

研究会資料

07-4

「再処理の経済性向上を目指す先進技術の開発状況と課題」 UREX+、COEX 及び NEXT 法の概要と比較

平成19年4月10日

次世代原子力システム研究開発部門
船坂 英之

報告内容

- 米国の開発状況について
GNEPプログラムについて
UREX+ (Uranium Extraction)
- 仏国の開発状況について
燃料サイクルにおける今後の方針(CEA(フランス原子力庁)の提案)
COEX (Co-extraction)/
(PUREX)-DIAMEX (Diamide Extraction)-SANEX (Selective Actinides Extraction)/
GANEX (Grouped Actinides Extraction)
- 日本の開発しているプロセス(NEXT)との比較について
NEXT (New Extraction System for TRU Recovery)/
UREX+/COEX
- 国際協力の進め方について

GNEP (Global Nuclear Energy Partnership) の概要

2006年2月6日、米国エネルギー省(DOE)のボドマン長官は、ブッシュ大統領の先進エネルギー戦略構想の一環として、グローバル原子力パートナーシップ(GNEP)の立上げを発表。

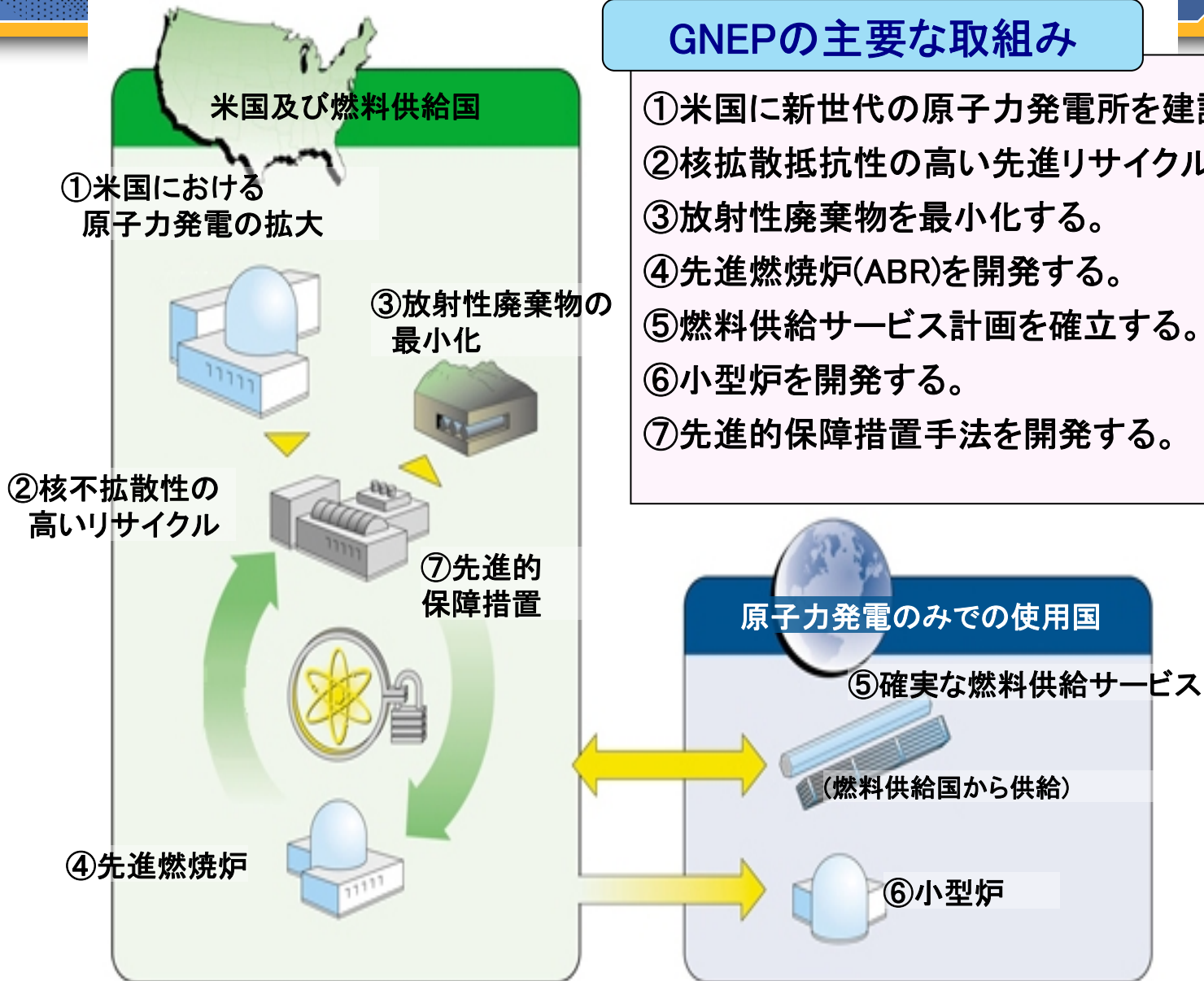
GNEPのねらい

- 米国の海外の化石燃料への依存度を下げ、経済成長を促進する。
- 核拡散抵抗性を高める先進的技術を活用して核燃料リサイクルを行い、**より多くのエネルギーを再生産するとともに廃棄物を低減**する。
- 世界の成長と繁栄、クリーンな開発を奨励する。
- 世界の**核拡散のリスクを減らす**ため、最新の技術を利用する。

GNEPの概要

GNEPの主要な取組み

- ①米国に新世代の原子力発電所を建設する。
- ②核拡散抵抗性の高い先進リサイクル技術を開発する。
- ③放射性廃棄物を最小化する。
- ④先進燃焼炉(ABR)を開発する。
- ⑤燃料供給サービス計画を確立する。
- ⑥小型炉を開発する。
- ⑦先進的保障措置手法を開発する。



GNEP Element-2 : 核拡散抵抗性の高いリサイクル技術の実証

構 想

- GNEPパートナー国と共に、核拡散抵抗性の高い技術による燃料リサイクル実証—工学規模実証(ESD)
- 50年以上の試験ニーズに応えるため、多目的のR&D施設である先進燃料サイクル施設(AFCF)を設置
- 使用済燃料からのUおよびTRU(Np, Pu, Am, Cm)の回収と新燃料の製造を行うリサイクルプラントは、核拡散リスク低減のため燃料供給国にのみ設置
- 燃料供給国との技術開発協力を模索

技術開発

- TRUの再利用、廃棄物低減、核拡散抵抗性向上のため、TRU元素を一括して取り扱う分離プロセスを開発(例:UREX+)
- 工学規模実証(ESD):
UREX+: 実験室規模で高純度ウランの分離と全TRUの回収に成功
商用プラント(2000t/y以上)の設計と操業に資するコスト&性能データ取得
先進燃焼炉(ABR)の燃料試験のためのTRU供給も
- 先進燃料サイクル施設(AFCF):
50年以上の試験ニーズに応える多目的のR&D施設
モジュール型の柔軟な建設方法を採用
短期的には、ABRで用いる燃料の製造と品質確認
- 先進シミュレーションラボ(ASL):
コンピュータシミュレーションとビジュアル化により研究を支援
試験費の抑制、AFCFの設計支援

High purity uranium oxide product recovered from used nuclear fuel using the UREX+ process



スケジュール

| | | |
|--------|---|----------------------|
| 2008 | : | ASL運用 |
| 2010まで | : | AFCF設計 |
| 2011 | : | ESDリサイクルプラント運転開始目標 |
| 2016 | : | AFCF(第一次研究モジュール)運転開始 |

GNEP Element-3 : 放射性廃棄物の最小化

概要

米国は、今世紀、原子力発電所から発生する放射性廃棄物の処分に最終処分場が必要である。次世紀まで新規の最終処分場が不要となるよう、使用済燃料の効率的な管理を目指す。

どのようにリサイクル・管理を行うか

使用済燃料のTRUをABRで燃焼し、残渣は、最終処分場での処分のため形態を整える。

GNEPは、処分場での使用済燃料の廃棄のため3つの改善を計画している。

- (a) 廃棄物の容量の画期的な減少
- (b) 廃棄物の形での熱負荷を減少させることによる熱管理の高度化
- (c) 長寿命核種を減少

ユッカマウンテンは、米国の原子力発電所から供用中に発生する全ての使用済燃料を収容する技術的能力がある。

2007年度 : 544.5百万\$要求



Aerial view of Yucca Mountain, Nevada, (www.ocrwm.doe.gov/ymfp)

GNEP構想を巡る主要経緯

- 2月6日 DOEによるGNEP構想の発表。
- 2月7日 内閣府、外務省、文部科学省、経済産業省
- 「米国が原子力発電の世界的な発展拡大を許容しつつ核不拡散を確保する構想を提案したことを評価する。またGNEP構想は注目すべきイニシアティブであり、どのような貢献ができるか検討を行っていく」との見解を表明。
- 2月末 東京にて政府間会合、DOEから協力要請。JAEAも、GNEP対応検討会を設置、検討を開始した。
- 5月5日 小坂文部科学省大臣(当時)とボドマンDOE長官との間でGNEP構想に係る意見交換。
- 「米国の核燃料サイクル施設の共同設計活動など5項目及びそれら以外の分野についても協力内容を検討していくことを合意。」
- 5月下旬 東京にて政府間会合、「原子炉」、「燃料サイクル」のWGを設置。
- 6月 米国にてDOE-JAEA会合、協力計画案の協議が行われた。
- 8月3日 DOEは、2トラックアプローチを公表、併せて国内外の産業界からEOI (Expressions of Interest)の募集の発表。
- 8月 東京にて政府間会合、「シミュレーションとモデリング」、「小型炉」、「廃棄物処分」の新たなワーキング・グループを設置。
- 9月8日 JAEAは国内関連各社と連名で、EOIに関心がある旨を表明。

2トラックアプローチ

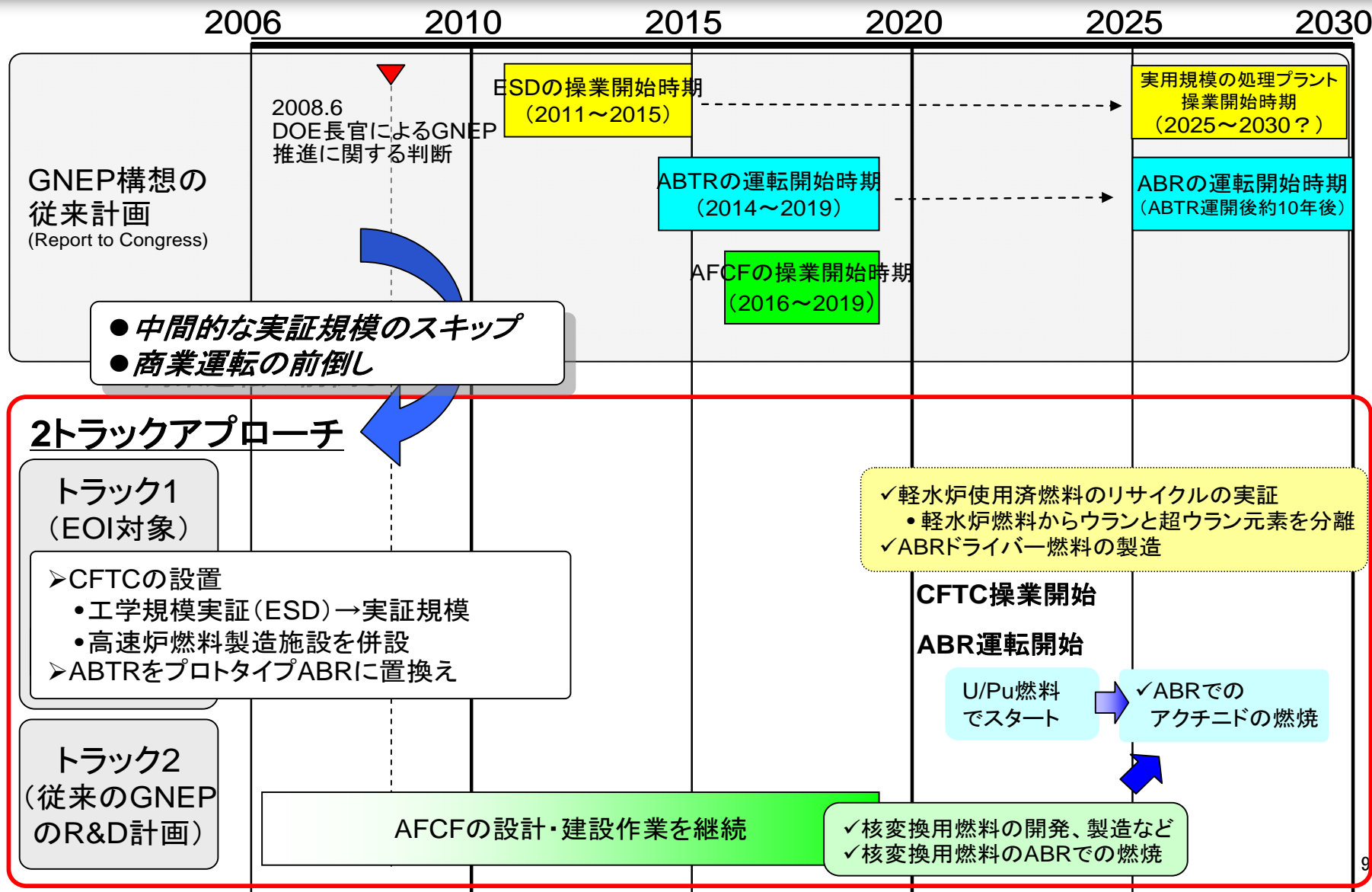
トラック1

- 統合核燃料取扱センター(CFTC: Consolidated Fuel Treatment Center)と先進燃焼炉(ABR: Advanced Burner Reactor)の商業規模施設から成る。
- CFTCは、軽水炉使用済燃料を再処理し、プルトニウムの単体分離ではなく、ABRで燃焼用の超ウラン元素として分離する。さらに、高速炉用ドライバー燃料(当面はマイナーアクチニドを含有しない燃料)を製造する施設も含まれる。
- ABRは、発電に伴い超ウラン元素を短寿命核種に変換する高速中性子炉心であり、初期は通常のU/Pu燃料炉心を用いるが、将来的には核変換燃料(MA含有燃料)に置き換えられる予定である。

トラック2

- 軽水炉使用済燃料に加えて高速炉使用済燃料も再処理し、マイナーアクチニド含有燃料を製造し、ABRで燃焼する。再処理においては純粋なプルトニウムを存在させないことが要件である。
- さらに、将来の超ウラン元素リサイクル技術に備えた試験施設として、先進的燃料サイクル研究施設(AFCE: Advanced Fuel Cycle Research Facility)を考慮中である。

