	ケイ砂(コンクリート成分)	代表成分としてケイ砂粒子を選定。 他成分粒子は非球状の微細粒子の製造が困難。
7	流量	1m ³ /h, 10m ³ /h	液相系システムの系統流量である10m ³ /hを設定 →UF膜は1m ³ /hで試験し、比例計算などで評価。
8	通水時間	逆洗設定圧力到達まで通水する。	

本試験により、差圧挙動や粒子捕集率の観点から、フィルタ性能に与える粒子形状の影響を評価する。

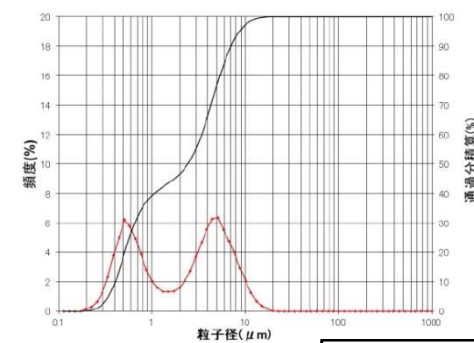
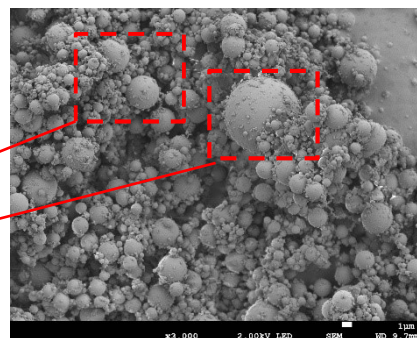
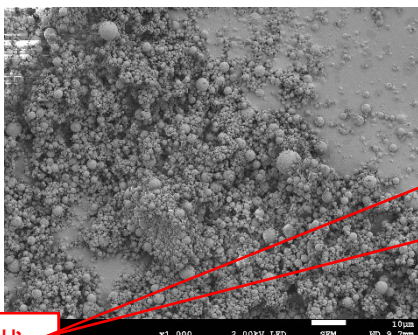
7. 実施内容

③-1 非溶解性核種除去技術の開発

➤ 本試験で使用した模擬粒子

本フィルタ試験に使用した各粒子のSEM画像および粒径分布を掲載する

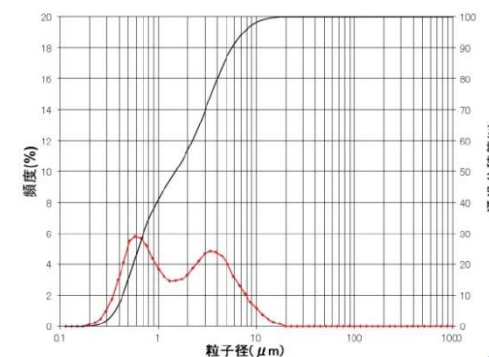
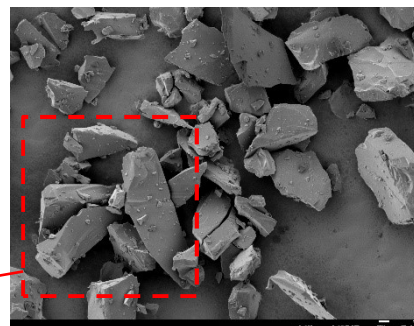
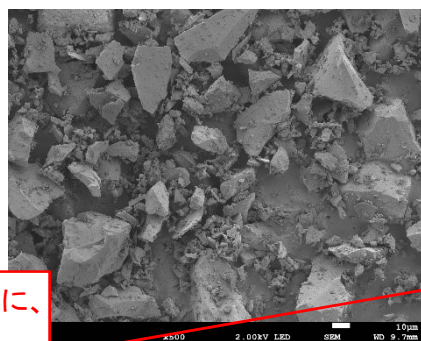
球形粒子



角がなく真球に近い形状の粒子が支配的。

粒子の混合比率を調整し、ほぼ同一の粒径分布とした。

非球形粒子



ブロック状や板状のように、角のある粒子が支配的。球形の粒子はほぼなし。

両者の粒径分布に差異は生じないように調整した。(ダブルピークの分布)

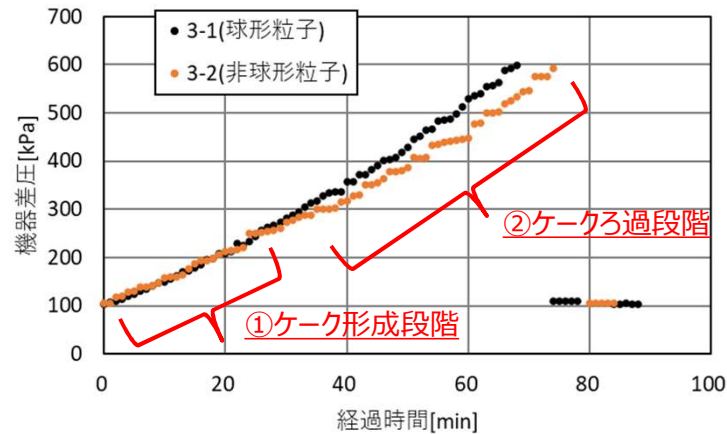
その他のパラメータも同じであるため、試験結果に現れた差異は粒子形状に起因するものとして評価した。

7. 実施内容

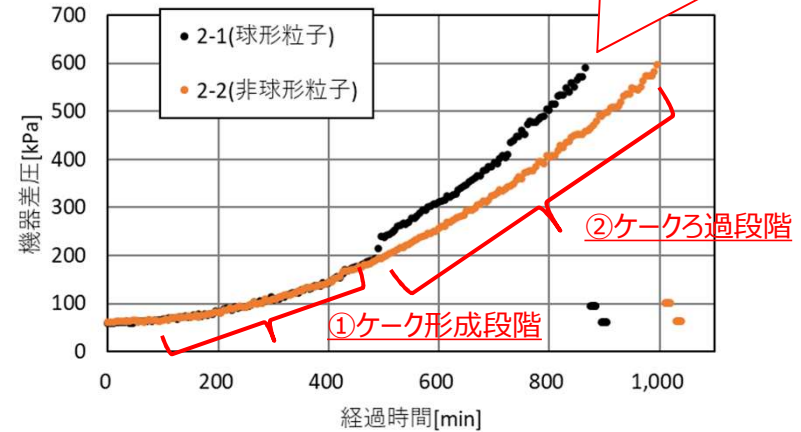
③-1 非溶解性核種除去技術の開発

➤ 通水粒子の形状による差圧上昇挙動の差異

球形粒子/非球形粒子を通水した時の機器差圧の上昇挙動を比較評価した。



(a)1.4 μ mMF膜



(b)0.05 μ mUF膜

図 フィルタ試験結果 差圧挙動

機器差圧の全体的な挙動を比較すると、“球形粒子 > 非球形粒子”という関係が読み取れる。特にMF膜では通水開始後約30min、UF膜では通水約500minから、両者に差異が生じていることが読み取れる。この原因は下記のように考察した。

①ケーキ形成段階

粒子がフィルタろ過で捕集され、ケーキを形成していく段階。フィルタ抵抗が支配的であり、ケーキ抵抗の影響は軽微である。そのため、粒子形状によって差圧上昇挙動に差異が生じにくい。

②ケーキろ過段階

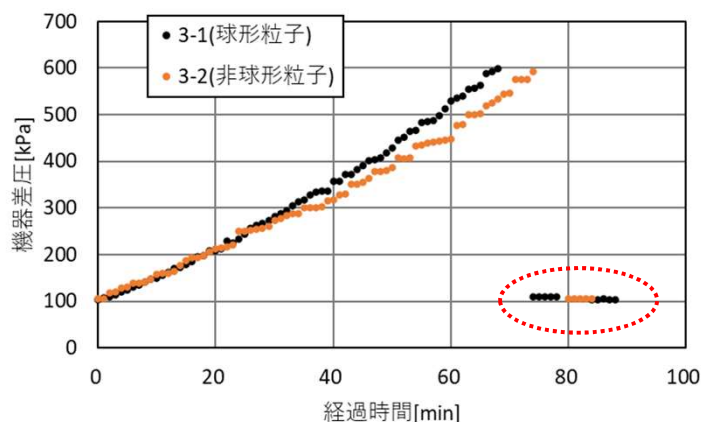
ケーキが形成され、通水粒子がケーキろ過される段階。フィルタ抵抗に加えてケーキ抵抗の影響が表れる。ケーキの粒子充填密度に依存してケーキ抵抗が異なり、球形粒子の方が充填密度が大きいためケーキ抵抗は大きい。そのため、差圧が非球形粒子を通水した場合と比較して大きい。通水時間が経過するほどケーキが厚く成長していくため、差異が大きくなっていく。

7. 実施内容

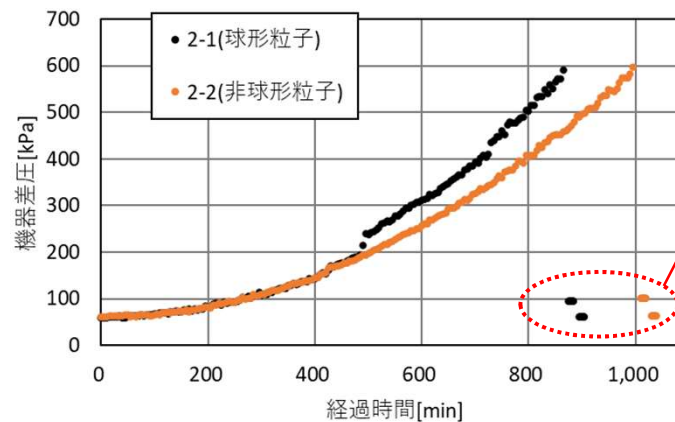
③-1 非溶解性核種除去技術の開発

➤ 通水粒子の形状による逆洗性能の差異

球形粒子/非球形粒子通水による差圧上昇時の、逆洗操作による差圧回復挙動を比較評価した。



(a) 1.4 μ m MF膜



(b) 0.05 μ m UF膜

球形/非球形いずれも
逆洗により初期差圧付近まで
差圧回復が可能

特に優位差は確認されず

図 フィルタ試験結果 差圧挙動

逆洗性能に関する考察

- 球形粒子/非球形粒子のいずれを通水した場合においても、逆洗により初期差圧付近まで回復しており、粒子形状に依存せず逆洗性能は非常に高いと評価した。
- 比較評価した場合、非球形粒子を使用した場合の方が逆洗後の差圧が低い傾向があるが、両者の差は微小であり、粒子形状に起因する差であるかは不明である。

一般的には、球形粒子よりも繊維状に近い非球形粒子を通水した場合、逆洗による粒子の払い出しが容易となり、逆洗性能が向上することが知られているが、数mm以上の粒径の粒子における知見である。本試験のような数 μ mオーダーの粒子が支配的である場合でも同じ効果があるが、粒径が小さくなるほど寄与が小さくなっていくと考えられる。

➡ 逆洗時の差圧回復挙動は、粒子形状に起因する差異は軽微であり、逆洗によりほぼ全ての粒子は払い出し可能であると考えられる。

7. 実施内容

③-1 非溶解性核種除去技術の開発

➤ Lewisのろ過方程式を用いた評価

平均ケーキ比抵抗より、ろ過性能の粒子形状による依存性を評価した。

平均ケーキ比抵抗 α_{av} [m/kg]

ろ過によりフィルタ表面に形成されたケーキを流体が通過するときの抵抗を示す物理量。一般的に、使用するフィルタのろ過対象液に対しするろ過性能の判定に使用される。

判定値基準値[m/kg]

$\alpha_{av} \leq 10^{11}$: 易

$10^{12} \leq \alpha_{av} \leq 10^{13}$: 中

$10^{13} \leq \alpha_{av}$: 難

※判定値は一般的な経験則に基づく基準

表 平均ケーキ比抵抗/平均ろ過抵抗の評価結果 (代表ケースを比較評価)

試験ケース	2-1	2-2	3-1	3-2
フィルタ種類	0.05 μ mUF膜	0.05 μ mUF膜	1.4 μ mMF膜	1.4 μ mMF膜
粒子形状	球形	非球形	球形	非球形
粒子捕集率[%]	99.9	99.9	69.7	71.5
平均ケーキ比抵抗[m/kg]	7.9.E+12	6.9.E+12	1.4.E+12	1.2.E+12
ろ材抵抗[1/m]	-3.0.E+11	-2.2.E+11	6.4.E+10	5.1.E+10

※現象論的に負の値になることはないため、実際は0に近い値であると考えられる。
 ≡ 粒子非含有の液を通水したとき、機器差圧がほとんど上昇しない

- 今回の試験では、球状粒子/非球状粒子の違いに依らず、平均ケーキ比抵抗は、UF膜では1.0E+12オーダー、MF膜では1.0E+11オーダーと評価された。
- 比較評価したとき、球形粒子の方が平均ケーキ比抵抗が大きい傾向があるが、差異は小さいため、ほぼ同様の性状のケーキが形成されたと考えられる。
- 粒子同士はある程度凝集し、数 μ m以上の凝集体を形成した状態であると想定されるため、粒子形状の依存性が小さかった可能性も考えられる。
- より粒径が大きい(数mmオーダー)粒子が多量に含まれる液を処理する場合、粒子形状の依存性が大きく表れると考えられる。ただし、粒径が大きくなるほど、ケーキの空隙率の上昇に伴いケーキ抵抗が小さくなること、数mm以上の粒子は大部分がPCV内で沈降すると想定されることなどの理由から、大粒子をろ過する場合のフィルタ性能の粒子形状の影響評価は、必要性が低いと考えられる。

➡ 本試験結果より、粒子形状の変動を考慮して、粒子除去システムを設計する必要性は低いと判断した。

7. 実施内容

③-1 非溶解性核種除去技術の開発

➤ 各パラメータの粒子除去システムへの影響評価

表 各パラメータの粒子除去システムへの影響度の評価

No.	項目	粒子除去システムへの影響度	試験実績	検討内容
1	粒子成分	オートストレーナ:高 セラミックフィルタ:低	○	オートストレーナはフィルトレーションに加えて、遠心分離でも粒子を分離する機構であるため、燃料デブリ等の高比重粒子ほど分離性能が高い。ただし、コンクリート粒子のような低比重粒子には、ほぼ遠心分離による除去効果は寄与しない。
2	SS濃度	高	○	各フィルタの差圧上昇速度に顕著な影響があるため、濃縮倍率に大きく影響する。
3	粒径範囲	高	○	各系統で捕集される粒子量の割合は、粒径が律速するとみなせる。そのため、各系統の粒子捕集範囲の粒子量によって、システム全体の濃縮倍率が大きく変化する。
4	粒径分布	高	○	
5	粒子形状	低	○	球形粒子/非球形粒子を使用したフィルタ試験により、粒子形状の影響は小さいと評価した。
6	粒子強度	低	×	燃料デブリ取り出し作業で発生する粒子は、基本的にはある程度の硬度を有した固形物であると想定されるため、影響は小さいと評価した。
7	析出物	中	×	水分を多く含んだゲル状の析出物が発生すると、顕著な目詰まりが発生する。結晶度の高い析出物であれば影響は小さい。
8	イオン強度	低	△	イオン強度が高い場合、塩析効果が付与されることによる見かけ上の粒径が大きくなる。実機で考えられる水質では、ほぼ無視できる程度の凝集しか発生しないと想定される。
9	系統構成	高	○	粒径分布に応じて、設置するフィルタ種類/目開き/ろ過面積を変更することにより、システム全体の濃縮倍率を向上させることが可能。現在は幅広い条件に対応可能であるシステムを検討。
10	除去範囲(下限)	中	○	ろ過精度の要求値が、0.1 μ m程度までであれば影響は小さい。0.01 μ m程度から廃液発生量の増大や設備規模の増大などの影響が顕在化する。
11	濃度低減要求	中	△	放射能濃度の低減要求が大きいほど、大きな除去率が必要となるため影響が大きい。

➡ 影響が大きい物理量(赤塗り)をパラメータとし、粒子除去システムの性能を評価した。

7. 実施内容

③-1 非溶解性核種除去技術の開発

➤ 粒子除去システムの廃液発生量評価

フィルタ試験結果より、燃料デブリ取り出し期間中に発生するフィルタ廃液量を試算した。

フィルタ廃液発生量の評価式

$$V_{bw}(c_{in}, a_n) = \sum_{n=1}^3 \left(\frac{V_{in} \times v_n \times a_n \times c_{in}}{m_n} \right)$$

- V_{bw} : 年間廃液発生量[m3/year]
- V_{in} : 年間処理液量[m3/year]
- c_{in} : インพุット水のSS濃度[kg/m3]
- v_n : 各フィルタ機器の1回あたりの逆洗水量[m3/回]
- a_n : 各フィルタ機器の粒子捕集率[%](粒径分布)
- m_n : 各フィルタ機器の逆洗までの粒子捕集量[kg/回]

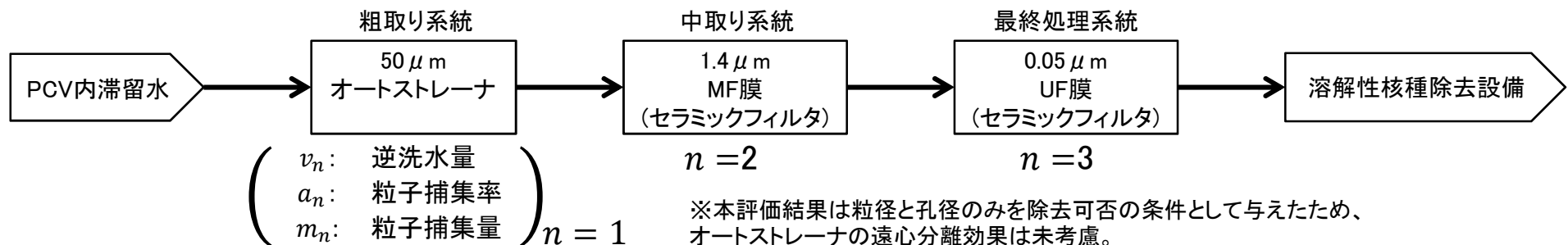
表 粒子捕集機器とエレメント数の設定条件

系統	粒子捕集機器	装填エレメント数
粗取り	50μmオートストレーナ	1本
中取り	1.4μmMF膜	70本 ^{※1}
最終処理	0.05μmUF膜	70本 ^{※1}

※1 逆洗頻度が1回/day以下となり、
なおかつフィルタ線流速が十分に小さくなる本数

- 上記パラメータは、液相系システムの検討値、要素試験結果等を境界条件として設定
- SS濃度 c_{in} と粒子捕集率 a_n (粒径分布)は変数設定し、インพุット水の水質条件を数パターン仮定

➤ 本評価の基本モデル(粒子除去システム)

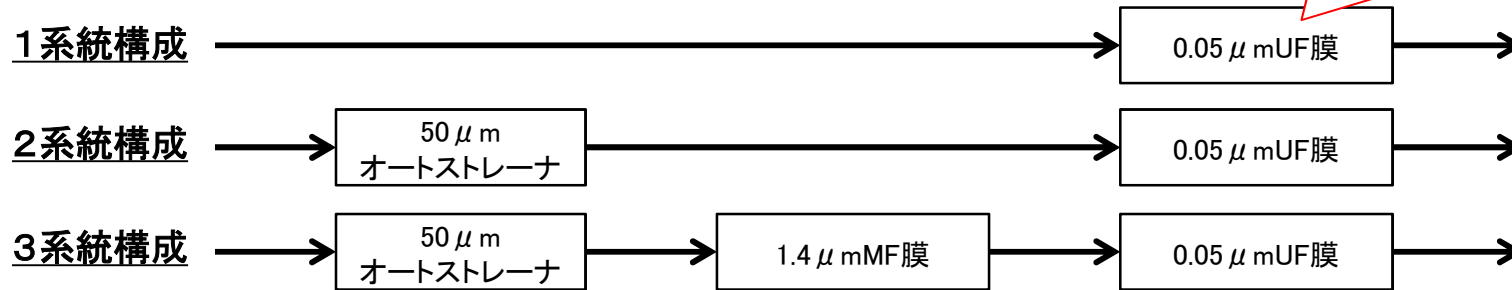


7. 実施内容

③-1 非溶解性核種除去技術の開発

➤ 粒子除去システムの系統構成

本評価は粒子除去システムの系統構成を下記3パターンで評価した。



粗取り系統/中取り系統を設置しない場合、後段の最終処理システムでその分の粒子を捕集すると仮定

➤ 廃液発生量評価結果

各構成の粒子除去システムにおいて、想定水質の廃液を処理した場合の廃液発生量を評価した。

: 1.0 m³/year
 : 100 m³/year
 : 1000 m³/year

表 粒子除去システム発生廃液量評価結果[m³/year]

粒径範囲[μm]			3系統構成					2系統構成					1系統構成				
粗取り	中取り	最終処理	SS濃度[ppm]					SS濃度[ppm]					SS濃度[ppm]				
50~100	1~50	0.1~1	1	10	50	100	200	1	10	50	100	200	1	10	50	100	200
33%	33%	33%	3	27	135	271	542	3	33	165	330	660	2	25	123	246	492
90%	5%	5%	5	46	232	464	927	5	47	236	472	945	2	25	123	246	492
80%	10%	10%	4	43	215	430	859	4	45	224	447	894	2	25	123	246	492
5%	90%	5%	1	10	50	99	198	3	26	129	258	517	2	25	123	246	492
10%	80%	10%	1	13	65	130	259	3	27	136	271	542	2	25	123	246	492
5%	5%	90%	2	25	125	250	499	3	26	129	258	517	2	25	123	246	492
10%	10%	80%	3	25	127	253	507	3	27	136	271	542	2	25	123	246	492

※オートストレーナの遠心分離効果は、本評価では未考慮。定性的には大粒子/高比重粒子ほど遠心分離効果が大きい



インพุット水の性状に応じて、適切な粒子除去システムの構成が異なる。
 想定条件ごとに適切なシステム構成について検討した。

7. 実施内容

③-1 非溶解性核種除去技術の開発

➤ 粒子除去システムの基本システム構成

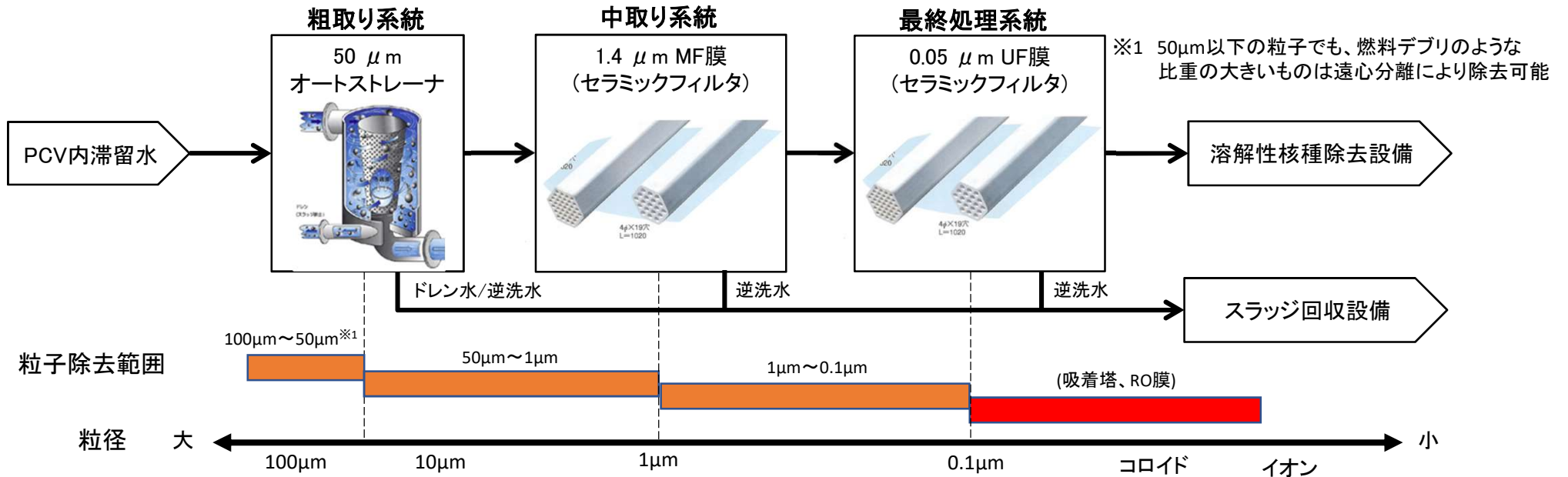


表 各水質における粒子除去システム構成の検討

No.	水質条件	適切なシステム構成案	粒子除去システムの系統構成の検討
1	ブロードな粒径分布	3系統構成	各粒径範囲の粒子が高効率で捕集可能なように、3系統構成システムとする。(基本構成)
2	1μm以下粒子が多い	1系統構成	1μm以下の粒子は、ほぼ最終処理システムのみで捕集される。 <u>最終処理システム以外で捕集される粒子が少ない</u> ため、設備規模低減のため1系統のみのシステムが適用性が高い。
3	数μm粒子が多い	3系統構成	<u>数μm粒子は中取りシステムで捕集する構成が最も負荷が少ない</u> 。そのため3系統構成が適用性が高い。
4	高比重粒子が多い	2 or 3系統構成	<u>燃料デブリ等の高比重粒子は、粗取りシステムで高効率の捕集が期待される</u> ため、2系統もしくは3系統構成のシステムが望ましい。
5	SS濃度が低い(数ppm)	1系統構成	<u>SS濃度が10ppm以下と十分に小さければ、いずれの系統構成でも大差ない廃液発生量となる</u> ため、設備規模が最も小さい、1系統構成が望ましい。

7. 実施内容

③-1 非溶解性核種除去技術の開発

➤ 各粒子捕集機器の性能評価結果まとめ

各系統における候補粒子捕集機器の想定仕様を、現時点までに取得した試験結果より評価した。

表 フィルタ性能評価結果まとめ(3系統通水構成)

系統	粒子捕集機器		必要基数	必要	定格	ろ過	除去	概略寸法	必要エリア寸法	交換頻度	2次廃棄物	ドレン・	廃液
			基/1系統	エレメント数	流量	精度	効率	(1基あたり)	(1基あたり)	(寿命)	発生量	逆洗回数	発生量
				個	m3/h	μm以上	%以上	φ_m×_mH	_mL×_mW	回/year	kg/year	回/day	m3/year
粗取り	オート	間欠ドレン	1	1	10~30	50	99	φ0.5m×1.0mH	1.4mL×1.4mW	2	11	2.5	167
	ストレーナ	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	オート	間欠ドレン	1	1	10~30	20	96	φ0.5m×1.0mH	1.4mL×1.4mW	2	11	502	33500
	ストレーナ	常時ドレン	1	1	10~30	20	96	φ0.5m×1.0mH	1.4mL×1.4mW	2	11	118	9200
		金属焼結フィルタ	3	11	6.5	2	99	φ0.21m×1.2mH	3.0mL×1.6mW	18300	146500	25.1	815
		バグフィルタ	4	122	10	3	99	φ0.7m×1.6mH	2.0mL×2.0mW	5	440	-	-
		MF膜	4	70	10	1.4	99	φ0.3m×1.4mH	1.4mL×1.4mW	1	77	0.05	30
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	0.17	5.5
	UF膜	0.05μm	3	70	10	0.05	99	φ0.3m×1.4mH	1.4mL×1.4mW	1	77	0.11	50

※評価条件: 処理流量; 52m3/day、SS濃度; 100ppm、粒子捕集率: 各系統33%

➤ 今後の開発課題

① フィルタ交換方法の検討および交換周期(寿命)の評価

[フィルタエレメントの遠隔交換や、遠隔交換が困難な場合の代替交換方法について検討が必要](#)。また、交換周期設定のために必要なフィルタ寿命のデータが不足しているため、今後評価する必要がある。なおセラミックフィルタ類は、フィルタ本体の劣化に起因する交換周期より、ガスケット材の耐用年数(1~2年想定)による交換周期が律速すると想定し、類似の1Fフィルタ機器のガスケット材の運用実績から仮定することを検討。

② 装填エレメント数および通水流速など適正化検討

装填するエレメント数が多いほど、または流速が遅いほど、線流速が小さくなりフィルタとケーキの抵抗が軽減されるため、逆洗差圧までに捕集可能な粒子量が大きくなる。ただし、設備規模の増大と処理時間の長時間化がトレードオフであるため、諸要因を考慮して[エレメント数や流速などの処理条件を適正化する必要がある](#)。

7. 実施内容

③-1 非溶解性核種除去技術の開発

【これまでの成果】

- ✓ 中取り系統に適用可能な候補機器として、1.4 μ m MF膜を選定した。
- ✓ 各系統候補機器への粒子形状の依存性を検証した。その結果、粒子形状の影響は小さいため、粒子除去システムの概念設計へ反映する必要性は低いことを確認した。
- ✓ 粒子除去システムの系統構成として、3系統システムを基本構成として、1系統/2系統/3系統構成の3パターンについて検討した。
- ✓ 粒子除去システムより発生する廃液量を概算評価し、インプット水質ごとに優位と考えられるシステム構成を整理した。

【今後の検討課題】

- ✓ 燃料デブリ取り出し工法が選定され、発生する切削紛の性状(発生量, 成分, 粒径分布など)が推定可能となった段階で、本検討成果を用いてより合理的なシステムを選定する。
- ✓ 溶解性核種除去システムやRO濃縮水処理システムにおいても、フィルタ機器の適用が検討されており、クロスフロー方式により粉末吸着材を濃縮処理する想定である。それらの処理を想定した際のクロスフローフィルタの適用性について検討が必要である。

【まとめ】

粒子除去システムの各系統に適用可能なフィルタ機器候補を選定し、性能評価を実施した。3系統構成のシステムを基本構成とし、インプット水質性状に応じて適切なシステムを検討した。

7. 実施内容

③-2 スラッジ脱水処理技術の開発

➤ 脱水による減容効果の評価

【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90vol.%から、水分を除去した場合の体積減少挙動を評価した。

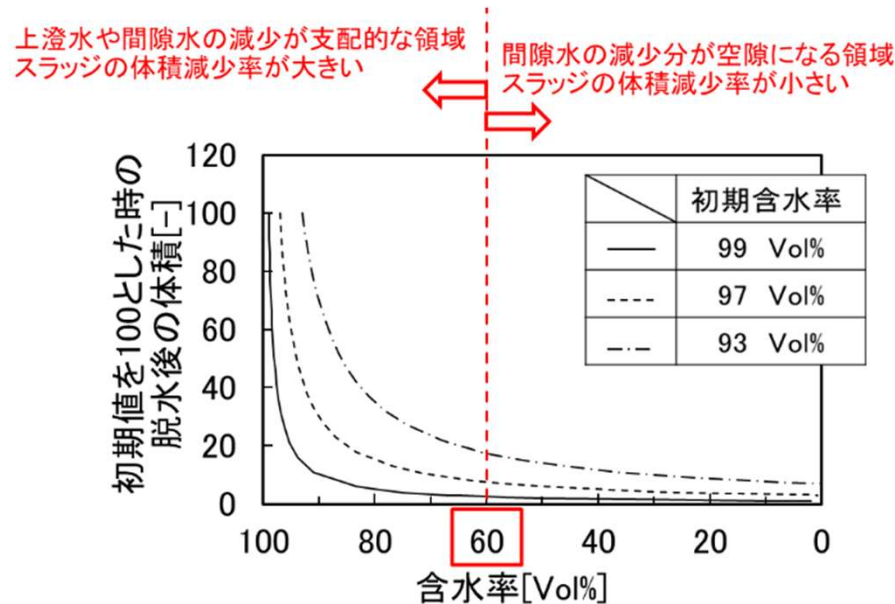


図 スラッジの含水率と体積の関係



沈殿スラッジの外観

含水率60vol.%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くなる

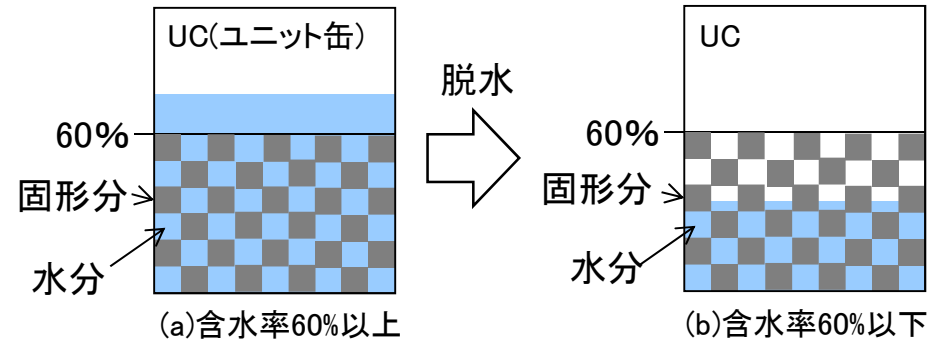


図 スラッジ体積の減少挙動のイメージ

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

③-2 スラッジ脱水処理技術の開発

➤ 候補技術の選定

スラッジ脱水処理システムの概念フローは下図のように仮定した。

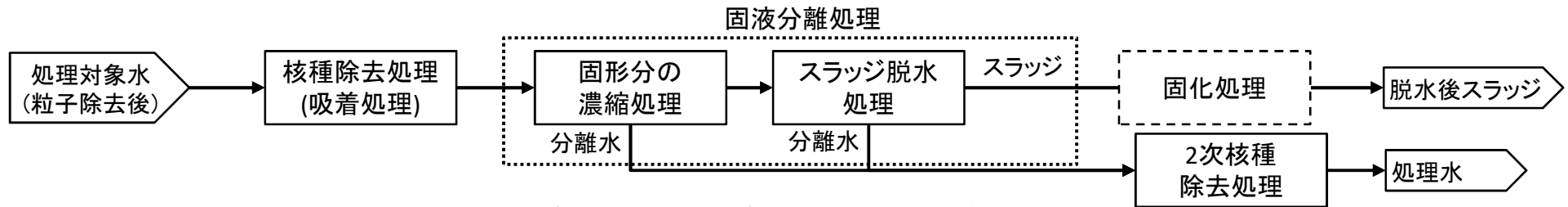


図 粉末吸着材の固液分離システムの概念フロー

表 各固液分離技術が適用可能な処理方法の検討

No.	候補技術	適用候補処理	考え方
1	MF、UF膜(DE)ろ過	固形分の濃縮処理	SS濃度100ppm以下の液を数千ppmまで濃縮処理する技術として適用可能と想定。
2	クロスフロー(CF)ろ過		SS濃度100ppm以下の液を数万ppmまで濃縮処理する技術として適用可能と想定。
3	凝集沈殿処理		SS濃度数百～数万ppmの液を数万ppmまで濃縮処理し、沈殿スラッジ化する技術として適用可能と想定。ただし、残留粒子量が比較的大きく、粒子捕集率が低い。
4	RO濃縮	フィルタ透過水等の2次核種除去処理	フィルタ除去が困難である微粒子、イオン状核種の除去として適用可能と想定。
5	エバポレーター		フィルタ除去が困難である微粒子、イオン状核種の除去として適用可能と想定。
6	カートリッジフィルタ	スラッジ脱水処理	吸着処理液/濃縮液/沈殿スラッジをカートリッジフィルタでろ過し、固形分濃度40%程度まで脱水しケーキ化することが可能と想定。
7	減圧・加熱脱水		濃縮液/沈殿スラッジを固形分濃度40%以上に脱水する技術として適用可能と想定。

➡ スラッジ脱水処理システムへの各候補技術の適用性について検討した。

7. 実施内容

③-2 スラッジ脱水処理技術の開発

➤ 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した。

No.	必要とされる処理	候補技術	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
1	固形分の濃縮処理	MF、UF膜(DE)ろ過	スラリー性状に応じた濃縮限界を評価する必要がある。前年度フィルタ試験結果を参考に検討可能と想定。	×	×
2		クロスフロー(CF)ろ過	スラリー性状に応じた濃縮限界および処理量のスループットを評価する必要がある。海外原子力サイト事例を参考に検討可能と想定するが、スループットの評価は困難な可能性あり。	×	△
3		凝集沈殿処理	今期補助事業項目②にて実施。	×	○(項目②)
4	フィルタ透過水等の2次核種除去処理	RO濃縮	核種除去技術として選定したため要素試験の対象外	×	—
5		エバポレーター	核種除去技術として選定したため要素試験の対象外	×	—
6	スラッジ脱水処理	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。	○	○
7		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。	○	×
8	(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未定である。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、運用データを取得した。
その他の候補技術については机上検討にて適用性を検討。

