

核燃料サイクル関連分野に係る
技術に関する施策・事業
評価報告書
(案)

平成27年〇月

産業構造審議会産業技術環境分科会

研究開発・評価小委員会評価ワーキンググループ

はじめに

研究開発の評価は、研究開発活動の効率化・活性化、優れた成果の獲得や社会・経済への還元等を図るとともに、国民に対して説明責任を果たすために、極めて重要な活動であり、このため、経済産業省では、「国の研究開発評価に関する大綱的指針」（平成24年12月6日、内閣総理大臣決定）等に沿った適切な評価を実施すべく「経済産業省技術評価指針」（平成26年4月改正）を定め、これに基づいて研究開発の評価を実施している。

また、第25回産業構造審議会評価小委員会（平成21年1月）において、新たな評価類型として「技術に関する施策評価」が審議・了承された。技術に関する施策評価は、当該技術分野全体の方向性等を勘案しつつ、当該施策の下に位置付けられる技術に関する事業のまとまりを俯瞰する形で、各事業の相互関係等に着目し、個々の事業に係る評価結果を踏まえて行うこととしている。

経済産業省において実施している技術に関する施策「核燃料サイクルに係る施策」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、以下の技術に関する事業から構成される施策である。

- ① 高速炉再処理回収ウラン等除染開発委託費に係る事業
（平成19年度から平成23年度）
- ② 回収ウラン利用技術開発委託費に係る事業
（平成21年度から平成22年度）
- ③ 使用済燃料再処理事業高度化補助金に係る事業
（平成21年度から平成25年度）

今回の評価は、技術に関する施策「核燃料サイクルに係る施策」、及びこの構成要素である技術に関する事業評価であり、実際の評価に際しては、省外の有識者からなる核燃料サイクル関連分野に係る技術に関する施策・事業評価検討会（座長：高木 直行 東京都市大学工学部教授）を開催した。

今般、当該検討会における検討結果が評価報告書の原案として産業構造審議会産業技術環境分科会研究開発・評価小委員会評価ワーキンググループ（座長：渡部 俊也 東京大学政策ビジョン研究センター教授）に付議され、内容を審議し、了承された。

本書は、これらの評価結果を取りまとめたものである。

平成27年〇月

産業構造審議会産業技術環境分科会

研究開発・評価小委員会評価ワーキンググループ

産業構造審議会産業技術環境分科会研究開発・評価小委員会評価ワーキンググループ

委 員 名 簿

座長	渡部 俊也	東京大学政策ビジョン研究センター教授
	大島 まり	東京大学大学院情報学環教授 東京大学生産技術研究所教授
	太田 健一郎	横浜国立大学工学研究院グリーン水素研究センター長 ・特任教授
	亀井 信一	株式会社三菱総合研究所人間・生活研究本部長
	菊池 純一	青山学院大学法学研究科附置ビジネスローセンター長 教授
	小林 直人	早稲田大学研究戦略センター副所長・教授
	鈴木 潤	政策研究大学院大学教授
	高橋 真木子	金沢工業大学虎ノ門大学院工学研究科教授
	津川 若子	東京農工大学大学院工学研究院准教授
	西尾 好司	株式会社富士通総研経済研究所主任研究員
	森 俊介	東京理科大学理工学研究科長 東京理科大学理工学部経営工学科教授
	吉本 陽子	三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社 経済・社会政策部主席研究員

(委員長除き、五十音順)

事務局：経済産業省産業技術環境局技術評価室

核燃料サイクル関連分野に係る技術に関する施策・事業評価検討会
委員名簿

座長	高木 直行	東京都市大学工学部 教授
	黒木 敏高	独立行政法人科学技術振興機構 執行役
	杉山 一弥	一般社団法人原子力産業協会 企画総務部長
	関 哲朗	文教大学情報学部 教授
	藤原 啓司	原子力発電環境整備機構 技術部長

(五十音順)

事務局：経済産業省資源エネルギー庁
原子力立地・核燃料サイクル産業課

核燃料サイクル関連分野に係る技術に関する施策・事業評価に係る省内関係者

1. 技術に関する施策

【中間評価時】

(平成21年度)

資源エネルギー庁 原子力立地・核燃料サイクル産業課長 森本 英雄 (事業担当課長)
産業技術環境局 産業技術政策課 技術評価室長 長濱 裕二

2. 技術に関する事業

A. 高速炉再処理回収ウラン等除染技術開発委託費に係る事業

【事後評価時】

(今回)

資源エネルギー庁原子力立地・核燃料サイクル産業課長 小澤 典明 (事業担当課長)
産業技術環境局 産業技術政策課 技術評価室長 福田 敦史

【中間評価時】

(平成21年度)

資源エネルギー庁原子力立地・核燃料サイクル産業課長 森本 英雄 (事業担当課長)
産業技術環境局 産業技術政策課 技術評価室長 長濱 裕二

【事前評価時】 (事業初年度予算要求時)

資源エネルギー庁原子力立地・核燃料サイクル産業課長 中西 宏典 (事業担当課長)

B. 回収ウラン利用技術開発委託費に係る事業

【事後評価時】

(今回)

資源エネルギー庁原子力立地・核燃料サイクル産業課長 小澤 典明 (事業担当課長)
産業技術環境局 産業技術政策課 技術評価室長 福田 敦史

【事前評価時】 (事業初年度予算要求時)

資源エネルギー庁原子力産業課長 森本 英雄 (事業担当課長)

C. 使用済燃料再処理事業高度化補助金に係る事業

【事後評価時】

(今回)

資源エネルギー庁原子力立地・核燃料サイクル産業課長 小澤 典明 (事業担当課長)

産業技術環境局 産業技術政策課 技術評価室長 福田 敦史

【事前評価時】 (事業初年度予算要求時)

資源エネルギー庁原子力産業課長 森本 英雄 (事業担当課長)

核燃料サイクル関連分野に係る技術に関する施策・事業評価

審 議 経 過

○第1回評価検討会（平成27年1月26日）

- ・評価の方法等について
- ・技術に関する施策・事業の概要について
- ・評価の進め方について

○第2回評価検討会（平成27年2月25日）

- ・第1回検討会議事録（案）の承認
- ・評価報告書(案)について

○産業構造審議会産業技術環境分科会研究開発・評価小委員会評価ワーキンググループ（平成27年〇月〇日）

- ・評価報告書(案)について

目 次

はじめに

産業構造審議会産業技術環境分科会研究開発・評価小委員会評価ワーキンググループ 委員名簿

核燃料サイクル関連分野に係る技術に関する施策・事業評価検討会 委員名簿

核燃料サイクル関連分野に係る技術に関する施策・事業評価に係る省内関係者

核燃料サイクル関連分野に係る技術に関する施策・事業評価 審議経過

	ページ
技術に関する施策・事業評価報告書概要	i
第1章 評価の実施方法	
1. 評価目的	1
2. 評価者	3
3. 評価対象	3
4. 評価方法	4
5. プロジェクト評価における標準的な評価項目・評価基準	4
第2章 技術に関する施策の概要	
1. 施策の目的・政策的位置付け	7
2. 施策の構造及び目的実現の見通し	9
第3章 技術に関する事業の概要	
A. 高速炉再処理回収ウラン等除染技術開発委託費に係る事業	
1. 事業の目的・政策的位置付け	1 5
2. 研究開発等の目標	1 8
3. 成果、目標の達成度	2 4
4. 事業化、波及効果について	6 3
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等	6 4
B. 回収ウラン利用技術開発委託費に係る事業	
1. 事業の目的・政策的位置付け	6 8
2. 研究開発等の目標	7 1
3. 成果、目標の達成度	7 4
4. 事業化、波及効果について	9 5
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等	9 7
C. 使用済燃料再処理事業高度化補助金に係る事業	
1. 事業の目的・政策的位置付け	1 0 1
2. 研究開発等の目標	1 0 3
3. 成果、目標の達成度	1 2 6
4. 事業化、波及効果について	1 2 8
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等	1 2 8
第4章 技術に関する施策評価	
1. 施策の目的・政策的位置付けの妥当性	1 3 6
2. 施策の構造及び目的実現の見通しの妥当性	1 3 9
3. 総合評価	1 4 1

第5章 技術に関する事業評価

- A. 高速炉再処理回収ウラン等除染技術開発委託費に係る事業総合評価 … 1 4 4
- B. 回収ウラン利用技術開発委託費に係る事業総合評価 …………… 1 4 6
- C. 使用済燃料再処理事業高度化補助金に係る事業総合評価 …………… 1 4 8

第6章 今後の研究開発の方向等に関する提言 …………… 1 5 1

第7章 評点法による評点結果 …………… 1 5 5

参考資料

- 参考資料 1 経済産業省技術評価指針
- 参考資料 2 経済産業省技術評価指針に基づく標準的評価項目・評価基準
- 参考資料 3 核燃料サイクル関連分野に係るプロジェクト中間評価報告書（概要版）

技術に関する施策・事業評価報告書概要

技術に関する施策

技術に関する 施策名	核燃料サイクルに係る施策
担当課	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

技術に関する施策の目的・概要

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。また、原子力研究開発は、技術開発から事業化まで相当な期間を要し、多額の費用を要する他、世界的な核不拡散体制等の国際的動向も踏まえた政策対応を図ることが必要であるため、民間のみに取り組みを求めることは困難であり、国が適切に技術開発の推進や事業環境の整備を図ることが必要である。

軽水炉サイクルの実現

核燃料資源を合理的に達成できる限りにおいて有効に利用することにより、我が国のエネルギーの安定供給を確保する観点から、再処理施設で用いられるガラス固化技術について、新しい性状のガラス素材及びこれに対応しうる新型溶融炉の開発、六ヶ所再処理工場から回収される回収ウランの利用技術の開発及び使用済プルサーマル燃料の再処理実証に係る技術開発を実施する。

高速炉サイクルの実現

高速炉導入後も、全ての軽水炉が高速炉に置き換わるまでの間、長期にわたって軽水炉と高速炉が共存する。この移行期には高速増殖炉サイクルと軽水炉サイクルで相互にウラン等を受給できることがそれぞれのサイクルの燃料バランスを保つうえで必要となる。そのため、軽水炉サイクルから高速炉サイクルへの円滑な移行を念頭におきつつ、高速炉サイクルの確立において、次世代再処理工場から回収が想定されている高線量回収ウラン等の軽水炉サイクルへの供給は極めて重要であり、これら高線量回収ウラン等の軽水炉への供給を実現するために必要な研究開発を実施する。

技術に関する事業一覧

- A. 高速炉再処理回収ウラン等除染技術開発委託費に係る事業
- B. 回収ウラン利用技術開発委託費に係る事業
- C. 使用済燃料再処理事業高度化補助金に係る事業
- D. 次世代再処理ガラス固化技術基盤研究委託費に係る事業（開始年度であり次回以降の評価とする）

技術に関する施策評価の概要

1. 施策の目的・政策的位置付けの妥当性

エネルギー資源の無い我が国にとって、原子力エネルギーを安全かつ適切に活用していかざるを得ないと考えられるため、それを支える核燃料サイクルの推進は不可欠である。本施策は、準国産かつ持続可能な核エネルギー体系の開発を進める上で、環境適合性や核不拡散性の確保に配慮した技術戦略が追求されており、長期的視点から将来の社会的ニーズに適う計画となっている。

なお、個々の技術課題について、解決が必要な技術課題とその達成すべき目標が示されているが、全体を俯瞰したときに、何故、その時、その技術開発を実施するのかが明確でない。また、原子力政策大綱やエネルギー基本計画に基づく原子力戦略を進める上では、既定戦略と相対する概念についても一定規模の範囲で並列して調査、検討を実施すべきである。

2. 施策の構造及び目的実現の見通しの妥当性

各事業は、施策を具体化する上で、現時点においても極めて必要性の高いものと判断される。また、各事業とも、調査、開発の目標を的確に設定するとともに、中間評価の実施により、開発を実施していく上での問題点の洗い出し、進捗管理を実施しており、事業スケジュール、成果も概ね妥当である。

なお、福島第一原発事故によって我が国の原子力政策は大きな変革が求められており、今後、施策の構造については見直しが必要である。

3. 総合評価

技術に関する施策、技術に関する事業共に、事業の進捗と問題点、課題を的確にモニタリングするための中間評価と終了時評価を外部の有識者を交えて実施しており、評価体制は問題ないとする。本施策は国がイニシアチブを持って実施すべき施策であり、評価対象事業の成果、費用対効果についても肯定的評価に値するものであると判断できる。得られた成果が次なるステップに有効に活用され、商用利用されることを期待したい。

なお、これらの事業を推進した結果、課題が解決できた一方で新たな課題も分かったはずであり、その整理も必要ではないかと思われる。核燃料サイクル先進国との国際連携については、適切な契約の下で情報交換や共同開発を進めることが、資金的な制約の補完などの観点で必要である。また、施策による確実な成果確保と実施過程の妥当性確保のために、諸外国では一般と考えられるマネジメント手法の導入が期待される。

今後の研究開発の方向等に関する提言

エネルギー資源の無い我が国にとって、原子力エネルギーを安全かつ適切に活用していかざるを得ないと考えられるため、エネルギー基本計画等を踏まえ、核燃料サイクル推進に資する具体的な施策を再度整理し今後も着実に実施に移していくことが重要である。また、国内外の最新研究動向を踏まえつつ、既成概念にとらわれない柔軟な発想で今後の施策を考え、開かれた政策決定プロセスを展開することが、原子力の信頼回復等に必要と考える。

今回の評価対象事業においては、期待される成果が得られ、成果による費用対効果の適切性が提示されているが、果たして、そのプロセスが適切であったかについては評価できない。この点についてのマ

ネジメントと報告の必要性を示すべきである。

また、今回の施策に配置された事業の他にもキーコンポーネントが数多くある。事業の設定の際は、核燃料サイクル全体を見た大きな俯瞰図に基づいて計画的に事業を配置する必要がある。

技術に関する事業

技術に関する事業名	A. 高速炉再処理回収ウラン等除染技術開発委託費に係る事業
上位施策名	核燃料サイクルに係る施策
担当課	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・概要

「高速増殖炉サイクル実用化研究開発」では、2050 年頃の商業用高速増殖炉の導入開始を目標に、プルトニウムのリサイクルを可能とする各種研究開発が進められており、その中で次世代再処理技術の候補として先進湿式法が有望視されている。

一方、商業用高速増殖炉の導入開始以降、既存の軽水炉がすべて高速増殖炉に置き換わるまでの相当長い期間、軽水炉と高速増殖炉が併存することになり、この移行期には高速増殖炉サイクルと軽水炉サイクルで相互にウラン等を受給できることがそれぞれのサイクルの燃料バランスを保つうえで必要となる。しかし、先進湿式法を用いた再処理により回収されたウランやプルトニウムは高線量であり、既存の軽水炉燃料加工施設では取り扱うことができないという問題がある。

そこで、本研究開発では、高速増殖炉サイクルから軽水炉サイクルへのウラン等の供給を行ううえで必要となる高除染化技術について調査及び基礎試験等を行い、商業的に利用可能な除染技術を開発する。

また、商業用高速増殖炉の導入開始時期が 2050 年頃となる場合を基本シナリオとしたうえで、導入開始時期が 2050 年よりも早まる場合や遅れる場合について、原子炉を含めた核燃料サイクル全体の軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの詳細な移行シナリオを策定・検討し、ここから導き出される移行期における最適なプラントスタイルの検討を実施する。

さらに、技術の知的所有権等に係る整理を実施するとともに、国内の再処理技術、運転経験等を次世代に引き継ぐための知識の体系化等に関する研究を実施する。

予算額等（委託）

（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成 19 年度	平成 23 年度	平成 21 年度	平成 26 年度	日本原子力研究開発機構
H21FY 予算額	H22FY 予算額	H23FY 予算額	総予算額	総執行額
540,317	293,301	373,279	2,116,397	1,735,436

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

個別要素技術	目標・指標	成果	達成度
(1) 除染技術の調査・開発 ① 除染技術の調査	・ 除染技術としての技術的要件を整理するとともに、有望な除染技術を選定する。	・ 技術的要件として除染プロセス技術に求められる除染係数等の検討、設定を行った。 ・ 有望な除染技術として「溶媒として TBP を、抽出器として遠心抽出器を用いる溶媒抽出法」を選定した。	達成
② 溶媒抽出法による除染プロセス開発 a. 遠心抽出システム開発	・ 単段型遠心抽出器の試験機(200 トン/年規模)を用いた中性子吸収材内封型遠心抽出器の成立性を評価する。	・ 200t トン/年規模の単段型遠心抽出器試験装置を用いて大型化設計の妥当性を確認した。その後、臨界安全上有利となる中性子吸収材内封型遠心抽出器の適用検討として流動試験を実施し、通常型と同等以上の流動性能を達成可能な中性子吸収材の最大体積を示した。	達成
	・ 単段型遠心抽出器の臨界安全上の最大規模を評価する。	・ 形状管理及び中性子吸収材管理を前提とした臨界管理のもと、達成される遠心抽出器の最大処理流量を評価した。その結果、濃縮ボロンの使用等の条件で、約 5400L/h (800 トン/年規模相当) まで達成できることがわかった。	達成
	・ 除染プロセスに対する多段型遠心抽出器の適用性を評価する。	・ 一般産業用多段型遠心抽出器又はその情報を用い、抽出性能(Nd 使用)を評価した結果、段効率が 0.74 程度であり、また、臨界安全上の最大処理流量を評価した結果、600L/h であった。さらに、商用プラントに適用可能な構造検討を行い、構造案を示した。	達成
	・ 単段／多段の遠心抽出器における運転異常発生までの時間等の耐スラッジ性を評価する。	・ 単段／多段の遠心抽出器でアルミナを用い、異常発生時間、異常事象の種類等を取得するためにスラッジ試験(加速試験)を実施した。その結果、単段型が約 250 分に、多段型で約 115 分に異常が発生し、その異常は両機ともエントレインメント(有機相出口からの水相排出)の発生であった。 ・ 単段型遠心抽出器を用いてスラッジ粒径に対するロータ内の残留率を試験で取得し、ストークスの式に基づいた理論値と比較した。その結果、運転条件(回転数及び処理流量)も加味した補正係数を設定することで実験結果を計算で再現できることがわかった。	達成
	・ 流動解析シミュレーションの実用性を評価する。	・ 実験結果による検証の結果、実際の遠心抽出器の系を反映した混合部及びコレクタ部のフローパターン解析結果を得ることができた。これらの結果から、遠心抽出器用の流動解析シミュレーション技術が適用可能な見通しが得られた。	達成
b. コプロセスニング法を用いた除染プロセス開発	・ 移行期における処理対象溶液からウラン、プルトニウムを共回収するプロセスフロー	・ 軽水炉燃料 (Pu/U 比 : 1%)、軽水炉 MOX 燃料 (Pu/U 比 : 3%)、高速増殖炉燃料 (Pu/U 比 : 20%) を想定したプロセスフローシートを抽出計算コードにより設定した。分配段を対象	達成

	シートを抽出計算コードにより設定する。また、設定したフローシートに基づき、ウラン、プルトニウムを共回収するプロセスの確立に向け、ミキサセトラ試験を行いフローシートの成立性を確認する。	としたウラン/プルトニウム共回収試験を実施し、1%、3%及び20%の全ての場合においてウラン/プルトニウム共回収フローシートが成立することを確認した。	
	ウラン/プルトニウム共回収液中のウラン同伴を監視するためのウラン/プルトニウム混合モニタに係る試験を行う。	ウラン/プルトニウム混合モニタとして、ポルタンメトリー、吸光光度法、超音波計測法及び電気伝導率法により、ウラン、プルトニウム及び酸濃度の定量分析が可能であることを確認した。	達成
c. モノアミドを用いた除染プロセス開発	事業化へ向けた研究開発段階へ移行するための判断材料となる分離プロセス基礎データを整備する。	- モノアミドのウラン、プルトニウム及び酸に対する分配比計算式を導出した。これを用いて連続抽出プロセスにおけるウラン及びプルトニウムの移行挙動のシミュレーション解析を行い、モノアミドを用いた除染プロセスのフローシートを作成した。 - ミキサセトラによる連続抽出試験を実施し、プルトニウムの還元剤を使用せずにウランを除染するプロセスの成立性を支持する結果を得た。 - モノアミド劣化物の一種であるカルボン酸の除去法としてアルカリ洗浄の有効性を示した。 - X線構造解析等により、モノアミドの劣化物(カルボン酸及び二級アミン)と模擬核分裂生成物との錯体の構造を明らかにした。	達成
③フッ化物揮発法を用いた除染プロセス開発	フッ化物揮発法や同手法にて課題と考えられる粉末ハンドリング技術に関する調査を行う。	フレーム炉を中心としたフッ化物揮発工程及び粉末ハンドリング技術に関して国内外の情報を調査し、プラントの実績や課題を整理した。フレーム炉に関してはロシア、フランス、カナダにおける炉の寸法や稼働実績からフッ化技術として採用可能との結論を得た。また、粉末ハンドリングでは機器の閉塞、固着等が課題として挙げられ、配管等内面のバフ研磨やコーティング等の対策が有効であることを示した。	達成
	軽水炉へ供給可能なフッ化転換・高除染プロセスを検討し、ブロックフロー及びプロセスフローを作成し、プロセス概念と物質収支を検討する。	調査した情報や文献等を基に高除染を前提としたブロックフロー及びプロセスフローを作成し、機器・設備構成や物質収支などの設備設計が妥当であることを確認した。	達成
	施設概念設計を行う上での課題抽出及び対策の検討を行う。	施設概念設計を行う上での課題として、粉末ハンドリング以外にも、フッ化炉の残渣回収技術や計量管理技術等を抽出した。また、フッ化炉の装置構造の工夫による残渣回収機	達成

		構や、新たな計量管理概念と中性子検出器の併用による計量精度の向上策等の対策案を提示した。	
(2) 軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの移行シナリオ等検討	・原子炉を含めた核燃料サイクル全体の軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの移行シナリオを明らかにする。	・発電設備容量、高速増殖炉への移行開始年、移行期間（高速増殖炉導入速度）等のパラメータを考慮して、複数のシナリオを比較検討するとともに、代表的な移行シナリオを明らかにした。これにより、第二再処理工場の設備容量及び導入時期を具体化した。	達成
	・軽水炉から高速増殖炉への移行期に必要な第二再処理工場のプラントスタイルについて、ブロックフローレベルでの概略検討を行う。	・第二再処理工場の主工程にコプロセッシング法を採用する場合について、施設の共有の有無や燃料の処理パターンを考慮した概略物質収支及びブロックフローを検討した。これに基づき、技術的成立性、経済性等の観点で各スタイル間の比較評価を行い、抽出工程以降を共用するスタイルが優位との結果を得た。	達成
	・第二再処理工場の主工程に採用される可能性のある複数の再処理プロセス技術を採用した場合のプラントイメージの整理と、種々の観点から相互比較を行う。	・再処理プロセス技術として、コプロセッシング法、先進湿式法、FLUOREX 法、超臨界直接抽出法を採用した場合の、工程系統図、物質収支、必要系列数、機器リストを検討・整理した。これに基づき、経済性、環境負荷等の観点での相互比較を行い、1400 トン/年の軽水炉/高速増殖炉共用 (LF 共用) 再処理施設に採用する再処理プロセス技術としてコプロセッシング法が最有力候補との結果を得た。	達成
	・コプロセッシング法の軽水炉/高速増殖炉共用再処理施設として考え得る複数のプラント概念の設備構成パターンを検討し、その特質を明らかにする。	・LF 共用再処理施設として考え得る 3 つのプラント概念について、原子力発電設備容量 68GWe を想定したプラント導入パターン、工程系統図、物質収支を検討した上で、3 つのプラント概念の設備構成パターンを整理した。これにより、第二再処理工場はプルトニウム処理量の増加に伴いウラン/プルトニウム濃縮設備等の系列数が増加する特徴を有すること（モジュール型が最大）が分かった。	達成
(3) 再処理工学の枠組み構築	・我が国の再処理技術に関する知的所有権について調査・整理し、技術汚染の可能性を評価する。また、国内再処理技術を次世代に引き継ぐための知識の体系化に関する手法を検討するとともに、再処理技術への適用性を検討する。	・我が国の再処理技術に関する特許及び実用新案について調査・整理し、既存の特許等が第二再処理工場へ採用される技術に影響を与える可能性は小さいと結論した。 ・再処理に係る知識の体系化を念頭に、一般産業界における知識の体系化事例や概念調査を行い、この調査結果も踏まえ、再処理技術に係る知識の体系化に関する手法の概念を提案した。	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

特になし

< 共通指標 >

論文数	論文の 被引用度数	特許等件数 (出願を含む)	特許権の 実施件数	ライセンス 供与数	取得ライセ ンス料	国際標準へ の寄与
5	11	-	-	-	-	-

総合評価概要

適切な技術開発マネジメントのもとで、達成目標が設定され、それに至る検討過程も妥当であり、目標も達成されていると考える。今回得られた成果は、将来の再処理施設での実用化が見込めるレベルにあるが、他の候補技術についても、引き続き検討を深めることが、将来の候補技術の絞り込みをより確かなものとする上で有用と考える。中間報告の指摘に対しても適切に対処しており、事業完遂に向けた姿勢は高く評価できる。再処理工学の枠組み構築は、技術継承のための 1 ツールとして引き続き整備していくべきである。

なお、軽水炉から高速炉への移行シナリオについては、事業実施期間や終了時期との兼ね合い、さらに今後の軽水炉再稼働の見通しが不透明なこともあり、十分な検討が行えていない。再稼働が見込める原発の基数や稼働年数、再処理量等について、幅広い想定による検討が必要である。

今後の研究開発の方向等に関する提言

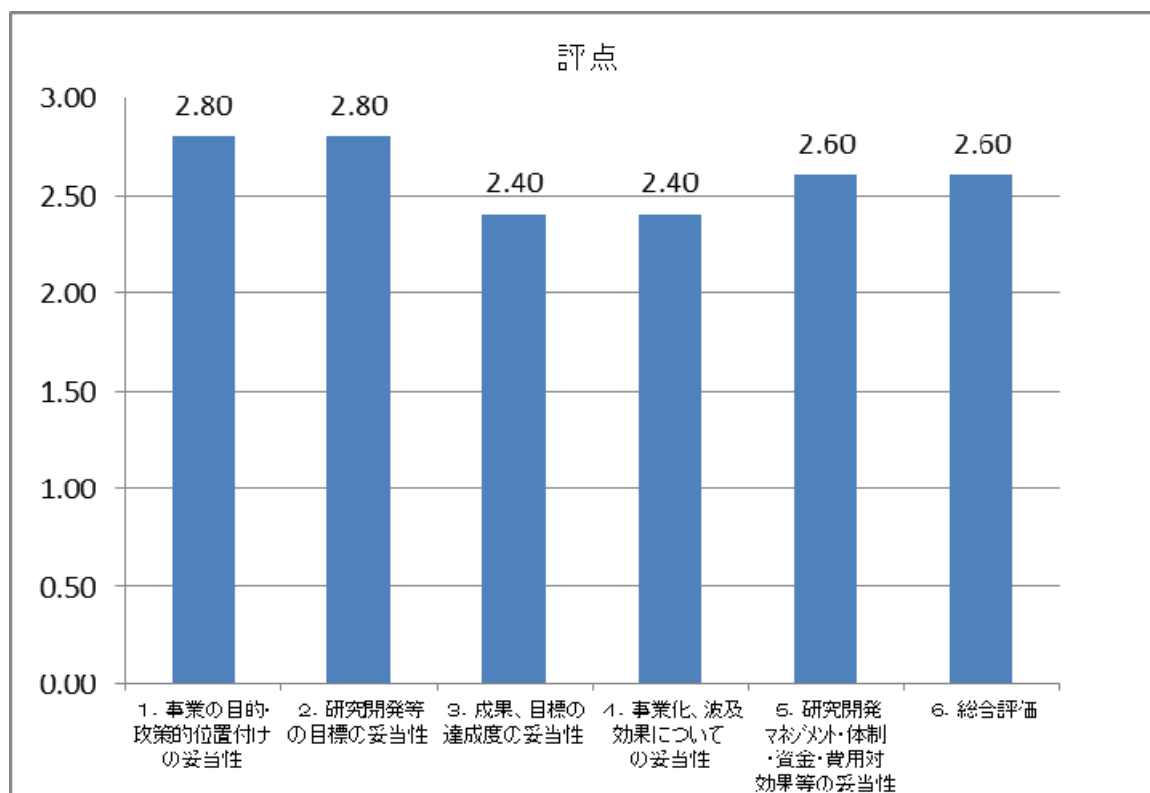
概ね適切な成果が得られている。本事業の成果をさらに発展させ、回収ウラン等の除染技術の実用化に向けて継続的に取り組まれることを期待する。

評点結果

評点法による評点結果

(A. 高速炉再処理回収ウラン等除染技術開発委託費に係る事業)

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.80	3	2	3	3	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.80	3	2	3	3	3
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.40	3	2	2	3	2
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.40	2	2	2	3	3
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.60	3	2	2	3	3
6. 総合評価	2.60	3	2	2	3	3



技術に関する事業

技術に関する 事業名	B. 回収ウラン利用技術開発委託費に係る事業
上位施策名	核燃料サイクルに係る施策
担当課	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・概要

我が国では、核燃料資源の有効利用の観点から、使用済燃料を再処理し、回収されるウラン、プルトニウムを有効利用する核燃料サイクルの推進を基本方針としており、六ヶ所再処理工場の本格操業後には年間８００トンの使用済燃料が再処理され、年間７００トン以上のウランが回収される。

原子力政策大綱等では、使用済燃料の再処理により回収されるウランは、核分裂性ウランの含有率が天然ウランよりも高く備蓄効果も高いことから、将来のウラン需要に備えた戦略的備蓄と位置付けられているが、国内での回収ウランの利用にあたっては、転換施設（酸化物状態で回収されるウランを濃縮するためにふっ化物に転換するための施設）の導入に要する期間、費用の見積もり、既存のウラン濃縮施設の対応可能性等について検討が必要とされている。

また、回収ウランは、微量の核分裂生成物や超ウラン元素が含まれるとともに、天然ウランと同位体組成が異なることから、ウランの子孫核種等による作業員の被ばくや原子炉の中性子利用効率の低下等の影響についても考慮が必要と考えられている。

本プロジェクトでは、六ヶ所再処理工場から回収されるウランを再び軽水炉で利用するため、既存のウラン濃縮施設、再転換施設、成型加工施設での回収ウラン取扱いへの影響や原子炉の炉心特性に与える影響等を調査する。また、高性能で安全性、経済性に優れた転換プロセス、濃縮プロセス、再転換プロセスを検討し、回収ウラン利用の技術開発の概念検討を実施する。

予算額等（委託）

（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成２１年度	平成２２年度	－	平成２６年度	三菱マテリアル
H20FY 予算額	H21FY 予算額	H22FY 予算額	総予算額	総執行額
95,000 (H21FY に繰越)	85,500 (H22FY に繰越)	－	180,500	145,645

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

個別要素技術	目標・指標	成果	達成度
(1) 国内外の回収ウラン取扱実績等に関する調査	・各国の核燃料サイクル施設における回収ウランの取扱い実績、軽水炉における回収ウランの利用実績及び回収ウランの取扱いに関する技術的課題を調査する。	・各国の核燃料サイクル施設における回収ウランの取扱い実績や軽水炉における回収ウランの利用実績について調査・整理した。 ・回収ウランの γ 線に起因する事項、回収ウランの高い α 放射能によって影響される事項、回収ウランの微量不純物放射能によって影響される事項など、各国の事例を調査するとともに、回収ウランの特性と関連付けて整理した。	達成
(2) 既存施設における回収ウランの受入条件に関する調査	・既存の国内外の主要な転換、濃縮、再転換、成型加工、原子炉、各種輸送設備における取扱核種、線量等の受入条件等を調査する。	・既存の国内外の主要な転換（人形峠）、濃縮（人形峠）、再転換・成型加工（4施設）、発電用原子炉、回収ウラン酸化物、UF ₆ 、回収ウラン燃料集合体の輸送設備における取扱核種、線量などの受入条件及び受入上限値を調査した。同様に、海外の転換（仏、露、英）、濃縮（独、英、蘭）、再転換・成型加工（仏、露、独）等における取扱核種、線量などの受入条件及び受入上限値を調査した。	達成
(3) 炉心特性に与える影響に関する調査	・回収ウランに含まれるU-236、核分裂生成物（FP）、マイナーアクチニド（MA）、 α 線放出核種等が炉心特性に与える影響を調査する。	・六ヶ所再処理工場からの回収ウラン組成等の条件を考慮し、再濃縮燃料の組成を設定して、回収ウラン燃料を用いた炉心特性に与える影響を複数の許認可コードによる計算で評価し、PWR、BWRとも、濃縮回収ウラン燃料を使用した炉心の成立性に問題ないことを確認した。	達成
(4) 国内外の転換プロセスに関する調査	・回収ウラン酸化物をUF ₆ に転換する国内外のプロセス技術を調査する。	・回収ウラン酸化物をUF ₆ に転換するプロセスについて、日 人形峠、仏 COMURHEX、露 SCC等のプロセスフローと各工程の要素技術、反応機器の特徴等を調査した。また、海外の主要な天然ウラン転換工場（仏 COMURHEX、加 Cameco、米 ConverDyn、英 Westinghouse、露 SCC等）の情報も調査し、それぞれのプロセスの特徴や課題等に関する情報を整理した。	達成
(5) 転換プロセスの検討	・六ヶ所再処理工場からの回収ウランを六フッ化ウランに転換するプロセスの検討を行う。	・六ヶ所再処理工場の使用済燃料受入仕様に基づき、回収ウランの同位体組成の変動等を検討し、転換プロセスで扱う原料回収ウランの受入仕様を検討した。 ・原料の運搬と取出し、転換プロセスへの供給も含めて、六フッ化ウラン（UF ₆ ）ガスの形態にふっ化転換するプロセスを検討し、国内の技術実績の活用観点から2段階ふっ化法を選定した。	達成
(6) 回収ウラン濃縮プロセスの検討	・国内の既存のウラン濃縮施設（六ヶ所ウラン濃縮工場）で回収ウランUF ₆ を取扱う場合の課題を検討する。	・六ヶ所ウラン濃縮工場において、原料として回収ウランUF ₆ を取扱う上で課題となる事項を処理工程毎に抽出し、外部遮蔽対策、濃縮前後の待機時間の短縮等の対策の必要性を明らかにした。	達成
(7) 回収ウラン再転換プロセスの検討	・濃縮された回収ウランUF ₆ を国内の既存の再転換施設	・濃縮された回収ウランを国内の既存の再転換施設で再転換する場合の回収ウラン取扱いによる課題	達成

討	設で取扱う場合の課題を検討する。また、劣化ウラン(UF6)の酸化固形化を新たに実施する場合のプロセスを検討する。	について検討し、遮蔽対策、設備の自動化や成型加工時間短縮等の対策の必要性を明らかにした。 ・劣化ウラン酸化固形化プロセスについて、国内の劣化ウラン貯蔵量、今後の発生量想定から、施設の規模、処理プロセスを検討した。	
(8) 転換プロセスの事業化の概念検討	・回収ウラン酸化物をUF6に転換する回収ウラン転換プロセスの事業化に対する概念検討を行う。	・(5)で選定された転換プロセスによる転換施設の施設規模、機器構成、運転に必要な試薬、人員などの情報を整理し、二段ふっ化法に基づく800tU/年の処理能力を持つ回収ウラン転換施設について概念検討した。 ・回収ウラン利用における転換プロセスの成立性の検討を行うとともに、回収ウランの転換から再濃縮、再転換、成型加工を経て原子炉へ装荷されるまでの全工程について事業化に対する課題を整理した。	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

特になし

<共通指標>

論文数	論文の被引用度数	特許等件数 (出願を含む)	特許権の実施件数	ライセンス 供与数	取得ライセンス料	国際標準への寄与
-	-	-	-	-	-	-

総合評価概要

今後、再処理施設の稼働により回収ウランが蓄積することは明らかであり、近い将来での事業化が見込め、その効果も大きな事業である。また、目標の設定・根拠・成果が明確に示されており、事業完遂に向けた姿勢は高く評価できる。

なお、全体として調査報告で終わっている傾向にあり、技術課題の洗い出しが甘く、もう少し深く掘り下げて次の研究開発アクションにつなげるべきではないか。特に、「(3) 炉心特性に与える影響」については検討の度合いが浅く、「濃縮回収ウラン燃料を使用した炉心の成立性に問題ないことを確認」とあるが、その根拠が一面的で不十分である。また、国費の適切な活用と目標達成までの時間の適切性を説明し、国際競争力のある研究開発体制を確立するためにも適切なマネジメント体制の確立が期待される。

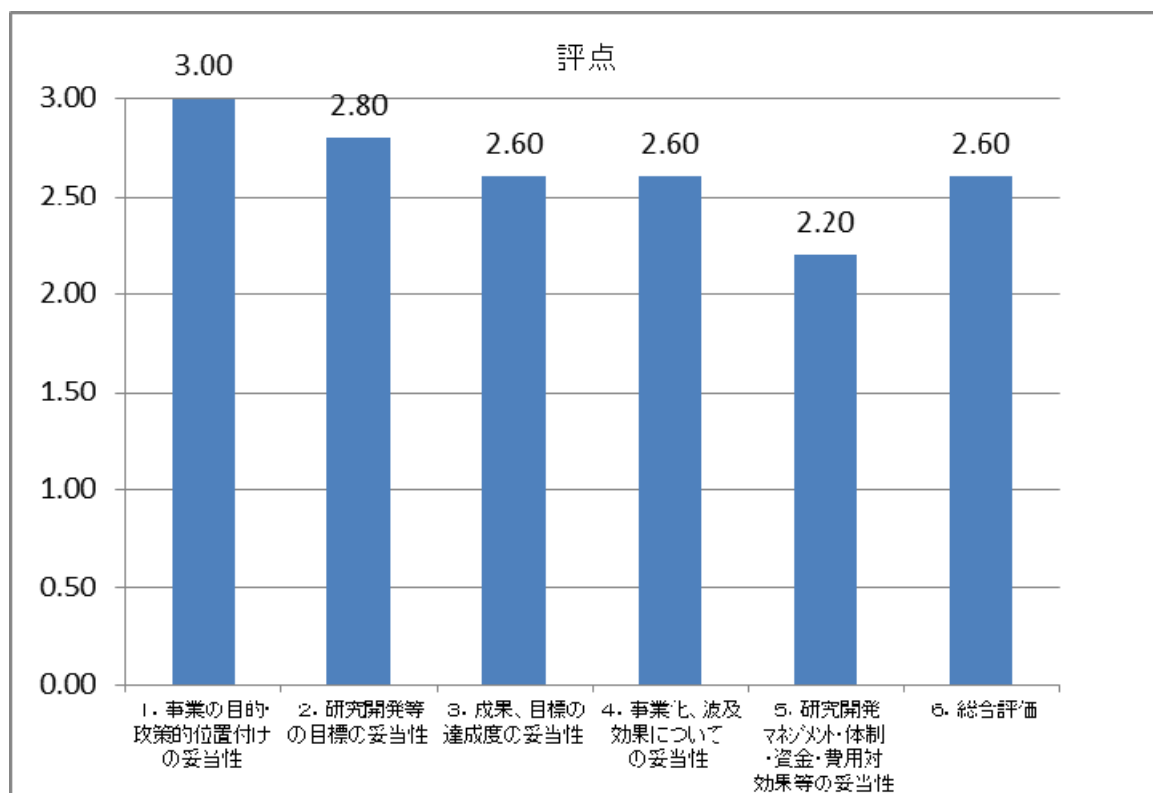
今後の研究開発の方向等に関する提言

概ね適切な成果が得られているが、「(3) 炉心特性に与える影響」については、原子炉の運転管理を行う電気事業者の判断材料を得るためにはさらなる検討が必要である。本事業の成果をさらに発展させ、実用化に向けて継続的に取り組まれることを期待する。

評点結果

評点法による評点結果 (B. 回収ウラン利用技術開発委託費に係る事業)

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	3.00	3	3	3	3	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.80	3	2	3	3	3
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.60	3	2	3	3	2
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.60	3	2	2	3	3
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.20	3	2	2	3	1
6. 総合評価	2.60	3	2	3	3	2



技術に関する事業

技術に関する 事業名	C. 使用済燃料再処理事業高度化補助金に係る事業
上位施策名	核燃料サイクルに係る施策
担当課	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・概要

我が国においては、使用済燃料を再処理し、回収されるプルトニウム、ウラン等を有効利用するという基本的方針を踏まえ、当面、プルサーマルを着実に推進することとしており、事業者には核燃料サイクルの要である六ヶ所再処理工場の着実な操業運転を進めることが期待されている。

本プロジェクトは、再処理施設で用いられるガラス固化技術についてより多くの白金族元素等を含む高レベル廃液を溶融可能な新しい性状のガラス素材を開発するとともに、これに対応しうる新型のガラス溶融炉を開発することにより、我が国の使用済燃料再処理技術の高度化を図るものである。

また、新型ガラス溶融炉の開発に際しては、六ヶ所再処理工場の運転経験を反映する研究もあわせて行う。

予算額等（委託）

（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成 2 1 年度	平成 2 5 年度	平成 2 0 年度	平成 2 6 年度	日本原燃
H23FY 予算額	H24FY 予算額	H25FY 予算額	総予算額	総執行額
2, 275, 268	1, 030, 000	1, 030, 000	7, 727, 268	5, 716, 517

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

個別要素技術	目標・指標	成果	達成度
(1) 新ガラス素材の開発 ①イエローフェーズ発生抑制ガラス素材の開発	・イエローフェーズ (YP) の発生を可能な限り抑制する新ガラス素材を開発する。 ・開発したガラスの性能については、るつぼ試験、小型・中型溶融炉試験、新型ガラス溶融炉実規模モックアップ試験において確認する。	・るつぼ試験により、YP 発生抑制ガラス素材の組成（従来ガラス素材中のアルミニウム (Al) とケイ素 (Si) の一部を廃液側に分配）を選定した。 ・小型および中型溶融炉試験において、調整液を添加しない条件で YP 発生抑制効果を確認することができた。 ・新型ガラス溶融炉の実規模モックアップ試験において、調整液を添加しない条件で新ガラス素材を使用して、適切な温度管理ができ、安定した運転が可能であった。また、YP 発生抑制効果については、運転条件の最適化を図る等の課題を確認することができた。	概ね達成（新型ガラス溶融炉により運転が可能なことを確認し、今後は、運転条件の最適化を自主事業の中で進める。）
②高減容ガラス素材の開発	・より多くの高レベル廃液を取り込める新ガラス素材を開発する。 ・開発したガラスの性能については、るつぼ試験、小型溶融炉試験において確認する。	・るつぼ試験により、高減容ガラス素材の組成（従来ガラス素材中のアルミニウム (Al) とホウ素 (B) の一部を廃液側に分配、バナジウム (V) の添加）を選定した。 ・小型溶融炉試験において、廃棄物含有率 34wt%（現行は 20.8wt%）を達成できることを確認できた。	達成
(2) 新型ガラス溶融炉の開発 ①新型ガラス溶融炉構成技術の開発	・白金族元素の堆積抑制および抜き出し性の向上を目的として、新型ガラス溶融炉を構成する技術（炉底部技術、炉内要素技術）を開発する。 ・開発した各構成技術については新型ガラス溶融炉の実規模モックアップ試験において検証を行う。	・炉底部形状を円すい、傾斜角度を 60° に変更し、炉底部の加熱手段を追加した炉底部のモックアップ試験等により、現行ガラス溶融炉と比べ、白金族元素の堆積抑制および抜き出し性、ならびにガラスの流下性が向上することを確認した。また、通常の約 5 倍の白金族元素濃度のガラスにおいても、良好に流下することができた。 ・新型ガラス溶融炉の実規模モックアップ試験により安定した温度管理が可能であり、白金族元素の堆積抑制、抜き出し性およびガラスの流下性が向上することを確認した。	達成
②ガラス溶融炉解析コードの高度化	・ガラス溶融炉内の温度および白金族元素分布等の挙動を模擬できる解析コードを開発する。	・解析コードに仮焼層のモデルやガラス物性値の反映等を行うことで、従来の解析コードと比べ、ガラス溶融炉内のガラス温度および白金族元素分布の再現性が向上した。 ・解析コードを用いて、新型ガラス溶融炉の実規模モックアップ試験の運転条件の事前検討を行うことができた。	達成
③ガラス物性等の基礎試験	・白金族元素および模擬廃液成分を含有したガラスの物性等の基礎データを取得する。	・白金族元素を含有したガラスの物性値、炉内の白金族元素の挙動、仮焼層の構造等のデータを取得し、ガラス溶融炉解析コードの高度化等に利用した。	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

特になし

< 共通指標 >

論文数	論文の 被引用度数	特許等件数 (出願を含む)	特許権の 実施件数	ライセンス 供与数	取得ライセ ンス料	国際標準へ の寄与
12	-	-	-	-	-	-

総合評価概要

再処理工場の安定運転だけでなく、処分の観点から、ガラス固化体の安定性向上、発生量抑制に寄与するものとして評価できる。特に、高減容ガラスや溶融炉（洗浄頻度低減、固化体発生数削減）の開発では、その部分の課題（イエローフェーズ、白金族挙動など）をビーカー試験から大型モックアップ試験まで緻密な実証試験で課題解決しており、事業を展開する上で大きな成果が得られた。また、中間報告の状況を勘案すると、明確かつ適切な成果が得られた。

なお、課題が解決できた一方で新たな課題も分かったはずで、その整理も必要で、それら全体を俯瞰した研究計画があっても良いように思われる。本施策の分野においてどのように国際的なイニシアチブを持つべきかについては難しい問題である。一方で、本分野における技術の国産化は様々な面で必要になることが考えられる。どのような手段をもって、事業の成功を得るかということは、マネジメントの基本的な課題である。

今後の研究開発の方向等に関する提言

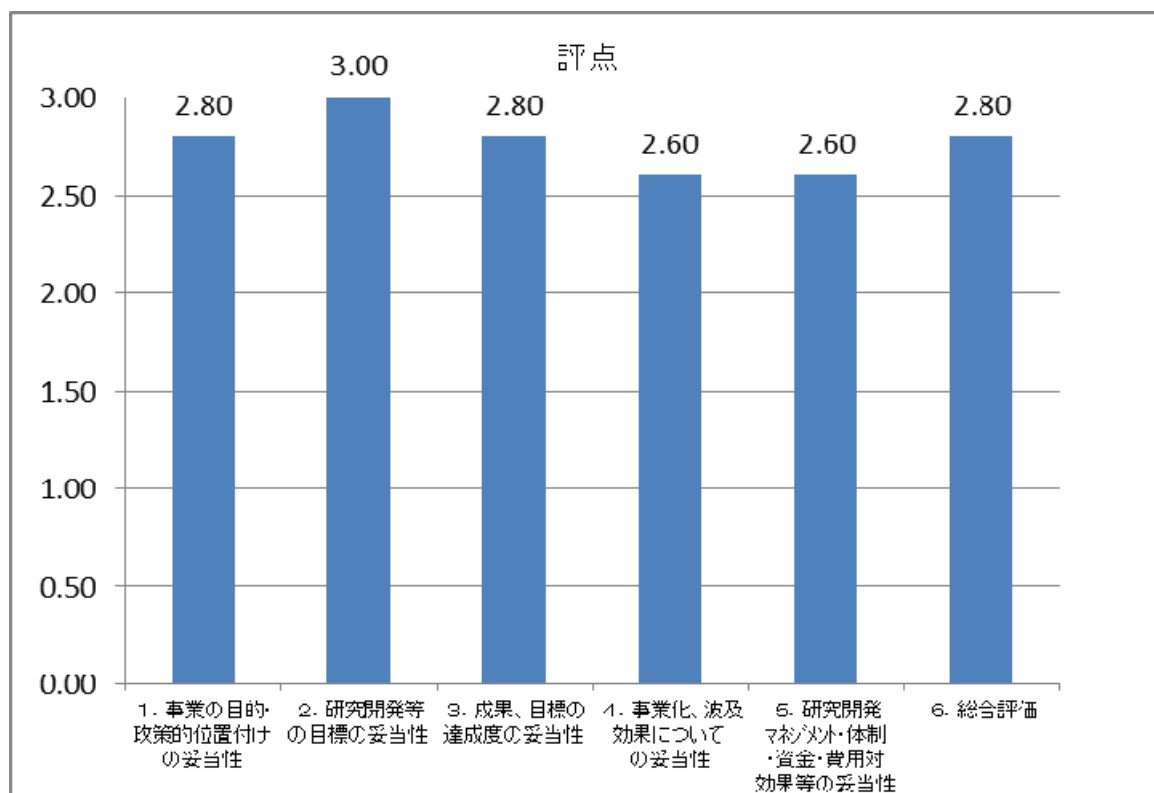
国策を推進していく上で、根幹となる事業であり、将来この技術が採用されたときに、先の六ヶ所再処理工場のガラス固化のトラブルのような問題が発生しないように、徹底した実規模レベルの実証試験が必要である。

また、高レベル放射性廃棄物処分の問題は、最大の問題であり、この問題に対処していくためにも、高速炉を活用した放射性廃棄物の減容、有害度減少などの研究開発に、より一層の力点が置かれるべきである。

評点結果

評点法による評点結果 (C. 使用済燃料再処理事業高度化補助金に係る事業)

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.80	3	2	3	3	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	3.00	3	3	3	3	3
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.80	3	2	3	3	3
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.60	3	2	2	3	3
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.60	3	2	2	3	3
6. 総合評価	2.80	3	2	3	3	3



第 1 章 評価の実施方法

第1章 評価の実施方法

本プロジェクト評価は、「経済産業省技術評価指針」（平成26年4月改定、以下「評価指針」という。）に基づき、実施した。

1. 評価の目的

以下の（１）～（４）を目的として評価を実施した。

（１）より良い政策・施策への反映

評価を適切かつ公正に行うことにより、研究者の創造性が十分に発揮されるような、柔軟かつ競争的で開かれた研究開発環境の創出など、より良い政策・施策の形成等につなげること。

（２）より効率的・効果的な研究開発の実施

評価を支援的に行うことにより、研究開発の前進や質の向上、独創的で有望な優れた研究開発や研究者の発掘、研究者の意欲の向上など、研究開発を効率的・効率的に推進すること。

（３）国民への技術に関する施策・事業の開示

高度かつ専門的な内容を含む技術に関する施策・事業の意義や内容について、一般国民にわかりやすく開示すること。

（４）資源の重点的・効率的配分への反映

評価の結果を技術に関する施策・事業の継続、拡大・縮小・中止など資源の配分へ反映させることにより資源の重点化及び効率化を促進すること。また、研究開発をその評価の結果に基づく適切な資源配分等通じて次の段階に連続してつなげることなどにより、研究開発成果の国民・社会への還元効率化・迅速化に資すること。

また、評価の実施に当たっては、以下の①～④を基本理念として実施した。

① 透明性の確保

推進課、主管課及び研究開発機関においては、積極的に成果を公開し、その内容について広く有識者等の意見を聴くこと。評価事務局においては、透明で公正な評価システムの形成、定着を図るため、評価手続、評価項目・評価基準を含めた評価システム全般についてあらかじめ明確に定め、これを公開することにより、評価システム自体を誰にも分かるものとするとともに、評価結果のみならず評価の過程についても可能な限り公開すること。

② 中立性の確保

評価を行う場合には、被評価者に直接利害を有しない中立的な者である外部評価の導入等により、中立性の確保に努めること。

③ 継続性の確保

技術に関する施策・事業においては、個々の評価がそれ自体意義を持つだけでなく、評価とそれを反映した技術に関する施策・事業の推進というプロセスを繰り返していく時系列のつながりにも意義がある。したがって、推進課及び主管課にとって評価結果を後の技術に関する施策・事業の企画立案等に反映させる際に有用な知見を抽出し、継続性のある評価方法で評価を行うこと。

④ 実効性の確保

政策目的に照らし、効果的な技術に関する施策・事業が行われているか判断するための効率的評価が行われるよう、明確で実効性のある評価システムを確立・維持するとともに、技術に関する施策・事業の運営に支障が生じたり、評価者及び被評価者双方に過重な負担をかけることのない費用対効果の高い評価を行うこと。

2. 評価者

評価を実施するにあたり、評価指針に定められた「評価を行う場合には、被評価者に直接利害を有しない中立的な者である外部評価者の導入等により、中立性の確保に努めること」との規定に基づき、外部の有識者・専門家で構成する検討会を設置し、評価を行うこととした。

これに基づき、評価検討会を設置し、技術に関する施策、技術に関する事業（プロジェクト等）の目的や研究内容に即した専門家や経済・社会ニーズについて指摘できる有識者等から評価検討会委員名簿にある5名が選任された。