GNEP構想の従来計画と“2トラックアプローチ”



- 中間的な実証規模のスキップ
- 商業運転の前倒し

2トラックアプローチ

トラック1 (EOI対象)

- >CFTCの設置
 - ・工学規模実証(ESD)→実証規模
 - ・高速炉燃料製造施設を併設
- >ABTRをプロトタイプABRに置換え

トラック2 (従来のGNEPのR&D計画)

- AFCFの設計・建設作業を継続
- ✓核変換用燃料の開発、製造など
- ✓核変換用燃料のABRでの燃焼

LWR燃料処理のための回収仕様

| 規準 | 熱中性子炉リサイクル | U及び全TRUの高速炉リサイクル |
|------------------|-------------------|-------------------|
| 回収効率 | | |
| U | 90% | 90% |
| Pu/Np | 99% | 99% |
| Am/Cm | 99.5% | 99.5% |
| Cs/Sr | 97% | 97% |
| Tc、I | 95% | 95% |
| 精製(純度)の要求 | | |
| U | 99.9%、99.97% *1 | 99% |
| Pu/Np | 99.5% | 97% |
| Am/Cm | TBD | 97% |
| Cs/Sr | <100nCi TRU/kg *2 | <100nCi TRU/kg *2 |

* 1: Uを再濃縮する場合は、高純度が必要

* 2: 米国の非 α 廃棄物制限

出典: "Advanced Fuel Cycle Initiative (AFCI) Program Plan", May 1, 2005

回収仕様の設定理由

- U の分離・回収
 - 再濃縮or将来の再利用のために遮蔽なしの施設で貯蔵or低レベル廃棄物として処分

- I, Tc の分離・回収
 - 耐久性ある高レベル廃棄物形態へ(米国の処分場は酸化性雰囲気なのでTc回収が必要)

- Cs/Sr の分離・回収
 - 数百年長期貯蔵(おそらくsub-地上施設)
→低レベル廃棄物へ

- TRU 分離・回収
 - 貯蔵・処分、ABR用燃料、または一部を熱中性子炉での燃焼も考慮

UREX + プロセスについて (1)

- 目的に合わせて複数のプロセス“UREX suite”が提案
 - 現時点では UREX+1a がリファレンスとされている模様

| <i>Process</i> | <i>Prod #1</i> | <i>Prod #2</i> | <i>Prod #3</i> | <i>Prod #4</i> | <i>Prod #5</i> | <i>Prod #6</i> | <i>Prod #7</i> |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| UREX+1 | U | Tc | Cs/Sr | TRU+Ln | FP | | |
| UREX+1a | U | Tc | Cs/Sr | TRU | All FP | | |
| UREX+2 | U | Tc | Cs/Sr | Pu+Np | Am+Cm+Ln | FP | |
| UREX+3 | U | Tc | Cs/Sr | Pu+Np | Am+Cm | All FP | |
| UREX+4 | U | Tc | Cs/Sr | Pu+Np | Am | Cm | All FP |

Notes: (1) in all cases, iodine is removed as an off-gas from the dissolution process.

(2) processes are designed for the generation of no liquid high-level wastes

UREX + プロセスについて (2)

■ 主たる研究機関

- 米国アルゴンヌ国立研究所 (ANL)、アイダホ国立研究所 (INL) が中心となり研究開発を実施

■ 経緯

- 1998年に英国BNFL及びロシアKRIより、 UO_2^{2+} に対して Np^{4+} や Pu^{4+} と優先的に錯形成するヒドロキサム酸の特性を利用した Np の制御方法が提案
- ATW計画において、米国 ANLにより、使用済燃料中からUのみを抽出する溶媒抽出法として、ヒドロキサム酸の化学的特性を利用した UREX 法のフローシートが開発、提案 (~1999年)
- AFCIにおいて、ユッカマウンテン最終処分場の寿命を延ばすことに効果的であるとして、研究が継続
 - 使用済燃料中の大半を占めるUを分離する機能が有効
- GNEPでは、本年5月のDOEによる使用済燃料リサイクル計画において、高速炉での超ウラン元素の燃焼を目的とするUREX+1及びUREX+1aが検討の対象

UREX+1プロセスについて

Phase1時代に対応する分離

- 純粋なUの分離(低レベル廃棄物として処分可能)
 - 抽出剤はTBP、Pu(Ⅲ)に還元するためにアセトヒドロキシルアミン(AHA)を添加
 - U/Tcを共抽出後に、強酸下でTcを逆抽出
- Cs/Srの分離(減衰のためのピュアな形態で貯蔵、最終的に低レベル廃棄物として処分)
 - リファレンスはCCD/PEG(Chlorinated cobalt dicarbollide/polyethylene glycol)プロセスで、カリックスアレンも代替として検討中
- TRU元素をランタノイドFPと共に回収
 - Cs/Sr分離ラフィネートを脱硝後、TRUEX法で処理
 - 回収したTRU/FPは、貯蔵・処分(retrieval)→ジルカой製ハルを利用して、高速炉用燃料orターゲットとしてCERMET燃料ロッドの形態にすることが可能
- Tc, Iを効率良く回収

試験状況

- サバンナリバー(WSRC)及びINLにて、LWR使用済燃料を用いたラボスケールでフローシートを実証済
- ANLにおいて、統合したラボスケール実証試験を実施(2005FYの下半期)

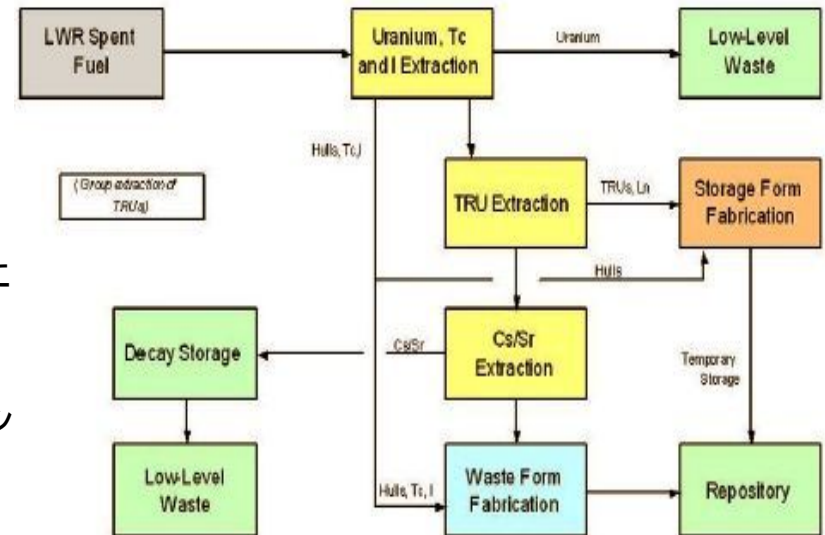
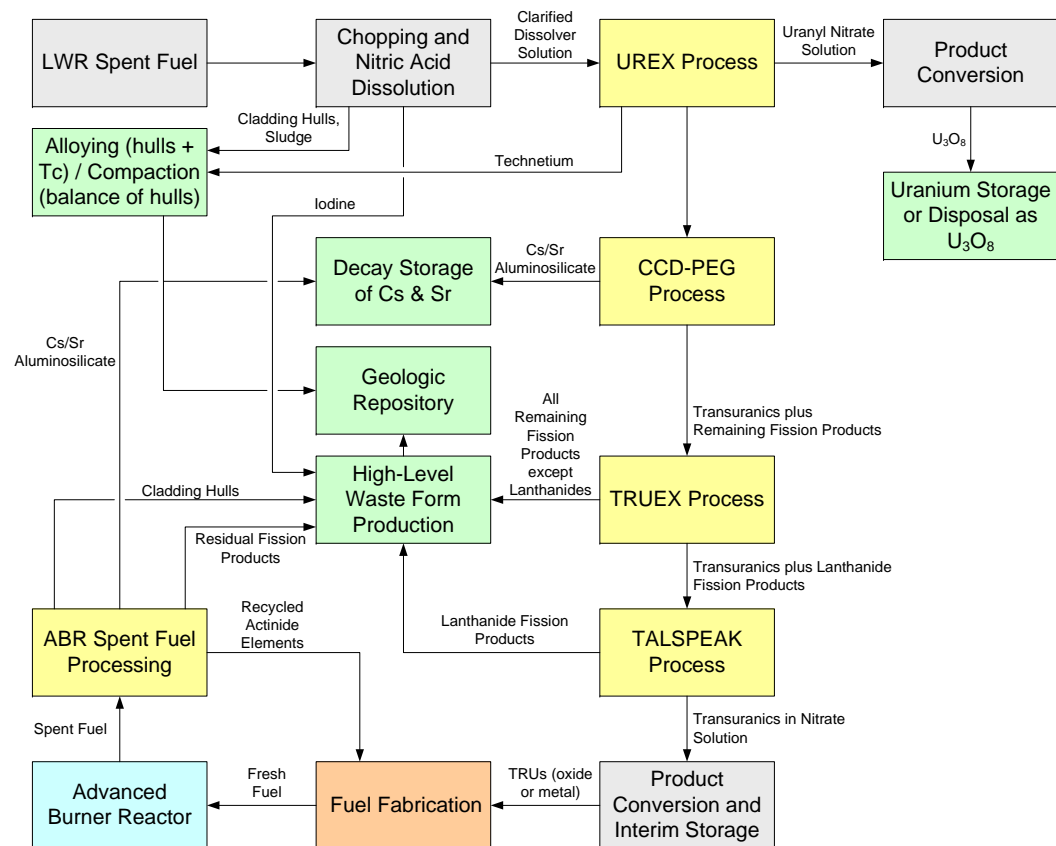


Figure 5-2. Phase 1 Processing of LWR Spent Fuel (UREX+1)

注: 下記出典中の説明文では、Cs/Sr分離後にTRU/ランタノイド回収となっているが、上記図では順番が逆になっている。

UREX+1aプロセスについて

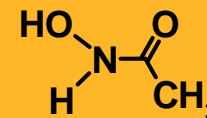
- Uの分離
 - UREX プロセス
- I,Tcの分離
 - 強酸下でTcを回収
- Cs/Srの分離
 - CCD/PEG プロセス
- TRU分離(2段階)
 - ランタニドを除くFPとTRUを分離(TRUEXプロセス)
 - TRUからランタニドを分離(TALSPEAKプロセス)
- 回収したTRUは、ABR用燃料製造へ(酸化物or金属)



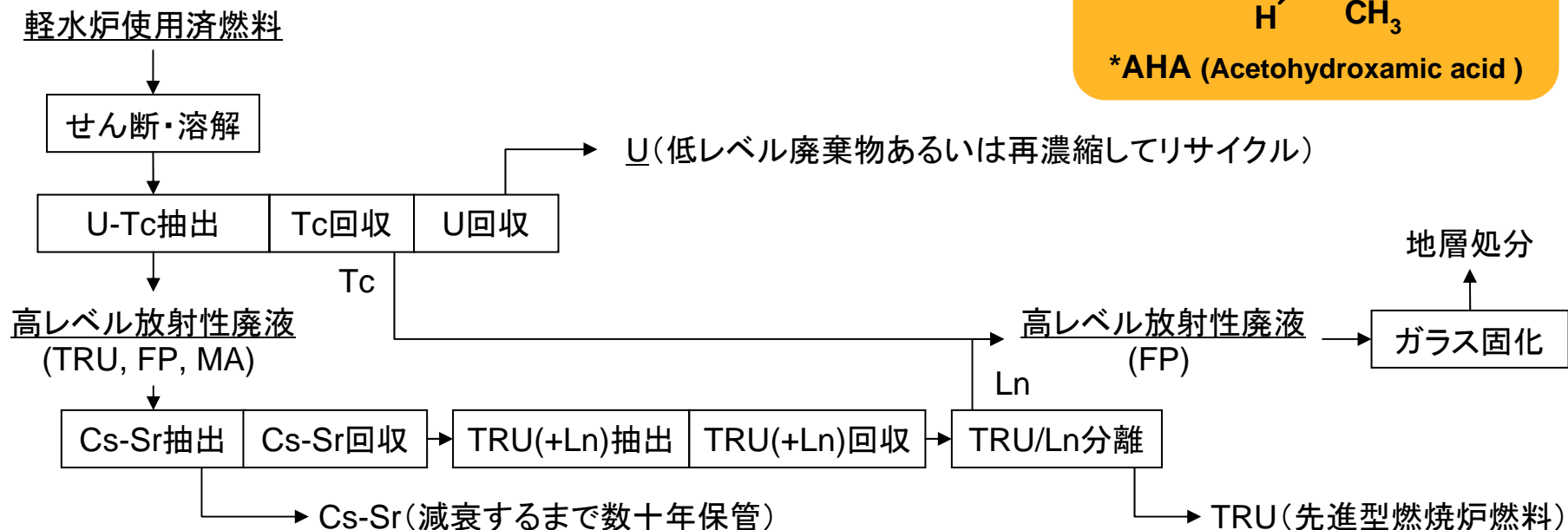
出典: ・U.S.-Japan Meeting-Global Nuclear Energy Partnership(GNEP), Feb.27-28,2006, " Preliminary U.S. Plan for a Global Nuclear Energy Partnership"(Feb.5,2006, Version 4)
 ・U.S.-Japan Meeting-Global Nuclear Energy Partnership(GNEP), Feb.27-28,2006, "Global Nuclear Energy Partnership: Separations Development"
 ・"Advanced Fuel Cycle Initiative Current R&D Program on Chemical Processing of Spent Nuclear Fuel", James J.Laidler(2006.3.16、第2回分離に関する日仏米3国協力打合せ(於サクレー研究所))

UREX +1a プロセスについて

- PUREX 法と同様なTBPを抽出剤として使用(U-Tc抽出)
- 錯化剤・還元剤であるヒドロキサム酸(AHA*)を加え、Pu及びNpがUとともに抽出されることを回避
- AHAは高硝酸濃度(> 3M)において加水分解されるため、フィード液の酸濃度を1M程度に調整
- I, TcはPUREXプロセスと同様な手法により回収



*AHA (Acetohydroxamic acid)



UREX+2プロセスについて

■ Phase2時代に対応する分離

- 熱中性子炉へのリサイクルのために、Pu/Npを分離（おそらくAmも）
 - UREX+1が最初にU,Tcを分離するのに対し、UREX+2では、U,Tc,Pu/Npを分離
 - Cs/Sr分離後にPu/Npを分離
- 米国内の103基のLWRの内、少なくとも30基がMOX燃料を燃焼可能(電力会社が受け入れるために移行期間が必要)

