

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

目 次

1. 事業の目的・政策的位置付け	1
1 - 1 事業目的	1
1 - 2 政策的位置付け	2
1 - 3 国の関与の必要性	3
2. 研究開発目標	4
2 - 1 研究開発目標	4
2 - 1 - 1 全体の目標設定	4
2 - 1 - 2 個別要素技術の目標設定	5
3. 成果、目標の達成度	10
3 - 1 成果	10
3 - 1 - 1 全体成果	10
3 - 1 - 2 個別要素技術成果	10
3 - 1 - 3 特許出願状況等	41
3 - 2 目標の達成度	43
4. 事業化、波及効果について	49
4 - 1 事業化の見通し	49
4 - 2 波及効果	49
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等	50
5 - 1 研究開発計画	50
5 - 2 研究開発実施者の実施体制・運営	51
5 - 3 資金配分	52
5 - 4 費用対効果	52
5 - 5 変化への対応	53

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)。

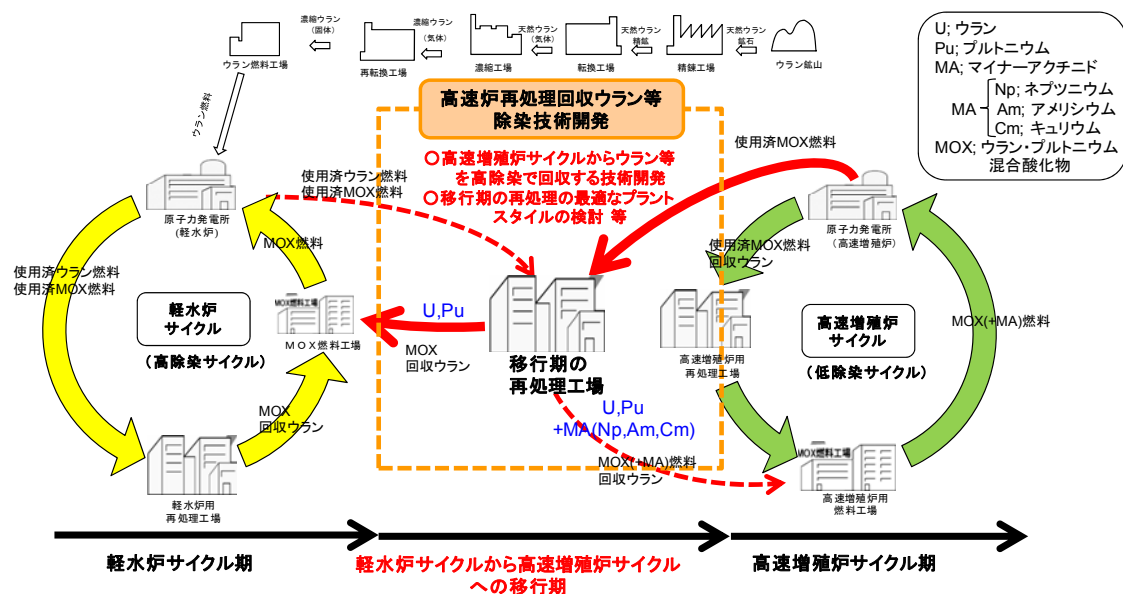


図 1 高速炉再処理回収ウラン等除染技術開発事業

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、その結果を受けて各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、廃液へのロスはなし）	◎（短時間で再起動、廃液へのロスはなし）
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。電動機はセル内）
	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。