なお、本評価検討会の事務局については、指針に基づき経済産業省資源エネルギー庁原子力立地・核燃料サイクル産業課が担当した。

3. 評価対象

技術に関する施策「核燃料サイクルに係る施策」

技術に関する事業

A. 高速炉再処理回収ウラン等除染技術開発委託費に係る事業

(実施期間：平成19年度から平成23年度)

B. 回収ウラン利用技術開発委託費に係る事業

(実施期間：平成21年度から平成22年度)

C. 使用済燃料再処理事業高度化補助金に係る事業

(実施期間：平成21年度から平成22年度)

を評価対象として、研究開発実施者（独立行政法人日本原子力研究開発機構、三菱マテリアル株式会社、日本原燃株式会社）から提出された資料をもとに、技術に関する事業の評価を行うとともに、それらの事業評価の結果を踏まえて、各事業を俯瞰する形で各事業の相互関係等に着目し、技術に関する施策の評価を実施した。

4. 評価方法

第1回評価検討会においては、担当課、研究開発実施者からの資料提供、説明及び質疑応答が行われた。

第2回評価検討会においては、それらを踏まえて、第〇回産業構造審議会産業技術部会評価小委員会資料において審議（平成21年1月28日）において審議・了承された「技術に関する施策の評価」の評価項目（施策の目的・政策的位置付け、施策の構造及び目的実現の見通し、総合評価）、「プロジェクト評価における標準的評価項目・評価基準（【参考】参照）」に従い評価を実施し、今後の研究開発の方向等に関する提言をいただいた。技術に関する事業評価については、加えて4段階評点法による評価を行い、評価報告書（案）を審議、確定した。

また、評価の透明性の確保の観点から、知的財産保護、個人情報で支障が生じると認められる場合等を除き、評価検討会を公開として実施した。

5. 評価項目

【技術に関する施策】

○施策の目的・政策的位置付けの妥当性

- ・ 施策の目的の妥当性
- ・ 施策の政策的位置付けの妥当性
- ・ 国の施策としての妥当性、国の関与が必要とされる施策か。

○施策の構造及び目的実現見通しの妥当性

- ・ 現時点において得られた成果は妥当性
- ・ 施策の目的を実現するために技術に関する事業が適切に配置されているか。

○総合評価

【技術に関する事業】

○事業の目的・政策的位置付けの妥当性

- ・ 事業の目的は妥当で、政策的位置付けは明確か。
- ・ 国の事業として妥当であるか、国の関与が必要とされる事業か。

○研究開発等の目標の妥当性

- ・ 研究開発等の目標は適切かつ妥当か。

○成果、目標の達成度の妥当性

- ・ 成果は妥当か。
- ・ 目標の達成度は妥当か。

○事業化、波及効果についての妥当性

- ・ 事業化については妥当か。
- ・ 波及効果は妥当か。

○研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

- ・ 研究開発計画は適切かつ妥当か。
- ・ 研究開発実施者の実施体制・運営は適切かつ妥当か。
- ・ 資金配分は妥当か。
- ・ 費用対効果は妥当か。
- ・ 変化への対応は妥当か。

○総合評価

第2章 技術に関する施策の概要

第2章 技術に関する施策の概要

1. 施策の目的・政策的位置付け

1-1 施策の目的

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。

例えば、プルサーマル（プルトニウムを軽水炉で利用）を進めることで、

- (1) ウラン資源を約1～2割節約することができる。
- (2) 高レベル放射性廃棄物についても直接処分する場合に比べ体積を約1/4に減らすことができる。
- (3) 高レベル放射性廃棄物の有害度が天然ウラン並になるまでの期間についても、約8千年と直接処分する場合に比べ1/10以下にすることができる。

といった効果がある。

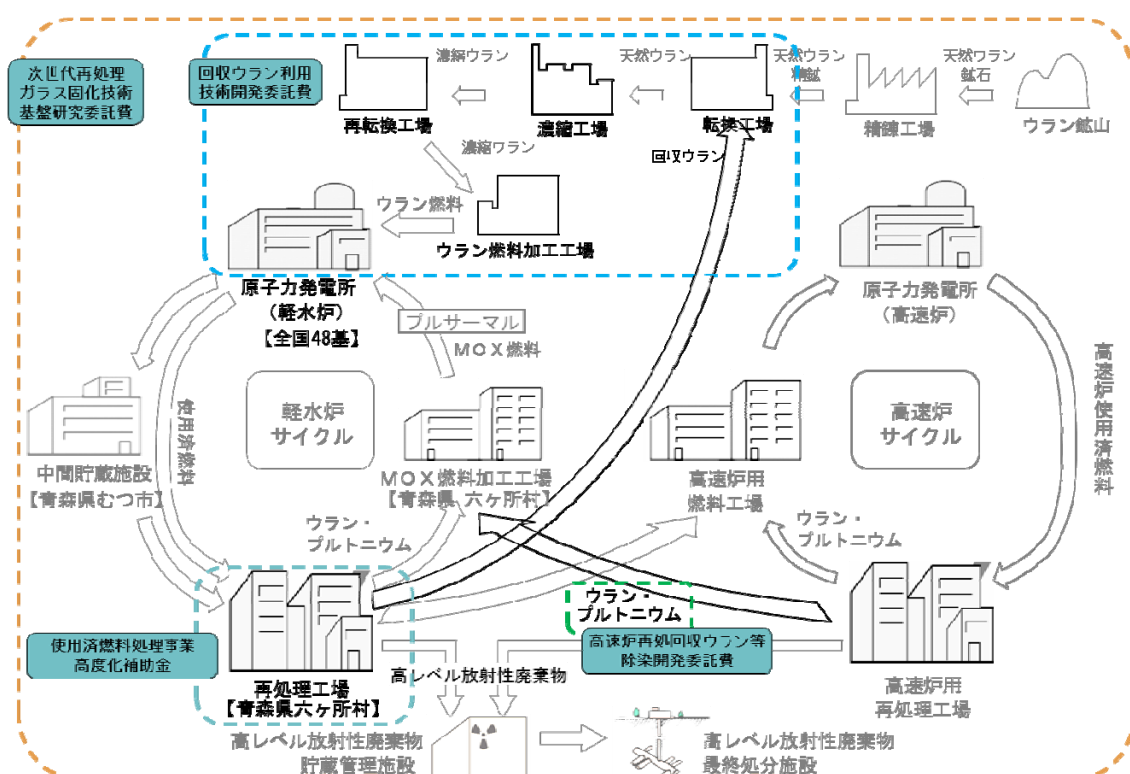
また、原子力研究開発は、技術開発から事業化まで相当な期間を要し、多額の費用を要する他、世界的な核不拡散体制等の国際的動向も踏まえた政策対応を図ることが必要であるため、民間のみに取り組みを求めることは困難であり、国が適切に技術開発の推進や事業環境の整備を図ることが必要である。

軽水炉サイクルの実現

核燃料資源を合理的に達成できる限りにおいて有効に利用することにより、我が国のエネルギーの安定供給を確保する観点から、再処理施設で用いられるガラス固化技術について、新しい性状のガラス素材及びこれに対応する新型溶融炉の開発、六ヶ所再処理工場から回収される回収ウランの利用技術の開発及び使用済プルサーマル燃料の再処理実証に係る技術開発を実施する。

高速炉サイクルの実現

高速炉導入後も、全ての軽水炉が高速炉に置き換わるまでの間、長期にわたって軽水炉と高速炉が共存する。この移行期には高速増殖炉サイクルと軽水炉サイクルで相互にウラン等を受給できることがそれぞれのサイクルの燃料バランスを保つうえで必要となる。そのため、軽水炉サイクルから高速炉サイクルへの円滑な移行を念頭におきつつ、高速炉サイクルの確立において、次世代再処理工場から回収が想定されている高線量回収ウラン等の軽水炉サイクルへの供給は極めて重要であり、これらの軽水炉への供給を実現するために必要な研究開発を実施する。



1-2 政策的位置付け

核燃料サイクルに係る施策については、原子力政策大綱やエネルギー基本計画において以下のとおり記載されており、これらに基づき合理的な範囲内で核燃料サイクルの自主性を確保することを目指し、施策の取組が行われてきている。

原子力政策大綱（抜粋）※平成17年10月14日閣議決定

「我が国における原子力発電の推進に当たっては、経済性の確保のみならず、循環型社会の追究、エネルギー安定供給、将来における不確実性への対応能力の確保等を総合的に勘案するべきである。そこで、これら10項目の視点からの各シナリオの評価に基づいて、我が国においては、核燃料資源を合理的に達成できる限りにおいて有効に利用することを目指して、安全性、核不拡散性、環境適合性を確保するとともに、経済性にも留意しつつ、使用済燃料を再処理し、回収されるプルトニウム、ウラン等を有効利用することを基本的方針とする。使用済燃料の再処理は、核燃料サイクルの自主性を確実なものにする観点から、国内で行うことを原則とする。」

エネルギー基本計画（抜粋）※平成26年4月11日閣議決定

「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。

核燃料サイクルについては、六ヶ所再処理工場の竣工遅延やもんじゅのトラブルなどが続いてきた。このような現状を真摯に受け止め、これら技術的課題やトラブルの克服など直面する問題を一つ一つ解決することが重要である。その上で、使用済燃料の処分に関する課題を解決し、将来世代のリスクや負担を軽減するためにも、高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減や、資源の有効利用等に資する核燃料サイクルについて、これまでの経緯等も十分に考慮し、引き続き関係自治体や国際社会の理解を得つつ取り組むこととし、再処理やプルサーマル等を推進する。」

1－3 国の関与の必要性

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。また、原子力研究開発は、技術開発から事業化までに相当な期間を要し、多額の費用を要する他、世界的な核不拡散体制等の国際的動向も踏まえた政策対応を図ることが必要であるため、民間のみに取り組みを求めることは困難であり、国が適切に技術開発の推進や事業環境の整備を図ることが必要である。

2. 施策の構造及び目的実現の見通し

2－1 施策の構造

核燃料サイクルにかかる事業については、下表に示す通りである。また、それら事業に関し、各事業の施策としての目標との関係、進捗を整理すると共に中期的なアウトカムにおける各事業間の関連を整理したロジックモデルを図1に、及び施策で掲げられた市場について、市場を起点に課題ツリーを構築し、各事業の技術体形を当てはまる形で整理したロジックツリーを図2に示す。

事業名	実施期間	評価区分	事業概要
高速炉再処理回収ウラン等除染技術開発委託費	平成19～23年度	終了時評価	高速炉導入後も、全ての軽水炉が高速炉に置き換わるまでの間、長期にわたって軽水炉と高速炉が共存する。この移行期には高速増殖炉サイクルと軽水炉サイクルで相互にウラン等を受給できることがそれぞれのサイクルの燃料バランスを保つうえで必要となる。そこで、高速炉用再処理工場で回収される高線量のウラン、プルトニウム等を既存の軽水炉用燃料加工工場で取り扱うための除染技術開発を行った。
回収ウラン利用技術開発委託費	平成21～22年度	終了時評価	六ヶ所再処理工場から回収されるウランを再び軽水炉で利用するため、既存のウラン濃縮施設、再転換施設での回収ウラン取扱いへの影響や原子炉の炉心特性に与える影響等を調査した。また、高性能で安全性、経済性に優れた転換プロセス、濃縮プロセス、再転換プロセスを検討し、回収ウラン利用の技術開発の概念検討を行った。
使用済燃料再処理事業高度化補助金	平成21～25年度	終了時評価	再処理施設で用いられるガラス固化技術について、より多くの高レベル廃液を溶融可能な新しい性状のガラスを開発するとともに、これに対応しうる新型のガラス溶融炉を開発する。
次世代再処理ガラス固化技術基盤研究委託費	平成26年度～	事業開始年度であるため評価対象外	我が国では、原子力発電所等の操業・廃止時の除染等により発生する低レベル廃液等については、そのガラス固化技術の研究開発は手つかずの状況である(米・仏・韓ではすでに実用化済)。そのため、低レベル廃液の組成に合ったガラス固化技術の確立を目指し、低レベル廃液を中心とした様々な廃液組成に対応可能な「ガラス」及び「ガラス溶融炉の運転制御技術」に関する調査・基礎試験等を実施する。

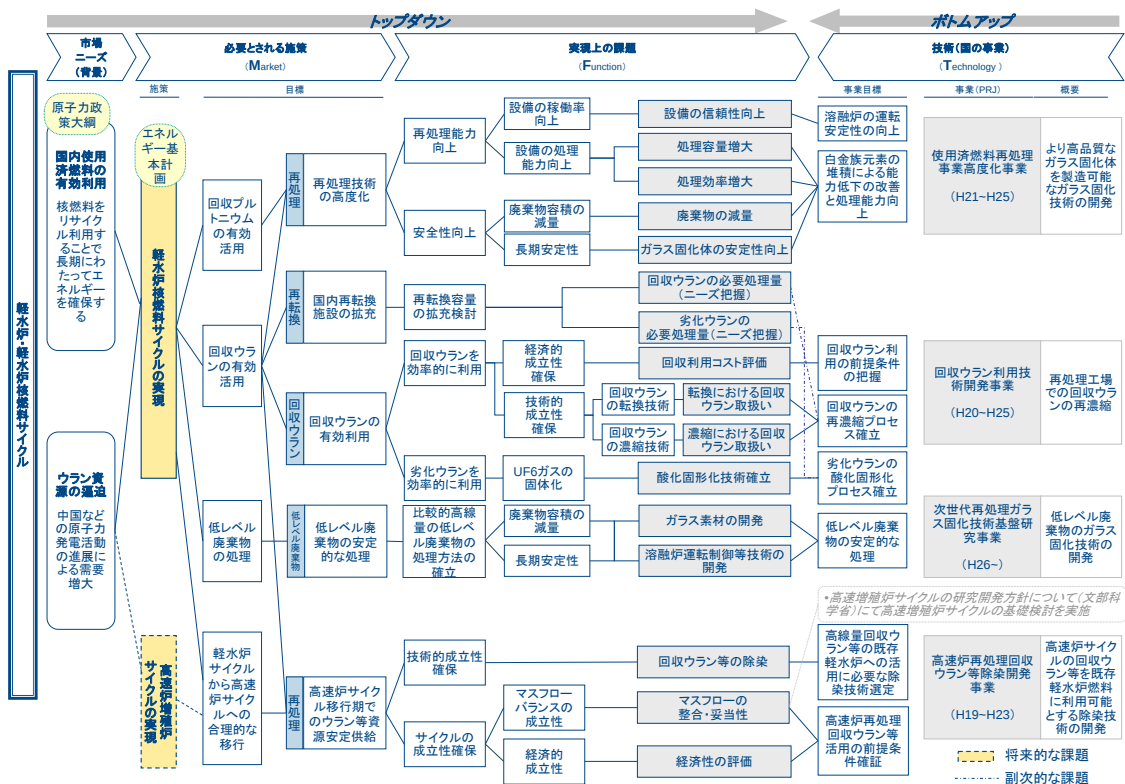


図1 ロジックモデル

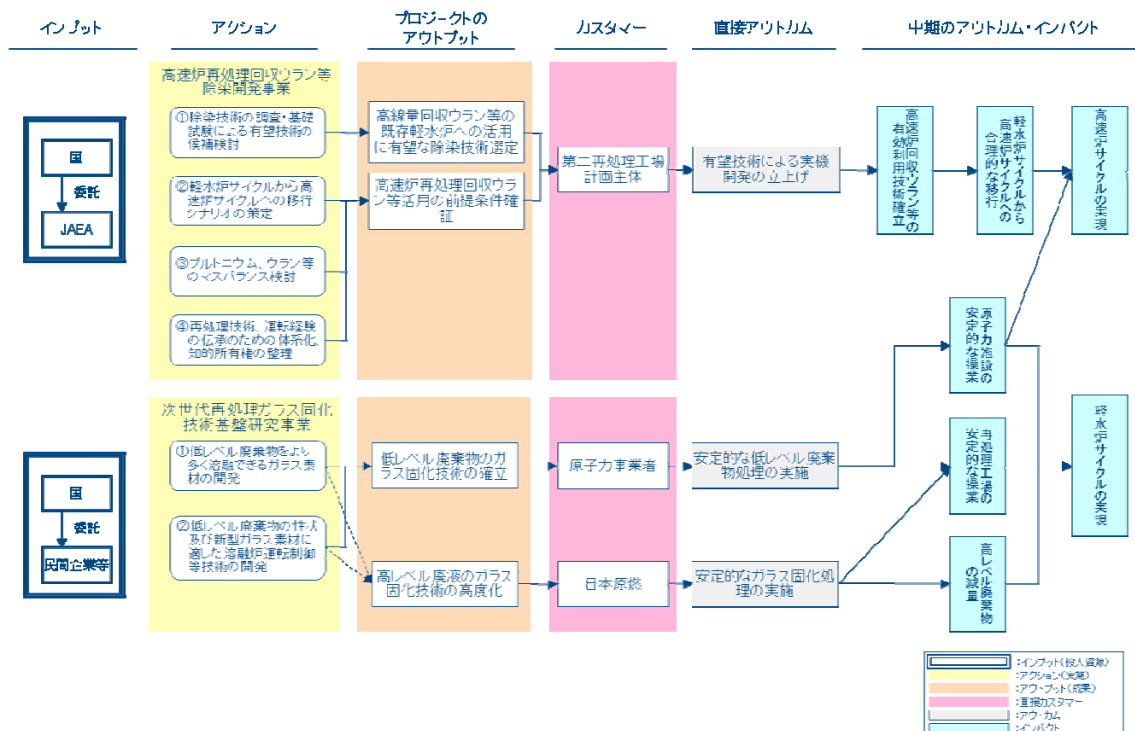
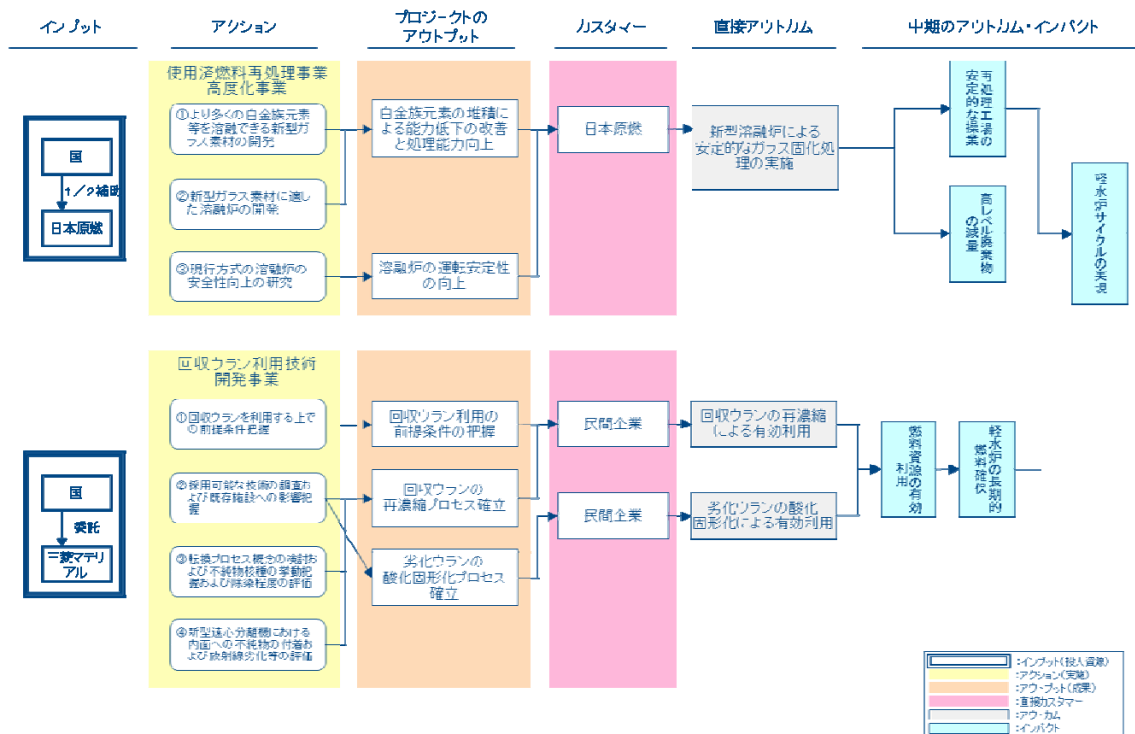


図2 ロジックツリー

2-2 得られた成果

①高速炉再処理回収ウラン等除染技術開発委託費に係る事業（H19-23）

【アウトプット】

複数の除染プロセス候補のうち、技術的成立性が最も高いプロセス技術として溶媒抽出法を選定し、遠心抽出機を用いて除染係数等の基礎データを取得した。

また、軽水炉サイクルから高速炉サイクルへの詳細な移行シナリオを策定。さらに、再処理技術に係る知識、データ等の体系化のための手法の検討を行い、再処理工学としての枠組みを構築するとともに、再処理技術の知的所有権等の整理を実施した。

【アウトプットからアウトカムへの展開】

核燃料サイクルの基本方針を踏まえた柔軟性のある第二再処理工場の検討に資する。

【アウトカム】

高速炉サイクルにおいて、回収ウラン等を軽水炉に利用することにより、軽水炉サイクルから高速炉サイクルへの円滑な移行が図られる。

②回収ウラン利用技術開発委託費に係る事業（H21-22）

【アウトプット】

- ・ 回収ウランを利用する上での前提条件
- ・ 採用可能な利用技術
- ・ 既存施設への影響
- ・ 転換プロセス概念
- ・ 転換技術を中心とした回収ウラン利用技術

【アウトプットからアウトカムへの展開】

電気事業者及び日本原燃が回収ウラン利用への機動的な対応可能性を明らかにする。

【アウトカム】

天然ウランの供給を海外に依存するわが国にとって回収ウランの有効活用により純国産資源としての選択肢が提供される。これにより、将来において懸念されている天然ウラン需給逼迫に対する影響の緩和が期待できる。

③使用済燃料再処理事業高度化補助金に係る事業（H21-25）

【アウトプット】

より多くの白金族元素を含む高レベル廃液を溶融可能なガラス及び溶融炉の開発等によって、より高品質のガラス固化体を製造可能なガ

ラス固化技術を開発。

【アウトプットからアウトカムへの展開】

六ヶ所再処理工場の本格操業後に更新が計画されているガラス溶融炉および同工場のガラス固化施設の運転に反映する。

【アウトカム】

六ヶ所再処理工場の安定運転により、我が国の核燃料サイクルを着実に推進し、資源の有効利用、高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減等に資する。

また、白金族元素をより多く含むことができ、浸出率を低くすることができるガラス素材及び溶融炉を開発することにより、高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）発生量の低減、安全裕度の一層の向上を図ることができる。

④次世代再処理ガラス固化技術基盤研究委託費に係る事業（H26-）

本事業は、事業の開始が平成26年度であり、成果は今後得られる予定であることから、現時点で期待されるアウトプット、アウトカムを記す。

【アウトプット】

原子力発電所等の操業・廃止時の除染等により発生する低レベル廃液の組成にあったガラス固化技術の確立を目指し、低レベル廃液を中心とした様々な廃液組成に対応可能な「ガラス」及び「ガラス溶融炉の運転制御技術」に関する調査・基礎試験等を実施し、ガラス固化技術の基盤整備を行う。

【アウトプットからアウトカムへの展開】

低レベル放射性廃棄物のガラス固化技術については、今後行われる国内外の原子力発電所等の操業、廃止時の除染作業等において、民間団体等が低レベル放射性廃棄物の処理方法を検討する際の1つの手法として評価することが可能となる。

【アウトカム】

我が国では手つかずの状況である原子力発電所等の操業・廃止の際の除染等により発生する低レベル放射性廃液に係るガラス固化技術の研究開発であると共に、既に実用化されている高レベル放射性廃液のガラス固化技術も向上することから、ガラス固化体の最終処分場面積の縮減等が見込まれる。

第3章 技術に関する事業の概要

A. 高速炉再処理回収ウラン等除染技術開発委託費に係る事業

1. 事業の目的・政策的位置付け

1-1 事業目的

独立行政法人 日本原子力研究開発機構で実施している「高速増殖炉サイクル実用化研究開発」では、2050年頃の商業用高速増殖炉の導入開始を目標に、プルトニウムのリサイクルを可能とする各種研究開発が進められており、その中で次世代再処理技術の候補として先進湿式法が有望視されている。

一方、商業用高速増殖炉の導入開始以降、既存の軽水炉がすべて高速増殖炉に置き換わるまでの相当長い期間、軽水炉と高速増殖炉が併存することになり、この移行期には高速増殖炉サイクルと軽水炉サイクルで相互にウラン等を受給できることがそれぞれのサイクルの燃料バランスを保つうえで必要となる。しかし、先進湿式法を用いた再処理により回収されたウランやプルトニウムは高線量であり、既存の軽水炉燃料加工施設では取り扱うことができないという問題がある。

そこで、本研究開発では、高速増殖炉サイクルから軽水炉サイクルへのウラン等の供給を行ううえで必要となる高除染化技術について調査及び基礎試験等を行い、商業的に利用可能な除染技術を開発する(図1参照)。

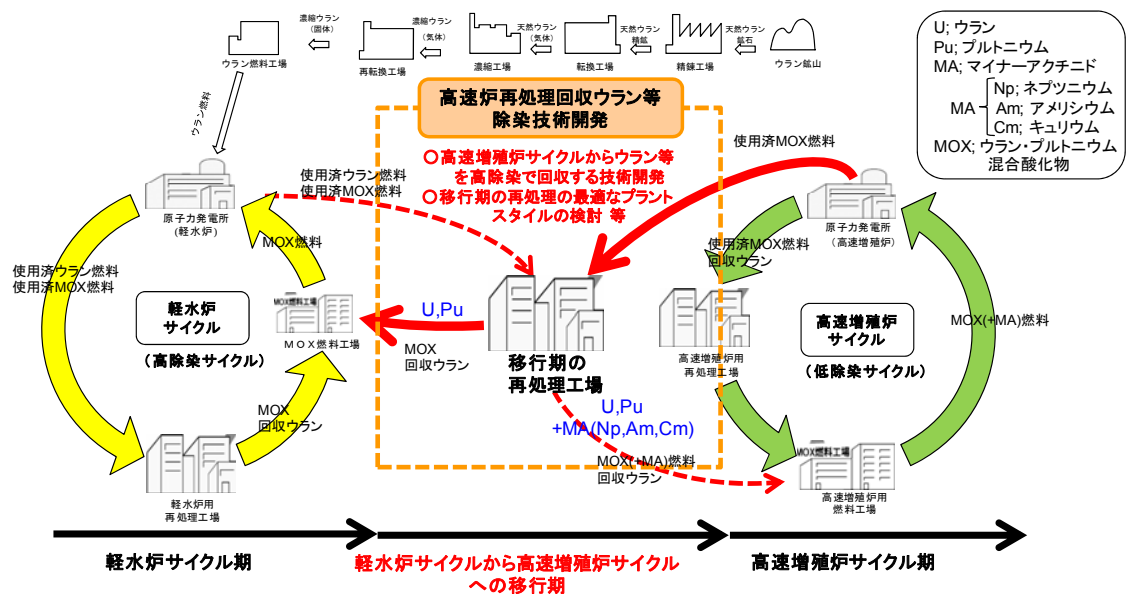


図1 高速炉再処理回収ウラン等除染技術開発事業

また、商業用高速増殖炉の導入開始時期が 2050 年頃となる場合を基本シナリオとしたうえで、導入開始時期が 2050 年よりも早まる場合や遅れる場合について、原子炉を含めた核燃料サイクル全体の軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの詳細な移行シナリオを策定・検討し、ここから導き出される移行期における最適なプラントスタイルの検討を実施する。

さらに、技術の知的所有権等に係る整理を実施するとともに、国内の再処理技術、運転経験等を次世代に引き継ぐための知識の体系化等に関する研究を実施する。

1 - 2 政策的位置付け

本事業は、軽水炉サイクルから高速炉増殖炉サイクルへの円滑な移行を図るため、両サイクルが共存する移行期に高速増殖炉サイクルから軽水炉サイクルへのウラン等の供給を可能とする除染技術を開発するとともに、軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの詳細な移行シナリオを検討し、移行期における最適なプラントスタイルの検討を行うものである。また、国内の再処理技術等を次世代に継承するために、知識の体系化等に関する研究を行うものである。

これらについて、「原子力政策大綱(平成 17 年 10 月 14 日、閣議決定)」及び「原子力立国計画(平成 18 年 8 月 8 日、総合資源エネルギー調査会電気事業分科会原子力部会報告)」において以下のように示されている。

「原子力政策大綱」

- 「高速増殖炉については、(中略)、2050 年頃から商業ベースでの導入を目指す。」
- 「我が国においては、核燃料資源を合理的に達成できる限りにおいて有効に利用することを目指して、(中略)、使用済燃料を再処理し、回収されるプルトニウム、ウラン等を有効利用することを基本的方針とする。」
- 「(前略) 軽水炉使用済 MOX 燃料の再処理の方策は、六ヶ所再処理工場の運転実績、高速増殖炉及び再処理技術に関する研究開発の進捗状況、核不拡散を巡る国際的な動向等を踏まえて 2010 年頃から検討を開始する。」

「原子力立国計画」

- 「第二再処理工場については、「原子力政策大綱」において 2010 年頃からその検討を開始することとされているが、その検討のための準備として、第二再処理工場の目的や求められる機能について、調査研究やデータ蓄積を行うことが必要である。」
- 「再処理工場の建設間隔（約 40 年）が原子力発電所に比べて長期であることを鑑みると、技術の継承のためには、これに加え、技術等のノウハウ

を工学的に体系化し、効率的に伝承する手法の研究が必要である。」

1 - 3 国の関与の必要性

低除染(高線量)でウランやプルトニウムのリサイクルを行う高速増殖炉サイクルからウラン等を高除染(低線量)で回収するプロセス技術を選択するための各種状況は、商業用高速増殖炉の導入時期、除染プロセス技術開発の進捗状況等に影響されるために不確実性が高く、また、技術開発に係るリスクも大きい。さらに、技術開発から実用化までのインキュベーション期間が長く、民間の技術開発投資としては成り立たない。

また、高除染プロセスと対を成す高速増殖炉用再処理技術は、同様の理由から、国により進められている。高除染プロセスについてもこれと一体的に国が研究開発を実施すれば、相互の研究内容の重複防止や研究開発目標の調整、データの共有等、より効率よく進めることが可能となる。

さらに、再処理工場の建設間隔は数十年と非常に長く、一般産業界における製品製造活動を仲立ちとした技術の継承、技術蓄積・維持や大学等の学術活動による知識の体系化、人材育成が期待できないことから、これを国が積極的に支援する必要がある。

2. 研究開発目標

2 - 1 研究開発目標

2 - 1 - 1 全体の目標設定

本研究開発は、以下の3つの項目で構成されている。

- (1) 除染技術の調査・開発
- (2) 軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの移行シナリオ等検討
- (3) 再処理工学の枠組み構築

これら3つの項目の目標を表1に示す。

表1. 全体の目標

目標・指標	設定理由・根拠等
・ 除染技術の調査・開発 高速増殖炉サイクルから回収するウラン等の高除染化技術について、有望な除染技術候補を選定するとともに、候補技術の基礎試験、プロセス試験等を行い、商業的に利用可能な除染技術としての道筋を示す。	・ 多数ある除染技術の中から、有望技術を選定することにより、本事業における研究開発の効率化を図る。また、選定された有望技術について試験を実施し、将来的な商業利用やプラント構成の議論に必要なデータ類を整備する必要がある。
・ 軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの移行シナリオ等検討 軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの移行シナリオを明らかにし、対応した再処理プラントイメージの概念検討を進め、検討を深めるべきプラントイメージの絞り込みやプラント設備構成等の検討を行う。	・ 高速増殖炉の円滑な導入を図る上で、今後の核燃料の需給バランス等、核燃料サイクルの全体バランスを把握しておくことが必要である。また、この移行シナリオに対応できる複数の再処理プラント概念を整理し、これらの利害得失の比較から候補プラントイメージの絞り込みを行い、今後の関連研究の効率化を図る必要がある。
・ 再処理工学の枠組み構築 我が国の再処理技術に関する知的所有権について調査・整理し、技術汚染の可能性を評価するとともに、再処理技術に係る知識、データ等の体系化のための手法の調査・検討を行い、有用な方法を摘出する。	・ 再処理施設は数十年ごとに建設するため、開発成果や六ヶ所再処理施設の経験等を次世代に引き継ぐための知識の体系化、再処理技術の工学への進化が不可欠である。また、海外からの導入技術に関する技術汚染を防止する必要がある。

2 - 1 - 2 個別要素技術の目標設定

2-1-1 項で示した各研究開発項目に対する個別要素技術の目標を表 2 に示す。本事業のうち「除染技術の調査・開発」については、平成 19 年度に実施した候補技術の調査結果に基づき、以下のとおり具体的な開発項目を選定しており、それぞれの開発項目に対して目標の設定を行った。

平成 19 年度に実施した候補技術の調査の結果、技術的成立性や実現可能性の観点から「溶媒としてリン酸トリブチル（TBP）を、抽出器として遠心抽出器を用いる溶媒抽出法」を有望な候補技術として選定した。また、今後必要となるデータ取得の範囲が小さく、これらが充足されれば TBP 溶媒を用いる技術とほぼ同等となる「溶媒としてモノアミドを用いる溶媒抽出法」を第二の候補として選定した。さらに、技術が成立した場合に施設の建設に係る費用が低くなる可能性を有するとともに、その検討結果がフッ化物揮発法に溶媒抽出法を組み合わせたプロセスである FLUOREX 法への反映も可能という観点から、フッ化物揮発法も当面の研究対象に加えることとした。なお、溶媒として TBP を用いる溶媒抽出法として、既存の PUREX 法に比べ核拡散抵抗性を向上させた再処理プロセスとしても研究されているコプロセッシング法を平成 20 年度からの研究対象とした。

これらを踏まえ、「除染技術の調査・開発」における個別要素技術は以下のとおりとした。

(1) 除染技術の調査・開発

- ① 除染技術の調査
- ② 溶媒抽出法による除染プロセス開発
 - a. 遠心抽出システム開発
 - b. コプロセッシング法を用いた除染プロセス開発
 - c. モノアミドを用いた除染プロセス開発
- ③ フッ化物揮発法を用いた除染プロセス開発

なお、溶媒抽出法における有望な主要機器として選定された遠心抽出器には単段型と多段型があり、遠心抽出システムについては、これらの抽出器の特徴や開発経緯を踏まえた開発目標を設定することとした。

表 2. 個別要素技術の目標

要素技術	目標・指標	設定理由・根拠等
(1) 除染技術の調査・開発		
① 除染技術の調査	・ 除染技術としての技術的要件を整理するとともに、有望な除染技術を選定する。	・ 技術候補は多数あり、有望技術を選定することにより、本事業における研究開発の効率化を図る。
②溶媒抽出法による除染プロセス開発		
a. 遠心抽出システム開発	・ 単段型遠心抽出器の試験機(200 トン/年規模)を用いた中性子吸収材内封型遠心抽出器の成立性を評価する。	・ 中性子吸収材内封型遠心抽出器を適用できれば、臨界安全上の制約が緩和され更に大型化設計が可能となるため実施する必要がある。
	・ 単段型遠心抽出器の臨界安全上の最大規模を評価する。	・ 大型遠心抽出器の基本構造を提示するために、臨界安全上の最大規模を評価する必要がある。
	・ 除染プロセスに対する多段型遠心抽出器の適用性を評価する。	・ 単段型と比較するため、多段型遠心抽出器の基本性能の評価、臨界安全上の最大規模の検討等を行い、除染プロセスへの適用性を評価する必要がある。
	・ 単段／多段の遠心抽出器における運転異常発生までの時間等の耐スラッジ性を評価する。	・ スラッジ流入に対応可能な遠心抽出器システムを構築するため、単段型及び多段型の遠心抽出器を用いたスラッジ試験によりスラッジ堆積挙動を定量的に把握する必要がある。
	・ 流動解析シミュレーションの実用性を評価する。	・ スラッジ挙動を含めた流動性評価に対してコンピュータシミュレーションが有効である。従って、大型化検討及び耐スラッジ構造の検討を効率的に進めるために流動解析シミュレーション技

		術を開発する必要がある。
b. コプロセッシング法を用いた除染プロセス開発	・ 移行期の処理対象溶液からウラン、プルトニウムを共回収するプロセスフローシートを抽出計算コードにより設定する。また、設定したフローシートに基づき、ウラン、プルトニウムを共回収するプロセスの確立に向け、ミキサセトラ試験を行いフローシートの成立性を確認する。	・ 抽出計算コードによるウラン、プルトニウムの挙動は、現状、必ずしも実際と一致するとは限らないため、計算コードと試験の比較による技術的成立性の確認をする必要がある。
	・ ウラン/プルトニウム共回収液中でのウラン同伴を監視するためのウラン/プルトニウム混合モニタに係る試験を行う。	・ ウラン/プルトニウム共回収液に影響を与えない分析方法（試薬の添加等が不要な方法）を選定し、測定の可否を確認する必要がある。
c. モノアミドを用いた除染プロセス開発	・ 事業化へ向けた研究開発段階へ移行するための判断材料となる分離プロセス基礎データを整備する。	・ 除染プロセスにおける抽出剤としてのモノアミドに関しては、連続抽出プロセスにおけるウラン及びプルトニウムの移行挙動、溶媒洗浄、並びに溶媒劣化物の影響等に関する基礎データが十分に整備されていない。 このため、連続抽出プロセスにおけるウラン及びプルトニウムの移行挙動をシミュレーション解析で把握するとともに、ミキサセトラによる連続抽出試験を実施し、モノアミドを用いた除染プロセスの成立性を評価する必要がある。また、溶媒の劣化物は沈殿生成等の問題を引き起こす可能性があるため、劣化物の洗浄法を検討す

		るとともに、劣化物と金属元素との錯体に関する基礎物性も明らかにする必要がある。
③ フッ化物揮発法を用いた除染プロセス開発	・ フッ化物揮発法や同手法にて課題と考えられる粉末ハンドリング技術に関する調査を行う。	・ フッ化転換技術として有望なフレーム炉の適用を想定し、その妥当性を検討するため、国内外の類似技術の調査を行う。また、粉末移送等のハンドリング手法が懸念されるため、同技術の実情を調査する必要がある。
	・ 軽水炉へ供給可能なフッ化転換・高除染プロセスを検討し、ブロックフロー及びプロセスフローを作成し、プロセス概念と物質収支を検討する。	・ プロセスの概念を検討するために、調査結果等を基にブロックフローやプロセスフローを作成する必要がある。
	・ 施設概念設計を行う上での課題抽出及び対策の検討を行う。	・ 技術の実現性を検討するために、施設概念設計を行う上での課題や対策を整理する必要がある。
(2) 軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの移行シナリオ等検討	・ 原子炉を含めた核燃料サイクル全体の軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの移行シナリオを明らかにする。	・ 高速増殖炉の円滑な市場導入を図る上で、いつ頃、どの程度の量のウラン等の受給が見込まれるか等、核燃料サイクルの全体像を把握する必要がある。
	・ 上述の核燃料サイクルを実現していく上で、軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの移行期に必要な第二再処理工場のプラントスタイルについて、ブロックフローレベルでの概略検討を行う。	・ 移行期には、軽水炉（軽水炉MOX 含む）や高速増殖炉の使用済燃料の再処理が必要となるが、このための方策としていくつかのプラントスタイルが考えられる。今後の各種研究開発を効率的に進めていくためには、ターゲットプラントのスタイルを明ら

		かにしていく必要がある。このため、複数考えられるプラントスタイルに特徴的な利害得失を把握するために、まずはブロックフローレベルでの概略を検討する必要がある。
	・ 第二再処理工場の主工程に採用される可能性のある複数の再処理プロセス技術を採用した場合のプラントイメージの整理と、種々の観点から相互比較を行う。	・ 第二再処理工場の主工程に採用する再処理プロセス技術として複数の候補が想定される。このため、いくつかの有力な再処理技術を採用した場合のプラントイメージを明らかにし、それらの利害得失を明らかにして、有力な再処理技術を絞り込む必要がある。
	・ コプロセッシング法の軽水炉/高速増殖炉共用再処理施設として考え得る複数のプラント概念の設備構成パターンを検討し、その特質を明らかにする。	・ 移行期における再処理施設については、ウラン等の受給への対応、国内技術の育成や産業力維持などの種々の観点から、複数のプラント概念が考えられる。このため、これらのプラント概念のプラントイメージを検討し、その特質を明らかにしておく必要がある。
(3) 再処理工学の枠組み構築	・ 我が国の再処理技術に関する知的所有権について調査・整理し、技術汚染の可能性を評価するとともに、再処理技術に係る知識、データ等の体系化のための手法の調査・検討を行い、有用な方法を摘出する。	・ 再処理施設は数十年ごとに建設するため、開発成果や六ヶ所再処理施設の経験等を次世代に引き継ぐための知識の体系化、再処理技術の工学への進化が不可欠である。また、海外からの導入技術に関する技術汚染を防止する必要がある。

3. 成果、目標の達成度

3 - 1 成果

3 - 1 - 1 全体成果

平成 19 年度に除染プロセスの候補技術を選定し、その結果を受けて個別技術の基礎試験、プロセス試験等を実施した。合わせて、軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの移行シナリオの検討等や再処理工学の枠組み構築を実施しており、これらについてはそれぞれに設定した目標・指標を満足する成果が得られている。各項目の成果については、以下に記載するとおりである。

3 - 1 - 2 個別要素技術成果

(1) 除染技術の調査・開発

① 除染技術の調査

高速増殖炉サイクルから回収するウラン等の高除染化プロセスに対する技術的要件として、本プロセスに求められる除染係数を主要核種ごとに設定した。設定にあたっては使用済燃料の仕様、前段のプロセスである晶析工程等の性能、回収ウランを受け入れる転換工程の受け入れ基準や作業上の制約等を整理し、検討を行った。

候補技術の比較評価基準として、技術的成立性、実現可能性、経済性、核拡散抵抗性を設定した。溶媒抽出法、沈殿法、クロマトグラフィー法及びフッ化物揮発法の技術分類ごとに代表的な 2 つの技術を候補として調査し、比較評価を行った。比較評価を行った結果を表 3 に示す。

また、溶媒抽出法に用いられる各種抽出装置（ミキサセトラ、パルスカラム及び遠心抽出器）を種々の観点から比較検討（表 4 参照）した結果、総合的にパルスカラムと遠心抽出器の適用性が高く、特に遠心抽出器は、装置が小型であることによる建設費低減や放射線による溶媒の劣化の影響が小さいといった有利な点があり、スラッジ流入の対応や機器の大型化の信頼性等の課題を克服することで有望な機器となることがわかった。

これらの調査結果を踏まえ、技術的成立性や実現可能性の点で他の技術を上回る「溶媒として TBP を、抽出器として遠心抽出器を用いる溶媒抽出法」を有望な候補技術として選定した。また、TBP を用いた溶媒抽出法と機器開発を共有でき、今後必要となるデータ取得の範囲（分配係数、密度、粘度、蒸気圧などの基礎データと引火点や劣化物の熱暴走開始温度などの安全性に関するもの）が小さく、これらが充足されれば TBP を用いる技術とほぼ同等となる「溶媒としてモノアミドを用いる溶媒抽出法」を第二の有望技術として選定した。また、フッ化物揮発法は、技術開発を進めるために施設の整備が求められるものの、技術が確立した場合に施設の建設に係る費用が低くなる可能性を有するとともに、その検討結果がフッ化物揮

発法に溶媒抽出法を組み合わせたプロセスである FLUOREX 法へも反映可能という観点から、今後の当面の研究対象に加えることとした。

表 3 候補技術の比較評価

指標			溶媒抽出法		沈殿法		クロマトグラフィー法		フッ化物揮発法	
			TBP を用いる溶媒抽出法	モノアミドを用いる溶媒抽出法	晶析法	NCP※ 沈殿法	イオン交換法	抽出クロマトグラフィー法	フッ化物揮発法	FLUOREX 法
技術的 成立性	技術要件の達成	除染性能	○	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
		機器概念 (処理性能)	○	○	▲	▲	▲	▲	▲	▲
	安全性 (安全上の制限値)		○	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
実現可能性	技術の完成度	使用物質の物性値	○	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
		放射能収支	○	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
		物質収支	○	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
		機器設計	○	○	▲	▲	▲	▲	▲	▲
	研究開発の進展に関する見通し		○	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
	研究開発に必要な資源	施設の有無	○	○	○	○	○	○	▲	▲
		人材の多寡	○	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
経済性	建設に係る費用		○	◎	○	▲	▲	▲	◎	◎
	操業に係る費用		○	○	○	○	○	○	○	○
核拡散抵抗性	保障措置 (除染工程における Pu の計量)		○	○	○	▲	○	○	▲	▲
	核物質防護 (除染工程からの Pu の盗取)		○	○	○	○	○	○	○	○

(相対的に、◎：良いと考えられる場合 ○：同等と考えられる場合 ▲：劣っていると考えられる場合を示した。)

※ NCP; N-シクロ-2-ヘキシルピロリドン

表 4 抽出装置の比較評価（抜粋）

比較項目		ミキサセトラ	パルスカラム	遠心抽出器	
				単段型	多段型
性能／能力	スケールアップ	○（容易）	○（容易）	○（容易）	▲（不明/今後検討要）
	流量変動に対する柔軟性	○（0%～最大流量）	○（定格流量±20%）	◎（極めて高い柔軟性）	○（30%～最大流量）
	溶液保持量	▲（大きい）	○（少ない）	◎（極めて少ない）	◎（極めて少ない）
	溶液滞留時間	▲（長い）	○（短い）	◎（極めて短い）	◎（極めて短い）
	溶媒の放射線劣化	▲（多い）	○（少ない）	◎（極めて少ない）	◎（極めて少ない）
	固形分による障害	○（有る）	◎（少ない）	○（有る）	▲（非常に有る）
	反応速度が遅いケースへの適用性	◎（良）	◎（良）	○（効率低下の可能性）	○（効率低下の可能性）
運転性	制御応答性	▲（長い）	○（比較的短い）	◎（短い）	◎（短く敏感）
	スタートアップ／シャットダウン	▲（長時間を要する）	○（比較的短時間）	◎（極めて短時間）	◎（極めて短時間）
	短時間停止後の再起動	○（適切な手順により、廃液へのロス回避。平衡回復は容易）	○（適切な手順により、廃液へのロス回避。平衡回復は容易）	◎（短時間で再起動、廃液へのロスなし）	◎（短時間で再起動、廃液へのロスなし）
保守	保守対象	▲（各段毎に保守は必要）	◎（カラム本体は無保守）	▲（各段毎に保守は必要）	○（多段毎に保守は必要）
寸法／配置	装置の構造・大きさ	○（平板状。各段上部に電動機）	○（円筒状。本体構造は単純。パルス発生装置はセル外）	◎（コンパクト。電動機はセル内）	◎（コンパクト。電動機は遠へい外）
	配置	▲（広い設置面積と上部に保守エリアが必要）	○（設置面積は小さいがセル高さが必要）	○（設置面積は小さいが保守エリアの考慮が必要）	○（設置面積は小さいが保守エリアの考慮が必要）

（相対的に、◎：良いと考えられる場合 ○：同等と考えられる場合 ▲：劣っていると考えられる場合を示した。）

② 溶媒抽出法による除染プロセス開発

a. 遠心抽出システム開発

遠心抽出器システムの開発は、単段型と多段型の遠心抽出器について並行して進めた。単段型については、まず、工学規模で実証した設計方法を用いて、200 トン/年規模単段型遠心抽出器を設計、試作し、流動試験を通して大型化に向けてロータ部の設計手法の妥当性を確認した。次に、本試験機を用いた中性子吸収材内封型の適用試験を実施し、その結果を基に臨界安全上の最大規模の評価を実施した。多段型については、単段型と比較するため、基本性能の評価、臨界安全上の最大規模の評価等を行い、除染プロセスに適用可能な構造案を示した。また、両抽出器に対して、スラッジ堆積状況を詳細に評価するためのスラッジ試験、大型機の設計に必要な抽出器内の流動性並びにスラッジ堆積挙動評価に対する流動解析シミュレーション技術の適用性について評価した。以下に具体的な成果を示す。

（ア）単段型遠心抽出器の臨界安全上の最大規模の評価

遠心抽出器の混合・分離性能は、抽出器内の液の流動状態の安定性に影響を受ける。つまり、ロータ内の液の流動性とロータから分離された 2 相（水相・有機相）を回収して次段に移送するハウジング内の液の流動性は、遠心抽出器の安定運転の範囲を設定する根拠となる評価因子である。商用プラント用の大型遠心抽出器を開発するためには、ロータ及びハウジングがこれを満足するように適切に設計される必要があり、これまでに 200 トン/年規模の単段型遠心抽出器（通常型）を設計試作し、

流動試験によりその設計の妥当性を確認した。一方、ロータ内部に挿入する中性子吸収材（円柱形状）を設置する中性子吸収材内封型遠心抽出器は、臨界安全上の制約が緩和されることで、さらに大型化設計が可能となるため適用することが望まれるが、流動性能に影響を与えない大きさとしなければならない。そのため、内部に設置可能な中性子吸収材の最大体積を決定するために、中性子吸収材の大きさを条件に、各種流動性能から運転可能領域を評価するための流動試験を実施し、通常型と同等以上の流動性能を示す中性子吸収材の最大体積を評価した。試験に用いた装置概略図を図2に、得られた運転可能領域の比較を図3に示す。試験の結果、通常型と同等以上の流動性能を示す円柱径を求めることができ、高さ方向にも延長可能であることがわかった。

上記の中性子吸収材内封型遠心抽出器を適用させ、形状管理及び中性子吸収材管理を前提とした臨界管理のもと、達成される遠心抽出器の最大処理流量を評価した。評価は、まず、設計計算上約 3000L/h～約 12000L/h の範囲で 10 条件の遠心抽出器を設計し、それをもとに臨界計算を実施し、未臨界条件を実効増倍率($k_{\text{eff}}+3\sigma$)が 0.95 以内となる処理流量を求めることで行った。評価モデルを図4に、評価結果を図5に示す。その結果、これまでの設計手法を用いた基本モデルの場合、未臨界条件の最大処理流量は約 4100L/h（700 トン/年規模相当）であった。また、比較的簡単な改良で（有機相コレクタ高さ減少、コレクタ間拡張）、約 500L/h の処理流量を増加できることがわかった。さらに、濃縮ボロンを使用すると、最大処理流量は約 5400L/h とすることができ、この値は 800 トン/年規模プラントの処理流量を超えることがわかった。