■ 試験状況

- ラボスケールで、ANL及びORNLで実証済

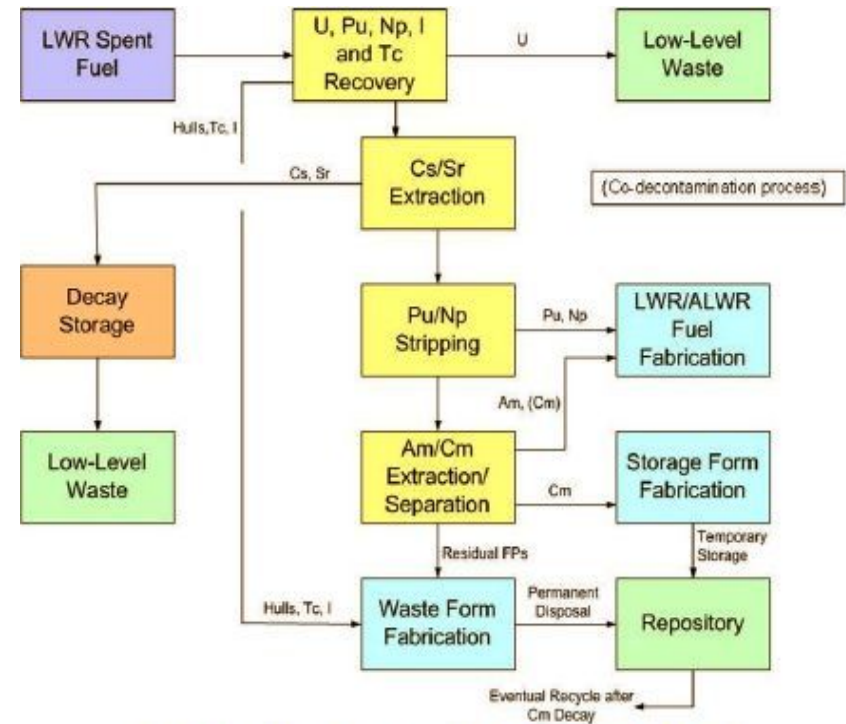


Figure 5-3. Phase 2 Processing of LWR Spent Fuel (UREX+2)

UREX+3プロセスについて

- Phase3時代に対応する分離
 - 高速炉システムでの燃焼のためにMAを分離
- 試験状況
 - Am、Cm分離プロセスの最適化が課題(米国及び欧州で実施中)
 - Ln(3価)の分離が難しい
 - 下記の2つの方法が評価中
 - 2段階プロセス(Am/Cm/Lnを分離後、Lnを分離)
 - 1段階プロセス
 - DIAMEX-SANEXプロセスの試験が様々な研究所で成功裏に行われた
 - 使用済燃料を用いたCYANEX-301プロセス試験で良好な結果を収めた
 - 幾つかのオプション有り(次頁以降参照)

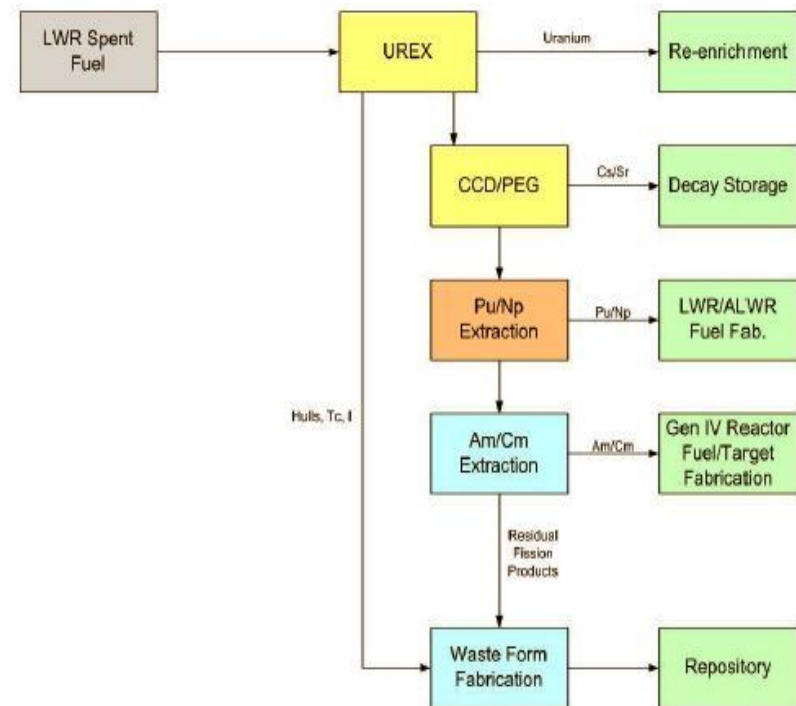
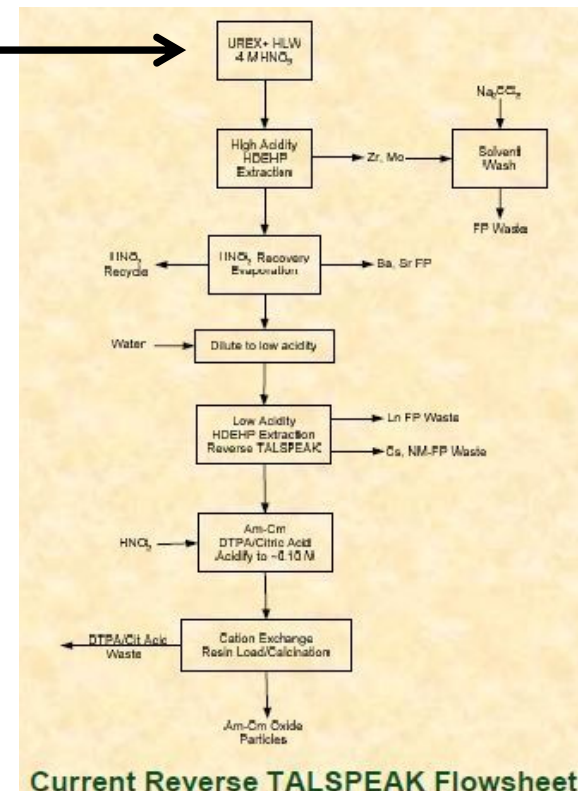
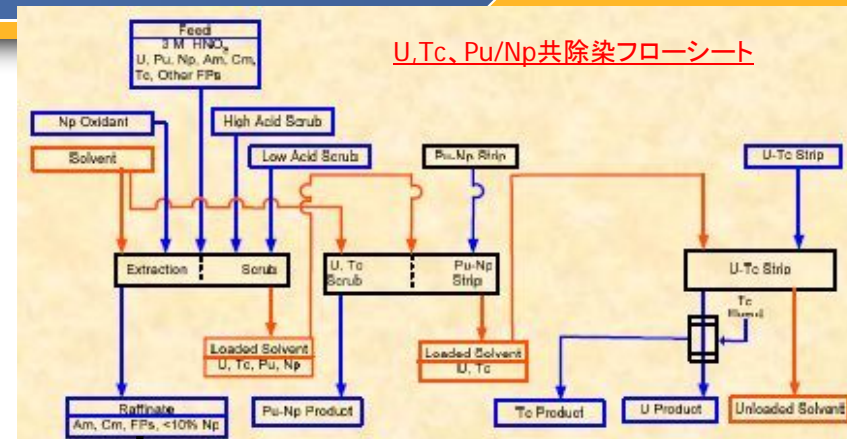


Figure 5-4. Phase 3 Processing of LWR Spent Fuel (UREX+3)

ORNLで開発しているUREX+3のフローシート

- U,Tcと共にPu/Npを共除染(UREX+2と同様)
- Am,Cm分離に、Reverse TALSPEAKプロセス*を採用
 - 適切な希釈剤中での溶媒としてHDEHP (Di-2-ethyl hexyl phosphoric acid: 酸性・有機リン系溶媒)のみを用いるプロセス
 - Zr,Moとの加水分解の問題を避けるために複数の抽出工程を用意
 - 強酸下でのHDEHP抽出(Zr,Mo除去)
 - 酸回収(Ba,Srを除去)
 - 低酸濃度に希釈
 - Reverse TALSPEAKによりLn、Cs、貴金属を分離し、DTPA(Diethylenetriaminepentaacetic acid: 錯化剤)/クエン酸でAm/Cm逆抽出
 - 陽イオン交換樹脂でDTPA/クエン酸を除去し、Am,Cm酸化物粒子を得る



* :元々ORNLで開発されたTALSPEAK法は、MAとLnを含む溶液にDTPAを加え、その後、HDEHPでMAを抽出する方法。これに対し、Reverse TALSPEAKは、MAとLnを含むHDEHP溶媒側からDTPAでMAを逆抽出方法。Reverse TALSPEAKの方が、給液調整が簡略化でき実用的と言われている。

フランス原子力庁(CEA)の提案

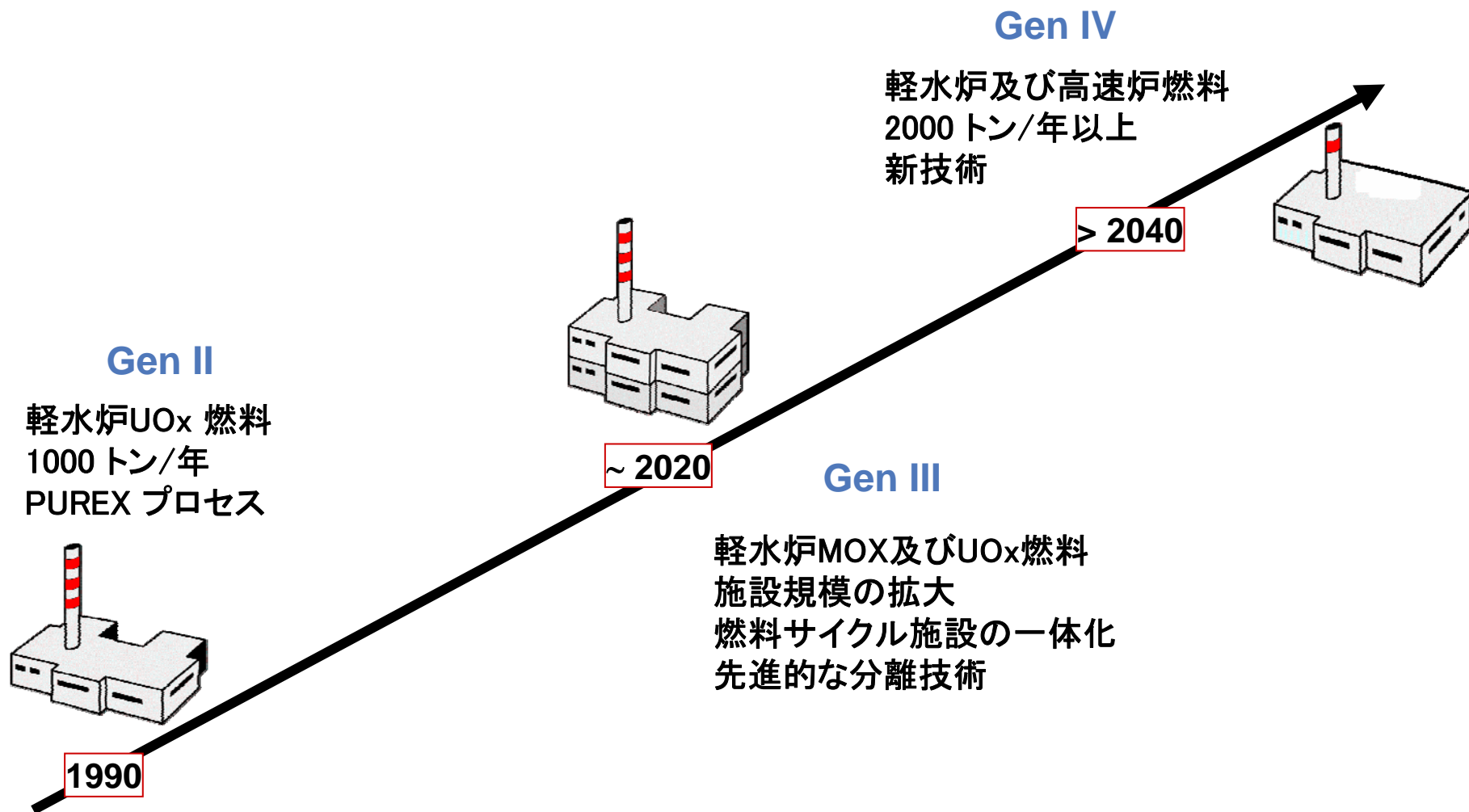
各国の開発と実用化のレベルは同じではなく、
いろいろな方策が利用可能

CEAは次の3段階の取り組みを提案

- 2030年までの短期的な実用化方策としての **COEX** によるリサイクル戦略(U, Puを共にリサイクル)
- 2040年頃までに実証される**DIAMEX-SANEX**プロセスにより、**COEX** 技術を他のアクチニドに拡大
- アクチニドの一括リサイクル技術(**GANEX, NEXT, UREX+1a**等)を開発し、2040年以降に実用化

