

核燃料サイクル ～ FBRサイクル ～

2007年9月11日

(独) 日本原子力研究開発機構
次世代原子力システム研究開発部門

滑川 卓志

内 容

1. 核燃料サイクルの概念
2. 再処理
 - 軽水炉燃料再処理
 - 最新のFBR燃料再処理
3. 燃料製造
 - プルサーマル燃料製造
 - 最新のFBR燃料製造

1. 核燃料サイクルの概念

— 核燃料サイクル技術：多岐にわたる総合工学技術 —

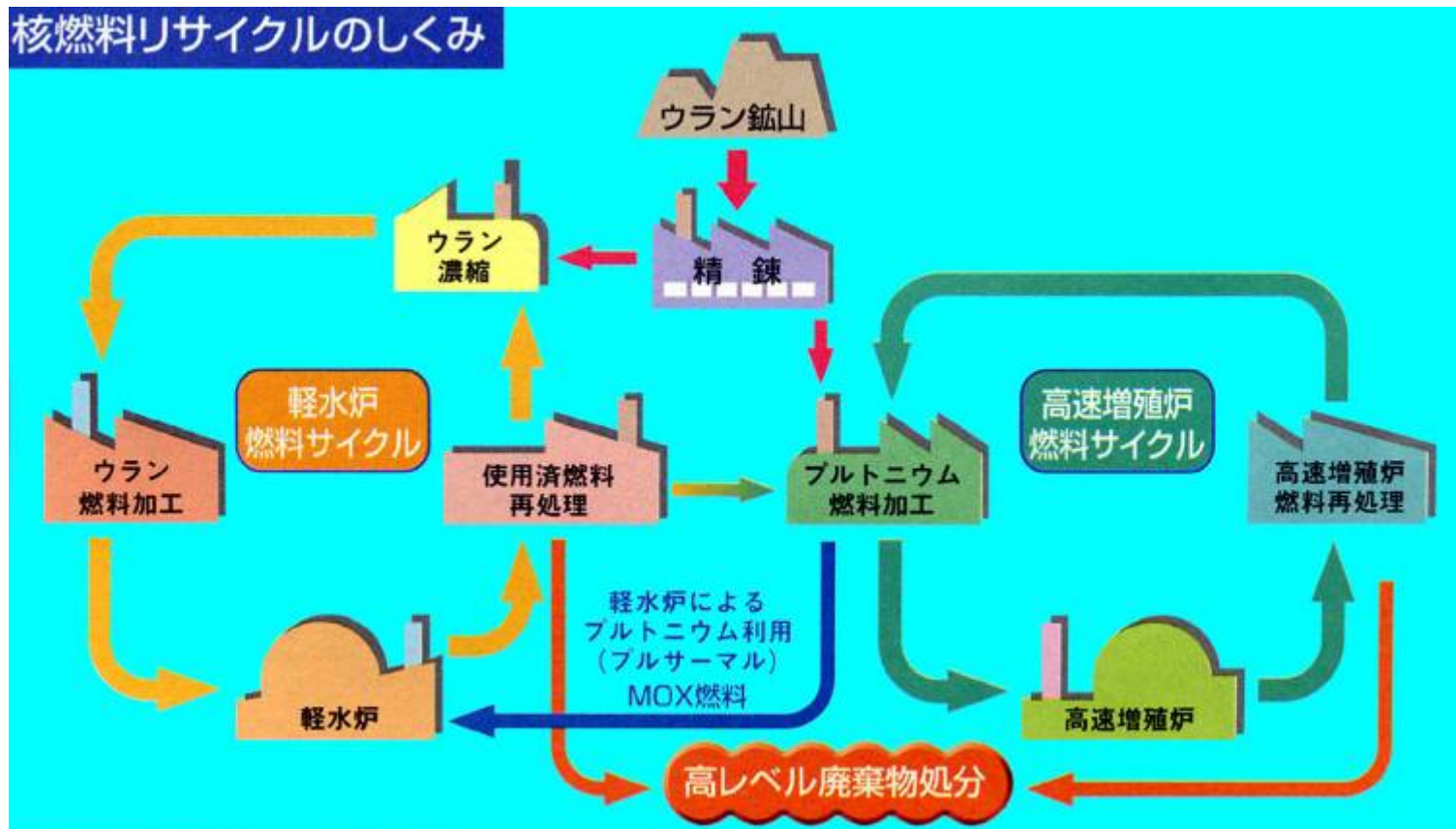
六フッ化ウラン イエローケーキ ウラン鉱石

酸化ウラン

燃料ペレット

集合体

使用済燃料



硝酸ウラニル
硝酸プルトニウム

混合酸化物燃料
(MOX)

高レベル廃液

ガラス固化体廃棄物

低レベル廃棄物

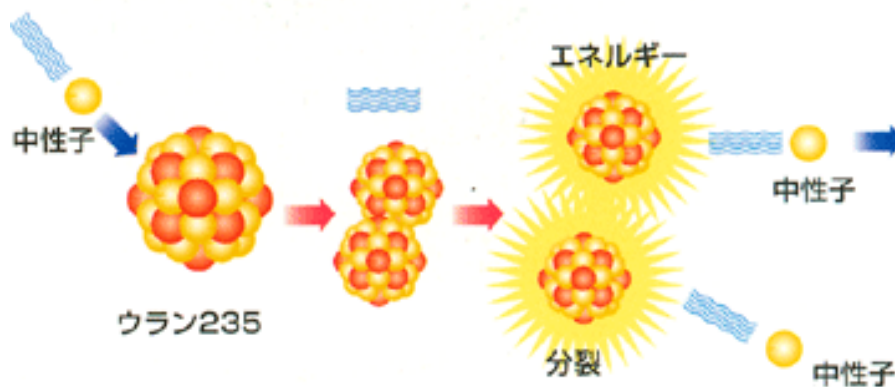
原子力エネルギー

ウランの同位体

ウランには核分裂しやすいウラン235と核分裂しにくいウラン238があります。

0.7%	存在比	99.3%
陽子の数 92 中性子の数 143		陽子の数 92 中性子の数 146
ウラン235		ウラン238

核分裂のようす

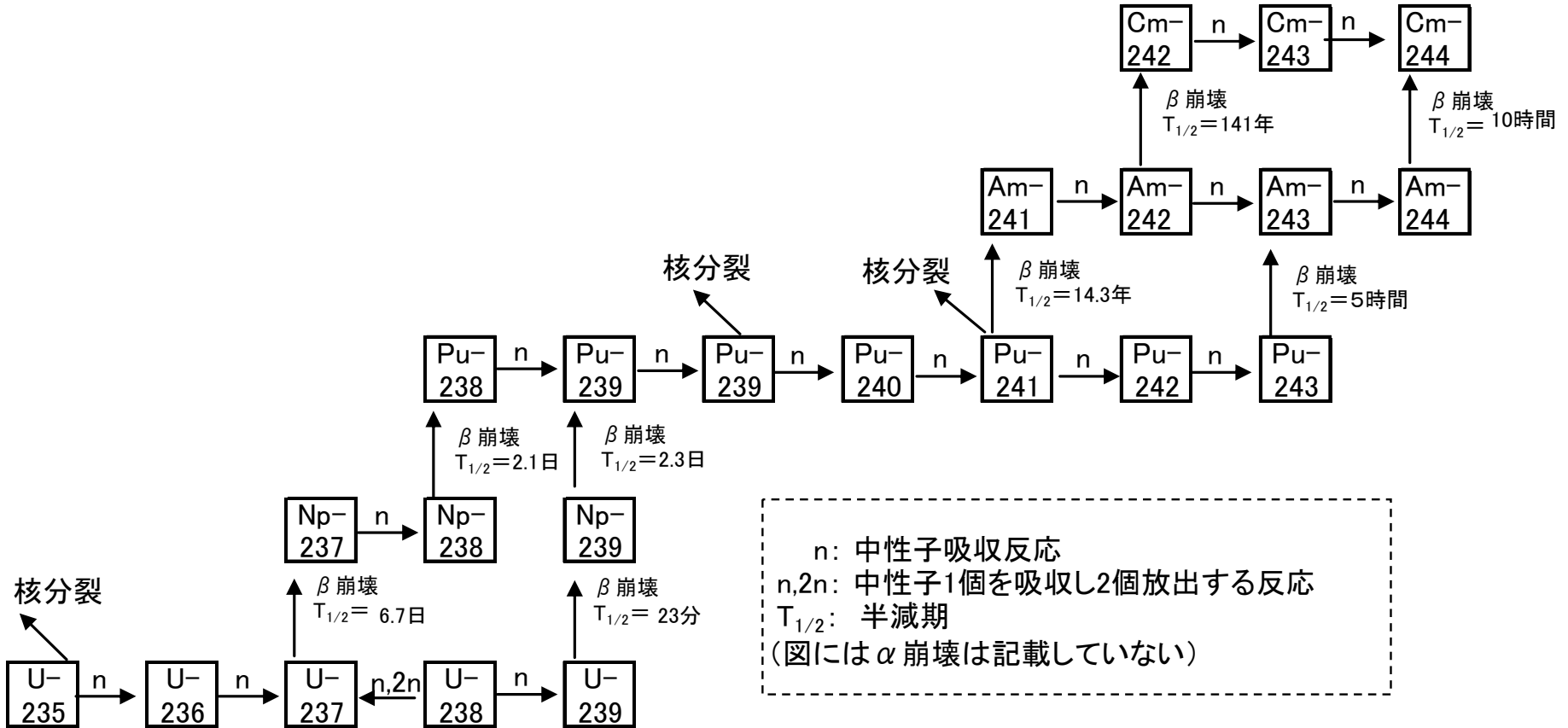


原子核の変換にともなって生まれるエネルギーを「原子力」という。
 現在発電に利用されている原子力は「核分裂」による原子力エネルギー。

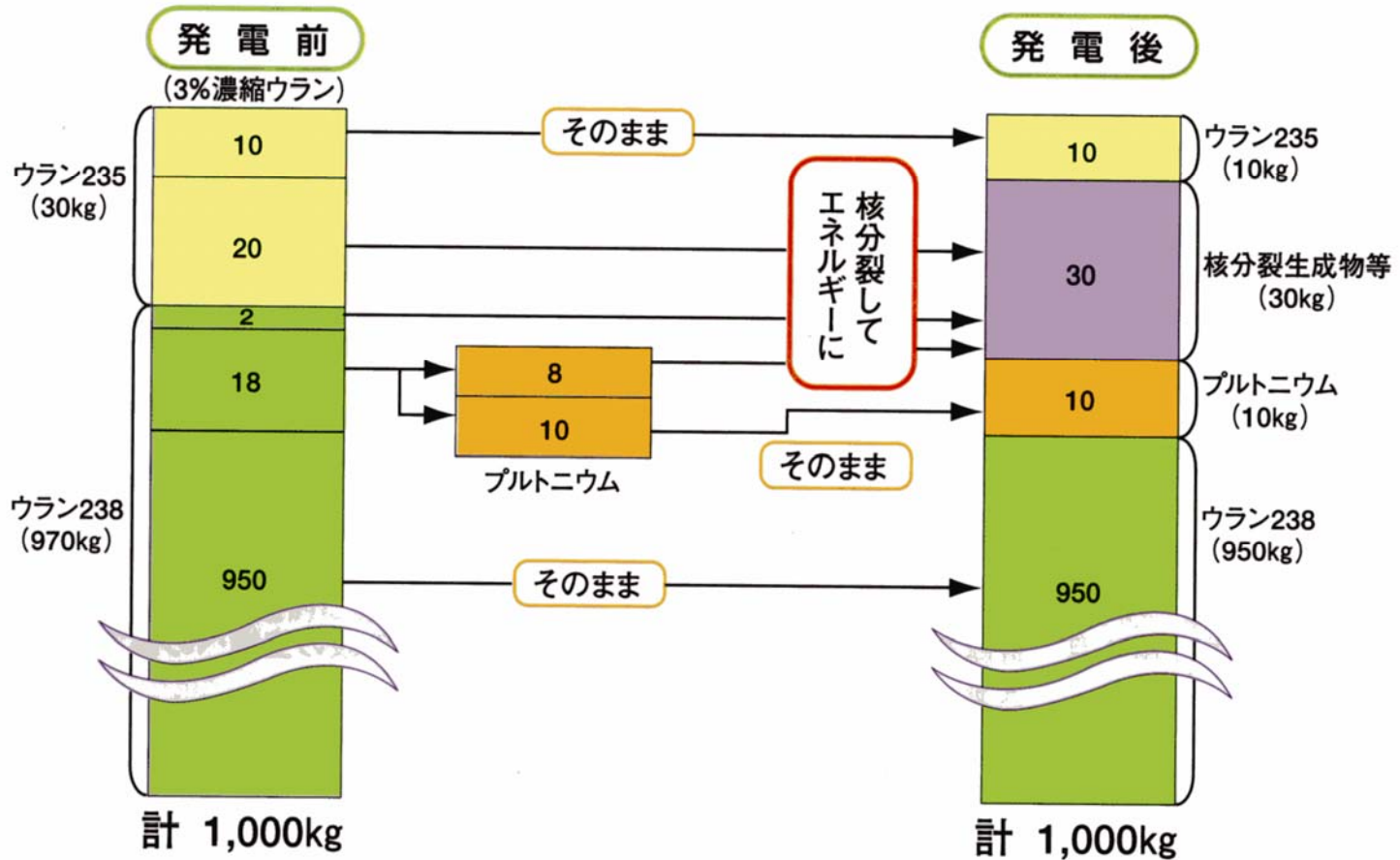
「核分裂」とはウランなどの質量のある程度以上に大きい原子核が、外部からの中性子を吸収すると不安定になり、2個の異なる原子核に分裂することをいう。

ウラン、プルトニウムなどは、中性子を吸収すると核分裂し、熱を発生するとともに放射線を放出。また核分裂が起きると、そこから2～3個の中性子が飛び出す。これが他の原子核を分裂させることで、次々と核分裂が続くのが「核分裂連鎖反応」。

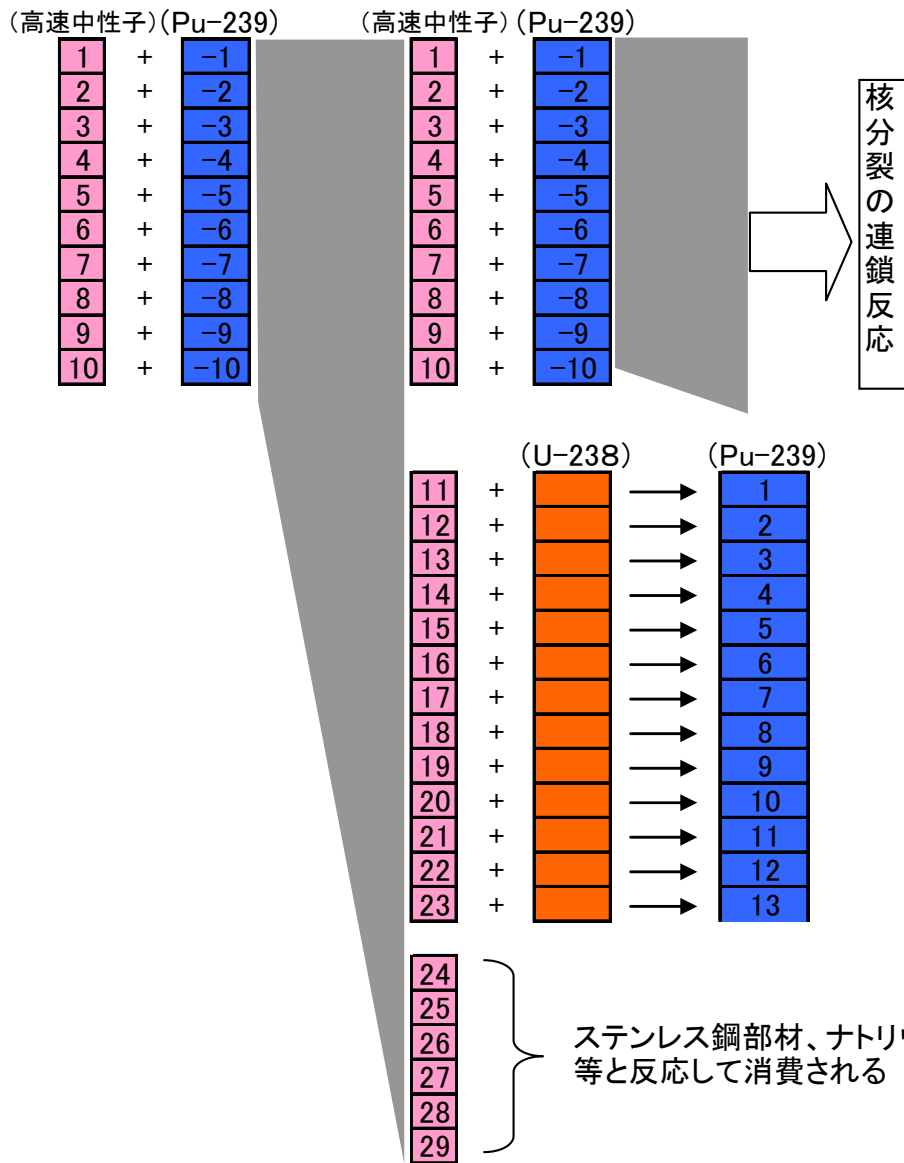
原子炉内の主な核分裂と核生成反応



軽水炉燃料の燃焼後の組成変化



高速増殖炉における中性子の収支例



軽水炉と高速増殖炉

表1 原子炉の比較

	分裂に寄与する中性子	燃料	減速材	冷却材	転換比
高速増殖炉 (FBR)	高速中性子	核分裂性 プルトニウム 約16~21% 劣化ウラン 約79~84% (ブランケット燃料 は劣化ウランのみ)	—	ナトリウム	約1.2
軽水炉 (BWR/PWR)	熱中性子	ウラン235 3~5% ウラン238 95~97%	軽水	軽水	約0.6

