

【成果公開資料】

令和5年度開始廃炉・汚染水・処理水対策事業費補助金

安全システム（液体処理システム）

2024年度最終報告

Decom.Tech

2025年9月

東双みらいテクノロジー株式会社

事業概要	1章. はじめに	・・・ p.4
	2章. 事業の目的	・・・ p.5
	3章. 事業の背景	・・・ p.6
	4章. 本事業完了時の達成目標	・・・ p.8
	5章. 実施体制図	・・・ p.9
	6章. 実施スケジュール	・・・ p.10
	7章. 実施項目	・・・ p.11
成果報告	8章. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果	・・・ p.18
	9章. α 核種除去技術の開発, 実液試験準備に伴う要素試験結果	・・・ p.70
	10章. 二次廃棄物処理技術の開発, 固形分濃縮技術の要素試験結果	・・・ p.101
	11章. 二次廃棄物処理技術の開発, スラッジ脱水技術の要素試験結果	・・・ p.109
	12章. まとめ	・・・ p.130
	補足資料	・・・ p.132

8章. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果		p.18
8.1 コロイド除去の試験液調製方法の検討 (模擬性の検討, 試験液の調製)		p.22
8.2 コロイド除去方式の性能試験の計画		p.29
8.2.1 新規設備: 吸着槽方式 (粉状吸着材) の除去性能試験		p.32
8.2.2 新規設備: 水質調整方式の除去性能試験		p.36
8.2.3 現行設備: 共沈方式の除去性能試験		p.41
8.3 現行設備に関するイオン状 α 核種除去試験		p.46
8.4 現場への適用性の観点における分析		p.51
8.5 今後の課題整理とまとめ		P.64
9章. α 核種除去技術の開発, 実液試験準備に伴う要素試験結果		p.70
9.1 バッチ試験結果を用いた解析評価		p.74
9.2 通水初期の吸着挙動確認		p.84
9.3.1 実液サンプル中のスラッジの酸溶解・中和処理・調整等		p.87
9.3.2 スラッジからの α 核種溶出評価試験		p.89
9.3.3 低 α 濃度溶液を使用した浸漬試験		p.91
9.4.1 実液を用いた次段階の試験計画の策定		p.92
9.4.2 現場への適用性の観点における分析		p.96
9.4.3 今後の課題整理とまとめ		p.98
8・9章まとめ α 核種除去技術の開発		p.100

10章. 二次廃棄物処理技術の開発, 固形分濃縮技術の要素試験結果		p.101
10.1 クロスフローフィルタ要素試験		p.105
10.2 現場への適用性の観点における分析		p.108
11章. 二次廃棄物処理技術の開発, スラッジ脱水技術の要素試験結果		p.109
11.1 フィルタ方式によるスラッジ脱水性能の確認試験		p.113
11.1.1 カートリッジフィルタ要素試験		p.113
11.1.2 バグフィルタ試験		p.118
11.2 減圧・加熱方式によるスラッジ脱水性能の確認試験		p.121
11.2.1 減圧・加熱脱水試験		p.121
11.2.2 核種脱離試験		p.124
11.3 現場への適用性の観点における分析 3つの方式まとめ		p.125
11.3.1 カートリッジフィルタを用いる場合の容器充填率の向上方法について		p.126
11.3.2 カートリッジフィルタ以外の脱水技術の選定について		p.126
11.3.3 今後の課題		p.127
11.4 二次廃棄物処理システムの構成案（吸着槽方式）		p.128
12章. まとめ		p.130
補足資料		p.132
8章. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果		p.133
9章. α 核種除去技術の開発, 実液試験準備に伴う要素試験結果		p.161
10章. 二次廃棄物処理技術の開発, 固形分濃縮技術の要素試験結果		p.178
11章. 二次廃棄物処理技術の開発, スラッジ脱水技術の要素試験結果		p.188

1. はじめに

- 本資料は、「安全システム（液体処理システム）」における成果公開資料である。以下の「資料の内容」にて構成される。

◆ 資料の内容

- 本事業の概要（1～7章） …… 実施概要
- 実施した技術開発の試験結果（8～11章） …… 最終成果と将来の課題
 - ✓ α 核種除去技術の開発
 - ✓ 二次廃棄物処理技術の開発
- 全体まとめ
- 補足資料 …… 8章から11章までにに関する補足資料を巻末に添付

2. 事業の目的

◆ 2.1 事業の目的

- 福島第一原子力発電所（1F）の廃炉事業においては中長期ロードマップに基づく大規模な燃料デブリ取り出し作業の実現を目指し、取り出し時の安全システムを確立させるため、過年度から研究開発をすすめている。
- 2021-2022年度に実施された、燃料デブリ取り出し時の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）の事業成果を踏まえ、以下の安全システム（液体処理システム）の開発を目的とし、本開発を実施することで1Fの廃炉対策を円滑に進めるとともに、我が国の科学技術水準の向上の一助に資することを目的とする。
 - ① **α核種除去技術の開発**
 - ✓ 液体処理システムの除去対象の一つとして溶解性α核種があり、2022年度までの補助事業では吸着塔方式を用いた溶解性α核種の除去を主案として検討してきた。これまでの試験結果より、**吸着塔では除去できないコロイド状α核種が含まれる懸念があるため、コロイド状α核種にも対応し得る処理方法の開発を行う。**また、これまで検討した吸着塔方式を実機適用に進めるための試験準備を行う。
 - ② **二次廃棄物処理技術の開発**
 - ✓ 液体処理システムでは、**システムで発生する二次廃棄物（燃料デブリ粒子等のα核種を含有したスラッジ等）の処理技術が必要であり、発生するスラッジに対応し得る処理方法の技術開発を行う。**これまでの補助事業での検討結果から、固液分離処理の前段に必要な固形分濃縮技術、スラッジを減容するための脱水技術の開発を行う。
- 本開発は、東京電力HDのニーズを踏まえ、関係者（経済産業省、東京電力HD、NDF）との協議を行い、進めるものとする。本開発の成果は、液相系安全システム設計へ展開され、今後の実機設計計画策定に活用される。

3. 事業の背景（1/2）

◆ 3.1 これまでの成果と本事業の実施方針（①α核種除去技術の開発）

➤ 事業の背景として、これまでの成果と課題，そして課題をふまえた本事業の実施方針を下表に示す。

表 これまでの成果と本事業の実施方針（α核種除去技術の開発）

項目	これまで（2022年度まで）の成果	課 題※	本事業の実施方針※
a.	✓ 溶解性α核種除去のため吸着塔方式の除去技術の開発として、燃料デブリ取り出し時の環境（窒素環境、アルカリ条件等）を想定した性能試験を実施し、有効な吸着材を導出。	✓ コロイド状のα核種については、吸着塔方式による除去が困難である旨の指摘があり、また1Fの地下滞留水にはコロイド状のα核種が一定量存在することが示唆されている。 ✓ コロイド状α核種除去の優位な技術として現行設備（共沈方式）や新規の方式が候補に挙がったが、性能把握のための要素試験は未実施。	✓ コロイド状α核種にも対応し得る処理方法を開発する。
b.	✓ 吸着塔方式を用いた溶解性α核種除去技術を実機適用まで進めるために必要な、通水試験のステップ（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）を検討した。そのうちミニカラム試験については、試験装置構成の検討および実液を用いた試験液の調整方法を検討した。	✓ 吸着塔方式の実機適用には、通水時の除去性能確認、吸着材寿命の検証、吸着材/吸着塔構成の設定のため、通水試験を実施し実機への適用性に係わるリスク低減を図る必要があるが、試験に必要な水の確保はα核種の濃度・量の観点から、ラボ試験では困難な見込み。	✓ 通水試験に必要な水の確保のため、1Fの滞留水（実液）を用いた試験が有効と考えており、1Fにおける実液試験計画案を具体化する。 ✓ 実液試験計画案の策定に資するラボで可能な要素試験を計画。（今後の実液試験に用いる候補吸着材の絞り込み等）

※ 内容詳細については、項目a.は8章，b.は9章 を参照

3. 事業の背景（2/2）

◆ 3.2 これまでの成果と本事業の実施方針（②二次廃棄物処理技術の開発）

➤ 事業の背景として、これまでの成果と課題，そして課題をふまえた本事業の実施方針を下表に示す。

表 これまでの成果と本事業の実施方針（二次廃棄物処理技術の開発）

項目	これまで（2022年度まで）の成果	課題※1	本事業の実施方針※1
a.	✓ 粉末吸着材を用いて処理した水を固液分離する技術については，沈降分離を想定し，沈降分離処理に用いる凝集剤の選定等を行い，沈降分離処理の手法を立案。	✓ 沈降分離処理の前段でSS※2成分を濃縮処理し，適切なSS濃度範囲に調整する必要性が示され，文献調査からクロスフロー（CF）フィルタの適用性が高いことを確認し液体処理システムへ適用可能な見込みを得たが，CFフィルタの適用性確認を目的とした要素試験が未実施。	✓ CFフィルタの適用性確認のため要素試験を計画。
b.	✓ 廃棄物減容の観点から脱水方法を検討。スラッジ脱水技術の候補として，カートリッジフィルタ方式，バグフィルタ方式および減圧・加熱方式を選定。 ✓ 候補のひとつであるカートリッジフィルタの適用性検討を目的とした要素試験を実施し，脱水率，ろ過速度および脱水後のスラッジ性状等の検討に資するデータを取得。	✓ カートリッジフィルタ方式の要素試験ではろ過速度が小さくなることが判明。 ✓ バグフィルタ方式（空気逆洗方式）によりスラッジ回収容器内部にカートリッジフィルタ等の構造物を設置せずにスラッジ充填率を向上させる優位技術を選定したが，適用性検討を目的とした要素試験が未実施。 ✓ フィルタ方式以外の脱水技術の候補として減圧・加熱方式を選定したが，適用性検討を目的とした要素試験が未実施。	✓ カートリッジフィルタ方式ではろ過速度の向上を図る改善を施し要素試験を計画。 ✓ 未実施であるバグフィルタ方式および減圧・加熱脱水方式の要素試験を計画。

※1 内容詳細については，項目a.は10章，b.は11章を参照

※2 Suspended Solids, 水中に浮遊する不溶性物質

4. 本事業完了時の達成目標

事業の目標達成の判断基準となるべき、わかりやすい指標を検討の上、数値等で設定（目標とする技術成熟度（TRL）を設定）し、事業完了時にその達成/未達について検証。

2023/2024年度事業完了時の達成目標		技術成熟度 (TRL)	結果
① α 核種除去技術の開発			
a. 溶解性 α 核種に加えてコロイド状 α 核種にも対応し得る、より合理的な処理方法の開発 ➤コロイド状の α 核種の除去技術が選定されていること。コロイド状の α 核種の除去も考慮した処理装置の系統構成案が導出されていること。		3	達成
b. 液体処理システムの実機への適用性に係わるリスク低減のため実液使用する試験準備 ➤実液の使用を想定した試験に用いる候補吸着材が選定されていること。また試験方法、試験装置等を含めた試験計画案が具体化されていること。		3	達成
② 二次廃棄物処理技術の開発			
a. 粉状吸着材による処理後の固形分濃縮技術の開発 ➤吸着材を用いた核種吸着処理で発生する処理済水内の固形分濃縮に用いるクロスフローフィルタ候補が選定されていること。		4	達成
b. スラッジ回収システムの合理化検討 ➤二次廃棄物（スラッジ）の回収にカートリッジフィルタを用いる場合の容器充填率の向上方法を取得していること。またカートリッジフィルタ以外の脱水技術についても選定されていること。		4	達成

TRL3：「応用研究」

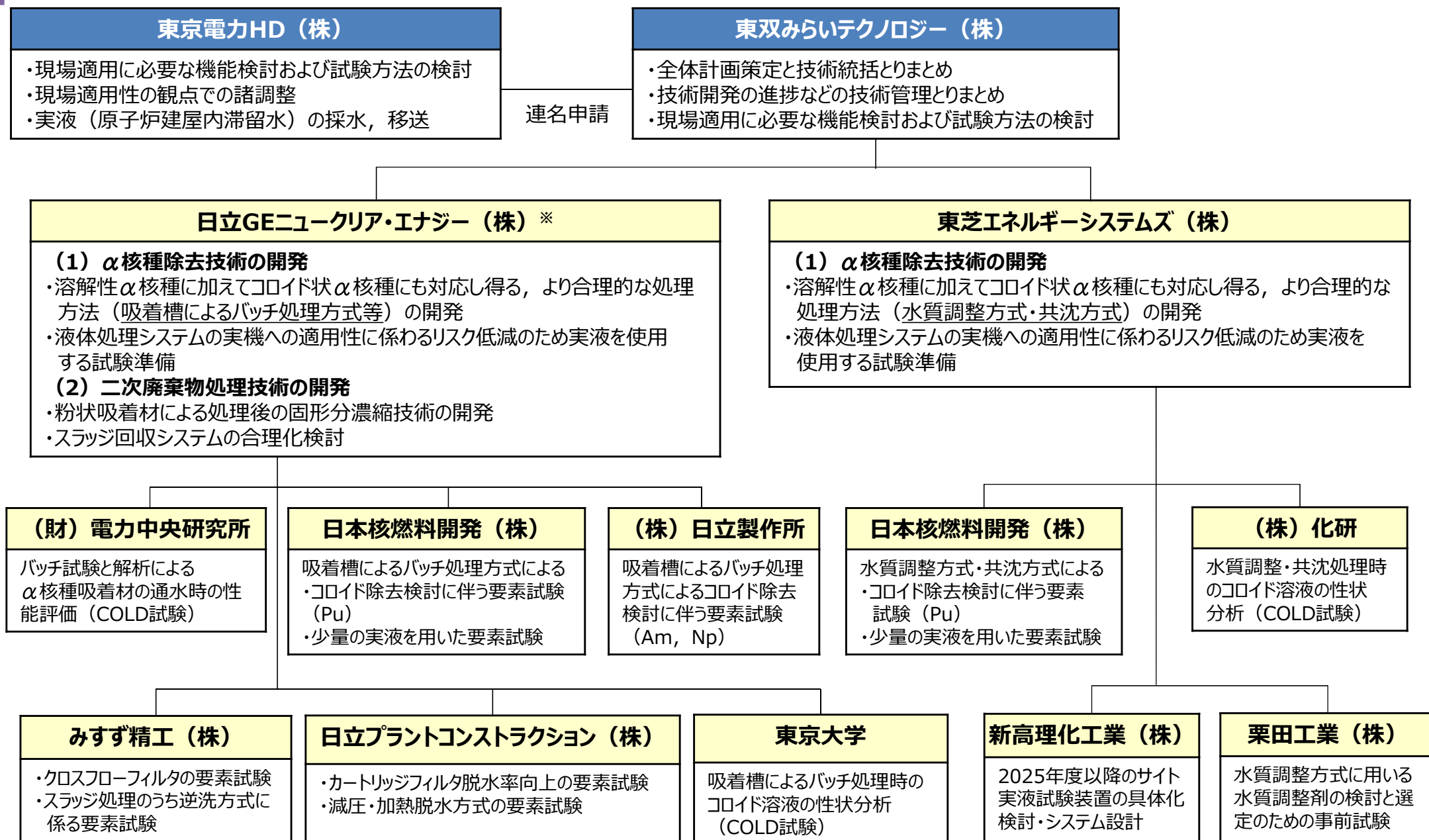
従来の経験を応用，組合せによる開発，エンジニアリングを進めている段階。または，従来経験のほとんど無い領域で基礎データに基づき開発，エンジニアリングを進めている段階。

TRL4：「実用化研究」

開発，エンジニアリングのプロセスとして，試作レベルの機能試験を実施する段階。

結果の詳細については8章以降を参照

5. 実施体制図



6. 実施スケジュール

■ : 計画
▼ : 主要なマイルストーン
▼ : 事業レビューに関するマイルストーン
▽ : 事業レビュー時期

事業名：安全システム（液体処理システム）

実施項目		令和 5 年度							令和 6 年度												
		9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	
主要なマイルストン		▼交付決定							▼中間報告 ▼試験計画策定							▼中間報告 最終報告 コロイド除去設備の系統構成策定 実液試験計画策定 クロスフローフィルタ選定 スラッジ回収システム選定					
事業レビュー		▽試験計画概要レビュー							コロイド除去設備▽の系統検討方針 実液試験計画策定方針▽ クロスフローフィルタ選定方針▽ スラッジ回収システム選定方針▽												
①α核種除去技術の開発	a.溶解性α核種に加えてコロイド状α核種にも対応し得る、より合理的な処理方法の開発	計画策定・用品手配							新規設備に係る要素試験（粒状・粉状吸着材の性能試験）												
		事前試験（コロイド溶液調製試験）							現行設備でのコロイド状α核種の除去方法検討に係る要素試験 コロイド除去設備構成検討												
	b.液体処理システムの実機への適用性に係わるリスク低減のため実液使用する試験準備	計画策定・用品手配							候補吸着材の絞り込み(事前試験・要素試験)												
		実液試験方法の検討・準備							実液の調整方法等の検討 実液を用いた試験計画検討												
②二次廃棄物処理技術の開発	a.粉状吸着材による処理後の固形分濃縮技術の開発	計画策定・用品手配							クロスフローフィルタ要素試験 クロスフローフィルタ候補選定												
	b.スラッジ回収システムの合理化検討	計画策定・用品手配							カートリッジフィルタ要素試験 減圧・加熱脱水方式の要素試験 スラッジ回収システムの合理化検討												

7. 実施項目（1/7）

◆ 7.1 本事業の検討対象，全体フロー

- 燃料デブリ取り出し時に想定される液体処理システムのうち，**本事業の検討対象（①α核種除去および②二次廃棄物処理技術）を以下に示す**とともに，上流（実施項目①）から下流（実施項目②）へと繋がる処理プロセス間，前後の関連性を図示する。

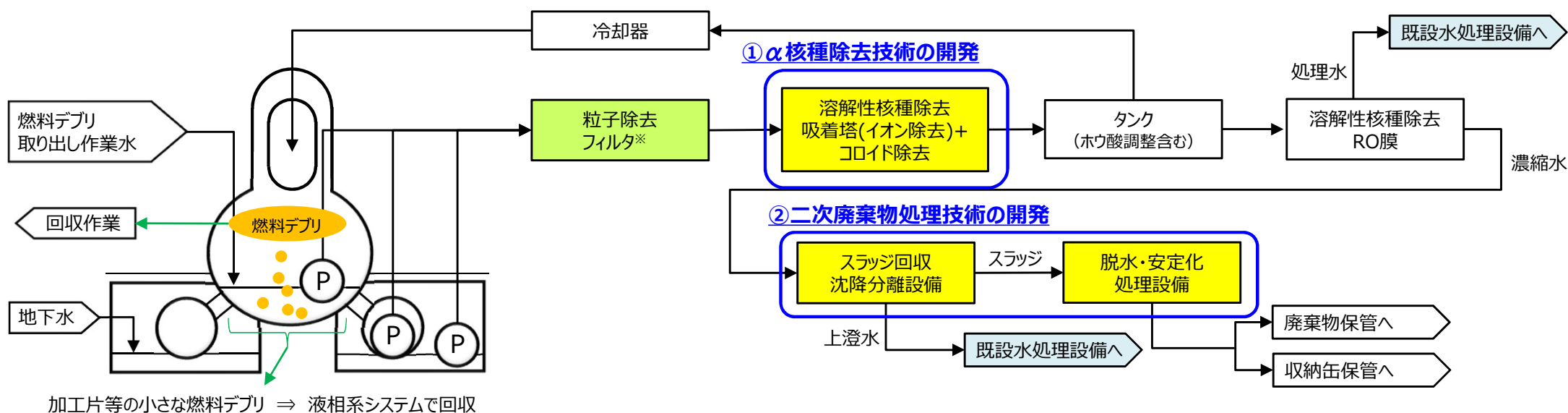


図 燃料デブリ取り出し時の液体処理システム（概略）

※ 粒子除去フィルタは0.1μm以上の粒子を除去する想定

7. 実施項目（2/7）

◆ 7.1 本事業の検討対象，全体フロー

- 本事業で対象とする燃料デブリの粒径は，粒子除去フィルタを通過した後の**粒径0.1μm未満の粒子**を対象とする。

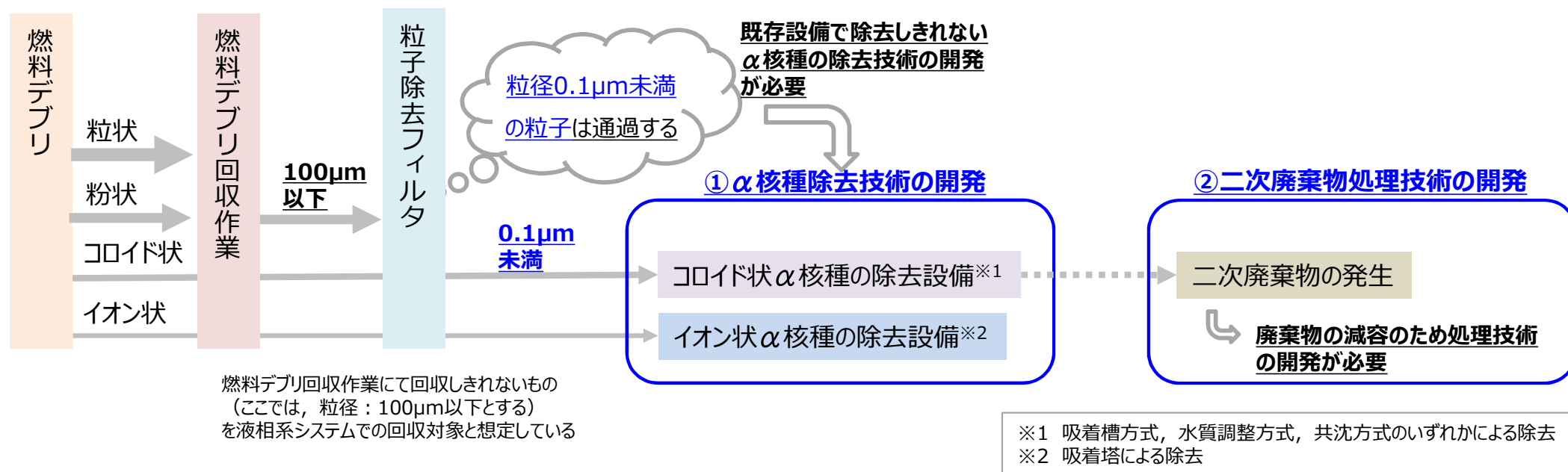


図 本事業で対象とする燃料デブリの粒径

7. 実施項目（3/7）

◆ 燃料デブリの除去/回収の中でのコロイド状物質の除去

- 本事業では、燃料デブリ取り出しで発生する様々な燃料デブリ粒子のうち、これまでに計画された固体状粒子の回収方法では対応の難しいコロイド状 α 核種の除去が可能な要素技術の開発を行う。

■ 各粒径範囲のデブリ粒子の除去方法

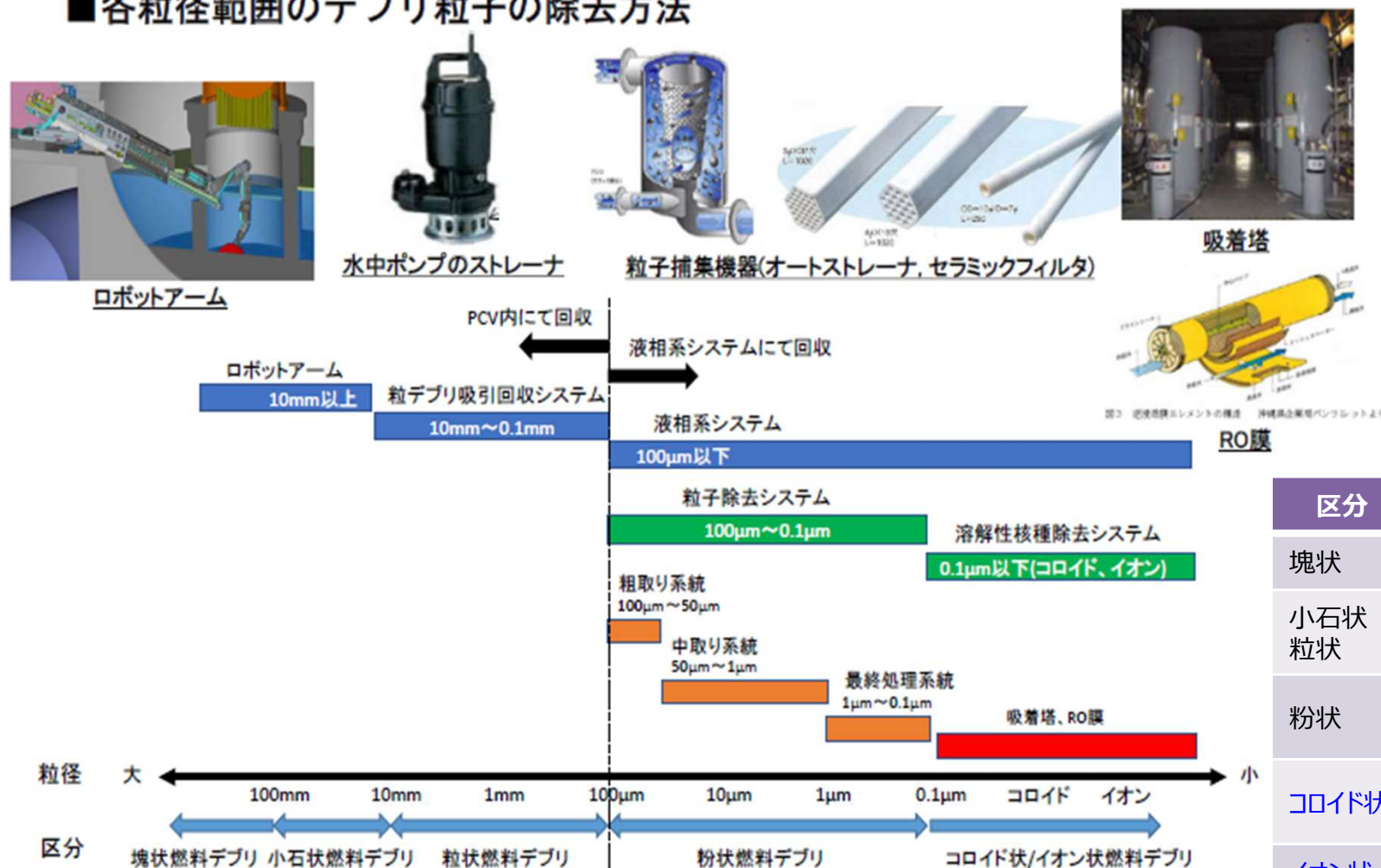


図 燃料デブリの除去/回収方法について

7. 実施項目（4/7）

◆ 本事業の検討対象，実施項目間の関連性 全体フロー（詳細）

本事業で想定する全体フロー

（過去のフロー図より，説明用として作成

システム構成は8.4および11.4の成果を参照のこと）

9章にて説明 実液試験準備のため，要素試験を行う

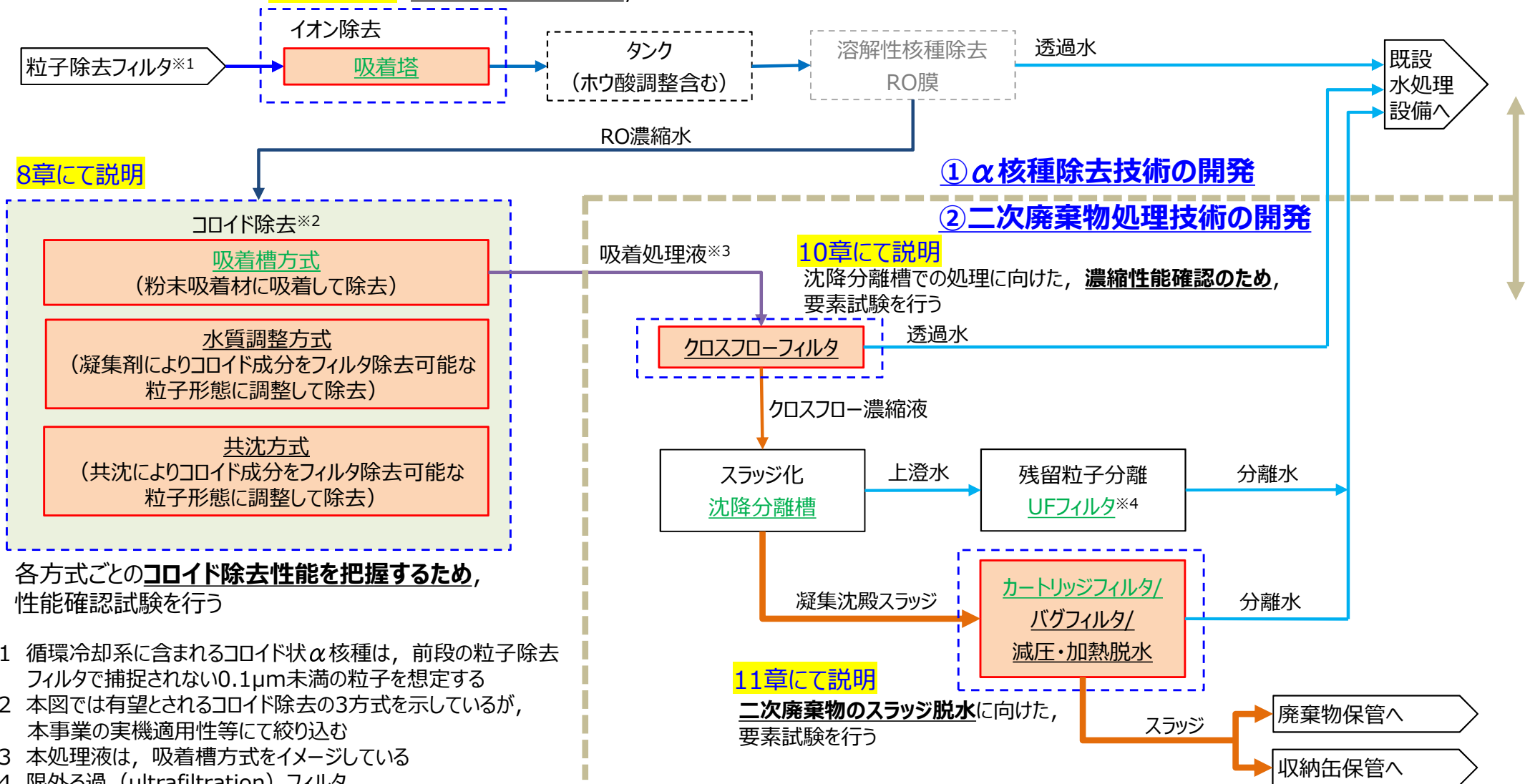


図 燃料デブリ取り出し時の液体処理システム

緑書き：2022年度補助事業までに開発実績のある設備
青点線：2023-2024年度補助事業における開発対象設備

- ※1 循環冷却系に含まれるコロイド状α核種は，前段の粒子除去フィルタで捕捉されない0.1μm未満の粒子を想定する
- ※2 本図では有望とされるコロイド除去の3方式を示しているが，本事業の実機適用性等にて絞り込む
- ※3 本処理液は，吸着槽方式をイメージしている
- ※4 限外ろ過 (ultrafiltration) フィルタ

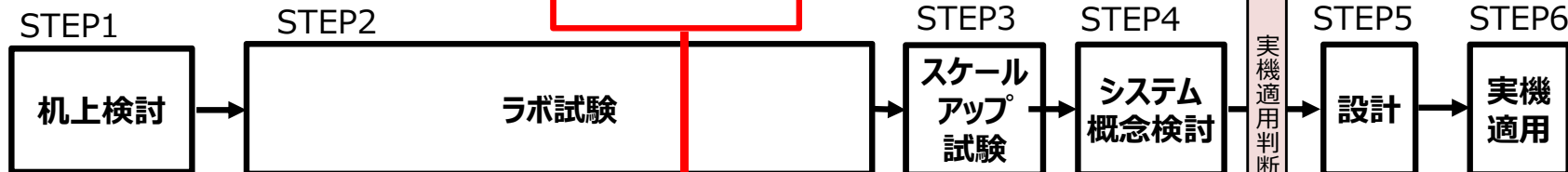
7. 実施項目（5/7）

◆ 実施項目①「 α 核種除去技術の開発」の検討の流れ

HP-1:ホールドポイント
燃料デブリ採取後

HP-2

大規模
燃料デブリ
取り出し



①-a. コロイド状 α 核種(0.1 μ m未満)
⇒コロイド状 α 核種にも対応し得る処理
方法を開発(3方式)

- ✓ 吸着槽方式
- ✓ 水質調整方式
- ✓ 共沈方式

今回※2実施：8章

STEP1
条件を選定
・ 実機想定
条件
・ 除去方式

STEP2
コロイド状試験
液調製
⇒ 3方式による浸漬試験

実液試験
(バッチ試験
方法は
方式により
設定する)

STEP3
試験計画を
立案

STEP4
システム
概念設計

STEP5
詳細設計

STEP6
実機
性能
確認

実機適用判断

前回※1実施

STEP1
条件を選定
・ 実機想定
条件
・ 除去方式

STEP2
イオン状試験
液調製
↓
浸漬試験

今回※2実施：9章

STEP2
バッチ試験
(ミニカラム試験の
代替案)

実液試験
(バッチ試験
or and
ミニカラム試験)

STEP3
通水試験
・ 実機長カラム
・ 実機1/10規模

：ラボ試験より可否を検討し、計画する

実施済み

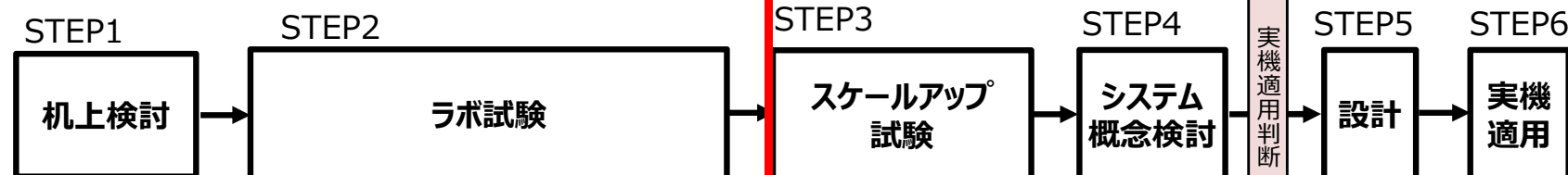
未実施

※1 2021-2022年度補助事業にて実施

※2 2023-2024年度補助事業にて実施

7. 実施項目（6/7）

◆ 実施項目②「二次廃棄物処理技術の開発」の検討の流れ



②-a. 粉状吸着材(吸着槽方式)による処理後の固形分濃縮技術の開発
⇒粉末吸着材が含まれた廃液を固形分濃縮する技術の開発(1方式)

✓ クロスフローフィルタ

今回※2実施：10章

STEP1

条件を選定
・ 実機想定条件
・ 濃縮方式

STEP2

試験装置作製
装置試運転 ⇒ 要素試験

STEP3

スケールアップ試験

STEP3

ラボ試験の結果によって今後の実施の要否を判断

①の α 核種除去方法が選定されてから

STEP4

システム概念検討

STEP4

システム概念設計

STEP5

設計

STEP5

詳細設計

STEP6

実機適用

STEP6

実機性能確認

②-b. スラッジ回収システムの合理化検討

⇒減容のためのスラッジ脱水技術の開発(3方式)

✓ カートリッジフィルタ
✓ バグフィルタ
✓ 減圧・加熱脱水

前回※1実施

STEP1

条件を選定
・ 実機想定条件
・ 脱水方式※3

今回※2実施：11章

STEP2

試験装置作製
装置試運転 ⇒ 要素試験

：ラボ試験より要否を検討し、計画する

実施済み

未実施

※1 2021-2022年度補助事業にて実施

※2 2023-2024年度補助事業にて実施

※3 カートリッジフィルタのみ2021年度補助事業（前回）で検討

7. 実施項目（7/7）

◆ 7.2 インプット・アウトプット情報

➤ 他研究との関連性

本事業は、燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発PJなどの関連するPJと連携して実施した。

表 他研究との関連性

No.	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 （液体処理システム）の開発 【安全PJ】	東京電力 HD	実液の採取可能な対象 と試験可能な候補場所	実液を用いた試験方法，試験計 画の検討
2	安全システム （液体処理システム）の開発 【安全PJ】	燃料デブリ収納・ 移送・保管技術の開発 【収納缶PJ】	収納缶等の形状	二次廃棄物の安定化処理技術 の検討
3	燃料デブリ収納・ 移送・保管技術の開発 【収納缶PJ】	安全システム （液体処理システム）の開発 【安全PJ】	液体処理システムで発生する 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

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (目次)

コロイド状 α 核種の除去方法の検討に係る実施項目を以下の構成にて示す。

- 8章における試験対象範囲
- 8章 コロイド除去方法の検討計画 検討フローと期待される成果
- 本検討の背景, 試験対象とする α 核種, 除去目標, 水質条件
- 8.1 コロイド除去の試験液調製方法の検討 (模擬性の検討, 試験液の調製)
- 8.2 コロイド除去方式の性能試験の計画
 - 8.2.1 新規設備: 吸着槽方式 (粉状吸着材) の除去性能試験
 - 8.2.2 新規設備: 水質調整方式の除去性能試験
 - 8.2.3 現行設備: 共沈方式の除去性能試験
- 8.3 現行設備に関するイオン状 α 核種除去試験
- 8.4 現場への適用性の観点における分析
- 8.5 今後の課題整理とまとめ

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (1/51)

Decom.Tech

◆ 8章における試験対象範囲

本事業で想定する全体フロー

(過去のフロー図より, 説明用として作成)

システム構成は8.4および11.4の成果を参照のこと)

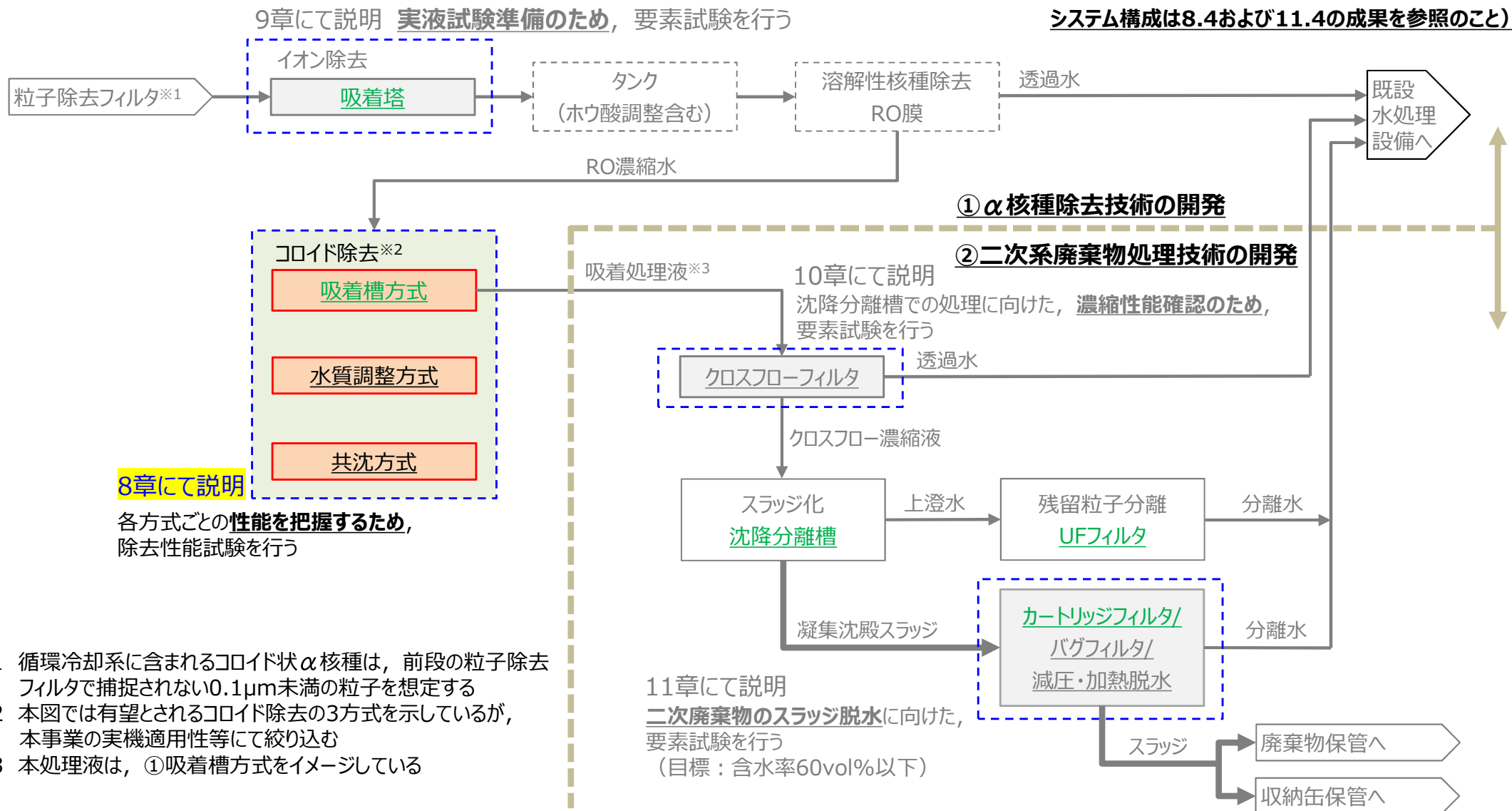


図 燃料デブリ取り出し時の液体処理システム

緑書き: 2022年度補助事業までに開発実績のある設備
青点線: 2023-2024年度補助事業における開発対象設備

- ※1 循環冷却系に含まれるコロイド状 α 核種は, 前段の粒子除去フィルタで捕捉されない $0.1\mu\text{m}$ 未満の粒子を想定する
- ※2 本図では有望とされるコロイド除去の3方式を示しているが, 本事業の実機適用性等にて絞り込む
- ※3 本処理液は, ①吸着槽方式をイメージしている

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (2/51)

◆ 8章 コロイド除去方法の検討計画 検討フローと期待される成果

- 各実施事項で得られる結果・成果（下図の青字）を検討フローに示す。得られた結果は，下図で関連する項目へのインプット，ないし8.4項のコロイド除去設備の系統構成の検討・現場への適用性の観点における分析に使用する。

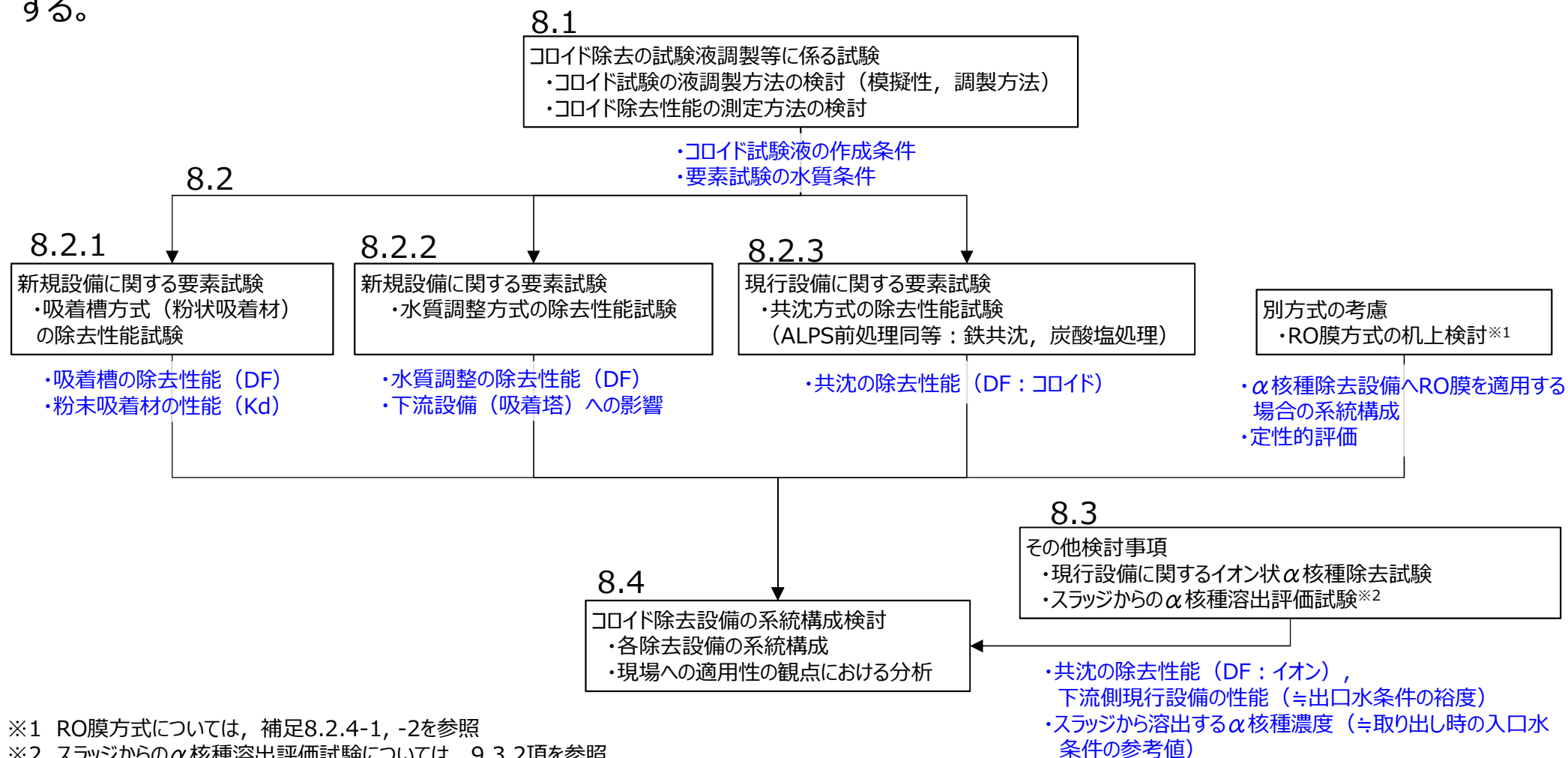


図 コロイド除去方法の計画および検討の流れ

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (3/51)

◆ 本検討の背景, 試験対象とする α 核種, 除去目標, 水質条件 (8章)

➤ 本検討に着手するにあたり, これまでの補助事業等の成果 (補足8-1を参照。)を踏まえ主要な条件を下記にて設定した。

✓ 除去対象核種 :

平成28年度補助事業にて設定されたU, Np, Pu, Am, Cmを想定。一方で α 核種・コロイド・水質の組合せ全ての試験を行うことは, HOT試験の実施ケース数に制約があることを考慮すると優先順位の設定が必要。まずは除去優先度の高いPu, Amから試験等で考察を深めていき, CmはAmとの化学的類似性がありAm試験結果から評価可能と想定, Npは除去優先度は比較的低い但他元素と化学形態が異なるため試験が有益と想定, Uは被ばく影響が低く優先度が低いと想定されることから, **本検討ではPu, Am, Npを評価試験の条件とした。**

✓ 除去目標 :

平成28年度補助事業にて設定された値を踏襲。公衆被ばく量を十分に低く抑えるための要求値として, 現在のPCV滞留水の α 核種濃度は最大で告示濃度の約68倍 (短半減期で保管期間での減衰が見込めるCm-242を除き, その他の長半減期核種にて計算) となっている (表1) ことから, **目標値をDF100と設定。**また, 既設水処理設備への払い出し条件として告示濃度以下を仮設定。なお, **燃料デブリ取り出し時には滞留水中の α 核種濃度が増加する懸念があるため, これに合わせたDF設定が必要となる。**

✓ 滞留水の水質性状 :

令和3年補助事業の水質条件を参考とし, また建屋滞留水も考慮した (表2)。

表1 公衆被ばく評価に含まれる α 核種

No.	元素	α 核種	PCV滞留水濃度 [Bq/mL]	告示濃度 [Bq/mL]
1	U	U-234	7.7E-04	2.0E-02
2		U-235	5.1E-06	2.0E-02
3		U-236	1.2E-04	2.0E-02
4		U-238	1.7E-04	2.0E-02
5	Np	Np-237	データなし	9.0E-03
6	Pu	Pu-238	2.4E-01	4.0E-03
7		Pu-239	2.7E-01	4.0E-03
8		Pu-240		4.0E-03
9		Pu-242	データなし	4.0E-03
10	Am	Am-241	2.7E-01	5.0E-03
11		Am-242m	データなし	5.0E-03
12		Am-243	データなし	5.0E-03
13	Cm	Cm-242	3.0E+01	6.0E-02
14		Cm-243	データなし	6.0E-03
15		Cm-244	3.8E-01	7.0E-03

表2 PCV/建屋滞留水の想定水質

模擬水	No.	海水	コンクリート成分	ホウ酸水	pH	気相環境	備考
—	—	0ppm	0ppm	0ppm	中性	窒素封入 (負圧制御による インレーク空気あり)	純水
PCV 滞留水	1	Cl <20ppm	Ca <1ppm	B 0 ppm	中性		1000倍希釈海水相当(基本ケース)
	2	Cl <100ppm	Ca <1ppm	B 0 ppm	中性		200倍希釈海水
	3	Cl <20ppm	Ca <1ppm	B 7000 ppm-B	弱アルカリ		1000倍希釈海水 + ホウ酸水
	4	Cl <100ppm	Ca <1ppm	B 7000 ppm-B	弱アルカリ		200倍希釈海水 + ホウ酸水
	5	Cl <20ppm	なりゆき	B 0 ppm	9		1000倍希釈海水 + コンクリート溶出
	6	Cl <20ppm	なりゆき	B 0 ppm	10		1000倍希釈海水 + コンクリート溶出
	7	Cl <100ppm	なりゆき	B 0 ppm	9		200倍希釈海水 + コンクリート溶出
	8	Cl <100ppm	なりゆき	B 0 ppm	10		200倍希釈海水 + コンクリート溶出
建屋 滞留水	9	Cl 350ppm	Ca 40ppm	B 0 ppm	中性	大気開放	50倍希釈海水(Ca調整あり)
	10	Cl 350ppm	Ca 40ppm	B 7000 ppm-B	弱アルカリ性		50倍希釈海水(Ca調整あり) + ホウ酸水

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (4/51)

◆ 8.1 コロイド除去の試験液調製方法の検討 (模擬性の検討, 試験液の調製)

本事業におけるコロイドの定義：粒径0.1 μ m未満

- 燃料デブリ取り出し作業に伴うPCV内固相成分の切削や飛散した粒子が冷却水等に取り込まれることで、PCV固相の一部は粒子の形態（コロイド含む）でPCV液相（PCV滞留水）へ移行する。
- PCV滞留水中に移行した粒子は、滞留中に沈降するものと滞留・浮遊を継続するものに分かれ、後者はPCV滞留水と共に取水された後、 α 核種除去設備内の粒子除去フィルタ（孔径0.1 μ m）に通水され、このフィルタで捕捉されない粒径0.1 μ m未満の粒子は溶解性核種除去設備へ流入する。（下図）
- 本事業では、この「粒径0.1 μ m未満の粒子」をコロイドと定義した。

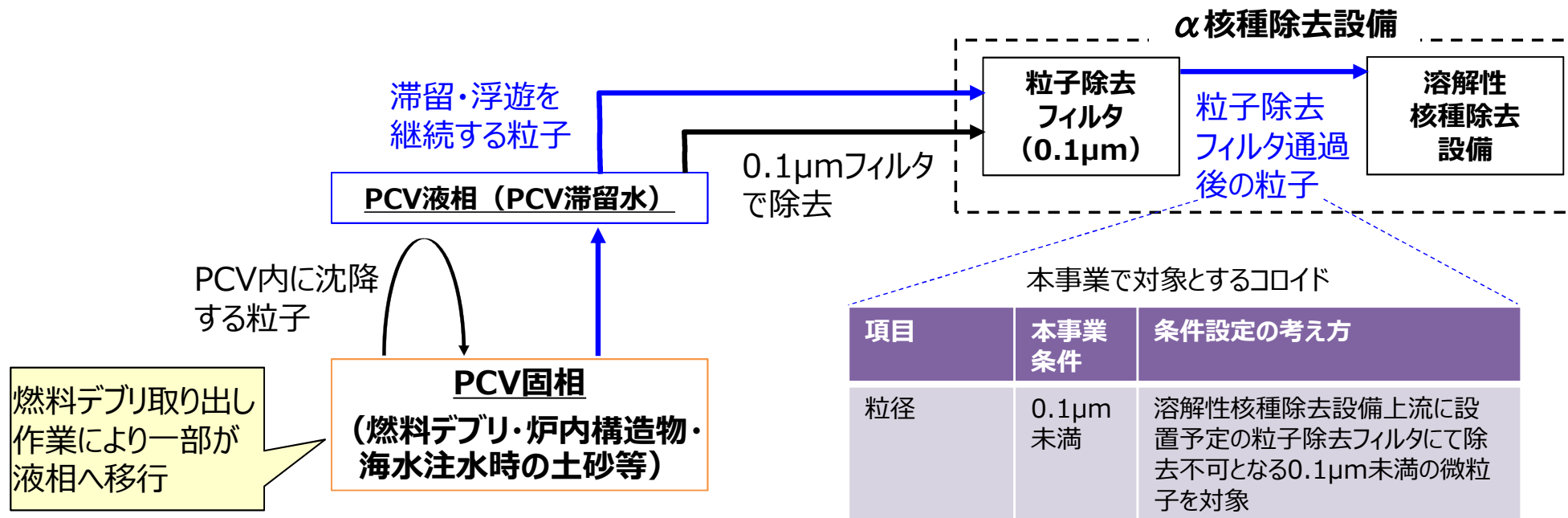


図 燃料デブリ取り出し時の体系とコロイドの定義

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (5/51)

◆ 8.1 コロイド除去の試験液調製方法の検討 (模擬性の検討, 試験液の調製)

除去対象コロイドの性状: 擬似コロイドと推定

- これまでに実施された1F滞留水の性状分析結果を考慮すると, 燃料デブリ取り出し時の循環冷却水にはイオン, 擬似コロイド, 真正コロイドが共存していると想定。また, 以下の分析データから擬似コロイドが支配的であると推定している。
- ✓ 東京電力HD, JAEAの1F滞留水の分析結果から, 滞留水中の固相の成分はOおよびFeが支配的であることが確認されている。
- ✓ 液相の α 核種の元素濃度はFe等の元素濃度に比べ低いことを考慮すると, α 核種同士が集合して真正コロイドを形成するよりも, 微細な固相成分 (鉄酸化物ないし鉄水酸化物) に α 核種が付着した状態 (擬似コロイド) が支配的であると推定。
- 擬似コロイド/真正コロイドの生成挙動に関するデータ (各元素濃度と液中の粒径の相関) を流動場分画法により取得するための試験を実施した。なお, HOT試験環境がないためEuトレーサによるCOLD試験のみ実施 (補足8.1-1を参照)。

表 燃料デブリ取り出し時の体系とコロイドの定義

No.	語句	本事業における定義
1	コロイド	循環冷却水中に存在する微粒子のうち, 粒径が $0.1\mu\text{m}$ 未満であり, 吸着塔通水により除去が困難である微粒子
2	無機コロイド	鉄酸化物, シリカなど単成分のコロイド (本事業では α 核種が付着していない状態のものを指す)
3	擬似コロイド	循環冷却水中に存在する無機コロイドに α 核種が付着することにより, α 放射能を帯びた微粒子
4	真正コロイド	水質変化等によりイオン状 α 核種が析出することにより形成される微粒子
5	コロイド状 α 核種	α 放射能を有するコロイド全般 (擬似コロイドと真正コロイドのいずれも含む)
6	イオン状 α 核種	α 核種のうちイオンで存在するもの全般

本事業の主目標
 α 核種除去のためには,
 擬似コロイドを除去する
 必要性が高いと推定。

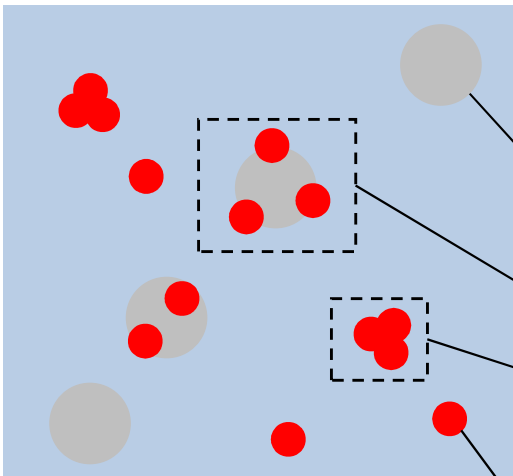


図 循環冷却水中 (フィルタ設備通過後) における α 核種の存在形態のイメージ図

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (7/51)

◆ 8.1 コロイド除去の試験液調製方法の検討 (模擬性の検討, 試験液の調製)

コロイド試験液調製の流れ：無機コロイド/擬似コロイド

- コロイド除去試験に供する試験液作成の手順としては、前頁で示したフローのうち、**擬似コロイドの元となる4つの成分試薬 (FeOOH , Fe_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2)** に対して、まず無機コロイド液の調製を行った。続いて、無機コロイドが生成可能であることを確認した試薬に対して α 核種トレーサを添加して擬似コロイド液の調製を行い、コロイド状 α 核種が安定して存在していること、および濃度が確保できている条件を確認した。
- コロイド液の分析のため濃度以外にもゼータ電位・酸化還元電位・粒径等を測定した。

表 コロイド試験液調製の流れ

No.	試験名	試験目的 (試験の確認事項)	試験の手法
1	無機コロイド液調製	無機コロイドが安定分散するか	無機コロイド試薬を水中に添加し、振とう
2	擬似コロイド液調製	コロイド状 α 核種が液中に安定して存在するか	無機コロイド液に α 核種トレーサを添加し、振とう
3	コロイド状 α 核種濃度の確認	試験液の初期濃度確保 (除去性能の評価可能か：目安DF100と測定下限を考慮)	フィルタ等で凝集粒子を除去し、濃度測定の差分をコロイド濃度とする (下図)。

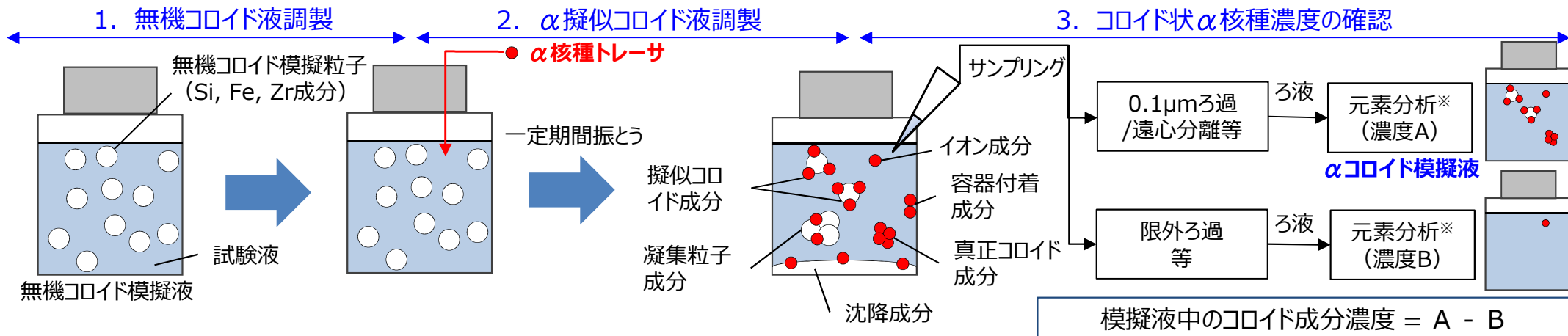


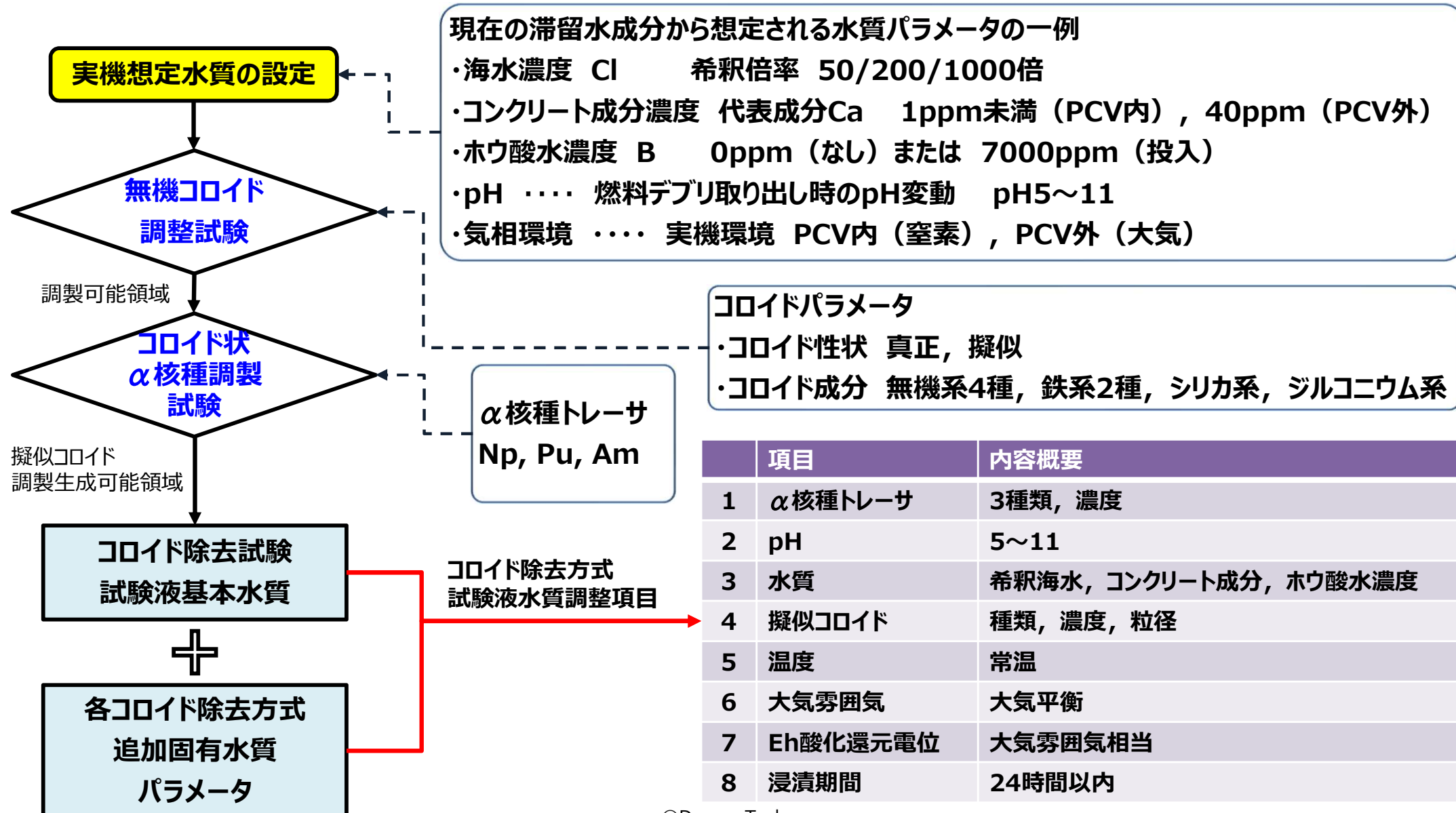
図 α コロイド模擬液調製試験イメージ図

※ ただし、擬似コロイドが真正コロイドを分離できる手段は確立されていないため、両者を合算した α 核種濃度での評価となる

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (8/51)

◆ 8.1 コロイド除去の試験液調製方法の検討 (模擬性の検討, 試験液の調製)

コロイド試験液調製方法の検討フロー



8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (9/51)

◆ 8.1 コロイド除去の試験液調製方法の検討 (模擬性の検討, 試験液の調製)

無機コロイド液調製の結果

無機コロイドの生成可否

- 4種の成分 (6種の試薬) で無機コロイド液調製の試験を実施。
- **ジルコニウム系の試薬では, 0.1 μ m未満の無機コロイドは, ほとんど存在しない結果となった。**
- **鉄系 (FeOOH微粒子) およびシリカ系 (SiO₂微粒子) の試薬にて, 無機コロイドが安定分散する条件を確認した。**

表 無機コロイド液の調製可否 (予備試験結果)

凡例 ○ : 存在している, × : 存在しない
(0.1 μ m未満の粒子の状態で判定)

		鉄系			シリカ系		ジルコニウム系
		FeOOH	Fe ₂ O ₃		SiO ₂		ZrO ₂
試薬名 (供給社名)		ナノ・キューブ・ジャパン製 FeOOHナノ粒子	US Research Nanomaterials製	MKnano製	Micromod製 SiO ₂ 微粒子	MKnano製	US Research Nanomaterials製
粒径 (カタログ値) (μ m)		0.08	0.005	0.02	0.07	0.015	0.02
水質		1000倍希釈海水	1000倍希釈海水	1000倍希釈海水	1000倍希釈海水	1000倍希釈海水	1000倍希釈海水
液中の 最頻度 粒径※1 (μ m)	酸性 (pH4)	0.09※4	—※2	—	0.09※4 160※4	—	—
	中性 (pH6-7)	0.09※4 10※4	1.364~1.488※2, 3	0.358~0.705 0.089~0.145※2, 3	0.09※4 150※4	0.520~0.581※3	0.421~0.467※3 0.097~0.105※2
	中性 (pH8)	0.09※4 20※4	—	—※2	—	0.332~0.344※3	—
	アルカリ性 (pH10)	25※4	—	—	0.09※4	—※2	—
無機コロイド調製可否		○	×	×	○	×	×

※1 複数ピークを持つ場合は, 頻度が高い順に記載

※2 試験液に供するろ液のコロイド濃度が低い (DF評価に十分な濃度未達)

※3 コロイド濃度10ppmでの評価結果

※4 コロイド濃度3000ppmでの評価結果

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (10/51)

◆ 8.1 コロイド除去の試験液調製方法の検討 (模擬性の検討, 試験液の調製)

コロイド試験液の調製結果

擬似コロイドの生成可否

- 調製した無機コロイド溶液に α 核種トレーサを添加し, **除去目的とする0.1 μ m未満の擬似コロイドが調製できた領域は黄色部, PuではFeOOH (pH5), AmではSiO₂ (pH10) とFeOOH (pH5)**であった。Npは全体的にコロイド存在率が低かった。大半となった灰色部は, 二次凝集等により粒径が増加した結果と推定している。(詳細は補足8.1-3を参照)
- コロイド除去試験では, コロイドの存在率の高い条件を優先して除去試験を進めた。また, 除去方式ごとに実機適合性の評価や今後の開発に資する観点で, 知見拡充用の参考データについても取得した。

表 擬似コロイド液の調製可否 (ベース条件: 1000倍希釈海水)

トレーサ (α 核種)		Np		Pu		Am	
		FeOOH	SiO ₂	FeOOH	SiO ₂	FeOOH	SiO ₂
無機コロイド		ナノ・キューブ・ジャパン製 FeOOHナノ粒子	Micromod製 SiO ₂ 微粒子	ナノ・キューブ・ジャパン製 FeOOHナノ粒子	Micromod製 SiO ₂ 微粒子	ナノ・キューブ・ジャパン製 FeOOHナノ粒子	Micromod製 SiO ₂ 微粒子
粒径 (カタログ値) (μ m)		0.08	0.03	0.08	0.03	0.08	0.03
水質		1000倍希釈海水					
擬似コロイド生成可否 (コロイド状 α 核種の存在率※2)	酸性 (pH 5 付近)	×	▲※1 (10~12%)	○ (pH5) (86%)	▲※1 (17%)	○ (pH5) (90~95%)	▲※1 (0~18%)
	中性 (pH7付近)	▲※1 (9~14%)	×※1 (8~10%)	△※1 (38%)	×※1 (10%)	△※1 (95~98%)	▲※1 (0~12%)
	アルカリ性 (pH9~11付近)	△※1 (14~70%)	×	△※1 (57%)	▲ (15%)	△※1 (98~100%)	○ (pH10) (96%)

※1 大部分が0.1 μ m以上の粒子として存在
(コロイド同士の二次凝集と想定。表中の灰色部)

※2 コロイド状 α 核種の存在率は, トレーサ添加量の全 α 濃度を100%としたときに,
イオン状態でない (限外ろ過で通過しない) ものの比率として計算

凡例 ○: 擬似コロイドかつ0.1 μ m未満の粒子が存在

△: 擬似コロイドが存在するが, 0.1 μ m以上※1の大きさ

▲: 擬似コロイドが存在するが濃度が低い (コロイド率※2: 20%以下)

×: 擬似コロイドがほぼ存在しない (コロイド率※2: 10%以下)

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (11/51)

◆ 8.2 コロイド除去方式の性能試験の計画

➤ コロイド除去性能試験における主なパラメータ※

凡例
高：全除去試験共通
中：各試験毎のパラメータ
低：データ取得のみ

表 コロイド吸着試験における各パラメータの重要度と設定根拠

No.	項目		実機想定条件	今回試験条件 (パラメータ)	重要度
1	擬似コロイド	種類	①燃料デブリ (UO ₂) ②炉心構造物 (Fe系, Zr系) ③コンクリート成分 (Si系, Ca系) ④底部堆積物 (Fe系, Si系, その他) ⑤析出物 (アルカリ金属類, Si系, その他) ⑥PCV投入物 (中性子吸収材, 固化剤, その他) ⑦地下水含有粒子 (鉱物粒子複数種類)	②④：水酸化鉄系FeOOH ③④⑤：シリカ系SiO ₂ (実滞留水の分析結果から支配的な粒子を選定)	高
2	トレーサ	種類	Am, Cm, Np, U, Pu (被ばく評価にて核種を設定)	Am, Pu (前章8.1章の表擬似コロイド液の調製可否 参照)	高
3		濃度	最大約100Bq/ml (滞留水分析結果より設定)	10Bq/ml (定量的な分析の成立のために設定)	高
4	水質	pH	pH5~11 (以下の要因でpH変動の可能性あり) ①コンクリート溶出成分 ②ホウ酸水成分 ③吸着材溶出成分 ④pH調整処理 (導入する場合) ⑤大気混合	FeOOH : pH5 SiO ₂ : pH9 (前章8.1章の試験結果より コロイドが十分に分散するpH領域で設定)	高
5		海水濃度	①希釈海水条件 1000倍 (PCV内), 200倍 (PCV内イオン濃度強) 50倍希釈 (Ca 40ppm) (建屋内滞留水内) ②ホウ酸水条件	①希釈海水条件 (純水, 1000倍, 200倍, 50倍希釈 (Ca 40ppm)) 現状のPCV管理値より設定 ②ホウ酸水条件	中
6	その他	-	擬似コロイド濃度 (1~100ppm) 粒径 (0.1 μ m未満) 温度 (10~30℃) 大気雰囲気 (大気平衡/酸化性雰囲気側)	擬似コロイド濃度 (10ppm) 粒径 (0.1 μ m未満) 温度 (20℃) 大気雰囲気 (大気平衡)	低

※ 詳細は補足8.1-4を参照

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (12/51)

◆ 8.2 コロイド除去方式の性能試験の計画

➤ コロイド除去性能試験

コロイド状 α 核種の除去性能は, 前回の補助事業で選定した下表に示す3つの方式に対して実施し, 添加された α 核種トレーサ: Am, Puの除去率「DF100」を目標値として評価を実施した。

	吸着槽方式※1	水質調整方式※2	共沈方式※3
除去方式	粉末（粉状）吸着材に吸着して除去する	コロイド成分をフィルタ除去可能な粒子形態に調整して除去する ⇒ 凝集剤による	コロイド成分をフィルタ除去可能な粒子形態に調整して除去する ⇒ 共沈（凝集剤）による
基本水質 添加 トレーサ	pH：5付近および11付近, 海水希釈倍率：1000 コロイド条件：FeOOH, SiO ₂ α 核種トレーサ：Am, Pu		
添加材・ 添加 試薬	吸着材6種類 （前回補助事業で選定）	無機系凝集剤2種類※6	現行設備（ALPS前段方式） ① 鉄共沈処理 ② 炭酸塩沈殿処理
試験 ケース数 ※4	Cold 20ケース（N:1~3） Hot 57ケース（N:3）	Cold 21ケース（N:2~3※5） Hot 4ケース（N:3）	Cold 14ケース（N:2~3※5） Hot 11ケース（N:3）
試験 実施数	Cold 20/20 完了 Hot 57/57 完了	Cold 21/21 完了 Hot 4/4 完了	Cold 16/16 完了 Hot 11/11 完了

※1 吸着槽方式の詳細は, 補足8.2.1-1~2を参照

※2 水質調整方式の詳細は, 補足8.2.2-1~5を参照

※3 共沈方式の詳細は, 補足8.2.3-1~2を参照

※4 ブランク条件含む

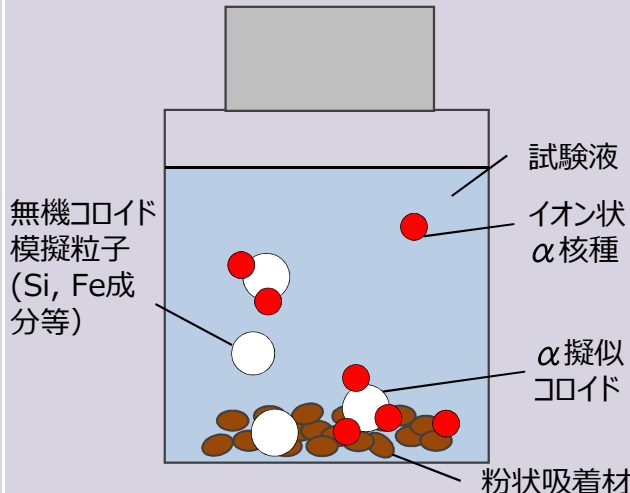
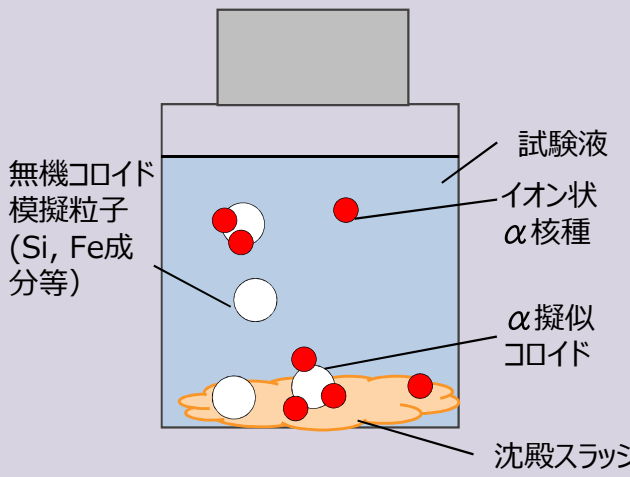
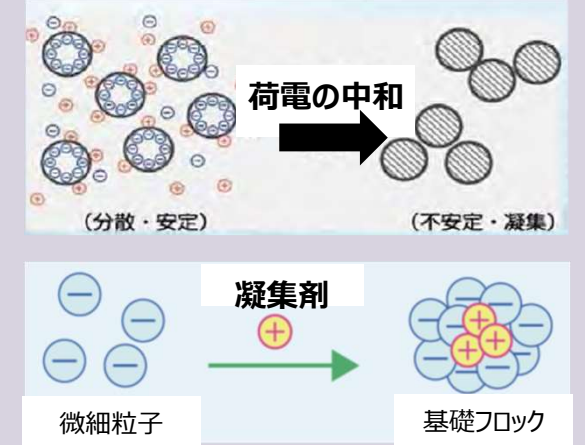
※5 ばらつきが大きいと判断される場合, N:3にて評価

※6 比較用に塩化第二鉄も追加で評価

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (13/51)

◆ 8.2 コロイド除去方式の性能試験の計画

➤ コロイド除去方式の概要

方式	吸着槽方式	共沈方式	水質調整方式
概要	処理対象水に粉状吸着材を添加し, コロイド成分を吸着材の固相部へ吸着させ, 固液分離することで液相から除去。	1F既存水処理設備にて適用実績のある前処理方法を模擬。沈殿を生成させ, コロイド成分を固相へ吸着, 吸蔵し固液分離方法によって液相から除去。	1F既存水処理設備で適用されている凝集剤以外での処理方法での評価。コロイド成分を粒子形態に調整し, 固液分離方法によって液相から除去。
添加材※1	添着活性炭, 鉄系, チタン酸, ケイチタン酸, 等	塩化第二鉄※1,2, 炭酸ソーダ	PAC, 高塩基度PAC (比較用に塩化第二鉄も評価)
イメージ	 試験液 イオン状α核種 α擬似コロイド 粉状吸着材 無機コロイド模擬粒子 (Si, Fe成分等)	 試験液 イオン状α核種 α擬似コロイド 沈殿スラッジ 無機コロイド模擬粒子 (Si, Fe成分等)	注) 体系イメージは共沈方式と同様 ゼータ電位が正, 負 ゼータ電位が0付近  荷電の中和 (分散・安定) (不安定・凝集) 凝集剤 微細粒子 基礎フロック

※1: 共沈方式, 水質調整方式ではpH調整剤も添加

※2: 凝集ポリマー添加条件も検討

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (14/51)

◆ 8.2.1 新規設備：吸着槽方式（粉状吸着材）の除去性能試験

➤ 試験概要：除去性能試験（吸着試験）

- ✓ 8.1で調製した試験液に2022年度の補助事業で選定した粉末吸着材を添加し，吸着試験を行う。
- ✓ 吸着試験液の核種およびコロイド模擬微粒子濃度 C_{ini} と浸漬時間 t での濃度 C_t からそれぞれの吸着率を評価する※。
- ✓ 添着活性炭を吸着材に用いた予備試験を実施し，試験手順の成立性を確認した（補足8.2.1-1～2を参照）。