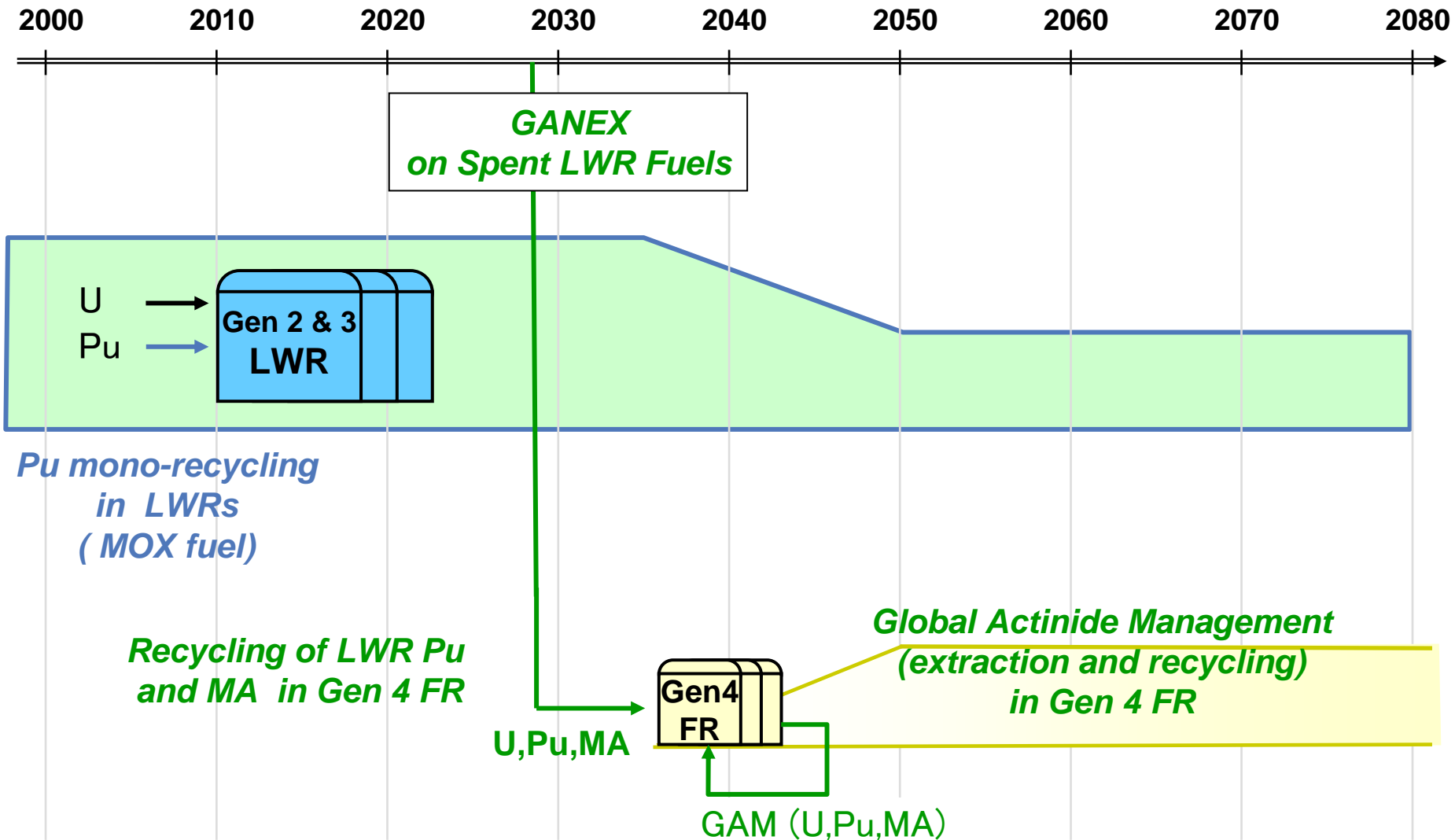
2020年に原型プラントを導入する計画では、
2012年にプロセスの選定が必要

次世代の再処理施設



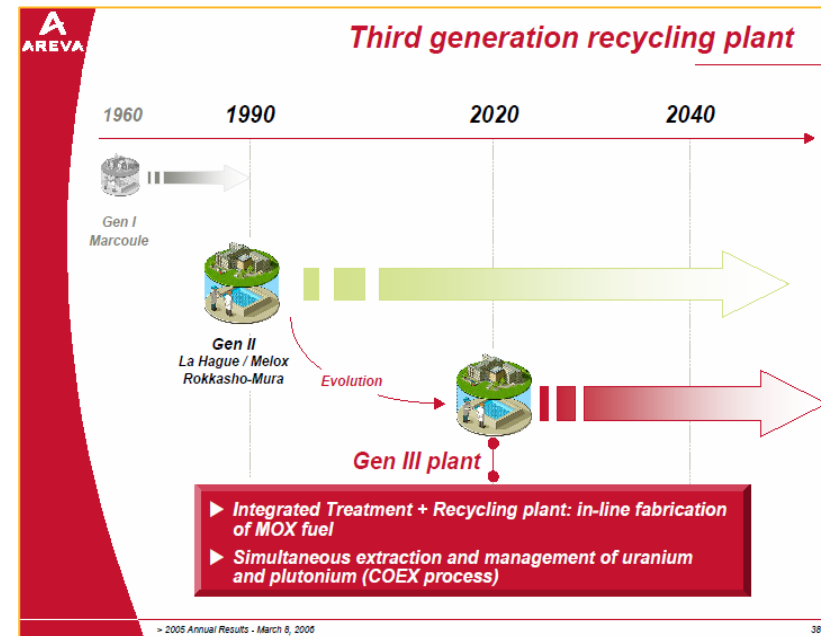
GANEXの開発計画

Fuel cycle : Perspective for actinides management



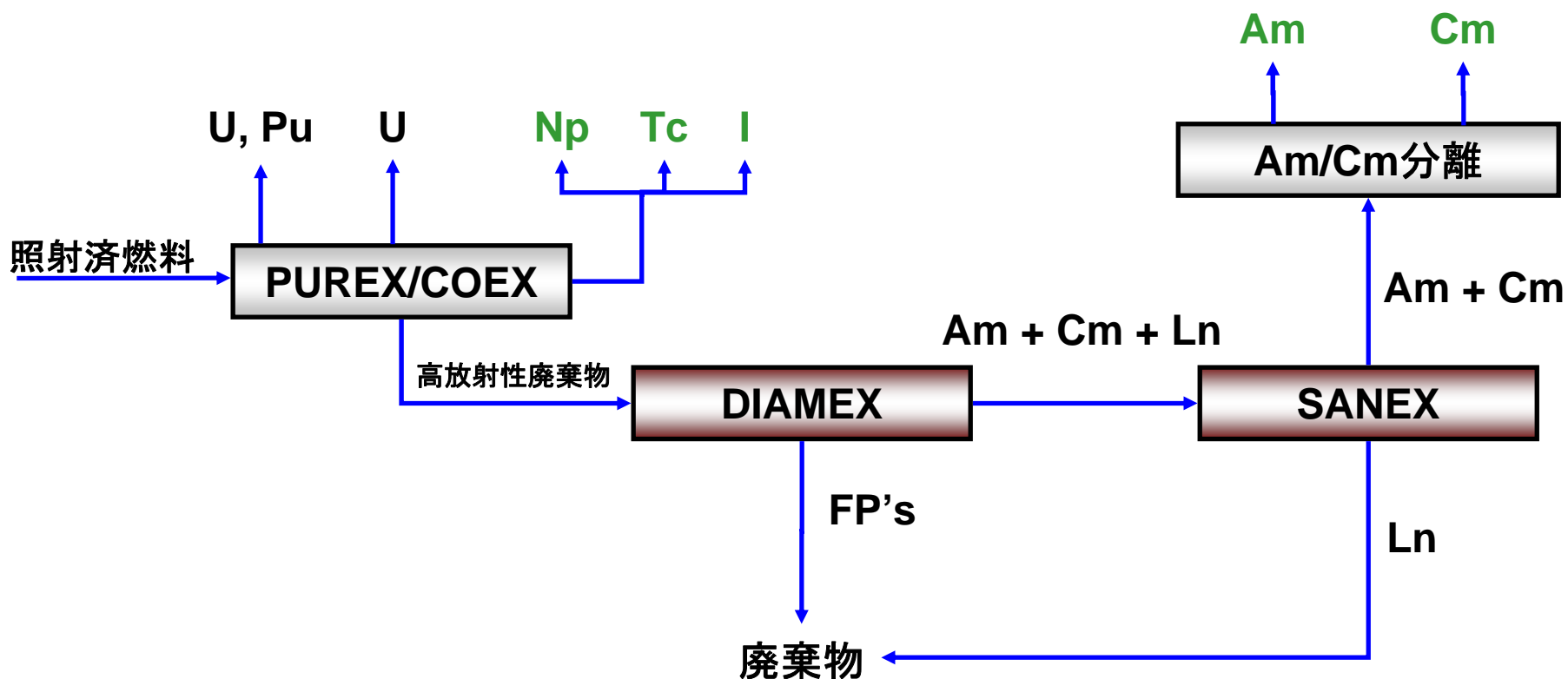
COEX 法 これまでの開発経緯

- 主たる研究機関
 - 仏国 AREVA グループが主として研究開発を実施
- 経緯
 - 2006年3月8日に投資家向けに行った2005年度の決算に係る説明が最初であると思われる
 - 「MOX燃料を製造する統合された処理・リサイクルプラント」において、UとPuをともに抽出、処理するプロセスとの説明
 - このプラントは現行のプラント（La Hagueと六ヶ所再処理工場）を発展させた第三世代のもので、2020年頃に導入する計画
 - 2006年8月、GNEP (Track 1)における再処理技術の有力候補の1つとして取り上げられる



Anne Lauvergeon, Gérald Arbola : "2005 results",
March 8, 2006 (2006)

第2ステップ：将来の新分離技術への展開



Talspeak、抽出クロマトグラフィー、TODGA の様な他のプロセスは選択肢

DIAMEX-SANEXの試験結果

Minor Actinides : *Main lab-scale results*



- **Neptunium :**

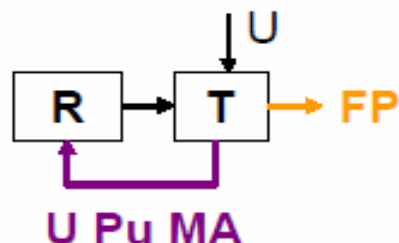
 - ⇒ *recovery yield : > 99 % (adaptation of PUREX process)*

- **Américium et curium :**

 - ⇒ *recovery yield : 99,9 % Am + Cm*

GANEXプロセスの提案

2nd route considered : Global Actinide Recycling (TRU recovery)



