

# 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 補足説明資料 (評価対象期間：2019～2021年度)

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

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

一般社団法人 新金属協会

## 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の方針としている。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）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）

# (事業の目的等)

2

|              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |        |        |        |                    |       |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------------------|-------|
| 類 型          | 複数課題プログラム / 研究開発課題（プロジェクト） / 研究開発資金制度                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |        |        |        |                    |       |
| 実施期間         | 2014年度～2024年度（11年間）                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |        |        | 会計区分   | 一般会計 / エネルギー対策特別会計 |       |
| 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         | A. 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）<br>B. 国 →（一社）新金属協会,（国研）日本原子力研究開発機構（委託）<br>C. 国 → 日本原燃（株）,（国研）日本原子力研究開発機構（委託）<br>D. 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   | A. 薄井 康史（株）IHI 原子力SBU システム設計部 部長<br>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<br><br>B. 近藤 敏（一社）新金属協会 専務理事<br>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<br><br>C. 新津 好伸 日本原燃（株） 技術管理部長<br>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<br>核燃料サイクル設計室 室長<br><br>D. 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<br>人形峠環境技術センター 環境保全技術開発部 部長<br>青木 豊和 原子燃料工業（株） 燃料技術部 グループ長 |        |        |        |                    |       |
| 執行額<br>（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づけ／背景について

## ＜第6次エネルギー基本計画（抜粋）＞

- 我が国は、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。
  - 使用済燃料については、既に発生したものを含め、長期にわたって安全に管理しつつ、適切に処理・処分を進める必要があること、長期的なリスク低減のため、その減容化・有害度低減が重要であること等を十分に考慮して対応を進める必要がある。
  - このため、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。
- 
- 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。
  - 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及びガラス溶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。
  - 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中深度処分や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、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ることにより、核燃料サイクル政策の推進に資するものである。

- 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、事業者到处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。

- 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。
- 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。



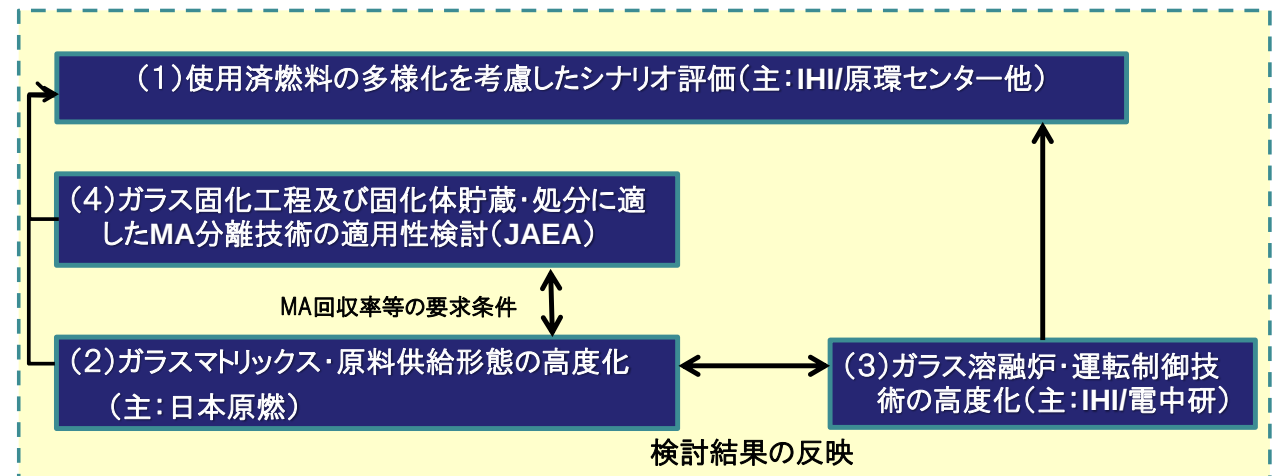
# 事業の全体構成

## <事業目的>

- ✓ 放射性廃棄物の減容化・有害度低減
- ✓ 放射性廃棄物の安定的な処理方法の確立

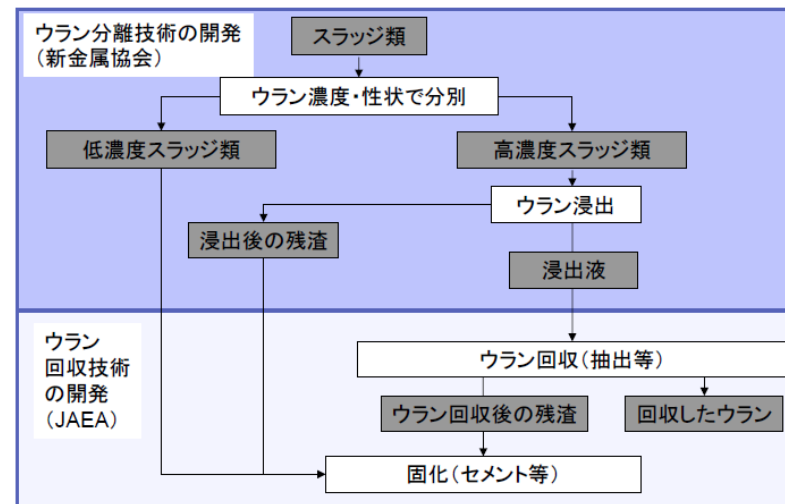
高レベル放射性廃棄物のガラス固化技術の開発による廃棄物の減容化・有害度低減及び処理技術の安定性向上を図る

## 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

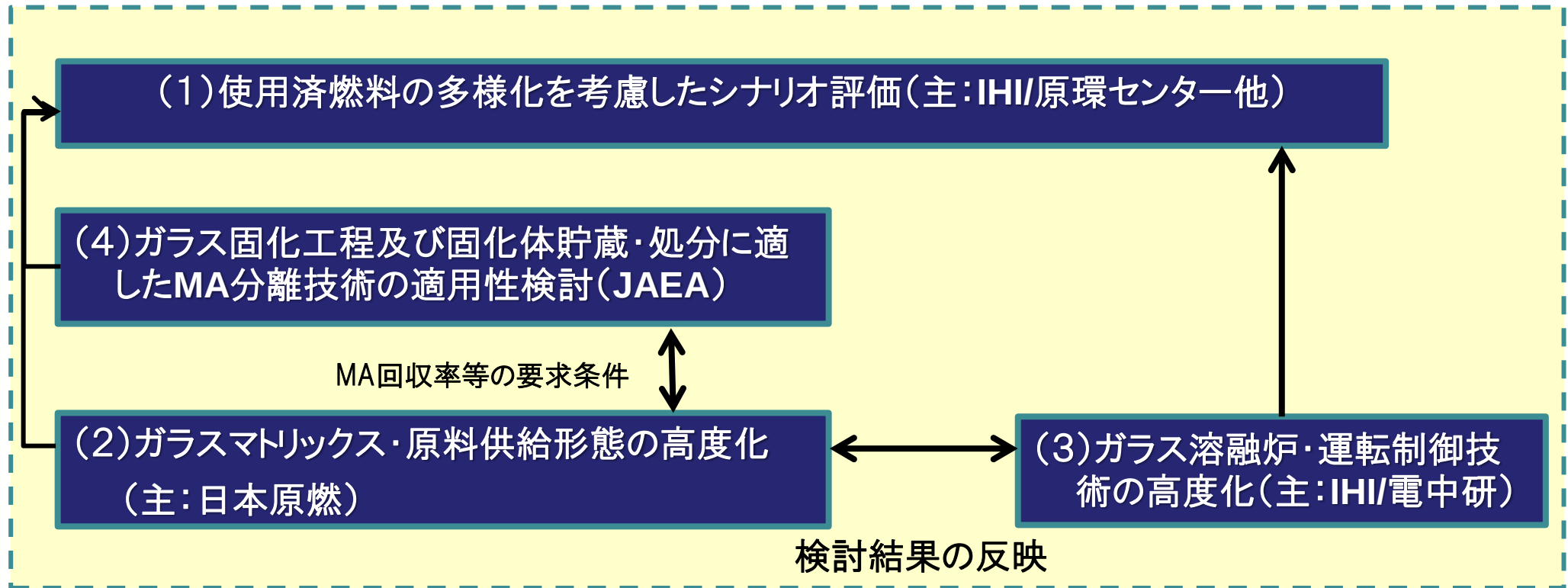
ウラン廃棄物からのウラン分離・回収技術の開発により減容化・有害度低減及び処理技術の安定性向上を図る



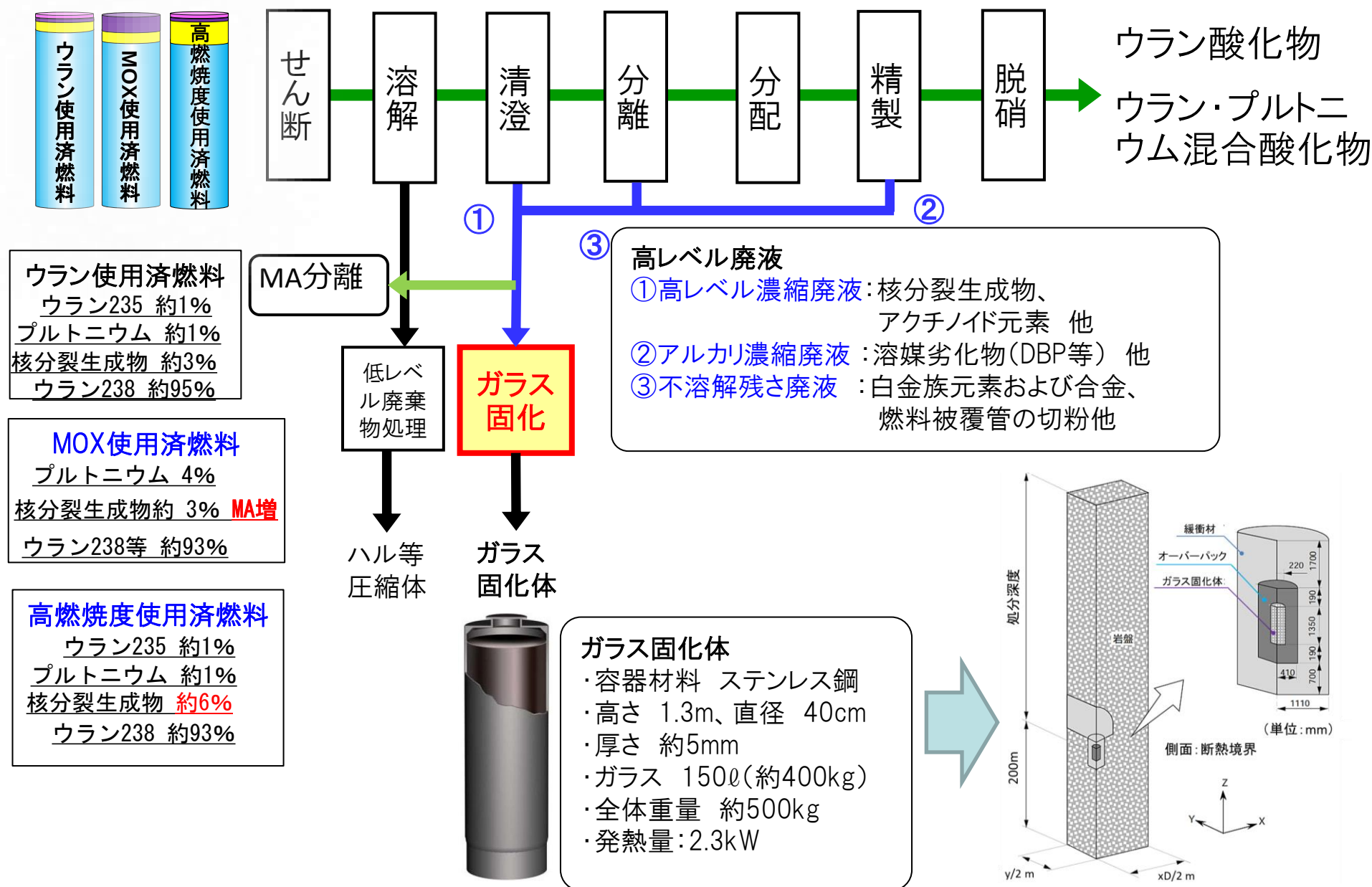
## A. ガラス固化技術の基盤整備



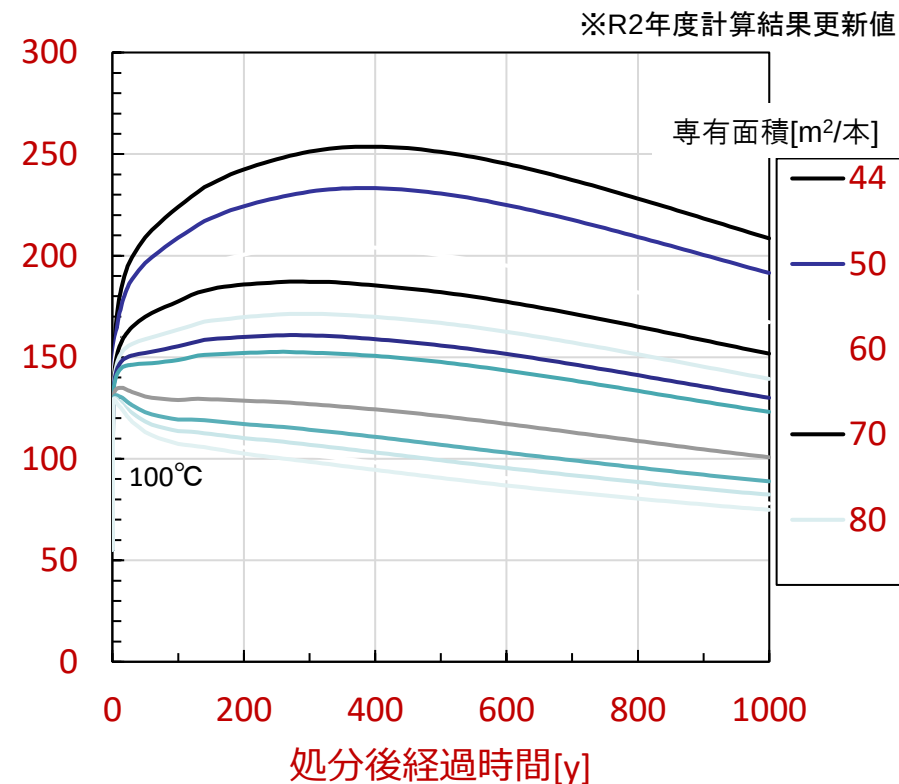
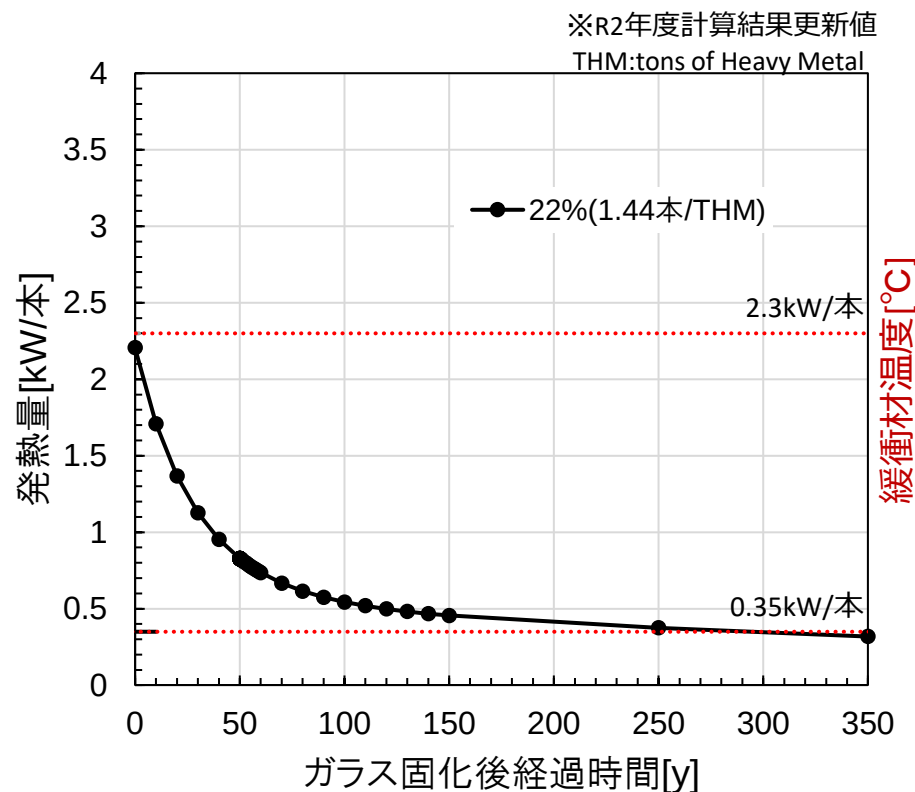
| 研究開発項目                                            |                    | 実施者                                                           |
|---------------------------------------------------|--------------------|---------------------------------------------------------------|
| (1)使用済燃料の多様化<br>を考慮したシナリオ<br>評価                   | ① シナリオ検討           | IHI、JNFL、電中研、原環センター                                           |
| (2) ガラスマトリックス・原料供給形態の<br>高度化                      | ① ガラス組成の選定         | IHI、JNFL、電中研、秋田大学、東京工業大学、九州大学、東北大学、愛媛大学、八戸工業高専、岩手大学、弘前大学、熊本大学 |
|                                                   | ② 原料供給形態の改良        | IHI、電中研、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 | JAEA、立命館大学、弘前大学                                               |
| (3) ガラス溶融炉・運転<br>制御技術の高度化                         | ① ガラス溶融炉の高度化       | IHI、JNFL、電中研、東京都市大学                                           |
|                                                   | ② センシング技術の開発       | IHI、電中研、埼玉大学、中部電力                                             |
|                                                   | ③ 運転技術の高度化         | IHI、JNFL、電中研、埼玉大学                                             |
| (4) ガラス固化工程及び<br>固化体貯蔵・処分に<br>適したMA分離技術<br>の適用性検討 | ① MA分離フローシートの構築    | JAEA、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     | JAEA、大川原化工機、芝浦工業大学、東北大学、茨城大学                                  |
|                                                   | ③ MA分離システム開発       | IHI、JAEA、東京工業大学                                               |



