

# 福島第一原子力発電所の中期的リスクの低減目標マップ上の 課題の対応状況について（固体廃棄物関係）

2025年2月17日

**TEPCO**

東京電力ホールディングス株式会社

# 中期的リスクの低減目標マップ（固体廃棄物関係）

- 中期的リスクの低減目標マップ（固体廃棄物関係）を下記に示す。
- 本資料では、下記の廃棄物に対して設定された目標への対応状況について報告する。
  - a. 建屋解体物等 – 解体モデルケース検討
  - b. 瓦礫類等 – 表面線量率による放射能濃度管理手法の構築
  - c. 水処理廃棄物等 – 固化処理方針の策定

## 東京電力福島第一原子力発電所の中期的リスクの低減目標マップ

### 固形状の放射性物質：優先して取り組むべきリスク低減に向けた分野

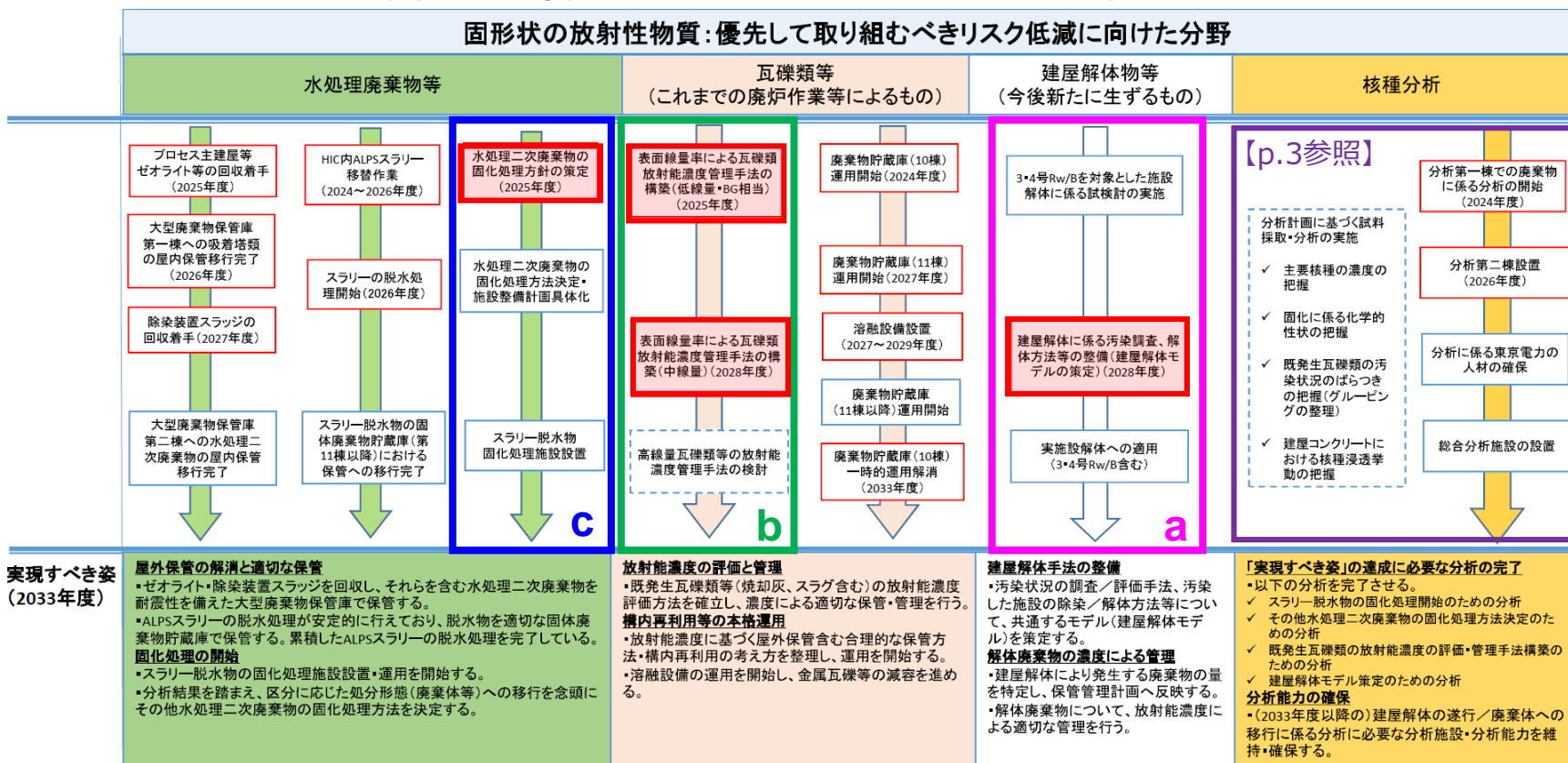


表 リスクマップで示された実現すべき姿と直近の目標について

項目名	対象廃棄物	実現すべき姿 (2033年度)	ねらい	直近の目標	
				目標内容	目標年度
a 解体モデルケース 検討	建屋解体物等 (将来の建屋解体に伴い発生する廃棄物)	建屋解体手法の整備	<ul style="list-style-type: none"> <li>汚染状況に応じた建屋解体手法等を整備することで、将来の建屋解体に伴い発生する廃棄物量の抑制、合理的な放射能濃度管理を実現する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>建屋解体に係る汚染調査・評価、除染・解体、廃棄物対策等に関する一連の試検討を実施する。</li> <li>試検討結果に基づき、廃棄物量の削減、合理的な放射能濃度管理を念頭に置いた建屋解体手法の整備を行う。</li> </ul>	2028
		<ul style="list-style-type: none"> <li>汚染状況の調査／評価手法、汚染した施設の除染／解体方法等について、共通するモデル（建屋解体モデル）を策定する。</li> </ul>			
b 放射能濃度 評価手法の整備	瓦礫類等 (既発生の瓦礫等)	放射能濃度の評価と管理	<ul style="list-style-type: none"> <li>これまで表面線量率による管理を行ってきた瓦礫類等について、放射能濃度管理に移行させる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>保管容器に収納された既発生 of 瓦礫類を対象とした表面線量率による放射能濃度評価手法を整備する。</li> </ul>	2028
		<ul style="list-style-type: none"> <li>既発生瓦礫等（焼却灰、スラグ含む）の放射能濃度評価方法を確立し、濃度による適切な保管・管理を行う。</li> </ul>			
c 固化処理方針の 策定	水処理二次廃棄物	固化処理の開始	<ul style="list-style-type: none"> <li>ALPSスラリーをより安全で安定的な形態での保管に移行させる。</li> <li>廃棄物ストリーム全体を俯瞰した合理的な固化処理方針を具体化する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>水処理二次廃棄物の固化処理に対する要件を明確化し、固化処理方針を策定する。</li> <li>ALPSスラリーを中心に、水処理二次廃棄物全体を俯瞰して検討を進める。</li> </ul>	2025
		<ul style="list-style-type: none"> <li>スラリー脱水物の固化処理施設設置・運用を開始する。</li> <li>分析結果を踏まえ、区分に応じた処分形態（廃棄体等）への移行を念頭にその他水処理二次廃棄物の固化処理方法を決定する。</li> </ul>			

直近の目標に対する対応状況を報告

- 「核種分析」については、それぞれの検討において必要な分析データを抽出・整理し、試料採取・分析計画を策定している。試料採取・分析の計画及び実施状況は、それぞれの検討に含める形で整理している。
- また、廃棄物毎の分析ニーズを踏まえた分析計画を統合し、「東京電力福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた固体廃棄物の分析計画」を策定しており、2025年度版を年度内に公表予定である。策定した分析計画に基づく今後の分析ニーズの見通しを踏まえて、分析施設の設置、人材育成等の分析能力の整備を進めている。
- 核種分析に係る個別の課題として、第23回技術会合（2024.12.5）において下記について議論が行われている。それぞれの概要についても本資料に記載した。
  - ① 1F 固体廃棄物分析における分析対象核種の選定について【参考資料(p.35)に記載】
  - ② ALPS スラリーの当面の分析計画について【固化処理方針の策定にて記載】

# 解体モデルケース検討の検討状況 (概要)

# リスクマップ目標に対する検討フロー

- 解体モデルケース検討のフローを下図に示した。
- 当面の目標は、3・4号Rw/Bを対象とした試検討による建屋解体に係る汚染調査、解体方法等の整備である（2028年度目標）。

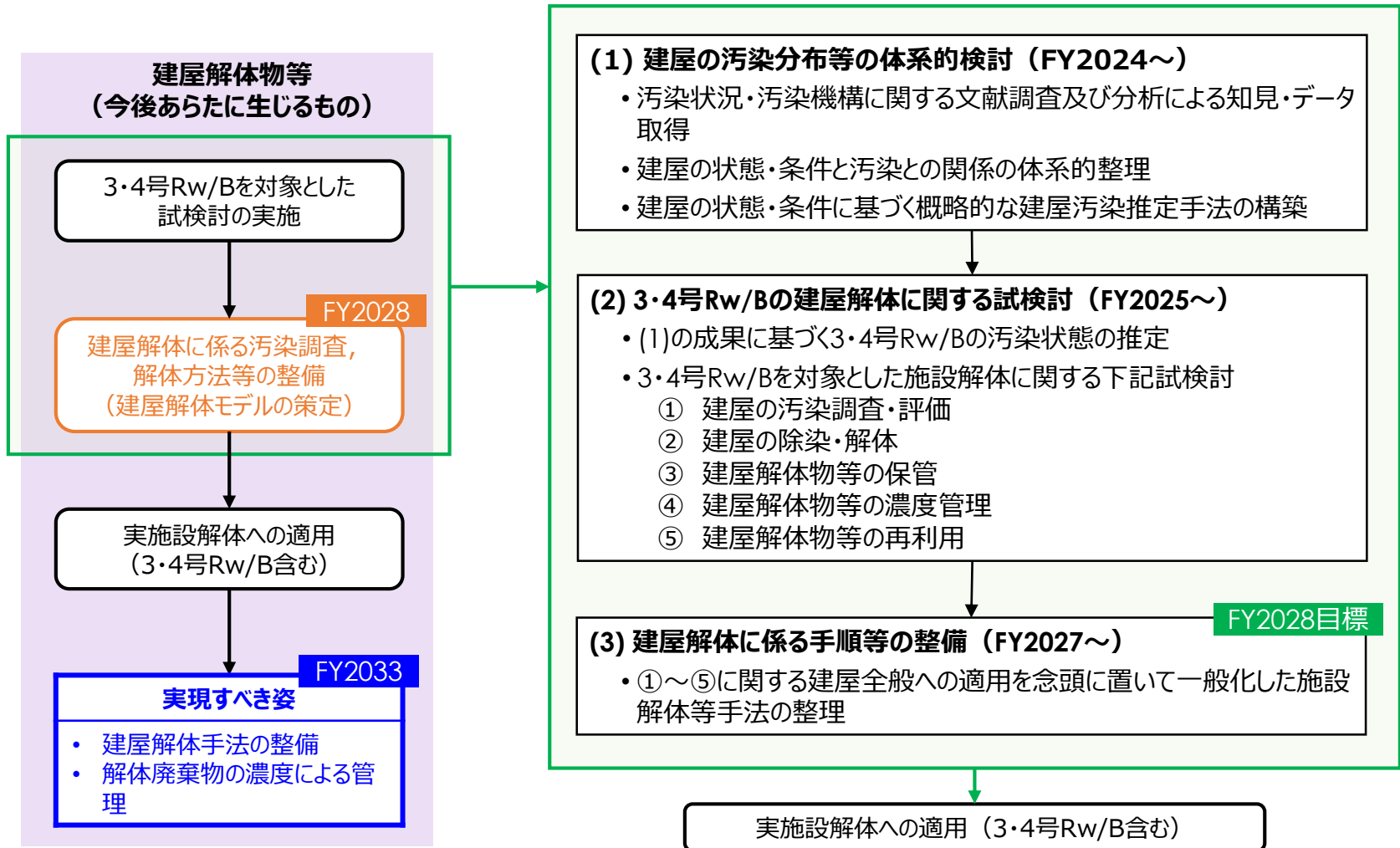


図 解体モデルケース検討の流れ

表 解体モデルケース検討工程（目標）※

	年度					実現すべき姿（2033年度）
	2024	2025	2026	2027	2028	
<b>(1) 建屋の汚染分布等の体系的検討</b>	文献調査					<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">                     ・ 試料採取が困難な滞留水接触部位などの分析は時間を要する見込み。廃炉作業と連携し、対象範囲を拡大していく。                 </div> <div style="border: 2px solid blue; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <b>実現すべき姿（2033年度）</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 建屋解体手法の整備</li> <li>・ 廃棄物量の特定、保管管理計画への反映</li> <li>・ 解体廃棄物の濃度による管理</li> </ul> </div>
	↓					
	仮定に基づく予備検討					
	↓					
	建屋の汚染状況調査（分析）					
<b>(2) 3・4号Rw/B建屋解体試験検討</b>						<div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">                     建屋の汚染調査・評価方法                 </div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">                     建屋解体・除染方法（発生量評価含む） <span style="color: purple;">[e]</span> </div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">                     合理的な保管方法の検討                 </div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">                     放射能濃度管理方法の検討                 </div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">                     廃棄物の再利用方法の検討                 </div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">                     ↓ ② 試検討結果                 </div>
<b>(3) 建屋解体等に係る手順等の整備</b>						<div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">                     建屋の汚染調査・評価手法の構築 <span style="color: purple;">[d]</span> </div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">                     建屋の除染・解体手法の構築 <span style="color: purple;">[d]</span> </div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">                     建屋解体物等の保管方法の構築 <span style="color: purple;">[b]</span> </div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">                     建屋解体物等の濃度管理手法の構築 <span style="color: purple;">[a]</span> </div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">                     建屋解体物等の再利用手法の構築 <span style="color: purple;">[c]</span> </div>

2024年度の実施事項

- 1) 汚染に係る文献調査
- 2) 仮定に基づく予備検討（調査の着目点整理）
- 3) 建屋の汚染調査

※：研究性が高い検討であることから、検討工程は途中経過を踏まえて必要に応じて適宜更新する。

# 2024年度の検討内容及び主な成果

## (1) 建屋の汚染分布等の体系的検討

### 1) 建屋の汚染状況・汚染機構に関する文献調査

- 国内外の文献調査により、コンクリートの汚染分布・汚染機構に関する知見を収集した。
- 文献調査の結果から、建屋コンクリート汚染に対する影響因子を抽出し、今後実施する建屋汚染調査（試料採取及び分析）における着目点を抽出した。【p.9】
- 影響因子の組み合わせにより建屋の汚染状況のパターン化を行い、各因子の影響が評価できるように試料採取計画を検討した。

### 2) 仮定に基づく予備検討

- 文献調査の結果を踏まえて、建屋（3・4号Rw/Bを想定）の汚染メカニズム・汚染状態を仮定し、解体方法を仮設定した。
- 上記の仮定及び仮設定の妥当性確認及び評価の定量化に向けた建屋汚染調査（試料採取及び分析）の確認事項を整理した。【p.9】

### 3) 建屋の汚染状況調査

- 上記の検討により策定した試料採取計画に基づき、実際の建屋からの試料採取を実施した（コンクリートコア：53試料、はつり試料：13試料（2024年度予定分））。【p.10】



## 2024年度の主な成果

- 国内外文献に基づく建屋コンクリート汚染に関する科学的知見の整備
- 建屋コンクリート汚染に係る影響因子の抽出・整理
- 建屋の汚染状況調査（試料採取及び分析）における着目点と確認事項の整理
- 着目点及び確認事項を踏まえた試料採取計画の策定
- 建屋からの分析試料の採取の実施



# 2025年度以降の検討内容

## (1) 建屋の汚染分布等の体系的検討（～2027）

### 3) 建屋の汚染状況調査（継続）

- 調査（試料採取・分析）を継続する。サンプリングが難しい滞留水接触領域等に調査範囲を拡大していく。

### 4) 建屋部位・条件毎の汚染状態推定方法の構築

- 文献調査及び建屋汚染調査結果を踏まえた建屋の状態・条件に基づく概略的な建屋の汚染状態推定手法を構築する。

## (2) 3・4号Rw/B建屋解体試検討（2025～2027）

- (1)の成果に基づき、3・4号Rw/Bの汚染状態の推定を行う。
- 3・4号Rw/Bを対象とした施設解体に関する試検討を実施する（検討事項の案は下表参照）。

表 建屋解体に係る試検討の検討事項

検討事項	検討概要
汚染調査・評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>解体着手前に建屋の汚染状態を把握するための調査項目・確認事項及び評価方法を整備する。</li> <li>解体作業の各プロセスにおける汚染等に関する調査項目・確認事項及び評価方法を整備する。</li> <li>上記に対応する測定技術・手順等を整理する。</li> </ul>
除染・解体	<ul style="list-style-type: none"> <li>汚染状況に応じた具体的な解体プロセス及び除染・分別の手順・方法・技術の整備を行う。</li> <li>検討した解体プロセス及び除染・分別により発生が想定される廃棄物種類・性状・量を推定する。</li> </ul>
放射能濃度管理	<ul style="list-style-type: none"> <li>解体に伴い発生する廃棄物について、解体プロセス及び除染・分別を踏まえた放射能濃度管理手法の構築を行う。</li> <li>放射能濃度管理を行うための解体作業における管理項目及び記録事項の具体化を図る。</li> </ul>
廃棄物保管	<ul style="list-style-type: none"> <li>廃棄物性状に応じた合理的な保管方法を検討する（屋外保管を含む）。</li> <li>解体廃棄物の管理区分、保管容器、保管方法、保管施設について検討を行う。</li> </ul>
再利用	<ul style="list-style-type: none"> <li>解体に伴い発生する廃棄物の再利用方法について検討を行う（構内再利用等を含む）。</li> </ul>

## (3) 建屋解体等に係る手順等の整備（2027～2028）

- 試検討の結果に基づき、建屋全般への適用を念頭に置いて一般化した施設解体等の手法の整備を行う。

- 文献調査の結果等より抽出した建屋汚染調査（分析）における主な着目点

表 建屋汚染調査（分析）における主な着目点

分類	着目点
採取位置 曝露環境	<ul style="list-style-type: none"> <li>雨水接触による放射能濃度及び核種濃度比の変化の傾向</li> <li>滞留水との接触条件（放射能濃度・接触時間等）と核種毎の浸透深さの関係</li> <li>乾湿を繰り返した場合の核種毎の浸透深さの関係</li> </ul>
表面状態	<ul style="list-style-type: none"> <li>塗装・保護層による核種浸透抑制効果の確認</li> <li>塗装・保護層及び飛散防止材への核種吸着の確認</li> <li>飛散防止材による雨水による核種移行抑制効果の確認，核種濃度比の変化の傾向確認</li> </ul>
性状・ 劣化状態	<ul style="list-style-type: none"> <li>亀裂内での核種毎の分布傾向の確認</li> <li>炭酸化，溶脱領域における核種毎の浸透深さ（分布）の確認</li> <li>粗骨材への核種吸着状況の確認</li> <li>細骨材，結合材の組成の違いによる核種浸透挙動への影響確認</li> </ul>

- 仮定した建屋の汚染状態及び解体方法を踏まえた主な確認事項（期待事項）

- |   |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>塗装・保護層が健全且つ滞留水と接触履歴の無い領域は，塗装・保護層の剥離で十分な除染効果が得られないか（塗装・保護層による核種浸透抑制）。</li> <li>コンクリートが露出し且つ滞留水と接触履歴の無い領域は，炭酸化深さをはつり厚の目安にできるのではないか（炭酸化領域内での核種吸着性の向上による核種浸透抑止）。</li> <li>亀裂内の汚染分布の確認により，除去する（切り離す）必要がある亀裂の条件（安全確保の観点から容認できない放射エネルギーの条件）を定義できないか。</li> <li>細骨材・結合材の仕様によって，核種の浸透が抑制されないか（核種吸着性の変化）。</li> <li>滞留水接触前の水分状態（事前の海水・地下水接触等）により，核種の浸透が抑制されないか（コンクリート間隙への水分浸入の抑制等）。</li> </ul> |
|---|

# 建屋からの試料採取計画・試料採取状況（2024年度）

- 汚染に対する影響因子の組み合わせにより建屋の汚染状況をパターン化し、各因子の影響の評価及び抽出した着目点・確認事項が評価できるように試料採取計画を検討した。
- 試料採取計画に基づき、分析試料の採取を実施した。

表 分析試料の採取計画・採取実績（2024年度分）

No.	位置 (建屋部位)		a. 採取位置（曝露環境）			b. 表面状態		c. コンクリート性状	試料採取数※		方針・着目点	
			雨水接触	滞留水接触	地下水接触	塗装・保護層	飛散防止材	亀裂	コア	はつり		
1	地上部	外壁	○						10	1	基本となる状態。 優先して試料採取を実施。	
2			○			○			22	4		
3			○				○			2		
4			○					○		1		
5		建屋内								4	2	特に飛散防止材 下の核種残存状 況に着目。
6						○				2		
7	地下部	外壁			○						基本となる状態。 優先して試料採取を実施。	
8		建屋内		○						8		6
9				○		○						1
										3		試料採取において制約が多く、 採取方法について検討を進める。

※：実施予定（年度内）のものを含むため、変更の可能性有

# 瓦礫類の放射能濃度管理手法構築の検討状況 (概要)

# リスクマップ目標に対する検討フロー

- 瓦礫類の放射能濃度管理手法構築のフローを下図に示した。
- 瓦礫類の材質、形状、汚染状態が多様であることから、まずは対象を破砕したコンクリートに絞って検討を進める（Phase.1）。

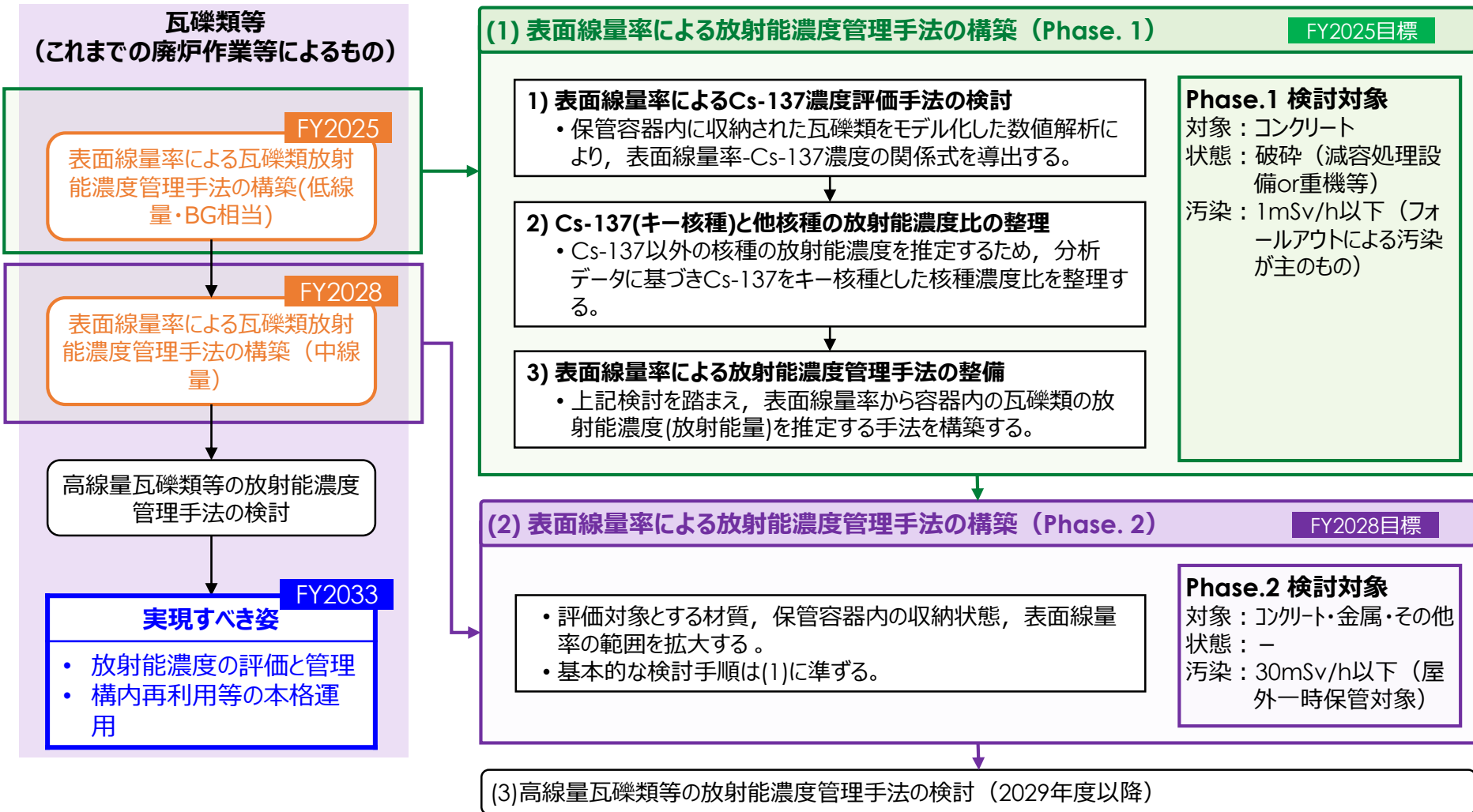


図 瓦礫類の放射能濃度管理手法構築の検討の流れ

表 瓦礫類の放射能濃度管理手法構築の検討工程（目標）※

	年度					
	2024	2025	2026	2027	2028	
(1) 表面線量率による放射能濃度管理手法の構築 (Phase. 1)	1) 表面線量率によるCs-137濃度評価手法の検討 (破碎したコンクリートを対象とした検討)	↓ 3)放射能濃度管理手法の検討 (Phase.1)			エビデンスの蓄積 (分析の継続)	<p><b>実現すべき姿</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>既発生瓦礫等（焼却灰、スラグ含む）の放射能濃度評価方法を確立し、濃度による適切な保管・管理を行う。</li> <li>放射能濃度に基づく屋外保管含む合理的な保管方法・構内再利用の考え方を整理し、運用を開始する。</li> <li>溶融設備の運用を開始し、金属瓦礫等の減容を進める。</li> </ul>
	2) Cs-137と他核種の放射能濃度比の整理 (低線量コンクリートを主とする分析)					
(2) 表面線量率による放射能濃度管理手法の構築 (Phase. 2)			1) 表面線量率によるCs-137濃度評価手法の検討 (材料・収納状況等の評価対象拡大)		エビデンスの蓄積 (分析の継続)	<p>[a]放射能濃度の評価手法の確立</p> <p>[b]放射能濃度による適切な管理を実施</p> <p>[c]放射能濃度に基づく合理的な保管方法構築、運用開始 (屋外保管含む)</p>
			2) Cs-137と他核種の放射能濃度比の整理 (材料・収納状況等の評価対象拡大)			
			3)放射能濃度管理手法の検討 (Phase.2) [a][b][c]			
(共通)		表面線量率の測定方法・技術等に関する調査・検討				
		許容可能なバラツキ・不均一性に関する評価 (安全評価パラメータスタディ)				

**2024年度の実施事項**

- 1) 破碎されたコンクリートの表面線量率 - Cs-137 濃度評価手法検討 (解析的手法による検討)
- 2) 核種濃度比の整理 (分析)

※：研究性が高い検討であることから、検討工程は途中経過を踏まえて必要に応じて適宜更新する。

## 1) 表面線量率によるCs-137濃度評価手法の検討

- ・保管容器内に収納された瓦礫類をモデル化した数値解析により、表面線量率-Cs-137濃度の関係式を導出する。
- ・容器への収納状況、汚染分布等の様々なバラツキ・不均一性の影響を評価し、合理的かつ保守的な濃度評価方法を検討する。