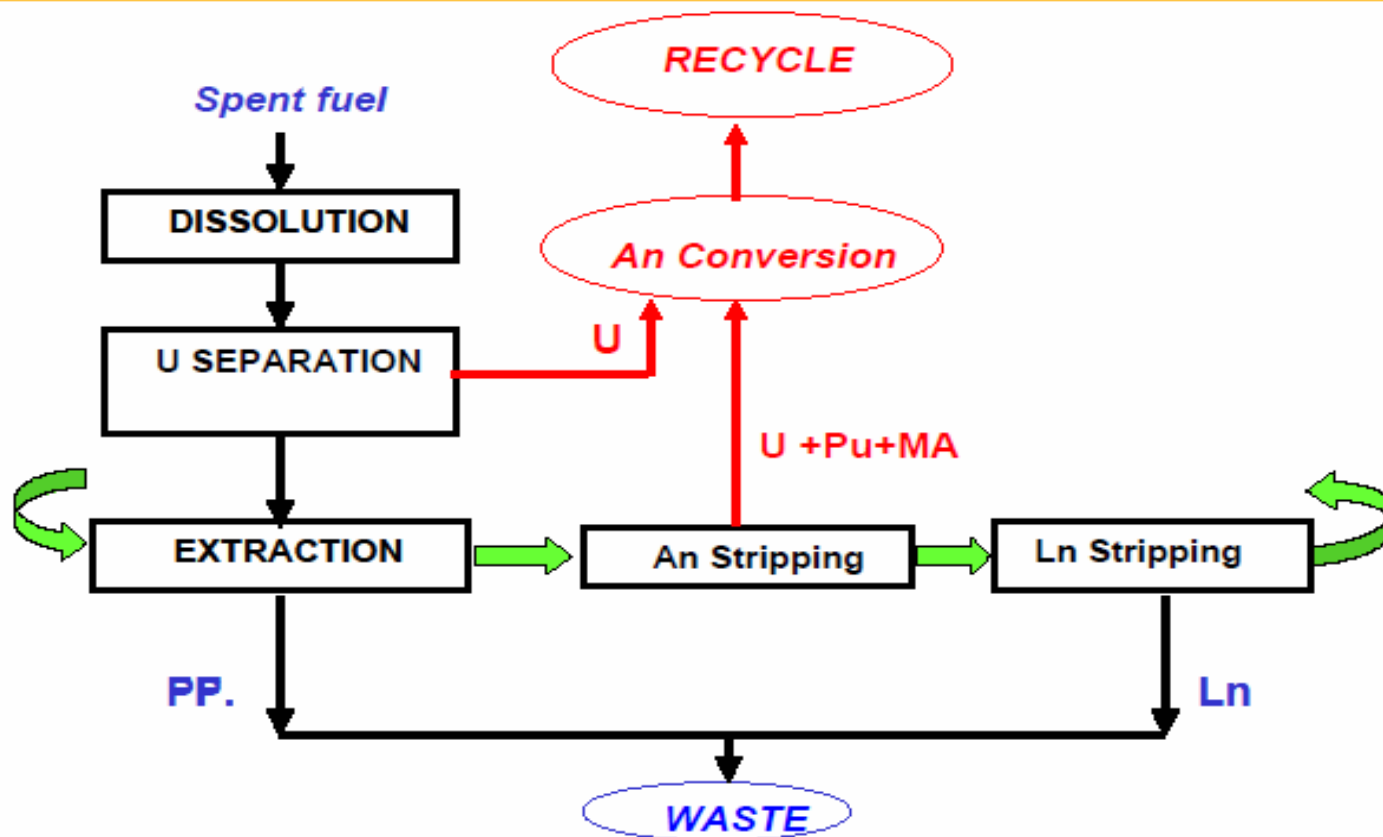
Homogeneous recycling

- **ALL-ACTINIDE GROUPED EXTRACTION**

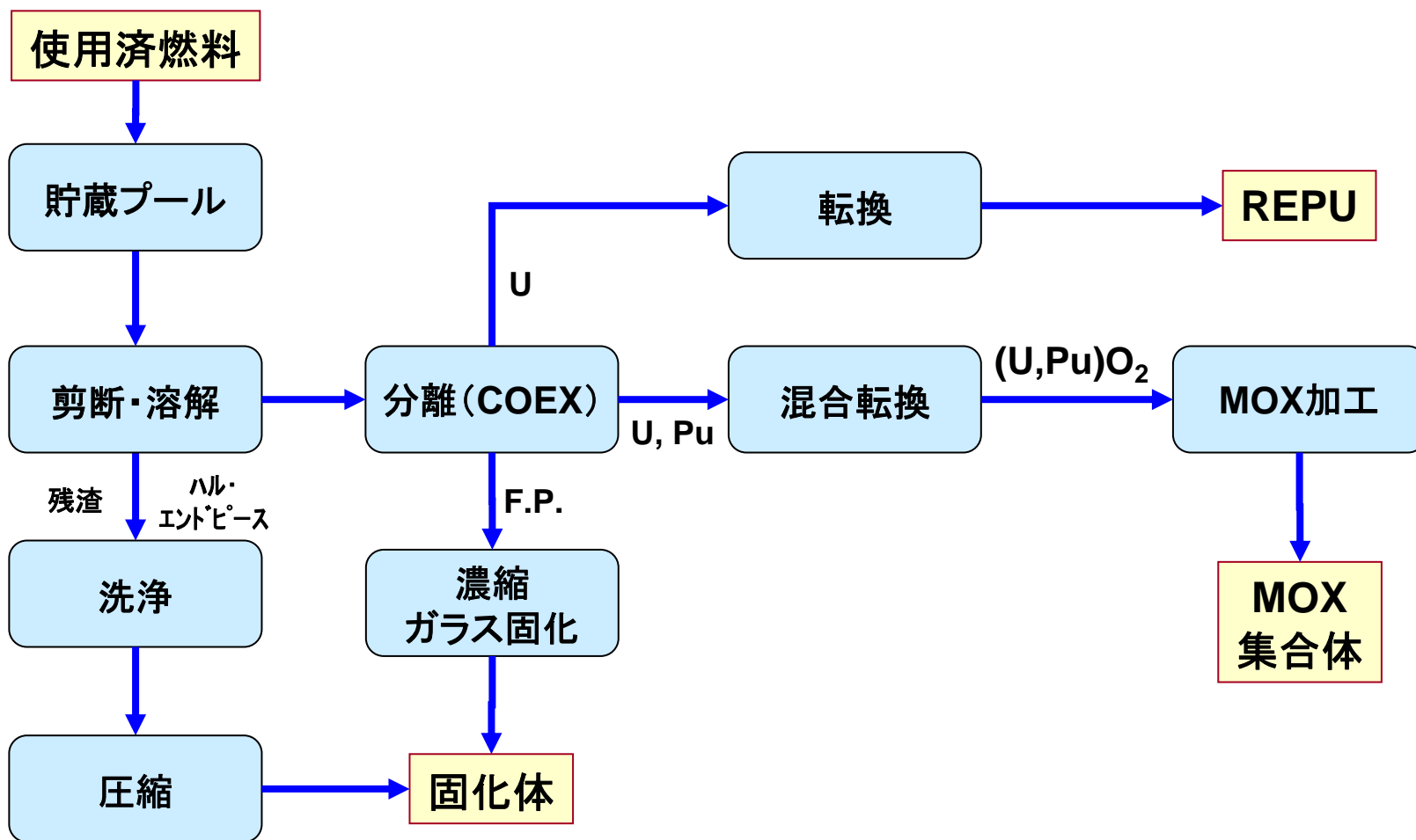
- *adapted DIAMEX-SANEX (with U, Pu, Np...)*
- *other new molecules...*

GANEXプロセスの概念

The GANEX Concept

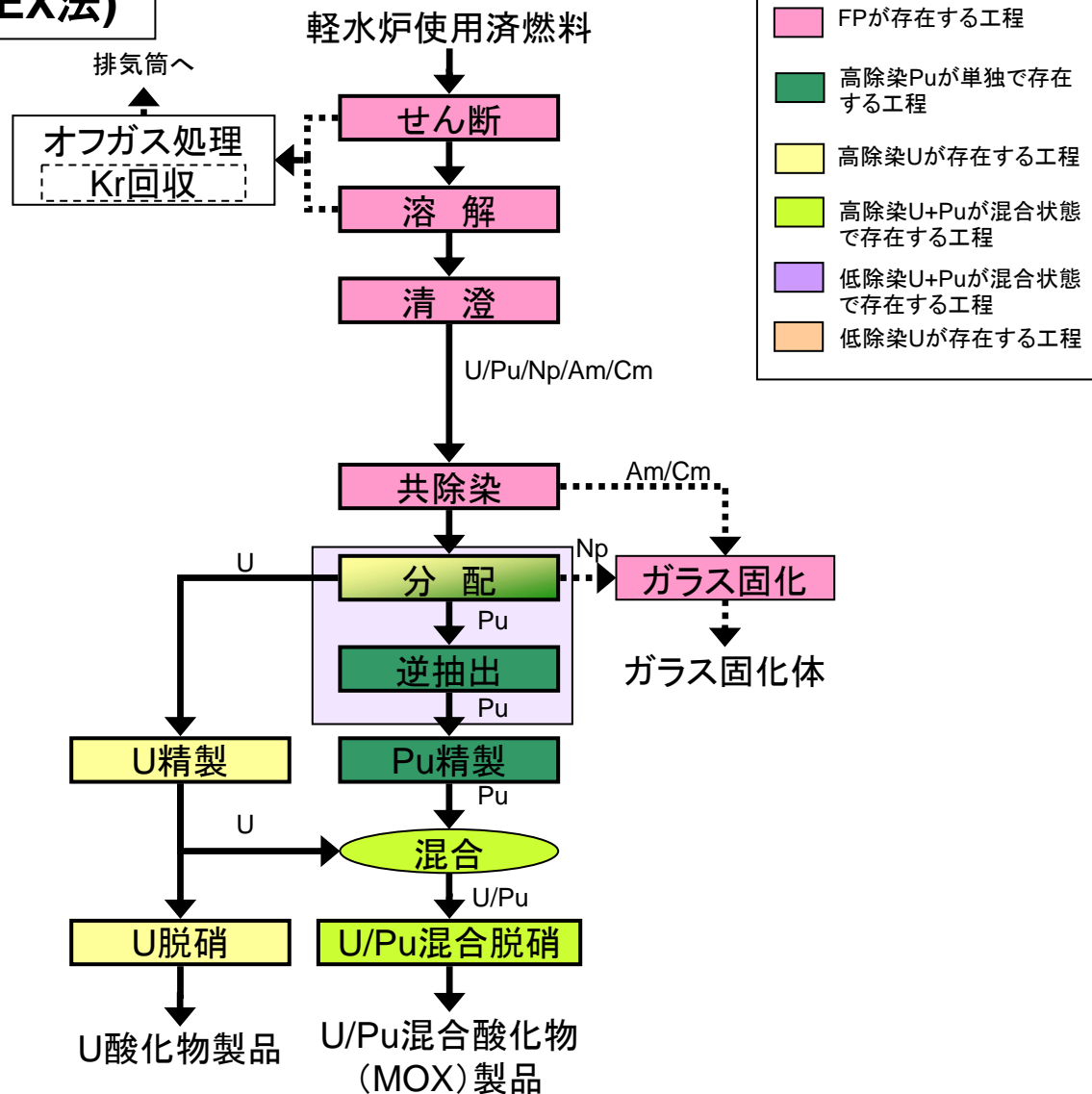


COEXのプロセスフロー



従来湿式再処理法 (PUREX法) について

従来湿式再処理法(PUREX法)

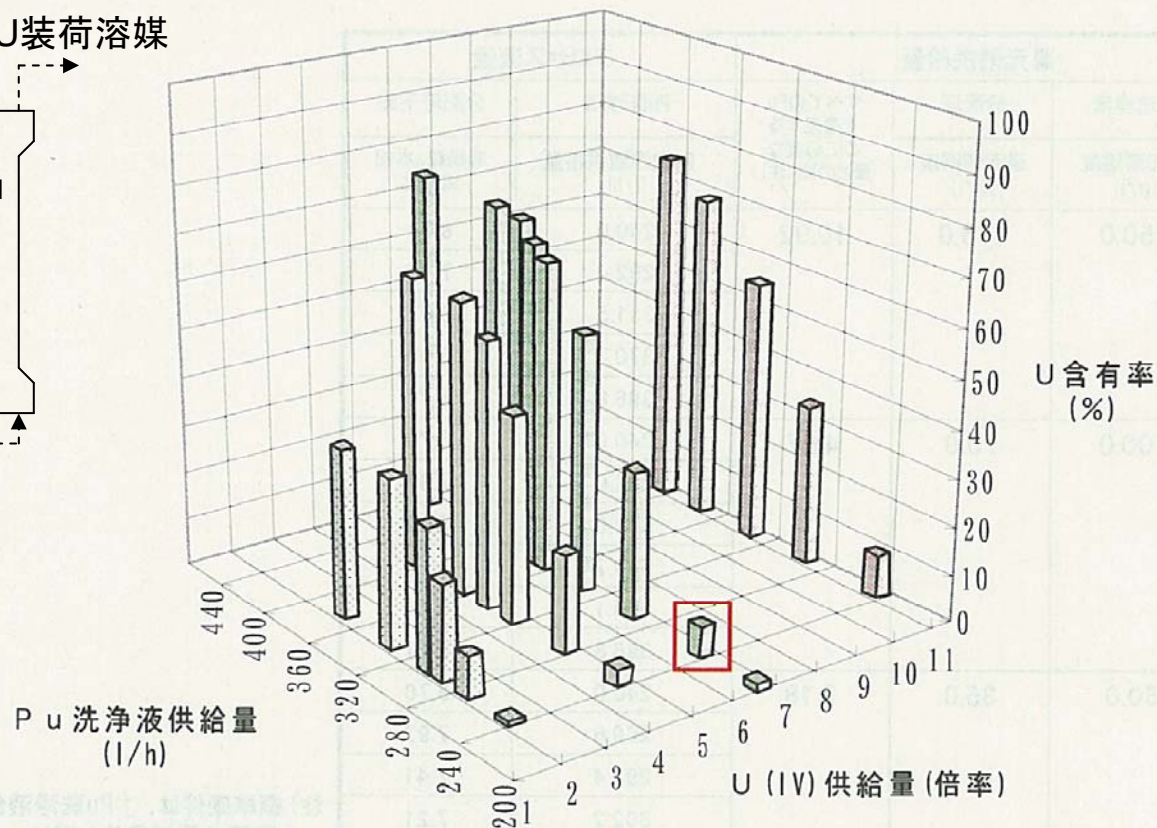
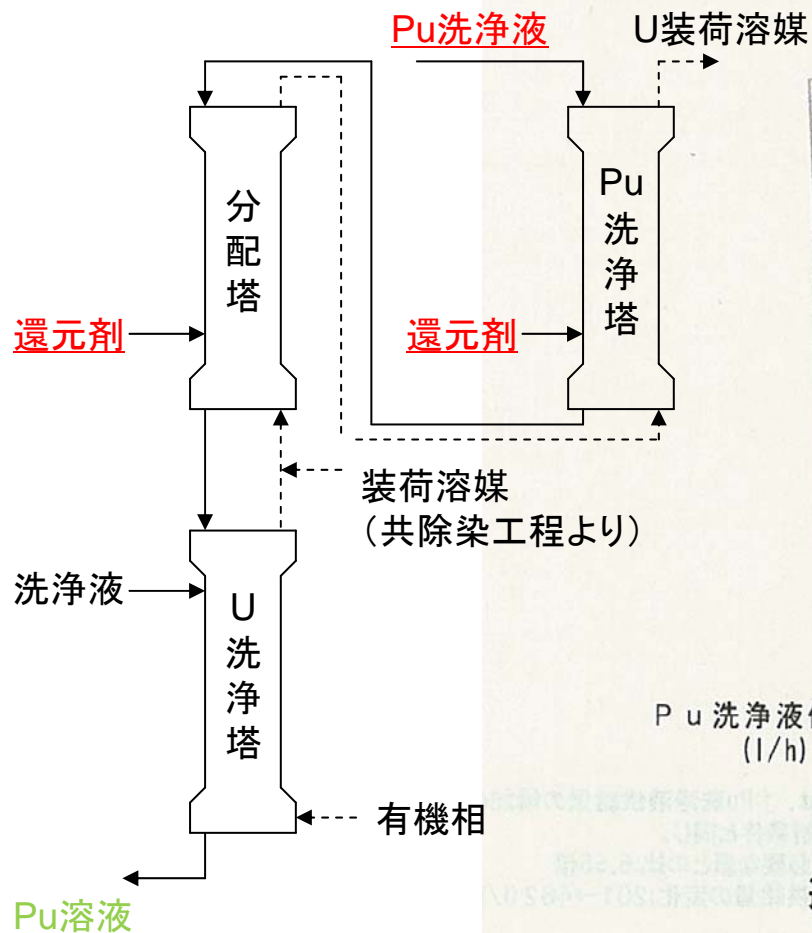


COEX 法 プロセスの推定 (1)

- **溶媒抽出におけるU-Pu共回収**
 - プロセスの変更はPu分配工程においてなされ、Pu逆抽出液とU洗浄部に集約されると考えられる
 - 前者については、Pu逆抽出液の流量と還元剤濃度の制御、また、後者については、U洗浄部の削除、もしくは溶媒流量の制御がそれぞれ考えられる
- **Pu逆抽出液の変更**
 - 還元剤である U(IV) の濃度を高めると Pu 製品に移行する U の割合が増加
 - 流量を高めるとU の割合が増加
- **U洗浄部の変更**
 - U洗浄部を省略すると、U が確実に Pu 製品に混入
 - Pu 洗浄のための硝酸溶液(Pu 洗浄液)や溶媒(洗浄溶媒)の流量を変えることにより、U の割合の調整が可能

COEX 法 プロセスの推定 (2)

U洗浄塔下部水相出口でのPu溶液に混入するUの割合 (%)



還元剤 (U (IV)) 供給量及びPu洗浄液供給量とU洗浄塔下部水相出口でのPu溶液に混入するUの割合 (%)

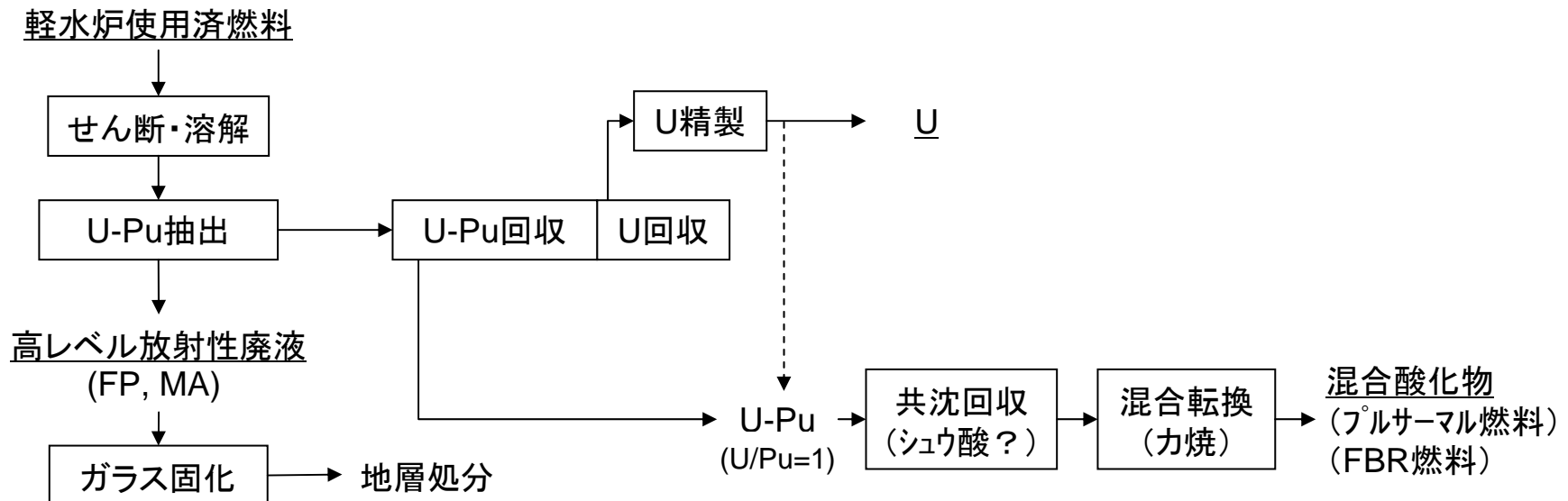
COEX法 プロセスの推定 (3)

