

原子力施設より発生する低レベル放射性廃棄物のガラス固化技術

Vitrification Technology for Treating Low-Level Waste from Nuclear Facilities

鬼木 俊郎 原子力セクター原燃プロジェクト部
 鍋本 豊伸 原子力セクター原燃プロジェクト部 課長
 福井 寿樹 原子力セクター原燃プロジェクト部 部長

原子力発電所や使用済燃料再処理施設などの操業時・廃止時に発生する放射性廃棄物の処理技術の開発が国内外で進められている。放射性廃棄物の処理技術のうち、ガラス固化技術は廃棄物をより安定した状態にすることができる技術として注目されている。放射性廃棄物の低減、最終処分問題の解決につながる技術開発の解説として、ガラス固化技術を確立するための国内の取組みを、低レベル放射性廃棄物のガラス固化技術開発の成果を中心として当社の技術開発状況とともに紹介する。

The development of technologies for treating nuclear waste generated by nuclear power plants and reprocessing plants during their operation or decommissioning is underway both in Japan and abroad. Of the many types of treatment technologies that have been developed, vitrification technology is attracting attention as being the most promising technology for converting such waste into a stable state. As a brief review of technical developments aimed at reducing nuclear waste and finding a solution to the final disposal issue, this paper describes approaches to completing the development of vitrification technology in Japan, including IHI's activities.

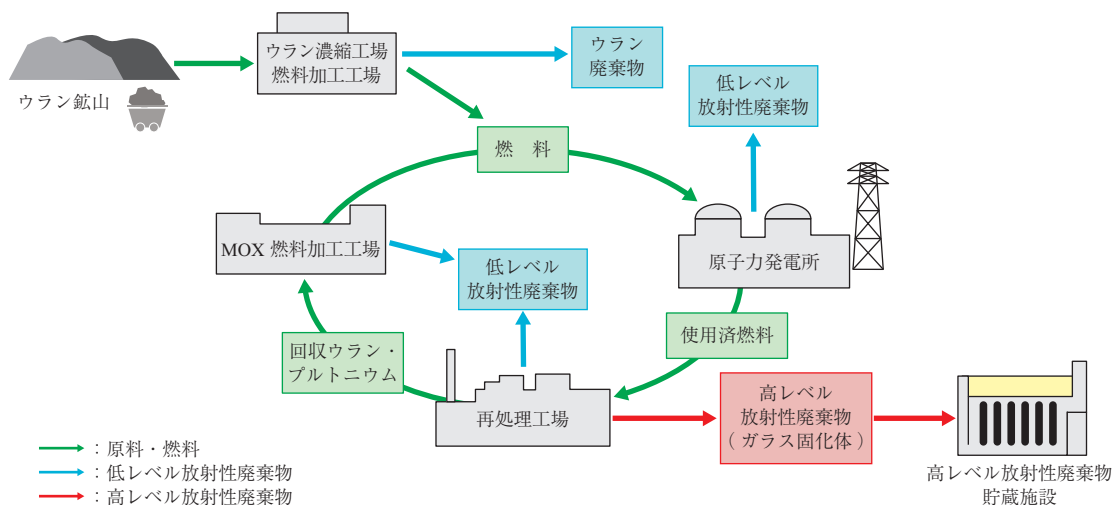
1. 緒 言

原子力発電所、使用済燃料再処理施設（以下、再処理施設）などの運転・解体などに伴い発生する種々の気体、液体、固体廃棄物は、性状、放射性物質の種類などに応じて、それぞれ合理的に処理・処分されている。第1図に核燃料サイクル、第2図に再処理施設の運転に伴い発生