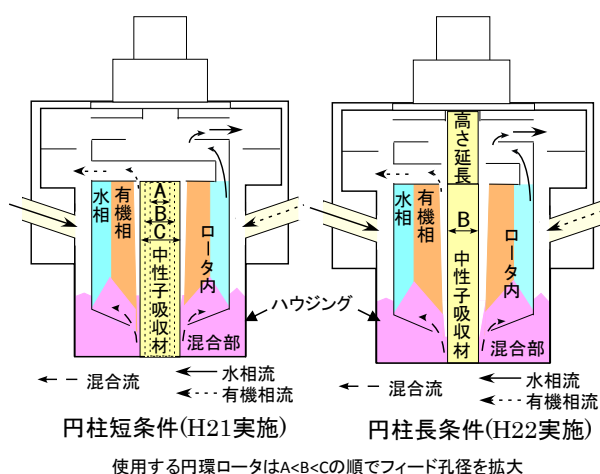


図2 試験に用いた単段型遠心抽出器の断面図

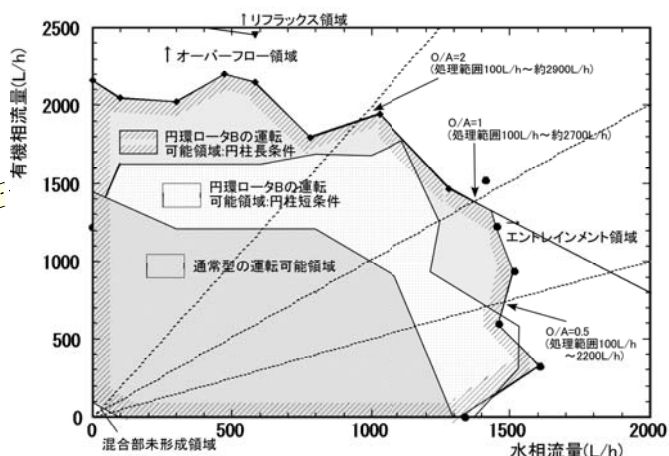


図3 運転可能領域の比較

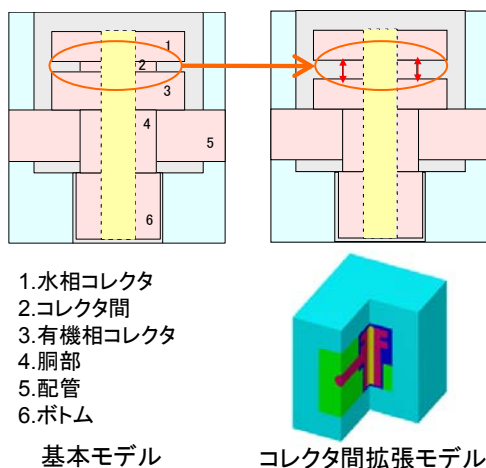


図4 臨界評価モデル

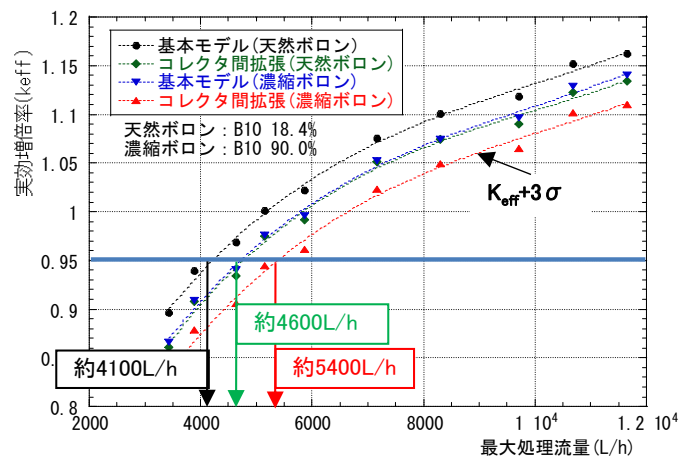


図5 臨界安全上の最大処理流量の評価

(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

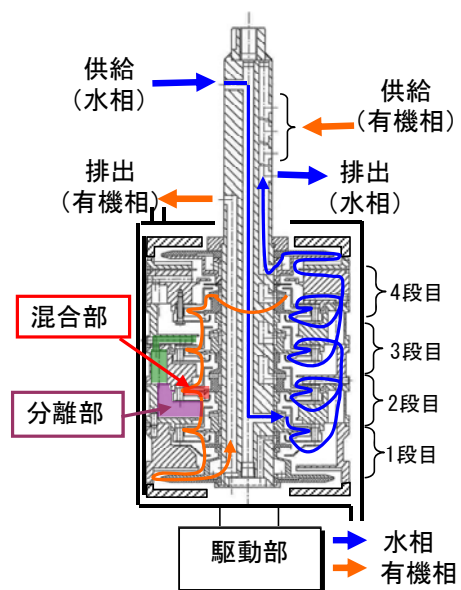


図6 一般産業用多段型遠心抽出器の構造と原理

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。

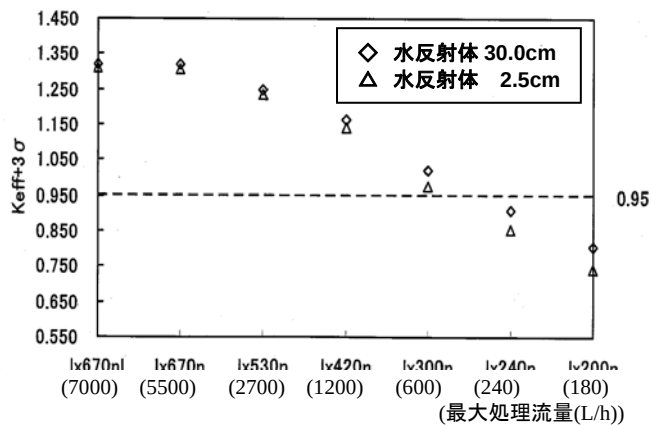


図7 臨界安全上の最大処理流量の評価

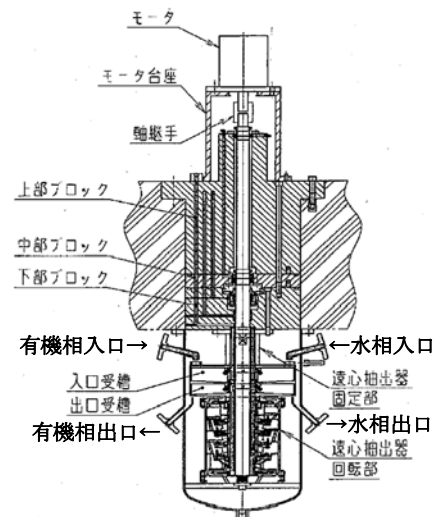


図8 多段型遠心抽出器構造案

(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。

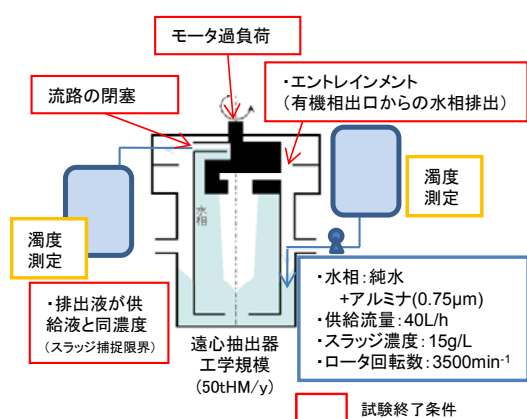


図9 スラッジ試験装置概略図

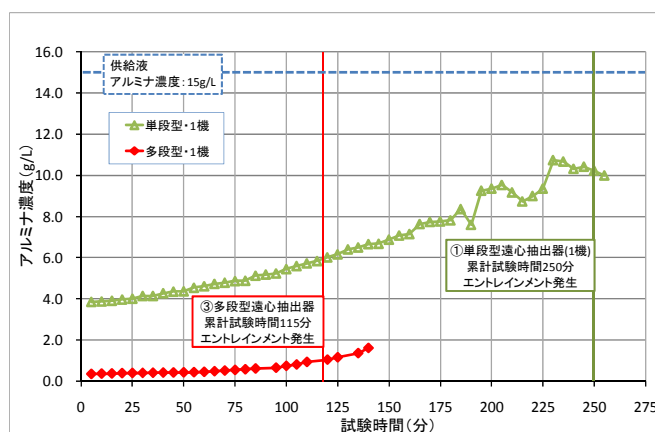


図10 排水液中のアルミナ濃度の推移

（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。