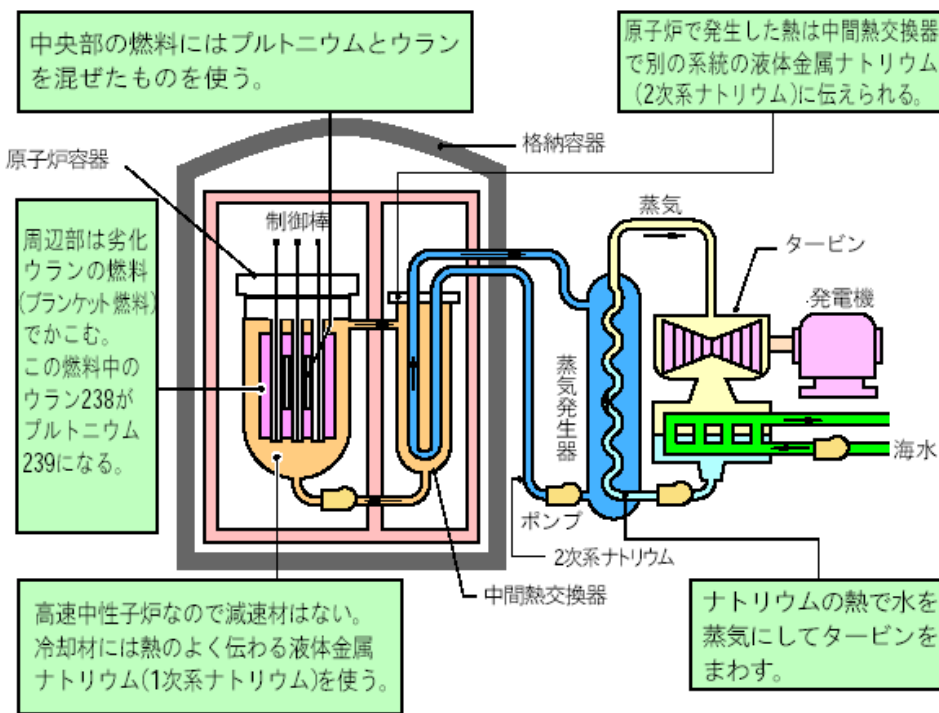


図1 高速増殖炉(FBR)のしくみ

[出典]日本原子力文化振興財団:「原子力」図面集(2005)

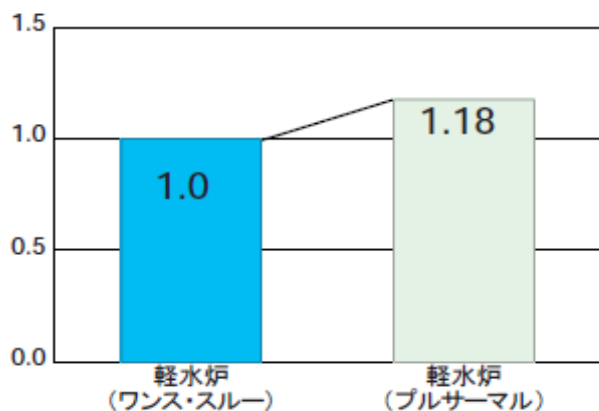
高速増殖炉：高速中性子のスピードをあまり減速させない液体金属Naを冷却材として使用。減速材を必要としない。

軽水炉：ウラン235の核分裂によって生じた高速中性子を水によって減速させた熱中性子を用い、核分裂により生じた熱はこの水により冷却する。

[出典]日本原子力文化振興財団:「原子力」図面集(2005)

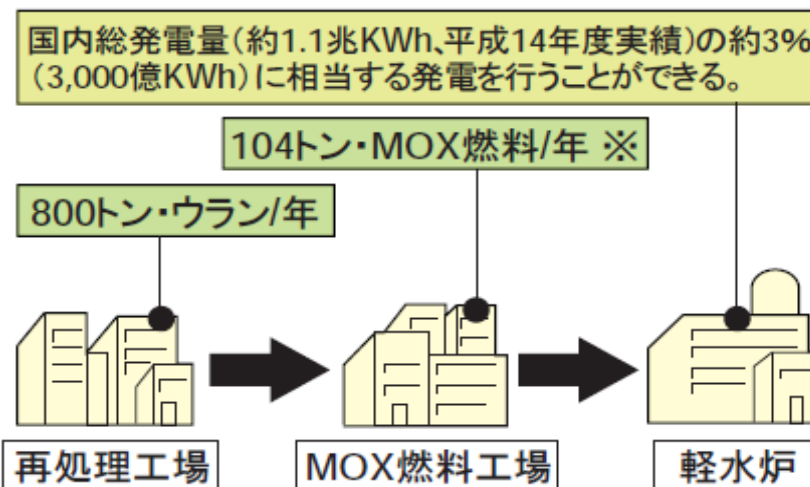
核燃料サイクルの違いによる資源利用効率の差の評価例

ウランの利用効率



高速炉サイクルの実用化によるプルトニウム利用によりウラン利用効率を約30倍に高めることが期待される。……出典：(1)

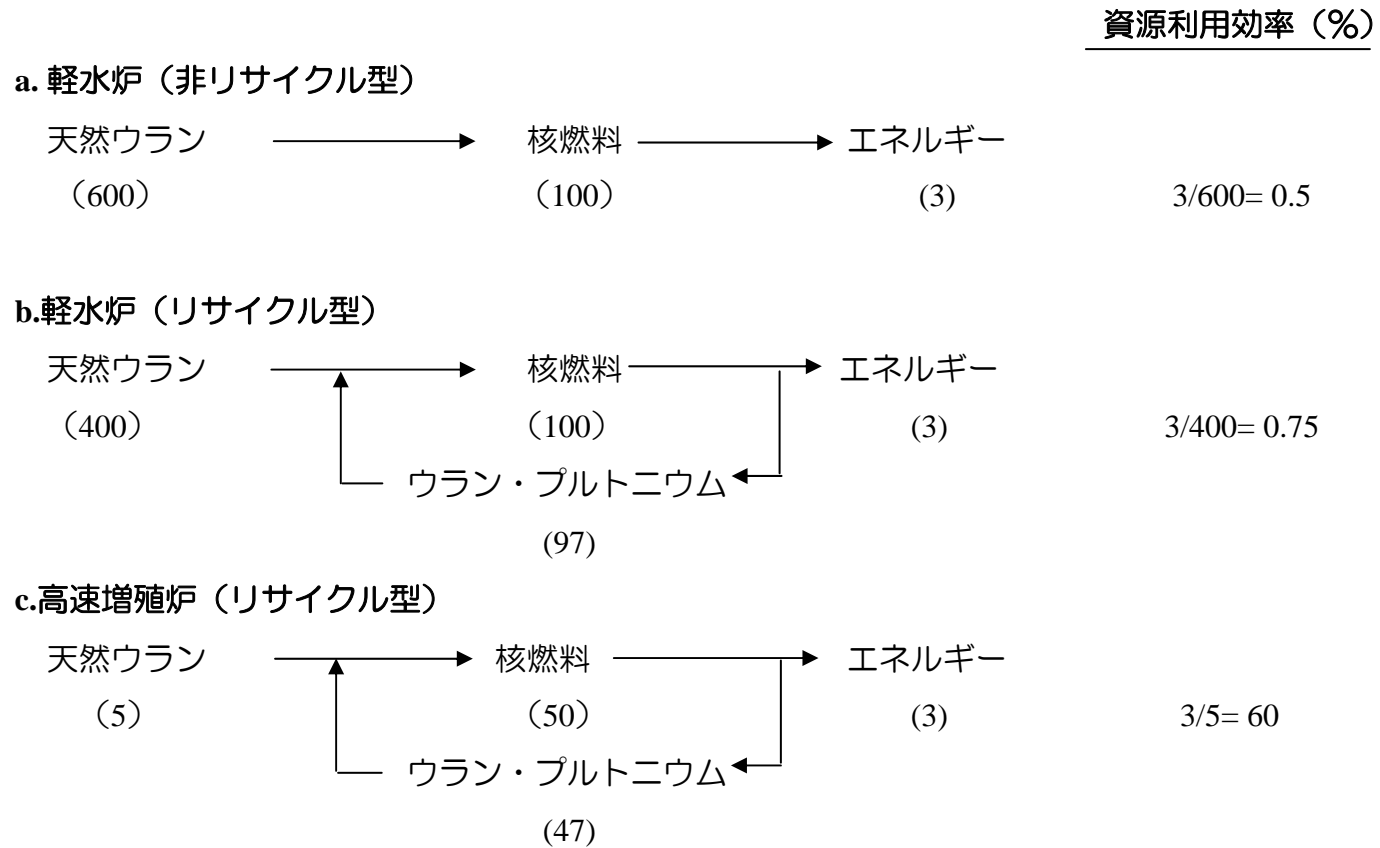
六ヶ所工場 回収プルトニウムの軽水炉利用 （「プルサーマル」利用）



※使用済燃料1トン再処理すると130KgMOX燃料を製造することができる。……出典：(2)

出典：(1) IAEA・OECD/NEA "URANIUM2003"
 (2) 原子力委員会 新計画策定会議(第5回)資料(平成16年)

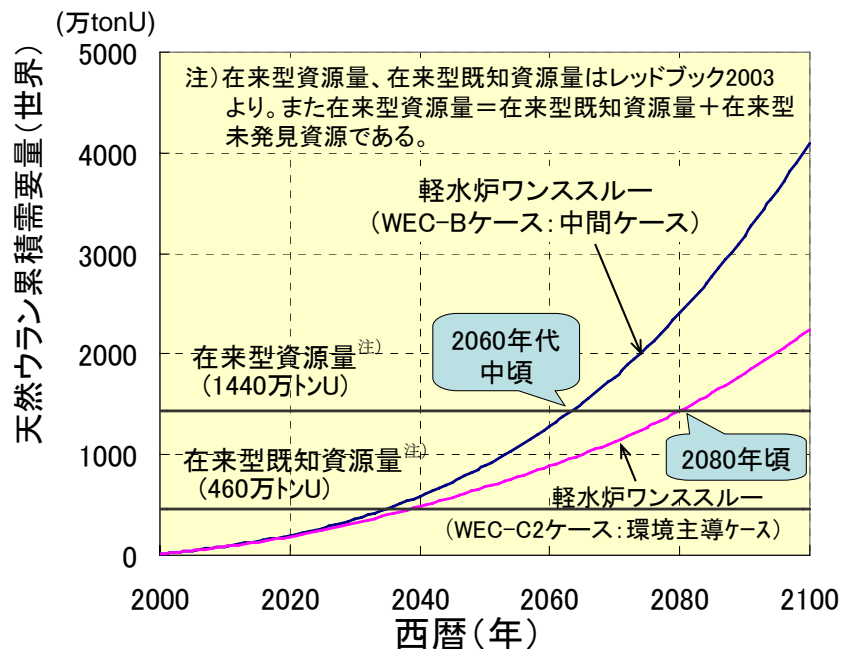
核燃料サイクルの違いによる資源利用効率の差の評価例



出典：鈴木篤之編著「プルトニウム」より

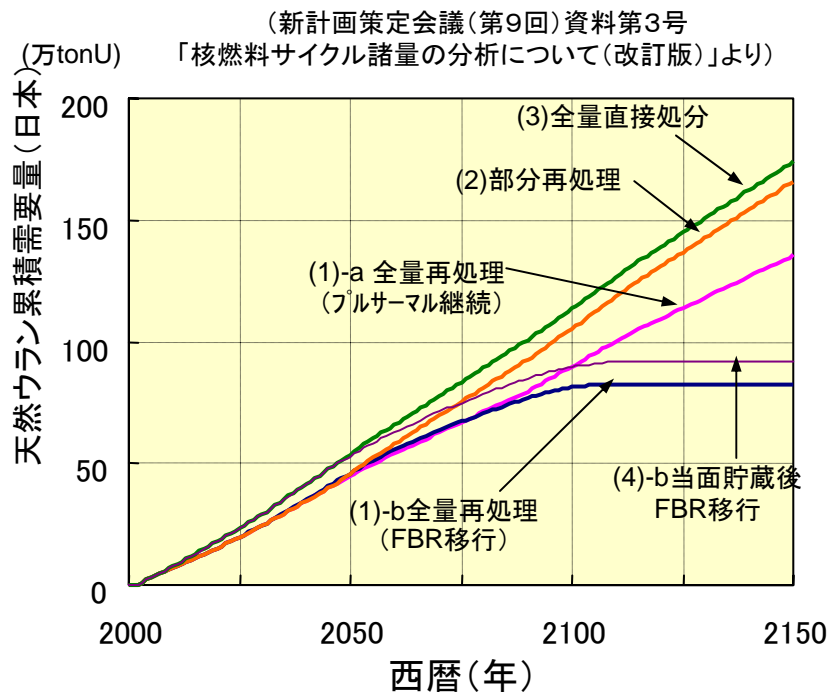
FBRサイクルの意義

ーウラン資源の有効利用とエネルギーセキュリティの確保ー



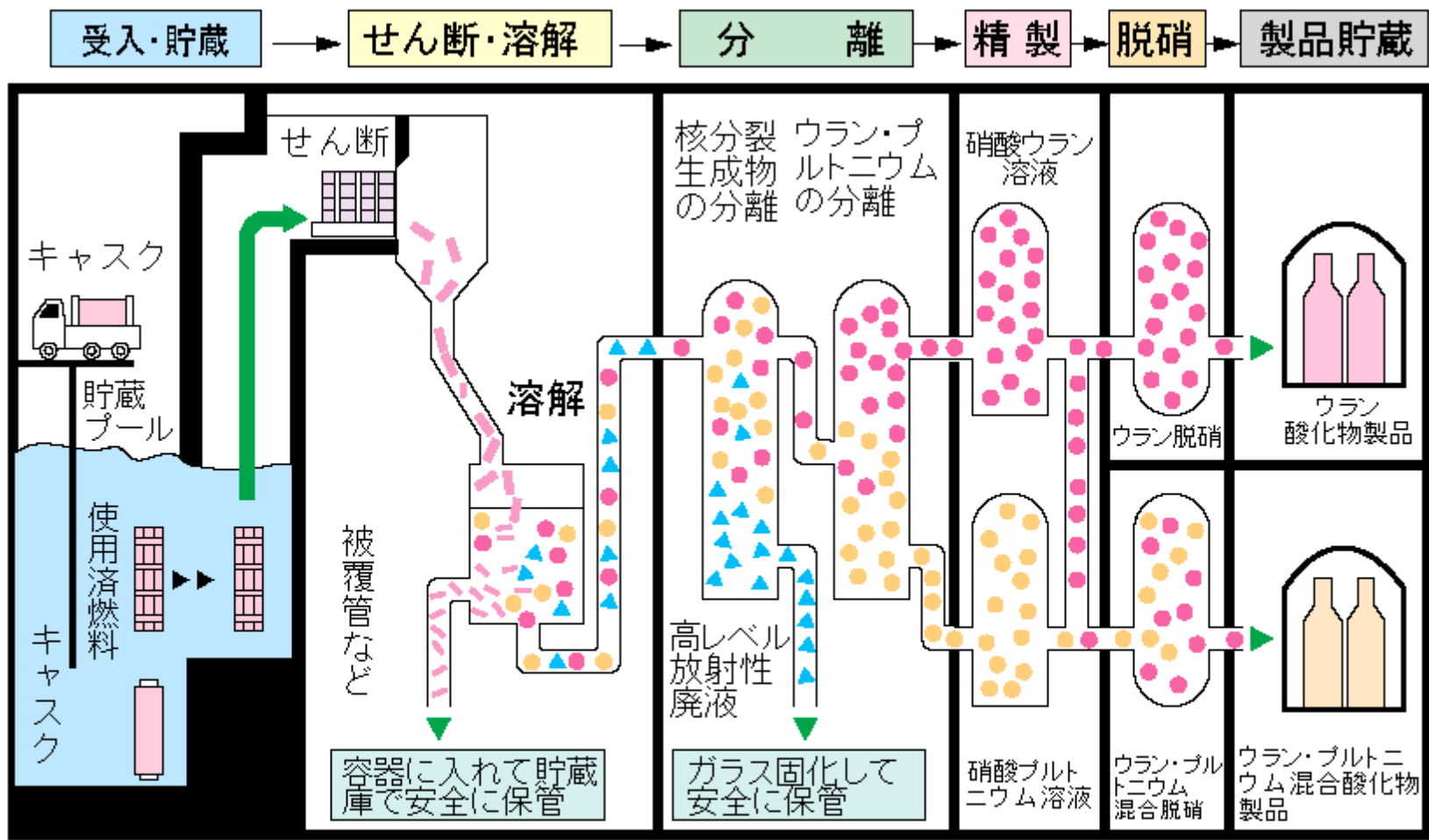
世界エネルギー会議 (WEC)における長期の世界エネルギー需給に基づくサイクル諸量解析によれば軽水炉ワンスルーでは、21世紀中頃以降ウラン資源の枯渇が現実化する可能性がある。