する放射性廃棄物の処理を示す。

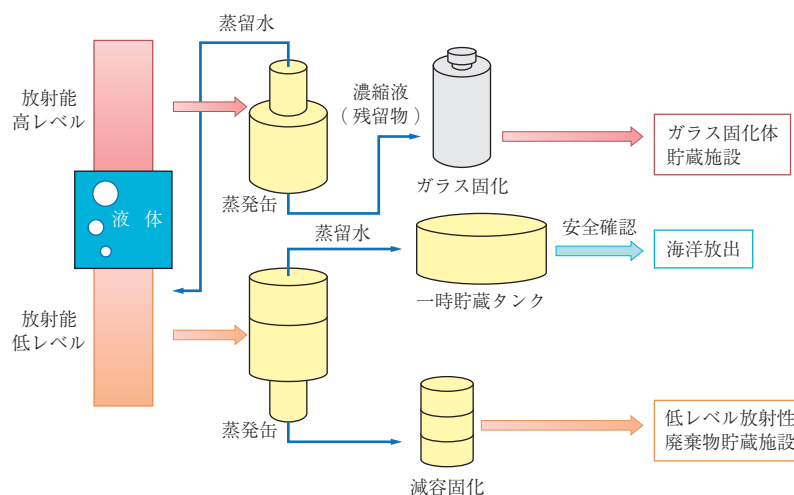
使用済燃料を再処理した際に発生する高レベル放射性廃液（以下、高レベル廃液）は、放射能レベルが高く、腐食性であるなどの特徴をもつ。このため、処理に当たっては、放射性物質の閉じ込め性、長期安定性の観点から、国内外でガラス固化技術が採用・実用化されている。

当社は高レベル廃液のガラス固化処理、および処理に



(注) MOX: ウラン・プルトニウム混合酸化物

第1図 核燃料サイクル
 Fig. 1 Nuclear fuel cycle



第2図 再処理施設の運転に伴い発生する放射性廃棄物の処理
 Fig. 2 Treatment process for nuclear waste from reprocessing plants

よって発生するガラス固化体の貯蔵技術の開発と関連する施設の建設を手掛けてきている。

一方、原子力発電所、再処理施設などで発生する低レベル放射性廃棄物（以下、低レベル廃棄物）は、高レベル廃液とは異なり、放射能レベル、組成・材質などが多種多様であるという特徴もっている。このため、処理に際しては、廃棄物の特徴に応じたさまざまな技術が検討・導入されている。国内では、①焼却②圧縮③セメント固化、が一般的でありガラス固化技術は導入されていないが、海外では以下の低レベル廃棄物などに対してガラス固化技術が導入されている。

(1) フランスの AREVA 社

再処理施設の解体・除染時に発生する比較的放射能レベルの高い低レベル廃液

(2) アメリカのエネルギー省 (DOE)

国立研究所に保管されている比較的放射能レベルの高い低レベル廃液

(3) 韓国 KHNP (Korea Hydro & Nuclear Power) 社

原子力発電所の運転で発生する低レベル廃棄物

上記の海外の状況を踏まえ、当社は国内で発生する低レベル廃棄物にもガラス固化技術が適用可能と考え、技術開発に着手することにした。

2. 原子力発電所、再処理施設などで発生した低レベル廃棄物へのガラス固化技術の適用 — 国内における技術開発の取組み —

今後、我が国においても原子力発電所や再処理施設などの廃止措置などに伴い、発生する比較的放射能レベルの高

い低レベル廃棄物（除染廃液など）に対する処理技術が必要であることから、低レベル廃棄物に対するガラス固化技術の基盤を確立しておくことは放射性廃棄物（以下、廃棄物）の低減、最終処分問題解決の観点からも、我々にとって重要な課題である。

上記を踏まえた国内の動向として、経済産業省資源エネルギー庁では平成 26 年度から委託事業として「次世代再処理ガラス固化技術基盤研究事業」（以降、基盤研究事業）を実施している。

基盤研究事業では、①これまで開発がなされていない原子力発電所および再処理施設など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な廃棄体とするためのガラス固化技術の基盤整備を行うとともに、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技術の高度化（廃棄物の高充填化および運転制御技術の向上）についても検討が行われている。

基盤研究事業は、放射性廃棄物ガラスの研究・開発・試験に実績のある株式会社 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および一般財団法人電力中央研究所の 4 者が共同で受託しており、再委託先として国内のガラス産業・鉄鋼・原子力などを専門とする研究機関および企業、ガラス固化を専門とする国内外の研究機関が参画し、国内外の英知を結集した体制としている。