本事業では、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体の開発に取り組み、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（MA）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原環センターおよび処分時に必要となるガラス固化体性状に精通する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、溶融炉国内製造実績があるIHIおよ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電中研が担当する。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JAEAが担当する。



- 使用済MOX燃料を再処理した場合、MA濃度の増加により中間貯蔵50年間で発熱量0.35kW/本以下（処分場の設計条件の目安）とならない。  
⇒ MA分離技術を含めシナリオ検討し全体最適化が必要



- MOX燃料では、中間貯蔵100年でも0.35kW/本未達
- 処分開始直後から緩衝材温度が100°Cを超えるため、廃棄体専有面積を広げても効果が期待できない

- 使用済MOX燃料再処理では、ガラス固化体発生本数を年間1,000本とし、廃棄物充填率を22.9wt%（仮定）とする場合に、初期の発熱量を低減するため、再処理まで冷却年数15年として、設定した場合、想定されるガラス固化体は従来の製造と比較して、以下の課題がある

## ①白金族濃度上昇

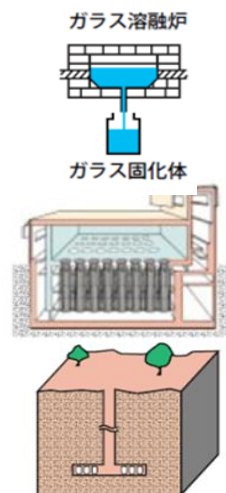
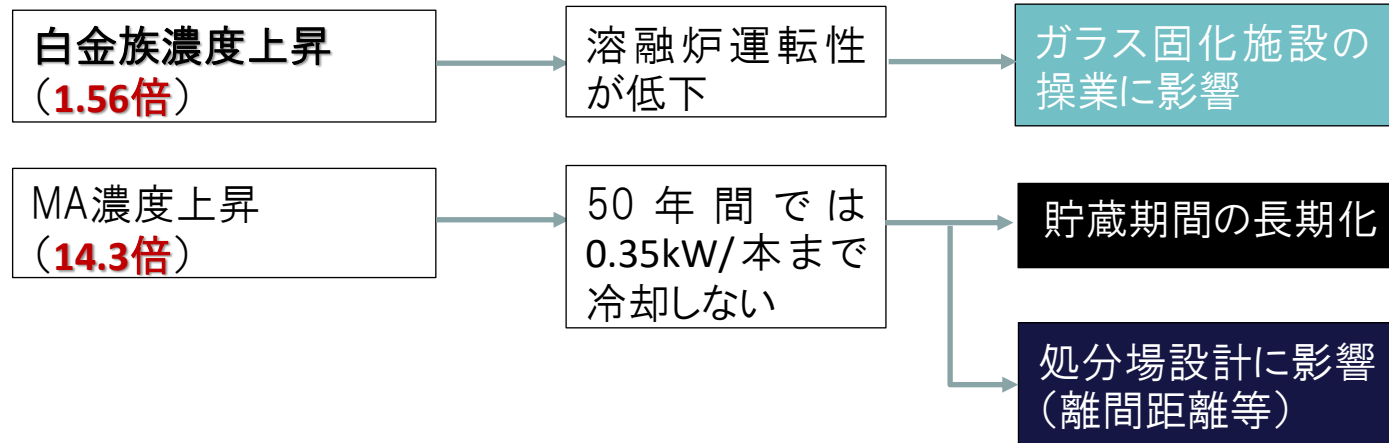
## ②MA濃度上昇（処分時に高発熱）

|                          | 廃棄物<br>充填率<br>[wt%] | 影響因子                        |                             |                            |
|--------------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
|                          |                     | ガラス固化体                      |                             |                            |
|                          |                     | 白金族元素                       | MA成分                        | 50年後発熱量                    |
| 設計条件<br>(45GWD/t、4年冷却)   | 22.1                | 1.25wt%<br>(1.00)           | 0.09wt%<br>(1.00)           | 0.35kW/本<br>(1.00)         |
| MOX燃料<br>(45GWD/t、15年冷却) | 22.9                | 1.95wt%<br>( <b>1.56倍</b> ) | 1.32wt%<br>( <b>14.3倍</b> ) | 0.6kW/本<br>( <b>1.7倍</b> ) |

## 【影響因子変動】

## 【想定事象】

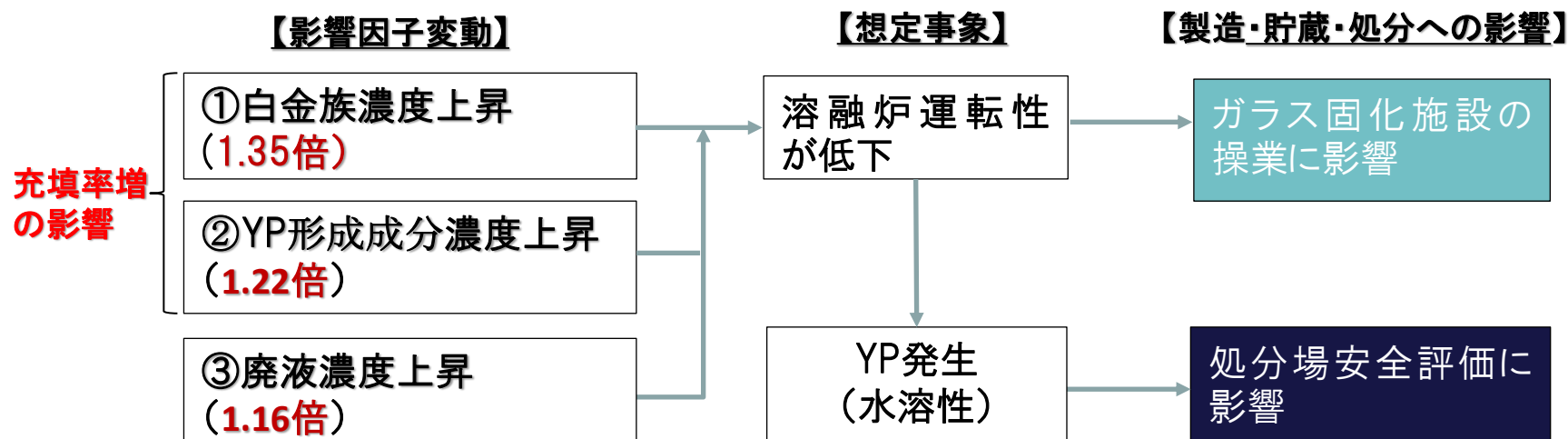
## 【製造・貯蔵・処分への影響】



- 高燃焼度燃料再処理において、ガラス固化体発生本数を年間1,000本とするため、廃棄物充填率を24.7wt%とし、発熱量を低減するため、再処理まで冷却年数8年とした。
- 以下の影響因子変動に対する対策が必要
  - ①白金族濃度上昇 ②YP(イエローフェーズ(分相))形成成分\*濃度上昇 ③廃液濃度上昇 (燃料あたりの核分裂生成物:増)

\* モリブデン酸塩等

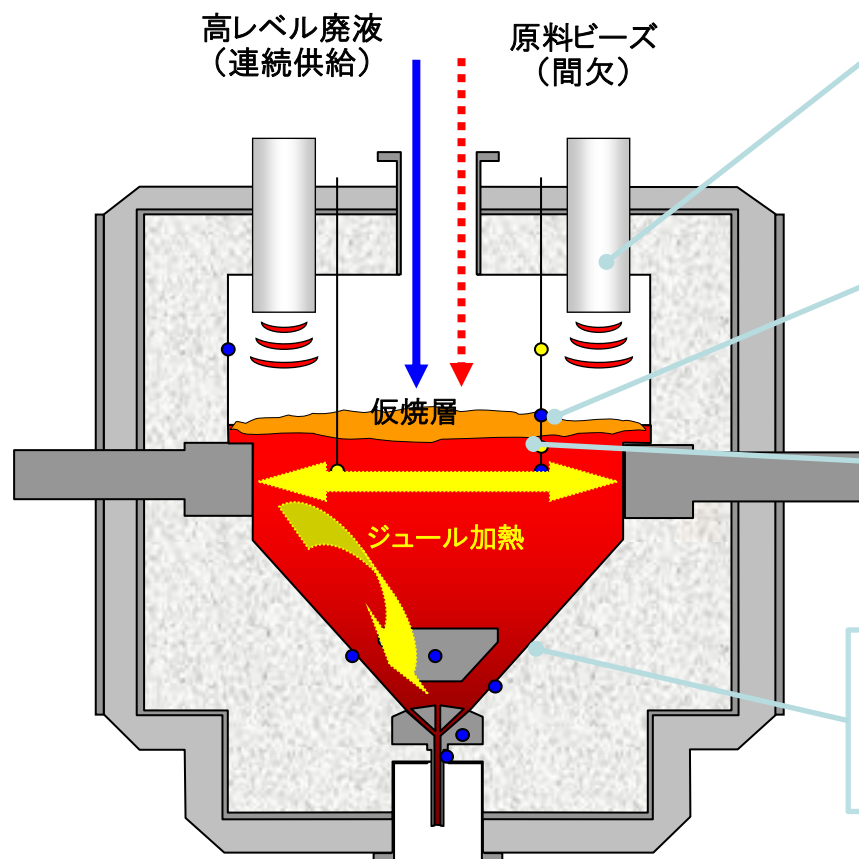
|                          | 廃棄物<br>充填率<br>[wt%] | 影響因子                        |                             |                            |                        |
|--------------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------|
|                          |                     | ガラス固化体                      |                             | 高レベル廃液                     | 廃液濃度                   |
|                          |                     | 白金族元素                       | YP形成成分                      | 濃縮制限なし                     | 濃縮制限あり                 |
| 設計条件<br>(45GWD/t、4年冷却)   | 22.1                | 1.25wt%<br>(1.00)           | 2.30wt%<br>(1.00)           | 118g/L                     | —                      |
| 高燃焼度条件<br>(55GWD/t、8年冷却) | 24.7                | 1.68wt%<br>( <u>1.35倍</u> ) | 2.80wt%<br>( <u>1.22倍</u> ) | 137g/L<br>( <u>1.16倍</u> ) | 118g/L<br><u>※廃液増大</u> |





## ガラス固化体施設への影響

- 影響因子変動①～③がガラス溶融炉の**安定運転**、**稼働率に影響**



### 想定事象④：リワーク成分\*増加、配管閉塞

要因：◇仮焼層状態変化に伴う飛沫同伴量増加

(想定事象①)

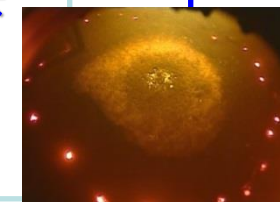
※リワーク成分：Cs, Tc, Ru等の揮発成分で、オフガ斯塔槽類でトラップ回収され、供給廃液系統に戻されガラス溶融炉に戻ってくる成分

### 想定事象①：処理能力不足・運転性低下

要因：仮焼層形成状態・熱バランスの変化

◇白金族濃度上昇(影響因子変動①)

◇廃液濃度上昇(影響因子変動③) 等



### 想定事象②：YP発生・運転悪化

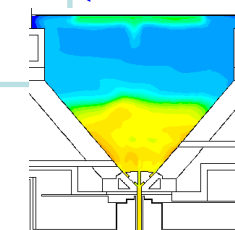
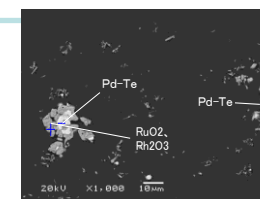
要因：◇仮焼層状態の変化(想定事象①)

◇YP形成成分濃度上昇(影響因子変動②)