なお、WEC-Bケースは2100年でGDPが1990年の10倍となる経済成長を前提とし、WEC-C2ケースは原子力依存の上にGDPが11倍で更に環境保全からCO₂の排出制限を前提としている。



我が国においては、2050年以降、軽水炉のリプレースによりFBRを本格的に導入していけば、22世紀には、天然ウランの調達は不要となる。

2. 再処理 基本工程



● ウラン ● プルトニウム ▲ 核分裂生成物(高レベル放射性廃棄物) ■ 被覆管など

再処理の工程

[出典] 電気事業連合会(編): 原子力図面集 2001-2002(2001年10月)、p.158

工 程	基本技術	主要設備
使用済燃料輸送、受入・貯蔵	キャスク輸送、水プール貯蔵	輸送容器 貯蔵プール
せん断	せん断	せん断機
溶解	硝酸溶解 ヨウ素追い出し	バッチ溶解槽、連続溶解槽、 ヨウ素追出槽
清澄	ろ過	パルスフィルター 遠心清澄機
分離	抽出（PUREX法）	パルスカラム ミキサセトラ
分配	逆抽出（PUREX法）	パルスカラム ミキサセトラ
精製	抽出（PUREX法） 逆抽出（PUREX法）	パルスカラム ミキサセトラ
酸・溶媒回収	蒸留、溶媒洗浄、溶媒回収	蒸発缶、ミキサセトラ
脱硝・製品貯蔵	加熱分解、ばい焼、還元	脱硝装置、ばい焼炉、還元炉、貯蔵容器
高レベル廃液ガラス固化	ガラス固化	ガラス溶融炉
低レベル廃棄物処理		
気体廃棄物処理		

ピューレックス(PUREX)法の原理

使用済み燃料の硝酸溶解液を、パルスカラム、ミキサセトラ、遠心抽出機等の溶媒抽出装置を用いて有機溶媒(リン酸トリブチルをドデカンで希釈したもの)と接触することにより、まずウランとプルトニウムだけを有機相に抽出させ、核分裂生成物を水相に残す。次にこの有機相を硝酸ヒドロキシルアミンなどの還元剤を含む水相と接触することにより、プルトニウムだけを水相に逆抽出させ、ウランと分離する。

溶媒抽出・分離の原理

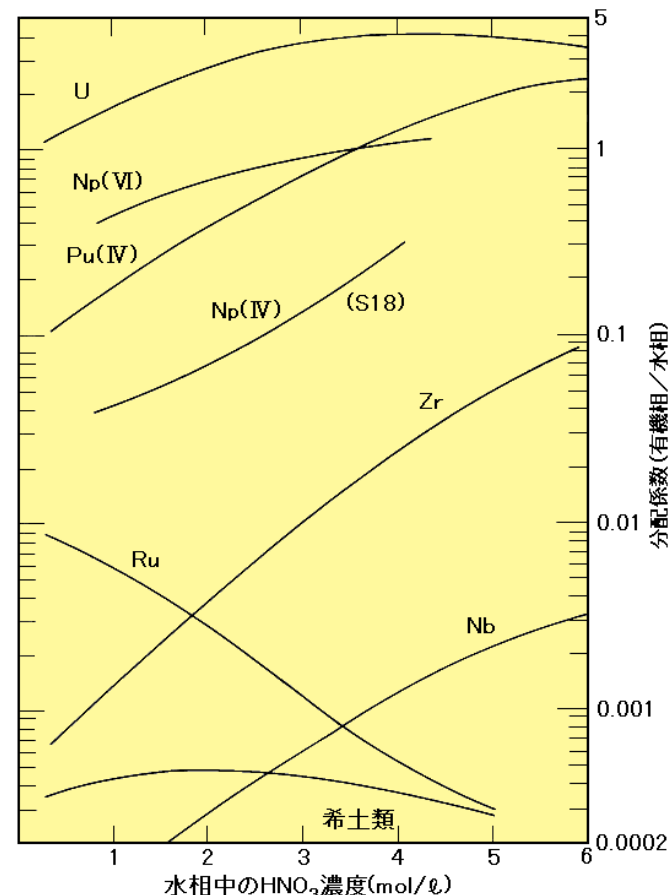
抽出すべき成分(ウラン、プルトニウム)を含む水溶液と溶媒を同一容器に入れ、十分に攪拌したのち静置すると、互いに溶け合わない性質(水と油)によって2つの相に分かれ、このとき成分(溶質)は、2つの相に一定の割合で(平衡状態で)分配される。これを抽出単位操作(1段)という。この割合は、分配係数: $k_d = \text{溶媒相中の成分の濃度} / \text{水溶液中の成分の濃度}$ として定義される。 k_d の値は、成分元素の種類および原子価、水溶液の酸濃度、温度、溶媒組成などに支配されて定まる(図1参照)。

1例として、 $k_d=4$ の場合を考えよう。溶媒(有機相)と水溶液(水相)が等量とすると、抽出単位操作(1段)では溶質(例えばウラン)の80%が有機相に、20%が水相に分配される。抽出単位操作(1段)では平衡関係であるからこれ以上の抽出は行われない。

次に、20%の溶質を含む水相を取り分け、等量の新しい溶媒と抽出単位操作を行うと、溶質の16%が有機相に、4%が水相に分配される。即ち2段の抽出単位操作では96%の溶質が有機相に分離できたことになる。3段では、99.2%、4段では99.84%、5段では99.97%が分離できる理屈である。

目的の物質のほぼ全量を抽出したい場合、抽出単位操作を繰り返す(多段抽出操作)のが通例である。多段化にあたり各段に新しい溶媒を加えると全体の溶媒量が増えてしまうので、新しい溶媒ではなく次段目の溶質をより少なく含んでいる溶媒を回すことにする。このようにすると各段の単位操作間で有機相と水相が反対方向に受渡しされることになる。これを多段向流方式といい、実用装置はこれを実現するものである。

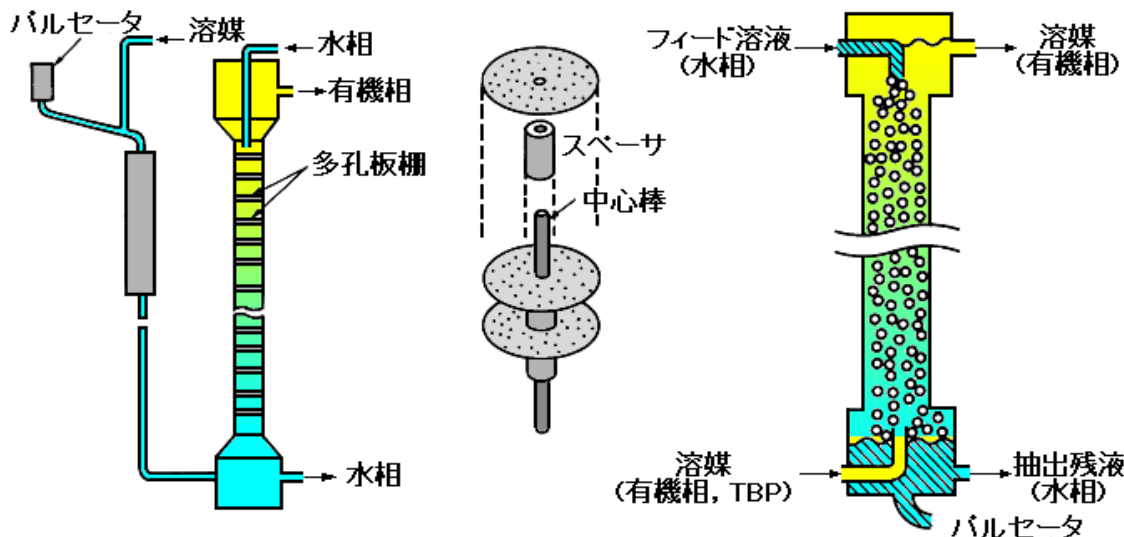
図1から分かるように水相の硝酸濃度が低くなるとウランの有機相への分配係数は減少する。これを利用してウランを含む有機相を水又は希薄硝酸と攪拌、静置するとウランの大部分は水相中に移る。これを逆抽出(逆抽出単位操作1段)という。



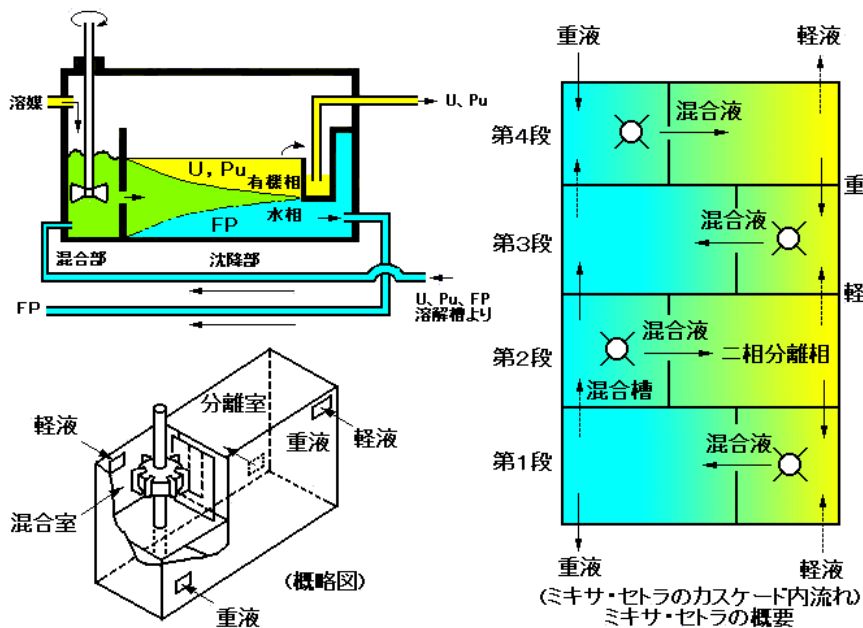
(ウランで80%飽和した30%TBP-ケロシン溶媒における25°Cの場合)

図1 分配係数に及ぼす硝酸濃度の影響

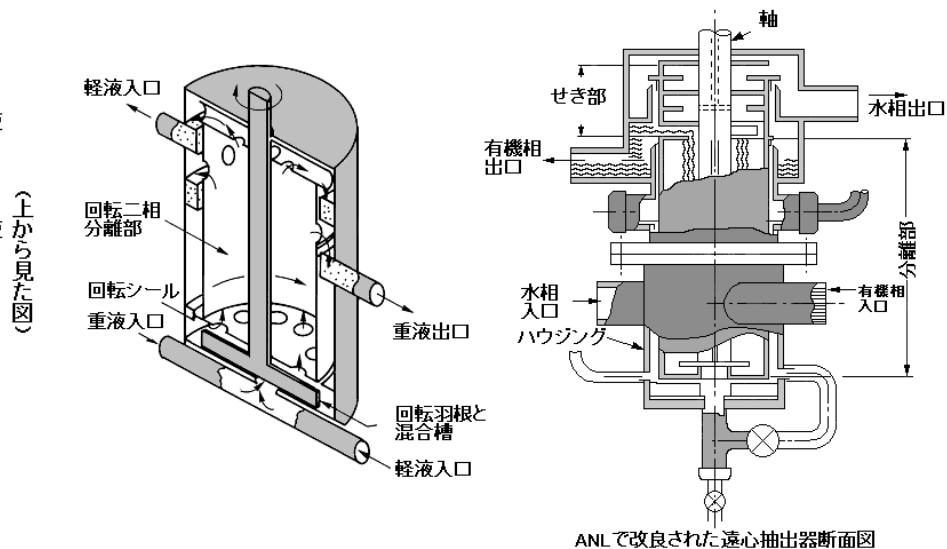
[出典]清瀬 量平(訳):原子力科学工学(第4分冊)燃料再処理と放射性廃棄物管理の化学工学、日刊工業新聞社(1983.12)p.50



パルスカラムの概念図



ミキサセトラの概念図



遠心抽出器の概念図 (FBR燃料用)

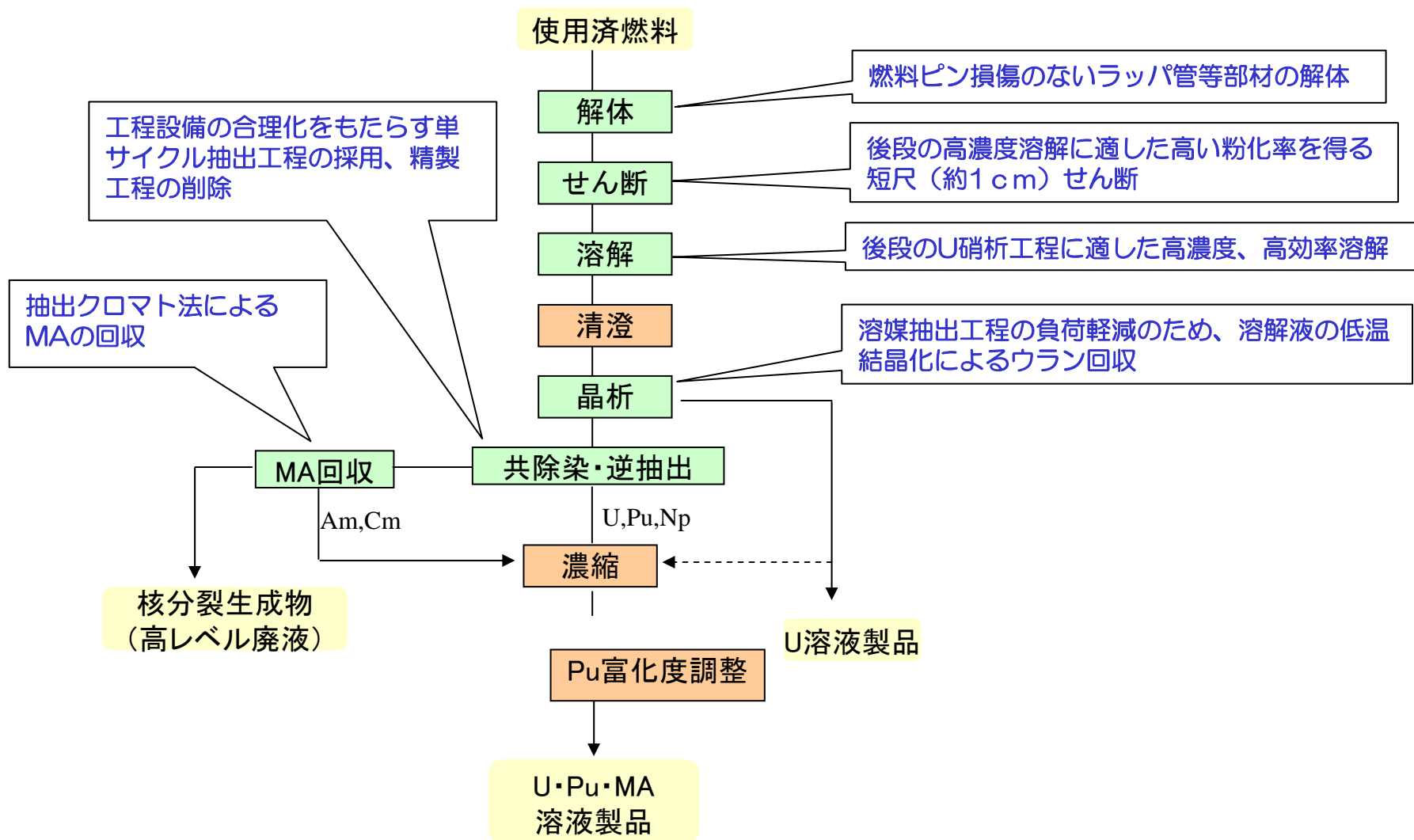
■ FBR燃料再処理条件の特徴

- ・ 高濃度プルトニウム
 - 臨界管理が厳しい
 - 核不拡散への対応が厳しい
 - 硝酸溶解性が劣る
 - α 放射能が高い
 - ・ 高燃焼度燃料
 - 放射線環境が厳しい
- } → 溶媒劣化環境が厳しい

