

1. A.高速炉再処理回収ウラン等除染技術開発委託費 に係る事業の概要

概 要	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を開発する。また、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・策定し、ここから導き出される高速増殖炉サイクルへの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、国内における再処理技術に係る知識、データ等の体系化に関する研究を実施する。
実施期間	平成19年度～平成23年度 （5年間）
予算総額	17.5億円（委託） （平成19年度：2.7億円 平成20年度：4.4億円 平成21年度：5.0億円 平成22年度：2.7億円 平成23年度：2.7億円）
実 施 者	独立行政法人 日本原子力研究開発機構
プロジェクト リーダー	大森 栄一 （原子力機構 次世代原子力システム研究開発部門 技術主席）

2. A.プロジェクトの目的・政策的位置付け

2-1. 目的

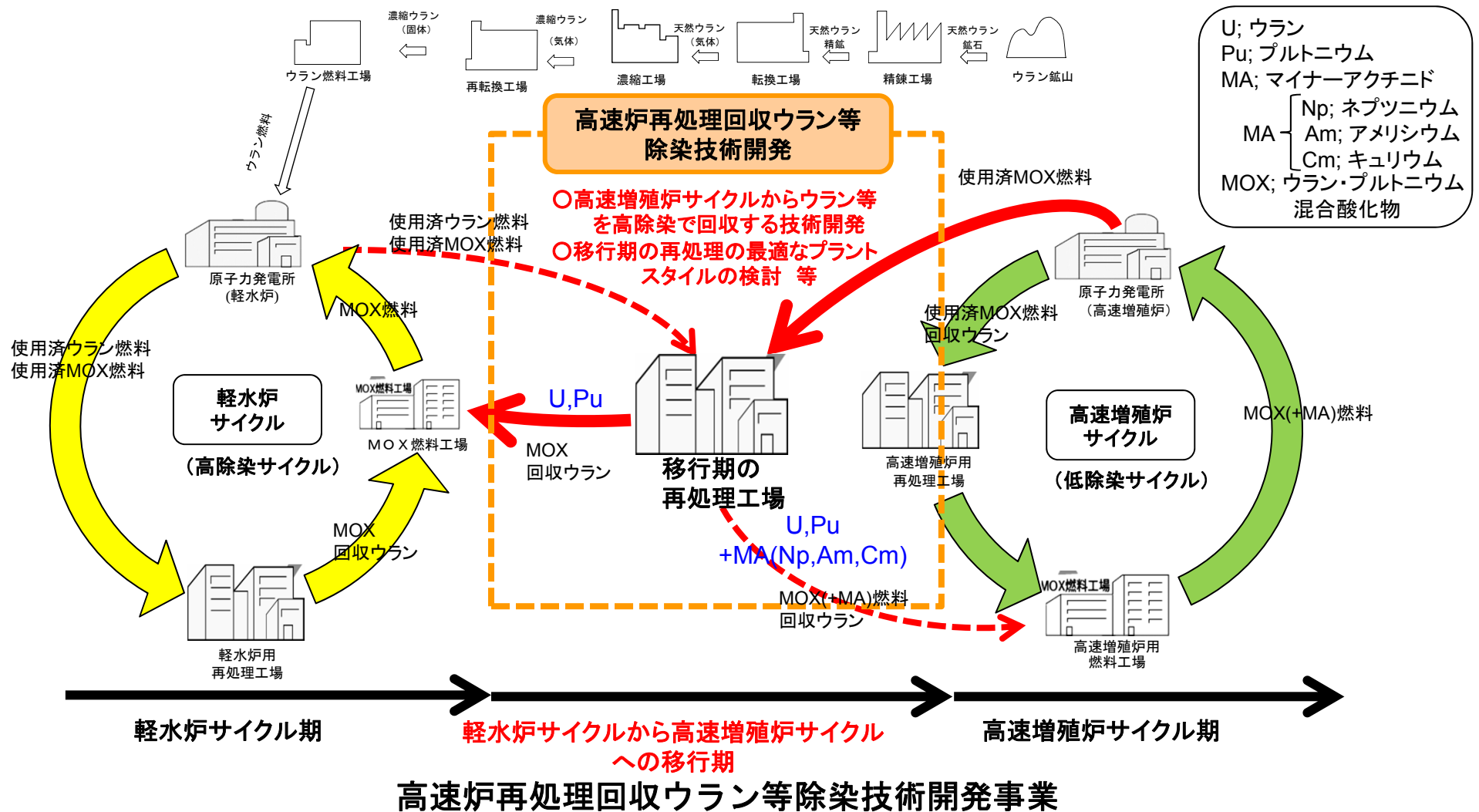
平成17年の「原子力政策大綱」では、2050年頃からの商用ベースでの高速増殖炉の導入を目指すことが記されており、この高速増殖炉サイクルを可能とする再処理技術の研究が進められている。軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの移行期において、高速増殖炉サイクルからも軽水炉サイクルにウラン等を受給できることがそれぞれのサイクルの燃料バランスを保つために必要となる。しかし、高速増殖炉使用済燃料の再処理施設より回収される高線量のウラン等は軽水炉への供給のために既存の軽水炉燃料加工施設で取扱うことが困難であるため、これを可能とする高除染化技術について調査及び基礎試験等を行い、商業的に利用可能な除染技術を開発する。

また、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検討し、ここから導きだ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、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や、技術の知的所有権等に係る整理を実施する。

2. A.プロジェクトの目的・政策的位置付け

- ◆ 高速増殖炉の導入以降、全ての軽水炉を高速増殖炉へ置き換えるには数十年の期間を要する。この間、**軽水炉サイクルと高速増殖炉サイクルが共存する(移行期)**。
- ◆ 移行期における両サイクル間の燃料バランスをとるため、**移行期の再処理工場(六ヶ所再処理工場に続く第二再処理工場)の在り方について検討を行うことが必要**。



2. A.プロジェクトの目的・政策的位置付け

2-2. 政策的位置付け

○原子力政策大綱（平成17年10月 閣議決定）（抜粋）

「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」

2. A.プロジェクトの目的・政策的位置付け

2-2. 政策的位置付け

○原子力立国計画（平成18年8月 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）（抜粋）

「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」

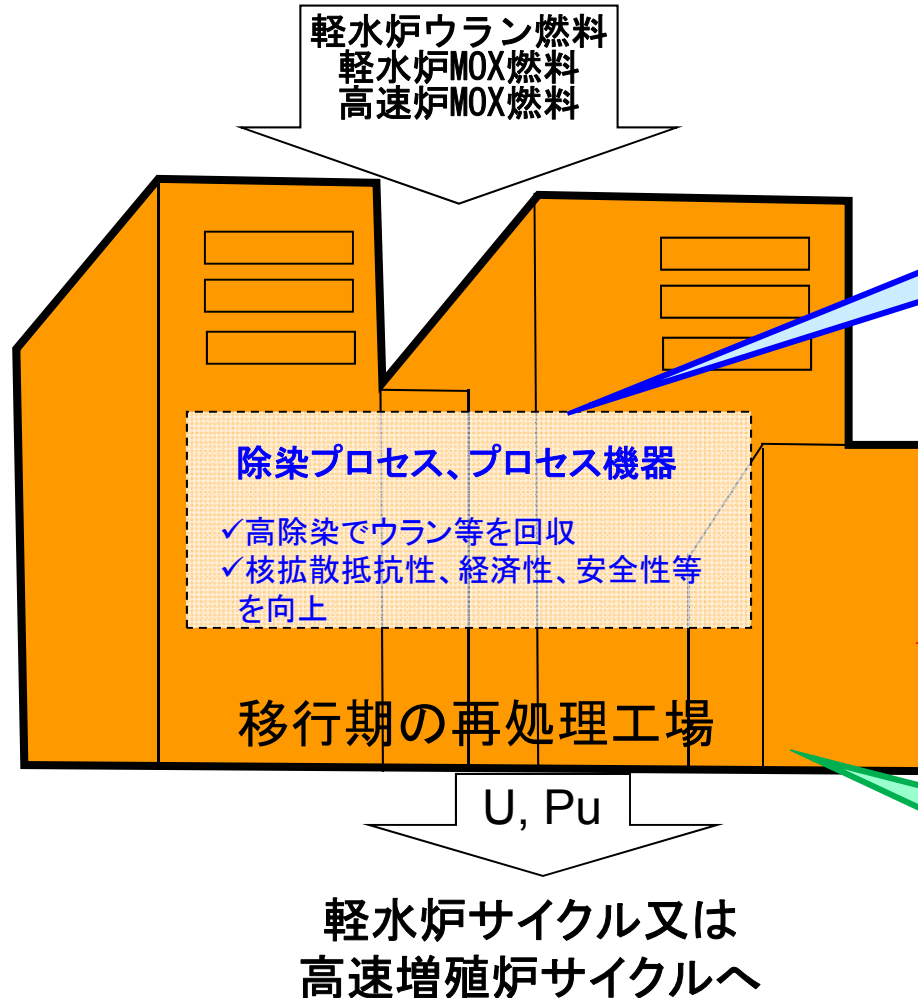
3. A.目標(全体)