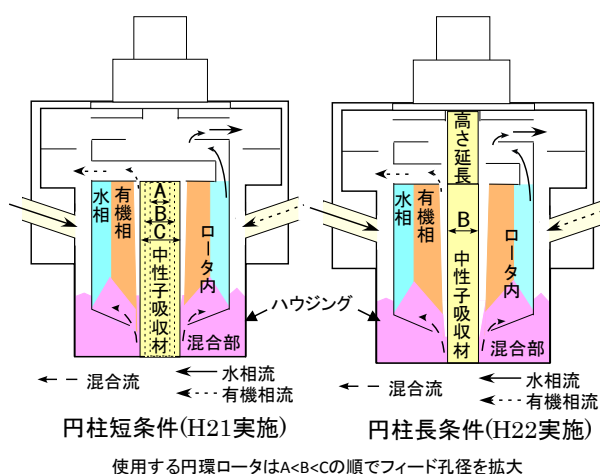


図2 試験に用いた単段型遠心抽出器の断面図

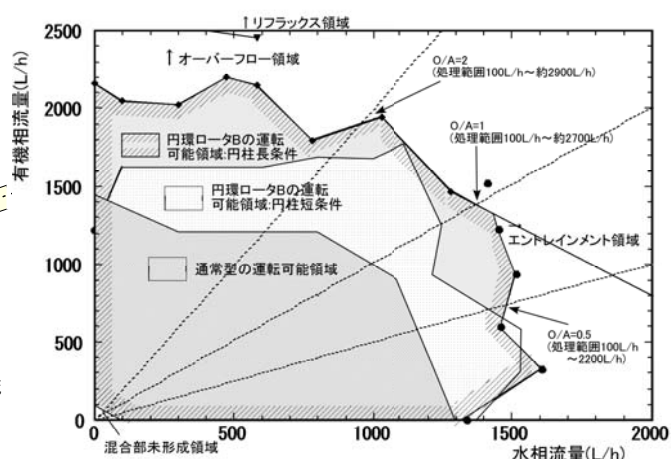


図3 運転可能領域の比較

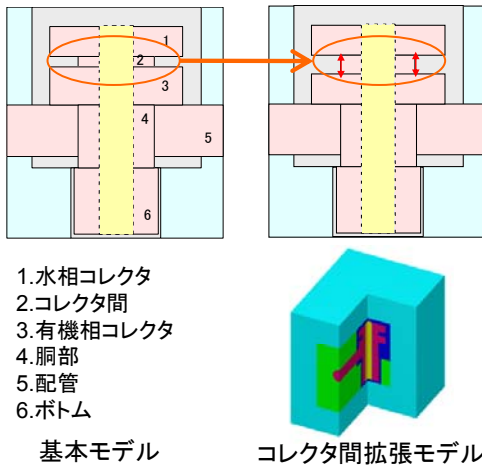


図 4 臨界評価モデル

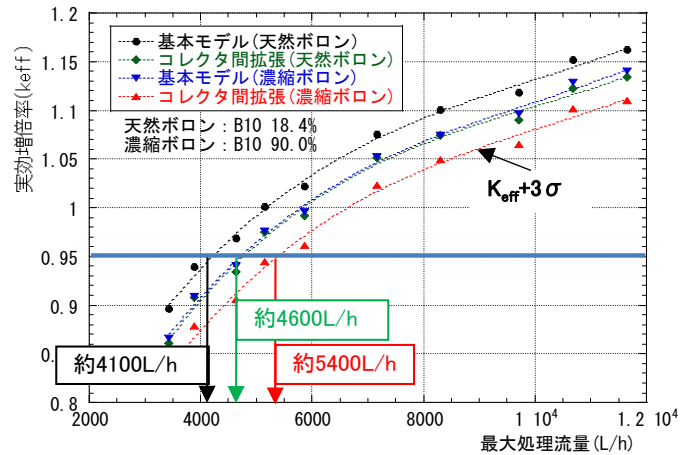


図 5 臨界安全上の最大処理流量の評価

(イ) 多段型遠心抽出器の除染プロセスへの適用性評価

多段型遠心抽出器の除染プロセスへの適用性を検討するため、一般産業用多段型遠心抽出器(図6)を用いて、流動性能及び抽出性能を試験により評価した。その結果、流動試験により、処理量が過大となると有機相出口のエントレインメント(有機相出口からの水相排出)が増大して運転上の制約になることがわかった。また、ネオジム(Nd)を用いた抽出試験により、理論的な溶媒抽出性能に対する実際の抽出器での抽出性能(段効率)が平均で0.74となり、単段型遠心抽出器(ウラン試験で0.95以上)よりもかなり低い可能性が示された。

また、臨界安全上の最大規模を(ア)項に示した単段型遠心抽出器の計算条件で、ロバテル社のカタログ寸法(複雑な内部構造は考慮せず有限高さ円環モデルを使用)を基に計算した。その結果を図7に示す。図からわかるように、形状管理に基づく最大処理流量は240L/h(ロバテル社の1x240n型機のカタログ流量)であった。構造材をボロン入り(2wt%)ステンレスとすると600L/h(1x300n型機のカタログ流量)まで臨界安全を担保できることがわかったが、この値は単段型遠心抽出器の最大処理流量に比べ桁小さ

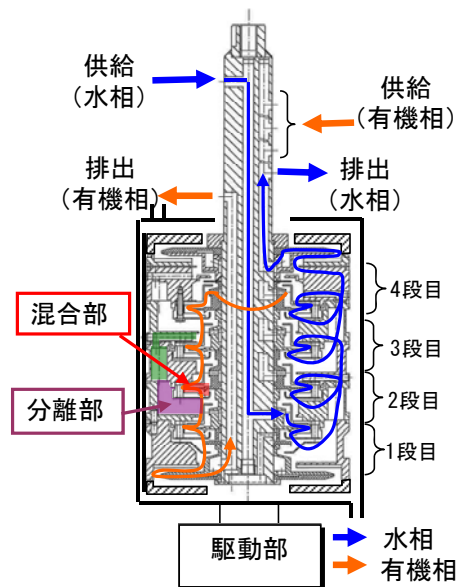


図 6 一般産業用多段型遠心抽出器の構造と原理

い値であった。

次に、商用プラントに適用可能な多段型遠心抽出器の構造の提示を目的に、スラッジの洗浄を考慮した内部構造、保守性を考慮した外部構造を検討した。内部構造に関しては、スラッジの定期的な洗浄に適した構造を検討し、流動解析により評価した。外部構造に関しては、運転と保守の操作を考慮して構造を検討した。その結果、堆積物のスプレー洗浄に適した内部構造、保守を実現する外部構造を有する多段型遠心抽出器構造案を示した（図8）。

耐スラッジ性については、スラッジ流入に対応可能な多段型遠心抽出器を試作し、スラッジ挙動評価システム試験設備において評価試験を行った。その結果は、同様な試験を実施した単段型遠心抽出器と合わせて（ウ）項に示す。

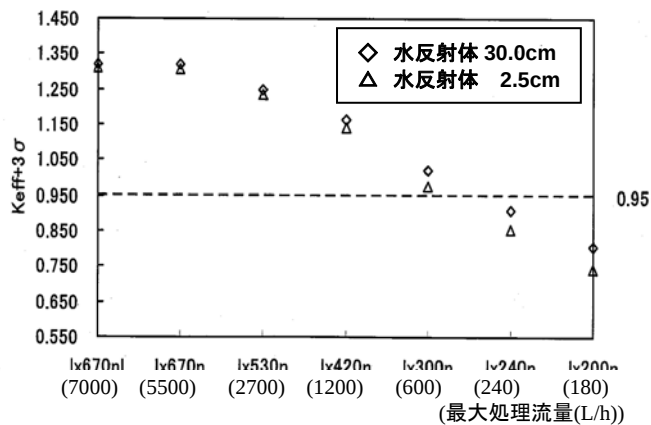


図7 臨界安全上の最大処理流量の評価

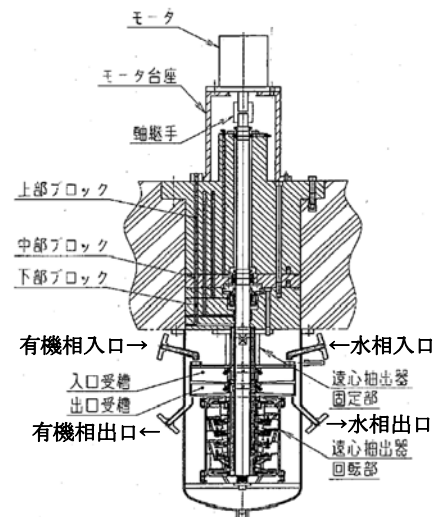


図8 多段型遠心抽出器構造案

(ウ) 耐スラッジ性の評価

遠心抽出器では、水相と有機相の分離操作にロータ回転時の遠心力を用いていることから、プロセス液中に混入する微量の固体成分（スラッジ）が遠心抽出器内の遠心場で捕獲されロータ内壁等に堆積する可能性がある。このことから、実際のプラント構成を模擬したシステム環境において遠心抽出器内のスラッジ堆積状況等を把握することが重要である。このため、工学規模のスラッジ試験設備を整備し、単段・多段の両遠心抽出器について、異常が発生するまでの時間、その異常事象（エントレインメントの発生、抽出器内流路の閉塞等）等を明らかにすることを目的に、スラッジ堆積状況等を把握する試験を実施した。なお、試験は実プラントの溶解液で想定されるよりも濃いアルミナ濃度を使った加速試験とした。試験装置の概略図を図9に、試験結果を図10に示す、

試験の結果、試験で発生した異常事象は、単段型遠心抽出器及び多段型遠心抽出器ともにエントレインメントの発生であり、運転継続時間は単段型（1機）では約250分であり、多段型遠心抽出器（4段型1機）では約115分であった。

また、流入するスラッジ粒径に対するロータ内へのスラッジ堆積状況（残留率）がわかれば、実際のプラントで想定されるスラッジ流量条件を基に異常が発生するまでの時間を推定することができる。そのため、単段型遠心抽出器を用いてスラッジ粒径に対するロータ内の残留率を試験で取得し、ストークスの式に基づいた理論値と比較した。その結果、運転条件（回転数及び処理流量）も加味した補正係数を設定することで実験結果を計算で再現できることがわかった。

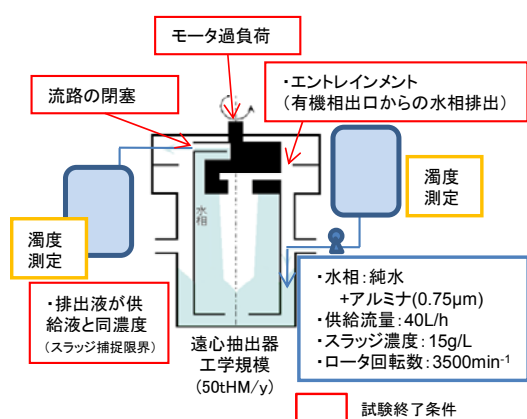


図9 スラッジ試験装置概略図

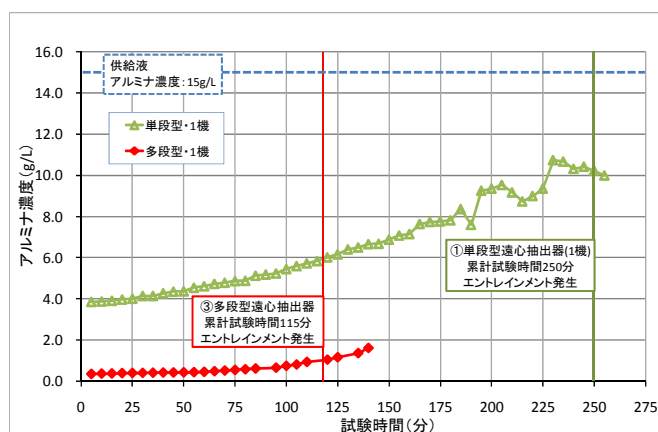


図10 排水液中のアルミナ濃度の推移

（エ）流動解析シミュレーション技術の実用性評価

遠心抽出器の抽出・分離性能は抽出器内の流動状態に依存することから、商用プラント用の大型遠心抽出器の合理的な開発及び設計精度の向上等のために、流動解析シミュレーション技術の遠心抽出器への適用性を評価した。評価は流動解析シミュレーションの結果と試験による実測値を比較することで実施した。試験では超高速カメラを用いて遠心抽出器の混合部及びコレクタ部を撮影し、フローパターン（流れの方向及び速度）及び気泡粒径等を実測した。試験結果とシミュレーション結果のフローパターンの比較結果を図11に示す。流れの方向、流速については、試験結果とシミュレーション結果はよく一致しており、シミュレーションにより実際の遠心抽出器の混合部及びコレクタ部のフローパターン解析結果を得ることができた。これらの結果から、遠心抽出器への流動解析シミュレーション技術が適用可能であることが分かった。

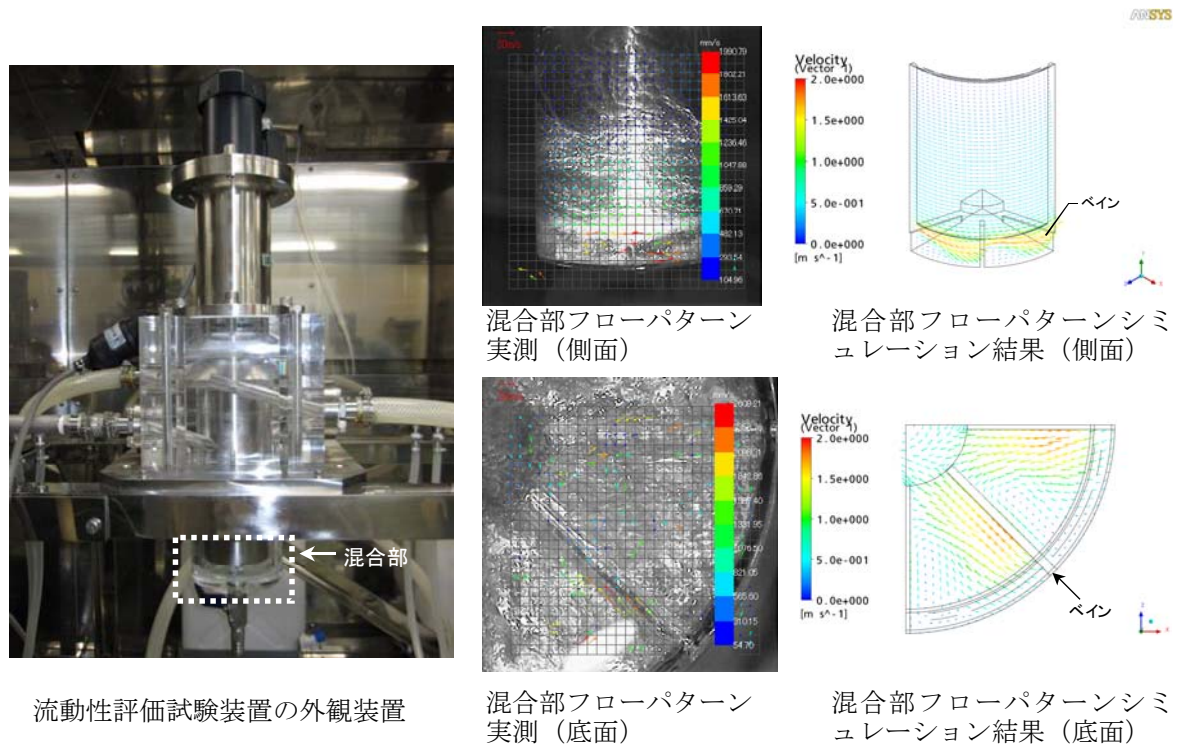


図 1 1 混合部の実測とシミュレーション結果とのフローパターンの比較

b. コプロセッシング法を用いた除染プロセス開発

コプロセッシング法は、プルトニウム含有率の異なる種々の処理対象溶液を対象とし、常にプルトニウムにウランが同伴した状態で共回収を行うプロセスである。開発は、プロセス構成を設定した上で、プロセスパラメータ（試薬流量、濃度等）を抽出計算コードにより設定し、ミキサセトラ試験によりフローシートの成立性を確認することによって行った。また、ウラン/プルトニウム共回収液中でのウラン同伴を監視するためのウラン/プルトニウム混合モニタに係る試験を行った。以下に具体的成果を示す。

（ア） プロセス設定

コプロセッシング法では、単にウラン、プルトニウムを共回収するだけでなく、運転方法の変更だけではプルトニウムを単離できない構成とするため、以下の特徴を有する構成とした。

- PUREX 法に設置されるウラン洗浄段が存在すると、当該段の流量条件によってプルトニウム単離が可能となるため、ウラン洗浄段を設けない。
- PUREX 法に設置される精製サイクルから分配部への溶媒リサイクルラインが存在すると、精製サイクルにおける試薬流量の変化等によって、プルトニウムを単離させ易くなるため、同ラインを設けない。

また、回収するウラン/プルトニウム混合溶液のプルトニウム/ウラン比(Pu/U比)は、0.5～2.0の範囲として核拡散抵抗性を高めるとともに、高除染サイクルに対応するため、抽出工程に求められる核分裂生成物(FP)の除染性能に応じ、サイクル数を選択できるプロセスを設定した(図12)。

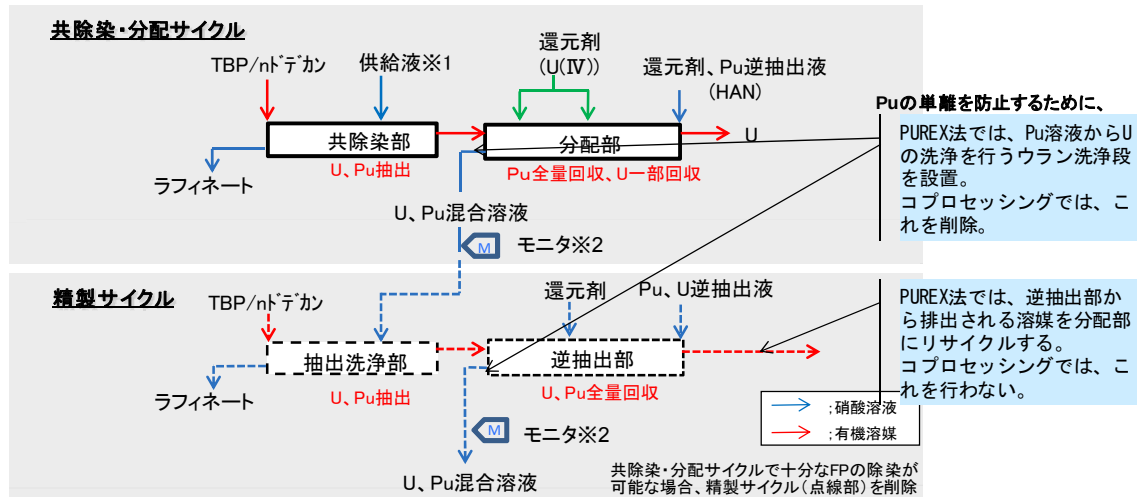


図12 プロセス構成

※1: 軽水炉ウラン燃料(Pu/U比; 1%)、軽水炉 MOX 燃料(軽水炉ウラン燃料との混合)(Pu/U比; 3%)、高速増殖炉燃料(Pu/U比; 20%)を想定

※2: ウラン/プルトニウム混合溶液におけるウラン同伴を監視するウラン/プルトニウム混合モニター

(イ) ミキサセトラ試験

設定したプロセスフローシートに基づき、分配部を対象としてウラン、プルトニウム溶液を用いてミキサセトラ試験を実施した。試験における抽出器には、取扱いが容易で様々な流量に対応可能であるミキサセトラを用いたが、得られる試験結果は遠心抽出器を用いた場合とほぼ同様となる。主な試験条件を表5に示すが、供給液中 Pu/U 比 1% では、回収するウラン/プルトニウム混合溶液のプルトニウム濃度を高めるため、有機相/水相の流量比を大きく(～20)する必要がある。この場合には、有機相からの水相への酸移行量が多く、水相中酸濃度が増加する。このため、高硝酸濃度で有効なウラナス(U(IV))をプルトニウムの還元剤に用いた。また、供給液 Pu/U 比 1% の場合、有機相と水相の流量比が大きくなるため、内部リサイクル(セトラの水相を同段のミキサへ循環すること)を行う条件とした。供給液 Pu/U 比 3% 及び 20% では、有機相/水相の流量比は 2～10 程度であり、この場合には硝酸濃度が低下し、ウラナスに比べて還元力が弱い硝酸ヒドロキシルアミン(HAN)の効果を期待できるため、ウラナスと HAN を併用し、内部リサイクルを行わ

ない条件とした。

試験の結果、全 Pu/U 比の条件でプルトニウムを全量回収することが可能であり、臨界等の安全性に問題はないことを確認した。また、全 Pu/U 比の条件において、ウラン/プルトニウム混合溶液中の Pu/U 比は所定の範囲で回収が可能であり、核拡散抵抗性を向上できることを確認した（表 5、図 1 2、1 3 参照）。

表 5 各試験条件 (Pu/U 比; 1%, 3% 及び 20%) での試験条件と試験結果

供給液中 Pu/U 比	Pu 還元剤	有機相/水 相流量比	内部リサイクル の有無	Pu リーク の有無	U/Pu 製品 溶液中の U/Pu 比
1%	U (IV)	～20	有	無	～0.7
3%	HAN, U (IV)	～10	無	無	～0.9
20%	HAN, U (IV)	～2	無	無	～1.0

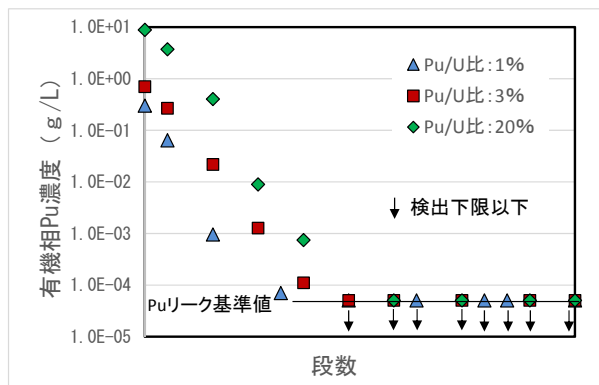


図 1 2 有機相におけるプルトニウム濃度の分布



図 1 3 プルトニウム逆抽出の様子

(ウ) 試験データと抽出計算コードの比較

プロセス開発を行ううえでは、試験により得られた結果を抽出計算コードに反映させることにより計算精度を向上させ、計算により最適なプロセスパラメータを求めることが効率的である。

有機相/水相流量比の大きい Pu/U 比 1% (内部リサイクルを行わない場合) や Pu/U 比 3% での試験を実施した場合は、試験でのプルトニウム逆抽出の効率が計算結果に比べて悪く、かつ還元剤に添加しているヒドラジンの消費量が計算値に比べ実測値が大きかった。この原因として、有機相/水相の混合が不十分なことによる理論的な溶媒抽出性能に対する実際の抽出器での抽出性能 (段効率) の低下と、抽出計算コードに内蔵される既存の計算式により計算される化学反応速度と実際の化学反応速

度が異なることが考えられた。段効率については、化学反応の影響を受けないウラン 6 価のみを用いた試験を実施した結果、約 0.9 (理論通りの抽出が行われた場合の段効率は 1) と判明した。また、実際の試験ではより多くの亜硝酸が生成しており、ヒドラジンはこの亜硝酸の分解反応により消費されていることが考えられた。この亜硝酸を生成する化学反応の候補として、水相中又は有機相中における、ウラナスの酸化反応又はプルトニウム 3 価の酸化反応が挙げられ、これらのうちのいずれかの実際の化学反応速度が、既存の反応速度計算式で計算される速度よりも速く進むことが考えられた。これらの化学反応について検討した結果、以下のことが分かった。

- ウラナス及びヒドラジンのみを用いたプロセス試験を実施した結果、ヒドラジンの消費量は計算結果と一致した。
- 水相中のプルトニウム 3 価の酸化反応を増倍させることにより試験結果を説明する場合、既存化学反応速度式により計算される速度よりも約 6 倍の反応速度を有する必要がある。一方で、当該反応速度を 3 倍以上として東海再処理工場のプロセスを計算した場合、プルトニウムの挙動の計算結果は実際のプロセス内挙動と異なることとなる。

以上により、残る候補として、有機相中のプルトニウム 3 価の酸化反応の反応速度を、計算コードによる計算結果と実際の試験におけるプルトニウム挙動の相違の原因と特定した。抽出段効率の影響を考慮し、試験におけるプルトニウム及びヒドラジンの挙動を再現できるプルトニウム 3 価酸化反応速度を求めた結果、当該反応は既存の知見に比べ 10^6 倍のオーダーで速く進むことが推定された。プルトニウム逆抽出が良好に行われなかった試験における水相中でのプルトニウム濃度分布について、同試験条件で、当該反応の反応速度を既存の反応速度計算式で計算した場合と当該反応速度の計算を 10^6 倍として計算した結果を、試験結果とともに図 1 4 に示す。

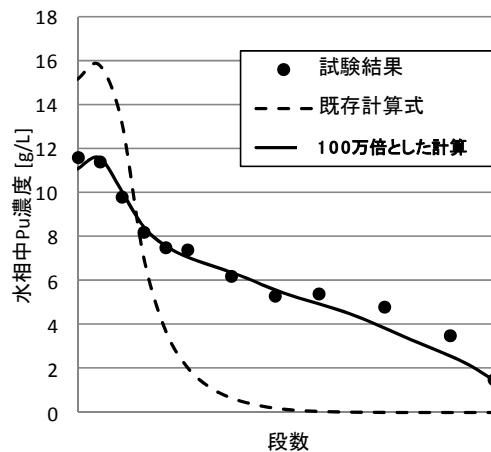


図 1 4 水相中プルトニウム濃度の試験結果と、有機相中プルトニウム 3 価の反応速度を、既存計算式により計算した結果と当該反応の計算式を 100 万倍として計算した結果の比較 (Pu/U 比;3%)

(エ) ウラン/プルトニウム混合モニタの開発

ウラン、プルトニウム濃度モニタの候補技術として微分パルスボルタンメトリー及び吸光光度法、酸濃度モニタの候補技術として超音波計測法及び電気伝導率法を用いて、ウラン、プルトニウム溶液（表 6）を用いた基礎試験を行った。この結果、吸光光度法及び電気伝導率法がウラン、プルトニウム測定に優れた適用性を示した（表 7）。

表 6 試験に用いた U, Pu 溶液の濃度

試料	酸濃度(mol/L)	U,Pu濃度(g/L)*
U(IV)	0.25~2.5	1~10
U(VI)	0.5~2.5	1~10
Pu(III)	1.5~2.5	1~10

*ヒドラジン 6g/L を含む

表 7 各候補技術の適用性

候補技術	U(VI)	U(IV)	Pu(III)	酸
微分パルスボルタンメトリー	○	×	○	/
吸光光度法	○	○	○	/
超音波計測法	/	/	/	×
電気伝導率法	/	/	/	○

○：適用可 ×：適用困難

・ 微分パルスボルタンメトリー

電位-1.0~-1.2V 付近にウラン 6 価の還元ピーク、電位 0.8~0.9V 付近にプルトニウム 3 価の酸化ピークが観測され（図 15、16）、これらのピーク電流は、それぞれの濃度と良好な正の相関があることを確認した。また、酸濃度の上昇により補正可能な電流値の増加が認められたものの、ウラニウム酸化ピークは、バックグラウンド電流に吸収され、観測されなかった。

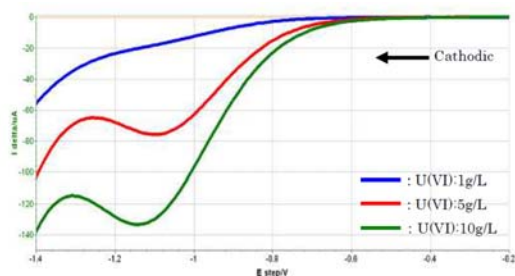


図 15 各 U(IV) 濃度における U(IV) の還元ピーク
 H^+ : 2.5mol/L, U(IV): 1-10g/L,
 N_2H_4 : 6g/L, Temp.: 30°C

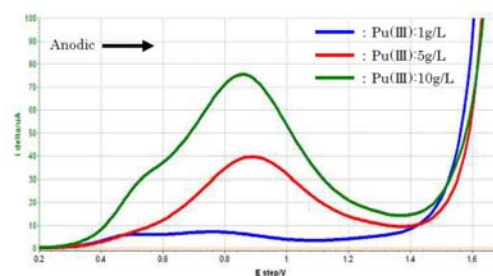


図 16 各 Pu(III) 濃度における Pu(III) の酸化ピーク
 H^+ : 2mol/L, Pu(III): 1-10g/L,
 N_2H_4 : 6g/L, Temp.: 30°C

・ 吸光光度法

吸収波長 414nm [U(VI)]、478nm[U(IV)]、566nm[Pu(III)]において、

それぞれの濃度と良好に近似する吸収ピークを観測した（図 17、図 18）。また、酸濃度の上昇により補正可能な吸光度の増加が認められた。

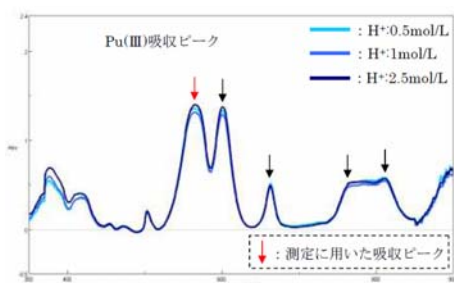


図 17 各酸濃度における Pu(III) 10g/L の吸収スペクトル
(H^+ : 1.5–2.5mol/L, Pu(III): 10g/L),
 N_2H_4 : 6g/L, Temp.: 30°C)

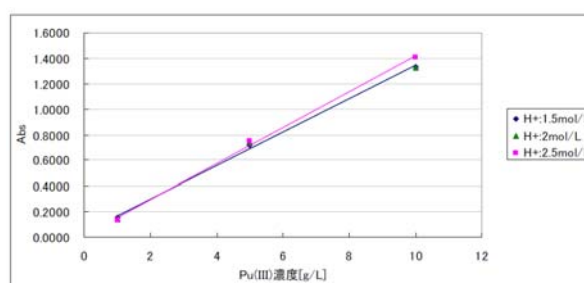


図 18 各酸濃度における Pu(III) 濃度と Pu(III) 吸収ピークの関係
(H^+ : 1.5–2.5mol/L, Pu(III): 1–10g/L),
 N_2H_4 : 6g/L, Temp.: 30°C, 吸収ピーク: 566nm)

・超音波計測法

ウラン溶液測定時の超音波伝搬速度は、酸濃度が 1 mol/L のときに最も低い数値を示し、その前後で高くなることが分かった。酸濃度がまったくの未知である場合、超音波計測法による酸濃度の算出は困難と考えられた。

・電気伝導率法

電気伝導率は、酸濃度に対して良好な正の相関を示し、かつ、共存物質の種類、濃度、原子価の違いによる変化は見られなかった（図 19）。

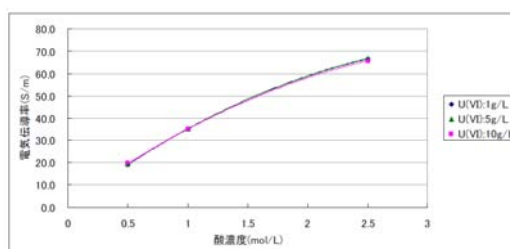


図 19 各 U(VI) 資料における酸濃度と電気伝導率の関係
(H^+ : 0.5–2.5mol/L, U(IV): 1–10g/L, N_2H_4 : 6g/L, Temp.: 30°C)

c. モノアミドを用いた除染プロセス開発

本事業における除染技術の調査において、二番目に有望な候補技術に選定されたモノアミドを用いた除染プロセスに関する基礎データの整備として、連続抽出プロセスにおけるウラン等の移行挙動解析、劣化溶媒の

洗浄技術開発及び溶媒劣化物と金属錯体との構造評価を行った。

(ア) 連続抽出プロセスにおけるウラン等の移行挙動解析

モノアミドは炭素、水素、酸素及び窒素原子から構成されているため、焼却による廃溶媒処理を行うことにより、二次廃棄物発生量の低減が見込まれる。また、既存の商用再処理プロセスで抽出剤として使用されている TBP と同様にドデカンに可溶である。

モノアミドは分子構造によってウランやプルトニウム等に対して異なる抽出特性を示す。例えば、*N,N*-ジ(2-エチルヘキシル)-2,2-ジメチルプロパンアミド(略称 DEHDMPA、図 2 0)は 6 価のウランに対する選択的抽出能力が高く、*N,N*-ジ(2-エチルヘキシル)ブタンアミド(同 DEHBA、図 2 1)は 6 価のウラン及び 4 価のプルトニウムの両方を抽出する性質を持つ。これらの抽出特性を活用することにより、ウランの選択的抽出、ウラン/プルトニウムの共抽出並びにウラン/プルトニウムの分配等、異なる機能を持つプロセスの構築が期待できる。本事業では、これまでに行われた抽出剤開発の結果から DEHDMPA 及び DEHBA を選定し、これらを用いたプロセスについて検討を行った。

DEHDMPA 及び DEHBA のウラン、プルトニウム及び酸に対する抽出特性を定量的に明らかにするためのバッチ抽出試験を行い、その結果に基づいて分配比計算式を導出した(図 2 2)。この分配比計算式を計算コードに導入することにより、連続抽出プロセスにおけるウラン、プルトニウム及び酸の移行挙動のシミュレーション解析が実行可能となった。これにより、各種の分離条件(流量、濃度及び段数等)がウラン

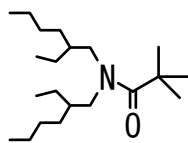


図 2 0 *N,N*-ジ(2-エチルヘキシル)-2,2-ジメチルプロパンアミド(DEHDMPA)の構造式

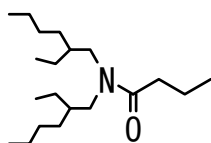
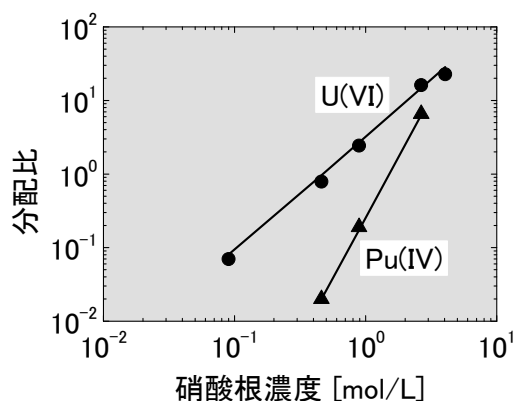


図 2 1 *N,N*-ジ(2-エチルヘキシル)ブタンアミド(DEHBA)の構造式



$$D_U = 1.4[\text{NO}_3^-]_{\text{aq}}^{1.6}[\text{DEHBA}_{\text{free}}]_{\text{org}}^2$$

$$D_{\text{Pu}} = 0.11[\text{NO}_3^-]_{\text{aq}}^{3.3}[\text{DEHBA}_{\text{free}}]_{\text{org}}^2$$

図 2 2 DEHBA のウラン及びプルトニウムに対する分配比の硝酸根濃度依存性、並びに分配比計算式

及びプルトニウムの移行挙動に与える影響を明らかにした。さらに、モノアミドを用いた除染プロセスのフローシートを作成し、DEHDMPA あるいは DEHBA のいずれかを抽出剤として用いた場合、及び DEHDMPA と DEHBA の両方を抽出剤として用いた場合の 3 種類のプロセスについて、ミキサセトラを用いた連続抽出試験を実施した。

いずれの連続抽出試験においても、フィード液から 94～99.9%のウラン及び 97～99.9%のプルトニウムを抽出した。一方、核分裂生成物(ストロンチウム、バリウム、ジルコニウム、モリブデン、ルテニウム、ロジウム、パラジウム及びネオジム)はほとんど抽出されず、ウランフラクション及びウラン-プルトニウムフラクションにおける核分裂生成物の濃度は検出限界未満あるいはそれに近い値まで低下した。DEHDMPA と DEHBA の両方を抽出剤として用いたプロセス(図 2 3)の場合、ウランフラクションにおけるウランのプルトニウムに対する除染係数は 1.9×10^4 であり、モノアミドを用いた除染プロセスの成立性に見通しを示した。さらに、連続抽出試験で得た実験値とシミュレーション解析で得た計算値との比較を行い、分配比計算式及びそれを適用したシミュレーション解析がウラン抽出部、ウラン/プルトニウム共抽出部及びウラン回収部等におけるウラン、プルトニウム及び酸の移行挙動解析に有効であることを確認した。

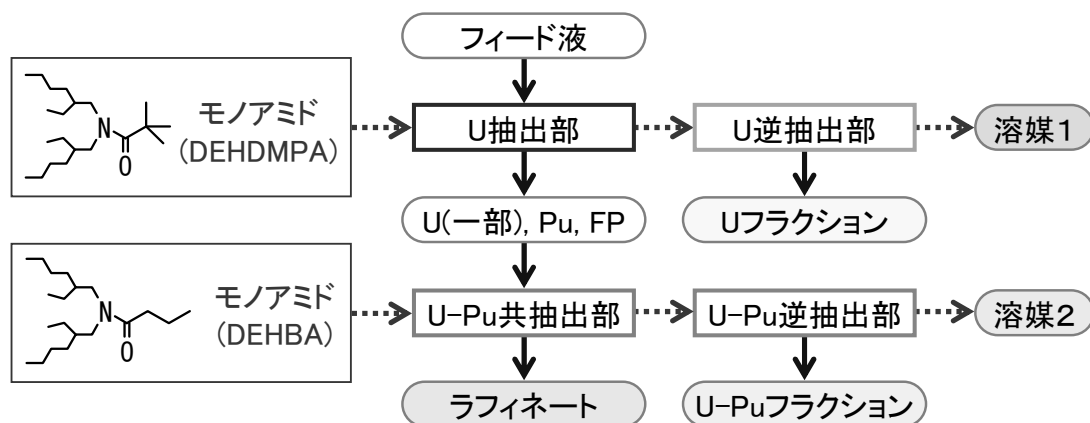


図 2 3 DEHDMPA と DEHBA の両方を抽出剤に用いたプロセスのフローシート
実線及び点線の矢印はそれぞれ水相及び有機相の流れを示す。

(イ) 劣化溶媒の洗浄技術開発

モノアミドに対して最大 1.3 MGy のガンマ線を照射し、それによって生成する劣化物の同定を行った。その結果、従来考えられていた劣化物であるカルボン酸と二級アミンに加えて、脂肪族アルカンや *N*-置換型アミド等の存在を明らかにした。これらの劣化物のうち、カルボ

ン酸と二級アミンの除去技術の検討を行った。カルボン酸はアルカリ溶液(炭酸ナトリウム及び水酸化ナトリウム)を用いた洗浄によって99%以上除去可能であり、二級アミンは強イオン交換基(スルホン基)を持つ固層カラムを用いることで100%洗浄できることを明らかにした。

(ウ) 溶媒劣化物と金属錯体との構造評価

モノアミドの劣化生成物であるカルボン酸及び二級アミンと金属元素との錯体に関する基礎データを把握するために、イオン結合性イオンの例としてネオジム、d 電子共有結合性イオンの例としてパラジウムを対象元素として、単結晶 X 線構造解析及び広域 X 線吸収微細構造解析法(EXAFS 法)による錯体構造評価を行った。

カルボン酸と二級アミンが共存する条件において、ネオジムとの錯形成に直接的に関与するのはカルボン酸であり、カルボン酸の側鎖構造の違いによってネオジムの錯体が異なる沈殿生成挙動を示すことを明らかにした。このことから、イオン結合性イオンの沈殿生成に関する対応策を、カルボン酸の側鎖構造の観点から検討できることが示唆された。パラジウムは共存するカルボン酸の有無あるいはその側鎖構造にかかわらず、二級アミンとの錯形成が沈殿生成の原因となっていることが示唆された。

核磁気共鳴装置による測定結果から、二級アミンの一つである *N,N*-ジオクチルアミンとジルコニウム、ルテニウム、パラジウム、ネオジム及びユウロピウムとの錯形成定数を求め、希土類イオンよりも遷移金属イオンとより強く錯形成することを示した。さらに、*N,N*-ジオクチルアミン及びカルボン酸の一つであるオクタン酸とジルコニウム、ルテニウム、パラジウム、ネオジム及びユウロピウムとの錯形成挙動のシミュレーション計算を行い、いずれの錯体も pH が 1 以上の条件で解離する結果を得た。このことから、モノアミドを用いてウランを抽出する高い硝酸濃度条件では、カルボン酸やアミンは金属イオンに直接配位せず、ウランの除染係数に影響しないことが示された。

③ フッ化物揮発法を用いた除染プロセス開発

平成 19 年度に実施した回収ウラン高除染候補技術の調査では、TBP やモノアミドを用いた溶媒抽出法が有望であると評価されたが、経済性の観点からはフッ化物揮発法が有望となる可能性も示された。これを受けて、フッ化物揮発法による回収ウラン除染技術の実現性の検討に資するため、国内外のフッ化物揮発法に係る技術の調査を行い、それらを基にプロセスフローを構築するとともに、技術課題の摘出及び解決策の検討を行った。

調査の結果、ウランのフッ化転換技術としては、ロシア、フランス、カナダにおける実績からフレーム炉の採用が妥当と考えられる。また、懸念される技術課題と考えた粉末ハンドリング技術に関する調査を行い、粉末トラブル事例として機器の閉塞、固着等を挙げ、事例に応じた対策として、配管等内面のバフ研磨やコーティング等の対策が有効である等の結果を示した。これらの調査により、フッ化工程にフレーム炉を採用するフッ化物揮発法による回収ウラン除染プロセスが構築可能であることが明らかとなった。

次に、調査した情報や文献等を参考として 1200 トン/年規模の先進湿式再処理における回収ウラン除染工程への適用を想定したフッ化物揮発法のプロセスブロックフローを構築し、個々の工程での物質の反応及び収支の検討を行った。フッ化工程に採用するフレーム炉の概念を図 2 4 に示す。フッ化転換後の UF_6 に随伴する揮発性核分裂生成物のフッ化物はフッ化ナトリウム (NaF) を初めとする各種吸着剤で除染できる。技術調査結果を基に各吸着剤の吸着率を評価し、各トラップでの吸着率を算定した (表 8)。

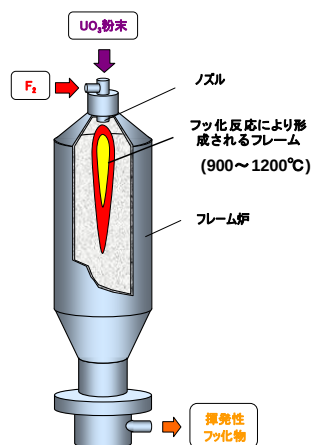


表 8 揮発性フッ化物の割合及びトラップの吸着率

元素	フレーム炉 で揮発性フ ッ化物とな る割合	UO_2F_2 トラップ 吸着率	NaFトラップ [*] 吸着率	MgF_2 トラップ [*] 吸着率	BaF_2 トラップ [*] 吸着率
Pu	40%	100%	—	—	—
Np	90%	100%	—	—	—
Nb	95%	0%	99.5%	99%	90%
Mo	95%	0%	0%	90%	99%
Tc	95%	0%	0%	99%	90%
Ru	50%	0%	99%	90%	90%
Sb	95%	0%	50%	99%	90%
Te	95%	0%	0%	50%	50%
Se	95%	0%	0%	50%	50%

図 2 4 フレーム炉の概念

これらの物質収支を基に、粉末化した使用済燃料受け入れから回収ウラン製品払い出しまでのブロックフロー及びプロセスフローを構築した。図 2 5 に構築したプロセスフローを、表 9 には工程中の主要なポイントでの注目すべき元素の収支を示した。これらの物質収支評価により、妥当な設備設計が可能であることを提示した。

更に、構築したプロセスフローを基に施設の設計を行う際に想定される検討課題として、(1) 粉末ハンドリング技術、(2) フッ化炉残渣回収技術、(3) 計量管理技術、(4) フッ素、フッ化物系ガスの漏えい対策、(5) 高線量下でのメンテナンス性、及びその他の事項を摘出し、それぞれに対する課題解決策として、例えば(1) 粉末の流動性向上策、(2) フレーム炉における残

渣回収機構、(3) 計量精度向上のための物質収支区域の設定や中性子検出器の活用、(4) 漏えい対策としての負圧管理の徹底、(5) 遠隔保守技術の高度化等の対応を提示し、技術の実現性を示した。

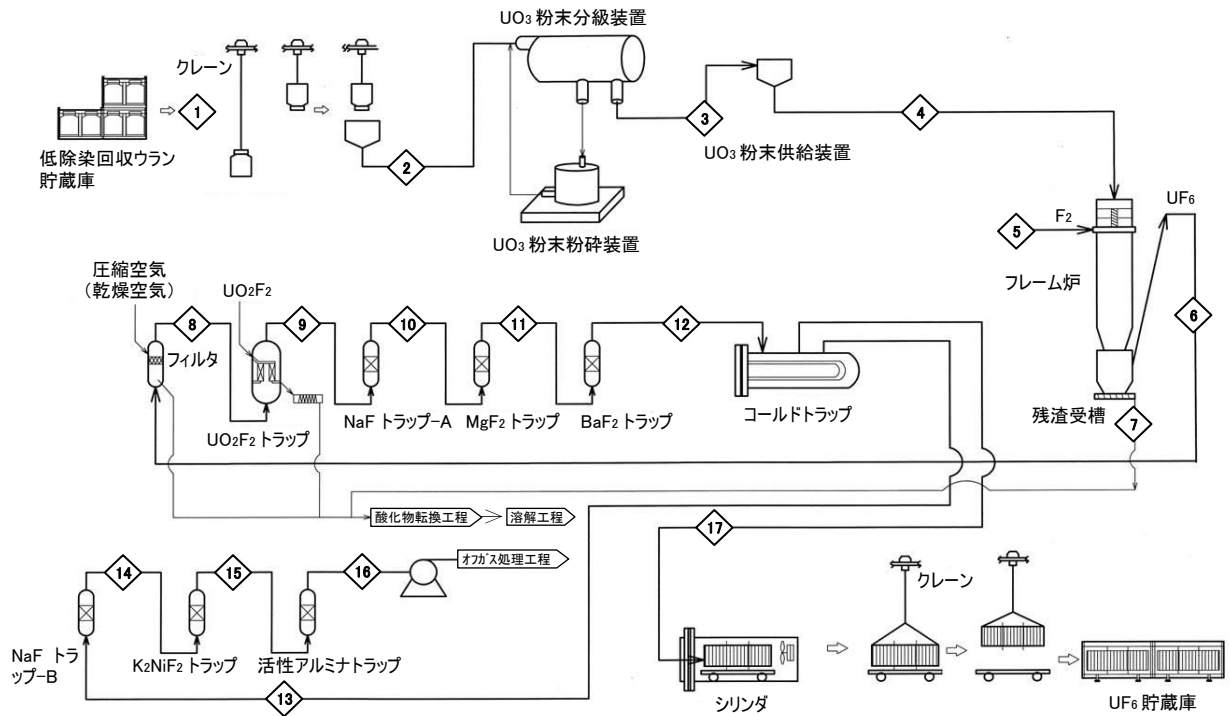


図 25 フッ化物揮発法による回収ウラン除染プロセスフロー

表 9 回収ウラン除染プロセスの物質収支

区分	成分	単位	①	④	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯
アクチノイド	U	kg/day	5.57E+03	5.57E+03	5.45E+03	1.11E+02	5.45E+03	5.48E+03	5.48E+03	5.48E+03	5.48E+03	5.48E+00	5.48E+03	5.48E-04	5.48E-04
	Pu	kg/day	7.80E+01	7.79E+01	3.12E+01	4.67E+01	3.12E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	Np	kg/day	6.61E+00	6.60E+00	5.94E+00	6.60E-01	5.94E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	Am	kg/day	3.08E+00	3.08E+00	0.00E+00	3.08E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	Cm	kg/day	5.48E-01	5.47E-01	0.00E+00	5.47E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	UF ₆	kg/day	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
フッ化揮発FP	Nb	kg/day	2.69E-05	2.69E-05	2.55E-05	1.34E-06	2.55E-05	2.55E-05	1.28E-07	1.28E-09	1.28E-10	1.28E-13	1.28E-10	0.00E+00	0.00E+00
	Mo	kg/day	3.32E+01	3.31E+01	3.15E+01	1.66E+00	3.15E+01	3.15E+01	3.15E+01	3.15E+00	3.15E-02	3.15E-05	3.14E-02	0.00E+00	0.00E+00
	Tc	kg/day	7.28E+00	7.27E+00	6.91E+00	3.64E-01	6.91E+00	6.91E+00	6.91E+00	6.91E-02	6.91E-03	6.91E-06	6.90E-03	0.00E+00	0.00E+00
	Ru	kg/day	2.22E+01	2.22E+01	1.11E+01	1.11E+01	1.11E+01	1.11E+01	1.11E-01	1.11E-02	1.11E-03	1.11E-06	1.11E-03	0.00E+00	0.00E+00
	Sb	kg/day	2.13E-01	2.13E-01	2.02E-01	1.06E-02	2.02E-01	2.02E-01	1.01E-01	1.01E-03	1.01E-04	1.01E-07	1.01E-04	0.00E+00	0.00E+00
	Te	kg/day	4.71E+00	4.70E+00	4.47E+00	2.35E-01	4.47E+00	4.47E+00	4.47E+00	2.23E+00	1.12E+00	1.12E+00	0.00E+00	1.12E+00	1.12E+00
	Se	kg/day	5.55E-01	5.54E-01	5.27E-01	2.77E-02	5.27E-01	5.27E-01	5.27E-01	2.63E-01	1.32E-01	1.32E-01	0.00E+00	1.32E-01	1.32E-01
気体FP	H	kg/day	4.35E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	C	kg/day	2.62E-07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	Br	kg/day	2.11E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	Kr	kg/day	3.68E+00	1.47E+00	1.47E+00	0.00E+00	1.47E+00	1.47E+00	1.47E+00	1.47E+00	1.47E+00	1.47E+00	0.00E+00	1.47E+00	1.47E+00
	I	kg/day	2.22E+00	4.44E-01	4.44E-01	0.00E+00	4.44E-01	4.44E-01	4.44E-01	4.44E-01	4.44E-01	4.44E-01	0.00E+00	4.44E-01	4.44E-01
	Xe	kg/day	5.21E+01	2.09E+01	2.09E+01	0.00E+00	2.09E+01	2.09E+01	2.09E+01	2.09E+01	2.09E+01	2.09E+01	0.00E+00	2.09E+01	2.09E+01
	UF ₆	kg/day	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

注) 工程②③の物質収支は①と同様、⑤はフッ素ガス供給を示すため記載を省略

(2) 軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの移行シナリオ等検討

(ア) 移行シナリオの検討

軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの移行に関し、原子炉のリプレースや再処理施設建設のシナリオに基づくマテリアルバランスを検討した。

移行シナリオ検討においては、表 10 に示す発電設備容量、高速増殖炉への移行開始年や移行期間（高速増殖炉導入速度）等のパラメータを考慮して、複数のシナリオを比較検討した。

表 10 移行シナリオ検討において考慮したパラメータ

分類		パラメータ	データ
原子炉	設備容量	発電設備容量 (GWe)	58, 80, 110
		高速増殖炉への移行開始年	2040, 2050, 2070
		高速増殖炉への移行期間(年)	60, 60 年より長く
		施設寿命	60
	原子炉の運用	高燃焼度化	・2030 年に高燃焼度炉心に一齐移行 ・2030 年以降に新設される炉は移行
		軽水炉での MOX 利用	・プルトニウム収支に合わせて求める ・高速増殖炉と併用
		高速増殖炉での増殖	増殖比 1.2~1.03 へ移行
再処理	設備容量	六ヶ所再処理施設運転終了年	2046
		軽水炉再処理設備容量 (tU/y)	(導かれる値)
		軽水炉再処理運転開始年	(導かれる値)
		高速炉再処理設備容量 (tU/y)	(導かれる値)
		高速炉再処理運転開始年	(導かれる値)
		核分裂性プルトニウム(Puf)貯蔵量 (t)	20 (六ヶ所) なし (第二再処理)
		軽水炉 MOX 燃料を処理する施設	軽水炉燃料再処理
		施設寿命	40
	施設の運用	軽水炉 MOX 燃料の処理割合	軽水炉燃料と処理する場合について 50 : 50
		軽水炉 MOX 燃料の処理開始年	第二再処理の運転開始年

原子力発電規模 58GWe、2050 年高速増殖炉導入開始の場合の原子力発電計画とマテリアルバランスの検討結果の一例を図 26 に示す。使用済燃料の貯蔵量の増加は、六ヶ所再処理施設の運転開始に伴い鈍化し、高速増殖炉の導入のために第二再処理工場にて軽水炉使用済燃料を処理し始めると減少する。燃料製造量は、軽水炉ウラン燃料は 2050 年以後に減少傾向となり、軽水炉 MOX 燃料は 2009 年から 2044 年まで製造される。高速増殖炉燃料は、2049 年から出荷され 2010 年から 2120 年代にピークを迎える。これは高い増殖比での運転が収束する時期と符合する。

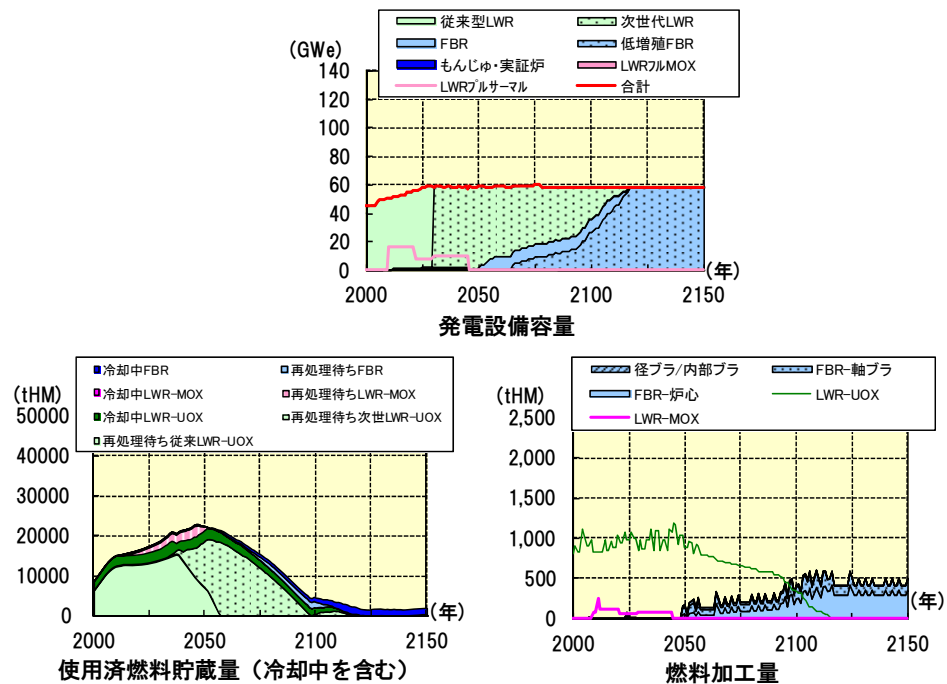


図 2 6 原子力発電容量及びマテリアルバランスの試算の例
(原子力発電規模 58GWe、2050 年高速増殖炉導入開始の場合)

