

放射性廃棄物の減容化に向けたガラス固化技術
の基盤研究事業
(ガラス固化技術の基盤整備)

評価用資料

令和元年 11月25日

経済産業省事業推進課名
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

研究開発実施機関名
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

放射性廃棄物の減容化に向けたガラス固化技術の基盤研究事業
（ガラス固化技術の基盤整備）
技術評価結果報告書（中間評価）

プロジェクト名	放射性廃棄物の減容化に向けたガラス固化技術の基盤研究事業 （ガラス固化技術の基盤整備）
行政事業レビューとの関係	平成 31 年度行政事業レビューシート 0330
上位施策名	エネルギー基本計画
担当課室	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
<u>プロジェクトの目的・概要</u> 我が国では、使用済燃料を再処理した際に生じる高レベル放射性廃液については、日本原燃の六ヶ所再処理工場においてガラス固化技術が実用化されている一方、原子力発電所等の操業・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技術については、高レベル放射性廃液と異なり、組成が多種多様であり技術的に容易では無いことから、国内における研究開発は手付かずの状況である。他方、韓国では廃棄物を粉体状で保管する事が禁止されており焼却に代わる減容化が必要であるため、仏国では再処理施設等の廃止措置時に発生する廃棄物を安定的に保管するため、米国では軍用施設で発生した廃棄物を安定した状態で処理・処分するため、既にガラス固化処理が実用化されている。今後、我が国では原子力発電所等の操業・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ついても安定的な処理が求められることが想定され、ガラス固化の技術的可能性について検討しておくことは重要である。また、高レベル放射性廃棄物のガラス固化技術についても、更なる廃棄物の減容化を可能とするガラス組成及び熔融炉の運転制御技術の開発の実施により、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こととなる。 当初、本事業は使用済ウラン燃料の再処理等において発生する放射性廃棄物を対象とし、平成 30 年度に事業を終了する予定であったが、平成 30 年 7 月に閣議決定されたエネルギー基本計画では、使用済MOX燃料の処理の方策について引き続き研究開発に取り組みつつ核燃料サイクル政策を推進することとされたことから、これを踏まえた新たな技術開発に着手することとなった。具体的には、これまで開発してきた技術を活用して、使用済燃料の再処理等において発生する様々な種類の放射性廃棄物について、高充填化を妨げる白金族元素の凝集を抑制する技術や、長寿命または発熱性の高い核種を分離する技術等を開発することを目的として、令和 6 年まで継続実施することとする。	

予算額等（委託）				（単位：百万円）
開始年度	終了年度	中間評価時期	終了時評価時期	事業実施主体
平成 26 年度	令和 6 年度	令和元年度	令和 6 年度	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
H28FY 執行額	H29FY 執行額	H30FY 執行額	H26～H30FY の 総執行額	総予算額
655	336	368	2,704	6,904

※総予算額は平成 26 年度から平成 30 年度執行額と令和元年度から令和 6 年度予算額の合計

1. 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。 さらに、上記の技術を活用し、燃料多様化に伴い発生する様々な種類の高レベル放射性廃液をガラス固化できる技術を開発し、放射性廃棄物の一層の減容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。		
指標目標値		
事業開始時 (平成26年度)	計画： ①ガラス固化技術に係る様々な関係者の協力の下で実施し、外部有識者による研究開発計画等の評価、助言を得ることができる体制を構築する。	実績：目標達成度 100% ①研究機関、再処理事業者、溶融炉メーカー等のガラス固化に係る関係者が参加する体制を組むとともに、有識者、ガラス産業界等から構成される研究評価委員会（3回/年）を設置し、評価、助言を得ながら事業を進める仕組みを構築した。
中間評価時 (平成27年度末)	計画： ①高充填化が可能なガラス組成を探索できるデータベースの基本設計を行う。 ②文献調査等により、評価項目、管理基準の設定、評価方法を検討する。 ③低レベル放射性廃棄物の性状を明らかにし、ガラス化が可能な廃棄物を選定する。 ④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。	実績：目標達成度 100% ①既存のデータベースと連携可能なデータ構造、仕様を決定しプログラミングに着手した。 ②実用化に必要な評価項目、基準値を設定した。 ③ガラス固化が適用されていない低レベル放射性廃棄物に対してガラス化できる組成候補を選定した。 ④高レベル放射性廃液を模擬した廃液を用い廃棄物充填率を3割以上向上できる候補組成を選定した。
中間評価時 (平成30年度)	計画： ①放射性廃棄物について、ガラス固化体中への充填率や品質等の観点から有望なガラス組成を選定・開発できるプラットフォームを構築する。 ②放射性廃棄物の高充填が可能な組成、溶融炉方式および運転制御方法を	実績：目標達成度 100% ①ガラス固化体中への充填率や品質等の観点から有望なガラス組成を選定・開発できるプラットフォームを構築した。 ②放射性廃棄物の高充填が可能な組成、溶融炉方式および運転制御方法を