7. 実施内容

③-2 スラッジ脱水処理技術の開発

➤ カートリッジフィルタ試験

実施したカートリッジフィルタ試験の試験手順を示す。

試験条件(試験ケース1-1)

試験液: 1000倍希釈海水、pH: 7.1、吸着材: チタンケイ酸塩、50ppm、凝集剤: 無添加、0ppm、
使用液量: 13500mL、ろ過圧力: 0.2MPa(加圧ろ過)、ろ過膜: 1.2 μ mメンブレンフィルタ \times ϕ 47mm

主な試験手順

①スラリー供給槽に
所定性状のスラリーを供給

②コンプレッサにより加圧

③時間経過とともに、
ろ過膜にケーキが堆積し、
透過液が浸出

④液滴の滴下が確認されな
くなった時点で試験終了

⑤各測定・分析を実施

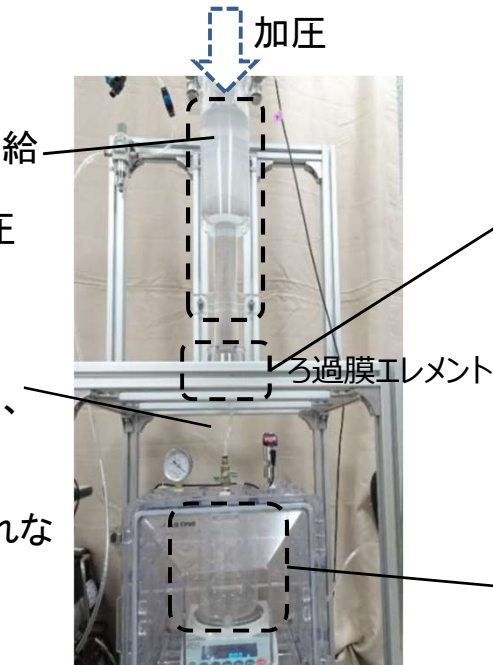
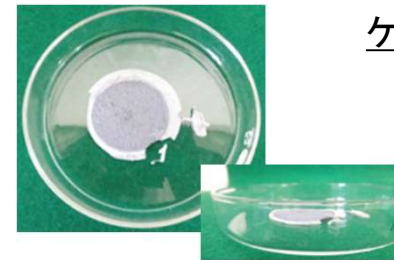


図 カートリッジフィルタ試験装置
(加圧ろ過試験中)



(a)ろ過残渣(ケーキ)

ケーキの測定項目

重量、含水率、ケーキ厚さ



(b)透過液(ろ液)

ろ液の測定項目

重量(容積)、残留粒子濃度、濁度

その他測定項目

ろ過速度(処理時間)、ろ過性、
その他目視確認



本試験により、ろ過速度が目標値を満足するかを評価するとともに、ろ過ケーキの性状データを取得し、カートリッジフィルタのスラッジ脱水技術としての適用性を評価する。

7. 実施内容

③-2 スラッジ脱水処理技術の開発

➤ 供給スラリー/スラッジ性状の設定

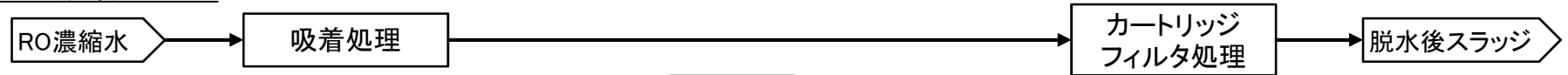
表 カートリッジフィルタ設備で処理する可能性のあるスラリー/スラッジの整理

No.	想定スラリー/スラッジ	固形分濃度	粒子成分	含有成分	備考	
1	吸着処理水	約100ppm	粉末吸着材	—	粉末吸着材により吸着処理した後に発生する廃液	
2	CF濃縮水	約10000ppm		—	No.1の廃液をCFろ過により濃縮処理した濃縮水	
3	凝集沈殿スラッジ	<100000ppm(10%)		凝集剤成分		No.2CF濃縮水に凝集剤を添加し、凝集沈殿処理した後に発生する沈殿スラッジ
4 (追加)	凝集沈殿スラッジ (事前濃縮なし)	<100000ppm(10%)				No.1吸着処理水に凝集剤を添加し、凝集沈殿処理した後に発生する沈殿スラッジ

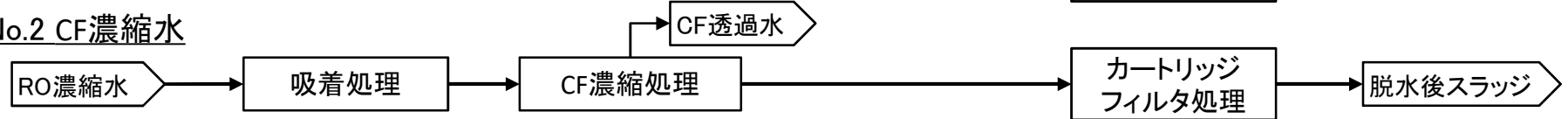
➤ RO濃縮水処理プロセス案

当初処理対象として想定されていたRO濃縮水沈殿スラッジ(No.3)に加えて、スラッジ脱水処理設備で処理する可能性が高いと想定されるスラリー/スラッジを対象とした試験も実施した。

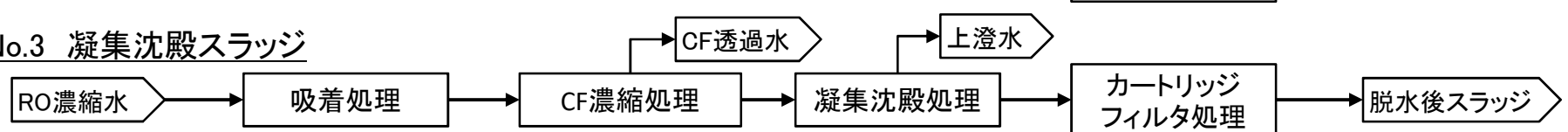
No.1 吸着処理水



No.2 CF濃縮水



No.3 凝集沈殿スラッジ



No.4 凝集沈殿スラッジ(事前濃縮なし)

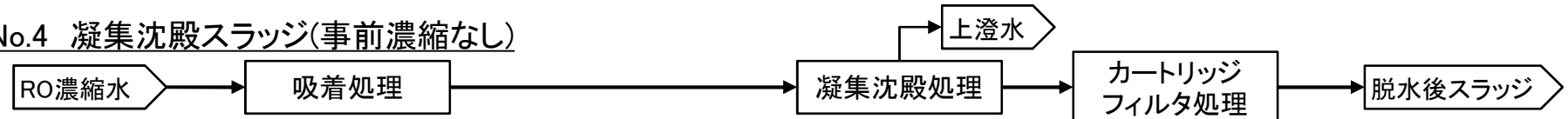


図 カートリッジフィルタ設備へのインプット水質条件の設定

7. 実施内容

③-2 スラッジ脱水処理技術の開発

➤ 試験パラメータ(スラリー/スラッジの条件設定)

スラリー/スラッジの調製に関するパラメータを下記に示す。

RO濃縮水処理試験結果を基に、粉末吸着材としてチタンケイ酸塩と添着活性炭、凝集剤として硫酸アルミを選定した。

表 スラリー/スラッジに関するパラメータ

No.	粉末吸着材※1		凝集剤		試験液条件	模擬対象
	種類	濃度[ppm]	種類	濃度[ppm]		
1-1	チタンケイ酸塩	50	硫酸アルミ	—	1000倍希釈海水	No.1 吸着処理水
1-2		10000		—		No.2 CF濃縮水/DEろ過逆洗水
1-3		約100000		5000		No.3 凝集沈殿スラッジ
1-4		約100000	高塩基PAC※2	2000		No.3 凝集沈殿スラッジ
1-5	添着活性炭	200	硫酸アルミ	—	1000倍希釈海水	No.1 吸着処理水
1-6		10000		—		No.2 CF濃縮水/DEろ過逆洗水
1-7		約100000		1000		No.3 凝集沈殿スラッジ
1-8		約100000	高塩基PAC※2	1000		No.3 凝集沈殿スラッジ
1-9※3	チタンケイ酸塩	50	高塩基PAC	500	1000倍希釈海水	No.4 凝集沈殿スラッジ (事前濃縮なし)
1-10※3	添着活性炭	200	高塩基PAC	500		

※1 チタン酸も高い α 核種除去性能が確認されたが、入手可能なサンプル量が少ないため、本試験では使用しない。粒径や比重が近いチタンケイ酸塩の試験結果を使用して評価する。

※2 高塩基PACも基本条件のみ実施

※3 追加試験：濃縮処理なし/凝集沈殿処理ありの場合の処理スラッジを模擬

→ゲル状物質の析出により、スラッジが難ろ過性の物質となることを確認した(後述)。

7. 実施内容

③-2 スラッジ脱水処理技術の開発

➤ カートリッジフィルタの適用性評価

● 各スラリー/スラッジのろ過性に関して考察(平均ろ過速度)

各試験で取得した平均ろ過速度の評価結果を示す。

	模擬物	吸着材	凝集剤	
1-1	吸着処理水	チタン ケイ酸塩	50ppm	—
1-2	CF濃縮水		10000ppm	—
1-3	沈殿スラッジ		約100000ppm	硫酸アルミ 500ppm
1-4	沈殿スラッジ		約100000ppm	高塩基PAC 200ppm
1-9	沈殿スラッジ		50ppm	高塩基PAC 500ppm
1-5	吸着処理水	添着 活性炭	200ppm	—
1-6	CF濃縮水		10000ppm	—
1-7	沈殿スラッジ		約100000ppm	硫酸アルミ 1000ppm
1-8	沈殿スラッジ		約100000ppm	高塩基PAC 1000ppm
1-10	沈殿スラッジ		200ppm	高塩基PAC 500ppm

ろ過速度判定閾値: 平均ろ過速度V [ml/min]

吸着処理水: V = 28 [ml/min]

CF濃縮水: V = 0.56 [ml/min]

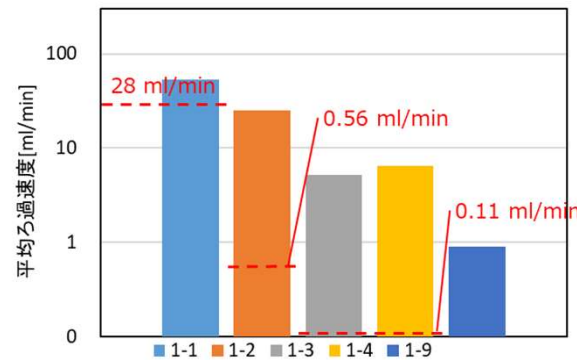
沈殿スラッジ: V = 0.11 [ml/min]

※RO濃縮水14m³/dayを処理可能なろ過速度

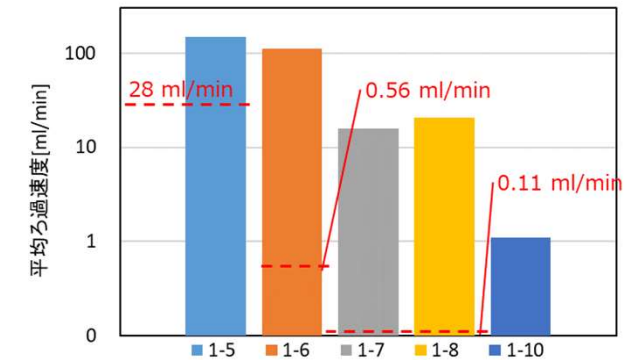
ろ過速度の全体傾向

- ・ 吸着処理水 ≥ CF濃縮水 > 沈殿スラッジ
- ・ 活性炭 > チタンケイ酸塩

判定閾値を満足するろ過速度を確認



(a)チタンケイ酸塩



(b)添着活性炭

図 平均ろ過速度の評価結果

- ・ 本試験では、全ての試験で閾値を上回るろ過速度を確認した。
- ・ CF濃縮処理後の高SS濃度の廃液を処理した場合でも、濃縮処理なしの廃液と比較してろ過速度の減少は小さい(1-1と1-2の比較評価)。
- ・ 凝集剤を添加した場合、無添加の場合と比較してろ過速度が遅くなる傾向があり、凝集剤成分によりケーキ厚が大きくなつたためと考えられる。特に、追加試験1-9と1-10のように、低SS濃度条件で処理した場合に、その傾向が顕著となった。凝集剤の過剰添加により、析出物がろ過膜を目詰まりさせているためと考えられる。
- ・ 以上より、設定したいずれの処理パターンでも、カートリッジフィルタによるスラッジ脱水処理が成立する見込みを得た。

7. 実施内容

③-2 スラッジ脱水処理技術の開発

➤ カートリッジフィルタの適用性評価

● 各スラリー/スラッジのろ過性に関して考察(平均ろ過比抵抗)

各試験で取得した平均ろ過比抵抗の評価結果を示す。

ろ過性判定値: 平均ろ過比抵抗 α_{av} [m/kg]

$\alpha_{av} \leq 10^{11}$: 易
 $10^{12} \leq \alpha_{av} \leq 10^{13}$: 中
 $10^{13} \leq \alpha_{av}$: 難

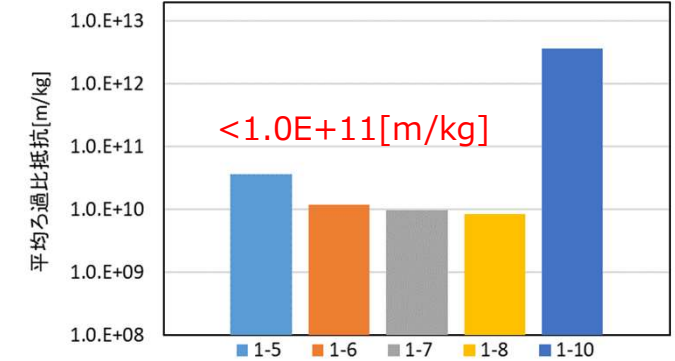
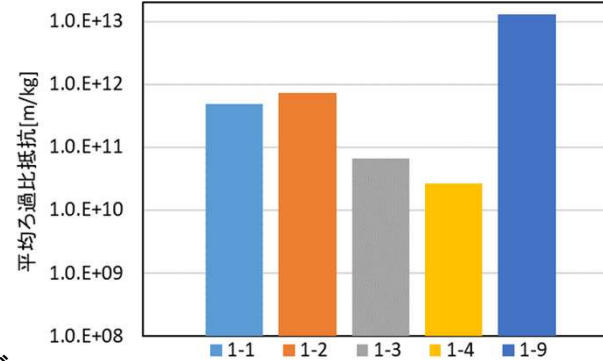
※判定値は一般的な経験則に基づく基準

ろ過比抵抗の全体傾向

- ・ 吸着処理水≒CF濃縮水>沈殿スラッジ
- ・ チタンケイ酸塩>活性炭

凝集剤無添加: $1.0E+11 \sim 12$ [m/kg]
 凝集剤添加: $1.0E+10 \sim 11$ [m/kg]

	模擬物	吸着材	凝集剤		
1-1	吸着処理水	チタンケイ酸塩	50ppm	—	—
1-2	CF濃縮水		10000ppm	—	—
1-3	沈殿スラッジ		約100000ppm	硫酸アルミ	500ppm
1-4	沈殿スラッジ		約100000ppm	高塩基PAC	200ppm
1-9	沈殿スラッジ	添着活性炭	50ppm	高塩基PAC	500ppm
1-5	吸着処理水		200ppm	—	—
1-6	CF濃縮水		10000ppm	—	—
1-7	沈殿スラッジ		約100000ppm	硫酸アルミ	1000ppm
1-8	沈殿スラッジ		約100000ppm	高塩基PAC	1000ppm
1-10	沈殿スラッジ		200ppm	高塩基PAC	500ppm



(a)チタンケイ酸塩

(b)添着活性炭

図 平均ろ過比抵抗の評価結果

- ・ 本試験結果より算出した平均ろ過比抵抗は、全ての試験ケースで $1.0E+12$ m/kg以下となり、スラリー/スラッジのろ過性が良好であることが示された(1-9と1-10は除く)。
- ・ 全体的な傾向として、凝集剤を添加し沈殿スラッジ化した場合、ろ過比抵抗が小さくなることを確認した。ただし、凝集剤成分によりケーキ厚さ(体積)が大きくなるため、前ページに記載のようろ過速度は遅くなる。
- ・ また、凝集剤無添加条件(1-1,1-5等)では、チタンケイ酸塩より活性炭の方がろ過比抵抗が小さい。チタンケイ酸塩は表面電荷を帯びているため、水分子を把持する静電的な力が働く分、水分の透過性が鈍化したと考えられる。なお、凝集剤を添加した場合、表面電荷が中和されるため、ろ過比抵抗が小さくなったと考えられる。
- ・ 吸着材低濃度条件(1-9,1-10)で凝集沈殿処理した場合は、難ろ過性のスラッジとなることを確認した。

7. 実施内容

③-2 スラッジ脱水処理技術の開発

➤ カートリッジフィルタの適用性評価

● ろ過残渣(ケーキ)の含水率に関する考察

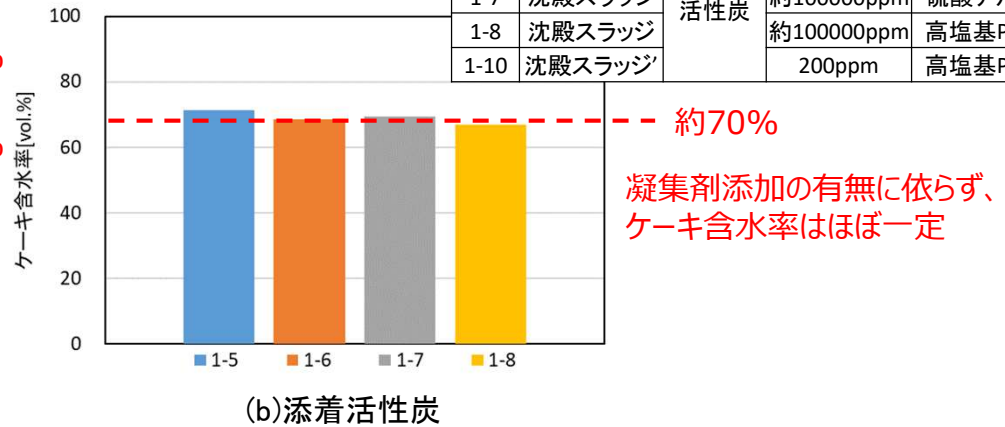
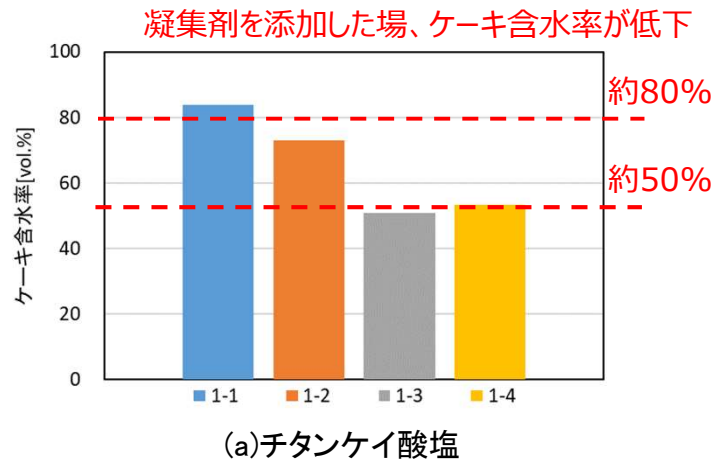


図 ろ過残渣(ケーキ)の含水率測定結果

※減容化処理の観点から、脱水後の含水率の目標値は60vol.%と設定

チタンケイ酸塩

- 凝集剤を添加せざろ過した場合、約80vol.%と高い含水率となり、凝集剤を添加しスラッジ化しろ過した場合、約50vol.%と目標値を満足する値となった。
- チタンケイ酸塩は理論的にはマイナスの表面電荷を持つため、静電的な作用により水分子を保持する効果により、凝集剤無添加条件の含水率が高くなったと考えられる。結晶構造は3次元的であるため、膨潤作用により内部に水を保持することは考えにくいと考察する(水和水を含む可能性はある)。
- 凝集剤を添加した条件では、表面電荷が中和され、前述の静電的な影響が軽減されたため、含水率が相対的に小さくなったと考えられる。40~50vol.%の水分量は、ろ過による脱水が困難なケーキ中の間隙水であると考えられる。

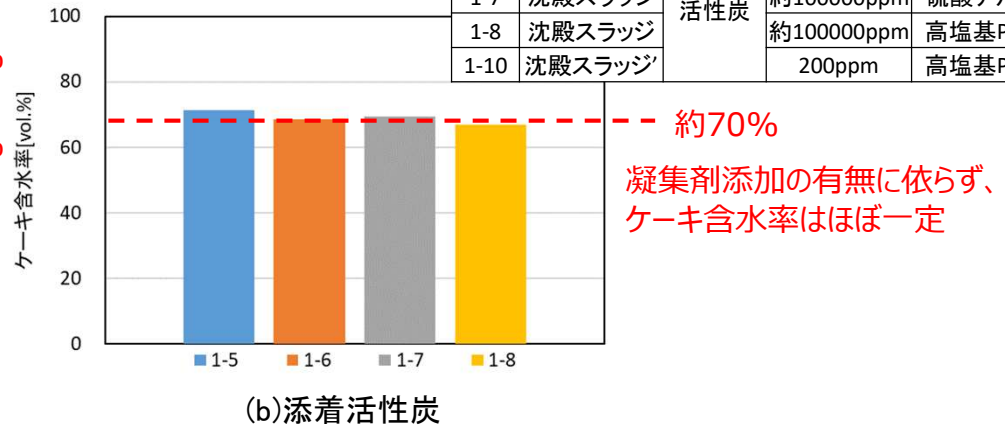
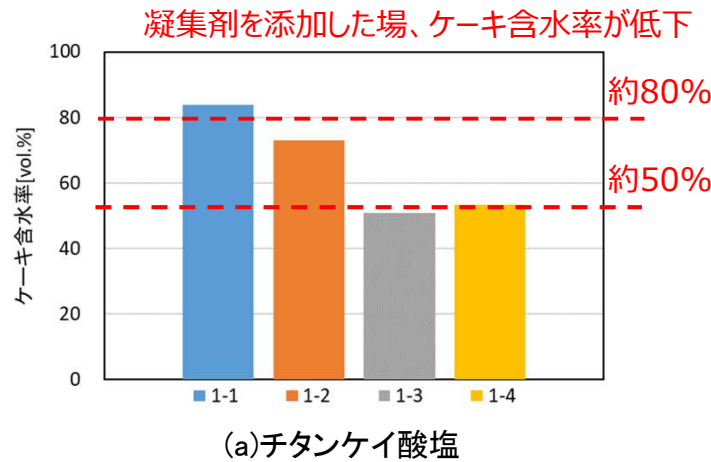
	模擬物	吸着材	凝集剤		
1-1	吸着処理水	チタンケイ酸塩	50ppm	—	—
1-2	CF濃縮水		10000ppm	—	—
1-3	沈殿スラッジ		約100000ppm	硫酸アルミ	500ppm
1-4	沈殿スラッジ		約100000ppm	高塩基PAC	200ppm
1-9	沈殿スラッジ	添着活性炭	50ppm	高塩基PAC	500ppm
1-5	吸着処理水		200ppm	—	—
1-6	CF濃縮水		10000ppm	—	—
1-7	沈殿スラッジ		約100000ppm	硫酸アルミ	100ppm
1-8	沈殿スラッジ		約100000ppm	高塩基PAC	100ppm
1-10	沈殿スラッジ		200ppm	高塩基PAC	500ppm

7. 実施内容

③-2 スラッジ脱水処理技術の開発

➤ カートリッジフィルタの適用性評価

● ろ過残渣(ケーキ)の含水率に関する考察



	模擬物	吸着材	凝集剤		
1-1	吸着処理水	チタンケイ酸塩	50ppm	—	—
1-2	CF濃縮水		10000ppm	—	—
1-3	沈殿スラッジ		約100000ppm	硫酸アルミ	500ppm
1-4	沈殿スラッジ		約100000ppm	高塩基PAC	200ppm
1-9	沈殿スラッジ	添着活性炭	50ppm	高塩基PAC	500ppm
1-5	吸着処理水		200ppm	—	—
1-6	CF濃縮水		10000ppm	—	—
1-7	沈殿スラッジ		約100000ppm	硫酸アルミ	100ppm
1-8	沈殿スラッジ		約100000ppm	高塩基PAC	100ppm
1-10	沈殿スラッジ		200ppm	高塩基PAC	500ppm

図 ろ過残渣(ケーキ)の含水率測定結果

※減容化処理の観点から、
脱水後の含水率の目標値は60vol.%と設定

添着活性炭

- 凝集剤添加の有無に依存せず、いずれの処理条件でも60~70vol.%の含水率となった。
- 目標値60vol.%までの脱水処理は困難であるが、近い水準まで脱水可能であることを確認した。
- 活性炭は理論的には表面電荷を持たないため、静電作用による水分子の保持は発生しにくく、また、膨潤作用もないと考えられる。そのため、凝集剤添加/無添加に依らず、含水率がほぼ一定となったと考えられる。
- また、チタンケイ酸塩を沈殿スラッジ化した条件(1-3, 1-4)と比較して含水率が高い原因としては、活性炭粒子の表面にはマイクロポアが無数に存在するため、マイクロポア中に水分が保持される可能性が考えられる。
- なお、活性炭は粒子の真密度が小さいため、ケーキ密度が小さくなるため、質量含水率はチタンケイ酸塩と比較して大きくなる傾向がある。

7. 実施内容

③-2 スラッジ脱水処理技術の開発

➤ カートリッジフィルタの適用性評価

● ろ過残渣(ケーキ)の含水率に関する考察

試験結果より、カートリッジフィルタによる加圧ろ過後に残るろ過残渣(ケーキ)の含水率について、寄与の大きいパラメータは下記項目であると考える。

- ・ケーキの間隙率(粒子充填密度)
- ・粒子表面の静電的性状
- ・粒子の結晶構造(膨潤性の有無、微小孔の有無など)

ケーキ含水率は、粒子自体の表面性状・物性による影響を受け大きくなる。しかし、適切な条件で凝集沈殿処理を行えば、粒子の表面性状の影響を軽減することが可能であり、60～70vol.%まで脱水可能である。

なお、ろ過圧力、ろ過時間、フィルタ目開き等のろ過条件による、ケーキ含水率の変化は軽微であった。

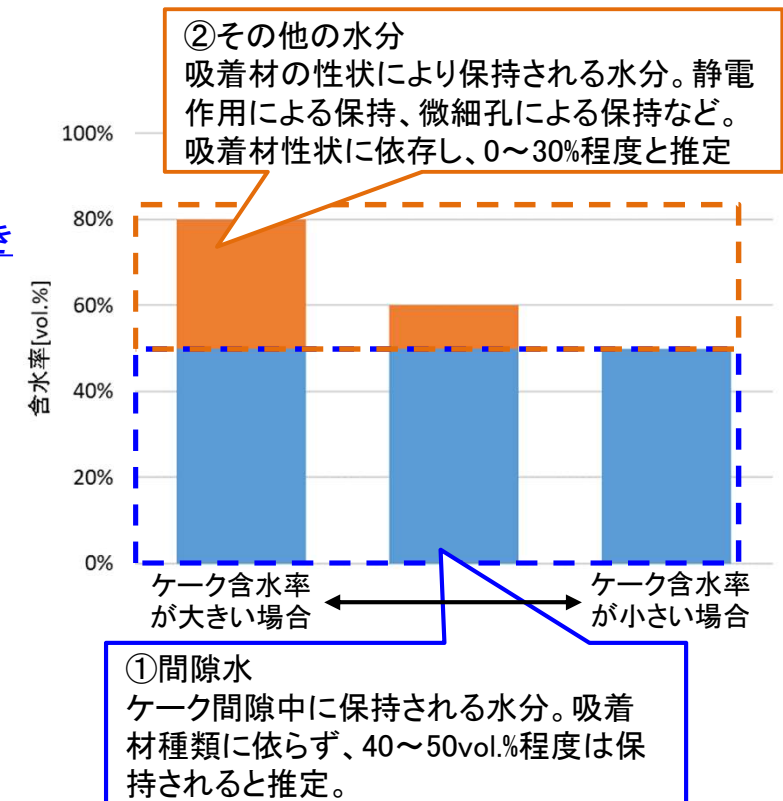
本試験結果より、ケーキ間隙に保持されている水分は、含水率換算で40～50vol.%存在する可能性が示唆された。

また、使用する粉末吸着材の物性に依存して、20～30%分の含水率がさらに大きくなると推定される。

※間隙水を加圧ろ過方式で除去することは困難であるため、

絶乾状態に近い水準まで脱水処理が求められる場合、加熱式の脱水処理などを適用する必要がある。

ただし、水素対策や減容化の観点では、60～70vol.%までの脱水処理で十分であると考えられる。



7. 実施内容

③-2 スラッジ脱水処理技術の開発

➤ 沈殿スラッジ(事前濃縮なし)条件でのろ過性能低下に関する考察

追加試験1-9および1-10では、粉末吸着材による吸着処理後にCF濃縮処理を実施せず、凝集沈殿処理を実施した場合を模擬し、数十～数百ppmのSS濃度の廃液を凝集沈殿処理した。その後、発生した沈殿スラッジを使用して、カートリッジフィルタろ過試験を実施した。

その結果、ろ過速度の顕著な低下が確認され、ゲル状物質による目詰まりが原因であると考察した。

試験ケース1-10で確認されたゲル状スラッジ

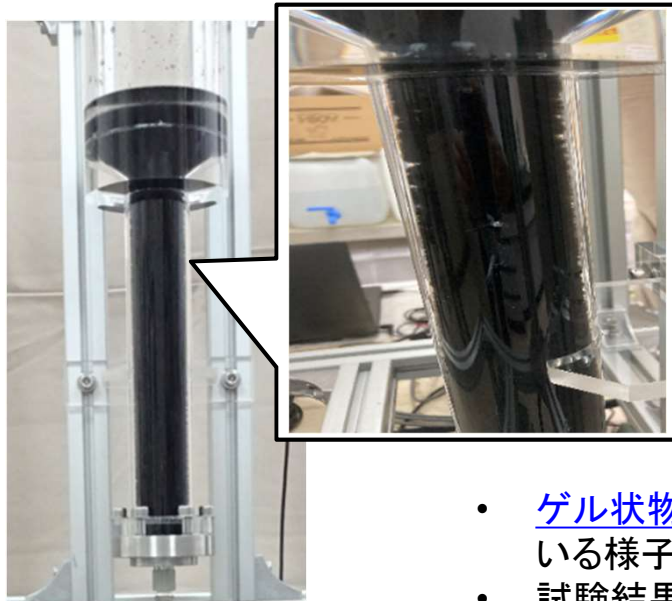


図 カートリッジフィルタ試験装置
(加圧ろ過試験中)

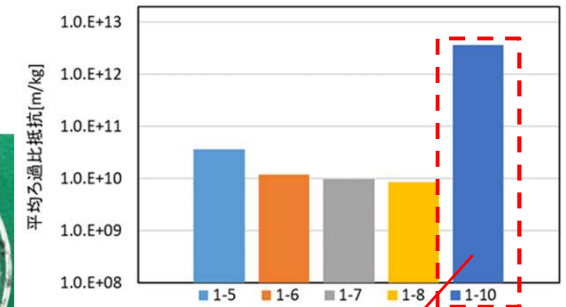
凝集剤成分が大きいいため、粘性が強く、含水率も高いケーキが形成された



(a)乾燥前

(b)乾燥後

図 ろ液およびろ過残渣(ケーキ)



他試験ケースと比較して、平均ろ過比抵抗の顕著な増大を確認。ろ過速度も大きく低下した。

- ゲル状物質と粉末吸着材粒子が混合して堆積しており、スラッジ体積が増大している様子を確認。
- 試験結果(平均ろ過比抵抗など)により示した通り、他試験と比較してろ過速度の顕著な低下を確認した。



含水率の高いスラッジ(ゲル状物質)が、フィルタ孔を目詰まりさせることにより、ろ過液の透過が阻害されていると考えられる。

7. 実施内容

③-2 スラッジ脱水処理技術の開発

➤ 吸着材低濃度条件でろ過性が低下した原因に関する考察

凝集剤成分のゲル化

試験ケース1-9および1-10では、ろ過速度の低下および、平均ろ過比抵抗の増大より、難ろ過性のケーキが形成されたと考えられる。試験ケース1-9と1-10は、吸着材濃度が数十～数百ppmと小さいため、凝集剤が過剰添加であった可能性が考えられる。

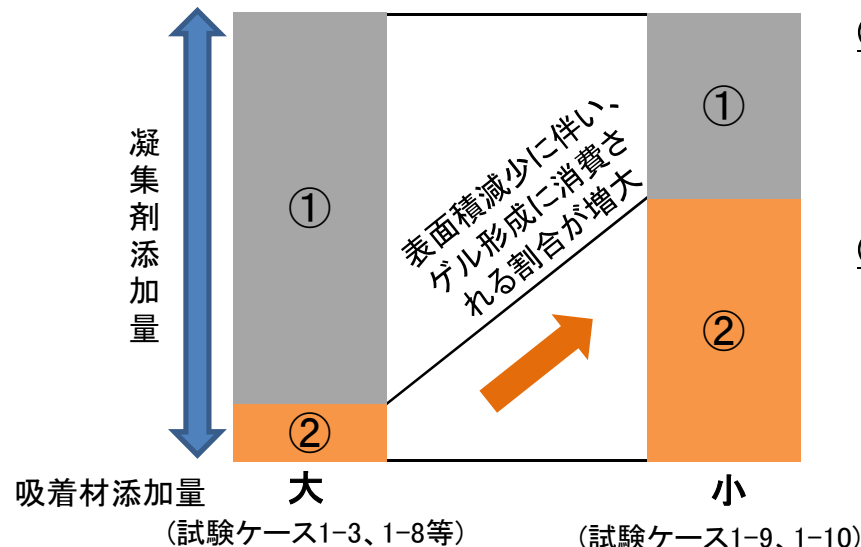


図 凝集剤の過飽和成分の消費のイメージ図

①表面へ析出する成分

- 狭隘部や固相表面の化学的に活性な部分に析出する成分。
- 優先的に反応が進行する。
- [析出物の含水率は低い](#)。

②ゲルを形成する成分

- 上澄液中でコロイドや固相を形成する成分。
- 固相表面へ析出しきれない余剰成分が本反応で消費される。
- [析出物の含水率は高い](#)。結晶度が小さく非晶質と想定。

※凝集剤はAl系試薬を使用しているため、水酸化アルミニウムの形態で析出すると考えられる。

粉末吸着材量が小さくなるほど、表面への析出に消費される割合が少なくなり、ゲル形成に消費される割合が増大する。

吸着材濃度が大きい場合(試験ケース1-3等)、液相中に膨大な表面積が存在するため、凝集剤成分はほぼ全量が表面への析出に消費され、ゲルを形成する余剰成分は少ない。一方、[吸着材濃度が小さい場合\(試験ケース1-9等\)](#)、液相中に十分な表面積が存在しないため、凝集剤の余剰成分が発生する。余剰成分は上澄液中で水分を多量に含んだ状態で析出するためゲル状となると考えられる。