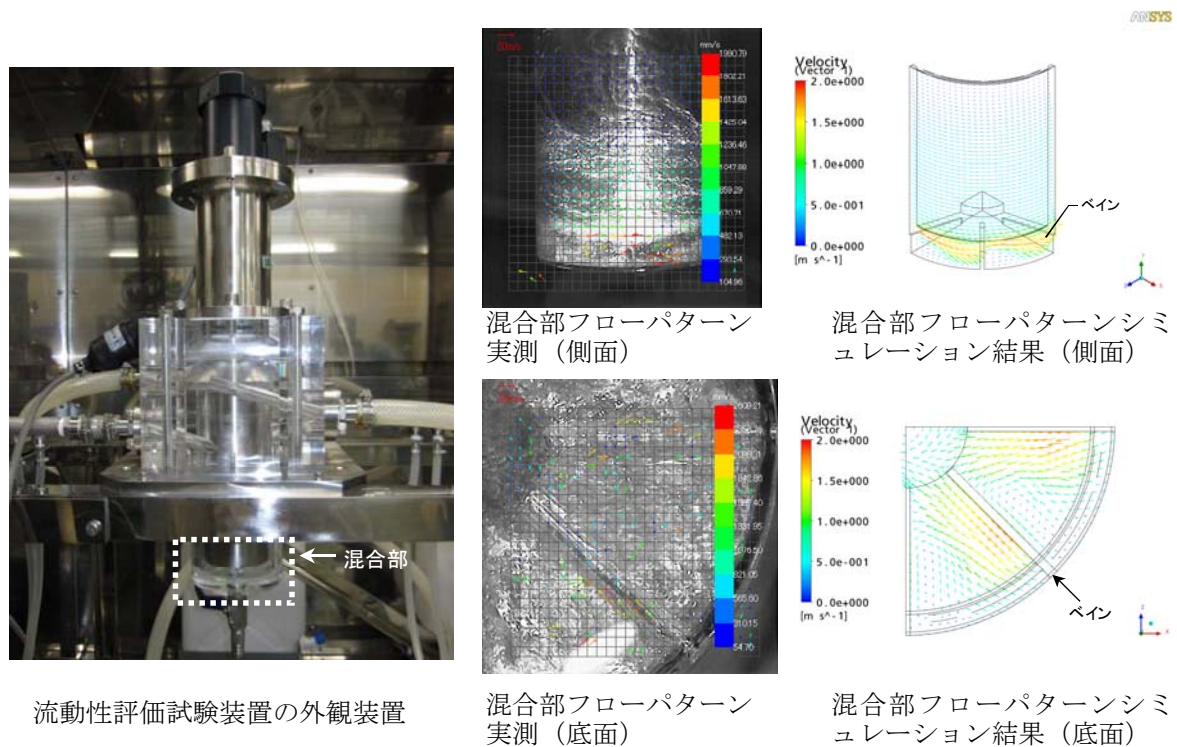


図 1 1 混合部の実測とシミュレーション結果とのフローパターンの比較

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)。

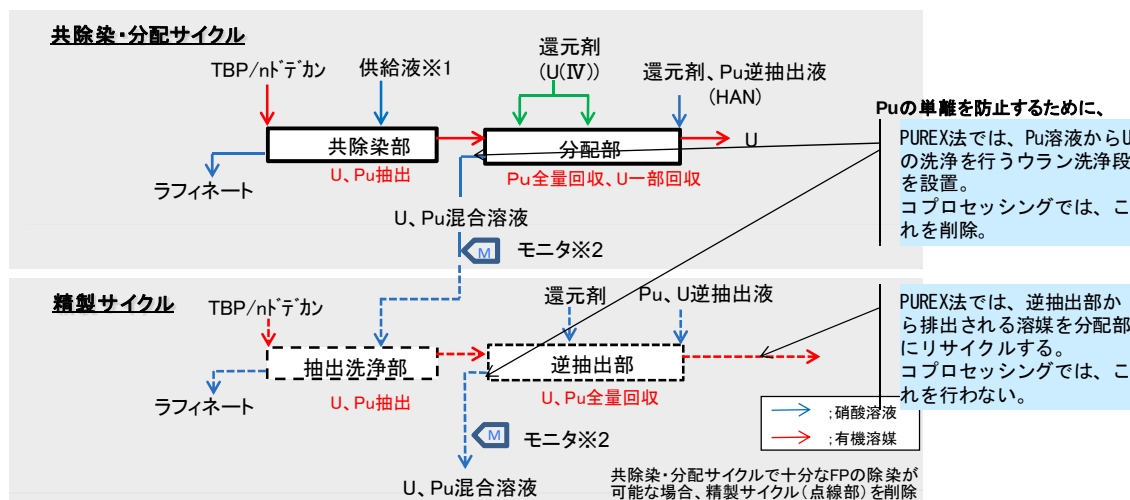


図12 プロセス構成

※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

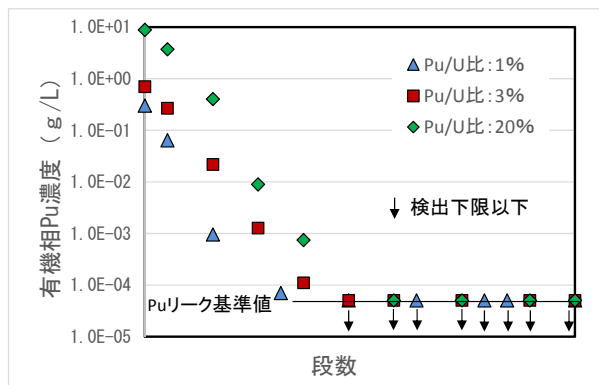


図 1 2 有機相におけるプルトニウム濃度の分布



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では、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。

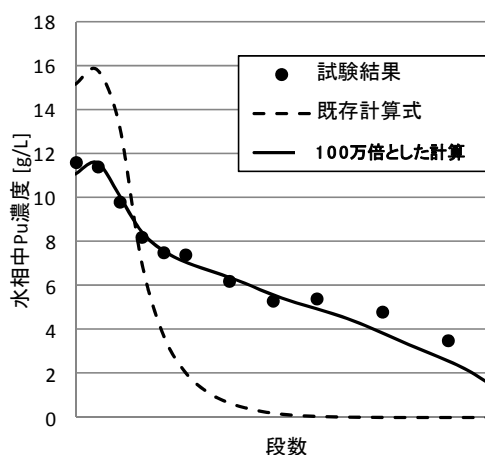


図 1 4 水相中プルトニウム濃度の試験結果と、有機相中プルトニウム 3 価の反応速度を、既存計算式により計算した結果と当該反応の計算式を 100 万倍として計算した結果の比較 (Pu/U 比;3%)

(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、ウラナス酸化ピークは、バックグラウンド電流に吸収され、観測されなかった。

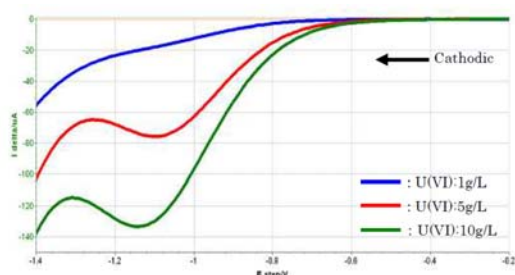


図 15 各 U(IV) 濃度における U(IV) の還元ピーク