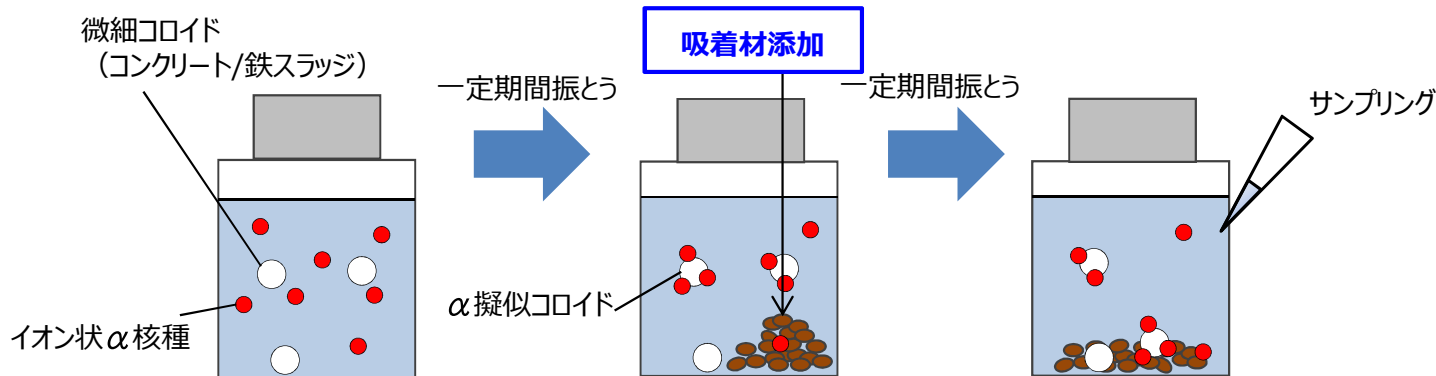


図1 コロイド除去試験 イメージ図

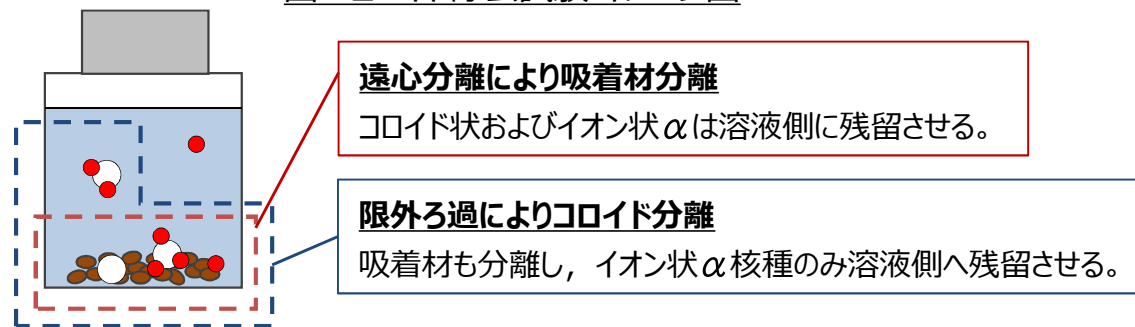
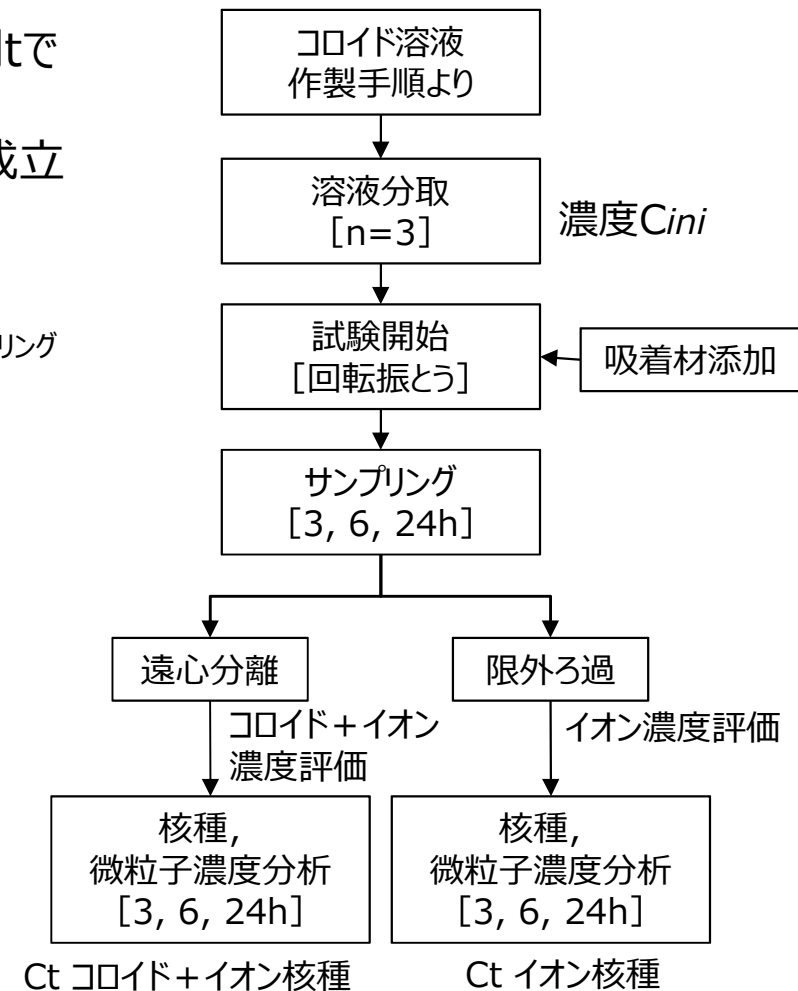


図2 吸着材およびコロイドの分離方法のイメージ図

吸着試験の実施手順



※ ブランク試験（吸着材添加しない手順）を実施し比較評価を行う

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (15/51)

◆ 8.2.1 新規設備：吸着槽方式（粉状吸着材）の除去性能試験

➤ 試験パラメータ※

項目		設定	備考
トレーサ	種類	Pu, Am	擬似コロイド生成が確認された除去対象 α 核種, 知見拡充のため核種の追加も考慮
	濃度	10Bq/mL	DF100およびKd $1.0E+06$ 程度が試験で確認可能な濃度。また滞留水分析結果より設定
水質		①1000倍希釈海水 (②200倍希釈海水条件) (③アルカリ水質条件) (④ホウ酸水条件)	①Cl濃度17ppm相当 (本事業でのベース条件) ②Cl濃度100ppm相当 ③pH10相当 (水酸化カルシウムで調整) ④7000ppm as B (5ホウ酸ナトリウムで調整)
擬似コロイド	種類	FeOOH, SiO ₂	循環冷却水中に支配的に存在すると想定されるコロイド成分を選定
	添加濃度	10ppm as FeOOH/SiO ₂	コロイド溶液作製予備試験結果より設定
大気雰囲気		大気解放	2022年度までの補助事業成果より, 吸着現象に及ぼす大気雰囲気の影響は軽微であると考えられるため, 試験負荷が小さい大気雰囲気で試験を行う
温度		常温範囲 (約20℃)	温度影響は小さいと想定されるため, 特に温度制御はせず, 常温範囲の20℃程度で試験。温度記録を残す
pH		FeOOH : pH5 SiO ₂ : pH9	コロイド溶液調製予備試験結果より, FeOOHコロイドの場合はpH5, SiO ₂ コロイドの場合はpH9を選定。ただし, 左記のpH範囲外でも, 擬似コロイド生成が確認された条件においても, 必要に応じて試験を実施する。また, アルカリ水質条件はpH10, ホウ酸水条件はpH8程度とする。
Eh		大気雰囲気相当 (約0.5V)	特に制御しない
浸漬期間 (サンプリング時間)		0, 3, 6, 24h	実機の処理時間を24h以内と想定し設定。120min以内の初期吸着挙動についても, 代表ケースで試験しデータ取得
吸着材分離方法		遠心分離	予備試験結果より遠心分離を採用
コロイド分離方法		限外ろ過	予備試験結果より限外ろ過を採用
Run数		N=2 or 3	再現性の確認のため, 最低限N=2で確認
容器材質		PP容器	2022年度補助事業試験から容器付着が少なかった材質 (PP:ポリプロピレン) を選定
吸着材	種類	①チタン酸, ②ケイチタン酸, ③添着活性炭, ④鉄系吸着材, ⑤鉄系吸着材 (顆粒), ⑥Zr系吸着材	2022年度補助事業成果より選定された α 核種吸着材を使用し試験
	液固比	10000mL/g	Kd=1.0E+06が評価可能な液固比を設定

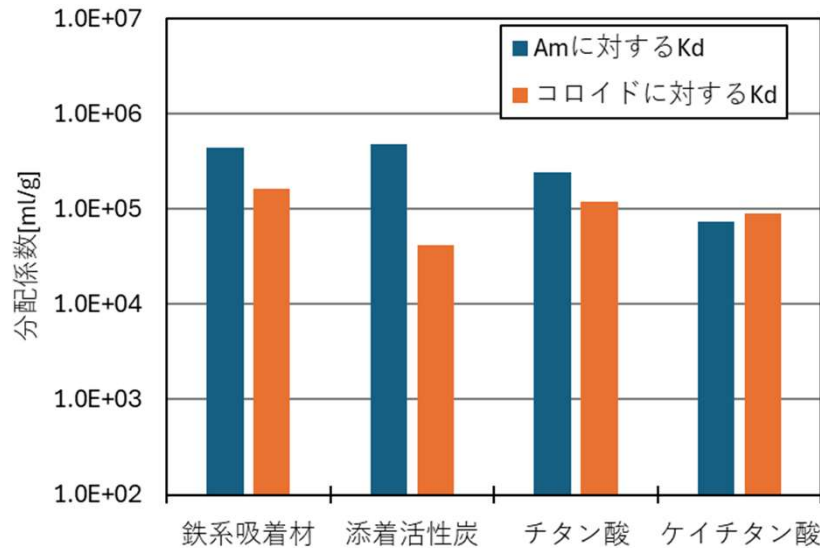
※ 手順と評価内容については補足8.2.1-1~2を参照

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (16/51)

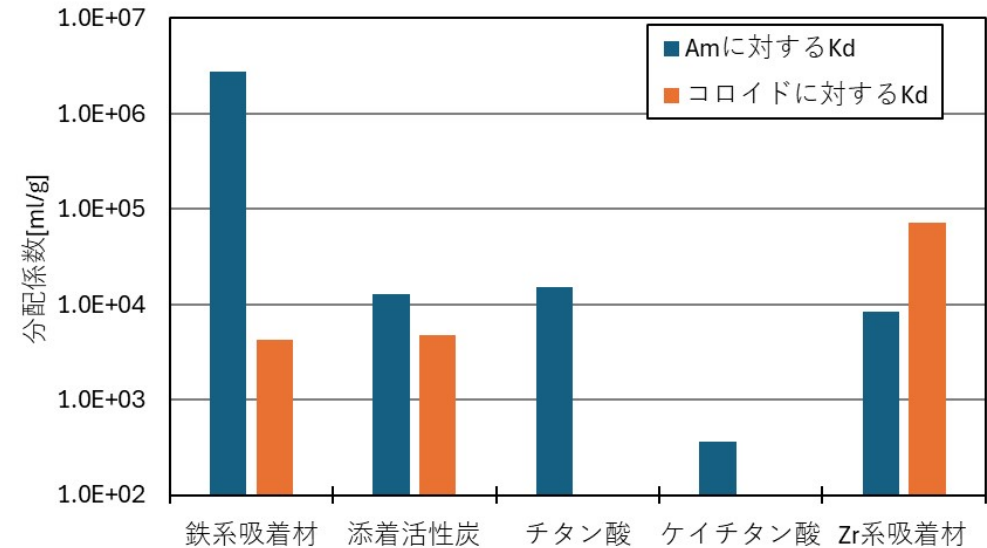
◆ 8.2.1 新規設備：吸着槽方式（粉状吸着材）の除去性能試験

➤ 試験結果 Amの試験結果

Am擬似コロイド吸着試験結果のうち、1000倍希釈海水条件、浸漬時間24hにおける分配係数の評価結果を下記に示す。



(a) Am-FeOOH (1000倍希釈海水, pH5)



(b) Am-SiO2 (1000倍希釈海水, pH9)

図 Am擬似コロイド吸着試験結果 分配係数評価結果

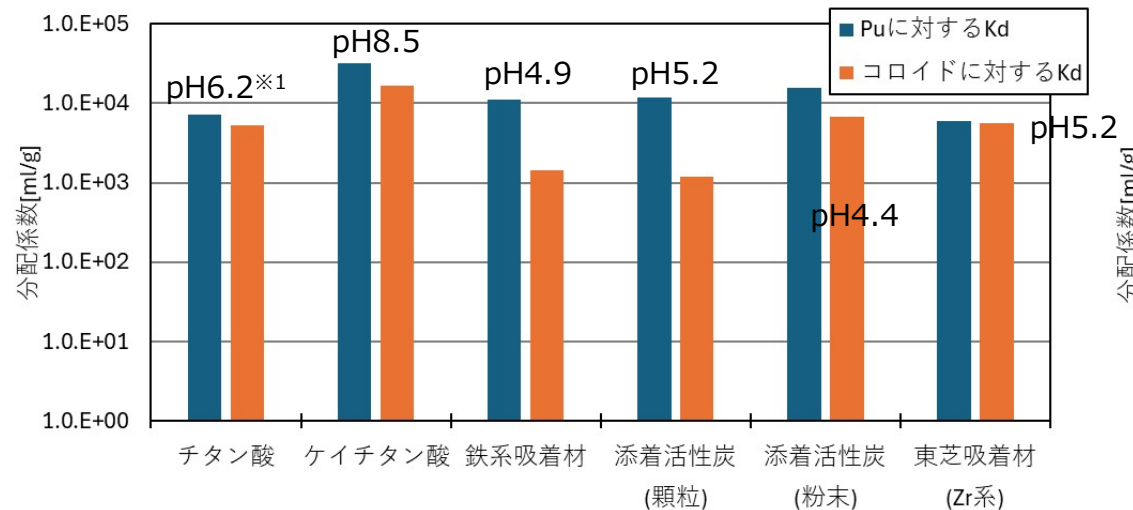
- ✓ Am-FeOOH擬似コロイド吸着試験では、Amは擬似コロイドとして存在しているため、Am吸着率（青の棒グラフ：ここではAmトレーサ除去の測定結果でありイオン状Amも含む）とFeOOHコロイド吸着率（オレンジの棒グラフ：Fe成分の測定結果）に相関が見られた。FeOOHコロイドが吸着された場合、同伴するAmも除去されると考えられる。
- ✓ Am-FeOOH擬似コロイドに対する各吸着材の吸着挙動は、青の棒グラフに示すように、多くの吸着材で分配係数 $K_d = 1.0E+05 \sim 06 \text{ ml/g}$ のオーダーの結果が得られた。⇒ 除去性能DF100に必要な吸着材添加量は100ppm
- ✓ Am-SiO₂擬似コロイド吸着試験については、Amはイオンとして存在しているため、Am吸着率とSiO₂コロイド吸着率に相関が見られない。イオン状Amの吸着現象とSiO₂コロイドの吸着現象は、それぞれ個別の現象として発生していると考えられる。
- ✓ SiO₂はAmの付着が発生しにくく、擬似コロイド化しにくいいため、除去の必要性は低いと考える。

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (17/51)

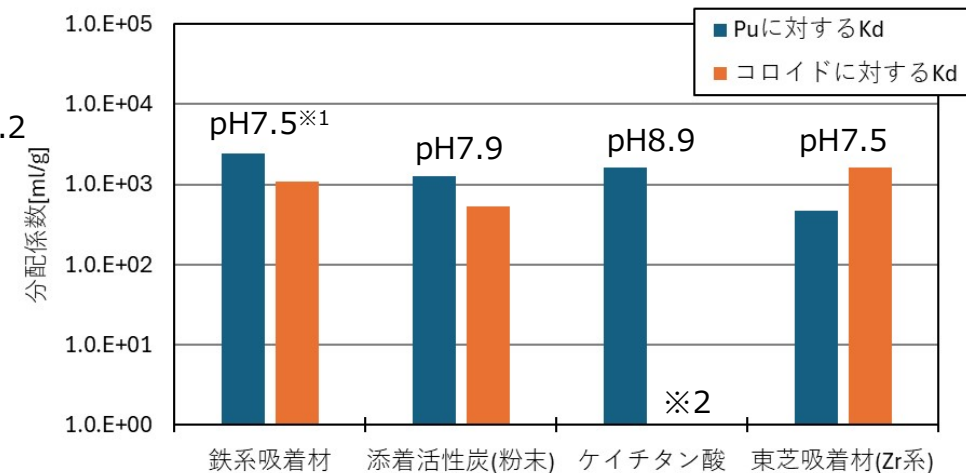
◆ 8.2.1 新規設備：吸着槽方式（粉状吸着材）の除去性能試験

➤ 試験結果 Puの試験結果

Pu擬似コロイド吸着試験結果のうち, 1000倍希釈海水条件, 浸漬時間24hにおける分配係数の評価結果を下記に示す。



(a) Pu-FeOOH (1000倍希釈海水, pH5)



(b) Pu-SiO₂ (1000倍希釈海水, pH9)

図 Pu擬似コロイド吸着試験結果 分配係数評価結果

※1 グラフ中のpHはすべて試験終了時点(t=24h)のもの
 ※2 ケイチタン酸よりSiが溶出したため, NDとなったと推定

- ✓ Pu-FeOOH擬似コロイド吸着試験では, PuはFeOOHに付着した状態で存在するため, Puに対するKd (青の棒グラフ：ここではPuトレーサ除去の測定結果でありイオン状Puも含む) とコロイドに対するKd (オレンジの棒グラフ：Fe成分の測定結果) に相関が見られた。
- ✓ Pu-FeOOH擬似コロイドに対する各吸着材の吸着挙動は, 青の棒グラフに示すように, 多くの吸着材で分配係数 $K_d=1.0E+04 \sim 05 \text{ ml/g}$ のオーダーの結果が得られた。⇒ 除去性能DF100に必要な吸着材添加量は1000ppm
- ✓ このうち, ケイチタン酸塩が最も吸着性能が高く, $K_d=3.3 \sim 2.6E+04 \text{ ml/g}$ となった。次いでチタン酸, 添着活性炭(粉末), 酸化鉄(顆粒)が高いKdを示し, $1.0E+04 \text{ ml/g}$ 以上となった。ケイチタン酸が高いKdを示した理由として, pH8.5とFeOOHコロイドのゼロ電荷点付近までpHが変化し, コロイド同士の凝集が発生したためと考えられる。
- ✓ Pu-SiO₂擬似コロイド吸着試験については, 全体的にKdが低く約 $1.0E+03 \text{ ml/g}$ となった。⇒ DF100で10000ppm必要
- ✓ 本試験で使用した吸着材はいずれもマイナスチャージの表面電荷を帯びているため, 同様にマイナスチャージの表面電荷であるSiO₂も除去困難であったと考えられる。

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (18/51)

◆ 8.2.2 新規設備：水質調整方式の除去性能試験

➤ 試験概要：除去性能試験（水質調整試験）

＜水質調整方式でのコロイド除去試験＞

- ✓ 机上検討にて候補となる水質調整剤（凝集剤等）を抽出した上で、 α 核種を添加しないCOLD試験にて水質調整剤（凝集剤等）を選定する。その水質調整剤に対して、 α 核種を添加したHOT試験にて除去性能評価を行う。除去性能評価にあたってはろ過後の元素濃度から性能評価を行う（補足8.2.2-1～3を参照）。
- ✓ 試験液中には複数の α 核種形態が考えられるため、可能な限りこれらを分離して各成分中の濃度を確認する。

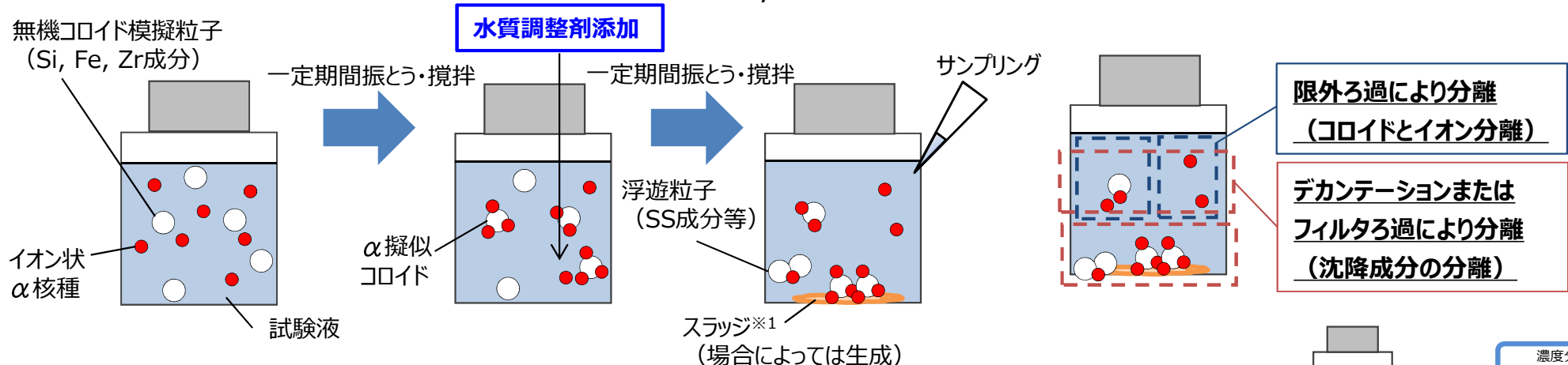


図1 コロイド除去試験（水質調整方式）イメージ図※2

＜吸着塔への水質影響確認試験＞

- ✓ 上記コロイド除去試験にて、コロイド除去性能効果のある水質調整剤を用いて評価を実施。
- ✓ コロイド除去（水質調整）を吸着塔上流で実施した場合、2022年度までの補助事業にて候補としてきた吸着材の α 核種吸着性能への影響が想定される。従い、2022年度までと同様の吸着試験（バッチ試験）にて影響の有無を評価。試験の結果、水質影響は軽微であった。

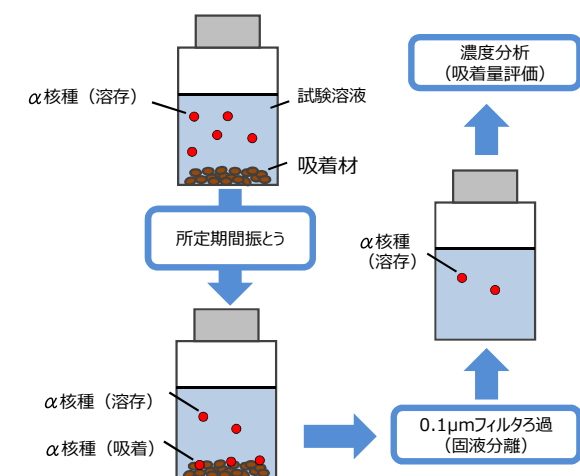


図2 吸着塔への水質影響確認試験（バッチ試験）イメージ図

※1 無機コロイド模擬液を用いた除去試験にて粒径を確認

※2 容器付着影響はブランク液にて評価

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (19/51)

◆ 8.2.2 新規設備：水質調整方式の除去性能試験

➤ 試験パラメータ

- ✓ 水質調整方式のコロイド除去試験のパラメータは以下のように設定。
- ✓ 候補となる水質調整剤や添加量は未確定のため、 α 核種を添加しないCOLD試験により絞り込み。

表 水質調整方式のコロイド α 核種除去試験 試験パラメータ※3

No.	項目		設定	備考
1	トレーサ	種類	Pu, Am	擬似コロイド生成が確認された除去対象 α 核種, 知見拡充のため核種の追加も考慮
		濃度	10Bq/mL	試験容器等の損失を考慮した試験評価可能な濃度を設定
2	試験液水質	希釈海水	①1000倍希釈海水 (②50倍希釈海水(Ca 40ppm))	①Cl濃度17ppm相当 (本事業でのベース条件) ②Cl濃度350ppm + Ca濃度40ppm相当
		pH	FeOOH : pH5程度 SiO ₂ : pH9-10程度	コロイド試験液の調製結果を反映し, 無機コロイドが安定して分散するpH条件を設定
		Eh	大気雰囲気相当 (約0.5V)	Eh制御する場合, 酸化剤および還元剤の添加が必要となり, 実機想定水質から乖離した条件となるため, 制御はしない
3	無機コロイド模擬粒子※1	種類	FeOOH, SiO ₂	循環冷却水中に存在すると想定されるコロイド成分を選定
		添加濃度	10ppm as FeOOH/SiO ₂	試験評価可能な濃度を設定
4	水質調整剤	種類	PAC等	机上検討にて絞り込んだ無機系凝集剤を設定
		添加量	2~3条件程度	適用見込みのある水質調整剤に対して, 廃棄物の観点から薬液添加量を低くした条件を追加で実施 (数十ppm程度)
5	気相雰囲気		大気解放	2022年度までの補助事業成果より, 吸着現象に及ぼす大気雰囲気の影響は軽微であると考えられるため, 試験負荷の小さい大気雰囲気で試験を実施
6	温度		常温範囲 (10℃~30℃程度)	温度影響は小さいと想定されることに加え, 温度制御する場合 (恒温槽等を適用) の試験成立性を考慮し, 室温で実施
7	Run数		N=2 or 3	再現性の確認のため, 最低限N=2で確認
8	吸着材※2	種類	Zr系, 鉄系, 活性炭, チタン系等	2022年度までの補助事業成果より選定された候補となる α 核種吸着材
		V/M	1000 (吸着材 : 0.03g 試験液 : 30mL)	2022年度までの補助事業成果より, ミニラム通水試験を実施する場合に設定された, 吸着材量, 試験液量にて実施

※1 コロイド除去試験のみ

※2 吸着塔への水質影響確認試験 (バッチ試験) のみ

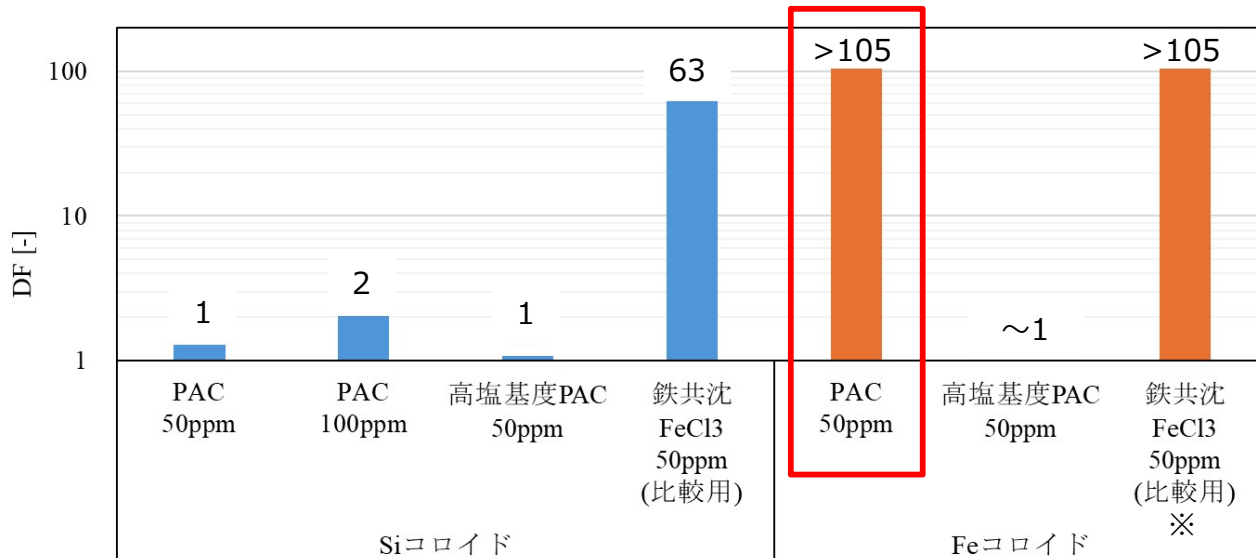
※3 手順と評価内容については, 補足8.2.2-4~5を参照

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (20/51)

◆ 8.2.2 新規設備：水質調整方式の除去性能試験

➤ 試験結果

- ✓ Si, Feコロイド除去試験結果を下図に示す。試験液はベース条件である1000倍希釈海水を用いて, PACおよび高塩基度PACは50～100ppmを添加し, 調整目標pHを6～7程度として試験を行った (PAC, 高塩基度PACが一般的に凝集機能を発揮すると考えられるpH帯)。なお, 比較評価用として鉄共沈 (FeCl₃は50ppm) 条件も実施した。
- ✓ Si, Feコロイド試験液の様子としては, PAC, 高塩基度PACでは沈殿は生成しなかった。塩化第二鉄ではpH8程度にすると安定して沈殿が生成する傾向が確認された。
- ✓ Siコロイド除去試験では, PAC, 高塩基度PACでは添加量を変えてもほとんど除去効果がないことがわかった。Feコロイド除去試験では, 高塩基度PACを除いて, DFは100を超える結果となった。ただし, PACは高い除去DFが得られたものの, 系内で沈殿が確認されなかったことから, 凝集剤による影響 (効果) ではなく, Feコロイド成分がフィルタ等への付着によって見かけ上DFが向上した可能性がある。



※：ポリマー添加なしの条件

図 PACおよび高塩基度PACを用いたSi, FeコロイドDF結果 (コールド試験)

©Decom.Tech

表 各凝集剤での沈殿生成傾向

凝集剤	PAC	高塩基度PAC	鉄共沈
沈殿生成傾向	沈殿生成無し (50ppm, 100ppm条件ともに) 予備試験より, 調整pH6～8の範囲では沈殿生成しないことを確認	沈殿生成無し	pH6～7程度では不安定な沈殿生成傾向。 pH8程度では安定して沈殿生成あり。 (左記結果はpH8程度での結果)

8. α 核種除去技術の開発，コロイド除去方法の検討結果（21/51）

➤ 8.2.2 新規設備：水質調整方式 凝集剤に関する方針見直し

- ✓ 机上検討で選定した「PAC」および「高塩基度PAC」は、汎用品の中では効果的な凝集力と広範囲なpH範囲で利用できる凝集剤であるが、今回のCOLD試験における除去性能（DF）は、計画値に届かなかった。
- ✓ このため、現在の滞留水に対して適合性の高い凝集剤として、ALPSで使用実績のある「塩化第二鉄」を追加選定し、COLD試験を実施した。この結果、SiコロイドのDFは、計画値に届かないものの、吸着槽方式に近い性能を示した。
- ✓ この結果を受けて、水質調整方式では、塩化第二鉄を用いて評価を進める方針に変更した。なお、塩化第二鉄は、共沈方式でも使用しているため、両者における検討内容が重複しないように、試験条件を下表のように設定した。また、共沈方式との試験結果が比較できるように試験の諸条件は基本的に合致させることとした。

表 水質調整剤（凝集剤）を塩化第二鉄とした試験計画案

パラメータ	共沈方式の評価分	水質調整方式の評価分
凝集剤	塩化第二鉄（pH調整剤・ポリマー凝集剤）	塩化第二鉄（pH調整剤・ポリマー凝集剤※1）
凝集剤添加量	100～200ppm	50ppm以下
凝集剤添加時の調整目標pH	7～10程度	6～8程度
COLD試験	Si/Feコロイド	Si/Feコロイド
HOT試験	Pu-FeOOHコロイド Am-SiO ₂ コロイド	Pu-FeOOHコロイド Am-SiO ₂ コロイド (Pu-SiO ₂ コロイド※2)

※1 水質調整方式側では、ポリマー凝集剤は基本的に添加しないが、一部の条件にて、凝集剤の添加有無の影響を確認

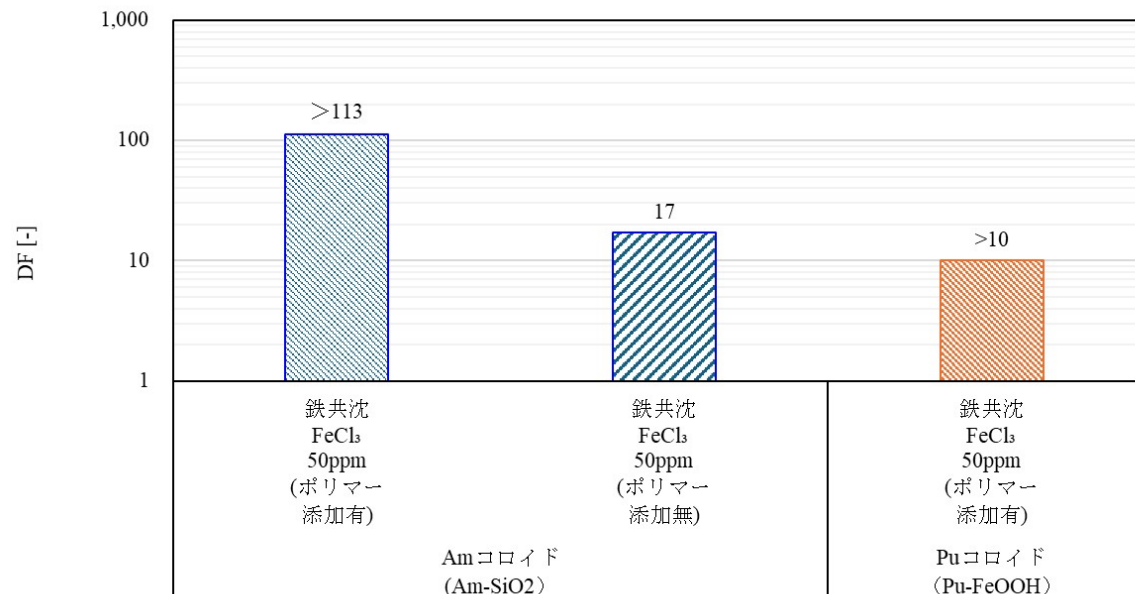
※2 日立/NFDの試験結果をもとに、擬似コロイド調製可能な分散剤を添加した条件にて評価を計画。

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (22/51)

Decom.Tech

➤ 8.2.2 新規設備：水質調整方式 方針変更後の試験結果

- ✓ Amコロイド (Am-SiO_2), Puコロイド (Pu-FeOOH) 試験液に対して, 凝集剤を塩化第二鉄とし, 添加量を50ppmとしたAmおよびPuのDFを下図に示す。鉄共沈方式にて添加しているポリマー※影響を確認するため, Amコロイドではポリマー添加有無で評価を行った。ポリマー添加有りの条件では, Amコロイド, Puコロイドそれぞれ, 凝集後の $0.1\mu\text{m}$ ろ液の核種濃度が検出下限未満となった。特にAmのDFは高い結果となった。
- ✓ 一方で, Amコロイドにてポリマー添加無しの条件ではDFは100を下回る結果となり, 目標DF100を満足できない結果となった。
- ✓ ポリマー添加によりDF が上がった理由は, 電荷を帯びたコロイド粒子がポリマーに捕捉される, もしくはポリマーの鎖に分子間引力等で捕捉されることにより, Si コロイドのDF が向上した可能性がある。
- ✓ なお, Puコロイド試験液はブランク (共沈試薬添加無し) 条件にて, $0.1\mu\text{m}$ ろ液の濃度が低く, 検出下限の観点からDF10程度までしか評価できなかった。



※ポリマー：カチオン系凝集助剤

図 水質調整方式 (塩化第二鉄50ppm添加条件) でのDF結果 (Am-SiO_2 , Pu-FeOOH)

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (23/51)

◆ 8.2.3 現行設備：共沈方式の除去性能試験

➤ 試験概要：除去性能試験（共沈試験）

- ✓ ろ過後の元素濃度からコロイド除去性能評価を行う。
- ✓ 試験液中には複数の α 核種形態が考えられるため、可能な限りこれらを分離して各成分中の濃度を確認する。
- ✓ 共沈には、吸蔵（沈殿粒子が生成する過程で対象元素が包み込まれて、沈殿中にコロイド成分等が移行）や、吸着（沈殿粒子表面のイオンは溶液中に存在する反対電荷のイオンを吸着）等のメカニズムが考えられ、コロイド成分に加えて、イオン成分も除去できる可能性がある。
- ✓ 本試験体系では沈殿へ移行した α 核種の形態（コロイド成分かイオン成分か）までは把握できないため、別途、イオン状 α 核種（無機コロイド模擬粒子を添加せず、溶解性トレーサのみを添加した試験）を対象とした共沈試験を実施する（8.3 現行設備に関するイオン状 α 核種除去試験に示す）。

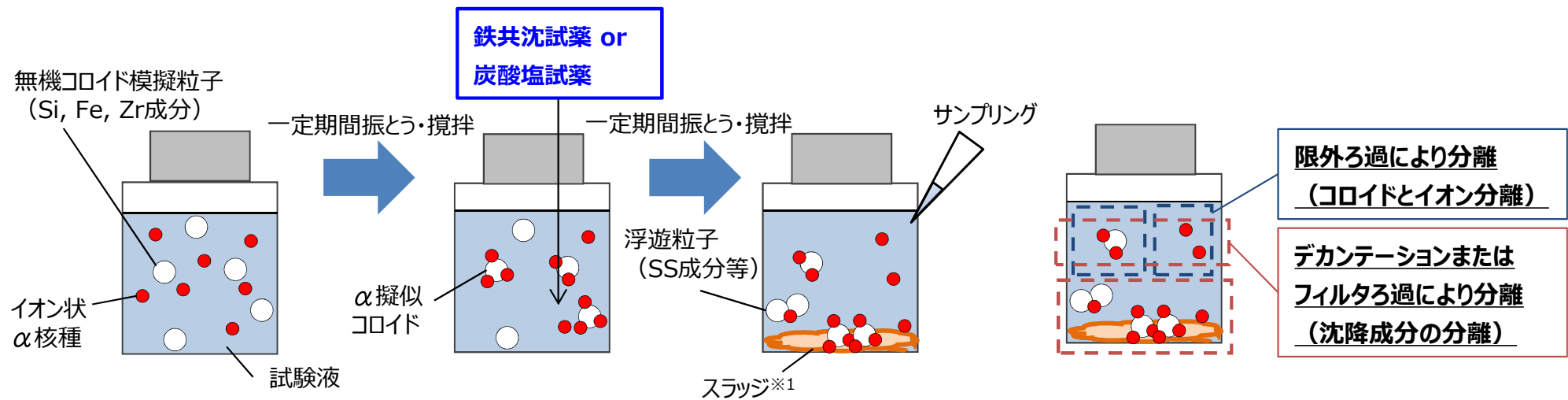


図 コロイド除去試験（共沈方式）イメージ図※2

※1 事前に沈殿性状（粒径，含水率など）を可能な範囲で確認

※2 容器付着影響はブランク液にて評価

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (24/51)

◆ 8.2.3 現行設備：共沈方式の除去性能試験

➤ 試験パラメータ

- ✓ 共沈方式のコロイド除去試験のパラメータは以下のように設定。
- ✓ 添加量や調整pH条件については, α 核種を添加しないCOLD試験により絞り込み。

表 共沈方式のコロイド状 α 核種除去試験 試験パラメータ※4

No.	項目		設定	備考
1	トレーサ	種類	Pu, Am	擬似コロイド生成が確認された除去対象 α 核種, 知見拡充のため核種の追加も考慮
		濃度	10Bq/mL	試験容器等の損失を考慮した試験評価可能な濃度を設定
2	試験液水質	希釈海水 ※3	①1000倍希釈海水 ②50倍希釈海水 (Ca 40ppm) ※1	①Cl濃度17ppm相当 (本事業でのベース条件) ②建屋滞留水質・既存水処理設備で処理する場合水質を想定
		pH	FeOOH : pH5程度 SiO ₂ : pH9-10程度	コロイド試験液の調製結果を反映し, 無機コロイドが安定して分散するpH条件を設定
		Eh	大気雰囲気相当 (約0.5V)	Eh制御する場合, 酸化剤および還元剤の添加が必要となり, 実機想定水質から乖離した条件となるため, 制御はしない
3	無機コロイド 模擬粒子	種類	FeOOH, SiO ₂	循環冷却水中に存在すると想定されるコロイド成分を選定
		添加濃度	10ppm as FeOOH/SiO ₂	試験評価可能な濃度を設定
4	共沈薬液	種類	鉄共沈処理, 炭酸塩処理	塩化第二鉄, 水酸化ナトリウム, 炭酸ナトリウム, 水酸化ナトリウム等を使用
		添加量	2~3条件程度※2	廃棄物の観点から薬液添加量を低くした条件を追加で実施 (数十~数百ppm)
		pH	2~3条件※2	調整するpHによって α 核種の除去性能が変化する可能性があるため, pH4~10程度で可能な範囲でパラメータを設定
5	気相雰囲気		大気解放	2022年度までの補助事業成果より, 吸着現象に及ぼす大気雰囲気の影響は軽微であると考えられるため, 試験負荷の小さい大気雰囲気で試験を実施
6	温度		常温範囲 (10℃~30℃程度)	温度影響は小さいと想定されることに加え, 温度制御する場合 (恒温槽等を適用) の試験成立性を考慮し, 室温で実施
7	Run数		N=2 or 3	再現性の確認のため, 最低限N=2で確認

※1 炭酸塩処理はNo.2試験液水質の②条件のみ実施

※2 鉄共沈処理を優先的に評価

※3 評価用の水質・コロイド種類はコロイド試験液の調製結果を反映する

※4 手順については, 補足8.2.3-2を参照

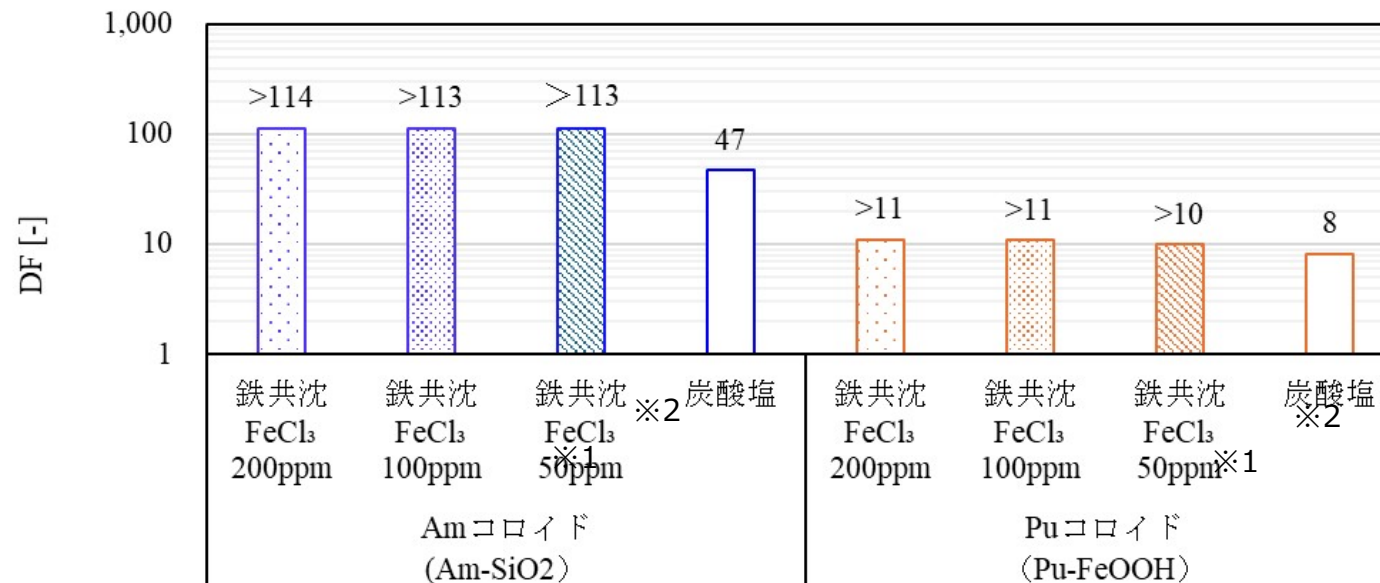
8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (25/51)

◆ 8.2.3 現行設備：共沈方式の除去性能試験

◆ コロイド除去試験結果と考察の妥当性

➤ 共沈方式での試験結果 (HOT試験)

- ✓ Amコロイド (Am-SiO_2), Puコロイド (Pu-FeOOH) 試験液に対して, 鉄共沈処理および炭酸塩処理時のAmおよびPuのDFを下図に示す (水質調整方式の結果と合わせて掲載)。鉄共沈処理では塩化第二鉄の添加量を50~200ppmとすることで核種は検出下限未満となった。特にAmは高いDFを保持できた。
- ✓ 一方で炭酸塩処理はAm, Pu共に, DF100を満足できなかった。
- ✓ Puコロイド試験液はブランク (共沈試薬添加無し) 条件にて, $0.1\mu\text{m}$ ろ液の濃度が低く, 検出下限の観点からDF10程度までしか評価できなかった。ただし, 鉄共沈処理後のPuは検出下限未満でありPu-FeOOH コロイド粒子の除去効果は十分有していると考えられる。
- ✓ また, FeOOHは鉄共沈スラリーと類似の組成である点などから, 高いDFが見込まれる。



※1：水質調整方式にて評価した結果を掲載

※2：炭酸塩処理時の水質は50倍希釈海水条件, (鉄共沈処理では1000倍希釈海水条件)

図 鉄共沈処理と炭酸塩処理のDF結果 (Am-SiO_2 , Pu-FeOOH)

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (26/51)

◆ 8.2.3 現行設備：共沈方式の除去性能試験

◆ コロイド除去試験結果と考察の妥当性

➤ 共沈方式での試験結果の考察（炭酸塩沈殿処理）

- ✓ Am, Pu共に炭酸塩処理によるDF(イオン+コロイド)は鉄共沈より低い結果となった点について考察する。
- ✓ 鉄共沈試験では試験後pHが7前後となっており, そのpH 条件では SiO_2 のゼータ電位はマイナス(図1), 鉄沈殿のゼータ電位はプラス(図1)であり, 電気的な引力が働いている状態であると考えられる。
- ✓ 一方で, 炭酸塩処理のpH12 以上では, SiO_2 のゼータ電位は変わらずマイナス(図1), CaCO_3 もマイナスであるため(図2), 電気的な反発力が働き, SiO_2 擬似コロイドの共沈効果が低くなった可能性がある。

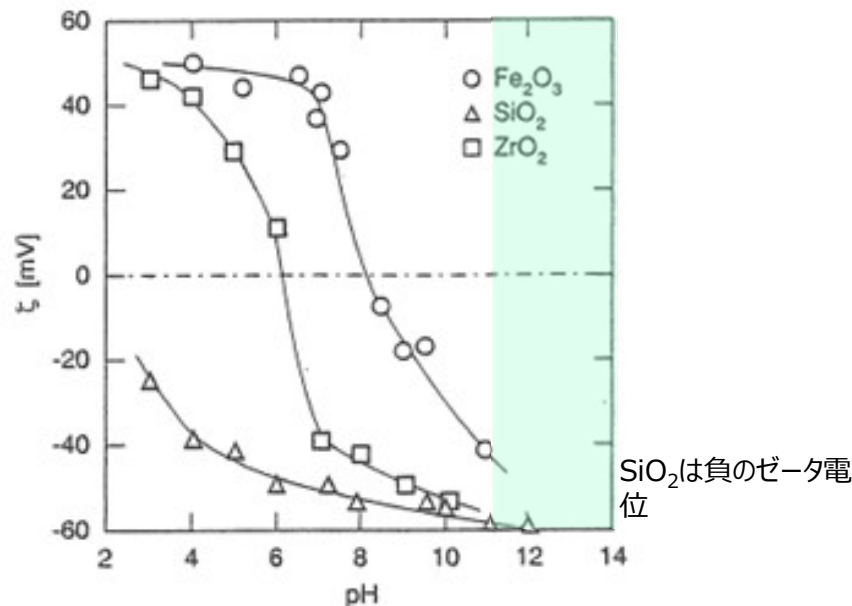


図1 各酸化物のpHに対数するゼータ電位※1

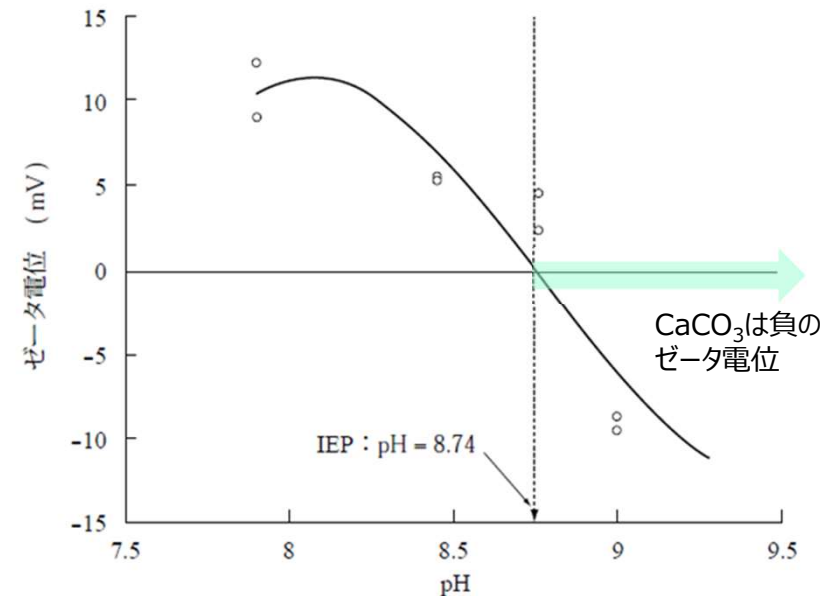


図2 自然海水中における CaCO_3 コロイドのゼータ電位※2

※1 塩化ナトリウムを利用した液中懸濁微粒子の高度分画法の開発 2001年3月 入江英司ら 名古屋大学大学院工学研究科

※2 赤嶺健一, 櫻木勇, 海水中における石灰質膜の電着機構, 石川島播磨技報, 43(1), 27-33(2003-1)

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (27/51)

◆ 8.2.3 現行設備：共沈方式の除去性能試験

◆ コロイド除去試験結果と考察の妥当性

➤ 共沈方式での試験結果の考察（鉄共沈処理）

- ✓ Siコロイド試験液のみで鉄共沈処理を行った結果（図1）では，目標DF100を下回る（可能性が高い）結果となった。
- ✓ 一方で，イオン状のAmを対象とした鉄共沈処理試験を実施した結果，DFは100以上であった（図2）。
- ✓ これらの結果を組み合わせると，Am-SiO₂疑似コロイドで存在している系に塩化第二鉄を添加し，水酸化鉄沈殿が生成すると，AmはSiコロイドから解離し，イオン状のAmが凝集（共沈）して除去されている可能性がある
- ✓ そのため，液相中で疑似コロイドで存在しているような形態でも，より親和性の高い粒子が近くで生成されると，イオン形態等の状態で核種のみが解離し，親和性が高い成分へ移行している可能性がある。
- ✓ なお，Puイオンの除去DFは100以上であり，Am同様にコロイド形態であっても高いDFを確保できる可能性がある。

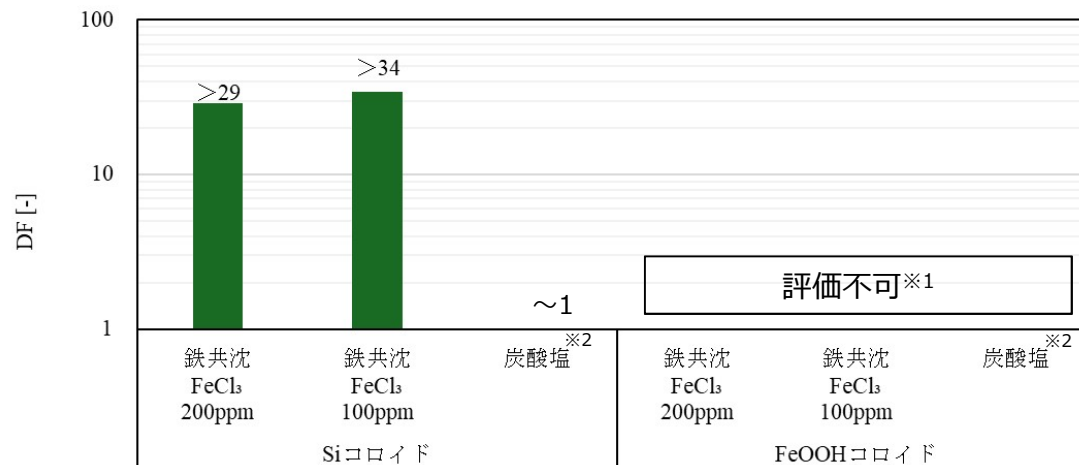


図1 鉄共沈処理と炭酸塩処理のSi, FeコロイドDF結果（コールド試験）

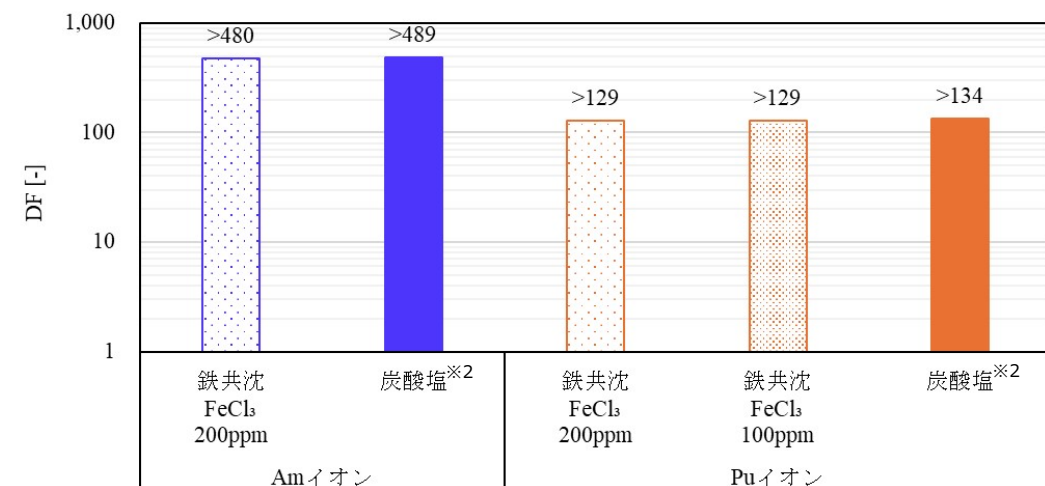


図2 鉄共沈処理と炭酸塩処理のイオン状Am, PuのDF結果

※1：コロイド試験液自体がフィルタにて定量下限未満除去されたため，評価不可。ただし，共沈後の上澄み液からは試験液由来のFe成分が除去されていることを確認。

※2：炭酸塩処理時の水質は50倍希釈海水条件，（鉄共沈処理では1000倍希釈海水条件）

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (28/51)

◆ 8.3 現行設備に関するイオン状 α 核種除去試験

➤ 試験概要

- ✓ ろ過後の元素濃度からイオン除去性能評価を行う。
- ✓ 試験液中には複数の α 核種形態が考えられるため, 可能な限りこれらを分離して各成分中の濃度を確認する。
- ✓ 共沈には, 吸蔵 (沈殿粒子が生成する過程で対象元素が包み込まれて, 沈殿中にコロイド成分等が移行) や, 吸着 (沈殿粒子表面のイオンは溶液中に存在する反対電荷のイオンを吸着) 等のメカニズムが考えられ, コロイド成分に加えて, イオン成分も除去できる可能性がある。
- ✓ 本試験体系ではイオン状 α 核種を対象とした共沈試験を実施する。なお, コロイド状 α 核種を対象とした除去性能試験は, 8.2.3 現行設備: 共沈方式の除去性能試験にて実施する。2つの試験結果を踏まえて, イオン状およびコロイド状の α 核種に対する除去可否を評価する。

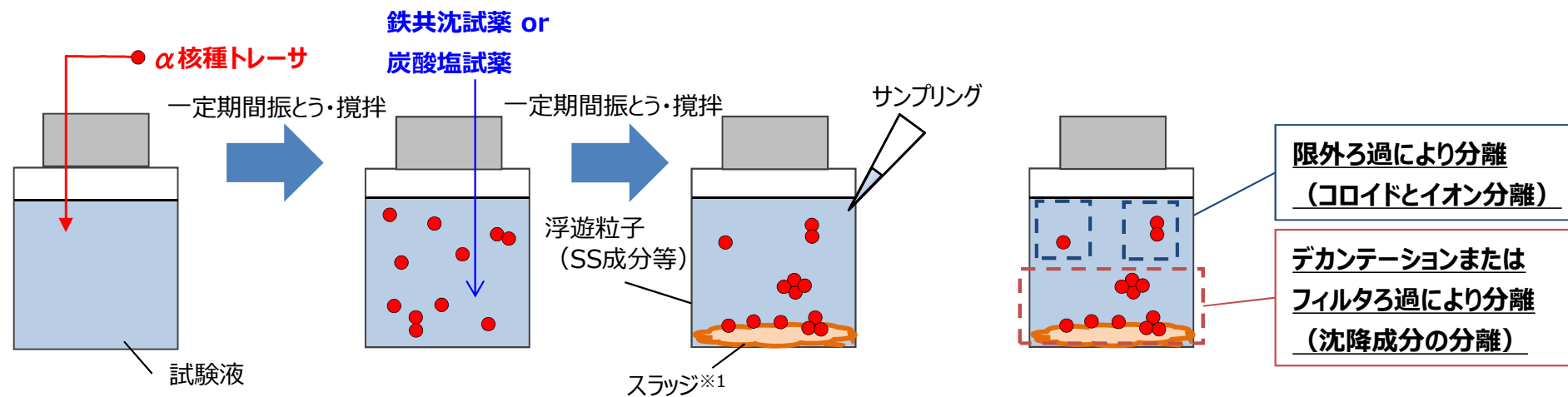


図 イオン除去試験 (共沈方式) イメージ図※2

※1 事前に沈殿性状 (粒径, 含水率など) を可能な範囲で確認

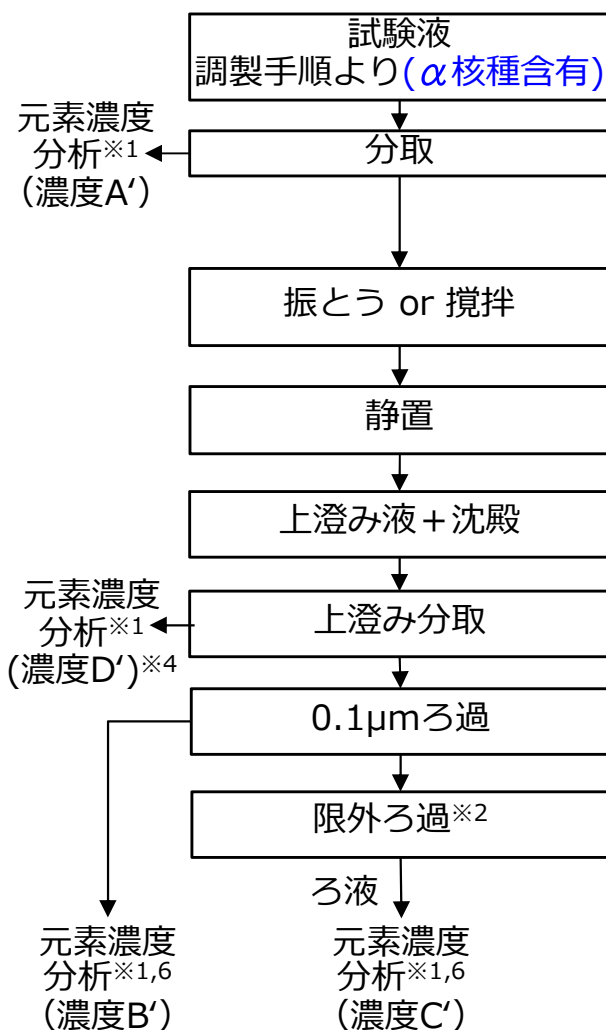
※2 容器付着影響はブランク液にて評価

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (29/51)

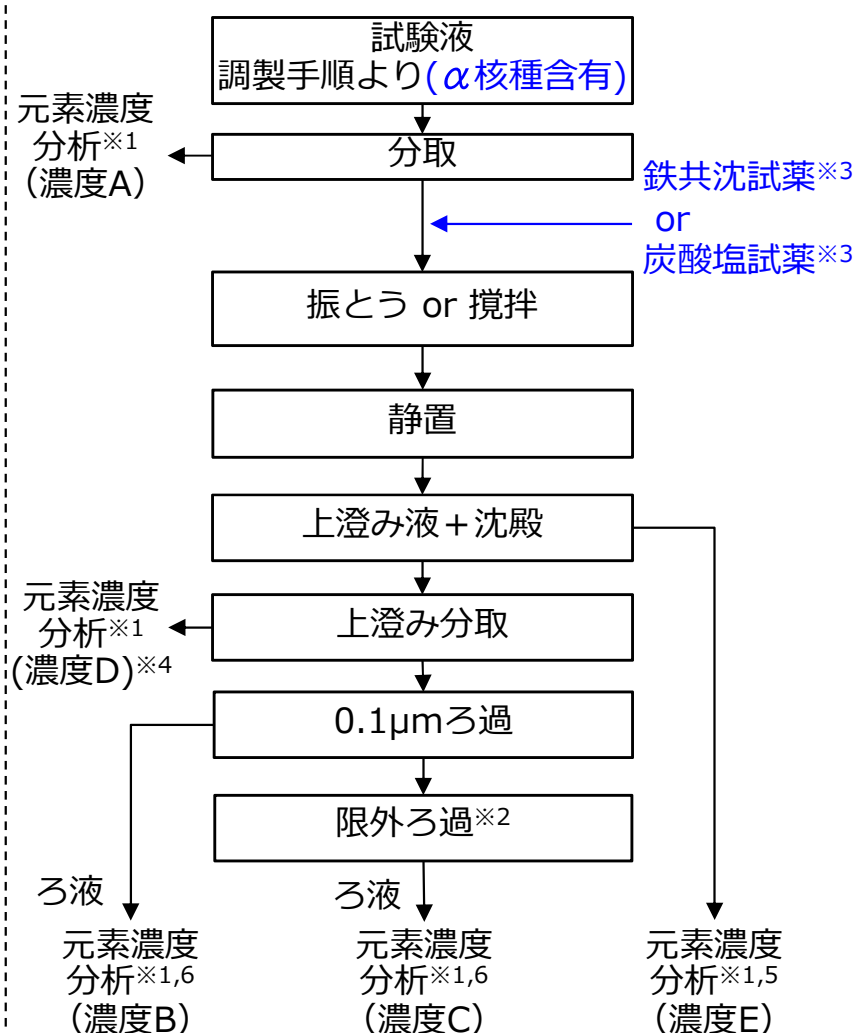
➤ 試験手順

<共沈方式でのイオン除去試験の概略試験手順>

薬液添加無し（ブランク液）概略手順



薬液添加有り概略手順



<各評価方法>
(濃度は α 核種濃度を想定)

【イオン除去に関するDF評価】

$$\text{除去係数(DF)} = \frac{C'}{C}$$

- ※1：溶解液を用いて溶解後に濃度分析
- ※2：上澄み液の α 核種濃度が比較的高い場合、必要に応じて実施
- ※3：pH調整含む
- ※4：考察に資するデータとして容器付着影響を確認するために濃度D、D'を測定
- ※5：沈殿が溶解し、かつコロイド模擬粒子が溶解可能な条件にて溶解液を測定（各試験原則N=1のみ実施）
- ※6：考察に資するデータとして、コロイド成分（真正コロイド等）の評価ができるように濃度B、B'、C、C'を測定

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (30/51)

◆ 8.3 現行設備に関するイオン状 α 核種除去試験

➤ 試験パラメータ

✓ イオン状 α 核種除去試験のパラメータは以下のように設定。

表 ALPS前処理のイオン状 α 核種除去試験 試験パラメータ

No.	項目		設定	備考
1	トレーサ	種類	Pu, Am	擬似コロイド生成が確認された除去対象 α 核種, 知見拡充のため核種の追加も考慮
		濃度	10Bq/mL	試験容器等の損失を考慮した試験評価可能な濃度を設定
2	試験液水質	希釈海水	①1000倍希釈海水 ②50倍希釈海水 (Ca 40ppm) ※1	①Cl濃度17ppm相当 (本事業でのベース条件) ②建屋滞留水質・既存水処理設備で処理する場合水質を想定
		pH	pH6～8程度	大気雰囲気です試験するため, CO ₂ 影響が少なく, 試験中の水質変動影響が少ない中性条件で評価
		Eh	大気雰囲気相当 (約0.5V)	Eh制御する場合, 酸化剤および還元剤の添加が必要となり, 実機想定水質から乖離した条件となるため, 制御はしない
3	共沈薬液	種類	鉄共沈処理, 炭酸塩処理	塩化第二鉄, 水酸化ナトリウム, 炭酸ナトリウム, 水酸化ナトリウム等を使用
		添加量	2～3条件程度※2	適用見込みのある水質調整剤に対して, 廃棄物の観点から薬液添加量を低くした条件を追加で実施 (数十～数百ppm)
		pH	2～3条件※2	調整するpHによって α 核種の除去性能が変化する可能性があるため, pH4～10程度で可能な範囲でパラメータを設定
4	気相雰囲気		大気解放	2022年度までの補助事業成果より, 吸着現象に及ぼす大気雰囲気の影響は軽微であると考えられるため, 試験負荷の小さい大気雰囲気です試験を実施
5	温度		常温範囲 (10℃～30℃程度)	温度影響は小さいと想定されることに加え, 温度制御する場合 (恒温槽等を適用) の試験成立性を考慮し, 室温で実施
6	Run数		N=2 or 3	再現性の確認のため, 最低限N=2で確認

※1 炭酸塩処理はNo.2試験液水質の②条件のみ実施

※2 鉄共沈処理を優先的に評価

8. α核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (31/51)

◆ 8.3 現行設備に関するイオン状α核種除去試験

➤ ブランク試験結果を受けたイオン状Amの試験方針

- ✓ Amブランク試験結果を受けて, Am共沈試験 (鉄共沈処理) の方針について纏めた。
- ✓ まず, 測定器 (液体シンチレーションカウンタ) の検出下限を考慮すると, 1000倍希釈海水条件では, Am共沈試験ではDF5程度まで評価可能な見込みである。
- ✓ 以下にAm共沈試験を実施する場合の方針を表に整理した。比較的低濃度の海水条件では溶存Am除去の必要性は低いことを確認したが, これまでの補助事業結果 (図) より, 高い海水濃度 (50倍希釈海水条件) では溶存Amの割合が高くなり, 除去必要性が高くなるため, **50倍希釈海水濃度条件にて評価を実施した。**

表 イオン状Amの試験方針

方針案	考え方	推奨	理由
① 試験条件の変更	Am添加量の増加	△～ ×	・Amトレーサに含まれるキャリアおよび溶媒成分濃度が増加し, 水質条件が変化するため, 他の条件との比較が難しい。 ・廃棄物の観点から許容されない可能性あり。
	水質条件の変更	○ △～ ×	＜海水濃度＞ 希釈海水条件を変更すると, 他の試験条件と比較評価ができない一方で, 溶存Amの除去必要性が高くなる海水濃度条件にてデータ取得する必要性は高い。 ＜ホウ酸＞ ホウ酸は緩衝作用があるため, pH調整ができず, 沈殿が生成されない懸念あり。
② 試験条件を変更することなく参考値としてデータを取得	測定の検出下限を考慮してDF5程度まで評価する。 (共沈試験後のろ液濃度が検出下限以下となる場合, DF>5として評価)	△	・水質条件によってはAmは粒子形態になりやすく, 粒子除去フィルタにて捕捉され, 溶解性核種除去設備へ流入するAm濃度は低くなる可能性あり。一方で, フィルタにて目標まで全α核種濃度を低減しきれない場合に備えて, 共沈設備の能力を可能な範囲で把握しておく。

海水濃度を上昇させることで,
0.1μmろ過後のろ液中に含まれるAm濃度が上昇
⇒粒子生成が抑制

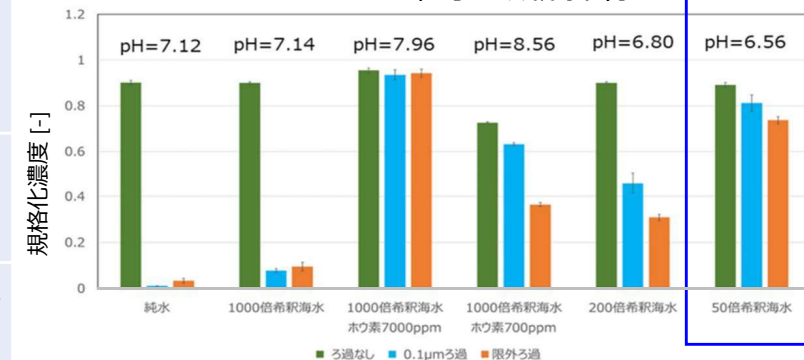


図 Amブランク試験結果
(2022年度事業成果)

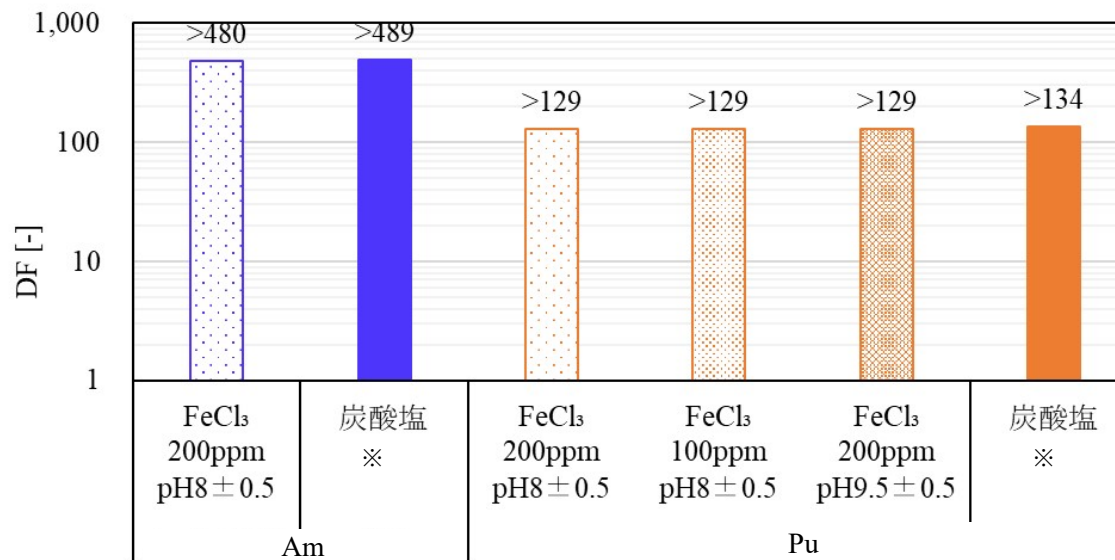
8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (32/51)

Decom.Tech

◆ 8.3 現行設備に関するイオン状 α 核種除去試験

➤ 試験結果まとめ

- ✓ 溶解性 α 核種の除去試験でのAmとPuのDF比較結果を下図に示す。
- ✓ 0.1 μ mろ過後の液中のAm濃度は鉄共沈, 炭酸塩試験のいずれも検出限界未満で違いはあまりみられなかった。そのためDFとしても鉄共沈で >480 , 炭酸塩処理で >489 であった。
- ✓ Puの結果においても同様であった。いずれの試験でも検出限界未満となりDFは鉄共沈で >129 , 炭酸塩処理で >134 であった。いずれも目標DF100以上を達成するという評価であった。
- ✓ 炭酸塩沈殿にて高いDFとなったのはアルカリ側に調整したことでAm, Puが水酸化物形態となった可能性が高く, 水酸化物として沈殿除去されたものと推察される。
- ✓ 鉄共沈では, 塩化第二鉄試薬量を半減してもDFに差異はみられなかった。コロイド除去性能が比較的高い塩化第二鉄添加量100~200ppm条件ではイオン状の α 核種の除去DFも高いことがわかった。鉄共沈処理を α 核種除去システムに組み込むことで, イオン状 α 吸着塔数が削減できる可能性がある。



※：炭酸塩処理時の水質は50倍希釈海水条件, (鉄共沈処理では1000倍希釈海水条件)

図 鉄共沈処理と炭酸塩処理のイオン状Am, PuのDF結果

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (33/51)

◆ 8.4 現場への適用性の観点における分析

- コロイド除去設備の系統構成検討の実機適用性評価方針は、液体処理設備を導入・運用する場合において事業者目線で重視すべき項目を抽出して、各除去設備の系統構成について検討・評価した。
- 本事業完了段階では、全ての項目に対する精度の良い評価は困難なため、定性的/相対的な評価に留めた項目もある。

現場適用性の評価項目

No	評価項目	評価項目の説明	評価の方針	目標 (値)
1	除去性能	・要素試験におけるコロイド状 α 核種除去性能 (DF) が目標値を満足するか	要素試験により、コロイド状 α 核種の除去性能を確認し、目標とする性能を満足することを確認する。	DF100
2	設備構成	・設備設置に際し、膨大なスペースを要することはないか、特別な制約はないかなど	No.1「除去性能」の目標値を達成する見込みがある除去方式について、システム構成を再確認し、主要な設備構成および設備規模を想定する。この際の必要処理量は22m ³ /日とし、寸法の大きい主要機器より、規模感を評価する。	設備規模感 (主要機器の寸法・容量など)
3	ロバスト性	・水質の変化に対して、処理対象への不確定要素はないか	水質 (想定水質パラメータ) が変動することにより、想定される不確定要素について整理する。	水質変化に対する ロバスト性 (対策の容易性)
4	廃棄物	・二次廃棄物の発生量はどの程度か ・発生する廃棄物の保管/処分に際し、新たな障害となる課題はないか	廃棄物の発生量を評価し、保管/処分に関する課題を机上で検討し、整理する。	発生量低減 新たな課題なし
5	メンテナンス性	・ α 核種除去性能の維持に必要なメンテナンス頻度/交換部品が膨大とならないか ・故障時の復旧作業は容易か (過大な被ばくが伴うことが想定されないかなど)	・系統に必要となる動的機器を評価する。その他系統プロセスのメンテナンス性に係る課題を机上で検討し、整理する。 ・故障時に想定される復旧作業と課題について机上検討を行う。	動的機器低減 保守時の被ばく評価

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (34/51)

◆ 8.4 現場への適用性の観点における分析

➤ 現場への適用性の評価 (吸着槽方式)

評価結果の凡例

○：目標達成見込有, △：課題有も想定範囲, ×：目標未達

No.	評価項目	評価内容	評価結果	判断根拠の概要
1	除去性能	・コロイド状 α 核種除去性能 (DF)	○：DF100相当の処理は、Pu-FeOOHでは添加濃度1000ppm以下で可能と試算	吸着試験結果より、Pu-FeOOH擬似コロイドに対して $K_d=1.0E+04\sim 05\text{ml/g}$ 程度の分配係数を有することを確認。DF100相当の除去性能を満たす添加濃度は数百 $\sim 1000\text{ppm}$ と試算された。
2	設備構成	・設備構成 ・設置スペース (規模感) ・ユーティリティ使用量 (規模感)	○：吸着反応槽, 吸着材タンク供給タンク, 処理水受槽, 攪拌設備, その他付帯設備	吸着槽方式の概念システム設計より主要設備を選定。22 m^3/day の処理流量を考慮すると、吸着反応槽や各バッファタンクは30 m^3 規模の容量が必要と想定。
3	ロバスト性	・処理可能水質 (pH, 海水濃度等)	△：各 α 核種コロイドが優位に発生する水質条件では、処理可能	擬似コロイド作製試験により選定された、 α 核種擬似コロイドが顕著に形成される水質条件では、高い除去性能を試験により確認した) DF100以上の除去性能が必要な場合は吸着材の投入量を増加することで、除去率の向上が可能。ただし、廃棄物量は増大する。処理水量の増大については、多系統化によるロバスト性の確保が必要と想定。また、水質変動については想定水質範囲内であれば処理可能と想定される。
4	廃棄物	・二次廃棄物発生量 ・二次廃棄物性状	○：粉末吸着材が乾燥状態のスラッジとして発生する、発生量はユニット缶1 ~ 2 本程度	添加した粉末吸着材がスラッジ系廃棄物となる。また、後段のフィルタ機器等が二次廃棄物となる。発生量およびスラッジ性状に関しては11章まとめに記載。
5	メンテナンス性	・メンテナンス方法, 頻度 ・交換部品 ・故障時の復旧作業の被ばく	△：移送ポンプ, 攪拌機等の最小限の動的機器の定期的保守作業が必要, これらによる被ばく量は今後の評価項目となる	攪拌機器や移送ポンプ以外の動的設備は少ないため、メンテナンス性は高いと想定。ただし、配管内壁などに粉末吸着材が固着してしまう場合、定期的な化学洗浄による除去が必要となる。

8. α核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (35/51)