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
(1) 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。
(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	・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、今後の核燃料の受給バランス等、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。
(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工場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. A.目標(全体)

- (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

移行期にはPu含有量の異なる様々な使用済燃料が発生



- ・有望なプロセス・機器を選定
- ・有望/代替プロセスの検討、試験による成
立性確認
- ・有望機器の試験・評価

軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの円滑な移行を図るため、

- ・移行期の燃料受給バランスを評価
(使用済燃料発生量、再処理工場の設備
容量等)
- ・プラントスタイルの検討
(軽水炉ウラン燃料、軽水炉MOX燃料及び
高速炉MOX燃料を、同じ設備で処理／別
設備で処理等)
- ・プラント概念の検討
(集中型(大型)1系列／モジュール型(小型)
多系列等)

- ・再処理技術の知的所有権を調査
- ・海外導入技術との技術汚染の可能性を評
価
- ・再処理技術の体系化のための手法を調
査・検討

3. A.目標

・ 全体スケジュール

	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					

3. A.目標

(1)除染技術の調査・開発

①除染技術の調査

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
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。	候補技術は多数あり、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。

技術調査の候補

分類		候補技術	有望技術の選定
溶媒抽出法	プロセス	1) TBPを用いる溶媒抽出法 2) モノアミドを用いる溶媒抽出法	⇒第1に有望な候補(コプロセッシング法) ⇒第2に有望な候補
	機器	a) 遠心抽出器 b) パルスカラム c) ミキサセトラ	⇒機器として有望な候補
沈殿法		3) 晶析法 4) NCP沈殿法	
クロマトグラフィー		5) イオン交換法 6) 抽出クロマトグラフィー	
フッ化物揮発法		7) フッ化物揮発法 8) FLUOREX法	⇒経済性に優れる可能性を有する候補

TBP; トリブチルリン酸
NCP; N-シクロ-2-ヘキシルピロリドン

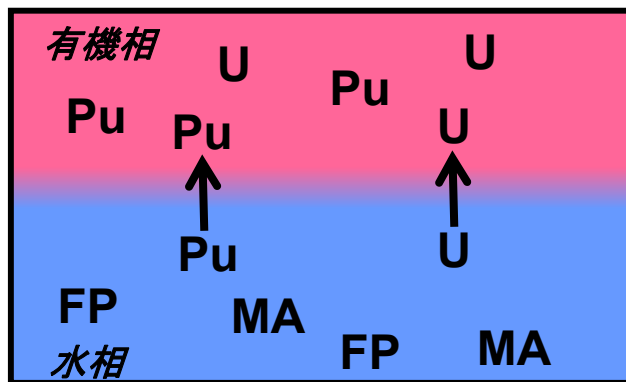
3. A.目標

(1)除染技術の調査・開発

①除染技術の調査

溶媒抽出法

使用済燃料を酸(水相)に溶かした後、有機溶媒(有機相)と接触させ、ウラン(U)、プルトニウム(Pu)のみを有機相に移行(抽出)し、酸に溶けている核分裂生成物(FP)やマイナーアクチニド(MA)と分離する方法。
(水相酸濃度の調整により、U、Puを水相側に移行(逆抽出)することも可能)



抽出器

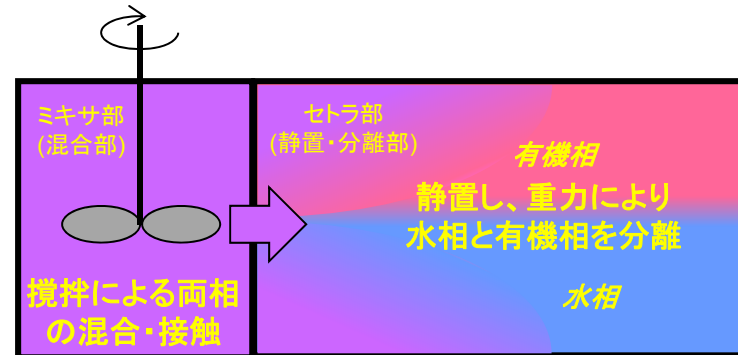
MA: ネプツニウム(Np)、アメリシウム(Am)、キュリウム(Cm)

有機溶媒(抽出剤);

PUREX法、コプロセッシング法; トリブチルリン酸(TBP)
モノアミドを用いた溶媒抽出法; モノアミド(DEHDMPA, DEHBA)

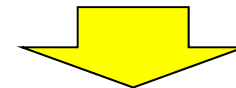
抽出器

ミキサ・セトラ



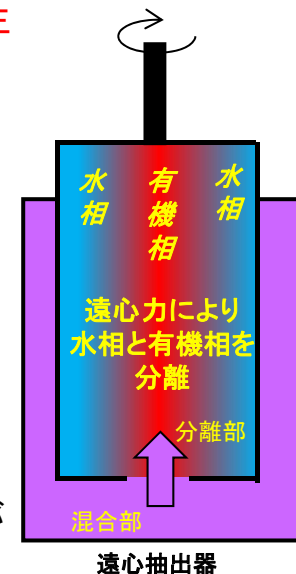
ミキサセトラ

- ✓ 従来抽出器では、水相/有機相の分離に、**比重差**を利用した重力による分離を行っている。
- ✓ 静置時間を確保するため、**機器が大型化**
- ✓ 大型機器では、**高いPu濃度となるMOX燃料の処理時に臨界安全上の問題が発生**



遠心抽出器

- ✓ 水相/有機相を**遠心力**により強制的に分離。
- ✓ セトラ部(静置部)を小さくでき、**機器の小型化が可能**。
- ✓ MOX燃料処理時の**臨界安全性が向上**。
- ✓ 溶媒と放射性物質の接触時間が短くなり**溶媒の劣化が低減**。



遠心抽出器

3. A.目標

(1)除染技術の調査・開発

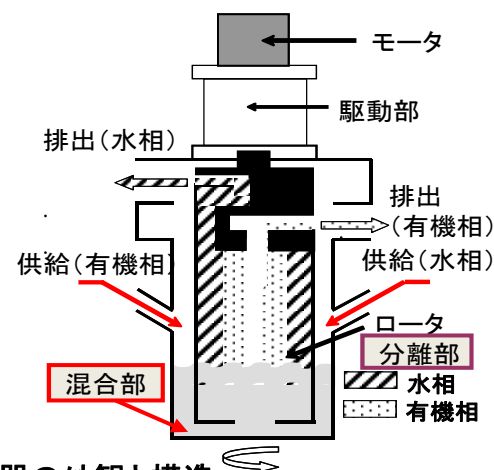
②溶媒抽出法による除染プロセス開発

a. 遠心抽出システム開発

概要； 溶媒抽出法によるU・Puの除染には、これまで抽出器として、ミキサ・セトラやパルスカラムが用いられており、これらは有機相と水相の分離に重力を利用している。遠心抽出器では、遠心力により強制的に有機相/水相の分離を行う。