 H^+ : 2.5mol/L, U(IV): 1-10g/L,
 N_2H_4 : 6g/L, Temp.: 30°C

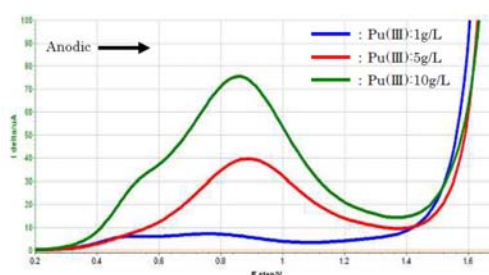


図 16 各 Pu(III) 濃度における Pu(III) の酸化ピーク
 H^+ : 2mol/L, Pu(III): 1-10g/L,
 N_2H_4 : 6g/L, Temp.: 30°C

・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。

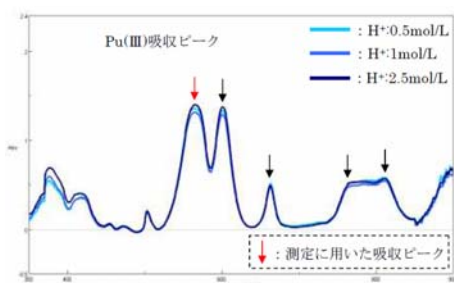


図 17 各酸濃度における Pu(III) 10g/L の吸収スペクトル (H⁺: 1.5–2.5mol/L, Pu(III): 10g/L), N₂H₄: 6g/L, Temp.: 30°C)

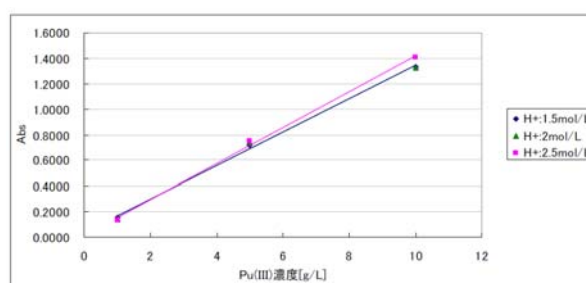


図 18 各酸濃度における Pu(III) 濃度と Pu(III) 吸収ピークの関係 (H⁺: 1.5–2.5mol/L, Pu(III): 1–10g/L), N₂H₄: 6g/L, Temp.: 30°C, 吸収ピーク: 566nm)

・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）。

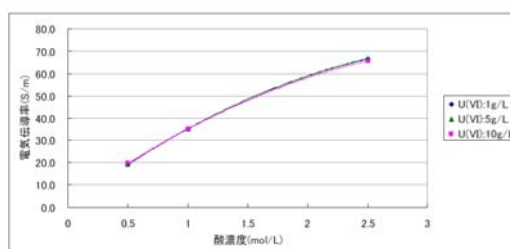


図 19 各 U(VI) 資料における酸濃度と電気伝導率の関係 (H⁺: 0.5–2.5mol/L, U(IV): 1–10g/L, N₂H₄: 6g/L, Temp.: 30°C)

