

新型炉及び核燃料サイクルの技術開発の方向性

(3) 核燃料サイクル技術開発の現状

(国) 日本原子力研究開発機構

竹内 正行

- 昨年から革新炉ワーキンググループ（座長：黒崎先生）を中心に、我が国の炉型開発に係る道筋をつけるための議論が活発に進められ、革新炉開発の技術ロードマップが示された。
- 昨年12月の政府によるGX実行会議において、GX実現に向けた基本方針（案）～今後10年を見据えたロードマップ～が示され、脱炭素社会の実現に向けた基本方針がまとめられた。この中では、安全保障に寄与し、脱炭素効果の高い電源を最大限活用するとし、原子力に関しては、安全性の確保を大前提に、次世代革新炉の開発・建設に取り組むことが明記された。
- 同時期に戦略ロードマップが改訂され、2024年以降の開発の在り方について具体的な開発マイルストーンの設定並びに関係者の役割がより明確化された。



燃料サイクル技術開発はFaCT凍結以降、技術維持レベルの開発を進めている状況であるが、新型炉開発及び実用化に向けた議論が活発に進められており、これに連動して必要となる燃料サイクル技術についても実用化に向けた研究開発を今後加速していく必要がある。

改訂された戦略ロードマップでは、以下の今後の開発作業計画が示されている。

- 2023年度夏：2024年度以降の概念設計の対象となる炉概念の仕様と中核企業を選定
- 2024年度～2028年度頃：実証炉の概念設計・必要な技術開発

この期間の中では、**2026年度頃を目途に**研究開発成果・国際協力を通じて知見を得つつ、これらを踏まえて**燃料技術の具体的な検討**を行うとしている。

- 2028年度頃：炉の概念設計の結果と制度整備の状況等を踏まえたステップ3への移行の判断

関係者間での体制構築に向けた認識の共通化に加え、社会から当該技術が受容されるための説明責任を果たし、立地対策や規制対応についても具体的な対応の検討が必要であるとともに、適切な事業運営体制が構築されることが必要

燃料サイクル技術開発に係る原子力機構の役割

- サイクル技術は研究開発のために大量のプルトニウムを扱い、ホット試験が必要となる等、民間が主体的に開発を進めるにはハードルが高いことから、当面は軽水炉サイクルとの共通技術を含めて、原子力機構がステークホルダーとの連携を図りつつ、開発の中心的役割を果たす必要がある。
- 原子力機構及び民間が研究開発を実施していくためには、原子力機構が有する、常陽、ナトリウム試験施設、ホット試験施設等のハード、及び、解析評価技術や規格基準類の基礎データといったソフトの開発基盤を、必要な時期に利用可能とする維持・整備を行うことも原子力機構の役割である。また、原子力分野の人材育成についても、大学等とともに担う必要がある。

2022年9月26日 第19回高速炉開発会議 戦略ワーキンググループ 資料1「戦略ロードマップ改訂案」一部抜粋



原子力機構が所有する高速炉燃料サイクル開発に必要な主要施設

MOX燃料製造分野における主な開発対象

脱硝・造粒・転換一元処理 (FaCT)

再処理側から受入れた原料溶液から富化度調整済の流動性の良いMOX粉末を製造する技術

ダイ潤滑成型 (FaCT)

金型壁面に潤滑剤を噴霧塗布することにより、潤滑剤を混合することなく、MOX粉を直接成型する技術

焼結・O/M調整 (FaCT)

熱処理により、MOXペレットのO/Mを1.97以下に調整し、高燃焼度時の被覆管内面腐食を抑制する技術

セル内遠隔保守 (FaCT)

セル内のMOX燃料製造設備を、マニプレーター等を用いて遠隔で保守・補修する技術

MA燃料取扱 (FaCT)