効用； 遠心力を利用して有機相/水相の分離を迅速に行うため、溶液のホールドアップ量を低減でき、機器の小型化が可能となる。このため、システムの小型化、溶媒劣化の低減、機器の起動/停止時間の短縮による稼働率の向上等が見込まれる。

目標； ・大型化(大処理容量化)に向けた臨界安全性の評価。
・単段型その他、多段型抽出器の適用性評価。
・不溶解残渣(スラッジ)流入時の耐性評価。 等



遠心抽出器の外観と構造

3. A.目標

(1)除染技術の調査・開発

②溶媒抽出法による除染プロセス開発

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
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。 ・単段型遠心抽出器の臨界安全上の最大規模を評価する。 ・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／多段の遠心抽出器両機による異常発生までの時間等の耐スラッジ性を評価する。 ・流動解析シミュレーションの実用性を評価する。	・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。 ・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。 ・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、除染プロセス適用性を評価する必要がある。 ・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。 ・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。

3. A.目標

(1)除染技術の調査・開発

②溶媒抽出法による除染プロセス開発

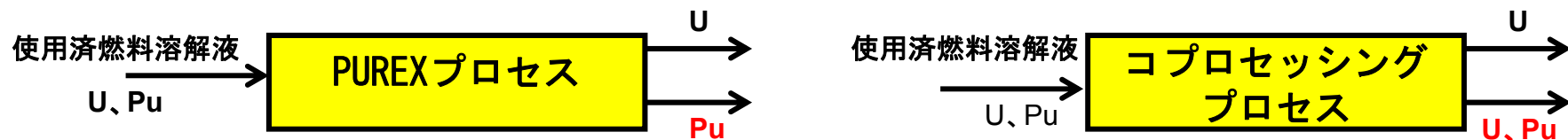
b. コプロセッシング法を用いた除染プロセス開発

概要； 従来の再処理プロセス(PUREX法)では、プルトニウム(Pu)を単独に分離して除染している。コプロセッシング法は、PUREX法の改良プロセスであり、プルトニウムを常にウラン(U)が同伴した状態で除染を行う。

また、移行期に発生するプルトニウム含有率の異なる種々の使用済燃料(軽水炉ウラン燃料、軽水炉MOX燃料、高速炉MOX燃料)の処理を可能とする。

効用； Puの単独分離を行わないため、核拡散抵抗性が大幅に向上する。これにより我が国における燃料サイクルの実施について、国際的理解の助けとなる。また、移行期のウラン等の受給に対し柔軟な対応が可能となる。

目標； ・移行期に発生する種々の燃料に対し、ウラン/プルトニウム(U/Pu)共除染を行うプロセスフローシートの検討。
・上記フローシートに係る小型試験設備での実証。 等



Puの単独回収の可能性を排除し、
核拡散抵抗性を向上

3. A.目標

(1)除染技術の調査・開発

②溶媒抽出法による除染プロセス開発

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
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。 ・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。	・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り、技術的成立性を確認する必要がある。 ・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。

3. A.目標

(1)除染技術の調査・開発

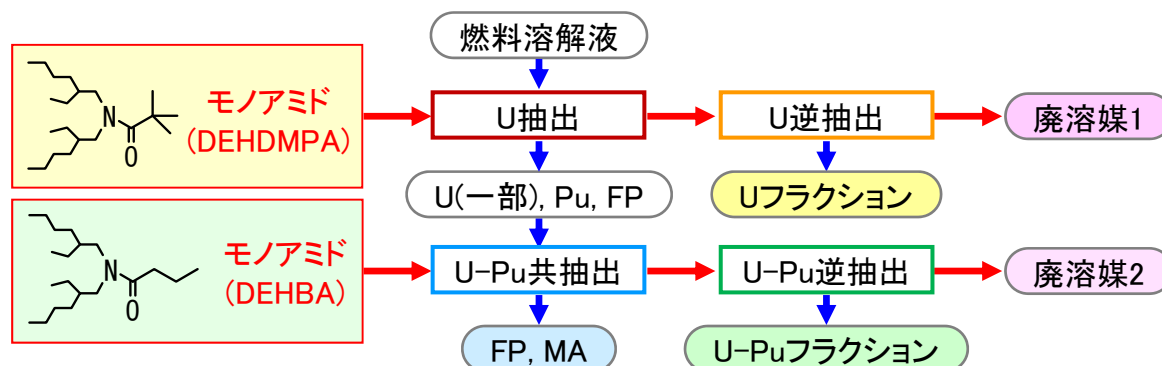
②溶媒抽出法による除染プロセス開発

c. モノアミドを用いた除染プロセス開発

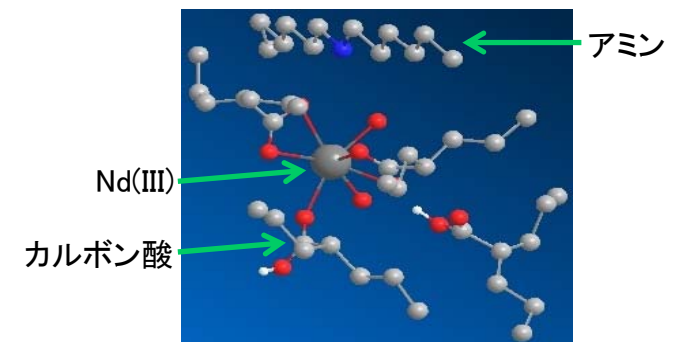
概要； 新規抽出剤としてのモノアミドを用いた除染プロセスの開発を行う。PUREX法と機器開発を共有でき、データの充足によりTBPを用いる溶媒抽出法と同等の性能を有すると考えられる。コプロセッシング法に次いで有望な除染技術として開発を実施。

効用； モノアミドの種類を変えることにより、目的に応じたプロセスの構築が期待できる。また、炭素、水素、酸素及び窒素から構成されているため、廃溶媒の焼却処理を行うことで、廃棄物発生量の低減が見込まれる。

目標； ・事業化へ向けた研究段階に移行するための、分配性能、溶媒劣化等に係る基礎データの取得。
・モノアミドを用いた除染プロセスのフローシートの検討。
・小型試験設備を用いたプロセス試験によるプロセス成立性の確認。 等



ウラン抽出及びウラン/プルトニウム共抽出プロセスのフローシート



$\text{Nd}(\text{NO}_3)_3$ -配位子(アミン、カルボン酸)錯体の構造

3. A.目標

(1)除染技術の調査・開発

②溶媒抽出法による除染プロセス開発

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
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. A.目標

(1)除染技術の調査・開発

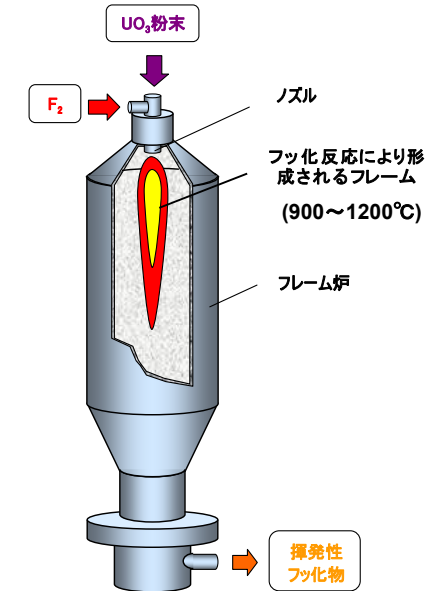
③フッ化物揮発法を用いた除染プロセス開発

概要； 低除染で回収されたウランを高除染化するにあたり、乾式法であるフッ化物揮発法を用いる技術開発を実施。

効用； 溶媒抽出法に比べ、施設建設費等の経済性の観点から優位となる可能性を有する。

目標；

- ・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。
- ・回収ウランの高除染化のためのプロセス概念を検討するとともに、物質収支を検討する。
- ・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。



