

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
中間評価

評価用資料

2022 年 11 月 21 日

経済産業省 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

(事業の目的等)

事業名	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		
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		
事業の目的	我が国では、資源の有効利用、高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減等の観点から使用済燃料を再処理し、回収されるプルトニウム等を有効利用する核燃料サイクルの推進を基本的方針としている。回収されたプルトニウムは MOX 燃料に加工されプルサーマル発電に使用されるが、これによって発生する使用済 MOX 燃料の再処理過程で発生する高レベル放射性廃液には、使用済ウラン燃料のそれと比べ、長寿命で発熱性の高い核種（マイナーアクチニド（MA））が多く含まれる。さらに、使用済 MOX 燃料から発生する再処理廃液には、不純物（白金族元素）量の増加も挙げられ、より高い不純物を含むガラス固化プロセスが必要と考えられる。 また、燃料加工施設等のウラン取扱施設から発生するウラン廃棄物についてもウラン濃度が高い場合、高レベル放射性廃棄物と同様に地層処分の必要性が発生する。これをなるべく抑制するために、ウラン廃棄物のうちウラン濃度の比較的高いものからウランを分離・回収することにより地層処分の処分施設に与える負荷を軽減する必要がある。 これらの理由により、本事業では処理・処分にあたっての長期的なリスク低減の観点から放射性廃棄物の減容化・有害度低減に資するため、下記の取組を実施するものである。 A. ガラス固化技術の基盤整備（2014～2024 年度） B. ウラン分離・回収技術の開発（2019～2024 年度） なお、本事業においては A, B 以外に、下記の C, D にも取り組んでいるが、C は 2021 年度に開始したこと、D は 2017 年度終了した事業であり終了時評価を実施していることから、本評価の対象外とする。 C. 使用済 MOX 燃料処理技術の基盤整備（2021～2024 年度） D. 低レベル放射性廃棄物の除染方法の検討（2014～2017 年度）		
類型	複数課題プログラム / 研究開発課題（プロジェクト） / 研究資金制度		
実施時期	2014 年度～2024 年度（11 年間）	会計区分	一般会計 / エネルギー対策会計

評価時期	事前評価：2013年度、中間評価：2016, 2019, 2022年度、終了時評価：2025年度					
実施形態	(1) 国 → (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(委託) (2) 国 → (一社) 新金属協会(委託) (3) 国 → (国研) 日本原子力研究開発機構(委託) (4) 国 → 日本原燃(株), (国研) 日本原子力研究開発機構(委託) (5) 国 → (国研) 日本原子力研究開発機構, 原子燃料工業(株)(委託)					
プロジェクトリーダー	(1) 薄井 康史 (株) IHI 原子力 SBU システム設計部 部長 兼平 憲男 日本原燃(株) エンジニアリングセンター プロジェクト部長 (2) 近藤 敏 (一社) 新金属協会 専務理事 (3) 佐々木 紀樹 (国研) 日本原子力研究開発機構 バックエンド統括本部 バックエンド推進部 技術主席 (4) 新津 好伸 日本原燃(株) 技術管理部長 竹内 正行 (国研) 日本原子力研究開発機構 高速炉・新型炉研究開発部門 核燃料サイクル設計室 室長 (5) 植地 保文 (国研) 日本原子力研究開発機構 核燃料・バックエンド研究開 発部門 人形峠環境技術センター 環境保全技術開発部 部長 青木 豊和 原子燃料工業(株) 燃料技術部 グループ長					
執行額 (百万円)	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	総執行額	総予算額
	730	780	809	395	5,289	5,575
	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度		
	368	641	654	912		

1. 本事業の政策的位置付け/背景

原子力発電所から発生する使用済燃料及び核燃料サイクル施設から発生する放射性廃棄物は長期にわたって安全に管理し、適切に処理・処分する必要がある。また、処理・処分にあたっては長期的なリスク低減の観点から放射性廃棄物の減容化・有害度低減が重要である。

令和 3 年 10 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 2030 年代後半の技術確立を目途に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。

本事業においては、平成 26～30 年度にかけて低レベル放射性廃棄物ガラス固化技術の基盤整備を進めてきた。この中で培われた技術は高レベル放射性廃棄物、特に第 6 次エネルギー基本計画において 2030 年代後半の技術確立を目指すこととしている使用済 MOX 燃料の処理・処分に反映できると考えられる。具体的には、これまで開発してきた様々な低レベル放射性廃棄物に対するガラス組成の最適化技術及びガラス熔融炉の運転制御技術を活用して、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。

また、ウラン燃料加工施設等から発生するウラン廃棄物については、スラッジ状廃棄物のように放射能濃度の比較的高い廃棄物は地層処分も想定されるため、処分場を圧迫することが懸念される。そのため、ウラン廃棄物からウランを分離・回収することで、放射能濃度を低減した後、安定的に固化する技術を開発することで廃棄物発生量の低減に資する。

これらを踏まえ、本事業では下記の取組を実施することにより、核燃料サイクル施設等から生じる様々な種類の放射性廃棄物の最終処分等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ものである。

- A. ガラス固化技術の基盤整備
- B. ウラン分離・回収技術の開発

2. 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や核燃料サイクル施設等から発生する廃棄物は、事業者には処分責任があるものの、多種多様の廃棄物に適した処理・処分方法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。

使用済 MOX 燃料等の再処理により発生する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。また、ウラン廃棄物の減容化・

有害度低減技術については、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、今後の核燃料サイクル施設等の廃止措置の円滑化にも資するものである。

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。

3. 国内外の類似・競合する研究開発等の状況

2020 年 1 月以降、国内の原子力発電所から約 21 トンの使用済 MOX 燃料が取り出されており、今後、プルサーマル炉 1 基当たり年間約 5 トン程度が継続的に発生する見込みであることから、これらを再処理するための技術基盤の整備は喫緊の課題となっている。海外では、フランス、ドイツ、ロシア及びイギリスで、使用済 MOX 燃料の再処理をおこなった実績があり、特にフランスは、わが国と同様に使用済燃料の再処理を行い、回収されたプルトニウムを MOX 燃料として発電に用いている。さらに、再処理時に発生した高レベル廃液をガラス固化し、地層処分を行う計画である等、原子力に関する基本的な枠組みをわが国と共有しており、現在でも様々な研究開発が実施されている。

一方、ウランの分離・回収技術については、韓国で燃料製造過程において発生するウランスクラップからウランを回収し再利用する工程の開発が行われており、回収工程に炭酸塩抽出を利用している。回収技術はフランス、アメリカ、ロシア等でもモノアミドによる溶媒抽出、イオン交換法及びフッ化物揮発法といった様々な研究がされており、回収率、廃棄物発生量及びコストといった観点からもそれぞれ特徴を有していることから、適用先の条件を踏まえ適切に選定する必要がある。

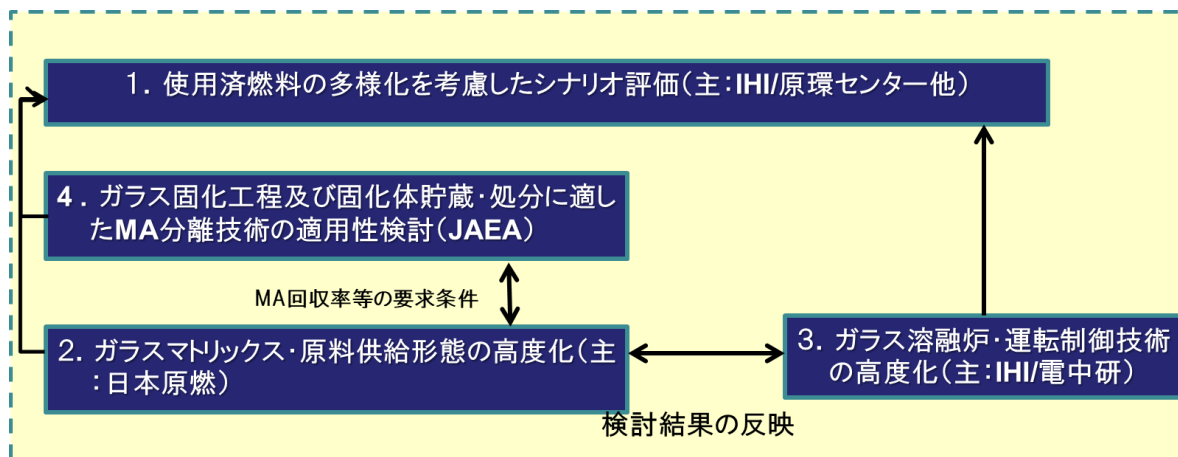
A. ガラス固化技術の基盤整備

A-4. 研究開発の内容

A-4-1 研究開発の全体構成

研究開発項目		実施者
(1) 使用済燃料の多様化を考慮したシナリオ評価	① シナリオ検討	(株) IHI、日本原燃(株)、(一財) 電力中央研究所、 (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター
(2) ガラスマトリックス・原料供給形態の高度化	① ガラス組成の選定	(株) IHI、日本原燃(株)、(一財) 電力中央研究所、秋田大学、東京工業大学、九州大学、東北大学、愛媛大学、八戸工業高等専門学校、岩手大学、弘前大学、熊本大学
	② 原料供給形態の改良	(株) IHI、(一財) 電力中央研究所、東京工業大学、秋田大学、名古屋大学
	③ 構造解析によるガラスの健全性評価	(国研) 日本原子力研究開発機構、立命館大学、弘前大学
(3) ガラス溶融炉・運転制御技術の高度化	① ガラス溶融炉の高度化	(株) IHI、日本原燃(株)、(一財) 電力中央研究所、東京都市大学
	② センシング技術の開発	(株) IHI、(一財) 電力中央研究所、埼玉大学、中部電力(株)
	③ 運転技術の高度化	(株) IHI、日本原燃(株)、(一財) 電力中央研究所、埼玉大学
(4) 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	① MA 分離フローシートの構築	(国研) 日本原子力研究開発機構、芝浦工業大学、東北大学、東京工業大学
	② MA 分離技術の安全性評価	(国研) 日本原子力研究開発機構、大川原化工機(株)、芝浦工業大学、東北大学、茨城大学
	③ MA 分離システム開発	(株) IHI、(国研) 日本原子力研究開発機構、東京工業大学