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 DEHMPA、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 DEHMPA 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。

DEHMPA 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

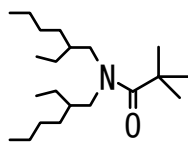


図 2 0 *N,N*-ジ(2-エチルヘキシル)-2,2-ジメチルプロパンアミド(DEHMPA)の構造式

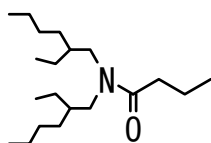
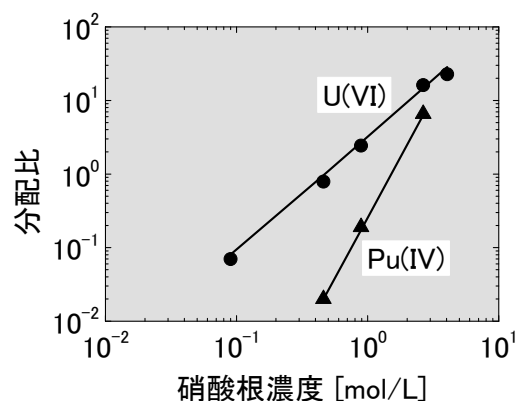


図 2 1 *N,N*-ジ(2-エチルヘキシル)ブタンアミド(DEHBA)の構造式



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

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

