

# 次世代再処理ガラス固化技術基盤研究事業 プロジェクト中間評価 補足資料

平成28年12月21日

資源エネルギー庁電力・ガス事業部  
原子力立地・核燃料サイクル産業課

# 総目次

## 次世代再処理ガラス固化技術基盤研究事業

A. ガラス固化技術の基盤整備

B. 低レベル放射性廃棄物の除染方法の検討

# 次世代再処理ガラス固化技術 基盤研究事業

# 1. 事業の概要及び政策的位置付け

## 概 要

原子力発電所や使用済燃料再処理施設等の操業・廃止措置に伴い発生する様々な放射性廃棄物を処分するため、放射性物質を長期間安定的に閉じ込めておくことに優れ、かつ廃棄物の減容も可能な処理技術の開発を行う。

### 【実施テーマ】

- A. ガラス固化技術の基盤整備
- B. 低レベル放射性廃棄物の除染方法の検討

## 政策的 位置付け

本研究開発は、

「廃炉等に伴って生じる放射性廃棄物の処分については、低レベル放射性廃棄物も含め、発生者責任の原則の下、原子力事業者等が処分に向けた取組を進めることを基本としつつ、処分の円滑な実現に向け、国として必要な研究開発を推進するなど、安全確保のための取組を促進する。」

「廃棄物を発生させた現世代の責任として将来世代に負担を先送りしないよう、高レベル放射性廃棄物の問題の解決に向け、国が前面に立って取り組む必要がある。」

としたエネルギー基本計画(平成26年4月閣議決定)に基づくものである。

# A. ガラス固化技術の基盤整備

# 目次

1. 事業の概要
2. 事業アウトカム
3. 事業アウトプット
4. 当省(国)が実施することの必要性
5. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ
6. 研究開発の実施・マネジメント体制等
7. 費用対効果
8. 外部有識者の評価等
9. 提言及び提言に対する対処方針

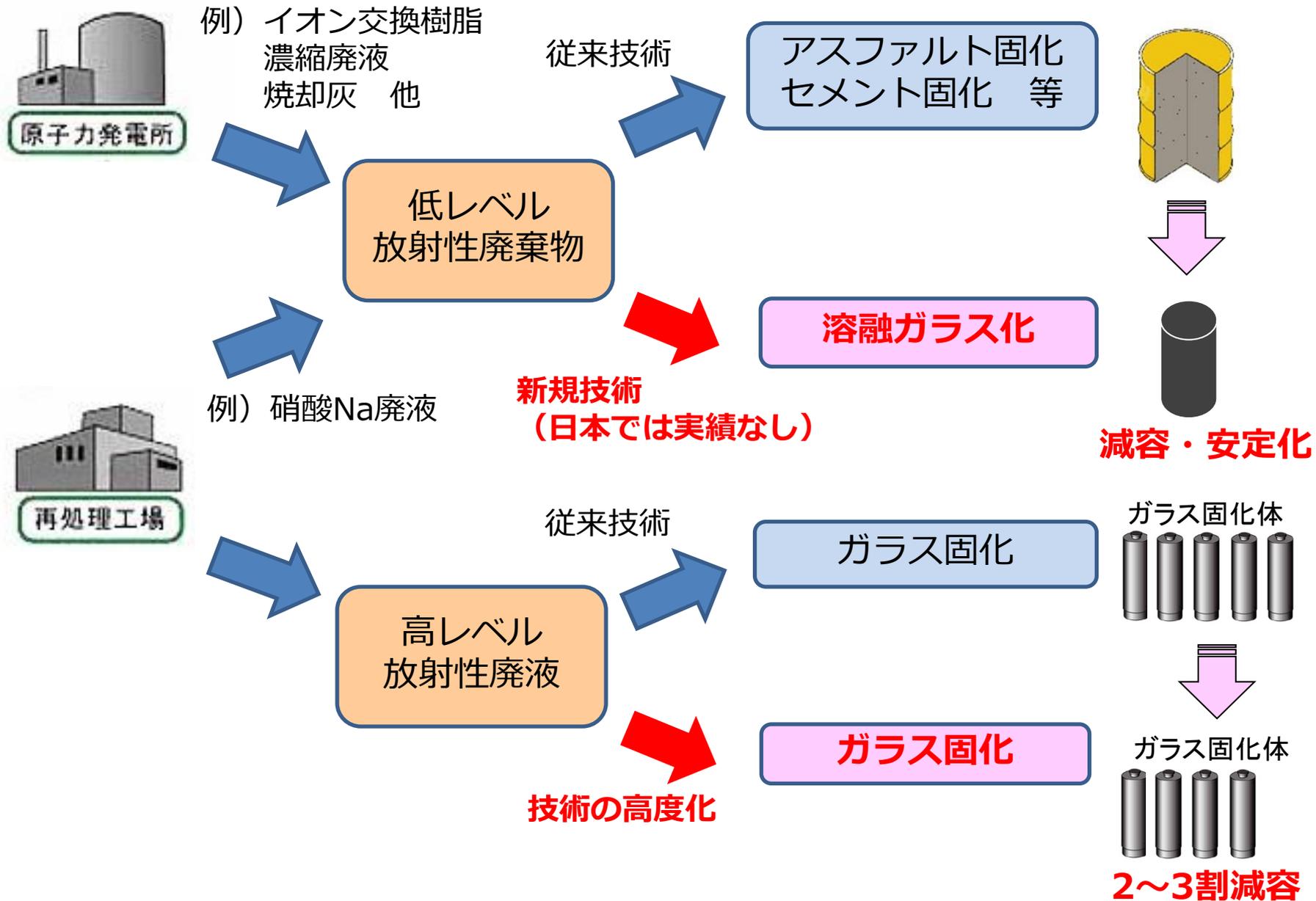
個別要素技術の達成状況

参考資料

# 1. 事業の概要

<p>概 要</p>	<p>原子力発電所や使用済核燃料再処理施設等の操業・廃止時の除染等により発生する低レベル放射性廃棄物等に対応したガラス固化技術を確立するため、「ガラス組成」及び「ガラス溶融炉の運転制御技術」に関する調査・基礎試験等を実施する。</p>												
<p>実施期間</p>	<p>平成26年度～平成30年度（5年間）</p>												
<p>実施形態</p>	<p>国からの直執行（次世代再処理ガラス固化技術基盤研究事業）</p>												
<p>予算総額</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>年度</th> <th>H26</th> <th>H27</th> <th>H28</th> <th>H29～H30</th> <th>総額</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>予算額 (億円)</td> <td>6.7</td> <td>6.8</td> <td>6.7</td> <td>14.4</td> <td>34.6</td> </tr> </tbody> </table>	年度	H26	H27	H28	H29～H30	総額	予算額 (億円)	6.7	6.8	6.7	14.4	34.6
年度	H26	H27	H28	H29～H30	総額								
予算額 (億円)	6.7	6.8	6.7	14.4	34.6								
<p>実施者</p>	<p>(株)IHI 日本原燃(株) (国研)日本原子力研究開発機構 (一財)電力中央研究所</p>												
<p>プロジェクトリーダー</p>	<p>(株)IHI 原子力セクター 原燃プロジェクト部 部長 福井寿樹 日本原燃(株) 再処理事業部 エンジニアリングセンター長 牧隆</p>												

# 1.1 事業のイメージ



## 1.2 目的

- 国内では、低レベル廃棄物に対してガラス固化は適用されていないが、海外では、比較的放射能レベルの高い廃棄物等にガラス固化技術の導入実績がある
- 今後、我が国においても原子力発電所や再処理施設等の廃止措置等に伴い発生する比較的放射能レベルの高い低レベル放射性廃棄物(除染廃液等)に対する処理技術が必要であり、低レベル廃棄物に対するガラス固化技術の基盤を確立することは重要である
- また、低レベル放射性廃棄物ガラス固化技術の基盤が整備されれば、高レベル廃液のガラス固化技術の高度化にも反映可能であり、高レベル放射性廃液中の核分裂生成物等を安定的により多く取り込む技術やガラス溶融炉の運転制御技術なども向上できる
- 以上から、本事業では、以下について調査・検討を行う

- ① 原子力発電所および再処理施設等で発生する低レベル廃棄物を対象として、安定性に優れ、かつ減容も可能なガラス固化技術の基盤整備を行う
- ② それら基盤整備で得られた知見を反映し、国内で実用化されている高レベル廃液のガラス固化の高度化についても検討する

### 政策的位置付け

本技術開発は、「廃炉等に伴って生じる放射性廃棄物の処分については、低レベル放射性廃棄物も含め、発生者責任の原則の下、原子力事業者等が処分に向けた取組を進めることを基本としつつ、処分の円滑な実現に向け、国として必要な研究開発を推進するなど、安全確保のための取組を促進する。」、「廃棄物を発生させた現世代の責任として将来世代に負担を先送りしないよう、高レベル放射性廃棄物の問題の解決に向け、国が前面に立って取り組む必要がある。」としたエネルギー基本計画に基づくものである。

# 1. 3 溶融ガラス化技術とその他技術の比較

	ガラス固化技術		溶融固化技術
	ガラス固化(従来)	溶融ガラス化	
概要	<p>廃棄物にホウ珪酸ガラスなどの所定のガラス原料を添加し、ガラス固化する方法</p> 	<p>廃棄物自体に含まれる成分(SiO<sub>2</sub>等)をガラス形成成分とすることで、添加物を最小限に抑えて、ガラス固化する方法</p> 	<p>廃棄物を溶融し、スラグとして固化する方法</p> 
減容性	<p>△</p> <p>※ガラス原料添加により、廃棄物充填率を一定に保つため、減容性は低い</p>	<p>○</p> <p>※<u>安定性を確保できる範囲で、添加物量を最小限に抑制するため、減容性は比較的高い</u></p> <p>※但し、廃棄物組成によって減容性は変動する</p>	<p>◎</p> <p>※添加材がないため、減容性が高い</p>
操業性	<p>◎</p> <p>※溶融ガラスの高温物性を一定範囲に管理できるため、加熱・流下(出湯)条件は毎回一定</p> <p>※但し、高レベル廃液の場合は、白金族管理が運転に影響</p>	<p>○</p> <p>※<u>溶融ガラスの高温物性を決められた範囲内に管理できるため、加熱・流下(出湯)条件を大きく変動せずに運転できる</u></p>	<p>△</p> <p>※廃棄物組成によって高温物性が異なるため、加熱・流下(出湯)条件を毎回設定する必要がある</p>
廃棄物安定性	<p>◎</p> <p>※ガラス固化後の組成が常に一定範囲に管理されるため、安定性に優れる</p>	<p>○</p> <p>※<u>添加物を調整することで、安定性を確保できる</u>。但し、廃棄物組成によって安定性は変動する</p>	<p>△</p> <p>※廃棄物組成によってスラグ組成が決まるため、安定性は一定でない</p>

低レベル廃棄物の特徴: SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等のガラス形成成分を含む廃棄物が多数ある

# 1.4 低レベル放射性廃棄物へのガラス固化適用の考え方

## (1)低レベル廃棄物の特徴

- ▶放射能レベル、組成・材質などが多種多様であり、発生量が多い
- ▶ガラス形成成分(Si、Al、P、Fe等)を含有する廃棄物が多数ある

## (2)ガラス固化適用の考え方

- ▶廃棄物自体に含まれるガラス形成成分を利用し、添加物を最小限に抑えて、ガラス化する方法(**溶融ガラス化技術**)を採用
- ▶溶融ガラス化技術は、事業者ニーズや処分要求に対して、**減容性、操業性、廃棄体安定性**を調整可能
- ▶また、**廃棄物同士を組み合わせることで、安定な廃棄体とすることも可能**

## (3)溶融ガラス化の目的

- ▶溶融ガラス化技術の適用効果が期待される廃棄物を以下の目的から選定

**目的Ⅰ**：現在検討されている処理技術で**処理が困難な廃棄物を安定化**  
例)高線量で無機化が必要なイオン交換樹脂 等

**目的Ⅱ**：現在検討されている処理技術より**廃棄物発生量を低減化**  
例)SiO<sub>2</sub>、CaO等を主成分とする焼却灰 等

## 2. 事業アウトカム

### 事業アウトカム指標

低レベル放射性廃棄物の成分に適したガラス組成の開発及びそれに対応する信頼性の高いガラス溶融炉の運転制御技術の基礎試験等を実施することにより、低レベル放射性廃棄物の安定化に優れ、かつ減容化も可能なガラス固化技術の基盤を整備する。

また、それら基盤整備で得られた知見を反映し、国内で実用化されている高レベル廃液のガラス固化の高度化についても検討することにより、安定的に多くの廃棄物(現状の廃棄物充填率の2～3割向上\*1を目指す)を取り込むことができるガラス固化技術の基盤を整備する。

これら基盤の整備により、今後の実証・実用化の道筋をたてる。

\*1: 廃棄物充填率約22wt(重量)%(Na<sub>2</sub>O約10wt%含む)に対して、2～3割の充填率向上を目標とし、30wt%(Na<sub>2</sub>O約10wt%含む)を目標値とする。

### アウトカムが実現した場合の効果

本事業により低レベル放射性廃棄物の溶融ガラス化技術の基盤が整備され、その後、実用化に向けた技術課題がクリアされた場合には、原子力発電所等の操業・廃止時に発生する低レベル放射性廃棄物の新たな処理方法として、従来の固化方法では処理が不可能なものを可能とするほか、廃棄物の種類によっては大幅な減容化が可能となり、低レベル放射性廃棄物の処理・処分の円滑化に資する。

また、高レベル放射性廃液のガラス固化技術の廃棄物充填率を2～3割増加させることで、六ヶ所再処理工場にて発生するガラス固化体約40,000本のうち約8,000本～12,000本の低減が可能となることから、それらに係るコスト低減、立地選択肢の拡大等に貢献する。

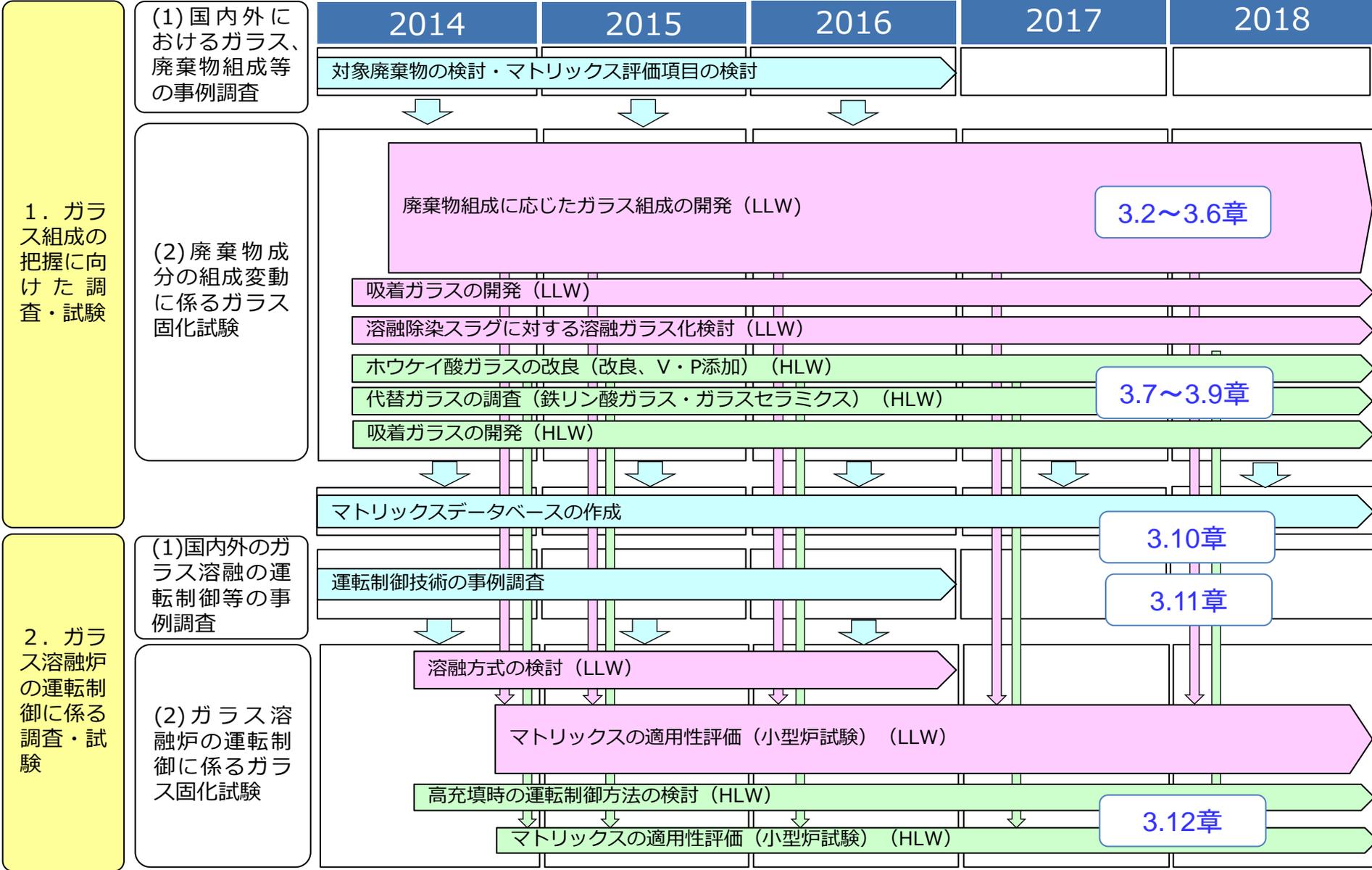


**放射性廃棄物の低減、最終処分場問題の解決に資する**

### 3. 事業アウトプット

事業アウトプット指標 (妥当性・設定理由・根拠)	目標値(計画)	達成状況(実績値・達成度)
<p>多種多様な低レベル放射性廃棄物の組成に対応可能なガラス材料の検討に必要な情報を整理するため、原子力発電所や再処理施設等の操業・廃止時の除染等により発生する<b>低レベル放射性廃棄物の組成を調査</b>する。</p> <p>多くの高レベル放射性廃液を安定的に処理できるガラス溶融技術の検討を行うために、<b>国内外の文献等を調査し、有用なガラス組成について把握</b>する。</p> <p><b>諸外国で研究・実用化が行われている運転制御技術を調査し、有用な技術の適用性を把握</b>する。</p> <p>上記調査の結果等を踏まえ、ガラス組成及び廃棄物組成の関係性等、<b>ガラス固化技術に係るデータベースを作成</b>する。</p>	<p><b>(中間評価時)</b> 中間目標(平成27年度末時点)</p> <p>①ガラス固化が可能な低レベル放射性廃棄物を選定する。</p> <p>②国内外のガラス溶融炉の調査を行い、低レベル放射性廃棄物のガラス固化に適した溶融炉を選定する。</p> <p>③低レベル放射性廃棄物の実用化に必要な評価項目を設定する。</p> <p>④データベースへ登録する項目の整理、基本設計を行う。</p> <p>⑤小規模の試験にて高レベル放射性廃液の充填率を2～3割向上できるガラスマトリクスを開発する。</p> <p>⑥文献等を調査し、廃棄物充填率を向上できる運転制御技術についてガラス溶融炉を用いた試験を行い適用性を確認する。</p>	<p>当初目標達成度:100%</p> <p>①ガラス固化が可能な低レベル放射性廃棄物<b>6種類</b>の非放射性の組成模擬物に対してガラス化できる候補組成を選定した。</p> <p>②上記廃棄物のガラス固化に適したガラス溶融炉を<b>2種類</b>(CCIM, プラズマ)選定した。</p> <p>③ガラス固化体の製造、処分の観点から特性評価項目を<b>20件</b>設定した。</p> <p>④既存のデータベース(INTERGLAD, FactSage)と連携可能なデータ構造、仕様の設計を行い、プログラミングに着手した。</p> <p>⑤高レベル放射性廃液を模擬した非放射性溶液で廃棄物充填率を3割向上できる組成を<b>4種類</b>開発した。</p> <p>⑥文献調査の結果、廃棄物充填率の向上を見込める運転制御技術を4件選定し、そのうち1件についてガラス溶融炉を用いた試験を行い適用性を確認した。</p>
	<p><b>(事業終了時)</b> 最終目標(平成30年度末時点)</p> <p>①低レベル放射性廃棄物をガラス化できる組成を把握し、ガラス溶融方式の選定、運転方法を確立する。</p> <p>②ガラス固化に係る過去の知見および本事業で得た成果を反映したデータベースを作成する。</p> <p>③高レベル放射性廃液の充填率を2～3割向上できるガラス固化技術を開発する。</p>	<p>—</p>