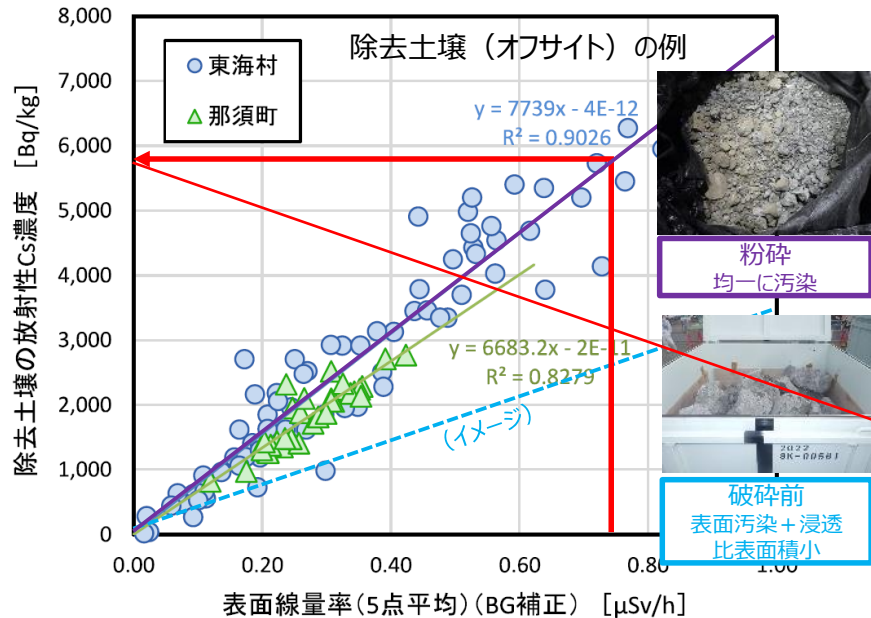


図 表面線量率 - Cs-137濃度の関係(イメージ)

表面線量率測定による放射能濃度の推計について  
(環境省環境再生・資源循環局,2020) より抜粋・加工

## 2) Cs-137(キー核種)と他核種の放射能濃度比の整理

- ・Cs-137以外の核種の放射能濃度を推定するため、分析データに基づきCs-137をキー核種とした核種濃度比を整理する。
- ・試料採取・分析を進め、分析データに基づき汚染傾向の類似性によるグルーピング及び核種毎の濃度評価方法の検討を行う。
- ・なお、構築した濃度評価方法は、継続的に分析データ収集を進め精度向上を図っていく。

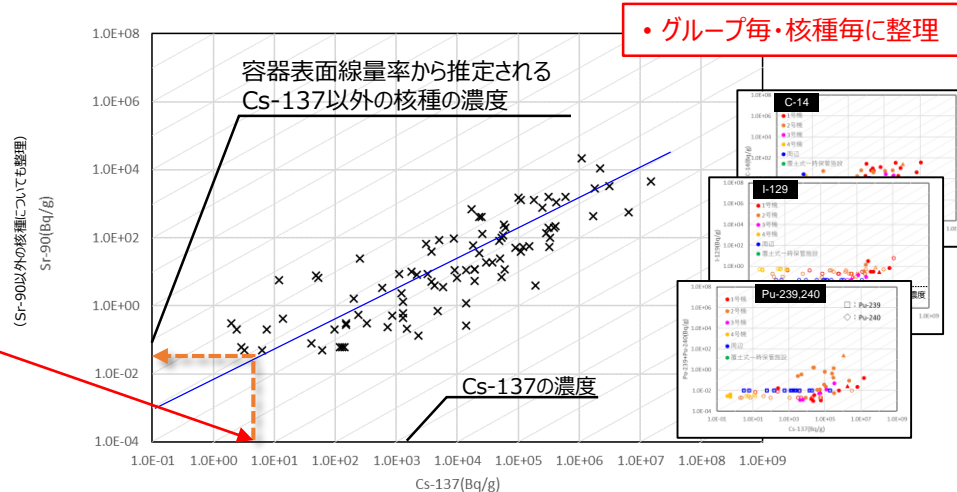


図 Cs-137濃度 - Sr-90濃度の関係 (イメージ)

## 3) 表面線量率による放射能濃度管理手法の整備

- ・表面線量率から保管容器内の瓦礫類の放射能濃度(放射能量)を推定する手法を構築する。
- ・予備的安全評価に基づき、安全確保の観点から許容可能なバラツキ・不均一性の検討を行う。
- ・表面線量率の具体的な測定方法・手順の具体化を図る。

# 2024年度の検討内容及び主な成果

## (1) 表面線量率による放射能濃度管理手法の構築 (Phase. 1)

### 1) 表面線量率によるCs-137濃度評価手法の検討

- 合理的な評価手法構築に向けて、2024年度は予察的評価として2次元数値解析による表面線量率－Cs-137濃度の評価に関するパラメータスタディ（感度解析）を実施した。
- パラメータスタディ結果に基づき、瓦礫の収納状況や汚染分布等のバラツキ・不確かさが結果（線量－濃度の相関性）に与える影響を整理し、合理的と考えられる表面線量率－放射能量（放射能濃度）の評価方針を検討した。【p.17】
  - 表面線量率測定データは容器内周近傍の狭い領域内の汚染箇所により支配される。
  - 線源数が増えると、線源の位置の不確かさに起因するバラツキの幅が低減する。
  - 粒子間の間隙中の細粒分の密度の不均一性が遮蔽体として及ぼす影響は軽微である。
  - 線源の放射能量のバラツキの影響は大きい。
  - 保管容器表面から測定できない領域が存在する。
- 評価方針を踏まえた解析モデルの考え方・イメージを整理した。【p.18】

### 2) Cs-137(キー核種)と他核種の放射能濃度比の整理

- 分析実施状況等を踏まえ、核種濃度比に関する評価方針を更新した。【p.19】
- 試料採取及び分析計画を更新し、瓦礫類の分析試料の採取及び分析を実施した（試料採取：265試料，分析：56試料（2024年度予定分））。【p.20】



### 2024年度の主な成果

- 表面線量率によるCs-137濃度評価における評価条件及びバラツキ・不確かさの影響の把握
- 表面線量率によるCs-137濃度評価の評価方針及び解析モデルの考え方・イメージの構築
- 瓦礫類の分析試料の採取及び分析の実施



# 2025年度以降の検討内容

## (1) 表面線量率による放射能濃度管理手法の構築 (Phase. 1) (～2025)

### 1) 表面線量率によるCs-137濃度評価手法の検討 (継続)

- 評価方針【p.17】及び解析モデルの考え方【p.18】に基づき、下記の検討により3次元解析モデルによる表面線量率とCs-137濃度の関係式の導出を進める。
  - ✓ 3次元解析モデルによるバラツキ・不確かさの影響の詳細評価
  - ✓ 保管容器内周部領域の放射能評価方法の検討
  - ✓ 保管容器内中心領域の内挿方法の検討
  - ✓ 予備的安全評価の実施 (許容可能なバラツキ・不確かさの評価)
  - ✓ 実際の保管容器の表面線量率の分布調査 (容器内の汚染の空間的な分布の把握)

### 2) Cs-137(キー核種)と他核種の放射能濃度比の整理 (継続)

- 引き続き、瓦礫類からの試料採取及び分析を実施する。
- 分析データに基づき、Cs-137をキー核種とした核種濃度比の整理を行う。なお、建屋解体物の核種濃度比に関する分析データも活用する。

### 3) 表面線量率による放射能濃度管理手法の整備

- 上記の成果に基づき、表面線量率から容器内の瓦礫類の放射能濃度 (放射能量) を推定する手法を構築する。
- 予備的安全評価に基づき、安全確保の観点から許容可能な瓦礫類のバラツキ・不均一性の設定、対策の検討等を行う。
- 表面線量率の測定技術・評価方法等について調査を行う。設定した評価方針【p.17】及び調査結果を踏まえ、実際の保管容器を対象とした表面線量率の測定方法・手順を具体化する。

## (2) 表面線量率による放射能濃度管理手法の構築 (Phase. 2) (～2028)

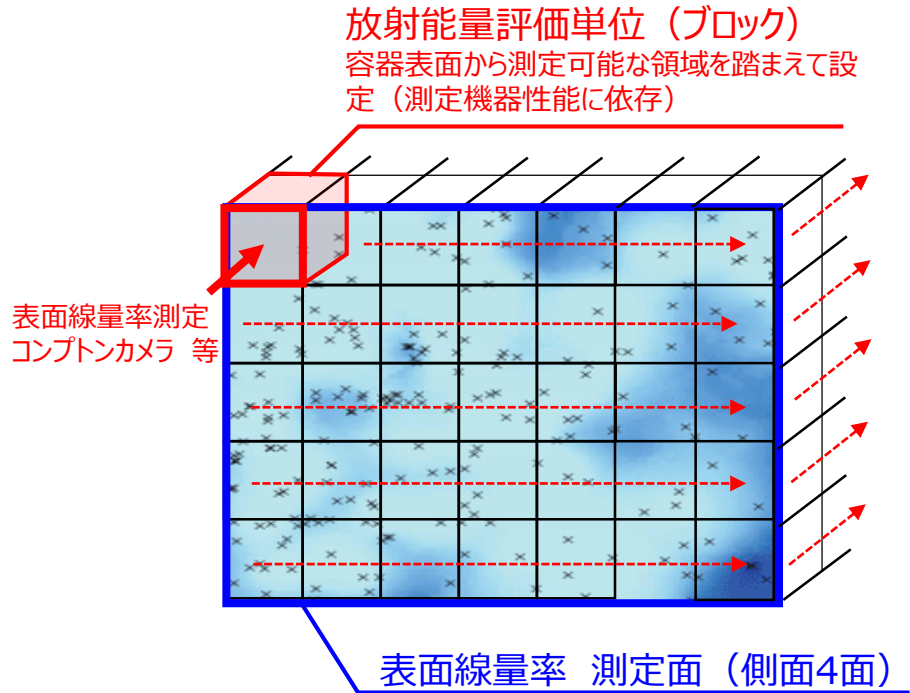
- 評価対象とする瓦礫類の材質、保管容器への収納状況 (瓦礫の形状)、表面線量率の範囲を拡大し、Phase.1に準じた検討を実施する。

# 表面線量率－放射能量（放射能濃度）の評価方針

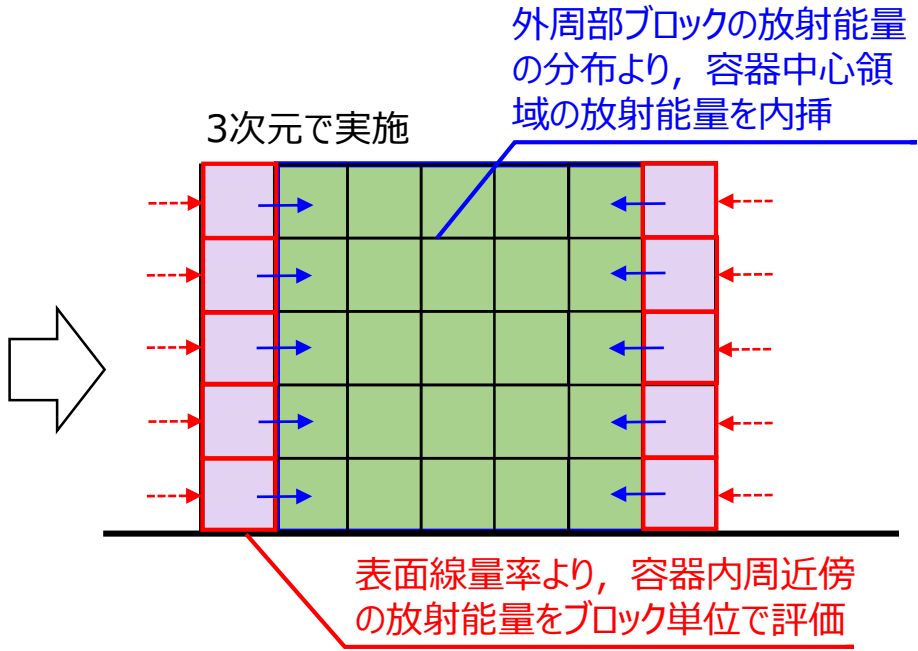
表 予察的評価結果を踏まえた表面線量率－放射能量（放射能濃度）の評価方針

項目	解析モデルの評価方針
①表面線量率測定データは容器内周近傍の狭い領域内の汚染箇所により支配される	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 表面線量率から精度の良い評価が可能な領域は限られる。</li> <li>• 低線量の瓦礫の場合、測定可能な領域は保管容器の内周部近傍に限られる（測定機器性能に依存）。</li> </ul> <p>→ フォールアウトによる汚染が支配的で極端なホットスポットは存在しないこと、減容プロセスで均一化が進むことから、容器内は比較的均一に汚染されていることを前提に、容器内周部近傍の放射能量の分布を評価し、中心領域は外周の放射能量の分布から内挿する。</p>
②線源数が増えると、線源の位置の不確かさに起因するバラツキの幅が低減する	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 小さい粒径に破碎された比較的汚染が均一な瓦礫（破碎コンクリート）であれば、バラツキの幅は大きくないと推定される。</li> </ul> <p>→ 汚染の空間的不均一性の程度は、容器の表面線量率の2次元的な分布の実測データを蓄積することで、確認できるものとする。実測データに線量分布等を考慮し、予備的安全評価により線源の不均一性が安全に与える影響を評価する。</p>
③粒子間の間隙中の細粒分の密度の不均一性が結果に及ぼす影響は軽微である	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 間隙に存在する細粒分の遮蔽体としての影響は軽微である。</li> <li>• 細粒分は表面積が大きいこと及びコンクリート表面から機械的な摩擦により生成されたものである可能性があることから、核種が選択的に含まれている可能性がある。容器底部に細粒分が堆積し、線源が偏る可能性がある。</li> </ul> <p>→ 線源が偏る可能性を考慮し、保管容器の表面線量率は面毎に2次元的に測定する。</p>
④線源の放射能量のバラツキが結果に及ぼす影響は大きいと推定される	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 放射能濃度のバラツキが大きい場合、大きく上振れした線源の影響により、不確かさによる評価結果の幅は広がり、最頻値も変動する。</li> </ul> <p>→ 保管容器の測定面をメッシュで区切り、2次元的に保管容器の表面線量率を測定し、区画ごとに放射能量を評価する。表面線量率－放射能量の評価を区画したブロック単位で評価することで、不均一性の影響を低減する。</p>
⑤保管容器表面から測定できない領域が存在する	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 保管容器の中心付近に高い線源が配置された場合、自己遮蔽により保管容器表面から把握することは困難である。</li> </ul> <p>→ ①に記載したとおり汚染は比較的均一であると考えますが、ホットスポットが保管容器中心付近に配置されることの否定は難しい。容器の表面線量率の2次元的な分布の実測データの蓄積を進めることで、ホットスポットの出現頻度等を評価し、出現頻度を踏まえた予備安全評価により安全性を担保する。</p>

# 評価方針を踏まえた解析モデルの考え方・イメージ（案）



①保管容器内周部のブロック毎の放射エネルギー評価

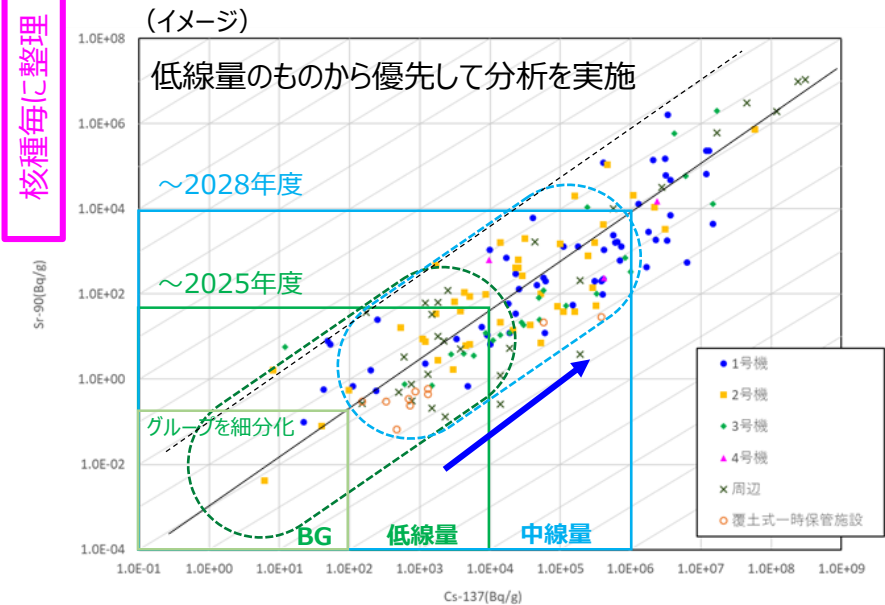


②保管容器内部領域の放射エネルギー評価

# Cs-137と他核種の放射能濃度比の評価方針

- 分析データに基づきCs-137をキー核種とした核種濃度比を整理する。
- 分析実施状況及び今後の見通しを踏まえ、核種濃度比の評価方針を下記のとおり見直した。
  - ✓ JAEA分析・研究施設の役割の拡大（ALPS処理水第三者分析等）を踏まえ、評価方法の合理化による必要な分析数の見直しを図った。
  - ✓ 一部の核種について検出下限値が十分でない可能性があったため、低線量領域（BG以下）について統計的な放射能濃度評価の前段の対応として、高線量側から外挿により推定するものとした。
  - ✓ 上記の方針を踏まえ、評価単位とするグループのCs-137濃度の幅を広く設定するものとし、また、建屋解体物の核種濃度比の分析データを取り込んで核種毎の相関性の評価を行うものとした。
  - ✓ Phase.1としてコンクリートの評価を先行させるが、材料毎の評価の切り分けの必要性を確認するため、金属・その他の分析データとの比較も実施する。

## 変更前（第15回技術会合にて提示した方針）



## 変更後

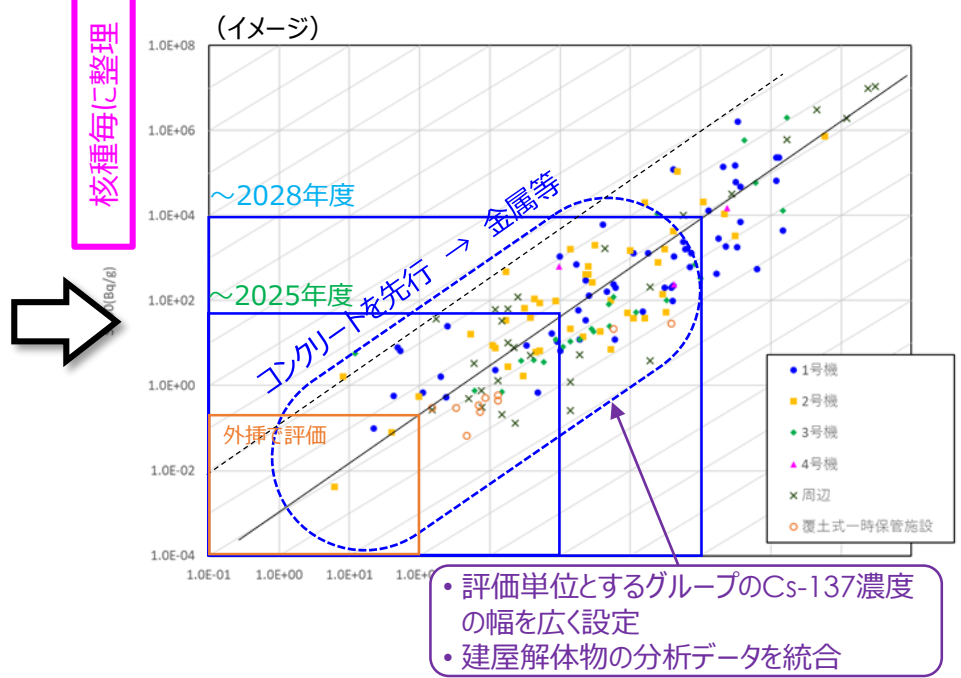


図 核種濃度比の評価方針の見直し

表 試料採取実績

対象		2024年度		既取得分	評価
		計画	実績※		
瓦礫類	金属	120	145	149	<ul style="list-style-type: none"> <li>減容処理設備でコンクリートの減容処理が行われなかったため、コンクリートの採取数が減少した</li> </ul>
	コンクリート	176	69	111	
	その他	60	51	322	
合計		356	265	582	

※：実施予定（年度内）のものを含むため、変更の可能性有

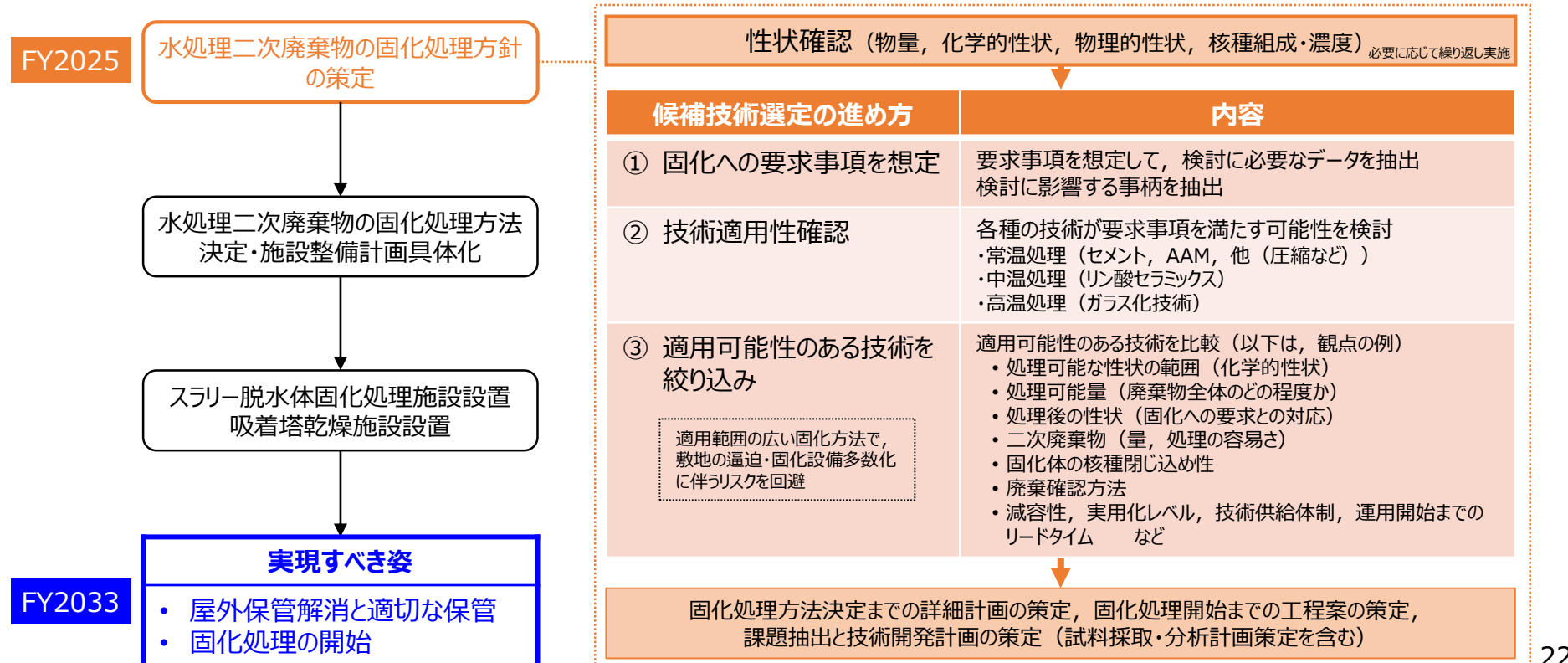
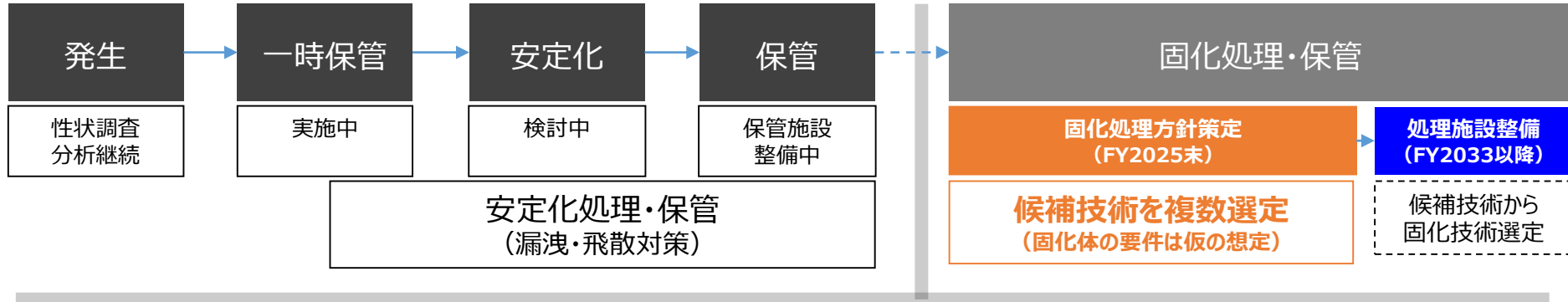
表 分析実績

対象		2024年度計画	実績※（大熊/茨城/合計）			備考
瓦礫類	金属	60	0	5	<b>5</b>	
	コンクリート	55	39	0	<b>39</b>	
	その他	40	12	0	<b>12</b>	
合計		155	51	5	<b>56</b>	

