

平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金  
(固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発)」

2019年度成果

2020年12月

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID)

# 報告の内容

1. 研究開発への取り組み方
2. 事業内容
  - a. 保管管理
    - (a) 保管・管理方法の検討・評価
    - (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発
  - b. 処理・処分概念の構築と安全評価手法の開発
    - (a) 先行的処理方法の選定手法の構築
    - (b) 処分方法の提示及び安全性評価手法の開発
      - ① 固体廃棄物の分類に応じた処分方法の検討と安全評価手法の構築に向けた情報の収集・整理
      - ② 処分への影響物質等の影響評価手法の開発
  - c. 性状把握の効率化
    - (a) 性状把握の効率化
    - (b) サンプルング技術の開発
  - d. 研究開発成果の統合
3. 研究開発の運営

# 1. 研究開発への取り組み方 ～研究開発の背景・目的～

## 「中長期ロードマップ」\*における廃棄物対策の基本的考え方

- ◆ 固体廃棄物の処理・処分の検討を進めていくために、核種組成、放射能濃度等の性状を把握することが必要。
- ◆ 発生した固体廃棄物については、その性状を踏まえて安全かつ合理的な保管・管理を行う。
- ◆ 固体廃棄物をより安全に保管・管理するため、処分の技術的要件が決定される前に、安定化・固定化するための処理(先行的処理)の方法を合理的に選定する手法を構築し、先行的処理の方法を選定する。
- ◆ 固体廃棄物の処理・処分に係る研究開発を効率的に進めていくため、性状把握、処理、処分の研究開発の各分野の連携を密にする。各分野の検討状況や課題を共有し、固体廃棄物の管理全体を俯瞰した上で、必要な研究開発課題を確認しながら進めていく。

2021年度頃までを目処に、

処理・処分方策とその安全性に関する技術的な見通しを示す。

\*「東京電力HD(株) 福島第一原子力発電所の廃止措置に向けた中長期ロードマップ(2017年9月26日)」4-5 抜粋、一部修文。

# 1. 研究開発への取り組み方

## 中長期ロードマップのマイルストーン達成に係る目標

- 2021年度頃のマイルストーン達成に関し、原子力損害賠償・廃炉等支援機構(以下「NDF」という。)の戦略プラン\*においては、以下の様な具体的な目標が示されており、これに資するように取り組んでいる。

### 技術的な見通しのための具体的目標

1. 福島第一原子力発電所で発生する固体廃棄物の性状と物量及びそれらに適用可能な処理技術を踏まえた安全かつ合理的な**処分概念を構築**し、諸外国の例を踏まえつつ、処分概念の特徴を反映した**安全評価手法を整備**すること。
2. 性状把握のための**分析・評価手法が明確**になっていること。
3. 水処理二次廃棄物等いくつかの**重要な廃棄物ストリームに対して処分を念頭に置いた安定化、固定化のための実機導入が期待される処理技術が明確**になっていること。
4. 3.をベースに、処分の技術要件が決定される前に、**安定化・固定化するための処理(先行的処理)の方法を合理的に選定する手法を構築**すること。
5. 固体廃棄物のうち、処分を念頭に置いた処理技術が明確となっていないものについては、2021年までに開発した一連の手法を用いて**処理・処分方策を設定できる見通し**があること。
6. 固体廃棄物の廃棄体化前までの**保管管理に係る課題と対策が明確**になっていること。

\* 原子力損害賠償・廃炉等支援機構, “東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の 廃炉のための技術戦略プラン2019,” 2019年9月9日, 3.2.2.4.



# 1. 研究開発への取り組み方

## ～ 目標 (1/2) ～

事項／年度	第2期（燃料デブリ取り出しが開始されるまでの期間）					
	2016	2017	2018	2019	2020	2021以降
現行中長期ロードマップにおける主要イベント	△処理・処分に関する基本的な考え方の取りまとめ 処理・処分方策とその安全性に関する技術的見通し △					
<b>【固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発】</b> <b>I. 保管・管理</b> 1. 保管・管理方法の検討・評価  2. 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発  <b>II. 処理・処分概念の構築と安全評価手法の開発</b> 1. 先行的処理方法の選定手法の構築  2. 処分方法の提示及び安全性評価手法の開発	デブリ取出し 廃棄物の種類、物量の評価			デブリ取出し 付随廃棄物の種類、物量の評価及び取り出しの検討 進捗を踏まえた改訂		評価検討、現地 の状況に応じた 対策の検討
	高線量廃棄物の保管に関する国内外事例調査、1Fへの適用性検討、課題整理			水素対策を含めた保管・管理方法の検討・提示		
	α 汚染等の測定・評価方法の調査・検討			現地適用に向けたシステム化	モックアップ 試験	測定・評価方法 の技術開発
	技術の調査、試験、評価、候補技術の提示			高温処理技術及び低温処理技術について、工学規模の試験装置等を用いて、必要なデータの取得・評価		
				多角的な評価のための必要な項目・情報の収集・整理、課題の提示	技術的観点による実処理に適用可能な技術の抽出(一部の廃棄物対象)	先行的処理方法 の抽出
	国内外の処分方策の調査			処分概念及び安全評価手法の検討	廃棄体イメージの明確化、処分方法毎の安全評価手法に必要なデータの整理	予察的安全評価
	処分影響物質等に関する事例調査、解析的手法検討			主要影響物質に関する影響評価用データの取得、影響評価手法の改良		

【出典】 廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議(第63回、2019.2.28)，“2019年度廃炉研究開発計画,” P. 16. 研究開発の項目を抜き出して作成。

# 1. 研究開発への取り組み方 ～目標 (2/2)～

事項／年度	第2期（燃料デブリ取り出しが開始されるまでの期間）					
	2016	2017	2018	2019	2020	2021以降
現行中長期ロードマップにおける主要イベント	△処理・処分に関する基本的な考え方の取りまとめ 処理・処分方策とその安全性に関する技術的見直し △					
Ⅲ.性状把握 1. 性状把握の効率化 (1)分析データと移行モデルに基づく評価データを組み合わせて性状を把握する方法の構築  (2)分析方法の簡易迅速化	水処理二次廃棄物・瓦礫・伐採木・土壌の分析データの反映		分析データと移行モデルに基づく評価データを組み合わせて性状を把握する方法の構築、分析方法の簡易・迅速化			手法の適用性検討、大熊第1棟への反映
			分析方法の簡易・迅速化、マニュアル整備に向けた手法検討・提案、廃棄物管理全体のニーズや整合性等に資するための分析データの取得・評価・管理等			大熊第1棟への反映
	セシウム吸着材・原子炉建屋内試料採取技術開発、除染装置スラッジ採取		モックアップ装置設計に必要な要素試験・評価			製作・採取試験
2. サンプルング技術の開発						
Ⅳ.研究開発成果の統合 廃棄物ストリームの検討	原案作成、成果の反映、見直し		研究開発の統合的な進捗、整合性、課題評価			研究開発の進捗を踏まえた評価

【出典】廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議(第63回、2019.2.28)，“2019年度廃炉研究開発計画,” P. 16.

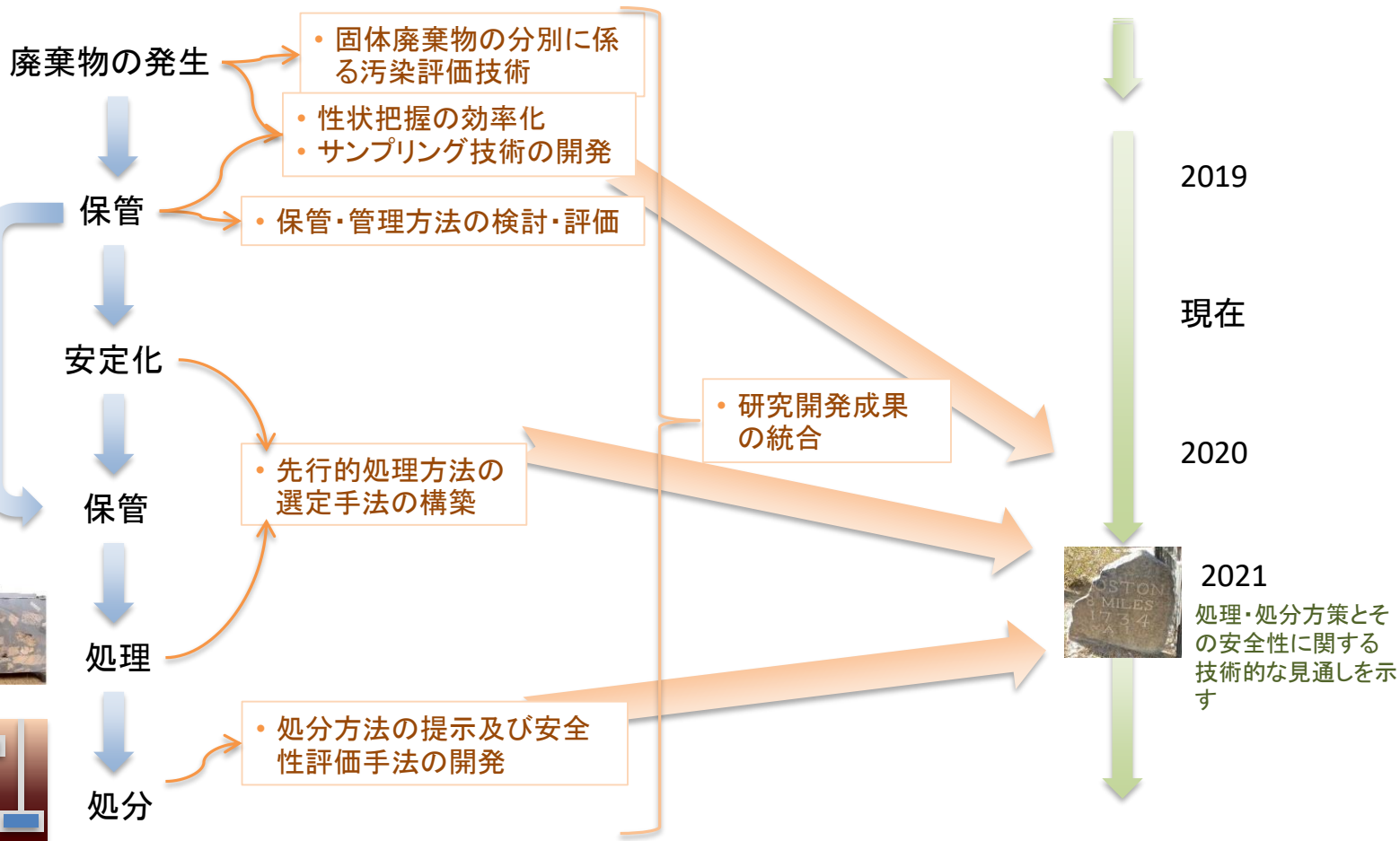
# 1. 研究開発への取り組み方

## 福島第一原子力発電所の廃炉への成果の反映

廃棄物管理  
[事業]

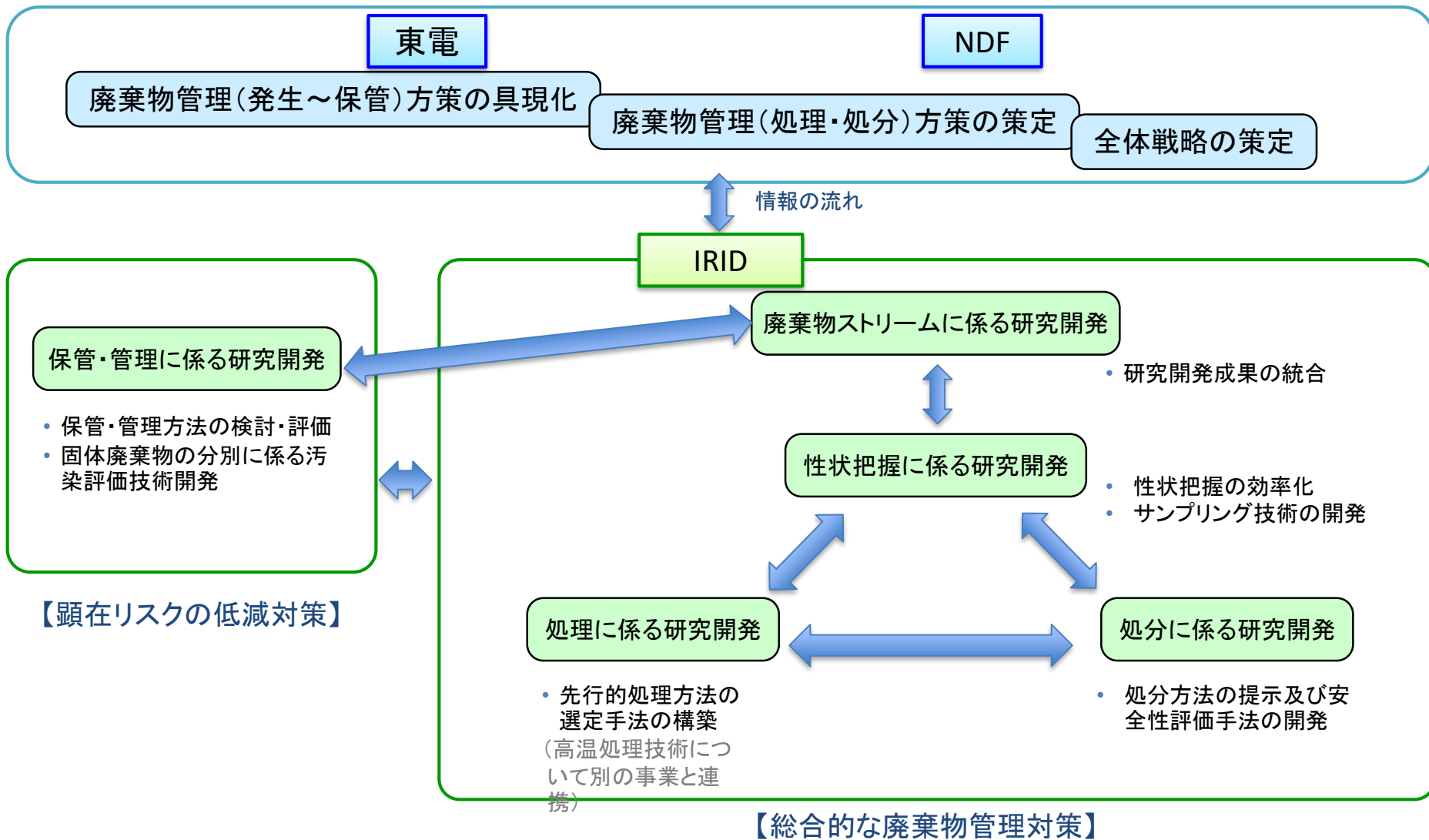
研究開発

マイルストーン  
[廃棄物]



# 1. 研究開発への取り組み方

## 関係機関の役割分担と検討事項の相関



# 1. 研究開発への取り組み方 ～ 他研究との関連性 ～

## 【本PJへのインプット】

ID	実施項目と具体的内容 (情報の用途)	必要情報	必要時期	入手先	備考
1	廃棄物管理の検討対象となる高線量廃棄物の保管条件の把握	燃料デブリ取り出し時に使用する機器の消耗品や、水処理・空調系の設備仕様、及び回収容器の仕様	適時	デブリ取りPJ	適宜情報交換 〔 今年度実績 4回 〕
2	廃棄物管理の検討対象となる高線量廃棄物の保管条件の把握	燃料デブリ収納缶の収納・移送・保管に使用する設備の仕様	適時	収納缶PJ	適宜情報交換 〔 今年度実績 3回 〕
3	廃棄物ストリーム検討及び処理技術適用性評価アプローチ検討に係る基礎知見の把握	高温処理技術に係る情報	適時	部分提案者	MRI殿を介して連携

## 【本PJからのアウトプット】

ID	実施項目と アウトプットする内容	アウトプット先での 用途	必要時期	提供先	備考
1	これまでの補助事業での研究成果	高温処理技術検討に係る基礎データとして把握	適時	部分提案者	MRI殿を介して連携
2	保管管理の成果共有と取り合い条件の調整	デブリ取り出しプロセスとの適合性の確認	適時	デブリ取りPJ	
3	水素発生量評価条件の確認	燃料デブリの水素発生量評価との比較	適時	収納缶PJ	

注記) デブリ取りPJ:「燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発」PJ  
 収納缶PJ:「燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発」PJ

# 1. 研究開発への取り組み方 ～ 実施スケジュール (1/4) ～

実施内容	計画 実績	2019年度		2020年度	
		上期	下期	上期	下期
a. 保管管理					
(a) 保管・管理方法の検討・評価					
① 廃棄物情報の調査・評価及び高線量廃棄物の保管方法の検討					
		高線量廃棄物の最新情報の整理			
			高線量廃棄物取り扱いプロセスの検討		
				高線量廃棄物長期保管方策の検討	
					廃棄物性状に応じた保管方法の検討
② 容器及び保管設備の要求事項の検討		前提条件の整理、既往研究・技術の調査			
		合理的な内容器形状の検討			
			フィルターベント及び保管・移送容器の考え方（シナリオ）検討		
				フィルターベント要求仕様の検討	
			乾燥処理設備要求条件の検討		保管・移送容器要求仕様の検討
		測定要求事項の整理		乾燥処理設備基本機能の検討	
			測定項目の検討		乾燥処理設備概念の検討
				測定方法の検討	
					測定設備の検討
(b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発		試作機改良			
			要素試験・システム化予備試験、及び測定システムの設計		
				測定システムの製作	
					モックアップ試験、性能評価
b. 処理・処分概念の構築と安全評価手法の開発					
(a) 先行的処理方法の選定手法の構築					
① 低温処理技術					
i. 技術の抽出に資する低温処理技術のデータ取得・評価					
		低温処理固化可能性検査手法の検討（炭酸塩スラリーによる検証）			
				検査手法見直し・合理化の検討（鉄共沈スラリーによる検証）	
		スラリーに対するセメント・AAM固化体特性データ取得（炭酸塩スラリー）			
				スラリーに対するセメント・AAM固化体特性データ取得（鉄共沈スラリー）	
		特殊セメント系の調査（文献調査・母材性能評価）			
				特殊セメント系の調査（模擬廃棄物による適用可能範囲の抽出）	

# 1. 研究開発への取り組み方 ～ 実施スケジュール (2/4) ～

実施内容	計画 実績	2019年度		2020年度		
		上期	下期	上期	下期	
ii. 固化体変質に関する調査		加熱等による固化体変質の調査 (文献調査・母材性能評価試験)				
				加熱等による固化体変質の調査 (不足データの取得及び性能評価の検証)		
		Cs等インベントリと固化体温度の関係性評価 (OPCモデル試解析、等)				
		Cs等インベントリと固化体温度の関係性評価 (AAMモデル試解析、等)				
		長期的な変質に与える影響因子の調査と評価 (炭酸塩スラリーの鉱物相変化の検討、等)				
		長期的な変質に与える影響因子の調査と評価 (鉄共沈スラリーの鉱物相変化の検討、等)				
② 処理技術の適用性評価アプローチの検討						
i. 廃棄物組成等の固化体性能への影響に関する調査検討		ガラス固化試験データの収集及び特性モデルによる解析 (廃棄物充填濃度の評価)				
				ガラス溶融試験による特性確認		
				複数廃棄物を混合する場合の充填濃度評価		
ii. 各処理技術の設備構成等に関するデータ取得		各処理設備構成等に関する調査・検討				
				各処理設備構成等に関する調査・検討 (経済性データ補充、等)		
iii. 高温処理時のCs揮発量及び抑制に関する調査		Cs揮発量に関する文献調査及び工学試験結果の整理				
				高温処理によるCs揮発量測定及びCs揮発抑制効果の評価		
(b) 処分方法の提示及び安全性評価手法の開発						
① 固体廃棄物の分類に応じた処分方法の検討と安全評価手法の構築に向けた情報の収集・整理		廃棄物特徴の整理及び処分概念・安全評価手法の検討 (2019年度選定廃棄物)				
			処分から廃棄体への要求事項の検討			
				廃棄物特徴の整理及び処分概念・安全評価手法の検討 (2020年度選定廃棄物)		
				廃棄体イメージの検討		
② 処分への影響物質等の影響評価手法の開発	・基礎データの調査	データ取得条件設定、調査・データ取得 (アクチニド核種中心)				
				データ取得条件設定、調査・データ取得 (遷移金属中心)		
		内部試験データ取得条件設定、試験によるデータ取得 (ホウ酸)			内部試験データ取得条件設定、試験によるデータ取得 (ホウ酸の補足)	
・影響評価手法の調査		影響評価手法の調査・構築				
			2019年度取得データに基づくパラメータ設定			
			影響評価手法の調査・構築 (補足調査・データ取得による試行)			

# 1. 研究開発への取り組み方 ～ 実施スケジュール (3/4) ～

実施内容	計画 実績	2019年度		2020年度	
		上期	下期	上期	下期
c. 性状把握の効率化					
(a) インベントリ推定法の開発と分析データの取得					
①分析データと移行モデルに基づく評価データを組み合わせて性状を把握する方法の構築					
		汚染メカニズムの把握 (対象汚染物の検討とケーススタディ)		汚染メカニズムの把握 (対象廃棄物への適用性検討、等)	
		分析データ代表性に関する評価 (廃棄物データの特性を整理し、分析データとの関係を整理)		分析データ代表性に関する評価 (廃棄物データ分類方法見直し、代表性評価)	
		分析データ代表性に関する評価 (廃棄物データの特性を整理し、分析データとの関係を整理)		分析データ代表性に関する評価 (廃棄物データの特性を整理し、分析データとの関係を整理)	
		分析データ特徴に関する調査 (廃棄物・保管施設単位での汚染分布の検討)		分析データ特徴に関する調査 (保管容器単位での汚染分布の検討)	
		統計論的インベントリ推定方法 (統計的手法適用の検討及び廃棄物の類型化)		統計論的インベントリ推定方法 (推定方法検討及び適用性の評価)	
		分析データの評価・管理 (データベースの運用・保守)		分析データの評価・管理 (1F廃棄物への分析計画法の提案)	
		分析データの取得 (試料採取・輸送、及び分析)			
②分析方法の簡易・迅速化等					
i. 試料のサンプリング技術開発					
		最適化の条件抽出のための試験及びモックアップ機設計		モックアップ試験機の製作	
		採取方法の検討		モックアップ試験	
ii. 分離プロセスの合理化検討					
		模擬試料を用いた試験 (放射能測定法、非アクチノイド)		模擬試料を用いた試験 (放射能測定法、アクチノイド)	
		分離手法整理			
		合理的分析手法の提案			
		校正方法の提案			
		模擬試料を用いた試験 (ICP-MS法、非アクチノイド)		模擬試料を用いた試験 (ICP-MS法、アクチノイド)	



# 1. 研究開発への取り組み方 ～ 実施スケジュール (4/4) ～

実施内容	計画 実績	2019年度		2020年度	
		上期	下期	上期	下期
iii. 自動化技術の開発		分離捜査試験 (非アクチノイド)			
				分離操作試験 (アクチノイド)	
iv. 標準的な分析手法の確立		成立性評価試験 (放射能測定法、非アクチノイド)			
				成立性評価試験 (放射能測定法、アクチノイド)	
		成立性評価試験 (ICP-MS法、非アクチノイド)			
(b) サンプリング技術の開発		要素試験装置の設計			
				要素試験装置の製作	
		吸着塔模擬体等製作		要素試験手順検討	
					要素試験
d. 研究開発成果の統合		処理処分を踏まえた選択肢の検討 (保管のあるべき姿、等)			
				処理の選択肢の絞り込みの考え方整理 (廃棄物ストリームの構築)	

# 1. 研究開発への取り組み方 ～ 実施体制図 ～



## 2. 事業内容

### a. 保管管理

#### (a) 保管・管理方法の検討・評価

- ① 廃棄物情報の調査・評価及び高線量廃棄物保管方法の検討
- ② 容器及び保管設備の要求事項の検討

#### (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発

燃料デブリ取り出しにより発生する高線量廃棄物に係る検討の状況

(a) 保管・管理方法の検討・評価

検討に必要なインプットの例

廃棄物情報

- ・廃棄物の性状情報 → 直接的情報なし
- ・燃料デブリ/廃棄物の範囲 → 議論中
- ・切断方法、サイズ → 複数の候補を検討中

プロセス要件

- ・構内移送の要件 → 未定
- ・廃棄物保管庫の受入要件 → 未定
- ・計量管理方針 → 未定
- ・仕分け → 検討中

2017 年度検討開始

検討の前提条件を設定

- ・廃棄物情報
- ・プロセス要件

安全機能要求から収納・移送・保管フローを検討し、一次案を提示  
(2018年度最終報告参照)

→シナリオ一次案を本検討の出発点とする

2019 年度本補助事業 開始

最新情報の基づく前提条件の再設定

- ・他PJの最新情報を収集し、廃棄物情報を更新

機器・設備の概念具体化

- ・内容器
- ・フィルタベント付保管容器
- ・移送容器
- ・乾燥設備
- ・測定装置

昨年度までの検討にて抽出

収納・移送・保管フローの更新・検討

- ・前提条件の再設定、機器・設備概念具体化を反映
- ・プロセス全体を通じての整合性を検証

GOAL

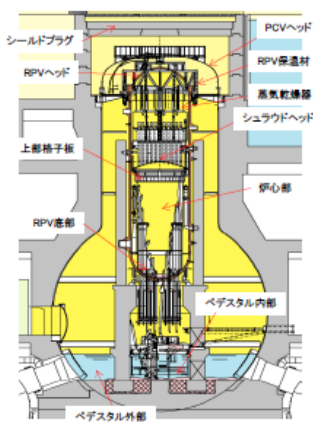
最新の廃棄物情報に基づき、高線量廃棄物(燃料デブリ取り出しにより発生する廃棄物)の取扱いプロセスについて、想定される複数のシナリオを示す。

昨年度のプロセス検討(蓋締めと構内移送を例示)

作業	3. 内容を保管容器へ収納・蓋締め		6. 構内移送			
	作業フロー	仕様	安全機能	設備・装置	設備・装置	
作業フロー						
仕様		<ul style="list-style-type: none"> <li>・搬入セルの汚染防止</li> <li>・保守セルと搬入セル間のダブルアシストにより、搬入セルの汚染を防止</li> <li>・保管容器の仕様</li> <li>・逆へい機能有する</li> <li>・フィルタベント機能有する</li> <li>・遠隔操作により移送容器へ収納可能</li> <li>・遠隔操作により蓋締め可能</li> <li>・耐震性を有する(保管時)</li> <li>・搬入セル内の廃棄物容器の移動は、台車、またはベルトコンベアを用いる(詳細検討中)</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>・構内移送</li> <li>・転倒防止機能、及び転倒時に廃棄物容器の内容物が漏洩しない構造強度を有する</li> <li>・輸送機</li> <li>・保管容器の転倒を防止する機能を有する</li> </ul>	
				設備・装置	設備・装置	
				安全機能	安全機能	
				保管容器	保管容器	
				保守セル / 搬入セル	移送容器	
					移送車両	
重大事象	汚染拡大 / 内漏洩はく	閉じ込め	閉じ込め	検定検疫	閉じ込め	
	外漏洩はく	逆へい	逆へい	閉じ込め	閉じ込め	
	火災	水漏れ対策	水漏れ対策	水漏れ対策	水漏れ対策	
作業事故	操作性	操作性	操作性	操作性	操作性	
課題						

<これまでの検討成果① 前提条件設定の例：廃棄物情報>

既往研究の例



廃棄物 <sup>②</sup>	分類 <sup>①</sup>
シールドプラグ	固体放射性廃棄物
PCVヘッド	固体放射性廃棄物
RPV保温材	固体放射性廃棄物
RPVヘッド	固体放射性廃棄物
蒸気乾燥機	固体放射性廃棄物
シュラウドヘッド	固体放射性廃棄物
上部格子板	燃料デブリ
シュラウド	燃料デブリ
ジェットポンプ	燃料デブリ
炉心部燃料デブリ	燃料デブリ
RPV底部燃料デブリ	燃料デブリ
RPV下部/CRDハウジングに付着した燃料デブリ	燃料デブリ
ペDESTAL内部構造物	燃料デブリ
CRD交換機	燃料デブリ
ペDESTAL内部燃料デブリ	燃料デブリ
ペDESTAL外部構造物	固体放射性廃棄物
ペDESTAL外部燃料デブリ	燃料デブリ

平成26年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金  
燃料デブリ・炉内構造物取り出し工法・システムの高度化事業

既往研究を出発点に、関連PJと協議(H29-31年度に計23回実施)しながら検討

廃棄物として取り扱うものの基本的な考え方(暫定)

- ①撤去物  
燃料装荷位置よりも上部(シュラウドヘッド～シールドプラグ)およびペDESTAL外部構造物
- ②その他の廃棄物  
原型を留めていること、かつ、臨界可能性のないもの

関連PJ検討成果から廃棄物情報を抽出し、整理

廃棄物情報の整理(2018年度最終報告を基に加工)

廃棄物区分	発生廃棄物	想定発生量(1基あたり)	想定線量
撤去物(炉内構造物ほか)	シールドプラグ・PCVヘッド RPV保温材・RPVヘッド 蒸気乾燥機・セパレータ 等	・デブリ上取り出し：670 t ・デブリ横取り出し：67 t	3.4E+12 ~ 1E+16 Bq/t
取り出し機器	ドリル・マニピュレータ・カメラ 等	未定 (取り出し工法による)	—
空調・水処理系廃棄物	HEPAフィルタ・水処理フィルタ 廃吸着剤 等	—	—

関連PJの検討進捗に伴い  
更新が必要

本補助事業にて最新の工法の報告をもとに、廃棄物情報を更新する

その他の前提条件の例(現行の福一構内における廃棄物取り扱い情報を基に仮設定)

- ①構内移送要件
  - ・移送容器の表面線量 30 mSv/h以下
  - … 現在の福一※の廃棄物構内移送を参考に設定
  - ・移送容器は密閉式とする
  - … α汚染拡大防止の観点より
- ②保管庫受入要件
  - ・保管容器の表面線量 10 Sv/h以下
  - … 固体廃棄物貯蔵庫第9棟の運用を参考に設定
  - ・保管容器の重量(遮へい・内容物含む) 7.5ton以下
  - … 固体廃棄物貯蔵庫第9棟の運用を参考に設定

(※以降のスライドにおいて、「福一」は「福島第一原子力発電所」を示す。)

〈これまでの検討成果② 安全機能/水素対策の検討〉

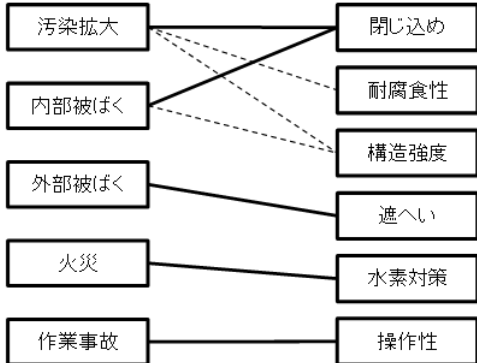
安全機能の検討

(2018年度最終報告より抜粋)

前提条件を基に安全機能を検討

想定重大事故

安全機能要求

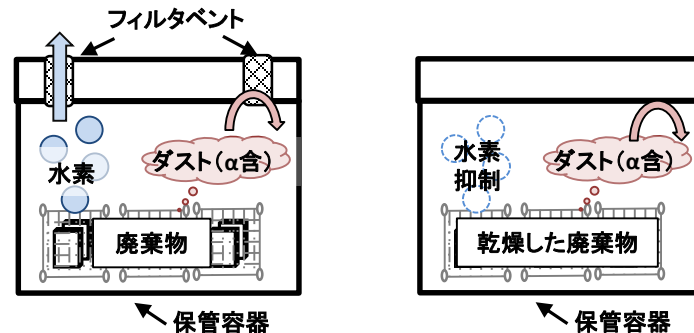


高線量廃棄物の国内外保管事例調査

(2018年度最終報告を基に加工)

保管方法	水素対策	主な適用事例	適用時の課題
乾式 / ベント無し	乾燥+密閉保管容器	・Zion(米国)	・乾燥技術の開発 ・乾燥設備規模と乾燥時間
乾式 / ベント有り※	フィルタベントによる排気	・TMI-2(米国)	・適したフィルタベントの開発
湿式 / ベント無し	冠水+開放保管容器	・シュラウド交換工事等(国内)	・ <b>プールの汚染</b> ・ <b>プールの確保</b> と水処理設備が必要
湿式 / ベント有り	ベント管 / Compensator	・Paks-2(ハンガリー)	・ベント管の開発 ・ <b>プールの確保</b>

プールの確保・管理が不要な乾式保管に着目し、フィルタベントの海外事例調査の結果も踏まえて、「乾式/ベント無し」及び「乾式/ベント有り」を候補として選定保管方法のイメージ(左:乾式/ベント有り、右:乾式/ベント無し)



※構内移送時には密閉移送容器でオーバーパックし、水素発生量を時間管理

重要な課題を抽出

・核種飛散を防止 (**密閉性**の確保)

相反する安全機能要求であり、両立させる方策が必要

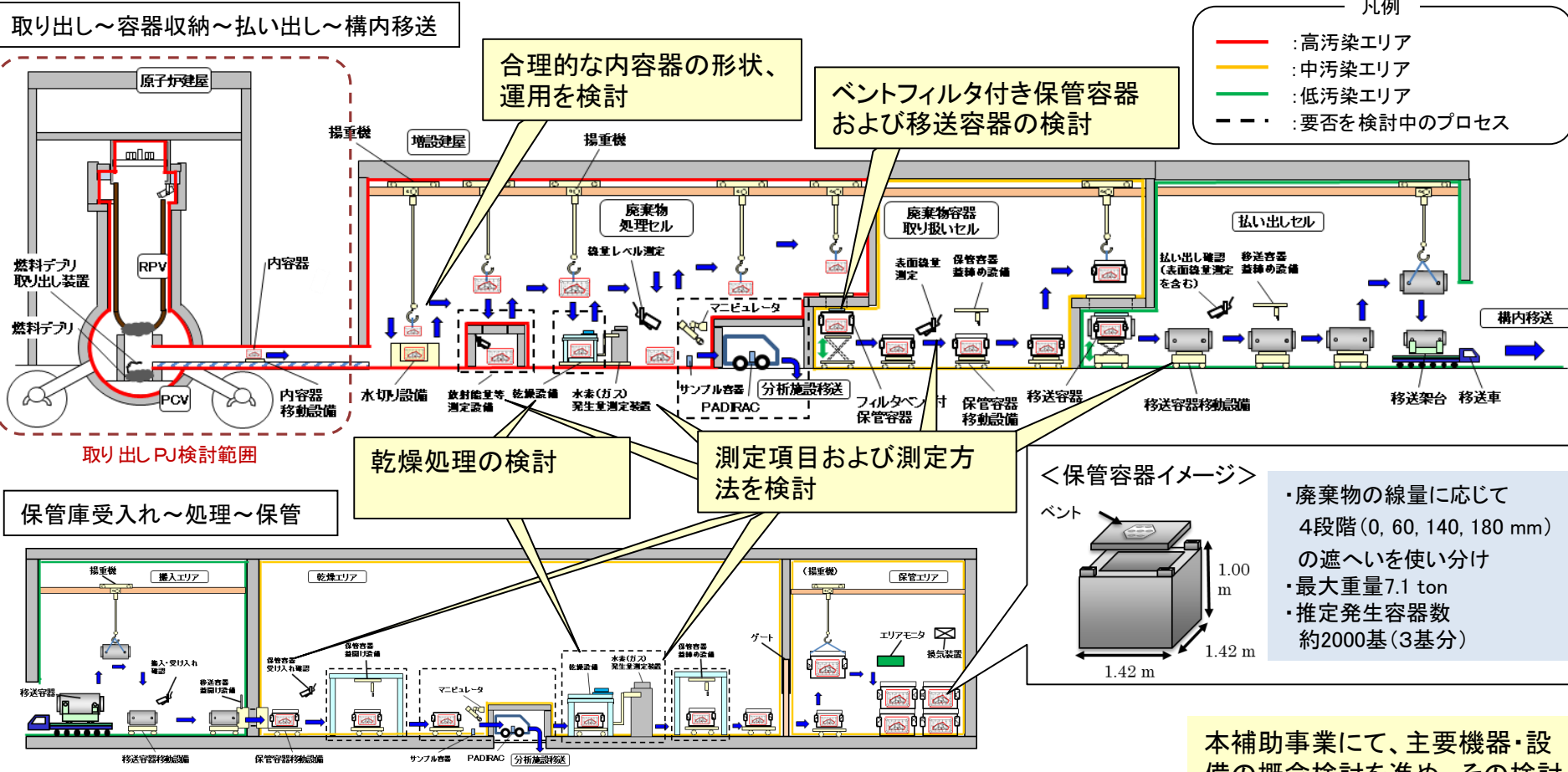
・水素ガスを放出 (**通気性**の確保)

本補助事業にて、燃料デブリ取り出しの廃棄物に適した**フィルタベントシステム**と**乾燥方法**について概念具体化を検討する



### <これまでの検討成果③ 収納・移送・保管フローの検討>

燃料デブリ取り出しにより発生する廃棄物の収納・移送・保管フロー  
(横取り出し工法PLAN-Bにて、ベントフィルタ付き容器により水素対策を講じる例)  
(2018年度 最終報告を基に加工)



- <コンセプト>
- 保管時の水素対策としてベントフィルタ付きの保管容器を用いる。
  - 構内移送は $\alpha$ 汚染拡大防止のため、密封式の移送容器を用いる。移送中は時間管理により水素濃度を管理する。
  - 汚染拡大防止、作業被ばく低減のため、汚染レベルに応じて3つ以上のエリア区分(赤、黄、緑)を設ける。

本補助事業にて、主要機器・設備の概念検討を進め、その検討結果を反映しプロセスフローを更新する。

## (a) 保管・管理方法の検討・評価

表1 (a) 保管・管理方法の検討・評価の2019年度成果と2020年度成果(予定)

項目		2019年度成果	2020年度成果(予定)
①廃棄物情報の調査・評価及び高線量廃棄物の保管方法の検討	廃棄物情報の調査・評価	燃料デブリ取り出し工法の検討状況に応じた高線量廃棄物の種類、物量等の最新の情報を整理	(必要に応じて見直し)
	シナリオの検討	高線量廃棄物の取扱いプロセスについて、想定されるシナリオ(収納・移送・保管フロー)を提示	高線量廃棄物の取扱いプロセスについて、複数のシナリオの成立性の提示
②容器及び保管設備の要求事項の検討	内容器*の形状・運用の検討	合理的な内容器の寸法、運用方法の提示	(必要に応じて見直し)
	ガス発生対策の検討	フィルタベント適用実績調査、フィルタベント・保管容器・移送容器の考え方の提示	フィルタベント・保管容器・移送容器の要求事項の提示
	乾燥処理の検討	既往の乾燥処理技術の調査、乾燥処理設備の要求事項の一次案の提示	乾燥処理等の設備の要求事項の提示
	測定方法および測定設備の検討	測定要求事項の整理とそれに基づく測定項目の提示	測定方法(測定項目・測定場所・測定時期等)・測定設備案の提示

\*内容器.....炉内で廃棄物を回収する容器。取り出しロボットによって取り扱われる。また、保管容器の中に収納される。



(a) 保管・管理方法の検討・評価

① 廃棄物情報の調査・評価及び高線量廃棄物の保管方法の検討(概要)

■ 2018年度までの実績

- 燃料デブリ取り出し時に発生する高線量廃棄物(炉内構造物)を安全に収納・移送・保管する方法を検討し、保管までの収納・移送・保管フローの案を示した。
- 保管までの収納・移送・保管フローの案を基に、保管容器に要求される機能を整理し、要求機能を満足する保管容器の候補を例示した。

■ 目標

- 最新の廃棄物情報に基づき、高線量廃棄物の取扱いプロセスについて、想定される複数のシナリオを示す。

■ 実施内容

- 2019年度は、燃料デブリ取り出し工法の検討状況に応じて高線量廃棄物の種類、物量等の最新の情報を整理した。また、代表的な高線量廃棄物の取扱いプロセスについて、想定される複数のシナリオを検討する。
- 2020年度は、引き続き燃料デブリ取り出し工法の検討状況に応じて高線量廃棄物の種類、物量等の最新の情報を整理するとともに、その情報に基づいて高線量廃棄物の保管までの取扱いプロセスを検討する。また、検討した複数のシナリオについて、スループットや保管容量等への影響を評価し、成立性を確認する。

■ 目標達成を判断するための指標

- (2019年度)高線量廃棄物の種類、物量等の最新の情報の提示。代表的な高線量廃棄物の取扱いプロセスについて、想定される複数のシナリオを提示。
- (2020年度)高線量廃棄物の種類、物量等の最新の情報の提示、および、その情報に基づいた保管までの取扱いプロセスの提示。提示した複数のシナリオの成立性の提示。

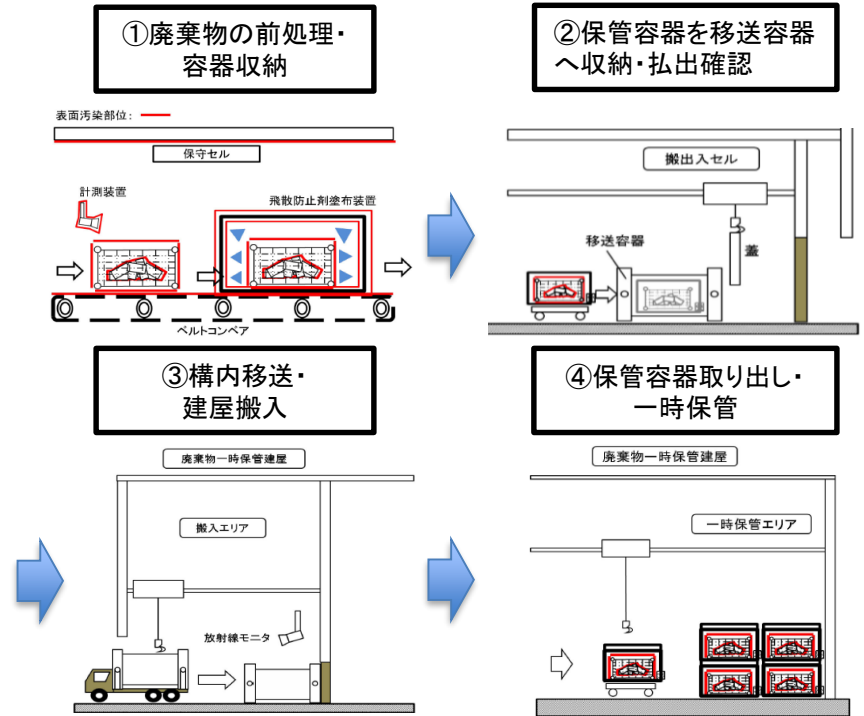


図1 高線量廃棄物に対する収納・移送・保管フローの例(概略)

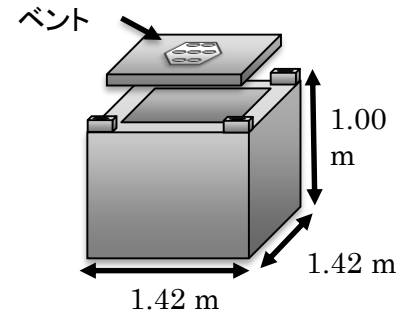


図2 廃棄物保管容器(軽量容器案※)外観イメージ

※寸法は遮蔽、及び廃棄物重量を含めた際に、現行の福一廃棄物容器の制限重量を超過しないように仮設定

## <廃棄物情報の調査・評価>

### ● 調査した関連PJの報告

・平成28年度補正予算廃炉・汚染水対策事業費補助金  
燃料デブリ・炉内構造物取り出しの基盤技術開発事業



主に撤去物・取り出し機器  
に関する情報を収集

・平成28年度補正予算廃炉・汚染水対策事業費補助金  
燃料デブリ・炉内構造物取り出し工法システムの高度化事業



主に液相系・気相系  
二次廃棄物に関する  
情報を収集

### ● 調査項目

- ・廃棄物分類(撤去物/取り出し機器消耗品/液相系/気相系)
- ・機器・廃棄物名称
- ・廃棄物性状(材質/形状)
- ・発生量
- ・線量 など

### ● 調査により更新された主な項目

- ・撤去物の想定発生量を各工法ごとに整理
- ・撤去物の切断後形状
- ・取り出し機器の廃棄物名称の具体化(廃棄物となる機器の特定)
- ・液相系/気相系二次廃棄物の廃棄物名称の具体化
- ・液相系二次廃棄物(一部)の発生量

### ● 評価項目

- ・撤去物の水素発生速度

## (a) 保管・管理方法の検討・評価

① 廃棄物情報の調査・評価及び高線量廃棄物の保管方法の検討  
廃棄物情報の調査・評価(2/3)

デブリ取り出しに伴い発生する廃棄物の情報を整理

➡ 次頁以降の検討における共通の前提条件

表1 燃料デブリ取り出しに伴い発生する廃棄物<sup>※1</sup>情報の整理結果概要

主な更新箇所を赤字で示す。

廃棄物発生区分		主な発生廃棄物	想定線量	発生する工法	廃棄物の形状 <sup>※2</sup>	想定発生量 <sup>※3</sup> (1基あたり)
撤去物	フロア撤去物	福一L撤去物	—	横取り出し	□260 mm ~ □500 mm / 板状	1 ton (PLAN-C) 24 ton (PLAN-A, B)
	格納容器/ 圧力容器 撤去物	シールドプラグ DSスロットプラグ	4 Sv/h	上取り出し	□1800 mm × 厚さ306 mm / 板状	91 ton (ルートA) 792 ton (ルートB)
		PCVヘッド・RPV保温材 RPVヘッド・蒸気乾燥機 セパレータ	4~400 Sv/h	上取り出し	・□108 mm ~ □500 mm / 板状 ・Φ150 mm / 筒状	
		ペDESTAL外部構造物	—	横取り出し	・□108 mm ~ □500 mm / 板状 ・Φ150 mm / 筒状	38 ton (PLAN-A) 157 ton (PLAN-B, C)
取り出し機器	ピット・カッター ワイヤ・把持爪 ケーブル・シール材	—	上取り出し、 横取り出し	—	—	
液相系二次廃棄物	フィルタろ材・パッキン	—	上取り出し、 横取り出し	—	—	
気相系二次廃棄物	フィルタろ材・パッキン	—	上取り出し、 横取り出し	—	—	

※1 廃棄物ストリーム分類の「燃料デブリ取り出しに伴う廃棄物」に相当する。

※2 「□260mm~□500mm」は「縦横260mm~縦横500mmの正方形」を意味する。「Φ150 mm」は「直径150 mmの円」を意味する。

※3 ルートA,B工法はデブリ上取り出し、PLAN-A,B,C工法はデブリ横取り出し工法（燃料デブリ・炉内構造物の取り出し基盤技術の高度化2018年度最終報告参照）

(a) 保管・管理方法の検討・評価  
 ① 廃棄物情報の調査・評価及び高線量廃棄物の保管方法の検討  
 廃棄物情報の調査・評価 (3/3)

代表的な廃棄物について、水素発生速度を評価

➡ (a)②ガス発生対策のインプット条件とする\*

\*2019年度は本評価結果に基づき「(a)②ガス発生対策」を検討した。  
 検討結果を踏まえ、必要に応じて2020年度に評価モデルを見直す。

表1 想定水素発生速度(上取り出し・横取り出し工法の金属・コンクリート廃棄物の最大値を示す)

項目		上取り出し 金属廃棄物	上取り出し コンクリート廃棄物	横取り出し 金属廃棄物	横取り出し コンクリート廃棄物
線源(Bq/t)	Cs-137	1.90E+15	3.40E+12	3.40E+12	3.40E+12
保管容器当たりの収納量(t)		0.6	2.08	1.3	2.08
線源(Bq)	Cs-137	1.1E+15	7.1E+12	4.4E+12	7.1E+12
放出エネルギー (MeV/s)		1.3E+15	7.9E+12	4.9E+12	7.9E+12
水素発生速度(m <sup>3</sup> /d)		<b>1.8E-02</b>	<b>1.1E-04</b>	<b>7.1E-05</b>	<b>1.1E-04</b>
<参考> 想定廃棄物		ドライヤ	シールド プラグ	ペDESTAL外 撤去物	ペDESTAL外 撤去物

<ご参考> 評価条件(2017年度-2018年度水素発生対策の成果を参考に設定)

計算パラメータ	設定値
評価式	水素発生速度 = $\sum_{ij} (\text{核種}i\text{の崩壊熱} \times \text{線種}j\text{のG値} \times \text{線種}j\text{の吸収効率})$ 核種 <i>i</i> の崩壊熱 = $\sum_j (\text{核種}i\text{のインベントリ} \times \text{線種}j\text{の放出率} \times \text{線種}j\text{の放出エネルギー})$
G値 (β, γ線)	0.45 (2018年度水素発生対策の成果を参考に設定)
吸収効率	1.0 (最も保守的に設定)
Cs-137の一壊変あたりの放出エネルギー	1.11 MeV (= 0.662 × 0.851 + 0.514 × 0.944 + 1.176 × 0.056) 【γ,β線の一壊変あたりの発生確率 × エネルギー。β線のエネルギーは最大値で計算(保守的)】

(a) 保管・管理方法の検討・評価

① 廃棄物情報の調査・評価及び高線量廃棄物の保管方法の検討  
シナリオの検討(1/3)

- ▶ 検討成果に基づき、収納・移送・保管フローを更新した。
- ▶ 収納・移送・保管フローの更新において、フローの大幅な変更を要するものでないことを確認した。

作業	1. 廃棄物を内容器に詰め込み・セル内移送	2. 各種計測	3. 内容物を保管容器へ収納・密封																									
作業フロー																												
仕様	<ul style="list-style-type: none"> <li>内容器(セル内移送手段)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・遊差は無し(内容器は常に連続操作で取り扱う)</li> <li>・内容器は、取り出し装置との取り合い、複数遊差用の保管容器への収納効率等を踏まえて合理的な仕様を検討</li> <li>・概算必要個数(上取り出しユニット工法1号機あたり)                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>①内容器口500 mm × 300 mmの場合→10016個</li> <li>②内容器口335 mm × 272 mmの場合→27216個</li> <li>③内容器口450 mm × 272 mmの場合→14612個</li> <li>④内容器口535 mm × 272 mmの場合→10180個</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>ベルトコンベア(セル内移送手段の例)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・スルーフィット向上・連続操作の簡素化の、取り出しセル内の移動にはベルトコンベア等を用いる。</li> </ul> </li> <li>・取り出し時にカメラにて寸法・外形、表面状態、材質の確認を行う。                             <ul style="list-style-type: none"> <li>→一部大型除去物に関しては、内容器に収納されずPCV内から払い出される可能性がある。</li> <li>→一部大型除去物に関しては、内容器サイズまで切断され、内容器に収納される可能性がある。</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>各種計測(詳細検討)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・内容器に収納した状態で測定を行う</li> <li>・測定の種類                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>・質量</li> <li>・表面線量率</li> <li>・検定の検種   <ul style="list-style-type: none"> <li>・放射線量(γ)</li> <li>・放射能(α・β)</li> </ul> </li> <li>・核物質</li> <li>・水素発生速度</li> </ul> </li> <li>・サンプリングの実施(詳細検討)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・必要に応じて廃棄物のサンプリングを行い、分析施設へ移送する</li> </ul> </li> <li>・サブプロセス                             <ul style="list-style-type: none"> <li>例)測定装置が基準値を上回った場合</li> <li>→a) 保管容器あたりの内容器収納数変更</li> <li>→b) 除去物の詰め直し</li> </ul> </li> </ul> </li></ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>保管容器取り出しセルの汚染防止                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・取り出しセルと保管容器取り出しセル間のダブルアシスト相当品により、保管容器取り出しセルの汚染を抑制</li> </ul> </li> <li>・保管容器の仕様                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・遊へい機能を有する(内容器に応じて複数の遊差率: 0.60, 140, 180 mm)</li> <li>・フィルタベント機能を有する</li> <li>・遠隔操作により移送容器へ収納可能</li> <li>・遠隔操作による確認が可能</li> <li>・保管時の腐食を考慮する</li> </ul> </li> <li>・保管室内での搬入フェードバックによる遊差を考慮し、容器収納後の遊差が既行の搬入フェードバックの制限遊差を超過しないように寸法を設定する。(既定外径: 1.4 m × 1.4 m × 1.0 m)</li> <li>→一部大型除去物を保管容器サイズまで切断し、保管容器に直接収納する可能性がある。</li> <li>・保管容器取り出しセル内の廃棄物容積の移動は、クレーン、台車、またはベルトコンベアを用いる</li> <li>・必要に応じて保管容器の各種測定を行う                             <ul style="list-style-type: none"> <li>例) 表面線量測定、表面汚染</li> <li>→サブプロセス</li> <li>例) 遊差の不具合が生じた場合→(3.3)遊差め直し</li> <li>例) 表面汚染が保管庫の受け入れ線量を超過した場合→(3.3)除染</li> </ul> </li> </ul>																									
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">計測・検査</th> </tr> <tr> <th>安全検査</th> <th>内容器</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>閉じ込め</td> <td>・閉じ込め機能を確保する。 ・HEPAフィルタ等で除染を管理</td> </tr> <tr> <td>遊へい</td> <td>・遊へい率により遊へい機能を有する</td> </tr> <tr> <td>水漏れ対策</td> <td>・上部は常に開放 ・換気する</td> </tr> <tr> <td>作業事故</td> <td>・操作性 ・容積に、かつ、安全に取り扱える操作性を有する</td> </tr> </tbody> </table>		計測・検査		安全検査	内容器	閉じ込め	・閉じ込め機能を確保する。 ・HEPAフィルタ等で除染を管理	遊へい	・遊へい率により遊へい機能を有する	水漏れ対策	・上部は常に開放 ・換気する	作業事故	・操作性 ・容積に、かつ、安全に取り扱える操作性を有する	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">計測・検査</th> </tr> <tr> <th>安全検査</th> <th>保管容器</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>閉じ込め</td> <td>・閉じ込め機能を確保する。 ・HEPAフィルタ等で除染を管理</td> </tr> <tr> <td>遊へい</td> <td>・遊へい率により遊へい機能を有する</td> </tr> <tr> <td>水漏れ対策</td> <td>・上部は常に開放 ・換気する</td> </tr> <tr> <td>作業事故</td> <td>・操作性 ・容積に、かつ、安全に取り扱える操作性を有する</td> </tr> </tbody> </table>		計測・検査		安全検査	保管容器	閉じ込め	・閉じ込め機能を確保する。 ・HEPAフィルタ等で除染を管理	遊へい	・遊へい率により遊へい機能を有する	水漏れ対策	・上部は常に開放 ・換気する	作業事故	・操作性 ・容積に、かつ、安全に取り扱える操作性を有する
計測・検査																												
安全検査	内容器																											
閉じ込め	・閉じ込め機能を確保する。 ・HEPAフィルタ等で除染を管理																											
遊へい	・遊へい率により遊へい機能を有する																											
水漏れ対策	・上部は常に開放 ・換気する																											
作業事故	・操作性 ・容積に、かつ、安全に取り扱える操作性を有する																											
計測・検査																												
安全検査	保管容器																											
閉じ込め	・閉じ込め機能を確保する。 ・HEPAフィルタ等で除染を管理																											
遊へい	・遊へい率により遊へい機能を有する																											
水漏れ対策	・上部は常に開放 ・換気する																											
作業事故	・操作性 ・容積に、かつ、安全に取り扱える操作性を有する																											
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">計測・検査</th> </tr> <tr> <th>安全検査</th> <th>保管容器 / 搬出セル</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>閉じ込め</td> <td>・閉じ込め機能を確保する。 ・HEPAフィルタ等で除染を管理</td> </tr> <tr> <td>遊へい</td> <td>・遊へい率により遊へい機能を有する</td> </tr> <tr> <td>水漏れ対策</td> <td>・フィルタベント機能を有する</td> </tr> <tr> <td>作業事故</td> <td>・容積に、かつ、安全に取り扱える操作性を有する</td> </tr> </tbody> </table>		計測・検査		安全検査	保管容器 / 搬出セル	閉じ込め	・閉じ込め機能を確保する。 ・HEPAフィルタ等で除染を管理	遊へい	・遊へい率により遊へい機能を有する	水漏れ対策	・フィルタベント機能を有する	作業事故	・容積に、かつ、安全に取り扱える操作性を有する														
計測・検査																												
安全検査	保管容器 / 搬出セル																											
閉じ込め	・閉じ込め機能を確保する。 ・HEPAフィルタ等で除染を管理																											
遊へい	・遊へい率により遊へい機能を有する																											
水漏れ対策	・フィルタベント機能を有する																											
作業事故	・容積に、かつ、安全に取り扱える操作性を有する																											
課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>・各型廃棄物の形状の検討</li> <li>・サンプリング方法の検討</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・各種測定内容の検討</li> <li>・サンプリング方法の検討</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・遊差操作による容積収納</li> <li>・遊差操作による遊差め</li> <li>・ダブルアシストによる保管容器取り出しセルの汚染防止</li> <li>・フィルタベントの調査</li> <li>・各種測定の実験</li> </ul>																									

図1 更新した収納・移送・保管フロー(一部抜粋)

表1 主な更新箇所と更新内容

主な更新項目	更新内容
廃棄物情報	▶ 更新した廃棄物情報において、フローに問題がないことを確認
内容器	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 複数の内容器を保管容器へ収納するように変更</li> <li>▶ 発生する保管容器数を内容器形状ごとに整理</li> </ul>
測定方法の検討	▶ 各プロセスにて確認項目・測定項目の一次案を追加

フィルタベント・保管容器・移送容器・乾燥設備は、2020年度に検討成果を反映予定



(a) 保管・管理方法の検討・評価

① 廃棄物情報の調査・評価及び高線量廃棄物の保管方法の検討  
シナリオの検討(2/3)

更新した収納・移送・保管フロー(1/2)

作業	1. 廃棄物を内容器に詰め込み・セル内移送		2. 各種計測		3. 内容器を保管容器へ収納・蓋締め		4. 保管容器を移送容器に収納、移送容器の蓋締め		5. 払い出し確認・移送容器の装荷																															
作業フロー																																								
仕様	<ul style="list-style-type: none"> <li>内容器(セル内移送手段)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・道敷は無し(内容器は常に遠隔操作で取り扱う)</li> <li>・内容器は、取り出し装置との取り合い、複数道敷層の保管容器への収納効率を踏まえて合理的な形状を検討</li> <li>・廃棄必要量計(上取り出しルーラー口高さ19種あり)                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>①内容器口350 mm×300 mmの場合→10016個</li> <li>②内容器口335 mm×272 mmの場合→27216個</li> <li>③内容器口450 mm×272 mmの場合→14612個</li> <li>④内容器口355 mm×272 mmの場合→10180個</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>ベルトコンベア(セル内移送手段の例)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・スルーポン上向・遠隔操作の簡素化の為、取り出しセル内の移動にはベルトコンベアを用いる</li> </ul> </li> <li>取り出し時にカメラにて寸法・外觀、表面状態、材質の確認を行う。</li> <li>一部大型除去物に関しては、内容器に収納されずPCV内から払い出される可能性がある。</li> <li>一部大型除去物に関しては、内容器サイズまで切断され、内容器に収納される可能性がある。</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>各種計測(詳細検討中)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・内容器に収納した状態で測定を行う</li> <li>・測定の種類                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>・重量</li> <li>・表面線量率</li> <li>・推定の種類   <ul style="list-style-type: none"> <li>・放射線量(γ)</li> <li>・放射線量(α・β)</li> <li>・核物質</li> <li>・発熱量</li> <li>・水素発生速度</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>サンプリングの実施(詳細検討中)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・必要に応じて廃棄物のサンプリングを行い、分析施設へ移送する</li> </ul> </li> <li>サブプロセス                             <ul style="list-style-type: none"> <li>例)測定値が基準値を上回った場合</li> <li>→2.a 保管容器あたりの内容器収納数変更</li> <li>→2.b 除去物の詰め直し</li> </ul> </li> </ul> </li></ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>保管容器取り扱セルの汚染防止                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・取り出しセルと保管容器取り扱セル間のダブルドアシステム相当品により、保管容器取り扱セルの汚染を抑制</li> </ul> </li> <li>保管容器の仕様                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・遮へい機能を有する(内容器に応じて複数の道敷厚、0.60, 140, 180 mm)</li> <li>・フィルタベント機能を有する</li> <li>・遠隔操作により移送容器へ収納可能</li> <li>・遠隔操作により蓋締め可能</li> <li>・保管時の腐食を考慮する</li> <li>・保管庫内での無人フォーークリフトによる運搬を考慮し、容器収納後の重量が単行の無人フォーークリフトの制限重量を超過しないように寸法を設定する(暫定外径: 1.4 m×1.4 m×1.0 m)</li> <li>・一部大型除去物を保管容器サイズまで切断し、保管容器に直接収納する可能性がある。</li> <li>・保管容器取り扱セル内の廃棄物容器の移動は、クレーン、台車、またはベルトコンベアを用いる</li> <li>・必要に応じて保管容器の各種測定を行う                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>例) 表面線量測定、表面汚染</li> </ul> </li> <li>サブプロセス                             <ul style="list-style-type: none"> <li>例) 蓋締め不具合が生じた場合→(3.a)蓋締め直し</li> <li>例) 表面汚染が保管庫の受け入れ線量を超過した場合→(3.b)除染</li> </ul> </li> </ul> </li></ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>移送容器の仕様                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・遮へい機能を有する</li> <li>・閉じ込め機能を有する</li> <li>・遠隔操作により保管容器を収納可能</li> <li>・移送時に転倒しても内容器を放出しない構造強度を有する</li> <li>・水素濃度を爆発下限以下に維持する空間管理を有する</li> <li>・繰り返し使用する適い箱方式とする</li> </ul> </li> <li>搬出入セル内の廃棄物容器の移動は、クレーン、台車、またはベルトコンベアを用いる</li> <li>一部大型除去物に関しては、専用容器に直接収納される可能性がある。</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>払い出し確認                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・搬出前に、保管容器の払出確認(表面汚染確認、表面線量率確認、密閉確認、外観確認(ID確認含む)等)が必要</li> </ul> </li> <li>表面線量計測装置(詳細検討中)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・表面線量計測を行い、構内移送方法を決定</li> <li>・1F構内の廃棄物の移送(現状)                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>・表面線量 &gt; 30 mSv/h: 遠隔(無人)移送</li> <li>・表面線量 &lt; 30 mSv/h: 有人トラック移送</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>サブプロセス                             <ul style="list-style-type: none"> <li>例) 蓋締め不具合が生じた場合→(5.a)蓋締め直し</li> <li>例) 表面汚染が移送の基準線量を超過した場合→(5.b)除染</li> </ul> </li> </ul>																															
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">装置・設備</th> </tr> <tr> <th>安全機能</th> <th>内容器 / 取出しセル / 保守セル</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>閉じ込め</td> <td>・閉じ込め機能を確保する。 ・HEPAフィルタ等で排気を管理</td> </tr> </tbody> </table>		装置・設備		安全機能	内容器 / 取出しセル / 保守セル	閉じ込め	・閉じ込め機能を確保する。 ・HEPAフィルタ等で排気を管理	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">装置・設備</th> </tr> <tr> <th>安全機能</th> <th>内容器 / 保守セル</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>閉じ込め</td> <td>・閉じ込め機能を確保する ・HEPAフィルタ等で排気を管理</td> </tr> </tbody> </table>		装置・設備		安全機能	内容器 / 保守セル	閉じ込め	・閉じ込め機能を確保する ・HEPAフィルタ等で排気を管理	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">装置・設備</th> </tr> <tr> <th>安全機能</th> <th>保管容器 / 保守セル / 搬出入セル</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>閉じ込め</td> <td>・フィルタベントによる微粒子の閉じ込め ・閉じ込め機能を確保する ・HEPAフィルタ等で排気を管理</td> </tr> </tbody> </table>		装置・設備		安全機能	保管容器 / 保守セル / 搬出入セル	閉じ込め	・フィルタベントによる微粒子の閉じ込め ・閉じ込め機能を確保する ・HEPAフィルタ等で排気を管理	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">装置・設備</th> </tr> <tr> <th>安全機能</th> <th>保管容器 / 搬出入セル / 移送容器</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>閉じ込め</td> <td>・フィルタベントによる微粒子の閉じ込め ・閉じ込め機能を確保する ・HEPAフィルタ等で排気を管理 ・密閉機能を有する</td> </tr> </tbody> </table>		装置・設備		安全機能	保管容器 / 搬出入セル / 移送容器	閉じ込め	・フィルタベントによる微粒子の閉じ込め ・閉じ込め機能を確保する ・HEPAフィルタ等で排気を管理 ・密閉機能を有する	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">装置・設備</th> </tr> <tr> <th>安全機能</th> <th>保管容器 / 搬出入セル / 移送容器</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>閉じ込め</td> <td>・フィルタベントによる微粒子の閉じ込め ・閉じ込め機能を確保する ・HEPAフィルタ等で排気を管理</td> </tr> </tbody> </table>		装置・設備		安全機能	保管容器 / 搬出入セル / 移送容器	閉じ込め	・フィルタベントによる微粒子の閉じ込め ・閉じ込め機能を確保する ・HEPAフィルタ等で排気を管理
装置・設備																																								
安全機能	内容器 / 取出しセル / 保守セル																																							
閉じ込め	・閉じ込め機能を確保する。 ・HEPAフィルタ等で排気を管理																																							
装置・設備																																								
安全機能	内容器 / 保守セル																																							
閉じ込め	・閉じ込め機能を確保する ・HEPAフィルタ等で排気を管理																																							
装置・設備																																								
安全機能	保管容器 / 保守セル / 搬出入セル																																							
閉じ込め	・フィルタベントによる微粒子の閉じ込め ・閉じ込め機能を確保する ・HEPAフィルタ等で排気を管理																																							
装置・設備																																								
安全機能	保管容器 / 搬出入セル / 移送容器																																							
閉じ込め	・フィルタベントによる微粒子の閉じ込め ・閉じ込め機能を確保する ・HEPAフィルタ等で排気を管理 ・密閉機能を有する																																							
装置・設備																																								
安全機能	保管容器 / 搬出入セル / 移送容器																																							
閉じ込め	・フィルタベントによる微粒子の閉じ込め ・閉じ込め機能を確保する ・HEPAフィルタ等で排気を管理																																							
重大事象	<table border="1"> <thead> <tr> <th>外部被ばく</th> <th>遮へい</th> <th>・遮へい厚により遮へい機能を有する</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>遮へい</td> <td>-</td> <td>遮へい</td> </tr> </tbody> </table>		外部被ばく	遮へい	・遮へい厚により遮へい機能を有する	遮へい	-	遮へい	<table border="1"> <thead> <tr> <th>外部被ばく</th> <th>遮へい</th> <th>・遮へい厚により遮へい機能を有する</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>遮へい</td> <td>-</td> <td>遮へい</td> </tr> </tbody> </table>		外部被ばく	遮へい	・遮へい厚により遮へい機能を有する	遮へい	-	遮へい	<table border="1"> <thead> <tr> <th>外部被ばく</th> <th>遮へい</th> <th>・内容器に応じて複数の道敷厚</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>遮へい</td> <td>-</td> <td>遮へい</td> </tr> </tbody> </table>		外部被ばく	遮へい	・内容器に応じて複数の道敷厚	遮へい	-	遮へい	<table border="1"> <thead> <tr> <th>外部被ばく</th> <th>遮へい</th> <th>・遮へい厚により遮へい機能を確保する</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>遮へい</td> <td>-</td> <td>遮へい</td> </tr> </tbody> </table>		外部被ばく	遮へい	・遮へい厚により遮へい機能を確保する	遮へい	-	遮へい								
外部被ばく	遮へい	・遮へい厚により遮へい機能を有する																																						
遮へい	-	遮へい																																						
外部被ばく	遮へい	・遮へい厚により遮へい機能を有する																																						
遮へい	-	遮へい																																						
外部被ばく	遮へい	・内容器に応じて複数の道敷厚																																						
遮へい	-	遮へい																																						
外部被ばく	遮へい	・遮へい厚により遮へい機能を確保する																																						
遮へい	-	遮へい																																						
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>水素対策</th> <th>・上部は常に解放</th> <th>・換気する</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>水素対策</td> <td>-</td> <td>換気する</td> </tr> </tbody> </table>		水素対策	・上部は常に解放	・換気する	水素対策	-	換気する	<table border="1"> <thead> <tr> <th>水素対策</th> <th>・上部は常に解放</th> <th>・換気する</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>水素対策</td> <td>-</td> <td>換気する</td> </tr> </tbody> </table>		水素対策	・上部は常に解放	・換気する	水素対策	-	換気する	<table border="1"> <thead> <tr> <th>水素対策</th> <th>・フィルタベント機能を有する</th> <th>・換気する</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>水素対策</td> <td>-</td> <td>換気する</td> </tr> </tbody> </table>		水素対策	・フィルタベント機能を有する	・換気する	水素対策	-	換気する	<table border="1"> <thead> <tr> <th>水素対策</th> <th>・フィルタベント機能を有する</th> <th>・換気する</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>水素対策</td> <td>-</td> <td>換気する</td> </tr> </tbody> </table>		水素対策	・フィルタベント機能を有する	・換気する	水素対策	-	換気する								
水素対策	・上部は常に解放	・換気する																																						
水素対策	-	換気する																																						
水素対策	・上部は常に解放	・換気する																																						
水素対策	-	換気する																																						
水素対策	・フィルタベント機能を有する	・換気する																																						
水素対策	-	換気する																																						
水素対策	・フィルタベント機能を有する	・換気する																																						
水素対策	-	換気する																																						
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>操作性</th> <th>・容易に、かつ、安全に取り扱える操作性を有する</th> <th>-</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>操作性</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table>		操作性	・容易に、かつ、安全に取り扱える操作性を有する	-	操作性	-	-	<table border="1"> <thead> <tr> <th>操作性</th> <th>・容易に、かつ、安全に取り扱える操作性を有する</th> <th>-</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>操作性</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table>		操作性	・容易に、かつ、安全に取り扱える操作性を有する	-	操作性	-	-	<table border="1"> <thead> <tr> <th>操作性</th> <th>・容易に、かつ、安全に取り扱える操作性を有する</th> <th>-</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>操作性</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table>		操作性	・容易に、かつ、安全に取り扱える操作性を有する	-	操作性	-	-	<table border="1"> <thead> <tr> <th>操作性</th> <th>・容易に、かつ、安全に取り扱える操作性を有する</th> <th>-</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>操作性</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table>		操作性	・容易に、かつ、安全に取り扱える操作性を有する	-	操作性	-	-								
操作性	・容易に、かつ、安全に取り扱える操作性を有する	-																																						
操作性	-	-																																						
操作性	・容易に、かつ、安全に取り扱える操作性を有する	-																																						
操作性	-	-																																						
操作性	・容易に、かつ、安全に取り扱える操作性を有する	-																																						
操作性	-	-																																						
操作性	・容易に、かつ、安全に取り扱える操作性を有する	-																																						
操作性	-	-																																						
課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>・合理的な内容器形状の検討</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・各種測定内容の検討</li> <li>・サンプリング方法の検討</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・遠隔操作による容器収納</li> <li>・遠隔操作による蓋締め</li> <li>・ダブルドアシステムによる保管容器取り扱セルの汚染防止</li> <li>・フィルタベントの開発</li> <li>・各種測定の検討</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・遠隔操作による容器収納</li> <li>・遠隔操作による蓋締め</li> <li>・ダブルドアシステムによる搬出入セルの汚染防止</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・払い出し検査項目の検討</li> <li>・移送前搬出時の被ばく低減</li> <li>・密閉性の確保</li> </ul>																															

(a) 保管・管理方法の検討・評価

① 廃棄物情報の調査・評価及び高線量廃棄物の保管方法の検討  
シナリオの検討(3/3)

更新した収納・移送・保管フロー(2/2)

作業	6. 構内移送			7. 移送容器の受け入れ検査・保管建屋に搬入			8. 移送容器の蓋取り外し、保管容器の搬入			9. 乾燥処理			10. 一時保管						
	作業フロー	表面低線量/汚染部位	有人移送車両	表面低線量/汚染部位	搬入エリア	後廃物一時保管建屋	表面低線量/汚染部位	搬入エリア	乾燥エリア	表面中線量/汚染部位	乾燥エリア	表面中線量/汚染部位	搬入エリア	一時保管エリア	後廃物一時保管建屋				
作業フロー																			
仕様	<ul style="list-style-type: none"> <li>・構内移送                     <ul style="list-style-type: none"> <li>・移送容器は転倒防止機能、及び転倒時に廃棄物容器の内容物が漏洩しない構造強度を有する</li> </ul> </li> <li>・移送車両                     <ul style="list-style-type: none"> <li>・保管容器の転倒を防止する機能を有する</li> <li>・遠蔽機能を有する</li> </ul> </li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>・受け入れ検査                     <ul style="list-style-type: none"> <li>・移送容器が、保管建屋の受け入れ基準に合致しているか測定を行う</li> </ul> </li> <li>・保管庫の受け入れ総量制限は、暫定的に固体貯蔵庫第9棟地下2階相当と設定                     <ul style="list-style-type: none"> <li>・固体貯蔵庫第9棟受け入れ総量制限</li> <li>・表面線量 &lt; 30 mSv/h; 地下1階</li> <li>・表面線量 &lt; 10 Sv/h; 地下2階</li> </ul> </li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>・搬入エリアの汚染防止                     <ul style="list-style-type: none"> <li>・搬入エリアと乾燥エリア間のダブルドアシステムにより、搬入エリアの汚染を抑制</li> </ul> </li> <li>・保管容器搬入                     <ul style="list-style-type: none"> <li>・遠隔操作による移送容器の蓋取り外し</li> <li>・遠隔操作による保管容器の搬入</li> </ul> </li> <li>・乾燥エリア内の保管容器の移動は、クレーン、台車、ベルトコンベア、または無人フォークリフトを用いる</li> <li>・必要に応じて保管容器の各種測定を行う</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>・乾燥処理                     <ul style="list-style-type: none"> <li>・保管時の腐食低減の為水分を除去</li> </ul> </li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>・水素対策                     <ul style="list-style-type: none"> <li>・一時保管建屋の換気もしくは水素処理施設によって水素濃度の増加を防ぐ</li> </ul> </li> <li>・モニタリング                     <ul style="list-style-type: none"> <li>・水素濃度、放射線等のモニタリングを行う</li> </ul> </li> <li>・搬入物の概算必要保管床面積(上取り出しルートB工法1号機あたり)                     <ul style="list-style-type: none"> <li>①内容積500 mm × 300 mmの場合⇒2100 m<sup>2</sup></li> <li>②内容積335 mm × 272 mmの場合⇒1200 m<sup>2</sup></li> <li>③内容積450 mm × 272 mmの場合⇒1300 m<sup>2</sup></li> <li>④内容積535 mm × 272 mmの場合⇒1400 m<sup>2</sup></li> </ul> </li> </ul>						
重大事象	安全機能	装置・設備			装置・設備			装置・設備			装置・設備			装置・設備					
	汚染拡大/内部被ばく	構造強度	-	-	-	構造強度	-	-	-	閉じ込め	-	-	閉じ込め	-	-	構造強度	-	-	
		閉じ込め	・フィルタベントによる微粒子の閉じ込め	・密閉機能を有する	-	閉じ込め	・フィルタベントによる微粒子の閉じ込め	・密閉機能を有する	-	閉じ込め	・フィルタベントによる微粒子の閉じ込め	・密閉機能を有する	閉じ込め	・フィルタベントによる微粒子の閉じ込め	・密閉機能を有する	閉じ込め	・フィルタベントによる微粒子の閉じ込め	・密閉機能を有する	
		外部被ばく	・内容物に応じて複数の遮蔽層	・遮蔽層により遮蔽機能を確保する	・遮蔽機能を有する(線量の高いものは無人輸送を行う)	・内容物に応じて複数の遮蔽層	・遮蔽層により遮蔽機能を確保する	・遮蔽機能を有する(線量の高いものは無人輸送を行う)	・内容物に応じて複数の遮蔽層	・遮蔽層により遮蔽機能を確保する	・遮蔽機能を有する	・内容物に応じて複数の遮蔽層	・遮蔽層により遮蔽機能を確保する	・遮蔽機能を有する	・内容物に応じて複数の遮蔽層	・遮蔽層により遮蔽機能を確保する	・遮蔽機能を有する	・遮蔽層により遮蔽機能を確保する	・遮蔽機能を有する
		火災	水素対策	・フィルタベント機能を有する	・水素濃度が爆発下限未満になるように時間管理を行う。	水素対策	・フィルタベント機能を有する	・水素濃度が爆発下限未満になるように時間管理を行う。	-	水素対策	・フィルタベント機能を有する	・換気もしくは水素処理施設を設置する	水素対策	・フィルタベント機能を有する	・換気もしくは水素処理施設を設置する	水素対策	・フィルタベント機能を有する	・換気もしくは水素処理施設を設置する	
作業事故	操作性	・容易に、かつ、安全に取り扱える操作性を有する	・容易に、かつ、安全に取り扱える操作性を有する	・転倒防止機能を有する	操作性	・容易に、かつ、安全に取り扱える操作性を有する	・容易に、かつ、安全に取り扱える操作性を有する	-	操作性	・容易に、かつ、安全に取り扱える操作性を有する	-	操作性	・容易に、かつ、安全に取り扱える操作性を有する	-	操作性	・容易に、かつ、安全に取り扱える操作性を有する	-		
課題	・無人移送におけるスループットの向上			・受け入れ検査項目の検討 ・計量管理の方法			・遠隔操作による蓋開け ・遠隔操作による保管容器取り出し ・ダブルドアシステムによる搬入エリアの汚染防止 ・各種測定値の検討			・乾燥処理の検討			・長期保管対策の検討 ・モニタリングの検討						

(a) 保管・管理方法の検討・評価  
② 容器及び保管設備の要求事項の検討  
概要

■ 実績

- 海外の高線量廃棄物の水素ガス対策の調査を行い、各国の水素発生対策方法、および考え方の整理を行った。

■ 目標

- 高線量廃棄物の収納・移送・保管に必要な容器及び保管設備の要求事項を示す。

■ 実施内容

- (2019年度) 線量レベルに応じた複数の遮蔽厚さを有する保管容器に収納可能な合理的な内容器\*を検討する。燃料デブリ取り出し工事に伴い発生する廃棄物のガス発生対策に適した、フィルタベント付き保管容器および移送容器の考え方を整理する。燃料デブリ取り出し工事に伴い発生する廃棄物の収納時の腐食対策および処分時に密封することを想定したガス発生対策に適した、乾燥処理等の設備の考え方を整理する。保管建屋での保管に必要な測定項目について、優先度と現地への適用性を考慮して、測定方法および測定設備の考え方を整理する。

- (2020年度) 燃料デブリ取り出し工事に伴い発生する廃棄物のガス発生対策に適した、フィルタベント付き保管容器および移送容器の要求事項を検討する。燃料デブリ取り出し工事に伴い発生する廃棄物の収納時の腐食対策および処分時に密封することを想定したガス発生対策に適した、乾燥処理等の設備の要求事項を検討する。保管建屋での保管に必要な測定項目について、優先度と現地への適用性を考慮して、測定方法および測定方法、測定設備の要求事項、測定場所、測定時期等を検討する。

■ 目標達成を判断するための指標

- (2019年度) 複数の遮蔽厚さに対応可能な合理的な内容器の提示。フィルタベント付き保管容器および移送容器の考え方の提示。乾燥処理等の設備の考え方の提示。測定方法および測定設備の考え方の提示。
- (2020年度) フィルタベント付き保管容器および移送容器の要求事項の提示。乾燥処理等の設備の要求事項の提示。測定方法および測定設備の要求事項、測定場所、測定時期等の提示。

\*内容器.....炉内で廃棄物を回収する容器。取り出しロボットによって取り扱われる。また、保管容器の中に収納される。



図1 高線量廃棄物の移送容器の例  
(米国B型輸送容器：TRUPACT-II)



図2 遠隔操作式フィルタベント取り付け装置  
(DVS: Drum Venting System) 外観

(Carlsbadの廃棄物隔離パイロットプラント(WIPP)にて使用)



(a) 保管・管理方法の検討・評価  
 ② 容器及び保管設備の要求事項の検討  
 合理的な内容物の形状・運用の検討(1/3)

<背景と目的>

● 背景

内容物・・・PCV内にて切断した廃棄物を収納する一次容器

- 機能の例・・・
- ① 切断した廃棄物を収納する
  - ② メッシュ構造であり、水切りが可能である
  - ③ 保管容器に効率的に収納できる

これまでの検討・・・2018年度までに検討したフローでは、  
内容物1基を保管容器1基に収納することを暫定的に想定(図1)

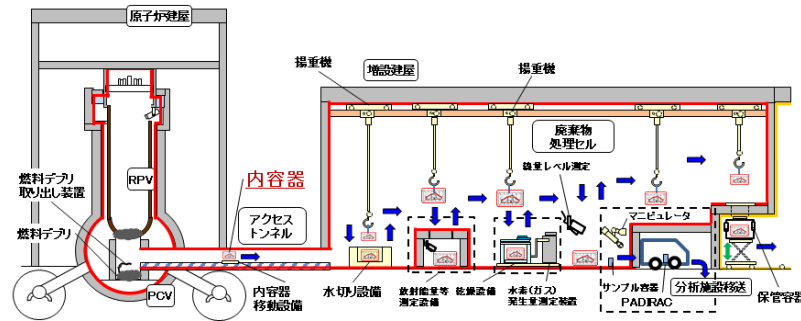


図1 収納・移送・保管フロー  
 (内容物に係る箇所のみ抜粋)

● 課題点

- ① 保管容器は廃棄物線量に応じて内貼り遮へいを使い分けるため、複数のサイズの内容物を使い分けることになる
- ② その後、取り出しPJより、各取り出し工法の設備に適した内容物寸法が報告された(表1)。昨年度想定よりも小型であり、複数個の内容物を保管容器1基に収納することを想定

表1 デブリ取り出しPJにおける各工法の内容物寸法

工法	内容物寸法(mm)
横取り出しプランA	—
横取り出しプランB	φ 550 × 400 (φ 390 × 400)
横取り出しプランC	φ 400 × 810
上取り出しルートA	φ 400 × 400
上取り出しルートB	□ 500 × 300

\*「φ400」は直径400の円、「□500」は縦横500の正方形

● 目的

廃棄物保管・管理に適した内容物の形状や運用方法の一次案を提示する。

保管・管理の視点からの評価

● 検討手順・・・評価指標として、保管容器の発生基数を比較する。

- ① 最新の取り出し工法に基づいて、発生する保管容器の個数を推定する。
- ② 保管容器の発生基数を合理化できる内容物形状を検討する。
- ③ 保管容器の発生基数を合理化できる運用方法を検討する。
- ④ 上記検討に基づき、合理的な内容物の形状や運用方法を検討する。

(a) 保管・管理方法の検討・評価  
 ② 容器及び保管設備の要求事項の検討  
 合理的な内容物の形状・運用の検討 (2/3)

< 検討結果①; 内容物寸法の検討 >

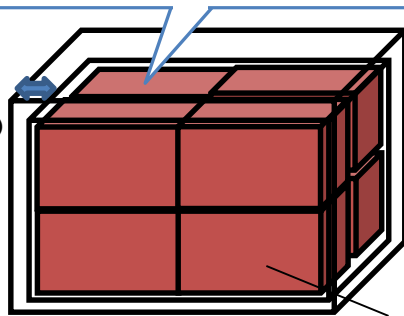
Case	検討ケース名	検討内容※	必要内容容器 (個/号機)	必要保管容器 (個/号機)
1	工法暫定案 (上取り出しルートBを例示)	上取り出しルートB、最新取り出し工法の内容容器を使用した場合 (□500 × 高さ300 mm)	10016	1425
2	内容物寸法の検討	内容物の縦、横、高さのサイズを変更した場合を検討 (必要保管容器数が極小となる3パターンを例示)	①27216	①807
		①□335 × 高さ272 mm	②14612	②867
		②□450 × 高さ272 mm ③□535 × 高さ272 mm	③10180	③956

※容器寸法は外寸法を示す。「□500」は縦横500の正方形を示す。

工法の想定では  
 収納効率が悪く、  
 保管容器数が多い

寸法変更により  
 最大43%削減

内容物サイズ  
 工法暫定案ケース: □500 × 高さ300 mm  
 内容物サイズ変更ケース: □○○ mm × 高さXX mm



容器厚さ(6.4 mm)  
 + 遮蔽厚さ\*1  
 + 間隙(25 mm)

高さ方向は間隙(25mm)を考慮した上で85%まで充填可能

内容物への廃棄物収納率  
 金属廃棄物; 10%  
 コンクリート廃棄物; 50%

\*1; 0,60,140,180 mmの4種

図1 工法暫定案ケース、内容物サイズ変更ケースの検討イメージ

表1 (参考) 保管容器数および内容物数の計算方法

STEP	計算内容	計算式	検討イメージ
①	保管容器内寸を計算	保管容器縦or横内寸(m) = 保管容器縦or横外寸 - 2 × (遮蔽厚 + 保管容器厚 + 間隙) 保管容器高さ内寸(m) = (保管容器高さ外寸 - 2 × (遮蔽厚 + 保管容器厚) - 間隙) × 85%	保管容器外寸から遮蔽厚、容器厚、間隙を差し引いて内寸を計算 (高さ方向は遮閉めを考慮し85%まで有効と仮定)
②	内容物内寸を計算	Case1: 保管容器内寸から内容物厚さを引いた値 Case2,4,5: 上取り出しルートB回収容器外寸から容器厚さを引いた値 Case3: 内容物寸法をパラメータとした評価結果より決定	Caseによって異なるが、基本的に内容物外寸から容器厚(2mmと仮定)を差し引いたものを内寸とする。
③	1保管容器あたりの内容物収納数を計算	縦方向: 保管容器縦内寸 + 内容物縦外寸 = X個 (端数切捨て) 横方向: 保管容器横内寸 + 内容物横外寸 = Y個 (同上) 高さ方向: 保管容器高さ内寸 + 内容物高さ外寸 = Z個 (同上) 1保管容器あたりの内容物収納数 = XYZ個	保管容器の内寸を内容物の外寸で除して縦横高さ方向に何個内容物が収納できるか計算
④	内容物1個あたりの廃棄物収納量 (m³/個) を計算	内容物1個あたりの廃棄物収納量 W (m³/個) = 内容物縦内寸(m) × 横内寸(m) × 高さ内寸(m) × 廃棄物充填率 (金属: 10%, コンクリート: 50%)	金属充填率: 10% 内容物の内容積に材質別の充填率を乗じ、内容物1個当たりの廃棄物収納量を計算
⑤	保管容器1個あたりの廃棄物収納量 (m³/個) を計算	保管容器1個あたりの廃棄物収納量 (m³/個) = 内容物収納可能量 W (m³/個) × XYZ個	保管容器に収納できる内容物数とその1個当たりの廃棄物収納量から保管容器1個当たりの廃棄物収納量を計算
⑥	廃棄物量 (m³)	上取り出しルートBの設定値を使用	—
⑦	保管容器個数を計算	⑥ ÷ ⑤	—
⑧	内容物個数を計算	⑦ × ③	—

(a) 保管・管理方法の検討・評価  
 ② 容器及び保管設備の要求事項の検討  
 合理的な内容容器の形状・運用の検討 (3/3)

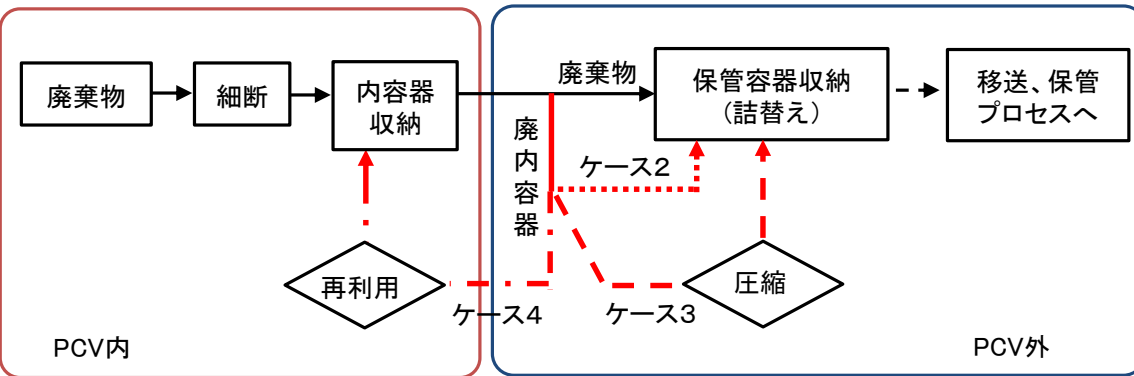
< 検討結果②; 運用方法の検討 >

Case	検討ケース名	検討内容	必要内容容器 (個/号機)	必要保管容器 (個/号機)
1	<比較用> 工法暫定案 (上取り出しルートBを例示)	・上取り出しルートB、最新取り出し工法の内容容器を使用した場合 (□500×高さ300 mm) ・詰替えなし	10016	1425
2	詰替えケース	・廃棄物を保管容器に詰替え ・内容器は全数廃棄 ・廃内容器は0mm遮蔽厚保管容器に収納して廃棄すると仮定	10016	1786
3	詰替え、圧縮ケース	・ケース2と同様の条件において、廃内容器を高さ方向30%まで圧縮できると仮定	10016	952
4	詰替え、内容器再利用ケース	・ケース2と同様の条件において、廃内容器をPCV内に戻し、10回再利用すると仮定	1002	660

詰替えのみでは保管容器数は増加

圧縮や再利用は工法と調整要

※「□500」は縦横500の正方形を示す。



廃内容器のプロセスの凡例  
 ..... ; ケース2    - - - ; ケース3    - · - · ; ケース4    ——— ; 共通

<まとめと考察>  
 ▶ 前提条件 (線量ごとの廃棄物量など) が継続的に見直されるため、最適寸法や発生保管容器個数の定量的な比較はあまり重要ではないと考える。  
 ▶ 重要な知見は以下の2点  
 ① **内容器寸法により保管容器数が大きく変動する可能性が高く、保管へのインパクトが大きい。**ただし、現時点で内容器寸法をFIXすることは現実的でなく、ある程度柔軟に変更できるような設計が望ましい。  
 ② 寸法の適正化が難しい場合は、**運用面での代替も可能な見込み。**ただし、詰替え設備や再利用ルート (PCVへの戻りルート) などの検討が必要となる、また、**廃棄物のトレーサビリティの確保が必要**となる。  
 ▶ 取り出しPJと意見交換を実施し、検討成果をインプット済み。

図1 詰替えケース (圧縮・内容器再利用) の検討イメージ

(a) 保管・管理方法の検討・評価  
 ② 容器及び保管設備の要求事項の検討  
 ガス発生対策の検討(1/3)

< 検討結果③; フィルタの必要個数と移送容器の空隙体積 >

保管容器を保管する際に保管容器内の水素濃度を4vol%未満に保つために設置が必要なフィルタの個数と、その際に移送容器(密閉)内の水素濃度を7日間で4vol%未満に保つために必要な空隙体積を評価した。

評価条件

- ベントフィルタの種類は米国で実績があるものから水素拡散性能を満足するものを仮で選択した。
- ベントフィルタの水素拡散性能は温度依存することが知られており、温度が低いほど性能が低下するため、ここでは1F固体廃棄物貯蔵庫の設計最低温度である2°Cで補正した。
- 廃棄物の構内移送期間は、最大7日間とした(収納缶PJの想定条件に合わせた)。

表1 ベントフィルタの必要個数と移送容器の必要な空隙体積の評価結果

想定ケース	上取り出し金属 廃棄物ケース	上取り出しコンクリ ート廃棄物ケース	横取り出し金属 廃棄物ケース	横取り出しコンクリ ート廃棄物ケース
材質	金属	コンクリート	金属	コンクリート
水素発生速度(m <sup>3</sup> /d) (再掲)	1.8E-02	1.1E-04	7.1E-05	1.1E-04
①最小水素放出速 度@4vol% (mol/s/mol fraction)	2.3E-04	1.5E-06	9.2E-07	1.5E-06
ベントフィルタの種類	NF016S	NF016L	NF016L	NF016L
②ベントフィルタの 水素拡散性能 (mol/s/mol fraction @ 2°C)	1.43E-04	3.22E-06	3.22E-06	3.22E-06
必要最低個数	2	1	1	1
移送容器の 空隙体積	3.25m <sup>3</sup> 以上	20L以上	10L以上	20L以上

以下の式で保管容器内の水素濃度を4vol%未満に維持するために必要な水素放出速度を算出(米国の考え方に基づく) (①)

$$T_d = \frac{Q \times G}{N_A \times N \times X_{H2}}$$

$T_d$ : 水素放出速度(mol/s/mol fraction)

$Q$ : 崩壊熱(Joule/s)

$G$ : G値(molecules/100 eV)

$N_A$ : アボガドロ定数(molecules/mol)

$N$ : 換算定数(Joule/ev)

$X_{H2}$ : 容器内の水素濃度(4vol%)

以下の式でベントフィルタの水素拡散性能(カタログ値\*)を温度補正した(米国の考え方に基づく) (②)

$$T_{D,T} = T_{D,T_0} * \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1.75}$$