2.1 節以降では、基盤研究事業のうち、低レベル廃棄物への取組みの概要を紹介する。

2.1 開発目標

原子力発電所、再処理施設などで発生する低レベル廃棄

物を対象に以下の開発を実施することを目標としている。

(1) ガラス組成開発

現在検討されている処理技術で処理が困難な廃棄物や、現在検討されている処理技術よりも廃棄体発生量を低減できる廃棄物を対象に、ガラス組成の選定技術を確立する。

(2) 運転制御技術開発

さまざまな廃棄物に対して選定した各種ガラス組成に適した溶融方式を整理・検討をする。

2.2 低レベル廃棄物へのガラス固化技術適用の考え方

当社では低レベル廃棄物に、溶融ガラス化技術と名付けた技術の適用を目指している。この技術は以下に示す定義のように、従来のガラス固化技術を応用した技術である。従来のガラス固化技術、すなわち高レベル廃液の処理に適用されているガラス固化技術は、廃棄物にホウケイ酸ガラスなどのガラス原料を添加し、ガラス固化する技術である。一方、廃棄物自体に含まれる成分（SiO₂ など）をガラス形成成分として用いることで、添加剤の量を最小限に抑えてガラス固化する方法が溶融ガラス化技術である。基盤研究事業では当社が自社研究として開発してきたこの技術を活用している。第1表に溶融ガラス化技術の特徴を示す。

溶融ガラス化技術は、事業者ニーズや処分方法に応じ

て、減容性、操作性、廃棄体安定性の調整が可能であり、また異なる廃棄物同士を組み合わせ、安定な廃棄体とすることも可能である。溶融ガラス化技術の適用効果が見込まれる廃棄物を以下の目的から選定する。

(1) 目的I

現在検討されている処理技術の適用が困難な廃棄物を安定化（耐水性を向上）させる。

たとえば）高線量で無機化が必要なイオン交換樹脂など

(2) 目的II

現在検討されている処理技術より廃棄体発生量を低減化させる。




たとえば）SiO₂、CaOなどを主成分とする焼却灰など

たとえば、焼却灰 0.3 t を処理したときの試算では、溶融ガラス化によって発生する廃棄体の容量は、セメント固化と比較して約 1/4 程度に減容できるとの結果が得られている。第3図にガラス固化による減容効果の評価例を示す。

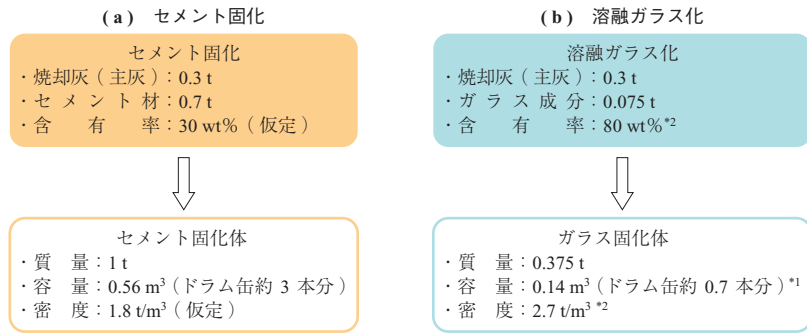
2.3 原子力施設から発生する廃棄物の調査

低レベル廃棄物ガラス固化技術の開発においては、はじめに原子力発電所、再処理施設から発生する低レベル廃棄

第1表 溶融ガラス化技術の特徴
Table 1 Comparison of vitrification processes

項目	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>廃棄物にホウケイ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（たとえば、SiO₂）など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	△ ガラス原料添加によって、廃棄物充填率を一定に保つため、減容性は低い。	○ 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。ただし、廃棄物組成によって減容性は変動する。	◎ 添加材がないため、減容性が高い。
操作性	◎ 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）条件は毎回一定である。ただし、高レベル廃液の場合は、白金族管理が運転に影響する。	○ 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）条件は大きく変動しない範囲で運転できる。	△ 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。
廃棄体安定性	◎ 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。	○ 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ことで安定性は比較的高い。ただし、廃棄物組成によって安定性は変動する。	△ 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。