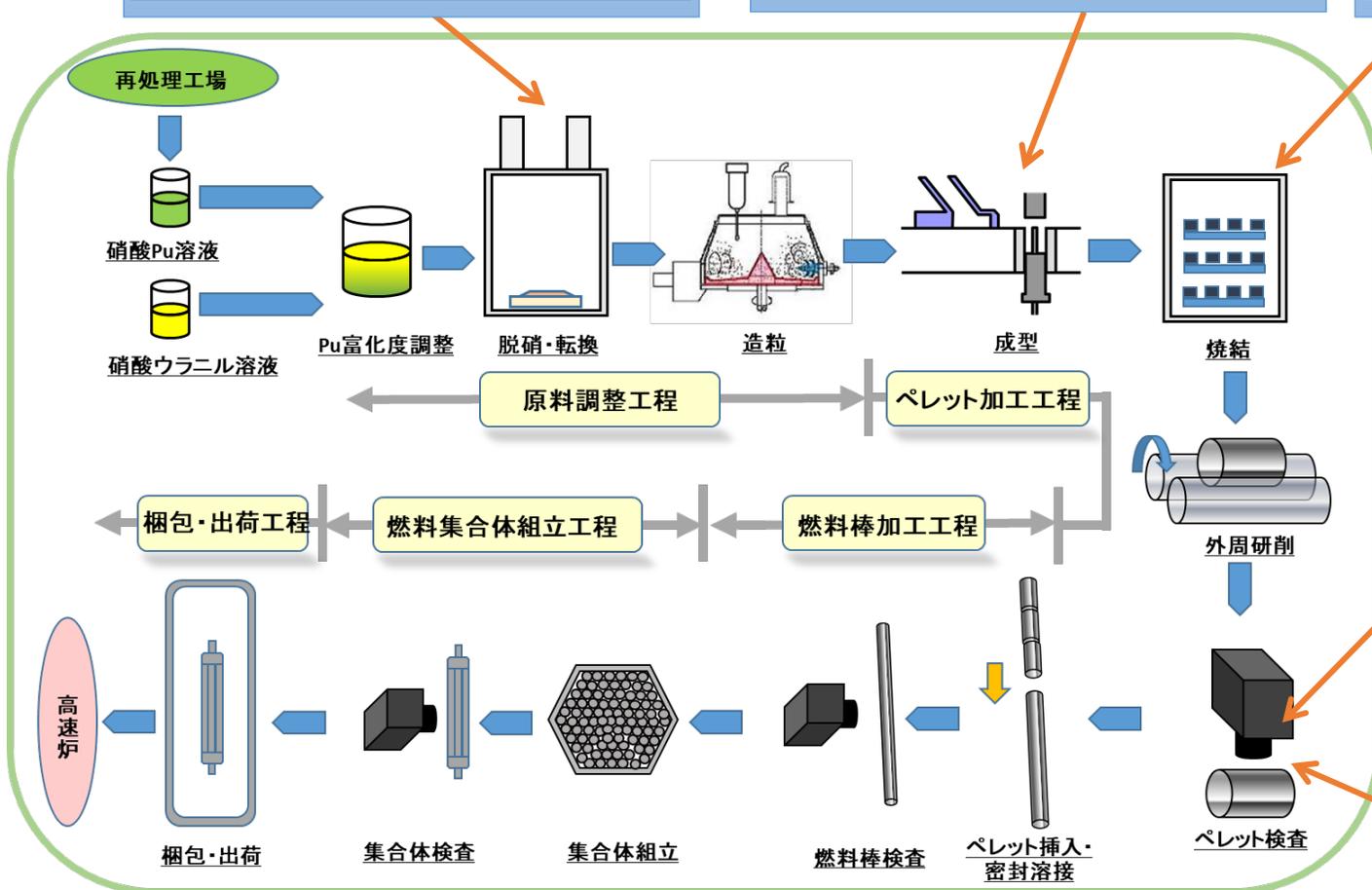
発熱の大きいMA含有MOX燃料を制限温度以下に冷却する技術

乾式リサイクル

ペレット検査で不合格となったペレットを粉砕し、原料粉末として再生する技術

中空ペレット検査

製品ペレットの検査（寸法、重量、外観等）を行う技術。中空ペレットの内径検査技術の開発が課題



MOX燃料製造技術のベースは構築されているが、更なる高度化に向けた開発を進めている

MOX燃料再処理分野における主な開発対象

清澄

燃料溶解で発生する固体状の残渣を分離回収する技術



コプロセッシング法

従来の溶媒抽出技術を改良したU-Pu共回収プロセス技術

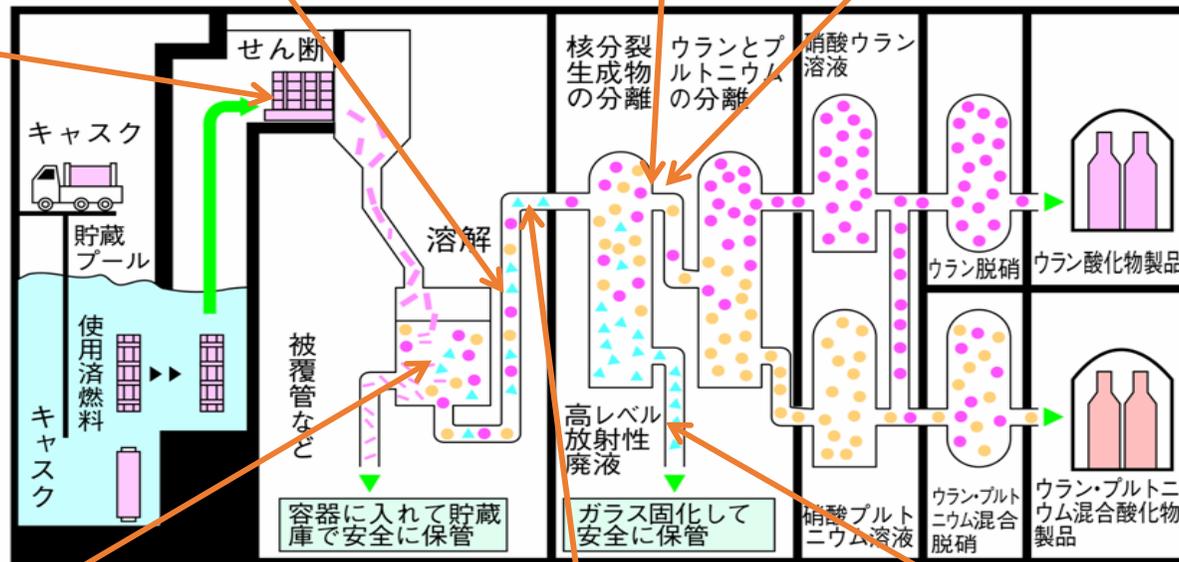
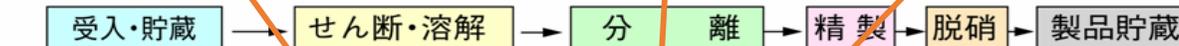
抽出機器 (FaCT)

小型で高性能を有する遠心抽出器の開発



解体・せん断 (FaCT)

燃料ピン束を収納するラッパ管を解体し、内部の燃料ピンをせん断するシステム技術



● 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

廃棄物低減化 (FaCT)

濃縮操作により、全体の放射性廃液を極低レベルと高レベルに分ける技術

溶解 (FaCT)

Pu含有量の高い高速炉燃料の溶解技術



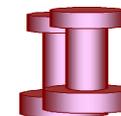
晶析 (FaCT)

冷却操作で燃料溶解液からUの大半を粗分離する技術



MA回収 (FaCT)

高レベル放射性廃液からマイナーアクチニド(MA)を分離回収する技術



技術開発の相対的なレベル	TRL	TRLの定義
システムの運転段階	TRL 9	想定される全ての条件で運転された実システム
システムの試運転段階	TRL 8	試験と実証を通じて完成し性能確認された実システム
	TRL 7	フルスケールで、同様な（原型的な）システムを、現実的な環境において実証しているレベル
技術の実証段階	TRL 6	工学規模で、同様な（原型的な）システムを、現実的な環境において検証しているレベル
技術の開発段階	TRL 5	実験室規模で、同様なシステムを、現実的な環境において検証しているレベル
	TRL 4	実験室環境で、機器・サブシステムを検証しているレベル
実現可能性を示すための研究段階	TRL 3	解析や実験によって、概念の重要な機能・特性を証明しているレベル
	TRL 2	技術概念・その適用性を確認しているレベル
基礎技術の研究段階	TRL 1	基本原理を確認しているレベル