また、上記のケースに対応したプルトニウム貯蔵量と再処理需要の一例を図 2 7 に示す。この場合、2047 年より軽水炉使用済燃料を処理規模 1200 トン/年で処理し、高速増殖炉使用済燃料については 2060 年に 200 トン/年程度、その後 2080 年に 100 トン/年程度の処理量増加を行い、最大で 600 トン/年程度の処理を行えば、高速増殖炉の導入に必要なプルトニウムを供給可能であることが示された。

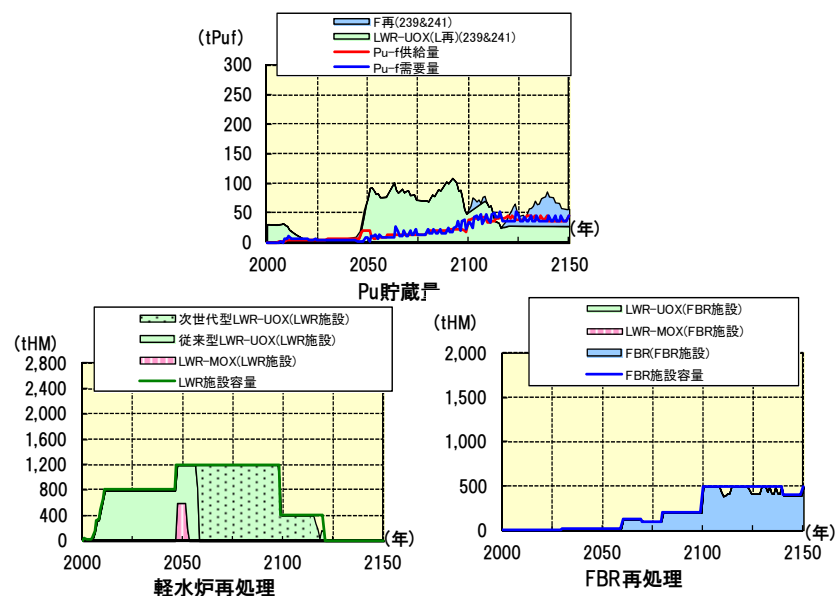


図 2 7 プルトニウム貯蔵量及び再処理需要の試算の例

これらの評価結果に対応した再処理負荷パターンの検討結果の例を図 2 8 に示す。ここで、軽水炉/高速増殖炉 (LF) 独立専用スタイルとは、軽水炉使用済燃料 (ウラン燃料と MOX 燃料) は軽水炉用プラントで、高速増殖炉使用済燃料は高速増殖炉用プラントで再処理するものである。一方、LF 共用スタイルとは、軽水炉使用済燃料と高速増殖炉使用済燃料を単一の共用プラントで再処理するものである。

この場合、第二再処理工場は、以下のような特徴を有する。

- ・ 処理能力：1200～1400 トン/年
- ・ 運転開始から 5 年程度は軽水炉使用済 MOX 燃料の処理が必要
- ・ 2060 年頃から高速増殖炉使用済燃料の再処理が必要

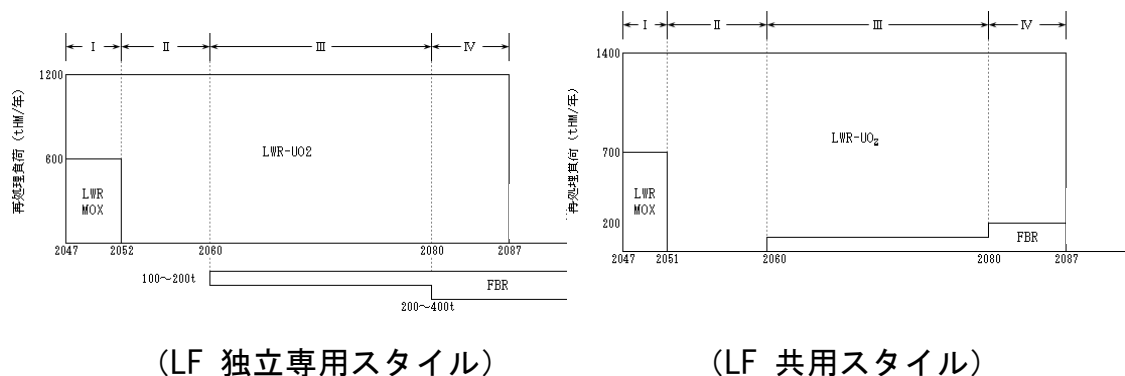


図 2 8 再処理負荷パターンの例

(イ) プラントイメージの概略検討

上記のシナリオの検討結果を踏まえ、コプロセッシング法を想定した LF 独立専用スタイル及び LF 共用スタイルについて、燃料の処理パターンを考慮した概略物質収支及びブロックフローを検討し、技術的成立性、経済性、環境負荷等の観点から各スタイル間の比較評価を行った。なお、LF 共用スタイルについては軽水炉用プラントと高速増殖炉用プラントの施設の共用の度合いを考慮し、溶解工程以降を共用する場合、分離 (抽出) 工程以降を共用する場合、精製工程以降を共用する場合について検討を行った。

技術的成立性については、共用化のポイントとなる溶解槽について臨界安全性の観点から評価を行い、六ヶ所再処理施設と同等の溶解槽で軽水炉 MOX 燃料や高速増殖炉燃料を処理する場合、一定量の中性子吸収材の使用が必要となることが分かった。

経済性については、主要工程機器の単系列当たりの処理能力について検討を行い、再処理負荷パターンに対応するために必要な系列数を求め、各スタイル間の相対的なコスト比較を行った。この際、軽水炉ウラン燃

料と軽水炉 MOX 燃料や高速増殖炉燃料を同時に処理する場合（同時処理）と時間分割して処理する場合（時間分割処理）の比較を行ったが、時間分割処理は特にプルトニウム処理に係る系列数の増加を招き合理的ではないことが分かった。同時処理を行う場合のコスト比較からは、LF 共用スタイルの方が LF 独立専用スタイルに比べ優位であり、LF 共用スタイルの中では、六ヶ所再処理施設と同等の溶解槽を用いて溶解槽以降を共用化するスタイルや抽出工程以降を共用化するスタイルが優位と見られた。

環境負荷の観点からガラス固化体発生量の試算を行い、ガラス固化体中の廃棄物の量と発熱量のバランスの関係で、LF 独立専用スタイルに対し LF 共用スタイルが優位となることが分かった。ただし、六ヶ所再処理施設と同等の溶解槽を用いて溶解槽以降を共用化するスタイルの場合は、溶解槽での臨界安全上の制約から中性子吸収材の使用が必要となり、これがガラス固化体発生量を増加させることから LF 独立専用スタイルよりも若干不利となる。

ウラン製品の観点からは、軽水炉ウラン燃料と高速増殖炉燃料を処理している期間において、LF 共用スタイルの場合には回収ウランの残留濃縮度が若干下がることに起因して、LF 独立専用スタイルの方が若干優位と見られたが、回収ウランの再濃縮利用は海外からの濃縮ウランの輸入コストとの比較において選択されるものである事に注意を要する。

これらの検討結果を踏まえると、共用スタイル間の比較においては、主要設備コストが低く、ガラス固化体発生量も少ないと見積もられる抽出工程以降を共用化するスタイルが現時点では優位と考えられる。なお、本検討における比較評価結果については、コスト評価はブロックフローレベルのもので精度が粗いこと、回収ウランの再濃縮の要否が不確定であること、ガラス固化体の廃棄物含有率目標が将来拡大されると六ヶ所再処理施設と同等の溶解槽を用いて溶解槽以降を共用化するとした共用スタイルの欠点が解消され共用スタイル間では最も有望なケースとなる可能性があることなどに注意が必要である。

（ウ）再処理プロセス技術（4 プロセス）の比較検討

上記のプラントイメージの概略検討を踏まえ、LF 共用スタイルの再処理施設に採用する再処理プロセス技術として、コプロセッシング法、先進湿式法（低プルトニウム富化度・高除染対応版）、FLUOREX 法及び超臨界直接抽出法（表 1 1）を仮定し、各再処理プロセス技術を用いて軽水炉ウラン使用済燃料、軽水炉 MOX 使用済燃料及び高速増殖炉使用済燃料を処理する場合について、主要工程のプロセスフローダイアグラム（PFD）、物質収支図、機器リストを作成した。

表 1 1 再処理プロセス技術（4 プロセス）

コプロセッシング法	抽出工程に U/Pu の逆抽出操作でプルトニウムの単体回収のために必要なウラン洗浄装置を設けず、ウランの一部を常にプルトニウムと同伴させ、再処理工程内でプルトニウムが単独で存在しないよう PUREX 法を改良した技術。
先進湿式法	高プルトニウム富化度の高速増殖炉燃料を処理対象とし、低除染のウラン、ウラン／プルトニウムを製品とする高速増殖炉再処理専用プラントへの適用を目的に開発中の技術。燃料溶解液から晶析法によりウランの大部分を硝酸ウラン結晶として回収しウラン製品とすることで以降の抽出工程の処理液量を低減させ、ウラン／プルトニウム分配機能を不要とする。晶析法で残った溶液（母液）は簡素化溶媒抽出法で精製のみ行いウラン／プルトニウム製品とする。本検討では、第二再処理工場として要求される低プルトニウム富化度、高除染製品仕様の 軽水炉再処理に適用するため、分配及びウラン精製に各々晶析工程を 3 回繰り返すプロセスを基本構成とした。
FLUOREX 法	乾式再処理法のフッ化物揮発法と湿式再処理法の PUREX 法を組み合わせたハイブリッド再処理法。フッ化物揮発法は、小型の設備で高除染のウランを回収できることから、後流の PUREX 法による工程を小型化できる可能性がある。
超臨界直接抽出法	従来の PUREX 法の溶解、清澄、抽出の各工程を一括して一つの超臨界 CO ₂ -硝酸 TBP 流体により直接溶解・抽出することで、再処理工程の削減を行うことが特徴。これにより、設備及び使用する試薬量を低減できる可能性がある。

作成した機器リストを基に機器製作コストを見積もり、再処理プロセス技術のコスト比較を行った。また、環境負荷低減の観点からガラス固化体発生量の比較、核拡散抵抗性の観点から計量ポイントの比較を行った。さらに各再処理プロセス技術で LF 共用プラントを実現するまでの主要な開発課題を整理した（表 1 2）。

表 1 2 再処理プロセス技術の比較

		コプロセッシング法	先進湿式法	FLUOREX 法	超臨界直接抽出法	備 考
経済合理性	主要機器製作コスト（相対値）	1 ○	1.3 △	1.2* △	1.2 △	* FLUOREX 法のウラン製品は UF ₆ のため、回収ウランを再濃縮する際の転換費用まで含むコストとみることが適当
環境負荷低減	ガラス固化体発生量（相対値）	1 ○	1 ○	1.7 △	0.8* ○	*核分裂生成物（FP）の一部は高放射性固体廃棄物へ移行
核拡散抵抗性	制度障壁（計量管理）	○	○	△	△	入出量計量ポイントを検討
技術的成立性		◎	○	△	△	
現時点での総合比較		◎	△	△	△	

コプロセッシング法は現行 PUREX 法に近いプロセス技術であることから、六ヶ所再処理施設と同様の設備構成となった。コプロセッシング法の主要機器製作コスト試算結果を 1 とした場合、先進湿式法（低プルトニウム富化度・高除染対応版）は複数の晶析プロセスの採用が機器製作コストを押し上げた結果、主要機器製作コスト試算結果は約 1.3 倍となった。FLUOREX 法では、主要機器である燃料のフッ化反応を行うフレーム炉がスケールアップの観点から 4 系列となるなどフッ化設備や脱被覆設備等の系列数増加や解体・せん断工程における系列数増加などが機器製作コストを押し上げた結果、主要機器製作コスト試算結果は約 1.2 倍となった。超臨界直接抽出法では、臨界安全上の制約から 10 系列の直接抽出塔を準備していることなどがコストを押し上げた結果、主要機器製作コスト試算結果は約 1.2 倍となった。

ガラス固化体発生量は FLUOREX 法以外 3 プロセスで同等となった。FLUOREX 法はフッ化設備の各種吸着剤をガラス固化処理することとしたため約 7 割の増加となった。

計量ポイントについては、FLUOREX 法、超臨界直接抽出法の入量計量がせん断後の燃料粉末で行われることが想定され、十分な計量精度を担保できない可能性がある。

LF 共用プラントを実現するまでの主要な開発課題では、FLUOREX 法における高プルトニウム富化度粉末の硝酸溶解性やフッ化物の酸化物転換割合や超臨界直接抽出法における高圧バルブの成立性など、いくつかの事項で技術的成立性が不明であるため実験データに基づいた移行率設定や機器性能の設定など具体的な設計検討を深めていくことが難しい部分があった。こうした課題は将来解決されるものとして検討を進めたが、課題解決がなされない場合には大幅なコスト増加や当該プロセス技術の適用性そのものを危うくする可能性を孕んでおり、まずは研究を継続し技術的成立性に係る課題解決を優先すべきと考えられる。先進湿式法は元来高速増殖炉再処理向けに特化したプロセス技術であり、その分離プロセスである晶析法が核分裂生成物に対する除染係数やウランに対するプルトニウムの分離係数が低いため多段の晶析装置を要し、本検討で対象としたような低プルトニウム富化度で高除染が要求される LF 共用プラントには不向きであることが明らかとなった。晶析法に関してはある程度基礎データが採取されつつあり、これを低除染プロセス技術と見做せばある程度のデータ蓄積があるが、プラント設計を行う上では未だ十分とは言えず、今後基礎データの拡充を行っていく必要がある。コプロセッシング法は PUREX 法をベースにしており、今後のプロセス実証を行うことで技術的成立性に問題はないと考えられる。

以上のことから、現時点での技術開発状況において、相対的にコスト

が小さいこと、技術課題の少なさ、ガラス固化体発生量が増えないことなどから、コプロセッシング法が 1400 トン/年の LF 共用プラントへの採用プロセスとして最も有力な候補と考える。

先進湿式法（低プルトニウム富化度・高除染対応版）は本検討で対象としたような低プルトニウム富化度で高除染が要求される LF 共用プラントには不向きであり、今後 LF 共用プラントの設計検討を進めていく上で採用候補技術に挙げる必要はないと考える。FLUOREX 法、超臨界直接抽出法は技術的成立性を見通せない課題が多く、設計検討を進めていく段階にはないと考える。

（エ）第二再処理工場の概念検討（設備構成パターンの検討）

（ア）～（ウ）の検討結果を踏まえ、コプロセッシング法の LF 共用再処理プラントとして、プルトニウム需要への対応や国内技術の育成、産業力維持などの種々の観点から、適切と考えられる以下の 3 つのプラント概念（集中型、分割型、モジュール型）の主要設備に対する基本系統構成、物質収支、主要機器の処理能力及び設備構成パターンを検討し、第二再処理工場のプラントイメージとその特質を明らかにした。

検討に際しては、まず 3 つのプラント概念に対する設備容量を設定するために、原子力発電設備容量 68GWe を想定したサイクル諸量評価を実施し、プラント導入計画を検討した。（図 2 9）

基本系統構成の検討では、上記のプラント導入計画に基づき、各プラント概念の主要な機能ごとに代表的な機器とそのつながり、流れを示す工程系統案を作成した。作成した設備は、解体・せん断、溶解、清澄、調整、分離、ウラン精製、ウラン/プルトニウム精製、ウラン濃縮、ウラン/プルトニウム濃縮、ウラン脱硝、ウラン/プルトニウム脱硝、高放射性廃液（HAW）濃縮、酸回収、せん断・溶解オフガス処理及び槽類オフガス処理である。

次に、作成した工程系統案を基に物質収支計算を行った。物質収支計算に際しては、任意の再処理量について概略の物質収支を簡易に計算することを可能とするために、100 トン/年の処理量に規格化した物質収支とした。解体・せん断、溶解、清澄の各設備についてはその工程の律速となる処理対象燃料を想定して規格化物質収支を作成した。調整、分離設備以降については、入量中のプルトニウム含有率によってプロセス物量が大きく異なるため、想定される処理燃料の組合せを整理し、5 つの代表ケースについて規格化物質収支を作成した。

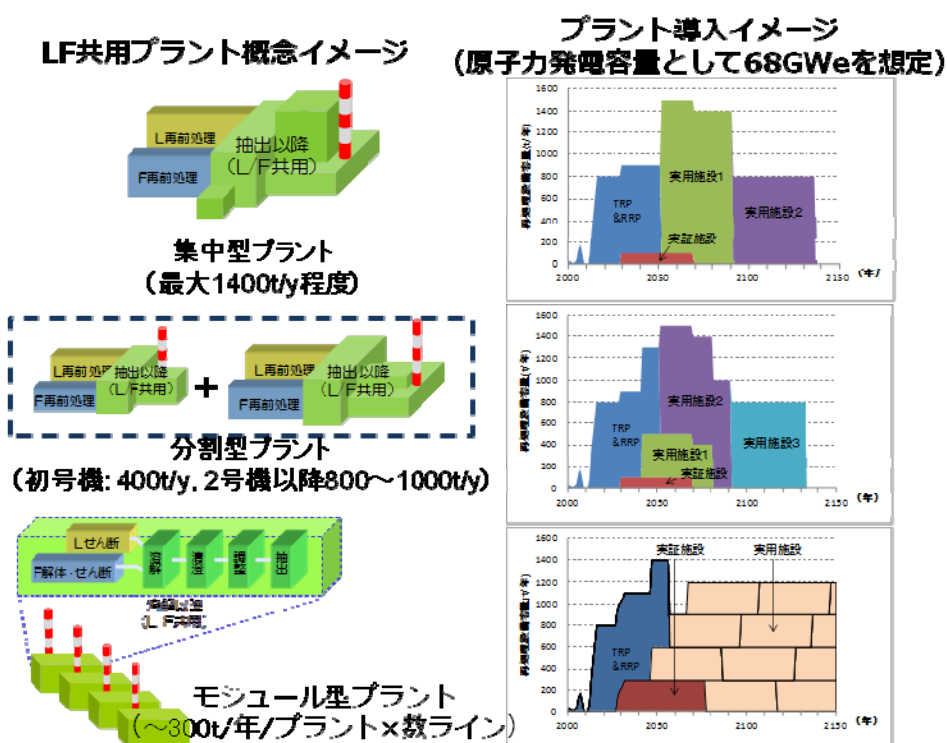


図 2 9 LF 共用プラント概念イメージとプラント導入計画

また、その工程でのプロセス物量が必ずしも再処理量と比例的な関係にならない高放射性廃液濃縮、酸回収、せん断・溶解オフガス処理及び槽類オフガス処理については過去の検討結果から概略 100 トン/年相当に近い廃液処理量やオフガス処理量を設定して規格化物質収支を作成した。

主要機器の処理能力の検討では、集合体解体機、せん断機、破碎機、溶解槽（回転ドラム型、水車型）、清澄機、抽出器（遠心抽出器、パルスカラム、ミキサセトラ）、ウラン濃縮缶、ウラン/プルトニウム濃縮缶、ウラン脱硝装置、ウラン/プルトニウム脱硝装置、高放射性廃液蒸発缶について、機器単体の最大処理能力を推定した。この推定にあたっては、一般的な製作性や輸送性はもとより、各機器の開発あるいは運転実績を基に技術的成立性が高いと考えられる数値を採用することを基本とした。

この結果、単機の処理能力が低い設備はウラン/プルトニウム脱硝装置であることが確認された。また、パルスカラム、ウラン濃縮缶は想定されている最大処理能力 1400 トン/年までは単系列で処理可能であることも確認された。

設備構成パターンの検討では、まず各設備の必要系列数（必要最少系列数）を算定した。算定にあたっては、主要機器の能力の範囲で最少と

なる系列数に予備系列を必要に応じて加えた。予備系列の要否は、動的機器の有無、その設置場所がセル内かセル外か、交換に伴う停止時間の長短、現段階での技術的成立性の程度を考慮して決定した。

設備構成パターンの設定に際しては、各設備の最少の必要系列数のみを考慮して設備を構成するパターンと、前処理設備（解体・せん断～清澄設備まで）を一連の設備ととらえ、実際の運転を考慮し、前後の系列数を標準化してバランスよく設備を構成するパターン、予備系列の設備容量を小さくするために、系列数を増やし単系列当たりの処理量を小さくするパターンについて設定した。

設備構成のパターンは計 30 ケースを設定し、それぞれのケースでの各工程設備の系列数を明らかにした。

第二再処理工場の特徴として、プルトニウム処理量の増大に伴い特に系統数が大きくなる設備はウラン/プルトニウム濃縮設備、ウラン/プルトニウム脱硝設備であり、特に同じ年間処理量当たりに必要な系列数が最も多いのは、高速増殖炉燃料の単独処理を想定し、プルトニウム処理系への負荷の大きいモジュール型（集中型と分割型は同程度）である。

また、集中型の実用施設 1 及び分割型の実用施設 2 についてはプラントの運転期間中の 2070～80 年頃にプルトニウム処理が増加する予想される。そのため、プルトニウム処理量の増加の時期に合わせてウラン/プルトニウム濃縮設備、ウラン/プルトニウム脱硝設備を増設することで初期投資を抑えることも可能である。

（３）再処理工学の枠組み構築

（ア）国内再処理技術の知的所有権等に関する整理

特許庁データベースから再処理に関する 890 件の特許等（昭和 61 年から）を抽出、東海再処理施設、六ヶ所再処理施設、先進湿式法との関連を調査した。日本原子力研究開発機構と日本原燃株式会社が出願人ではない特許を使用した例はなかった。将来のプラント建設において、技術汚染に関する問題が発生することの可能性を精査するには、知的所有権のみならず企業間の契約に立ち入る必要がある。

（イ）再処理技術の体系化のための手法の検討

技術継承の事例を聞き取りと文献により調べた。聞き取りは、宇宙航空研究開発機構、東京電力株式会社、日本原燃株式会社、東京大学 北森教授等に行った。調査対象の事例はいずれもプロジェクト的な技術であり、計画から実現に至るまでの時間が長いものであった。世代間の継承や、研究開発、製作、運用といった段階間の継承が問題として認識され、また、対策が講じられていた。以下の知見が得られ、知識を継承す

るツールは図30のように分類された。

- ・ 技術情報は可能な限り書類などの形式知として残す努力が必要。
- ・ 知識を集約する作業は労力が增大するので、効率的に行う工夫が望まれる。
- ・ 膨大な情報を扱うので、目的とする情報を容易に入手する手段が重要となる

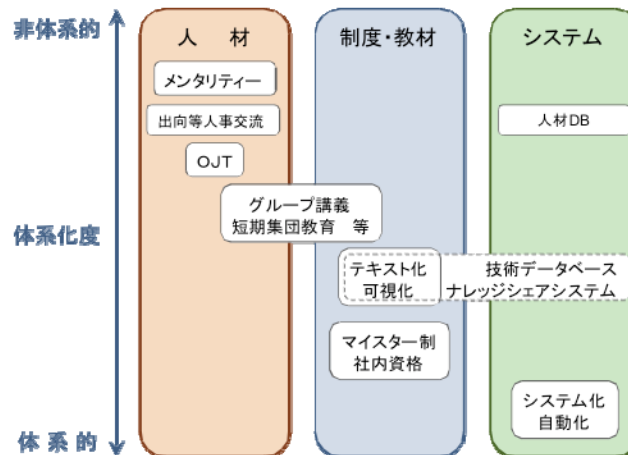


図30 知識を継承するツールの分類

再処理技術の特徴を踏まえ、体系化する対象（知識の構造）は次のように考えられ、図31のように整理された。ここで、異なる機関の間で知識を共有する体制を前提として検討した。

- ・ 研究開発から運転に至る主要な段階については、重点を置くべき優先順位は、設計、建設、研究開発、運転である。
- ・ 再処理施設を構成する設備の機能とそれを実現する構造に関する情報を記録する必要がある。

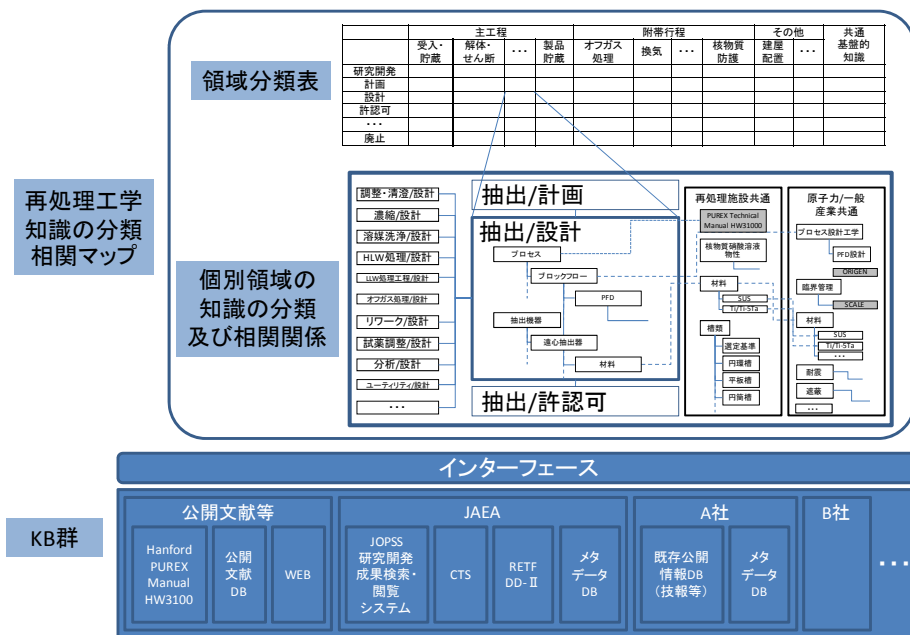


図3-1 体系化した知識の構造

また、手法については次のように考えられた。

- ・ 体系化すべき情報は階層的な構造を有するので、それら構成要素について一定の情報構造を記述すれば良いと考えられる。
- ・ 情報は、その値を取る理由を明らかにし、限界を示すよう記述する。
- ・ 知識を体系化する情報構造を表1-3のように検討した。これは、知識を体系化するときのテンプレートとして活用できる。

情報構造のテンプレートに関してはその利用を試行した。構造化手法（例えば行動ダイアグラムを用いた解析）を利用することによって、技術情報が効果的に整理されるとともに、暗黙知の表出や欠損した情報の洗い出し等を行うことができ、伝達する技術情報の品質が向上することを示した。設計情報の表現に適していると考えられる長方形型のダイアグラムを図3-2に示す。また、運用の際の手引き（注意事項）を整理してまとめた。

表 13 知識を体系化する情報構造 (テンプレート)

分類	内容
設計対象	定義
要求仕様	● 性能 (分離、保持、移送、監視、操作、保守など) ● 設計対象が置かれる環境条件 (入力条件、あるいは前提条件として) ・ 最高使用温度、最高使用圧力、根拠 ・ 機器区分、根拠 ・ 機器の耐久性、耐放射線性、交換頻度、根拠 ● 設計対象が達成すべき性能 (出力条件として) ● 設計対象と関連する工程・機器が備える性能 ● 安全 ● 臨界 ● 火災・爆発防止 ● 放射線 (遮へい) ● 閉じ込め (施設内、施設外への放出) ● 耐震 ● 適合すべき法令等 ● 適用法規 ● 適用規格
設計	● 型式選定 (分離、保持、移送、監視、操作、保守など) ● 型式候補、選定した型式、選定の根拠 ● 構造* ● 性能を達成する方法、範囲、根拠 ● 材料* ● 性能を達成する方法、範囲、根拠 ● 安全* ● 臨界安全を達成する方法、範囲、根拠 ● 火災・爆発安全を達成する方法、範囲、根拠 ● 放射線 (遮へい) 安全を達成する方法、範囲、根拠 ● 閉じ込め (施設内、施設外への放出) 安全を達成する方法、範囲、根拠、使用材料、耐食性 (腐食代の設定、根拠) ● 耐震安全を達成する方法、範囲、根拠 ● 性能検証 ● 計算などに基づく構造、材料、安全などの立証 ● 検査 ● 使用前検査、溶接検査、定期検査 ● 経済性 ● 機器製作コスト ● ランニングコスト ● 関連する情報 ● 機能を発揮するための原理 ● 関連する文献 ● 関連する物性定数 ● 用語

* 設計対象により項目は変わりうる。

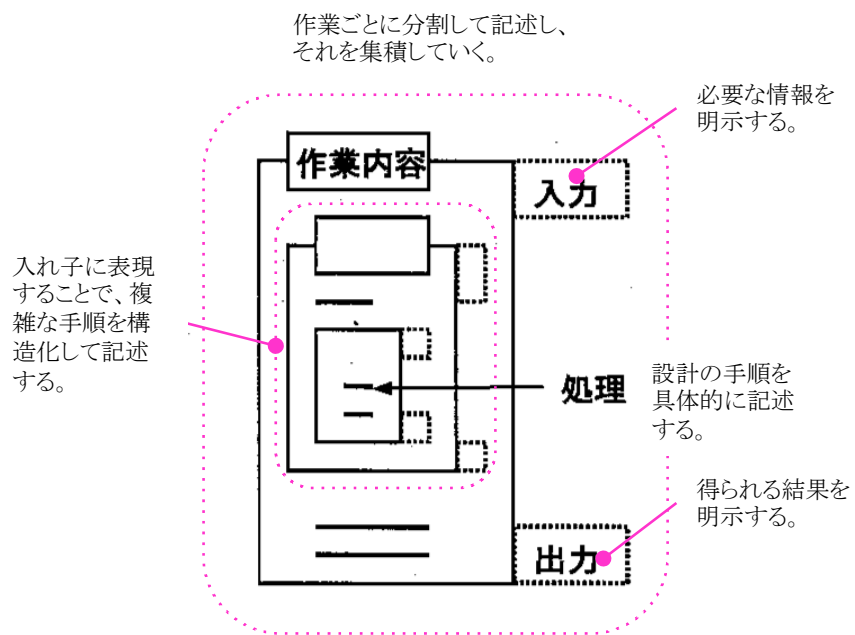


図 3 2 設計情報の表現に適していると考えられた長方形型のダイアグラム

3 - 1 - 3 特許出願状況等

表 1 4 特許・論文等件数

要素技術	論文数	論文の被引用度数	特許等件数(出願を含む)	特許権の実施件数	ライセンス供与数	取得ライセンス料	国際標準への寄与
モノアミドを用いた除染プロセス開発	5	11	0	0	0	0	0
計	5	11	0	0	0	0	0

表 1 5 論文、投稿、発表、特許リスト

	題目・メディア等	時期
論文	Solvent Extraction and Ion Exchange, 29 , 519-533(2011), “Selective extraction of U(VI) by counter-current liquid-liquid extraction with <i>N,N</i> -di(2-ethylhexyl)-2,2-dimethylpropanamide”	H23. 7
	Solvent Extraction and Ion Exchange, 30 , 142-155(2012), “Distribution of U(VI) and Pu(IV) by <i>N,N</i> -di(2-ethylhexyl)butanamide in continuous counter-current extraction with mixer-settler extractor”	H24. 2
	Journal of Nuclear Science and Technology, 49 , 588-294(2012), “Application of <i>N,N</i> -di(2-ethylhexyl)butanamide for mutual separation of U(VI) and Pu(IV) by a continuous counter-current extraction with mixer-settler extractors”	H24. 5
	Solvent Extraction and Ion Exchange, 31 , 590-603(2013), “Recovery of U and Pu from nitric acid using <i>N,N</i> -di(2-ethylhexyl)butanamide in mixer-settler extractors”	H25. 9
	Solvent Extraction and Ion Exchange, 32 , 348-364(2014), “Uranium and plutonium extraction from nitric acid by <i>N,N</i> -di(2-ethylhexyl)-2,2-dimethylpropanamide (DEHDMPA) and <i>N,N</i> -di(2-ethylhexyl)butanamide (DEHBA) using mixer-settler extractors”	H26. 3
発表	日本原子力学会 2008 年秋の大会「モノアミド抽出剤 D2EHMPA による U 選択的抽出の連続多段分離試験」	H20. 9
	日本原子力学会 2009 年秋の大会「一軸多段型遠心抽出器の適用性検討」	H21. 9
	日本原子力学会 2009 年秋の大会「遠心抽出器の設計 (2)-200tHM/year 規模遠心抽出器の運転可能領域の評価」	H21. 9
	日本原子力学会 2009 年秋の大会「流れ場環境における微分	H21. 9

	パルスボルタンメトリ法の適用性検討」	
	日本原子力学会 2010 年春の大会「 <i>N,N</i> -ジアルキルアミドを使用した U, Pu 分離プロセスの開発 — (1) DEHBA を使用した U, Pu の連続抽出試験 —」	H22. 3
	日本原子力学会 2010 年春の大会「 <i>N,N</i> -ジアルキルアミドを使用した U, Pu 分離プロセスの開発 — (2) シミュレーション計算によるフローシート解析 —」	H22. 3
	日本原子力学会 2011 年春の年会「遠心抽出器の設計—(3) 中性子吸収材内封型遠心抽出器の運転可能領域の評価—	H23. 3
	日本原子力学会 2012 年春の年会「コプロセッシング法の抽出フローシート開発 〔I〕抽出計算コードによるフローシート設定」	H24. 3
	日本原子力学会 2012 年春の年会「コプロセッシング法の抽出フローシート開発 〔II〕設定フローシートに基づく小型ミキサセトラ試験」	H24. 3
	日本原子力学会 2012 年春の大会「モノアミド抽出剤 DEHDMPA を用いた U(VI) 抽出プロセスの検討」	H24. 3
	日本原子力学会 2012 年春の年会「コプロセッシング法の抽出フローシート開発 内部リサイクル方式小型ミキサセトラを用いた試験」	H25. 3
	Global2013 「Development of U and Pu Co-Recovery Process (Co-Processing) for Future Reprocessing」	H25. 9

3 - 2 目標の達成度

表 16 目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標	成果	達成度
(1) 除染技術の調査・開発			
① 除染技術の調査	・ 除染技術としての技術的要件を整理するとともに、有望な除染技術を選定する。	・ 技術的要件として除染プロセス技術に求められる除染係数等の検討、設定を行った。 ・ 有望な除染技術として「溶媒として TBP を、抽出器として遠心抽出器を用いる溶媒抽出法」を選定した。	達成
② 溶媒抽出法による除染プロセス開発			
a. 遠心抽出システム開発	・ 単段型遠心抽出器の試験機(200 トン/年規模)を用いた中性子吸収材内封型遠心抽出器の適用性を評価する。	・ 200 トン/年規模単段型遠心抽出器試験装置を用いて大型化設計の妥当性を確認した。その後、臨界安全上有利となる中性子吸収材内封型遠心抽出器の適用検討として流動試験を実施し、通常型と同等以上の流動性能を示す中性子吸収材の最大体積を明らかにした。	達成
	・ 単段型遠心抽出器の臨界安全上の最大規模を評価する。	・ 形状管理及び中性子吸収材管理を前提した臨界管理のもと、達成される遠心抽出器の最大処理流量を評価した。その結果、濃縮ボロンを使用等の条件で、約 5400 L/h (800 トン/年規模相当)まで達成できることがわかった。	達成
	・ 除染プロセスに対する多段型遠心抽出器の適用性を評価する。	・ 一般産業用多段型遠心抽出器又はその情報を用い、抽出性能(Nd 使用)を評価し	達成

		た結果、段効率が 0.74 程度であり、また、臨界安全上の最大処理流量を評価した結果、600L/h であった。さらに、商用プラントに適用可能な構造検討を行い、構造案を示した。	
	・ 単段／多段の遠心抽出器における運転異常発生までの時間等の耐スラッジ性を評価する。	・ 単段／多段の遠心抽出器でアルミナを用い、異常発生時間、異常事象の種類等を取得するためにスラッジ試験（加速試験）を実施した。その結果、単段型が約 250 分で、多段型は約 115 分で異常が発生し、その異常は両機ともエントレインメントの発生によるものであった。 ・ 単段型遠心抽出器を用いてスラッジ粒径に対するロータ内の残留率を試験で取得し、理論値と比較した結果、運転条件も加味した補正係数を設定することで実験結果を計算で再現できることがわかった。	達成
	・ 流動解析シミュレーションの実用性を評価する。	・ 実際の遠心抽出器の系を反映した混合部及びコレクタ部のフローパターンを取得した結果、流れの方向、流速について、試験結果とシミュレーション結果はよく一致していることを確認した。この結果、遠心抽出器の流動評価に解析シミュレーション技術が適用可能で	達成

		ある見通しを得た。	
b. コプロセッシング法を用いた除染プロセス開発	・ 移行期の処理対象溶液からウラン、プルトニウムを共回収するプロセスフローシートを抽出計算コードにより設定する。また、設定したフローシートに基づき、ウラン、プルトニウムを共回収するプロセスの確立に向け、ミキサセトラ試験を行いフローシートの成立性を確認する。	・ 軽水炉ウラン燃料（Pu/U 比：1%）、軽水炉 MOX 燃料（Pu/U 比：3%）、高速増殖炉燃料（Pu/U 比：20%）を想定したプロセスフローシートを抽出計算コードにより設定した。分配段を対象としたウラン/プルトニウム共回収試験を実施し、1%、3%及び 20%の全ての場合においてウラン/プルトニウム共回収フローシートが成立することを確認した。	達成
	・ ウラン/プルトニウム共回収液中のウラン同伴を監視するためのウラン/プルトニウム混合モニタに係る試験を行う。	・ ウラン/プルトニウム混合モニタとして、ボルタンメトリー、吸光光度法、超音波計測法及び電気伝導率法により、ウラン、プルトニウム及び酸濃度の定量分析が可能であることを確認した。	達成
c. モノアミドを用いた除染プロセス開発	・ 事業化へ向けた研究開発段階へ移行するための判断材料となる分離プロセス基礎データを整備する。	・ モノアミドのウラン、プルトニウム及び酸に対する分配比計算式を導出した。これを用いて連続抽出プロセスにおけるウラン及びプルトニウムの移行挙動のシミュレーション解析を行い、モノアミドを用いた除染プロセスのフローシートを作成した。 ・ ミキサセトラによる連続抽出試験を実施し、プルトニウムの還元剤を使用せずにウランを除染するプロセスの成立性を支持する結果	達成

		を得た。 ・モノアミド劣化物の一種であるカルボン酸の除去法としてアルカリ洗浄の有効性を示した。 ・X線構造解析等により、モノアミドの劣化物(カルボン酸及び二級アミン)と模擬核分裂生成物との錯体の構造を明らかにした。	
③ フッ化物揮発法を用いた除染プロセス開発	・フッ化物揮発法や同手法にて課題と考えられる粉末ハンドリング技術に関する調査を行う。	・フレーム炉を中心としたフッ化物揮発工程及び粉末ハンドリング技術に関して国内外の情報を調査し、プラントの実績や課題を整理した。フレーム炉に関してはロシア、フランス、カナダにおける炉の寸法や稼働実績からフッ化技術として採用可能との結論を得た。また、粉末ハンドリングでは機器の閉塞、固着等が課題として挙げられ、配管等内面のバフ研磨やコーティング等の対策が有効であることを示した。	達成
	・軽水炉へ供給可能なフッ化転換・高除染プロセスを検討し、ブロックフロー及びプロセスフローを作成し、プロセス概念と物質収支を検討する。	・調査した情報や文献等を基に高除染を前提としたブロックフロー及びプロセスフローを作成し、機器・設備構成や物質収支などの設備設計が妥当であることを確認した。	達成
	・施設概念設計を行う上での課題抽出及び対策の検討を行う。	・施設概念設計を行う上での課題として、粉末ハンドリング以外にも、フッ化炉の	達成

		残渣回収技術や計量管理技術等を摘出した。また、フッ化炉の装置構造の工夫による残渣回収機構や、新たな計量管理概念と中性子検出器の併用による計量精度の向上策等の対策案を提示した。	
(2) 軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの移行シナリオ等検討	・ 原子炉を含めた核燃料サイクル全体の軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの移行シナリオを明らかにする。	・ 発電設備容量、高速増殖炉への移行開始年、移行期間（高速増殖炉導入速度）等のパラメータを考慮して、複数のシナリオを比較検討するとともに、代表的な移行シナリオを明らかにした。これにより、第二再処理工場の設備容量及び導入時期を具体化した。	達成
	・ 上述の核燃料サイクルを実現していく上で、軽水炉から高速増殖炉への移行期に必要な第二再処理工場のプラントスタイルについて、ブロックフローレベルでの概略検討を行う。	・ 第二再処理工場の主工程にコプロセッシング法を採用する場合について、施設の共用の有無や燃料の処理パターンを考慮した概略物質収支及びブロックフローを検討した。これに基づき、技術的成立性、経済性等の観点で各スタイル間の比較評価を行い、抽出工程以降を共用するスタイルが優位との結果を得た。	達成
	・ 第二再処理工場の主工程に採用される可能性のある複数の再処理プロセス技術を採用した場合のプラントイメージの整理と、種々の観点から相互比較を行う。	・ 再処理プロセス技術として、コプロセッシング法、先進湿式法、FLUOREX 法、超臨界直接抽出法を採用した場合の、工程系統図、物質収支、必要系列数、機器リストを検討・整理した。	達成

		これに基づき、経済性、環境負荷等の観点で比較を行い、1400 トン/年の LF 共用再処理施設に採用する再処理プロセス技術として、コプロセッシング法が最有力候補との結果を得た。	
	・ コプロセッシング法の軽水炉/高速増殖炉共用再処理施設として考え得る複数のプラント概念の設備構成パターンを検討し、その特質を明らかにする。	・ 軽水炉/高速増殖炉共用再処理施設として考え得る 3 つのプラント概念について、原子力発電設備容量 68GWe を想定したプラント導入パターン、工程系統図、物質収支を検討した上で、3 つのプラント概念の設備構成パターンを整理した。これにより、第二再処理工場はプルトニウム処理量の増加に伴いウラン/プルトニウム濃縮設備等の系列数が増加する特徴を有すること（モジュール型が最大）が分かった。	達成
(3) 再処理工学の枠組み構築	・ 我が国の再処理技術に関する知的所有権について調査・整理し、技術汚染の可能性を評価する。また、国内再処理技術を次世代に引き継ぐための知識の体系化に関する手法を検討するとともに、再処理技術への適用性を検討する。	・ 我が国の再処理技術に関する特許及び実用新案について調査・整理し、既存の特許等が第二再処理工場へ採用される技術の影響を与える可能性は小さいと結論した。 ・ 再処理に係る知識の体系化を念頭に、一般産業界における知識の体系化事例や概念調査を行い、この調査結果も踏まえ、再処理技術に係る知識の体系化に関する手法の概念を提案した。	達成

4. 事業化、波及効果について

4 - 1 事業化の見通し

本事業により開発を進めている除染技術は、高速増殖炉サイクルから高除染でウランやプルトニウムを回収する高除染化技術として、また、別途検討が進められる第二再処理工場の分離技術として利用が見込まれるものである。

これらは、移行シナリオの検討として実施してきた核燃料サイクル全体でのプルトニウムやウラン等のマテリアルバランスの整理結果やプラントイメージの検討結果と併せて、今後の第二再処理工場に関する検討に資することが見込まれる。

4 - 2 波及効果

本事業の成果は、直接的には今後行われる第二再処理工場の検討やその実用化像の提示、さらにその後の第二再処理工場の設計・建設に活用されるものである。また、本事業をとおして、再処理技術の調査と有望技術の選定や核燃料サイクル全体でのマテリアルバランスの整理とこれを考慮したプラントイメージの検討を行ったことにより、今後の研究開発の方向性が明らかとなり、研究開発の効率化につながるものである。合わせて、本事業を国内で継続し、第二再処理工場の建設・運転につなげることは、国内における再処理技術の継承や進化に貢献し、再処理プラント建設技術の国内定着を進めるとともに、現在の特定期国による当該技術の寡占状態を打破し、核燃料サイクル関連産業における国際的な競争力の確保につながることを期待される。さらに、軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの移行期における適切なプラントスタイルの実現に向けた研究開発等の効率的かつ着実な進展により、高速増殖炉再処理技術開発の高度化にも寄与することが期待される。

5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

5 - 1 研究開発計画

本事業の主要なテーマである除染技術開発は、「高速増殖炉サイクル実用化研究開発」にて研究開発が進められている高速増殖炉サイクルから高除染のウラン等を回収するものであり、「高速増殖炉サイクル実用化研究開発」の研究成果等も踏まえつつ開発を進めていくことが重要である。

本事業の研究開発計画は、「高速増殖炉サイクル実用化研究開発」の研究成果等も踏まえつつ、各年度の研究開発成果を段階的に発展させた計画的なスケジュールで実施しており、研究開発計画は妥当であった（表17参照）。

表 17 研究開発計画

	H19	H20	H21	H22	H23
(1) 除染技術の調査・開発 ① 除染技術の調査 ② 溶媒抽出法による除染プロセス開発 a. 遠心抽出システム開発 ・ 単段型遠心抽出器 ・ 多段型遠心抽出器 b. コプロセッシング法を用いた除染プロセス開発 c. モノアミドを用いた除染プロセス開発 ③ フッ化物揮発法を用いた除染プロセス開発					
(2) 軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの移行シナリオ等検討					第二再処理工場の概念検討（設備構成パターンの検討）
(3) 再処理工学の枠組み構築					

5 - 2 研究開発実施者の実施体制・運営

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、独立行政法人 日本原子力研究開発機構が経済産業省からの委託を受けて実施した。

日本原子力研究開発機構は、国内唯一の総合的原子力研究開発機関であり、本事業で取り上げた各種除染技術の実用化に向けて、広範囲な知見や技術を動員し、かつ実際にウランやプルトニウムを用いた試験を遂行できる実施者として適切である。

実施体制としては、産学連携推進部を契約窓口に、次世代原子力システム研究開発部門を研究開発の取りまとめ部署として、次世代原子力システム研究開発部門、原子力基礎工学研究開発部門、サイクル工学試験部及び再処理技術開発センターが、連携を図りつつ、それぞれの部署の特色を活かして各研究開発項目を実施した。また、調査研究計画調整委員会を設置し、本事業のプロジェクトリーダー(次世代原子力システム研究開発部門 技術主席)を委員長として研究開発を統括させるとともに、各実施部署の研究実施責任者を委員として、研究開発の進捗管理及び情報共有を図った。合わせて、外部有識者を委員とする再処理プロセス研究検討委員会を設置し、研究開発に係る目的や実施内容、成果の妥当性について、確認を行っている。

研究開発の一部については、再委託先として三菱重工業株式会社等が参加した。

実施体制については、図33のとおりである。

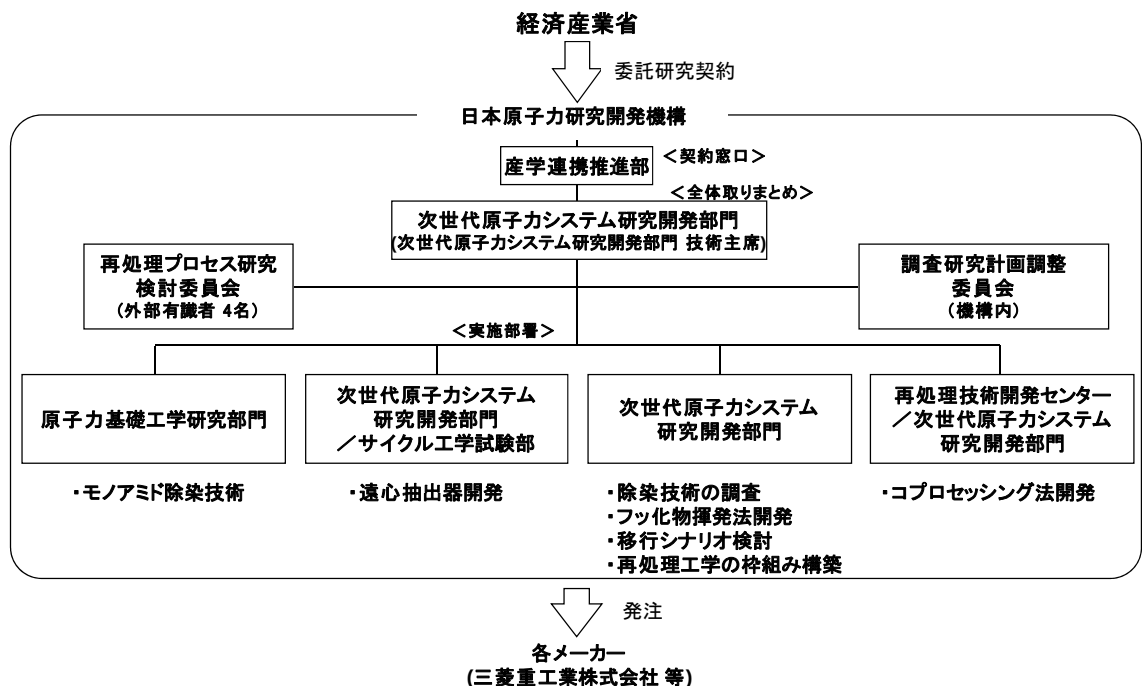


図33 研究開発実施体制

5 - 3 資金配分

本研究開発に係る予算は、各技術項目の進捗に合わせ、必要な実施項目と支出予算を精査した上で、適切に配分を行った。

資金の年度及び各研究開発項目への配分を表 18 に示す。

表 18 資金配分 (単位：百万円)

年度 平成	19	20	21	22	23	合計
(1) 除染技術の調査・開発 【①+②+③】	228	384	406	266	185	1,469
① 除染技術の調査	13	00	00	00	00	13
② 溶媒抽出法による除染プロセス開発 【a. +b. +c. 】	215	334	406	266	185	1,406
a. 遠心抽出システム開発	203	223	288	106	47	867
b. コプロセッシング法を用いた除染プロセス開発	00	14	53	118	109	294
c. モノアミドを用いた除染プロセス開発	12	97	65	42	29	245
③ フッ化物揮発法を用いた除染プロセス開発	00	50	00	00	00	50
(2) 軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの移行シナリオ検討	33	57	80	00	80	250
(3) 再処理工学の枠組み構築	11	1	15	00	00	27
合計 【(1)+(2)+(3)】	272	442	501	266	265	1,746

5 - 4 費用対効果

高速増殖炉サイクルから高除染でウラン等を回収し、軽水炉サイクルへ供給できるプロセスの確立により、軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの移行期における両サイクルの燃料バランスの融通性が増すとともに、高速増殖炉の導入ペースの変動に対する柔軟性が向上することで、高速増殖炉サイクルへの円滑な移行を図ることができる。また、高除染で回収されるウラン等を既存の軽水炉サイクル施設で取り扱うことが可能となることで、核燃料資源の有効利用が図れるとともに、軽水炉サイクル施設への低除染対応に係る設備投資が不要となり、サイクルコストの増加を抑制できる。

本研究開発を次世代再処理技術の開発と並行して実施することで両技術の

適合性から見た場合の技術的要求事項、改善点、成果を互いに融通できるため、開発の効率化を図ることができる。

また、今後の第二再処理工場に関する検討を円滑に展開するうえでは、検討に必要な題材が提供できるようあらかじめ準備することが不可欠であり、本研究開発は検討のための技術的知見の提供にも有用である。さらに本研究開発の成果に基づき、第二再処理工場の設計・建設にまで進展が図られる場合には、本研究開発により取り扱う核拡散抵抗性の高い除染プロセスは、我が国での核燃料サイクル実施に係る国際的理解の助けになるとともに、核燃料サイクル関連産業の国際競争力の確保と国内外への関連産業の展開が図られることが期待される。