# 3.1 事業のロードマップ



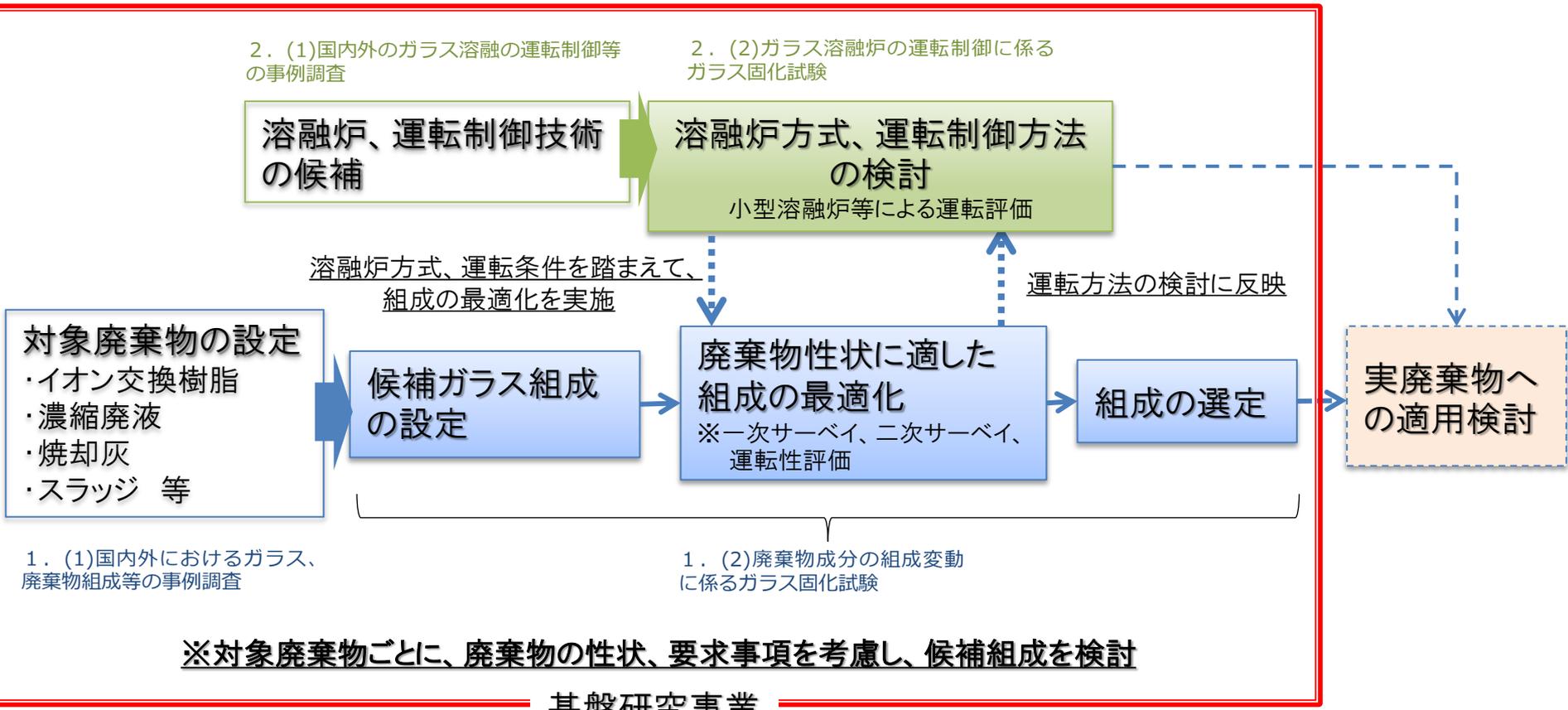
凡例

LLW: 低レベル放射性廃棄物

HLW: 高レベル放射性廃液

# 3. 2 低レベル放射性廃棄物溶融ガラス化の開発概要

- 対象廃棄物ごとにガラス化可能なガラス組成を検討
- 一次サーベイ(基本特性)、二次サーベイ(運転評価、処分に必要な特性等)により組成を絞り込み
- 最終年度に向けて、対象廃棄物毎に廃棄物の性状に適したガラス組成を選定



### 3.3 低レベル放射性廃棄物へのガラス固化適用のメリット

処分場 (廃棄物)		コンクリートピット処分 (L2廃棄物)	余裕深度処分、地層処分 (L1廃棄物、TRU廃棄物)
減容性		○:セメント固化等で充填したものを廃棄物 同士で安定化させることで、添加材を 最小限に抑制し、減容性も向上	○:左に同じ
操業性	固化体 製造	○:出湯(流下)操作を要するときに、安定 した運転が可能	○:左に同じ
	無機化	△:溶融方式によっては、溶融ガラス化時 に無機化可能	△:左に同じ
廃棄体 特性	高発熱量	— (セメント固化で対応可能)	○:セメント等に比べて、発熱制限は高いが、 結晶化温度によって制限される
	高線量	— (セメント固化で対応可能)	○:セメント等に比べて、線量制限は高い ※ガラス固化体以上の廃棄体はない
	バリア 機能	— (現行施設の安全評価では、導入効果は ない)	△:現在検討中の施設の安全評価のままでは、 導入効果はない ※但し、設計見直し等により、バリア機能 を考慮するようなケースが出てくれば、 効果は期待できる

※○:セメント固化等既存の固化方法に比べ優位性が期待される項目

△:条件によっては、セメント固化等既存の固化方法に比べ優位性が期待される項目

### 3.4 対象廃棄物の調査

対象廃棄物	目的		特徴	課題解決	
	I	II		ガラス組成 開発	溶融炉 開発
①イオン交換樹脂	○		・高線量 ・水分と有機物を含有	○	○
②低レベル濃縮廃液、除染廃液 (硝酸ナトリウム廃液)	○	○	・硝酸Na濃度が高い	○	○
③低レベル濃縮廃液 (リン酸廃液)		○	・リン酸イオンと少量の硝酸を含有	○	○
④ホウ酸廃液		○	・B、Na、水分を含有	○	—
⑤イオン交換樹脂の溶離液		○	・高線量 ・S濃度が高い	○	○
⑥焼却灰(飛灰含む)		○	・高線量 ・組成変動が大きい	○	—
⑦HEPAフィルタ、金属Al板等	○		・金属Alを含む	—	○
⑧スラッジ等		○	・Fe濃度が高い	○	—
⑨アスベスト	○		・化学的には安定、形状が有害	—	○
⑩有害金属廃棄物	○		・鉛、水銀等の重金属を含有	○	○
⑪サンドペーパー		○	・ポリプロピレン製	—	○
⑫液体フィルタ	○		・有機物を含有	—	○
⑬ブラスト材		○	・Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (主成分)、Si、Fe等	○	—
⑭活性炭		○	・C主成分	—	○

目的 I：現在検討されている処理技術で処理が困難な廃棄物を安定化

目的 II：現在検討されている処理技術より廃棄物発生量を低減化



本事業における試験対象廃棄物

### 3.5 低レベル放射性廃棄物溶融ガラス化におけるガラス組成評価項目

- 「減容性」・「操業性」・「廃棄体の安定性」の観点からガラス特性の評価項目を設定
- 一次サーベイ(基本特性)、二次サーベイ(運転評価、処分に必要な特性等)により組成を絞り込み

評価項目		1次 サーベイ	2次 サーベイ	
減容性	廃棄物含有率	○	—	
	密度(常温)	○	—	
	揮発率	ガラス成分	○	—
		対象元素	—	○
操業性	溶融温度	○	—	
	溶融ガラス物性	粘度	○	—
		導電率	—	○
		密度	—	○
		比熱	—	○
		熱伝導率	—	○
	浸食挙動	レンガ	—	○
金属		—	○	
廃棄体の安定性	化学的安定性	短期試験	○	—
		中・長期試験	—	○
	均質性(ガラス化)	○	—	
	結晶化温度(TTT線図)	—	○	
	固化体物性	熱容量	—	○
		熱伝導率	—	○
		熱膨張係数	—	○
機械強度		—	○	

### 3. 6 廃棄物成分の組成変動に係るガラス固化試験 (低レベル放射性廃棄物)

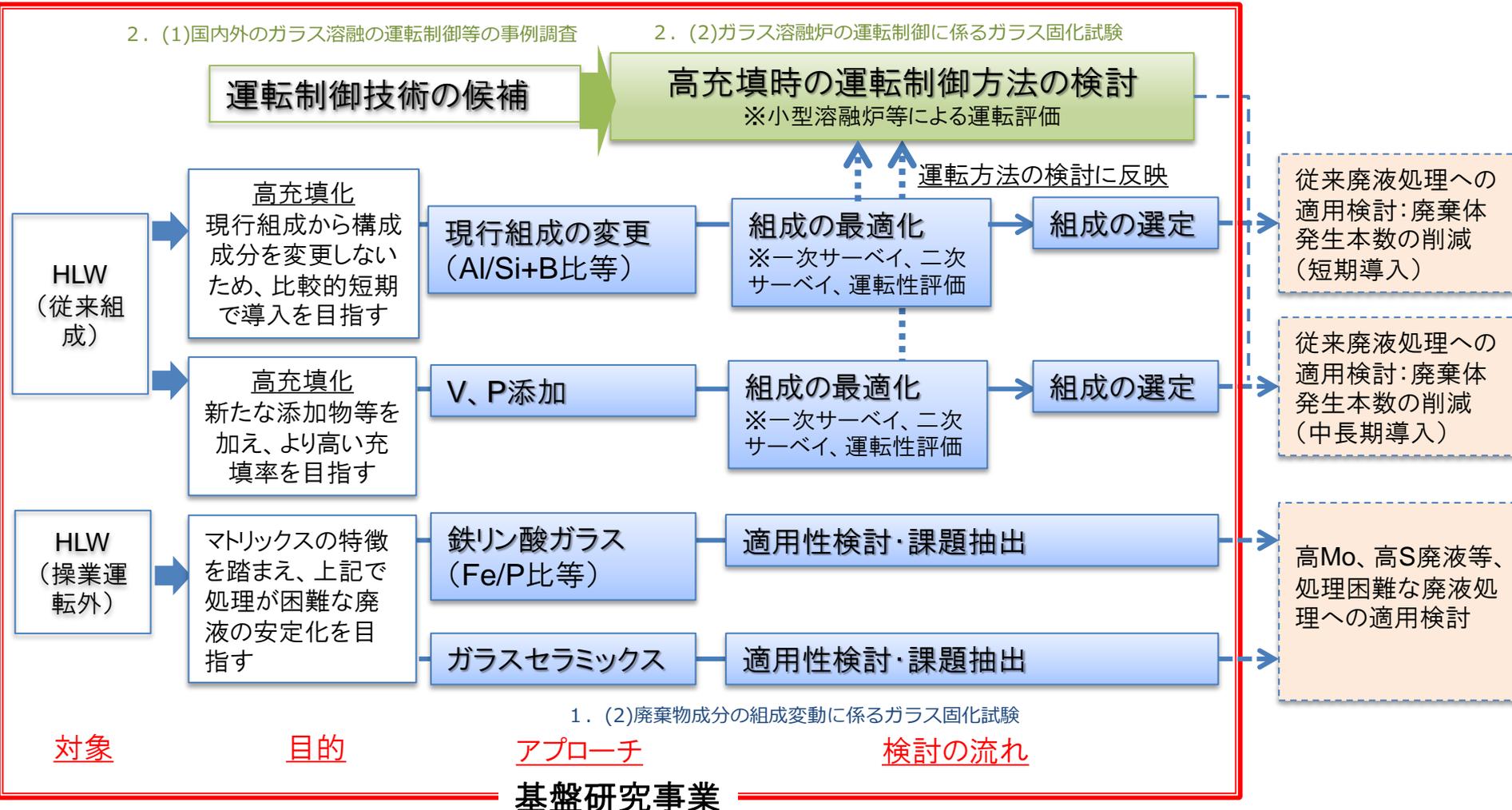
- 原子力発電所、再処理施設から発生する**廃棄物調査**を実施し、調査結果を基に、**従来の固化方法で処理が困難、大幅に減容化が見込まれる廃棄物を対象廃棄物に選定**
- 各廃棄物に対してつぼ規模の試験により、**熔融ガラス化可能なガラス組成を検討**
- 検討したガラス組成に対して、基本特性(廃棄物充填率等)を評価

#### 低レベル放射性廃棄物熔融ガラス化の開発結果概要(平成27年度終了時点)

廃棄物	廃棄物充填率	ガラス原料組成	熔融ガラス化の有効性
イオン交換樹脂 (主成分:Fe)	35wt%	①SiO <sub>2</sub> -Na <sub>2</sub> O	・高線量でセメント固化が困難な場合でも固化可能
	40wt%	②P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
高硝酸Na廃液 (主成分:Na)	40wt%	SiO <sub>2</sub> -B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -CaO	・高温処理のため脱硝が可能 ・セメント固化に比べ、 <b>高充填化による減容化が期待</b> できる
焼却灰 (主成分:Si/Ca/Al)	80wt%	①Li <sub>2</sub> O-B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (主灰のとき)	・高線量・高塩濃度でセメント固化が困難な場合でも固化可能 ・焼却灰の主成分を <b>ガラス形成成分</b> とすることで <b>大幅な減容化</b> が可能
	75wt%	②SiO <sub>2</sub> -Li <sub>2</sub> O-B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (飛灰、混合灰のとき)	
高硝酸Na廃液・ リン酸廃液・スラッジ (主成分:Fe、P、Na)	21wt%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	・セメント固化するためには中和が必要。 ・セメントへの充填率は12wt%程度であるが、 <b>ガラス固化による減容化が期待</b> できる
HEPAフィルタ (主成分:Al/Si)	25wt%	SiO <sub>2</sub> -Na <sub>2</sub> O-Li <sub>2</sub> O-B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	・金属Alを酸化し、ガラス固化することで、水素ガス発生を抑制可能
イオン交換樹脂の溶 離液(主成分:S)	15wt%	SiO <sub>2</sub> -B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -BaO	・高線量でセメント固化が困難な場合でも固化可能 ・ガラスセラミックス等の採用により、 <b>硫黄を高濃度含む廃棄物</b> に対して、 <b>廃棄物充填率の向上</b> が見込め、減容化が可能

# 3.7 高レベル放射性廃液のガラス固化技術の高度化概要

- 高充填、代替組成の設定を目的として、ガラスマトリックスを検討
- 一次サーベイ(基本特性)、二次サーベイ(運転評価、処分に必要な特性等)によりガラスマトリックスの組成を絞り込み
- 最終年度に向けて、適用する廃液種類、導入時期等に応じてガラスマトリックス毎に最適なガラス組成を選定



### 3.8 高レベル放射性廃液のガラス固化におけるガラス組成評価項目

- 「減容性」・「操業性」・「廃棄体の安定性」の観点からガラス特性の評価項目を設定
- 一次サーベイ(基本特性)、二次サーベイ(運転評価、処分に必要な特性等)により組成を絞り込み

項目		1次サーベイ	2次サーベイ	
製造 (溶融プロセス)	廃棄物含有率	○	—	
	揮発率	—	○	
	ガラス化状態	○	—	
	溶融温度	○	—	
	溶融ガラス物性	粘度	○	—
		導電率	—	○
		密度	—	○
		比熱	—	○
		熱伝導率	—	○
	固化体物性	密度	○	—
		比熱	—	○
		熱伝導率	—	○
		結晶化温度(TTT線図)	—	○
	浸食挙動	レンガ	—	○
金属		—	○	
貯蔵・輸送	固化体物性	密度	—	○
		導電率	—	○
		熱容量	—	○
		結晶化温度(TTT線図)	—	○
処分	化学的安定性	短期試験	○	—
		中・長期試験	—	○
	固化体物性	密度	—	○
		熱容量	—	○
		熱伝導率	—	○
		結晶化温度(TTT線図)	—	○

### 3.9 廃棄物成分の組成変動に係るガラス固化試験 (高レベル放射性廃液ガラス固化)

- 事例調査(海外調査、国内知見)等により、ガラス組成の考え方、組成設定方法について調査を実施
- 廃棄物充填率を向上できる組成調整パラメータの影響を確認
- ガラス化の確認とともに、一部の候補組成に対してガラス物性、耐水性等を評価

#### 高充填マトリクスの開発結果概要(平成27年度終了時点)

充填率向上 方策		廃棄物充填率*1 (Na含む)	ガラス原料組成	特徴
現行組成		約22wt%	$\text{Na}_2\text{O}-\text{Li}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}-\text{ZnO}$	各国で高レベル放射性廃液の処理に使用
ホウケイ酸ガラス	現行組成改良	約36wt% ( $\text{Na}_2\text{O}$ 約10wt%含む)	$\text{Na}_2\text{O}-\text{Li}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}-\text{ZnO}$	現行組成から構成成分を変更しないため、比較的短期に開発が可能
	V添加	約36wt% ( $\text{Na}_2\text{O}$ 約10wt%含む)	$\text{Na}_2\text{O}-\text{Li}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{V}_2\text{O}_5$	Vの添加により多原子イオンが取込まれ易い領域が形成されることから、相分離を抑制する効果が期待
	P添加	約36wt% ( $\text{Na}_2\text{O}$ 約10wt%含む)	$\text{Na}_2\text{O}-\text{Li}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{P}_2\text{O}_5$ に対する $\text{MoO}_3$ の溶解度が非常に高いため、相分離を抑制する効果が期待
代替ガラス	鉄リン酸ガラス	約20wt% ( $\text{Na}_2\text{O}$ 約4wt%含む)	$\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{P}_2\text{O}_5$	ホウケイ酸ガラスに比べて1~2割程度密度が大きいいため、同じ充填率でもガラス固化体1本あたりの充填量は大きくできる
	結晶化ガラス	Mo溶解量 15-18wt% ( $\text{MoO}_3$ 換算)	原料ガラス $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-$ OthersにMoを $\text{MoO}_3$ で15-18wt%分散 (現行ガラスでは、溶解量約1.3wt%)	ガラスに溶解しにくい物質を非水溶性の結晶相(ガラスセラミクス)としてガラス中に分散

\*1: 廃棄物充填率約22wt%に対して、3割向上した場合、目標廃棄物充填率は約30wt%となる( $\text{Na}_2\text{O}$ 濃度を含めた値)

# 3. 10 マトリックスデータベースの作成

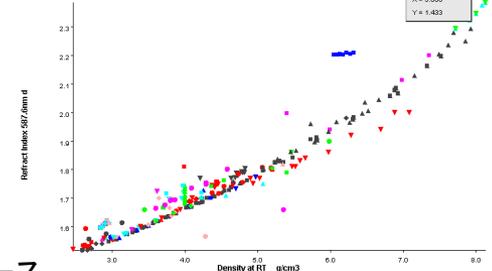
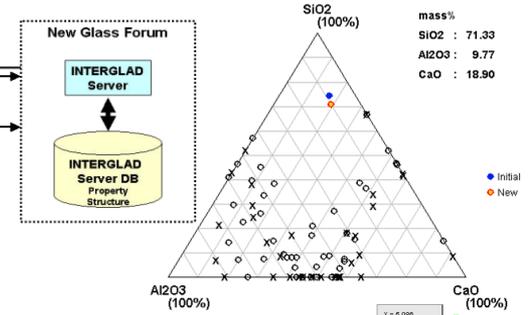
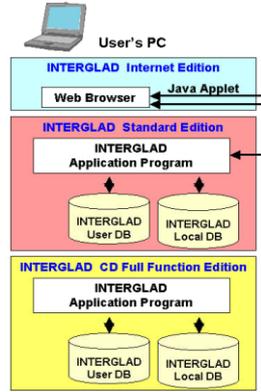
- ▶ 今後将来のガラス固化マトリックス開発において、従来の試行錯誤的なアプローチから、蓄積してきたガラス組成・特性データを活用する解析的なアプローチへ発展させる
- ▶ 本開発で得られたガラス組成・特性データを格納・管理するとともに、これらから推定できる情報を研究開発者が統合的に利用できるようにするため、データベースを構築する

廃棄物ガラスデータベース  
WAGLAD



国際ガラスデータベースINTERGLAD

- ・組成と特性の相関を推定
- ・特性を満たす組成を推定
- ・ガラス化範囲を推定

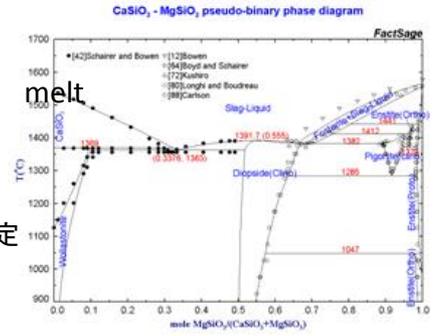


出典：ニューガラスフォーラムHP



本基盤研究事業  
で取得するデータ

熱力学的諸量データベース  
例) FactSage



- ・組成から熔融温度を推定
- ・組成から粘度を推定



出典：計算力学研究センターHP

### 3. 11 国内外のガラス溶融の運転制御等の事例調査

- 有望な溶融炉方式として、低レベル廃棄物に対してはプラズマ炉、コールドクルーシブル炉(CCIM)、高レベル廃液に対してはジュール加熱炉を選定
- 運転制御技術として、バブリング・添加剤・温度管理に着目し、基礎試験により効果を確認
- 国内のガラス産業界の溶融炉を調査し、原子力分野へ適用可能な技術を抽出
- 溶融炉調査の結果から、原料の供給方式、監視箇所、制御技術、流下方式等の一部を運転制御技術の検討内容に反映

#### 溶融炉技術の調査結果概要

	加熱方式			
	ジュール加熱	高周波誘導加熱		プラズマ加熱
		ホットクルーシブル	コールドクルーシブル	
ポトムドレン (フリーズバルブ)	日本:TVF(JAEA) 日本:K施設(日本原燃) 独:VEK 中国:VPC	仏国:AVM/AVH(AREVA) 英国:WVP(Sellafield)	仏国:(AREVA) 仏国:(AREVA) 韓国:(KHNP) ロシア:(RADON) 仏国:Shiva(CEA)	韓国:(KHNP)
ポトムドレン (スライドバルブ)		日本:金属溶融炉(JAEA)		ロシア:(RADON)
ポトムドレン (遠心力調整)				日本:PACT (日本原電) スイス:PACT (ZWIRAG)
サイドドレン (スライドバルブ)	ロシア:(MAYAK)			
サイドドレン (傾動出湯)				日本:雑固体溶融炉 (JAEA)
オーバーフロー (エアリフト)	米国:WVDP、WTP 米国:WTP、VITPP			
オーバーフロー (負圧吸引)	米国:DWPF			
IN-CAN		(米国、英国、独、インド) 日本:IH(IN-CAN)	赤字:高レベル廃液ガラス固化 青字:低レベル廃棄物溶融もしくはガラス固化 下線:研究施設	