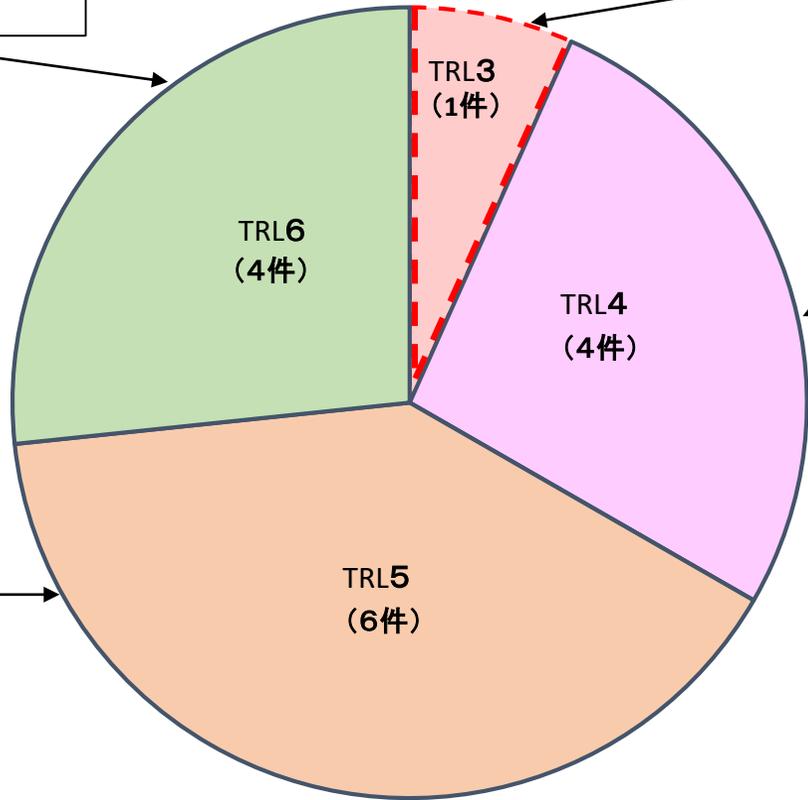
- : FaCTでの課題
- : FaCT以降で開発対象とした革新技術課題

- 溶液段階でのPu富化度調整技術
- 太径中空ペレット製造技術
- 太径中空ペレット製造技術（ロール解砕式造粒技術）
- 太径中空ペレット焼結技術

○ 焼結体外径制御技術
 ⇒ 本技術は、2018年度以降の試験・評価を踏まえ必須となる開発対象技術からは外す

- 脱硝・転換・造粒一元処理技術（転動造粒（プロセス））
- 脱硝・転換・造粒一元処理技術（転動造粒（量産））
- ダイ潤滑成型技術
- 焼結・O/M調整技術（プロセス技術）
- 焼結・O/M調整技術（量産技術）
- MA燃料取扱技術

- 焼結・O/M調整技術（量産技術）
- セル内遠隔設備技術
- 中空ペレット内径検査技術
- 乾式粉末リサイクル技術



燃料製造技術開発に係る現時点のTRL評価値集計(15課題)

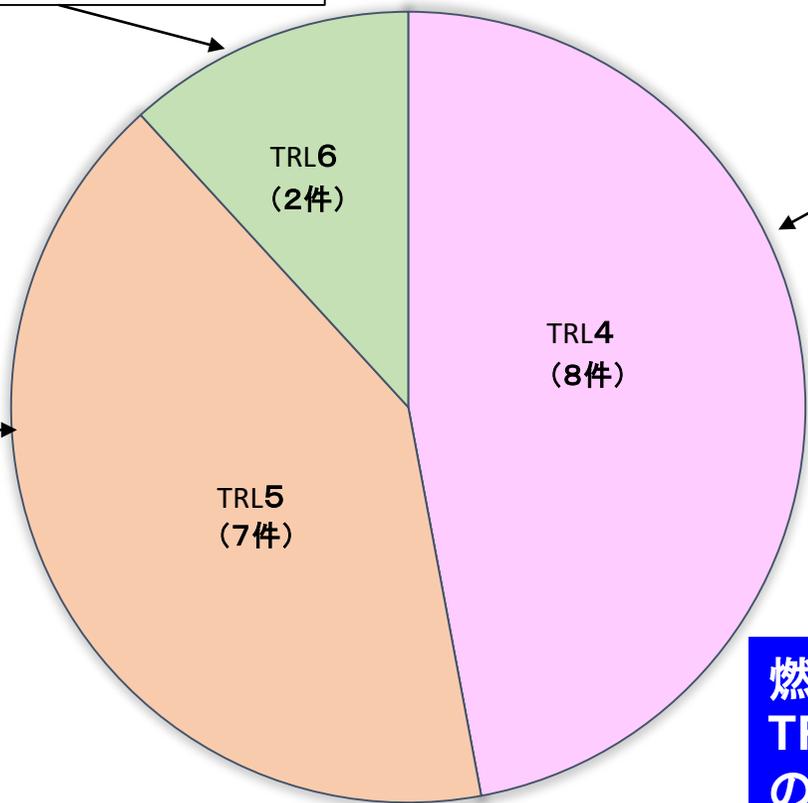
●: FaCTでの課題

○: FaCT以降で開発対象とした革新技術課題

- 解体・せん断技術開発(FR燃料集合体解体機)
- 解体・せん断技術開発(FR燃料集合体せん断機)

- 晶析プロセス
- 抽出クロマト法によるMA回収技術(プロセス技術)
- 抽出クロマト法によるMA回収技術(MAクロマト分離装置)
- 溶媒洗浄ソルトフリープロセス
- ソルトフリー洗浄廃液電解槽
- コプロセッシング(共除染部)
- 高性能清澄システム
- 抽出プロセスシミュレーション技術

- 高効率溶解技術開発(プロセス開発)
- 高効率溶解技術開発(溶解機器開発)
- 晶析技術による効率的ウラン回収技術
- U-Pu-Npを一括回収する高効率抽出システムの開発(回収プロセスの開発)
- U-Pu-Npを一括回収する高効率抽出システムの開発(遠心抽出機の開発)
- コプロセッシング(分配部)
- 溶解プロセスシミュレーション技術開発



燃料技術、再処理技術ともにTRL値の相対的に低い技術の底上げが必要

再処理技術開発に係る現時点のTRL評価値集計(17課題)