[ゲル状物質はフィルタ孔の閉塞を顕著に引き起こす](#)ため、ろ過性の優位な低下が生じたと考えられる。

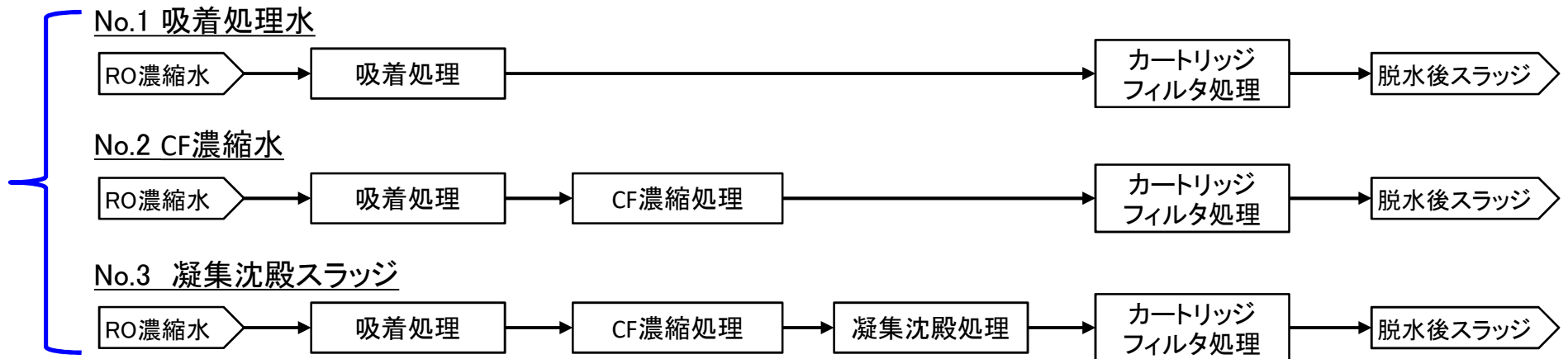
7. 実施内容

③-2 スラッジ脱水処理技術の開発

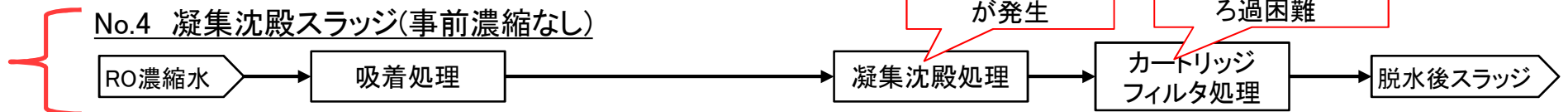
➤ 要素試験結果まとめ

- No.1～3の処理条件では、カートリッジフィルタは要求されるスループットを満足すると評価された。
- 一方、No.4の処理条件では、ゲル状物質のフィルタ孔閉塞が原因と考えられるスループットの低下が確認され、カートリッジフィルタによる脱水処理が困難である可能性が示唆された。
- カートリッジフィルタによりスラッジの含水率は、前段処理に多少影響するが、60～70%程度まで低減可能である。

目標スループットを満足すると評価された処理プロセス。
発生するスラリー/スラッジのろ過性は良好。



目標スループットを満足することが困難な可能性があるとして評価された処理プロセス。
発生するスラリー/スラッジは難ろ過物。



➡ 要素試験結果から、No.1～3の処理プロセスで脱水処理が成立する見込みを得た。
今後は本成果を基に、処理プロセス全体の合理化を図るとともに、各設備の具体化検討が必要である。

7. 実施内容

③-2 スラッジ脱水処理技術の開発

【これまでの成果】

- ✓ RO濃縮水処理により発生する沈殿スラッジについて、減容化効果および水素発生量を評価し、脱水後の目標値を60vol.%と設定した。
- ✓ スラリー/スラッジの脱水処理方法として、カートリッジフィルタを用いた技術を選定し、実機適用性を評価するための要素試験案を立案した。
- ✓ 要素試験結果より、吸着処理水/CF濃縮水/沈殿スラッジのいずれも、カートリッジフィルタでのろ過性は良好であり、スループットを満足すると評価された。
- ✓ 吸着処理後に、濃縮処理をせずに凝集沈殿処理するようなシステムについては、沈殿スラッジが難ろ過性のゲル状となるため、適用性が低い可能性が示された。
- ✓ ろ過後のケーキの含水率は、処理条件に依存するが60～70vol.%となり、目標設定していた程度のスラッジ発生量の減容化が図れる可能性が示された。

【今後の検討課題】

- ✓ 立案した各処理システムにおいて、設備規模、スループット、運用パターンなどを検討し、より適切と考えられるシステムを選定する。
- ✓ 別法の脱水技術の検討や、エア逆洗によるケーキの払い出しなど、システムの合理化検討に必要と考えられる開発課題を整理する。

【まとめ】

スラッジ脱水技術として、カートリッジフィルタによる脱水技術を選定し、要素試験により適用性を評価した。要素試験結果より、カートリッジフィルタを用いた脱水処理が成立する処理プロセスを複数選定し、スラッジ回収システムの概念検討を実施した。

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)

上表に記載の目標を達成した。

※TRL:技術成熟度

令和3年度開始廃炉・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)

最終報告
(2)臨界管理技術

2023年6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 これ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
 - 7.1 現場運用手順の開発
 - 7.2 固化型吸収材技術(水ガラス)の開発
 - 7.3 臨界管理の全体まとめ
 - 7.4 今後へ向けての課題の整理
 - 8 実施目的を達成するための具体的目標
- 参考資料

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

【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や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が取り出しシステムの設計やスループットの検討に活用するための情報を提供する。
- 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。

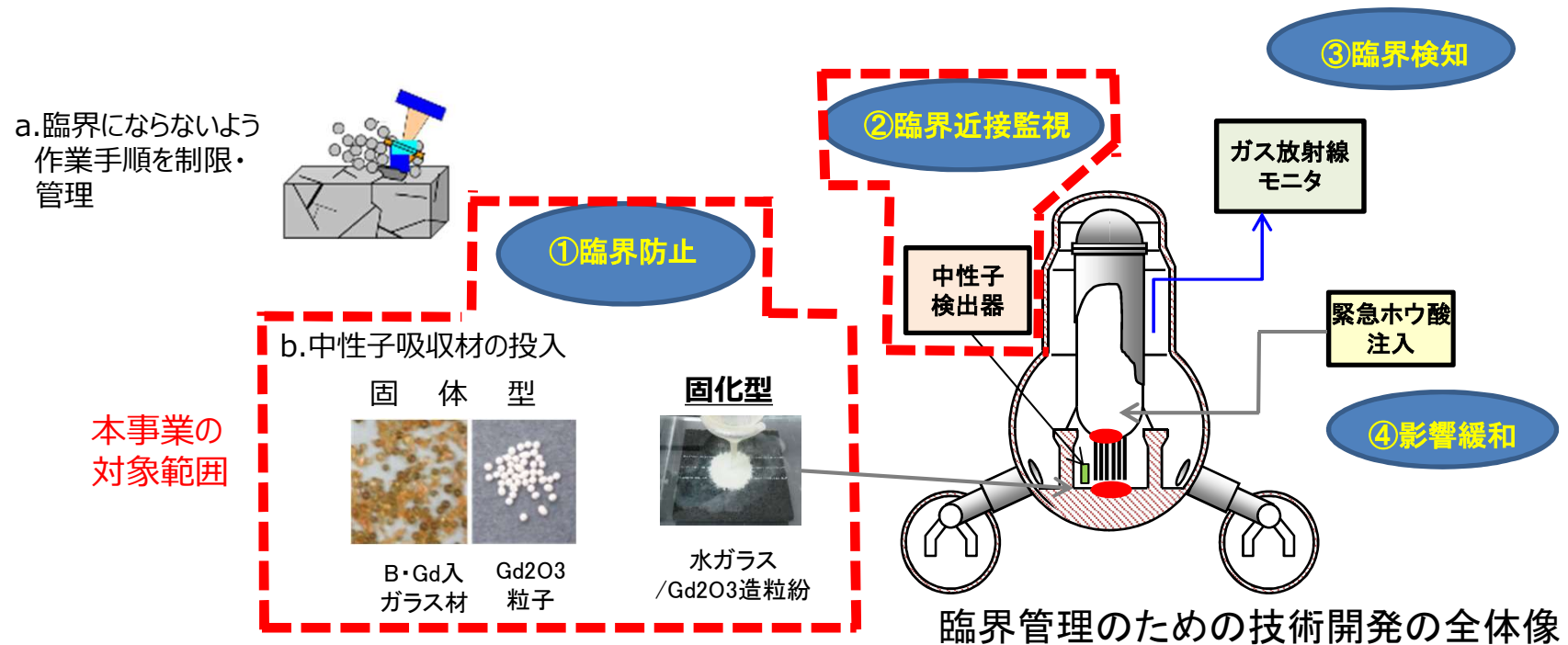
②固化型吸収材技術の開発

- 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、前期PJ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**、これまでの技術開発成果を踏まえて、検討を具体化した。



2. 補助事業の概要 段階的な臨界管理

- 臨界管理技術は、燃料デブリの取り出し量や取り出し方法に応じた臨界発生リスクを考慮し、段階的に適用する。
- 取り出し量や状態変化が大きくなる取り出し方になるほど相対的に臨界リスクが高まるため、多様な臨界管理技術が選択できるようにする。

燃料デブリの状態変化の大きさ → 小 ← 大 →

取り出し作業	内部調査	燃料デブリ取り出し				
		段階的に規模を拡大する取り出し			本格取り出し	
取り出し量	微量(数g)	少量(数kg)		少量(数kg～数10kg)	本格(～数100kg/日)	
取り出し方法	把持・吸引等	把持・吸引等	コアボーリング等	コアボーリング等	コアボーリング、チゼル等	
①臨界防止 ②臨界近接監視	作業制限	燃料デブリに変化を与えない方法	燃料デブリに変化を与えない方法	・1回あたりの加工量制限 ・取り出し位置間隔の制限	・1回あたりの加工量制限	・1回あたりの加工量制限(拡大)
	臨界近接監視	—	—	中性子束監視	中性子束監視	中性子束監視 未臨界度測定*1
	非溶解性中性子吸収材	—	—	—	—	非溶解性中性子吸収材*2
	溶解性中性子吸収材	—	—	—	—	五ホウ酸ナトリウム水*3 (6000pp)
③臨界検知	臨界検知	PCVガス放射線モニタ	PCVガス放射線モニタ	PCVガス放射線モニタ 中性子束モニタ	PCVガス放射線モニタ 中性子束モニタ	PCVガス放射線モニタ 中性子束モニタ
④影響緩和	臨界終息	五ホウ酸ナトリウム水注入	五ホウ酸ナトリウム水注入	五ホウ酸ナトリウム水注入	五ホウ酸ナトリウム水注入	五ホウ酸ナトリウム水注入

本事業の
対象範囲

* 1、2、3は取り出し作業内容・現場の環境条件等を考慮した臨界リスクに依存して選択される。

3. これまでに実施した事業の実績と残された課題

No.6

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) 	<p>代替中性子検出器(コロナ放電利用型、SiC半導体型、マルチセルHe-3型)の適用性確認試験 (KUCA試験#5) (→7.1.2項)</p> <p>KUCA; 京都大学臨界実験装置</p>
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(コロナ放電利用型、SiC半導体型、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 	<p>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)</p>

3. これまでに実施した事業の実績と残された課題

No.7

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・アウトプット情報

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、と連携して実施した。

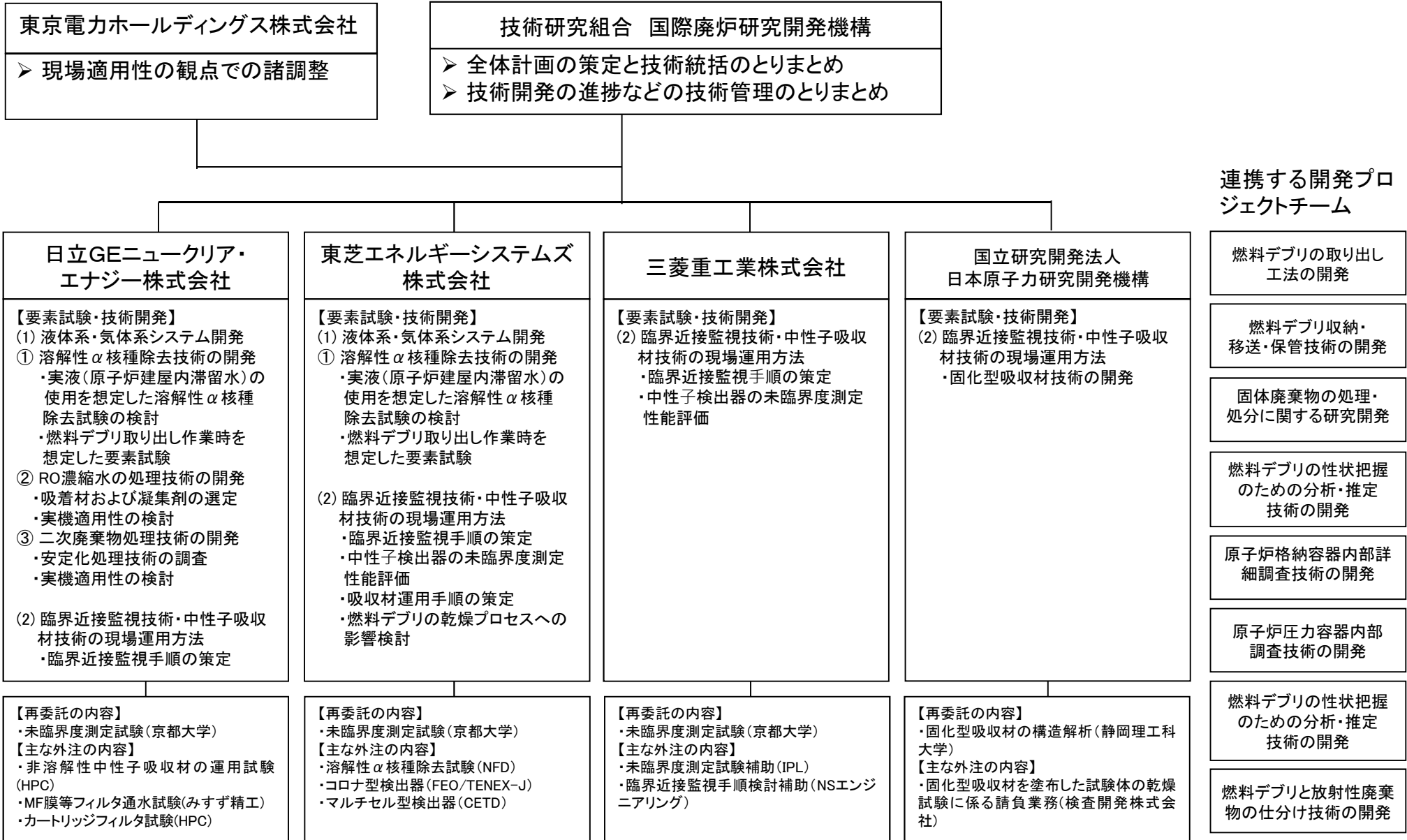
ID	要求側事業	提供側事業	内容(概要)	時期	情報の用途
1	安全システムの開発 (液体系・気体システム、臨界管理技術)	燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発	干渉物撤去の方法、燃料デブリへのアクセス方法、燃料デブリや炉内構造物の加工・回収方法	2021年 6月	臨界近接監視や吸収材散布の現場運用手順の検討
2	燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発	安全システムの開発 (液体系・気体システム、臨界管理技術)	中性子検出器による臨界近接監視の現場運用手順、非溶解性中性子吸収材の現場運用手順	2023年 3月	燃料デブリ取り出し工法の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 (7月) ▲ 中間報告 (9月) ▲ プロジェクトステアリング会議 (3月) ▲ 中間報告 (4月) ▲ プロジェクトステアリング会議 (8月) ▲ 中間報告 (9月) ▲ プロジェクトステアリング会議 (1月) ▲ 最終報告 (3月)																							
(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 ② 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 試験場所: KUCA	試験計画																							
	b. 試験準備・手配	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 試験場所: KUCA	KUCA試験			要素試験																				
	d. まとめ		まとめ																							
(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 試験場所: JAEA	試験準備・調達																							
	c. 要素試験	委託先: 静岡理科大学 試験場所: 静岡理科大学	基礎試験																							
	d. まとめ		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。

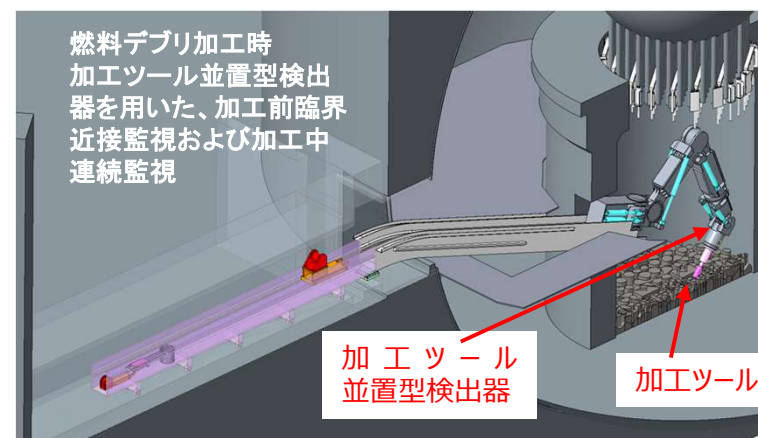


図1 燃料デブリ取り出し時臨界近接監視(横アクセスPLAN-Aの例)

【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が取り出しシステムの設計やスループットの検討に活用するための情報を提供する。

(*)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

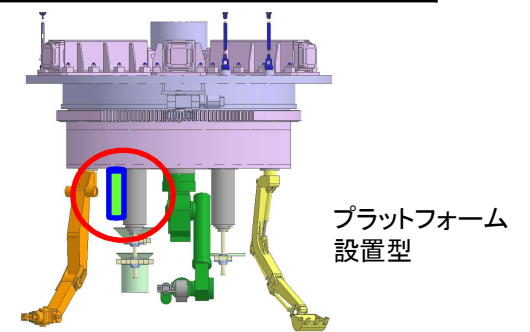
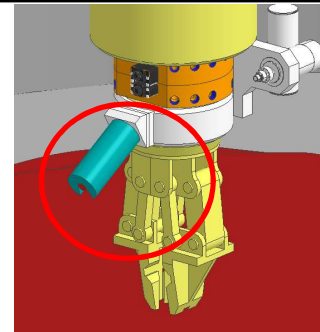
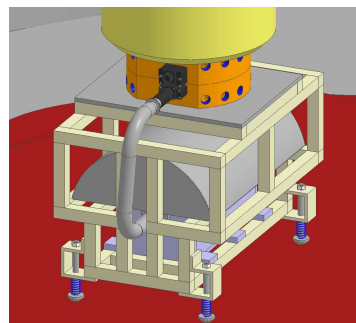
a.前提条件の整理

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	取り出し位置近傍 の1点 ^(注2)	加工位置に応じて 適宜移動 ^(注2)	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)燃料デブリに対する測定位置は固定されておらず、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 -----

-上アクセス一体搬出工法-

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PLAN-A工法の臨界監視方法
(→No.15)

③横取り出しPLAN-B工法の臨界監視方法
(→No.16~18)

③上アクセス一体搬出工法の臨界監視方法
(→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.23~26)

⑨代表加工例(レーザー加工)での監視手順(→No.27)

⑩監視システムの保守
(→No.28)

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

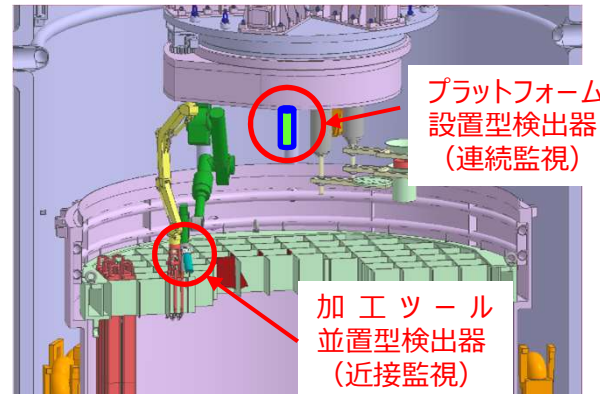
b. 手順の検討 ①上取り出し時の臨界監視方法

【検討成果】

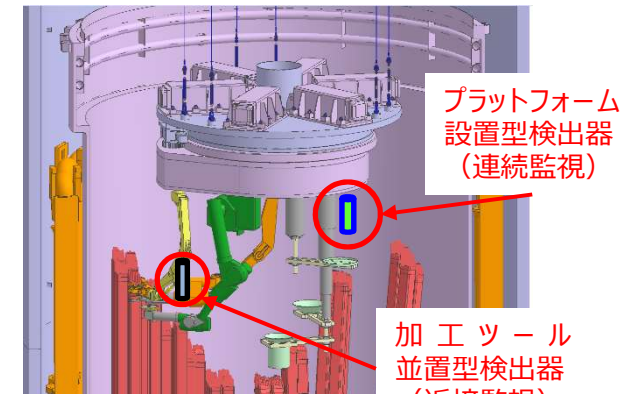
上取り出し工法を代表例として燃料デブリ取り出しステップにおける臨界近接監視の方法を検討した。

臨界近接監視は3種類の中性子計測で構成されるが、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。

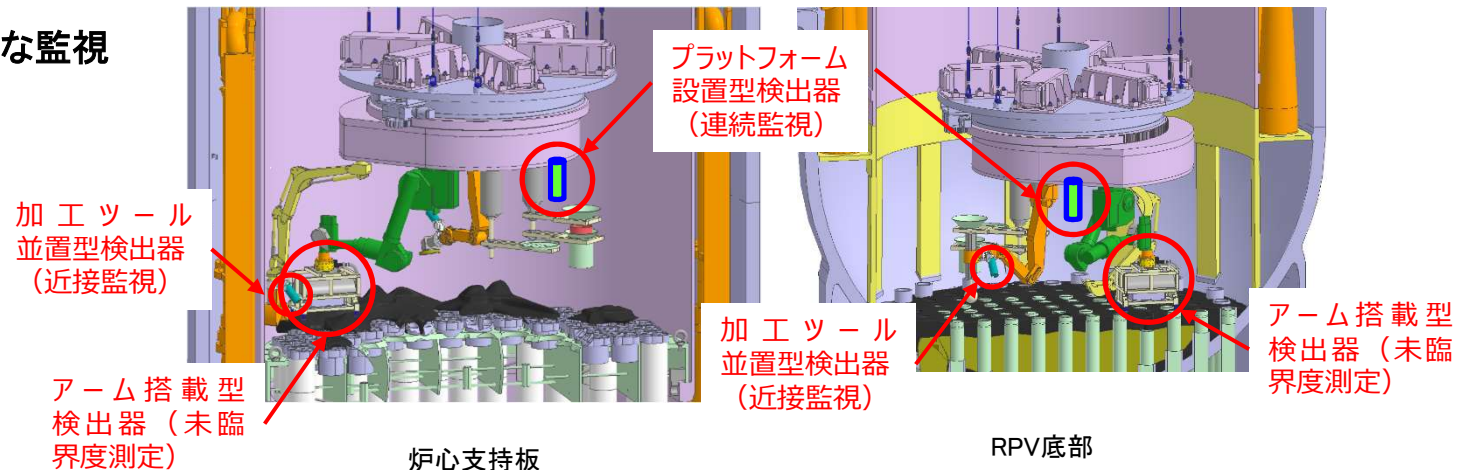
想定される臨界リスクに応じて必要な監視の機能を使い分ける。
(3種類 or 2種類)



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PLAN-A工法の臨界監視方法

【検討成果】

横取り出しPLAN-A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PLAN-A工法の臨界監視方法

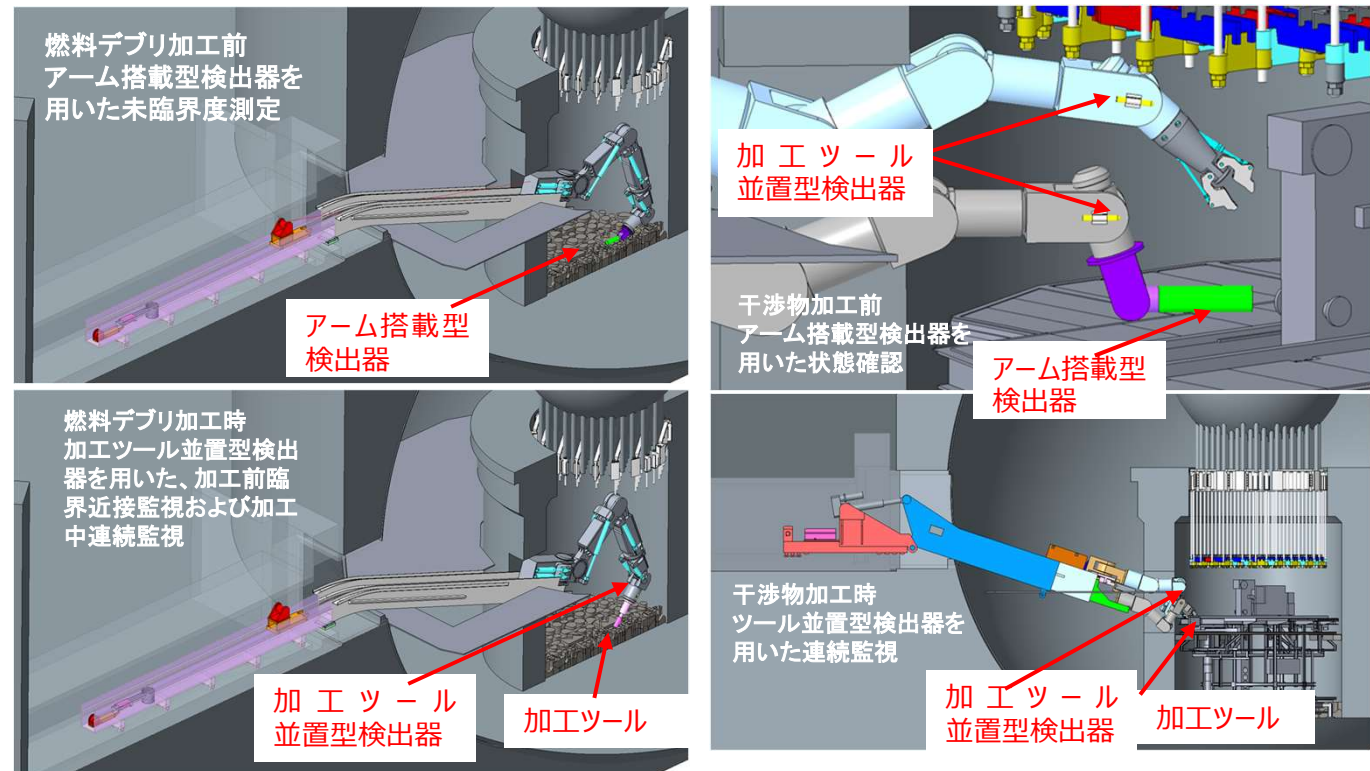


図 燃料デブリ取り出し時臨界監視(抜粋)

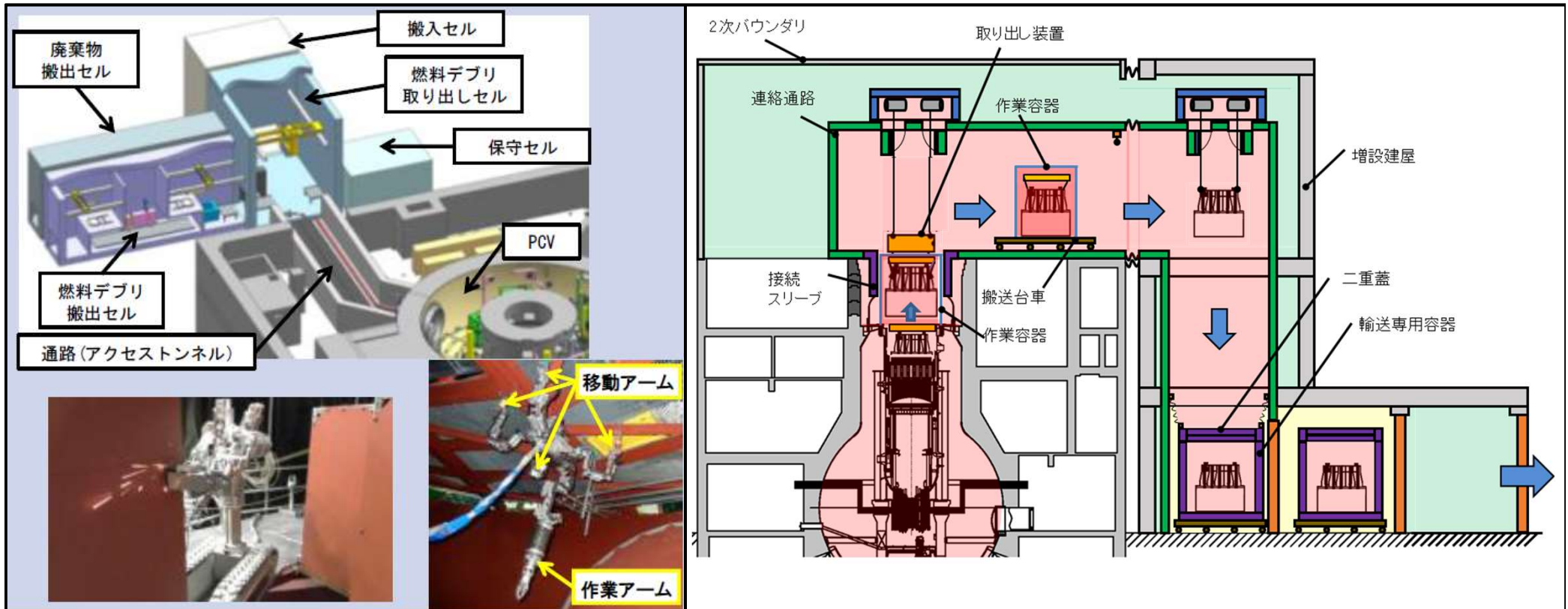
図 干渉物撤去時臨界監視(抜粋)

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横取り出しPLAN-B工法/ 上アクセス一体搬出工法の臨界監視方法

● 横取り出しPLAN-B工法および上アクセス一体搬出工法の概要



- ・ 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

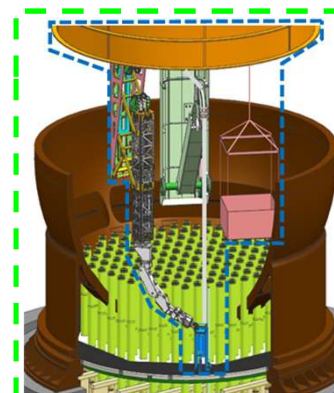
7.1 現場運用手順の開発

7.1.1 臨界近接監視の運用手順 b.手順の検討 ③横取り出しPLAN-B工法/ 上アクセス一体搬出工法の臨界監視方法

- 横取り出しPLAN-B工法および上アクセス一体搬出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。



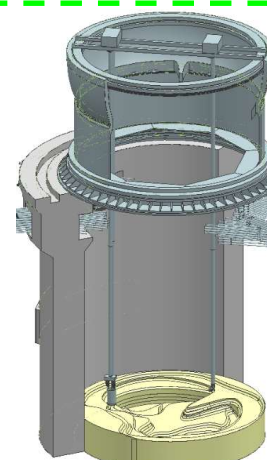
重量物運搬装置による中性子
検出器ユニット(模擬体)の搭載
および移動
(横取り出しPLAN-B工法)



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
(横取り出し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横取り出しPLAN-B工法/ 上アクセス一体搬出工法の臨界監視方法

【検討結果】

- 横取り出しPLAN-B工法および上アクセス一体搬出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。

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

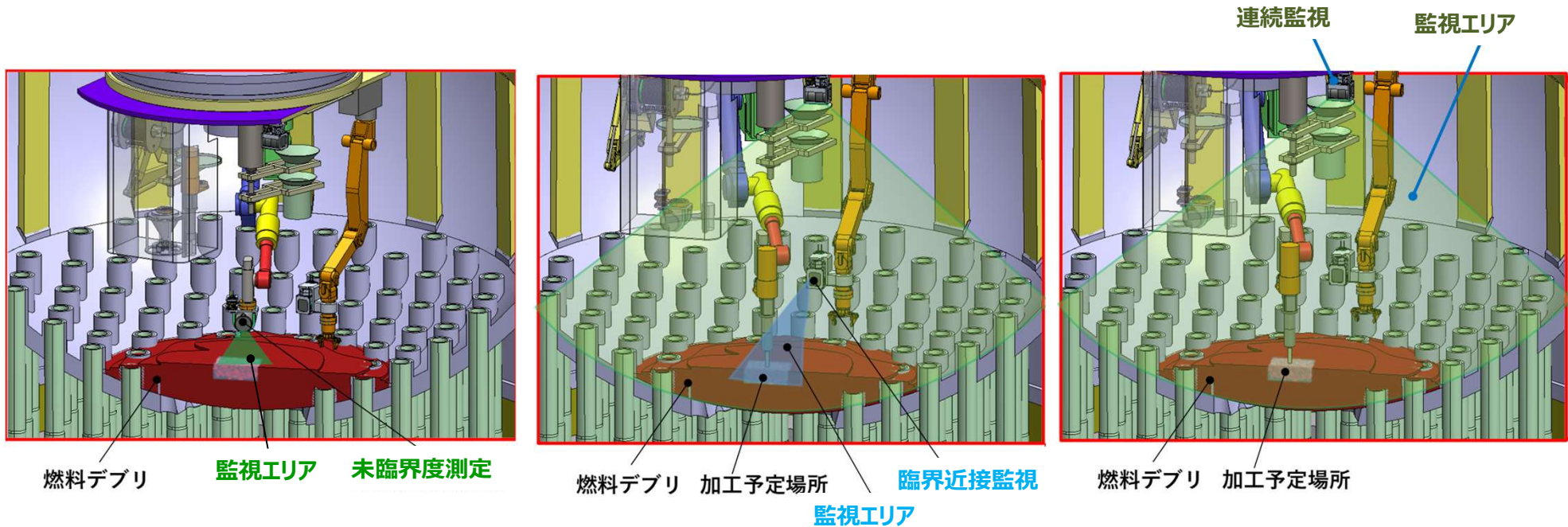
測定点: 加工位置に応じて適宜移動

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



(*)加工位置に応じて適宜移動する場合の連続監視のイメージは、中央の図の臨界近接監視の監視エリアと同じである。

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 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。