◆ 8.4 現場への適用性の観点における分析

➤ 現場への適用性の評価（吸着槽方式） α核種除去システムの構成案

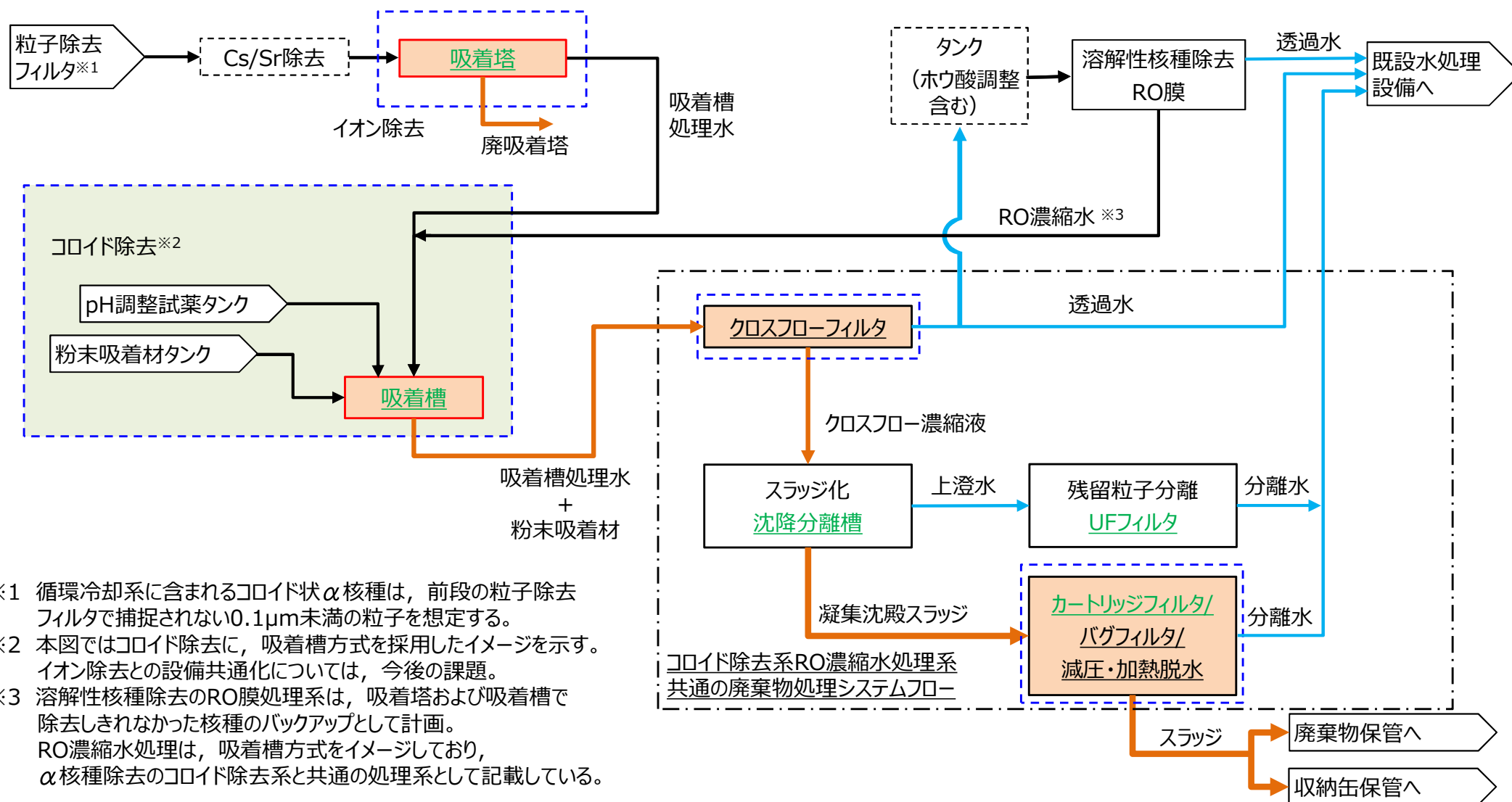


図 燃料デブリ取り出し時の液体処理システム

緑書き：2022年度補助事業までに開発実績のある設備
青点線：2023-2024年度補助事業における開発対象設備

8. α 核種除去技術の開発，コロイド除去方法の検討結果（36/51）

Decom.Tech

◆ 8.4 現場への適用性の観点における分析

➤ 現場への適用性の評価（水質調整方式） …… 共沈処理と比較の観点で整理

No.	評価項目	評価内容	評価結果	判断根拠の概要
1	除去性能	・コロイド状 α 核種除去性能（DF）	PAC系：性能未達 塩化第二鉄：一部条件でのみ達成 ×：共沈方式に劣る	PAC系ではSi，Feコロイド共に安定したDF100の確保が難しい 塩化第二鉄では，ポリマー添加条件次第でDF100を満足できる見込があるが，共沈方式に対する優位性はない
2	設備構成	・設備構成 ・設置スペース（規模感） ・ユーティリティ使用量（規模感）	△：共沈方式と同等	設備構成は共沈方式と同程度になると想定されるため，優位性はない（凝集剤を塩化第二鉄とする場合，水質調整方式・共沈方式で設備規模は同等）
3	ロバスト性	・処理可能水量 ・処理可能水質（pH，海水濃度等）	×：共沈方式に劣る	PAC系は処理対象水質によって凝集傾向が変化するため，水質変動した場合，安定した処理ができない可能性が高い（想定水質でも性能未達なので厳しい）
4	廃棄物	・二次廃棄物発生量 ・二次廃棄物性状	△～○：一部条件では共沈方式よりも低減可能	共沈方式より添加量が少ない分，廃棄物発生量は低減可能（凝集剤を塩化第二鉄とする場合，ポリマー添加しなければ，性能は低下するため，共沈方式と同程度の塩化第二鉄添加量が必要な可能性あり）。
5	メンテナンス性	・メンテナンス方法，頻度 ・交換部品 ・故障時の復旧作業の被ばく	△：共沈方式と同等	設備構成は共沈方式と同程度になると想定されるため，優位性はない。

◆ α 核種除去システムの構成案（水質調整方式）

➤ 評価結果より，共沈方式に統合するとした

評価結果の凡例 ○：優，△：同等，×：劣

8. α 核種除去技術の開発，コロイド除去方法の検討結果（37/51）

◆ 8.4 現場への適用性の観点における分析

➤ 現場への適用性の評価（共沈方式）

評価結果の凡例

○：目標達成見込有，△：課題有も想定範囲，×：目標未達

No.	評価項目	評価内容	評価結果	判断根拠の概要
1	除去性能	・コロイド状 α 核種除去性能（DF）	○：添加濃度100～200ppmにてDF100の処理が可能	α 核種の擬似コロイド試験液を用いた鉄共沈処理を模擬した試験結果より，DF100以上の除去性能が得られる見込み。
2	設備構成	・設備構成 ・設置スペース（規模感） ・ユーティリティ使用量（規模感）	○：共沈処理槽，循環槽，フィルタ，その他付帯設備	既存水処理設備設備を参考にシステム構成案を設定。処理量22m ³ /dayの処理流量を考慮すると，処理対象水を受け入れるタンクは最大で30m ³ 規模の容量が必要と想定。
3	ロバスト性	・処理可能水量 ・処理可能水質（pH，海水濃度等）	○：pH等の水質は，事前調整するためロバスト性は高い	共沈試薬（鉄共沈処理の場合，塩化第二鉄や水酸化ナトリウム等）を添加するため，処理対象水の液性は均一にした状態で処理可能。処理対象水質によって，沈殿性状がやや変化するものの，処理性能は大きな変化はないと想定。
4	廃棄物	・二次廃棄物発生量 ・二次廃棄物性状	△：粒径数十 μ m程度，含水率90vol%以上のスラッジが発生（脱水方法の設定が必要），発生量は1日あたり，ユニット缶1～2本程度	共沈処理時の沈殿スラッジが廃棄物となる。スラッジ性状は粒径数十 μ m，含水率90vol%以上のスラッジが発生（廃棄物処理時にはフィルタ等の脱水操作が必要）。スラッジ発生量については，カートリッジフィルタ等にて二次廃棄物処理技術にて目標としている含水率60vol%程度を満足できれば，ユニット缶1本程度に抑制可能。
5	メンテナンス性	・メンテナンス方法，頻度 ・交換部品 ・故障時の復旧作業の被ばく	△：既存設備の運用実績より定期的な保守作業内容は把握済，保守時の被ばく低減対策が必須	既設設備において，被ばく影響の大きい課題の改善が必要。共沈処理反応槽の攪拌システム改良（ポンプによる循環攪拌など），タンク内面点検時の線量低減策（反応槽上流のプロセスでの線源回収），反応槽内の固着したスラッジの回収機能（遠隔回収）が必要など。

◆ 8.4 現場への適用性の観点における分析

図 燃料デブリ取り出し時の液体処理システム

※1 循環冷却系に含まれるコロイド状α核種は、前段の粒子除去フィルタで捕捉されない0.1μm未満の粒子を想定する
 ※2 イオン除去にて大部分のα核種除去を想定するため、これまでの補助事業実績から、水質調整（pH等）設備の設置を想定している
 ※3 RO濃縮水系の廃棄物処理では、吸着槽方式の適用をイメージしているコロイド除去との設備共通化は今後の課題
 ※4 コロイド除去系の廃棄物は、今回開発した二次廃棄物処理技術の適用性を含めて今後の課題

©Decom.Tech

緑書き：2022年度補助事業までに開発実績のある設備
青点線：2023-2024年度補助事業における開発対象設備

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (39/51)

Decom.Tech

◆ 現場への適用性の観点における分析 3つのコロイド除去方式まとめ

凡例 ○：目標達成見込有, △：課題有も想定範囲, ×：目標未達

No.	評価項目	評価項目	吸着槽方式	水質調整方式	共沈方式	指標
1	除去性能	・コロイド状 α 核種除去性 (DF)	○：DF100相当の処理は、添加濃度1000ppm以下で可能と試算	PAC系：性能未達 塩化第二鉄：一部条件でのみ達成 ×：共沈方式に劣る	○：添加濃度100～200ppmにてDF100の処理が可能	対象 PuおよびAm DF100
2	設備構成	・設備構成 ・設置スペース ・ユーティリティ使用量	○：吸着反応槽, 吸着材タンク供給タンク, 処理水受槽, 攪拌設備, その他付帯設備	○：共沈方式と同等	○：共沈処理槽, 循環槽, フィルタ, その他付帯設備	標準的な 必要設備構成 @22m ³ /日処理
3	ロバスト性	・処理可能水質 (pH, 海水濃度等)	△：各 α 核種コロイドが優位に発生する水質条件では、処理可能	×：共沈方式に劣る	○：pH等の水質は、事前調整するためロバスト性は高い	処理量変動 水質変動
4	廃棄物	・二次廃棄物発生量 ・二次廃棄物性状	○：粉末吸着材が乾燥状態のスラッジとして発生する、発生量はユニット缶1～2本程度	△～○：一部条件では共沈方式よりも低減可能	△：粒径数十 μ m程度、含水率90vol%以上のスラッジが発生（脱水方法の設定が必要）、発生量は1日あたり、ユニット缶1～2本程度	評価DF値 あたりの発生量
5	メンテナンス性	・メンテナンス方法, 頻度 ・交換部品 ・故障時の復旧作業の被ばく	△：移送ポンプ, 攪拌機等の最小限の動的機器の定期的保守作業が必要, これらによる被ばく量は今後の評価項目となる	○：共沈方式と同等	△：既存設備の運用実績より定期的な保守作業内容は把握済, 保守時の被ばく低減対策が必須	年間作業員被ばく量 (将来)
評価			○：見込有	×：見込無	○：見込有	

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (40/51)

◆ 8.4 現場への適用性の観点における分析 (吸着槽方式)

項目		検討内容
粉末 (粉状) 吸着材	鉄系吸着材	基本水質において除去性能が高く, イオン, コロイドを除去可能。 ホウ酸水水質では除去性能が低下するが, 減少幅は比較的小さい。ケーキ化した際のろ過性が良好。
	添着活性炭	基本水質において除去性能が高く, イオン, コロイドを除去可能。 ただし, ホウ酸水水質で除去性能が大きく低下する。ケーキ化した際のろ過性が非常に良好。
	チタン酸	基本水質においてイオンの除去性能が低く, コロイド除去性能が高い。 ただし, ホウ酸水水質ではイオン除去性能が最も高く, コロイドもある程度除去可能。Srに対する除去性能も高い。 ケーキ化した際のろ過性が比較的低い。
	チタンケイ酸	基本水質においてイオンの除去性能が低く, コロイド除去性能は高い。 ただし, ホウ酸水水質ではイオン除去性能が高く, コロイドも除去可能。CsとSrに対する除去性能も高い。 ケーキ化した際のろ過性が比較的低い。
	Zr系吸着材	基本水質においてバッチ処理であれば, 除去性能が高く, イオン, コロイドを除去可能。 CsとSrに対する除去性能が低い。
システム	規模	液体処理システムの全体規模が適正であり, 増設建屋内に設置可能な規模であること, システムの運用が簡易であることなどが評価事項となる。ただし, いずれの吸着材でも, ほぼ同様のシステムに適用可能と想定。
	水質変動に対する冗長性	候補吸着材全てに共通して見られた性能として, ホウ酸水条件下では除去性能が低下することが明らかとなったため, ホウ酸水添加時の処理が課題である。 ホウ酸水添加時の処理手順としては, 下記の案が候補となる。 ①鉄系吸着材の添加量を増量し, 除去率を向上させる ②チタン酸やチタンケイ酸塩を添加する ③ホウ酸水添加時は液体処理システムでは処理せず, 回収後にバッチ処理する
	二次廃棄物	いずれの吸着材を使用した場合でも, スラッジ含水率は50~70vol%程度となると想定される。ろ過性の観点では, 添着活性炭が最もろ過性が高いため, スラッジ含水率が低くなる。 鉄系吸着材, チタン酸, チタンケイ酸を使用する場合, 廃棄物発生量は1日あたりユニット缶1本以下程度(カートリッジフィルタ方式の場合)。添着活性炭の場合は約5本/日。

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (41/51)

◆ α 核種除去システムの構成案（吸着槽方式）・・・ 評価観点からのケーススタディ

候補プロセス	評価観点					総合評価
	性能	規模	ロバスト	廃棄物※3	メンテナンス	
処理手順案1&2※1 	○ イオン＋コロイド除去可能	○ システム構成がシンプル	○ 水質に対するロバスト性が最も高い	△ ユニット缶1本/day	○ スラッジ廃棄物の線量が低い	○ 水質に対して最も冗長性が高い
処理手順案3 	○ イオン＋コロイド除去可能	△ 凝集沈殿処理は必須ではない	△ ホウ酸水添加時は処理困難	○ ユニット缶1本/3～4day	○ スラッジ廃棄物の線量が低い	○ 基本水質において最もスループットが大きい
処理手順案4 	○ イオン＋コロイド除去可能	○ システム構成がシンプル	△ ホウ酸水添加時は処理困難	△ ユニット缶5本/day	○ スラッジ廃棄物の線量が低い	△ 添着活性炭使用案として良好
処理手順案5 	基本水質条件：× ホウ酸水質条件：○	○ システム構成がシンプル	△ ホウ酸水添加時に最も除去性能が高い	○ ユニット缶1本/day	△ スラッジ廃棄物の線量が比較的高い	△ ホウ酸水添加時に処理可能

※1:処理手順案1;カートリッジフィルタを適用したシステム
処理手順案2:バグフィルタを適用したシステム

©Decom.Tech

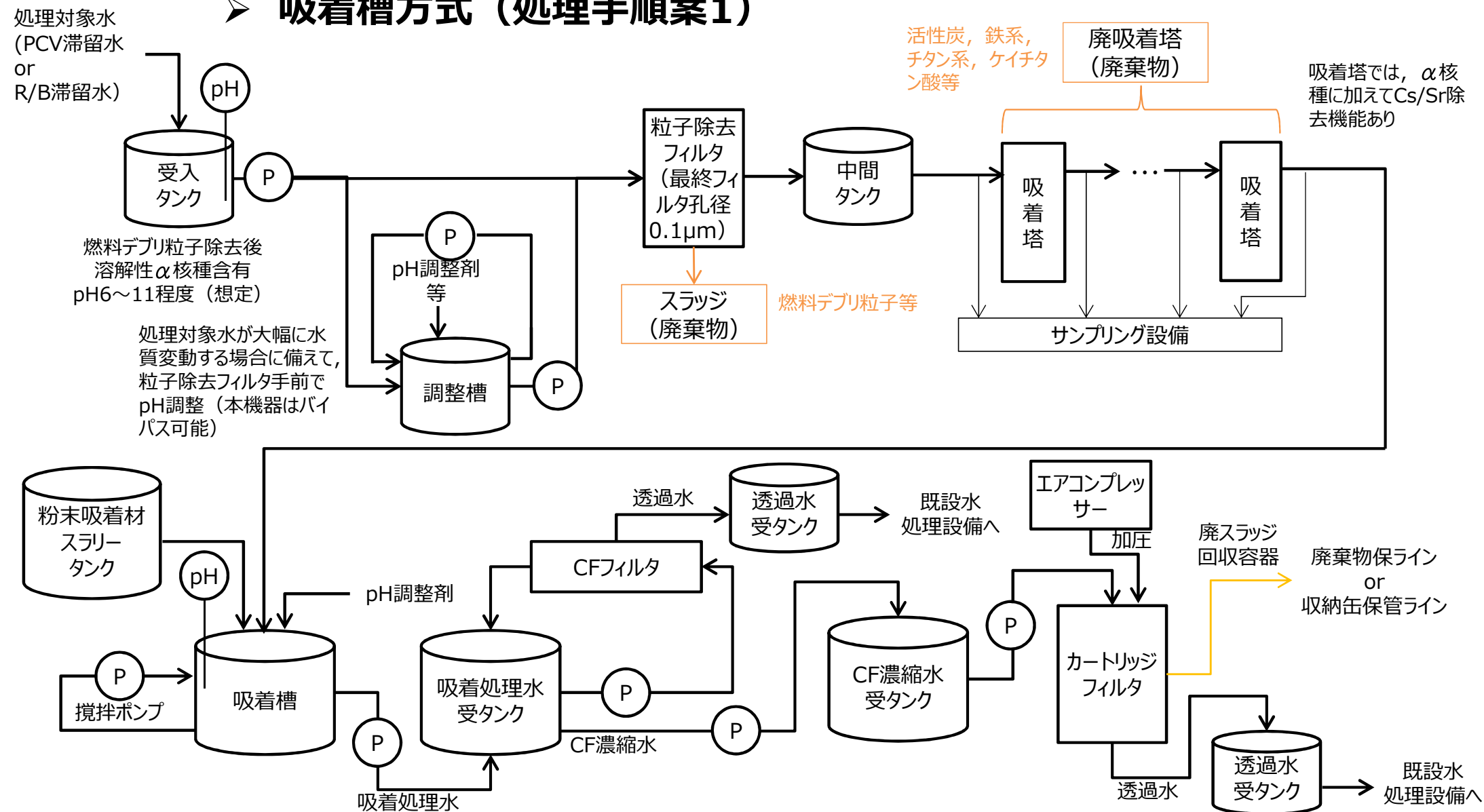
※2：バグフィルタでも代替可能
※3：吸着槽より発生するスラッジ系廃棄物(脱水処理後)

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (42/51)

Decom.Tech

◆ α 核種除去設備のシステム構成案

➤ 吸着槽方式 (処理手順案1)



8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (43/51)

Decom.Tech

◆ 8.4 現場への適用性の観点における分析 (共沈方式)

項目		検討内容
凝集剤	塩化第二鉄 (鉄共沈処理)	目標であるDF100は確保可能な見込みがあるため、最も適用見込みが高い凝集剤として選定。調整目標pHに関しては、8程度とすることで、安定した凝集が確認された。 α 核種については、コロイド化している成分でも、イオン化している成分でも除去性能が高く、水酸化鉄との親和性が高いことを確認した。
	炭酸ナトリウム (炭酸塩処理)	目標であるDF100を下回ったため、適用見込みは低いと判断。炭酸塩のゼータ電位等の観点から、今回想定したコロイド成分に対するDFは低くなった可能性あり。
	PAC	目標であるDF100を下回ったことに加えて、処理対象水の粒子濃度や塩化物イオン濃度に依存して、凝集が左右されるため、適用見込みは低いと判断。 ただし、二次廃棄物処理系など、処理対象水の粒子濃度および、塩化物イオン濃度が高い場合は一定の凝集作用が見込まれるため、適用できる可能性はあり。
	高塩基度PAC	PACと同様に、DFが低い点、粒子濃度や塩化物イオン濃度が低い場合、凝集はしなかったため、適用見込みは低いと判断。(さらに、PAC同様、処理対象水の粒子濃度および、塩化物イオン濃度が高い場合は一定の凝集作用が見込まれると想定)
システム	規模	液体処理システムの全体規模が適正であり、増設建屋内に設置可能な規模であること、システムの運用が簡易であることなどが評価事項となる。構成は反応槽と固形分離装置から構成され、いずれの凝集剤でも同様の構成となる。
	水質変動に対する冗長性	薬液を添加し、目標となるpHへ調整するため、水質変動しても適切なpHへ調整できれば、ロバスト性は確保可能である。 一方で、ホウ酸条件において凝集沈殿させるためには凝集剤の添加量を多くする必要がある(ホウ酸の緩衝作用により)、廃棄物等の観点から許容できるか評価していく必要がある。
	二次廃棄物	塩化第二鉄のスラッジ含水率は90vol%程度となるため、脱水を行い、減容して払い出す必要がある。二次廃棄物処理技術の開発にて、目標としている含水率60vol%程度まで低減できれば、廃棄物発生量は1日あたりユニット缶1本程度である。

8. α核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (44/51)

◆ α核種除去システムの構成案（共沈方式）・・・ 評価観点からのケーススタディ

候補プロセス	評価観点					総合評価
	性能	規模	ロバスト	廃棄物 (凝集沈殿処理)	メンテナンス	
パターンA 	○ イオン+コロイド除去可能	×～△ 凝集設備の遮蔽が最大	○ 最上流で水質調整可	△～○ ユニット缶1～2本/day	× 高線量の凝集スラリー発生	× 規模, メンテナンス面で×
・・・パターンA：前段設備の高線量化に伴う，設備メンテナンス性に課題あり						
パターンB 	○ イオン+コロイド除去	△～○ 凝集設備の遮蔽が小	△ 粒子除去+吸着塔で水質変動影響大	△～○ ユニット缶1～2本/day	○ 凝集スラリーの線量低減可能	○ 運用面, 性能面で適用見込み高い
パターンC 	○ イオン+コロイド除去可能	△ 凝集設備の遮蔽が大	△ 粒子除去にて水質変動影響が大	△～○ ユニット缶1～2本/day	×～△ 高線量の凝集スラリー発生	△ メンテナンス面に課題あり
パターンD 	×～△ 凝集処理だけでは不足	△ 凝集設備の遮蔽が大	△ 粒子除去にて水質変動影響が大	△ ユニット缶1本以上/day※2	×～△ 高線量の凝集スラリー発生	× 性能, メンテナンス面で×

※1：吸着塔前段にはロバスト性を確保するために水質調整設備を設置する場合もあり。

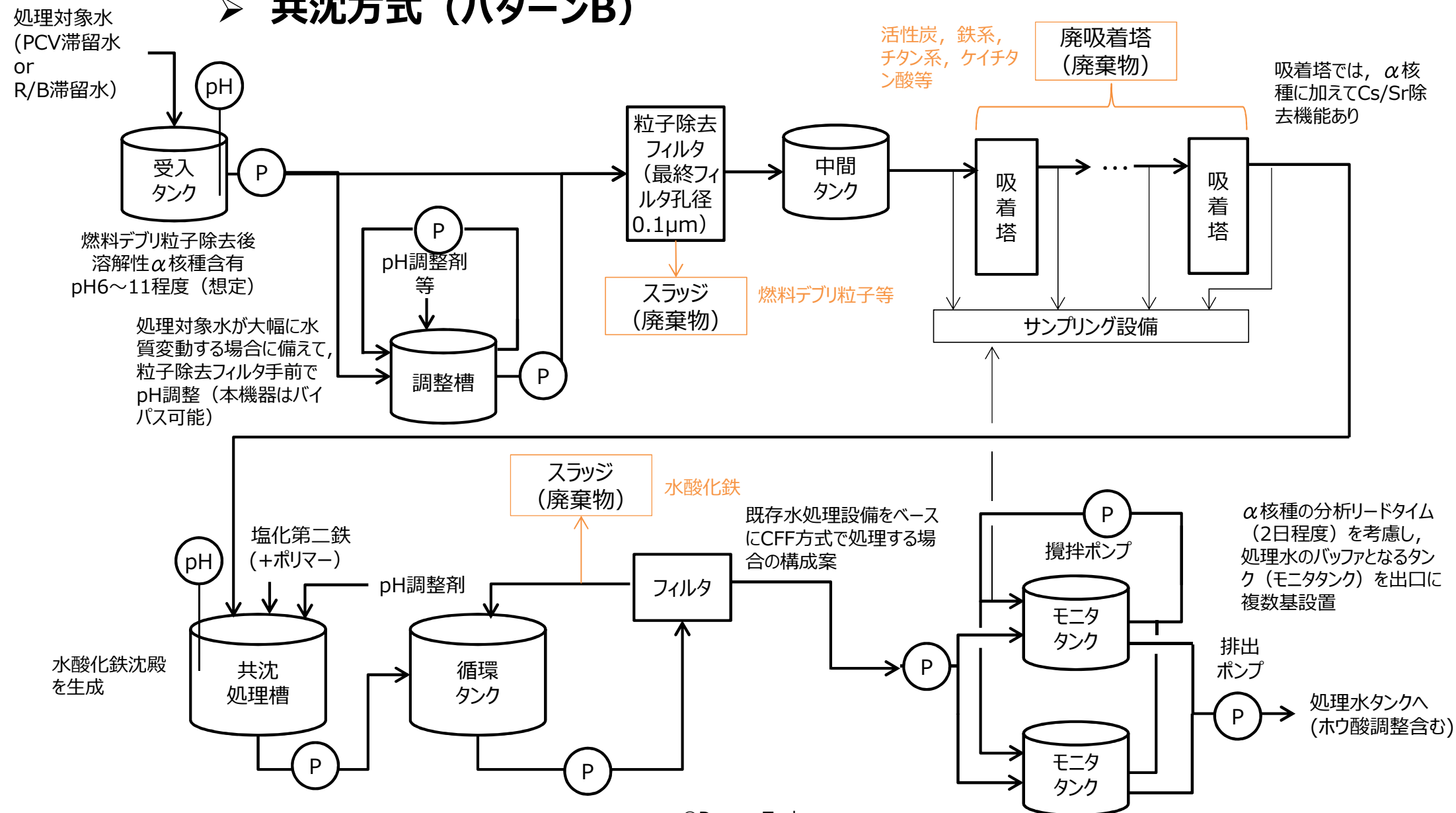
※2：コロイド成分+イオン成分を除去しきる場合，凝集沈殿量は増大する可能性あり。

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (45/51)

Decom.Tech

◆ α 核種除去設備のシステム構成案

➤ 共沈方式 (パターンB)



◆ 8.5 今後の課題整理とまとめ (成果)

- 燃料デブリ取り出し時滞留水の想定水質において, $0.1\mu\text{m}$ 未満のコロイド状 α 核種(擬似コロイド)が生成・存在する可能性があることを確認した
⇒ コロイド状 α 核種の除去技術の必要性を確認
- $0.1\mu\text{m}$ 未満のコロイド状 α 核種の生成・存在は, 想定水質パラメータのうち, pHに大きく依存することを確認した
⇒ 現在の滞留水の標準的水質 (pH) と, コロイド状 α 核種が生成・存在する想定水質 (pH) は大きく異なることから, 現在の滞留水を用いた実液試験は有効な手法ではない
- 3つのコロイド除去方式 (吸着槽方式, 共沈方式, 水質調整方式) に対して, 擬似コロイド液を用いた除去要素試験を行い, コロイド状 α 核種の除去性能を検証した
⇒ 吸着槽方式と共沈方式の2つの除去方式において, 有効性を確認した
- 現場への適用性の観点における分析を「5つの項目」より実施し, 吸着槽方式と共沈方式の2つの除去方式に関する系統構成案を整理した
⇒ これらの課題を抽出しまとめた
(コロイド除去技術の開発に係る課題はp.67～p.69参照)

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (47/51)

Decom.Tech

◆ 8.5 今後の課題整理とまとめ (コロイド除去技術の開発方針について)

コロイド状 α 核種の除去試験結果

- 滞留水pH（酸性, アルカリ性付近）では, 0.1 μ m未満のコロイド状 α 核種が存在する可能性あり（中性領域では凝集されて粒径が大きくなりやすい傾向を確認, 2つの領域で存在を確認）
- 0.1 μ m未満のコロイド状 α 核種は, 吸着槽方式及び共沈方式で除去可能な見通し

コロイド状 α 核種に係る懸案事項

- 燃料デブリ加工方法やPCV内の構造物, 充填材等からの溶出影響を踏まえて, 燃料デブリ取り出し時の滞留水中のコロイド成分やpH等の水質を適切に推定する必要がある（試験データの補足）
- 燃料デブリ取り出し時の滞留水に含まれるコロイド状 α 核種濃度は, 現状データがなく設定する必要がある
- 燃料デブリ取り出し時の滞留水中に含まれる物質や複数のコロイド状 α 核種を, 模擬試験液で再現することは困難であり, 実液による通水試験が必要になる（イオン状 α 核種と同じ懸案）

★HP-1 α 核種濃度他に関する精度の向上（燃料デブリ採取後）

- 燃料デブリ取り出し時の水質の特定または信頼性の高い想定を行う
- CSH・粘土系等のコロイド成分の追加検討の要否判断を行う
- 燃料デブリ取り出し時の滞留水に含まれる α 核種濃度の特定または信頼性の高い想定を行う

★HP-2 α 核種除去の技術開発必要性判断（段階的な燃料デブリ取り出し規模の拡大に伴い実施）

- 既設水処理除去性能と燃料デブリ取り出し滞留水に含まれる α 核種濃度を比較し, 必要性を判断
- 燃料デブリ取り出し時の滞留水に相当する模擬水による通水試験（性能確認バッチ試験）

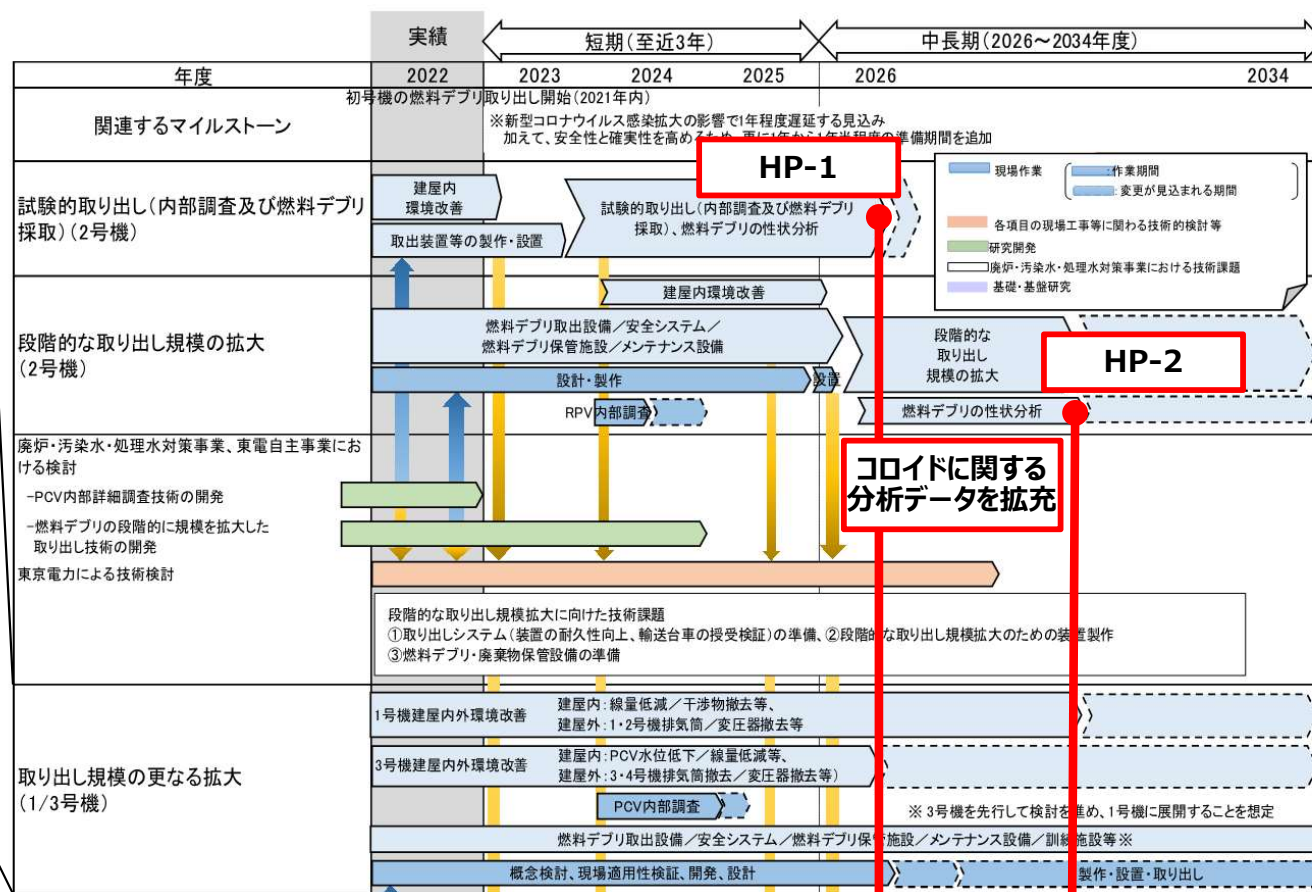
8. α核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (48/51)

Decom.Tech

◆ 8.5 今後の課題整理とまとめ

技術開発内容とホールドポイント

取り出し規模の更なる拡大 1/3号機	想定 取り出し 量 (kg)	α核種 除去	追加での α核種 除去要否
現時点 (取り出した燃料デブリによる影響がない状態)	—	既設水処理設備	不要
試験的取り出し	3kg ～30kg	既設水処理設備で 対応可能 見込	不要と 推定
連続取り出し	30kg ～300kg	既設水処理設備 + 専用設備	専用設備 による α核種 除去が必要と推定
本格取り出し	～300kg		



α核種除去技術の開発									
粒子状	粒径 0.1μm以上					※3	※1		
コロイド状	(粒径相当 0.1μm未満)							※2	
イオン状									
※2	二次廃棄物処理技術 (非溶解性/α核種除去廃棄物)								

年表出典：東京電力HD福島第一原子力発電所の 廃炉のための技術戦略プラン2024
P.73 (図20) 燃料デブリ取り出しに係る主な技術課題と今後の計画 (工程表) より

※1 S3は, P15/16のSTEP 3を示す (S4～S6も同じ)

※2 吸着槽方式の場合の事例, それ以外ではS2の実施が必要

※3 連続回収を想定

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (49/51)

Decom.Tech

◆ 8.5 今後の課題整理とまとめ (コロイド除去技術の開発に係る課題 1/3)

No.	分類	実機適用に向けて残された課題	課題解決の方案と想定される実施時期 (Step※)	
1	コロイド 模擬性	Cm等, 本事業でにて評価対象外としたコロイド成分の除去評価	- トレーサ添加模擬液を用いたコロイド除去評価 - 現状の滞留水を用いた複数のα核種が混合した系での評価	Step 2
2		Uコロイドの除去必要性の評価 (U真正コロイドやUを無機コロイドとした擬似コロイドの除去必要性) 【有識者会議指摘事項】	- Uコロイド調製方法の検討 (本事業で実施した文献調査では, 実機想定環境下でのUコロイド調製実績はなし) - Uコロイド調製可否の評価/Uコロイド除去評価 - 実機環境で生成すると考えられる, Uコロイド存在割合の評価	Step 2 Step 3
3	処理対象コロイド性状	実機で存在するコロイド性状の把握	- 燃料デブリ取り出し時の滞留水中に含まれるαコロイドの特定(構成元素組成, α濃度, 粒径等のデータ拡充, CSHコロイド, 粘土コロイドの有無など) - 模擬デブリを用いた液相への微粉成分の移行評価, 微粉成分の性状評価	Step 2 適用性判断
4	処理対象水の水質	これまで検討対象とされていない水質条件(非溶解性臨界防止剤を適用した場合, 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	- 燃料デブリ取り出し時の回収臨界管理方針の整理 - 二次廃棄物処理設備からの返送水質条件の設定 - ジオポリマー等の充填材影響による水質影響整理 - 水質条件をパラメータとした評価	Step 2 適用性判断
5	コロイド除去方法	コロイド除去方法(薬液種類や添加量等)の最適化	- 本事業で絞り込んだコロイド除去方式の具体化検討 - 廃棄物発生量および除去性能を考慮した凝集剤添加量の評価 - 凝集剤助剤等の添加必要性の評価	Step 3

※ Stepはp.15/16に示した検討から実機適用までの各段階を表す

青字：本事業にて新たに抽出した内容

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (50/51)

Decom.Tech

◆ 8.5 今後の課題整理とまとめ (コロイド除去技術の開発に係る課題 2/3)

No.	分類	実機適用に向けて残された課題	課題解決の方案と想定される実施時期 (Step※)
6	実機性能	実機環境での安定した処理性能評価	- 試験装置の詳細検討, 製作 - 現在の1F滞留水を用いた性能評価 (複数のα核種が混合した系での除去性能評価) - ラボスケールより実機スケールに近づけた場合の性能評価 - 候補システム構成案での性能評価
7		実機処理性能の設定 (除去DFの設定)	- 既存設備 (SARRY, SARRY後段フィルタ設備等) でのコロイド除去能力を評価 - 処理対象水質 (含有放射能等) の見直し, 核種ごとの除去要求の設定
8	処理流量	核種除去効率を考慮した処理流量の設定 (現状は2~10m ³ /hの範囲を処理流量範囲として仮設定)	- 液相系システムの水バランスを考慮した処理流量の見直し - 絞り込んだコロイド除去方式を模擬し, 反応時間をパラメータとした試験評価
9	システム構成	既存設備を活用したシステム構成案の検討 (液相系システム合理化検討)	- 既存設備でのイオン, コロイド除去能力を評価 - 液相系システムの更新
10	モニタリング	後段へ想定を超える α 粒子の流出を防ぐための, モニタリング方法や再度処理システムの構築	αの分析リードタイム (約2日程度) を考慮したシステム構成の検討 - 分析体制の確立
11	廃棄物発生量	二次廃棄物発生量の評価	- 模擬液を用いた試験評価 (スケールアップ) - 現在の1F滞留水を用いた試験評価

青字 : 本事業にて新たに抽出した内容

※ Stepはp.15/16に示した検討から実機適用までの各段階を表す

8. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果 (51/51)

Decom.Tech

◆ 8.5 今後の課題整理とまとめ (コロイド除去技術の開発に係る課題 3/3)

No.	分類	実機適用に向けて残された課題	課題解決の方案と想定される実施時期 (Step※)	
12	廃物物処理	共沈方式による発生廃棄物 (スラリー) の安定化処理	- 放射能インベントリ評価 (α 廃棄物となる) - ALPS系スラリー処理システムとの差異確認, システム検討	Step 4
13	廃棄物処分	廃棄物処分を考慮したコロイド除去方法の設定	- 廃棄物処分時の要求事項の整理 (他PJでの最新の検討実績の調査) - 廃棄物処分実績の調査	Step 4
14	設備規模	想定設置スペースへの配置可能性の評価	- 設置候補場所, スペースの設定 - 機器配置検討, 配置可能性の評価	Step 5
15	メンテナンス性	被ばく影響を低減したメンテナンス方法の設定 (スラッジには高濃度の $\alpha/\beta/\gamma$ 核種が含有)	- 遠隔メンテナンス技術の検討 (成立見込みのある技術絞り込み, 開発) - バウンダリを維持したメンテナンス方針の検討 - メンテナンス性を考慮した機器の検討 (メンテナンス頻度が低い, メンテナンスしやすい機器の検討)	Step 3

青字 : 本事業にて新たに抽出した内容

※ Stepはp.15/16に示した検討から実機適用までの各段階を表す

9. α 核種除去技術の開発，実液試験準備に伴う要素試験結果（目次）

本章ではイオン状 α 核種除去のための吸着塔開発に必要な，2022年度の浸漬試験に続く次段階の試験計画策定に係る実施項目を以下の構成にて示す。

- 9章における試験対象範囲
- 9章 実液試験準備に伴う要素試験計画 検討フローと期待される成果
- 本検討の背景，これまで（2022年補助事業）の成果
- 9.1 バッチ試験結果を用いた解析評価
- 9.2 通水初期の吸着挙動確認
- 9.3.1 実液サンプル※中のスラッジの酸溶解・中和処理・調整等
- 9.3.2 スラッジからの α 核種溶出評価試験
- 9.3.3 低 α 濃度溶液を使用した浸漬試験
- 9.4.1 実液を用いた次段階の試験計画の策定
- 9.4.2 現場への適用性の観点における分析
- 9.4.3 今後の課題整理とまとめ

※ 「実液」の語句の使い分けについて；

- ・「実液試験」：将来 1 F構内で実施を計画している吸着塔方式のための通水試験
- ・「実液サンプル」：2024年度に 1 Fで採取し，本事業の9.3章で用いたもの。

9. α 核種除去技術の開発, 実液試験準備に伴う要素試験結果 (1/30)

Decom.Tech

◆ 9章における試験対象範囲

本事業で想定する全体フロー
(過去のフロー図より, 説明用として作成
システム構成は11.4の成果を参照のこと)

9章にて説明 実液試験準備のため, 要素試験を行う

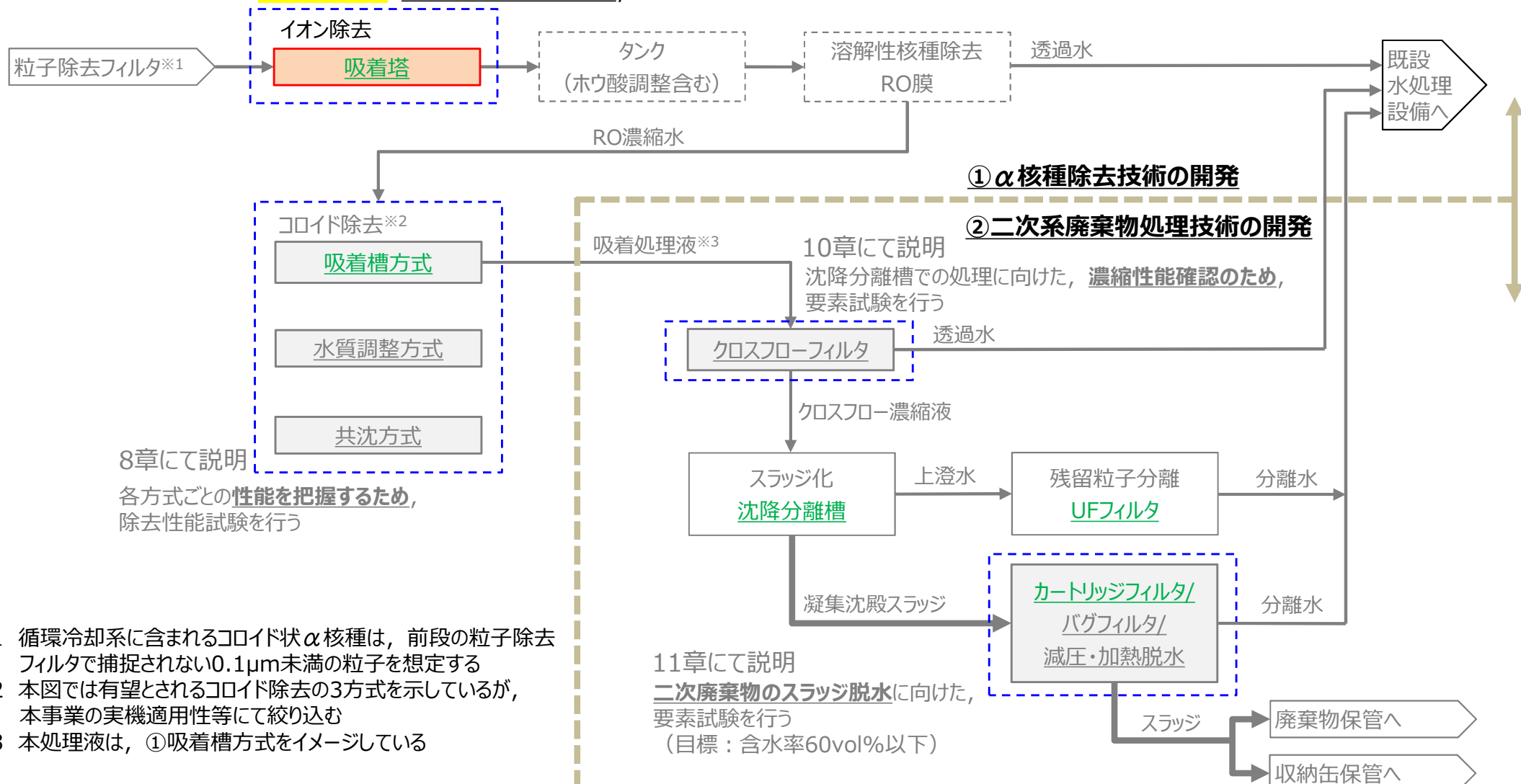


図 燃料デブリ取り出し時の液体処理システム

緑書き: 2022年度補助事業までに開発実績のある設備
青点線: 2023-2024年度補助事業における開発対象設備

- ※1 循環冷却系に含まれるコロイド状 α 核種は, 前段の粒子除去フィルタで捕捉されない $0.1\mu\text{m}$ 未満の粒子を想定する
 ※2 本図では有望とされるコロイド除去の3方式を示しているが, 本事業の実機適用性等にて絞り込む
 ※3 本処理液は, ①吸着槽方式をイメージしている

9. α 核種除去技術の開発，実液試験準備に伴う要素試験結果（2/30）

Decom.Tech

◆ 9章 実液試験準備に伴う要素試験計画 検討フローと期待される成果

- 本章では，溶解性 α 核種の吸着材の通水試験に用いる実液（試験液）の量・濃度の確保について成立性等に懸念があるため，以下の検討・試験を行い，次段階の実液試験計画に反映していく。
- 各実施事項で得られる結果・成果（下図の青字）を検討フローに示す。得られた結果は，下図で関連する項目へのインプット，ないし9.4項の次段階の実液を用いた試験計画案の策定，現場への適用性の観点における分析に使用する。

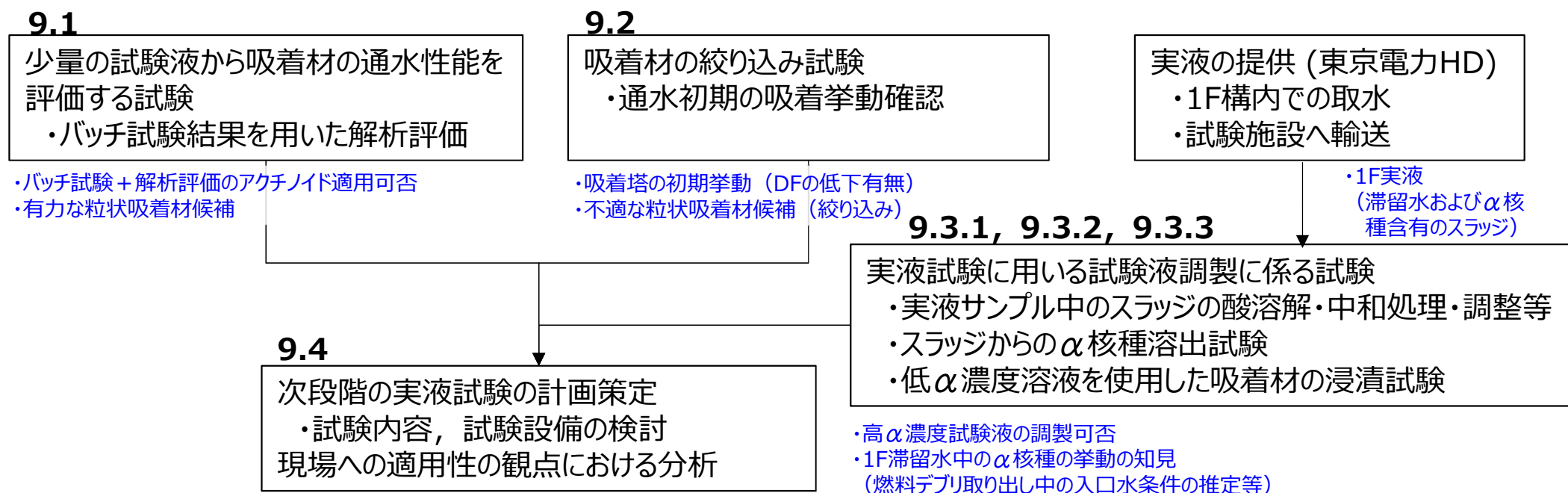


図 実液試験準備に伴う要素試験計画検討の流れ

9. α 核種除去技術の開発，実液試験準備に伴う要素試験結果（3/30）

◆ 本検討の背景，これまで（2022年補助事業）の成果

- 2022年度までの補助事業の成果として溶解性 α 核種（本事業ではコロイドと区別のためイオン状 α 核種と呼称）除去の要素試験をラボスケールの浸漬（バッチ）試験を行い，候補吸着材を選定。イオン状 α 核種を除去対象として，吸着塔方式が検討されている。
- また，吸着塔の寿命データ等を取るための通水試験が必要であり，吸着塔方式を用いた溶解性 α 核種除去を実機適用まで進めるために必要な，通水試験のステップを導出した（下図）。2022年度実施した浸漬試験の次段階として，下図青矢印にて示す，通水試験（ミニカラム）の試験が必要。

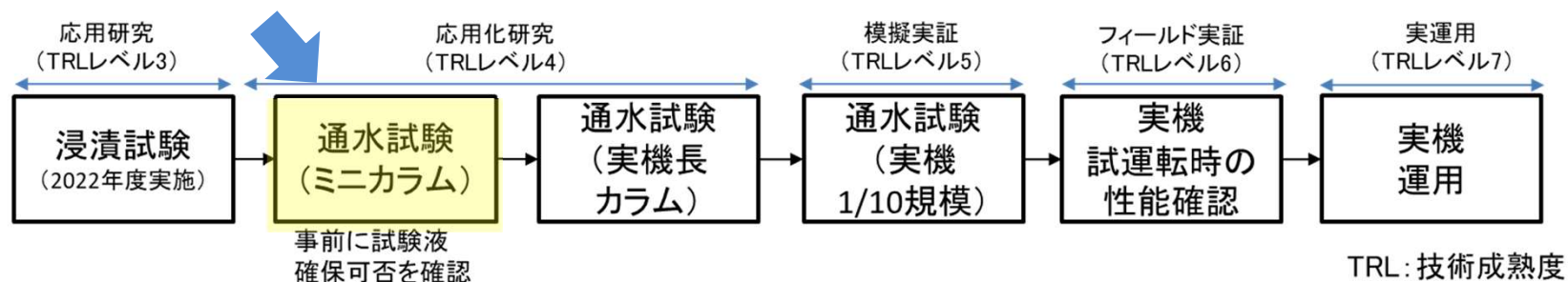


図 溶解性 α 核種除去設備の実機運用までの通水試験ステップ 実施フロー（吸着塔方式）

- 通水試験では多量の試験液が必要であるが，取り扱い可能な α 核種量の制限の観点でラボでは α 核種を扱う通水試験は実施困難であるため，1Fサイトで実液試験を行うことを想定。

➡ 本事業では，今後の1Fサイトにおける実液試験※の計画案を具体化（9章）。

※ 上図の実施フローにて示す通水試験（ミニカラム）あるいは少量の試験液で可能な代替試験の開発

9. α 核種除去技術の開発, 実液試験準備に伴う要素試験結果 (4/30)

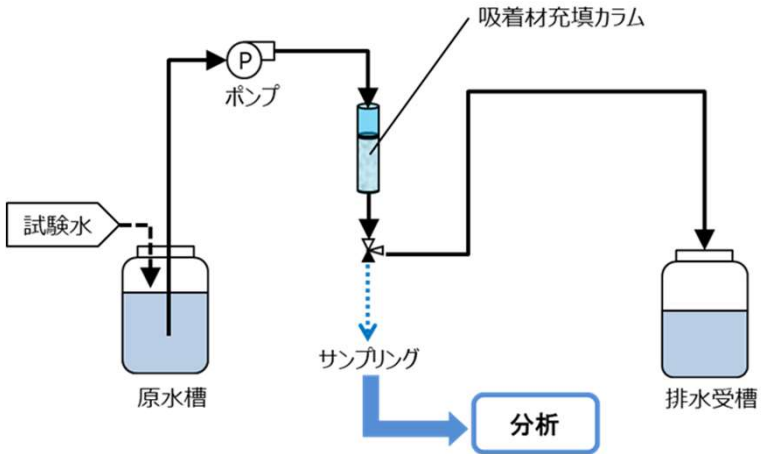
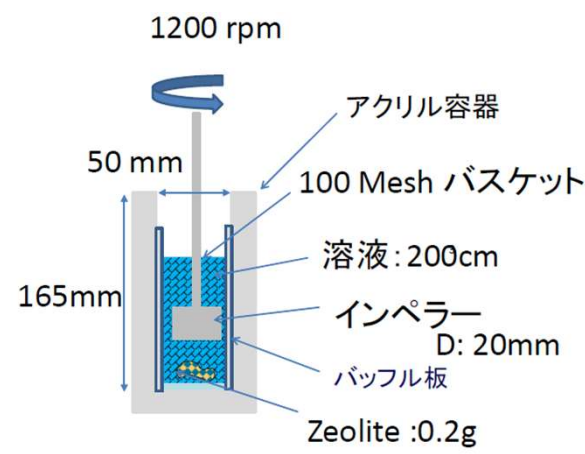
Decom.Tech

◆ 9.1 バッチ試験結果を用いた解析評価

➤ 試験目的 吸着塔通水時の性能（寿命評価）を推定するための代替方法

- ✓ 吸着塔の性能評価を行うためには一般的に通水試験（カラム試験）を行い除去率および寿命データを取得するが、カラム容量の数千～数万倍（カラム容量が数mLであっても、数十L程度）の液量を通水する必要があるため、ラボでは実施困難。また、現地で実施する場合、試験液を大量に確保することは、被ばくりスクが大きいと考える。
- ✓ 従って、少量の実液を使用して吸着材の寿命データを推定する方法を、本事業にて適用することを検討した。
- ✓ 本手法が適用可能な場合は、バッチ試験（HOT）の実施データと電中研の解析手法を組合せ、実液試験の一部を代替する。使用する試験液が少量であるバッチ試験のみで、吸着塔通水時の除去率と吸着材寿命が評価可能となる。

表 吸着塔の寿命評価試験の比較

	一般的な試験	バッチ試験結果を用いた解析評価
試験 イメージ	連続通水試験 	バッチ試験 × 解析 
必要液量	数千～数万mL程度/1ケース	数十～数百mL程度/1ケース

9. α 核種除去技術の開発，実液試験準備に伴う要素試験結果（5/30）

◆ 9.1 バッチ試験結果を用いた解析評価

➤ 解析による吸着塔通水時の性能評価

- ✓ 本手法はSARRY（セシウム除去装置）の性能評価を目的として適用された技術で，バッチ式の吸着速度試験で得られた吸着速度に関わる係数を使用し，解析評価により吸着塔通水時の性能を評価する手法。（適用例核種：Cs, Sr）
- ✓ 以下の表にバッチ試験結果を用いた解析評価の流れを示す。平衡吸着試験，吸着速度試験等を実施し，吸着速度に関わるデータを取得する。そのデータを活用した解析評価を行うことにより，吸着塔通水時の核種除去性能を評価することが可能であると考え評価を実施した。さらにカラム試験を行い，解析の補正を行った。
- ✓ ただし，本技術は α 核種（アクチノイド）でもSARRY同様の解析評価が可能であるかは先行例がないため，まずはアクチノイドの代替トレーサであるEu（COLDトレーサ）を使用して， α 核種への適用性を評価した。※
- ✓ 下表のNo.1～5を実施した結果，バッチ試験と解析評価にて吸着塔通水時の核種除去性能評価は可能であり，候補吸着材について実機を想定した吸着塔運用のシミュレーションに活用した。

表 バッチ試験結果を用いた解析評価の流れ

No.	試験	試験内容/目的
1	吸着材物性評価	各試験に供する吸着材について，物性データを測定により取得。
2	平衡吸着試験	浸漬式の吸着試験を実施。 試験結果より吸着等温図を取得し，分配係数を評価する。
3	吸着速度試験	攪拌式の吸着試験（←バッチ式の試験）を実施。 解析評価に必要である吸着速度に関わる係数を取得する。
4	解析評価	上記No.1～3までの取得データをインプット条件として，吸着塔通水時の解析評価を行う。
5	カラム試験	カラム通水試験を実施。取得したデータと解析評価結果（上記No.4）とを比較し補正係数を取得，解析評価による通水時の吸着性能評価の適用可否を検討する。

※ Euによる適用性見通しが得られた後，Amトレーサによるバッチ試験も実施した。

9. α核種除去技術の開発，実液試験準備に伴う要素試験結果（6/30）

◆ 9.1 バッチ試験結果を用いた解析評価

➤ 試験に供する吸着材と試験ケース

- ✓ 各試験には2022年度の補助事業で選定した下表に示す6つの吸着材を使用。
- ✓ 試験水質は「純水」，「1000倍希釈海水」，「200倍希釈海水」，「ホウ酸水」の条件とする。
- ✓ ただし，カラム試験についてはPCV内滞留水相当の海水濃度である「1000倍希釈海水」の条件で実施。

表1 供試吸着材一覧

No.	吸着材	備考
A1	ケイチタン酸1	いずれも吸着塔充填可能な吸着材として，顆粒タイプを選定。
A2	ケイチタン酸2	
A3	添着活性炭	
A4	チタン系吸着材	
A5	鉄系吸着材	
A6	ケイチタン酸3 ※	

※ 2023年度の試験結果を踏まえて，新たにA6吸着材を追加
pH変動が大きいA1に代わり試験を実施

表2 試験ケース

No.	吸着材	試験水質	平衡吸着試験	吸着速度試験	カラム試験
1	A1: ケイチタン酸1	S1: 純水 pH5~9	○	—	—
2	A2: ケイチタン酸2		○	○	—
3	A3: 添着活性炭		○	○	—
4	A4: チタン系吸着材		○	○	—
5	A5: 鉄系吸着材		○	○	—
6	A6: ケイチタン酸3		○	○	—
7	A1: ケイチタン酸1	S2: 200倍希釈海水 Cl <100ppm pH5~9	○	—	—
8	A2: ケイチタン酸2		○	○	—
9	A3: 添着活性炭		○	○	—
10	A4: チタン系吸着材		○	○	—
11	A5: 鉄系吸着材		○	○	—
12	A6: ケイチタン酸3		○	○	—
13	A1: ケイチタン酸1	S3: 1000倍希釈海水 Cl <20ppm (基本水質条件) pH5~9	○	—	—
14	A2: ケイチタン酸2		○	○	○
15	A3: 添着活性炭		○	○	○
16	A4: チタン系吸着材		○	○	○
17	A5: 鉄系吸着材		○	○	○
18	A6: ケイチタン酸3		○	○	○
19	A1: ケイチタン酸1	S4: ホウ酸水 7000ppm as B pH5~9	—	—	—
20	A2: ケイチタン酸2		○	○	—
21	A3: 添着活性炭		○	○	—
22	A4: チタン系吸着材		○	○	—
23	A5: 鉄系吸着材		○	○	—
24	A6: ケイチタン酸3		○	○	—

9. α 核種除去技術の開発，実液試験準備に伴う要素試験結果（7/30）

◆ 9.1 バッチ試験結果を用いた解析評価

➤ 吸着材物性評価

- ✓ 各試験に供する吸着材について，物性データを測定により取得（表2）。
- ✓ 測定した粉末密度と見かけの密度から粒子空隙率を得た。粒子空隙率と粒子径は解析条件のパラメータとして使用する。

表1 吸着材物性データ 測定項目

No.	測定項目	備考
1	粉末密度	測定法は図を参照
2	見かけの密度	閉気泡を含む密度 測定法は図を参照
3	かさ密度	カラム充填時の密度
4	粒径分布	—

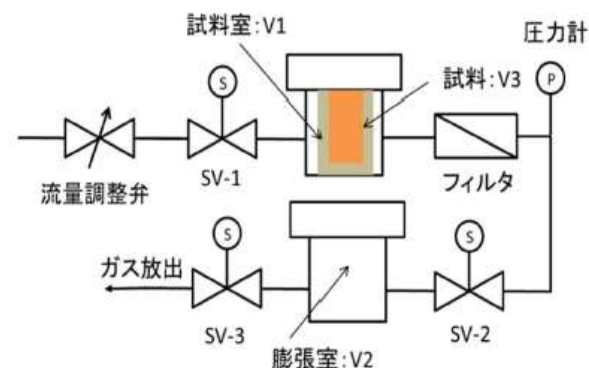


図 気体置換法による密度測定

表2 吸着材物性データ 測定結果

吸着材	粉末密度 : ρ_A $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	見かけの密度 : ρ_P $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	粒子空隙率 : ε_P ($=1 - \rho_A / \rho_P$)	粒子径 (ピーク位置) μm
A1	1.79	1.81	0.015	710~1000
A2	1.48	1.60	0.079	250~500
A3	0.82	0.91	0.100	500~710
A4	1.07	1.28	0.170	250~500
A5	1.51	1.62	0.072	250~500
A6	2.742	2.744	0.001	250~500

9. α 核種除去技術の開発, 実液試験準備に伴う要素試験結果 (8/30)

Decom.Tech

◆ 9.1 バッチ試験結果を用いた解析評価

➤ 平衡吸着試験

- ✓ 浸漬式の吸着試験を実施し, 平衡吸着率のデータを取得。
- ✓ 解析評価により, 吸着等温線から分配係数を評価。

➤ 平衡吸着試験 試験結果

- ✓ 各吸着材のEu吸着性能データを取得した。
- ✓ 平衡吸着試験結果より, 吸着等温線および分配係数を評価した結果を下記に示す(図2~4)。今後の解析評価に資するデータを得た。
- ✓ 一部の吸着材(A2, A6)ではV/mが低い条件では析出が生じたため, V/mを20000まで上げて試験を実施した。
- ✓ 実機の想定濃度 $8.8 \times 10^{-14} \text{ mol/L}$ における分配係数は, $A2 \approx A4 \approx A6 \gg A3 \approx A5$ と評価された。

表 平衡吸着試験のパラメータ設定

No.	パラメータ	設定
1	トレーサ濃度	0.5~2000 ppm
2	液量	200~1000 cm ³
3	液固比	1000~20000
4	浸漬時間	160時間以上
5	振とう方法	回転式120rpm

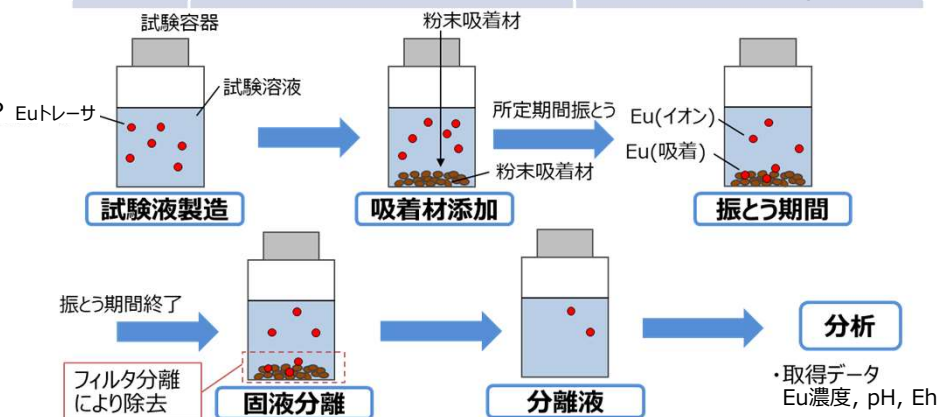


図1 平衡吸着試験の試験概要

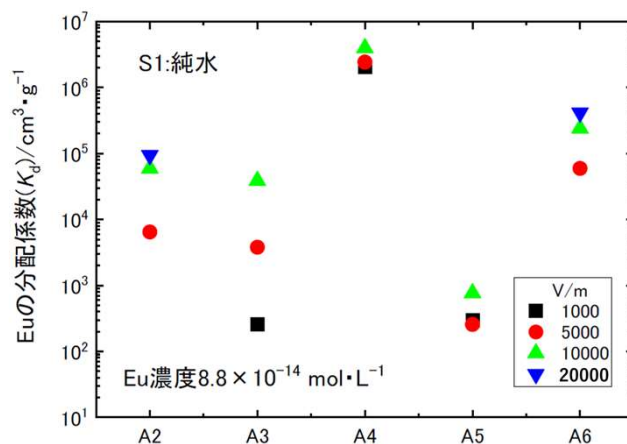


図2 分配係数評価結果 (純水)

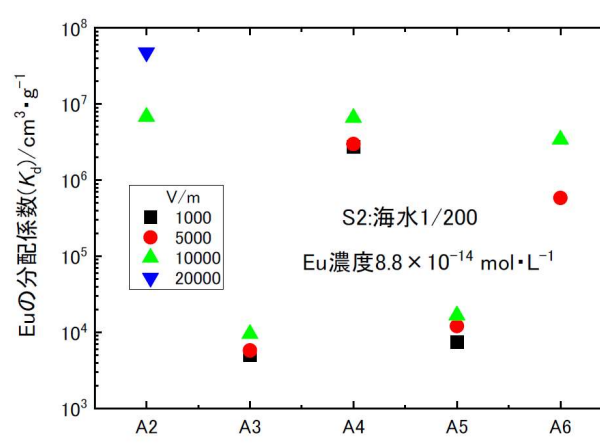


図3 分配係数評価結果 (200倍希釈海水)

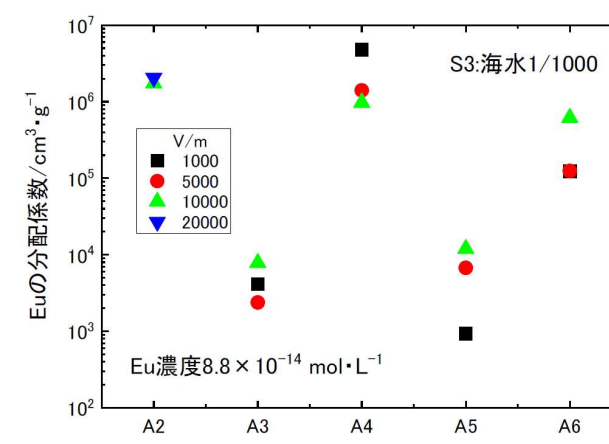


図4 分配係数評価結果 (1000倍希釈海水)

9. α 核種除去技術の開発, 実液試験準備に伴う要素試験結果 (9/30)

Decom.Tech

◆ 9.1 バッチ試験結果を用いた解析評価

➤ 吸着速度試験

攪拌式の吸着試験を実施し, 解析評価に必要な吸着速度データを取得する。
吸着速度試験の概要を下記に示す。

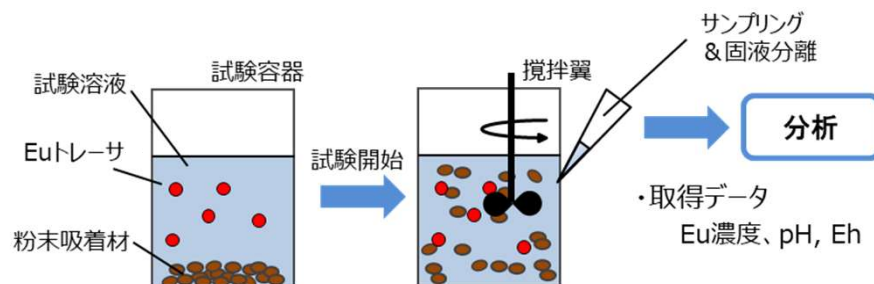


図1 吸着速度試験の試験概要

表 吸着速度試験のパラメータ設定

パラメータ	設定
トレーサ濃度 (Eu)	平衡試験より決定
液量	200~1000cm ³
液固比	1000~20000
浸漬時間	160時間以上
攪拌方法	インペラー 800~1400rpm



図2 吸着速度試験装置
(電中研保有試験装置)

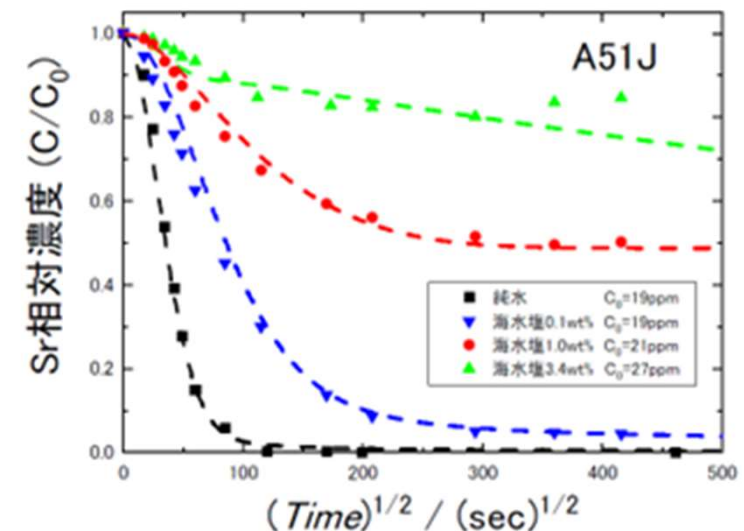


図3 吸着速度試験結果の例※

※ 電中研にて実施したSr吸着性能を評価した試験結果を一例として掲載

- ✓ 上記体系のバッチ試験により, 浸漬時間と吸着率の関係を評価する。特に試験開始直後のサンプリングは高頻度で実施し, 吸着現象立ち上がり時のデータを評価する。
- ✓ 取得した浸漬時間-吸着率の関係より, 吸着速度に関わる係数を取得する。そして, 吸着塔通水時のモデルを対象とした解析評価を実施し, 吸着塔通水時の性能を評価する。

9. α核種除去技術の開発，実液試験準備に伴う要素試験結果（10/30）

◆ 9.1 バッチ試験結果を用いた解析評価

➤ 解析評価

- ✓ 吸着塔通水時の破過曲線をシミュレーション解析で算出するためには，3つの吸着に関する係数を算出する必要があり，係数の算出の為に 吸着材の物性評価※¹，平衡吸着試験，吸着速度試験，補正のためEu（COLDトレーサ）のカラム試験を行う。
 - 境膜物質移動係数（ k_f ）：吸着材表面の境膜内をイオンが移動する速度を示す。
 - 全吸着容量に対する即時吸着容量の割合（ η ）：イオンが電気二重層（EDL）に保持される割合を示す。
 - 粒子内拡散係数（ D_p ）：吸着材の細孔内をイオンが拡散する速度を示す。
- ✓ 上記の係数を当てはめた解析モデルの連立微分方程式を解くことにより破過曲線を得る。
- ✓ 得られた破過曲線から，破過帯長さ（≒交換寿命）などを評価できる。

カラム内（バルク）のイオン濃度 C_b の物質収支

$$\frac{\partial C_b}{\partial t} = \underbrace{D_b \frac{\partial^2 C_b}{\partial x^2}}_{\text{拡散項}} - \underbrace{u \frac{\partial C_b}{\partial x}}_{\text{移流項}} - \frac{3k_f(1-\varepsilon_b)}{R\varepsilon_b} (C_b - C_{ex}) \quad ※2$$

電気二重層（EDL）領域の溶液中イオン濃度 C_{ex} の物質収支※³

$$\frac{\partial C_{ex}}{\partial t} = -\frac{(1-\varepsilon_p)}{\varepsilon_p} \rho \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{1}{\eta R \varepsilon_p} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{3k_f}{\eta} (C_b - C_{ex}) \right) + \frac{1}{\eta R \varepsilon_p} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{3D_p}{\eta} \frac{\partial C_p}{\partial r} \right) \Big|_{r=R}$$

細孔内の溶液中イオン濃度 C_p の物質収支※³

$$\frac{\partial C_p}{\partial t} = -\frac{(1-\varepsilon_p)}{\varepsilon_p} \rho \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon_p(1-\eta)} D_p \left(\frac{\partial^2 C_p}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C_p}{\partial r} \right)$$

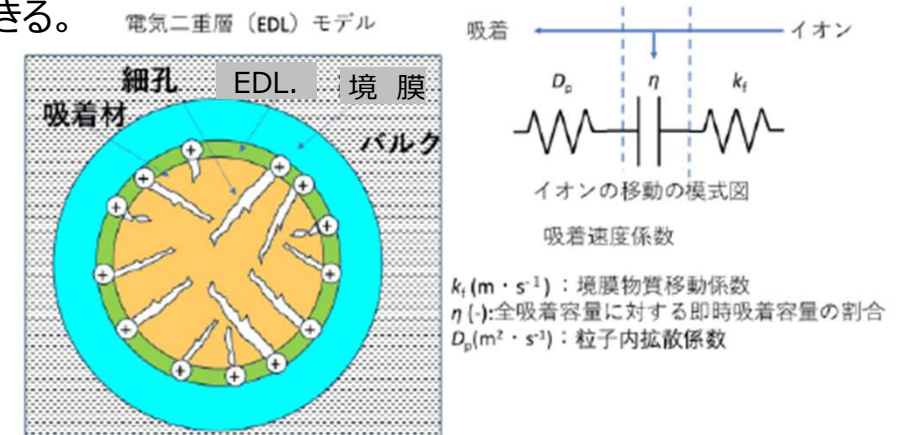


図 吸着塔通水時の吸着モデル概要

- ※¹ 吸着材の物性評価から， ε （各領域の空隙率）， R （粒子径）， ρ （吸着材の密度）等を測定する。
- ※² バッチ試験（吸着速度試験）では，試験装置の溶液回転によって拡散抵抗を落とすことにより，拡散項と移流項を無視することができる。
- ※³ 固相のイオン吸着濃度 q との関係式

9. α 核種除去技術の開発，実液試験準備に伴う要素試験結果（11/30）

Decom.Tech

◆ 9.1 バッチ試験結果を用いた解析評価

➤ 解析評価結果

- ✓ Euを使用した吸着材物性評価結果，平衡吸着試験および吸着速度試験の結果を使用して，解析評価を実施。解析評価式を使用して吸着速度試験結果のフィッティングを実施し，係数比較法で各係数を評価。
- ✓ 解析結果の妥当性確認のため，電中研試験設備で実施した結果および，委託先各社の試験設備にて実施した結果（ローラー振とう，縦型振とう）の両者を用いて解析を実施。各係数は概ね同じオーダーと評価されたため，**解析結果の妥当性は確認された**と判断。
- ✓ カラム試験結果と解析結果の比較も実施し，妥当性を確認。
- ✓ Amを使用した吸着速度試験を委託先各社の試験設備にて実施。（Amについても同様に解析評価を実施）

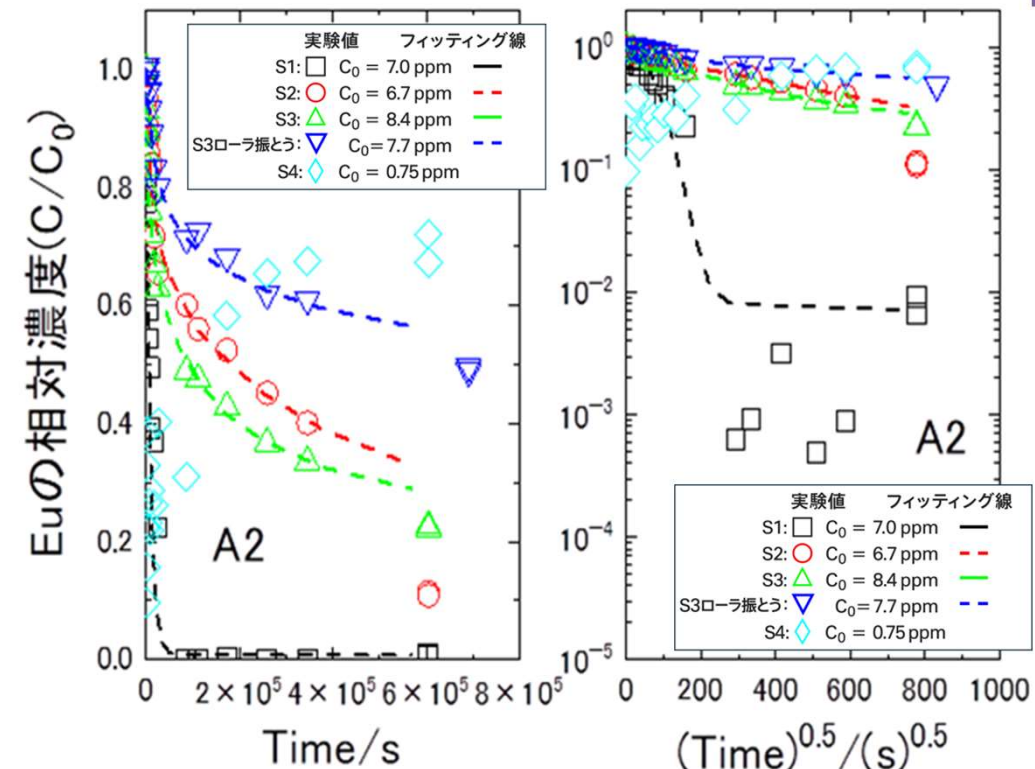


図 吸着速度試験データを用いたフィッティング結果
(A2:ケイチタン酸2)

表 解析により取得した各係数の評価結果（A2:ケイチタン酸2）

各係数\水質条件		S1:純水	S2:200倍希釈海水	S3:1000倍希釈海水	S3:1000倍希釈海水 (ローラー振とう)	S4:ホウ酸水
D_p [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]	粒子内拡散係数	1.3.E-09	1.6.E-10	4.8.E-10	1.7.E-10	-
k_f [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	境膜物質移動係数	1.3.E-04	2.9.E-04	5.5.E-04	3.0.E-05	-
η [-]	全吸着容量に対する 即時吸着容量の割合	1.0.E+00	4.8.E-02	8.5.E-02	2.4.E-01	-

9. α 核種除去技術の開発，実液試験準備に伴う要素試験結果（12/30）

Decom.Tech

◆ 9.1 バッチ試験結果を用いた解析評価

➤ カラム試験

- ✓ カラム試験を実施し，吸着材の破過曲線を取得。
- ✓ 解析評価結果とカラム試験結果を比較し，差異を補正するための補正係数を取得。

表1 カラム試験のパラメータ設定

No.	パラメータ	設定
1	トレーサ濃度	1.2～1.6 ppm
2	通水流量	16～17 cm/min
3	カラムサイズ	内径2 cm，充填高さ10 cm
4	吸着材充填量	約31.4 cm ³
5	サンプリング間隔	5分から1.5時間

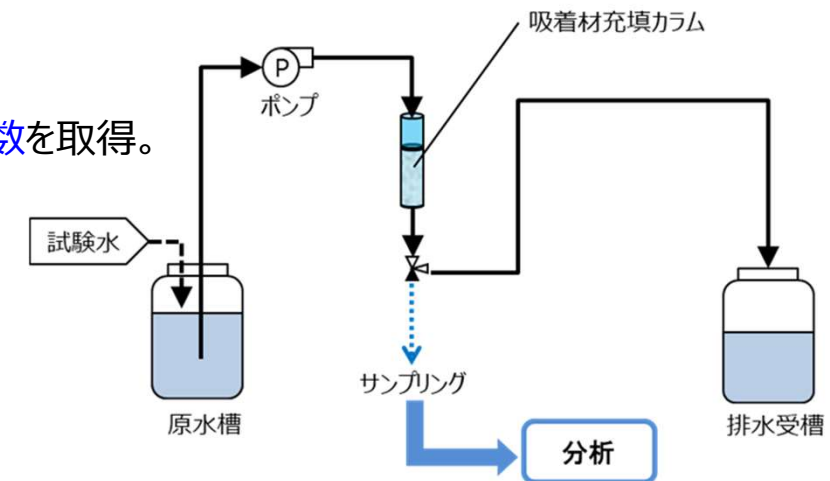


図 カラム試験の試験概要

➤ 吸着塔寿命評価シミュレーション

- ✓ 吸着塔寿命評価シミュレーションで使用する実機想定条件を設定した。（表2）
- ✓ 平衡吸着試験および吸着速度試験の結果得られたパラメータを用いて解析シミュレーションを実施。

表2 吸着塔寿命評価シミュレーションで使用する実機想定条件

項目	条件	設定根拠
塔構成	4塔メリーゴーランド (3塔通水 + 1 塔待機)	補助事業の塔構成
処理流量	10 m ³ /h	・処理量を満足し保守的な設定 ・実液試験の計画を踏まえる
吸着材充填量	1.0 m ³	ALPS実機相当
層高	1.15 m	
SV（空間速度）	10 h ⁻¹	処理流量と塔のサイズから算出
LV（線速度）	11.5 m/h (3.19 mm/s)	
交換周期	DF100に達した時点で交換	初期目標値として設定
²⁴¹ Am濃度	2.7×10 ⁻³ Bq/cm ³	補助事業成果を参照し設定
通水期間	365日	1年間の運転をシミュレーション

