

次世代再処理ガラス固化技術 基盤研究事業 (ガラス固化技術の基盤整備) 概要

平成28年11月1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

株式会社IHI

日本原燃株式会社

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

一般財団法人電力中央研究所

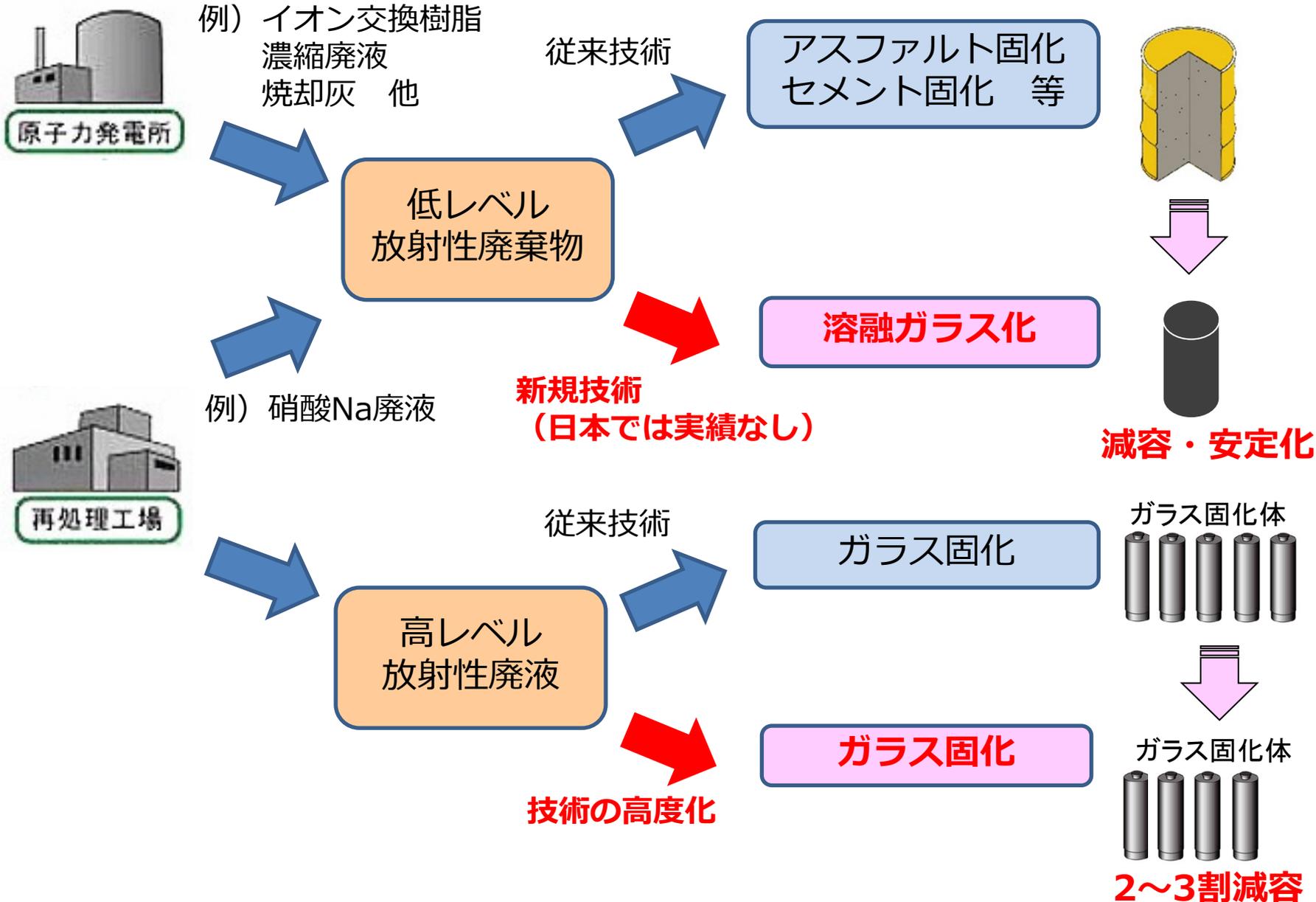
目次

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

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「ガラス熔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より多く、安定的に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、減容性が高く、より安定した廃棄体とするための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(SiO₂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>
廃安 棄定 体性	<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: SiO₂、Al₂O₃等のガラス形成成分を含む廃棄物が多数ある

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減容化、安定化に優れた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、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)を安定的に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)%(Na₂O約10wt%含む)に対して、2~3割の充填率向上を目標とし、30wt%(Na₂O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。