5 - 5 変化への対応

本研究開発は、平成 19 年度から平成 23 年度までの 5 年計画で実施したものである。本研究開発期間中の平成 23 年 3 月には、東日本大震災及び福島第一原発における事故が発生したものの、将来にわたる我が国の安定的なエネルギー供給を担う柱となる原子力の利用と核燃料サイクル実現の必要性は震災前後で変わることはなかった。こうした中で、事故の教訓を踏まえつつ、臨界防止対策等を強化したことにより安全性の高い再処理技術開発に取り組んだ。今後の研究開発の展開については、我が国のエネルギー政策の議論を踏まえつつ、柔軟に対応を図るものとする。

B. 回収ウラン利用技術開発委託費に係る事業

1. 事業の目的・政策的位置付け

1-1 事業目的

我が国では、核燃料資源の有効利用の観点から、使用済燃料を再処理し、回収されるウラン、プルトニウムを有効利用する核燃料サイクルの推進を基本方針としており、六ヶ所再処理工場の本格操業後には年間800トンの使用済燃料が再処理され、年間700トン以上のウランが回収される。

原子力政策大綱等では、使用済燃料の再処理により回収されるウランは、核分裂性ウランの含有率が天然ウランよりも高く備蓄効果も高いことから、将来のウラン需要に備えた戦略的備蓄と位置付けられているが、国内での回収ウランの利用にあたっては、転換施設（酸化物状態で回収されるウランを濃縮するためにふっ化物に転換するための施設）の導入に要する期間、費用の見積もり、既存のウラン濃縮施設の対応可能性等について検討が必要とされている。

また、回収ウランは、微量の核分裂生成物や超ウラン元素が含まれるとともに、天然ウランと同位体組成が異なることから、ウランの子孫核種等による作業員の被ばくや原子炉の中性子利用効率の低下等の影響についても考慮が必要と考えられている。

本プロジェクトでは、六ヶ所再処理工場から回収されるウランを再び軽水炉で利用するため、既存のウラン濃縮施設、再転換施設、成型加工施設での回収ウラン取扱いへの影響や原子炉の炉心特性に与える影響等を調査した。また、高性能で安全性、経済性に優れた転換プロセス、濃縮プロセス、再転換プロセスを検討し、回収ウラン利用の技術開発の概念検討を実施した。

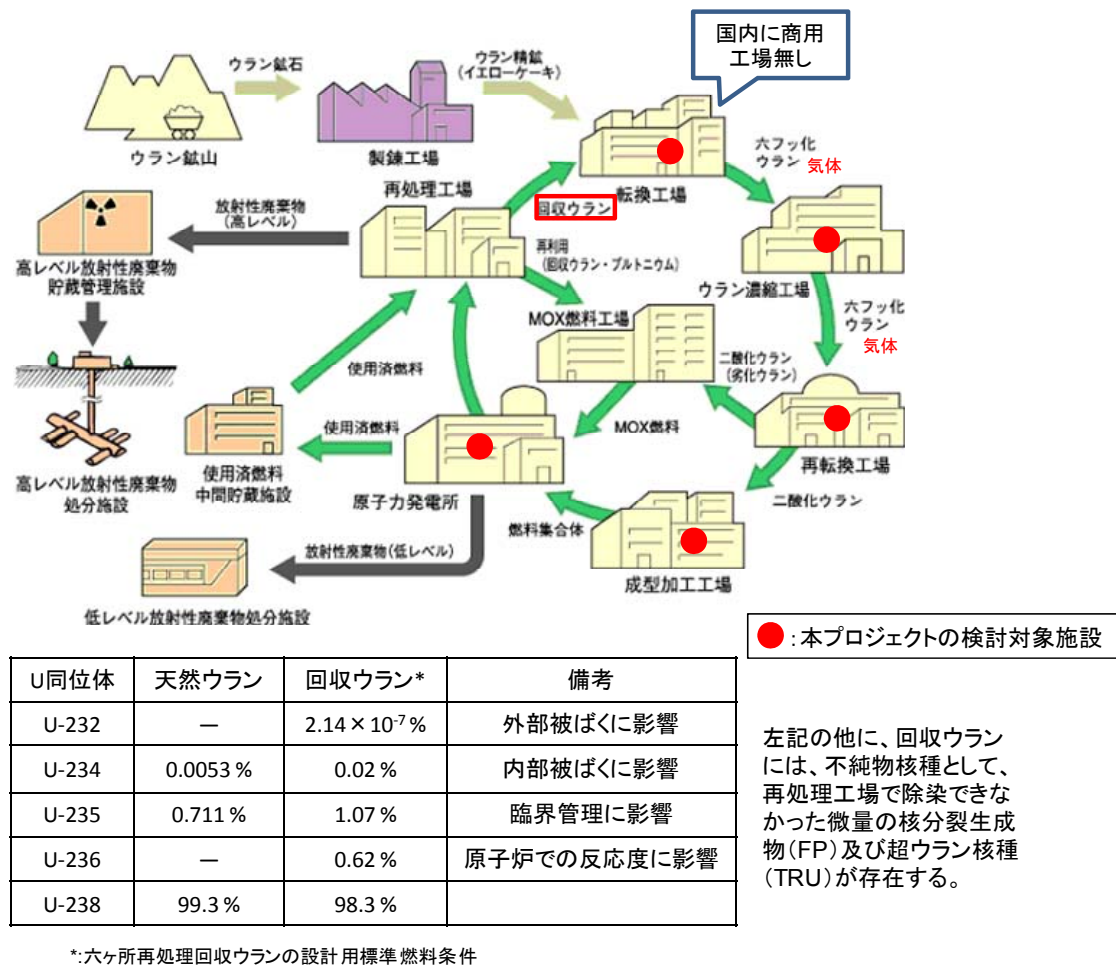


図 1. 軽水炉サイクルにおける回収ウランの利用の流れと特性

1-2 政策的位置付け

回収ウランの利用は、核燃料資源を有効利用する核燃料サイクルの基本方針に従っており、原子力発電による電力供給の安定性を一層改善し、長期にわたる我が国のエネルギー需要構造の安定性に寄与する。

使用済燃料の再処理によって回収されるプルトニウム、ウラン等を有効利用する核燃料サイクルの推進については、「原子力政策大綱」（平成 17 年 10 月）、「原子力立国計画」（平成 18 年 8 月）、「エネルギー基本計画」（平成 19 年 3 月）にそれぞれ示されている。

「原子力政策大綱」（平成 17 年 10 月 14 日、閣議決定）

3-1-3.核燃料サイクル

（略）、我が国においては、核燃料資源を合理的に達成できる限りにおいて有効に利用することを目指して、安全性、核不拡散性、環境適合性を確保するとともに、経済性にも留意しつつ、使用済燃料を再処理し、回収されるプ

ルトリウム、ウラン等を有効利用することを基本的方針とする。

「原子力立国計画」（平成 18 年 8 月）

第 3 節戦略的産業分野を支える分野

4.回収ウラン

国内における再処理の結果得られる回収ウランは、国内利用を第一目標とするが、現在ウラン価格は上昇しているもののウラン調達自身に困難は見出されていないこと、ウラン濃縮度が高く備蓄効果も高いことから、当面は将来のウラン需要に備えた戦略的備蓄と位置付けることが合理的である。

その一方で、電気事業者及び日本原燃は、回収ウラン利用への機動的な対応可能性を明らかにするため、日本原子力研究開発機構の協力も得つつ、回収ウランの国内利用を想定した転換施設の導入に要する期間、費用の見積もり、新型遠心分離機の対応可能性等に関する検討を進めることが不可欠である。

「エネルギー基本計画」（平成 19 年 3 月 9 日、閣議決定）

第 2 章第 3 節 1.原子力の開発、導入及び利用

原子力発電については、安全確保を大前提に、今後とも基幹電源として位置付け推進する。その際、使用済燃料を再処理し、回収されるプルトニウム、ウラン等を有効利用する核燃料サイクルは、供給安定性に優れる原子力発電の特性を一層向上させるものであり、国の基本的方針として、核燃料サイクルを推進する。

1－3 国の関与の必要性

原子力発電はエネルギーの安定供給に資するほか、地球温暖化対策の面で優れた特性を有するため、我が国では原子力発電を基幹電源として位置付けるとともに、使用済燃料の再処理に伴い回収されるプルトニウム、ウラン等を有効利用することを国の基本的方針とし、その確立に向けた研究開発を推進している。

六ヶ所再処理工場で回収される回収ウランは国内に保管されることから、準国産燃料と位置付けることができる。

一方、中国、インドにおける電力需要の急増、米国、欧州における地球温暖化対策等から原子力発電所の建設が推進されており、その結果、天然ウラン価格が高騰し、中長期的な需給逼迫も懸念され、国際的なウラン権益獲得競争が激化する中、天然ウランの調達が困難になる可能性がある。天然ウランの供給を海外に依存している我が国においては、その代替として回収ウランを利用することが不可避となる。

このため、六ヶ所再処理工場の本格操業にあたり、回収ウラン利用への機動的な対応可能性を確保しておく必要がある。

2. 研究開発目標

2-1 研究開発目標

2-1-1 全体の目標設定

本プロジェクトは、六ヶ所再処理工場からの回収ウランを再び軽水炉で利用するにあたり、既存の核燃料サイクル施設への影響等を把握し、転換プロセスを中心とした高性能で安全性、経済性に優れた回収ウラン利用技術を開発することを目的とするものである。表1に全体の目標を示す。

表1. 全体の目標

目標・指標	設定理由・根拠等
➤ 六ヶ所再処理工場からの回収ウランを再び軽水炉で利用するにあたり、既存の核燃料サイクル施設への影響等を把握し、転換プロセスを中心とした高性能で安全性、経済性に優れた回収ウラン利用技術を開発する。	➤ 将来の回収ウラン転換の事業化に備え、その事業の成立性を評価するため、準国産燃料と見なされる回収ウランの特性を検討し、回収ウラン転換プロセスを中心とした回収ウラン利用技術を構築することが必要である。

2-1-2 個別要素技術の目標設定

個別要素技術ごとの開発目標及びその妥当性を表 2 に示す。

表 2. 個別要素技術の目標

要素技術	目標・指標	設定理由・根拠等
(1) 国内外の回収ウラン取扱実績等に関する調査	各国の核燃料サイクル施設、原子炉等における回収ウランの取扱実績及び回収ウランの取扱いに関する技術的課題を調査する。	将来の事業化に備え、既に明らかとなった課題を把握した上で検討を行うため、これまでの国内外の回収ウラン取扱実績等に関して調査を行うことが必要である。
(2) 既存施設における回収ウランの受入条件に関する調査	既存の国内外の主要な転換、濃縮、再転換、成型加工、原子炉、各種輸送設備における取扱核種、線量等の受入条件等を調査する。	将来の事業化に備え、回収ウラン利用の各段階での施設の安全性担保の条件を検討するため、既存施設における回収ウランの受入条件に関して調査することが必要である。
(3) 炉心特性に与える影響に関する調査	回収ウランに含まれる U-236、核分裂生成物(FP)、マイナーアクチニド(MA)、 α 線放出核種等が炉心特性に与える影響を調査する。	将来の事業化に備え、回収ウランを用いた炉心の成立性を確認するため、不純物の核種が炉心特性に与える影響の有無に関して調査することが必要である。
(4) 国内外の転換プロセスに関する調査	回収ウラン酸化物を UF ₆ に転換する国内外のプロセス技術を調査する。	将来の事業化に備え、最新の技術動向を把握するため、国内外のプロセスに関して調査し、先行事例を把握することが必要である。
(5) 転換プロセスの検討	現状の調査結果を反映して、六ヶ所再処理工場からの回収ウランを六フッ化ウランに転換するプロセスの検討を行う。	将来の事業化に備え、最新の調査事項を反映した合理的な転換プロセスを実現するため、六ヶ所再処理工場からの UO ₃ に焦点を当てた UF ₆ へのふっ化転換プロセスの検討を行うことが必要である。

(6) 回収ウラン濃縮プロセスの検討	国内の既存のウラン濃縮施設（六ヶ所ウラン濃縮工場）で回収ウラン UF6 を取扱う場合の課題を検討する。	将来の事業化に備え、六ヶ所ウラン濃縮工場で回収ウランを取扱う場合の課題を把握するため、濃縮プロセスを検討することが必要である。
(7) 回収ウラン再転換プロセスの検討	濃縮された回収ウラン UF6 を国内の既存の再転換施設で取扱う場合の課題を検討する。また、劣化ウラン(UF6)の酸化固形化を新たに実施する場合のプロセスを検討する。	将来の事業化に備え、国内既存の再転換施設で回収ウランを取扱う場合の課題を把握するため、再転換プロセスを検討することが必要である。また、劣化ウラン転換の課題を把握するため、濃縮施設から発生する劣化ウラン(UF6)の酸化固形化プロセスの検討を行うことが必要である。
(8) 転換プロセスの事業化の概念検討	回収ウラン酸化物を UF6 に転換する回収ウラン転換プロセスの事業化に対する概念検討を行う。	将来の事業化に備え、回収ウラン転換事業の成立性を評価し、我が国の核燃料政策への影響を明確化させるため、回収ウラン酸化物を UF6 に転換する回収ウラン転換プロセスの事業化に対する概念検討を行うことが必要である。

3. 成果、目標の達成度

3-1 成果

3-1-1 全体成果

本研究開発は、平成 21 年度において国内外の回収ウラン取扱実績等、既存施設における回収ウランの受入条件、炉心特性に与える影響、国内外の転換プロセスの調査を実施し、その上で、平成 22 年度には、事業化すると仮定した場合におけるプラントイメージを策定し、全体として、いずれも当初目標どおりの成果が達成された。各項目の成果については以下に記載するとおりである。

3-1-2 個別要素技術成果

(1) 国内外の回収ウラン取扱実績等に関する調査

軽水炉での回収ウラン燃料利用はフランスとドイツで定常的に行なわれている。そのための回収ウラン転換と再濃縮はロシアに委託され、成型加工、組み立てがフランス、ロシア、ドイツで行われている。また、日本、ベルギー、スイス等の原子炉において、2003 年までに各々300～500tU 程度の回収ウラン再濃縮燃料が利用された。各国の軽水炉での回収ウラン利用実績を表 3 に示す。いずれも安全上の大きな問題は特に報告されていない。フランスでは、遠心分離法による新ウラン濃縮工場の建設が進んでおり、その一部を回収ウランの再濃縮用とするため、回収ウラン転換プラントの更新増強が検討されている。

表 3. 各国の回収ウラン利用状況

	2003年までに得た回収ウラン量 (tU)	2003年までの軽水炉利用回収ウラン量 (tU)	2004～2010年の軽水炉利用予定回収ウラン量 (tU)	備考
ベルギー	643	525	—	大半が再濃縮利用
	再処理はフランスに委託。回収ウランの利用は1989年に天然ウラン起源の濃縮ウランと混合利用。1994年から軽水炉の再濃縮利用が開始される。再濃縮はウレンコにて実施。ベルギーは現在再処理政策を止めており、今後の利用の予定はない。			
フランス	9600	2900	400～2800	大半が再濃縮利用
	1980年代に再濃縮利用に係る試験が実施され、1994年から商業規模の回収ウラン利用が開始。転換はピエールラット、再濃縮は当初ウレンコにて実施。1992年からは転換、再濃縮の一部がロシアに委託された。現在は全てロシアで実施。新規転換工場建設の予定あり。			
ドイツ	5078	2696	2467	大半が再濃縮利用
	再処理はフランス、イギリスに委託。1970年代にMOX母材として利用され、その後は試験的に軽水炉で再濃縮利用され、現在では定常的に利用されている。当初は、転換はフランスに委託、再濃縮はウレンコで実施。現在は、全てロシアで実施。			
日本	6060	335	未定	再濃縮利用
	海外への再処理委託で得た回収ウランのうち150tUがウレンコで再濃縮され国内で再転換・加工され発電所に装荷された。国内では人形峠の転換施設、濃縮施設を使用して回収ウランが処理され利用された。			
オランダ	270	270	60	混合利用
	再処理はベルギー（現在は廃止）、フランス、イギリスに委託。利用法は、ロシアの高濃縮ウランとの混合で用いられる。			
スイス	565	365	328	混合利用
	再処理はフランスとイギリスに委託。利用法は、ロシアの高濃縮ウランとの混合で用いられる。			

回収ウランの再濃縮利用では、天然ウランと同様の処理工程（転換、濃縮、再転換、成型加工）を経る。天然ウランの場合と比較し、処理過程の回収ウランの取扱いの問題点として以下の３点が上げられる。

- ・ U-232 の子孫核種による高エネルギー γ 線
- ・ U-234 の濃度増による α 比放射能の上昇
- ・ 微量含有する TRU, FP

回収ウランの γ 線は、回収ウランに含まれる U-232 の子孫核種である Tl-208 及び Bi-212 の影響により増加する。両核種の半減期が短いことから、その生成量は親核種である U-232 及び Th-228 の半減期により支配される。U-232 の崩壊系列を図 2 に示す。Th-228 は、再処理でウランから除去される他、UF₆ のガス化の際にも不揮発性のため除去される。この精製された回収ウランでは、Th-228 の濃度は徐々に上昇して U-232 の存在量と平衡になるまで約 10 年を要する（その後は U-232 の半減期に従って減少する）。図 3 に Th-228 の生成量の経時変化を示す。

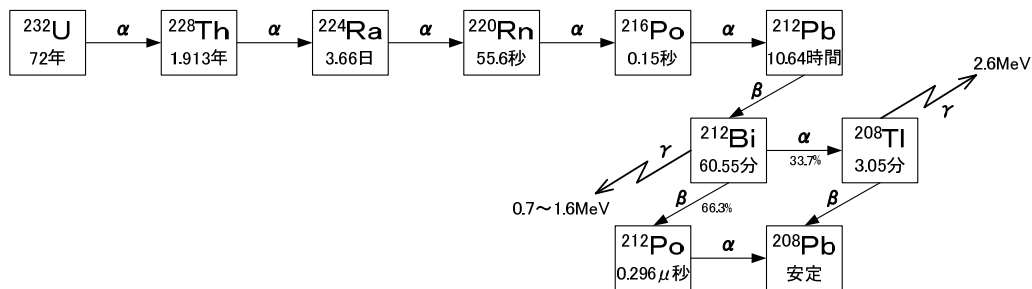
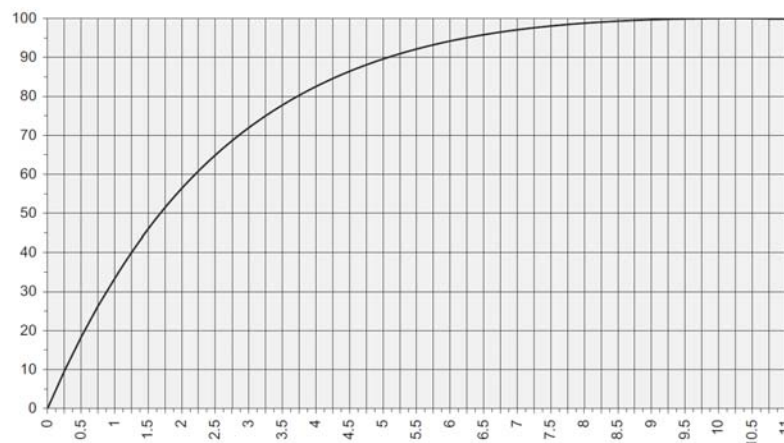


図 2. U-232 の崩壊系列



IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-4.4

“Use of Reprocessed Uranium: Challenges and Options”

図 3. Th-228 の生成量の経時変化

再処理施設におけるウラン精製直後やウラン濃縮施設、再転換施設における UF_6 の気化直後であれば γ 線の影響はないが、精製から時間を経た回収ウランは外部被ばくへの影響が大きくなる。回収ウラン転換工程ではウランがふっ化されて UF_6 （ガス）になる部分で残渣にトリウムの子孫核種が沈着し周囲の γ 線線量率が上昇する。人形峠における回収ウラン転換工程の転換反応炉周囲の γ 線線量率は天然ウラン転換時の約 6 倍の値となった報告がある。また、回収ウランの成型加工においても、日本の加工事業者の回収ウランの燃料集合体からの γ 線線量率は、天然ウランの場合と比較して有意に高い結果が得られたが、従事者の外部被ばく線量は各事業所とも 5mSv を超える実績はなかった。これは回収ウラン転換量が少量だったこと、回収ウランの再転換から入荷までの期間が短く線量の増加が小さかったこと、予め被ばく低減のための設備対策を施すことや作業時間の短縮などの配慮のためと考えられる。

回収ウランの α 比放射能は、U-234 の濃度が高いため天然ウランに比べ高いという特徴を持つ。特にウラン濃縮を経た再転換、成型加工の工程では U-234 の濃度が増加し、加工事業者の受入仕様によれば通常ウランより 2 倍強の α 比放射能を持つ。しかし、加工事業者が回収ウランを取扱った時期における内部被ばく結果は全て記録レベル未満であり通常ウランを取扱った年度と比較して大差はなかった。これは、回収ウラン取扱いに際しての従業員への教育、ウラン飛散防止の観点からの対策、回収ウラン取扱量が少なかったこと等によると考えられる。

回収ウランの TRU,FP は、再処理工程の精製度により存在量が決まるが、転換プロセス内の F_2 フッ化工程でウランと概ね分離されることが知られている。人形峠における試験では、元々原料 UO_3 中の存在量が少なく、転換プロセスのフィルタや吸着剤に対し精密な分析を行っても、多くが分析の下限値を下回った。また、回収ウラン取扱時における排気、排水実績も濃度管理目標値を十分に下回る結果であった。

（２）既存施設における回収ウランの受入条件に関する調査

国内では、既存施設の回収ウランの受入条件としては、安全上と燃料品質上のものがあり、ウラン同位体組成と TRU 濃度、FP 濃度、その他の項目について定められている。安全上のものは、事前の評価で回収ウランを扱う際の放射線安全が確保され環境への影響に問題がないことを確認した際の前提条件であり、その条件に基づいて法令上の取扱許可を得たものである。表 4 に一例として、人形峠の製錬転換施設とウラン濃縮原型プラント及び国内の再転換施設で回収ウラン実用化試験が行われた際の受入仕様を示す。安全評価に用いた各濃度は、東海再処理工場の処理対象燃料の燃焼条件を基に、初期濃縮度、燃焼度、冷却、貯蔵条件のパラメータを被ばく評価が保守的に

なるような条件で設定された。安全評価への影響が大きな事項として、U-232 濃度、U-234 濃度、TRU 濃度、FP 濃度が上げられる。

表 4. 回収ウラン受入仕様の一例

物質区分		値の種類	実用化試験時の仕様と実績				
元素種類区分	核種	製錬転換施設の原料UO3		ウラン濃縮原型プラントの原料回収UF6		既存再転換施設での濃縮回収ウラン	
		UO3受入仕様 (上限値)	東海再処理施設 UO3製品の 分析結果	受入仕様 (上限値)	平成7年度受入れ UF6原料分析値	受入仕様 (上限値)	平成6年から平成 18年の仕様実績値
ウラン同位体	U-232(ppb/U)	1.8	0.51~1.0	1.2	≤ 0.8	10	≤ 8
	U-234(wt%)	—	0.01468~1.0183	0.027	≤ 0.018	—	—
	U-235(wt%)	1.3	0.7926~1.1649	0.9~1.3	0.937~1.121	—	—
	U-236(wt%)	—	0.2156~0.3295	0.4	≤ 0.315	—	—
	U(α)	—	—	—	—	3.3 × 10 ⁵	2.1 × 10 ⁵
核分裂生成物	Zr-95 (Bq/gU)	37.0	< 2	—	—	—	—
	Nb-95(Bq/gU)	37.0		13	≤ 0.089	—	—
	Ru-106(Bq/gU)	194	< 4	100	≤ 8.9	10	≤ 4.6
	Sb-125 (Bq/gU)	37.0	< 1	—	—	2	≤ 1.2
	Cs-137(Bq/gU)	37.0	< 0.52	—	—	—	—
	Ce-144(Bq/gU)	37.0	—	—	—	—	—
	Tc-99 (Bq/gU)	—	—	—	≤ 0.15	10	≤ 1.8
超ウラン元素	Np-237 (Bq/gU)	66.7	0.0048~0.078	0.096	≤ 0.012	0.1	≤ 0.1
	Pu(α) (Bq/gU)	5.61	0.031~0.048	0.10	≤ 0.0007	0.1	≤ 0.043
	Pu(β) (Bq/gU)	—	1~2.4	—	≤ 1.9	3	≤ 2.1
	Am(α) (Bq/gU)	33.3	—	0.32	≤ 0.038	—	—
	Cm(β) (Bq/gU)	33.3	—	—	—	—	—

海外では、フランス、ドイツはロシアに回収ウランの転換、再濃縮を委託しており、ロシアとの間の原料となる回収ウランや再濃縮後の回収ウランのやり取りは ASTM 規格を基本に、施設の特性に応じて ASTM 規格を下回る基準値が適用される例が多い。U-232 濃度については、今後の軽水炉ウラン燃料の高燃焼度化に合わせて比較的高い濃度を許容する代りに、子孫核種によるγ線の影響を抑えるため、子孫核種を除去精製する等の対策も導入されている。

(3) 炉心特性に与える影響に関する調査

六ヶ所再処理工場からの回収ウラン組成等の条件を考慮し、再濃縮後のウラン燃料の組成を設定して、回収ウラン燃料を用いた炉心特性に与える影響を複数の許認可コードによる計算で評価した。その結果、PWR、BWR とも、再濃縮後の回収ウラン燃料を使用した炉心の成立性に問題はないことが確認できた。

なお、いずれも U-236 のために反応度が低下する結果となった。しかし、実際の BWR 燃料集合体では、種々の濃縮度ペレットで濃縮度分布をもたせているので、その調整により U-236 の影響を今回の評価結果よりも抑えることが可能である。PWR の評価では、濃縮度 4.8%の回収ウラン燃料はほぼ濃

縮度 4.1%の通常ウラン燃料と等価であるとの結果だった。図 4 に回収ウラン燃料と通常ウラン燃料の燃料集合体の無限増倍率の比較を示す。

回収ウラン中の FP, TRU の影響は、汎用モンテカルロ計算コード MCNP5 を用いて評価した。現行の加工事業者の受入仕様値内の濃度であれば、U-236 や U-234 による反応度低下の影響に比べて非常に小さいとの結果だった。

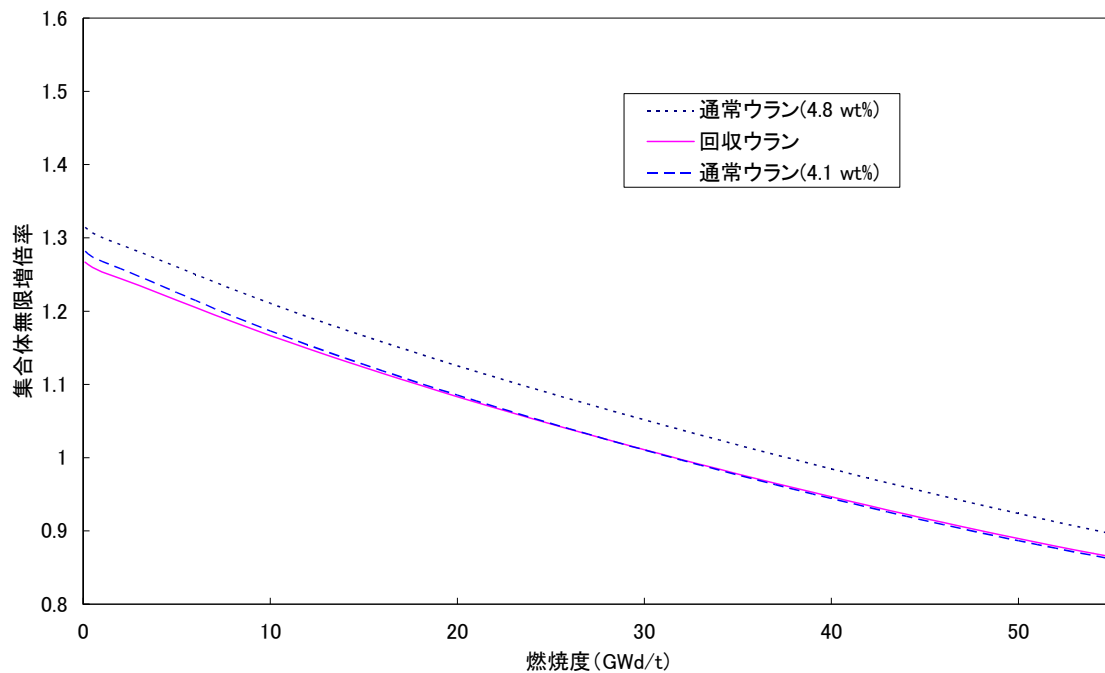


図 4. 燃料集合体無限増倍率 (PWR)

(4) 国内外の転換プロセスに関する調査

天然ウランと回収ウラン転換を調査した結果、商業施設の多くが UF_4 を経由するプロセスとなっており、 UF_4 を生産するまではフッ化水素でふっ化し、 UF_4 を UF_6 に転換する工程のみ高価なフッ素ガスを使用する 2 段ふっ化法であることがわかった。これに対し、ロシアではウラン酸化物とフッ素ガスとを直接反応させて六フッ化ウランに転換する技術である直接ふっ化法が実用化されており、反応装置はフレーム炉が使われていることがわかった。この転換プロセスは、設備構成は単純だが、フッ素ガスの取扱規模が大きくなる特性を有する。ロシアの経済性の高いウラン濃縮技術と相まって、全体として経済性を維持しているものと見られる。

表 5 に世界の天然ウラン転換工場（一部回収ウラン転換を含む）の概要を示す。表 6 に世界の回収ウラン転換工場の概要を示す。図 5 に 2 段ふっ化法と直接ふっ化法のプロセスの比較を示す。

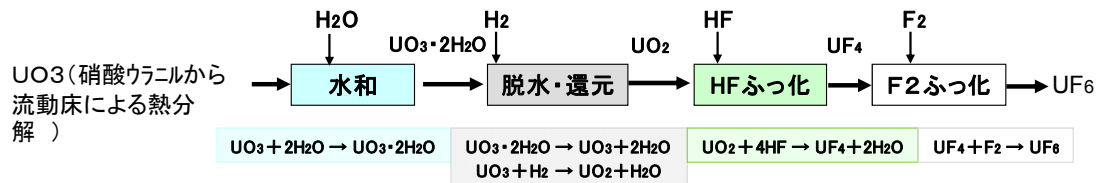
表 5. 世界の天然ウラン転換工場（一部回収ウラン転換を含む）の概要

国名 所有機関	運営会社	施設名	サイト名	操業開始	生産能力 (tU/y)	転換プロセス概要	備考
France AREVA NC	COMURHEX	Malvesi(UF ₄)	Malvesi	1959年	14,000	UOC→粗製UNH→精製UNH→ADU →UO ₃ →UO ₂ →UF ₄	
	COMURHEX	Pierrelatte (UF ₆)	Pierrelatte	1961年	14,000	UF ₄ →UF ₆	
	COMURHEX	INB-105	Pierrelatte	1972年	330	再処理UNH→ADU→UO ₃ →UO ₂ → UF ₄ →UF ₆	軽水炉回収ウラン転換用(稼働停止)
Canada Cameco	Cameco	Blind River Refinery	Blind River	1970年	18,000	UOC→粗製UNH→精製UNH→UO ₃	Port Hopeと Springfieldsへ UO ₃ を供給
	Cameco	Port Hope Conversion Facility	Port Hope	1970年	12,500	UO ₃ →UO ₂ →UF ₄ ・nH ₂ O→UF ₄ →UF ₆	
USA Honywell- GENERAL ATOMICS	ConverDyn	Metropolis / Converdyn	Metropolis	1959年	17,600	UOC→UO ₂ →UF ₄ →粗製UF ₆ → 精製UF ₆	
UK NDA	Westinghouse/UK	NDA Springfields Line 4 Hex Plant	Springfields	1968年	6,000	(UOC→粗製UNH→精製UNH) →UO ₃ →UO ₂ →UF ₄ →UF ₆	Camecoとの 転換契約
RF Rosatom	Atomenergoprom TVEL	Chepetsky Mechanical Plant (ChMP)	Glazov	不明	不明	UOC→(精製)→U ₃ O ₈ →UO ₂ ²⁺ →U ⁴⁺ →UF ₄ ・nH ₂ O→UF ₄	AECC, SCCへUF ₄ を 供給
	Atomenergoprom TENEX	Angarsk Electrolysis Chemical Combine	Angarsk	1954年	17,000	UF ₄ ・U ₃ O ₈ →UF ₆	実能力～9,000tU/y (ロシアIBR社調べ)
	Atomenergoprom TENEX	Siberian Chemical Complex (SCC)	Seversk (Tomsk)	1950年	8,000	UF ₄ ・U ₃ O ₈ →UF ₆	実能力～6,000tU/y (ロシアIBR社調べ)

表 6. 世界の回収ウラン転換工場の概要

国名／機関／規模	原料	転換プロセス	現況	プロセスの特徴・課題	備考
日本／ JAEA(旧PNC)人形峠 事業所／0.8tU/d	UO ₃ (粉) 東海再処理 工場より搬入 (流動層粉)		停止、 解体中	①流動層を多用することで施設のコンパクト化を図る ②HFフッ化を二段とすることにより転換率を高める ③F2フッ化を二段(フレーム炉+流動層)とすることにより転換率を高める ・転換率の向上(流動層反応装置) ・流動媒体が廃棄物化 ・稼働率の安定化と向上(水和、フッ化等) ・プロセス廃棄物の低減 ・リサイクル設備の増強 ・高線量の残渣の取扱いに伴う被ばく	
フランス／ Comurhex Pierrelatte ／350tU/y	UN (溶液) ラーグ再処理 工場より搬入		停止	①湿式粉末製造による活性粉製造 ・湿式法に伴い廃液発生量が多い ・高線量の残渣の取扱いに伴う被ばく	Pierrelatteに て、1,500t/y 規模の施設 が検討されて いる。
ロシア／ TENEX Siberian Chemical Complex／ 1,500tU/y	U ₃ O ₈ (粉) AREVA社より 搬入		運転中	①溶解・精製工程の導入に伴い、受入れ原料形態が広い(YC, U ₃ O ₈ , UO ₃ , UN溶液等) ②精製を行うことにより、FP, Uの子孫核種の放射線問題を軽減 ③U ₃ O ₈ の直接フッ化 ④F ₂ フッ化を二段(フレーム炉+F ₂ 回収炉)とすることにより転換率を 高める ⑤工程のシンプル化により工程内インベントリ小 ・直接フッ化によりフッ素の使用量が多く、電解設備能力大	転換コスト試 算例: 8USD/kgU
米国／ Oak Ridge Diffusion Plant／～3U/d	UO ₃ (粉) サバンナリバー、 ハンフォードより 搬入		解体済	①F ₂ フッ化を二段(フレーム炉+F ₂ 回収炉)とすることにより転換率を 高める ・高線量の残渣の取扱いに伴う被ばく	

2段フッ化プロセスフロー(日本)



直接フッ化プロセスフロー(ロシア)

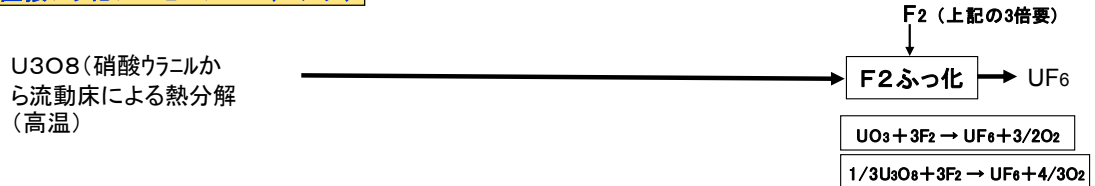


図 5. 2 段ふっ化法と直接ふっ化法のプロセスの比較

(5) 転換プロセスの検討

六ヶ所再処理工場からの回収ウランをウラン濃縮の原料である UF₆ に転換する転換プロセスの検討を行った。

まず、六ヶ所再処理工場の使用済燃料受入仕様に基づき、回収ウランの同位体組成の変動等を検討し、転換プロセスで扱う回収ウランの受入仕様を検討した。特に外部被ばくへの影響が大きい U-232 の生成量に着目して設定した。表 7 に回収ウランの受入仕様の検討結果を示す。過去の人形峠等で行われた技術開発時の燃料より燃焼度が高いこと等により、U-232 濃度は約 3ppb/U と高い数値になり、その後の回収ウラン燃料の製造過程における従事者の外部被ばくへ大きな影響を与えることが明らかになった。

表 7. 回収ウランの受入仕様

物質区分		値の種類	転換プロセス (検討案)		実用化試験時の人形峠製錬転換施設の原料 UO ₃	
元素種類区分	核種		UO ₃ 受入仕様	UO ₃ 受入仕様 (上限値)	東海再処理施設 UO ₃ 製品の分析結果	
ウラン同位体	U-232(ppb/U)		3.13 (*1)	1.8	0.51~1.0	
	U-234(wt%)		特に規定せず	-	0.01468~1.0183	
	U-235(wt%)		1.6 (*2)	1.3	0.7926~1.1649	
	U-236(wt%)		特に規定せず	-	0.2156~0.3295	
	U(α)		特に規定せず	-	-	
核分裂生成物	Zr-95(Bq/gU)		≒ 0 (*3)	37.0	< 2	
	Nb-95(Bq/gU)		≒ 0 (*3)	37.0		
	Ru-106(Bq/gU)		1.04 × 10 ⁴ (*3)	194	< 4	
	Sb-125(Bq/gU)		3.06 (*3)	37.0	< 1	
	Cs-137(Bq/gU)		104 (*3)	37.0	< 0.52	
	Ce-144(Bq/gU)		30.8 (*3)	37.0	-	
	Tc-99(Bq/gU)		208 (*3)	-	-	
超ウラン元素	Np-237(Bq/gU)		128 (*3)	66.7	0.0048~0.078	
	Pu(α)(Bq/gU)		128 (*3)	5.61	0.031~0.048	
	Pu(β)(Bq/gU)		3.52 × 10 ³ (*3)	-	1~2.4	
	Am(α)(Bq/gU)		0 (*3)	33.3	-	
	Cm(α)(Bq/gU)		0 (*3)	33.3	-	

(*1) ウラン同位体組成の変化の検討結果による (*2) 六ヶ所再処理工場の仕様 (*3) 六ヶ所再処理工場の脱硝工程の FP・TRU 移行率による計算結果

六ヶ所再処理工場では、最終工程であるウラン脱硝工程で流動層式反応装置を用いた熱分解反応方式を用いているため、回収ウラン (UO_3) は緻密で固い球状粒子であり、粒径も $150\sim 300\mu\text{m}$ の比較的粒の大きいものである。回収ウラン転換プロセスに関し、採用し得る直接ふっ化法と2段ふっ化法の2つの方法について、六ヶ所再処理工場からの UO_3 の特性に適した方式を検討した。

2段ふっ化法では、緻密な UO_3 粒子を原料とする場合、 UO_3 粒子と反応ガスの反応性を向上させるために、 UO_3 の水和前処理を行う必要がある。水和反応により結晶水を付加することで UO_3 粒子にクラックを生じさせ比表面積を増加させることで反応性を上げる。その後脱水還元工程、HF ふっ化工程、 F_2 ふっ化工程を経て UF_6 を生成する。

直接ふっ化法では、ロシアでは原料の U_3O_8 を硝酸ウラニル溶液から高温で熱分解して得ているため、 U_3O_8 が活性であり、これをそのままフレイム炉での F_2 ふっ化反応に供給している。六ヶ所再処理工場の緻密で粒径の大きい UO_3 を原料とする場合には、フレイム炉での処理前に、焙焼及び粉碎によって UO_3 を微粉化することが必要である。なお、直接ふっ化法では、2段ふっ化法に比べて3倍の F_2 ガス量が必要となる。

図6に六ヶ所再処理工場の回収ウラン (UO_3) に適用する場合の2段ふっ化法と直接ふっ化法のプロセスフローの比較を示す。

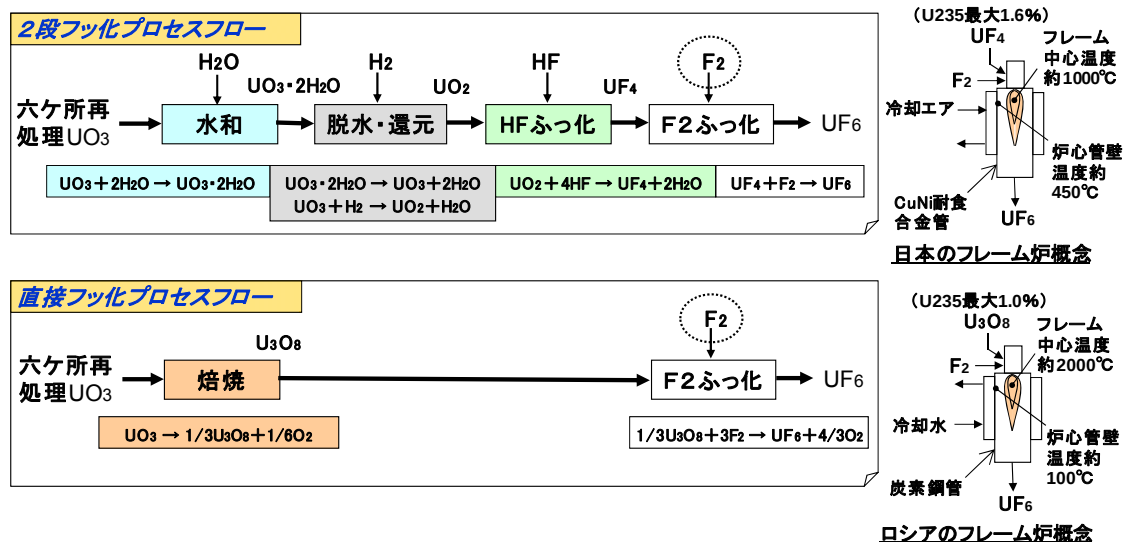


図6. 2段ふっ化法と直接ふっ化法のプロセスフローの比較
(六ヶ所再処理工場の回収ウラン (UO_3) に適用する場合)

表 8 に適用プロセスを考えるにあたっての検討事項のまとめを示す。主工程の設置エリア、運転に関する項目では、2 段ふっ化法がウランを取扱う工程が多いことに対し、直接ふっ化法は単純な工程構成となる。一方、F₂ 電解工程は直接ふっ化法の F₂ 使用量が 2 段ふっ化法の 3 倍である。主工程のユーティリティでは、2 段ふっ化法の水和前処理工程、脱水・還元工程、HF ふっ化工程の反応器の加熱等に要する電力と、直接ふっ化法の粉碎、焙焼炉の加熱等に要する電力が差異として現れ、2 段ふっ化法の消費電力量が若干多くなる。一方、F₂ 電解工程では 2 段ふっ化法の方が F₂ 電解の電力が少なくなる。

表 8. 適用プロセスを考えるにあたっての検討事項のまとめ

	直接ふっ化（改良）	2 段ふっ化
プロセスフロー	焙焼、粉碎 → F ₂ ふっ化 ・ 六ヶ所再処理工場の UO ₃ に対応するため原料の微粉化が必要（改良） ・ フッ素分は全量 F ₂ 形態で供給	水合 → 脱水還元 → HF ふっ化 → F ₂ ふっ化 ・ フッ素分は 2/3 を HF 形態、1/3 を F ₂ 形態で供給
技術的な観点	・ F ₂ ふっ化工程での微粉の取扱いは国内技術は無い ・ ロシア等の設計、運転関連の情報量少	・ 国内で開発された方法 ・ 各工程での反応効率の向上が基本となるが、最適運転条件による長期運転の確証データは少
設備・（建屋） + は負荷の程度を半定量的に示す	・ 焙焼工程（粉碎） ++ ・ F₂ふっ化工程（UF₆捕集） + *1 ・ 電解工程 ++++++	・ 水合工程 +++++ ・ 脱水・還元工程 + ・ HF ふっ化工程 + ・ F₂ふっ化工程（UF₆捕集） ++ ・ 電解工程 ++
運転 + は負荷の程度を半定量的に示す	運転員（保守含） ++	運転員（保守含） +++
	副原料 無水 HF ガス *2 ++	副原料 水素ガス（H₂） + 無水 HF ガス *2 ++
	電力・ユーティリティ +++++	電力・ユーティリティ +++++
	廃棄物 未反応 F₂ 固定化 + 排気中 UF₆ 固定化 + 不純物吸着剤 + 使用済流動媒体 +	廃棄物 水素ガス（H₂） 燃焼し排気 + 未反応 F₂ 固定化 + 排気中 UF₆ 固定化 + 不純物吸着剤 + 使用済流動媒体 +
運転性、メンテナンス性など	・ 粉碎後は微粉末（装置への供給）又は F₂ふっ化反応残渣のハンドリング性に問題あり。 ・ F₂ふっ化工程のフレームタワーが高温化するため耐久性に問題あり。 ロシアは以下の方策により保守時の外部被ばくを減少させている。 ① 転換直前に脱硝し U-232 子孫核種の影響を排除 ② 天然ウランとの混合処理	・ UO₃ の流れ性は良好であるが、UF₄ 生成までは原料 UO₃ の粒径を維持すると考えられる。

*1: 臨界管理上、第 1 コールドトラップの基数は直接ふっ化法の方が多い。

*2: HF 使用量は両法で F₂ 電解を含めほぼ同量を使用するため差異はほとんどない。

回収ウラン転換プロセスの構築にあたっては以下の点に留意が必要である。

- ・ 国内における 2 段ふっ化法の技術は、最適な運転条件の下での長期間の稼働による実証には至っていないが、国内に 2 段ふっ化法の技術実績が豊富である。
- ・ 直接ふっ化法は、日本で経験のない技術的要素の多いことが問題として上げられるが、今後の研究開発による確証で対応が可能と考えられる。

回収ウラン転換プロセスの概念検討では、国内の技術実績を活用した検討

が可能となる2段階法によるものとした。

転換工程における回収ウラン特有の不純物の除去プロセスについては国内外の研究、転換運転時の実績等を調査検討し、人形峠における開発においても使用したフッ化マグネシウム (MgF_2) を吸着剤としこれに UF_6 ガスを通気することで FP、TRU 等を除去するプロセスとして選定した。

(6) 回収ウラン濃縮プロセスの検討

既存の六ヶ所ウラン濃縮工場にて回収ウランを取扱う場合、最も留意すべきは U-232 子孫核種に起因する放射線の影響に伴う種々の課題である。作業頻度の高い UF_6 シリンダ類の取扱いにおける従事者被ばく線量は約1桁増加することから、被ばく線量低減のために線源となる U-232 の子孫核種の生成期間短縮や廃棄物の保管場所、設備の遮へい等の対策を行う必要がある。また、一般公衆の線量も増加するため、線源となるウランや廃棄物の保管場所への考慮、貯蔵中の UF_6 シリンダ類に遮へい等を講じる必要がある。

図7に発生回収室、均質室、ウラン貯蔵庫における1人あたり年間の従事者の被ばく量を評価した結果を示す。

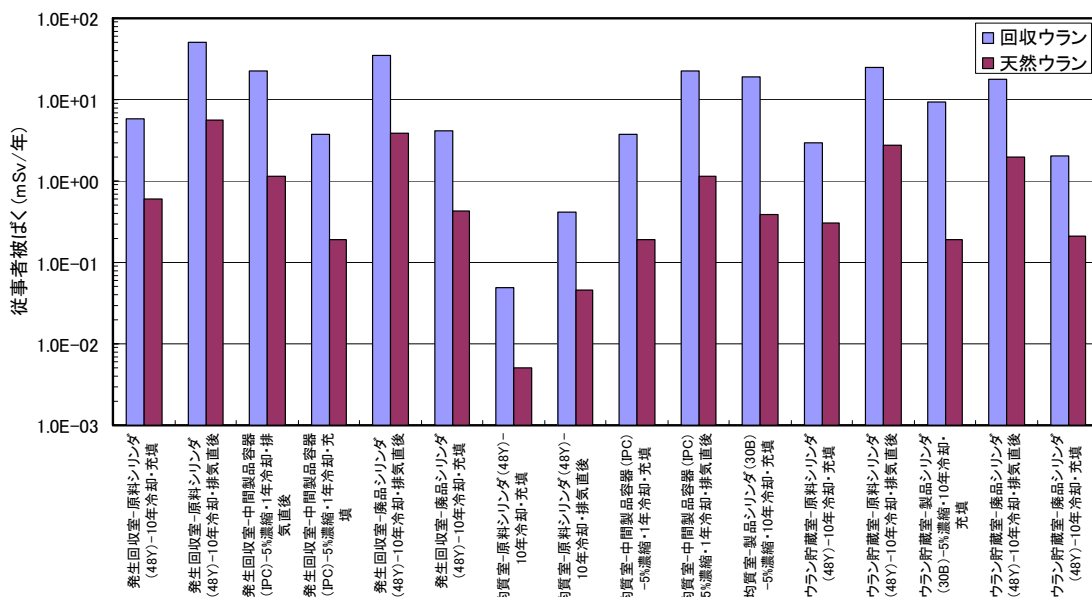


図7. 従事者被ばく線量推定結果

従事者の被ばく線量を低減させる方策案を以下に示す。

- ・ U-232 子孫核種の多くは不揮発性で、濃縮工場で回収ウランの原料 UF_6 を発生させた後にはシリンダに残留する。このため、空となった原料シリンダに残留する子孫核種の影響を最小限にする措置が必要である。原料シリンダの詰め替え（空シリンダは転換工程への返却）及び転換工場から短期間で濃縮工場へ運び、短時間で濃縮することで子孫核種の生成

を極力抑える運転計画が考えられる。

- ・ UF₆ シリンダ類搬送設備の遠隔自動化、UF₆ シリンダの配管接続時の自動脱着化、排気処理の NaF トラップの充填物の遠隔交換システム化などが必要である。
- ・ 濃縮 UF₆ を冷却捕集する製品コールドトラップ内には、次第に不揮発性の U-232 子孫核種が蓄積していくため、装置回りに遮蔽措置を講じられるよう、設置間隔を離したりする等の配置設計が必要である。
- ・ 廃品 UF₆ シリンダは、保管中の U-232 子孫核種の生成を極力抑制するため、原料 UF₆ の空シリンダ（子孫核種が残留）を転用せずに、廃品専用シリンダを使用する必要がある。
- ・ 濃縮 UF₆ を充填した履歴のある中間貯蔵容器を洗浄した洗浄廃液には、U-232 子孫核種が多く含まれているためその取扱に注意する必要がある。

図 8 に従事者被ばく低減措置適用案を図示した。

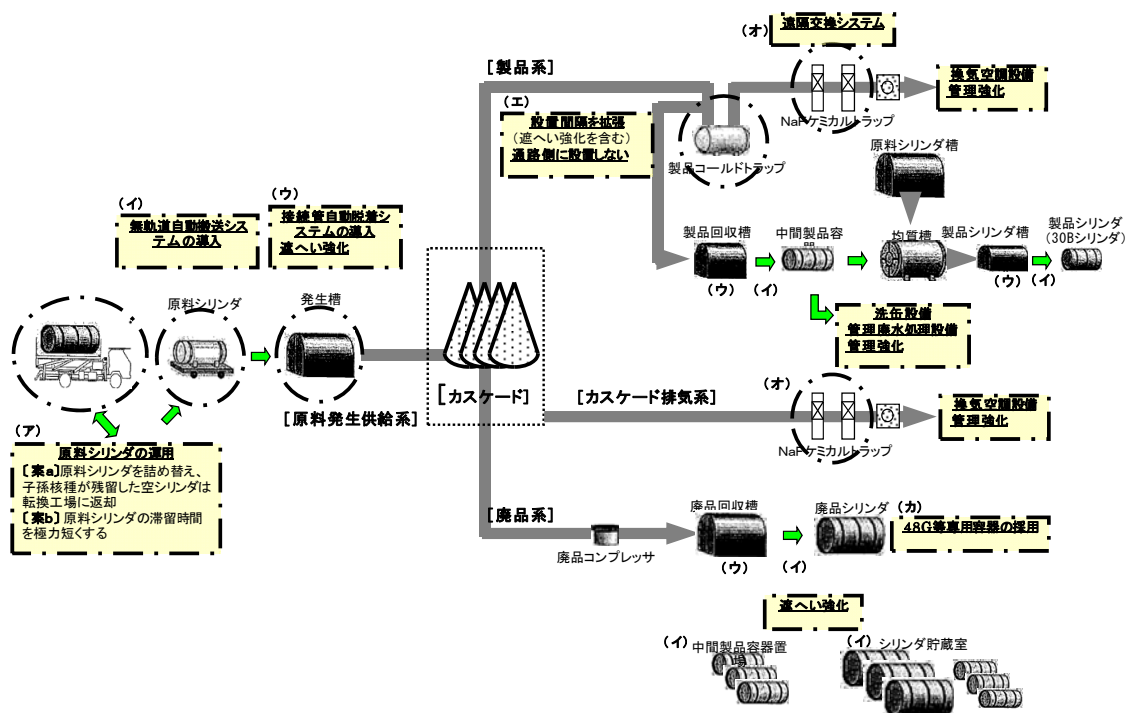


図 8. 従事者被ばく低減措置適用案

なお、回収ウラン取扱いにおける臨界管理上の制約については、従来の天然ウラン取扱い時並の管理で対応可能である。外部放射線に対する影響への対策の他に、設備的には回収ウランの U-235 濃度が天然ウランより高いことを考慮した最適なカスケード設備設計が必要となるが、現在のウラン濃縮工場を大幅に変更することなく回収ウランの再濃縮は可能であると判断される。