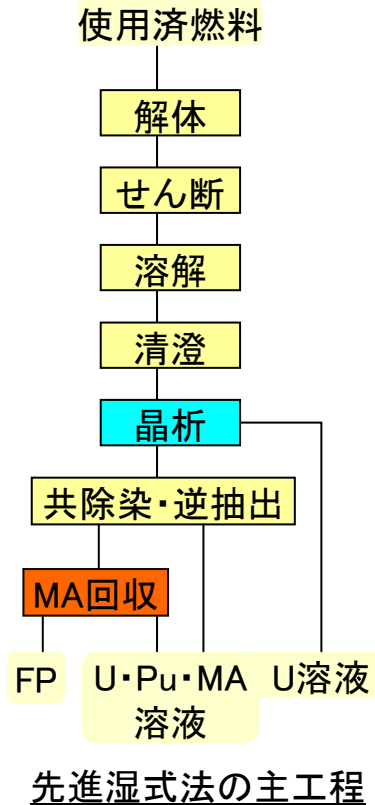
■ FBR燃料再処理技術の目指すもの

- ・ 製品に微量の核分裂生成物の残留を許容 → 工程の簡素化
- ・ 製品に微量の核分裂生成物及びMAの含有 → 高い核不拡散性
- ・ MAの回収 → 環境負荷の低減、資源の有効利用
- ・ 廃棄物発生 の低減

次世代FBR燃料再処理：先進湿式再処理技術



先進湿式再処理技術の現状



開発ステップ		物理・化学的原理確認 (プロセス開発)	性能確認・遠隔自動化 (機器開発)	工学規模実証	実用化 (原型→実用プラント)
		模擬物質→使用済燃料	模擬物質(→ウラン)	使用済燃料	使用済燃料
先進湿式再処理技術の開発レベル	主工程*	解体	RETf用機器開発などの成果を活用	⇒	切断工具の耐久性、光ファイバーの耐放射線性評価、実用炉燃料集合体用の設計
		せん断	RETf用機器開発などの成果を活用	⇒	燃料ピン開口率、短尺せん断条件の設定
		溶解	RETf用機器開発などの成果を活用	⇒	短尺せん断片の溶解処理条件の最適化 大規模溶解槽の設計検討
		清澄	RETf用機器開発などの成果を活用	⇒	
		晶析	小規模ホット試験、U試験	⇒	FP挙動データの蓄積、工学規模での性能確認
		共除染・逆抽出	小規模ホット試験、遠心抽出器開発	⇒	実用化に向けた異常時等プロセスデータ蓄積
		MA回収		⇒	ホット試験による確認、吸着塔の設計・開発、火災等に対する安全性データ取得

解体・せん断技術開発 (1/2)

●解体技術

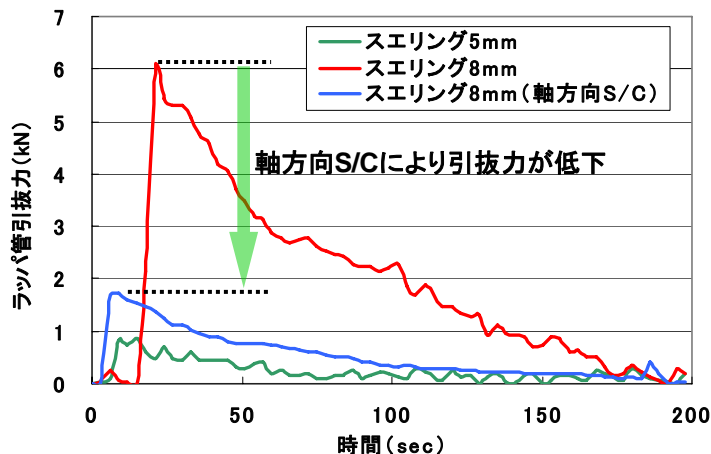
目標:ピン損傷の無い解体技術の構築

ラッパ管引抜き方式

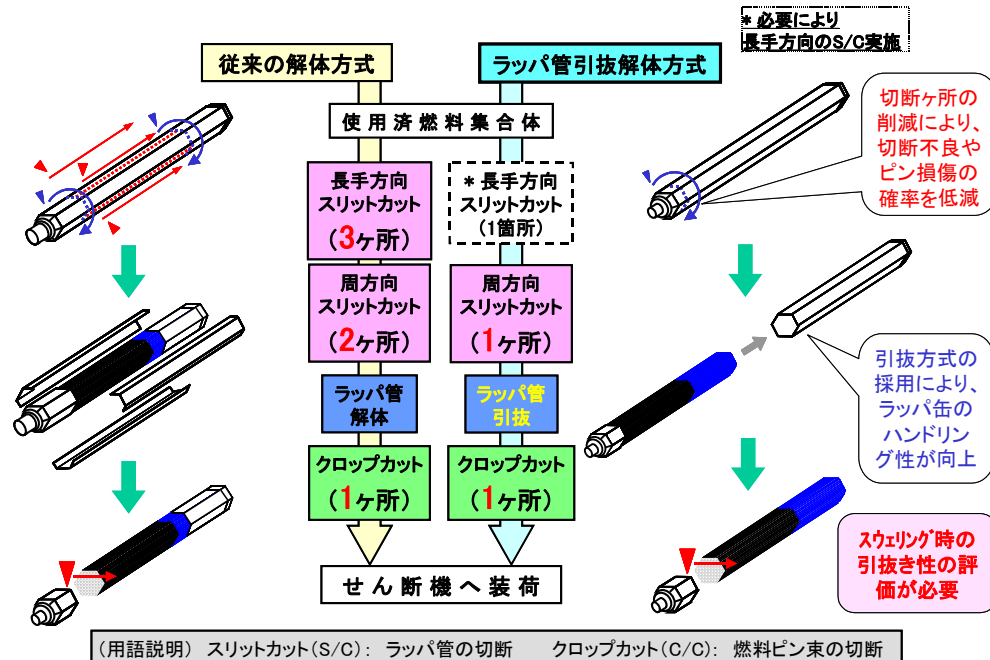
- ・解体手順を合理化。
- ・切断箇所の削減により、切断不良やピン損傷の確率を低減。
- ・ラッパ管のハンドリング性の向上。

【模擬燃料集合体の引き抜き試験】

- ・スエリング(径方向の体積膨張)を模擬した集合体に対するラッパ管の引抜きを実施
- ・最大で約6KNの引抜き力を観測。
- ・軸方向S/Cを行うことで引抜き力が1/3に低減。



ラッパ管引抜き状況

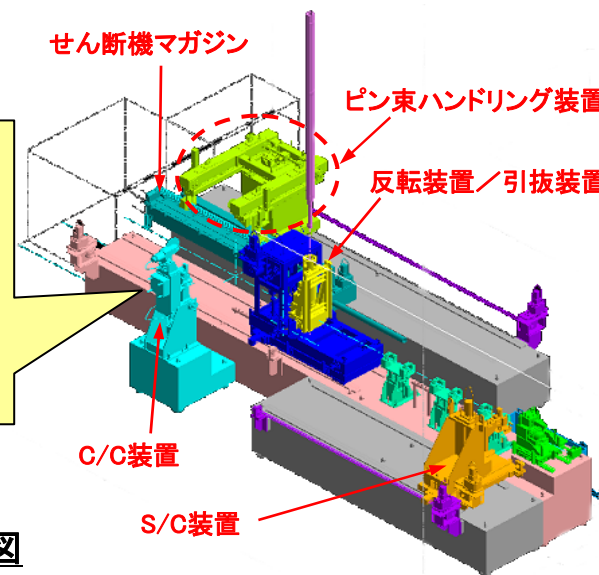


解体・せん断技術開発 (2/2)

● 解体技術

機械式切断方式

- ・切削精度が高く、熱影響も少なく、燃料ピン損傷を最小限に留める。
- ・高耐久性の解体工具(キュービトロン, CBN)の採用



解体機鳥瞰図

● せん断技術

目標：高粉化燃料による溶解性向上

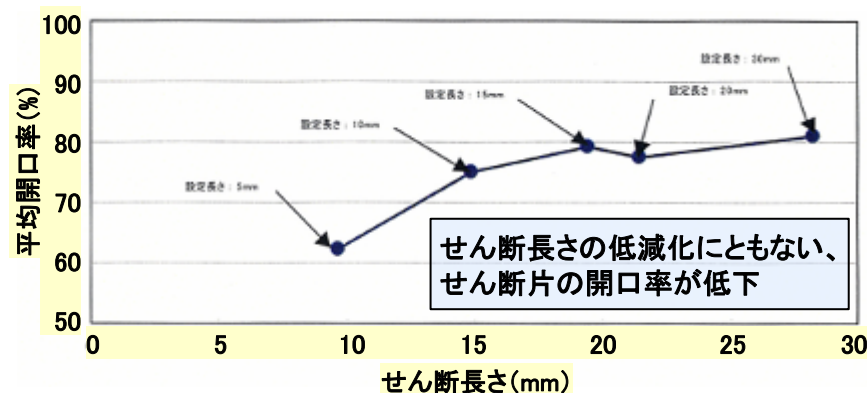
高濃度溶解液調整用の短尺せん断技術

- ・せん断長の短縮化(約3cm→約1cm)
- ・短尺せん断試験：

燃料ピンやワイヤーの長さにバラツキ長さ統一する為のピン配列及び切断方法を検討する。
被覆管端面が潰れ、開口率の観測。



【模擬燃料集合体の短尺せん断基礎試験】



せん断片の開口率

1. 開発状況

① 高効率溶解プロセス開発

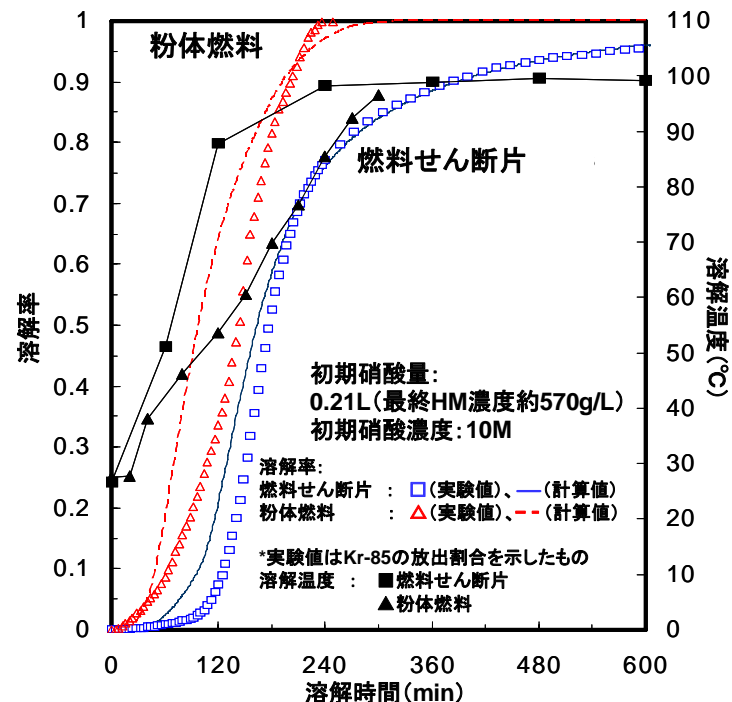
- ・ CPFでの溶解試験を基に、粉化燃料に適用できる溶解シミュレーションコードを開発した。
- ・ 従来のせん断片燃料及び粉化燃料を用いた高金属濃度溶解試験より、粉化燃料の場合、せん断片と比較して短時間に溶解反応が終了する結果を得た。
- ・ また、溶解温度の制御により溶解速度を制御できる（**粉化燃料と硝酸との急激な反応を防止できる**）こともわかった。
- ・ これらの溶解挙動は溶解シミュレーション結果に概ね従うことを確認した。
- ・ 以上の結果から、**燃料を粉化することにより、実用的な時間で高濃度溶解液を得ることができ**ることを確認した。

② 大容量高効率溶解装置の開発

- ・ 工学規模試験装置によるコールド試験により、槽内の溶液やせん断片（ハル）の移行状況を把握。
- ・ 短尺せん断技術で生じる粉化率の高い燃料及びハルの槽内での移行状況を把握。
- ・ 粉化率の高い燃料と硝酸との**溶解反応を安定かつ効率的に行う**為の条件を選定。
- ・ 溶解槽のスケールアップ検討及び運転制御に適する為のダイナミックシミュレーションコードを開発する。

2. 今後の予定

- ① 安定した溶解反応（突沸等の回避）による高濃度溶解試験
- ② 小型工学規模溶解槽の安定運転操作試験



照射済高速炉燃料を用いた溶解試験結果
(燃料: Mk-II 炉心(約64GWd/t)、Pu富化度 30%)



晶析技術開発 (1/2)

1. 晶析プロセス開発

- ・ 使用済燃溶解液等の実験室規模の晶析試験で、ウラン回収率70%以上が得られた。晶析プロセス試験データの拡充を図り、晶析操作条件の最適化を行う。
- ・ **ウラン結晶の高除染化**に向けた操作条件の検討を進める。

2. 結晶精製技術の検討

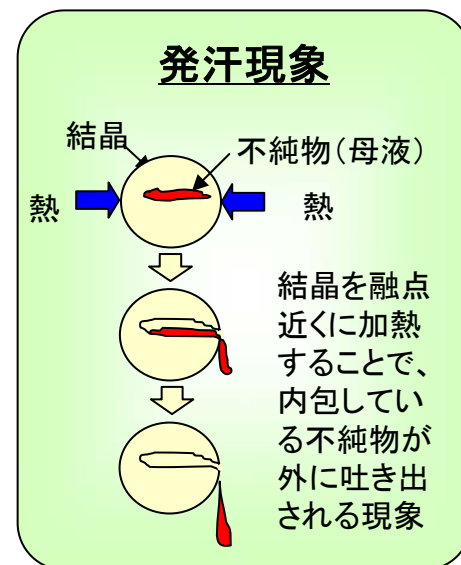
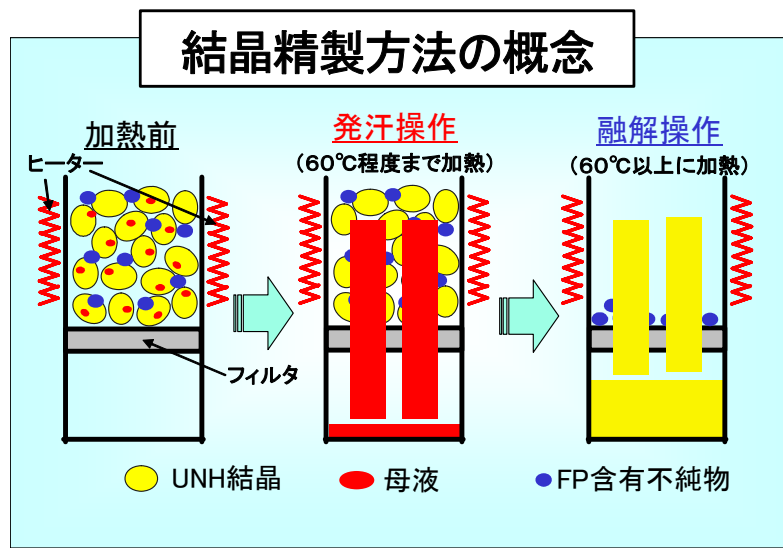
- ・ 結晶精製方法のプロセス及び工学的な検討を進める。
- ・ UNH結晶に取り込まれた母液の除去（液状不純物）
→ 結晶の**発汗現象**を利用した除去
- ・ 混在する低溶解度成分の分離（固体状不純物）
→ 融点差を利用した**溶解分離**



Cs添加条件で得られたUNH結晶

緑色の点が複塩と予想される不純物、黄色はUNH結晶。(白色はフィルタ)

UNH: Uranyl Nitrate Hexahydrate

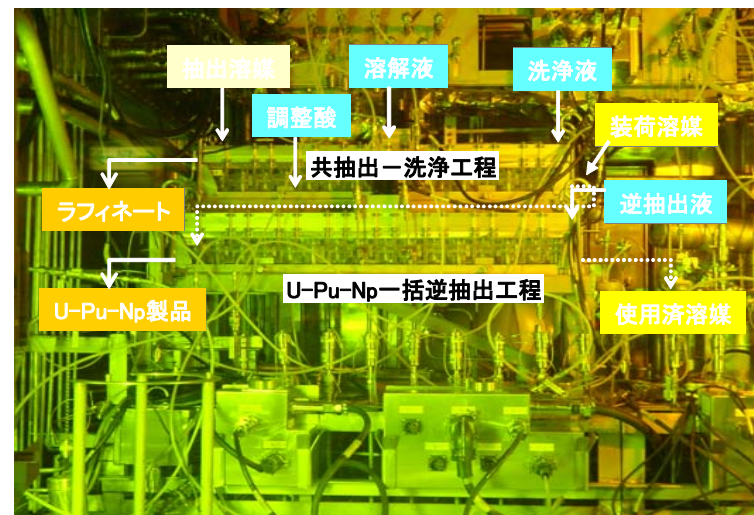


抽出技術開発 (1/2)