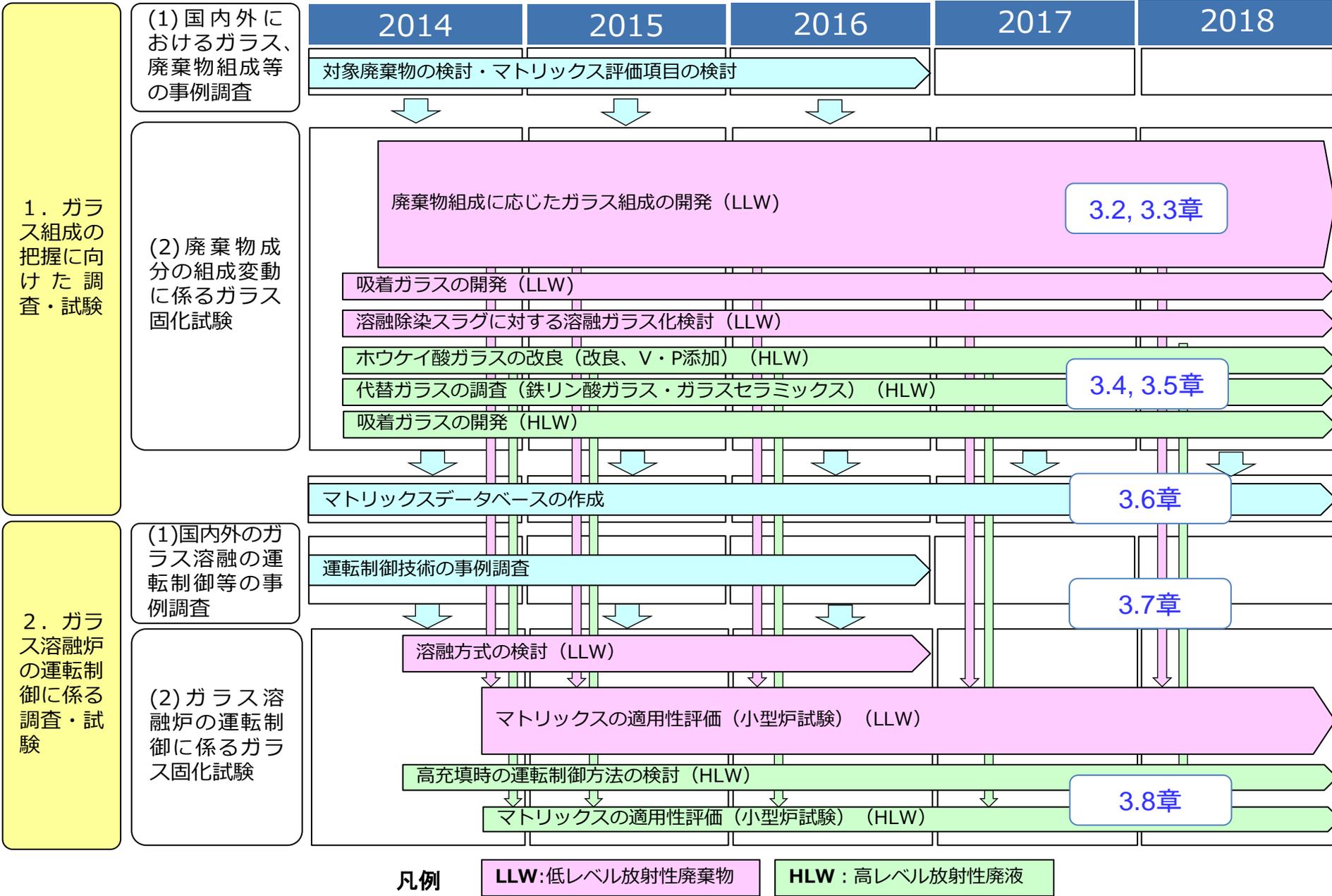


放射性廃棄物の低減、最終処分場問題の解決に資する

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低レベル放射性廃棄物の組成を調査する。</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、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する。</p> <p>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、ガラス固化技術に係るデータベースを作成する。</p>	<p>(中間評価時) 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ックスを開発する。</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6種類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2種類(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20件設定した。</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4種類開発した。</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件について処理能力が向上することを確認した。</p>
	<p>(事業終了時) 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



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

2. (1)国内外のガラス溶融の運転制御等の事例調査

2. (2)ガラス溶融炉の運転制御に係るガラス固化試験

溶融炉、運転制御技術の候補

溶融炉方式、運転制御方法の検討

小型溶融炉等による運転評価

溶融炉方式、運転条件を踏まえて、組成の最適化を実施

運転方法の検討に反映

対象廃棄物の設定

- ・イオン交換樹脂
- ・濃縮廃液
- ・焼却灰
- ・スラッジ 等

候補ガラス組成の設定

廃棄物性状に適した組成の最適化

※一次サーベイ、二次サーベイ、運転性評価

組成の選定

実廃棄物への適用検討

1. (1)国内外におけるガラス、廃棄物組成等の事例調査

1. (2)廃棄物成分の組成変動に係るガラス固化試験

※対象廃棄物ごとに、廃棄物の性状、要求事項を考慮し、候補組成を検討

基盤研究事業

3. 3 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)