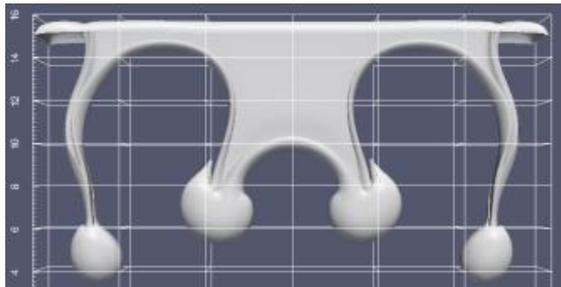
#### 運転制御技術の調査結果概要

技術	廃棄物、ガラス原料	実績
機械式スターラ及びガスバブリング	<ul style="list-style-type: none"> <li>LLW</li> <li>MLW</li> <li>HLW</li> </ul>	仏国 CCIM <sup>*1</sup>
ガスバブリング	<ul style="list-style-type: none"> <li>高濃度Al、Fe、Mnを含むHLW</li> </ul>	米国 JHCM <sup>*2</sup>
還元剤の添加	<ul style="list-style-type: none"> <li>Na、Sを含む廃棄物</li> <li>Sを含む廃棄物</li> <li>高濃度Al、Fe、Mnを含むHLW</li> </ul>	米国 JHCM <sup>*2</sup>
ガスバブリング 添加物の添加	<ul style="list-style-type: none"> <li>高濃度のSを含むHLW</li> <li>原料ガラスにSb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、廃液にV<sub>2</sub>O<sub>5</sub>を添加</li> </ul>	独 LFCM <sup>*3</sup>

- \*1:CCIM:コールドクルーシブル誘導加熱炉  
\*2:JHCM:ジュール加熱式セラミックメルター  
\*3:LFCM:液体供給式セラミックメルター

### 3.12 ガラス溶融炉の運転制御に係るガラス固化試験

項目	概要	実施結果
a. ガラス原料供給形態の調査	<ul style="list-style-type: none"> <li>ガラス原料の形態改良により、ガラスに溶解しにくい成分（イエローフェーズなど）のガラスへの溶解性の向上を検討</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ガラス原料の形態を小さくすることで、ガラスへイエローフェーズが溶解しやすくなることを確認した</li> </ul>
b. 白金族元素の沈降挙動メカニズムの解明	<ul style="list-style-type: none"> <li>廃棄物充填率を高めた際に、ガラスに溶解しない白金族元素濃度も増加するため、溶融炉で沈降し、閉塞等が懸念される。沈降メカニズムを解明し、溶融炉運転時の評価を実施。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>白金族元素が発生する温度および化学形態の一部を明らかにした</li> <li>炉上部で沈降しはじめる際の白金族元素の沈降挙動の概要モデルで再現した</li> <li>炉底部で沈降した白金族元素の移動挙動を評価するための一部のデータを取得した</li> </ul>
c. 運転制御技術の調査および小型溶融炉を用いた試験 ※高充填運転時の課題抽出	<ul style="list-style-type: none"> <li>廃棄物充填率を高め、溶融炉で運転を行う際に、必要な運転制御技術を小型溶融炉で確認</li> <li>開発したガラスマトリックスを用い、高充填運転際の課題を抽出</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>有効な運転制御技術として、①バブリング、②還元剤添加等を選定した</li> <li>小型溶融炉試験を行い、バブリングによる処理能力の向上を確認、運転に係る基礎データを取得した</li> </ul>



白金族元素の沈降挙動の概要モデル

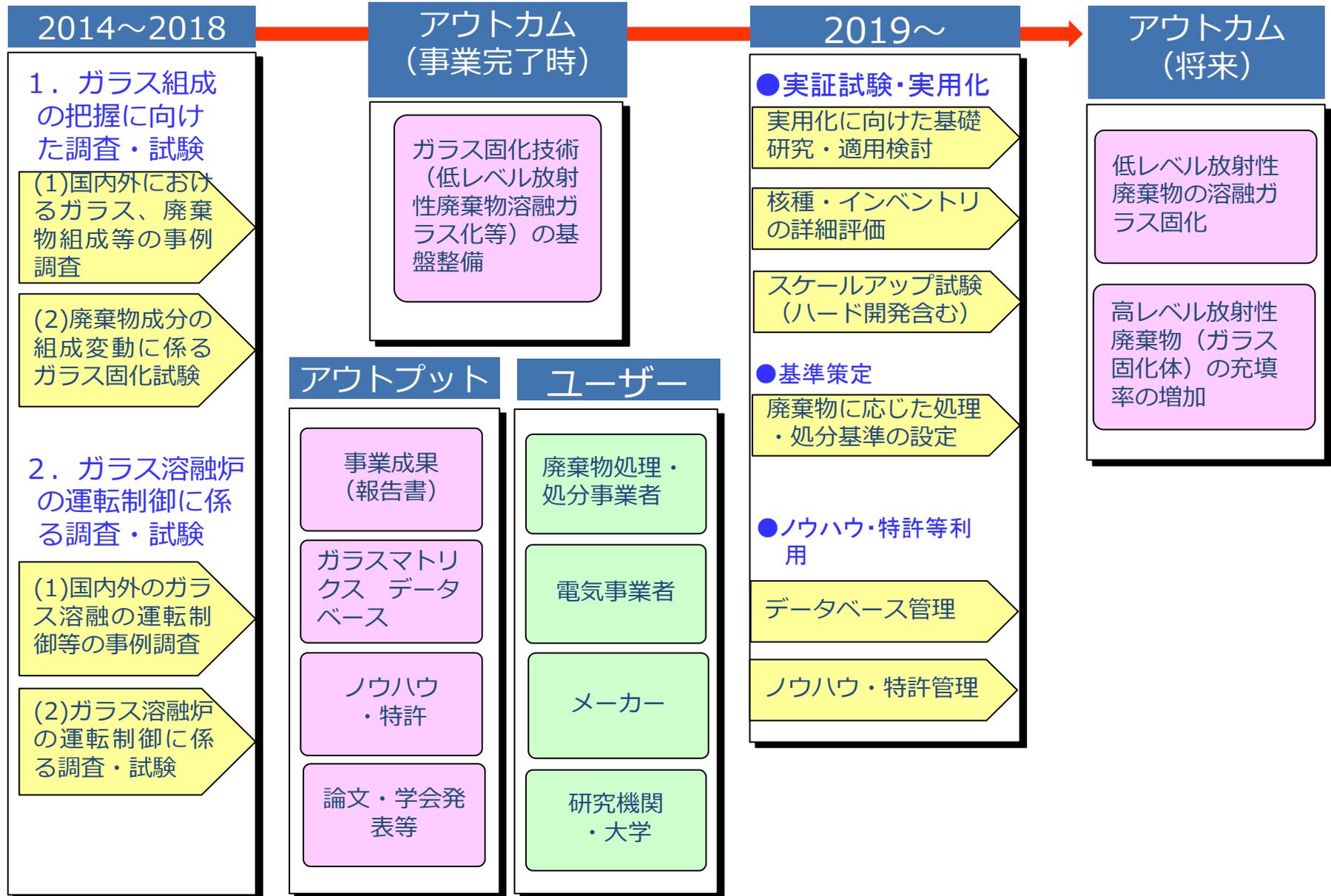


小型ガラス溶融炉

## 4. 当省(国)が実施することの必要性

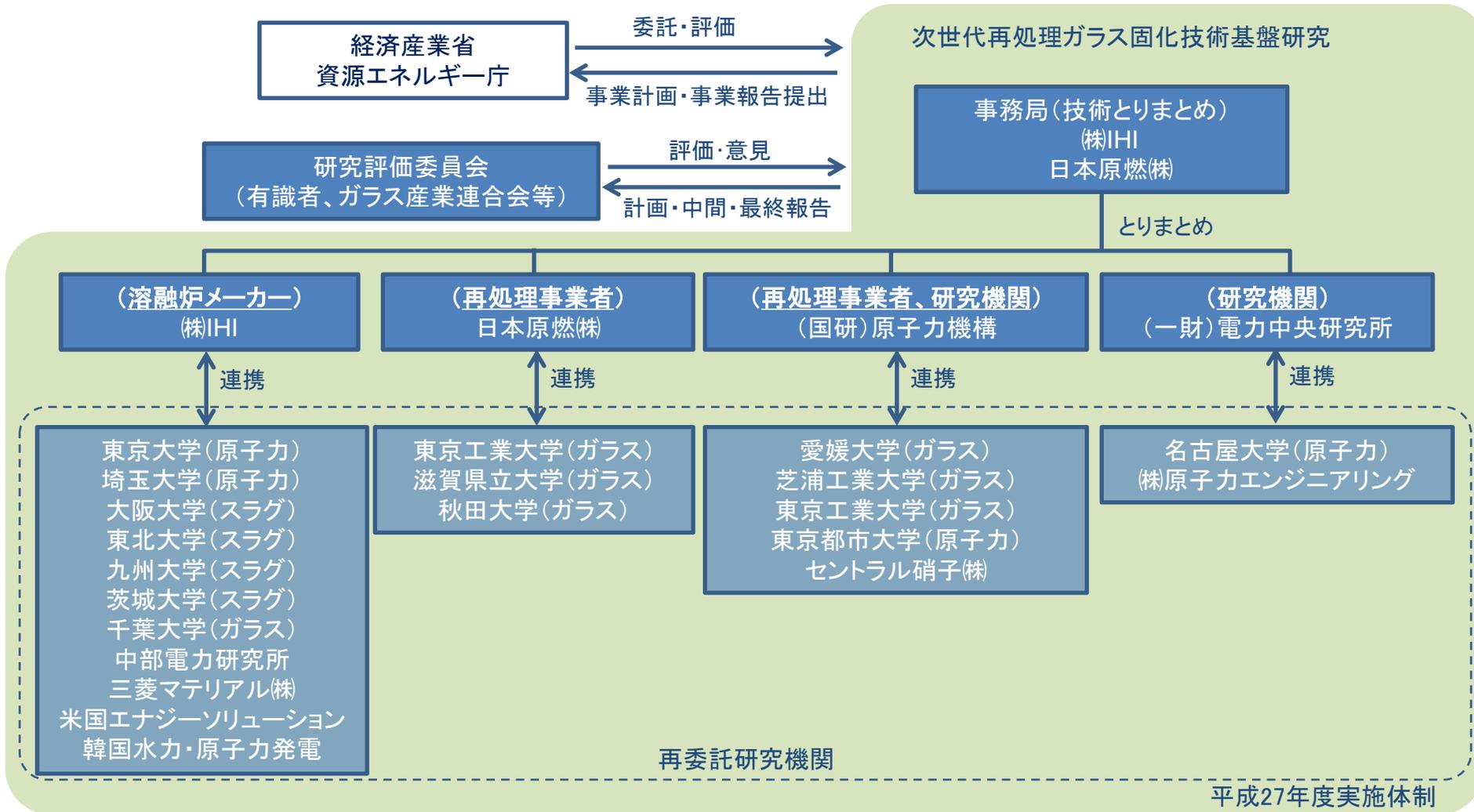
- 放射性廃棄物の安定化かつ減容化を目指した当該ガラス固化技術開発事業は、多種多様の廃棄物に適したガラス組成の選定とそれに対応する信頼性の高い固化技術を開発するため、技術的難度を有するとともに多額の開発費用と長期の開発期間を要する。このため、民間事業者にとっては開発リスクが高い事業であり国の主導で行う必要がある。
- 低レベル放射性廃棄物のガラス固化技術は、将来当該技術を使用する原子力事業者が多数にわたるとともに、今後の原子力発電所等の原子力施設の廃炉措置の円滑化にも資するものである。また、高レベル放射性廃棄物のガラス固化技術については、最終処分という国が前面に立つべき課題の解決に資するものである。
- 国が前面に立つことにより、放射性廃棄物の処理、最終処分問題に対して、事業者、研究機関、大学、企業等国内外の英知を結集したオールジャパン体制での対応が可能となる。
- 平成26年4月に閣議決定された「エネルギー基本計画」においても、低レベルを含む放射性廃棄物の処分については、原子力事業者等が処分に向けた取り組みを進めることを基本としつつ、処分の円滑な実現に向け、国として必要な研究開発を推進すること、高レベル放射性廃棄物の問題の解決に向け、国が前面に立って取り組む必要があることが明記されている。

# 5. 事業アウトカムに至るまでのロードマップ



## 6. 研究開発の実施・マネジメント体制等

- ▶ ガラス固化技術に精通している**4社体制**で共同受託
- ▶ 有識者、ガラス産業界等から構成される**研究評価委員会を設置**（年3回開催）
- ▶ ガラス産業・鉄鋼・原子力等を専門とする**研究機関および企業が協力機関として参画**



## 6.1 事業者の役割分担(1/2)

➤ 以下の経験・実績に基づき、本事業を実施

IHI	溶融炉メーカー	ガラス固化施設に関わる設計・開発等の実績・経験
日本原燃(JNFL)	再処理事業者	廃棄物保管及び再処理施設に関わる開発、運転等の実績・経験
原子力機構(JAEA)	再処理事業者・研究機関	廃棄物保管及び再処理施設に関わる研究、開発、運転等の実績・経験
電中研	研究機関	ガラス固化技術に関わる研究開発等の実績・経験

### (1) ガラス組成の把握に向けた調査・試験

#### ① 国内外におけるガラス、廃棄物組成等の事例調査

項目	事業者	再委託先
対象廃棄物の検討	IHI/電中研	米国エネルギーソリューション/韓国水力・原子力発電/原子力エンジニアリング
マトリックスデータベースの作成・管理	JAEA	—
マトリックス評価項目の検討	IHI/電中研/JAEA/JNFL	—

#### ② 廃棄物成分の組成変動に係るガラス固化試験

項目	事業者	再委託先	
廃棄物組成に応じたガラス組成の開発	IHI/JAEA	千葉大/中部電力/九大/阪大/東北大/芝浦工大	
溶融除染スラグに対する溶融ガラス化の検討	IHI	三菱マテリアル	
候補ガラス組成評価	電中研/IHI/JAEA	芝浦工大	
吸着ガラスの開発	JAEA/IHI	中部電力	
高充填マトリックスの開発	改良ホウケイ酸ガラス	JNFL	秋田大/滋賀県大/東工大
	バナジウム添加ガラス	IHI	阪大/都市大/九大/東北大/茨城大
	リン添加ガラス	JAEA	—
代替マトリックスの調査	鉄リン酸ガラス	JAEA	愛媛大/セントラル硝子
	ガラスセラミックス化	電中研	—

## 6. 1 事業者の役割分担(2/2)

### (2) ガラス溶融炉の運転制御に係る調査・試験

#### ① 国内外のガラス溶融の運転制御等の事例調査

項目	事業者	再委託先
運転制御技術の事例調査 (ガラス溶融炉、運転制御)	電中研/IHI/JAEA/JNFL	—

#### ② ガラス溶融炉の運転制御に係るガラス固化試験

目的	事業者	再委託先
溶融方式の検討 マトリックスの適用性評価(LLW)	電中研/IHI	—
高充填時の運転制御方法の検討	電中研	名古屋大
	IHI	東大、埼玉大、千葉大
	JNFL	東工大
適用性評価(HLW)	IHI/電中研/JNFL	—

## 6.2 研究開発のマネジメント

H26～H30年度（低レベル廃棄物溶融ガラス化）

- ・事務局
- ・IHI
- ・JNFL
- ・JAEA
- ・電中研

第1ステージ

- ・事例調査
- ・候補ガラス組成の設定

第2ステージ

- ・組成の最適化  
(1次サーベイ)

第3ステージ

- ・組成の最適化  
(2次サーベイ)

組成の選定

1次サーベイの結果  
を踏まえた評価、  
組成の絞込み

2次サーベイの結果  
を踏まえた評価、  
組成の絞込み

年度内

第1回研究評価委員会

意見・評価

学会発表等

意見

第2回研究評価委員会

意見・評価

第3回研究評価委員会

意見・評価

- ・事務局
- ・IHI
- ・JNFL
- ・JAEA
- ・電中研

計画作成

前年度成果  
を踏まえた  
実施内容・  
予算配分等  
を協議

計画報告

意見・評価  
を計画に反  
映

研究実施

4社会議  
(毎月)

進捗管理・調  
整事項等協議

中間報告

意見・評価  
を実施内容  
に反映

研究実施

4社会議  
(毎月)

進捗管理・調  
整事項等協議

最終報告

意見・評価  
を報告書に  
反映

## 7. 費用対効果（低レベル放射性廃棄物）

- 低レベル放射性廃棄物のガラス固化技術が確立された場合の効果
  - ◆ 減容効果により、**廃棄体の処分費、測定費、輸送費の削減が可能**となる。
  - ◆ ガラス固化の対象となる低レベル放射性廃棄物は、廃樹脂、濃縮廃液、焼却灰等多岐に渡るが、**濃縮廃液を例にガラス固化を適用した場合の削減効果を試算**した。<sup>(\*1,2)</sup>
  - ◆ 試算の結果、セメント固化体に対するガラス固化体の**発生量が1/4に低減**されたとした場合、輸送費・処分費等が約**133億円の削減**<sup>(\*3)</sup>が見込まれる。
  - ◆ セメント固化からガラス固化への処理方法変更により、廃棄体の安定性は向上するが、処理費用の増加も考えられる。本費用は含まれていないが、事業終了時には処理コストを含めた総合評価を実施予定。

### 【試算根拠】

➤ 本試算は、ガラス固化適用により、処分費用中の操業費、測定費用、輸送費用が削減される仮定で算出した。

・地層処分対象の低レベル廃棄物（約18,000m<sup>3</sup>）の内、濃縮廃液は約8%（1,500m<sup>3</sup>）<sup>(\*1,2)</sup>

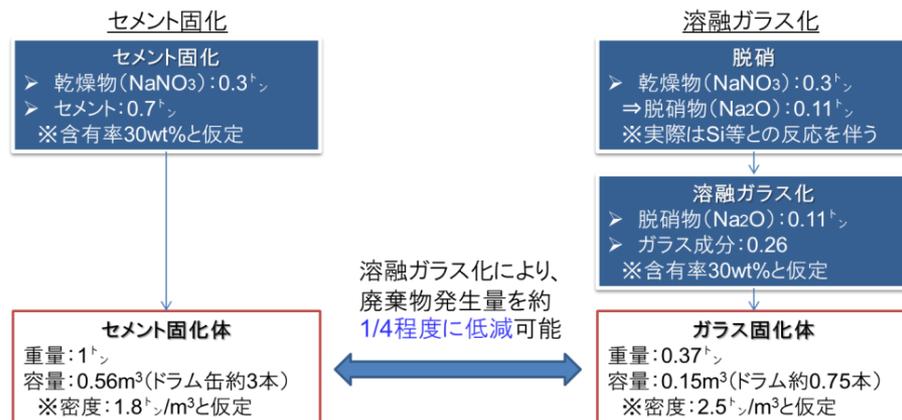
対象廃棄物：低レベル濃縮廃液の乾燥物（硝酸ナトリウム）0.3<sup>ト</sup>

・処分費用中の操業費（地層処分） 1,400億円  
 ・操業廃棄物輸送・処分中の測定費（地層処分） 9億円  
 ・操業廃棄物輸送・処分中の輸送費（地層処分） 800億円

操業費、測定費、輸送費の合計 2,209億円

・濃縮廃液に関わる操業費、測定費、輸送費の合計  
 （セメント固化）：2,209億円 × 8% = 177億円  
 （ガラス固化）：2,209億円 × 8% × (1/4) = 44億円

**削減効果 177億円 - 44億円 = 133億円**<sup>(\*3)</sup>



※含有率、密度は仮定の値を用いて算出

(\*1) コスト等検討委員会資料(2011)参照。

(\*2) 約40年間の日本原燃(株)の再処理施設、MOX燃料加工施設の操業及び解体に伴い発生する

TRU廃棄物及び海外再処理に伴い返還される低レベル廃棄物のうち、地層処分対象のTRU廃棄物が対象

(\*3) TRU廃棄物の処分施設の操業期間全体での削減効果

## 7. 費用対効果(高レベル放射性廃液)

- 高レベル放射性廃液のガラス固化技術の向上により、より多くの廃棄物を充填(現状の廃棄物充填率の3割向上)できた場合の効果
  - ◆ ガラス固化体発生本数を1,000本/年として、40年操業で、40,000本発生することを前提条件とすると、3割の減容化により12,000本の削減が期待できる。
  - ◆ ガラス固化体が12,000本削減できれば、高レベル放射性廃液の処理費、高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)の貯蔵費、輸送費、処分費が削減されると考えられる。
  - ◆ 但し、処理費、処分費は発生本数に比例した削減効果は見込めないため、本試算では、保守的に評価に含めていない。
    - ・処理費(4,700億円<sup>(\*1)</sup>): 操業期間は廃液発生量に依存。キャニスタ等の購入費は削減。
    - ・処分費(28,882億円<sup>(\*2)</sup>): 高充填に伴うガラス固化体の発熱量増加を考慮した評価が必要。
  - ◆ 高レベル放射性廃棄物の貯蔵費用、輸送費用として、約2,790億円の削減<sup>(\*3)</sup>が見込めるものと考えられる。
  - ◆ 但し、高充填化に伴い貯蔵期間が増加した場合、貯蔵費用のコスト増が見込まれる。