焼結・O/M比調整技術開発

- 小規模試験では目標値（焼結密度95%、O/M比1.97）を達成したが、工学規模試験では未達
- 量産に適したO/M比調整炉の設計検討等が必要

中空ペレット検査技術開発

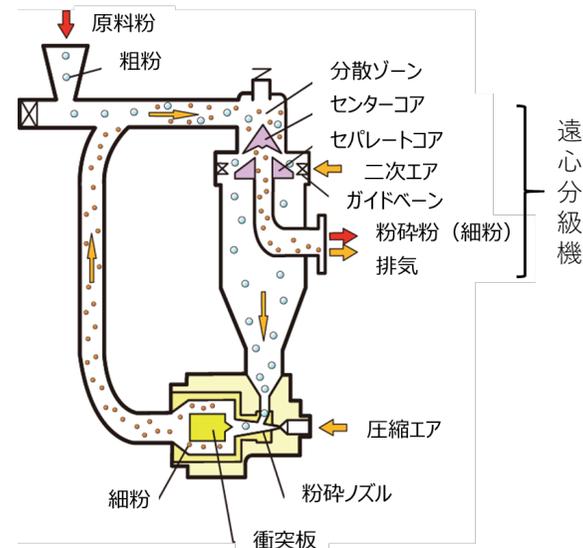
- ペレット内径測定、内表面（割れ、異物の有無等）の検査手法の調査、選定、コールド試験等による原理確認、既存検査装置へ適用するための設計検討が必要

乾式リサイクル技術開発

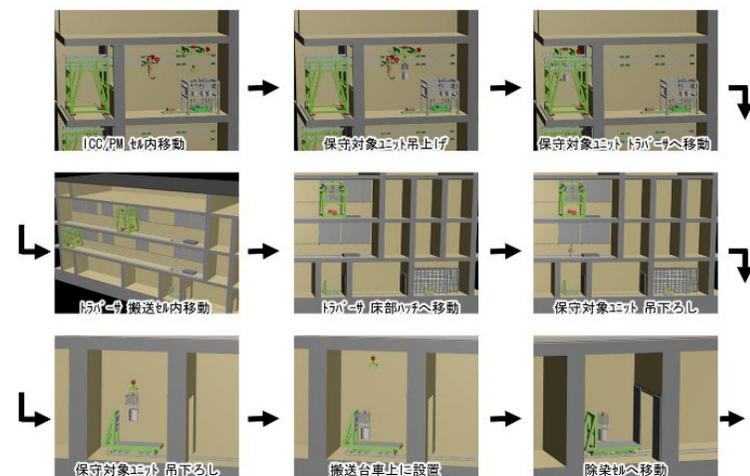
- 設備を構成する要素機器の開発段階であり、機種選定のための試験データ取得、乾式リサイクル設備の設計検討が必要

セル内遠隔保守技術開発

- AGFのセル内に設置した燃料製造設備を用いた技術開発により、基本的なセル内遠隔製造技術を確立。セル内遠隔製造設備のモックアップ試験を部分的に実施
- 遠隔保守シミュレーション、粉末付着・滞留防止技術、除染セルにおける除染技術、メンテナンスグローブボックス（セル）内における保守・補修手順の検討、デジタルツインの適用検討等が必要



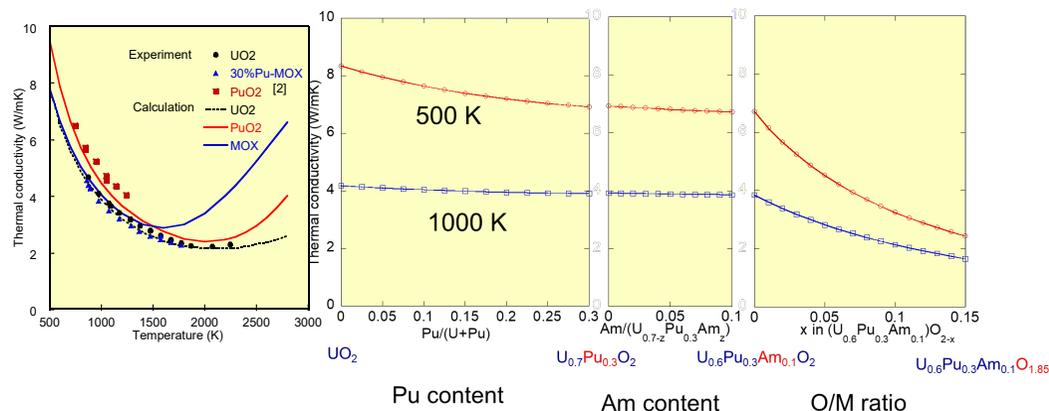
乾式リサイクル設備の気流粉碎機の概略図



設備の遠隔保守シミュレーションの一例

MA含有燃料の物性研究

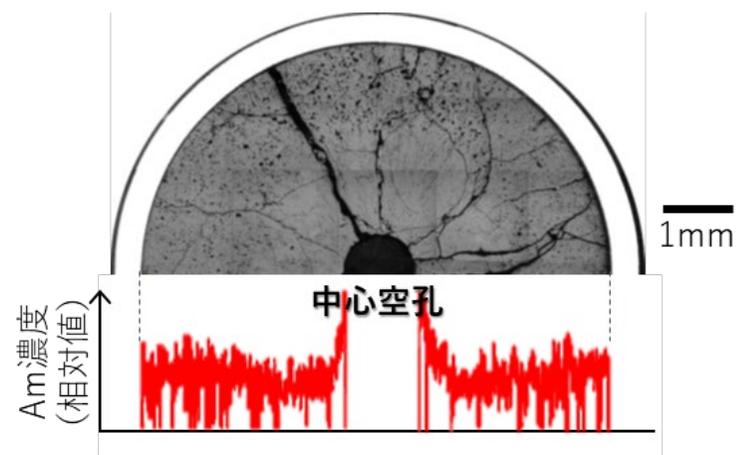
- 取得した酸化物燃料の基礎特性データに基づき、外挿性のある機構論モデルを導出。Pu、MA、O/M比、温度、密度をパラメータとした熱伝導率等の基礎物性の評価が可能
- 2000~3000Kの熱物性の信頼性向上、燃焼度効果、照射挙動モデルの開発が課題



MA含有MOX燃料の熱伝導率評価

MA含有燃料の照射特性評価、健全性実証

- MA含有燃料（Am含有率5%）を製造し、常陽で短期照射試験を実施。MA再分布挙動データ等を取得
- 定常照射試験（SmARTサイクル研究を含む）により、MA含有燃料の照射特性評価、健全性実証が必要（常陽運転再開後）