### 想定事象③：白金族元素堆積による運転悪化

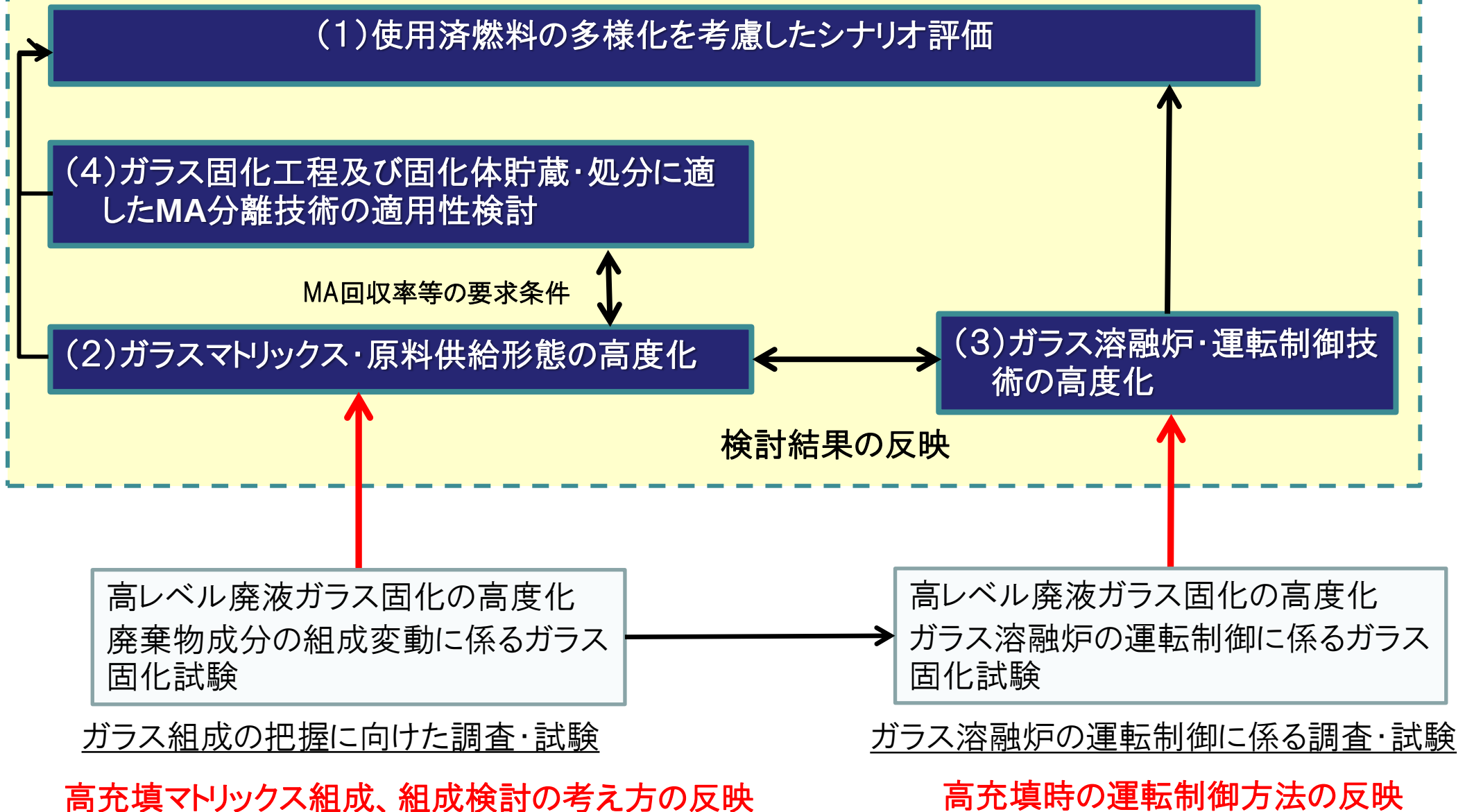
要因：◇仮焼層状態の変化(想定事象①)

◇白金族濃度の増加(影響因子変動①)



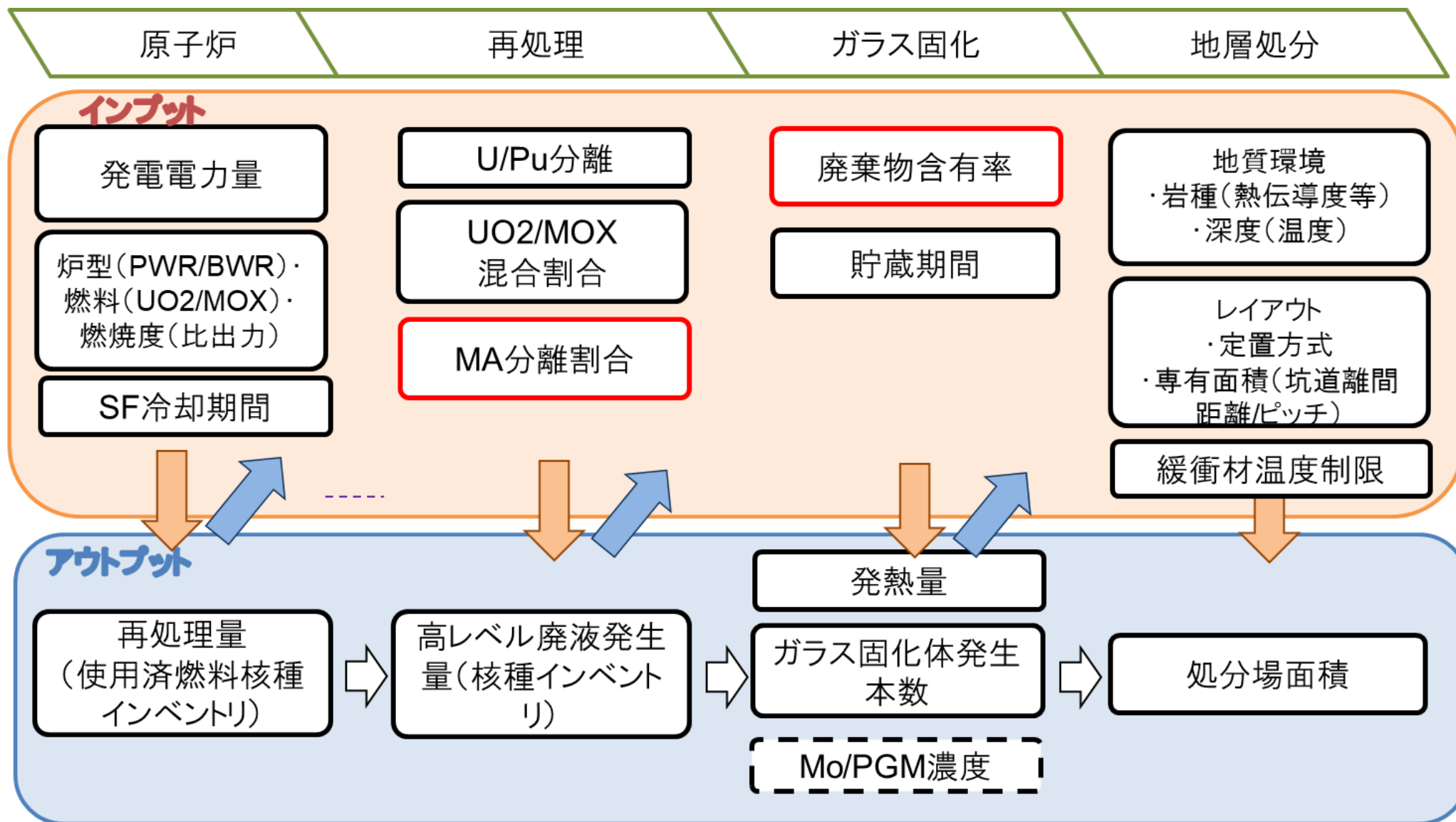


2019～ 対象：高レベル廃棄物（高燃焼度，MOX）



～2018 対象：低レベル廃棄物＋高レベル廃棄物（従来燃焼度）

| 対象燃料                                                                                        | 軽水炉MOX燃料(45GWd/t)                                                                                                                                                                                      | 高燃焼度燃料(55GWd/t)                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 再処理により発生する高レベル廃液の特徴<br>(現行 $\text{UO}_2$ 燃料(45GWd/t)との比較)                                   | 白金族元素:1.47倍<br>MA成分(発熱性核種):14.3倍                                                                                                                                                                       | 廃液濃度:1.16倍                                                                                                                                                                                                            |
| ガラス固化工程への課題<br>(現行 $\text{UO}_2$ 燃料の廃棄物充填率22.1wt%のガラス固化との比較)<br>【発生本数:1000/y】<br>【貯蔵期間:50y】 | <p>①処分に適した発熱量となるガラス固化体とするためには、一部のMA元素を取り除いてからガラス固化する必要がある。</p> <p>②白金族元素の増加に対する対策技術の開発が必要となる。</p> <p>③発熱性核種の除去によるさらなる高充填化が可能となる可能性がある。</p> <p>④高充填化を妨げる要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が必要となる。</p> | <p>①従来の廃棄物充填率では、年間発生本数の1000本を超える。そのため、廃棄物の高充填化が必要であり、ガラス固化体として、以下の濃度が上昇。<br/>白金族元素:1.35倍<br/>YP形成成分:1.22倍</p> <p>②左記と同様に、高充填化を妨げる要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が必要となる。</p> <p>③高濃度の廃液に対する溶融炉運転技術の高度化が必要となる。</p> |
| 開発目標                                                                                        | ガラス固化体工程に適したMA分離シナリオを検討する。これを受けて、放射性廃棄物の減容化を実現する上で、有効なMA回収率を設定し、その達成が可能な信頼性に優れたMA分離システムを確立する。また、得られる廃液に対し、白金族元素の凝集発生、イエローフェーズの発生を抑制する技術等を開発し、さらなる高充填化を検討する。                                            | 廃棄物充填率を2割程度増加させることを可能とするために、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を開発する。                                                                                                                                                         |



本研究開発では、原子炉～地層処分までの主要因子をパラメータとして、実施している。

エネルギー基本計画をもとに原子力利用シナリオから試算される再処理量を設定した。

### 条件（仮定）

- ・ 現行再処理工場UO<sub>2</sub>処理能力：800tU／年
- ・ 再処理可能となる冷却期間（UO<sub>2</sub>-SF：15年以上、MOX-SF：30年以上）に合わせて、再処理量を調整
- ・ 現行再処理工場は稼働年数40年、それ以降は将来再処理の導入を想定し、将来再処理からMOX-SFの再処理も考慮

### 結果

- 高燃焼度燃料の再処理は2041年から開始される
- UO<sub>2</sub>/MOX混合処理の場合（将来再処理）、MOX割合は16.7～25%となる。
- 現行の再処理におけるUO<sub>2</sub>-SFの再処理量は、約25,700トンと想定

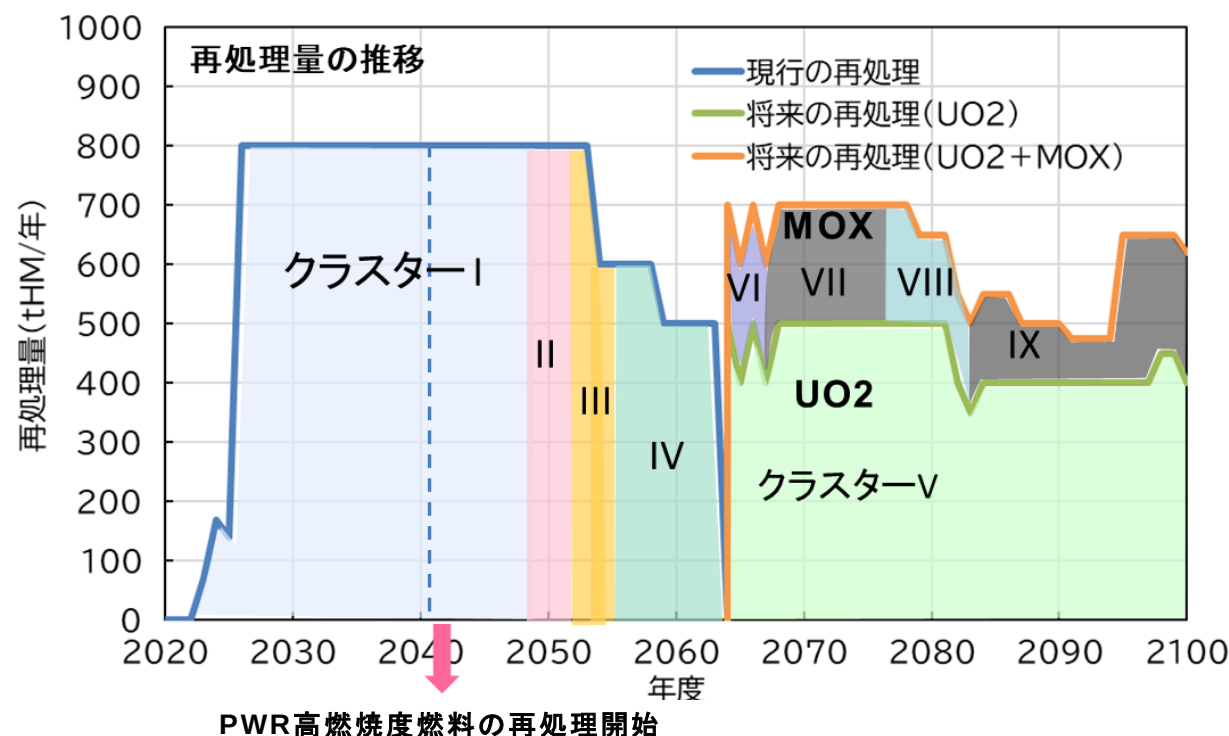
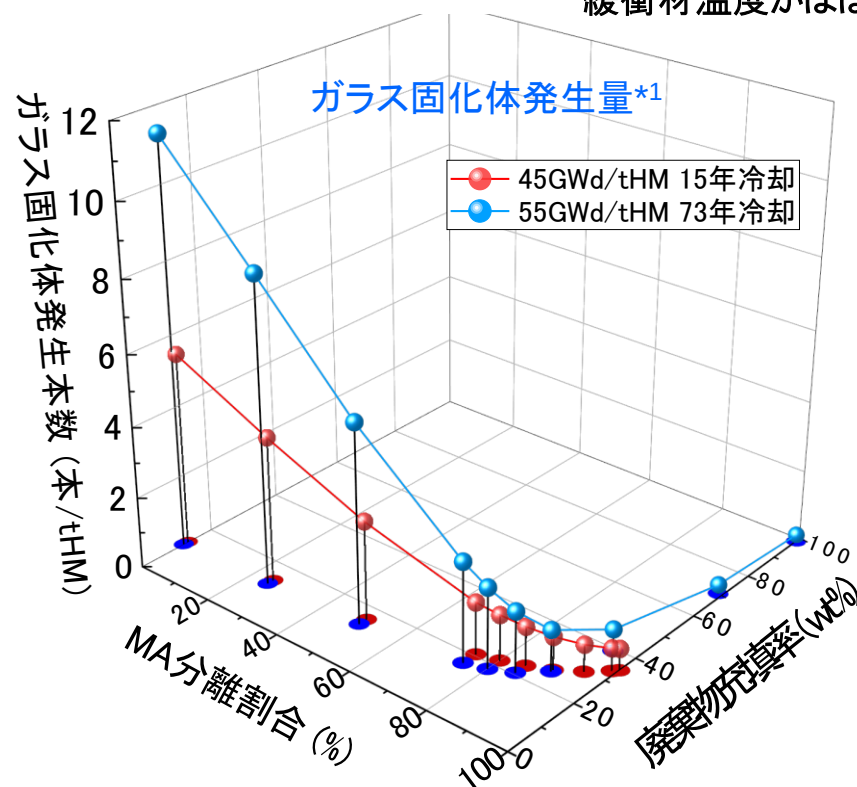