本事業では、使用済 MOX 燃料等の多様な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棄物の減容化・有害度低減に向けたガラス固化技術の開発に取り組み、最終処分場の負荷低減を目的とし、高レベル放射性廃液からマイナーアクチニド（以下、「MA」という。）を分離し、技術の実証化の見通しを得ることを目標としている。処分場を考慮したシナリオ検討は、国内処分場に精通する（公財）原子力環境整備促進・資金管理センター及び処分時に必要となるガラス固化体性状に精通する（株）IHI が主として担当し、ガラスマトリックス・原料供給形態の高度化においては、ガラス固化体を製造する再処理工場事業者でもある日本原燃（株）が担当する。また、ガラス溶融炉の運転制御技術については、国内での溶融炉製造実績がある（株）IHI 及びこれまで電力会社の知見として再処理技術をつみ重ねた（一財）電力中央研究所が担当する。さらに、MA 分離技術は、将来の原子力研究を長きにわたり実施してきた（国研）日本原子力研究開発機構が担当する。



A-4-2 各研究開発項目の実施内容

(1) 使用済燃料の多様化を考慮したシナリオ評価

①シナリオ検討

今後、MOX 燃料や高燃焼度燃料といった使用済燃料が多様化した場合、ガラス固化体や地層処分場の処分場への影響因子に変動が予想される。具体的な例として、多様化した使用済燃料には、発熱量の高い MA、ガラス溶融工程で悪影響を及ぼす白金族元素やイエローフェーズ（以下、「YP」という。）形成成分が多く含まれることが想定されるため、海外での事例等を参照しつつ、MOX 燃料等の再処理によって発生する高レベル放射性廃液の組成及びガラス固化条件等を検討する。

また、地層処分の処分場面積の負荷低減を図るため、MA の分離を含む複数の核燃料サイクルシナリオを調査し、ガラス固化体への廃液の充填率の最適化条件や MA の分離等の技術オプションの効果と開発目標を検討する。

こうした検討結果を通して、使用済燃料の多様化を踏まえたガラス固化時の課題及び対策等を検討する。

（２）ガラスマトリックス・原料供給形態の高度化

使用済 MOX 燃料や使用済高燃焼度燃料から取り出される高レベル放射性廃液を対象として、ガラス固化体への閉じ込め性能の向上を目的としたガラス化技術の開発を行う。

①ガラス組成の選定

平成 30 年度までに開発したホウケイ酸ガラス組成を改良し、模擬廃液による溶融試験を行い、YP の発生過程や廃棄物の溶解挙動に関わる基礎検討を行う。検討結果を踏まえ、対象となる放射性廃液をより多く安定的に取り込めるガラス組成を開発する。

②原料供給形態の改良

供給するガラス原料と高レベル放射性廃液の接触面積を増やすことでよりガラス化反応が促進されることが想定される。開発したガラス組成に対して、溶融試験等を実施し、供給するガラス原料の形態を従来のビーズからスラリー、粉末等に変更することによる影響を原料の合理的な製造方法を含め調査する。こうした取組を通じて、廃液のガラスへの移行速度、YP の形成成分の発生を抑制する効果、白金族元素の形状決定因子や原子価、沈降挙動等の基礎物性を解明し、各原料供給形態の効果を比較検証することで、最適な原料供給形態を開発する。

③構造解析によるガラスの健全性評価

開発したガラスマトリックスや原料供給形態について構造解析を行うことで、そのガラスがもつ効果や影響に関する物理的な原理を確認する。具体的には、廃液成分とガラスの反応する際の挙動解明、ホウ素同位体を使用したガラスによる分相や分散・凝集の評価を進める。また、応力ひずみ解析による機械的性質導出と XAFS（X 線吸収微細構造解析）をはじめとする構造解析手段を連携させ、健全性評価技術の確立を進める。

（３）溶融炉・運転制御技術の高度化

多様化した使用済燃料から再処理して得られる高レベル放射性廃液は、従来の使用済燃料と比べて組成が大きく変わるため、ガラス溶融工程に求められる要求も変わることが想定される。使用済燃料の多様化に伴って必要となるガラス溶融技術の検討及び開発を行う。

①ガラス溶融炉の高度化

多様化した使用済燃料由来の高レベル廃液をガラスに高充填することを想定した際の、ガラス溶融炉の設計を含むガラス固化技術の概念検討を行う。具体的には、白金族元素の濃度やオフガスの発生量が増大した場合の仮焼層の制御設備の検討や内壁レンガの耐食性等の試験を行うことで、今後想定されるガラス溶融炉に求められる機能やガラス溶融技術等の検討を行う。

②センシング技術の開発

目視が困難な炉内の状態を把握する技術を開発することで、ガラスと仮焼層の構造情報を取得する。また、炉内の温度計測技術等の高度化に向けた調査を行うとともに、有望な技術について

適用性の検討を行う。さらに、ガラスと仮焼層中の温度と電気化学的情報を調べるためのプローブを検討する。

③運転技術の高度化

添加物の調整や廃液の供給方法といった運転方法を改良し、ガラス溶融工程に悪影響を及ぼす放射性物質の抑制方法を検討することで、現行炉への応用を含めたガラス溶融技術の開発を行う。具体的には、仮焼層状態を把握するモニタリング技術と推定ツールの作成のために必要な種々の廃液条件における熱量データ等の取得・蓄積等を行う。また、開発した技術を用いて、処理能力向上、運転性、制御性の向上を目的とした、運転制御・方法の高度化の検討を行う。さらに、アルカリ廃液と高レベル濃縮廃液を別々に処理するための運転技術の検討を行う。

(4) 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

主に MOX 燃料由来の高レベル放射性廃液には、従来の廃液と比べて、MA が多く含まれる。発熱量が高い MA はガラス固化体の発生量や処分場面積を増大させることが想定されるため、これを分離するための技術開発を行う。

①分離フローシートの構築

MA 分離の性能を踏まえ、システム全体の装置フロー確立のため、ロバスト性を有する分離フローシートの設計として、MA+Ln（ランタニド）回収用吸着材及び MA/Ln 分離用吸着材を用いた各種元素の吸着溶離挙動評価試験により、使用済 MOX 燃料等から発生する廃液を処理するためのフローシート条件を具体化する。また、分離条件の最適化に向け、吸着材のポリマー被覆条件の改良を進める。製品品質の予測（シミュレーション）技術開発として、吸着材の劣化挙動を反映した計算コードの構築に着手するとともに、計算パラメータの精密化のためのデータの取得を進める。あわせて、前段の溶媒抽出プロセスに係る MA の挙動評価として、抽出計算コードを用いたネプツニウム抽出挙動について評価を行う。

②分離技術の安全性評価

分離技術に必要な装置の安全機能実現のため、微粒子の流入防止技術開発として、充填層型フィルタを用いた微粒子捕捉試験等により捕捉条件を具体化する。また、吸着材の放射線による劣化生成物への安全対策として、MA+Ln 回収用吸着材及び MA/Ln 分離用吸着材を対象に、劣化試験及び劣化物の分析等により吸着材の放射線劣化メカニズムを推定する。さらに、分離塔内の流れの抵抗低減技術の開発として、造粒条件の最適化に向け、通液条件等をパラメータとした造粒試験を実施し、製品粒子の各種物性評価を行う。また、使用済吸着材の処理技術の開発として、再生不可となった吸着材の処理方法を検討し、実験的に確認する。

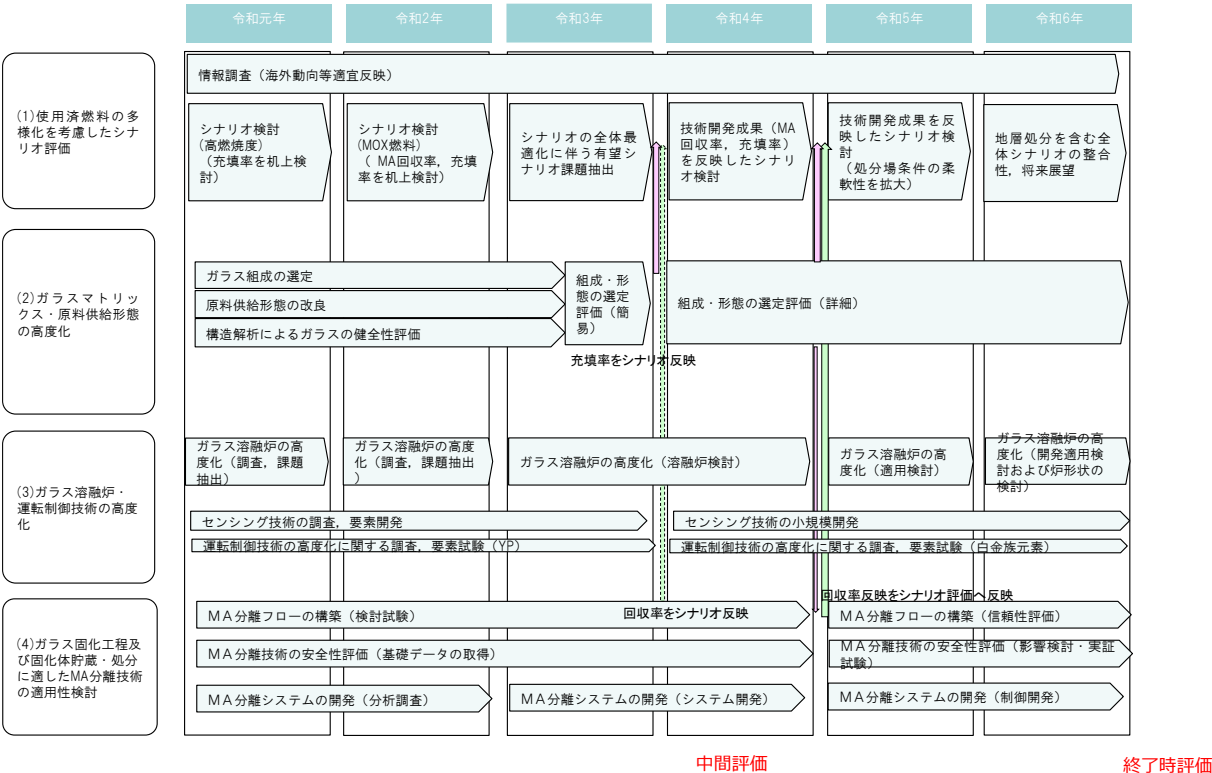
③分離システムの開発

分離システムが正しく運転できていることを監視するため、出口液のモニタリング、運転制御技術の開発として、インライン分析への適用に有望と考えられる熱レンズ計測を対象に、運転制御用の分析に要求される速度を検討するとともに、これを達成するための制御システムフローを