### 【試算根拠】

- 本試算は操業、輸送費用として、以下のデータ<sup>(\*1)</sup>を用いて算出した。

・高レベル放射性廃棄物貯蔵	7,400億円
・高レベル放射性廃棄物輸送	1,900億円

---

高レベル放射性廃棄物貯蔵・移送費用合計 9,300億円

**削減効果  $9,300\text{億円} \times 0.3 = 2,790\text{億円}$**

(\*1)コスト等検討委員会資料(2011)参照、(\*2)原子力発電環境整備機構ホームページ参照、

(\*3)処理施設の40年操業期間での削減効果

## 8. 外部有識者の評価等

### 8-1. 評価検討会

評価検討会名称

「次世代再処理ガラス固化技術基盤研究事業」中間評価検討会

座長

朽山 修 公益財団法人原子力安全研究協会 技術顧問

評価検討会委員

委員

浅沼 徳子 東海大学工学部原子力工学科 准教授

杉山 一弥 一般社団法人原子力産業協会 事務局長

関 哲朗 文教大学情報学部情報社会学科 教授

出口 朗 原子力発電環境整備機構 技術部長

## 8-2. 総合評価

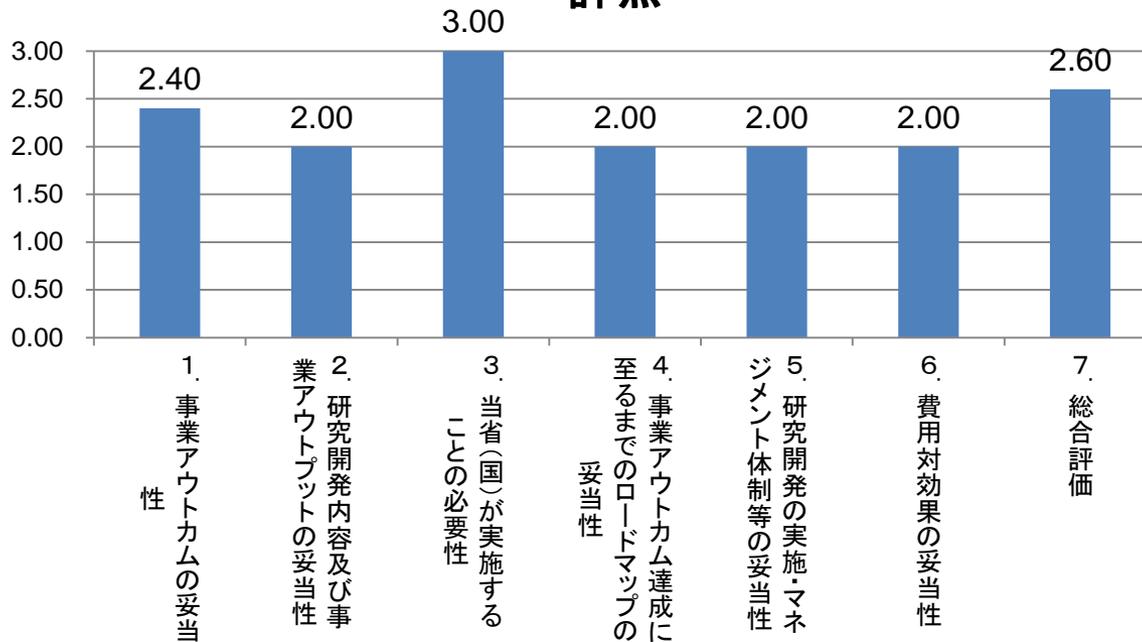
放射性廃棄物は、原子力施設の操業により既に発生しているものであり、また今後の廃止措置に伴って更なる発生が避けられないものであり、これらの安全かつ合理的な処分は大変重要であり、継続的に取り組むべき喫緊の課題である。本技術開発は、ガラス固化という安定性に優れた固化技術により、従来固化処理が懸念されていた廃棄物に対してその解決を目指すものであり、さらには減容化により合理的な処分にも資するものである。国の関与のもと、産学官が連携してこれを行うことで、早期に実用化を図り、当該課題の解決が期待できる。

なお、高レベル放射性廃液については、充填率の増加により固化体の発熱量が増加する等、管理や処分も含めて全体の最適化を図る必要があり、これを考慮した目標を定める必要がある。また、ベネフィットを整理して示すことで、広く国民の理解が得られるものとする。

## 8-3. 評点結果

○「経済産業省技術評価指針」に基づき、プロジェクト中間評価において、評点法による評価を実施した。

### 評点



#### 【評価項目の判定基準】

評価項目 1.~6.  
 3点:極めて妥当  
 2点:妥当  
 1点:概ね妥当  
 0点:妥当でない

#### 7. 総合評価

(中間評価の場合)

3点:事業は優れており、より積極的に推進すべきである。  
 2点:事業は良好であり、継続すべきである。  
 1点:事業は継続して良いが、大幅に見直す必要がある。  
 0点:事業を中止することが望ましい。

## 9. 提言及び提言に対する対処方針(1)

### 今後の研究開発の方向等に関する提言

- 本研究開発による波及効果として、福島第一発電所事故によって発生した廃棄物への適用が考えられる。福島第一発電所事故によって低レベル放射性廃棄物とみなされる様々な汚染物質が大量に発生しており、今後その適切な固化と減容が大きな課題となる。本事業の成果は、これに対する解決の糸口を与えるものとしても大いに期待できるものであり、成果のとりまとめに当たっては、当該問題に対する提言も含めて整理することを期待する。

### 提言に対する対処方針

- 本研究開発では、原子力発電所や再処理施設等の操業・廃止措置に伴って発生する様々な低レベル放射性廃棄物に対して、安定性に優れ、かつ減容性の高いガラス原料組成の設定手法を確立することとしている。本研究開発でガラス固化試験未実施の運転・解体廃棄物、更には、福島第一発電所事故に伴うスラッジ等の水処理二次廃棄物といった事故廃棄物についてもガラス固化を検討する際に、当該手法は有効であると考えられる。成果のとりまとめにおいては、そのような提言も含めて整理する。

## 9. 提言及び提言に対する対処方針(2)

### 今後の研究開発の方向等に関する提言

- 様々な物理・化学性状を持つ低レベル放射性廃棄物に対応するためには、ガラス固化条件（組成だけでなく炉の運転制御も含む）として、負の影響を与える要素も明らかにし整理すること。
- 成功の評価の主張が、本研究開発プロジェクトの結果が生み出すプロフィットに終始せず、原子力関連の事業、国の施策に対してどのような貢献が成されたのか、国民に対してどのようなベネフィットを提供することに繋がる成果を示せたのかといったようなことを適切に示せるように事業を進めるべき。

### 提言に対する対処方針

- 本事業では、低レベル放射性廃棄物のうちガラス固化処理の対象として、従来の固化方法では処理が困難な廃棄物や従来の固化方法よりも大幅な減容化が見込まれる廃棄物を選定しており、その廃棄物の種類（組成、特性等）毎に適したガラス固化条件の検討を行っている。従って、ガラス固化に適さない廃棄物やガラス固化条件等の負の影響を与える要素及びその根拠についても把握できるため、これらを整理した上で示していく。
- 本事業は、核燃料サイクル政策の意義の一つである、放射性廃棄物の安定化、減容化等を目指した処理技術の開発を行うものであり、そうした成果が国民生活の安全・安心の確保にも留意しつつ効果的に示していけるよう事業を進めていく。

# A. ガラス固化技術の基盤整備 個別要素技術の達成状況

# 個別要素技術のアウトプット指標・目標値及び達成状況

## ・ガラス組成の把握に向けた調査・試験

要素技術	目標・指標(中間評価)	成果	達成度
対象廃棄物の検討	原子力発電所の操業・廃止時の除染等により発生する低レベル放射性廃棄物の組成・特性等を把握する。	原子力発電所、再処理施設において発生する低レベル放射性廃棄物の種類、性状等を調査により把握した。さらに、本事業で対象とする6種類の廃棄物を選定すると共に、ガラス組成の検討(試験計画)に反映した。 【対象廃棄物】 a. イオン交換樹脂 b. 低レベル放射性濃縮廃液(高硝酸ナトリウム廃液) c. 低レベル放射性濃縮廃液(リン酸廃液) d. 焼却灰 e. HEPAフィルタ f. イオン交換樹脂の溶離液	達成
マトリックス評価方法の検討	低レベル放射性廃棄物及び高レベル放射性廃液に対するガラス組成の検討における評価項目を設定する。	文献調査により、評価項目を以下のとおり設定した。 ・低レベル:20項目 ・高レベル:25項目	達成
データベースの作成・管理	ガラスマトリックスの組成・物性の検索機能、物性予測機能等を有するマトリックスデータベースの基本設計を行う。	マトリックスデータベースの基本設計を実施し、データの出力方式、データ構造、出力画面等の仕様の設計を行い、プログラミングに着手した。	達成
溶融除染技術の調査	再処理施設の廃止措置等で発生する金属廃棄物への溶融除染の適用性を確認する。	金属の溶融除染係数は10000以上である事を明らかにし、再処理施設等の廃止措置で発生する金属廃棄物に対して、溶融除染が適用可能である事を確認した。	達成

# 個別要素技術のアウトプット指標・目標値及び達成状況

## ・ガラス組成の把握に向けた調査・試験 - 低レベル放射性廃棄物の溶融ガラス化 -

要素技術	目標・指標(中間評価)	成果	達成度
廃棄物組成に応じたガラス組成の開発	<p>①より多くの低レベル放射性廃液を安定的に取り込むことができるガラス組成を基礎試験により選定し、ガラス固化体の基本特性を取得する。</p> <p>②硫黄が高濃度で含まれる廃液に対して、ガラス化可能な組成を明らかにする。</p>	<p>①ガラス化する低レベル放射性廃棄物を5種類選定し、粘度、短期浸出率のデータを取得し、いずれにおいても良好な結果を得た。</p> <p>a. イオン交換樹脂: 充填率約35wt%</p> <p>b. 低レベル放射性濃縮廃液: 充填率約30wt%</p> <p>c. 焼却灰: 充填率約75wt%</p> <p>d. スラッジ混合物: 充填率約21wt%</p> <p>e. HEPAフィルタ: 充填率約25wt%</p> <p>②ガラスセラミックスを用いガラス化できる見通しを得た。 SO<sub>3</sub>充填率: 約15wt%</p>	達成
溶融除染スラグに対する溶融ガラス化の検討	溶融除染で発生したスラグに対して、溶融ガラス化による安定化が可能なことを確認する。	廃棄物充填率60wt%程度でガラス化が可能であることを確認した。	達成
吸着ガラスの開発	ガラス自体を吸着材として用いる多孔質ガラスの組成、製造方法を明らかにすると共に、溶融ガラス化の適用性を確認する。	コバルト等を吸着分離可能な多孔質ガラスの組成、製造条件を設定した。	達成

# 個別要素技術のアウトプット指標・目標値及び達成状況

## ・ガラス組成の把握に向けた調査・試験-高レベル放射性廃液ガラス固化-

要素技術	目標・指標(中間評価)	成果	達成度
ホウケイ酸ガラスの改良	<p>現行のホウケイ酸ガラスを改良することにより、廃棄物充填率20wt%(Na除く)以上が可能な組成を開発する。</p> <p>a. 改良ホウケイ酸ガラス b. バナジウム添加ガラス c. リン添加ガラス</p>	<p>a. <math>\text{SiO}_2/\text{B}_2\text{O}_3=1.75</math>(mol比) かつ<math>\text{Al}_2\text{O}_3</math>濃度を2倍に増加させた組成において、廃棄物充填率26wt%を達成。Mo溶解度も向上し、耐水性は良好な結果を得た。</p> <p>b. バナジウムを添加しアルカリ比を0.22~0.27(mol/mol)にすることで、廃棄物充填率26wt%を達成。Mo溶解度も向上する見通しを得た。</p> <p>c. <math>\text{P}_2\text{O}_5</math>の添加により、廃棄物充填率26wt%を達成。<math>\text{MoO}_3</math>溶解度も向上することを確認した。</p>	達成
代替ガラスの調査	<p>現行のホウケイ酸ガラスでは処理が困難な廃棄物について、安定的にガラス固化できる新しい組成を検討する。</p> <p>a. 鉄リン酸ガラス b. ガラスセラミックス化</p>	<p>a. 鉄リン酸ガラス</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・鉄リン酸ガラスマトリックスで、高レベル放射性廃液の模擬物をガラス固化できることを確認した。ただし、現在の組成範囲では、Zr等のリン酸塩結晶が析出することを確認した。</li> <li>・浸出速度は低く、耐水性は良好であることを確認した。</li> </ul> <p>b. ガラスセラミックス化</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・非水溶性の<math>\text{CaMoO}_4</math>結晶相を充填率15-18wt%(<math>\text{MoO}_3</math>相当)で分散できることを確認した。</li> </ul>	達成
吸着ガラスの開発	<p>ガラス固化技術を応用した新しい概念を検討する。</p>	<p>抽出材を含浸させた<math>\text{SiO}_2</math>担体による抽出クロマトグラフィ法を選定し、模擬廃棄物成分を吸着させた吸着材を用い、熔融ガラス化できることを確認した。</p>	達成

# 個別要素技術のアウトプット指標・目標値及び達成状況

## ・国内外のガラス溶融炉の運転制御等の事例調査

要素技術	目標・指標(中間評価)	成果	達成度
国内外のガラス溶融炉の事例調査	国内外で実用化されているガラス溶融炉について調査し、本事業で対象とするにふさわしい技術を選定する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・対象とした低レベル放射性廃棄物6項目に対し有用性の高い溶融方式を2項目選定した。               <ul style="list-style-type: none"> <li>a. コールドクルーシブル処理</li> <li>b. プラズマ溶融処理</li> </ul> </li> <li>・高レベル放射性廃液処理用のガラス溶融炉は、情報の入手性および溶融炉の規模の観点から、本事業ではジュール加熱方式を選定した。</li> </ul>	達成
国内外のガラス溶融炉の運転制御等の事例調査	国内外のガラス溶融炉にて開発・実用化されている運転技術や開発動向を把握し、調査結果を本事業の運転制御試験に反映するため、適用可能な技術を選定する。	<p>国内外で開発・実用化され、原子力施設に利用されているガラス溶融炉を調査し、17件の有効性のある技術を確認した。そのうち、高充填を見込める4件の運転技術を選定した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. ガスバブリング</li> <li>b. 還元剤の添加</li> <li>c. ガスバブリング+添加物の添加</li> <li>d. 攪拌器+ガスバブリング</li> </ul>	達成
低レベル放射性廃棄物溶融ガラス化の開発	選定した溶融方式において、溶融ガラス化をできる事を確認する。	基礎試験にて溶融ガラス化できる見通しを得たイオン交換樹脂に対し、プラズマ溶融炉にて溶融ガラス化試験を実施し、ガラス化できる見込みを得た。ただし、原料の供給方法については改善の余地がある。	達成
高レベル放射性廃液ガラス固化の高度化	<p>廃棄物充填率の向上に伴い発生する運転課題の抽出と対策方法を検討する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. 処理能力の向上</li> <li>b. イエローフェーズ成分の溶解性の向上</li> <li>c. 白金族元素の沈降抑制</li> <li>d. 原料の供給形態の影響評価・ガラス化反応の解明</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. 溶融ガラス中にてバブリングを実施することにより、処理能力(ガラス固化体製造速度)が33%向上することを確認した。(廃棄物充填率:14wt%時)</li> <li>b. 原料ガラスを8<math>\mu</math>m程度に小径化することで、仮焼層上部において炉内雰囲気遮蔽され、酸化を抑制することにより、イエローフェーズ形成を抑制できることを確認した。</li> <li>c. 白金族元素沈降現象を数値解析モデルにより再現した。</li> <li>d. ガラス原料サイズの減少により、ガラス中の白金族元素粒子が分散される傾向が確認された。</li> </ul>	達成

# A. ガラス固化技術の基盤整備 参考資料

## 参考:従来方法によるガラス固化について

### 概要

- 廃棄物にホウ珪酸ガラスなどの所定のガラス原料を添加し、ガラス固化する方法



### 適用例

- 高レベル放射性廃液ガラス固化
- 低レベル放射性廃棄物ガラス固化

### 溶融炉

- ①ジュール加熱式溶融炉
- ②高周波加熱式溶融炉

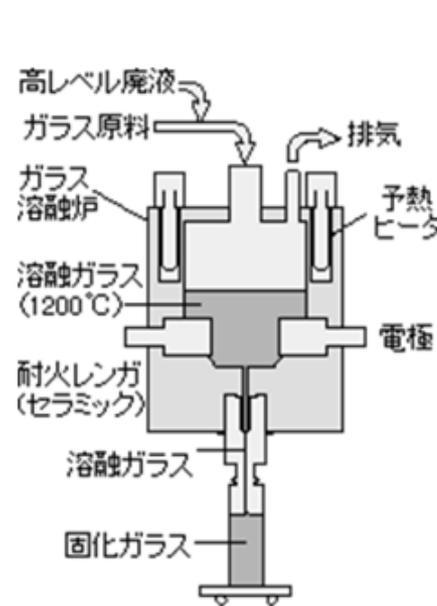
### 評価

**減容性:**ガラス原料の添加により、減容性は低い(△)

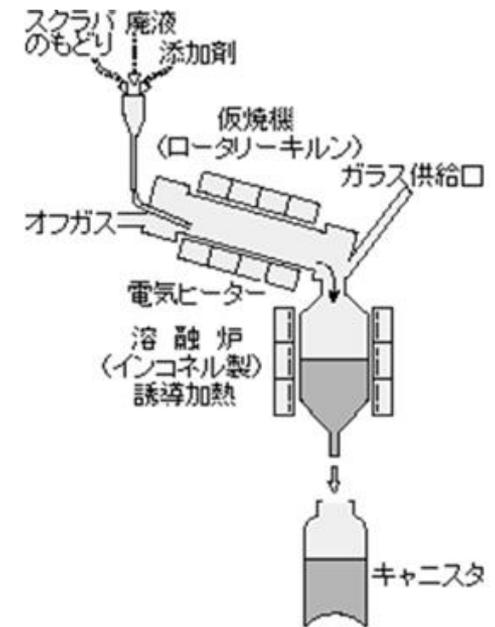
**操業性:**溶融ガラスの高温物性を一定範囲に管理。加熱・流下条件は一定(◎)

※高レベル放射性廃液の場合、白金族元素の沈降・堆積によって、高温物性(粘性及び導電率)が変化するため、白金族元素管理に影響される

**廃棄体安定性:**ガラス組成一定に管理され、化学的安定性に優れる(◎)



LFCM法の概念図<sup>[1]</sup>



AVM法の概念図<sup>[1]</sup>

[1] 原子力環境整備促進・資金管理センターライブラリ「ポケットブック・代表的なガラス固化処理法」より図を抜粋

# 参考: ガラス原料を使用しない溶融固化技術について

## 概要

- ▶ 廃棄物を真密度まで溶融し、スラグとして固化する方法



## 適用例

- ▶ 原子力発電所の雑固体廃棄物の溶融固化

## 溶融炉

- ① プラズマ加熱式溶融炉
- ② 高周波加熱式溶融炉 (IN-CAN)

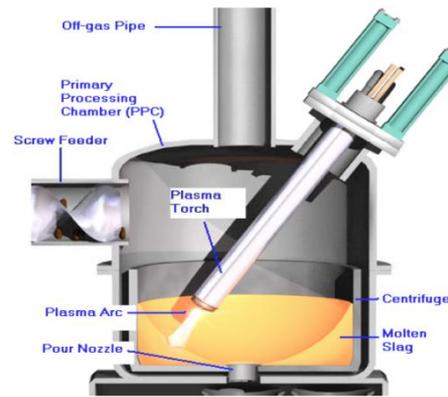
## 評価

**減容性:** 添加材がないため、減容性が高い(◎)

**操業性:** 廃棄物組成によってスラグ物性が異なるため、加熱・流下条件が変動(△)  
 ⇒ 流下操作を伴わないIN-CAN溶融炉が採用されている理由の一つ

**廃棄体安定性:** スラグ組成によって、化学的安定性は変動(△)

塩基度 (CaO/SiO <sub>2</sub> )	低	高
操業性	↓(高粘度)	↑(低粘度)
廃棄体安定性	↑(高い)	↓(低い)

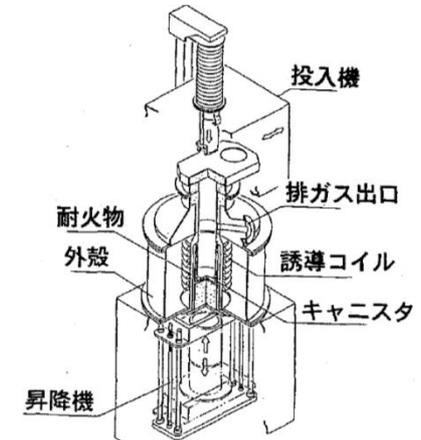


(スイスZwilag、日本)<sup>[1]</sup>

## プラズマ加熱式溶融炉

[1] M.W.Shuey, "LLW Processing and Operational Experience using a Plasma ARC Centrifugal Treatment (PACTM) System, WM'06