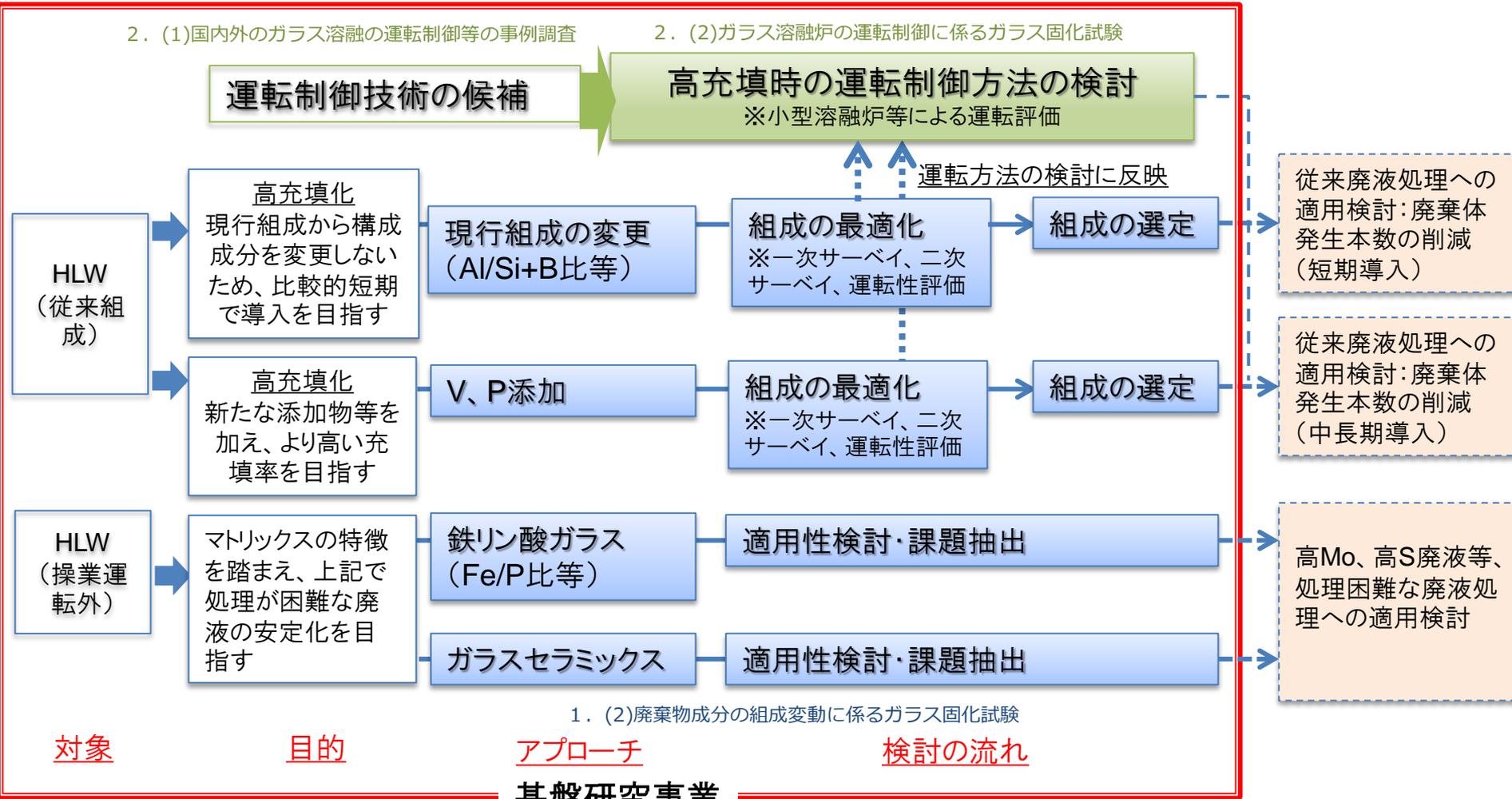
- 原子力発電所、再処理施設から発生する**廃棄物調査**を実施し、調査結果を基に、**従来の固化方法で処理が困難、大幅に減容化が見込まれる廃棄物を対象廃棄物に選定**
- 各廃棄物に対してるつぼ規模の試験により、**熔融ガラス化可能なガラス組成を検討**
- 検討したガラス組成に対して、基本特性(廃棄物充填率等)を評価

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 ₂ -Na ₂ 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 ₂ O ₅	
高硝酸Na廃液 (主成分:Na)	40wt%	SiO ₂ -B ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃ -CaO	・高温処理のため脱硝が可能 ・セメント固化に比べ、 高充填化による減容化が期待 できる
焼却灰 (主成分:Si/Ca/Al)	80wt%	①Li ₂ O-B ₂ O ₃ (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 ガラス形成成分 とすることで 大幅な減容化 が可能
	75wt%	②SiO ₂ -Li ₂ O-B ₂ O ₃ (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 ₂ O ₃ -P ₂ O ₅	・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、 ガラス固化による減容化が期待 できる
HEPAフィルタ (主成分:Al/Si)	25wt%	SiO ₂ -Na ₂ O-Li ₂ O-B ₂ O ₃	・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 ₂ -B ₂ O ₃ -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、 硫黄を高濃度含む廃棄物 に対して、 廃棄物充填率の向上 が見込め、減容化が可能

3.4 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



3.5 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

高充填マトリッ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% (Na_2O 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% (Na_2O 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% (Na_2O 約10wt%含む)	$\text{Na}_2\text{O}-\text{Li}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{P}_2\text{O}_5$	P_2O_5 に対する 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% (Na_2O 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% (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 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(ガラスセラミックス)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(Na_2O 濃度を含めた値)