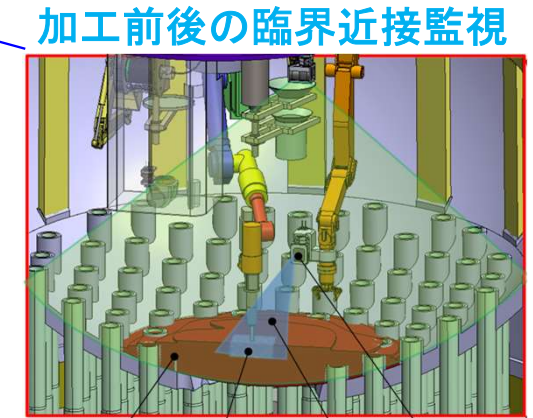
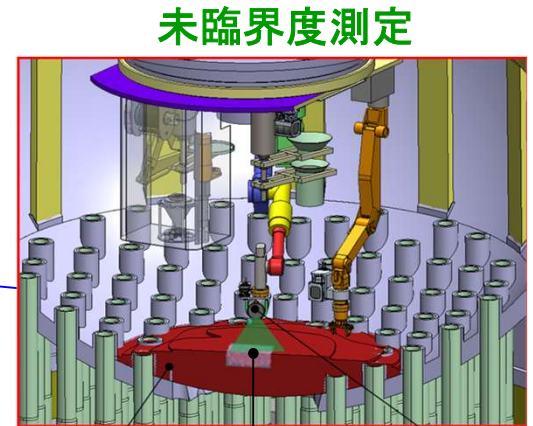
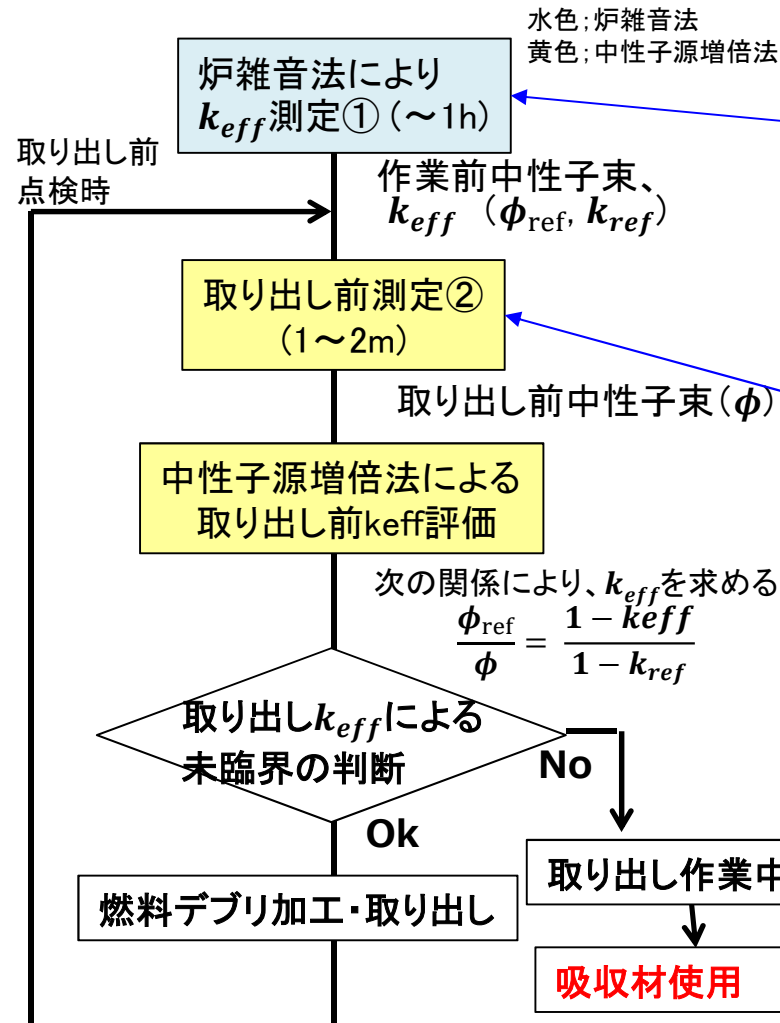
- ・燃料デブリ取り出し作業開始前に炉雑音法により中性子増倍率 (k_{eff}) を測定①
これが中性子源増倍法の基準になる。
- ・燃料デブリ加工の前後は中性子計数率を測定②
- ・燃料デブリ取り出し加工中は中性子計数率を連続監視
- ・中性子計数率が変化したら中性子源増倍法で中性子増倍率 (k_{eff}) を評価
- ・中性子増倍率が判断基準に達したら作業中断
- ・吸収材を使用
- ・吸収材使用後に炉雑音法により中性子増倍率 (k_{eff}) を測定①
これは中性子源増倍法の基準の再測定になる。

k_{eff} : 中性子増倍率

k_{ref} : 炉雑音法による測定時点の中性子増倍率

ϕ_{ref} : 炉雑音法による測定時点の中性子束

ϕ : 取り出し前の中性子束



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

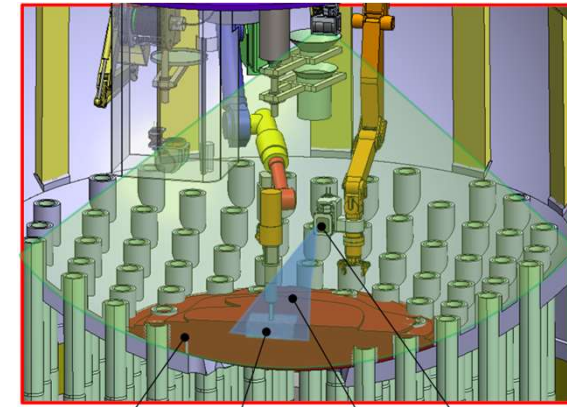
7.1.1 臨界近接監視の運用手順

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。

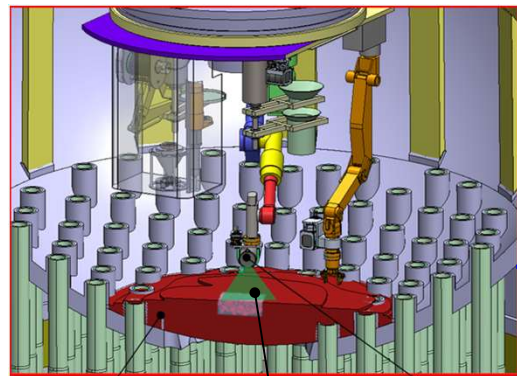
- ・燃料デブリ取り出し作業開始前に炉雑音法により中性子増倍率(k_{eff})を測定①
これが中性子源増倍法の基準になる。
 - ・燃料デブリ加工の前後は中性子計数率を測定②
 - ・燃料デブリ取り出し加工中は中性子計数率を連続監視
 - ・中性子計数率が変化したら中性子源増倍法で中性子増倍率(k_{eff})を評価
 - ・中性子増倍率が判断基準に達したら作業中断
 - ・吸収材を使用
 - ・吸収材使用後に炉雑音法により中性子増倍率(k_{eff})を測定①
 - ・作業再開判断～作業再開
- 以上の監視機能は、No.14～15シートに記載のとおり、現場の状況に応じ監視機能を使い分ける。

加工前後の臨界近接監視

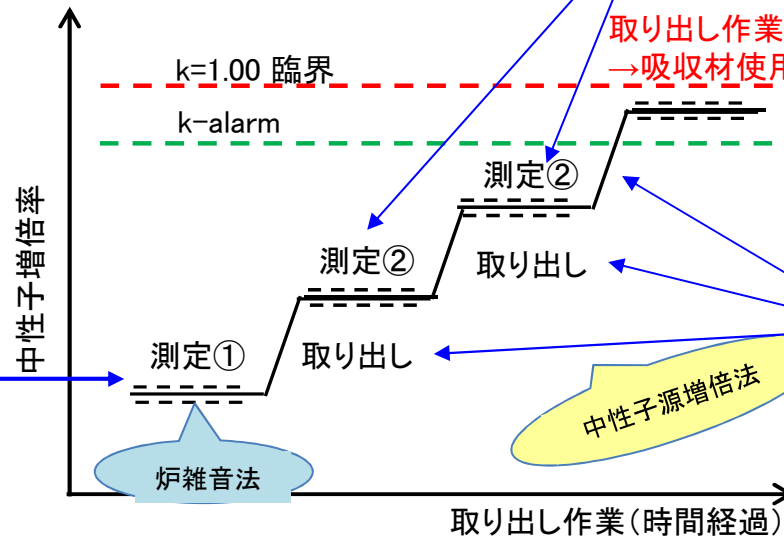


燃料デブリ 加工予定場所 臨界近接監視
監視エリア

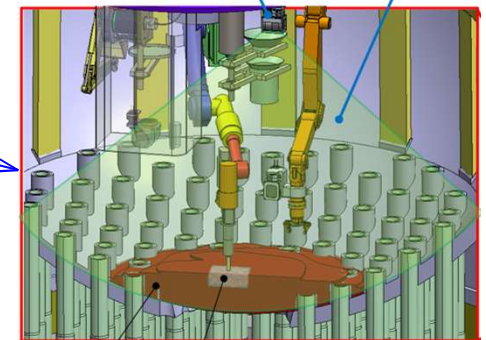
未臨界度測定



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。

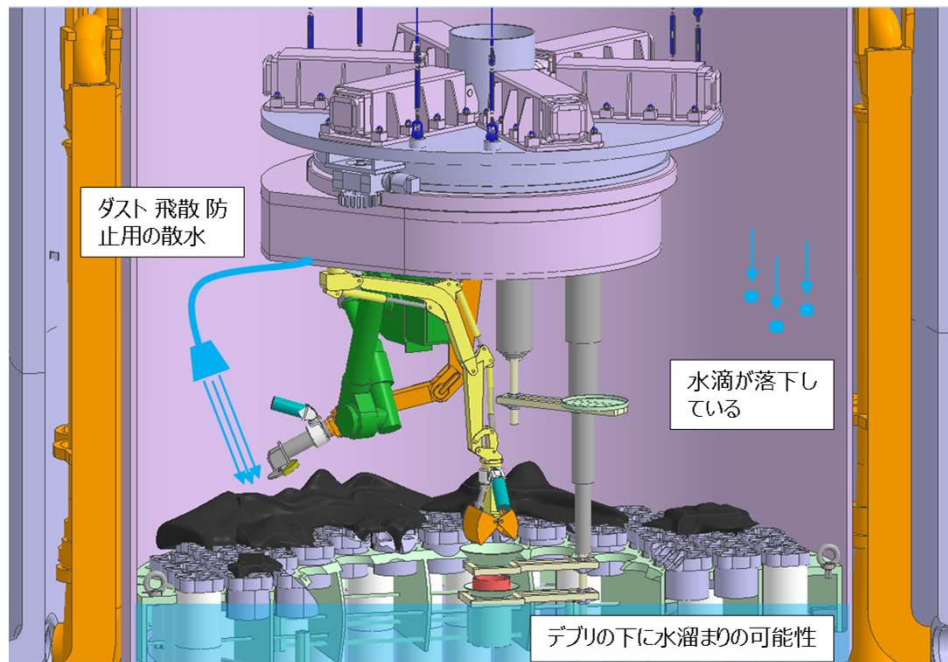


図1 気中加工の環境条件

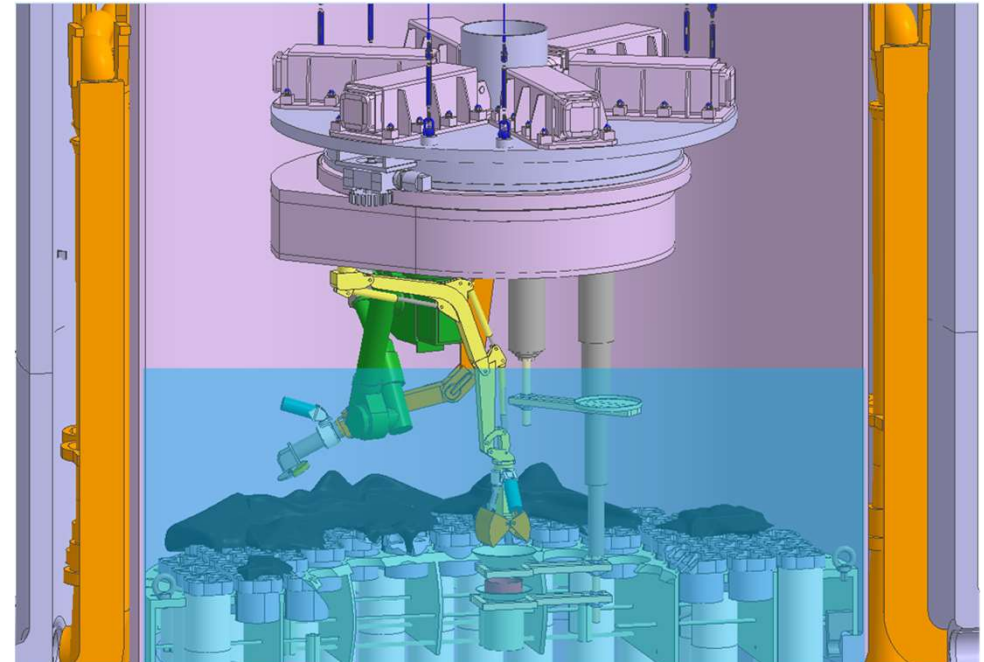


図2 水中加工の環境条件

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

(加工作業の例)レーザーガウジング加工

【加工試験結果】水中—水流の場合

- 加工速度 330g/min(最大)
- 切削粉の粒径分布 (表1)
1mm以上が、70%–80%と大部分を占める。

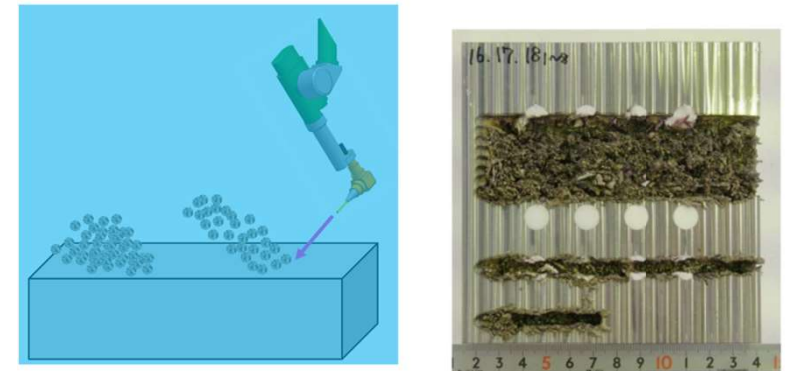
【臨界リスク評価】

- 臨界評価結果(図1)から、臨界量は40kg程度^{(*)3}であり、それだけの量に達するには2時間程度の加工時間を要する。
- 切削粉が水中で巻き上がっても、大部分は速やかに沈降し(速度40–80[cm/s])、臨界量に達することはない。
- 加工時に臨界となるリスクはほとんどないが、切削粉がまとまって蓄積しないように**注意**が必要

(*)1 燃料デブリ・炉内構造物取り出しの基盤技術開発 平成28年度最終報告書 IRID

(*)2 燃料デブリ臨界管理技術の開発 平成26年度研究報告書 IRID

(*)3 今後燃料デブリ性状の知見が得られれば、制限の緩和が期待される。



レーザーガウジング加工の様子(左図)と加工後の模擬試験体(右図)

表1 沈殿物の粒径分布(割合、%)(*)1

	気中—ガス	水中—ガス	水中—水流
250 μ m 以上 500 μ m 未満	13.0	12.5	3.9
500 μ m 以上 1mm 未満	14.2	20.4	11.8
1mm 以上 4mm 未満	64.7	63.6	83.1
4mm 以上	8.1	3.5	1.1

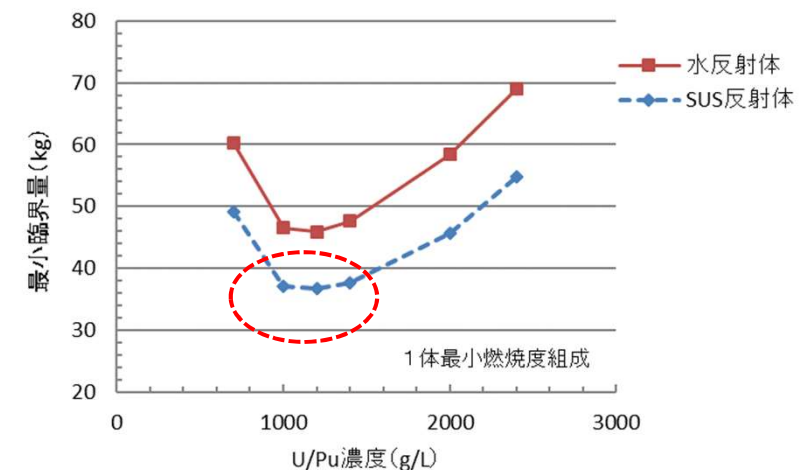


図1 燃料デブリ巻き上がり時の最小臨界量評価
(*)2)(*)3

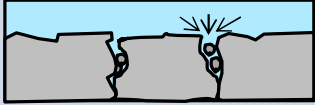
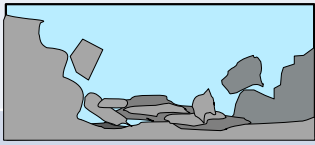
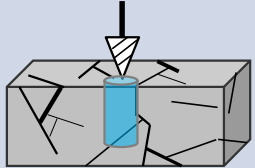
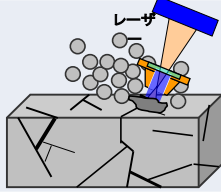
7. 実施内容

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

燃料デブリ加工方法と臨界評価の概要^(*1)

燃料デブリ加工方法	想定される 臨界シナリオ	事象のイメージ	臨界評価の概要
カッタ、ワイヤーソー、アブレイシブ・ウォーター・ジェット(AWJ)	燃料デブリに 亀裂 が多数生じて、水が浸入する		塊状燃料デブリに構造材が20wt%含まれている状態から、亀裂によって1vol%程度の体積変化が生じると、 0.1%Δk^(*2) 程度の反応度が印加される。
チゼル	砕かれて小片化した燃料デブリが水中に 崩落 する		塊状燃料デブリに構造材が20wt%含まれている状態から、崩落や破砕によって10vol%程度の体積変化が生じると、 1%Δk^(*2) 程度の反応度が印加される。
コアボーリング	穴あけ 箇所に水が浸入する		塊状燃料デブリに構造材が20wt%含まれている状態から、直径7cm、深さ1m程度の穴をあけると、0.5%Δk程度の反応度が印加される。コアボーリングの加工速度は1cm/分程度なので、 0.005%Δk/分^(*2) 程度の反応度が印加される。
レーザー	水中で切削された粒状の燃料デブリが巻き上がる		加工速度が遅く、巻き上がった燃料デブリは臨界量40kg ^(*2) に到達する前に沈降するため、臨界にならない。(前シートより)

(*1)平成27年度補正予算廃炉・汚染水対策事業費補助金 燃料デブリ臨界管理技術の開発 研究報告書、平成30年3月、IRID

(*2)今後燃料デブリ性状の知見が得られれば、制限の緩和が期待される。

7. 実施内容

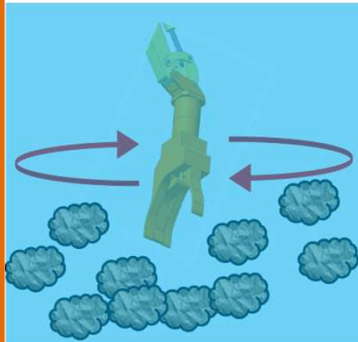
7.1 現場運用手順の開発

7.1.1 臨界近接監視の運用手順

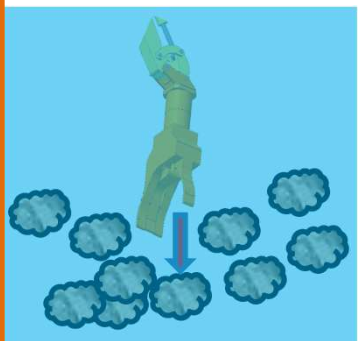
b. 手順の検討 ⑧水中加工での臨界リスクの整理

- 関連事業(*1)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

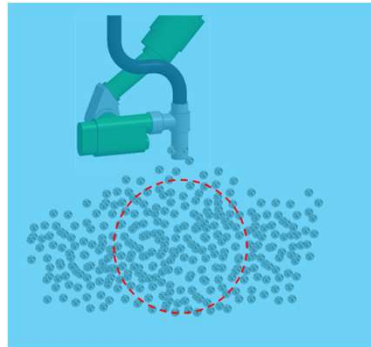


～200mmの大きさの燃料デブリ小片（収納缶に入るサイズ）を水中でつまみあげる作業自体に臨界リスクは**ない**。しかし、ロボットアームで燃料デブリ小片をかき回したり、崩す作業には**注意**が必要。



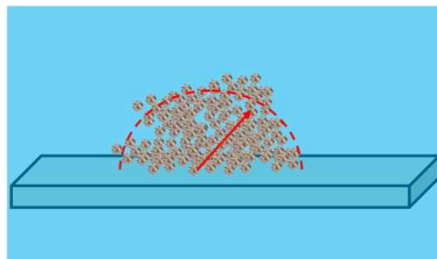
燃料デブリ小片を落下させて、堆積している燃料デブリ小片を崩落させると**注意**が必要。

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

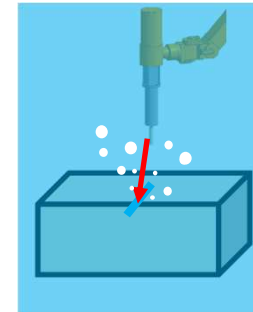


燃料デブリ細粉を水中で広い範囲で巻き上げる場合、**注意**が必要。（目安：直径46cm以上、重量71kg以上）(*2)

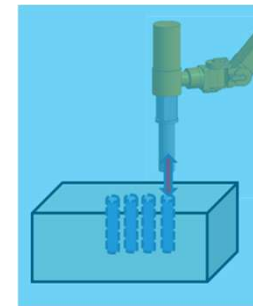
燃料デブリ細粉が水中で多量に堆積する場合、**注意**が必要。（目安：半径35cm以上、重量499kg以上）(*2)



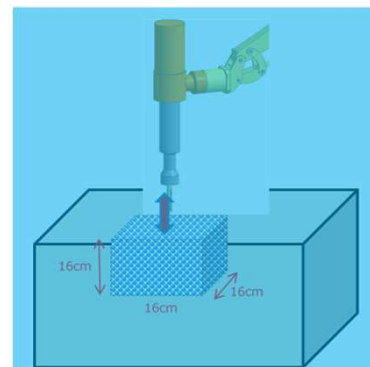
投入反応度が0.5%Δkを超える可能性がある加工



切断する際に、短い間隔（～数cm程度）(*2)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）(*2)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碎する際に、加工範囲が16×16×16cm(*2)を超えると、**臨界リスクあり**。

(*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) 今後燃料デブリ性状の知見が得られれば、制限の緩和が期待される。

7. 実施内容

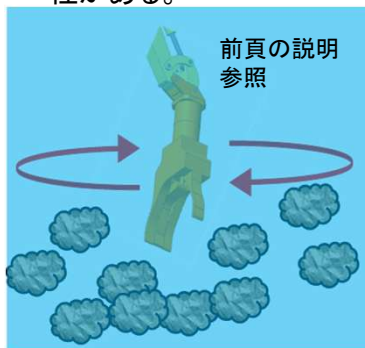
7.1 現場運用手順の開発

7.1.1 臨界近接監視の運用手順

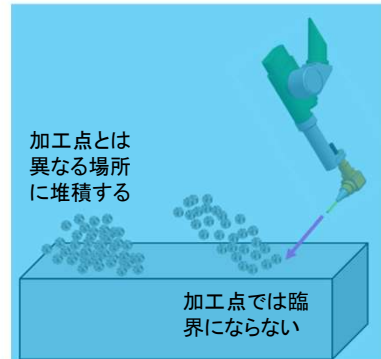
b. 手順の検討

⑧水中加工での臨界監視の必要性

- 加工方法毎の臨界監視の必要性を気中加工と水中加工の別に整理した。(ただし、臨界リスクは加工方法だけで決まるものではなく、燃料デブリ性状に大きく依存するため、監視の必要性「あり」が必ずしも臨界リスク「高い」とは限らない。)
- 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、加工点とは異なる場所に堆積するような、2次的作用について注意が必要となる。
- 「注意」の場合、万々に備えて臨界近接監視又は連続監視を実施することを検討するが、適切な加工手順を採用することで、加工範囲の制限や未臨界度測定を省略できる可能性がある。
- チゼル加工は瞬間的に燃料デブリの形状変化が生じるため、臨界監視の必要性「あり」とした。加工範囲の制限と未臨界度測定+臨界近接監視+連続監視を基本とするが、燃料デブリの状態が判明していれば未臨界度測定を省略できる可能性がある。



予期せぬ使い方の例



2次的作用の例

表 加工方法毎の臨界監視の必要性

分類	加工方法	特徴・概要(*)	臨界監視の必要性	
			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
	バケット	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		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

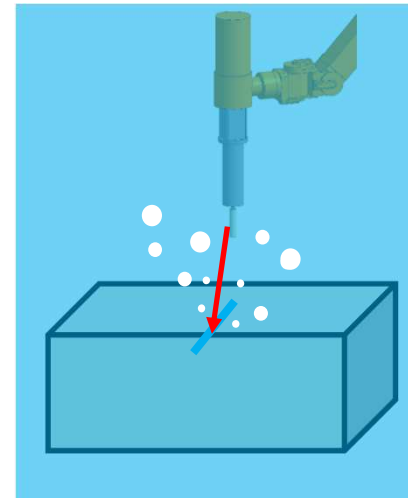
b. 手順の検討

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。^(*1)
- 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、 $\Delta k=0.016$ ^(*2)の反応度が加わり、燃料デブリから放出される中性子は1.5倍に増加する。(図)
- **加工後に中性子計数率を測定する。**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。
- 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。加工終了とほぼ同時に中性子計数率の上昇は止まるので(図)、運転員は時間の余裕を持って判断できる。

(*1) 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。

(*2) 今後燃料デブリ性状の知見が得られれば、制限の緩和が期待される。



【評価条件】

燃料デブリ組成：濃縮度4wt%ウラン^(*2)
 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。^(*1)
 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[%]

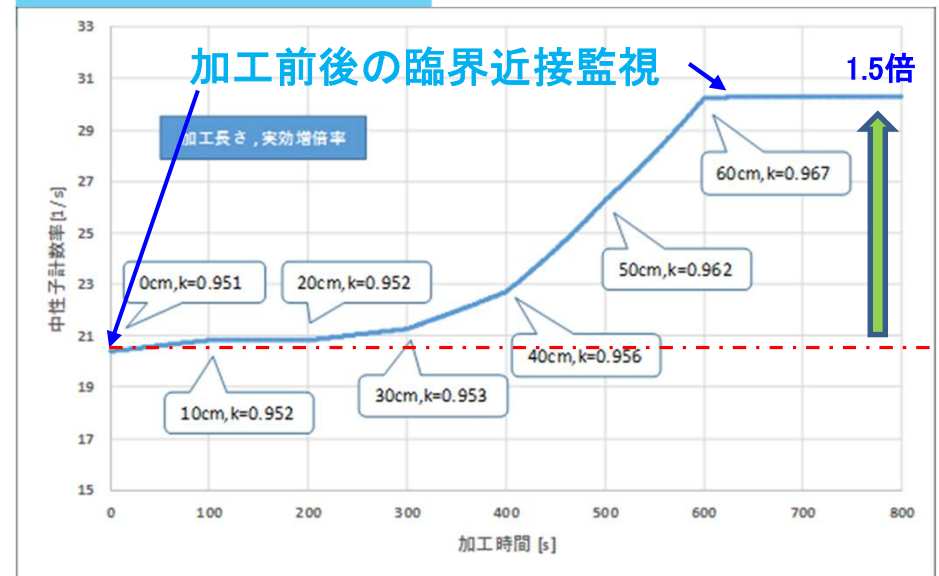


図 レーザー切断加工を想定した中性子応答のシミュレーション

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。

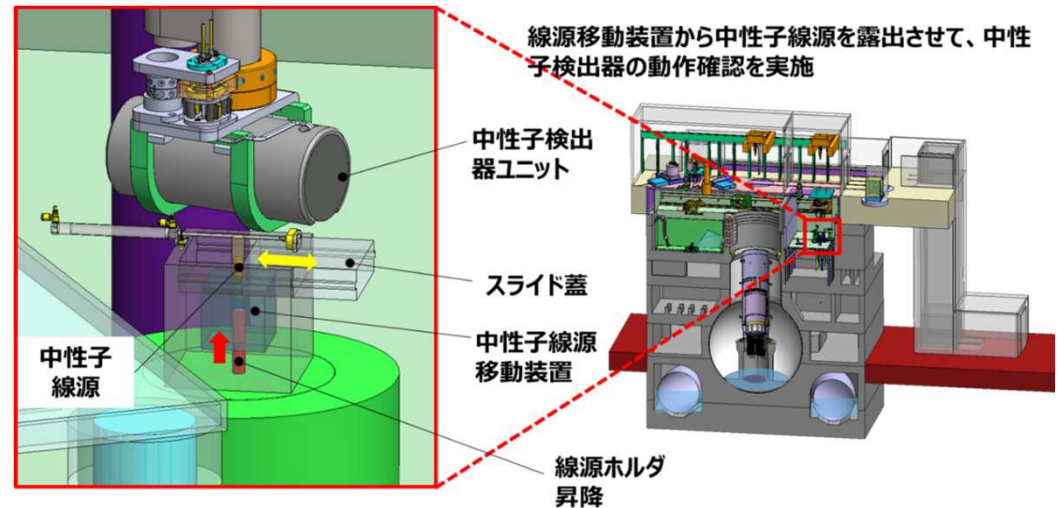


図 建屋内のメンテナンスエリア

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。 (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エンジニアリング段階での開発が必要。	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) 中性子線源自体も減衰するので交換が必要。
	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	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. まとめ

【成果】

- ✓ 燃料デブリ取り出し時の臨界近接監視について、中性子検出器による監視の範囲/測定手順/加工時の臨界リスク/システム保守、等の項目について現場運用のイメージを具体化して、燃料デブリ取り出し工法チームが取り出しシステムの設計やスループットの検討に活用するための情報を提供した。

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

【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(コロナ放電利用型、SiC半導体型、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 B-10コロナ放電利用型検出器の外観



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 前期PJ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)	B-10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)	B-10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)	B-10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)	コロナ放電利用型 SiC半導体型 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 (関連事業(*)で検討されているもの)
2	改良小型B-10 比例計数管	IRID/ Hitachi-GE	ガス 検出器	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)
3	B-10比例計数管 前記PJまでに試験実施済	CETD		
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コロナ放電利用型検出器	RosRAO		
6	He-3コロナ放電利用型検出器	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 (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半導体型検出器	IPL		
8	CMOS検出器	IRID/ Hitachi-GE		

今回の試験対象

7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

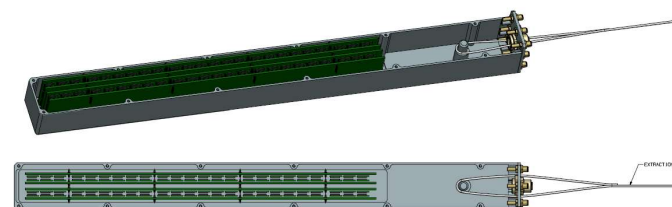
7.1.2 中性子検出器の未臨界度測定への適用性確認

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

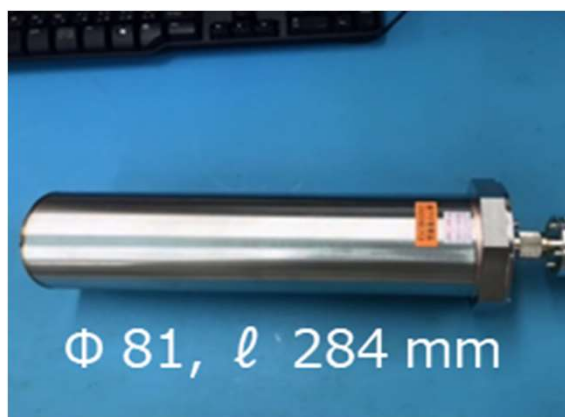


コロナ放電利用型 中性子検出器 (B-10/He-3)

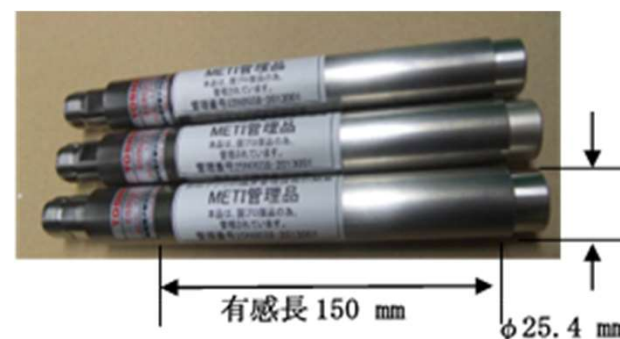


50 × 50 × 540 mm

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

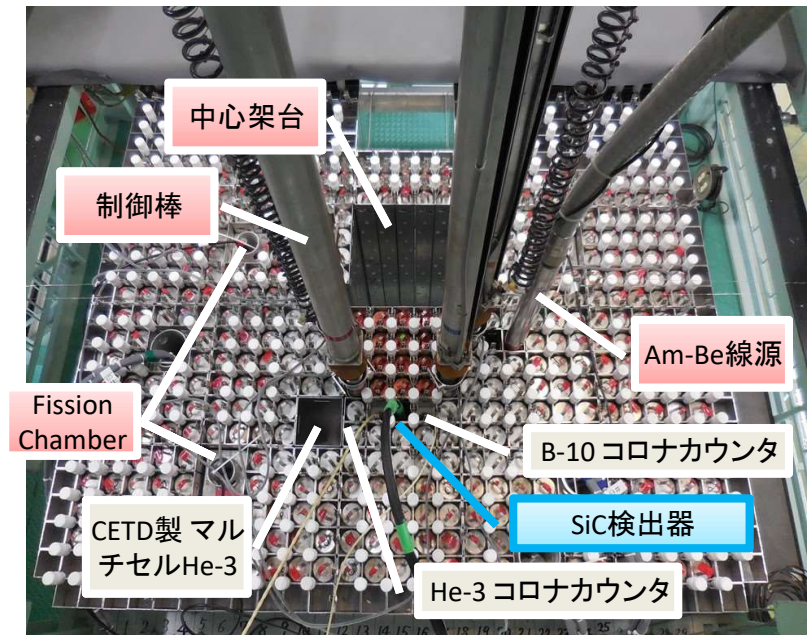
c. 要素試験

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、ファインマン 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

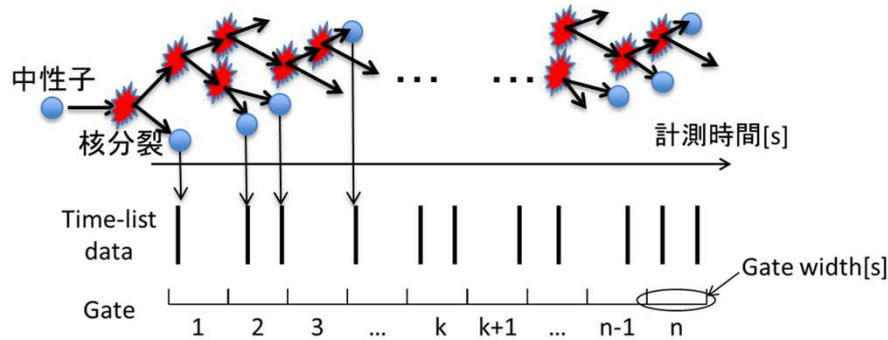
7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

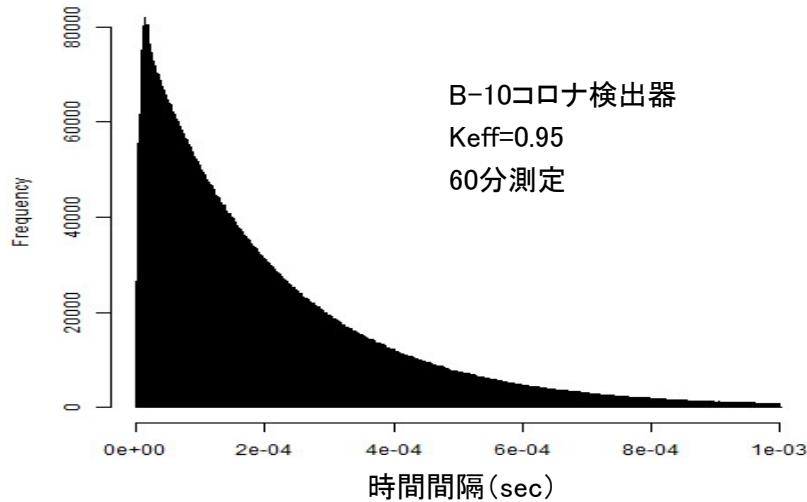
7.1.2 中性子検出器の未臨界度測定への適用性確認

c. 要素試験

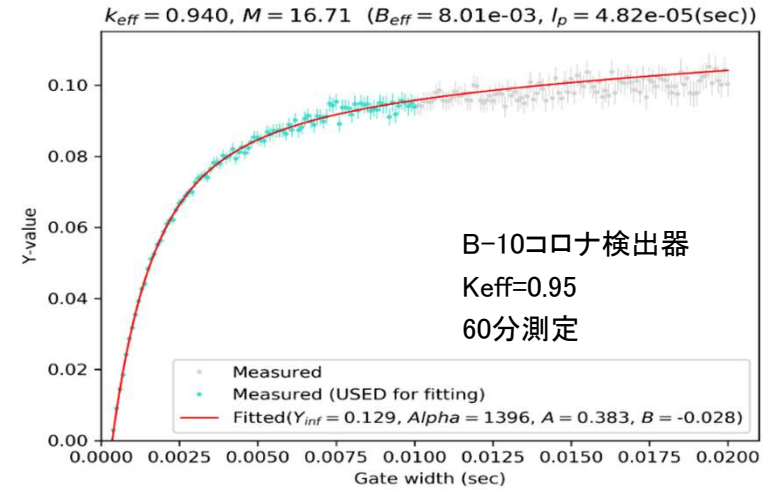
未臨界度測定(ファインマンα法)の評価の手順



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。

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

- α : 即発中性子減衰定数 (1/sec)
- β : 遅発中性子割合
- l : 即発中性子寿命 (sec)
- k_{eff} : 中性子増倍率
- ΔT : 中性子カウントのゲート時間幅 (sec)
- Y : 中性子カウントの分散対平均比

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

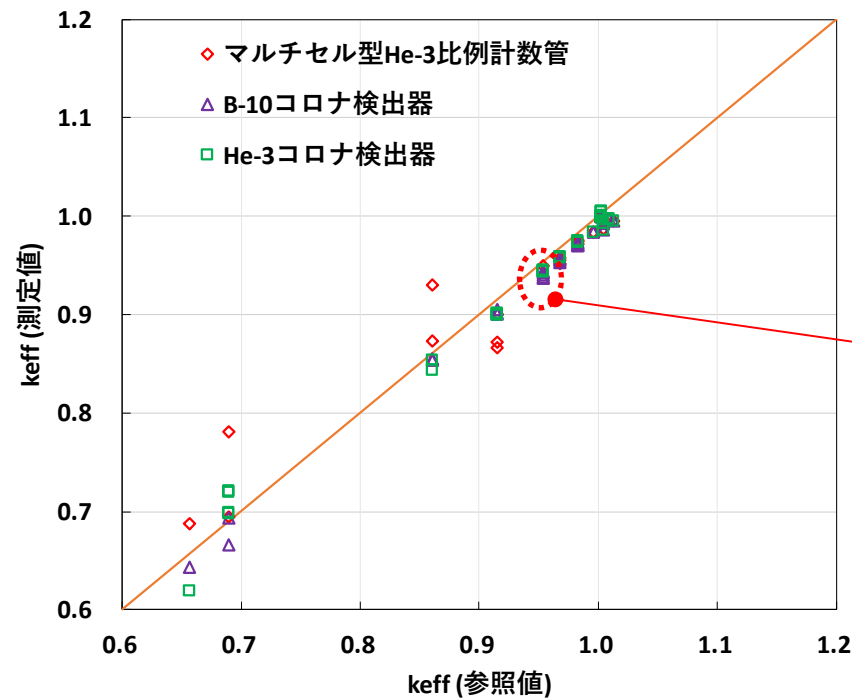
7.1 現場運用手順の開発

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(コロナ放電利用型、マルチセル型)