図 再処理量の推移

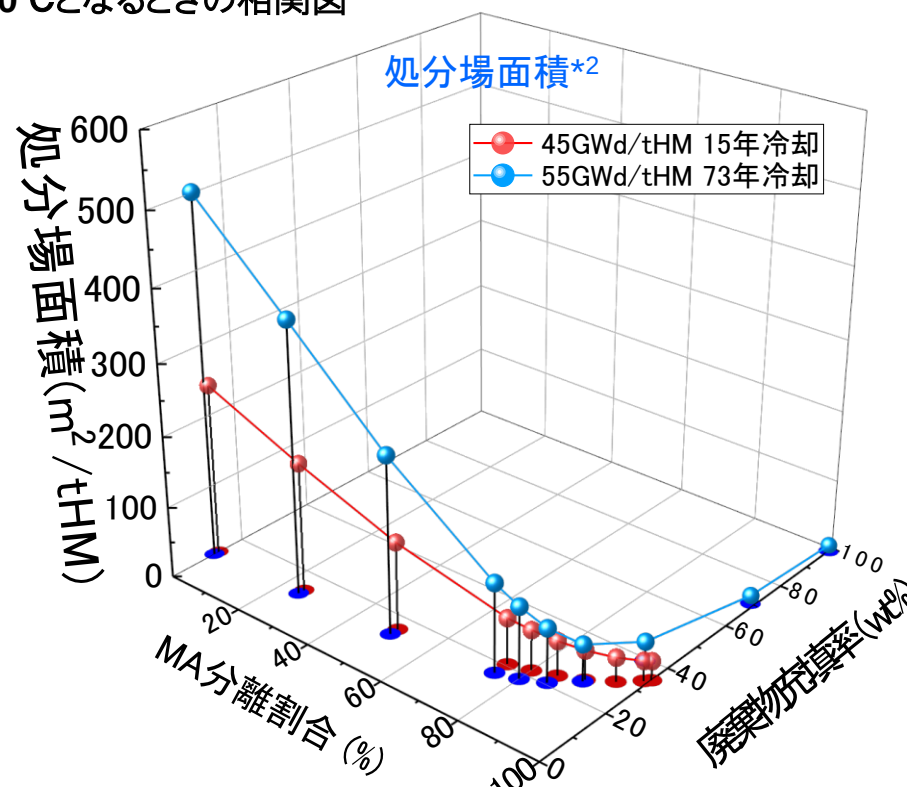
## シナリオ検討から得られるガラス固化体発生本数，処分場に及ぼす廃棄物充填率とMA分離の関係性（机上算出）

- 使用済MOX燃料におけるガラス固化体本数，処分場面積とMA分離，廃棄物充填率の関係性は，MA分離：90%付近，廃棄物充填率：30%付近までに大きく低減する傾向となる。

緩衝材温度がほぼ100℃となるとき的相关図



\*1 UO<sub>2</sub>標準:1.25本/tHM



\*2 UO<sub>2</sub>標準:55.5 m²/tHM

## (1)使用済燃料の多様化を考慮したシナリオ評価

- **原子力利用シナリオ**をもとに、様々な使用済燃料について、必要再処理量およびガラス固化体発生量から検討した

ここでは、MA分離や廃棄物条件の開発目標(処分場面積(小)の合理化)を設定とした試算を行った。

**MA分離については、87%を設定した場合、ガラス固化体には、廃棄物充填率約25%～が求められることが分かった。**

| クラスター | 年代    | 炉型      | 燃焼度<br>(GWd/tHM) | 冷却期間MA分離<br>(years)(%) |    | 廃棄物含有率<br>(%) | 処分場面積<br>(m <sup>2</sup> /TWh) |
|-------|-------|---------|------------------|------------------------|----|---------------|--------------------------------|
| I     | ～2020 | PWR     | 30               | 40                     | 0  | 23.4          | 154.8                          |
|       |       | BWR     | 30               | 40                     | 0  | 26.1          | 127.7                          |
|       |       | PWR     | 40               | 30                     | 0  | 23.6          | 141.8                          |
|       |       | BWR     | 40               | 30                     | 0  | 25.8          | 121.1                          |
|       |       | PWR     | 45               | 30                     | 0  | 24.2          | 132.3                          |
|       |       | BWR     | 45               | 30                     | 0  | 25.4          | 121.4                          |
|       |       | PWR     | 50               | 30                     | 0  | 24.3          | 128.9                          |
| II    | 2020  | PWR     | 50               | 25                     | 0  | 24            | 131.4                          |
|       | 2020  | BWR     | 45               | 25                     | 0  | 25            | 124.4                          |
| III   | 2030  | PWR     | 50               | 20                     | 0  | 23.6          | 134.9                          |
|       | 2030  | BWR     | 50               | 20                     | 0  | 24.7          | 124.1                          |
| IV    | 2040  | PWR     | 55               | 15                     | 0  | 23.4          | 134.2                          |
|       | 2040  | BWR     | 55               | 15                     | 0  | 24.3          | 125.1                          |
| V     | 2050～ | PWR     | 60               | 15                     | 0  | 23.4          | 132.3                          |
|       |       | BWR     | 60               | 15                     | 0  | 24.4          | 122.5                          |
| VI    | ～2029 | MOX/PWR | 38               | 40                     | 87 | 23            | 147.2                          |
|       |       | MOX/BWR | 33               |                        | 87 | 26            | 123.3                          |
| VII   | 2030～ | MOX/PWR | 40               | 35                     | 87 | 23.2          | 143.2                          |
|       |       | MOX/BWR |                  |                        | 87 | 25.7          | 120.0                          |
| VIII  | 2040～ | MOX/PWR | 50               | 35                     | 87 | 22.8          | 141.6                          |
|       |       | MOX/BWR |                  |                        | 87 | 25.1          | 119.4                          |
| IX    | 2050～ | MOX/PWR | 55               | 30                     | 87 | 22.1          | 136.2                          |
|       |       | MOX/BWR |                  |                        | 87 | 25.5          | 114.5                          |

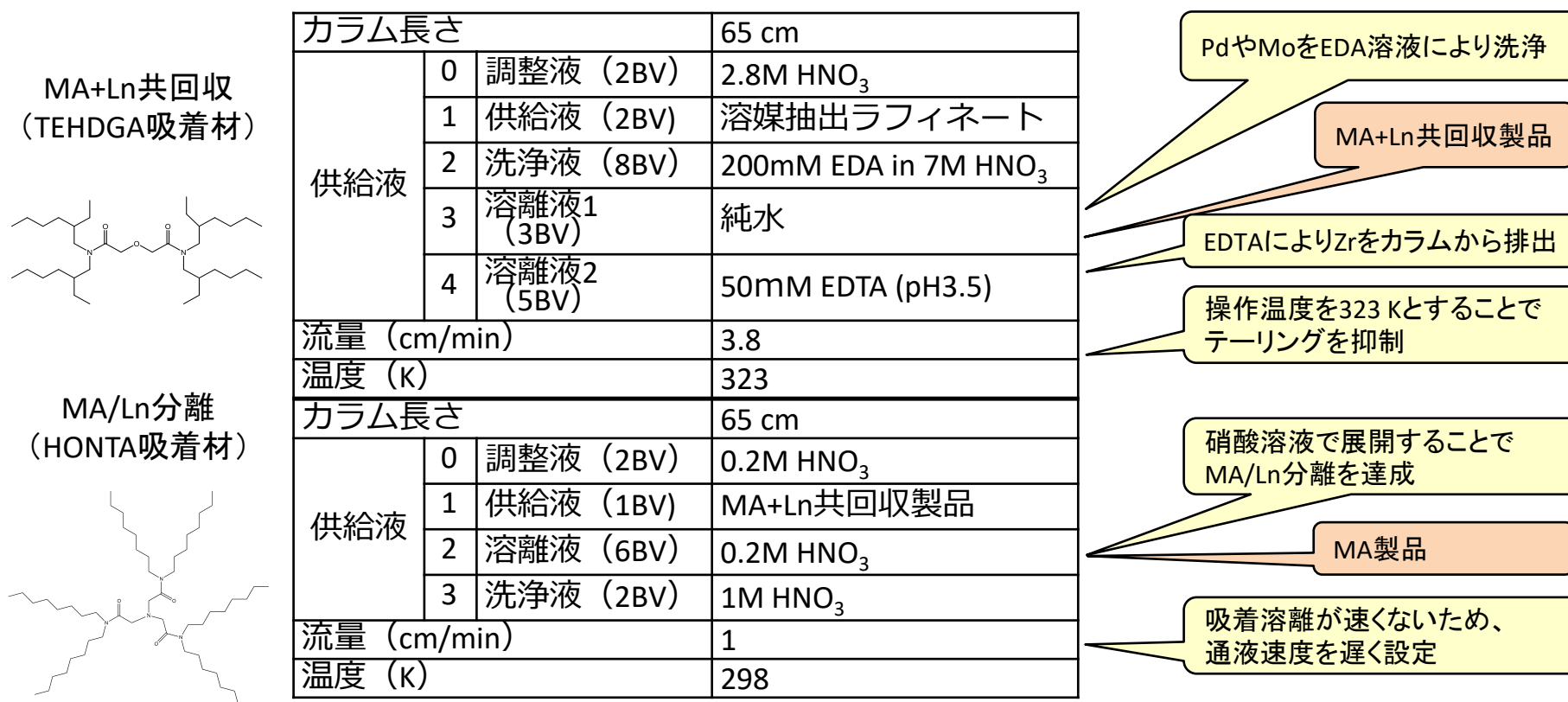


## (4) ガラス固化工程及び固化体貯蔵・処分に適したMA分離技術の適用性検討

## MA分離フローシートの構築

MA回収率90%程度（以上）を目標として、分離装置の開発を実施した。

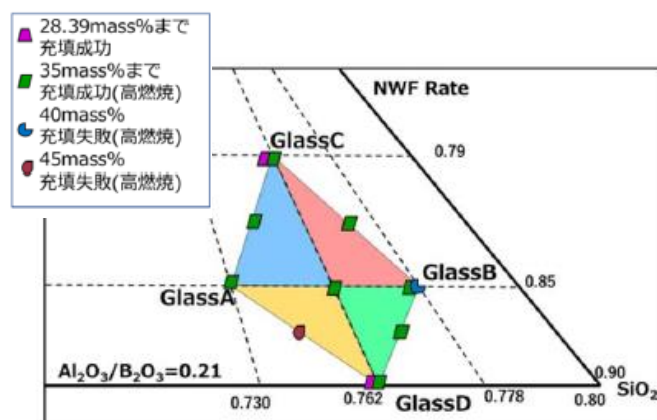
MA+ランタノイド元素（Ln）共回収及びMA/Ln分離の2段から成る抽出クロマトグラフィーを対象に、MOX燃料再処理時に発生する廃液からMAを分離回収するためのフローシート条件を模擬コールド試験、廃液発生量等（ガラス固化する廃液）の評価を実施した。



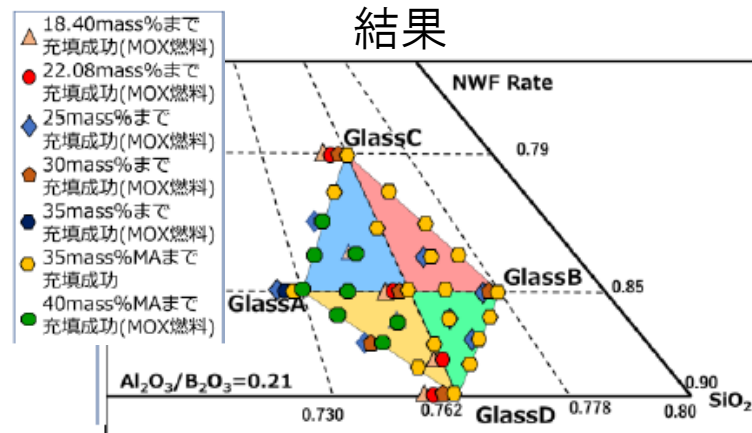
1Lの溶媒抽出ラフィネートの処理により、9LのMA製品と16Lの廃液（内、4LがEDA、2.5LがEDTAを含む）が発生

## 評価項目 2-1

- 高燃焼度燃料ガラスの目安とした廃棄物充填率13wt% (Na除く)  
を超える範囲で充填率を高めるガラス組成を小規模な試験系にて検討できた。
- 処理する際のガラス形状を検討して、ガラスブリケットやガラスファイバーカートリッジについて、YPに対する効果を確認し、比表面積が大きくなる形状ほどYP抑制が可能であることが分かった。



高燃焼度燃料用組成探索  
結果



MOX燃料用組成探索結果

〈組成範囲〉

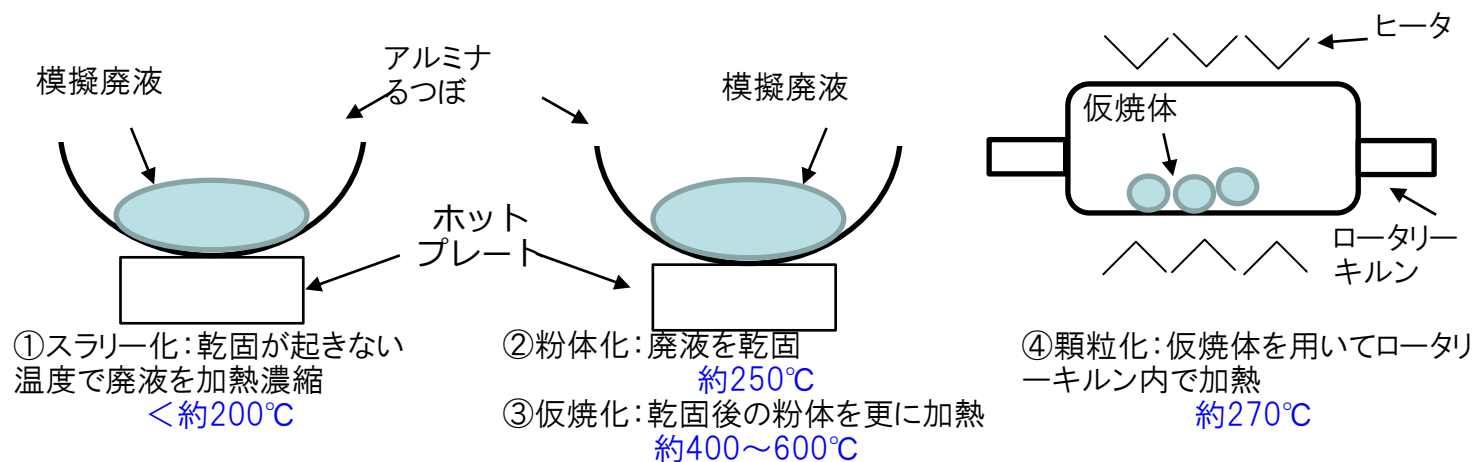
・  $2.7 \leq \text{SiO}_2/\text{B}_2\text{O}_3 \leq 4$  、  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{B}_2\text{O}_3 = 0.21$  、  
 $79 \leq \text{SiO}_2 + \text{B}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 90$

| 高燃焼度燃料模擬廃液     |  |
|----------------|--|
| 粉末ガラスブリケット     |  |
| ガラスファイバーカートリッジ |  |

## 評価項目 2-1

## (1) ガラス溶融炉の高度化廃液多様化への対応

- 高燃焼燃料やMOX燃料の使用済燃料から発生する高レベル放射性廃液の性状を把握し、処理能力を維持しつつ溶融炉の小型化を達成するため、小型炉試験等により溶融表面積あたりの処理能力の向上について検討する。
- これまでに高燃焼燃料やMOX燃料の使用済燃料から発生する高レベル放射性廃液の性状（酸濃度、溶解度など）を把握した。
- 処理能力（溶融炉の加熱能力）に重要な因子として、処理する廃液濃度（水分量）が重要であるため、廃液を供給する廃棄物濃度を検討し、ガラス溶融炉での処理条件についてるつぼ規模および管状炉（実験室規模）を用いて、各廃棄物濃度のデータを蓄積した。ほとんど水分を飛ばした廃液状態でも処理可能であった。