[2] 小畑ら; 高周波誘導加熱方式による溶融体製作時の核種挙動、原子力バックエンド研究 4(2), 21-30, 1998



(IN-CAN、日本)<sup>[2]</sup>

## 高周波加熱式溶融炉

# 参考：溶融ガラス化技術について

## 概要

- 廃棄物自体に含まれる成分(例えば、 $\text{SiO}_2$ )をガラス形成成分とすることで、添加物を最小限に抑えて、ガラス固化する方法



## 適用例

- 国内での実績なし
- 海外では廃棄物組成に応じてガラス原料の添加を調整する等の実績あり

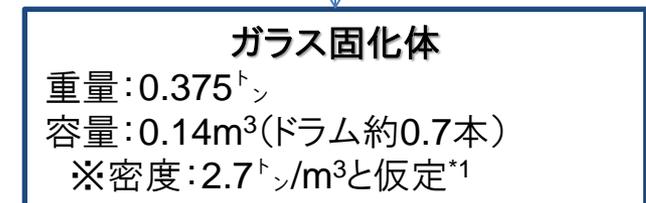
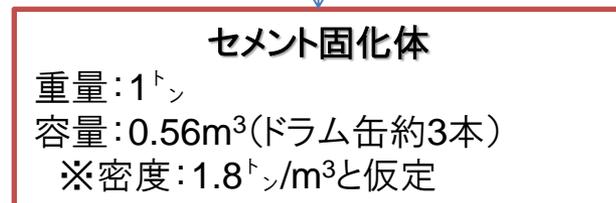
## 評価

**減容性:** 添加物量を最小限に抑制することで、減容性は比較的高い(○)

※但し、廃棄物組成によって減容性は変動する

**操業性:** 溶融ガラスの高温物性を決められた範囲内に管理できるため、加熱・流下条件は大きく変動しない(○)

**廃棄体安定性:** 安定性に対する要求に応じて、添加物量を調整(○)

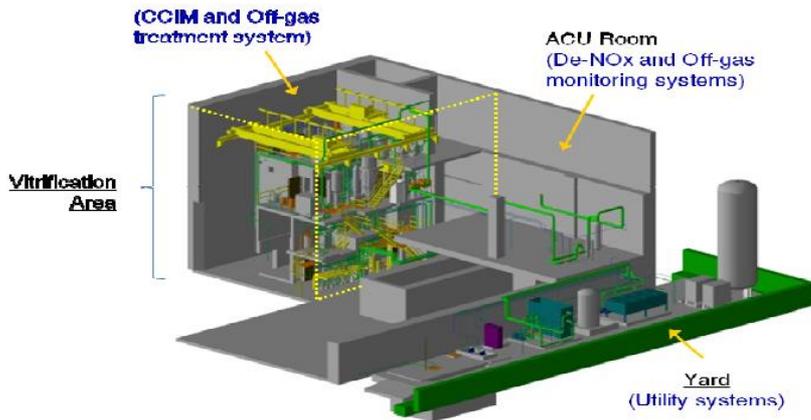


約1/4程度に低減



\*1: 2015年度の結果から設定

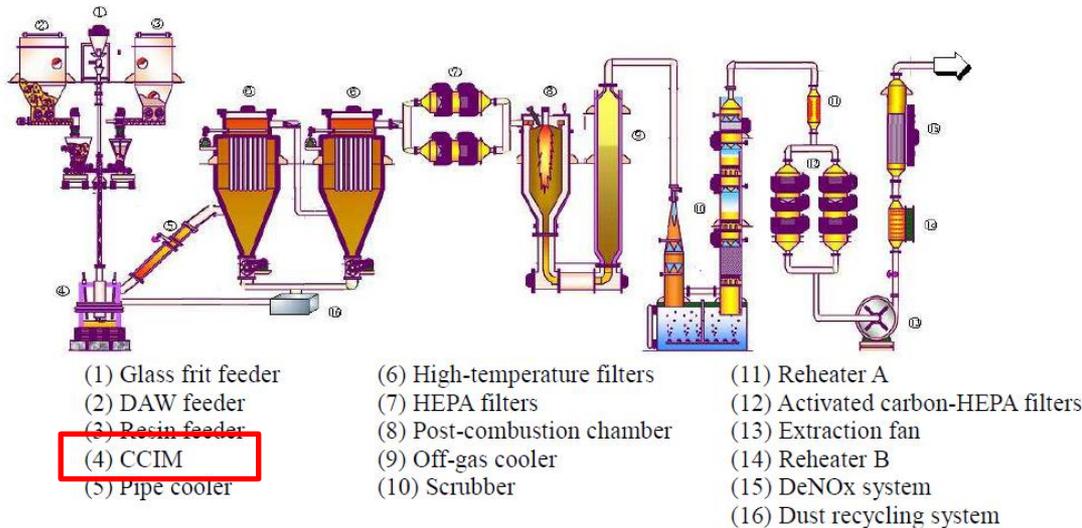
# 参考：韓国KHNPにおける低レベル廃棄物のガラス固化実績



ガラス固化施設の鳥瞰図



CCIM外観



Ulchin Vitrification Facility (UVF) の処理システム

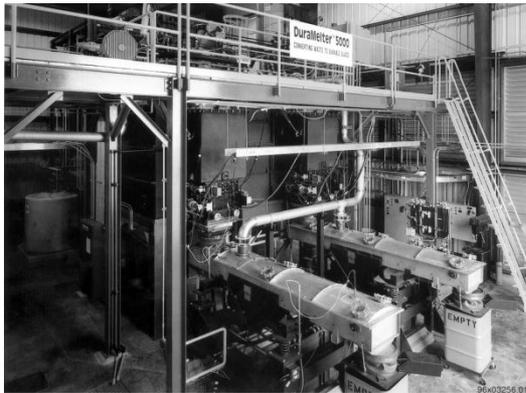
## CCIMの特徴

- ◆ 高周波加熱を熱源とし、接液部に金属を用いたガラス溶融炉
- ◆ 炉壁の水冷によるスカル層形成によってガラスの腐食性を低減（腐食性の高いガラスにも適用可能、長寿命化）
- ◆ スタートアップ、シャットダウンを短時間に実施（容易に処理廃棄物を変更可能）

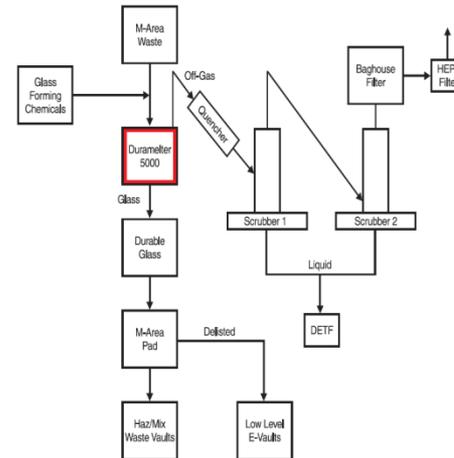
・2009年より実廃棄物処理開始  
 ・対象廃棄物は、イオン交換樹脂、焼却灰、可燃物等

# 参考：米国DOEにおける低レベル廃棄物のガラス固化実績

## 1. Savannah River Site



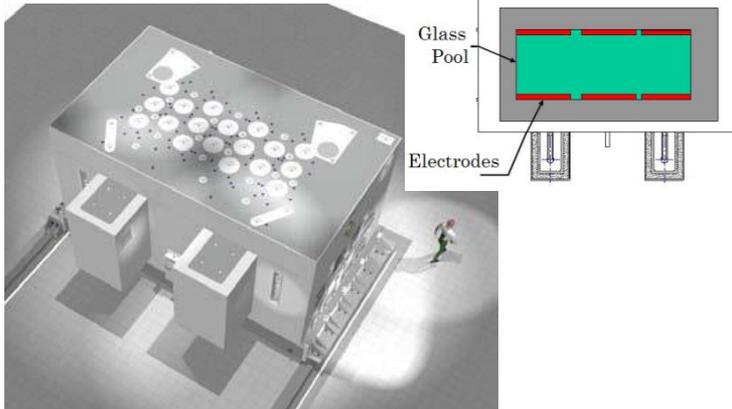
**Dura Melter 5000 外観**



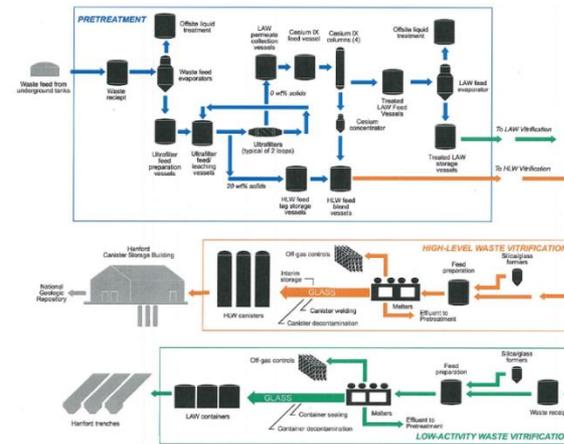
**Vender Treatment Facility (VTF)の処理システム**

- ・1996年より実廃棄物処理開始
- ・対象廃棄物は、地下水の溶剤汚染を起こしている材料製造エリア (Mエリア)のスラッジ等
- ※加熱方式は、ジュール加熱方式を採用

## 2. Hanford Site



**WTP LAW Melter 外観図(右上:水平断面図)**



**Waste Treatment Plant (WTP)の処理システム**

- ・対象廃棄物は、再処理廃液より分離した低レベル廃棄物
- ・2000年より1/3スケール試験炉にて模擬廃棄物の処理を実証
- ・2009年より実廃棄物の処理に向けてWTP施設を建設中
- ※加熱方式は、ジュール加熱方式を採用

引用1) Carol M. Jantzen et al; Savannah River Site Waste Vitrification Projects Initiated Throughout the United States: Disposal and Recycle Options, WSRC-MS-2000-00105

引用2) M. J. Lawrence; RIVER PROTECTION PROJECT – WASTE TREATMENT PLANT CONCEPT AND APPROACH(2000)

引用3) Ian L. Pegg; West Valley and M-Area: Key Steps in JHCM Technology Advancement(2010)

## B. 低レベル放射性廃棄物の 除染方法の検討

# 目次

1. 事業の概要
2. 事業アウトカム
3. 事業アウトプット
4. 当省(国)が実施することの必要性
5. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ
6. 研究開発の実施・マネジメント体制等
7. 費用対効果
8. 外部有識者の評価等
9. 提言及び提言に対する対処方針

# 1. 事業の概要

## 概要

低レベル放射性廃棄物中のウラン等の除染に伴い発生する廃液等のガラス固化への課題を整理し、ガラス固化の前処理としてのウラン等の除染技術及び除染結果を精密に測定する技術の開発を目的とする。

具体的には、ウラン等と共にはぎ取られた母材がガラス固化に与える影響について検討し、ガラス固化の課題を整理する。また、ガラス固化の前処理として、除染時の母材の混入量を極力抑え、かつ除染のための薬品等の二次廃棄物の発生を最小化するウラン除染技術を開発するとともに、除染の効果を確認するため、母材からのウラン等の除染結果を精密に測定する技術を開発する。

## 実施期間

平成26年度～平成29年度(4年間)

## 実施形態

国からの直執行(次世代再処理ガラス固化技術基盤研究事業)

# 1. 事業の概要

## 予算総額

総額4.0億円

		平成26年度	平成27年度	平成28年度	平成29年度
【除染技術開発(NFI実施分)】		0.33	0.24	0.25	0.36
※ 除染と分離の予算内訳を( )で示す	除染	(0.25)	(0.15)	(-)	(-)
	分離	(0.08)	(0.09)	(0.25)	(0.36)
【計測技術開発(JAEA実施分)】		0.28	0.80	1.30	0.42
合計		0.60	1.03	1.55	0.79

## 実施者

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（計測技術開発）

原子燃料工業株式会社（除染技術開発）

## プロジェクト リーダー

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

人形峠環境技術センター環境保全技術開発部長 植地保文

原子燃料工業株式会社

燃料技術部 グループ長 青木豊和

# 1.1 目的

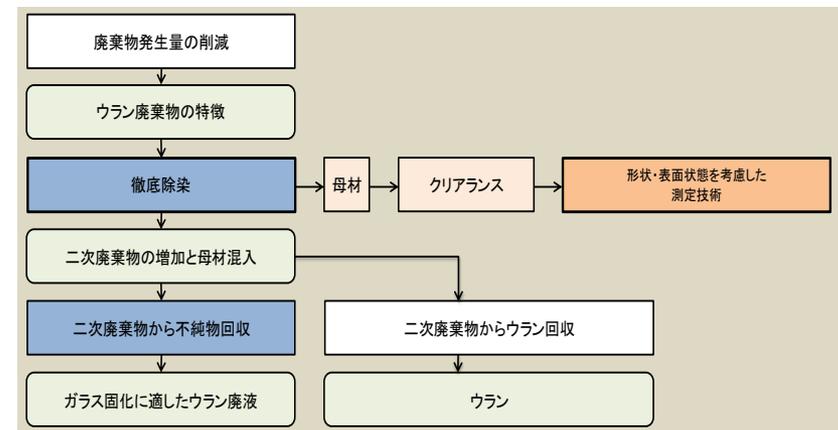
- ・原子力発電所や再処理施設等の操業・廃止時の除染等により発生する低レベル放射性廃液等のガラス固化処理については、諸外国では実用化が進んでいる。我が国としても、低レベル放射性廃液等をより安定に、高含有率でガラス固化する技術の可能性を検討しておくことが重要である。
- ・特に、ウランを取り扱う施設の操業・廃止時に発生する低レベル放射性廃棄物等については、ウランの放射能減衰が期待できないことから、金属等の母材から完全にウランを除去することが重要となる。除染廃液にはウラン等と共にはぎ取られた母材が過剰に含まれることとなり、廃液のガラス固化体の量が不必要に増大するとともに、その安定性にも懸念が生じる。
- ・このため、除染の際に母材の混入量を極力抑え、除染のための薬品等の二次廃棄物の発生を最小化するウラン除染技術を開発するとともに、除染の効果を確認するため、母材からのウラン等の除染結果を精密に測定する技術を開発する。
- ・こうした低レベル放射性廃棄物中のウラン等の処理技術の向上により、ガラス固化体の発生量を減少させることが可能であり、ひいては処分場の面積を縮減でき、将来世代への負担を軽減することが期待される。
- ・本事業では、ウラン等を含む低レベル放射性廃棄物の処理技術について、国内外の文献等の調査、それらを踏まえたウラン等の除染技術の検討、ウラン等を除去した母材に残留しているウラン等の測定技術の開発等を行い、ガラス固化の前処理技術としての基盤を整備する。

## ＜政策的位置付け＞

本技術開発は、「廃炉等に伴って生じる放射性廃棄物の処分については、低レベル放射性廃棄物も含め、発生者責任の原則の下、原子力事業者等が処分に向けた取組を進めることを基本としつつ、処分の円滑な実現に向け、国として必要な研究開発を推進するなど、安全確保のための取組を促進する。」としたエネルギー基本計画に基づくものである。

## 1.2 技術開発の概要(1/2)

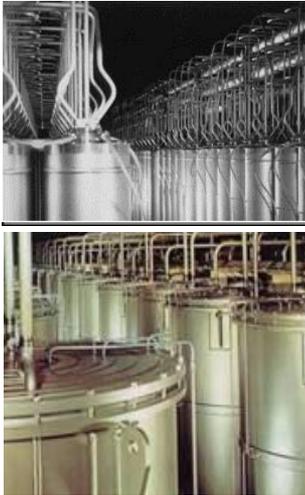
- ・ウランを取り扱う施設では、ウラン酸化物、もしくはウランフッ化物の粉体が表面に一様に付着した金属の低レベル放射性廃棄物が多量に発生する。この中で、少量ではあるものの、金属表面の付着物、金属表面の腐食層、機械による浸食層等にウラン化合物が取り込まれている器材が存在する。
- ・ウランは半減期が極めて長く、放射能の減衰が期待できないという特徴があるため、ウラン等を含む金属の低レベル放射性廃棄物の発生量を削減するためには、除染等によりウラン等を母材から除去し、クリアランス後に母材を再利用することが有効な手段の一つとなる。
- ・このため、母材に付着したウラン等を確実にクリアランスレベル(1Bq/g)以下まで除染できることが求められる他、除染性能と合わせて、除染過程で生じる二次廃棄物の発生量及び廃液組成についてもガラス固化への適応性の観点から考慮することが重要となる。
- ・また、プラント機器や設備の更新等により発生した除染及び測定対象となる器材には、平板や大口径の円筒等の単純形状の物ばかりではなく、バルブやフランジ等の複雑な形状をしている物も存在する。
- ・さらに、材質的な特徴としては、プラント機器や配管等の炭素鋼の他、遠心機等の部品であるアルミニウムやステンレス、ウラン燃料の被覆管のジルコニウム合金等の特殊鋼等がある。
- ・以上のことから、器材の形状・材質や表面状態等の特徴を考慮することが重要となる。



ウラン等を含む金属の低レベル放射性廃棄物の処理技術の一般的な考え方

# 1. 2 技術開発の概要(2/2)

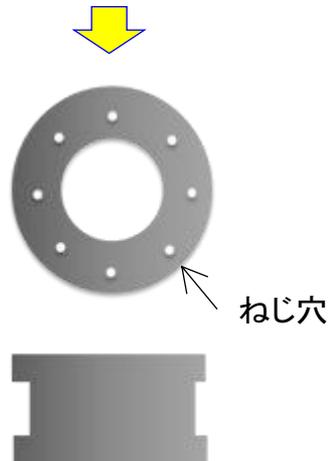
ウランが付着している金属廃棄物の一例



遠心機部品等



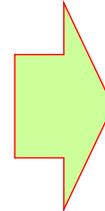
プラント機器・配管等



遠心機部品のイメージ



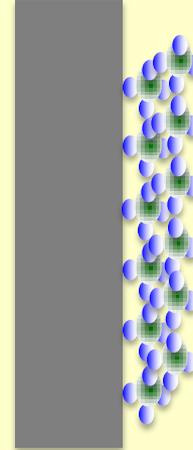
ウラン燃料の被覆管



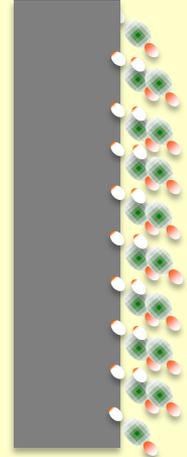
金属表面のウランの付着状態

一般的な表面汚染のイメージ

フッ化物(UF<sub>4</sub>等)



酸化物(UO<sub>2</sub>)

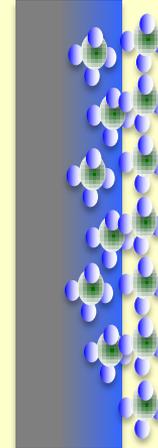


特異な表面汚染のイメージ

表面付着物  
への浸透



腐食層へ  
の浸透



機械浸食層  
への浸透



## 1. 3 課題設定(1/2)

・除染及び測定対象の特徴等を考慮し、以下に示した3点の技術課題を設定して、これらの課題を解決するために必要となる調査・検討等を行う。

### (1) 低レベル放射性廃棄物中のウラン等の除去試験等(除染技術開発)

#### 【課題1: 金属からのウラン等の除染技術】

- ・ウラン等を選択的に溶解し、母材の混入を極力避けることが可能な酸浸漬法及びウラン等を効率的に切削することが可能なブラスト法に関する調査・検討等を行う。
- ・また、金属表面のウラン等の付着状態を考慮し、器材の発生場所や保管環境等を踏まえ、金属表面のウラン等による汚染状態を再現した上で、除染技術の適用性を評価する。

#### 【課題2: 除染廃液からの不純物分離技術】

- ・課題1の除染技術についての調査・検討等の結果を踏まえ、除染廃液からの母材及びウラン等の分離・回収技術、並びに除染剤の再利用に適用可能な分離・回収技術について、調査・検討等を行う。
- ・なお、分離・回収技術の開発では、母材、ウラン、除染剤等の回収、再利用により、二次廃棄物の発生量を削減することを考慮する。

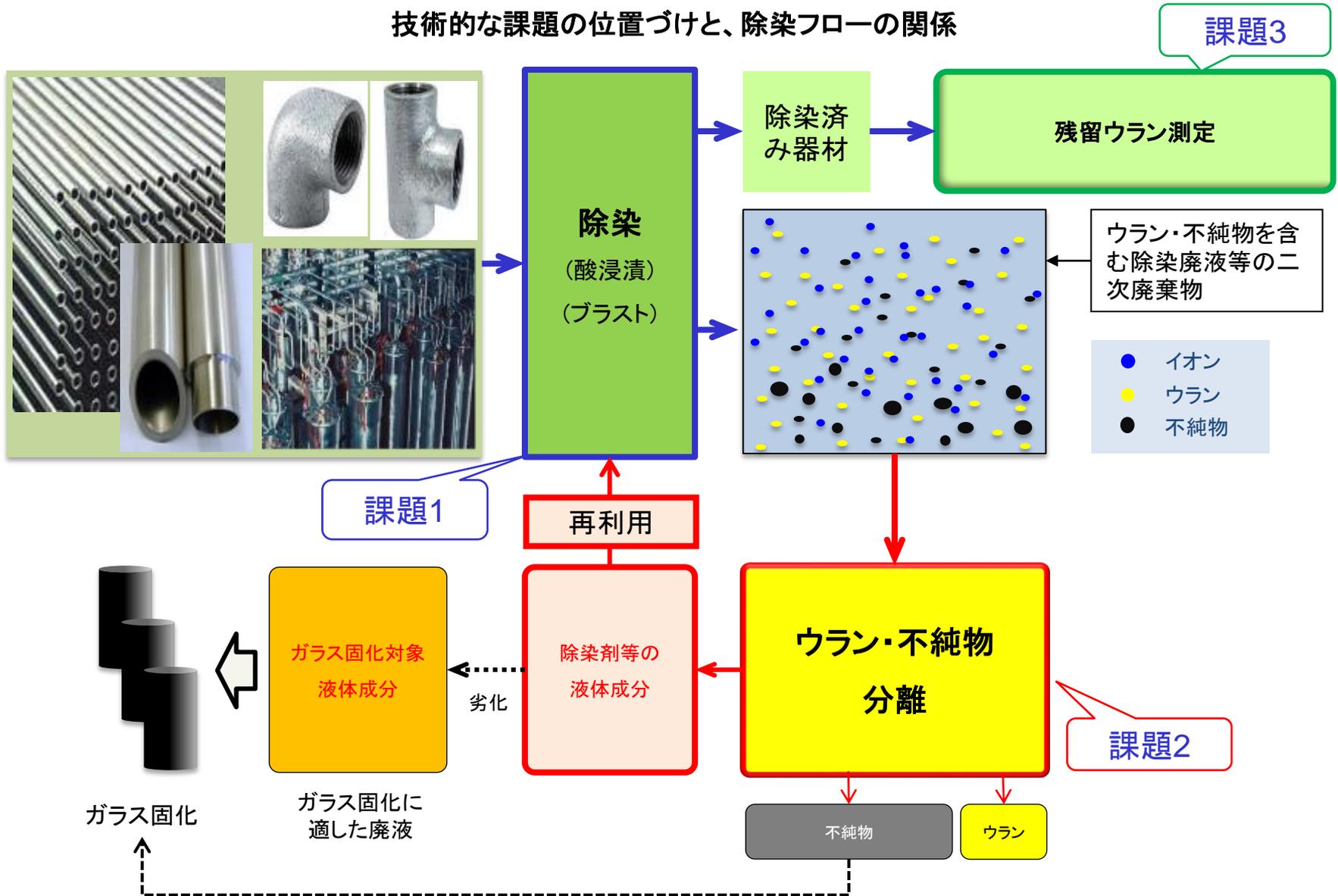
### (2) クリアランスレベルのウラン等の測定技術に係る試験等(計測技術開発)