- コロナ放電利用型、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。



	B-10 比例計数 管	He-3 コロ ナ放電利 用型 検出器	B-10 コロ ナ放電利 用型 検出器	マルチセ ル型He-3 比例計数 管
参照値か 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

図 測定値と参照値の差(コロナ放電利用型、マルチセル型)

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

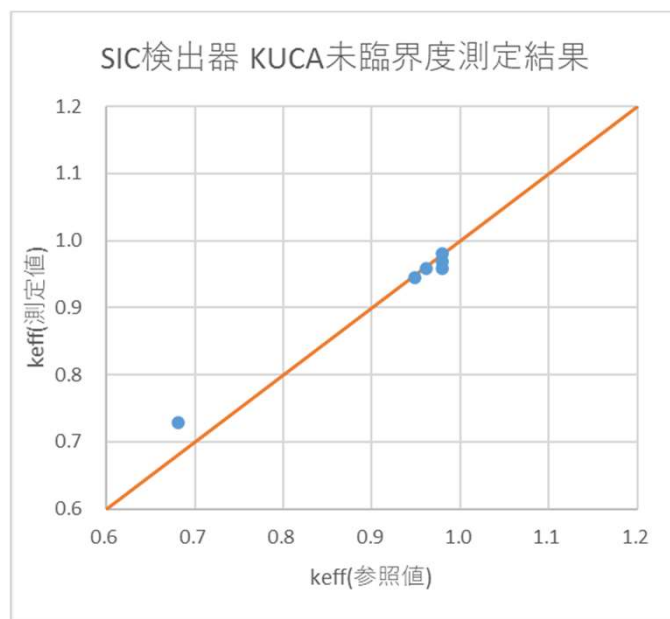
7.1 現場運用手順の開発

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%dk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では、参照値との差が4.8%dk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(%dk)	備考
Case1-1 ($k_{eff}=0.95$)	0.948	0.944	-0.4	
Case1-2 ($k_{eff}=0.97$)	0.962	0.958	-0.4	
Case1-3 ($k_{eff}=0.98$)	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 ($k_{eff}=0.70$)	0.681	0.729	4.8	

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

耐ガンマ線試験の概要

【試験目的】

- 未臨界度測定の候補となる中性子検出器について、どのくらいの強度のガンマ線量率まで中性子を弁別できるか、中性子弁別可能なガンマ線量率の上限を確認する。
- 高ガンマ線環境において、ファインマン α 法による測定が可能か、確認する。

【試験場所】

名古屋大学 Co-60照射室

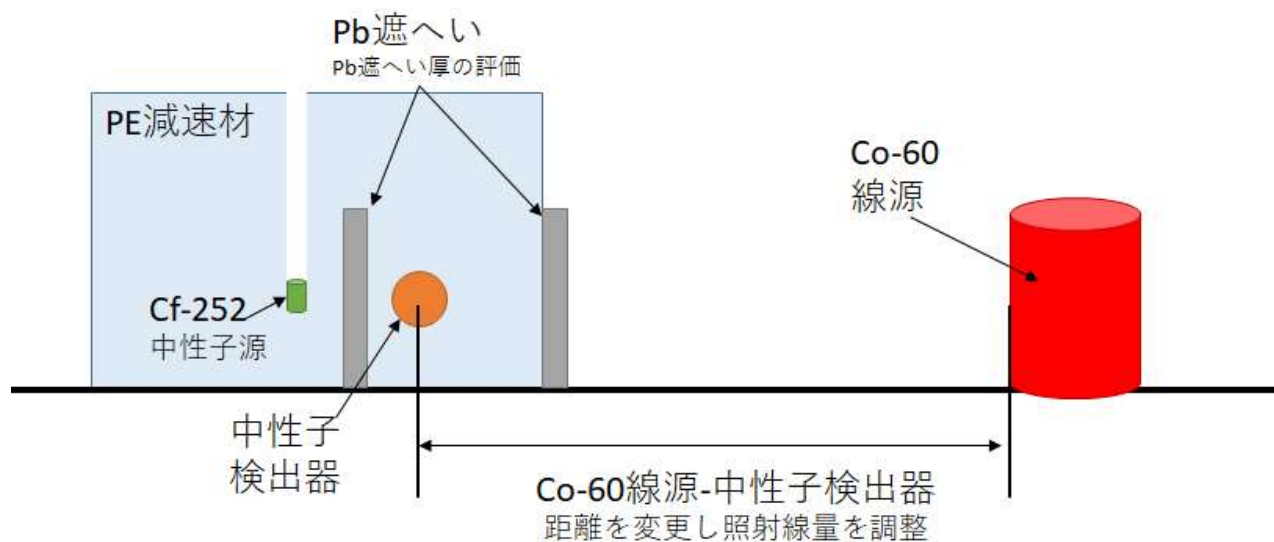
【試験対象】

- B-10コロナ放電利用型検出器
- He-3コロナ放電利用型検出器
- マルチセル型He-3比例計数管
- B-10比例計数管

他の中性子検出器については別途、ベンダー試験等で評価済



実際の試験の様子



試験体系

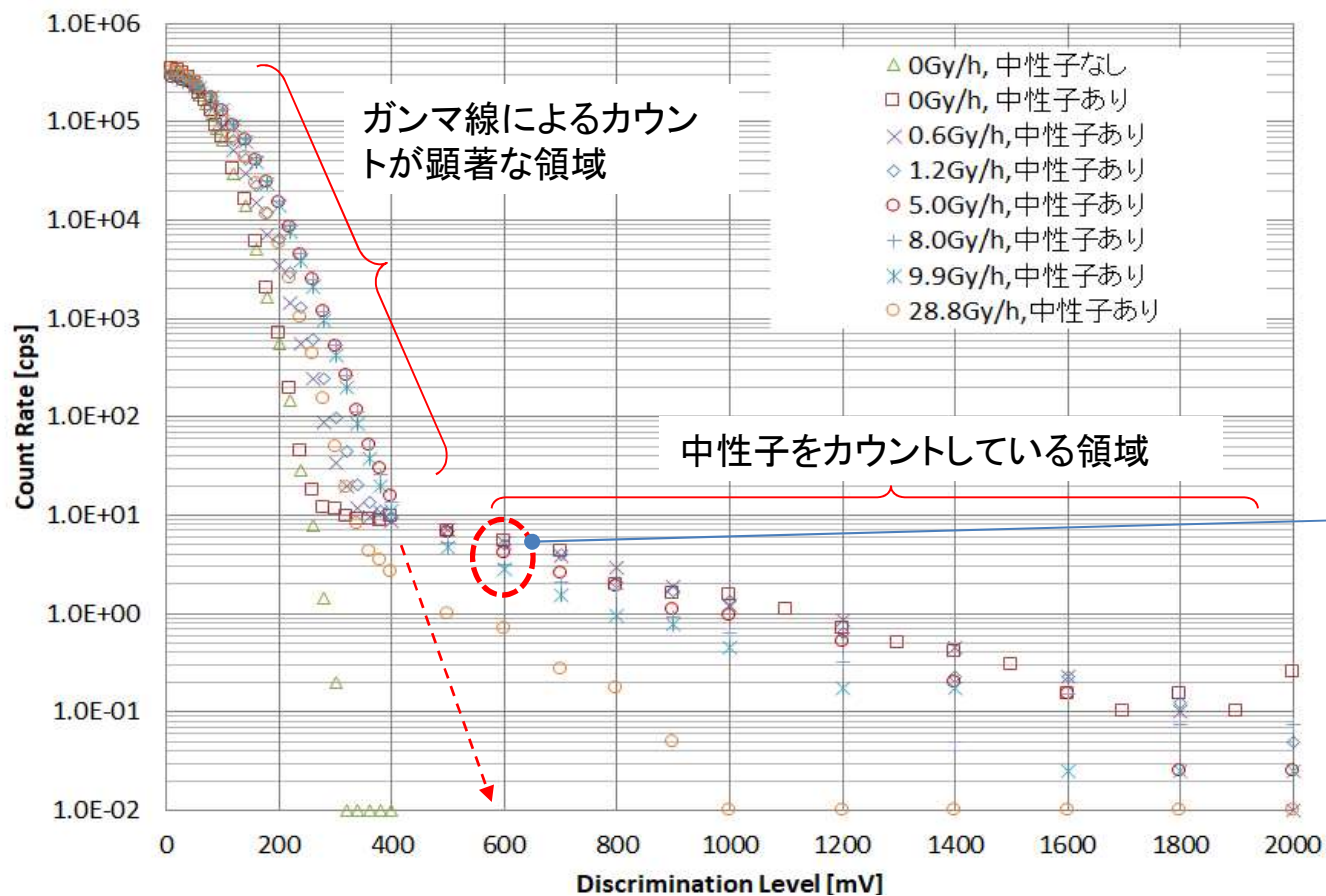
7. 実施内容

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

耐ガンマ線試験結果の例 (B-10コロナ放電利用型検出器の波高弁別特性)



測定回路のパルス波高弁別レベル

- 左図の測定結果より、ガンマ線と中性子を分離可能なディスクリレベルとして600mVを設定。
- ガンマ線による中性子検出感度の低下は、10Gy/hで47%であった。
- この検出器感度でフィンマン α 測定できるか、確認した。(次頁)

7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

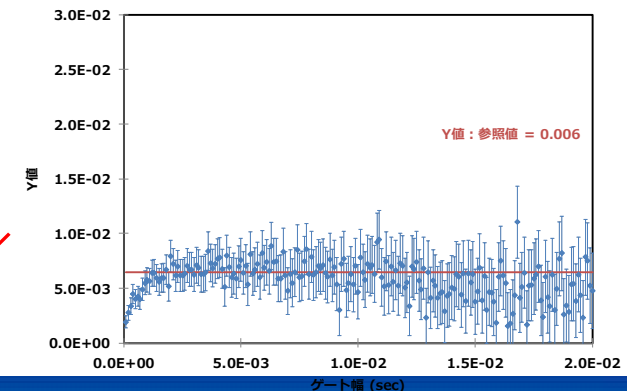
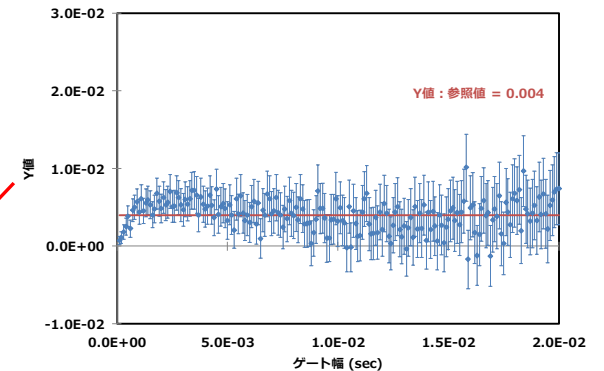
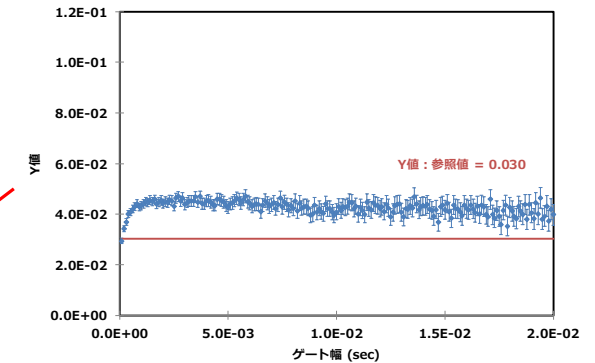
7.1.2 中性子検出器の未臨界度測定への適用性確認

c. 要素試験

耐ガンマ線試験結果

- Y曲線が観測されたら測定可能と判断
- He-3コロナ型は0.5Gy/hまで、B-10コロナ型は10Gy/hまで遮蔽なしで測定可能
- 従来のB-10比例計数管は30Gy/hまで測定できた
- マルチセル型He-3比例計数管は動作不安定により測定不可

γ線吸収線量率 [Gy/h]	マルチセル型He-3比例計数管	He-3コロナ放電利用型検出器	B-10コロナ放電利用型検出器	B-10比例計数管
0	—(注1) (182064)	○ (63948)	○ (10599)	
0.5		○ (60396)	○ (33043)	
1		× (1697)	○ (21944)	
5	—(注1) (9164)		○ (228973)	○ (13634)
10			△ (2604)	○ (11876)
30	—(注1) (74656)			○ (16792)



7. 実施内容

No.41

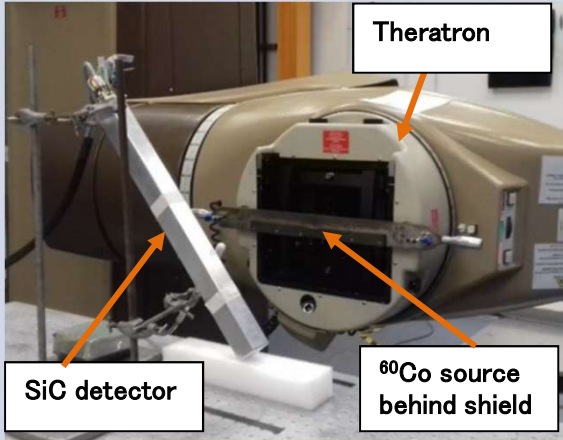
7.1 現場運用手順の開発

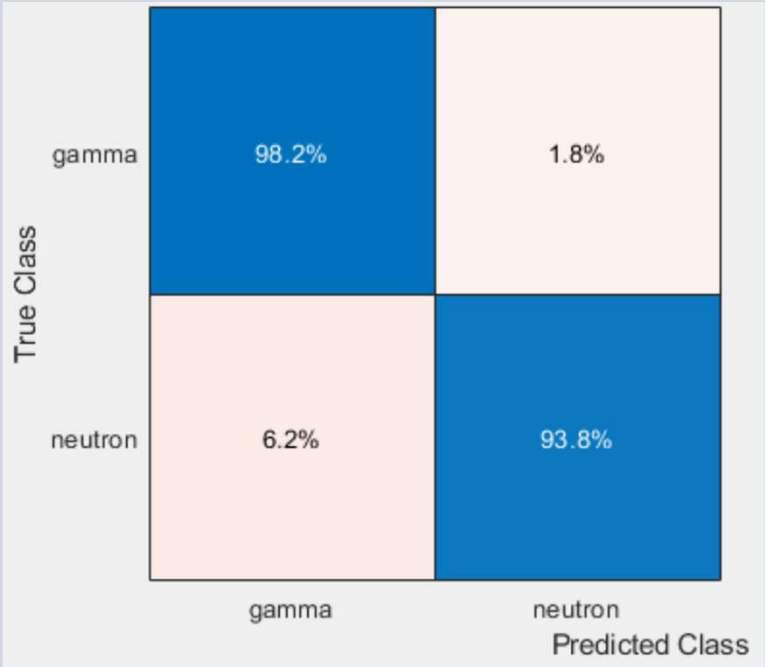
7.1.2 中性子検出器の未臨界度測定への適用性確認

c. 要素試験

SiC半導体型検出器 耐ガンマ線性能確認試験(1/2)

試験内容	確認内容・判定基準	結果
<p>① γ線除去の確認</p> <p>$1.5 \times 10^{13} \text{Bq}$の$^{60}\text{Co}$を照射できる設備を有するNPL (National Physical Laboratory)にて実施。(下図参照) 100Gy/hまでの照射におけるデータを採取し、中性子とγ線に起因するノイズのパルス形状を評価した。</p>	<p>γ線と中性子の弁別が可能なパルス識別設定ができること</p>	<p>パルス高さ、幅、立ち上がり時間などのパラメータにより、γ線と中性子のパルス識別が可能であることを確認した。 その結果、γ線を中性子と誤認識する確率は、2%程度であり、現場での使用には支障がないと考えられる。</p>





True Class	Predicted Class	
	gamma	neutron
gamma	98.2%	1.8%
neutron	6.2%	93.8%

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

SiC半導体型検出器 耐ガンマ線性能確認試験(2/2)

試験内容	確認内容・判定基準	結果
<p>② γ線積算線量の影響</p> <p>6540Gy/hまでの^{60}Coを照射できる設備を有するDCF (Dalton Cumbria Facility of Univ. of Manchester)にて実施。</p> <p>センサーチップとプリアンプを含むテストボードへの照射を実施。(下図チャンバー内に設置)</p> <p>施設利用可能範囲での積算線量を確認する。</p>	照射後に問題なく動作することを確認する。	<p>合計63kGyの積算線量照射後も正常に動作することを確認した。(α線源による波形確認、計数率の確認を実施)</p> <p>照射後でも、漏れ電流が有意に増加する傾向は確認できず、その増加を1MGyまで外挿して考えても十分問題なく動作できると判断できた。</p> <p>DCFにおけるγ線照射試験結果</p>



Test No	Time	Dose (Gy/hr)	Duration (m)	Test Dose (Gy)	Accumulated Dose (Gy)
1	12:35	60	30	30	30
2	13:07	114	30	57	87
3	13:20	27	30	13.5	100.5
4	13:55	275.4	30	137.7	238.2
5	15:16	275.4	30	137.7	375.9
6a-f	15:51	275.4	60	275.4	651.3
7	17:00	275.4	990	4544.1	5195.4
8	9:30	275.4	30	137.7	5333.1
11a-c	12:05	275.4	30	137.7	5470.8
12	12:50	571.8	20	190.6	5661.4
13	13:27	1386	20	462	6123.4
14	14:35	2796	20	928	7051.4
15	15:28	6540	20	2180	9231.4
16	17:00	3270	990	5395.5	63226.4
17	11:25	120	30	60	63286.4
18	12:55	120	30	60	63346.4

Time: 時刻、Dose: 照射時線量率、
Duration: 照射時間、
Test Dose: 各Test毎の積算線量
Accumulated Dose: 総積算線量

注意)この試験は、同じSiC半導体型検出器を用いたPCV詳細調査用検出器で行われた確認試験である。

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

d. まとめ

性能評価(1/3)

○:適合、△:条件付きで適合、×:不適

分類	項目	要求仕様	核分裂 電離箱	改良 B-10	B-10 比例計数 管	マルチセル He-3 比例計数管	B-10 コロナ	He-3 コロナ	SiC 検出器	CMOS 検出器
現場環境への適合性	雰囲気環境	水中もしくは湿度100%	○ IP68*1	○ IP68*1	○ 水封ケースで担保	○ 水封ケースで担保	○ IP68*1	○ IP68*1	○ IP68*1	○ IP68*1
	ガンマ線線量率(平均値)	10 Gy/h	○ 1×10 ⁴ Gy/h*2	○ 650 Gy/h	○ 30 Gy/h*3	×*3 (30 Gy/h*4)	○ 10 Gy/h*3 (700 Gy/h*5)	△ 0.5 Gy/h*3 遮蔽で対応 (2.5cm厚)	○ 100 Gy/h	○ 1000 Gy/h
	ガンマ線線量率(最大値)	100 Gy/h	○ 同上	○ 同上	△ 遮蔽で対応 (1cm厚)	×*3	△ 遮蔽で対応 (2cm厚)	△ 遮蔽で対応 (4.5cm厚)	○ 同上	○ 同上
	積算線量(使用期間)	0.6MGy以上 (8か月間)	○ 1000 MGy	○ >1MGy (プリアンプ 込み)*6	○ 1MGy*7	△*8 0.5 MGy	○ 0.64 MGy*9	データなし B-10コロナと 同等と推定	○ 1 MGy *10	× 0.013 MGy
	雰囲気温度	50℃	○ 300℃	○ 100℃	○ 50℃	○ 50℃	○ 50℃	○ 50℃	○ 50℃	△ 40℃

*)注記は別ページ参照

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

d. まとめ

性能評価(2/3)

○:適合、△:条件付きで適合、×:不適

分類	項目	要求仕様	核分裂電離箱	改良B-10	B-10 比例計数管	マルチセル He-3 比例計数管	B-10 コロナ	He-3 コロナ	SiC 検出器	CMOS 検出器
未臨界度測定への適合性	熱中性子感度*1	10 cps/nv	× (2.5本)*12 (5265cm3)*11	○ (50本) (192cm3)*11	○ (6本) (730cm3)*11	○ (0.5本) (642cm3)*11	○ (6本) (693cm3)*11	○ (1本) (120cm3)*11	○ (-)*13	× (1250体)*11 (15708cm3)
	(検出器単体の熱中性子感度)		4 cps/nv*14 @100Gy/h	0.2 cps/nv @100Gy/h	1.7 cps/nv @0Gy/h 0.8 cps/nv @28.8Gy/h*3	21 cps/nv @0Gy/h*4 0.2 cps/nv @0Gy/h*3	1.9 cps/nv @0 Gy/h 0.6 cps/nv @8 Gy/h *3	11 cps/nv @0 Gy/h 7.2 cps/nv @0.6 Gy/h*3	0.05cps/nv /チップ° @70Gy/h*13	0.008 cps/nv @100Gy/h
	(検出器単体の大きさ)		Φ 80mm × 419mm*14	Φ 7mm × 100mm	Φ 25.4mm × 245mm	Φ 76mm × 283mm	Φ 25.4mm × 260mm	Φ 25.4mm × 260mm	—*13	Φ 20mm × 40mm
	パルス幅(検出器)	2000 nsec 以下	○	○ 1000 nsec (プリアンプ方式依存)	○ 400 nsec 以下	○ 800 nsec 以下	○ 2000 nsec	○ 1800 nsec	○*15 4000 nsec	-
	識別可能な隣接パルス間隔(回路系)	100 nsec 以下	○	○ 1000 nsec (プリアンプ方式依存)	○ 100 nsec	○ 100 nsec	○ 100 nsec	○ 100 nsec	○ 100 nsec	-
	パルス出力遅延時間のバラつき(回路系)	10 ns 以下	○	○	○ 10 nsec	○ 10 nsec	○ 10 nsec	○ 10 nsec	○ 10 nsec	-

*)注記は別ページ参照

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

d. まとめ

性能評価(3/3)

○:適合、△:条件付きで適合、×:不適

分類	項目	要求仕様	核分裂 電離箱	改良 B-10	B-10 比例計 数管	マルチセル He-3 比例計数管	B-10 コロナ	He-3 コロナ	SiC 検出器	CMOS 検出器
遠隔 取扱 いへ の適 合性	ユニッ トの 大き さ	Φ700 mm × L1000 mm 未満	○ 5265 *16 cm3	○ 192 *16 cm3	○ 730 *16 cm3	○ 642 *16 cm3	○ 693 *16 cm3	○ 120 *16 cm3	○*17	○ 15708 *16 cm3
	ユニッ トの重 量	50~100 kg	○ 遮蔽不要	○ 遮蔽不要	△ 遮蔽1cm	—	△ 遮蔽2cm	× 遮蔽4.5cm	○ 遮蔽不要 *18	—
総合評価			適さない (熱中性子 感度が低 いため)	1F現場で の未臨界 度測定に 適している	1F現場で の未臨界 度測定に 適してい る	現状では適さ ないと評価 (動作不安定 のため)	1F現場で の未臨界 度測定に 適している	適さない (遮蔽厚さ が大き すぎるため)	1F現場で の未臨界 度測定に 適している	適さない (熱中性子 感度が低 く積算線 量が低 いため)

*)注記は別ページ参照

○、△のみで×が無ければ「適している」と評価

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

d. まとめ

性能評価 注記一覧

- *1 JIS/IEC規格で防水性能をあらわす指標。IP68は水中での継続使用が可能。
- *2 MIRION社CFUG08
- *3 耐ガンマ線試験の実測値
- *4 ベンダー評価
- *5 ベンダー評価 Digital Signal Processing モード 燃料デブリのガンマ線に対して未検証
- *6 ^{60}Co 線源を用いプリアンプ位置の線量率を 2.3kGy/h として照射試験を実施した。積算線量 1MGy において計測可能との結果を得た。
平成30年度補正予算「燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模のさらなる拡大に向けた技術の開発」最終報告会 資料No.840 参照。
- *7 プリアンプは遮蔽体付きでPCV内に設置する方式のため、センサのみの評価値である。同一タイプの型式仕様に基づいた値であり、当該試作品での照射は未実施。
- *8 プリアンプは遮蔽体付きでPCV内に設置する方式のため、センサのみの評価値である。同一タイプの型式仕様に基づいた値であり、当該試作品での照射は未実施。
- *9 プリアンプは遮蔽体無しでPCV外に設置する方式のため、センサのみの評価値である。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）」において、同一タイプ試作品の照射試験結果に基づいた値であり、当該試作品での照射は未実施。
- *10 ベンダー評価(工場検査の結果から評価)。 6540Gy/h までの ^{60}Co を照射設備で、センサーチップとプリアンプを含むテストボードへの照射を実施（追加の遮蔽は施さず）。合計 63kGy の積算線量照射後の挙動変化から 1MGy までの使用可能性を確認したもの。
- *11 検出器ユニットに組み上げた際に達成できる感度を比較するため、 10cps/nv を得る検出器の本数分の体積を記載。
- *12 サイズアップには核物質規制上の制約が生じる可能性あり
- *13 複数のセンサーチップで検出器を構成するが、チップ1個当たりの感度は構成によって変化する。ここではKUCA試験に使用した検出器の典型的な値を記載している。 10cps/nv を得るための遮蔽、減速体などを含んだ全ユニット体積は 4000cm^3 程度となる見込みである。
- *14 MIRION社CFUG08
- *15 複数検出器が独立で測定を行う構成であるとともに、パルス波形分析により重畳したパルスを分離可能であるので、パルス幅の大きさは数え落としなどの悪影響を及ぼさない
- *16 遮蔽厚さと、気中の場合は減速材ポリエチレンの大きさが加わるが、それを考慮しても要求仕様を満足すると評価
- *17 10cps/nv を達成するためには、遮蔽や減速体などを含んだ、ユニット全体の体積は、 4000cm^3 程度となる見通し
- *18 プリアンプ部分などには必要に応じて遮蔽を行うが、それを考慮してもユニット重量は 20kg 未満となる見通し

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

d. まとめ

【成果】

- ✓ 3種類の新型中性子検出器(コロナ放電利用型、SiC半導体型、マルチセルHe-3型)について、KUCAにて未臨界度測定試験を実施して、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。
- ✓ コロナ放電利用型、マルチセルHe-3型検出器についてガンマ線環境下の中性子測定試験を行い、中性子弁別可能なガンマ線量率の上限を確認した。また、高ガンマ線環境において、ファインマン α 法による測定が可能であることを確認した。
- ✓ 1F燃料デブリ取り出しの現場で未臨界度測定を行うための中性子検出器候補について、現場環境への適合性、未臨界度測定への適合性、遠隔取扱いへの適合性、の観点から試験評価を行い、以下を選定した。
 - B-10比例計数管(従来型/改良小型)
 - B-10コロナ放電利用型
 - SiC半導体型

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)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、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が取り出しシステムの設計やスループットの検討に活用するための情報を提供する。

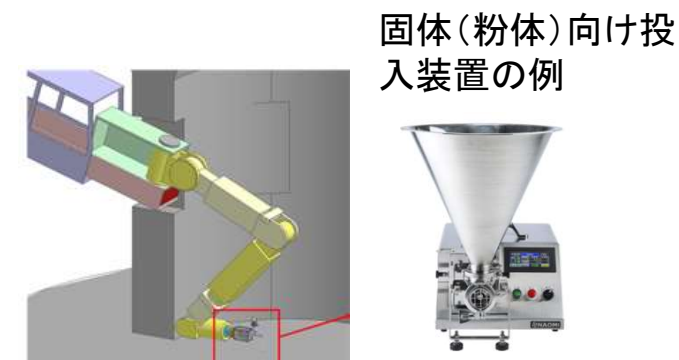
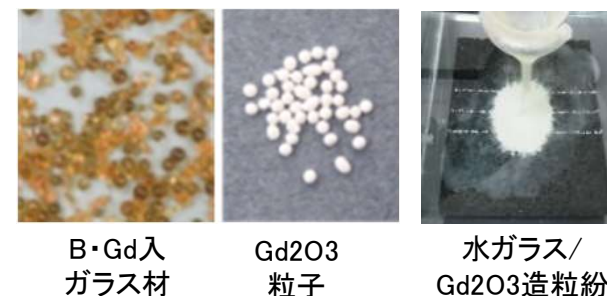


図1 燃料デブリへの吸収材投入のイメージ

(*)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。

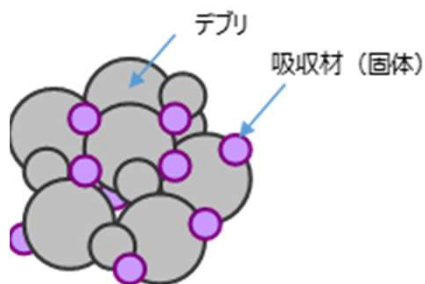


図1 小石状の燃料デブリに固体タイプの吸収材を使用

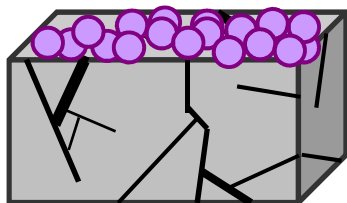


図2 岩盤状の燃料デブリに固体タイプの吸収材を使用



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

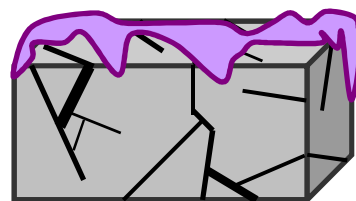


図4 岩盤状の燃料デブリに液体→固化タイプの吸収材を使用

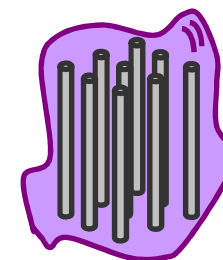


図5 棒状の燃料デブリに液体→固化タイプの吸収材を使用



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

吸収材と燃料デブリが混合する効果

- ・加工によって燃料デブリと吸収材が混合する場合の吸収材の効果を解析評価した。
- ・取り出し領域は、加工によって燃料デブリ(UO₂)が粒となり、隙間に水が浸入して臨界になる条件とした。
- ・中性子増倍率が最大となるのは、燃料デブリの体積占有率が20vol%で水が80vol%の条件である。(図1)
- ・吸収材(Gd₂O₃;粒)を混合するとわずか3vol%で未臨界になる(図2)。
- ・吸収材の粒径は1cmよりも1mmの方が有効であることが示された。

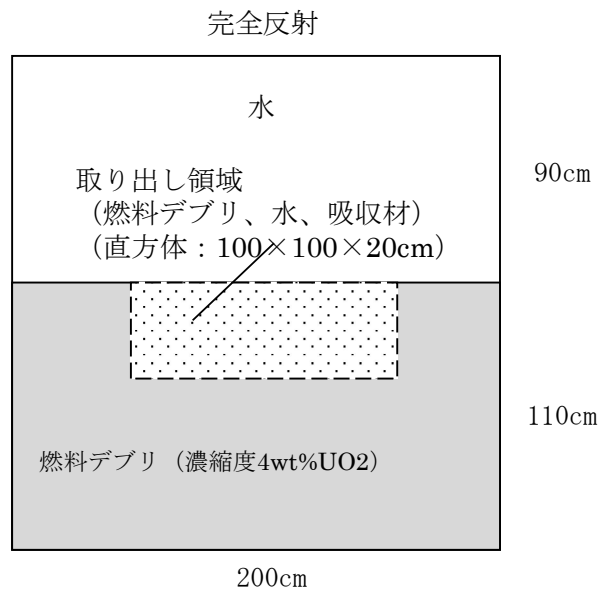


図1 解析モデル

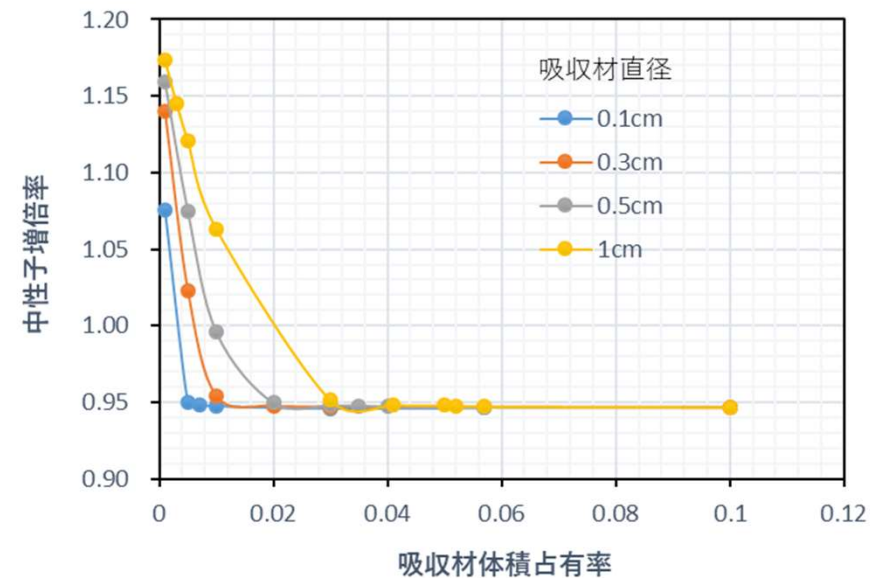


図2 解析結果(*1)

(*1) 今後デブリ性状の知見が得られれば、制限の緩和が期待される。

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研究報告書より

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

吸収材を燃料デブリ上に配置する効果

- ・20cm幅のリング状の吸収体を仮定して、取り出し領域を拡大する効果が得られるか、解析評価した。
- ・吸収材を燃料デブリ表面に回収可能な形で配置した場合、反応度低減効果は高々2% Δk 程度であり、取り出し領域を2cm拡大できるものの(一辺16 \rightarrow 18cm)、効果は小さい。

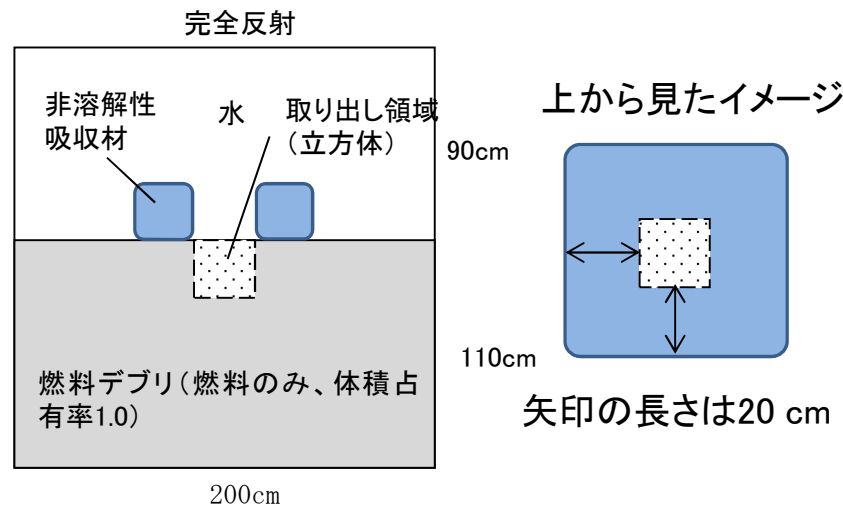


図1 解析モデル

表1 添加反応度を0.1% Δk に制限するための取り出し領域の大きさ

取り出し領域の添加反応度	吸収材なし	回収可能な吸収材	
		Gd ₂ O ₃ 粒子	水ガラス (Gd)
取り出し領域1辺の長さ	16 cm ^(*1)	18 cm ^(*1)	18 cm ^(*1)

(*1) 今後燃料デブリ性状の知見が得られれば、制限の緩和が期待される。

平成29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工法・システムの高度化(臨界管理方法の確立に関する技術開発)より