	選定する。 ③低レベル放射性廃棄物ガラス固化体については、処分時の管理基準を提案する。	③低レベル放射性廃棄物ガラス固化体の処分時の管理基準を提案した。
終了時評価 (令和6年度)	計画： ①燃料の多様化に伴い、これらを再処理した際に発生する様々な高レベル廃液に対する処理・貯蔵・処分の技術的見通しを得ると共に、開発課題を抽出する。また、廃液から MA 分離技術を開発する。 処理・貯蔵・処分の全体最適化を進めると共に、工学的成立性に向けた課題を抽出する。 ②ウラン廃棄物からウランを分離または除染する技術の実用化に目途をつける。	実績：—
目標最終年度	計画： 低レベル放射性廃棄物の溶融ガラス化技術の技術的な知見が詳細に整備されることで、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処理方法の一つとして評価することが可能となる。その知見に基づき低レベル放射性廃棄物の合理的な処理、処分方法についての議論が進展する。 ガラス固化技術の基盤が整備されることにより、高レベル放射性廃液のガラス固化技術が向上し、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については約 8000 本～12000 本の低減が期待でき、最終処分場面積の縮減も期待できることから、それらに係るコスト低減、立地選択肢の拡大等が期待できる。さらに、上記の技術を活用し、燃料多様化に伴い発生する様々な種類の高レベル放射性廃棄物の最終処分に向けた技術的課題の解決に道筋をつけ、核燃料サイクル政策の推進に資する。	

2. 研究開発内容及び事業アウトプット

(1) 研究開発内容

廃止措置等で発生する対象とする低レベル放射性廃棄物の性状を明らかにし、溶融ガラス化が可能で廃棄物成分をより多く安定的に取り込むことができるガラス組成を開発する。また、含有させる廃棄物を増加させると成分の一部が結晶として析出し、ガラス固化体の安定性が低下する等の問題が生じるため、成分の析出を防止する溶融炉運転技術（温度管理、攪拌等）を開発する。低レベル放射性廃棄物等のガラス固化技術の研究で得られた成果を踏まえつつ、高レベル放射性廃棄物のガラス固化技術についても、さらなる廃棄物の充填率向上（2～3割向上）を可能とするガラス組成及び溶融炉の運転制御技術を開発する。なお、将来発生する廃棄物について、最適なガラス固化

条件を短期間で効率的に探索するため、上記の結果（組成探索・運転制御）を踏まえたガラス固化技術に係るデータベースを構築する。

さらに、上記の技術を活用し、燃料多様化に伴い発生する様々な種類の廃液に応じて溶融・固化プロセスを改善し、溶融炉の運転において問題となるイエローフェーズの生成や白金族元素の沈降を抑える技術等を検討するとともに、廃液から長寿命で発熱性の高い核種の分離技術を開発することで、燃料の多様化に伴い発生する廃液に対する安定固化方法を確立し、最終処分までのシナリオ検討を行い、課題抽出を行う。

（２）事業アウトプット

事業アウトプット指標		
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。 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、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。 諸外国で研究・実用化が行われているガラス固化技術の実態について調査する。 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。 上記の技術を活用し、燃料多様化に伴い発生する廃液に対する安定固化方法を確立し、放射性廃棄物の一層の減容化を実現する。		
指標目標値（計画及び実績）		
事業開始時 （平成２６年度）	計画： 最終目標（平成３０年度末時点） 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。 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。 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。	実績：－
中間評価時 （平成２７年度末）	計画： 中間目標（平成２７年度末時点） 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。 ②国内外のガラス溶融炉の調査を行い、ガラス固化に適した溶融炉を選定	実績：目標達成度 100% 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。 ②上記廃棄物のガラス固化に適したガ

	する。 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。 ④データベースへ登録する項目の整理、基本設計を行う。 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。 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。	ラス溶融炉を2種類（CCIM, プラズマ）選定した。 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。 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。 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。 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。
中間評価時 （平成30年度）	計画： 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。 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。 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。	実績：目標達成度 100% 低レベル放射性廃棄物6種類に対して、製造、処分の観点から、重要な5項目について特性評価を行い、選定された溶融炉方式を用い、特定の廃棄物において、運転方法を確立した。 ②本事業で得られたガラスの基礎データも含め、データを格納し、物性が予測可能なツールを作製した。 ③製造処分の観点からの特性評価、運転方法（原料の小径化等）を検討し充填率を2～3割向上したガラス固化技術を開発した。
終了時評価 （令和6年度）	計画： ①使用済燃料多様化に伴って発生する様々な廃液に対する安定固化方法を確立する。 ②廃液から高分離効率でマイナーアクチニドを分離するプロセスを確立する。 ③高ウラン濃度廃棄物の減容化技術を確立する。	実績：－