MA含有MOX燃料のAm再分布挙動
(5%Am含有MOX燃料、24時間照射)

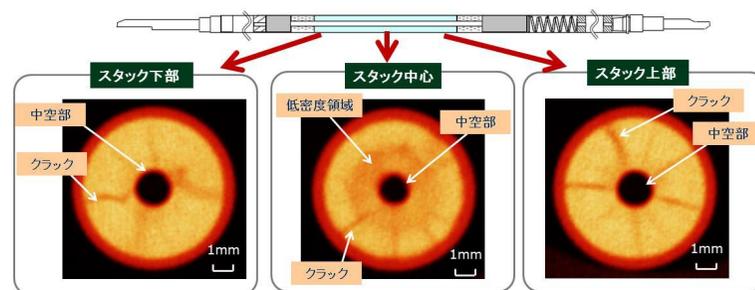
太径中空燃料の性能実証

- 常陽、英PFR、米EBR-II等で照射実績あり（ピン径8.5mmまで）
- 次期炉で想定される燃料仕様（例：ピン径10.4mm）の燃料ピン・燃料集合体照射試験による照射健全性確認、性能実証が必要（常陽運転再開後）

長寿命炉心材料の開発

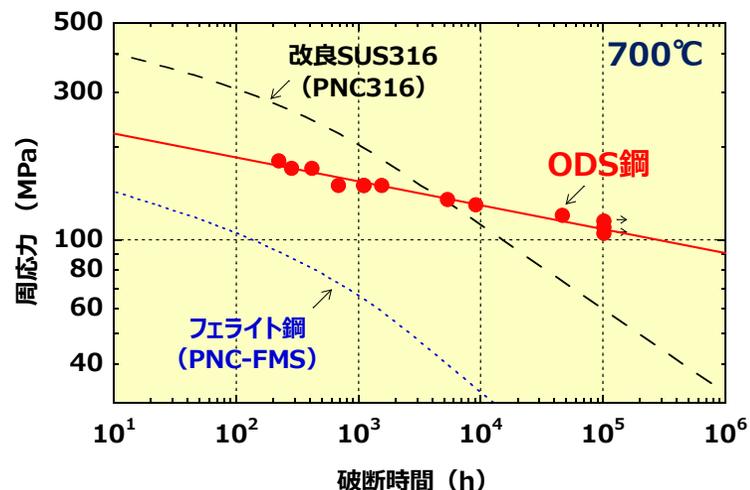
- 世界に先駆けてODS鋼被覆管の製造に成功し、現在は量産技術開発を実施中。高温強度データ取得を着実に進め、世界最高レベルのクリープ強度を長時間維持することを実証
- 量産技術開発、基準類の整備に向けた強度データ取得を継続するとともに、材料照射試験、燃料ピン・燃料集合体照射試験による照射データ取得、性能実証が必要（常陽運転再開後）

燃料被覆管をはじめとする炉心材料や照射装置部材等の
サプライチェーンの再構築が不可欠



「常陽」における太径中空燃料の照射挙動データの取得例

（太径中空燃料の照射後のX線CT結果）



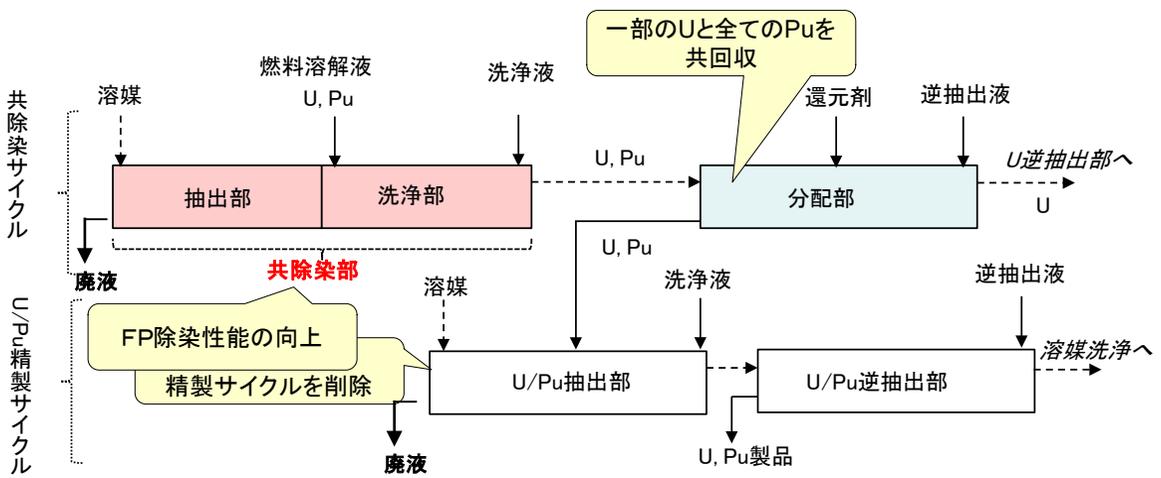
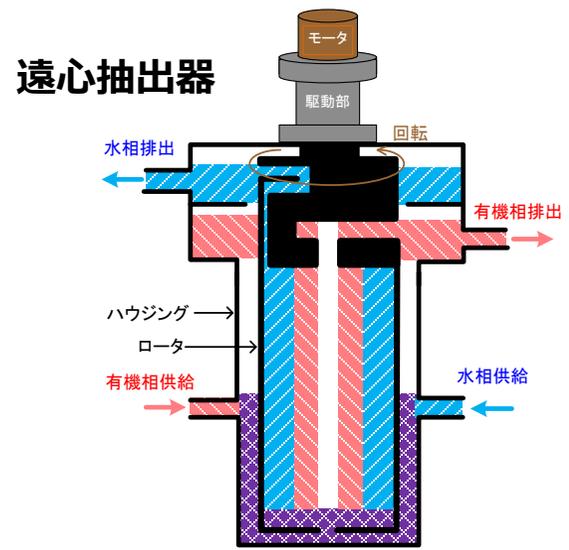
ODS鋼被覆管のクリープ強度