$T_{D,T}$ : 温度Tにおける水素拡散性能

$T_0$ : 既知の水素拡散性能における温度

\* 21°C(294K)の試験結果

②>①となる個数

移送容器内の水素濃度を7日間、4vol%未満とするために必要な空隙体積

## < 考慮が必要なフィルタの事象と対策案(1/2) >

プロセスフローを参照して考慮が必要なフィルタの事象とその対策案を検討した。

作業ステップ	移送時(構内移送時含む)	一時(長期)保管時
<p>作業イメージ図</p>		
<p>考慮が必要な フィルタの 事象</p>	<p>(1) <u>フィルタの目詰まり</u>              内容物が移送時に舞い上がり、フィルタを目詰まりさせ、水素の放出ができなくなる。</p> <p>(2) <u>内容物の飛散による汚染</u>              フィルタから放出される微粒子またはガス成分により、建屋内や移送容器内部が汚染する。</p>	<p>(3) <u>フィルタの腐食、劣化</u>              長期保管によりフィルタが腐食または劣化し、水素拡散性能を満たさなくなる(目開きが狭まる側)。または内容物が飛散しやすくなる(目開きが広がる側)。</p> <p>(4) <u>フィルタの結露による性能低下</u>              容器内外の湿分がフィルタ部で結露し、フィルタを塞ぎ、水素拡散性能を満たさなくなる。</p>



## <考慮が必要なフィルタの事象と対策(2/2)>

作業ステップ	移送時	一時(長期)保管時
対策案*	<p><u>(1)フィルタの目詰まり</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>フィルタを複数個取り付け(多重化)、仮に1つ目詰まりが発生した場合でも、残りで水素が放出できるようにする。</li> <li>フィルタの取付構造をラビリンスにするなどして内容物が直接フィルタに到達しないようにする。</li> <li>フィルタの目詰まりは移送時に内容物が舞うことにより発生することが想定されるため、移送時専用のフィルタ付きの蓋を用いる(保管時に保管専用のフィルタ付きの蓋に交換する)。</li> <li>想定される水素濃度(4vol%)で仮に爆発した場合の、保管容器の影響評価を行う。</li> </ul> <p><u>(2)内容物の飛散による汚染</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>微粒子については、HEPA並みの粒子捕集効率(0.3 μmの粒子に対して99.97%の粒子捕集率)を要求する。</li> <li>ガス成分については、換気システムで処理する。</li> <li>フィルタからの飛散を想定したエリア区分(レッド、イエロー、グリーン)の設定、汚染管理を実施する。</li> <li>構内移送前や保管前に、保管容器の表面汚染検査(必要に応じて除染)を実施する。</li> </ul>	<p><u>(3)フィルタの腐食、劣化</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>フィルタ(多孔質焼結フィルタ)のメディアに大気環境下での耐腐食性材料のSUS316Lや炭素複合材を選定する。</li> <li>同一条件(あるいは過酷な条件)で同じ材質のテストピースにより、耐腐食性を確認する。</li> </ul> <p><u>(4)フィルタの結露による性能低下</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>保管施設の換気システムで温度・湿度を管理し、結露を防止する。</li> <li>保管施設の換気システムが停止し、結露が発生した場合には、保管容器内の水素濃度が4vol%を超える前に換気システムを復旧し、結露を解消する必要がある。この復旧に要する想定時間内に保管容器内の水素濃度が4vol%を超えないことを確認する。仮に超える(時間的裕度を確保できない)場合は、換気システムの多重化や非常用電源の準備により、換気システムの機能を常に維持する。</li> </ul>

\* ベントフィルタの適用可否や対策の程度は規制側との交渉による

(a) 保管・管理方法の検討・評価  
 ② 容器及び保管設備の要求事項の検討  
 乾燥処理の検討(1/3)

【2019年度の実施内容】

(1) 既往の乾燥処理技術を調査(条件整理を含む)

(2) 乾燥処理設備の要求事項を検討

(1) 既往の乾燥処理技術の調査結果

- 乾燥処理に関する前提条件を検討した。(表1)
- 乾燥の基本原理に基づき、伝熱形態(4方式)や廃棄物搬送(2方式)の組み合わせにより、8方式を抽出した。(表2)
- 上記の方式について、比較\*1を行い、**静置(対流、伝導)方式が既往技術の適用可能性があり、複数の伝熱形態(対流、伝導、放射)を併用できることを確認した。**

\*1: バルク状の金属やコンクリート廃棄物に対する適用可能性(形状、水分、放射線に関する考慮)、他検討との取り合い(容器、保管建屋)、容器腐食対策に必要な検討項目、乾燥処理中の影響(ダスト、水素)について対応可能を示す有意な調査結果を得た。

表1 乾燥処理に関する前提条件

大項目	小項目	条件
対象とする廃棄物の性状	原廃棄物の状況	・デブリ取出しに伴い発生する撤去物(炉内冷却水で濡れた状態、 <b>水切りを想定、バルク形状</b> )
	一時保管に向けた処理	・デブリ取出し作業時に発生した原廃棄物は、PCV内で容器サイズ以下まで切断され、自重による水切りをし、一次保管前の乾燥以外の処理は行わない
取出しフローへの適用		・水素対策は、 <b>完全乾燥(密閉容器)又はベント式(非密閉容器)</b> のシナリオ候補がある ・保管建屋での乾燥処理は主に <b>容器の閉じ込め(腐食対策)</b> に資する(保管中の容器腐食対策の成立可能性目途が得られるまでは、容器内廃棄物を詰替可能とする)

表2 乾燥処理に関する既往技術の調査結果  
(抽出した8方式の比較検討結果)

調査項目		調査結果		
比較項目	バルク状の金属やコンクリートの廃棄物に対する適用可能性	形状	内容器 静置 : 乾燥機器内に静置又は定置可 伝導-移送 : 乾燥機器に定置不可 対流-静置/移送、伝導/放射-静置 : 追加加工が不要であり、バルク状に適用可 伝導-移送 : 内容器からの取出しに加え、追加加工が必要 放射-移送、マイクロ波-静置/移送 : 必要により、内容器からの取出し、追加加工が必要 水の浸透がない/浅いバルク状に適用可	
		水分	低減指標	含水無 : 平衡含水率まで可 含水有 : 方式毎に、限界含水率や表面からの照射可能深さ有
			持込量	静置、対流/放射/マイクロ波-移送 : 制約無 伝導-移送 : 制約有
	放射線に対する考慮	静置 : 取扱量に応じた遮へい要、機器内駆動部や内装品が少なく、 <b>保守部位が少ない</b> 移送 : 取扱量に応じた遮へい要、機器内駆動部や内装品が多く、 <b>保守部位が多い</b>		
	他検討との取り合い	容器	静置 : 内容器寸法及び構造、内容器の搬送方法 対流/放射/マイクロ波-移送 : 上記+乾燥機器内の移送方法 伝導-移送 : 内容器からの廃棄物取出し方法、乾燥後の内容器への収納方法	
		保管建屋	方式共通 : 給気/排気の系統、動力(電力)の系統	
容器腐食対策に必要な検討項目		方式共通 : 対象廃棄物(金属、コンクリート)の自由水の付着状態、乾燥処理後の残水量に基づく腐食代		
乾燥処理中の影響	ダスト(固体)	方式共通 : 乾燥機器内の気流発生も含め、給気/排気系統の閉じ込め(フィルタ)が必要		
	水素	対流-静置/移送、伝導/放射-静置 : 排気(真空室)により系外へ掃気 伝導-移送 : 乾燥機器の構造の複雑さ(掃気にくさ)や伝熱部の温度管理(水素発火防止)可能か確認要 放射-移送、マイクロ波-静置/移送 : 排気により系外に掃気するが、廃棄物の温度管理(水素発火防止)可能か確認要		

青表記: 条件に対応可能な内容、赤表記: 条件に対応難又は不可能な内容

(a) 保管・管理方法の検討・評価  
 ② 容器及び保管設備の要求事項の検討  
 乾燥処理の検討(2/3)

(2) 乾燥処理設備の要求事項の検討結果(1/2)

- 国内における放射性廃棄物を廃棄体を埋設処分するための要件として、日本原子力学会標準「余裕深度処分対象廃棄体の製作要件及び検査方法:2015」\*1を参照し、本検討廃棄物の乾燥処理との考え方を比較・整理\*2した。
- 上記検討の結果、乾燥処理に関する要件、容器単位の乾燥処理手順の対応性、運転管理指標の考え方に適用可能性が見込める既往技術として、**対流(静置)**、**伝導(静置)**の方式を確認した。

\*2: 以下の7点について、対応可能性があることを確認した。

- 考慮すべき対象廃棄物の条件
  - 自由水の除去方法
  - 自由水の乾燥方法
  - 適切な除去方法または乾燥方法の評価
  - 多量の自由水を含んでいないことを管理すべき要件
  - 容器単位の乾燥処理手順の対応
  - 運転管理指標や処理条件
- (日本原子力学会標準に記載の自由水とは、放射性廃棄物を容器に収納する場合に、放射性廃棄物とともに容器にもちこまれる水をいう)

表1 日本原子力学会標準とデブリ取出し時の発生廃棄物の乾燥処理の考え方の比較(抜粋)

項目	日本原子力学会標準「余裕深度処分対象廃棄体の製作要件及び検査方法:2015」*1における乾燥処理に関連する考え方	デブリ取出し時の発生廃棄物の乾燥処理の考え方
1 適用範囲	事業者が余裕深度処分対象として、 <b>廃棄体の製作における要求事項や技術基準への適合性検査</b> の方法 (埋施設や輸送からの技術要件を含まない)	<b>取出し時の発生～一時保管するまでの処理</b>  (廃棄体化に向けた処理は該当しない)
4.1 要求事項(附属書D(参考))	余裕深度処分報告書*3、埋設事業告示*4(表D.1)から、 <b>自由水除去は「廃棄体の十分な強度」と「汚染拡大の防止措置(容器の密閉性)」</b> に資すると解釈	一時保管に密閉容器を用いる場合の <b>水素ガス発生や腐食発生防止(容器の密閉性)</b> のために一時保管前に自由水を除去 (廃棄物の強度や処分に向けた完全乾燥は含まない)
4.2.1 容器に封入する場合の自由水除去	<b>廃棄体内に自由水が残留する場合、容器密閉前に自由水除去をする(「真空乾燥」及び「真空乾燥以外」に区分して規定)</b>	

- \*1: 日本原子力学会標準「余裕深度処分対象廃棄体の製作要件及び検査方法:2015」(原子力発電所、再処理施設から発生する放射性廃棄物を廃棄体として、埋設処分するための事業者向の標準)
- \*3: 低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に係る安全規制について(平成20年1月総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会 廃棄物安全小委員会)
- \*4: 核燃料物質又は核燃機物質によって汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則(埋設事業規則)

表2 既往技術と乾燥処理要件の比較\*5

方式	対流		伝導		放射		マイクロ波	
	静置	移送	静置	移送	静置	移送	静置	移送
対象廃棄物の条件	PCV内に存在する対象廃棄物の条件のうち、種類、形状、貯蔵場所(現状は取出し前のためPCV内にある)に関する情報については、計画を作成することが可能である。しかし、自由水の状態は不確かである。							
自由水の除去方法	●方式に従い、自由水が除去可能 ●除去時間は、水分持込量に依存	●同左 ●制約有	●追加加工要等	●同左 ●制約有	●方式に従い、自由水が除去可能 ●除去時間は、水分持込量に依存	●同左 ●制約有	●追加加工要等	●同左 ●制約有
自由水の乾燥方法	●既往技術で適用可 ●条件及び保持時間設定可	●機器内の保守部位多 ●同左	●既往技術で適用可 ●同左	●同左	●廃棄物温度の遠隔測定要等	●同左 ●制約有	●追加加工要等	●同左 ●制約有
適切な除去方法又は乾燥方法の評価	●既学会標準の考え方が適用可		●既往技術で適用可		●乾燥機内での移送モデルが複雑化	●同左 ●制約有	●追加加工要等	●同左 ●制約有
多量の自由水を含んでいないことの管理要件	●既学会標準の考え方が適用可		●既往技術で適用可		●乾燥機内での移送モデルが複雑化	●同左 ●制約有	●追加加工要等	●同左 ●制約有
容器単位の乾燥処理手順の対応性	●対応可	●同左 (汚染拡大防止設備が大型化)	●同左	●同左	●乾燥機内での移送モデルが複雑化	●同左 ●制約有	●追加加工要等	●同左 ●制約有
運転管理指標	●設定可		●設定可		●乾燥機内での移送モデルが複雑化	●同左 ●制約有	●追加加工要等	●同左 ●制約有
残水量	●設定可		●設定可		●乾燥機内での移送モデルが複雑化	●同左 ●制約有	●追加加工要等	●同左 ●制約有
運転時間	●設定可		●設定可		●乾燥機内での移送モデルが複雑化	●同左 ●制約有	●追加加工要等	●同左 ●制約有

\*5: 表中に示した色付き文字の区別を以下に示す。

青表記: 条件に対応可能な内容、赤表記: 条件に対応難又は不可能な内容



(a) 保管・管理方法の検討・評価  
 ② 容器及び保管設備の要求事項の検討  
 乾燥処理の検討(3/3)

(2) 乾燥処理設備の要求事項の検討結果(2/2)

➤ 既往技術の調査結果及び要件整理により、**乾燥処理設備の要求事項**を作成した。

表1 乾燥処理設備の要求事項

項目	乾燥処理設備の要求事項	備考
対象廃棄物に対する適用性	形状、形状 デブリ取出しに伴い発生する廃棄物(炉内冷却水で濡れた状態で、水切りされたバルク形状の金属及びコンクリート)が、 <b>保管容器単位(内容器収納)</b> で取扱い可能であること	想定廃棄物の性状設定に基づく
	放射線に対する考慮 廃棄物の取扱量に応じた <b>遮蔽が可能</b> であり、処理設備内の <b>駆動部や内装品がない</b> /又は <b>保守が可能</b> であること	同上
一時保管に向けた処理	デブリ取出し作業時に発生した原廃棄物は、PCV内で <b>内容器サイズ以下まで切断され、自重による水切り</b> をした状態で搬送され乾燥処理設備が受け入れる。乾燥処理設備では、 <b>一時保管前の乾燥</b> 以外の処理はしない	収納・移送・保管フローに基づく
取出しフローへの適用	<b>水素対策は、密閉容器又は非密閉容器とし、保管建屋での乾燥処理は主に容器の閉じこめ(腐食対策)*1</b> のために実施する *1:保管中の容器腐食対策の成立可能性目途が得られるまでは、容器内廃棄物を詰替可能とすること	対象廃棄物に応じて検討
	容器や保管建屋への取合い <b>容器(寸法、構造、搬送方法)及び保管建屋(給気/排気の系統、動力の系統)との取合いが可能</b> であること	既往技術調査より、適用可能性のある技術を抽出
乾燥処理中の影響	汚染拡大防止のため、乾燥処理設備の <b>給気/排気系統で放射性物質(ダスト)の除去(フィルタ)</b> を行うこと 乾燥処理中に発生する <b>水素</b> は、設備内に滞留せずに <b>系外へ掃気</b> すること	同上

項目	乾燥処理設備の要求事項	備考
乾燥の技術要件	対象廃棄物の条件 <b>種類、形状、貯蔵場所、自由水の付着状態</b> が設定可能であること (自由水の付着状態は、現時点での推定は困難であり、既学会標準(附属書E)の考え方に倣い、金属:管理区分Ⅰ、コンクリート:管理区分Ⅰ又はⅡ(内部の含水を考慮)と設定)	既学会標準の考え方が応用可
	汚染拡大防止措置 乾燥処理の前後で <b>容器及び乾燥処理設備での放射性物質の閉じ込めが可能</b> であること 材料:炭素鋼SS材 容器の構造:1F構内で使用中の角型容器に汚染拡大防止措置が可能なフィルタベントの取付けを検討中	
	健全性を損なうおそれのある物質 <b>密閉容器の閉じ込めを損なうおそれのある自由水を乾燥する設備</b> であること 腐食を著しく促進させる物質(腐食:水素イオン濃度指数2.0以下、腐アルカリ:同 12.5以上)やガス発生を著しく発生させる物質(自然発火性物質、禁水性物質)はない	想定廃棄物の性状設定に基づく
	自由水の除去方法、乾燥方法、評価 <b>既往技術の方式により、自由水が除去可能かつ、乾燥方法が評価可能</b> であること (除去時間は水分持込量に依存し、条件や保持時間が設定可能)	既往技術調査にて、乾燥処理の要求へ適用可能性のある技術を抽出 既学会標準の考え方が応用可
	多量の自由水を含んでいないこと <b>運転処理条件及び必要保持時間が設定可能</b> であること	同上
	容器単位の乾燥処理 <b>容器に放射性物質(廃棄物)を収納後、容器単位で乾燥処理</b> を実施すること	同上
運転管理指標	残水量 運転条件 運転時間 <b>放射性廃棄物の条件(管理区分)に応じ、既往技術の方式(真空乾燥、真空乾燥以外)で残水量(代表値)、運転条件(圧力、温度、排気/通風量)、運転時間(試験によって決定した保持時間)が設定可能</b> であること	同上

## <背景と目的>

### ●背景

これまでの検討・・・2018年度までに検討した収納・移送・保管フローでは、測定を行うことを想定したが、  
**測定項目、測定方法、測定設備等は未検討**

### ●課題点

- ① インプットとなる廃棄物性状・構内移送要件・保管要件など未決定
- ② 燃料デブリ取り出し全体を成立させるため、測定時間・設備設置スペース等に制限あり(定量的な設計要件は未定)
- ③ 全ての確認項目を測定にすることは現実的ではなく、選定するためのロジックが必要

### ●目的

測定設備の概念具体化(測定設備の要求事項(測定方法、測定場所、測定時期等)の提示)。

### ●検討手順

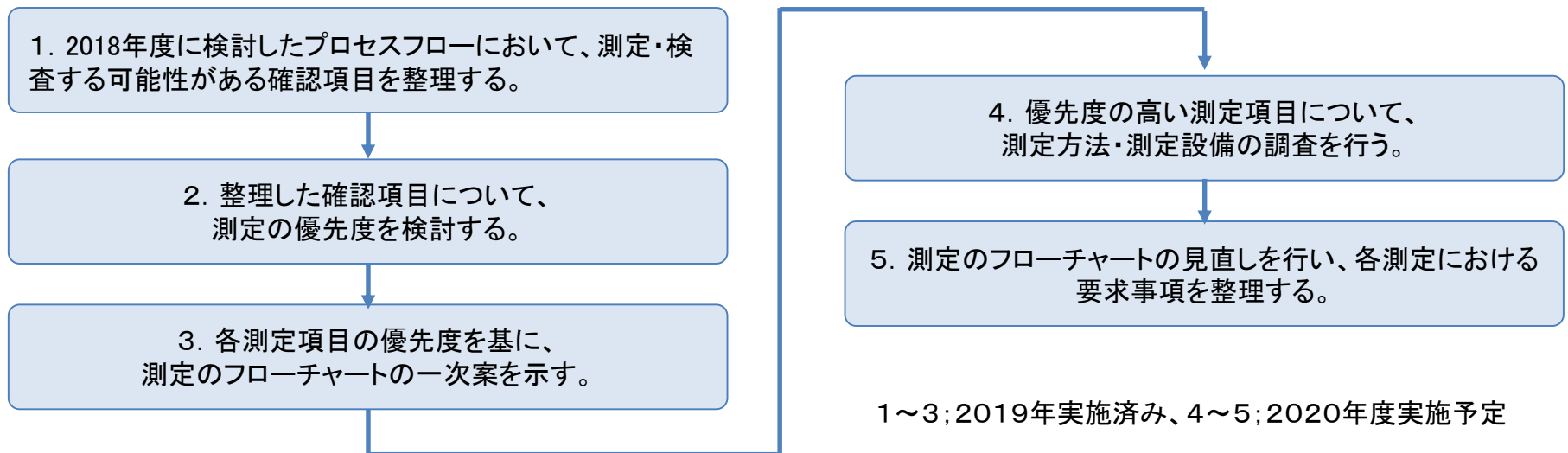


図1 測定方法および測定設備の検討プロセス

(a) 保管・管理方法の検討・評価  
② 容器及び保管設備の要求事項の検討  
測定方法および測定設備の検討(2/3)

1. 2018年度に検討したプロセスフローにおいて、測定・検査する可能性がある確認項目を整理する。

2. 整理した確認項目について、測定の優先度を検討する。

< 確認項目 >

< 確認項目の目的・趣旨等 >

● 内容器収納時

基礎特性

寸法、容量、重量、表面状態

廃棄物性状(組成)

材質、水、有機物、腐食性物質

放射化学的性状

表面線量率、放射能量、核物質質量

発熱特性

水素発生特性

● 保管容器収納時

外観

重量

充填率

表面線量率

表面汚染

表面温度

水素発生速度

核種放出量

● 移送容器収納時

外観

重量

表面線量率

表面汚染

表面温度

密閉

目的・趣旨

払出設備受入要件

構内輸送要件

保管庫受入要件

保管までのプロセスに反映

保管以降のプロセスに反映

< 確認項目の測定案 >

測定技術の案

測定内容・対象

実施方法

実施時期

実施場所

要求値

想定する課題

目的による優先度

設備受入要件・構内移送要件など、  
確認が必須な項目であるか

測定の難度

技術的に、保管までのプロセス中に  
測定できる見込みがあるか

他の測定値からの推定可能性

代替測定項目から比較的容易に  
推定が可能であるか

運用、評価、事前調査等による  
測定回避可能性

運用等による測定を代替することが  
可能であるか

< 測定フローチャートの設定方針 >

各優先度を基に、以下の方針で測定項目を設定

- ▶ 設備受入要件・構内移送要件などの収納・移送・保管までに必要な項目は確認必須とし、保管以降のプロセスに必要な項目は必須とはしない。
- ▶ 確認必須項目のうち、他の測定値からの推定や運用、評価、事前調査等によって測定回避できるものは測定を回避する方針とし、測定回避可能性の無い物は測定する。

(a) 保管・管理方法の検討・評価  
 ② 容器及び保管設備の要求事項の検討  
 測定方法および測定設備の検討 (3/3)

3. 各測定項目の優先度を基に、  
 測定のプロローチャートの一次案を示す。

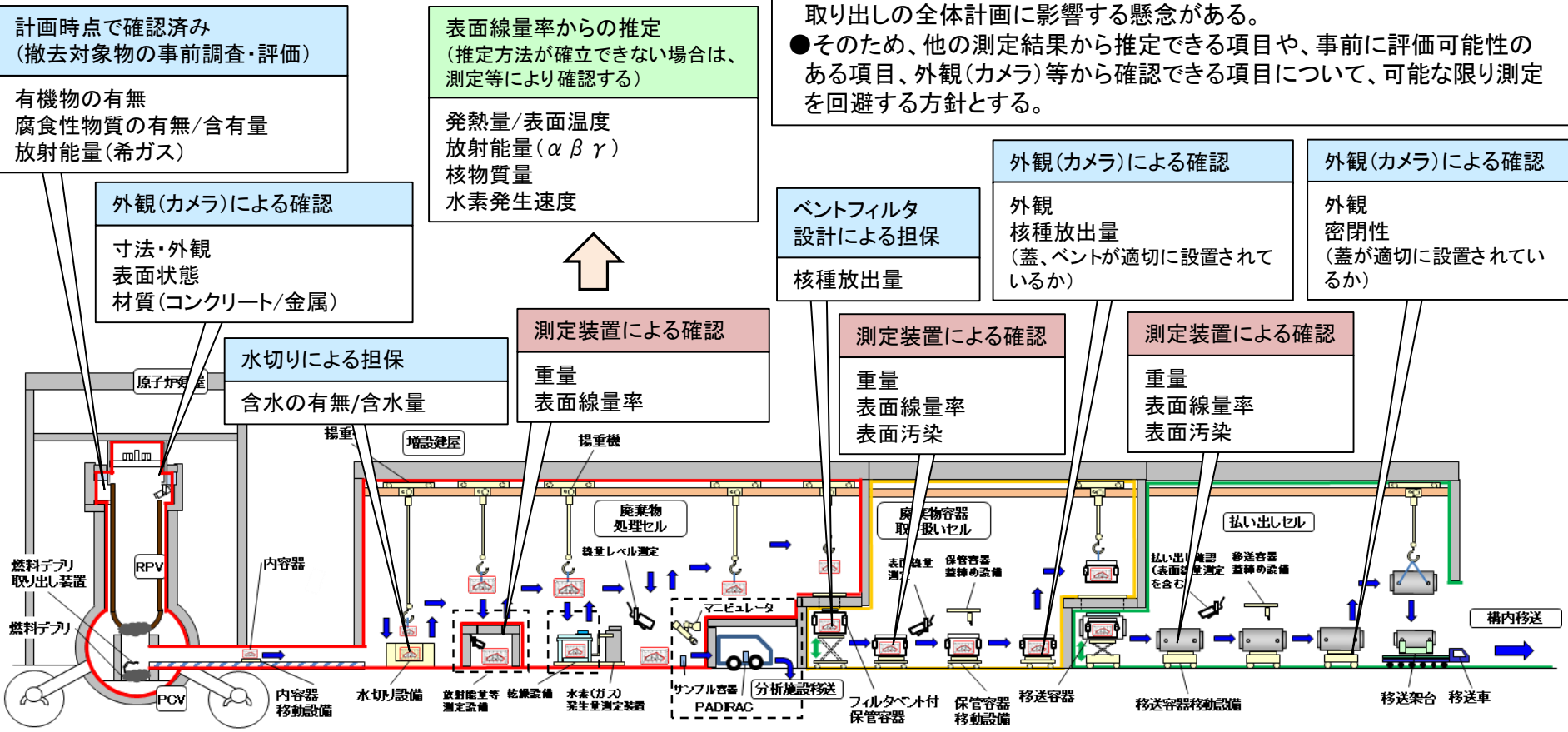


図1 測定プロローチャートの一次案

<コンセプト>  
 ● 測定項目が増加すると、測定時間・設備設置スペースにより燃料デブリ取り出しの全体計画に影響する懸念がある。  
 ● そのため、他の測定結果から推定できる項目や、事前に評価可能性のある項目、外観(カメラ)等から確認できる項目について、可能な限り測定を回避する方針とする。

計画時点で確認済み  
 (撤去対象物の事前調査・評価)  
 有機物の有無  
 腐食性物質の有無/含有量  
 放射能量(希ガス)

表面線量率からの推定  
 (推定方法が確立できない場合は、  
 測定等により確認する)  
 発熱量/表面温度  
 放射能量( $\alpha$   $\beta$   $\gamma$ )  
 核物質質量  
 水素発生速度

外観(カメラ)による確認  
 寸法・外観  
 表面状態  
 材質(コンクリート/金属)

水切りによる担保  
 含水の有無/含水量

測定装置による確認  
 重量  
 表面線量率

ベントフィルタ  
 設計による担保  
 核種放出量

外観(カメラ)による確認  
 外観  
 核種放出量  
 (蓋、ベントが適切に設置されているか)

外観(カメラ)による確認  
 外観  
 密閉性  
 (蓋が適切に設置されているか)

測定装置による確認  
 重量  
 表面線量率  
 表面汚染

測定装置による確認  
 重量  
 表面線量率  
 表面汚染

<まとめと今後の予定>  
 ▶ 廃棄物(内容器収納)の表面線量率から、複数の確認項目を推定する可能性があり、推定方法の開発が課題。  
 ▶ 今後は、今年度の検討で抽出した測定優先度の高い確認項目について、測定方法・測定設備の調査を行う。また、調査結果をもとに、測定プロローチャートを更新する予定。

- ...運用、評価、事前調査等によって測定回避可能と考えられる項目
- ...他の測定値からの推定可能性のある項目
- ...測定装置による確認が必要と考えられる項目



# (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発

## ～ 概要 ～

### ■ 実績

- 2018年度に、 $\alpha$ 汚染を遠隔で測定できる測定器(アルファカメラ)として、現場環境を想定した試作機(図1)を製作し、要素試験を実施した。要素試験の結果に基づき、本手法の課題を抽出し、適用範囲を示した。

### ■ 目標

- 建屋コンクリート、機器の表面に付着した $\alpha$ 汚染測定システムとして、パン・チルト機構などの走査機構と、3次元の汚染分布を作成する画像合成機能を有した測定システムを開発する。現地適用に向けシステムの設計・製作を実施し、システムの機能確認試験を実施する。その上で、現地で $\alpha$ 汚染機器を対象にモックアップ試験を実施し、性能評価を実施する。

### ■ 実施内容

- 2019年度には、2018年度要素試験結果を基に、試作機を改良し、要素試験を継続するとともに、システム化予備試験を実施し、測定システム(図2)の設計に必要なデータを取得する。
- 2020年度には、設計に基づきシステムを製作し、システムの機能確認試験を実施する。その上で、現地で $\alpha$ 汚染機器を対象としたモックアップ試験を実施し、性能評価を実施する。

### ■ 目標達成を判断する指標

- 設計完了に必要なデータを取得する。(2019年度)
- モックアップ試験による性能評価を行う。(2020年度)

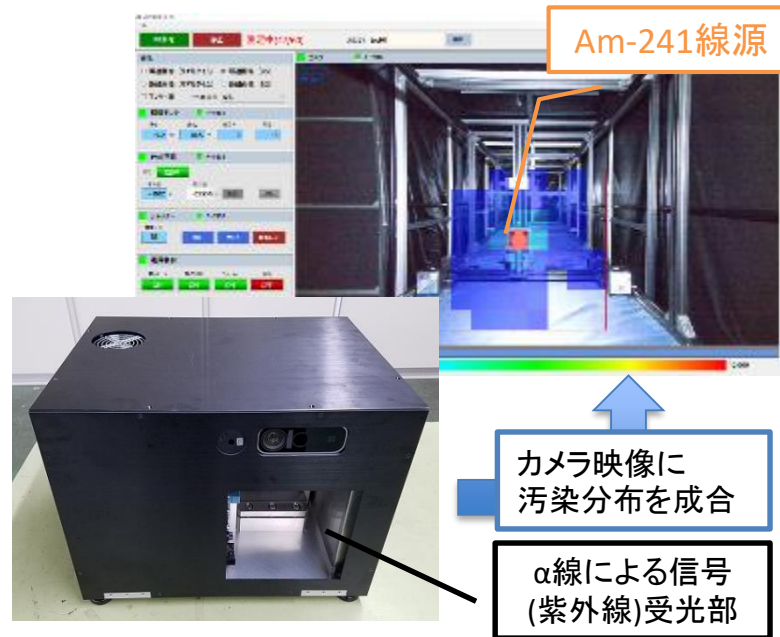


図1 2019年度に製作した試作機



図2  $\alpha$ 汚染測定システムのイメージ

## (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発 ～アルファカメラの原理～

### 測定原理

- ①  $\alpha$  線の飛程(数cm程度)の間に窒素と反応し、数100光子の紫外線が発生。
- ② この紫外線をレンズで集光、結像し、光検出器に到達した光子数の分布から  $\alpha$  線の分布を測定。
- ③  $\gamma$  線がPMT (Photomultiplier Tube)に入射するとチェレンコフ光などの影響を受けるため、PMTは遮蔽する。

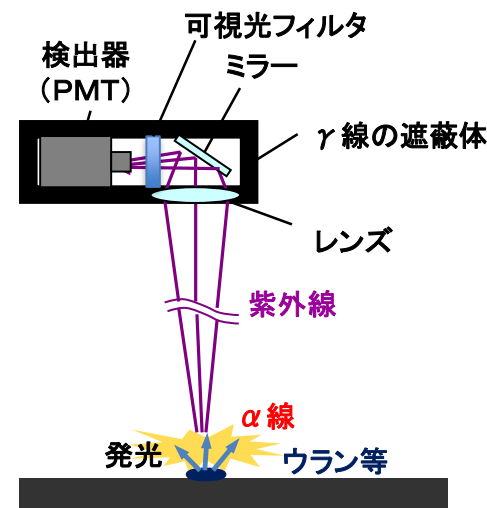


図1 原理を示す模式図

### アルファカメラに関する発表実績例

1. IEEE2013 NSS、Remote Detector of Alpha-Ray Using Ultraviolet Ray Emited by Nitrogen in Air
2. ICONE-23 REMOTE DETECTION OF ALPHA RADIATION USING UV PHOTONS EMITTED BY NITROGEN
3. 日本原子力学会2013春の大会、 $\alpha$  放射能の遠隔計測技術
4. 日本原子力学会2014秋の大会、 $\alpha$  放射能の遠隔計測技術-照明環境への適用-

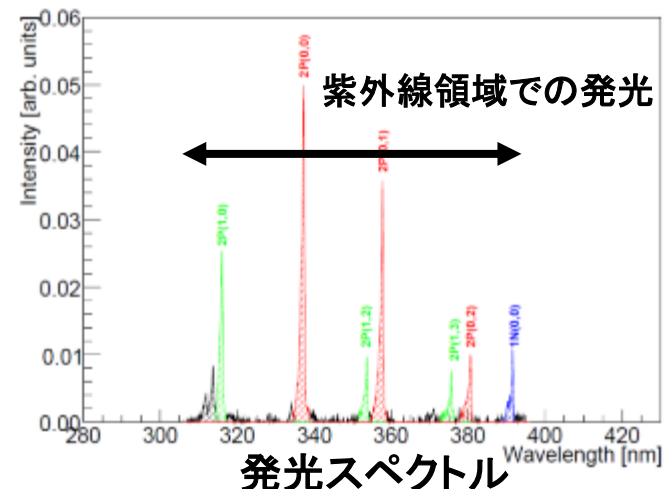


図2 窒素の発光スペクトル

J.Sand. Remote Optical Detection of Alfa Radiation. IAEA-CN-184/23.より引用

## (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発

### ～ アルファカメラ開発の経緯 ～

#### ■ 開発の経緯

- 2018年度に「固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発(先行的処理手法及び分析手法に関する研究開発)」において、想定される現場環境を調査し、要求仕様を策定
- 要求仕様に基づき、要素試験を実施することで、開発手法(アルファカメラ)の基本的な性能を確認

表1 要求仕様と試験結果概要

平成29年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業補助金(固体廃棄物の処理処分に関する緩急開発(先行的処理手法及び分析手法に関する研究開発))」2018年度研究報告書より引用

	項目	要求仕様	試験項目	結果概要
アクセシビリティ	測定距離	最大3m	基本性能試験： レンズ評価	・感度は距離の2乗に反比例 ・Φ100mmのレンズ、測定時間を延ばすことで4Bq/cm <sup>2</sup> も測定できるケースあり
	測定対象形状	球面、凹凸、平面	要素試験： 複雑線源の評価	・測定方向(球面)は0～90°で影響小 ・深さ25mmの凹部の汚染測定時、感度が71%に悪化。深さ50mmで67%。
	重量	台車に依存	要素試験： 環境線量の影響試験	γ線感度3.3[s <sup>-1</sup> /mSv/h]を確認。 ※一部入射角で遮蔽効果が薄い場所を確認。要改良
環境条件	環境線量	50mSv/h程度 (最大約150mSv/h)	要素試験： 環境線量の影響試験	※一部入射角で遮蔽効果が薄い場所を確認。要改良
	環境温度	-5℃～35℃	要素試験：温度試験	温調機構を使うことでノイズへの影響無し。
	環境湿度	最大100%	要素試験：湿度試験	最大95%でも感度低下は3%以下 ※線源に水をつけると感度は低下傾向
	照明	場合によっては照明有	基本性能試験： 光学フィルタ評価	光学フィルタにより感度が78%に減少
	粉塵	屋外の粉塵量以上	要素試験： 粉塵の影響試験	屋外環境でも感度変化は1%以下
	βγ核種濃度	$\alpha/\beta\gamma = 1/10^{6\sim 8}$ *	要素試験： βγ線核種濃度の影響評価試験	α線に対する相対感度を取得 β線 (Co-60) : 0.36% γ線 (Cs-137) : 0.009%

\* 平成29年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業補助金(固体廃棄物の処理処分に関する緩急開発(先行的処理手法及び分析手法に関する研究開発))」における性状把握で得た成果に基づき設定



## (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発 ～2019年度の実施内容の整理～

### 2018年度実施結果からの課題

1.  $\phi 100\text{mm}$ レンズと検出器の組み合わせでゴーストピークが発生することを確認。  
⇒ [ゴースト対策](#)
2. 感度がレンズ径の2乗に比例することを確認し、 $\phi 100\text{mm}$ のレンズ(過去実績は $\phi 50\text{mm}$ )を採用。大型化したこともあり、遮蔽体の効果が薄い方向があることを確認。  
⇒ [試作機改良](#)

### 2019年度から取組む課題

3. 2018年度に定型の標準線源での試験まで実施済み。しかし、現地を想定した材質、形状の模擬は未実施。  
⇒ [要素試験の継続](#)
4. 2018年度はアルファカメラ単体試験で、固定位置で画像化まで完了。遠隔で測定場所を移動させ、データ評価できるシステム設計が必要。  
⇒ [ソフトウェアへの機能追加、測定システムの設計](#)

## (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発 ～α汚染廃棄物管理の現状と課題～

### ● α汚染廃棄物管理の現状

スミア測定により、表面汚染密度 $0.4\text{Bq}/\text{cm}^2$ 以上のα核種による汚染が検出された場合、分別の上で保管容器に収納して保管。しかし、今後、廃炉作業が本格化し、大量の廃棄物が発生する。このため、解体後に全ての廃棄物をスミア測定・分別することは、測定に係る時間や作業員の被ばくを考えると現実的ではない。

### ● 廃棄物分別技術に係るニーズ

- 解体前に対象物の表面汚染分布を把握できること。
- 測定時間を短縮し、測定に係る被ばく線量を低減すること。

### ● 本PJの目的

現場への適用性を検討し、解体前に解体対象物(または、エリア)を網羅的、かつ短時間に測定できる技術を開発する。

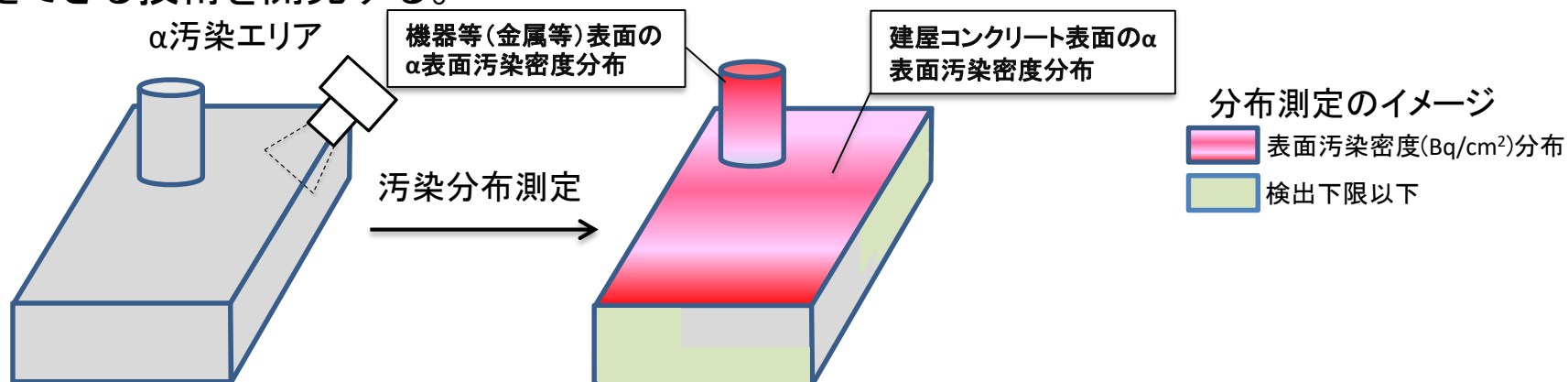


図1 アルファカメラを用いた分布測定のイメージ

## (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発 ～適用ターゲット～

測定ニーズを調査し、適用の時期及び測定の目的を具体化。  
今後のデブリ取り出しにかかわる準備工事、機器解体などの工事計画の検討  
に使用できる“**汚染分布の把握**”を適用ターゲット(用途)とした。

【想定廃炉フロー(例:R/B)】

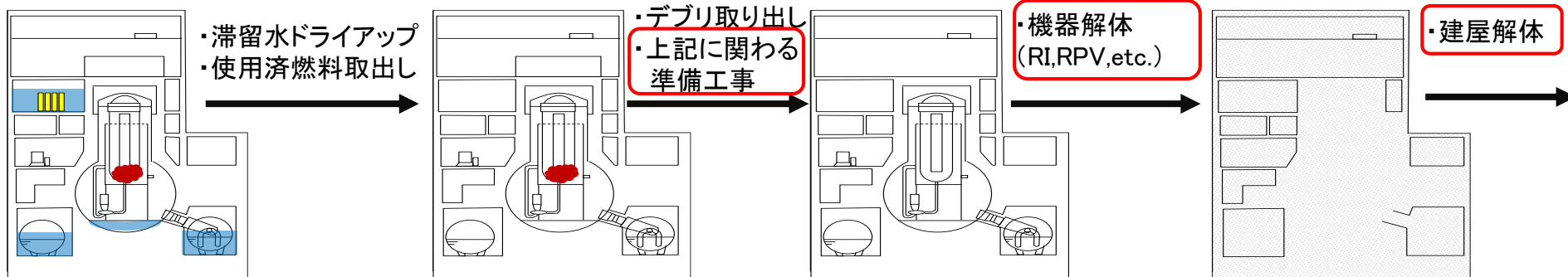


図1 アルファカメラ適用先のイメージ

### 表面 $\alpha$ 汚染測定の適用ターゲット

- 時期: デブリ取出し準備工事、機器解体工事の前
- 対象: 工事範囲内の構造物・機器の表面
- 用途: 汚染分布の把握

## (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発 ～アルファカメラの適用タイミング～

東電HD殿の最新のニーズ(汚染測定の目的)を調査し、本技術の目指す方向をより具体化。

汚染測定目的:

- ・解体前の機器、構造物表面の“**表面汚染密度分布の定性的な把握**”

測定した汚染分布の活用方法(案):

- ・汚染拡大、廃棄物を増やさない工事計画の立案
- ・汚染濃度、作業内容に応じた適切な放射線管理方法の検討
- ・サンプリングなどの詳細測定の要否、計画の検討

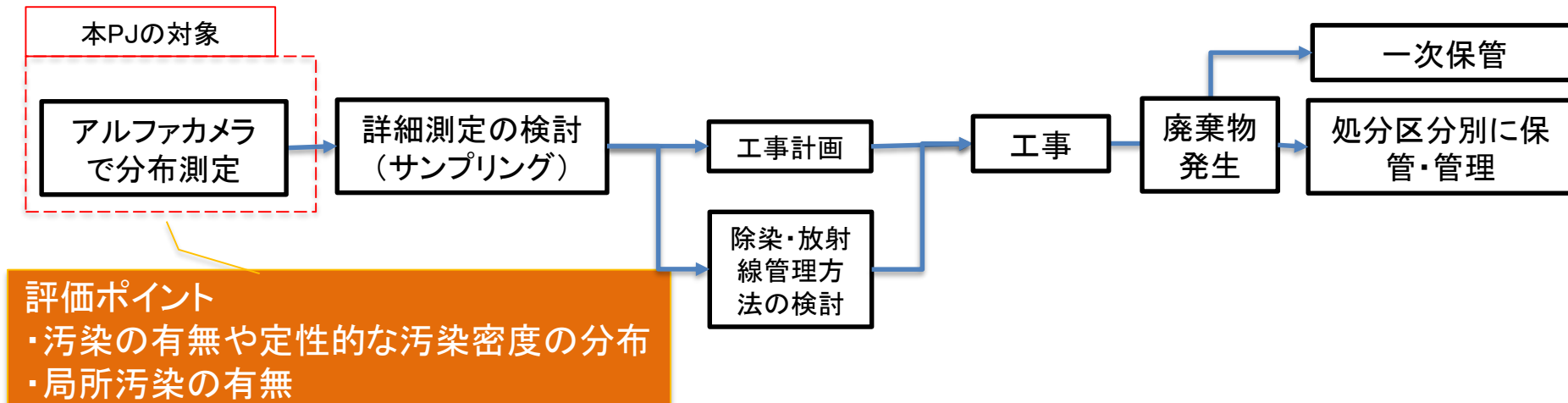


図1 想定している工事のフローとアルファカメラの適用タイミング

# (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発 ～2019年度の開発成果の概要～

表1 2019年度の実施内容と実績

項目	実施内容	実績
ゴースト対策 確認試験	<b>ゴースト</b> (線源位置以外のピーク) <b>対策</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ゴーストピーク原因を特定し、装置を改良</li> </ul>
試作機改良	<b>遮蔽構造の改良</b> ①遮蔽体構造の見直し ②遮蔽構造に合わせた光学系の見直し	<ul style="list-style-type: none"> <li>光線追跡解析と遮蔽計算で、光学系および遮蔽構造を決定</li> <li>光学系:本構成の画角、分解能の評価を完了</li> <li>遮蔽構造:照射試験で、解析結果と同等以上の性能を確認</li> </ul>
	<b>改良アルファカメラの性能確認</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ゴーストが発生しないことを確認</li> <li>基本性能の再評価を実施し、アルファカメラの仕様を整理</li> </ul>
要素試験の継続	<b>非密封線源等を用いた測定性能の評価</b> ①コンクリートなどへの付着模擬 ②面線源などの測定	<ul style="list-style-type: none"> <li>アルファカメラの測定性能に与える要因として、測定対象の表面粗さ、汚染形状を抽出し、試験項目に反映</li> <li>非密封のAm-241線源を用いた、測定対象の表面粗さ、汚染形状による特性の評価を実施</li> </ul>
ソフトウェアへの機能追加	<b>測定結果のマッピング機能の追加</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>複数地点で取得した結果を合成する機能を追加</li> <li>アルファカメラの走査連動し、画像合成および3次元空間上へのマッピングができることを確認</li> </ul>
測定システムの設計	<b>現場適用範囲の検討</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>適用範囲を設定</li> </ul>
	<b>測定システムの仕様検討</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>必要機能として、パン・チルト・昇降機能を抽出し、装置へ反映</li> </ul>
	<b>機構仕様、制御方法の検討</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>検討した装置で必要機能(パン、チルト、昇降)の動作を確認</li> <li>マッピング機能との連携も確認</li> </ul>
	<b>測定システムの基礎検証</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>汚染分布測定に対する基礎検証を実施し、測定システムの課題を抽出</li> </ul>



# (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発 ～ゴースト対策(1/2)～

## ■実施目的

2018年度に確認されたゴーストピークに対する原因調査を実施し、解決できる構造を決定する。また、試験にてゴーストピークが出ないことを確認する。

## ■実施内容(概要)

ゴーストの発生理由は、光学系のレンズのみではなく、光電子増倍管PMTの内部構成が原因の可能性を確認。

⇒PMTの構造で対策する方法を検討。

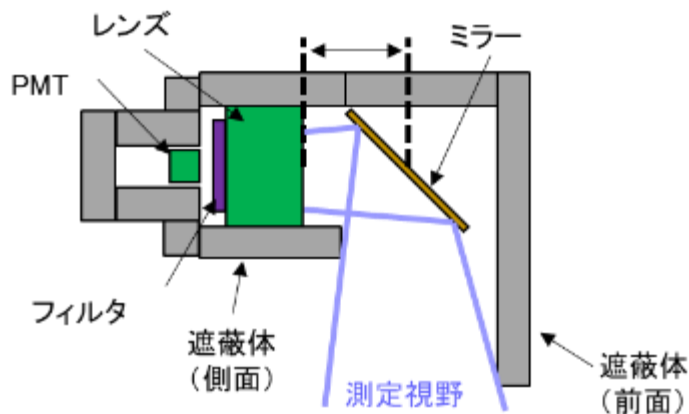


図1 装置内部の構成

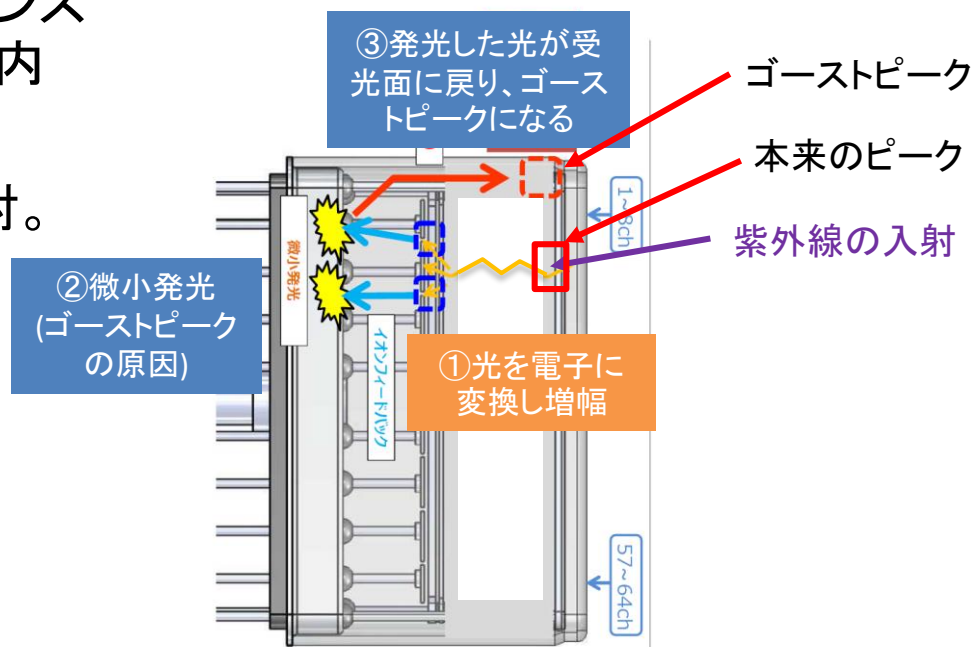


図2 PMTの断面図

# (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発 ～ゴースト対策(2/2)～

## ■実施結果

- ・ 発光戻り防止のため隙間を無くしたPMTで試験を実施、従来結果と比較
- ・ 市販の単レンズ(φ50mm)で、端部で発生するゴーストの低減を確認

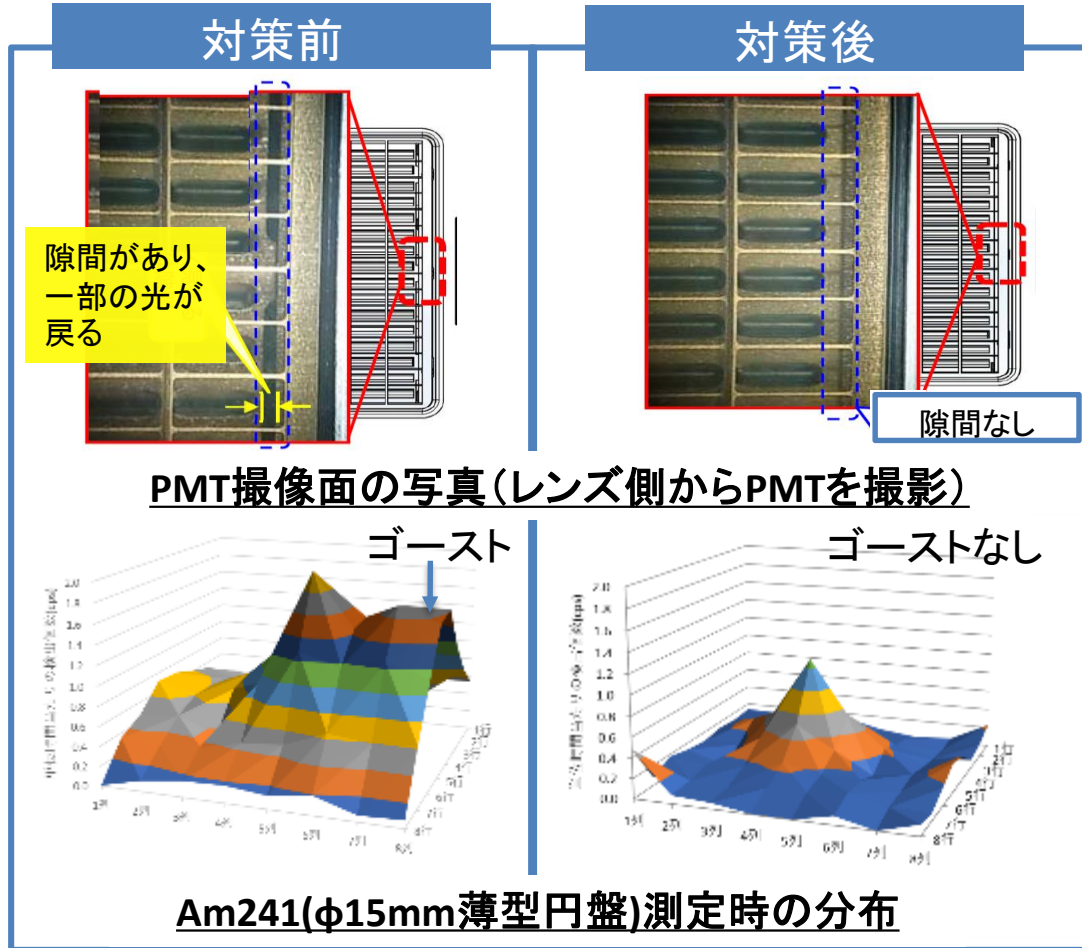


図1 ゴースト対策前後の比較

## (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発 ～遮蔽構造の改良(1/5)～

### ■実施目的

試作機では遮蔽効果が弱い方向が確認されており、遮蔽体、筐体の設計を見直す。  
また、対策を実施した試作機にて再度試験を実施し、効果を確認する。

### ■実施内容(概要)

$\alpha$ 線由来の紫外線を遮ることなく、遮蔽可能な構造の再設計、評価を実施。

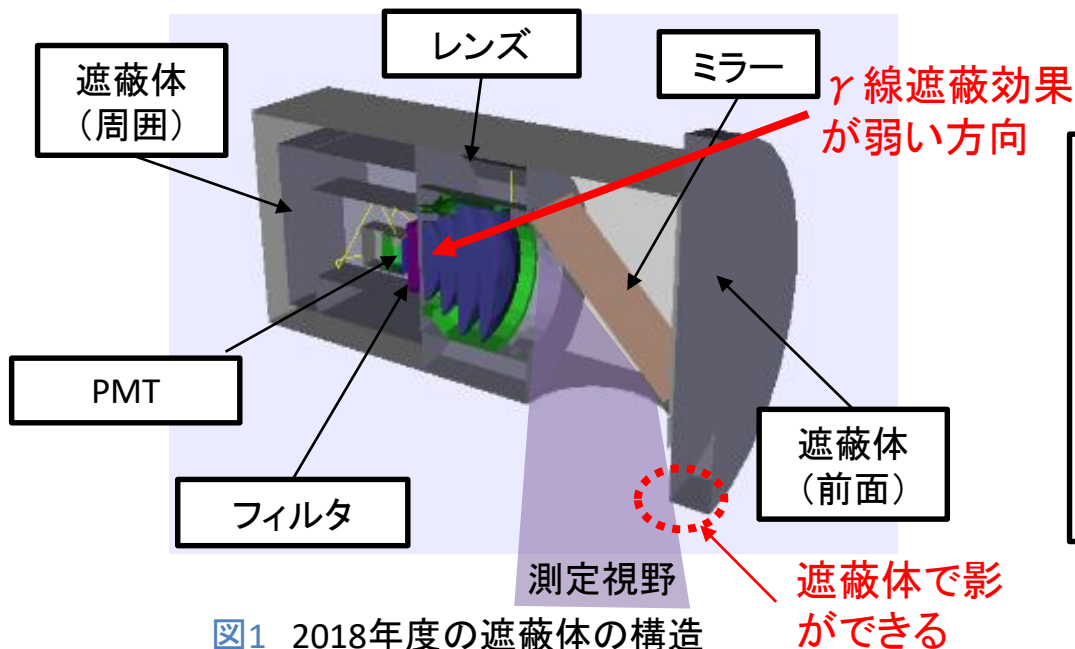


図1 2018年度の遮蔽体の構造

### 遮蔽体の構造

- 遮蔽体(前面)を大きくすることで、遮蔽効果の改善は可能。
- ただし、遮蔽体で測定視野の一部が欠ける(影ができる)ため感度が落ちる。

## (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発 ～遮蔽構造の改良(2/5)～

### ■実施結果

- ・光線追跡解析で画角内の光源から発する光線が通過する最小サイズを評価(図1、図2)
- ・光線をさえぎらない条件で、設置可能な遮蔽構造を検討(図3)
- ・解析評価で遮蔽構造の効果を確認(遮蔽構造の改良(3/5) 参照)
- ・Cs-137線源を用いた照射試験で入射角の依存性を確認(遮蔽構造の改良(4/5) 参照)

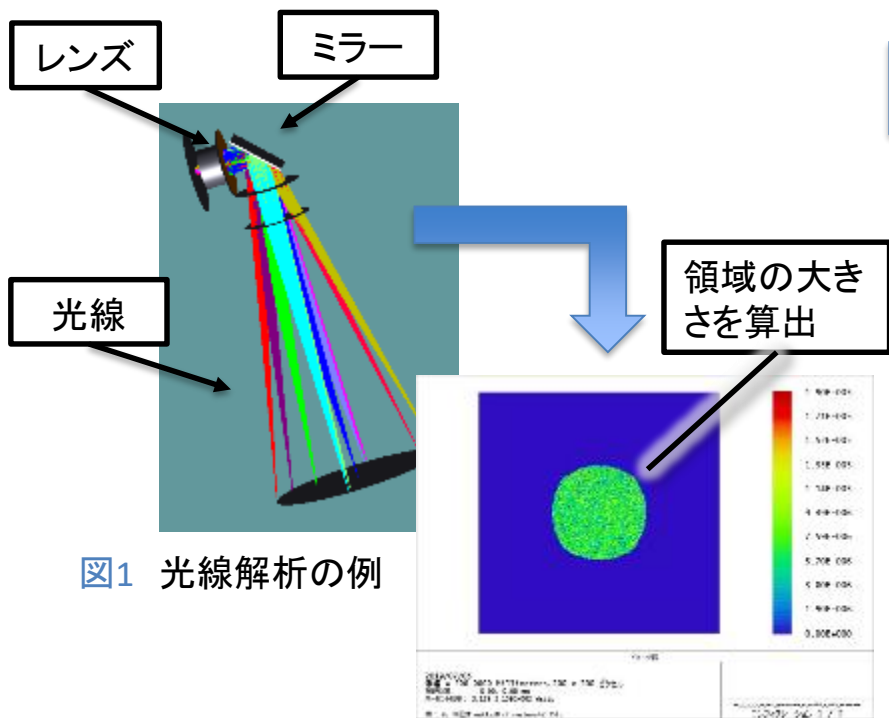


図1 光線解析の例

図2 ミラー下位置の光線通過領域(例)

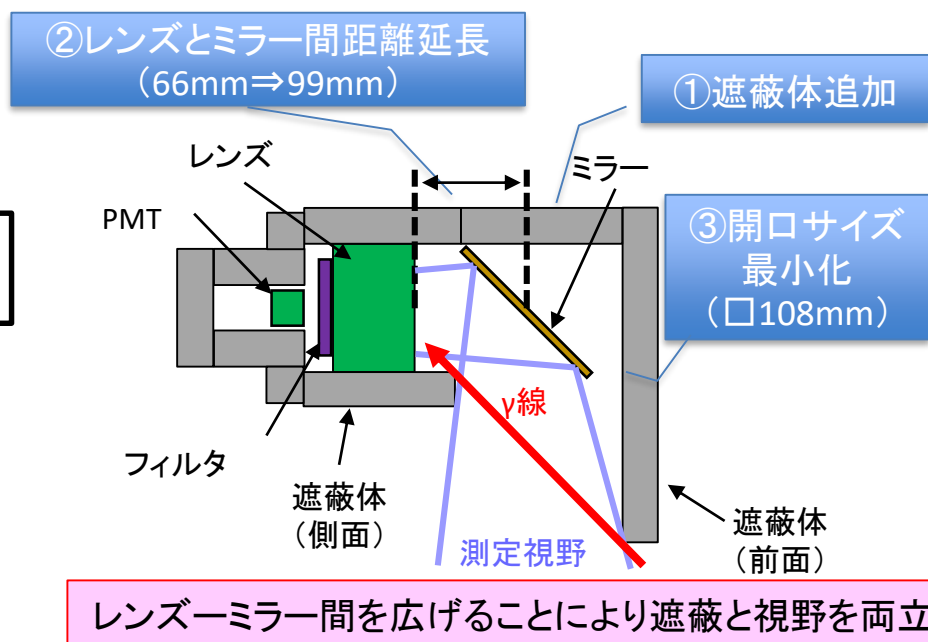


図3 改良項目と改良後の遮蔽体イメージ

# (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発 ～遮蔽構造の改良(3/5)～

## <解析評価の結果>

- アルファカメラ周囲にCs-137の一樣汚染を想定した場合の $\gamma$ 線感度を解析評価
- 再設計した構造で $\gamma$ 線感度を2018年度の構造に比べて1/6.5に低減できることを確認

表1 解析条件

#	レンズとミラ 一間距離	ミラー周り 遮蔽体	備考
1	66.4mm	遮蔽なし	2018年設計モデル
2	66.4mm	開口サイズ 120×120mm	開口サイズは、レンズとミラー間の距離が126.4mmで、紫外線を遮らない大きさで評価
3	96.4mm	開口サイズ 120×120mm	
4	126.4mm	開口サイズ 120×120mm	
5	96.4mm	開口サイズ 108×108mm	改良モデル。レンズとミラー間の距離が96.4mmで最小の開口

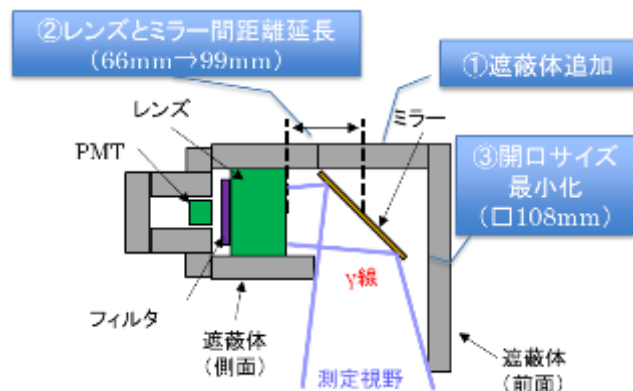


図1 アルファカメラ構造と改良ポイント

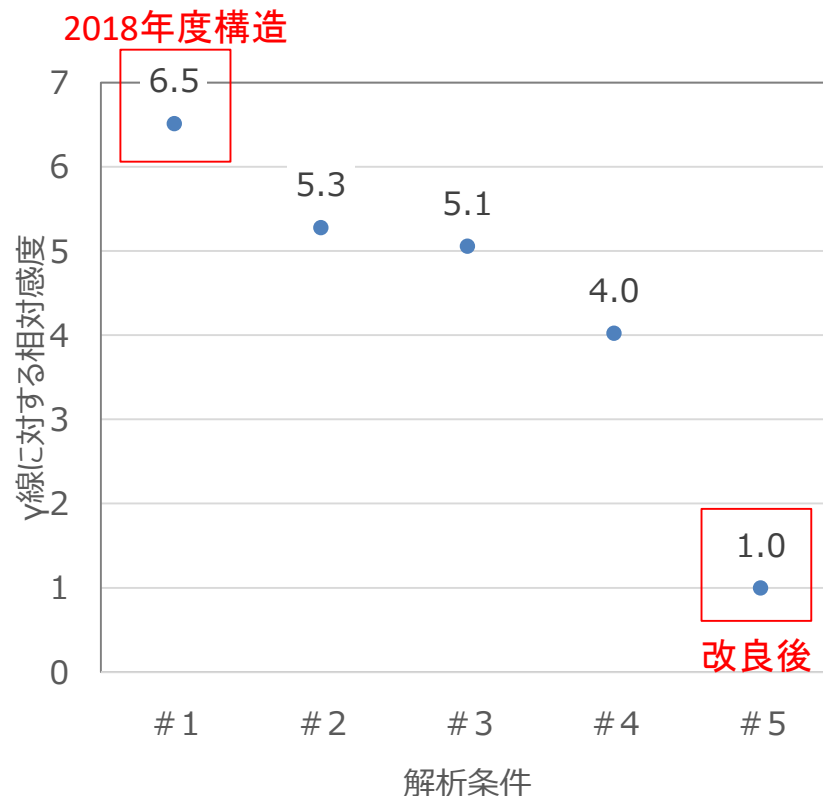


図2 測定環境に一樣に汚染している場合のCs-137に対する $\gamma$ 線に対する感度の評価



## (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発 ～遮蔽構造の改良(4/5)～

### <試験結果>

- Cs-137線源(位置固定)に対し、改良遮蔽体を適用したアルファカメラを回転させることで $\gamma$ 線の入射方向を制御し、 $\gamma$ 線ノイズの入射角依存性を評価
- 2018年度試験で遮蔽効果が少なかった $45^\circ$ 、 $135^\circ$ の条件で、ノイズ量が1/10以下に低減
- 平均値でも解析値と同等の1/13.7に削減できることを確認(図2)。レンズとPMTの間にフィルタを配置したことにより、レンズで発生した光がフィルタで減光したためと推定

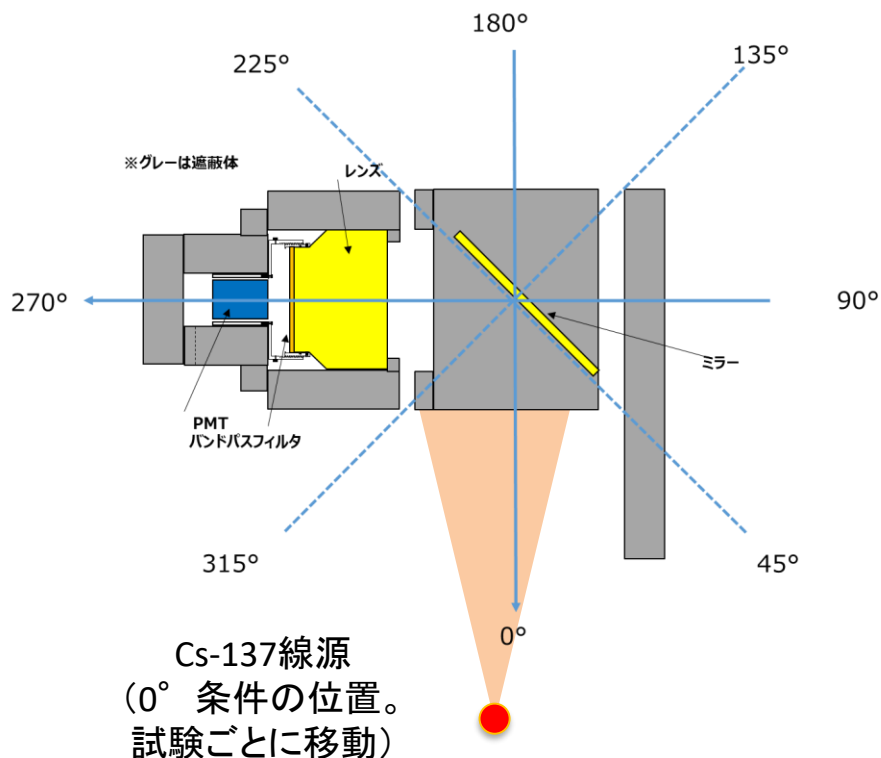


図1 試験体系

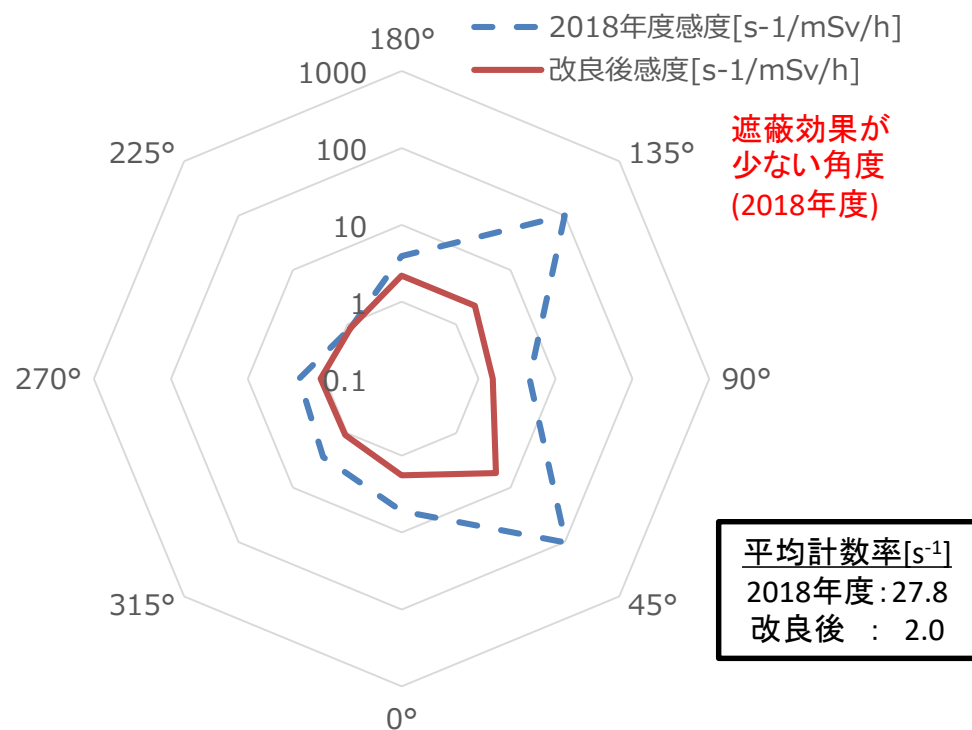


図2  $\gamma$ 線ノイズの入射角依存性

# (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発 ～遮蔽構造の改良(5/5)～

## <遮蔽体を含めた試作機の改良点>

表1 試作機の改良点

	2018年度	2019年度改良内容
PMT	撮像面の端部に開口あり	撮像面の端部の開口を埋める
遮蔽体	・ミラー周囲に開口あり ・レンズとミラー間の距離66mm	・α線由来の紫外線用の入射口以外は遮蔽体で覆う ・レンズとミラー間の距離96mm
PMTの冷却機構	PMTを冷却する構造とし、その外側に遮蔽体を設置	PMTを冷却し、周囲の遮蔽体全体から放熱する冷却構造(放熱フィン)に変更し、小型化、冷却性能を向上
遠隔制御機能	機能なし	遠隔で電源のON/OFFを操作できる機能を追加
アルファカメラ用回路	搭載	遮蔽体および筐体形状に合わせて、形状変更(機能は維持)
光学シャッター	ミラー下側に設置	レンズとミラーの間に設置
フィルタ	PMTの前面に固定	レンズと一体になるように治具を改良

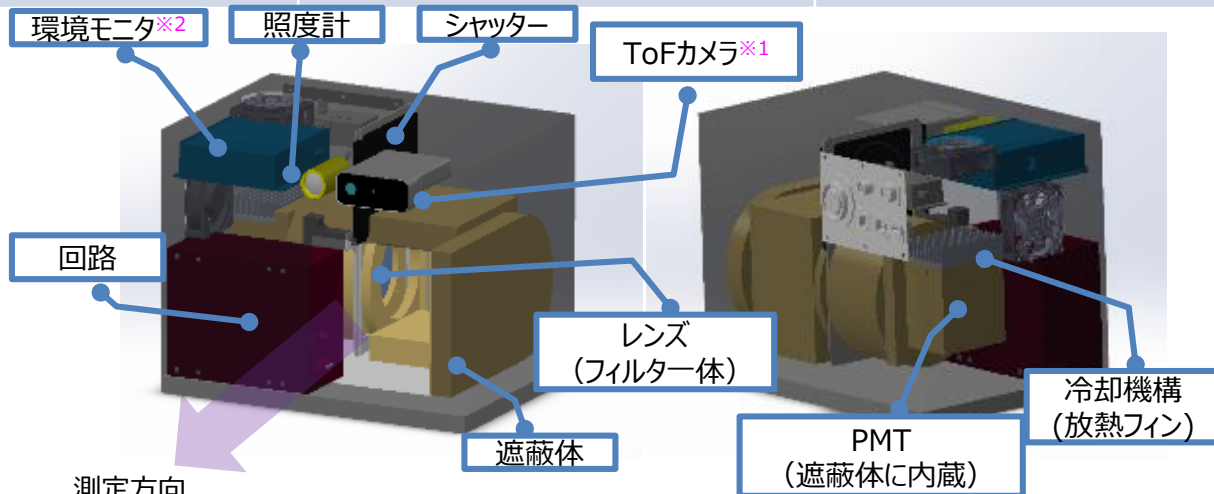


図1 2019年度の改良型遮蔽体

※1 ToFカメラ:3Dマッピング機能に使用。ToF(Time of Flight)機能を持つカメラで、通常のカメラ画像と距離データを同時に取得

※2 環境モニタ:冷却部の温度、照度計の値、遮蔽体内部のγ線強度を収集

# (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発 ～改良アルファカメラの性能確認(1/2)～

## ■実施目的

ゴースト対策、遮蔽体構造を改良したアルファカメラで、基本性能を再確認する。

## ■実施内容(概要)

- ・電源ON/OFF操作、光学系の変更に合わせて、2018年度制作ソフトを改良(図1～図3)
- ・ $\alpha$ 線の測定感度、画角、位置分解能等を評価

移動、準備	照明	シャッター	$\alpha$ 線データ	背景画像	距離データ
測定開始	ON	閉	—	表示	表示
BG測定	ON	閉	ノイズ測定	記録	記録
実測定	OFF	開	実測定	BG測定時の画像を表示	BG測定時の画像を表示
結果出力	ON	閉	実測定-ノイズ測定	BG測定時のデータを表示	BG測定時のデータを表示
移動、合成処理	ON	閉	—	表示	表示

図1 アルファカメラの測定フロー図

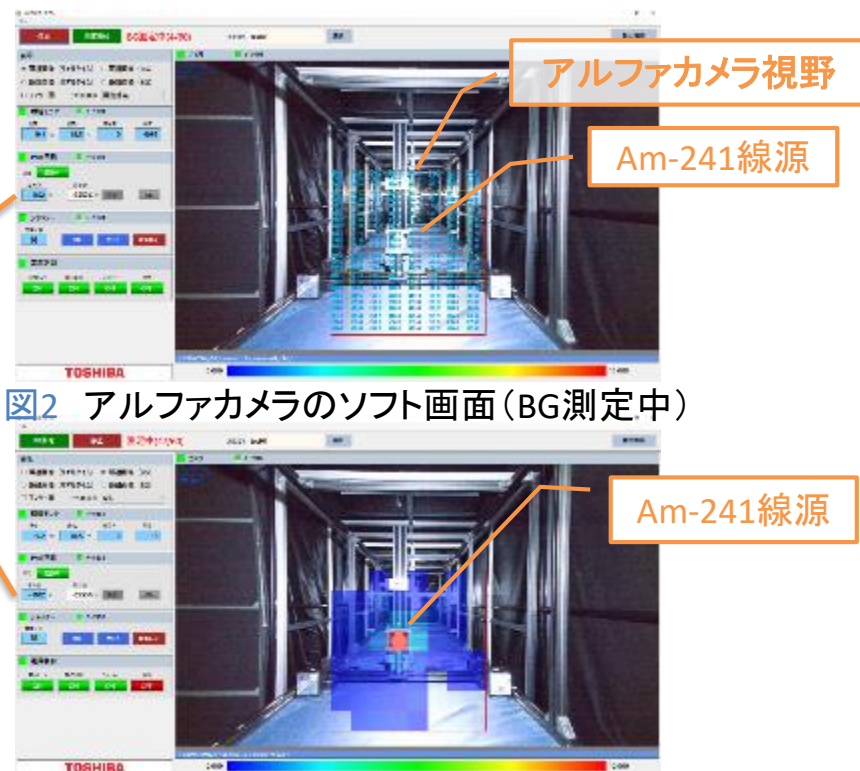


図2 アルファカメラのソフト画面(BG測定中)

図3 アルファカメラのソフト画面(実測定中)

# (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発 ～改良アルファカメラの性能確認(2/2)～

## ■実施結果

・2018年度確認された課題が解決し、アルファカメラの基本性能の評価が完了(表1)

表1 試験方法及び結果の概要

No.	項目	試験方法	結果	備考
1	$\alpha$ 線に対する感度	強度の異なる3種類の標準線源(10cm角、薄板)を距離1mに設置し測定	$0.23 \text{ s}^{-1}/(\text{Bq}/\text{cm}^2)$	光学フィルタの見直しで昨年度に比べ、2割程度感度低下
2	測定画角	$\Phi 36\text{mm}$ のAm-241線源を1m先に設置し、視野内の各位置での感度を評価	理想的な測定画角: $27.2^\circ \times 27.2^\circ$ 実効的な測定画角: $\phi 25.2^\circ$ を確認	図1参照。 80%以上の感度が得られる領域を実効的な画角と定義
3	位置分解能	アパーチャーでAm-241の点線源を模擬し、計測した分布から位置分解能を評価	$\pm 21\text{mm}$	$\alpha$ 線の発光領域の広がり为主要因であり、測定距離に対する依存性は小さい
4	距離特性	Am-241線源の設置位置を0.5m～3mで変えて測定	・距離の2乗に反比例することを確認 ・距離データで補正できることを確認	表2参照
5	$\beta$ 線に対する感度	Sr/Y-90線源(9kBq)を測定し、 $\beta$ 線感度を評価	$\alpha$ 線感度の0.05%以下	光学系の見直しで、2018年度結果より1桁影響低減
6	$\gamma$ 線に対する感度	照射施設で入射角依存性を評価	$2.0 \text{ s}^{-1}/(\text{mSv}/\text{h})$	2018年度結果 $3.3\text{s}^{-1}/(\text{mSv}/\text{h})$ より改善遮蔽構造の改良参照

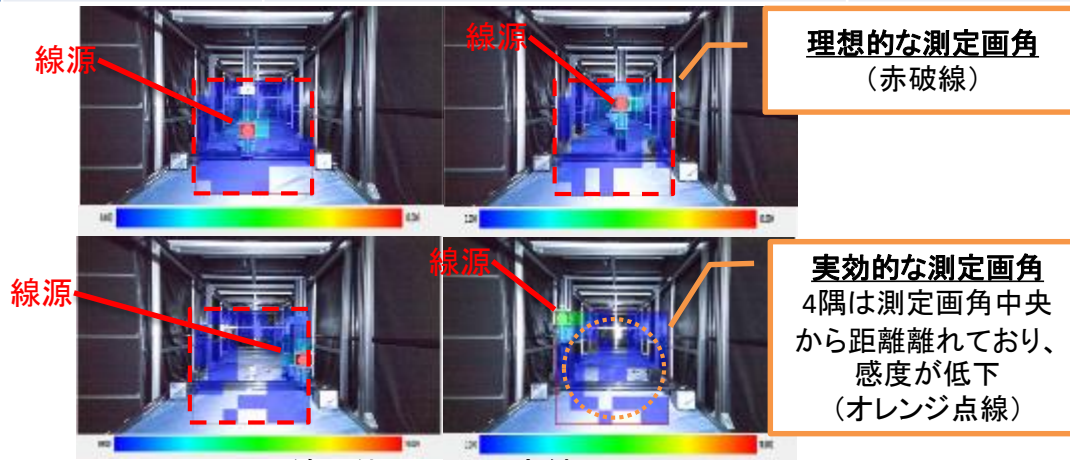


図1 線源位置別の測定結果

表2 距離特性と補正結果

距離[m]	計数率 [ $\text{s}^{-1}$ ]	補正後計数率 [ $\text{s}^{-1}$ ]
0.5	64.7	—
1	17.8	17.8
1.5	7.3	16.4
2	4.2	15.8
2.5	3.0	18.5
3	2.0	17.4

## (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発 ～非密封線源等を用いた測定性能の評価(1/5)～

### ■実施目的

2018年度は、薄型平板および薄型円盤の金属性密封線源を用いた試験を実施。しかし、現地ではコンクリートなどの非金属に、不定形の汚染が発生していると想定される。そこで、より現地に近い汚染を想定し試験することで、適用先を明確にする。

### ■実施内容(概要)

Am-241<sup>※1</sup>の非密封線源を複数種類製作し、密封線源と組み合わせることで以下の試験を実施する。また、各試験において、既存検出器(ZnSサーベイメータなど)と比較することで、測定結果の差を定量評価した。

※1: JIS4329:2004放射性表面汚染サーベイメータで指定の核種

表1 試験項目

#	試験項目	試験方法	パラメータ
1	現場の床・壁を想定した構造物測定時の性能評価	コンクリートに $\alpha$ 放射能を塗布した非密封線源を測定	コンクリート表面の塗装有無
2	複雑汚染形状に対する測定性能評価	非密封/密封線源を組み合わせることで、表面汚染形状を変えながら測定	線源形状



## (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発 ～非密封線源等を用いた測定性能の評価(2/5)～

### ■実施結果

- 表面汚染密度に対する検出下限に影響する要因を整理(図1)
- その要因の内、線源形状、線源表面形状を抽出
- 形状、及び濃度の異なる線源を作成し、測定感度を評価

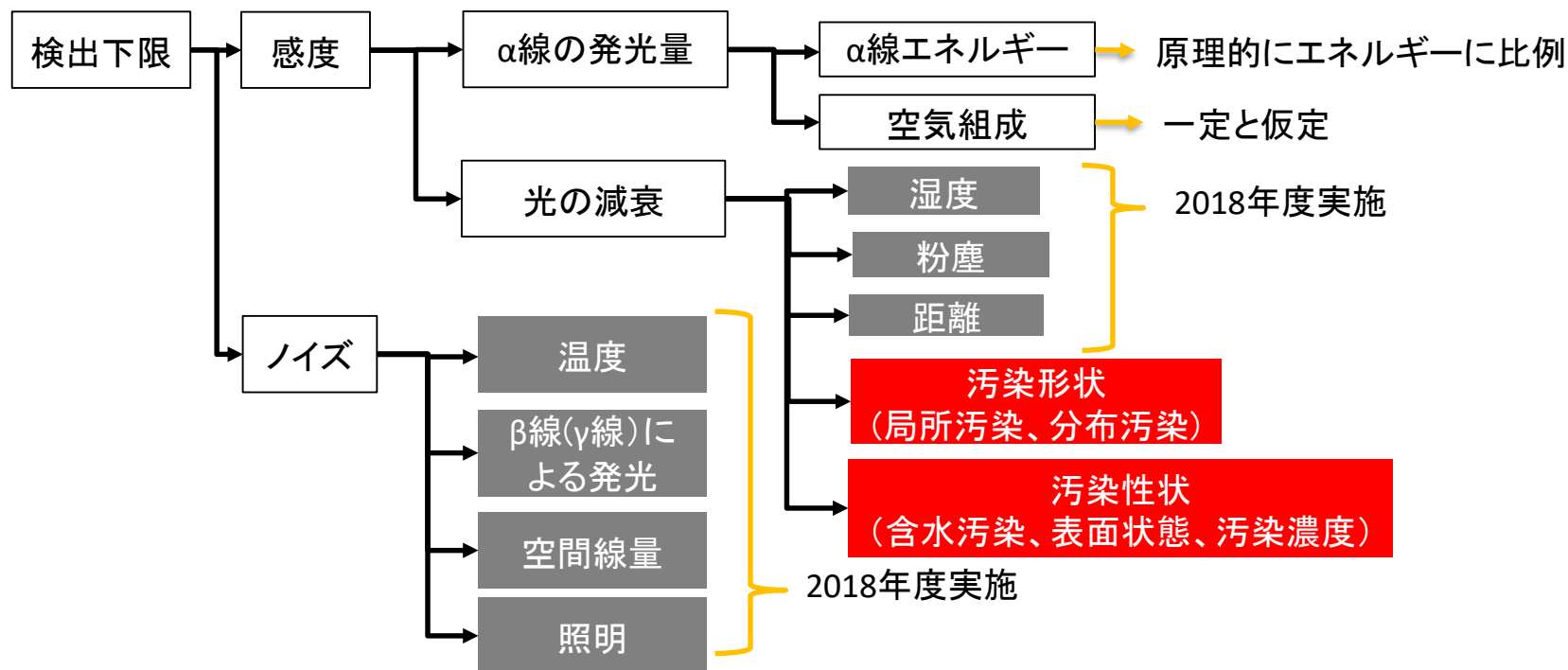


図1 検出下限に影響を与える要因の分析ツリー

# (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発

～非密封線源等を用いた測定性能の評価(3/5)～

## <非密封汚染物の作成方法と試験項目>

表1 評価項目と試験片の作成方法

評価項目		試験片の作成方法	試験方法
汚染形状	局所汚染	コンクリートにAm-241を滴下。 滴下液量、濃度(Bq/cc)をパラメータとする。	条件ごとにα線に対する感度を評価
	分布汚染	汚染濃度の異なる無垢コンクリート片をタイリングすることで形状を変更。(図1、図2)	
汚染性状	含水汚染	無垢コンクリートにAm-241を滴下し、水分を含むAm-241線源を作成。乾燥有無で水分量を変更	各材料の表面粗さとα線に対する感度を比較
	表面状態	コンクリート(ブラスト加工、無垢、エポキシ塗装)、金属平板の上にAm-241を滴下(図3)	
	汚染濃度	汚染濃度の異なる無垢コンクリートを使用	

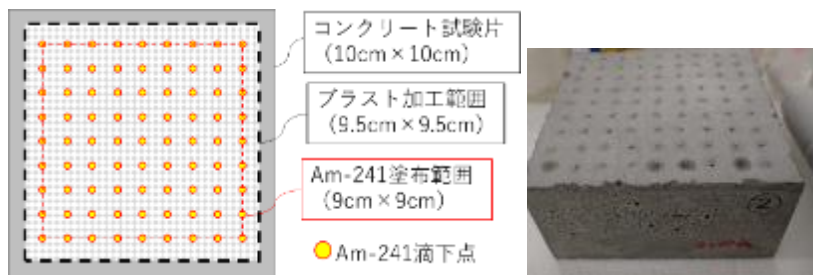


図1 タイリング用コンクリート(無垢)線源



図2 分布測定用のタイリングの状況



図3 各コンクリートの外観

# (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発

## ～非密封線源等を用いた測定性能の評価(4/5)～

### <試験結果サマリー>

測定対象の水分量、表面粗さが感度に与える影響を評価した。カメラ画像で測定対象の表面状態を確認しながら、α汚染分布を評価することを今後検討する。

表1 試験結果(サマリー)

試験名称	試験方法	結果	備考
汚染濃度	無垢コンクリートに40～4000Bq(0.4～40Bq/cm <sup>2</sup> )の放射能を塗布し、1m離れた位置から測定	濃度に対応した計数率を確認	図1参照
局所汚染	試験片へのAm-241線源の滴下量を制御し、サイズφ6mm～φ12mmの線源作成し、1m離れた位置から測定	線源サイズが小さいほど、感度は増加傾向であること確認	線源サイズが大きいほど、発光が複数の画素に広がるためと推定
分布汚染	10cm×10cmの無垢コンクリートをタイリングし、1m離れた位置から測定を実施。タイリング配置と計数率を比較	おおよその分布が測定できることを確認	次ページ参照
含水汚染	Am-241約400Bqを含む、20ulの溶媒を無垢コンクリートに滴下し、溶媒の乾燥前後で測定。感度を比較	水分を含んだ場合、感度が44%に減少することを確認	図2参照
表面状態	表面粗さの異なる無垢コンクリート、塗装コンクリート、ブラスト加工コンクリート(2種)に、4Bq/cm <sup>2</sup> のAm-241をメッシュ状に塗布し、1m離れた位置から測定	・表面粗さが増すほど感度が増加 ・ブラスト加工コンクリートは、無垢コンクリートより約6倍の感度を確認	・表面積が増加し、空気への放射率が增加したためと推定(図3参照)

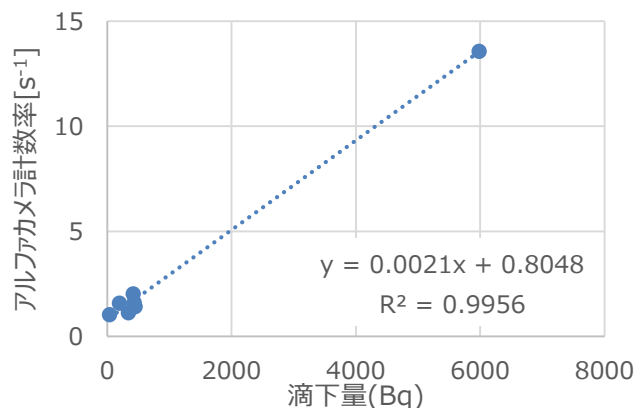


図1 無垢コンクリート線源での直線性

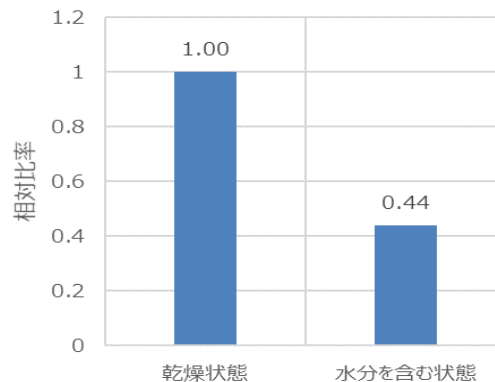


図2 汚染箇所における水分有無の比較

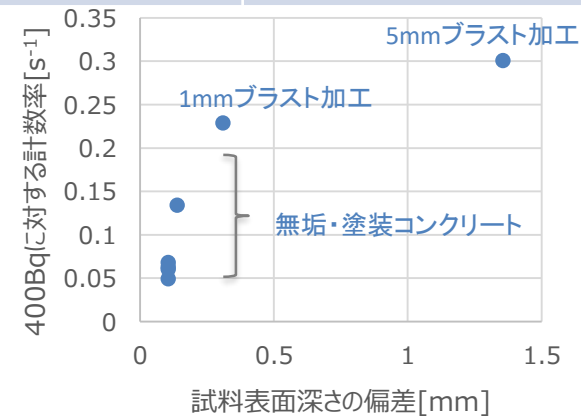


図3 表面粗さと計数率の相関

# (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発 ～非密封線源等を用いた測定性能の評価 (5/5)～

## <試験結果(線源分布の影響)>

- 線源の放射能分布に応じて、大まかな分布を測定できることを確認
- 高い放射能を持つ画素の周囲では、発光領域の広がりにより、計数率が高めに計数される傾向を確認

線源配置(四角中の数字が放射能[Bq])

アルファカメラの  
1画素に相当

A断面

発光の広がりによるボケ

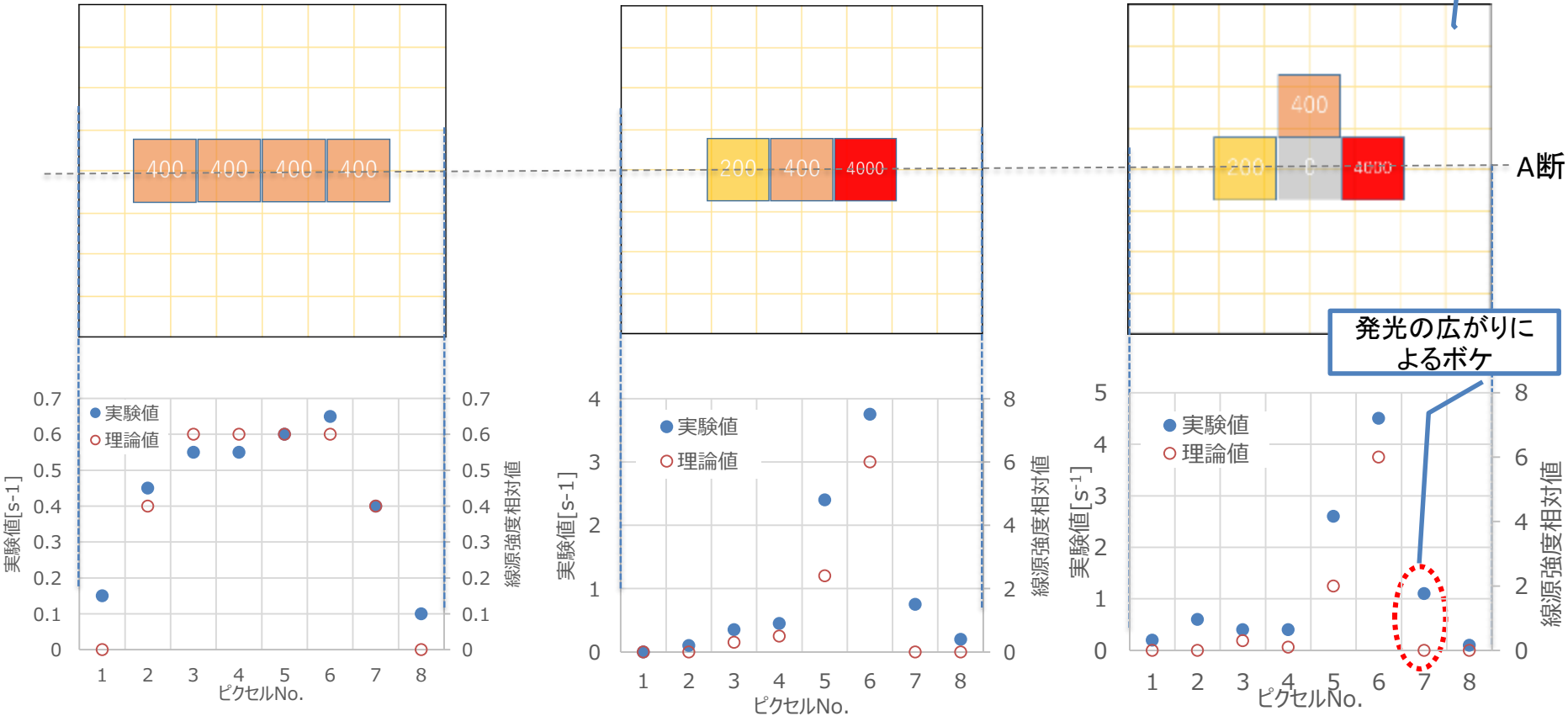


図1 線源配置と測定結果(A断面)の例

## (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発 ～測定結果のマッピング機能の追加(1/2)～

### ■実施目的

アルファカメラは、測定距離や環境で検出下限が変わる。そのため、測定距離、環境条件を用いて、同一の基準で評価できる測定結果の補正方法を検討する。  
また、2018年度に作成したカメラ画像にコンター図を合成し、汚染箇所を可視化するソフトをベースに複数箇所の測定結果の重ね合わせ(パノラマ化)ソフトを開発する。