3. A.目標

(1)除染技術の調査・開発

③フッ化物揮発法を用いた除染プロセス開発

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
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。 ・ 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。 ・ 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。	・ 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。 ・ 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。 ・ 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。

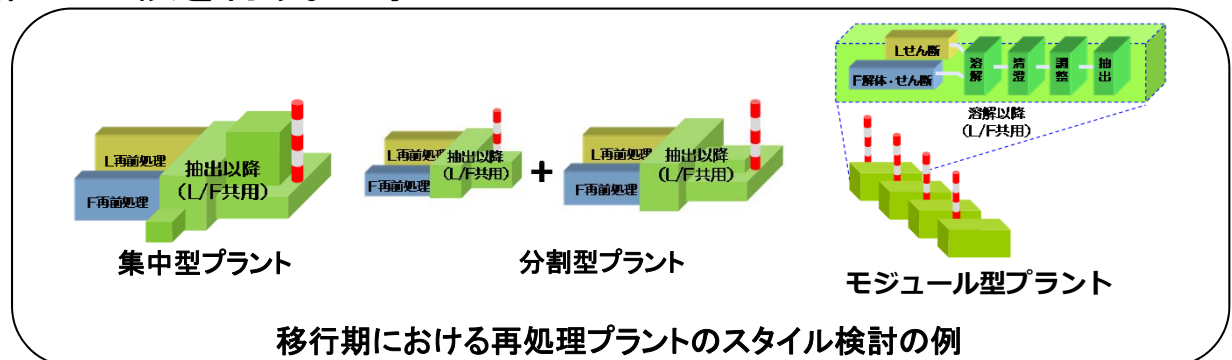
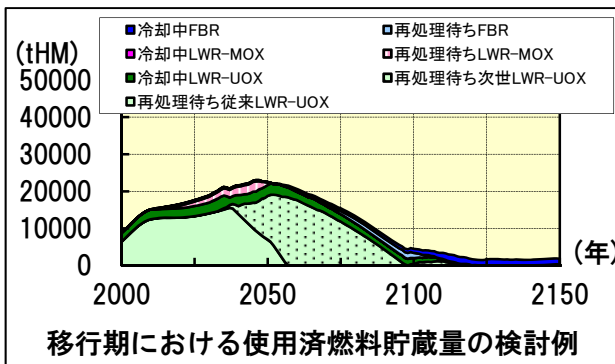
3. A.目標

(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

概要； 軽水炉と高速炉が長期にわたり共存する移行期について、高速増殖炉の導入速度等によるプルトニウム(Pu)の受給状況や再処理施設の在り方について検討を行い、軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの円滑な移行を図るためのシナリオを検討する。

効用； 高速増殖炉の段階的な導入に対応するため、適切なプルトニウムの受給を賄う再処理施設の在り方を示すとともに、軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの円滑な移行及び第二再処理工場のための議論に資する。

- 目標；
- ・移行期の燃料サイクル全体における燃料受給バランスを検討し、円滑な移行シナリオを明らかにする。
 - ・高速増殖炉の導入に伴い適切なプルトニウム受給を行うための再処理設備容量とともに、軽水炉燃料や高速増殖炉燃料の処理を行う第二再処理工場のプラントスタイルの検討を行う。
 - ・第二再処理工場に採用される可能性のある複数の再処理プロセスについて、種々の観点から相互比較を行う。等



3. A.目標

(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

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
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。 ・ 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。 ・ 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。	・ 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しておく必要がある。 ・ 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検討が必要となる。 ・ 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整理し、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。 ・ 移行期における再処理施設については、プルトニウム需要への対応、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. A.目標

(3)再処理工学の枠組み構築

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
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、有用な方法を抽出する。	・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工場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。

4. A.成果、目標の達成度

(1)除染技術の調査・開発

①除染技術の調査

要素技術	目標・指標	成 果	達成度
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

4. A.成果、目標の達成度

(1)除染技術の調査・開発

②溶媒抽出法による除染プロセス開発

要素技術	目標・指標	成 果	達成度
a. 遠心抽出システム開発(1/2)	・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

4. A.成果、目標の達成度

(1)除染技術の調査・開発

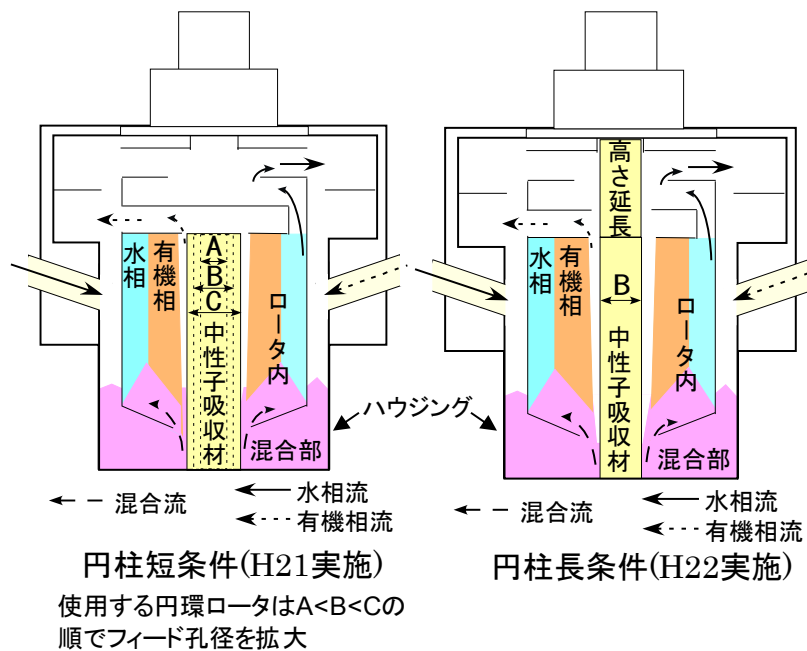
②溶媒抽出法による除染プロセス開発

要素技術	目標・指標	成 果	達成度
a. 遠心抽出システム開発(2/2)	・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