9. α 核種除去技術の開発, 実液試験準備に伴う要素試験結果 (13/30)

◆ 9.1 バッチ試験結果を用いた解析評価

➤ バッチ試験結果とカラム試験結果の比較

- ✓ それぞれのフィッティング結果から D_p , k_f , η を比較し, 概ね一致することを確認。(図1) 差異を補正するための補正係数を取得した。
- ✓ バッチ試験結果から D_p , k_f , η を求め, カラム試験結果の予測が可能であることを確認した。(カラム試験の破過曲線シミュレーション結果は補足9.1.1-1参照)

➤ 実機を想定した吸着塔運用のシミュレーション

- ✓ ^{241}Am のバッチ吸着試験※2から得られた D_p , およびカラム試験結果から得られた k_f , η を用いて吸着塔寿命評価シミュレーションを行った。(図2)
- ✓ DF100を下回った時に吸着材を交換する場合, A4 (チタン系吸着材) およびA6 (ケイチタン酸3) は交換に至らず, 他の吸着材に比べて長寿命との評価になった。次点でA5 (鉄系吸着材) が長寿命の評価となった。(A1~A6全体の優先度の検討については後述する9.4.1項を参照。)
- ✓ ただしA4材はバッチ吸着試験中に材の破損が確認されたことから実機への影響評価が必要である。また, A6材の D_p はS4 (ホウ酸水) の水質条件の試験結果であることに注意が必要である。

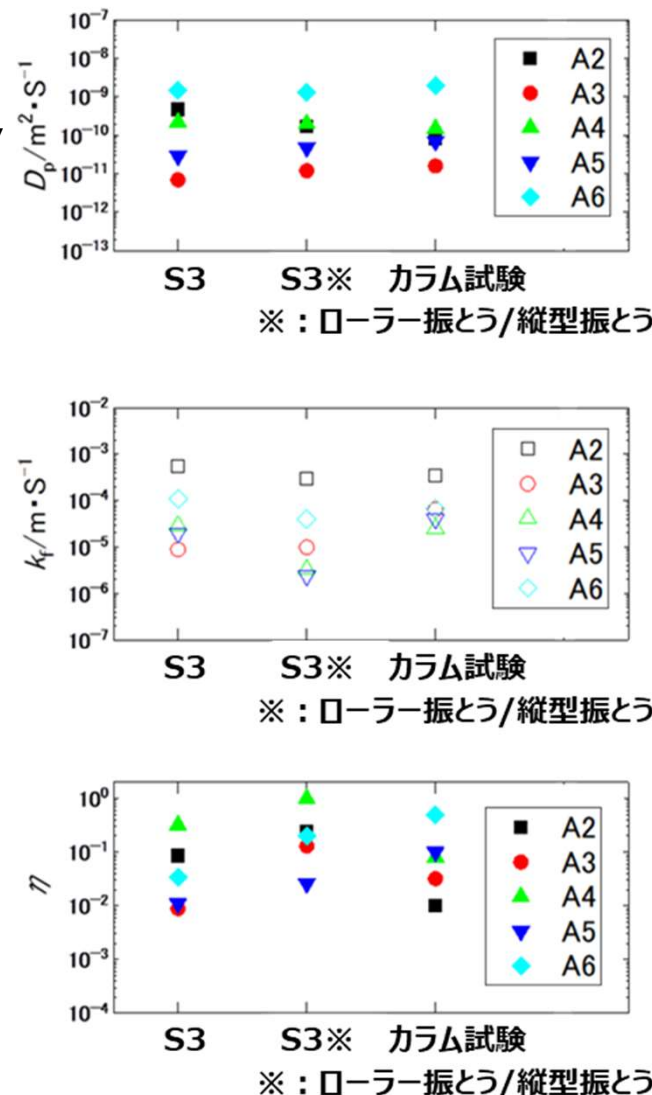


図1 Euバッチ試験結果とカラム試験結果から求めた D_p , k_f , η

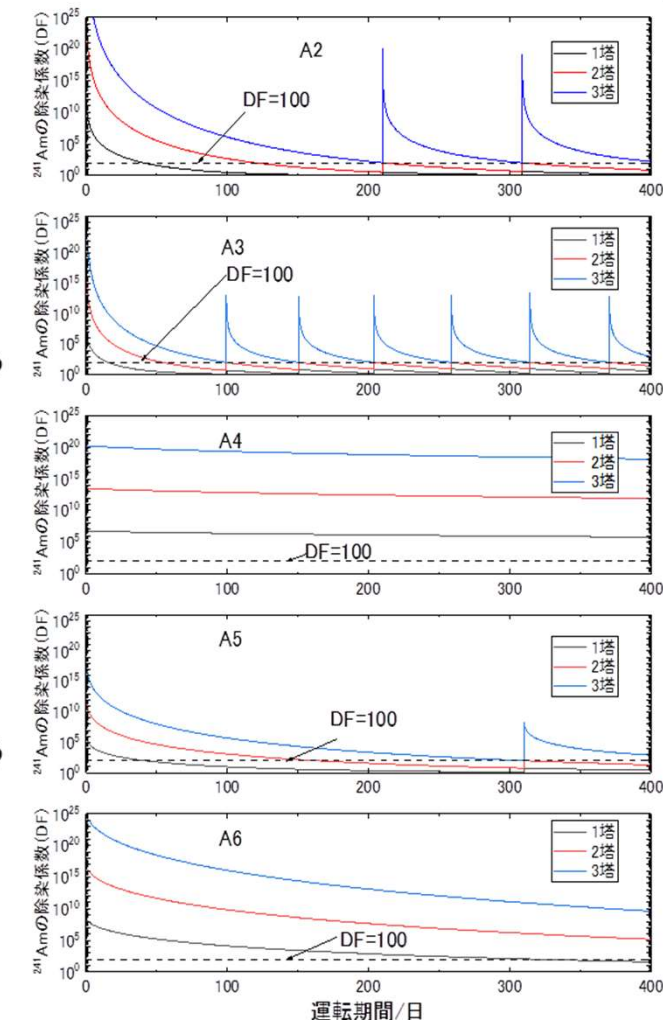


図2 吸着塔寿命評価シミュレーション結果

※2 [HOT試験条件]

- ・トレーサ: ^{241}Am
- ・A2, A6はS4 (ホウ酸水), A3, A4, A5はS3 (1000倍希釈海水) 使用
- ・A2, A3, A6はローラー振とう, A4, A5は縦型振とう

9. α 核種除去技術の開発，実液試験準備に伴う要素試験結果（14/30）

Decom.Tech

◆ 9.2 通水初期の吸着挙動確認

➤ 試験目的・試験概要

- ✓ 2022年度までの評価では，通水処理を模擬した試験を行っておらず，通水状態で処理した場合の適用性は今後評価していく必要がある。一方でラボでは， α 核種の使用制限等により，通水試験を実施するのは難しい。
- ✓ 今後実液での通水試験実施の際には使用可能な液量に制限があることを考慮して，吸着材等の条件は事前にある程度絞り込んでおく必要がある。
- ✓ そこで，ラボで実施可能な通水試験として，20BV※1程度通水時（通水時間は数時間程度）の吸着挙動確認試験を実施する。実機では1000BV以上通水し，性能維持を要求される可能性があり，本試験での20BV程度で性能が維持できない（ C/C_0 が徐々に上昇）する場合，優先度を下げる可能性がある（図1）。
- ✓ 試験イメージを図2に示す。また，通水性能は通水前後での α 核種濃度の割合から評価する。※3

$$\text{通水前後の濃度比 } (C/C_0) = \frac{\text{通水後液 } \alpha \text{ 核種濃度 (濃度 } C) \text{ [Bq/mL]}}{\text{通水前液 } \alpha \text{ 核種濃度 (濃度 } C_0) \text{ [Bq/mL]}}$$

吸着材Bは性能維持期間が短い可能性があるため（通水BVに応じて増加傾向），今後の長期通水試験での優先度を下げる可能性がある

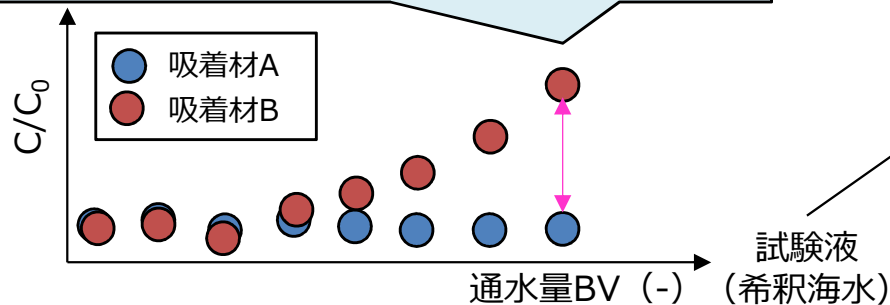


図1 通水初期の吸着挙動確認試験結果イメージ

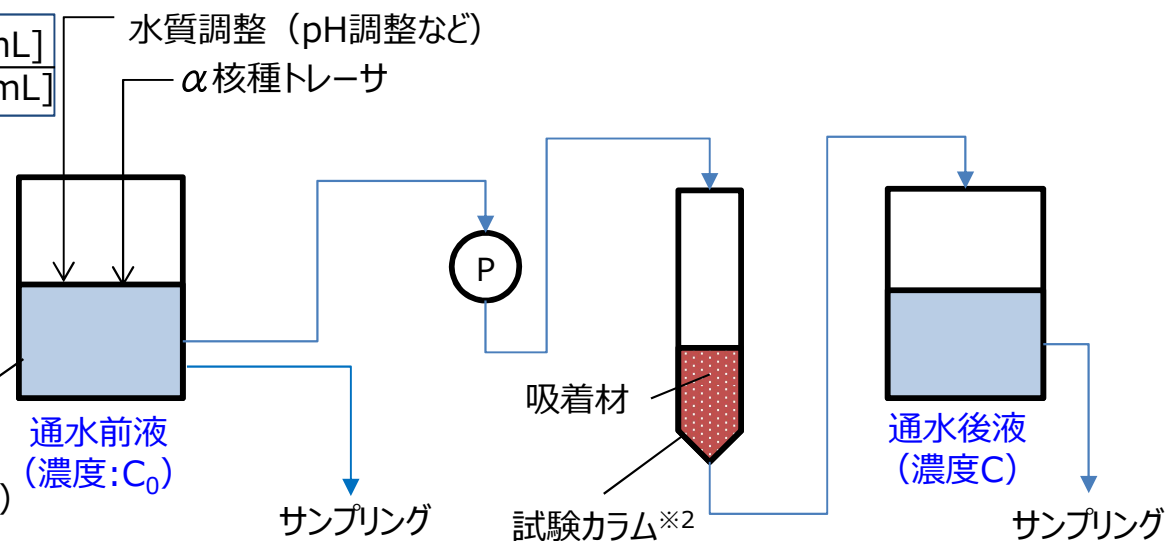


図2 通水初期の吸着挙動確認試験イメージ

※1 Bed Volume 吸着材充填量当たりの通水量

※2 試験カラム数は基本的に1吸着材の初期通水挙動を確認するため，1本で設定

※3 試験パラメータ，測定・評価項目は補足9.2.1-1 を参照

9. α 核種除去技術の開発, 実液試験準備に伴う要素試験結果 (15/30)

Decom.Tech

◆ 9.2 通水初期の吸着挙動確認

➤ 試験結果

- ✓ Pu, Am, Np共にブランク条件(吸着材添加なし条件)では試験期間中におけるカラム出入口濃度の有意な変化はなく懸念していたカラム等の機器への核種付着影響は軽微と評価した(図1,図2,図3)。
- ✓ Am試験では鉄系,チタン系と添着活性炭の出口濃度(C_{out})は検出下限値(ND)近傍の高い吸着性能が得られた。なおZr系,鉄系,チタン系の入口液(C_{in})は微粒子が生成し,ろ過後の核種濃度は約1/5に低下したが添着活性炭試験での核種濃度低下は軽微であった。
- ✓ Pu試験結果では,添着活性炭と鉄系吸着材で検出下限レベル(ND)の高い吸着性能を確認した(鉄系はNDレベルの性能到達に時間遅れあり)。Zr系吸着材の C/C_0 は一定で破過傾向は示していないが,カラム出口濃度(C_{out})が他の吸着材よりも高くなった(図1)。
- ✓ Am試験結果では,鉄系,チタン系共に高い除去性能となった。Zr系吸着材の C/C_0 は一定で破過傾向は示していないが,カラム出口濃度(C_{out})が他の吸着材よりも高いことを確認した(図2)。
- ✓ Npに関しても試験を実施しており,Zr系,鉄系,チタン系で高い吸着性能が得られた,添着活性炭では C/C_0 の増加傾向(破過の兆候)が見られた(図3)。

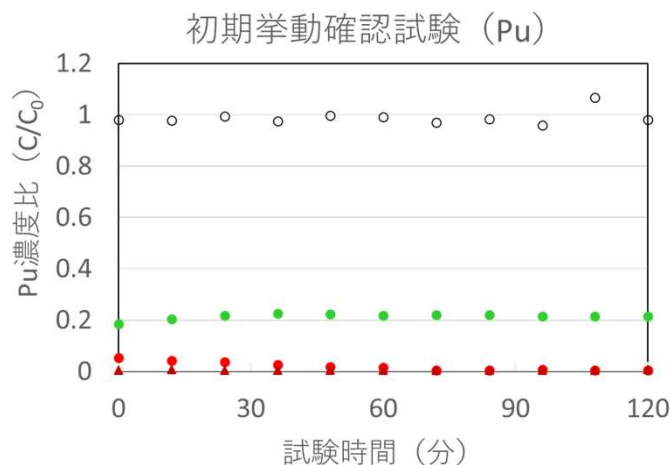


図1 吸着挙動確認試験結果 (Pu)

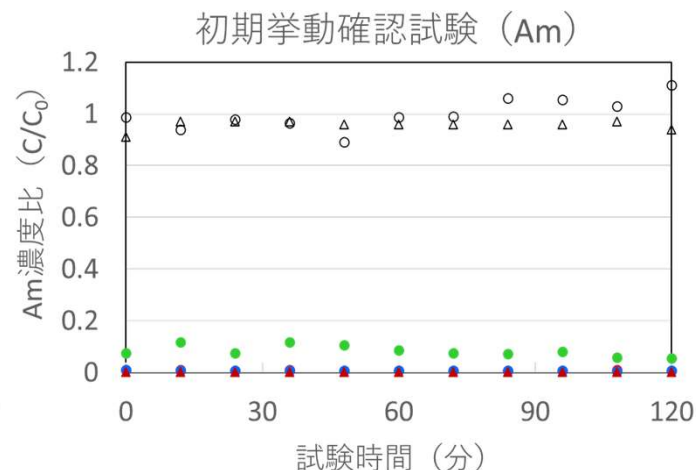


図2 吸着挙動確認試験結果 (Am)

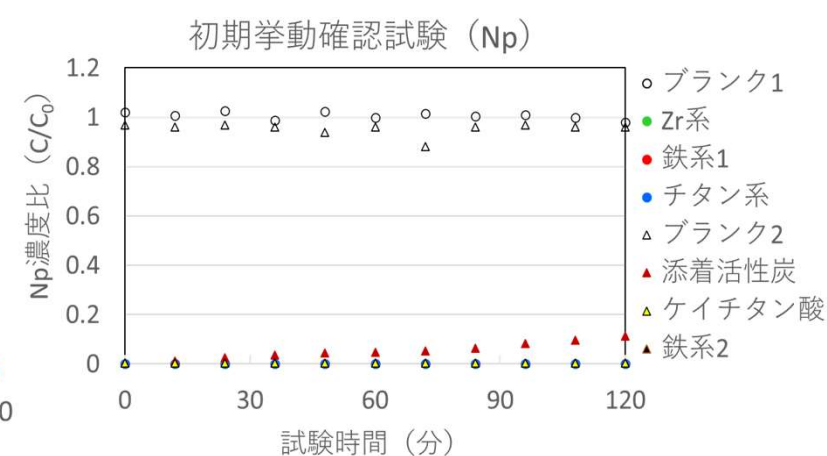


図3 吸着挙動確認試験結果 (Np)

9. α 核種除去技術の開発，実液試験準備に伴う要素試験結果（16/30）

Decom.Tech

◆ 9.2 通水初期の吸着挙動確認

➤ 試験結果

- ✓ 試験結果をもとに今後の評価優先度を設定した（下表）。2025年度以降に計画されている，実液を用いた通水試験では確保可能な実液量に制限があることが想定されるため，試験条件数を絞り込む必要がある。
- ✓ 本事業での通水試験結果より，鉄系，チタン系，添着活性炭の優先度を上げて評価することとした。
- ✓ Zr系吸着材はPu，Amの吸着速度が遅い可能性があるものの，これまでの補助事業結果より， α 核種の選択性が高い材として知られていることや，今後の評価にて候補全てで適用不可となり，吸着材選定から行うなどの出戻りが発生しないように，複数の吸着材を候補としておくのが望ましいため，評価対象からは除外はしないこととした。

表 通水初期の吸着挙動確認結果まとめ

吸着材	C/C ₀ の推移評価			今後の評価 優先度	備考
	Pu	Am	Np		
鉄系	○	○	○	高	実機運用として数十BV程度通水してから使用することでPu, Am, Npのいずれも高い吸着性能が期待できるため，優先度を高。
チタン系	—	○	○	高	Puは評価していないが，除去優先度の高いAmにて性能が期待できるため，優先度を高。
Zr系	△	△	○	中	Pu, AmでのC/C ₀ は一定で破過傾向も観測されていないが，C/C ₀ が他の吸着材よりも高いため，優先度を中。
添着活性炭	○	○	×	高	除去優先度の高いPu, Amにて性能が高いため優先度を高。

○：濃度一定（～ND） △：濃度一定（NDレベルではない） ×：濃度増加 —：試験なし

9. α 核種除去技術の開発, 実液試験準備に伴う要素試験結果 (17/30)

Decom.Tech

◆ 9.3.1 実液サンプル中のスラッジの酸溶解・中和処理・調整等

➤ 試験目的・試験概要

- ✓ 吸着材のカラム通水試験をラボで行う場合, 試験に必要な液相中 α 核種が多量であり, トレーサ添加では間に合わない見込みのため, 実液中のスラッジを酸溶解して, α 核種濃度を確保する手法を確立する必要がある。
- ✓ 1Fより採取された実液サンプルを固液分離し, スラッジサンプルと溶液サンプルを得る。スラッジサンプルに酸溶液を添加し, 液相への α 核種溶出を確認する。なお, 加熱溶解は実施しない。
- ✓ 溶液サンプル含有のベース試験液にスラッジ溶解後の酸溶液を添加し, 添加分の酸を中和するためにNaOHを添加し, 対象試験液を調製する。
- ✓ 調製した対象試験液に含まれる α 核種濃度を検証し, 通水試験液として成立するかを確認する。

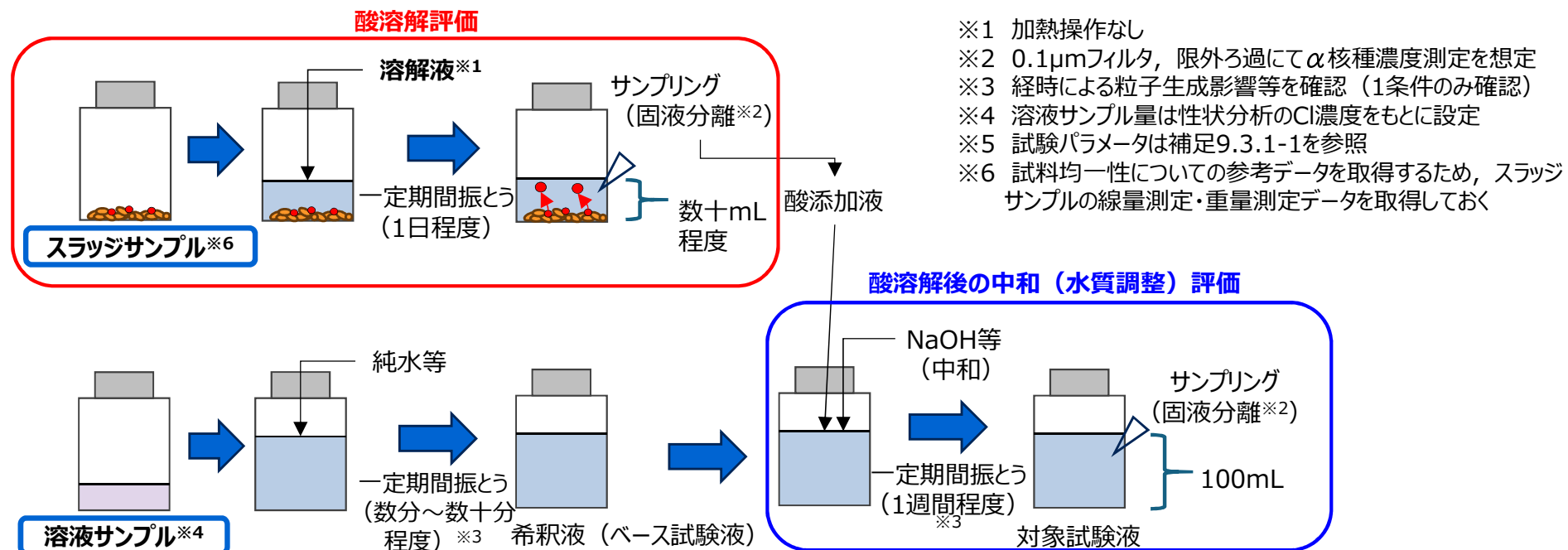


図 実液サンプル中のスラッジの酸溶解・中和処理・調整試験イメージ※5

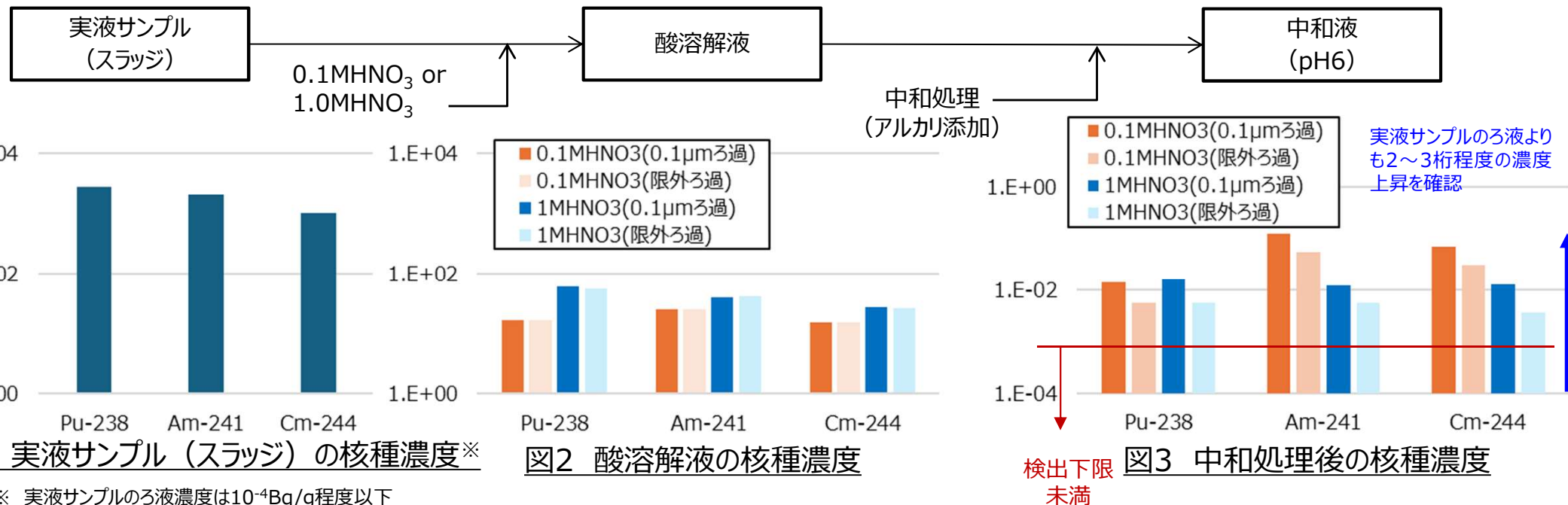
9. α 核種除去技術の開発, 実液試験準備に伴う要素試験結果 (18/30)

Decom.Tech

◆ 9.3.1 実液サンプル中のスラッジの酸溶解・中和処理・調整等

➤ 試験結果

- ✓ 実液サンプル（スラッジサンプル 図1）にして0.1M硝酸または1M硝酸を添加することで、**溶解性核種**（粒径0.1 μ m未満）を**1/10程度溶出させることができた**（図2）。また、溶出量について酸濃度によってオーダでの違いはなかった。さらに、限外ろ過の結果より、溶出した大部分の核種はイオン状で存在することがわかった（0.1 μ mろ過液と限外ろ過液で大きな濃度差はなし）。
- ✓ 酸溶液に対してアルカリ添加・中和処理（pH6）を行うと、3桁～4桁程度、溶解性核種濃度が低下した。これはアルカリ添加によって加水分解が発生したと考えられる。0.1M硝酸の方がAm, Cmの濃度低下が抑制された。また、いずれの核種もコロイド生成が確認された（0.1 μ mろ過液と限外ろ過液で濃度差あり 図3）。
- ✓ **実液サンプルに対する酸溶解液を0.1M硝酸とし、実機想定水質（中性）へ調整した場合、通水試験にてDF10～100程度の評価が可能**な見込みがある。以上を実液試験計画へ反映させる。



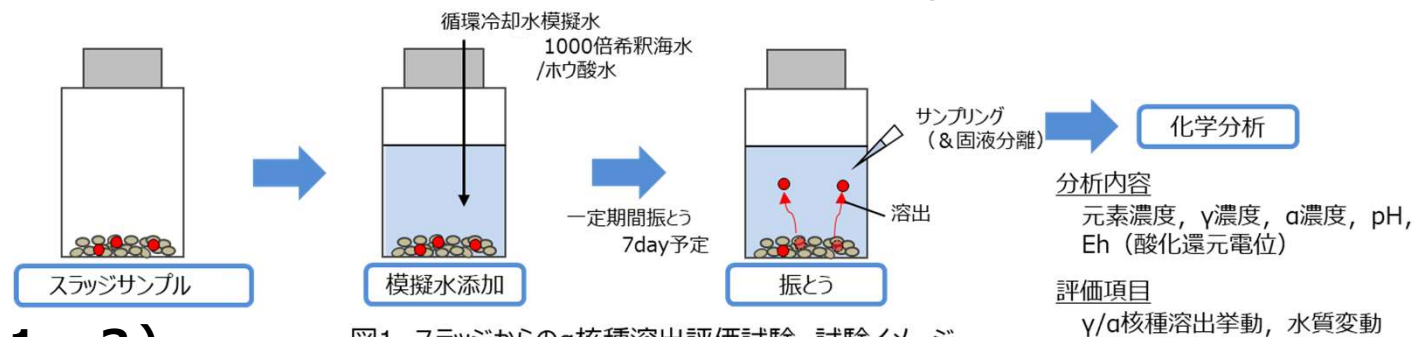
9. α 核種除去技術の開発, 実液試験準備に伴う要素試験結果 (19/30)

Decom.Tech

◆ 9.3.2 スラッジからの α 核種溶出評価試験

➤ 試験目的・試験概要

- ✓ 実機では液相がどの程度の α 核種濃度になるかが不明のため, 1Fより採取されたスラッジに循環冷却水の模擬液を添加し, **液相への α 核種溶出を確認**する。(本試験の諸条件表は補足9.3.2-1を参照)



➤ 試験結果 (Run. 1 ~ 3)

- ✓ 1000倍希釈海水条件(基本水質)では, ほぼすべての α 核種は検出下限値以下であり, スラッジからの顕著な溶出は確認されなかった。
- ✓ ホウ酸水浸漬時の液中の α 核種濃度は, Pu, Am, Cmは $1.0\text{E}-02 \sim -01\text{Bq/g}$ オーダーであり, U, Npは $1.0\text{E}-03 \sim -04\text{Bq/g}$ オーダーであった。
- ✓ 他条件(1000倍希釈海水, 実試料)と比較し, **ホウ酸水条件において, 測定したほぼすべての α 核種について特異な濃度上昇が確認され, スラッジから溶出したと考えられる。**これは, 2022年度までの補助事業における**模擬液試験で確認された, ホウ酸水条件において α 核種の溶存濃度が大きくなる傾向とも整合的**である。(補足9.3.2-2参照)
- ✓ スラッジからの溶出率を基準として評価すると, Pu, Am, Cmは約0.01%であるため, **燃料デブリに含まれる α 放射能のうち, 約0.01%に相当する量がホウ酸水中に溶出する可能性が考えられる。**しかしながら, 溶存種と非溶存種の比率ではなく, ホウ酸水中における溶解度が律速している可能性も考えられるため, 律速要因について今後評価が必要である。

※ 5ホウ酸ナトリウムを濃度7000ppmasBに調整

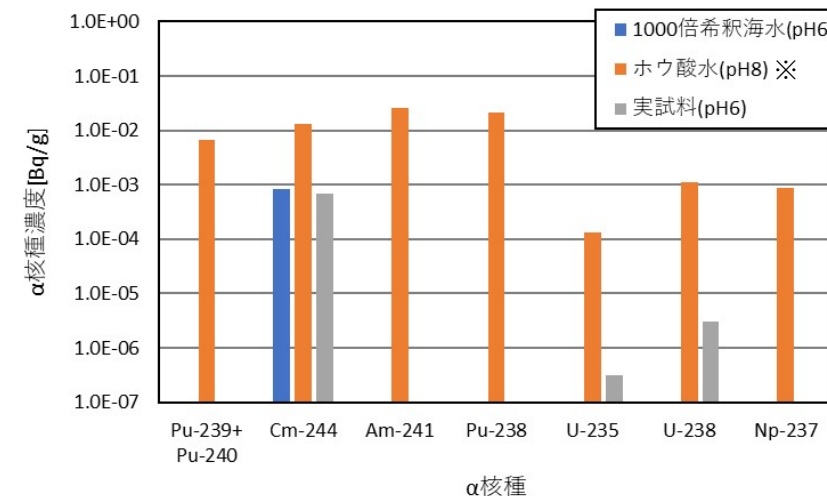


図2 試験液中の α 核種濃度測定結果 (0.1 μm ろ過溶液)

9. α 核種除去技術の開発，実液試験準備に伴う要素試験結果（20/30）

◆ 9.3.2 スラッジからの α 核種溶出評価試験

➤ 試験結果（Run.4, 5）

- ✓ スラッジサンプルに対して，実機想定水質（1000倍希釈海水・アルカリ性）にて溶出させ，核種ごとの0.1 μ mろ液の結果を表にまとめた。
- ✓ 測定対象としたU, Pu, Am, Cmは全て検出下限未満であった。また，初期pHをアルカリ性としても，緩衝作用により試験期間中にpHは6～7程度まで低下した。
- ✓ α 核種が溶出しなかった要因としては，試験中にpHが変化し，化学形態が変化しなかったこと，スラッジ中で共存するFe成分等が溶出しなかったこと等が要因と想定される。
- ✓ 実機PCV環境を想定すると，燃料デブリが取り出しされていない，静的環境においては（もしくは把持のみで行う初期の燃料デブリ取り出し時，即ち切削などの燃料デブリ加工を伴わない段階においては）pHが中性付近になり， α 核種の溶出は低いと想定される。一方で燃料デブリ取り出しされている動的環境（特に，切削などの燃料デブリ加工を伴う段階）においては，コンクリート成分が積極的に液相へ供給され，高いpHを維持できるため， α 核種の溶出は高くなる可能性がある。継続してアルカリ性での溶出挙動は評価していく必要がある。
- ✓ 試験結果全体（Run.1～5）を総括すると，初期の燃料デブリ取り出し時（切削などの燃料デブリ加工を伴わない段階）では，液相の α 核種濃度が顕著に高まる可能性が低く，既設の水処理設備の能力で賄える可能性は高い。但し，ホウ酸投入した場合は液相の α 核種濃度が上昇する懸念がある。

表 試験液中の α 核種濃度測定結果
(0.1 μ mろ過溶液)

核種 (Bq/ml)	1000倍希釈 海水(pH8)	1000倍希釈 海水(pH10)	実試料ろ液 (pH6)
Pu-239+ Pu-240	ND ($<1.7\text{E-}03$)	ND ($<1.36\text{E-}03$)	ND ($<2.95\text{E-}04$)
Pu-238+ Am-241	ND ($<1.7\text{E-}03$)	ND ($<1.36\text{E-}03$)	ND ($<2.95\text{E-}04$)
Cm-244	ND ($<4.25\text{E-}04$)	ND ($<3.41\text{E-}04$)	1.11E-04
U-235	ND ($<1.93\text{E-}06$)	ND ($<1.93\text{E-}06$)	6.8E-06
U-238	ND ($<5.12\text{E-}05$)	ND ($<5.12\text{E-}05$)	5.7E-05

ND：検出下限未満

9. α 核種除去技術の開発, 実液試験準備に伴う要素試験結果 (21/30)

Decom.Tech

◆ 9.3.3 低 α 濃度溶液を使用した浸漬試験

➤ 試験目的・試験概要

- ✓ 過去に補助事業において実施した吸着試験は模擬液試験のみであり, 実液を使用し吸着性能を試験的に評価した実績がない。実液試験で吸着性能を評価する必要がある。
⇒ 実液サンプル（液相側, 溶液サンプル）を使用した吸着試験（浸漬試験）を行い, 候補吸着材の α 核種吸着性能を評価。（本試験の諸条件表は補足9.3.3-1を参照）

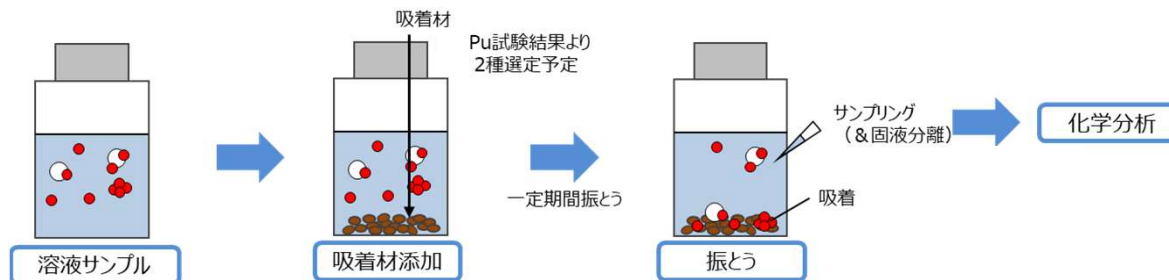


図1 低 α 濃度溶液を使用した浸漬試験 試験イメージ

➤ 試験結果

α 核種のうち, Pu, Am, Cmは試験開始時点の濃度がNDとなってしまったため, 検出可能であったUを対象として, 各吸着材の除去率および分配係数を評価した結果を図2に示す。

- ✓ チタン酸がUに対して最も良好な除去性能を示し, 分配係数 $K_d=1.0E+06\text{ml/g}$ 以上と評価された。他の吸着材3種は1オーダー程度低く, $0.5\sim2.0E+05\text{ml/g}$ 程度であった。
- ✓ チタンケイ酸塩やチタン酸は高Na強度にて高い α 核種除去性能となる傾向があるため, 実液試料(10倍希釈相当)ではより性能が発揮される水質条件であり, 高い分配係数が得られたと考える。

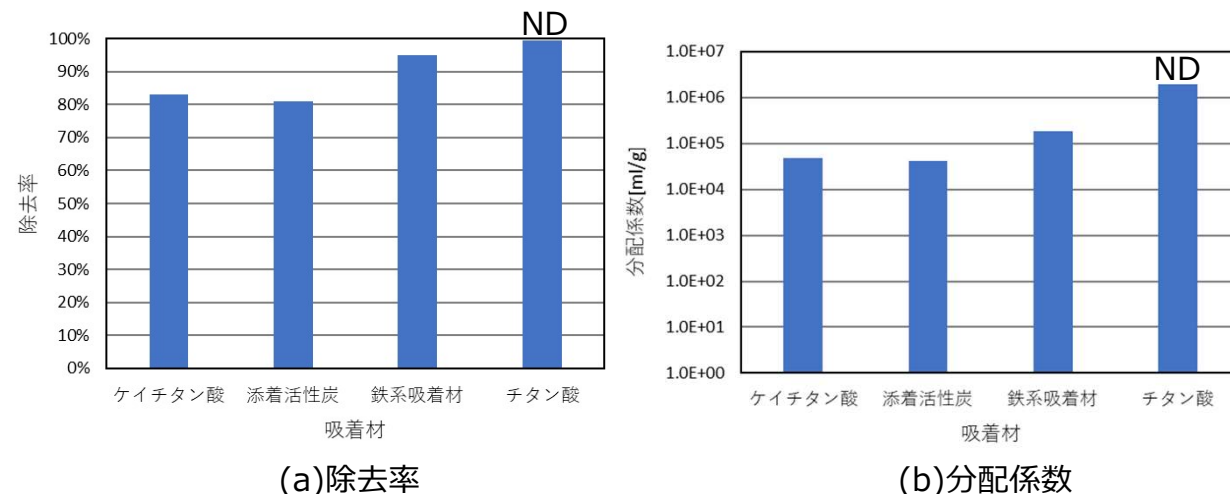


図2 Uに対する除去率および分配係数(t=24h)

9. α 核種除去技術の開発，実液試験準備に伴う要素試験結果（22/30）

◆ 9.4.1 実液を用いた次段階の試験計画の策定（候補吸着材の選定）

9.1 ミニカラム試験の代替方法（バッチ試験）の要素試験，9.2 通水初期の吸着挙動確認試験，9.3 1Fで採取した実液サンプルを使用した準備試験で得た結果にもとづき，次段階の実液試験に用いる候補吸着材の選定，試験に用いる際の優先度を検討した。下表に示す。

表 次段階の実液試験に用いる候補吸着材の優先度

吸着材（顆粒状）	優先度	優先度の根拠
A4：チタン系吸着材 A6：ケイチタン酸3	高	・A6, A4は今回シミュレーション結果から，最も長寿命の見込み ・A4はバッチ試験における材の破碎・微粉化が発生 ・A6のシミュレーションはS4(ホウ酸水)における^{241}Amに対するDpを使用している
A5：鉄系吸着材	高～中	・A5は，A4, A6について長寿命の見込み ・初期吸着性能が低下するが，実機運用として数十BV程度通水してから使用することで性能発揮する可能性あり。
-：Zr系吸着材	中	・除去優先度の高いPu, Amにて性能が低いため優先度を中
A2：ケイチタン酸2 A3：添着活性炭	低	・A2, A3は寿命評価でA4, A5, A6に劣る ・Euカラム試験ではA2, A3は差圧上昇により流速が低下 ・A2はA6と比較してpH変動しやすく，Eu析出しやすい
A1：ケイチタン酸1	除外	・pH変動が大きく，Eu析出しやすく評価困難であった（解析評価未実施）

9. α 核種除去技術の開発，実液試験準備に伴う要素試験結果（23/30）

◆ 9.4.1 実液を用いた次段階の試験計画の策定（試験体系について）

9.1.1では「バッチ試験＋解析評価」の手法が α 核種への適用が可能で，ミニカラム通水試験の代替として有効であることを確認した。よって，下表に示す各々の試験上の利点を活かし，次段階の通水試験計画の構想では，「バッチ試験＋解析評価」※と「ミニカラム通水試験」を併用して実施することを計画。
互いに補完し合う体系とすることが出来る。

（※ バッチ試験＋解析評価の実液試験に関する，ミニカラム試験との比較および試験案の課題整理については補足9.4.1-2を参照。）

表 2種類の試験体系の利点・メリットの整理 記号 ○：メリットのある側に○を記載

No.	試験上の利点・メリット	バッチ試験＋ 解析評価	ミニカラム 通水試験	備考
1	取り扱う試験液を少量に抑える（被ばくの観点）	○		
2	試験装置の規模・現場占有エリアを抑える	○		
3	試験パラメータを細かく設定し，ケース数を多く試すことができる	○		例：実液採取場所の違い，想定水質の違い
4	実機を想定した機器構成にて性能確認できる		○	例：直列に異なる候補吸着材を配置した試験
5	実機を模擬した機器仕様により，吸着性能以外のトラブルや問題点を早期発見		○	
6	複数ある候補吸着材の寿命評価を時間をかけずに実施	○		
7	新規開発の吸着材を試す際にハードルが低い	○		例：材質は同一だが造粒方法を変えた吸着材の試験など
8	バッチ試験（吸着速度試験）の信頼性の維持または向上のため補正係数を得る試験（代表ケース）を担う		○	
9	更に次の段階の通水試験（実機長カラム試験や実機1/10試験）へ移行する際の最終確認		○	

9. α 核種除去技術の開発，実液試験準備に伴う要素試験結果（24/30）

Decom.Tech

◆ 9.4.1 実液を用いた次段階の試験計画の策定

- ▶ 次段階の実液試験計画として，下記に示す「ミニカラム試験」と，「バッチ試験を用いた解析評価」の2案があり，両者の利点を活かし併用することで互いに補完する試験計画を策定。

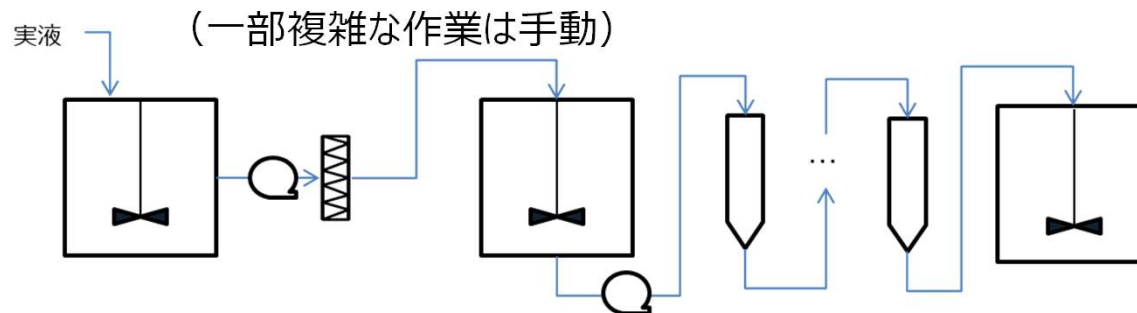
◆ 実液を用いた次段階の試験計画案（ミニカラム試験）※6

【本試験の目的】

- ✓ 溶解性核種除去設備内に設置する候補吸着塔への通水時の核種除去性能見込みを確認し，候補となる吸着塔構成の絞り込みを行うこと

【本試験装置のコンセプト】

- ✓ 採取した実液をそのまま受入れ可能な装置を想定
- ✓ カラム通水前には水質調整（実機想定水質へ調整等）可能な装置を想定
- ✓ 作業員の被ばくを低減するためになるべく遠隔で操作可能な装置を想定



- 【調整タンク】
- ✓ 採取した実液の受入
 - ✓ 実液の性状把握(pH、核種濃度等)
 - ✓ 実機想定水質への調整

- 【粒子除去フィルタ】
(0.1 μ m)
- ✓ 実液液に含まれる固形分を除去(溶解性の定義である粒径0.1 μ m未満の成分となるように分離)

- 【入口タンク】
- ✓ カラム通水前液の性状把握(pH、核種濃度等)
 - ✓ (必要であれば)追加の水質調整

- 【試験カラム】
- ✓ 吸着材を充填したカラムへ通水

- 【出口タンク※5】
- ✓ カラム通水後液の性状把握(pH、核種濃度等)
 - ✓ 入口タンクの核種濃度結果と合わせて核種除去性能(DF)を評価

表 試験仕様案※6

試験対象液	1F滞留水
使用液量	20L程度/3ケース※1
設置場所	1F（2号機Rw/B※2）
試験期間	1か月程度/3ケース※3
通水流量	1ml/min
吸着材※4	活性炭，Zr系，鉄系，チタン系，チタン酸系
吸着材充填量（カラム）	6ml

※1 一度の試験で3ケースまで試験可能な装置構成・1000BV程度の通水を想定

※2 暫定的に設定

※3 1日5時間装置稼働した場合を想定

※4 候補となるカラム構成（吸着塔構成）は本事業の検討結果を反映

※5 サンプルング時に均一な状態サンプルングするために攪拌機構を設置

※6 詳細は，補足9.4.1-1記載

図 実液試験装置の概略構成の暫定案

9. α 核種除去技術の開発，実液試験準備に伴う要素試験結果（25/30）

Decom.Tech

◆ 実液を用いた次段階の試験計画案（バッチ試験および解析評価）

➤ バッチ吸着試験と解析評価に関する検討内容※1

下図に実液試験にて候補とした，吸着速度試験の試験方法を示す。電中研にて開発された吸着速度試験は，インペラーによる高速攪拌を行いながら短間隔でサンプリングを行い，吸着速度を評価する方式である。しかしながら，25年度以降の実液試験では，HOT試験用に検討したローラー振とう方式の試験方法が望ましいと判断した。

簡易卓上型グローブボックス（GB）
（700×500×H500mm）

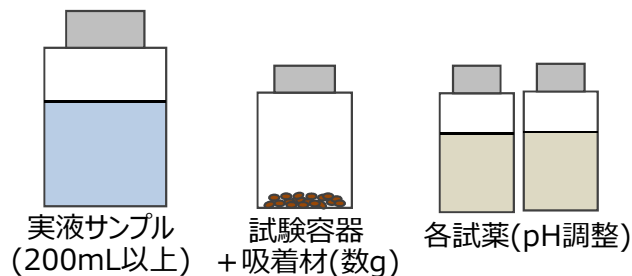


試験用品

- ・ マイクロピペット（&ホルダー）
- ・ pH計
- ・ ダストボックス
- ・ 廃液用容器

消耗品（複数個用意）

- ・ 0.1 μ mメンブレンフィルタ
- ・ シリンジ
- ・ サンプル容器
- ・ チップ（+チップホルダー）



試験手順案

- ① GB外にて吸着材を試験容器に20mg添加。
- ② GB内へ必要な試験機器一式を搬入(左図)。
- ③ GB内へ実液サンプルを搬入。
- ④ マイクロピペットを使用し実液200mlを試験容器へ添加。
pH計およびpH調整試薬を使用し，pH調整を実施。
- ⑤ 試験容器に蓋をし密閉後，ローラー振とう器(30rpm以上)にて振とう開始。
- ⑥ 所定間隔※2で試験液をサンプリング。採取量は各2～5mL。
- ⑦ サンプリング液を0.1 μ mメンブレンフィルタ(+シリンジ)にて固液分離し，ろ液を容器回収。
- ⑧ ろ液サンプルを1mL，マイクロピペットを使用し，サンプル容器に分取。24hと7dayサンプルはpHも測定。
- ⑨ 試験終了後，GB外にサンプル容器を搬出し，分析設備にて α 核種濃度分析等を実施。
- ⑩ 取得した分析結果より，分配係数および必要な速度係数を算出し，吸着塔モデルの解析による評価を実施。

※1 詳細は，補足9.4.1-3記載

※2 サンプリングタイミング： 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30min,
1, 3, 6, 24h, 2, 3, 7day

図 ローラー振とう式吸着速度試験の試験方法(イメージ図)

9. α 核種除去技術の開発，実液試験準備に伴う要素試験結果（26/30）

Decom.Tech

◆ 9.4.2 現場への適用性の観点における分析

- 実液試験計画の現場適用性（実機適用性）の評価方針としては，本事業で検討した実液試験用の設備を1F構内に一時的に導入し，試験を実施するにあたり，事業者目線で重視すべき項目を抽出し，実液試験の計画を評価した。

現場適用性の評価（ミニカラム試験方式について）

凡例：○:良 △:課題あり

No.	評価項目	評価項目（細目）	評価	評価の根拠
1	除去性能の測定評価	・通水時の除去性能の測定/評価方法が確立しているか	○:カラム前後の濃度割合から除去性能(DF)を評価が可能	試験装置内の各タンク（調整タンク，入口タンク，出口タンク）やカラム後段にサンプリングラインを設置。
2	被ばく・汚染拡大防止（安全）	・設置作業時，通水試験時に作業員被ばくの低減を図ることができるか ・設備の損傷・トラブルに起因して，放射性物質の拡散あるいは作業員被ばく量の増加につながる恐れはないか	△:ある程度の被ばく低減が可能	・核種が濃縮する可能性のある試験装置内の機器（フィルタやカラム等）には遮蔽を設置。 ・水質調整のための薬液添加やサンプリング操作等を除いて，遠隔で操作可能な装置を想定。 ・装置下部には受けパンと漏えい検知器を設置し，漏えい時には，発報，装置を自動停止し，漏えい拡大を防止可能。
3	設備構成	・設備設置に際し，膨大なスペースを要することはないか/特別な制約はないか	○:候補設置場所へ設置可能	試験装置の機器配置を検討し，1.8m×4.2m（平面）程度となり，候補設置場所（2号Rw/B）への適用見込みありと評価。
4	ロバスト性	・試験対象の不確定要素（試験液の採取量， α 核種濃度の変化）に対応可能か	△:条件によっては対応可能	・採取量が足りない場合， α 核種濃度によるが，模擬水（模擬海水）を添加してから通水試験の実施が可能。 ・ α 核種濃度の変化については，連続採取した液（滞留水移送ポンプ等で連続的に装置へ液を供給）を用いた試験の場合はインラインでの α 分析ができないため，濃度変動に対しては対応不可。一方で，バッチ採取した液（採水器等でバッチ採取した液を装置へ供給）を用いた試験の場合は，タンクにて均一になるように，水質調整，攪拌が可能。
5	既設設備への影響	・1Fの既設設備（滞留水移送装置等）に接続して試験を行う場合，既設設備に悪影響はないか？	○:悪影響ないように運用が可能	実液に対して酸等（これまでの試験結果より，0.1M硝酸）を添加する場合，スラッジの建屋地下への払い出しが許容されない可能性あり。そのため，フィルタにてなるべくスラッジを回収し，残存スラッジは中和処理後に払い出す運用を想定。

9. α 核種除去技術の開発，実液試験準備に伴う要素試験結果（27/30）

◆ 9.4.2 現場への適用性の観点における分析

現場適用性の評価（バッチ試験＋解析評価方式について）

凡例：○：良 △：課題あり

No.	評価項目	評価項目（細目）	評価	評価の根拠
1	除去性能の測定評価	・通水時の除去性能の測定/評価方法が確立しているか	○：吸着速度試験の結果より，解析にて除去性能を評価可能と推定	電中研開発のバッチ試験と解析評価による手法を採用する場合として評価。今期要素試験において， α 核種に対する適用性を確認した。
2	被ばく・汚染拡大防止（安全）	・設置作業時，通水試験時に作業員被ばくの低減を図ることができるか ・設備の損傷・トラブルに起因して，放射性物質の拡散あるいは作業員被ばく量の増加につながる恐れはないか	○：作業員被ばく量は小さい	・密閉系で試験可能 ・試験液量は数百mL/ケースと少量で試験可能（1F構外の試験施設での試験も想定）
3	設備構成	・設備設置に際し，膨大なスペースを要することはないか/特別な制約はないか	○：試験装置は比較的小規模に設計可能	・数百mL規模のバッチ試験体系 ・メイン試験装置はローラー振とう器，付属機器はサンプリング機器等 ・簡易型の卓上グローブボックス内(約700×500×H500mm)で試験実施(1F構内の場合) ・1F構外試験設備で実施する場合でも，グローブボックス内で試験実施。
4	ロバスト性	・試験対象の不確定要素（試験液の採取量， α 核種濃度の変化）に対応可能か	△：評価可能な水質条件と吸着材が限定されるが，試験は実施可能	・水質によっては α 核種濃度が低く，評価困難な場合がある ・バッチ試験であるため，吸着材による水質変動が大きい場合がある
5	既設設備への影響	・1Fの既設設備（滞留水移送装置等）に接続して試験を行う場合，既設設備に悪影響はないか？	○：既設への影響は小さい	使用する液量が少量であるため，既設水処理設備へ廃液を払出す場合でも，影響は軽微であると想定。影響が懸念される場合は，払出し可能な水質となるように事前処理が必要。

9. α 核種除去技術の開発，実液試験準備に伴う要素試験結果（28/30）

Decom.Tech

◆ 9.4.3 今後の課題整理とまとめ

No.	課題	今後の課題解決方針
①	イオン状 α 核種除去を主たる目的とした吸着塔方式以外の，コロイド状 α 核種除去に関する実液試験の検討	粉末吸着材を使用した実液試験(吸着試験)による吸着槽方式の適用性検討 または共沈試薬を使用した実液試験(吸着試験)による共沈方式の適用性検討
②	バッチ試験＋解析評価 におけるAm以外のHOT試験	- Np, U等を使用した模擬液試験による検証 - 実液を使用した試験による成立性の検証
③	実液試験の実施タイミングの検討（1F建屋滞留水による試験で有効な結果が見込める試験項目と，初期の燃料デブリ取り出し時以降に有効となる試験項目の見極め）	- 燃料デブリの各取り出し規模段階において実施可能な実液試験の検討 - 燃料デブリ取り出し作業に伴うα放射能濃度上昇に関するデータ取得

9. α 核種除去技術の開発, 実液試験準備に伴う要素試験結果 (29/30)

Decom.Tech

◆ 9.4.3 今後の課題整理とまとめ (イオン状 α 核種除去の実液試験計画について)

イオン状 α 核種除去の実液試験計画

- バッチ試験方式(少量の試験液で試験後, 解析評価を行う)技術を確立した。
- 吸着材の優先度を策定した。(評価項目: 寿命・初期吸着挙動・滞留水での除去性能)
⇒A4: チタン系吸着材 A6: ケイチタン酸 3 A5: 鉄系吸着材
- 実液サンプル(滞留水)では α 濃度が低く, 燃料デブリ取り出し時を想定した高 α 濃度水の模擬は困難。
⇒酸溶解・中和処理で濃縮した α 濃度水(次試験で利用できる程度)を調製が可能な事を確認した。
⇒滞留水スラッジは, 溶出試験における α 核種溶出がほぼ無く, 初期の燃料デブリ取り出し時は α 核種濃度が顕著に高まる可能性は低い(但しホウ酸投入時を模擬した水質の時は α 核種溶出を検出)
- バッチ試験及びミニカラム試験の試験計画案を作製した。
⇒今後の実液試験計画として, 双方のメリットを生かすために併用して実施する事を提案する。

懸案事項

- 燃料デブリ取り出し時の滞留水中に含まれる物質や複数の核種を, 模擬試験液で再現することは困難であり, 実液による通水試験が必要になる。

★HP-1 燃料デブリ採取後

イオン状 α 核種除去の技術開発が必要か以下の項目より判断する

- ✓ 既設のALPSで処理能力で対処可能か
- ✓ ホウ酸下での α 核種溶出影響評価



必要と判断した場合

- 今回作成したイオン状 α 核種実液試験計画案に沿って実液試験を行う。(S2)
⇒HP-2(実機適用性判断)へ

8・9章まとめ α核種除去技術の開発（30/30）

◆ 本事業の位置づけ

凡例	2021-2022年度補助事業	2023-2024年度補助事業範囲外
	2023-2024年度補助事業	

-FY2022

今回：FY2023-2024

HP-1
燃料デブリ採取後

S2：残りの要素試験
コロイド実液試験計画がメイン

α核種濃度確認

S3へ

S2完了

スケールアップ
試験の検討

試験

装置作製

※ 少量で可能な実液試験項目はラボ試験へ分担。液量を多く必要とする試験項目はサイト試験が担う想定。

図 α核種除去技術の開発における全体計画像

10. 二次廃棄物処理技術の開発，固形分濃縮技術の要素試験結果（目次）

Decom.Tech

粉状吸着材による処理後の固形分濃縮技術に係る試験・検討実施項目を以下構成にて示す。

- 10章における試験対象範囲
 - 10章 固形分濃縮技術の要素試験計画 検討フローと期待される成果
 - 本検討の背景，これまで（2022年補助事業）の成果 ※
- 10.1 クロスフローフィルタ要素試験
- 10.2 現場への適用性の観点における分析

※ ここでは濃縮技術（10章）・脱水技術（11章で個別説明）の双方について記述

10. 二次廃棄物処理技術の開発，固形分濃縮技術の要素試験結果（1/7）

Decom.Tech

◆ 10章における試験対象範囲

本事業で想定する全体フロー
（過去のフロー図より，説明用として作成
システム構成は11.4の成果を参照のこと）

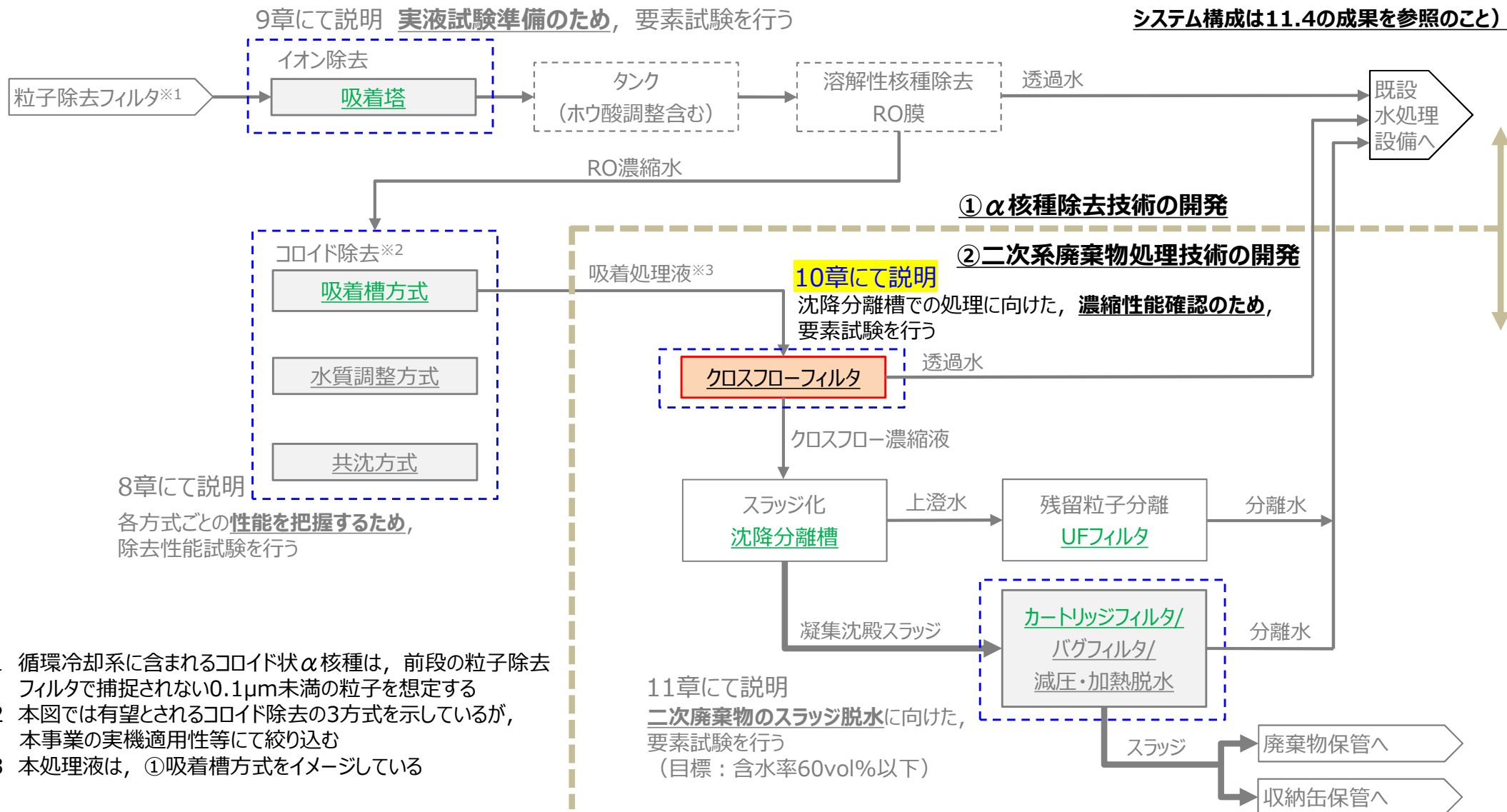


図 燃料デブリ取り出し時の液体処理システム

緑書き：2022年度補助事業までに開発実績のある設備
青点線：2023-2024年度補助事業における開発対象設備

- ※1 循環冷却系に含まれるコロイド状α核種は，前段の粒子除去フィルタで捕捉されない0.1μm未満の粒子を想定する
- ※2 本図では有望とされるコロイド除去の3方式を示しているが，本事業の実機適用性等にて絞り込む
- ※3 本処理液は，①吸着槽方式をイメージしている

10. 二次廃棄物処理技術の開発，固形分濃縮技術の要素試験結果（2/7）

◆ 10章 固形分濃縮技術の要素試験計画 検討フローと期待される成果

- 二次廃棄物処理技術の開発のうち②－a「粉状吸着材による処理後の固形分濃縮技術の開発」に伴う検討および要素試験の流れを以下に示す。
- ✓ 2022年度までの補助事業で選定した（複数の）粉状吸着材の模擬粒子を用いた要素試験を行い，CFフィルタによる濃縮性能（100倍以上を目標）および逆洗性能等の運用に係るデータを取得し，その結果からCFフィルタの実機適用性評価を行う。
- ✓ 実機適用性評価においては，濃縮処理設備の設備構成（CFフィルタ単体もしくは，CFフィルタと凝集沈殿処理）を検討し評価を行う。
- ✓ また，試験で得られる結果・成果（右図の青字）を検討フローに示す。得られた結果は，10.2項のCFフィルタの現場への適用性の観点における分析に使用する。

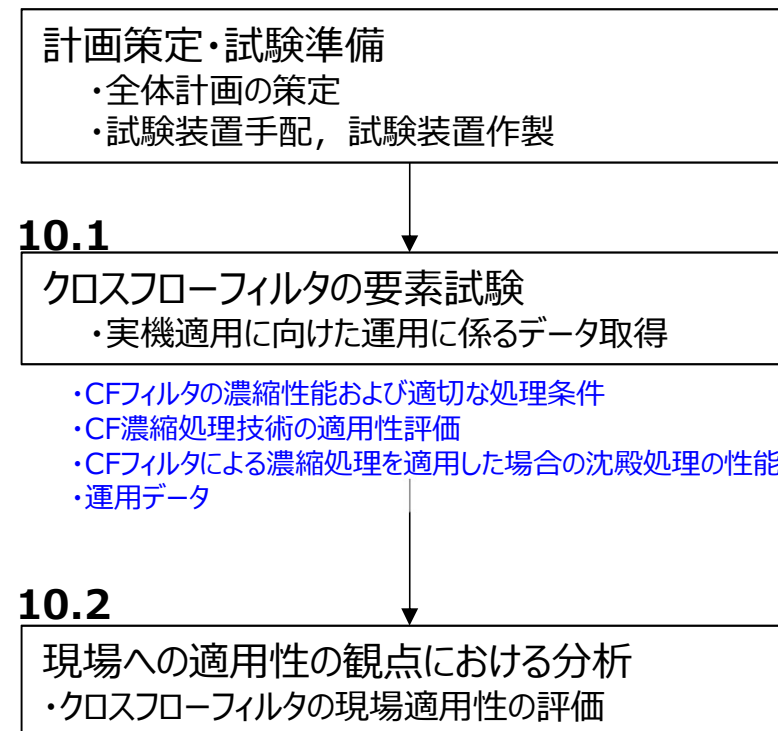


図 固形分濃縮技術の要素試験計画の流れ

10. 二次廃棄物処理技術の開発，固形分濃縮技術の要素試験結果（3/7）

Decom.Tech

◆ 本検討の背景，これまで（2022年補助事業）の成果

➤ 二次廃棄物処理システムの概要

RO濃縮水を処理する吸着槽から発生した粉末吸着材が含まれる廃液について，濃縮処理および脱水処理により，含水率（60vol%）のスラッジとして払出すことを目的として設置。（CF濃縮処理のみで十分な濃縮倍率が達成される場合，凝集沈殿処理は実施しない可能性あり）

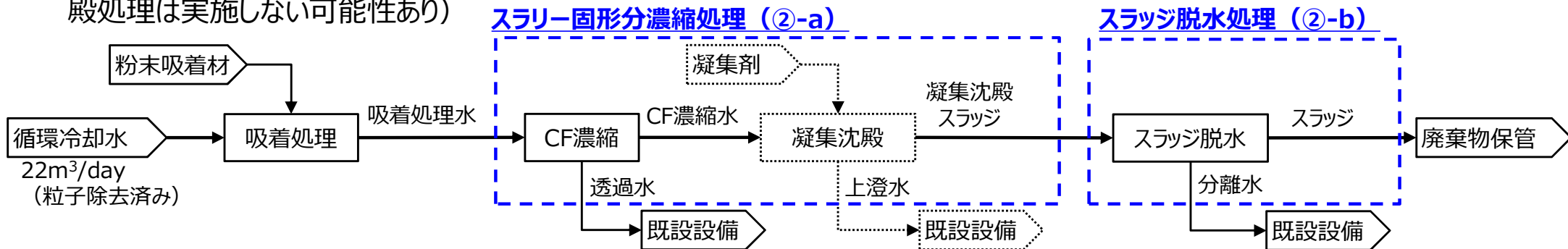


図 二次廃棄物処理システム フロー図

表 濃縮処理/脱水処理の候補技術

要素技術	候補技術	備考
核種除去技術	粉末吸着材による吸着処理	粉末吸着材目標性能： Kd=1.0E+06mL/g
スラリー 固形分濃縮 技術	クロスフローろ過	目標濃縮上限：約10000ppm 目標濃縮倍率：100倍
	凝集剤による凝集沈殿処理	目標濃縮上限：約100000ppm 目標濃縮倍率：10倍
スラッジ 脱水技術	カートリッジフィルタ	ろ過脱水のため，数百L/dayの脱水 処理が可能と想定。
	バグフィルタ	そのため，凝集沈殿処理による前処理 は必須ではないと想定。
	減圧・加熱脱水	蒸発による脱水処理のため，脱水速度 は数十～数L/dayと想定。そのため， 凝集沈殿処理による液量低減は必要 と想定。

凝集沈殿処理の性能安定およびスラッジ脱水処理の処理液量低減の観点から，CF濃縮処理では100倍以上の濃縮倍率を目標設定※1

廃棄物減容化の観点から脱水処理後の含水率の目標値を60vol%と設定※2し，脱水処理技術を検討する

要素試験に用いる模擬粒子（粉末吸着材の模擬粒子）を作製※3

- ・ケイ砂（チタン酸/チタンケイ酸）
- ・活性炭（添着活性炭）
- ・マグネタイト（Fe₃O₄）

※1 補足10-1を参照

※2 補足10-2を参照

※3 補足10-3を参照

10. 二次廃棄物処理技術の開発，固形分濃縮技術の要素試験結果（4/7）

Decom.Tech

◆ 10.1 クロスフローフィルタ要素試験

➤ クロスフローフィルタ候補の選定について / CFフィルタ候補エレメントの検討

- ✓ フィルタエレメントは，セラミクスフィルタや金属フィルタ等の無機フィルタ，ろ紙タイプや糸巻きタイプ等の有機フィルタに大別される。CFフィルタ設備では，空気逆洗や水逆洗等を行うため，耐圧性が高く逆洗再生が容易であることが求められる。
- ✓ 金属焼結フィルタや金網フィルタ(金属ワイヤー編込式)は，溶接や加工等の制約から，フィルタエレメント1本当たりの有効ろ過面積が比較的小さくなる。結果として，装置規模が非常に大きくなる懸念がある。
- ✓ 上記観点を満足すること，また1F適用実績(ALPSスラリー濃縮)があるというから，セラミクスタイプのフィルタエレメントをCFフィルタの候補として選定した。

表1 クロスフローフィルタ候補一覧

候補材	空洗可否	ろ過面積	粒子除去性能	耐久性	耐放性	適用実績※
セラミクスフィルタ	○	大	高	○	○	有
金属焼結フィルタ	○	中	高	○	○	無
金網フィルタ	○	中	高	○	○	無
各種有機フィルタ	×	大	高	—	—	—

※ CFフィルタとしての1F適用実績

➤ 選定したセラミクスフィルタ仕様

表2 選定したセラミクスフィルタの代表仕様

項目	設定値	備考
孔径	1.4μm	MF膜相当の孔径。各粉末吸着材の粒径分布の下限値より，DF100以上の除去率が期待される孔径を選定。
材質	α-Al ₂ O ₃ (セラミクス)	約900kPaまでの耐圧能力。
膜面積	0.35m ² /本	Φ3×37穴タイプ。1本あたりの有効ろ過面積を大きく取るため，チューブタイプではなくマルチホールタイプを選定。
寸法	27mm六角柱×L1020mm	ALPSスラリーの濃縮設備と同様タイプのエレメント形状。

膜面に平行な流れを作ることによって原液中の固形物が膜面に堆積することを抑制しながらろ過を行う

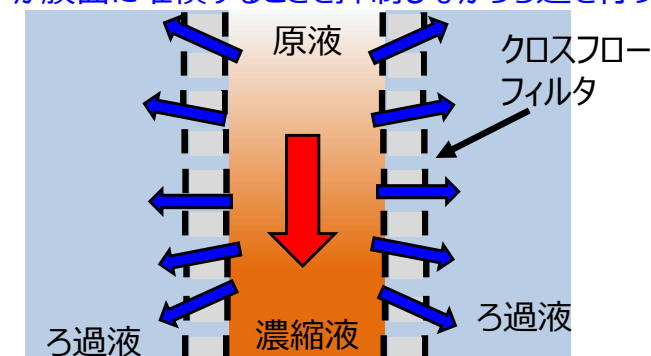


図1 クロスフローフィルタのろ過原理

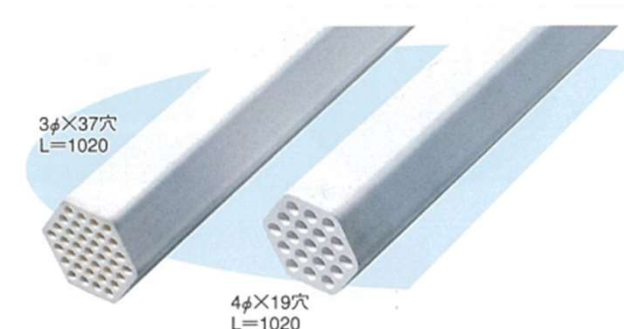


図2 セラミクスフィルタ(マルチホールタイプ)

10. 二次廃棄物処理技術の開発，固形分濃縮技術の要素試験結果（5/7）

Decom.Tech

◆ 10.1 クロスフローフィルタ要素試験

➤ 試験目的・試験概要

- ✓ 2022年の補助事業で抽出した各粉末吸着材の吸着処理液をCF濃縮処理した場合の濃縮性能を測定する※1。
- ✓ 差圧が一定値以上となった場合，逆洗を実施し差圧回復性能等を確認。

➤ 実施事項・成果

- ✓ 本事業にて実施したCFフィルタ試験により，流速2m/sから3.4m/sの範囲では，ケイ砂粒子スラリー，活性炭スラリーおよび酸化鉄スラリーは1回から3回程度のフィルタ逆洗を実施することで，**目標濃縮倍率100倍**を達成できることを確認した。次頁に，試験結果を示す。※2

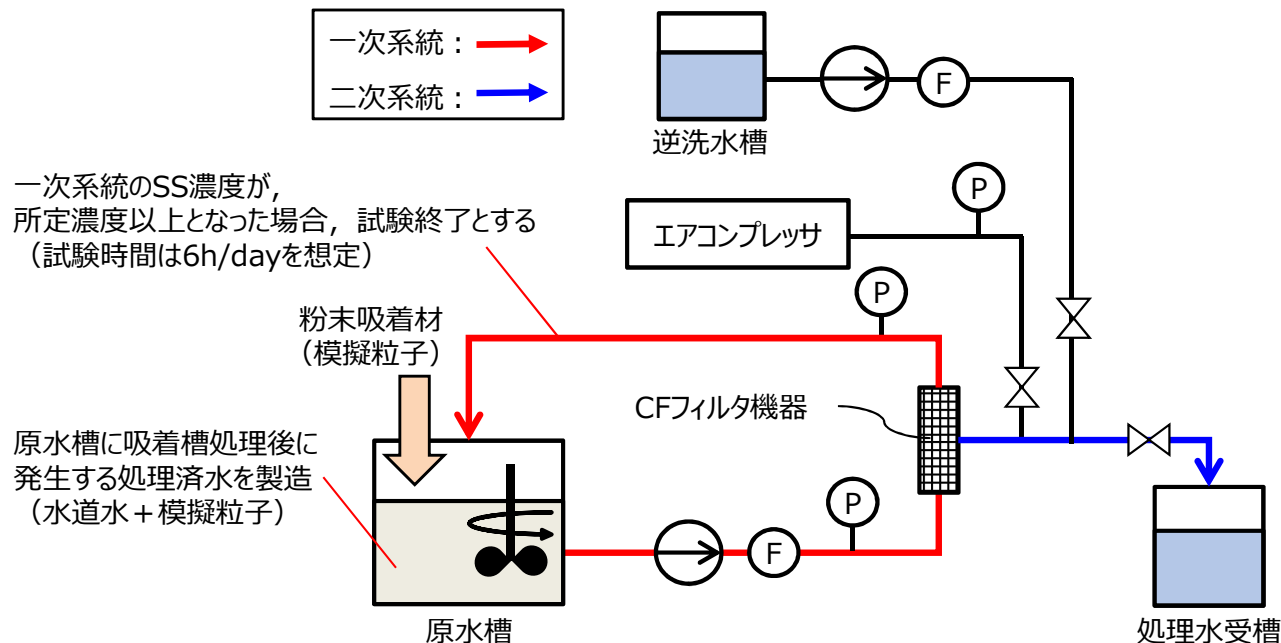


図1 CFフィルタ試験装置 系統構成図



図2 沈殿スラッジの外観

※1 1回の試験で濃縮倍率100倍まで処理すると一次系統内の水量が不足し，一次系統を循環運転できないため，初期SS濃度を基準として濃縮倍率10倍の試験を2回（100倍＝10倍×10倍）実施し，各濃縮処理時間を積分し評価する。

※2 本試験の諸条件表は，補足10.1-1を参照

10. 二次廃棄物処理技術の開発，固形分濃縮技術の要素試験結果（6/7）

Decom.Tech

◆ 10.1 クロスフローフィルタ要素試験

➤ 試験結果

- ✓ 流速2.0m/hから3.4m/hの範囲で，ケイ砂粒子スラリー，活性炭スラリーおよび酸化鉄スラリーの**全ての吸着材スラリーに対し，初期スラリー濃度から目標濃度倍率100倍まで濃縮可能**であることを確認した。（処理時間は40分程度）
- ✓ 流速3.0m/h以下では，目標濃縮倍率達成のため逆洗が必要であることを確認した。
- ✓ 試験結果の詳細は，補足10.1-2参照のこと。

表 試験結果の一部（ケイ砂粒子，流速3.4m/h）

No.	模擬 吸着材	流速 (m/h)	試験結果		通水時間(min) ※	逆洗有無
			低濃度50ppm	高濃度500ppm		
1, 2	ケイ砂 粒子	3.4	目標濃度500ppm 達成	目標濃度5000ppm 達成	トータル35分 【内訳】 低濃度17分 高濃度18分	無し

※ 停止期間を除く試験時間で，低濃度側で目標濃度500ppm，高濃度側で5000ppmを達成した時間

10. 二次廃棄物処理技術の開発，固形分濃縮技術の要素試験結果（7/7）

Decom.Tech

◆ 10.2 現場への適用性の観点における分析

- CFフィルタによる濃縮処理設備を導入し，運用していくにあたり事業者目線で重視すべき項目を抽出し，現場適用性を評価した。

現場適用性の評価（固形分濃縮技術）

凡例：○：良 △：課題あり

No.	評価項目	評価項目（細目）	評価	評価の根拠
1	除去性能	・濃縮倍率，濃縮処理量など性能	○：ケイ砂粒子スラリー，活性炭スラリーに対して目標濃縮倍率100倍の濃縮可能	CFフィルタ要素試験により，ケイ砂粒子スラリー，活性炭スラリーに対し，複数回のフィルタ逆洗を実施することで目標濃縮倍率100倍の濃縮を達成できることを確認した。
2	設備構成	・設備構成 ・設置スペース（規模感）	○：主な設備構成： 吸着材スラリー受けタンク， CFフィルタユニット（逆洗機能付き）， 透過水回収タンク	CFフィルタ試験結果と現地で1日に発生する吸着材スラリー量，設備稼働率に基づきケーススタディを実施し，規模感を評価した。
3	ロバスト性	・処理可能水量 ・処理可能スラリー性状	○：処理可能水量：22m ³ /d以上 ○：処理可能スラリー性状： ケイ砂粒子スラリー，活性炭スラリー 酸化鉄（マグネタイト）スラリー	4項に示すケーススタディにより現実的なフィルタ数で1日に発生する吸着材スラリー量(22m ³ /d)以上の処理が可能であることを確認した。 CFフィルタ通水試験により，流速3.4m/h以上であれば，全ての吸着材スラリーで目標濃縮倍率100倍を逆洗無しで達成できることを確認した。
4	廃棄物	・二次廃棄物発生量 ・二次廃棄物性状	○：二次廃棄物発生量： 0.22m ³ /d以上 二次廃棄物性状： 100倍濃縮スラリー	CFフィルタ通水試験により，全ての吸着材スラリーで目標濃縮倍率100倍を達成できることを確認したため，1日に発生する吸着材スラリー量22m ³ /dの100分の1が実機での二次廃棄物発生量と評価した。また，その性状は上述のことから100倍濃縮スラリーであると言える。
5	メンテナンス性	・メンテナンス方法，頻度 ・交換部品 ・故障時の復旧作業の被ばく	○：メンテナンス対象：フィルタ ○：メンテナンス方法： 水を用いた逆洗手法（頻度は流速に寄る。流速2m/hの場合は1回の処理で最大4回と想定） 交換部品：ろ過モジュール（交換周期は1か月以上1年未満） 故障時の復旧作業被ばく： ろ過モジュール毎交換することで作業被ばくの低減が可能	CFフィルタ通水試験では，水を用いた逆洗や系統洗浄を実施することで同一フィルタ1セットで全ての試験（18ケース＋予備試験）が実施可能であった。（流速毎の逆洗頻度は3項参照） フィルタの交換頻度を検討する上で，今回の試験では使用上限までは確認できなかったが，上述のことからフィルタは少なくとも1か月は使用可能と言える。また，フィルタ交換要因の1つとしてはろ過モジュールで使用するガasketの寿命が挙げられる。一般的なメーカ推奨使用期間は2年～3年であることから，安全側を見て1年をろ過モジュール（フィルタ）の交換周期上限と評価した。作業被ばくについては，装置構成上遠隔作業は困難と考える。ろ過モジュール毎の交換であればフィルタエレメントを直接交換するよりも作業員の被ばく低減が可能であると評価した。

11. 二次廃棄物処理技術の開発，スラッジ脱水技術の要素試験結果（目次）

スラッジ回収システム（脱水技術）の合理化検討に係る試験・検討実施項目を以下構成にて示す。

- 11章における試験対象範囲
- 11章 スラッジ脱水技術の要素試験計画 検討フローと期待される成果
- 本検討の背景，これまで（2022年補助事業）の成果
- 11.1 フィルタ方式によるスラッジ脱水性能の確認試験
 - 11.1.1 カートリッジフィルタ要素試験
 - 11.1.2 バグフィルタ試験
- 11.2 減圧・加熱方式によるスラッジ脱水性能の確認試験
 - 11.2.1 減圧・加熱脱水試験
 - 11.2.2 核種脱離試験
- 11.3 現場への適用性の観点における分析 3つの方式まとめ
 - 11.3.1 カートリッジフィルタを用いる場合の容器充填率の向上方法について
 - 11.3.2 カートリッジフィルタ以外の脱水技術の選定について
 - 11.3.3 今後の課題
- 11.4 二次廃棄物処理システムの構成案（吸着槽方式）

11. 二次系廃棄物処理技術の開発, スラッジ脱水技術の要素試験結果 (1/20) *Decom.Tech*

◆ 11章における試験対象範囲

本事業で想定する全体フロー
(過去のフロー図より, 説明用として作成
システム構成は11.4の成果を参照のこと)

9章にて説明 実液試験準備のため, 要素試験を行う

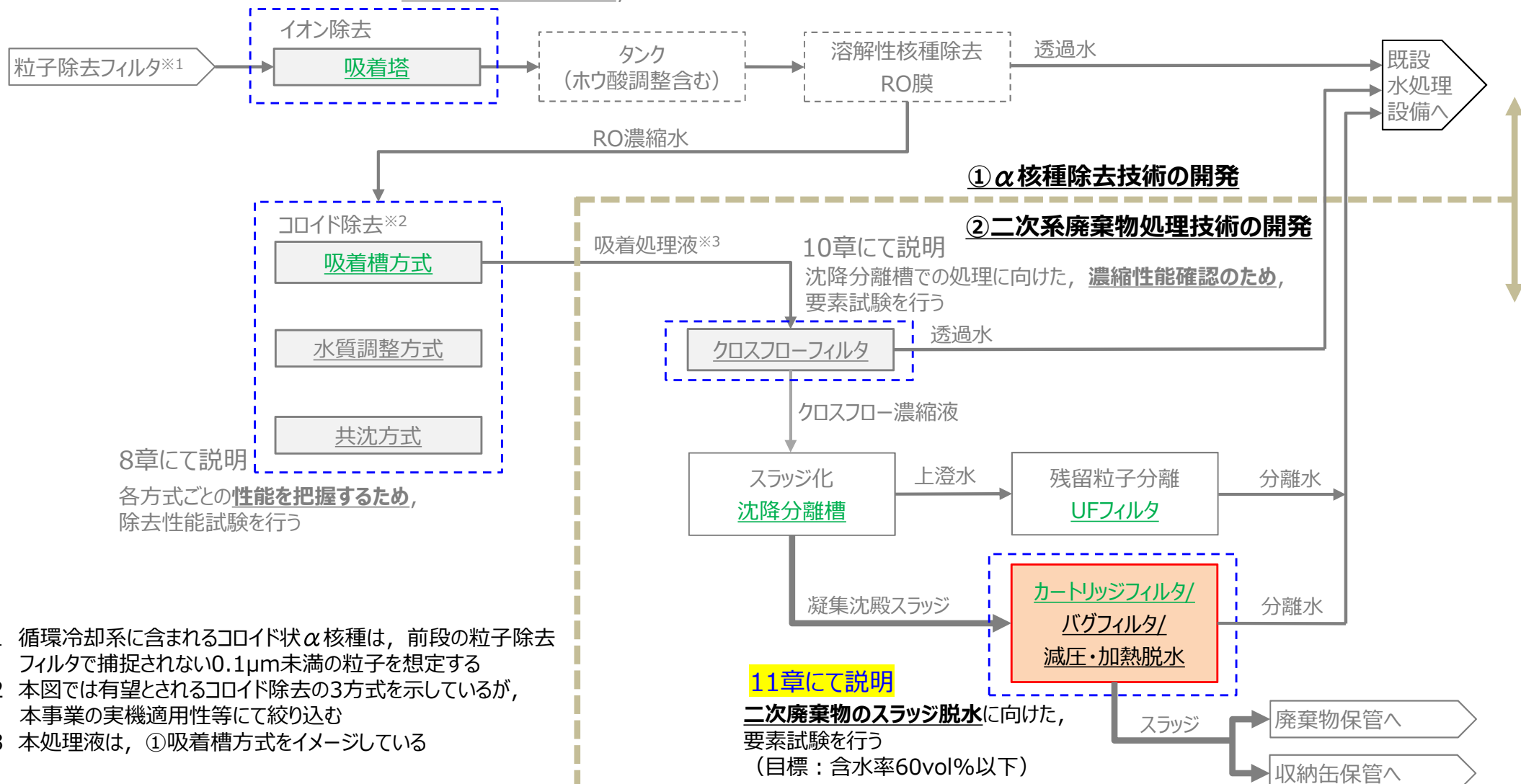


図 燃料デブリ取り出し時の液体処理システム

緑書き: 2022年度補助事業までに開発実績のある設備
青点線: 2023-2024年度補助事業における開発対象設備

- ※1 循環冷却系に含まれるコロイド状α核種は, 前段の粒子除去フィルタで捕捉されない0.1μm未満の粒子を想定する
- ※2 本図では有望とされるコロイド除去の3方式を示しているが, 本事業の実機適用性等にて絞り込む
- ※3 本処理液は, ①吸着槽方式をイメージしている

11. 二次廃棄物処理技術の開発，スラッジ脱水技術の要素試験結果（2/20）

Decom.Tech

◆ 11章 スラッジ脱水技術の要素試験計画 検討フローと期待される成果

- 各実施事項で得られる結果・成果（下図の青字）を検討フローに示す。得られた結果は，下図で関連する項目へのインプット，ないし11.3項の現場への適用性の観点における分析に使用する。



図 スラッジ脱水技術の要素試験計画の流れ

11. 二次廃棄物処理技術の開発，スラッジ脱水技術の要素試験結果（3/20） *Decom.Tech*

◆ 本検討の背景，これまで（2022年補助事業）の成果

➤ スラッジ回収システムの合理化検討が必要

2022年度補助事業では，スラッジ脱水技術としてカートリッジフィルタの適用性を検討した。課題として，スラッジ回収容器のスラッジ充填率を大きくすることが困難であることが明らかとなったため，充填率を向上させるための合理化検討が必要。

✓ カートリッジフィルタ方式

2022年度補助事業にて要素試験を実施した。スラッジ回収容器のスラッジ充填率が低くなることが課題である※1。

→ スラッジ回収容器と装填フィルタエレメントの適正化により，充填率を向上させることを検討

水分除去により空き空間が発生するが，追加でスラッジを投入するとケーキ厚が大きくなるため，ろ過困難となることが課題。

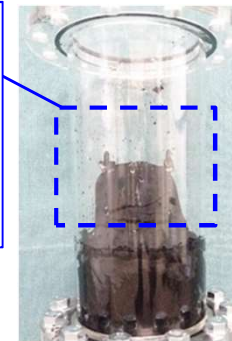


図1 2022年度補助事業
カートリッジフィルタ試験

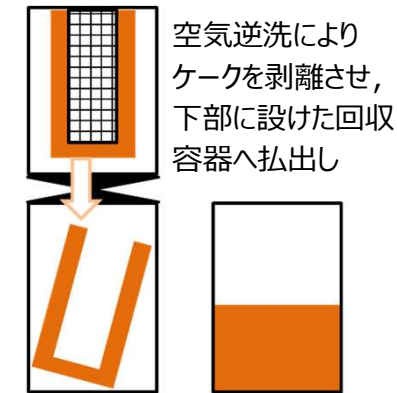


図2 バグフィルタによる脱水方法
(イメージ図)

✓ バグフィルタ方式

2022年度補助事業により優位技術として選定。要素試験は2022年度時点では未実施，適用性評価が必要。空気逆洗によりスラッジを払い出す方式により，充填率を向上させる改善案を検討。

→ 要素試験によりスラッジ脱水性能のデータを取得し，適用性を評価

✓ 減圧・加熱脱水方式

2022年度補助事業では要素試験は未実施であり，適用性評価が必要である。大容量を処理可能な規模の大きな脱水設備は，増設建屋内に設置することが困難であるため，モバイル型の小規模装置を使用することを想定する。処理量は1m³/day以下とする必要があると考えられるため，事前の濃縮処理が必要。

→ 要素試験によりスラッジ脱水性能のデータを取得し，適用性を評価



FIG. 19. In-drum drying unit (courtesy of Diversified Technologies Services).