<共通指標実績>

論文数	論文の 被引用度数	特許等件数 (出願を含む)	特許権の実 施件数	ライセンス 供与数	国際標準へ の寄与	プロトタイ プの作成
1 2	0	1	0	0	0	1

3. 当省(国)が実施することの必要性

本事業で対象とする原子力発電所等の操業・廃止から発生する廃棄物は、事業者に処分責任があるものの、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。

ガラス固化技術は困難性を伴う研究課題であり、各国ではその取組を国の研究機関がプロジェクトとして実施しており、我が国においても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 30 年 7 月に閣議決定された「エネルギー基本計画」においても、使用済 MOX 燃料の処理の方策について、引き続き研究開発に取り組みつつ、核燃料サイクル政策を推進すること、また、核燃料サイクルの重要なプロセスとして、放射性廃棄物を適切に処理・処分し、その減容化・有害度低減のための技術開発を推進すること、特に高レベル放射性廃棄物については国が前面に立って最終処分に向けた取組を進めることが明記されている。

4. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ

(1) 平成 26 年度の成果

- ①低レベル放射性廃棄物のガラス固化技術の調査のため、国外においては、既にガラス固化を実施している研究機関および民間事業者へのヒアリング、国内においては、原子力発電所および再処理事業者からヒアリングを行い、ガラス固化に資する廃棄物を整理し、本事業にて対象とする廃棄物を選定した。また、文献調査を行い、高充填化が見込める廃棄物組成および運転制御方法を選定し、一部の廃棄物組成については、 SiO_2 , Na_2O , B_2O_3 , Al_2O_3 の添加量に着目し熔融ガラス化の適用性試験を行った。
- ②現在、日本原子力研究開発機構が保有しているガラス組成および特性データとの連携を図る既存のデータベースや計算ソフトウェアを調査し、a. 熱力学平衡計算ソフト FactSage、b. 国際ガラスデータベース INTERGLAD、c. 統合型熱力学計算システム Thermo-Calc を抽出し利用方法および必要となる機能について整理した。
- ③ガラスマトリックスの調査において、開発シーケンスおよび評価項目を設定した。評価のフローとしては、熔融ガラス化の有効性を確認できる基本特性を評価する一次サーベイ、ガラス熔融炉の選定およびプロセス検討に必要な特性を評価する二次サーベイを行い、実用化に向けたガラス組成を設定する事とした。
- ④高レベル放射性廃液の高充填化については、現在、再処理工場にて使用している原料ガラスを一部改良し、ガラス化試験を行なった。具体的には、B/Si 比、バナジウム添加量、リン添加量に着目したガラスマトリックスにてるつぽ規模での試験を行ない、廃棄物充填率を5割上昇させた組成で、一部耐水性が劣るガラスがあったものの、高充填ガラスを作製できる見通しを得た。

（２）平成 27 年度の成果

①低レベル放射性廃棄物 6 種類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溶融ガラス化試験を実施した。具体的には、イオン交換樹脂、焼却灰、アルミニウム類、ホウ酸系濃縮廃液（2 種類）、有害物を含有する廃棄物にて溶融ガラス化が可能な見込みを得た。

また、上記廃棄物のガラス固化に適したガラス溶融技術を 2 種類選定した。具体的には、コールドクルーシブル処理技術、プラズマ溶融処理技術である。

②低レベル放射性廃棄物処分場へ埋設処分する際に想定される処分要件、評価項目・基準を設定した。具体的には、機械強度、ガラス密度、高温粘度等、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、平成 28 年度に実施する 1 次サーベイの基準値とした。

③データベースに要求される機能を抽出し、基本設計として登録する情報の構造的な整理、出力用グラフのイメージの検討、画面設計を行なった。また、既存のデータベースである INTERGLAD と連携可能なデータ形式に変換し、データエクスポートできるようデータ変換プログラミングに着手した。

④平成 26 年度の成果から、廃棄物充填率を 5 割程度向上できる組成の目処がついたため、平成 27 年度は耐水性の改善に着目し、ガラス組成の探索を行なった。具体的には、 B_2O_3 量を低下させ Al_2O_3 量を増加させる事により、 MoO_3 の溶解度を維持しつつ耐水性を向上させることが可能である事を確認した。

（３）平成 28 年度の成果

①低レベル放射性廃棄物 6 種類および高レベル放射性廃棄物に対して、物性や化学的安定性等を有するガラス組成の検討を実施した。本年度は、平成 27 年度の検討結果を基に、各廃棄物に対して、物性等を考慮してガラス組成の検討を進めるとともに、得られたガラス組成に対して、1 次サーベイ項目（粘度、化学的耐久性等）の評価を実施し、組成の絞り込みを行った。