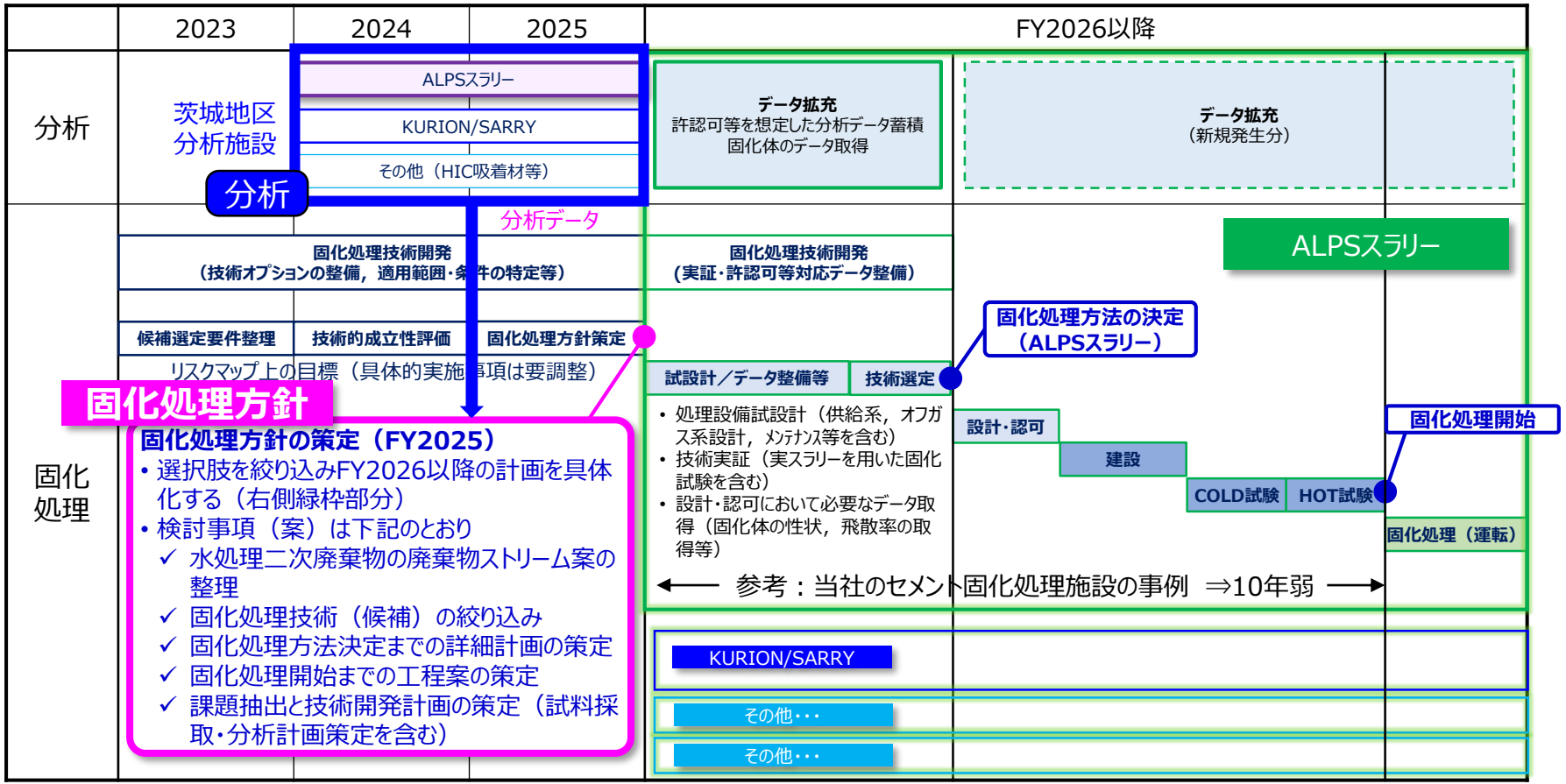
※：実施予定（年度内）のものを含むため、変更の可能性有

# 水処理二次廃棄物等の固化処理方針策定について (概要)

- 水処理二次廃棄物等への対応の流れと、固化処理方針検討の手順を以下に示した。
- 当面の目標は、固化方針の策定となる（2025年度目標）。



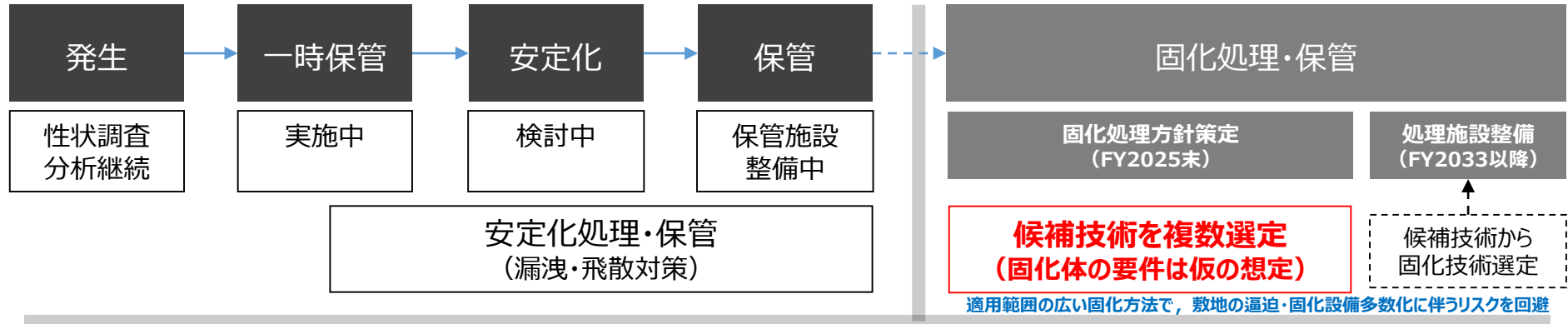
- 前項の方針を踏まえ、今後の進め方として下図の検討計画を提示した
- 現時点では固化処理方法を決定するために必要な廃棄物の性状把握、固化技術に係る知見が不十分であることから、FY2025を目途に必要な分析、検討を進め、固化処理方針を策定するものとした



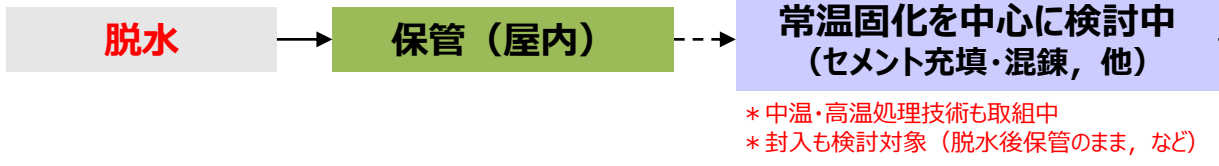


# 2024年度の検討内容及び主な成果

- 検討内容と主な成果は次のとおり
  - ① 固化体の要件を想定して検討に必要なデータを抽出した **【p.25】**
  - ② 現時点では、検討対象とした技術は、いずれも候補技術となりうると考える **【p.26, 27】**
  - ③ 候補技術を用いた処理工程を具体化する**【p.28, 29】**には、整理が必要な事項**【p.30】**がある（例：吸着材を一体に固めることの要否に応じて、超高線量の吸着材を取り出すための吸着塔解体・吸着材のガラス固化、等の要否が変わる）
  - ④ 引き続き、ALPSスラリーを始めとしてデータの整備を進め **【p.31,32,33】**、候補技術選定を進める**【p.34】**

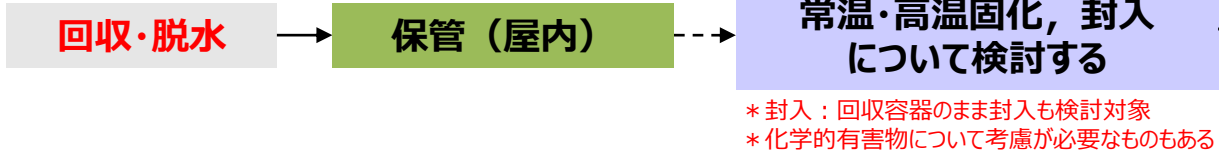


ALPSスラリーなどの  
含水微粉末  
(中線量)



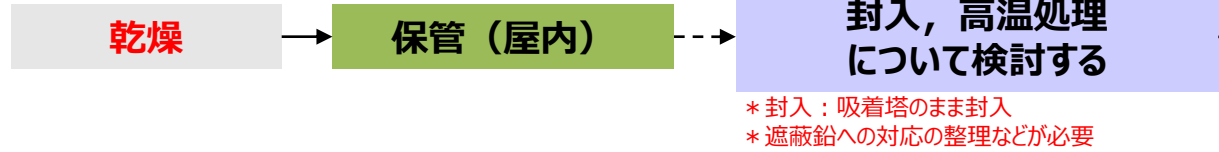
容器封入  
(無充填)

除染装置スラッジ,  
ゼオライト土嚢,  
各種の吸着材  
(中～高線量)



容器封入  
(充填)

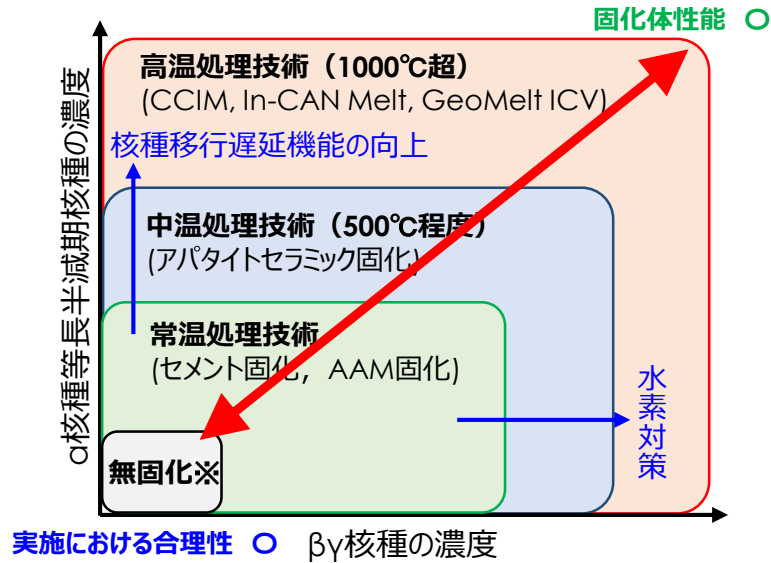
KURION・SARRYなど  
の吸着塔類  
(超高線量)



検討の手順		内容
① 固化への要求事項を想定		要求事項を想定して、 <b>検討に必要なデータを抽出</b> 検討に影響する事柄を抽出
観点	固化への要求事項（想定）	処理の適用性検討に必要なデータ
放射能・核種組成	<ul style="list-style-type: none"> <li>核種組成，放射エネルギーが決定できる</li> <li>廃棄体の処分区分が決定できる</li> <li>輸送・搬送・保管時の線量率制限に対応できる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>難測定核種濃度（C-14，I-129，など）</li> <li>線量率の大半を占める核種の濃度</li> <li>各核種の濃度の相関性</li> </ul>
化学性状	<ul style="list-style-type: none"> <li>保管にあたって有害・危険とみなされる物質が含まれない</li> <li>処理を阻害する物質を含まない</li> <li>廃棄体の機能を劣化させる物質を含まない</li> <li>廃棄体輸送時の安全性を評価するシナリオにおいて問題となる物質を含まない</li> <li>処分の安全性を評価するシナリオにおいて問題となる物質を含まない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>共通の事項                             <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 含水割合・固形分濃度，化学組成（固相，液相），pH（液相）</li> </ul> </li> <li>セメント固化への影響などに関連して着目する事項                             <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 塩化物イオン（固化阻害）</li> <li>✓ 硫酸イオン（体積膨張）</li> <li>✓ B（固化遅延）</li> <li>✓ Na・K（炭酸塩形態で処理中に急結）</li> <li>✓ Mg / Ca 比（埋設後の安定性）</li> <li>✓ pH（固化阻害）</li> <li>✓ 有機物量（固化遅延），など</li> </ul> </li> <li>高温固化への影響などに関連して着目する事項                             <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 塩化物，他の塩類（相分離）</li> <li>✓ ガラス形成成分（融点変動，相分離など）</li> <li>✓ 金属元素（金属層形成など）</li> </ul> </li> <li>圧縮，無固化などに関連して着目する事項                             <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 有機物の有無（長期的影響），など</li> </ul> </li> </ul>
物理性状	<ul style="list-style-type: none"> <li>保管容器の腐食が問題とならない</li> <li>有害な空隙を含まない（処分施設の陥没回避）</li> <li>形態，材質の性状が安定している</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>比重，粒度分布，粘度（混練・混合への影響）</li> <li>固化物の比重，機械的強度，空隙率 など</li> </ul>

## 適用範囲の広い固化方法で、敷地の逼迫・固化設備多数化に伴うリスクを回避

- 水処理二次廃棄物を含む廃棄物の固化処理については、下記を考慮して処理方法を決定する。
  - 固化体に求められる技術要件を満足すること（廃棄体要件，設計・評価上の要件等）
  - 固化処理が可能であること（処理技術に対する廃棄物の適合性）
  - 固化処理実施における合理性を有すること（費用，安全上の負荷，処理開始時期等）



### (1) 固化体技術要件 (固化の目的)

- 保管時の挙動安定性 (高)
- 飛散・漏洩防止 (飛散率低)
- 核種移行遅延機能 (高)
- 減容効果 (有)

### (3) 固化処理実施における合理性

- 処理費用 (大)
- 安全上の負荷 (高)
- 処理開始時期 (遅)

- 保管時の挙動安定性 (低)
- 飛散・漏洩防止 (飛散率高)
- 核種移行遅延機能 (低)
- 減容効果 (無・増)

- 処理費用 (小)
- 安全上の負荷 (低)
- 処理開始時期 (早)

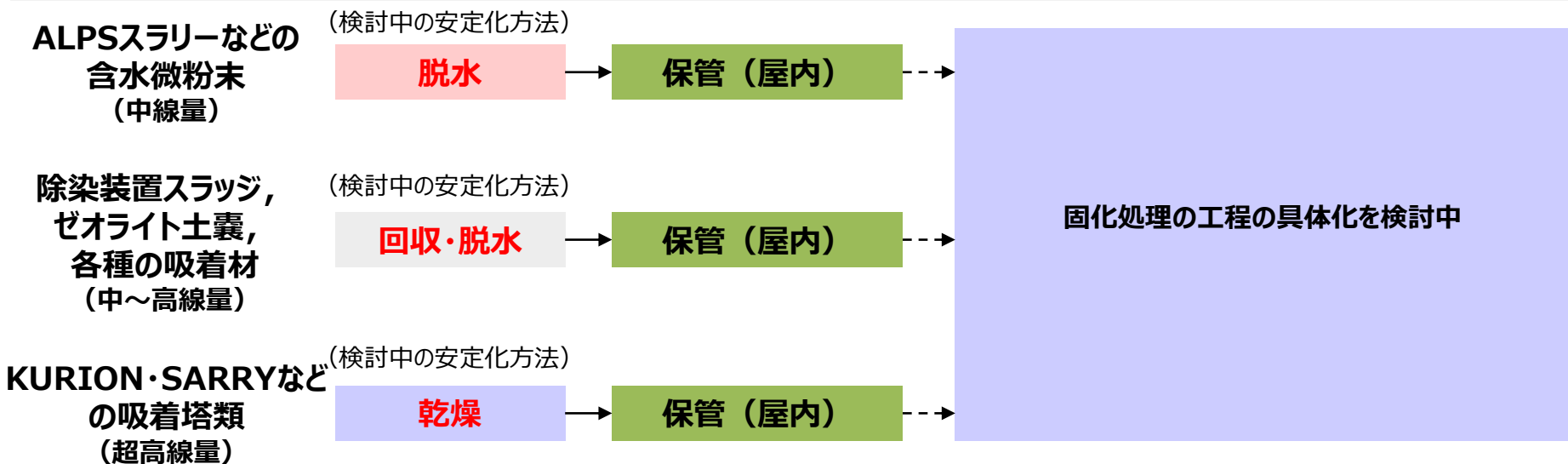
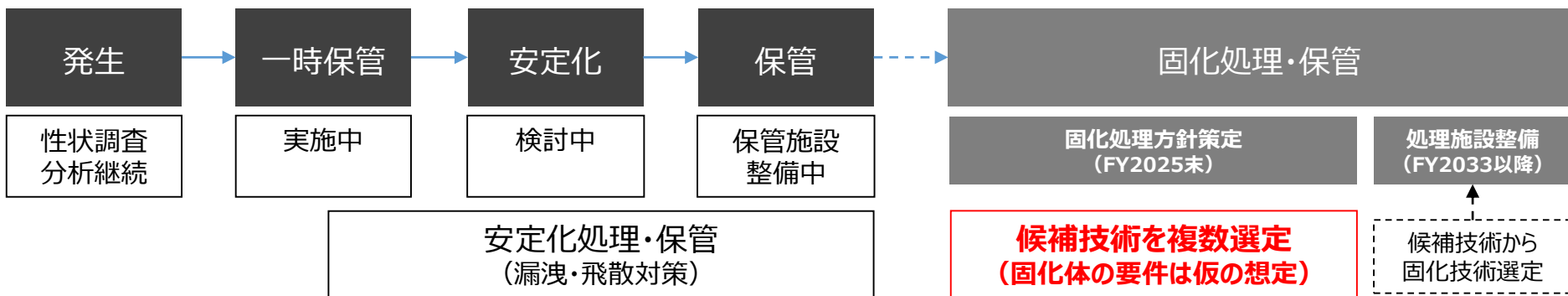
対象廃棄物の特性から要求される技術要件を充足する範囲において、固化処理実施の観点から合理的な技術（図左下側）を志向する

※ 例えば砂，ゼオライト等のオプションとして想定

## 検討の状況 技術の適用可能性

検討の手順		内容
②技術適用性確認		各種の技術が要求事項を満たす可能性を検討
固化への要求事項（想定）	処理技術	処理技術適用可能性の検討状況
<b>放射能・核種組成</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>廃棄体の処分区分を決定できる</li> <li>放射能インベントリを決定できる（評価対象核種の濃度を決定できる）</li> <li>線量率制限に対応できる</li> </ul> <b>化学性状</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>保管にあたって有害・危険とみなされる物質が含まれない</li> <li>処理を阻害する物質を含まない</li> <li>廃棄体の機能を劣化させる物質を含まない</li> <li>廃棄体輸送時の安全性を評価するシナリオにおいて問題となる物質を含まない</li> <li>処分の安全性を評価するシナリオにおいて問題となる物質を含まない</li> </ul> <b>物理性状</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>保管容器の腐食が問題とならない</li> <li>有害な空隙を含まない（処分施設の陥没回避）</li> <li>形態、材質の性状が安定している</li> </ul>	容器に封入（無固化）	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>放射能・核種組成</b>については、廃棄物の分析結果を基にして、既往の方法で評価可能と考える</li> <li><b>化学性状</b>については、水などの放射線分解に伴う水素発生、容器の腐食対策が必要</li> <li><b>物理性状</b>については、機械的強度を容器で担保でき、空隙が有害なもののみなされない技術的可能性はあるものとする</li> </ul>
	常温処理（セメント、AAM、他）	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>放射能・核種組成</b>については、廃棄物の分析結果を基にして、既往の方法で評価可能と考える</li> <li><b>化学性状</b>については、水処理二次廃棄物の固化を阻害するような濃度の成分は、現時点では、急結に関わるもの以外は問題とならないと推定している。分析・評価を更に進める。</li> <li><b>物理性状</b>については、放射線分解の影響などから形態や強度が変化する可能性が想定される。このため、放射能濃度が高い場合には適用は難しいと推定している</li> </ul>
	中温処理（リン酸セラミックス）	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>放射能・核種組成</b>については、処理時の核種の挙動が常温処理と同様と推定されるため、既往の方法で評価可能と考える</li> <li><b>化学性状</b>については、検討中。ただし、適用対象は常温固化よりも狭くないと推定している（ALPS炭酸塩スラリー中心）</li> <li><b>物理性状</b>については、母材に水が含まれない無機物であるため、大きな問題はないと推定している</li> </ul>
	高温処理（ガラス化）	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>放射能・核種組成</b>については、処理時の核種の挙動が常温処理と異なるため、挙動についてのデータの積み上げが必要。通常炉の低レベル廃棄物の熔融で採用された方法を参考にすることで評価可能と考える</li> <li><b>化学性状</b>については、常温処理と同様。</li> <li><b>物理性状</b>については、母材に水が含まれない無機物および金属であるため、大きな問題はないと推定している</li> </ul>

- 現時点で先行で固化すると、将来1F廃棄物の固化体の要件などが定められた場合に、固化やり直しが生じるリスクがある。一方、脱水・乾燥に容器収納を組み合わせることで、漏洩・飛散の可能性は低減可能と考える



適用範囲の広い固化方法で、敷地の逼迫・固化設備多数化に伴うリスクを回避

- ① 固化処理は工程ごとに複数の選択肢があり，それらの組み合わせで更に選択肢が増える
- ② 選択肢の選定には，固化への要求事項が影響する
- ③ 個々の処理技術の適用性は，廃棄物の性状に応じて確認が必要

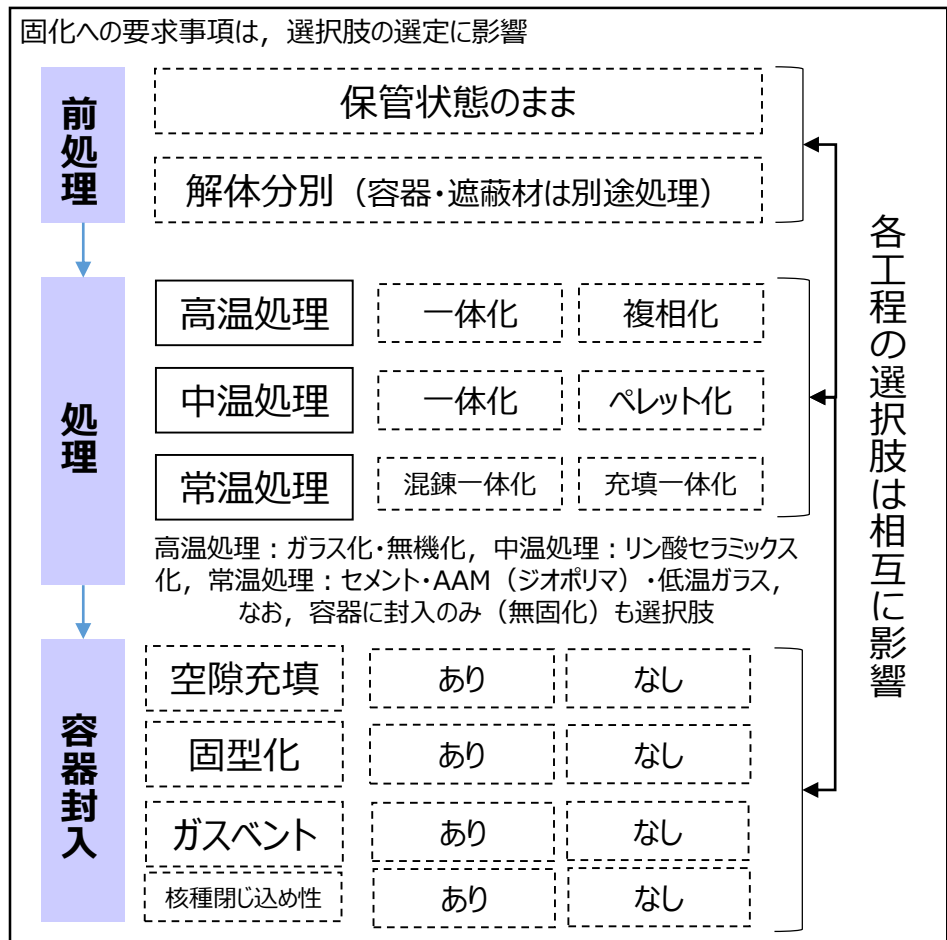
## 固化への要求事項

観点	内容
放射能・核種組成	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 核種組成，放射エネルギーが決定できる</li> <li>・ 廃棄物の処分区分が決定できる</li> <li>・ 輸送・搬送・保管時の線量率制限に対応できる</li> </ul>
化学的性状	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 保管にあたって有害・危険とみなされる物質が含まれない</li> <li>・ 処理を阻害する物質を含まない</li> <li>・ 廃棄物の機能を劣化させる物質を含まない</li> <li>・ 廃棄物輸送時の安全性を評価するシナリオにおいて問題となる物質を含まない</li> <li>・ 処分の安全性を評価するシナリオにおいて問題となる物質を含まない</li> </ul>
物理的性状	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 保管容器の腐食が問題とならない</li> <li>・ 有害な空隙を含まない（処分施設の陥没回避）</li> <li>・ 形態，材質の性状が安定している</li> </ul>

\*固化体として想定している2つの姿

1. 廃棄物を容器に封入した形態
2. 廃棄物を容器と一体になるように固型化した形態

## 要求に対応する固化処理の工程と選択肢（例）



固化方針の選定に影響する事柄，整理・検討する意義があると考える事柄の抽出を進める（例）

- 粉粒体を容器に封入した廃棄体の成立性（吸着材などを一体に固めることの要否）
  - ・ 超高線量の吸着塔を解体せずに廃棄体化できるか否か，などに影響
  - ・ 粉粒体の性状，核種組成，粉粒体中での核種の存在形態などは，廃棄物別に異なるため廃棄物に応じた整理が必要
  
- 容器に水素ガス抜き機能を持たせることの成立性
  - ・ 水素の発生源となる水の残るセメントなどの適用範囲，廃棄物の無機化の必要性，分別の程度，などに影響
  
- 化学的有害物の取り扱い
  - ・ 吸着塔の鉛遮へい体除去要否，シアン化物を含む吸着材の酸化処理・無機化処理の要否，廃棄物分別の程度，などに影響

- 下記について補強を図っていく。実施場所と分析数を調整中
  - ✓ 放射能濃度：C-14, I-129, 等の長半減期核種, α核種, など
  - ✓ 化学組成・物理性状：固化に影響する物質の有無（塩化物イオン, 硫酸イオン, 等）, 処理可能な性状の範囲, 埋設環境下での安定性評価に資する事柄
- **候補技術の絞り込み**では, **固化に影響する因子（化学成分など）**の有無, 設備の補器類（排ガス系など）への影響, 二次廃棄物などへの対応の見通しなどを確認する。ALPSの処理対象では, 固化に影響する可能性がある海水起源の塩類などが時系列的に増す方向ではないことから, 現状のスラリーおよび処理対象水のデータに基づく推定評価と数点の追加分析に注力することで, 確認可能と考える
- **その先の技術選定**については, 固化物の検認（核種組成・濃度など）方法, 固化にあたっての減容性や二次廃棄物への対応, 設備規模と内容（廃棄物のハンドリングや被ばく対策も考慮した設計）などを検討する必要がある。このため, 検討に必要なデータを積み上げていく必要がある。

ALPSスラリー 分析計画（状況を反映して見直し, 更新する）

マイルストーン（仮）	分析数（仮）：試料準備数と分析施設対応可能数とで調整し見直す								
	～2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
			▼分析計画策定	▼固化方針策定（候補技術の絞り込み）			▼固化技術選定		
				複数候補の技術実証等			技術選定・設計検討		
炭酸塩スラリー（既設）	5	2	2	4	4	4	8	8	8
鉄共沈スラリー（既設）	5	2	2	4	4	4	8	8	8
炭酸塩スラリー（増設）	8	2	2	4	4	4	8	8	8
合計	18	6	6	12	12	12	24	24	24

実施場所, 分析数, 分析項目を調整中・分析実施中

**HICからの採取**  
（安定化処理（脱水）前のスラリー）

**安定化処理ラインからの採取**  
（固化前の廃棄物）



## 固化技術の適用性検討に反映するデータと、データ整備の対応

	必要なデータ	固化方針の策定に反映するデータ	
		データから推定・模擬試料測定 (補助事業, 他)	実試料測定
核種組成	<ul style="list-style-type: none"> <li>難測定核種の濃度</li> <li>測定可能な核種の濃度 など</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sr-90</li> <li>Cs-137</li> <li>α核種 他</li> </ul>	(実施可能な項目を確認中) <ul style="list-style-type: none"> <li>C-14, I-129, Tc-99, Se-79, α核種, 他</li> </ul>
化学性状	(固化の阻害などの観点) <ul style="list-style-type: none"> <li>固相の定性</li> <li>pH (液相)</li> <li>化学組成・特性</li> <li>✓ 塩化物イオン</li> <li>✓ 硫酸イオン</li> <li>✓ Na, K</li> <li>✓ Mg/Ca比</li> <li>✓ ガラス形成成分の濃度</li> <li>✓ 処分に適さない物質の有無 など</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 水処理関連データから推定</li> <li>化学組成・特性</li> <li>✓ 塩化物イオン</li> <li>✓ 硫酸イオン</li> <li>✓ Na, K</li> <li>✓ Mg/Ca比</li> <li>✓ ガラス形成成分 (Si, Al, B 他) 濃度</li> <li>✓ pH (液相)</li> <li>など</li> </ul>	(実施可能な項目を確認中) <ul style="list-style-type: none"> <li>固相の定性 (化学組成, 結晶相 他)</li> <li>pH (液相)</li> <li>化学組成</li> <li>✓ 塩化物イオン</li> <li>✓ 硫酸イオン</li> <li>✓ Na, K</li> <li>✓ Mg/Ca比</li> <li>✓ ガラス形成成分 (Si, Al, B 他) 濃度</li> <li>✓ 有機物 (TOC)</li> <li>など</li> </ul>
物理性状	<ul style="list-style-type: none"> <li>含水割合, 固形分濃度</li> <li>比重, 粒度分布, 粘度</li> <li>固化物の比重, 機械的強度, 空隙率 など</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 模擬試料測定から推定</li> <li>含水割合, 固形分濃度</li> <li>比重, 粒度分布, 粘度</li> <li>固化物の比重, 機械的強度, 空隙率 など</li> </ul>	(実施可能な項目を確認中) <ul style="list-style-type: none"> <li>含水割合, 固形分濃度</li> <li>比重, 粒度分布, 粘度</li> <li>など</li> </ul>

固化技術に関する知見を反映し更新していく

データを収集・推定し, 更新していく

実施場所, 分析数, 分析項目を調整中

## ALPSスラリーの当面の分析計画

- 水処理二次廃棄物については、ALPSスラリーを中心として漏洩・飛散防止対策を講じるとともに、将来の固化について検討を進めてきた
- 固化処理方針の策定に反映する、当面のALPSスラリーの分析対象選定の考え方と分析項目を整理した
- 引き続きデータ整備と分析試料の準備を継続し、固化方針の検討を進める