図3 減圧・加熱脱水装置（既往製品の例※2）

※1 詳細は補足11-1を参照

※2 設置スペース：ドラム缶（200L）×2，規模で3m×3m IAEA, “Mobile Processing Systems for Radioactive Waste Management”, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.8. 2014

11. 二次廃棄物処理技術の開発，スラッジ脱水技術の要素試験結果（4/20）

Decom.Tech

◆ 11.1 フィルタ方式によるスラッジ脱水性能の確認試験

◆ 11.1.1 カートリッジフィルタ要素試験

➤ カートリッジフィルタ試験の目的・概要

- ✓ カートリッジフィルタ試験により，カートリッジフィルタのろ過速度および各運転データを取得。
- ✓ 2022年度補助事業のカートリッジフィルタ試験では，ろ過速度が小さく，目標値を下回ると評価された。
- ✓ ろ過速度が小さい原因と課題（ろ過速度を上げるためにスラッジ充填率を上げるとケーキ厚が適切なサイズを超過し脱水困難，また真空ポンプの出力が小さい事でろ過速度を上げられない※1）が明らかとなったため，本試験では以下の改善案を試みる。

①フィルタエレメントのレイアウト改善

②ろ過圧力の適正化

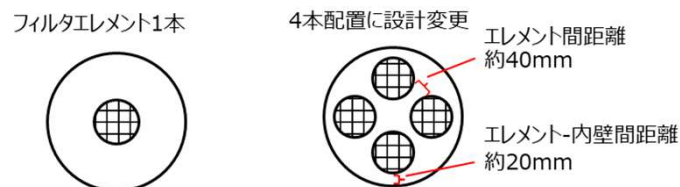


図1 フィルタエレメントのレイアウト適正化

表 ろ過圧力の適正化

項目	前期補助事業 試験条件	今期補助事業試 験条件※2
エレメント数	1本	4本
ろ過圧力	-0.05 Mpa	0.2MPa
ろ過方式	真空ろ過	加圧ろ過

ろ過圧力を大きくできるように，加圧ろ過方式を適用。

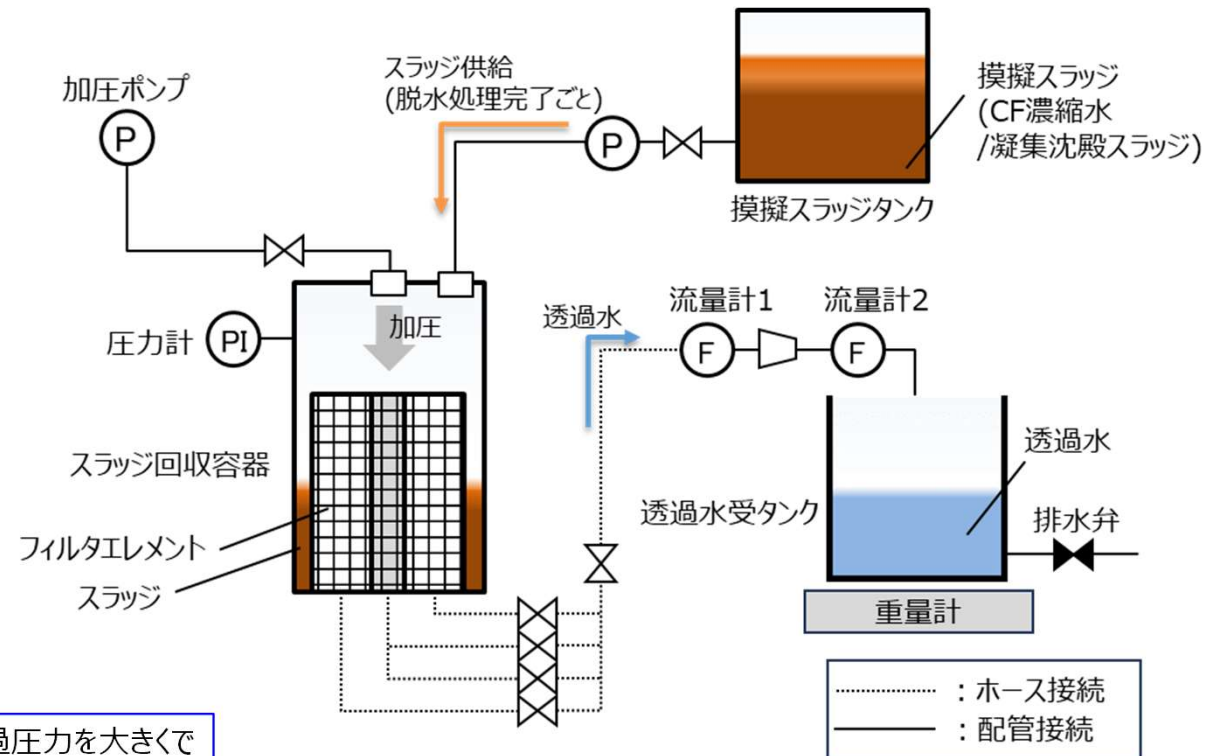


図2 カートリッジフィルタ試験装置※2

※1 補足11.1.1-1，-2の「適正ケーキ厚の評価」，「カートリッジフィルタ装置の改善案」を参照

※2 その他の諸条件表は，補足11.1.1-3を参照。

11. 二次廃棄物処理技術の開発，スラッジ脱水技術の要素試験結果（5/20）

Decom.Tech

◆ 11.1.1 カートリッジフィルタ要素試験

➤ 試験結果

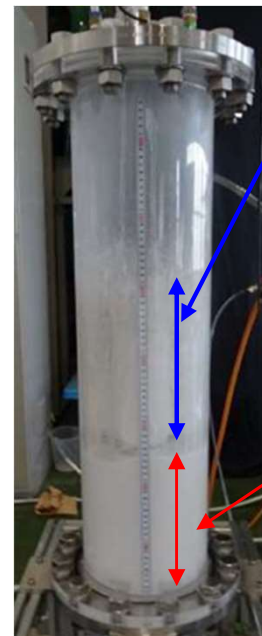
カートリッジフィルタ試験実施中の様子として，各処理サイクル終了時点の試験装置の外観を示す。
下図は試験ケース2-1の代表例である。



(a)1サイクル目



(b)2サイクル目



(c)3サイクル目

フィルタ有効ろ過表面

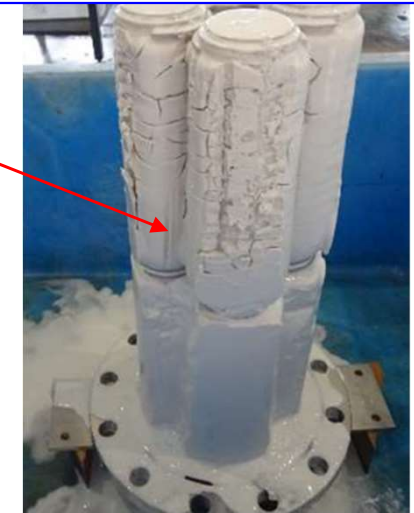
フィルタエレメント表面が底部堆積スラッジより露出している部分。この部分がある場合は，ろ過速度が確保されと考えられる。完全に底部堆積ケーキに埋没した場合は，ろ過速度が著しく遅くなるため，ろ過不可と考えられる。

付着ケーキ

フィルタ表面に付着しているケーキ。形成されている場合でも，ろ過速度への影響は比較的小さい。

底部堆積ケーキ

ろ過処理を重ねるごとに，容器底部に堆積していくケーキ。ろ過速度の低下に影響が大きい。



スラッジ回収容器取り外し後

図 カートリッジフィルタ試験実施中の外観(試験ケース2-1)

- ✓ いずれの試験ケースにおいても，フィルタエレメント表面に付着するケーキ(付着ケーキ)と，スラッジ回収容器の底部へ堆積していくケーキ(底部堆積ケーキ)が確認された。付着ケーキが形成された場合でも，ろ過速度低下の影響は小さいが，底部堆積ケーキは大きくろ過速度を低下させる挙動が確認された。
- ✓ ろ過処理を繰り返し実施した場合でも，フィルタエレメントが底部堆積ケーキに完全に埋没するまではある程度ろ過速度が速い状態が維持されるため，**継続してろ過処理が可能**であることが示された。
- ✓ 実機設計では，可能な限りフィルタエレメントの高さ寸法を大きくし，繰り返しろ過処理した場合においても，フィルタ有効ろ過表面が確保される構造が望ましいと考える。

11. 二次廃棄物処理技術の開発，スラッジ脱水技術の要素試験結果（6/20）

Decom.Tech

◆ 11.1.1 カートリッジフィルタ要素試験

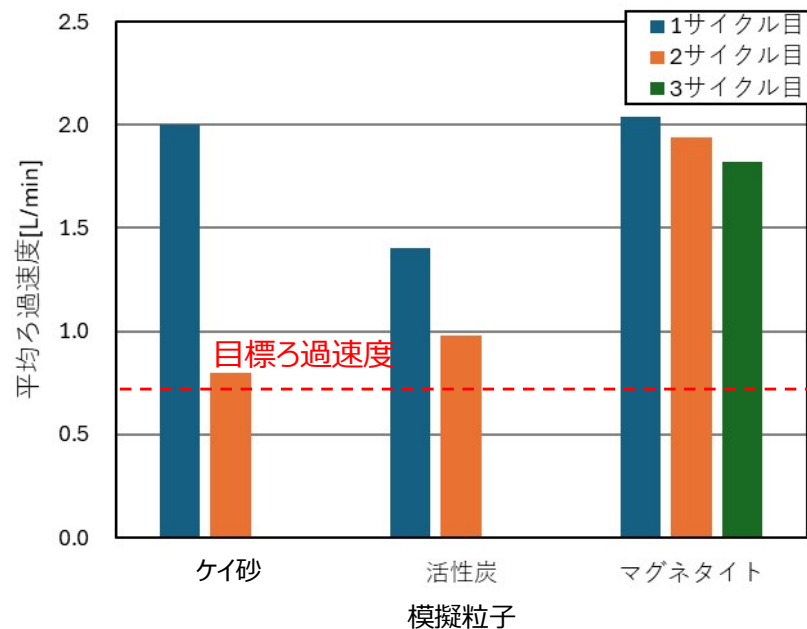
➤ 試験結果

カートリッジフィルタ試験結果のうち，各スラリーを処理した際の平均ろ過速度の評価結果を示す。

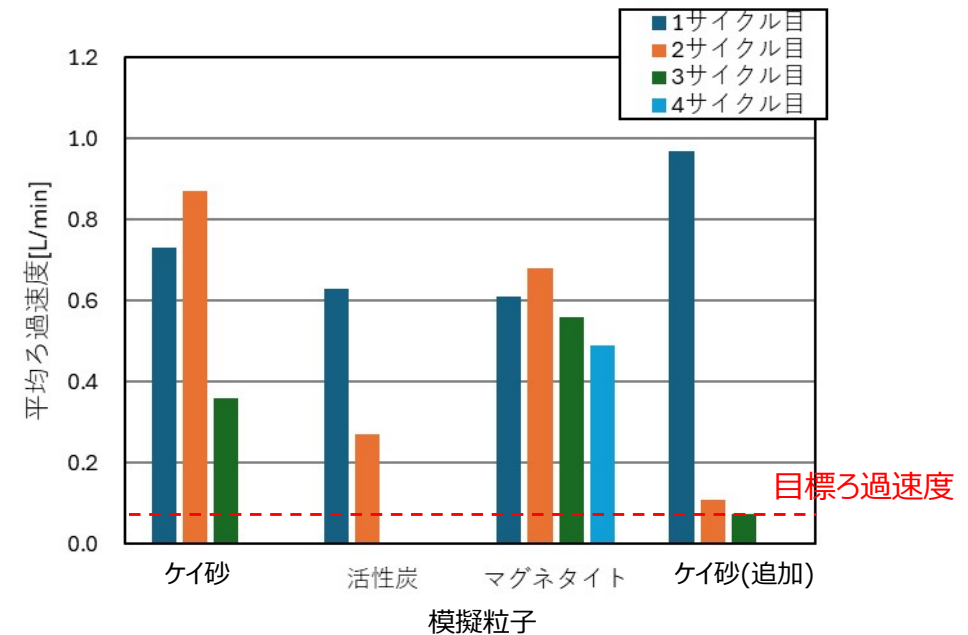
平均ろ過速度目標値

CF濃縮水：40L/h(約0.7L/min)

沈殿スラッジ：4.0L/h(約0.07L/min)



(a)CF濃縮水



(b)沈殿スラッジ

追加で1hのろ過

図 カートリッジフィルタ試験結果 平均ろ過速度

- ✓ CF濃縮水と沈殿スラッジともに，多くの試験ケースでろ過速度の目標値を満足する結果となった。前述のようにフィルタ有効ろ過表面の露出がある状態であれば，概ね目標値を満足するろ過速度が得られると期待される。
- ✓ 凝集沈殿処理を実施し，沈殿スラッジ化した場合でも，大きなろ過速度の減少が見られない。このことから，凝集沈殿処理設備の運用負荷および処理時間が大きくない場合，凝集沈殿処理は実施することが望ましいと考える。ただし，システム全体の運用負荷を考慮し，検討する必要がある。
- ✓ 特に活性炭とマグネタイトは，ケーキ化した場合も水分の透過性が良好であり，ろ過速度が速く，カートリッジフィルタ等のフィルトレーション方式と相性が良好であると考えられる。

11. 二次廃棄物処理技術の開発，スラッジ脱水技術の要素試験結果（7/20）

Decom.Tech

◆ 11.1.1 カートリッジフィルタ要素試験

➤ 試験結果

カートリッジフィルタ試験結果のうち，各スラリーを処理した際のスラッジ含水率とSS濃度の評価結果を示す。
なお，スラッジ含水率は60vol%を目標値として設定した。

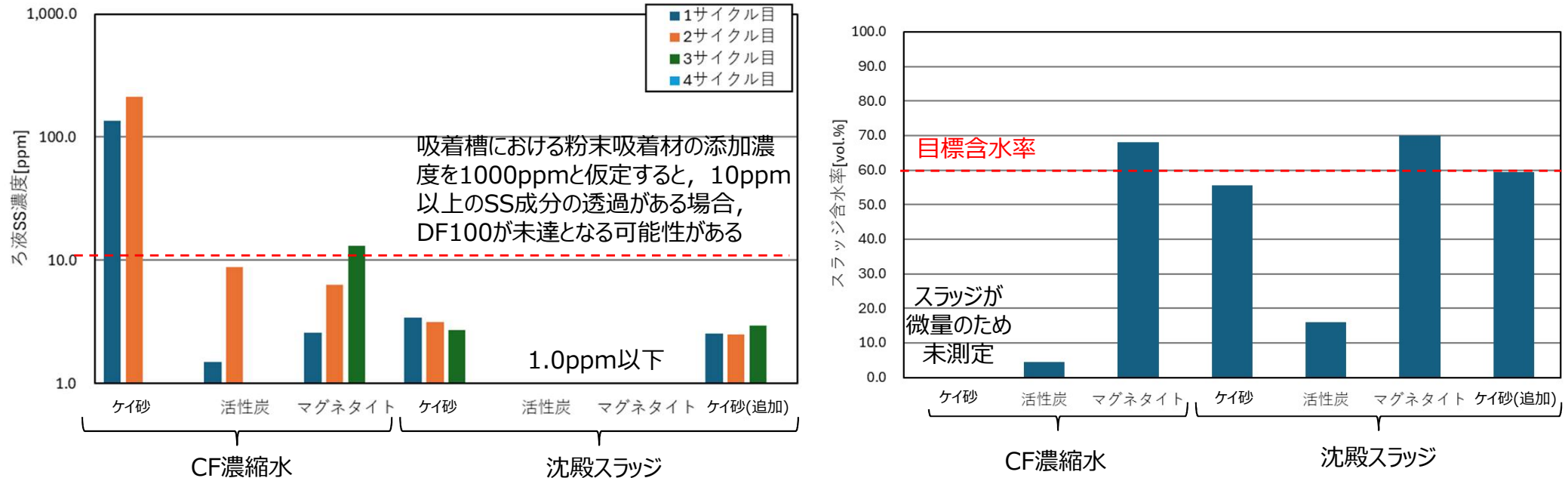


図 カートリッジフィルタ試験結果 ろ液SS濃度，スラッジ含水率

- ✓ 試験ケース全体の傾向として，2次側へ透過するSS量はCF濃縮水は大きく，沈殿スラッジは小さいことが確認された。
- ✓ 特に，ケイ砂模擬粒子を使用した試験では，SS濃度100ppm以上のSS成分の透過が見られた。しかし，凝集沈殿処理を実施した場合，数ppmオーダーまで低下したため，凝集沈殿処理の必要性が高いと考えられる。
- ✓ 活性炭およびマグネタイト粒子では，凝集沈殿処理を実施しない場合でも，ほとんどの試験ケースで2次側へ透過するSS量はSS濃度10ppm以下であった。
- ✓ スラッジ含水率について，目標値60vol%は満足せず約70vol%となる試験ケースが数ケース確認された（上図，右）が，概ね目標値を満足する結果が得られたと考える。特に活性炭については，含水率が20vol%以下となるまで脱水可能であり，カートリッジフィルタろ過方式の適用性が高い可能性が示唆された。

11. 二次廃棄物処理技術の開発，スラッジ脱水技術の要素試験結果（8/20）

Decom.Tech

◆ 11.1.1 カートリッジフィルタ要素試験

➤ 試験結果

カートリッジフィルタ試験結果より得られた，スラッジ充填率に関する考察を示す。

- ✓ 前述の考察の通り，フィルタエレメントがケーキに埋没するまではろ過処理が可能であると想定され，図1のイメージの通りのろ過プロセスとなる。
- ✓ 代表的な試験結果では，試験ケース1-2(活性炭,凝集剤無添加)ではスラッジ充填率が46.5%，試験ケース2-2(活性炭,凝集剤添加)ではスラッジ充填率が58.1%であった。今回の試験体系では，概ね45～60%程度までスラッジ充填率を向上させることが可能である結果を得た。

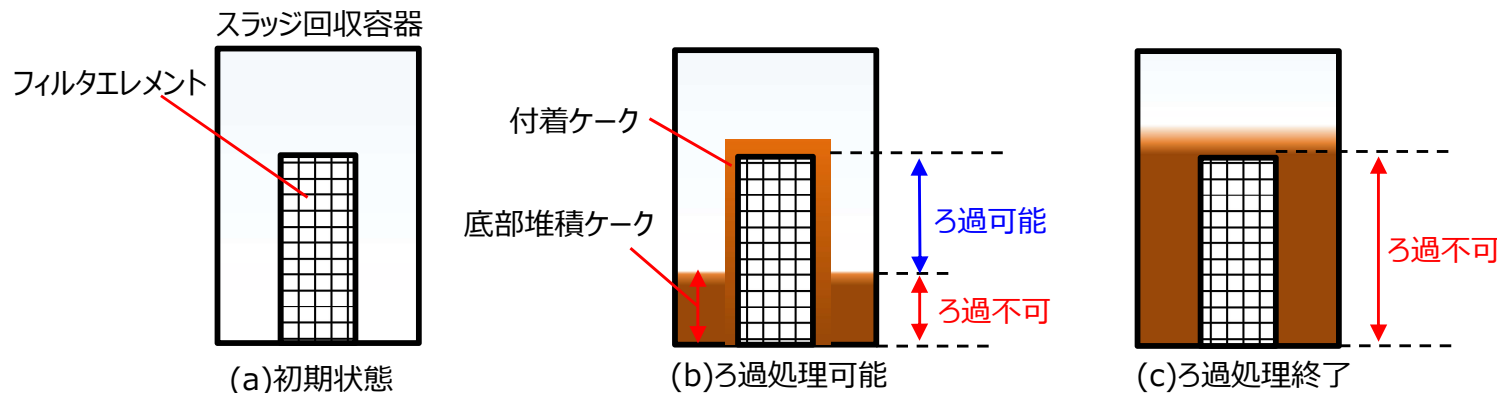


図1 カートリッジフィルタ方式のろ過処理イメージ

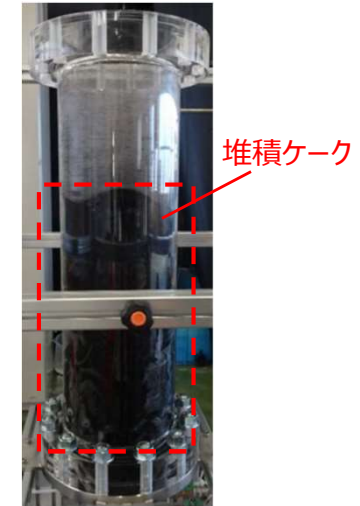


図2 活性炭粒子を使用した試験におけるフィルタエレメントがケーキに埋没した状態（試験ケース1-2;試験終了時点）

➤ スラッジ充填率向上のための改善案

- ① フィルタエレメントの径方向寸法を小さくし，設置本数を増設する。
→フィルタ内部のデッドスペースが小さくなり，スラッジ充填率が向上すると期待される。
- ② フィルタエレメントの長さ方向寸法を大きくし，ろ過処理可能な状態を長く維持する。
→容器上部のデッドスペースが小さくなり，スラッジ充填率が向上すると期待される。

➡ 改善案①は小径の既製品が限られるため，特注品が必要になる可能性が高い。
よりスラッジ充填率の向上の効果が大きく，現実的な改善案として改善案②が適用性が高いと考える。

11. 二次廃棄物処理技術の開発，スラッジ脱水技術の要素試験結果（9/20）

Decom.Tech

◆ 11.1.2 バグフィルタ試験

➤ バグフィルタ試験の目的・概要

- ✓ フィルタ試験により，バグフィルタの性能評価および各運転データを取得。
- ✓ 吸着処理水/CF濃縮水をバグフィルタでろ過処理し，所定の処理流量を満足しケーキ形成可能かを評価。※1

※1 本試験の諸条件表は補足11.1.2-1を参照。

➤ 実施事項・成果

- ✓ バグフィルタ試験にて所定流量におけるプレコート処理およびスラリーろ過処理により，CF濃縮水を模擬した吸着材スラリーのケーキを形成可能（また，含水率結果から減容効果を確認）。
- ✓ 吸着処理水を模擬した吸着材スラリーではケイ砂粒子スラリーのみケーキを形成をしたが，吸着材回収量はCF濃縮水の10分の1程度であるため，**バグフィルタによる脱水処理にはCF濃縮処理が必要**。

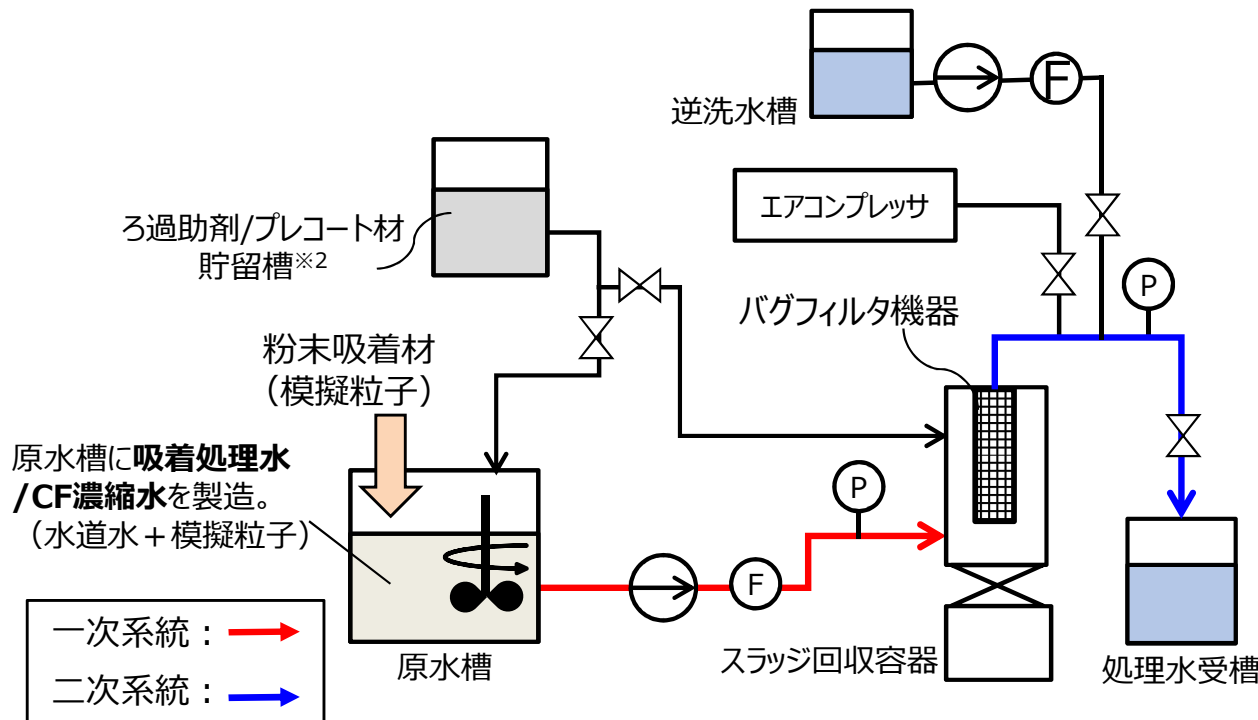


図1 バグフィルタ試験装置 系統構成図

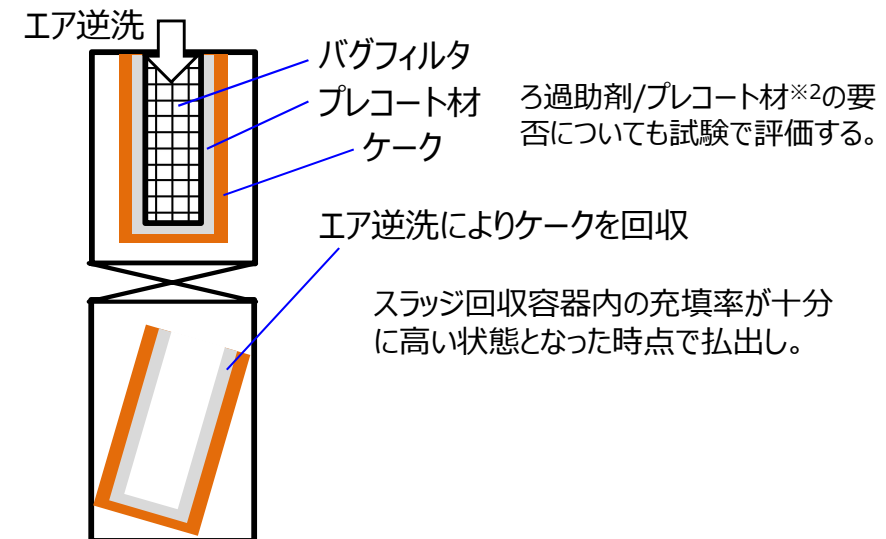


図2 ケーキ回収 イメージ図

※2 ろ過助剤/プレコート材：いずれも粒子状の珪藻土
ろ過助剤：処理対象水と混合させ、通水時のろ過性を向上させる
プレコート材：通水前に予めフィルタにコーティングし、通水時のろ過性、逆洗時のケーキの剥離性を向上させる

11. 二次廃棄物処理技術の開発，スラッジ脱水技術の要素試験結果（10/20） *Decom.Tech*

◆ 11.1.2 バグフィルタ試験

➤ 試験結果

- ✓ CF濃縮水を想定した吸着材スラリーは，**プレコート材およびろ過助剤を添加することで固体としてケーキが回収可能**であること，含水率の結果から脱水効果および減容化効果を確認した。（補足11.1.2-1の（7/9）以降を参照。）

表 バグフィルタ試験結果（CF濃縮水）

吸着材			プレコート (g)	ろ過助剤 (g)	全量固形物量(g)			ケーキ情報							ケーキ外観
種類	一次系統 の濃度 (ppm)	添加量 (g)			試験前	回収 直後	乾燥後	ケーキ 回収率 (%)	ケーキ 含水率 (wt%) (vol%)	ケーキ厚さ(mm)			吸着材 割合	吸着材 としての 回収率	
										スラッジ層	プレコート				
											2層目	1層目			
ケイ砂粒子	5000	500	324	500 (吸着材 等量)	1324	353	172	13%	51wt% (67vol%)	3.0	2.0	0.5	27%	9%	
活性炭	20000	2000	324	2000 (吸着材 等量)	4324	781	546	13%	30wt% (20vol%)	21.5	3.0	0.0	44%	12%	
マグネタイト	100000	10000	324	10000 (吸着材 等量)	20324	5273	5053	25%	4wt% (21vol%)	20.0	1.5	1.5	43%	22%	

11. 二次廃棄物処理技術の開発, スラッジ脱水技術の要素試験結果 (11/20) *Decom.Tech*

◆ 11.1.2 バグフィルタ試験

➤ 試験結果

- ✓ 吸着処理水を模擬した吸着材スラリーのうちケーキを形成をしたのはケイ砂粒子スラリーのみ, 活性炭スラリーおよびマグネタイトスラリーはケーキ形成不可であることを確認した。

表 バグフィルタ試験結果 (吸着処理水)

No.	吸着材			プレコート材(g)		ろ過助剤 (g)	全量固形物量(g)			ケーキ情報							
	種類	濃度 (ppm)	添加量 (g)	# 100	# 800		試験前	回収 直後	乾燥後	ケーキ 回収率 (%)	ケーキ 含水率 (wt%) (vol%)	ケーキ厚さ(mm)			吸着材 割合	吸着材 としての 回収率	ケーキ外観
												スラッジ層	プレコート				
													2層目	1層目			
1	ケイ砂 粒子	50	30	162	162	30 (吸着材 等量)	354	304	228	59%	25wt% (40vol%)	0.1	3	3	2%	12.5%	
7	活性炭	200	1200	162	162	1200 (吸着材 等量)	1524	302	101	4% (固体として 回収不可)	67wt% (55vol%)	測定不可	測定 不可	測定 不可	評価 不可	評価不可	
13	マグネ タイト	1000	800	162	162	800 (吸着材 等量)	324	189	167	2% (固体として 回収不可)	12wt% (41vol%)	測定不可	測定 不可	測定 不可	評価 不可	評価不可	

11. 二次廃棄物処理技術の開発, スラッジ脱水技術の要素試験結果 (12/20) *Decom.Tech*

◆ 11.2 減圧・加熱方式によるスラッジ脱水性能の確認試験

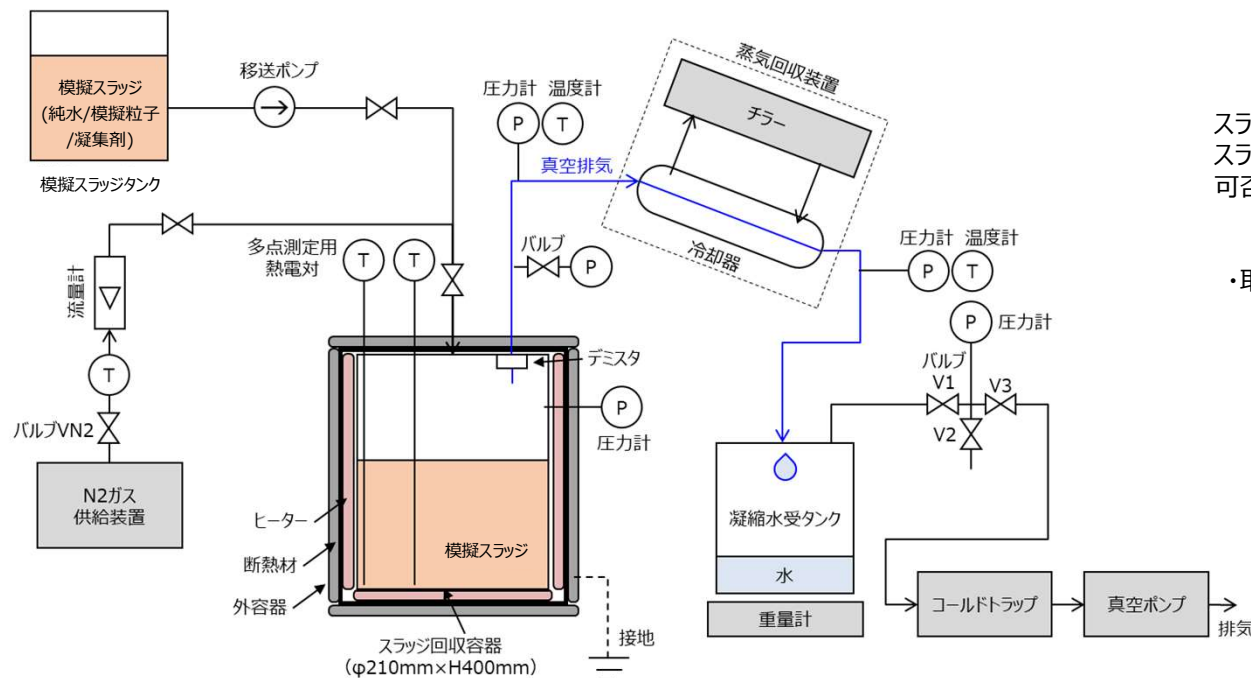
◆ 11.2.1 減圧・加熱脱水試験

➤ 減圧・加熱脱水方式によるスラッジ脱水試験の目的・概要

- ✓ 減圧・加熱脱水試験により, 減圧・加熱脱水方式の性能評価および各運転データを取得。
- ✓ 模擬スラリー/スラッジ (CF濃縮水/沈殿スラッジ) を使用し, 適切に脱水処理が可能かを検証。
- ✓ 加熱処理による核種の脱着の有無についても核種脱離試験により検証。
⇒ 試験の結果, 加熱温度100℃までは核種の脱離現象が促進される挙動は確認されず。
(詳細は11.2.2を参照。)

➤ 実施事項・成果

- ✓ 2023年度はラボスケールの小規模試験ならびに装置規模試験を実施し, 要素試験に向けたパラメータサーバイを実施。2024年度後半から本試験実施。(本試験の諸条件表は補足11.2.1-1 を参照)



スラッジ供給と脱水操作を繰り返し実施。
スラッジ充填率が高い状態での払出しの
可否について検証。

・取得データ例

脱水後スラッジ
含水率, スラッジ充填率

凝縮水
脱水速度, 必要熱量, SS移行率

図 減圧・加熱脱水試験装置 構成図

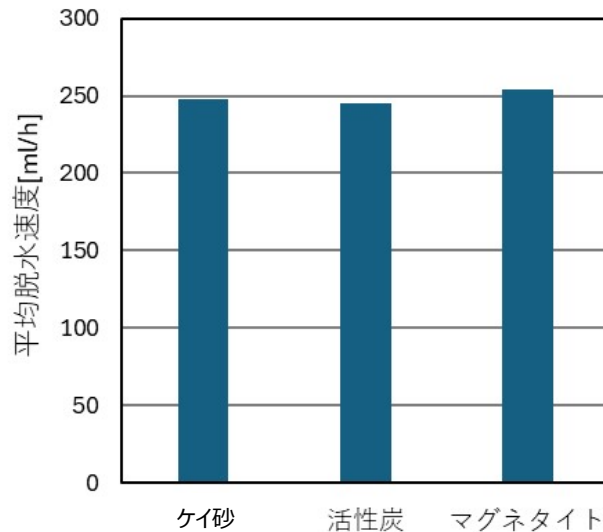
11. 二次廃棄物処理技術の開発，スラッジ脱水技術の要素試験結果（13/20） *Decom.Tech*

◆ 11.2.1 減圧・加熱脱水試験

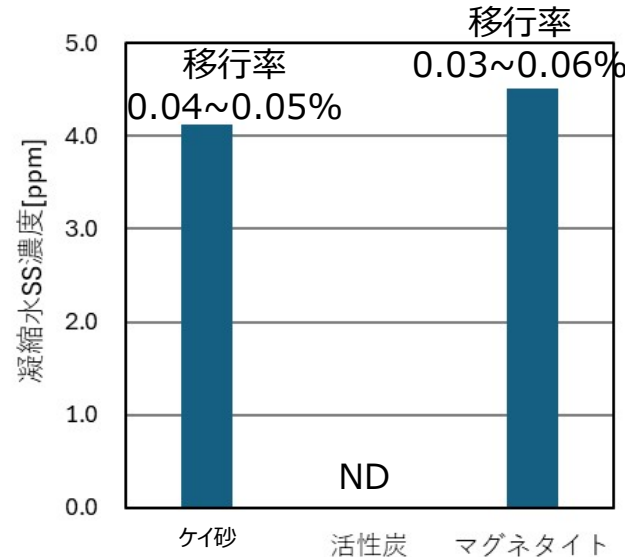
➤ 減圧・加熱脱水方式によるスラッジ脱水試験 試験結果

減圧・加熱脱水試験結果のうち，代表的なパラメータの測定結果を示す。

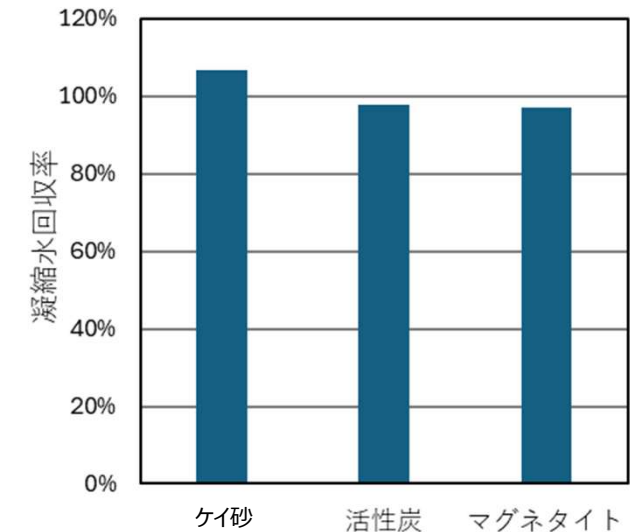
平均脱水速度目標値
沈殿スラッジ：4.0L/h



(a)平均脱水速度



(b)ろ液SS濃度



(c)凝縮水回収率

図 減圧・加熱脱水試験結果 測定結果代表例

- ✓ 平均脱水速度は約250ml/hであり，模擬粒子による依存性は見られなかった。減圧・加熱脱水設備では，沈殿スラッジを処理することを検討しており，必要な脱水速度は約4.0L/hと試算されており，目標値を満足しない結果となった。
- ✓ 実機システムにおいて減圧・加熱脱水方式を適用する場合，10～20程度の多系統化や，前段の濃縮処理設備の濃縮倍率をより大きくすることなどが必要である。
- ✓ 2次側に移行するSS成分は0.1%以下と評価された。吸着槽設備での粉末吸着材の投入濃度を1000ppmと仮定した場合，除去目標値DF100は満足すると考えられる。
- ✓ 凝縮水の回収率はほぼすべての試験ケースで95%以上であった。高い回収率が得られたと考えられるが，数%の蒸気はシステム外に排出されてしまうため，許容値について評価が必要である。

11. 二次廃棄物処理技術の開発，スラッジ脱水技術の要素試験結果（14/20） *Decom.Tech*

◆ 11.2.1 減圧・加熱脱水試験

➤ 減圧・加熱脱水方式によるスラッジ脱水試験 試験結果

減圧・加熱脱水試験結果のうち，ケイ砂粒子を使用した沈殿スラッジ(試験ケース2-1)の試験ケースを示す。
なお，初期投入量に対して十分な量の凝縮水が回収された時点で試験は終了とした。

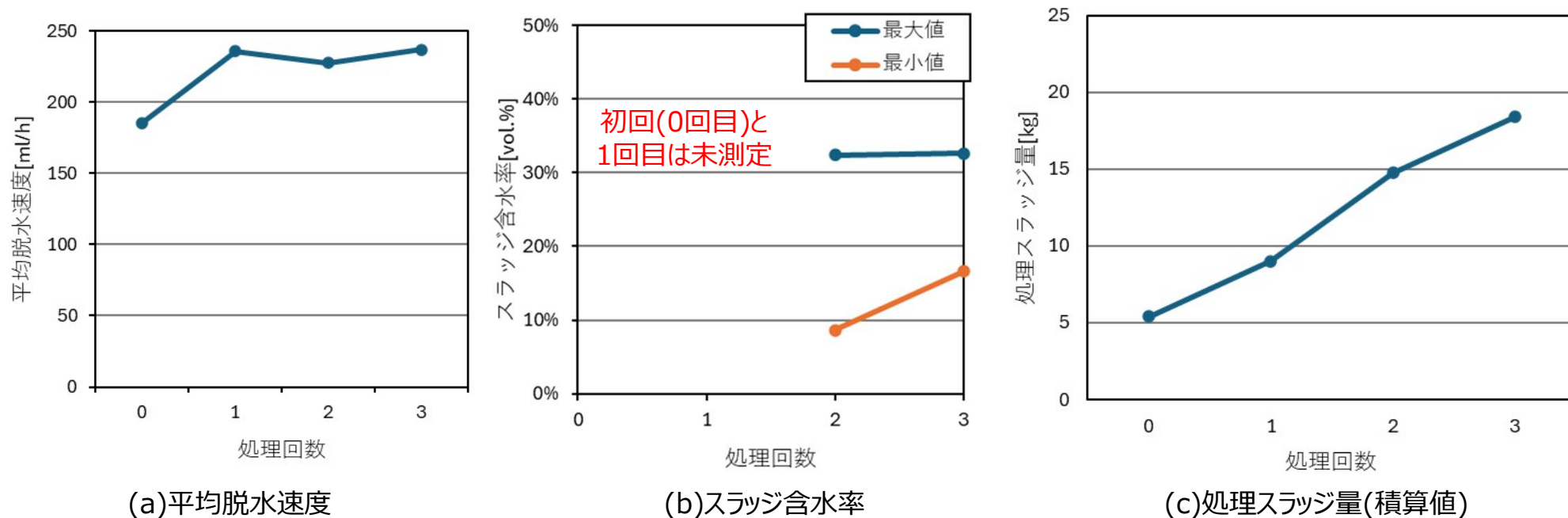


図 減圧・加熱脱水試験結果 測定結果代表例

- ✓ 平均脱水速度は前ページの試験結果(試験ケース1-1～1-3)と同様に約250ml/hであった。
- ✓ スラッジ含水率はサンプリング箇所によってばらつきがあるが，10～30vol%の範囲であり，目標値60vol%を満足する結果であった。今回は初期投入したスラッジ量に対して十分に脱水したと判断した時点で試験終了としたが，より低含水率まで脱水は可能と考える。
- ✓ 処理スラッジ量は，4回目処理終了までの積算値が約19kg(L)であり，1day分の処理スラッジ量22Lを処理するには，5回程度の繰り返しが必要である。また，4回目処理終了時点でのスラッジ充填率が約20%であり，1day分処理した際のスラッジ充填率は約25%になると想定される。

11. 二次廃棄物処理技術の開発, スラッジ脱水技術の要素試験結果 (15/20) *Decom.Tech*

◆ 11.2.2 核種脱離試験

➤ 加熱処理による核種脱離試験の目的・概要

高温の水溶液中で吸着された核種の脱離現象が発生するかを検証（下図）。
吸着材の加熱振とう試験により、吸着された核種の脱離現象が発生するかを評価した。

➤ 減圧・加熱脱水技術に関する課題

減圧・加熱脱水処理時に、吸着材に吸着された核種が脱離する懸念があり、本試験により適切な加熱温度を評価。

➤ 実施事項・成果

本試験実施の結果、いずれの核種でも加熱温度100℃まで核種の脱離現象が促進される挙動は確認されず。

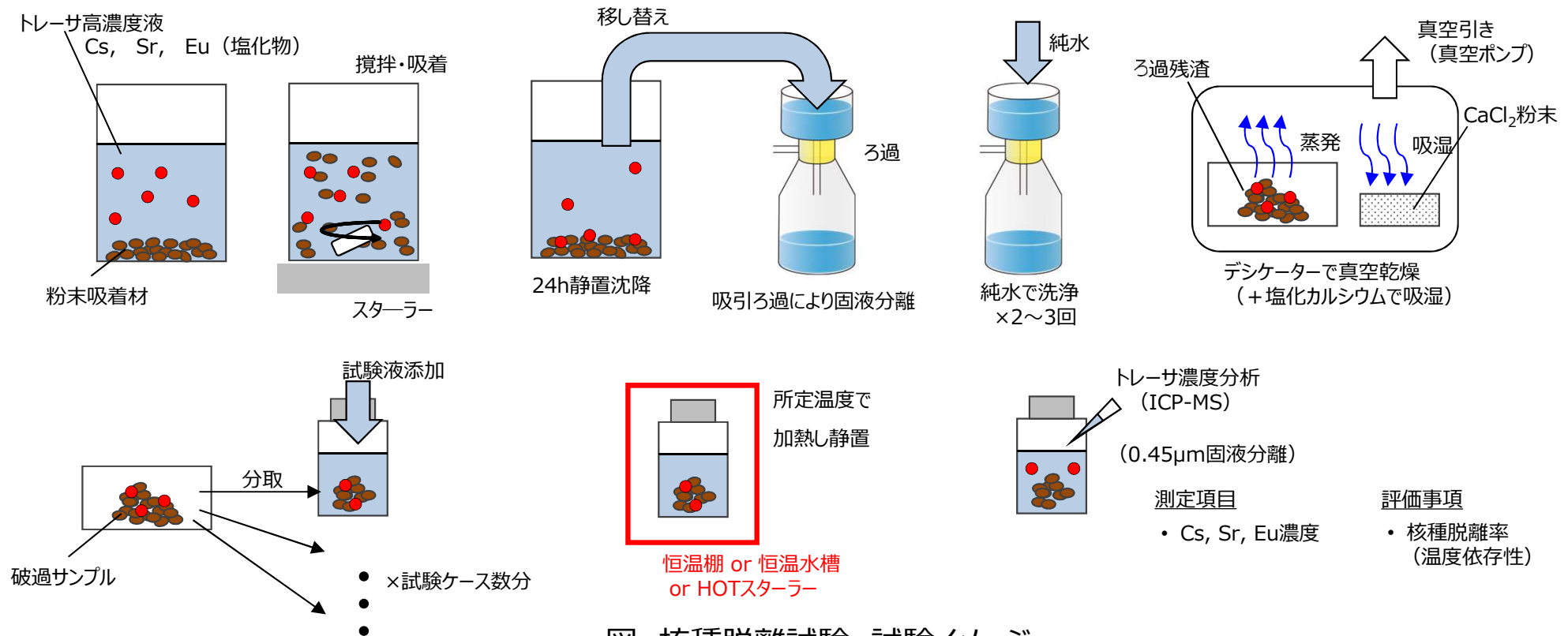


図 核種脱離試験 試験イメージ

11. 二次廃棄物処理技術の開発，スラッジ脱水技術の要素試験結果（16/20） *Decom.Tech*

◆ 11.3 現場への適用性の観点における分析 3つの方式まとめ

- スラッジ脱水技術の現場適用性の評価方針として，液体処理設備を導入し，運用していくにあたり事業者目線で重視すべき項目を抽出し，脱水技術毎に評価した。

現場適用性の評価（各脱水方式）

評価結果の凡例

○：目標達成見込有，△：課題有も想定範囲，×：目標未達

No.	評価項目	評価項目（細目）	カートリッジフィルタ方式	バグフィルタ方式	減圧・加熱脱水方式	備考
1	脱水性能	①スラッジ脱水性能 ②脱水速度性能	○：①DF1000以上 (チタン酸等のCF濃縮水を処理する場合は低い) ○：②CF濃縮水:2.0～0.7L/min, 沈殿スラッジ:1.0～0.1L/min	○：①DF1000以上 ○：②1.0m ³ /h(十分なる過面積が確保される場合)	○：①DF1000以上 ×：②250ml/h	いずれも2次側への透過SS濃度は数ppmオーダー，もしくはそれ以下と想定
2	設備構成	・設備構成（規模感）	○：小規模	○：小～中規模	×：大規模	
3	ロバスト性	①処理可能水量 ②処理可能スラッジ性状	○：①高い △：②中	○：①高い △：②中	×：①低い ○：②高い	フィルトレーション方式は設備規模を大きくすることにより，処理水量におけるロバスト性を確保することが可能。減圧・加熱脱水方式は，脱水速度がスラッジ性状に依存しないため，スラッジに対してロバスト性を確保することが可能
4	廃棄物	①二次廃棄物発生量 ②二次廃棄物性状	△：①中(充填率約50%) △：②含水率70vol%以下 α核種濃度 1.0E+06～07Bq/L	△：①中(高充填率;ただしろ過助剤等により増大) ○：②含水率40vol%以下 α核種濃度 1.0E+06～07Bq/L	○：①小さい(充填率は高い) ○：②含水率30vol%以下 α核種濃度 1.0E+06～07Bq/L	スラッジ中のα核種含有濃度は，初期α核種濃度を10Bq/mlと仮定した場合の試算結果。
5	メンテナンス性	・メンテナンス方法，頻度 ・交換部品 ・故障時の復旧作業の被ばく	○：定期的な系統洗浄	○：定期的な系統洗浄	○：定期的な系統洗浄 ・シーリング材，ヒーター機器等の寿命交換	現時点（要素試験段階）では顕著な問題は無いが，今後マテハン検討は必要。
評価			○：見込有	○：見込有	×：見込無	

11. 二次廃棄物処理技術の開発，スラッジ脱水技術の要素試験結果（17/20） *Decom.Tech*

◆ 11.3.1 カートリッジフィルタを用いる場合の容器充填率の向上方法について

- カートリッジフィルタによるスラッジ脱水方式を適用することにより，CF濃縮水や沈殿スラッジの減容化を図り，回収容器への充填率を向上させることが可能である。
- 1dayの処理水量を処理した場合，ユニット缶サイズのスラッジ回収容器1本分までの減容化が可能である。なお，その際のスラッジ充填率は約50%と評価した。

◆ 11.3.2 カートリッジフィルタ以外の脱水技術の選定について

- バグフィルタおよび逆洗によるスラッジ脱水方式を適用することにより，CF濃縮水の減容化を図り，回収容器への充填率を向上させることが可能である。
- 1dayの処理水量を処理した場合，ユニット缶サイズのスラッジ回収容器2本分までの減容化が可能である。なお，バグフィルタ方式はスラッジ回収容器側の自由度が大きいいため，スラッジ充填率は50%以上とすることが可能である。
- 減圧・加熱脱水方式によるスラッジ脱水は，脱水速度が目標値と比較して遅く，減容化処理およびスラッジ充填率の向上を図ることは困難である。

11. 二次廃棄物処理技術の開発，スラッジ脱水技術の要素試験結果（18/20） *Decom.Tech*

◆ 11.3.3 今後の課題

No.	分類	実機適用に向けて残された課題	今後の課題解決方針
1	スラッジ回収容器	スラッジ回収容器の形状について，運用の簡易化，長期保管等の観点から適正化を図る必要	他分野（移送・保管分野）と連携のうえ容器形状共通化等の検討をすすめる。
2	スラッジ回収容器	バグフィルタ方式において，スラッジ回収容器の取り換えや払出し等のハンドリングについて検討が必要	基本的には収納缶保管ラインと同様のハンドリングでスラッジ回収容器を取扱うことを想定
3	減圧・加熱脱水方式	減圧・加熱脱水方式の適用性を向上させるための検討が必要。	多系統化による脱水速度の向上，事前の濃縮処理の濃縮倍率の向上による処理水量の低減等が候補。
4	減圧・加熱脱水方式	スラッジ回収容器の取り換えや払出し等のハンドリングについて検討が必要	基本的には収納缶保管ラインと同様のハンドリングでスラッジ回収容器を取り扱うことを想定する。本方式の場合はスループットの観点の評価に付随して実機導入までの解決見込み有無を検討する必要がある。

11. 二次廃棄物処理技術の開発，スラッジ脱水技術の要素試験結果（19/20） *Decom.Tech*

◆ 11.4 二次廃棄物処理システムの構成案（吸着槽方式）

➤ α核種コロイド除去システム検討フロー

- ✓ 想定される水質条件および処理要件に応じて，除去対象であるコロイド状α核種およびイオン状α核種を適切に除去可能であると考えられる処理システムを検討した。
- ✓ 本来は前段のα核種コロイド除去システム(8章：吸着槽or共沈)が確立されてから，後段であるスラッジ脱水技術構成案を検討する必要があるが，今回は吸着槽ではほぼ全ての想定水質条件において分配係数 $1.0E+05\text{ml/g}$ 以上を確認した鉄系の粉状吸着材のパターンを想定した（鉄系吸着材の選定過程は補足11.4-1参照）。
- ✓ 他の手順案については補足11.4-2を参照。

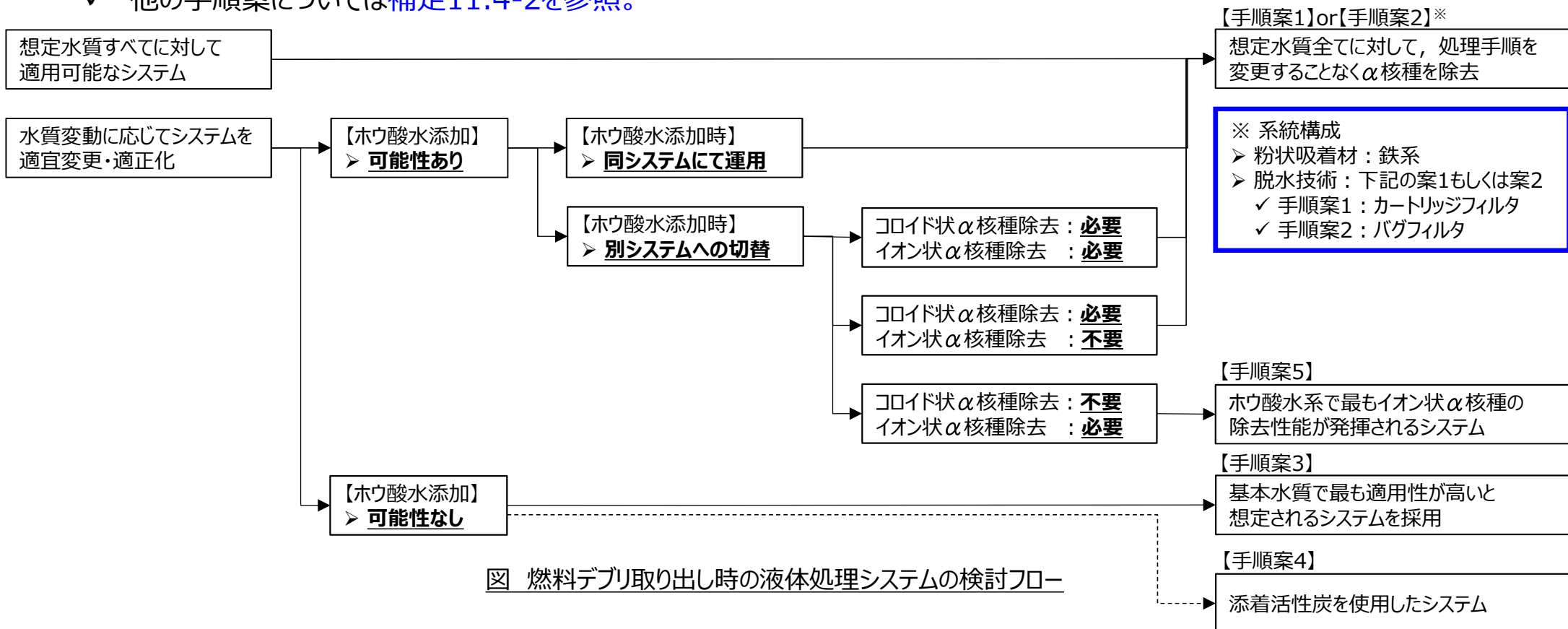


図 燃料デブリ取り出し時の液体処理システムの検討フロー

➤ **α 核種コロイド除去手順案(1.カートリッジフィルタ採用案 2.バグフィルタ採用案)**

※ 案2：バグフィルタも適用候補

- ほぼ全ての想定水質条件において、分配係数 $1.0E+05\text{ml/g}$ 以上を確認。
DF100相当の除去性能を発揮するには、 1000ppm の添加濃度が必要



12. まとめ（1/2）

◆ 12. まとめ

➤ ① α 核種除去技術の開発

①-a：滞留水分析結果に基づいた実機想定水質を設定し，コロイド試薬と α 核種トレーサを主成分とする擬似コロイドが安定的に存在する α 核種コロイド試験液を調製した。また，コロイド除去試験（吸着槽方式，共沈方式，水質調整方式）を実施し，目標性能を得られる除去方式を抽出し選定した。また，各々の試験結果に基づき α 核種除去システムの系統構成案を導出した。

①-b：吸着塔通水時の性能評価試験の計画策定に必要な，少量の試験液から吸着材の通水性能を評価する代替案の試験，候補吸着材の絞り込みに関する試験を実施。また，1Fで採取した実液サンプルを用いた試験を実施。各々の試験結果に基づきミニカラム通水試験と，バッチ試験＋解析評価の2案について次段階の実液試験計画を策定した。

今回の補助事業によって， α 核種コロイドの生成の可能性がある事が模擬試験液の調製等から確認され，イオン状 α 核種を含め，現在の滞留水中の α 核種濃度に対して基準値(DF100)を満足するような除去方法を確認した。今後の段階的な燃料デブリ取り出しの規模拡大時に滞留水中に移行する α 核種濃度がどの程度変動するか確認のうえ，本成果活用の必要性を判断する。

12. まとめ（2/2）

◆ 12. まとめ

➤ ② 二次廃棄物処理技術の開発

②-a：粉状吸着材による α 核種吸着処理後に発生する，処理水の固形分濃縮に用いるクロスフローフィルタの要素試験を実施し目標の濃縮倍率達成を確認した。試験結果に基づきクロスフローフィルタ候補を選定した。

②-b：3つの脱水方式ごとに脱水技術の要素試験を実施した。カートリッジフィルタ方式においては容器充填率の向上方法を取得した。また，バグフィルタ方式，減圧・加熱方式の試験結果から，カートリッジフィルタ方式以外の脱水技術としてのバグフィルタ方式の有効性と減圧・加熱方式の課題を確認した。また，濃縮技術（クロスフローフィルタ）の成果と脱水技術の成果を併せて，粉状吸着材を α 核種除去に用いる場合の二次廃棄物処理システムの構成案を導出した。

今回の補助事業によって，吸着槽方式における二次廃棄物処理技術を確立した。今後，①にて α 核種除去方法や処理量等が検討されたのちに，本事業における成果を二次廃棄物処理技術開発に活用する。

目 次 ～補足資料～

8章. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果	・・・ p.133
9章. α 核種除去技術の開発, 実液試験準備に伴う要素試験結果	・・・ p.161
10章. 二次廃棄物処理技術の開発, 固形分濃縮技術の要素試験結果	・・・ p.178
11章. 二次廃棄物処理技術の開発, スラッジ脱水技術の要素試験結果	・・・ p.188

目 次 ～補足資料～

8章. α 核種除去技術の開発, コロイド除去方法の検討結果

- 補足8-1 2022年度までの補助事業の主な成果
- 補足8.1-1 模擬性の検討：流動場分画法およびICP-MS分析 (1/4)～(4/4)
- 補足8.1-2 模擬性の検討：ゼータ電位等からの考察 (1/2)～(2/2)
- 補足8.1-3 試験液の調製： α コロイド予備試験概要 (1/2)～(2/2)
- 補足8.1-4 コロイド吸着試験における各パラメータの重要度と設定根拠 (1/3)～(3/3)
- 補足8.2.1-1 吸着槽方式：試験手順
- 補足8.2.1-2 吸着槽方式：測定項目, 評価内容
- 補足8.2.2-1 水質調整方式：分離手法
- 補足8.2.2-2 凝集剤の選定
- 補足8.2.2-3 水質調整方式：コロイド除去の考え方
- 補足8.2.2-4 水質調整方式：試験手順
- 補足8.2.2-5 水質調整方式：評価内容
- 補足8.2.3-1 共沈方式の概要
- 補足8.2.3-2 共沈方式の評価方針・試験手順 (1/2)～(2/2)
- 補足8.2.4-1 RO膜方式の概要
- 補足8.2.4-2 RO膜方式 (1/4)～(4/4)

補足8-1_2022年度までの補助事業の主な成果

◆ 本検討の背景, これまでの成果 (8章)

- 2022年度までの補助事業の成果として溶解性 α 核種（本事業ではコロイドと区別のためイオン状 α 核種と呼称。）除去の要素試験をラボで行い候補吸着材を選定。吸着塔方式を用いたイオン状 α 核種の除去技術を開発してきた。
- 一方, 東京電力HDにて実施した, **3号機原子炉建屋滞留水サンプルを利用したカラム通水試験 (図1) にてカラム出口側に有意な濃度の α 核種が検出された (図2) ことから, 吸着塔通水方式で除去困難なコロイド状 α 核種が存在すると示唆されている。**

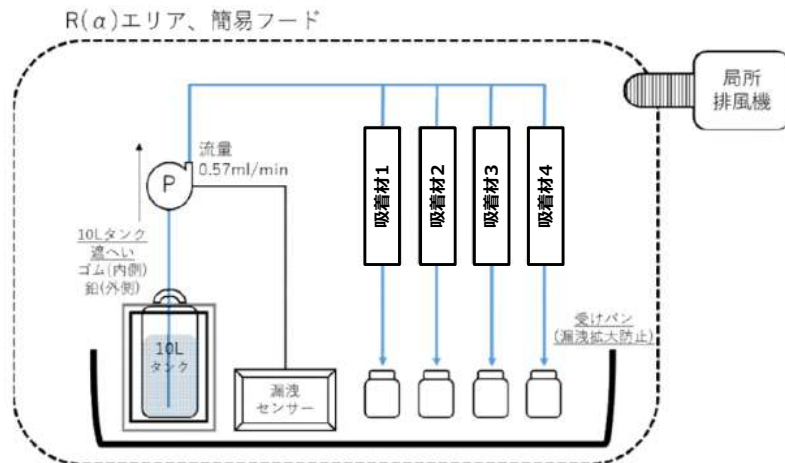


図1 カラム通水試験装置 (イメージ図)

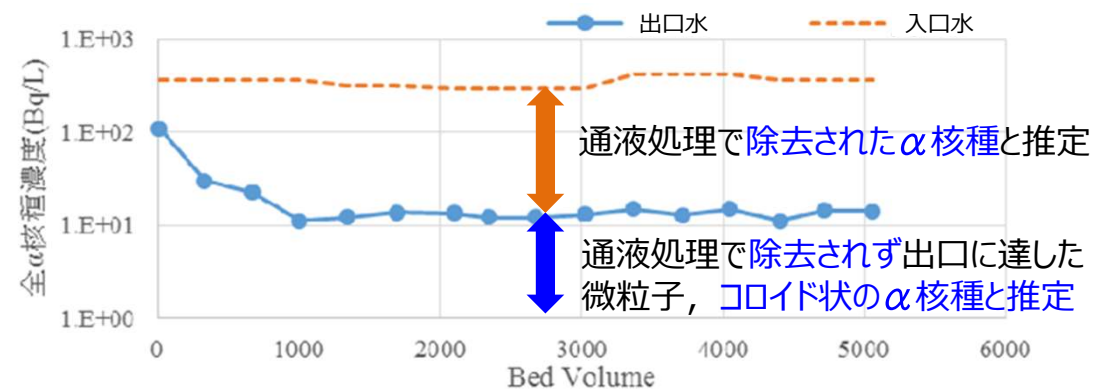


図2 カラム通水試験結果サンプル (α 核種濃度: 入口/出口)

- 従い, 本事業ではコロイド状 α 核種の除去が可能な要素技術の開発を行い, 過年度成果と組み合わせることでイオン状・コロイド状 α 核種ともに除去できる設備系統案を検討する。

表 イオン/コロイド状 α 核種の区別

	本事業における区別 (定義)	備考
イオン状 α 核種	水中に溶解している α 核種元素	吸着塔通水で除去可能と想定
コロイド状α核種	水中を浮遊する α 放射能を有する微粒子。0.1 μ m未満の粒子とする。 (粒子除去フィルタ (最終フィルタ孔径0.1 μ m) を通過するため)	吸着塔通水では 除去困難 と想定

➡ 本事業では, **コロイド状 α 核種の除去方法を開発**する (8章)。

◆ 8.1 コロイド試験の液調製方法の検討（模擬性の検討）

参考：擬似コロイド/真正コロイドの生成挙動のデータ取得

- 現状、 α 核種コロイド試験液を作成した場合に、精度よくコロイドの粒径分布を測る手段がない（レーザー回折法や動的光散乱法では、粒径の大きな粒子が混在した場合の影響が大きく、擬似コロイド同士が凝集した大きな粒子が存在する場合、確実に $0.1\mu\text{m}$ 未満の α 核種付着した擬似コロイドが存在すると判定できない可能性がある）。
- 従って、 α 核種コロイドの生成状態を推測するために、大学で研究されている流動場分画法/ICP-MSが適用できるかの確認試験を参考に行う（ただし、 α 核種取扱い可能な環境にないため、Euを α 核種の代替トレーサとしたCOLD試験のみ実施）。
- 流動場分画法/ICP-MSであれば、各粒径領域におけるコロイド濃度を定量分析することが可能であり、Eu測定結果より、擬似コロイドの生成を判断することが可能と期待される。

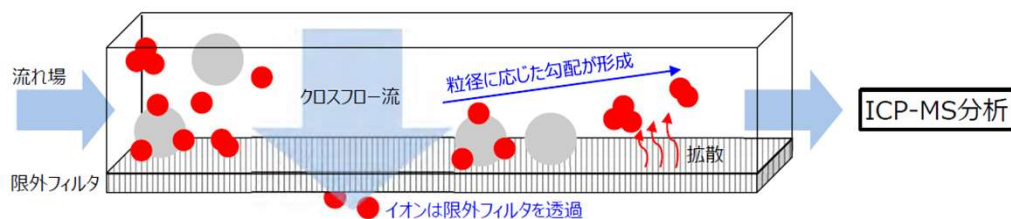


図1 流動場分画法, ICP-MSのイメージ図

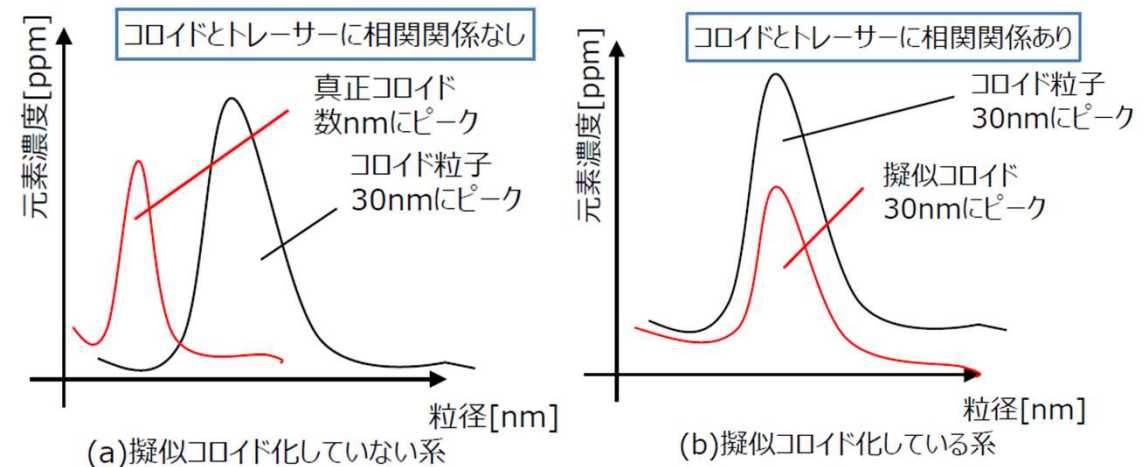


図2 流動場分画法/ICP-MSの想定分析結果

➡ 粒径分布-コロイド元素濃度のデータから、**擬似/真正コロイドの定量分析**が可能

◆ 8.1 コロイド試験の液調製方法の検討（模擬性の検討）

参考：擬似コロイド/真正コロイドの生成挙動のデータ取得（2023年度試験成果）

表 流動場分画法/ICP-MS 分析サンプル一覧

No.	項目	設定	
1	コロイド	FeOOH	SiO ₂
2	Eu濃度	5ppm	
3	pH	6	
4	前処理（固液分離）	遠心分離500×g, 5min	

- ✓ FeOOHコロイドは粒径数～数十nm, SiO₂コロイドは粒径30nmであるが, 100nm以下でピークは確認されなかった。
- ✓ コロイドの1次粒子は凝集しており, 100nm以上の2次粒子を形成していると考えられる。
- ✓ 沈殿は発生していないため, 2次粒子の状態で液中に分散していると推定。
- ✓ 10nm以下でEuのピークが確認された。同じ粒径領域にFeおよびSiのピークが存在しないため, Euの真正コロイドである可能性が高い。
- ✓ 擬似コロイドの有無を確認するためには, コロイド粒子の分散性を維持する必要がある。