②マトリックスデータベースに関して、モデルやコードに関する設計を行い、プロトタイプを作成した。また、本事業で検討されたガラスの組成・物性データの信頼性を向上させることを目的として、高信頼性データの要件を整理した。

③ガラス溶融炉の運転技術として、低レベル廃棄物については、バブリング技術を用いた適用性試験を行い、選定したガラス組成において、有効性を示した。

④ガラス溶融炉の運転技術として、高レベル廃棄物については、小型溶融炉を用いて高充填運転試験を行い、課題抽出を行った。

（４）平成 29 年度の成果

①低レベル放射性廃棄物 6 種類および高レベル放射性廃棄物に対して、均質性や化学的安定性等の向上を目指してガラス組成の改良を行った。また、ガラスの廃棄体（ガラス固化体）を貯蔵・処分する観点から設定した 2 次サーベイの項目の一部に対して、評価を行い、組成選定を行った。

②これまでに作成したプロトタイプマトリックスデータベースについて、信頼性の向上等を目的とした高度化、改良を行った。

③ガラス溶融炉の運転技術として、低レベル廃棄物については、選定されたガラス組成に対して、

熔融炉の運転を模擬した管状炉などを用いて、適用性の確認を行った。廃棄物を熔融し、均質なガラスを製造することが確認できたが、硝酸ナトリウムなどの一部の廃棄物においては、オフガスに移行を評価し、運転方法について課題抽出を行った。

④ガラス熔融炉の運転技術として、高レベル廃棄物については、小型熔融炉を用いて高充填運転試験を行い、課題抽出を行った。

（５）平成 30 年度の成果

①低レベル放射性廃棄物 6 種類および高レベル放射性廃棄物に対して、均質性や化学的安定性等の向上を目指してガラス組成の改良を行った。また、ガラスの廃棄体(ガラス固化体)を貯蔵・処分する観点から設定した 2 次サーベイの項目に対して、評価を行い、組成選定を行った。

②これまでに作成したプロトタイプのマトリックスデータベースについて、更なる信頼性の向上等を目的とした高度化、改良を行い、実用版を整備した。また、本事業で得られた成果を反映した。

③ガラス熔融炉の運転技術として、低レベル廃棄物については、選定されたガラス組成を用いて、炉の運転を模擬した試験を行い、処理速度やオフガス移行率の観点から運転方法を検討し、適用性を確認した。

④ガラス熔融炉の運転技術として、高レベル廃棄物については、小型熔融炉を用い、また、これまでに技術選定されたガラス原料の小粒子化やバブリングを用いて、高充填運転試験を行い、適切な運転方法を検討し、処理可能な見通しが得られた。

⑤事業で得られた減容に関する成果から、廃棄物を処分するまでの費用を算出し、その削減効果概算した。

（６）令和元年度から令和 6 年度の目標

令和 6 年度までに、燃料多様化に伴い発生する様々な高レベル放射性廃液の性状に応じて、高充填化に最適なガラス組成の選定・評価を行うとともに、高充填化を妨げる原因となる白金族元素の凝集やイエローフェーズの発生を抑制する技術等の開発を行う。あわせて、MA の分離技術として、抽出クロマトグラフィの安全性や工学的成立性を確保するための基盤技術を開発し、実用化に向けた見通し判断に必要な知見を取得する。