- **製品(固体)として回収するための An(III)-An(IV) 共沈法**
 - An(III) とAn(IV) の共沈を取り扱ったシュウ酸沈殿に係るCEAの特許*
 - 溶媒抽出法におけるU(IV) 及びPu(III) の共沈への適用を示唆
 - $(\text{N}_2\text{H}_5)_{0.75} [\text{U}^{\text{IV}}_{0.25}\text{Nd}_{0.75}(\text{C}_2\text{O}_4)_2 \cdot 4.5 \text{H}_2\text{O}]$ などが沈殿
 - U(IV)-Pu(III)、Th(IV)-Pu(III)、Th(IV)-U(IV)-Np(IV)-Pu(III)-Am(III)、Pu(III)-Am(III) で同様の結果である
 - 比較として、マイクロ波脱硝 (MH) 法により同等の機能を達成できるものと考えられる。

* Grandjean Stephane, Beres Andre, Maillard Christophe, Rousselle Jerome : "Method for coprecipitation of actinides in different oxidation states and method for preparation of mixed compounds of actinides", US2005288542 (2005)

COEX法 プロセスの推定(4)

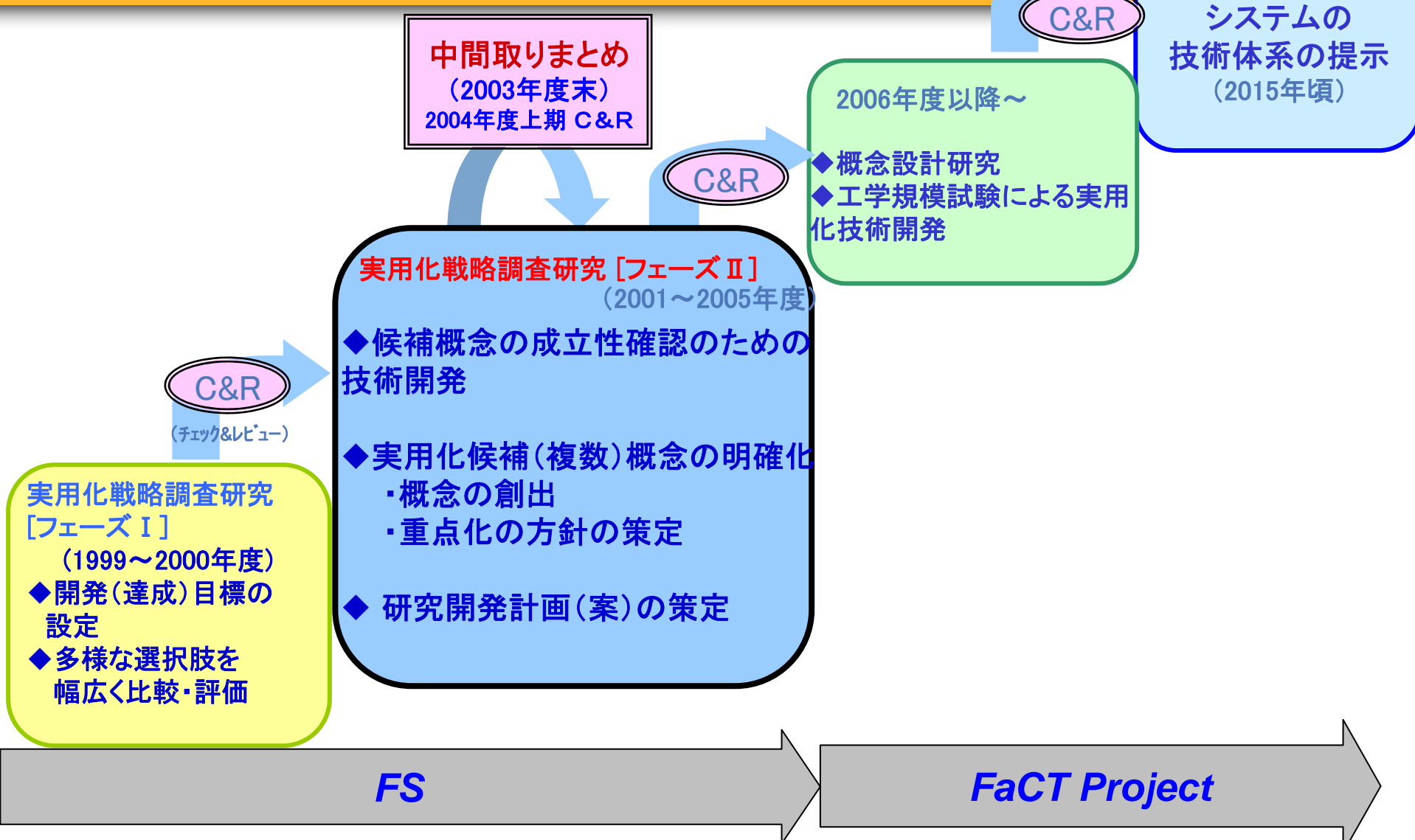
- U及びU-Pu混合物を分離し、MOX燃料の原料とする
- 工程内にPu単体が存在しない
 - Pu逆抽出液あるいはU洗浄部の変更・制御により対応するものと考えられる
- U-Pu混合物の精製工程はない
 - 共沈回収工程での除染性能を期待？



Co-Processing 法 国内の取り組み

- 溶媒抽出技術に関する取り組み
 - 東海再処理工場のプロセス変更に関する検討(1990年頃)
 - NpをPu製品に移行させるようプロセスの変更に関する検討がなされ、Puを一部のUとともに回収するフローシートが提案
 - 高速炉燃料再処理への適用(1993年頃)
 - 高速炉燃料再処理を対象としてU-Pu混合製品を得るフローシートを実験により確証
 - 電中研による評価研究(1996-8年頃)
 - Pu分配工程で得るPu製品にUを混入する方法について解析的な研究を実施
 - 米国エネルギー省のGNEP に関わる関心表明(2006年)
 - Near-term track (Track1) に対する提案として「Co-Processing」を提案
- 混合脱硝技術に関する取り組み
 - 昭和52年の日米間交渉に基づく、U-Pu混合転換の技術開発
 - 共沈法、流動床法、マイクロ波加熱直接脱床法(MH法)を比較。独自技術であるMH法を選定し、研究開発を推進

FS/FaCTプロジェクトの展開



FSにおける開発目標の設計要求への展開

- 開発目標を実際の設計検討作業における具体的な指標に展開するため、定量的な設計要求を設定

開発目標

燃料サイクルの設計要求

安全性

- 同時代の軽水炉燃料サイクルシステムと同等以上（異常の発生要因を極力排除、異常の拡大防止等）
- 施設内での放射性物質の大規模放出事象の発生頻度を 10^{-6} /プラント・年未満に抑制し、その事象を想定しても、施設の閉じ込め能力を確保して、影響を周辺環境に及ぼさない設計

経済性

- 再処理・燃料製造費 0.8円/kWh
- 処分費等を含む燃料サイクル費としては、1.1円/kWh

高速増殖炉サイクル全体としての発電原価 4円/kWh

環境負荷低減性

- 発電量あたりの放射性廃棄物の発生量が軽水炉燃料サイクル施設と同等以下を要求、1/10に削減することを目指す
- UおよびTRUの廃棄物への移行率 0.1%以下（目標）
- 長寿命核種の分離核変換技術の採用などにより処分負荷低減の可能性を追求