7. 実施内容

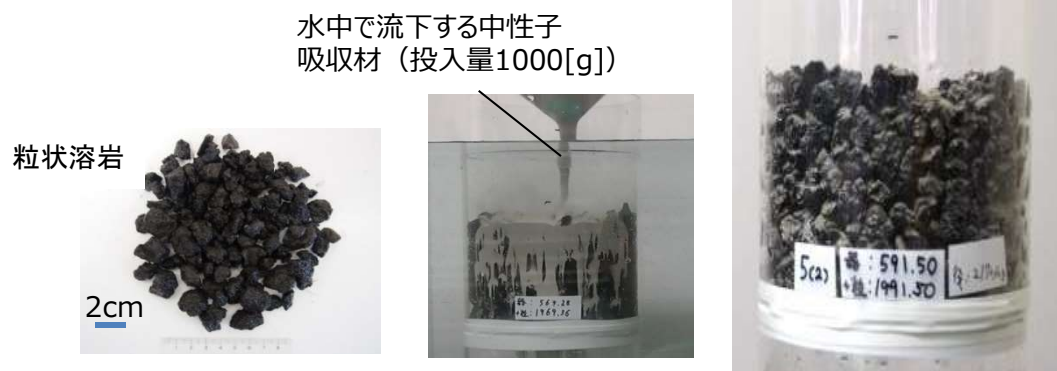
7.1 現場運用手順の開発

7.1.3 中性子吸収材の運用手順

a. 前提条件の整理

燃料デブリの隙間への吸収材の侵入

- ・燃料デブリを模擬した試験体(粒状溶岩;直径数cm程度)に固化体タイプ(水ガラス/Gd₂O₃造粒紛材)の吸収材を滴下して、吸収材が燃料デブリの隙間に奥深く侵入して付着することを確認した。
- ・固体タイプ(粒状)の吸収材については、粒径が1mm以下であり、比重は3~4で水よりも十分大きいいため、1mm以上の隙間に侵入すると考えられる。



粒状溶岩に付着した中性子吸収材の重量 測定結果

粘度 [mPa·s]	投入量[g]	試験回数	重量増 [g]	重量増(平均)[g]
2000	1000	1	109.2	107.3
		2	105.4	
	100	1	19.5	21.5
		2	23.4	

図1 粒状溶岩への付着試験の様子

平成27年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金」(燃料デブリ臨界管理技術の開発)より

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



(b) 試験前後外観(上面)

(*1) 今後燃料デブリ性状の知見が得られれば、制限の緩和が期待される。

燃料デブリと吸収材の加工による混合

- ・燃料デブリを模擬した試験体(MCCI模擬)に固体タイプ吸収材を散布した状態で、水中チゼル加工する試験を実施。
- ・破碎後に表層の吸収材を除いて、燃料デブリ破砕片の領域に吸収材が混入していることを確認した。

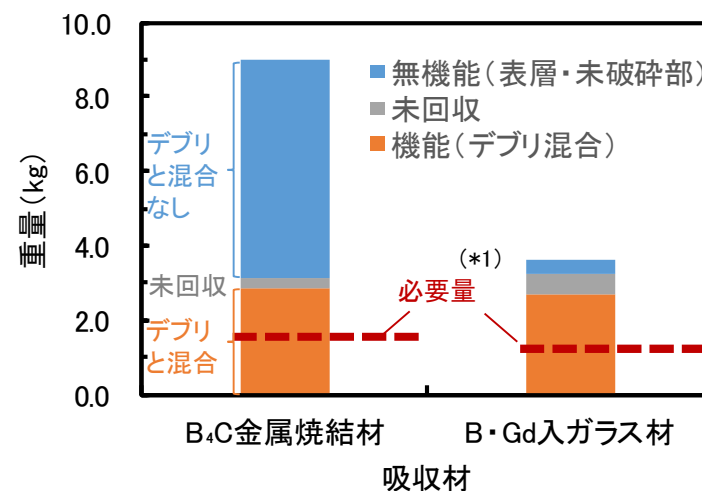


図1 吸収材の混入量と必要量

平成29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工法・システムの高度化(臨界管理方法の確立に関する技術開発)より

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 (PLAN-A/B) ----- -上アクセス一体搬出工法 - -

①吸収材使用の判断、レベル1への復帰手順(→No.55)

②吸収材の供給装置の仕様(→No.56~57)

③吸収材の運用プロセス(→No.58)

④吸収材の搬入出のプロセス(→No.59)

⑤固化型吸収材の硬化時間(→No.60)

⑥吸収材の事前散布の有効性評価(→No.61)

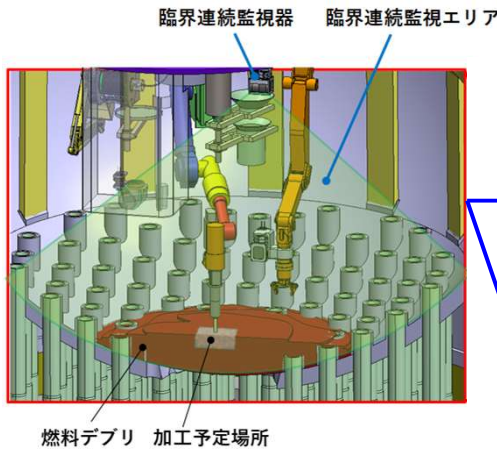
7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

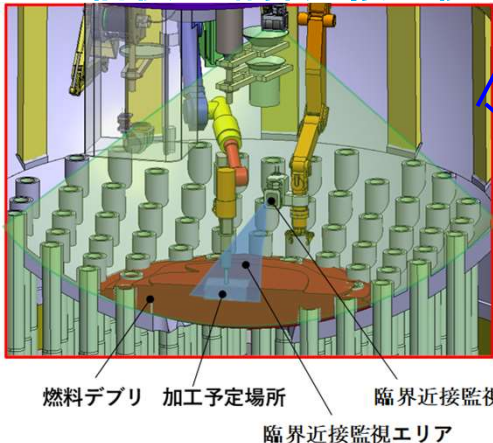
7.1.3 中性子吸収材の運用手順

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

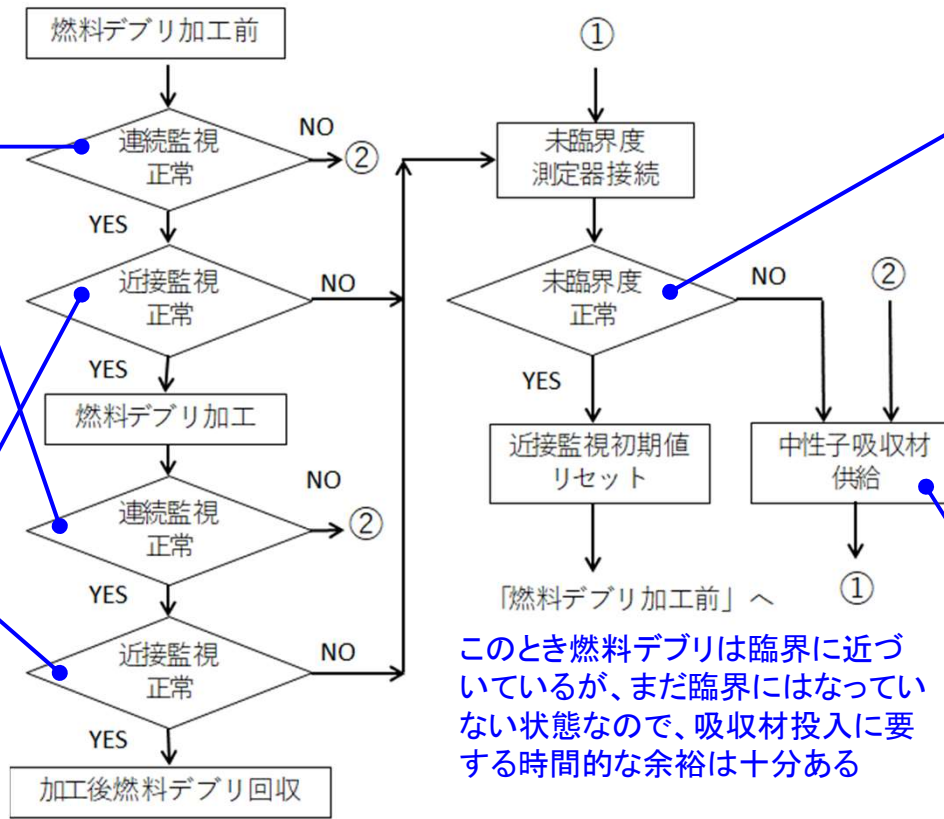
加工中の中性子束連続監視



加工前後の臨界近接監視



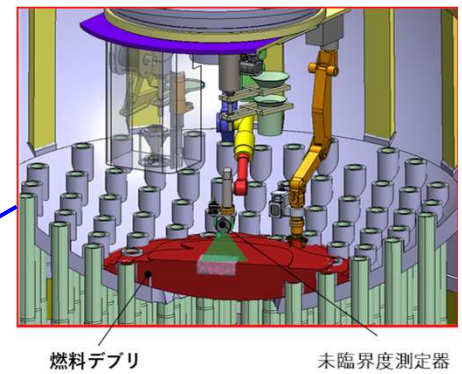
- 吸収材使用の判断と、レベル1への復帰の手順を整理した



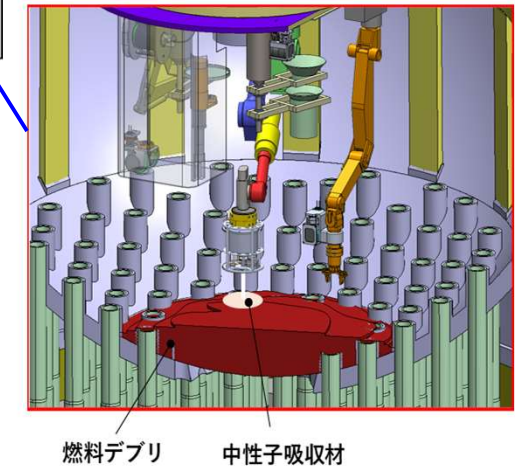
このとき燃料デブリは臨界に近づいているが、まだ臨界にはなっていない状態なので、吸収材投入に要する時間的な余裕は十分ある

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。

未臨界度測定



中性子吸収材投入



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(供給機構の簡素化)

- 関連事業^(*1)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)
- 供給装置は安全系とは異なるが、燃料デブリを未臨界に維持するためのものであるため、燃料デブリ取り出し装置と同等の高い信頼性が求められる。

表 吸収材の必要量

非溶解性中性子吸収材	吸収材重量 ^{(*2)(*3)} (kg/日)	吸収材容量 ^{(*2)(*3)} (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

- (*2) 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)
- (*3) 今後燃料デブリ性状の知見が得られれば、制限の緩和が期待される(No.87)。

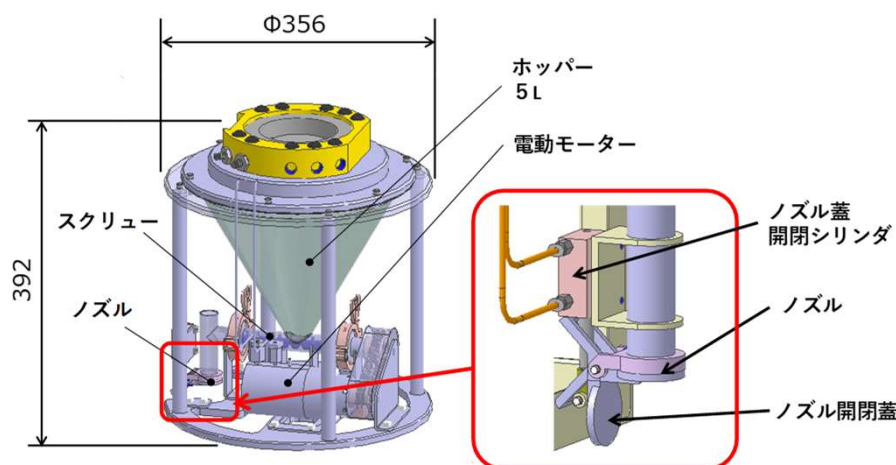


図1 固体タイプ(Gd₂O₃粒子)用の供給装置

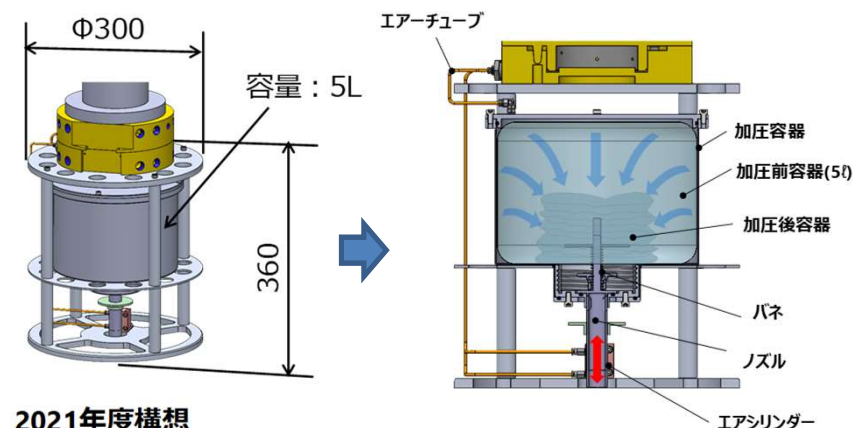


図2 固化体タイプ(水ガラス/Gd₂O₃造粒粉材)用の供給装置

(*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)

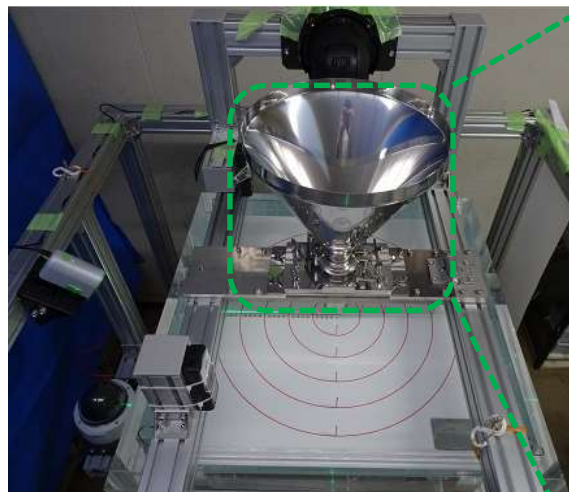
7. 実施内容

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(投入範囲の確認)

- ・固体タイプの吸収材投入装置を対象に、モータおよびスクリューを排除し、ホッパーに弁を直接取り付けることで投入機構を簡素化しても安定的に吸収材(B・Gd入りガラス材)を投入可能か検討した。
- ・装置出口径が最も細いタイプでは、含水状態の吸収材で閉塞が発生したが、それ以外のタイプでは安定的に供給できることを確認した。また、水深が深くなる、装置出口から水面までの距離が離れるなど投入目標箇所の距離が離れるにつれて拡散範囲が広がる傾向を確認した。
- ・実運用時の過剰投入による廃棄物量増加を防止する観点から装置出口と投入箇所はなるべく近い方が良いと考えられ、詳細設計においては装置自体が多少水没する環境でも動作することも含めた検討をする必要があると考える。



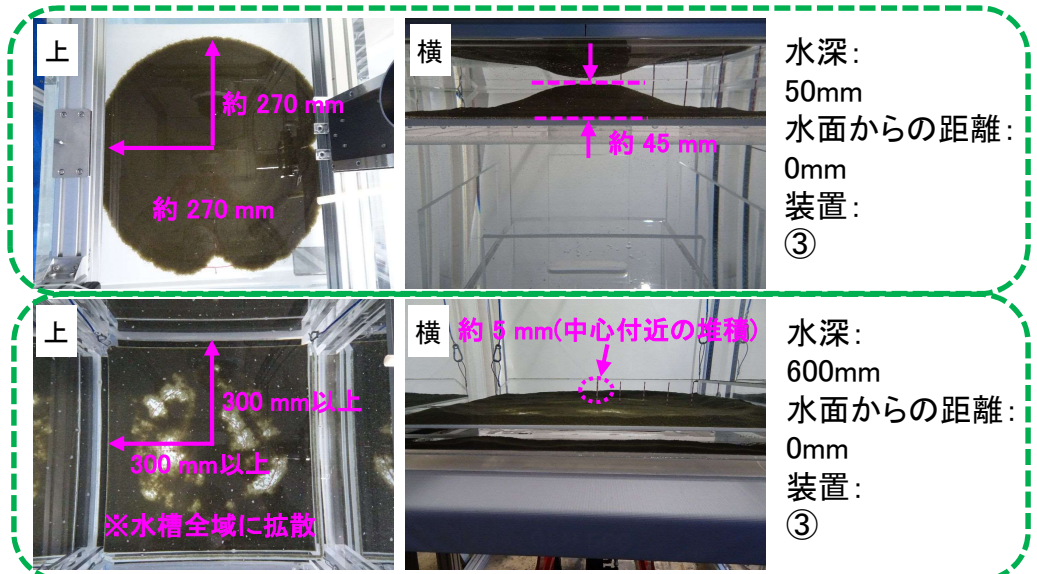
装置出口径、水深、装置出口から水面までの距離をパラメータとした。



①
呼径: 1S
内径: 23.0mm
外径: 25.4mm

②
呼径: 2S
内径: 47.8mm
外径: 50.8mm

③
呼径: 3S
内径: 72.3mm
外径: 76.3mm



実規模の投入量を1回あたり5kgと想定し、水深をパラメータとしたケース。

図2 投入後の吸収材の分布状況(例)

図1 試験装置と使用した投入装置タイプ

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)の固体タイプ(Gd粒子)の例

- 固体タイプ吸収材について、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。
- 固体タイプ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1.5時間+帰路3時間程度(洗浄、搬出エリアの空気入替のため)=合計4.5時間程度と見積もった。
- あらかじめメンテナンスエリアに投入装置を準備しておけば、1時間以内に投入可能。

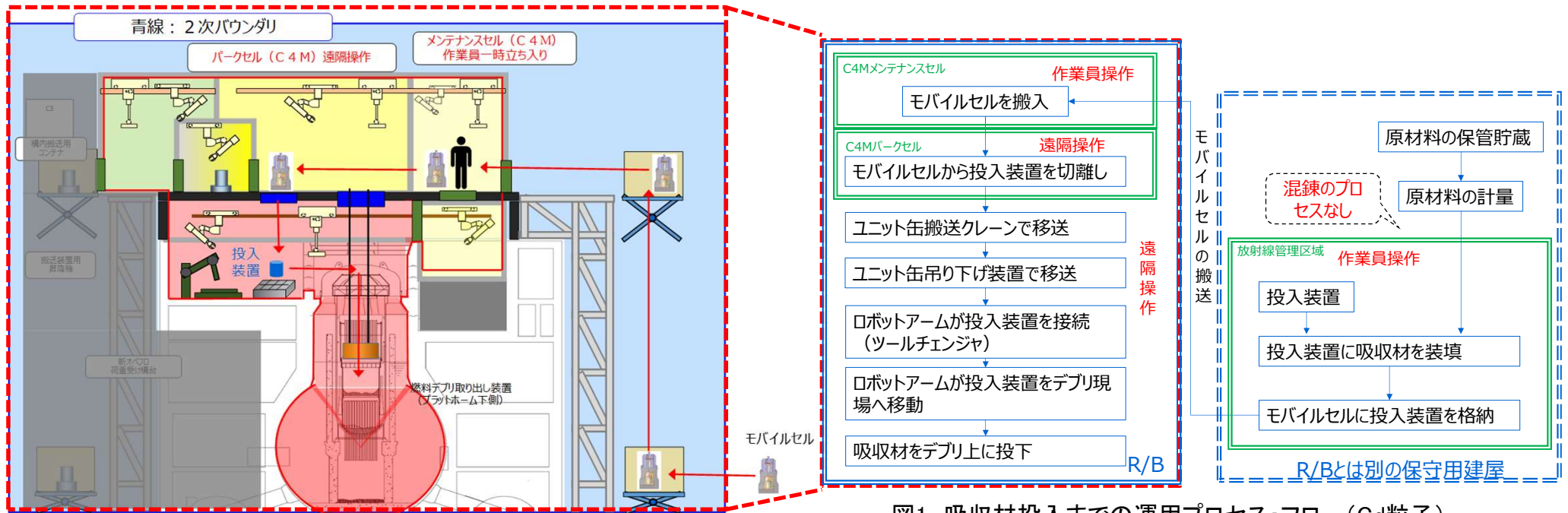


図2 供給装置の搬入経路

図1 吸収材投入までの運用プロセス・フロー(Gd粒子)

(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

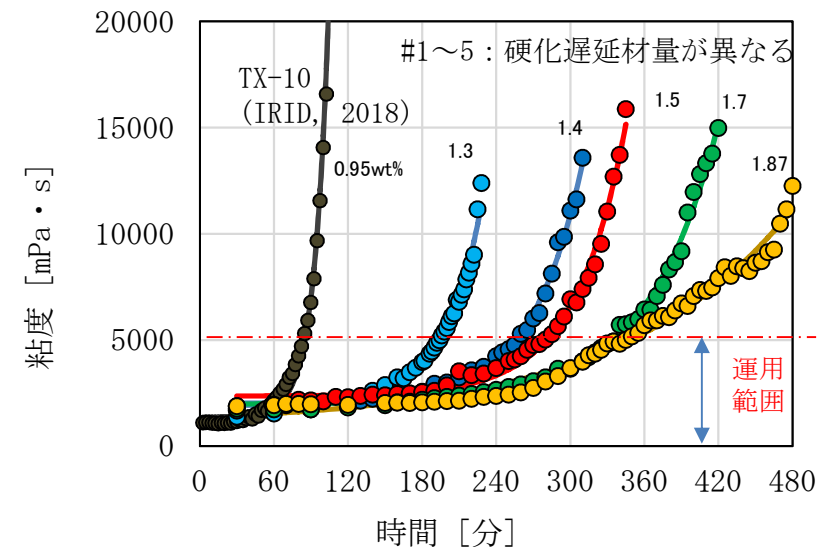


図 水ガラス/Gd₂O₃造粒粉材の混合後の経過時間と粘度の試験結果

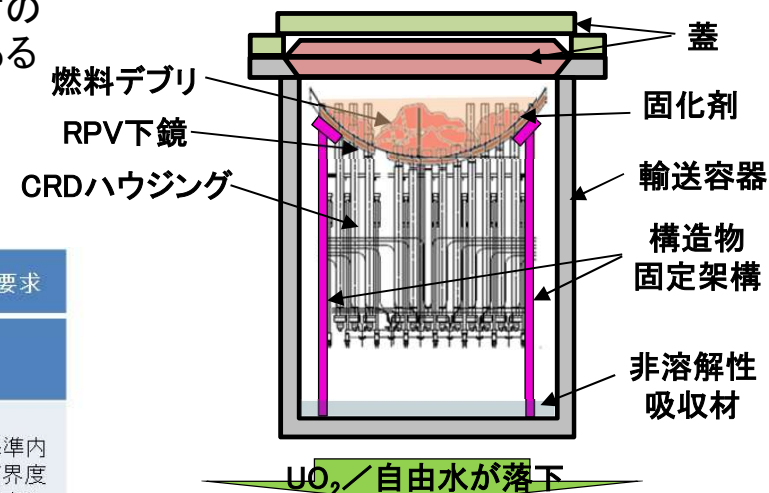
7. 実施内容

7.1 現場運用手順の開発

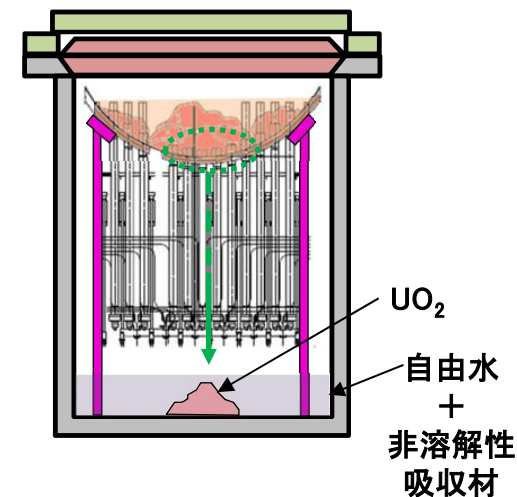
7.1.3 中性子吸収材の運用手順

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



レベル1(通常状態) 異常発生防止=臨界防止	レベル2(異常状態) 異常拡大防止=臨界事故防止	レベル3(事故) 事故の影響緩和	機能要求
keff	10		
敷地境界線量 (未臨界維持)	(臨界到達防止)	1mSv	5mSv
落下物発生防止 ホウ酸水による未臨界維持 ・ホウ素濃度監視 (オプション)	失敗(臨界発生)		管理基準内に未臨界度を維持すること
	臨界検知(ガスサンプリング系システム)		
	緊急ホウ酸水注入	失敗(通常レベル超過)	臨界を検知し、速やかに停止し、通常レベル以上の外部影響発生を防止すること
成功(臨界箇所の除去により通常状態へ復帰)			一般公衆・作業員過剰被ばく防止
	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		
成功(臨界終息後、臨界発生箇所の除去により通常状態へ復帰)			



大規模取り出し時の臨界管理方法(重量物落下) 一参考資料

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. まとめ

【成果】

- ✓ 燃料デブリ取り出し時の臨界防止について、非溶解性吸収材の使用の判断/使用後の復帰手順/供給装置/搬送手順/事前散布、等の項目について現場運用のイメージを具体化して、燃料デブリ取り出し工法チームが取り出しシステムの設計やスループットの検討に活用するための情報を提供した。

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。
 - 令和3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0.5 vol%に設定**
(燃料デブリ0.1wt%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、本研究での成果の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)

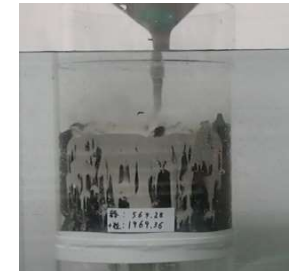


図1 水ガラスタイプの中性子吸収材の模擬燃料デブリへの投入の様子

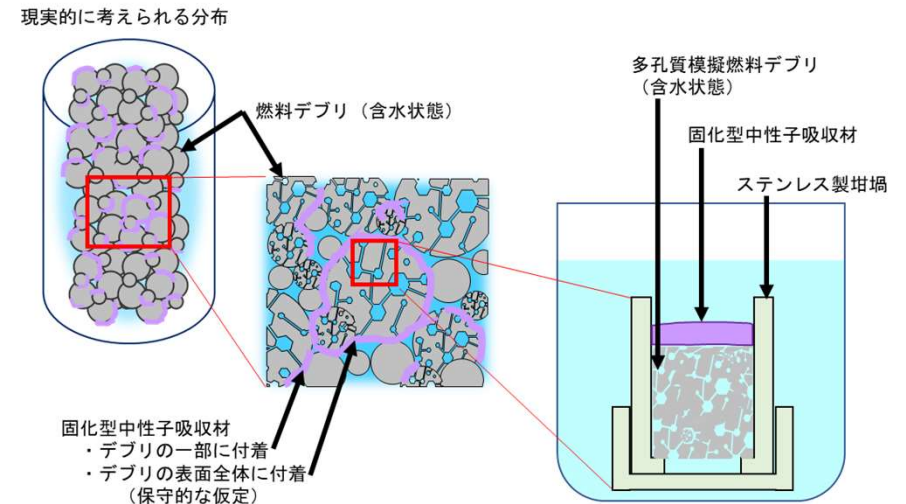


図2 収納缶における燃料デブリの状態の推定と模擬試験

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(図1)。
- 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(図2)。

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1 凹凸表面を水ガラス吸収材で覆った例



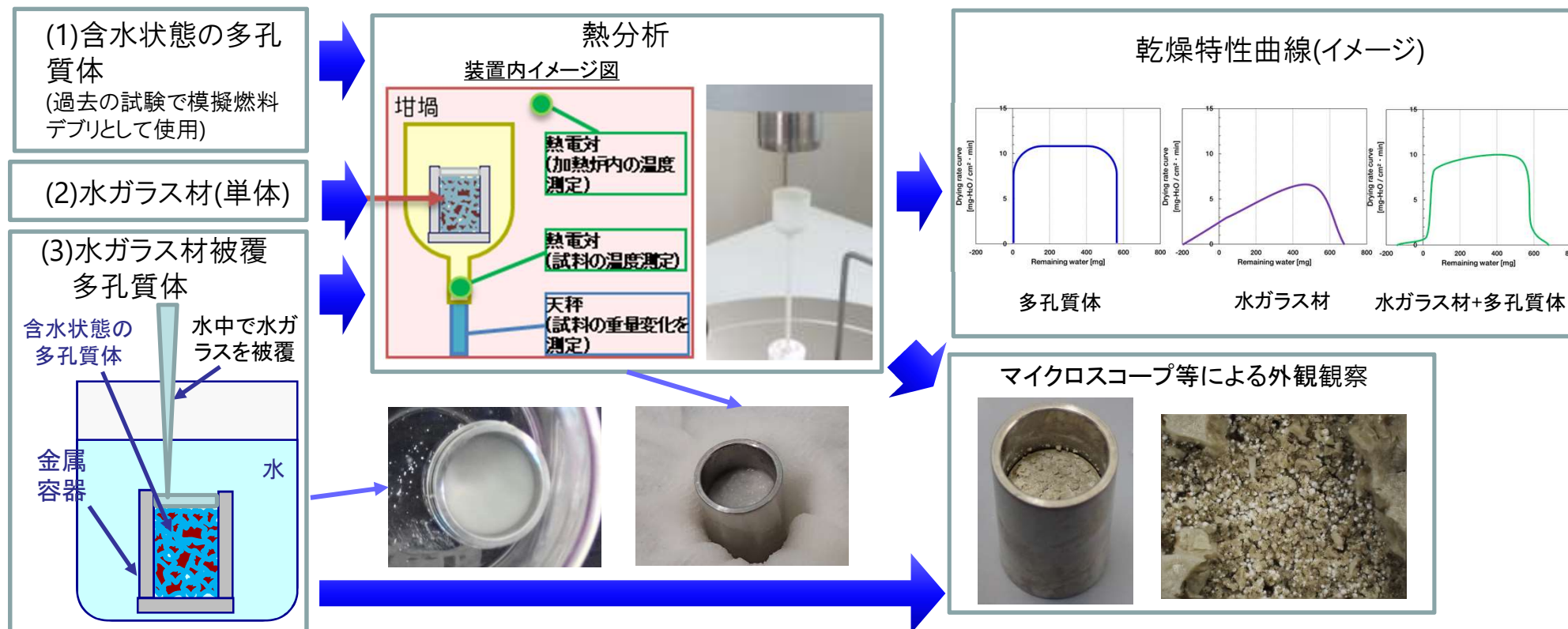
図2 中性子吸収材の使い分け例

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 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 令和3年度試験実施概要



令和3年度の実施内容

- 水ガラス材に覆われた燃料デブリをイメージした試料を調製し、それらの評価に適した含水・乾燥試験システムを再構築
- 全体が水ガラス材に覆われた条件(最も保守的な条件)の試験を実施し、水ガラス材の影響の有無を確認
- 水ガラス材の影響の定量的な評価に向けて、水ガラス材自体の性状分析を実施

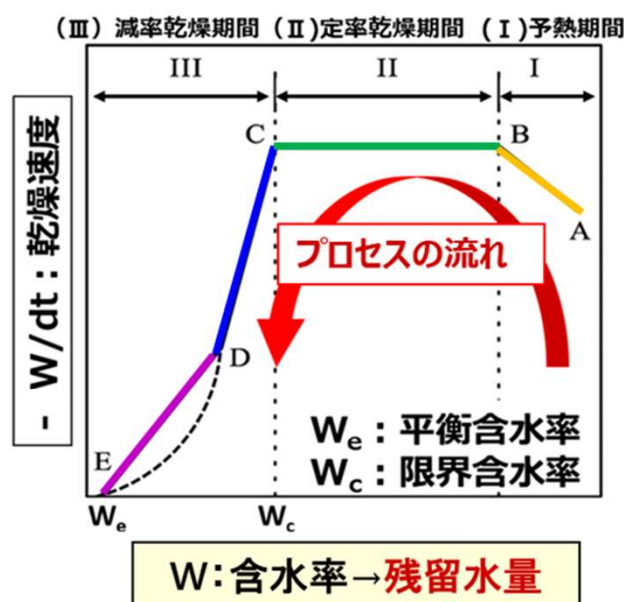
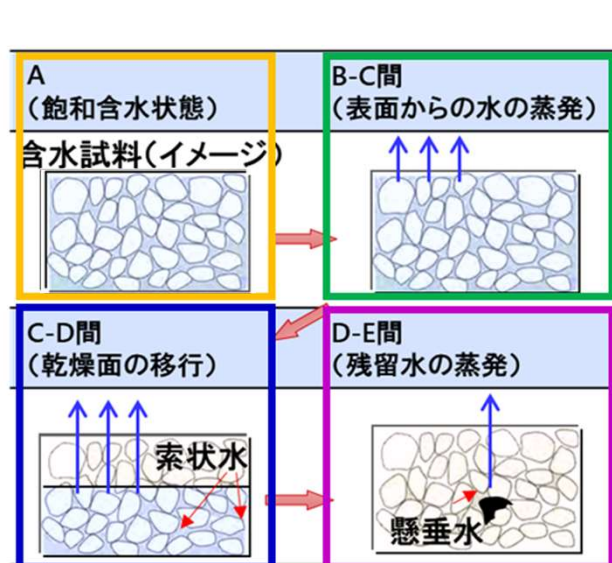
7. 実施内容

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、**独自に一元化した表現・比較が可能な乾燥特性曲線に着目**
- 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

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 令和3年度試験の成果と課題

成果と課題

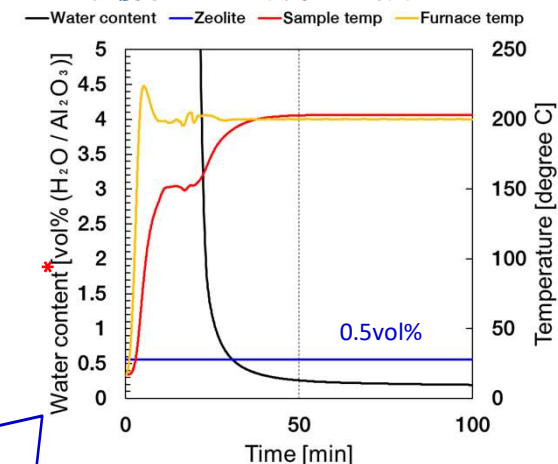
- 飽水状態の多孔質 Al_2O_3 (模擬燃料デブリ)は、水ガラス材が塗布された状態においても乾燥に至ることを確認
- 水ガラス材自体も、水分が放出されない状態まで乾燥に至ることを確認
- ▲ 水ガラス材の乾燥挙動は多孔質 Al_2O_3 単体とは異なる挙動を示しており、水ガラス材中の結合水等の影響を示唆
- ▲ 水ガラス材の投入量(水分量)は乾燥時間にも影響を与えることを確認



令和4年度に解決すべき課題として、以下を設定

- ペレットスケールの検討だけでは、水ガラス材が燃料デブリの乾燥時間に与える具体的な影響が考察できない
 - 乾燥プロセス検討に反映しやすいデータとするために、スケールアップの影響を調査
- 水の投入量と乾燥後重量の物質収支が一致せず、水素発生観点からも水の存在状況の把握が必要
 - 結合水等の影響評価のために、水ガラス材の乾燥後の組成の解明
 - 水ガラス材の投入量(割合)の影響調査のため、乾燥時間の定量評価に係るデータの取得

含水率の経時変化曲線
多孔質体+水ガラス材
被覆厚1mm・水中養生24時間



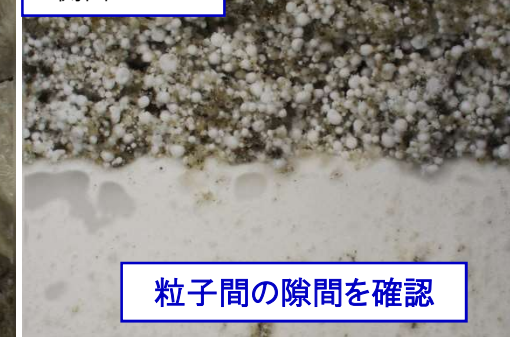
収納缶PJ(実機スケールの含水ゼオライトの乾燥試験)の目標含水率
↓
燃料デブリ換算で0.1wt%≒ゼオライト換算で0.3wt% ≒ 0.5vol%
目標含水率:0.5vol%未滿