構築する。また、分離性能維持のための装置の耐久性向上を目的として、耐久性を向上すべき機器として選定した送液ポンプ中のダイヤフラムの候補となり得る各種材料を対象とした劣化試験を実施し、耐久性向上に向けた各種物性データや劣化機構の評価、比較を行う。

A－5．研究開発の実施・マネジメント体制等

A－5－1 研究開発計画



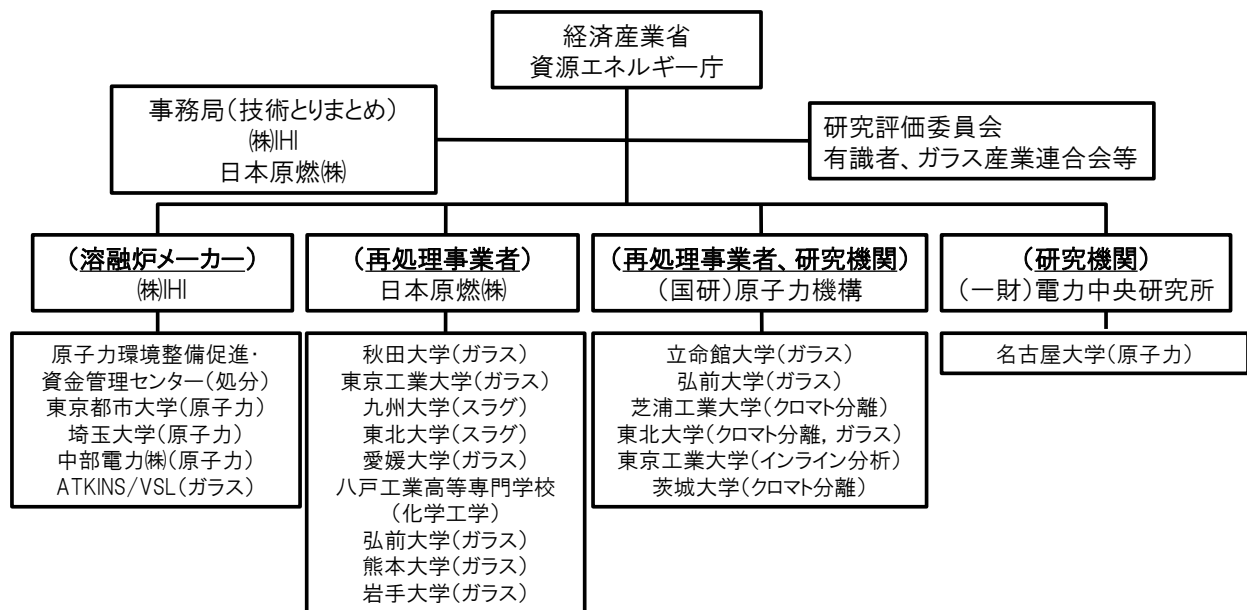
A－5－2 資金配分

(単位：百万円)

研究開発項目	2019年度	2020年度	2021年度	合計
ガラス固化技術の基盤整備	597 (委託)	601 (委託)	607 (委託)	1,805 (委託)

A－5－3 研究開発の実施・マネジメント体制

ガラス固化技術に精通している4社体制で共同受託しており、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2～3回開催）している。ガラス産業・鉄鋼・原子力等を専門とする研究機関及び企業が協力機関として参画している。



A-5-4 知財や研究開発データの取扱い

本開発の円滑な実施及びその成果を効率的に活用するために、必要な知的財産の取扱いについて「知的財産権及びデータの取り扱いについての合意書（知財合意書）」で定めている。この知財合意書にもとづき知財運営委員会を設置し、知的財産や研究開発データの取扱いについて審議することとしている。

受託者の承認を得ることなく、本開発で得られた研究開発データは第三者に開示や漏洩をしてはならないとしているが、知財運営委員会の承認が得られた研究開発データについては、広範な利活用を促進するように努めている。本開発で得られた成果は、公開可能なデータであり、各事業者が有効に活用できるように、適宜、学会発表等を実施している。

A-6. 事業アウトプット

A-6-1 研究開発目標

研究開発項目		中間目標 (2021 年度)	最終目標 (2024 年度)	設定（変更）理由
(1)使用済燃料の多様化を考慮したシナリオ評価	① 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。	本事業で開発されるガラス素材、MA 分離技術を反映した評価検討を行い、地層処分シナリオを提示する。	サイクル多様性を考慮したガラス固化技術、MA 分離技術を横断的に取り込むことで、合理的なシナリオを構築することができるため。

(2) ガラスマトリックス・原料供給形態の高度化	① ガラス組成の選定	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。 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。	各候補ガラス組成の物性取得により、運転性及び耐久性を評価し、候補組成を選定する。 アルカリ廃液中の工程添加物影響を検討し、適用性を評価する。 リン酸ジブチル対策技術のスケールアップ等の検討を行う。	ガラス組成を実用的に活用するにあたり、利用しやすいデータを取得でき、また、アルカリ廃液の処理に対する実用的な評価を行うため。
	② 原料供給形態の改良	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。	YP 抑制性と仮焼層安定形成の観点で、最適な原料形状や組成の異なる複数の原料ガラスを組み合わせることで原料供給形態を検討する。	原料供給形態について YP 抑制の効果を検討し、効果的な形態を選定することが可能となるため。
	③ 構造解析によるガラスの健全性評価	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。	構造解析から、最適なガラス組成及び健全性を評価するとともに、指標とするために、構造と物性の相関解析を進める。	ガラス組成を検討するにあたり、構造の観点から評価することが可能となる。
(3) ガラス溶融炉・運転制御技術の高度化	① ガラス溶融炉の高度化	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。 溶融炉や耐火物の調査を行い、適用性について検討を行う。	ガラス組成の選定及び原料供給形態の改良で開発された素材を用いて小型炉による試験評価を行う。 廃液の多様化におけるガラス溶融炉の概念を検討する。	実験室規模から、スケールを大きくし、連続運転としての評価が可能となり、その際の課題抽出ができるため。

	② 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。	電気プローブを組み合わせ、小型炉試験を行い、仮焼層構造を検知できることを示す。 溶融炉内の電位測定から、炉内の温度や白金族の分布を推定する。	センシング技術を溶融炉で使用する際の課題を抽出し、装置に反映するため。
	③ 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の解明及び廃液中の 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 YP の生成を抑制しプロセスを安定化する。	白金族元素の形状決定因子を詳細に解明し、また沈降を促進するメカニズムを解明して沈降抑制策を検討する。	白金族元素のメカニズム解明により、溶融炉運転時の要因を分析できるため。
(4) 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	① MA 分離フローシートの構築	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。 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を整備する。	MA 分離フローシートのホット実証により、供給液の組成変動による影響を明らかにする。 シミュレーションコードによる製品品質の予測精度を向上させる。	MA 分離の装置性能、必要分離性能について、評価することができるため。
	② MA 分離技術の安全性評価	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概念の提示を行う。 吸着材の放射線による劣化生成物の同定を行う。 吸着材物性に及ぼす造粒条件の影響を把握する。 吸着材の再生方法、分解・減容方案を提示する。	充填層型フィルタの遠隔保守性を実証する。 劣化生成物に対する安全対策を具体化する。 分離塔からの排熱、排ガス特性を確認する。 使用済吸着材の再生及び処理技術を実証する。	装置の安全性向上につなげることができるため。

	③MA 分離システム開発	分離塔流出液の迅速分析手法、制御フロー案を提示する。 良好な耐久性を備えた装置機器概念を具体化する。	連続試験により計装システムの適用性を実証する。 連続試験により対象機器の耐久性を実証するとともに交換頻度を提示する。	MA 分離システムの運用を目的とした評価が可能となるため。
--	--------------	---	---	-------------------------------

A-6-2 研究開発の成果

研究開発項目		中間目標 (2021 年度)	成果・意義	達成 状況	未達の原因分析/ 今後の見通し
(1) 使用済燃料の多様化を考慮したシナリオ評価	①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。	高燃焼度化等のサイクル条件の多様性を考慮したガラス固化体の評価システムを構築し、地層処分の処分場面積を最小化するための高充填化やMA分離といった技術オプションシナリオの最適化を提示した。	達成	本事業で開発されるガラス素材、MA 分離技術を反映した評価検討を行い、地層処分シナリオを提示する。
(2) ガラスマトリックス・原料供給形態の高度化	①ガラス組成の選定	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。 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。	平成 30 年度までに開発したガラス組成を改良し、高燃焼度燃料向け原料ガラスの候補組成を見出した。高燃焼度燃料向けの候補組成を基に、MOX 燃料向け原料ガラスの組成探索を実施し、目標充填率を達成可能と考えられる組成範囲を見出した。 アルカリ廃液に対して、より多くの廃棄物を取り込めるガラスマトリックス組成を検討し、ガラス化可能であることを確認した。	達成	各候補ガラス組成の物性取得により、運転性及び耐久性を評価し、候補組成を選定する。 アルカリ廃液中の工程添加物の影響を検討し、適用性を評価する。 リン酸ジブチル対策技術のスケールアップ等の検討を行う。