4. A.成果、目標の達成度

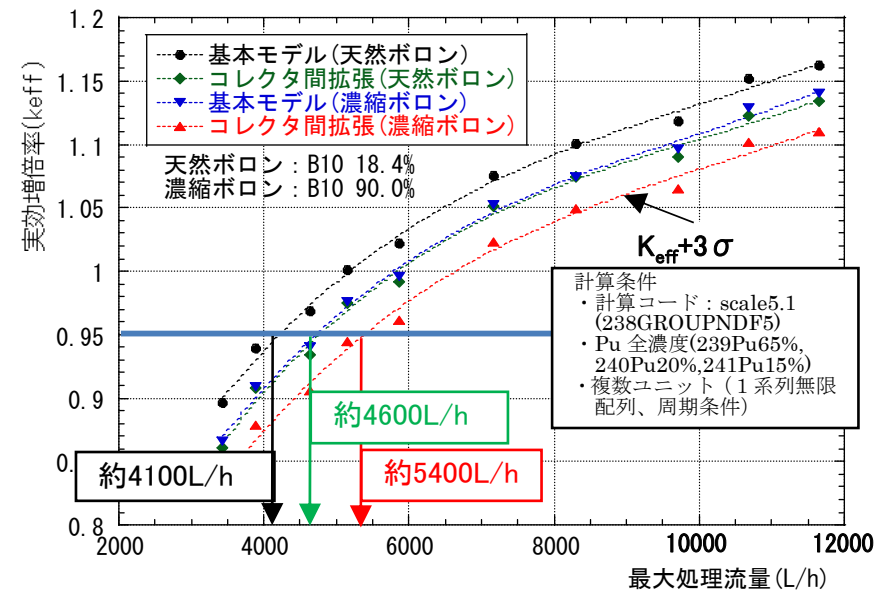
(1)除染技術の調査・開発

②溶媒抽出法による除染プロセス開発:遠心抽出システム;成果概要



中性子吸収体を内封した遠心抽出器の成立性評価

上記構造の試験装置による流動試験により、成立性を確認



遠心抽出器の臨界安全上の最大規模評価

濃縮ボロンの使用等の条件で、約5400L/h(800トン/年規模相当)まで処理可能

4. A.成果、目標の達成度

(1)除染技術の調査・開発

②溶媒抽出法による除染プロセス開発

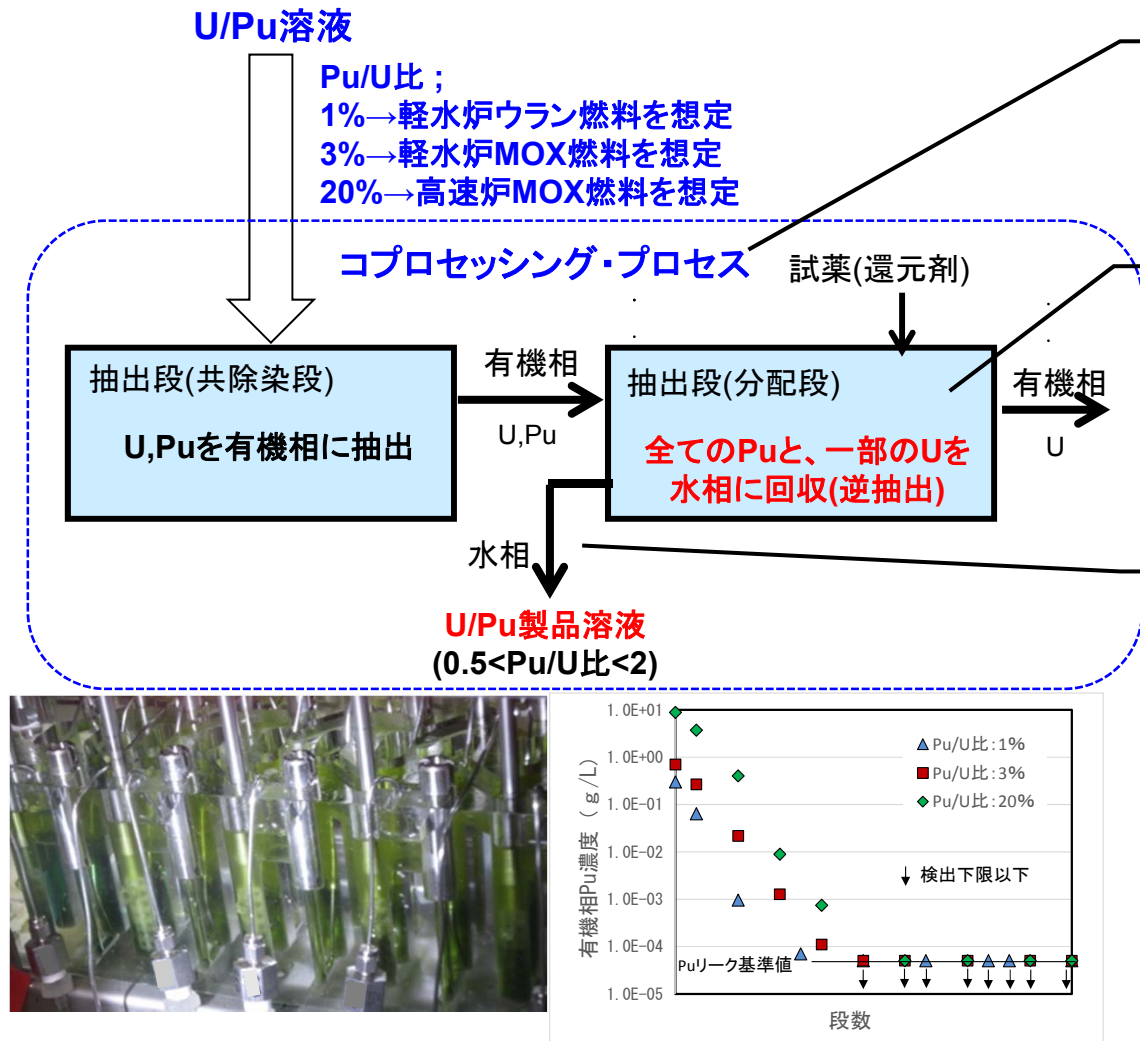
要素技術	目標・指標	成 果	達成度
b. コプロセッシング法を用いた除染プロセス開発	・移行期における処理対象溶液からウラン、プルトニウムを共回収するプロセスフローシートを抽出計算コードにより設定する。また、設定したフローシートに基づき、ウラン、プルトニウムを共回収するプロセスの確立に向け、ミキサセトラ試験を行いフローシートの成立性を確認する。	・軽水炉燃料(Pu/U比:1%)、軽水炉MOX燃料(Pu/U比:3%)、高速増殖炉燃料(Pu/U比:20%)を想定したプロセスフローシートを抽出計算コードにより設定した。分配段を対象としたウラン/プルトニウム共回収試験を実施し、1%、3%及び20%の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

4. A.成果、目標の達成度

(1)除染技術の調査・開発

②溶媒抽出法による除染プロセス開発

コプロセッシング法を用いた除染プロセス;成果概要



ミキサセトラ試験の様子

分配段におけるPu逆抽出状況

シミュレーションによるプロセス構築
 全ての燃料を対象に、U/Pu共除染が可能となるプロセスを構築

小型ミキサトラ、U/Pu溶液を用いたプロセス試験を実施

- ✓ 全ての燃料を対象に、U/Pu共除染が可能であることを試験により確認
- ✓ 燃料種に依らず、MOX燃料製造に適したU/Pu製品溶液 ($0.5 < \text{Pu/U比} < 2$) を得ることが可能であることを確認