上面 ×140



上面に亀裂の発生を確認

側面 ×140

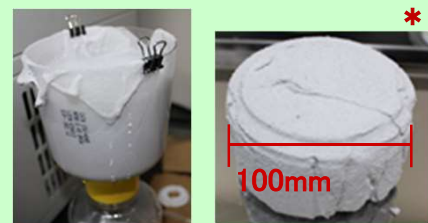



粒子間の隙間を確認

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 スケールアップ試験概要

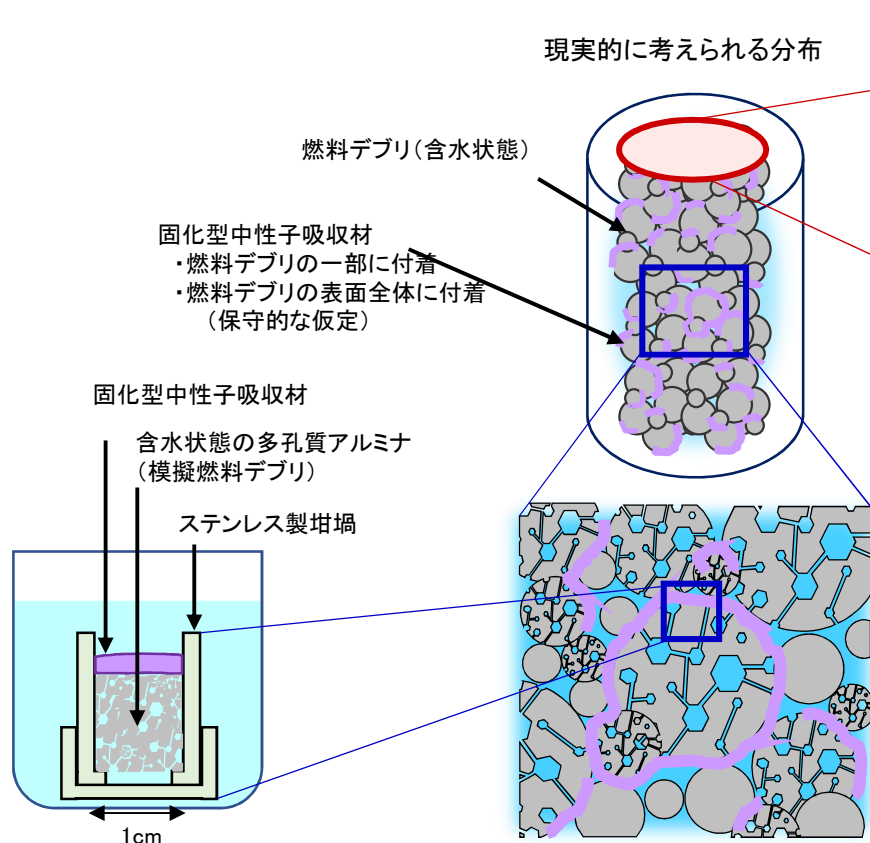
- 令和3年度の試験規模は、小規模スケール(10gオーダー)の試験体を対象とした乾燥試験であり、定量的なデータを得るためにはスケールアップは不可欠である。
- ラボスケールと同様の評価手法を用いてベンチスケール試験を実施することで、スケールアップ因子に対する知見を取得する。
(実運用を見据えたパイロットスケール試験は、乾燥時間の変化に繋がる因子の特定に不向き)
- 燃料デブリの処置技術(乾燥)開発の流れ

	ラボスケール	ベンチスケール	パイロットスケール
目的	基礎特性の把握	スケールアップ因子の把握	安全性・効率性・経済性の把握
乾燥試験 (模擬燃料デブリ)	<p>形状 内部構造(空隙率) 内部構造(気孔径) 材質・組成(元素・化学形) *1</p> <p>塊状 大 大 酸化物(セラミック)(UO_2)</p> <p>粉状 小 小 模擬MCCI生成物(ヒメントペースト) TMI-2デブリ等</p>	<p>*1</p>  <p>100mm</p> <p>Al_2O_3粉粒体</p>	 <p>外径210mm</p> <p>乾燥設備の概念検討</p>
平成26年度～			<p>実用化</p>
乾燥試験(+水ガラス材)	<p>水ガラス材の乾燥の有無</p> <p>多孔質体との乾燥速度の比較</p> <p>水ガラス材の組成・反応機構解明</p>	<p>水ガラス材の投入量(割合)の影響</p> <p>水ガラス材の分布(面積・深さ)の影響</p>	
令和3年度～			<p>基礎特性・スケールアップ因子等を把握することで、乾燥設備のマイナーチェンジ等にも対応可能な裕度を確保する。</p>

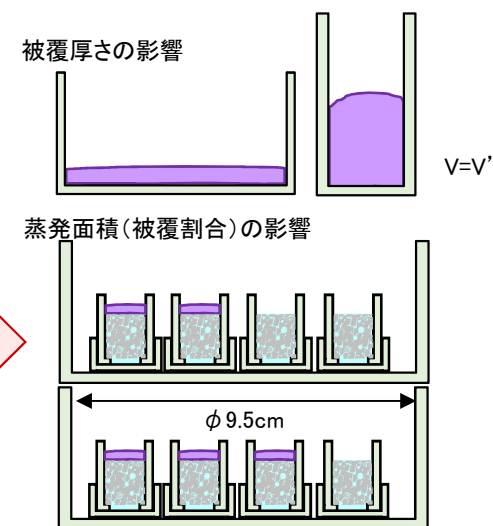
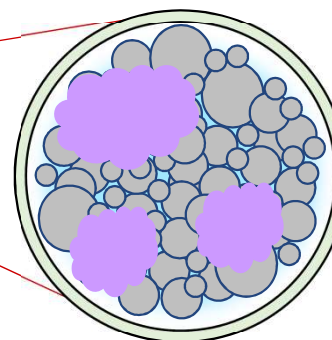
7. 実施内容

7.2 固化型吸収材技術(水ガラス)の開発 b.試験準備 スケールアップ試験概要

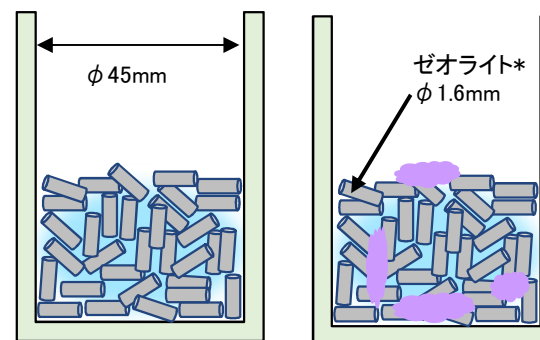
〈収納缶の燃料デブリと水ガラス材の付着イメージ〉



蒸発面イメージ(保守的な仮定)



令和4年度:水ガラス材の分布(面積・深さ)を考慮した乾燥試験



*収納缶PJの乾燥試験と同仕様

令和3年度:最も保守的な条件(ラボスケール)での乾燥試験

令和4年度:これまでの試験条件を網羅したベンチスケールでの乾燥試験

試験① 模擬燃料デブリ乾燥試験

➢ 水ガラス材を塗布したゼオライトの乾燥特性曲線や含水量の変化量測定による乾燥挙動の調査

試験② 水ガラス材の結晶構造解析

➢ 水ガラス材単体の組成分析による水分の性状に係る調査

7. 実施内容

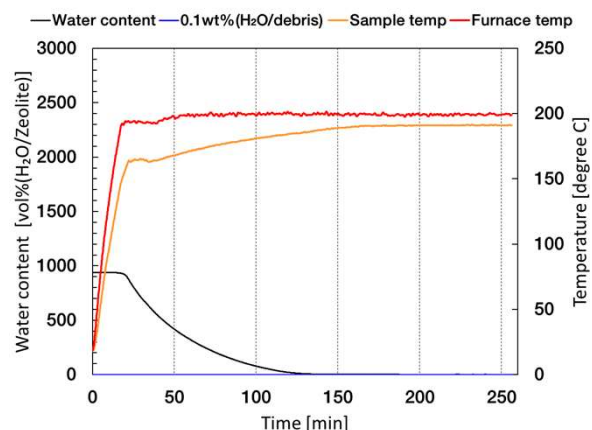
7.2 固化型吸収材技術(水ガラス)の開発 c.要素試験

試験① 模擬燃料デブリ乾燥試験 ゼオライト+水ガラス材(5mm相当)の試験結果

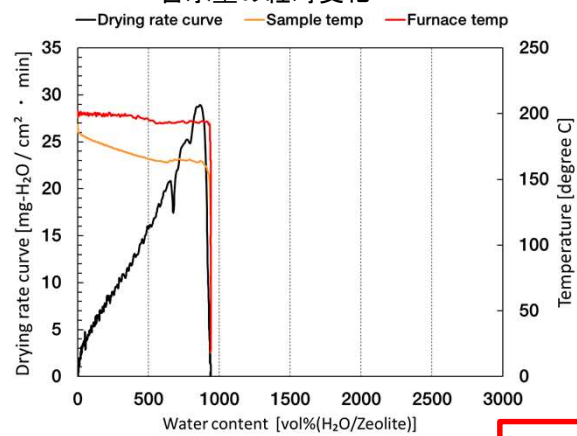


乾燥試験前後の外観
(ゼオライト、水ガラス材5mm相当)

ゼオライト単体

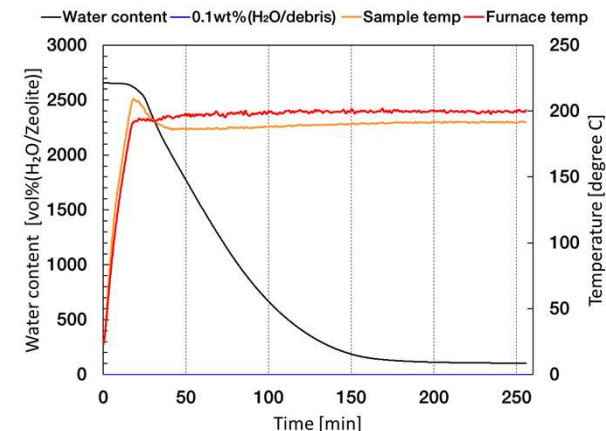


含水量の経時変化

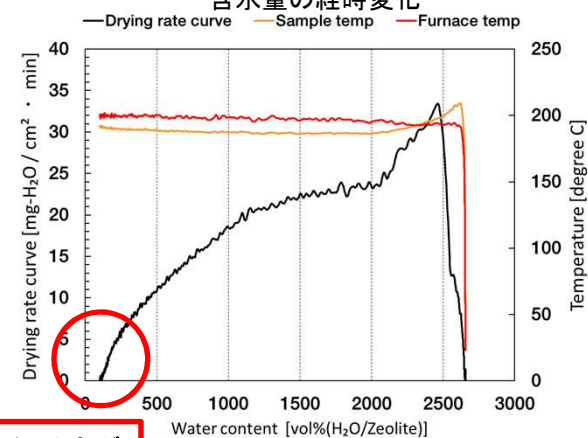


乾燥特性曲線

ゼオライト+水ガラス材(5mm相当)



含水量の経時変化



乾燥特性曲線

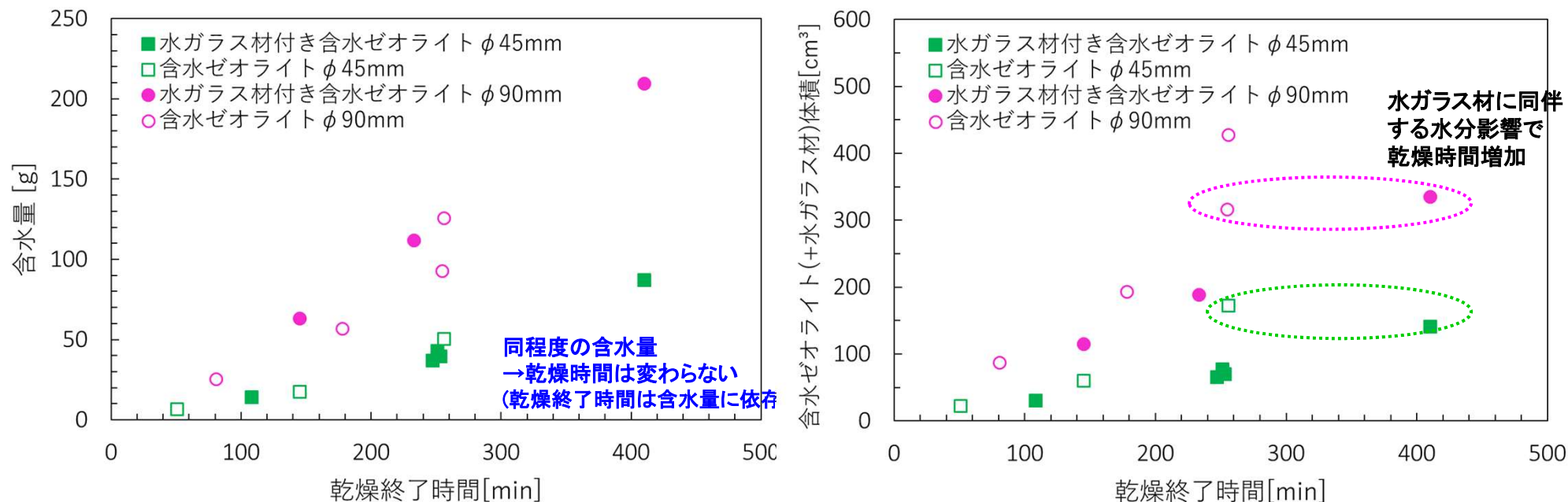
残留重量に係る水ガラス材の性状調査を
試験②にて実施

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① 模擬燃料デブリ乾燥試験 乾燥時間への影響評価

(注) 乾燥終了時間
乾燥速度が $0(\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ に到達するまでの時間



- ゼオライトに含水した水分と、水ガラス材に含まれる水分の総量が乾燥終了時間^(注)に影響することを確認した。
 - 水ガラス材によるゼオライトの細孔や間隙の閉塞による乾燥処理への阻害は認められなかった。
 - 水ガラス材の投入により試験体の水分量が増大したことで、水ガラス材が無い条件と比較して乾燥終了時間が増加する傾向にあった。
(含水ゼオライトの体積の約5割が水ガラス材に置き換わった場合、100分程度)
- 試験体の乾燥速度は表面積が大きく寄与し、容器の寸法に依存する可能性が示唆された。

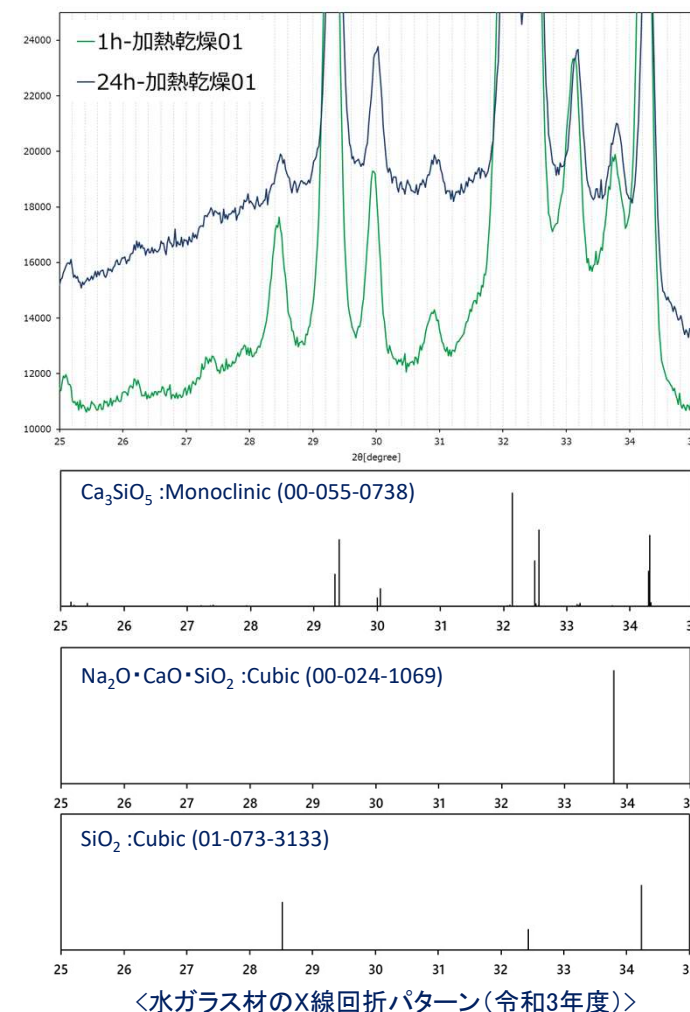
7. 実施内容

7.2 固化型吸収材技術(水ガラス)の開発 c.要素試験 試験② 水ガラス材の結晶構造解析

X線回折法(XRD)、核磁気共鳴分析(NMR)を利用した構造解析
乾燥特性曲線の評価から、試験体は十分に乾燥状態に到達することを示しているが、水分の残留重量が確認されている。
乾燥処理後の水ガラス材の結晶構造を明らかにすることで、水分の残留重量の影響を考察する。

- 水ガラス材の様な非晶質領域の構造解析においては、XRD分析による構造解析が有効である。
 - 令和4年度の構造解析では非晶質領域の解析に適した分析装置で測定を実施。
- 分析試料表面の電気化学的特性の評価ができるNMRを用いて、XRDでは解析できない結晶構造(Si-Si結合のネットワーク形成状況)の違いを観測する。
- これらの構造解析により、水ガラス材中の非晶質領域を定性・定量し、水ガラス材の結合水の状態を理解する。
(静岡理工科大学に再委託の上、実施した)

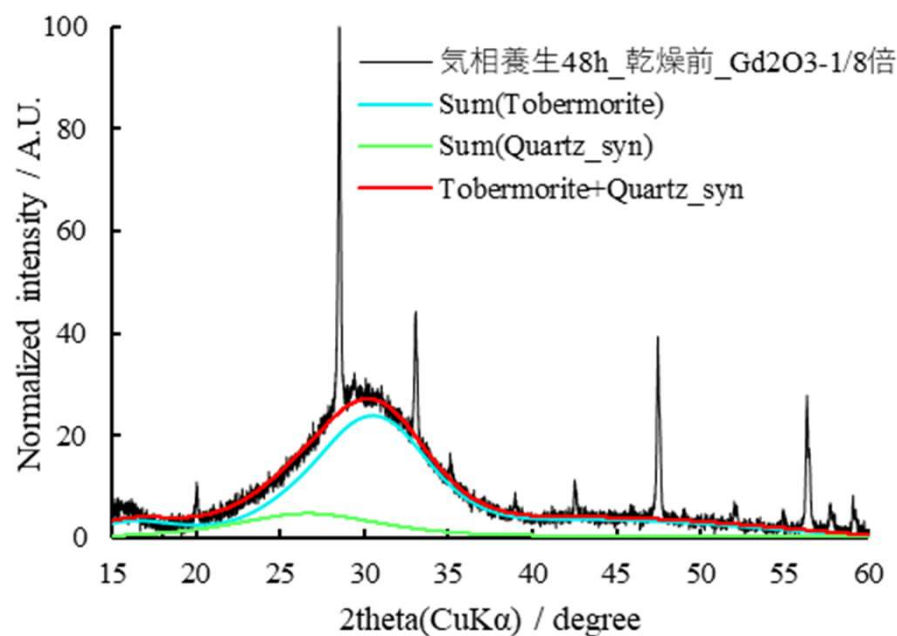
⇒ 導出された水ガラス材の自由水と結合水の比率および結合水の乾燥挙動をベンチスケール乾燥試験の結果に反映。



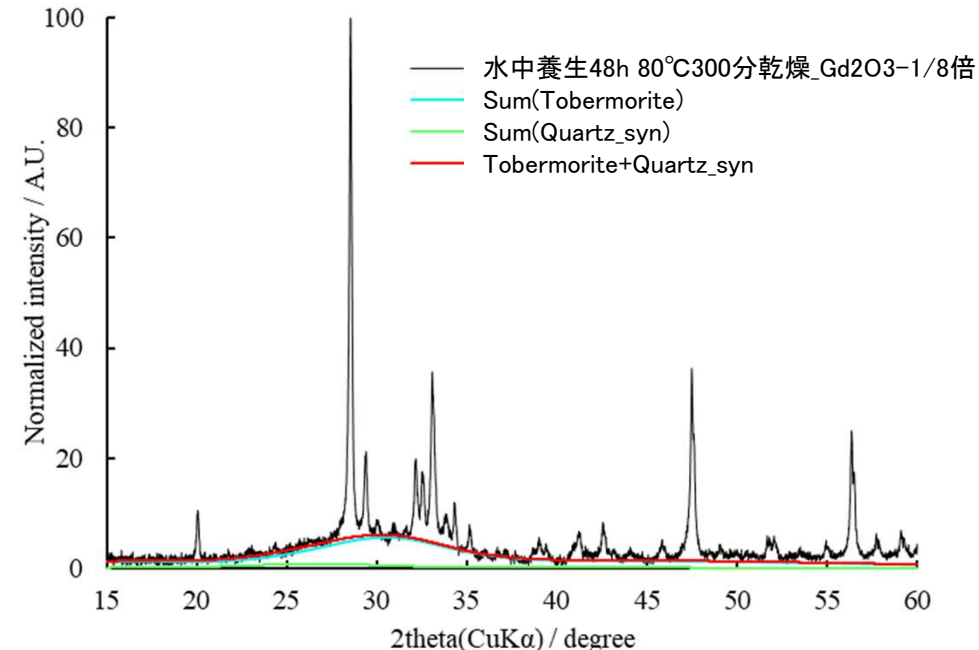
〈水ガラス材のX線回折パターン(令和3年度)〉

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 試験② 水ガラス材の結晶構造解析 XRD分析結果



気相中で48時間養生した試料



水中で48時間養生した試料

Quartz: シリカゲル ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)に類する化合物

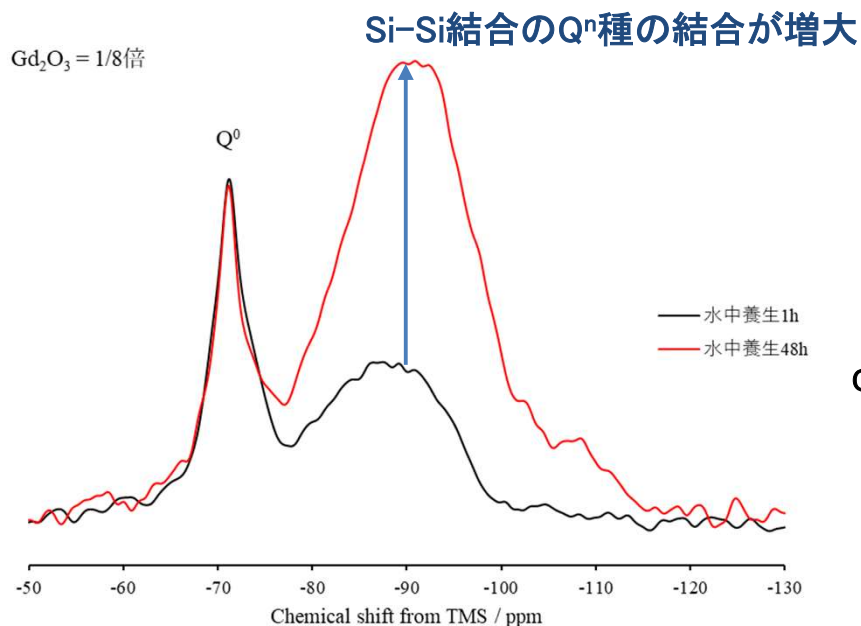
Tobermorite: トバモライト($5\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)に類する化合物

- 共にセメント材やコンクリート材に存在するアモルファス(非晶質)成分として知られる、シリカゲルやトバモライトに類する構造を含むことを明らかにした。
 - 水ガラス材の主成分は、水中養生では強固な結晶体を形成していない様子が明らかになった。
 - 水中養生においては、水ガラス材の結晶水は非常に少ない組成であることが明らかとなった。

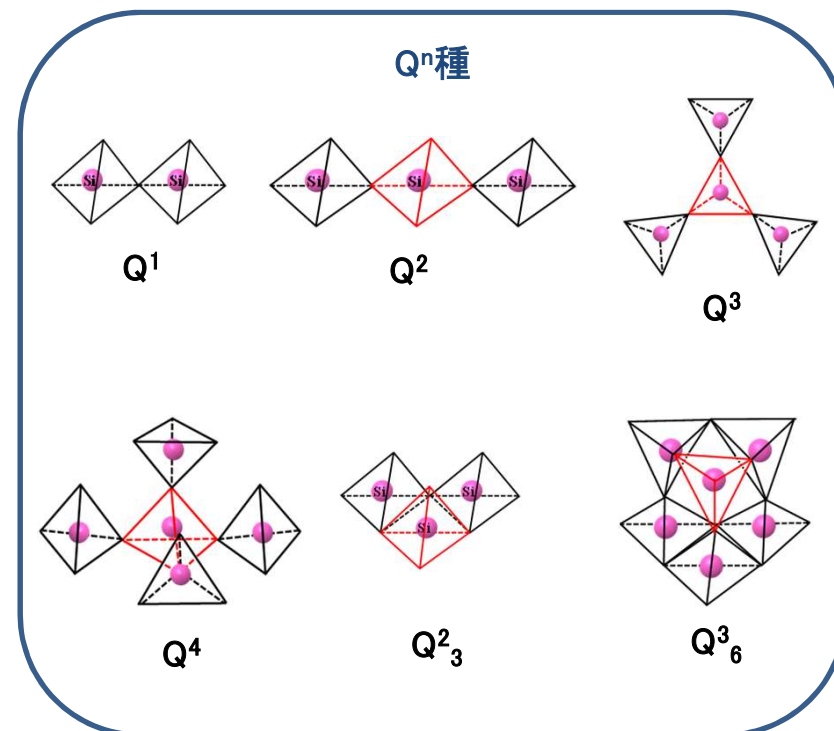
7. 実施内容

7.2 固化型吸収材技術(水ガラス)の開発 c.要素試験

試験② 水ガラス材の結晶構造解析 固体NMR分析 気相養生と水中養生の比較



乾燥処理後の水ガラス材のNMR分析結果



- NMR分析の結果、Si-O₄四面体構造の高次元構造のピーク強度が増大する傾向を明らかにした。
- 中性子吸収材を含む**固化体の非晶質は、細孔構造がないため、水を強く保持しない構造**である。
 - 水ガラス材中に存在する水分は結晶水であり、この結晶水が水分の残留に影響していると示唆される結果を得た。
 - 結晶水は、放射線照射下で水素発生に寄与しないことが知られている^{1), 2)}。
 - 過去に実施した、水ガラス材に対するγ線照射試験の結果に同意するものである³⁾。
- Gd₂O₃の存在は結晶成長過程に影響せず、結晶構造内に保持される(中性子吸収効果を維持する)ことが示唆された。

7. 実施内容

7.2 固化型吸収材技術(水ガラス)の開発

d. まとめ

【成果】

試験① 模擬燃料デブリ乾燥試験(スケールアップ試験)

- ゼオライトに含水した水分と、水ガラス材に含まれる水分の総量が乾燥終了時間に影響することを確認した。
 - 水ガラス材によるゼオライトの細孔や間隙の閉塞による乾燥処理への阻害は認められなかった。
 - 水ガラス材の投入により試験体の水分量が増大したことで、水ガラス材が無い条件と比較して乾燥終了時間が増加する傾向にあった。

試験② 水ガラス材の結晶構造解析

- XRD分析の結果、セメント材やコンクリート材に存在するアモルファス(非晶質)成分として知られる、シリカゲルやトバモライトに類する構造を含むことを明らかにした。
 - 水ガラス材の主成分は、水中養生では強固な結晶体を形成していない様子が明らかになった。
- NMR分析の結果、中性子吸収材を含む固化体の非晶質は細孔構造がないため、水を強く保持しない構造であることを明らかにした。
 - 実環境において使用する水ガラス材の結晶水に寄与する成分は微量である傾向にあり、それに含まれる結晶水が燃料デブリの発熱で発生する水蒸気量も僅かなものであると推察する。
- 乾燥後の水ガラス材は結晶水が非常に少ない組成であり、また、水を強く保持しない構造であることを明らかにした。
 - 水ガラス材に対する放射線分解による水素発生に与える影響は限定的であることを確認した。

水ガラス材は燃料デブリの乾燥を阻害しないが、一方で、水ガラス材の存在により乾燥時間が延長となる結果が得られたため、投入する水ガラス材量は必要最低限にするべきである。

また、乾燥処理後の水ガラス材は水素が発生しない組成であることを明らかにした。

7. 実施内容

7.3 臨界管理の全体まとめ

- ・前記7.1～7.2の検討を踏まえ、**臨界管理の全体まとめとして、要求事項と監視手順を整理した。**
- ・臨界管理方法は、燃料デブリ取り出し工法に応じた手順を選定する必要があるが、考え方の統一を図るべく、いずれの場合にも守るべき基本的な要求事項を整理した。
- ・要求事項が適切かどうか確認するため、代表的な工法に展開した例を示した。
- ・臨界管理手順に組み込まれる臨界監視の手順を補足説明として、具体的な手順、判断基準の考え方などを整理した。

整理の項目

項目		要求
1) 臨界管理の目的	・ 臨界管理の目的と目標	臨界管理の目的
		リスク特定
2) 臨界防止	・ 臨界近接要因の排除	未臨界の維持
		臨界到達防止
	・ 臨界近接が生じた場合でも、臨界に到達する前に終息させる	臨界近接監視(予測監視)
		作業中状態監視(常時監視)
3) 臨界検知と終息	・ 想定される深い未臨界状態での異常の早期検知	長期的な監視
		臨界検知
		臨界終息
4) 取り出し作業の実施条件	—	—
5) 取り出し物の収容	—	—

7. 実施内容

7.3 臨界管理の全体まとめ

構成

- ・全工法に**共通の要求を整理(赤囲み)**し、右側に、代表的な工法について具体的展開を記載している(例を下表に示す)。
- ・**各工法への展開は想定されるリスクごとに記載**
下(横)取り出し工法については、ホウ酸水なし、ホウ酸水常用、干渉物撤去に分けて整理している。
- ・臨界管理手順を補足説明として添付
i)未臨界度測定、ii)予測監視、iii)常時監視、iv)臨界検知・終息

臨界管理の要求事項			具体的展開：下横取り出し作業（ホウ酸水常用せず）		
項目	要求	要求(細目)	燃料デブリ過剰加工	切削粉蓄積	(省略)
2) 臨界防止	2-1) 特定されたリスクについて、未臨界維持対策(臨界の発生防止対策)を講じる。	2-1-1) (臨界管理担当者) 臨界防止として①未臨界の維持、②臨界到達防止の対策を講じる。 2-1-2) (臨界管理担当者) ①未臨界の維持のため、臨界近接の起因となる事象の発生防止、過剰な臨界近接の抑制(添加反応度の抑制)、中性子吸収材による未臨界維持などの対策を講じる。 2-1-3) (臨界管理担当者) ②臨界到達防止のため、臨界近接を監視し臨界に到達する前に作業を停止する対策を講じる。ただし、①において、取り出し対象物の臨界リスクが小さいと判断される場合、あるいは中性子吸収材などで未臨界維持の方法を強化する場合には、臨界監視を緩和することも可とする。	取り出し作業が直接の起因事象となる。よって、発生頻度が大きと考え、①未臨界の維持、②臨界到達防止の対策をそれぞれ2-2)及び2-3)にて講じる。 なお、対象物ごとの臨界管理方法の選択を補足フロー1)に示す。	取り出し作業が起因事象となるが、切削粉の発生量から臨界量まで蓄積するためには長期間を要するとともに、特定箇所に集中した蓄積などの、複数の条件重畳が必要となる。よって、発生頻度は小さいと考えて、①未臨界の維持対策のみ2-2)にて講じる。	(省略)

7. 実施内容

7.3 臨界管理の全体まとめ

臨界管理の目的

- ・「事故」を外部に通常レベルを超過する影響を及ぼす事象と定義
- ・臨界管理の目的を、「臨界を防止し、万一臨界が発生した場合でも臨界事故への拡大を防止する」とする。

臨界リスクの特定

- ・各工法でリスクを分析・特定し、リスクごとの管理方法(リスクの特性・大きさ)に応じた管理方法の選択を要求。

臨界管理の要求事項		
項目	要求	要求(細目)
1) 臨界管理の目的	1-1) 臨界管理は、燃料デブリ取り出し作業に伴う臨界を防止するとともに、万一、臨界が発生した場合でもその影響を緩和し、臨界事故の発生を防止(臨界事故への拡大を防止)する目的を持つ。地震時など自然災害はこの要求事項での管理対象外とする。	1-1-1) 臨界事故の定義 臨界に伴う放射性物質の追加放出により、通常レベルを超える影響を生じる事象を臨界事故と定義する。 「通常レベル」は、敷地境界の一般公衆の被ばく量1mSv/年、作業員の被ばく量50mSv/年とする(注1)。
	1-2) 燃料デブリ取り出しに伴うリスクを分析し、特定されたリスクごとに臨界を防止する対策と、万一臨界が発生した場合の事故への拡大防止の対策を講じる。	1-1-2) 臨界の定義 実効増倍率(keff)=1.0をもって臨界とする。ただし、臨界事象の不確定さを考慮し、各種対策の検討においてはkeff=0.95を臨界の管理基準とする(注2)。 1-2-1) (臨界管理担当者) 対象作業および工法について、臨界リスクを特定する。 1-2-2) (臨界管理担当者) 特定されたリスクに対して、独立した臨界防止対策と臨界発生時の影響緩和(臨界事故への拡大防止)対策を講じるものとする。

注1) 通常レベルの定義は現在検討中の一例であり、安全の考え方の検討進捗に合わせて見直す。なお、敷地境界線量は、1事象当たりの影響が燃料デブリ取り出しに伴う増加分を考量しても1mSv未満に収まることを目標とする。

注2) 臨界評価などでは各種不確定さを含めて、keff=0.95などを判断基準にする場合が多い。

7. 実施内容

7.3 臨界管理の全体まとめ

深層防護のレベルと対策策定の考え方

- ・安全管理の考え方では、「事故」を外部に通常レベルを超過する影響を及ぼす事象と定義しているのに合わせ、外部への影響でレベル分け(注1)をした。レベルを判断する手段を設けること、レベルの高い層への移行防止策、移行した場合の復帰策を設けることを対策の指針とした。

注1) 同じ臨界でも様々な核出力を取り得て、外部影響も変わり得るため、事故の基準を「通常を超える外部影響を生じる事象」とした(すなわち体系の k_{eff} が1.0となることではない)。ただし、作業員の被ばくも超過しないように考慮する。

これまでの検討で、臨界発生時でも速やかに検知・終息することで、外部影響は、通常レベルを超えないことを確認している(下図)ことから、今後の設備や現場手順を考える際に、臨界時にも通常レベル未満とすることを目標としている。

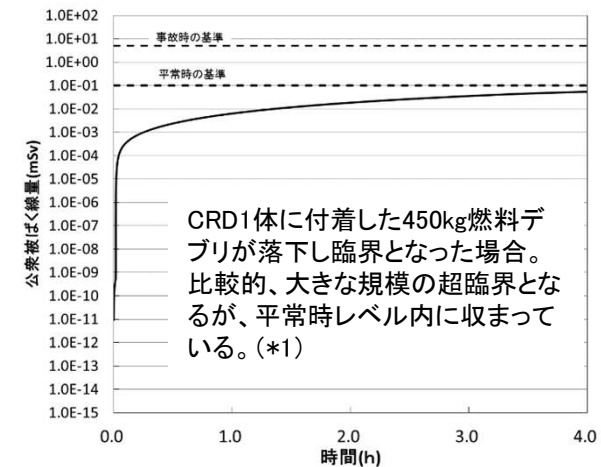
レベル1: 通常状態

レベル2: 異常な状態(物理的な臨界を生じているが、外部影響は通常レベル未満)

レベル3: 臨界事故状態(外部への影響が生じている状態)

- ・なお、上記の考え方は、臨界を許容するものではない。臨界防止のためには、後述のように、複数の手段を講じている。

(*1) 今後燃料デブリ性状の知見が得られれば、影響の緩和が期待される。



臨界時被ばく評価の例(平成28年度補助事業成果より) (*1)

7. 実施内容

7.3 臨界管理の全体まとめ

大規模取り出し時の臨界管理方法(ホウ酸水無し)