			リン酸ジブチル対策として触媒水熱分解、パルス放電分解法、微粒子消泡技術のビーカーレベルでの有効性を確認し、錯体構造等に関する知見を得た		
	②原料供給形態の改良	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。	現行組成の原料ガラスを従来のビーズ形状から多孔質ビーズ、ブリケット（ガラス粉末の集合体）及びカートリッジ（ガラス繊維の集合体）に変更し、比表面積を大きくすることで、廃液成分と原料ガラスの反応が促進され、YP の形成量が減少することを確認した。また、形状ごとに廃液と原料ガラスの混合状態が変化するため、仮焼層の形成状態や溶け込み速度が変化することを確認した。	達成	YP 抑制性と仮焼層安定形成の観点で、最適な原料形状や組成の異なる複数の原料ガラスを組み合わせることで原料供給形態を検討する。
	③構造解析によるガラスの健全性評価	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。	ガラス組成（MOX と現行、Na 量）や製造条件（攪拌と温度）による違いをパラメータとして、構造の観点から、構成元素の局所構造と化学状態、中長距離構造秩序及び応力ひずみについて検討し、今後のガラス固化技術高度化に必要なデータを取得した。	達成	構造解析から、最適なガラス組成及び健全性を評価するとともに、指標とするために、構造と物性の相関解析を進める。

(3) ガラス溶融炉・運転制御技術の高度化	① ガラス溶融炉の高度化	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。溶融炉や耐火物の調査を行い、適用性について検討を行う。	多様化した廃液の液性を調査し、ガラス溶融炉に供給する性状について、課題抽出を行った。 また、小型ガラス溶融炉を用いて、従来と異なる廃液を用いた際の運転条件などの課題を見出した。 溶融炉耐火物の調査を行い、耐食性等試験検討を行った。	達成	ガラス組成の選定及び原料供給形態の改良で開発された素材を用いた小型炉による試験評価を行う。 廃液の多様化におけるガラス溶融炉の概念を検討する。
	② 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。	仮焼層を構造情報取得のため、サーモグラフィや電気プローブ技術を調査検討した。またガラス溶融炉の内壁に設置した電極の電位から、ガラス温度の変化や白金族元素の堆積状況を推定技術や溶融炉の出口ガラス温度を可視光から計測する技術などを検討した。	達成	電気プローブを組み合わせる小型炉試験を行い、仮焼層構造を検知できることを示す。 溶融炉内の電位測定から、炉内の温度や白金族の分布を推定する。
	③ 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の解明及び廃液中の 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 YP の生成を抑制しプロセスを安定化する。	白金族元素の形態に関し、一部の共存元素が Na のガラスへの溶解を抑制することで RuO ₂ の針状化に関与するという反応機構を解明した。白金族元素の沈降に関し、密度の異なる元素が同じ分布となることを示した。廃液中の Na 量を低減することで、YP の形成量が減少し、オフガスへの揮発	達成	白金族元素の形状決定因子を詳細に解明し、また沈降を促進するメカニズムを解明して沈降抑制策を検討する。

			成分の移行も抑制できることを確認した。		
(4) 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	①MA分離フローシートの構築	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。 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を整備する。	組成の異なる2種類の模擬廃液を対象に製品への影響評価を実施し、所定の回収率や除染係数を得るためのフローシート条件を明らかにした。 分配比や圧損等の各種データを取得・整備し、シミュレーションコードへの組込みを行った。	達成	MA分離フローシートのホット実証により、供給液の組成変動による影響を明らかにする。 シミュレーションコードによる製品品質の予測精度を向上させる。
	②MA分離技術の安全性評価	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概念の提示を行う。 吸着材の放射線による劣化生成物の同定を行う。 吸着材物性に及ぼす造粒条件の影響を把握する。 吸着材の再生方法、分解・減容方案を提示する。	高レベル放射性廃液中のスラッジ性状に関して文献調査を実施するとともに、これを踏まえて遠隔保守が可能なSiO ₂ 粒子（粒径40-75μm）を用いた充填層型のフィルタ概念を具体化した。 吸着材中の有機物が分解して生成する劣化生成物をGC/MS、LC/MS等を用いて分析・同定した。 供給液組成や噴霧乾燥条件が吸着材物性に及ぼす影響を調査し、供給液の粘度を上昇させ、供給液中の界面活性剤を除いて気泡の発生を抑制することで、粒子強度等が改善されることを確認した。	達成	充填層型フィルタの遠隔保守性を実証する。 劣化生成物に対する安全対策を具体化する。 分離塔からの排熱、排ガス特性を確認する。 使用済吸着材の再生及び処理技術を実証する。

			フェントン反応を利用した吸着材の分解条件を明らかにするとともに、分解後の再生方法及びその性能を確認した。		
	③MA 分離システム開発	分離塔流出液の迅速分析手法、制御フロー案を提示する。良好な耐久性を備えた装置機器概念を具体化する。	インライン分析への適用に有望と考えられる熱レンズ計測を対象に感度や応答速度に関するデータを取得するとともに、バルブ切替に反映するための装置構成等の制御フローを具体化した。 耐久性を向上すべき機器として高レベル放射性廃液の送液ポンプを選定するとともに、耐放射線性の EPDM がダイヤフラム材として好ましい性能を有することを確認した。	達成	連続試験により計装システムの適用性を実証する。 連続試験により対象機器の耐久性を実証するとともに交換頻度を提示する。

A-6-3 活動指標（論文発表、特許出願等）

年度	論文数	国内特許出願	国外特許出願	PCT 出願
2019 年	3 件	0 件	0 件	0 件
2020 年	0 件	0 件	0 件	0 件
2021 年	6 件	0 件	0 件	0 件

本開発で得られた成果は、各事業者が有効に活用できるように、適宜、学会発表等を行い、広範な利活用を促進するように努めるとともに、国民への対話の一環として、セミナーでの講演なども定期的に行っている。

学会発表：29 件（2019 年度）、31 件（2020 年度）、49 件（2021 年度）

セミナー講演：1 件（2019 年度）、2 件（2020 年度）、2 件（2021 年度）

また、本研究を通じて関わりのある大学については学生などにも研究開発にも参画を促しており、人材育成にも寄与している。

国際標準への寄与
なし

プロトタイプの作成
なし

B. ウラン分離・回収技術の開発

B-4. 研究開発の内容

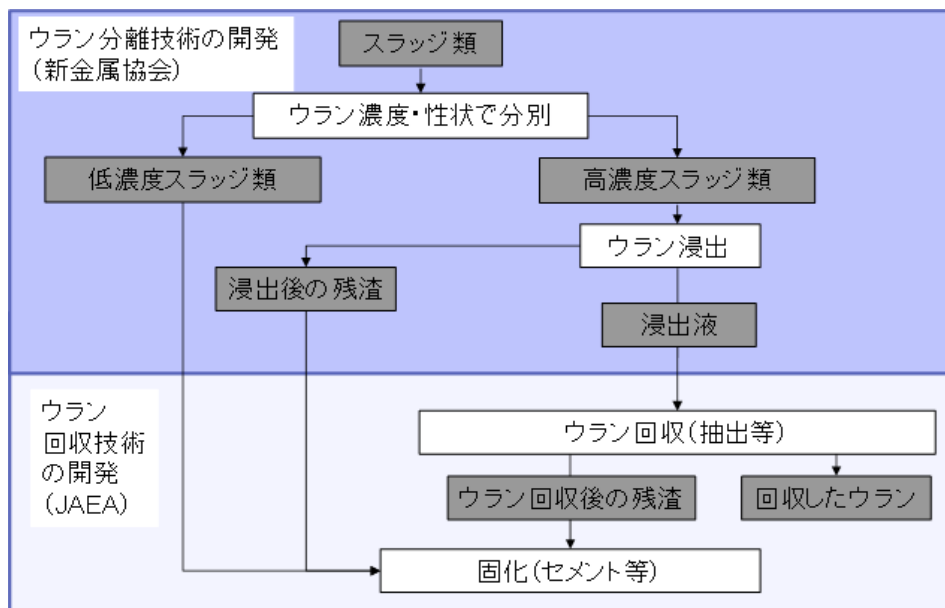
B-4-1 研究開発の全体構成

研究開発項目		実施者
(1) ウラン分離技術の開発	① ウラン廃棄物の性状把握の研究	(一社)新金属協会、(株)化研
	② ウラン分離技術の開発	(一社)新金属協会、(株)化研、東海大学
(2) ウラン回収技術の開発	① ウラン選択回収技術の開発	(国研)日本原子力研究開発機構、東京工業大学
	② 処理液再利用または分解実用技術の開発	(国研)日本原子力研究開発機構、北海道大学、神戸大学
(3) ウラン回収後の廃棄物の安定固化技術の開発	① スラッジ状廃棄物分析及び情報整理	(国研)日本原子力研究開発機構
	② 有害物を含む廃棄物の安定固化技術の開発	(国研)日本原子力研究開発機構

本事業は、核燃料加工施設等から発生したスラッジ状のウラン廃棄物の処理・処分にに関する技術的課題の解決に資するものである。そのためには、核燃料加工やそれに伴い発生するウラン廃棄物に関する知見、さらにはそれらを含めた放射性廃棄物全般の処理・処分にに関する知見が必要とされる。

ウラン廃棄物の発生者である加工事業者（(一社)新金属協会）は、ウラン廃棄物の発生過程や性状に精通しており、浸出・溶解といった化学的挙動の検討を成し得ることから、ウラン分離技術の開発事業を担当する。また、(国研)日本原子力研究開発機構は再処理技術や廃棄物の処理技術に関し高い専門性を有していることから、ウラン回収技術の開発事業を担当する。両者の開発分担は下図の通りであり、スラッジ状の廃棄物の性状把握から最終的な処分形態である廃棄体化まで、各研究要素を網羅している。

また、加工事業者（(一社)新金属協会）は(国研)日本原子力研究開発機構に対し、必要な廃棄物試料（模擬物を含む）や関連情報を提供する。各種分析結果や分離回収試験結果等は、両者の協議会等で共有し、連携して本開発全体を円滑かつ効率的に進めている。



研究開発の全体構成

B-4-2 各研究開発項目の実施内容

(1) ウラン分離技術の開発

①ウラン廃棄物の性状把握の研究

核燃料加工施設から発生するスラッジ状の廃棄物は、事業所や工程によって発生状況が異なる多様な性状を有する廃棄物であり、それぞれの施設で保管している。これらの廃棄物を対象として処理方法を開発していくためには、その性状が類似するものに分類し、同様の処理方法で取り扱えるように類型化していくことが合理的と考えられる。本開発では、実際に核燃料加工事業所等で保管している廃棄物を分析して成分を確認し、さらに過去に取得したデータも含めて総括することによって、成分の傾向を把握する。また、類似した性状を有するものに分類、整理する。