(注) 1. 低レベル廃棄物の特徴
SiO₂、Al₂O₃などのガラス形成成分を含む廃棄物が多数ある。
2. 技術の評価結果
◎：優、○：良、△：可



(注) *1: セメント固化→溶融ガラス化の結果 1/4 に減容
*2: 2015 年度の結果から設定

第 3 図 ガラス固化による減容効果の評価例

Fig. 3 Comparison between vitrification and cement solidification

物について事業者ヒアリングし、溶融ガラス化技術の適用性が高い廃棄物を調査し、基盤研究事業における対象廃棄物を選定する進め方を採っている。第 2 表に原子力施設から発生する廃棄物の調査を示す。

2.4 ガラス組成開発

さまざまな廃棄物に対して、ガラス組成（ガラスマトリックス）を設定するため、以下のアプローチによって検討し、減容性、操業性および廃棄体の安定性に優れた溶融ガラス化技術の開発を目指している。

- (1) 海外実績に基づくアプローチ
- (2) 産業界のノウハウを取り込んだアプローチ

上記調査結果の項で紹介したように、低レベル廃棄物は、それぞれ組成、性状が異なっており、廃棄物に応じたガラス組成を設定する必要がある。このため、既存の国際ガラスデータベース（INTERGLAD Ver. 7 ニューガラスフォーラム）などを活用して、廃棄物組成に応じたガラス組成を事前に予測（ガラス組成候補の設定）し、ガラス固化試験を実施することで開発の効率化を図っている。

次に、上記ガラス組成候補の特性・物性などのデータを取得し、処分に対する安定性、ガラス溶融炉運転への適用性を評価する。

開発ではイオン交換樹脂、焼却灰、高硝酸 Na 廃液の

第 2 表 原子力施設から発生する廃棄物の調査

Table 2 Features of waste from nuclear facilities

No.	対象廃棄物	目的		特徴	課題解決	
		I	II		ガラス組成開発	運転制御開発
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（高硝酸 Na 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	◎	-
7	HEPA フィルタ、金属 Al 板など	○		・金属 Al を含む	-	◎
8	スラッジなど		○	・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、水銀などの重金属を含有	◎	◎
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	プラスト材		○	・Al ₂ O ₃ （主成分）、Si, Fe など	◎	-
14	活性炭		○	・C 主成分	-	◎

(注) 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
○: 目的に該当する対象廃棄物
◎: 課題解決のため技術開発が必要

模擬廃液物に対して溶融ガラス化した結果、溶融温度 1 100℃でガラス化が可能であることを確認した。第 3 表に低レベル廃棄物へのガラス固化適用性評価状況を示す。また、検討したガラス組成に対して、粘度および耐水性などを評価した。評価に当たっては、国内での基準がないため、ほかの廃棄物と比べたガラスの優位性を示すことを目的として、アメリカの基準などを参考にして設定した参考値を満足できる溶融ガラス化条件について検討している。

3. 福島第一原子力発電所事故で発生した廃棄物へのガラス固化技術の適用 – 自社研究による技術開発の取組み –

以降、当社が自社研究として検討している福島第一原子力発電所事故（以下、福島事故）で発生した廃棄物へのガラス固化技術の適用性の検討とともに、ガラス溶融炉の開発状況を紹介する。

3.1 溶融炉選定の考え方

福島事故廃棄物のなかには、原子力施設で今までに発生していない廃棄物が多くあり、そのなかには溶融ガラス化に適している廃棄物が多数存在する。

廃棄物の溶融ガラス化においては廃棄物の特性などを踏まえて溶融方式を検討する必要があるが、海外事例調査結果なども考慮して溶融方式を検討した結果、CCIM (Cold Crucible Induction Melting) 炉の適用性が高いことが示唆された。ここでは CCIM 炉の特徴（第 4 図）を以下に紹介する。

- (1) 高周波加熱を熱源とし、炉壁（接液部）に金属を用いたガラス溶融炉である。
- (2) 炉壁を水冷することにより形成されるスカル層によって炉壁材料に対する溶融ガラスの腐食性を低減できる。この構造的な特徴によって、腐食性の高い