### ■実施内容(概要)

1. 距離、環境条件の補正機能開発
2. 複数地点の測定結果の重ね合わせソフトの開発

#### 1. 距離、環境条件の補正機能開発

- ・2018年度の試験で、 $\alpha$ 線に対する感度 [ $S^{-1}/Bq/cm^2$ ] は距離の2乗に反比例することを確認済み。
- ・画角内の水平位置のズレなどを含めて、感度を推定する機能を追加、データ補正方法を検討する。

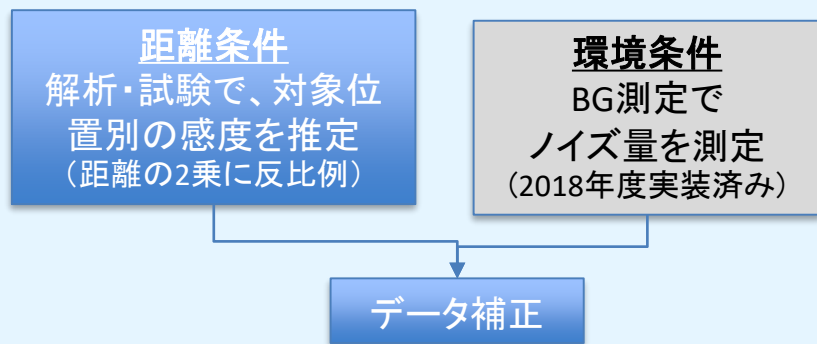


図1 データ補正フロー

#### 2. 複数地点の測定結果の重ね合わせソフトの開発

複数箇所で取得された搭載センサの情報(画像、アルファ線量、距離)を合成するアルゴリズムと、合成したデータを俯瞰して見ることが可能なビューアソフトの開発を行う。

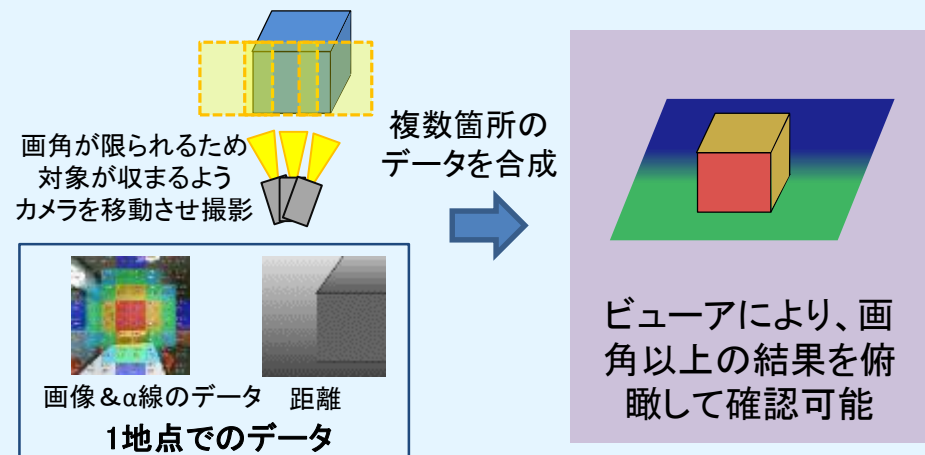


図2 画像の重ね合わせソフトのイメージ



## (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発 ～測定結果のマッピング機能の追加(2/2)～

### ■実施結果

- パン、チルト、台車昇降による異なる位置で撮影されたデータの合成処理について処理フローを検討、試験にて動作することを確認(図1)
- 3次元距離データ(TOFカメラで取得)の特性で想定されたゆがみ対策や、ノイズ、色の補正方法を実装(図2)、試験評価を実施
- 異なる向きで撮影した壁、床、構造物の3Dデータが、目視に近い画質で表現できることを確認

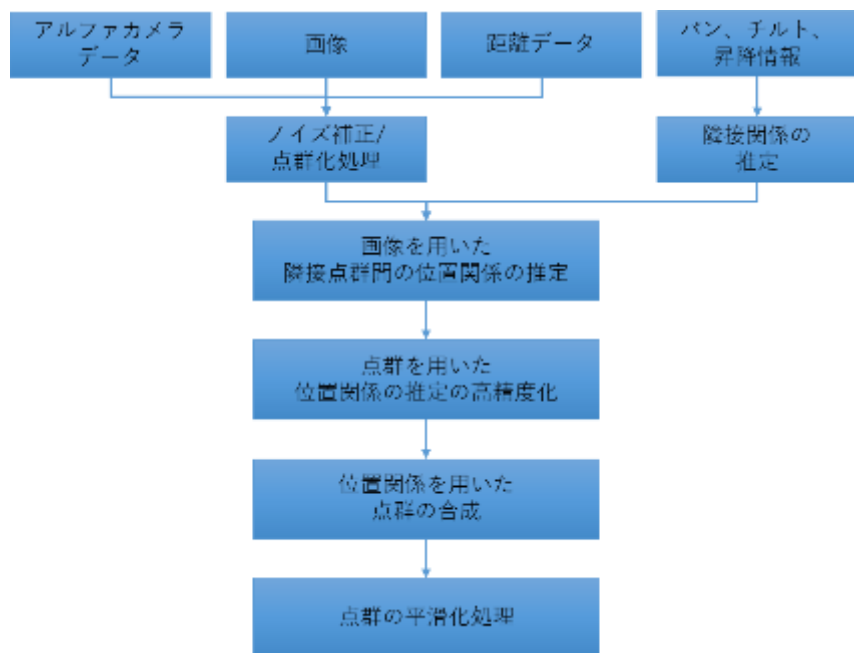


図1 処理フロー

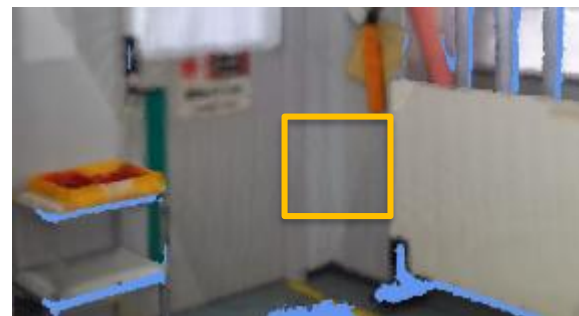
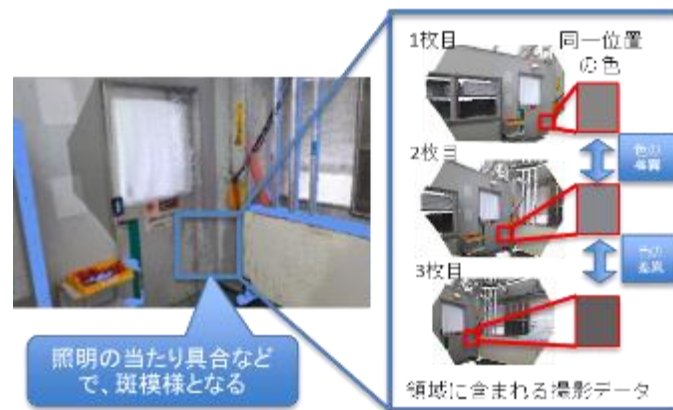


図2 平滑化処理のイメージ

複数地点の測定結果で、色、アルファカメラ計測結果の平均を算出



## (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発 ～現場適用範囲の検討(1/2)～

### ■実施目的

- 2018年度までの要素試験結果に基づき、環境要因に対する特性評価を実施する。
- アルファカメラの仕様(サイズ、重量、測定距離)と、測定対象候補を検討。本条件における最適なシステム設計を行うため、現場適用の範囲を明確にする。

### ■実施内容(概要)

1. 使用場所の検討(オペフロもしくはR/Bの1階や3階)
2. 測定対象の検討

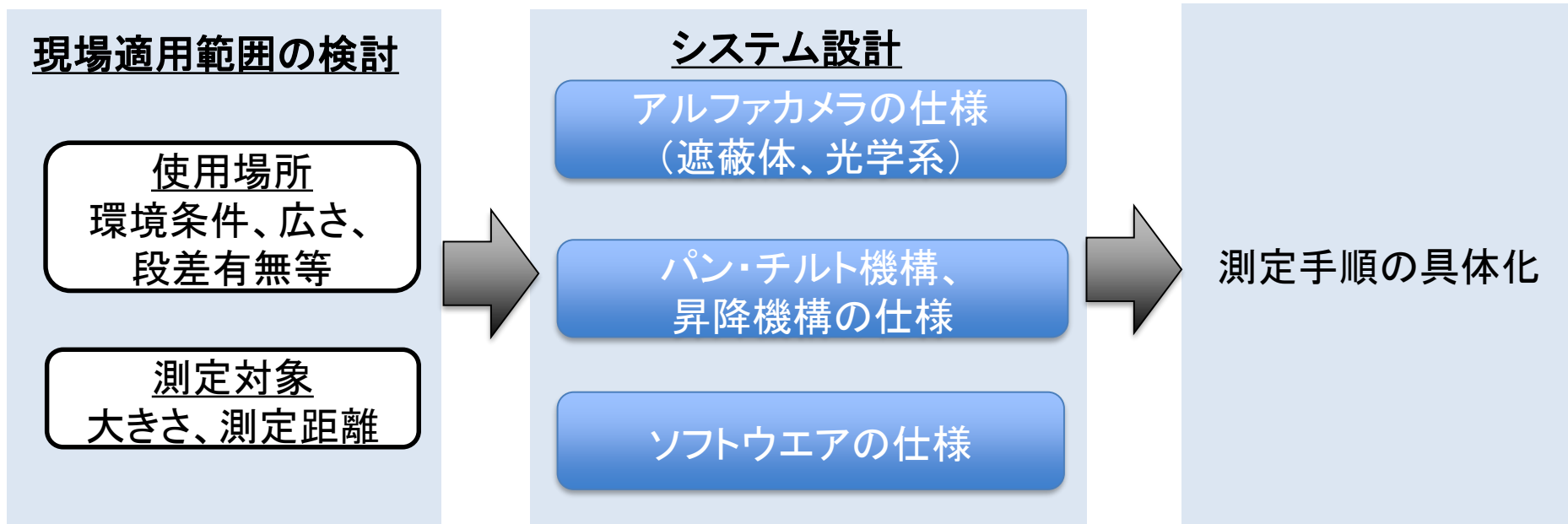


図1 システム設計のながれ

## (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発 ～現場適用範囲の検討(2/2)～

### ■実施結果

- 表面 $\alpha$ 汚染密度測定に関して、ニーズ調査を実施。廃棄物の分別よりも、解体などの工事計画の立案向けに、汚染分布を定性的に把握することによりニーズがあることを確認。
- デブリ取出し関連の工事が発生する可能性が高い、1号機R/Bの3階、2号機、3号機のR/B1階、および2号機R/Bオペフロを使用現場に想定した。
- 分布測定時の装置構成を検討し、装置仕様へフィードバックした。

表1 アルファカメラの適用範囲

項目	適用可能な条件	備考
測定場所の照明状況	暗室 (特に紫外線が存在しない)	・太陽や月などの紫外線が含まれる光の存在下は適用不可 ・紫外線がなければ0.1luxの暗室
測定環境の線量率	最大50mSv/h程度 (検出下限に依存、昨年度の評価結果)	改良した遮蔽体の性能を反映
測定範囲内の $\beta\gamma$ 表面汚染密度	最大100MBq/cm <sup>2</sup> 程度 (検出下限に依存、昨年度の評価結果)	改良アルファカメラの性能を反映
測定対象の材質	コンクリート(無垢、塗装)、金属。 ただし、測定対象が水分を含む場合、感度が低下	改良アルファカメラの性能を反映

# (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発 ～測定システムの仕様検討(1/2)～

## ■実施目的

現場の適用範囲に合わせて測定システムに必要な機能を抽出する。また、現場の適用範囲に基づいて、現場での測定手順を具体化し、システムの仕様を決定する。

## ■実施内容(概要)

- ・アルファカメラの画角情報、測定距離による特性変化を考慮し、測定方法を検討
- ・検討した測定方法に基づき、必要な操作機能を評価

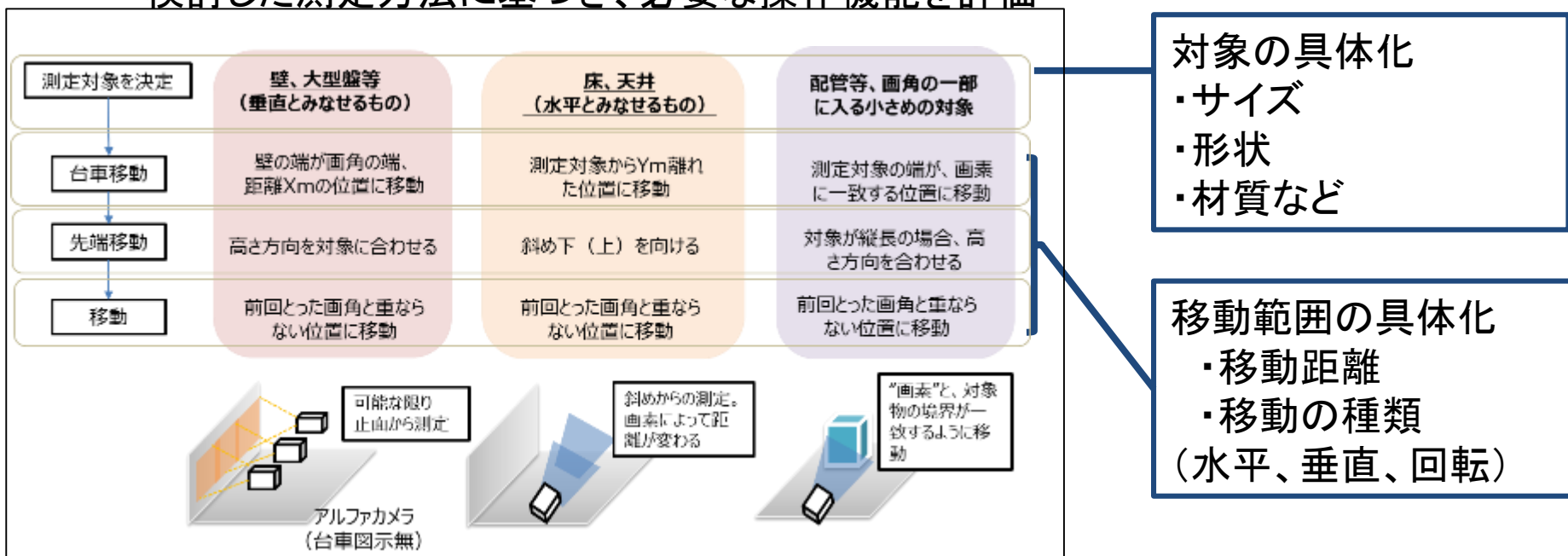


図1 2018年度検討した測定手順

平成29年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業補助金(固体廃棄物の処理処分に関する緩急開発(先行的処理手法及び分析手法に関する研究開発))」 IRIDデザインレビュー(G1#2) “α汚染測定手法に関する調査・開発について”より抜粋

## (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発

### ～測定システムの仕様検討(2/2)～

#### ■実施結果

- ・測定対象との距離が一定になるよう測定する方法を検討(図1)
- ・測定の目的である表面汚染分布を評価するため、床面、壁、天井の測定を想定し、以下の機能が必須、又は持つことが望ましいと判断。どちらの機能も持たせる仕様とすることを決定した。

1) 必須機能 : チルト(上下の首振り)および昇降機能

2) 望ましい機能: パン(水平方向の首振り)機能

#### 床面測定時

なるべく床面を垂直に測定できるように上昇させ、カメラの向きを変えて測定

アルファカメラ



チルト機構で角度を変え、台車を水平移動させて測定

#### 壁面測定時

壁面を垂直に測定できるように高さを変えて測定

※アルファカメラの向きは台車もしくはパンで制御

アルファカメラ

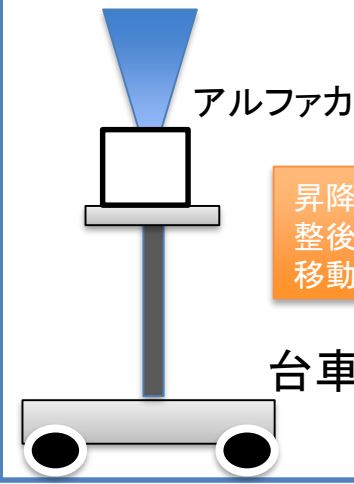


昇降機構で高さを変えて測定

#### 天井測定時

アルファカメラの向きを上向きに取り付け、天井を測定。必要に応じて、昇降させる

アルファカメラ



昇降機構で高さ調整後、台車を水平移動させて測定

図1 昇降、パン・チルト機能を使ったアルファカメラの測定イメージ

# (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発 ～機構仕様、制御方法の検討(1/3)～

## ■実施目的

現場は高線量環境が想定されるため、遠隔操作でアルファカメラの測定場所、向きを制御する必要がある。遮蔽体を含むアルファカメラ(約150kg以上)のパン・チルト、昇降などの機構について、仕様、制御方法を決定する。

## ■実施内容(概要)

- ・アルファカメラをパン・チルト、昇降操作が遠隔から操作できる駆動機構の検討
- ・測定結果のマッピングに必要な測定条件データ(パン、チルト、高さ)を共有するシステムの検討
- ・地震などの緊急時を想定した、アルファカメラの転倒防止策の検討

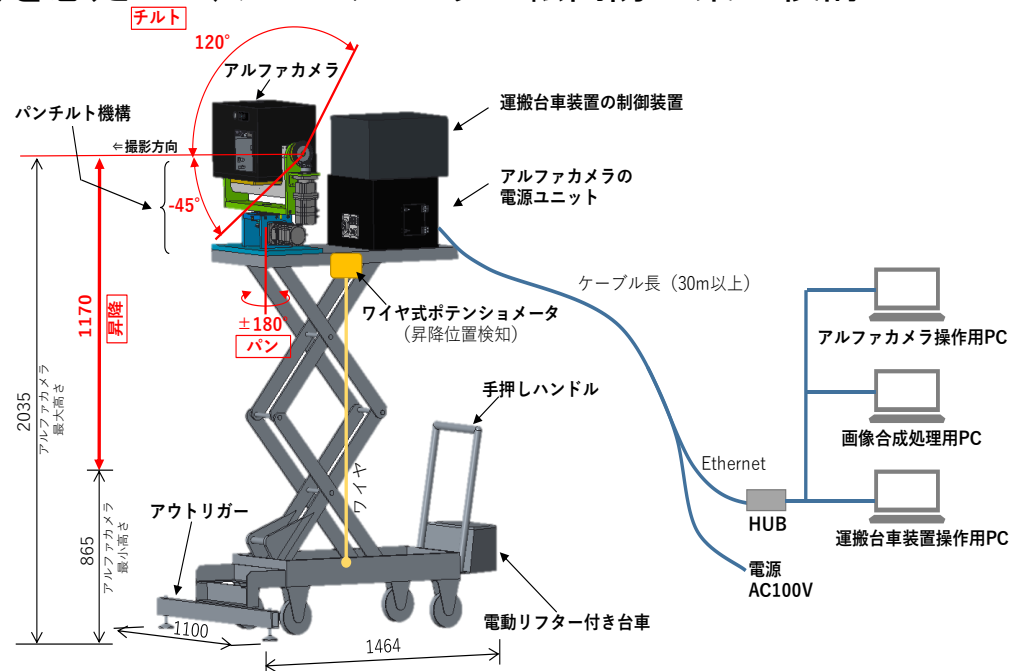


図1 測定システムの構成

# (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発 ～機構仕様、制御方法の検討(2/3)～

## ■実施結果

＜パン・チルトおよび昇降機能付き台車＞

・下方向の測定時に、アルファカメラの視野を台車で遮らない範囲で、パン・チルト、昇降動作で転倒しない位置にアルファカメラを配置。

・パン・チルト、昇降動作を遠隔制御できるシステムを決定(表1参照)

表1 調査システムの仕様

分類	項目	要求仕様	備考
アクセス性	パンチルト 範囲	パン : ±180 [°] チルト : -45～120 [°] (アルファカメラ 搭載時の運用可能なチルト 上限は 90 [°]まで。 試験結果参照)	パン : 正面 0 [°] チルト : 水平 0 [°]
	昇降ストローク	1170 [mm]	
軸位置測定方法	アルファカメラ 高さ	昇降下端時 : 床面から 865 [mm] 昇降上端時 : 床面から 2035 [mm]	カメラ光軸高さ
	パンチルト 角度	モータ搭載レゾルバ	
駆動方式	昇降位置	ワイヤ式ポテンシオメータ	
	パンチルト 軸	ブレーキ付きステップモータ	
制御方式	昇降軸	電動ポンプ駆動油圧 シリンダ	電動リフター 搭載品
	パンチルト 軸	目標角度制御 : JOG 運転 (操作ボタンを押している間動作)	加減速制御
移動性	昇降軸	目標位置制御 : JOG 運転 (操作ボタンを押している間動作)	ON/OFF 制御による一定速度動作
	移動方法	手押し移動	
遠隔操作	転倒防止	昇降動作 でアルファカメラを 高い位置に上げる際にはアウトリガー 取り付け	地震時などの安全対策
	有線/無線	有線 (AC100V 線およびイーサネット)	イーサネットは 現システムでも無線化可能
重量・外形	操作場所	30 [m]以上の遠隔地 から操作用 PC で操作可能	
	通信方式	イーサネット	
重量・外形	重量	パンチルト 機構 : 42 [kg] 制御装置 : 16 [kg] リフター 台車 : 183 [kg]	(各単体重量)
	外形	昇降下端時 : 1100 (W) [mm] × 1464 (L) [mm] × 10 65 (H) [mm] 昇降上端時 : 1100 (W) [mm] × 1464 (L) [mm] × 2235 (H) [mm] (アルファカメラ, アウトリガーを含む)	アウトリガー 無しの場合の幅 (W) は 759 [mm]



図1 パン・チルト機構の外観



# (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発 ～機構仕様、制御方法の検討(3/3)～

## <画像合成試験>

- ・遮蔽体付きのアルファカメラを搭載した状態で、パン・チルト・昇降動作が可能
- ・45条件の測定結果(背景画像、距離データ)を3次元データに合成できることを確認

表1 合成データの測定条件

	昇降量[mm]	パン[°]	チルト[°]	画像取得数
パラメータ	78mm	0,20,40,60,80(5条件)	-20,0,20(3条件)	15
	493mm	0,20,40,60,80(5条件)	-20,0,20(3条件)	15
	883mm	0,20,40,60,80(5条件)	-40,-20,0(3条件)	15

改良アルファカメラ  
(遮蔽体含む)

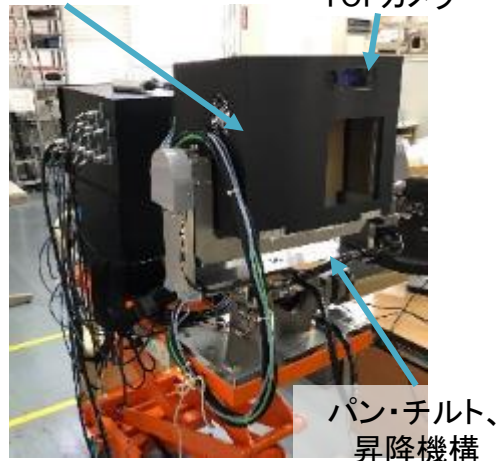


図1 装置写真

TOFカメラ

パン・チルト、  
昇降機構



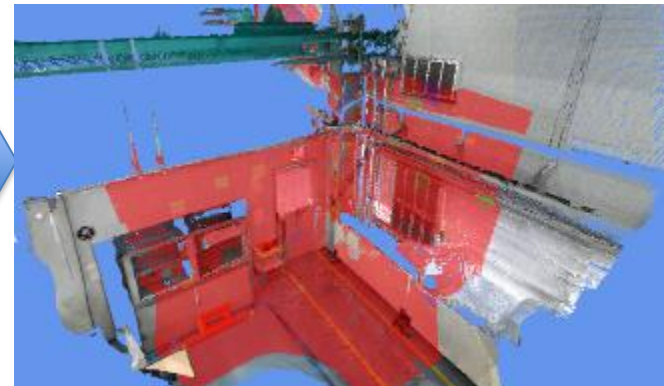
+

+

⋮

合成  
処理

45条件(15×3)  
の画像



水色部: 距離  
データが取得  
できていない  
範囲

赤色部: アル  
ファカメラ測  
定領域

図2 複数の地点で撮影したデータを3次元で合成した例

# (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発 ～測定システムの基礎検証～

## ■実施目的

- ・検討した測定システムの基礎検証として、 $\alpha$  汚染分布を測定し測定システムの課題を抽出する。

## ■実施内容

- ・暗室内に標準  $\alpha$  線源を複数配置した状態で、測定方向(パン角)を変えて測定し、 $\alpha$  汚染分布を評価

(表1、図1)

## ■実施結果

- ・大まかな分布が見えることを確認
- ・ただし、距離データが欠損している線源①は  $\alpha$  汚染分布が表示されなかった(課題)
- ・線源④220Bqは表面密度が低く(2Bq/cm<sup>2</sup>)、かつ、距離が離れているため測定できなかった。

表1 使用したAm-241線源

	放射能	形状
線源①	2.96kBq	100×100mm、平板
線源②	9.4kBq	Φ36mm、円板
線源③	744Bq	100×100mm、平板
線源④	220Bq	100×100mm、平板

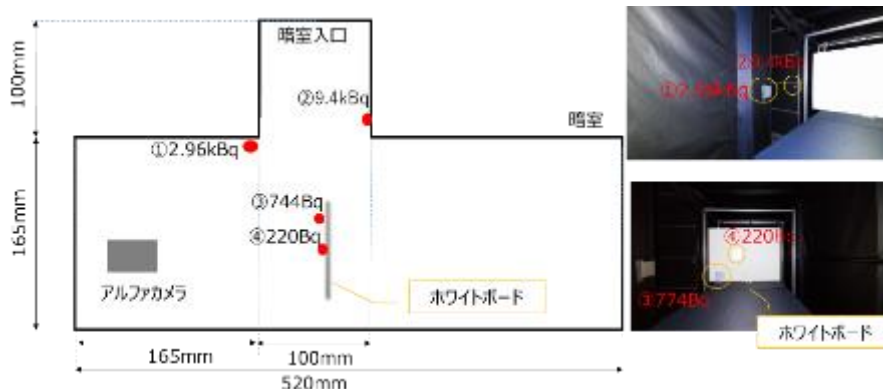


図1 暗室内の線源配置

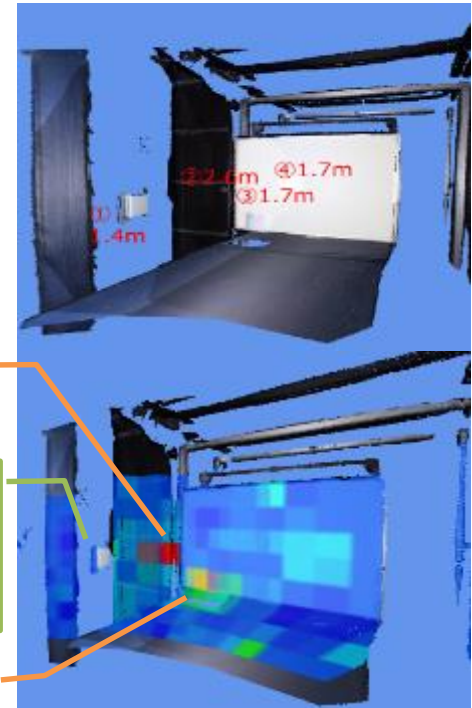


図2 3次元合成結果

## (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発 ～まとめ(1/2)～

### <ゴースト対策確認試験>

- ゴーストピークが発生する要因が、PMTであることを特定し、PMTの改良を実施した。その結果、ゴーストピークが発生しないことを確認

### <試作機改良>

- $\alpha$ 線由来の紫外線を遮らず、遮蔽性能を向上させる遮蔽体構造を設計
- 改良アルファカメラで試験した結果、 $\alpha$ 汚染分布が取得できること、必要な遮蔽性能を得られることを確認

### <要素試験の継続>

- 非密封線源を用いた試験を行い、測定対象の表面粗さ、水分量の評価、線源サイズの影響の確認完了
- 表面粗さが粗い場合や、水分量を含む場合、感度が0.4～6倍程度変わることを確認
- カメラ画像などを併用した、 $\alpha$ 汚染分布の評価方法の検討が必要(課題)

### <ソフトウェアへの機能追加>

- 複数地点の測定結果を合成し、3次元空間にマッピングする機能を開発。
- ただし、測定対象によっては距離データの取得が困難な場所があり、表示が抜ける場所があること、3次元データの作成処理に時間が長いこと(15枚の画像の合成に要した時間が約96分必要)などの課題を確認(課題)

### <測定システムの設計>

- アルファカメラを搭載した状態で、現場での測定に必要なパン、チルト、昇降機能を遠隔地から制御できるシステムの設計を完了

## (b) 固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術開発 ～まとめ(2/2)～

### <2020年度実施計画案>

#### ①測定手順の具体化および測定結果の方法の検討

- ・今年度確認された材料の表面粗さの影響や、3次元モデルへのマッピング時の課題を考慮した、測定方法および測定結果の評価方法を検討する。

#### ②性能評価試験に向けた調査システムの制作、試験準備

- ・性能評価試験に必要な装置の制作および試験に必要な準備を行う。

#### ③性能評価試験

- ・ $\beta\gamma$ 核種の汚染環境に開発手法を適用し、 $\alpha$ 汚染分布の測定性能を確認する。

#### ④開発手法の現地適用性評価

- ・性能評価試験結果をもとに開発手法の適用性を評価する。

## 2. 事業内容

### b. 処理・処分概念の構築と安全評価手法の開発

#### (a) 先行的処理方法の選定手法の構築

- ① 低温処理技術
- ② 処理技術の適用性評価アプローチの検討

#### (b) 処分方法の提示及び安全評価手法の開発

- ① 固体廃棄物の分類に応じた処分方法の検討と安全評価手法の構築に向けた情報の収集・整理
- ② 処分への影響物質等の影響評価手法の開発

## (a) 先行的処理方法の選定手法の構築

### ■ 2018年度までの実績

- 廃棄物特性と処理技術を合わせて評価するための評価軸の洗出しを行い、技術の多角的な評価を可能とする手法（アプローチ）案を示した。
- 低温処理技術（セメント固化、AAM固化）を対象に、洗出しを行う評価軸のうち、固化体特性に関して不足しているデータについて、廃棄物非混合系でのデータ取得を実施した。

### ■ 目標

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

### ■ 実施項目と概要

実施項目		概要	
① 低温処理技術	i. 技術の抽出に資する低温処理技術のデータ取得・評価	(i) 低温処理固化可能性検査手法の検討	固化の可否、条件の設定に用いる検査手法の適用性を評価
		(ii) スラリーに対するセメント、AAM固化体の特性データ取得	模擬固化体を作成し、各種物性測定を行い、特性データを取得する
		(iii) 特殊セメント系の調査	有用な特殊セメントを調査し、Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 制限値などに関するデータ取得試験を行う
	ii. 固化体変質に関する調査	(i) 加熱等による固化体変質の調査	加熱、乾燥等による変質傾向の検討と試験によるデータ取得
		(ii) Cs等インベントリと固化体温度の関係性評価	形状の異なる容器や材質の違いによる固化体の熱条件の変化を明らかにする
		(iii) 長期的な変質に与える影響因子の調査と評価	熱力学平衡計算について、適用範囲の検討および推定
② 処理技術の適用性評価アプローチの検討	i. 廃棄物組成等の固化体性能への影響に関する調査検討	固体廃棄物の組成による固化体性能への影響を検討	
	ii. 各処理技術の設備構成等に関するデータ取得	経済性データを取得し、技術調査表の追加更新	
	iii. 高温処理時のCs揮発量及び抑制に関する調査	Cs揮発と抑制メカニズムを調査	

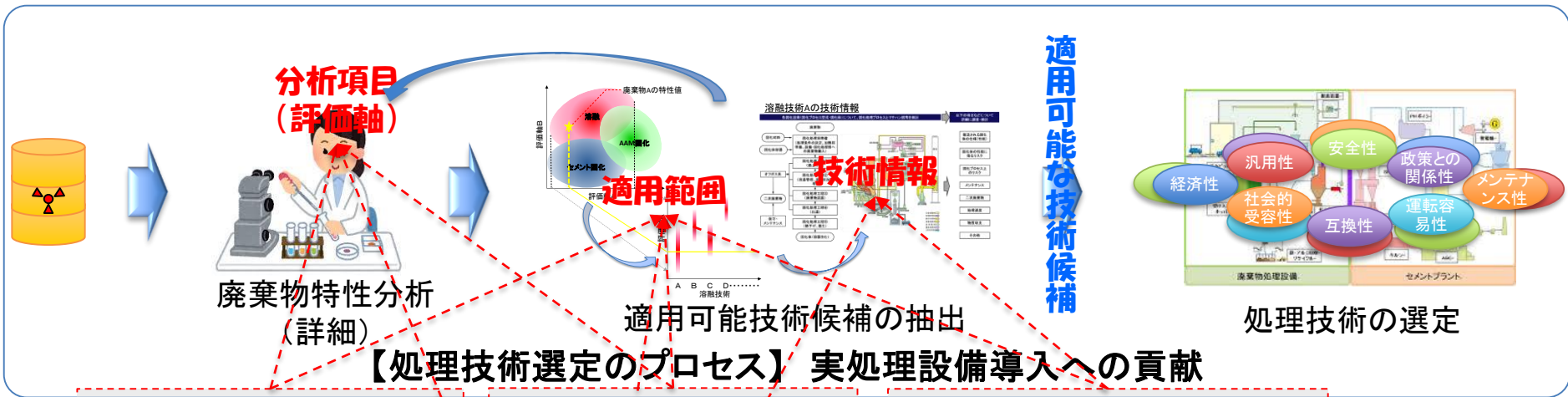


## (a) 先行的処理方法の選定手法の構築

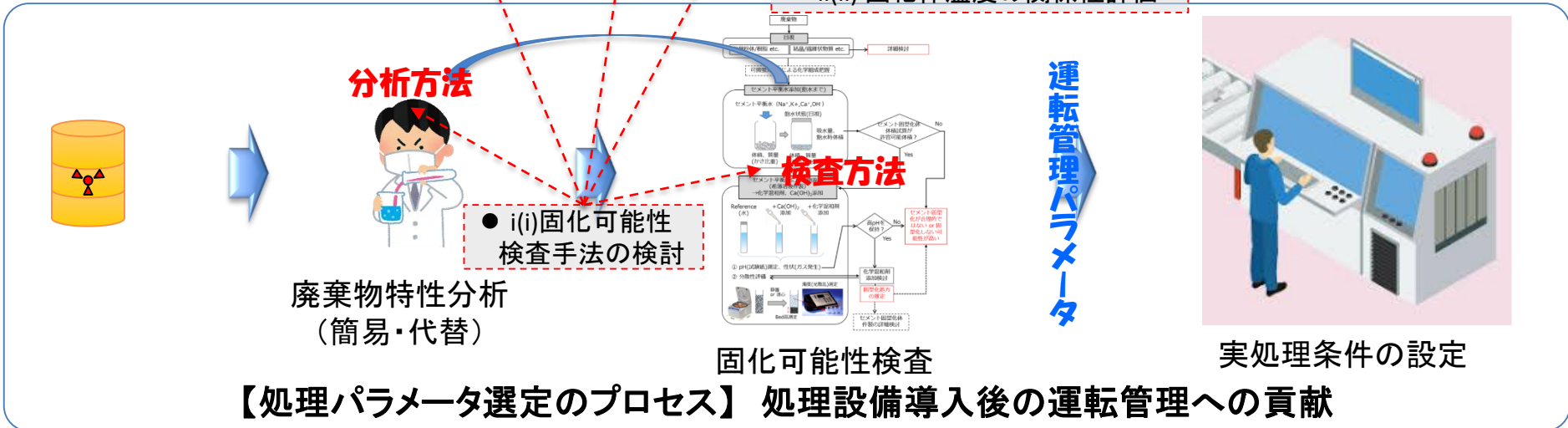
### ■ 実施内容及び目標達成を判断するための指標

実施項目		実施内容	目標達成を判断する指標	
①低温処理	i. データ取得	(i) 検査手法	低温処理固化可能性手法の検討	固化可能かどうかをスクリーニングする手法案を提示
			各種低温固化体の適用可能範囲の抽出	手法の検証を行い、適用可能範囲を抽出
		(ii) 固化体の特性データ	炭酸塩スラリー混合データ取得	模擬炭酸塩スラリー混合時の固化体性能等データを整備
			鉄共沈スラリー混合データ取得	模擬鉄共沈スラリー混合時の固化体性能等データを整備 固化特性に係る適用範囲の提示
		(iii) 特殊セメント系	利用可能性のある特殊セメントの調査	適用範囲が広がる可能性のある候補の抽出と母材特性の把握
			各種低温固化体の適用可能範囲の検討	各種低温固化体の適用可能範囲を抽出
	ii. 固化体変質	(i) 加熱等による固化体変質	加熱/乾燥による性状変化調査と母材特性の変化傾向の検討	母材の性能変化傾向の提示
			特性変化変曲点近傍のデータ取得	性能変化変曲点近傍のデータに基づく適用範囲の提示
		(ii) 固化体温度	解析体系の構築とセメント固化体に対する解析	セメント固化体のインベントリと熱の関係性提示
			AAMを含めた熱解析の実施	固化体のインベントリと熱の関係性、推定到達温度の提示
		(iii) 長期的な変質	熱力学データ収集と熱力学平衡計算の試行	(セメント) 鉱物相変化の推定結果の提示 (AAM) 熱力学データの充足性、平衡計算適用可否の提示
			熱力学平衡計算の適用性評価	相変化への熱力学平衡計算の適用性とその結果の提示
②アプローチ	i. 固化体性能への影響	ガラス化データの収集とガラス特性モデルによる評価	ガラス特性データの収集と国内ガラスデータベースに基づく水処理二次廃棄物の充填濃度の評価結果提示	
		米国ガラスデータベースに基づく評価と低温処理に係る混合可能範囲評価	主な水処理二次廃棄物のガラスへの混合範囲の提示 低温処理は①i、iiのデータに基づく範囲の提示	
	ii. 設備構成等	各処理技術の設備構成等に関するデータ取得	設備構成、処理パラメータ等のデータ提示	
		各処理技術の調査結果の整理	各技術情報の取り纏め結果の提示	
	iii. Cs揮発量及び抑制	Cs揮発抑制に関する知見の整理	Cs揮発抑制に関する知見の整理結果の提示	
		高温処理におけるCs揮発の抑制効果の測定	試験に基づくCs揮発抑制手法の効果の提示	

# (a) 先行的処理方法の選定手法の構築 ～実施内容と反映先～



- 【物性等データ】**
    - i(ii) 固化体の特性データ取得
    - i(iii) 特殊セメント系の調査
  - 【熱影響、長期健全性データ】**
    - ii 固化体変質に関する調査
  - 【プロセス情報等】**
    - ② 適用性評価アプローチの検討
  - 【熱影響、長期健全性データ】**
    - ii(ii) 固化体温度の関係性評価
- (温度条件)



(a) 先行的処理方法の選定手法の構築 ① 低温処理技術  
 i. 技術の抽出に資する低温処理技術のデータ取得・評価  
 【目標】

(i) 低温処理固化可能性検査手法の検討

- 低温処理固化技術のうち、セメント固化とアルカリ活性化材(AAM)固化について、廃棄物の吸水性等の測定を組合せ、事前に固化の可能性を判断する手法(図1)を検討する。

(ii) スラリーに対するセメント、AAM固化体の特性データ取得

- 模擬スラリー(炭酸塩、鉄共沈)の各々を混合した試験体(図2)を作製し、強度や溶出性など分析を行うことで、固化過程の現象理解を深めるとともに、データを取得し提示する。

(iii) 特殊セメント系の調査

- 普通ポルトランドセメント(OPC)に悪影響がある成分を含む特定の廃棄物への適用性を検討するため、必要な特性に特化した特徴を持つ普通ポルトランドセメント以外のセメント系材料(特殊セメント)の調査を行う。

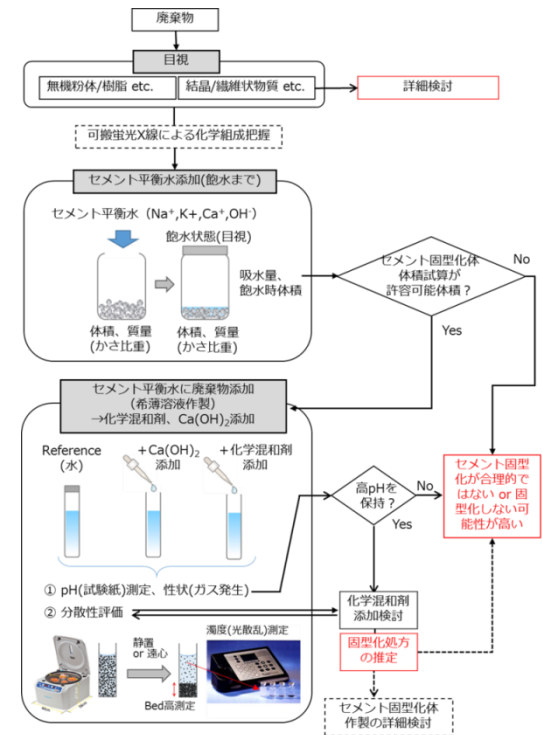


図1 セメント固化スクリーニングフロー例

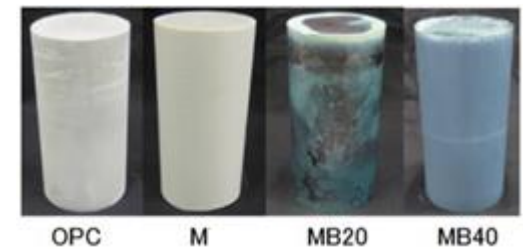


図2 試験体の例

(M:メタカオリン, MB(xx):高炉スラグ(xx)%置換メカオリン)

(a)先行的処理方法の選定手法の構築 ①低温処理技術  
 i. 技術の抽出に資する低温処理技術のデータ取得・評価  
 (i)低温処理固化可能性検査手法の検討  
**【実施内容】**

低温処理固化技術のうち、セメント固化とAAM固化について、廃棄物の吸水性等の測定を組合せ、事前に固化の可能性を判断する手法を検討する。

- 処理中の主な要求性能としては流動性があり、その影響因子としては、廃棄物の含水率や廃棄物の形状などの物理的特性、溶解性や反応性などの化学的特性が寄与
- 固化可能性の検査手法を検討し、運転管理を簡便にすることを目指す
- 整備した判定手法は、アプローチの検討で整理するプロセスフロー等に反映予定



年度	実施内容
2019	<b>低温処理固化可能性手法の検討</b> ・ 吸水率や硬化特性に着目してセメント固化可能かどうかをスクリーニングする手法を検討する
2020	<b>各種低温固化体の適用可能範囲の抽出</b> ・ 固型化体特性に与える影響因子の実験による評価手法の検証を行い、適用可能範囲の抽出を行う

(a) 先行的処理方法の選定手法の構築 ① 低温処理技術  
 i. 技術の抽出に資する低温処理技術のデータ取得・評価  
 (i) 低温処理固化可能性検査手法の検討

【検討の流れ】

【廃棄物の性状測定法(図3左)】

- ① 低温固化に影響する性状を整理し、かさ密度、吸水率、化学反応性など測定したい性状を設定
- ② 検査手法の試行に用いるための、模擬物として、廃棄物に含まれる可能性があり、確認する性状に差が生じると想定される材料の選定
- ③ 農業や土壌など他分野の知見なども含め、①で設定した各々の性状を小型容器で検査する手法の試行
- ④ 上記の各々の性状に関する検査手法を組合せることで、フローを検討

【固化処理時性状の簡便測定方法(図3右)】

- ⑤ 加えて、流動性と圧縮強度について、濁度や超音波伝搬など外部測定で、より簡便に把握する方法等についても検討

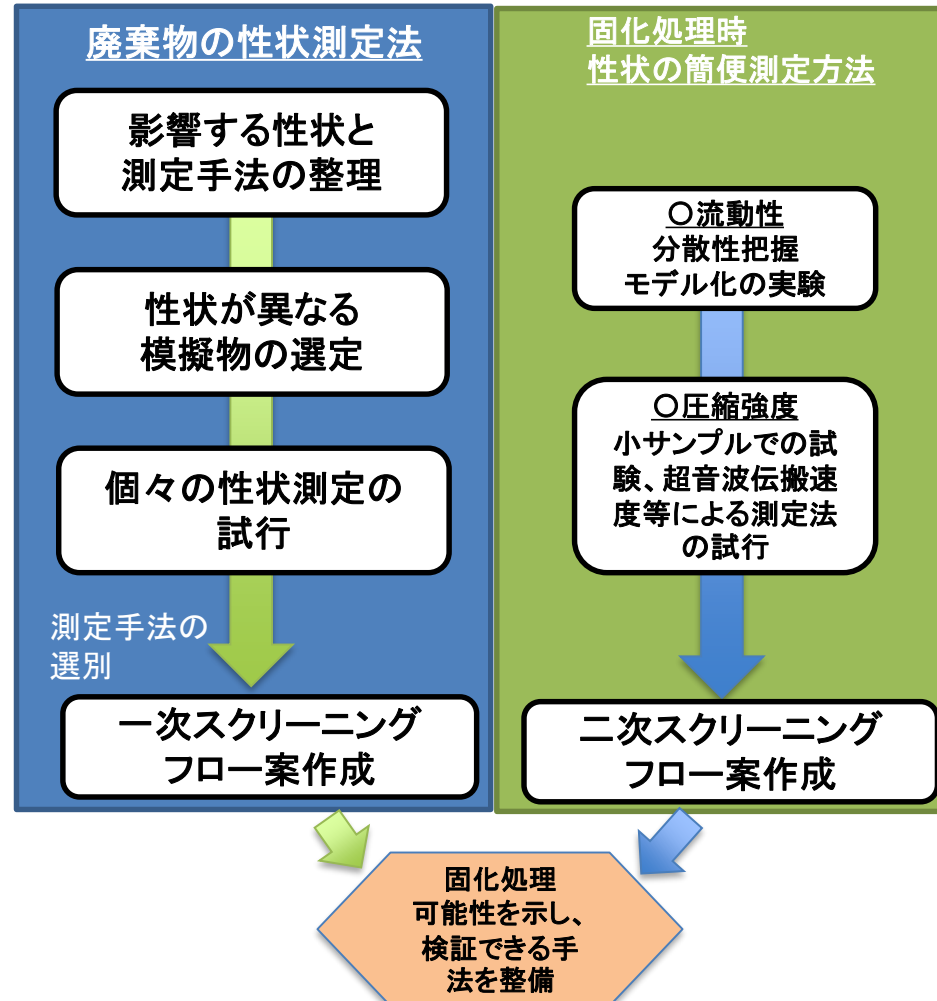


図3 検査手法の検討事項



## 【検討結果】

### ～性状が異なる模擬物の選定～

- これまでの調査や知見から、固化に影響する性状と影響を与える物性の組合せを検討(表1)

表1 低温固化処理可能性を左右する固化体特性と廃棄物性状の関係)

考慮すべき固化体特性		廃棄物の性状														
影響するプロセス	特性	形状・大きさ	粒度分布	密度	かさ密度	含水率	化学組成	線量	液体(混練水等)添加時の性状							
									吸水性	膨潤性	発熱性	ガス発生	分散性	溶解性	液性(pH)	
処理プロセス自体	可使用時間		○				◎		◎	◎	◎		○			
	流動性	◎	◎	○	◎	○	◎	-	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
	均質性	◎	◎	○			○		△	○			◎	◎		
	作業安全性						○	◎				◎	◎			
固化後(固化体)	固化体強度	◎	◎	○			◎	◎		◎	◎		◎		◎	
	寸法安定性	○					○	◎		◎	◎	○	◎			
	固化後変質						○	◎		◎	◎	○	○		○	
	核種固定性							◎		◎	◎					
処理プロセス成立性・固化体性能に多大な悪影響を及ぼす性状							√(他性状で間接的に評価)					√	√	√		√

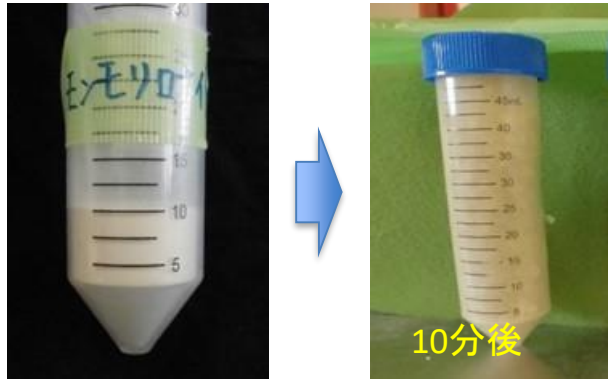
※(凡例の意味)影響度:◎(大)、○(中)、△(小)、-(無し)、空欄(影響が不明なもの)

福一から発生する廃棄物を念頭に、低温固化(セメント、AAM)に影響する性状が異なる  
と想定される模擬物(珪砂、硫酸バリウム等)12種類を選定。

## 【検討結果】

### ～個々の性状測定の実施例～

#### ○吸水性



モンモリロナイト(8g)  
の体積は約10cc

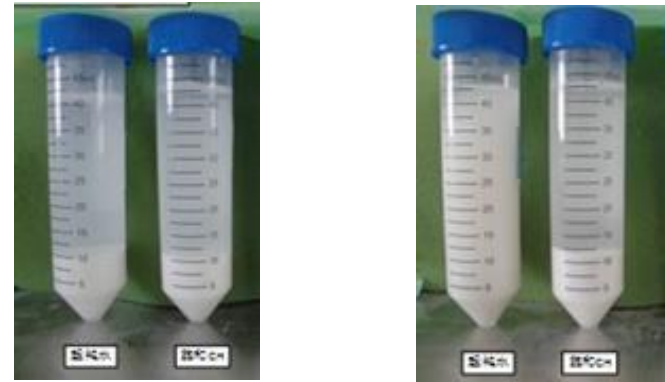
純水40gに添加して  
10分後の状態

図4 吸水性(膨張性)の確認結果(モンモリロナイト)

- 炭酸カルシウム(軽質、重質)、珪石粉末、珪砂、モンモリロナイトの5種の粉末を各々液固比5で2分間混合
- モンモリロナイトだけは吸水し、遠沈管内全体に膨張(図4)  
⇒混練水が減ってしまうとともに、廃棄物自体も膨張  
⇒セメント固化処理できても、充填率はかなり低くなる可能性高

セメント固化処理は不適切と判断できる。

#### ○分散性



炭酸カルシウム  
(重質)180分後

珪石微粉末  
180分後

図5 溶媒の違いによる分散性(かさ密度)の確認結果

- 異なる溶媒を入れて、攪拌し、180分静置。  
左側:純水、右側:セメント混練水を模擬した飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- 均一に分散していた状態から、材料と溶媒の違いにより、分散度合が異なる。
- 炭酸カルシウムは、水でも $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液でも同様の挙動であるが、珪石は $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液よりも純水中の方が分散が継続する。  
⇒このような固体粉末と溶媒の組合せによる挙動の変化が、廃棄物を固化する際の成否や条件調整に影響している。

## 【検討結果】

### ～スクリーニングフロー案の検討(1/2)～

- 個々の性状測定を組合せ、廃棄物の性状測定法となる一次スクリーニング(Step1～5)(表2)と固化処理時性状の簡便測定方法にあたる二次スクリーニング(Step6～7)(表3)から構成される検査手法(案)を構築
- 一次スクリーニングでは、調査した検査手法のうち、小型容器(50mL小型遠沈管)を用い、低温処理固化プロセス成立性や固化体性能に致命的な悪影響を及ぼさない廃棄物であるかを検査

表2 一次スクリーニング(案)

Step	目的 (評価性状)	操作	使用器具	次Stepへの 移行判断基準
1	形状、かさ密度	遠沈管に一定量の試料を投入し、形状や大きさを目視観察した後、20回タッピングし、かさ密度を算出	電子天秤 遠沈管	基準値未定
2	吸水性、膨潤性、混練水添加の影響(発熱性、ガス発生性)	Step1の操作を行った遠沈管に混練水模擬液を滴下し、吸水量、体積変化、ガス発生有無を確認。放射温度計により発熱の有無を確認	ピペット 放射温度計	著しい膨潤、過大なガス発生及び発熱がないこと
3	混練水中での分散性、粒度分布	Step2の操作を行った遠沈管の上部まで混練水模擬液を追加し振とう後、試料の沈降状況を目視で確認(濁度計を使用する方法も考えられる)	振とう器 (濁度計)	基準値未定
4 (セメントのみ)	セメント懸濁系模擬液添加の影響(発熱性、ガス発生性)	Step3の操作を行った遠沈管に水酸化カルシウムを添加し、ガス発生有無を確認。放射温度計により発熱を確認	放射温度計	過大なガス発生と発熱がないこと
5	液性(pH)確認	セメント系はStep4操作後遠沈管、AAM系はStep3操作後遠沈管に対して遠心分離を行い、上澄み液のpHを測定(BTB溶液滴下による目視確認が簡易)	pH試験紙等 BTB溶液	アルカリ性を示すこと

Step5までの操作により、処理プロセスの成立(適用)に致命的となる現象(著しい膨潤、ガス発生、発熱)が生じない廃棄物であることを確認

## 【検討結果】

### ～スクリーニングフロー案の検討(2/2)～

- 二次スクリーニング(表3)では、流動性、圧縮強度を簡易的に評価するが、放射性廃棄物を用いることから、できるだけ小規模(少量)で実施する方法を検討。

#### 圧縮強度

- 2cm角(1 inch cube)程度の小型試験体の強度は、 $\Phi 5 \times 10$ と同様に直線性があり強度の簡易評価に有用。

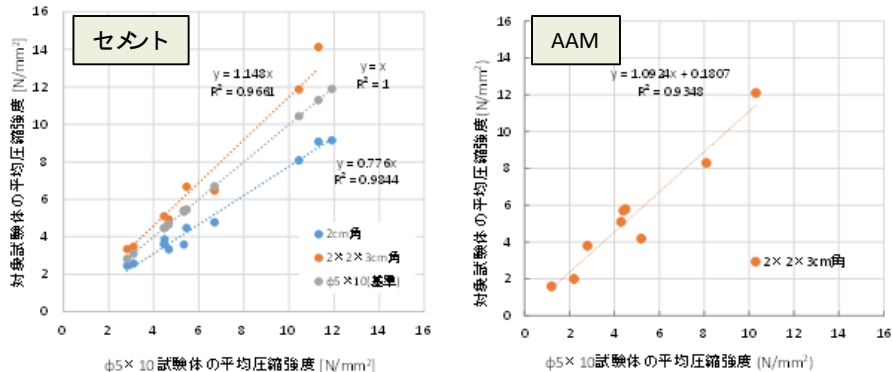


図6  $\Phi 5 \times 10$ と小型試験体の7日圧縮強度の関係

必要試料量  
 $\Phi 5 \times 10$ : 200mL  
 $2 \times 2 \times 3$ : 12mL



内寸2cm角の  
シリコンゴム製の型枠

流動性、圧縮強度ともに、数十mL程度の量で評価できることを確認し、2次スクリーニング案とした。

表3 二次スクリーニング(案)





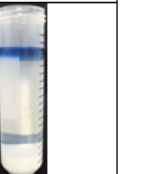
Step	目的 (評価性状)	操作	使用器具	次Stepへの 移行判断基準
6	固化処理時の流動性	小規模(ハンドミキサー等)で試料を混練し、小規模フロー試験によって固化処理時の流動性を評価(配合を変化させて実施)	ハンドミキサー等 小フローコーン	目標フローを満足すること
7	固化処理後の固化体強度、凝結不良(可使時間)	小規模(ハンドミキサー等)で試料を混練し、小型枠に打設し養生した後、材齢7dなど短期材齢で強度を評価。また、凝結不良を評価。	小型型枠 強度試験機	目標強度を満足すること

## 【検討結果】

### ～流動性・圧縮強度の予測手法の検討(2/2)～

いくつかの資材を用いて、検査手法案によるスクリーニングを試行した。



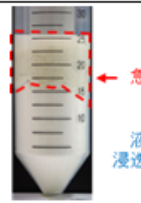
表4 炭酸塩スラリー模擬物(乾燥・粉碎物)による  
一次スクリーニング検証例(セメント系)

Step	1	2	3	4	5
評価性状	形状・大きさ、かさ密度	膨潤性, 吸水性 発熱性, ガス発生	分散性 粒度分布	セメント懸濁 模擬液の影響 (発熱性, ガス発生)	液性 (pH)
操作状況					
条件・操作など	試料 8g	試料 8g 純水 滴下量 10.7cc	純水投入量 (合計) 40cc 振とう終了から 60分後	セメント懸濁 し模擬液添加	振とう, 遠心 分離後, 上澄 みに BIB 滴下
判定	形状粉末状 かさ密度 0.8g/cc	膨潤なし 発熱なし ガス発生なし 補水量: 0.54 cc/g		発熱なし ガス発生なし	アルカリ性 (参考) pH=10.8
次の Step 移行可否	○	○	○	○	○



2次スクリーニングによる検討

表5 硫酸マグネシウムの一次スクリーニング検証結果(AAM系)

Step	1	2	3~5	6
評価性状	形状・大きさ、かさ密度	膨潤性, 吸水性, 発熱性, ガス発生		流動性 可使用時間(凝結)
操作状況				
操作条件など	試料 8g	試料 8g AAM 混練水滴下量 5.7cc		配合: 充填率 40wt%
判定	形状粉末状 かさ密度 0.8g/cc	滴下直後に接水部が急 結・膨潤 激しい発熱(約 60°C) ガス発生なし		混練水滴下直後に接水部が急 結したため, 混練不可 激しい発熱(約 50°C) ガス発生なし
次の Step 移行可否	○	× (急結, 激しい発熱)		× (急結, 激しい発熱)



不適判定

セメント固化、AAM固化の適用性について、一定の判断が可能

加えて、1次スクリーニングで得られる情報から、2次スクリーニングの測定項目である流動性や圧縮強度を推定する検討も合わせて実施した。



(a) 先行的処理方法の選定手法の構築 ①低温処理技術  
i. 技術の抽出に資する低温処理技術のデータ取得・評価  
(i) 低温処理固化可能性検査手法の検討  
【まとめ・次年度計画】

➤ 現在までのまとめ

- 処理の成立性に影響する物性を整理したうえで、特徴をもつ模擬廃棄物を選定
- 50mL容器を用いて、物性を評価する手法を試行し、それを組み合わせることで、スクリーニング手法案を作成
- 模擬廃棄物を用いて、スクリーニングの試行を行い、判断が可能であろうことを確認した。

➤ 次年度計画

- 模擬鉄共沈スラリー乾燥品や新たな模擬廃棄物材料によるスクリーニングフロー(案)の妥当性・利用性の検証
- スクリーニングフロー(案)で得られる情報を用いた流動性、強度推定方法の検討(密度情報に代わる情報の検討、自由水量算出方法の見直し検討など)
- データを定量化するための試行

(a) 先行的処理方法の選定手法の構築 ① 低温処理技術  
 i. 技術の抽出に資する低温処理技術のデータ取得・評価  
 (ii) スラリーに対するセメント、AAM固化体の特性データ取得  
**【目標】**

2種類の模擬スラリー(炭酸塩、鉄共沈)の各々を混合した試験体を作製し、強度や溶出性など分析を行うことで、固化過程の現象理解を深めるとともに、データを取得し提示する。

- 使用する模擬スラリーは、炭酸塩スラリーと鉄共沈スラリーの2種類を、保管時の脱水処理を想定し調整したものを使用する計画とする。
- 2019年度は、炭酸塩スラリーを混合した試験を、2020年度は鉄共沈スラリーを混合した試験を実施しデータを取得する。



- 得られたデータは、OPCおよびAAMの適用範囲の検討(アプローチ検討)に反映させる。  
 ⇒ 評価軸: 固化体性能(浸出率、水素ガス発生等)、運転性(廃棄物含水量、プロセス)など  
 ※2018年度結果から、AAMの流動性を低減し、水分量を低減した配合も検討する予定。

年度	実施内容
2019	スラリーに対するセメント、AAM固化体の特性データ取得 ・炭酸塩スラリーを混合した模擬固化体に関する各種特性データを取得する
2020	スラリーに対するセメント、AAM固化体の特性データ取得 ・鉄共沈スラリーを混合した模擬固化体に関する各種特性データの取得、得られたデータよりOPC、AAMの適用範囲の検討

(a) 先行的処理方法の選定手法の構築 ①低温処理技術  
i. 技術の抽出に資する低温処理技術のデータ取得・評価  
(ii) スラリーに対するセメント、AAM固化体の特性データ取得  
【実施する試験】

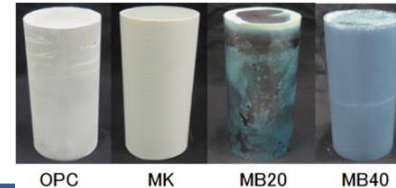
### 模擬スラリー評価



### 固化体の作製条件と硬化特性



・配合を調整し、試験体を製作するとともに、流動性や凝結性の試験を行う。



### 溶出特性

・水に浸漬し、溶出してくる成分を測定。  
粉末を用いる平衡溶出、固体を用いる非平衡溶出を計画



### γ線照射特性

・γ線を照射した場合の特性評価。固体から発生する水素量の測定と固化体の変質の評価に関する情報を取得する。



(a)先行的処理方法の選定手法の構築 ①低温処理技術  
 i. 技術の抽出に資する低温処理技術のデータ取得・評価  
 (ii)スラリーに対するセメント、AAM固化体の特性データ取得  
**【試験項目とパラメータ】**

		パラメーター	配合選定	漏斗またはフロー試験	粘性試験	ビーカー針試験	強度試験	MIP	XRD	TG/DTA	EPMA	SEM/EDS	液相分析	NMR	水素ガス測定	XRF	粒度分布		
模擬スラリー評価		炭酸塩スラリー 鉄共沈スラリー							● ●	● ●						● ●	● ●		
固化体作製条件検討		M MB20 MB40 OPC	● ● ● ●																
硬化特性	流動性	M MB20 MB40 OPC		● ● ● ●	● ● ● ●														
	固化時間	M MB20 MB40 OPC				● ● ● ●													
固化体特性	圧縮強度	養生期間（日）																	
		3					●	●											
		7						●	●										
		28						●	●										
		91						●	●										
		長期材齢1 長期材齢2						● ●	● ●										
	溶出特性	平衡溶解性	液固比：5水準																
			10						●	●			●						
			100							●	●			●	●				
			500							●	●			●					
			1000							●	●			●	●				
		2000							●	●			●						
	非平衡溶出性	浸漬期間（週）																	
1							●	●		●	●	●							
4 13							● ●	● ●		● ●	● ●	● ●							
γ線照射特性 (水素発生等)	線強度																		
	積算線量1						●		●	●						●			
	積算線量2 積算線量3						● ●		● ●	● ●						● ●			

・硬化特性、固化体特性の各種試験は、配合選定で決定した代表配合にて実施

## 【検討結果】

### ～模擬廃棄物(炭酸塩スラリー)の製作～

- 試験に利用する模擬スラリー脱水物(320kg)は、フィルタプレス試験時の配合条件(表1)と同一とした。
- 実廃棄物の保管状況を勘案し、福一の現場で適用が予定されているフィルタプレス機による圧搾を行ったもの(図1)を使用した。

表1 炭酸塩スラリーの配合条件 (1m<sup>3</sup>当たり)

	品名	添加量(kg)	備考
A	塩化ナトリウム	28.5	海水成分
B	塩化マグネシウム6水和物	180	海水成分
C	塩化カルシウム2水和物	79.5	海水成分
D	硫酸マグネシウム7水和物	6.82	海水成分
E	炭酸ナトリウム	152	
F	48%水酸化ナトリウム	130	pH12になるよう添加



図1 圧搾前のスラリー(左)と圧搾後のスラリー(右)

#### 試験時に得られた実用知見



脱水処理用の濾布を新品に交換したところ、洗浄時に泡立ちが発生。

実機でも生じる可能性。



洗浄廃液を用いた予察試験を行い、固化への明らかな影響が無いことを確認。



## 【検討結果】

### ～模擬廃棄物の混合方法の検討～

#### ➤ 脱水物の性状

- 手で強く押すと変形する紙粘土のような状態であり、流動性はない(図2)  
⇒そのまま混練すると均一化されない(図3)
- 脱水物の水/固体比は約0.47  
⇒脱水物の状態で混合するには追加で水を投入する必要があるが、余剰水が生じる可能性あり。



図2 脱水物の外観



図3 脱水物をそのまま混練した状況

#### ➤ 模擬廃棄物の混合方法

本研究では、固化時の特性や固化材料と廃棄物の反応など、処理技術間で評価軸となりうる基礎的なデータを取得することが目的であることから、特性データの取得が可能な、スラリー粒子と固化材粒子を均一に混合した試験とした。



図4 乾燥中の様子



図5 乾燥後粉碎・ふるいがけしたもの

乾燥(105°C、24h)後(図4)  
粉碎、粉碎・ふるいがけしたもの(図5)を  
固型化材料の粉体と事前に混合。

検討の結果、余剰水を生じず混練可能な流動性を確保するため、脱水物を乾燥粉体にして混合することで、均一な固化試料を作製することとした。

## 【検討結果】

～混合方法の検討を受けて実機導入に向け新たに認識された課題～

- スラリー脱水物の低温固化処理の実施に当たり、均一固化体とするか充填固化体とするか、その方策により処理工程・設備、廃棄物充填量などが大幅に変わるため、早期にその方針の決定が必要
- 充填固化体とする場合で、固化体に一定の強度が求められる場合には、別途圧搾物自体の強度並びに充填量をパラメータとした試験による強度確認が必要
- 均一固化体とする場合には、圧搾後のスラリーの再流動化など適切な前処理方法の検討が必要
- なお、圧搾体の保管状況によっては、含有放射能の崩壊熱による乾燥や、積層による圧縮により、圧搾体の乾燥、圧密化の進行が想定されるため、それを考慮した上記検討が必要

## 【検討結果】

### ～セメント固化体の作製条件：配合調整の評価試験方法と基準～

- 配合を決定するための評価基準を以下の通り設定

	流動性	凝結性	圧縮強度
試験方法	<b>J14漏斗流下時間</b> (JSCE-F-514 充填モルタルの 流動性試験 方法) 	<b>始発時間</b> (JIS R 5201 セメントの 物理試験 方法) 	<b>圧縮強度</b> (JIS R 5201 セメントの 物理試験 方法)  Φ5×10cm 20℃密閉養生
評価基準	J14漏斗流下時間 =2～4秒	急結を生じず、且つ24時間以内でブリーディングを生じず硬化	1.47 N/mm <sup>2</sup> 以上 (材齢28日)

#### 充填率の定義

$$\text{充填率(wt\%)} = \frac{\text{母材粉体} + \text{母材液体} + \text{廃棄物}}{\text{母材粉体} + \text{母材液体} + \text{廃棄物}} \times 100$$

充填率30wt% 水/固体比45wt% (水セメント比wt80%)	水 31wt%	セメント 39wt%	炭酸塩乾燥粉碎品 30wt%
充填率50wt% 水/固体比45wt% (水セメント比164wt%)	水 31wt%	セメント 19wt%	炭酸塩乾燥粉碎品 50wt%

※水/固体比を一定とした場合、充填率の増大に伴い、セメントやAAM用粉体の割合が減少

## 【検討結果】 ～セメント固化体の作製条件(1/2)～

2018年度事業にて検討したセメント固化体配合(水セメント比:W/C=45wt%)に模擬廃棄物を充填すると、流動性が大きく低下し、混練不可あるいは流動性のない混練物が得られる可能性がある。そのため、W/Cを高めた配合で、模擬廃棄物の充填率を変化させ、流動性、翌日硬化性(ブリーディング有無含む)、圧縮強度の特性データを取得し、設定した評価基準を満たす配合を抽出した。

### 検討配合

- W/Cを3水準(100、150、200wt%)設定し、模擬廃棄物の充填率を変えて各物性を取得。

表2 検討配合

W/C	模擬廃棄物充填率(%)									備考
	0	15	20	25	30	35	40	45	50	
100	—	●	●	●	●	—	●	—	—	
150	—	—	●	—	●	●	●	—	●	
200	—	—	●	—	●	●	●	●	●	
45	●	—	—	—	—	—	—	—	—	2018年度配合

「—」: 未実施、「●」: 物性取得を実施

強度発現は極僅かであるか、固化しない可能性があるため実施せず

流動性得られず

### 流動性

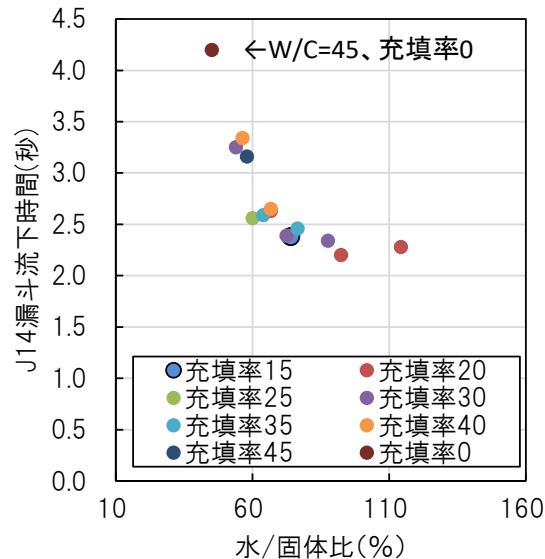


図6 水/固体比と流下時間の関係

- 漏斗試験を行える流動性を得られた水準について、水/固体比と流下時間の関係を整理すると、水/固体比の減少に伴い流下時間は増加
- 漏斗試験を行えた配合は、全て評価基準範囲内であった。

※水/固体比 = 水重量 / (セメント重量 + 廃棄物乾燥重量)

## 【検討結果】

### ～セメント固化体の作製条件(2/2)～

#### 圧縮強度

- 模擬廃棄物を充填すると強度は大きく低下
- 水/固体比の増加に伴い強度は低下
- 充填率増加に伴い強度は低下
- 充填率増加に伴う強度低下は、単位容積中のセメント量が減少するためと推察

#### 凝結性

- W/C=150と200の充填率20wt%の配合では、翌日にブリーディングあり
- 他の配合では、翌日にブリーディングがなく表面は硬化

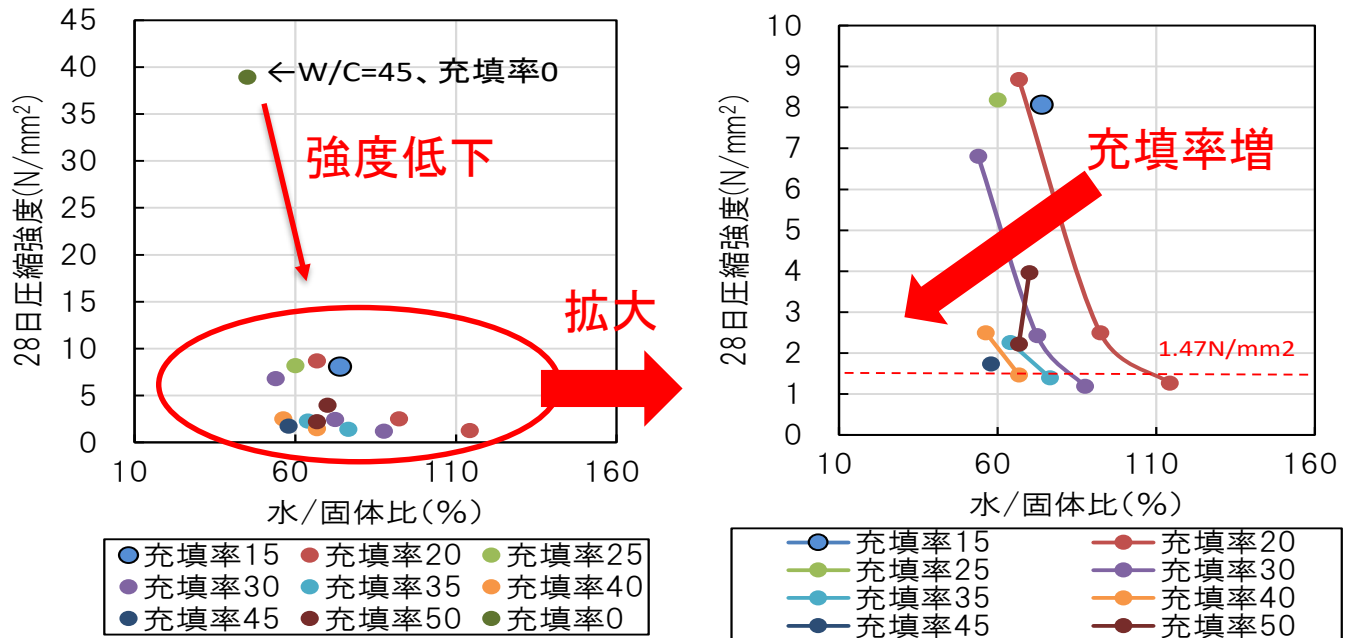


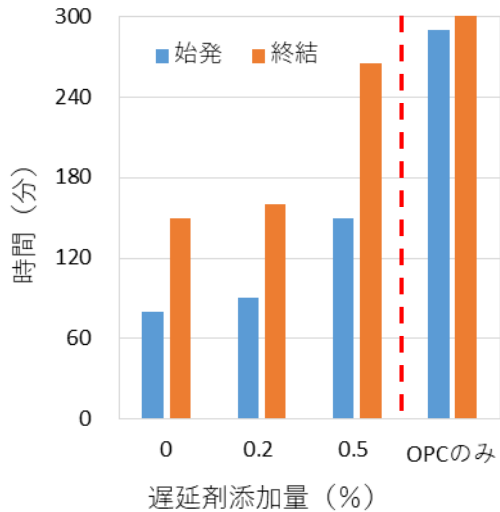
図7 水/固体比と圧縮強度の関係

評価基準を満たす配合の中から、各物性の変動なども考慮し、  
**「W/C=100、廃棄物充填率30wt%」** の配合を選定

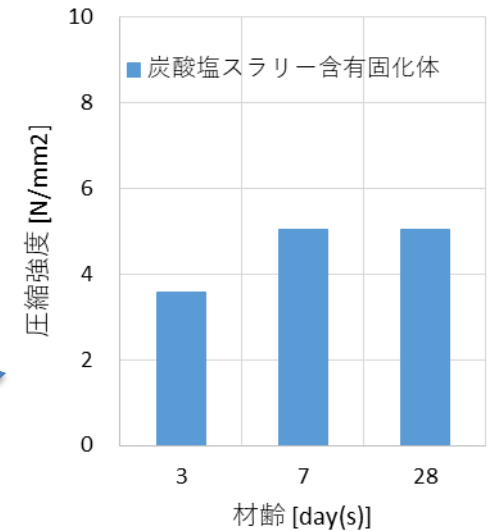
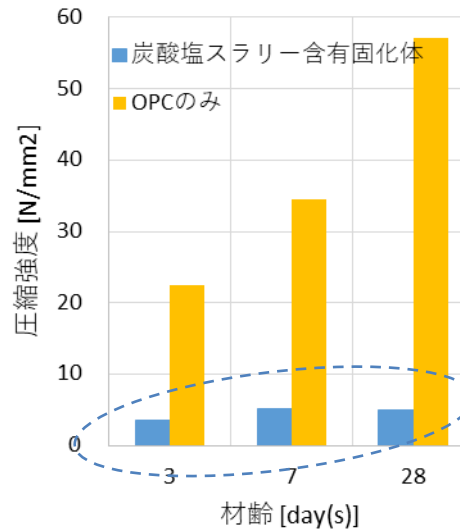


# 【検討結果】 ～固化時間、圧縮強度～

固化時間



圧縮強度



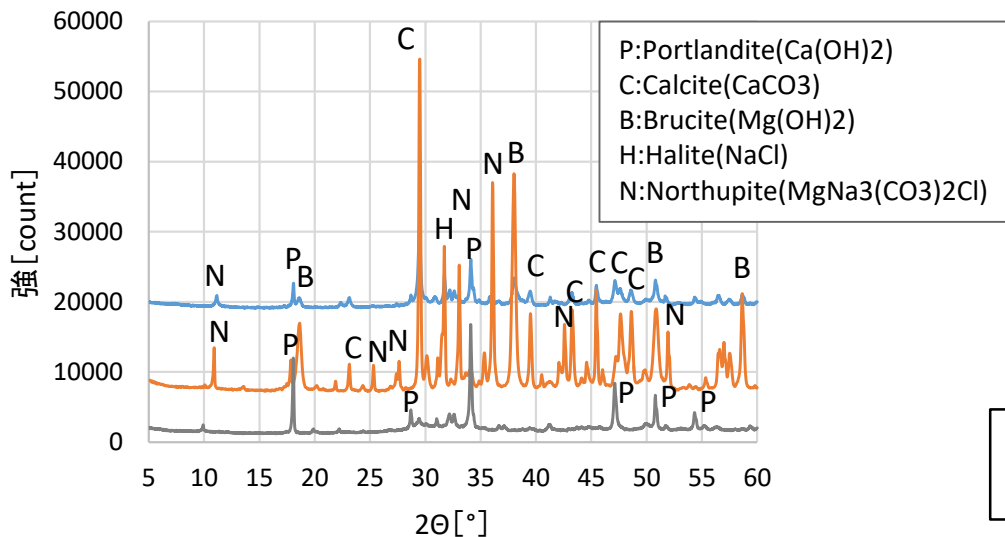
炭酸塩スラリー含有セメント固化体 (30wt%) の始発、終結はOPCのみと比べ早い、遅延剤の併用により始発、終結時間を調整可能

遅延剤: フローリックT(コンクリート用超遅延剤)

炭酸塩スラリー含有セメント固化体は、OPC母材のみに比べて強度は大きく低下。  
材齢7日と28日の強度は、ほぼ同等であり、強度増進なし

# 【検討結果】 ～XRD、TG/DTA～

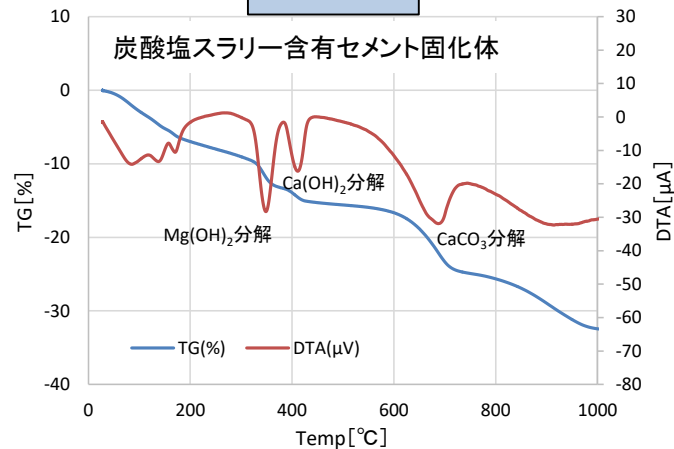
## 鉱物の定性



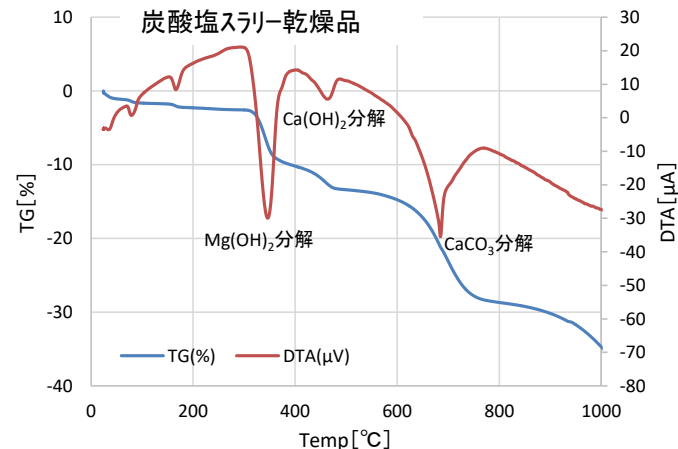
— OPC固化体  
 — 炭酸塩スラリー乾燥品  
 — 炭酸塩スラリー含有セメント固化体

炭酸塩スラリー含有セメント固化体からは、OPC固化体や炭酸塩スラリーを構成する鉱物などを確認

## TG/DTA



炭酸塩スラリー含有セメント固化体の50～1000℃の質量減少率は、約32%



## 【検討結果】

### ～AAM固化体の作製条件(配合の基礎条件)～

- 固化体基礎特性である流動性・凝結性・圧縮強度の評価基準を満たす配合を代表配合として抽出することを目的とし、AAMの配合調整を検討
- 具体的には、2018年度事業にて抽出した「AAM母材固化体を配合設計する上での設計指標(水/全粉体比、母材Na/Siモル比)」および「廃棄物充填率」を変化させ、流動性・凝結性・圧縮強度を評価

種類	MK /母材粉体 [wt%]	BFS /母材粉体 [wt%]	母材中 Si/Alモル比 [mol/mol]	廃棄物 充填率 [wt%]	水/固体比 [wt%]	母材中 Na/Siモル比 [mol/mol]
M	100	0	1.8	0	150	0.84
MB20	80	20	1.8	0	110	0.50
MB40	60	40	1.8	0	100	0.63
M	100	0	1.8	30, 40, 50.	変化させ, 配合影響 検証	変化させ, 配合影響 検証
MB20	80	20	1.8			
MB40	60	40	1.8			

2018年度

2019年度

M:  
メタカオリン

BFS:  
高炉スラグ微粉末

固体 = 母材粉体 + 廃棄物固相

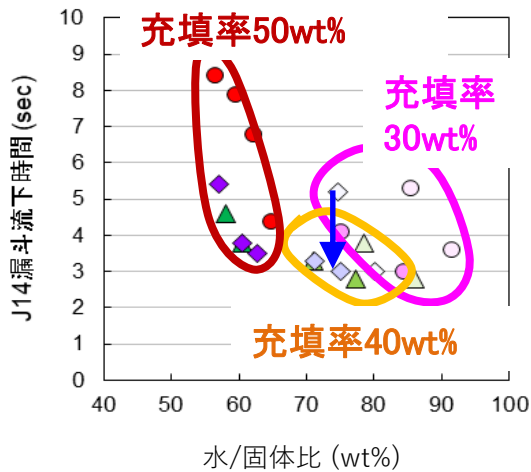
M: メタカオリンのみ、MB20: メタカオリンの20wt%を高炉スラグに置換、MB40: メタカオリンの40wt%高炉スラグに置換

## 【検討結果】

～AAM固化体の作製条件: 固化体特性の配合による変化～

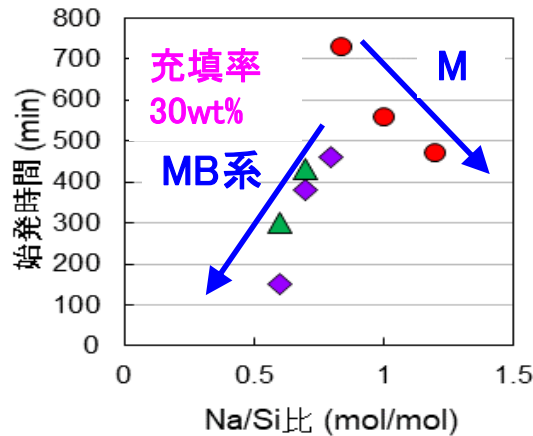
凡例: ● M    ▲ MB20    ◆ MB40

### 流動性



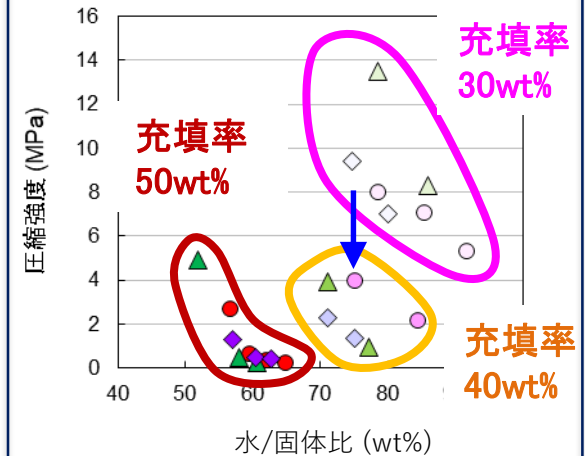
- 充填率の増大(水/固体比一定)⇒流動性向上
- 水/固体比増大(充填率一定)⇒流動性向上

### 凝結性



- 母材Na/Siモル比により, 粉体種類ごとに異なる変化(母材と同じ傾向、充填率影響は微小)
- 水/固体比増大⇒凝結遅延

### 圧縮強度



- 水/固体比、充填率の増大⇒強度低下
- 高炉スラグ置換系: Na/Siモル比の低下⇒強度低下

(AAM配合特性)

- 水/固体比を増大させると、流動性は確保されるが強度は低下。
- 充填率を上げる(水/固体比一定の場合)と、流動性は増大するが、強度は低下。
- 凝結性は、Na/Siモル比に強く影響される。スラグを含むか含まないかにより、影響が逆転。

⇒配合による変化傾向が特性毎に異なるため、各特性を満たす配合の抽出が重要

## 【検討結果】

～AAM固化体の作製条件: 評価基準を満たす配合の選定～

流動性・凝結性の評価基準を満たす配合における圧縮強度

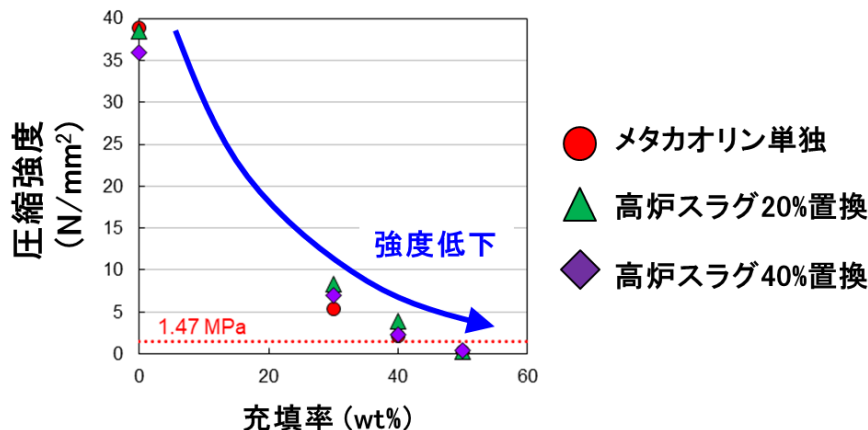


図8 炭酸塩スラリー乾燥品の充填率と圧縮強度

評価基準を満たす配合の中から、各物性の変動なども考慮し、以下の配合を抽出



種類	廃棄物充填率 [wt%]	水/固体比 [wt%]	母材中 Na/Siモル比 [mol/mol]	J14漏斗 流下時間 [sec]	凝結		28日 圧縮強度 [N/mm2]
					始発[min]	24h後	
M	30	92	1.2	3.6	470	終結	5.3
MB20	30	86	0.7	2.8	430	終結	8.3
MB40	30	80	0.8	3.0	460	終結	7.0

AAMもセメント同様、「廃棄物充填率30wt%」の配合を選定



## 【検討結果】

### ～データの取得:硬化特性～

#### ○硬化性(粘性変化)

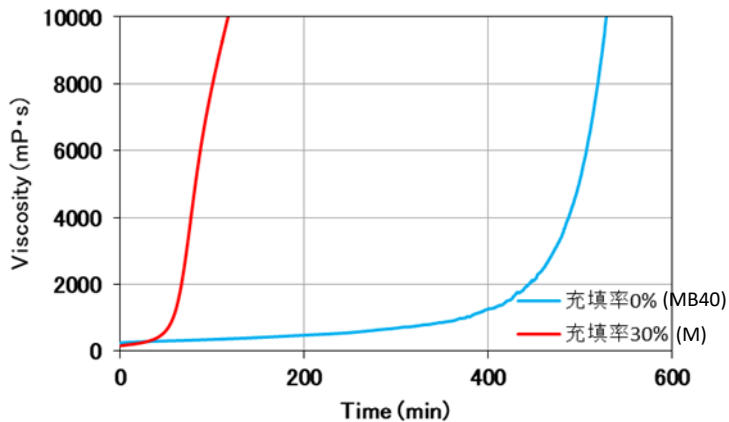


図9 AAM固化体の硬化中の粘性と廃棄物充填率の影響

スラリーを30wt%含むと

- ・初期の粘性は同様の値
- ・粘性が高くなり始める時間が早くなる傾向
- ・粘性増加の傾き(時間変化のグラフ形状)が緩く変化

処理運転時に影響する物性に複雑な変化が生じていることも明らかになった。

#### ○照射試験(硬化中)

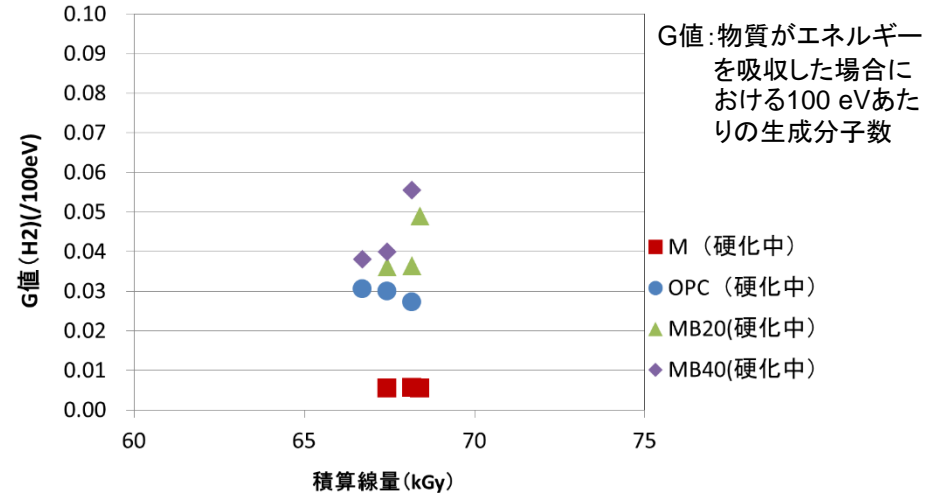


図10 硬化中におけるG値

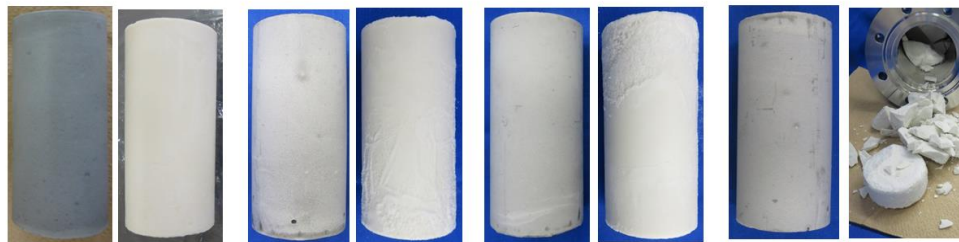
- ・ 混練直後のペーストにγ線照射を行い、硬化進行中の水素発生挙動を調査した。
- ・ 硬化中のG値は、 $M < OPC < MB20 < MB40$ の順に大きい値。
- ・ 固化体切断を行い、内部への気泡状態の分析を継続している。

その他、溶出試験、照射試験(模擬固化体)等データの取得を継続している。

# 【検討結果】 ～データの取得:γ線照射特性～

表3 照射条件

試験内容	固化体母材へのγ線照射試験 (2018年度事業)	模擬スラリー含有固化体への γ線照射試験(本事業)
試験場	高崎量子応用研究所	
供試体	OPC、M、MB20、MB40 (母材のみ) 養生期間：28日間	OPC、M (模擬炭酸塩スラリー30wt%含有) 養生期間：28日間
照射条件	固定照射(線源に対して照射容器を固定)	
線源	Co-60	
線量率	約1.8～5kGy/h	
積算線量(計画)	3kGy、10kGy、30kGy	



OPC M OPC M OPC M OPC M  
照射前 3kGy照射後 10kGy照射後 30kGy照射後

図11 模擬スラリー含有固化体の照射前後の外観

OPCはいずれの積算線量でも照射前後の外観変化はほとんど見られず。Mは積算線量3kG、10kGyの照射では変化が見られなかったが、30kGy照射後の固化体は照射容器内で脆く崩れており、元の形状を保っていなかった。

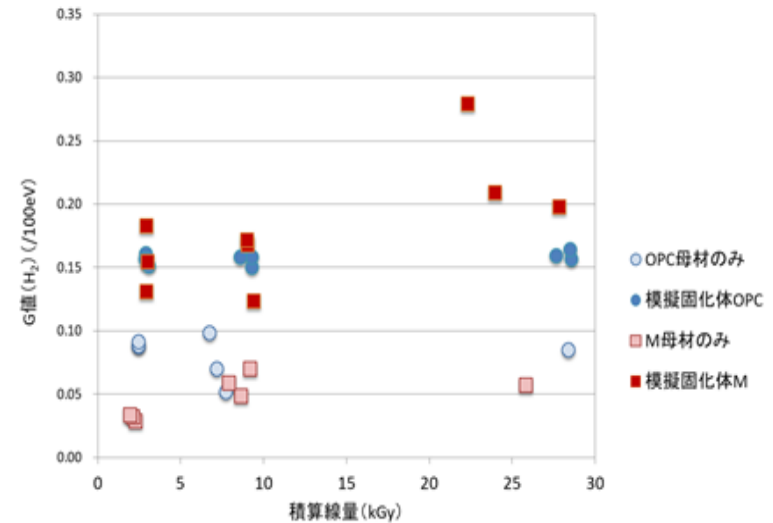


図12 積算線量に対する水素ガスのG値

炭酸塩スラリー含有固化体の水素ガスのG値を2018年度事業で実施した母材のみへの照射試験の結果と比較すると、OPC、Mともに母材に対してスラリー含有固化体の方がG値が高くなる傾向がみられた。