②ウラン分離技術の開発

スラッジ状の廃棄物からウランを浸出させ、浸出後の残渣をトレンチ処分可能とするウラン分離能力（10 Bq/g 程度への低減を目標）を有する処理方法を開発する。汎用性がありかつ実用性を踏まえた浸出法を用い、種々の条件（浸出液の組成や温度等）での浸出後の残渣中のウラン量を確認することによって、ウランの分離能力を評価する。また、併せて浸出性を高めるための前処理方法について検討する。

これらの結果と(a)の性状把握の結果を結びつけることで、分類したスラッジ状の廃棄物に対する浸出処理の方法や条件を整理、類型化する。また、確認された分離能力や実際に保管している廃棄物の物量を踏まえて、分離処理を実施するためのシステムの検討を行う。

(2) ウラン回収技術開発

①ウラン選択回収技術の開発

ウラン及びその他の金属イオンを含む硝酸浸出液から、ウランを選択的に回収し、回収ウランの長期保管に向けて化学的に安定化するための技術を開発する。技術の開発は、既存技術の適用

も視野に入れつつ進めることとし、廃棄物発生量が少なく、廃棄物の組成に合わせたプロセスのコントロールが容易なものを選定して実施する。

技術の候補の一つであるゲル化抽出法は、基本的な性能については確認されているものの、他の候補である溶媒抽出法や抽出クロマトグラフィ法と比較してプロセスへの応用に関する実績が乏しいため、本事業においては基礎的な分離メカニズムの解明から、工学規模機器の概念設計に向けた検討に至るまで幅広く系統的に研究開発を進めていく。回収ウランの化学的安定化については、ゲル化抽出によって得られるプロダクトの情報をもとに、含有する有機物成分を除去し、ウランを長期保管可能な酸化物にするための条件の選定を行う。

②処理液再利用または分解実用技術の開発

ウラン分離の浸出液の候補として硝酸や炭酸溶液が想定されている。多量の浸出液が使用されるため、硝酸を使用する場合は硝酸を回収して再生し、再利用することができれば経済的であり、二次廃棄物の発生量も低減する。そこで、スラッジ状の廃棄物の浸出液を想定し、鉄成分が多量であるような多様な組成を持つ条件でも対応可能な硝酸再生方法を開発する。触媒と還元剤を組み合わせた手法により、高濃度の硝酸の回収から低濃度の硝酸の分解まで連続的に処理可能な方法を検討する。

後段の固化工程を阻害する成分として、硝酸再生後も浸出液に微量に残留する硝酸や、スラッジ状の廃棄物に元から含まれるアンモニウム塩が存在する。また、前段のウラン回収処理において使用される有機物が処理液中に残留する。これらの成分は固化処理の前に分解する必要があるため、それぞれ必要に応じてオゾン酸化や超音波照射等の二次廃棄物発生量が少なく、簡便な装置で実施可能な分解方法を検討する。

(3) ウラン回収後の廃棄物の安定固化技術の開発

①スラッジ状廃棄物分析及び情報整理

スラッジ状廃棄物の安定固化に必要な基礎情報の取得を目的として、ウラン燃料加工事業者から発生した 14 種類のスラッジ状廃棄物を対象に、乾式・湿式分析による廃棄物の性状確認や溶出試験による溶出特性の把握を行う。性状確認として、廃棄物中の有害物質含有量やイオン種の分析、スラッジ状廃棄物の形状、元素の分布及び含水量の確認を行う。また、廃棄物中の溶出特性の把握は環境省告示 13 号を模擬し、純水及びアルカリ水溶液条件下での溶出試験及び溶出液の分析を行う。

以上の試験及び分析から得られた情報に基づき、主成分や溶出性有害元素量による分類や情報整理を行う。

②有害物を含む廃棄物の安定固化技術の開発

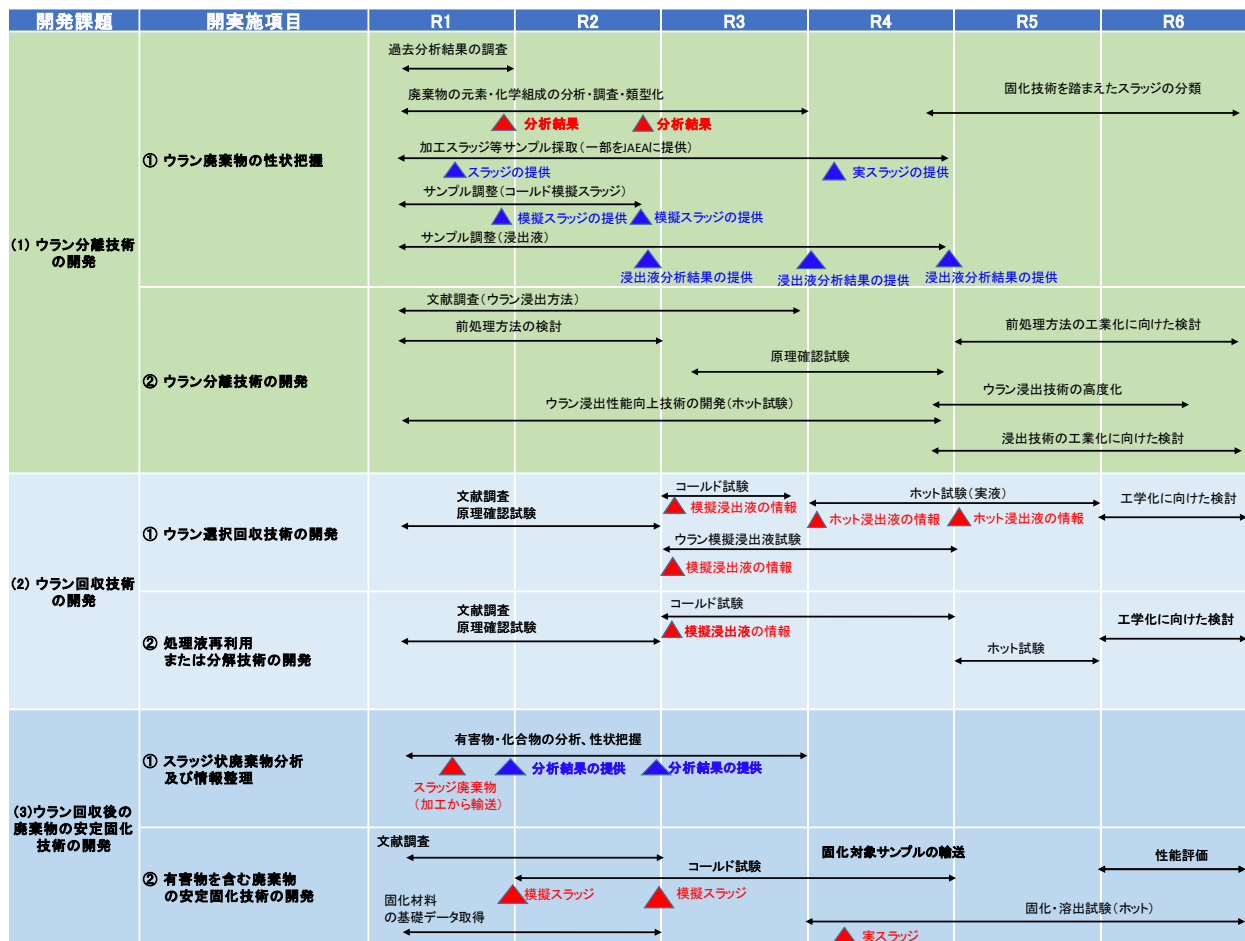
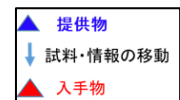
有害物を含む多種多様なスラッジを固化できる、埋設処分しなければならない廃棄物の量をできる限り低減したプロセスの開発を目的にスラッジ状廃棄物を用いた安定固化試験を行い、有害物の溶出挙動及び一軸圧縮強度から固化性能の評価を行う。なお、ホット試験では廃棄物の使用量に制限があるためセメント固化体は小型 (20mm × 20mm × 20mm) とする。セメント材の選定はコールド試験及び過去の文献から行う。溶出挙動は環境省告示 13 号を模擬した試験を行い、埋立

処分にかかわる判定基準（有害元素：Cr(VI)、As、Se、Cd、Pb、Hg）と比較し評価する。一軸圧縮強度は一軸圧縮試験を行い、1.47 N/mm²を満たすかを評価する。なお、一般的に一軸圧縮強度はΦ5×10 cmの円柱供試体を用いて評価されるため、本事業では、コールド試験により小型化による影響を確認する。以上の評価及び有害物溶出抑制材の添加を考慮し、スラッジ状廃棄物の充填率が最大となる固化条件を明らかにする。また、ホット試験で得られた結果をもとに、コールド試験により配合比の再検討等、安定固化に向けたホット試験の補足・補助を行う。

B-5. 研究開発の実施・マネジメント体制等

B-5-1 研究開発計画

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 ウラン分離・回収技術の開発〈6ヵ年実施計画〉



（1）ウラン分離技術の開発

「調査・予備検討」、「基盤技術の開発」、「工業化に向けた検討」を、それぞれ令和1～3年度、令和3～5年度、令和5～6年度を目処として、段階的に進める。

①ウラン廃棄物の性状把握

- ・「調査・予備検討」（令和1～3年度）

過去の分析値の調査や本事業での分析結果を踏まえ、廃棄物の組成と浸出性に基づく類型化の考え方を示す。

- ・「基盤技術の開発」(令和 3～5 年度)

組成のばらつきを考慮した廃棄物の類型化(浸出特性、固化安定化特性)の適用性を確認する。スラッジ状の廃棄物の実試料や模擬試料、浸出液の情報等は適宜回収事業側に提供する。

②ウラン分離技術の開発

- ・「調査・予備検討」(令和 1～3 年度)