3. 6 マトリックスデータベースの作成

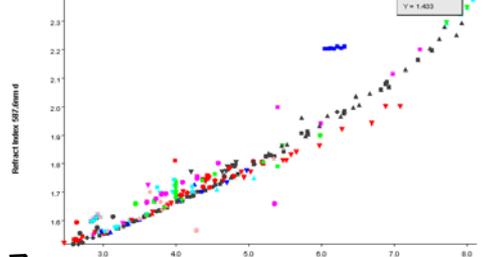
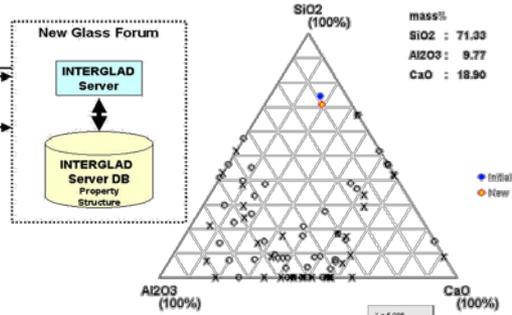
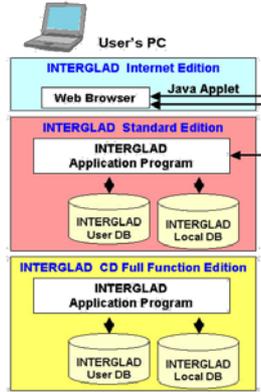
- ▶ 今後将来のガラス固化マトリックス開発において、従来の試行錯誤的なアプローチから、蓄積してきたガラス組成・特性データを活用する解析的なアプローチへ発展させる
- ▶ 本開発で得られたガラス組成・特性データを格納・管理するとともに、これらから推定できる情報を研究開発者が統合的に利用できるようにするため、データベースを構築する

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

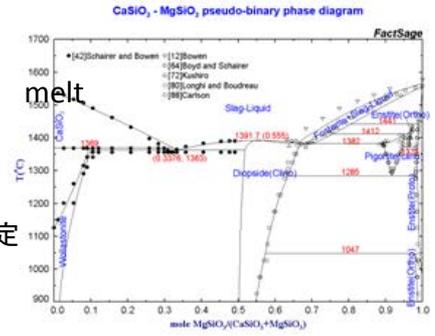


出典：ニューガラスフォーラムHP

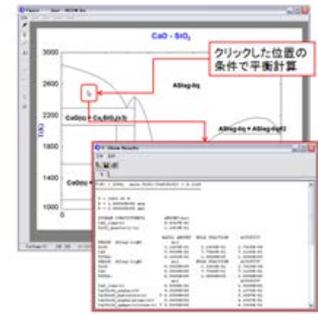


本基盤研究事業
で取得するデータ

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

3.7 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	

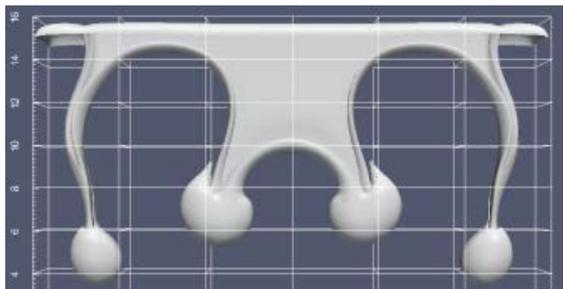
運転制御技術の調査結果概要

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"> LLW MLW HLW 	仏国 CCIM*1
ガスバブリング	<ul style="list-style-type: none"> 高濃度Al、Fe、Mnを含むHLW 	米国 JHCM*2
還元剤の添加	<ul style="list-style-type: none"> Na、Sを含む廃棄物 	米国 JHCM*2
	<ul style="list-style-type: none"> Sを含む廃棄物 高濃度Al、Fe、Mnを含むHLW 	
ガスバブリング 添加物の添加	<ul style="list-style-type: none"> 高濃度のSを含むHLW 原料ガラスにSb₂O₅、廃液にV₂O₅を添加 	独 LFCM*3

- *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. 8 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"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> 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
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"> 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。 	<ul style="list-style-type: none"> 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 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 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
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"> 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 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 	<ul style="list-style-type: none"> 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 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