(7) 回収ウラン再転換プロセスの検討

回収ウラン再転換プロセスについては、現行の再転換工場で回収ウランを取り扱う場合、現行許可量に対し最大 7.5 倍の処理能力を必要とし特に外部放射線の影響が大きくなる。U-232 濃度が最大 20ppb/U と現行の受入仕様値の約 2 倍になる。

これに対し、現行の敷地境界外の放射線量は管理目標値（ $50\mu\text{Sv/y}$ ）に対して余裕がないため、抜本的な外部放射線対策が不可欠であり、既存再転換施設での回収ウラン取扱いは困難であることがわかった。

U-232 の子孫核種の影響を排除するためには、以下の方策が考えられる。

- ・ウラン濃縮工場で充填された原料濃縮回収ウランシリンダは 1 年以内に再転換施設に搬入させるよう輸送
- ・再転換施設に搬入後、1 年以内に再転換、成型加工を終えて出荷
- ・設備の遮へい対策、設備の自動化、成型加工期間短縮のための綿密な工程管理

劣化ウランの酸化固形化については、国内での開発技術を含む採用し得る三つの乾式プロセスについて、技術的な観点、 U_3O_8 製品の品質（純度）、フッ素分回収の容易性、技術の開発度などを検討・整理した。

図 9 に国内の劣化ウラン累積発生量の予測を示す。

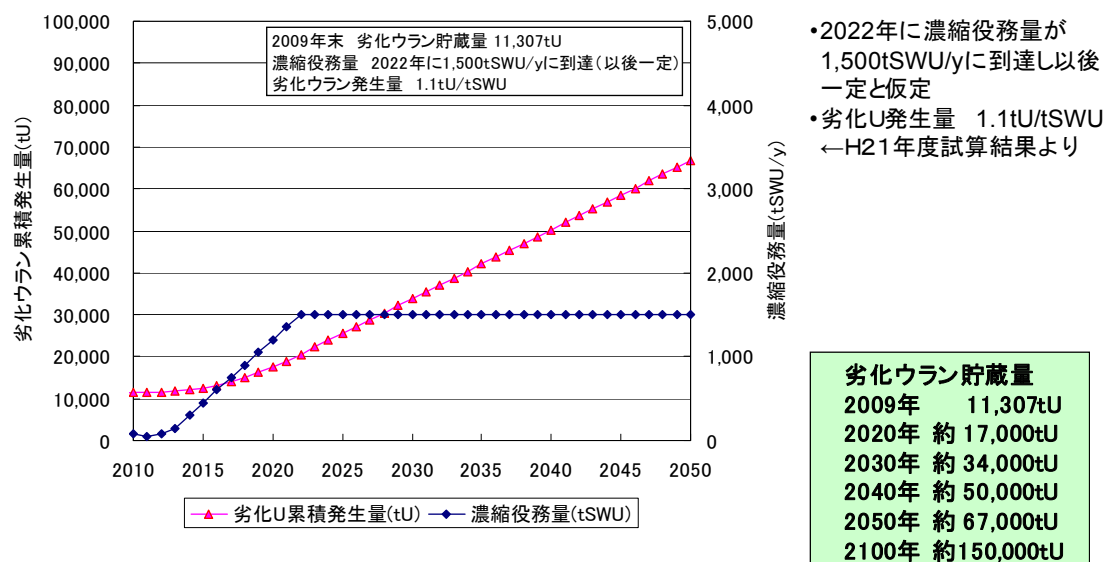


図 9. 国内の劣化ウランの累積発生量の予測

劣化ウランの再転換プロセスの選定においては、酸化固形化の U_3O_8 製品が長期貯蔵に適したものであるかを重要視すべきである。したがって、かさ密

度が高く貯蔵体積が小さくなり、且つ容器への充填等が円滑となるよう流動性の良い製品粉体が得られる技術が求められる。表 9 に劣化ウランの酸化固形化プロセスの特徴を示す。

表 9. 劣化ウラン酸化固形化プロセスの特徴

方法	プロセス概要	粉末形状	特徴	実績
フランス AREVA NC		かさ密度 1g/cm ³ 圧縮後 3g/cm ³ 程度	・燃料用プロセスの応用 ・加水分解反応が高温 ・粉末が微粉で低密度 - フランス法: 圧縮要 ・水素の利用※	・1984年より処理 ・約320,000tUF₆処理(2009年まで) ・ロシアに技術提供(2009年末に竣工) ・イギリスにも導入される見通し
アメリカ UDS		かさ密度 2～3 g/cm ³	・貯蔵効率、取出性を考慮し、高密度、高流動性の粉末製造をターゲットに開発 ・加水分解反応が低温 ・副原料はスチームのみ	・約22,000tU/y処理(2施設合計) ・ポーツマス: 2009年9月運転開始 ・バデューカ: 試運転
日本 MMC		かさ密度 4g/cm ³		・パイロットプラント開発のみ

実績の観点からは、フランス方式が先行しているが、この方法では、流動性の良い高密度の U_3O_8 を得ることができず、製品粉体の密度調整のために圧縮処理を必要とする。

アメリカ方式と日本方式は、流動層反応塔を用いることにより流動性の良い高密度の粉体が得られる。アメリカ方式では、1 塔の流動層反応塔で全体の反応を進めるため工程が簡素になるメリットがある。まだ商業運転が始まったばかりであるため今後も注視する必要がある。日本方式はパイロット規模ながら反応ガスに水素を使わない利点がある。

いずれのプロセスも一長一短があるが、国内での実績や経験等を踏まえ、日本方式を採用し施設の検討を行った。処理規模は、1,900～2,000tU/y 程度に設定するのが妥当であるが、より確実な施設運転を目指し、運転開始から 20 年間は 1,000tU/y (5tU/d、確証試験の処理規模の 5 倍) とし、その後 2,200tU/y (11tU/d) に増強することが適当と判断された。処理プロセスは、UF₆ 発生工程、酸化固形化工程、シリンダ洗缶工程、U₃O₈ 貯蔵工程、HF 回収工程、オフガス/廃液処理工程から成る。図 10 に劣化ウランの酸化固形化工程のプロセスフローを示す。

劣化ウラン酸化固形化プロセス及び濃縮 UF₆ 再転換プロセスからは希フッ酸が副生するが、フッ素資源の海外への依存度が高い環境下では、これを無水フッ酸として回収ウラン転換に再利用することがフッ素資源の有効利用の観点から合理的と判断された。なお、国内では、希フッ酸を無水フッ酸と

するプロセスはパイロットプラント規模で確立しており、希フッ酸を一般産業界の無水フッ酸製造の原料である固体のフッ化カルシウムに固定化する技術については実験室規模の開発実績がある。

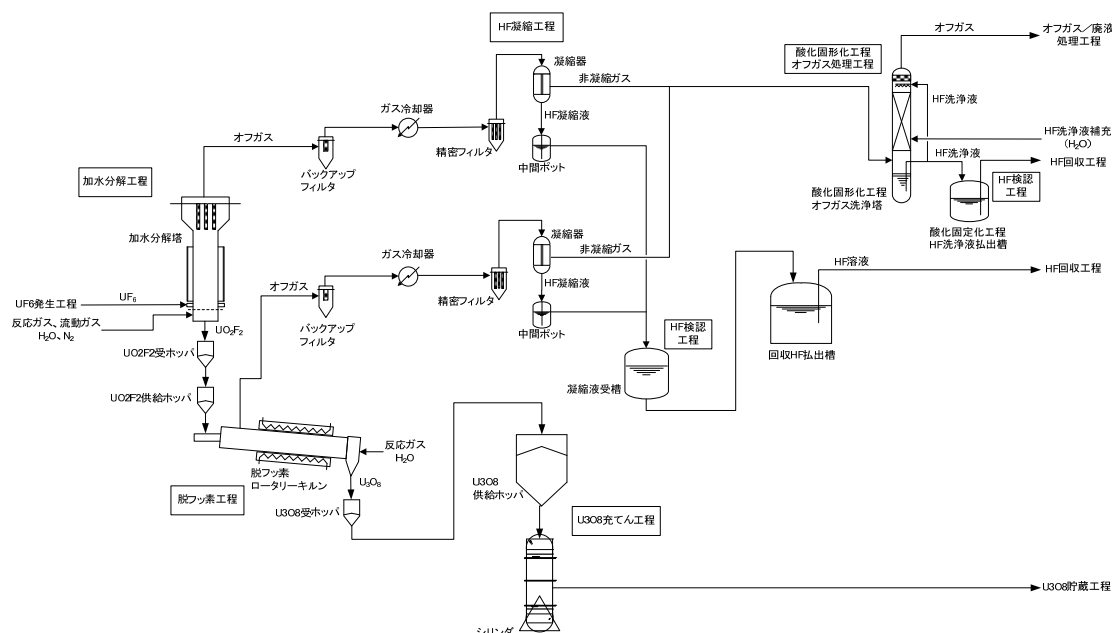


図 10. 劣化ウランの酸化固形化工程のプロセスフロー

（８） 転換プロセスの事業化の概念検討

2 段ふっ化法プロセスに基づく 800tU/年の処理能力を持つ回収ウラン転換施設について概念検討し、建設費と運転費を試算した。

プロセス設計条件は以下のとおりである。

- ・原料：六ヶ所再処理工場のウラン脱硝施設で生成する三酸化ウラン（ UO_3 ）
U-235 濃度は 1.6%以下
- ・製品：六ふっ化ウラン（ UF_6 ）
- ・処理能力：800t/年
- ・採用技術：2 段ふっ化法

回収ウラン転換施設の構成は以下のとおりである。

- ・ウランふっ化施設：原料 UO_3 を水和前処理、脱水還元、 HF ふっ化及び F_2 ふっ化を行うことにより UF_6 に転換する各工程設備と廃ガス処理設備、廃液処理設備及び試薬・ユーティリティ設備を設置する。
- ・ F_2 ガス製造施設： F_2 ふっ化に必要な F_2 ガスを製造する電解設備、廃液処

理設備及び試薬・ユーティリティ設備を設置する。

- ・ 六フッ化ウラン貯蔵施設：ウラン六フッ化施設において生成した六フッ化ウラン（ UF_6 ）が充填されたシリンダを1年分貯蔵する。
- ・ ウラン六フッ化施設附属管理棟：プラント内各設備の制御設備を設置するとともに、施設全体の管理事務等を行う。

図 11 には、上記のうち、ウラン六フッ化施設と F_2 ガス製造設備の概略フローを示す。

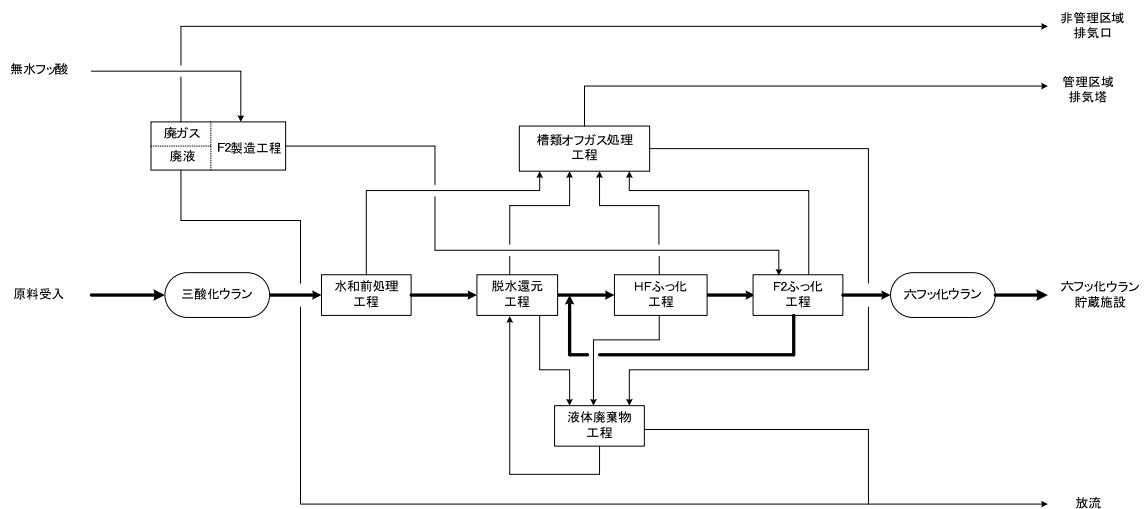


図 11. ウラン六フッ化施設と F_2 ガス製造設備の概略フロー

水和前処理工程は、後続の工程におけるウラン粉末の反応性を高めるため、 UO_3 粉末に純水を添加し、含水ウラン粉末（ $UO_3 \cdot 2H_2O$ ）とする工程である。脱水還元工程は、水和前処理工程から受入れた含水ウラン粉末（ $UO_3 \cdot 2H_2O$ ）を流動層型の脱水還元塔において H_2 ガスで脱水還元し、 UO_2 粉末とする工程である。HF 六フッ化工程は、脱水還元工程より受入れた UO_2 粉末を流動層型の HF 六フッ化塔において HF ガスにより HF 六フッ化し、 UF_4 粉末とする工程である。F2 六フッ化工程は、HF 六フッ化工程より受入れた UF_4 粉末をフレーム炉型及び流動層型の F_2 六フッ化塔にて F_2 ガスにより F_2 六フッ化を行い UF_6 ガスとし、 MgF_2 トラップにて放射性不純物を除去後、コールドトラップにて UF_6 を冷却・捕集する工程である。図 12 に一例として、 F_2 六フッ化工程の工程概略図を示す。また、表 10 に回収ウラン転換プロセスの経済性検討の条件をまとめる。

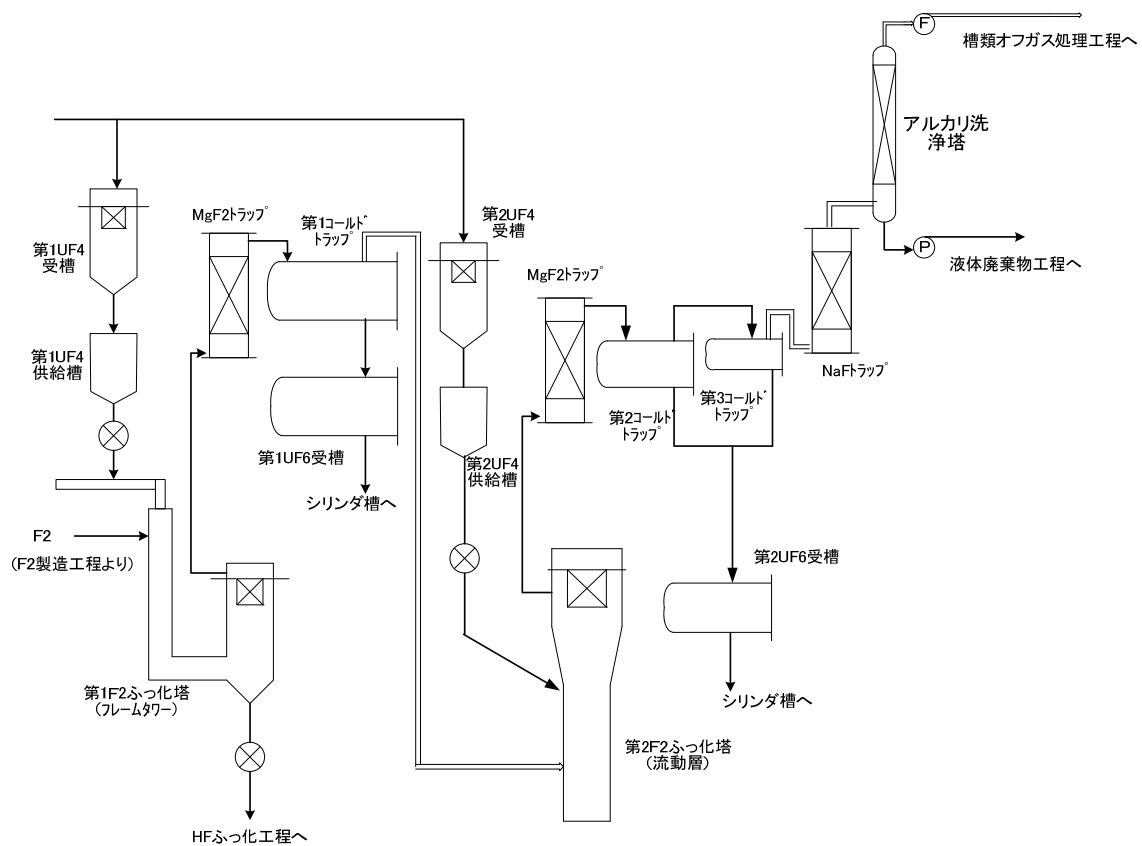
図 12. 回収ウラン転換プロセスの工程概略図（一例：F₂ fluorin 化工程）

表 10. 回収ウラン転換プロセスの経済性検討の条件

事項	内容
機器配置	ウランふっ化施設と F2 製造施設の延べ床面積はそれぞれ、1,670m ² 、1,220m ²
ユーティリティ	運転に必要な試薬、ユーティリティ及び物品を集計
運転人員	運転に必要な人員を検討 ➤ 運転グループ 90 名（5 班 3 交代） ➤ 管理グループ 11 名 ➤ 安全管理グループ 15 名 ➤ 工務グループ 11 名
廃棄物発生量	操業廃棄物を検討

- ・建設費：上記施設に関連する設備費は約 330 億円と見積もられた。さらに、ユーティリティ設備、廃液処理設備、管理棟等を含め、建屋建設費は建屋付帯設備（換気、空調、照明等）を含め約 150 億円と試算された。建屋の解体処分費は対象外とした。この結果、建屋費と設備費の合計は

約 480 億円と見積もられた。

- ・ 操業費：操業費は、減価償却費、消耗品（試薬、物品）費、ユーティリティ費、労務費、修繕費、固定資産税、損害保険料、一般管理費、設備資金利子、運転資金利子、操業廃棄物処理処分費の原価要素を集計した。減価償却費は、設備と建屋の税法上の耐用年数を考慮し建設費から算出した。回収ウラン転換施設の操業により発生する操業廃棄物の処分費用は、余裕深度処分相当、浅地中コンクリートピット処分相当、産業廃棄物の処分相当等の種類別に単価を設定し試算した。年間操業費は約 45 億円／年となった。

上記結果より、単位ウラン処理量あたりの単価を計算すると、年間処理量は 800t であるので、約 10 百万円／tU（約 10,000 円/kgU）となった。これに対し、天然ウラン UO_2 価格は約 200\$/kgU である。なお、原子力発電単価 5.9 円/kwh のうち、燃料サイクルに関する内訳（ UF_6 、濃縮、再転換・成型加工の割合）は、各々、3%、5%、5%と小さく、回収ウラン利用の原子力発電コストへの影響は限定的で、今回の検討で得た回収ウラン転換コストを前提にしても回収ウラン利用の事業化に与える影響は軽微である。

3-1-3 特許出願状況等

表 11. 特許・論文等件数

要素技術	論文数	論文の被引用度数	特許等件数（出願を含む）	特許権の実施件数	ライセンス供与数	取得ライセンス料	国際標準への寄与
	0	0	0	0	0	0	0
計	0	0	0	0	0	0	0

表 12. 論文、投稿、発表、特許リスト

	題目・メディア等	時期
論文	なし	
投稿	日本原子力学会再処理リサイクル部会「核燃料サイクル」第3章ウラン濃縮, 3-1「ウラン転換」	H25.2
発表	なし	
特許	なし	

3-2 目標の達成度

要素技術ごとに設定した目標・指標について、それぞれの成果、達成度を表5に示す。

各要素技術とも、設定された指標に対し所定の成果を得ており、本プロジェクト全体として目標を十分満足しているものと考えられる。

表 13. 目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標	成果	達成度
(1) 国内外の回収ウラン取扱実績等に関する調査	各国の核燃料サイクル施設における回収ウランの取扱い実績、軽水炉における回収ウランの利用実績及び回収ウランの取扱いに関する技術的課題を調査する。	各国の核燃料サイクル施設における回収ウランの取扱い実績や軽水炉における回収ウランの利用実績について調査・整理した。 回収ウランのγ線に起因する事項、回収ウランの高いα放射能によって影響される事項、回収ウランの微量不純物放射能によって影響される事項など、各国の事例を調査するとともに、回収ウランの特性と関連付けて整理した。	達成
(2) 既存施設における回収ウランの受入条件に関する調査	既存の国内外の主要な転換、濃縮、再転換、成型加工、原子炉、各種輸送設備における取扱核種、線量等の受入条件等を調査する。	既存の国内外の主要な転換（人形峠）、濃縮（人形峠）、再転換・成型加工（4施設）、発電用原子炉、回収ウラン酸化物、UF₆、回収ウラン燃料集合体の輸送設備における取扱核種、線量などの受入条件及び受入上限値を調査した。同様に、海外の転換（仏、露、英）、濃縮（独、英、蘭）、再転換・成型加工（仏、露、独）等における取扱核種、線量などの受入条件及び受入上限値を調査した。	達成

(3) 炉心特性に与える影響に関する調査	回収ウランに含まれる U-236、核分裂生成物(FP)、マイナーアクチニド(MA)、 α 線放出核種等が炉心特性に与える影響を調査する。	六ヶ所再処理工場からの回収ウラン組成等の条件を考慮し、再濃縮燃料の組成を設定して、回収ウラン燃料を用いた炉心特性に与える影響を複数の許認可コードによる計算で評価し、PWR、BWR とも、濃縮回収ウラン燃料を使用した炉心の成立性に問題ないことを確認した。	達成
(4) 国内外の転換プロセスに関する調査	回収ウラン酸化物を UF ₆ に転換する国内外のプロセス技術を調査する。	回収ウラン酸化物を UF ₆ に転換するプロセスについて、日 人形峠、仏 COMURHEX、露 SCC 等のプロセスフローと各工程の要素技術、反応機器の特徴等を調査した。また、海外の主要な天然ウラン転換工場（仏 COMURHEX、加 CAMECO、米 ConverDyn、英 Westinghouse、露 SCC 等）の情報も調査し、それぞれのプロセスの特徴や課題等に関する情報を整理した。	達成
(5) 転換プロセスの検討	六ヶ所再処理工場からの回収ウランを六フッ化ウランに転換するプロセスの検討を行う。	六ヶ所再処理工場の使用済燃料受入仕様に基づき、回収ウランの同位体組成の変動等を検討し、転換プロセスで扱う原料回収ウランの受入仕様を検討した。原料の運搬と取出し、転換プロセスへの供給も含めて、六フッ化ウラン (UF ₆)ガスの形態にふっ化転換するプロセスを検討し、国内の技術実績の活用の観点から 2 段ふっ化法を選定した。	達成

(6) 回収ウラン濃縮プロセスの検討	国内の既存のウラン濃縮施設（六ヶ所ウラン濃縮工場）で回収ウランUF6を取扱う場合の課題を検討する。	六ヶ所ウラン濃縮工場において、原料として回収ウランUF6を取扱う上で課題となる事項を処理工程毎に抽出し、外部遮蔽対策、濃縮前後の待機時間の短縮等の対策の必要性を明らかにした。	達成
(7) 回収ウラン再転換プロセスの検討	濃縮された回収ウランUF6を国内の既存の再転換施設で取扱う場合の課題を検討する。また、劣化ウラン(UF6)の酸化固形化を新たに実施する場合のプロセスを検討する。	濃縮された回収ウランを国内の既存の再転換施設で再転換する場合の回収ウラン取扱いによる課題について検討し、遮蔽対策、設備の自動化や成型加工時間短縮等の対策の必要性を明らかにした。 劣化ウラン酸化固形化プロセスについて、国内の劣化ウラン貯蔵量、今後の発生量想定から、施設の規模、処理プロセスを検討した。	達成
(8) 転換プロセスの事業化の概念検討	回収ウラン酸化物をUF6に転換する回収ウラン転換プロセスの事業化に対する概念検討を行う。	(5)で選定された転換プロセスによる転換施設の施設規模、機器構成、運転に必要な試薬、人員などの情報を整理し、2段階法に基づく800tU/年の処理能力を持つ回収ウラン転換施設について概念検討した。 回収ウラン利用における転換プロセスの成立性の検討を行うとともに、回収ウランの転換から再濃縮、再転換、成型加工を経て原子炉へ装荷されるまでの全工程について事業化に対する課題を整理した。	達成

4. 事業化、波及効果について

4-1 事業化の見通し

回収ウランは、当面「戦略的備蓄」として位置付けており、喫緊の課題として事業化への見通しはないが、国内利用にあたって、導入に関する諸課題を整理し、課題解決を図っておくことで、今後の回収ウラン利用への機動的な対応可能性を明らかにしておくことが重要である。

表 14. 事業化に対する課題の抽出

事項	内容
転換	年間 800t の回収ウランを UF_6 に転換できる能力を持つ新転換工場が必要である。国内の技術開発経験から 3 倍程度のスケールアップとなり特に困難なものではないが、これまでの国内の技術開発経験などを最大限活用すべきである。
濃縮	800t の回収ウランを全て用いた場合、六ヶ所ウラン濃縮工場のフル稼働時（年間 1,500tSWU）の濃縮能力の 35%程度を占める。貯蔵中の UF_6 シリンダ類に遮蔽対策等を施すことが重要であり、現在のウラン濃縮工場を大幅に変更することなく回収ウランの再濃縮は可能である。
再転換	再転換の部分は、既存施設に対し、6～8 倍の処理能力アップに対する抜本的な外部放射線の遮蔽対策が不可欠である。新たな再転換・成型加工施設を構築する方が有利である。
その他	回収ウランを取扱うプロセスで、回収ウランの滞留時間が必要以上に長くなると、U-232 の子孫核種の生成で γ 線の影響が大きくなる。転換から濃縮を経て成型加工に至る一連の生産システムを回収ウラン燃料装荷計画に合わせて最短で稼働させる体制の構築が必要である。

4－2 波及効果

軽水炉サイクルの早期確立に必要な技術課題、既存施設への影響が明確となり、今後の回収ウラン利用のあり方を方向付けることで、施策の目標達成に大きく寄与する。さらにその中で、回収ウラン利用技術開発の推進によって、我が国において自立性のある核燃料サイクルを確立し、エネルギーの安定供給及びエネルギー・セキュリティの確保に資する。

5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

5-1 研究開発計画

本事業は、平成 21 年度において 4 項目の調査を実施し、その上で、平成 22 年度には、事業化すると仮定した場合におけるプラントイメージを策定することとした。研究開発計画を表 15 に示す。

表 15. 研究開発計画

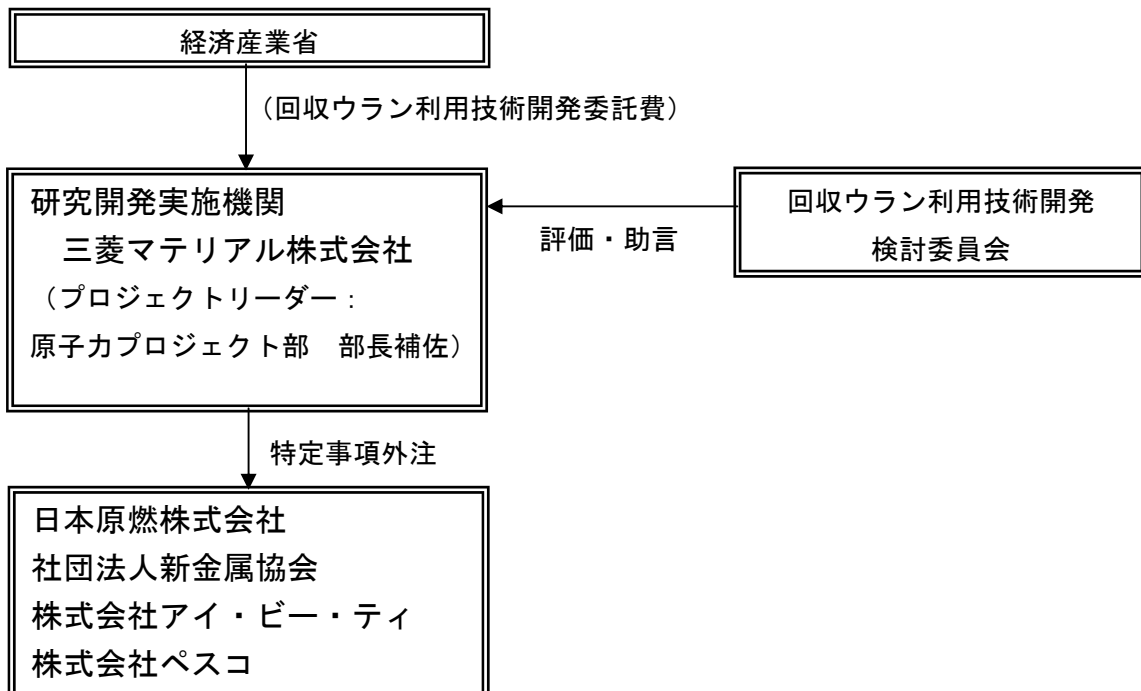
実施項目／年度	H21	H22
(1) 国内外の回収ウラン取扱実績等に関する調査		
(2) 既存施設における回収ウラン受入条件に関する調査		
(3) 炉心特性に与える影響に関する調査		
(4) 国内外の転換プロセスに関する調査		
(5) 転換プロセスの検討		
(6) 回収ウラン濃縮プロセスの検討		
(7) 回収ウラン再転換プロセスの検討		
(8) 転換プロセスの事業化の概念検討		

5-2 研究開発実施者の実施体制・運営

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、三菱マテリアル株式会社が経済産業省からの委託を受けて実施した。また、特定事項の外注先として日本原燃株式会社、社団法人新金属協会、株式会社アイ・ビー・ティ、株式会社ペスコが参加した。

また、研究開発の実施にあたっては、研究開発を統括するためのプロジェクトリーダー（原子力プロジェクト部 部長補佐）を設置するとともに、試験計画の策定、実施、評価等において適宜確認、アドバイスを受けるため、学識経験者、電気事業者、加工メーカー等からなる回収ウラン利用技術開発検討委員会を設置した。

図 13. 研究開発実施体制



5－3 資金配分

本プロジェクトに係る概算事業費（年度予算）は表 16 に示すとおりである。

表 16. 資金度配分

（単位：百万円）

年度	H21	H22
回収ウラン取り扱い実績等に関する調査	95	—
プロセスの検討	—	86

5－4 費用対効果

本研究開発は、転換プロセスを中心とした回収ウラン利用技術を開発することで、六ヶ所再処理工場で回収されるウランを再び軽水炉で利用することを目的としており、我が国の既存の核燃料サイクル施設への影響等を把握することで、既存施設の活用が図られ、もって我が国の核燃料サイクルの着実な推進が期待される。

5－5 変化への対応

本研究開発は平成 21 年度から 22 年度の 2 年計画で実施された。技術動向・社会情勢・市場ニーズの変化など、事業に影響を与える情勢変化は特になく、当初計画通りの内容で開発を行った。

C. 使用済燃料再処理事業高度化補助金に係る事業

1. 事業の目的・政策的位置付け

1-1 事業目的

原子力政策大綱（平成 17 年 10 月）に示されているように、我が国においては、使用済燃料を再処理し、回収されるプルトニウム、ウラン等を有効利用するという基本的方針を踏まえ、当面、プルサーマルを着実に推進することとしており、事業者には核燃料サイクルの要である六ヶ所再処理工場の着実な操業運転を進めることが期待されている。

本プロジェクトは、再処理施設で用いられるガラス固化技術についてより多くの白金族元素等を含む高レベル廃液を溶融可能な新しい性状のガラスを開発するとともに、これに対応する新型のガラス溶融炉を開発することにより、我が国の使用済燃料再処理技術の高度化を図るものである。

また、新型ガラス溶融炉の開発に際しては、六ヶ所再処理工場の運転経験を反映する研究もあわせて行う。

六ヶ所再処理工場ガラス溶融炉の概要を図 1 に示す。

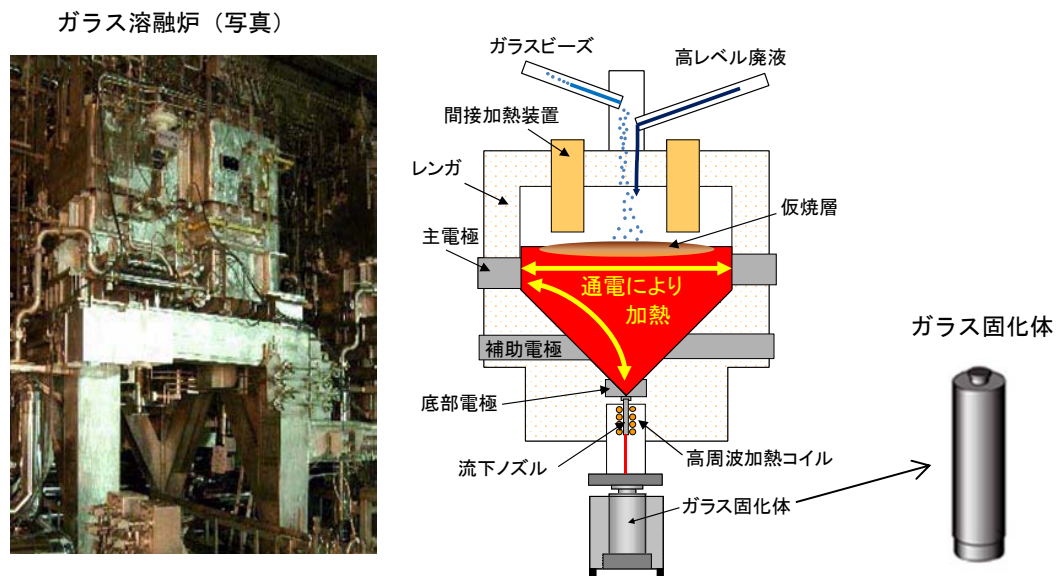


図 1 六ヶ所再処理工場 ガラス溶融炉の概要

1-2 政策的位置付け

ガラス固化技術は、使用済燃料の再処理により発生した高レベル廃液をガラスとともに固化するものであり、再処理工場を円滑に運転していく上で重要な

技術である。

したがって、ガラス固化技術を高度化することは再処理工場の安定運転につながるとともに、最終的には安定的な核燃料サイクルの推進に寄与するものである。

核燃料サイクルの基本的な考え方に関しては、原子力政策大綱（平成 17 年 10 月）において、以下のように示されている。

「第 3 章 原子力利用の着実な推進

3-1. エネルギー利用

3-1-3. 核燃料サイクル

(1) 使用済燃料の取扱い（核燃料サイクルの基本的考え方）

（中略）我が国においては、核燃料資源を合理的に達成できる限りにおいて有効に利用することを目指して、安全性、核不拡散性、環境適合性を確保するとともに、経済性にも留意しつつ、使用済燃料を再処理し、回収されるプルトニウム、ウラン等を有効利用することを基本の方針とする。使用済燃料の再処理は、核燃料サイクルの自主性を確実なものにする観点から、国内で行うことを原則とする。」

また、核燃料サイクル政策の推進に関しては、エネルギー基本計画（平成 26 年 4 月）において、以下のように示されている。

「第 3 章 エネルギーの需給に関する長期的、総合的かつ計画的に講ずべき施策

第 4 節 原子力政策の再構築

4. 対策を将来へ先送りせず、着実に進める取組

(2) 核燃料サイクル政策の推進

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の方針としている。

核燃料サイクルについては、六ヶ所再処理工場の竣工遅延やもんじゅのトラブルなどが続いてきた。このような現状を真摯に受け止め、これら技術的課題やトラブルの克服など直面する問題を一つ一つ解決することが重要である。その上で、使用済燃料の処分に関する課題を解決し、将来世代のリスクや負担を軽減するためにも、高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減や、資源の有効利用等に資する核燃料サイクルについて、これまでの経緯等も十分に考慮し、引き続き関係自治体や国際社会の理解を得つつ取り組むこととし、

再処理やプルサーマル等を推進する。」

1-3 国の関与の必要性

日本原燃は国内で唯一の民間再処理工場の実施主体であり、再処理工場を円滑に運転していく上で重要な技術であるガラス固化技術を高度化させ、民間事業として定着させるためには国が支援する必要がある。これらは、原子力政策大綱において、以下のとおり示されている。

原子力政策大綱（平成 17 年 10 月 14 日、閣議決定）

第 4 章 原子力研究開発の推進

4-1. 原子力研究開発の進め方

4-1-5. 既に実用化された技術を改良・改善するための研究開発

既に実用化された技術を改良・改善するための研究開発既に実用化された技術を改良・改善する研究開発は事業者自ら資源を投じて実施すべきである。ただし、その成果が多く的事業者間で共有されることが望ましい場合や、その研究開発の成功が公益に資するところが大きい場合等には、国が、その内容を適宜適切に評価しつつ、共同開発の仕組み等を整備して、これを支援・誘導することが妥当である。

なお、今後、原子力発電所の新規建設の停滞が続くことが予想され、産業界に築き上げられてきた技術基盤の維持に懸念が生じているが、このような技術開発の推進は、この技術基盤の維持に貢献することにも留意する必要がある。

この段階の主要な活動としては、既存軽水炉技術の高度化、遠心法ウラン濃縮技術の高度化、我が国初の民間 MOX 燃料加工工場へ適用する MOX 燃料加工技術の確証、高レベル放射性廃液のガラス固化技術の高度化を図るための技術開発等がある。

2. 研究開発目標

2-1 研究開発目標

六ヶ所再処理工場で採用しているガラス固化方法は、独立行政法人日本原子力研究開発機構が開発したガラスに直接電流を流して加熱する直接通電加熱方式のため運転効率が高く、炉の寿命も海外の同種のガラス溶融炉より長くできるといった長所を有している。しかしながら、それでも 5 年程度の期間で更新が必要であるため、この更新に際してより性能の高い新ガラス素材および新型ガラス溶融炉が利用できれば、処分時の安全裕度の一層の向上や、ガラス固化

体の製造本数の削減などの効率化を図ることが可能となる。

このため、より多くの白金族元素を含む高レベル廃液を溶融可能なガラス素材およびガラス溶融炉の開発等によって、より高品質のガラス固化体を製造可能なガラス固化技術を開発する。

ガラス固化技術は、5年程度で更新が計画されている六ヶ所再処理工場のガラス溶融炉および同工場のガラス固化施設の運転制御に反映する予定であり、その結果、六ヶ所再処理工場の安定運転が可能となり、ひいては我が国の核燃料サイクルの着実な推進に寄与することが期待される。

また、白金族元素等をより多く含むことができ、ガラス固化体から環境への放射性物質の浸出率を低くすることができるガラス素材およびガラス溶融炉を開発することにより、ガラス固化体処分の効率性、安全裕度の一層の向上を図ることができる。

2-1-1 全体の目標設定

全体の目標・指標および設定理由・根拠を表 1 に示す。

表 1 全体の目標

目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
より多くの白金族元素等を含む高レベル廃液を溶融可能なガラス素材およびガラス溶融炉を開発する。	核燃料サイクルの安定性向上に寄与するとともに、ガラス固化体処分の効率性、安全裕度の一層の向上を図るため。

2-1-2 個別要素技術の目標設定

個別要素技術の目標・指標および設定理由・根拠を表 2 に、各個別要素技術の相関関係を図 2 に示す。

表 2 個別要素技術の目標

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
(1) 新ガラス素材の開発 ① イエローフェーズ (YP) 発生抑制ガラス素材の開発	・イエローフェーズ (YP) の発生を可能な限り抑制する新ガラス素材を開発する。 ・開発したガラスの性能については、るつぼ試験、小型・中型溶融炉試験、新型ガラス溶融炉実	・YP 発生を抑制できるガラス素材を開発する必要があるため。 ・ガラス素材の試験を段階的にスケールアップして新ガラス素材の性能を確認することで、YP 発生の抑制効果およびスケール

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
	規模モックアップ試験において確認する。	アップによる影響を評価しながら開発を進める必要があるため。
②高減容ガラス素材の開発	・より多くの高レベル廃液を取り込める新ガラス素材を開発する。 ・開発したガラスの性能については、るつぽ試験、小型溶融炉試験において確認する。	・より多くの高レベル廃液をガラスに充填できるガラス素材を開発する必要があるため。 ・ガラス素材の試験を段階的にスケールアップして新ガラス素材の性能を確認することで、廃棄物含有率およびスケールアップによる影響を評価しながら開発を進める必要があるため。
(2) 新型ガラス溶融炉の開発 ① 新型ガラス溶融炉構成技術の開発	・白金族元素の堆積抑制および抜き出し性の向上を目的として、新型ガラス溶融炉を構成する技術（炉底部技術、炉内要素技術）を開発する。 ・開発した各構成技術については新型ガラス溶融炉の実規模モックアップ試験において検証を行う。	・より多くの白金族元素等を含む高レベル廃液を溶融可能とするために、白金族元素の堆積抑制および抜き出し性の向上を図る必要があるため。 ・白金族元素の堆積抑制および抜き出し性の向上を図るために必要となる構成技術を個別に開発・検証した後、実規模のモックアップ試験で総合的な検証を行う必要があるため。
② ガラス溶融炉解析コードの高度化	・ガラス溶融炉内の温度および白金族元素分布等の挙動を模擬できる解析コードを開発する。	・新型ガラス溶融炉のモックアップ試験において事前に運転条件を設定するために、炉内挙動を模擬できる解析コードを開発する必要があるため。
③ ガラス物性等の基礎	・白金族元素および模擬	・ガラス溶融炉解析コード

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
試験	廃液成分を含有したガラスの物性等の基礎データを取得する。	に使用するガラス物性等の基礎データを取得する必要があるため。

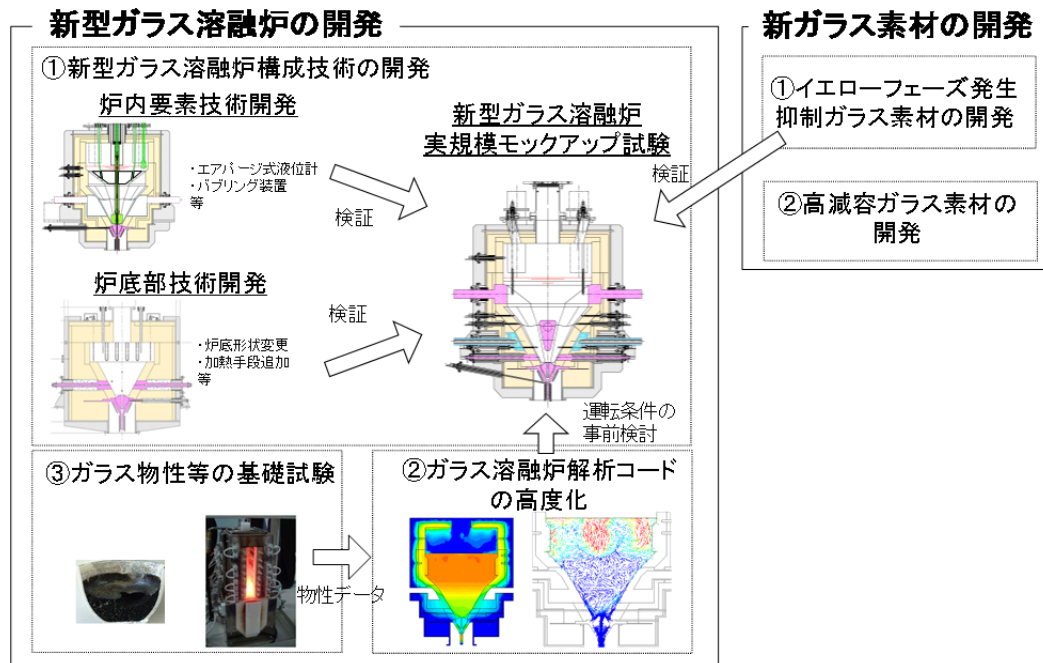


図 2 個別要素技術の相關図

3. 成果、目標の達成度

3-1 成果

3-1-1 全体成果

個別要素技術として、新ガラス素材および新型ガラス溶融炉の開発を行っている。新ガラス素材の開発は、実験室規模での試験（るつぼ試験）、小型溶融炉での試験等と段階的に評価を行った。また、新型ガラス溶融炉の開発は、炉底部のみを模擬した部分モックアップ試験装置やアクリル製容器等を使用した可視化試験等で段階的に評価を行った。最終的には、新型ガラス溶融炉の実規模モックアップ試験により検証を行い、従来のガラス溶融炉を上回る安定性をもつことを確認した。

3-1-2 個別要素技術成果

個別要素技術成果を以下に示す。

（1）新ガラス素材の開発

①イエローフェーズ発生抑制ガラス素材の開発

ガラス溶融炉におけるイエローフェーズ（Yellow phase、以下「YP」という。）の発生については、従来から考慮されてきたモリブデン（Mo）酸塩の溶解限度に加え、原料ガラスビーズと廃液成分の溶解初期過程における反応速度が大きく影響していると考えられている。

そのため、アルミニウム（Al）、ケイ素（Si）等の原料ガラスビーズ中のガラス成分の一部を廃液側に分配し、ガラスの溶融性を高める方法（再分配法）により、廃液中に含まれるモリブデン（Mo）酸塩等と原料ガラスビーズの初期の溶解反応速度を向上させて YP 発生抑制を行った。なお、ガラス固化体の組成の変更は、ガラス溶融炉の運転方法等に影響を与えることから、製造するガラス固化体の最終的な組成は変更しないこととした。再分配法の概念図を図 3 に示す。

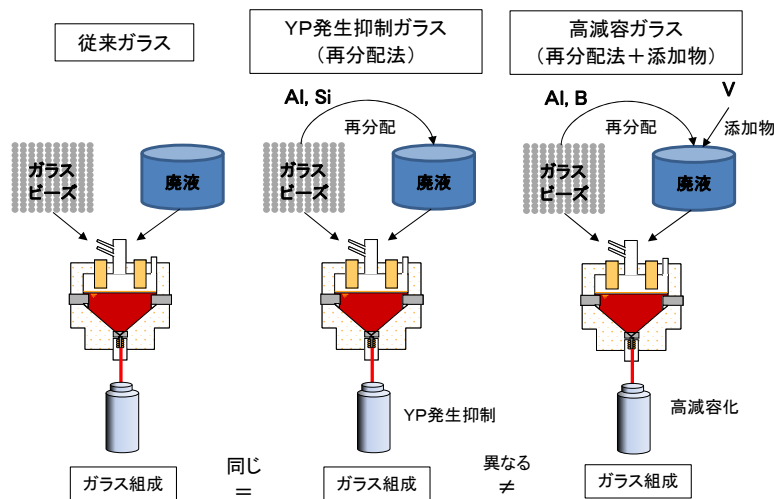


図 3 再分配法の概念図

YP 発生抑制効果の確認は、るつぼ試験、小型溶融炉試験、中型溶融炉試験、新型ガラス溶融炉の実規模モックアップ試験の順で段階的に実施した。各試験における目的を表 3 に示す。

表 3 YP 発生抑制ガラス素材の開発における試験と目的

試験	目的
るつぼ試験	YP 発生抑制ガラス素材の組成の選定
小型溶融炉試験	ガラス溶融炉運転時に想定されるプロセス変動範囲における YP 発生抑制効果の確認
中型溶融炉試験	ガラス溶融炉をスケールアップした条件における YP 発生抑制効果の確認
実規模モックアップ試験	新型ガラス溶融炉における YP 発生抑制効果の確認

a. るつぼ試験

高レベル廃液の模擬廃液成分を用いたるつぼ試験では、従来の原料ガラスと比較し、YP 発生抑制効果を確認するとともに、原料ガラス成分のうち、アルミニウム (Al) とケイ素 (Si) の一部を廃液側に再分配する組み合わせが有効であることを確認し、以降の試験で使用する組成として選定した。

b. 小型溶融炉試験

模擬廃液を用いた小型溶融炉試験では、ガラス溶融炉運転時に想定されるプロセス変動範囲（溶融ガラス温度、気相温度等の変動範囲）において、調整液を添加しない条件で YP 発生抑制効果を確認した。

c. 中型溶融炉試験

中型溶融炉試験では、溶融炉をスケールアップした条件、また、ガラス溶融炉の運転（炉底低温運転）を模擬した条件において、調整液を添加しない条件で YP 発生抑制効果を確認した。

d. 実規模モックアップ試験

実規模モックアップ試験において、調整液を添加しない条件で新ガラス素材を使用してガラス温度および気相温度を目標温度に制御することができた。また、YP 発生抑制効果については、運転条件の最適化を図る等の課題を確認することができた。

②高減容ガラス素材の開発

YP 発生抑制ガラス素材の開発で採用した再分配法は、廃棄物と原料ガラスビーズの初期の溶融反応速度を向上させて YP 発生の抑制を図ることを目的としていることから、高減容ガラス素材への適用も可能と推測される。また、製造するガラス固化体の組成の変更を許容することにより、自由度の高い開発を行うことが可能となる。そのため、再分配法を用いるとともに、製造するガラス固化体の組成を変更する条件で高減容ガラス素材の開発を行った。

高減容ガラス素材の開発は、るつぼ試験および小型溶融炉試験を用いて実施した。各試験における目的を表 4 に示す。

表 4 高減容ガラス素材の開発における試験と目的

試験	目的
----	----

るつぼ試験（その 1）	高減容ガラス素材の組成の選定およびガラスの物性データの取得
小型溶融炉試験	YP 発生抑制効果の確認
るつぼ試験（その 2）	るつぼ試験（その 1）および小型溶融炉試験の試験結果を踏まえた高減容化に向けたガラス組成の検討

a. るつぼ試験（その 1）

るつぼ試験（その 1）では、高レベル廃液の模擬廃液成分を用いたるつぼ試験、縦型温度勾配炉試験を行い、原料ガラス成分のうちアルミニウム（Al）とホウ素（B）の一部を廃液側に分配し、バナジウム（V）を添加した組成が YP 発生抑制効果に有効であることを確認した。また、当該ガラスの高温粘度、電気伝導度、浸出率等の物性データを取得した。

b. 小型溶融炉試験

高レベル廃液の模擬廃液を用いた小型溶融炉試験では、原料ガラス中の酸化ナトリウム（ Na_2O ）寄与分を除いた廃棄物含有率 30wt%～34wt%の範囲において、YP 発生抑制効果を確認した。

c. るつぼ試験（その 2）

a 項および b 項の試験結果を踏まえ、るつぼ試験（その 2）では、仮焼層の温度条件も模擬した縦型温度勾配炉試験を行い、バナジウム（V）以上に YP 発生抑制効果をもつ添加物がないこと、現行の廃棄物含有率 20.8wt%に対して、高減容ガラス素材を使用することにより廃棄物含有率 34wt%を達成できる見通しがあることを確認した。

（2）新型ガラス溶融炉の開発

①新型ガラス溶融炉構成技術の開発

新型ガラス溶融炉は、現行のガラス溶融炉と比較すると、白金族元素の堆積防止、抜き出し性向上を目的として、底部電極用高周波加熱コイルの追加等、炉底部の構造を変更した（図 4 参照）。

また、新型ガラス溶融炉は、白金族元素の炉底部への堆積時における対策、炉内のガラス保有量の正確な把握、YP の発生抑制対策として、それぞれかくはん装置、エアパージ式液位計、バブリング装置を開発した。