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。

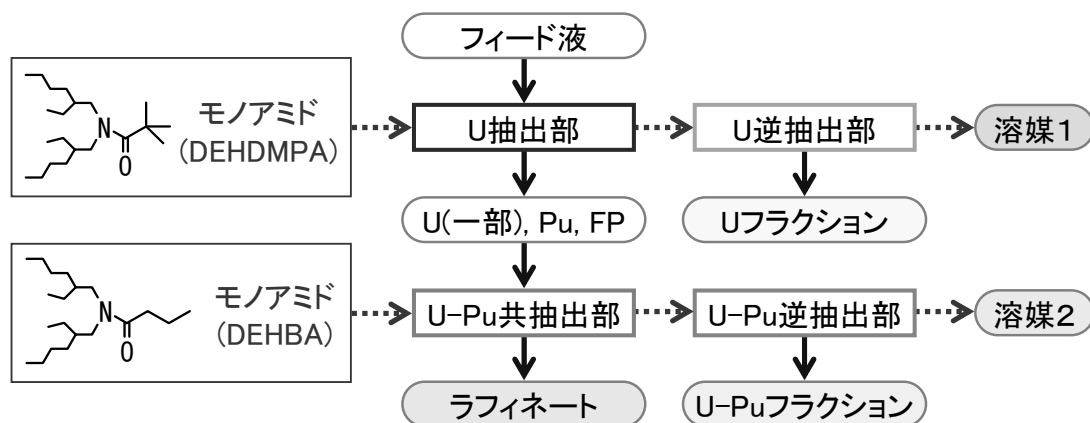


図 2 3 DEHDMPA と DEHBA の両方を抽出剤に用いたプロセスのフローシート
実線及び点線の矢印はそれぞれ水相及び有機相の流れを示す。

(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)。

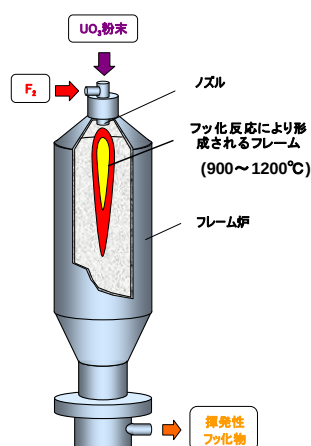


表 8 揮発性フッ化物の割合及びトラップの吸着率

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。

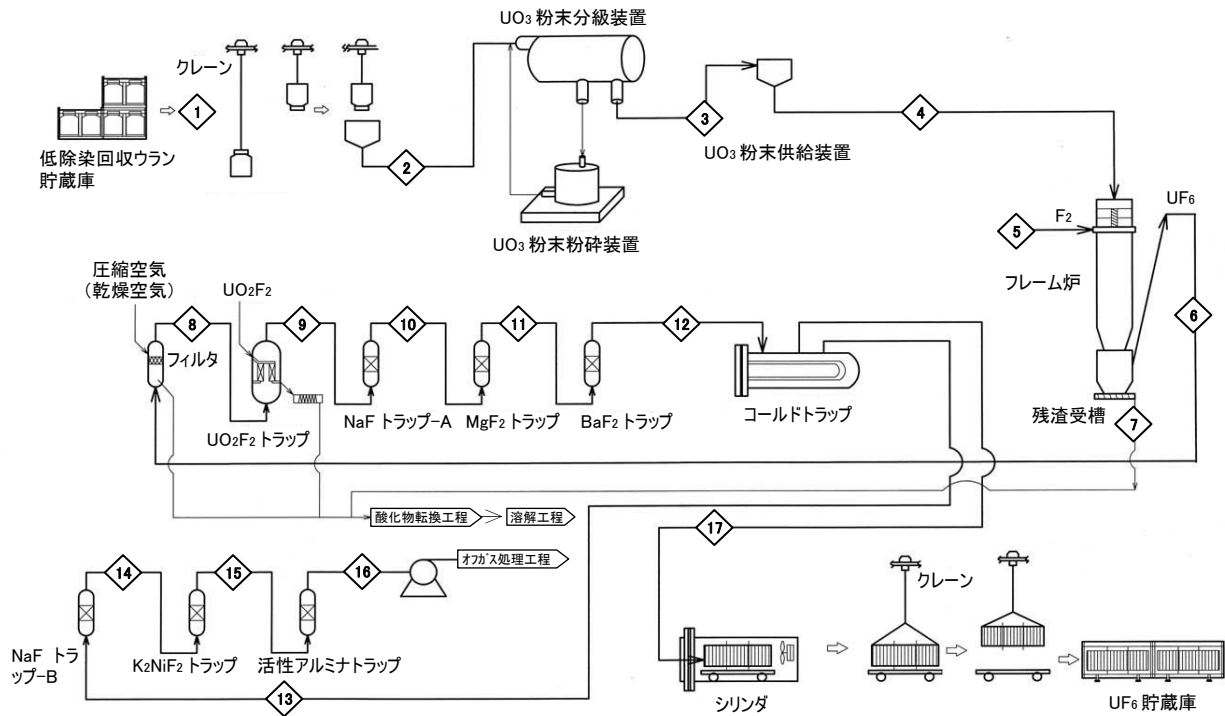


図 2 5 フッ化物揮発法による回収ウラン除染プロセスフロー

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。

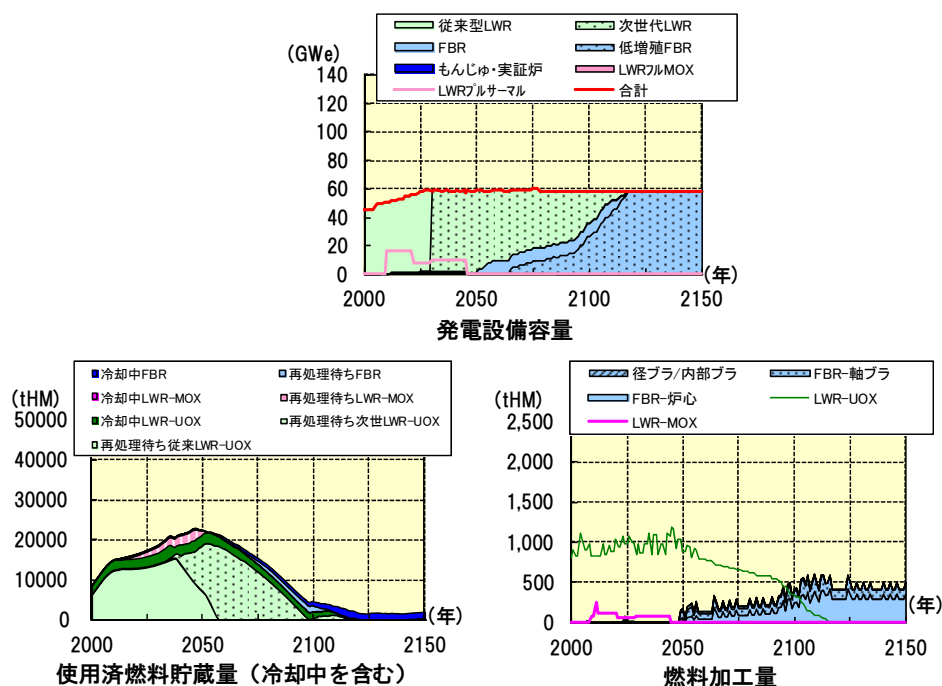


図 2 6 原子力発電容量及びマテリアルバランスの試算の例
(原子力発電規模 58GWe、2050 年高速増殖炉導入開始の場合)