#### 【課題3: 除染済み母材の残留ウラン測定技術】

- ・バルブやフランジ等の複雑な形状の器材に対するクリアランスレベル(1Bq/g)以下の高精度なウラン等の測定では、 $\alpha$ 線が遮蔽されるため、これまでに実用化されている $\alpha$ 線を用いたクリアランス測定の適用が困難と考えられる。
- ・このため、クリアランス対象物全体の約半分を占めている複雑形状の器材の高精度な測定ができなければ、金属の低レベル放射性廃棄物のリサイクルは限定的なものとなる可能性がある。
- ・そこで、測定対象の材質及び形状的な多様性や、除染後にわずかに残留しているウラン等の分布状態、母材の発錆等の表面状態を考慮し、クリアランスに求められる精度で、 $\alpha$ 線による測定(日本原子力研究開発機構の例では約30分)と同程度の実用的な時間で測定することができる $\gamma$ 線による測定手法の技術的な成立性について調査・検討を行う。

# 1. 3 課題設定(2/2)

技術的な課題の位置づけと、除染フローの関係



## 2. 事業アウトカム

事業アウトカム指標 (妥当性・設定理由・根拠等)	目標値(計画)	達成状況 (実績値・達成度)	原因分析 (未達成の場合)
<p>(1)低レベル放射性廃棄物中のウラン等の除去試験等(除染技術開発) 【金属からのウラン等の除染技術】 【除染廃液からの不純物分離技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ガラス固化の前処理として、母材の混入量を極力抑え、薬品等の二次廃棄物の発生を最小化するウランの除染・分離技術を開発する。</li> </ul> <p>(2)クリアランスレベルのウラン等の測定技術に係る試験等(計測技術開発) 【除染済み母材の残留ウラン測定技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・確実にクリアランスするため、母材からのウラン等の除染結果を精密に測定する技術を開発する。</li> </ul> <p>除染技術開発及び計測技術開発により、2050年頃までに発生するウラン廃棄物のうち、約半数を占める金属のクリアランスが可能であり、以下の効果が見込まれる。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・クリアランスの促進</li> <li>・ウラン廃棄物の物量低減</li> <li>・放射性廃棄物処分場の必要面積の縮減</li> <li>・最終処分場の逼迫時期の延命</li> <li>・新たな評価手法による検認技術の運用</li> </ul> <p>※事業の実施にあたっては、将来にも亘る実効性のある研究成果を得るために、国内のウラン燃料加工施設やウラン濃縮施設等から発生する低レベル放射性廃棄物の現状を十分に踏まえる。</p>	<p>(事業終了時:平成29年度)</p> <p>【金属からのウラン等の除染技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・金属の低レベル放射性廃棄物中のウラン等の除染技術として、金属表面に残留しているウラン等を選択的に除去し、母材の混入を極力避けることが可能な酸浸漬法及び表面に残留するウラン等を効率的に切削することが可能なブラスト法の技術的実証。</li> </ul> <p>【除染廃液からの不純物分離技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・除染廃液からの母材及びウランの分離・回収技術、並びに除染剤の再利用に適用可能な分離・回収技術の実証。</li> </ul> <p>【除染済み母材の残留ウラン測定技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・測定対象の材質及び形状的な多様性や、除染後にわずかに残留しているウラン等の分布状態、母材の発錆等の表面状態を考慮し、クリアランスに求められる精度で、<math>\alpha</math>線による測定(日本原子力研究開発機構の例では約30分)と同程度の実用的な時間で測定することができる<math>\gamma</math>線による測定評価手法の確立。</li> </ul>	<p>(平成27年度までの結果)</p> <p>【金属からのウラン等の除染技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・文献調査により、有機酸浸漬法及びウエットブラスト法を有効な除染候補として絞り込むとともに、予備的な除染試験を行い、二次廃棄物の特徴を含めた基礎データが得られた。(計画どおり)</li> </ul> <p>【除染廃液からの不純物分離技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・文献調査、小規模試験により、酸浸漬の廃液は化学的分離、ウエットブラスト法の廃液は物理分離が有力な候補となりうることを確認した。(計画どおり)</li> </ul> <p>【除染済み母材の残留ウラン測定技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・試験及びシミュレーションにより、<math>\gamma</math>線測定手法に影響する酸浸漬法による除染後の母材表面のU-238とPa-234mの残留状況に関わるデータを取得し、<math>\gamma</math>線によるウランの定量法の成立性を確認した。(計画どおり)</li> <li>・シミュレーションと模擬的な試験により、線源の空間的な偏りと<math>\gamma</math>線遮へい状況が測定対象物の放射能の評価結果へ与える影響についてデータを取得した。これにより、クリアランス計測への散乱<math>\gamma</math>線等価モデル法適用の妥当性を確認し、技術実証のための測定装置の概念設計を行った。(計画どおり)</li> </ul>	<p>—</p>

# 2.1 技術開発フロー(1/2)

## (1) 低レベル放射性廃棄物中のウラン等の除去試験等

### 課題1(金属からのウラン等の除染技術)

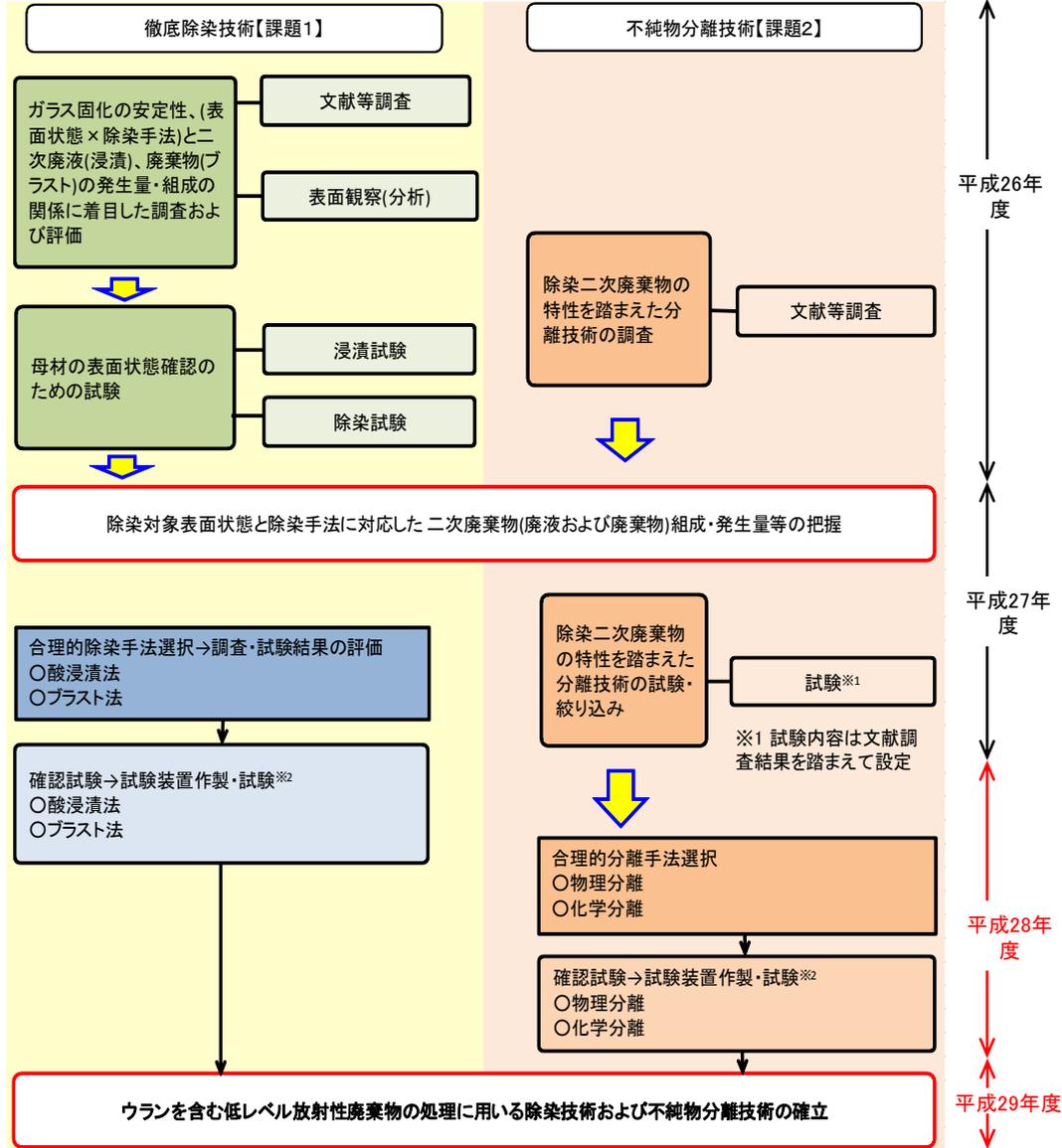
- ・文献調査として、廃止措置や除染技術の分野における論文や技術レポート等から情報収集を行い、体系的に整理する。
- ・さらに試験として、金属表面の付着物の付着状態等を再現した試験片を作製し、酸浸漬法及びブラスト法による除染技術の性能を把握する。
- ・上記の調査・試験で得られた知見を踏まえ、酸浸漬及びブラスト除染における最適除染条件を設定して、金属の表面状態に応じた適切な除染方法の技術的成立性を評価する。

### 課題2(除染廃液等からの不純物分離技術)

- ・母材及びウラン等の分離・回収技術、並びに除染剤の再利用に適用可能な不純物分離技術に関して、文献・レポート等を調査し、体系的に整理する。
- ・文献調査により絞り込んだ方法に対し、想定される二次廃棄物に対して最適な分離法を選択する。
- ・選定した分離法に対する小規模な確認試験を行い、分離効果を評価する。
- ・平成28年度は物理分離によるブラスト廃液の分離について、実規模スケールの分離試験を行い、分離効果を評価します。また、化学分離については、導入要否の検討を行う。

### 【除染技術及び分離技術の統合システムの確立】

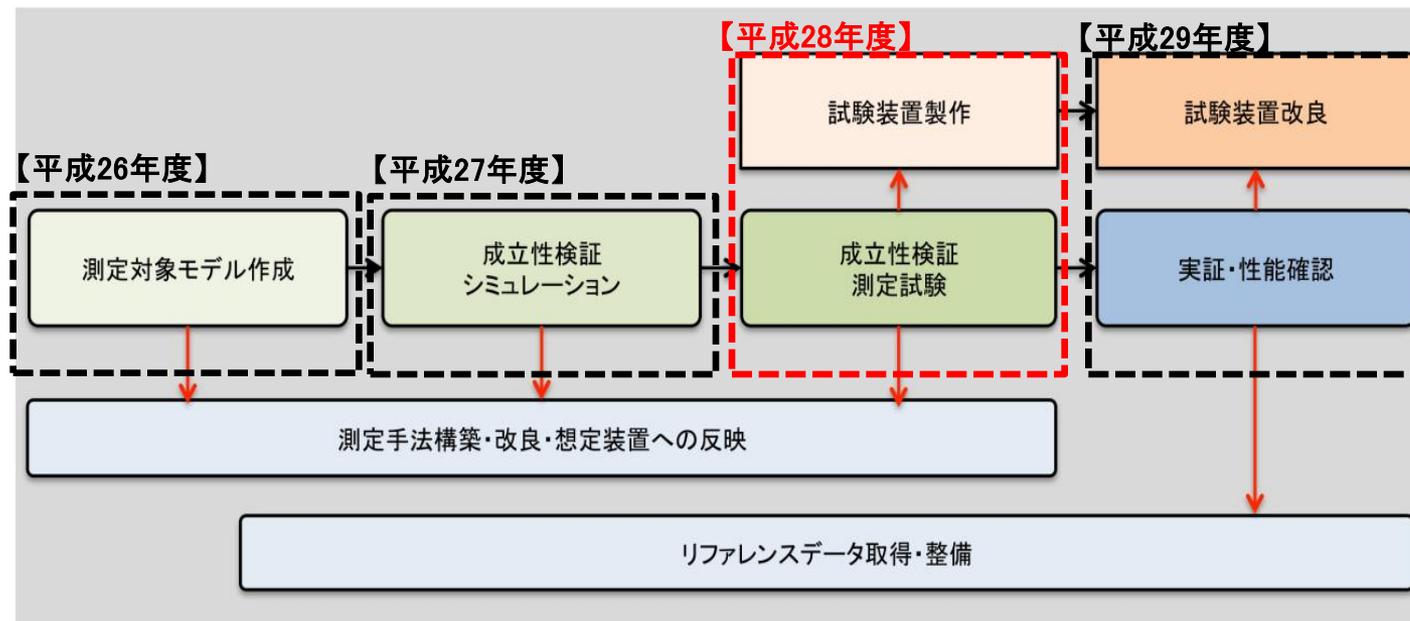
- ・平成29年度は、課題1,2に有効な手法として選択された技術を用いて、除染から分離までを合理的に行う統合システムを製作し、本事業で開発した除染・分離技術の成立性を確認するとともに、除染の事業によって生じる二次廃棄物(機器も含む)の総量を評価する。



## 2.1 技術開発フロー(2/2)

### (2) クリアランスレベルのウラン等の測定技術に係る試験等 課題3(除染済み母材の残留ウラン測定技術)

- ・酸浸漬法及びブラスト法で除染済みの複雑形状の器材や、発錆した器材を対象とした $\gamma$ 線測定手法による残留ウラン測定技術では、除染手法の違いによるU-238とPa-234mの平衡状態、器材の複雑形状や発錆等の表面状態の違いによる $\gamma$ 線の遮蔽効果を考慮する必要がある。
- ・そこで、 $\gamma$ 線計測装置による測定結果について、測定対象となる除染済みの母材の特徴を踏まえたタイプ別に作成したモデルを用いてシミュレーション解析を行い、 $\gamma$ 線測定手法の技術的成立性を検証する。
- ・また、 $\gamma$ 線測定手法の技術的成立性を確認する段階で得られる知見を参考とし、実用的な測定時間でクリアランスレベル(1Bq/g以下)の残留ウランの測定に求められる高精度の $\gamma$ 線測定装置の設計・製作を行い、酸浸漬法及びブラスト法による除染済み母材の残留ウラン測定技術の実証に向けた $\gamma$ 線測定手法の性能を確認する。



クリアランス測定技術の実証に向けた $\gamma$ 線測定手法の技術開発フロー図

# 3. 事業アウトプット

(1/3)

事業アウトプット指標 (妥当性・設定理由・根拠等)	目標値(計画)	達成状況 (実績値・達成度)	原因分析 (未達成の場合)
<p>(1)低レベル放射性廃棄物中のウラン等の除去試験等(除染技術開発)</p> <p><b>【金属からのウラン等の除染技術】</b>  <b>【除染廃液からの不純物分離技術】</b></p> <p>・国内外で取組まれている低レベル放射性廃棄物からのウラン等の除去技術を調査し、物理的・化学的な除染・分離、その適用範囲、その際に発生する二次的な廃棄物の発生量、固化ガラスの安定性への影響に係る技術の特徴を整理する。</p> <p>(2)クリアランスレベルのウラン等の測定技術に係る試験等(計測技術開発)</p> <p><b>【除染済み母材の残留ウラン測定技術】</b></p> <p>・国内で多量に発生している複雑形状の金属廃棄物の特徴を踏まえ、ウラン等の除去後の母材に残留したクリアランスレベルのウラン等の検出が可能となる高感度なγ線測定手法を開発する。</p>	<p>(事業開始時:平成26年度)</p> <p><b>【金属からのウラン等の除染技術】</b>            文献等により、最適な除染方法の選定及び除染で発生する二次廃棄物の特徴を調査する。            選定した除染方法による予備的な除染試験を行い、基礎データを得る。</p> <p><b>【除染廃液からの不純物分離技術】</b>            文献等により、除染廃液からの母材及びウランの分離、除染材の再利用に適用可能な不純物分離技術を調査する。</p> <p><b>【除染済み母材の残留ウラン測定技術】</b>            γ線測定手法への除染方法の影響評価試験を行い、γ線によるウランの定量法の成立性を検証する。</p> <p>クリアランス対象物の形状やウラン等の付着状態の違いによる遮蔽効果等を考慮したモデルを検討する。</p>	<p><b>【金属からのウラン等の除染技術】</b>            文献調査により、有機酸浸漬法及びウエットブラスト法を有効な除染候補として絞り込むとともに、予備的な除染試験を行い、二次廃棄物の特徴を含めた基礎データが得られた。(計画どおり)</p> <p><b>【除染廃液からの不純物分離技術】</b>            文献調査により、酸浸漬の廃液は化学的分離、ウエットブラスト法の廃液は物理的分離が有力な候補となりうることを示された。(計画どおり)</p> <p><b>【除染済み母材の残留ウラン測定技術】</b>            試験及びシミュレーションにより、γ線測定手法に影響する酸浸漬法による除染後の母材表面のU-238とPa-234mの残留状況に関わるデータを取得し、γ線によるウランの定量法の成立性を確認した。(計画どおり)</p> <p>シミュレーションにより、線源の空間的な偏りとγ線遮へい状況が測定対象物の放射能の評価結果へ与える影響についてモデル化してデータを取得した。(計画どおり)</p>	<p>達成</p>

# 3. 事業アウトプット

(2/3)

事業アウトプット指標 (妥当性・設定理由・根拠等)	目標値(計画)	達成状況 (実績値・達成度)	原因分析 (未達成の場合)
<p>(1)低レベル放射性廃棄物中のウラン等の除去試験等(除染技術開発)</p> <p><b>【金属からのウラン等の除染技術】</b> <b>【除染廃液からの不純物分離技術】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>国内外で取組まれている低レベル放射性廃棄物からのウラン等の除去技術を調査し、物理的・化学的な除染・分離、その適用範囲、その際に発生する二次的な廃棄物の発生量、固化ガラスの安定性への影響に係る技術の特徴を整理する。</li> </ul> <p>(2)クリアランスレベルのウラン等の測定技術に係る試験等(計測技術開発)</p> <p><b>【除染済み母材の残留ウラン測定技術】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>国内で多量に発生している複雑形状の金属廃棄物の特徴を踏まえ、ウラン等の除去後の母材に残留したクリアランスレベルのウラン等の検出が可能となる高感度なγ線測定手法を開発する。</li> </ul>	<p>(中間評価時:平成27年度)</p> <p><b>【金属からのウラン等の除染技術】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>酸浸漬法及びウェットブラスト法による除染試験を行い、最適条件を見出す。</li> </ul> <p><b>【除染廃液からの不純物分離技術】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ウェットブラスト法の模擬溶液を用いた小規模なサイクロン分離機による分離試験を行い、基礎データを得る。</li> </ul> <p><b>【除染済み母材の残留ウラン測定技術】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>γ線測定手法への除染方法の影響評価試験を行い、解析結果をデータベース化する検討を行う。</li> <li>線源の空間的な偏りとγ線遮へい状況が、測定対象物の放射能の評価結果へ与える影響について、シミュレーション及び模擬コンテナ等を用いた測定試験を実施し、散乱γ線等価モデル法の適用の妥当性を検証する。</li> <li>ウラン燃料加工施設等におけるクリアランス測定装置設置場所の調査、複数位置測定を模擬した装置によるγ線の効率的な測定を実現するための検出器配置を調査する試験等を実施し、クリアランス測定装置の仕様を決定する。</li> </ul>	<p><b>【金属からのウラン等の除染技術】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>除染試験により、酸浸漬法の最適条件及びウェットブラスト法の最適条件に関するデータを取得した。この条件を実用化における除染条件とすることとした。(計画どおり)</li> </ul> <p><b>【除染廃液からの不純物分離技術】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ブラスト研磨材と金属表面の研削屑の分離に係る基礎データを取得し、不純物分離に係る技術的見通しを得た。(計画どおり)</li> </ul> <p><b>【除染済み母材の残留ウラン測定技術】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>酸浸漬法によるウラン化合物、トリウム化合物の溶解度のシミュレーションによる放射平衡状態に関するデータを取得し、データベース化を検討した。(計画どおり)</li> <li>シミュレーション及び模擬コンテナ等を用いた測定試験により、各種データを取得した。これにより、散乱γ線等価モデル法適用の妥当性を確認した。(計画どおり)</li> <li>各施設でのバックグラウンド測定データを解析し、遮へい体の厚さを設定した。また、既存のドラム缶測定装置の測定データから検出器の台数を設定した。これらの結果をもとに、クリアランス測定装置の仕様を決定し、概念設計を終了した。(計画どおり)</li> </ul>	<p>達成</p>