上記のガラス溶融炉構成技術は個別に開発を進め、最終的には新型ガラス溶融炉のモックアップ試験でそれらの性能を検証した。各試験における目的を表 5 に示す。

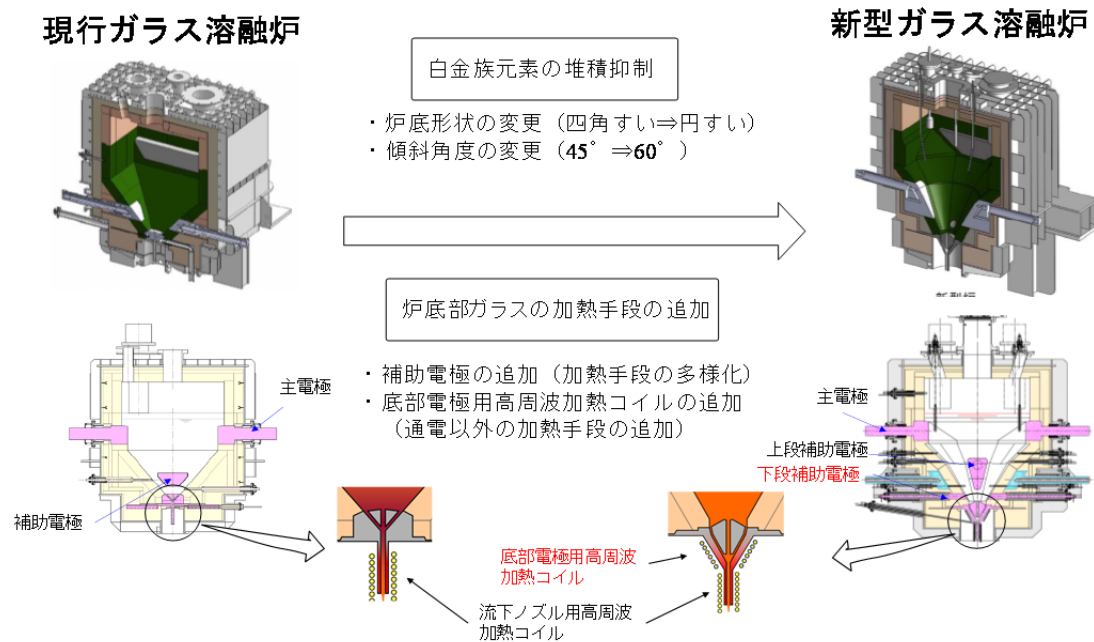


図 4 現行ガラス溶融炉と新型ガラス溶融炉の構造の比較

表 5 新型ガラス溶融炉構成技術の開発における試験と目的

試験名称		目的
炉底部技術の開発	炉底部モックアップ試験	炉底部の性能（流下性、加熱手段追加効果、白金族元素堆積防止効果、白金族元素堆積時の除去性）の確認
	流下ノズル寿命評価試験	底部電極・流下ノズルの構造健全性の確認
	耐火物腐食試験	接液レンガの腐食データの取得
炉内要素技術の開発		かくはん装置、エアパージ式液位計およびバブリング装置の検討および設計
新型ガラス溶融炉の実規模モックアップ試験		炉底部技術および炉内要素技術の実規模モックアップ試験による検証

a. 炉底部技術の開発

(a) 炉底部モックアップ試験

新型ガラス溶融炉の炉底部のみを模擬した部分モックアップ試験装置（図 5 参照）を用い、白金族元素含有模擬ガラスによる加熱試験、流下試験等を実施し、炉底部の性能を確認した（表 6 参照）。

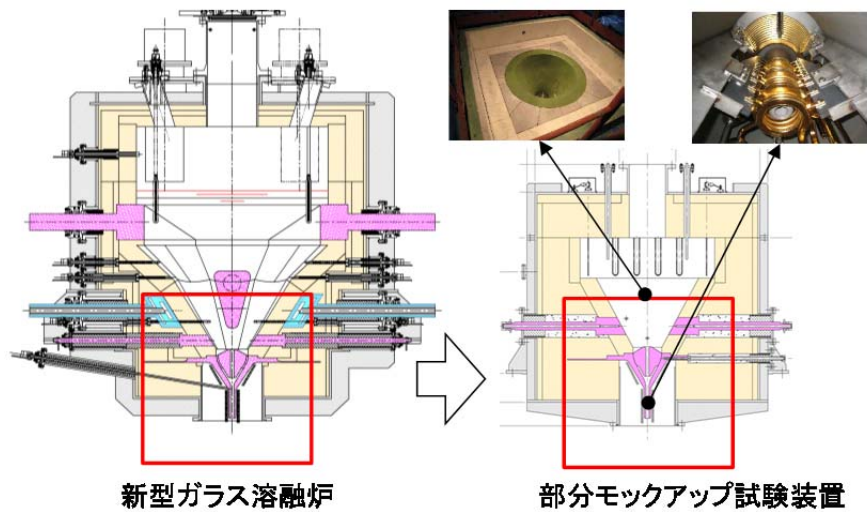
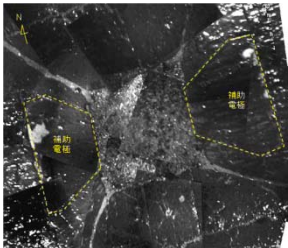
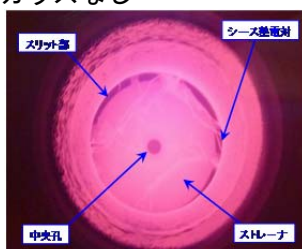
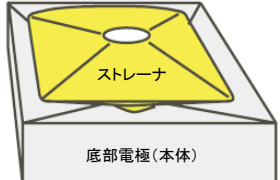
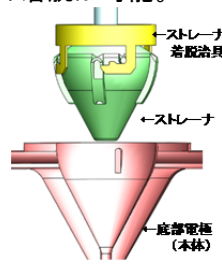


図 5 新型ガラス溶融炉と部分モックアップ試験装置

表 6 炉底部モックアップ試験の試験結果

	現行ガラス溶融炉	炉底部モックアップ試験
流下性	ガラス流下開始直後からの流下速度の立ち上がりが現行のガラス溶融炉と比較して早く、さらに安定した。また、通常の約 5 倍の白金族元素濃度のガラスでも流下性は良好であった。 ガラスの流下開始からの経過時間	ガラス流下開始直後からの流下速度の立ち上がりが現行のガラス溶融炉と比較して早く、さらに安定した。また、通常の約 5 倍の白金族元素濃度のガラスでも流下性は良好であった。
加熱手段追加効果	- 加熱手段が主電極－底部電極間通電のみ ⇒炉底部に白金族元素が堆積すると加熱性が低下 - 底部電極内に非加熱部位	- 底部電極高周波加熱により、底部電極全体を加熱可能 ⇒初期流下性が安定（偏流なし） - 下段補助電極間通電により、底部電極直上のガラスを加熱可能 ⇒白金族元素が堆積しても良好に流下

	現行ガラス溶融炉	炉底部モックアップ試験
白金族元素堆積防止効果	ガラスの堆積により底部電極のスリットが見えない。  現行ガラス溶融炉の ドレンアウト後	高濃度の白金族元素含有ガラスの流下後でも、炉底円すい部および底部電極上に残留ガラスなし  炉底部モックアップ試験 ドレンアウト後
白金族元素堆積時の除去	底部電極（本体）とストレーナが一体構造であるため、ストレーナの着脱が不可能。  現行ガラス溶融炉の底部電極構造	ストレーナ着脱治具を用いることでストレーナの着脱が可能。  底部電極構造

(b) 流下ノズル寿命評価試験

新型ガラス溶融炉の底部電極・流下ノズルの構造健全性について、実際の破壊現象を忠実に評価するため、実規模形状・寸法を模擬した試験装置（図 6 参照）を用いて、流下ノズル寿命評価試験（運転期間 5 年に相当する加速試験）を実施した結果、底部電極・流下ノズルにき裂や変形も確認されなかった。

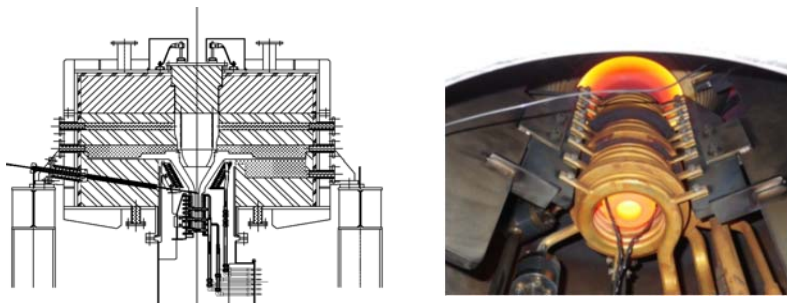


図 6 流下ノズル寿命評価試験装置（左）と試験中の流下ノズル（右）

(c) 耐火物腐食試験

新型ガラス溶融炉の接液部に使用している耐火物について、溶融ガラスによる腐食試験を実施し、腐食速度を取得した。

b. 炉内要素技術の開発

新型ガラス溶融炉の炉内に適用するかくはん装置、エアパーージ式液位計、バブリング装置の各種機器の技術開発を行った。新型ガラス溶融炉の炉内要素技術の概要を図 7 に示す。

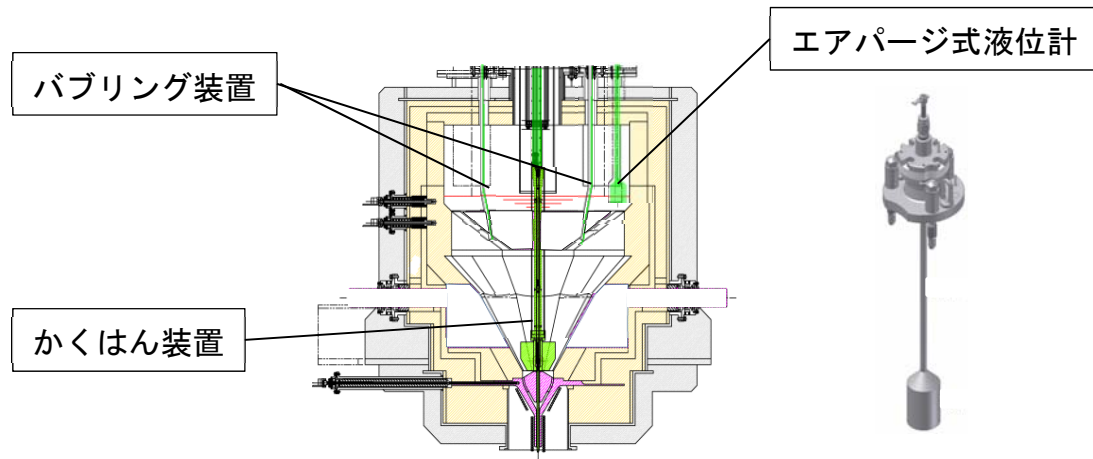


図 7 新型ガラス溶融炉の炉内要素技術の概要

(a) かくはん装置

かくはん装置は、ガラス溶融炉の原料供給器の上部に設置し、白金族元素が堆積した場合に、早期にかつ効率的に炉底のかくはん操作（堆積した白金族元素の除去操作）を行う。また、レンガ片により流下ノズルが閉塞した場合に、閉塞解除が可能な構造としている。新型ガラス溶融炉の炉底部を模擬したアクリル製容器と溶融状態のガラス粘度を模擬した模擬流体を用いた試験結果等から、かくはん部構造としてインペラー型を採用し、腐食試験の結果から最も溶融ガラスへの耐侵食性を有するニッケル合金をかくはん部の主材料として使用することとした。

(b) エアパーージ式液位計

エアパーージ式液位計は、圧縮空気を吹き込むと先端の液压と管内圧が等しくなることを利用する測定方式である。また、連続測定が可能であり、計測器の耐熱性、耐放射線性の考慮が不要であるという特徴を有するとともに、炉内のガラス量がより正確に把握できる。ただし、溶融ガラスに浸漬する部分の腐食対策および先端部（ベル部）の閉塞対策が必要である。アクリル製容器と模擬流体を用いた試験結果から、エアパーージ式液位計の先端のベル部（図 8 参照）内径を設定した。



図 8 エアパーージ式液位計先端

(c) バブリング装置

バブリング装置は、仮焼層下面に挿入したノズルから空気を吹き込み、溶融炉上部のガラスを強制的に攪拌させることにより、YP 発生抑制や処理能力の向上が期待できる装置である。

バブラー管形状は、かくはん効果および耐食性に影響するため、アクリル製容器と模擬流体を用いた結果より、一定の角度をもたせた曲棒型（図 9 参照）とするとともに、バブラー管の本数を 2 本とした。また、バブリング流量については、試験結果を踏まえ、最適化した。

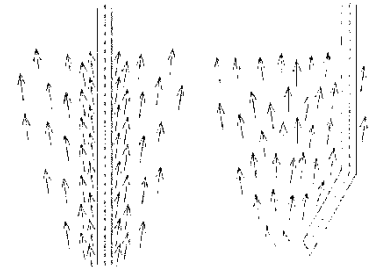


図 9 バブリング装置

c. 実規模モックアップ試験

開発した炉底部技術および炉内要素技術の効果について、新型ガラス溶融炉の実規模モックアップ試験炉（図 10、表 7 参照）を用いた試験で検証を行った。



図 10 実規模モックアップ試験炉の外観

表 7 実規模モックアップ試験炉の仕様

主要寸法	外径寸法 約 3m×約 3m×約 3m 炉底部傾斜角度 60°、円すい形状
加熱方式	直接通電 ヒータ加熱（気相部） 誘導加熱（底部電極、流下ノズル）
ガラス原料供給方式	炉上部からのビーズ供給
ガラス抜き出し方式	誘導加熱によるフリーズバルブ方式

(a) 試験計画

模擬ビーズ試験（高レベル廃液の模擬廃液成分を含んだガラスビーズを供給）、低模擬廃液試験（白金族元素の含まない模擬廃液を供給）、高模擬

廃液試験（白金族元素を含んだ模擬廃液を供給）と段階的に試験を行い、炉の熱特性・ガラスの流下性・安定運転等を合計 100 バッチの流下で確認した（図 11 参照）。なお、現行ガラス溶融炉との比較・評価のため、現行ガラス溶融炉がこれまで実施してきた炉底低温運転¹を踏襲した。

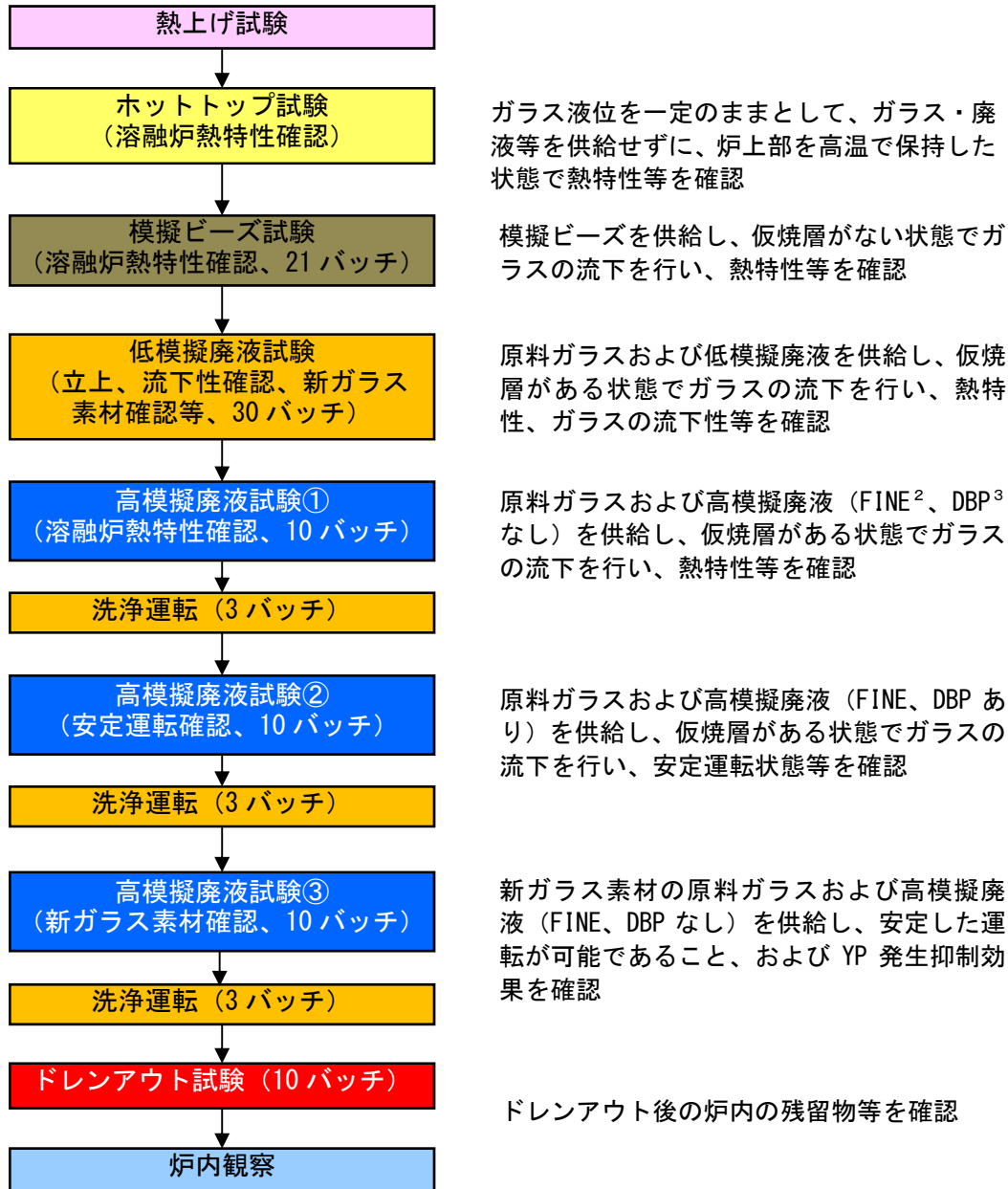


図 11 新型ガラス溶融炉の実規模モックアップ試験フロー

¹ 炉底低温運転：ガラス流下終了後に炉底部の温度を低下させ、流下後の白金族元素の炉底部への沈降を抑制する運転。

² 不溶解残渣（FINE）：使用済燃料の溶解工程において、硝酸で溶けずに残るもの。原子炉内での核分裂により生成する合金（Mo、Ru、Rh、Pd、Tc）およびせん断時に発生する燃料被覆管の粉末（Zr、Fe）が主な成分である。

³ リン酸二ブチル（DBP）：使用済燃料を硝酸で溶解した溶解液からウランとプルトニウムを抽出するための溶媒抽出に用いるリン酸三ブチル（TBP）が放射線分解（劣化）して生成される。これが溶媒再生工程でアルカリ廃液へ移行し、高レベル廃液に含まれることになる。

(b) 試験結果

① 温度管理

高模擬廃液試験の温度推移を図 12 に示す。各ガラス温度計指示値をもとに主電極電力、間接加熱電力を調整することで、ガラス温度および気相温度を目標温度（試験により異なる）に制御することができた。

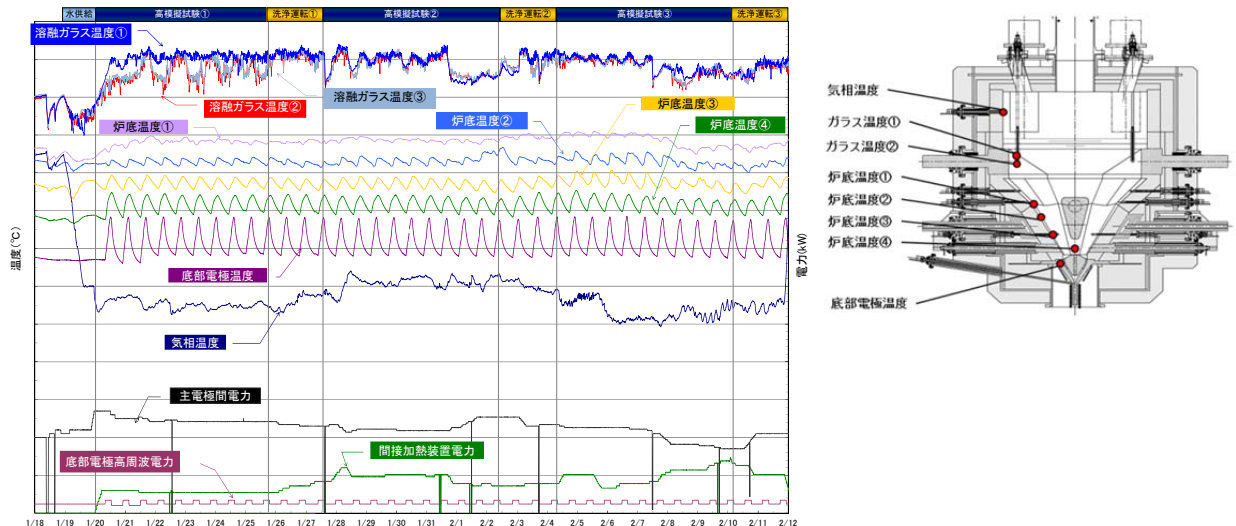


図 12 新型ガラス溶融炉の実規模モックアップ試験における温度および電力の推移

② ガラスの流下性

バッチ毎に、ガラス流下時の流下速度が 50kg/h に到達した時間の推移を図 13 に示す。本到達時間は、現行ガラス溶融炉において、白金族元素の堆積によりガラス流下速度が顕著に悪化する前に回復運転（洗浄運転）に移行するための流下性低下の判断指標として用いている。試験の結果、流下回数を重ねても、流下性は良好であり、白金族元素が炉底部に堆積した傾向は確認されなかった。また、現行ガラス溶融炉の試験結果と比較しても、安定した流下が継続できることが確認できた。

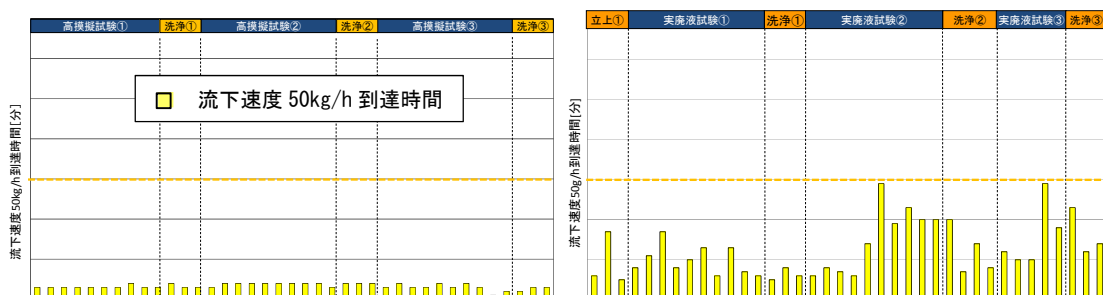


図 13 新型ガラス溶融炉の実規模モックアップ試験（左）と六ヶ所再処理工場 A 系列ガラス固化試験（2013 年 5 月）（右）におけるガラス流下速度 50kg/h 到達時間

また、ドレンアウト試験後の炉内観察結果を図 14 に示す。現行ガラス溶融炉と異なり、モックアップ試験炉では炉内のガラスは全て排出されており、白金族元素等の残留物も確認されなかった。

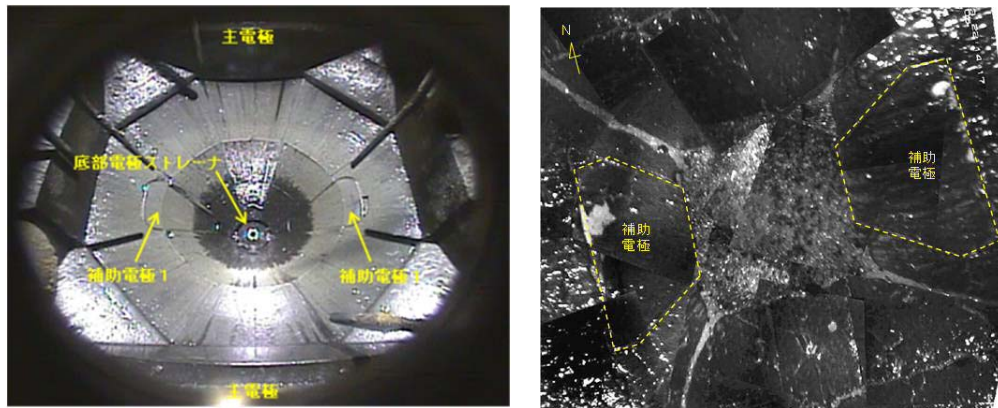


図 14 新型炉モックアップ試験（左）と六ヶ所再処理工場 B 系列ガラス固化試験（右）のドレンアウト試験後の炉内観察結果

③その他

エアパージ式液位計による液位測定等、その他の改良技術についても良好な性能・効果が確認できた。

（3）ガラス溶融炉解析コードの高度化

新型ガラス溶融炉の実規模モックアップ試験の試験計画を検討するためには、事前にガラス溶融炉の運転条件（目標温度、投入電力量等）を設定する必要がある。その際、試験を効率的に進めるためには、投入電力量等の入力条件の範囲をある程度絞っておく必要がある。そのために、ガラス溶融炉の運転条件に応じた炉内状況を再現（シミュレーション）できるガラス溶融炉解析コードの高度化を行った。

ガラス溶融炉解析コードの機能構成を図 15 に示す。

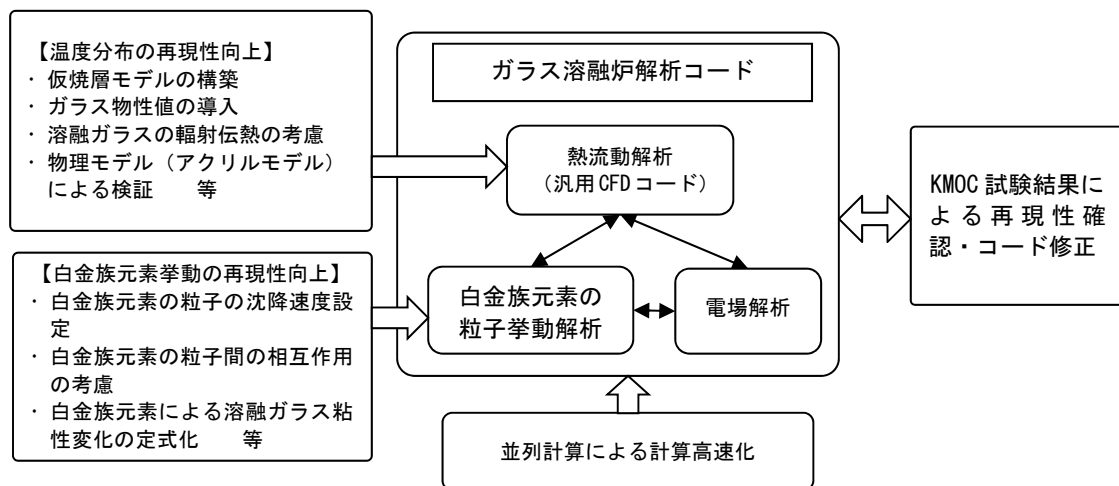


図 15 ガラス溶融炉解析コードの機能構成と改良・検証項目

a. 炉内温度分布および白金族元素挙動の再現

ガラス溶融炉解析コードによる炉内温度分布の再現性を確認するために、現行ガラス溶融炉に係る機能の検証を目的とした各種試験を行うための実規模大のガラス溶融炉（以下、「KMOC」という。）を対象にして解析モデルを組み（図 16 参照）、過去の KMOC 試験での運転と同様の加熱・冷却条件を与えることで、これらの温度変化の再現性を確認し、ガラス溶融炉解析コードの修正を行った。

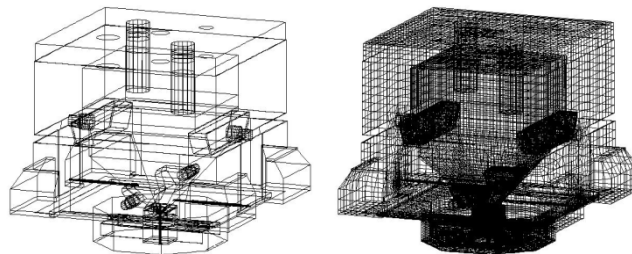


図 16 KMOC の解析モデル

KMOC 試験結果とガラス溶融炉解析コードにより計算した炉内温度の比較を図 17 に示す。KMOC 試験の試験結果を踏まえた解析モデルの適用やガラス物性値の導入等によるガラス溶融炉解析コードの高度化により、計算した炉内温度はガラス溶融炉内の温度分布を再現できることを確認した。

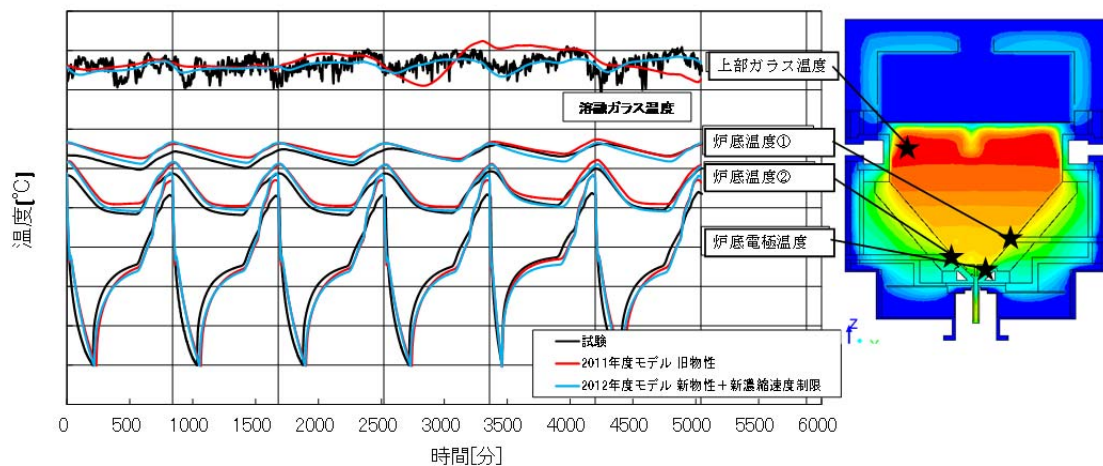


図 17 KMOC 試験結果とガラス溶融炉解析コードによる解析結果の比較

また、ガラス溶融炉解析コードにより炉内の白金族元素の分布（図 18 参照）と流下による白金族元素の抜き出し量を解析し、KMOC 試験における白金族元素の抜き出し量の推移と比較し、解析コードにより炉内の白金族元素の挙動を再現できることが確認できた。

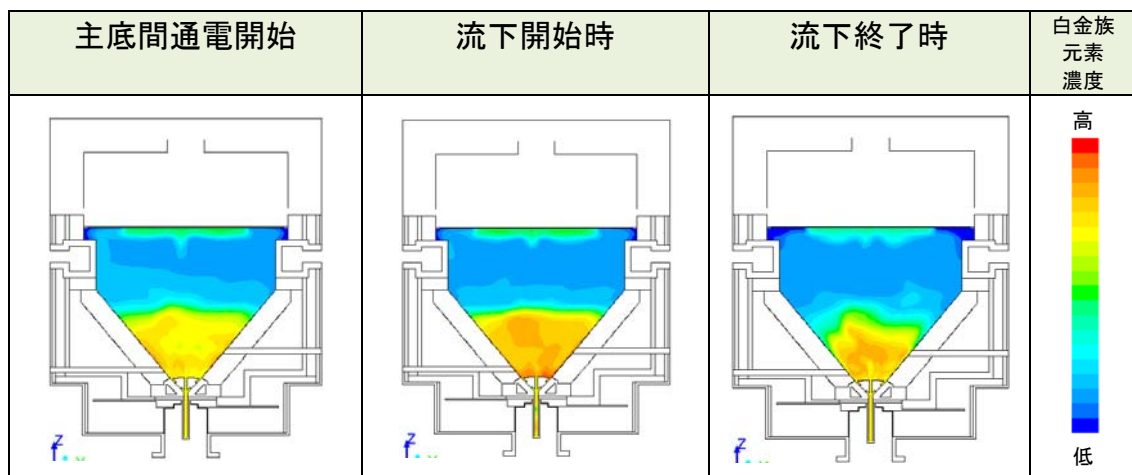


図 18 白金族元素分布のコンター図

b. 実規模モックアップ試験の事前検討

実規模モックアップ試験において、事前にガラス溶融炉の運転条件（目標温度、投入電力量等）を設定する必要がある。その際、試験を効率的に進めるためには、投入電力量等の入力条件の範囲をある程度絞っておく必要がある。

ガラス溶融炉解析コードに適用した新型ガラス溶融炉の解析モデルと解析メッシュは以下のとおりである（図 19 参照）。

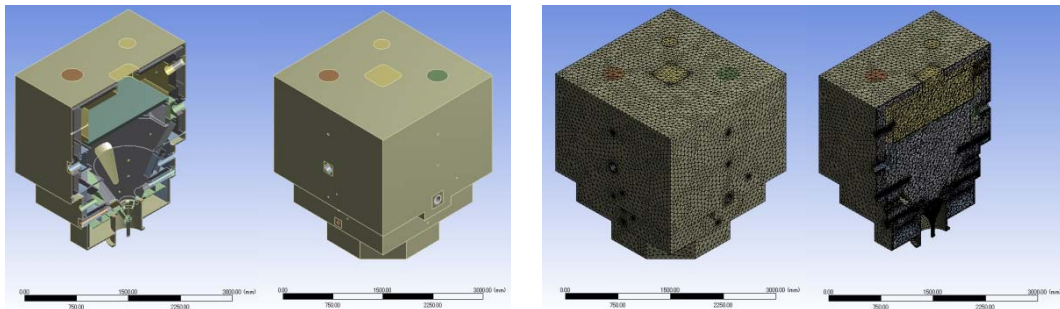


図 19 新型ガラス溶融炉の解析モデル図（左）と解析メッシュ（右）

新型ガラス溶融炉の実規模モックアップ試験では、六ヶ所再処理工場のガラス溶融炉の炉底低温運転を踏襲することから、六ヶ所再処理工場のガラス溶融炉の温度分布を元の実規模モックアップ試験炉における目標温度分布を設定し、ガラス溶融炉解析コードにより各加熱ツール（主電極・補助電極・底部電極間の各通電、底部高周波加熱コイル）の感度解析を実施したうえで、目標温度分布に近づける入熱量（電力量）を設定した（図 20 参照）。

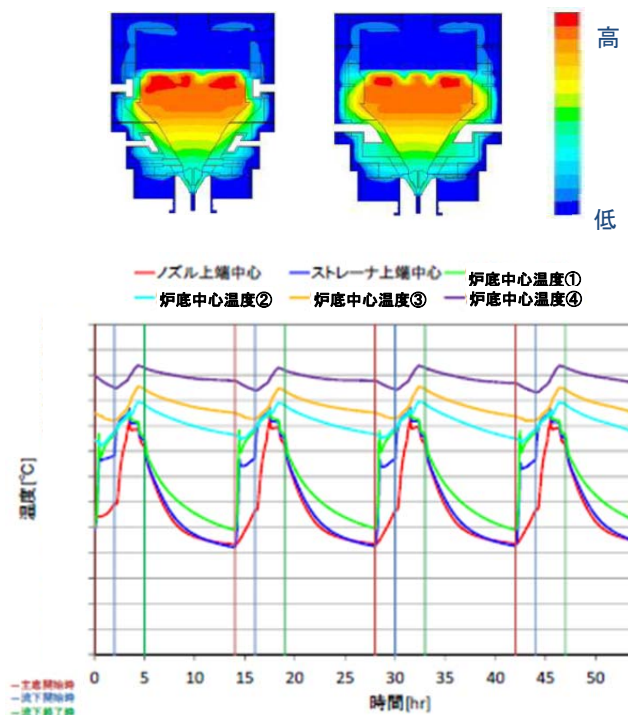


図 20 ガラス溶融炉解析コードで設定した新型ガラス溶融炉の目標温度

（４）ガラス物性等の基礎試験

ガラス溶融炉解析コードの高度化で必要となる白金族元素を含有した溶融状態のガラスの物性データの取得や評価モデルの整備を行うとともに、ガラス溶融炉内の白金族元素の粒子挙動や仮焼層形成のメカニズムの解明等

を目的に、基礎試験を実施した。

実施テーマは図 21 のとおりである。

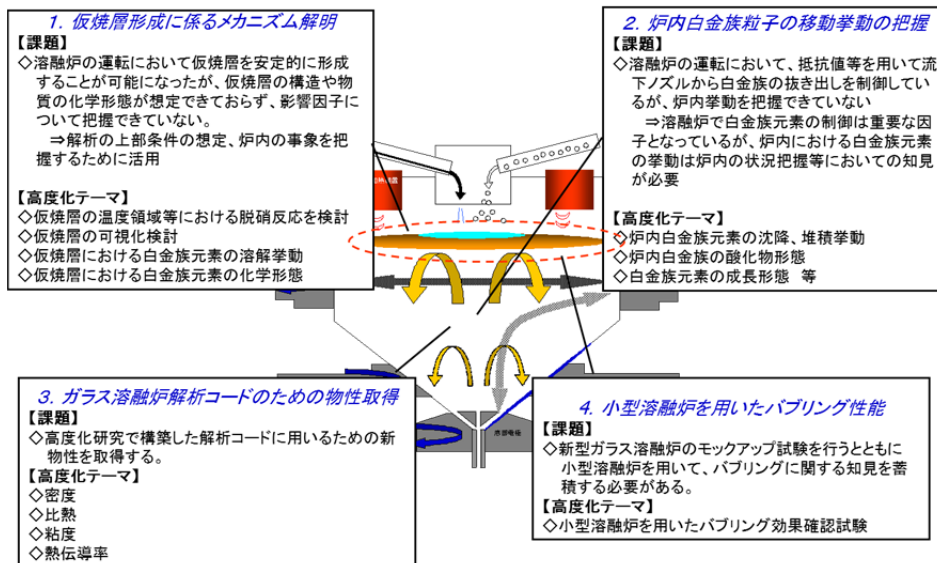


図 21 ガラス物性等の基礎試験の実施テーマ

a. 仮焼層形成に係るメカニズム解明

(a) 仮焼層における熱挙動

仮焼層状態を把握するためには、仮焼層内における物質移動を考慮する必要がある。仮焼層においては、廃液供給から溶融ガラスまでの温度勾配があることから、まず、各温度における物質の化学形態について整理するため、化学物質単独のデータを整理した。

次に、混合系（模擬廃液）の熱挙動（反応速度）のデータ取得を行った。単独系の熱データから計算した各温度における反応速度および混合系の実験データを図 22 に示す。単独系の計算データと混合系の試験データについてほぼ一致するデータが得られたことから、単独系で想定した各温度における化学物質の形態変化が仮焼層で起こっていることが分かった。

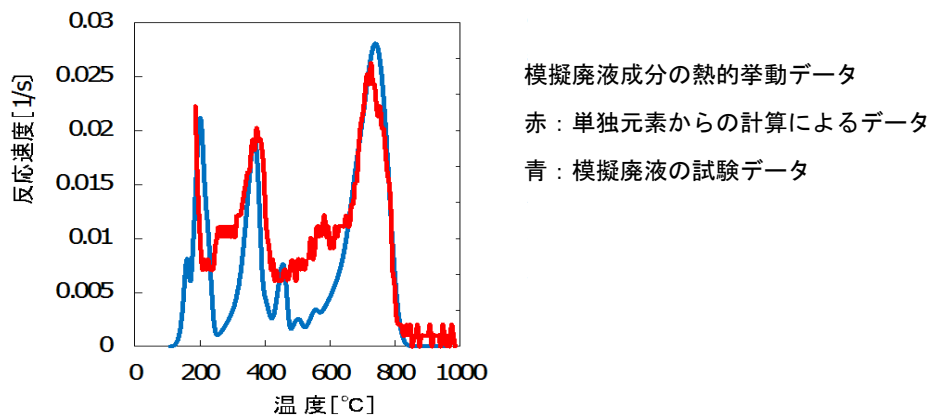


図 22 各温度における廃液成分の反応速度変化

(b) 仮焼層構造

仮焼層の熱伝導等を考慮する場合には、仮焼層の構造が重要な因子となる。そこで、約 800°C～1200°C の高温下において仮焼層を模擬できる装置を開発し、X 線を用いて直接仮焼層内部構造を観察した。本装置では、空隙率に着目し観察を行い、廃液成分と原料ガラスビーズが反応していく様子を可視化した。装置の外観図および得られた画像を図 23 に示す。

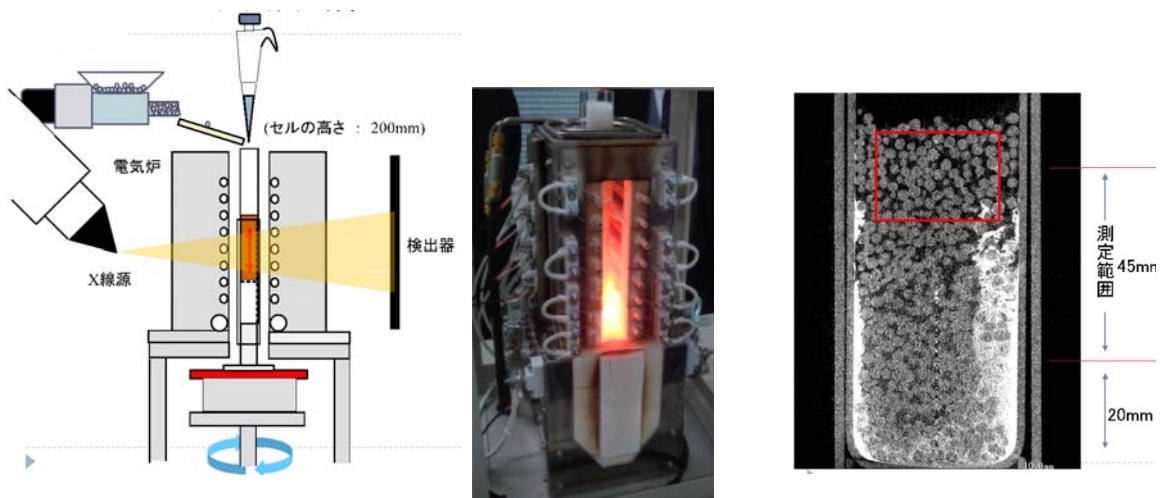


図 23 仮焼層観察装置外観図および計測画像

各温度における空隙率の変化を図 24 に示す。本結果から、仮焼層の空隙率（構造）を明らかにし、ガラス溶融炉解析コードにおける仮焼層の熱伝導を考慮する際には本データを参照している。

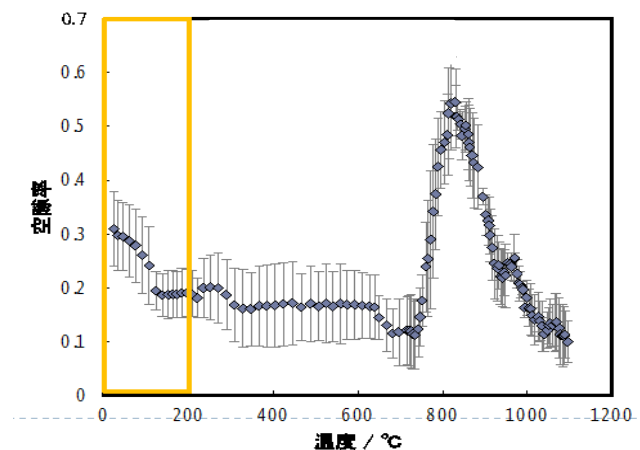


図 24 各温度領域における仮焼層内の空隙率の変化

(c) 空隙率と白金族元素の凝集性について

白金族元素の炉内挙動を把握することは、ガラス溶融炉の運転を行う上で必要な基礎データとなる。仮焼層の空隙構造と白金族元素の移動挙動について、XAFS (X-ray absorption fine structure、X 線吸収微細構造) を用いて可視化した (図 25 参照)。その結果、廃液が蒸発し、発泡する際に、泡の隙間で白金族元素の粒子が凝集することが分かった。

また、空隙が小さくなる小粒子径の原料ガラスビーズを用いた場合に白金族元素の凝集物も小さくなることが示唆された。

これらの結果から、白金族元素の凝集については、仮焼層の空隙構造等に影響を受けることが分かった。

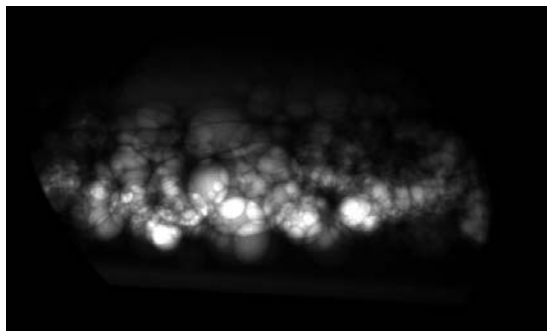


図 25 XAFS による仮焼層イメージ (泡の像)

b. 炉内白金族元素の粒子の物理挙動の把握

(a) 白金族元素の粒子の沈降速度、成長

ガラス溶融炉内の白金族元素の粒子の移動挙動を把握するため、ガラス中における白金族元素の粒子の沈降速度データを種々の白金族元素濃度および温度に関して取得した (図 26 参照)。沈降速度については界面沈降速度を定式化し、解析へ反映を行った。

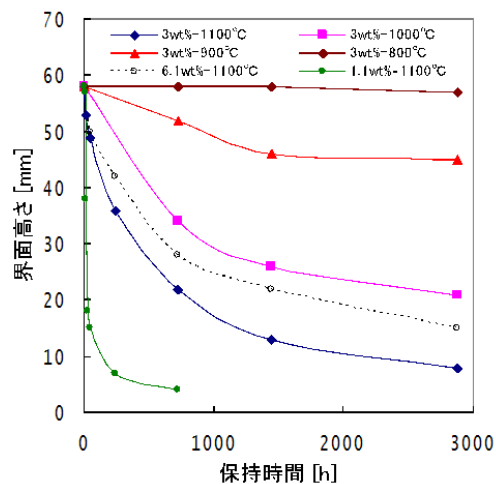


図 26 白金族元素濃度、温度を変化させたガラスの界面沈降

(b) 白金族元素の化学形態に及ぼす REDOX 影響

各温度、酸素分圧を変化させた白金族元素の化学形態を XAFS により測定し、白金族元素の化学形態と REDOX（酸化還元状態）の関係について整理した。本データを利用して、ガラス溶融炉から採取したガラス内の白金族元素の化学状態から、炉内の REDOX を評価することができた。

c. ガラス溶融炉解析コードのための物性取得

新規に白金族元素含有ガラスの物性計測を行い、ガラス溶融炉解析コードに適用した（表 8 参照）。

表 8 ガラス物性の取得

No.	評価項目	測定方法
1	密度(熱膨張率)	低温域：熱機械測定（TMA:Thermomechanical analysis） 中温域：塩化物溶融塩によるアルキメデス法 高温域：アルキメデス 2 球法による測定
2	比熱	低温域：示差走査熱量測定（DSC:Differential scanning calorimetry） 高温域：落下熱量測定
3	粘度	平行平板回転法を用いた粘度計測 粒子モデル実験・シミュレーションからの粘性式を導出（粒子懸濁液の粘性に係る実験式を適用）
4	熱伝導度	熱拡散率計測から熱伝導率を算出した値に赤外線吸収率を考慮するロッセランド近似で輻射の熱伝導相当を加算した式を適用

d. 小型溶融炉を用いたバブリング効果確認試験

本試験において小型溶融炉（図 27 参照）を製作し、運転データを取得した。小型溶融炉上部には、覗き窓が 2 箇所設置されており、常時仮焼層が観察でき、仮焼層をサンプリングできる構造としている。

各種の運転条件における仮焼層の試料について分析を行い、廃棄物成分の濃度分布データを取得した。

また、小型溶融炉にバブリング装置を設置し、試験を行った結果、処理能力が向上することを確認した。



図 27 小型溶融炉外観（左）およびサンプリングした仮焼層（右）

3-1-3 特許出願状況等

表 9 特許・論文等件数

要素技術	論文数	論文の被引用度数	特許等件数（出願を含む）	特許権の実施件数	ライセンス供与数	取得ライセンス料	国際標準への寄与
(2) 新型ガラス溶融炉の開発	12	0	0	0	0	0	0

表 10 論文、投稿、発表、特許リスト

	題目・メディア等	時期
論文	Glass Technology: European Journal of Glass Science and Technology Part A 「X-ray CT imaging of the vitrified glasses containing pseudo-radioactive wastes - Structure and chemical reactions of glass beads and wastes in Cold Cap -」	2012. 12

	Physics and Chemistry of Glasses 「Density measurement of simulated radioactive waste glass by Archimedean method using molten chloride salts」	2013. 6
	Journal of Nuclear Materials 「High-temperature heat capacity and density of simulated high-level waste glass」	2014. 8
	他 9 件、投稿中 2 件	
投稿	なし	—
発表	GLOBAL2011 「Development of New Method for Yellow Phase Suppression by Redistribution of Frit Components」	2011. 12
	日本原子力学会 2012 年秋の大会「ガラス溶融炉高度化研究（２）ガラス溶融炉の開発」	2012. 9
	DGG-ACerS GOMD 2014 「Full-Scale Inactive Test for Development of the Advanced Melter in RRP」	2014. 5
	日本保全学会 第 11 回学術講演会「ガラス溶融炉高度化研究」	2014. 7
	他 132 件	
特許	なし	

3-2 目標の達成度

要素技術ごとに設定した目標・指標について、それぞれの成果および達成度を表 11 に示す。各要素技術とも、設定された指標に対して所定の成果を得ており、全ての事業目標を達成した。

表 11 目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標	成果	達成度
(1)新ガラス素材の開発 ①イエローフェーズ発生抑制ガラス素材の開発	・ イエローフェーズ（YP）の発生を可能な限り抑制する新ガラス素材を開発する。 ・ 開発したガラスの性能については、るつぼ試験、小型・中型溶融炉試験、新型ガラス溶融炉実規模モ	・ るつぼ試験により、YP 発生抑制ガラス素材の組成（従来ガラス素材中のアルミニウム（Al）とケイ素（Si）の一部を廃液側に分配）を選定した。 ・ 小型および中型溶融炉試験において、調整液を添加しない条件で YP 発生抑制効果を確認することができた。 ・ 新型ガラス溶融炉の実規模モ	概ね達成（新型ガラス溶融炉により運転が可能なることを確認し、今

要素技術	目標・指標	成果	達成度
	ツクアップ試験において確認する。	ツクアップ試験において、調整液を添加しない条件で新ガラス素材を使用して、適切な温度管理ができ、安定した運転が可能であった。また、YP 発生抑制効果については、運転条件の最適化を図る等の課題を確認することができた。	後は、運転条件の最適化を自主事業の中で進める。）
②高減容ガラス素材の開発	・ より多くの高レベル廃液を取り込める新ガラス素材を開発する。 ・ 開発したガラスの性能については、るつぼ試験、小型溶融炉試験において確認する。	・ るつぼ試験により、高減容ガラス素材の組成（従来ガラス素材中のアルミニウム（Al）とホウ素（B）の一部を廃液側に分配、バナジウム（V）の添加）を選定した。 ・ 小型溶融炉試験において、廃棄物含有率 34wt%（現行は 20.8wt%）を達成できることを確認できた。	達成
(2) 新型ガラス溶融炉の開発 ① 新型ガラス溶融炉構成技術の開発	・ 白金族元素の堆積抑制および抜き出し性の向上を目的として、新型ガラス溶融炉を構成する技術（炉底部技術、炉内要素技術）を開発する。 ・ 開発した各構成技術については新型ガラス溶融炉の実規模モックアップ試験において検証を行う。	・ 炉底部形状を円すい、傾斜角度を 60° に変更し、炉底部の加熱手段を追加した炉底部のモックアップ試験等により、現行ガラス溶融炉と比べ、白金族元素の堆積抑制および抜き出し性、ならびにガラスの流下性が向上することを確認した。また、通常の約 5 倍の白金族元素濃度のガラスにおいても、良好に流下することができた。 ・ 新型ガラス溶融炉の実規模モックアップ試験により安定した温度管理が可能であり、白金族元素の堆積抑制、抜き出し性およびガラスの流下性が	達成

要素技術	目標・指標	成果	達成度
		向上することを確認した	
②ガラス溶融炉解析コードの高度化	・ ガラス溶融炉内の温度および白金族元素分布等の挙動を模擬できる解析コードを開発する。	・ 解析コードに仮焼層のモデルやガラス物性値の反映等を行うことで、従来の解析コードと比べ、ガラス溶融炉内のガラス温度および白金族元素分布の再現性が向上した。 ・ 解析コードを用いて、新型ガラス溶融炉の実規模モックアップ試験の運転条件の事前検討を行うことができた。	達成
③ガラス物性等の基礎試験	・ 白金族元素および模擬廃液成分を含有したガラスの物性等の基礎データを取得する。	白金族元素を含有したガラスの物性値、炉内の白金族元素の挙動、仮焼層の構造等のデータを取得し、ガラス溶融炉解析コードの高度化等に利用した。	達成

4. 事業化、波及効果について

4-1 事業化の見通し

本事業において開発されたガラス固化技術は、実用化に向けた更なる技術検証を進めたうえで、5年程度で更新が計画されている六ヶ所再処理工場のガラス溶融炉の設計に反映することができる。