## ■ 線量率と時系列の範囲を網羅するように、採取対象を選定する

- ✓ ALPSスラリーの性状は、ALPS入口水の組成の時系列的な変化の影響を概ね受けていると思われる。そこで発生年ごとに分析することとし、分析数は、基本的には年ごとのHIC本数に案分する
- ✓ 2014年度およびその前後は他の期間に比べて線量率の変化が大きいことから、保管本数からの案分数よりも多めにサンプリングし、性状の違いの有無について情報を得るようにする
- ✓ 炭酸塩について、既設と増設との割合は、発生量に合わせて1：1を目安とする

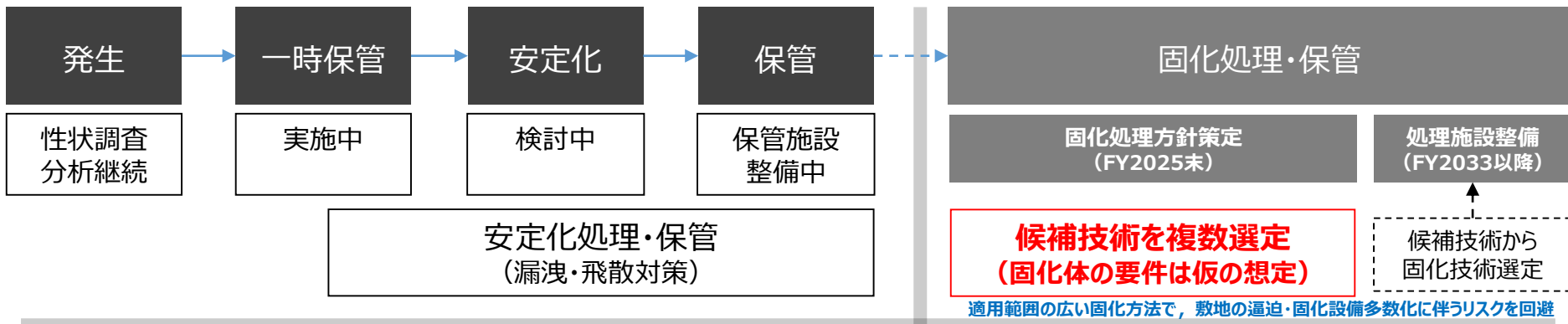
## ■ 下記について補強を図っていく。実施場所と分析数を調整中

- ✓ 放射能濃度：C-14, I-129, 等の長半減期核種, α核種, など
- ✓ 化学組成・物理性状：固化に影響する物質の有無（塩化物イオン, 硫酸イオン, 等）, 処理可能な性状の範囲, 埋設環境下での安定性評価に資するデータ

## ■ 候補技術の絞り込みでは、固化に影響する因子（化学成分など）の有無、設備の補器類（排ガス系など）への影響、二次廃棄物への対応の見通しなどを確認する。ALPSの処理対象では、固化に影響する可能性がある海水起源の塩類などが時系列的に増す方向ではないことから、現状のスラリーおよび処理対象水のデータに基づく推定評価と数点の追加分析に注力することで、確認可能と考える

## ■ その先の技術選定については、固化物の検認（核種組成・濃度など）方法、固化にあたっての減容性や二次廃棄物への対応、設備規模と内容（廃棄物のハンドリングや被ばく対策も考慮した設計）などを検討する必要がある。このため、検討に必要なデータを積み上げていく必要がある

- 現時点で先行で固化すると、将来1F廃棄物の固化体の要件などが定められた場合に、固化やり直しが生じるリスクがある。一方、脱水・乾燥に容器収納を組み合わせることで、漏洩・飛散の可能性は低減可能と考える
- 固化体の要件を想定して水処理二次廃棄物の固化方針を検討している。状況は次のとおりである
  - ① 現時点では、検討対象とした技術は、いずれも候補技術となりうると考える
  - ② 各選択枝の具体化には、整理が必要な事項がある。引き続き検討を進める（例：吸着材を一体に固めることの要否に応じて、超高線量の吸着材を取り出すための吸着塔解体・吸着材のガラス固化、等の要否が変わる）



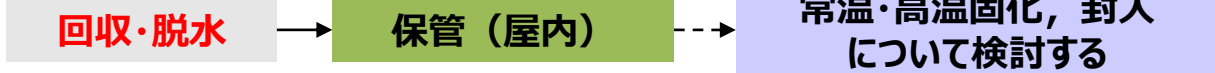
ALPSスラリーなどの  
含水微粉末  
(中線量)



- \* 中温・高温処理技術も取組中
- \* 封入も検討対象 (脱水後保管のまま, など)

容器封入  
(無充填)

除染装置スラッジ,  
ゼオライト土嚢,  
各種の吸着材  
(中～高線量)



- \* 封入：回収容器のまま封入も検討対象
- \* 化学的有害物について考慮が必要なものもある

容器封入  
(充填)

KURION・SARRYなど  
の吸着塔類  
(超高線量)



- \* 封入：吸着塔のまま封入
- \* 遮蔽鉛への対応の整理などが必要

参考資料  
(分析対象核種について)

# 分析対象核種について

- 固体廃棄物の分析を進めるにあたり、分析対象核種の選定を行った。
- 分析対象として30核種、そのうち優先的に分析を進める核種として10核種を選定した（下表参照）。これらの核種をベースに、廃棄物毎に個別の条件等を考慮して、分析対象核種を決定する。
- 再利用の可能性のある対象物は、再利用形態を考慮した分析対象核種を設定する。
- 将来的には1F固有の条件（廃棄物特性など）を踏まえ、必要に応じて更新する。

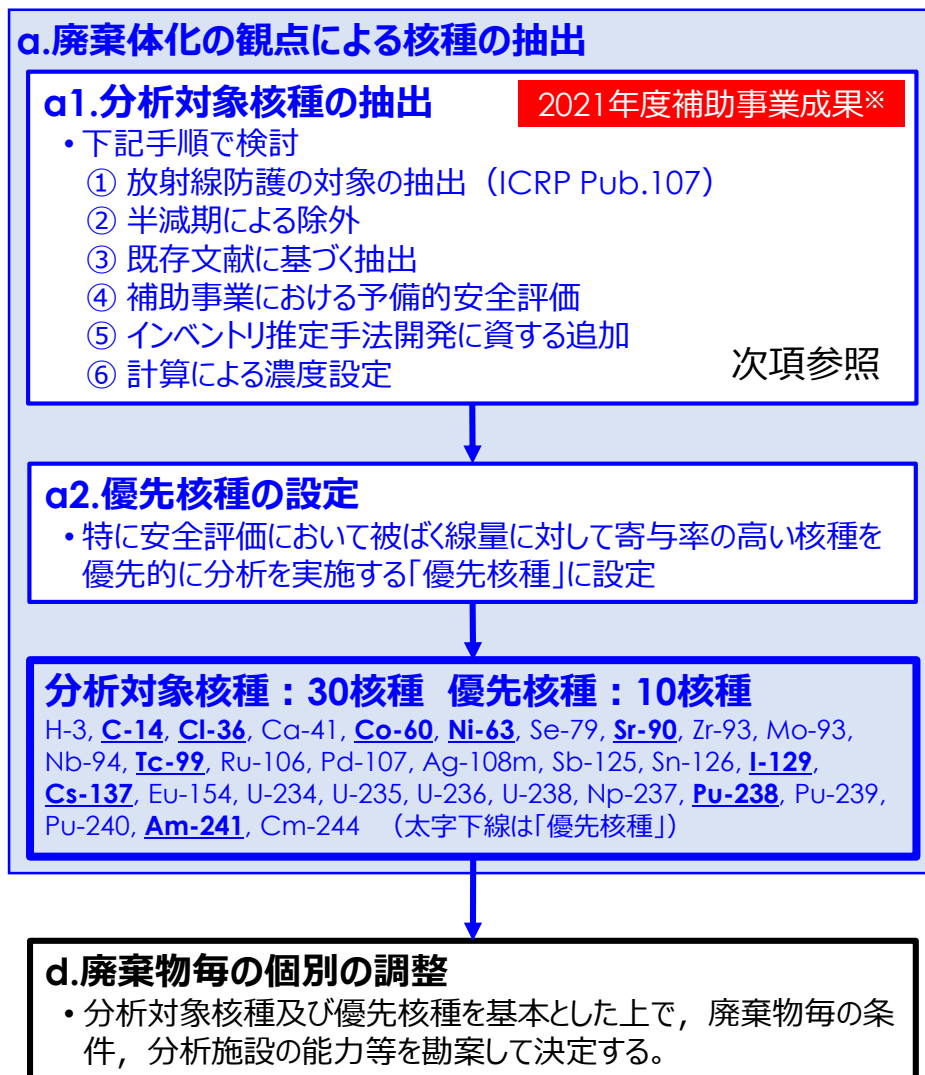
表 分析対象核種

核種	分析対象 <sup>※1</sup>	優先核種 <sup>※2</sup>	核種	分析対象 <sup>※1</sup>	優先核種 <sup>※2</sup>
H-3	○		Sb-125	○	
C-14	○	○	Sn-126	○	
Cl-36	○	○	I-129	○	○
Ca-41	○		Cs-137	○	○
Co-60	○	○	Eu-154	○	
Ni-63	○	○	U-234	○	
Se-79	○		U-235	○	
Sr-90	○	○	U-236	○	
Zr-93	○		U-238	○	
Mo-93	○		Np-237	○	
Nb-94	○		Pu-238	○	○
Tc-99	○	○	Pu-239	○	
Ru-106	○		Pu-240	○	
Pd-107	○		Am-241	○	○
Ag-108m	○		Cm-244	○	

※1：既存の放射性廃棄物の安全評価事例等より抽出した核種 → 合理的に可能な範囲で分析対象とする。

※2：処分区分の濃度上限値設定核種（特に重要度の高い核種） → 原則、分析対象とする。

- 分析対象核種の選定フローを下記に示す。



※国際廃炉研究開発機構 (IRID), “令和3年度開始「廃炉・汚染水対策事業費補助金 (固体廃棄物の処理・処分に 関する研究開発)」2021年度最終報告”, 2022年9月

**b. 再利用の観点による核種の追加**

- 想定される再利用用途を踏まえた安全評価において寄与率の高い核種

+

**c. 保管管理の観点による核種の追加**

- 想定される保管形態を踏まえた安全評価において寄与率の高い核種

図 分析対象核種の選定フロー

## 分析対象核種の抽出

### ①放射線防護の対象

・ICRP Pub.107を参照し、**1252核種**を抽出

### ②半減期による除外

・半減期 $T_{1/2} \geq 1y$ の**138核種**を抽出（半減期1年未満の核種を除外）

### ③既存文献に基づく抽出

・既存の放射性廃棄物に関する文書（規制関連文書、事業許可申請書、技術レポート）において、重要核種・主要核種として挙げられた**38核種**を抽出

### ④補助事業における予備的安全評価

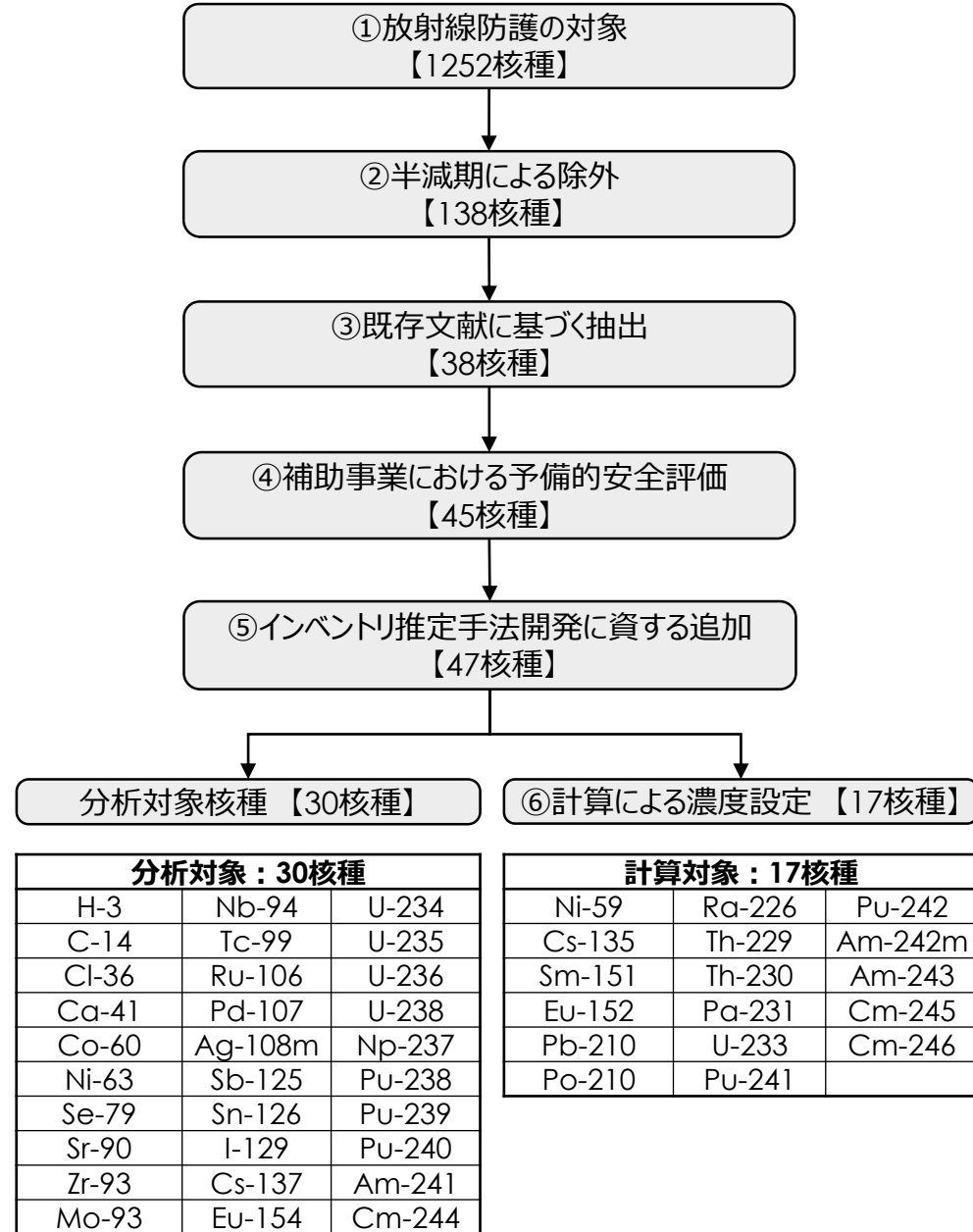
・補助事業において実施された1F廃棄物に関する予備的安全評価結果（パラメータスタディ）を踏まえて**7核種**を追加し、**45核種**を抽出

### ⑤インベントリ推定手法開発に資する追加

・核種移行挙動の評価を目的に、Csに次ぐ揮発性を有する $\gamma$ 核種であるRu-106,Sb-125の**2核種**（移行挙動が確認しやすい核種）を追加し、**評価対象核種：47核種を選定**

### ⑥計算による濃度設定

・同位体や平衡計算により推定可能な核種（17核種）は計算で対応するものとし、**分析対象核種：30核種を選定**



参考資料  
(解体モデルケース検討)



# 実現すべき姿に向けた対応方針

## リスクマップ上の目標（実現すべき姿）に向けた対応方針

- 実現すべき姿（2033年度目標） → 「建屋解体手法の整理」「解体廃棄物の濃度による管理」
- 上記目標に対して、2028年度を目途に3・4号Rw/Bを対象に施設解体に係る一連の試検討を実施することで、汚染調査・評価方法、施設の解体方法・除染方法、廃棄物区分・保管方法、放射能濃度管理方法などの具体化を進める（解体モデルケース検討）。
- 適宜、実施設の解体に成果を展開していく。

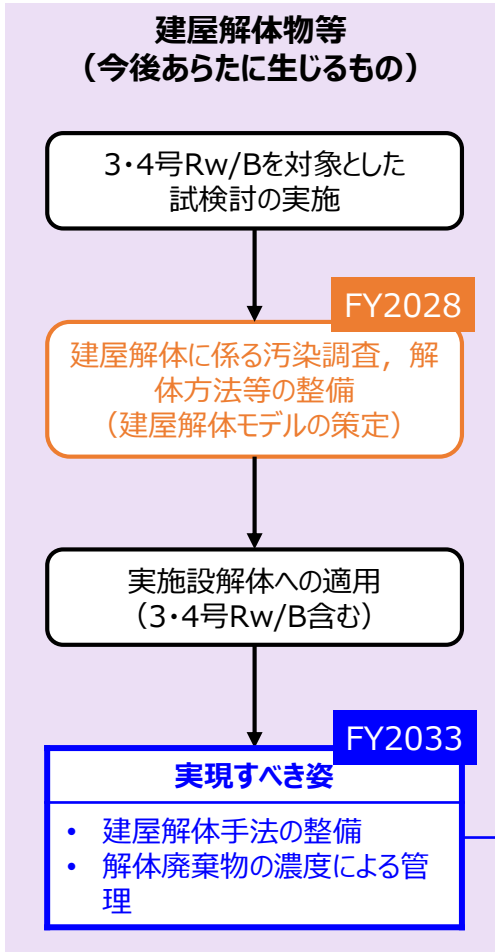


表 実現すべき姿に対する対応方針

実現すべき姿（2033年度）		対応方針	実施時期
建屋解体手法の整備	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 汚染状況の調査／評価手法、汚染した施設の除染／解体方法等について、共通するモデル（建屋解体モデル）を策定する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3・4号Rw/Bを対象とした施設解体に係る一連の試検討を実施し、汚染調査・評価方法、施設の解体方法・除染方法、廃棄物区分・保管方法、放射能濃度管理方法を構築する</li> </ul>	2028年度(目標)
解体廃棄物の濃度による管理	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 建屋解体により発生する廃棄物の量を特定し、保管管理計画へ反映する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 解体モデルケース検討で発生廃棄物量想定方法を整理する。</li> </ul>	建屋解体手法整備以降（成果を適宜展開）
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 解体廃棄物について、放射能濃度による適切な管理を行う。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 解体モデルケース検討で構築した濃度管理方法を参照し、発生した解体廃棄物の濃度管理を行う。</li> </ul>	建屋解体手法整備以降（成果を適宜展開）

# 解体モデルケースの対象施設について

- 解体モデルケース検討の対象施設として、**3・4号Rw/B（廃棄物処理建屋）**を選定した。
- 当該施設を選定した理由は下記のとおり。
  - ✓ デブリ取り出しに向けた準備工事として比較的早期に解体に着手する可能性があること（具体的な工程は検討中）。
  - ✓ 事故炉に近接していること、滞留水と接触していることなどから、R/B,T/Bも含めた幅広い施設に適用できる成果取得が期待できること。

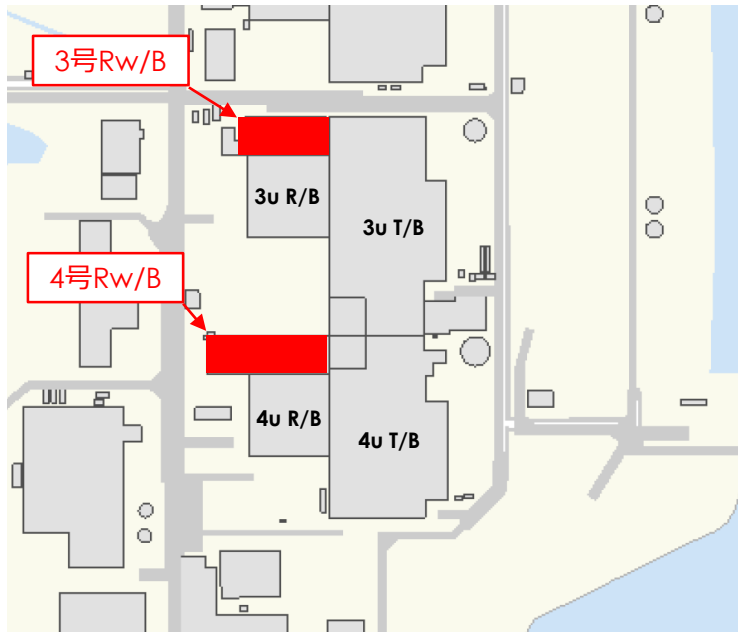


図 3・4号Rw/B 位置

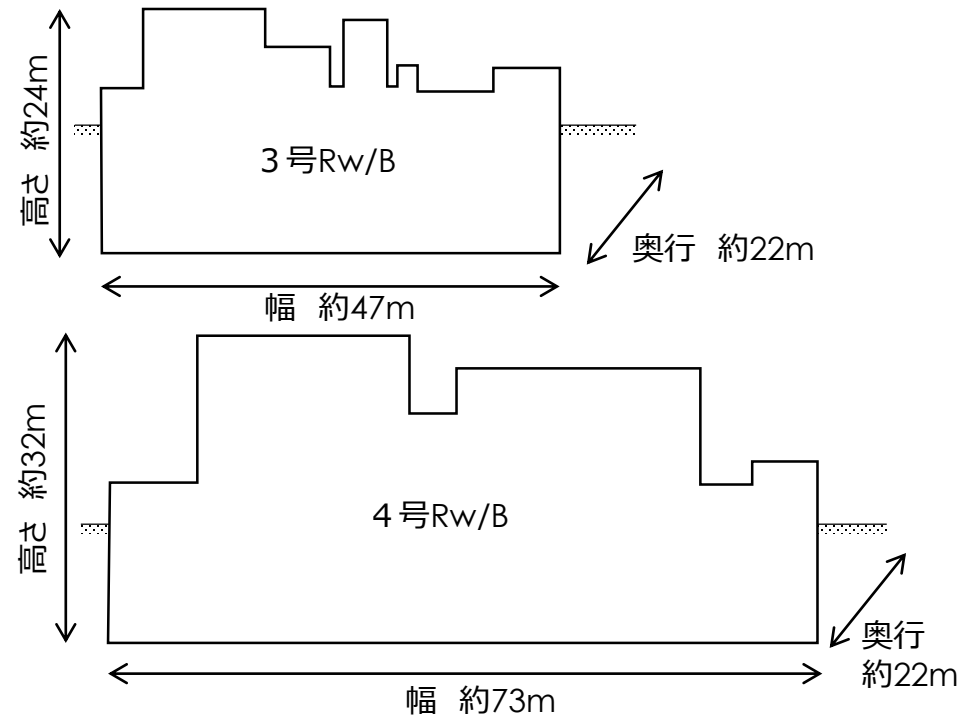


図 3・4号Rw/B 断面・寸法

# 建屋の汚染分布等の体系的検討の検討方法

## 1) 建屋の汚染状況・汚染機構に関する文献調査

- 国内外の文献調査により、コンクリートの汚染分布・汚染機構に関する知見を収集を実施。
- 汚染に対する影響因子を抽出。汚染状態調査計画に反映。

### 調査に基づき抽出した主要な影響因子

- ウエザリング影響
- 滞留水接触
- 地下水接触
- 塗装・保護層
- 飛散防止材
- 亀裂
- 炭酸化・溶脱
- 骨材・結合材組成

## 2) 仮定に基づく予備検討

- 文献調査結果を踏まえて建屋の汚染状況を仮定。
- 解体方法を仮定し、妥当性確認または更新するための調査・分析における確認事項を具体化。

影響因子及び調査・分析の着目点等

## 3) 建屋の汚染状態調査（試料採取・分析）

- 汚染に対する影響因子を踏まえた試料採取・分析計画を策定し、1F建屋の汚染分布・汚染機構に関する分析データの蓄積を進める。

文献調査に基づく汚染影響因子の例（分析計画に反映）

- 塗装・保護層
- 雨水・滞留水
- 飛散防止材
- 骨材・結合材
- 亀裂・溶脱・炭酸化

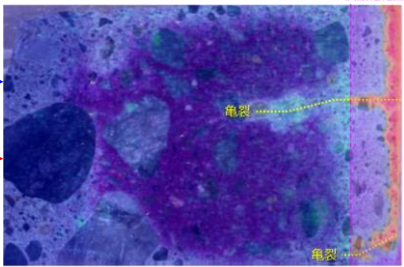
試料採取・分析

建屋汚染に関する知見（一般）

## 4) 建屋部位・条件毎の汚染状態推定方法の構築（アウトプット）

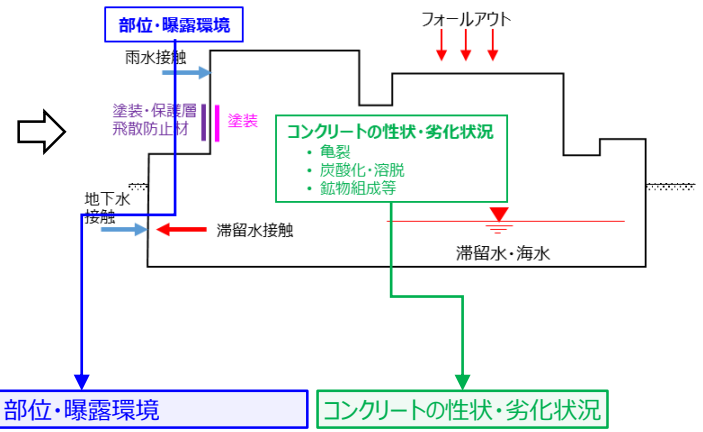
- 文献調査結果及び分析データより、建屋の部位、環境、コンクリートの性状・劣化状況等と汚染分布・汚染機構について体系的に整理を行う。
- 部位の条件に合わせた汚染状態の推定方法の構築を行う。

### 汚染分布・汚染機構の体系的整理



- 核種毎の分布・浸透状況
- 亀裂・炭酸化等の影響
- 水接触履歴の影響 等

### 部位の条件に合わせた汚染状態の推定方法の構築



雨水接触(コンクリート面露出)	滞留水接触(コンクリート面露出)	炭酸化範囲との関係
雨水接触(塗装・保護層)	滞留水接触(塗装・保護層)	亀裂との関係
雨水接触(飛散防止材)		骨材・結合材組成との関係