- ・炭酸塩スラリー含有固化体(MB20、MB40)についても同様に照射試験を実施済み。照射後の割れ等は発生していない。
- ・現在、水素ガス等の分析を実施している。

## 【検討結果】

～データの取得:γ線照射特性、溶解試験～

### 照射試験後の圧縮強度

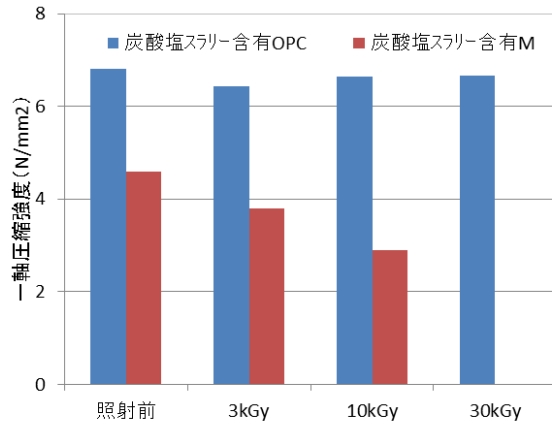


図13 照射試験前後の圧縮強度

炭酸塩スラリー含有固化体の圧縮強度

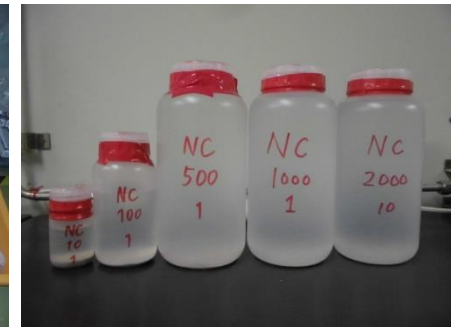
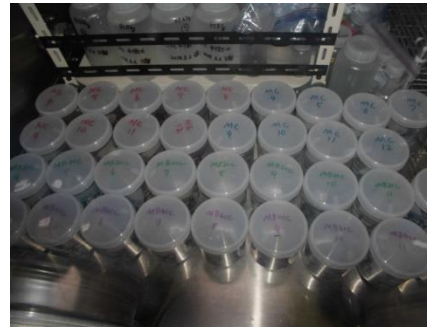
- OPCは、照射前後で強度に変化無し。
- Mは、照射により脆く崩れた30kGy以外でも、照射により若干の強度低下が生じた。但し、強度基準(1.47N/mm<sup>2</sup>)以上ではあった。

(データ取得中の項目)

- 溶解試験継続(固化体の溶解性などを含む各種特性確認)
- γ線照射後の水分(TG/DTA)、鉱物相(XRD)の確認など
- 模擬核種浸出性確認

### 溶解試験

現在実施中

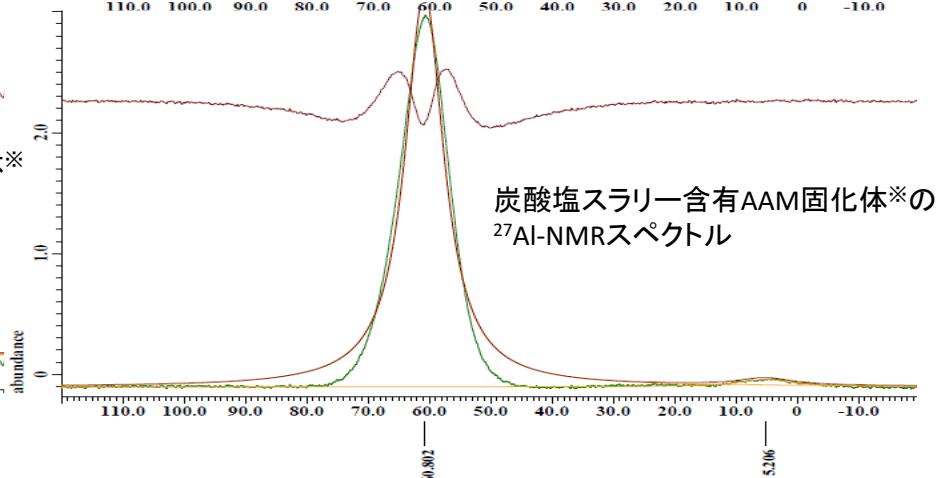
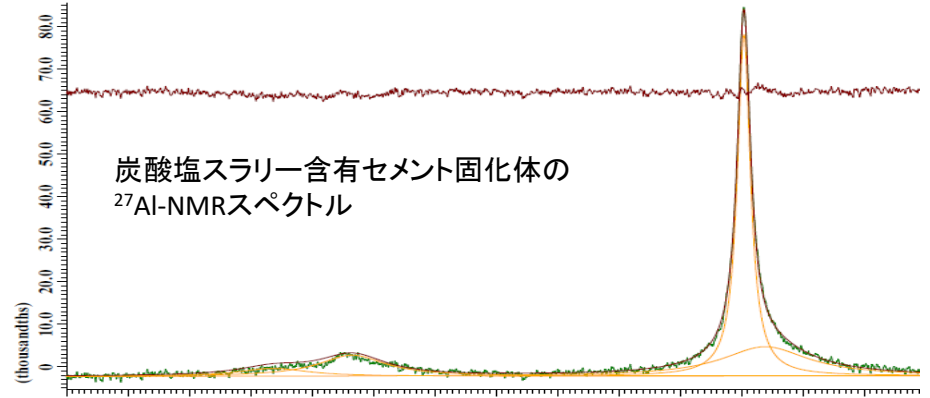
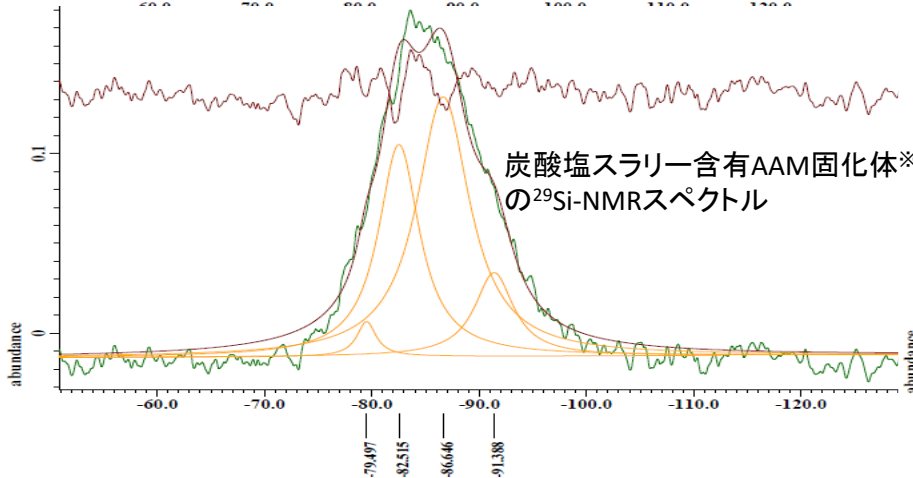
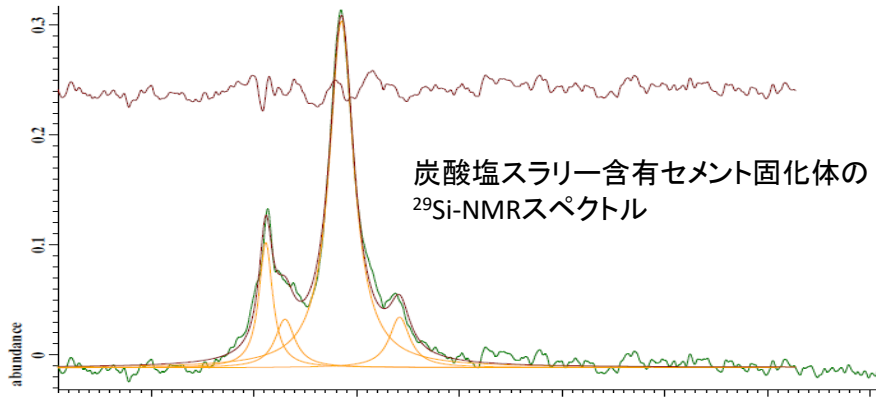


# 【検討結果】

## ～炭酸塩スラリー含有含有固化体のNMR～

NMR

セメント固化体、AAM固化体(3種)初期試料の<sup>29</sup>Si、<sup>27</sup>Al-NMR測定実施



※グラフのAAM固化体は高炉スラグを含まないタカオリン単独での固化試料

- 今後、XRDの鉱物定性結果を考慮して帰属を定性する

(a) 先行的処理方法の選定手法の構築 ① 低温処理技術  
i. 技術の抽出に資する低温処理技術のデータ取得・評価  
(ii) スラリーに対するセメント、AAM固化体の特性データ取得  
【まとめ・次年度計画】

➤ 現在までのまとめ

- 炭酸塩スラリーの模擬物について、現状まで検討されている通り、フィルタープレスを行い脱水するなどの工程を模擬して作製した。
- 得られた炭酸塩スラリーを用いて、セメント、AAMの配合を検討した。評価基準を満たす配合としては、セメントでは廃棄物充填率(乾燥粉体重量)45wt%が、AAMでは40wt%が限度であった。
- 両者の比較を確実にを行うため、物性の変動を見込んだ上で、廃棄物充填率(乾燥粉体重量)30wt%の配合を代表配合として選定した。
- 決定した配合で固化試料を製作し、粘性測定、照射試験等のデータ取得を行っている。

➤ 次年度計画

- 鉄共沈スラリーの模擬物を作製し、同様にデータを取得する。
- 得られた結果をとりまとめ、アプローチを検討する際のデータとして適用範囲等を明らかにする。



- (a) 先行的処理方法の選定手法の構築 ①低温処理技術  
 i. 技術の抽出に資する低温処理技術のデータ取得・評価  
 (iii) 特殊セメント系の調査

【実施内容】

普通ポルトランドセメント(OPC)に悪影響がある成分を含む水処理二次廃棄物への適用性を検討するため、必要な特性に特化した特徴を持つOPC以外のセメント系材料(特殊セメント)の調査を行う。

(調査概要)

調査対象とする特殊セメント種類を決定した後、放射性廃棄物固化用途での利用実績・研究例、必要な特性に焦点を当てた固化体特性の調査を行うと共に、国内における原材料の入手の容易さや試験実施可能性の観点を踏まえ、試験検討対象とする特殊セメント系固化体を抽出する。

年度	実施内容
2019	<b>利用可能性が高い特殊セメントの抽出 (文献調査)</b> 調査の観点：OPCに比べ、炭酸ナトリウムの影響が低減されるもの（OPCに比べ、適用範囲が広がる可能性があるもの）
	<b>母材の評価</b> 特殊セメントを用いた母材について性能評価
2020	各種低温固化体の適用可能範囲の抽出に資する検討（模擬廃棄物、炭酸ナトリウム、ホウ酸塩の添加等）

## 【検討結果】

### ～特殊セメントの抽出～

- 昨年度までにOPCの固化阻害物質について調査し、水処理二次廃棄物に含まれ少量で影響を及ぼす可能性のある物質として、ホウ酸塩、炭酸ナトリウムなどを抽出
- AAMでの固化適用性検討と合わせて、これらの効果的な低温処理オプションを探索
- 技術的成熟度が高い特殊セメントを網羅的に抽出(表1)し、適用可能性を検討

表1 抽出した特殊セメント

(1) JISに規定されたセメントの種類	(2) 特殊なセメントの種類(JIS規格外)
ポルトランドセメント	ポルトランドセメントをベースにしたもの
・普通ポルトランドセメント	・膨張性セメント
・早強ポルトランドセメント	・2成分系の低発熱セメント
・超早強ポルトランドセメント	・3成分系の低発熱セメント
・中庸熱ポルトランドセメント	ポルトランドセメントの成分や粒度の構成を変えたもの
・低熱ポルトランドセメント	・白色ポルトランドセメント
・耐硫酸塩ポルトランドセメント	・セメント系固化材
混合セメント	・超微粒子セメント
・高炉セメント(A,B,C種)	・高ビーライト系セメント
・フライアッシュセメント(A,B,C種)	ポルトランドセメントとは異なる成分のもの
・シリカセメント(A,B,C種)	・超速硬セメント
それ以外のセメント	・気硬性セメント
・エコセメント(普通、速硬)	・アルミナセメント
	・その他のセメント (カルシウムサルフォアルミネートセメント、リン酸マグネシウムセメント)

## 【検討結果】

### ～調査の視点と対象とした特殊セメントの分類～

#### 【調査の視点】

##### ①放射性廃棄物固化用途としての利用実績・研究例

当該セメントの利用実績・研究例の有無を調査

##### ②OPCに対して悪影響を及ぼす成分の影響

スラリーに含まれる成分中で「ホウ酸塩」および、「炭酸ナトリウム(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)」の影響の大小に関する情報や、セメント構成成分から推察

##### ③必要な特性に特化した特徴

固化プロセス成立性や水素ガス発生量抑制(水セメント比の低減)の観点から、「高流動性」に着目  
対応可能な廃棄物核種インベントリや廃棄物充填率の増大に繋がる可能性の観点から「高耐熱性」に着目

セメントの分類	<ul style="list-style-type: none"><li>□ ポルトランドセメントをベースにしたもの<ul style="list-style-type: none"><li>・ 膨張性セメント</li><li>・ 多成分系の低発熱セメント(JIS規定の置換率を超える混和材混合セメントを含み調査)</li></ul></li><li>□ ポルトランドセメントの成分や粒度の構成を変えたもの<ul style="list-style-type: none"><li>・ 白色ポルトランドセメント、</li><li>・ セメント系固化材、</li><li>・ 超微粒子セメント、</li><li>・ 高ビーライト系セメント</li></ul></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>□ ポルトランドセメントとは異なる成分のもの<ul style="list-style-type: none"><li>・ 超速硬セメント</li><li>・ 気硬性セメント</li><li>・ アルミナセメント(アルミナセメントをベースとするセメントを含む)</li><li>・ カルシウムサルフォアルミネートセメント</li><li>・ リン酸マグネシウムセメント</li></ul></li></ul>
総括的な特徴	<ul style="list-style-type: none"><li>● OPCがベースなので、OPCと反応や性質等は類似</li><li>● 混和材が多くなると、OPCと異なる性質が強くなる</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● OPCとは含有元素などが大きく異なることから、反応や性質等は、相違</li><li>● 特定の用途を想定して、調整されていることから、性質の差が極端な傾向</li></ul>

## 【検討結果】

### ～個々の特殊セメント特徴を踏まえた適用可能性検討～

#### 特殊セメントの調査結果例

<p>□ 膨張性セメント</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 固化用途での利用実績・研究例は見当たらず</li> <li>・ 処分施設用途では、ひび割れ抑制を目的に実績あり(浅地中ピット)</li> <li>・ セメントの構成から、本調査の着眼点では普通セメントと大差ないと推察</li> </ul> <p>⇒ 利用可能性は低いと推察</p>
<p>選定</p> <p>□ 多成分系の低発熱セメント(JIS規定の置換率を超える混和材混合セメントを含め調査)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 固化用途での利用実績は、国内では見当たらず</li> <li>・ 研究として、高炉スラグ高置換セメント(1:9)による炭酸ナトリウム溶液固化研究例において、利用可能性がある旨が報告されている</li> <li>・ 海外では、Hanfordでの低レベル廃液(硝酸Na)の基本の固化材として、フライアッシュ・高炉スラグ高置換セメント(「Cast Stone」)の適用性検討が行われている</li> </ul> <p>⇒ 「高炉スラグ微粉末高置換したセメント(1:9)」は、普通セメント割合が非常に少ないことから、炭酸ナトリウムやホウ酸の影響度が異なり、<b>利用可能性があると判断</b></p>
<p>選定</p> <p>□ アルミナセメント(アルミナセメントをベースとするセメントを含む)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 固化用途での利用実績は見当たらず</li> <li>・ アルミナセメント単独系の欠点である初期の水和発熱や材齢進行による強度低下を防ぐための材料設計として、アルミナセメントにフライアッシュや高炉スラグを混合する系の研究例がある。普通セメントと構成が全く異なるため、炭酸ナトリウム、ホウ酸塩の影響が異なる可能性がある</li> <li>・ 耐熱性は高い。流動性については、高性能減水剤を利用した場合に、超低水セメント比でも高流動性が得られるとの報告有り</li> </ul> <p>⇒ 普通セメントにとっての有害成分影響、耐熱性の観点から、<b>利用可能性があると判断</b></p> <p>⇒ 水和発熱抑制、材齢進行による強度低下抑制が重要と考え、「アルミナセメント+フライアッシュ」を選定</p>
<p>□ リン酸マグネシウムセメント</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 固化用途での利用実績は見当たらず</li> <li>・ 固化用途としては、Hanfordにおける硝酸Na廃液固化用途として、リン酸マグネシウムセメントにあたる「Ceramicrete」の適用性検討あり</li> <li>・ 普通セメントと構成が全く異なるため、炭酸ナトリウム、ホウ酸塩の影響が異なる可能性が有る。</li> </ul> <p>⇒ 利用可能性は<b>あると推察</b>⇒しかし、<b>製造(材料・配合)条件、参考文献の有無より試験実施は困難と判断</b></p>

#### ■ 高炉スラグ高置換セメント

⇒炭酸ナトリウム混合廃棄物(炭酸塩スラリー)への適用性に優れる可能性あり

#### ■ フライアッシュ混合アルミナセメント

⇒耐熱性・流動性に優れる可能性あり。成分影響も普通セメントと異なる可能性あり

代表配合を検討し、得られた代表配合について、圧縮強度など基礎物性を取得する。

## 【検討結果】

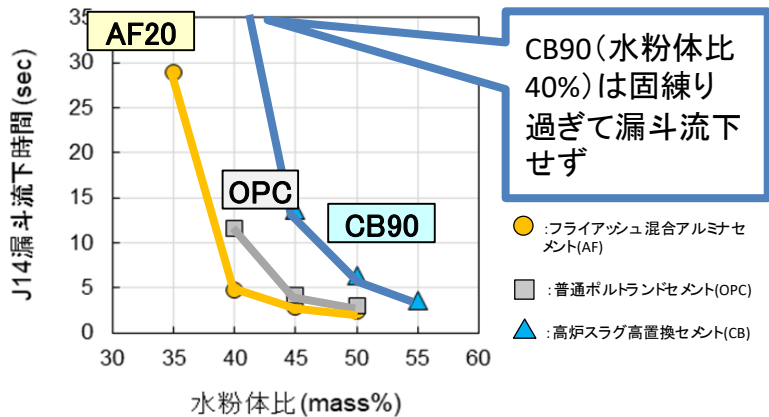
### ～配合と流動性・凝結性の関係～

#### ➤ 本年度計画(基本的要求性能の確認)

- 配合(水粉体比)を変化させ製造した固化体について、凝結性状と流動性を評価
- 代表配合を抽出し、圧縮強度、細孔径分布、構成相(XRD)、水分状態(自由水、結合水)を評価

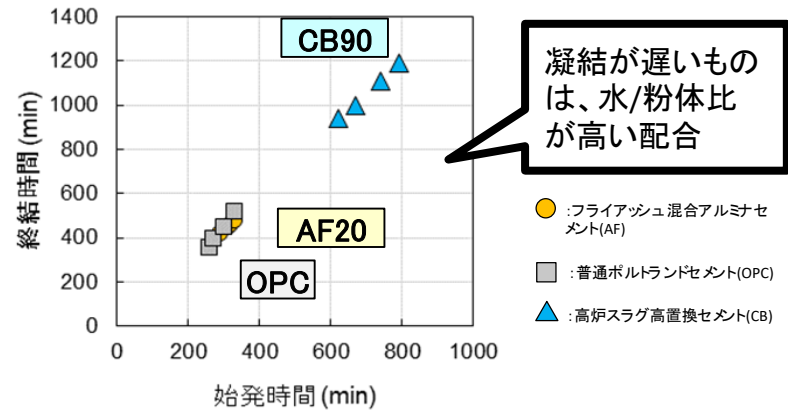
配合(水粉体比)を変化させ、流動性と凝結性を測定し、代表配合を決定した。

#### 流動性(J14漏斗流下試験)



- 流動性: フライアッシュ混合アルミナセメント > 普通セメント > 高炉スラグ高置換セメント
- 文献調査通り、アルミナセメントは流動性高

#### 凝結性(ビカー針試験)



- いずれの固化体も、十分なハンドリングタイム(可使用時間)を保持しており、且つ24h以内で終結しているため、製造プロセスが成立可能な見込み

代表配合	種類	水/粉体比 [wt%]	J14漏斗流下時間 [sec]	凝結	
				始発[min]	24h後
	CB90	55	3.6	790	1190
	AF20	40	4.7	310	450
	OPC(比較用)	45	4.2	270	400

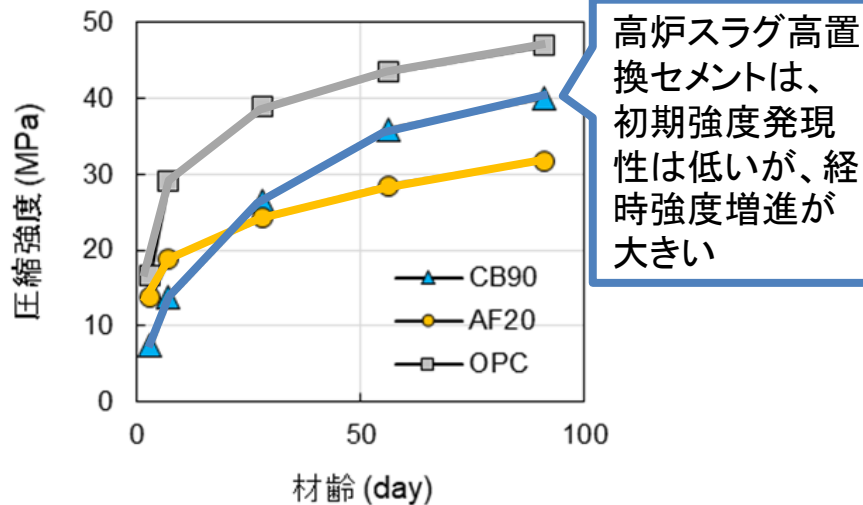
CB90: OPC/高炉スラグ微粉末 = 10/90に調合したもの、AF20: アルミナセメント/フライアッシュ = 80/20に調合したもの

## 【検討結果】

### ～代表配合と代表配合固化体の特性データ～

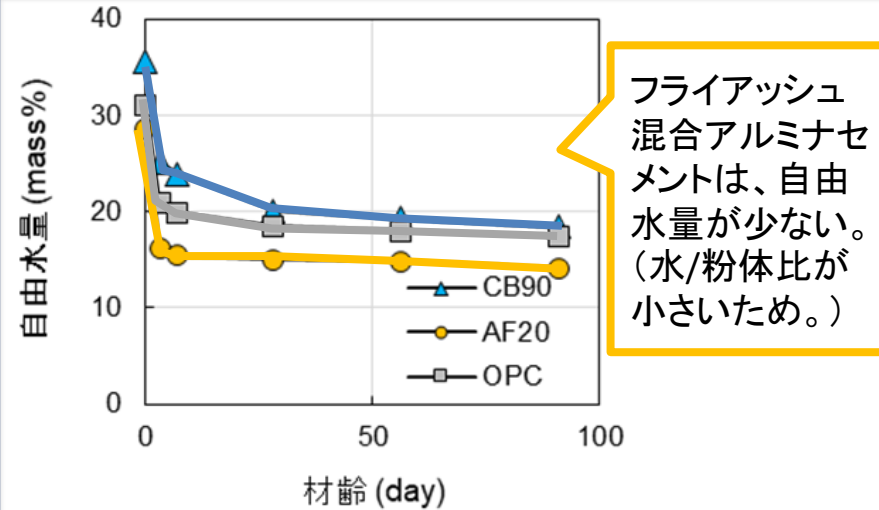
- 代表配合に対して、固化試験体を製作し、圧縮強度、自由水量などの特性を取得

#### 圧縮強度(材齢変化)



- 材齢28日強度: 普通セメント > 高炉スラグ高置換セメント ≒ フライアッシュ混合アルミナセメント

#### 自由水量(材齢変化)



- 材齢28日自由水量: フライアッシュ混合アルミナセメント < 普通セメント < 高炉スラグ高置換セメント

CB90は、OPC: 高炉スラグ微粉末 = 10:90に調合したもの

AF20は、アルミナセメント: フライアッシュ = 80:20に調合したもの

- その他、分析項目(細孔径分布、構成相(XRD))については、データ取得中



(a) 先行的処理方法の選定手法の構築 ①低温処理技術  
 i. 技術の抽出に資する低温処理技術のデータ取得・評価  
 (iii) 特殊セメント系の調査  
 【まとめ・次年度計画】

➤ 現在までのまとめ

- 特殊セメントについての文献調査を行い、OPCの代替材料として試験する材料として高炉スラグ高置換セメント及びフライアッシュ混合アルミナセメントを選定した。
- 母材を用いて、流動性や圧縮強度など基礎的なデータを取得した。
- 一部のデータ（細孔径分布、構成相(XRD)）は、現在取得中である。

➤ 次年度計画

- 今年度抽出した特殊セメント二種に対する、OPC固化体に対して悪影響を及ぼす物質（炭酸ナトリウム、ホウ酸塩等）、模擬廃棄物（各種スラリー乾燥粉碎品）および、熱・乾燥が及ぼす影響の検証
- 特殊セメントを利用した場合について、セメント固化が適用可能な廃棄物性状等の範囲を検討・整理（②処理技術の適用性評価アプローチの検討にフィードバック）

表2 特殊セメントの検討項目

廃棄物特等 適用性評価軸	普通 ポルトランドセメント	高炉スラグ高置換 セメント	フライアッシュ混合 アルミナセメント
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	セメント重量比2%以下	2020年度検討	2020年度検討
ホウ酸	セメント重量比0.1%以下	2020年度検討	2020年度検討
スラリー模擬廃棄物 許容充填率	炭酸塩:30~40% (※i(ii)検討より抽出)	2020年度検討	2020年度検討
熱・乾燥負荷影響	ii(i)検討より抽出	2020年度ii(i)検討	2020年度ii(i)検討

# (a) 先行的処理方法の選定手法の構築 ① 低温処理技術

## ii. 固化体変質に関する調査

### 【目標】

#### (i) 加熱等による固化体変質の調査

- 2018年度に実施したアプローチの検討及び固化材料の物性等測定法等の調査結果を基に、固化体材質毎の材質変質要因の整理と可能性について検討する。低温処理については、2018年度に取得したTGの結果を基に、加熱状態、乾燥状態での固化体の変質を明らかにする。

#### (ii) Cs等インベントリと固化体温度の関係性評価(図1)

- 形状の異なる容器(容器数種)の固化体での熱条件の変化を明らかにする。
- 廃棄物を混合した場合の、密度、熱伝導率等の値を調査し、解析に反映させるとともに、影響の大きさを明らかにする。

#### (iii) 長期的な変質に与える影響因子の調査と変質挙動の評価

- 結晶相への転移、温度上昇(～60℃)、溶脱変質を想定した安定相の計算を実施(図2)。

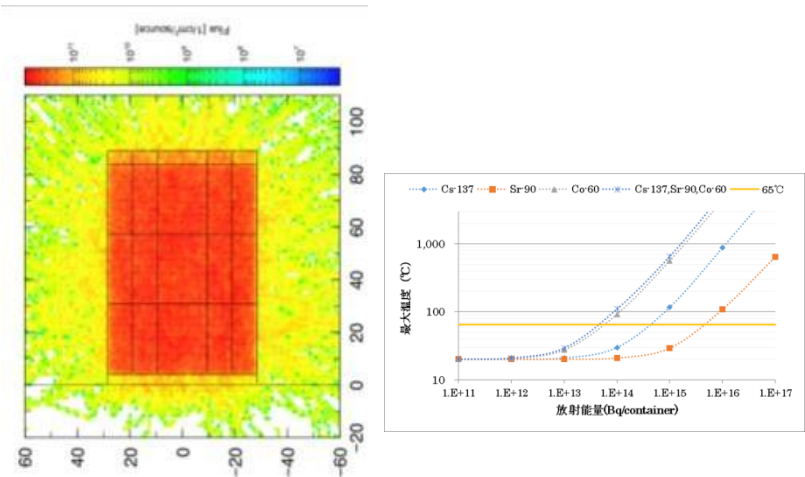


図1 Cs等インベントリと固化体温度の関係性評価(例)

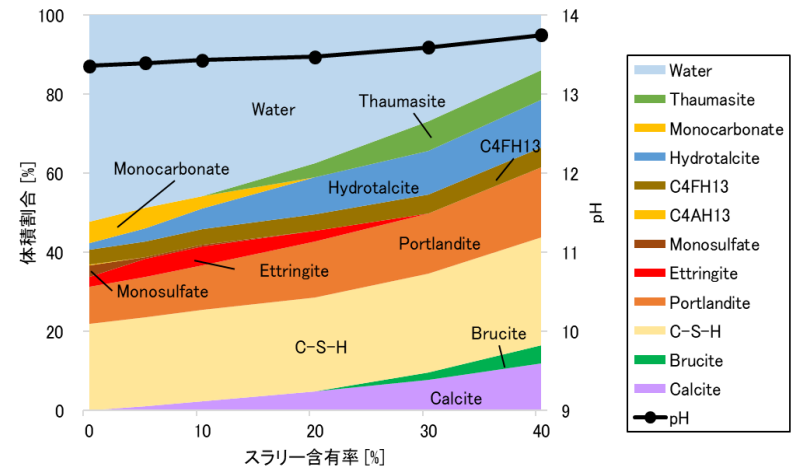


図2 スラリー含有時の鉱物相組成の検討(例)

(a) 先行的処理方法の選定手法の構築 ①低温処理技術  
 ii. 固化体変質に関する調査 (i)加熱等による固化体変質の調査  
 【実施内容】

保管時に受ける影響を調査するため、加熱状態及び乾燥状態で保管された場合の変質についての調査を行う。

他の項目で得られた試験データや文献等の調査から変質の可能性についての知見を整理するとともに、不足する乾燥等のデータについては、試験を行いデータを取得する。

2019年度は、変質の可能性に関する知見の整理を行い、2020年度に不足するデータの取得を行う。

年度	実施内容
2019	<b>加熱及び乾燥による性能変化の調査</b> ・ 文献調査等から変質の可能性について知見を整理
	<b>母材の評価試験</b> ・ 「乾燥影響」、「熱と乾燥の複合影響」を評価 「①-i- (ii) スラリーに対するAAM固化体の特性データ取得」にて決定した母材について、加熱及び乾燥による性能変化を評価 (温度域、乾燥強度域を広めに設定し、検証)
2020	<b>母材の評価試験</b> ・ 2019年度結果を受け、性能が大きく変化する範囲(温度、乾燥強度)に絞りこみをかけ、検証

# 【検討結果】

## ～試験条件設定のための文献調査結果～

- 文献等の調査から変質の可能性についての知見を整理している。

### セメント固化体 (OPC)

#### <熱> 乾燥と熱による組織変質

- 70~100°C: 空隙内自由水、一部の水和物(エトリンガイト)の逸散⇒組織収縮、空隙径粗大化
- 100°C~450°C: C-S-Hの脱水⇒さらなる組織収縮、空隙径粗大化
- 450°C以上: Ca(OH)<sub>2</sub>、CaCO<sub>3</sub>の分解(CaO化)等⇒固化体の様相を消失していき、顕著な強度低下(図1)

#### <乾燥(湿度)> 乾燥による組織収縮が主

40°C乾燥よりRH(相対湿度)11%乾燥による収縮ひずみが小(図2)

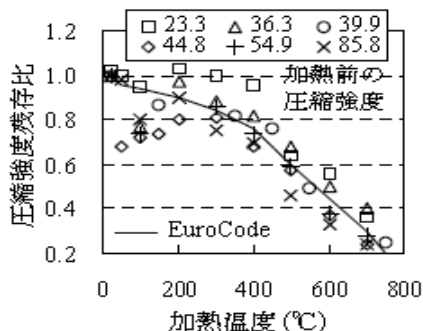


図1 コンクリートにおける温度と強度の関係(～800°C)<sup>1)</sup>

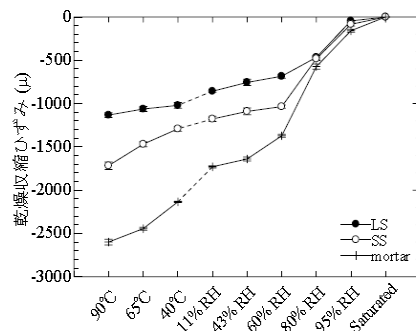


図2 コンクリート乾燥条件と乾燥収縮ひずみの関係<sup>2)</sup>

### AAM固化体

#### <熱> 乾燥と熱による組織変質

- ～100°C: 空隙内自由水が逸散⇒組織収縮、空隙径粗大化(推察)
- 100°C～: ゲル状生成物からの連続的な脱水⇒組織収縮、空隙径粗大化

セメント固化体に比べ高温での強度低下が少ない(図3)

Ca量が多いと、高温(1000°C～)耐熱性が低いとの報告

#### <乾燥(湿度)>

乾燥による組織収縮が主(推察)

研究例が少ない

傾向について

統一的な見解がない

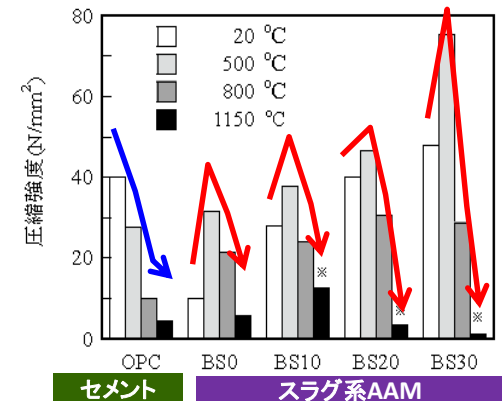


図3 AAM(スラグ系)における温度と強度の関係<sup>3)</sup>

参考文献

### AAMの熱・乾燥影響について、試験でのデータ取得が必要(圧縮強度、収縮ひずみ)

- 土木学会: コンクリート構造物の対価技術研究小委員会報告ならびにシンポジウム論文集、コンクリート技術シリーズ63、pp.32-38、2004
- 伊藤ら: 温度・湿度変化による乾燥を受けたコンクリートの割裂引張強度に関する検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.36、pp.382-387、2014
- 一宮ら: フライアッシュベースのジオポリマーの配合ならびに高温抵抗性、コンクリート工学年次論文集、Vol.36、pp.2230-2235、2014

## 【検討結果】

### ～調査を踏まえ設定した熱、乾燥負荷条件～

➤ 調査結果より、固化体の試験における熱乾燥負荷条件を以下の通り設定。

#### (熱負荷条件)

- 20°C(RH60%)(規準)
- 80°C(熱負荷試験で先行研究で設定されることが多い温度)
- 105°C(空隙内自由水がほぼ逸散(自由水量測定条件と同じ条件))
- 200°C(AAM固化体のTG分析において、逸散が落ち着いた温度域)(図1)

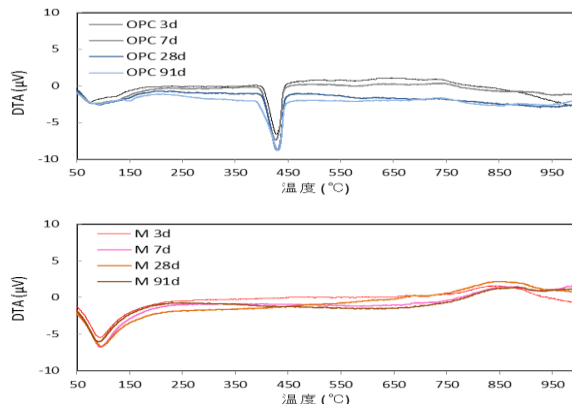


図1 DTA曲線(2018年度データ)

#### (乾燥負荷条件(図2))

- RH100%(20°C)(乾燥しない場合)
- RH80%(20°C)
- RH60%(20°C)(規準)※熱負荷の規準と同じ
- RH11%(20°C)(セメント固化体:空隙内自由水がほぼ逸散)

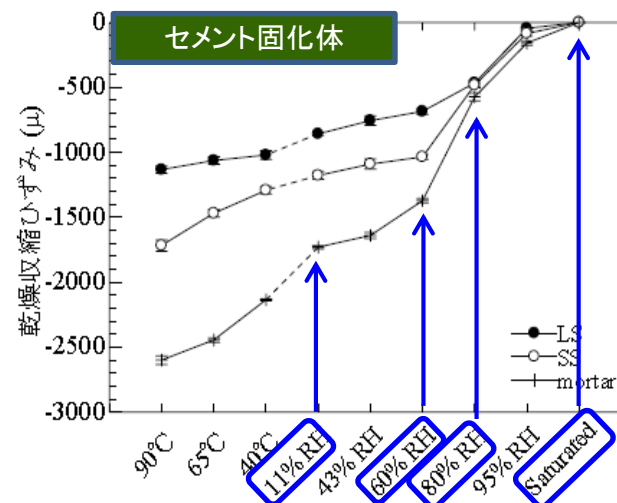


図2 乾燥条件と乾燥収縮ひずみの関係

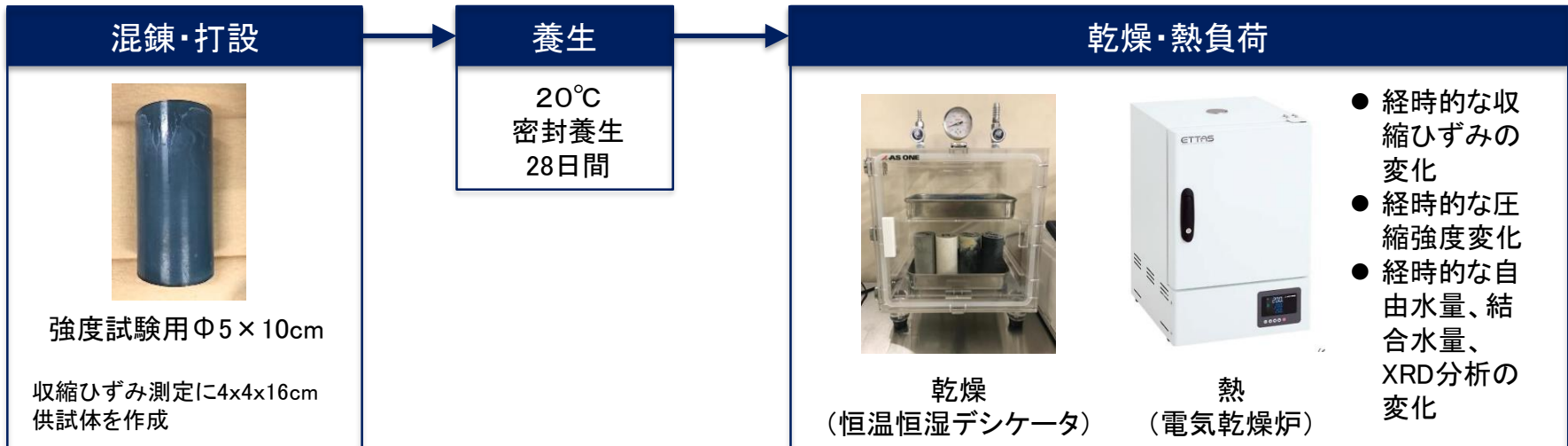
現在、母材のみの固化体を製作し、熱負荷試験を開始

# 【検討結果】

## ～母材の評価試験：試験概要～

表1 熱、乾燥負荷試験の供試体配合条件

種類	M /母材粉体 [wt%]	BFS /母材粉体 [wt%]	母材中 Si/Alモル比 [mol/mol]	廃棄物 充填率 [wt%]	水/固体比 [wt%]	母材中 Na/Siモル比 [mol/mol]
OPC	-	-	-	0	45	-
M	100	0	1.8	0	150	0.84
MB20	80	20	1.8	0	110	0.50
MB40	60	40	1.8	0	100	0.63





## 【検討結果】

### ～母材の評価試験：熱・乾燥による圧縮強度の変化～

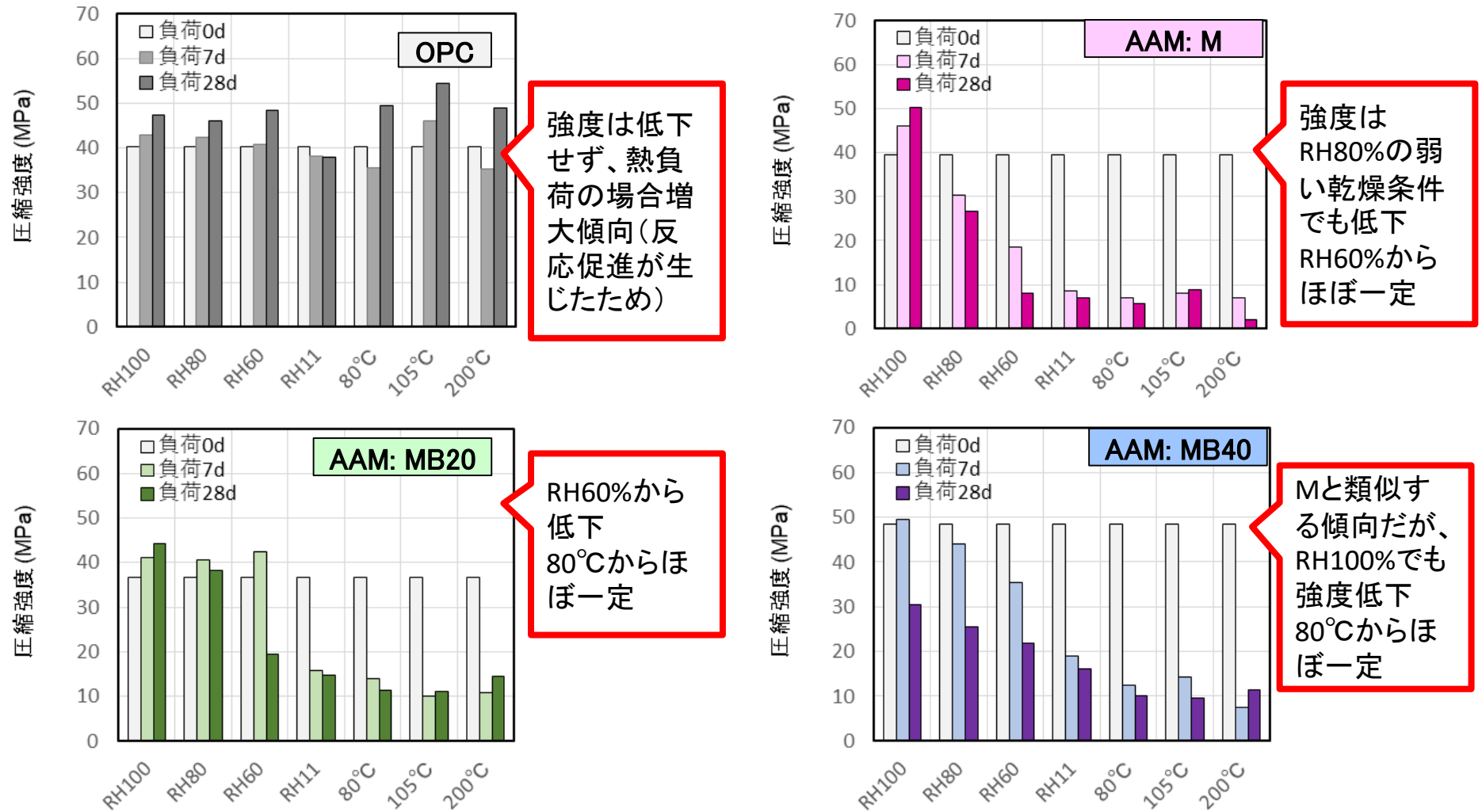


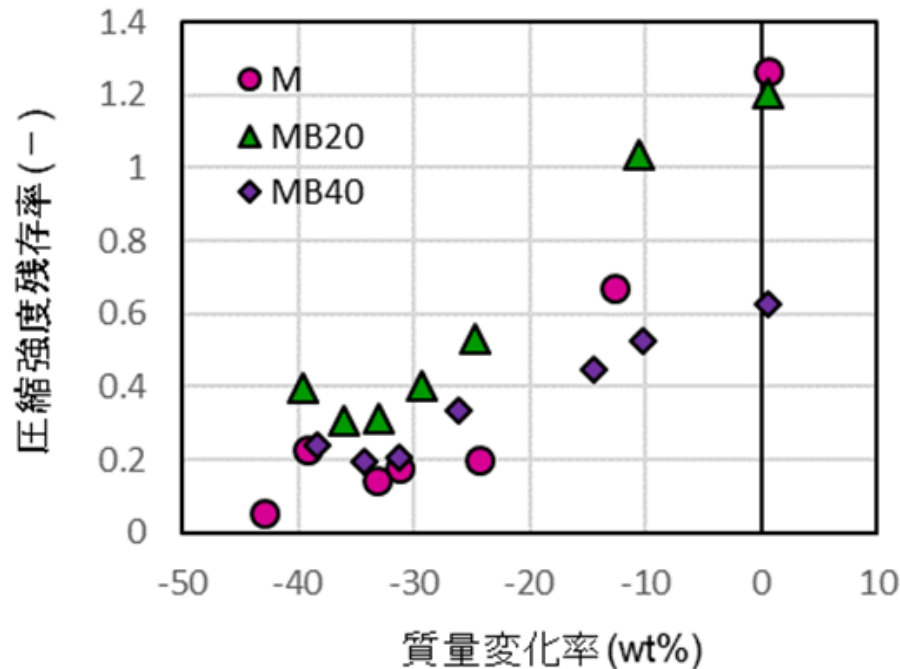
図1 各種固化体の熱・乾燥負荷による圧縮強度変化

- OPC固化体：熱・乾燥負荷をかけても顕著な強度低下は生じず
- AAM固化体：程度の差はあるが、弱い乾燥条件であっても強度低下(負荷7日間で変化ほぼ収束)

## 【検討結果】

～母材の評価試験：熱・乾燥による質量の変化～

### 各種熱・乾燥負荷条件・負荷28日における質量変化率と圧縮強度残存率の関係



温度℃	湿度%
20	100
20	80
20	60
20	11
80	(-管理なし)
105	(-管理なし)
200	(-管理なし)

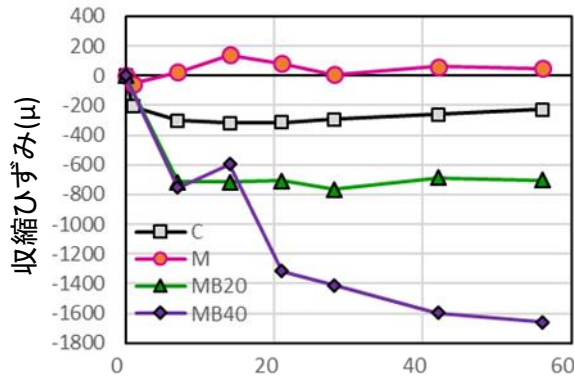
質量減少率が大きい傾向が見られた。

図1 質量変化率と圧縮強度残存率の関係(熱・乾燥負荷28日)

- 質量変化率が大きいほど、強度残存率が低下(ただし、MB40のRH100%は質量減少しないが強度低下)  
 ⇒乾燥による強度低下  
 ⇒乾燥収縮ひずみに起因しひび割れが発生し、強度低下している可能性

## 【検討結果】

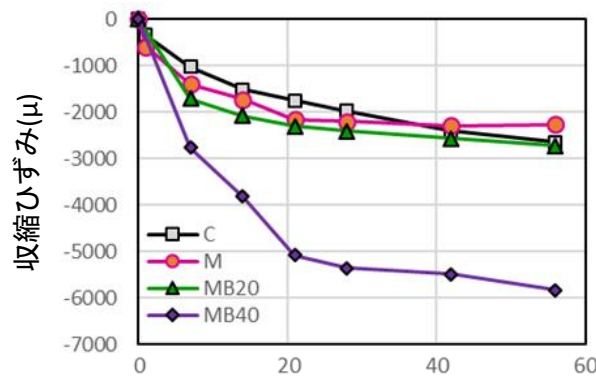
～母材の評価試験：熱・乾燥による長さ変化(収縮ひずみ)～



熱・乾燥負荷日数(d)

**RH 100%**

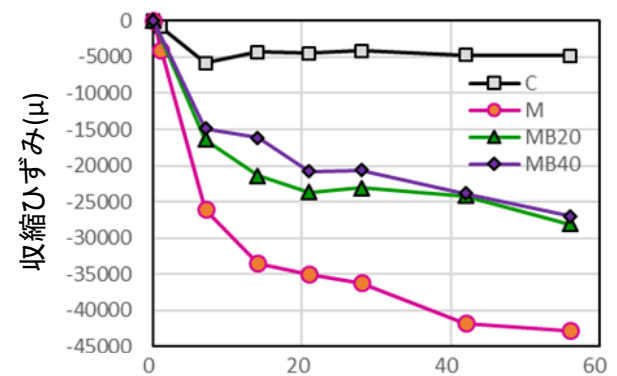
MB40の収縮ひずみが大きい



熱・乾燥負荷日数(d)

**RH 60%**

MB40のみ収縮ひずみが顕著に大きい



熱・乾燥負荷日数(d)

**80°C**

収縮ひずみ：  
M > MB20 ≒ MB40 ≫ OPC

- 収縮ひずみは、全体としてOPC固化体に比べAAM固化体で大きい。
- AAM固化体の熱・乾燥による圧縮強度の変化と収縮ひずみの大きさに相関があることから、AAM固化体の強度低下の主要因は収縮ひずみによるものと推察される。
- 水分逸散の程度や乾燥収縮ひずみは、固化体の様々な要因(水分量、空隙構造等)で変化することから、模擬廃棄物固化体では傾向が異なる可能性がある。

(a) 先行的処理方法の選定手法の構築 ① 低温処理技術  
ii. 固化体変質に関する調査 (i) 加熱等による固化体変質の調査  
【まとめ・次年度計画】

➤ 現在までのまとめ

- セメント及びAAMについて、既往の文献調査から、加熱・乾燥による変質の可能性についての知見を整理した。
- 試験体を作製し、加熱及び乾燥条件での圧縮強度、ひずみ量に関するデータを取得し、収縮ひずみは、全体としてOPC固化体に比べAAM固化体で大きいことを確認した。

➤ 次年度計画

- 特殊セメント固化体における熱・乾燥負荷影響の検証を行う。

(a) 先行的処理方法の選定手法の構築 ① 低温処理技術

ii. 固化体変質に関する調査 (ii) Cs等インベントリと固化体温度の関係性評価  
【実施内容】

- 低温固化処理技術(セメント、AAM)において、固化体の性能は温度により影響を受けるため、材料毎に上限値が決まる。
- 熱移動は体系に依存するため、容器の形状、大きさにより、廃棄物充填量の制限値は変化することが見込まれる。



最高温度の解析を行うことにより、形状、寸法による変化を明らかにすることで、崩壊熱から検討した固化可能インベントリ制限値をデータとして取得する。

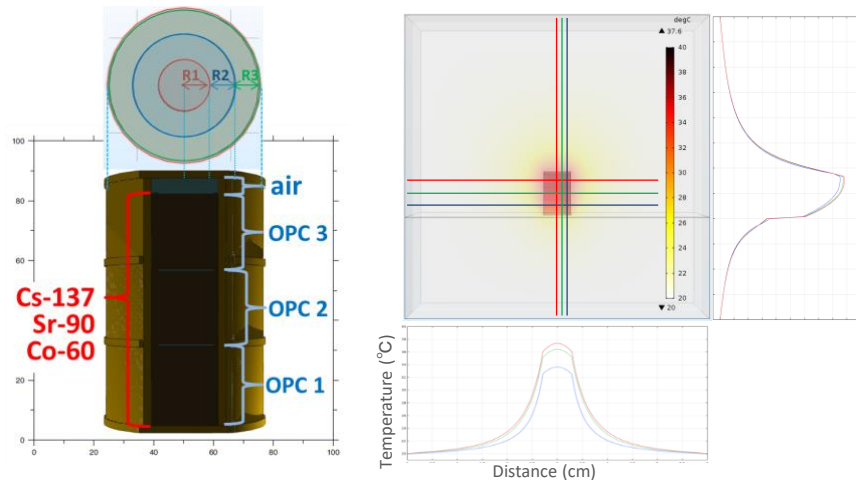


図1 PHITS、COMSOLによるシミュレーション結果(例)

年度	実施内容
2019	<b>OPC固化体の形状・インベントリによる熱的影響調査</b> ・ 体系の選定 (円筒形・角型等) ・ 体系モデル作成・解析条件設定 ・ Cs熱影響解析、Cs他核種熱影響解析
2020	<b>新規固型化材の熱的影響調査</b> ・ AAM固化体の熱影響解析等

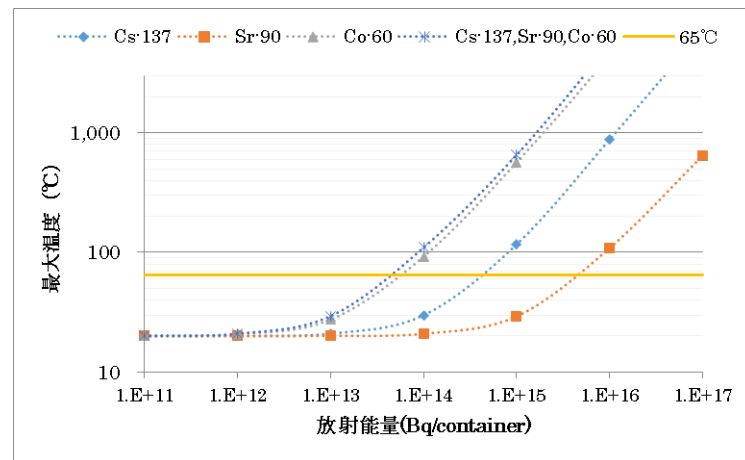


図2 核種インベントリと固化体最大温度(例200ドラム缶)

# 【検討結果】 ～解析対象容器の選定～

- 固化処理した廃棄物の保管容器は未定
- 福一やその他原子力施設で用いられている代表的な廃棄物容器の形状・寸法並びに検討中の容器などを調査
- 大別して円柱状と角型の2種類の区分から、解析対象としてそれぞれ3つの容器を選定(表1,2のハッチング)

表1 主な円柱容器







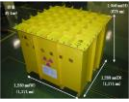





円柱容器	ペール缶	キャニスター	ドラム缶	MJ PIC	HIC(type2)	タンクコンテナ
容器外観						
内容量(m <sup>3</sup> )	0.022	0.15	0.22	1.25	2.69	24.00
充填量(m <sup>3</sup> )	0.018	0.12	0.17	1.00	2.15	19.20
内W/H	0.84	0.42	0.65	0.96	0.88	2.46
その他	JIS Z 1620	JAEA	JIS Z 1600	太平洋セメント他	TEPCO	

表2 主な角型容器

角型容器	ウラン系コンテナ	1m <sup>3</sup>	1m <sup>3</sup> (内張有り)	LLW-2型	6m <sup>3</sup>	20FT
容器外観						
内容量(m <sup>3</sup> )	1.20	1.35	0.77	3.02	5.20	32.91
充填量(m <sup>3</sup> )	0.96	1.08	0.62	2.42	4.16	26.33
内W/H	1.34	1.63	1.00	3.11	1.54	2.46
その他	JAEA	想定モデル	想定モデル (遮蔽厚さ70mm)	NFT HPより	想定モデル	JIS Z 1610



## 【検討結果】

### ～体系モデルと解析条件～

#### ➤ 体系モデルの作成

- 6容器について、放射線輸送解析と熱解析に使用する体系モデルを作成
  - 円柱型：ペール缶、ドラム缶、HIC
  - 角型：1m<sup>3</sup>、6m<sup>3</sup>、遮蔽体付き1m<sup>3</sup>
- 各容器とも、体積の8割まで放射性核種を含む固化体を充填

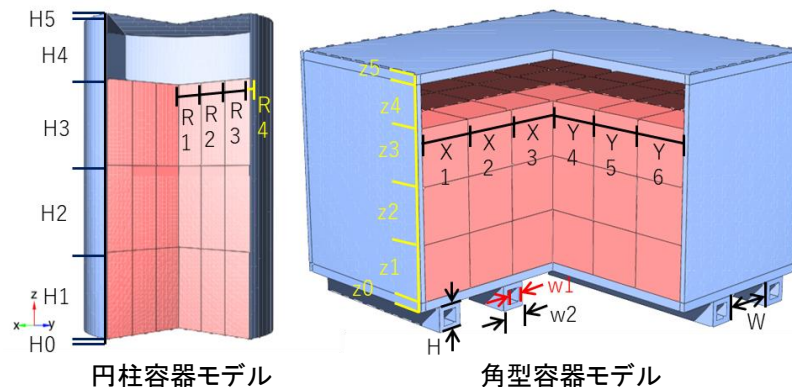


図3 放射線輸送解析に用いた体系モデル(例)

#### ➤ 解析条件

- 固型化材料
  - 普通ポルトランドセメント(OPC)
  - 密度2.69 g/cm<sup>3</sup>、熱伝導率0.5 W/(mk)
- 放射性核種
  - 水処理二次廃棄物に含まれる代表核種を想定
  - Sr-90、Co-60、Cs-137
- 放射能濃度
  - 温度変化が見込まれる値について解析
  - 1.0E+5 ～ 1.0E+10 Bq/cm<sup>3</sup>

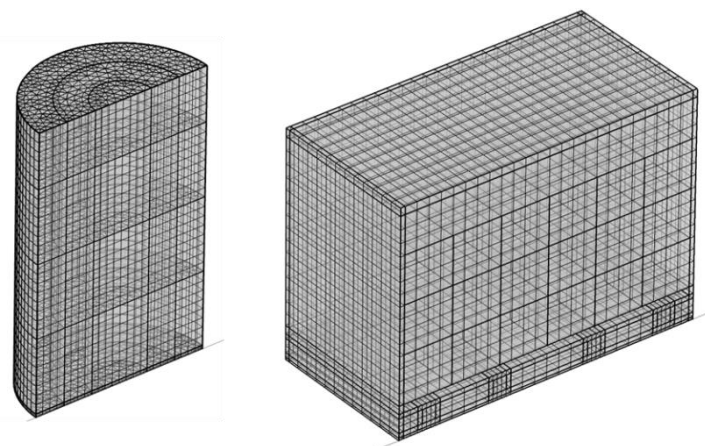


図4 熱解析に用いた体系モデル(例)

# 【検討結果】 ～容器体系と最大温度の関係～

## ➤ 容器の違いによる最大温度の変化

- 円柱型3種類、角型3種類の体系で、最大温度を解析
- 形状毎に、体積に対しての最大温度の傾向を把握(図6上図)
- 固化体の体積を固化体中心と固化体上面の辺中点(エッジ)の距離で除した数で整理することで、形状によらず、最高温度を一本の関係式で整理できる可能性を示唆(図6下図)

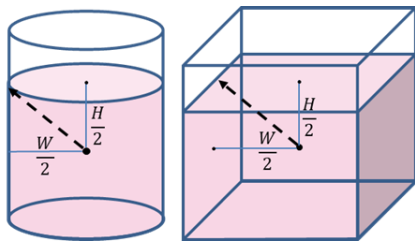


図5 固化体中心からエッジまでの距離

## ➤ 核種の影響に関する調査

- 核種を変えて、固化体温度を調査
- 水処理二次廃棄物の放射能濃度分析値から試算すると、Cs-137、Co-60については温度上昇がないと推算
- 一方で、Sr-90については3°C程度の温度上昇と推算

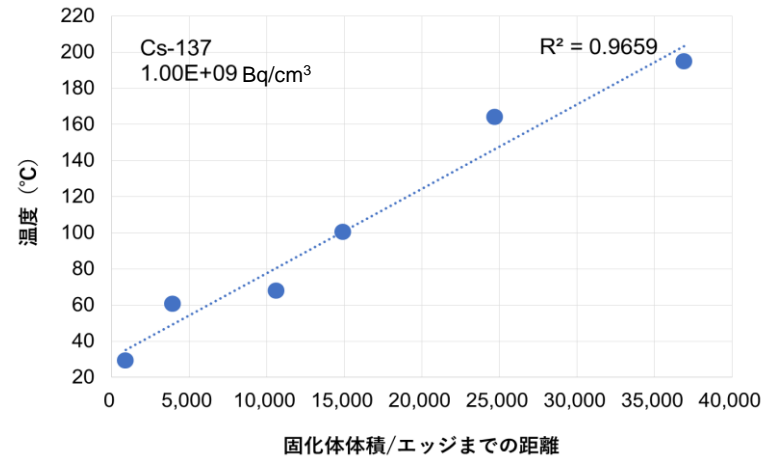
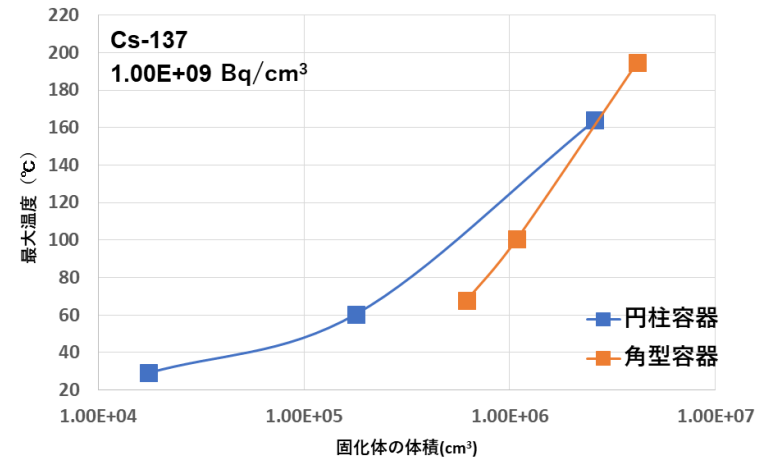


図6 温度と容器体系の関係

(a) 先行的処理方法の選定手法の構築 ① 低温処理技術  
ii. 固化体変質に関する調査 (ii) Cs等インベントリと固化体温度の関係性評価  
【まとめ・次年度計画】

➤ 現在までのまとめ

- 福一やその他原子力施設で用いられている代表的な廃棄物容器の形状・寸法並びに検討中の容器などを調査。
- 円柱状と角型の2種類の区分から、解析対象としてそれぞれ3つの容器を選定し、最大温度への影響を解析。単体では強度などの固化体変質を及ぼすような高熱に到達しない可能性大。
- 容器形状によらず最高温度を中心と辺中点との距離の関係式で整理できる可能性を発見。

➤ 次年度計画

- データ取得で作製しているAAM固化体の熱伝導率を測定し、計算に反映させることで、AAMの場合の計算を行い、セメント固化体との違いを調査する。
- 主要核種(Sr-90、Co-60、Cs137)の計算を基に、分析値から固化体温度を推算するための係数の算出を試みる。

## (a) 先行的処理方法の選定手法の構築 ① 低温処理技術

### ii. 固化体変質に関する調査 (iii) 長期的な変質に与える影響因子の調査と評価 【実施内容】

固化体の長期的な変質挙動を調査するため、時間経過や外部要因によって生じる影響について調査を行う。セメントについて長期的な変質挙動評価の実績がある熱力学平衡計算による手法について、セメント固化体、AAM固化体の解析に必要な熱力学データの調査およびデータの充足性の評価を行う。



評価の結果として得られる相変化等の情報から、OPC やAAMの固化処理に影響し、除外すべき特定の成分(廃棄物)の抽出を試みる。

年度	実施内容
2019	<b>熱力学データの収集・整理と熱力学平衡計算の適用性検討</b> 結晶相への転移、乾燥、温度上昇（～60℃）を想定した安定相の計算を実施 ・ 長期挙動に影響する鉱物相変化の把握について、平衡計算による推定を試みる。 ・ AAMに関しては、長期挙動を予測するための熱力学データの充足性や平衡計算の適用性を検討する。
2020	<b>固化体の変質挙動評価における熱力学平衡計算手法の適用性</b> 各種低温固化体の適用可能範囲の抽出。地下水接触による固化体の変質挙動のシミュレーション。実験結果と比較することで、熱力学データの充足性と適用性を検討。 ・ セメント固型化体に関しては、長期変質に与える炭酸塩スラリーと鉄共沈スラリーの影響に関する知見を提示し、固化体の変質挙動評価における熱力学平衡計算手法の適用性を示す。

# 【検討結果】

## ～検討事項と実施状況(1/6)～

### ➤ 熱力学データの収集と整備(セメント・AAM共通)

- データベースはフランス地質調査所作成のThermoddemを使用。
- 計算コードはThe Geochemist's Workbenchを使用。
- AAMの非晶質相を計算するためにN-A-S-H相の熱力学データを調査し、データベースに追加。セメントに関しては計算に必要な鉱物が含まれていることを確認。

### ➤ AAM系材料の計算

#### 熱力学安定相の検討

組成的にAAMに類似する天然のゼオライトや、塩湖やアルカリ湖周辺の天然鉱物の変質などの知見(図1)を基に、変質後に現れる鉱物相を推測。

⇒AAMの計算には文献調査から推定した鉱物相とN-A-S-H相を使用

#### 鉱物相の計算

AAM固相及び共存する液相の計算を実施するとともに、2018年度に取得したメタカオリン系AAMの溶出試験結果と比較した。固相の計算結果及び、液相のpHの計算結果と実験値の比較を図2に示した。

⇒平衡溶解試験の期間内では、固相は一致せず。液相の計算では、実験値に近い傾向(pHやNa濃度は概ね再現。Si濃度は乖離)を再現した結果が得られた。

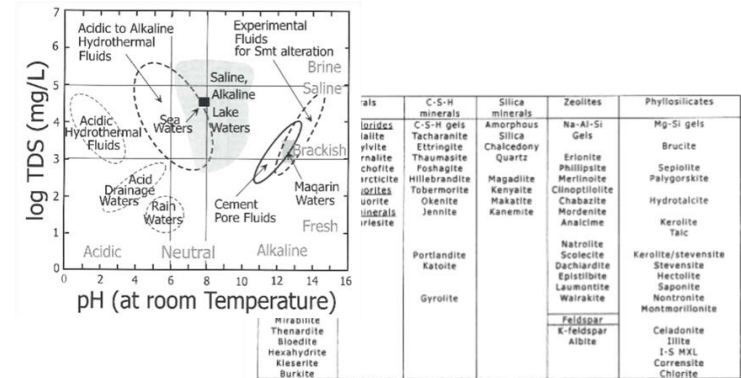


図1 様々な天然水のpH及び塩湖アルカリ湖にみられる2次鉱物のリスト(井上 2004)

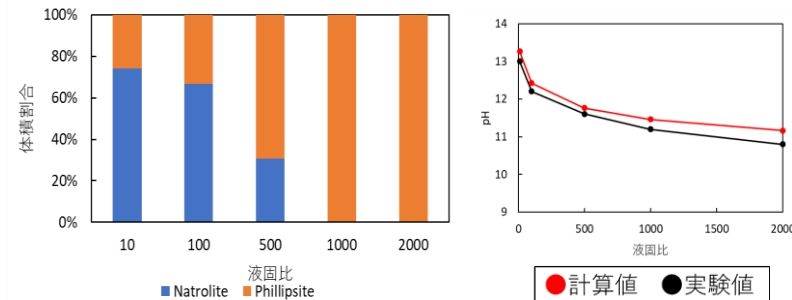


図2 液固比の変化による鉱物相の体積変化とpHの変化



# 【検討結果】

## ～検討事項と実施状況(2/6)～

### • 相当する鉱物相の探査

現時点での熱力学的平衡計算では非晶質であるAAMをN-A-S-H単相で再現することが困難であり、鉱物の組合せとなってしまった。しかしながら、その状態でも液相のpHや成分量の変化傾向の一部を再現できた。

液相の変化傾向だけでも把握できるならば、処分の検討に貢献できる可能性があることから、溶出試験で得られた液相のpH、Si/Al比、Si量、Al量、Na量などを良く再現できる固相鉱物の組合せ(AAM非晶質に相当する鉱物相)を探査。

⇒計算結果と実験値の比較評価を実施。(表1)

液相組成等を良く再現できる組合せがいくつか存在し、固相Si/Al比なども一定程度再現可能。

⇒各条件で計算されたpH(Al, Na濃度)は、いずれの鉱物組合せにおいても実験値と近い値(図4)。固相のSi/Al比は、液固比が高い条件において計算値は実験値と離れた値になった。



AAM材料の長期挙動に関する知見や熱力学的なデータが少ないが、短期の溶出挙動を複数の準安定相を設定することで再現することはできる可能性が示唆。

表1 鉱物組合せによる計算結果と実験値の比較評価

鉱物組み合わせ	固相	液相				点数
	Si/Al比	pH	Si	Al	Na	
Phillipsite × Natrolite	△	○	△	△	○	3.5
Heulandite × Natrolite	△	○	○	△	○	4.0
Clinoptilolite × Natrolite	○	○	○	×	○	4.0
amo Si × Natrolite	○	○	○	×	○	4.0
Zeolite Y × Natrolite	○	○	○	×	○	4.0
N-A-S-H 2 × Natrolite	○	○	○	×	○	4.0
Phillipsite × N-A-S-H 1	×	○	×	△	○	2.5
Heulandite × N-A-S-H 1	△	○	○	△	○	4.0
Clinoptilolite × N-A-S-H 1	△	○	○	○	○	4.5
amo Si × N-A-S-H 1	△	×	△	△	○	2.5
Zeolite Y × N-A-S-H 1	×	×	△	△	○	2.0
N-A-S-H 2 × N-A-S-H 1	×	×	△	△	○	2.0
Phillipsite × Zeolite X	×	○	×	△	○	2.5
Heulandite × Zeolite X	×	○	○	△	○	3.5
Clinoptilolite × Zeolite X	△	○	○	○	○	4.5
amo Si × Zeolite X	○	×	△	△	○	3.0
Zeolite Y × Zeolite X	○	×	△	△	○	3.0
N-A-S-H 2 × Zeolite X	○	×	△	△	○	3.0

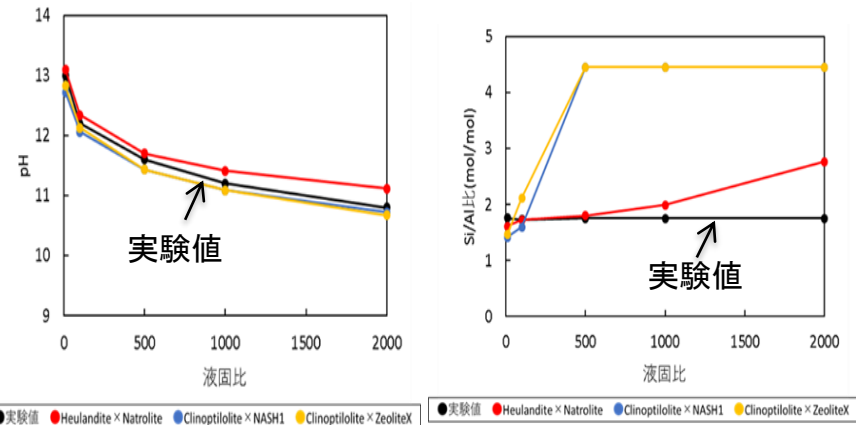


図4 平衡溶解試験結果との比較(pH、固相Si/Al比)



## 【検討結果】

### ～検討事項と実施状況(3/6)～

#### ➤ セメント材料の計算

##### • 熱力学安定相の検討

セメントでは、熱力学平衡計算による評価実績あり。しかしながら、実験的な知見を基に、意図的に鉱物相を選択する操作をしている。

➡ 実験知見のない、廃棄物を含む固化体の解析では適用できない。

鉱物相の除外の仕方を以下のように変えて、解析を行った。

[1]①	DB中の全鉱物を考慮した計算結果
[1]②	[1]①から、熱力学安定相とされた鉱物および結晶のC-S-H鉱物を除外しながら、再計算を繰り返した結果
[1]③	[1]-②に加え、温度や圧力などの条件から生成が想定されない鉱物をさらに除外した計算
[2]	DB中から、対象となる系で生成が想定される鉱物を抽出し、抽出した鉱物のみが生成する条件で鉱物相組成を計算

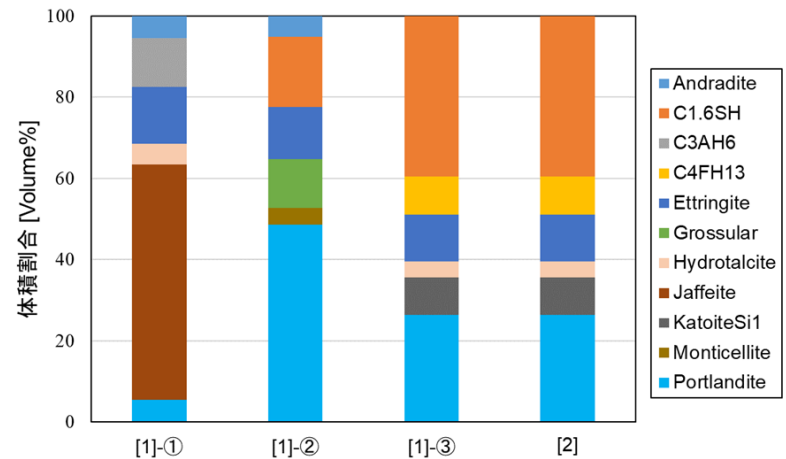


図4 各水準における生成鉱物相の体積割合

除外の仕方でも結果(図4)が大きく異なるものの、本研究で検討した熱力学的安定相を基に一定のルールで除外する方法で、知見を基に生成が想定される鉱物を抽出し計算した場合と、同様の結果が得られることを確認([1]③と[2])

## 【検討結果】

### ～検討事項と実施状況(4/6)～

- セメント固化体に関して、炭酸塩スラリーの含有率を変えた場合の計算、温度変化を受けた場合の計算、及び水に接して溶出を受けた場合の計算を行った。

(※現段階では、熱力学平衡計算で得られた結果からの示唆であり、実験知見等との比較検証が別途必要)

#### ➤ スラリー含有時の鉱物相組成(図5)

スラリー: 炭酸塩スラリー

温度: 20°C

含有量が0~55 [mass%] 5%刻み

※60 [mass%]以上では計算が収束しなかった。

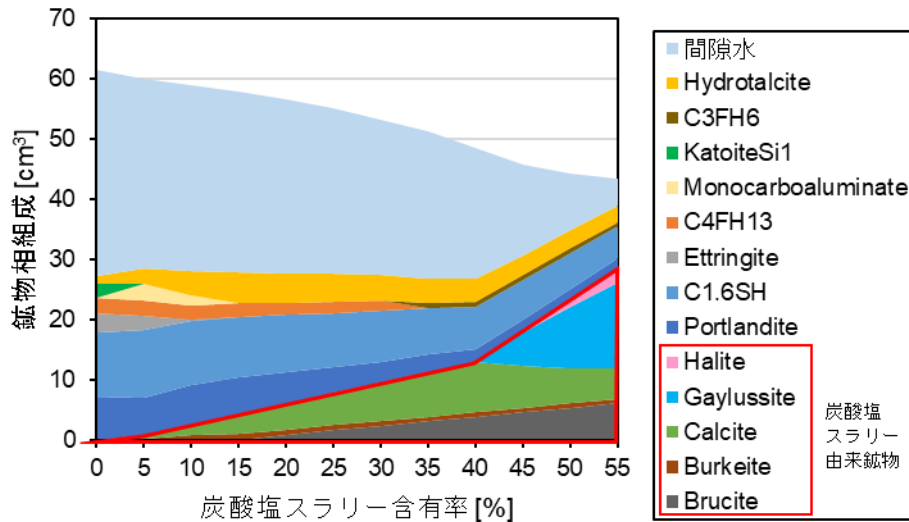


図5 炭酸塩スラリー含有量の変化に伴うセメント固化体の鉱物相の体積変化

#### 【計算結果から示唆されること】

○炭酸塩スラリー添加によるセメント系鉱物の変化

・セメントの主要鉱物であるPortlanditeが減少

・アルミネート系鉱物の変化

(KatoiteSi1, Ettringite → Monocarboaluminate, hydrotalcite)

・フェライト系鉱物の変化 (C4FH13 → C3FH6)

→ 大きな体積変化は無い

○炭酸塩スラリー45mass%以上

炭酸塩スラリー由来の新たな生成相により固相体積が増加

## 【検討結果】

### ～検討事項と実施状況(5/6)～

#### ➤ 温度変化時の鉱物組成変化

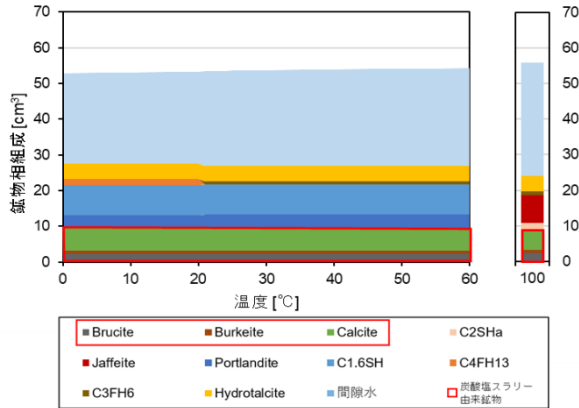


図6 温度変化に伴う炭酸塩スラリーセメント固化体の鉱物相の体積変化

- ・廃棄物含有率: 炭酸塩スラリーを30 [mass%]
- ・温度: 0~60 [°C]、100 [°C] (結晶化条件)
- ※カルシウムシリケート水和物(C-S-H)が結晶相に変化する温度は不明であり、変化しない温度域である0~60°Cと、変化しているであろう温度100°Cで計算した。

#### 【計算結果から示唆されること】

- 60°Cまでの温度上昇
  - ・フェライト系鉱物の変化(C4FH13→C3FH6)
  - ・炭酸塩スラリー由来鉱物に変化なし。
- 固化体に大きな変化は見られない。
- 100°Cの結晶化条件
  - ・C-S-H、Portlanditeが消失し、結晶鉱物が生成。
- 鉱物相変化、固相の体積減少。

#### ➤ 水に接して溶出を受けた場合の鉱物相変化

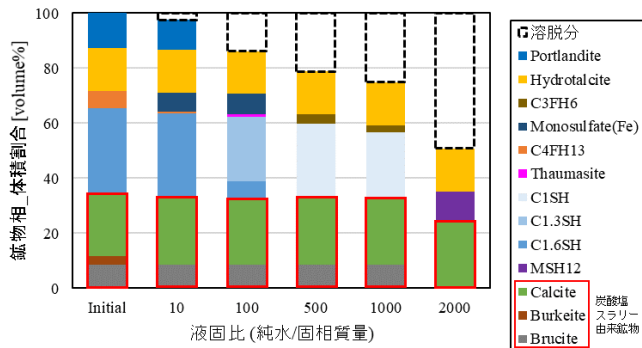


図7 液固比の変化に伴う鉱物相の質量割合変化

- ・廃棄物充填量: 炭酸塩スラリー30 [mass%]
- ・浸漬条件: 純水
- ・固液比: 1:10、1:100、1:500、1:1000、1:2000
- ・各液固比の計算において、固相の質量と体積の減少分を溶脱分とした。

#### 【計算結果から示唆されること】

- セメント系鉱物の溶解変質
  - ・Portlanditeが消失。
  - ・C-S-HのC/S比が低下。
  - ・M-S-Hが生成。
- 炭酸塩スラリー由来鉱物の変化
  - ・液固比2000でBruciteが消失し、Calciteが減少。
  - ・M-S-Hが生成。
- 溶解により固相の体積減少。

セメントについては、廃棄物固化体を検討する上で、必要となる充填率や温度変化、溶出特性に関する計算結果が得られた。

(a) 先行的処理方法の選定手法の構築 ① 低温処理技術

ii. 固化体変質に関する調査 (iii) 長期的な変質に与える影響因子の調査と評価  
【まとめ・次年度計画】

➤ 現在までのまとめ

- 熱力学データの収集と整備を行い、文献等の調査から熱力学的安定相・準安定相を抽出した。  
(AAM)
- AAM固体及び共存する液相の計算を実施、2018年度に取得したメタカオリン系AAMの溶出試験結果と比較し、複数の準安定相を設定することで再現の可能性を得た。  
(セメント)
- 炭酸塩スラリーを含む固化体の鉱物相、温度変化による鉱物相変化、水に接して溶出を受けた場合の鉱物相変化に係る解析値を得た。

➤ 次年度計画

(AAM)

- 廃棄物成分などを添加した場合の計算等を行い、熱力学平衡計算の現時点における適用性を明らかにし、課題を整理する。

(セメント)

- 鉄共沈スラリーの計算を行うとともに、他の実施項目で取得中のスラリーを含む固化体の分析、溶出試験、加熱乾燥試験などの結果と計算結果を比較することで、熱力学平衡計算の現時点における適用性を明らかにし、課題を整理する。

(a) 先行的処理方法の選定手法の構築  
 ② 処理技術の適用性評価アプローチの検討  
 【目標】

i. 廃棄物組成等の固化体性能への影響に関する調査検討

各処理技術が適用可能な固体廃棄物の範囲を評価するため、固体廃棄物の組成・化学形態や固化体組成による固化体性能への影響を検討する。

ii. 各処理技術の設備構成等に関するデータ取得

各処理技術の廃棄体仕様を評価するため、固化処理設備の概念を検討し、設備構成と処理効率、保守の内容、消耗品種類と交換頻度、二次廃棄物種類と量などの経済性データを取得し、技術調査表の追加更新を行う。

iii. 高温処理時のCs揮発量及び抑制に関する調査

高温処理技術ではCsの揮発が課題となるため、Csの揮発と抑制メカニズムを調査し、処理方法や運転条件によるCsの揮発特性を評価する。

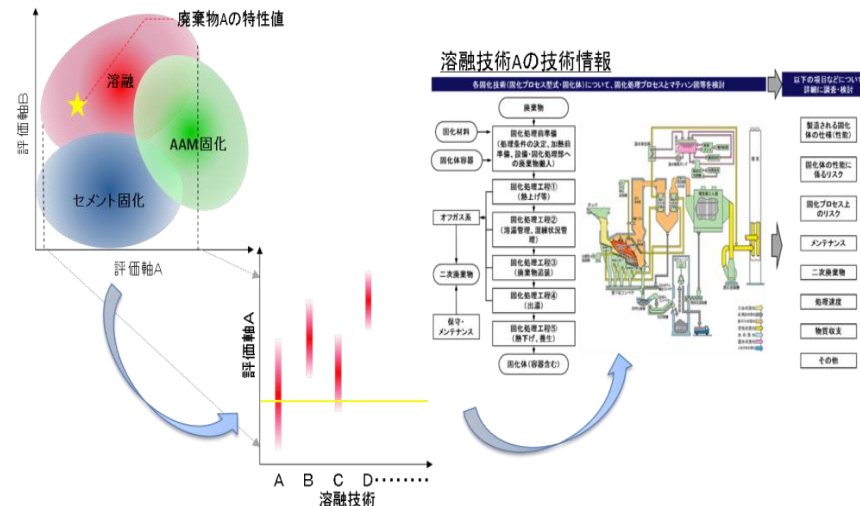


図1 開発する適用可能性評価方法(評価アプローチ)のイメージ

(a)先行的処理方法の選定手法の構築  
 ②処理技術の適用性評価アプローチの検討

i. 廃棄物組成等の固化体性能への影響に関する調査検討

【実施内容】

各処理技術が適用可能な固体廃棄物の範囲を評価するため、固体廃棄物の組成・化学形態や固化体組成による固化体性能への影響を検討する。高温処理の範囲については、データベース等を用いた範囲の検討を、低温処理の範囲については、別項目で実施している試験の結果や文献調査を通じて調査を行う。

2019年度は、データベースや文献等を用いた適用範囲の調査を行い、2020年度は不足しているデータを実験的に取得するとともに適用範囲の検討を行う。

年度	実施内容
2019	<p><b>各水処理二次廃棄物に対する充填濃度（組成範囲）の評価</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・文献等調査により、水処理二次廃棄物のガラス化試験（補助事業を含む）データを収集し、様々な充填濃度・組成でのガラス特性を整理する。</li> <li>・ガラス特性モデルに反映し、融点等のガラス特性を確保する範囲での、主な水処理二次廃棄物の最大充填濃度を評価する。</li> </ul>
2020	<p><b>複数廃棄物を混合する場合の充填濃度（組成範囲）の評価</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・低温系の実験で得られた結果、文献調査結果を反映し、廃棄物特性範囲の制限値、スラリーに関する充填濃度（混合可能範囲）を整理・評価する。</li> <li>・融点等のガラス特性を確保する範囲での、主な水処理二次廃棄物の最大充填濃度をガラス特性モデルで評価する。なお、必要に応じ、ガラス溶融試験により特性確認を行う（2019-2020）。</li> </ul>



## 【検討結果】 ～検討方法～

- 廃炉・汚染水対策事業において実測された福島第一原子力発電所模擬廃棄物のガラス固化試験の結果と公開文献のガラスデータと合わせて収集
- 拘束条件(融点、粘性、析出相の有無、等)を設定し、その条件の下での、水処理二次廃棄物の最高濃度を、ガラスデータベースの外挿により評価
  - ニューガラスフォーラムのINTERGLAD ver.8と部分提案者のデータを基に解析
- 水処理二次廃棄物は、量の多い、炭酸塩スラリー(Ca,Mg,Na)、ゼオライト類(Si,Al,Na)、チタン酸(Si,Ti)を主要成分として評価

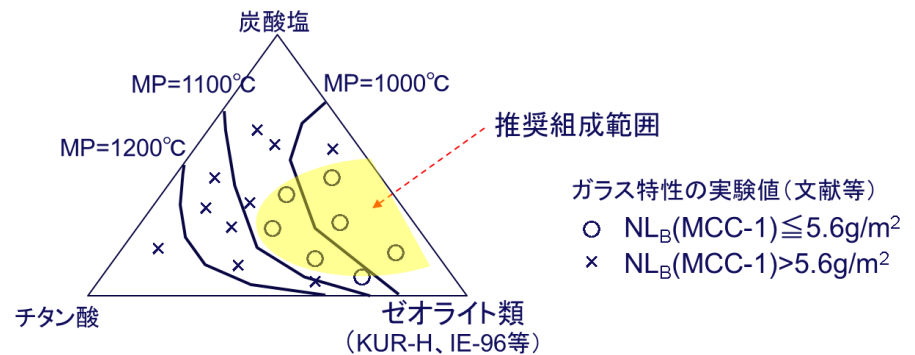


図2 評価結果のイメージ

## 【検討結果】

### ～ガラス特性モデルによる解析～

- INTERGLADからゼオライト50%超含有ガラスの物性データが計18,209件抽出でき(図3)、液相温度、粘度等について重回帰分析による推算式導出が可能だった(図4)。一方、炭酸塩スラリーやチタン酸含有ガラスについては、十分なデータがなく、推算式導出が困難であった。
- PNNL推算式(公開)と比較すると、粘度は $10^3$  dPa・s以下ではほぼ一致するものの、それ以上では高めとなった(図5)。次年度PNNL委託により推算式の精度を上げ、濃度範囲を評価する。

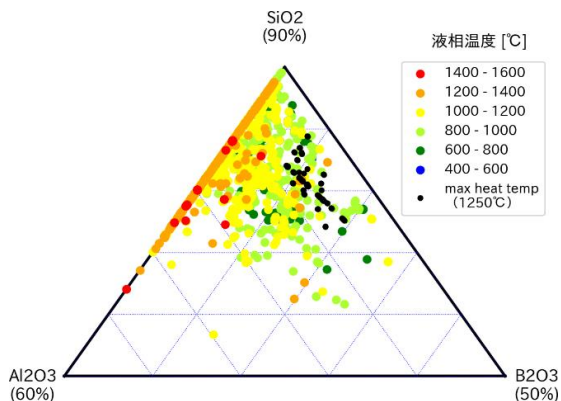
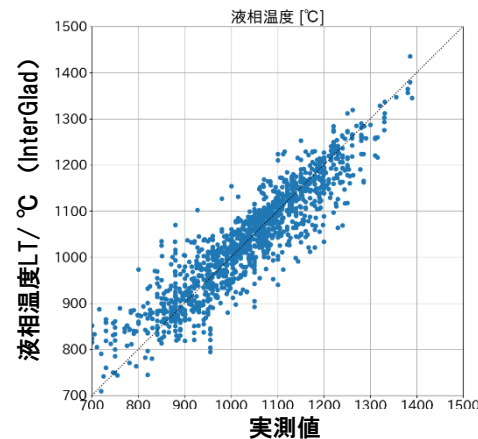


図3 液相温度のデータ  
(黒点は1250°Cで溶融確認)



$$\text{推算式 } LT[T/K] = \sum a_i x_i$$

図4 液相温度データの重回帰結果及び推算式例(xは含まれる元素iの量を示し、aは元素iに対する係数。)

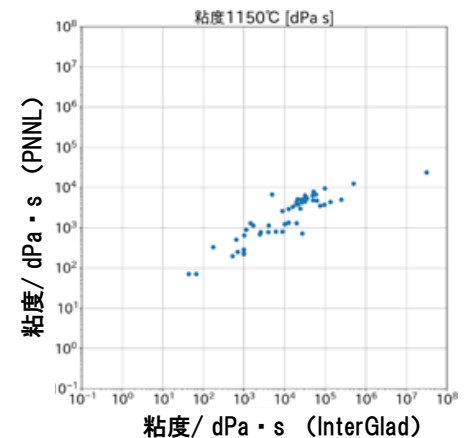


図5 異なる粘度推算式による評価値の比較  
(INTERGLADによる推算式とPNNL公開式)

(a)先行的処理方法の選定手法の構築  
②処理技術の適用性評価アプローチの検討  
i. 廃棄物組成等の固化体性能への影響に関する調査検討  
【まとめ・次年度計画】

➤ 現在までのまとめ

- 公開データに基づくニューガラスフォーラムのINTERGLAD ver.8と部分提案者のデータを基に解析し、ゼオライト含有組成のガラスについて、液相温度、粘度等について重回帰分析による推算式導出が可能であることを確認した。

➤ 次年度計画

- 公開データにPNNL独自のデータベース、部分事業者のデータ等を追加することにより、ガラスの物性推算式を導出し、ゼオライト(チャバサイト)、ケイチタン酸(CST)、炭酸塩スラリー等の水処理二次廃棄物について、ガラスに溶融できる濃度範囲を評価する。

(a)先行的処理方法の選定手法の構築  
 ②処理技術の適用性評価アプローチの検討  
 ii. 各処理技術の設備構成等に関するデータ取得  
 【実施内容】(1/2)

各処理技術の廃棄体仕様を評価するため、設備構成と処理効率、保守の内容、消耗品種類と交換頻度、二次廃棄物種類と量等の経済性データを調査し、整理する。

一部の技術については、固化処理設備の概念を検討するなどして、不足する経済性データを取得し、各技術の技術情報として整理する。

2019年度は、不足する経済性データの取得を行い、2020年度はこれまでに得られているデータも含めて調査結果を整理する。

年度	実施内容
2019	<p><b>各処理技術の設備構成等に関するデータ取得</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>各処理技術の適用性評価の一環として、対象とする技術について、設備構成や処理効率、保守の内容、消耗品種類と交換頻度、二次廃棄物量等のデータを調査・検討する。</li> <li>一部の技術については、さらにプロセスフローやマテリアルハンドリング等の検討を行い、各技術の技術情報として整理する。</li> </ul>
2020	<p><b>各技術の調査結果整理</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>これまでに得られているデータも含めて調査結果を整理する。</li> </ul>

(a) 先行的処理方法の選定手法の構築  
 ② 処理技術の適用性評価アプローチの検討  
 ii. 各処理技術の設備構成等に関するデータ取得  
 ～調査対象技術～

分類	固化処理技術方式		調査種別(大区分)		
			技術調査 (プロセスフロー、設備構成等の調査)	経済性に関するデータに 踏み込んだ調査 (線量による設備規模等の検討)	
高温 処理	ガラス 固化	流下式	ジュール加熱(LFCM)	2019年度	△ (低線量の場合の事例がなく、調査が可能 か等を2019年度に検討。)
			誘導加熱(AVM, AVH)	- (ジュール加熱と誘導加熱で代替評価可能と判 断)	- (ジュール加熱と誘導加熱で代替評価可能 と判断)
			誘導加熱(CCIM)	[部分事業]	[部分事業]
		InCan式	ジュール加熱(ICV)	2018年度	[部分事業]
			外部加熱(Dem&Melt)	[部分事業]	[部分事業]
	溶融 固化	流下式	誘導加熱	- (InCan/誘導加熱で代替評価可能と判断)	- (InCan/誘導加熱で代替評価可能と判断)
			プラズマ加熱	2019年度	△ (高線量の場合の事例がなく、調査が可能 か等を2019年度に検討。)
		InCan式	誘導加熱	2018年度	△ (高線量の場合の事例がなく、調査が可能 か等を2019年度に検討。)
低温 処理	セメント 固化	アウトドラム式	2018年度	2019年度	
		インドラム式	2018年度	2019年度	
	AAM 固化	アウトドラム式	- (工業的に検討されていない。セメントと同様の構 成であり代替評価できると判断)	- (線量の違いによる設備の対応性は、セメント固 化で代替評価できると判断)	
		インドラム式	2018年度		