1. 開発状況

① 簡素化溶媒抽出プロセス開発

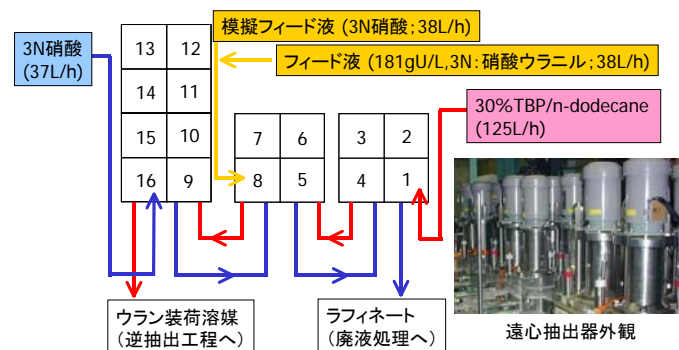
- CPFでのホット試験によりラフィネート及び廃溶媒中への損失をU, Puについては0.1%以下、Npについては2%程度にそれぞれ抑えた上で、これらの元素を共回収できるフローシートを確認した。
- 上記フローシートでは、FPについては 4×10^4 程度の除染係数を確保できることを確認した。
- 原子価調整等の付加的な工程を設けない場合でも、供給液の高酸濃度化等により一定のNp共回収が可能であるとの見通しが得られた。



簡素化溶媒抽出ホット試験

② 工学規模遠心抽出器システムによるU抽出・逆抽出試験

- 遠心抽出器システム全体を通して、抽出・逆抽出試験ともに液の流動性は良好であり、有意な異相混入も認められず、優れた相分離性能を示した。
- 段効率に関して、理論プロファイルと実験値の比較から抽出工程でほぼ100%、逆抽出工程で97~98%であり、目標値以上の性能が得られていることを工学的に実証した。
- 酸及びウラン濃度プロファイルは試験開始10分で安定することが分かり、遠心抽出器の特徴である立上げ時間の早さを確認した。



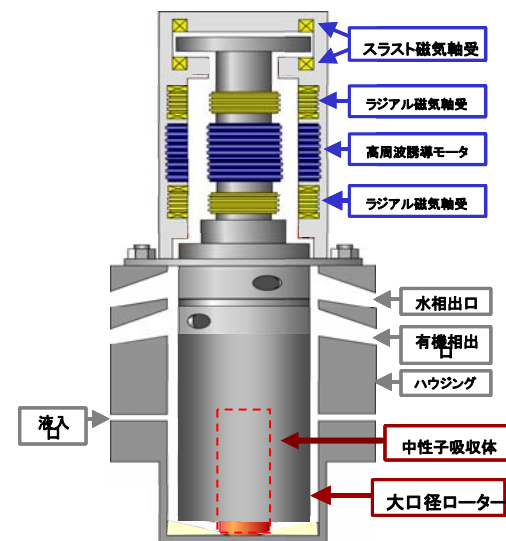
抽出技術開発 (2/2)

③ 遠心抽出器の長期耐久試験

遠心抽出器の**駆動部耐久性**（セラミックボール軸受採用）を評価するための連続運転試験を行い、**5,000時間の耐久実績**を得られ、ボール軸受の材質改善や硝酸ミストの混入防止対策を機器に施すことにより、初期の耐久性能（約800時間）よりも大幅に耐久性の改善が図られた。

④ 磁気軸受型遠心抽出器の試作および基礎性能評価

磁気軸受を駆動部に採用した遠心抽出器の試作機を完成させたことで、新型抽出器の製作が技術的に可能であることが分かった。また、基本的な液の流動性や分配性が良好であることをコールド試験により確認するとともに、運転中の磁気軸受の制御についても安定していることを工学的に確認した。



大容量遠心抽出器概念

2. 今後の予定

- ① U-Pu-Np一括回収率99.9%以上及び除染計数100以上の抽出プロセス条件の確認試験
- ② 小型工学規模抽出器試験装置の軸受信頼性、計装制御、安定運転操作条件確認試験

MA回収技術開発

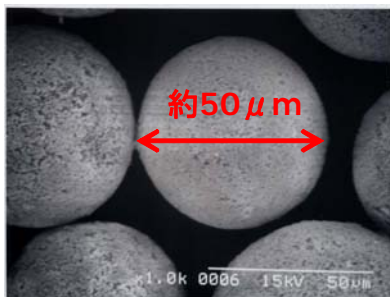
1. 抽出クロマト法によるMA回収

- ・ CMPO/SiO₂-P及びTODGA/SiO₂-Pについて、希土類元素の吸着容量や耐熱性、耐酸性、耐放射線性等の基礎的なデータを収集した。高温、高硝酸濃度条件下において、**CMPO含浸吸着材が良好な耐久性を示すこと**等が明らかとなった。
- ・ CMPO/SiO₂-Pについて、**吸着材からのCMPOの浸出を最小化する方法**を考案し、分離試験によりその基本性能に問題がないことを確認した。
- ・ **TODGA/SiO₂-P**を用いた分離性能評価試験より、TODGA含浸吸着材の配位能がCMPO含浸吸着材に比べて高いこと、これに伴い、吸着材からの金属元素の溶離に際しては負荷が増大する（溶離液量の増大や溶離剤（錯化剤）の使用等）可能性があること等を確認した。

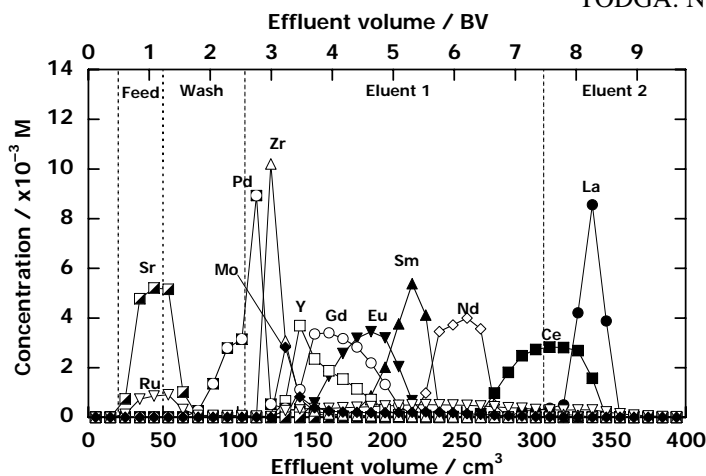
2. 機器開発

- ・ クロマトグラフィ法による分離装置の主要要素について、既存技術の調査を実施し、調査・検討結果に基づき要素試験装置の設計・製作を実施している。
- ・ 今後、要素試験装置を用いて、**クロマト分離塔内部における流動特性及び温度特性、ならびに分離回収性能の耐久性を確認**するための試験を実施する。
- ・ 工学規模装置設計に向け、遠隔操作性等を考慮に入れた装置の概念検討を実施している。

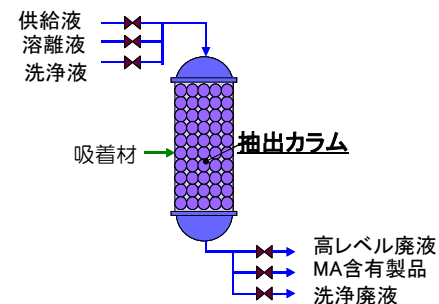
CMPO: Octyl(Phenyl)-N,N-diisobutylcarbonoylmethyl-Phosphine oxide
 TODGA: N,N,N',N'-TetraOctyl-DiGlycolAmide



シリカベースの吸着材の外観



Column : 10 mm ϕ x 520 mmh, 50 °C, Flow rate: 1 cm³/min
 Solutions: (Wash) 3 M HNO₃ (Eluent 1) 0.05 M DTPA, pH 2, (Eluent 2) HNO₃, pH 3.5.



要素試験装置の概念

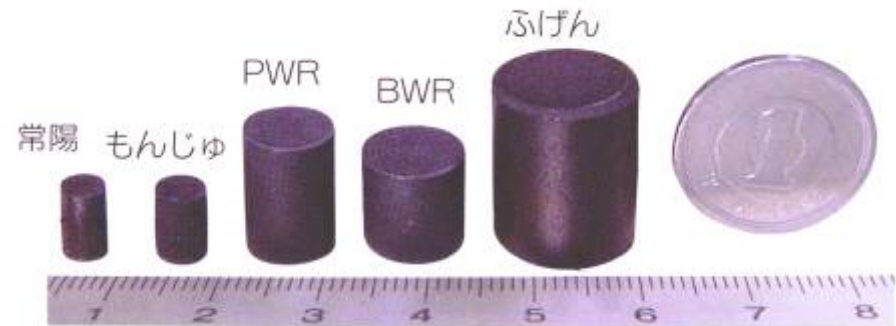
CMPO/SiO₂-Pを用いた模擬高レベル廃液を対象とした分離試験

3. 燃料製造

核燃料の特徴： 化石燃料と比較すると...

(1) エネルギー発生密度が高い。小さな体積で多くのエネルギーを発生する。

⇒発生する熱を効率的に除去。燃料形状は表面積が大きい円筒状。



(2) 燃焼後もリサイクル可能

(3) 燃焼とともに核分裂生成物が蓄積

使用済み燃料の貯蔵や輸送には遮蔽と除熱を考慮

(4) 放射線管理、臨界管理などの厳格な管理

周辺環境と従事者への放射線管理が要求される

燃料の形態

原子炉の燃料は大部分で酸化物燃料が使用されている。

- ・ 軽水炉： UO_2 焼結体（セラミックス）
- ・ 高速炉：MOX（酸化ウランと酸化プルトニウム混合物）焼結体

金属燃料の特徴

- (1) 熱伝導度がよい。
- (2) 余分な成分がなく、核燃料物質密度が高い。中性子の余分な吸収がない。
- (3) 融点が高い。高温で被覆材や冷却材との両立性が悪い。

酸化物燃料の特徴

- (1) 融点が高い。 UO_2 で約 2800°C 。金属Uでは約 1130°C 。
熱伝導度は低いが、高温にできるのでエネルギー密度を高められる。
- (2) 融点まで物理・化学的（寸法形状など）に安定である。
- (3) 高温水に対する腐食性が優れる。金属Uは高温水と反応。
- (4) 核分裂生成物の保有能力が高い。

混合酸化物燃料 (MOX燃料)

Mixed Oxide : 酸化ウランと酸化プルトニウム、酸化ウランと酸化トリウムなど核燃料に用いられる酸化物の混合物の総称

ウラン燃料

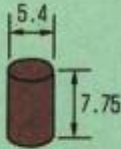

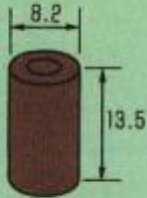



一般の原子炉で使われている燃料で、民間のウラン燃料製造会社が製造している。

燃えるウラン (U-235) と燃えないウランがあり、燃料の中には燃えるウランが約3%~約5%の割合で含まれている。

MOX燃料

一般の原子炉で使われる燃えるウラン (U-235) のかわりにプルトニウムを混ぜ合わせてつくる燃料を、MOX (モックス) 燃料という。

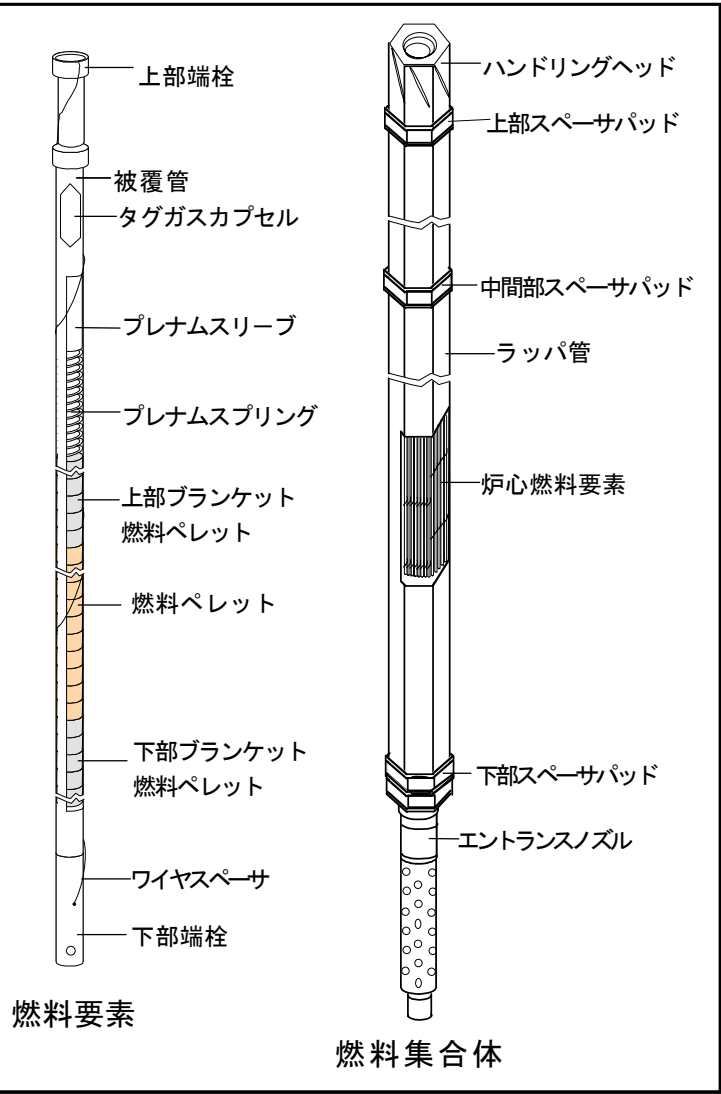
プルサーマルでは、4~9%、FBRでは20~30%のプルトニウムが混ぜられる。

	FBR	ATR	軽水炉
ペレットの大きさ 実物大 (mm)			
ペレットの重さ (g)	1.7	30.1	7.4
発生電気量 (kWh)	1,100	3,400	1,800
1世帯の1年間の使用 電気は何個のペレット で支えられるか? (1世帯当り: 3,333kWh)			

プルサーマル燃料

- 核分裂性物質としてPlutoniumを主体とする燃料を熱中性子炉（Thermal炉）で利用すること
- プルサーマルの意義
 - 天然ウラン資源の有効利用
 - 廃棄物対策
 - 核不拡散上のリスク低減
 - （使用済燃料直接処分では将来Pu鉱山問題発生）
 - FBR-燃料サイクル確立への橋渡し
 - 燃料サイクル技術基盤（Pu取扱い、MOX加工技術、再処理技術、保障措置技術等）は共通
- 世界的にMOX燃料の軽水炉への利用は、1960年代から開始された。フランス、ドイツ、スイス、ベルギーにおいては、1980年代から利用が本格化。
- 日本では、原研JRR-2、NSRRを用いた基礎照射試験、海外GETR、ハルデン炉、Saxton炉を用いた確性照射試験に続き、1980年後半から敦賀1号機および美浜1号機において少数体先行照射が実施されMOX燃料の健全性が実証されている。
- MOX燃料の被覆管や燃料集合体構造は UO_2 燃料と同じ。