（４）事業終了後のアウトカム達成まで

本事業にて構築したプラットフォームを活用し、各事業者および各研究機関と連携し実用化に向けた基礎研究、スケールアップ試験等を行い、事業アウトカムを達成する。

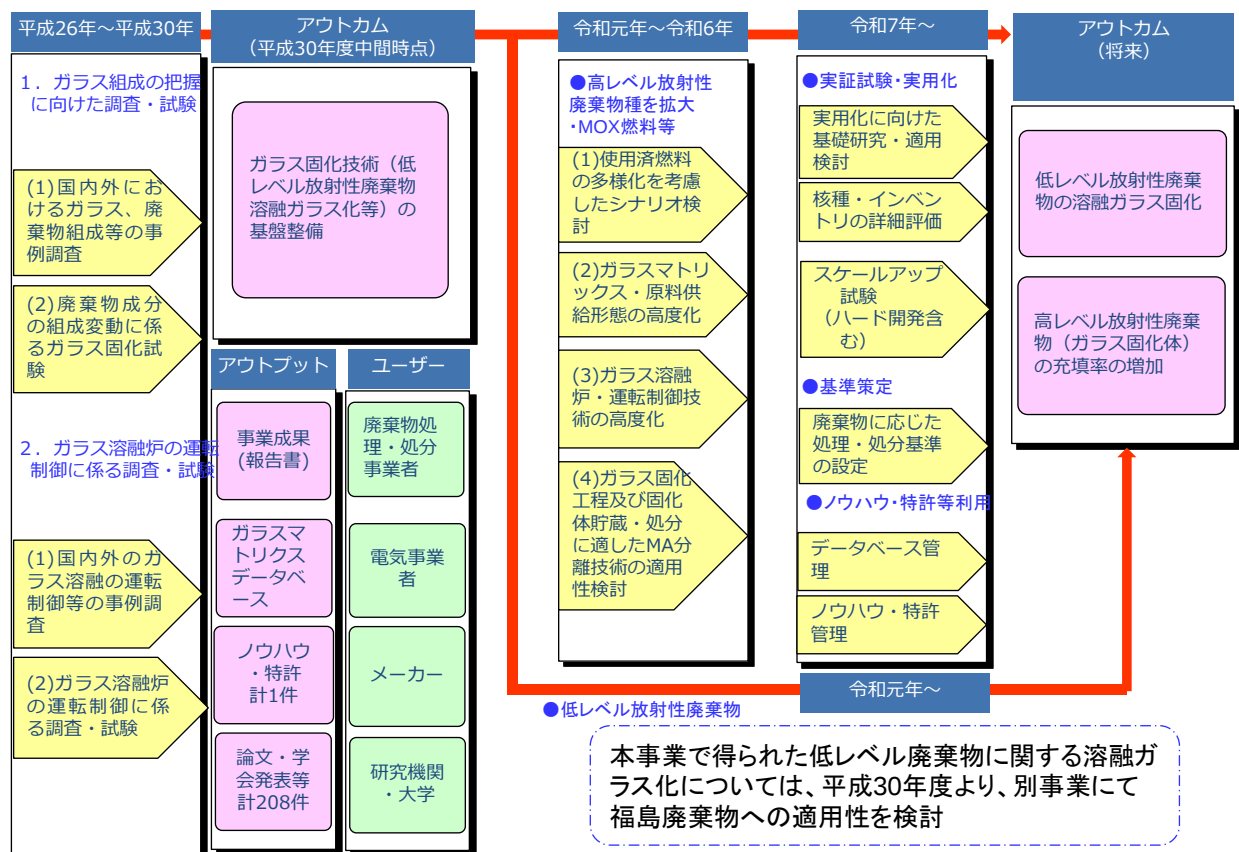


図4 アウトカム達成に向けたロードマップ

5. 研究開発の実施・マネジメント体制等

事業の実施に当っては、着実かつ有意義な研究成果を得るため、ガラス固化技術に精通している4社体制で共同受託し、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の協力のもと開発を実施している。また、外部から評価、助言を得るため有識者による研究評価委員会を2～3回/年開催し、当該委員会等での議論を事業に反映できる柔軟な実施体制を構築している。なお、事業の着実な推進ため、受託4社での月例会議（1回/月）を実施し、各研究の課題、フォローアップ等を行っている。開発に当っては、幅広い分野において大学との連携によりガラス固化の基盤的技術の高度化を実施している。

外部有識者（評価検討会）の所見を踏まえた改善点等（対処結果）

＜研究開発内容及び事業アウトプットの妥当性＞

- ・ 本事業においては、計画当初より安全性を確保するための試験・評価についても実施することとしており、本事業が国民の安全・安心に繋がるよう、引き続き着実な技術の進展を図った。
- ・ 本事業においては、これまでも海外の技術・動向を注視しながら実施してきており、引き続きこの取組みを継続するとともに、知的財産権の確保・ノウハウ管理を図った。

＜事業アウトカム達成に至るまでのロードマップの妥当性＞

- ・ 実証段階に向けた体制・仕組みづくりについては、低レベル放射性廃棄物においては、韓国水力・原子力発電から協業できるよう調整を図った。高レベル放射性廃棄物においては、再処理事業者を中心として、今後の事業の進捗を踏まえると共に関係事業者との調整を行いながら検討を進めている。

＜研究開発の実施・マネジメント体制等の妥当性＞

- ・ これまでの事業成果においては一定の成果を挙げており、現時点で実用化できる要素技術もあるが、エネルギー基本計画の改定も鑑み、燃料の変化に対応した安全かつ合理的な処理・処分の実現に向けて、さらに6年継続で基盤研究事業を進めることとした。

＜今後の研究開発の方向等に関する提言＞

- ・ 国が主導する固体廃棄物の処理・処分の研究開発プロジェクトの中で、福島事故により発生した廃棄物の処理方法に関する1案として、本技術の適用の検討が進められている。