汚染

建屋汚染に関する知見（1F）

表 汚染状況・汚染機構に関する文献調査結果概要（1/3）

分類	現象	着目点	分析・評価方針	知見
ウエザリング影響	a. 雨水接触によるコンクリート表面の放射能濃度の変化	<ul style="list-style-type: none"> <li>雨水を媒体とした核種移行によりコンクリート外壁表面の放射能濃度は経時的に低下するものと予想される。</li> <li>雨水の接触条件（期間・程度等）に依存すると考えられる。</li> <li>飛来塩分の有無により、挙動が異なる核種が存在する。（イオン交換することにより、外部へ溶脱、内部へ移動の可能性がある）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>雨水接触の条件（時間・程度等）が比較的明確な部位を対象に、雨水接触時間と放射能濃度の関係を確認する。はつりもしくはスミヤ試料で評価可能。</li> <li>海側の壁と反対側のコンクリートコアを採取して放射能濃度分布を測定する。</li> <li>飛来塩分の影響が顕著な場合には、効果の具体化、メカニズム解明を目的とした分析・評価計画を検討する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>比較的短い期間であれば降雨によるCs-137濃度低下は見られない。*1</li> <li>経年的にCs-137濃度低下が見られるデータもある。*2</li> </ul>
	b. 雨水接触によるコンクリート表面の核種濃度比の変化	<ul style="list-style-type: none"> <li>液相への移行のしやすさなどにより、雨水を媒体とした放射能濃度の変化は核種毎に異なる可能性がある。</li> <li>経時的に核種濃度比に変化が生じている可能性がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>雨水接触条件の差が比較的明確な部位を対象に、雨水接触時間と放射能濃度の関係を確認する。はつりもしくはスミヤ試料で評価可能。</li> <li>核種毎の変化の傾向を把握し、保守的な核種濃度比の評価条件を導出する。特にキー核種の変化の傾向が重要となる（Csの移行が顕著な場合には、過度に保守的となる可能性）。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>比較的短い期間であれば降雨によるCs-137濃度低下は見られない。*1</li> <li>経年的にCs-137濃度低下が見られるデータもある。*2</li> </ul>
	c. 雨水による核種移行に伴うホットスポットの形成	<ul style="list-style-type: none"> <li>雨水による核種移行に伴い、下流域にホットスポットが形成される可能性がある（外壁面際の土壌表面部近傍など）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>外壁の地表付近の土壌及び土壌部付近のコンクリートの放射能濃度を確認する。γカメラ等を利用して汚染箇所を特定し、試料採取・分析を行う。</li> <li>コンクリート側に顕著な汚染が確認された場合には、コア採取、分析。</li> </ul>	
採取位置・曝露条件 滞留水接触	d. 滞留水組成・接触時間の影響	<ul style="list-style-type: none"> <li>滞留水を媒体とした汚染では、滞留水の組成及び接触時間等によりコンクリート内への浸透深さが変わるものと予想される。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>滞留水組成及び接触時間が比較的明確な部位を対象にコンクリートコアを採取し、核種毎の浸透深さを評価する。</li> <li>表面状態、劣化状態との関係に留意（特に塗装面による浸透抑制効果）。</li> <li>既往研究での核種浸透評価モデル計算の検証データとする。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>浸漬試験に基づきビット地下の表面汚染について推定した事例がある。*3*10</li> </ul>
	e. 事前の海水・地下水接触履歴による浸透抑制の可能性	<ul style="list-style-type: none"> <li>事前に海水・地下水と接触歴のある領域は、コンクリート中の空隙の飽和及び吸着座の競合が、核種毎の浸透深さ・浸透挙動に影響を及ぼす可能性がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>滞留水流入前に海水と接触した部位を対象にコンクリートコアを採取し、核種毎の浸透状況を確認する。</li> <li>既往研究での核種浸透評価モデル計算の検証データとする。</li> <li>接触無しの部位と比較して有意な差が見られた場合には、効果の具体化、メカニズム解明を目的とした分析・評価計画を検討する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>実験結果に基づきビット地下の表面汚染について推定した事例がある。*10</li> </ul>
	f. 乾湿繰り返しによる核種毎の浸透深さ・浸透挙動	<ul style="list-style-type: none"> <li>乾湿繰り返しによる水分移動と核種吸着の関係から、核種毎にコンクリート中への浸透深さ・浸透挙動に違いが生じる可能性がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>乾湿繰り返しを受けた部位のコンクリートコアを採取し、核種毎の分布状況を確認する。</li> <li>乾湿繰り返し試験による模擬核種の移行挙動を確認する。</li> <li>上記より浸透メカニズムを評価し、乾湿が繰り返された場合の汚染傾向を理解する。</li> <li>湿度と核種の移動に関するデータを取得し、核種の移動をモデル化する。</li> </ul>	
地下水接触	g. 土壌による吸着効果	<ul style="list-style-type: none"> <li>土壌によって核種が吸着され、地下水の放射能濃度は相対的に低い水準となり、地下水接触部の汚染は軽微である可能性がある。</li> <li>土壌に対する核種の吸着性の違いにより、核種濃度比が大きく変化する可能性がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地下外壁部（地下水接触）のコンクリートコアを採取し、核種毎の浸透状況を確認する。</li> <li>コア採取が容易でないため、工事等のタイミングに合わせて試料採取を計画するものとするが、当面は周辺土壌・地下水の放射能濃度の把握を優先する。</li> </ul>	

表 汚染状況・汚染機構に関する文献調査結果概要（2/3）

分類	現象	着目点	分析・評価方針	知見
表面状態	塗装・保護層	h. 塗装・保護層による核種浸透抑制効果 <ul style="list-style-type: none"> <li>健全な塗装面ではCs-137の浸透深さは数mm以内に留まる報告がある。</li> <li>炭酸化によりCsが溶出しにくくなるデータもある。</li> <li>塗装面の状態によっては、表面より数cmの深さまでCs-137が浸透している事例もあり、塗装面の状態、ひび割れ、滞留水との接触時間等が影響している可能性がある。</li> <li>滞留水との接触履歴の無く塗装面が健全な領域は、塗装面の剥離により有効な除染ができる可能性がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>塗装・保護層の有無・劣化状態の差が比較可能な部位を選択し、塗料・保護層及び層下のコンクリート表面の放射能濃度の測定を行う。はつりもしくはスミヤ試料で評価可能。</li> <li>層下に比較的高い濃度の汚染が確認された場合には、コンクリートコアを採取し浸透状況の確認を行う。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>塗料（エポキシ）には放射性核種（Cs-137が主）を含む溶液はほとんど浸透しないという事例がある。*11</li> </ul>
	塗装・保護層への核種吸着	i. 塗装・保護層への核種吸着 <ul style="list-style-type: none"> <li>エポキシ樹脂塗装面に対して、Cs-137の吸着は微量であるのに対して、Sr-90の一定程度の吸着・浸透が確認されている。塗装・保護層が特定の核種を吸着している可能性がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>塗装・保護層の放射能濃度の分析を行う。</li> <li>塗装・保護層の材質との関係を整理する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>表面保護層（エポキシ）に対してCs-137吸着は微量である。*4</li> <li>Sr-90はエポキシ樹脂に一定程度吸着・浸透する。</li> </ul>
	飛散防止材	j. 飛散防止材による核種移行抑制 <ul style="list-style-type: none"> <li>建屋壁面に事故直後に散布された飛散防止材により、ウェザリングによるコンクリート表面の核種の移行（流出・浸透）が抑制されている可能性がある。</li> <li>（飛散防止剤の健全性、均質性により異なる）</li> </ul> k. 飛散防止材への核種吸着 <ul style="list-style-type: none"> <li>飛散防止材が特定の核種を吸着している可能性がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>飛散防止材の劣化状態の差が比較可能部位を選択し、層下のコンクリート表面の放射能濃度の測定を行う。はつりもしくはスミヤ試料で評価可能。</li> <li>層下に比較的高い濃度の汚染が確認された場合には、コンクリートコアを採取し浸透状況の確認を行う。</li> </ul>	

表 汚染状況・汚染機構に関する文献調査結果概要（3/3）

分類	現象	着目点	分析・評価方針	知見
劣化状態	亀裂	<ul style="list-style-type: none"> <li>亀裂部に対して、核種の選択的な移行が確認されている。水を媒体に浸入していると考えられ、滞留水が接触した箇所は、比較的深部まで汚染されている可能性がある。</li> <li>Cs-137とSr-90の亀裂内での移行挙動の違いが確認されている。亀裂内面への吸着性などにより、核種毎の浸透挙動が異なる可能性がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>亀裂部のコアを採取して亀裂内の核種浸透状況について確認を行う。表面状態、劣化状態との関係に留意（特に塗装面による浸透抑制効果）</li> <li>亀裂部の浸透（浸入）メカニズムについて検討し、乾湿繰り返しのある条件も考慮して亀裂内の核種浸透に関する保守的な評価条件を導出する。([e]で構築したモデルの高度化で評価可能)</li> <li>亀裂の特性（頻度・深さ・幅等）についても整理し、安全上、許容できる条件の具体化を図る。</li> <li>外観観察によるひび割れ密度から内部の放射能濃度分布を推定する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>亀裂中のCs-137浸透挙動*5</li> <li>亀裂中のSr-90浸透挙動</li> <li>亀裂の頻度、深さを予測するモデルは報告されている*10</li> </ul>
	炭酸化・溶脱	<ul style="list-style-type: none"> <li>コンクリートの炭酸化・溶脱により、基質部の核種の吸着特性（鋳物組成）、空隙構造が変化する。</li> <li>既存の知見ではCs,Srは炭酸化領域に留まっているデータが多い。ただし、他の核種は不明。</li> <li>フェノールフタレインにより容易に識別可能な炭酸化領域を、建屋解体時の除染・分別範囲の目安にできる可能性がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>炭酸化した部位のコンクリートコアを採取し、コンクリート内の核種毎の浸透状況を確認する。</li> <li>Cs-137等は吸着性が向上し、炭酸化領域に留まることが考えられるが、他核種についても確認が必要である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>炭酸化・溶脱による核種吸着特性の変化*6</li> </ul>
	骨材・結合材組成	<ul style="list-style-type: none"> <li>特定の粗骨材にCs-137が高濃度で吸着される事例が確認されている。</li> <li>再利用等を行う場合に、何らかの対応が必要となる可能性がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>γについては、相対的に高線量の個体（骨材）を確認し、採取・分析を行う。</li> <li>β・αについては非破壊での個体選定が困難であるため、鋳物学的に吸着する可能性の高い組成の粗骨材種類を特定し、試料採取・分析を行う。</li> <li>高濃度の粗骨材の存在の安全上の影響評価や再利用等における条件について検討を行う。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>骨材組成による核種浸透挙動の変化*7</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>細骨材・結合材の組成による核種浸透深さ・浸透挙動の変化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>コンクリート内の核種浸透挙動に影響を及ぼす鋳物組成・空隙構造は、結合材、細骨材の仕様に支配され、核種毎に影響は異なる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>細骨材・結合材が異なるコンクリートの核種浸透状況の違いについて、コンクリートコアを採取・分析し、比較を行う。</li> <li>空隙構造、吸着性と核種の浸透挙動メカニズムの整理を行う。コールド試験の可能性。</li> </ul>

- \*1 大槻謙太郎, 小林光, 須藤慎仁 (2023). "コンクリート/アスファルト等の人工被覆試験体を用いた Cs-137深度分布のウェザリング影響評価" 環境放射能除染研究発表会 12: S5-8.
- \*2 山田 正人, 立尾浩一, 国分宏城, 福島県で発生した建設系廃棄物の処理処分に伴う放射性セシウムの移動量の推計, 環境放射能除染学会研究発表会, P1-3, 2021
- \*3 洞秀幸, 渋谷和俊, 山田一夫, 丸山一平, 放射性物質によるコンクリート汚染の機構解明と汚染分布推定に関する研究 (24) ひび割れたコンクリートの汚染量試算, 日本原子力学会秋の大会, 1C17, 2023
- \*4 Maeda, K., et al. (2014). "Distribution of radioactive nuclides of boring core samples extracted from concrete structures of reactor buildings in the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant." Journal of Nuclear Science and Technology 51(7-8): 1006-1023.
- \*5 Yamada, K., et al. (2019). "Field Survey of Radioactive Cesium Contamination in Concrete After the Fukushima-Daiichi Nuclear Power Station Accident." Journal of Advanced Concrete Technology 17: 659-672.
- \*6 李春鶴, 半井健一郎, 石井祐輔, 横塚清規, 材齢初期からの炭酸化がセメント硬化体の細孔構造および酸素拡散係数に与える影響に関する 2, 3 の考察, セメント・コンクリート論文集, No.63, pp.99-106, 2009
- \*7 山田一夫, 檜森恵大, 富田さゆり, 市川恒樹, コンクリート構成物のイオン吸着とイオン浸透の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, pp.484-489, 2023
- \*8 Ngala, V. T. and C. L. Page (1997). "EFFECTS OF CARBONATION ON PORE STRUCTURE AND DIFFUSIONAL PROPERTIES OF HYDRATED CEMENT PASTES." Cement and Concrete Research 27(7): 995-1007.
- \*9 佐々木賢二, 横澤良太, 佐伯竜彦, セメント系硬化体の塩化物イオン拡散性上に及ぼす炭酸化の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, pp.1035-1040, 2007
- \*10 福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉環境国際共同研究センター, 東京大学, 合理的な処分のための実機環境を考慮した汚染鉄筋コンクリート長期状態変化の定量評価 (委託研究), JAEA-Review2024-011
- \*11 Sato, I., et al. (2015). "Penetration behavior of water solution containing radioactive species into dried concrete/mortar and epoxy resin materials." Journal of Nuclear Science and Technology 52(4): 580-587.

表 文献調査に基づく汚染状態・建屋解体方法の仮定と調査・分析における確認事項（1/2）

部位		汚染状態（仮定）	解体方法	調査・分析における確認事項	
外壁	地上部	塗装・保護層有（健全）	<ul style="list-style-type: none"> <li>塗装・保護層の剥離・回収</li> <li>基質部への浸透汚染は許容（分離しない）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>塗装・保護層の放射能濃度・核種濃度比（表面汚染及び核種吸着）</li> <li>塗装・保護層下の基質部の核種浸透状況（大半の核種が塗装・保護層に留まっていることの確認）</li> <li>ウェザリング影響の確認</li> </ul>	
		塗装・保護層有（劣化） 塗装・保護層無	<ul style="list-style-type: none"> <li>塗装・保護層の剥離・回収（有の場合）</li> <li>汚染レベルが高い場合→炭酸化領域の確認・分離（はつり）</li> <li>汚染レベルが低い場合→汚染領域の確認・分離（はつり）</li> <li>コンクリート及び塗装・保護層の混合が問題無い場合には、上記を同時に実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>塗装・保護層の放射能濃度・核種濃度比（表面汚染及び核種吸着）</li> <li>基質部の核種浸透状況（大半の核種が炭酸化領域に留まっていることの確認＋炭酸化領域の確認）</li> <li>ウェザリング影響の確認</li> </ul>	
		飛散防止材塗布	<ul style="list-style-type: none"> <li>飛散防止材の剥離・回収</li> <li>汚染レベルが高い場合→炭酸化領域の確認・分離（はつり）</li> <li>汚染レベルが低い場合→汚染領域の確認・分離（はつり）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>飛散防止材の放射能濃度・核種濃度比</li> <li>飛散防止材下の外壁表面の放射能濃度・核種濃度比の確認</li> <li>基質部の核種浸透状況（大半の核種が炭酸化領域に留まっていることの確認＋炭酸化領域の確認）</li> <li>ウェザリング影響の確認</li> </ul>	
	地下部（通常）	塗装・保護層有（健全） 塗装・保護層有（劣化） 塗装・保護層無	<ul style="list-style-type: none"> <li>周辺土壌への吸着により地下水の放射能濃度は低い水準が維持されること及び飽和により水の浸入が生じにくいことから、基質部への浸透は安全上許容できるレベル。</li> <li>核種濃度比は、周辺土壌への吸着等の影響で変化する。建屋際の地表部付近の土壌にホットスポット形成の可能性がある。</li> <li>塗装等にSr-90等の核種が吸着されている。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>塗装・保護層の放射能濃度・核種濃度比（表面汚染及び核種吸着）</li> <li>塗装・保護層下の基質部の核種浸透状況（大半の核種が塗装・保護層に留まっていることの確認）</li> <li>周辺土壌の汚染状況</li> </ul>	
	地下部 （地下水の汚染高）	塗装・保護層有（健全）	<ul style="list-style-type: none"> <li>汚染は大半が塗装・保護層表面に留まる。基質部への浸透は安全上許容できるレベル。</li> <li>核種濃度比は、周辺土壌への吸着等の影響で変化する。建屋際地表部付近の土壌にホットスポット形成の可能性がある。</li> <li>塗装等にSr-90等の核種が吸着されている。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>塗装・保護層の剥離・回収</li> <li>基質部への浸透汚染は許容（分離しない）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>塗装・保護層の放射能濃度・核種濃度比（表面汚染及び核種吸着）</li> <li>塗装・保護層下の基質部の核種浸透状況（大半の核種が塗装・保護層に留まっていることの確認）</li> <li>周辺土壌の汚染状況</li> </ul>
		滞留水漏洩箇所近傍など	塗装・保護層有（劣化） 塗装・保護層無	<ul style="list-style-type: none"> <li>塗装・保護層の剥離・回収（有の場合）</li> <li>土壌側ホットスポット近傍の汚染領域の確認→必要に応じて除去</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>塗装・保護層の放射能濃度・核種濃度比（表面汚染及び核種吸着）</li> <li>塗装・保護層下の基質部の核種浸透状況</li> <li>周辺土壌の汚染状況</li> </ul>



表 文献調査に基づく汚染状態・建屋解体方法の仮定と調査・分析における確認事項（2/2）

部位		汚染状態（仮定）	解体方法	調査・分析における確認事項	
屋内	滞留水接触有	塗装・保護層有（健全）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・汚染は塗装・保護層により浸透が抑制される。一定の基質部への浸透が生じている。大半が炭酸化領域に留まる。</li> <li>・乾湿繰り返し等の影響で、核種濃度比及び浸透範囲が変化している。</li> <li>・塗装等にSr-90等の核種が吸着されている。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・塗装・保護層の剥離・回収</li> <li>・炭酸化領域の確認・分離（はつり）</li> <li>・コンクリート及び塗装・保護層の混合が問題無い場合には、上記を同時に実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・塗装・保護層の放射能濃度・核種濃度比（表面汚染及び核種吸着）</li> <li>・塗装・保護層下の基質部の核種浸透状況（大半の核種が炭酸化領域に留まっていることの確認）</li> </ul>
		塗装・保護層有（劣化） 塗装・保護層無	<ul style="list-style-type: none"> <li>・基質部への浸透が生じている。炭酸化領域は高いレベルでの汚染が想定される。</li> <li>・乾湿繰り返し等の影響で、核種濃度比及び浸透範囲が変化している。</li> <li>・塗装等にSr-90等の核種が吸着されている。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・塗装・保護層の剥離・回収</li> <li>・汚染領域の確認・分離（はつり）もしくは</li> <li>・分離無し（平均化した一つの廃棄物として扱う）（工学的に合理的に分離が困難な場合）</li> <li>・コンクリート及び塗装・保護層の混合が問題無い場合には、上記を同時に実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・塗装・保護層の放射能濃度・核種濃度比（表面汚染及び核種吸着）</li> <li>・塗装・保護層下の基質部の核種浸透状況（核種毎の浸透深さ）</li> </ul>
	滞留水接触無	塗装・保護層有（健全）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・汚染は大半が塗装・保護層表面に留まる。基質部への浸透は安全上許容できるレベル。</li> <li>・塗装等にSr-90等の核種が吸着されている。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・塗装・保護層の剥離・回収</li> <li>・基質部への浸透汚染は許容（分離しない）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・塗装・保護層の放射能濃度・核種濃度比（表面汚染及び核種吸着）</li> <li>・塗装・保護層下の基質部の核種浸透状況（大半の核種が塗装・保護層に留まっていることの確認）</li> </ul>
		塗装・保護層有（劣化） 塗装・保護層無	<ul style="list-style-type: none"> <li>・汚染は基質部に浸透し、大半が炭酸化領域に留まる。</li> <li>・塗装等にSr-90等の核種が吸着されている</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・塗装・保護層の剥離・回収（有の場合）</li> <li>・汚染レベルが高い場合→炭酸化領域の確認・分離（はつり）</li> <li>・汚染レベルが低い場合→汚染領域の確認・分離（はつり）</li> <li>・コンクリート及び塗装・保護層の混合が問題無い場合には、上記を同時に実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・塗装・保護層の放射能濃度・核種濃度比（表面汚染及び核種吸着）</li> <li>・塗装・保護層下の基質部の核種浸透状況（大半の核種が炭酸化領域に留まっていることの確認）</li> </ul>
共通	基質部	<p>共通 （上記との組み合わせ）</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・表面より拡散もしくは水の移行により、コンクリートの基質部内での核種移行が進行する。</li> <li>・汚染範囲は核種毎に異なり、結合材・細骨材仕様・組成、事前の水分的状態、乾湿繰り返し、炭酸化範囲により変化する。</li> <li>・特定の粗骨材に特定の核種が吸着されている可能性がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・汚染領域の確認・分離（はつり）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・粗骨材仕様・組成毎の核種吸着性の確認</li> <li>・結合材・細骨材仕様・組成毎の核種移行性の確認</li> <li>・水分状態の影響確認（乾湿影響等）</li> <li>・許容可能な浸透状況の評価（マクロの放射能濃度・放射エネルギーへの影響評価）</li> </ul>	
	亀裂部	<p>共通 （上記との組み合わせ）</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・表面汚染より亀裂部に核種が浸透する。</li> <li>・核種は水を媒体に亀裂内を移行する。</li> <li>・浸透の程度は、表面の放射エネルギー、亀裂状態、水の供給条件等に依存する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・安全上許容できる亀裂状態及び頻度を定義し、亀裂状態を確認 → 亀裂部の汚染混合を許容</li> <li>・分離が必要な場合には、亀裂の有無で領域を区分し、それぞれ切り離して取り扱う。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実施の亀裂内への核種浸入状態を確認し、亀裂条件と放射エネルギーの浸入割合などの関係を整理。亀裂状態と表面汚染から、亀裂内の放射エネルギーに関する保守的な推定方法を整理する。</li> <li>・予備的安全評価により、安全上許容できる亀裂状態及び頻度を定義する（マクロの放射能濃度・放射エネルギーへの影響評価）。</li> </ul>	

# 試料採取・分析の実施方針

- 建屋の部位，環境，コンクリートの性状・劣化状況等と汚染分布・汚染機構との関係を把握するため，抽出した影響因子の組み合わせをパターン化し，実施設からの試料採取・分析により，パターン毎の核種毎の浸透状況・分布を確認する。
- 試料採取は，下記の建屋を対象に実施する。パターン毎の核種毎の浸透状況・分布の差異の比較・評価ができるように試料採取位置を決定する。また，試料採取の容易性も考慮して計画を策定する。

表 分析試料採取対象

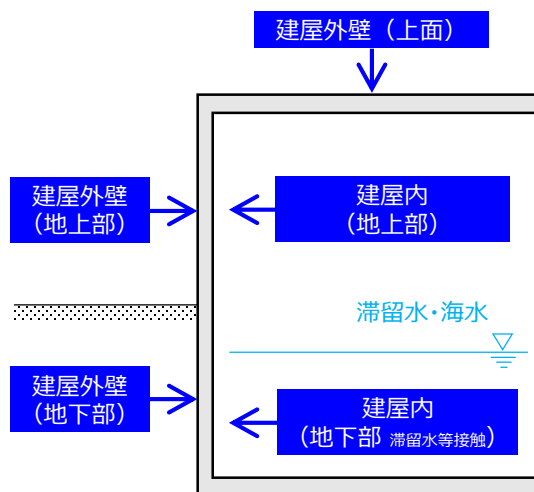
対象施設	調査目的	汚染状態			試料採取性
		事故前汚染	事故由来汚染	滞留水接触	
3・4号Rw/B	• 解体モデルケース検討の対象施設	有	有	有／無	難
1-4号機R/B・T/B・附属施設	• 深刻な事故由来汚染の評価を実施	有 (原子炉領域含む)	有	有／無	難
5・6号機R/B・T/B・附属施設	• 軽微なフォールアウトに対する評価を実施	有 (原子炉領域含む)	有 (主にフォールアウト)	無	-
その他施設	• 軽微なフォールアウトに対する評価を実施	無	低 (主にフォールアウト)	無	-

※事故炉や滞留水接触部位の試料採取は，採取方法・安全対策の検討に時間を要する見込み。当面は，他工事と連携して試料採取を進めていく。

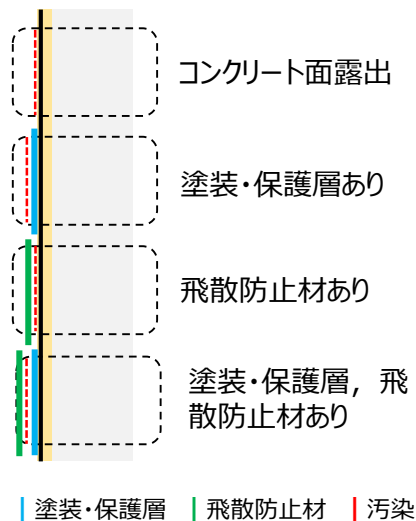
表 部位・汚染影響因子の組み合わせのパターン

No.	位置		a. 採取位置 (部位・曝露環境)			b. 表面状態		c. コンクリート性状			
			a) ウェザリング	b) 滞留水接触	c) 地下水接触	d) 塗装・保護層	e) 飛散防止材	f) 亀裂	g) 炭酸化/溶脱	h) 骨材・結合材	
1	地上部	外壁 (側面)	○					亀裂箇所の核種移行挙動を評価	炭酸化/溶脱等による核種移行挙動を評価	骨材の違いによる核種移行挙動を評価	
2			○			○					
3			○				○				
4			○			○	○				
5	地上部	建屋内									
6						○					
7	地下部	外壁			○						
8		建屋内		○							
9		建屋内		○		○					

### a. 採取位置 (曝露環境)



### b. 表面状態



### c. コンクリート性状

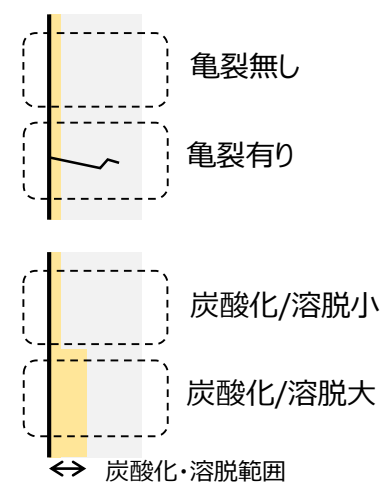


表 建屋解体物に係る試料採取計画

対象		施設	位置	形態	採取数	備考
3・4号Rw/B		3号機Rw/B	1F・2F	コア	9	
				はつり	3	
1号～4号	R/B・T/B	2号機R/B	外壁	コア	10	
		2号機T/B	2F	コア	4	低線量エリア
	はつり			4		
	附属施設	プロセス主建屋	B1F床（滞留水接触）	コア	4	塗装有無
		3・4号開閉所	外壁	コア	4	
		1・2号機活性炭H/U建屋	外壁，内壁・床	コア	8	
				環境管理棟	内壁	コア
	はつり	2				
5・6号	R/B・T/B	5・6号R/B・T/B	屋内 (コア6，はつり2)	コア	12	
			屋外 (コア6，はつり2)	はつり	4	

参考資料  
(瓦礫類の放射能濃度管理手法構築の検討)

# 実現すべき姿に向けた対応方針

## リスクマップ上の目標（実現すべき姿）に向けた対応方針

- 実現すべき姿（2033年度目標） → 「放射能濃度の評価と管理」「構内再利用等の本格運用」
- これに対して、瓦礫類の放射能濃度評価手法の確立を進めていく。既発生の瓦礫類からの試料採取の合理性を考慮し、屋外一時保管解消までの2028年度を目標に検討を進める。

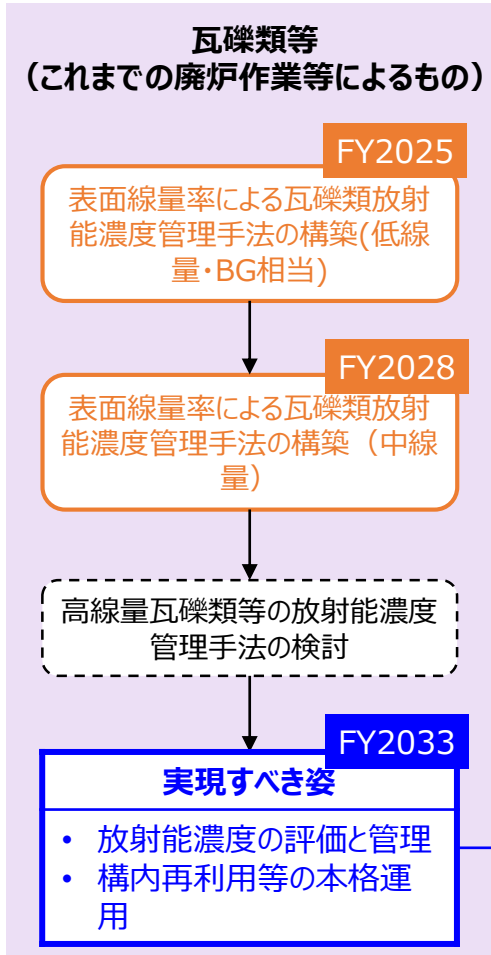


表 実現すべき姿に対する対応方針

実現すべき姿（2033年度）		対応方針	実施時期
放射能濃度の評価と管理	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 既発生瓦礫等（焼却灰，スラグ含む）の放射能濃度評価方法を確立し，濃度による適切な保管・管理を行う。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 保管容器の表面線量率から放射能濃度を評価する手法を構築する。</li> </ul>	2028年度（目標）
構内再利用等の本格運用	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 放射能濃度に基づく屋外保管含む合理的な保管方法・構内再利用の考え方を整理し，運用を開始する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1F固有の廃棄物特性や条件を考慮した保管方法，再利用方法の検討を行う。解体モデルケース検討の一部として実施予定。</li> </ul>	解体モデルケース検討で対応。
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 溶融設備の運用を開始し，金属瓦礫等の減容を進める。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 金属溶融設備の設置。</li> </ul>	1F固体廃棄物の保管管理計画に準ずる。