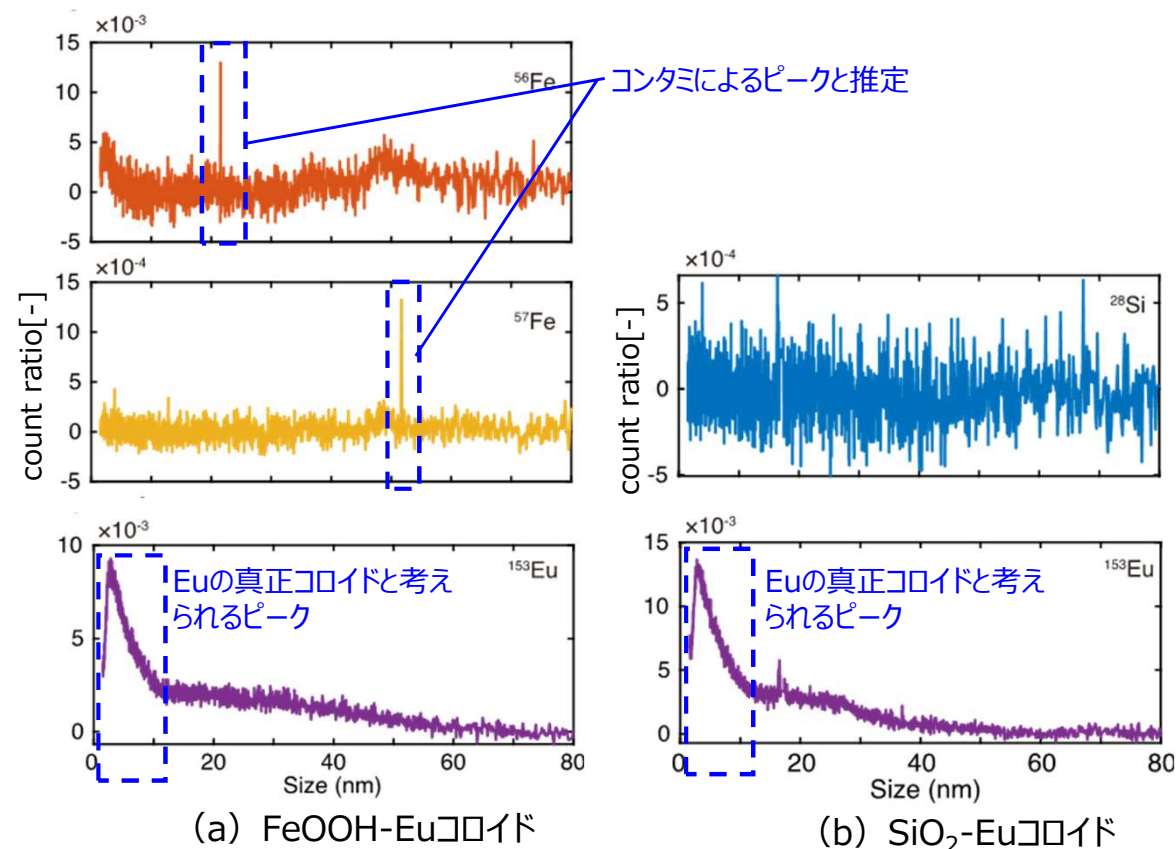


図 流動場分画法/ICP-MSの分析結果※

※ 縦軸はCount数であり各元素濃度に相当
横軸はコロイドのサイズ（粒径）

➡ 今回分析したコロイド溶液サンプルでは, 真正コロイドが確認された。
しかし, 擬似コロイドの有無については確認が困難であった。

◆ 8.1 コロイド試験の液調製方法の検討（模擬性の検討）

参考：擬似コロイド/真正コロイドの生成挙動のデータ取得（2024年度試験成果）

FeOOH-Euコロイド分析結果

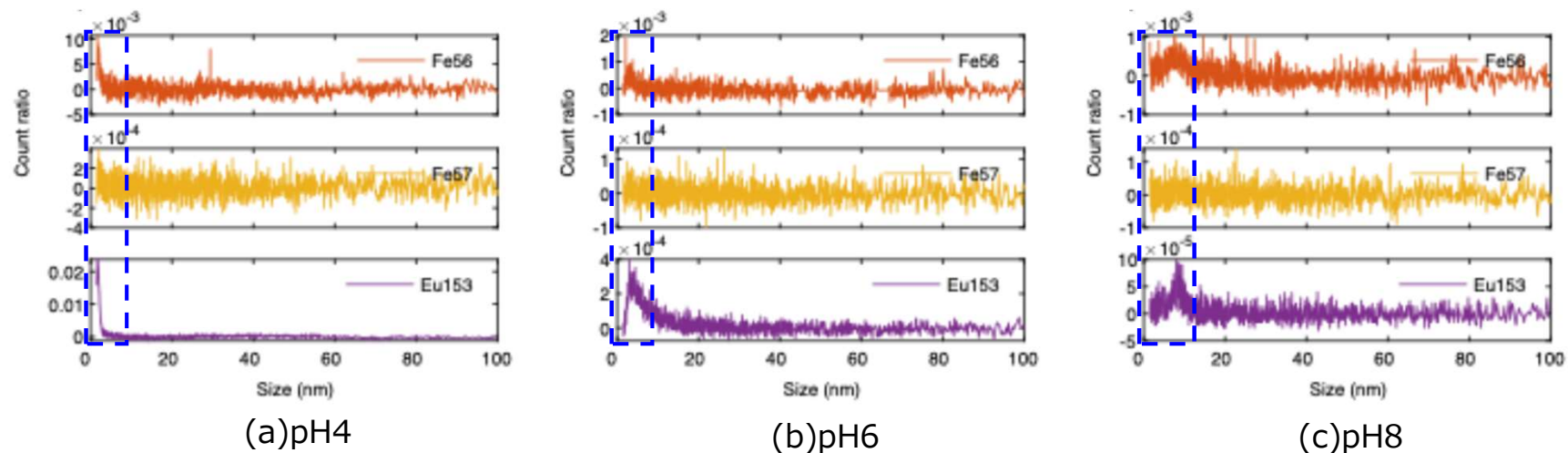
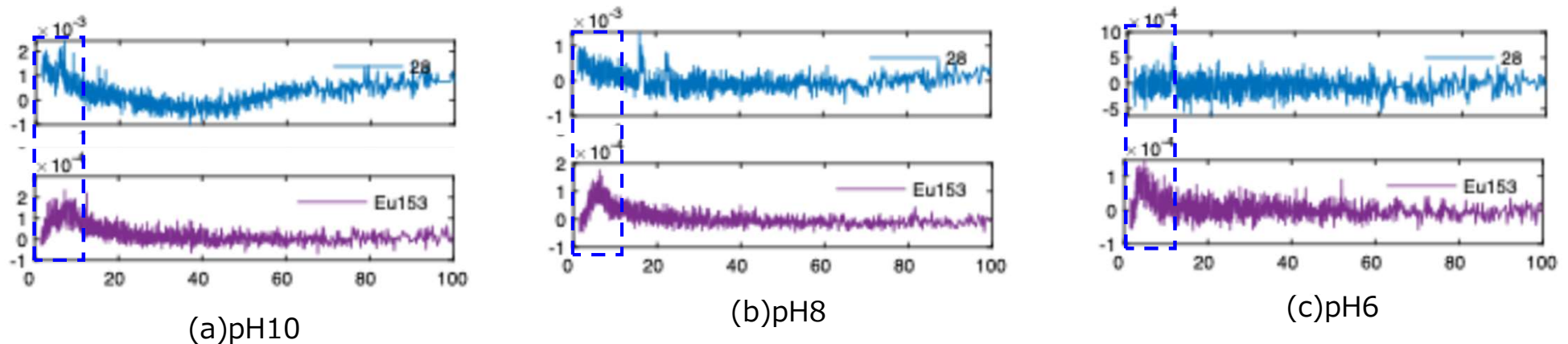


図 FeOOH-Euコロイド 流動場分画法/ICP-MS分析結果

- ✓ FeとEuの分析結果を比較すると、いずれも数～10nmの範囲にピーク値が確認され、ほぼ同じ位置であることが確認された。
- ✓ 試験液のpHが4, 6, 8と増加する共に、Feのピーク値が1.6, 3.6, 8.9nmと高サイズ側へシフトした。pH上昇に伴いFeOOHコロイドが凝集し、粒径が大きい2次粒子を形成したためと考えられる。
- ✓ Euのピーク値もpH上昇に伴い、高サイズ側にシフトしており、Feと同じ位置にピークが確認された。このことから、EuはFeOOHコロイドに吸着した状態で存在しており、すなわち擬似コロイドを形成していたと考えられる。
- ✓ Euの数～10nmのピークは、Euの真正コロイドである可能性も考えられる。しかし、Feのピーク値と同じ推移の傾向が見られたことから、擬似コロイドである可能性が高いと考える。

◆ 8.1 コロイド試験の液調製方法の検討（模擬性の検討）

参考：擬似コロイド/真正コロイドの生成挙動のデータ取得（2024年度試験成果）

SiO₂-Euコロイド分析結果図 SiO₂-Euコロイド 流動場分画法/ICP-MS分析結果

- ✓ SiとEuの分析結果を比較すると、いずれも数～10nmの範囲にピーク値が確認された。しかしながら、両者のピーク値の間に相関関係が認められるかは判断が困難であった。
- ✓ 試験液のpHが10, 8の条件では、数～10nmの位置にSiのピークが確認された。ただし、ピーク形がブロードであるため、ピーク値の推定が困難であった。一方、pH6条件では、同じ位置にピークが確認されなかった。
- ✓ EuはpH10, 8, 6のいずれの条件でも数～10nmの位置にピーク値が確認された。ただし、Siのピーク形と比較してシャープであること、Siのピーク値が確認されないpH6条件でもEuはピーク値が確認されたことから、Euは真正コロイドを確認していた可能性が考えられる。
- ✓ pH10, 8条件では、SiO₂とEuの擬似コロイドが形成された可能性も考えられるが、存在量は真正コロイドが支配的であったと考えられる。

補足8.1-2_模擬性の検討：ゼータ電位等からの考察（1/2）

◆ 8.1 コロイド試験の液調製方法の検討（模擬性の検討）

コロイド状 α 核種の想定と模擬方針

- 燃料デブリ取り出し作業時のPCV内環境中に含まれるコロイド性状は不明であるため、粒径 $10\mu\text{m}$ 以上の α 核種を含む粒子性状の傾向（FeやO等が主成分となる粒子に含有）が、コロイドでも同様の傾向をとると仮定し、PCV固相を主成分とするコロイドに α 核種が吸着することでコロイド状 α 核種が生成されると想定した。
- また、PCV固相はFe, Si, Zr, Al等の無機成分から構成され、PCV液相は酸化雰囲気を示すことから、コロイドの形態は、酸化物から成る無機コロイドと推定した。
- コロイド性状（濃度や粒径等）に大きく影響を及ぼすのはコロイド表面電位（ゼータ電位）であり（図1）、これらはpHなどの水質によって変化することが知られている（図2）。
- PCV固相に含まれるすべての無機酸化物に対して評価を行うことはできないため、pHごとのゼータ電位の傾向が異なると考えられる、 Fe_2O_3 、 SiO_2 ^{※1}、 ZrO_2 を模擬対象物質として選定した。なお、 UO_2 に関しては、pH-ゼータ電位のトレンドは不明であるものの、図2に示すいずれかの傾向になると推定した。

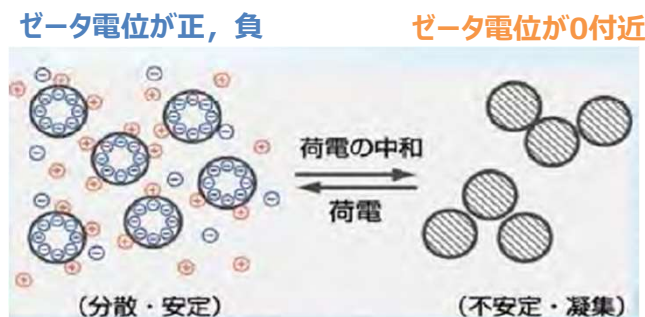


図1 ゼータ電位によるコロイド粒子の性状変化模式図

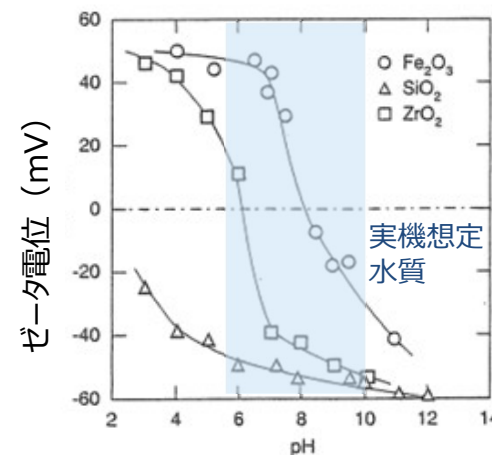


図2 pHに対するゼータ電位※2

表 今回選定した対象試薬（粉末状の酸化物試薬）

コロイド 模擬物質	メーカ・型式
Fe_2O_3	US Research Nanomaterials社製 (5nm) MKnano社製 (20nm)
ZrO_2	US Research Nanomaterials社製
SiO_2	MKnano社製

※1 SiO_2 以外のSi系コロイドとして考えられる粘土コロイドやCSH（ケイ酸カルシウム水和物）コロイドについては、入手手段および調製方法を調査し、試験実施可否を検討する。

※2 塩化ナトリウムを利用した液中懸濁微粒子の高度分画法の開発
2001年3月 入江英司ら 名古屋大学大学院工学研究科

補足8.1-2_模擬性の検討：ゼータ電位等からの考察（2/2）

◆ 8.1 コロイド試験の液調製方法の検討（模擬性の検討）

コロイド状 α 核種の想定と模擬方針

- コロイド試験に供するFeOOHナノ粒子について、pHごとのゼータ電位を測定した（図1）。
- 既知の物質のグラフ（図2）と比較すると、FeOOHナノ粒子については、 Fe_2O_3 と類似した傾向を示す結果であった。

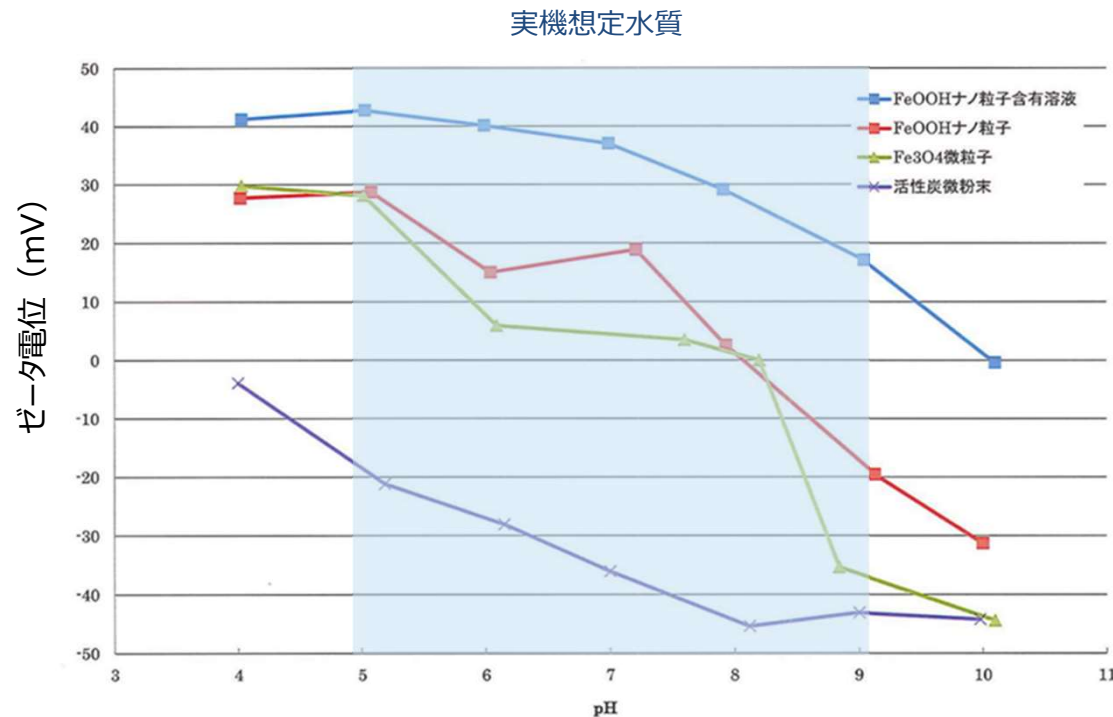


図1 pHに対するゼータ電位（測定結果）
（FeOOHナノ粒子含有溶液/FeOOHナノ粒子）

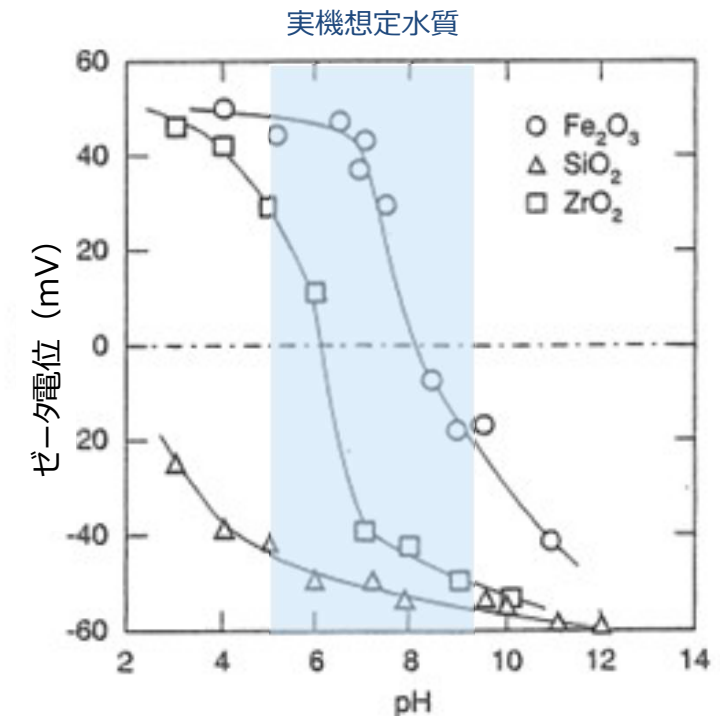
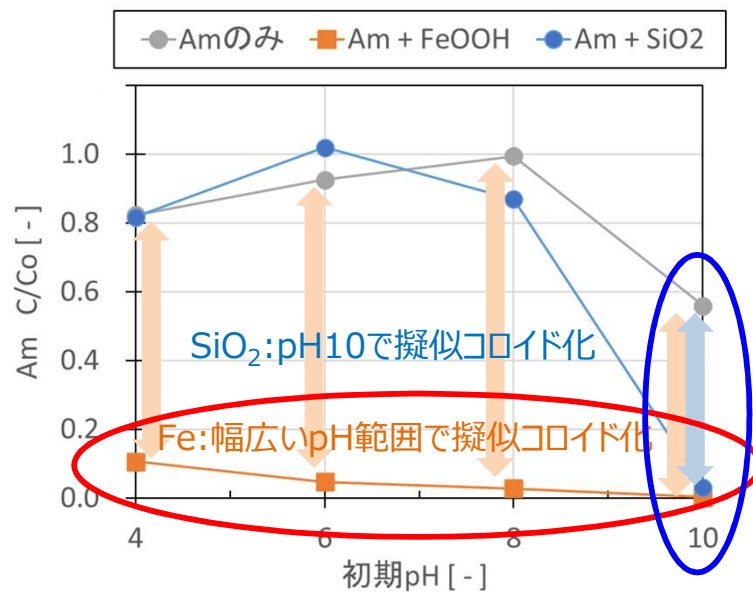


図2 pHに対するゼータ電位（文献値）
（ Fe_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2 ）

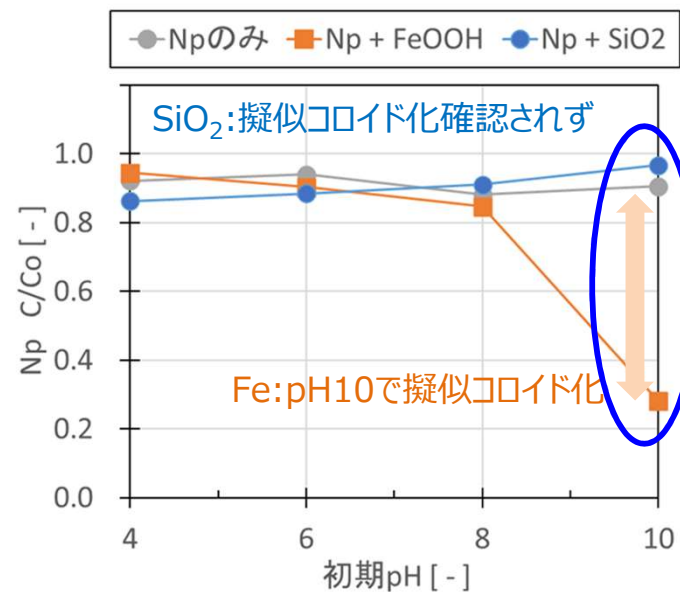
補足8.1-3_試験液の調製： α コロイド予備試験概要（1/2）

◆ 8.1 コロイド試験の液調製方法の検討（試験液の調製） 擬似コロイド液調製の結果

- 無機コロイドが確認された水質条件，鉄系（FeOOH微粒子）およびシリカ系（SiO₂微粒子）のコロイド試薬， α 核種トレーサAm, Np, Puを用いた擬似コロイド液調製試験を実施した。
- ✓ FeOOH， SiO₂ともに，擬似コロイドの生成にはpH依存性があることを確認した。一例を下図に示す。
- ✓ α 核種濃度の低下が確認されたpH領域では，無機コロイドに付着した擬似コロイドが生成。



(a) Am擬似コロイド化予備試験結果



(b) Np擬似コロイド化予備試験結果

表 擬似コロイド生成挙動まとめ

核種-コロイド	擬似コロイド化するpH範囲
Am-FeOOH	pH4～10
Am-SiO ₂	pH10
Np-FeOOH	pH10
Np-SiO ₂	(確認されず)
Pu-FeOOH	pH5～9 (特にpH5)
Pu-SiO ₂	(確認されず)

凡例

Co：基準液Am濃度（Bq/mL）

C：限外ろ過後のろ液Am濃度（Bq/mL）

図 擬似コロイド作製予備試験結果

補足8.1-3_試験液の調製：αコロイド予備試験概要（2/2）

◆ 8.1 コロイド試験の液調製方法の検討（試験液の調製）

➤ 擬似コロイド含有溶液の調製方法の検討

α核種の擬似コロイドが作製される条件をパラメータサーベイする。

✓ Am, Np擬似コロイド調製予備試験手順

- ① 1000倍希釈海水溶液を準備
- ② 溶液30mLに核種を添加（10Bq/mL）
- ③ pHを調整
- ④ コロイド模擬微粒子を添加（10ppm）し，超音波10min実施
- ⑤ 回転振とう1日後，溶液を分取
- ⑥ 限外ろ過あり/なしで核種濃度を分析し，擬似コロイドの生成を確認

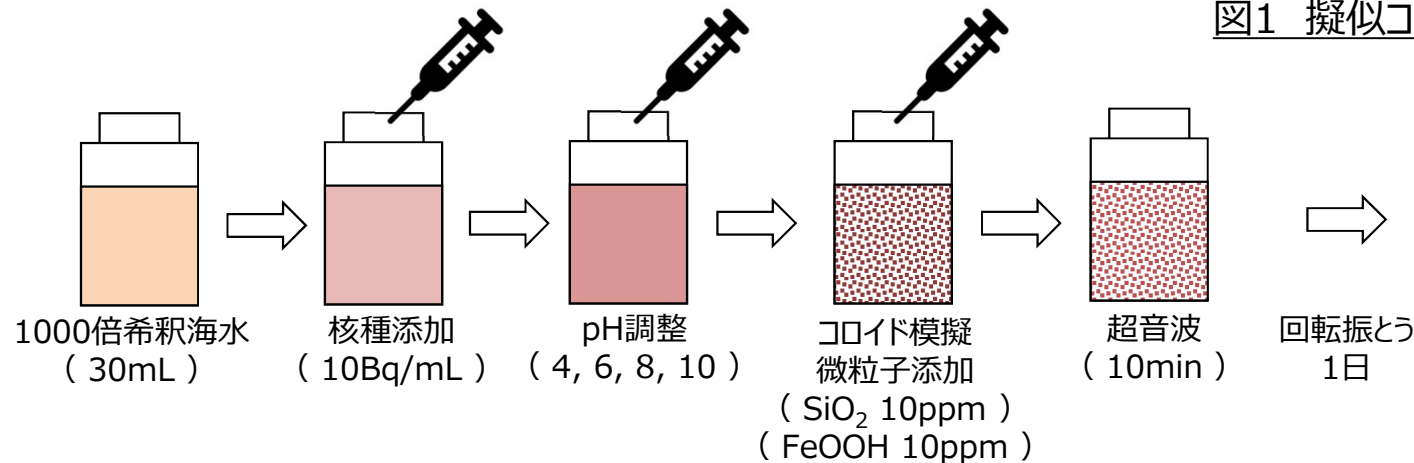


図2 擬似コロイド調整予備試験手順

コロイド模擬微粒子の添加により液中の核種濃度が低下すれば，擬似コロイドが生成したと判断

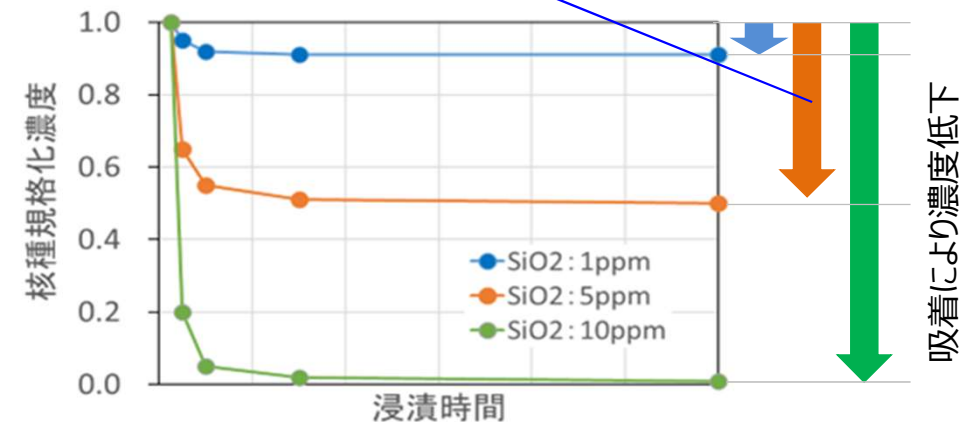


図1 擬似コロイド含有溶液調製のアウトプットイメージ

➡ 容器付着分を除外した濃度比 (C/C0) を求め，コロイド模擬微粒子への核種吸着挙動（擬似コロイド生成挙動）を確認した。

補足8.1-4_コロイド吸着試験における各パラメータの重要度と設定根拠 (1/3)

表 コロイド吸着試験における各パラメータの重要度と設定根拠 (1/3)

No.	項目		想定実機条件 (変動要因を考慮して設定)	変動要因	試験条件 (パラメータ)	重要度	パラメータ 変動有無	①実機想定条件の 設定根拠	②変動要因に関する考察	③試験条件の設定根拠
1	トレーサ	種類	Am, Cm, Np, U, Pu	①イオン強度 ②pH ③Eh (≒気相雰囲気)	Am, Np, (U), Pu	高	有	①FPのα核種のうち、被ばく評価上、除去の必要性が高いと判断された5核種を選定。ただし、U, Npは比較的放射能濃度が低いため、評価する優先度は低い。	②いずれの核種も燃料デブリ取り出しに伴い溶出する可能性がある。ただし、溶出量は変動要因に示す水質性状に依存する。	③核種による吸着挙動が異なると考えられるため試験では、Am, Np, U, Puの4核種についてそれぞれ評価する。ただし、CmはAmとの化学アナログが認められると考え、Am試験結果から評価する。
2		濃度	最大約100Bq/ml	①イオン強度 ②pH ③Eh (≒気相雰囲気) ④移行量	10Bq/ml	中	無	①滞留水分析結果などから、スラッジ中のα核種が全量溶解した場合、約100Bq/mlオーダーのα核種濃度となると試算。	②燃料デブリ取り出し作業に伴う環境条件（水質等）の変化により、より高濃度となる可能性がある。しかし、イオン強度が低くpHが中性領域の水質に対しては、アクチノイドの溶解度は一般的に低いため、100Bq/ml以上となる可能性は低いと考えられる。	③試験では、分析の観点からDF100の除去率および1.0E+05ml/gのKdを確認可能なα核種濃度として10Bq/mlを設定。高濃度における吸着挙動は10Bq/mlの結果から推定可能であるため、高濃度条件の必要性はそれほど高くない（重要度：中）。また、α核種トレーサは使用に制限があるため、高濃度とすることは困難。
3	pH		pH5～11	①コンクリート溶出成分 ②ホウ酸水成分 ③吸着材溶出成分 ④pH調整処理（導入する場合） ⑤大気混合	FeOOH : pH5 SiO ₂ : pH9	高	有	①実機では積極的なpH制御システムの適用は現時点では考えられておらず、現在と同程度の中性水質が維持される可能性が高いと推定する。エンジニアリングによる検討ではpHは5～9を基本条件として設定。さらにコンクリート溶出成分が増大した場合を想定し、pH11程度までを設定。	②pHはコロイドの凝集・分散に影響がある。予備試験により、コロイドの凝集・分散状態はpHの影響を強く受けることを確認済み（2023）。PCV内および液相系システムの系統内で、変動要因に示す種々の要因によりpHは変動する可能性がある。例としてコンクリート溶出により高pH条件（pH10以上）になる可能性がある。	③コロイドが凝集するpH領域では、凝集体が沈殿（もしくはフィルタ捕集）されるため、溶解性核種除去設備まで移行しないと想定される。そのため、コロイドが十分に分散するpH領域を試験パラメータに設定する。
4	水質		①希釈海水条件（1000倍、200倍、50倍希釈） ②コンクリート溶出時（アルカリ）の水質条件 ③ホウ酸水条件	①海水成分の混入（取水場所により濃度変化） ②地下水流入 ③ホウ酸水添加 ④各成分の溶出	①希釈海水条件（純水、1000倍、200倍、50倍希釈） ②アルカリ水質条件 ③ホウ酸水条件	高	有	①現在のPCV内は塩素濃度20ppm以下の水質であることが分析結果より示差されている。人工海水濃度を基準とすると1000倍希釈海水相当であり、他の海水由来成分も同程度の希釈率で存在すると想定される。また、既存水処理設備（建屋滞留水）で処理する場合（50倍希釈相当）も条件に含む	②水質（イオン強度）はコロイドの凝集・分散に影響がある。また、錯体形成にも影響を及ぼす場合がある。変動要因によって、アルカリ水質条件や、ホウ酸水条件が考えられる。	③実機水質条件として、1000倍希釈海水を代表条件に設定。また、イオン強度が比較的大きいと考えられる、200倍希釈海水（塩化物イオン濃度100ppm相当）、アルカリ水質条件（コンクリート溶出（約pH10））、ホウ酸水条件を設定。コロイドが分散するpH領域を選定し、同じpH領域で各水質条件を模擬し、試験を実施する。水質調整によりpH領域が大きく変わる場合は、試験要否を再検討。

補足8.1-4_コロイド吸着試験における各パラメータの重要度と設定根拠 (2/3)

表 コロイド吸着試験における各パラメータの重要度と設定根拠 (2/3)

No.	項目	想定実機条件 (変動要因を考慮 して設定)	変動要因	試験条件 (パラメータ)	重要度	パラメータ 変動有無	①実機想定条件の設定 根拠	②変動要因に関する考察	③試験条件の設定根拠
5	種類	①燃料デブリ (UO ₂) ②炉心構造物 (Fe系, Zr系) ③コンクリート成分 (Si系, Ca系) ④底部堆積物 (Fe系, Si系, その他) ⑤析出物 (アルカリ金属類, Si系, その他) ⑥PCV投入物 (中性子吸収材, 固化剤, その他) ⑦地下水含有粒子 (鉱物粒子複数種類)	①各成分の有無 ②(切削等によ る)微粒子化の 有無 ③化学組成・結晶 構造などの変化 ④擬似コロイド化の 有無	FeOOH, SiO ₂	高	有	①PCV内に存在する固相 成分が微粒子化すると想 定。また、外部より流入 する微粒子や析出粒子 なども考慮。	②コロイド状α核種は、微粒子に α核種が付着することにより形成 された擬似コロイドが支配的であ ると想定される。そのため、α核 種が付着しやすい表面状態のコ ロイド粒子ほど除去の必要性が 高い。表面性状は化学組成や 結晶構造などに依存するため、 既往知見などから机上評価する ことは困難である。 擬似コロイドの多くは炉内の構 造材やコンクリート等に含まれる 鉄やシリカに由来するものであると 考えられる。しかし、燃料デブリ (UO ₂)や地下水に含まれる鉱 物粒子なども擬似コロイドを生成 している可能性がある。	③吸着試験では、現在の滞留水分析 結果より支配的に検出されている微 粒子成分であるFe系とSi系のコロイド 粒子を対象として試験を行う。特にFe コロイドはナチュラアナログの研究報 告例からも、Puを初めとしたアクチノ イド核種が顕著に付着する可能性が高 いため、優先的に試験する。Uは他 のRIおよびα核種と混合して試験を 実施することができないため、UO ₂ を 含む擬似コロイドの生成試験は2024 年度は実施しない。 粘土コロイド、CSHコロイドは溶液製 造方法が確立されていないため、 2024年度に試験は実施しない。 2025年度以降に試験方法の確立か ら検討が必要。
6	濃度	1~100ppm	①取り出し工法 ②粒子除去フィルタ (前段)	10ppm	中	無	①燃料デブリ取り出しの目 標スループット等から、循 環冷却水中に含まれる SS濃度は保守的に 100ppm以下と試算。	②コロイドのSS濃度は、吸着現象 に影響があり、定性的にはより 高濃度ほど除去性能が高くなると 想定される。また、高濃度では 破過が早くなり、吸着材寿命が 短くなると想定される。SS濃度が 非常に大きい領域では、自然に 凝集し沈殿するため、極端な高 SS濃度となる可能性は低いと考 える。	③粒子除去フィルタにて99%以上の粒 子成分を除去する想定であるため、 後段へ移行する粒子のSS濃度は 1ppmと試算。ごく低濃度では除去の 必要性が低くなることに加えて、試験 での定量分析が難しくなるという理由 から、試験条件は10ppmを設定。
7	粒径	0.1μm未満	①取り出し工法 ②粒子除去フィルタ (前段) ③コロイド同士の凝 集	0.1μm未満	中	無	①システム前段の粒子除去 フィルタとし 0.05~0.1μmのセラミ ックフィルタ(最終処理設 備)が候補に選定されて いるため、後段のα核種 除去システムへ移行する 粒子は粒径0.1μm未満 が支配的となると想定。	②燃料デブリ取り出し工法に応じて 発生する微粒子の粒径分布は 異なる。粒子の大きさに応じて吸 着挙動などが変化する可能性が あるが、0.1μm以上の粒子は 結局システム前段の粒子除去 フィルタで除去されるため、影響 は小さいと想定する。	③粒子除去フィルタ通過後は、コロイド 粒径がある程度均一化されるため、 幅広い粒径分布を試験パラメータに 設定する必要性は低い。試験では粒 径0.1μm未満のコロイド粒子を使用 することで統一。

補足8.1-4_コロイド吸着試験における各パラメータの重要度と設定根拠 (3/3)

表 コロイド吸着試験における各パラメータの重要度と設定根拠 (3/3)

No.	項目	想定実機条件 (変動要因を考慮 して設定)	変動要因	試験条件 (パラメータ)	重要度	パラメータ 変動有無	①実機想定条件の設定根拠	②変動要因に関する考察	③試験条件の設定根拠
8	温度	10～30℃	①四季による外気温 変動	常温範囲 (約20℃)	低	無	①四季変動の影響による10～30℃の温度変動範囲を想定。	②温度は核種吸着、錯体形成、コロイド凝集分散などに影響がある。ただし、実機で想定される温度変動幅は20K程度と小さいため、影響はごく軽微と想定される。	③実機の想定温度範囲では、温度に起因する影響は無視可能と想定されるため、代表温度として常温(約20℃)と試験条件を設定。
9	大気雰囲気	大気平衡 /酸化性雰囲気側	①窒素封入 ②インリーク (PCV負圧制御)	大気平衡	低	無	①大気雰囲気との平衡状態を基本条件として設定。Eh=0.5V程度の酸化性雰囲気。PCV内は窒素封入により還元性雰囲気側に平衡が移動するが、インリークがあることと窒素封入だけでは0V以下の還元性雰囲気にはならないため、依然として酸化性雰囲気が維持されると想定。	②酸化還元雰囲気は、定性的には錯体形成などに影響がある。ただし、大気インリークを考慮した窒素封入の環境では、吸着現象にはほぼ影響がないことを確認(2021-2022年度)	③実機では気相雰囲気や酸化還元雰囲気の顕著な変動はないと考えられ、また試験操作を簡易にするため、大気平衡状態を代表条件として設定。
10	Eh	約0.5Vの酸化性 雰囲気 (0V以上と想定)		大気雰囲気 相当 (約0.5V)					
11	浸漬期間	24h以内	①処理工程	0, 1, 3, 7, 24h	高	有	①実機の処理時間として24h以内を想定。吸着材は1バッチ処理で廃棄する想定。吸着材を回収し再利用する場合でも、液相と吸着材の接液時間は実質24h以内になると想定。	②処理時間が長いほど、吸着量は大きくなる。吸着平衡に達するまでの時間内では、時間依存性があると想定される。	③比表面積が大きい数～数十 μm^2 の吸着材であれば、24h以内に吸着平衡に達すると想定され、また、実機では1day以内の処理が現実的であるため、試験時間は最長24hと設定。

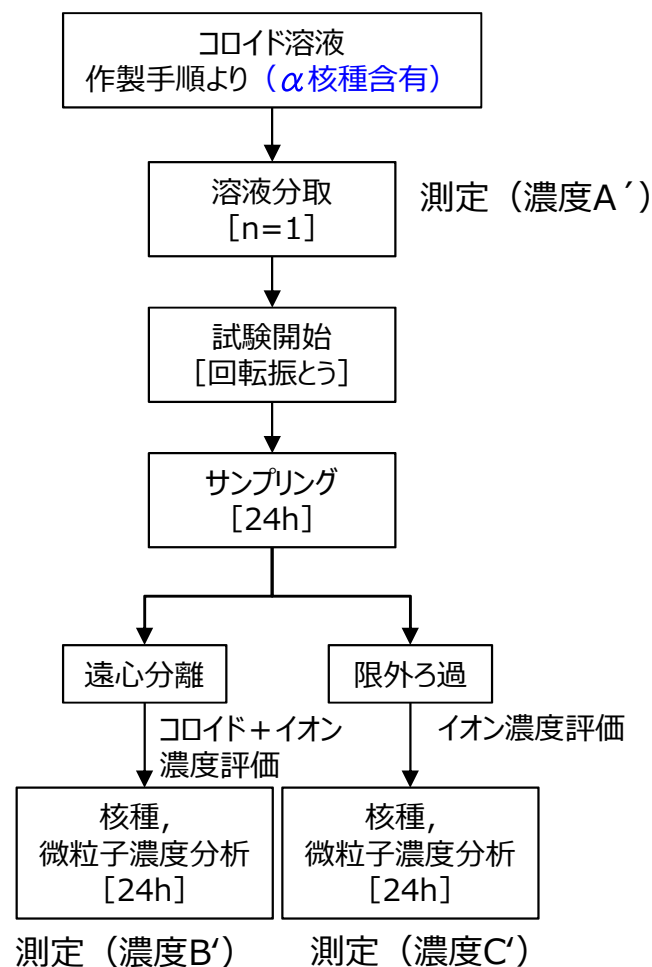
補足8.2.1-1_吸着槽方式：試験手順

◆ 8.2.1 新規設備：吸着槽方式（粉状吸着材）の除去性能試験

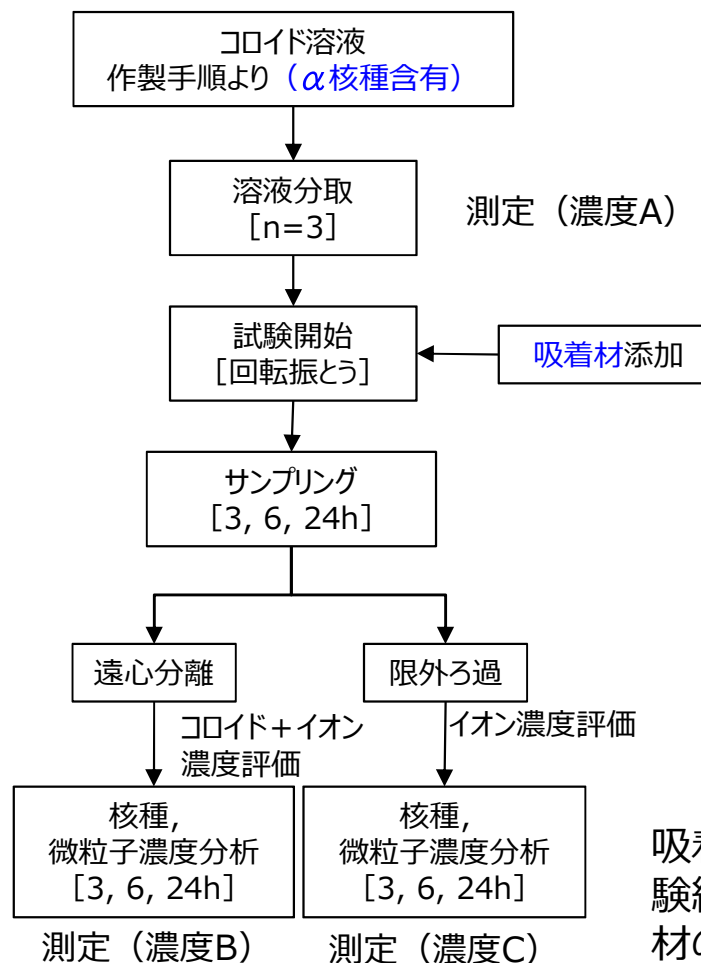
➤ 試験手順

＜吸着槽方式でのコロイド除去試験の概略試験手順＞

吸着材添加無し（ブランク液）概略手順



吸着材添加有り概略手順



＜各評価方法＞
(濃度はα核種濃度を想定)

【コロイド除去に関するDF評価式】

$$\text{除染係数 (DF)} = \frac{B' - C'}{B - C}$$

【コロイド+イオン除去に関するDF評価式】

$$\text{除染係数 (DF)} = \frac{B'}{B}$$

【コロイド/イオン評価】

コロイド濃度 = B - C
(ブランクのコロイド濃度B' - C'と比較)

イオン濃度 = C
(ブランクのイオン濃度C'と比較)

※ ブランク試験の初期濃度からの減少量 (A' - B') は、容器付着などによる損失として評価。

吸着試験結果より得られた吸着量，ブランク試験結果※との差分を考慮することにより，吸着材の正味の吸着量を評価する。

◆ 8.2.1 新規設備：吸着槽方式（粉状吸着材）の除去性能試験

➤ 測定項目

- ✓ コロイド除去性能は吸着率，ブランク試験を加味した除染係数（DF），および分配係数（Kd）にて評価する。
- ✓ 本事業では暫定的にDF100（目安）を確保可能な粉末吸着材を絞り込む。

表 コロイド吸着試験 測定項目※

項目	測定対象	測定方法	備考
トレーサ濃度 [Bq/mL]	Am, Np, (U)	Ge半導体検出器, (比色分析)	Am, NpはGe半導体検出器により測定。 (Uは比色分析法により測定)
	Pu	液体シンチレーションカウンタ	NFD保有の液体シンチレーションカウンタにて測定。
コロイド濃度 [mg/L]	Fe, Si	ICP-MS/ICP-AESもしくは比色分析	NFDではICP-MS/ICP-AESにより測定。（日立では、 HOT用のICP装置がないため、コロイド予備試験により検 討した比色分析法により測定。）

※ その他に温度，pHなどを測定

➤ 評価内容

- ✓ コロイドの除去率と核種除去率を区別して評価する。
- ✓ 試験前後の核種濃度およびコロイド濃度を測定し，除去率および分配係数を評価する。
- ✓ 遠心分離後に液中に残留する成分をコロイドおよびイオン，限外ろ過後に液中に残留する成分をイオンとして評価。

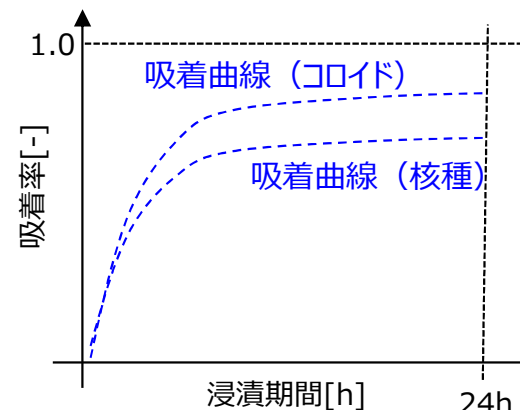


図 コロイド吸着試験結果のイメージ図

$$\text{吸着率}[-] = \frac{C_{ini} - C_t}{C_{ini}}$$

$$\text{分配係数 (Kd) [mL/g]} = \frac{C_{ini} - C_t}{C_t} \times \frac{V}{M}$$

 C_{ini} : 初期核種濃度[Bq/L]/コロイド濃度[mg/L]

 C_t : 浸漬時間t[h]における核種濃度[Bq/L]/
コロイド濃度[mg/L]

V : 試験液量[mL]

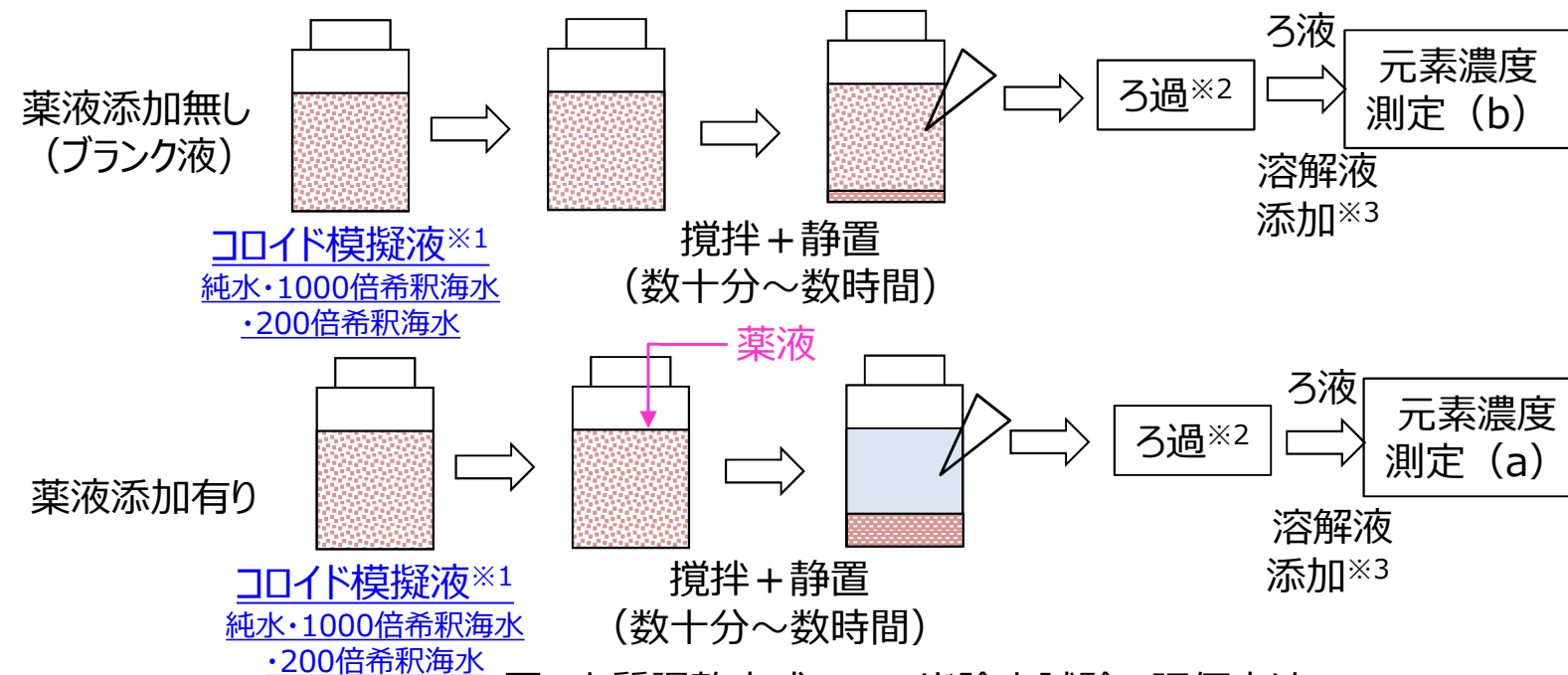
M : 吸着材添加量[g]

補足8.2.2-1_水質調整方式：分離手法

◆ 8.2.2 新規設備：水質調整方式の除去性能試験

➤ コロイド除去試験の評価方針（分離手法）

- ✓ 調製した無機コロイド模擬液を用いた除去性能試験の評価方法を示す。
- ✓ コロイド除去方式のうち、水質調整方式と共沈方式の2種類においては、コロイド成分が含まれた処理対象水に薬液を添加し、コロイド成分を凝集させて沈降分離もしくはフィルタ分離によりコロイド除去する方針である。
- ✓ 除去試験評価時に除去評価時に過大評価とならないように、コロイド模擬液中の粒子が時間経過と共に凝集することで除去されたのか、あるいは薬液の影響によって凝集したのか、その両方の効果によって除去されたのか、を考慮する必要がある。そこで、薬液添加有無の液を調製し、それぞれの元素濃度（ α 核種濃度等）から除染係数（DF）を評価する。なお、これまでの補助事業にて、溶解性 α 核種除去設備での除去DFとしてDF100（暫定）が要求されており、性能を満足する除去方法を絞り込む。



$$\text{除染係数 (DF)} = \frac{\text{元素濃度 (b)}}{\text{元素濃度 (a)}}$$

- ※1 試験条件の絞り込みおよび、試験結果の考察のために、無機コロイド模擬液（COLD試験）、 α コロイド模擬液（HOT試験）をそれぞれを用いた除去試験を実施。
- ※2 想定する処理プロセスに合わせてろ過孔径を変更。試験結果考察のためにろ過なしの濃度分析も実施。
- ※3 対象物質に合わせて溶解液にて粒子を溶解する（事前検討結果より、溶解液は以下を暫定で想定）。
Fe₂O₃：塩酸、ZrO₂：硫酸、SiO₂：水酸化ナトリウム

図 水質調整方式のコロイド除去試験の評価方法

補足8.2.2-2_凝集剤の選定

一般的に用いられる凝集剤の調査を行い、机上検討にて本試験にて評価対象とする凝集剤の絞り込みを行った。

表 凝集剤の選定

凝集剤	作用	評価	理由
塩化アルミニウム (PAC)	Al ³⁺ , Fe ³⁺ , Fe ²⁺ などの多価カチオンが懸濁粒子の荷電を中和する。同時に生成する, Al(OH) ₃ などの水酸化物が粒子を吸着するので, 若干のフロック化作用もある	○～△	添加量によっては設備影響が低く, 価数が高いため電荷中和作用が大きい可能性あり。入手性の観点で優れている。
高塩基度PAC		○～△	PACよりも凝集性, 低残留Al性等の観点で優れている。入手性の観点で優れている。
塩化アルミニウム (LAC) (高分子化していない塩化アルミニウム)		△～×	PACは, 水溶液中では〔Al ₆ (OH) ₁₅ 〕 ³⁺ , 〔Al ₈ (OH) ₂₀ 〕 ⁴⁺ , 〔Al ₁₃ (OH) ₃₄ 〕 ⁵⁺ 等の形態をとり Al 当たりの価数は 0.5 程度だが, AlCl ₃ のAl価数は3+となり, PACより荷電中和力は高い。ただし, PACより強酸性であり, 取り扱い性の観点から優先度は比較的に低い。
硫酸アルミニウム		△～×	硫酸イオンは設備影響 (腐食等) や, 廃棄物の観点から積極的な添加は推奨されない可能性あり。
硫酸鉄		△～×	
ポリ硫酸第二鉄		△～×	一般的によく使われる凝集剤 (ALPS適用実績あり)。別途共沈方式で評価するものの, 比較用評価用として選定。
塩化第二鉄		○～△	
ポリシリカ鉄		△～×	Feによる荷電中和力に加え, 重合シリカにより凝集性が向上されている。PACの代替として上水向け開発されたものの, 実績として置き換わっておらず, 優位性は小さい。(一般的に普及していない)
消石灰	Mg ²⁺ , Ca ²⁺ が荷電中和の作用 (無機凝集剤としての作用) を持つ	—	炭酸塩が生成するため, 別途共沈方式で検討。
塩化カルシウム/ 塩化マグネシウム		△	添加量によっては微細なFe成分を凝集させる効果があるものの, 多量添加しないと効果ない可能性あり。
アルミン酸ナトリウム 塩化ナトリウム	Na ⁺ が懸濁粒子の荷電を中和する。	×	強アルカリ性になるため, 後段設備への影響が大きい。
		△～×	本事業での定性評価結果より, 実機想定水質条件 (純水～200倍希釈海水) の範囲での海水濃度では凝集効果は低い。
塩化コッパラス FeCl ₃ ・Fe ₂ (SO ₄) ₃	塩化第2鉄と硫酸第2鉄との混合物であり, それぞれ作用と同じ	△～×	一般的に普及していない。
チタン系凝集剤 硫酸チタニル (O ₅ STi) 等	Ti ⁴⁺ による荷電中和	△～×	一般的に普及していない (高価)。 酸性 (pH4～5) 凝集に使用され, 中性域では凝集性が低い。

補足8.2.2-3_水質調整方式：コロイド除去の考え方

◆ 8.2.2 新規設備：水質調整方式の除去性能試験

➤ 水質調整方式でのコロイド除去の考え方

- ✓ コロイド成分の**水質調整による除去方針**としては、大きく2つあり、コロイド成分を溶解してイオン成分に調整して吸着除去する考え方と、**コロイド成分をフィルタ除去可能な粒子形態に調整して除去する**考え方がある。前者は強酸性に水質調整する必要があり、設備負荷が高いため本事業では検討対象外とする。
- ✓ 粒子形態に調整するためにコロイド成分を凝集させる考え方を表に示す。コロイドの安定性に寄与する表面電荷を**水質調整剤によって**、打ち消すか、利用することで**フロックを生成させてフィルタ除去する**。
- ✓ 水質調整剤の選定方針としては、大きく以下、3点の観点で選定する。
 - ①設備影響の観点から腐食性成分を多量に添加する必要がないこと
 - ②廃棄物の安定化の観点から有機物成分が含まれないこと
 - ③一般的に普及しており、入手しやすい水質調整剤であること
- ✓ 一般的に用いられる凝集剤について文献調査を行い、机上検討にて絞り込みを行った（下表）。

表 本事業にて候補とした水質調整剤（無機系凝集剤）※

凝集剤	作用	理由
塩化アルミニウム (PAC)	Al ³⁺ （多価カチオン）が懸濁粒子の荷電を中和する。	・塩化物イオンが含まれているが、添加量によっては設備影響が低いと想定。 ・入手性の観点で優れている。
高塩基度PAC	同時生成する、Al(OH) ₃ などの水酸化物が粒子を吸着するので、フロック化作用もあり。	・PACよりも凝集性、低残留Al性等の観点で優れている可能性あり。 ・PAC同様に塩化物イオンが含まれているが、添加量によっては設備影響が低いと想定。 ・PAC同様に入手性の観点で優れている。

※ 比較用としてPAC同様に一般的によく用いられる、塩化第二鉄（FeCl₃）も同時に評価（詳細は、補足8.2.2-2を参照）

ゼータ電位が正、負 ゼータ電位が0付近

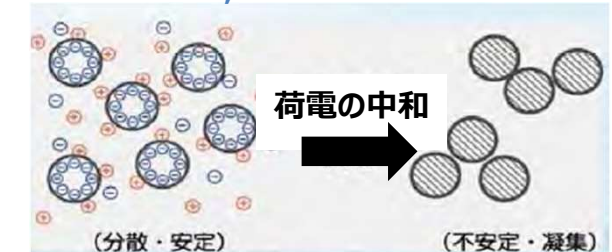


図 凝集イメージ

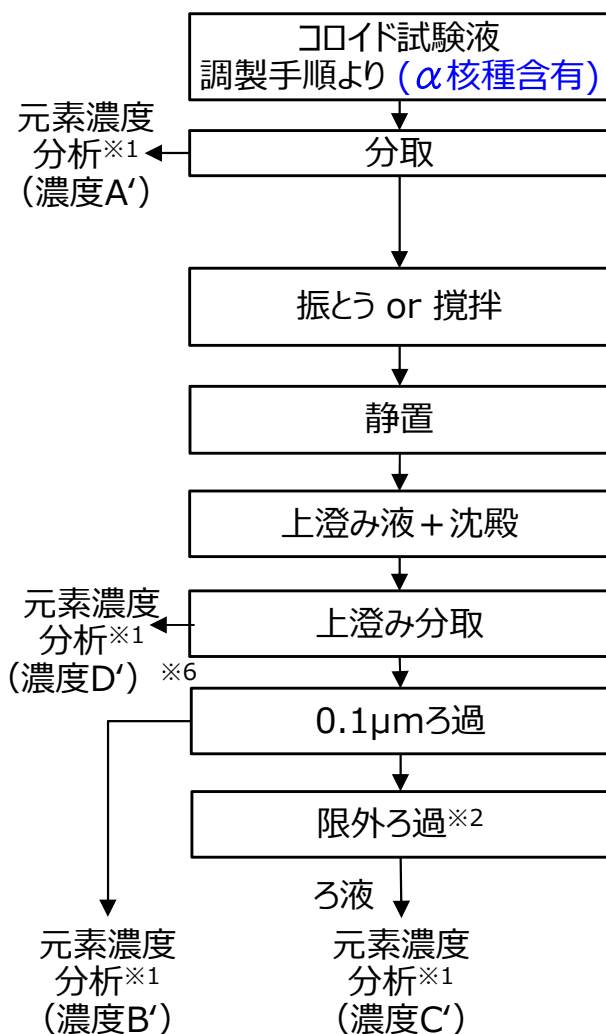
補足8.2.2-4_水質調整方式：試験手順

◆ 8.2.2 新規設備：水質調整方式の除去性能試験

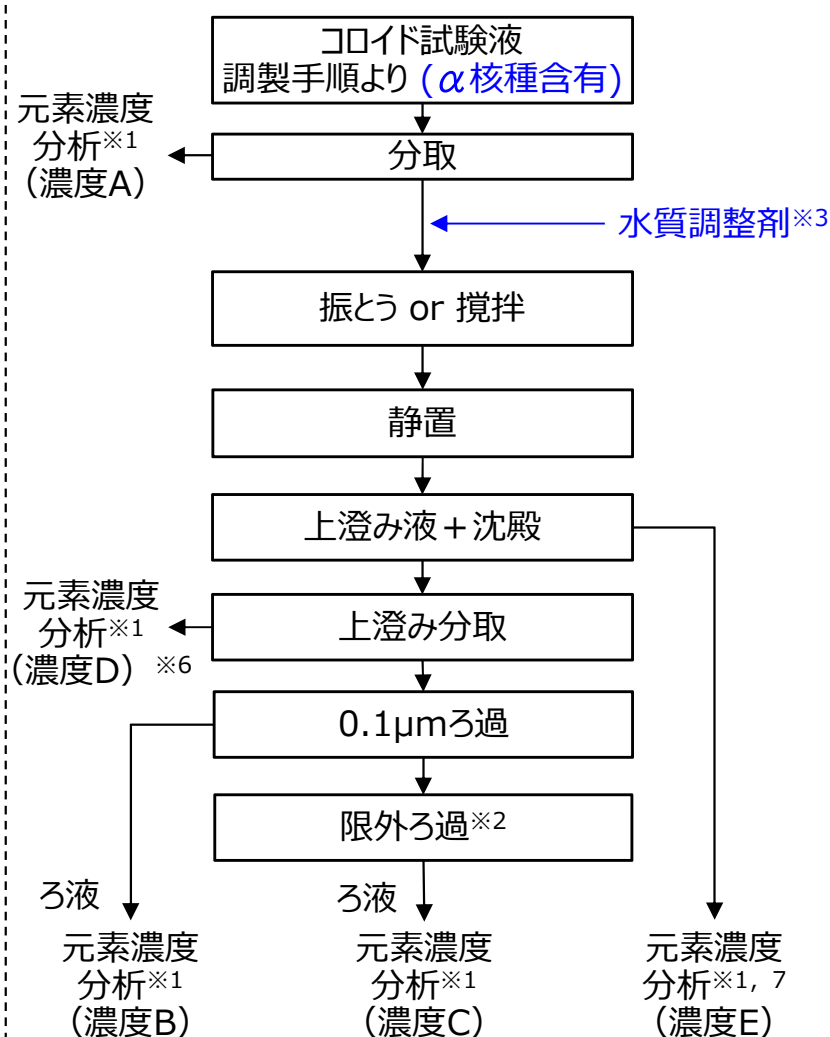
➤ ②試験手順

<水質調整方式でのコロイド除去試験の概略試験手順>

薬液添加無し（ブランク液）概略手順※5



薬液添加有り概略手順※5



<各評価方法>

【コロイド除去に関するDF評価】※4

$$\text{除染係数 (DF)} = \frac{B' - C'}{B - C}$$

【コロイド+イオン除去に関するDF評価】

$$\text{除染係数 (DF)} = \frac{B'}{B}$$

【残渣中のα核種濃度の評価】

スラッジ（沈降成分）中濃度 = E

【コロイド/イオン評価】

コロイド濃度 = B - C
(ブランクのコロイド濃度B' - C'と比較)イオン濃度 = C
(ブランクのイオン濃度C'と比較)

- ※1 溶解液を用いて溶解後に濃度分析
- ※2 上澄み液のα核種濃度が比較的高い場合、必要に応じて実施
- ※3 pH調整含む
- ※4 DF評価において水質調整前の濃度Aを考慮
- ※5 COLD試験手順も同様
- ※6 考察に資するデータとして容器付着影響を確認するために濃度D, D'を測定
- ※7 沈殿が溶解し、かつコロイド模擬粒子が溶解可能な条件にて溶解液を測定（各試験原則N=1のみ実施、溶解操作負荷が大きい場合は実施不可の可能性あり）

補足8.2.2-5_水質調整方式：評価内容

◆ 8.2.2 新規設備：水質調整方式の除去性能試験

➤ 評価内容（水質調整によるコロイド除去）

- ✓ コロイド除去性能は除染係数（DF）にて評価する。
- ✓ 本事業では暫定的にDF100を確保可能な水質調整剤を絞り込む。

表1 コロイド除去（水質調整方式）性能評価項目

項目	測定対象	測定方法
トレーサ濃度 [Bq/mL]	Pu, Am, (Cm), Np	液体シンチレーションカウンタ
コロイド濃度 [mg/L]	Fe, Si	ICP-MS/ICP-AES

➤ 評価内容（吸着塔への水質影響確認）

- ✓ 2022年度までの補助事業同様に、分配係数（Kd）にて評価する。
- ✓ これまでの補助事業にて得られたKdを基準として、コロイド除去のための水質調整剤を添加した場合のKdを評価する。
- ✓ 基準と誤差範囲内で一致する、あるいはより高いKdを示す場合、水質調整剤は候補吸着材との相性が良いと判断される。
- ✓ 一方で、誤差範囲内よりもKdが低下する場合、水質調整剤あるいは候補吸着材の見直しが必要である。

表2 水質調整影響確認（吸着試験）評価項目

項目	測定対象	測定方法
トレーサ濃度 [Bq/mL]	Pu, Am, (Cm), Np	液体シンチレーションカウンタ

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

C_i ：浸漬期間経過後のブランク試料の核種濃度
 C_f ：浸漬期間経過後のサンプル試料の核種濃度
 V ：浸漬液相の体積 [mL]
 m ：吸着材重量 [g]

$$\text{除染係数 (DF)} = \frac{\text{ブランク液の濃度}}{\text{薬液添加有り液の濃度}}$$

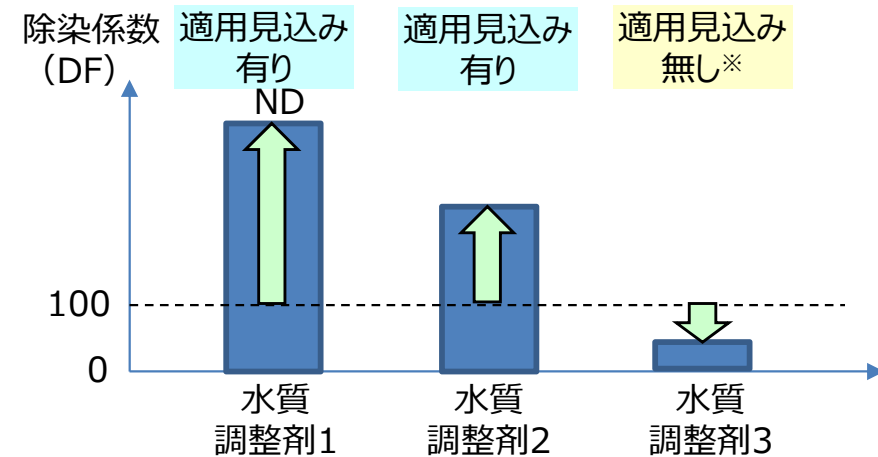


図1 コロイド除去試験（水質調整方式）試験結果イメージ

※ DF100を下回る場合も、直列に設備設置する等の設備的な対応をもってDF100を達成する見込みがある場合、適用見込み有り（条件付き）として評価する。

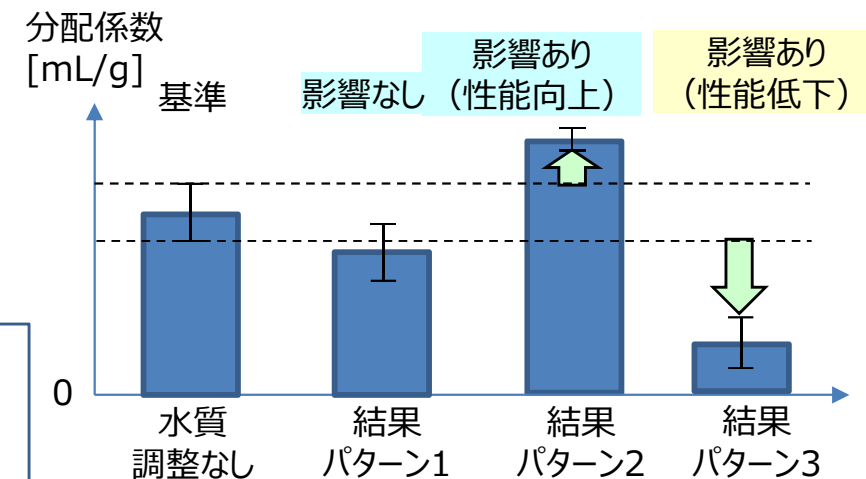


図2 水質調整影響確認（吸着試験）結果イメージ

➤ 共沈方式でのコロイド除去の考え方

- ✓ コロイド成分をフィルタ除去可能な粒子形態に調整するもう一つのアプローチとしては共沈が考えられる。
- ✓ 既設多核種除去設備では、吸着塔通水前の前処理工程にて、鉄共沈および炭酸塩処理を行っている（図1）。これら二次廃棄物スラリーの分析結果より、鉄共沈処理および炭酸塩処理では、Pu, Am, Cmなどの α 核種が捕捉されている（図2）。さらに現在までの滞留水分析結果も合わせると、大部分は粒子状 α 核種が捕捉されていると考えられる。
- ✓ 以上から、コロイド成分のような粒子状 α 核種除去に適している共沈方法として、本事業では実績をベースに、鉄共沈処理および炭酸塩処理を選定した。
- ✓ 鉄共沈処理および炭酸塩処理をコロイド除去に適用した場合の評価（擬似コロイド液を用いたDF評価）を実施する。

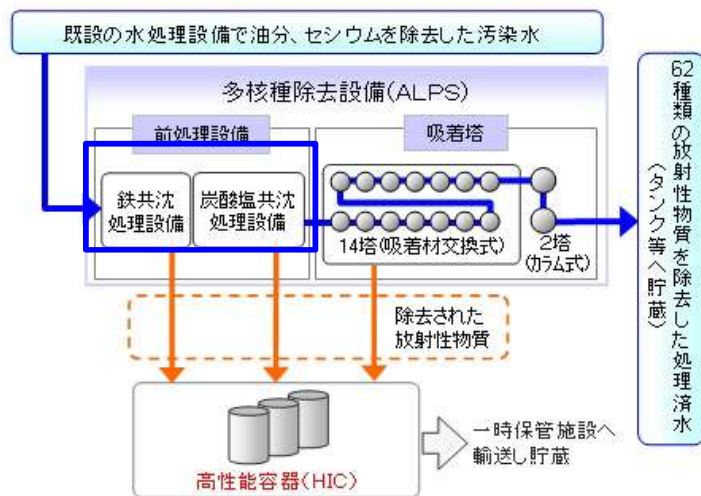


図1 既設多核種除去設備の概略系統構成※1

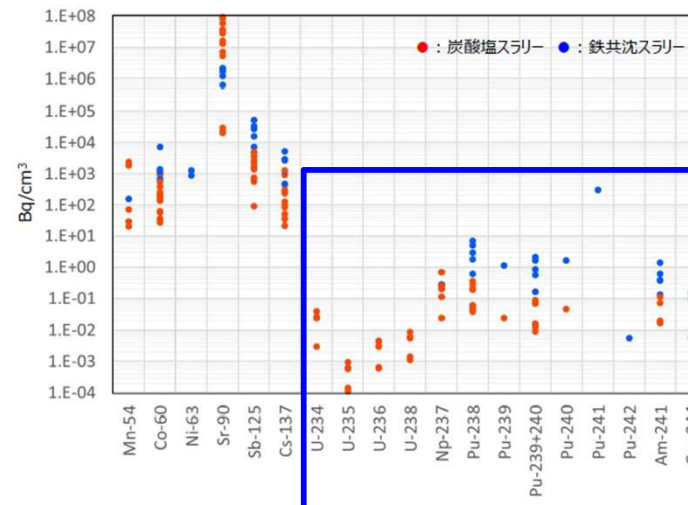


図2 多核種除去設備の前処理設備で発生するスラリー分析結果※2

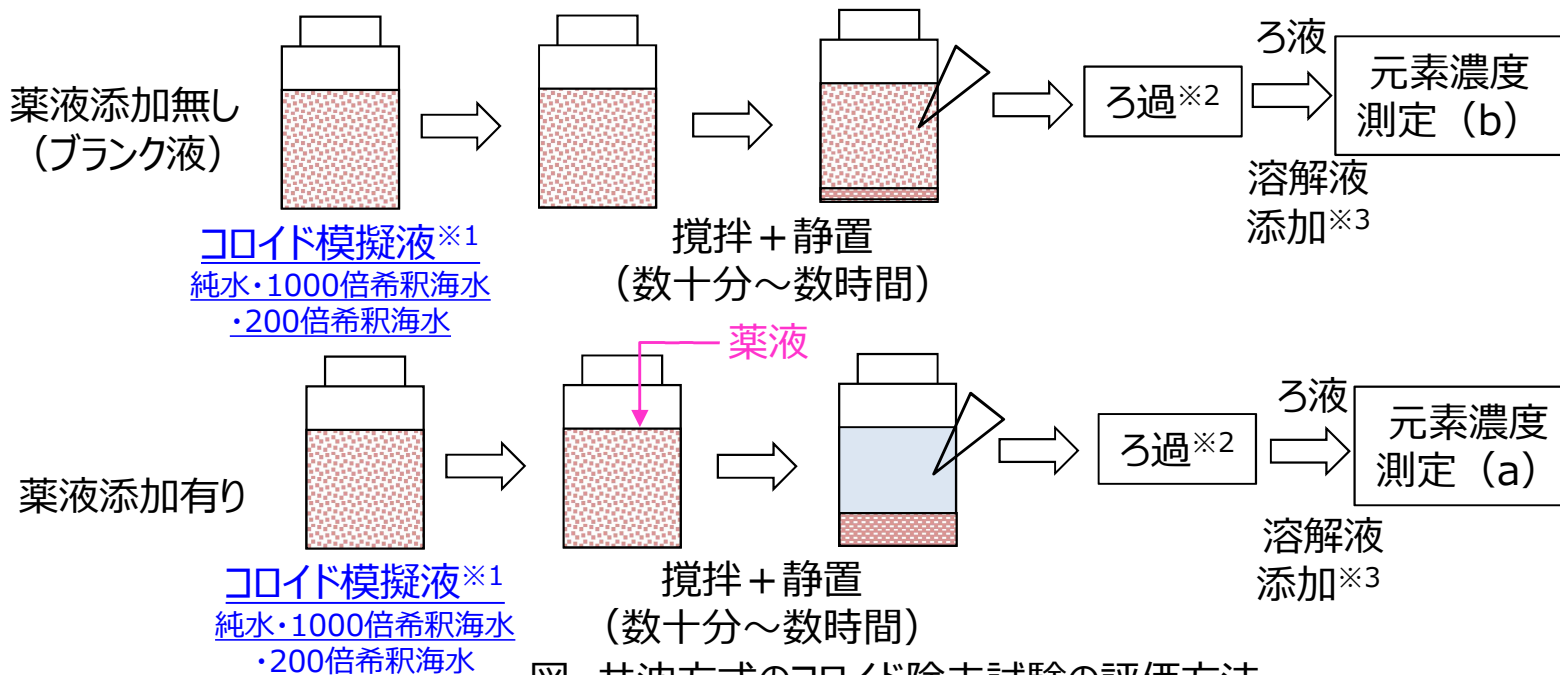
- ※1: 東京電力HD HP : https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/f1/genkyo/fp_cc/fp_alps/
- ※2: 「ALPSスラリーおよび低レベルコンクリート等廃棄物の分析方針」2023年6月5日 東京電力HD

補足8.2.3-2_共沈方式の評価方針・試験手順（1/2）

◆ 8.2.3 現行設備：共沈方式の除去性能試験

➤ コロイド除去試験の評価方針（分離手法）

- ✓ 調製した無機コロイド模擬液を用いた除去性能試験の評価方法を示す。
- ✓ コロイド除去方式のうち、水質調整方式と共沈方式の2種類においては、コロイド成分が含まれた処理対象水に薬液を添加し、コロイド成分を凝集させて沈降分離もしくはフィルタ分離によりコロイド除去する方針である。
- ✓ 除去試験評価時に除去評価時に過大評価とならないように、コロイド模擬液中の粒子が時間経過と共に凝集することで除去されたのか、あるいは薬液の影響によって凝集したのか、その両方の効果によって除去されたのか、を考慮する必要がある。そこで、薬液添加有無の液を調製し、それぞれの元素濃度（ α 核種濃度等）から除染係数（DF）を評価する。なお、これまでの補助事業にて、溶解性 α 核種除去設備での除去DFとしてDF100（暫定）が要求されており、性能を満足する除去方法を絞り込む。



$$\text{除染係数 (DF)} = \frac{\text{元素濃度 (b)}}{\text{元素濃度 (a)}}$$

- ※1 試験条件の絞り込みおよび、試験結果の考察のために、無機コロイド模擬液（COLD試験）、 α コロイド模擬液（HOT試験）をそれぞれを用いた除去試験を実施。
- ※2 想定する処理プロセスに合わせてろ過孔径を変更。試験結果考察のためにろ過なしの濃度分析も実施。
- ※3 対象物質に合わせて溶解液にて粒子を溶解する（事前検討結果より、溶解液は以下を暫定で想定）。
Fe₂O₃：塩酸，ZrO₂：硫酸，SiO₂：水酸化ナトリウム。

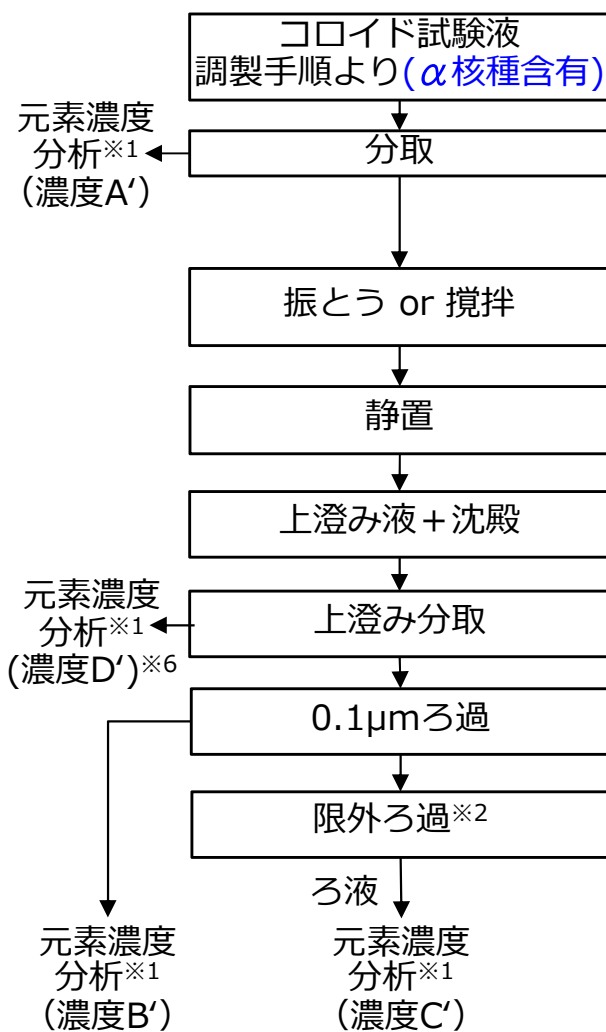
図 共沈方式のコロイド除去試験の評価方法

補足8.2.3-2_共沈方式の評価方針・試験手順 (2/2)