U/Pu混合モニタの成立性を確認

- ✓ 溶液をモニタし、PuにUが同伴していることをオンラインで確認する分析手法の成立性を確認

Puの単独分離を行わず、U/Puを共回収する核拡散抵抗性に優れたプロセスの成立性の見通しを得た。

4. A.成果、目標の達成度

(1)除染技術の調査・開発

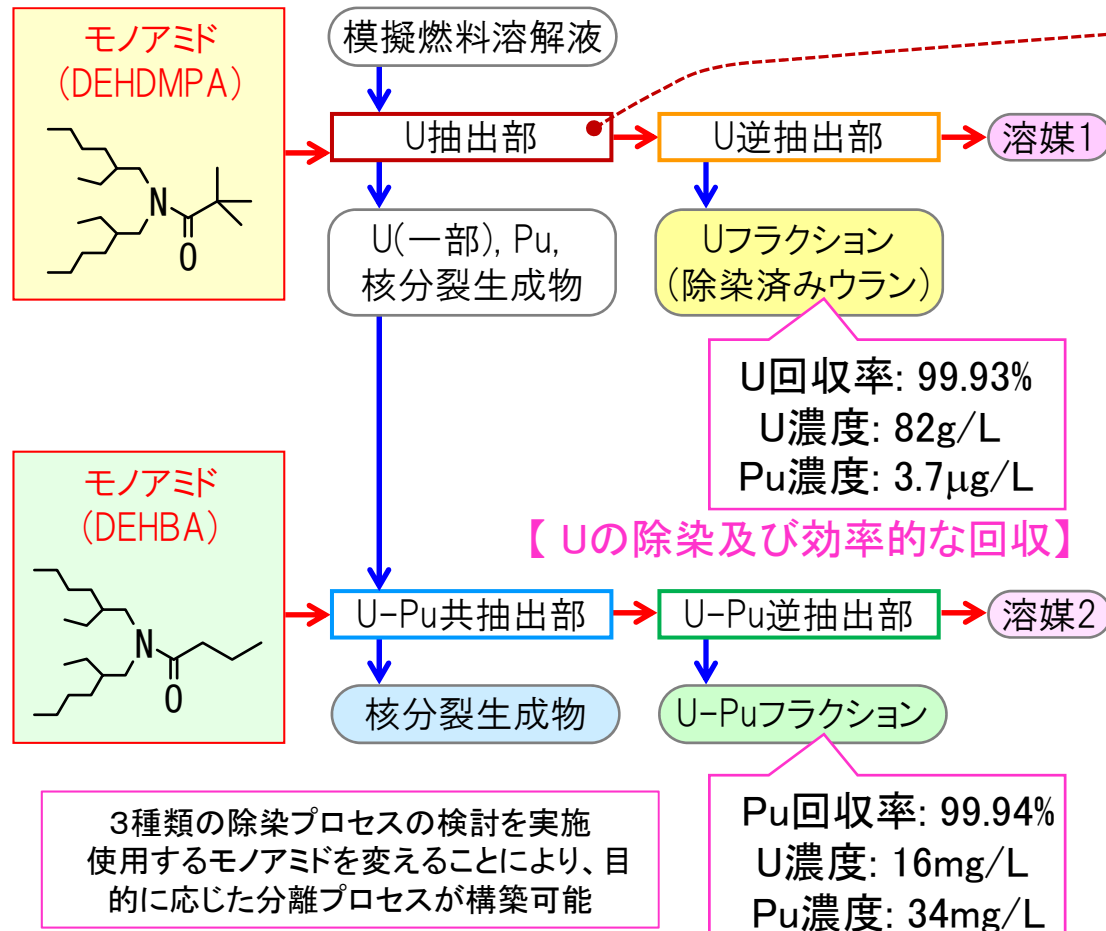
②溶媒抽出法による除染プロセス開発

要素技術	目標・指標	成果	達成度
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

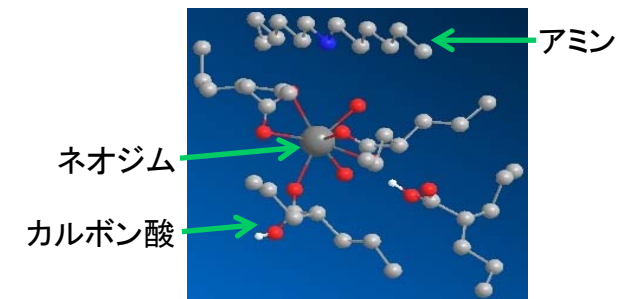
4. A.成果、目標の達成度

(1)除染技術の調査・開発 ②溶媒抽出法による除染プロセス開発

c. モノアミドを用いた除染プロセス開発：成果概要



試験時におけるU抽出部の状況
析出物や滞留等は発生せず、
良好に抽出操作が実施可能



モノアミドの劣化物(アミン及びカルボン酸)と
ネオジウムとの錯体構造
沈殿生成因子として二級アミンの可能性を提示

除染プロセスの例 (赤矢印: 有機相の流れ、青矢印: 水相の流れ)
Puの単離を伴わない、U除染プロセスの成立性を実証

4. A.成果、目標の達成度

(1)除染技術の調査・開発

③フッ化物揮発法を用いた除染プロセス開発

要素技術	目標・指標	成 果	達成度
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。	達成

4. A.成果、目標の達成度

30

(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

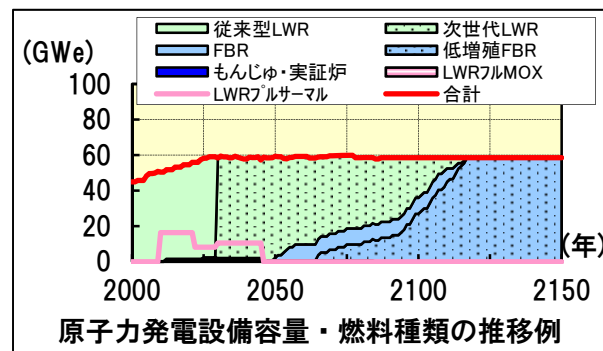
要素技術	目標・指標	成 果	達成度
軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの移行シナリオ等検討	・ 原子炉を含めた核燃料サイクル全体の軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの移行シナリオを明らかにする。	・ 発電設備容量、高速増殖炉への移行開始年、移行期間（高速増殖炉導入速度）等のパラメータを考慮して、複数のシナリオを比較検討するとともに、代表的な移行シナリオを明らかにした。これにより、第二再処理工場の設備容量及び導入時期を具体化した。	達成
	・ 軽水炉から高速増殖炉への移行期に必要な第二再処理工場のプラントスタイルについて、ブロックフローレベルでの概略検討を行う。	・ 第二再処理工場の主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。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

4. A.成果、目標の達成度

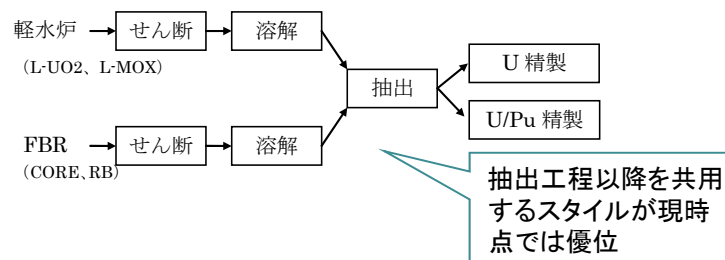
31

(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 ；成果概要

●移行シナリオの明確化



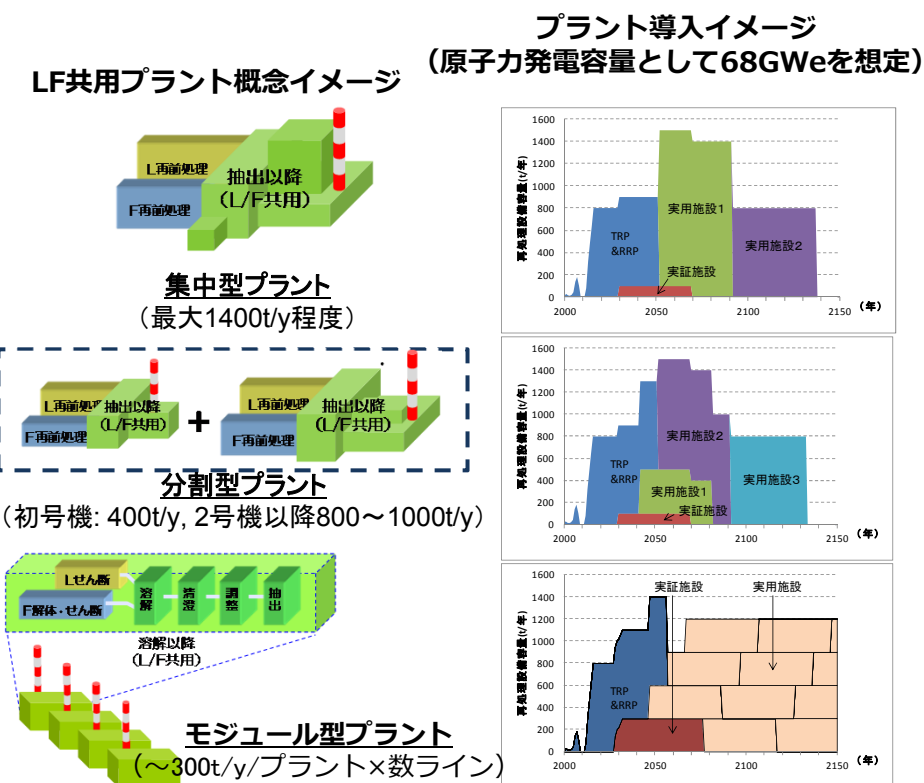
●第二再処理工場のプラントスタイルの検討



●再処理プロセス技術相互比較

	コプロセッシング法が優位	コプロセッシング法	先進湿式法	FLUOREX法	超臨界直接抽出法
経済合理性	主要機器製作コスト(相対値)	1 ○	1.3 △	1.2 △	1.2 △
環境負荷低減	ガラス固化体発生量(相対値)	1 ○	1 ○	1.7 △	0.8 ○
核拡散抵抗性	制度障壁(計量管理)	○	○	△	△
技術的成立性		◎	○	△	△
現時点での総合比較		◎	△	△	△