# 検討条件（表面線量率によるCs-137濃度評価手法の検討）

## ■ 想定する瓦礫類の状態（Phase.1）

- 瓦礫類は形状・保管状態が多様であり、それらの不規則さへの対応が問題となる。下記を踏まえ、まずは「減容施設または破碎機器により破碎されたコンクリート」を対象を絞って検討を進める。
  - ✓ 低線量の瓦礫類は、原則として減容処理施設にて破碎・切断による減容が行われること。
  - ✓ 路盤材として再利用を進めているコンクリートガラの放射能濃度評価を優先して進めたいこと。
  - ✓ 粒径が小さい方が相対的に表面積が増えるため、濃度の定量化においては保守的な条件であると考えられること。

## ■ 線源種類

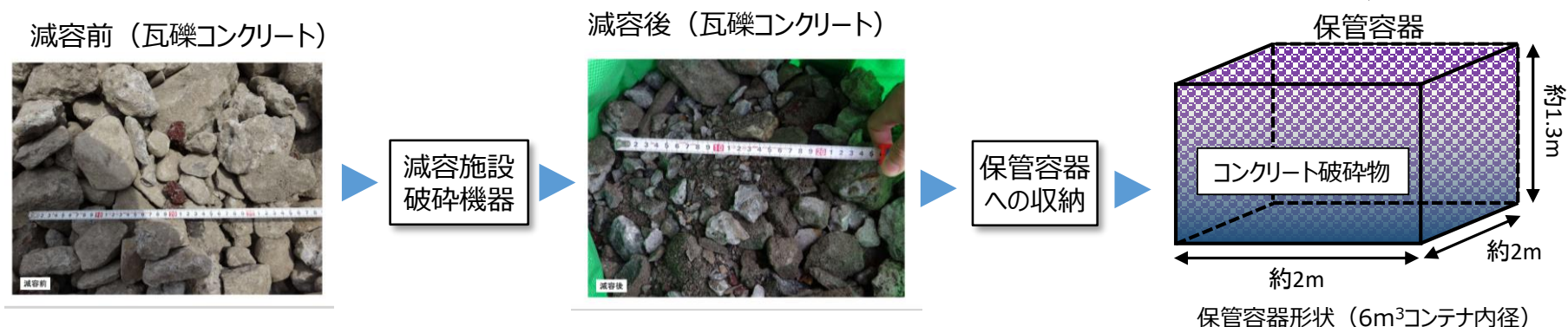
- 下記の理由により、線源とする $\gamma$ 核種をすべてCs-137と想定する。
  - ✓ 既往の分析において1F構内の低線量の土壌のCo-60濃度が全てNDであること
  - ✓ 表面線量率からのCs-137濃度推定において、放射能濃度が相対的に高く評価されること

## ■ コンクリート内部への汚染浸透

- 遮蔽効果を考慮し、1個体に対して等価な線源分布として設定する。

## ■ 保管容器形状について

- 6m<sup>3</sup>コンテナを基本とする。



# 検討条件（Cs-137と他核種の放射能濃度比の整理）

## ■ グループングについて

- 核種濃度比の評価は、汚染傾向が類似の廃棄物でグループングを行い、グループ毎に評価を行う。
- まずは下記の2グループから検討をスタートする。分析データに基づく核種濃度比の評価の結果を踏まえ、必要に応じてグループを追加（分割）していく。

グループ	対象
Group.1	β無
Group.2	β有（ [70μm 線量当量率] - [1cm 線量当量率] > 0.01mSv/h）
（Group.3～）	分析データに基づき、傾向の異なる管理可能なグループを必要に応じて追加（分割）

## ■ 評価対象とする核種について

- キー核種はCs-137とする。
- キー核種に対する核種濃度比を評価する核種は、固体廃棄物の分析対象核種選定の考え方を踏襲して選定する（優先核種10核種を優先、可能な範囲で分析対象30核種をカバー）。



①

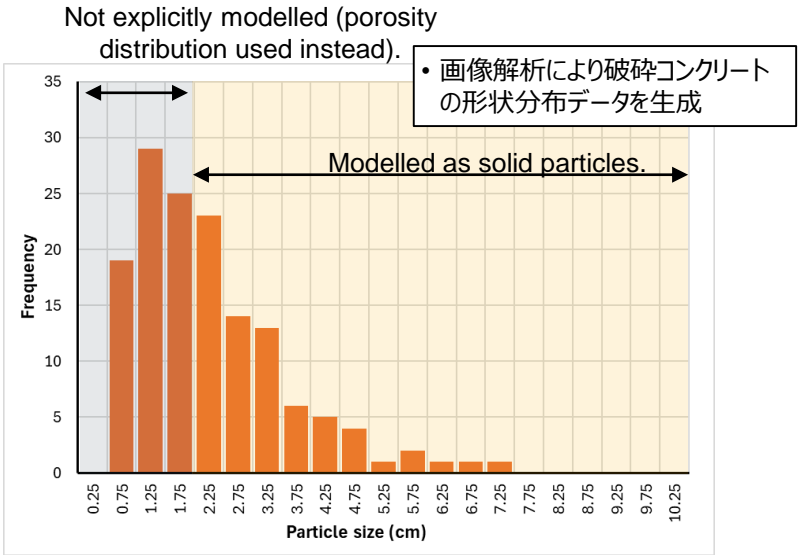


図 破碎コンクリートの形状分布 (画像解析により生成)

②

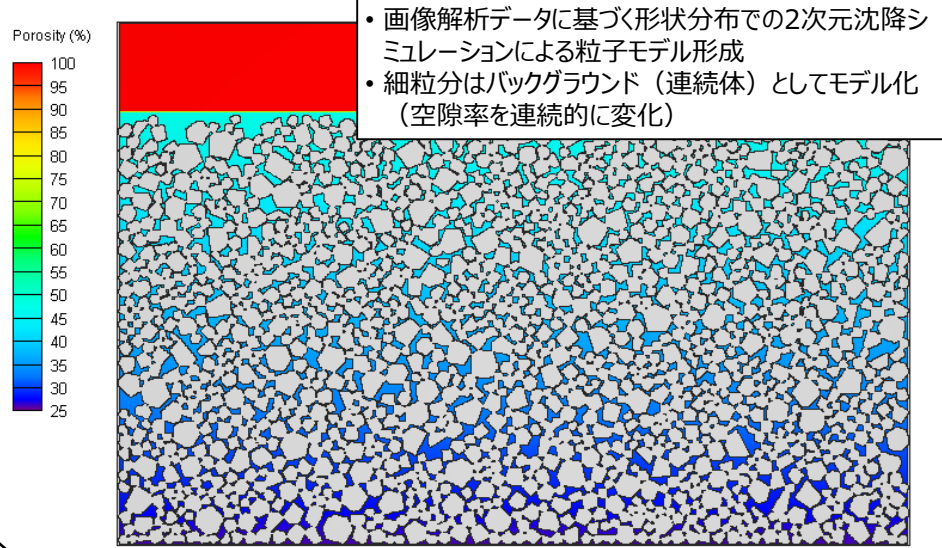


図 保管容器に収納された破碎コンクリート粒子モデルの例

③

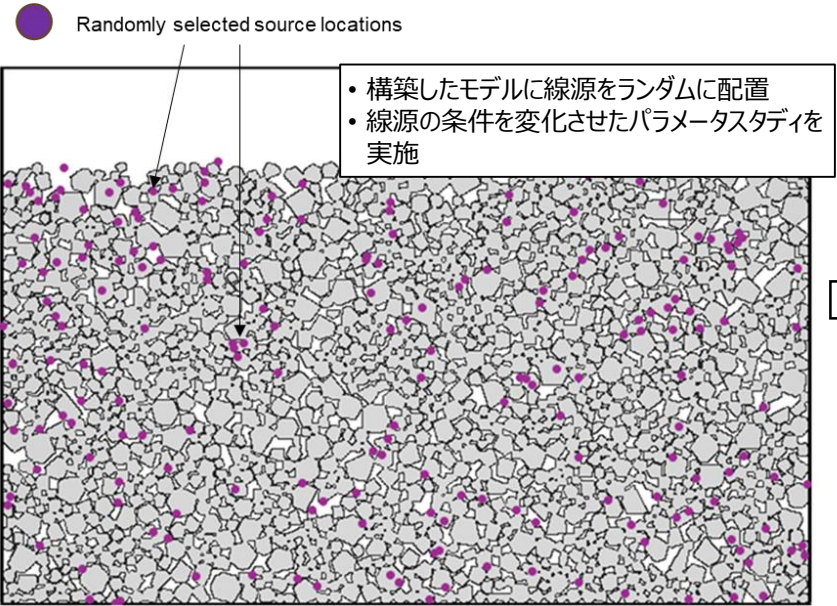


図 線源設定の例 (200個をランダムに配置)

④

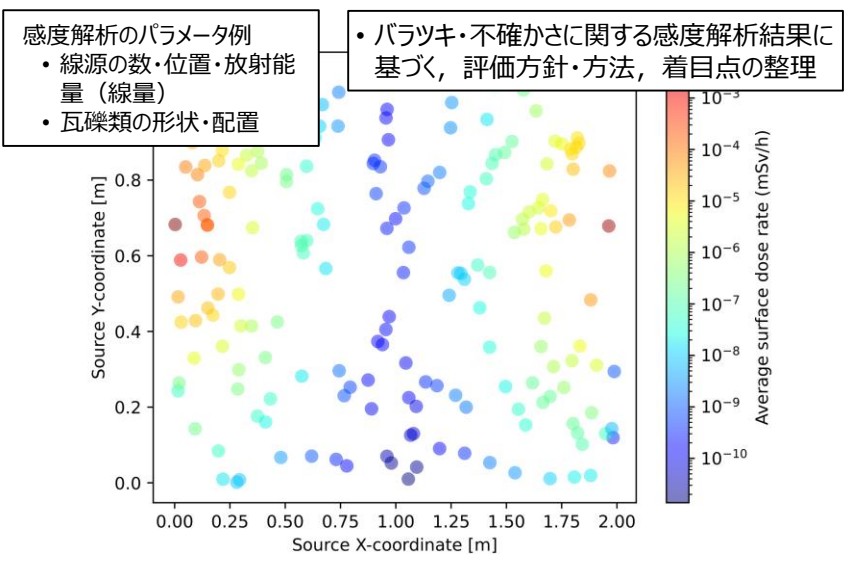
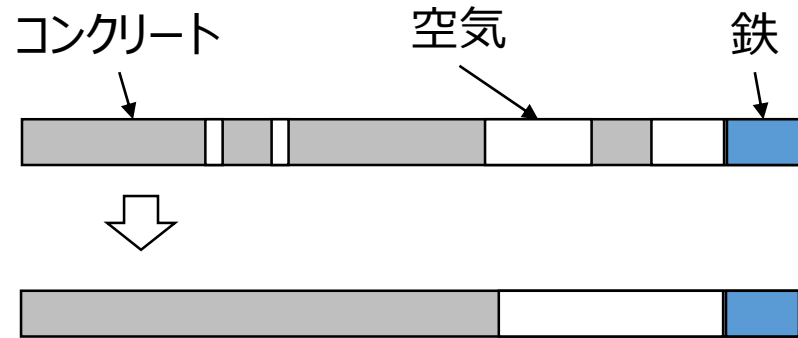
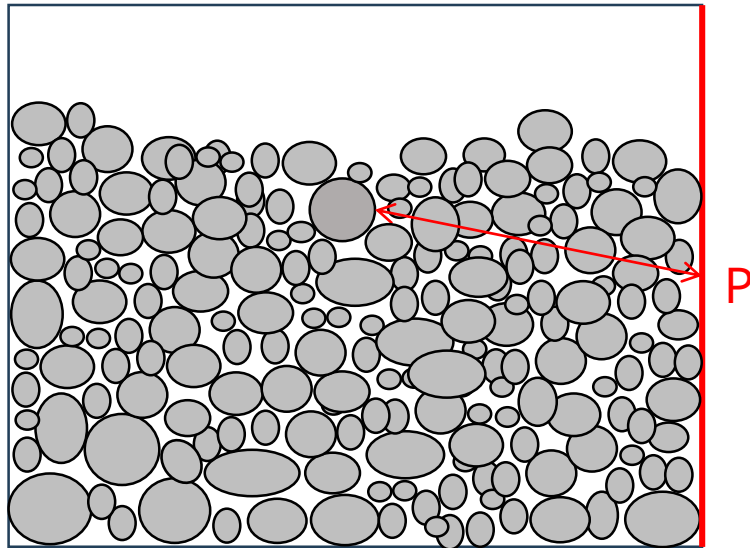


図 線源位置毎の表面線量率寄与率

## 測定面（左右両面において評価）



1. 各コンクリートがれき $i$ の放射能濃度が一律( $\bar{S}$  [Bq $\cdot$ cm $^{-3}$ ], 未知)で体積が $V_i$  [cm $^3$ ]であると仮定する。また、モデルは2次元を仮定する。
2. 測定面および測定点Pの位置を設定する。
3. 各線源の位置から測定点までのコンクリート、空気、鉄の厚さを取得
4. コンクリートおよび鉄の厚さに応じた実効線量透過率( $F_i$  [-])と計算
5. 各コンクリートの中心における点線源( $\bar{S}V_i$  [Bq])が放出するガンマ線による測定面における実効線量 $E_i$  [Sv $\cdot$ h $^{-1}$ ]は以下の式で計算できる。

$$E_i = \frac{SV_i}{4\pi r_i^2} \times \varepsilon \times \left(\frac{E}{\Phi}\right) \times 10^{-12} \times 3600 \times F_i$$

6. 各コンクリートがれきからの影響について和をとると以下ようになる。  
 $\dot{E}$  [Sv $\cdot$ h $^{-1}$ ]は容器表面における実効線量の値であり、測定値があるのでこの関係式から $\bar{S}$ の値を計算できる。

$$\frac{\dot{E}}{\bar{S}} = \frac{1}{\bar{S}} \sum_i E_i = \sum_i \left( \frac{V_i}{4\pi r_i^2} \times \varepsilon \times \left(\frac{E}{\Phi}\right) \times 10^{-12} \times 3600 \times F_i \right)$$

7. 測定点Pや測定面の位置を数ケース変えて上記の $\dot{E}/\bar{S}$ の値の変化を確認する

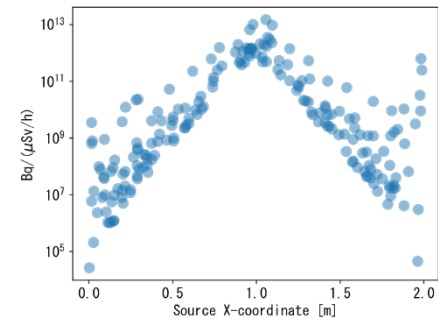
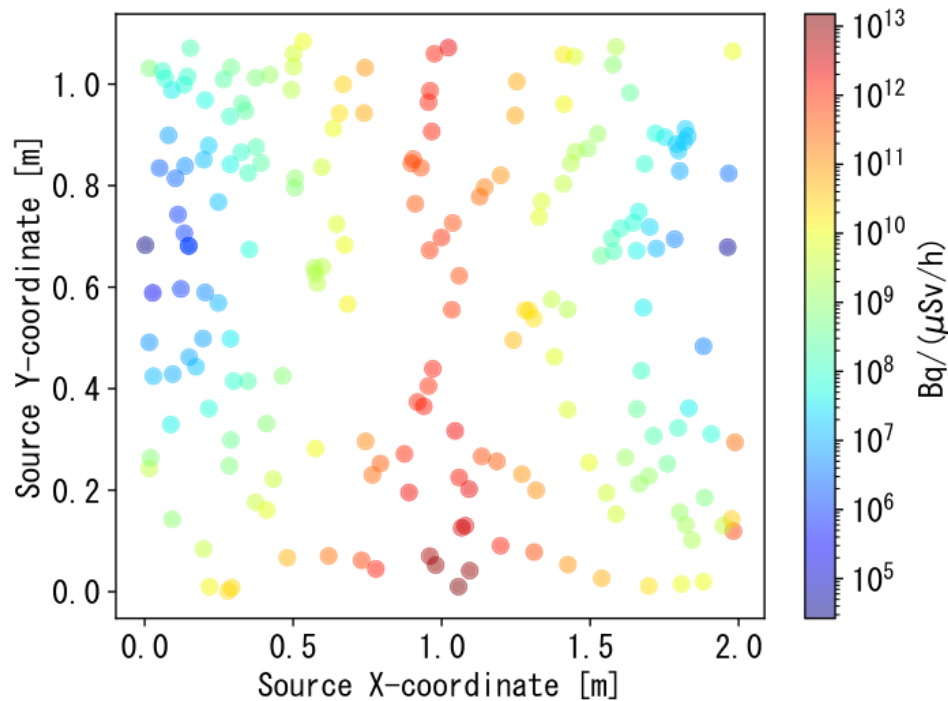
左式のパラメーター一覧

Effective dose rate	$E_i$	Sv $\cdot$ h $^{-1}$
Distance from source	$r$	cm
$\gamma$ -ray emission rate	$\varepsilon(E)$	—
Effective dose conversion coefficient	$\left(\frac{E}{\Phi}\right)$	pSv $\cdot$ cm $^2$
Effective dose transmittance	$F_i(t)$	—

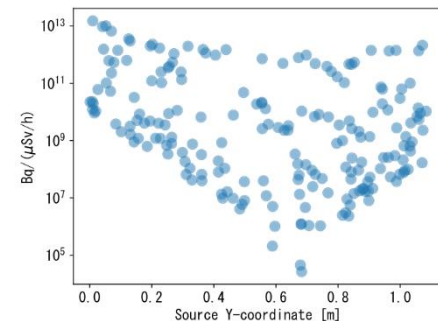
# 表面線量率と放射エネルギーの相関の位置依存性 (1/2)

単位表面線量率(1 $\mu$ Sv/h)に相当する放射エネルギーの位置依存性

- ランダムに配置した各線源の寄与による容器側面での表面線量率は位置によって大きく異なり、外側から内側に向けて上昇する。
- 単位表面線量率に相当する放射エネルギーは容器外側の測定位置直近と最も遠い容器中央底部とで8桁程度異なる。



単位表面線量率(1  $\mu$ Sv/h)に相当する放射能分布 (水平方向)



単位表面線量率(1  $\mu$ Sv/h)に相当する放射能分布 (鉛直方向)

図 ランダムに配置した各放射線源による単位表面線量率(1  $\mu$ Sv/h)に相当する放射能分布 (左右の平均線量率から換算)

# 表面線量率と放射エネルギーの相関の位置依存性 (2/2)

- 前項のグラフのとおり、瓦礫（コンクリート）の遮蔽効果及びガンマ線の広がりのために容器壁から内側に離れるにつれて表面線量率への寄与は急激に低下する。
- 測定点に対して低角で入射するガンマ線は遮蔽効果の大きい鉄容器内の距離が大きいことから、さらに減衰する。
- 個々の測定点での表面線量率測定データは、それぞれ近傍の比較的狭い範囲内の汚染箇所により支配されているものと考えられる。

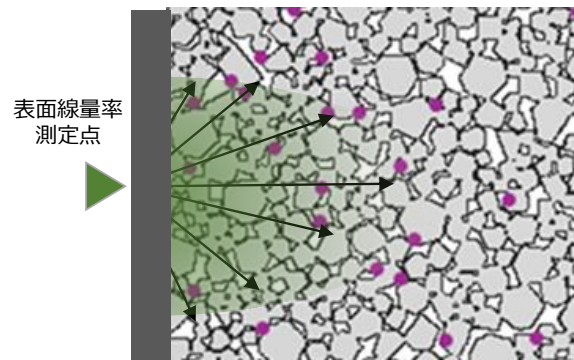


図 各測定点の対象範囲

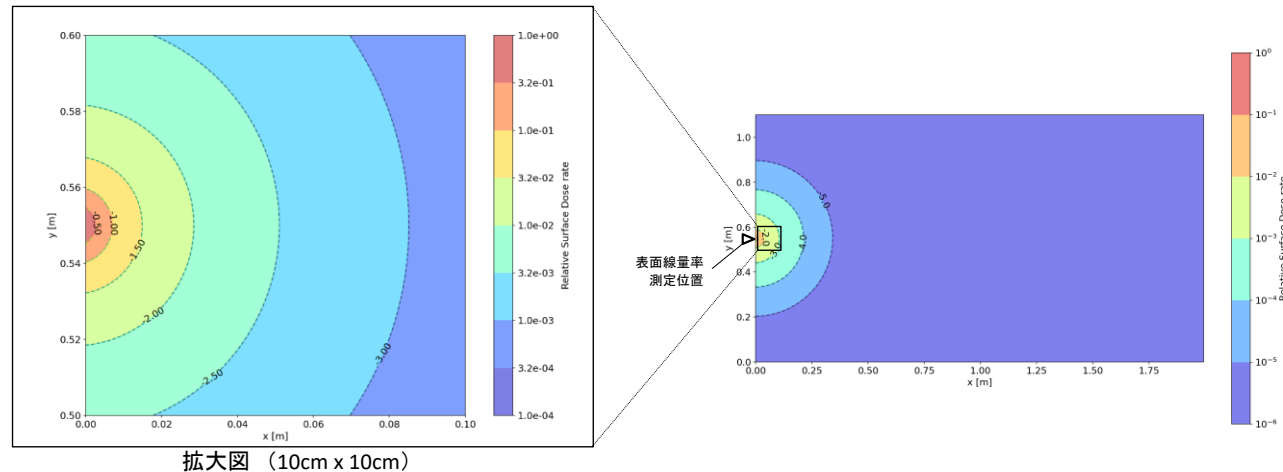
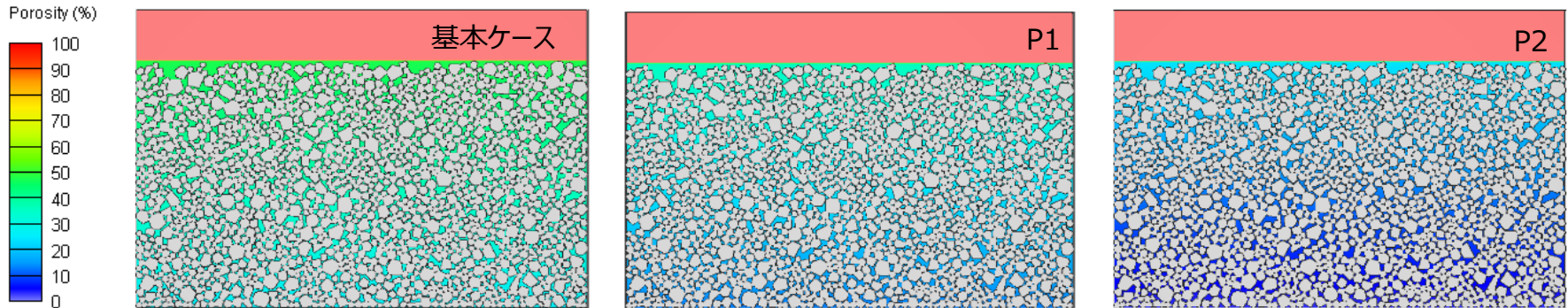


図 各点での表面線量率に寄与する線源の範囲

- 個々の測定点での表面線量率の測定データは、それぞれ近傍の比較的狭い範囲内の汚染箇所により支配されているものと考えられる。
- 表面線量率から精度よく想定可能な保管容器内の領域は、容器内周部近傍に限られると考えられる。
- 瓦礫類の放射能濃度が低い場合、容器内周部近傍の領域しか測定できていない可能性がある（測定可能な範囲は、線源の強度及び測定機器の性能に依存）

# 感度解析：微細粒子の間隙率

- 微細粒子（直径2cm未満）は、深さに応じて変化する空隙率を持つ連続体として表し、空隙率 $\phi$ は $\phi_{top}$ から $\phi_{bottom}$ に直線的に減少するものと仮定している。
- ここでは、 $\phi_{top}$ と $\phi_{bottom}$ を変化させた2種類の変動ケースについてシミュレーションを行った



Model	$\phi_{top}$	$\phi_{bottom}$
Base Case	47.6%	26%
P1	36%	13%
P2	24%	3%

基本ケース及び変動ケースにおける各線源による表面線量率の比較

- 連続体として表現した微細粒子の間隙率が低下することによって遮蔽効果が増大し、各線源による表面線量率は若干低下するが、その影響は必ずしも大きなものではない

- 表面線量率 – Cs-137濃度に対する間隙の細粒分の不均一性の影響の程度は大きくない。高密度な材料で充填されている状態が保守的であることを踏まえて評価を行う。
- 細粒分に選択的にCs-137が含まれている可能性があり、線源の不均一性の要因となる可能性がある（底部への線源の偏り）。

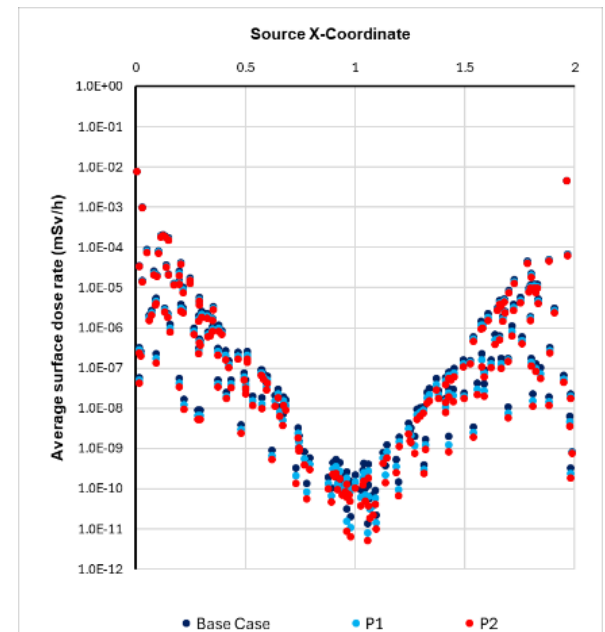


図 評価結果（線量寄与率の違い）

# 感度解析：汚染箇所（放射線源）の数量

- 200個のソースからランダムにn個を重複を許さずに抽出し、それぞれのセットにおける1ソースあたりの単位表面線量率に相当する放射エネルギーの平均値を算出する。
- この操作を1000セットについて繰り返し、それぞれのnにおけるアンサンブル平均を算出した。
- nが増加するにつれてアンサンブル平均は一定値に収束する。