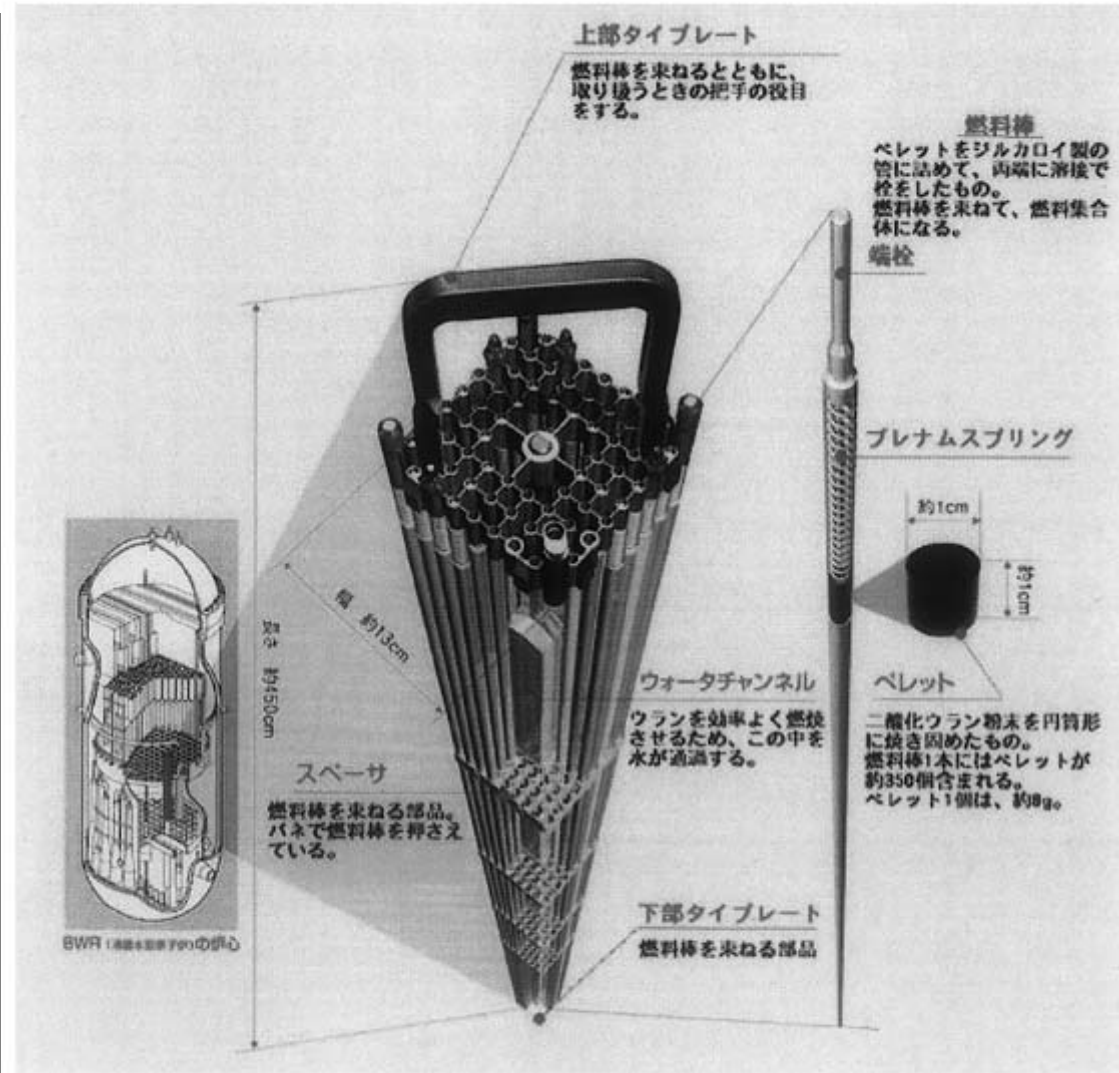
燃料及び燃料集合体



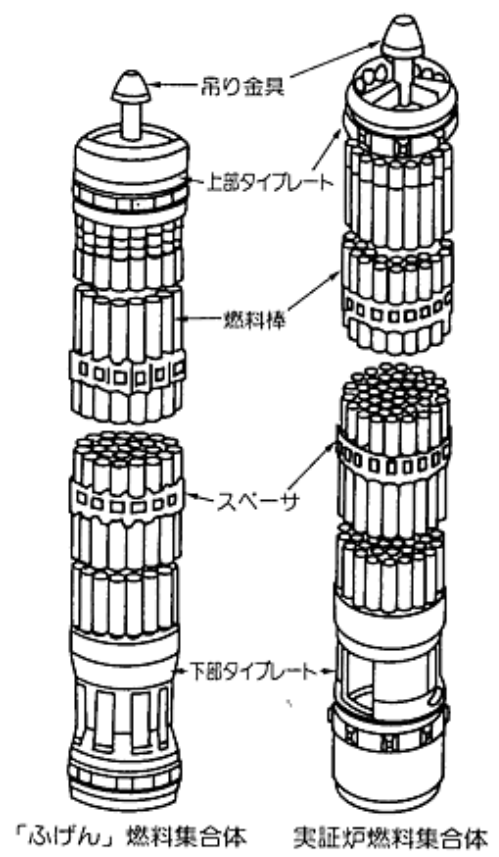
燃料要素

燃料集合体

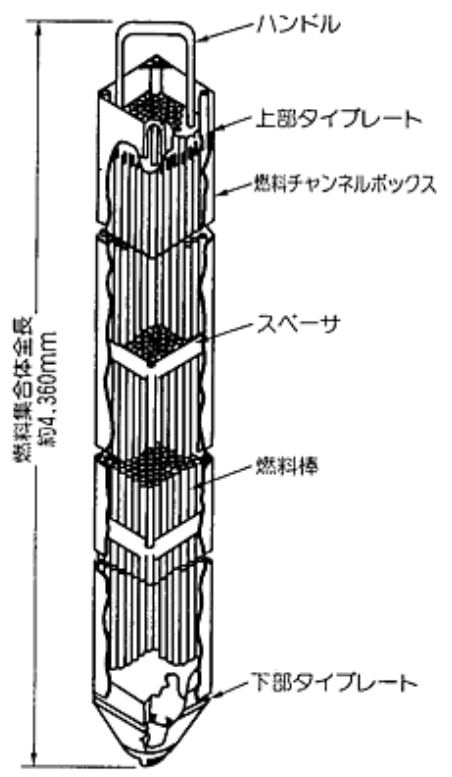
もんじゅ用燃料



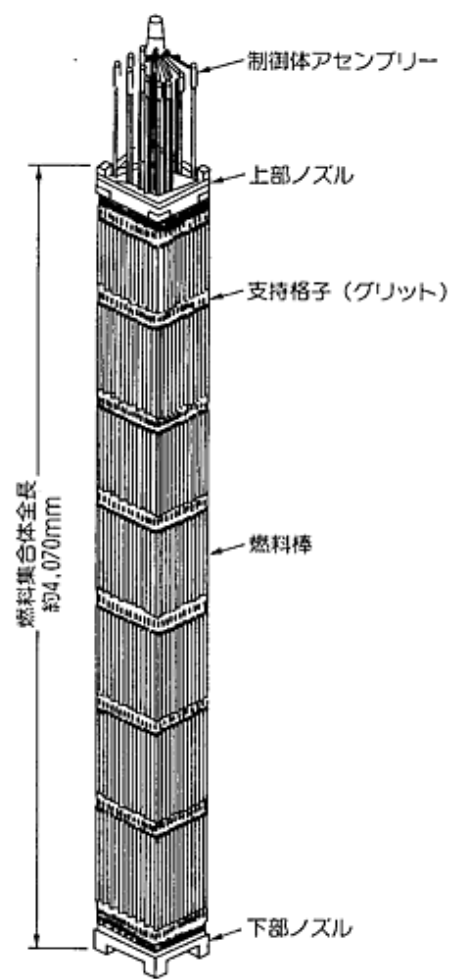
第1図 BWR 燃料集合体の例



「ふげん」及び実証炉燃料集合体



沸騰水型軽水炉燃料集合体



加圧水型軽水炉燃料集合体

プルトニウム取扱上の考慮点

特性

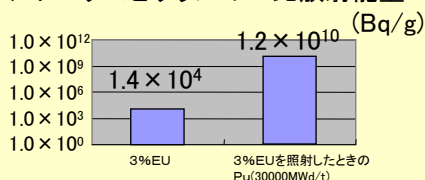
Puは核分裂しやすい

PuとUの熱中性子による核分裂断面積 (barm)

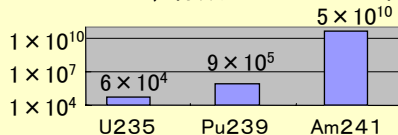
核種	反応断面積
Pu	574.8
U (天然ウラン)	4.1

Puは放射線レベルが高い

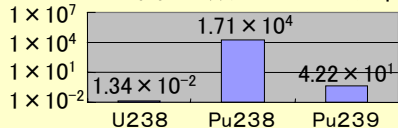
プルトニウムとウランの α 比放射線量 (Bq/g)



γ 線放出データ (Bq/g)



中性子放出データ (Bq/g)



影響

臨界制限量が小さい

ウランとプルトニウムの臨界質量 (kg)

	ウラン-235	プルトニウム-239
金属	22.8	5.6
溶液	0.82	0.51

作業者への影響
製造機器へのダメージ

作業者への影響
製造機器へのダメージ

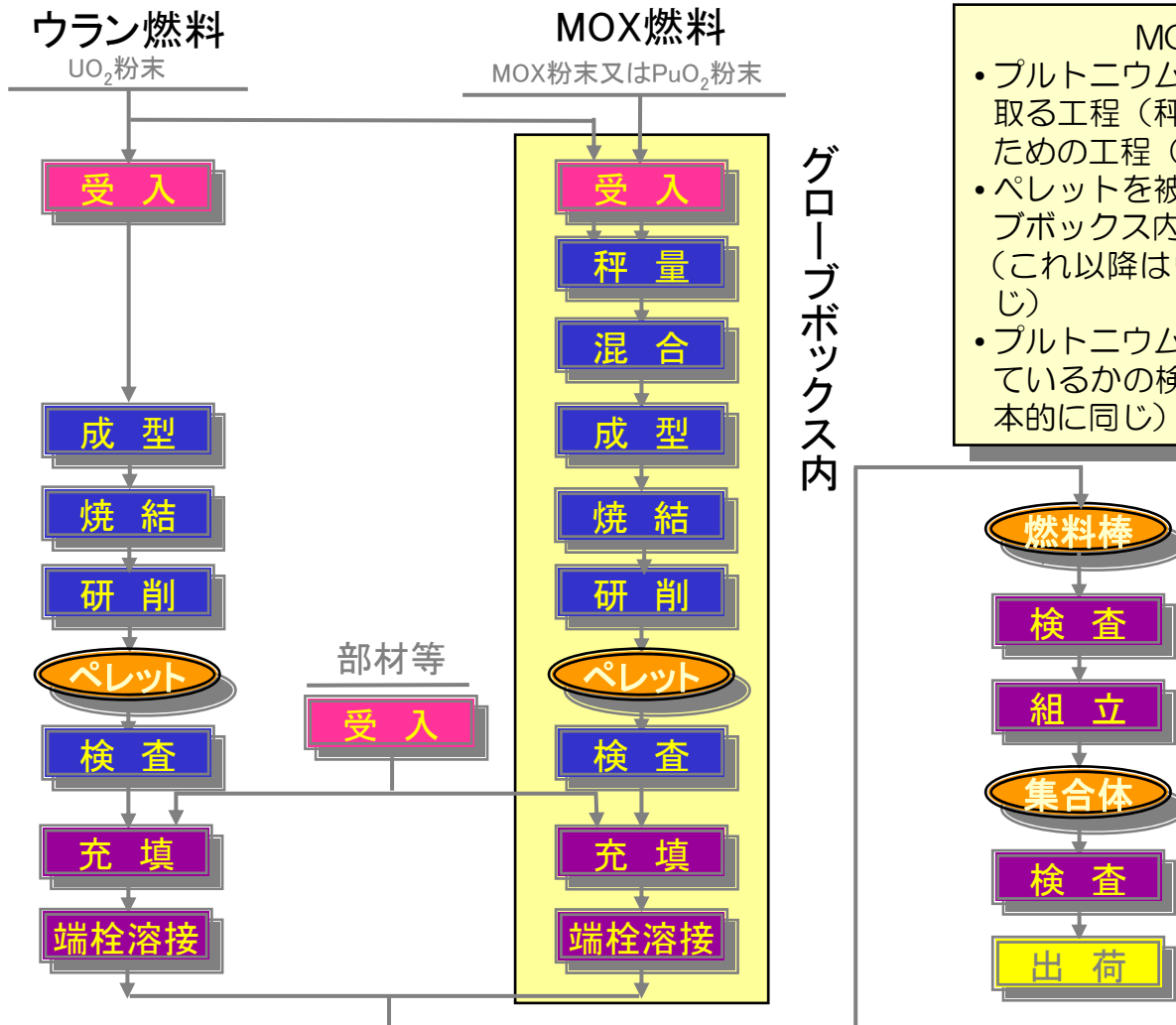
対応

- 乾式工程の採用(回収, 研削, 造粒)
- 小バッチ化
- 計量精度

- グローブボックスによる閉じ込め
- 負圧維持

- 遠隔・自動化
- 遮へい
- 粉末飛散防止

ウラン燃料とMOX製造のフロー比較



MOX燃料製造の特徴

- プルトニウムとウランを所定の量ずつ秤り取る工程（秤量）と両者を均一に混合するための工程（混合）が必要
- ペレットを被覆管に密閉するまではグローブボックス内
（これ以降はウラン燃料製造と基本的に同じ）
- プルトニウムの混合割合と均一に混合されているかの検査（この2点の検査以外は基本的に同じ）



グローブボックス設備

プルサーマル燃料製造工程

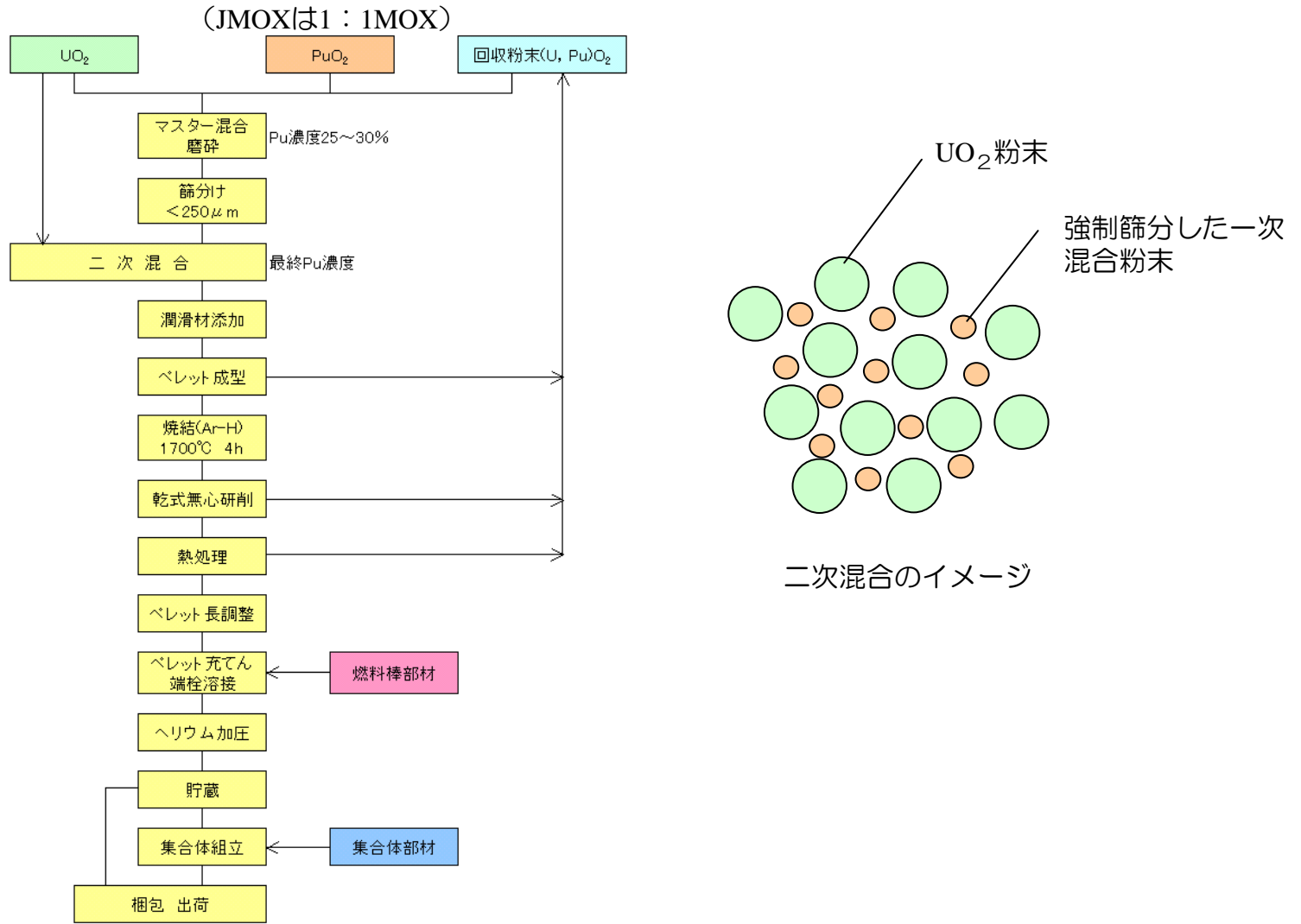


図2 MIMASプロセスによるフランスのMOX燃料製造法

[出典] E Trauwaert et al, "IAEA Technical Committee Meeting on Recycling of Plutonium and Uranium in Water Reactor Fuels", No.2-2, (1989年11月13-16日)