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。

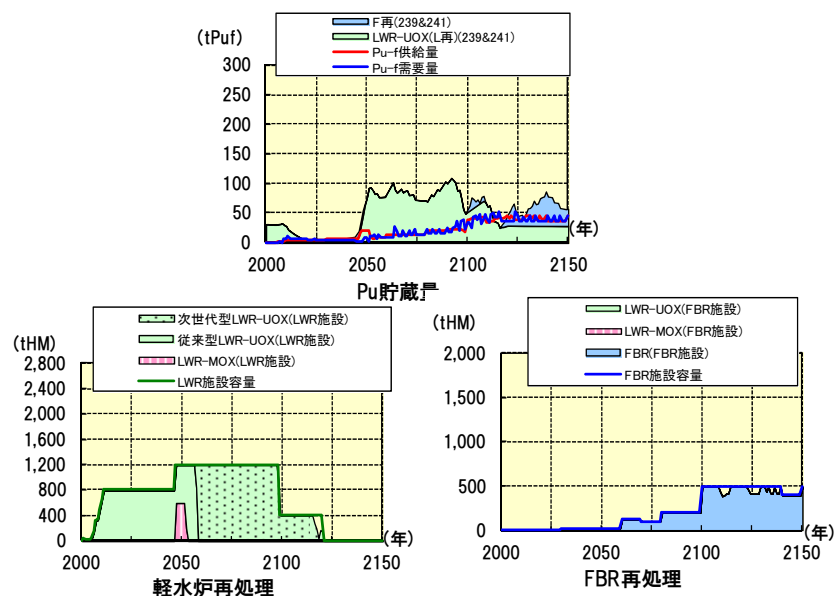


図 2 7 プルトニウム貯蔵量及び再処理需要の試算の例

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

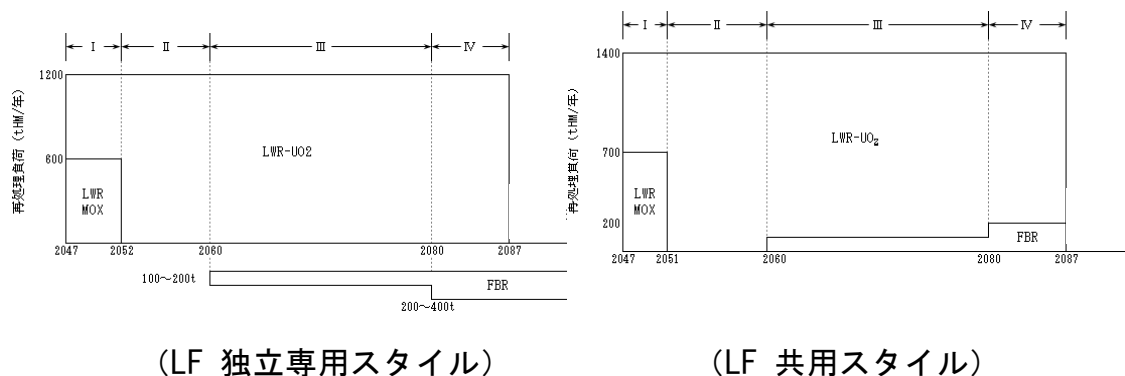


図 2 8 再処理負荷パターンの例

(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。

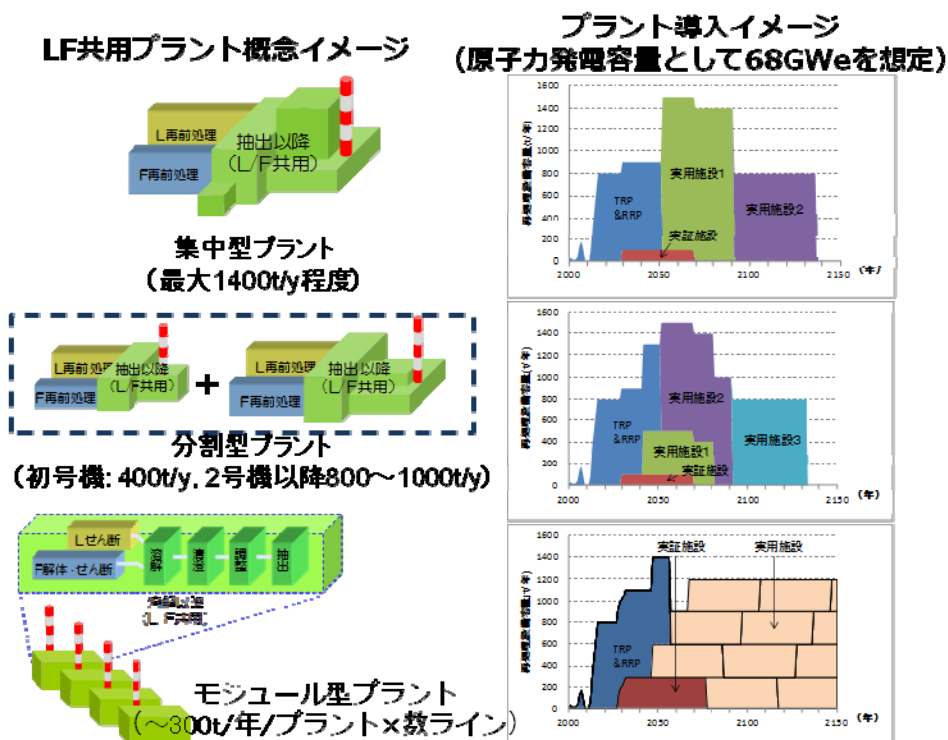


図 2 9 LF 共用プラント概念イメージとプラント導入計画

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

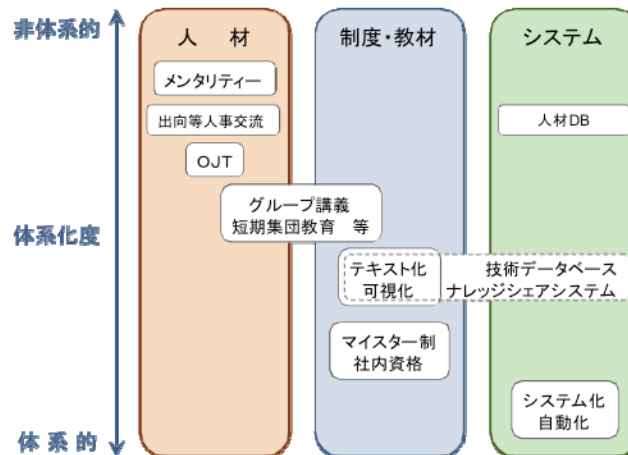


図30 知識を継承するツールの分類

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。

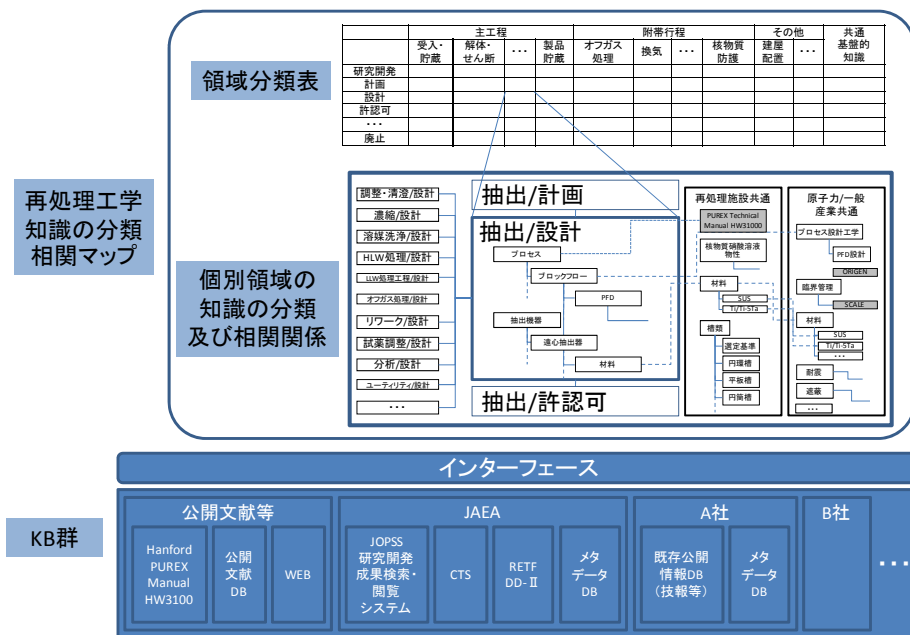


図3-1 体系化した知識の構造

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 1 3 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。

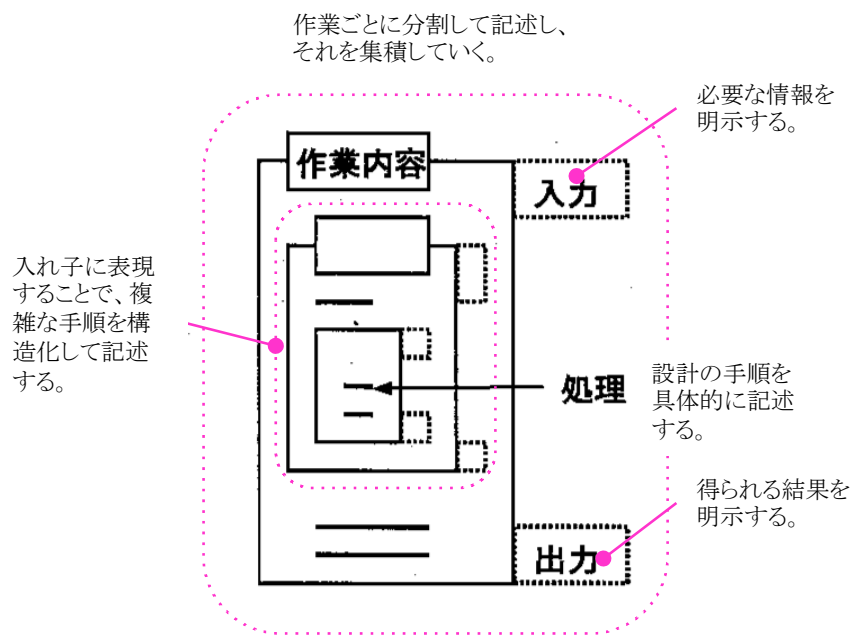