〔 実用炉で想定される使用期間約9年を大きく上回る
10万時間超でも優れたクリープ強度を維持 〕

MOX燃料再処理技術開発の状況

—コプロセッシング法(U,Pu共回収法)の開発—

- ✓ 従来のPUREX法とは異なり、抽出工程内でPuが単独で分離されないように制御した抽出プロセスの構築が**核拡散抵抗性向上**の観点から重要
- ✓ 共除染部でのFP除染性能を向上させることで、従来プロセスに設置される**精製サイクルを削除可能**⇒**経済性の向上、廃液発生量の低減**
- ✓ PUREX法の改良プロセスであり、技術的ハードルが高くない
- ✓ これまでにU,Pu溶液系での抽出データの取得やシミュレーション計算による抽出フローシートの具体化により、本法の性能見通しを得ており、抽出機器についても遠心抽出器により、本法で求められる溶液流量条件で良好な相分離処理が可能との結果を得ている。



コプロセッシング法確立に向けた改良の狙い

【装置原理】

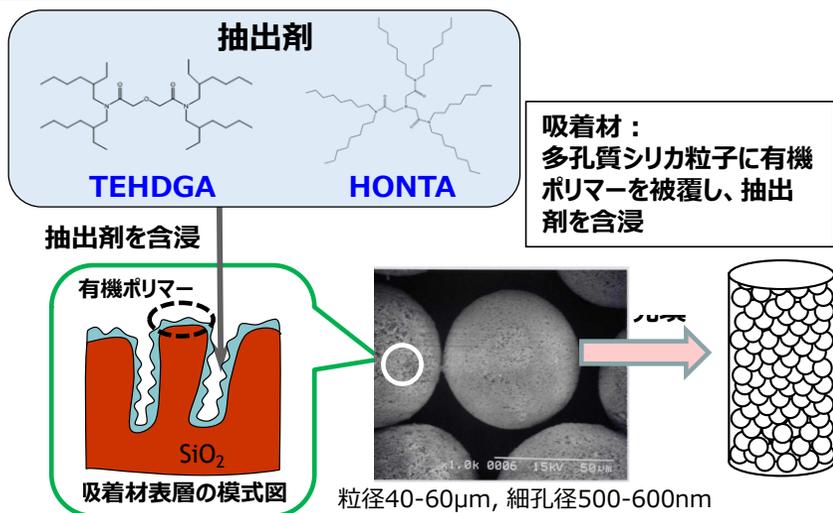
ロータの回転により水溶液と溶媒を激しく混合し、相分離を遠心力下で行う

【主な特徴】

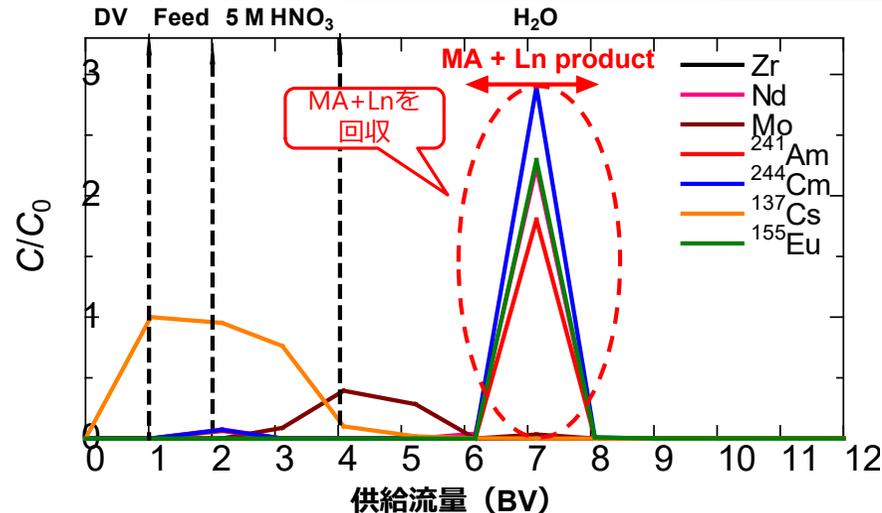
- ✓ 小型でコンパクトなシステム構成が可能
- ✓ 液のホールドアップ量が少なく、抽出・分離時間が短い
- ✓ 起動・停止時間が短い
- ✓ 臨界安全設計が容易

【主要課題】

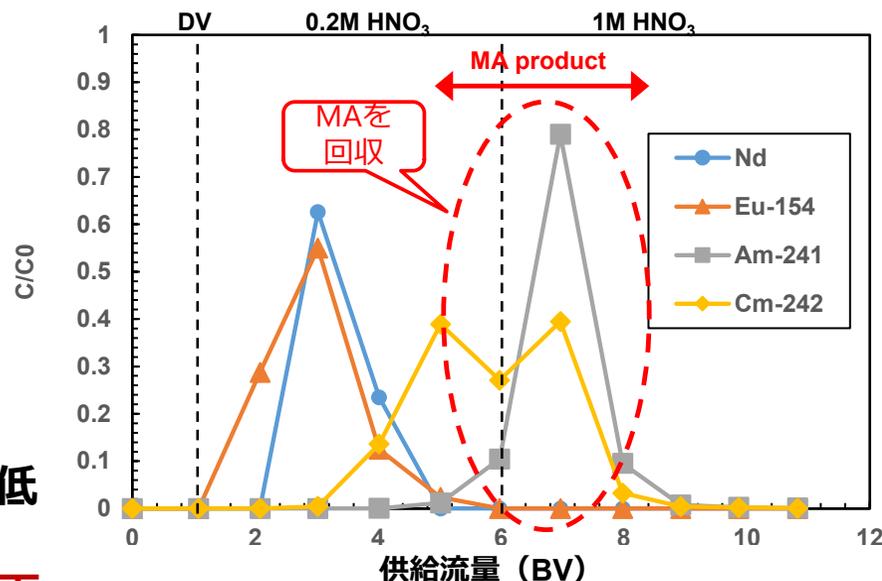
遠心抽出器を利用した共除染部、分配部のホット性能実証→既存のホット再処理研究施設で評価を計画