前処理については、技術調査をもとに汎用性のある適切な手法を選定し、最適条件を検討、適用する。ウラン分離操作については、技術調査や基礎試験をもとに、候補となる分離手法を選定し、基本となる処理条件を把握する。

- ・「基盤技術の開発」(令和 3～5 年度)

処理時の負荷を低減させる手法を検討する。その結果を踏まえ、廃棄物の類型化をもとに、分類ごとの処理条件や処理性能を確定する。

- ・「工業化に向けた検討」(令和 5～6 年度)

スラッジ状の廃棄物の類型化や確定した処理条件、性能及び実際の廃棄物の保管物量をもとに、廃棄物処理システムの概念設計を検討する。

(2) ウラン回収技術開発

①ウラン選択回収技術の開発

プロセス開発として、令和 1 年度に技術の調査、原理の確認を行い、ゲル化抽出を選定する。本技術について、令和 5 年度までにメカニズムの調査、配位子及びポリマーの最適化、プロセス改良、ロバスト性の評価、ウラン製品の酸化物転換処理、優位性の評価を実施し、令和 6 年度に最終的なプロセス実証を確認する。令和 4 年度以降は本技術を用いた機器開発に関する検討を平行して行う。検討項目としては、沈殿物回収方法の検討、多段操作を考慮した装置の検討、スケールアップ効果の確認、計装機器類の検討、臨界管理、工学機器の概念検討を行う。

②処理液再利用または分解実用技術の開発

プロセス開発として、令和 1～3 年度に技術の調査、原理の確認を行い、硝酸分解やアンモニア分解方法を選定する。本技術について、用いる触媒・還元剤の最適化、メカニズムの調査、プロセス改良、ロバスト性の評価、 NH_4^+ ・有機物の分解確認を実施する。令和 4 年度以降は本技術を用いた機器概念に関する検討を並行して行う。検討項目としては、多段操作を考慮した装置の検討、触媒添加・回収方法の検討、還元剤添加方法の検討、工学機器の概念検討を行う。

(3) ウラン回収後の廃棄物の安定固化技術の開発

①スラッジ状廃棄物分析及び情報整理

令和 1～3 年度にかけてスラッジ状廃棄物の基礎情報として、組成及び溶出特性を把握する。初めに乾式分析(蛍光 X 線分析、EDX 付き電子顕微鏡)により廃棄物の大まかな性状を把握し、その

後、湿式（酸溶解）分析により元素及びイオン体を詳細に把握する。また、固化剤によって pH が異なることから、pH を変えた溶出試験を行い、特に有害物質について溶出特性を把握する。

②ウラン回収後の廃棄物の安定固化技術の開発

令和 1 年度に、スラッジ廃棄物に含まれる有害物質と産業廃棄物において規制対象となる有害物質から、本事業の対象とする有害物質を選定する。固化材料については、令和 1 年度及び令和 2 年度において、選定した有害物質の安定固化に関する文献調査を実施し、本事業の対象とする固化材料を選定した。選定した固化材料については、令和 3 年度までに一軸圧縮強度や有害物質の溶出性に関する基礎データを取得した。

加工事業者が実プロセスを模擬して作製した模擬スラッジを対象に、令和 2 年度からコールド試験を進め、固化・溶出試験（ホット）にて検討するパラメータの絞り込みを行った。固化・溶出試験（ホット）では、令和 4 年度以降から加工事業者から提供を受けた実廃棄物を対象に固化試験を行い、固化試料の物性値を取得する。最終年度において、性能評価として得られた成果をとりまとめ、固化材料の性能を評価し、スラッジ廃棄物を安定固化可能なプロセスを提案する。

B-5-2 資金配分

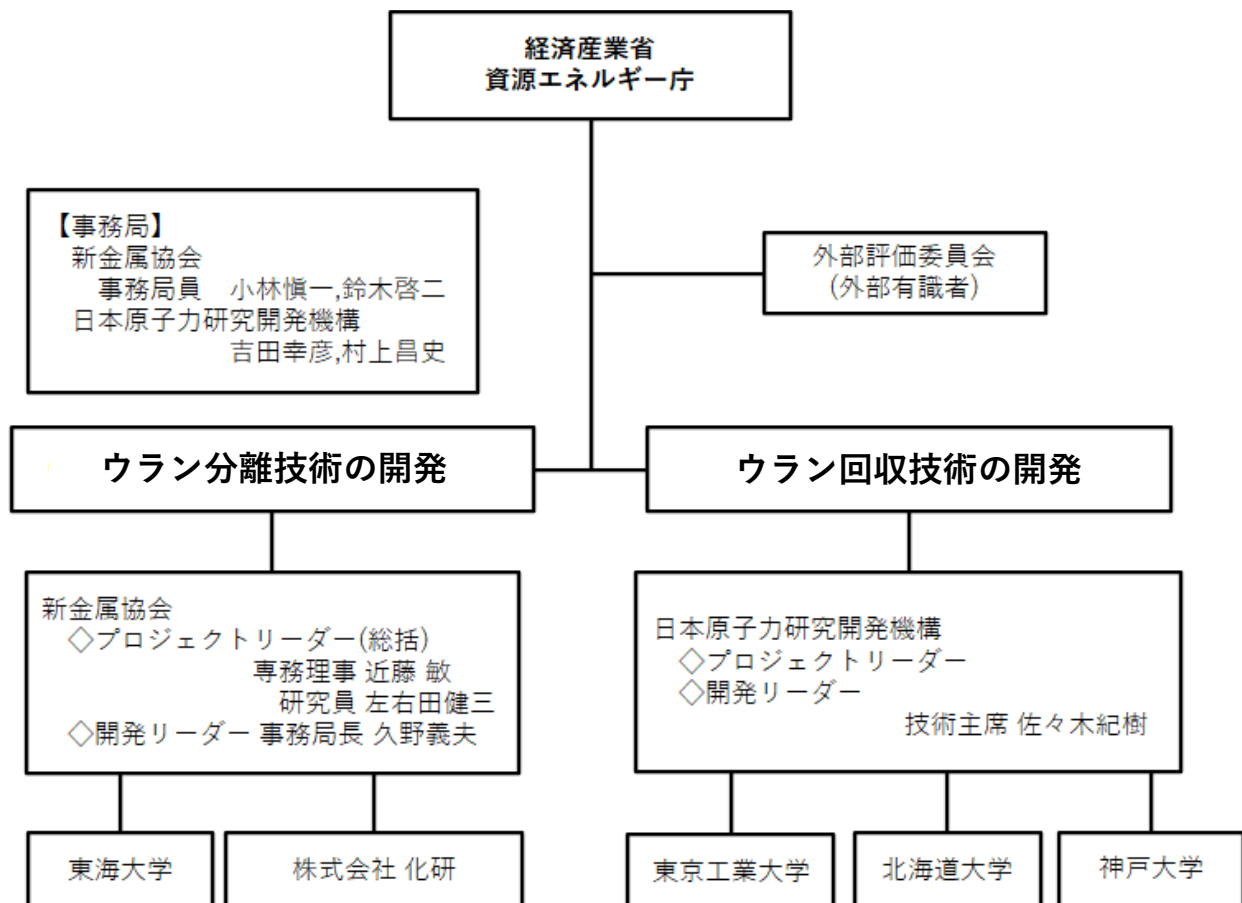
（単位：百万円）

研究開発項目	2019年度	2020年度	2021年度	合計
ウラン分離技術の開発	34（委託）	30（委託）	30（委託）	94（委託）
ウラン回収技術の開発	20（委託）	26（委託）	28（委託）	74（委託）
計	54	56	58	168

B-5-3 研究開発の実施・マネジメント体制

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、一般社団法人新金属協会でウラン分離技術開発を実施、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構でウラン回収技術開発を実施し、綿密な情報交換（連携会議 4 回/年）をしながら進めている。実施にあたっては、国内のウラン取扱い事業者や大学の協力を得ながら事業を進めている。

また、外部から評価、助言を得るため有識者による外部評価委員会を開催（2 回/年）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。



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
ウラン分離・回収技術の開発体制

B-5-4 知財や研究開発データの取扱い

本開発の円滑な実施及びその成果を効率的に活用するために、必要な知的財産の取扱いについて「知的財産権及びデータの取り扱いについての合意書（知財合意書）」で定めている。この知財合意書にもとづき知財運営委員会を設置し、知的財産や研究開発データの取扱いについて審議決定している。なお本委員会については、再委託先との連携協議会のなかで、年３回以上開催し、試験状況とともに知財の取り扱いについても逐次確認している。

知財運営委員会の承認を得ることなく、本開発で得られた研究開発データは第三者に開示や漏洩をしてはならないとしているが、知財運営委員会の承認が得られた研究開発データについては、広範な利活用を促進するように努めている。本開発で得られた成果は、その前提となるウラン廃棄物の情報を含めて公開可能なデータであり、各事業者が有効に活用できるように、適宜、学会発表等を実施している。

B-6. 事業アウトプット

B-6-1 研究開発目標

研究開発項目		中間目標 (2021 年度)	最終目標 (2024 年度)	設定（変更）理由
(1) ウラン 分離技術 の開発	① ウラン 廃棄物の 性状把握	スラッジ状の廃棄物の分析を実施し、合理的な処理方法を検討するための類型化を行う。回収側に必要な試料提供や浸出液の情報提示を適切に実施する。	多様なスラッジの浸出性（低浸出性、高浸出性等）や連携先で確認される廃棄体化の固化特性を踏まえた総括的な類型化を行う。また引き続き、回収側に必要な試料提供や浸出液の情報提示を適切に実施する。	多様なスラッジから効率的にウラン分離を行うためには、類型化をすることが重要であるため。
	② ウラン 分離技術 の開発	ウランの浸出を効果的に実施するための前処理法を検討する。また、ウランの分離に効果的な浸出手法の候補を選定し、基本的な処理条件を把握する。	回収工程への負荷を低減するための浸出方法を検討する。その結果をもとに、実用化を踏まえた効率的な浸出方法・条件及び浸出性能を決定する。さらに、廃棄物の物量を踏まえ、ウラン分離のためのシステムの基本設計を提示する。	類型化されたスラッジ状廃棄物からウラン分離を効率的に行う方法・条件を見出すことで、より合理的なシステムの提示ができるため。
(2) ウラン 回収技術 開発	① ウラン 選択回収 技術の開 発	ウラン浸出液組成をもとに、適切なウラン回収手法を設定し、実験室規模の試験によって成立性を見通しを得る。	多様なウラン浸出液組成について対応可能なウランの選択的回収手法を検討する。これらが可能な装置の概念を提示する。	多種多様な性状のウラン含有スラッジからのウラン回収に柔軟に対応する必要があるため。
	② 処理液 再利用ま たは分解 実用技術 の開発	ウラン浸出液組成をもとに、硝酸回収・分解手法を設定し、実験室規模の試験によって成立性を見通しを得る。	浸出液の硝酸を回収し、固化を阻害する成分を分解するための処理手法を選定する。これらが可能な装置の概	硝酸を再利用し、発生する2次廃棄物量を低減するため。