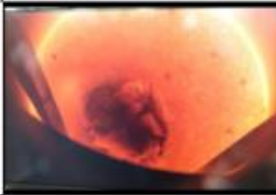
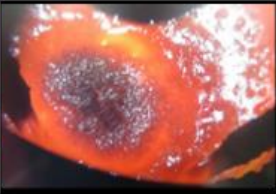
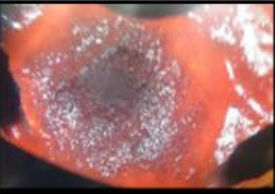
廃液の水分濃度を減らした廃棄物調整

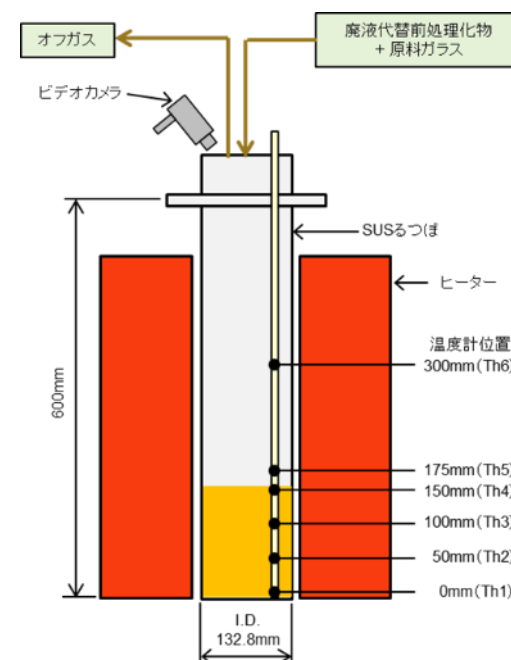
## 評価項目 2-1

- 高燃焼度燃料における高レベル放射性廃液（模擬）を用いて、溶融炉を模した試験系での運転を行い、従来の使用済燃料との比較を行った。
- 管状炉試験の結果、廃液の供給速度を調整することでガラス化可能である見通しを得たが、現状の運転制御の範囲では仮焼層が従来より薄くなる傾向となった。
- 廃液供給時の仮焼層形成には、廃液中の水分の潜熱が大きく寄与していると考えられ、廃液前処理化物の溶融ガラス化に当たっては、仮焼層形成状態の変化を含めた運転方法の検討が必要

高燃焼度廃液成分の仮焼層表面写真

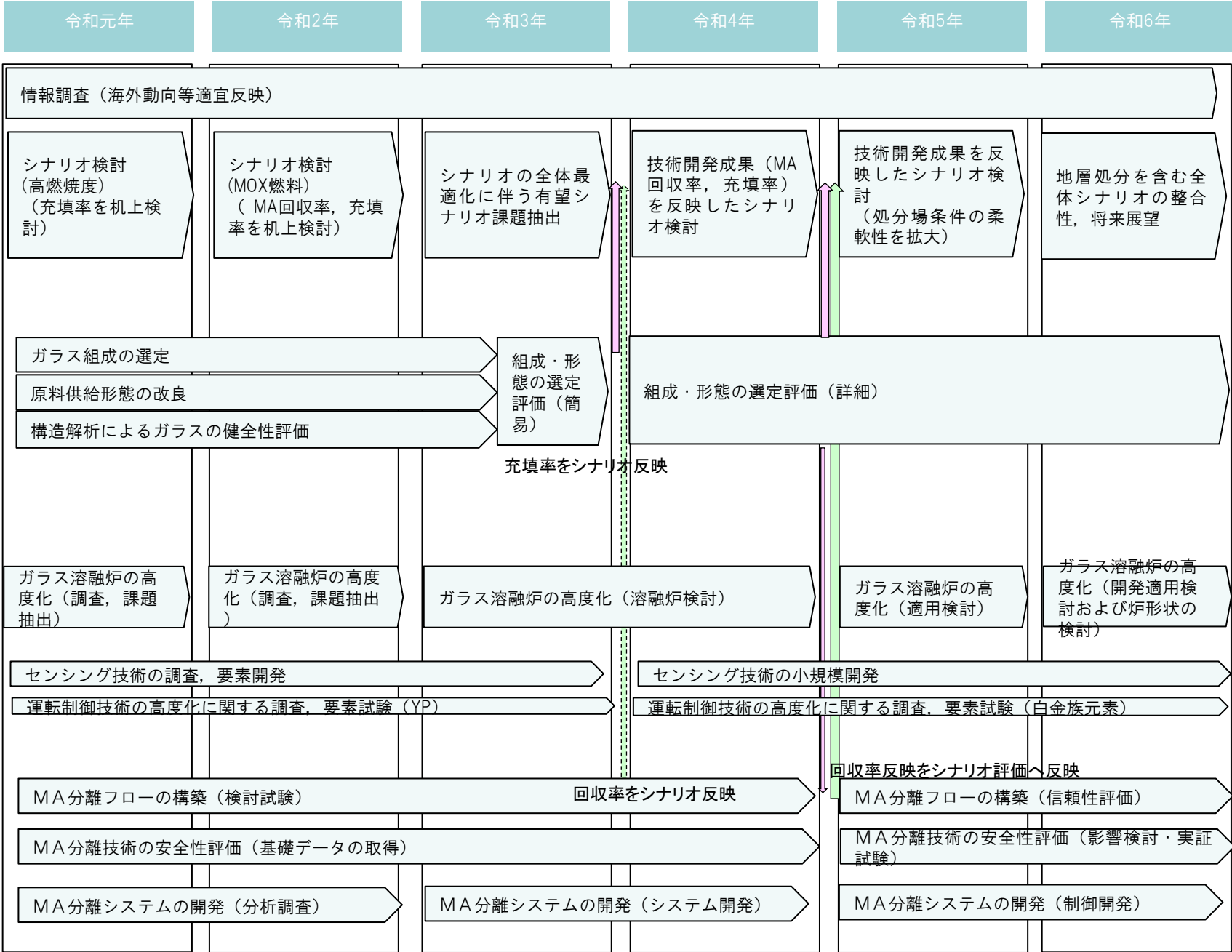
(上:廃液供給 / 下:前処理化物供給(処理速度:廃液供給時の2倍))

| 試験時間      | 5h                                                                                  | 6h                                                                                  | 7h                                                                                   | 8h                                                                                    |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 仮焼層写真     |    |    |    |    |
| 制御温度      | 1150℃                                                                               |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
| 高燃焼度廃液    | 383g/h                                                                              |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
| 原料ビーズ     | 194g/h                                                                              |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
| 試験時間      | 5h10min                                                                             | 6h10min                                                                             | 7h10min                                                                              | 7h55min                                                                               |
| 仮焼層写真     |  |  |  |  |
| 制御温度      | 1150℃                                                                               |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
| 廃液代替前処理化物 | 127g/h                                                                              |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
| 原料ガラス     | 386g/h                                                                              |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |



管状炉試験装置概略

- (1)使用済燃料の多様化を考慮したシナリオ評価
- (2)ガラスマトリックス・原料供給形態の高度化
- (3)ガラス溶融炉・運転制御技術の高度化
- (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

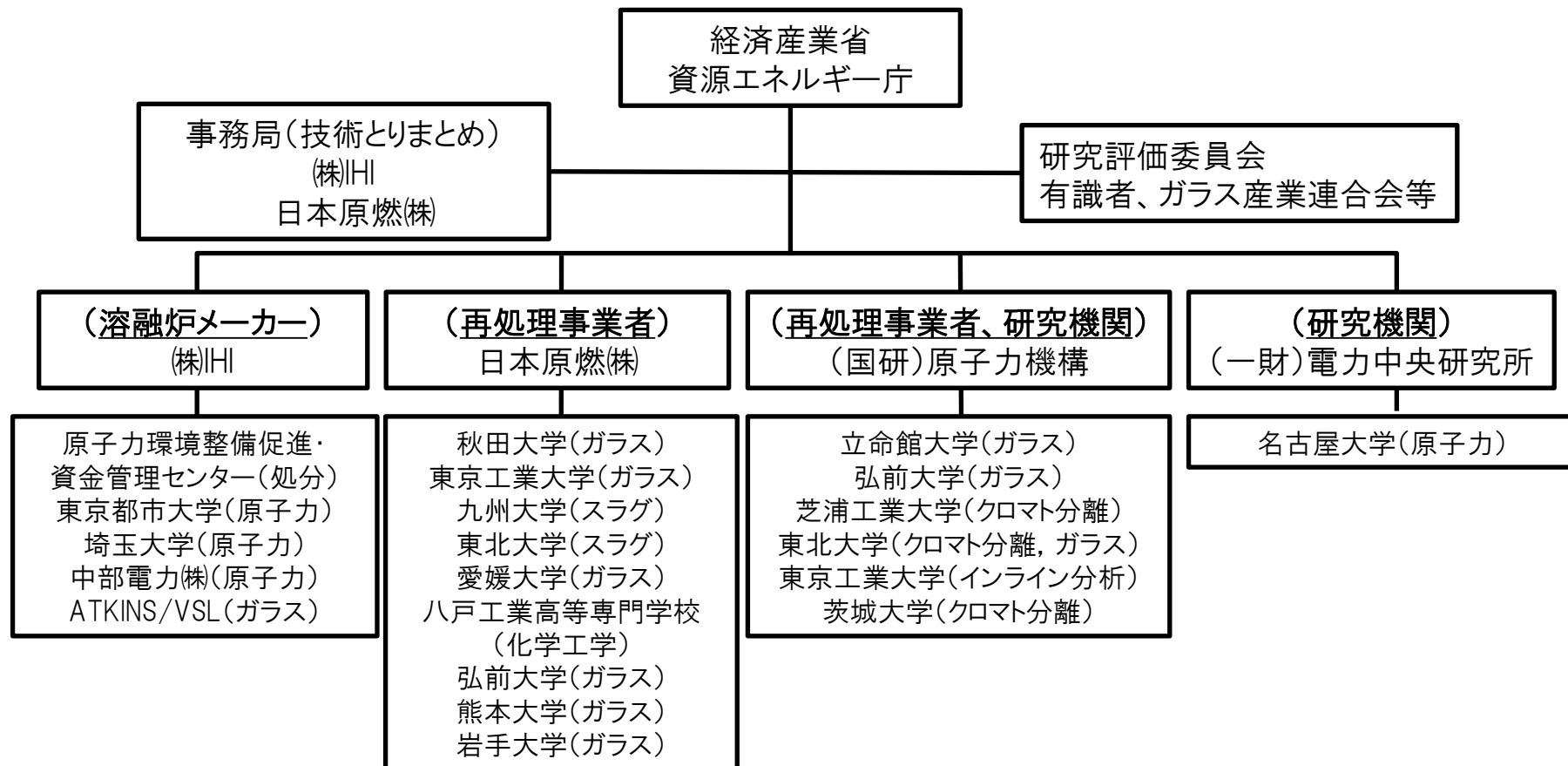


(単位：百万円)

| 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<br>基盤整備 | 597（委託） | 601（委託） | 607（委託） | 1,805（委託） |



- 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2～3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



- 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。

| 研究開発項目                   |                    | 中間目標（2022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。<br>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、運転性および耐久性を評価し、候補組成を選定する。<br>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。<br>DBP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。                            |

| 研究開発項目                |              | 中間目標（2022年度）                                                                             | 最終目標（2024年度）                                                                | 設定（変更）理由                                           |
|-----------------------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| (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。<br>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。                 | ガラス組成の選定およ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。<br>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。<br>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。 | 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。                |

| 研究開発項目                                |                  | 中間目標（2022年度）                                                                                                      | 最終目標（2024年度）                                                                                  | 設定（変更）理由                           |
|---------------------------------------|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| (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。<br>上記に必要な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。<br>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。<br>吸着材の放射線による劣化生成物の同定を行う。<br>吸着材物性に及ぼす造粒条件の影響を把握する。<br>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。<br>劣化生成物に対する安全対策を具体化する。<br>分離塔からの排熱、排ガス特性を確認する。<br>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。             |
|                                       | ③ MA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。<br>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。<br>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。       |

| 研究開発項目                  | 中間目標（2022年度） | 成果・意義                                                                                                              | 達成状況 | 未達の原因分析/<br>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。                                                               | 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。 | 達成   | 各候補ガラス組成の物性取得により、運転性および耐久性を評価し、候補組成を選定する。<br>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。<br>DBP対策技術のスケールアップ等の検討を行う。 |



| 研究開発項目                  |                   | 中間目標（2022年度）                                                                                  | 成果・意義                                                                                                                                                                              | 達成状況 | 未達の原因分析/<br>今後の見通し                                                      |
|-------------------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-------------------------------------------------------------------------|
| (2)ガラスマトリックス・原料供給形態の高度化 | 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）およびカートリッジ（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状を調査し、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   | ガラス組成の選定およ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。 |

| 研究開発項目                                                                | 中間目標（2022年度）     | 成果・意義                                                                                    | 達成状況 | 未達の原因分析/<br>今後の見通し                                                           |
|-----------------------------------------------------------------------|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------|------------------------------------------------------------------------------|
| (3)ガラス<br>熔融炉・<br>運転制御<br>技術の高度化                                      | 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。                                          | 達成   | 電気プローブを組み合わせて小型炉試験を行い、仮焼層構造を検知できることを示す。<br>熔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。 | 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。                           |
| (4)ガラス<br>固化工程<br>及び固化<br>体貯蔵・<br>処分に適<br>した MA<br>分離技術<br>の適用性<br>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。<br>上記に必要な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。                          | 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。<br>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。 |

| 研究開発項目                                |                | 中間目標（2022年度）                                                                                                      | 成果・意義                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 達成状況 | 未達の原因分析/<br>今後の見通し                                                                            |
|---------------------------------------|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| (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 | 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。<br>吸着材の放射線による劣化生成物の同定を行う。<br>吸着材物性に及ぼす造粒条件の影響を把握する。<br>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 <sub>2</sub> 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。<br>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。<br>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。<br>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。 | 達成   | 充填層型フィルタの遠隔保守性を実証する。<br>劣化生成物に対する安全対策を具体化する。<br>分離塔からの排熱、排ガス特性を確認する。<br>使用済吸着材の再生及び処理技術を実証する。 |
|                                       | ③ MA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。<br>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。<br>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。<br>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。                                 |

| 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    |

本事業で得られた成果は、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

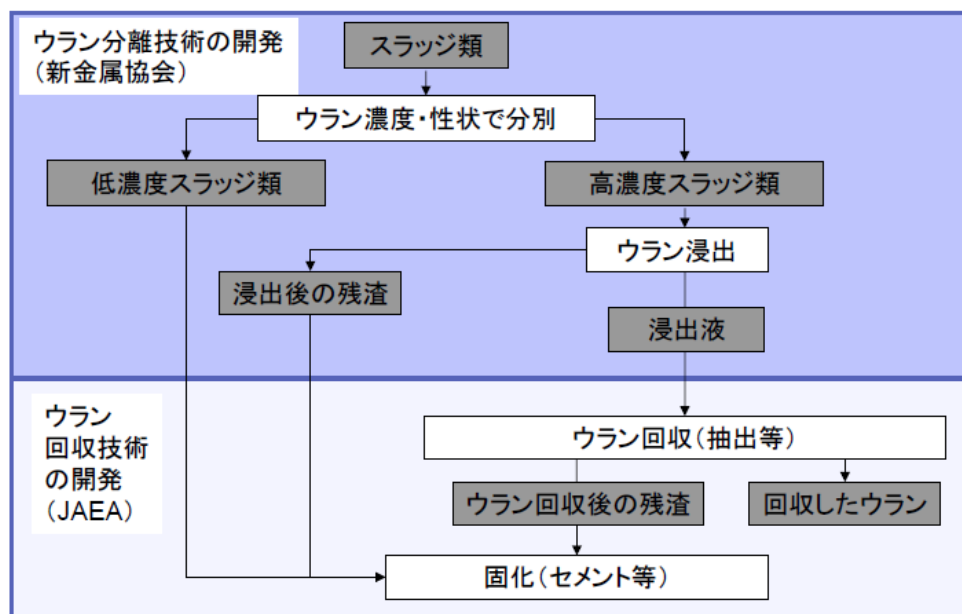
なし

#### プロトタイプの実証

なし

## B. ウラン分離・回収技術の開発

| 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      | 新金属協会、化研        |
|                          | ② ウラン分離技術の開発          | 新金属協会、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        | JAEA、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  | JAEA、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    | JAEA            |
|                          | ② 有害物を含む廃棄物の安定固化技術の開発 | JAEA            |