白金族元素の沈降挙動の概要モデル

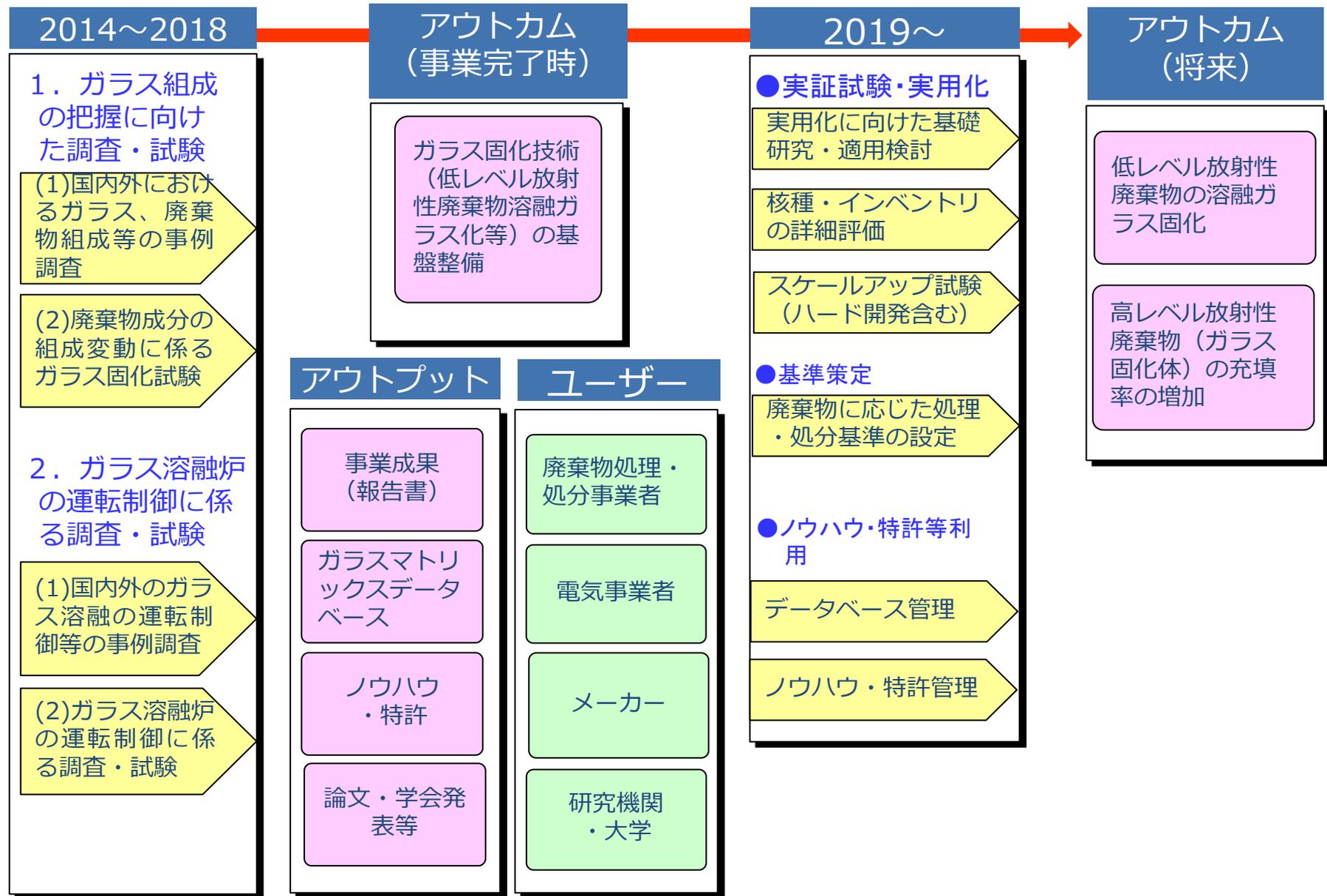


小型ガラス溶融炉

4. 当省(国)が実施することの必要性

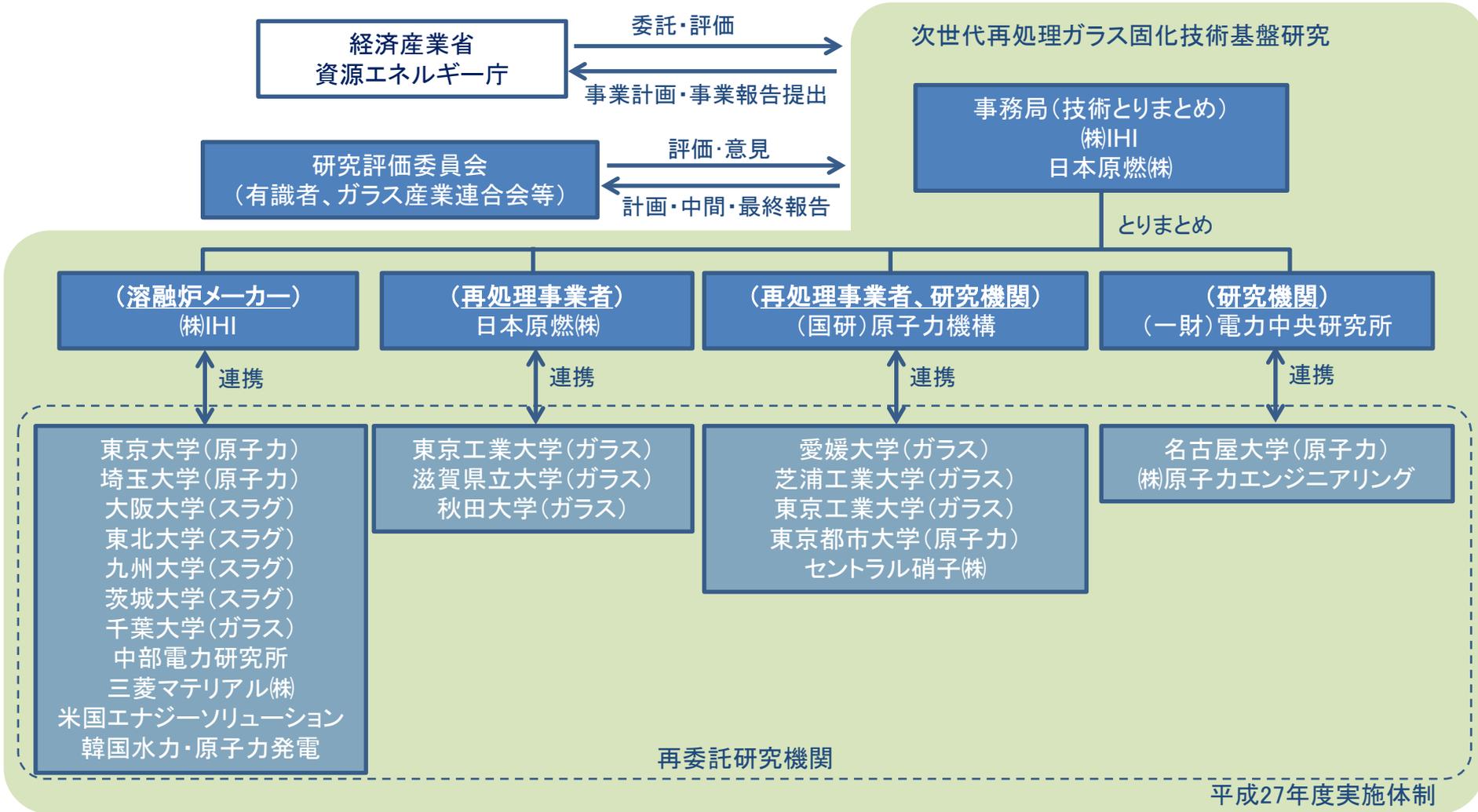
- 放射性廃棄物の安定的かつ減容化を目指した当該ガラス固化技術開発事業は、多種多様の廃棄物に適したガラス組成の選定とそれに対応する信頼性の高い固化技術を開発するため、技術的難度を有するとともに多額の開発費用と長期の開発期間を要する。このため、民間事業者にとっては開発リスクが高い事業であり国の主導で行う必要がある。
- 低レベル放射性廃棄物のガラス固化技術は、将来当該技術を使用する原子力事業者が多数にわたるとともに、今後の原子力発電所等の原子力施設の廃炉措置の円滑化にも資するものである。また、高レベル放射性廃棄物のガラス固化技術については、最終処分という国が前面に立つべき課題の解決に資するものである。
- 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。^(*1,2)
 - ◆ 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**されるとした場合、輸送費・処分費等が約**133億円の削減**^(*3)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18,000m³）の内、濃縮廃液は約8%（1,500m³）^(*1,2)