			念を提示する。	
(3) ウラン回収後の廃棄物の安定固化技術の開発	① スラッジ状廃棄物分析及び情報整理	スラッジ状廃棄物に含まれる有害物質および処分影響物質の種類と量を評価するとともに、「(1) ウラン分離技術の開発」にて実施するスラッジ状廃棄物の性状把握に資するデータを提供する。	—	処分における有害物質の固化性能評価を行うために含有量を把握するとともに、一部「(1) ウラン分離技術の開発」にて実施するスラッジの類型化に資するデータを提供するため。
	② 有害物を含む廃棄物の安定固化技術の開発	本事業で対象とする対象有害物質及び固化材料の選定を行う。選定した固化材料については、一軸圧縮強度や有害物質の溶出性などの基礎データを取得する。	実廃棄物を用いて固化試験を行い、一軸圧縮強度や有害物質の溶出性に関するデータを取得する。得られた結果を取りまとめ、有害物質を含む多種多様なスラッジを安定固化可能なプロセスを提示する。	スラッジには有害物が含まれており、これを安定固化する技術がないと浅地中処分への道筋がつけられないため。

B-6-2 研究開発の成果

研究開発項目		中間目標 (2021 年度)	成果・意義	達成 状況	未達の原因分析/ 今後の見通し
(1) ウラン分離技術の開発	① ウラン廃棄物の性状把握の研究	スラッジ状の廃棄物の分析を実施し、合理的な処理方法を検討するための類型化を行う。回収側で必要な試料提供や浸出液の情報提示を適切に実施する。	種々のスラッジ状の廃棄物を分析し、それらの成分データを集約して傾向を把握した。また、その結果及び主成分や発生履歴から廃棄物を分類し、それぞれの浸出性を考慮した類型化の考え方を提示した。	達成	スラッジ状廃棄物を鉄澱物、シリカ澱物及び焼却灰に分類し、浸出条件の最適化を図る。

	②ウラン分離技術の開発	ウランの浸出を効果的に実施するための前処理法を検討する。 また、ウランの分離に効果的な浸出手法の候補を選定し、基本的な処理条件を把握する。	前処理方法として粉碎処理を選定し、効率的に微粉化する条件を確認し、浸出試験に適用した。また、汎用性の高い硝酸による浸出試験を実施し、鉄澱物、シリカ澱物及び焼却灰について、最適浸出条件を確認した。残渣を処分可能な濃度レベルまで低減できる見込みが得られた。	達成	更に、使用する浸出液の最小化を図り、工業化を見越した粉碎処理条件、機器の検討を行い全体の工業化に繋げる。
(2) ウラン回収技術開発	①ウラン選択回収技術の開発	ウラン浸出液組成をもとに、適切なウラン回収手法を設定し、実験室規模の試験によって成立性の見通しを得る。	ウラン回収技術としてゲル化抽出法を選定し、抽出剤としてモノアミドを使用した場合の基礎データを取得した。 それぞれの反応についてメカニズムを推定することが出来、成立性の見通しを得ることが出来た。これにより工学機器の検討に移行可能となった。	達成	ゲル状沈殿物回収方法の検討、多段操作を考慮した装置の検討、スケールアップ効果の確認等本技術を用いた工学機器の概念検討を行う。
	②処理液再利用または分解実用技術の開発	ウラン浸出液組成をもとに、硝酸回収・分解手法を設定し、実験室規模の試験によって成立性の見通しを得る。	硝酸回収・分解について炭素触媒存在下での還元剤添加により回収・分解処理が可能であることを確認した。 それぞれの反応についてメカニズムを推定することが出来、成立性の見通しを得ることが出来た。これにより工学機器の検討に移行可能となった。	達成	触媒回収方法の検討、多段操作を考慮した装置の検討、スケールアップ効果の確認等本技術を用いた工学機器の概念検討を行う。

(3) ウラン回収後の廃棄物の安定固化技術の開発	①スラッジ状廃棄物分析及び情報整理	スラッジ状廃棄物に含まれる有害物質および処分影響物質の種類と量を評価するとともに、「(1)ウラン分離技術の開発」にて実施するスラッジ状廃棄物の性状把握に資するデータを提供する。	実廃棄物の分析データ及び産業廃棄物における規制物質を定量評価し、対象とする有害物質を選定した。また、分析データを「(1)ウラン分離技術の開発」に提供した。	達成	令和3年度で目標を達成し、終了した。
	②有害物を含む廃棄物の安定固化技術の開発	本事業で対象とする対象有害物質及び固化材料の選定を行う。選定した固化材料については、一軸圧縮強度や有害物質の溶出性などの基礎データを取得する。	文献調査を実施し、対象とする固化材料を選定した。 選定した固化材料を用いて固化・溶出試験を行い、一軸圧縮強度や各固化材料からの有害物質の溶出性に関する基礎データを取得した。得られた結果から、安定固化可能な有害物質の最大添加量を推定した。	達成	令和4年度以降は、実廃棄物を用いて固化試験を行い、一軸圧縮強度や有害物質の溶出性に関するデータを取得可能な見込みである。最終年度には、得られた結果を取りまとめ、有害物質を含む多種多様なスラッジを安定固化可能なプロセスを提示できる見込みである。

B-6-3 活動指標（論文発表、特許出願等）

年度	論文数	国内特許出願	国外特許出願	PCT 出願
2019 年	0 件	0 件	0 件	0 件
2020 年	0 件	0 件	0 件	0 件
2021 年	0 件	0 件	0 件	0 件

2021 年度までに国際会議での論文発表を 3 件予定していたが、新型コロナウイルス感染症の影響で、発表を取りやめた。予定していた内容の発表は、別の国際会議において今後発表予定である。

本開発で得られた成果は、各事業者が有効に活用できるように、適宜、学会発表等を行い、広範な利活用を促進するように努めている。

学会発表：2 件（2021 年度）

また、本研究を通じて関わりのある大学については学生などにも研究開発にも参画を促しており、人材育成にも寄与している。

国際標準への寄与
なし

プロトタイプの作成
なし

7. 事業アウトカム

7-1 事業アウトカムの内容

低レベル放射性廃棄物のガラス固化技術の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、多くの廃棄物を安定的に取り込むことができるガラス固化技術（現状の廃棄物充填率の 2～3 割向上を目指す）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を確立する。

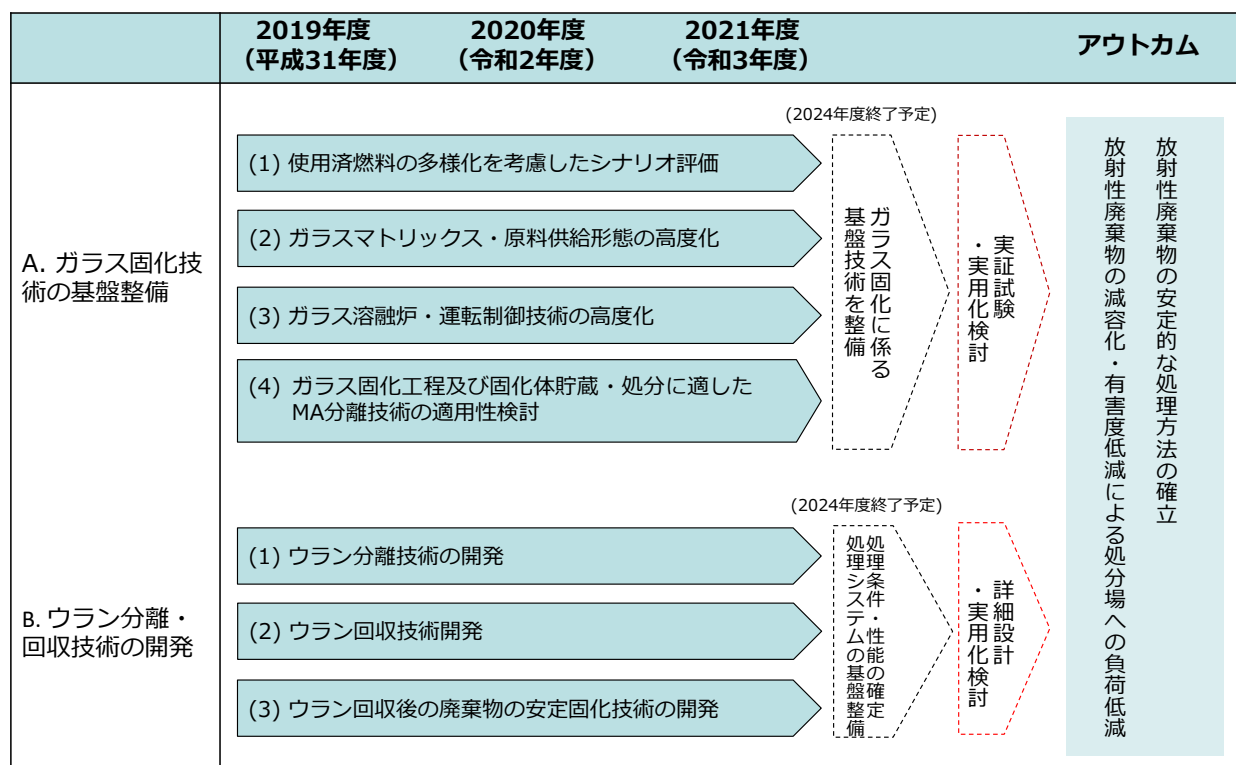
また、スラッジ状のウラン廃棄物からのウラン分離・回収技術の実用化に向けた技術的見通しを得るとともに、ウラン分離・回収プロセスの基本設計を行うために必要となる知見や情報を整備する。処分場の操業開始時期を踏まえつつ、廃棄物処理システムの実用化を目指し、浅地中処分への廃棄物の処分を実現可能とする。