ウラン廃棄物の発生者である加工事業者（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、JAEA（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。両者の開発分担は左図の通りであり、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。



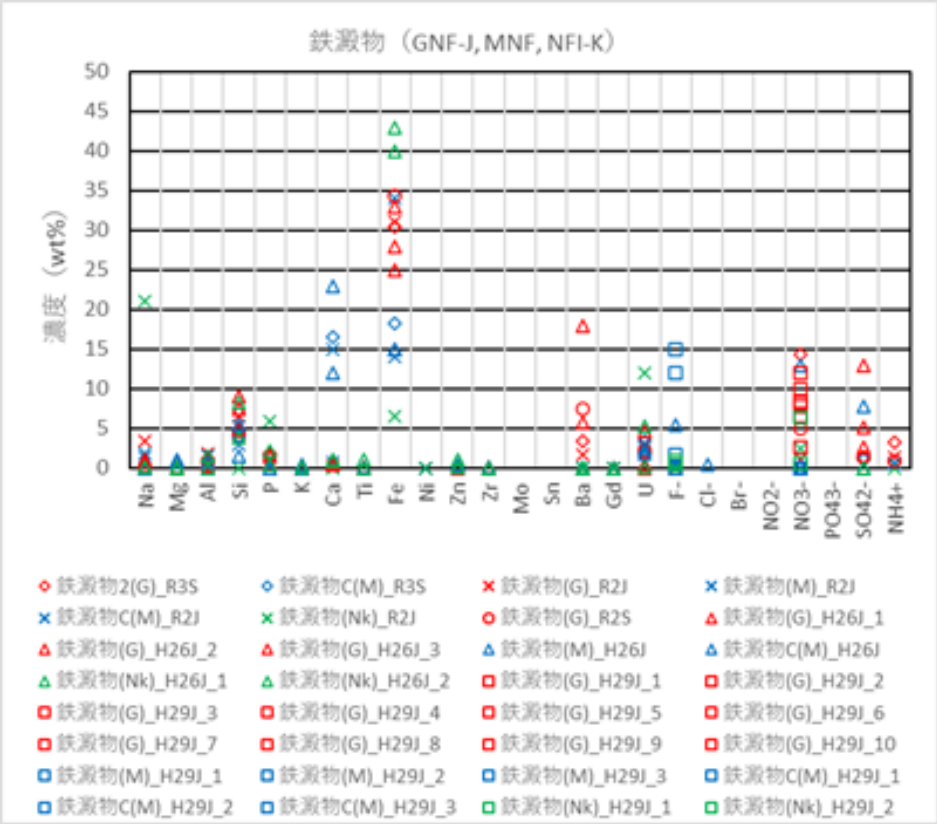
① ウラン廃棄物の性状把握

核燃料加工施設等の各事業者では多様なウラン廃棄物を保管しており、その処分に向けた処理を効率的に実施するためには、類似する成分のものに分類して行うことが合理的である。

発生廃棄物中、スラッジ状廃棄物は比較的ウラン濃度が高いが、これらのスラッジ状廃棄物について、本事業での分析結果及び連携先(JAEA)や過去の分析結果を整理して、化学組成に関する傾向を把握した。事例として鉄澱物の整理結果を示す(右図)。

スラッジ状廃棄物の性状による分類の考え方

| 分類   | 化学組成       |                                                                                 |        | 候補試料                                                  | 備考                 |
|------|------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------|-------------------------------------------------------|--------------------|
|      | 主成分        | 主な付随成分                                                                          | 主な有害金属 |                                                       |                    |
| Fe主体 | Fe         | Na, Si, Ca, Ba, F, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Cr, Pb | 鉄澱物 (GNF-J)<br>鉄澱物 (MNF)<br>鉄澱物 (NFI-K)<br>鉄澱物C (MNF) | —                  |
| Si主体 | Si         | F <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>    | (Cr)   | シリカ、水ガラス澱物 (MNF)                                      | 一部でCrを検出           |
| Al主体 | Al         | Na, Si, (Fe), NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>      | Cr, Pb | PAO (NFI-T)<br>K-スラッジ (NFI-K)                         | K-スラッジではFeが高いものもあり |
| Ca主体 | Ca         | Al, Si, F <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>                           | (Cr)   | CaF <sub>2</sub> (NFI-T)                              | 一部でCrを検出           |
| 焼却灰  | Ca, Al, Si | (Fe)                                                                            | Cr, Pb | 焼却灰 (MNF)<br>焼却灰 (NFI-K)<br>焼却灰 (NFI-T)               | —                  |



スラッジ状廃棄物の組成に関する性状把握(鉄澱物の例)

さらに、組成や発生履歴をもとに主要な化学成分で分類し、主な付随成分や含有の可能性のある重金属の情報を取りまとめた（左図）。

尚、連携先での技術開発に必要なサンプルやウラン浸出液の情報の提供も、本開発のなかで適宜実施した。特に、連携先でのコールドでの固化試験を実施するために、ウランを含まない模擬のスラッジを製作し、提供を行った。

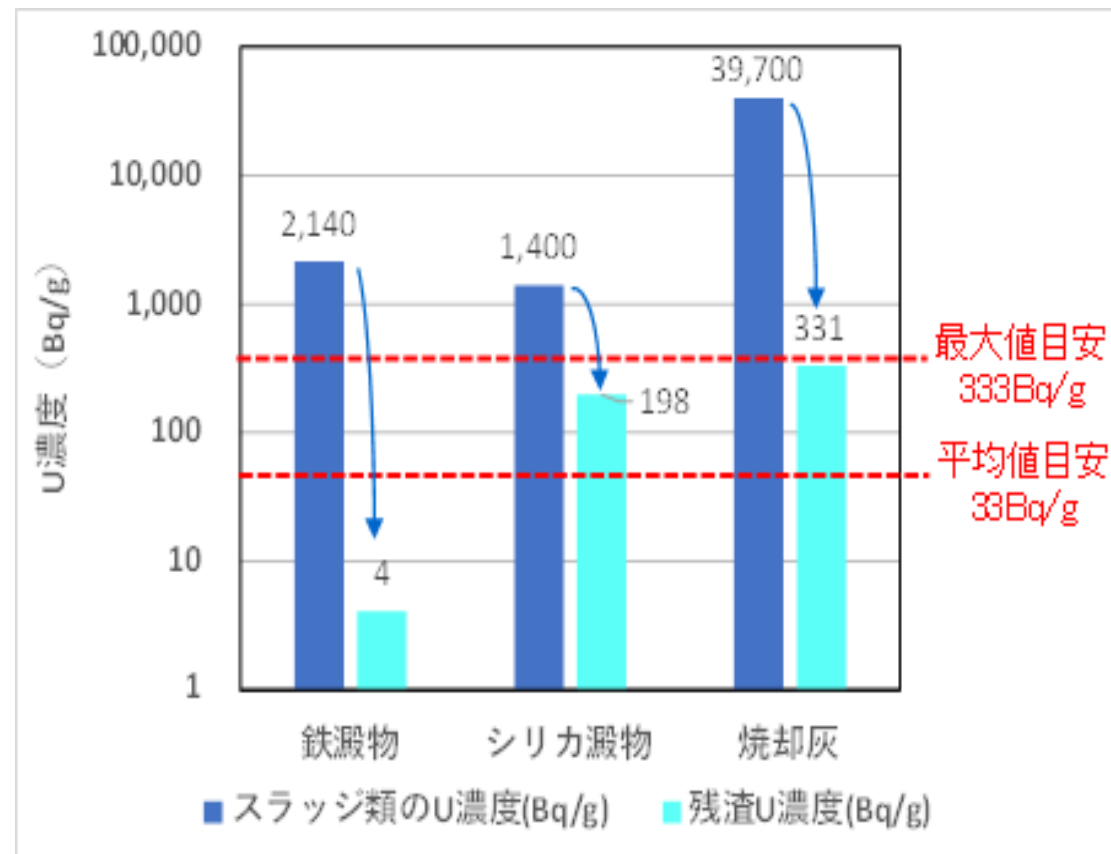
## ② ウラン分離技術の開発(1/2)

スラッジ状の廃棄物からウランを浸出し、分離する技術の文献調査・検討を実施。

本事業では、まずは汎用性の高い硝酸による浸出試験を実施した。また開発の優先性を踏まえ、核燃料加工事業者が保管しているスラッジ状の廃棄物のうち、物量が多い、あるいは含有するウラン濃度が高いものとして、主に鉄澱物、シリカ澱物、焼却灰を浸出試験の対象として選定した。

一部の試料では、類似するものが複数の事業所で発生することから、それらの性状の相違が浸出挙動に及ぼす影響も確認した。

種々の試験の結果から、硝酸については3N、70～100℃程度の条件が、最適な浸出条件であることを確認した。鉄澱物の残渣はトレンチ処分で想定されるウラン濃度（平均値）を下回り処分可能な濃度への低減が、またシリカ澱物や焼却灰の残渣も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（右図）。



硝酸による浸出試験の結果の例

② ウラン分離技術の開発(2/2)

一方、硝酸による浸出は廃棄物自体（母材）を溶解するので、ウラン以外の成分も浸出液に溶解し、またNOXの発生や環境面の配慮が必要であることから、後段のウラン回収の過程に及ぼす負荷は大きいことが課題と考えられる。

その対策のための硝酸の分解・再利用に関する検討は、連携先のウラン回収技術の開発事業で実施しているが、前段のウランの分離の過程でウランだけを選択的に浸出させる技術が開発されれば、分離・回収全体での作業負荷低減に寄与すると考えられる。

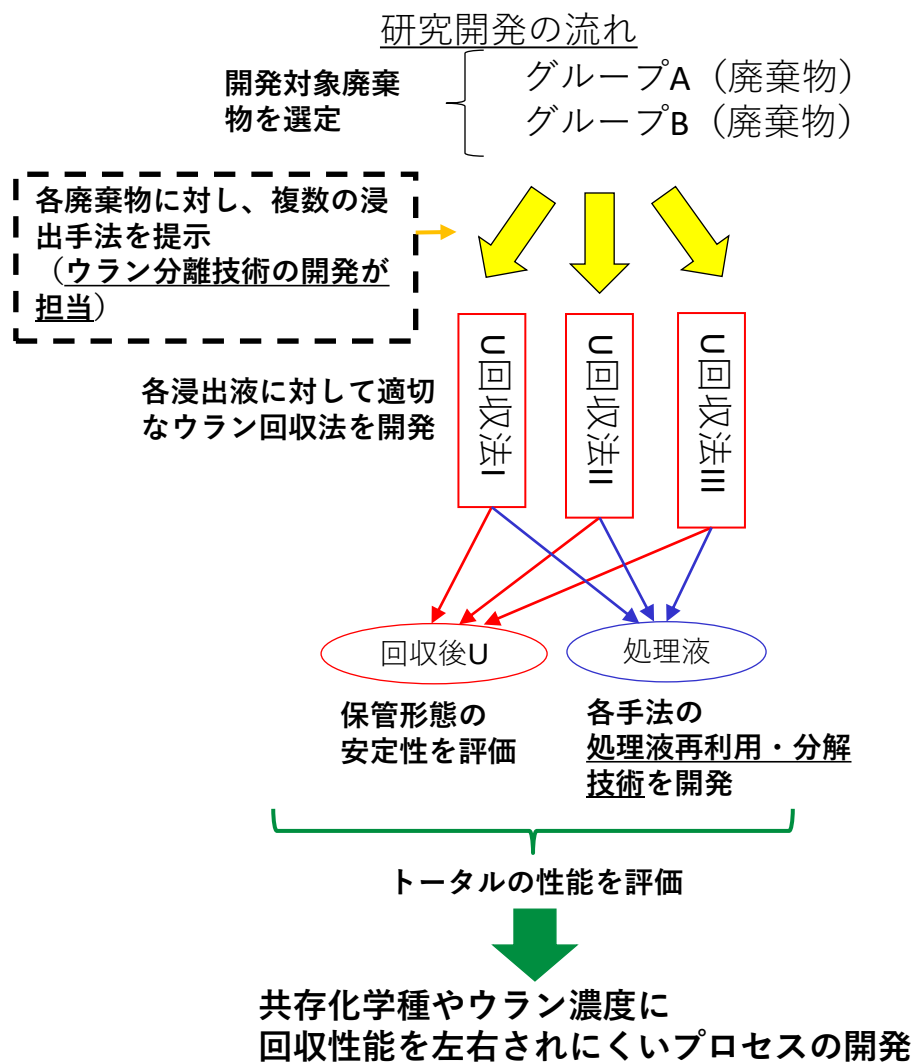
そこで、ウランが安定な炭酸塩錯体を生成する性質を利用し、炭酸塩溶液によってウランを選択的に浸出させる新規の手法も検討を実施した。炭酸塩浸出は硝酸よりは浸出性が低いため、現在、浸出温度、時間、攪拌条件等を検討してウランの浸出性の向上を目指している。

これらの浸出試験の結果と①の廃棄物の性状把握に基づく分類検討を整理して、浸出性による廃棄物の類型化の考え方を提示した（右図）。今後、本考え方の適用性を確認していくとともに、実用化を踏まえ、低浸出スラッジ類と高浸出性スラッジ類のそれぞれの処理工程の検討を進めていく。