資源有効利用性

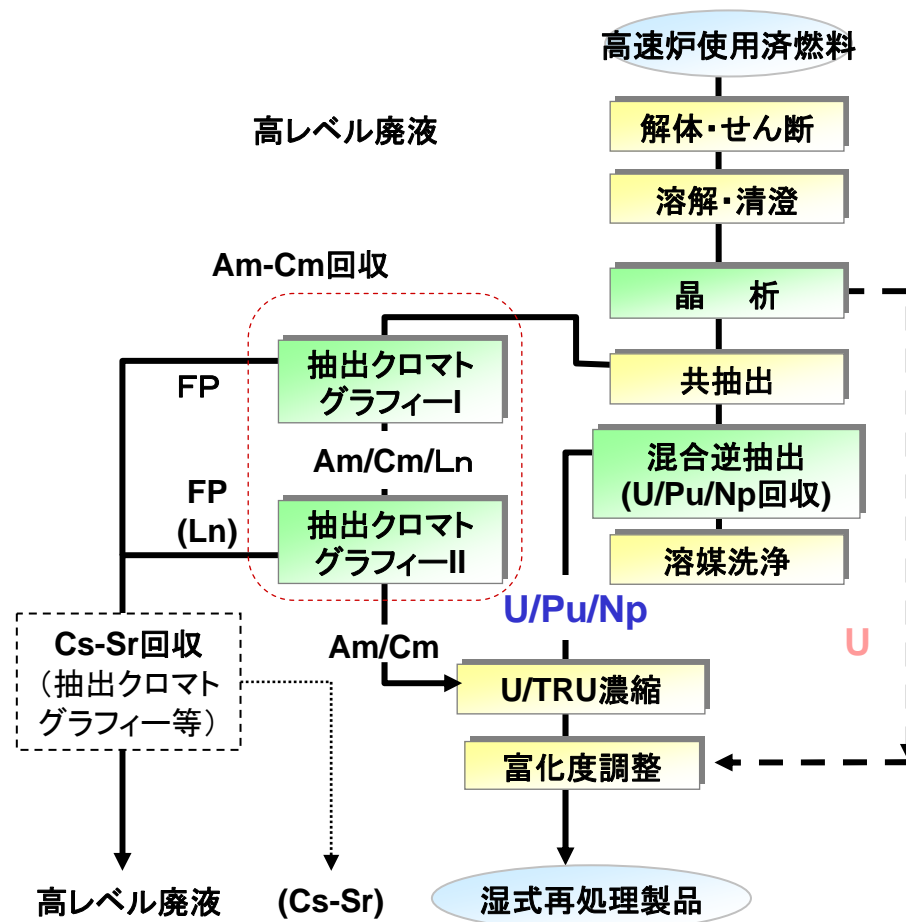
- UおよびTRU回収率99%以上

核拡散抵抗性

- 核物質防護、保障措置への対応を考慮した設計プルトニウムが単体の状態で存在しないこと
- 低除染・TRU燃料の使用に伴う高線量化による接近性の制限

NEXT 法 プロセスの概要

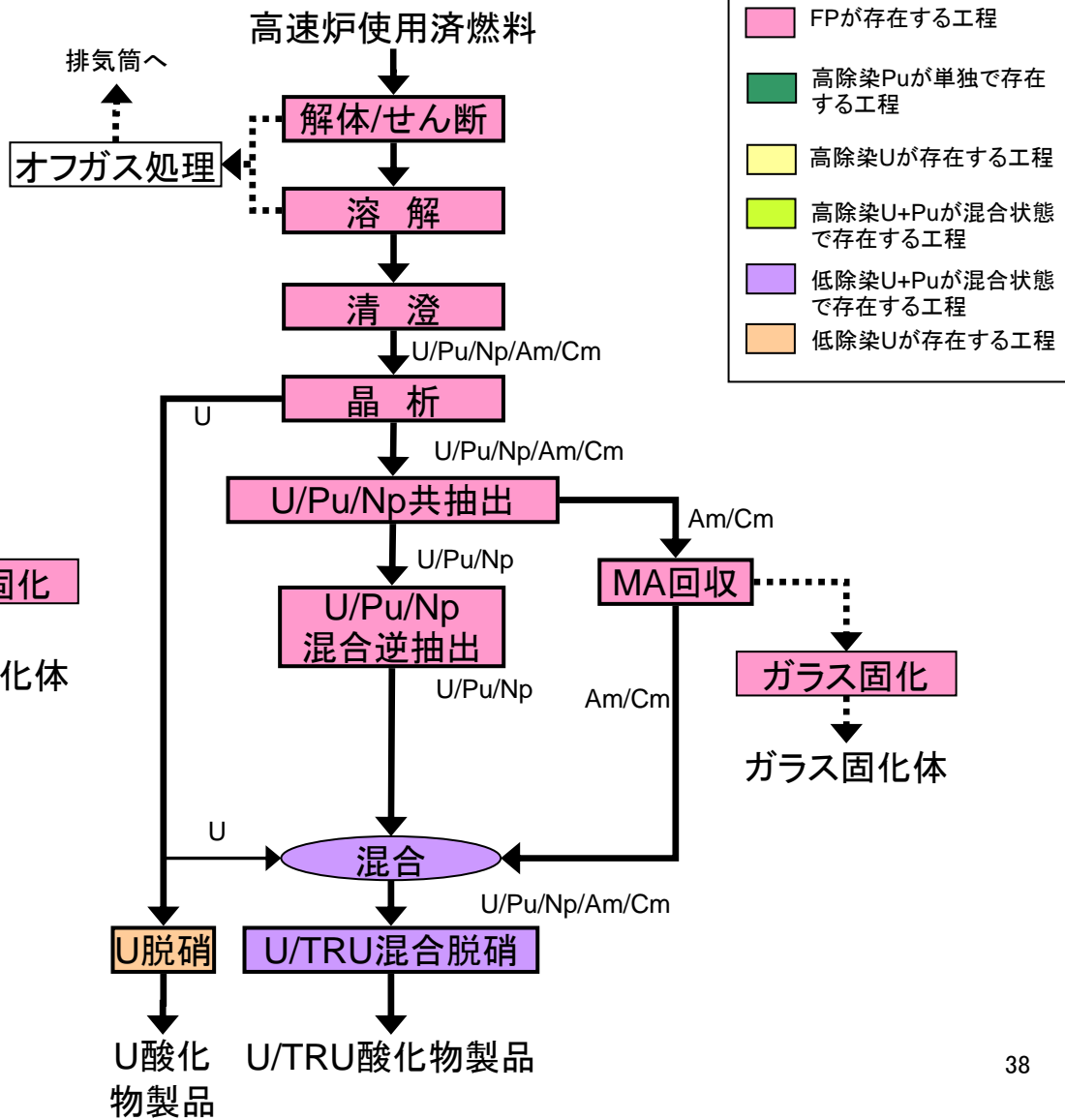
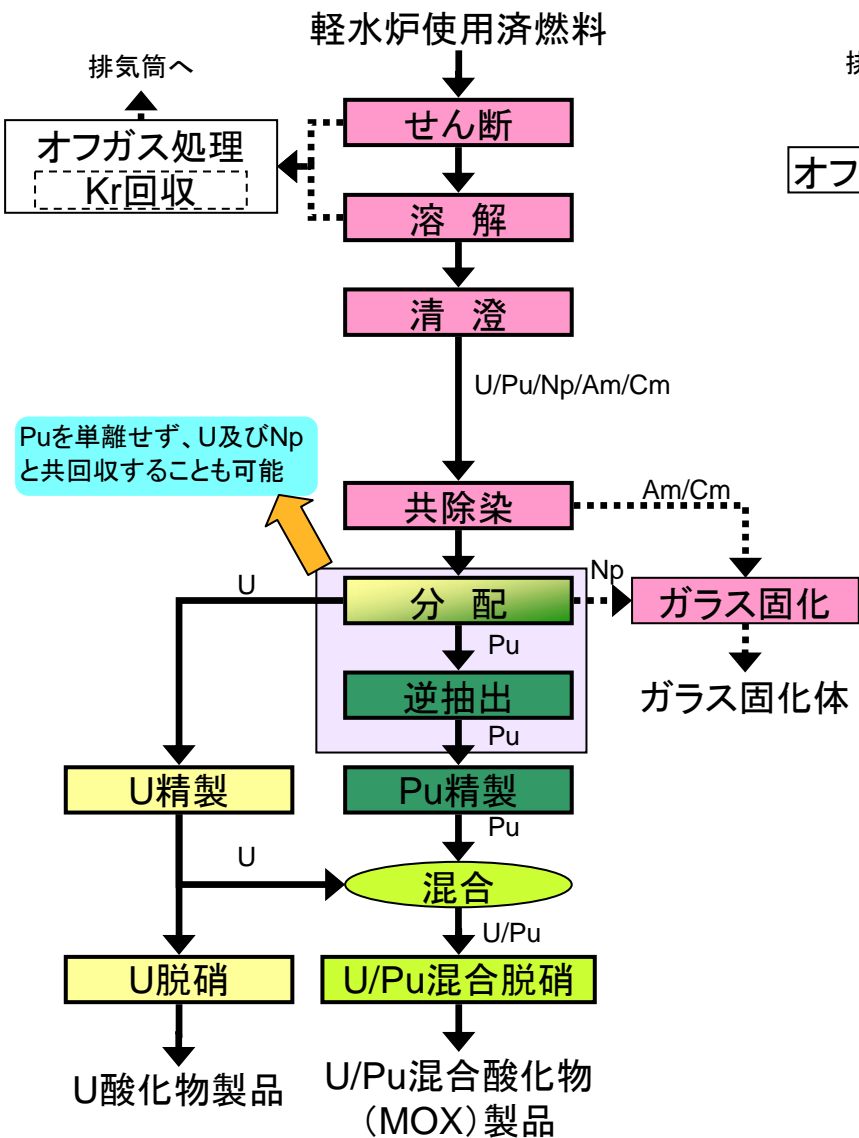
- 晶析工程におけるU粗回収
 - 抽出工程での処理量低減
- U-Pu-Np一括回収(Pu非単離)
 - 抽出工程の簡素化
(分配工程、精製工程削除)
- Am-Cm回収
 - 抽出クロマトグラフィー技術の適用
- Cs-Sr回収
 - 抽出クロマトグラフィー技術等の適用を検討



従来再処理技術と先進湿式再処理技術の比較

従来湿式再処理法(PUREX法)

先進湿式再処理法



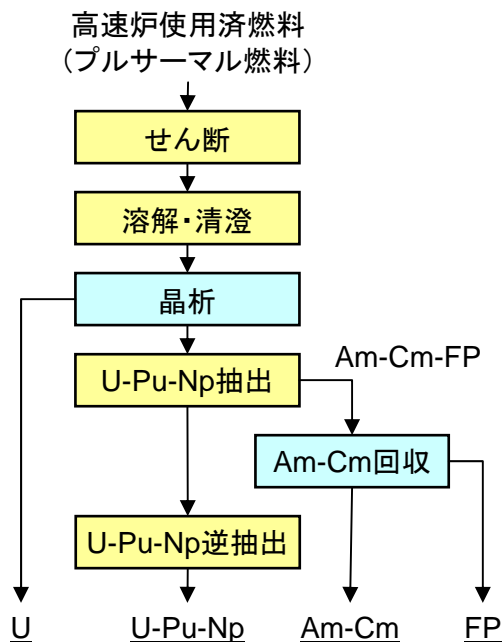
NEXT法 プロセスの特徴

- U+TRUを回収
- FBRサイクル(低除染燃料)への適用
 - 非溶媒抽出技術の採用(晶析)
- 核不拡散性の向上
 - U-Pu-Np一括回収フローシート(Pu非単離)の採用
- 高経済性(プロセス簡素化、廃棄物低減化)の追求
 - 晶析法によるU粗回収(後工程の負荷低減)
 - MA回収工程における非溶媒抽出技術(抽出クロマトグラフィ)の採用
- 原理実証、プロセス基礎研究をほぼ終了

各技術の比較 プロセスの構成など

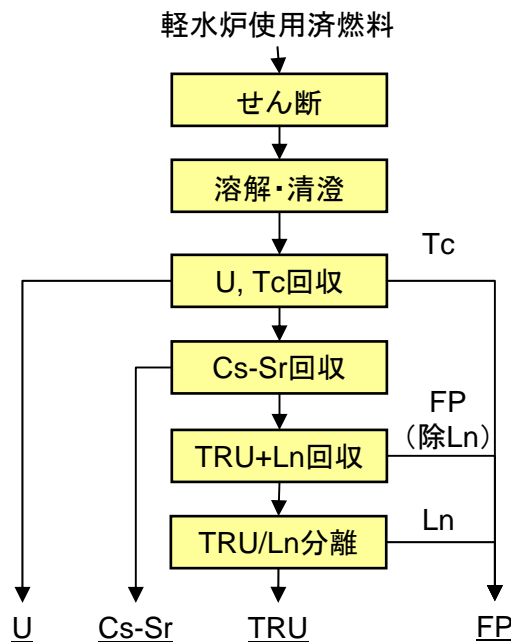
■ 溶媒抽出工程 ■ 溶媒抽出以外の工程

NEXT法



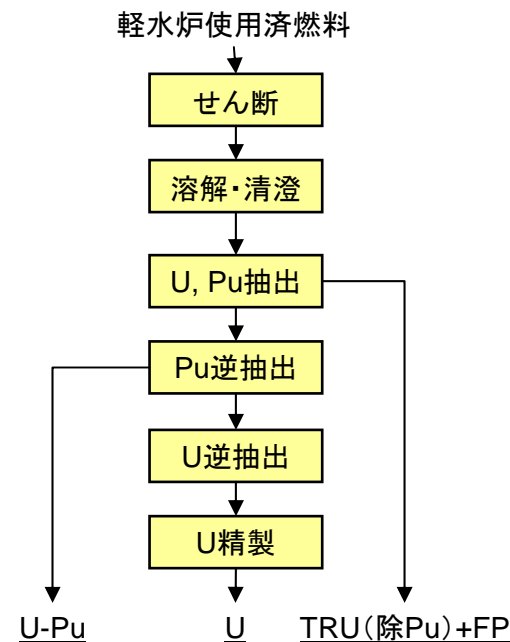
- 使用済燃料を用いた実験室規模での実証
- TBPを抽出剤とした溶媒抽出工程 + 晶析法 (U粗回収)、抽出クロマト法 (Am-Cm回収) 等の非溶媒抽出工程より構成
- U, Pu, Npは一括で逆抽出し、回収
- 回収したU, U-Pu-Np及びAm-Cmは、FBR燃料として利用
- FPは、高レベル廃棄物として処分

UREX法 (UREX+1a)



- 使用済燃料を用いた実験室規模での実証
- TBP等、複数の抽出剤を用いる抽出工程より構成 (TBP(U, Tc), Cs-Sr(CCD-PEG), CMPO(TRU+Ln), HDEHP(An))
- 回収したUは低レベル廃棄物として処分
- 回収したCs-Srは発熱核種として、貯蔵管理
- 回収したTRUは、ABR燃料として利用
- FPは高レベル廃棄物として処分

COEX法



- 詳細は明らかではないが、商用に近いレベルにあると推測
- TBPを抽出剤とした溶媒抽出工程より構成
- Puを一部のUとともに逆抽出、精製は省略してシュウ酸沈殿法により回収
- 回収したUは、精製する
- Puを除くTRU及びFPは、高レベル廃棄物として処分

各技術の比較 処理する使用済み燃料と用いる化学物質

| 国名 | 機関 | プロセス | 対象燃料 | 抽出剤 | 希釈剤 | 特徴的な使用試薬 |
|----|--------------|---------|------|---|-----------------------------------|--|
| 日本 | JAEA | NEXT | 高速炉 | TBP (U-Pu-Np回収用) CMPO, BTP (Am-Cm回収用) | ドデカン 無(抽出クロマト) | — シュウ酸、DTPA |
| 米国 | ANL, etc. | UREX+1a | 軽水炉 | TBP (U, Tc回収用) CCD-PEG (Sr-Cs回収用) CMPO (TRU(含Ln)回収用) HDEHP (TRU / Ln分離用) | ドデカン FS-13 TBP-ドデカン ドデカン | AHA 炭酸グアニジン, DTPA 乳酸、DTPA 乳酸、DTPA |
| 仏国 | CEA | COEX | 軽水炉 | TBP? (U, U-Pu, Tc回収用) | ケロセン? | シュウ酸? |
| | | GANEX* | 軽水炉 | DOiBA? (U回収用) DMDOHEMA, HDEHP? (U-Pu-Np-Am-Cm回収用) | TPH? | HEDTA, シュウ酸, クエン酸? |

* Grouped Actinides Extractionの略で、使用済み燃料からU, Pu, MAを一括回収する再処理技術

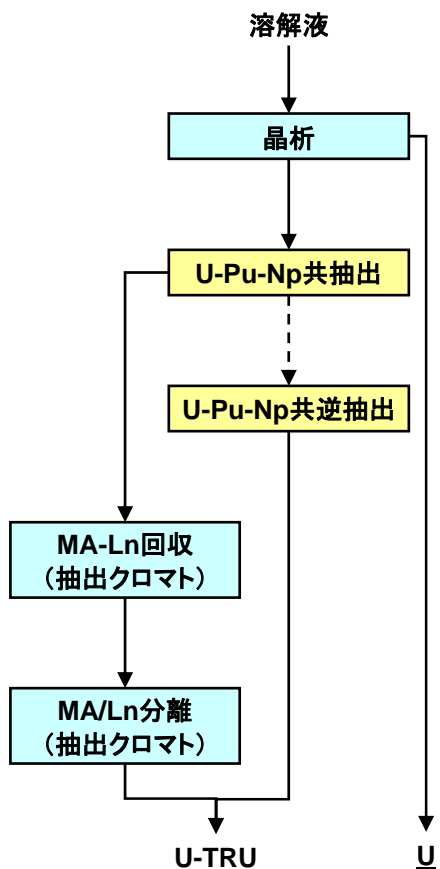
参考文献

- J. Law, et al., "Development of a Regenerable Strip Reagent for Treatment of Acidic, Radioactive Waste with Cobalt Dicarbolide-based Solvent Extraction Processes", Solvent Extr. Ion Exch., 23, 59-83 (2005)
- C. Pereira, et al., "Preliminary Results of the Lab-Scale Demonstration of the Urex+1a Process Using Spent Nuclear Fuel", 2005 AIChE National Meeting
- J. Adnet, et al., "Development of New Hydrometallurgical Processes for Actinide Recovery: GANEX concept", GLOBAL2005, Tsukuba, Japan (2005)

各技術の比較 溶媒抽出工程の数

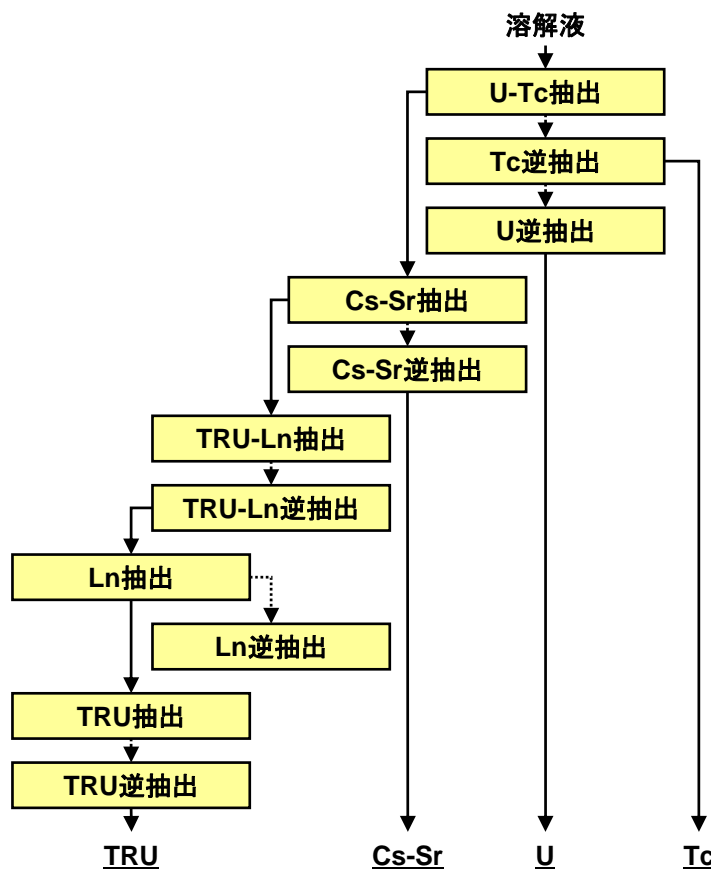
NEXT

- 2 バンク
- ✓ 晶析(非溶媒抽出)
- ✓ U-Pu-Np 共回収サイクル
- ✓ 抽出クロマトグラフィー(非溶媒抽出)