また、本事業により開発されたガラス固化技術を六ヶ所再処理工場に適用することにより、ガラス溶融炉の運転で行っている定期的な洗浄運転（廃液供給10バッチに対して模擬廃液による洗浄運転3バッチ）を低減または不要とすることによるガラス固化体の発生本数の低減も期待できる。

4-2 波及効果

本事業により開発されたガラス固化技術により、ウランおよびプルトニウムを準国産エネルギーとして利用する我が国の核燃料サイクルの要である再処理および高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）処分の効率化、処分に際しての安全裕度の一層の向上に資することが期待できる。

5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

5-1 研究開発計画

新ガラス素材の開発においては、候補となるガラス素材について実験室規模での試験（るつぼ試験）や小型溶融炉等を用いた試験を段階的に進めて評価を行い、最終的には新型ガラス溶融炉の実規模モックアップ試験により性能を確認する計画とした。

また、新型ガラス溶融炉の開発においては、ガラス溶融炉の構成技術である炉底部技術および炉内要素技術の開発を進めるとともに、それらを反映した新型ガラス溶融炉の実規模モックアップ試験炉の設計・製作を行い、モックアップ試験を実施して開発技術の検証を行った。また、ガラス物性等の基礎試験で得られた基礎データ等を元にガラス溶融炉解析コードの高度化を行い、実規模モックアップ試験の検討に利用した。

これらの開発においては、技術的確認すべき目標に向けて要素試験ごとに達成すべき目標、試験内容を設定して、計画的な取り組みを行った。さらに、実規模モックアップ試験により、要素開発の関連性が十分考慮されていることから、事業の開発内容、スケジュールは妥当であった。

研究開発計画を図 28 研究開発計画に示す。

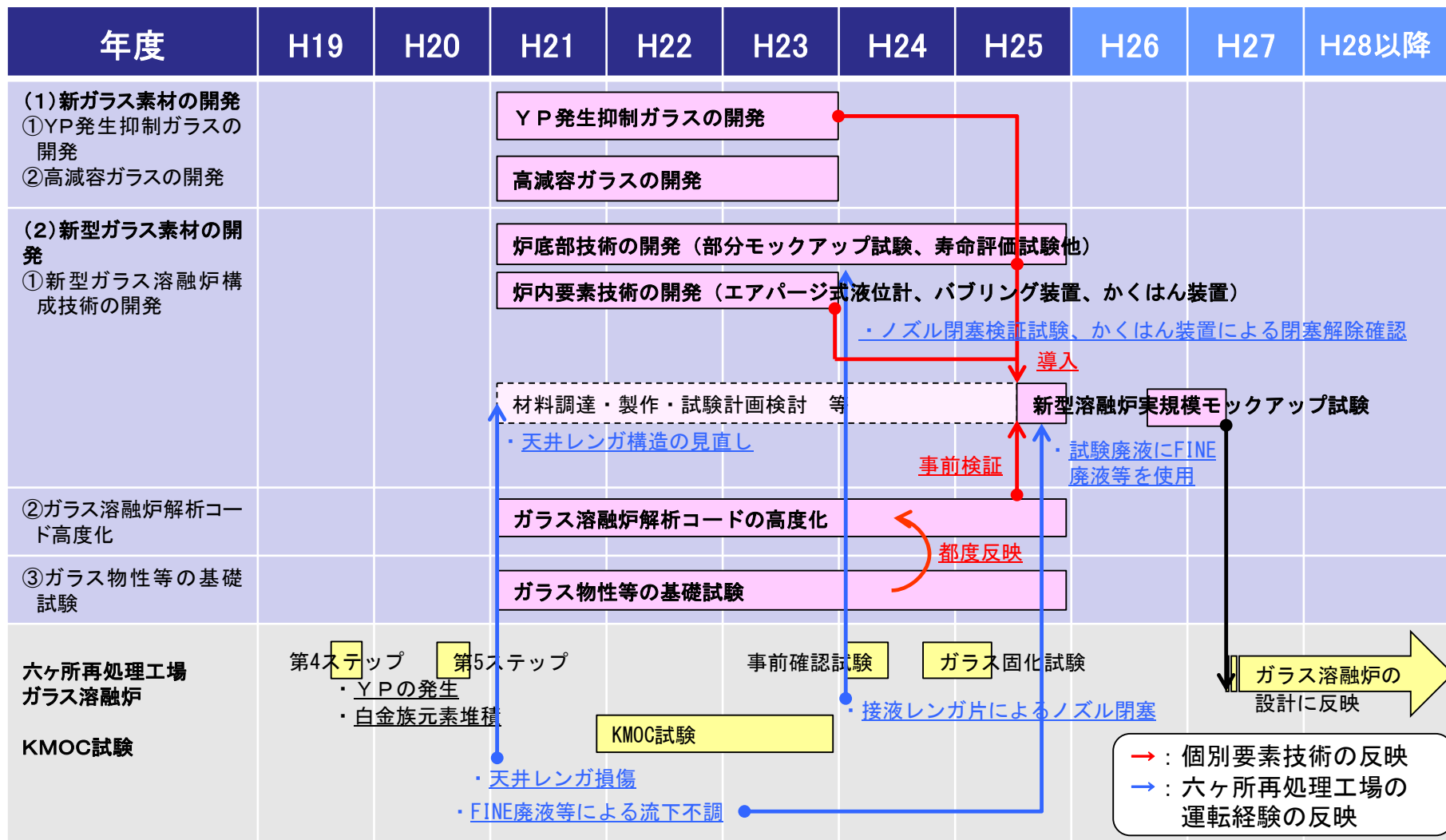


図 28 研究開発計画

5-2 研究開発実施者の実施体制・運営

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、日本原燃が経済産業省から補助金の交付を受けて実施した。

研究開発を統括する実施責任者としては、日本原燃再処理計画部長 中村裕行（H21 年度～H24. 12. 11）、エンジニアリングセンター長 越智英治（H24. 12. 12～H25 年度）とし、その下でプロジェクト運営・研究開発部門（再処理計画部（H21 年度～H24. 12. 11）、エンジニアリングセンター（H24. 12. 12～H25 年度））と運転部門（ガラス固化施設部）が連携して事業に取り組んでおり、事業全期間を通じて適切な実施体制を維持した。

日本原燃は本事業の実施にあたり、試験計画の策定、実施、評価等について総括的に管理を行っており、新ガラス素材および新型ガラス溶融炉の開発に係る専門的・工業規模での試験を六ヶ所再処理工場のガラス溶融炉の設計・製作・試運転の実績を有するメーカーに、新型ガラス溶融炉の開発における基礎的研究を大学・研究機関・メーカーに請負または委託した。また、日本原燃は、必要に応じて試験の請負および委託先と会議体を設けて情報の共有化を図り、実施者間の連携が行われる体制とした。

なお、日本原燃は本事業の遂行にあたり、ガラス、製鉄溶鉱炉および原子力の専門家等の外部有識者から構成されるガラス固化技術研究評価委員会を開催し、試験の計画策定、実施等において評価・助言を受けた。

本研究開発の実施体制を図 29 に示す。

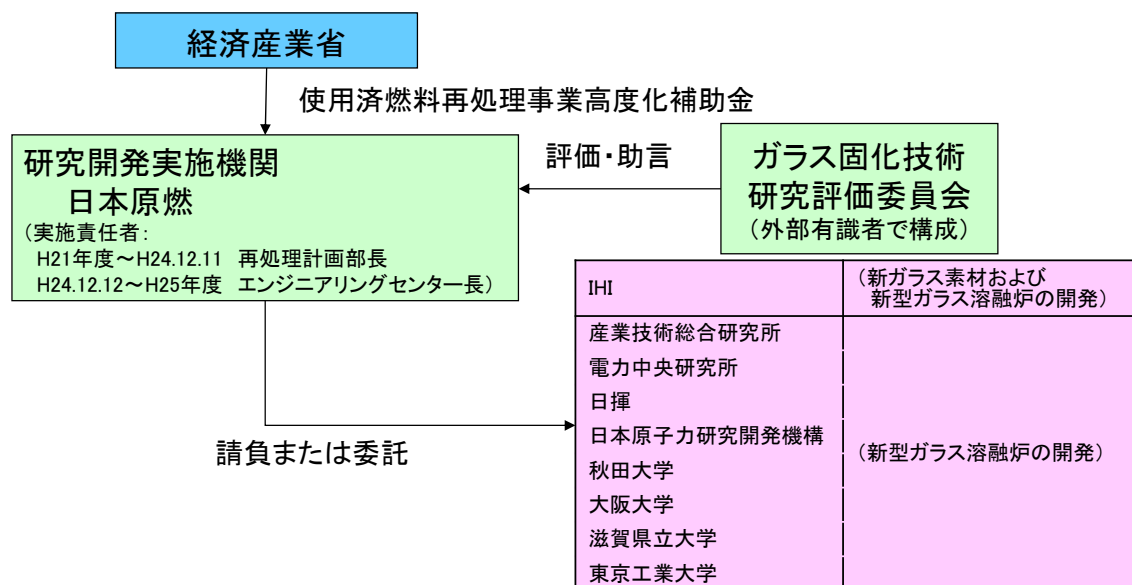


図 29 研究開発実施体制

5-3 資金配分

本事業の予算については、各技術開発項目の進捗や社会環境の変化等を踏まえ、必要な実施項目と支出予算を精査した上で、各年度において適切な資金配分を行った。資金配分を表 12 に示す。

平成 21 年度分の資金は、平成 22 年度に繰越しを行った。また、東北地方太平洋沖地震（平成 23 年 3 月 11 日）の影響により平成 23 年度に試験を行うための資機材の準備等が困難になったことから、当初平成 23 年度分までの資金配分を、平成 25 年度までの資金配分に変更した。

表 12 資金配分

（単位：百万円）

年度 平成		21	22	23	24	25	合計※
労務費		34	30	10	7	7	89
諸経費		10	6	3	3	1	23
試験費	新ガラス素材の開発	101	165	126	—	—	393
	新型ガラス溶融炉の開発	1,376	1,346	528	941	1,021	5,211
合計※		1,522	1,547	667	952	1,029	5,717

※ 四捨五入しているため、各費用と合計は一致しない。

5-4 費用対効果

開発されたガラス固化技術は、5 年程度で更新が計画されている六ヶ所再処理工場のガラス溶融炉に反映される。その結果、六ヶ所再処理工場の安定運転が可能となり、ひいては我が国の核燃料サイクルの着実な推進に寄与することが期待される。

また、より多くの白金族元素を含む高レベル廃液を溶融可能なガラス素材およびガラス溶融炉が実用化された場合には、ガラス固化体の製造本数が削減でき、ガラス固化体の処分費用等の低減が期待できる。

現行のガラス溶融炉で行っている洗浄運転が不要となった場合、ガラス固化体の発生本数を 2 割程度低減できる。

5－5 変化への対応

本プロジェクトの実施期間中に六ヶ所再処理工場におけるガラス溶融炉の試験運転で得られた課題について、適切に新型ガラス溶融炉の開発に反映した（図 28 参照）。

以上

第 4 章 技術に関する施策評価

第4章 技術に関する施策評価

1. 施策の目的・政策的位置付けの妥当性

エネルギー資源の無い我が国にとって、原子力エネルギーを安全かつ適切に活用していかざるを得ないと考えられるため、それを支える核燃料サイクルの推進は不可欠である。本施策は、準国産かつ持続可能な核エネルギー体系の開発を進める上で、環境適合性や核不拡散性の確保に配慮した技術戦略が追求されており、長期的視点から将来の社会的ニーズに適う計画となっている。

なお、個々の技術課題について、解決が必要な技術課題とその達成すべき目標が示されているが、全体を俯瞰したときに、何故、その時、その技術開発を実施するのかが明確でない。また、原子力政策大綱やエネルギー基本計画に基づく原子力戦略を進める上では、規定戦略と相対する概念についても一定規模の範囲で並列して調査、検討を実施すべきである。

【肯定的意見】

- ・ エネルギー資源の無い我が国にとって、将来の再生可能エネルギーの利用割合を確実に増やす意味においても、少なくとも当面の間は原子力エネルギーも適切かつ安全に活用していかざるを得ないと考えられるため、それを支える核燃料サイクルの推進は不可欠である。これについては、国の大綱や計画にも明記しており、それに基づく本施策の目的は妥当であり、核燃料サイクルの中での位置づけや、長期的な運用を睨んだ上での必要性、実施主体の実績等を鑑みた体制など、具体的に説明されている。
- ・ 各技術課題については、高速炉サイクルと軽水炉サイクルを結びつける場合や、放射化した回収ウランを軽水炉サイクルに戻す上で解決が必要な技術課題とその達成すべき目標が示されていると思料される。
- ・ 原子力発電を含む核燃料サイクル技術は、地球規模で見ても将来の化石燃料が枯渇した時代には世界で必要になる技術であると予想されるが、シェールガスなどの開発も進められる現状では、経済性の観点から当面は化石燃料にエネルギーソースを頼り、その出口としての二酸化炭素の固定化技術などで地球温暖化を防ぐ対策を取ることも平行して進めることが現実的である。また、核不拡散の観点から、核燃料サイクル技術を民間ベースで海外に展開することは、現状の国際状況では大きく制限されることは必定である。これらのことから、ビジネスベースの事業化は当面困難であり、我が国の中で国費で経済産業省を中心に開発を続けていくことが当面の姿であると思料される。

- ・ 研究開発時の原子力大綱や原子力立国計画で示された方向性をもとに、プロジェクトの目的や政策的位置づけ、全体目標を設定しており、各施策は妥当であると考えている。
- ・ 国策の実現であり、研究開発に金と時間を要することから国の関与は、必須であると考えている。
- ・ エネルギー基本計画（平成26年4月）においても、資源の有効利用、高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減等のため、核不拡散に十分配慮して再処理を含む核燃料サイクルを推進するとしている。したがって、本施策の目的・政策的位置付けは、同基本計画に沿ったものとなっており、現時点においても、国が支援すべき技術開発としてタイムリーであり、技術の選択は妥当であったと評価する。
- ・ エネルギー基本計画と矛盾の無い施策が実施されている。また、準国産かつ持続可能な核エネルギー体系の開発を進める上で、環境適合性や核不拡散性の確保に配慮した技術戦略が追求されており、長期的視点から将来の社会的ニーズに適う計画となっている。
- ・ 本施策の目的は妥当であり、国際的な動向に照らしても、国内の種々の事情に照らしても、国として積極的に推進すべきものと判断できる。

【問題点・改善すべき点】

- ・ 個々の技術課題については解決が必要な技術課題とその達成すべき目標が示されているが、全体を俯瞰したときに「なぜ・今・これか」がいまひとつ明確ではなく、当該技術の開発ありき、あるいは、「トラブルのもぐらたたきの解決」で計画が進められている感がある。例えば、ガラス固化体技術は高レベル廃棄物処理のクリティカルパスであり、順調な運転を阻害する要因を排除する今回の事業は全く否定すべきものはないが、「他に阻害要件は無いのか」を詰めたかどうか不明瞭である。
- ・ 当該施策で実施された事業では、海外情報の収集は行われているが、海外機関との相互の情報交換などは行われておらず、国際的なアクションは乏しい。核不拡散の観点から、核燃料サイクル技術を海外に展開することは現状の国際関係では大きく制限があり、これは他国からみても同様で、他国でも研究開発が進められているものの、国際連携の形で共同開発する等の進め方は制約が多いのは仕方がない。ただし、核燃料サイクル先進国との国際連携については、適切な契約の下で情報交換や共同開発を進めることが、資金的な制約の補完などの観点で必要である。
- ・ 目標、指標の妥当性については、評価しづらいので可能な範囲ものについては、達成目標の具体化、定量化が望ましい。
- ・ 原子力政策大綱やエネルギー基本計画に基づく原子力戦略を進める上では、既定戦略と相対する概念についても一定規模の範囲で並列して調査、検討を進めておくこ

とは有効である。

- ・ 本施策の必要性は多くの国民に十分理解されるものであると考えられるが、東北地方における震災以降の国民感情を理解した説明が十分になされたかについては判然としない。本施策を含めた国による原子力関連施策の役割と必要性が国民一般に理解されるように求める。
- ・ 本分野における我が国の取り組みが一部他国に比べ後発であることを考慮するとき、海外からの技術導入の可否や程度、我が国がイニシアチブを取るべき箇所について、各プロジェクトのオーナーたる国が更に明確に方針を示す必要性があると考えられる。

2. 施策の構造及び目的実現見通しの妥当性

各事業は、施策を具体化する上で、現時点においても極めて必要性の高いものと判断される。また、各事業とも、調査、開発の目標を的確に設定するとともに、中間評価の実施により、開発を実施していく上での問題点の洗い出し、進捗管理を実施しており、事業スケジュール、成果も概ね妥当である。

なお、福島第一原発事故によって我が国の原子力政策は大きな変革が求められており、今後、施策の構造については見直しが必要である。

【肯定的意見】

- ・ 本施策に配置された事業は、A：「高速炉再処理回収ウラン等除染開発委託費」に係る事業、B：「回収ウラン利用技術開発委託費」に係る事業、C：「使用済燃料再処理事業高度化補助金」に係る事業の3事業であるが、これらは、日本で想定・推進されている核燃料サイクルの要素技術であると同時に、核燃料サイクルが軽水炉サイクルから高速炉サイクル中心に移行する期間も含めた長期的な運用にコンティンジェンシーを付与するために必要な技術でもあり、本施策でこれらの3事業を配置したことは適切である。
- ・ A：「高速炉再処理回収ウラン等除染開発委託費」に係る事業においては、個々の除染技術（遠心抽出機やモノアミド抽出、フレーム炉）および軽水炉サイクルから高速炉サイクルへの移行シナリオそのものについて緻密な試験や検討・評価が行われ、また、B：「回収ウラン利用技術開発委託費」に係る事業においては、軽水炉使用済み燃料を再処理して利用する場合、高速炉サイクルが立ち上がる前においてMOX燃料として用いるシナリオだけではマスマバランスが硬直的で実運用と整合が取れない事態が発生しやすいことに対して、回収ウランの再転換という別のルートを確保するための定量的な評価がされている。さらに、C：「使用済燃料再処理事業高度化補助金」に係る事業においては、高レベル廃棄物処理工程の最終出口の形態を左右する重要な技術であるガラス固化技術について課題（イエローフェーズ、白金族挙動など）を小型試験から大型モックアップ試験まで緻密な実証試験で課題解決しているなど、成果としては妥当であると考えられる。
- ・ これらの事業に使用された予算の配分やスケジュールについても、3事業の成果のレベルを勘案すると、違和感はない。
- ・ 調査、開発の目標を的確に設定するとともに、中間評価の実施により、開発を実施していく上での問題点の洗い出し、進捗管理を実施しており、事業スケジュール、成果も概ね妥当である。
- ・ 各事業は、施策を具体化する上で、現時点においても極めて必要性の高いものと判断される。また、各事業とも、所期目標が適切に設定され、その目標が達成されたものと考ええる。

- ・ 予算の範囲内で施策の目的を実現するための事業が配置されている。殆どの事業について、目的を満足する十分な成果が得られている。
- ・ 現時点における成果、事業の配置については概ね妥当であると評価できる。

【問題点・改善すべき点】

- ・ 事業間で、目的の達成度にばらつきがある。その理由の一つとして事業実施者の選定が、事業目的と整合していないことが考えられる。
- ・ 福島第一原発事故によって我が国の原子力政策は大きな変革が求められており、今後、施策の構造については見直しが必要である。特に原子炉導入戦略、再処理の容量・機能やMOX燃料利用シナリオなどには、福島事故が少なからぬインパクトを与えているはずであるが、事業実施期間や終了時期との兼ね合いもあり、十分な検討が行えなかったことが推察される。
- ・ 多くの取り組みの成果が明確であるが、「高速炉再処理回収ウラン等除染技術開発委託費に係る事業」における「再処理工学の枠組み構築」は概念的必要性の高さに対して成果が明確では無いように思える。
- ・ また、現代プロジェクトマネジメントの視点からは、現在の報告レベルから予算、スケジュールの評価を適切に行うことは難しい。成果の妥当性は十分に評価できるし、本施策が実現レベルとの比較で費用対効果が十分に得られる見込みであることは多くの部分で良好な評価をさせるものである。一方で、プロジェクト完了に必要なコスト、期間が適切な意思決定の下で管理、誘導されたものであるかどうかは確認できない。この種の重要施策の実施において高度なマネジメントの導入が不可欠であることは否めない。成果の獲得に向けた多くの研究活動が、当初目的に加えて多くの成果を与え、その中には人材の育成など、将来に必要な大切な要素が含まれることを認めながらも、諸費用、人材、時間の有効な活用とその必要性の説明力の確保のためには適切なマネジメント・システムの導入が期待されるものとする。

3. 総合評価

技術に関する施策、技術に関する事業共に、事業の進捗と問題点、課題を的確にモニタリングするための中間評価と終了時評価を外部の有識者を交えて実施しており、評価体制は問題ないとする。本施策は国がイニシアチブを持って実施すべき施策であり、評価対象事業の成果、費用対効果についても肯定的評価に値するものであると判断できる。得られた成果が次なるステップに有効に活用され、商用利用されることを期待したい。

なお、これらの事業を推進した結果、課題が解決できた一方で新たな課題も分かったはずであり、その整理も必要ではないかと思われる。核燃料サイクル先進国との国際連携については、適切な契約の下で情報交換や共同開発を進めることが、資金的な制約の補完などの観点で必要である。また、施策による確実な成果確保と実施過程の妥当性確保のために、諸外国では一般と考えられるマネジメント手法の導入が期待される。

【肯定的意見】

- ・ エネルギー資源の無い我が国にとって、当面の間は原子力エネルギーも適切かつ安全に活用していかざるを得ないと考えられるため、それを支える核燃料サイクルの推進は不可欠であることは国の大綱や計画にも明記しており、それに基づく本施策は妥当である。
- ・ 本施策に配置された事業は、A：「高速炉再処理回収ウラン等除染開発委託費」に係る事業、B：「回収ウラン利用技術開発委託費」に係る事業、C：「使用済燃料再処理事業高度化補助金」に係る事業の3事業であるが、各事業については、高速炉サイクルと軽水炉サイクルを結びつける場合や、放射化した回収ウランを軽水炉サイクルに戻す上で解決が必要な技術課題とその達成すべき目標が示されており、これら3事業の配置は適切であるとともに、今後も国費で経済産業省を中心に開発を続けていくことが当面の姿であると思料される。
- ・ これらの3事業では、それぞれ、緻密な試験や検討、定量的な評価、実証試験による課題解決がなされており、成果としては妥当であると考えられる。また、これらの事業に使用された予算の配分やスケジュールについても、3事業の成果のレベルを勘案すると、違和感はない。
- ・ 技術に関する施策、技術に関する事業共に、事業の進捗と問題点、課題を的確にモニタリングするための中間評価と終了時評価を外部の有識者を交えて実施しており、評価体制は問題ないとする。
- ・ 開発テーマについてもその時の国策に沿って、吟味・設定されており、時に政策の方向性が変わったりしているものもあるが、得られた成果が次なるステップに有効に活用され、商用利用されることを期待したい。
- ・ 施策は、各事業間の関連やの将来の展開を踏まえて構築されており、今後の実用化

へ向けた諸施策の方向性を相当程度明らかにできたものとして評価する。

- ・ 準国産かつ持続可能な核エネルギー体系の開発を進める上で、環境適合性や核不拡散性の確保に配慮した技術戦略が追求されている。
- ・ 長期的視点から将来の社会ニーズに適う計画が実施され、意図した目的がほぼ達成された。
- ・ 本施策は国がイニシアチブを持って実施すべき施策である。評価対象事業の成果、費用対効果についても肯定的評価に値するものであると判断できる。

【問題点・改善すべき点】

- ・ 全体を俯瞰したときに「なぜ・今・これか」がいまひとつ明確ではなく、当該技術の開発ありきで計画が進められている感がある。
- ・ 核不拡散の観点から、核燃料サイクル技術を海外に展開することは現状の国際関係では大きく制限があるが、核燃料サイクル先進国との国際連携については、適切な契約の下で情報交換や共同開発を進めることが、資金的な制約の補完などの観点で必要である。
- ・ また、これらの事業を推進した結果、課題が解決できた一方で新たな課題も分かったはずであり、その整理も必要ではないかと思われる。また、東日本大震災と福島第一発電所の事故を受けて国民の科学技術の信頼性に対して著しく懐疑的な見方が広がっている現状では、本事業を推進する関係者もそのような国民の意識を無関係と切り捨てるのではなく、課題は課題として、不安なことは不安なこととして正直に記述することが国民の理解を得られる第一歩であると考えられる。
- ・ エネルギー基本計画を基本としながらも、画一的、硬直的にならず、価値観の多様化する国民の納得感が高まることに配慮し、規定戦略と相対する概念についても一定規模の範囲で並列して調査、検討を進めておくことは有効である。
- ・ 多くの国民の原子力関連事業に対する正しい理解を促進するために、施策の内容と必要性に対するより一層の説明努力を期待する。
- ・ 施策による確実な成果確保と実施過程の妥当性確保のために、諸外国では一般と考えられるマネジメント手法の導入が期待される。

第5章 技術に関する事業評価

第5章 技術に関する事業評価

A. 高速炉再処理回収ウラン等除染開発委託に係る事業 (総合評価)

適切な技術開発マネジメントのもとで、達成目標が設定され、それに至る検討過程も妥当であり、目標も達成されていると考える。今回得られた成果は、将来の再処理施設での実用化が見込めるレベルにあるが、他の候補技術についても、引き続き検討を深めることが、将来の候補技術の絞り込みをより確かなものとする上で有用と考える。中間報告の指摘に対しても適切に対処しており、事業完遂に向けた姿勢は高く評価できる。再処理工学の枠組み構築は、技術継承のための1ツールとして引き続き整備していくべきである。

なお、軽水炉から高速炉への移行シナリオについては、事業実施期間や終了時期との兼ね合い、さらに今後の軽水炉再稼働の見通しが不透明なこともあり、十分な検討が行えていない。再稼働が見込める原発の基数や稼働年数、再処理量等について、幅広い想定による検討が必要である。

【肯定的意見】

- ・ 個々の除染技術（遠心抽出機やモノアミド抽出、フレーム炉）および軽水炉サイクルから高速炉サイクルへの移行シナリオそのものについては、緻密な試験や検討・評価が行われている。
- ・ 昨年4月のエネ基において政策的位置づけが変わってきているが、大綱ベースの内容で概ね実施されている。
- ・ 変化への対応ということで、震災・原子力事故への対応も記載しているところは評価される。
- ・ 適切な技術開発マネジメントのもとで、達成目標が設定され、それに至る検討過程も妥当であり、目標も達成されていると考える。今回得られた成果は、将来の再処理施設での実用化が見込めるレベルにあるが、他の候補技術についても、引き続き検討を深めることが、将来の候補技術の絞り込みをより確かなものとする上で有用と考える。なお、再処理工学の枠組み構築は、技術継承のための1ツールとして引き続き整備していただきたい。
- ・ 次代の再処理施設に求められる目的・機能についてのデータ蓄積に必要な重要度の高い事業が展開され、十分な成果が得られている。
- ・ 本事業の必要性は高く、成果も妥当なものだと判断できる。中間報告の指摘に対しても適切に対処しており、事業完遂に向けた姿勢は高く評価できる。

【問題点・改善すべき点】

- ・ 政策的な位置づけなどの国の大綱などから本事業の位置づけを説明しているが、なぜ今この技術（遠心抽出機やモノアミド抽出、フレーム炉）なのかが唐突であり、この技術の研究開発ありきで後付けで必要性を説明しているように感じられる。他の技術も含め、それらの研究開発のポテンシャル維持という原子力特有の実情もあることは理解できるが、であるが故に慎重な表現が求められる。
- ・ 「変化への対応」の部分については、東日本大震災と福島第一発電所の事故が「変化の原因」として記述されているが、「それでも核燃料サイクルの必要性は変わらない」と切り捨てたような表現は国民の理解を得られない。技術的には正しいが、ここについても、慎重な表現が求められる。
- ・ 遠心抽出機のスラッジ堆積について、異常が発生するまでの時間を評価しているが、堆積状況を把握することよりも堆積のメカニズムを把握して、スラッジ堆積が発生しない（発生までの時間が無限大）でないと、放射性物質を扱う機器の定期交換は極力避けるべきという原則に照らして、そもそものアプローチが間違っていないか。
- ・ 達成度については、成果評価指標として、可能なものは数値化などの定量化するのが望ましい
- ・ 除染というワードは、クリーン化するイメージがあるので、高除染化技術は、回収技術もしくは分離技術言い換えられないか。
- ・ 軽水炉から高速炉への移行シナリオについては、事業実施期間や終了時期との兼ね合い、さらに今後の軽水炉再稼働の見通しが不透明なこともあり、十分な検討が行えていない感がある。再稼働が見込める基数や稼働年数、再処理量等について、広い想定幅を持たせた検討が必要。また昨今では、事故耐性の高い軽水炉燃料や高燃焼度化等、従来概念を越える軽水炉利用法も検討が進んでおり、検討対象の多様化にも対応する必要がある。
- ・ 「再処理工学の枠組み構築」の成果が、当初の目的と合致するものであるのかについて判断できない。
- ・ 技術評価を中心とした研究開発体制の確立は認められるが、研究開発推進と成果確保に向けたマネジメント体制の確立は確認できない。国費の適切な活用と目標達成までの時間の適切性を説明し、国際競争力のある研究開発体制を確立するためにも適切なマネジメント体制の確立が期待される。

B. 回収ウラン利用技術開発委託費に係る事業

(総合評価)

今後、再処理施設の稼働により回収ウランが蓄積することは明らかであり、近い将来での事業化が見込め、その効果も大きな事業である。また、目標の設定・根拠・成果が明確に示されており、事業完遂に向けた姿勢は高く評価できる。

なお、全体として調査報告で終わっている傾向にあり、技術課題の洗い出しが甘く、もう少し深く掘り下げて次の研究開発アクションにつなげるべきではないか。特に、「(3) 炉心特性に与える影響」については検討の度合いが浅く、「濃縮回収ウラン燃料を使用した炉心の成立性に問題ないことを確認」とあるが、その根拠が一面的で不十分である。

【肯定的意見】

- ・ 軽水炉使用済み燃料を再処理して利用する場合、高速炉サイクルが立ち上がる前においてMOX燃料として用いるシナリオだけではマスマバランスが硬直的で実運用と整合が取れない事態が発生しやすい。その意味でも、回収ウランの再転換という別のルートを確保することは意義がある。回収ウランの再転換は発想としては昔からあったが、本事業により定量的な評価ができたと思われる。
- ・ 本研究開発は、喫緊の問題ではないものの、事業化に向けた課題の抽出がなされ、将来的なサイクルの確立に資する上で、概ね妥当であると考ええる。
- ・ 今後、再処理施設の稼働により回収ウランが蓄積することは明らかである。仮に、回収ウラン利用の道筋が用意できなければ、回収ウランの貯蔵スペースのみが増大することになる。本検討で、最新の情報を基に、転換から再転換までの実現性のあるプロセスと概算費用が示された。今後、回収ウランの利用を検討する上で有意義な成果である。
- ・ 近い将来での事業化が見込め、その効果も大きな事業である。
- ・ 本事業の必要性は高く、成果も妥当なものだと判断できる。目標の設定・根拠・成果が明確に示されており、事業完遂に向けた姿勢は高く評価できる。

【問題点・改善すべき点】

- ・ 調査と机上検討が主体であるため特許が出ないことは理解できるが、ビジネスモデル特許など発想を広げた知的財産戦略があっても良いのではないかな。
- ・ 全体として調査報告で終わっている傾向にあり、技術課題の洗い出しが（本文中に触れてはあるが）甘く、もう少し深く掘り下げて次の研究開発アクションにつなげるべきではないか。
- ・ 「(3) 炉心特性に与える影響」については検討の度合いが浅い。「濃縮回収ウラ

ン燃料を使用した炉心の成立性に問題ないことを確認」とあるが、その根拠が一面的で不十分である。

- 十分な成果と多くの事業完遂に向けた努力を評価した上であるが、研究開発推進と成果確保に向けたマネジメント体制の確立は確認できないことを指摘したい。国費の適切な活用と目標達成までの時間の適切性を説明し、国際競争力のある研究開発体制を確立するためにも適切なマネジメント体制の確立が期待される。

C. 使用済燃料再処理事業高度化補助金に係る事業

(総合評価)

再処理工場の安定運転だけでなく、処分の観点から、ガラス固化体の安定性向上、発生量抑制に寄与するものとして評価できる。特に、高減容ガラスや溶融炉（洗浄頻度低減、固化体発生数削減）の開発では、その部分の課題（イエローフェーズ、白金族挙動など）をビーカー試験から大型モックアップ試験まで緻密な実証試験で課題解決しており、事業を展開する上で大きな成果が得られた。また、中間報告の状況を勘案すると、明確かつ適切な成果が得られた。

なお、課題が解決できた一方で新たな課題も分かったはずで、その整理も必要で、それら全体を俯瞰した研究計画があっても良いように思われる。本施策の分野においてどのように国際的なイニシアチブを持つべきかについては難しい問題である。一方で、本分野における技術の国産化は様々な面で必要になることが考えられる。どのような手段をもって、事業の成功を得るかということは、マネジメントの基本的な課題である。

【肯定的意見】

- ・ ガラス固化技術は、高レベル廃棄物処理工程の最終出口の形態を左右する重要な技術であり、その部分の課題（イエローフェーズ、白金族挙動など）をビーカー試験から大型モックアップ試験まで緻密な実証試験で課題解決していることは高く評価できる。
- ・ 国内外の知見も入れて、いずれ更新が計画されている六ヶ所のガラス溶融炉の設計のための要素技術の開発について、開発目標に対する所定の成果を達成している。
- ・ 本成果は、再処理工場の安定運転だけでなく、処分の観点から、ガラス固化体の特性向上、発生量抑制に寄与するものとして評価できる。今後も、廃棄物の減容率や廃棄体特性の向上、また、種々の廃棄物の固化も念頭に、固化技術の高度化検討を継続願いたい。
- ・ 円滑な燃料サイクル事業の展開に不可欠な重要課題について十分な成果が得られた。特に、高減容ガラスや溶融炉（洗浄頻度低減、固化体発生数削減）の開発では、事業を展開する上で大きな成果が得られた。
- ・ 本事業の必要性は高く、成果も妥当なものだと判断できる。中間報告の状況を勘案すると、明確かつ適切な成果が得られたものと理解できる。

【問題点・改善すべき点】

- ・ 全体的に「対症療法」的な進め方であり、本事業でも課題が解決できた一方で新たな課題も分かったはずで、その整理も必要ではないか。もし、それが全くないので

あれば、本技術は完璧に完成したことになり、更新プラントのガラス固化工程は磐石の設備になるが、他にも解決すべき課題が山積しているはずで、それら全体を俯瞰した研究計画があっても良いように思われる。確かに、技術開発には「やってみなければ分からない」ことも多く、それは仕方がないが、そのようなアプローチだとムービングターゲットを追うことになり、結果としていつまでも“もぐらたたきの”な対応ではプラントの稼動はおぼつかなくなる。

- ・ 「変化への対応」の部分については、何も触れてない。確かに技術的にはそうであるが、東日本大震災と福島第一発電所の事故を受けて国民の科学技術の信頼性に対しては著しく懐疑的な見方が広がっている。本事業を推進する関係者もそのような国民の意識を無関係と切り捨てるのではなく、課題は課題として、不安なことは不安なこととして正直に記述することが国民の理解を得られる第一歩である。本当に一切ないのであればすばらしいが、このような視点についても慎重な表現が求められる。
- ・ 現溶融炉の問題点がフィードバックされたのかどうか、要素技術はいいとしても、システム技術としての達成目標についての言及がほしい。
- ・ イエローフェーズ発生抑制や高減容ガラスの開発における最適な添加剤の選定について、日本独自の検討の可能性がある。
- ・ 本事業ではシステム化技術としての成功が大きく認められることを示した上で、諸外国における先行技術の導入が計画的であったのか、また、我が国の科学技術政策上の適切な対応であったのか判断できないことを指摘したい。特に本施策の分野においてどのように国際的なイニシアチブを持つべきかについては難しい問題である。一方で、本分野における技術の国産化、国保有化は様々な面で必要になることが考えられる。どのような手段を持って、事業の成功を得るかということは、マネジメントの基本的な課題である。
- ・ 技術評価を中心とした研究開発体制の確立は認められるが、研究開発推進と成果確保に向けたマネジメント体制の確立は確認できない。国費の適切な活用と目標達成までの時間の適切性を説明し、国際競争力のある研究開発体制を確立するためにも適切なマネジメント体制の確立が期待される。

第 6 章 今後の研究開発の方向等に関する提言

第6章 今後の研究開発の方向等に関する提言

【技術に関する施策】

（核燃料サイクル関連分野）

エネルギー資源の無い我が国にとって、原子力エネルギーを安全かつ適切に活用していかざるを得ないと考えられるため、エネルギー基本計画等を踏まえ、核燃料サイクル推進に資する具体的な施策を再度整理し今後も着実に実施に移していくことが重要である。また、国内外の最新研究動向を踏まえつつ、既成概念にとらわれない柔軟な発想で今後の施策を考え、開かれた政策決定プロセスを展開することが、原子力の信頼回復等に必要と考える。

今回の評価対象事業においては、期待される成果が得られ、成果による費用対効果の適切性が提示されているが、果たして、そのプロセスが適切であったかについては評価できない。この点についてのマネジメントと報告の必要性を示すべきである。

また、今回の施策に配置された事業の他にもキーコンポーネントが数多くある。事業の設定の際は、核燃料サイクル全体を見た大きな俯瞰図に基づいて計画的に事業を配置する必要がある。

【各委員の提言】

- ・ エネルギー資源の無い我が国にとって、当面の間は原子力エネルギーも適切かつ安全に活用していかざるを得ないと考えられるため、それを支える核燃料サイクルの推進は不可欠であることは国の大綱や計画にも明記しており、関連の技術開発ポテンシャルをさらに向上させ人材の育成を継続するという観点からも、引き続き、本施策を継続する必要がある。
- ・ エネルギー基本計画等を踏まえ、核燃料サイクル推進に資する具体的な施策を再度整理し今後も着実に実施に移していくことが重要と考えます。
- ・ 核分裂資源の有効利用を追求する上で、燃料サイクルを完結させることの重要性は不動だが、目的とする資源利用率について、高ければ高い方が良いとする従来の考え方に自由度を持たせ、多角的に将来の原子炉・サイクルの在り方を捉えることは有効である。
- ・ 完全リサイクルに固執せず、これに裕度を持たせることが、全体的に見た廃棄物発生量、処分施設の安全性能、核拡散リスクにどのような影響を与えるか、また必要十分な資源利用率の達成によるサイクル開発の合理化度合や、資源の多様化による持続可能性等について根本的検討が望まれる。
- ・ 国内外の最新研究動向を踏まえつつ、既成概念にとらわれない柔軟な発想で今後の施策を考え、開かれた政策決定プロセスを展開することが、原子力の信頼回復やリ

ブレースや新規建設推進に必要と考える。

- 今後の技術に関する施策については、昨年4月のエネルギー基本計画や今後策定される予定の新生原子力委員会による「基本的考え方」などをベースに将来のサイクルの方向性を見通しつつ、作成されることを期待したい。実用化に近い技術などは必要に応じて、海外レビューなども織り込むことが必要ではないかと考える。
- 今回の施策に配置された事業は、「高速炉再処理回収ウラン等除染」、「回収ウラン利用技術開発」および「ガラス固化技術開発」の3事業であるが、燃料サイクル全体を見ると他のキーコンポーネントが数多くある。このような事業の設定については、毎年個別にピックアップして事業を設定するとか、トラブル解決のために事業をするといった、場当たりの設定では多くがムービングターゲットになってしまい、いつまでも終わりの無い開発になってしまう。大きな俯瞰図に基づいて計画的に事業を配置する必要があると思われる。またマイルストーン設定も有効かもしれない。
- 原子力開発に限らず、どのような研究開発の場でも、研究者・開発者は良いことばかりを強調し欠点はあいまいにすることが多い。しかし、欠点を一番よく知っているのは当該研究者・開発者であり、欠点や課題こそ前面に出して真摯に周囲に問いかけていく進め方が、結局、早期開発につながると思われる。
- 新しい技術開発をし続けることだけが良いことではなく、原子力も早く「枯れた技術」になることこそが必要ではないか。
- 初期の要求事項の中で、プロジェクト推進に向けた適切なマネジメント体制の確立と報告の必要性について明示すべきであると考えられる。この際には、総括的な研究開発マネジメント体制と個々の事業を適切に推進し、確実に成果を得るためのプロジェクトマネジメント体制の確立が期待される。
- 今回の評価対象事業においては、期待される成果が得られ、成果による費用対効果の適切性が提示されているが、果たして、そのプロセスが適切であったかについては評価できない。この点についてのマネジメントと報告の必要性を示すべきではないだろうか。
- 本施策による事業に求めるものが、新規の要素技術であるのか、我が国の種々の現状に合わせたシステム化技術（要素技術の開発も含む）であるのかについては、国の国際競争力確保の視点から、施策上の要求として明示されるべきものと考えられる。

【技術に関する事業】

（A. 高速炉再処理回収ウラン等除染開発委託費に係る事業）

概ね適切な成果が得られている。本事業の成果をさらに発展させ、回収ウラン等の除染技術の実用化に向けて継続的に取り組まれることを期待する。

【各委員の提言】

- ・ 各事業については、本事業の成果をさらに発展させ、実用化に向けて継続的に取り組まれることを期待します。
- ・ 個々の事業については、概ね適切な成果が得られたものと考えられる。

（B. 回収ウラン利用技術開発委託費に係る事業）

概ね適切な成果が得られているが、「（３）炉心特性に与える影響」については、原子炉の運転管理を行う電気事業者の判断材料を得るためにはさらなる検討が必要である。本事業の成果をさらに発展させ、実用化に向けて継続的に取り組まれることを期待する。

【各委員の提言】

- ・ 各事業については、本事業の成果をさらに発展させ、実用化に向けて継続的に取り組まれることを期待します。（再掲）
- ・ 「（３）炉心特性に与える影響」については、原子炉の運転管理を行う電気事業者の判断材料を得るためにはさらなる検討が必要である。
- ・ 個々の事業については、概ね適切な成果が得られたものと考えられる。（再掲）

（C. 使用済燃料再処理事業高度化補助金に係る事業）

国策を推進していく上で、根幹となる事業であり、将来この技術が採用されたときに、先の六ヶ所再処理工場のガラス固化のトラブルのような問題が発生しないように、徹底した実規模レベルの実証試験が必要である。

また、高レベル放射性廃棄物処分の問題は、最大の問題であり、この問題に対処していくためにも、高速炉を活用した放射性廃棄物の減容、有害度減少などの研究開発に、より一層の力点が置かれるべきである。

【各委員の提言】

- ・ 今回実施対象になっていた使用済み燃料再処理事業の高度化については、一面、事業者サイドの研究開発的要素もあると思われるが、国策を推進していく上で、根幹となる事業であることから、国の支援により、確実に着実に実施していくことが必要である。将来この技術が採用されたときに、先の六ヶ所のガラス固化のトラブルのような問題にならないように、徹底した実規模レベルの実証試験が必要であると考ええる。
- ・ 高レベル廃棄物処分の問題は、最大の問題であり、原子力小委の放射性廃棄物WGでの検討が進められており、学術会議により更なる提言もされると聞いている。この問題に対処していくためにも、高速炉を活用した放射性廃棄物の減容、有害度減少などの研究開発により一層の力点が置かれるべきであると考ええる。
- ・ 各事業については、本事業の成果をさらに発展させ、実用化に向けて継続的に取り組まれることを期待します。（再掲）
- ・ 個々の事業については、概ね適切な成果が得られたものと考えられる。（再掲）

第 7 章 評点法による評点結果

第 7 章 評点法による評点結果

「核燃料サイクルに係る施策」に係る評価の実施に併せて、以下に基づき、本評価検討会委員による「評点法による評価」を実施した。その結果は「3. 評点結果」のとおりである。

1. 趣 旨

評点法による評価については、産業技術審議会評価部会の下で平成 11 年度に評価を行った研究開発事業（39 プロジェクト）について「試行」を行い、本格的導入の是非について評価部会において検討を行ってきたところである。その結果、第 9 回評価部会（平成 12 年 5 月 12 日開催）において、評価手法としての評点法について、

(1) 数値での提示は評価結果の全体的傾向の把握に有効である、

(2) 個々のプロジェクト毎に評価者は異なっても相対評価はある程度可能である、との判断がなされ、これを受けて今後のプロジェクト評価において評点法による評価を行っていくことが確認されている。

これらを踏まえ、プロジェクトの中間・事後評価においては、

(1) 評価結果をできる限りわかりやすく提示すること、

(2) プロジェクト間の相対評価がある程度可能となるようにすること、

を目的として、評価委員全員による評点法による評価を実施することとする。

本評点法は、各評価委員の概括的な判断に基づき、点数による評価を行うもので、評価報告書を取りまとめる際の議論の参考に供するとともに、それ自体評価報告書を補足する資料とする。

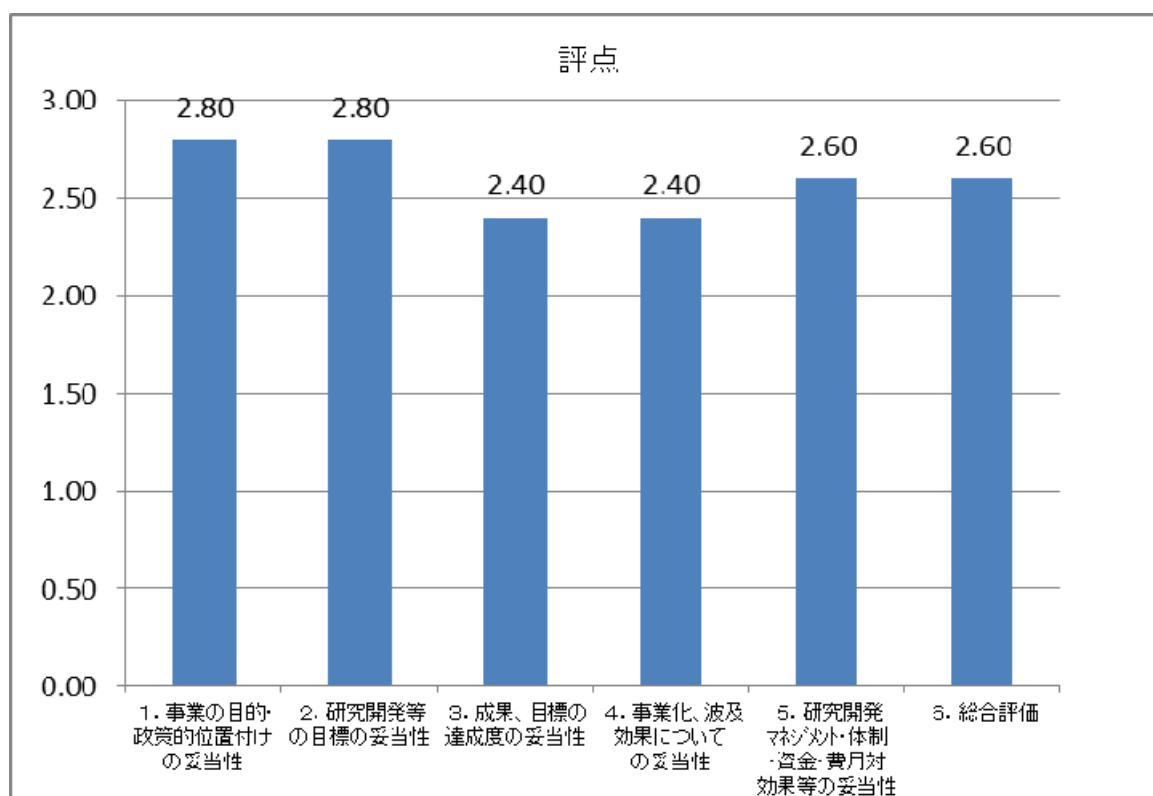
2. 評価方法

- ・ 各項目ごとに 4 段階（A（優）、B（良）、C（可）、D（不可）〈a, b, c, d も同様〉）で評価する。
- ・ 4 段階はそれぞれ、 $A(a) = 3$ 点、 $B(b) = 2$ 点、 $C(c) = 1$ 点、 $D(d) = 0$ 点に該当する。
- ・ 評価シートの記入に際しては、評価シートの《判定基準》に示された基準を参照し、該当と思われる段階に○を付ける。
- ・ 大項目（A, B, C, D）及び小項目（a, b, c, d）は、それぞれ別に評点を付ける。
- ・ 総合評価は、各項目の評点とは別に、プロジェクト全体に総合点を付ける。

3. 評点結果

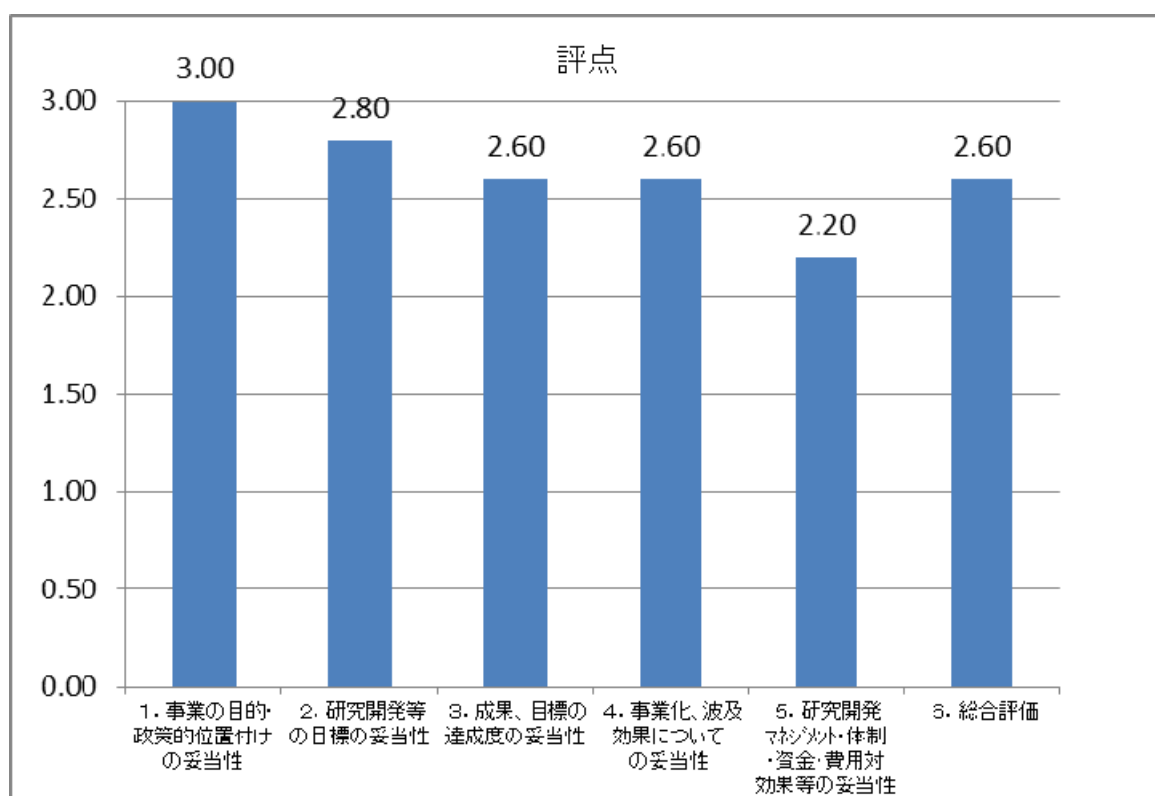
評点法による評点結果
(A. 高速炉再処回収ウラン等除染技術開発委託費に係る事業)

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.80	3	2	3	3	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.80	3	2	3	3	3
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.40	3	2	2	3	2
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.40	2	2	2	3	3
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.60	3	2	2	3	3
6. 総合評価	2.60	3	2	2	3	3



評点法による評点結果
(B. 回収ウラン利用技術開発委託費に係る事業)

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	3.00	3	3	3	3	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.80	3	2	3	3	3
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.60	3	2	3	3	2
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.60	3	2	2	3	3
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.20	3	2	2	3	1
6. 総合評価	2.60	3	2	3	3	2



評点法による評点結果
(C. 使用済燃料再処理事業高度化補助金に係る事業)

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.80	3	2	3	3	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	3.00	3	3	3	3	3
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.80	3	2	3	3	3
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.60	3	2	2	3	3
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.60	3	2	2	3	3
6. 総合評価	2.80	3	2	3	3	3