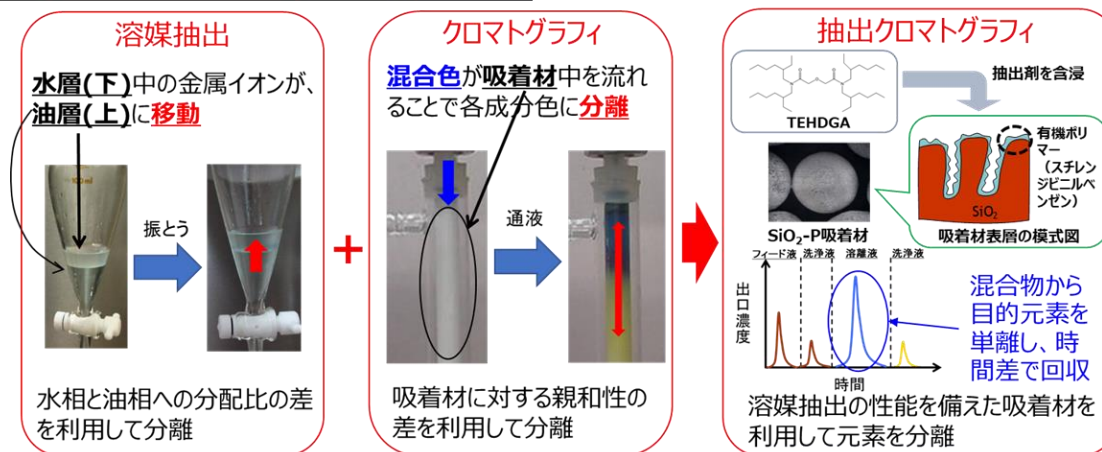
浸出性によるスラッジ類の類型化の考え方

| 分類   | 浸出対象<br>試料  | 事業所                   | 浸出挙動          | 硝酸溶液<br>(3N, 70-<br>100℃)** | 炭酸塩溶液<br>(50℃以上、超<br>音波付加等)** | グループ<br>(硝酸への<br>ウランの浸<br>出性) |
|------|-------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Fe主体 | 鉄澱物<br>鉄澱物C | GNF-J<br>MNF          | U残渣率(%)       | 0.03 - 0.19                 | 12 - 48                       | 高浸出ス<br>ラッジ類                  |
|      |             |                       | 固化体U濃度(Bq/g)* | 1 - 18                      | 78 - 366                      |                               |
|      |             |                       | 全残渣率(%)       | 9 - 19                      | 73 - 90                       |                               |
| Si主体 | シリカ澱物       | MNF                   | U残渣率(%)       | 11 - 13                     | 10 - 12                       | 低浸出ス<br>ラッジ類                  |
|      |             |                       | 固化体U濃度(Bq/g)* | 59 - 62                     | 52 - 62                       |                               |
|      |             |                       | 全残渣率(%)       | 81 - 87                     | 79 - 84                       |                               |
| 焼却灰  | 焼却灰         | MNF<br>NFI-K<br>NFI-T | U残渣率(%)       | 0.08 - 1.3                  | 9 - 53                        | 低浸出ス<br>ラッジ類                  |
|      |             |                       | 固化体U濃度(Bq/g)* | 11 - 179                    | 241 - 3750                    |                               |
|      |             |                       | 全残渣率(%)       | 10 - 35                     | 59 - 106                      |                               |
| Al主体 | K-スラッジ      | NFI-K                 | U残渣率(%)       | 5                           | 14                            | 今後検討                          |
|      |             |                       | 固化体U濃度(Bq/g)* | 1128                        | 927                           |                               |
|      |             |                       | 全残渣率(%)       | 25                          | 80                            |                               |

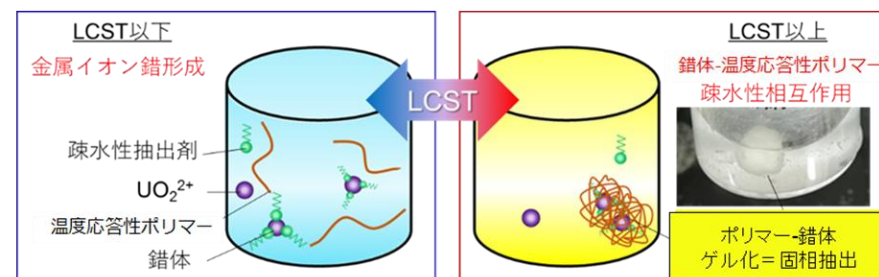
## ① ウラン選択回収技術の開発(1/2)



## 抽出クロマトグラフィ



## ゲル化抽出



水溶液中に抽出剤及び温度変化によってゲル化する水溶性ポリマー（温度応答性ポリマー）を分散させ、溶媒抽出の原理で金属を抽出した後、加温によって抽出錯体をゲルに包含して沈殿させる分離技術



## ① ウラン選択回収技術の開発(2/2)

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方法として、ゲル化抽出法の実施する。

## ◆ 原理の確認、メカニズムの調査

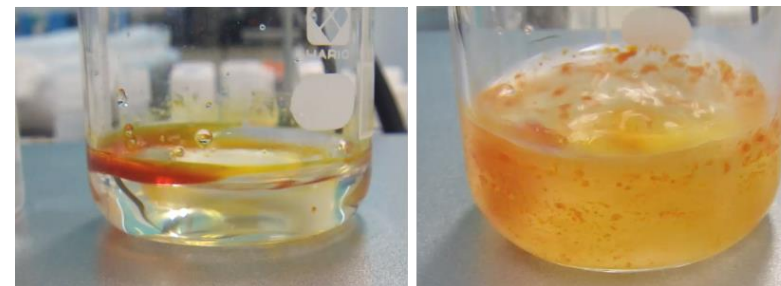
- モノアミドに親和性を示す $\text{Ce}^{4+}$ を用いて、原理、操作手順等の確認を行った。
- $\text{Ce}^{4+}$ ,  $\text{UO}_2^{2+}$ を対象として、抽出試験、錯体構造解析等を用いて化学量論比を決定するとともに、ゲル化抽出が溶媒抽出と同様の反応をもとに進むことを確認した。

## ◆ 配位子及びポリマーの最適化

- 複数の配位子-ポリマーの組合せでウラン選択回収性能、操作性、コストについて評価を実施した。
- 適切な組み合わせを選定するとともに、ウラン製品純度向上に向けた改良点等を挙げる事が出来た。

## ◆ 酸化物転換

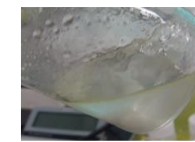
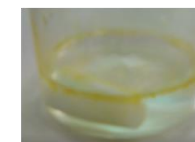
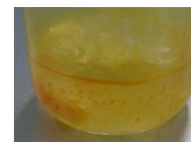
- 模擬液から回収したウラン製品を対象として、適切な熱処理条件を選定し、本条件によりウラン酸化物が得られることを確認した。



$\text{Ce}^{4+}$ を対象として実施したゲル化試験の様子

## ポリマーの性能の比較

|                                       | PNIPAAm                                               | PNDEAAm                                   | PNEAAm                       | PNIPMAAm                                          |
|---------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------|
| [H <sup>+</sup> ]=3M条件での相転移温度（東工大報告値） | -15℃                                                  | 55℃                                       | 85℃                          | 10℃                                               |
| 温度操作性                                 | ○                                                     | ×                                         | ×                            | ○                                                 |
| 抽出錯体-ゲル回収性                            | △                                                     | ×                                         | ×                            | ○                                                 |
| 評価                                    | ・ 室温～50℃程度でもゲル化しやすい<br>・ 容器にゲルが固着しやすい<br>・ 抽出剤がゲル外に残る | ・ 高温(液温85℃前後)にしてもゲル化しにくい。<br>・ 抽出剤がゲル外に残る | ・ 高温(液温85℃前後)に加熱してもほぼゲル化しない。 | ・ 液温50～60℃でゲルが抽出剤を包含する。<br>・ 固着しにくく回収が容易なゲルを形成する。 |



ゲル化抽出による模擬廃液中U回収に適したポリマーとしてPNIPMAAm(、PNIPAAm)を選定し、U回収試験に供した。



$\text{UO}_2^{2+}$ -モノアミドゲル化沈殿物の加熱分解挙動

## ② 処理液再利用または分解実用技術の開発

## ◆ 処理液再利用技術の開発

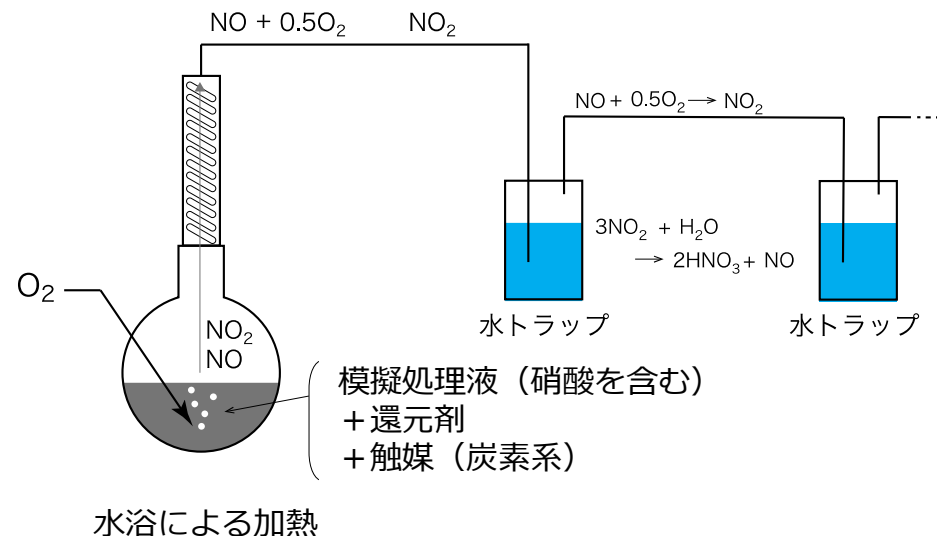
浸出液である硝酸を回収して浸出に再利用することで経済性が向上し、二次廃棄物の発生量が低減するため、スラッジ組成に合わせた硝酸再利用技術を開発する。

- 触媒と還元剤を組み合わせた手法を調査し、活性炭およびギ酸を選定した。
- 濃度条件等をパラメータとした基礎データを取得し、反応メカニズムを推定した。
- 高濃度から低濃度まで処理可能であることを確認し、成立性の見通しを得た。