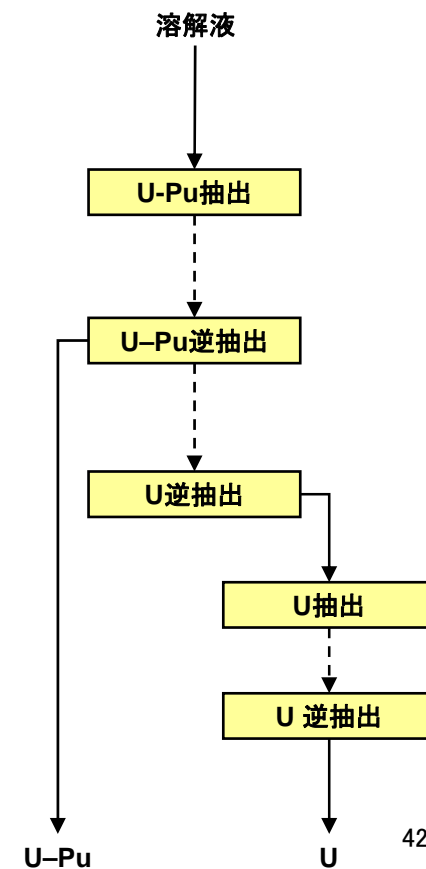
UREX+1a

- 11 バンク
- ✓ UREX
- ✓ CCD-PEG
- ✓ TRUEX
- ✓ TALSPEAK

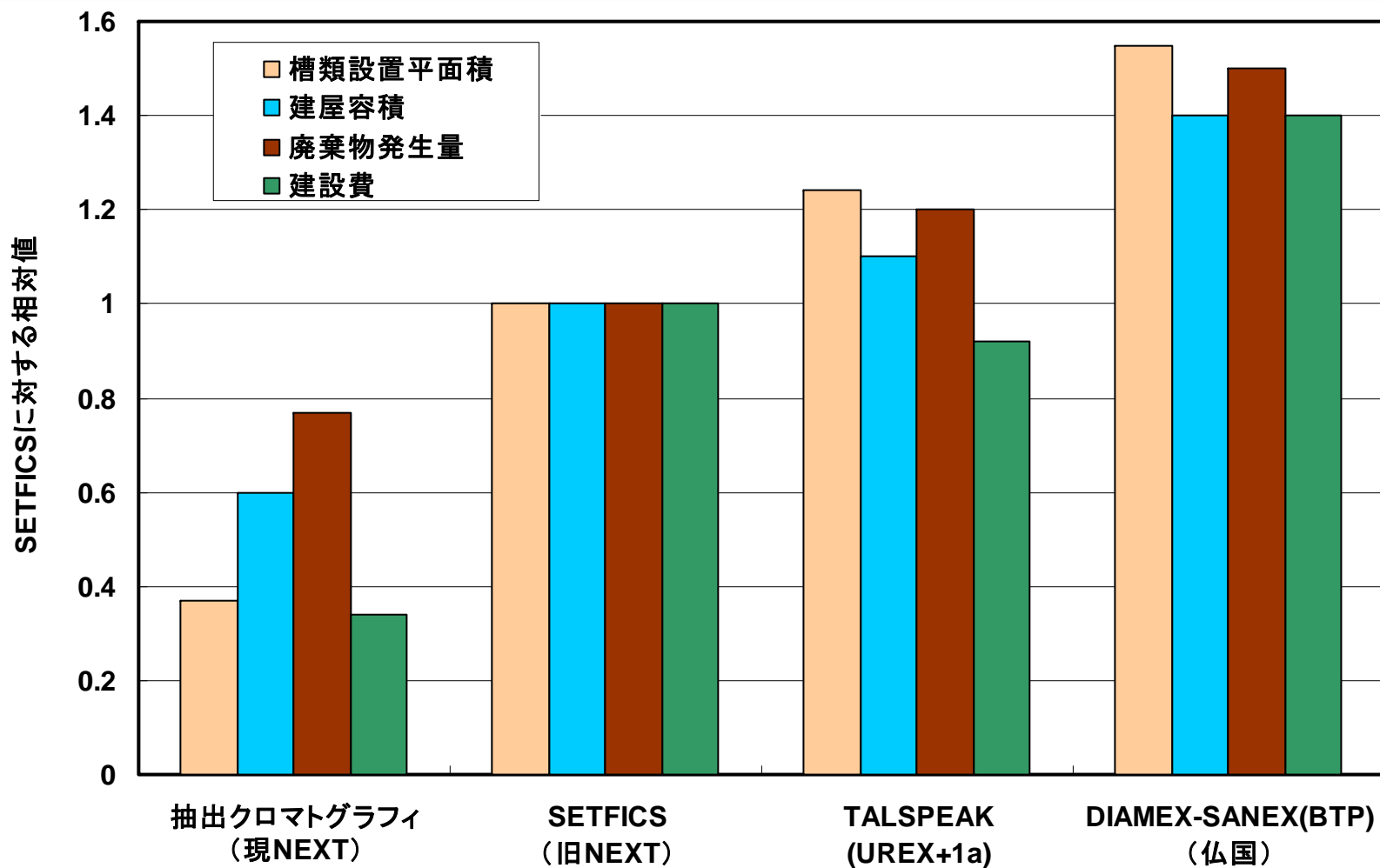


COEX

- 5 バンク
- ✓ 分離サイクル
- ✓ U 精製サイクル
(MA 回収は行わない)



各技術の比較 MA 回収に関する比較例



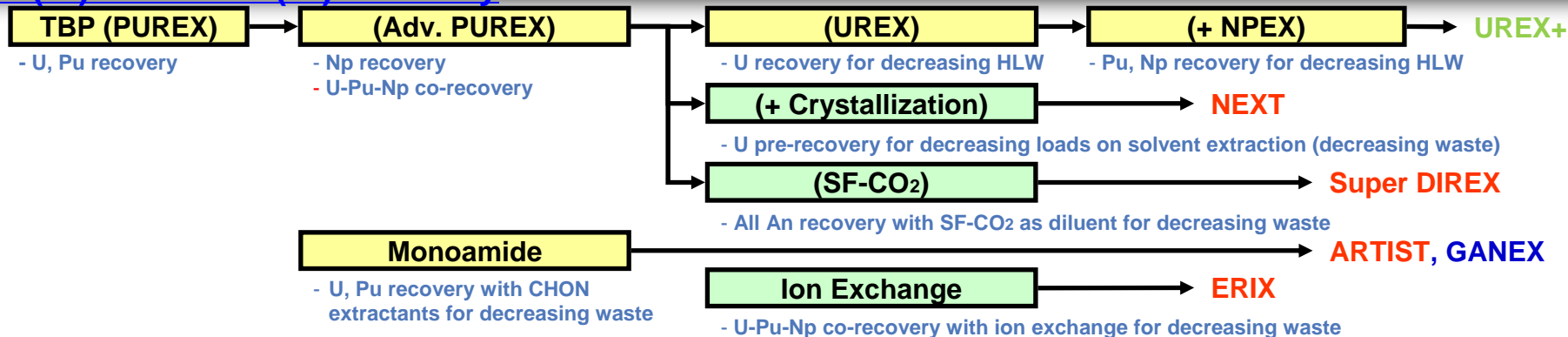
200tHM/y再処理プラントにおける高レベル廃液処理量での比較

各技術の比較 研究開発課題

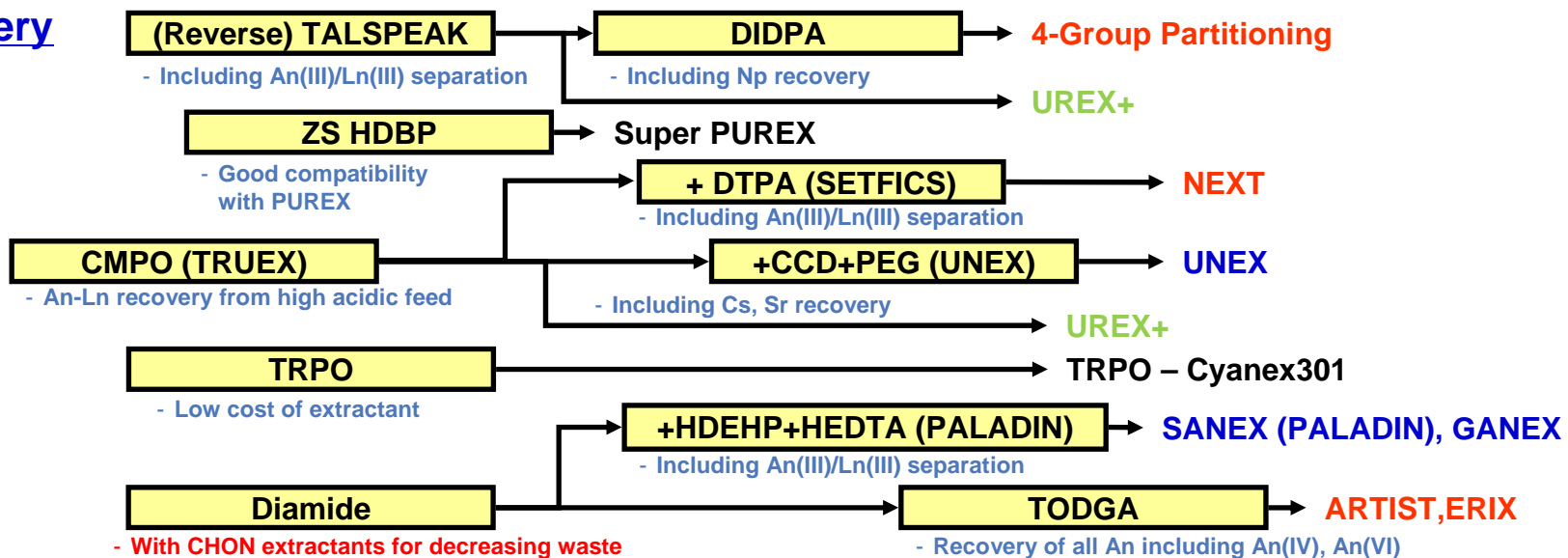
- UREX(軽水炉使用済燃料を対象)
 - UREX+1a を構成する各溶媒抽出技術について、向流多段抽出の小規模実証試験が行われている
 - プロセスの最適化などは必要であるが、大きな研究開発課題はないものと推測される
 - 工程が複雑・長大であるので、経済性の観点からの改良が必要であると考えられる
- COEX(軽水炉使用済燃料を対象)
 - 実現性の高い技術を採用しており、大きな研究開発課題はないものと推測される
 - MA の回収を行うよう方針を転換する場合、工程が付加される
- NEXT(高速炉使用済燃料を対象)
 - 晶析、抽出クロマトグラフィーなど、重点的な研究開発が必要な要素技術がある

分離プロセス研究について

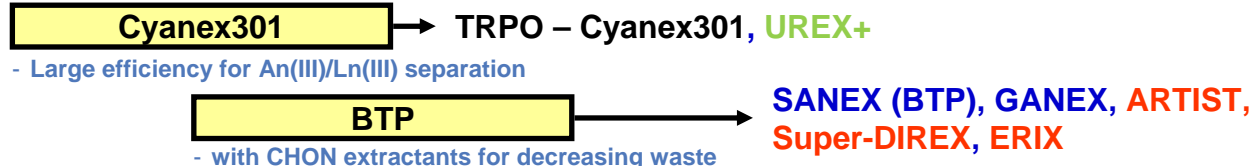
An(IV) or/and An(VI) recovery



An(III) recovery



An(III)/Ln(III) separation



CFTC計画の提案と我が国の計画の比較

| | 2006 | 2011 | 2016 | 2021 | 2026 | 2031 | 2036 | 2041 | |
|---|-----------------------|--------|------------------|------------------|--|--------------------------|--|--------------------|--|
| 米国の計画 | CFTC計画 | | | | | | | | |
| | Track1 | | 概念設計/基本設計/詳細設計 | 建設、試運転 | ▼2020年運転開始 運 転 【軽水炉使用済燃料の分離、ABRドライバー燃料(MAなし)の製造】 | | | | |
| | Track2 | | | | 概念設計/基本設計/詳細設計 | 建設、試運転 | ▼2030年運転開始(想定した最短スケジュール) 運 転 【ABR使用済燃料の分離、MA含有核変換用燃料の製造】 | | |
| | AFCF(先進的燃料サイクル施設)計画 | | 概念設計/基本設計 | 詳細設計/建設/試運転 | ▼2016年運転開始 運 転* | | | | |
| * : AFCFは4つのモジュールを順次整備し、運転していく計画としている(燃料製造モジュール、湿式再処理モジュール、研究モジュール、パイロプロセスモジュール)。 | | | | | | | | | |
| 我が国のFBRサイクル実用化に向けた計画 | ○再処理 -工学規模ホット試験施設 | | 基本設計/詳細設計(許認可含む) | 建設、試運転 | ▼2015年頃運転開始 工学規模ホット試験 | | | | |
| | -実証施設 | | 概念設計 | 基本設計/詳細設計(許認可含む) | 建設、試運転 | ▼2030年頃運転開始 運 転 | | | |
| | ○燃料製造 -工学規模ホット試験施設 | | 概念設計 | 基本設計/詳細設計(許認可含む) | 建設、試運転 | ▼2020年頃運転開始 工学規模ホット試験 | | | |
| | -実証施設 | | 概念設計-1 | 概念設計-2 | 基本設計/詳細設計(許認可含む) | 建設、試運転 | ▼2032年頃運転開始 運 転 | | |
| ○実用燃料サイクル施設 | | 概念設計-1 | 概念設計-2 | 概念設計-3 | 概念設計-4 | 基本設計/詳細設計(許認可含む) | 建設、試運転 | ▼2043年頃運転開始 運 転 | |

国際協力の進め方（特に米国、仏国との協力）

- 次期に採用する主要プロセス(NEXT(日)、(PUREX)-DIAMEX-SANEX(仏)、UREX+1a(米))については相互の比較評価を実施し、今後の共同開発の可能性を協議する。
とりわけMA回収技術については、優れた溶媒を必要としている点は共通課題であり、仏米との共同開発を打診していく。
- 将来型の分離プロセス(アクチニド一括回収等)については、各国とも緒についた段階であり、共同開発に向けた話し合いを開始する。
- 上記以外の国との協力については、とりわけ再処理技術は、核不拡散等、国際的課題と関係すること等を踏まえ、実施方法(相手国の選定を含む)、実施内容を検討して進めることとする。