●プラント概念の設備構成パターンの検討



3つのプラント概念の設備構成パターンを整理
第二再処理工場はプルトニウム処理量の増加
→ウラン/プルトニウム濃縮設備等の系列数の増加が特徴

4. A.成果、目標の達成度

(3)再処理工学の枠組み構築

要素技術	目標・指標	成 果	達成度
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

5. A.事業化、波及効果

本事業で開発した除染技術は、高速増殖炉サイクルから回収するウラン等を高除染化する技術として、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のプルトニウムやウラン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合わせて、今後の第二再処理工場に関する検討に資することとなる。

また、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最適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。

さらに、再処理施設に係る検討を行うことにより、今後の再処理施設建設技術の国内定着への道筋を開き、本分野における国際競争力を確保することが期待される。

6. A.研究開発マネジメント・体制等

35

(1) 研究開発計画

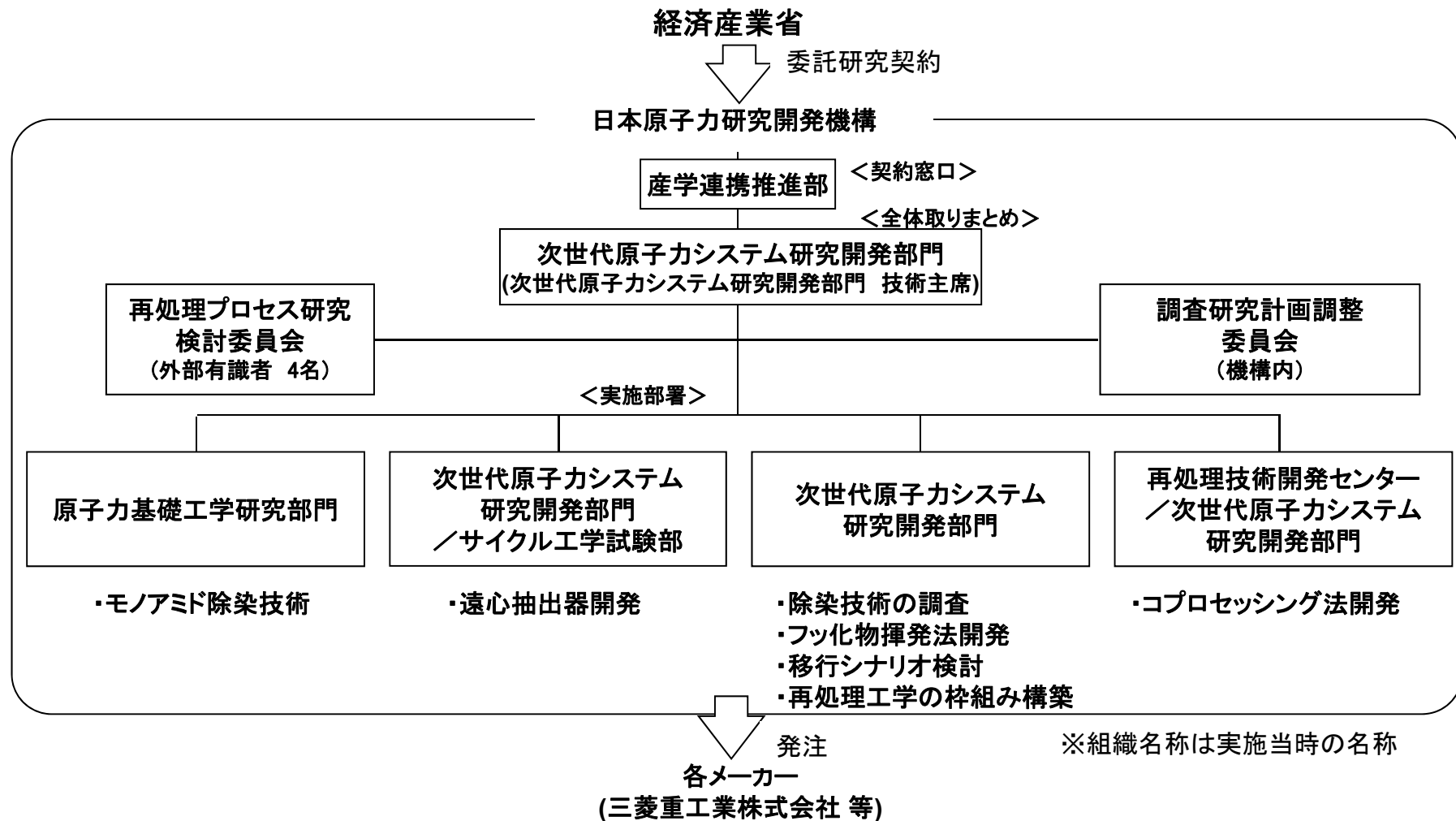
本事業の研究開発計画は、原子力機構で実施する「高速増殖炉サイクル実用化研究開発」の研究成果等も踏まえつつ、各年度の研究開発成果を段階的に発展させた計画的なスケジュールにより実施しており、研究開発計画は妥当であった。

	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	  技術調査、プロセスフロー構築、課題整理	流動性試験 (200tHM/y規模) スラッジ試験設備設計・設置 課題整理／基本構造検討／抽出性能・耐スラッジ性評価／大型化検討	大容量処理ロータによる流動性試験／臨界評価 フローシート検討、U, Puを用いたミキサセトラ試験 Pu/U比=1%, 3%, 20% U, Pu共抽出及びU, Pu分配プロセスの連続抽出試験 U, Pu混合モニタ試験	スラッジ耐性評価 第二再処理工場の概念検討（設備構成パターンの検討）	
(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		移行シナリオの検討・プラントイメージの検討			
(3) 再処理工学の枠組み構築		技術体系化のための手法の検討			

6. A.研究開発マネジメント・体制等

(2) 実施体制・運営

研究開発の実施に当たっては、原子力機構内に調整委員会を設置し、進捗管理及び情報共有を行うとともに、外部有識者を委員とする検討委員会を設置し、実施内容及び成果等の妥当性の確認を行っている。



6. A.研究開発マネジメント・体制等

(3) 資金配分

研究予算は、各技術開発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。

(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	0	0	0	0	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		0	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		0	50	0	0	0	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	0	80	250
(3) 再処理工学の枠組み構築		11	1	15	0	0	27
合 計【(1)+(2)+(3)】		272	442	501	266	265	1,746

6. A.研究開発マネジメント・体制等

(4) 費用対効果

本研究開発の実施により、

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が可能となり、両サイクルの燃料バランスの融通性が増加する。

高速増殖炉導入ペースの変動に対する柔軟性が確保され、高速増殖炉サイクルへの円滑な移行が可能となる。

今後の第二再処理工場に係る議論を円滑に進める上で必要となる有用な情報が提供可能となる。

核拡散抵抗性の高い除染プロセスの開発により、我が国での核燃料サイクルの実施に係る国際的理解を高める。

我が国での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。

(5) 変化への対応

本研究開発の実施期間中に発生した東北地方太平洋沖地震及び東電福島第一発電所事故が生じたものの、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の開発に取り組んだ。

7. A. 中間評価の結果

中間評価での評点結果及び総合評価

平成21年中間評価での評点結果

評 価 項 目	平均点	標準偏差
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.20	0.75
2. 研究開発等の目標の妥当性	1.40	0.49
3. 成果、目標の達成度の妥当性	1.60	0.49
4. 事業化、波及効果についての妥当性	1.00	0.63
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	1.00	0.63
6. 総合評価	1.20	0.40

(3点満点)