FBR燃料製造設備の概要

ペレット 製造工程



混合工程
 プルトニウムとウランを
 所定の割合に調合して混
 合します。



成型工程
 粉末を押し固めてペレ
 ットにします。



焼結工程
 約1700℃でペレットを焼
 き固めます。



ペレット仕上検査工程
 ペレットの寸法・密度・
 外観を検査します。



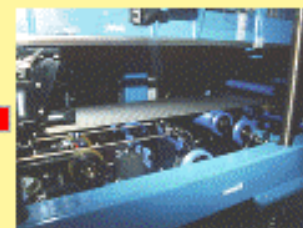
集合体検査工程
 集合体を検査し最終製品
 とします。



集合体組立工程
 ピンを束ねて集合体に組
 立します。



ワイヤ巻付工程
 ピンにワイヤを巻付けま
 す。



充填工程
 製品ペレットをピンに充
 填します。

燃料棒加工工程

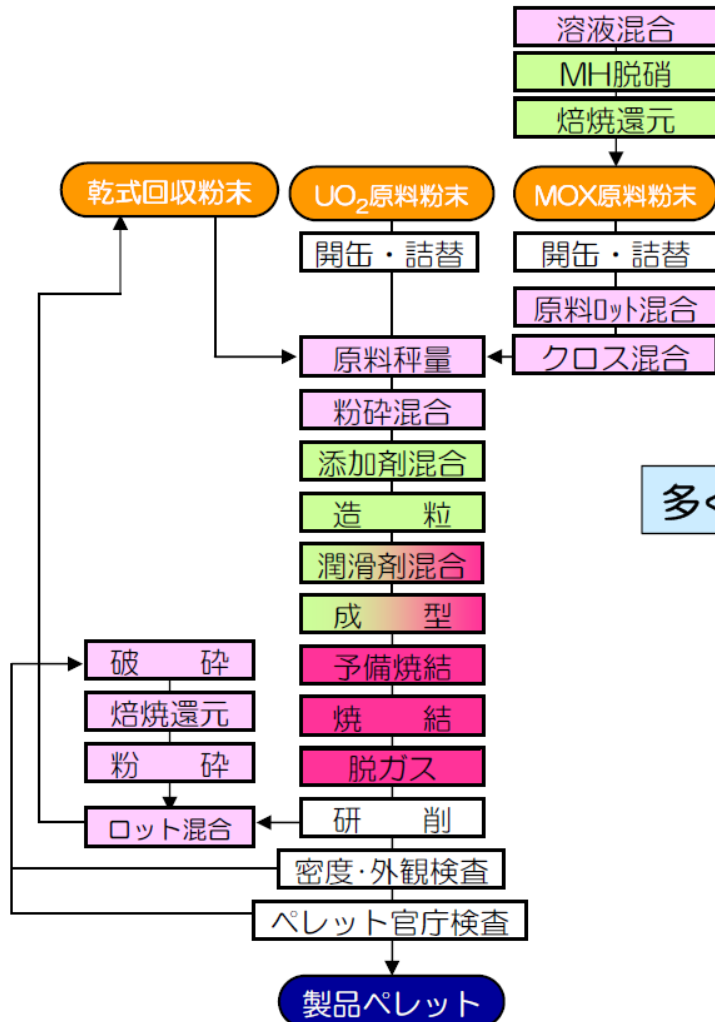
MOX燃料製造工程

[出所] 核燃料サイクル開発機構ホームページ

(<http://www.jnc.go.jp/ztokai/facilities/sisetu/PuHP/home/home.htm>)

次世代燃料製造：簡素化ペレット法工程

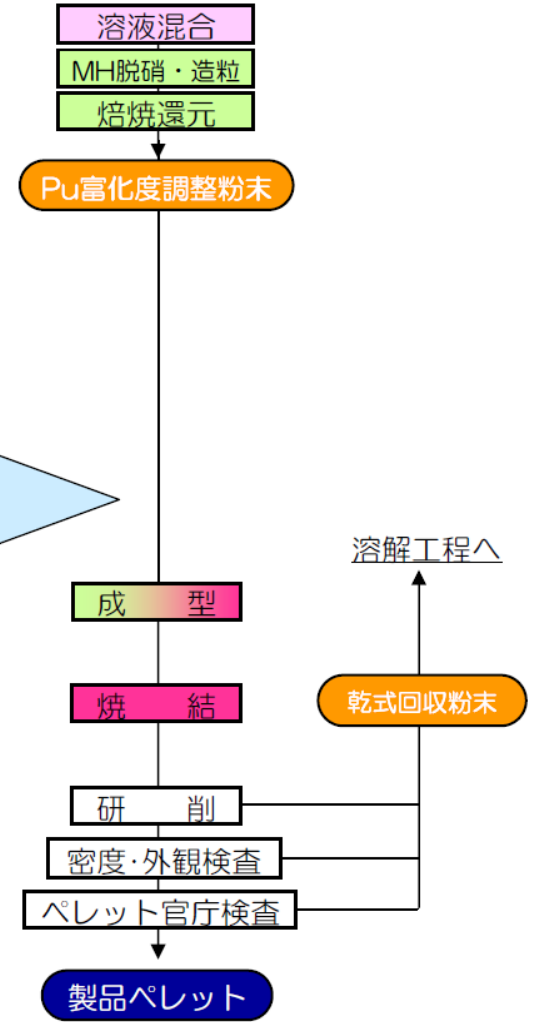
現行のFBR-MOXペレット製造工程



簡素化ペレット法燃料製造工程

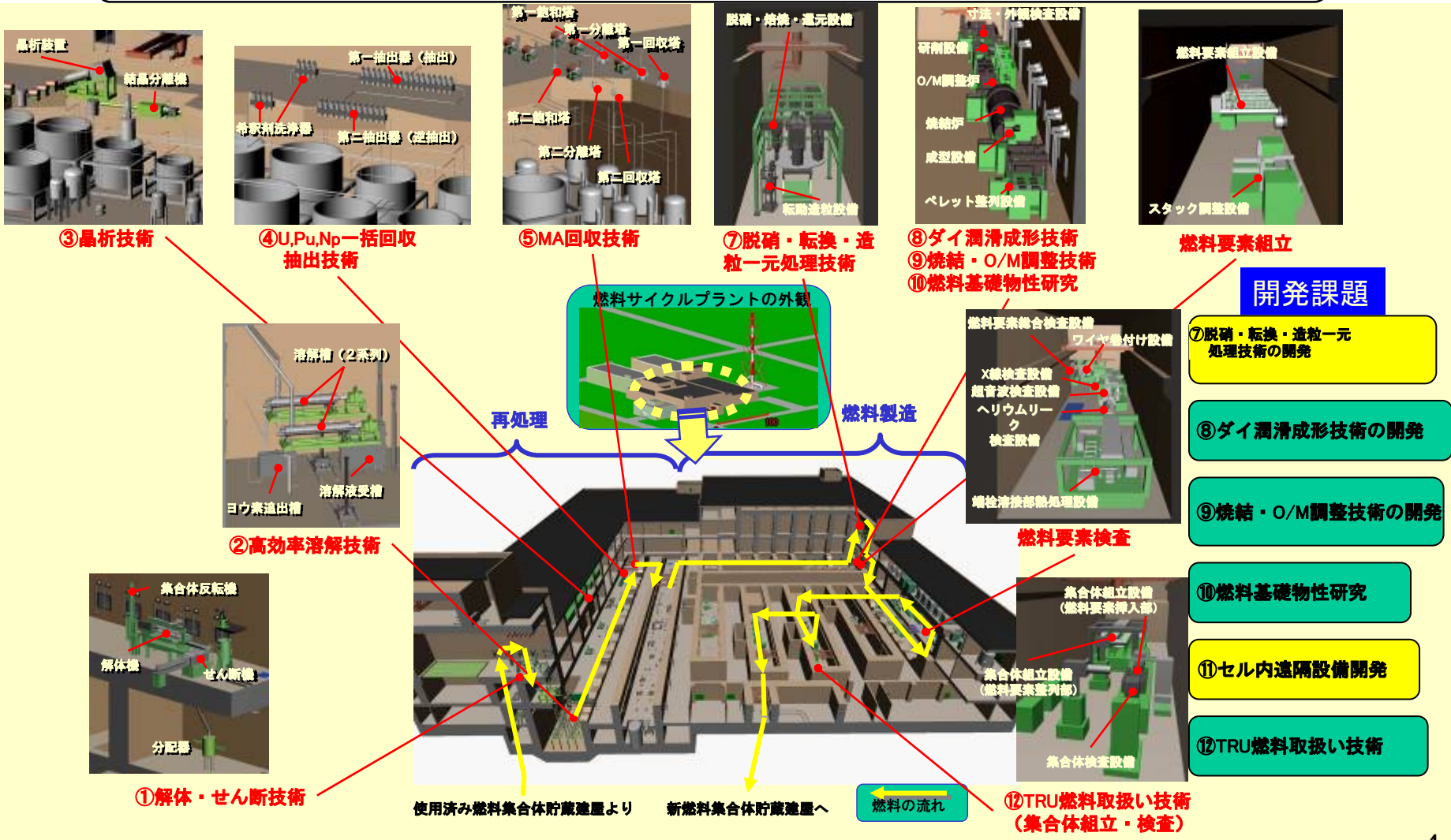
多くの粉末混合工程を削減

- Pu富化度調整技術開発による工程の削減
- 粉末流動性の改良技術開発による工程の削減
- ダイ潤滑型成型機の開発による工程の削減



次世代燃料製造プラント概念と開発課題

先進湿式法再処理+簡素化ペレット法燃料製造一体プラント概念

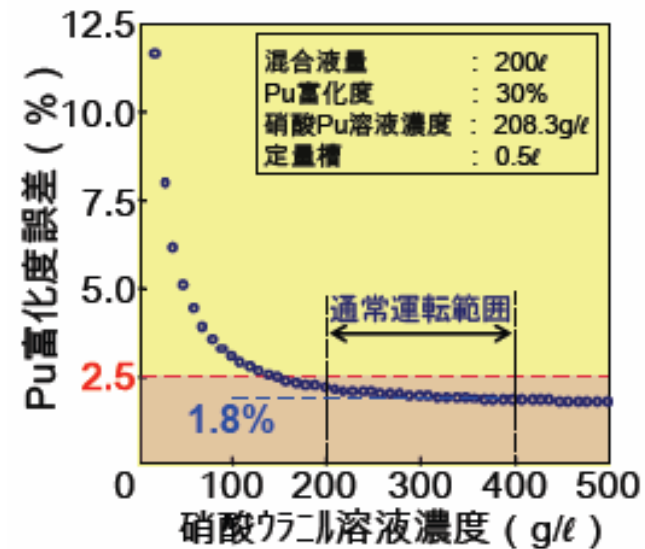
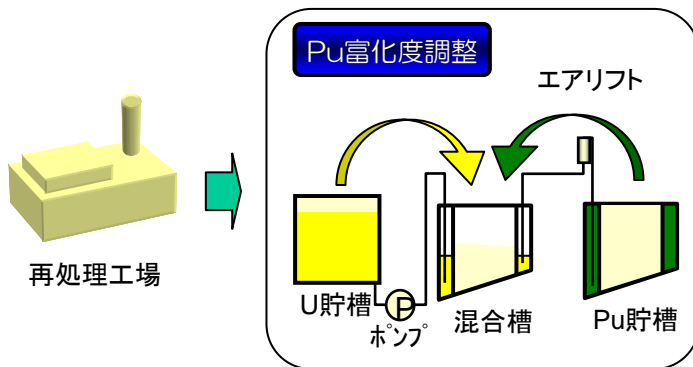


Pu 富化度調整技術 開発状況

現状・実績と計画

- 硝酸プルトニウム及び硝酸ウラニルの模擬溶液(塩化カルシウム)を用いた試験(300ℓ/バッチ)において、現状の送液設備に定量供給槽を追加することで、目標とするPu富化度調整精度(±2.5%)を満足できる結果(±1.8%)を得ている。
- 現行設備をベースに遠隔保守性の検討を実施予定。

実用規模 約500ℓ/バッチ



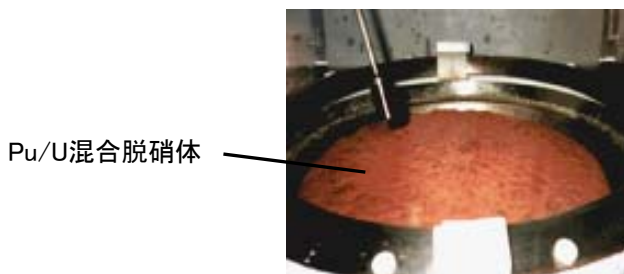
硝酸ウラニル溶液濃度とPu富化度誤差

マイクロ波脱硝技術 開発状況

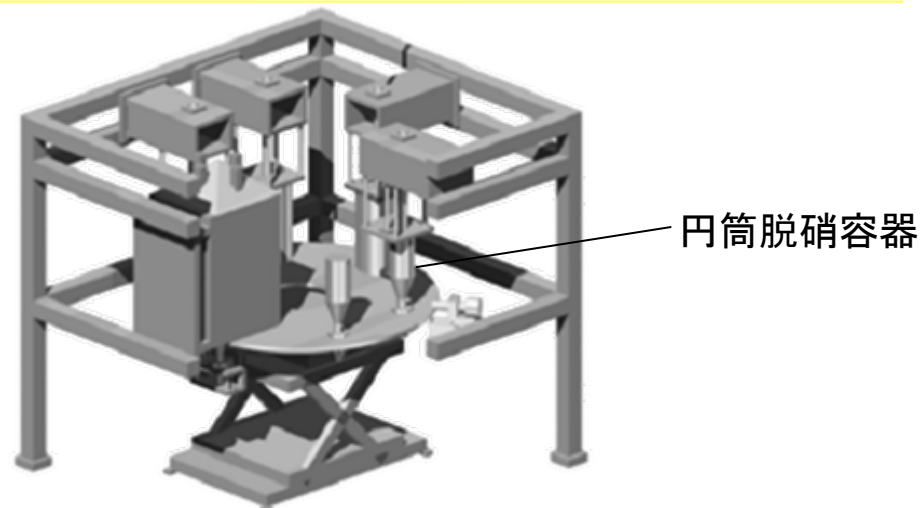
現状・実績と計画

- 円筒脱硝容器（FSフェーズⅡ概念、5 k g MOX/バッチ）については、60 g UO₂/バッチ規模のウラン試験の結果、現行の浅皿容器を用いて得られる粉末と同等の粉末が得られたが、吹きこぼれ等の課題が判明。従来技術の浅皿容器については、2 kg MOX/バッチについての実績がある
- 円筒容器の吹きこぼれ等の課題対策検討、浅皿容器のバッチサイズ拡大（2 kg MOX/バッチ→5 k g MOX/バッチ）のウラン試験を実施し、形式を選定する予定。

実用規模 MOX：5 k g/バッチ、UO₂：8.5 k g/バッチ、処理時間：1時間/バッチ



浅皿容器



円筒容器方式装置概念

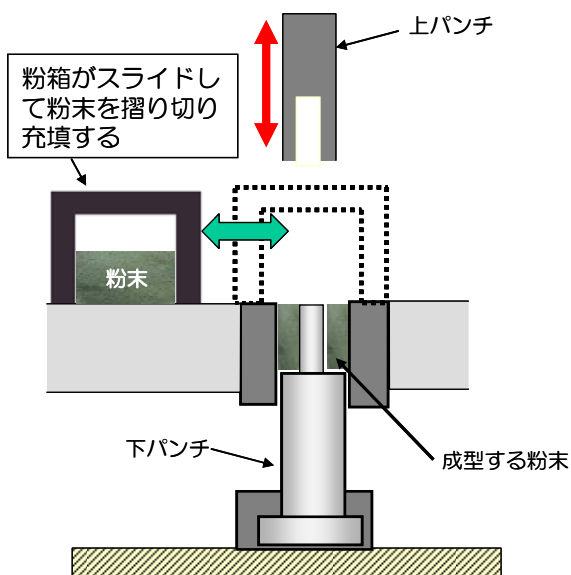
脱硝転換（焙焼還元）装置

造粒技術 開発状況

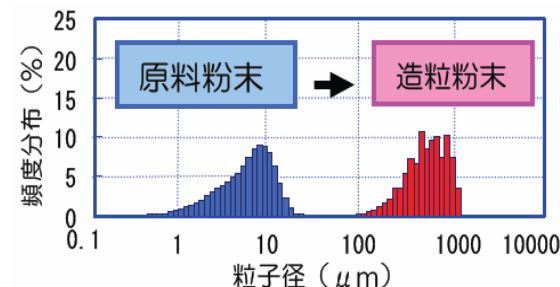
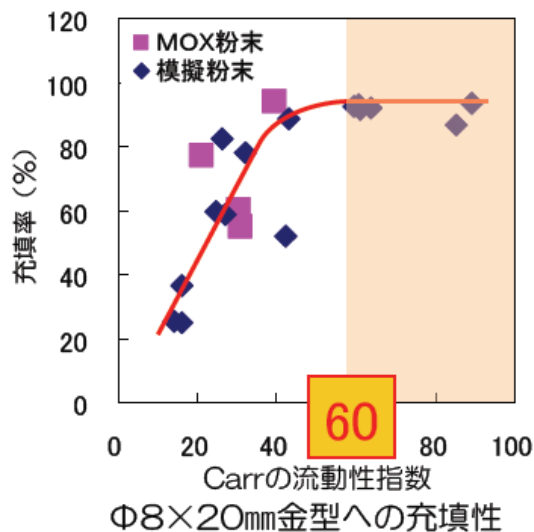
現状・実績と計画