吸着材の基本構造



高レベル放射性廃液からのMA + Ln共回収結果の例



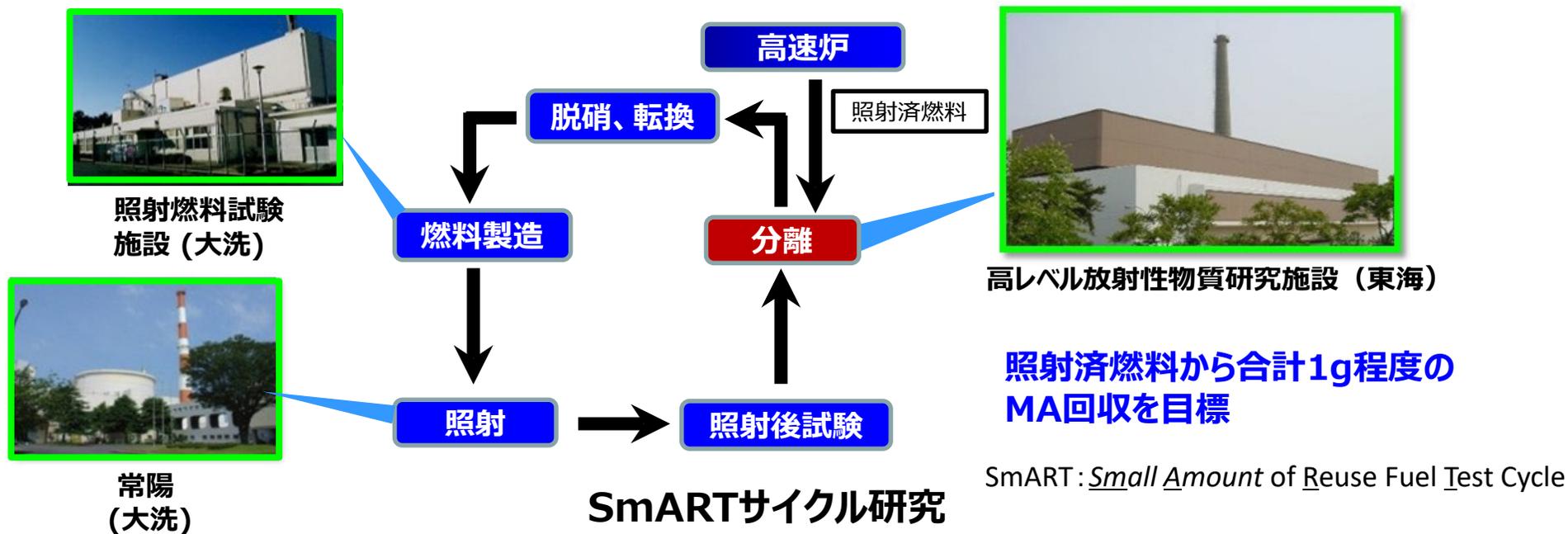
MA + Ln共回収溶液からのMA分離結果の例

- 放射性廃棄物の減容化・有害度低減を実現する上で、**長寿命核種や発熱性核種を有するMAの分離技術が必要不可欠**
- 第1段階 (MA + Ln共回収：抽出剤 TEHDGA)、第2段階 (MA/Ln分離：抽出剤 HONTA) によるフローシートを検討
- 第1段階では、**Cs、Mo等のFP元素に対して100以上の除染係数**を有するMA+Ln中間製品を回収できること、第2段階では**MAのみを95%以上回収**できることを確認

【主要課題】

- ✓ MA分離回収率、除染性能の更なる向上、廃液発生量の低減、機器システムの信頼性、安全性向上
- **既存のホット研究施設やコールド工学試験施設で評価を計画**

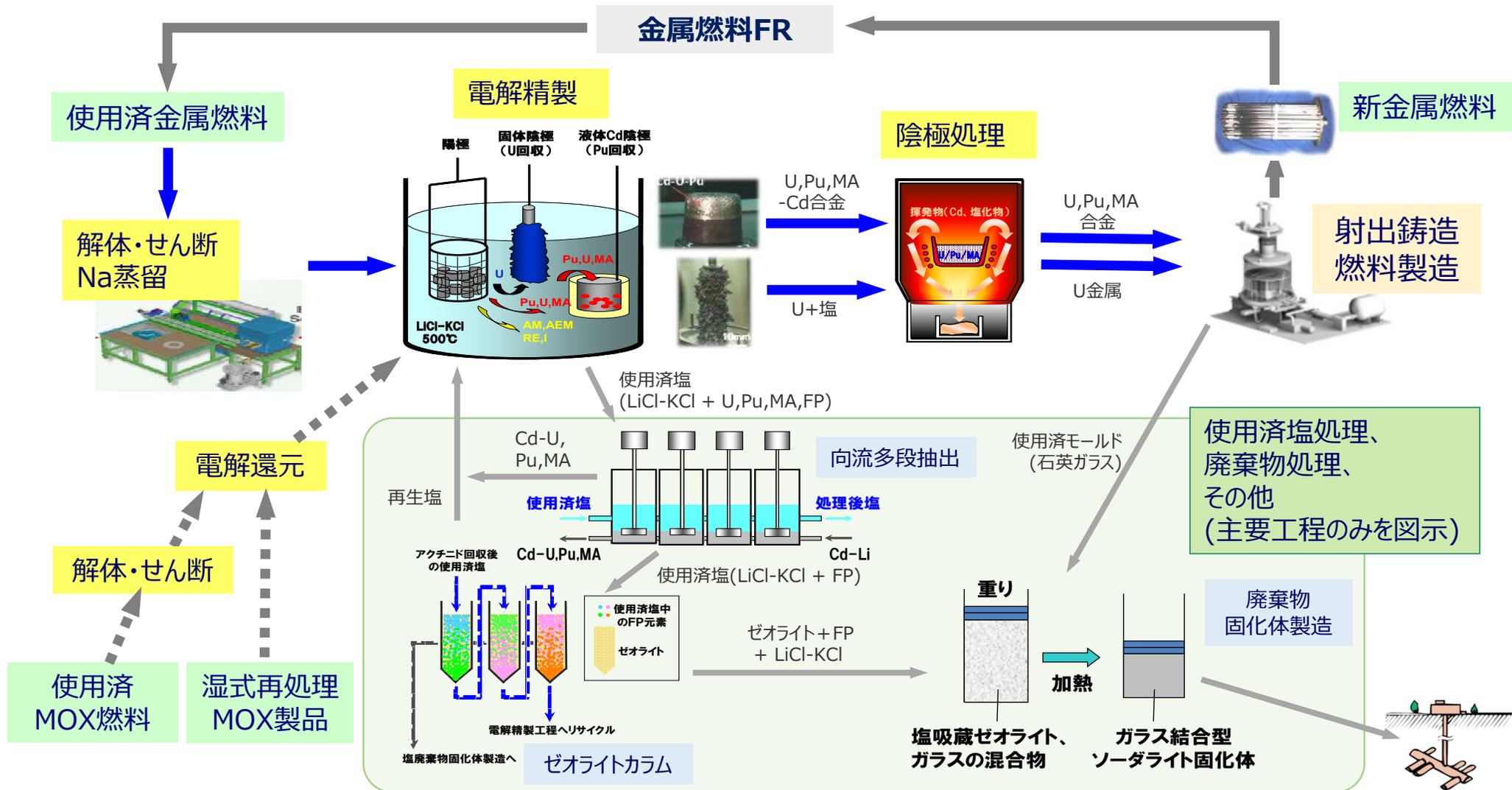
放射性廃棄物の減容化・有害度低減の観点から、照射済燃料中の少量MAを出発原料とした高速炉利用による一連のサイクル試験（SmART研究）計画を推進