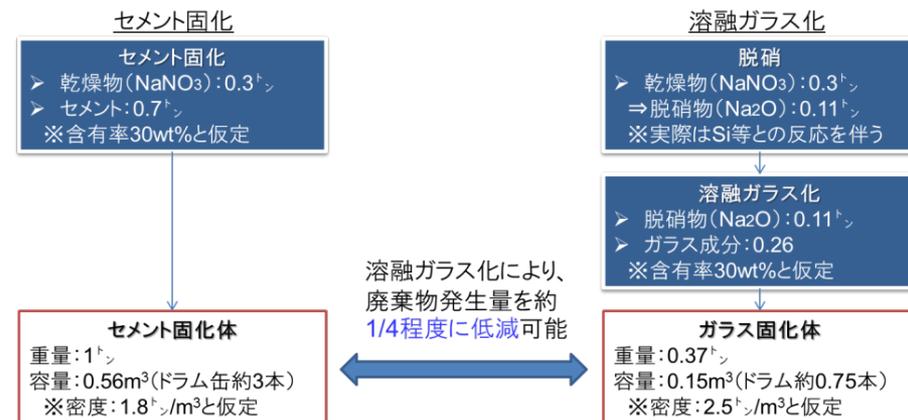
対象廃棄物：低レベル濃縮廃液の乾燥物（硝酸ナトリウム）0.3^ト

・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^(*3)



※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^(*1)): 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^(*2)): 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^(*1)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
<hr/>	
高レベル放射性廃棄物貯蔵・移送費用合計	<u>9,300億円</u>

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

次世代再処理ガラス固化技術
基盤研究事業
(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。 SO₃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. $\text{SiO}_2/\text{B}_2\text{O}_3=1.75$(mol比) かつ$\text{Al}_2\text{O}_3$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. P_2O_5の添加により、廃棄物充填率26wt%を達成。MoO_3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"> ・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。 ・浸出速度は低く、耐水性は良好であることを確認した。 <p>b. ガラスセラミックス化</p> <ul style="list-style-type: none"> ・非水溶性のCaMoO_4結晶相を充填率15-18wt%(MoO_3相当)で分散できることを確認した。 	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SiO_2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"> ・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"> a. コールドクルーシブル処理 b. プラズマ溶融処理 ・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。 	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"> a. ガスバブリング b. 還元剤の添加 c. ガスバブリング+添加物の添加 d. 攪拌器+ガスバブリング 	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"> a. 処理能力の向上 b. イエローフェーズ成分の溶解性の向上 c. 白金族元素の沈降抑制 d. 原料の供給形態の影響評価・ガラス化反応の解明 	<ul style="list-style-type: none"> 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) b. 原料ガラスを8μm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。 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。 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。 	達成

參考資料

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

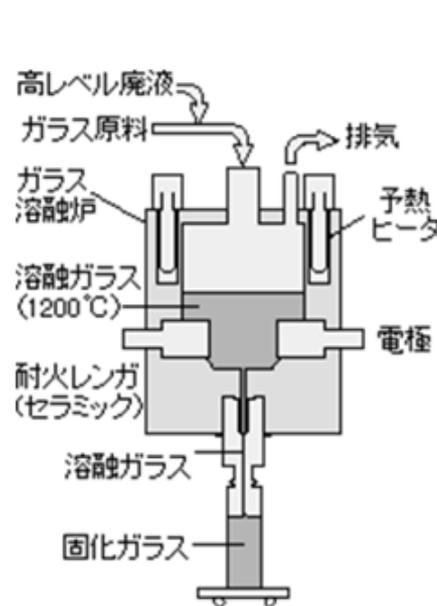
評価

減容性:ガラス原料の添加により、減容性は低い(△)