【中間評価における総合評価】

平成18年7月に設立された「五者協議会」(文部科学省、経済産業省、電気事業連合会、(社)日本電機工業会、(独)日本原子力研究開発機構(JAEA))では、軽水炉から高速炉サイクルへの移行シナリオの検討も行われることになっているが、実際の技術開発については、その中心を担うJAEAの研究開発は、あくまで高速増殖炉サイクルに特化した計画であった。将来の高速炉サイクルへの移行に備え、その移行を円滑に進めるうえでの課題を見極め、ギャップを埋めるための準備を今から進めておくことは重要であり、本事業で埋められることになった意義は大きいと考える。また、使用済MOX燃料の再処理や第二再処理工場の検討を2010年頃から開始するという国の方針に照らし、軽水炉サイクルから高速炉サイクルへの移行シナリオの検討は時宜を得た検討である。

なお、50年を超える移行シナリオは極めて多面的であり、エネルギー需給バランス、エネルギー供給形態のグローバルな推移、外交、経済等に依存して大きく変わる。不確定性も大きく、前提条件及び除染技術として想定される要素技術の目標・指標があいまいである。技術的課題に関しては、2010年頃から開始するとされている検討を踏まえて適宜取捨選択し、限られた研究開発資金を有効に活用していくことが望ましい。

7. A. 中間評価の結果

中間評価で挙げた問題点・改善すべき点とその対応方針(1/4)

問題点・改善すべき点	対 応 方 針
前提条件及び除染技術として想定される要素技術の目標・指標があいまいである。それをはっきりさせて候補技術の選定が行われていることを示してほしい。	除染技術の選定については、放射線安全の観点から、10^5以上の除染係数が得られることを要件に、技術的成立性、実現可能性、経済性及び核拡散抵抗性の比較評価により実施している。候補技術については、開発途上のものが多く、評価時点で活用できるデータ類から見込まれる性能を指標としている。
本事業のタイトルは、その必要性が一般に分かりにくく、また視野が狭すぎるように思われる。「軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの移行を円滑化するための基盤整備事業」として再定義したらどうか？そうすることにより、第2再処理工場(高速増殖炉立ち上げのためのPu供給プラントとしての役割を持つことになる)向けの下準備もこの事業の中で進める意義付けができる。	事業の必要性や目的を明確にしつつ、その目的に見合った分かりやすい名前の事業の実施を心掛けることとする。
遠心抽出器とTBPによるコプロセッシング法は、第2再処理工場を実現するための基幹技術となる可能性が大きい。その意味で、本事業における研究開発資金の多くをそこに集中していくことが望ましい。	核拡散抵抗性に優れたコプロセッシング法は第2再処理工場を見据えた有力候補であり、遠心抽出器の適用を含めて適切な資金を配分して開発を進めて行きたい。代替オプションとしてのモノアミドを用いた除染技術についても開発を継続する。また、今後の核燃料の受給バランスや想定シナリオの変動に対する柔軟性などを考慮しつつ、第2再処理工場のプラントイメージの構築を行っていくこととする。
ただし、事業化の時期はかなり先の話なので、シナリオ検討や一定レベルでの代替オプションの研究は継続すべきである。	

7. A. 中間評価の結果

中間評価で挙げた問題点・改善すべき点とその対応方針(2/4)

問題点・改善すべき点	対 応 方 針
多段型遠心抽出器の開発ではスラッジ堆積への対応を検討しているが、プロセス液を抽出機にフィードする手前に小型の遠心清澄機(注)を設け、フィード液中の残留スラッジを除去するプロセスを設ける事例がある(フィード液クリーンアップ工程)。検討してみるべき。 (注)溶解液の清澄工程とは別に、供給液調整後のフィード液を再度クリーンアップするために、小型の遠心清澄機を抽出工程の手前に設ける。	スラッジ堆積による影響については、単段型・多段型遠心抽出器の共通的課題であるため、まず単段型の試験機を用いて、清澄性能を持たせた遠心機を前段に配置した場合のスラッジ除去性能等について検討する。
再処理用の遠心抽出機は、ロンドンガイドラインのトリガーリストに抵触するであろうことから、公開文献としての発表にあたっては、その仕様の詳細までは示さないなどの配慮が必要であろう(知的所有権保護の観点からも)。	ご指摘のとおりであり、成果の公開にあたっては、機器の寸法等、仕様の詳細については、公開対象としない方向で対処する。

7. A. 中間評価の結果

中間評価で挙げた問題点・改善すべき点とその対応方針(3/4)

問題点・改善すべき点	対 応 方 針
軽水炉+高速炉共存シナリオ検討では、燃料バランスのみでなく、廃棄物(MA)バランスも同様に配慮する視点が(FaCTとの整合という意味では)必要。これによりシナリオ検討段階で不適と評価されたシナリオの除染技術は詳細検討不要となり、事業効率化にもなる。	ご指摘のとおり、MAバランスに配慮した視点は重要と考える。一方、五者協議会における高速増殖炉サイクル実証プロセス研究会では、「核燃料サイクル分野の今後の展開について【技術的論点整理】」(平成21年7月)において、MA回収・リサイクルについて、炉心の安全性、燃料製造、燃料サイクルコスト、環境負荷に与える影響などを評価した上で、検討課題が残されていることを指摘している。また、FaCTにおいてもMA回収について技術的見通しを判断できる段階には至っていない状況である。よって、本事業ではウラン、プルトニウムの回収を中心にしたシナリオ検討等を展開した。今後、MA回収技術についての技術的見通しがつき、今後のエネルギー政策の議論等で核燃料サイクルのあり方が明確になった段階でMAも含めたバランス評価を実施していくこととしたい。
再処理工学の枠組み構築は具体的成果がまだよく見えていない。最終年度での進展が望まれる。	平成21年度に取りまとめたテンプレートの利用を試行し、有用性を確認した。具体的には、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。また、運用の際の手引き(注意事項)を整理してまとめた。

7. A. 中間評価の結果

中間評価で挙げた問題点・改善すべき点とその対応方針(4/4)

問題点・改善すべき点	対 応 方 針
50年を超える移行シナリオは極めて多面的であり、エネルギー受給バランス、エネルギー供給形態のグローバルな推移、外交、経済に依存して大きく変わる。不確定性も大きい。まずは、シナリオ作成のためのオールジャパンに必要なメンバー構成を考え、議論すべき課題のメニューを明らかにし、その中で事業計画の意義や優先度を定めるべきである。きびしい政府予算の中で、現状の事業計画は高い投資優先度を正当化できないだろう。関係省庁が連携した検討体制が必須である。	ご指摘のとおり、軽水炉から高速増殖炉への移行は、長期的かつ極めて多面的であり、不確定要素も大きいことから、従前より軽水炉から高速増殖炉サイクルへの円滑な移行を念頭に、関係省庁、電力、メーカー、有識者等で構成される五者協議会(高速増殖炉サイクル実証プロセス研究会)にて「核燃料サイクル分野の今後の展開について【技術的論点整理】」(平成21年7月)を取りまとめ、同報告で今後検討すべき課題、体制等を明確にした。今後のエネルギー基本計画の改定、原子力政策の見直しに係る動向を踏まえながら、移行シナリオの具体化の検討を進めるなど、効率的に事業を進めていくこととしたい。 また、個別の除染技術に関しては、上記の議論の結果を踏まえた上で、緊急性の高い課題に傾注し、要素技術の目標・指標を明確にして開発に取り組む等の見直しを行い事業を進めることとしたい。
成果として何に結びつくか見えにくい。軽水炉から高速増殖炉への移行期への研究開発はすべきであるが、事業で実施している項目がどう成果と結びつくのか。また、数年にわたるプロジェクトだと思うので、十分な管理が今後は必要だと考える。	高速増殖炉再処理回収ウラン等の除染あるいは第二再処理工場の事業化までには長い年月を要し、その間、適宜、エネルギー政策や国際情勢等を反映してあり方の議論を行っていくべきものと考えている。本事業により得られる移行シナリオや適用可能技術の知見は、効率的かつ実現的な議論や判断を行う上で重要な土台となるものである。