【本研究の狙い】

炉・燃料・再処理のJAEA施設を最大限に活用しつつ、MAを中心とした分離変換データを取得し、サイクル成立性の小規模実証を行う

(照射済燃料中のMA核種に係る照射変換挙動データは世界的にも貴重な知見であり、高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減の実現に貢献)



○ 製造技術開発

- 常陽での金属燃料ピン照射試験用に、射出鋳造技術によるU-Pu-Zr燃料スラグの製造、小規模Naボンディング装置を用いた燃料ピン組立の実績あり（JAEA大洗研燃料研究棟（廃止措置施設））
- U-Zr合金の工学規模の射出鋳造試験の実績あり
- 工学規模での射出鋳造技術等の実証試験、MA含有を考慮した成立性確認試験の実施が必要



燃料研究棟に整備した
Arガス雰囲気グローブボックス

○ 照射特性評価、健全性実証

- 米EBR-II等で照射実績が蓄積されてきたが国内での照射実績はなし
- 製造した金属燃料ピンの照射試験による照射健全性確認、性能実証が必要（常陽運転再開後）



(U-20Pu-10Zr燃料スラグ)



製造した金属燃料スラグと金属燃料ピン

重点課題（廃棄物処理技術、電解還元技術）に関して米国と研究協力を実施

● 参加機関

- 日本： 原子力機構、電力中央研究所
- 米国： 米国エネルギー省 (DOE)
アイダホ国立研究所 (INL)
アルゴンヌ国立研究所 (ANL)

● 期間

2018年9月に5年間の取決めとしてPA-NE-09を締結し、研究協力を実施中

● 協力項目

廃棄物処理技術開発

- Task-1： セラミック廃棄物固化体
- Task-2： 金属廃棄物固化体
- Task-3： 前処理操作(DOE側のみ実施)

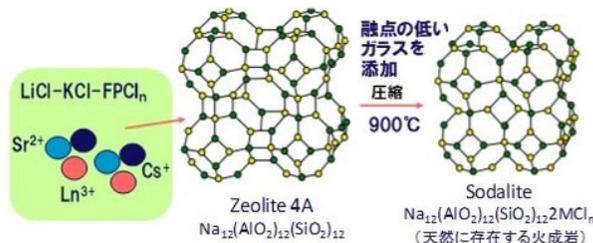
電解還元技術開発

- Task-1： 酸化物燃料の電解還元における核分裂生成物とジルコニウムの挙動評価
- Task-2： 陽極材料
- Task-3： 装置設計

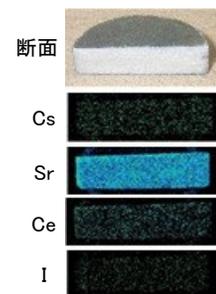
● 実施内容

【廃棄物処理技術開発】

高レベル廃棄物（セラミック固化体）への廃棄物元素の充填量増大方策や安定な金属廃棄物固化体製造のための研究開発を実施



FPを吸着したゼオライトにガラス基材を加え、高温高圧でセラミック固化体化（ソーダライト）する技術→廃棄物元素含有率向上に資するため、アルカリ金属等の吸着、固化挙動評価を実施



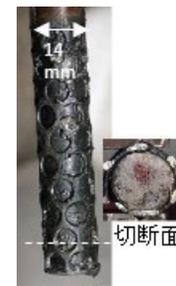
作製したセラミック固化体試料断面と元素分布(R3)



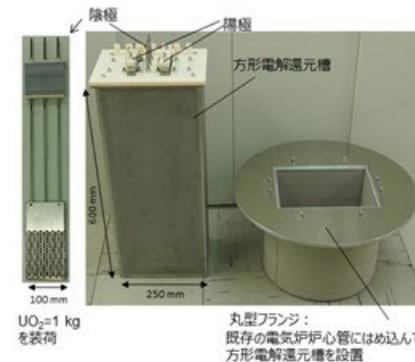
米国INLのホットセル内の実金属廃棄物固化装置（直径約1.2m）

【電解還元技術開発】

- 様々な組成の使用済燃料の還元処理を検討するため、電解還元時のFP、アクチニド、Zr等の元素挙動を評価
- 工学規模の電解還元処理装置を開発
- CPFではU,Pu,Am,模擬FPを用いた小規模試験を実施



電解還元後の陰極と切断面の例(R3)



試作した工学規模電解還元装置の電極部 (R2)

- 燃料サイクル技術開発については現状、基盤研究を進めている状況であるが、GX実現に向けた動きとともに、技術の実用化に係る議論が活発化している。以上の状況をふまえ、実用化開発計画の具体化、技術開発体制の再構築が極めて重要である。
- 酸化物燃料サイクル技術の現状の技術成熟度はおおむねTRL=4～6に位置付けられ、技術全体の実用見通しをより早期に見極めるためには、TRLの低い技術に比重を置いた技術開発が必要である。
- 金属燃料サイクル技術に関しても、電力中央研究所とともに基礎・基盤研究を進めているが、実用性の見通しを得るためには、国内での技術開発だけでなく、米国での技術実証データの反映が必要である。
- 国内で技術の実用化を図るためには、TRL=7に到達させることが必要であり、そのためにはホット工学実証を実現するための施設整備が必要である。

当面の計画としては、戦略ロードマップ改訂版に明記された2026年頃を目途とした燃料検討を着実に進めるための酸化物・金属燃料サイクルの技術評価を中心に進めていく。