ガラスにも適用可能であるとともに、溶融炉の長寿命化が図れる。

- (3) 溶融炉の立ち上げ（スタートアップ）、溶融炉の停止（シャットダウン）に必要な運転時間は各 4 時間以内である。たとえば、曜日、または週によって処理する廃棄物を変更するなど、容易に処理廃棄物を変更することが可能である。
- (4) スラッジ、ゼオライト、使用済樹脂、液体廃棄物、焼却灰、可燃性廃棄物などの多様な廃棄物の溶融ガラス化に適用可能である。

3.2 CCIM 炉の開発

当社は 2011 年の東日本大震災から、福島事故廃棄物処理に関する調査を開始するとともに、福島事故廃棄物に対する溶融ガラス化の適用検討を開始した。また、2012 年度から、CCIM 炉による低レベル廃棄物の処理実績をもつ韓国 KHNP 社と協定を結び、福島事故廃棄物の CCIM 炉適用性検討を開始している。2013～2015 年までに実規模の CCIM 炉設備を用いた実証試験を実施するとともに、福島事故廃棄物の処理を想定した実規模設備の概念検討を実施中である。

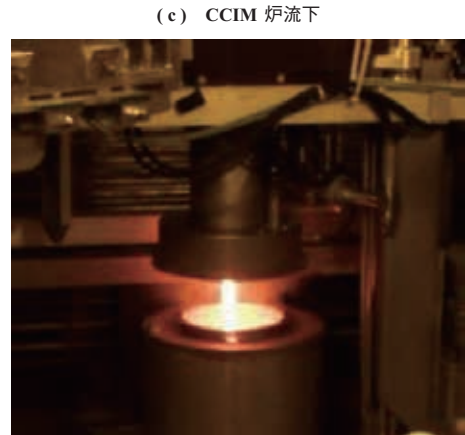
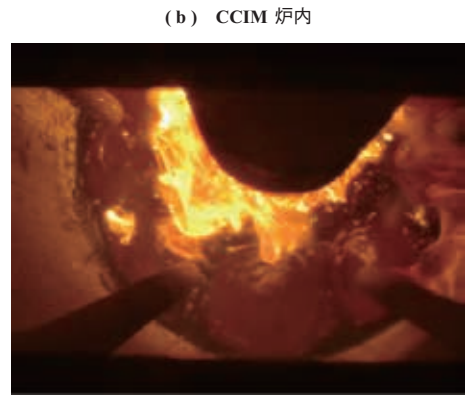
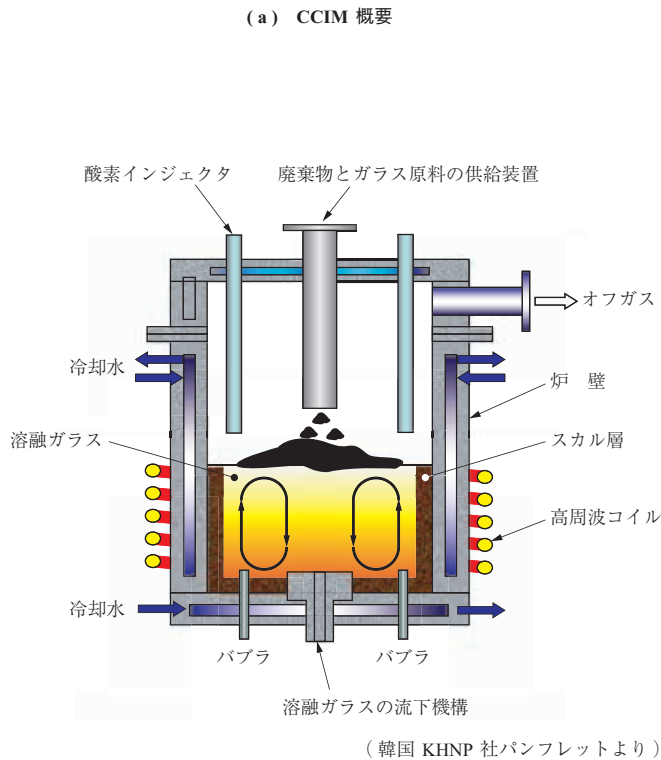
るつぼなどを用いたラボスケール試験で、福島事故廃棄物へのガラス固化適用性評価を進めるとともに、CCIM 炉実証試験として以下に取り組んでいる。