- MOX原料粉末流動性の改良に造粒が有効であり、現行のタブレット造粒にかわる転動造粒法が有効であることを実験室規模でのMOX試験(150gMOX/バッチ)により確認した。
- 小規模MOX試験設備(1kgMOX/バッチ規模)を整備し、流動性改良MOX粉末の特性(流動性、粒度分布、成型性、焼結性)を評価する予定。
- コールドモックアップ試験にて遠隔設備を開発予定。

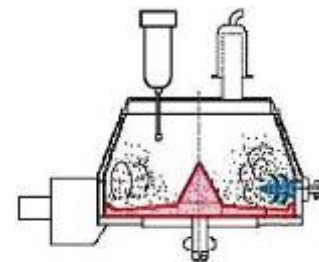
実用規模 MOX : 2.5 k g / バッチ、UO₂ : 4.3 k g / バッチ、処理時間 : 30分 / バッチ



金型への粉末の充填



転動造粒による粒度分布例



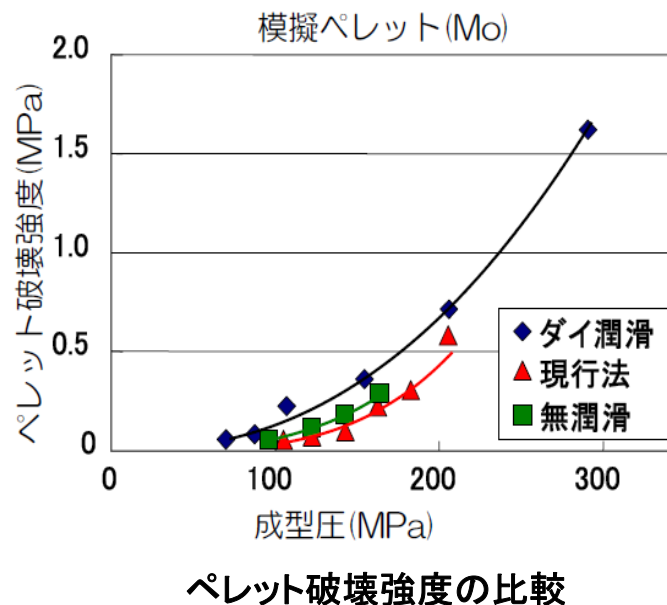
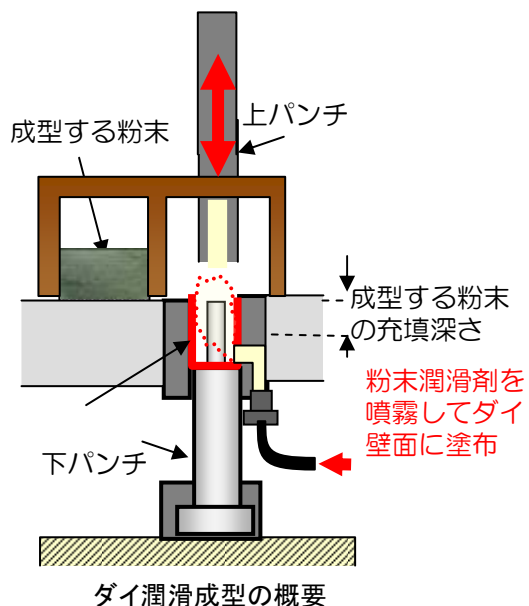
転動装置概念

ダイ潤滑成型技術 開発状況

現状・実績と計画

- Pu富化度調整溶液から得た転動造粒粉を、ダイ潤滑を模擬（潤滑剤を手作業により金型に塗布）した従来型成型機を用いて成型、焼結し、合計約550個の中空MOXペレットを得て開発目標を満足するペレットが得られることを確認した。
- Mo, W粉末を6連パンチ式のダイ潤滑成型機を用いて成型し、合計約5,400個の中空模擬ペレットを得て、開発目標とする7.5サイクル/分の成型速度が達成可能であることを確認した。
- 専用の小規模MOX試験機を整備した試験により、成型体（グリーンペレット）の品質等を確認する予定。

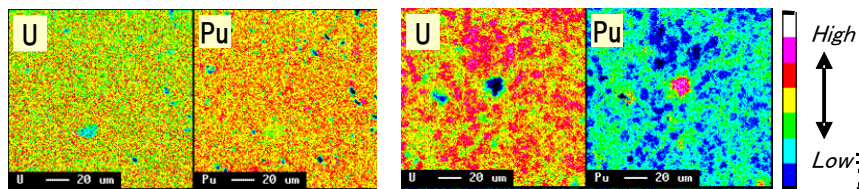
実用規模 12連パンチ、約7.5サイクル/分



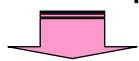
現状・実績と計画

- 実験室規模の試験を実施し、高密度ペレットが得られることを確認した。また、熱処理時の電気炉内酸素量の制御により、O/Mを1.97以下に調整する条件を把握した。同条件に基づき「常陽」照射燃料用にO/M=1.95及び1.98のNp/Am-MOXペレット (Np, Am含有率：各2%) 及びAm-MOXペレット (Am含有率：3%, 5%) を製造した。製造数は約400個。
- 小規模MOX試験設備を整備し (2~3 k g MOX/バッチ程度)、バッチサイズを工学規模に拡大した場合の影響を評価する予定。
- 臨界設計、機器製作性、運転性の観点から量産化に適した設備方式の選定するための検討・試作を実施し、方式を選定する。

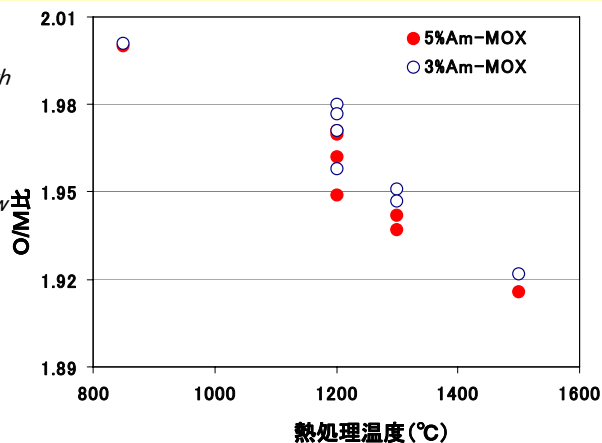
実用規模 焼結密度 95%TD、O/M 1.97以下
 焼結炉：連続焼結式、約1,500^oレット/30分 O/M調整炉：バッチ式、約7.5万^oレット/日



高酸素ポテンシャル 低酸素ポテンシャル



焼結条件の把握：高酸素ポテンシャル下の焼結が均質性を促進



熱処理還元によるO/M比調整



2%Np/2%Am-MOXペレット

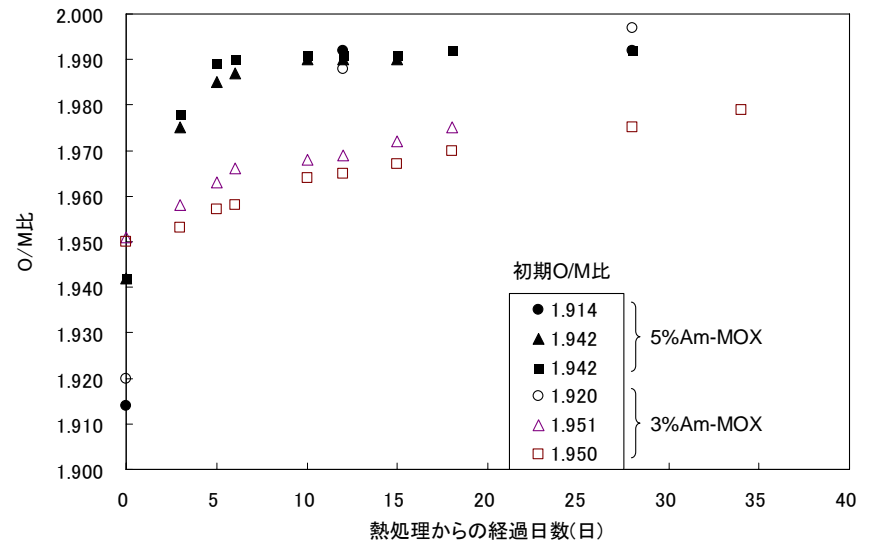
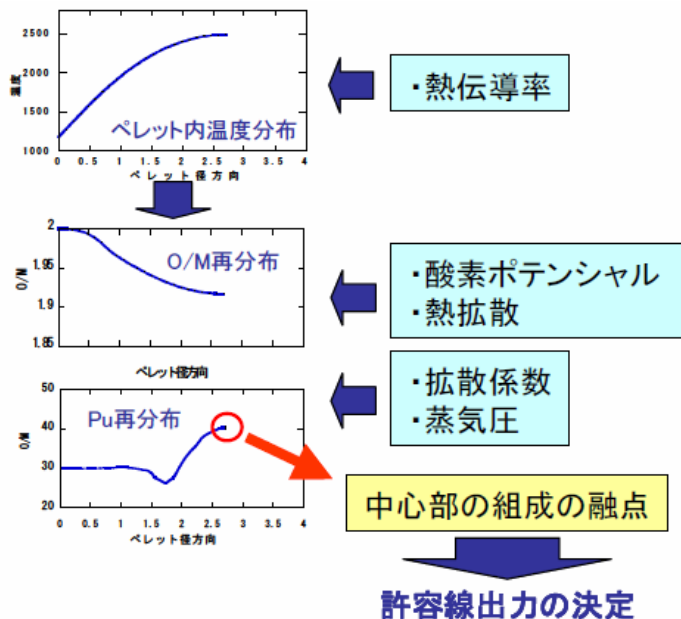
3-6. 燃料基礎物性研究状況

現状・実績と計画

● Np,Amを含むMOXの物性測定の実績

- 融点 Am : 3-5%、Pu : 0-60%、 O/M : 2.00-1.90
- 熱伝導率 Am : ~3%、Pu : 0-40%、 O/M : 2.00-1.90
- 格子定数 Np : 0-12%、Am : 0-5%、Pu : 0-100%
- その他、酸素ポテンシャル、酸化速度、状態図等

- 燃料製造あるいは燃料設計に反映できる物性データを整備、拡充していく予定。
- 物性データの理論的評価に基づく予測手法を開発する予定。

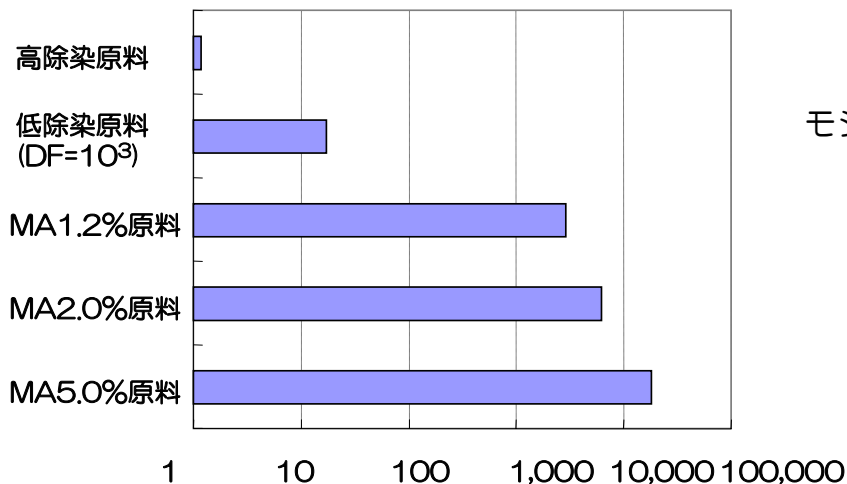


空気雰囲気におけるO/M比変化量測定例

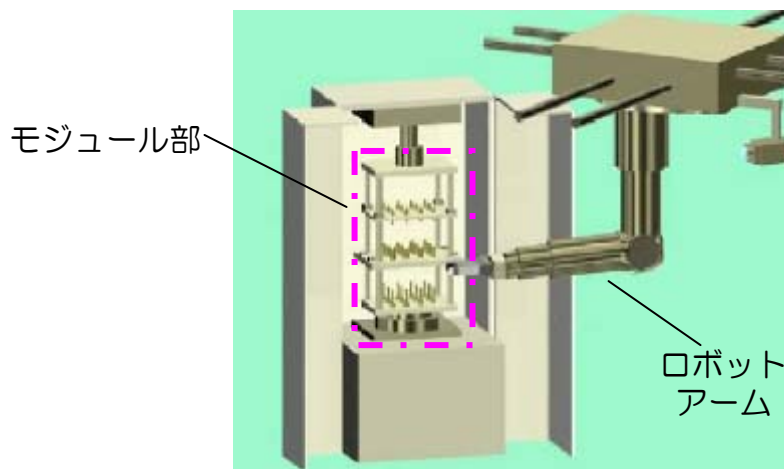
現状・実績と計画

- セル内遠隔設備に共通的に適用するモジュール化技術を開発する。多様な機構を有する代表的な設備である成型設備を対象とし、モジュール化設備及びそれをハンドリングするマニピュレータの試作を行い、コールドモックアップ試験による開発を実施中。また、ペレット検査及び粉末物性分析設備の遠隔・迅速化設備の開発を実施中。
- 上記の遠隔保守に関する共通的な技術開発成果を反映して、ペレット研削、燃料要素加工・検査、集合体組立工程における量産設備の遠隔保守対応設備を開発する予定。
- 遠隔設備の円滑な運転に資するため、成型設備の運転監視・異常診断技術を検討する予定。

実用規模 完全遠隔対応セル内設備



(評価例) 線量率は現行燃料と比較して、低DFで約10倍、MA1.2%で約1,000倍、MA5.0%で約10,000倍となる。



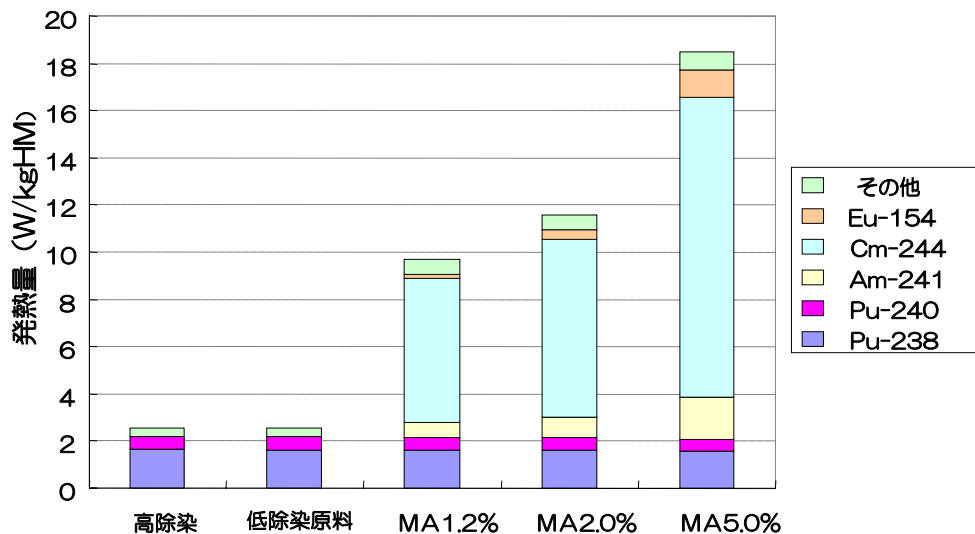
遠隔保守概念 (ペレット成型装置の例)

TRU燃料取扱技術 開発状況

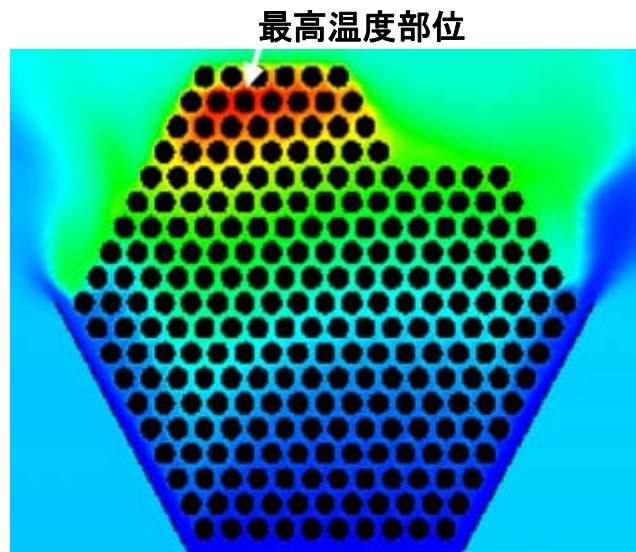
現状・実績と計画

- 発熱対策として、発熱源分散、除熱、雰囲気制御等による影響緩和策の概略評価を実施している。
- 集合体組立設備の発熱影響対策として、コールドモックアップ試験により燃料要素バンドルの除熱システム開発を実施中。

実用規模 255本ピン／集合体、炉心燃料部 129kgHM / 集合体



(評価例) MA添加原料の発熱量は、
現行原料と比較して約4倍～約7倍となる。



集合体組立時の下部からの送風冷却における温度解析例

FBRサイクルの研究開発計画 ～FaCTプロジェクト～