8. 産構審評価ワーキンググループの所見及び同所見を踏まえた改善点等

外部有識者（産業構造審議会評価WG）の所見【前回中間評価時】

＜研究開発内容及び事業アウトプットの妥当性＞

- ・ 減容化とともに安全性を確保する技術の着実な進展を図ること。

＜事業アウトカム達成に至るまでのロードマップの妥当性＞

- ・ 多くの大学・機関が関係しているので、実証に向けた体制・仕組みづくりを早めに検討すること。

＜研究開発の実施・マネジメント体制等の妥当性＞

- ・ ノウハウや特許等の知財を確保し、将来の国際的なビジネス展開を視野に入れて、国際的な優位性を図ること。
- ・ 福島の廃棄物への適用の可能性を検討すること。

外部有識者（産業構造審議会評価WG）の所見を踏まえた改善点等（対処結果）

＜研究開発内容及び事業アウトプットの妥当性＞

- ・ 本事業においては、計画当初より安全性を確保するための試験・評価についても実施することとしており、本事業が国民の安全・安心に繋がるよう、引き続き着実な技術の進展を図っている。

＜事業アウトカム達成に至るまでのロードマップの妥当性＞

- ・実証段階に向けた体制・仕組みづくりについては、低レベル放射性廃棄物においては、韓国水力・原子力発電から協業できるよう調整を図った。高レベル放射性廃棄物においては、再処理事業者を中心として、今後の事業の進捗を踏まえると共に関係事業者との調整を行いながら検討を進めている。

＜研究開発の実施・マネジメント体制等の妥当性＞

- ・本事業においては、これまでも海外の技術・動向を注視しながら実施してきており、引き続きこの取組みを継続するとともに、国際的なビジネス展開が見込まれる技術的な成果が得られる場合には、積極的に知的財産権の確保・ノウハウ管理を図っていく。
- ・福島事故により発生した廃棄物へのガラス固化技術の適用の検討については、国が主導する固体廃棄物の処理・処分の研究開発プロジェクトの中で、処理方法に関する1案として検討が進められている。

【参考資料】

<事業成果（詳細版）>

1. 事業の目的・政策的位置付け

1-1 事業目的

我が国では手付かずの状況である低レベル放射性廃棄物等のガラス固化技術について、基盤技術を確立するものであり、ガラス固化に係る技術的課題等が把握されれば、今後、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処理方法を検討する際の一つの手法として評価することが可能となる。

また、当該事業により、ガラス固化技術の基盤が整備されることに伴い、高レベル放射性廃液のガラス固化技術も向上することが想定される。これにより、より多くの廃棄物を含有し、また安定的に取り込むことが可能になれば、ガラス固化体の発生本数ひいては最終処分場問題という国が前面に立つべき課題の解決にも資することとなる。

なお、平成 30 年 7 月に閣議決定された「エネルギー基本計画」においては、「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。」こと、「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。」こと、「使用済MOX燃料の処理の方策について、引き続き研究開発に取り組みつつ、検討を進める。」ことが明記されている。

2. 研究開発目標及び成果、目標の達成度

2-1 全体の目標設定

我が国では手付かずの状況である低レベル放射性廃棄物等のガラス固化技術について基盤を構築するため、事業終了時の目標を以下の3項目に設定する。

- ①放射性廃棄物について、ガラス固化体中への充填率や品質等の観点から有望なガラス組成を選定・開発できるプラットフォームを構築する。
- ②放射性廃棄物の高充填が可能な組成、熔融炉方式および運転制御方法を選定する。
- ③低レベル放射性廃棄物ガラス固化体については、本事業の成果を基に処分時の管理基準を提案する。

これらの目標を達成するため、本事業における中間目標、最終目標を表2-1に示す。

表2-1 全体の目標

目標・指標 (事後評価時点)	目標・指標 (中間評価時点)	設定理由・根拠等
(事業開始前) ①低レベル放射性廃棄物をガラス化できる組成を把握する。 ②低レベル放射性廃棄物をガラス化できる熔融炉の選定、運転方法を確立する。 ③過去の知見および本事業で得た知見を反映したデータベースを作成する。 ④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。	(中間評価時) ①低レベル放射性廃棄物の選定 ②低レベル放射性廃棄物をガラス化できる熔融炉を選定した。 ③データベースへ登録するデータの整理、基本設計を行う。 ④高レベル放射性廃液の充填率を2～3割以上向上できるガラスマトリックスを開発する。	各種廃棄物組成に適したガラス組成を短期間で開発できるよう、過去の知見、一般産業界で利用されているソフトウェアと連携したデータベースを作成し、開発プラットフォームを構築することを目標とし、必要な情報の調査・検証を行う。 高レベル放射性廃棄物の減容化の一環として、核燃料再処理工場にて発生する高レベル放射性廃液について、ガラス固化体中への廃棄物充填量を向上させる事によりガラス固化体の発生本数を低減させるための技術開発を目標とし、高充填化に適したガラスの開発、熔融炉運転技術を確立する。