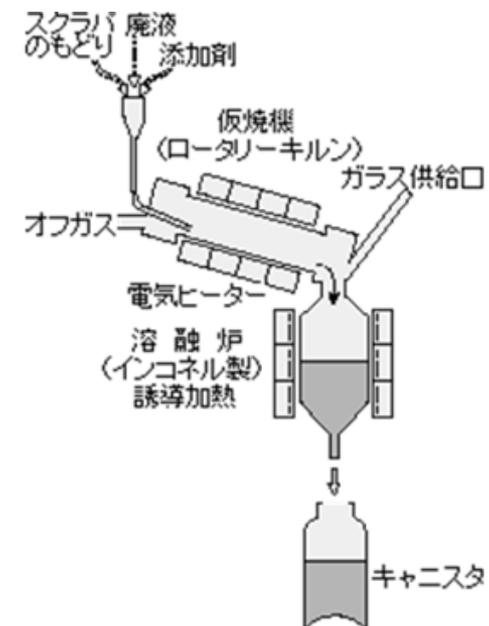
操業性:溶融ガラスの高温物性を一定範囲に管理。加熱・流下条件は一定(◎)

※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^[1]



AVM法の概念図^[1]

[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)

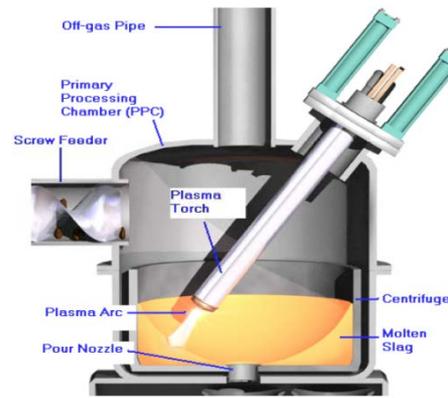
評価

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

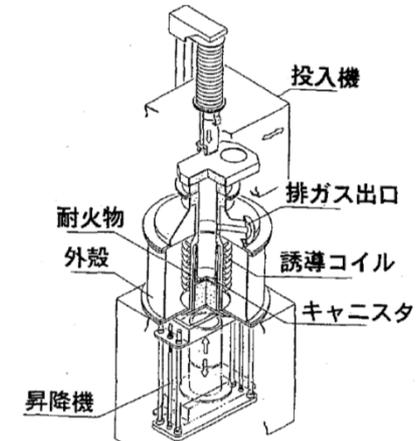
廃棄体安定性: スラグ組成によって、化学的安定性は変動(△)

塩基度 (CaO/SiO ₂)	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)^[1]

プラズマ加熱式溶融炉



(IN-CAN、日本)^[2]

高周波加熱式溶融炉

[1] M.W.Shuey, "LLW Processing and Operational Experience using a Plasma ARC Centrifugal Treatment (PACTTM) 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

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、 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

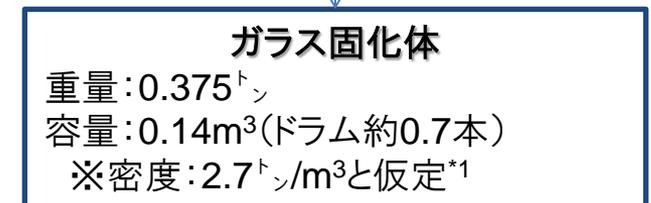
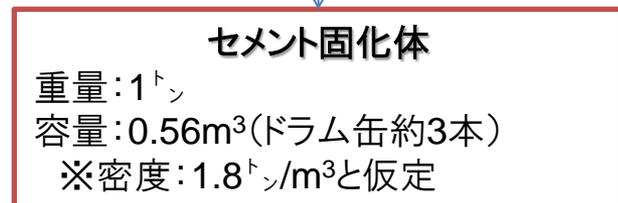
評価

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: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)SiO₂、CaO等を主成分とする焼却灰 等