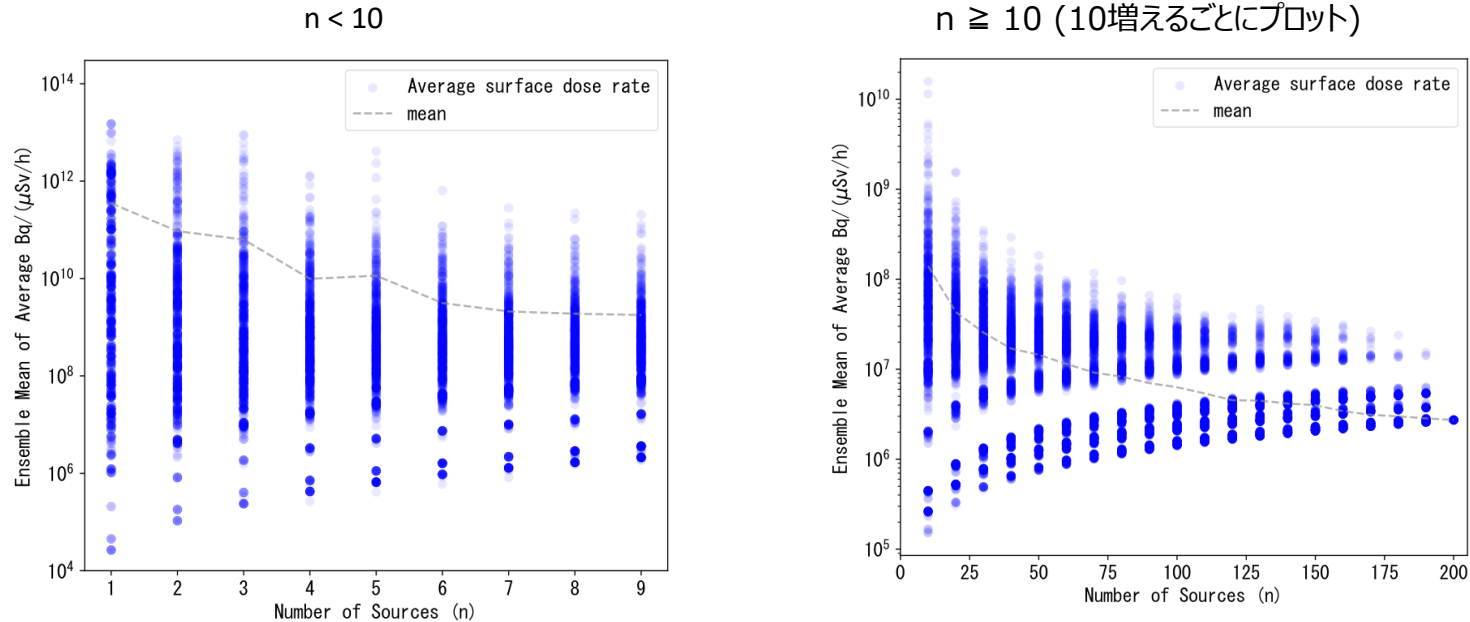


図 容器内汚染箇所数nが変化した場合の単位表面線量率に相当する放射エネルギーとその分散の推移

- 瓦礫類の寸法が大きい場合や汚染の濃淡が大きい場合など、汚染の空間的不均一性が大きい場合には、表面線量率 - Cs-137濃度の関係のバラツキの幅が大きくなる。
- 破碎したコンクリートは、粒径が小さく破碎・容器収納のプロセスで混合されるため均質性は高く、影響は大きくないと考えられる。
- “面”を対象とした2次元的な表面線量率分布の測定は、容器内の空間的なバラツキの程度を把握できる可能性があり、破碎したコンクリートの汚染の不均一性の程度を理解のためのデータ収取及び実管理における測定方法として有効であると考えられる。

# 感度解析：放射エネルギー分布（1/2）

- 線源の放射エネルギーのバラツキ（濃淡）の影響について感度解析を実施した。
- 破碎したコンクリートは粒径が小さく、破碎及び容器への充填により混合が進むことから、線源の分布及び放射エネルギー（線量）は規則性が無くランダムであると仮定する。
- 本検討では、以下の条件で2次元モデルを用いた解析を試行した。
  - ✓ 汚染箇所の点数：1,000点（必要に応じて今後増加）
  - ✓ 線量率測定点数：24箇所（左右両面の合計）
  - ✓ 汚染箇所の放射エネルギー頻度分布：対数正規分布（対数標準偏差を種々に変化させる）
  - ✓ 計算数：各ケースについて100回
- 評価結果は次項のとおり。

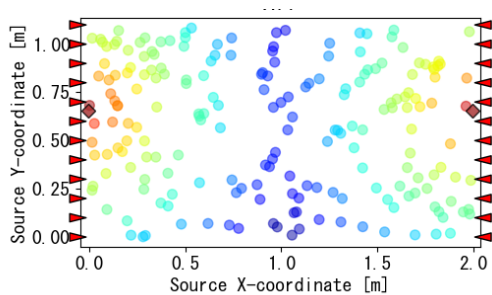


図 表面線量率測定点の配置

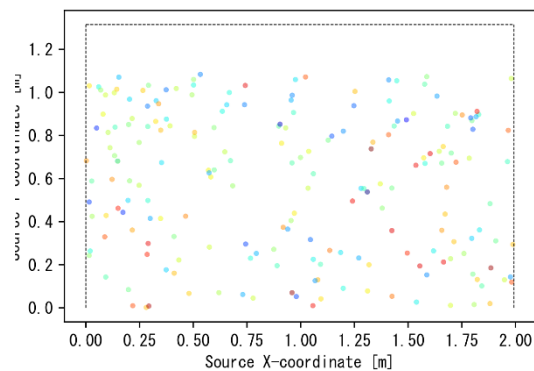


図 汚染源の配置例（n=200）

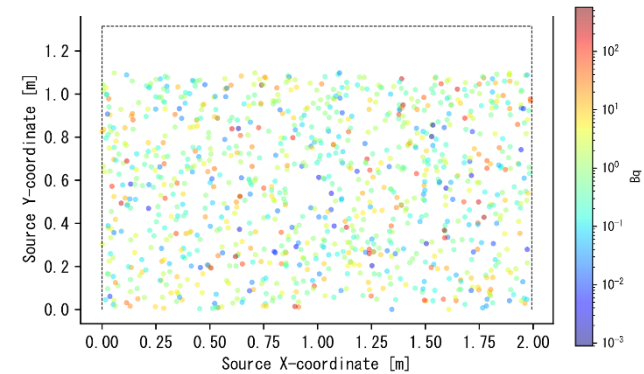
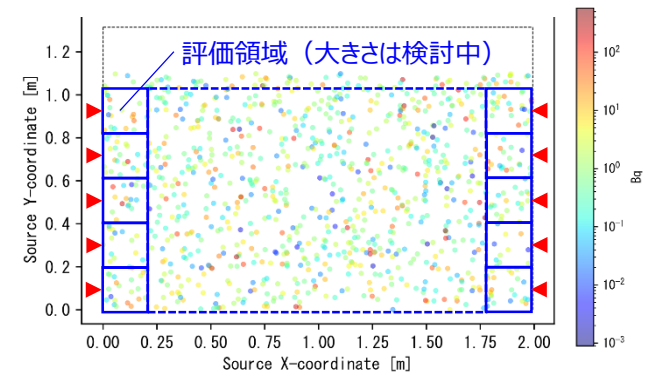


図 汚染源の配置例（n=1000）

- 評価点左右1点と放射エネルギーの関係のバラツキの幅は大きい。容器全体を対象に、平均もしくは最大表面線量率から容器内の放射エネルギーを推定するのは合理的ではないと考える。
- 前述の方針を踏まえ、表面線量率による放射エネルギーの評価範囲を容器内周近傍に制限するものとし、評価領域を区切って再評価を行う。



# 感度解析：放射エネルギー分布（2/2）

汚染源の点数 = 200 (予備検討相当)

汚染源の点数 = 1000

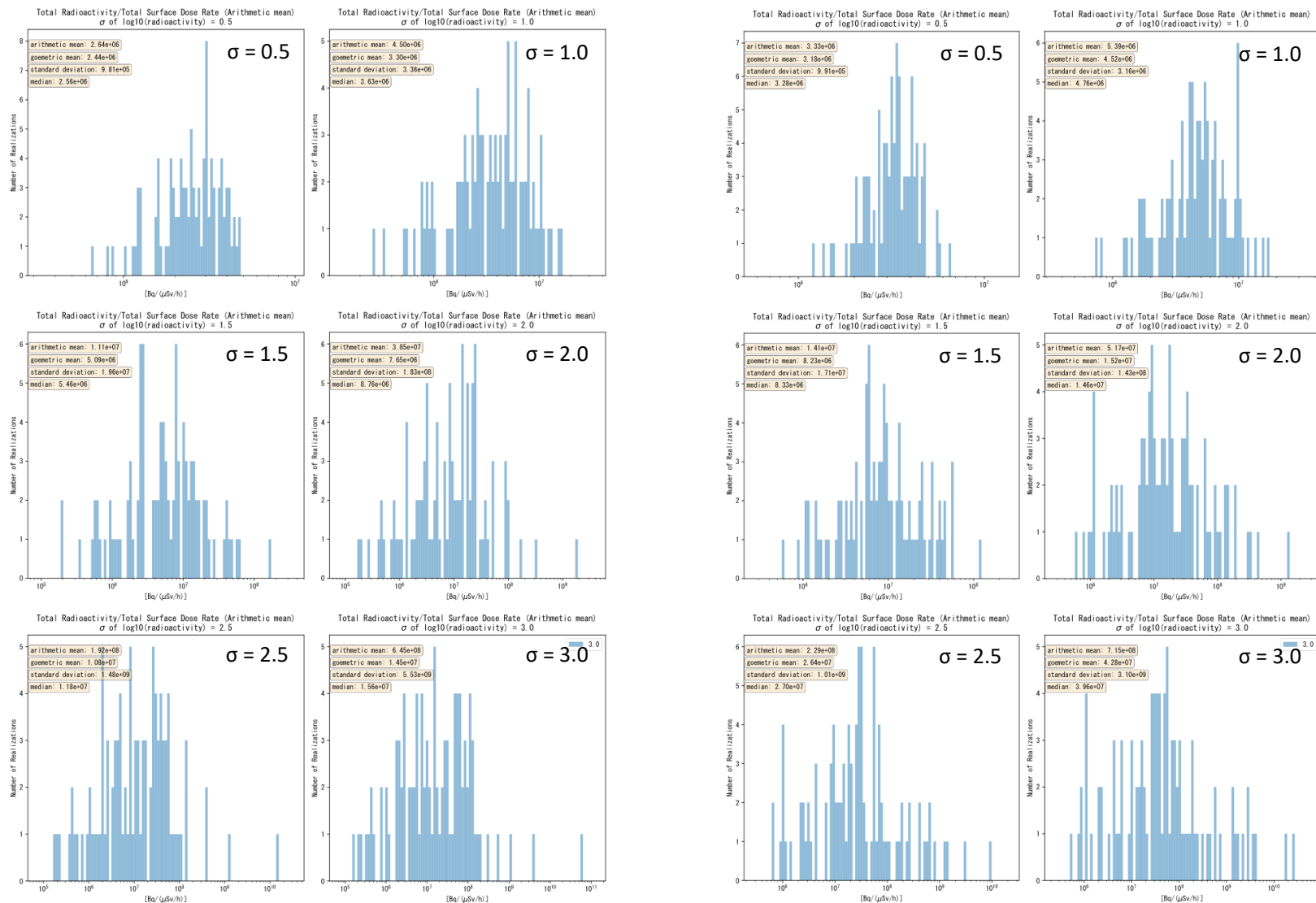


図 単位表面線量率（24測定点の算術平均）あたりの放射エネルギー分布

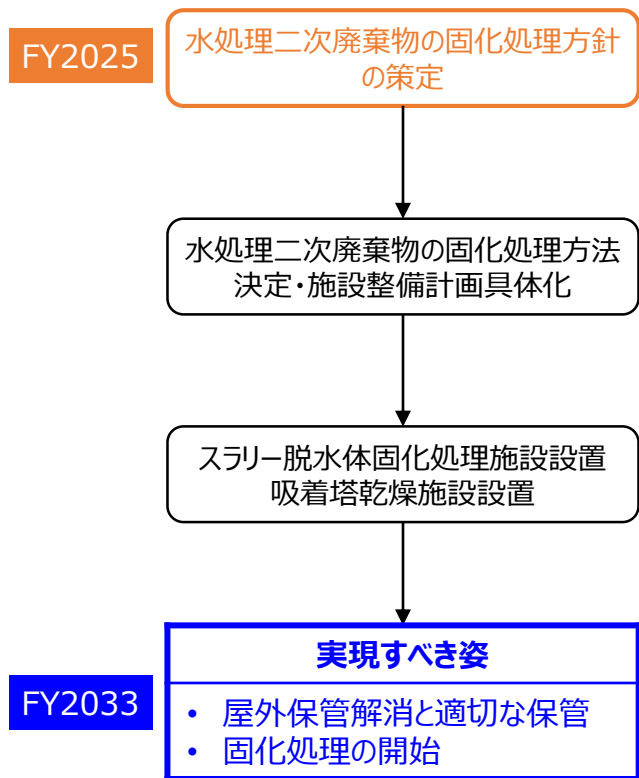


参考資料  
(水処理二次廃棄物等の固化処理方針策定)

# 実現すべき姿に向けた対応方針

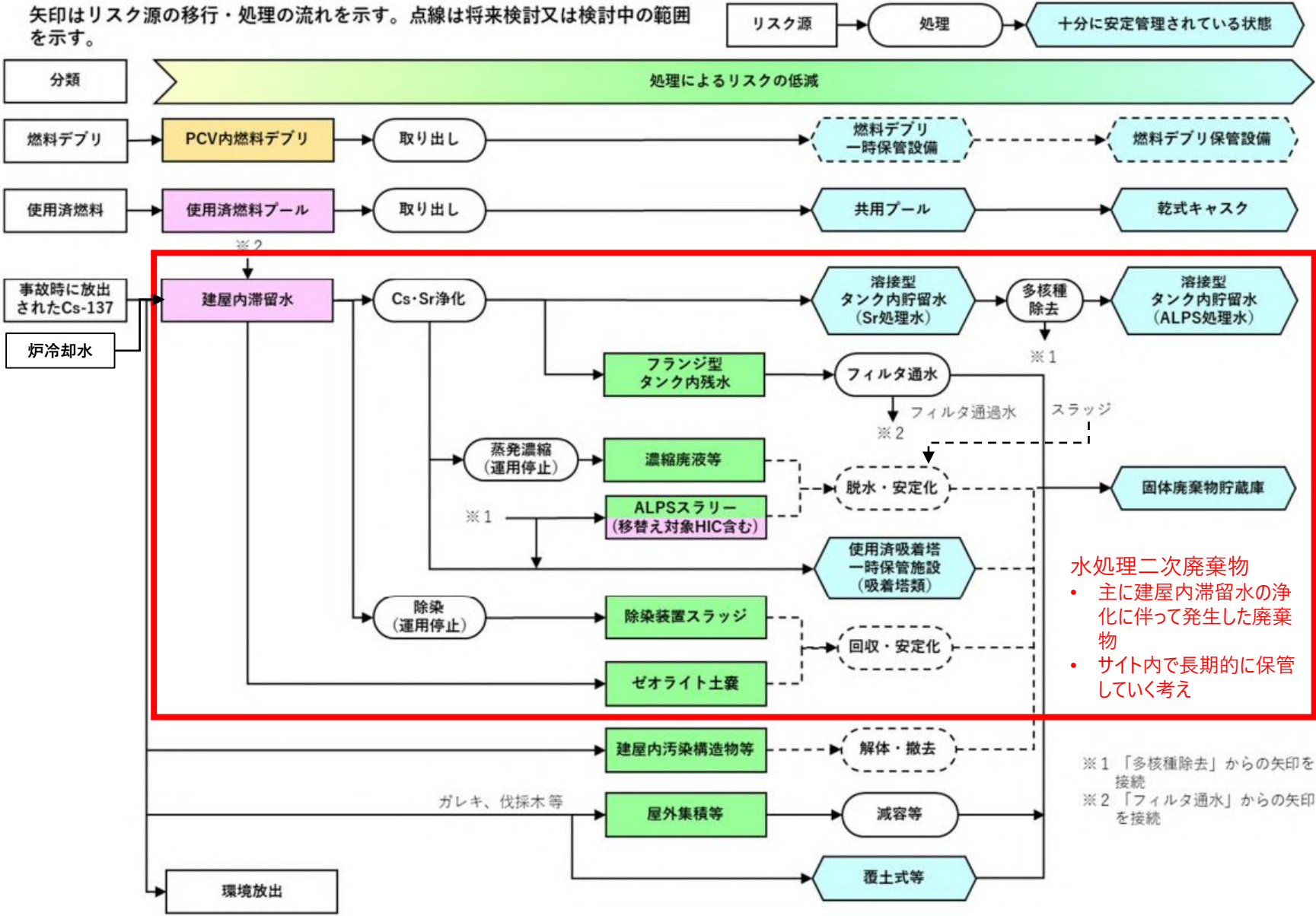
## リスクマップ上の目標（実現すべき姿）に向けた対応方針

- 実現すべき姿（FY2033目標） → 「屋外保管の解消と適切な保管」「固化処理の開始」
- 「屋外保管の解消と適切な保管」については、固体廃棄物貯蔵庫設置、脱水処理に向けた検討等を進めている（別途議論が進められているため本資料では省略）
- 「固化処理の開始」に向けて、ALPSスラリーの固化処理方法の具体化を図る必要がある。現時点では評価・判断に必要な廃棄物性状に係る情報が不足しているため、分析データの蓄積を進め、FY2025に固化処理方針の具体化を図る
- ALPSスラリーを主体に検討を進めていくが、全体を俯瞰した合理性への配慮も必要であることから、他の水処理二次廃棄物についても並行して検討を進め、水処理二次廃棄物に対する今後の対応の全体像を示していく



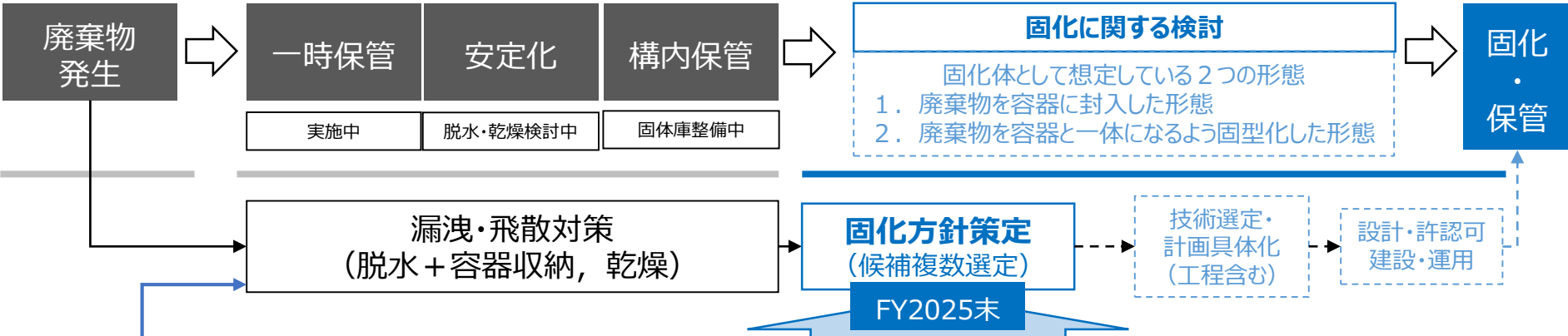
実現すべき姿（FY2033）		対応方針	実施時期
屋外保管の解消と適切な保管	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ゼオライト・除染装置スラッジを回収し、それらを含む水処理二次廃棄物を耐震性を備えた大型廃棄物保管庫で保管する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 回収方法については別途検討中</li> <li>• 大型廃棄物保管庫第一棟・第二棟の設置を進めている</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (FY2024着手, FY2027完了予定)</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ALPSスラリーの脱水処理が安定的に行えており、脱水物を適切な固体廃棄物貯蔵庫で保管する。累積したALPSスラリーの脱水処理を完了している</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• フィルタプレスによる脱水設備設置に向けて対応中</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (FY2028処理開始. FY2033には、完了時期を見通せる状況に至る)</li> </ul>
固化処理の開始	<ul style="list-style-type: none"> <li>• スラリー脱水物の固化処理施設設置・運用を開始する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• セメント固化（混練、充填）を有望な候補として、他の技術も候補に含めた上で、候補を絞る</li> <li>• 技術を選定し、設計・許認可・建設を進める</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• FY2025 : 候補複数選定</li> <li>• FY2027 : 技術選定</li> <li>• FY2028 : 許認可申請</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 分析結果を踏まえ、区分に応じた処分形態（廃棄体等）への移行を念頭にその他水処理二次廃棄物の固化処理方法を決定する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 性状調査（分析）を通じて、その他廃棄物へのセメント固化およびその他の技術の適用可能性を確認する</li> <li>• セメント固化（混練、充填）が適用できない廃棄物への適用技術選定を進める</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• FY2033 : 技術選定</li> <li>• FY2034以降 : 設計開始</li> </ul>

# 水処理二次廃棄物



NDF技術戦略プラン2024, '図 6 主要なリスク源のリスク低減プロセスとその進捗 (2024年3月時点) (1/2)' に追記

# 検討の手順と内容



- 性状確認
- 物量
  - 化学的性状
  - 物理的性状
  - 核種組成・濃度

性状確認は、必要に応じて繰り返し実施

適用範囲の広い固化方法で、敷地の逼迫・固化設備多数化に伴うリスクを回避

検討の手順	内容
①固化への要求事項を想定	要求事項を想定して、検討に必要なデータを抽出 検討に影響する事柄を抽出
②技術適用性確認	各種の技術が要求事項を満たす可能性を検討 <ul style="list-style-type: none"> <li>・常温処理（セメント，AAM，他（圧縮など））</li> <li>・中温処理（リン酸セラミックス）</li> <li>・高温処理（ガラス化技術）</li> </ul>
③適用可能性のある技術を絞り込み	適用可能性のある技術を比較（以下は，観点の例） <ul style="list-style-type: none"> <li>・処理可能な性状の範囲（化学的性状）</li> <li>・処理可能量（廃棄物全体のどの程度か）</li> <li>・処理後の性状（固化への要求との対応）</li> <li>・二次廃棄物（量，処理の容易さ）</li> <li>・固化体の核種閉じ込め性</li> <li>・廃棄確認方法</li> <li>・減容性</li> <li>・実用化レベル</li> <li>・技術供給体制</li> <li>・運用開始までのリードタイム など</li> </ul>

## 水処理二次廃棄物の性状

形態・性状	材質・化学形態	収納状態	核種の存在形態	核種・濃度
スラリー・スラッジ系	炭酸塩, 鉄共沈, 硫酸バリウム・フェロシアン化鉄	ピット, タンク, 容器	固相, 吸着, 水溶液中のイオン	FP系, CP系とも存在し濃度も様々
吸着材系 (固体)	活性炭系, ゼオライト系, 珪チタン酸塩系, 珪砂, 高分子系 (修飾物や化学形態は各種存在)	吸着塔, 容器	吸着材に吸着, 残水中のイオン	FP系, CP系とも存在し濃度も様々

廃棄物種類	保管状況		
	物理的性状	放射エネルギー (Bq/本)	主要核種
除染装置スラッジ	半固体	~1E14	Cs, Sr
KURION	固体	~1E15	Cs
SARRY	固体	~1E16	Cs
SARRY-II	固体	~1E16	Cs
サブドレン	固体	~1E10	Cs
モバイルKURION	固体	~1E14	Sr
モバイル系	固体	~1E15	Sr
ALPS吸着材(HIC)	固体	~1E13	多様
ALPSスラリー (炭酸塩, 鉄共沈)	半固体	~1E13	Sr, Cs
ALPS処理カラム	固体	~1E11	多様
ゼオライト土嚢等	固体	~1E14	Cs
高性能ALPS・Sub-ALPS	固体	~1E16	Sr
高性能ALPS検証試験装置・浄化ユニット	固体	小	Cs
SFP浄化	固体	(未評価)	Cs

- 線量率と時系列の範囲を網羅するように、分析対象を選定する。
  - ✓ ALPSスラリーの性状は、ALPS入口水の組成の時系列的な変化の影響を概ね受けていると思われる。そこで発生年ごとに分析することとし、分析数は、基本的には年ごとのHIC本数に案分する。
  - ✓ 2014年度およびその前後は他の期間に比べて線量率の変化が大きいことから、保管本数からの案分数よりも多めに分析し、性状の違いの有無について情報を得るようにする。
  - ✓ 炭酸塩について、既設と増設との割合は、発生量に合わせて1 : 1を目安とする。
  
- 下記について補強を図っていく。実施場所と分析数を調整中
  - ✓ 放射能濃度：C-14, I-129, 等の長半減期核種, α核種, など
  - ✓ 化学組成・物理性状：固化に影響する物質の有無（塩化物イオン, 硫酸イオン, 等）, 処理可能な性状の範囲, 埋設環境下での安定性評価に資する条件
  
- 候補技術の絞り込みでは、固化に影響する因子（化学成分など）の有無、設備の補器類（排ガス系など）への影響、二次廃棄物などへの対応の見通しなどを確認する。ALPSの処理対象では、固化に影響する可能性がある海水起源の塩類などが時系列的に増す方向ではないことから、現状のスラリーおよび処理対象水のデータに基づく推定評価と数点の追加分析に注力することで、確認可能と考える
  
- その先の技術選定については、固化物の検認（核種組成・濃度など）方法、固化にあたっての減容性や二次廃棄物への対応、設備規模と内容（廃棄物のハンドリングや被ばく対策も考慮した設計）などを検討する必要がある。このため、検討に必要なデータを積み上げていく必要がある。

	必要なデータ	固化方針の策定に反映するデータ	
		データから推定・模擬試料測定 (補助事業, 他)	実試料測定
核種組成	<ul style="list-style-type: none"> <li>難測定核種の濃度</li> <li>測定可能な核種の濃度 など</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sr-90</li> <li>Cs-137</li> <li>α核種 他</li> </ul>	(実施可能な項目を確認中) <ul style="list-style-type: none"> <li>C-14, I-129, Tc-99, Se-79, α核種, 他</li> </ul>
化学性状	(固化の阻害などの観点) <ul style="list-style-type: none"> <li>固相の定性</li> <li>pH (液相)</li> <li>化学組成・特性</li> <li>✓ 塩化物イオン</li> <li>✓ 硫酸イオン</li> <li>✓ Na, K</li> <li>✓ Mg/Ca比</li> <li>✓ ガラス形成成分の濃度</li> <li>✓ 処分に適さない物質の有無 など</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 水処理関連データから推定</li> <li>化学組成・特性</li> <li>✓ 塩化物イオン</li> <li>✓ 硫酸イオン</li> <li>✓ Na, K</li> <li>✓ Mg/Ca比</li> <li>✓ ガラス形成成分 (Si, Al, B 他) 濃度</li> <li>✓ pH (液相) など</li> </ul>	(実施可能な項目を確認中) <ul style="list-style-type: none"> <li>固相の定性 (化学組成, 結晶相 他)</li> <li>pH (液相)</li> <li>化学組成</li> <li>✓ 塩化物イオン</li> <li>✓ 硫酸イオン</li> <li>✓ Na, K</li> <li>✓ Mg/Ca比</li> <li>✓ ガラス形成成分 (Si, Al, B 他) 濃度</li> <li>✓ 有機物 (TOC) など</li> </ul>
物理性状	<ul style="list-style-type: none"> <li>含水割合, 固形分濃度</li> <li>比重, 粒度分布, 粘度</li> <li>固化物の比重, 機械的強度, 空隙率 など</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 模擬試料測定から推定</li> <li>含水割合, 固形分濃度</li> <li>比重, 粒度分布, 粘度</li> <li>固化物の比重, 機械的強度, 空隙率 など</li> </ul>	(実施可能な項目を確認中) <ul style="list-style-type: none"> <li>含水割合, 固形分濃度</li> <li>比重, 粒度分布, 粘度 など</li> </ul>