# 3. 事業アウトプット

(3/3)

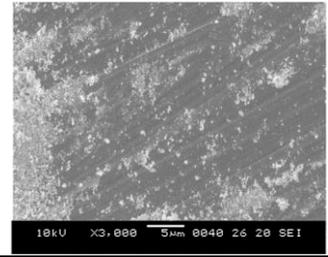
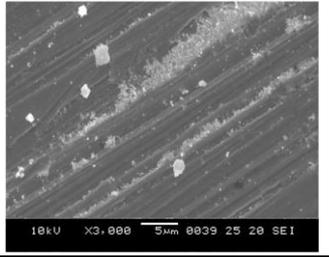
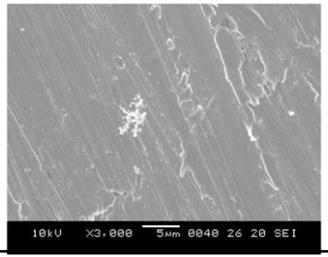
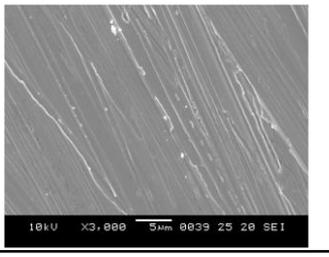
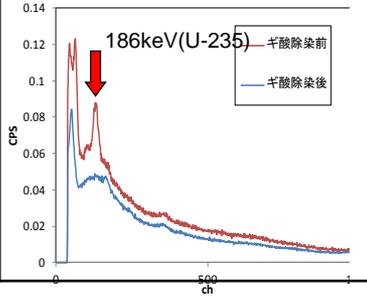
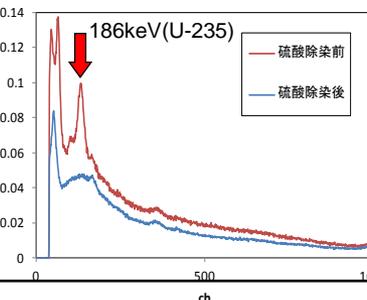
事業アウトプット指標 (妥当性・設定理由・根拠等)	目標値(計画)	達成状況 (実績値・達成度)	原因分析 (未達成の場合)
<p>(1)低レベル放射性廃棄物中のウラン等の除去試験等(除染技術開発)  <b>【金属からのウラン等の除染技術】</b>  <b>【除染廃液からの不純物分離技術】</b>            ・国内外で取組まれている低レベル放射性廃棄物からのウラン等の除去技術を調査し、物理的・化学的な除染・分離、その適用範囲、その際に発生する二次的な廃棄物の発生量、固化ガラスの安定性への影響に係る技術の特徴を整理する。</p> <p>(2)クリアランスレベルのウラン等の測定技術に係る試験等(計測技術開発)  <b>【除染済み母材の残留ウラン測定技術】</b>            ・国内で多量に発生している複雑形状の金属廃棄物の特徴を踏まえ、ウラン等の除去後の母材に残留したクリアランスレベルのウラン等の検出が可能となる高感度なγ線測定手法を開発する。</p>	<p>(事業終了時:平成29年度)</p> <p><b>【金属からのウラン等の除染技術】</b>            ・平成27年度までの技術開発により、枢要技術としての除染技術に関する開発目標は達成されたことから、平成29年度に計画している統合システムにおいて、実廃棄物サイズの試料に対する除染効率等を確認し、実規模での技術的成立性を評価する。</p> <p><b>【除染廃液からの不純物分離技術】</b>            ・平成27年度に技術的見通しが得られたサイクロン分離機による分離について、実用的な廃液量を処理可能な実規模スケールでの試験を実施し、実規模での技術的成立性を評価する。</p> <p><b>【除染済み母材の残留ウラン測定技術】</b>            ・計測に影響を与えるウラン化合物、トリウム化合物の放射平衡状態を評価し、データベースを構築し、放射平衡の判断機能をクリアランス測定装置に導入する。            ・ドラム缶型容器の測定装置を製作し、性能を評価する。極端な偏在を持つ試料の実測及びシミュレーションを実施し、その結果をもとに装置の測定精度を高める。また、U-235量の定量が可能になるように「散乱γ線等価モデル法」を拡張する。最終的には、実用的な測定時間で、クリアランスレベル(1Bq/g以下)の残留ウランの測定に求められる高精度のクリアランス測定装置を開発、実証する。</p>	-	-

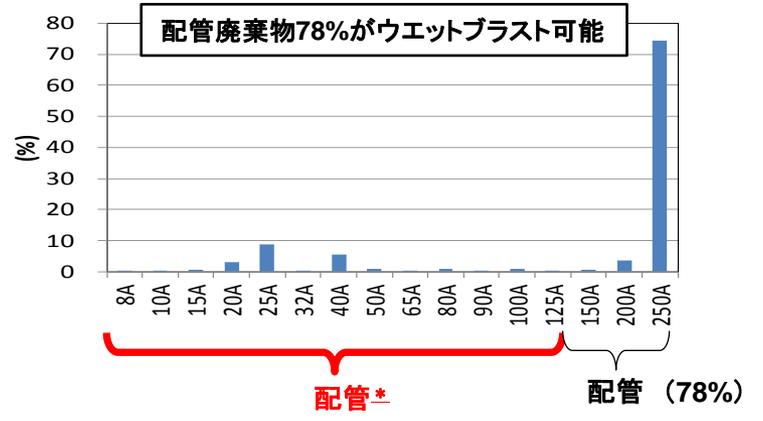
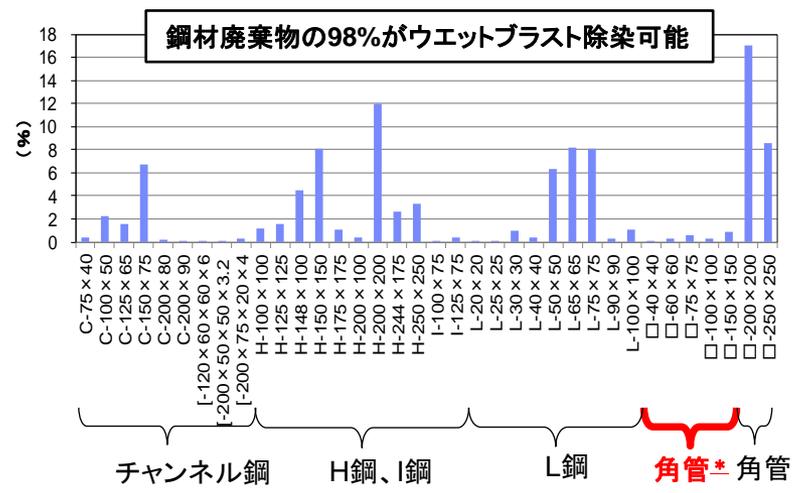
# 3. 1 除染技術開発結果の概要

※ ウラン等の除染技術 (1/2)

除染試験により、酸浸漬法及びウェットブラスト法の実用化における最適除染条件を設定した。

- 酸浸漬法: 温度、濃度等について、ギ酸、硫酸による最適条件を設定。SEMによる表面観察及び放射エネルギー測定により、クリアランスレベルの除染を確認した。
- ウェットブラスト法: 二次廃棄物発生量と除染レベルの観点から、母材の剥離量に着目し最適条件を設定(ブラスト圧0.2MPa、角度45°)。事業者がクリアランス予定の金属廃棄物のうち、鋼材の98%(配管では78%)が確実に除染可能であることを確認した。

	ギ酸 0.2mol/l 50℃	硫酸 0.5mol/l 50℃
除染前		
除染後		
除染前後放射能		



SEM観察、放射能測定の結果、除染後ウランの付着はほとんどないことを確認した。

\*: そのままの形状では、ウェットブラスト処理が適用できない管類

# 3. 1 除染技術開発結果の概要

※ 不純物分離技術

(2/2)

ブラスト研磨材と金属表面の研削屑の分離に係る基礎データを取得し、不純物分離に係る技術的見通しを得た。

- ウェットブラスト除染廃液中からウラン、その他の不純物を除去し、研磨材を繰り返し利用するため、湿式サイクロンを用いた遠心力分離による分離試験を実施した。
- 水、研磨材、ジルカロイ研削屑、摩耗した研磨材が混合懸濁した廃液の模擬溶液を調製し、粒度分布を測定(図1)。図2に示す試験体系で模擬溶液を連続的に分離し、上側(小粒径側②)と下側(大粒径側③)の出口流体の粒度分布を測定した(図3)。
- 遠心力分離によって、小粒径側②には研磨材が含まれていないことを確認した。
- 一方、大粒径側③には研削屑が一部残留したが、分離パラメータの調整により研削屑の混入が抑制できる見込みである。

なお、ガラス固化は、安定性と減容性が期待できる選択肢であり、ガラス固化体に影響を及ぼす不純物(Fe、Cr、Ni等)について要求スペックを参照することにより影響を評価したところ、実用的な処理能力で金属廃棄物を除染した際にもガラス固化体に与える影響は十分低いと考えられた。

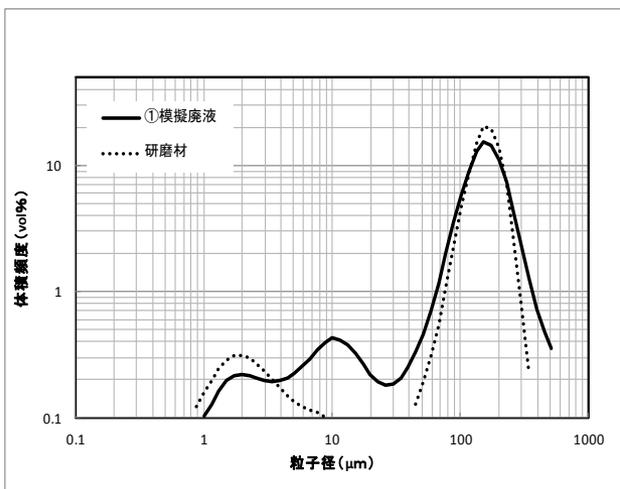


図1 模擬廃液の粒径分布

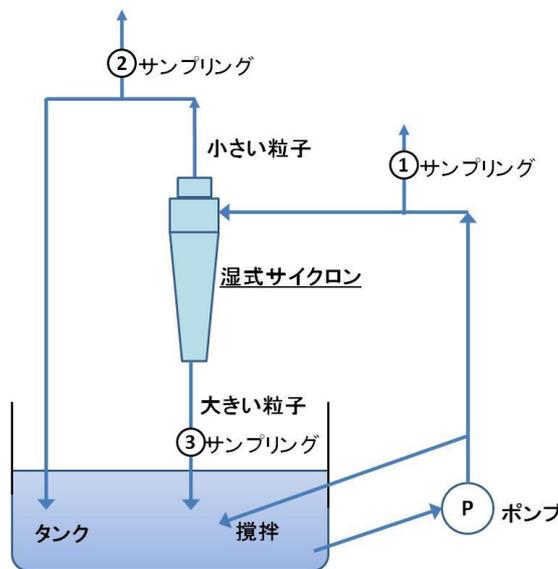


図2 遠心分離小規模試験体系

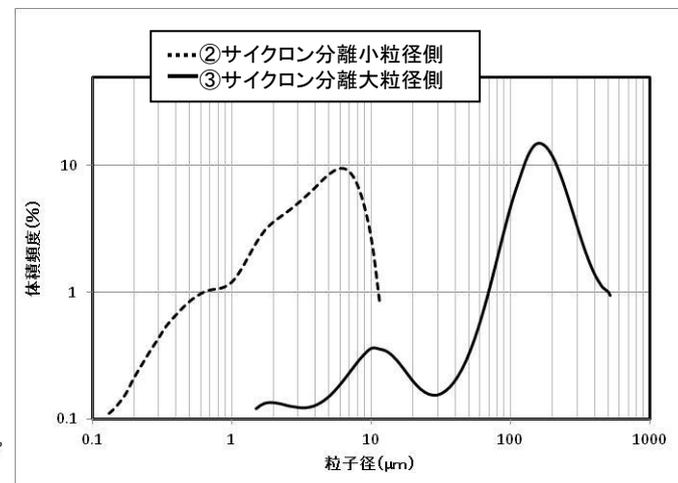


図3 サイクロン出口流体の粒径分布比較

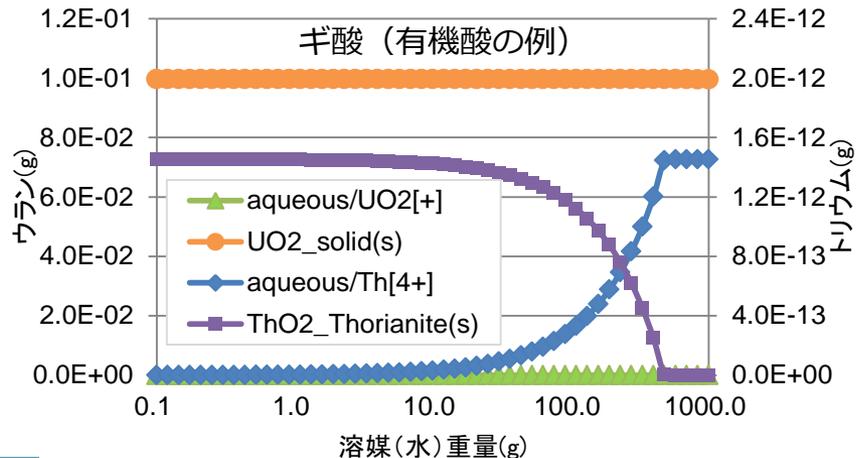
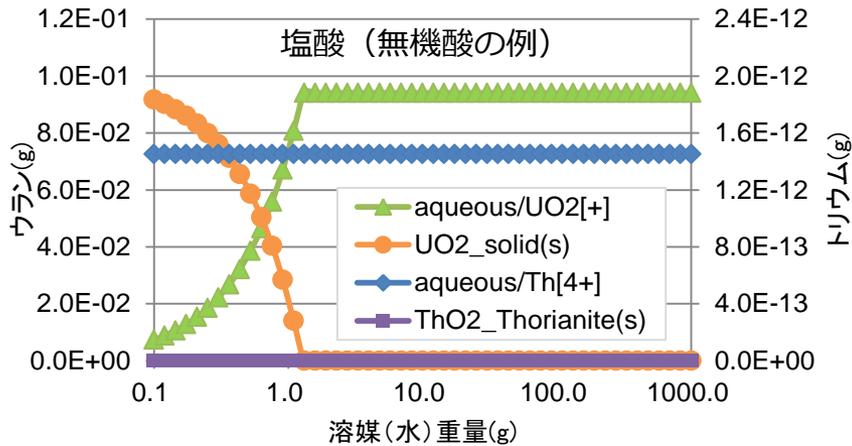
# 3. 2 計測技術開発結果の概要

(1/2)

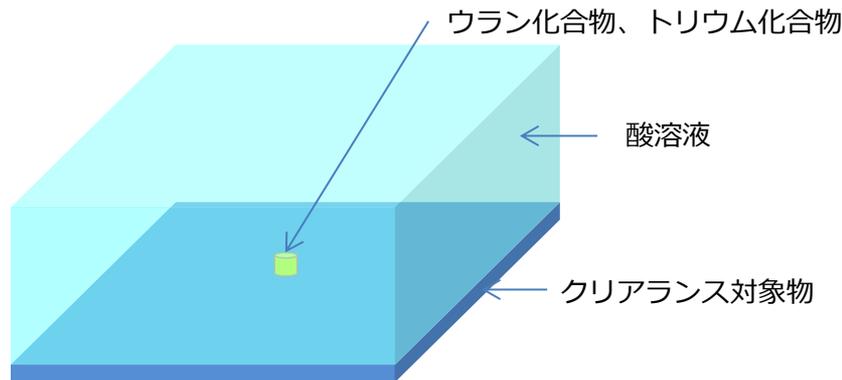
酸浸漬法によるウラン化合物、トリウム化合物の溶解度のシミュレーションによる放射平衡状態に関するデータを取得し、データベース化を検討した。

※  $\gamma$ 線によるウランの定量では、存在比が最も大きいU-238を対象として、U-238の子孫核種であるプロトアクチニウム(Pa-234m)の $\gamma$ 線を測定するが、除染方法によっては、母材表面のU-238とPa-234mの残留割合が異なるため、ウランの定量に影響する。

- 酸浸漬法による除染後の母材表面のU-238とPa-234mの残留状況を、無機酸と有機酸に対する溶解度を用いて検討した。(例えば、狭隘部では、溶解に寄与する酸溶液の体積は小さくなると考えられる。)
- 酸溶液の溶媒量を変えて、ウラン化合物とトリウム化合物の溶解度を計算した。



	計算結果	
	UO <sub>2</sub>	ThO <sub>2</sub>
塩酸 (HCl)	溶液重量1~2g程度で溶解	溶解
硫酸 (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	溶液重量1~2g程度で溶解	不溶 (Th(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> で沈殿)
硝酸 (HNO <sub>3</sub> )	溶液重量1~2g程度で溶解	溶解
ギ酸 (HCOOH)	不溶	溶液重量500g程度で溶解
酢酸 (CH <sub>3</sub> COOH)	不溶	不溶



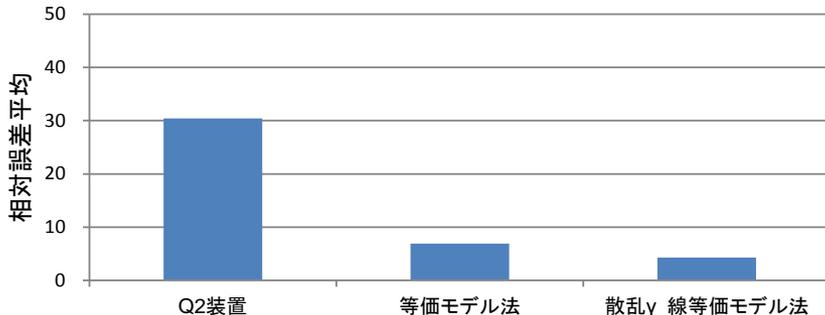
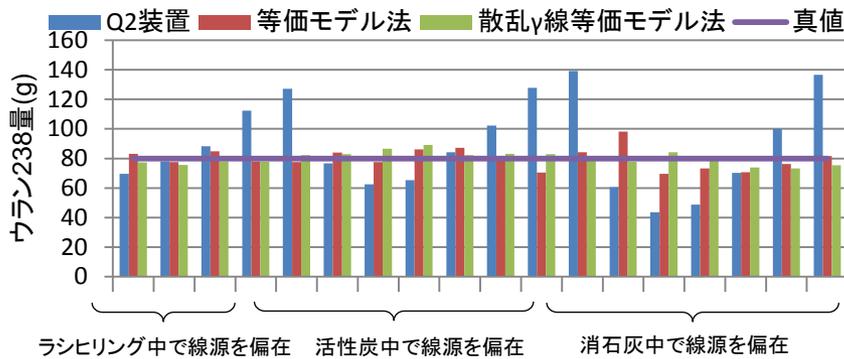
# 3. 2 計測技術開発結果の概要

(2/2)

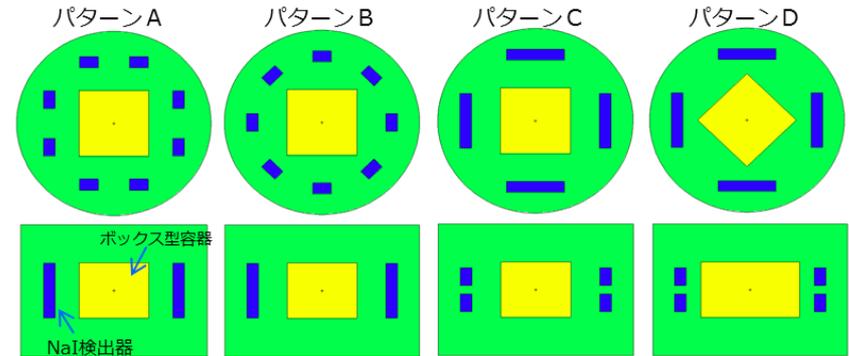
シミュレーション及び模擬コンテナ等を用いた測定試験により、散乱 $\gamma$ 線等価モデル法適用の妥当性を確認した。各施設でのバックグラウンド測定データや既存のドラム缶測定装置の測定データから遮へい体の厚さ、検出器の台数等を設定した。これらの結果をもとに、クリアランス測定装置の仕様を決定し、概念設計を終了した。

- 散乱 $\gamma$ 線等価モデル法適用の確認では、等価モデル法を拡張し、散乱 $\gamma$ 線を含む2つのエネルギー範囲の $\gamma$ 線計数率を用いて、線源位置の偏り等を評価した。線源の偏り等を補正して放射能の定量を行った。(クリアランス測定対象物は、766keV、1001keVのピークが小さいため、散乱 $\gamma$ 線を使用できるように改良)
- 加工メーカーの解体物量等や環境調査結果等を踏まえ、遮へい体の厚さや検出器の配置、形状、台数を検討し、かさ密度1.0g/cm<sup>3</sup>程度の測定対象について、放射能濃度0.1Bq/g (NU) の測定を30～60分以内で実現する測定装置を、クリアランス測定対象物の多様な収納形状等にも対応しながら概念設計した。