2-2 各個別要素技術開発の目標、成果、目標の達成度

2-2-1 ガラス組成の把握に向けた調査

表 2-2-1 個別要素技術の成果、目標の達成度

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	①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。	①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	①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。	①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: 11 項目	達成
データベースの作成・管理	①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。	①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	①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。	①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

2-2-2 ガラス組成の把握に向けた試験（低レベル放射性廃棄物の溶融ガラス化の開発）

表 2-2-2 個別要素技術の成果、目標の達成度

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	①多くの低レベル放射性廃棄物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。 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。	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。 a. イオン交換樹脂：充填率約 35wt% b. 低レベル放射性濃縮廃液：充填率約 30wt% c. 焼却灰：充填率約 75wt% d. スラッジ混合物：充填率約 21wt% e. HEPA フィルタ：充填率約 25wt% 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%	達成
溶融除染スラグに対する溶融ガラス化の検討	①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。	①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	①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。	①コバルト等を吸着分離可能な多孔質ガラスの組成、製造条件を確認した。	達成

2-2-3 ガラス組成の把握に向けた試験（高レベル放射性廃液ガラス固化の高度化）

表 2-2-3 個別要素技術の成果、目標の達成度

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	① 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。 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	a. $\text{SiO}_2/\text{B}_2\text{O}_3=1.75$(mol 比) かつ Al_2O_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。 b. バナジウムを添加しアルカリ比を $0.22\sim0.27$(mol/mol) にすることで、廃棄物充填率 20wt% を達成。Mo 溶解度も向上する見通しを得た。 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。	達成
代替ガラスの調査	① 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。	a. 鉄リン酸ガラス ・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。 b. ガラスセラミックス化 ・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	① ガラス固化技術を応用した新しい概念を検討する。	① 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。	達成
ガラス組成の選定 (多種燃料)	① 平成 30 年度までに開発したホウケイ酸ガラス組成をベースに、燃料多様化に伴い発生する様々な種類の高レベル放射性廃液に適用可能なガラス組成の開発を実施する。		

	②アルカリ廃液をより多く安定的に固化可能なガラスマトリックスについて検討する。		
原料供給形態の改良 (多種燃料)	①ガラスマトリックスの改良で検討した組成に対して、原料ガラスのスラリー化や、比表面積が大きいガラスなど、原料供給形態の変更による影響を調査し、物質移動の促進やYP抑制などの効果を確認する。		
構造解析によるガラスの健全性評価 (多種燃料)	①近距離～長距離の視点で段階的にガラス構造の解析を行い、ガラス組成や製造条件による違いを明確化し、ガラス固化技術高度化のために資するデータとして蓄積する。		

2-2-4 ガラス溶融炉の運転制御にかかる調査・試験

表 2-2-4 個別要素技術の成果、目標の達成度

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	①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。	①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。 【溶融方式】 a. コールドクルーシブル処理 b. プラズマ溶融処理 ②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	①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。	①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。 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	①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。	①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	①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。 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	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 8 μ 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。	達成

		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。	
ガラス溶融炉の高度化	・廃液多様化への対応 濃度変化等の廃液多様化に対応したガラス溶融炉を開発するために必要な課題抽出を行う。 ・溶融炉の調査・検討 溶融炉や耐火物の調査を行い、適用性について検討を行う。		
センシング技術の開発	ガラスと仮焼層の構造情報を得るために、計測技術を調査し電気化学的センシング等の手法を検討する。		
運転技術の高度化	白金族元素の形態と沈降等のメカニズムを解明および廃液中の Na 量の低減、廃液供給方法の変更等の高度化により、白金族元素の沈降やイエローフェーズの生成を抑制しプロセスを安定化する。		

2-2-5 使用済燃料の多様化を考慮したシナリオ検討および

ガラス固化工程及び固化体貯蔵・処分に適した MA 分離技術の適用性検討

表 2-2-5 個別要素技術の成果、目標の達成度

要素技術	目標・指標(中間評価)	成果	達成度
国内外のシナリオ調査	フランスを中心に原子力利用及び燃料サイクル・処分に關する研究・事業を調査し、先行事例としてシナリオ検討・検証に反映させる。		
シナリオ検討	サイクル条件の多様性を考慮した評価システムを構築し、地層処分と整合的な技術オプションシナリオを提示する。		
シナリオ検証	関連技術の開発成果や原子力利用及びサイクル・処分事業の進捗を考慮することでシナリオを検証し、地層処分の負荷低減を提示すると共に、サイクル全体の課題を抽出する。		
MA 分離フローシートの構築	①供給液組成の変動による分離回収製品への影響評価を行う。 ②上記に必要となるシミュレーションコード用インプットデータ整備する。		
MA 分離技術の安全性評価	①微粒子の流入防止のために、遠隔操作性に優れたフィルター概念の提示を行う。 ②吸着材放射線劣化生成物の同定を行う。 ③吸着材物性に及ぼす造粒条件の影響を把握する。 ④吸着材の再生方法、分解・		