これらにより、放射性廃棄物の長期的なリスク低減の観点から減容化・有害度低減化技術の実証・実用化の道筋をたてる。

7-2 事業アウトカム目標

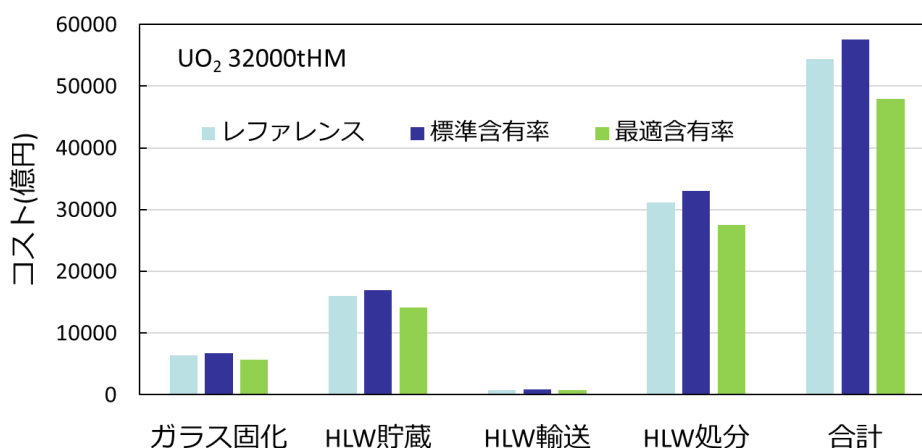
アウトカム目標		目標の設定理由	目標達成の見込み
2024 年度 (令和 6 年度)	・使用済 MOX 燃料や高燃焼度燃料等から発生する高レベル放射性廃液の性状に応じて、ガラス固化体への高充填化を可能にする技術及び当該廃液から MA を分離する技術を開発し、基盤整備を行うことにより、今後の実証・実用化の道筋をたてる。	・使用済 MOX 燃料の処理技術の基盤が整備され、その後、実用化に向けた技術課題がクリアされた場合には、今後、使用済 MOX 燃料から発生する高レベル放射性廃棄物の減容・有害度低減が可能となり、将来の放射性廃棄物の立地選択肢の拡大等に貢献することができると期待される。また、高レベル放射性廃液のガラス固化体の廃棄物充填率を高めることで、六ヶ所再処理工場にて発生するガラス固化体本数の低減が可能となることから、それらに係るコスト低減に貢献できる。	2021 年度段階において、使用済 MOX 燃料から発生する高レベル放射性廃液のガラス化技術に対して、小規模な試験で見通しを得た。また、MA 分離技術も基本となる分離フローが設定できた。これらの処分シナリオについても構築してきており、今後精緻化していくことで実証・実用化の道筋を立てることができると見込みである。
	・実用化を踏まえ、処理条件や処理性能を確定する。 ・技術的成立性を有する廃棄物処理システムの基盤情報を整備する。	・ウラン廃棄物でもスラッジ状廃棄物は、ウラン濃度が高いものが多いが、浅地中処分場（トレンチ処分場）で処分するためにはウラン濃度の低減が必要である。浸出液としての硝酸や炭酸塩については、ウランの溶解に関する従来知見が得られており、十分な実績もあるが、スラッジ状のウラン廃棄物のウラン濃度の低減を目的にウラン分離・回収に特化したものはこれまで無かったことによる。 ・ウラン分離・回収技術の工業化のための第一歩として、ビーカー試験からスケールアップした実用化のための概念検討を実施（含、懸案事項の抽出と対策立案）しておくことで、次段階のモックアップ試験等による実証検討に繋げることができる。	2021 (令和 3 年度) までの事業成果でスラッジ状ウラン廃棄物を浅地中処分できる目処が付いた。現在、浸出液の低減を図る開発を実施中。この結果により効率的な工業化の概念検討が実施できる見込みである。

8. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ



9. 費用対効果

本事業で実施した研究で実施している高燃料度燃料処理シナリオ評価において、レファレンスケースから想定される高燃焼度燃料処理では、ガラス固化体発生本数が増えるため、費用が高くなるものの最適なガラス固化体を製造していくことで、約 15～20%程度のコスト削減が見込まれることを試算した。しかし、廃棄物の含有率を大きくしていくことで、ガラスが脆くなることも想定されるため、安全的な評価もあわせて評価しながら、今後の研究でさらに、検討していくこととしている。



- **レファレンス (4 万本)**：標準ガラス (45 GWd/tHM, 22 wt%)
- **標準充填率 (4.23 万本)**：充填率一定とし (22 wt%)、高燃焼度化により発生量が増加するケース
- **最適充填率 (3.52 万本)**：高充填化により発生量を最適化したケース (処分場面積を最小化)

また、2050 年頃までに核燃料加工事業所等で発生すると見込まれるウラン廃棄物について、スラッジ状の廃棄物は約 900 トンである。このうちの約半分 (450 トン) がウラン濃度 100Bq/g 以上と想定されており、中深度処分又は地層処分の対象となる (これらの高濃度な廃棄物の具体的な処分方法はまだ決定していない)。これらの物量から生じる廃棄体は約 3750 本 (混練率 0.3、廃棄体重量 400kg/ドラム缶を仮定) と考えられる。

これらを直接中深度処分した場合は約 90 億円となるのに対し、ウラン濃度を低減しトレンチ処分を可能とできるならば、約 6 億円と想定される (ウランだけを選択的に分離回収し、もとの物量が変わらないと仮定)。概算としては、84 億円程度の処分費用の削減、及び処分場への負荷低減の寄与が見込まれる。

同様に、地層処分 (TRU 廃棄物) を想定した場合は約 338 億円となるので、トレンチ処分ができるならば 332 億円程度の処分費用の削減、及び処分場への負荷低減が見込まれる。

なお、上記の削減を達成するために、引き続き、ウランの分離回収性能の向上や処理システムの検討を実施していく。

○トレンチ処分の単価； 約 148 千円／本

令和 4 年度 埋設処分業務に関する計画（年度計画）

（国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、令和 4 年 3 月 31 日制定）

○中深度（余裕深度）処分の単価； 約 240 万円／本（12 百万円／ m^3 より算出）

ウラン濃縮工場のバックエンド費用について（電気事業連合会、平成 16 年 1 月）

○第二種特定放射性廃棄物（TRU 廃棄物）処分の拠出金単価； 約 900 万円／本（46,882 千円／ m^3 より算出）

特定放射性廃棄物の最終処分費用及び拠出金単価の改正について

（資源エネルギー庁・放射性廃棄物対策課、令和 3 年 11 月 25 日）

10. 前回評価の指摘事項と対応状況

評価検討会（中間評価）

今後の研究開発の方向等に関する提言	対応状況
ガラス固化体への廃棄物充填率を向上させることは、固化体の本数を削減できるという意味では効果的に見えるが、管理上も処分場の負荷も大きく変わらない可能性もある。溶融固化から最終的な処分までの全体最適化の観点に踏み込んで、トレードオフになる課題等を整理の上検討を進めることで、より合理的で実用的な成果が期待できると考えられる。 今後、高燃焼度燃料や MOX 燃料の処理により発生する廃棄物をガラス固化する場合の検討を進めていくことになるが、充填率の高いガラス固化体を作ることが効果的となるのはどのような条件か、シナリオを検討し選定していくことが必要と考える。 本事業が、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である。 また、事業者、国、大学の専門家を集めたこれまでの体制を、世代交代、人材育成を踏まえ、維持、発展できるよう、国の強い支援が望まれる。	本事業では、高燃焼度燃料や MOX 燃料を含めた多様な使用済燃料より発生する廃棄物について、再処理から最終処分までの全体最適化の観点に踏み込んだ処分シナリオ検討を実施している。具体的には、ガラス固化体への廃棄物充填率向上に伴う課題の整理を行うとともに、ガラス固化体発生本数及び処分場の面積や管理面などの観点から、最も効果的となる廃棄物充填率等の検討を実施している。 本事業は、我が国の産業活動や国民が享受する電力供給を担う、原子力関連事業から排出され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、この成果は国民生活の安全、安心や環境防護の向上に繋がるとともに、国が推進する原子力政策への信頼性の向上に資すると考えている。そのようなベネフィットを有している点について、「エネルギーに関する基礎用語、最新の動向やトピックなど政策に関連する情報をできる限り分かりやすく表現するよう継続的に努めていく」としたエネルギー基本計画（令和3年10月閣議決定）に基づき示している。具体的には、資源エネルギー庁のホームページで、核燃料サイクルの確立に向けた取組等を紹介するとともに、原子力小委員会等において本事業の取組について紹介している。また、事業者においても講演会等において本事業を紹介している。引き続き、エネルギー基本計画に基づき、本事業成果を含むエネルギーに関する基礎用語や基本データ、最新の動向やトピックなど政策に関連する情報を随時、丁寧に発信していく。 本事業は令和6年度までの継続事業であることから、得られた成果などを再委託先の関連メーカーや大学など幅広く展開しており、今後も、

	これまで構築してきた体制を一層発展させるとともに、引き続き維持できるよう支援していく。
--	---

評価 WG（中間評価）

所見	対応状況
技術開発としては、中間評価段階では目標達成しているが、最終的な減容化によるメリットやデメリット、或いは最適な技術の組み合わせについて、ガラスの処理から最終処分の観点まで含めて、トータルコストも踏まえた上で継続して検討を続けて頂きたい。	本事業ではガラス固化処理から最終処分までの様々なシナリオを評価し、トータルコストを踏まえた上で、最終的な廃棄物減容化によるメリットやデメリット、最適な技術の組み合わせ等の検討を進めている。