## 実測データによる検討例

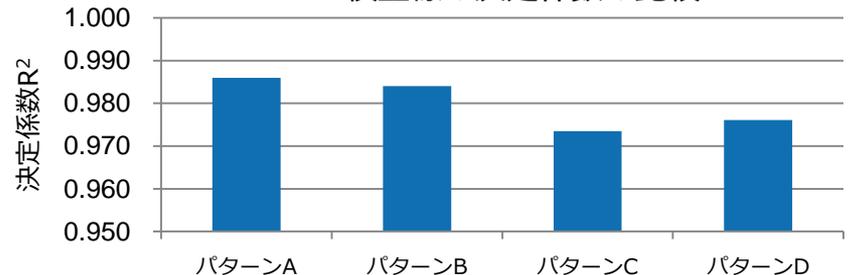


## シミュレーションによる検討例



検出器配置図

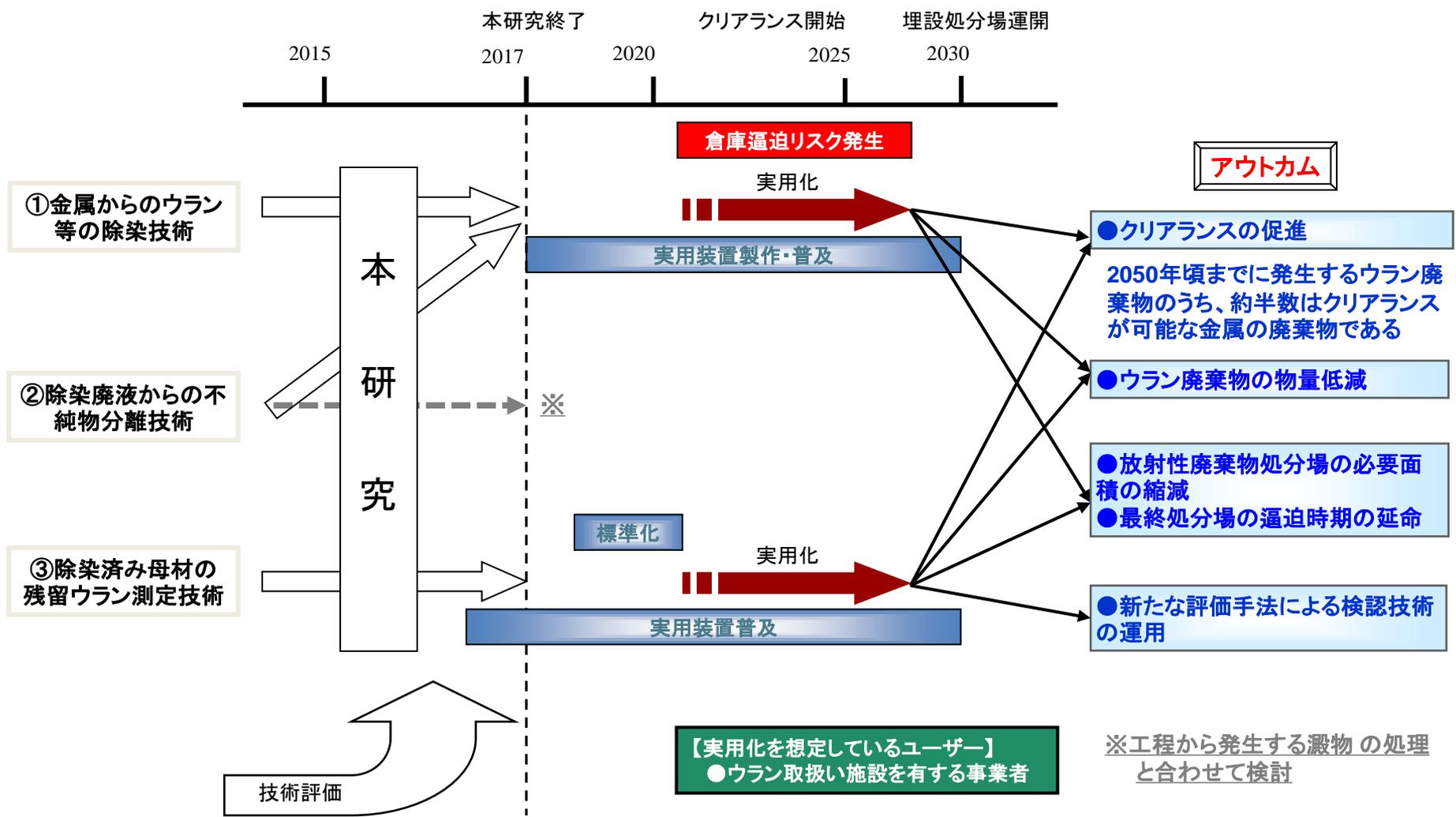
## 検量線の決定係数の比較



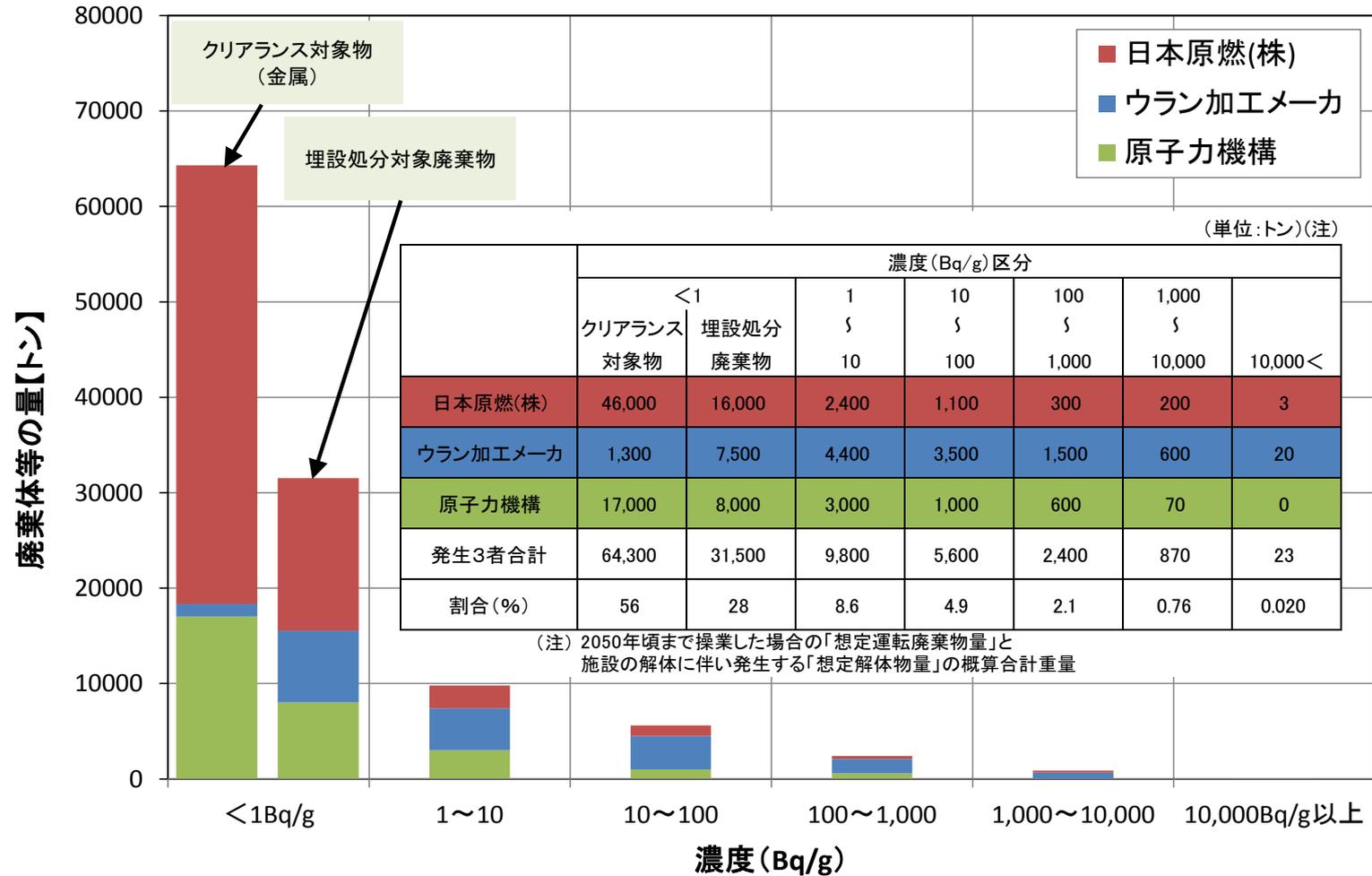
## 4. 当省(国)が実施することの必要性

- ①放射性廃棄物の排出者である核燃料サイクル事業者は、廃棄物の安全、安心な処理処分を行うための技術的及び社会的な共通の課題を有している。これらの課題解決には技術的難度を有するとともに多額の開発費用と長期の開発期間を要するため民間事業者にとって開発リスクが高いと言えることから国が主導で行う必要がある。
- ②国内の主要事業者が一体となって取り組むことで、クリアランスの除染方法及び測定方法について、成果の標準化(例:複雑金属のクリアランス測定方法について学会標準を作成する)が促進され、さらに国内の事業者は本事業の成果を導入しやすくなる。
- ③国の関与によって産学官連携が強まり、開発過程の知見を共有できるため、上記の標準化が進めやすくなるとともに、規制側も多様な手法への対応の負担を軽減できる。
- ④平成26年4月閣議決定された「エネルギー基本計画」においても、放射性廃棄物の処分については、原子力事業者等が処分に向けた取組を進めることを基本としつつ、処分の円滑な実現に向け、国として必要な研究開発を推進することが明記されている。

# 5. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ



# 5.1 廃棄体等の発生量



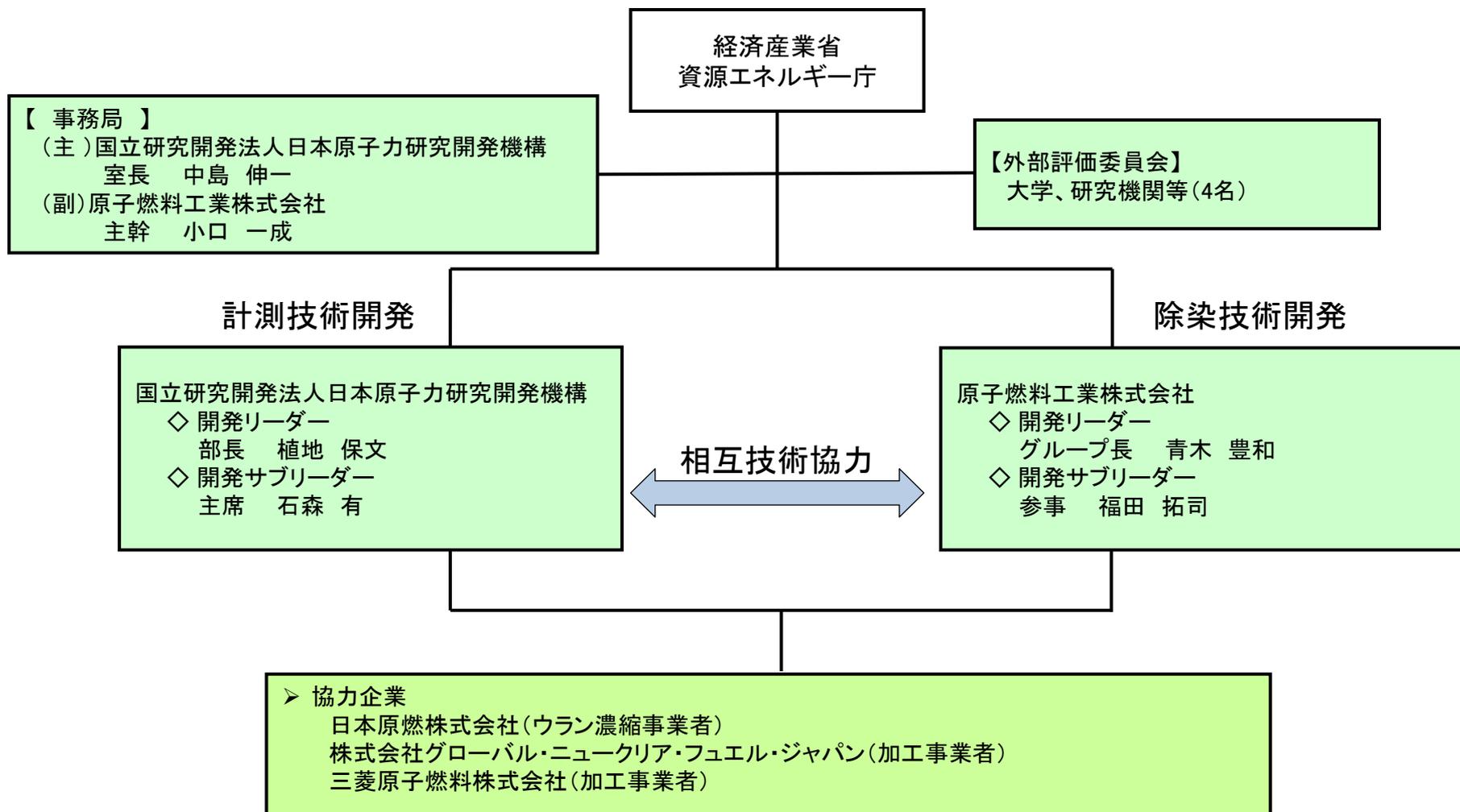
## 2050年頃までの廃棄体等の発生量

※出典元: 一般社団法人日本原子力学会「東京電力福島第一原子力発電所事故以降の低レベル放射性廃棄物処理処分の在り方」特別専門委員会「低レベル放射性廃棄物処分におけるウランの扱いについて—浅地中トレンチ処分に係る規制への提言—平成26年度報告書」

## 6. 研究開発の実施・マネジメント体制等

### 【業務実施体制、役割分担】

- ・事業の実施に当たっては、着実かつ有意義な研究成果を得るため、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構と原子燃料工業株式会社の2社体制で除染技術と計測技術を開発する。
- ・また、研究協力機関として事業に密接に関連するウラン濃縮・加工事業者の協力を得る。



## 7. 費用対効果

○投入する予定の国費総額は約4億円(4年間)である。

○本事業により以下のアウトプットが得られる見込みである。

- 除染・分離及び測定に係る装置設計に関する技術情報
- 装置の有効性や評価手法の妥当性に関する技術情報

○国内のウラン取り扱い事業者は、本技術情報を共有する。その結果、国内事業者はクリアランスの実施(アウトカム)に向けて、開発や標準化に必要な費用の重複を回避することができ、規制側も多様な手法への対応を軽減できるため十分な費用対効果が得られる。

○2050年頃までに加工メーカー及び原子力機構等から発生するウラン廃棄物のうち、複雑形状を含む金属の約半数の3万トン(15万本/200Lドラム缶)に対して本除染・計測技術を取り入れた場合、金属の埋設処分費用約300億円の削減が見込める。

- 現行、ウラン廃棄物の処分制度が確立していないため、コストの算出にあたっては、第二種廃棄物埋設事業における処分単価\*1を参考にした。

\*1:文部科学省 原子力科学技術委員会 研究施設等廃棄物作業部会(第9回)  
資料1「埋設処分業務の実施に関する計画」に基づく業務の実施状況について  
【トレンチ処分単価:186千円/本】

- トレンチ処分する費用単価を20万円/本と仮定すると、約300億円の処分費用の削減が見込める。

## 8. 外部有識者の評価等

### 8-1. 評価検討会

評価検討会名称

「次世代再処理ガラス固化技術基盤研究事業」中間評価検討会

評価検討会委員

座長

朽山 修 公益財団法人原子力安全研究協会 技術顧問

委員

浅沼 徳子 東海大学工学部原子力工学科 准教授

杉山 一弥 一般社団法人原子力産業協会 事務局長

関 哲朗 文教大学情報学部情報社会学科 教授

出口 朗 原子力発電環境整備機構 技術部長

## 8-2. 総合評価

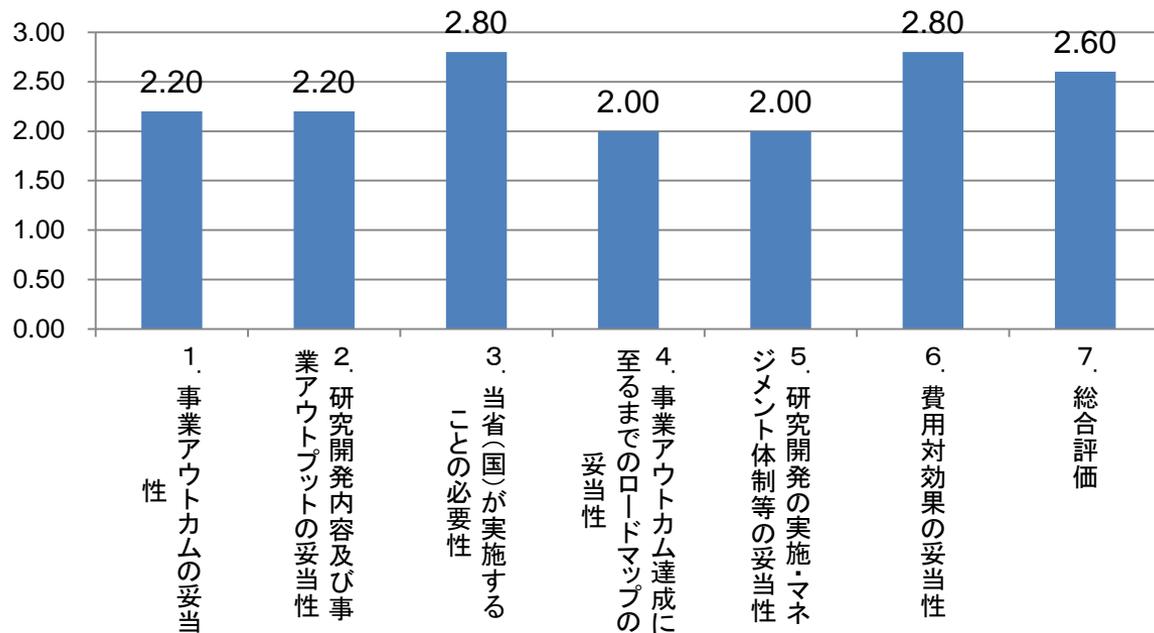
低レベル放射性廃棄物の処理処分についてはPPP(汚染者負担の原則)に従い事業者が解決すべきものとして、その責任の所在がこれまで曖昧にされてきたが、放射性廃棄物の処理処分はPPPの原則に従って、それにかかる費用を経済取引の中に内部化できる問題ではない。その意味で、本課題に国が積極的に関与して解決を目指すことは非常に意義深いことであり、担当事業者は、その技術的課題の克服に着実に取り組んでいる。また、ウラン廃棄物の処理に対する検討は、核燃料サイクル政策を維持する上で非常に重要な研究課題であり、当該研究は着実に成果を上げつつあり高く評価できる。今後も計画通り進捗させる必要がある。

一方、除染後の廃棄物・廃液をガラス固化することをもう少し意識して、総合的に比較検討及び評価できるよう研究開発を進める必要がある。また、本研究開発の成果は、広く国民の安全、安心に繋がるものであると考えられ、成果の直接の享受者は事業者であるが、その結果は国民の安定した生活に直結するものである。この観点からのベネフィットを整理し、広く国民の理解を得るように努めるべき。

## 8-3. 評点結果

○「経済産業省技術評価指針」に基づき、プロジェクト中間評価において、評点法による評価を実施した。

### 評点



#### 【評価項目の判定基準】

評価項目1.~6.  
 3点:極めて妥当  
 2点:妥当  
 1点:概ね妥当  
 0点:妥当でない

#### 7. 総合評価

(中間評価の場合)

3点:事業は優れており、より積極的に推進すべきである。  
 2点:事業は良好であり、継続すべきである。  
 1点:事業は継続して良いが、大幅に見直す必要がある。  
 0点:事業を中止することが望ましい。

## 9. 提言及び提言に対する対処方針

### 今後の研究開発の方向等に関する提言

- 当事業はガラス固化の前処理という位置付けでウラン廃棄物の除染技術等を開発するものであり、酸浸漬による化学除染で発生する除染廃液の方がガラス固化に向いている。また、ブラスト法では研磨材とウラン化合物が完全に分離できなければ、ガラス固化処理への影響を検討する必要がでてくる。このように除染処理技術について、ガラス固化を考慮した比較検討をすることにより事業の到達点がより明確になる。
- 成功の評価の主張が、本研究開発プロジェクトの結果が生み出すプロフィットに終始せず、原子力関連の事業、国の施策に対してどのような貢献が成されたのか、国民に対してどのようなベネフィットを提供することに繋がる成果を示せたのかといったようなことを適切に示せるように事業を進めるべき。

### 提言に対する対処方針

- 廃液や不純物に含まれる成分がガラス固化に与える影響の評価は、化学除染については平成26年度に、また物理除染については平成27年度にそれぞれ実施している。平成28年度以降は、物理除染と化学除染とを適切に比較できるよう、それぞれの最適除染条件（平成26年度及び平成27年度に設定したもの）下で除染を実施したときのガラス固化への影響を評価し、化学除染と物理除染との比較を行う。なお、物理除染については、使用済みの研磨材の影響についても検討を行う。
- 本事業は、核燃料サイクル政策の意義の一つである、放射性廃棄物の安定化、減容化等を目指した処理技術の開発を行うものであり、そうした成果が国民生活の安全・安心の確保にも留意しつつ効果的に示していけるよう事業を進めていく。