- 固化処理技術方式のうち、調査を行っていないもの(ジュール加熱式、プラズマ加熱式)に関する技術調査
- 経済性に関するデータに踏み込んだ調査として、セメント固化技術について、線量に応じた設備付加(閉じ込めや遮蔽など)や設備の大きさに関する調査

## 【検討結果】

### ～水処理二次廃棄物への適用性調査～

- 水処理二次廃棄物の特性を挙げ、高温固化処理技術適用範囲を調査

廃棄物	問題となる廃棄物特性	制限値	
		LFCM	プラズマ加熱
全ての廃棄物	融点	1200°C未満	1650°C未満
	粘性	処理温度で10Pa・sオーダー以下※1 出湯時にも同等未満の粘性であることが必要	処理温度で約1Pa・sオーダー以下※1 出湯時にも同等未満の粘性であることが必要
	Cs濃度	濃度に関わらずオフガスへの移行がある(コールドキャップによる抑制対策が実施可)	濃度に関わらずオフガスへの移行がある。
	含水率	液体やスラリー状態での供給が可能	目安として5wt%以下
フェロシアンスラッジ	BaSO <sub>4</sub>	硫酸塩層の形成により、固化体浸出耐性が低下するため、廃棄物混合量の制限が必要。	融点降下のため、廃棄物混合量が制限される。SiO <sub>2</sub> の場合、廃棄物投入量は約50wt%。SO <sub>x</sub> として揮発すると予測されるため、硫酸塩層形成の観点からの制限はない。
	シアン化物	CNは分解・酸化され固化体内に残存しない。	CNは分解・酸化され固化体内に残存しない。
炭酸塩スラリー	CaCO <sub>3</sub>	融点降下剤の添加が必要	融点降下剤の添加が必要。(例えば、重量比で廃棄物:SiO <sub>2</sub> =66:34)
	Mg(OH) <sub>2</sub>	融点降下剤の添加が必要	
	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Naは融点降下させるため問題ないが、Naの化学形態によってはNaやCsの揮発が増加する。	
	ホウ酸	Bは融点降下させるため問題ないが、化学形態によってはBやCsの揮発が増加する。	
チタン酸塩	チタン酸塩	融点が処理温度を越える場合、融点降下剤が必要。	

※1 調査結果に基づく。但し、1桁異なっているが、プラズマ加熱の場合に原理的により低い粘度が要求されるということではない。



## 【検討結果】

～経済性に関するデータの取得(配置等に関する検討結果)～

- 水処理二次廃棄物の線量を考慮し、閉じ込め・遮蔽等の項目や設備規模を調査

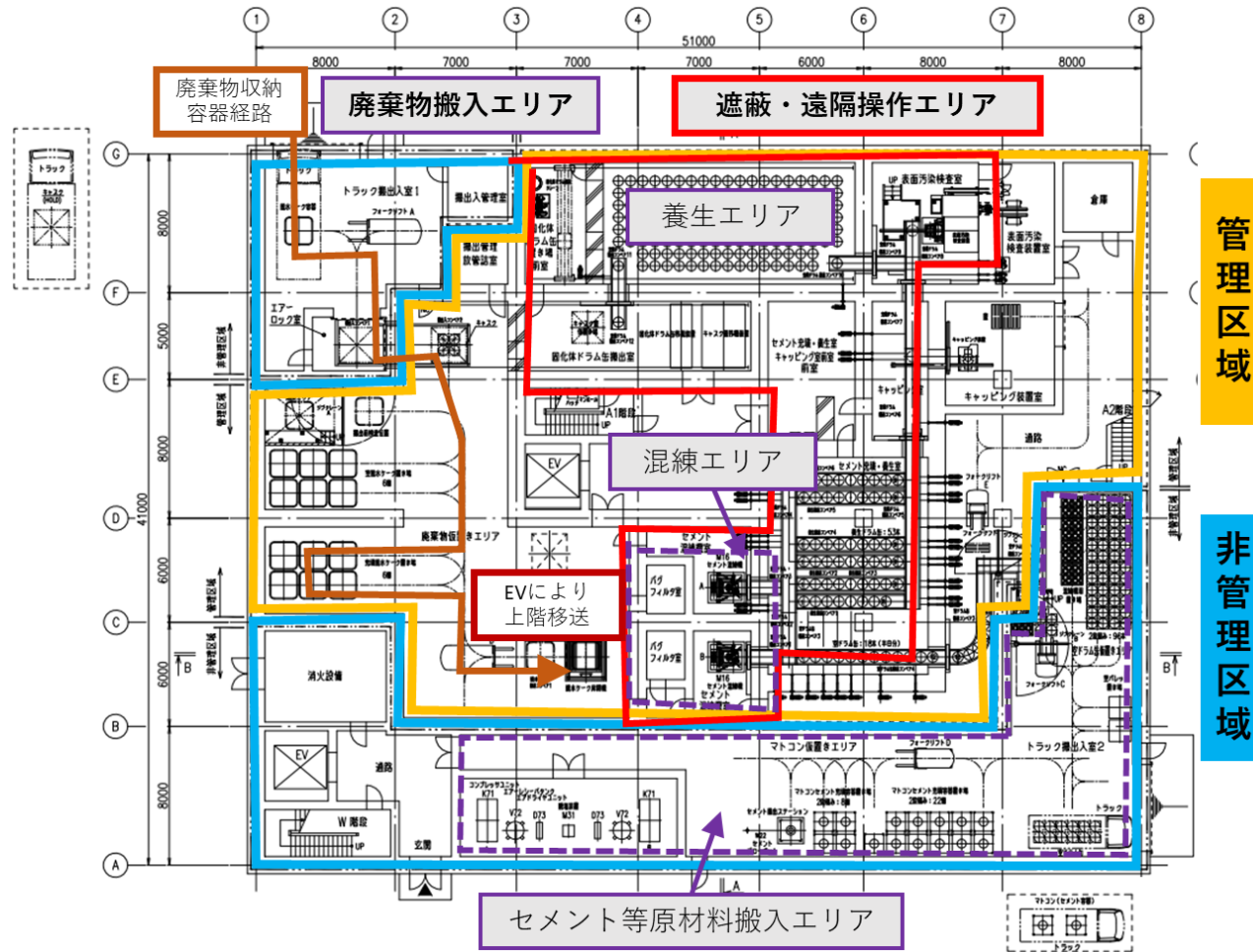


図1 遠隔操作・インドラム式セメント固化処理の機器配置図

# 【検討結果】

## ～経済性に関するデータの取得と工学的実用性の比較～

### 2018年度に続き各技術の工学的実用性を比較・検討

本年度調査した技術		LFCM	プラズマ加熱	セメント固化・イントラム式 (高線量※1-遠隔操作)	
対象水処理二次廃棄物 → 固化体製品		ゼオライト+炭酸塩スラリー → ガラス固化体	炭酸塩スラリー → 溶融固化体(スラグ)	炭酸塩スラリー → セメント固化体	
主な評価軸	技術実績	国内外で実規模にて実用段階 (HLW, LAW)	国内外で実規模にて実用段階(LLW)	国内外で廃棄物(LLW)の処理実績多数	
	プロセス	処理温度	1100～1200℃	～1600℃	常温
		処理速度	約～0.3t/h ※2	約0.2～0.3t/h ※3	0.24t/h(12バッチ/系列)-2系統
		Cs揮発率	Cs 不明※4	Cs 一例として50%	無
	運転性	高影響パラメータ	コールドキャップ形成, 処理温度, 出湯制御	組成調整, 処理温度, 出湯制御	廃棄物の含水量, 炭酸Na量
		プロセスリスク	非均質な固化体生成, 出湯部の閉塞, 容器損傷, コールドキャップ制御不能	冷却水漏れ, 容器損傷, 出湯不備	流動性不良時のバックアップ (水追加)困難
	経済性	主要設備構成	電力供給設備, オフガス系, 遮蔽設備	乾燥設備, 電力供給設備, トーチ, オフガス系, 遮蔽設備	材料供給設備, 攪拌設備, 防塵・排気設備, 遮蔽設備(遠隔操作系), 遮蔽付フォークリフト
		発生二次廃棄物	HEPAフィルタ, フィルタ残渣, 張替え耐火物, 電極	HEPAフィルタ, フィルタ残渣, 張替え耐火物, 電極	なし
		遠隔操作困難事項	炉内耐火物張替え	炉内耐火物張替え	なし
遮蔽エリアでのプロセス		廃棄物の供給・混合, ガラス化・出湯	低線量での実績のみのため不明, LFCMに同等と予測	廃棄物破砕, 計量, 混練, 固化体移送, 蓋閉め, 養生	
遮蔽/管理区域/全体建築面積(m <sup>2</sup> )		不明	0/不明/1450(地下2F, 地上2F 延べ4800)	700/1400/2100	
現場適用への成熟度の目安		模擬廃棄物での実規模レベルでの実証試験が必要	固化処理条件最適化の上で模擬廃棄物での実規模レベルでの実証試験, アクティブ試験が必要	模擬廃棄物での実規模レベルでの実証試験, アクティブ試験が必要	

※1 現状得られている炭酸塩スラリーにおける各核種のインベントリ測定最大値の約1/100が高線量と低線量の閾とした。

※2 ガラス製造速度1t/hとし, 固化体中の廃棄物充填率0.2, 前処理前廃棄物含水率50wt%として概算した。

※3 調査結果による。日本原子力発電のPACT-8やJAEAのプラズマ溶融炉で見積もった場合, 約0.2～0.5t/h。処理対象の配合比は, 炭酸塩スラリー: ガラス材=5:5。固化体密度2500kg/m<sup>3</sup>, 前処理前廃棄物含水率50wt%, 炭酸塩スラリー固体中の揮発分考慮。

※4 次年度に米国での実績値を調査予定。

(a) 先行的処理方法の選定手法の構築  
② 処理技術の適用性評価アプローチの検討  
ii. 各処理技術の設備構成等に関するデータ取得  
【まとめ・次年度計画】

➤ 現在までのまとめ

- 高温処理のLFCMとプラズマ溶融について、技術調査を進めた。
- 低温処理であるセメント固化・インドラム式については、水処理二次廃棄物の線量を考慮し、閉じ込め・遮蔽等の項目や設備規模といった経済性に関する項目を調査

➤ 次年度計画

- これまでに調査したデータを整理し、技術間の比較を行う際の評価軸となる項目を整理するとともに、各技術の適用範囲を図示する。
- 取りまとめる過程で、追加で必要となったデータ等について取得する。

(a)先行的処理方法の選定手法の構築  
②処理技術の適用性評価アプローチの検討  
iii. 高温処理時のCs揮発量及び抑制に関する調査  
【実施内容】

高温処理技術では Cs の揮発が課題となり、型式や設備構成等に強く影響する。

このため、実験室スケールで現象的にCs の揮発と抑制メカニズムを調査し、処理方法や運転条件による Cs の揮発特性を評価する。2019年度はCs揮発に関する情報の収集と揮発抑制に関する検討を行い、2020年度は少量の試料を用いた実験によりデータを取得する。



各種設備で採用されている温度管理や廃棄物の追加装荷によるCsの揮発率の抑制対策のメカニズムを調査確認することで、Cs揮発率の評価及び有効な抑制対策を提示

年度	実施内容
2019	廃棄物の高温処理におけるCsの揮発抑制に関わる知見の整理 ・ 関連する文献調査と各候補技術の工学試験結果を整理する
2020	水処理二次廃棄物の高温処理におけるCs揮発の抑制効果の測定 ・ KURION-H、IE-96、珪チタン酸、等でのCsの揮発抑制効果の評価（2019-2020） ・ ガラス構成材を入れたガラス固化を模擬する試料でのCsの揮発抑制効果の評価（2019-2020） ・ 整理した各型式の工学試験結果を、得られた理想的条件での揮発抑制効果と比較する。（2019-2020）

# (a) 先行的処理方法の選定手法の構築

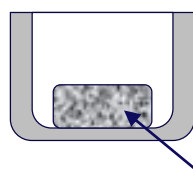
## ② 処理技術の適用性評価アプローチの検討

### iii. 高温処理時のCs揮発量及び抑制に関する調査

#### ～ 調査試験の概要(1/2) ～

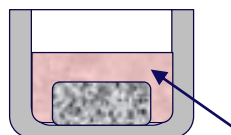
- TG-DTA等を利用し、水処理二次廃棄物からのCsの揮発が、抑制対策によりどの程度低下するかを測定する。

#### i) Cold Cap(低温)模擬

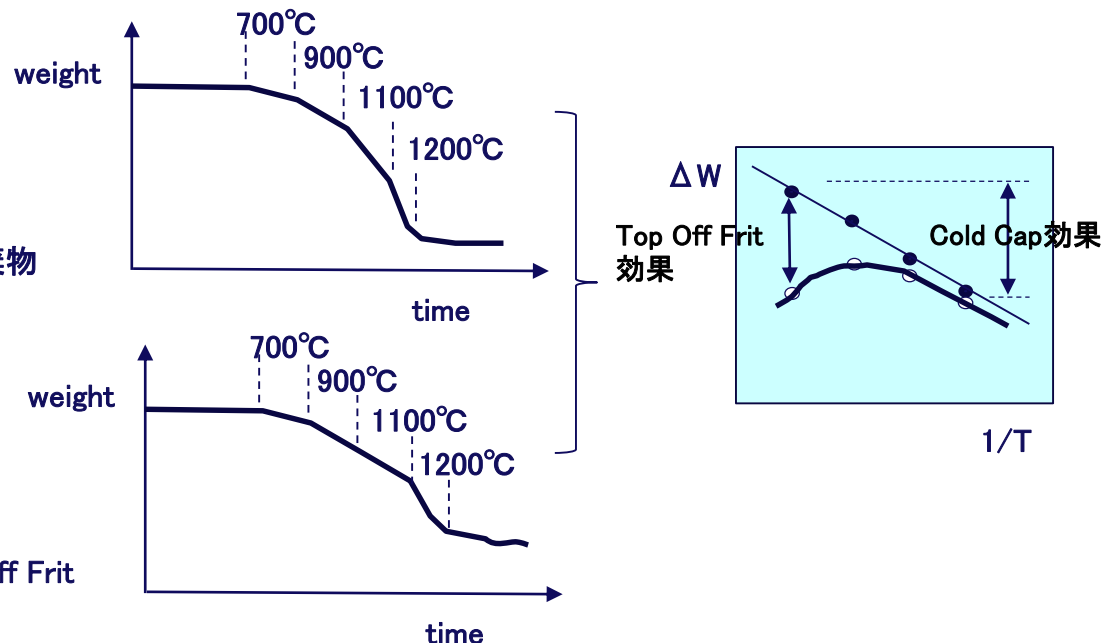


乾燥した水処理二次廃棄物

#### ii) Top Off Fritの模擬



Top Off Frit



Top Off Frit効果: 溶湯表面に低融点のガラス化剤を投入し、熔融温度を下げることで揮発を抑制する効果

Cold Cap効果: 熔融物上部に低温の固体コールドキャップを浮かせることで、蒸発面積を低減し揮発を抑制する効果

#### ➤ 試験の流れ

廃棄物試料単体での  
揮発挙動の把握

廃棄物にガラス化剤  
を添加した場合の揮  
発挙動把握

廃棄物+ガラス化剤  
+Cold Capの場合の  
揮発抑制効果確認

## 【検討結果】

### ～廃棄物の高温処理におけるCsの揮発抑制に関わる知見の整理～

#### ➤ 文献・実績調査

- ゼオライトのガラス固化時のCs揮発は、熔融温度やガラス添加剤(B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等)により大きく変化することが報告。その他の吸着材のCs揮発は殆ど報告なし。
- Cs揮発率は型式により差があるが、気密性や炉内温度制御、攪拌方法(バブリング)等の装置条件だけでなく、熔融温度やcold capの形成、廃棄物の混合割合、ガラス化材の選定などの運転条件も異なるため、判断が難しい。

型式	廃液供給セラミック溶融(LFCM)	ロータリーキルンか焼一誘導加熱(AVM, AVH)	水冷容器誘導加熱(CCIM)	ジュール加熱(GeoMelt)	外部加熱式(Dem&Melt)
運転温度 /加熱方法	1100～1200℃ /直接通電ジュール加熱	1150℃ /高周波誘導加熱(金属容器)	1000～1200℃ /高周波誘導加熱(ガラス)	1250℃ /直接通電ジュール加熱	900-1100℃ /外部ヒータ
工学規模試験 /実規模試験 におけるCs等 揮発データ	・吸着剤入り高レスラリーはWestValley、SRS、Hanfordで実機実績。高レベル硝酸廃液はWAK、JNFLで実機実績。 ・Cs揮発の実績は不明。	・ORANO-UP3で実機運転 ・Cs揮発が問題との情報があるが、具体的な揮発量は不明。	・IHIの工学規模試験でオフガス移行率がCs=数%以上 (他補助事業者の実施試験のため詳細不明)	・KURIONの工学規模試験でオフガス移行率Cs=1～9% (他補助事業者の実施試験のため詳細不明)	・ORANOの工学規模試験でオフガス移行率Cs=1%未満 (他補助事業者の実施試験のため詳細不明)
揮発抑制方法	・Cold Capの形成	・廃液供給により溶湯上面に低温のか焼層を形成する	・Cold Cap形成 ・ガラス組成の最適化による溶融温度の低下。 ・バブリングは最低限とする	・下部から溶融し、上部は低温を保って揮発を抑制。 ・廃棄物を最上部まで溶融する最終段階では、Top Off Fritと呼ばれる低融点ガラス材を投入して揮発を抑制する。	・比較的低温 ・温度コントロールが容易でCs揮発を抑制し易い

➡Cs揮発率の差を解釈するため、運転条件による揮発特性の変化データが必要



## 【検討結果】

### ～揮発抑制効果の確認～

#### ➤ 高温処理におけるCs揮発量の測定

- 異なる温度域での揮発量の明確化
- ・Csを吸着したゼオライトをガラス化剤とともに加熱。各温度域での重量減を測定。

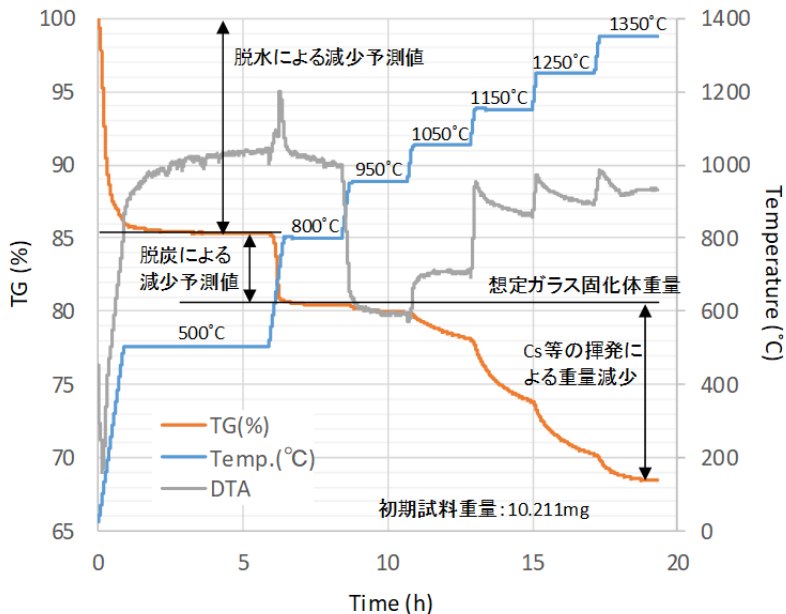


図1 試薬ベースで添加した試料のTG/DTA結果

異なる温度域での揮発による重量減少量を測定することで、熔融温度の違い(Cold Cap)による理想的な揮発量低減効果を明確にできた。

⇒データの取得を継続し、運転条件の差による揮発率の変化の傾向を把握。工学規模試験の結果等の差が、運転条件の差により説明できるかどうかを検討し、型式によるCs揮発率の比較に反映する。

- ガラス化剤添加による揮発量の変化
- ・Csを吸着したゼオライトに加えるガラス化剤を変えて、加熱し、重量減を測定。

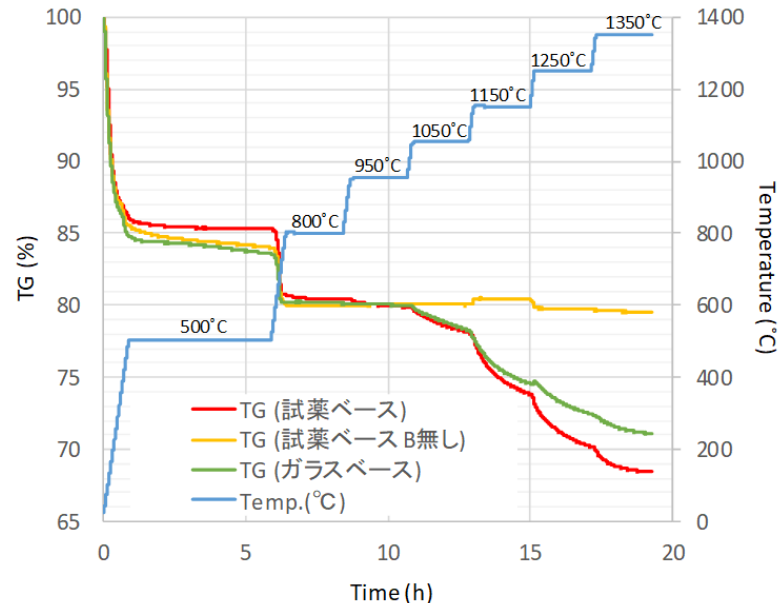


図2 各添加方法におけるTG分析結果

ガラス化剤の組成(Bの有無)、添加状態(試薬粉末、ガラス化粉末)の違いにより揮発量に変化が生じ、1000°C以上の温度で差が顕著になるといったデータを取得中。

(a)先行的処理方法の選定手法の構築  
②処理技術の適用性評価アプローチの検討  
iii. 高温処理時のCs揮発量及び抑制に関する調査  
【まとめ・次年度計画】

➤ 現在までのまとめ

- 廃棄物の高温処理におけるCsの揮発抑制に関わる知見の整理を行った。
- 実験室スケールで現象的にCsの揮発を測定する試験に着手した。

➤ 次年度計画

- 実験室スケールで現象的にCsの揮発を測定する試験を継続しデータを取得する。
- 工学試験結果の差が、運転条件の差により説明できるかどうかを検討し、評価軸としての型式によるCs揮発率の比較に反映する。

## (a)先行的処理方法の選定手法の構築 ～進捗状況のまとめ～

実施項目		概要	
① 低温処理技術	i. 技術の抽出に資する低温処理技術のデータ取得・評価	(i) 低温処理固化可能性検査手法の検討	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 模擬廃棄物の選定、評価手法の検討を終了</li> <li>● スクリーニングフロー案を作成</li> </ul>
		(ii) スラリーに対するセメント、AAM固化体の特性データ取得	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 炭酸塩スラリー模擬物製作</li> <li>● 模擬固化体の配合条件選定</li> <li>● 模擬固化体の製作および各種分析を継続実施中</li> </ul>
		(iii) 特殊セメント系の調査	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 文献調査及び試験対象セメントの選定終了</li> <li>● 対象特殊セメント母材の性能試験を終了</li> </ul>
	ii. 固化体変質に関する調査	(i) 加熱等による固化体変質の調査	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 加熱等による固化体変質の文献調査を終了</li> <li>● 熱付加試験を実施(一部継続中)</li> </ul>
		(ii) Cs等インベントリと固化体温度の関係性評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 容器のモデル化、シミュレーション計算(OPC)を終了</li> <li>● インベントリと固化体温度の関係性試行</li> </ul>
		(iii) 長期的な変質に与える影響因子の調査と評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>● AAM硬化体の熱力学平衡計算と実験結果との比較実施</li> <li>● 炭酸塩スラリーセメント固化体の変質挙動について熱力学平衡計算を試行</li> </ul>
② 処理技術の適用性評価アプローチの検討	i. 廃棄物組成等の固化体性能への影響に関する調査検討	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ガラス固化試験データの収集整理終了</li> <li>● ガラス特性モデル(InterGlad)による物性評価計算を終了</li> </ul>	
	ii. 各処理技術の設備構成等に関するデータ取得	<ul style="list-style-type: none"> <li>● プラズマ熔融、LFCM、セメント固化に係る調査終了</li> <li>● 技術調査表の追加更新</li> </ul>	
	iii. 高温処理時のCs揮発量及び抑制に関する調査	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Cs揮発に関する文献調査および工学試験結果の整理終了</li> <li>● 高温処理におけるCs揮発量の測定試験を継続実施</li> </ul>	

➤ ① i (ii)スラリーに対するセメント、AAM固化体の特性データ取得に一部遅れがあるものの、概ね、計画通り進捗している。

## (b) 処分方法の提示及び安全性評価手法の開発

### ① 固体廃棄物の分類に応じた処分方法の検討と安全評価手法の構築に向けた情報の収集・整理

#### ■ 実績

- 海外処分場調査を行い、重要事例を抽出するとともに、福一廃棄物処分への適用性について評価した。
- 廃棄物マネジメント戦略を検討するための、処分概念検討プロセスを構築した。

#### ■ 目標

- 固体廃棄物の分類に応じた廃棄体イメージ、および処分方法を示す。

#### ■ 実施内容

- 2019年度には、国内外の処分概念及び安全性評価手法に関する調査内容並びに固体廃棄物の性状に関する情報を踏まえ、固体廃棄物の分類に応じた複数の処分方法を検討する。処分方法毎の安全評価手法の構築に向けて、検討を要する項目の洗い出しを行なう。検討した処分方法について、固体廃棄物の特徴に応じた適用可能な各処理技術による廃棄体のイメージを明確化するための考え方を整理する。
- 2020年度には、引続き国内外の処分概念及び安全性評価手法に関する調査内容並びに固体廃棄物の性状に関する情報を踏まえ、固体廃棄物の分類に応じた複数の処分方法を検討する。洗い出した検討を要する項目について、必要な情報を収集・整理する。検討した処分方法について、固体廃棄物の特徴に応じた適用可能な各処理技術による廃棄体のイメージを検討する。

#### ■ 目標達成を判断するための指標

- (2019年度) 処分方法毎の安全評価手法の構築に向けて、検討を要する項目の提示。廃棄体のイメージを明確化するための考え方の提示。
- (2020年度) 固体廃棄物の分類に応じた複数の処分方法の提示。洗い出した検討を要する項目について、必要な情報の提示。廃棄体のイメージの提示。



図1 英国における廃棄物処分戦略

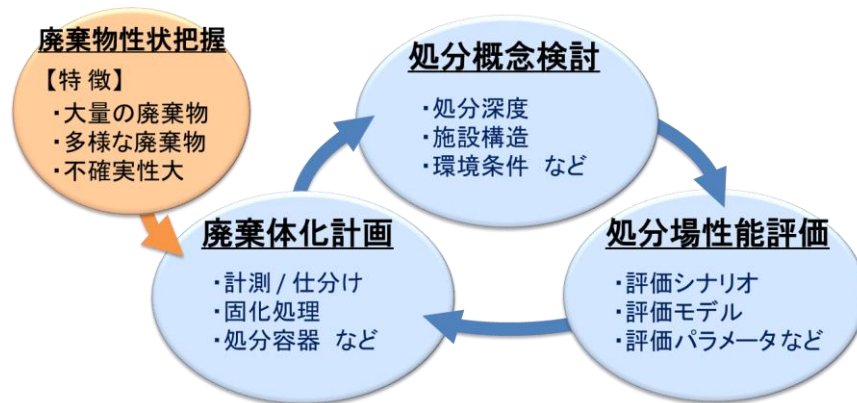


図2 処分概念検討プロセス

(b) 処分方法の提示及び安全性評価手法の開発

① 固体廃棄物の分類に応じた処分方法の検討と安全評価手法の構築に向けた情報の収集・整理

	2019		2020	
1. 研究計画の立案、見直し				
2. 外注仕様の検討、契約				
3. 廃棄物の特徴の整理および分類				
4. 処分概念の検討	2019年度対象廃棄物 		2020年度対象廃棄物 	
5. 安全評価手法の検討	2019年度対象廃棄物 		2020年度対象廃棄物 	
6. 廃棄体への要求事項の検討				
7. 廃棄体イメージの検討				

■ 実施内容詳細(案)

1. 研究計画の立案、見直しを行う。
2. 外注仕様の検討および契約を行う。
3. 固体廃棄物の特徴を整理し、分類する。
4. 固体廃棄物の特徴に適した処分概念を検討する。
5. 検討した処分概念について、処分場性能評価を行う。
6. 処分からの廃棄体への要求事項を検討する。
7. 適用可能な各処理技術による廃棄体のイメージを検討する。



## 2017-2018年度の成果・課題と2019-2020年度の検討方針

### <2017-2018年度の主な成果>

#### 1. 海外処分場の事例調査

- 海外処分場の事例を抽出し、福一廃棄物処分への適用性について評価した。

#### 2. 処分概念の検討プロセスの構築

- 廃棄体化計画(計測/仕分け、固化処理、容器など)、処分概念検討、処分場性能評価を連環的に検討する、処分概念検討プロセスを構築した。

#### 3. 複数の処分概念に対するケーススタディ

- 処分施設、処分容器、固化体のそれぞれについて閉じ込め性能を改善した場合のケーススタディを行い、効果の確認やフィードバックが可能であることを確認した。

### <課題と2019-2020年度の検討方針>

#### 1. 廃棄物ごとの特徴を考慮した処分概念の検討

- ▶ 2019-2020年度の検討にて、廃棄物ごとの特徴を検討、整理する。
- ▶ 廃棄物ごとの特徴に基づいた、処分概念を導出するプロセスを検討する。

#### 2. 安全評価手法の構築に向けた課題、検討を要する項目の抽出

- ▶ 仮想廃棄体、仮想処分場に対して最新の規制を考慮した安全評価を行い、安全評価における課題や必要なパラメータを検討する。

#### 3. 処分安全からの廃棄体要求事項の考え方の検討

- ▶ 廃棄物ごとの特徴に基づき、廃棄体化の考え方、及びその要求事項を検討する。



(b) 処分方法の提示及び安全性評価手法の開発

① 固体廃棄物の分類に応じた処分方法の検討と安全評価手法の構築に向けた情報の収集・整理

**2019-2020年度の進め方(1/2)**

< 計画立案にあたり、関係者で協議した事項 >

- **検討する廃棄物の種類は**、広範な廃棄物を網羅していること、及び、これまでの検討成果を利用できることから、性状把握にて検討している推定インベントリの**事故廃棄物27種類**とする。
- 現時点では、インベントリの不確かさ、及び処分サイトが決定していないことによる線量評価パラメータの不確かさなどがあり、線量評価の結果は数桁の不確実性を含むものと推測する。  
そのため本検討では、線量評価の結果は参考値とし、**処分方法を決定するためのプロセス構築、及びその課題抽出を主眼に置く**。
- まずは出発点として**予備的に線量評価**を行う。ここでは、事故廃棄物27種類を原廃棄物として、トレンチ・ピット・中深度に仮想的に処分した場合の線量を評価し、規制庁の検討中も含めた基準値と比較する。個々の廃棄物に関して、どの処分区分が想定されるのか、処分概念のベースとして予備的に検討する。  
この処分区分を基に、廃棄物ごとの特徴を踏まえて処理・処分方策を検討し、**廃棄物の分類に応じた処分概念**の提示を目指す。

表1 事故廃棄物27種類の例

廃棄物種類	
水処理廃棄物	Kurion
	AREVAスラッジ
	SARRY
	炭酸塩沈殿スラリー
	ALPS使用済吸着材(チタン酸塩)
瓦礫	<0.005 mSv/h
	0.005-0.1 mSv/h
	0.1-1 mSv/h
	1-30 mSv/h
	>30 mSv/h
解体廃棄物	RPV廃棄物(事故前L1)
	PCV内金属(事故前L2)
	建屋内金属(事故前L3)
	建屋内コンクリート(事故前非放)

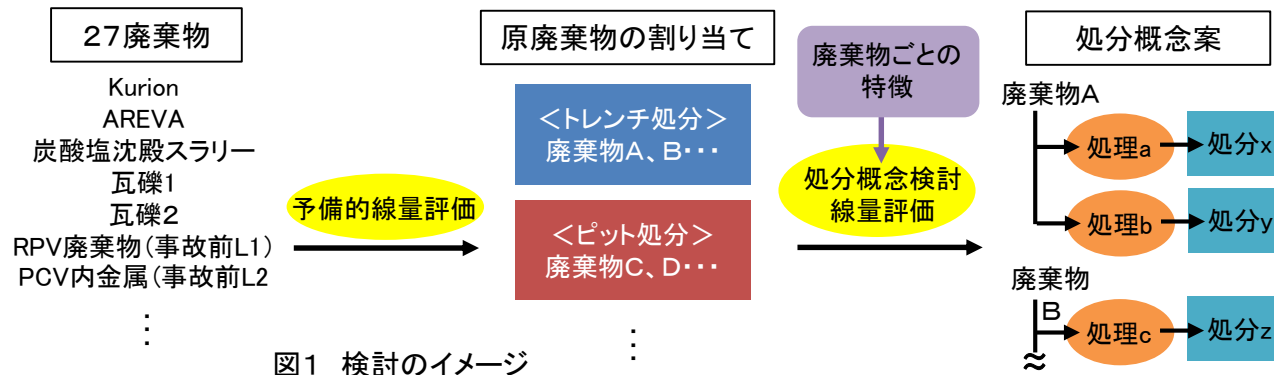
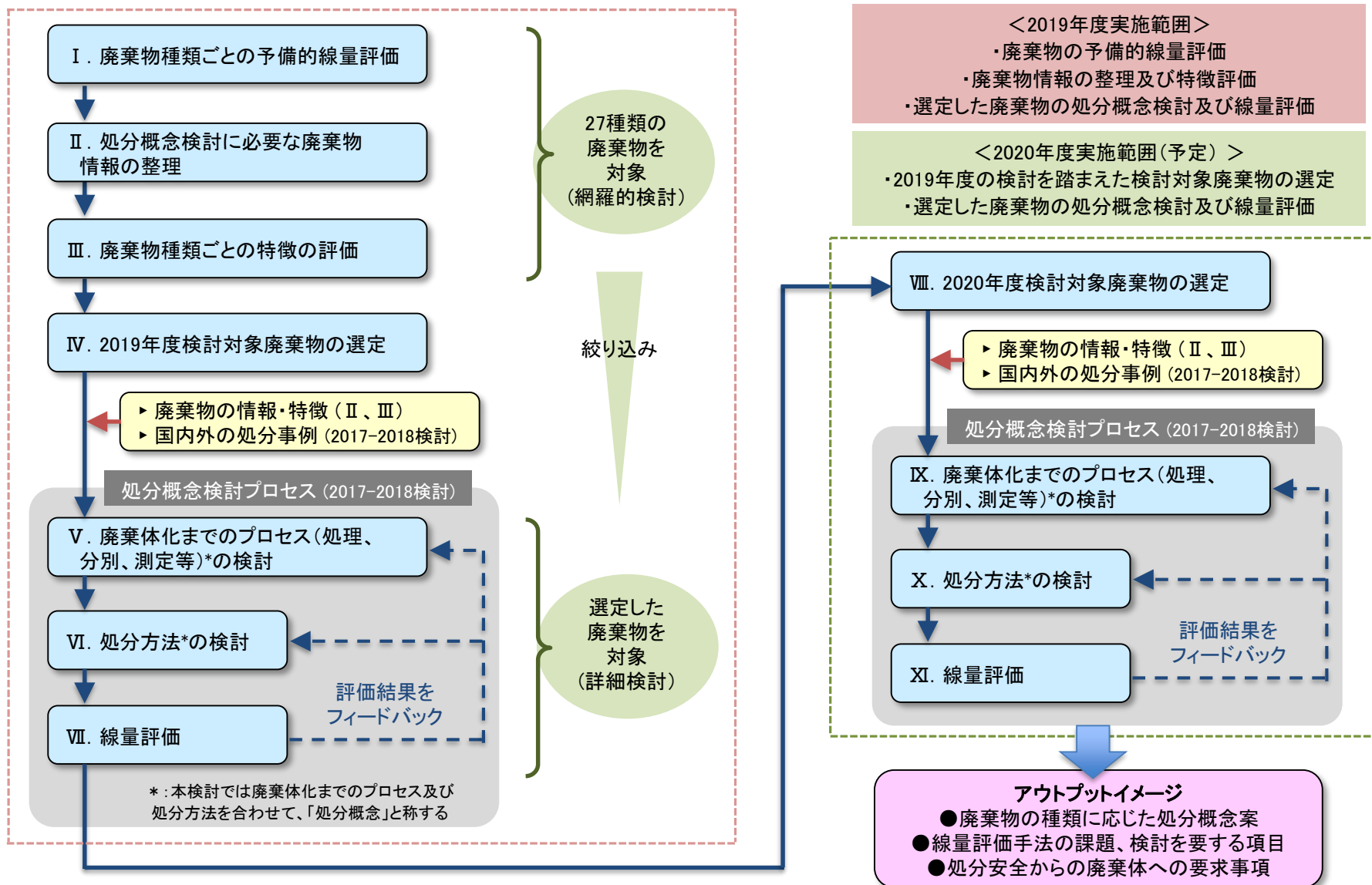


図1 検討のイメージ

(b) 処分方法の提示及び安全性評価手法の開発

① 固体廃棄物の分類に応じた処分方法の検討と安全評価手法の構築に向けた情報の収集・整理  
**2019-2020年度の進め方(2/2)**



### I. 廃棄物種類毎の予備的線量評価

目的

評価方法の概要

インベントリ  
(27廃棄物)

接近シナリオでの  
線量評価

地下水シナリオでの  
線量評価

予備的な処分区分  
の割り当て

**事故廃棄物27種類**(水処理二次廃棄物, 瓦礫, 伐採木, 解体廃棄物)を、**トレンチ処分・ピット処分・中深度処分・地層処分に割り当てる。**

- ▶ I では、**原廃棄物を想定**する。ただし、地下水シナリオにおける溶出期間の被ばく線量への感度はパラメータスタディにより評価。
- ▶ I では、2017-2018年度に調査した海外事例(人工バリア等)は考慮しない。

**地下水シナリオ**と**接近シナリオ**を利用する。

2017-2018年度IRID検討成果である、事故廃棄物27種類(水処理二次廃棄物, 瓦礫, 伐採木, 解体廃棄物)の推定インベントリを用いた。

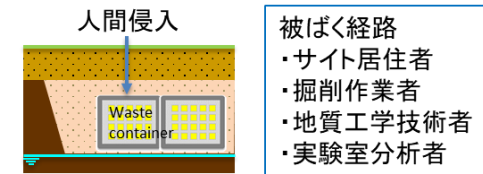
以下のパラメータサーベイを実施

- ▶ インベントリ(50%ile、95%ile)
- ▶ 発生時期(トレンチ; 50~600年、ピット; 300~600年)

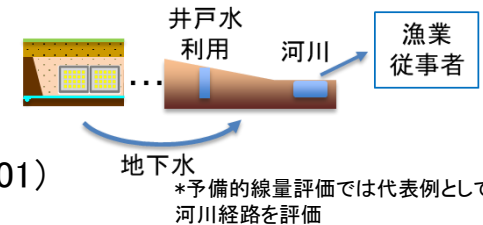
以下のパラメータサーベイを実施

- ▶ インベントリ(50%ile、95%ile)
- ▶ 処分影響物質有無による影響
- ▶ 溶出期間(1y ~ 100,000y)、浸透水量(基準値 x1 ~ x0.001)

事故廃棄物27種類(水処理二次廃棄物, 瓦礫, 伐採木, 解体廃棄物)をトレンチ処分, ピット処分, 中深度処分, 地層処分に割り当てた。



\*予備的線量評価では代表例としてサイト居住者を評価



## I. 廃棄物種類毎の予備的線量評価

### 予備的線量評価 結果まとめ

27種類の廃棄物について、主に原廃棄物を想定し、処分区分を割り当てた。

- ➡ **接近シナリオ**では、シナリオが生じた場合の線量は概ね処分の方法(定置密度)に依存する。  
このシナリオに対しては、以下の項目が対策になりうる。
  - ・**インベントリの保守性の低減**
  - ・**管理期間の延長**
  
- ➡ **地下水シナリオ**では、未対策では深い深度での処分が必要とされる廃棄物が大部分を占める。  
このシナリオに対しては以下の項目が対策となりうる。
  - ・**インベントリの保守性の低減**
  - ・**処分影響物質の影響排除**により、天然バリアおよび分配平衡領域の分配収着性能を低下させない
  - ・**核種移行対策**(固化処理、人工バリア設置)
  
- ➡ 上記の**対策を講じた場合の効果**(線量や処分区分の変化)を感度評価し、**廃棄物の種類ごとに整理**した。

## II. 廃棄物情報の整理

予備的線量評価の結果、および、これまでのIRID検討等から、処分概念を検討するにあたり必要な廃棄物情報を整理した。

### 対象とした廃棄物

インベントリと紐づいた27種類の廃棄物

#### 水処理二次廃棄物

- ▶ KURION
- ▶ AREVA
- ▶ SARRY
- ▶ スラリー1 鉄共沈
- ▶ スラリー2 炭酸塩沈殿
- ▶ ALPS-4 Ag添着活性炭
- ▶ ALPS-2 チタン酸塩  
など

#### 瓦礫・伐採木

- ▶ 瓦礫1～5
- ▶ 伐採木

#### 解体廃棄物

- ▶ RPV廃棄物(事故前L1, L2)
- ▶ PCV廃棄物(金属)(事故前L2, L3)
- ▶ PCV廃棄物(コンクリート)(事故前L2, L3)
- ▶ 建屋内廃棄物(金属)(事故前L3, 非放)
- ▶ 建屋内廃棄物(コンクリート)(事故前L3, 非放)

### 整理項目(抜粋)

#### 基本情報

- ▶ 物量

#### 放射能特性

- ▶ 核種ごとの放射エネルギー
- ▶ 放射エネルギーの不確実性
- ▶ 処分形態  
接近シナリオ、地下水シナリオ

#### 物性

- ▶ 物理的性状  
形状、大きさ、形状安定性、分散性、  
可溶性、閉じ込め性
- ▶ 化学的性状  
材質・物質、含水率、  
含有物(毒物、影響物質、有機物)

#### 保管、処理

- ▶ 保管状況  
発生状況(既発生、今後発生)、保管形態
- ▶ 処理オプション

<情報のソース>

2018年度検討  
推定インベントリ

I. 予備的線量評価

廃棄物PJ検討成果、  
公開情報など



### Ⅲ. 廃棄物特徴の評価

#### 「物量」の大きい廃棄物の例

- ▶ 瓦礫1 (0~0.005mSv/h)などの瓦礫類  
瓦礫類全体では数十万m<sup>3</sup>のオーダーであり、六ヶ所の最大予定量と同程度。
- ▶ 建屋内コンクリート(事故前非放)  
事故時の汚染により放射性廃棄物になったもので、物量は数十万m<sup>3</sup>のオーダー。汚染状況による物量の変動有り。
- ▶ KURION、炭酸塩スラリー  
水処理二次廃棄物は比較的物量は小さいが、吸着材としてはKURIONが、スラリー・スラッジとしては炭酸塩スラリーが最も多い。

物量・多様性・不確実性に  
着目し、27種類の廃棄物の  
特徴を評価した。

#### 「多様性」の大きい廃棄物の例

- ▶ 水処理二次廃棄物全般  
福一固有の廃棄物。設備の運転履歴等により、同じ種類の廃棄物でも混在している放射性物質・化学物質の量は異なる。
- ▶ 瓦礫類  
主要な廃棄物は金属とコンクリートであるが、汚染(量、汚染形態)や混入物(種類、量)のばらつきがある。
- ▶ 解体廃棄物  
廃棄物自体は一般廃炉の解体廃棄物と同じく放射化されており、かつ放射性気体、微粒子、汚染水による汚染の程度の幅は広い。  
燃料デブリ取り出しや解体時の他の種類の廃棄物や化学物質の混入の可能性あり。
- ▶ 建屋内コンクリート(事故前非放)  
一般廃炉では放射性廃棄物として分類されないものであり、汚染が福一固有である。

#### 「不確実性」の大きい廃棄物の例

- ▶ 水処理二次廃棄物全般  
今後の設備の運転状況等により発生量の変動あり。核種吸着量のばらつき等から、放射能特性の不確実性も大きい。
- ▶ 解体廃棄物  
汚染状況により放射能特性が変動するため、不確実性が大きい。
- ▶ 建屋内コンクリート(事故前非放)  
汚染状況により発生量や放射能特性が変動するため、不確実性が大きい。



## IV. 各年度検討対象廃棄物の選定

これまでの検討結果より、詳細検討(V～VII)の対象として、8種類の廃棄物を選定

表1 選定した廃棄物

No.	廃棄物	カテゴリ	廃棄物の概要
1	KURION	水処理二次廃棄物	C-137等の放射性核種を吸着したゼオライト等の吸着材、および包蔵する金属容器
2	AREVA	水処理二次廃棄物	Sr-90等の放射性核種を含む沈殿物(フェロシアン化物, 硫酸バリウム等を含む)
3	スラリー2 炭酸塩沈殿	水処理二次廃棄物	水処理設備で発生した炭酸塩スラリー(主成分はCaCO <sub>3</sub> , Mg(OH) <sub>2</sub> )で代表的な核種はSr-90
4	瓦礫1(0 - 0.005 mSv/h)	瓦礫類	構内の建屋等の構造物が破砕、解体されて汚染したもので、主要材料は金属とコンクリート
5	瓦礫2(0.005 - 0.1 mSv/h)	瓦礫類	より放射エネルギーが大きいことを除き、瓦礫1と同様
6	圧力容器廃棄物(事故前L1)	解体廃棄物	圧力容器内の放射化金属に、事故由来の燃料デブリ、セシウム等が付着
7	PCV内廃棄物(金属)(事故前L2)	解体廃棄物	格納容器内の放射化金属(PCV本体, 機器)に、事故由来の燃料デブリ、セシウム等が付着
8	建屋内廃棄物(コンクリート)(事故前非放)	解体廃棄物	建屋及び建屋内の非放射性コンクリートに、高濃度汚染水及び/または汚染空気が付着

## ＜選定した廃棄物の代表性＞

<p><b>放射能濃度</b></p> <p>非常に高い廃棄物(KURION、圧力容器廃棄物)から低い廃棄物(瓦礫1)まで網羅</p>	<p><b>カテゴリ</b></p> <p>水処理二次廃棄物、瓦礫類、解体廃棄物のカテゴリから、複数の廃棄物を選定</p>
<p><b>見込まれる処分概念</b></p> <p>L3～L1、地層処分が見込まれる廃棄物を網羅</p>	<p><b>主要核種</b></p> <p>放射化と汚染による短半減期核種と長半減期核種を含む</p>
<p><b>物理的性状物質の種類</b></p> <p>スラリーや建築材料(建屋コンクリート)、金属系原子炉構成材を含む</p>	<p><b>放射能分布不均一性</b></p> <p>比較的一様な水処理二次廃棄物と不均一に表面汚染した固体廃棄物を含む</p>
<p><b>影響物質</b></p> <p>有機物を含む可能性のある瓦礫類処分、環境影響物質を含む(AREVA)</p>	<p><b>含水性と移動性</b></p> <p>ハザードリスク低減のために固化することが要求される可能性がある含水廃棄物を含む</p>
<p><b>原廃棄物量</b></p> <p>最も物量の多い二つの原廃棄物(瓦礫1及び建屋内コンクリート(事故前非放))から物量の少ない原廃棄物まで網羅</p>	<p><b>発生時期</b></p> <p>サイトで現在貯蔵している既存廃棄物(瓦礫など)及び数十年後に発生する解体廃棄物を含む</p>

## IV. 各年度検討対象廃棄物の選定

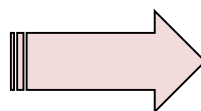
### 「V. 廃棄体化までのプロセス検討」、「VI. 処分方法の検討」、「VII. 線量評価」の検討方針

- ① 「V. 廃棄体化までのプロセス検討」では、廃棄物ごとの特徴を踏まえ、複数の処理オプションを検討する。
- ② 「VI. 処分方法の検討」では、地表処分概念 (L3)、浅地中処分概念 (L2)、中深度処分概念 (L1) の3区分について、浸透水量を低減するための人工バリアを設置した処分場概念を検討する。
- ③ 「VII. 線量評価」では、V、VIで検討した処理オプション、人工バリアを線量評価に取り込むためのモデル・パラメータを検討する。ここでは、長期の制度的管理を前提とし、諸外国事例等を参考に核種移行・生物圏等のパラメータを見直す。

#### 予備的線量評価・特徴評価 ( I ~ III )

対象: 27廃棄物(網羅的)  
発生時期・Kd・溶出率・浸透水量等を感度的に評価

対策の方向性を検討



#### 処分概念検討・線量評価 ( V ~ VII )

対象: 選定した8廃棄物

- 処分オプション、処分方法を設定
- 線量評価のためのモデル、パラメータを整備

具体的な対策案と  
評価方法を検討

(b) 処分方法の提示及び安全性評価手法の開発

① 固体廃棄物の分類に応じた処分方法の検討と安全評価手法の構築に向けた情報の収集・整理

V. 廃棄体化までのプロセスの検討



建屋内コンクリート(事故前非放)の廃棄体化までの複数のプロセスを検討し、発生する廃棄体ごとに放射エネルギー・物量を設定。

表1 処理オプションごとのフロー  
(建屋内廃棄物(コンクリート)(事故前非放)を例示)

図1 建屋コンクリートのイメージ

	オプションA	オプションB	オプションC		
原廃棄物	建屋内コンクリート (事故前非放)				
処理	ダイヤモンドワイヤーで切断	汚染表面はつり ↓ 除染物 → 汚染表面物 ↓ ↓ 破碎・粉砕・材料の分離 ISOコンテナ内グラウト充填	破碎・粉砕・材料の分離	汚染瓦礫 → 放射性瓦礫 → パッケージ化・グラウト充填	放射能ごとに分離 → 放射性瓦礫 → パッケージ化・グラウト充填
処分/再利用	コンクリートブロック	コンクリートから、鉄筋 (CLレベル)      汚染表面物パッケージ	コンクリートから (CLレベル)	コンクリートからパッケージ	鉄筋 (CLレベル)
放射能・体積変化 <sup>注)</sup>	100%・100%	0%・98%      100%・2%	0%・89%	100%・17%	0%・1%

注) NEA/RWM/R(2011), NDA/RWM/120(2015)を参考に設定。%は原廃棄物に対する割合。

### V. 廃棄体化までのプロセスの検討

KURIONの廃棄体化までの複数のプロセスを検討し、発生する廃棄体ごとに放射エネルギー・物量を設定。

表1 処理オプションごとのフロー(KURIONを例示)

	オプションA	オプションB	オプションC	オプションD
原廃棄物	KURION			
処理	吸着材抽出・分離 ↓ 吸着材 → SS容器内グラウト充填 一時保管容器 → 熔融 → スラグ → SS容器内グラウト充填	吸着材抽出・分離 ↓ 吸着材 → 脱水圧縮 → 遮へい付高耐久性容器内グラウト充填 一時保管容器 → 熔融 → スラグ → SS容器内グラウト充填	吸着材抽出・分離 ↓ 吸着材 → ガラス固化 → SS容器収納 一時保管容器 → 熔融 → スラグ → SS容器内グラウト充填	乾燥
処分/再利用	吸着材パッケージ スラグパッケージ 金属 (CLLバル)	吸着材パッケージ スラグパッケージ 金属 (CLLバル)	吸着材パッケージ スラグパッケージ 金属 (CLLバル)	乾燥した原廃棄物
放射能・体積変化 <sup>注)</sup>	99%・198% 1%・3% 0%・96%	99%・60% 1%・3% 0%・96%	99%・36% 1%・3% 0%・96%	100%・100%

注)IAEA. TRS No 401(2001), NDA/RWM/120(2015), IHI Engineering Review/ Pp25 Vol5, Issue 1(2018)を参考に設定。%は原廃棄物に対する割合。

## (b) 処分方法の提示及び安全性評価手法の開発

## ① 固体廃棄物の分類に応じた処分方法の検討と安全評価手法の構築に向けた情報の収集・整理

## V. 廃棄体化までのプロセスの検討

表1 水処理二次廃棄物の処理オプション

廃棄物	処理オプション	説明	廃棄体	放射能・体積変化 <sup>注)</sup>
AREVA	A	スラッジをステンレススチール（SS）容器内でグラウト充填	スラッジパッケージ（SS容器内グラウト充填）	100%・330%
	B	スラッジを脱水圧縮し、遮へい付高耐久性容器に収納	スラッジパッケージ（高耐久性容器）	100%・100%
	C	スラッジをガラス固化し、SS容器に収納	ガラス固化体パッケージ（SS容器）	100%・60%
	原廃棄物	原廃棄物処分（処理/パッケージ化を検討しない）	原廃棄物	100%・100%
Kurion	A	一時保管容器と吸着材を分別。 一次廃棄物（吸着材）をSS容器内グラウト充填 二次廃棄物（一時保管容器）を溶融し、スラグをSS容器内グラウト充填	吸着材パッケージ（SS容器内グラウト充填）	99%・198%
			スラグパッケージ（SS容器内グラウト充填）	1%・3%
			金属（CLレベル）	0%・96%
	B	一時保管容器と吸着材を分別。 一次廃棄物（吸着材）を脱水圧縮し、遮へい付高耐久性容器グラウト充填 二次廃棄物（一時保管容器）を溶融し、スラグをSS容器内グラウト充填	吸着材パッケージ（高耐久性容器内グラウト充填）	99%・60%
			スラグパッケージ（SS容器内グラウト充填） 金属（CLレベル）	1%・3% 0%・38%
	C	一時保管容器と吸着材を分別。 一次廃棄物（吸着材）をガラス固化し、SS容器に収納 二次廃棄物（一時保管容器）を溶融し、スラグをSS容器内グラウト充填	ガラス固化体パッケージ（SS容器）	99%・36%
			スラグパッケージ（SS容器内グラウト充填） 金属（CLレベル）	1%・3% 0%・38%
	D	一時保管容器内で乾燥し、直接処分	乾燥した原廃棄物	100%・100%
原廃棄物	原廃棄物処分（処理/パッケージ化を検討しない）	原廃棄物	100%・100%	
スラリー2 炭酸塩沈殿	A	一時保管容器とスラリーを分別。 一次廃棄物（スラリー）をSS容器内でグラウト充填 二次廃棄物（一時保管容器）を溶融し、スラグをSS容器内でグラウト充填	スラリーパッケージ（SS容器内グラウト充填）	99%・195%
			スラグパッケージ（SS容器内グラウト充填）	1%・3%
			金属（CLレベル）	0%・45%
	B	スラリーと高性能容器とを分ける。 一次廃棄物（スラリー）を脱水圧縮し、遮へい付高耐久性容器に収納 二次廃棄物（一時保管容器）を溶融し、スラグをSS容器内でグラウト充填	スラリーパッケージ（高耐久性容器）	99%・53%
			スラグパッケージ（SS容器内グラウト充填）	1%・3%
			金属（CLレベル）	0%・45%
	C	スラリーと高性能容器とを分ける。 一次廃棄物（スラリー）をガラス固化し、SS容器にてパッケージ化 二次廃棄物（一時保管容器）を溶融し、スラグをSS容器内でグラウト充填	ガラス固化体パッケージ（SS容器）	99%・32%
			スラグパッケージ（SS容器内グラウト充填） 金属（CLレベル）	1%・3% 0%・45%
D	一時保管容器内で乾燥し、直接処分	乾燥した原廃棄物	100%・100%	
原廃棄物	原廃棄物処分（処理/パッケージ化を検討しない）	原廃棄物	100%・100%	

注) IAEA. TRS No 401(2001), NDA/RWM/120(2015), IHI Engineering Review/ Pp25 Vol5, Issue 1(2018)を参考に設定。%は原廃棄物に対する割合。



(b) 処分方法の提示及び安全性評価手法の開発

① 固体廃棄物の分類に応じた処分方法の検討と安全評価手法の構築に向けた情報の収集・整理

V. 廃棄体化までのプロセスの検討

表1 瓦礫類、解体廃棄物の処理オプション

廃棄物	処理オプション	説明	廃棄体	放射能・体積変化 <sup>注1)</sup>
建屋内コンクリート (事故前非放)	A/原廃棄物	ダイヤモンドワイヤにて切断し、コンクリートブロックにして直接処分	コンクリートブロック	100%・100%
	B	汚染した表面部分をはつる 汚染表面はISOコンテナ内でグラウト充填	コンクリートがら (CLレベル)	0%・98%
			鉄筋 (CLレベル)	0%・1%
			表面汚染パッケージ (ISOコンテナ内グラウト充填)	100%・2%
	C	破碎し、放射性コンクリートがら、非放射性コンクリートがら及び鉄筋に分別 放射性コンクリートがらはISOコンテナ内でグラウト充填	コンクリートがら (CLレベル)	0%・89%
			鉄筋 (CLレベル)	0%・1%
		コンクリートがらパッケージ (ISOコンテナ内グラウト充填)	100%・17%	
PCV内金属 (事故前L2)	A	解体・細断し、ステンレススチール (SS) 容器内でグラウト充填	解体物パッケージ (SS容器内グラウト充填)	100%・255%
	B	解体し、汚染した表面をはつる 一次廃棄物 (表面汚染) をSS容器内でグラウト充填 二次廃棄物 (放射化金属) をSS容器でグラウト充填	表面汚染パッケージ (SS容器内グラウト充填)	核種ごとに設定 <sup>注2)</sup> ・17%
			放射化金属パッケージ (SS容器内グラウト充填)	核種ごとに設定 <sup>注2)</sup> ・153%
原廃棄物	原廃棄物処分 (処理/パッケージ化を検討しない)	原廃棄物	100%・100%	
RPV廃棄物 (事故前L1)	A	解体・細断し、SS容器内でグラウト充填	解体物パッケージ (SS容器内グラウト充填)	100%・255%
	原廃棄物	原廃棄物処分 (処理/パッケージ化を検討しない)	原廃棄物	100%・100%
瓦礫 1 (0 - 0.005 mSv/h)	A	粉碎により減容し、ISOコンテナ内でグラウト充填	瓦礫パッケージ (ISOコンテナ内グラウト充填)	100%・170%
	B	計測により放射性瓦礫と非放射性瓦礫に分別 放射性瓦礫はISOコンテナ内でグラウト化	瓦礫 (CLレベル)	0%・65%
			瓦礫パッケージ (ISOコンテナ内グラウト充填)	100%・60%
原廃棄物	原廃棄物処分 (処理/パッケージ化を検討しない)	原廃棄物	100%・100%	
瓦礫 2 (0.005 - 0.1 mSv/h)	A	粉碎により減容し、ISOコンテナ内でグラウト充填	瓦礫パッケージ (ISOコンテナ内グラウト充填)	100%・170%
	B	計測により放射性瓦礫と非放射性瓦礫に分別 放射性瓦礫はISOコンテナ内でグラウト化	瓦礫 (CLレベル)	0%・65%
			瓦礫パッケージ (ISOコンテナ内グラウト充填)	100%・60%
原廃棄物	原廃棄物処分 (処理/パッケージ化を検討しない)	原廃棄物	100%・100%	

注1) NEA/RWM/R(2011), NDA/RWM/120(2015), NWP-REP-120-Issue 1(2016), ED26.RP/340737/PROJ/00033 Version 2(2015)を参考に設定。%は原廃棄物に対する割合。

注2) 放射化生成物 (Be-10, C-14, Cl-36, Ca-41, Ni-59, Ni-63, Co-60, Mo-93, Nb-94) が同伴しているとして、核種ごとに設定した。

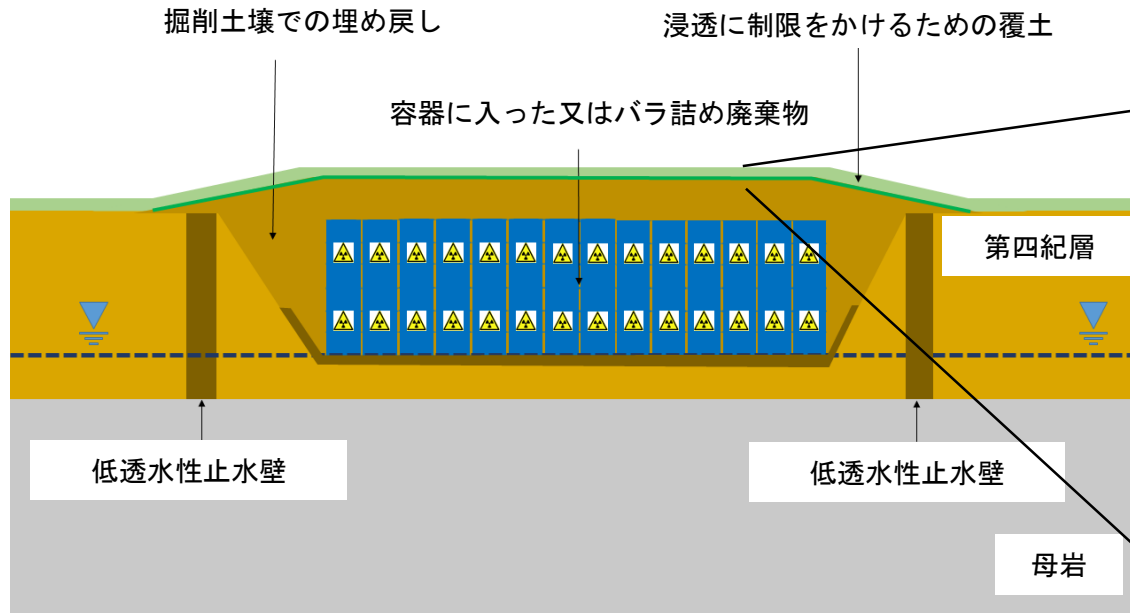


(b) 処分方法の提示及び安全性評価手法の開発

① 固体廃棄物の分類に応じた処分方法の検討と安全評価手法の構築に向けた情報の収集・整理

VI. 処分方法の検討

地表処分概念 (L3) のイメージ



低透水性の床面と側壁、上部には浸透水量を低減する低透水層を有し、覆土を施すことを想定する。埋設施設は土壌で埋め戻される。



英国VLLW処分場(Kings Cliffe)の人工バリアの例 (2017-2018海外処分場調査結果より)

<線量評価におけるニアフィールドの想定>

- ✓ 覆土を施した後の覆土粘土ライナーが継続的に $1E-09$  m/sの透水係数を維持する。
- ✓ 初期損傷時期までは容器は健全であり、その後単一の速度で容器が損傷する。
- ✓ 容器損傷後に直ぐに核種放出が始まるとする。加えて、廃棄体から埋め戻しへ瞬時に汚染物が輸送されるものとする。
- ✓ グラウト廃棄物や瓦礫の飽和期間は保守的に無視するものとする。コンテナ損傷後直ぐに完全な飽和が起こるものとする。
- ✓ 埋め戻しは割れ目のない混合コンパートメントでモデル化されている。埋め戻しを介した外部への支配的な輸送プロセスとして移流を想定する。
- ✓ 有機錯体の効果は、溶解度増大係数と吸着性減少係数により考慮する。
- ✓ 施設の底面や側壁よりも覆土は常に有効透水係数が小さいと想定する。従って、ニアフィールドを通る浸透水の流れは覆土の透水性に支配される。
- ✓ 不飽和層を通る輸送は無視される。即ち、埋め戻しから外部への核種輸送は飽和層に直接向かう。

## (b) 処分方法の提示及び安全性評価手法の開発

### ① 固体廃棄物の分類に応じた処分方法の検討と安全評価手法の構築に向けた情報の収集・整理

## VI. 処分方法の検討

### 浅地中処分概念 (L2) のイメージ

地表施設に類似。可能性のある違いは次のとおり。

- ・ グラウト/埋め戻し材としてセメントを多量に使用
- ・ 水の流れを抑制する高耐久性バリア
- ・ 低透水性輸送経路

廃棄体

セメントグラウト/埋め戻し

浸透を制限する覆土

第四紀層

基礎スラブ

母岩

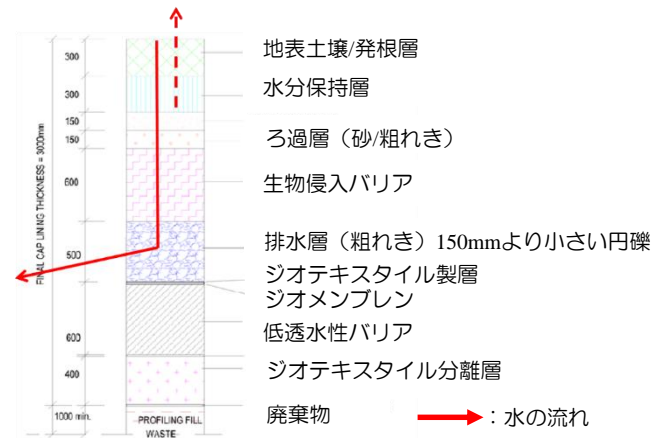
低透水性止水壁

低透水性止水壁

低透水性粘土を床面に敷設し、上部に多重覆土を施した鉄筋コンクリートボルトからなる。埋設施設はセメントグラウトで埋め戻される\*。ベントナイト壁面は浸透水を抑制する。

\*ガラス固化体を埋設する場合には、埋め戻しにベントナイトを用いる

### 人工バリアのイメージ



英国LLW処分場(Drigg)の人工バリアの例  
(2017-2018海外処分場調査結果より)

<線量評価におけるニアフィールドの想定>

以下の事項を除いて地表処分と同様。

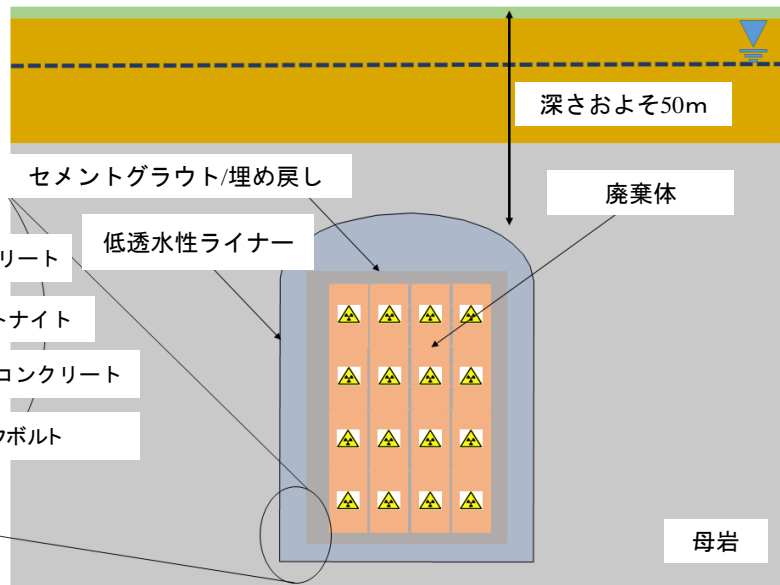
- ✓ 時間の経過に伴う埋め戻しpHの進展を無視し、埋め戻しの初期pHが長期間維持される。

(b) 処分方法の提示及び安全性評価手法の開発

① 固体廃棄物の分類に応じた処分方法の検討と安全評価手法の構築に向けた情報の収集・整理

## VI. 処分方法の検討

### 中深度処分施設 (L1) のイメージ



地下およそ50mに設置される。コンクリート壁を有するトンネルからなる。それをプラグし閉鎖する。空隙はセメントグラウトで埋め戻される。

<線量評価におけるニアフィールドの想定>

以下の事項を除いて地表処分と同様。

- ✓ 中深度埋設施設のバリアの透水係数は原子力施設で典型的に用いられている構造コンクリートに類似するものとする。これにより、初期透水係数は $1E-10$  m/sとし、5000年以降は完全に中深度埋設施設の透水係数の機能は失われ、透水係数は母岩と同じになる。

## (b) 処分方法の提示及び安全性評価手法の開発

## ① 固体廃棄物の分類に応じた処分方法の検討と安全評価手法の構築に向けた情報の収集・整理

## VII. 線量評価 - 評価シナリオ、パラメータの概要 -

## 線量評価の評価条件を設定

- ▶ シナリオ・基準線量は I・予備的線量評価と同様のものを使用(一部、考慮していなかったシナリオも評価)
- ▶ 核種移行・生物圏パラメータは、海外で実績のあるパラメータを使用
- ▶ 浸透水量・核種放出・容器破損時期の評価方法を検討(次頁の一例を示す)

表1 線量評価条件の概要と予備的線量評価との比較

大項目	項目	VII. 線量評価	<比較> I・予備的線量評価
シナリオ	接近シナリオ	土地利用者 (L3, L2)、掘削者 (L3, L2)、濃度制限 (L1)	土地利用者 (L3, L2)、濃度制限 (L1)
	接近シナリオ基準線量	300 $\mu$ Sv/y (L3), 1mSv/y (L2), 20 mSv/y (L1)	
	地下水シナリオ	河川利用者、海利用者、井戸利用者	河川利用者、海利用者
	地下水シナリオ基準線量	一種類の廃棄物につき 10 $\mu$ Sv/y	
パラメータ	制度的管理期間(y)	約400y (2400年まで)	50~600y (L3), 300~600y (L2)
	接近シナリオのインベントリ	地下水移行を考慮	地下水移行を考慮しない
	核種放出	廃棄体ごとに設定	瞬時放出(原廃棄物)
	容器破損時刻	容器ごとに設定	利用していない(原廃棄物)
	浸透水量	人工バリアにより浸透水量の抑制	日本での典型的な設定(L3:1, L2:0.1, L3:0.16 m/y)
	井戸までの移行距離	50 m (L3, L2), 150m(L1)	
	河川までの移行距離	100 m (L3, L2), 300m(L1)	
	河川流量	10 <sup>7</sup> m <sup>3</sup> /y	
	セメント系材料及び土壌での核種移行パラメータ	英国LLWRのデータ(LLWR 2011 ESC)	日本での典型的な設定
	生物圏移行係数	英国LLWRのデータ(LLWR 2011 ESC)	日本での典型的な設定
	処分影響物質による分配収着係数の変化	英国LLWRのデータ(LLWR 2011 ESC)を基に設定	分配収着係数を2セット用意し、個別に評価

## &lt;線量評価における地圏・生物圏の想定&gt;

- ✓ 地圏は多孔質媒体とする。
- ✓ LLWR2011ESCの生物圏モデルを適用する。これらは時間依存モデルである。PEGの実効線量は、海洋や地圏へ核種フラックスと生物圏係数を乗じることで評価する。
- ✓ 地圏における有機物の影響は地圏の有機物濃度の評価や収着抑制係数により考慮される。これは埋め戻しへの影響の考慮の方法と同じである

(b) 処分方法の提示及び安全性評価手法の開発

① 固体廃棄物の分類に応じた処分方法の検討と安全評価手法の構築に向けた情報の収集・整理

VII. 線量評価 -モデル、パラメータの設定の例-

<L3、L2施設の人エバリアの浸透水量の設定>

L3施設は粘土ライナー、L2施設は粘土ライナーとジオメンブレンで構成された人工バリアを想定する。

埋施設	人工バリア	浸透水量(初期)	劣化挙動
L 3	粘土ライナー	3.16e-2 m/y	—
	粘土ライナー	3.16e-2 m/y	—
L 2	ジオメンブレン (アスファルトシート)	3.16e-5 m/y	150yから損傷開始 1000yで機能喪失

<参考> SERCO/E.003796/010 issue 2.2011

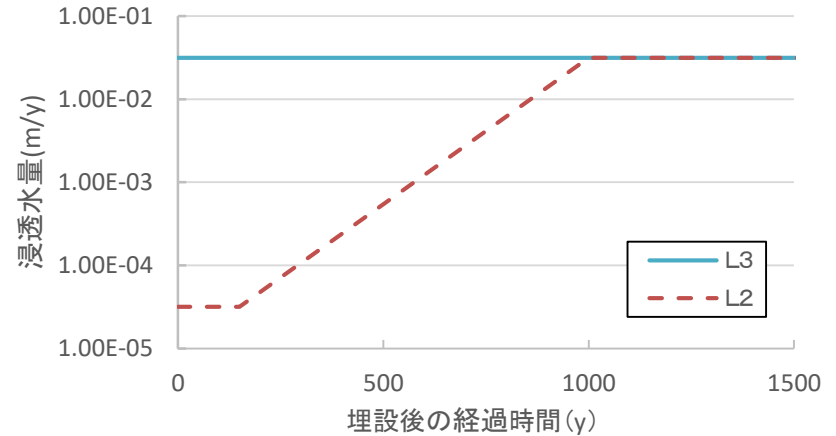


図1 L3施設およびL2施設の浸透水量の経時変化

<容器閉じ込め機能の設定>

容器は一定期間、廃棄体からの放射性核種を閉じ込める機能を有するものとする。また、経験的に容器の破損が破損開始後、破損時期と同じ期間に分布するという設定を採用し、破損時期と同じ長さの期間にわたって核種が段階的に放出される。

容器タイプ	損傷時期(閉鎖後年)	損傷期間(年)
ISOコンテナ	10	10
ステンレス製容器	300	300
遮へい付高耐久性容器	1000	1000

<参考> SA/ENC-0658 issue 2.2007

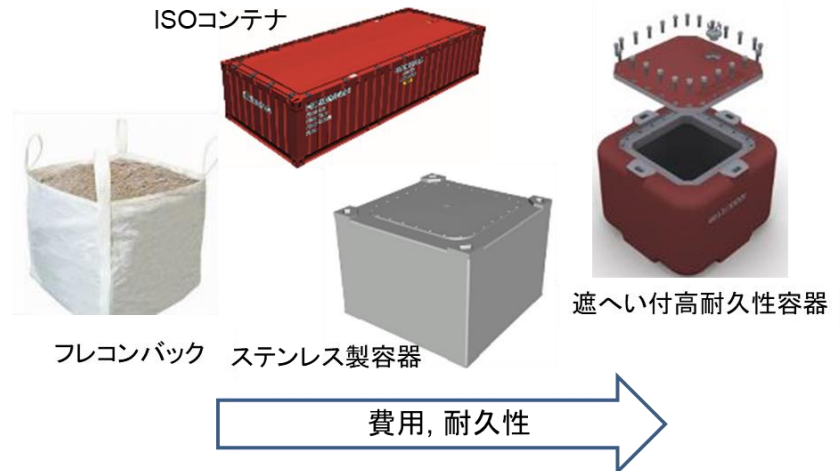


図2 処分容器のイメージ



## (b) 処分方法の提示及び安全性評価手法の開発

### ① 固体廃棄物の分類に応じた処分方法の検討と安全評価手法の構築に向けた情報の収集・整理

## まとめと課題

### まとめ

- ✓ 事故廃棄物を網羅的に27種類に分類し、原廃棄物として処分した場合にトレンチ・ピット・中深度・地層のいずれの処分区分が想定されるのか、予備的に線量評価を行った。また、インベントリのパーセントイル、収着分配係数、接近シナリオの発生時期、廃棄体の溶出率、浸透水量をパラメータサーベイし、それぞれの対策を取った場合の処分区分の変化を感度評価した。(I)
- ✓ 27種類の廃棄物を対象に、処分概念の検討に必要な情報を整理し、特徴を評価した。それらの結果から、詳細に処分概念を検討する8つの廃棄物を選定した。(II～IV)
- ✓ 選定した廃棄物それぞれについて、想定される複数の処理オプションを提示した。また、人工バリアを設置したL3、L2、L1の処分イメージを提示した。(V、VI)
- ✓ 処分概念を線量評価するためのモデル・パラメータを整備し、複数の処理オプションに対して線量評価を実施し、想定される処分区分を提示した。(VII)

### 課題

本検討の評価は大きな不確実性が存在することを前提としており、ここで開発した手法の不確実性を緩和していくことが今後の課題である。以下に不確実性の種類ごとに課題を記す。なお、個別の廃棄物ごとの課題はVIIIに記した。

- ✓ インベントリの不確実性; まず性状把握へのフィードバックを示すことが重要。そのうえでインベントリの不確実性を緩和していくための方法論を検討していく必要がある。例えば、C-14、I-129は多くの廃棄物において支配核種であり、これらのインベントリの精度を優先的に上げていくことで、不確実性の緩和が期待できる。
- ✓ パラメータの不確実性; 安全評価パラメータの一部は海外文献を参照しており、国内規制や福一廃棄物特性を考慮していく必要がある。例えば、固化体性能については、最新の処理の検討成果を反映していくなど、より現実的なパラメータを整備していく。
- ✓ 処分サイトの不確実性; 処分サイトに依存して、数値の不確実性があることが課題となる。この不確実性は処分サイトが決まるまで取り除くことはできないが、早期に決まらない可能性を考慮して対策を検討しておくべきである。一つのアプローチとしては、複数の仮想処分サイトのパラメータセットを設定し、互いを比較しながらサイト不確実性を検証していく方法が考えられる。



## (b) 処分方法の提示及び安全性評価手法の開発

### ② 処分への影響物質等の影響評価手法の開発

～目標と実施内容～

#### ■ 実績

- 固体廃棄物に含まれる可能性のある影響物質や想定される処分概念の調査から、処分時核種移行への影響評価の優先度が高い核種移行パラメータやバリア材を選定。
- 影響物質による影響プロセスの把握状況やデータ量に応じて核種収着パラメータへの影響を評価する手法の考え方を構築(図1)。

#### ■ 目標

- 多様な影響物質が処分時核種移行に及ぼす影響を定量的に評価する方法を、評価に必要なデータとともに整備し、それらを処分の成立性検討や安全評価の基盤情報として反映する。

#### ■ 実施内容(図2)

- 2019年度は、主要な影響物質による核種移行影響を評価するうえで不足している知見の調査とデータの拡充を行うとともに、処分時核種収着への影響(収着低減係数:SRF)を定量的に評価する手法を改良する。
- 2020年度は、不足している知見の調査とデータの拡充を継続して核種収着の影響評価手法を構築するとともに、現時点での安全評価の想定条件に対して核種収着パラメータ(分配係数:Kd)とその不確実性範囲の設定の試行と課題の抽出を行う。

#### ■ 目標達成を判断する指標

- 重要な影響物質と核種の組合せを対象として影響評価に必要なデータの拡充と影響評価手法の改良。(2019年度)
- 安全評価の想定条件に対して核種収着パラメータとその不確実性範囲の設定の試行と課題の抽出。(2020年度)

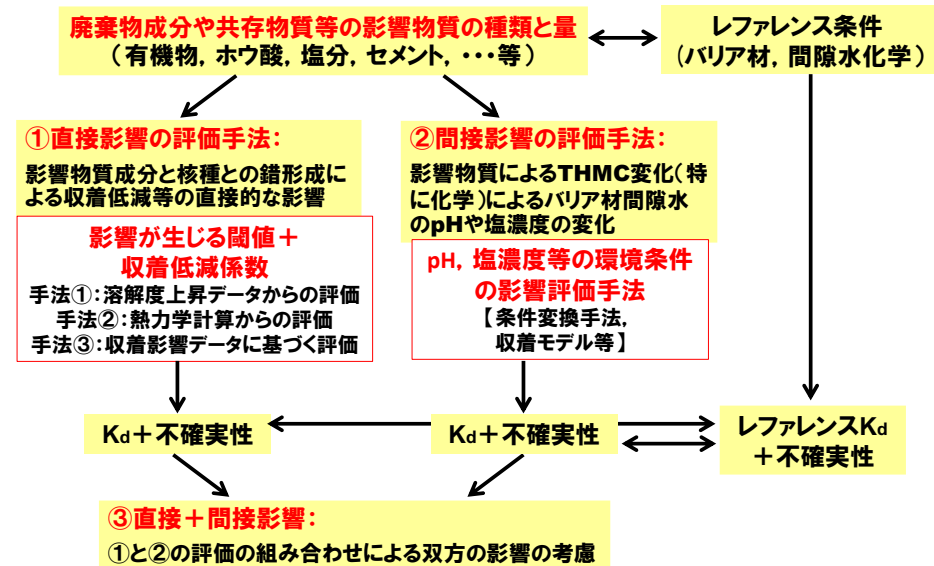


図1 影響物質が核種収着に及ぼす影響評価手法の概要

元素群	代表元素	収着低減係数 (SRF)					
		有機物	海水	ホウ酸	フェロシアン化合物	硫酸塩	炭酸塩
		ISA: $1 \times 10^{-2} M^*$ (EDTA: $1 M^*$ )	イオン強度 $0.68 M^*$	$Na_2B_{10}O_{16}$ $2 \times 10^{-3} M^*$	$Na_4[Fe(CN)_6]$ $1 \times 10^{-3} M^*$	$Na_2SO_4$ $1 \times 10^{-2} M^*$	$CO_3^{2-}$ $1 \times 10^{-2} M^*$
アルカリ金属	Cs						
アルカリ土類金属	Sr						
II 価遷移金属	Ni(II)						
IV 価遷移金属	Am(IV)						
V 価遷移金属	Am(V)						
III 価アクチニド	Am(III)						
IV 価アクチニド	Th(IV)						
V 価アクチニド	U(V)						
VI 価アクチニド	U(VI)						
ハロゲン	I						
陰イオン種	Se						

2019-2020年度のデータ拡充の視点  
 ・ホウ酸やフェロシアン化合物のアクチニドへの影響データ拡充  
 ・有機物や硫酸塩等の不足核種のデータ拡充

  : 既往の情報調査結果に基づき設定  
  : 収着試験による取得データに基づき設定 (未設定のものは今後設定, あるいはデータ拡充後に設定)  
  : 既往の情報調査およびデータ取得を未実施 (調査の結果データなどが無いことを確認したものを含む)

図2 影響因子に対するバリア材への収着低減係数の整理イメージ

## (b) 処分方法の提示及び安全性評価手法の開発

### ② 処分への影響物質等の影響評価手法の開発

#### ～検討の全体の流れ～

表 影響物質リスト(影響の関係整理例)

共存物質/産業体 化処理追加成分	影響
ホウ酸水	・ホウ酸イオンは核種と錯体を形成し、溶解度及び分配係数に影響を及ぼす可能性がある。 ・ホウ酸塩として存在する場合、そのカウンターイオン放出により間隙水イオン強度が増加する可能性がある。
海水成分	・海水成分の陽イオンは、核種の吸着において競合する可能性があるほか、イオン強度増加により溶解度等に影響を及ぼす可能性がある。 ・海水成分の溶出によって間隙水のイオン強度が上昇し、溶解度等に影響を及ぼす可能性がある。
油分	・海水成分によって、セメント中での二次鉱物生成や、ベントナイトのイライタ化が生じる可能性がある。 ・核種による放射線照射によるセメント中の水分とともに移行する可能性がある。 ・油分の分解による放射線の吸収率の低下が生じる可能性がある。
シリカ系 (無機系飛散防止剤)	・無機系の飛散防止剤(シリカ)が溶出してシリカを放出した場合、ベントナイトのセメンテーションやセメント中C-S-H相形成が生じる可能性がある。
有機物 (草木、有機系飛散防止剤)	・有機物により、その分解生成物と核種での錯形成が生じる可能性がある。
金属	・溶出した鉄イオンによって、ベントナイトの変質や鉄系コロイドの形成が生じる可能性がある。 ・腐食時に周辺間隙水のEh変化や腐食生成物によるコロイド形成が生じる可能性がある。
セメント系材料	・高pH間隙水を形成し、ベントナイトの変質や、核種溶解度の変化が生じる可能性がある。 ・セメント水和物起源のコロイドに核種が吸着する可能性がある。

検討対象とする  
物質を抽出

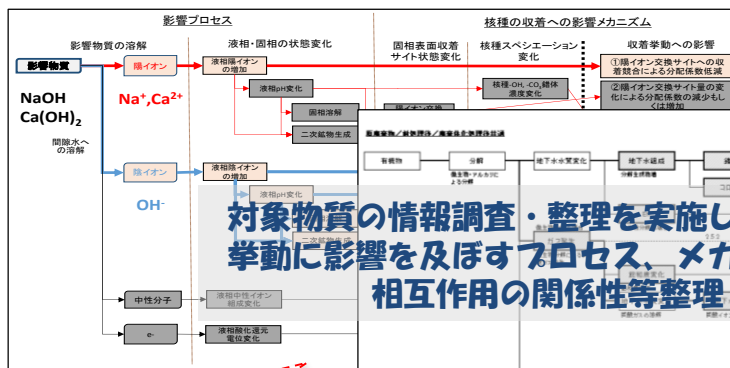


図 影響プロセスと核種相互作用に係る情報の関係性整理例



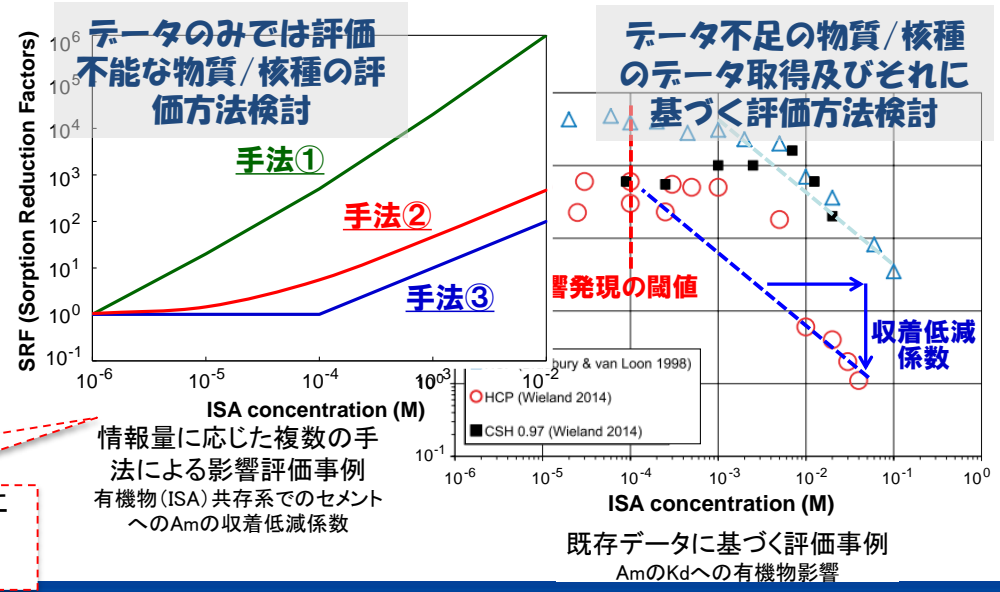
➤ 対象物質: 6物質を抽出  
(有機物、海水成分、ホウ酸、フェロシアン化物、硫酸塩、炭酸塩)

➤ 整理された影響物質に対し、網羅的に情報調査し、一通りの関係性の整理終了



元素群	代表元素	吸着低減係数(SRF)					
		物質A	物質B	物質C	物質D	物質E	物質F
アルカリ金属	Cs	1	2	2	1	2	46
アルカリ土類金属	Sr	1	7	3	10	8	31
II価遷移金属	Ni(II)	1	10	36	1	12	1
IV価遷移金属	Zr(IV)	1	10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	12	109	
V価遷移金属	Nb(V)	1	10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	1	12	10
III価アクチノイド	Am(III)	1	10 <sup>3</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>2</sup>	12	1
IV価アクチノイド	Th(IV)	1	10 <sup>3</sup>	10 <sup>6</sup>	12	1	
V価アクチノイド	Np(V)	1	100	10	10 <sup>2</sup>	12	1
VI価アクチノイド	U(VI)	1	100	10	10 <sup>2</sup>	12	1
ハロゲン	I	-	-	-	1	-	-
陰イオン種	Se	-	-	-	-	-	-

安全評価に資する処分影響物質の影響評価データの提示



影響因子に対するバリア材への吸着低減係数の整理イメージ

- データなし/不足のフェロシアン化合物、硫酸塩、炭酸塩を中心に吸着影響データ取得中
- データ量に応じた評価方法を検討・評価中

## (b) 処分方法の提示及び安全性評価手法の開発

### ② 処分への影響物質等の影響評価手法の開発

～2018年度までの検討結果「評価対象とする影響物質とバリア材の選定」～

#### ■ 評価対象の影響物質

- 多くの事故廃棄物に共通して含まれる共存物質として、有機物、海水成分、ホウ酸水を選定
- 共通性は高くないが優先度が比較的高い水処理二次廃棄物のうち、影響が懸念される原廃棄物成分として、フェロシアン化合物、硫酸塩、炭酸塩を選定

⇒ これら6種類の影響物質を対象に選定(表1)

#### ■ 評価対象のバリア材・パラメータ・核種

- いずれの処分概念に共通し、かつ、廃棄体に近い領域で影響物質の影響が大きいと想定されるバリア材と核種収着パラメータを選定(図1)。
- 既往の処分概念の評価対象核種と化学的類似性に基づくグルーピングの考え方より対象核種を選定

#### ■ 評価対象の影響物質とバリア材の組合せ

- 間隙水の化学変化等による間接影響については、既往の知見と手法が適用可能なことから、既往の知見が不足する影響物質の直接影響に着目
- 直接影響については、既往の知見等の充足度を考慮して評価対象を選定(緩衝材は対象を限定)

表1 主な事故廃棄物と含まれる影響物質

原廃棄物	汚染水処理二次廃棄物										瓦礫/伐採木等					解体廃棄物						
	セシウム吸着塔	第二セシウム吸着塔	除染装置スラッジ	鉄共沈スラリー	炭酸塩スラリー	Ae添着活性炭	チタン酸塩	酸化チタン	フェロシアン化合物	キレート樹脂	樹脂系吸着材(カラム)	瓦礫(コンクリート)	瓦礫(金属)	瓦礫(その他)	伐採木	土壌	使用済保護衣	燃料デブリ	解体廃棄物(コンクリート)	解体廃棄物(金属)	解体廃棄物(その他)	
ゼオライト	○	○																				
シリカ系物質	○		○																			
水酸化鉄			○																			
炭酸塩					○																	
水酸化マグネシウム					○																	
硫酸塩			○																			
活性炭						○																
有機物			○	○	○	○	○	○	○	○				○	○	○						○
チタン系物質	○																					
フェロシアン化合物			○																			
金属	○	○		○	○	○	○	○	○	○			○	○					○	○	○	
コンクリート																						
デブリ																						
MCOIデブリ																						
ホウ化物・炭化物																						
海水成分	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
ホウ酸水	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
油分	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
有機物	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
シリカ系物質																						
燃料付着物																						

○: 原廃棄物に含まれる影響物質

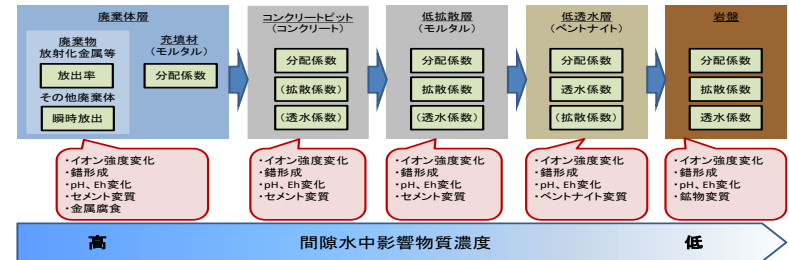


図1 各バリア層における核種収着への影響

(b) 処分方法の提示及び安全性評価手法の開発  
 ② 処分への影響物質等の影響評価手法の開発  
 ～データ取得・パラメータ設定状況～

セメント系

元素群	代表元素	有害物質					
		有機物※1	海水※2	ホウ酸	フェロシアン化合物	硫酸塩	炭酸塩
アルカリ金属	Cs	○	○	●	●	○	○
アルカリ土類金属	Sr	○	○	●	○	○	○
Ⅱ価遷移金属	Ni(Ⅱ)	○	○	●	○	●	○
Ⅳ価遷移金属	Sn(Ⅳ)	○	○	■	■	■	○
Ⅴ価遷移金属	Nb(Ⅴ)	○	○	■	■	■	■
Ⅲ価アクチノド	Am(Ⅲ)	○	○	●	●	●	○
Ⅳ価アクチノド	Th(Ⅳ)	○	○	×	×	×	○
Ⅴ価アクチノド	Np(Ⅴ)	○	○	●	○	●	○
Ⅵ価アクチノド	U(Ⅵ)	○	○	●	○	○	○
ハロゲン	I	○※3	○※3	○※3	○※3	○※3	○※3
陰イオン種	Se	○※3	○※3	○※3	○※3	○※3	○※3

ベントナイト系

元素群	代表元素	有害物質	
		ホウ酸	フェロシアン化合物
アルカリ金属	Cs	●	●
アルカリ土類金属	Sr	●	○
Ⅱ価遷移金属	Ni(Ⅱ)	●	○
Ⅳ価遷移金属	Sn(Ⅳ)	■	■
Ⅴ価遷移金属	Nb(Ⅴ)	■	■
Ⅲ価アクチノド	Am(Ⅲ)	●	●
Ⅳ価アクチノド	Th(Ⅳ)	×	×
Ⅴ価アクチノド	Np(Ⅴ)	●	○
Ⅵ価アクチノド	U(Ⅵ)	●	○
ハロゲン	I	○※3	○※3
陰イオン種	Se	○※3	○※3

※1: イソサッカリン酸 (ISA)  
 ※2: イオン強度 0.68M  
 ※3: Kd = 0 で設定  
 ○: データ設定済み  
 ●: 本年度新規取得・設定予定 (データ不足の場合次年度継続)  
 ■: 次年度新規取得・設定予定  
 ×: データ取得困難  
 □: 本年度追加調査・設定予定



## (b) 処分方法の提示及び安全性評価手法の開発

### ② 処分への影響物質等の影響評価手法の開発

～各影響物質の収着影響評価手法の検討：パラメータ設定の試行～

#### 有機物影響評価の検討例①

- 2019年度は、収着低減係数の評価手法として提案してきた3つの手法\*の比較と有効性の評価事例を拡充。
- 影響が最も大きいとされるイソサッカリン酸 (ISA) の収着影響を対象に、これまでの3価アクチニドAmの評価事例に加え、4価アクチニドTh(IV)及び6価アクチニドU(VI)を対象にした適用評価を検討。
- いずれの核種でも熱力学データに基づく評価手法②は、理想的な実測の収着データに基づく手法③よりも保守的な評価結果を導くことを確認。
- 一方で、手法②は熱力学データに大きく依存することも確認され、熱力学データの選択や信頼性の確認が重要となることを確認。