固化技術に関する知見を反映し更新していく

データを収集・推定し, 更新していく

実施場所, 分析数, 分析項目を調整中

- 高温処理技術（1000℃超）は、線量が高く常温固化の適用が難しく、また、無害化・無機化を目的にガラス化などの処理のニーズを有するKURION/SARRYの吸着材を対象に技術開発を進めている。
- ALPSスラリーは、その性状から高温処理技術が要求される可能性は低いと予想される。常温～中温固化技術（セメント・AAM, リン酸セラミック固化）について開発を進めている。
- 高温処理技術によりALPSスラリーの処理も可能であることから、処理施設の共用化を将来的なオプションと考え、高温処理技術のALPSスラリーへの適用性の確認は実施している。
- 容器などを含めると複数の材質を含む廃棄物の一括処理の実現性評価にも取り組み中

## 例：水処理二次廃棄物となる吸着材類の材質（40種類以上、大別すると下記）

- |  |   |  |
|--|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>a. ゼオライト系</li> <li>b. 銀ゼオライト系</li> <li>c. 珪チタン酸塩系</li> <li>d. 砂</li> <li>e. 活性炭系</li> <li>f. 高分子系</li> <li>g. その他(フェロシアン化物等)</li> </ul> | } | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 鋳物系であり、地下環境下で安定である可能性→固化を必要としない可能性もあるが、現行の埋設規則には適合しないため規則改定が必要。</li> <li>• 固化処理を行う場合、常温固化は適用が難しい。固化を行う場合にはガラス溶融等の高温処理が候補となる。</li> <li>• 熱分解による無機化・無害化が必要となる可能性がある。熱分解等の中間処理、ガラス溶融等の高温処理が候補となる。</li> </ul> |
|--|---|--|



- 中温固化処理技術（500°C程度）
  - ✓ Caを含むALPS炭酸塩スラリーにリン酸塩を添加することで、リン酸セラミックスの形成を促し、スラリーの安定化と核種の固定化を図るもの。
  - ✓ 炭酸塩スラリーの安定化に特化して、選択肢の一つとして検討中
  
- AAM固化処理技術（常温）
  - ✓ 対応できる化学的性質の範囲がセメント固化よりも広いことを期待して検討中
  
- 熱分解（有機物の炭化処理 800°C程度）＊ 固化前の中間処理として検討
  - ✓ 粒状樹脂・粉末樹脂など、長期的には分解する可能性のある有機物の安定化
  - ✓ 還元性の雰囲気ですばやく炭化させて安定化を図る
  - ✓ 炭化後には容器で保管可能となり、セメント固化等の複数の処理方法で固化可能
  
- （既存技術：圧縮（常温））
  - ✓ 様々な廃棄物に適用可能な実用化済みの減容技術。廃棄物をドラム缶などの薄板容器に収納して圧縮することで減容
  - ✓ 圧縮後は内容物の取り出しが容易ではないため、除去すべきものは圧縮前に分別
  - ✓ 圧縮対象物の性状によっては、加熱を組み合わせることで、より安定な塊とすることも可能

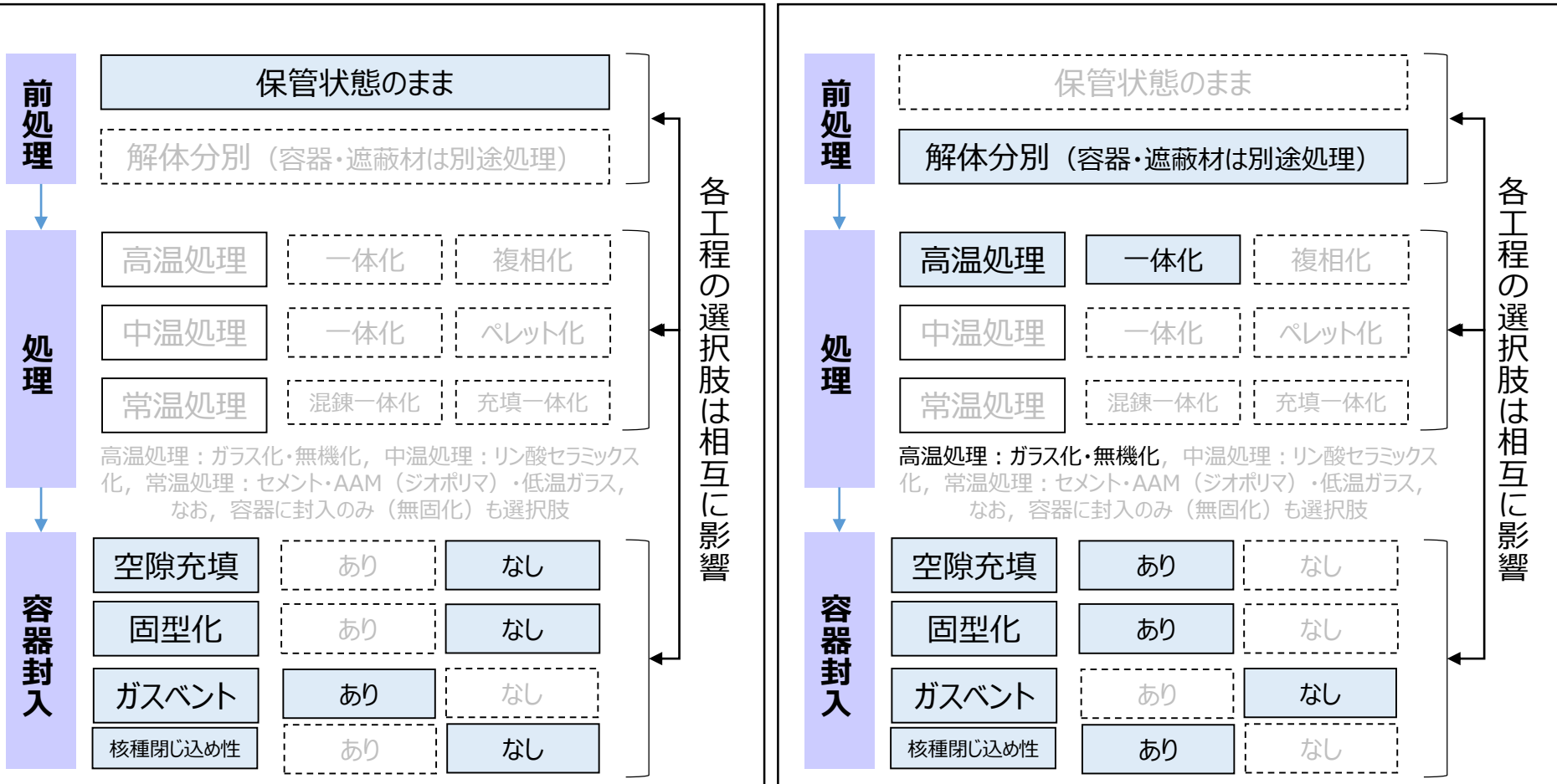
- ① 固化には複数の選択肢が選択可能
- ② 固化への要求事項は、工程の組み合わせの適用可否に影響する（整理が必要な事項がある）

## 簡素な場合の例

（脱水・乾燥物を容器に封入。固化体性能を見込まない）

## 高度な場合の例

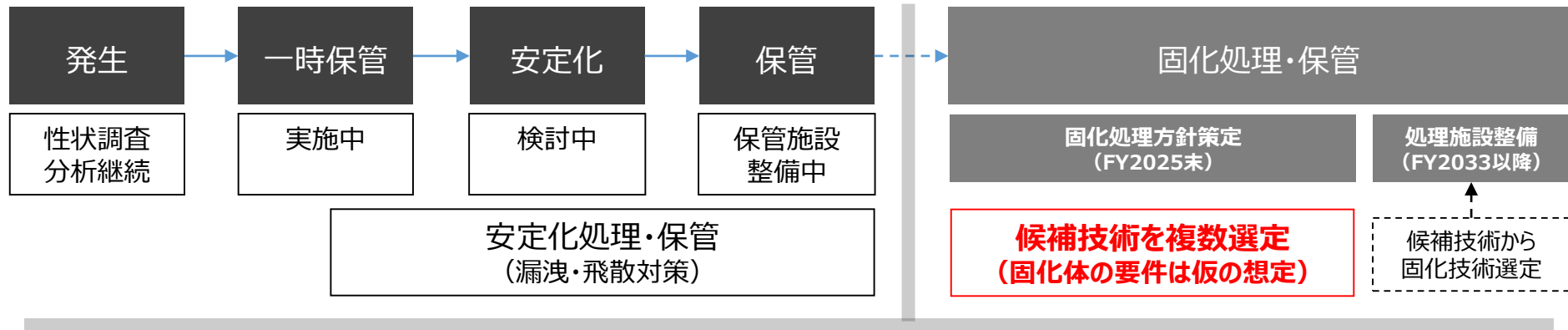
（脱水・乾燥物をガラス固化し容器に固型化。固化体性能を見込む）



（これら以外の組み合わせもあり得る）

# ALPSスラリー固化の候補技術

- ① 現時点では、検討対象とした技術は、いずれも候補技術となりうると考える
- ② 候補技術から固化技術を選定するには、各選択肢を具体化して、比較評価する必要がある
- ③ 各選択肢の具体化には、整理が必要な事項がある



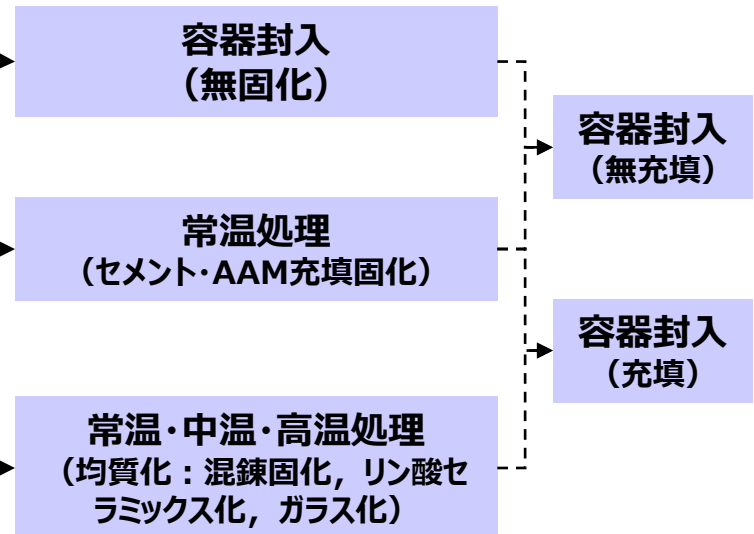
## ALPSスラリーなどの含水微粉末 (中線量)



- 長期保管する固化体として想定している2つの姿
1. 廃棄物を容器に封入した形態
  2. 廃棄物を容器と一体になるように固型化した形態

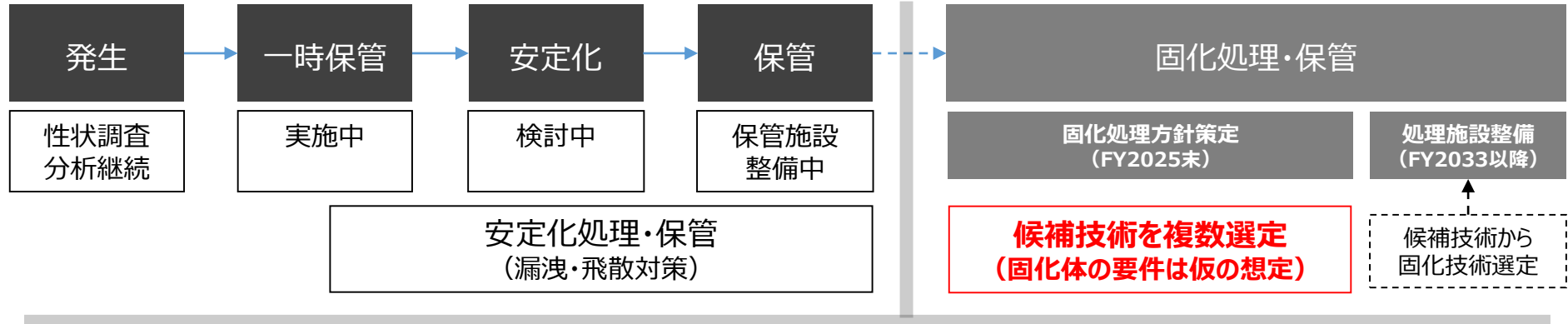
- ◆整理が必要な事項
- 粉粒体を容器に封入した廃棄体の成立性
  - 容器に水素ガス抜き機能を持たせることの成立性
  - 評価対象核種の放射能濃度決定方法 (現在は廃棄物の放射能に関する性状を調査している段階であり、現時点では検討が難しい)
  - 有害な空隙の考え方 (現在は処分施設を検討する段階になく、具体的には検討が難しい)

下向きに、より高度になる方向

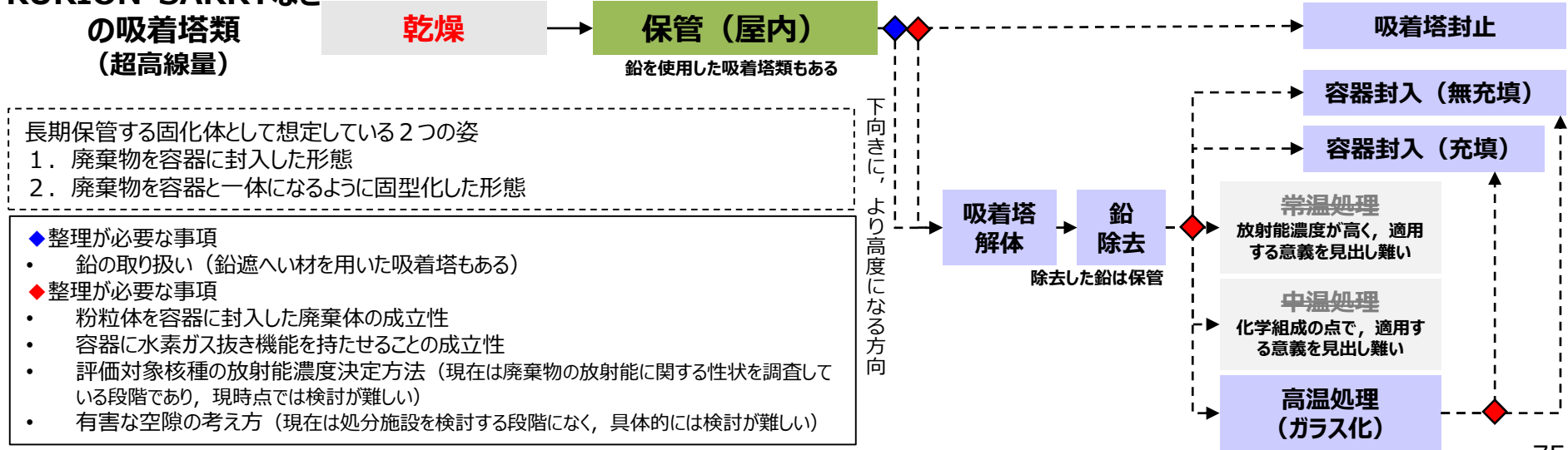


# 吸着塔類の固化の候補技術

- ① 現時点では、高温処理，封入が候補技術となりうると考える
- ② 候補技術から固化技術を選定するには，各選択肢を具体化して，比較評価する必要がある
- ③ 各選択肢の具体化には，整理が必要な事項がある



## KURION・SARRYなどの吸着塔類 (超高線量)



# 技術選定（選択肢の選定）に影響する事柄

検討の手順	内容
① 固化への要求事項を想定	要求事項を想定して、検討に必要なデータを抽出 <b>技術選定に関わる事柄を抽出</b>

観点	固化への要求事項（想定）	整理が必要な事項（検討中）
放射能・核種組成	<ul style="list-style-type: none"> <li>廃棄体の処分区分が決定できる</li> <li>核種インベントリが決定できる (評価対象核種の放射能濃度を決定できる)</li> <li>線量率制限に対応できる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>評価対象核種の放射能濃度を決定できる (評価対象核種と放射能濃度決定方法を定めるロジックとデータが必要。現在は、廃棄物の放射能に関する性状を調査している段階であり、議論にはデータの蓄積と評価が必要)</li> </ul>
化学性状	<ul style="list-style-type: none"> <li>保管にあたり有害・危険とみなされる物質が含まれない</li> <li>固化を阻害する成分が含まれない</li> <li>固化後の保管中に、結晶形成による体積膨張でひび割れを起こす、などの物質を含まない</li> <li>可燃性、爆発性、腐食性、ガス発生性、毒性、などを有する物質を含まない（化学的な有害物を含まない）</li> <li>核種移行を促進する、対策が必要となるようなガスを発生する、などの物質を含まない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>化学的有害物の取り扱い</li> <li>容器に水素ガス抜き機能を持たせることの成立性</li> <li>固化体の核種閉じ込め性の見込み方 (現在は、固化方式ごとの固化体の核種閉じ込め性を試験・調査している段階であり、現時点では議論できない。また、固化体の核種閉じ込め性が環境影響に与える効果を、処分方式ごとに今後検討しておく必要がある)</li> </ul>
物理性状	<ul style="list-style-type: none"> <li>保管容器の腐食が問題とならない</li> <li>保管中に必要な機械的強度を維持できる</li> <li>保管中に形態が損なわれない (漏洩・飛散しない。核種が固定されている。形態が安定している)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>粉粒体を容器に封入した廃棄体の成立性</li> <li>有害な空隙の考え方 (現在は、処分施設を検討する段階になく、具体的には検討できない)</li> </ul>

- 粉粒体を容器に封入した廃棄体の成立性
- 容器に水素ガス抜き機能を持たせることの成立性
- 評価対象核種の放射能濃度決定方法（現在は、廃棄物の放射能に関する性状を調査している段階であり、現時点では検討が難しい）
- 有害な空隙の考え方（現在は、処分施設を検討する段階になく、具体的には検討が難しい）

- 水処理二次廃棄物は、粉粒体と水との混合物が多く、水の割合によってスラリーや湿った粉粒体となっている。
- 水の割合を減らせば水処理二次廃棄物は粉粒体であり、自由水がない状態であれば液体の漏洩の可能性はなくなる。
- 自由水がない状態で容器に封入することで、廃棄物の粉末としての飛散は防止できる。ただし、自由水でなくとも、含まれる水分などの放射線分解などで水素が発生する。これについて、容器にベントフィルターを設けることが可能となれば、既往の廃棄体に求められる要件は、有害な空隙を除き、満たすことができると考える。
- ここで、廃棄体内の空隙や、地圧など外部からの圧力による圧密減容に伴う処分施設への影響の有無について、具体的な検討を進めることは難しい
- そこで、廃棄体内の空隙や圧密減容の影響については廃棄体側での対応は求めないこととすれば、廃棄体製作に関わる処理は脱水・乾燥程度となる。この場合、高度な処理を行う場合に比べると廃棄体製作に関わる作業の安全性を確保しやすくなると考える。
- ただし、廃棄体製作で高度な処理を行って、廃棄体としての核種の閉じ込め性を確保することで処分の段階での安全性確保を容易にする考え方も、選択肢の一つである。上記の議論は、そのような選択肢を妨げることはないと考える。

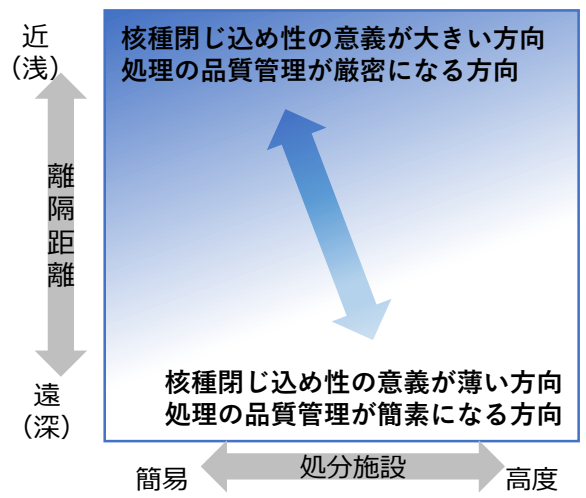
化学的有害物の取り扱い

- 例えば除染装置では、シアン化物を含む吸着材を用いたことから、除染によって発生したスラッジにはシアン化物が含まれる。シアン化物の分解には、酸素を含む雰囲気での加熱処理などが必要なため、除染装置スラッジの処理にあたり、シアン化物の取り扱いは、処理施設の検討に大きな影響を与える。
- 一方、除染装置スラッジは、核種組成と濃度の観点から、中深度処分相当以上となる可能性も否定できない。このため、最終的には離隔距離を深くとることが予想される。
- この場合、シアン化物の環境影響は、考慮するレベルに至るか否か検討する必要があると考える。仮に、シアン化物を含んだ状態で廃棄体化することができれば、シアン化物の分解が必要な場合に比べると簡素な対応となり、処理の安全対策も取りやすくなる。

廃棄体の核種閉じ込め性

現在は、固化方式ごとの廃棄体の核種閉じ込め性を試験・調査している段階であり、現時点では議論できない。  
 なお、廃棄体の核種閉じ込め性の効果を処分方式ごとに検討できれば、廃棄体の核種閉じ込め性の意義を定量化できるようになると考える。

離隔距離と廃棄体の核種閉じ込め性能の効果



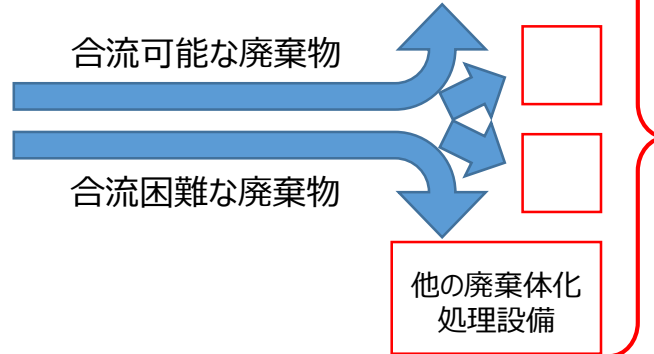
# 水処理二次廃棄物全体の処理・保管方策の整理

- 1Fの汚染水処理により発生する水処理二次廃棄物及びゼオライト土嚢など、滞留水を媒体に汚染された吸着材・スラリー・スラッジ等の廃棄物の性状は多様であり、それぞれの特性に依じた合理的で安全な処理・保管・処分方法等の検討が必要である
- 固化処理施設の設置にあたっては、廃棄物毎に施設を設置することは用地確保の点からも現実的ではなく、ある程度、廃棄物間での処理施設の共有化を念頭に置いた計画を策定する必要がある
- 例えば、常温固化（セメント・AAM）については、充填固化を採用できれば、水処理二次廃棄物を中心に瓦礫類など幅広い廃棄物に対して適用できる可能性がある。また、粉粒体を容器に封入した廃棄物の成立性、容器に水素ガス抜き機能を持たせることの成立性、などは、固化処理を簡素なものとし、固化処理に伴うリスクの低減につながると思われ、整理・検討する意義があるものと考える

段階	廃棄物の発生	一時保管	前処理・処理・再加工	構内保管	廃棄体化（固化）	廃棄前構内保管	処分（埋設）
ALPS	既設・高性能ALPSの前処理設備→HIC	使用済吸着塔一時保管施設第二・第三施設	安定化処理設備	固体廃棄物貯蔵庫	廃棄体化処理設備	(固体廃棄物貯蔵庫)	処分施設
	既発生分が大半	漏えい・水素対策下で保管	廃棄体化までのリスク低減	後段開始まで処理可能形態で安定保管	・処理技術 ・廃棄体容器	WAC	・地質調査 ・処分概念※ ・受入技術基準

※ : Waste Acceptance Criteria (WAC)

- 他の固体廃棄物
- ・水処理二次廃棄物
  - ・瓦礫類・建屋解体物等
  - ・デブリ取出廃棄物 (デブリ) etc.
  - ・解体廃棄物



廃棄物の物量・性状の共通性，処理実施時期，処理施設の用地確保，費用等を考慮し，保管容器，処理施設の共用化等を検討する



		評価の観点 (観点自体も検討中)								課題
		処理可能な廃棄物の種類*	対応できない廃棄物の量	処理後の性状 (要件との対応)	2次廃棄物 (量、処理の容易さ)	減容性	実用化レベル	技術供給体制	運用開始までのリードタイム	
		多いことが望ましい	少ないことが望ましい	問題ないことが必要	少ないことが望ましい	高いことが望ましい	事例が多いことが望ましい	多いことが望ましい	短いことが望ましい	
保管容器のまま	無固化	a.b.c.d.	基本なし	問題ない	比較的少	他と同等	事例なし	複数	比較的短	封入のみの成立性
脱水物保管容器のまま固化	セメント充填固化	a.b.c.d.	基本なし	問題ない	比較的少	他と同等	事例あり	複数	他と同等	固化阻害要因の有無, 脱水物の変質
	セメント混練固化	a.b.c.d.	基本なし	問題ない	比較的少	他と同等	事例あり	複数	他と同等	固化阻害要因の有無, 脱水物の混練性
	AAM充填固化	a.b.c.d.	基本なし	問題ない	比較的少	他と同等	事例少	限定的	他と同等	固化阻害要因の有無, 脱水物の変質
	AAM混練固化	a.b.c.d.	基本なし	問題ない	比較的少	他と同等	事例少	限定的	他と同等	固化阻害要因の有無, 脱水物の混練性
	高温固化 (ガラス化)	a.b.c.d. 組成に制約有	組成調整で余るものが生じる可能性	問題ない	比較的少	他と同等	事例少	限定的	他と同等	塩類の挙動
内容物取り出し・容器は別途処理**	セメント充填固化	a.b.c.d.	基本なし	問題ない	比較的少	他と同等	事例あり	複数	他と同等	容器から取り出す意義, 固化阻害要因の有無, 脱水物の変質
	セメント混練固化	a.b.c.d.	基本なし	問題ない	比較的少	他と同等	事例あり	複数	他と同等	固化阻害要因の有無, 脱水物の混練性
	AAM充填固化	a.b.c.d.	基本なし	問題ない	比較的少	他と同等	事例少	限定的	他と同等	固化阻害要因の有無, 脱水物の変質
	AAM混練固化	a.b.c.d.	基本なし	問題ない	比較的少	他と同等	事例少	限定的	他と同等	固化阻害要因の有無, 脱水物の混練性
	中温固化 (リン酸セラミックス化)	a.	炭酸塩スラリー以外への対応が難しい可能性	問題ない	不明	不明	研究開発	未定	未定	固化阻害要因の有無, 脱水物の混練性, 炭酸塩以外への適用性
	高温固化 (ガラス化)	a.b.c.d. 組成に制約有	組成調整で余るものが生じる可能性	問題ない	比較的少	他と同等	事例少	限定的	他と同等	塩類の挙動
	圧縮体化	a.b.c.d.	基本無し	問題ない	比較的少	他と同等	事例あり	複数	他と同等	圧縮容器要否, 圧縮物の充填工程が必要

\* : 廃棄物種類 : a. 既設・増設ALPSスラリー, b. 濃縮廃液スラリー, c. 除染装置スラッジ, d. 瓦礫  
 \*\*: 基本的に、内容物取り出し・取り出し後の容器の別途処理は、脱水物保管容器のまま固化に比べると、2次廃棄物対応で不利

1. 抽出した事柄のうち、固化方針策定（候補複数選定）への影響が比較的大きいと思われる事項について整理を進めたい。現時点では次の事項を考えている
  - 粉粒体を容器に封入した廃棄体の成立性
    - ・ 粉粒体の性状、核種組成、粉粒体中での核種の存在形態などは、廃棄物別に異なる
    - ・ 保管形態からの追加処理の必要性や処理の内容に関わる
  - 容器に水素ガス抜き機能を持たせることの成立性
    - ・ 廃棄体中の水分や有機物の量に影響する
    - ・ 保管形態からの追加処理の必要性や処理の内容に関わる
  - 化学的有害物の取り扱い
    - ・ 吸着材には、シアン化物を含むものもある
    - ・ 保管形態からの追加処理の必要性や処理の内容に関わる
3. その他、核種閉じ込め性、有害な空隙の考え方など、目安とするレベルの設定に事前検討が必要な事柄については、進め方を検討する。
4. 現状で可能な整理の結果に応じて、比較検討し、複数の候補技術を選定する
5. FY2025を目途に検討結果を取りまとめる

END