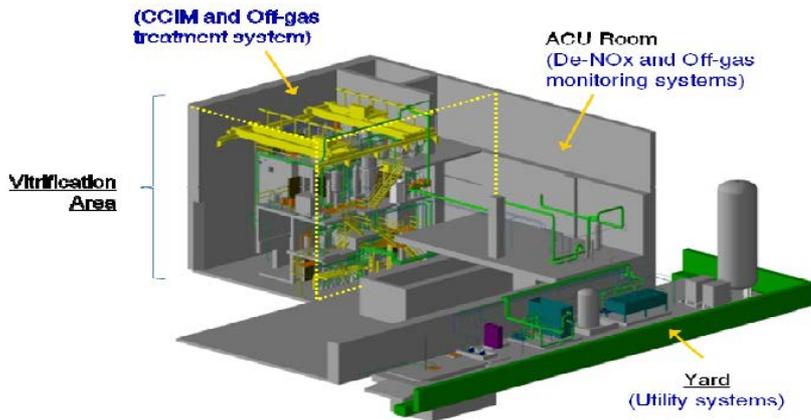
参考：低レベル放射性廃棄物へのガラス固化適用のメリット

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

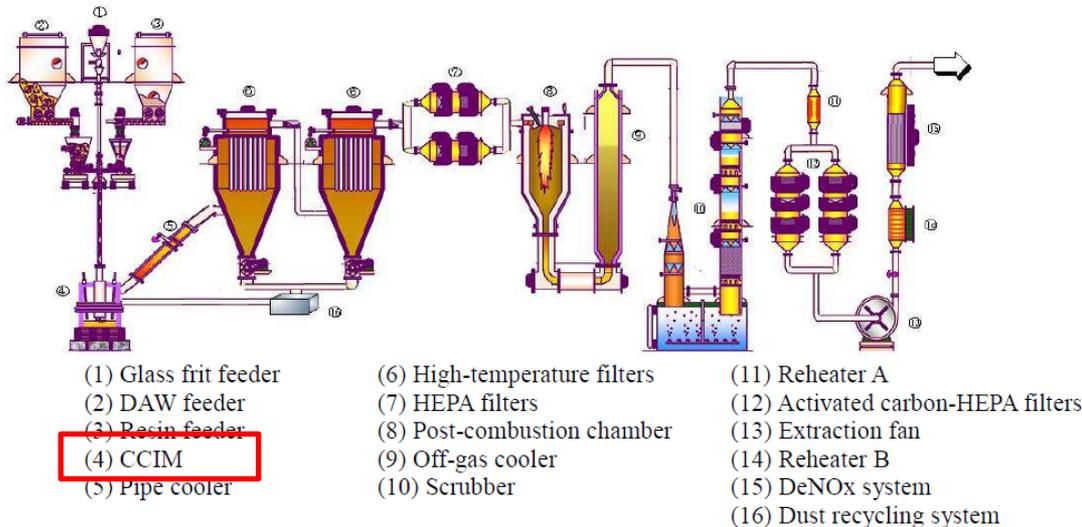
参考：韓国KHNPにおける低レベル廃棄物のガラス固化実績



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

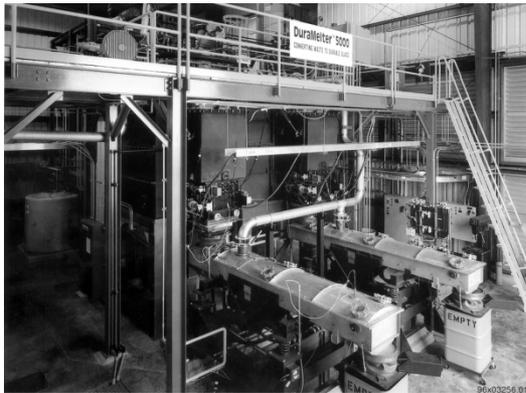
CCIMの特徴

- ◆ 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)

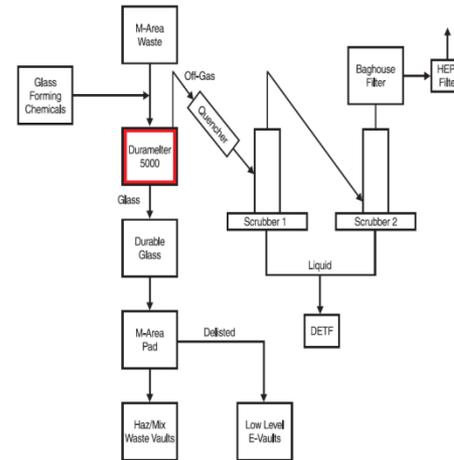
・2009年より実廃棄物処理開始
 ・対象廃棄物は、イオン交換樹脂、可燃物等

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



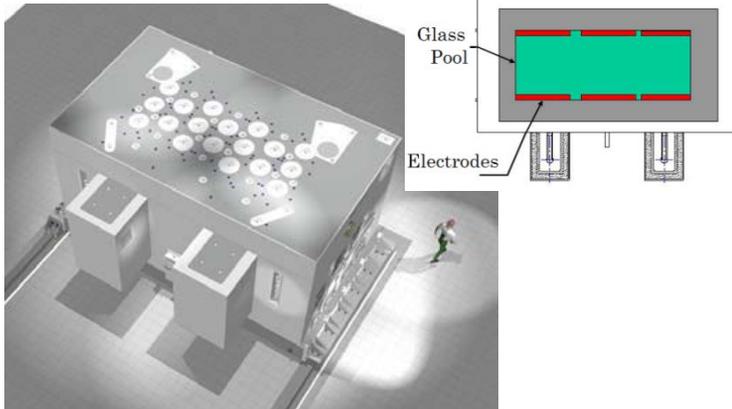
Dura Melter 5000 外観



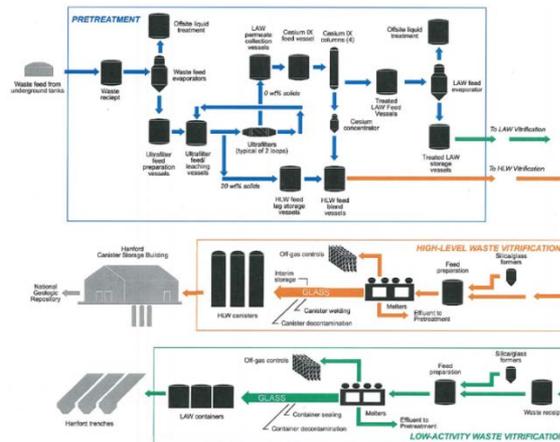
Vender Treatment Facility (VTF)の処理システム

- ・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)