\*収着低減係数の3つの評価手法

手法①：溶解度上昇データからの評価

手法②：熱力学計算からの評価

手法③：収着影響データに基づく評価

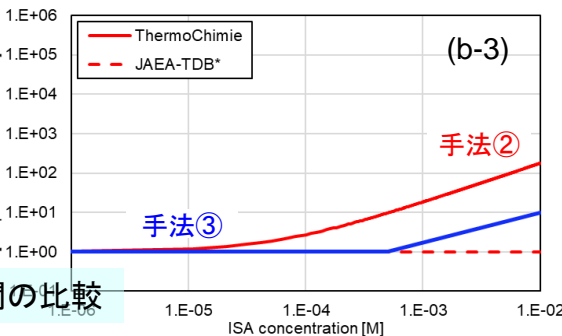
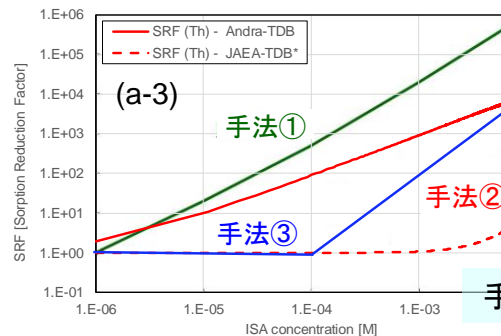
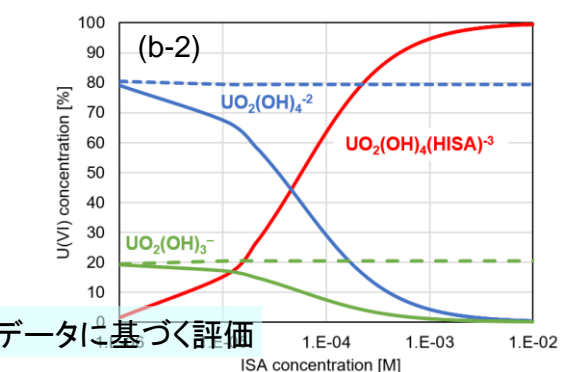
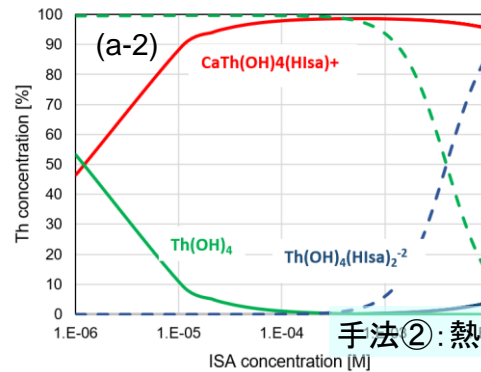
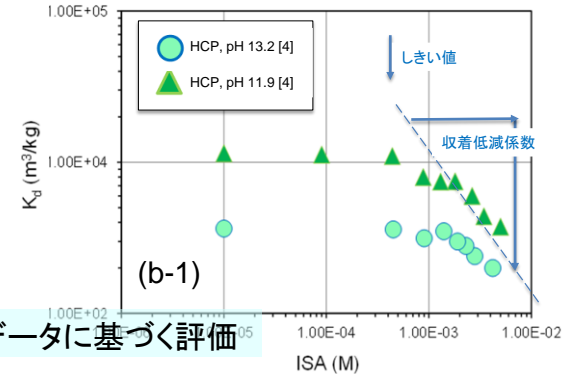
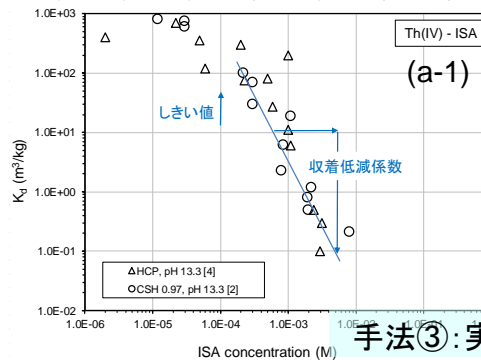


図1 各手法に基づく評価結果と比較の検討事例(左:Th(IV)、右:U(VI))

## (b) 処分方法の提示及び安全性評価手法の開発

### ② 処分への影響物質等の影響評価手法の開発

～各影響物質の収着影響評価手法の検討：パラメータ設定の試行～

#### 有機物影響評価の検討例②

- 多様な有機物を対象とした収着影響に関する国内外の代表的な評価事例を調査・整理。
  - スウェーデンSKBでの評価、スイスNagraでの評価、日本の第2次TRUレポートでの評価を対象として、それぞれの評価事例において、対象とされた有機物とその評価方法を整理。
  - いずれの評価事例でも、イソサッカリン酸 (ISA) の評価を中心に検討しており、その他の有機物については、影響がある場合にはISAの値を保守的に与えるか、実測データ等をもとに影響が顕在化しないとの評価を実施。
- ⇒ これらを踏まえ、ISAを対象として、実測の収着データに基づいて収着低減係数を設定

文献	対象有機物	影響発現濃度(閾値)の評価方法	有機物影響(収着低減係数)の評価方法
SKB TR14-10	ISA	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 実験結果、化学アナログ等より設定</li> <li>・ Ca濃度考慮</li> </ul>	実験結果、化学アナログ等より収着低減係数を設定。その値で分配係数のリファレンス設定値を除することにより、有機物影響を考慮した分配係数を設定
	EDTA・NTA等ISA以外の有機物	概ねISAの化学アナログにより設定	
	コンクリート混和剤及びその劣化物	金属イオンに対して強く影響しないため、潜在的な影響はないと仮定	
Nagra NTB 14-08	硝酸塩/亜硝酸塩	含有量が少なく評価されていない	
	EDTA	なし	Ni,Co,Pbの収着低減係数を設定
	シアン化物	なし	Ni,Coの収着低減係数を設定
	アンモニア、アミン	なし	セメント劣化ステージ、高NH <sub>3</sub> 濃度でNi,Coに影響あり
	ISA	実験結果、化学アナログ等により設定	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 実験結果、化学アナログ等により収着低減係数を設定。その値で分配係数のリファレンス設定値を除することにより、有機物影響を考慮した分配係数を設定</li> <li>・ 影響のない濃度から処分場で予想される最大濃度までの範囲で一定の収着低減係数を設定</li> </ul>
	GLU	同上	同上
	コンクリート混和剤	間隙水中濃度は低く影響は及ぼさない	
	有機高分子	影響は無視できる	
第2次TRU取りまとめ	ウエス等有機物	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 実験結果に基づき評価された事例を参照</li> <li>・ グループ2に含有される有機物は全てセルロースでISAに分解すると仮定し充填材間隙水中濃度を評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 溶解度上昇係数の設定事例より当該ASA濃度での収着低減係数を設定</li> <li>・ 収着低減係数は溶解度上昇係数と等しいと仮定</li> </ul>
	廃溶媒	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 熱力学データよりNi等溶解度へのDBPの影響がないことを確認</li> <li>・ 実験結果よりU溶解度へのTBP、DBPの影響がないことを確認</li> </ul>	
	アスファルト固化体	アスファルト浸出液を用いたPuの溶解度実験結果から影響なしと評価	
	セメント混和剤	減水剤共存下でのPuの分配係数データより影響は小さいと評価	



## (b) 処分方法の提示及び安全性評価手法の開発

### ② 処分への影響物質等の影響評価手法の開発

～各影響物質の収着影響評価手法の検討：パラメータ設定の試行～

#### 海水影響評価の検討例

- 諸外国のセメント系材料に対する核種収着パラメータ設定における海水影響評価の情報を調査

- 直近のスイスの事例では、海水成分の核種毎の収着影響のメカニズムや海水成分によるセメントの変質と2次鉱物生成の影響などまで、より詳細な検討とパラメータ設定を実施。
- 海水影響による収着の増減の傾向を表中で比較すると、セメントへの核種の収着メカニズムの複雑さを反映して、それぞれのレポートで多くの核種の増減の傾向が異なることを確認。

⇒ ここでは、最も系統的に海水影響をそのメカニズムを含めて検討したNagraの事例(Wieland, 2014)をベースとした収着低減係数を設定。

	JAEA-Review 2006-011 (三原, 2006)	Nagra NTB 14-08 (Wieland, 2014)	Ochs et al, 2016
Cs(I)	測定値に影響なし	収着低減係数2を設定	分配係数減 Na,K,Caと収着競合
Sr(II)	海水系条件で分配係数増	収着低減係数6を設定 セメント変質に伴う収着競合	—
Ni(II)		影響なし	影響なし
Zr(IV)	測定値に影響なし	塩水環境下では一桁小さい値を設定 III価アクチニドを参考	—
Nb(V)	海水系条件で分配係数増 または影響なし		
Am(III)	海水系条件で分配係数増	Kd設定では一桁小さい値を設定 (セメントペースト中での収着相をC-S-Hのみと仮定し、セメント変質により収着低下を考慮)	影響はわずか Npは塩濃度に鋭敏 塩水では分配係数増
Th(IV)		—	
Np(V)			
U(VI)	—	塩水環境下では一桁小さい値を設定 III価アクチニドを参考	—
I	海水系条件で分配係数減 陰イオンと収着競合	分配係数0を設定 Clと収着競合、C-S-H等への収着なし	分配係数減 安定Clとの収着競合
Se	海水系条件で分配係数減	収着相のエトリンガイトは変質後も十分残るとして分配係数 $10^{-4} \text{m}^3/\text{kg}$ を設定	—

\*分配係数が低減するとした知見を赤色、増加するとした知見を青色でハッチング

## (b) 処分方法の提示及び安全性評価手法の開発

### ② 処分への影響物質等の影響評価手法の開発

～収着低減係数設定のためのデータ取得の対象と条件の設定～

- 2019年度は、これまでに設定した影響物質－バリア材－核種の評価対象のうち、未取得あるいは再取得が必要なデータの取得を実施
- ホウ酸、フェロシアン化合物、硫酸塩共存下の収着データを取得するため、これらの影響物質の濃度や液性条件(pH等)をパラメータに収着試験を実施
- 実環境を考慮し、炭酸錯体を形成する核種は、一部炭酸を添加した条件で試験を実施(表1)

表1 データ取得条件

影響物質	ホウ酸				硫酸塩	
	ベントナイト		セメント		セメント	
試験溶液	NaCl	NaCl + 炭酸	NaCl	NaCl + 炭酸	NaCl	NaCl + 炭酸
pH	7, 9.3		セメント平衡水(約pH12.5)		セメント平衡水(約pH12.5)	
試験パラメーター	ホウ酸濃度	ホウ酸濃度 炭酸濃度	ホウ酸濃度 NaCl濃度	ホウ酸濃度 炭酸濃度	硫酸塩濃度	硫酸塩濃度 炭酸濃度
対象核種	Np(V)	Am, Th	Cs, Sr, Ni,	Eu, Np(V), U(VI)	Ni	Eu, Np(V)
影響物質	フェロシアン化合物					
	ベントナイト			セメント		
試験溶液	NaCl		NaCl + 炭酸		NaCl	
pH	4-12		8.8		セメント平衡水(約pH12.5)	
試験パラメーター	フェロシアン化合物濃度		フェロシアン化合物濃度 炭酸濃度		フェロシアン化合物濃度	
対象核種	Cs		Th		Cs, Eu	

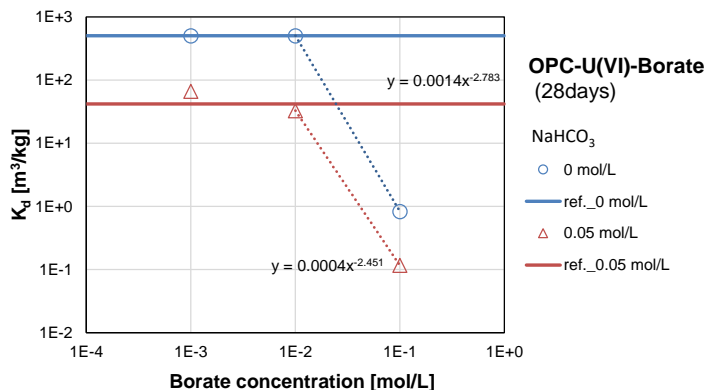
ベントナイトはクニミネ工業製クニピAFを、セメント試料はOPCセメントペーストを使用

(b) 処分方法の提示及び安全性評価手法の開発  
 ② 処分への影響物質等の影響評価手法の開発  
 ～収着低減係数設定のためのデータ取得結果(ホウ酸)～

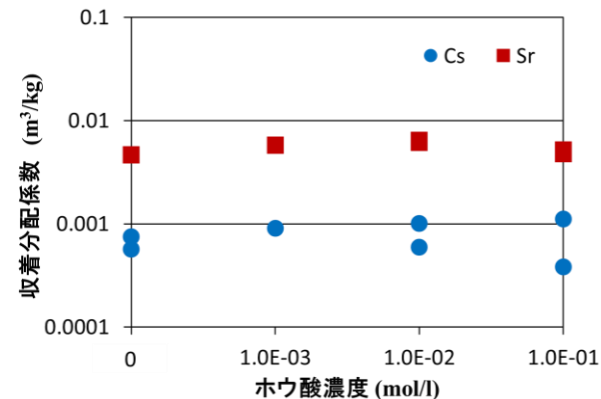
ホウ酸影響の評価検討

- これまでの先行研究でホウ酸共存系での収着データはほとんど報告されていないことから、これまでに本事業で取得してきた収着データをもとに、収着低減係数を設定。
- 炭酸共存下ではホウ酸影響が低下する効果と、セメント間隙水やベントナイト間隙水中に含まれる炭酸濃度も考慮した影響評価を検討。
- 今年度までに取得した核種については、そのホウ酸や炭酸共存下の収着データを踏まえれば、U(VI)以外の核種(Cs, Sr, Eu(III), Np(V))ではホウ酸影響は顕著とはならないと評価。

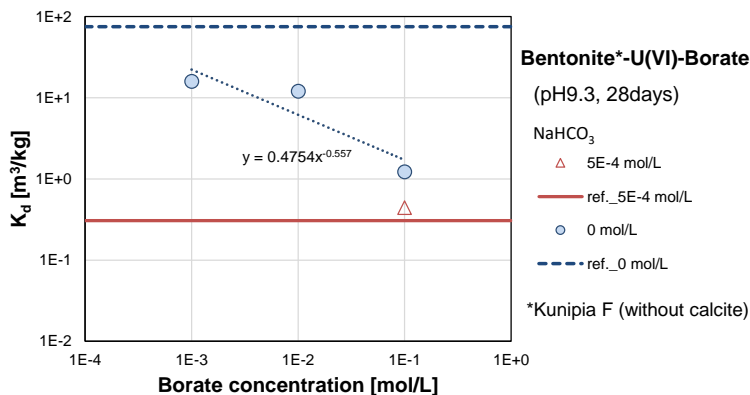
ホウ酸共存下でのセメント(OPC)へのU(VI)の収着試験結果



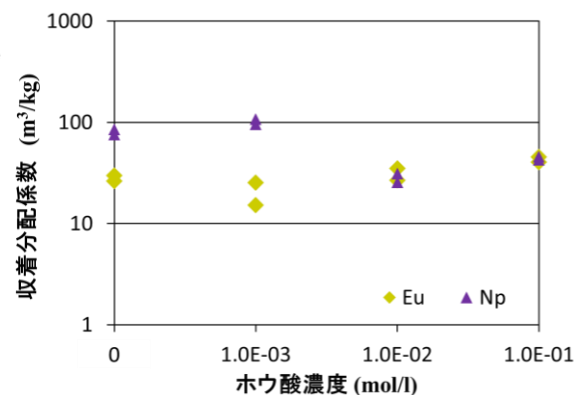
ホウ酸共存下でのセメント(OPC)へのCs, Srの収着試験の結果



ホウ酸共存下でのベントナイトへのU(VI)の収着試験の結果



ホウ酸共存下でのセメント(OPC)へのEu(III), Np(V)の収着試験の結果

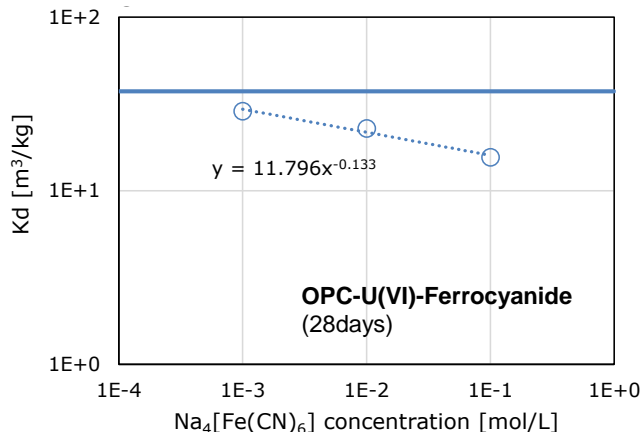


(b) 処分方法の提示及び安全性評価手法の開発  
 ② 処分への影響物質等の影響評価手法の開発  
 ～収着低減係数設定のためのデータ取得結果(硫酸塩)～

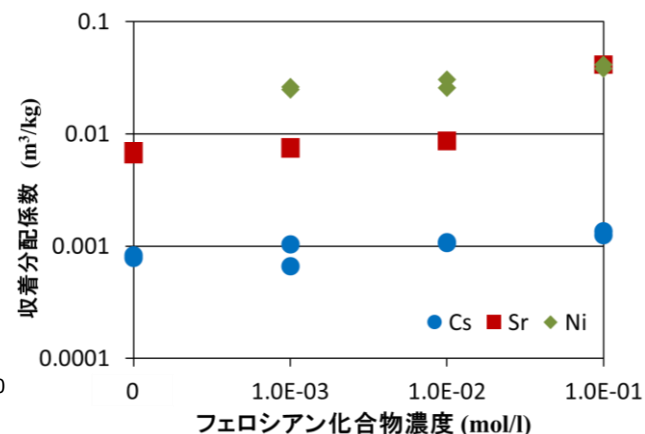
フェロシアン化合物影響の評価検討

- これまでの先行研究でフェロシアン化合物共存系での収着データはほとんど報告されていないことから、これまでに本事業で取得してきた収着データをもとに、収着低減係数を設定。
- フェロシアン化合物の錯形成による直接影響と、その影響のpH依存性(ベントナイト間隙水pHを含む広い範囲での影響)に着目して収着データを取得。
- 今年度までに取得したフェロシアン化合物共存下の収着データを踏まえ、U(VI)ではSRFを設定し、Cs, Sr, Niについてはフェロシアン化合物の影響は顕著とはならないと評価。

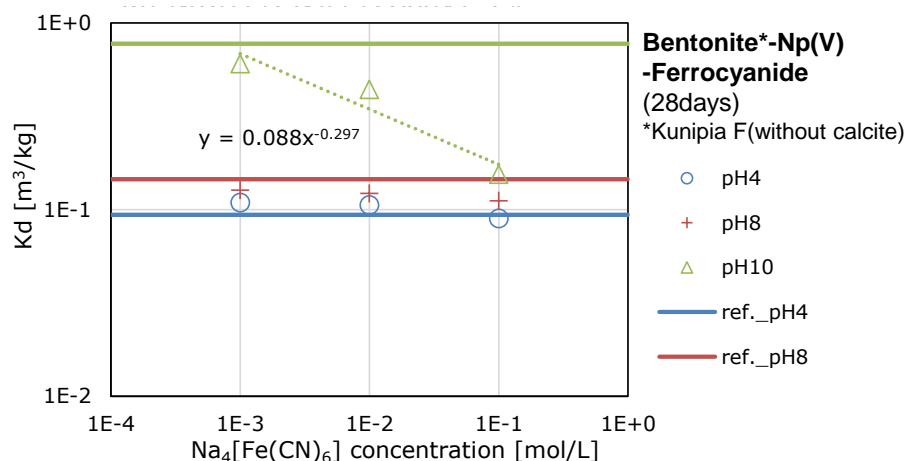
フェロシアン化合物共存下でのセメント(OPC)へのU(VI)の収着試験結果



フェロシアン化合物共存下でのセメント(OPC)へのCs, Sr, Niの収着試験結果



フェロシアン化合物共存下でのベントナイトへのNp(V)の収着試験結果

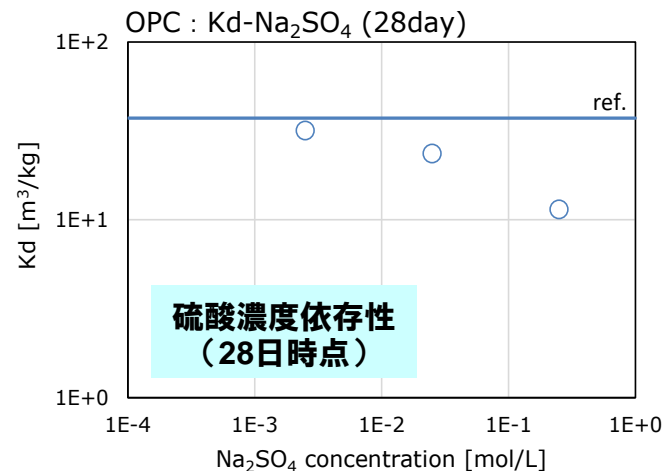
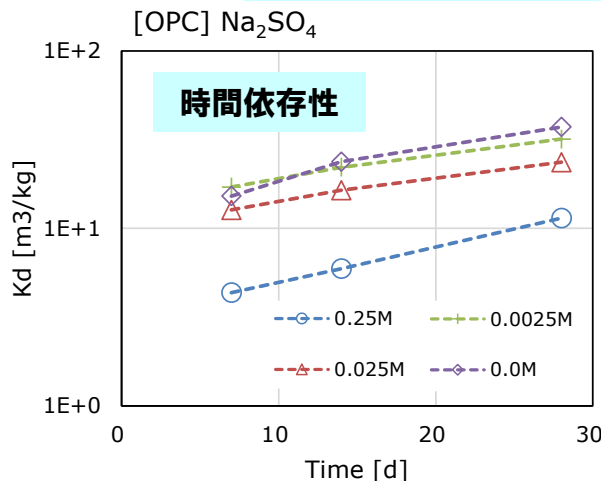


(b) 処分方法の提示及び安全性評価手法の開発  
 ② 処分への影響物質等の影響評価手法の開発  
 ～収着低減係数設定のためのデータ取得結果(硫酸塩)～

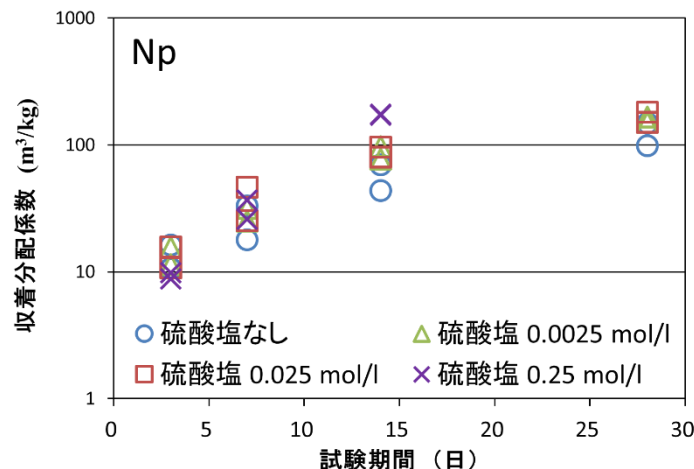
硫酸影響の評価検討

- これまでの先行調査で、硫酸との錯形成による直接影響に関し、熱力学データに基づく影響評価では多くの核種でその影響は顕在化しない可能性が示唆されるものの、硫酸共存下での収着データはほとんど報告されていないことから、本事業でデータ取得を進めてきた。
- 硫酸イオン共存の収着データは明瞭な時間依存性を示し、28日間の試験では、十分な収着平衡に達していない可能性が確認された。
- 十分な平衡に到達していない段階のデータからは、U(VI)では影響があり、Np(V)では影響が明瞭ではないことが確認できた。

硫酸共存下でのセメント(OPC)へのU(VI)の収着試験結果



硫酸共存下でのベントナイトへのNp(V)の収着試験結果:  
 収着の時間依存性



## (b) 処分方法の提示及び安全性評価手法の開発

### ② 処分への影響物質等の影響評価手法の開発

～パラメータ設定(影響発現のしきい値と収着低減係数)の試行結果のまとめ～

セメント系

元素群	代表元素	影響発現濃度 (しきい値) と収着低減係数 (SRF)						
		有機物 (ISA)		海水	ホウ酸		フェロシアン化合物	
		しきい値	SRF	SRF <sup>*3</sup>	しきい値	SRF	しきい値	SRF
アルカリ金属	Cs	—	1	2	—	1	—	1
アルカリ土類金属	Sr	1×10 <sup>-2</sup> M <sup>*1</sup>	10	8	—	1	—	1
II 価遷移金属	Ni	—	1	1	課題有	課題有	—	1
IV 価遷移金属	Sn	1×10 <sup>-4</sup> M	100	10				
V 価遷移金属	Nb	1×10 <sup>-4</sup> M	100	10				
III 価アクチニド	Am	1×10 <sup>-4</sup> M	10	10	—	1	—	1
IV 価アクチニド	Th	1×10 <sup>-4</sup> M	100	10	課題有	課題有	課題有	課題有
V 価アクチニド	Np	1×10 <sup>-4</sup> M	10	10	—	1	1×10 <sup>-3</sup> M	3
VI 価アクチニド	U	5×10 <sup>-4</sup> M	10	10	1×10 <sup>-2</sup> M	500	1×10 <sup>-3</sup> M	3
ハロゲン	I	— <sup>*2</sup>	1	— <sup>*2</sup>				
陰イオン種	Se	— <sup>*2</sup>	1	— <sup>*2</sup>				

ベントナイト系

元素群	代表元素	影響発現濃度 (しきい値) と収着低減係数 (SRF)			
		ホウ酸		フェロシアン化合物	
		しきい値	SRF	しきい値	SRF
アルカリ金属	Cs	—	1	—	1
アルカリ土類金属	Sr	—	1	—	1
II 価遷移金属	Ni				
IV 価遷移金属	Sn				
V 価遷移金属	Nb				
III 価アクチニド	Am			—	1
IV 価アクチニド	Th	課題有	課題有	課題有	課題有
V 価アクチニド	Np	—	1	1×10 <sup>-3</sup> M	4
VI 価アクチニド	U	—	1	1×10 <sup>-3</sup> M	2
ハロゲン	I				
陰イオン種	Se				

<sup>\*1</sup>M: mol/L, <sup>\*2</sup>K<sub>d</sub> = 0 (m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>)を設定,

<sup>\*3</sup> 降水条件⇒海水条件間の SRF

- : 既往の情報調査結果に基づき設定
- : 収着試験による取得データに基づき設定 (未設定のものは今後設定, あるいはデータ拡充後に設定)
- : 既往の情報調査およびデータ取得を未実施 (調査の結果データがないことを確認したものを含む)



## (b) 処分方法の提示及び安全性評価手法の開発

### ② 処分への影響物質等の影響評価手法の開発

～まとめと今後の計画～

- 本年度予定していたデータ調査及び取得を終了し、存在するデータに応じた閾値並びにSRFを設定するとともに、熱力学データに基づく値は実験的手法に比べて保守的に評価されることを確認
- 次年度は本年度の評価結果、処分被ばく線量評価結果などより、計画について再検討の上、重要性が高いと思われるデータ取得を実施し、SRF設定を試みる

表 影響物質ごとの現時点での評価と今後の課題

影響物質	処分時の収着影響の現時点での評価	今後の課題
有機物	<ul style="list-style-type: none"> <li>有機物影響については、既往の知見が比較的充実しており、特に最も影響が大きいイソサッカリン酸 (ISA) の収着影響データが充実していることから、現時点ではこのISA共存下の実測の収着データに基づく設定評価を検討することが妥当。</li> <li>他の有機物の影響は十分なデータは存在しないものの、熱力学データに基づく評価が適用できる可能性がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>事故廃棄物に含まれる可能性のある有機物とその分解生成物を想定しつつ、多様な有機物と核種の組合せに対して、熱力学データによる手法を含め評価手法の適用性や妥当性を検討していく必要がある。</li> </ul>
海水成分	<ul style="list-style-type: none"> <li>海水成分が核種収着に及ぼす影響については、既往の知見が比較的充実しており、海水成分との収着競合などの収着メカニズムの理解に基づいて、ある程度定量的な収着低減評価が可能である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>各核種の収着メカニズムと海水成分の影響評価に関する最新の知見に基づく設定の更なる見直しが必要。</li> </ul>
ホウ酸水	<ul style="list-style-type: none"> <li>ホウ酸の影響については、収着影響データを取得し、その結果をもとに、アルカリ金属、アルカリ土類金属ではホウ酸の影響は小さく、一方で、アクチニドの場合には、ホウ酸がある程度影響するものの炭酸共存を考慮すればその影響は顕著とはならないものと評価できる。</li> <li>廃棄物のホウ酸の含有量が高濃度となる場合には、ホウ素が環境基準物質であることに加え、廃棄体周辺のホウ酸濃度評価と核種移行影響を適切に考慮する必要がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>アクチニド核種をはじめとする高収着性核種の試験データを十分な精度で取得することが課題であり、ホウ酸による錯形成の影響と収着低減の関係性や、炭酸錯体などの他の配位子との競合の評価、核種間での影響の整合性などにも十分配慮した収着低減係数の評価を引き続き検討する必要がある。</li> </ul>
フェロシアン化合物	<ul style="list-style-type: none"> <li>フェロシアン化合物については、フェロシアン化合物共存下での収着データを取得し、アルカリ金属、アルカリ土類金属ではその影響は小さく、一部のアクチニドにおいてその収着への影響が顕在化する可能性が確認された。</li> <li>全シアンが環境基準物質であることに加え、フェロシアン化合物自体の廃棄体内や処分環境での挙動をあわせて評価し、前処理時の対策を含めた検討が必要である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>核種やpH等の条件によってその影響は複雑なことが推察され、フェロシアン化合物による錯形成の影響と収着低減の関係性についてデータを拡充するとともに、核種間での影響の整合性などを確認しつつ収着低減係数の評価を検討する必要がある。</li> </ul>
硫酸塩	<ul style="list-style-type: none"> <li>熱力学データに基づく評価から硫酸錯体は核種収着にほとんど影響を及ぼさないと推定された。一方で、硫酸塩共存系でのU(VI)のセメント系材料への収着試験では、比較的高い硫酸塩濃度において分配係数の硫酸塩濃度依存性が確認されたほか、収着の顕著な時間依存性が確認された。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>硫酸塩共存下の収着試験において顕著な時間依存性が確認されており、固相変遷の影響の可能性も含めて更なるデータ取得と評価が必要である。</li> </ul>
炭酸塩	<ul style="list-style-type: none"> <li>炭酸塩の影響については、もともと天然の岩石・地下水環境に含まれる成分であり、その影響評価手法も従来研究で検討されてきたものを活用可能である。</li> <li>事故廃棄物由来の炭酸塩が存在しない場合においても間隙水中の炭酸イオン濃度の影響は考慮されており、事故廃棄物に含まれる炭酸塩の影響をさらに追加して考慮する必要性は低いと考えられる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>左記の評価の妥当性を確認する必要がある。</li> </ul>

## 2. 事業内容

### c. 性状把握の効率化

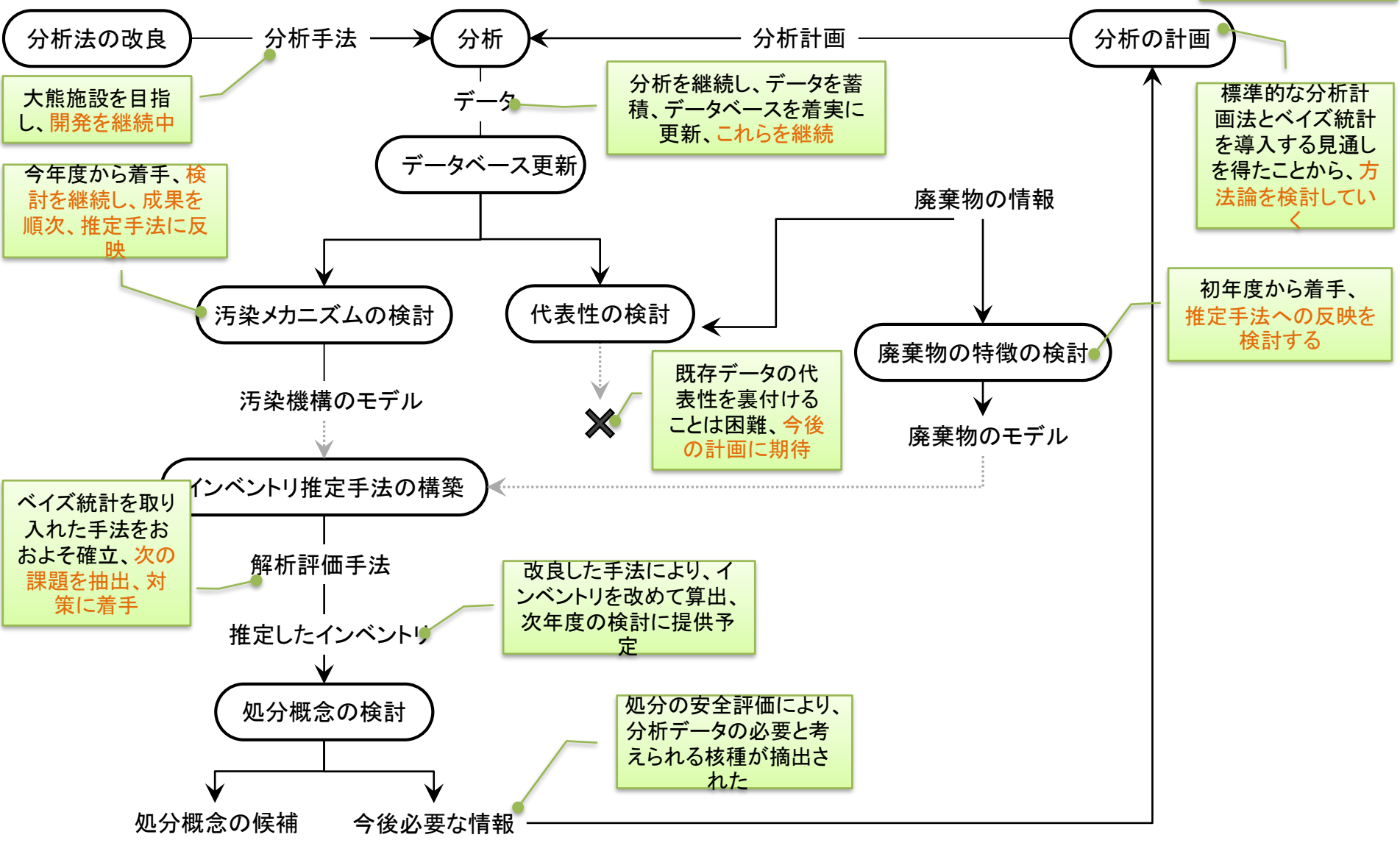
#### (a) 性状把握の効率化

- ① 分析データと移行モデルに基づく評価データを組み合わせて性状を把握する方法の構築
  - i. 汚染メカニズムの把握
  - ii. 分析データの代表性に関する評価
  - iii. 分析データの特徴に関する調査、整理
  - iv. 統計論的インベントリ推定方法
  - v. 分析データの取得
  - vi. 分析データの評価・管理
- ② 分析方法の簡易・迅速化等
  - i. 試料のサンプリング技術開発
  - ii. 分離プロセスの合理化検討
  - iii. 自動化技術の開発
  - iv. 標準的な分析手法の確立

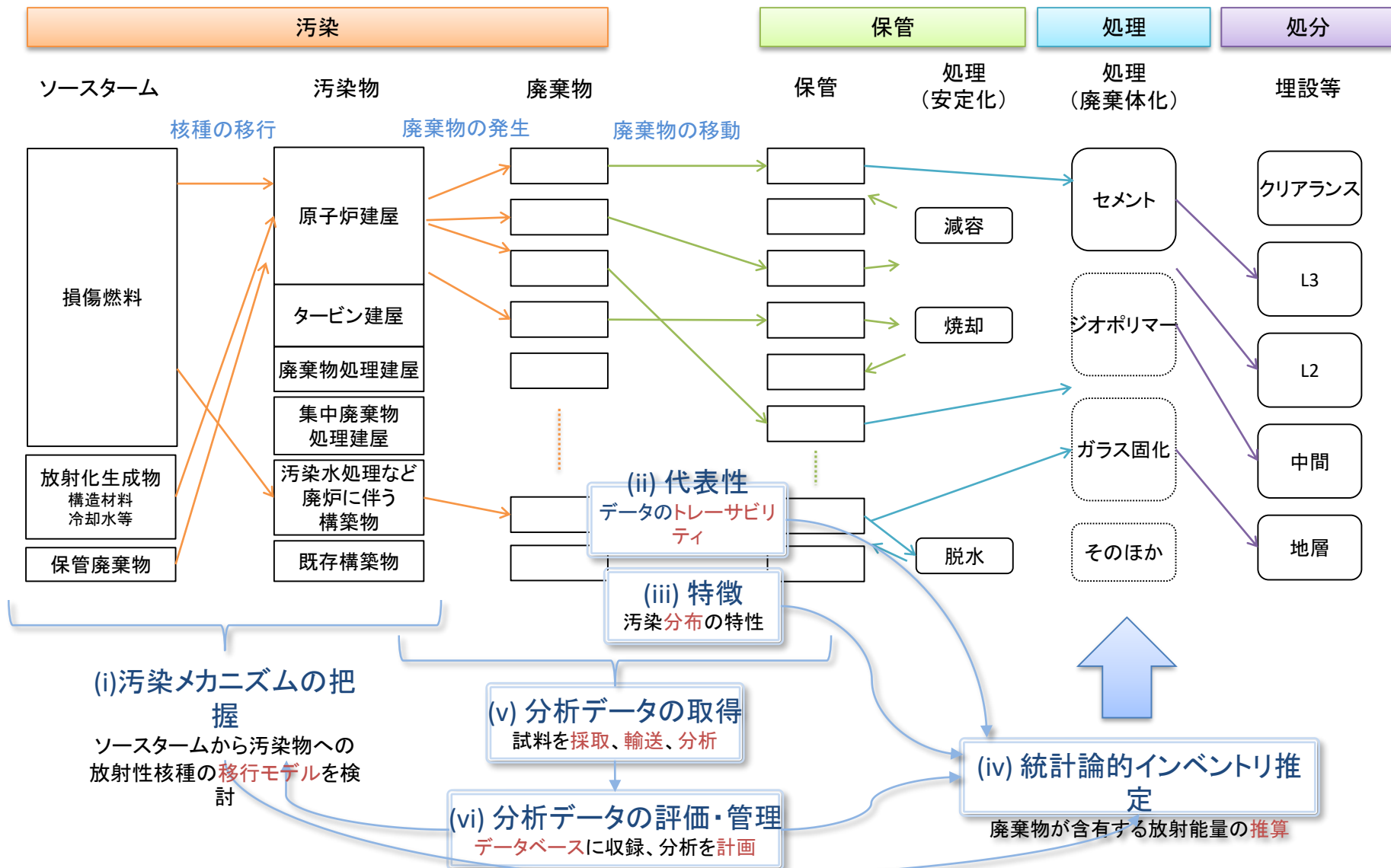
#### (b) サンプリング技術の開発

# (a) 性状把握の効率化 分析とそのデータを利用した研究開発の全体像

凡例: 取り組みの状況  
今年度の進め方



# (a) 性状把握の効率化 ①性状を把握する方法の構築 - 放射性廃棄物の発生から処分までの流れと実施内容 -



# (a) 性状把握の効率化 ①性状を把握する方法の構築

## i. 汚染メカニズムの把握

### ■ 実績

- 様々な試料の分析データを蓄積しており、放射性核種の汚染挙動の整理を進めている。例えば、汚染水中の U はPCV と以後の下流側で Cs に対する比が異なっている(図1)。また、Np は U や Pu と異なる挙動を示す(図2)。
- 同様に、固体や汚染水中の放射性核種の濃度について、Cs を基準として相対的に比較し、挙動に関する元素のグループを検討した。

### ■ 目標

- 放射性核種の移行挙動を表現するモデルを構築するため、汚染のメカニズムを把握する。

### ■ 実施内容

- 放射性核種の移行に関して、複数のソースターム、並びに複数の媒質を含むモデルを検討する。放射性核種は、廃棄物管理において重要と考えられるものを包含し、分析によってデータが得られない場合はその挙動を推定する。
- (2019年度)汚染の現象が一般的に対数正規分布により近似されることを考慮して、汚染の要素的な過程について考察する。
- (2020年度)新たに得られたデータをもとに検討結果を見直す。

### ■ 目標達成を判断する指標

- 汚染現象を表すモデルを作成する。(2019年度)
- モデルを見直す。(2020年度)

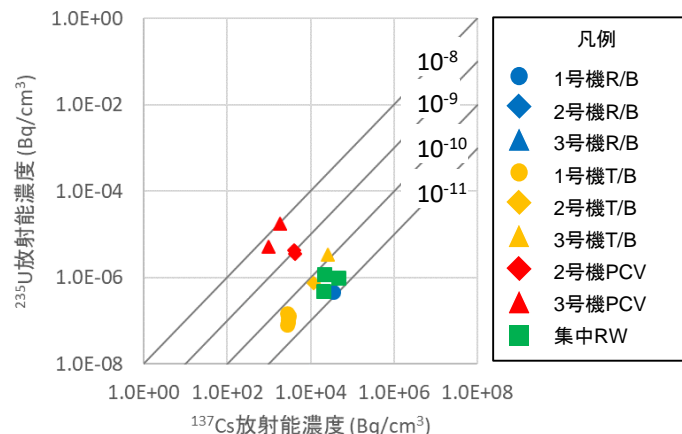


図1 種々の汚染水の  $^{235}\text{U}$  と  $^{137}\text{Cs}$  放射能濃度比\*1

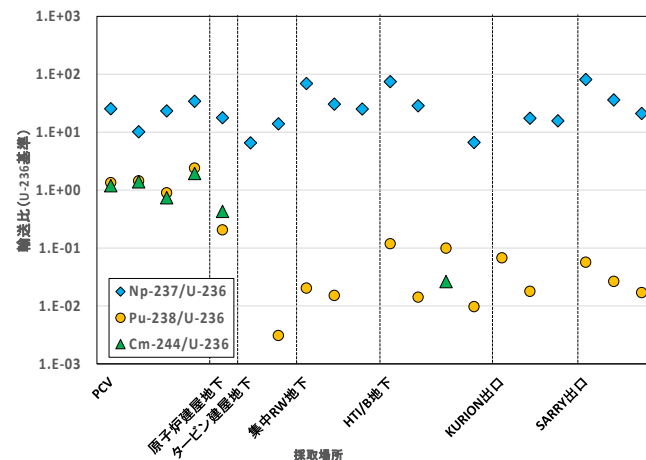


図2 種々の汚染水の  $^{237}\text{Np}$  と  $^{236}\text{U}$  放射能濃度比 (燃料組成で規格化した輸送比)



# (a) 性状把握の効率化 ①性状を把握する方法の構築

## i. 汚染メカニズムの把握

- 廃棄物は材質や発生場所により汚染状況が異なり多岐にわたるため、対象を限定して「ケーススタディ」を進めている(図1)。
- ケーススタディは、はじめに対象とする廃棄物の分類を検討し、21種を設定した(表1)。廃棄物の「重要性」を評価する方法を検討し、選定はこの指標を用いて3段階で行い、ケーススタディの対象廃棄物を選んだ。
- 第1段階では、瓦礫(3種)、水処理二次廃棄物(2種)、解体廃棄物(2種)の7種に絞りこまれた。
- 最終的には原子炉建屋解体廃棄物を選定した。原子炉建屋のうち、分析データの多い2号機を対象とした。原子炉建屋の汚染は、空気と汚染水を経由した2通りのメカニズムが考えられ、検討対象として好適である。(図2)

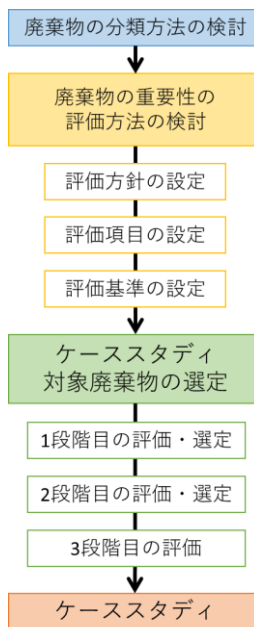


表1 ケーススタディのための廃棄物分類

分類1	分類2	材料	第1段階	第2段階
瓦礫	<0.005[mSv/h]	コンクリート, 金属	☑	
	0.005-0.1[mSv/h]	コンクリート, 金属	☑	☑
	0.1-1[mSv/h]	コンクリート, 金属		
	1-30[mSv/h]	コンクリート, 金属		
	>30[mSv/h]	コンクリート, 金属	☑	
保護衣等		焼却灰		
伐採木		焼却灰		
汚染土		汚染土		
水処理二次廃棄物	KURION	(吸着材ごと)	☑	
	SARRY	(吸着材ごと)		
	除染装置 (AREVA)	スラッジ		
	ALPSスラリー	鉄共沈, 炭酸塩沈殿	☑	☑
	ALPS吸着材	(吸着材ごと)		
	モバイル式処理装置	(吸着材ごと)		
解体廃棄物	濃縮廃液	スラリー		
	圧力容器内	コンクリート, 金属		
	格納容器内	コンクリート, 金属		
	原子炉建屋内	コンクリート, 金属	☑	☑
	その他建屋	コンクリート, 金属	☑	☑
	廃炉作業に伴う (デブリ取り出しを含む) 廃棄物	装置類(金属など) デブリ等付着の可能性あり		
	堆積物	堆積物		

段階的に絞りこみ、最終的に原子炉建屋内の汚染を選んだ

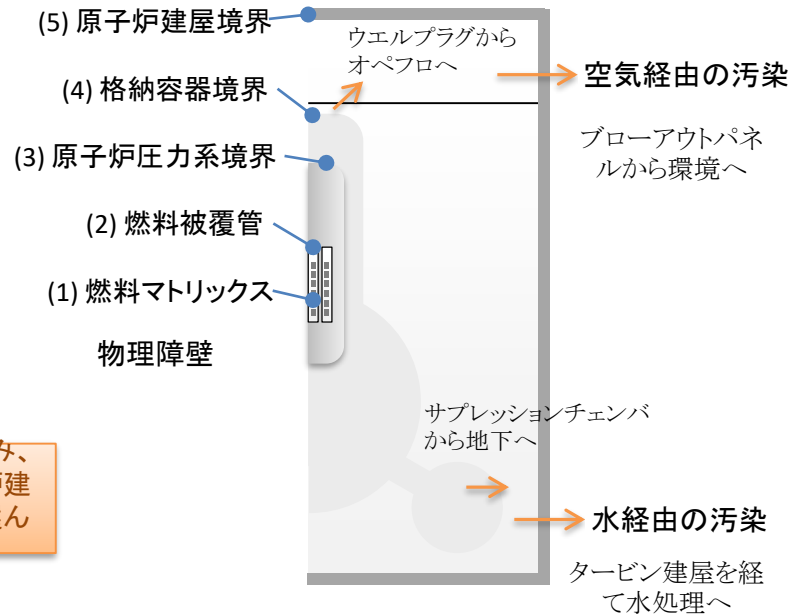


図2 ケーススタディの汚染モデル (2号機原子炉建屋内解体廃棄物)

図1 ケーススタディの進め方



# (a) 性状把握の効率化 ①性状を把握する方法の構築

## i. 汚染メカニズムの把握(つづき)

- 2号機原子炉建屋内での空気を経由した汚染に関して、採取場所が明らかな分析試料のデータを検討した(表1)。
- 主要な核種の輸送比( $^{137}\text{Cs}$ に対する相対値、燃料組成で規格化)は、化学的な性質が似た元素は同様の値を示す(図1)。媒質(空気)中を移動する過程で核種の組成変化は小さいとみられる。この知見を反映して、解析的インベントリ推定を進めている。
- 一方で、Cs との相関の傾向が異なる核種( $^3\text{H}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{60}\text{Co}$ など)は、ソースタームや移行のメカニズムが他と異なる可能性が示唆される。
- 汚染した場所での局所的な核種の移行に関して、イメージングプレートによる測定データを収集している(図2)。汚染は表層にとどまっている様子が認められる。
- 放射化学的分析データは、汚染した場所の情報を提供するが、ソースタームや核種移行過程に関する直接的な情報は含まない。分析データに基づく、帰納法的なアプローチを検討する必要がある。

表1 2号機原子炉建屋の分析試料  
(放射化学分析)

採取場所		試料性状	試料点数
5階	天井	デッキプレート 塗膜	5
	床 シールドプラグ東側	ボーリングコア表面塗膜	1
	床 ウエルプラグ上部(中央部)	ボーリングコア下層塗膜、コンクリート上層部・下層部	3
	床 北東部	同上	3
3階	床 北側(RCWポンプ近傍)	ボーリングコアストリップパブルペイント	1
2階	床 北側通路(RCW Hx近傍)	ボーリングコアストリップパブルペイント	1
1階	床 北西コーナー(パーソナルエアロック室入口)	ボーリングコア	1
PCV	TIP配管	配管閉塞物	1

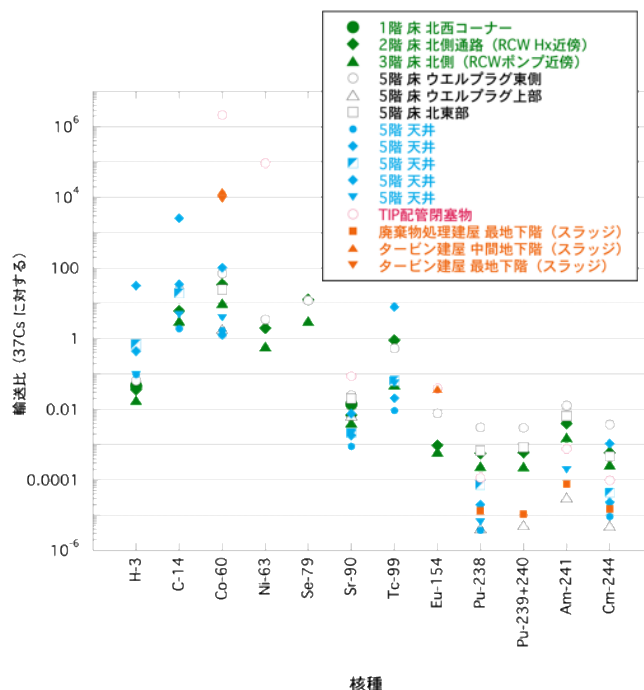


図1 2号機原子炉建屋の各階への主要核種の輸送比(規格化した $^{137}\text{Cs}$ に対する濃度比)

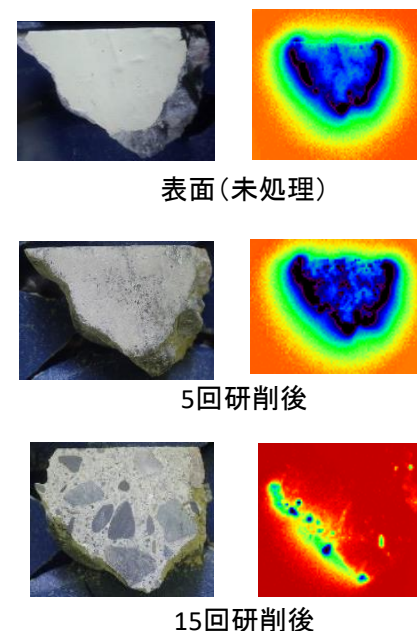


図2 イメージングプレートによる汚染分布データの例\*1 (試料番号 3RB-OP-C1)

# (a) 性状把握の効率化 ①性状を把握する方法の構築

## i. 汚染メカニズムの把握(つづき)

- 汚染水を経由した原子炉建屋の汚染に関して、分析データは汚染水に限定される。滞留水とこれに含まれる固形分(スラッジ)の分析データを手掛かりに検討している。
- 汚染水中のアクチニド核種の挙動は、U、Np、Pu-Am-Cmのそれぞれで異なる様子が見られる(図1)。
  - Uに比べて、Npはより高い割合で汚染水に移行している可能性がある。Uは、天然ウランからの寄与が認められる場合があり、構造材料からの溶出が示唆される。Pu、AmとCmはPCVから、原子炉建屋、タービン建屋へ移行する過程で、水から失われており、別の形態に転換したことが示唆される。
- 滞留水に含まれるスラッジの分析データからは、U、PuやAmが検出され、水との間の物質収支からは、スラッジへの移行が裏付けられた(図2)。
- 汚染水は循環利用されており、ある割合で継続的に放射性核種が流入している。ソースタームから水への移行過程の検討が重要である。また、不溶性のアクチニドの堆積を推定する必要がある。
  - 空気の場合と異なり帰納的なアプローチも取れないので、分析データの拡充(種々の種類の試料の入手を含め)とともに、本事業以外の知見を参照する必要がある。

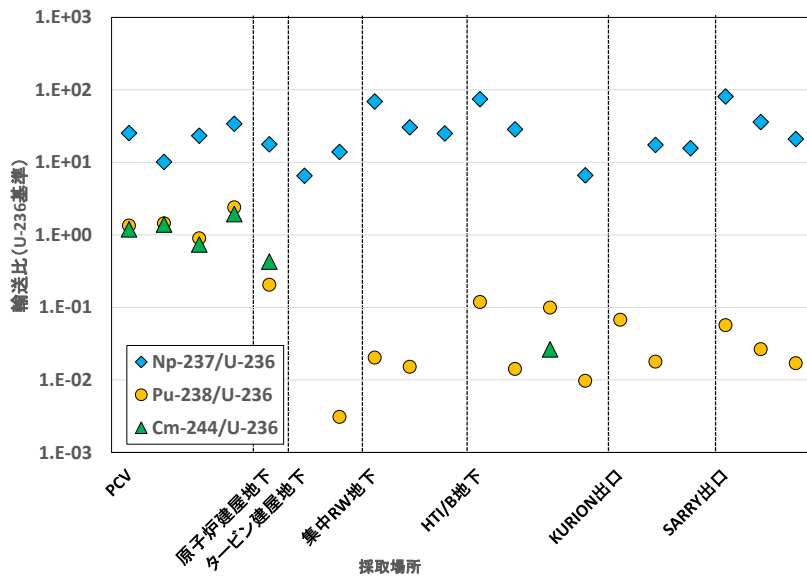


図1 汚染水への主要核種の輸送比 (規格化した<sup>236</sup>Uに対する濃度比)<sup>\*1</sup>

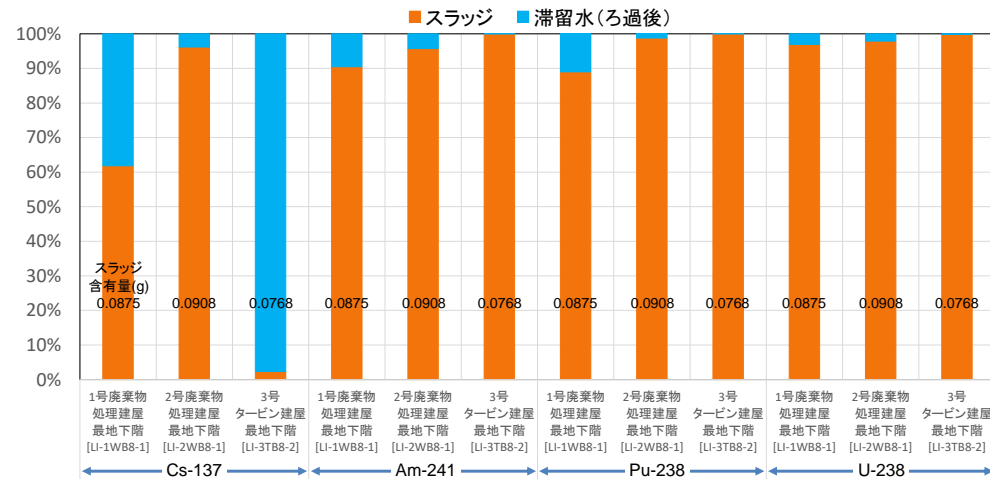


図2 固形分(スラッジ)を含む滞留水のCsとアクチニド核種の分布<sup>\*1</sup>

# (a) 性状把握の効率化 ①性状を把握する方法の構築

## i. 汚染メカニズムの把握(つづき)

- 廃棄物が含有する放射性核種の濃度は、できるだけ簡便な方法により求めることが望ましい。原子炉の運転廃棄物に含まれる測定が困難な核種に対して、スケーリングファクタ法が用いられる。ここで、濃度比は対数正規分布により近似される。
- 我々は、規格化した濃度比である輸送比が対数正規分布により近似できることを仮定し、インベントリの推定に利用してきた。対数正規分布に関する事例を調べ、福島第一原子力発電所廃棄物への適用性を検討した。
- 対数正規分布は様々な分野の事象の分布に適用されており、大気科学分野では、汚染物質に対して、エアロゾルの粒径と汚染物質の濃度が対数正規分布で表現される(表1)。また、汚染の要素過程を考えると、粒子の形成(固体微粒子や水滴)、媒質である空気の流れ(風速)、汚染の結果である濃度分布はいずれも対数正規分布があてはまる(図1)。
- 正規分布には再生性があり、対数正規分布についてもその性質に由来して、同様の再生性がある。粒径、風速と汚染分布がいずれも対数正規分布となることは妥当であると考えられる。検討を継続するとともに、インベントリ推定では対数正規分布を仮定する。

表1 対数正規分布が当てはまる種々の事象 \*1

分野	対数正規分布が適合する例	競合する分布
事象時間	伝染病の潜伏期間、病気回復時間、生存期間、勤続年数、再販時間、通話時間、問題解答時間等	3母数対数正規、逆ガウス、ワイブル、ガンマ、第2種ベータ等
経済学	株価、株式収益率、保険賠償請求額	3母数対数正規、ピアソン型、逆ガウス等
工業	熱イオン電子管システムの応用や粒子径の制御、金属疲労等が関係する生存時間分布	
生物学	血中成分の濃度、最小致死量	一般ガンマ、ディリクレ、多変量ガンマ
生態学	個体数	負の2項分布、対数級数分布
大気科学	エアロゾルの粒径、汚染物質の濃度、洪水頻度	第1種極値、ジョンソン、ワイブル、ベータ
地質学	粒径	多変量正規分布(空間的な相関について)

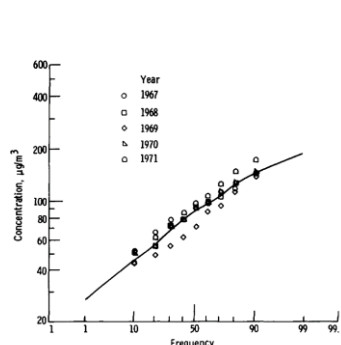


Figure 8-3. Lognormal plot of distribution by weight of total suspended particulate (24-hr. sampling) for monitoring station K (see Fig. 1) upwind of the industrial region.

粒子の質量

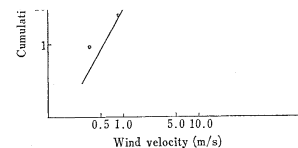


Fig. 1. Cumulative frequency for wind velocities at Kojiya in 1973.

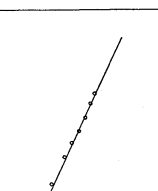


Fig. 7. Cumulative frequency for concentrations in four cases of stability with the distance of 40 km.

以上の角度 $\theta$ に対して $10^\circ$ の  
 いて、(8)式に基づく場合の濃  
 された昭和48年度の10分間平均  
 面を仮定し、有熱煙突高度を $2$   
 は距離 $r$ によって定まる関数と  
 わされる。  
 $\gamma = \zeta - \alpha \ln r$  (11)

いた拡散シミュレーションを行  
 し、煙源における風のデータと  
 安定度は安定度の出現頻度を考  
 類の B, C, D, E について計算  
 源を中心に方位 N, NE, E, SE,

汚染濃度

図1 放射性核種の汚染に関連する対数正規分布\*2,3

\*1 清水邦夫, 応用統計学, 17(1), 55-59 (1988). \*2 H. Neustadter et al., EPA-650/4-74-038 (1974). \*3 広尾 純 ほか, 大気汚染学会誌, 14(8), 311 (1979).

# (a) 性状把握の効率化 ①性状を把握する方法の構築

## i. 汚染メカニズムの把握(つづき)

- 汚染メカニズムの検討は、放射化学的分析データを基にした帰納的なアプローチが主体となる。分析データは徐々に蓄積されることを踏まえ、解析的、並びに、実験的アプローチからの知見を参照し、これらを組み合わせるよう検討を進めていく。(図1)
- 汚染の対象とともに、核種を限定して(基準として取り扱いやすい  $^{137}\text{Cs}$ 、処分安全評価における重要なアクチニド、 $^{14}\text{C}$  や  $^{129}\text{I}$ ) 検討する。

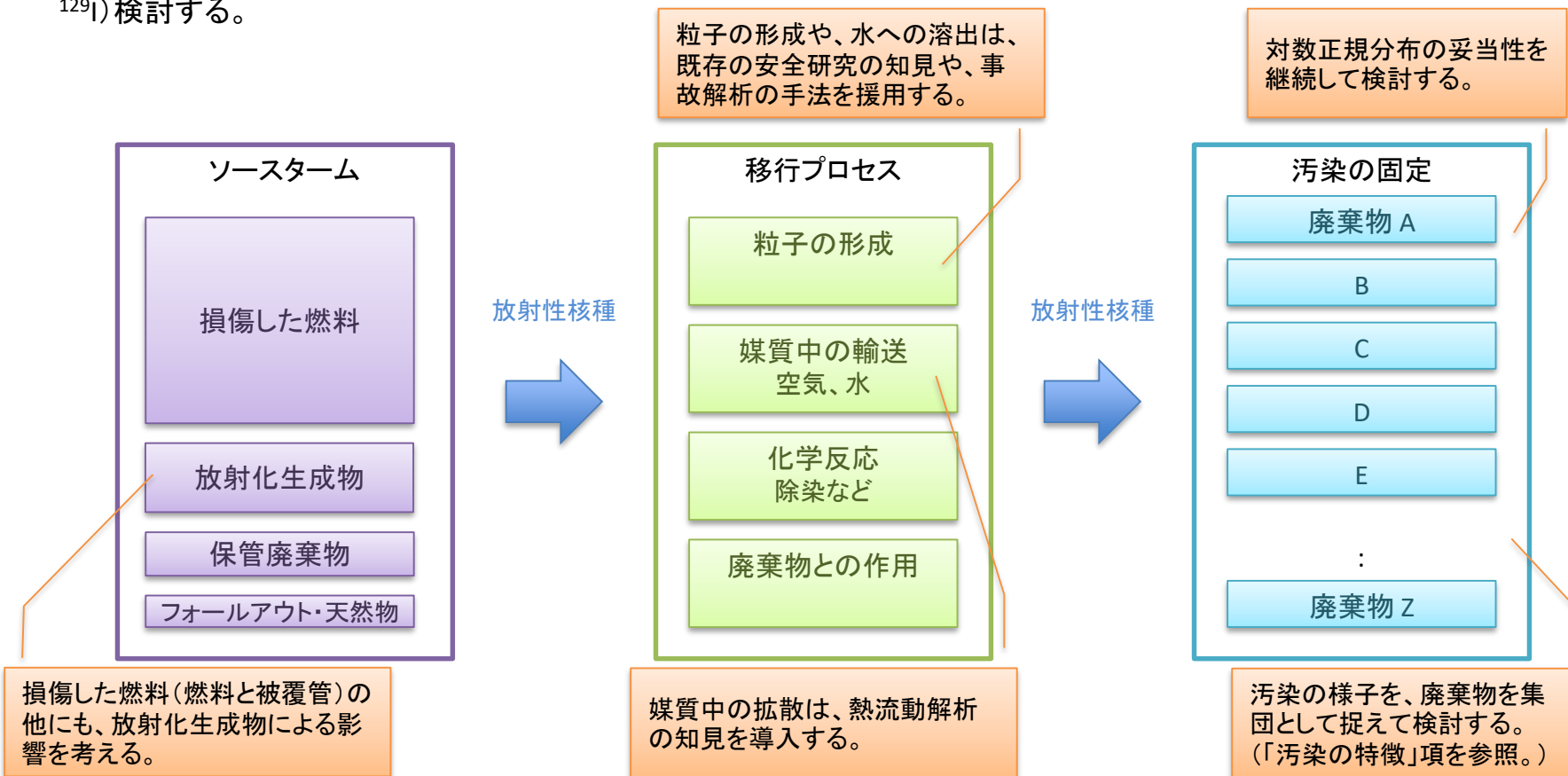


図1 汚染メカニズム検討の方向性



# (a) 性状把握の効率化 ①性状を把握する方法の構築

## ii. 分析データの代表性に関する評価

### ■ 実績

- 保管管理されている放射性廃棄物の情報の電子化(データベース化)に着手し、すでに約6万件のデータを集積している(図1)。
- 一方で、様々な試料の分析データを蓄積してきており、濃度は対数正規分布で表現できる可能性を見出した(図2)。

### ■ 目標

- 分析により得られるデータの代表性を評価する方法を見出す。

### ■ 実施内容

- 廃棄物の発生形態をいくつかの分類に類型化し、それぞれについてインベントリを推定する方法を検討する。
- (2019年度)廃棄物の汚染分布に関して、発生した状態から集積、保管される過程を想定して、汚染分布の変化を分析データを踏まえて検討する。母集団が確定していない対象を統計論的に検討するため、ベイズ推定の有用性を調査する。
- (2020年度)新たに得られたデータをもとに検討結果を見直す。前年の結果に基づいて、統計論的なインベントリ推定方法を検討する。また、方法の適用性を分析データを用いて評価する。

### ■ 目標達成を判断する指標

- 廃棄物の情報を整理し、廃棄物の特性を評価する。(2019年度)
- 廃棄物情報に対する分析データの位置を示す方法を提案する。(2020年度)

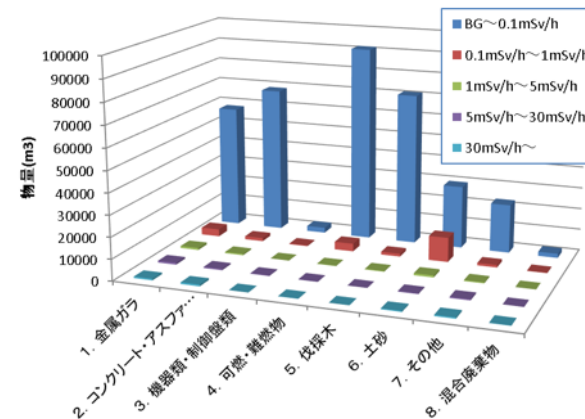


図1 保管されている廃棄物の情報の抽出例

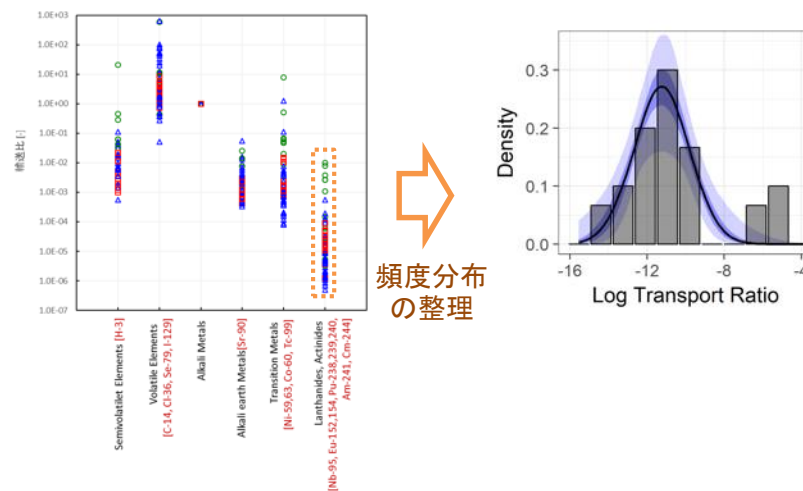


図2 分析データの統計的取り扱い方法に関する検討(建屋内気中放出割合の例)

# (a) 性状把握の効率化 ①性状を把握する方法の構築

## ii. 分析データの代表性に関する評価

- 分析試料と廃棄物の関係を推定するために、現場の保管管理状況と分析データベースを照合した。(図1)
- トレーサビリティを有する保管エリアは「エリアQ」と「固体廃棄物貯蔵庫」に限られることが分かった。(表1)
  - 「エリアQ」に存在した瓦礫類は既に固体廃棄物貯蔵庫内に移送されており、結果として、現在、トレーサビリティのある保管エリアは「固体廃棄物貯蔵庫」のみである。
- 分析データの代表性は、廃棄物のトレーサビリティに応じて、方法を検討しなければならない。

表1 保管エリアの情報と廃棄物のトレーサビリティ(2019.8.30時点)

エリア	保管方法	保管物	表面線量率区分 (mSv/h)	エリア占有率	トレーサビリティ
B	屋外集積	瓦礫類	0.1 以下	95%	無し
C	屋外集積	瓦礫類	0.1 以下	99%	無し
F2	屋外集積	瓦礫類	0.1 以下	85%	無し
J	屋外集積	瓦礫類	0.1 以下	78%	無し
N	屋外集積	瓦礫類	0.1 以下	96%	無し
O	屋外集積	瓦礫類	0.1 以下	83%	無し
P1	屋外集積	瓦礫類	0.1 以下	80%	無し
U	屋外集積	瓦礫類	0.1 以下	100%	無し
V	屋外集積	瓦礫類	0.1 以下	80%	無し
AA	屋外集積	瓦礫類	0.1 以下	26%	無し
D	シート養生	瓦礫類	0.1~1	58%	無し
E1	シート養生	瓦礫類	0.1~1	88%	無し
P2	シート養生	瓦礫類	0.1~1	62%	無し
W	シート養生	瓦礫類	0.1~1	27%	無し
X	シート養生	瓦礫類	0.1~1	65%	無し
L	覆土式一時保管施設	瓦礫類	1~30	100%	無し
A	仮設保管設備	瓦礫類	1~30	14%	無し
E2	容器収納	瓦礫類	1~30	26%	無し
F1	容器収納	瓦礫類	1~30	99%	無し
Q	容器収納	瓦礫類	1~30	0%	物により有り
固体廃棄物貯蔵庫	容器収納	瓦礫類	—	36%	有り
G	屋外集積	伐採木, 幹根枝葉	—	63%	無し
H	屋外集積	伐採木, 幹根枝葉	—	74%	無し
M	屋外集積	伐採木, 幹根枝葉	—	88%	無し
V	屋外集積	伐採木, 幹根枝葉	—	2%	無し
G	一時保管槽	伐採木, 枝葉	—	88%	無し
T	一時保管槽	伐採木, 枝葉	—	94%	無し
小文字エリア	屋外集積	使用済み保護衣	—	81%	無し

母集団における分析試料の分布位置を推定

廃棄物情報データベース

分析データベース



保管されている廃棄物の情報を整理

分析試料と廃棄物の対照関係を推定

現場の保管管理状況

図1 分析データの代表性に関する廃棄物データの参照



# (a) 性状把握の効率化 ①性状を把握する方法の構築

## ii. 分析データの代表性に関する評価

- 1～4号機エリアかつ屋内環境に着目し、廃棄物保管データと分析データの線量率の頻度を比較した。(図1)
- 廃棄物保管データについて、可燃・難燃物、金属ガラ、伐採木は線量の低いものが多い、コンクリートは $\geq 30$  mSv/hのものが多い。分析データについて、コンクリートは $5 \mu\text{Sv/h}$ を越えるものが多い。
- 分析試料は、分布を単純に代表するものではなく、特徴的な汚染を例示するものと位置付けられる。
- これらのことを踏まえて、代表性とこれを評価する方法の検討を継続する。

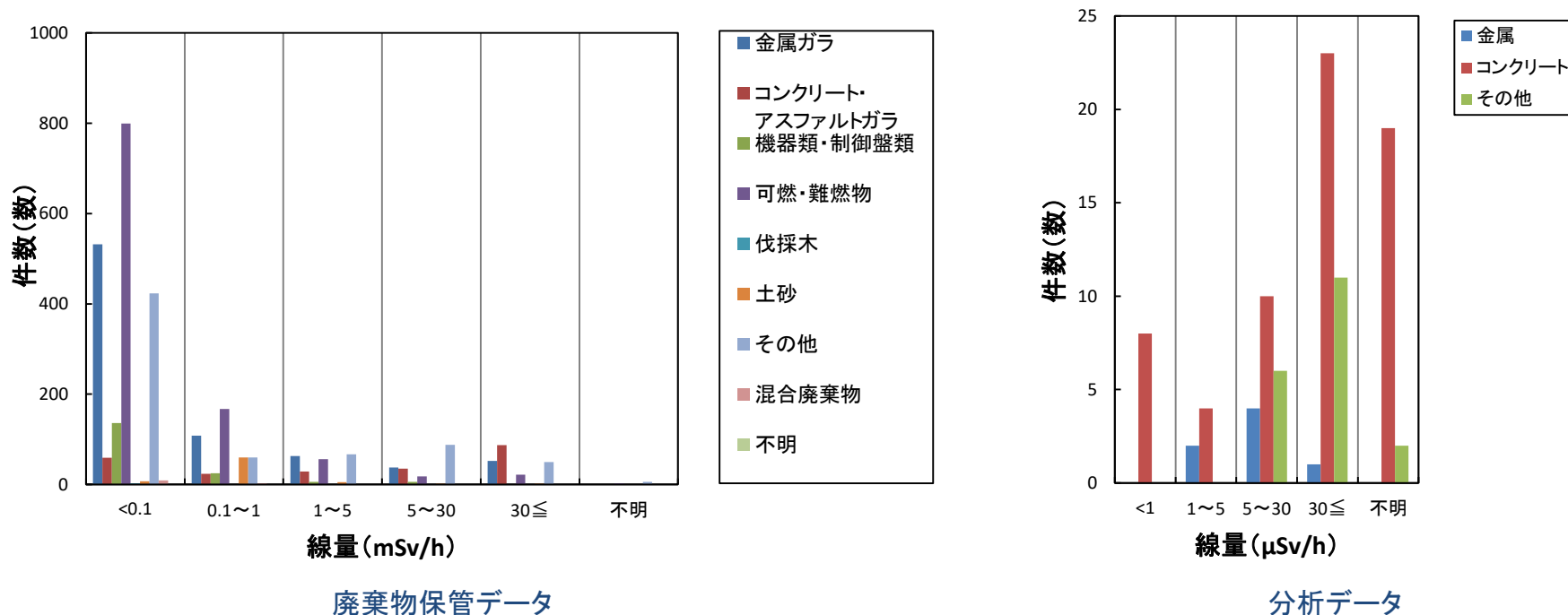


図1 1～4号機エリアの瓦礫の屋内の線量

# (a) 性状把握の効率化 ①性状を把握する方法の構築

## iii. 分析データの特徴に関する調査・整理、iv 統計論的インベントリ推定方法

### ■ 実績

- 核種の移行割合を推定するために、分析データからベイズ統計に基づき確率分布として表現しうることを見出した(図1)。
- 分析データの蓄積に伴い、分布のパラメータ(平均と分散)が変化するが、核種や廃棄物の種類により改善が見られない場合があることがわかり、モデルや処理方法の改善が必要である(図2)。

### ■ 目標

- 廃棄物の含有する放射能量(インベントリ)を統計論的に推定する方法を確立する。

### ■ 実施内容

- 廃棄物の発生形態をいくつかの分類に類型化し、それぞれについてインベントリを推定する方法を検討する。
- (2019年度)母集団が確定していない対象を統計論的に検討するため、ベイズ推定の有用性を調査する。廃棄物の汚染分布に関して、発生した状態から集積、保管される過程を想定して、汚染分布の変化を分析データを踏まえて検討する。
- (2020年度)新たに得られたデータをもとに検討結果を見直す。前年の結果に基づいて、統計論的なインベントリ推定方法を検討する。また、方法の適用性を分析データを用いて評価する。

### ■ 目標達成を判断する指標

- 分析データの特徴を整理して示す。応用に適した統計的な手法を抽出する。(2019年度)
- 検討結果を見直す。統計論的なインベントリ推定方法を提案する。その適用性を評価して示す。(2020年度)

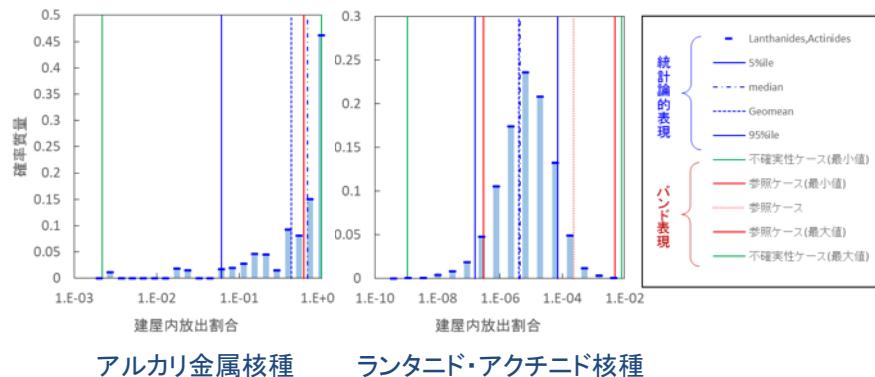


図1 ベイズ統計に基づきモンテカルロ計算を援用して求めた核種移行割合(確率密度分布としての表現)

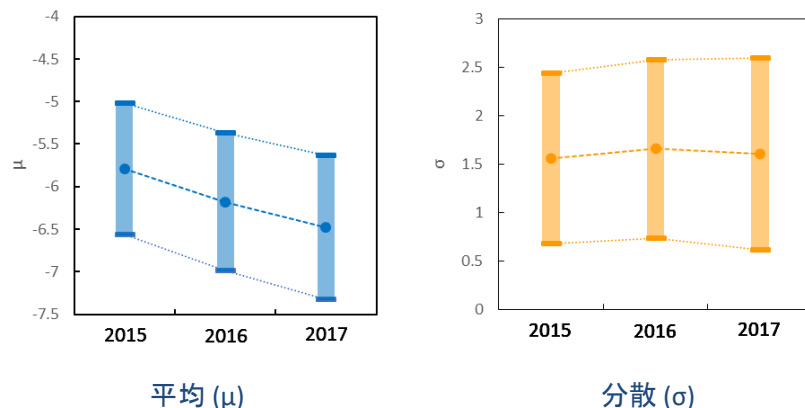


図2 データ増加に伴う対数正規分布パラメータの変化(原子炉建屋内へのアルカリ土類金属元素輸送比)

# (a) 性状把握の効率化 ①性状を把握する方法の構築

## iii. 分析データの特徴に関する調査・整理

- 現在保管されている廃棄物の特性を明らかにするため、廃棄物情報を基に線量率などの特徴を調べている。
- 1～4号機とその周辺が発生場所とされる保管廃棄物の記録は比較的多く整備されているので、原子炉建屋の汚染を把握することで、現在保管中の廃棄物の特性をおおよそ押さえられるとみられる。
- 容器(コンテナ)中で廃棄物は不均一に存在するとみられ、その様子をコンテナの線量率データから調べた(図1)。複数の方向から測定されたデータは、そのばらつきが特定の分布を持つことが示唆された。
- 施設に収納されている廃棄物の線量と物量の関係を調べた(図2)。収納されているブロックにばらつきはあるものの、全体的に見ると、特定の分布を持つことがうかがわれた。
- 以上のことから、廃棄物の物量や線量率のばらつきは、集団として捉えることにより、それぞれの分布を議論する可能性が見出された。
- そこで、廃棄物の集積の状態を3段階(個々の廃棄物、容器に収納した状態、設備にて保管する状態)でモデル化し、それぞれについて汚染分布の特徴を検討、定量化を試みる(図3)。

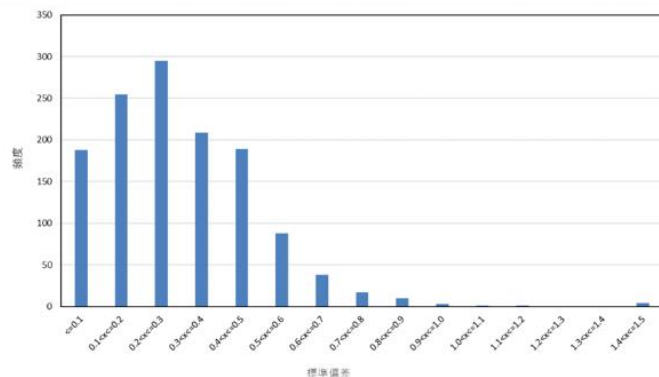


図1 高線量瓦礫コンテナの線量率の偏在(複数の方向からの測定値のばらつき)

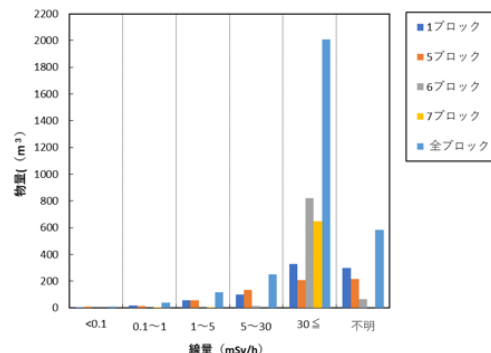


図2 固体廃棄物貯蔵庫8棟(B2F)における瓦礫の保管量

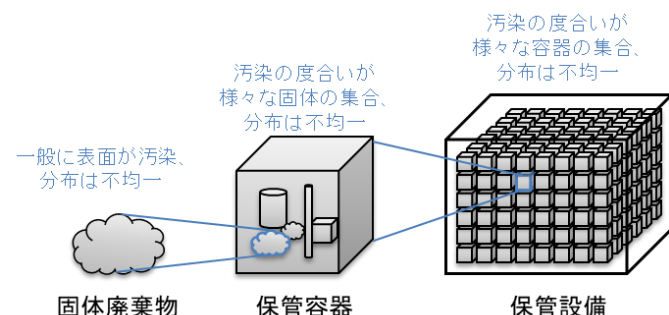
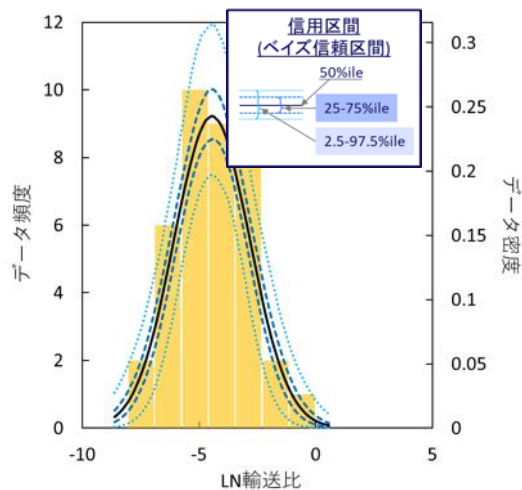


図3 廃棄物の集積に関する階層構造と汚染分布のばらつき

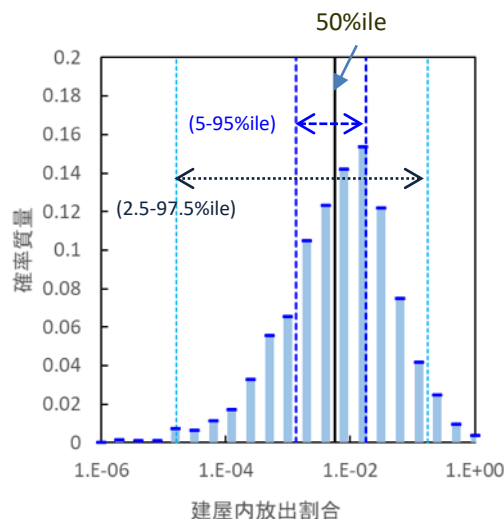
# (a) 性状把握の効率化 ①性状を把握する方法の構築

## iv. 統計論的インベントリ推定方法

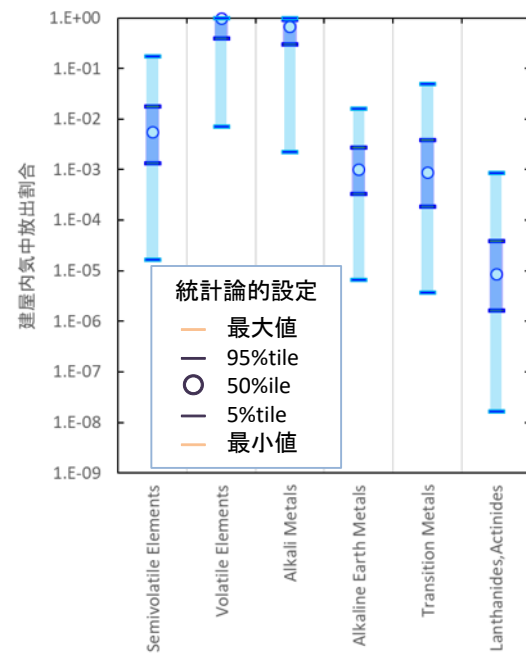
- 継続的に蓄積される分析データを基にして、解析的な核種移行モデルのパラメータを設定する方法を確立した(図1)。
- この方法では、相対的かつ規格化した濃度(輸送比)の分布をベイズ統計により解析し、パラメータ(平均と標準偏差)の不確実性を定量的に表す。これにより、移行割合を確率密度分布として表すことができる。また、結果として、推定したインベントリの確からしさを放射能とともに示すことができる。
- 分析データの蓄積とともに、パラメータの確からしさの変化を調べることができ、分析の計画に利用できる。



輸送比のベイズ統計手法による分析



建屋内気中放出割合の統計論的設定



各元素グループの建屋内気中放出割合

図1 ベイズ統計に基づく移行パラメータの設定の流れ

# (a) 性状把握の効率化 ①性状を把握する方法の構築

## iv. 統計論的インベントリ推定方法

- ベイズ統計手法導入の妥当性を検討するため、頻度論的にパラメータの区間推定を行う手法であるブートストラップ法とジャックナイフ法を検討し、データ数が少ない場合にブートストラップ法が優れており、確率分布パラメータをベイズ統計手法と比較した(図1)。
- 福島第一事故廃棄物のインベントリ推算への適用する場合、当面は、参照可能なデータ数が10~数十点程度にとどまる制約がある。頻度主義統計学に基づく手法は、データ数が少ない場合に、必要とされるよりも小さい信頼区間を与える可能性があること、シミュレーションによる検証を必要とするなどのデメリットが生じる。
- ベイズ統計手法は、対象の分布形状が分かれば、データが少なくてもパラメータの推定を行うことができ、原子力発電所の確率論的リスク評価において故障率などの実データが少ない状況においてもパラメータ推定を可能とする理論構築と実践の経験が重ねられてきている。さらに、データの逐次追加によって信用区間を更新して確信の程度を向上するプロセスを可視化できる。
- これらから、福島第一事故廃棄物のインベントリ推算への適合性が高いと考えられる。

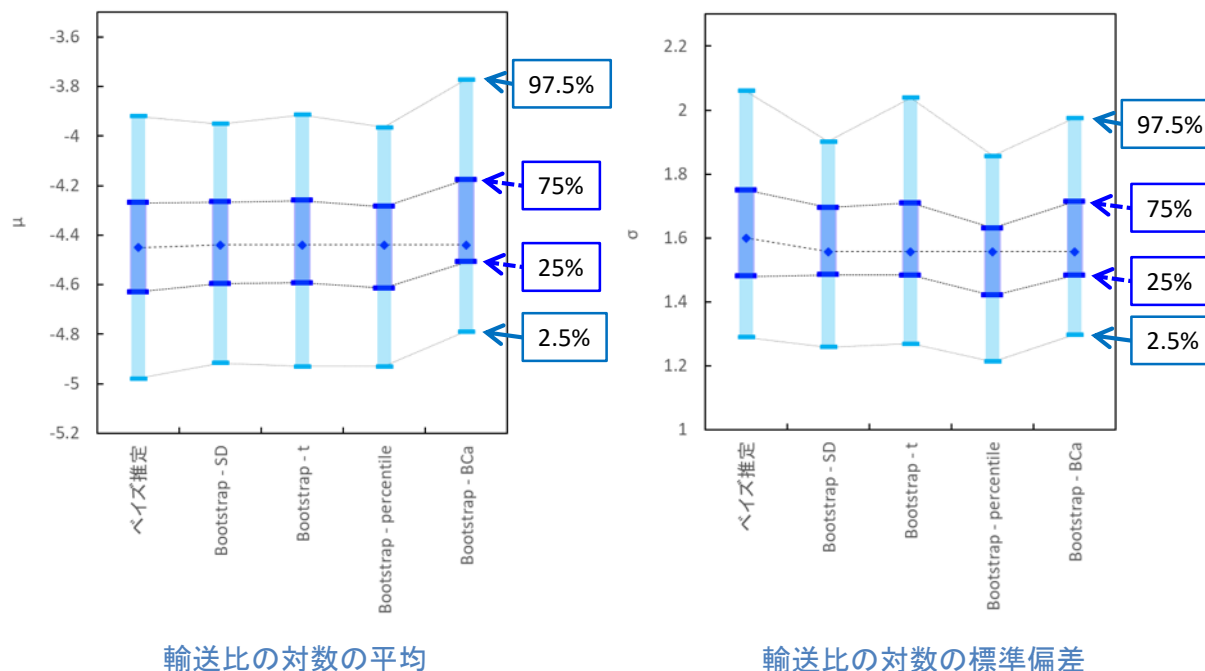


図1 確率分布パラメータの統計論的推算結果の比較(準揮発性核種の建屋内気中放出割合)



# (a) 性状把握の効率化 ①性状を把握する方法の構築

## iv. 統計論的インベントリ推定方法

- 検討した結果を利用して、種々の廃棄物のインベントリを再計算した(図1)。この結果は、次年度の処分概念の検討などで利用できる。

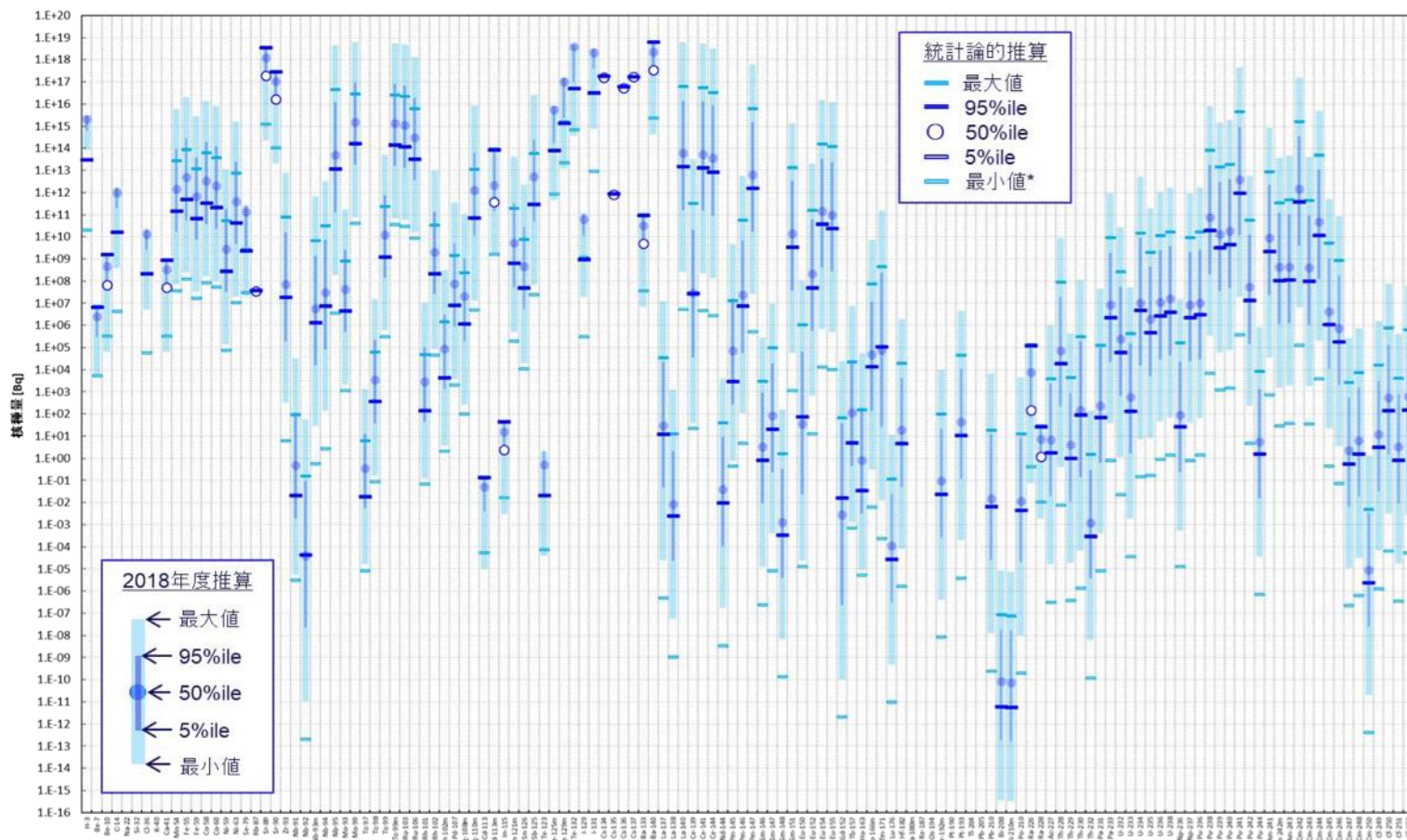


図1 統計論的なインベントリ推算結果の例(水処理二次廃棄物の KURION 吸着塔の総放射能量)