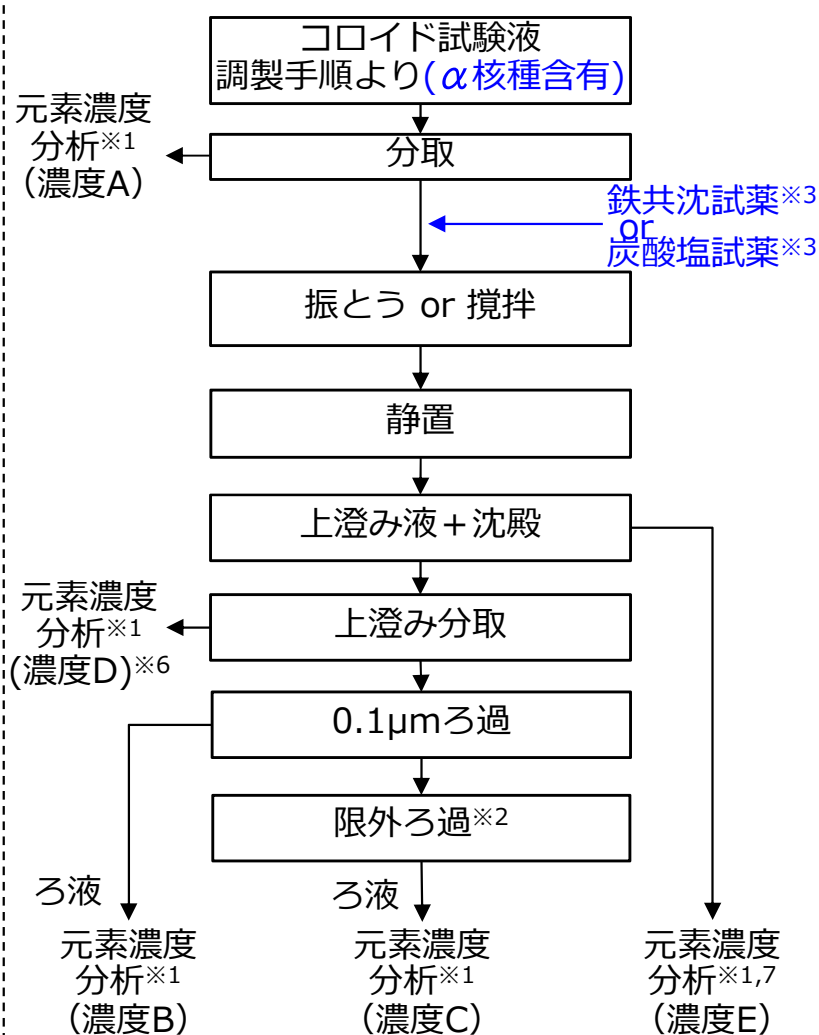
➤ 試験手順

＜共沈方式でのコロイド除去試験の概略試験手順案＞

薬液添加無し（ブランク液）概略手順※5



薬液添加有り概略手順※5



＜各評価方法案＞

【コロイド除去に関するDF評価】

$$\text{除染係数(DF)} = \frac{B' - C'}{B - C}$$

【コロイド+イオン除去に関するDF評価】

$$\text{除染係数(DF)} = \frac{B'}{B}$$

【残渣中のα核種濃度の評価】

$$\text{スラッジ(沈降成分)中濃度} = E$$

【コロイド/イオン評価】

$$\text{コロイド濃度} = B - C$$

(ブランクのコロイド濃度B'-C'と比較)

$$\text{イオン濃度} = C$$

(ブランクのイオン濃度C'と比較)

- ※1：溶解液を用いて溶解後に濃度分析
 ※2：上澄み液のα核種濃度が比較的高い場合、必要に応じて実施
 ※3：pH調整含む
 ※5：COLD試験手順も同様
 ※6：考察に資するデータとして容器付着影響を確認するために濃度D、D'を測定
 ※7：沈殿が溶解し、かつコロイド模擬粒子が溶解可能な条件にて溶解液を測定（各試験原則N=1のみ実施）

補足8.2.4-1_RO膜方式の概要

◆ RO膜方式の概要

➤ RO膜方式での処理イメージを図1に示す。

- ✓ RO膜は原理的に α 核種を含むほぼすべてのイオンに対して阻止能力を有し、コロイド形態の α 核種も除去可能であることが期待される。（吸着材は多くの場合、吸着選択性を有する）
- ✓ RO膜のフィルタ面に対して圧力をかけることで、除去対象となる粒子以外を後段へと透過させる処理方法である。
- ✓ なお、RO膜のメッシュは非常に細かいため、前処理でRO膜除去に合う粒径以上の粒子を十分に除去しておくことが現実的に運用可能な設備を検討する上で重要となる。

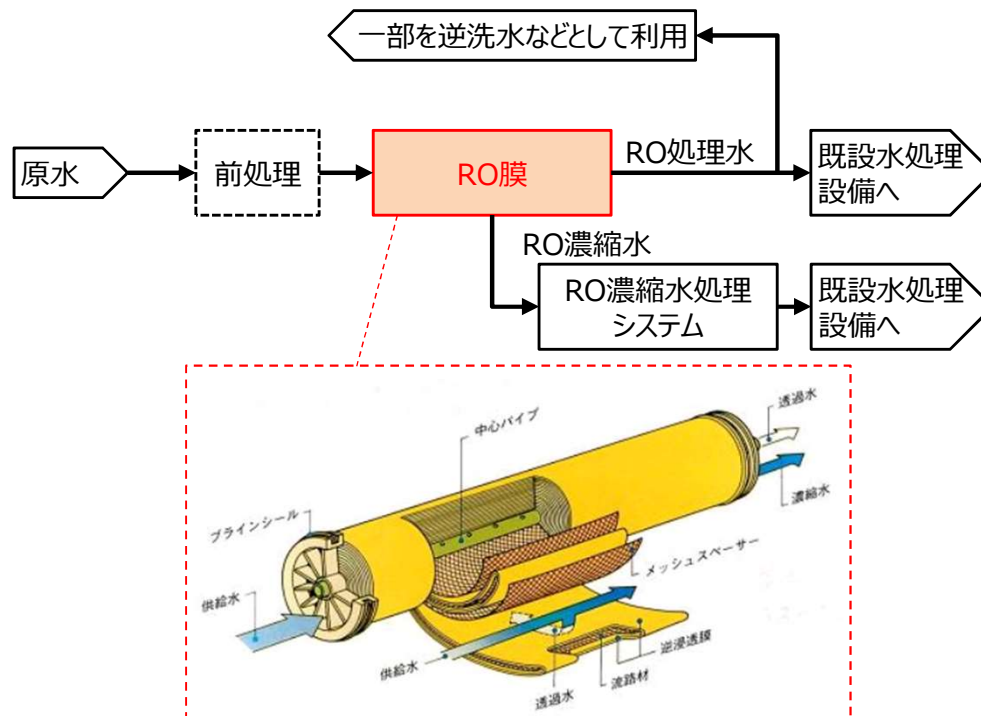


図1 RO膜を利用したシステム系統構成図のイメージ



図2 RO膜の除去対象のイメージ※

※ 出典（メンブレンの基礎知識：日東電工HP）
<https://www.nitto.com/jp/ja/products/membrane/about/>

補足8.2.4-2_RO膜方式（1/4）

◆ RO膜方式

➤ RO膜方式でのコロイド除去の検討

- ✓ RO膜は原理的に α 核種を含むほぼすべてのイオンに対して阻止能力を有し、コロイド形態の α 核種も除去可能であることが期待される。（吸着材は多くの場合、吸着選択性を有する）
- ✓ 液相系システムを継続運転するためには、炉注水（燃料デブリ冷却水）、粒子除去フィルタの逆洗水、系統洗浄水などが必要であり、外部水を使用することが検討されている。液相系システムにRO膜を設置する場合、RO処理水を確保できるため、前述した各運転水を代替することが可能であることが期待される。
- ✓ ただし、RO膜は運転に伴い濃縮水（RO濃縮水）が発生するため、その処理が必要である。2022年度補助事業では、粉末吸着材と凝集剤を併用した処理方式の研究・開発を実施した。
- ✓ また、RO膜は遠隔作業による保守・メンテナンス作業が困難な可能性が高く、作業員がアクセスする必要があり、作業員被ばくの低減（洗浄による除染、事前の放射エネルギー低減など）対策が必要である。

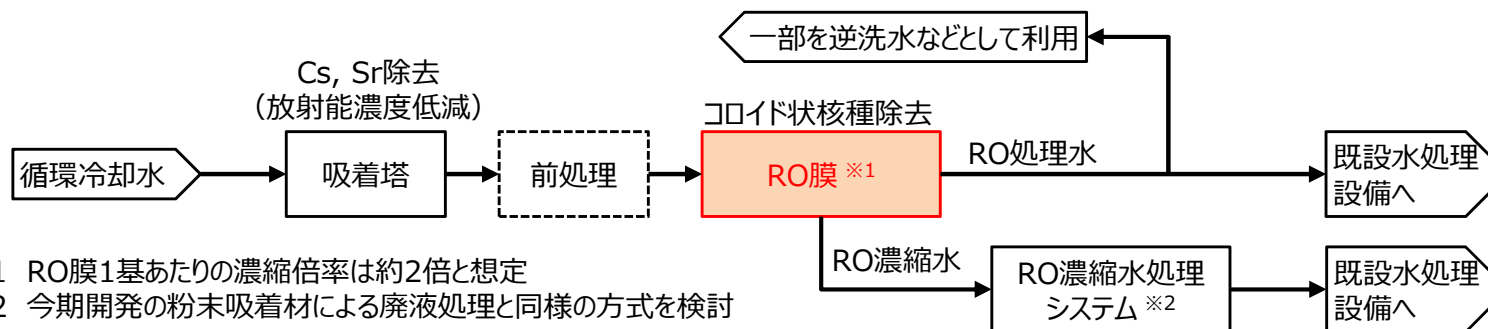


図1 RO膜を適用したシステム系統構成図

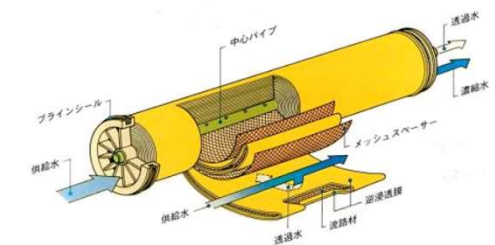


図2 RO膜イメージ図

➤ 検討方針

- ✓ 机上検討により、RO濃縮を適用する場合/しない場合の系統構成について、除去性能、運用性、メンテナンス性など観点から比較評価する。
- ✓ RO濃縮を適用する場合は、核種除去設備の前段において濃縮処理（液量低減）する系統構成を検討。

補足8.2.4-2_RO膜方式（2/4）

➤ RO膜方式を適用する場合の前提条件

使用用途

- ✓ RO膜は、コロイド除去システムの処理液量の低減を目的として設定する。理由は、RO膜は捕集した核種・コロイドをスラッジの形態で分離することができず、濃縮水として払出されるためである。

設置個所

- ✓ RO膜は、液体処理システム内の吸着塔後段(吸着槽前段)に設置することを想定。RO膜はCs, Sr等の放射性核種を捕集することにより高線量化することが懸念されるため、作業員によるメンテナンス性を保つには、吸着塔通水による放射能濃度低減の必要性が高いためである。

メリット・デメリット

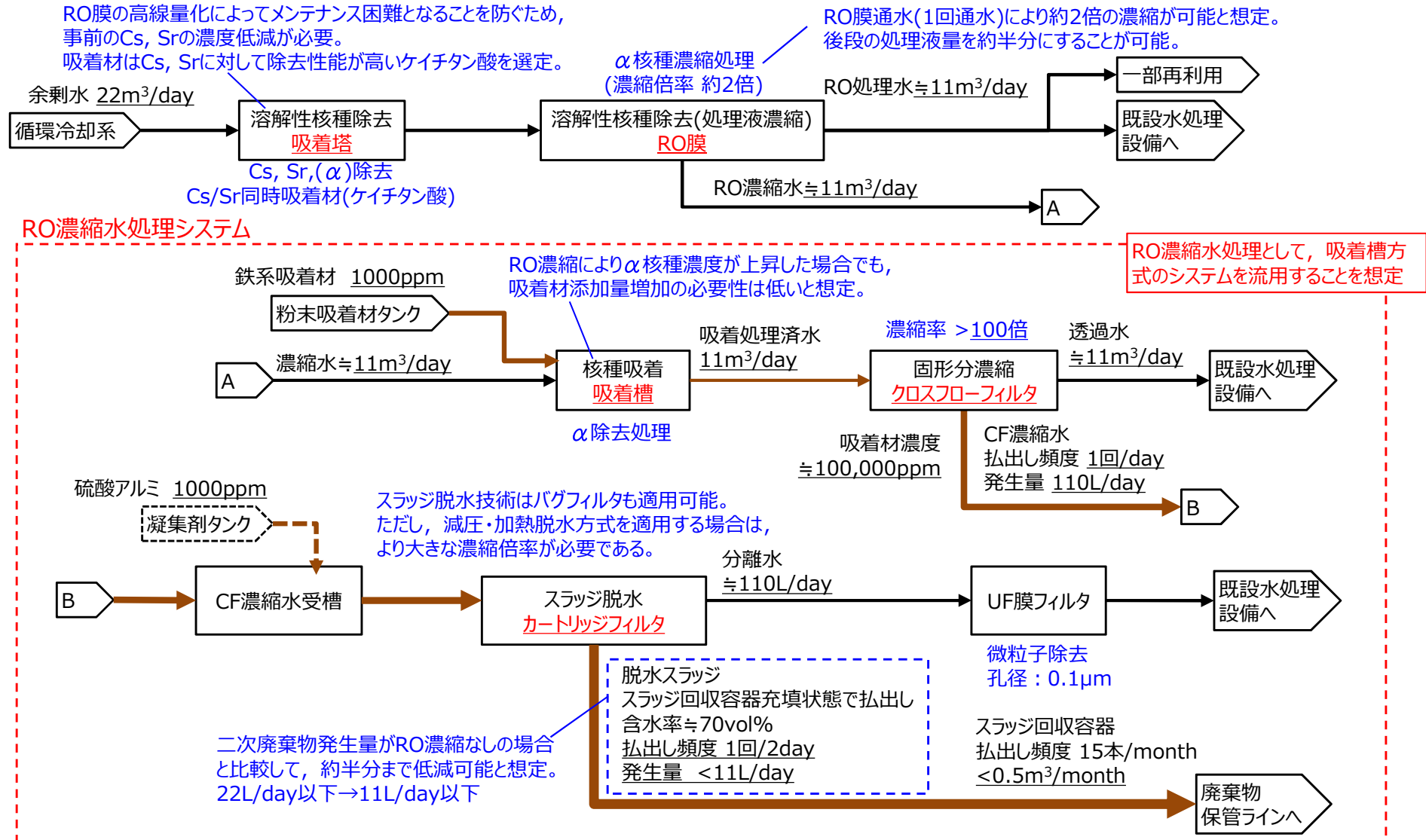
- ✓ RO膜使用に関して、代表的なメリットとデメリットの整理結果を示す。

	項目	備考
メリット	ほぼ全ての核種を対象とした除去が可能	吸着槽方式や共沈方式は、除去対象核種と吸着材(または試薬)との化学的・静電的な反応性を利用した除去方法であるため、除去可能な核種が限定的であることが多い。しかしながら、RO膜は物理ろ過方式による核種除去であるため、水和して存在するほぼ全ての核種に対する除去が可能と期待される。
	処理液量を低減可能	RO膜は1回通水で約2倍の濃縮処理が可能と想定され、約半分まで液量を低減可能。
	二次廃棄物発生量を低減可能	吸着処理や共沈処理では、除去対象核種の初期濃度が大きいほど除去性能(DF)が大きくなることが期待されるため、必要な吸着材量や共沈試薬量は、RO濃縮処理を実施しない場合と同じ程度の量で処理可能と期待される。その結果として、システムより発生するスラッジ廃棄物等の発生量が低減される。
	RO処理水を確保可能	RO処理水は、フィルタ設備等で必要となる逆洗水や炉注水として使用可能と期待される。
デメリット	濃縮倍率(除去率)が小さい	濃縮倍率を大きくすることが困難である。理由としては、多段階の通水処理が必要となるため、RO膜機器の追設が必要になること、ループ通水する場合は処理時間の増大が懸念されることにより、成立性が低いと考える。
	増設建屋内の配置スペースを圧迫	RO膜によるコロイド除去を行う場合、RO膜機器、(前段)吸着塔、(後段)吸着槽システムを設置する必要があり、必要な設備数が多く、増設建屋内のスペースを圧迫すると懸念される。
	運用負荷の増大	RO膜のメンテナンスには、フィルタエレメントを分解し交換することが必要であるため、特にメンテナンス負荷の増大が大きいと想定される。

補足8.2.4-2_RO膜方式 (3/4)

◆ RO膜を用いた α 核種コロイド除去手順案

RO膜を複数基設置し、濃縮倍率の大きい液量低減処理を行うことは、配置上の制約から困難であることが予想されるため、RO膜を1基設置した場合を仮定し、適用可能なコロイド除去システムについて検討した。下にシステム構成図を示す。

図 RO膜を用いた α 核種コロイド除去システム構成図

補足8.2.4-2_RO膜方式（4/4）

◆ RO膜を用いた α 核種コロイド除去手順案表 RO膜を用いた α 核種コロイド除去システムの処理手順案

No.	処理手順	処理手順	処理対象水	発生量	スラッジ含有量 /SS濃度	備考
-	非溶解性核種 除去システム (フィルタ機器)	粒子状核種除去 (切削粉等)	PCV取水	22m ³ /day	<1ppm	PCV内での燃料デブリ切削時に発生する切削粉等を、3段階のフィルトレーションにより除去する。粒径0.1 μ mまで除去。除去率DF100相当。
-	溶解性核種 除去システム (吸着塔)	イオン状核種除去	PCV取水	22m ³ /day	<1ppm	燃料デブリより溶出し、イオン状の形態となった α 核種を吸着塔により除去する。除去率DF100相当。
0	RO膜設備	RO濃縮処理	RO処理水	11m ³ /day	<1ppm	既設水処理設備へ払出し。
			RO濃縮水	11m ³ /day	<1ppm	吸着槽設備へ払出し。核種濃度は2倍、液量は1/2程度となると試算。
1	吸着槽設備	吸着処理 (粉末吸着材添加)	吸着処理液	11m ³ /day	1,000ppm	鉄系吸着材1000ppmを添加。水質変動も考慮し、DF100を達成可能な濃度を設定。投入量11kg/day。
2	CFフィルタ設備	CF濃縮処理	透過水	11m ³ /day	<1ppm	CF濃縮倍率は100倍以上と設定。正味の処理時間は1h以内と想定。 初期値1000ppm×濃縮倍率100倍 ≒100,000ppm
			CF濃縮水	110L/day	100,000ppm	
3	カートリッジ フィルタ設備	ろ過脱水処理	透過水	110L/day	数ppm	カートリッジフィルタを使用した加圧ろ過により、スラッジ含水率70vol%程度まで脱水処理。数回のバッチに分割し、合計で110L/dayを処理する。
			乾燥スラッジ	<11L/day	(含水率 70vol%)	
4	廃棄物保管建屋	スラッジ回収容器 払出し	—	2日あたり ユニット缶 1本分	(含水率 70vol%)	脱水処理完了後、スラッジ回収容器に充填された状態で乾燥スラッジを払出し、廃棄物保管建屋にて長期保管。

➡ RO濃縮処理なしのシステム(吸着槽システム)と比較して、廃棄物発生量が抑えられると期待されるが、配置スペースの圧迫および運用負荷の増大が影響として大きく、それらを考慮のうえRO膜の要否を決定することは今後の課題である。

目 次 ～補足資料～

9章. α 核種除去技術の開発, 実液試験準備に伴う要素試験結果

- 補足9.1.1-1 カラム試験, 破過曲線シミュレーション
- 補足9.2.1-1 通水初期の吸着挙動確認 (1/2)～(2/2)
- 補足9.3.1-1 スラッジの酸溶解・中和処理・調整等 (1/2)～(2/2)
- 補足9.3.2-1 スラッジからの α 核種溶出評価試験 (1/2)～(2/2)
- 補足9.3.2-2 スラッジからの α 核種溶出評価試験結果 (1/2)～(2/2)
- 補足9.3.3-1 低 α 濃度溶液を使用した浸漬試験 (1/2)～(2/2)
- 補足9.4.1-1 実液を用いた次段階の試験計画の策定 1
- 補足9.4.1-2 実液試験案の比較および課題整理 (1/2)～(2/2)
- 補足9.4.1-3 実液を用いた次段階の試験計画の策定 2

補足9.1.1-1 カラム試験，破過曲線シミュレーション

◆ 9.1.1 バッチ試験結果を用いた解析評価

➤ ミニカラム試験での ^{241}Am の破過曲線のシミュレーション

- ✓ バッチ吸着試験およびカラム試験結果から得られた係数を用いてミニカラム試験での ^{241}Am の破過曲線のシミュレーションを実施。
- ✓ $\phi 10\text{mm}$, 層高 64mm のカラムに流速 3.19mm/s で5日間通水した際のシミュレーションを行った。この際 ^{241}Am の入り口水濃度は $2.7 \times 10^{-3}\text{Bq/cm}^3$ とした。
- ✓ Langmuir係数および D_p の値は ^{241}Am のバッチ試験の値を用い，流動条件の影響が大きい k_f と η についてはカラム試験結果から求めた係数を用いた。
- ✓ シミュレーションの結果，長期通水後に相対濃度が低いのはA4およびA6材となった。
- ✓ A4の通水初期時に C/C_0 が0.1前後になるのは D_p が小さいためと考えられる。

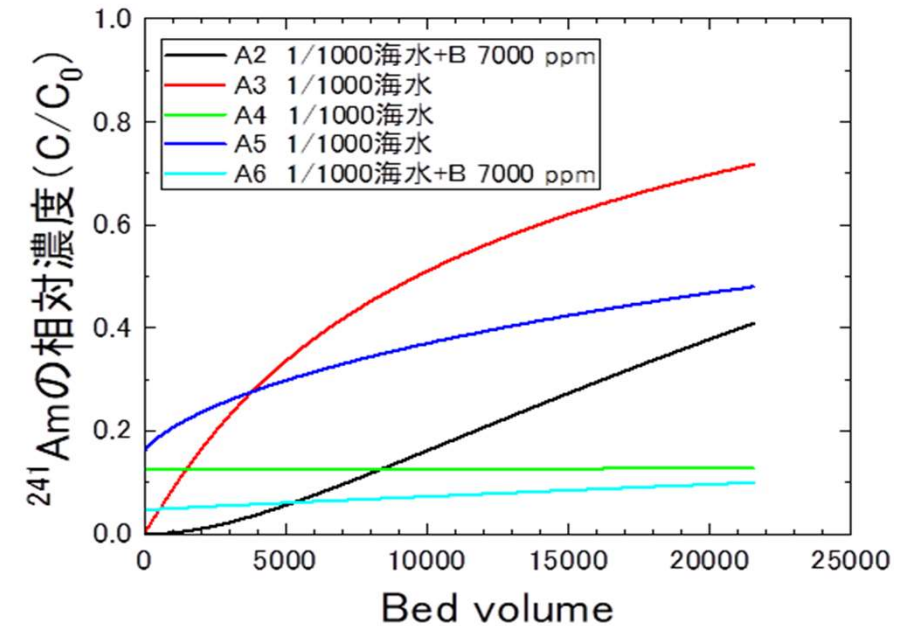


図 ^{241}Am バッチ試験とEuカラム試験から求めた係数を用いたミニカラム試験シミュレーション結果

表 シミュレーションに用いた係数

各係数\吸着材・水質条件		A2: ケイチタン酸2	A3: 添着活性炭	A4: チタン系吸着材	A5: 鉄系吸着材	A6: ケイチタン酸3
		S4: ホウ酸水	S3: 1000倍希釈海水	S3: 1000倍希釈海水	S3: 1000倍希釈海水	S4: ホウ酸水
$a[\text{cm}^3 \cdot \text{mmol}^{-1}]$	Langmuir係数	8.5.E+05	3.4.E+06	1.8.E+09	1.8.E+06	3.7.E+06
$b[\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}]$		0.050	0.013	0.11	0.11	0.10
$D_p [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	粒子内拡散係数	1.5.E-09	5.0.E-10	1.0.E-11	1.5.E-09	4.0.E-09
$k_f [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	境膜物質移動係数	3.5.E-04	6.4.E-05	2.5.E-05	4.0.E-05	6.7.E-05
$\eta [-]$	全吸着容量に対する即時吸着容量の割合	1.0.E-02	3.2.E-02	8.0.E-02	1.0.E-01	5.0.E-01

補足9.2.1-1_通水初期の吸着挙動確認（1/2）

◆ 9.2.1 通水初期の吸着挙動確認

➤ 試験パラメータ

表 通水初期の吸着挙動試験 試験パラメータ

No.	項目		設定	備考
1	トレーサ	種類	Pu, Am, Np	これまでの補助事業で選定された除去対象 α 核種
		濃度	10Bq/mL	DF100程度（暫定での設定値）で試験可能な濃度
2	通水前液の水質	希釈海水※2	①1000倍希釈海水（ホウ酸無し） （②200倍希釈海水） （③1000倍希釈海水（ホウ酸有り））	①Cl濃度17ppm相当（本事業でのベース条件） ②Cl濃度100ppm相当 ③7000ppm as B（5ホウ酸ナトリウムで調整・設備上流にて臨界防止剤を添加する水質調整を実施した場合の評価を想定）
		pH	pH6～8	大気雰囲気で行うため、CO ₂ 影響が少なく、試験中の水質変動影響が少ない中性条件で評価
		Eh	大気雰囲気相当（約0.5V）	Eh制御する場合、酸化剤および還元剤の添加が必要となり、実機想定水質から乖離した条件となるため、制御はしない
3	気相雰囲気		大気解放	2022年度までの補助事業成果より、吸着現象に及ぼす大気雰囲気の影響は軽微であると考えられるため、試験負荷の小さい大気雰囲気で行う試験を実施
4	温度		常温範囲（10℃～30℃程度）	温度影響は小さいと想定されることに加え、温度制御する場合（恒温槽等を適用）の試験成立性を考慮し、室温で実施
5	吸着材	種類	Zr系、鉄系、活性炭、チタン系等	2022年度までの補助事業成果より選定された候補となる α 核種吸着材
		カラム充填量	6mL程度	2022年度までの補助事業成果より、ミニカラム通水試験を実施する場合に設定された吸着材充填量
6	通水条件	SV（空間速度）※1	2, 10/h	2022年度までの補助事業成果および事業者エンジニアリング成果より、 α 核種除去設備で想定される処理量（2, 10m ³ /d）と暫定での吸着塔充填量（1m ³ ）から設定
7	Run数		N=1	取扱い可能な作業時間、作業スペースおよび廃棄物の観点から設定

※1 通水速度が大きい方が吸着しづらい評価となるため、SV=10/hでの評価を優先的に実施

※2 評価試験の水質は予備試験結果をもとに選定

©Decom.Tech

補足9.2.1-1_通水初期の吸着挙動確認 (2/2)

◆ 9.2.1 通水初期の吸着挙動確認

➤ 測定項目

測定項目は右表のように設定。吸着塔通水前後の α 核種濃度を測定する。

表 通水初期の吸着挙動確認試験での通水性能評価項目

項目	測定対象	測定方法
トレーサ濃度 [Bq/mL]	Pu, Am, (Cm), Np	液体シンチレーションカウンタ

➤ 評価項目

- ✓ 通水性能評価時には、 α 核種の試験機器（フィルタや試験カラム等）への付着が懸念されるため、吸着材を充填しないblank条件にて通水後液の α 核種濃度の維持傾向を事前に把握して、吸着試験の成立性を確認する。
- ✓ 図に示すような候補吸着材ごとの通水BVに対する通水性能（DF）を算出し、比較評価を行う。20BV程度通水時（通水時間は数時間程度）の吸着挙動確認試験を実施する。

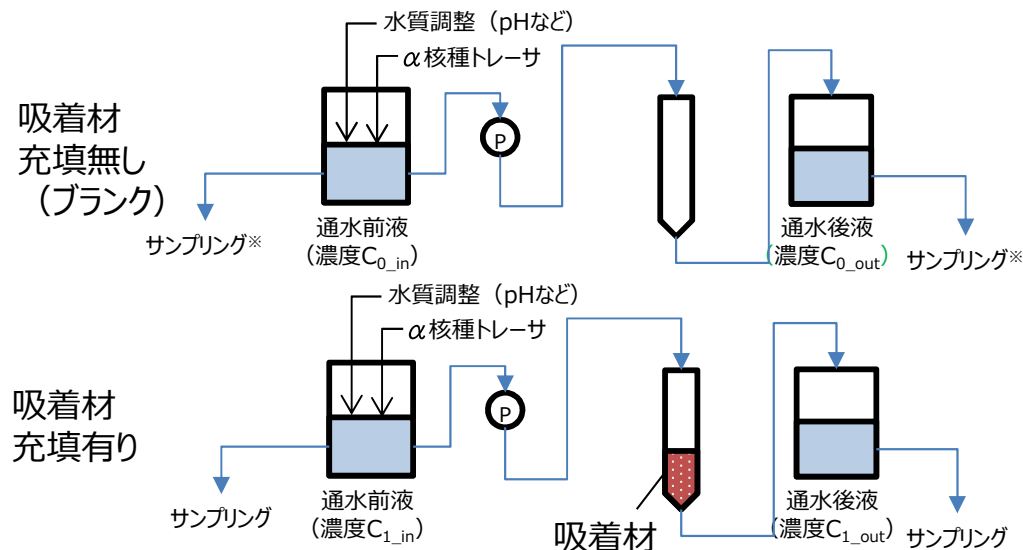


図 通水初期の吸着挙動確認試験の評価方針

$$\text{濃度維持率} = \frac{\text{濃度 } C_{0_out}}{\text{濃度 } C_{0_in}} \text{ の把握}$$

※ 0.1 μ mろ過操作と、ろ過なし操作を組み合わせ、粒子生成影響、機器付着影響を確認

$$\text{通水性能 (DF)} = \frac{\text{濃度 } C_{1_in}}{\text{濃度 } C_{1_out}}$$

補足9.3.1-1_スラッジの酸溶解・中和処理・調整等（1/2）

◆ 9.3.1 実液サンプル中のスラッジの酸溶解・中和処理・調整等

➤ 試験パラメータ

試験条件

試験条件は表1のように設定。

表1 酸溶解試験・中和処理 試験条件

No.	項目	試験条件	
		酸溶解評価	酸溶解後の中和（水質調整）評価
1	Run数	合計3ケース（Run.1～3）を実施。いずれもN=1とする。	
2	浸漬期間	浸漬期間は数時間～1日程度（暫定）。適宜ハンドシェイクにより攪拌を実施。	浸漬期間は7日程度（暫定）。適宜ハンドシェイクにより攪拌を実施。
3	試験液量/ スラッジ量	酸溶解液は数十mL程度・中和試薬は数～数十mL・その他水質調整剤は目標pHとなるまで添加 最終的な対象試験液は100mLとなるように調整。 スラッジ量は0.1g程度。	

試験液条件

試験液条件は表2のように設定。

表2 酸溶解試験・中和処理 試験液条件

試験ケース	酸溶解評価	酸溶解後の中和（水質調整）評価	備考
Run.1	0.1M HNO ₃	NaOH（pH6～8）	JAEAにて実績のある方法として設定。
Run.2	1M HNO ₃	NaOH（pH6～8）	0.1Mでは十分に溶解できない場合を想定し、一桁程度濃い条件を設定。
Run.3	追而	NaOH（pH6～8） + Ca(OH) ₂ （pH9～10）	酸溶解液はRun.1, 2の結果を踏まえて選定。 中和剤はNaOH, アルカリ性への調整試薬はCa(OH) ₂ を想定。

補足9.3.1-1_スラッジの酸溶解・中和処理・調整等（2/2）

◆ 9.3.1 実液サンプル中のスラッジの酸溶解・中和処理・調整等

➤ 測定項目

測定項目は下表のように設定。

表 酸溶解試験・中和処理 測定項目

測定項目	測定方法	備考
α 濃度	ICP-MS/Si型半導体検出器	Pu, Am, Cm （各元素代表1核種で分析）
γ 濃度	Ge半導体検出器	Cs-134, Cs-137等
元素濃度	ICP-MS	実液試料の元素濃度分析結果をもとに設定

➤ 評価項目

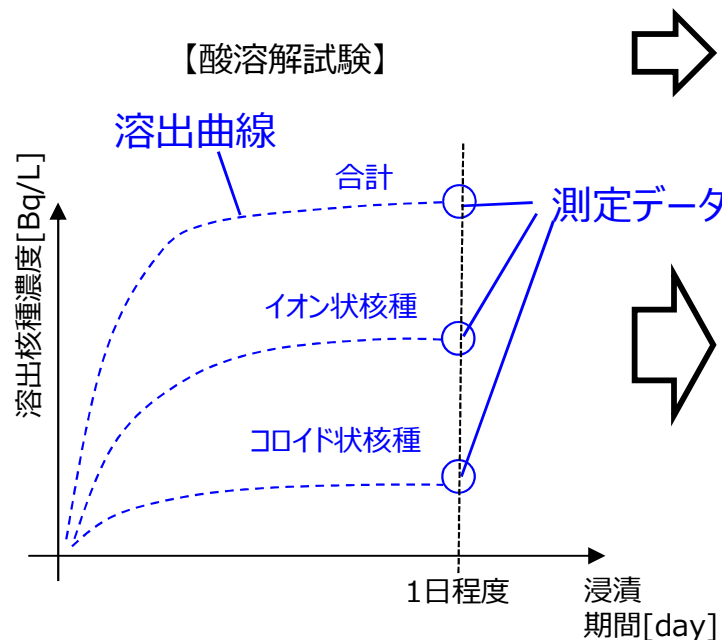


図1 酸溶出試験結果のイメージ図

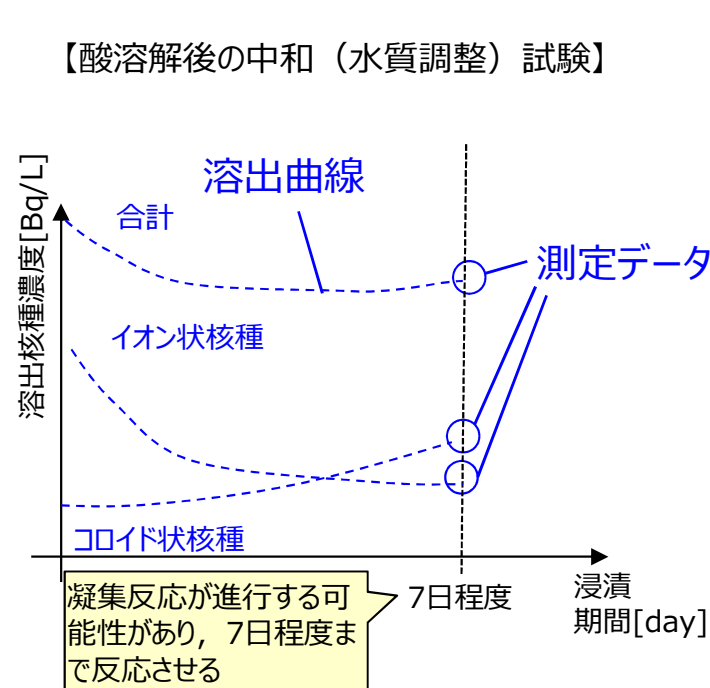


図2 酸溶解後の中和試験結果のイメージ図

核種濃度から溶出率を評価

- ✓ 限外フィルタの透過/不透過で、イオン/コロイドを個別して評価する。
- ✓ 酸溶解試験：溶出速度/溶出量/形態変化を評価
- ✓ 中和試験：形態変化を評価
- ✓ 溶出速度も評価する場合、細かいサンプリングを行う必要があり、液量数十～数百mLのサンプルから分取していくため分析試料の液量が少なくなるため、実施可能な分析が限られる。

補足9.3.2-1 スラッジからの α 核種溶出評価試験（1/2）

◆ 9.3.2 スラッジからの α 核種溶出評価試験

➤ 試験条件

試験条件は表1のように設定。

表1 溶出試験 試験条件

No.	項目	試験条件
1	Run数	合計5ケース（Run.1～5）を実施。いずれもN=1とする。
2	前処理	フィルタ分離後のスラッジサンプルに対して、純水洗浄および乾燥処理のみ実施。
3	浸漬期間	浸漬期間は7day。 適宜ハンドシェイクにより攪拌を実施。
4	試験液量/スラッジ量	試験液量は100mL/1ケースと設定。初期液量，分析液量から設定。 SS濃度は元サンプルと同様（11000ppm）となるように調整。
5	試験液条件	下表の条件を設定。

➤ 試験液条件

試験液条件は表2のように設定。

表2 溶出試験 試験液条件

試験ケース	試験液条件	調液方法	pH（試験開始時）
Run.1	1000希釈海水	・人工海水を添加し，1000倍希釈相当に調整（Cl濃度17ppm相当） ・pH6に調整	pH6
Run.2	ホウ酸水	・人工海水を添加し，1000倍希釈相当に調整（Cl濃度17ppm相当） ・ホウ酸試薬を7000ppmasBとなるように添加	pH8程度
Run.3	pH調整のみ	・液相を分離せずにpH6に調整	pH6
Run.4	1000倍希釈海水 + Ca(OH) ₂	・人工海水を添加し，1000倍希釈相当に調整（Cl濃度17ppm相当） ・コンクリート溶出を模擬し，Ca(OH) ₂ にてpH9～10に調整	pH9程度※
Run.5			pH10程度※

※ 試験容器は密閉し，可能な限り外部からの気体流入がない環境で試験を実施（試験結果には想定される気液比を併せて報告）

補足9.3.2-1 スラッジからの α 核種溶出評価試験（2/2）

◆ 9.3.2 スラッジからの α 核種溶出評価試験

➤ 測定項目

測定項目は下表のように設定。

表 溶出試験 測定項目

項目	測定方法	測定内容	
γ 濃度	Ge半導体検出器	限外ろ過後のろ過液	イオン濃度
		0.1 μ mろ過後のろ過液	コロイド濃度 + イオン濃度
全 α 濃度	ICP-MS / α 線計測	限外ろ過後のろ過液	イオン濃度
		0.1 μ mろ過後のろ過液	コロイド濃度 + イオン濃度
元素濃度	ICP-MS / ICP-AES	0.1 μ mろ過後のろ過液の元素濃度を定量分析する。測定対象元素は、2023年度の検討成果および実液分析試験結果を考慮して決定する。	

$$\text{溶出率[Bq/g]} = \frac{\text{核種濃度[Bq/L]}}{\text{試験液量[L]} \times \text{スラッジ重量[g]}}$$

➤ 評価項目

単位スラッジ量あたりの α ・ γ 核種の溶出量（溶出率）を評価。

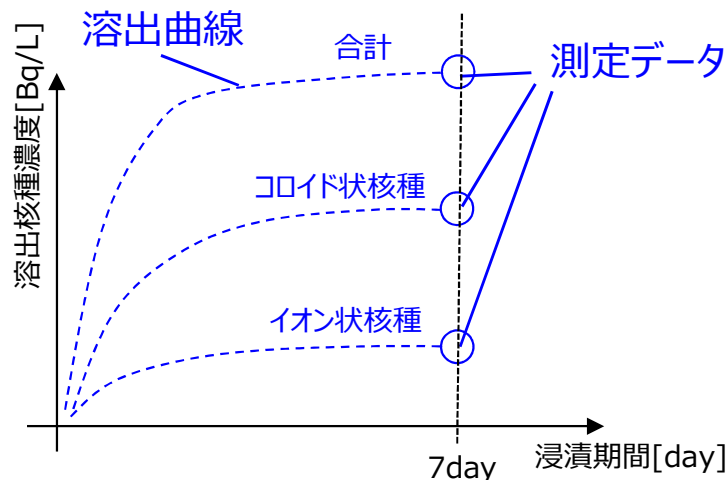


図 溶出試験結果のイメージ図

核種濃度から溶出率を評価

- ✓ 限外フィルタの透過/不透過で、イオン/コロイドを個別して評価する。
（擬似）平衡状態の溶出量进行评估
- ✓ 燃料デブリ取り出し時は、化学平衡に近い状態でそれぞれ核種が溶解していると想定し、平衡状態のデータ取得を重視する方針。
- ✓ 溶出速度も評価する場合、細かいサンプリングを行う必要があり、液量100mLのサンプルから分取していくため、分析試料の液量が少なくなり実施可能な分析に限られるため、**本件では7dayサンプルのみ分析を実施する方針とした。**

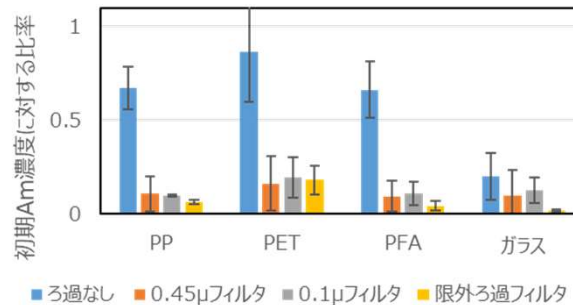
補足9.3.2-2 スラッジからの α 核種溶出評価試験結果（1/2）

◆ 9.3.2 スラッジからの α 核種溶出評価試験

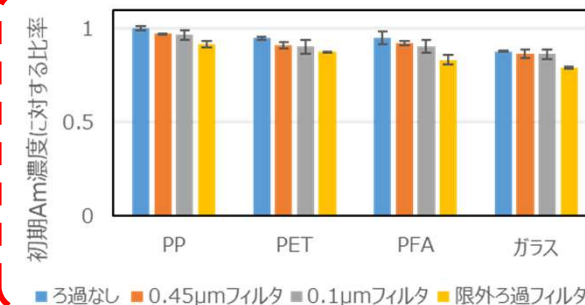
➤ 試験結果(ホウ酸水条件)

2022年度補助事業までに実施した模擬液試験の結果より、ホウ酸水中では α 核種の溶解量が大きくなる傾向が確認されている。

ホウ酸添加なし条件(1000倍希釈海水)では、0.45 μ mフィルタろ過により大部分のAmが除去され、沈殿形態で存在していたと推察される。



(a)ホウ素添加なし



(b)ホウ素添加あり 7000ppmasB

図1 模擬液試験によるAm濃度の評価結果(2020年度補助事業)

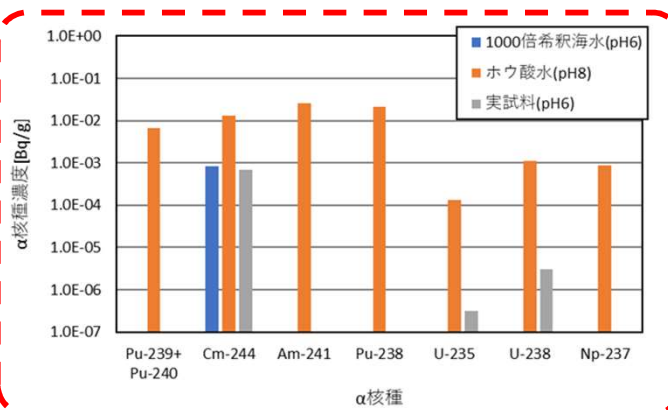
Am 10Bq/ccが全量近く溶解。
ホウ酸水条件にて、Amの溶存濃度
が大きくなる挙動を確認。

ホウ酸水条件における実液試験結果

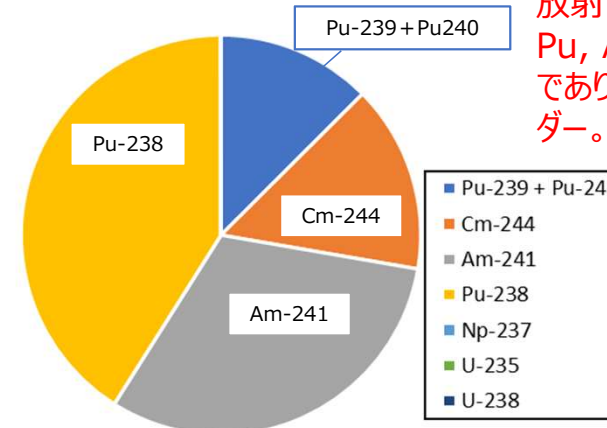
本実液試験の結果からも、同様にホウ酸水浸漬下でのみ α 核種濃度が上昇する挙動を確認した。
特に、Pu, Am, Cmの3核種が放射能濃度が支配的となることを確認した。

ホウ酸水条件にて、
各 α 核種の溶存濃度が
大きくなる挙動を確認。

1000倍希釈海水では、
ほぼすべての α 核種はND。



(a)ホウ酸水中の α 核種濃度



(b)ホウ酸水中の α 核種の放射能濃度比

放射能濃度比で整理した場合、
Pu, Am, Cmの3核種が支配的
であり、Np, Uは無視可能なオー
ダー。

図2 スラッジからの α 核種溶出評価試験 α 核種濃度測定結果(0.1 μ mろ過)

補足9.3.2-2 スラッジからの α 核種溶出評価試験結果（2/2）

◆ 9.3.2 スラッジからの α 核種溶出評価試験

➤ 試験結果(ホウ酸水条件)

出発物質による差異の考察

模擬液試験では、 α 核種の硝酸塩試薬を使用しており、出発物質が強酸性溶液下におけるイオン形態である。このことから、 α 核種が初期のイオン形態から固相形態に遷移する反応速度に対し、ホウ酸成分が速度論的な影響を及ぼし、平衡状態へ遷移する速度が非常に遅くなっている可能性が考えられた。しかし、本実液試験では、スラッジ中に何らかの固相形態で存在する α 核種を溶媒抽出した試験体系であるため、出発物質が固相形態の場合でも、同様の溶解度上昇が発生することを確認した。すなわち、出発物質の形態に関わらず、ホウ酸水中の α 核種の平衡濃度は増大する可能性が示された。

ホウ酸水中の α 核種の存在形態に関する考察

Pu, Am, Cmのコロイド割合が大きいという結果より、ホウ酸成分の影響により、スラッジ中の微粒子の表面電荷が変化し、コロイドとして液中に移行した可能性が考えられる。しかしながら、存在量が比較的大きいと想定されるAl, Si, Ca, Fe, Znについては顕著な濃度上昇は確認されなかったため、水酸化物等の真正コロイドである可能性も考えられる。ただし、Feは約250ppbに相当する微粒子成分がホウ酸水条件でのみ検出されたため、Feを主成分とする擬似コロイドであった可能性が考えられる。

擬似コロイド形態への遷移に関する考察

本補助事業にて実施した擬似コロイド作製試験結果や文献調査結果より、Pu, Am等はFeを主成分とするコロイドに付着しやすく、一方U, NpはFeおよびSiいずれのコロイドにも付着しにくい傾向が明らかとなった。以上を考慮すると、ホウ酸成分の影響によりスラッジ中に存在する α 核種(5核種)はまずイオンの形態に変化し、その後コロイド(Fe等)に捕捉されるように存在形態が遷移している可能性が考えられる(右図)。

上記の仮説が正しい場合、各核種のイオン/コロイドの存在比は、核種ごとのコロイドへの付着のしやすさに依存するため、コロイド割合に大きな分散がある結果とも整合的である。

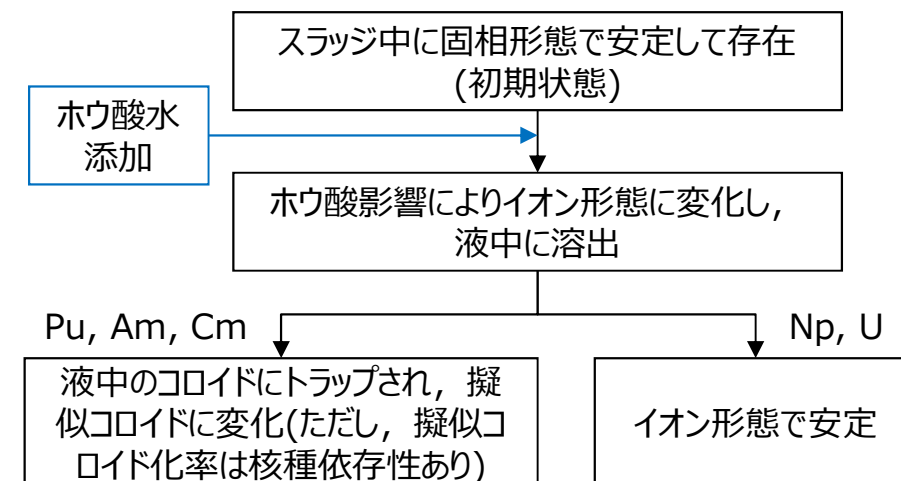


図 ホウ酸水中における各 α 核種の存在形態の推移に関する考察

補足9.3.3-1_低 α 濃度溶液を使用した浸漬試験（1/2）

◆ 9.3.3 低 α 濃度溶液を使用した浸漬試験

➤ 試験条件

試験条件は表1のように設定。

表1 浸漬試験 試験条件

No.	項目	試験条件
1	Run数	合計5ケース（ブランク試験含む）を各試験N=1で実施。粉末吸着材を使用した α 核種吸着試験では、試験サンプルのバラツキが小さいことが模擬液試験より示されたため、N数は1とする。
2	試験液	実液サンプルからスラッジを分離した液に、0.1M硝酸のスラッジ溶解液を添加し、 α 核種濃度を上昇させ使用する。試験液量は30mL/1ケースと設定。初期液量、分析液量から設定。
3	浸漬期間	浸漬期間は2, 6, 24h(基本は24h)の3条件。 適宜ハンドシェイクにより攪拌を実施する。
4	吸着材	α 核種吸着材候補より4種類を選定(表2に記載)。

- ✓ 本試験に供する吸着材は、表2に示す α 核種除去用の候補材4種類とする。
- ✓ スラッジの硝酸溶解液を添加するため、スラッジ由来のFe成分がコロイドを形成する可能性がある。そのため、イオン状およびコロイド状の α 核種いずれもが存在する可能性がある。そのため、両者の形態の α 核種除去性能を検証可能なように、吸着材種類は幅広く選定し試験を実施することとした。
- ✓ 液固比は、分配係数を適切に評価可能なように10000mL/gと設定。

表2 α 核種吸着材候補一覧

No.	吸着材	仕様	分配係数※	粒径
1	チタン酸	粉状（湿潤状態）のチタン酸	Np : $> 3.7E+05\text{mL/g}$ Pu(FeOOHコロイド) : $7.2E+03\text{mL/g}$	約4 μm
2	ケイチタン酸	粉末のケイチタン酸	Pu(FeOOHコロイド) : $3.2E+04\text{mL/g}$	約3 μm
3	添着活性炭	粉状の添着活性炭	Am : $> 5.0E+05\text{mL/g}$ Pu(FeOOHコロイド) : $1.6E+04\text{mL/g}$	約50 μm
4	Fe ₃ O ₄ （マグネタイト）	Fe ₃ O ₄ 微粒子	Pu(FeOOHコロイド) : $1.1E+04\text{mL/g}$	約1 μm

※ 2022年度補助事業 最終報告書および今期補助事業 Pu疑似コロイド吸着試験より

補足9.3.3-1_低 α 濃度溶液を使用した浸漬試験（2/2）

◆ 9.3.3 低 α 濃度溶液を使用した浸漬試験

➤ 測定項目

測定項目は下表のように設定。

表 吸着試験 測定項目

項目	測定方法	測定内容	
γ 濃度	Ge半導体検出器	限外ろ過後のろ過液	イオン濃度
		0.1 μ mろ過後のろ過液	コロイド濃度 + イオン濃度
全 α 濃度	ICP-MS / α 線計測	限外ろ過後のろ過液	イオン濃度
		0.1 μ mろ過後のろ過液	コロイド濃度 + イオン濃度
元素濃度	ICP-MS /ICP-AES	0.1 μ mろ過後のろ過液の元素濃度を定量分析する。測定対象元素は、2023年度の検討成果および実液分析試験結果を考慮して決定する。	

➤ 評価内容

- ✓ α 核種および γ 核種に対する吸着挙動（除去率、分配係数）を評価する。
- ✓ 各 α 核種濃度および全 γ 濃度（Cs-137）について測定・評価する。
- ✓ 限外フィルタの透過/不透過で、イオン/コロイドを区別して評価する。
- ✓ 実液性状分析試験結果より、実液（液相）に含まれる α 核種が想定よりも低濃度であることが示された。除去率を適切に評価するためにはある程度の初期 α 核種濃度が必要であるため、0.1M硝酸をスラッジに添加し α 核種を抽出した溶解液を添加し、 α 核種濃度を上昇させる。
- ✓ 溶解液を添加したが、溶解性 α 核種の濃度上昇は確認されず、U以外は検出下限値以下であった。理由としては、pH6への調整により、スラッジより溶解したFe成分が再沈殿し、 α 核種を共沈したためと考えられる。

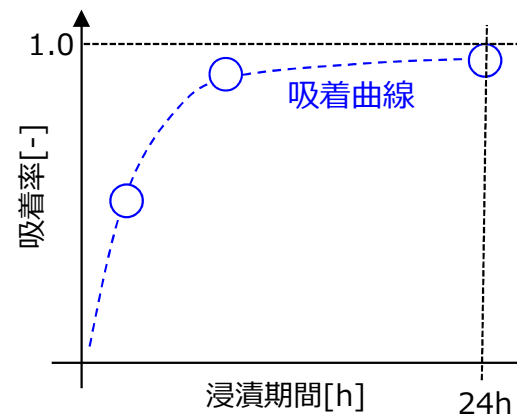


図 吸着試験結果のイメージ図

$$\text{除去率}[-] = \frac{C_{ini} - C_t}{C_{ini}}$$

$$\text{分配係数 (Kd) [mL/g]} = \frac{C_{ini} - C_t}{C_t} \times \frac{V}{M}$$

C_{ini} ：初期核種濃度[Bq/L]

C_t ：浸漬時間t[h]における核種濃度[Bq/L]

V：試験液量[mL]

M：吸着材添加量[g]

補足9.4.1-1_実液を用いた次段階の試験計画の策定 1

◆ 9.4.1 実液を用いた次段階の試験計画の策定（ミニカラム試験）

表 実液試験計画（ミニカラム試験）

実液試験計画		
No.	項目	内容
①	試験体系	・9.3項の検討結果より前処理（酸溶液＋中和処理）可能なミニカラム（吸着材充填量5～6ml程度）通水試験装置 ・上記試験体系の実施項目(測定項目)：核種濃度，元素濃度，pH，ORP，水温，塩化物イオン濃度，溶存酸素，IC，カラム差圧，装置内流量 ・上記試験体系の評価項目：核種濃度によるDF評価
②	使用する試験液	1F R/B滞留水
③	試験液量	6L程度（1000BV）/1ケース（実液試験装置は3系列を想定しており，最大3ケース同時通水試験可能）
④	試験実施場所	試験装置候補場所：1F 2号Rw/B
⑤	試験装置構成，装置規模	概略系統図を検討（図1）
⑥	試験装置サイズ（平面サイズ）	機器寸法：1.8m×4.2m（1F 2号Rw/Bに設置可能なサイズであることを確認。機器配置は図2）
⑦	候補吸着材の優先順位	通水初期の吸着挙動確認試験（9.2.1項）結果より，以下のように候補吸着材の優先度を設定 優先度 高：鉄系，チタン系，等 優先度 中：Zr系
⑧	工程（準備工程，試験工程）	準備工程：機器内洗浄，装置液張り 試験工程：実液の水質調整，実液中の固形分除去，通水前液の水質調整（通水前液の分析），カラム通水，通水後液の分析

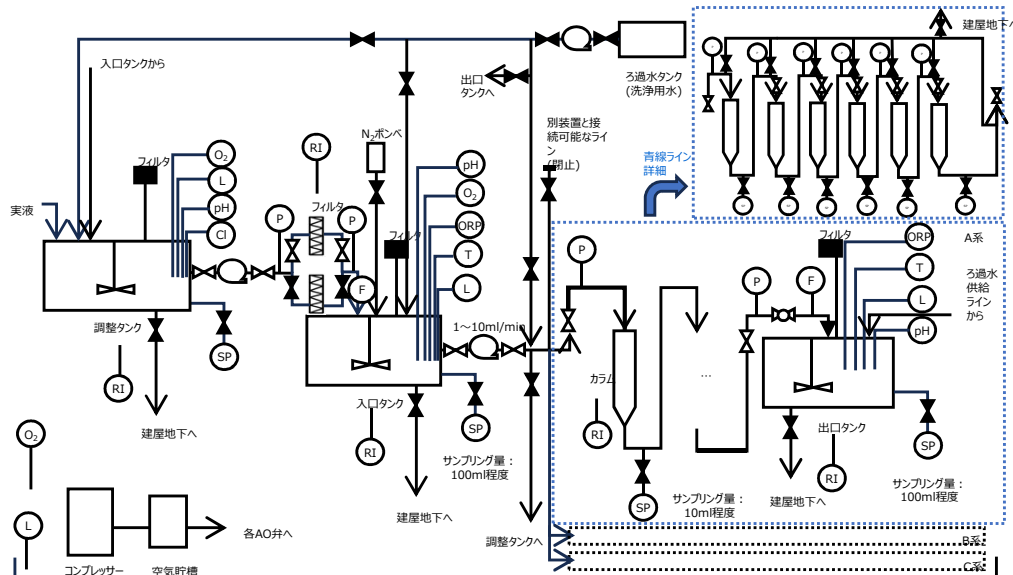


図1 実液試験装置の概略系統図

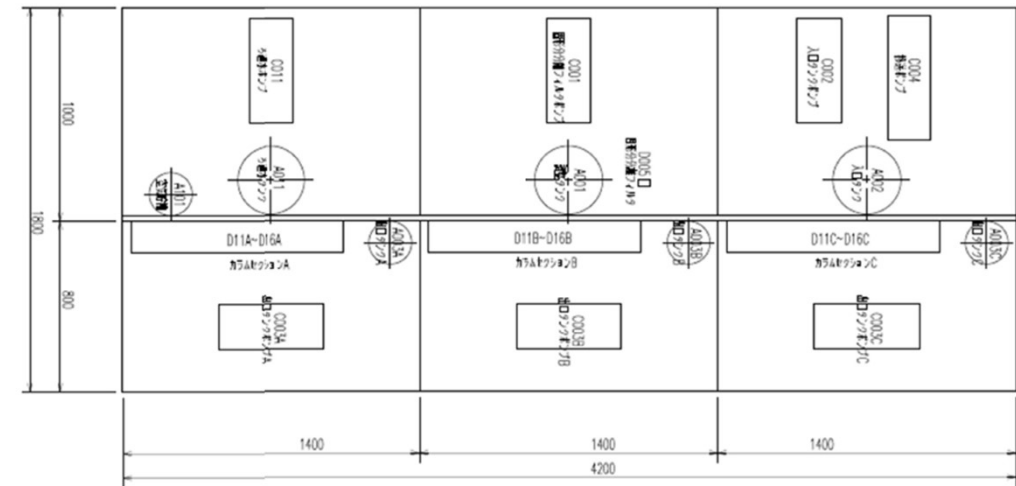


図2 実液試験装置の機器配置図（平面）

補足9.4.1-2_実液試験案の比較および課題整理（1/2）

◆ 9.4.1 実液を用いた次段階の試験計画の策定（バッチ試験および解析評価）

➤ 実液試験案の比較

表 実液試験案の比較

実液試験の主要方式として検討

項目\試験案	実機長カラム試験	ミニカラム試験	ミニカラム試験 (短期通水のみ)	バッチ試験&解析評価
実液使用量	多量/ケース	数十L/ケース	数百mL/ケース	約200mL/ケース
試験実施場所候補	1F構内	1F構内	NFD施設	NFD施設(&電中研)
酸溶解による α 核種の 高濃度化処理	× (液量が大きいため不可)	△ (液量が大きいため専用の処理 装置を要す)	○	○
試験時の被ばく量	大	中	小	小
α 核種個別分析	×	×	○	○
試験装置規模	大	大～中	小	小
通水時吸着性能評価	○	○/△ (リークの可能性あり)	○/△ (リークの可能性あり)	○/△ (今期成果に基づき検討)
寿命評価	○	○/△	×	○/△

バッチ試験&解析評価における課題

本手法は α 核種除去に対する実績がなく、実機性能と解析評価結果に乖離がある懸念がある。そのため、本補助事業(2023-2024年度)実施のEuを用いた試験により適用性を確認した。

次年度(2025年度)以降の実液試験および解析評価により取得された結果についても、代表ケースにおけるカラム試験を実施し、解析評価結果との整合性を評価する。

補足9.4.1-2_実液試験案の比較および課題整理（2/2）

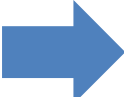
◆ 9.4.1 実液を用いた次段階の試験計画の策定（バッチ試験および解析評価）

➤ 実液試験案の課題整理

実液を使用してカラム試験を実施する場合に考えられる代表的な課題を下表に整理した。また、代替試験方法として検討したバッチ試験および解析評価を適用する場合に考えられるメリットも併記した。

表 カラム試験に関する課題整理表

No.	項目	実液を使用したカラム試験に関する課題	バッチ試験および解析評価で代替試験することによるメリット
1	多量の液量が必要	カラム試験には、1ケースあたり数十L規模の実液が試験液として必要であると試算されており(ミニカラム試験の場合)、多量の実液をサンプリングにより確保することや、試験にて取り扱うことに課題があると考ええる。	数百mL程度の少量の実液サンプルにて試験が可能
2	1F構内で実施する必要性が高い	1F構外での試験設備として、NFDやJAEAがあるが、実液を受入れ可能な量に制限があり、カラム試験に必要な液量を受入れることは困難である。そのため、1F構内で試験を実施することを前提とする必要がある。	必要な実液量が少量であるため、NFD施設にて試験可能と想定
3	試験時の被ばく量が大 きい	数十L規模の実液を取り扱う場合、試験時の作業員への被ばく量が大きくなる可能性があり、試験内容や作業時間等に制約が生じる可能性がある。	必要な実液量が少量であるため、試験員被ばくを抑制することが可能
4	試験ケースを多数実施 する必要がある	α 核種吸着材の候補数、燃料デブリ取り出し時の想定水質数、吸着塔構成パターン等の諸条件を網羅的に試験することを考慮すると、必要な試験ケース数が多数必要である。	1ケースあたりの試験負荷がカラム試験と比較して小さいため、多数の試験ケース数を実施することが可能と想定
5	試験方法・試験装置体 系が確立されていない	実液を通水したカラム試験にて、 α 核種の吸着材寿命を評価した実績はなく、長期通水を行う場合の試験方法および試験装置について検討する必要がある。	2023-2024年度補助事業にて、本技術の適用性および試験方法等の検討を実施

 バッチ試験および解析評価による代替試験であれば、実液試験が成立する見込みが高いと想定する。

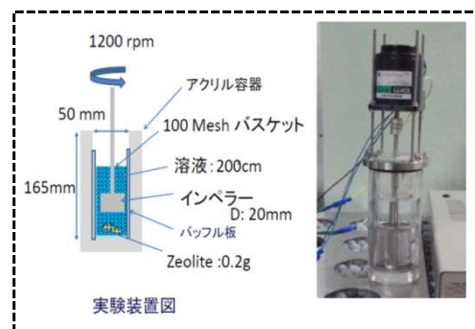
補足9.4.1-3_実液を用いた次段階の試験計画の策定 2

◆ 9.4.1 実液を用いた次段階の試験計画の策定（バッチ試験および解析評価）

表 実液試験計画（バッチ試験および解析評価）

実液試験計画		
No.	項目	内容
①	試験体系	・ローラー振とう方式のバッチ試験（平衡吸着試験および吸着速度試験） ・測定項目：核種濃度（α核種およびγ核種）、pH、元素濃度、ORP、水温、導電率 ・評価項目：各吸着材の核種除去性能（DF）、平衡吸着量（吸着平衡状態における吸着量）、吸着速度（吸着量-経過時間の関係）
②	使用する試験液	各取り出し規模段階における1F滞留水
③	試験液量	数百mL/1バッチ
④	試験実施場所	・1F構内（2号機Rw/B等） ・1F外の試験設備、ただし実液の受入れ量が制限されるため、全量1L規模以下の試験。
⑤	試験装置サイズ（平面サイズ）	試験装置自体の必要スペースとして1m四方以内を想定。 （実液等の保管場所、サンプリング機器、作業スペースなどが必要）
⑥	候補吸着材の優先順位	チタンケイ酸塩、鉄系吸着材など2024年度までの補助事業において、 α 核種除去用吸着材として選定されている顆粒状吸着材が試験優先度が高い
⑦	試験装置構成、装置規模	ローラー振とう器を使用した攪拌試験
⑧	工程（準備工程、試験工程）	燃料デブリの取り出し規模が拡大される各段階において実液をサンプリングし、試験を実施することを想定

- 本技術の本来の試験体系は、攪拌翼を使用し、試験液を常時高速攪拌しながら実施する体系で開発された。しかし、放射性核種が含まれる実液を非密閉系で攪拌しなければならないことが実液試験では難しいと想定される。
- 今期補助事業における検討により、ローラー振とう方式のバッチ試験方式でも、同様のデータ取得が可能と期待されることを確認した。
- ローラー振とう方式を代替手法とし、今後必要な実液試験の試験計画を立案。



(a) 攪拌式の吸着速度試験
（COLD試験（Eu試験））



(b) ローラー振とう式の吸着速度試験
（HOT試験（Am試験））

図 吸着速度試験の試験方法（2024年度補助事業）

補足9.4.1-3_ 実液を用いた次段階の試験計画の策定 2

◆ 9.4.1 実液を用いた次段階の試験計画の策定（バッチ試験および解析評価）

➤ バッチ吸着試験と解析評価に関する検討内容

下表に実液を使用した吸着速度試験の試験条件の検討内容を示す。

表 実液を使用した吸着速度試験の試験条件

No.	項目	設定	備考
1	試験実施場所	1F構内(2号Rw/B等) もしくは1F構外(NFD殿等の試験施設)	実液サンプルを搬出し、1F構外の試験設備で試験を実施する場合、今後試験実施可否も含めて調整が必要
2	実液採取量	1.0L	NFD設備で受入れ可能な液量
3	吸着材	チタン系吸着材, ケイチタン酸3, 鉄系吸着材, (ケイチタン酸2, 添着活性炭)	2024年度実施の候補吸着材絞り込みの成果より, α 核種除去用吸着材(吸着塔向け)として選定された吸着材のうち, 優先度の高い材を選定。
4	液性	1000倍希釈海水(基本条件), ホウ酸水, コンクリート溶出水	燃料デブリ取り出し期間中に想定される代表水質を選定
5	液量	200 cm³	1ケースあたりに使用する試験液量。
6	液固比(SS濃度)	V/M=1000~20000	試験液量あたりの吸着材添加量。基本は10000ml/gと設定。
7	浸漬期間	最大7day	吸着材添加から固液分離を行うまでの期間。 試験開始初期は数分間隔でサンプリングし、徐々に長間隔とする。
8	攪拌方法	振とう器により振とう もしくはハンドシェイク	攪拌翼による攪拌操作は、試験設備上困難であるため簡易的な振とう方式を採用する。
9	温度	室温制御	室温管理にて制御
10	Eh	特に制御しない	試験液の脱気操作は不要
11	気相雰囲気	大気雰囲気	—
12	フィルタ	0.1 μ m	スラッジ成分および吸着材成分を分離可能なフィルタを選定

吸着速度試験では、必要な液量は1バッチあたり200cm³以下と想定され、カラム試験より小さい。

吸着速度試験を実液で実施する場合は、試験体系はローラー振とう方式が適用性が高いことを本事業により確認。

目 次 ～補足資料～

10章. 二次廃棄物処理技術の開発, 固形分濃縮技術の要素試験結果

補足10-1 凝集剤性能からの考察

補足10-2 脱水処理後の含水率目標値の設定

補足10-3 模擬粒子の選定

補足10.1-1 クロスフローフィルタ要素試験 (1/3)～(3/3)

補足10.1-2 クロスフローフィルタ要素試験 –試験結果– (1/3)～(3/3)

補足10-1_凝集剤性能からの考察

◆ 本検討の背景, これまで（2022年補助事業）の成果

➤ 凝集剤性能からの考察

✓ 2022年度補助事業の凝集沈殿試験結果より, 下記の傾向を確認。

- ① 初期SS濃度に依存せず, SS濃度は約10ppmまで低減可能。
- ② SS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。
- 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。

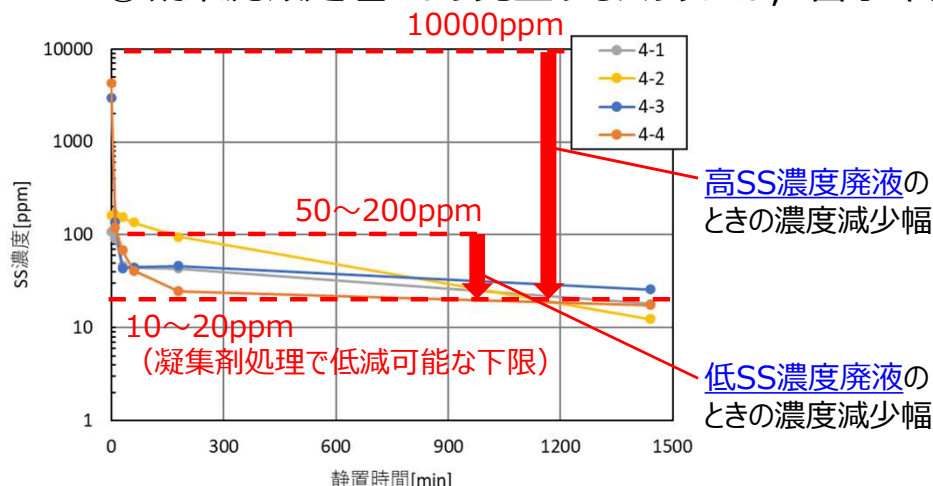


図 凝集沈殿試験結果（2022年度補助事業）

✓ 凝集沈殿処理の観点では, 廃液のSS濃度は数千～数万ppmの範囲が適切と考えられる。

✓ スラッジ脱水処理の処理液量低減の観点では, ろ過脱水の場合は0.1m³/dayオーダー, 減圧・加熱脱水の場合は0.01m³/dayオーダー以下に液量低減する必要があると想定。

➡ 凝集沈殿処理およびスラッジ脱水処理の観点から, CF濃縮処理では100倍以上の濃縮倍率が必要。

➤ 各処理設備の要求性能

表 各処理設備の要求性能

処理プロセス		水量	SS濃度※1	濃縮倍率	必要脱水速度※2
インプット水	—	22m ³ /day	0ppm	—	—
吸着処理	2200g添加	22m ³ /day	100ppm	—	約4.0 m ³ /h
CF濃縮処理	固形分1%まで濃縮	0.22m ³ /day	10,000ppm	100倍	約40 L/h
凝集沈殿処理	固形分10%まで濃縮	22L/day	10%	10倍	約4.0 L/h
スラッジ脱水処理	固形分40%まで脱水	5.5L/day	40%	(数十～数L脱水)	約1.0 L/h

※1 吸着材添加濃度100ppmで核種除去性能DF100を満足すると仮定

※2 処理時間を6h/dayと仮定した際に必要な脱水速度

今期要素試験により, 各処理プロセスの目標性能として設定した濃縮倍率, 脱水速度を満足するかを検証する。

◆ 本検討の背景, これまで（2022年補助事業）の成果

➤ 脱水処理後の含水率目標値の設定

- ✓ 2022年度補助事業において、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。

上澄水や間隙水の減少が支配的な領域
スラッジの体積減少率が大きい

間隙水の減少分が空隙になる領域
スラッジの体積減少率が小さい

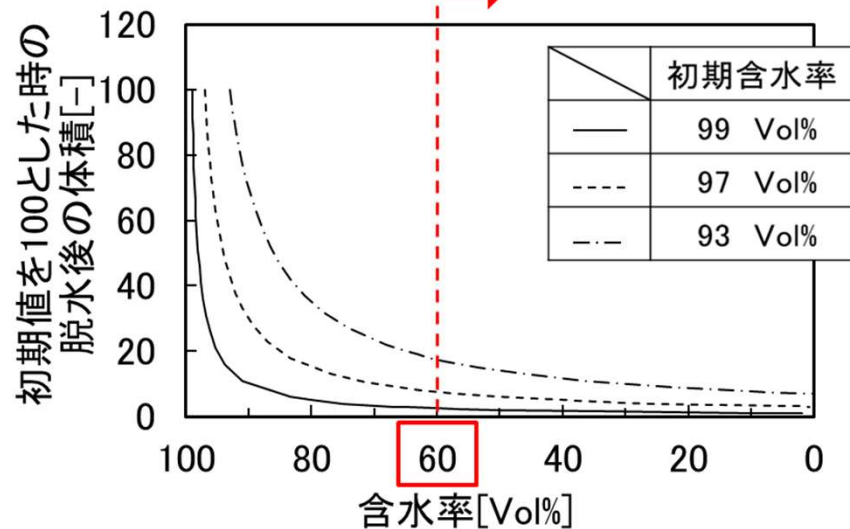


図1 スラッジの含水率と体積の関係※1



沈殿スラッジの外観

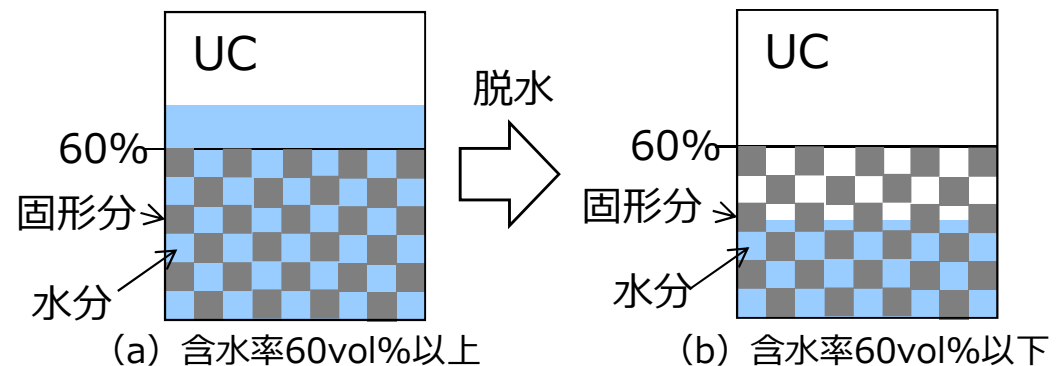


図2 スラッジ体積の減少挙動のイメージ

※1 スラッジ含水率の評価式

$$V_s = \frac{V_{ini} - V_{dry}}{V_{ini}} \times 100 [\text{vol}\%]$$

V_s : スラッジの体積含水率

V_{ini} : スラッジの初期体積

V_{dry} : スラッジの乾燥後体積

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い

- ✓ 含水率が90vol%程度のスラッジを脱水処理によって60vol%にすることで体積は20%程度に減容が可能。
- ✓ スラッジ含水率60vol%から更に脱水処理によって含水率を下げても、減容効果はほとんど得られない。

➡ 脱水処理後の含水率の目標値を60vol%と設定※2し、脱水処理技術を検討する。

※2 スラッジ含有率40vol%

補足10-3_模擬粒子の選定

◆ 要素試験に用いる模擬粒子について

➤ 模擬粒子の選定

- ✓ CFフィルタ要素試験およびスラッジ脱水関連の各要素試験を実施するにあたり、使用する粒子の選定を実施。
- ✓ 2022年度までの補助事業において選定された、 α 核種用の粉末吸着材を模擬対象として模擬粒子を選定。
表1の通り、化学組成が類似する市販品から、粒径分布が近いものを選定。

表1 模擬粒子の選定

No.	粉末吸着材			模擬粒子		
	種類	粒径[μm] ^{※1}	SS濃度[ppm]	種類	粒径[μm]	SS濃度[ppm]
1	チタン酸	4.08	50	ケイ砂粒子	5	50
2	ケイチタン酸	8.55	50			
3	添着活性炭	48.5	200	活性炭粒子	50	200
4	ヘマタイト (Fe_2O_3)	1.32	1000	マグネタイト粒子	1	1000
5	マグネタイト (Fe_3O_4)	1.96	1000			

※1 レーザー回折/散乱式粒子径分布測定装置

➤ 模擬粒子添加量

- ✓ 模擬粒子の添加濃度は、各粉末吸着材のKdのデータより、DF100を満足する添加量を設定。

表2 模擬粒子の添加濃度

No.	吸着材	分配係数 ^{※2}	必要添加濃度
1	チタン酸	Eu : 6.0E+06mL/g	16.5mg/L (<50mg/L)
2	ケイチタン酸	Eu : 3.8E+06mL/g	26mg/L (<50mg/L)
3	添着活性炭	Am : >5.3E+05mL/g	186mg/L (<200mg/L)
4	ヘマタイト (Fe_2O_3)	Np : 4.4E+01mL/g	—
5	マグネタイト (Fe_3O_4)	Am : 1.0E+05mL/g	990mg/L (<1000mg/L)

2023-2024年度補助事業にて、コロイド状 α 核種への吸着率も含めて、粉末吸着材のKdデータを取得する。
→「溶解性 α 核種除去技術の開発」の実施項目

※2 2022年度補助事業成果より
抜粋した代表値

- ✓ 2022年度までの補助事業では、主に吸着塔充填用の顆粒タイプの吸着材についてデータ取得

補足10.1-1_クロスフローフィルタ要素試験（1/3）

◆ 10.1 クロスフローフィルタ要素試験の概要

➤ 試験パラメータ

予備試験および試運転の結果から試験パラメータを設定。

表 CF濃縮試験 試験パラメータ

No.	項目	試験条件	備考
1	フィルタ	1.4 μ mMF膜 (マルチホールタイプ)	除去対象粒子である粉末吸着材の粒径 (>1 μ m) より選定。 OUT-IN方式で通水する。有効ろ過面積0.35m ² /本×7本。
2	粒子 (模擬対象)	・ケイ砂 (チタン酸/チタンケイ酸) ・活性炭 (添着活性炭) ・マグネタイト (Fe ₃ O ₄)	α 核種除去用の粉末吸着材を模擬対象として模擬粒子を選定。 SS濃度は各吸着材のKdより設定。
3	一次流量	13.0, 19.5, 22.0m ³ /h (見直し前: 4.2~12.6 m ³ /h)	2024年8月の試運転, 予備試験にて最小流量4.2m ³ /hではケイ砂 粒子がフィルタから剥離されず濃縮不良することを確認した。それにより, フィルタから粒子を剥離させる力を強くするため, 一次側の通水可能流量 22m ³ /h (流速3.4m/s) を起点に, 2.0m/s, 3.0m/sとなるように 一次流量を設定。
4	透過流量	4.2m ³ /h	処理流量22m ³ /dayおよび1日6h処理を仮定し設定。 2024年8月の試運転の結果から, 一次流速を変動させても二次流量 を一定に制御できることを確認済み。
5	ろ過圧力	0.3MPa	予備試験の結果より選定。 CFフィルタ後段の流調弁などで制御。
6	逆洗条件	二次側へ透過する流量が初期値 の20%以下となった場合	逆洗圧力, 逆洗流量などを2024年度の事前試験を行い, 水逆洗。

補足10.1-1_クロスフローフィルタ要素試験 (2/3)