- (1) 2013 年度：ゼオライト + 焼却灰の実証試験
2013 年度のゼオライト試験結果を踏まえ、CCIM 炉の適用性が高いことが確認されたため、2014 年度および 2015 年度にはほかの廃棄物に関する試験を実施し、同じく適用性が高いことを確認している。
- (2) 2014 年度：AREVA 社スラッジ（鉄リン酸ガラスをガラスマトリックスとして使用）の実証試験
- (3) 2015 年度：ALPS（放射性物質の除去装置）ス

第 3 表 低レベル廃棄物へのガラス固化適用性評価状況
Table 3 Evaluation of the applicability of vitrification technology in treating low-level waste

低レベル廃棄物		添加試薬	ガラス化		高温粘度	浸出率 *1
名称	主成分		廃棄物充填率 (wt%)	溶融温度 (℃)		
イオン交換樹脂	Fe	SiO ₂ - Na ₂ O	40 → 35	1 100	○	△
		P ₂ O ₅	40	1 100	-	○
焼却灰（主灰）	Si/Ca/Al	B ₂ O ₃ - Li ₂ O	75 以上	1 100	○	○
低レベル濃縮廃液（高硝酸 Na 廃液）	Na	SiO ₂	40	1 100	-	-
		SiO ₂ - B ₂ O ₃	40	1 100	×	×
		SiO ₂ - B ₂ O ₃ - Al ₂ O ₃ - CaO	30	1 100	○	△

（注）*1：PCT (Product Consistency Test) 結果
○：問題なし、△：基準値などから若干外れる、
×：基準値などから大きく外れる、-：データなし（未実施）



第 4 図 CCIM 炉の特徴

Fig. 4 Appearance of a cold crucible induction melter (CCIM)

ラリー（炭酸塩スラリー）の実証試験

4. 結 言

経済産業省資源エネルギー庁の「次世代再処理ガラス固化技術基盤研究事業」では、放射能レベルの比較的高い低レベル廃棄物をより安全・安定的に廃棄でき、かつ減容性の高い廃棄体とするために、国内では実績のない低レベル廃棄物のガラス固化技術の開発を進めている。

当社の自社研究および上記基盤研究事業で得られた成果から、低レベル廃棄物に関する溶融ガラス化の適用性を評価した結果は以下のとおりである。

- (1) イオン交換樹脂に関しては、残さ状態（無機物）の廃棄物を 40 wt%程度ガラスに含有させることができる見通しがあり、スラリー状で保管された状態から処理対象の無機化と安定化を一つのプロセスのなかで行うため、無機化と安定化を別々に行う場合と比較し減容効果が期待できる。
- (2) 焼却灰に関しては、廃棄物中のガラス形成成分（ SiO_2 など）を有効活用することで廃棄物含有率を 75 wt%以上に高めることが可能であった。

- (3) そのほかの廃棄物に関しても、溶融ガラス化の適用性が確認されており、さらなる調査を進めていく必要がある。
- (4) 一連の研究はラボスケール試験の結果が占める割合が多いため、今後実処理を考慮した試験検討を進めることで、廃棄物処理時の課題を解決していく必要がある。
- (5) 当社は福島事故廃棄物を対象とした溶融ガラス化適用性評価を進めるとともに、ガラス溶融炉として CCIM を選定し、ALPS スラリーなどが処理できることを実規模で確認済みである。

今後も、自社研究および基盤研究事業をとおして低レベル廃棄物に適したガラス溶融炉の開発を進めるとともに、当社のガラス固化技術全般の適用範囲拡大と信頼性向上を図っていく。

— 謝 辞 —

本稿は、経済産業省資源エネルギー庁委託事業「平成 26 年度及び平成 27 年度次世代再処理ガラス固化技術基盤研究事業」の成果の一部を紹介したものである。実施

に当たっては、多大なるご支援をいただいている関係各位
のご厚誼こうぎに対し、ここに記し、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

(1) 鬼木俊郎, 立花孝洋, 柿原敏明, 福井寿樹, 遠藤

芳浩: 次世代再処理ガラス固化技術基盤研究(その
1) - 低レベル廃棄物に対する溶融ガラス化の検
討 - 日本原子力学会第 11 回再処理・リサイク
ルセミナー 2015 年 12 月