ホウ酸水常用などのケースについては参考資料に示す

レベル1(通常状態) 異常発生防止=臨界防止	レベル2(異常状態) 異常拡大防止=臨界事故防止	レベル3(事故) 事故の影響緩和	機能要求
<p>keff</p> <p>敷地境界線量</p> <p>(未臨界維持)</p>	<p>1.0</p> <p>1 mSv</p> <p>5 mSv</p>		
<p>取り出し作業制限</p> <p>失敗 (臨界近接発生)</p>	<p>$X_e = 1 \text{ Bq/cm}^3$ (*) * 現行の実施計画で「臨界発生」と位置付けられている状態</p>		<p>管理基準内に未臨界度を維持すること</p>
<p>未臨界度測定</p> <p>加工前の予測監視、加工中の常時監視</p> <p>臨界近接監視(中性子検出器・ガスサンプリング系システム)</p> <p>成功(中性子吸収材などで未臨界度を深くし、臨界近接箇所の除去により通常状態へ復帰)</p>	<p>失敗(臨界発生)</p>		<p>想定以上の臨界近接を検知して、取り出し作業を停止することで、臨界を防止すること</p>
<p>成功(中性子吸収材などで未臨界度を深くし、臨界近接箇所の除去により通常状態へ復帰)</p> <p>(状況に応じて)ホウ酸水常用(**)へ移行</p> <p>** 事前にホウ酸水を投入し、ホウ酸水中下で取り出しを行うこと</p>	<p>臨界検知(ガスサンプリング系システム・中性子検出器)</p>	<p>失敗(通常レベル超過)</p>	<p>臨界を検知し、速やかに停止し、通常レベル以上の外部影響発生を防止をすること</p>
<p>成功(臨界箇所の除去により通常状態へ復帰)</p> <p>成功(臨界終息後、臨界発生箇所の除去により通常状態へ復帰)</p>	<p>緊急ホウ酸水注入</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>一般公衆・作業員過剰被ばく防止</p>

7. 実施内容

7.3 臨界管理の全体まとめ

- ・深層防護のレベルに対応する要求事項

レベル	要求機能	方法
レベル1 (通常状態) 異常発生防止 =臨界防止	[未臨界維持] →No.82 管理基準内に未臨界度を維持する	[未臨界度測定] →No.84 臨界までの余裕を定量的に把握して作業着手 [取り出し作業制限] 過剰な反応度添加の抑制 [中性子吸収材による未臨界維持](オプション) →No.85 ホウ酸水、非溶解性吸収材常用
	[臨界到達防止] 臨界近接を検知し取り出し作業を停止することで、臨界を防止する	[臨界近接監視] (予測監視・常時監視) →参考資料 取り出し作業中の状態を監視し臨界に到達する前に作業中断
レベル2 (異常状態) 異常拡大防止 =臨界事故防止	[臨界検知・終息] 臨界を検知し、速やかに終息させ、通常レベル以上の外部影響発生を防止をする	[臨界検知・終息] 臨界検知、ホウ酸水注入での終息
レベル3 (事故) 事故影響緩和	一般公衆・作業員過剰被ばく防止	[臨界終息手段、外部影響緩和手段の確保] ホウ酸水注入でも臨界が終息しなかった場合の、補完的終息手段、外部影響緩和手段の確保

斜体番号は関連説明箇所を示す

7. 実施内容

7.3 臨界管理の全体まとめ

未臨界の維持

・未臨界の維持

現状の未臨界度を推定し、**臨界までの余裕を確認したうえでの作業着手**

・臨界近接要因の排除

燃料デブリ加工体積制限(4,000cm³(*1)ごとの臨界監視の要求)

臨界管理の要求事項			具体的展開：下横取り出し作業（ホウ酸水常用せず）
項目	要求	要求（細目）	燃料デブリ過剰加工
2) 臨界防止	2-2) 未臨界の維持 臨界近接の要因を排除し、作業中に未臨界を維持する。	2-2-1) 未臨界の維持 実施する作業に伴う臨界近接を考慮しても未臨界が維持されることを確認して作業に着手する。	作業開始前に、取り出しアームに搭載する 未臨界度測定用中性子検出器 を用いて 未臨界度を測定 し、加工作業に伴う反応度添加を考慮しても臨界とならないことを確認してから作業に着手する。 →未臨界度測定手順
		2-2-2) 臨界近接の要因を排除 する、また、過剰な反応度添加が生じない作業方法を選択する。	一定加工体積(4,000cm³ (**1) ごとに臨界監視(予測監視)を実施 するものとする。加工体積の不確定さは、予測監視の判断基準に考慮するとともに、大規模取り出し前の段階で、余裕の妥当性を確認する。
		2-2-2-1) 過剰な反応度の判断基準としては、未臨界の維持(1回の添加で臨界に到達することのないこと)、万一臨界となった場合でも即発臨界とならない添加反応度量とする。	臨界監視(予測監視)ごとの 添加反応度を0.5%Δk/k以下 とする。

その他の各要求についても同様の整理を実施。(予測監視、常時監視、長期的な監視、臨界検知と終息手段、終息後の対応、取り出し作業の条件)

(*1) 今後燃料デブリ性状の知見が得られれば、影響の緩和が期待される。

7. 実施内容

7.3 臨界管理の全体まとめ

- ・基本 requirements を基に、工法ごとに具体的な展開を図る。

ここでは、中性子吸収材(ホウ酸水)常用及び干渉物(非燃料デブリ)撤去時への展開

項目	要求	下横取り出し作業 (ホウ酸水常用せず)	下横取り出し作業 (ホウ酸水常時使用)	ペDESTAL内干渉物撤去
1) 臨界管理の目的	省略	共通		
2) 臨界防止	2-1) 特定されたリスクについて、未臨界維持対策(臨界の発生防止対策)を講じる。	主要リスク： 燃料デブリ過剰加工/切削粉蓄積/重量物落下/水位上昇	ホウ酸水により臨界リスクが低減、ホウ素濃度低下が主要リスクとなる。	燃料デブリ加工量が少ないため、リスクは低く、重量物落下が主要リスクとなる。
	2-2) 未臨界の維持 臨界近接の要因を排除し、作業中に未臨界を維持する。	未臨界度測定による余裕確認 燃料デブリ加工制限	濃度(6,000ppm) ^(*) のホウ酸水による未臨界維持	加工に伴う変化が小さいことから適用せず
	2-3) 臨界到達防止 2-3-1) 臨界近接監視(予測監視)	一定体積加工ごとに予測監視を実施	ホウ素濃度モニタリング・維持	臨界リスクが小さいことから適用せず
	2-3-2) 作業中の状態監視(常時監視)	加工中の常時監視を実施	ホウ素濃度モニタリングのバックアップとして、中性子束の連続監視(常時監視)を行う。	想定外の状況も踏まえて、常時監視を実施する。
	2-3-3) 取り出し中の状態の長期的な監視	加工前後で想定以上の変化が生じていないことの確認 1/m、ガスモニタ指示値のトレンド分析	— 同左(頻度を落として実施)	— 同左(頻度を落として実施)
3) 臨界検知と終息	3-1) 臨界を検知し、速やかに臨界を終息させて臨界事故への拡大を防止する。	PCVガスモニタを用いた臨界検知 緊急ホウ酸水注入による臨界終息	同左(臨界検知・ホウ酸水緊急注入)	同左(臨界検知・ホウ酸水緊急注入)
4) 取り出し作業の実施条件	4-1) 上記の手段が機能していない状態で取り出し作業を行ってはならない。	同左	同左	同左
	4-2) 監視に使用する検出器は、適正に校正され動作可能であることを確認していること	同左	同左	同左
5) 取り出し物の収容	取り出し物を、搬出容器(ユニット缶、廃棄物容器)に収納する際には、特段の管理(監視や吸収材添加などの処置)を実施しない。	収納容器は形状管理で適切に臨界防止が図られていることを前提にする。	同左	同左

(*) 今後燃料デブリ性状の知見が得られれば、影響の緩和が期待される。

7. 実施内容

7.3 臨界管理の全体まとめ

未臨界度測定手順

項目	要求	考え方
1)目的・機能	<ul style="list-style-type: none"> ・臨界までの余裕の定量的把握 ・予測監視の初期値設定(監視精緻化) 	<ul style="list-style-type: none"> ・十分な余裕を確認して取り出し作業に着手 ・予測監視精緻化(keff監視)により、運用可能範囲を拡大
2)測定対象	<ul style="list-style-type: none"> ・臨界になり得る規模で水没している燃料デブリ(ペDESTアル内堆積物、RPV下部ヘッド堆積物) 	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料デブリ加工規模が小さい場合には、予測監視and/or常時監視のみで対応可能
3)測定方法	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料デブリ近傍の中性子検出器により中性子パルス時刻歴データ取得し、炉雑音法(ファインマンα法)を適用 	<ul style="list-style-type: none"> ・ファインマンα法は、未臨界度測定の代表的な手法。
4)測定位置	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料デブリの塊の、少なくとも1点で測定 ・取り出し位置が別の塊に移った場合には再測定 ・10~20cm程度掘り下げることにより再測定 	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料デブリの塊は測定位置によらず一つの未臨界度を持つ。 ・MCCI燃料デブリなど垂直方向で組成・性状が変化し得る可能性を考慮 ・中性子は全方位に等方に放出されるとは限らない。検出器がロボットアームの陰になることも考慮して、必要に応じて中性子測定シミュレーションを行い、検出器の配置を決める。
5)測定時間	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料デブリ状態(体系の大きさ)により1時間~数日と想定 	<ul style="list-style-type: none"> ・現場の中性子束と検出器の感度から必要測定時間を見積り
6)測定結果に見込む不確定さ	<ul style="list-style-type: none"> ・未臨界度測定(即発中性子減衰係数α)の不確定さ及びkeffへの換算の不確定さ(Q^*の不確定さ)を見込んでおく。 	<ul style="list-style-type: none"> ・KUCA試験結果により不確定さを評価しておく。
7)判断基準の設定方法	<ul style="list-style-type: none"> ・測定されたkeffに、数回分の加工に伴う添加反応度を加えても臨界にならないことを確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・最初の1回の加工で臨界とならないことの確認(2回目以降は予測監視が臨界近接を監視する)。
8)測定できない場合の処置	<ul style="list-style-type: none"> ・測定時間を増やして再測定 ・予測監視の監視をkeffではなく、1/mで行う。場合により燃料デブリ加工体積を小さく制限して、予測監視を行いながら段階的に規模を拡大していく。 	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料デブリ体系の大きさ及び未臨界度の深さにより測定できないケースがある。 ・測定不能の原因を、未臨界度が深い場合(測定範囲外)とそれ以外の場合に区別する方法が必要
9)代替手段	<ul style="list-style-type: none"> ・PCVガスモニタでのXe/Kr測定値の割合による未臨界度推定方法 	<ul style="list-style-type: none"> ・1号機適用済み。2、3号機でも同手法による測定が望ましい。 ・中性子検出器による未臨界度推定との関係において位置付け、必要性を整理する。

7. 実施内容

7.3 臨界管理の全体まとめ

非溶解性中性子吸収材 投入手順 (臨界近接した燃料デブリに使用する例)

項目	要求	考え方
1) 目的・機能	・未臨界度測定、または予測監視によって、燃料デブリが臨界に近接したと認められた場合に、未臨界度を深くして通常状態に復帰させる。	・大規模取り出し時の臨界管理方法(ホウ酸水なし)の異常発生防止に対応している。
2) 方法	・非溶解性吸収材を投入装置に充填して、ロボットアームで対象となる燃料デブリの上部に搬送し、上から燃料デブリ表面に散布する。	・局所的に使用するため、対象とする燃料デブリ範囲が判明していることが前提となる。
3) 投入頻度	・必要が生じたとき。(不定期)	・日常的に使用するのではなく、臨界近接が認められた場合に使用する。
4) 投入位置	・臨界近接していると認められた、局所的な燃料デブリ領域	・1日の燃料デブリ取り出し目標300kgに相当する範囲を目安とする。
5) 投入時間	・1時間程度	・1日1回投入してから燃料デブリ取り出しを行う想定とする。 ・レベル1での運用なので、緊急性はない。
6) 投入量の設定方法	・吸収材のタイプ(固体or固化体)、投入する量、範囲を設定してから現場投入する。 ・決められた量が決められた範囲に投入されたことを確認する。 ・投入後に未臨界度測定を行う。	・吸収材のタイプ、投入量、範囲を決める考え方と確認方法が課題。(→有効性評価) ・投入したことによる効果は未臨界度測定によって確認する。
7) 投入量不足の対応	・決められた量と範囲が未達の場合には、満足するまで繰り返し吸収材を投入する。 ・未臨界度測定の結果、効果が認められない場合には、吸収材のタイプを変える。	・固体タイプの吸収材が燃料デブリの隙間に入らず、効果が認められない場合には、固化体タイプの吸収材を投入することで効果が得られる可能性がある。
8) 有効性評価	・観測された燃料デブリ形状を模擬してシミュレーションによる臨界評価を実施して、吸収材の有効性を確認する。	・あらかじめ想定される燃料デブリ形状の代表的なパターンを模擬してシミュレーションを実施しておくのが良い。この解析は、6)の投入量を決める判断材料になる。
9) 設備故障対応	・非溶解性吸収材投入装置がスタンバイしていることを、取り出し作業の条件として位置づける。	・投入装置の故障自体は、臨界事象の起因とはならない。しかし通常状態に復帰できないので、燃料デブリ取り出しは実施できない。
10) その他	・吸収材投入後に燃料デブリ取り出し作業を再開するための手順、判断基準を定める。	・未臨界度測定を行い、 k_{eff} が判定基準より低いことを確認する。判定基準は、作業による増加分を考慮して、0.95より小さい値とする。

7. 実施内容

7.3 臨界管理の全体まとめ まとめ

- ・燃料デブリ大規模取り出し時臨界管理について、基本的な要求事項を整理した。
臨界管理の目的
 - 未臨界維持 : 未臨界度測定、取り出し作業制限、中性子吸収材常用
 - 臨界到達防止 : 臨界近接監視(予測監視・常時監視)、長期的な監視
 - 臨界検知・終息 : 臨界検知、ホウ酸水緊急注入による終息
- ・臨界監視手順について整理した。
未臨界度測定、予測監視、常時監視、臨界検知・終息
- ・非溶解性中性子吸収材の投入手順について整理した。

7. 実施内容

7.4 今後へ向けての課題の整理

これまでに得られた知見や課題をもとに、今後、取り出し工法の具体化や内部情報や燃料デブリ性状の新たな情報を踏まえながら、本格的な取り出しまでに実施すべき課題を以下に示す。

(表1) 工法に関する課題

- 採用される工法により解決されるべき課題の重要度が変わる点に留意が必要

項目	課題
重量物落下対策	<ul style="list-style-type: none"> ・ 内部の状況確認による落下・崩落の恐れのある物体の特定。取り出し計画での配慮。 ・ 燃料デブリの性状分析(壊れやすさ“破壊エネルギー”の把握による、臨界リスクの評価) ・ 代表事象での臨界発生時の外部影響評価
切削粉対策	<ul style="list-style-type: none"> ・ 加工法ごとの切削粉発生量、大規模取り出し時水位、冷却材循環量を踏まえた切削粉流動解析による蓄積可能性評価 ・ (必要に応じて) ベント管、S/C、トラス室での臨界検知方法、ホウ酸水注入方法の検討 ・ 切削粉蓄積臨界時の外部影響評価
スループット改善	<ul style="list-style-type: none"> ・ 取得情報に基づく臨界リスクを再評価、管理方法簡素の検討 ・ ホウ酸水常用による燃料デブリ取り出しの加速の可能性検討
その他	<ul style="list-style-type: none"> ・ ホウ酸水無しでの燃料デブリ取り出しに関する有識者意見の確認 ・ 加工制限、水位制限、最小臨界量、取り扱い量など、工法の制限の根拠となる臨界評価は、燃料デブリの不確かさを考慮して保守的な条件で評価されている。今後の内部調査や段階的取り出しによって、燃料デブリの濃縮度、不均一性、U含有率などの情報が得られれば、過度に保守的な条件を見直して臨界評価を再検討することによって、工法の制限の緩和が期待される。

7. 実施内容

7.4 今後へ向けての課題の整理

(表2) 臨界監視に関する課題

項目	未臨界度測定	予測監視	常時監視	臨界検知・終息
目的・機能	—	—	—	—
方法	<ul style="list-style-type: none"> 未臨界度測定方法の事前検証(検証データ追加、ブラインドテスト) 段階的取り出しでの試験的適用による確認 PCVがモニタによる推定やサブリング分析との照合による確認 ファインマンα法の適用の要否の判断(1/mとの使い分け) 	—	—	<ul style="list-style-type: none"> 加工箇所以外の臨界事象を希ガスモニタで検知した場合の場所の同定と対策の方法案(レベル1への復帰策)
測定頻度	—	<ul style="list-style-type: none"> 現場での加工体積の確認方法 大規模取り出し前の段階での加工体積不確定さの確認 	—	—
測定位置	<ul style="list-style-type: none"> 中性子束分布測定による監視計画策定 	<ul style="list-style-type: none"> 中性子束分布測定による監視計画策定 中性子束分布の高次モード変化の影響を考慮した測定位置の設定 	—	—
測定時間	<ul style="list-style-type: none"> 有意な測定結果を得るための必要カウント数の設定 	—	<ul style="list-style-type: none"> 装置ノイズ影響、現場の中性子束に応じた移動平均時間設定 	—
判断基準の設定方法	<ul style="list-style-type: none"> 臨界までの余裕の妥当確認 	—	<ul style="list-style-type: none"> 有効性評価の前提条件(加工量、加工体積の不確定さ等)の確認(大規模取り出し前の段階で確認) 	<ul style="list-style-type: none"> ベント管、S/Cの臨界検知性(システム側との協力による検討)
測定結果に見込む不確定さ	<ul style="list-style-type: none"> λ(即発中性子寿命)に起因する不確定さ低減 例：α固有値による臨界監視 吸収材投入後の影響(KUCA試験データの分析評価) 	<ul style="list-style-type: none"> 吸収材投入後の影響(KUCA試験データの分析評価) 	—	—

7. 実施内容

7.4 今後へ向けての課題の整理

(表2) 臨界監視に関する課題(続き)

項目()	未臨界度測定	予測監視	常時監視	臨界検知・終息
判断基準逸脱時の対応	—	—	・現場の手順を整理	・停止能力要求のホウ酸水系システム設計への反映
設備故障対応	・中性子線源を用いた遠隔校正の方法	・現場での動作確認方法、感度校正の方法検討。 ・中性子線源を用いた遠隔校正の方法	・現場での動作確認方法、感度校正の方法検討。 ・中性子線源を用いた遠隔校正の方法	—
その他	・測定できない場合の処置 Y値カーブから測定の妥当性を確認する方法 測定不能の要因が、未臨界度の深さ(測定範囲外)か、それ以外の原因(測定不能)かを区別する方法 ・以上の手順を臨界技術者がいなくても実施できるフレームワークに落とし込む。	・以上の手順を臨界技術者がいなくても実施できるフレームワークに落とし込む。	・以上の手順を臨界技術者がいなくても実施できるフレームワークに落とし込む。	・有効性評価 PORCAS-Fコード [*] 妥当性説明 ^(*) ・臨界が終息しない場合の処置 今後、仮設機器での対応も含めて、システムや安全担当者と検討 ・以上の手順を臨界技術者がいなくても実施できるフレームワークに落とし込む。

(*) PORCAS-Fコードの妥当性を確認するため、これまでに溶液体系を模擬した臨界過渡実験(TRACY実験)や燃料棒体系を模擬した臨界過渡実験(SPERT実験)との比較が行われている。しかし、燃料デブリのような粒状あるいは塊状の形状が自然対流で冷却されている条件とは異なる。このような臨界挙動を模擬した実験の事例は見つからず、実施は困難と考えられる。実験によらず妥当性を確認する方法としては、PIRT分析に基づく感度解析を行い、解析結果に見込むべき不確定さを評価する方法が考えられる。

7. 実施内容

7.4 今後へ向けての課題の整理

(表3) 中性子吸収材に関する課題

項目	ホウ酸水（常用、緊急注入）	非溶解性中性子吸収材
目的・機能	・ 常用及び緊急用。使用方法の策定	・ 複数の用途が考えられるため、それぞれの使用方法を策定（以下は「臨界近接した燃料デブリに使用する場合」の例）
方法	・ 常用及び緊急注入に必要設備の具体化 ・ ホウ酸水使用時の他設備影響評価、影響緩和策の検討	・ 投入装置を試作してロボットアームとの組み合わせによる遠隔操作の確認 ・ 段階的取り出しでの試験的適用による確認
投入頻度	・ (常用)運用中の濃度変化を考慮した、運用濃度の設定 ・ (緊急注入)代表的な臨界事象終息に必要な濃度設定	・ 吸収材の投入頻度を1日1回以下とするために、燃料デブリ取り出しの1日の加工範囲を確認して、十分な量を投入できるように投入装置の容量を定める。
投入位置	・ 冷却材のかからない位置での臨界防止策の検討	・ 事前に計画された1日あたりの加工範囲の燃料デブリ形状に対して、吸収材のタイプ、投入量を決める考え方 ・ 燃料デブリ加工装置と同程度の位置決め精度で吸収材を投入できることを確認する。 ・ 投入した範囲を目視等で確認する方法の確立
投入時間	・ (緊急注入)臨界時影響を許容範囲に収めるための注入時間の設定、実現するための設備検討	・ ロボットアームによる遠隔操作で投入装置を現場に搬送するまでの時間の確認。また、投入後に装置を回収して、次の使用に向けて吸収材を装填する準備が整うまでの時間の確認。
投入量の設定方法	・ (常用)ホウ素濃度モニタリング方法・間隔の設定 中性子束常時監視でのバックアップ	・ 加工予定の燃料デブリ形状に対して、吸収材のタイプ、投入量、範囲を決める考え方を準備しておく。
投入量不足の対応	・ 濃度維持の方法(濃度低下時の対応検討)	特になし (決められた量と範囲が未達の場合には、満足するまで繰り返し吸収材を投入する。)
有効性評価	・ 内部調査やサンプリングで得られる、燃料デブリ組成と形状の情報を適宜反映して臨界評価の解析を行い、吸収材の有効性の確認、必要濃度・投入量の見直し	
設備故障対応	・ 代替の濃度監視手段、ホウ酸補給方法の検討	・ 現場での動作確認方法 ・ 故障した投入装置の回収と予備機への交換方法
その他		・ 使用後の廃棄について廃棄物PJへ情報提供 ・ α 線、 β 線の影響について評価する方法

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。 (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。 (終了時目標TRL:レベル4)</p>

上記実施目標を達成した。

参考資料

- 参1 大規模取り出し時の臨界管理方法
- 参2 臨界管理の基本要求事項
- 参3 用語説明

参1 大規模取り出し時の臨界管理方法(ホウ酸水常用)

事前にホウ酸水を投入し、ホウ酸水中下で取り出しを行うこと

レベル1(通常状態) 異常発生防止=臨界防止	レベル2(異常状態) 異常拡大防止=臨界事故防止	レベル3(事故) 事故の影響緩和	機能要求
keff	1.0		
敷地境界線量	1mSv	5mSv	
<p>(未臨界維持)</p> <p>取り出し作業制限</p> <p>ホウ酸水による未臨界維持・ホウ素濃度監視</p>	<p>(臨界到達防止)</p> <p>大幅に緩和or撤廃</p> <p>失敗(臨界近接発生)</p> <p>加工中の常時監視のみ</p> <p>臨界近接監視(中性子検出器)</p> <p>取り出し作業中止</p> <p>成功(ホウ素濃度増加などで未臨界度を深くし、臨界近接箇所を除去により通常状態へ復帰)</p>		<p>管理基準内に未臨界度を維持すること</p>
	<p>失敗(臨界発生)</p> <p>臨界検知(ガスサンプリング系システム・中性子検出器)</p> <p>緊急ホウ酸水注入</p> <p>成功(臨界箇所の除去により通常状態へ復帰)</p>		<p>想定以上の臨界近接を検知して、取り出し作業を停止することで、臨界を防止すること</p>
	<p>成功(臨界終息後、臨界発生箇所の除去により通常状態へ復帰)</p>	<p>失敗(通常レベル超過)</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>臨界を検知し、速やかに停止し、通常レベル以上の外部影響発生を防止すること</p> <p>一般公衆・作業員過剰被ばく防止</p>

参1 大規模取り出し時の臨界管理方法(重量物落下)

レベル1(通常状態) 異常発生防止=臨界防止	レベル2(異常状態) 異常拡大防止=臨界事故防止	レベル3(事故) 事故の影響緩和	機能要求
keff	1.0		
敷地境界線量		1 mSv	5mSv
(未臨界維持) 落下物発生防止	(臨界到達防止)		管理基準内に未臨界度を維持すること
<div style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> ホウ酸水による未臨界維持 ・ホウ素濃度監視 (オプション) </div>		失敗(臨界発生)	
	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> 臨界検知 (ガスサンプリング系システム) </div>		臨界を検知し、速やかに停止し、通常レベル以上の外部影響発生を防止をすること
	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> 緊急ホウ酸水注入 </div>	失敗(通常レベル超過)	
成功(臨界箇所除去により通常状態へ復帰)			
	成功(臨界終息後、臨界発生箇所の除去により通常状態へ復帰)	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> 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 </div>	一般公衆・作業員過剰被ばく防止

参1 大規模取り出し時の臨界管理方法(切削粉蓄積)

レベル1(通常状態) 異常発生防止=臨界防止	レベル2(異常状態) 異常拡大防止=臨界事故防止	レベル3(事故) 事故の影響緩和	機能要求
keff	1.0		
敷地境界線量	1mSv	5mSv	
<p>(未臨界維持)</p> <p>切削粉回収</p> <p>水位制御などでの冷却水流出防止</p> <p>ホウ酸水による未臨界維持・ホウ素濃度監視</p> <p>(オプション)</p>	<p>(臨界到達防止)</p> <p>失敗(臨界近接発生)</p> <p>ガスモニタ・中性子モニタ(常時監視)</p> <p>臨界近接監視(中性子検出器・PCVガスモニタ)</p> <p>取り出し作業中止</p> <p>成功(ホウ素濃度増加などで未臨界度を深くし、臨界近接箇所の除去により通常状態へ復帰)</p>		<p>管理基準内に未臨界度を維持すること</p>
	<p>失敗(臨界発生)</p> <p>臨界検知(ガスサンプリング系システム)</p> <p>緊急ホウ酸水注入</p>		<p>想定以上の臨界近接を検知して、取り出し作業を停止することで、臨界を防止すること</p>
	<p>成功(臨界箇所の除去により通常状態へ復帰)</p>	<p>失敗(通常レベル超過)</p>	<p>臨界を検知し、速やかに停止し、通常レベル以上の外部影響発生を防止をすること</p>
	<p>成功(臨界終息後、臨界発生箇所の除去により通常状態へ復帰)</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>一般公衆・作業員過剰被ばく防止</p>

参1 大規模取り出し時の臨界管理方法

深層防護の補足説明

・ホウ酸水注入にもかかわらず臨界が終息しない場合の対応

これまでの臨界管理に関する検討では、臨界防止及び臨界発生時の終息・外部影響緩和を主に検討してきたが、ホウ酸水注入にもかかわらず臨界が終息しないと想定した場合の追加の終息・外部影響緩和手段を準備しておくことが望まれる(具体的な検討は今後の課題)。

なお、これまでの議論では、追加手段をすべて設備で対応するのではなく、機動的対応も含めてもよいという意見があった。よって、まずレベル2までを達成する設備を検討したうえで、臨界が終息しない可能性を分析し、仮設機器も用いた対応も含めて、対策を検討することが望まれる(今後の課題)。

・レベル3以降の対策

ホウ酸水注入にもかかわらず臨界が終息しない場合の追加対策を、暫定的にレベル3対策と記載しているが、本来は、レベルの定義、取り扱うべき事象は全体(臨界を含む)を対象として検討したうえで、具体的な対策の議論を進めるべきであると考え(なお、レベル4以降は事業者の対応が主になると考えている)。

参2 臨界管理の基本要求事項

臨界到達防止

- ・予測監視手順の一部を抜粋して以下に示す。

加工前の中性子束測定による臨界近接の有無確認、加工着手可否判断。

臨界管理の要求事項		具体的展開：下横取り出し作業（ホウ酸水常用せず）	
項目	要求	要求(細目)	燃料デブリ過剰加工
2) 臨界防止	2-3) 臨界到達防止 臨界近接が生じた場合でも、これを監視し臨界に至る前に事象を終結させる。	細目なし	臨界近接が生じた場合でも、これを監視し臨界に至る前に事象を終結させる措置を講じる。具体的には2-3-1)～2-3-3)に規定する ^(*) 。
	2-3-1) 臨界近接監視 (予測監視)	2-3-1-1) 作業中の臨界近接を監視する手段を持つ	取り出しアームに装着する予測監視用中性子検出器を用いる。
		2-3-1-2) 中性子束の測定位置は臨界近接が適切に監視できる位置とする。	加工位置と連続した燃料デブリの'島'で測定を行う。
		2-3-1-3) 燃料デブリ加工後の中性子束を測定し、次回加工での臨界到達がないことを判断して作業に着手する。	燃料デブリ加工後に燃料デブリ加工位置近傍で中性子束を測定する。初期状態のkeff(未臨界度測定結果)より、加工後のkeffを求め、判断基準未滿であることを確認して次回加工を実施する。keffが測定できない場合には、逆増倍係数(1/m)にて判断を行う。
		2-3-1-4) 臨界近接監視頻度 2-2-2で規定した添加反応度の間隔で測定を実施する。	4,000cm ³ の加工体積ごとに臨界近接監視を行う。
		2-3-1-5) 臨界近接判断基準の考え方 臨界管理基準から少なくとも1回分の添加反応度、余裕、測定の不確定さ、評価の不確定さを減じたものとする。	keffの臨界判断基準(0.95)から加工体積の不確定さ分として5倍程度の添加反応度、測定の不確定さを減じたものを判断基準とする。1/mの場合でも、臨界の管理基準から設定する。
	2-3-1-6) 臨界近接判断基準に抵触する場合には次回作業に着手せず、原因分析を行う。事前に策定しておいた作業再開のための手順を実施する。作業再開のための手順をサポートする。	臨界近接判断基準に抵触する場合次回作業に着手しない。未臨界度測定による臨界近接の有無を確認する。臨界までの余裕を確認する。その結果に基づき、加工体積制限を小さくした取り出しの継続、または、ホウ酸水常用での取り出しへの切り替えを検討する。	

参2 臨界管理の基本要求事項

予測監視 監視手順

No.98

項目	要求	考え方
1)目的・機能	<ul style="list-style-type: none"> ・臨界近接を検知して、加工作業を中断し臨界を防止する。 1) 過剰な臨界近接($k_{eff}=0.95$など)を検知し作業を停止 2) 想定以上の変化をとらえて臨界近接の兆候を早期検知 	<ul style="list-style-type: none"> ・2)は、1)をより確実なものとするため、予想以上の変化をとらえて事前に分析を行うもの。
2)方法	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料デブリ加工前に加工位置近傍の中性子検出器で中性子束を測定し、前回測定時からの変化量を外挿し、次回加工による臨界到達の可能性を評価し、加工着手の可否を判断する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・臨界近接の評価は、臨界近接監視に一般的に用いられる中性子源増倍法に基づく。 ・仮に初期k_{eff}が与えられていない場合、$1/m$による監視を用いる。
3)測定頻度	<ul style="list-style-type: none"> ・添加反応度$0.5\% \Delta k/k$に相当する体積に相当する加工ごとに監視を行う。(例えば燃料デブリ加工体積$4,000\text{cm}^3$ごと)。 ・加工体積は、加工に伴う不確定さを加味して設定する(見込むべき不確定さは、事前の小規模取り出しで得られる各種の情報に基づき設定する)。 	<ul style="list-style-type: none"> ・添加反応度$0.5\% \Delta k/k$は、①1回の加工で臨界に到達することが無いように十分小さなものとする。②万一臨界状態から燃料デブリ加工して反応度が添加された場合でも、即発臨界を防止するため設定したもの。
4)中性子測定位置	<ul style="list-style-type: none"> ・水平方向：燃料デブリ加工位置と同じ燃料デブリの'塊'で加工位置から水平方向で50cm(気中工法の場合)の範囲内で測定する。加工の進展に伴い測定位置からの水平方向距離が遠くなる場合には、基準計数率を測定しなおし測定点を移動。 	<ul style="list-style-type: none"> ・連続した燃料デブリの塊は同じ未臨界度を持ち中性子束の相対変化も共通のため、加工位置によらず測定点は固定しておいてよい。加工位置と測定点の距離50cmはKUCAなどの経験に基づく暫定値。 ・中性子は全方位に等方に放出されるとは限らない。検出器がロボットアームの陰になることも考慮して、必要に応じて中性子測定シミュレーションを行い、検出器の配置を決める。
5)中性子測定時間	<ul style="list-style-type: none"> ・計測時間は、判断基準に見込むべき不確定さを満足できるように設定(約10分程度と想定) 	<ul style="list-style-type: none"> ・中性子束計数の統計的不確定さは、標準偏差$\sigma=\sqrt{\text{計数值}}$とし、基準計数率との比の不確定さの許容値から設定する。
6)判断基準の設定方法	<ul style="list-style-type: none"> k_{eff}を用いる場合)臨界の判断基準(0.95)から次回加工に伴う添加反応度($0.5\% \Delta k/k \times \text{余裕}$)と不確定さを減じて設定 $1/m$を用いる場合)$1/m=0.5$から不確定さを減じて設定 	<p>左記参照</p>
7)不確定さの設定方法	<ul style="list-style-type: none"> ・計数值の統計的不確定さ、測定点の再現性(位置ずれ)、ノイズの影響、検出器感度の変動・減衰等 	<ul style="list-style-type: none"> ・ノイズ影響については事前の取り出し装置のモックアップ試験などで影響を確認しておく。
8)判断基準逸脱時の対応	<ul style="list-style-type: none"> ・臨界近接の恐れありとして、加工作業中断。 ・計測時間を長くした再測定及び未臨界度測定 	<ul style="list-style-type: none"> ・結果により、加工サイズの縮小(監視間隔の短縮)、中性子吸収材の適用などの対策を検討
9)通常状態(深い未臨界)での監視方法	<ul style="list-style-type: none"> ・通常想定される変化の大きさを超える場合に原因分析 ・取り出し作業は継続しつつ、臨界管理専門家を招集し、分析に着手する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・想定される変化を初期k_{eff}に応じて評価しておく。 ・6)の判断基準を逸脱しない限り、臨界のリスクは生じないため、作業継続は可能
10)中性子検出器故障対応	<ul style="list-style-type: none"> ・中性子検出器が正常に動作していることを、取り出し作業の条件として位置づける。 	<ul style="list-style-type: none"> ・中性子検出器の故障自体は、臨界事象の起因とはならないが、監視が行えない状態なので、燃料デブリ取り出しは実施できない。
11)中性子吸収材適用時予測監視	<ul style="list-style-type: none"> ・中性子吸収材を用いた場合の臨界近接防止(未臨界状態の維持)は吸収材の濃度管理で代替できる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・濃度監視のバックアップとして、定期的に中性子束レベル監視を行っておくほうが良い。

参3 用語説明

用語	説明
炉雑音法	核分裂反応による中性子を検出器で測定すると、一定の時間内における中性子の計数率は平均値のまわりに揺らいで観測される。このような中性子数の時間的揺らぎを原子炉雑音と称す。これを分析することにより、体系の核的な特性を得る手法が炉雑音法である。
ファインマン α 法	炉雑音法の一つであり、ある時間幅Tに起こった中性子検出数の平均と分散の比を調べ、時間幅Tに対してプロットすることにより、即発中性子減衰定数 α を得る手法である。R.P.Feynmanが提唱した。
非溶解性中性子吸収材	中性子吸収材は、中性子を吸収することによって、臨界になりにくくする性質を持つ。ホウ酸水のような溶解性の中性子吸収材に対して、“非溶解性”または“不溶性”の性質を持つ中性子吸収材のことである。
中性子検出器 - コロナ放電利用型	円筒管の内側に中性子と反応するB10が塗布されており、中心線と円筒管の間に電圧をかけて、コロナ放電が生じる高電圧領域で動作することが特徴的な検出器である。ロシアのFEO社(旧RosRAO)が開発した技術であり、関連する補助事業で試作された。
- SiC半導体型	中性子と反応するBをドーピングした薄型半導体検出器である。ガンマ線感受性が低く、遮蔽体を軽減できるため、小型・軽量で高感度検出器を構成可能。英国IPL社が開発した技術であり、関連する補助事業で試作した。
- マルチセルHe-3型	He-3ガスが充てんされた円筒管の内側に複数の陽極と陰極の芯線が配置された構造であり、高い中性子検出感度を狙った設計である。国内CETD社が関連する補助事業で試作した。

以上