	減容方案を提示する。		
MA 分離システム開発	⑤分離塔流出液の迅速分析手法、制御フロー案を提示する。 ⑥良好な耐久性を備えた装置機器概念を具体化する。		

2-2-6 ウラン分離・回収技術の開発

表 2-2-6 個別要素技術の成果、目標の達成度

要素技術	目標・指標(中間評価)	成果	達成度
スラッジ類の性状把握 及び類型化	合理的な処理方法の開発のため、スラッジ類の分析を通して後段の処理の簡略化に必要な類型化を行う。		
ウラン回収試験の必要に応じたコールド及びホット試料の作製	スラッジ類の分析結果を踏まえ、後段のウラン回収試験に必要な模擬スラッジ(コールド)及び浸出液(ホット)等を作製する。		
ウラン前処理技術の開発	ウランの浸出を効果的に実施する為に浸出前のスラッジ処理方法を検討する。		
ウラン浸出方法の検討	ウランの分離・回収に効果的な浸出方法を検討すると共に、その成分を把握し、後段の回収試験に情報を提供する。		
ウラン回収技術の開発	共存化学種やウラン濃度に分離性能を左右されにくいプロセスの開発を行う。		
処理液再利用または分解技術の開発	処理液の再利用または分解技術を開発し、廃棄物の発生量の低減を図る。		
有害物・化合物の把握	・スラッジ状廃棄物の固化試験のための性状把握を行う。 ・合理的な処理対策の検討のための情報取得およびスラッジの類型化を行う。		
有害物を含む廃棄物の安定固化技術の開発	有害物を含む多種多様なスラッジの固化に対応でき、かつ固化材の添加量をできる限り低減したプロセスを開発する。		

2-3 研究開発成果：学会発表状況

学会発表は日本原子力学会春の年会および秋の大会、ガラスおよびフォトンクス材料討論会、Asian Nuclear Prospects2016 (ANUP2016)、GLOBAL2017、ICG Annual meeting 2018 等、国内外の様々な会議において本事業の PR および成果について発表を行い、原子力業界だけでなくガラス産業界においても当事業について関心がもたれている。また、論文投稿を 16 件行い、当事業の PR を行なっている。

表 2-3 学会発表状況

	学会発表数	投稿論文数
平成 26 年度	7 件	1 件
平成 27 年度	40 件	1 件
平成 28 年度	51 件	4 件
平成 29 年度	56 件	7 件
平成 30 年度	38 件	3 件
合計	192 件	16 件

1)学会発表内容

①日本原子力学会 2015 年春の年会

日時:平成 27 年 3 月 21 日

会場:茨城大学 日立キャンパス

発表テーマ:次世代再処理ガラス固化技術基盤研究事業

- (1)基盤研究事業の全体計画について
- (2)低レベル廃棄物に対する溶融ガラス化の検討
- (3)コンビナトリアル手法による高充填減容固化用ガラスマトリックス組成の探索
- (4)仮焼層における白金族の結晶生成挙動
- (5)溶融ガラスにおける白金族の沈降挙動

②第 56 回ガラスおよびフォトンクス材料討論会

日時:平成 27 年 11 月 12 日

会場:愛知県産業労働センター ウィンクあいち

発表テーマ:放射性廃棄物の高充填減容固化のための簡素化組成模擬ガラスの耐水性評価
ーホウ素とナトリウムの含有量の影響ー

③Asian Nuclear Prospects 2016(ANUP2016)

日時:平成 28 年 10 月 26 日

会場:東北大学 川内キャンパス

発表テーマ:Development of Glass Melting Process for LLW

-Glass Formulation Testing to be Compatible with Composition Changes-

④GLOBAL2017 International Nuclear Fuel Cycle Conference

日時:平成 29 年 9 月 25 日

会場:Sheraton Grande Walkerhill (Seoul, Korea)

発表テーマ:Development of High Waste Loading Glasses

⑤ICG2018 Annual Meeting 2018

日時:平成 30 年 9 月 25 日

会場:パシフィコ横浜

発表テーマ:The outline of 'Basic Research Programs of Vitrification Technology
for Waste Volume Reduction'

他 183 件

2)論文投稿内容

①電気硝子工業会「電気ガラス」

論文件名:次世代再処理ガラス固化技術基盤研究事業について

②日本原子力学会バックエンド部会誌「原子力バックエンド研究」

論文件名:次世代再処理ガラス固化技術基盤研究事業の全体概要について

③(一社)ニューガラスフォーラム機関紙「NEW GLASS」

論文件名:我が国における放射性廃棄物ガラス固化の状況

④Journal of Non-Crystalline Solids

論文件名:Thermal conductivities of alkali-silicate and calcium-alkali-silicate melts

他 12 件