Decom.Tech

◆ 10.1 クロスフローフィルタ要素試験の概要

➤ 試験ケース

吸着材ごとのフィルタ必要ろ過面積の検討のため、流量をパラメータとした試験を実施する方針として試験ケースを設定。

表 CF濃縮試験 試験ケース

No.	吸着材			濃縮倍率※2	一次流量 (m ³ /h) ※1	透過流量 (m ³ /h) ※1	フィルタ目開き (μm)
	種類	平均粒径 (μm)	試験水初期SS濃 (ppm) ※2				
1	ケイ砂粒子	5	50	10	22.0	4.2	1.4
2			500	10			
3			50	10	19.5		
4			500	10			
5			50	10	13.0		
6			500	10			
7	活性炭	50	200	10	22.0		
8			2000	10			
9			200	10	19.5		
10			2000	10			
11			200	10	13.0		
12			2000	10			
13	マグネタイト (Fe ₃ O ₄)	1	1000	10	22.0		
14			10000	10			
15			1000	10	19.5		
16			10000	10			
17			1000	10	13.0		
18			10000	10			

※1 設定根拠は前頁を参照

※2 初期SS濃度を基準として濃縮倍率10倍の試験を2回実施し、濃縮倍率を評価する（10倍×10倍=100倍）ため、低濃度（50ppm, 200ppm, 1000ppm）と高濃度（500ppm, 2000ppm, 10000ppm）の2条件を設定。2023年度の予備試験ではケイ砂粒子は難ろ過性のケーキとなり、透過流量が小さい傾向を確認したため試験を3回に分けることにしていたが、2024年度の試運転および事前試験にて2回の試験で目標濃縮倍率100倍を達成できると判断したため、ケイ砂粒子の試験も2回に分けることとした。

補足10.1-1_クロスフローフィルタ要素試験（3/3）

◆ 10.1 クロスフローフィルタ要素試験の概要

➤ 測定項目

測定項目を表1のように設定。

表1 CF濃縮試験 測定項目

No.	測定項目※1	備考
1	一次系統のSS濃度	試験水に添加する吸着材と水の重量を測定
2	二次系統のSS濃度	試験後のフィルタ出口水の水量と、フィルタ出口水を乾燥後の固形分の重量を測定
3	処理流量	流量計によりフィルタ入口水流量を測定
4	処理時間	目標濃縮倍率（100）を達成する時間を測定
5	粒径分布	試験水に添加前の吸着材およびフィルタ出口水の固形分の粒径分布を測定
6	透過流量	流量計により二次系統側への透過流量を測定
7	フィルタ差圧	差圧計によりフィルタ差圧を測定
8	濃縮水・透過水の目視確認	フィルタ出口配管から透過水を目視で確認

※1 逆洗が必要になった場合は、逆洗水量、逆洗水中のSS濃度および逆洗水中の吸着材粒径分布を確認する

➤ 評価項目

評価項目を表2のように設定。

表2 CF濃縮試験 評価項目

No.	評価項目※2	備考
1	粒子補修率	CFフィルタ通水前後の吸着材・固形分のSS濃度の比により算出
2	フィルタ差圧の上昇率	フィルタ差圧の測定結果に基づき評価（フィルタ交換頻度を評価）
3	透過流量	透過流量の測定結果に基づき評価
4	フィルタの必要ろ過面積	処理流量および処理時間に基づき算出（実機でのフィルタ本数を評価）
5	CF濃縮水の性状確認	粒径分布および濃縮水の見視確認結果に基づき評価

※2 逆洗が必要になった場合は、逆洗条件の確認および逆洗水の性状確認を実施

◆ 10.1 クロスフローフィルタ要素試験

➤ 試験結果_ケイ砂粒子スラリーを用いたCFフィルタ通水試験

表 CFフィルタ試験結果（ケイ砂粒子スラリー）

No.	模擬 吸着材	流速 (m/h)	試験結果		通水時間 (min)※	逆洗有無
			低濃度50ppm	高濃度500ppm		
1, 2	ケイ砂 粒子	3.4	目標濃度 500ppm達成	目標濃度 5000ppm達成	トータル35分 【内訳】 低濃度17分 高濃度18分	無し
3, 4		3.0	目標濃度 500ppm達成	目標濃度 5000ppm達成	トータル35分 【内訳】 低濃度17分 高濃度18分	逆洗1回有り 高濃度側 4400ppm付近
5, 6		2.0	目標濃度 500ppm達成	目標濃度 5000ppm達成	トータル41分 【内訳】 低濃度17分 高濃度24分	逆洗4回あり 【内訳】 低濃度側 2回 220ppm付近, 340ppm付近 高濃度側 2回 2600ppm付近, 4750ppm付近

※ 停止期間を除く試験時間で、低濃度側で目標濃度500ppm、高濃度側で5000ppmを達成した時間

- ✓ 流速2.0m/hから3.4m/hの範囲で、ケイ砂粒子スラリー（初期濃度50ppm）を目標濃度倍率100倍まで濃縮可能であることを確認した。（処理時間は40分程度）
- ✓ 流速3.0m/h以下では、目標濃縮倍率達成のため逆洗が必要であることを確認した。

◆ 10.1 クロスフローフィルタ要素試験

➤ 試験結果_活性炭スラリーを用いたCFフィルタ通水試験

表 CFフィルタ試験結果（活性炭スラリー）

No.	模擬 吸着材	流速 (m/h)	試験結果		通水時間 (min)※	逆洗有無
			低濃度200ppm	高濃度2000ppm		
7, 8	活性炭	3.4	目標濃度 2000ppm達成	目標濃度 20000ppm達成	トータル36分 【内訳】 低濃度18分 高濃度18分	無し
9, 10		3.0	目標濃度 2000ppm達成	目標濃度 20000ppm達成	トータル36分 【内訳】 低濃度17分 高濃度19分	逆洗1回有り 高濃度側 4360ppm付近
11, 12		2.0	目標濃度 2000ppm達成	目標濃度 20000ppm達成	トータル39分 【内訳】 低濃度18分 高濃度21分	逆洗2回あり 【内訳】 高濃度側 2 回 3300ppm付近, 6500ppm付近

※ 停止期間を除く試験時間で、低濃度側で目標濃度2000ppm、高濃度側で20000ppmを達成した時間

- ✓ 流速2.0m/hから3.4m/hの範囲で、活性炭スラリー（初期濃度200ppm）を目標濃度倍率100倍まで濃縮可能であることを確認した。（処理時間は40分程度）
- ✓ 流速3.0m/h以下では、目標濃縮倍率達成のため逆洗が必要であることを確認した。

補足10.1-2_クロスフローフィルタ要素試験－試験結果－（3/3）

Decom.Tech

◆ 10.1 クロスフローフィルタ要素試験

➤ 試験結果_酸化鉄（マグネタイト）スラリーを用いたCFフィルタ通水試験

表 CFフィルタ試験結果（マグネタイトスラリー）

No.	模擬 吸着材	流速 (m/h)	試験結果		通水時間 (min)※	逆洗有無
			低濃度1000ppm	高濃度10000ppm		
13, 14	酸化鉄 (マグネ タイト)	3.4	目標濃度 10000ppm達成	目標濃度 100000ppm達成	トータル34分 【内訳】 低濃度17分 高濃度17分	無し
15, 16		3.0	目標濃度 10000ppm達成	目標濃度 100000ppm達成	トータル36分 【内訳】 低濃度18分 高濃度18分	逆洗2回有り 【内訳】 高濃度側 21300ppm付近, 32600ppm付近
17, 18		2.0	目標濃度 10000ppm達成	目標濃度 100000ppm達成	トータル38分 【内訳】 低濃度20分 高濃度18分	逆洗4回あり 【内訳】 低濃度側 2 回 2300ppm付近, 4560ppm付近 高濃度側 2 回 21000ppm付近, 32600ppm付近

※ 停止期間を除く試験時間で、低濃度側で目標濃度10000ppm、高濃度側で100000ppmを達成した時間

- ✓ 流速2.0m/hから3.4m/hの範囲で、酸化鉄（マグネタイト）スラリー（初期濃度1000ppm）を目標濃度倍率100倍まで濃縮可能であることを確認した。（処理時間は40分程度）
- ✓ 流速3.0m/h以下では、目標濃縮倍率達成のため逆洗が必要であることを確認した。

目 次 ～補足資料～

11章. 二次廃棄物処理技術の開発, スラッジ脱水技術の要素試験結果

補足11-1 スラッジ脱水試験 –2022年度補助事業– (1/2)～(2/2)

補足11.1.1-1 フィルタ方式による脱水試験 –適正ケーキ厚の評価–

補足11.1.1-2 フィルタ方式による脱水試験 –カートリッジフィルタ装置の改善案–

補足11.1.1-3 フィルタ方式による脱水試験 –カートリッジフィルタ要素試験– (1/4)～(4/4)

補足11.1.2-1 フィルタ方式による脱水試験 –バグフィルタ試験– (1/9)～(9/9)

補足11.2.1-1 減圧・加熱方式による脱水試験 –減圧・加熱脱水試験– (1/4)～(4/4)

補足11.4-1 二次廃棄物処理システムの構成案

補足11.4-2 二次廃棄物処理システムの構成案 (その他)

◆ 本検討の背景, これまでの成果

➤ 小規模カートリッジフィルタ装置試験結果概要

表 カートリッジフィルタ試験結果 (一部抜粋)

模擬スラッジ	吸着材	凝集剤	平均ろ過速度	含水率
CF濃縮水	添着活性炭 10000ppm	—	0.79L/min	71.0vol%
凝集沈殿 スラッジ	添着活性炭 10000ppm	硫酸アルミ 1000ppm	0.14L/min	77.3vol%

平均ろ過速度の判定閾値
CF濃縮水：1.17L/min以上
凝集沈殿スラッジ：0.23L/min以上

本試験では、平均ろ過速度が判定閾値を下回る結果となった。含水率は70～80vol%まで脱水できており、小規模試験と同じ水準まで脱水可能であることを確認。

① 平均ろ過速度に関する考察

φ47mmサイズのろ過膜エレメントを使用した試験（小規模試験）と比較して、本試験では平均ろ過速度が大きく低下した。その原因は、両者のケーキ厚の差異に起因すると考えられる。

小規模試験では、ケーキ厚を概ね10mm～20mm程度となるような条件で試験を実施しており、適切なケーキ厚でろ過を実施できていたと考えられる。本試験では、擬似的に100mm近い厚さのケーキが形成されていたと考えられるため、水分の透過性が悪化したと考えられる。

すなわち、本試験のように容器内部に設置したフィルタエレメントにてろ過する場合、スラッジのろ過が困難であり、長時間の処理が必要になると考えられる。

② スラッジ充填率を大きくすることが困難と考察

上記①に記載の通り、RO濃縮水処理で発生する性状のスラッジをカートリッジフィルタでろ過する場合、ケーキ厚がろ過性に大きく寄与する。

スラッジ充填率を向上させるためには、容器へスラッジを多量に投入しろ過処理する必要があるが、それに伴いケーキ厚は大きくなるため脱水は困難となる。そして、脱水によりスラッジ体積は減少するが、スラッジを追加投入し脱水処理できない場合は、減容した分の空間がデッドスペースとなるため、スラッジ充填率が低くなると考えられる。

水分除去により
発生した空き空間

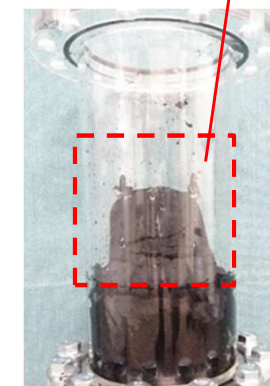


図 ろ過試験後スラッジ

➡ **2023年度以降の補助事業では、別法のスラッジ脱水技術を開発。**

◆ 本検討の背景，これまでの成果

➤ 2022年度実施の小規模カートリッジフィルタ試験結果一覧

ケーキ厚20mm以内では，平均ろ過速度がいずれも目標値を上回った。

表 2022年度補助事業 カートリッジフィルタ小規模試験結果

試験ケース	吸着材		凝集剤		試験結果							
	種類	濃度 [ppm]	種類	濃度 [ppm]	ろ過時間 [min]	ケーキ厚 [mm]	ろ液濁度 [°]	含水率 [vol%]	平均ろ過速度 [mL/min]	ろ過速度評価結果	平均ろ過比抵抗 [m/kg]	ろ過性評価結果
1-1	チタンケイ酸塩	50	—	—	244	0.8	1.8	84	53	○	4.8.E+11	易～中
1-2		10000	—	—	5.0	1.1	27	73	25	○	7.4.E+11	易～中
1-3		10000	硫酸アルミ	1000	17	11.4	1.3	51	5.1	○	6.6.E+10	易
1-4		10000	高塩基PAC	1000	13	10.2	2.7	53	6.5	○	2.6.E+11	易
1-5	添着活性炭	200	—	—	90	5.6	0.2	71	149	○	3.6.E+10	易
1-6		10000	—	—	2.3	5.6	0.8	69	111	○	1.2.E+10	易
1-7		10000	硫酸アルミ	1000	5.0	16.5	2.2	69	16	○	9.8.E+09	易
1-8		10000	高塩基PAC	1000	3.8	18.9	2.9	67	21	○	8.5.E+09	易
1-9	チタンケイ酸塩	50	高塩基PAC	500	490	26.3	0.0	—※	0.90	×	1.3.E+13	難
1-10	添着活性炭	200	高塩基PAC	500	570	14.8	1.1	84	1.1	○	3.7.E+12	中

※ 目詰まりによりサンプリング困難

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]

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

◆ 11.1.1 カートリッジフィルタ要素試験

➤ 適正ケーキ厚の評価

ケーキ厚－平均ろ過速度の関係より、適切な見かけ上のケーキ厚を評価した。
CF濃縮水の想定発生量220L/dayを脱水処理可能な条件として評価した。

ろ過速度はケーキ厚に大きく依存する傾向を確認

次頁に示すようにフィルタエレメントのサイズを
 $\Phi 75\text{mm} \times \text{H}500\text{mm}$ 、装填数を4本と仮定すると、有効ろ過面積は 0.471m^2 となるため、1日分のCF濃縮水220L/dayを脱水処理するために必要なろ過速度は下記のように評価された。

$$220\text{L} \div 24\text{h} \div 0.471\text{m}^2 \div 3.2\text{E-}04[\text{mL}/\text{min}/\text{mm}^2]$$

ケーキ厚－平均ろ過速度のグラフ（右図）より、
 $3.2\text{E-}04[\text{mL}/\text{min}/\text{mm}^2]$ 以上のろ過速度となるケーキ厚は20～30mm以内と評価された。

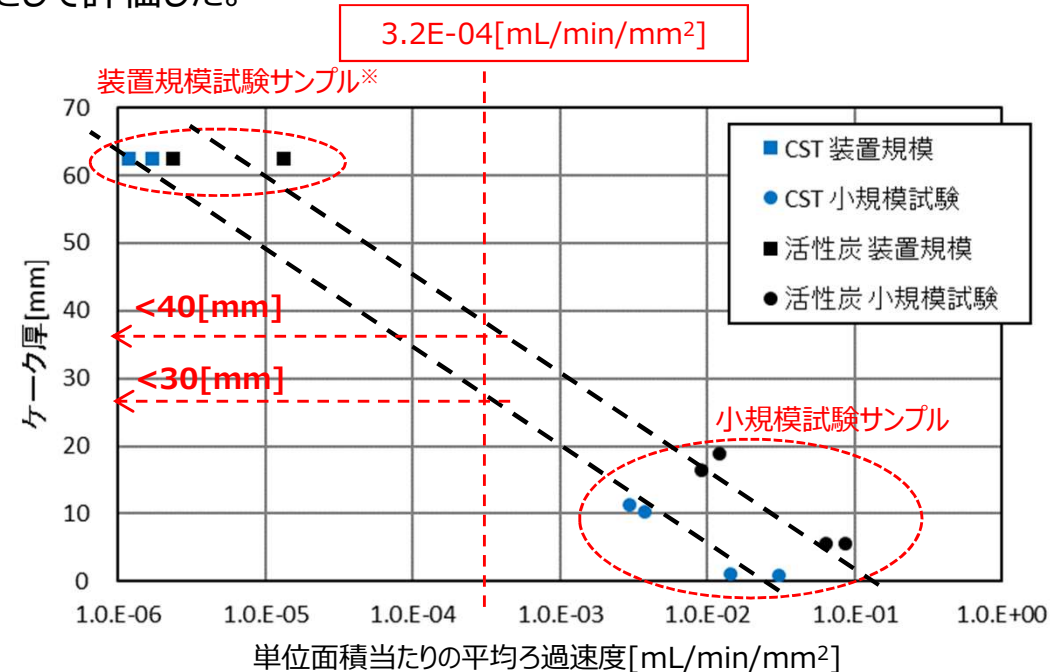


図 ケーキ厚－平均ろ過速度の関係
(2022年度補助事業 カートリッジフィルタ試験結果)

※ 装置規模試験については、フィルタエレメント内壁間の距離（約63mm）をケーキ厚として評価した。

➤ 2022年度実施の小規模カートリッジフィルタ試験結果の考察 (2022年度の試験結果については、前頁を参照。)

- ✓ ケイ酸塩の場合、ケーキ厚が概ね20mm以内であれば、ろ過速度が速い状態を維持して脱水処理が可能。
- ✓ 活性炭の場合は水分の透過性が良いため、30mm以内までであれば、ろ過速度が速い状態を維持して脱水処理が可能。

◆ 11.1.1 カートリッジフィルタ要素試験

➤ カートリッジフィルタ装置の改善案

ろ過面積の増加および見かけ上のケーキ厚の肥大化防止のため、フィルタエレメントを複数設置する案を試験する。
2022年度補助事業のカートリッジフィルタ試験で使用したフィルタエレメントと同型式のものを、4本に増加させて配置する。

表1 フィルタエレメントとスラッジ回収容器 サイズ比較

機器	サイズ	容積
フィルタエレメント	Φ75mm×H500mm×4本	8.8L
スラッジ回収容器	Φ210mm×H800mm	27.7L

配置上の制約から、スラッジ回収容器内に設置可能なエレメント数は最大4本、ケーキ厚を考慮した際の適正値は3本と想定する。

改善内容①フィルタエレメントのレイアウトの適正化

フィルタエレメント1本

4本配置に設計変更

エレメント間距離
約40mm

エレメント-内壁間距離
約20mm

フィルタエレメント数を4本に増加させることにより、有効ろ過面積が増大し、形成されるケーキ厚が薄くなるように制御することが可能となる。

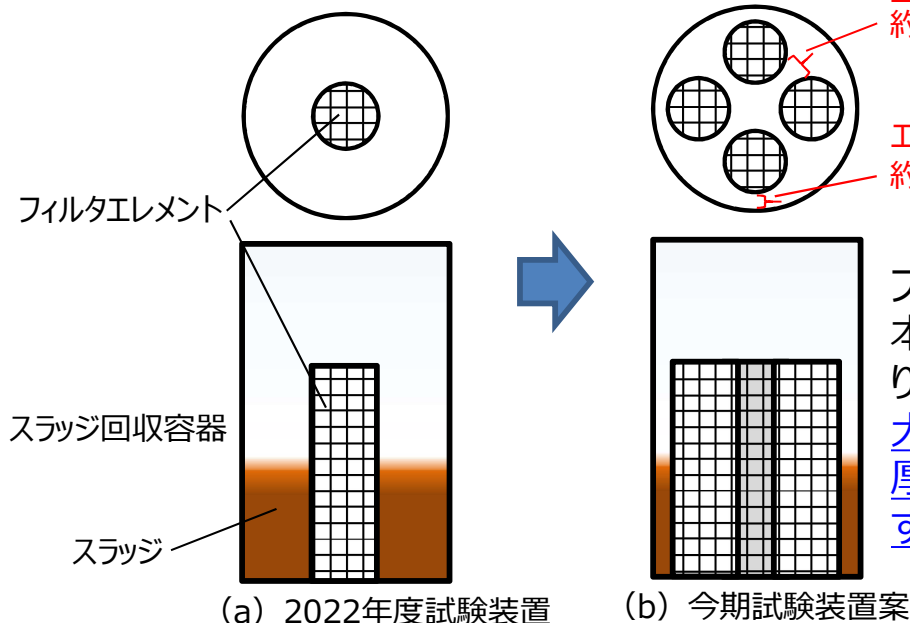


図 フィルタエレメントのレイアウト

改善内容②ろ過圧力の適正化

表2 ろ過圧力・ろ過方式の改善案

項目	2022年度試験条件	改善案
ろ過圧力	-0.05 MPa	0.2MPa
ろ過方式	真空ろ過	加圧ろ過

真空ポンプの出力から、2022年度試験ではろ過圧力を0.05MPaと設定。

2022年度補助事業の小規模試験では、0.2MPa程度までろ過速度の上昇を確認した。ろ過圧力を大きくすることにより、ろ過速度の向上を図る。真空ろ過方式では、ろ過圧力を大きくすることが難しいため、加圧ろ過方式を採用。

◆ 11.1.1 カートリッジフィルタ要素試験

➤ 試験パラメータ

2022年度補助事業のカートリッジフィルタ試験結果を参考とし、試験パラメータを設定。
 複数の模擬粒子を用いて、処理する可能性のあるスラッジとして、CF濃縮水と沈殿スラッジの2種類を設定。
 加圧ろ過方式にて含水率60vol%を下回るまで処理する。
 (⇒ 補足11.1.1-3 (2/4) を参照)

➤ 試験ケース

各模擬粒子ごとに2サイクル以上を実施。(⇒補足11.1.1-3 (3/4) を参照)

➤ 測定項目, 評価項目

スラッジ, 透過水を分析対象とし、スラッジ含水率, スラッジ回収容器の界面高さ, 目標とする脱水率に至る処理時間などを測定し、これら測定結果から、脱水速度, 処理後スラッジ含水率, スラッジ充填率等を評価。
 (⇒ 補足11.1.1-3 (4/4) を参照)

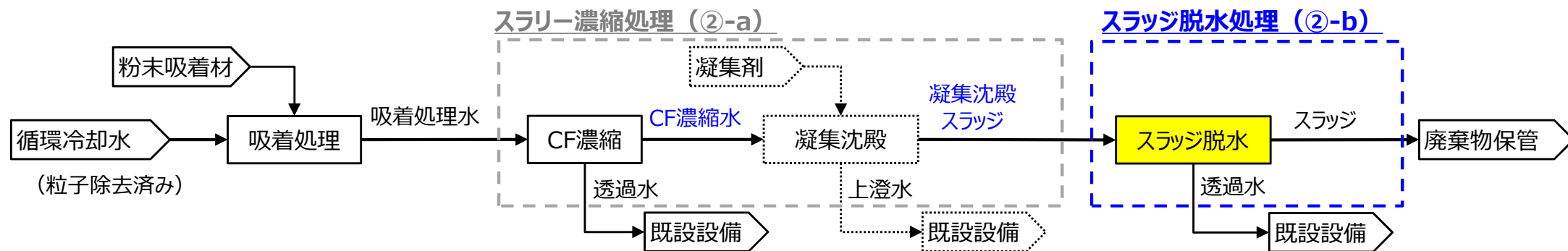


図 二次廃棄物処理システムフロー図

◆ 11.1.1 カートリッジフィルタ要素試験

➤ 試験パラメータ

2022年度補助事業のカートリッジフィルタ試験結果を参考とし、試験パラメータを設定。
(2022年度の試験結果については、補足11-1を参照)

表 カートリッジフィルタ要素試験 試験パラメータ

No.	項目	試験条件	備考
1	模擬粒子 (粒径)	ケイ砂 (5 μ m) 活性炭 (50 μ m) マグネタイト (1 μ m)	チタン酸, チタンケイ酸などのケイ酸塩鉱物はケイ砂, 添着活性炭は活性炭で模擬。鉄系吸着材はマグネタイト粒子を使用する。なお, 市販品より粒径に近い粒子を選定する。
2	模擬対象スラッジ	CF濃縮水, 沈殿スラッジ	処理する可能性のあるスラッジとして, CF濃縮水と沈殿スラッジを設定。
3	SS濃度	10000ppm (初期)	CF濃縮後の想定SS濃度を設定。沈殿スラッジの場合は, SS濃度10000ppmの液を凝集沈殿処理し製造。
4	凝集剤	硫酸アルミ, 無添加	2022年度試験までに選定した凝集剤。凝集沈殿処理の手順については, 2022年度までの凝集剤試験の手順に従うこととする。
5	試験溶液	水道水	イオン強度影響は軽微と考えられるため, 水道水を使用。ただし, 沈殿スラッジの場合は, 凝集沈殿処理後の上澄水をそのまま使用。
6	ろ過圧力	0.2MPa	昨年度試験より, -0.05MPa (真空引き) では十分なる過速度が達成されなかったため, 0.2MPaの加圧ろ過方式と設定。
7	容器サイズ	Φ210mm×H800mm	ユニット缶サイズを踏襲。ただし, 高さ工法の寸法についてはH800mmを上限値として適切に設定する。
8	処理時間	含水率<60vol% となるまで	目標値である60vol%を下回るまで処理。目標値を下回らない場合は, 1日で可能な時間まで実施。
9	繰り返しサイクル数	2サイクル以上	スラッジ充填率の向上のため, 2サイクル以上を設定。ただし, 1サイクルごとに必要な分析は実施。また, 脱水速度の粒子依存性評価のためCF濃縮水は1サイクルのみの試験を実施し, 各粒子の影響を評価する。

◆ 11.1.1 カートリッジフィルタ要素試験

➤ 試験ケース

カートリッジフィルタ試験の試験ケースは下表の通りに設定。SS濃度は，CF濃縮試験の結果を考慮して10000ppmと設定。処理サイクル数について，各模擬粒子について2サイクル以上を実施する。

また，ケイ砂とマグネタイトは試験時間の都合上，スラッジ充填率を最大まで向上させることが困難であったため，ろ過速度の傾向を確認できたと判断した途中で試験終了とした。

表 カートリッジフィルタ要素試験 試験ケース

No.	模擬粒子	SS濃度	処理 サイクル数	模擬対象 スラッジ	凝集剤	ろ過圧力	フィルタ仕様	容器サイズ		
1-1	ケイ砂	10000ppm	2	CF濃縮水	なし	0.2MPa	孔径：1μm サイズ：φ70mm×H500mm 装填本数：4本 (有効ろ過面積30.8E-03m³)	φ210mm × H800mm		
1-2	活性炭		2							
1-3	マグネタイト		3							
2-1	ケイ砂	10000ppm (初期)	3	沈殿スラッジ	硫酸アルミニウム (1000ppm)					
2-2	活性炭		2							
2-3	マグネタイト		4							
2-4	ケイ砂(追加)※		3							

※2-4：ろ過時間を追加した際の脱水の可否を検証するため追加実施

◆ 11.1.1 カートリッジフィルタ要素試験

➤ 測定項目

測定項目を表1のように設定。

表1 カートリッジフィルタ要素試験 測定項目

No.	分析対象	分析項目	備考
1	スラッジ	含水率	1サイクル終了ごとに少量サンプリングし、サンプルを乾燥後、重量測定し分析。
2		界面高さ（充填率）	目盛りを設置し目視確認。測定間隔は1h程度とする。
3	透過水	重量	1サイクル終了ごとに、透過水タンクの重量変化を記録。
4		SS濃度	濁度-SS濃度の検量線を事前に取得し、濁度測定結果から換算評価。
5		濁度	1サイクル終了ごとに、透過水をサンプリングし濁度測定。
6		流量	処理時間と透過水量より評価。 流量計の測定値を参照した測定も可とするが、流量が小さいため、流量計の測定範囲外となる可能性を考慮すること。
7	—	試験時間	タイマー等により加圧ろ過を開始した時点からの試験時間を測定。

➤ 評価項目

評価項目を表2のように設定。

表2 カートリッジフィルタ要素試験 評価項目

No.	評価項目	備考
1	脱水速度	透過水の重量変化と試験時間より、透過水の流量を評価。
2	処理後スラッジ含水率	試験後のスラッジ含水率より評価。
3	スラッジ充填率	試験終了後のスラッジ回収容器内のスラッジ容積より評価。
4	ケーキ抵抗	Ruthのろ過方程式から評価。
5	必要ろ過面積	単位面積あたりの脱水速度より $22\text{m}^3/\text{day}$ を処理するために必要ろ過面積を評価。
6	二次側への粒子移行率	スラッジの初期SS濃度、透過水のSS濃度より評価。

◆ 11.1.2 バグフィルタ試験

➤ バグフィルタ本試験での試験装置イメージ

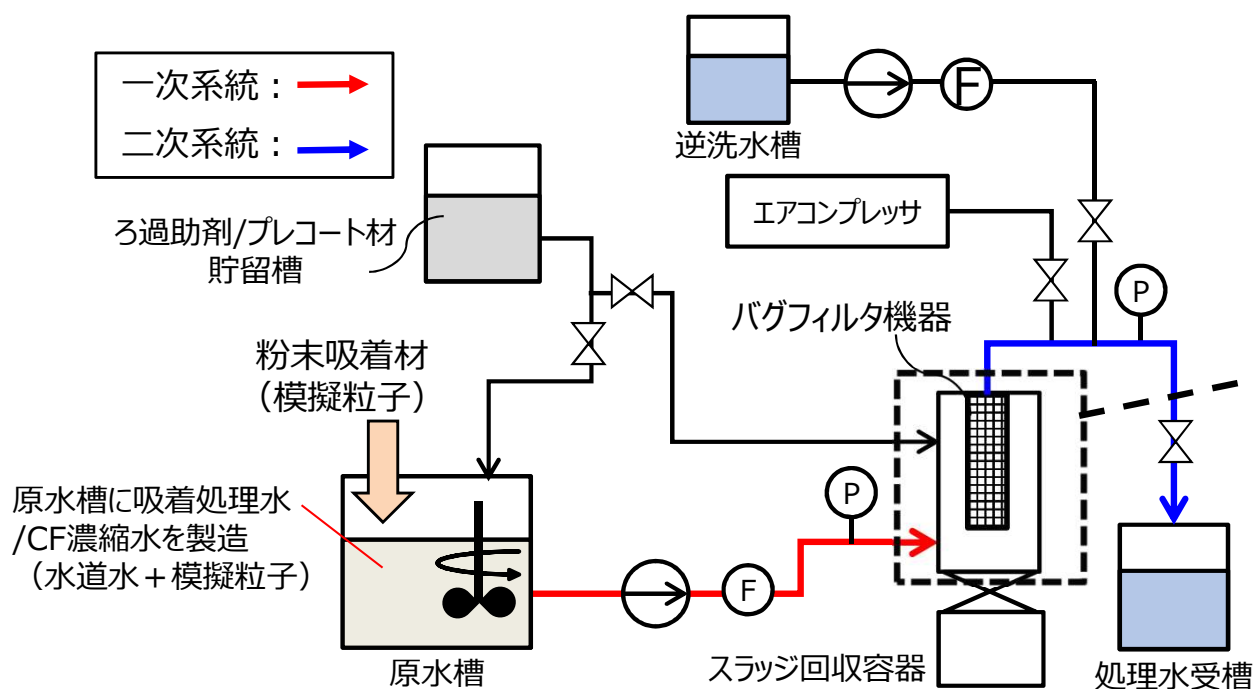


図1 バグフィルタ試験装置 系統構成図

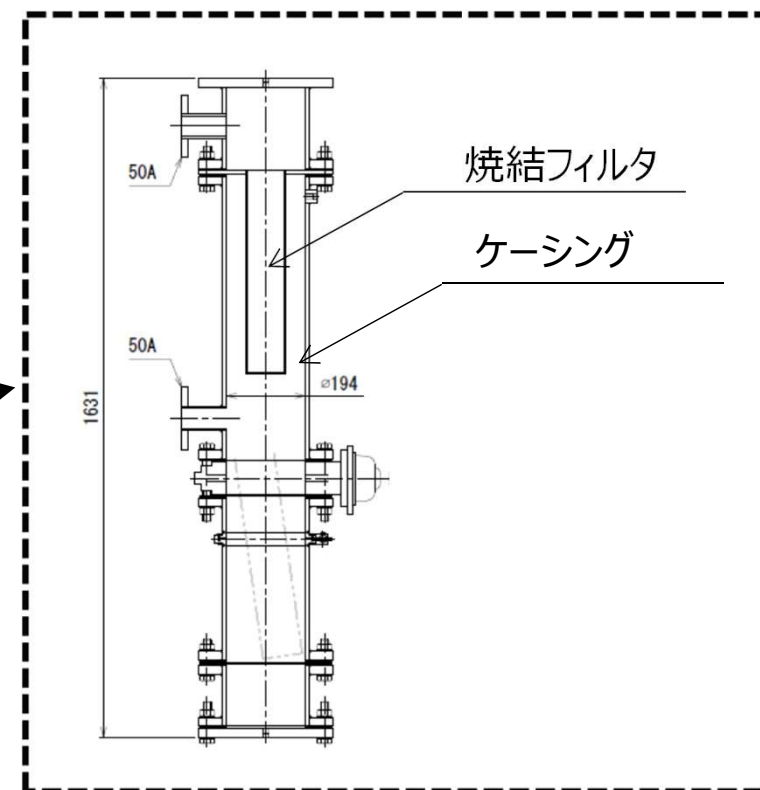


図2 バグフィルタ図面 (現状版)

◆ 11.1.2 バグフィルタ試験

➤ 試験パラメータ

複数の模擬粒子を用い、処理する対象として、吸着処理水とCF濃縮水の2種類を設定。金属焼結フィルタにてろ過処理する。逆洗条件は事前試験により検討する。

(⇒ 補足11.1.2-1(3/9)を参照)

➤ 試験ケース

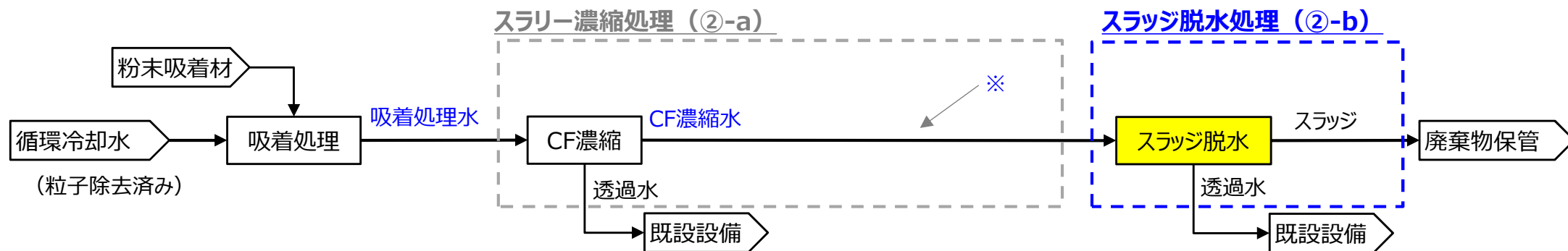
プレコート材およびろ過助剤の必要性を確認する試験（試験①）を実施した後、前段のCF濃縮処理有無を条件としたプレコート材およびろ過助剤の添加量をパラメータとした試験（試験②）を実施する計画。

(⇒ 補足11.1.2-1(4/9)を参照)

➤ 測定項目、評価項目

ケーキの含水率や透過水のSS濃度、流量、試験時間、逆洗が必要となった際の逆洗条件等を測定し、プレコートおよびろ過助剤の効果等を評価する計画。

(⇒ 補足11.1.2-1(6/9)を参照)



※ ろ過性の良いスラッジの場合、凝集沈殿処理による前処理は必須ではないと想定

図 二次廃棄物処理システム フロー図
(スラッジ脱水にバグフィルタ適用の想定例)

補足11.1.2-1_フィルタ方式による脱水試験 –バグフィルタ試験– (3/9)

◆ 11.1.2 バグフィルタ試験

➤ 試験パラメータ

バグフィルタ試験（小規模な予備試験）を行い，試験パラメータを設定。

表 バグフィルタ要素試験 試験パラメータ

No.	項目	試験条件	備考
1	フィルタ	2.0 μ m金属焼結フィルタ (円筒形状)	除去対象粒子である粉末吸着材の粒径 (>1 μ m) より選定。
2	通水流量	吸着処理水：2.0m ³ /h CF濃縮水：1.0m ³ /h	吸着処理水：処理流量22m ³ /dayおよび1日6h処理を仮定するとおよそ4m ³ /h通水する必要があるが試験で使用するフィルタの使用圧力上限(1MPa)により通水可能な最大流量2m ³ /hで設定。 CF濃縮水：必要処理流量を試算した場合約37L/hとなり，流速が遅く粒子移送が困難と想定されるため，粒子を移送可能な流量を設定。 なお，沈殿スラッジについては，バグフィルタの設備規模低減の観点で，凝集沈殿処理の寄与が小さいことから，処理対象に選定しないこととした。
3	粒子 (模擬対象)	ケイ砂（チタン酸/ケイチタン酸） 活性炭（添着活性炭） マグネタイト（酸化鉄）	α 核種除去用の粉末吸着材を模擬対象として模擬粒子を選定。
4	SS濃度 (吸着処理水の場合 /CF濃縮水の場合)	ケイ砂（50/5.0E+03ppm） 活性炭（200/2.0E+04ppm） マグネタイト（1.0E+03/1.0E+05ppm）	吸着処理水の場合，各吸着材のKdよりDF100を満足する添加量を設定。 CF濃縮水の場合，100倍濃縮処理後を仮定して設定。
5	ろ過助剤 /プレコート材	粒子状の珪藻土	添加濃度は，無添加，吸着材のSS濃の等量と2倍量の3条件を設定。また，廃棄物発生量低減のため，添加濃度の少量化についても試験。
6	ろ過圧力	最大0.8MPa	通水流量を満足するろ過圧力を予備試験により確認し，フィルタ許容差圧を考慮し，適切な値を設定した。
7	逆洗条件	0.3MPa，120sec以上 (流量が50%を下回った時点で逆洗を実施)	事前試験結果より設定。基本的には空気逆洗とし，空気逆洗による払出しが困難な場合は水逆洗を実施する。

補足11.1.2-1_フィルタ方式による脱水試験－バグフィルタ試験－（4/9）

Decom.Tech

◆ 11.1.2 バグフィルタ試験

➤ 試験ケース

プレコート材およびろ過助剤の必要性を確認する試験（試験①）を実施した後，前段のCF濃縮処理有無※⁴を条件としたプレコート材およびろ過助剤の添加量をパラメータとした試験（試験②）を実施する方針。

表1 試験①の試験ケース

No.	処理流量 (m ³ /h) ※ ¹	プレコート，ろ過助剤の有無※ ²		吸着材	
		プレコート	ろ過助剤	種類	濃度 (ppm) ※ ³
1	1.0	無	無	ケイ砂粒子	5000
2		324g	無		
3		無	吸着材等量		
4		324g	吸着材等量		
5		無	無	活性炭	20000
6		324g	無		
7		無	吸着材等量		
8		324g	吸着材等量		
9		無	無	マグネタイト	100000
10		324g	無		
11		無	吸着材等量		
12		324g	吸着材等量		

表2 試験②の試験ケース

No.	処理流量 (m ³ /h) ※ ¹	プレコート，ろ過助剤の添加量※ ⁶			吸着材	
		プレコート		ろ過助剤	種類	濃度 (ppm) ※ ⁵
		#100	#800			
1	2.0	162	162	吸着材等量	ケイ砂粒子	50
2		162	162	吸着材の2分の1		
3		162	162	無し		
4	1.0	162	162	吸着材の2分の1	ケイ砂粒子	5000
5		162	162	吸着材の3分の1		
6		162	無し	吸着材等量		
7	2.0	162	162	吸着材等量	活性炭	200
8		162	162	吸着材の2分の1		
9		162	162	無し		
10	1.0	162	162	吸着材の2分の1	活性炭	20000
11		162	162	吸着材の3分の1		
12		162	無し	吸着材等量		
13	2.0	162	162	吸着材等量	マグネタイト	1000
14		162	162	吸着材の2分の1		
15		162	162	無し		
16	1.0	162	162	吸着材の2分の1	マグネタイト	100000
17		162	162	吸着材の3分の1		
18		162	無し	吸着材等量		

※¹ 設定根拠は前頁記載

※² プレコート材は一般的なプレコート材の添加量（フィルタろ過単位面積あたり1kg程度）に基づき一層あたりの添加量を設定
ろ過助剤の添加量は二次廃棄物発生量を考慮して吸着材の等量（一般的な添加量最小値）と設定

※³ 前段のCF濃縮処理での初期濃度に対する目標濃縮倍率（100）に基づき設定

※⁴ 試験①の結果に基づき3ケース設定

※⁵ 低濃度は前段のCF濃縮処理無しを想定，高濃度はCF濃縮処理の目標濃縮倍率（100）に基づき設定

※⁶ 設定根拠は次頁記載

◆ 11.1.2 バグフィルタ試験

➤ 試験 2 の試験条件設定根拠

試験 2 の目的は、CF濃縮処理の必要性確認および二次廃棄物低減の検討である。これらについて確認するため、試験 2 の条件を以下の考えに基づき設定した。

CF濃縮処理の必要性確認については、試験 1 にて3つの吸着材スラリー(CF濃縮水想定)でケーキ形成を確認した条件（プレコート材有り、ろ過助剤吸着材等量添加）で、吸着処理水を想定した吸着材スラリーでもケーキを形成するか確認する。（試験 2 No.1,7,13）

二次廃棄物低減の検討については、以下について確認する。

- ・ろ過助剤添加量の下限確認：CF濃縮水についてはろ過助剤の添加量を吸着材の2分の1、3分の1になるように添加し、ケーキ形成可能か確認する。（試験 2 No.4,5,10,11,16,17）
吸着処理水についてはろ過助剤の添加無しから添加量を吸着材の2分の1になるように添加し、ケーキ形成可能か確認する。（試験 2 No.2,3,8,9,14,15）
- ・プレコート材添加量の下限確認：試験 1 ではケーキ形成しやすいように2種類のプレコート材（ラジオライト#100, #800）を添加してプレコート層を2層化していたが、試験ケースによって1層目の#800のプレコート層がフィルタから剥離しないものもあった。プレコート層を2層化しなくてもケーキ形成出来るか確認する。（試験 2 No.6,12,18）

補足11.1.2-1_フィルタ方式による脱水試験－バグフィルタ試験－（6/9）

◆ 11.1.2 バグフィルタ試験

➤ 測定項目

測定項目を表1のように設定。

表1 バグフィルタ要素試験 測定項目

No.	測定項目※1	備考
1	一次系統のSS濃度	吸着材投入量管理
2	二次系統のSS濃度	フィルタ出口水を乾燥後、固形分を重量測定
3	処理流量	流量計によりフィルタ入口流量を測定
4	処理時間	通水時間を測定
5	ケーキ外観確認	バグフィルタ容器からケーキを目視で確認
6	ケーキ含水率	試験水添加前の吸着材およびろ過助剤の重量と試験後に回収・乾燥後のケーキの重量に基づき算出
7	ケーキ厚さ	フィルタに付着したケーキの厚さを測定
8	透過水を目視確認	フィルタ出口配管から透過水を目視で確認
9	フィルタの差圧	差圧計によりフィルタ差圧確認

※1 逆洗が必要になった場合は、逆洗水量、逆洗水中のSS濃度および逆洗水中の吸着材粒径分布を確認する

➤ 評価項目

評価項目を表2のように設定。

表2 バグフィルタ要素試験 評価項目

No.	評価項目※2	備考
1	プレコートおよびろ過助剤の効果	試験①での結果に基づきプレコート材およびろ過助剤の必要性を評価
2	プレコートおよびろ過助剤の添加量	試験②での結果に基づきプレコート材およびろ過助剤の添加量を評価
3	粒子捕集率	バグフィルタ通水前後の固形物のSS濃度の比により算出
4	透過流量	透過流量の測定結果に基づき評価
5	フィルタの必要ろ過面積	処理流量および処理時間の測定結果に基づき評価
6	フィルタ差圧	フィルタ差圧の測定結果に基づき評価
7	ケーキの性状確認	ケーキの外観確認、含水率および厚さに基づき評価

※2 逆洗が必要になった場合は、逆洗条件の確認および逆洗水の性状確認を実施する

◆ 11.1.2 バグフィルタ試験

➤ 試験結果_CF濃縮処理の必要性

CF濃縮水を想定した吸着材スラリーでは、プレコート材有り、「ろ過助剤添加量は吸着材等量」であれば3つの吸着材スラリー全てで固体のケーキとして回収できていたが、**吸着処理水を想定した活性炭スラリーおよびマグネタイトスラリーでは固体のケーキとしての回収が不可**であった。また、**ケイ砂粒子スラリーは固体のケーキとしての回収は可能であるものの、その回収量はCF濃縮水を想定したケイ砂粒子スラリーでの回収量の10分の1以下**であった。（下表参照）

表 CF濃縮処理有無でのバグフィルタ通水によるケーキ形成可否

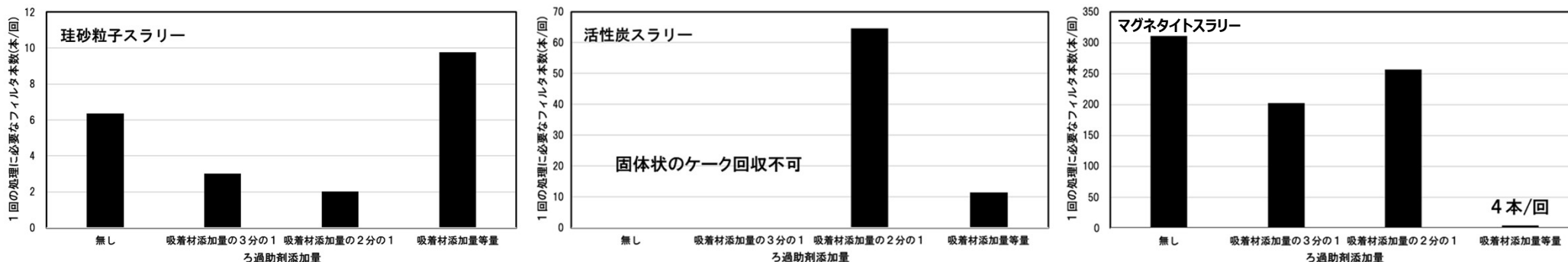
試験	No.	処理 流量 (m³/h)	吸着材		プレコート,ろ過助剤の 添加量			固体のケーキ としての 回収可否	ケーキ 回収量 (g)
			種類	濃度 (ppm)	プレコート材		ろ過助剤		
					#100	#800			
試験 1	4	1	ケイ砂 粒子	5000	162	162	吸着材 添加量等量	可	47
試験 2	1	2		50				可	4
試験 1	8	1	活性炭	20000				可	240
試験 2	7	2		200				否	回収不可
試験 1	12	1	マグネタ イト	100000				可	2197
試験 2	13	2		1000				否	回収不可

◆ 11.1.2 バグフィルタ試験

➤ 試験結果_二次廃棄物低減の検討 (1/2)

CF濃縮水を想定した吸着材スラリーに対し、ろ過助剤添加量ごとの実機での1回の処理に必要なフィルタ本数（吸着材回収量に基づき算出）を整理した。（下図参照）

- ✓ ケイ砂粒子スラリーではろ過助剤の添加量とフィルタ本数との間に相関は見られなかった。
- ✓ 活性炭スラリーでは、ろ過助剤を吸着材添加量の2分の1以上添加することでケーキ形成でき、その添加量も吸着材添加量と等量とすることでフィルタ本数を低減できることを確認した。
- ✓ マグネタイトスラリーでは、ろ過助剤を吸着材添加量の等量添加するとフィルタ必要本数が格段に少なくなる（吸着材回収率が高くなる）ことを確認した。
- ✓ 以上のことから、ケイ砂粒子スラリーではろ過助剤の必要性は低い、活性炭スラリーおよびマグネタイトスラリーではろ過助剤は必要でその添加量は吸着材添加量と等量とすることが望ましいと考える。



＜フィルタ本数の概算方法＞

- ① 実機フィルタ必要総本数 = 実機想定吸着材処理量(220LのCF濃縮水中の吸着材量) ÷ 試験時の吸着材回収量
- ② 実機での1日の想定処理回数 = 実機処理時間4h（実機作業時間6h = 準備1h + 処理4h + 終了作業1h） ÷ 試験時間
- ③ 1回の処理に必要なフィルタ本数 = ① ÷ ② ÷ 設備想定稼働率80%

図 CF濃縮水を想定した吸着材スラリーでのろ過助剤添加量ごとの実機での1回の処理に必要なフィルタ本数（プレコート材添加有り）

◆ 11.1.2 バグフィルタ試験

➤ 試験結果_二次廃棄物低減の検討 (2/2)

CF濃縮水を想定した吸着材スラリーに対し、プレコート材有無での実機での1回の処理に必要なフィルタ本数（吸着材回収量に基づき算出）を整理した。（下図参照）

- ✓ ケイ砂粒子スラリーでは、プレコート材#800の有無でフィルタ本数に大きな差は見られなかった。
- ✓ 活性炭スラリーおよびマグネタイトスラリーでは、プレコート材#800を添加した方がフィルタ本数が格段に少なくなる（吸着材回収量が格段に増える）ことを確認した。
- ✓ 以上のことから、前頁のろ過助剤と同様にケイ砂粒子スラリーではプレコート層の2層化の必要性は低いが、活性炭スラリーおよびマグネタイトスラリーではプレコート層の2層化はバグフィルタによる脱水処理に有効と考える。

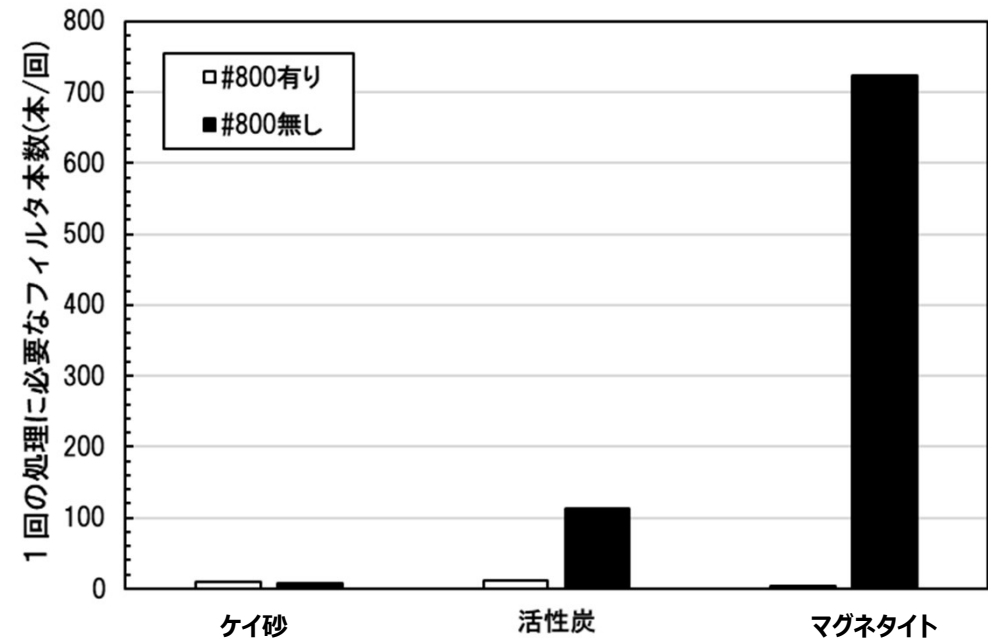


図 CF濃縮水を想定した吸着材スラリーに対するプレコート材#800有無での実機1回の処理に必要なフィルタ本数（ろ過助剤添加量＝吸着材添加量等量）

補足11.2.1-1_減圧・加熱方式による脱水試験－減圧・加熱脱水試験－（1/4） *Decom.Tech*

◆ 11.2.1 減圧・加熱脱水試験

➤ 試験パラメータ

複数の模擬粒子を用いて、処理する可能性のあるスラッジとして、CF濃縮水と沈殿スラッジの2種類を設定。減圧・加熱方式にて目標とする含水率60vol%を下回るまで処理する。

（⇒ 詳細は補足11.2.1-1(2/4)を参照）

➤ 試験ケース

以下の点に注目して試験ケースを設定。（⇒ 補足11.2.1-1(3/4)を参照）

試験No.1のシリーズ：各模擬スラッジの蒸発特性の差異（粒子依存性）を評価

試験No.2：減圧・加熱脱水方式による脱水可否の検証および運用データの取得

➤ 測定項目、評価項目

スラッジの含水率や凝縮水のSS濃度、重量、スラッジ回収容器の界面高さ（充填率）を測定、また処理時間から脱水速度等を評価する計画。

（⇒ 詳細は補足11.2.1-1(4/4)を参照）

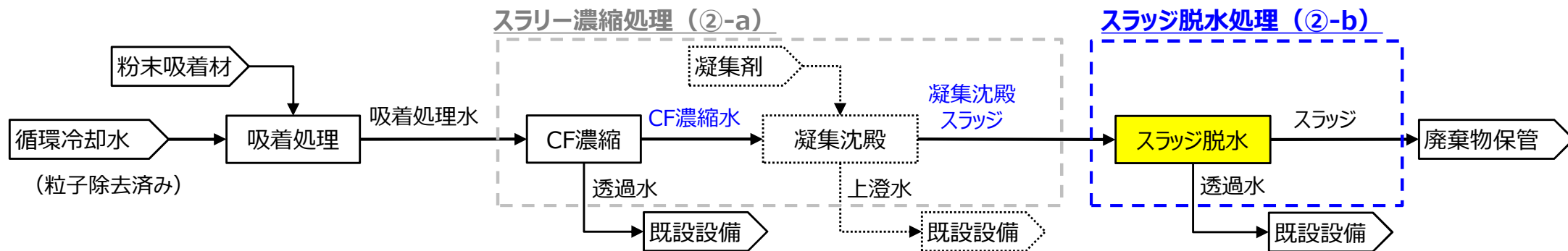


図 二次廃棄物処理システム フロー図

補足11.2.1-1_減圧・加熱方式による脱水試験－減圧・加熱脱水試験－（2/4） *Decom.Tech*

◆ 11.2.1 減圧・加熱脱水試験

➤ 試験パラメータ

減圧・加熱脱水試験の予備試験結果を参考とし、試験パラメータを設定。

表 減圧・加熱脱水試験 試験パラメータ

No.	項目	試験条件	備考
1	模擬粒子（粒径）	ケイ砂（5μm） 活性炭（50μm） マグネタイト（1μm）	チタン酸，ケイチタン酸などのケイ酸塩鉱物はケイ砂，添着活性炭は活性炭で模擬。鉄系吸着材はマグネタイト（Fe ₃ O ₄ ）粒子を使用する。なお，市販品より粒径が近い粒子を選定する。
2	模擬対象スラッジ	CF濃縮水，沈殿スラッジ	処理する可能性のあるスラッジとして，CF濃縮水と沈殿スラッジを設定。
3	SS濃度	10000ppm（初期）	CF濃縮後の想定SS濃度を設定。沈殿スラッジの場合は，SS濃度10000ppmの液を凝集沈殿処理し製造。
4	凝集剤	硫酸アルミ，無添加	2022年度試験までに選定した凝集剤。凝集沈殿処理の手順については，2022年度までの凝集剤試験の手順に従うこととする。
5	試験溶液	水道水	イオン強度影響は軽微と考えられるため，水道水を使用。ただし，沈殿スラッジの場合は，凝集沈殿処理後の上澄水をそのまま使用。
6	加熱温度（ヒーター）	140℃以上	予備試験結果より設定した
7	冷却温度（冷却器）	0℃（目標値）	予備試験結果より設定した
8	容器サイズ	Φ210mm×H400mm	ユニット缶サイズを踏襲。
9	乾燥時間	含水率<60vol%となるまで	目標値である60vol%を下回るまで処理。目標値を下回らない場合は，1日で可能な時間まで実施。
10	減圧条件	-80kPa（ゲージ圧）	試験結果より適切な圧力を選定した 相対圧力：-80kPa，絶対圧力：21kPa
11	N ₂ ガス流量	5.0NL/min	予備試験結果より適切な流量を選定した
12	繰り返しサイクル数	2サイクル以上	スラッジ充填率の向上のため，2サイクル以上を設定。ただし，1サイクルごとに必要な分析は実施。また，脱水速度の粒子依存性評価のためCF濃縮水は1サイクルのみの試験を実施し，各粒子の影響を評価する。

補足11.2.1-1_減圧・加熱方式による脱水試験－減圧・加熱脱水試験－（3/4） *Decom.Tech*

◆ 11.2.1 減圧・加熱脱水試験

➤ 試験ケース

- ✓ 粒子種類による脱水速度の依存性が十分に小さいことが、予備試験結果および本試験No.1-1～1-3の結果より示されたため、複数回脱水処理を繰り返す試験（No.2-1）で使用する模擬粒子はケイ砂のみを選定した。

表 減圧・加熱脱水試験 試験ケース

No.	模擬粒子	SS濃度[ppm]	凝集剤添加	脱水処理繰り返し回数	ヒーター温度
1-1	ケイ砂	10000	無	1回 (1day以内)	容器側面:140℃ 容器底面:100～140℃ フランジ・配管:80～90℃
1-2	活性炭				
1-3	マグネタイト				
2-1	ケイ砂	10000	有	4回	

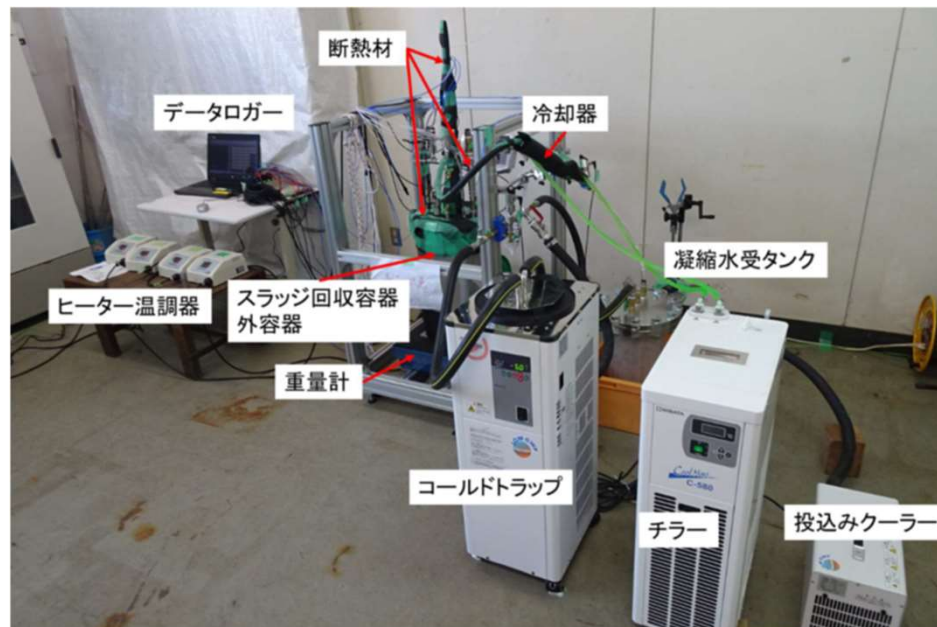


図1 減圧・加熱脱水試験 試験装置外観

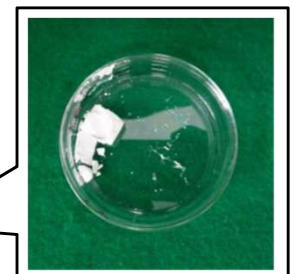
本試験では、試験時間の都合上、試験開始時に投入した投入量のスラッジに対して、凝縮水を十分に回収したと判断した時点で試験終了とした。試験終了後は、スラッジ回収容器の内部を確認し、スラッジの乾燥状態を確認。



(a)試験開始時



(b)6h脱水後



乾燥スラッジサンプル

図2 スラッジ回収容器内部 投入スラッジ外観(試験ケース2-1)

補足11.2.1-1_減圧・加熱方式による脱水試験－減圧・加熱脱水試験－（4/4） *Decom.Tech*

◆ 11.2.1 減圧・加熱脱水試験

➤ 測定項目

測定項目を表1のように設定。

表1 減圧・加熱脱水試験 測定項目

No.	測定対象	測定項目	測定方法
1	スラッジ	含水率	初期値。所定時間経過ごとに少量サンプリングし分析。
2		界面高さ（充填率）	1day経過ごとに測定。内面に目盛りを設置。
3		温度	温度変化をロガー記録。多点測定式熱電対を使用して、垂直方向と径方向の分布を測定。
4	凝縮水	重量	1day経過ごとの重量変化を記録
5		濁度	1day経過ごとに、凝縮水をサンプリングし濁度測定。
6	恒温槽内	温度	ロガーで記録または測定値を一定間隔で記録。 ただし、大きな変動はないと想定されるため、1h程度間隔での記録で十分と想定。
7		圧力	
8		湿度	
9	N ₂ ガス	流量	

➤ 評価項目

評価項目を表2のように設定。

表2 減圧・加熱脱水試験 評価項目

No.	評価項目	備考
1	脱水速度	凝縮水の重量変化と試験時間より評価。
2	スラッジ含水率（処理後）	試験後のスラッジ含水率より評価。
3	必要熱量	ヒーター出力と脱水速度の関係から評価。
4	スラッジ充填率	試験終了後のスラッジ回収容器内のスラッジ容積より評価。
5	SS濃度	濁度-SS濃度の検量線を事前に取得し、濁度測定結果から換算評価。
6	二次側への粒子移行率	スラッジの初期SS濃度、凝縮水のSS濃度より評価。
7	物質収支	試験前のスラッジの含水量および凝縮水量の関係より、本方式での水分の回収効率（蒸気回収率）を評価。
8	熱収支	入熱量（ヒータの電気出力と電源電圧より算出）と蒸発水分量（スラッジの重量変化より算出）の関係から、入熱量と脱水に消費される熱量のエネルギー効率を評価。

補足11.4-1_二次廃棄物処理システムの構成案

◆ 11.4 二次廃棄物処理システムの構成案（吸着槽方式）

➤ 各粉末吸着材の性能評価結果整理

- ✓ 取得した各粉末吸着材の試験結果を基に、各水質条件におけるイオン状/コロイド状 α 核種の除去性能を整理した。なお、基本水質である希釈海水系とコンクリート溶出水については、ほぼ同じ内容で整理可能であったため、同一の項目で整理した。

表 各粉末吸着材および各水質条件のイオン状/コロイド状 α 核種の除去性能の整理結果

吸着材\水質	希釈海水(基本条件)/コンクリート溶出水			ホウ酸水条件		
	イオン状 α 核種除去	FeOOH コロイド除去	SiO ₂ コロイド除去	イオン状 α 核種除去	FeOOH コロイド除去	SiO ₂ コロイド除去
鉄系吸着材(1)	○	○	△ ※	○	△	△ ※
添着活性炭	○	△	×	△	×	×
チタン酸	△	○	×	○	×	×
ケイチタン酸	×	○	×	△	△	×

※ 表面理論的には、互いのゼータ電位電位が異符号となる領域(pH6±1)に水質調整することにより、SiO₂コロイドを除去可能と想定。本事業ではpH9条件のみを試験した。

- ✓ 除去の必要性が高いイオン状 α 核種およびFeOOHコロイドについて、より広範な水質条件で除去可能である鉄系吸着材や添着活性炭が適用性が高い。特に鉄系吸着材は、ホウ酸水条件でも除去性能の低下幅が比較的小さいため、最も適用性が高いと評価した。
- ✓ AmやPuの擬似コロイド作製試験の結果より、SiO₂コロイドは擬似コロイド化率が低いことが示されており、除去の必要性が低いと想定される。そのため、積極的なSiO₂コロイドの除去は不要となると想定。今後実液試験等で検証が必要な事項として整理する。
- ✓ ホウ酸水条件では、全般的に各吸着材の性能が低下する。ただし、チタン酸およびチタンケイ酸のイオン状 α 核種の除去性能は向上するため、ホウ酸水条件下では、コロイド状 α 核種は除去不要なオーダーで濃度が低く、イオン状 α 核種が支配的となる条件では適用可能と想定。

補足11.4-1_二次廃棄物処理システムの構成案

◆ 11.4 二次廃棄物処理システムの構成案（吸着槽方式）

➤ α核種コロイド除去手順案1（カートリッジフィルタ採用案）

➤ 水質変動に対する冗長性の担保を重視

- ✓ ホウ酸水も含めたより広範な水質変動に対応可能な処理工程を立案。水質変動に応じて処理工程を変えることはせず、画一的に処理することを基本として検討した。

表 α核種コロイド除去手順案1（カートリッジフィルタ採用案）

No.	処理設備	処理手順	処理対象水	発生量	スラッジ含有量 /SS濃度	備考
-	非溶解性核種 除去システム (フィルタ機器)	粒子状核種除去 (切削粉等)	PCV取水	22m ³ /day	<1ppm	PCV内での燃料デブリ切削時に発生する切削粉等を、3段階のフィルトレーションにより除去する。粒径0.1μmまで除去。除去率DF100相当。
-	溶解性核種 除去システム (吸着塔)	イオン状核種除去	PCV取水	22m ³ /day	<1ppm	燃料デブリより溶出し、イオン状の形態となったα核種を吸着塔により除去する。除去率DF100相当。
1	吸着槽設備	吸着処理 (粉末吸着材添加)	吸着処理液	22m ³ /day	1,000ppm	鉄系吸着材1000ppmを添加。水質変動も考慮し、DF100を達成可能な濃度を設定。投入量22kg/day。
2	CFフィルタ設備	CF濃縮処理	透過水	22m ³ /day	<1ppm	CF濃縮倍率は100倍以上と設定。正味の処理時間は1h以内と想定。 初期値1000ppm×濃縮倍率100倍 ≒100,000ppm
			CF濃縮水	220L/day	100,000ppm	
3	カートリッジフィルタ設備	ろ過脱水処理	透過水	220L/day	数ppm	カートリッジフィルタを使用した加圧ろ過により、スラッジ含水率70vol%程度まで脱水処理。数回のバッチに分割し、合計で220L/dayを処理する。
			乾燥スラッジ	<22L/day	(含水率 70vol%)	
4	廃棄物保管建屋	スラッジ回収容器 払出し	—	1日あたり ユニット缶1本分	(含水率 70vol%)	脱水処理完了後、スラッジ回収容器に充填された状態で乾燥スラッジを払出し、廃棄物保管建屋にて長期保管。

- ✓ CF濃縮水に対して凝集剤を添加し、コロイドを含めた微粒子の回収率を向上させることも可能と想定。鉄系吸着材は比重が重く沈降性が良いため、基本水質条件では高い効果が期待できる。ただし、ホウ酸水添加時は、ホウ酸のアルカリ緩衝作用によりpH調整が効かなくなるため、凝集剤添加による諸効果は見込めないため、凝集沈降処理は実施しない工程を採用した。

補足11.4-1_二次廃棄物処理システムの構成案

◆ 11.4 二次廃棄物処理システムの構成案（吸着槽方式）

➤ α核種コロイド除去手順案2(バグフィルタ採用案)

➤ 水質変動に対する冗長性の担保を重視

- ✓ ホウ酸水も含めたより広範な水質変動に対応可能な処理工程を立案。水質変動に応じて処理工程を変えることはせず、画一的に処理することを基本として検討した。

表 α核種コロイド除去手順案2（バグフィルタ採用案）

No.	処理手順	処理手順	処理対象水	発生量	スラッジ含有量 /SS濃度	備考
-	非溶解性核種 除去システム (フィルタ機器)	粒子状核種除去 (切削粉等)	PCV取水	22m ³ /day	<1ppm	PCV内での燃料デブリ切削時に発生する切削粉等を、3段階のフィルトレーションにより除去する。粒径0.1μmまで除去。除去率DF100相当。
-	溶解性核種 除去システム (吸着塔)	イオン状核種除去	PCV取水	22m ³ /day	<1ppm	燃料デブリより溶出し、イオン状の形態となったα核種を吸着塔により除去する。除去率DF100相当。
1	吸着槽設備	吸着処理 (粉末吸着材添加)	吸着処理液	22m ³ /day	1,000ppm	鉄系吸着材1000ppmを添加。希釈海水条件およびコンクリート溶出水条件にて、DF100相当を達成可能な量を設定。投入量22kg/day。
2	CFフィルタ設備	CF濃縮処理	透過水	22m ³ /day	<1ppm	CF濃縮倍率は100倍以上と設定。正味の処理時間は1h以内と想定。 初期値1000ppm×濃縮倍率100倍 ≒100,000ppm
			CF濃縮水	220L/day	100,000ppm	
3	バグフィルタ設備	ろ過脱水処理 &逆洗によるケーキ払出し	透過水	220L/day	<1ppm	バグフィルタ通水を使用した加圧ろ過により、ケーキとして粉末吸着材を分離。空気逆洗によって払出し、スラッジ回収容器に回収。スラッジ含水率40vol%程度まで脱水処理。数回のバッチに分割し、合計で220L/dayを処理する。
			乾燥スラッジ	≒50L/day	(含水率 40vol%)	
4	廃棄物保管建屋	スラッジ回収容器 払出し	—	1日あたり ユニット缶2本分	(含水率 40vol%)	スラッジ回収容器にて回収されたケーキを払出し、廃棄物保管建屋にて長期保管。内容物は粉末吸着材に加えて、バグフィルタ処理時のろ過助剤等も含まれるため、スラッジ量が最大約2倍となると想定。

補足11.4-2_二次廃棄物処理システムの構成案（その他）

◆ 11.4 二次廃棄物処理システムの構成案（吸着槽方式）

➤ α核種コロイド除去手順案3(希釈海水系/コンクリート溶出水系)

➤ 基本水質においてのスループットを重視

- ✓ 1000倍/200倍希釈海水を適切に処理可能な工程を立案。また、コンクリート成分が溶出し、Caリッチかつ高pHとなった水質でも処理が成立すると期待される。ただし、ホウ酸水添加時は本工程案での処理は困難な可能性がある。

表 α核種コロイド除去手順案3（希釈海水系/コンクリート溶出水系）

No.	処理手順	処理手順	発生廃液/スラッジ	発生量	スラッジ含有量/SS濃度	備考
-	非溶解性核種除去システム(フィルタ機器)	粒子状核種除去(切削粉等)	—	22m ³ /day	<1ppm	PCV内での燃料デブリ切削時に発生する切削粉等を、3段階のフィルトレーションにより除去する。粒径0.1μmまで除去。除去率DF100相当。
-	溶解性核種除去システム(吸着塔)	イオン状核種除去	—	22m ³ /day	<1ppm	燃料デブリより溶出し、イオン状の形態となったα核種を吸着塔により除去する。除去率DF100相当。
1	吸着槽設備	吸着処理(粉末吸着材添加)	吸着処理液	22m ³ /day	300ppm	鉄系吸着材300ppmを添加。水質変動も考慮し、DF100を達成可能な濃度を設定。投入量6.6kg/day。
2	CFフィルタ設備	CF濃縮処理	透過水	22m ³ /day	<1ppm	CF濃縮倍率は300倍以上と設定。正味の処理時間は1h以内と想定。初期値300ppm×濃縮倍率300倍100,000ppm
			CF濃縮水	220L/day	100,000ppm	
3	凝集沈殿槽	凝集沈殿処理(凝集剤添加)	上澄水	220L/day	数ppm	上澄水中に数ppm程度の粒子は残留するため、UF膜相当のろ過処理が必要と想定。鉄粒子は比重が大きいため、より小さくなる可能性あり。
			沈殿スラッジ	22L	≒1.0 vol%	概ね初期液量の1/10程度まで濃縮処理可能と想定。その際のスラッジ含有率は約1.0vol%となると想定。
4	カートリッジフィルタ設備	ろ過脱水処理	透過水	22L/day	数ppm	カートリッジフィルタを使用した加圧ろ過により、スラッジ含水率70vol%程度まで脱水処理。数回のバッチに分割し、合計で22L/dayを処理する。
			乾燥スラッジ	<7L/day	(含水率70vol%)	
5	廃棄物保管建屋	回収容器払出し	—	3～4日あたり ユニット缶1本分	(含水率70vol%)	脱水処理完了後、スラッジ回収容器に充填された状態で乾燥スラッジを払出し、廃棄物保管建屋にて長期保管。

補足11.4-2_二次廃棄物処理システムの構成案（その他）

◆ 11.4 二次廃棄物処理システムの構成案（吸着槽方式）

➤ α核種コロイド除去手順案4(希釈海水系/コンクリート溶出水系)

- ✓ 添着活性炭は希釈海水系およびコンクリート溶出水条件において除去性能が優れるため、そのような処理対象水を処理することを前提として検討した。

表 α核種コロイド除去手順案4（希釈海水系/コンクリート溶出水系）

No.	処理手順	処理手順	処理対象水	発生量	スラッジ含有量 /SS濃度	備考
-	非溶解性核種 除去システム (フィルタ機器)	粒子状核種除去 (切削粉等)	PCV取水	22m ³ /day	<1ppm	PCV内での燃料デブリ切削時に発生する切削粉等を、3段階のフィルトレーションにより除去する。粒径0.1μmまで除去。除去率DF100相当。
-	溶解性核種 除去システム (吸着塔)	イオン状核種除去	PCV取水	22m ³ /day	<1ppm	燃料デブリより溶出し、イオン状の形態となったα核種を吸着塔により除去する。除去率DF100相当。
1	吸着槽設備	吸着処理 (粉末吸着材添加)	吸着処理液	22m ³ /day	1,000ppm	添着活性炭1000ppmを添加。希釈海水およびコンクリート溶出水条件においてα核種を十分に除去可能と想定。投入量22kg/day。
2	CFフィルタ設備	CF濃縮処理	透過水	22m ³ /day	<1ppm	CF濃縮倍率は100倍以上と設定。正味の処理時間は1h以内と想定。 初期値1000ppm×濃縮倍率100倍 ≒100,000ppm
			CF濃縮水	220L/day	100,000ppm	
3	カートリッジフィルタ設備	ろ過脱水処理	透過水	220L/day	数ppm	カートリッジフィルタを使用した加圧ろ過により、スラッジ含水率70vol%程度まで脱水処理。数回のバッチに分割し、合計で220L/dayを処理する。
			乾燥スラッジ	<110L/day	(含水率 70vol%)	
4	廃棄物保管建屋	スラッジ回収容器 払出し	—	1日あたり ユニット缶5本分	(含水率 70vol%)	脱水処理完了後、スラッジ回収容器に充填された状態で乾燥スラッジを払出し、廃棄物保管建屋にて長期保管。

◆ 11.4 二次廃棄物処理システムの構成案（吸着槽方式）

➤ α 核種コロイド除去手順案4(希釈海水系/コンクリート溶出水系)

- ✓ 添着活性炭はホウ酸水添加時に除去性能が低下するため、イオン状 α 核種除去性能およびFeOOHコロイド除去性能が不十分となる可能性がある。その場合は、別の処理手順(手順案1など)に切り替える運用が必要である。
- ✓ 添着活性炭は鉄系吸着材と比較して、比重が小さく、かさ体積が大きいいため、重量濃度換算で同量を添加した場合でも、最終的発生するスラッジは5～6倍の容量となる。
- ✓ スラッジ脱水技術としてカートリッジフィルタを適用する例を示したが、添着活性炭はろ過性が非常に良好であるため、バグフィルタも適用可能と想定する。
- ✓ ユニット缶サイズのスラッジ回収容器に収容する必要はなく、大型の廃棄物保管容器へ収容することが可能と評価された場合、バグフィルタの適用性が高いと考える。理由は、添着活性炭を使用する場合のスラッジ容量増大に伴う運用負荷増大を吸収可能と期待されるためである。

補足11.4-2_二次廃棄物処理システムの構成案（その他）

◆ 11.4 二次廃棄物処理システムの構成案（吸着槽方式）

➤ α核種コロイド除去手順案5(ホウ酸水系/イオン状核種除去)

- ✓ チタン酸やチタンケイ酸は、基本水質の1000倍希釈海水等では、イオン状α核種除去率が低いことが短所であるが、ホウ酸水条件におけるイオン状α核種の除去性能に優れることから、下記のような場合で適用可能と想定する。

想定水質性状

PCV内へホウ酸水が添加され、なおかつホウ酸水の影響により多量のα核種が燃料デブリよりイオン状で溶出し、イオン状α核種が支配的な水質条件となった場合。この際、コロイド状α核種は十分に低い濃度であり、除去不要であると仮定。

表 α核種コロイド除去手順案5（ホウ酸水系/イオン状核種除去）

No.	処理手順	処理手順	処理対象水	発生量	スラッジ含有量 /SS濃度	備考
-	非溶解性核種 除去システム (フィルタ機器)	粒子状核種除去 (切削粉等)	PCV取水	22m ³ /day	<1ppm	PCV内での燃料デブリ切削時に発生する切削粉等を、3段階のフィルトレーションにより除去する。粒径0.1μmまで除去。除去率DF100相当。
-	溶解性核種 除去システム (吸着塔)	イオン状核種除去	PCV取水	22m ³ /day	<1ppm	燃料デブリより溶出し、イオン状の形態となったα核種を吸着塔により除去する。除去率DF100相当。
1	吸着槽設備	吸着処理 (粉末吸着材添加)	吸着処理液	22m ³ /day	1,000ppm	チタン酸1000ppmを添加。水質変動も考慮し、DF100を達成可能な濃度を設定。
2	CFフィルタ設備	CF濃縮処理	透過水	22m ³ /day	<1ppm	CF濃縮倍率は100倍以上と設定。正味の処理時間は1h以内と想定。 初期値1000ppm×濃縮倍率100倍 ≒100,000ppm
			CF濃縮水	220L/day	100,000ppm	
3	バグフィルタ設備	ろ過脱水処理 &逆洗によるケーキ払出し	透過水	220L/day	数ppm	バグフィルタ通水を使用した加圧ろ過により、ケーキとして粉末吸着材を分離。空気逆洗によって払出し、スラッジ回収容器に回収。スラッジ含水率70vol%程度まで脱水処理。数回のバッチに分割し、合計で220L/dayを処理する。
			乾燥スラッジ	≒22L/day	(含水率70%)	
4	廃棄物保管建屋	スラッジ回収容器 払出し	—	1日あたり ユニット缶1本分	(含水率70%)	脱水処理完了後、スラッジ回収容器に充填された状態で乾燥スラッジを払出し、廃棄物保管建屋にて長期保管。

補足11.4-2_二次廃棄物処理システムの構成案（その他）

◆ 11.4 二次廃棄物処理システムの構成案 （吸着槽方式）

➤ α 核種コロイド除去手順案5(ホウ酸水系/イオン状核種除去)

- ✓ チタン酸やチタンケイ酸をカートリッジフィルタで処理する場合，事前の凝集沈殿処理の必要性が高い。理由としては，微粉末がフィルタを透過する量が大きいためである。カートリッジフィルタを適用する場合は，凝集沈殿処理もしくは透過粒子の除去が必須と考える。
- ✓ バグフィルタは凝集沈殿処理をせずに，十分に粒子を捕捉することが可能と想定されるため，本処理手順にはバグフィルタ方を適用することとした。

人を大切にし、新しい技術を創造し、地域と共に成長する

Decom.Tech