# (a) 性状把握の効率化 ①性状を把握する方法の構築 v. 分析データの取得

## ■ 実績

- 分析試料を採取、あるいは東京電力から提供を受けて入手し、これを輸送して分析している。(図1)。得られた分析データは順次公開するとともに(図2)、データベース化して閲覧に供している。

## ■ 目標

- 性状把握の方法を構築するため、分析データを蓄積する。

## ■ 実施内容

- 分析に供する試料を採取、あるいは東京電力から提供を受け入手する。得られた分析試料は東京電力の協力を得て保管管理するとともに、分析施設へ輸送する。試料は使用の許可を有する施設にて分析する。(2019年度、2020年度)
- 得られた分析データは順次公開するとともに、インターネットを介した閲覧に供する。また充足するべきデータを、蓄積したデータや廃棄物の発生予測等を考慮して検討する。(2019年度、2020年度)

## ■ 目標達成を判断する指標

- 分析試料の採取、保管管理、輸送、分析を実施する。分析データの公開を継続する。不足している分析データ、試料を示す。(2019年度、2020年度)

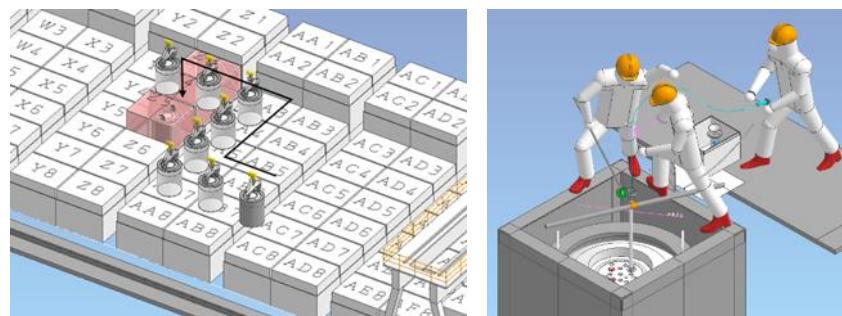


図1 保管容器 (HIC) からの水処理二次廃棄物試料の採取作業

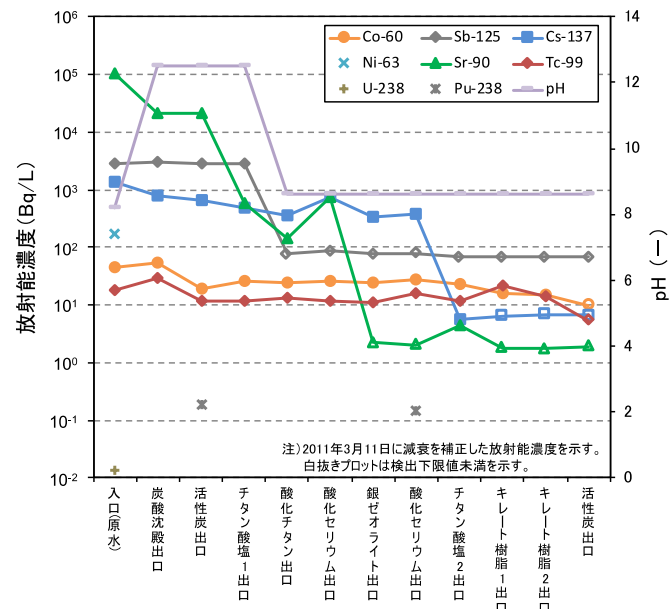


図2 多核種除去設備(増設B系)の主要機器出口の放射能濃度\*1

# (a) 性状把握の効率化 ①性状を把握する方法の構築 v. 分析データの取得

- 汚染水処理二次廃棄物に関する分析試料として、設備からの採取と保管中の容器からの採取をそれぞれ実施した。
- セシウム吸着装置(SARRY II)の工程水と、ALPS吸着材を採取した。
- 使用済み吸着塔は、高性能容器(HIC)への移送・排出の際に採取した。汚染水の減少に伴い、吸着材を払い出す頻度が減少しており、3体から採取した。(表1)
- 2016年4月以前に発生したHICからの試料採取を2018年度に検討し、29基のHICを採取対象として選定した。2018年度に29基のうち、12基から試料採取を実施しており、残り17基からの試料採取を2019年度に実施した。(表2)

表1 処理水およびALPS汚染水処理二次廃棄物の採取実績

分類	採取日	試料名称
処理水	2019年12月3日	SARRY II
	2020年1月30日	〃
	2020年3月17日	〃
吸着材	2019年8月26日	ALPSⅢキレート樹脂1
	2019年9月12日	ALPSⅢキレート樹脂2
	2019年11月29日	ALPS I チタン酸塩1

表2 保管中HIC試料の採取実績

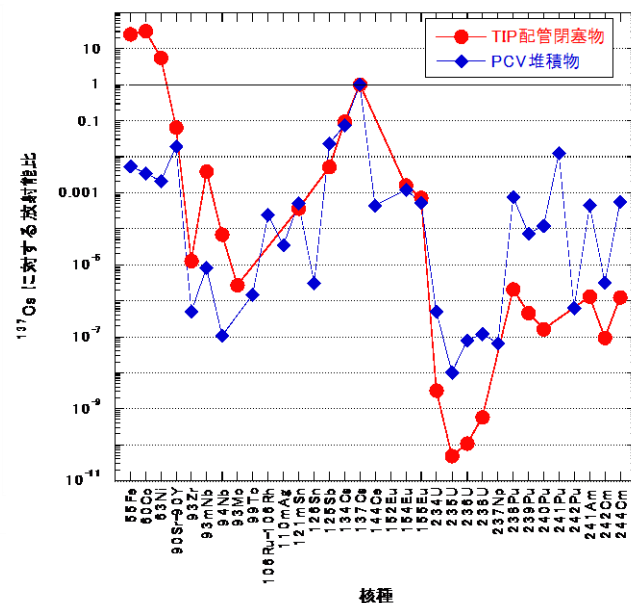
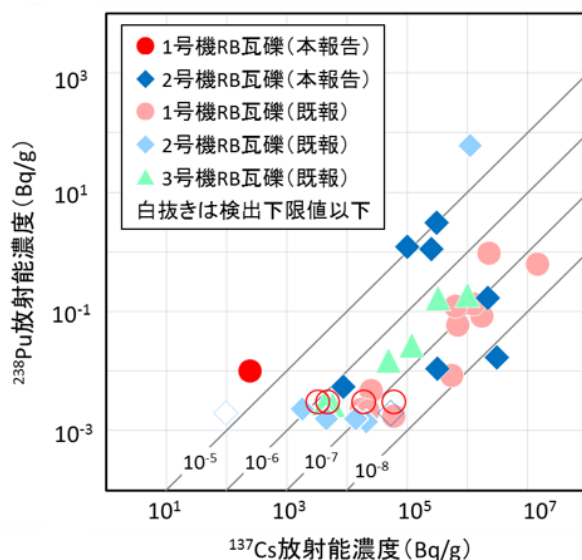
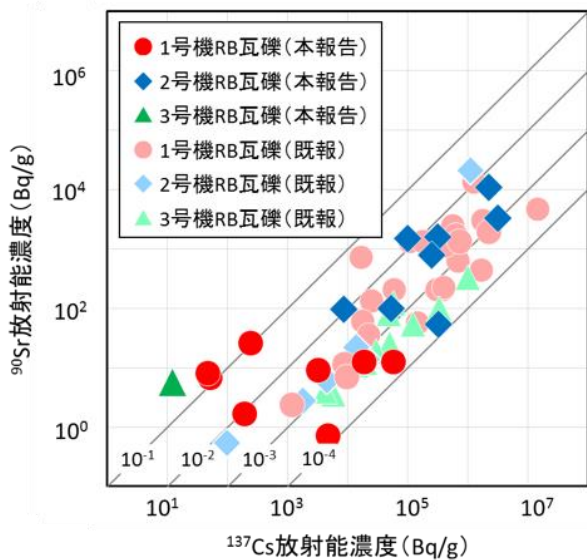
設備	試料名	採取日	採取点数	最大線量率 [mSv/h]					
				HIC側面		HIC採取孔		試料容器表面 (約10 mL)	
				$\gamma$	$\gamma + \beta$	$\gamma$	$\gamma + \beta$	$\gamma$	$\gamma + \beta$
ALPS I	鉄共沈スラリー	2019年12月18日	1点	0.535	0.7	60	0.0035	1.7	
		2019年12月19日	1点	3.114	3.5	210	0.025	8.0	
		2019年12月20日	1点	3.430	3.0	300	0.020	4.5	
		2019年12月23日	1点	4.000	1.2	120	0.035	13	
		2019年12月24日	1点	4.550	2.8	200	0.024	10	
		2019年12月25日	1点	1.859	2.5	160	0.055	15	
		2020年1月9日	1点	1.237	3.5	150	0.013	5.5	
		2020年1月10日	1点	1.462	0.6	40	0.035	13	
		2020年1月14日	1点	2.658	2.5	260	0.025	14	
		2020年1月17日	1点	4.240	2.5	100	0.060	15	
		2020年1月20日	1点	3.430	7.0	400	0.045	23	
		2020年1月24日	1点	4.550	4.0	300	0.080	22	
	ALPSⅢ	炭酸塩スラリー	2020年1月23日	1点	6.583	3.0	180	0.75	220
2020年1月15日			1点	7.873	15	800	1.1	350	
2020年1月21日			1点	9.547	15	1000	0.80	350	
2020年1月22日		1点	5.305	2.5	170	0.40	130		
	キレート樹脂2	2020年1月27日	3点	0.018	0.002	0.1	0.0005	0.08	



# (a) 性状把握の効率化 ①性状を把握する方法の構築

## v. 分析データの取得

- 第65回廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議(2019年4月25日)において、1、2及び3号機原子炉建屋内部から採取した瓦礫試料(床のボーリングコアと除染に伴うストリップابلペイント) (図1)、また、1号機格納容器堆積物及び2号機TIP配管内閉塞物試料(図2)の分析結果を報告した。



- $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ 比に関して、1号機1階床(貫通孔X6近傍)と3号機1階床から採取した試料では、比が高い傾向にある。
- $^{238}\text{Pu}/^{137}\text{Cs}$ 比に関して、1号機1階床(貫通孔X6近傍)と2号機5階ウエルプラグ上部床から採取した試料では、比が高い傾向にある。
- $^{90}\text{Sr}$ と $^{238}\text{Pu}$ については、Csに対する汚染の違いが認められる場所があることが示唆された。

- $^{137}\text{Cs}$ を基準とした放射能の比は、TIP配管閉塞物では $^{55}\text{Fe}$ 、 $^{60}\text{Co}$ と $^{63}\text{Ni}$ が顕著に高い。一方で、UやPuなどのアクチノイド核種は、逆に著しく低い。
- 格納容器の内部でも、汚染の傾向は場所によって大きく異なっている。

図1 原子炉建屋 (RB) 内から採取した瓦礫試料(床のボーリングコアと除染に伴うストリップابلペイント)から検出された核種の濃度 ( $^{137}\text{Cs}$ に対するプロット)

図2 1号機格納容器 (PCV) 堆積物及び2号機TIP配管内閉塞物から検出された核種の濃度 ( $^{137}\text{Cs}$ に対する比)

# (a) 性状把握の効率化 ①性状を把握する方法の構築

## v. 分析データの取得

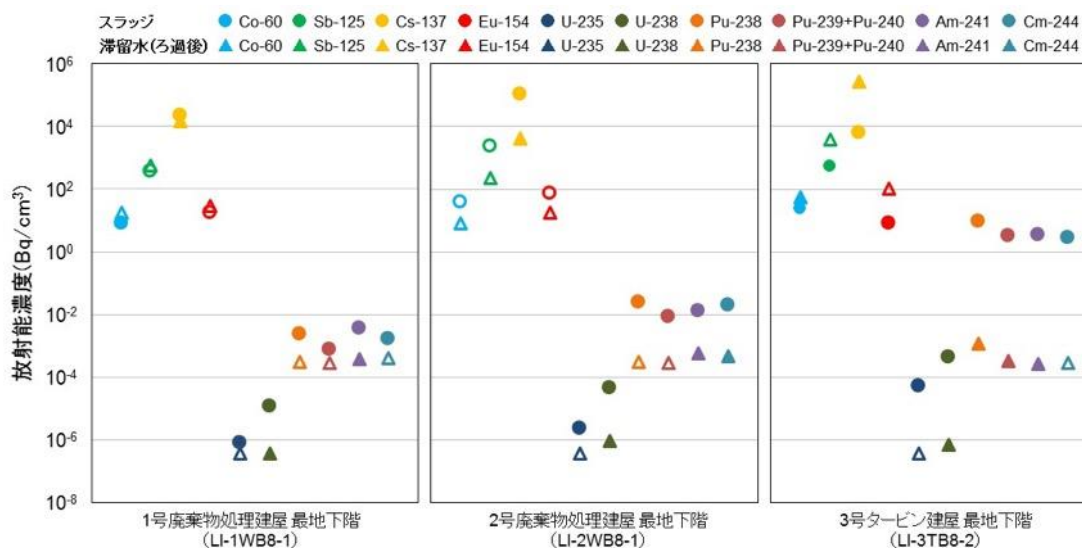
■ 第67回廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議(2019年6月27日)において、4号機R/B地下、2～4号機T/B地下及び1～4号Rw/B地下で採取した滞留水と、それに含まれるスラッジの分析結果を報告した(図1)。

○ スラッジには U や Pu 核種が濃縮される傾向が認められた。

■ また、既に分析結果を報告した滞留水及び処理水を対象として、<sup>237</sup>Np 及び <sup>129</sup>I の分析結果を報告した。

○ <sup>237</sup>Np については、1号機原子炉建屋滞留水、3号機PCV水面近傍水、SARRY出口水等の18点の試料を分析し、検出された<sup>237</sup>Npの濃度は、告示濃度※である $9 \times 10^3$  Bq/cm<sup>3</sup>を下回っていた。3号機PCV水面近傍水濃度が最も高く、 $2.5 \times 10^3$  Bq/cm<sup>3</sup>であった。その他、検出された濃度は、 $10^{-4} \sim 10^{-5}$  Bq/cm<sup>3</sup>のオーダーであった。

○ <sup>129</sup>I については、1号機原子炉建屋滞留水、KURION出口水等の47点の分析試料のうち、KURION出口水1試料、AREVA出口水2試料から検出された。放射能濃度は、KURION出口水が $1.6 \times 10^{-1}$  Bq/cm<sup>3</sup>、AREVA出口水が $2.7 \times 10^{-1}$  Bq/cm<sup>3</sup>、 $8.5 \times 10^{-2}$  Bq/cm<sup>3</sup>であった。



注) 放射能濃度はろ過前の滞留水体積で除して算出した。白抜きは検出下限値未満を示す。放射能濃度は2011年3月11日で減衰補正。

- 滞留水(ろ過後)よりスラッジで、多くのα核種を検出した。<sup>154</sup>Euを検出した3号タービン建屋スラッジのα核種濃度は、1及び2号廃棄物処理建屋より高い傾向が見られる。
- <sup>94</sup>Nb, <sup>152</sup>Euはすべての試料で不検出であった。

図1 各建屋の地下階から採取した滞留水(ろ過後)及びスラッジから検出された核種の濃度

※ 「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則の規定に基づく線量限度等を定める告示」に定められる周辺監視区域外の水中の濃度限度



# (a) 性状把握の効率化 ①性状を把握する方法の構築 v. 分析データの取得

- 2号機原子炉建屋の外壁のボーリングコアを分析した。壁の内外の汚染分布がわかる試料である。
- ボーリングコアは、西側外壁開口（幅5,230mm×高さ6,650mm）のうち上段（高さ5,300mm付近）の2か所、中段（高さ3,000mm付近）の2か所から採取した。
- 分析試料は、ボーリングコア外側の防水材、コンクリート部の外壁側、内壁側をそれぞれ分析した（図1、2）。
- $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ 比はこれまで報告した値と同程度であった。 $^{238}\text{Pu}/^{137}\text{Cs}$ 比はこれまで報告した値に比べ1桁程度大きな値であった（図3）。
- 2号機の局所的な汚染分布に関するデータであり、他のデータ（屋上、天井裏、床など）と合わせて分布を検討する。

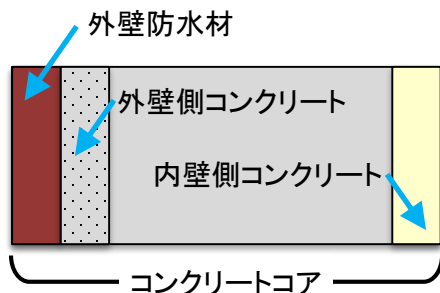
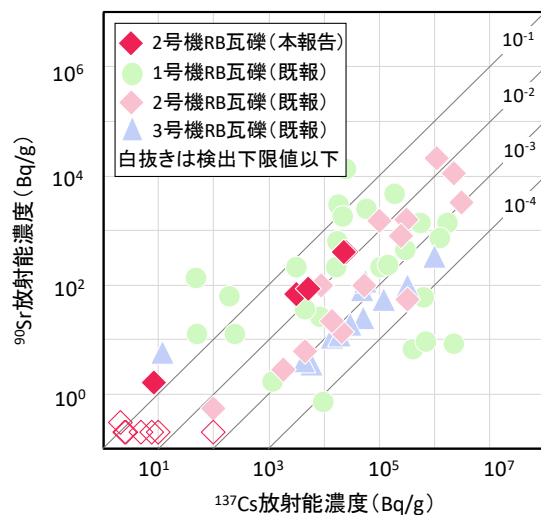


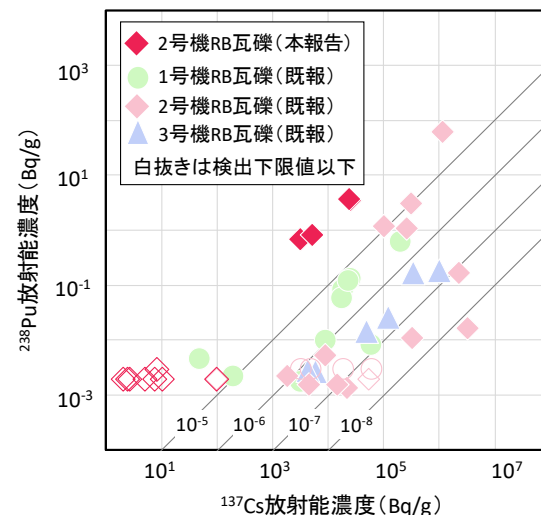
図1 分析試料の概略



図2 分析試料(外壁防水材)の外観



Sr-90



Pu-238

図3 2号機原子炉建屋西側外壁試料から検出された核種の濃度  
( $^{137}\text{Cs}$ に対するプロット)

# (a) 性状把握の効率化 ①性状を把握する方法の構築 v. 分析データの取得

- 水処理二次廃棄物である多核種除去設備 (ALPS) の使用済み吸着材は、その種類により含有する核種が異なり、処理・処分方法の検討のために放射能分析が重要である。初めて吸着材の分析を行った。
- 活性炭吸着材を分析するにあたり、あらかじめ分析方法を検討した。放射性 Cs 核種濃度が低かったため、γ線分析は、Cs 核種を除去せずに直接行った。α線及びβ線分析のために、固体試料を酸等に溶解し液体の状態にする処理(溶液化)の方法を検討し、適用した。(図1)
- 分析の結果、<sup>60</sup>Co、<sup>106</sup>Ru、<sup>125</sup>Sb と <sup>137</sup>Cs を検出、定量した(表1)。<sup>54</sup>Mn、<sup>90</sup>Sr、<sup>94</sup>Nb、<sup>134</sup>Cs、<sup>152</sup>Eu、<sup>154</sup>Eu、<sup>238</sup>Pu、<sup>239</sup>Pu+<sup>240</sup>Pu、<sup>241</sup>Am、<sup>244</sup>Cm は検出されなかった。これらのことから、工程の最終段階で捕捉される核種が明らかとなった。

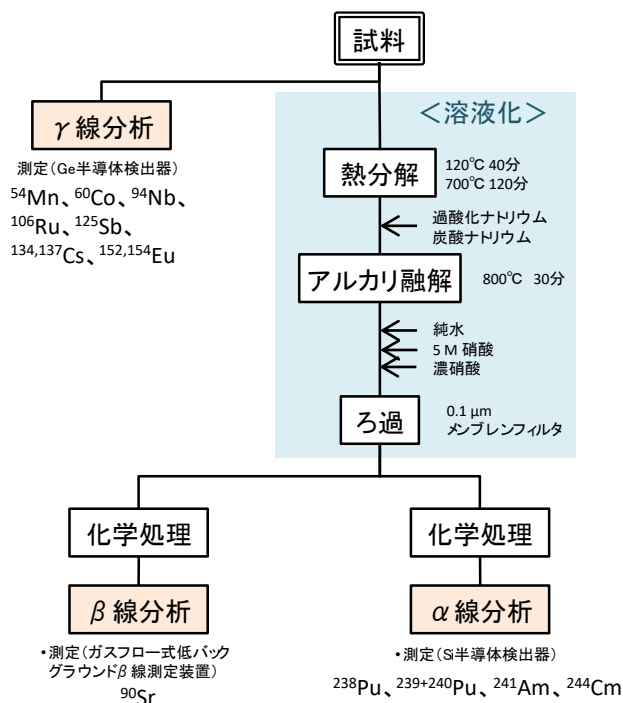


表1 活性炭吸着材に検出された放射性核種の濃度

試料名	放射能濃度 [Bq/g]			
	<sup>60</sup> Co (約5.3年)	<sup>106</sup> Ru (約374日)	<sup>125</sup> Sb (約2.8年)	<sup>137</sup> Cs (約30年)
ADC-AAL8-2	$(2.8 \pm 0.1) \times 10^1$	$(2.8 \pm 0.3) \times 10^2$	$(1.3 \pm 0.1) \times 10^1$	$< 6 \times 10^{-2}$
ADC-AAL8-3	$(1.6 \pm 0.1) \times 10^1$	$(2.1 \pm 0.2) \times 10^2$	$(6.9 \pm 0.3) \times 10^0$	$< 5 \times 10^{-2}$
ADC-EAL9-1	$(3.1 \pm 0.1) \times 10^1$	$(3.8 \pm 0.3) \times 10^2$	$(1.6 \pm 0.1) \times 10^1$	$(7.8 \pm 1.9) \times 10^{-2}$

図1 活性炭吸着材の分析フロー

# (a) 性状把握の効率化 ①性状を把握する方法の構築 v. 分析データの取得

## ■ 現在の分析試料

項目	分析施設	試料
瓦礫・汚染水等	JAEA(原科研)	2号機原子炉建屋オペフロ西壁瓦礫コンクリートコア
水処理二次廃棄物等	JAEA(核サ研)	建屋スラッジを含む滞留水、多核種除去設備吸着材(酸化セリウム、活性炭、銀ゼオライト等)
汚染分布等	JAEA(大洗)	覆土式一時保管施設瓦礫
建屋スラッジ、瓦礫等	NDC	建屋瓦礫、覆土式一時保管施設瓦礫、建屋スラッジを含む滞留水
PCV内汚染物等	NFD	1号機PCV堆積物、2号機TIP配管閉塞物

## ■ 福一から各分析施設への分析試料の輸送実績

回数	輸送日	行先	分析試料
輸送1	2019年9月26日	①JAEA(原科研)、②NDC	①滞留水、処理水 ②瓦礫
輸送2	2019年12月19日	①JAEA(核サ研)、②NFD	①多核種除去設備スラリー等 ②建屋スラッジ
輸送3	2020年2月19日	①JAEA(原科研)、②JAEA(大洗)	①瓦礫 ②瓦礫

# (a) 性状把握の効率化 ①性状を把握する方法の構築 v. 分析データの取得

- データベース FRAnDLi (Fukushima Daiichi Radwaste Analytical Data Library) の運用を継続して実施している(図1)。
- 本事業で得たデータとともに、東京電力が発表した関連データも収録している(表1)。
- アクセスの統計データから、年間を通して一定の利用があることがわかった(図2)。
- 次年度は、継続的なデータの拡充を行うとともに、長期期間にわたり分析データを蓄積することを考慮して改良点を検討する。

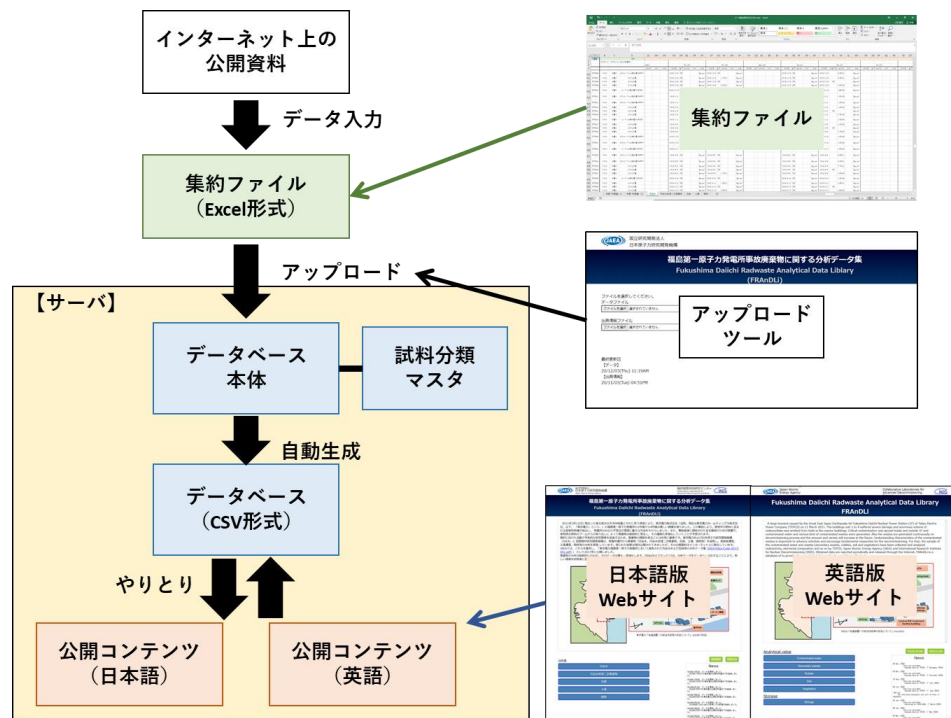


図1 分析結果のデータベース (FRAnDLi) の概要

表1 昨年度のデータ収録の実績(2020年2月14日現在)

データ(試料)	データ報告機関	格納件数
汚染水	IRID/原子力機構	11
瓦礫	IRID/原子力機構	17
建屋スラッジ	IRID/原子力機構	12
汚染水	東京電力	68
保管・貯蔵量	東京電力	1012
2019年度合計	—	1120
データ総数	—	11180

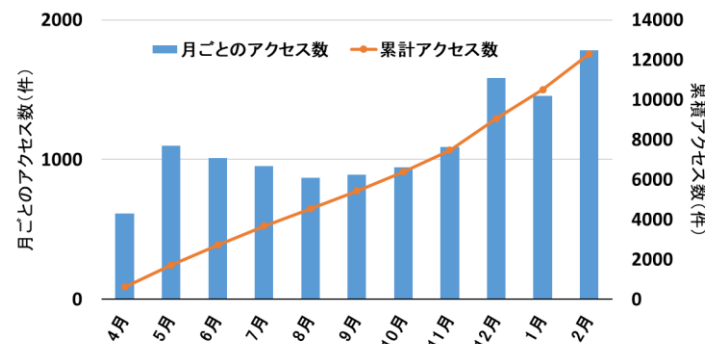


図2 データベースへのアクセス数の推移(リピーターを含む)

# (a) 性状把握の効率化 ①性状を把握する方法の構築

## vi. 分析データの評価・管理

- 保管されている廃棄物の汚染に関する検討
  - 現状の分析データの中にはα核種や、処分の安全評価上重要なI-129等の分析データが少ない。これら核種の分析データ拡充のため、廃棄物保管データの活用を検討した。
  - 分析対象の廃棄物を検討するため廃棄物保管データを汚染分類別に整理した。(図1)
  - α汚染が記録されている廃棄物の発生場所は1~4号エリアに限られている。ただし、α汚染が記録されている廃棄物は、1~4号エリアから発生した廃棄物のうちごくわずかである。(図2)
- 整理した廃棄物保管データを基に、今後分析が必要と考えられる試料のサンプリング方法を検討する。
  - 廃棄物保管データを利用したサンプリング方法について、以下の3つのアプローチを検討している。
    - ・ 固体廃物貯蔵庫のコンテナからの採取
    - ・ 既存の保管エリア(固体廃棄物貯蔵庫以外)からの採取
    - ・ 今後計画されている工事中に採取

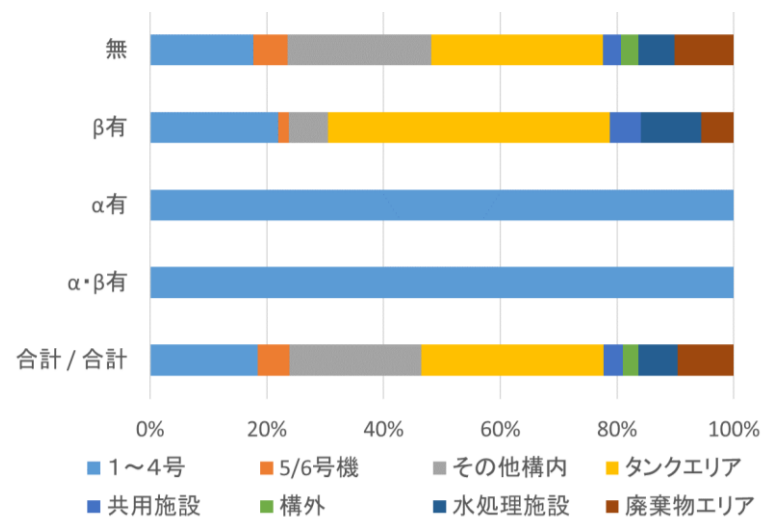


図1 廃棄物保管データの汚染分類別の発生場所割合

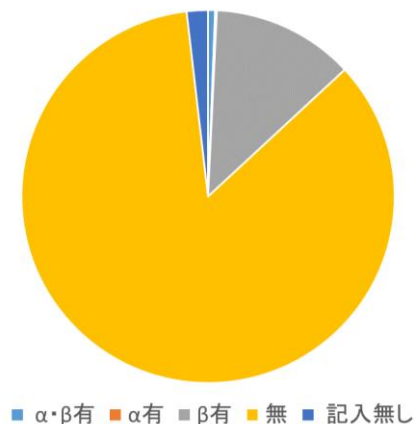


図2 1~4号発生廃棄物の汚染分類割合



# (a) 性状把握の効率化 ①性状を把握する方法の構築

## vi. 分析データの評価・管理

- 今後実施すべき試料の採取方法に関し、瓦礫類を対象として、2018年度に整備した瓦礫類データベースを用いて検討した。
- 固体廃棄物貯蔵庫内のコンテナから試料採取を行う方法、および今後発生する廃棄物から試料採取する方法(図1)を概念検討し、作業被ばく、設備および運用などの課題を抽出した。
- 既に保管している廃棄物からの採取は、相当な人手と時間を要するため、今後発生する廃棄物からの試料採取を優先して検討することが合理的であると考えられる。

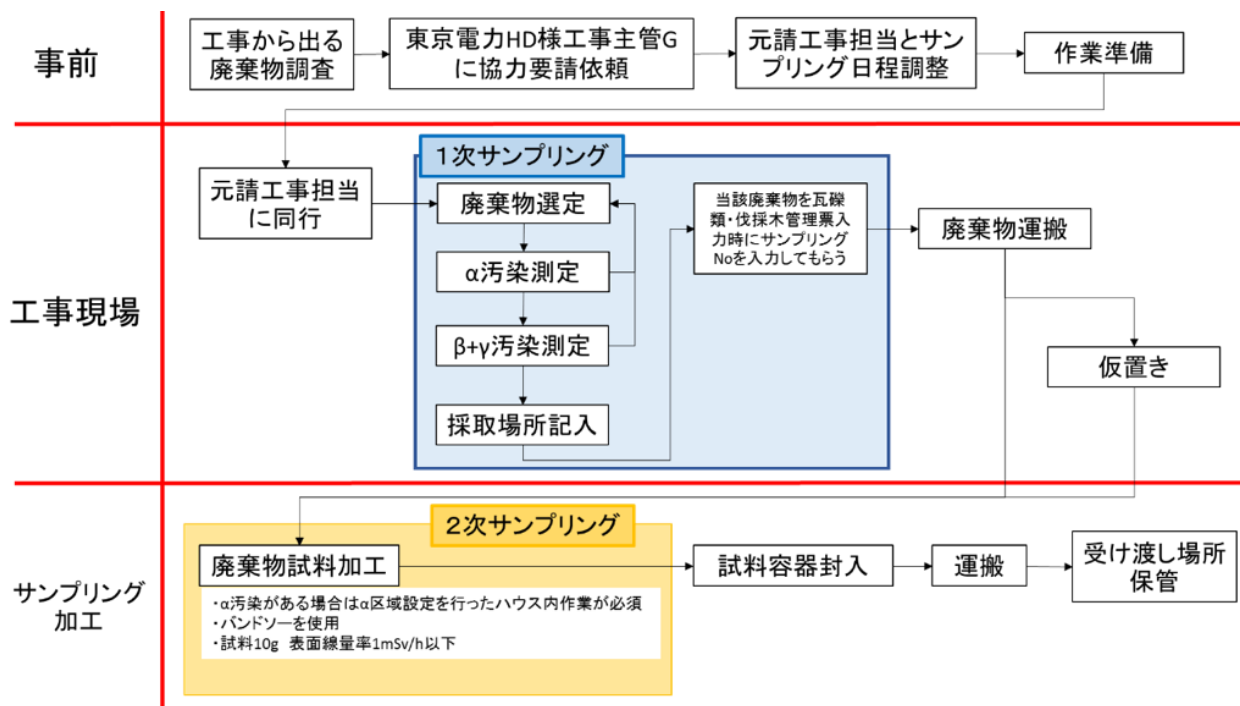


図1 今後発生する廃棄物から試料採取する方法の作業フローの例

# (a) 性状把握の効率化 ①性状を把握する方法の構築

## vi. 分析データの評価・管理

- 分析を継続して実施するために、福一廃棄物の特性に合わせた分析計画法の確立が不可欠であり、英国 NNLと協力して調査した。
- DQOプロセス (Data Quality Objectives Process) は、米国環境保護庁 (EPA) で環境復旧 (クリアランス) 向けに開発された分析計画法である\*。放射性廃棄物の分野では標準的な方法として認識されつつある。(図1)
- 英国では、この手法を廃棄物の分析に応用するとともに、母集団がはっきりしない対象についてベイズ統計を組み合わせている。(図2)

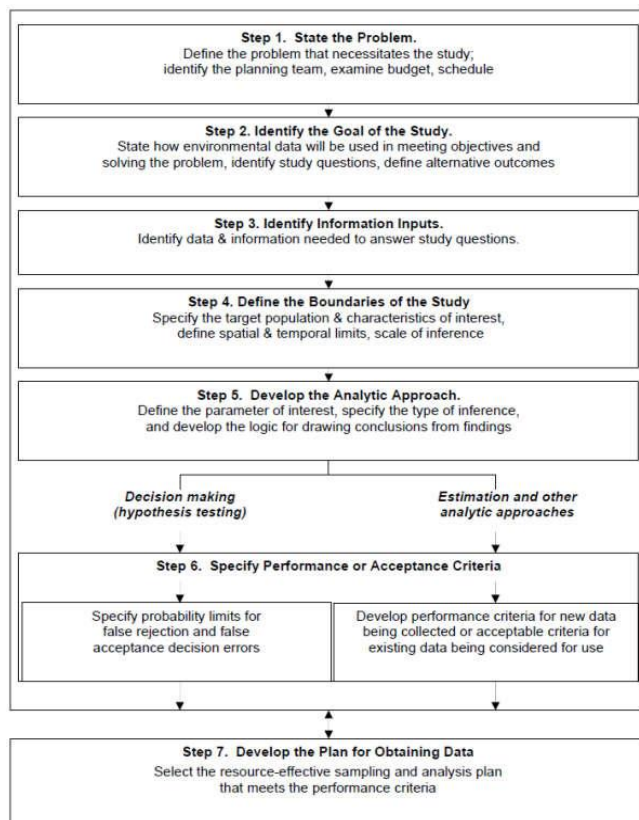
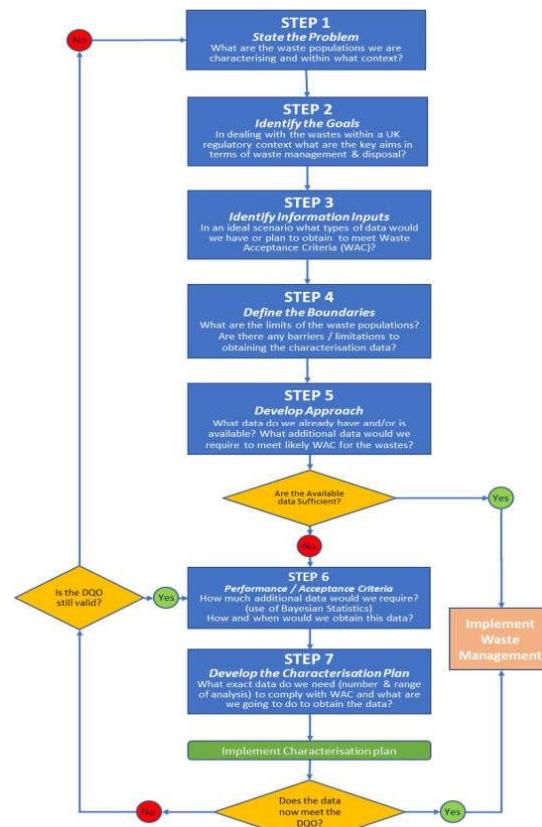


図1 米国 EPA の DQO プロセス



ステップ1 問題の明示

ステップ2 目標の特定

ステップ3 入力情報の同定

ステップ4 境界条件の設定

ステップ5 必要とするデータの特定

ステップ6 追加分析による効果の検討

ステップ7 分析計画の策定

図2 英国の廃棄物分析に応用した DQO プロセス

# (a) 性状把握の効率化 ①性状を把握する方法の構築

## vi. 分析データの評価・管理

- 福一に特徴的な廃棄物として、瓦礫、伐採木、水処理二次廃棄物(スラリー)を選び、ケーススタディを行った。英国の状況を前提とし、また、ベイズ統計を利用して濃度分布を推定し、必要な分析点数を評価した。
  - 瓦礫は、処分区分濃度に近い線量率区分のものが重要であり、分析を段階的に行うことが必要と考えられた。
  - 伐採木は、焼却した後の濃度を想定し、処分区分濃度と比べて必要な分析点数を見積もった。(図1)
  - スラリーは、放射能濃度が処分区分と比べて高く、分析の必要性は低いと考えられた。工学的に設計された設備から排出されるので、瓦礫などと比べて性状は把握しやすいとみられる。
- 今回の例を参考として、次年度は日本国内の状況を前提として検討を進めることとした。

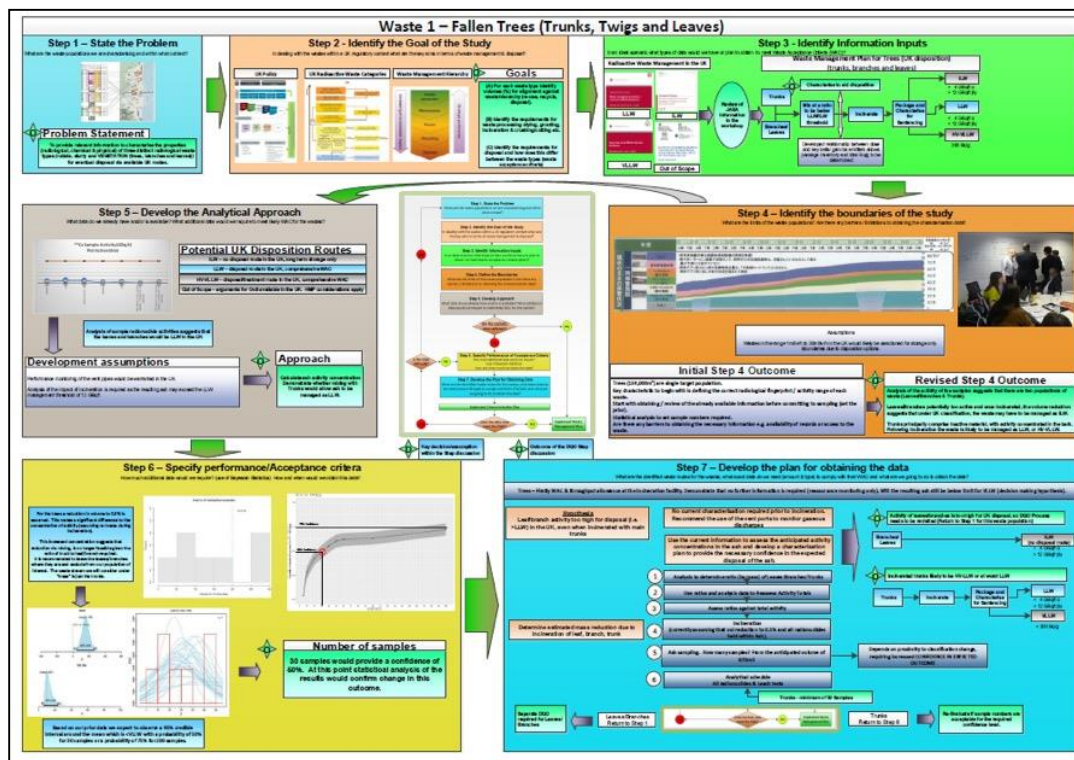


図1 DQO とベイズ統計を導入した方法により伐採木の分析点数を検討した例

# (a) 性状把握の効率化

## ② 分析方法の簡易・迅速化等

- 事故廃棄物の分析において定常的に用いる分析方法を確立することを目標として、現在の分析方法の簡易・迅速化を検討した。(図1)

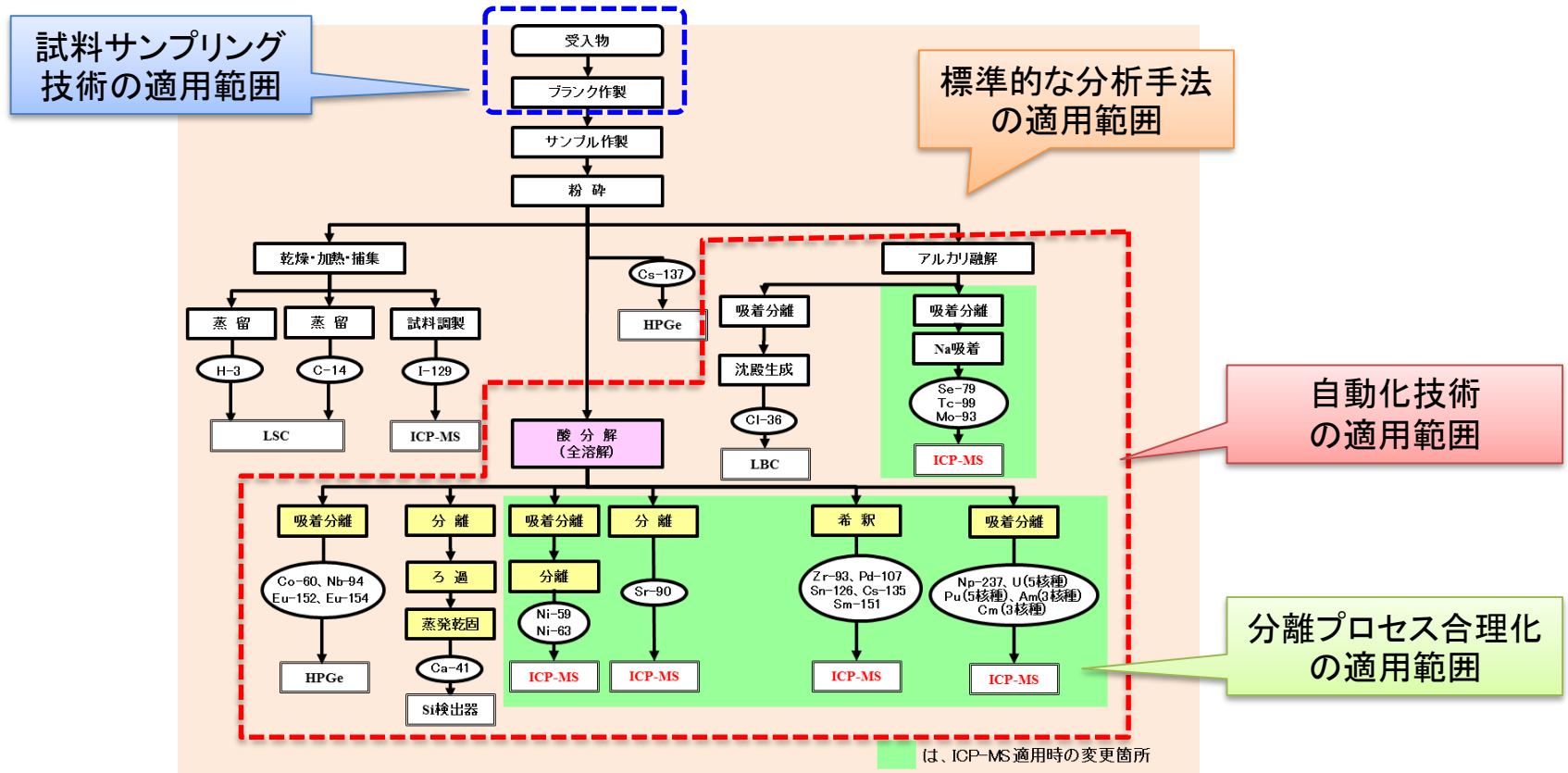


図1 分析方法の改良を図る対象とその方策



# (a) 性状把握の効率化 ②分析手法の簡易迅速化等

## i. 試料のサンプリング技術開発

### ■ 実績

- 非破壊分析で放射性廃棄物表面の放射能濃度分布を評価することにより、試料の代表性を確保しつつ極少量の試料採取で済むような方法論を構築した(図1)。
- 試料表面の $\gamma$ 線放出核種の分布を計測する装置および任意の位置から試料を粉体として採取する装置を試作した(図2,図3)。

### ■ 目標

- 合理的なサンプリング方法を確立するため、その具体的な方策を示すとともに、試料採取のための装置のモックアップ機を製作し、機能の検証と実機適用に向けた課題を抽出する。

### ■ 実施内容

- 2019年度には、統計学的に評価された試料表面からのサンプリングサイズに対して採取位置の決定方法、サンプリング精度およびサンプリングサイズの妥当性の確認方法について検討する。また、2018年度に作成した試作機から得られる知見を基に、設計上の最適化のための条件等を抽出する確認試験を実施し、モックアップ機を設計する。マッピング装置に関する確認試験では、高感度かつ定量的な測定が可能となるようにバックグラウンドの補正方法、試料と検出器の位置関係等の最適化を検討する。サンプリング装置に関する確認試験では、素材に合わせた採取方法および任意の位置から切削した試料を正確に採取するための設計の最適化等を検討する。
- 2020年度には、モックアップ機の製作を行い、現場適用に向けた改良点や解決すべき課題を抽出する。

### ■ 目標達成を判断する指標

- 分析試料の合理的なサンプリング方法の具体的な方策を提示する。(2019年度)
- 試料採取のための装置のモックアップ機の設計図を示す。(2019年度)
- 実用機の製作のための改良点および課題を提示する。(2020年度)

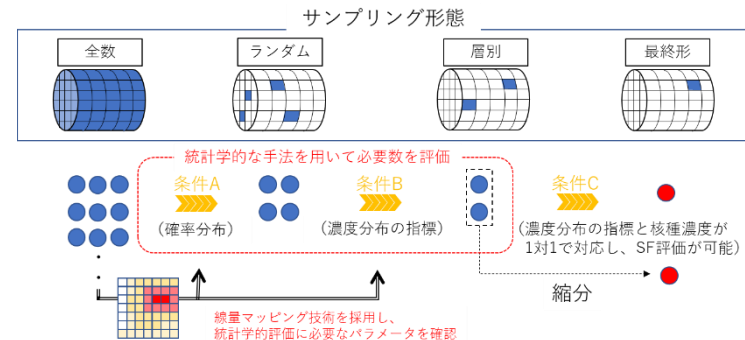


図1 最小限の試料量に抑えるサンプリング技術のイメージ

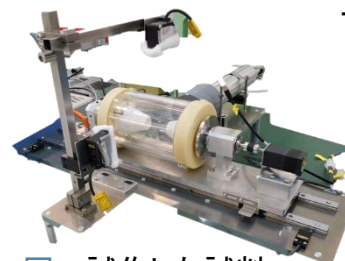


図2 試作した試料マッピング装置試作機



図3 サンプリング装置試作機



# (a) 性状把握の効率化 ②分析方法の簡易迅速化等

## i. 試料のサンプリング技術開発

■ 2018年度に作成した試作機から得られる知見を基にして試料表面の $\gamma$ 線放出核種測定装置(マッピング装置)のモックアップ機的设计を実施した。

- 装置は、試料搬送部、試料固定部、形状計測部、放射線計測部から構成される(図1)。
- 測定によって、対象とする試料の幾何形状と放射線データを求め、これを記録するシステムを設計した。

■ 測定対象部以外の放射能が測定値に与える影響を調べるため、模擬試験を実施した。測定対象部の周囲からの影響は、6%高い程度であり、分布を評価するのに十分な分解能が確認できた(図2のA-B)。濃度の違いが大きい場合においても、その影響は50%程度であり、放射能濃度の濃淡を高い分解能で確認できた(図2のA'-C)。

■ 試料表面の $\gamma$ 線放出核種濃度の分布データから、試料濃度の代表性を担保しつつ最小の試料量を評価するための統計学的方法論について検討した。

- 試料表面の放射能濃度分布に関して、正規性の仮定に応じた2つの場合を想定し、標本数の評価式を検討した。

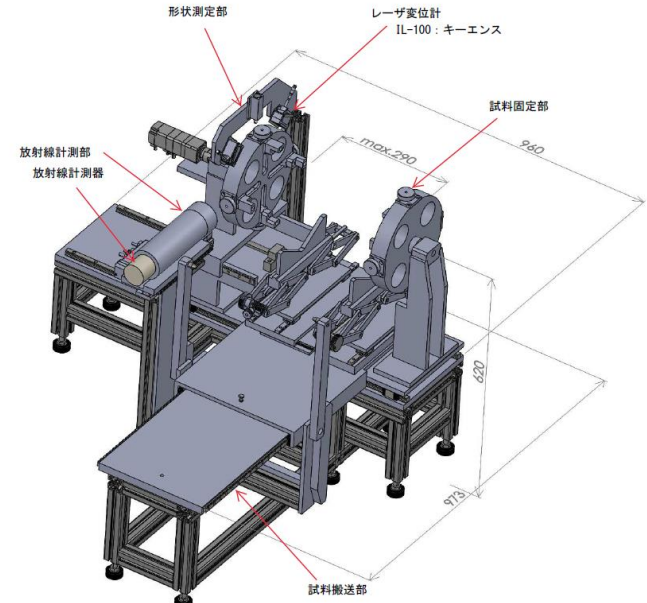


図1 試料表面の $\gamma$ 線放出核種測定装置(マッピング装置)のモックアップ機の全体概要

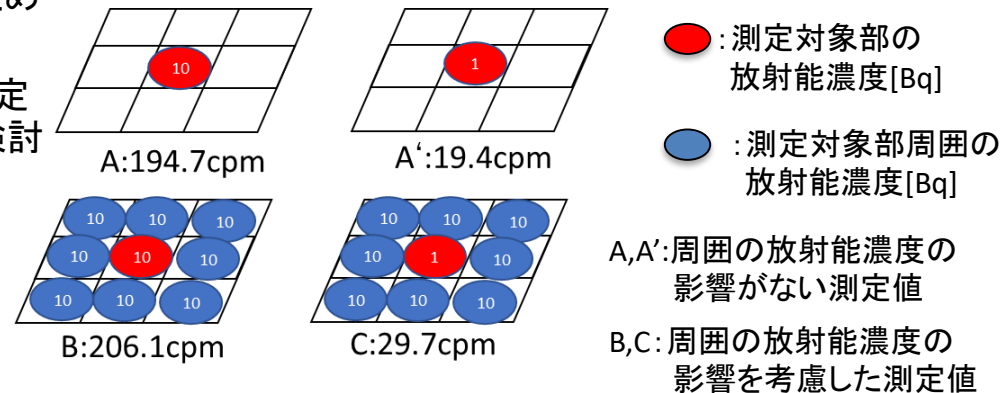


図2 測定の分解能に関する試験(3 cm角)

# (a) 性状把握の効率化 ②分析方法の簡易迅速化等

## i. 試料のサンプリング技術開発

■ 2018年度に作成した試作機から得られる知見を基にして試料表面から分析試料をサンプリングする装置のモックアップ機の実装を実施した。

- 対象素材に合わせたドリルの素材の検討およびドリルで切削する時に切削粉が周辺に飛散せず、切削穴近傍に集まり、容易に回収できるような形状のドリル刃を設計・試作した(図1)。

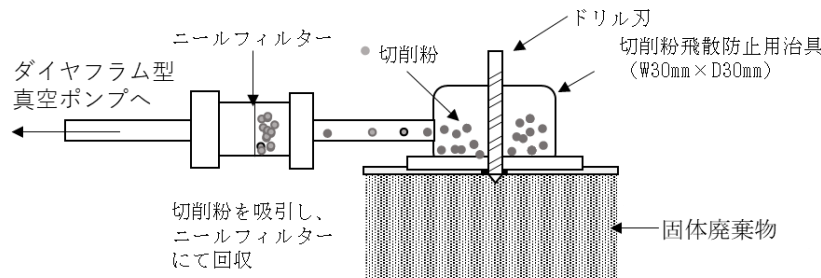


図1 試料採取機構の検討案

■ 検討結果の妥当性を評価するため、コンクリートの切削試験を行った。深さを変えて(25、50、75、100 mm)切削し、粉体の回収率を求めた(表1に25mm深さの結果を示す)。

- すべての切削深さにおいて96%以上の高い回収率が得られた。
- 相対標準偏差 (RSD) はすべての切削深さで7%以下であり、高い再現性で切削粉を回収できることが分かった。

表1 切削粉回収試験結果(切削深さ 25 mm)

n 数	ニールフィルター重量 【g】			コンクリートブロック重量 【g】			切削粉回収率 【%】
	風袋	切削粉込	差引	試験前	試験後	差引	
1	143.81	147.67	3.86	1857.52	1853.57	3.95	97.7
2	143.81	147.50	3.69	1853.57	1849.79	3.78	97.6
3	143.81	147.36	3.55	1849.79	1846.14	3.65	97.3
4	143.81	147.29	3.48	1846.14	1842.51	3.63	95.9
5	143.81	146.94	3.13	1842.51	1839.27	3.24	96.6
6	143.81	147.13	3.32	1839.27	1835.82	3.45	96.2
		平均値	3.51			平均値	96.9
		標準偏差	0.24				
		RSD【%】	6.8				

# (a) 性状把握の効率化 ② 分析方法の簡易迅速化等

## ii. 分離プロセスの合理化検討

- 実績
  - トリプル四重極ICP-MS (ICP-MS/MS) は、同じ質量数の核種 (同重体) の影響を、ガスとの反応により軽減でき、装置単体で高い分離性能をもつことから分離プロセスの合理化の観点から有用と考えられる。そこで、ICP-MS法を用いた分析に関する最新の知見 (検出下限値、有効な固相抽出剤および有効な反応ガスに関する情報等) を整理した (アクチノイドを除く)。これにより、8核種において、複雑な前処理が必要となる液体シンチレーションカウンタ (LSC) によるβ線測定から前処理工程の簡素化が可能なICP-MS法に変更した分離プロセスを提案することができた。(図1)
- 目標
  - 提案した分離プロセスについて放射性廃棄物の模擬試料を用いた試験を実施し、最適な分離条件および測定条件を評価する。
  - アクチノイドについても同様に合理的な分離プロセスを提案する。
- 実施内容
  - 2019年度には、2018年度で提案した分離プロセスについて模擬試料を用いた試験を実施し、最適な分離条件および測定条件を検討する。分離条件については、抽出・分離操作における試薬の最適な液性状および液量等を評価する。測定条件 (ICP-MS/MS) については妨害核種との分離が最適なガスの種類および流量等の装置条件について評価する。また、2018年度と同様にアクチノイドについても複数核種の一括での分離・測定が可能と考えられるICP-MSやα線スペクトロメトリを前提とした合理的な分離プロセスについて提案するとともに、その装置校正方法についても提案する。
  - 2020年度は、2019年度に引き続き、模擬試料を用いた試験を実施する。
- 目標達成を判断する指標
  - 合理化した分離プロセスの最適な分離・測定条件の提示 (2019年度、2020年度)
  - アクチノイドに関する現在の分析手法のリストを提示する。(2019年度)
  - アクチノイドに関する合理的な手法案を提示する。(2019年度)
  - アクチノイド測定に関する装置の校正方法案を提示する(2019年度)

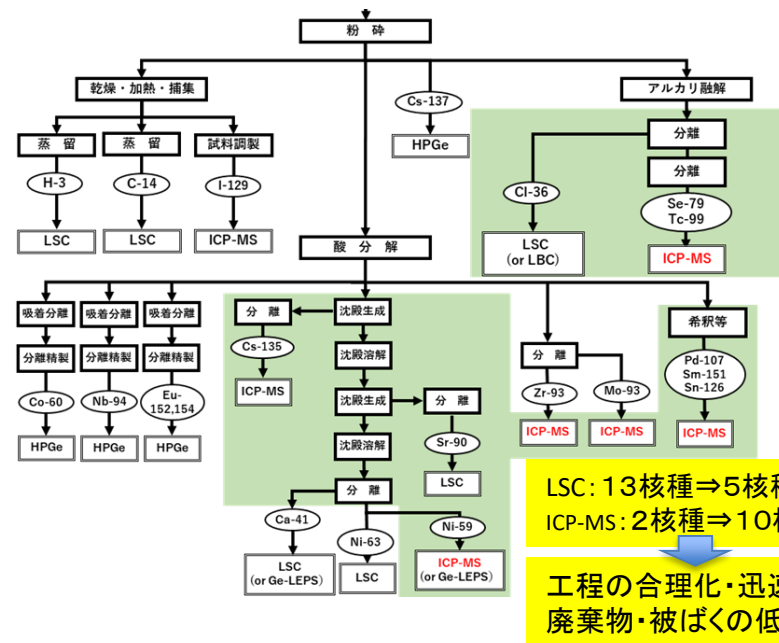


図1 新たにICP-MS法を導入した分離プロセスの概要

# (a) 性状把握の効率化 ②分析手法の簡易迅速化等

## ii. 分離プロセスの合理化検討

- 妥当性・成立性を評価するための試験での評価項目を決定した(表1)。
- ICP-MS法を適用した分離プロセスおよび放射能測定法\*による分離プロセスの妥当性評価試験を実施した。
- \* 検出感度の観点からICP-MS法の適用が適当でない判断したβ線測定核種 ( $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{41}\text{Ca}$ ,  $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ )
- $^{93}\text{Zr}$ と $^{93}\text{Mo}$ の化学分離は、Zr, Moに対して高い選択性を有する一方で、妨害となるNbを分離する手法を考案した(図1)。
- ICP-MS/MS分析では、反応ガスにアンモニアを用いて、Nbを分離する条件を見出した(図2、3)。

表1 妥当性・成立性試験での評価項目

ICP-MS法	放射能測定法
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 回収率評価</li> <li>● 同位体に関するスペクトル干渉の影響評価</li> <li>● 同重体に関するスペクトル干渉の影響評価</li> <li>● 試料マトリクスに関するスペクトル干渉の影響評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 回収率評価</li> <li>● 化学的挙動の類似等から測定を妨害する可能性のある核種の評価</li> <li>● 妨害核種の除染係数評価</li> </ul>

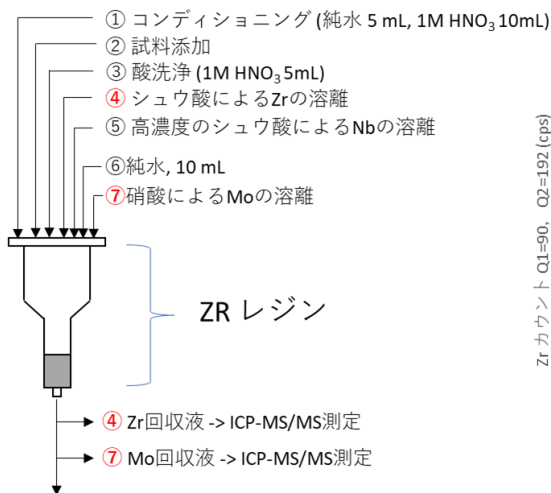


図1  $^{93}\text{Zr}$ と $^{93}\text{Mo}$ の分離プロセス

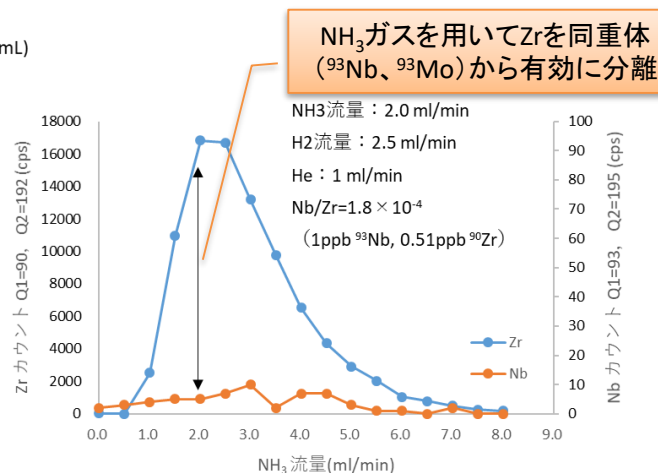


図2 反応ガスによるNbとZrの分離

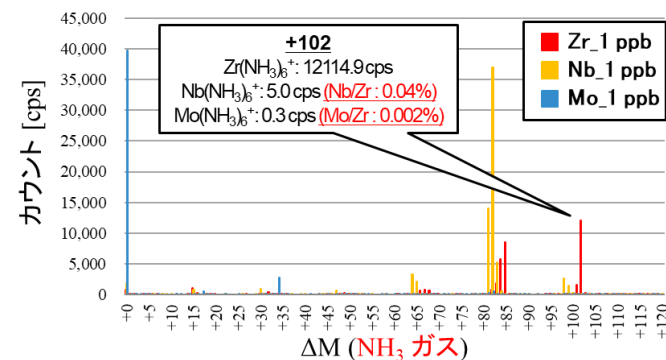


図3 ICP-MS/MSによる $^{93}\text{Nb}$ 、 $^{93}\text{Mo}$ からの $^{93}\text{Zr}$ の分離



# (a) 性状把握の効率化 ②分析手法の簡易迅速化等

## iii. 自動化技術の開発

- 実績
  - 製作した自動化システム(図1)の性能に関して、熟練者による操作と比較した。最も煩雑なNi-63の分離操作を想定してNiに関する一連の分析操作を行い、回収率を比較したところ、同等の回収率、精度を達成し、自動化システムの有用性を実証した(表1)。

- 目標
  - 製作した自動化システムを用いた測定対象核種の分離プロセスの成立性について評価する。

- 実施内容
 

2019年度および2020年度を通して、「(ii)分離プロセスの合理化」にて検討した分離プロセスに対して自動化システムを用いた分離・精製試験を実施し、その成立性を評価する。本試験は、実際の分析条件における成立性を評価することを目的として放射性廃棄物の模擬試料を用いて実施する。

分離プロセスのうち、固相抽出操作は分離対象元素毎に固相抽出剤の種類や量、さらに使用する試薬の種類、濃度が異なる。このため、自動固相抽出システムの操作条件も各対象元素に応じてカラムサイズを選択や分離操作時の試薬通液速度等の最適化を図り、その成立性を評価していく必要がある。特に、樹脂への試薬添加速度と樹脂中の通液速度に大きな差がある場合、カラム上部に試薬がたまり、試薬があふれたり、次ステップの試薬と混ざることによって分離精度に大きな影響を与える可能性が考えられるため、各分析条件における最適な操作内容の評価が重要となる。

また、当該試験の中で精度および迅速性の観点から現行の自動化装置の操作条件範囲内で十分対応できない課題が確認された場合は、課題解決のための装置改良を検討する。

- 目標達成を判断する指標
  - 合理化検討された分離プロセスに対する自動化システムを用いた分離操作の成立性評価結果を提示する。(2019年度および2020年度)

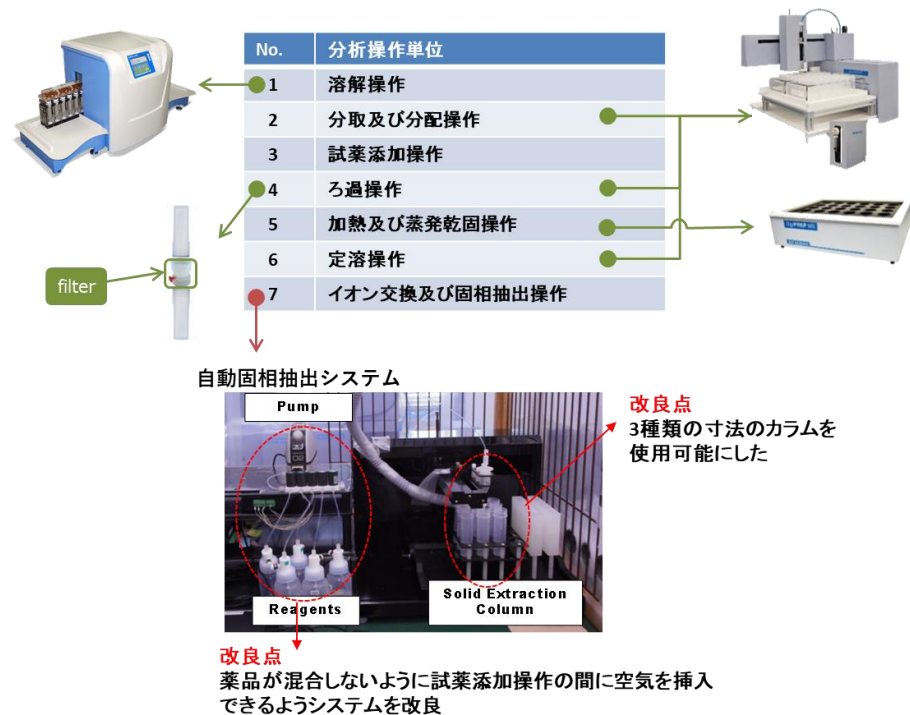


図1 自動化技術の構成と改良した自動固相抽出装置

表1 自動化システムの性能評価 (Ni-63分析における回収率の比較)

操作	Ni回収率	標準偏差
自動化システム	89.8%	2.9%
熟練分析者	87.0%	2.2%



# (a) 性状把握の効率化 ②分析手法の簡易迅速化等

## iii. 自動化技術の開発

- 検討した自動化装置の妥当性・成立性を評価するために、樹脂を充填するカラムのサイズ、試薬通液速度を対象とした。
- 自動固相抽出装置はカラムユニット、ポンプユニット、制御コンピュータから成る。4つの試料を同時に処理することが可能である(図1)。
- 抽出クロマトグラフィーとICP-MS/MSを組み合わせた分析法を対象として、自動固相抽出装置の適用性を検討した(表1)。Zr回収率の繰り返し精度は、人手による場合の相対標準偏差2.6%と比較して良好な結果が得られた。
- 溶離液が樹脂全体に行き渡らない場合がある現象が確認された(図2)。2020年度はこの現象を改善することにより更なる繰り返し精度および回収率を向上させるとともに通液速度を最適化することで更なる迅速化を検討していく。



図1 自動固相抽出装置を中核とする自動化システム (イオン交換および固相抽出の部分)

表1 自動固相抽出装置を用いた ZrとMoの抽出・分離の再現性

		Zr回収率[%]	Mo回収率[%]
Day 1	ポンプA	73.8	94.5
	ポンプB	82.9	95.0
	ポンプC	84.5	80.1
	平均	80.4	89.8
	相対標準偏差	7.1	9.4
Day 2	ポンプA	70.3	92.5
	ポンプB	82.6	94.6
	ポンプC	75.0	93.6
	平均	76.0	93.5
	相対標準偏差	8.1	1.1
Day 3	ポンプA	74.3	91.2
	ポンプB	76.0	88.9
	ポンプC	82.3	89.9
	平均	77.5	90.0
	相対標準偏差	5.5	1.3
全体	平均	78.0	91.1
	相対標準偏差	5.1	4.7

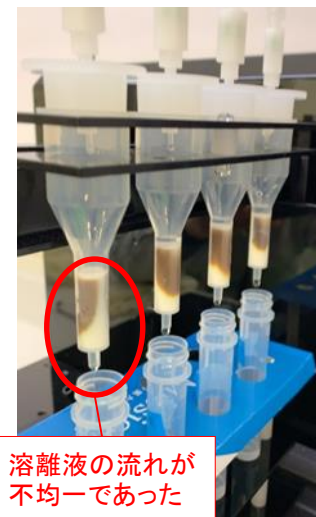


図2 Mo溶離操作後のカラムの状態

# (a) 性状把握の効率化 ②分析手法の簡易迅速化等

## iv. 標準的な分析手法の確立

### 実績

- β線測定核種に関して、提案した分離プロセスの成立性を評価するため、対象核種元素の分離・精製試験を実施した。回収率および標準偏差ともに良好な結果が得られ、放射性廃棄物分析へ適用できる見込みを得た(図1)。またβ核種は一般に計測の前に複雑な化学分離操作を必要とすることから、これを題材として、新たに分析を開始する技術者の訓練のための手法を検討した。
- ISO9001規格に準拠した体系に反映でき、放射性廃棄物の特徴である多種多様な分析試料に対する迅速な標準分析法の検認(図2)を考慮した品質保証要領書案を作成した。

### 目標

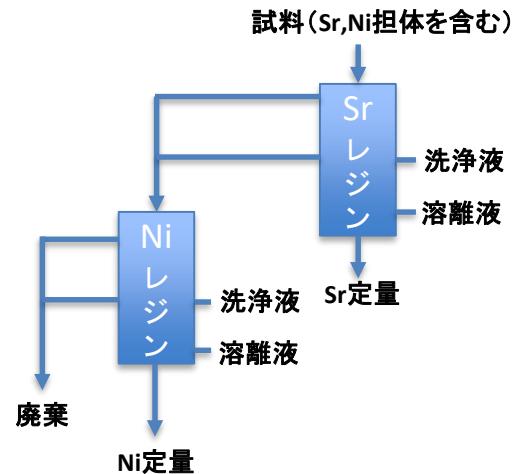
- 合理化された分離プロセスを用いた分析手法について、放射性廃棄物分析法としての品質保証的な観点から考慮した成立性を評価する。

### 実施内容

- 2019年度および2020年度を通して、「(ii)分離プロセスの合理化」にて検討した分離プロセスを用いた分析手法に対して、図2に示す検認条件に該当する各パラメータを評価し、放射性廃棄物分析法としての成立性を評価する。また妨害核種等の影響により十分な検出下限値が得られない等検認条件を満たさないと判断された場合は、影響除去方法または代替分析手法を検討する。

### 目標達成を判断する指標

- 合理化検討された分離プロセスを用いた分析手法に対して、放射性廃棄物分析法としての成立性評価結果を提示する。(2019年度および2020年度)



	回収率	標準偏差
Sr	88.1%	2.8%
Ni	95.8%	3.7%

図1 分離・精製試験の例(Sr、Ni核種の系統分離)

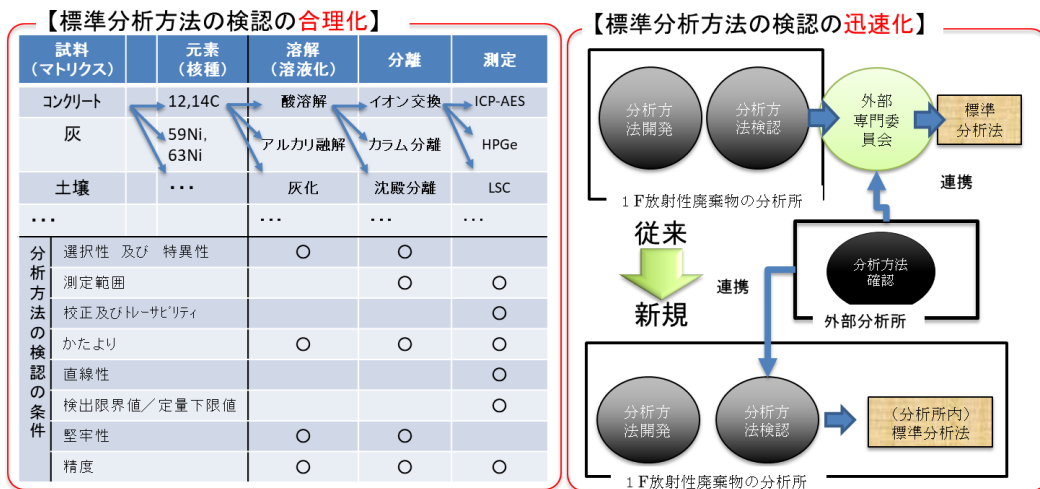


図2 検認の合理化・迅速化の具体的方法

# (a) 性状把握の効率化 ② 分析方法の簡易迅速化等 iv. 標準的な分析手法の確立

◆ 標準的な分析方法を検認する条件について具体的な評価項目案を提示(表1)。

表1 標準分析方法の検認方法

具体的評価項目の検討(案)

試料 (マトリクス)	元素(核種)	溶解 (溶液化)	分離	測定
コンクリート	C 14C 12C...	酸溶解	イオン交換	ICP-AES
灰	Ni 59Ni 63Ni...	アルカリ融解	カラム分離	HPGe
土壌	...	灰化	沈殿分離	LSC
...		...	...	...
分析方法の 検認条件	選択性 及び 特異性	○ ①	○ ③⑥⑦⑧	
	測定範囲		○ ④	○ ⑫⑬
	校正 及び トレーサビリティ			○ ⑩
	かたより	○ ①	○ ③⑥⑦⑧	○ ⑨⑩
	直線性			○ ⑫
	検出限界値/定量下限 値			○ ⑪
	堅牢性	○ ②	○ ⑤	
	精度	○ ①	○ ③	○ ⑩

## 【溶解】

- ①: 溶解・溶出率およびその繰り返し精度
- ②: 試料性状や試料成分の違いが溶解性・繰り返し精度に与える影響

## 【分離】

- ③\*: 回収率およびその繰り返し精度
- ④: 必要な感度を得るための濃縮操作の必要性
- ⑤\*: 試料性状の違いが回収率・繰り返し精度に与える影響
- ⑥\*: 測定を妨害すると考えられる核種の福一放射性廃棄物分析法として要求される除染係数を満たすか(β線測定核種)
- ⑦: 測定試料中の妨害核種が除去できたことの追認方法による評価(測定試料中のγ線核種測定等)(β線測定核種)
- ⑧\*: 操作BLANK試験と模擬試料試験のB.Gカウントの比較によるスペクトル干渉の評価(ICP-MS測定核種)

※:「分離プロセスの合理化検討」での妥当性評価で実施

## 【測定】

- ⑨: 校正試料と測定試料のマトリクスの違いが測定値に与える影響
- ⑩: トレーサビリティが確保された装置校正とその測定の正確さ
- ⑪: 方法検出下限値/方法定量下限値の評価
- ⑫: 定量下限値を含む検量線の直線性(ICP-MS測定核種)
- ⑬: β線測定のエネルギー範囲(β線測定核種)

## (b) サンプルング技術の開発

### ■ これまでの成果(2018年度)

- セシウム吸着装置(KIURION)および第二セシウム吸着装置(SARRY)吸着塔内部の試料採取装置の概念設計を実施した。(図1)
- 採取要素試験装置を製作し、吸着塔内からゼオライト試料を採取するための試験を実施し、サンプルングツールの採取性能を確認した。(図2)
- 試験の結果を基に、サンプルングツールの構造を検討、基本設計を実施した。(図3)

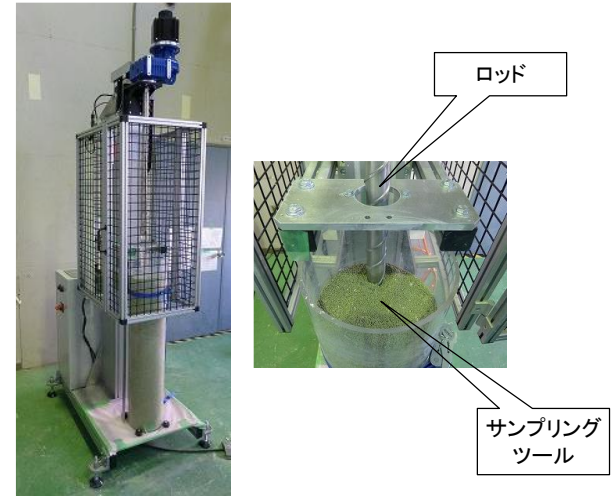


図2 採取要素試験装置

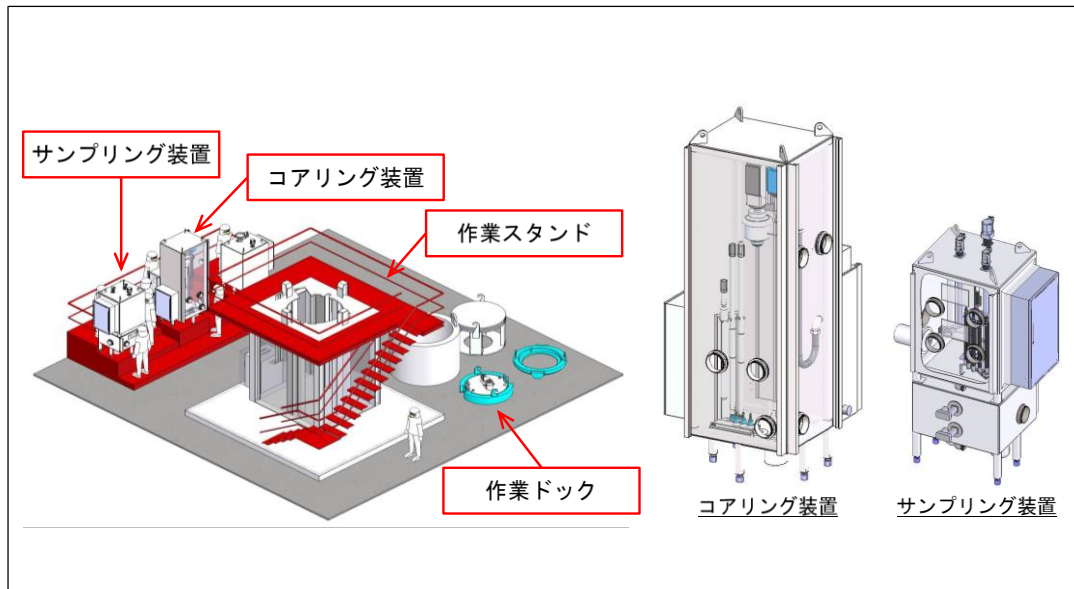


図1 試料採取装置の概念設計

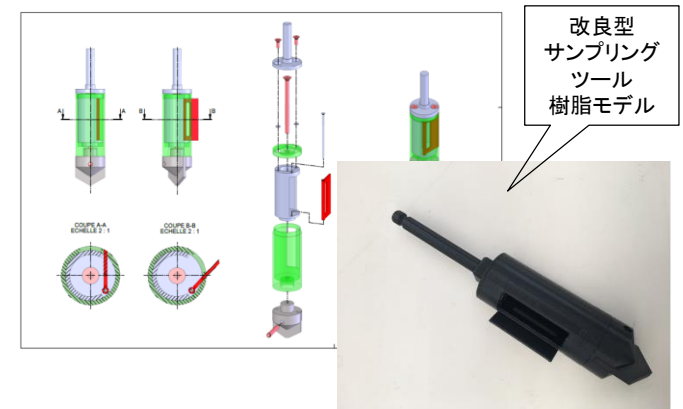


図3 サンプルングツール設計



## (b) サンプルング技術の開発

### ■ 目標

セシウム吸着材の採取に関して、セシウム吸着装置(KURION)、第2セシウム吸着装置(SARRY)の両方に対応する試料採取装置を検討し、モックアップ装置の設計に必要な要素技術の試験、評価を行う。

### ■ 実施内容

#### ● 2019年

試料採取装置の検討にあたり、吸着塔の内容物、発生時期、通水時間、表面線量率等の情報を整理し、分析ニーズ等を踏まえながら、採取対象とする吸着塔を選定する。合わせて、採取条件の見直しを行う。また、概念設計を行った、セシウム吸着装置(KURION)、第2セシウム吸着装置(SARRY)吸着塔の両方に対応する試料採取装置の検討結果を踏まえながら、モックアップ装置の設計に必要な吸着塔の穿孔、試料の採取、穿孔部位の閉止等の要素試験の項目を抽出し、必要な要素試験装置、試験用模擬吸着塔の設計製作を開始し、試験準備を行う。

#### ● 2020年

要素試験装置を完成させ、吸着塔の穿孔、試料の採取、穿孔部位の閉止について要素試験を実施し、評価する。評価結果を踏まえ、現場で適用できる採取工法、装置の見通しを得る。

### ■ 目標達成を判断する指標

2019年度	試料採取装置のモックアップ装置の設計に必要な要素試験項目を抽出し、試験準備を行う。(終了時目標TRL:レベル3→4)
2020年度	モックアップ装置の設計に必要な要素試験を完了させ、評価する。(終了時目標TRL:レベル3→4)

【補助事業概要説明書から抜粋】



## (b) サンプルング技術の開発

～吸着塔の選定・採取条件(1/4)～

採取対象とする吸着塔の選定のため、吸着塔から採取する試料の選定方針を検討した。

### ■ 分析・評価側ニーズ

- 滞留水の分析にて $\alpha$ 核種が検出されている。 $\alpha$ 核種は吸着分配係数が非常に高いことから、吸着材表層付近に存在している可能性がある。
- 処分時の安全評価の中間報告の結果より、処分における支配核種(C-14、I-129等)の存在確認の重要性が示されている。
- 吸着塔の性状は、吸着材種類、滞留水組成、運転条件等で大きく変動する。個体差の把握・評価が重要である。
- 震災初期に使用された吸着塔は滞留水中の核種濃度が高いため、優先して採取したい。

### ■ 代表性の考え方

- 採取する試料の代表性として、吸着塔の構造、使用された時期、使用された吸着材及び放射性核種の含有量等の吸着塔に着目した代表性(吸着塔個体差)と、吸着塔内部における放射性核種分布等の吸着材位置に着目した代表性(空間的不均一性)の2つが考えられる。

## (b) サンプルング技術の開発

### ～吸着塔の選定・採取条件(2/4)～

#### ■ 吸着塔個体差

- 吸着塔に用いられている吸着材の種類は10種類以上。
- 滞留水の組成は経時的に変動しており、処理システムとしての吸着塔の「構成」「並び」によっても、吸着塔に通水される汚染水の組成は変化する。
- したがって、吸着材固体ごとの核種組成・放射能濃度は多様である。実際に、吸着塔の表面線量のバラツキは大きく、個体差が大きいことが示されている。
- 特に吸着材に捕獲されている核種組成は、処理方法選定、処理設備設計等において影響度が大きく、傾向を把握する必要がある。



KURION吸着塔  
発生数:約 800 体

SARRY吸着塔  
発生数:約 200 体

図1 使用済み吸着塔の保管状態

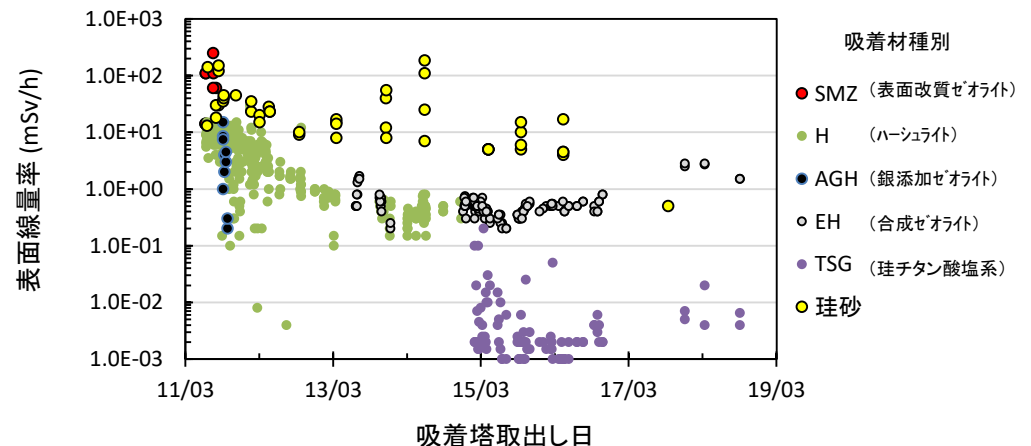


図2 KURION吸着塔のデータ整理例  
(内容物、線量率、発生日)

# (b) サンプリング技術の開発

～吸着塔の選定・採取条件(3/4)～

## ■ 空間的不均一性

➤ 2015年度、実規模のSARRY吸着塔内部試験体(図1)にIE-96吸着材を充填したCs吸着分布測定が実施された(JAEA/IRID※)(図2)。

- 深度方向のCs濃度分布は解析値と精度よく一致することが分かった。
- 円周方向の濃度分布がほとんどないことが確認された。

⇒ ある1か所の吸着濃度を実測すれば吸着塔全体の濃度分布を推定可能

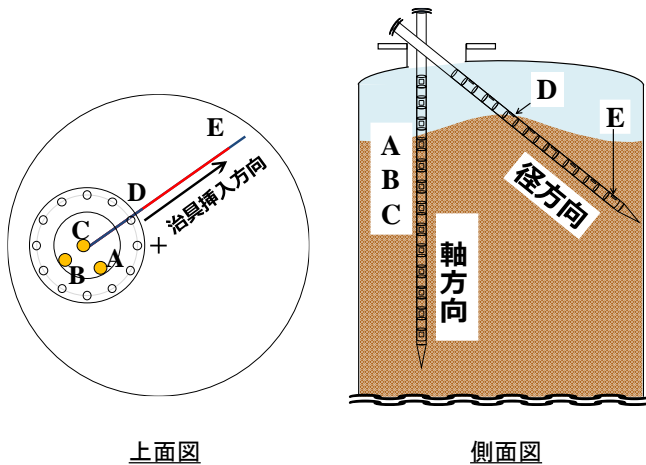
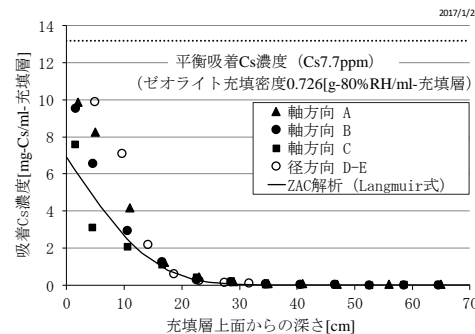
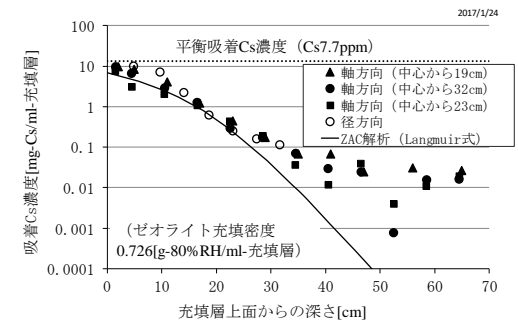


図1 SARRY吸着塔内部試験体



Cs吸着分布測定値(線形表示)



Cs吸着分布測定値(片対数表示)

※IRID(2017):“平成26年度補正予算廃炉・汚染水対策事業費補助金 固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発 研究報告書(最終報告)” pp. 3-20-3-22、pp. 4-381-4-386

# (b) サンプルング技術の開発

## ～吸着塔の選定・採取条件(4/4)～

### ■ 吸着塔の選定

- 滞留水中の核種濃度が高い運転初期に使用された吸着塔を優先する。
- 運転初期のSARRY吸着塔は、フランジ型が該当する。
- 上流側に配置されている吸着塔から優先して採取する。

### ■ 吸着塔の採取点数

- 各吸着塔の1点を採取する。

### ■ 採取位置

- 表層の範囲を吸着材の表面(上端)から100 mm と設定する。

表1 吸着塔の選定・採取条件

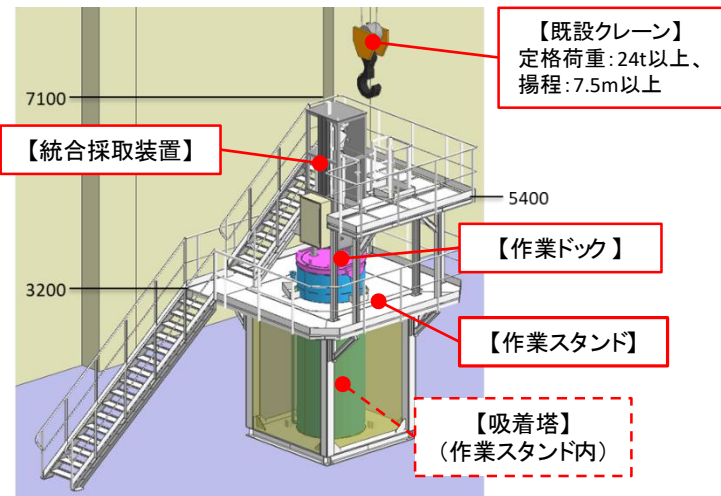
項目		吸着塔の選定・採取条件
採取対象	種類	運転初期に使用された吸着塔を優先 特に、系統の上流側が優先対象
	構造	KURION: 全吸着塔が共通構造 SARRY: フランジ型吸着塔が該当
採取量		10～20 mL/試料
1塔あたり 採取点数		円周方向1点×深さ方向1点 (計1点/吸着塔)
表層からの採取深さ		表層～100 mm 程度
穿孔位置		KURION: 吸着塔天板面 SARRY: 吸着材充填口フランジ
吸着塔穿孔径		約 $\phi$ 50mm
閉止方法		閉止部は1.37MPaの耐圧性を確保 閉止栓は取外し可能な構造

# (b) サンプリング技術の開発

～要素試験項目の抽出(1/3)～

## ■ 実作業の想定

現場での実作業を想定してリスク評価を行い、必要な要素試験項目、要素試験装置について検討した。



構成	機能
既設クレーン	吸着塔、統合採取装置、作業ドックの設置を行う
統合採取装置	垂直スライドユニットおよび先端ツールの交換により、穿孔、採取、閉止の一連の作業を遠隔で実施する装置
作業ドック	吸着塔上部の遮へい、吸着塔と試料採取装置の接続、バウンダリ確保、穿孔時のロッド芯ブレ抑制機能
作業スタンド	吸着塔の設置および側面の遮へい 作業員が作業するための足場

図1 機器配置

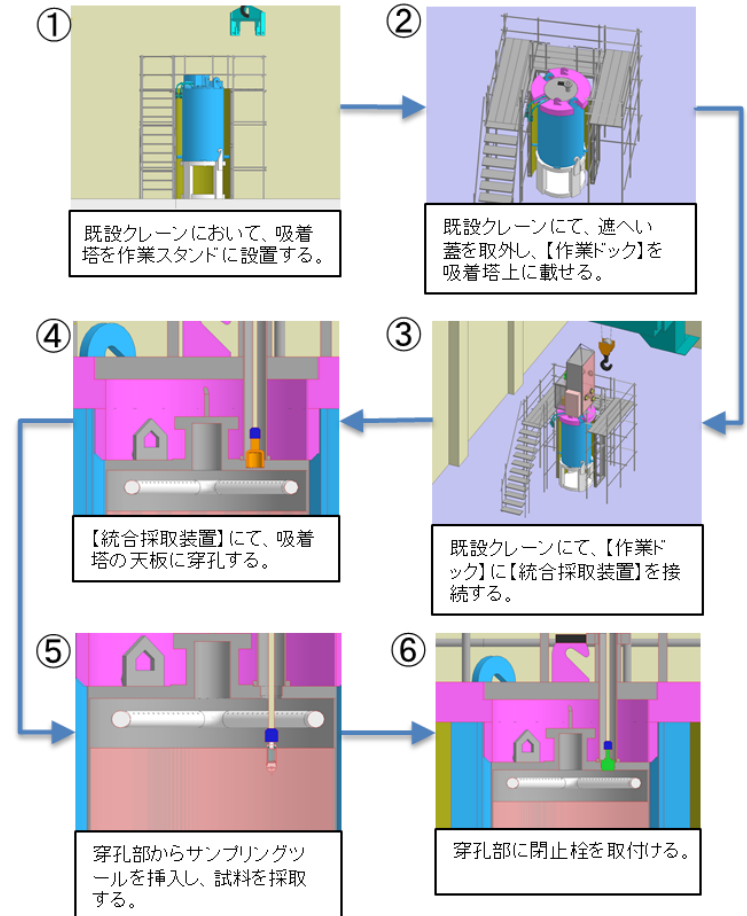


図2 作業ステップ (KURION吸着塔)