図 3 2 設計情報の表現に適していると考えられた長方形型のダイアグラム

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 D2EHMDPA 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 1 6 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うい、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. コプロセス 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 1 7 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					
(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、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。

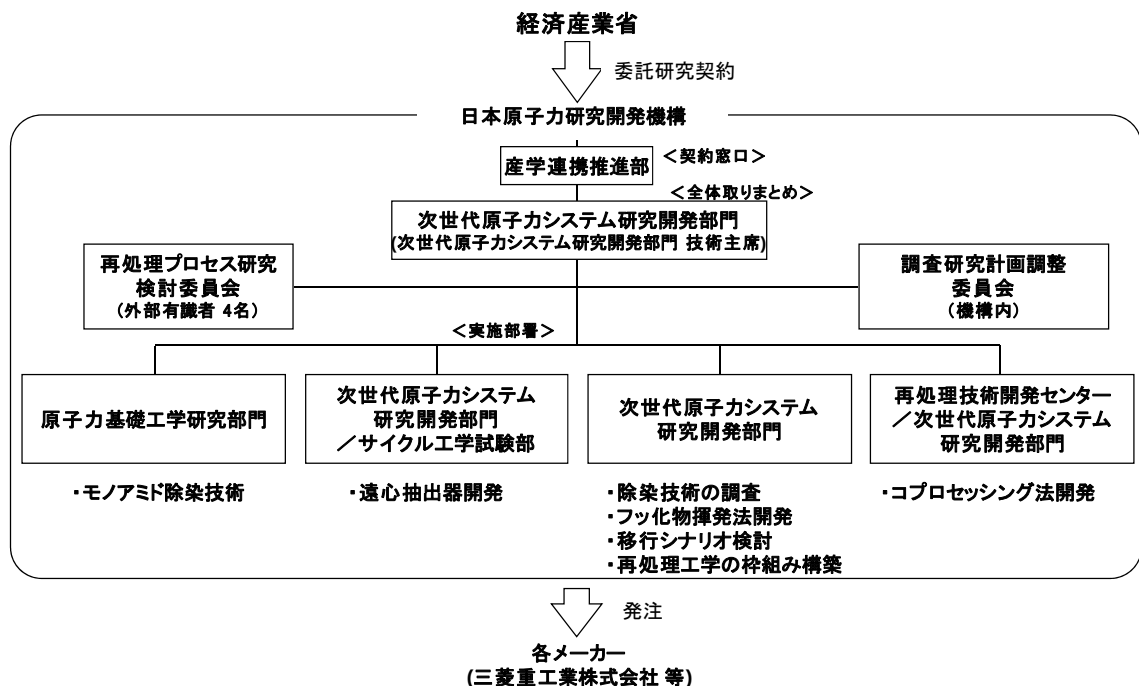


図33 研究開発実施体制

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 1 8 に示す。

表 1 8 資金配分 (単位：百万円)

年度 平成	1 9	2 0	2 1	2 2	2 3	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。