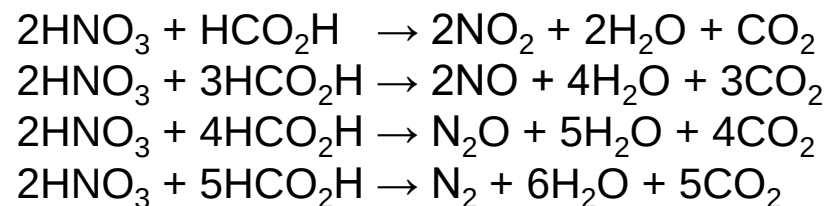
## ◆ 分解技術の開発

固化工程を阻害する成分を除去するために、浸出液の残留硝酸やスラッジに含まれるアンモニウム塩、またウラン回収処理で添加される有機物の分解技術を開発する。

- 硝酸再利用と同じ手法で低濃度硝酸は分解まで可能である見通しを得た。
- 分解技術を調査し、オゾン分解・超音波照射等を実施し基礎データを取得した。



## 硝酸回収・分解の装置構成



## 硝酸とギ酸の反応



## アンモニウム・有機物分解の様子



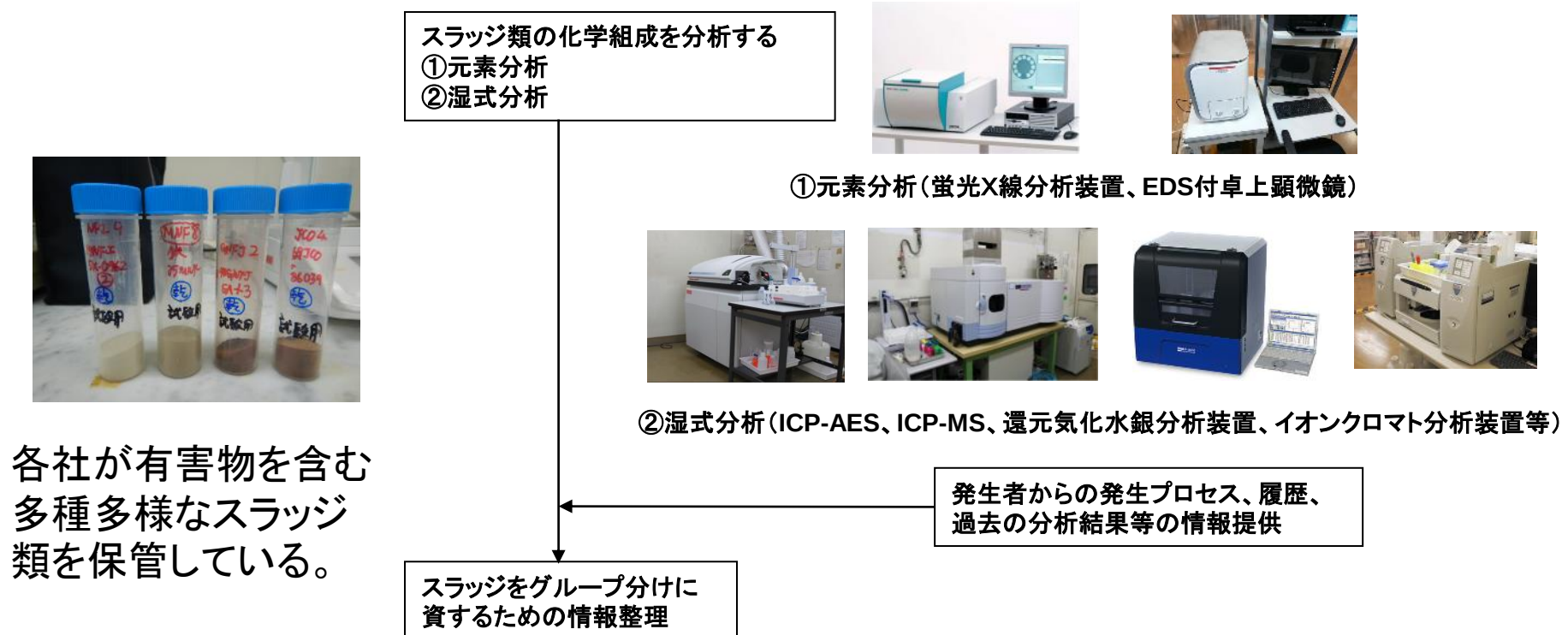
## ① スラッジ状廃棄物分析及び情報整理

## ◆ 開発目標

- スラッジ類の化学組成を把握する。

## ◆ 実施内容

- 1) スラッジ類の分析を行い化学組成を把握する。
- 2) 発生プロセス、履歴、過去の分析結果等も踏まえて、グループ分けに資する情報整理をする。



## ② 有害物を含む廃棄物の安定固化技術の開発

## ◆ 開発目標

- 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を開発する。

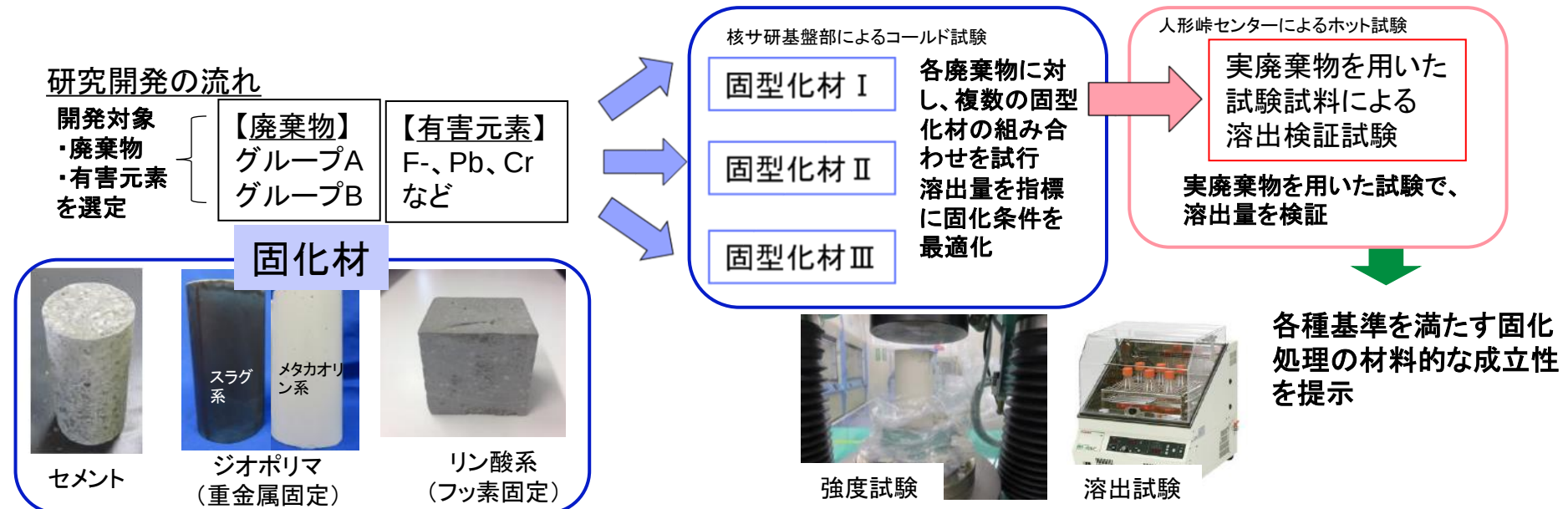
## ◆ 実施内容

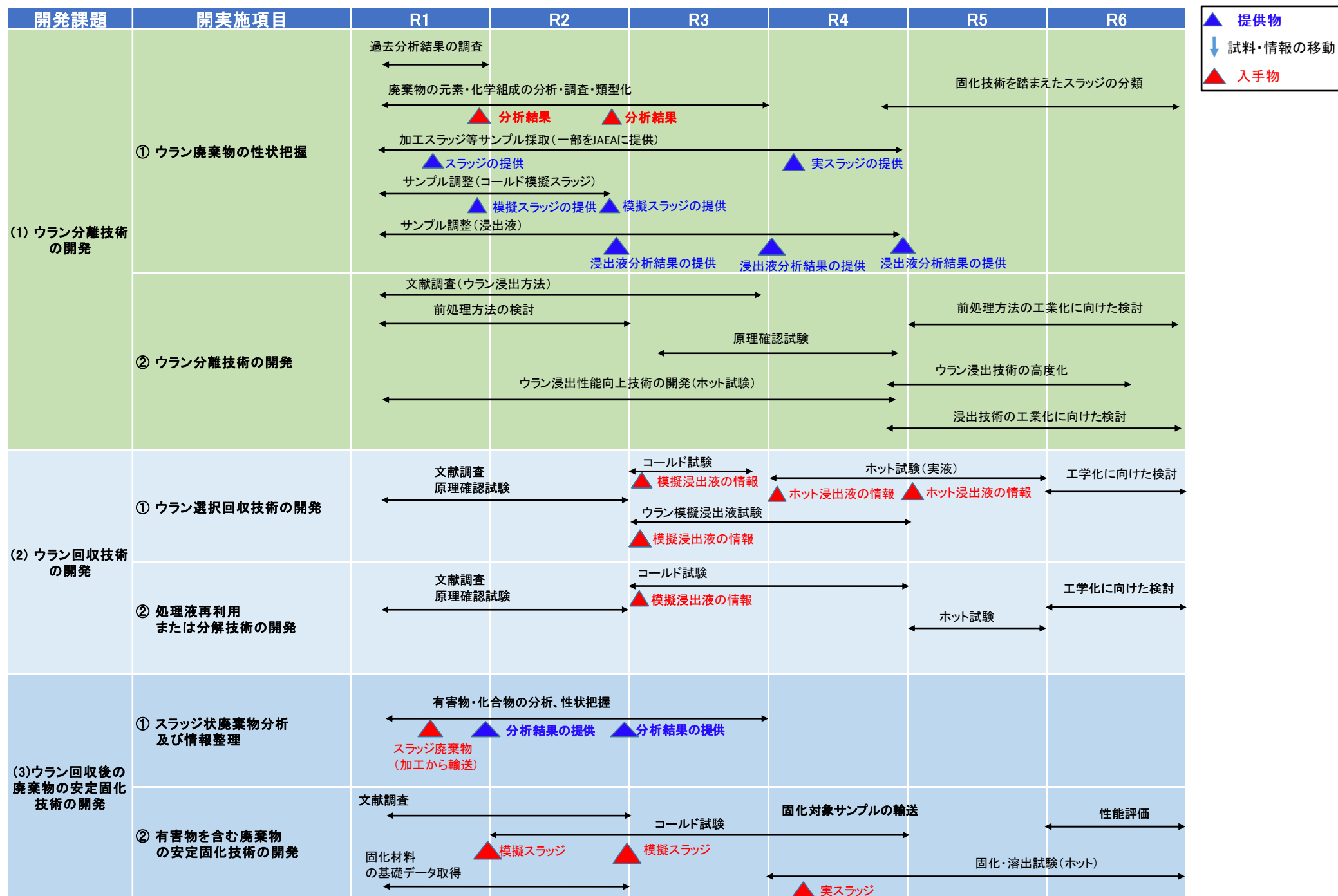
## 1) 固化材による有害物の安定化

- ・ 有害元素と固化材料のマッチングと、固化条件

## 2) 固化技術の開発

- ・ 固化処理時の反応性に関するpH、細孔分布、材料自体の強度や操作性



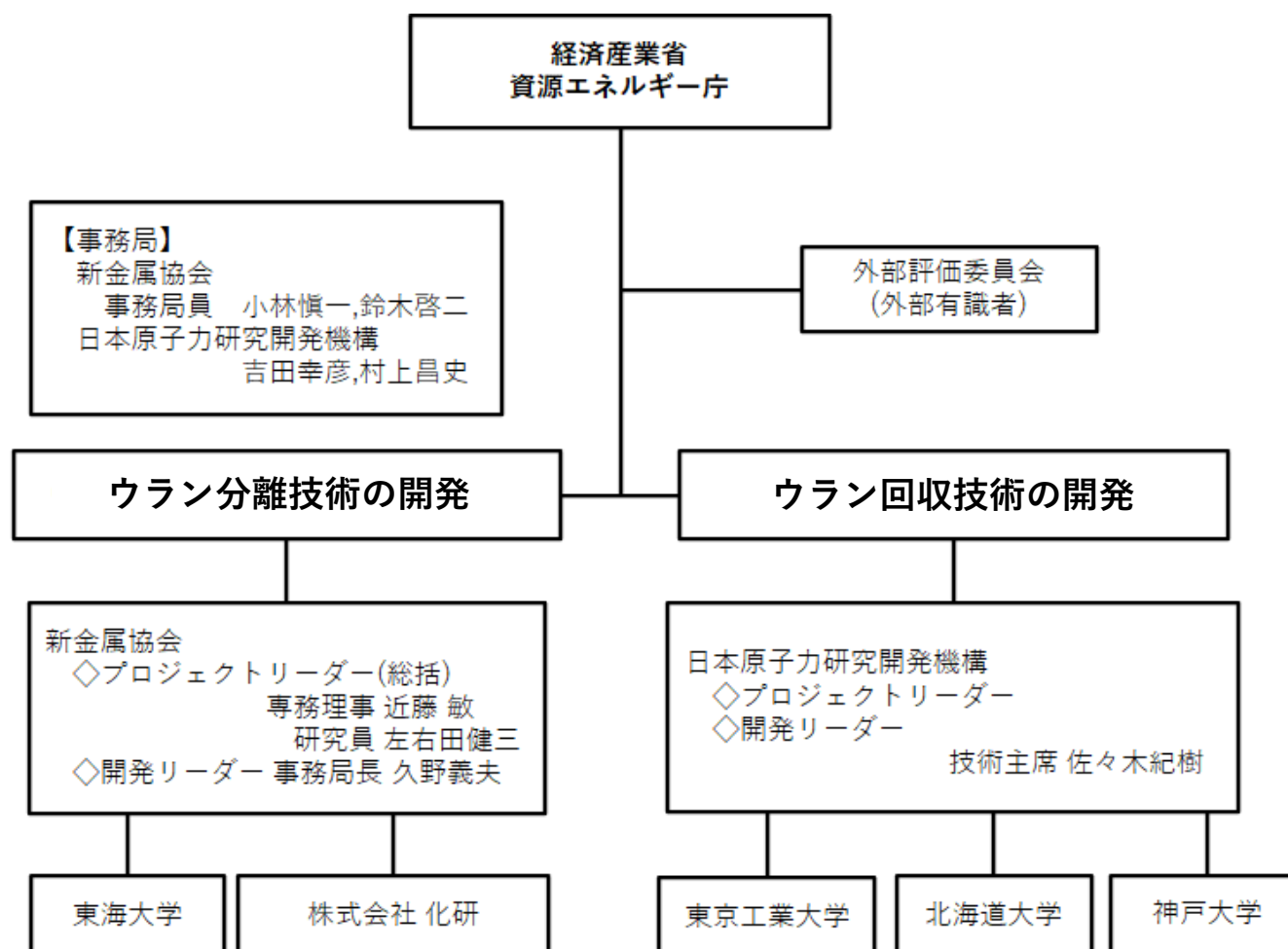


(単位：百万円)

| 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    |

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。





- 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。

| 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 | 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   | 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。 |

| 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                                                                           |
|--------------------------|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| (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。                                      | 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の見通しを得る。                                       | 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念を提示する。                                    | 硝酸を再利用し、発生する2次廃棄物量を低減するため。                                                         |
| (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。 | —<br>（本項目の実施期間は令和3年度までであるため）                                                                | 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。                                |

| 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/<br>今後の見通し                                   |
|-----------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------------------------------------------------------|
| (1)ウラン<br>分離技術<br>の開発 | ①ウラン<br>廃棄物の<br>性状把握<br>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。<br>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。 | 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<br>分離技術<br>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。<br>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。 |

| 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/<br>今後の見通し                                             |
|---------------|----------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------------------------------------------------------------|
| (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。<br>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。<br>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。     |

| 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/<br>今後の見通し                                                                                                        |
|--------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (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。<br>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。<br>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。 |



| 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、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。

本事業で得られた成果は、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

**事業目的を踏まえたアウトカムの内容**

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（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を確立する。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。

また、スラッジ状のウラン廃棄物からのウラン分離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。

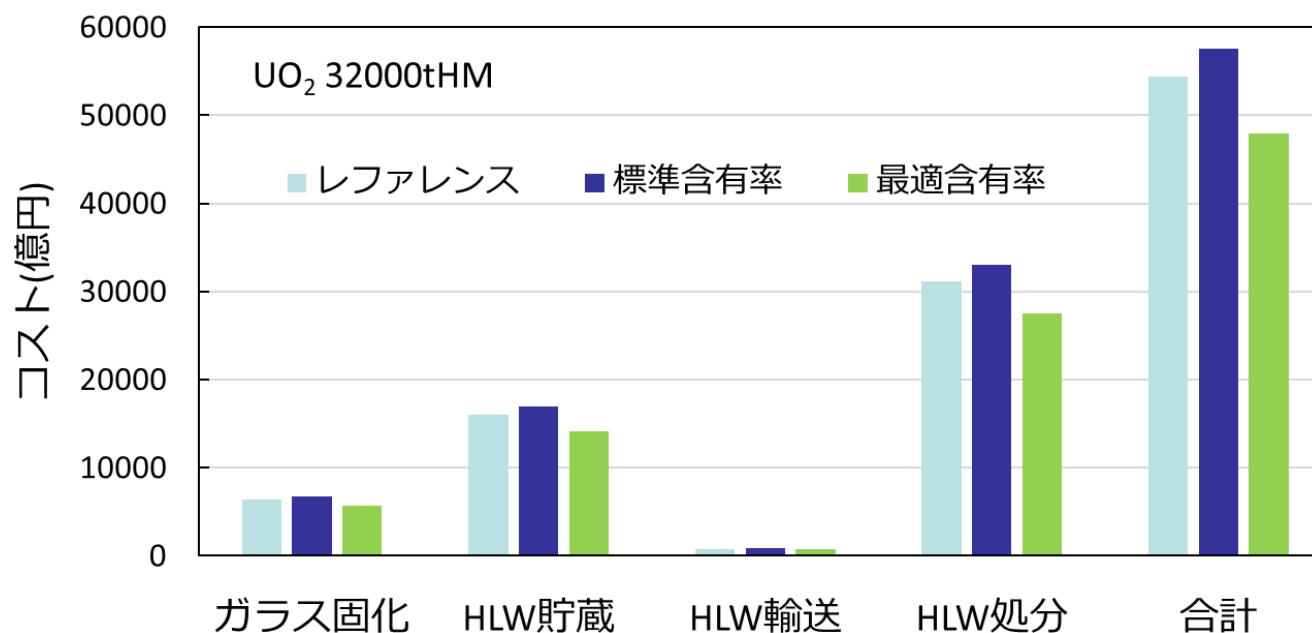
これらにより、放射性廃棄物の長期的なリスク低減の観点から減容化・有害度低減化技術の実証・実用化の道筋をたてる。

| アウトカム指標・目標                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                        | 目標達成の見込み                                                                                                                                                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2024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マイナーアクチニド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。 | 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見込みである。 |
| （目標の設定（変更）理由・根拠等）<br>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。<br>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。 |                                                                                                                        |                                                                                                                                                         |

| アウトカム指標・目標                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                  | 目標達成の見込み                                                                                                                                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2024年度                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <ul style="list-style-type: none"><li>・実用化を踏まえ、処理条件や処理性能を確定する。</li><li>・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。</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>・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。</li></ul> |
| <p>(目標の設定(変更)理由・根拠等)</p> <p>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く、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に特化したものはこれまで無かったことによる。</p> <p>本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。</p> |                                                                                                                  |                                                                                                                                                    |

|                  | 2019年度<br>(平成31年度) | 2020年度<br>(令和2年度)                                                                                                                                                                        | 2021年度<br>(令和3年度)                                                                                                                                                                                                                                    | アウトカム                                              |
|------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| A. ガラス固化技術の基盤整備  |                    |                                                                                                                                                                                          | <div>(2024年度終了予定)</div> <div><div>(1) 使用済燃料の多様化を考慮したシナリオ評価</div><div>(2) ガラスマトリックス・原料供給形態の高度化</div><div>(3) ガラス溶融炉・運転制御技術の高度化</div><div>(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</div></div> <div>ガラス固化に係る<br/>基盤技術を整備</div> <div>実証試験<br/>・実用化検討</div> | 放射性廃棄物の安定的な処理方法の確立<br>放射性廃棄物の減容化・有害度低減による処分場への負荷低減 |
| B. ウラン分離・回収技術の開発 |                    | <div>(2024年度終了予定)</div> <div><div>(1) ウラン分離技術の開発</div><div>(2) ウラン回収技術開発</div><div>(3) ウラン回収後の廃棄物の安定固化技術の開発</div></div> <div>処理条件・性能の確定<br/>処理システムの基盤整備</div> <div>詳細設計<br/>・実用化検討</div> |                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                    |

本事業で実施した研究で実施している高燃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)

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のうち、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）

#### ○中深度処分の単価； **約240万円／本**（12百万円／m<sup>3</sup>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<sup>3</sup>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）



## 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                                                                                                                                                                                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>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。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> </ul> |

## 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                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul> |

## 評価WG（中間評価）

| 所見                                                                                                                                                                       | 対応状況                                                                                                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> </ul> |