# (b) サンプリング技術の開発

## ～要素試験項目の抽出(2/3)～

### ■ リスク評価

表1 一連の作業におけるリスク評価

リスク項目	リスク内容	リスク低減対策
汚染	採取後のサンプリングヘッドによる周囲の汚染拡大	採取後のサンプリング機構の表面付着物(汚染)を評価し、適切な養生・封入を行う
	採取作業中の吸着塔内の汚染物の拡散	採取作業中のバウンダリ確保
	閉止部からの汚染物の漏洩	適切な密封度の確保
被ばく	採取装置の操作、メンテナンスによる作業員の過剰被ばく	吸着塔上部の遮蔽(作業ドックによる遮蔽) 人手作業時間の短縮
水素引火	吸着塔内部で発生した水素に引火	吸着塔内の換気、水素濃度測定
吸着塔の変質	穿孔時の摩擦熱やせん断力による吸着塔フランジ部ガスケット等の変質	適切な穿孔条件、潤滑により摩擦熱を低減
	板厚の差異、フランジ型の場合には想定したフランジ枚数との差異	切削能力、ストロークに余裕を持たせる カメラによる遠隔確認
異物混入	吸着塔内への切削片の混入	吸引による回収、混入が最小となる切削条件の把握
落下・飛来	作業ドックおよびISMの設置作業中の落下	専用吊具の使用、カメラによる監視
設備破損	吸着塔運搬時の破損	専用吊具の使用
	採取時の内部配管との干渉	穿孔後、内部をカメラで確認する
	穿孔、採取時のシャフトの振れによる干渉	シャフトの振れ量を事前に把握する
	穿孔、閉止時の噛み込み	穿孔、閉止が安定する条件の把握
吸着塔の健全性不良	閉止栓の耐圧不足	事前の耐圧試験に基づくプロセス管理
	サンプリングヘッドベーンの戻り不良(破損)によるロッドの引抜不良	ベーン部の構造の検討 ベーン不要なヘッド形状の検討

※  : 実試験による評価が必要と考えられる項目であり、本研究における試験項目とする。

# (b) サンプルング技術の開発

## ■ 要素試験項目

## ～要素試験項目の抽出(3/3)～

表1 要素試験項目

試験項目	試験目的	測定項目
穿孔試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>・運転条件の確認</li> <li>・シャフト保持機構の必要性判断</li> <li>・作業時間検討への反映</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・モータ負荷率(回転方向、垂直方向)</li> <li>・切削刃の耐久性</li> <li>・回転数、送り速度</li> <li>・穿孔に要する時間</li> <li>・切削片状況、切削油供給条件</li> <li>・シャフトの振れ、振動の状態</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・後段の作業(採取、閉止)への影響確認</li> <li>・穿孔刃の妥当性確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・孔の形状(真円度、同軸度等)</li> <li>・切削片、切削油の吸着塔内への混入量</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ジョイント部の作業性評価</li> <li>・機器配置の妥当性</li> <li>・汚染防止対策の要否判断</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・穿孔ツールの交換性、交換時間</li> <li>・グローブポートからの作業範囲</li> <li>・切削片、切削油の飛散状況</li> <li>・その他、課題抽出</li> </ul>
採取試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>・運転条件の確認</li> <li>・要求性能(10～20ml)の確認</li> <li>・汚染防止対策の要否判断</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・回転数、送り速度</li> <li>・採取量</li> <li>・試料の飛散状態</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ジョイント部の作業性評価</li> <li>・被ばく評価へのインプット情報把握(距離、時間)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・採取ツールの取扱い性、取扱い時間</li> <li>・グローブポートからの作業範囲</li> <li>・その他、課題抽出</li> </ul>
閉止試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>・運転条件の確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・閉止トルク値</li> <li>・送り速度</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・閉止栓構造の確認</li> <li>・運転条件の設定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・耐圧性(試験圧力:約2MPa)</li> <li>・取外しのための緩めトルク値</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ジョイント部の作業性評価</li> <li>・機器配置の妥当性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・閉止栓の取付性、取付時間</li> <li>・グローブポートからの作業範囲</li> <li>・その他、課題抽出</li> </ul>
設置性確認試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>・作業ドック位置合わせ部の構造確認</li> <li>・作業ドック設置作業時間の測定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・模擬吸着塔への作業ドックの設置性(位置合わせ)</li> <li>・実作業に向けた課題抽出</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・要素試験装置の位置合わせ部の構造確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・作業ドックへの装置の設置性</li> <li>・実作業に向けた課題抽出</li> </ul>

# (b) サンプリング技術の開発

～要素試験の進め方～

- **ステップ1: 要素試験の準備**・・・「要素試験装置の設計・製作」および「予備試験(穿孔・採取・閉止)」の実施
- **ステップ2: 要素試験**・・・要素試験装置を用いた一連の作業の成立性確認

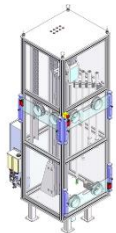
## 要素試験の準備

(ステップ1) 継続中。2020年上半期まで実施予定。

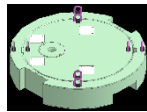
要素試験装置を設計するうえでの前提条件を整理

### 要素試験装置の設計・製作

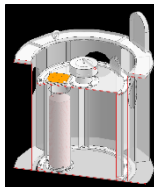
要素試験を実施するうえで必要となる装置等(図1)の設計・製作を行う。



試験用統合採取装置



試験用作業ドック



模擬吸着塔

図1 要素試験装置の構成

### 予備試験

穿孔・採取・閉止に必要な基本性能を予備試験(図2)にて確認する。



穿孔



採取



閉止

図2 予備試験の様子

予備試験の結果を設計に反映

## 要素試験

(ステップ2) 2020年下半期に実施する。

要素試験装置(図3)を用いてサンプリングに係る一連の作業の成立性を確認する。

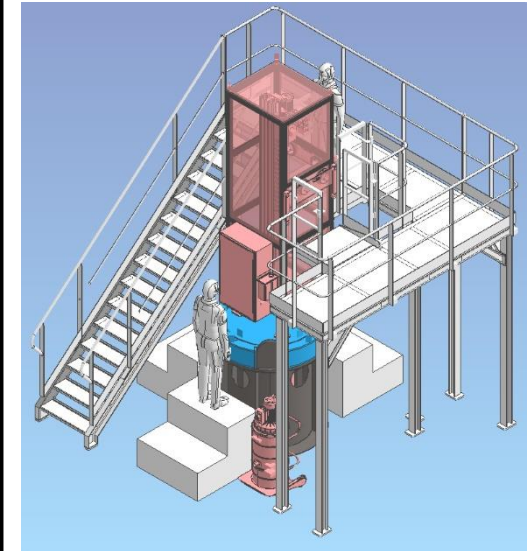


図3 要素試験装置のイメージ

# (b) サンプルング技術の開発

～要素試験の準備 要素試験装置の設計・製作(1/7)～

現場環境の想定、採取条件および試料採取手順の検討、予備試験の結果から、吸着塔の穿孔、試料の採取、穿孔部位の閉止等の要素試験を行うための各構成機器の詳細設計を実施し、製作を開始した。

## ■ 要素試験装置の構成

表1 要素試験装置の構成と機能

構成	機能
試験用統合採取装置	垂直方向に駆動する回転ロッド先端のツールを交換することで、穿孔・採取・閉止を行う。
試験用作業ドック	試験用統合採取装置を固定し、吸着塔上面との位置合わせを行う。
模擬吸着塔	SARRY、KURION吸着塔の上部構造を再現する。
試験用作業スタンド	試験中の装置を支え転倒防止を図る。ツール交換等の試験用統合採取装置廻りでの作業時の足場とする。

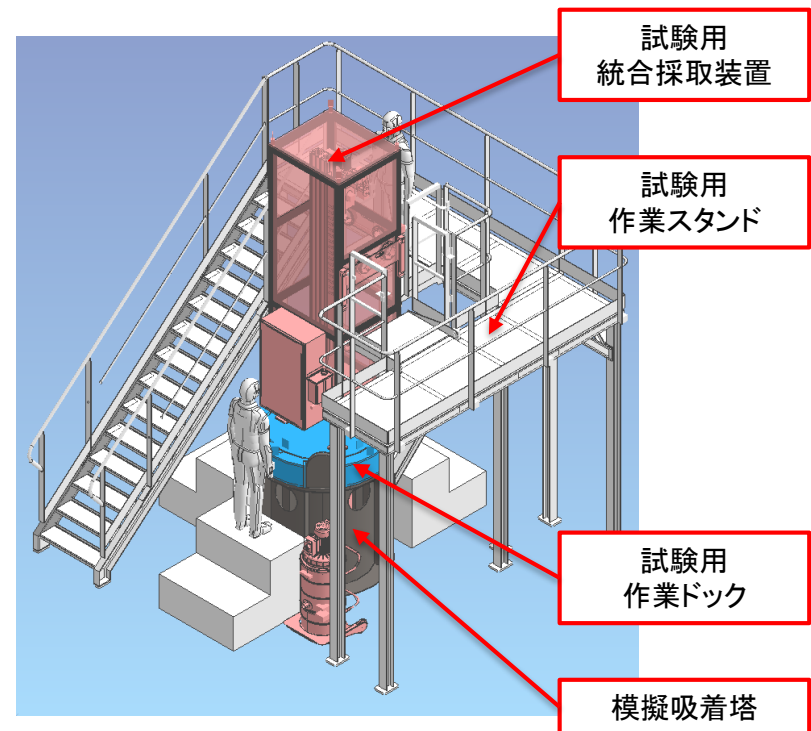


図1 要素試験装置の構成

- コールド環境下での要素試験を目的としているため、各機器は、バウンダリ確保のための機能や、遮へい機能は省略するが、作業性に影響する遮へい厚さ等の形状は再現する。

## (b) サンプルング技術の開発

～要素試験の準備 要素試験装置の設計・製作(2/7)～

### ■ 試験用統合採取装置

- ツールを交換することで、穿孔、採取、閉止の操作を行う。
- ツール交換はグローブポートを介し人手で行う。

表1 試験用統合採取装置の仕様

項目	仕様	仕様の根拠
外形	1100×950×3200mm	想定するクレーン揚程、必要ストローク、グローブポートによる作業性等を考慮し外形を決定。
垂直駆動	駆動方法	ボールねじによる垂直駆動
	モータ仕様	出力:0.75kW トルク:20Nm 回転速度:～250rpm
	ストローク	2000mm
回転駆動	モータ仕様	出力:5kW トルク:300Nm 回転速度:～150rpm
穿孔	<ul style="list-style-type: none"> <li>穿孔ツール(φ60、50、40mm)</li> <li>切削片吸引機能</li> <li>切削油噴霧機能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>複数の径で穿孔し、段付穴を形成する。</li> <li>切削片が吸着塔内に混入しないよう吸引機構を設ける。</li> <li>冷却および潤滑のため油噴霧機構を設ける。</li> </ul>
採取	サンプルングツール(採取容量最大20mL)	採取量の目標値は10～20mLであるため、採取容量を20mLと設定。
閉止	閉止ツールにより、閉止栓を挿入	形成された段付穴に遠隔で閉止栓を取り付ける。

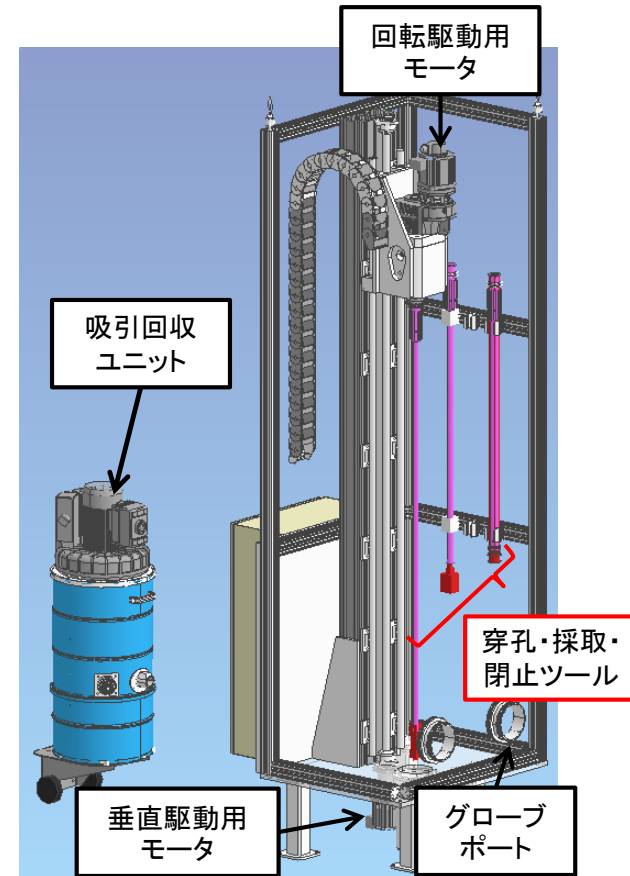


図1 試験用統合採取装置の内部イメージ



# (b) サンプリング技術の開発

～要素試験の準備 要素試験装置の設計・製作(3/7)～

## ■ 試験用統合採取装置の詳細設計(例示)

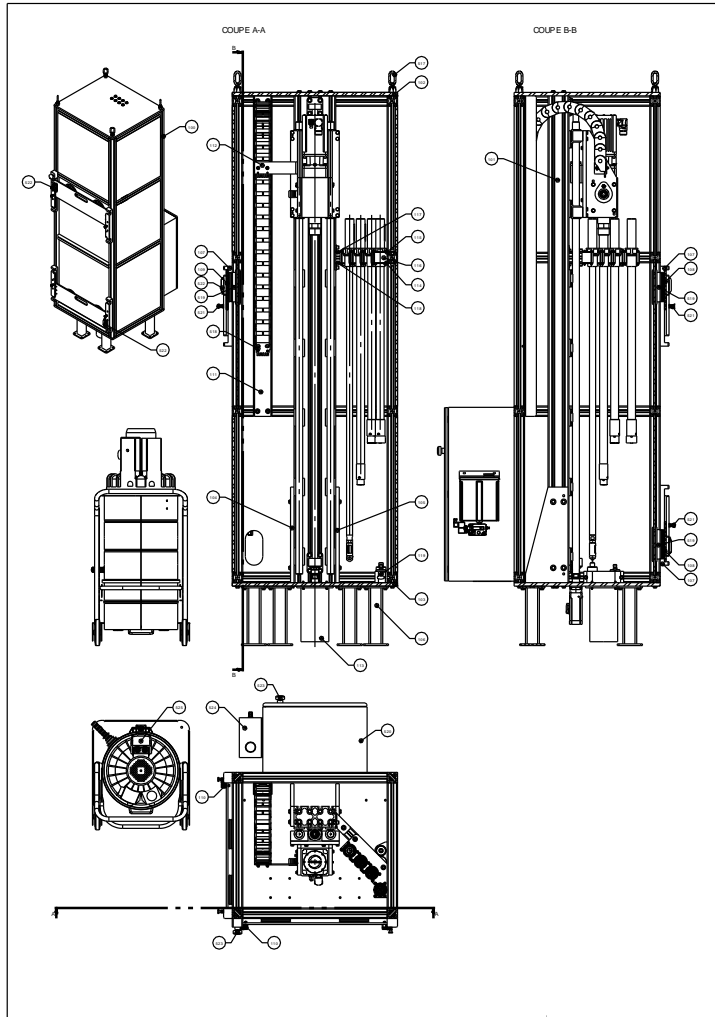


図1 試験用統合採取装置全体配置図

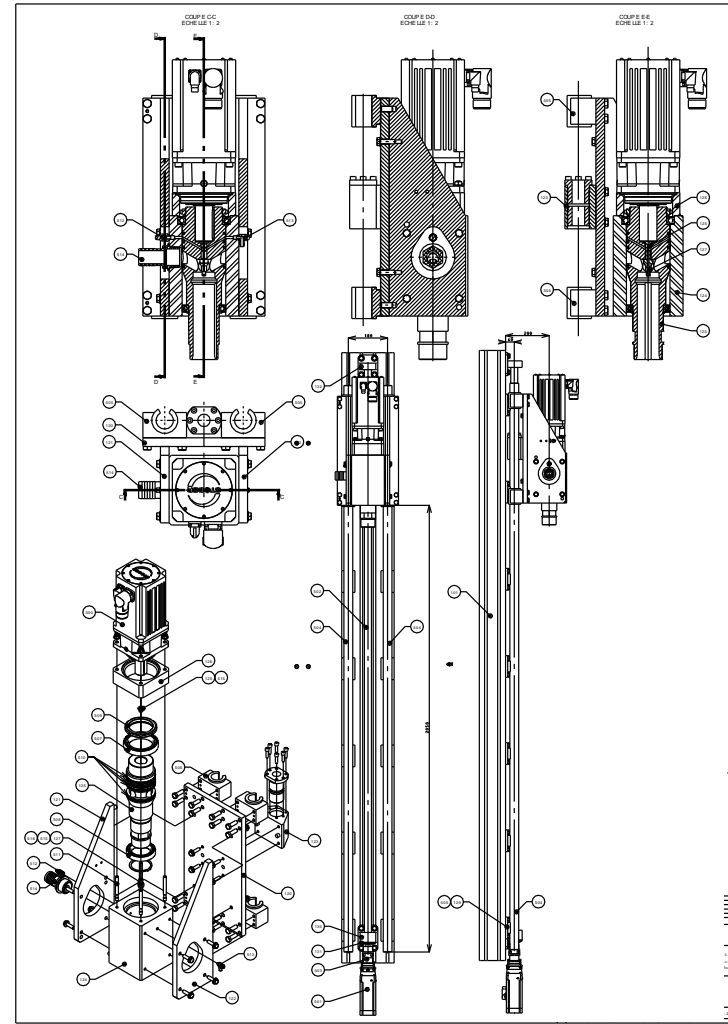


図2 ロッド駆動機構部分組立図

# (b) サンプリング技術の開発

～要素試験の準備 要素試験装置の設計・製作(4/7)～

## ■ 穿孔

表1 穿孔ツールの機能

要求される機能	装置の機能
KURIONおよびSARRY吸着塔の穿孔位置にサンプリングツールを挿入するための穴加工が遠隔で行えること (図1)	<ul style="list-style-type: none"> <li>穿孔ツールを遠隔で操作し、切削 (ツールの交換は手動操作)</li> <li>切削油を噴霧し、摩擦抑制および冷却 (図2)。</li> <li>切削片、切削油を吸引回収 (図2)</li> <li>ロッドの芯ブレ抑制のための保持機構</li> </ul>

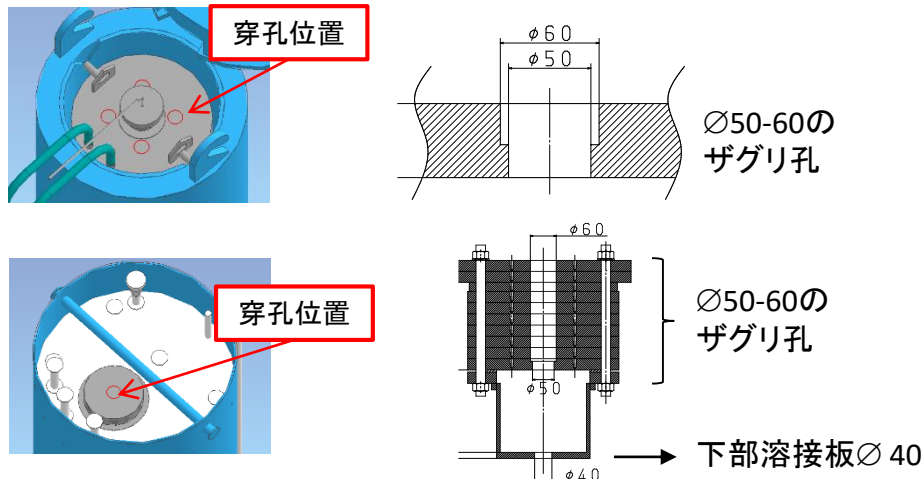


図1 穿孔位置および穿孔断面図(上:KURION吸着塔、下:SARRY吸着塔)

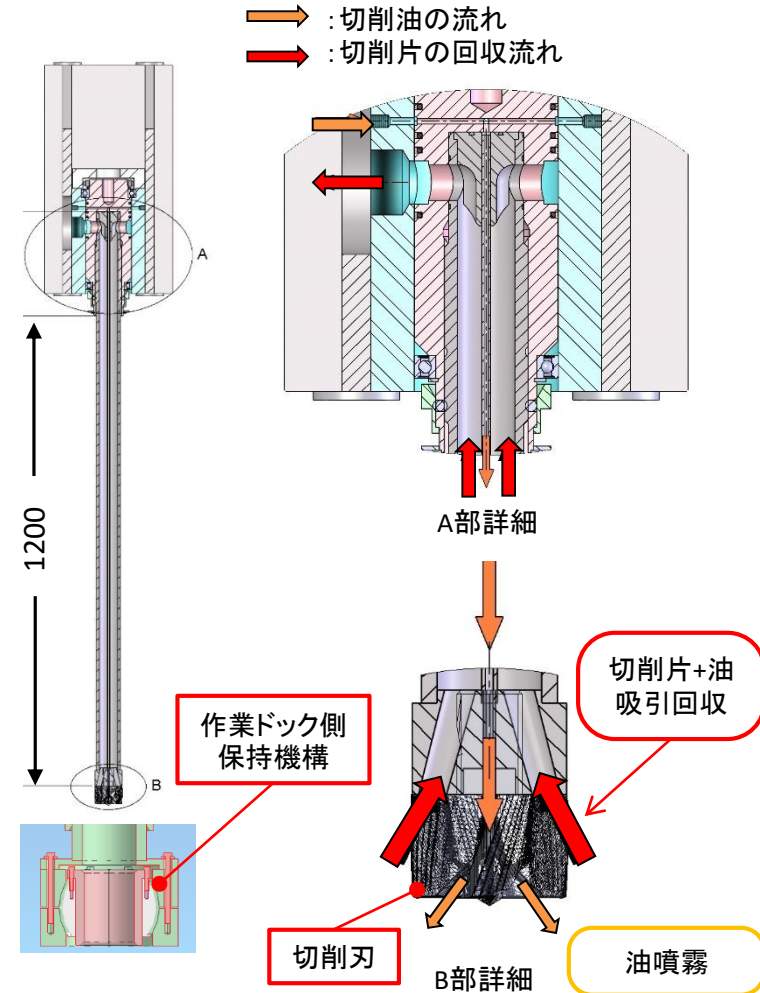


図2 穿孔ツールイメージ

# (b) サンプリング技術の開発

～要素試験の準備 要素試験装置の設計・製作(5/7)～

## ■ 穿孔ツール

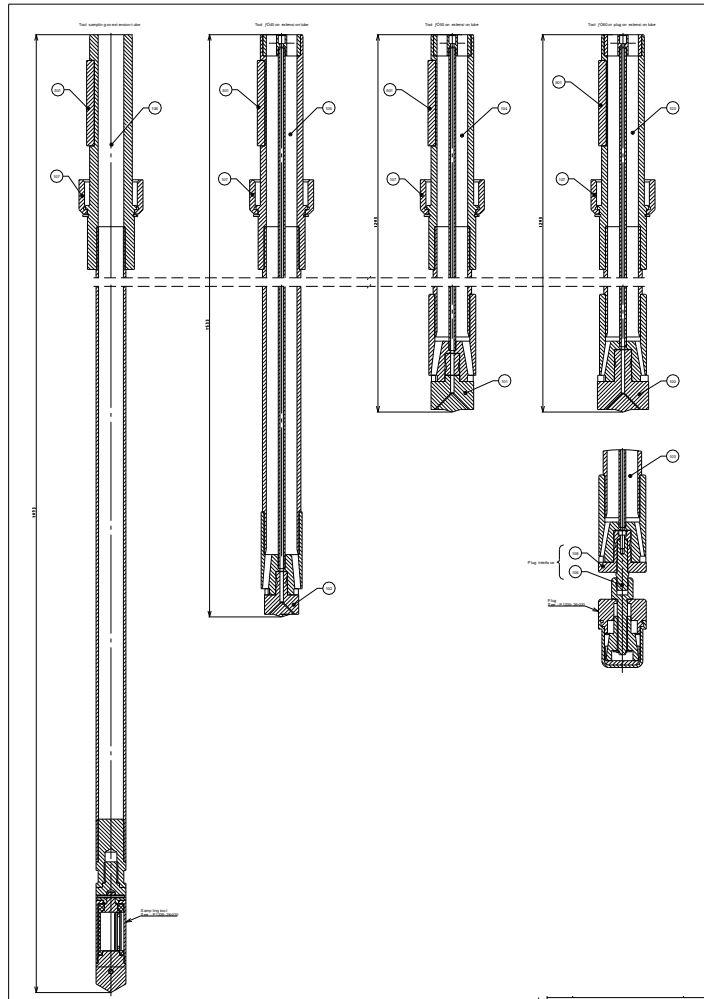
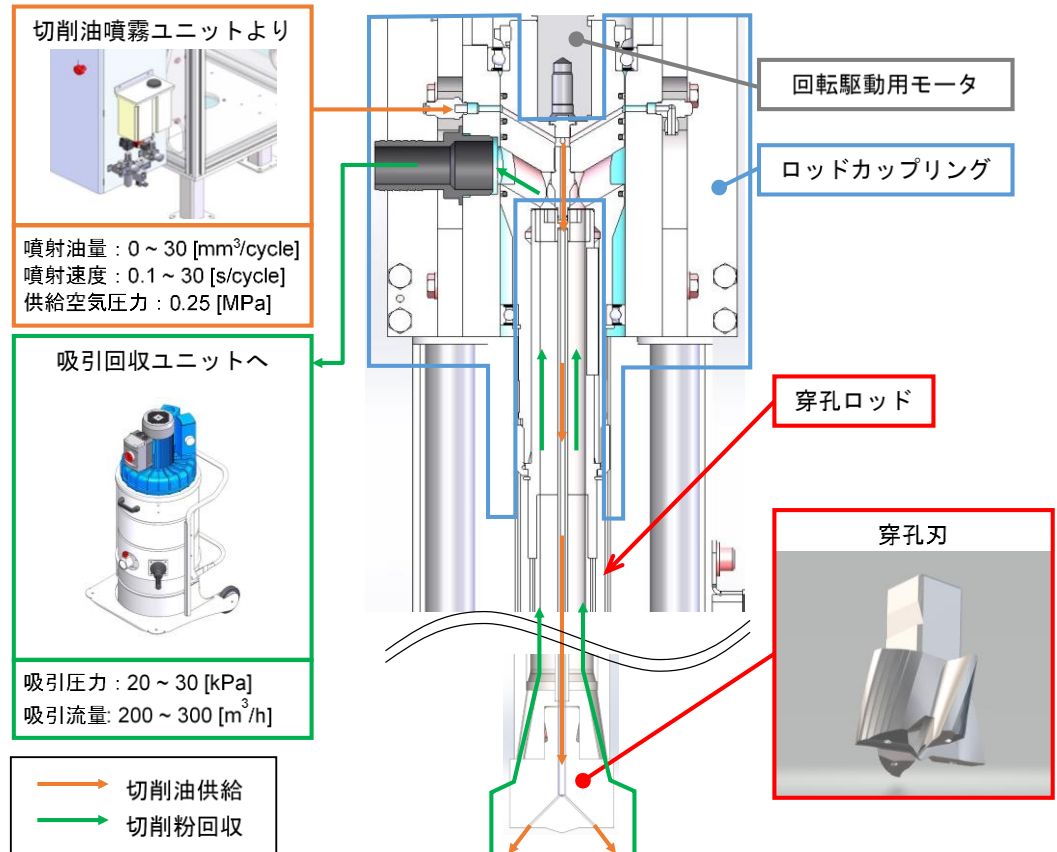


図1 穿孔ツール設計



「切削油供給ユニット」から供給された切削油はロッド中心を通り先に供給され、切削粉と一緒にロッド外周を通り吸引回収ユニットへ回収される。

図2 穿孔機構の構成

# (b) サンプルング技術の開発

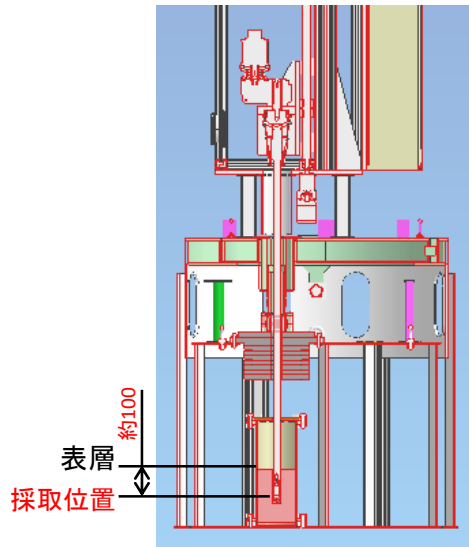
～要素試験の準備 要素試験装置の設計・製作(6/7)～

## ■ 採取(サンプリング)

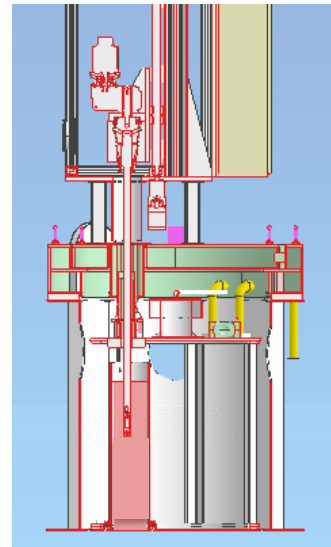
- 穿孔部(Ø50)にサンプリングツールを挿入し、吸着塔内部から試料を採取する。

表1 採取(サンプリング)ツールの機能

要求される機能	装置の機能	
表層付近の試料 10～20mLを遠隔で 採取できること	採取位置(図1)	吸着塔表層(100mm付近)の採取が可能となるストロークを設定。
	サンプリング ツール(図2)	サンプリングツールを右回転(採取口閉)でストロークさせ、採取位置まで到達したとき、左回転で採取口を開くと同時にベーンを出し、吸着材を掻きとり採取する(採取口体積:約20mL)。



(a) SARRY



(b) KURION

図1 試料採取位置

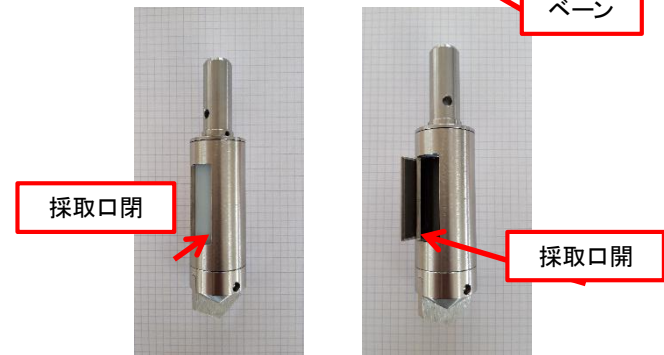
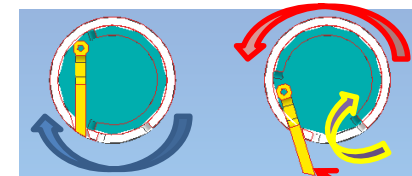


図2 ベーン開閉式サンプリングツール

# (b) サンプリング技術の開発

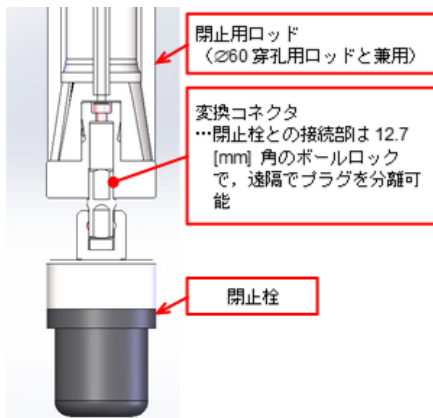
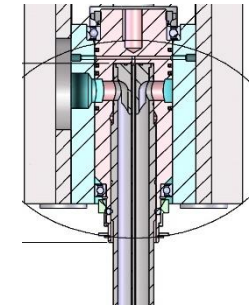
～要素試験の準備 要素試験装置の設計・製作(7/7)～

## ■ 閉止

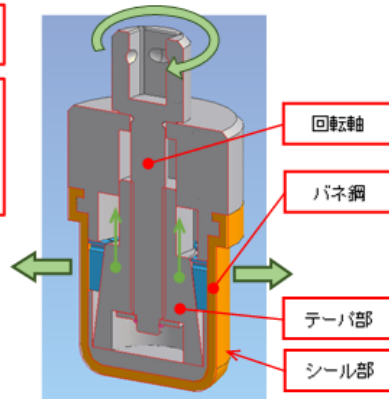
- 採取後、穿孔部に閉止栓を差込み、閉止操作を行う(図1、2)。
- 通常の保管時において圧力は作用しないが、抜き出し作業の工法によっては吸着塔に圧力が加わることが想定される。そこで吸着塔の耐圧性能と同等の閉止栓を検討した。

表1 閉止ツールの機能

要求される機能	装置の機能	
穿孔部を遠隔で閉止できること	取付方法	段付穴に閉止栓を押付けながら軸を回転させることにより、バネ鋼を押し出し、ポリウレタン部を拡張させ穿孔部を閉止する。軸を逆回転させることで、取外しも可能。
	仕様	<ul style="list-style-type: none"> <li>・最大圧力：約1.37MPa(吸着塔の最大使用圧力)</li> <li>・閉止部口径：<math>\phi 50\text{mm}</math></li> <li>・KURION、SARRY吸着塔の両方に対応</li> </ul>



(a) 閉止ツールの構造



(b) 閉止栓の構造

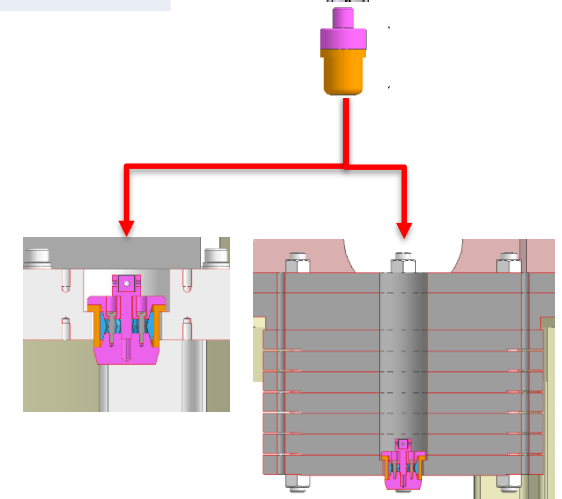


図2 閉止栓の取付(左:KURION、右:SARRY)

図1 閉止栓(左:イメージ、中:分解図、右:試作品)



## (b) サンプリング技術の開発

～要素試験の準備 穿孔予備試験～

### ■ 穿孔予備試験

- マシニングセンタに予備試験用穿孔ロッドおよび試作穿孔刃を取り付け、鋼板の穿孔予備試験を実施した(図1)。
- 穿孔刃の形状を工夫することで、切削片を小粒化(約5mm以下)できることを確認した。
- 保持機構を設けることで、穿孔穴の精度を向上できることを確認した。
- 予備試験結果より穿孔の見通しが得られたため、要素試験装置へ反映する。

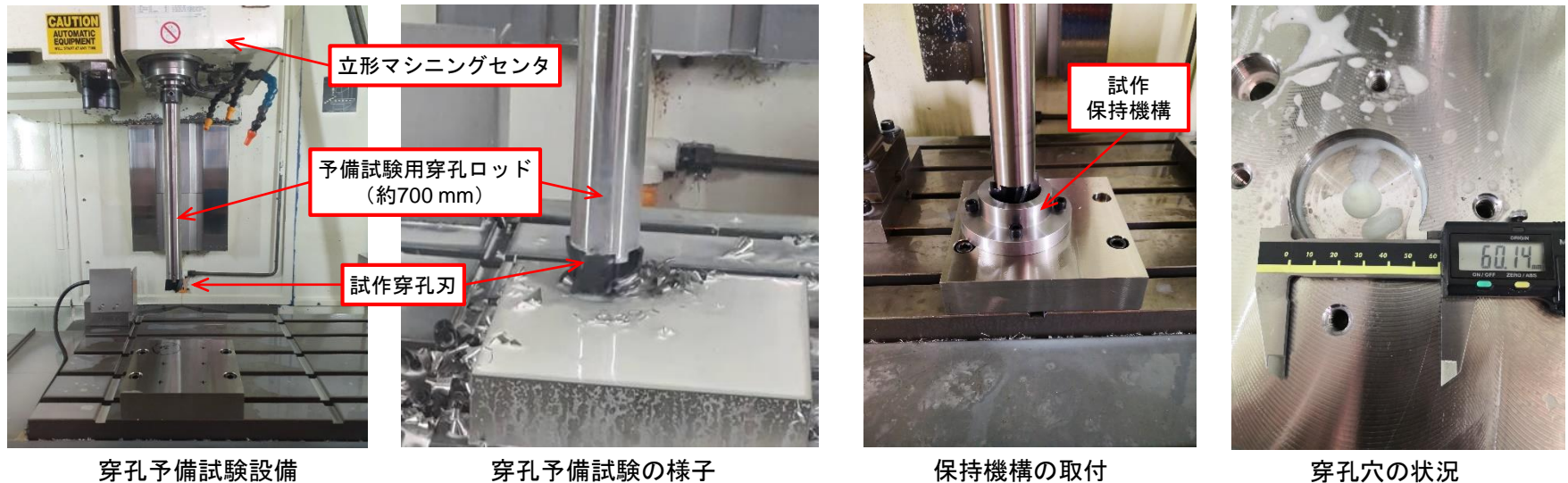


図1 穿孔予備試験

# (b) サンプルング技術の開発

～要素試験の準備 採取予備試験(1/2)～

## ■ 採取予備試験

- 過年度に製作した採取要素試験装置により、採取予備試験を実施した(図1)。
- 過年度の採取予備試験において採取量が不足する問題に対処するために、ベーン開閉式サンプリングツールを新たに製作した。
- 過年度の試験においては、採取対象(ゼオライト)の性状を1種類しか設定していなかった。実試料を想定し複数の試験対象に対して採取予備試験を実施した(図2)。

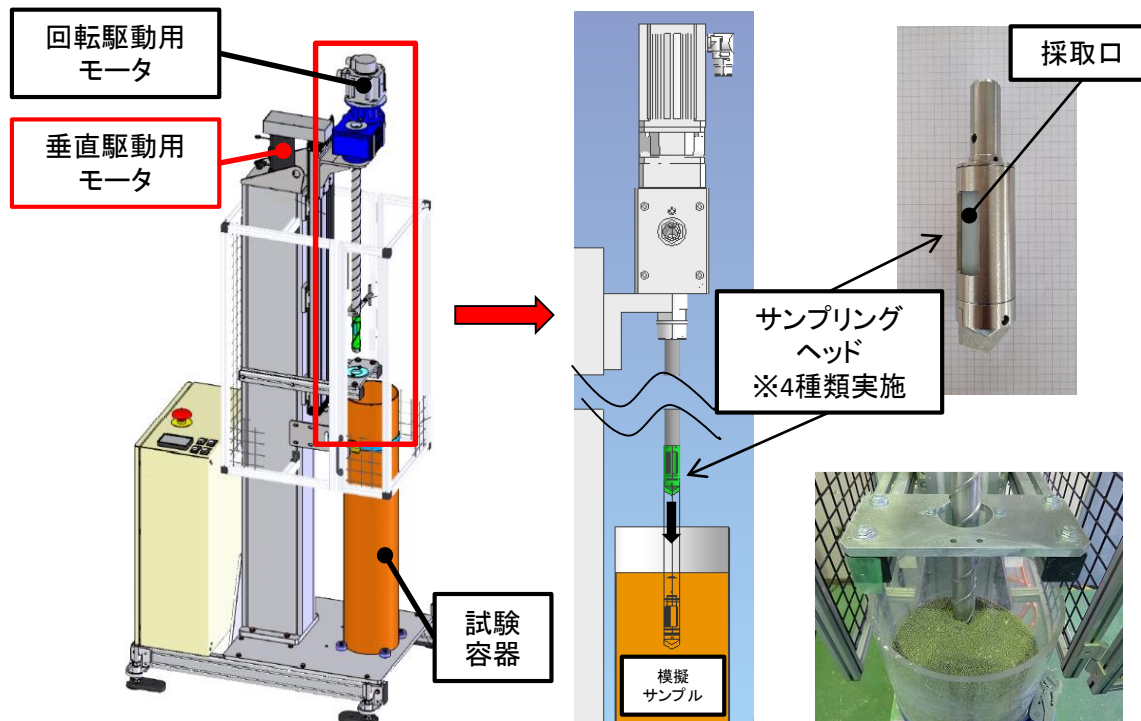


図1 採取要素試験装置



試験対象	
①	イタゼオライトZ-05 粒径0.5～1mm 乾燥
②	イタゼオライトZ-12 粒径0.5～2mm 乾燥
③	イタゼオライトZ-13 粒径1～3mm 乾燥
④	イタゼオライトZ-05 粒径0.5～1mm 湿潤
⑤	イタゼオライトZ-12 粒径0.5～2mm 湿潤 ※
⑥	イタゼオライトZ-13 粒径1～3mm 湿潤

※: 過年度の試験にて実施した試料

図2 試験対象

# (b) サンプルング技術の開発

～要素試験の準備 採取予備試験(2/2)～

## ■ 採取予備試験結果

各種サンプルングツール(図1)による採取予備試験の結果を示す(図2)。  
採取時の運転条件は、前年度の試験における最適値を用いた。

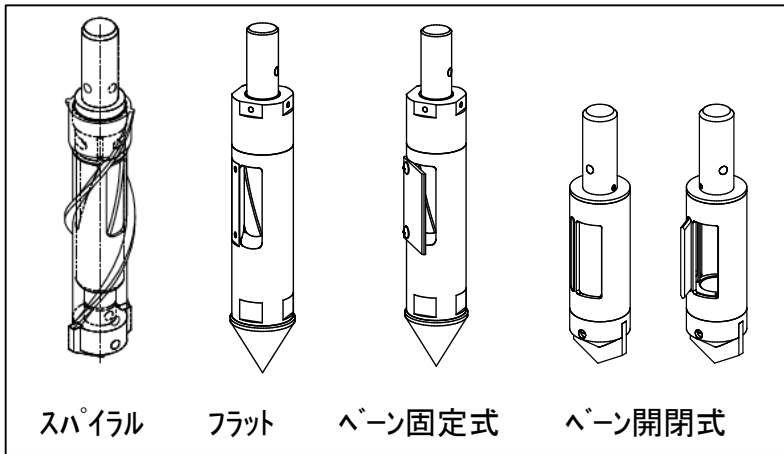


図1 各種サンプリングツール

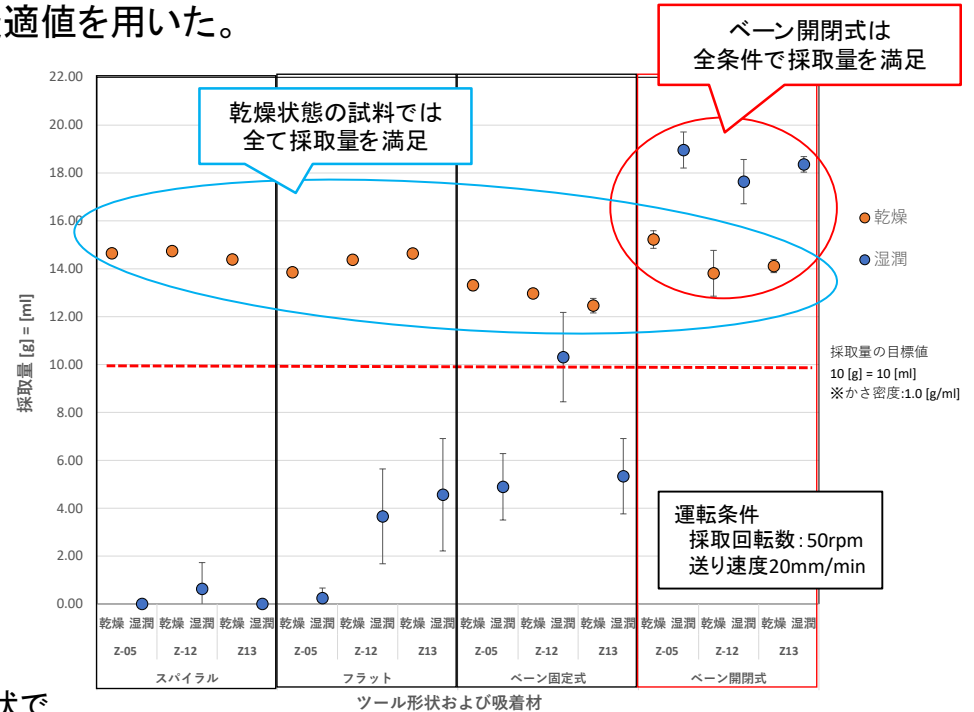


図2 採取予備試験結果

- 乾燥状態の試料は、流動性が高いため全てのツール形状で採取量を満足することができた。
- 湿潤状態の試料は付着性が高く、ベーン開閉式を除くツールでは安定した採取ができなかった。
- ベーン開閉式は全ての試料条件において採取量を満足した。  
一方、ベーン開閉式は開閉機構にゼオライトの噛みこみが見られた。また、穿孔部からツールを引き抜く際にベーンの干渉や破損のリスクがあるため、更なる形状の見直しと、リスク低減対策について検討を継続していく。

## (b) サンプルング技術の開発

～要素試験の準備 閉止予備試験～

### ■ 閉止予備試験

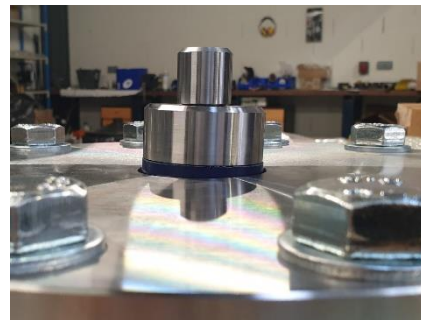
- 試作した閉止栓を耐圧試験機に取り付け、閉止予備試験を実施した(図1)。
- 閉止栓は手動工具により取付け、水圧ポンプにて圧力をかけ、閉止栓から漏洩が生じたときの圧力値を読み取った。
- 吸着塔の最大使用圧力である1.37MPaに対し、試作した閉止栓により1.4MPaまで漏洩が生じないことを確認した。
- 1.37MPaの1.5倍である約2MPaの耐圧試験で漏洩が生じない閉止栓の開発を目標として、材質や構造の最適化を検討していく。



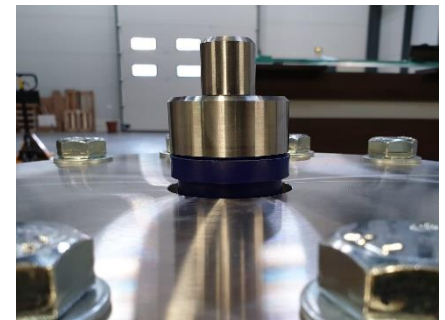
試作した閉止栓



閉止予備試験の様子



閉止栓の取付状況



内圧により閉止栓が  
浮上した時の様子

図1 閉止予備試験



# (b) サンプルング技術の開発

～まとめ(1/2)～

## ■ 本年度成果の概要と課題

### ➤ 採取条件、吸着塔選定方針

吸着塔(KURION、SARRY)の採取条件及び選定の方針について検討した(表1)。なお、今後の分析結果を踏まえて見直していく。

### ➤ 要素試験項目の抽出

穿孔、採取、閉止の一連の操作における要素試験項目を抽出した。

### ➤ 要素試験装置の設計

実作業を想定した一連の作業(吸着塔の穿孔、採取、閉止)の要素試験内容を検討した。また、試験を実施するための、要素試験装置の設計を完了し、製作を開始した(図1、2)。

表1 採取条件の概要

	項目	仕様
採取対象	種類	運転初期に使用された吸着塔を優先 特に、上流側吸着塔を優先
	構造	KURION: 全吸着塔に対応 SARRY: フランジ型
採取条件	点数	各1点
	深さ	吸着材表面～深さ100mm
	量	10～20mL
	穿孔径	φ50mm
	閉止栓	耐圧1.37MPa(短期)、取外可

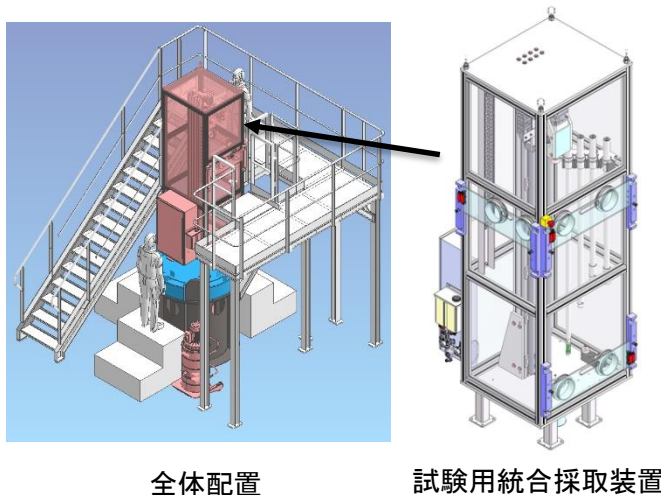


図1 要素試験装置

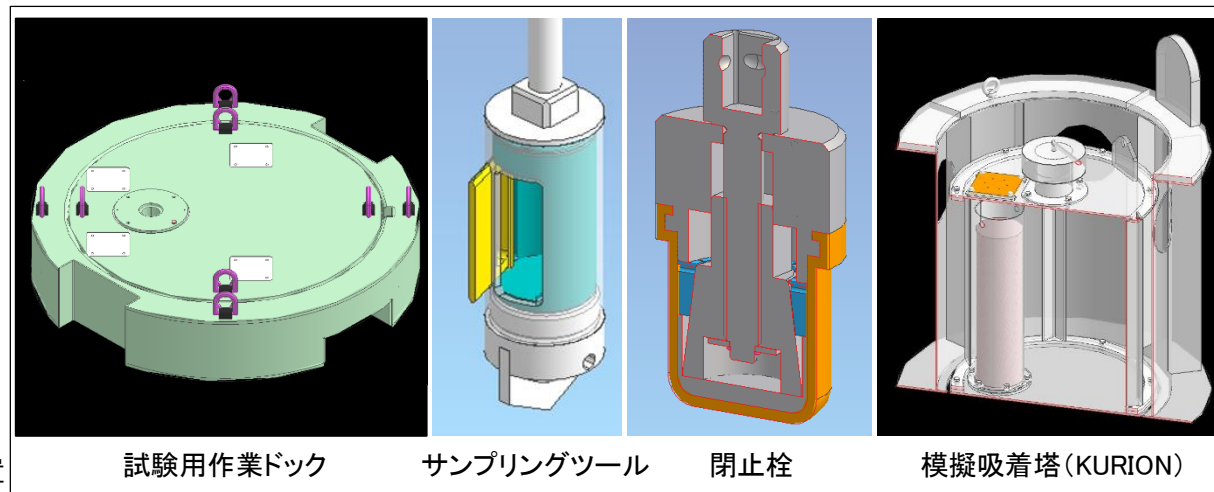


図2 要素試験装置構成品



# (b) サンプリング技術の開発

～まとめ(2/2)～

## ■ 本年度成果の概要と課題

### ➤ 予備試験の実施

- 穿孔、採取、閉止の各予備試験を実施した(図1～図3)。
- 穿孔方法について、予備試験により見通しを得た。
- 採取、閉止方法について引き続き検討を実施していく。



図1 穿孔予備試験の状況

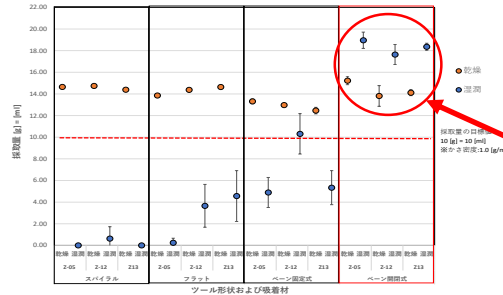


図2 採取予備試験結果



図3 閉止予備試験の状況

### ➤ リスク評価の実施

- 一連の作業のリスクを抽出した。要素試験を通じリスク評価を実施する。
- 一連の作業の被ばく評価を実施した。要素試験を通じて想定した作業時間の妥当性を評価する。

## ■ 次年度計画の概要

- 採取予備試験の結果を踏まえてサンプリングツールの改良を実施する。
- 要素試験に必要な、要素試験装置、模擬吸着塔等の製作を進め、要素試験の準備を完了させる。
- 吸着塔の穿孔、採取、閉止の一連の要素試験を実施する。
- 試験結果より、現場で適用する採取工法、装置の適用性を見通しを得る。

## 2. 事業内容

### d. 研究開発成果の統合

# d. 研究開発の統合 ～廃棄物ストリームの検討～

## ■ 実績

- 2018年度までに、既往研究で得られた最新の成果を反映し、進捗、成果の整合性、及び残された課題を統合的に評価する手法を構築した(図1)。また、構築した方法で、進捗、成果の整合性、及び残された課題を示した。

## ■ 目標

- 廃棄物ストリームに、他の研究で得られた成果を取り込み、進捗、成果の整合性及び残された課題を統合的に評価する。

## ■ 実施内容(詳細を次葉に示す。)

- 2019年度は、処理側(前処理・処理・再加工)の研究開発成果に加えて、処分側(廃棄体化、廃棄前保管)の研究開発成果に基づく要求を廃棄物ストリームに反映し、処理・処分の双方の観点から処理方法の選択肢を整備する。また必要に応じ、対象廃棄物毎に、インプット整理表(図2)の記載事項を見直す。
- 2020年度は、2019年度に得られた課題や研究開発成果を取り込んで廃棄物ストリームの更新を継続すると共に、進捗・成果の整合性および残された課題の評価結果を提示する。

## ■ 目標達成を判断する指標

- 廃棄物ストリームを更新する。(2020年度)
- インプット整理表を更新する(2020年度)

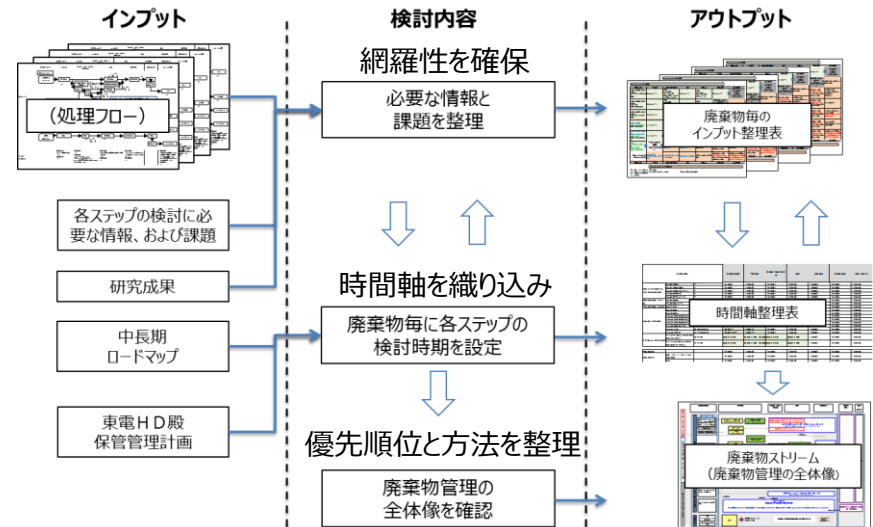


図1 廃棄物ストリーム検討の全体像

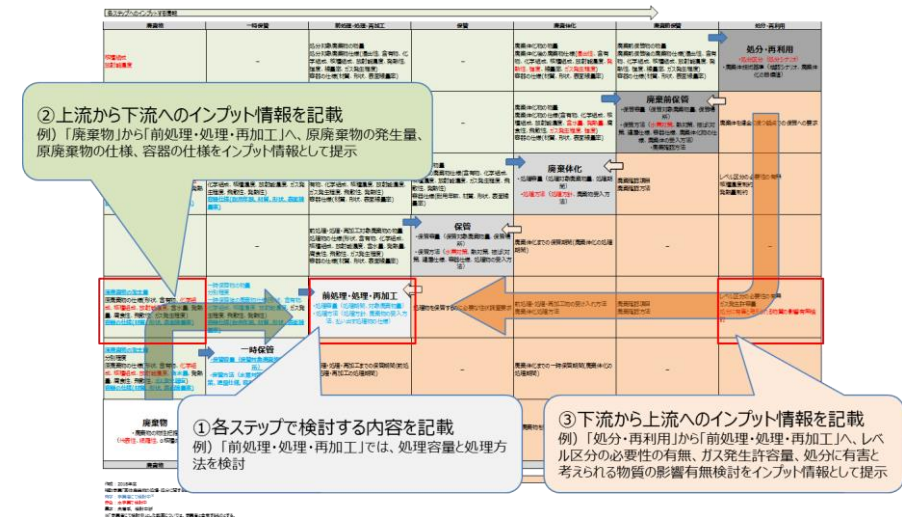


図2 インプット整理表の例

## d.研究開発の統合 ～背景と目標～

### 背景

- 1Fには多種多様な廃棄物があり、サイトの安全性への影響の観点で緊急性が異なり、また、性状が不明なものもある。
  - ✓ IRIDでは、既に発生しているものと今後発生すると予想されるものを含めて、2018年度末時点で890種類の固体廃棄物を見込み、リスト化している。廃棄物の種類は更に増える可能性がある
- これらを安全に処理し保管して、処分に向けた道筋を示す必要がある。
  - ✓ 中長期ロードマップでは、廃棄物の「処理・処分方策とその安全性に関する技術的な見通し」を2021年頃に得ることとしている
    - ① そのためには、固体廃棄物の発生から保管、処理(分別・減容・安定化等)を経て、長期保管あるいは処分にいたる流れ(廃棄物ストリーム)を整備する必要がある
    - ② 本補助事業では、廃棄物の性状に応じて複数の選択肢を持つ廃棄物ストリームの絞り込みに取り組み、取り組みを通じて、課題を抽出している。
- 一方、廃棄物の性状把握や処理・処分方策の安全性に関する研究の完了には時間を要する。
  - ✓ 研究開発全体を合理的、効率的に進める必要がある
    - ① 本補助事業では、研究開発の項目毎に情報を相互にフィードバックしながら進めることで研究開発全体の合理化・効率化を図っている。「研究開発成果の統合」の役割)

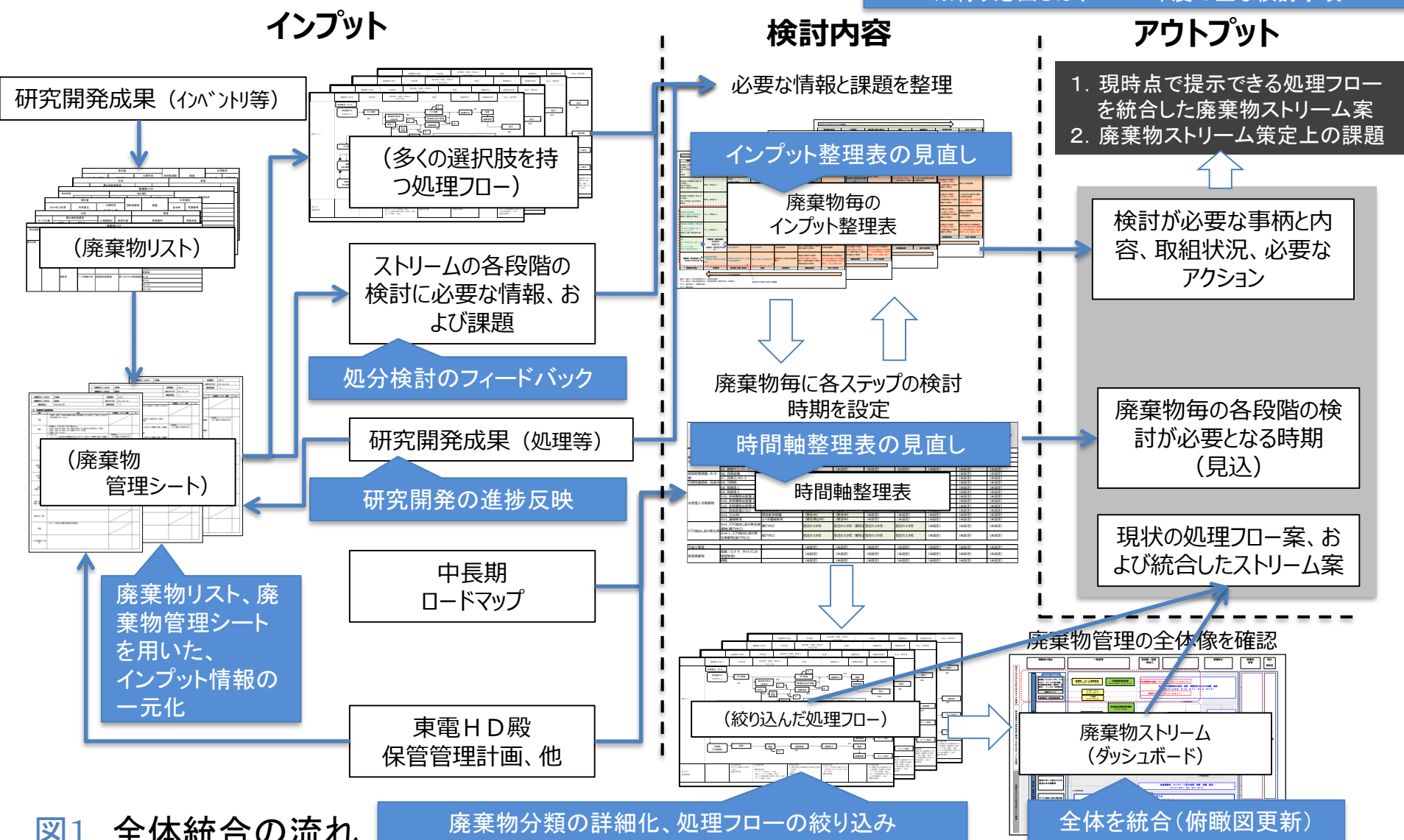
### 本補助事業のうち、研究開発成果の統合の目標

- 中長期ロードマップ第三期(2021年以降)に向けて、次を提示する。
  - ✓ 現時点で提示できる更新したインプット整理表・廃棄物ストリーム案
  - ✓ 廃棄物ストリーム策定にあたっての課題の評価結果

# d.研究開発の統合

～本補助事業における全体統合(廃棄物ストリーム策定)の流れ～

※青吹き出しは、2019年度の主な検討事項



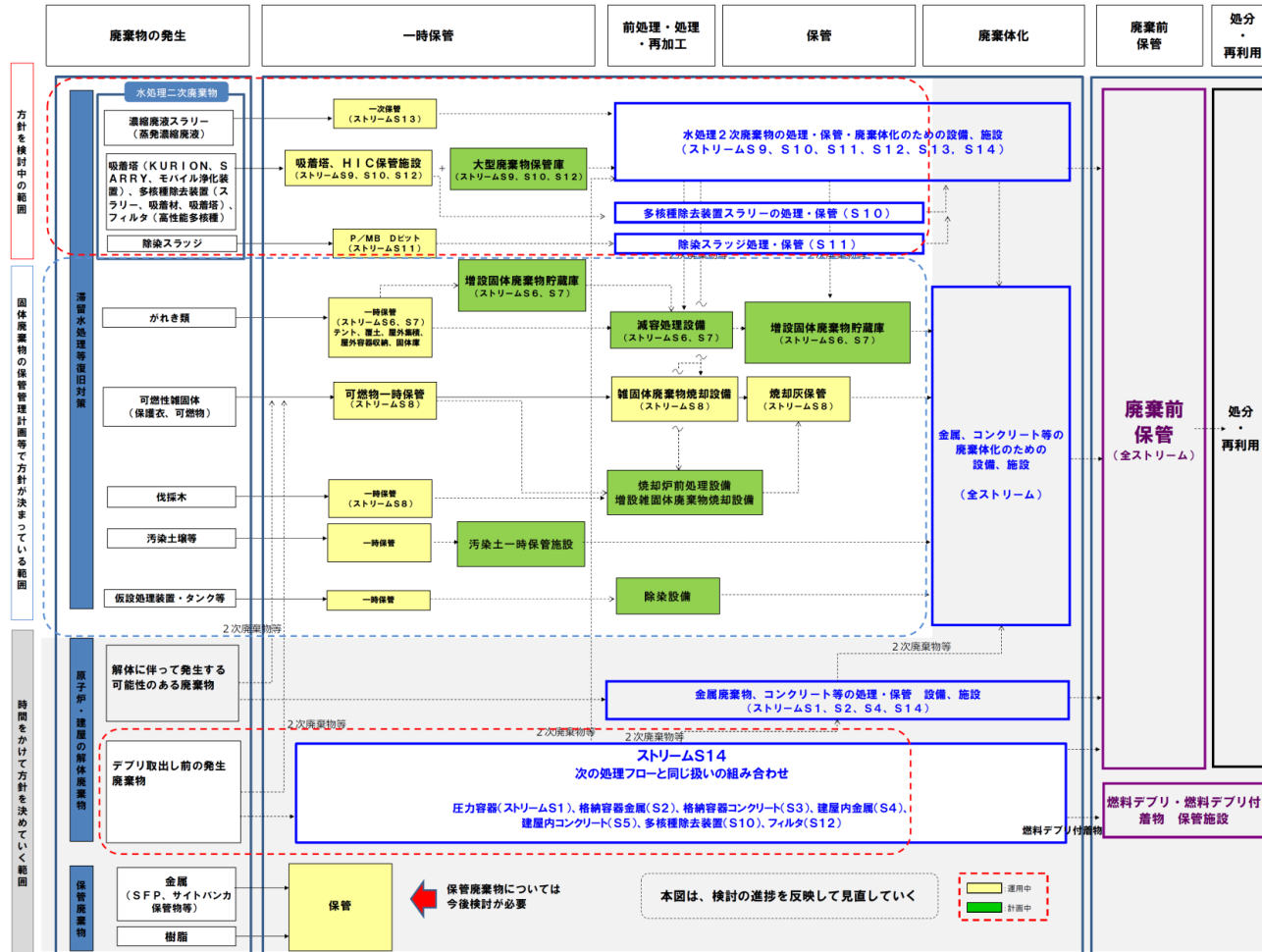


# d. 研究開発の統合

～本補助事業で現在まとめている1F廃棄物処理の全体像～

(廃棄物ストリームのダッシュボード)

全体を統合し着実に研究開発成果を積み上げているが、処理・処分の成立性を見通すには、情報が不足する中においても、更に踏み込んだ処理フローの絞り込みが必要。



青枠は、更に踏み込んだ検討が必要な部分

図1 廃棄物ストリームのダッシュボード(2018年度作成)

# d. 研究開発の統合

～処理フロー絞り込み検討の事例と現状の課題（HICスラリーの事例）～

①前処理・処理・再加工に複数の選択肢がある

②廃棄体化する方法に複数の選択肢がある

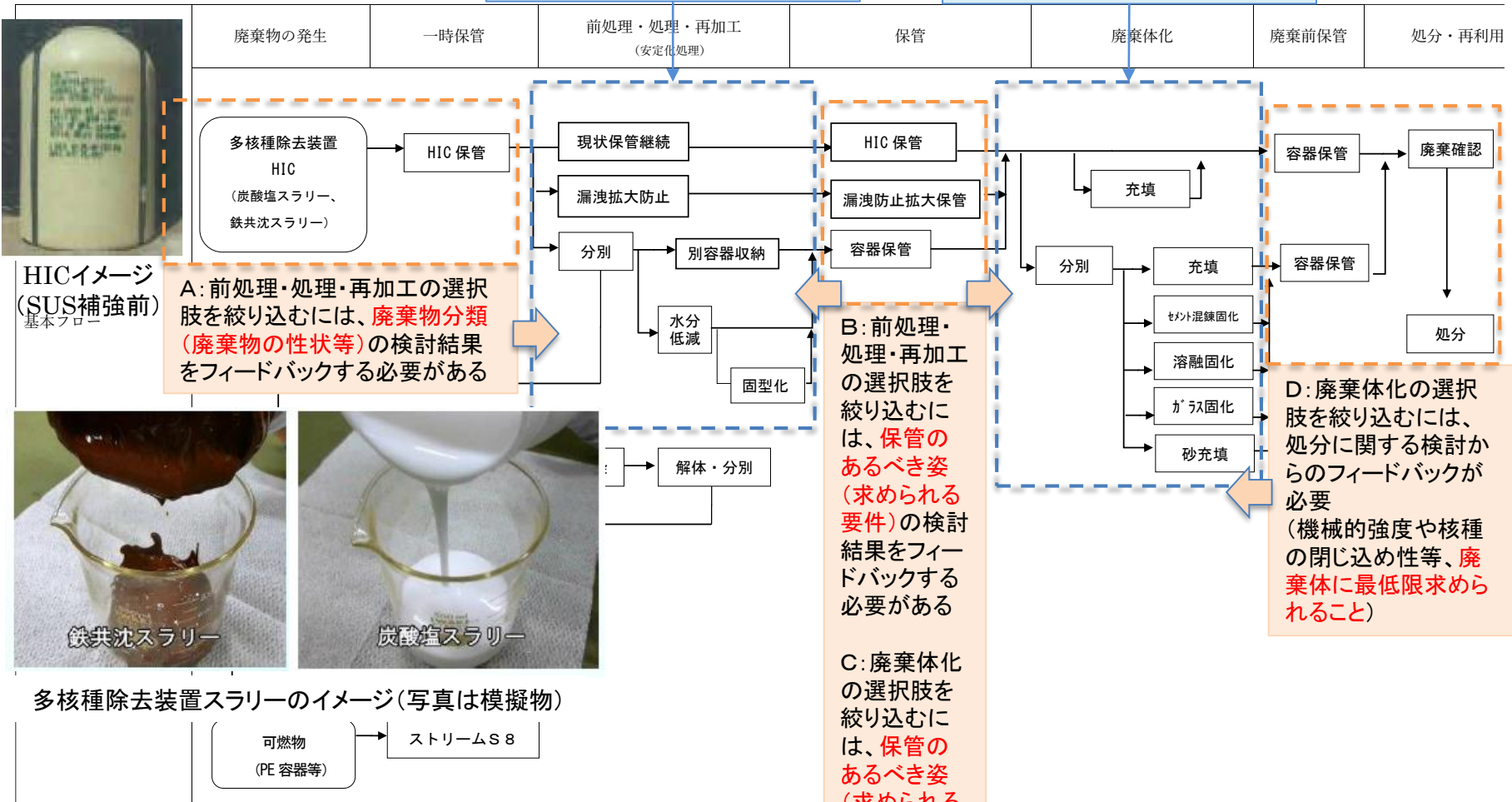


図1 処理フロー絞り込みの事例と現状の課題 (HICスラリーの事例)

## d.研究開発の統合

### ～現状の課題に対する検討方針～

1. 廃棄物分類について、性状把握から処分まで、各段階の検討に用いるものに整合性があることが必要

#### <検討方針>

- a. 先々の放射能評価につなげるために分類を再整理。
- b. インベントリ情報等を廃棄物リストに集約し一元管理していくことを検討。
- c. 既に作成済みの処理フローを核種種類や物量等を考慮したフローに改訂。

2. 保管のあるべき姿の具体化が必要

#### <検討方針>

- a. 保管のあるべき姿を検討し、それに必要な前処理・処理・再加工を検討。

3. 廃棄体に最低限求められる要件を示すことが必要

#### <検討方針>

- a. まずは廃棄体に閉じ込め等の性能を極力求めない場合について、処分概念の検討と協力し、成立性を確認。

# d. 研究開発の統合

～現状の課題に対する検討方針～

## 1. 廃棄物分類について

1Fの固体廃棄物は、先々の放射能評価につなげるために、大きく以下の4つに分類することが適切と考え、各廃棄物の定義(案)、特徴を検討した。また、この分類の詳細化を実施した。

(1)解体廃棄物、(2)瓦礫類、(3)水処理二次廃棄物、(4)その他(運転中廃棄物を含む)

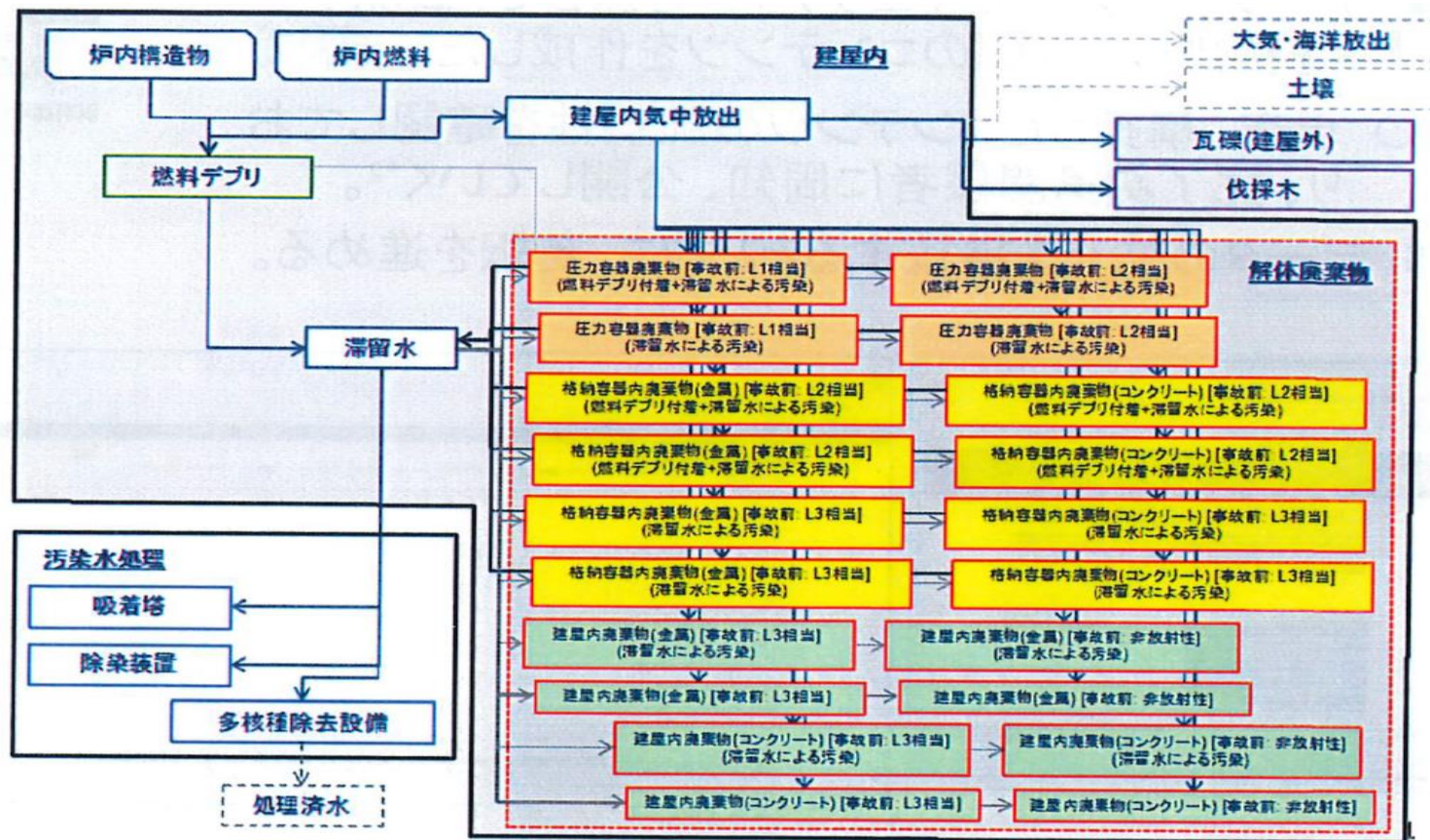


図1 汚染に基づく廃棄物の分類※

※固体廃棄物の処理・処分にに関する研究開発 中間報告(平成30年4月5日) 汚染に基づく廃棄物分類から引用



## d.研究開発の統合

### ～現状の課題に対する検討方針～

#### (1) 解体廃棄物

##### 1.廃棄物分類について

定義(案)	廃止措置計画に則り廃棄物発生時点で廃棄物性状毎に容器単位で内容物が管理されているもの。
特徴	事故前から1Fに存在し、放射化汚染等しているものもある。

#### (2) 瓦礫類

定義(案)	金属、コンクリートが主体であるが、有機物(工事で発生するガムテープや養生)等も混合しており、内容物が管理されていないもの。
特徴	事故前から1Fに存在しているものもあり、インベントリや材質等の性状のバラツキが大きい。

#### (3) 水処理二次廃棄物

定義(案)	汚染水処理設備から発生する使用済吸着材等の廃棄物。なお、汚染水処理設備そのものの解体廃棄物は含まない。
特徴	インベントリや含水率等の性状は発生時期や発生元の水処理設備により差があるが、吸着材等の種類毎に発生時点で分別管理されている。

#### (4) その他

定義(案)	上記、解体廃棄物、瓦礫類、水処理二次廃棄物に含まれないもの。
特徴	材質やインベントリ、物量、性状等、バラツキが大きく、一律に定義することが困難。





# d.研究開発の統合

## ～現状の課題に対する検討方針～

### 2.保管のあるべき姿について

「原子力安全の基本的考え方について」(日本原子力学会)より

#### 原子力安全の目的

人と環境を、原子力の施設と活動に起因する放射線の有害な影響から防護することである。

#### 原子力安全の基本原則

原子力安全	カテゴリ	原則	
人と環境を放射線リスクから防護する	1 責任とマネジメント	1 安全に対する責務	組織、体制に関わるもの (将来検討するもの)
		2 政府の役割	
		3 規制機関の役割	
		4 安全に対するリーダーシップとマネジメント	
		5 安全文化の醸成	
	2 人及び環境の防護	6 原子力施設と活動の正当性の説明	これらの観点から保管では、敷地境界線量を低減し、漏えい飛散を防止する必要がある
		7 人及び環境へのリスク抑制とその継続的取り組み	
	3 放射線リスク源の閉じ込め	8 事故の発生防止と影響緩和	避難等の防災措置が対象 (将来検討するもの)
		9 緊急時の準備と対応	
		10 現存する放射線リスク又は規制されていない放射線リスクの低減のための防護措置	

## d.研究開発の統合

### ～現状の課題に対する検討方針～

#### 2.保管のあるべき姿について

原子力安全を考慮した

### 保管のあるべき姿(案)

- 放射線の遮へいを担保。
- 放射性物質の閉じ込めを担保。(漏えい・飛散させない、また、しにくい状態を維持)
- 気体等を管理放出する場合、保管設備の換気空調系で放射性物質が十分希釈されていることを担保。  
(水素ガスを容器ベントを通じて放出する場合等)

上記を原則とし、将来の廃棄体化処理や、保管における安全性の確保等を勘案し、廃棄物毎に保管形態を検討する。

例えば、2019年度は、具体例で示したスラリー等の水処理二次廃棄物に対して、以下を想定。その他の廃棄物も保管のあるべき姿に従い、2020年度も検討する。

- 放射線は、保管施設で遮へいするものと想定した場合を検討。
- 放射性物質は、容器及び保管施設で閉じ込めるものと想定した場合を検討。  
更なる漏えい・飛散の不確実性(リスク)低減のため、可能な限り自由水を低減する。将来の廃棄体化処理への影響を勘案し、固型化処理は行わないものと想定した場合を検討。
- 廃棄物から発生する気体は、管理放出するものとした。保管施設の換気空調系にて、放射性物質が十分希釈されていることを担保するものと想定した場合を検討。

保管のあるべき姿について、機能要求の観点からも検討を継続する

## d.研究開発の統合

### ～現状の課題に対する検討方針～

### 3.廃棄体に最低限求められる要件について

廃棄物ストリームの廃棄体化処理を絞り込むうえで影響が大きい因子を抽出

- (1) 「固型化の要否」は、廃棄物ストリームを検討するうえで、特に影響が大きい。
- (2) 「無機化、無害化の要否」は、廃棄物ストリームを絞り込むうえで影響が大きい。

廃棄体性能を極力求めない場合の廃棄物ストリームを検討

- ① 技術的見通しを得るため、廃棄体化処理において可能な限り設備導入が少なく、処分まで成立するケースを検討し、それを廃棄物ストリームのケース1(ベースケース)とする。
- ② まず、廃棄体化処理(設備導入)を最小とするため、廃棄物の処分時に廃棄体に閉じ込め等の廃棄体性能を求めない廃棄物ストリームを構築し、その成立性を検討する。
- ③ ケース1では、課題を抽出するため、減容は考慮しない。(導入/計画済みの設備を除く)
- ④ ケース1を基に、その他のケースも検討していく。





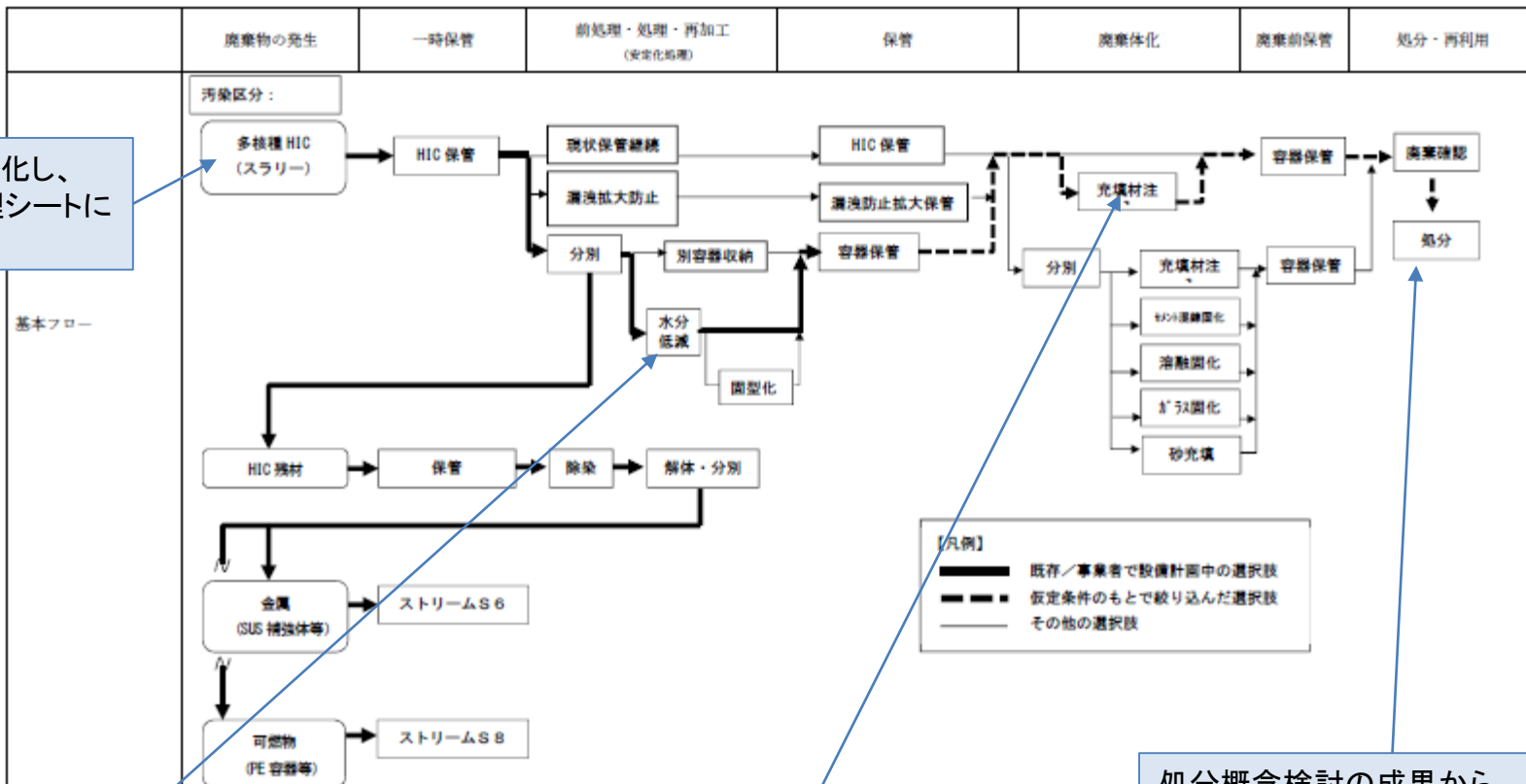


# d. 研究開発の統合

## ～処理フローの絞り込み案～

主要な水処理二次廃棄物に対して、保管のあるべき姿の検討結果や廃棄体に最低限求める機能の検討結果を踏まえ、処理フローの絞り込みを行った。

分類を詳細化し、廃棄物管理シートにまとめた。



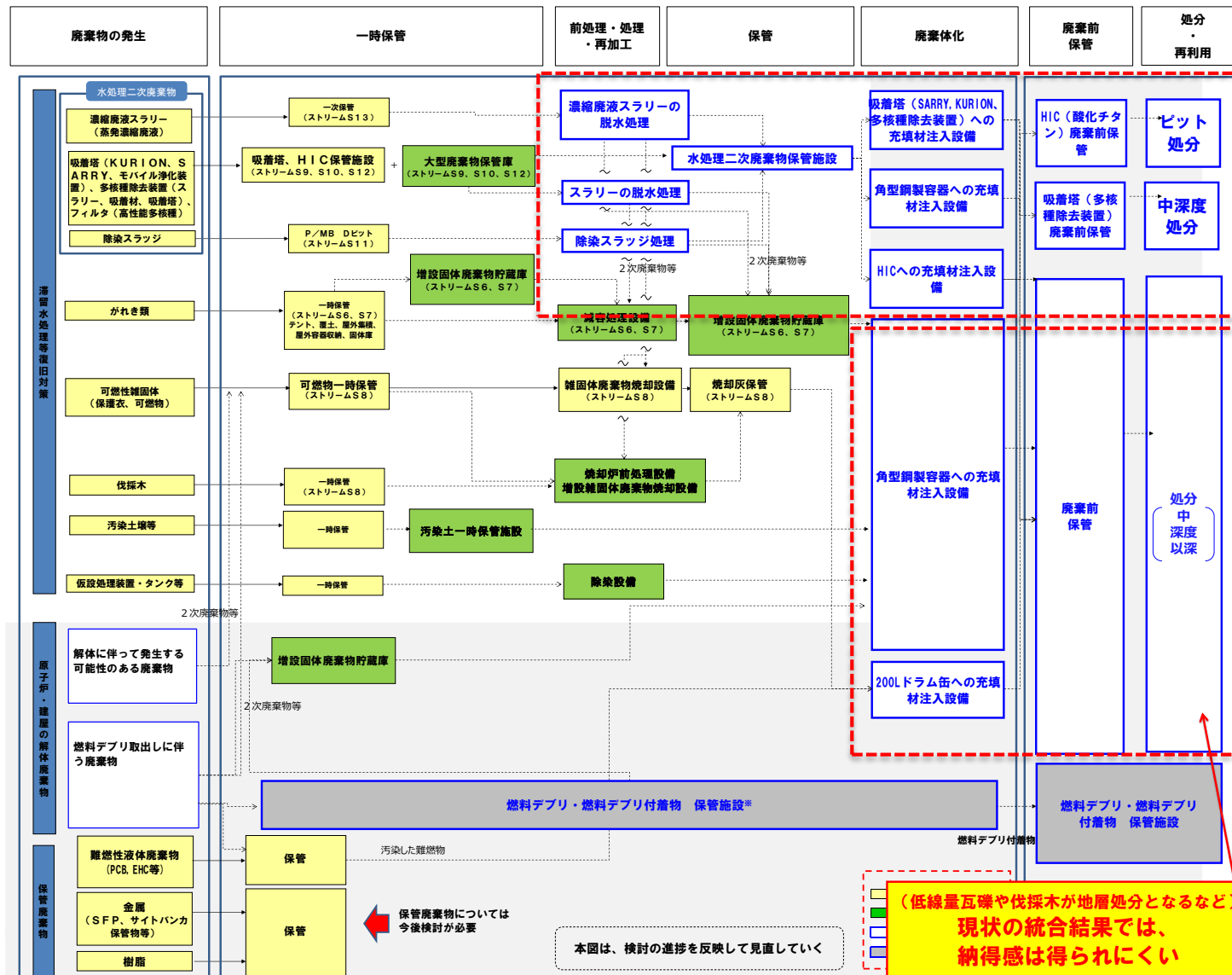
東電HD設計画及び保管のあるべき姿の検討から、水処理二次廃棄物は水分を低減するものとした。固型化は行わないものとした。

廃棄体に最低限求める要件の検討から、最低限の対応として、充填材を注入するものとした。この際、保管容器を廃棄体容器として流用するものとした。

処分概念検討の成果から、地層処分(余裕深度以深)とした。また廃棄体確認は、廃棄体化処理設備でのプロセス検認とした。

# d. 研究開発の統合

## ～廃棄物ストリーム(ダッシュボード)への反映例～



赤枠は、処理フロー絞り込み検討結果の反映例

(低線量瓦礫や伐採木が地層処分となるなど)  
現状の統合結果では、  
納得感は得られにくい

図1 廃棄物ストリーム(ダッシュボード)への反映例

※燃料デブリ取り出しに関する研究開発の検討結果を反映していくものとする  
2019/9/23 策定 3444-3451 ページ 1/1

## d.研究開発の統合

### ～まとめ～

### 2019年度の成果まとめ

1. 廃棄物分類を見直しの上で詳細化し、廃棄物管理シートをまとめた。
2. 保管のあるべき姿(案)を検討し、それに必要な処理を検討した。
3. 廃棄体性能を極力求めない場合について検討し、各研究開発の成果を取り込んだ上で、現状示せる、最も処理が少ない(処分側の負担が大きい)と考えられる廃棄物ストリーム案を構築した。

### 2019年度の研究開発を通して認識した、第三期に向けた主な課題

- ✓ ケース1での研究開発成果の統合結果について、現状の評価からは、比較的低線量な廃棄物である低線量瓦礫(表面線量率0～5 $\mu$ Sv/h)や伐採木等でも浅地中以浅に処分するためには固化や人工バリアなどの対策が必要となることが示唆された。合理性の観点で更なる検討が必要である。特に、検出下限値以下の重要核種(C-14やI-129)の設定について、汚染メカニズムからのインベントリ推定の確度向上が重要。
- ✓ ケース1の検討では、廃棄体化処理で有害な空隙対策が必要とし、現行の保管容器の廃棄体容器への流用や、廃棄体性能のプロセス検認を前提条件とした。成立性の担保には、これらの前提条件に対する技術面での裏付けを廃棄物毎に確認することが必要。

### 2020年度の計画(案)

ケース2として、現行の軽水炉の考え方を1F廃棄物へ適用した場合の廃棄物ストリームを構築する。  
(処分を除く)

### 3. 研究開発の運営

## ～ 人材育成、叡智の結集、条件・仕様の明確化、指標の設定～

- 中長期的視点での人材育成
  - 「IRID シンポジウム 2019 in いわき」(2019年8月1日)において、研究成果や今後の計画をパネルを用いて説明し、理解促進及び啓発活動を行った。
  - 日本原子力学会秋の大会(2019年9月13日～15日)において、12件の研究成果を発表し、理解促進及び啓発活動を行った。
- 国内外の叡智の結集
  - 2014年度来、研究機関(電力中央研究所)との協力を継続するとともに、海外研究機関への同種事例の情報調査を行い、有識者・経験者から有益な情報収集を行った。
  - 本事業において目指すべきアウトプット等の妥当性確認のためIRIDで内外有識者による設計レビューを実施。(2019年6月4日、7月19日、12月10日、2020年2月25日)
- 試験条件や開発仕様の明確化
  - 2019年6月4日にIRIDで実施した内外有識者による設計レビューにより、前提条件、仮定条件、事業のアウトプット内容等の意見交換を行を行い、試験条件や仕様の明確化を図った。
- 目標達成を判断する指標の設定
  - 着手にあたって、事業の目標達成の判断基準となるべき指標の検討を行い、目標とする技術成熟度(TRL)を設定した。



## ～ 他の研究開発との連携、研究管理、作業管理～

### ■ 廃炉作業や他の研究開発との連携

- 関連プロジェクト間にて定期的な打合わせを実施することにより、各プロジェクトの進捗状況、及び課題などに関する情報を共有した。また、これまでに構築している事業計画や成果の情報管理を共有化するしくみ(アーカイブ)を継続・活用した。
- 燃料デブリ取り出しに係る廃棄物処理・処分に関する研究開発を遺漏なく推進するため、収納缶プロジェクト及びデブリ取プロジェクトとのワーキングに参画し、それぞれのプロジェクトにおける情報共有を図った。

(2019年4月22日、5月20日、6月17日、2020年2月18日)

### ■ 研究の管理

- 本事業に係る関係者が一同に会した会議(廃棄物処理・処分プロジェクト調整会議)を毎月定期的に行い、研究開発のスケジュールと進捗状況を共有するとともに、発生した問題点などについての解決方針などを定め、対策を展開した。

(2019年4月5日、5月10日、6月6日、7月4日、8月2日、9月5日、10月3日、11月5日、  
12月6日、2020年1月9日、2月2日、3月2日※ ※書面会議)

### ■ 福一等の現場情報の反映と現場適用性を考慮した作業管理

- IRIDと東京電力間で「福一の廃炉に向けた取り組みに関わる覚書」を取り交わし、東京電力の協力のもと必要となる管理体制を構築し、適切な安全対策を実施した。

## ～ 事業の報告、情報発信、代替案 ～

### ■ 事業の報告

- 2019年10月29日に第1回目の報告会を行うと共に、進捗状況について、毎月の月末における実績工程表をMRI 事務局へ提出した。

### ■ 情報発信の充実

- IRID ホームページに本事業の成果を掲載し、一般の人を対象にわかりやすく情報発信を実施した。また、日本原子力学会や海外機関などが開催する国内外の学会等で発表することにより、本事業成果の情報発信を行った。

### ■ 代替案の事前準備

- 事業実施期間中は、事業が予定通りに進捗しなかった場合に備え、必要に応じて、事前に代替案を検討することとしているが、本期間中には発生しなかった。