

資料5
第2回FaCT評価委員会
平成22年12月16日



金属燃料サイクルの研究開発 進捗状況

2010年12月16日

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
電力中央研究所 次世代サイクル領域

「金属燃料サイクル」の開発意義

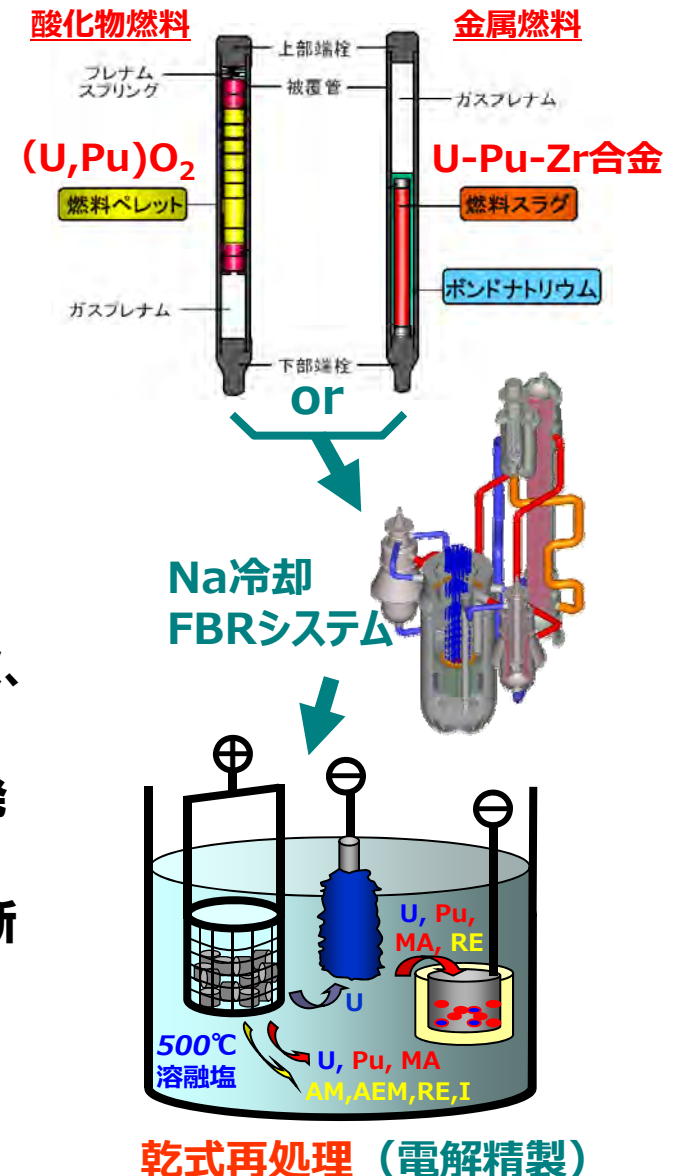
金属燃料サイクルの特長

- 高増殖率あるいはPu装荷量削減による柔軟なPu需要調整が可能
 - 小規模な燃料サイクル施設でも経済性を確保可能
- ➡ 将来の社会環境に柔軟に適合する可能性

海外の開発状況

- 米国: 核拡散抵抗性に着目して開発を継続、金属燃料照射試験・照射済金属燃料を用いた工学規模の乾式再処理・廃棄物固化体製造試験などを実施中
- 韓国: 高い増殖率・核拡散抵抗性に着目して、金属燃料照射試験、Uを用いた基礎試験、工学規模機器開発などを実施中
- インド・中国: 高い増殖率に着目して、金属燃料サイクルの研究開発を指向、早期実用化を検討中
- ➡ 海外で早期に実用化され、将来、国内実用化に着手の判断がなされる可能性

リスク分散の観点から、国内技術を蓄積・維持し、実用化を視野に入れた研究開発を進めておく必要



副概念とは？

「金属燃料ナトリウム冷却高速増殖炉＋金属電解法再処理＋射出鑄造法燃料製造」で構成される概念(通称;金属燃料サイクル)であり、実用化戦略調査研究(FS)の結果を受けた国の評価によりFBRサイクル実用化候補の「副概念」に選定された。

開発経緯

FSで抽出された以下の課題に対して、電中研中心に研究開発を展開

▶ 炉心燃料

- ◎ **金属燃料ピンの照射試験**； ・PhenixにおけるMA含有金属燃料ピン照射試験
・国内での金属燃料ピン製造＋常陽での照射(準備)
- ◎ **金属燃料炉心の特長を生かす炉心設計**； ・高増殖率炉心、低ボイド反応度炉心等

▶ 燃料サイクル

- ◎ **主要工程機器開発**； 乾式再処理工程フローシート評価、工学規模機器の成立性
- ◎ **高レベル廃棄物(HLW)発生量の低減**； セオライト技術の高度化、他の塩処理法の開発
- ◎ **保障措置・計量管理技術**； 計量技術の原理確認試験、新たな保障措置概念の検討

金属燃料ピンの照射試験

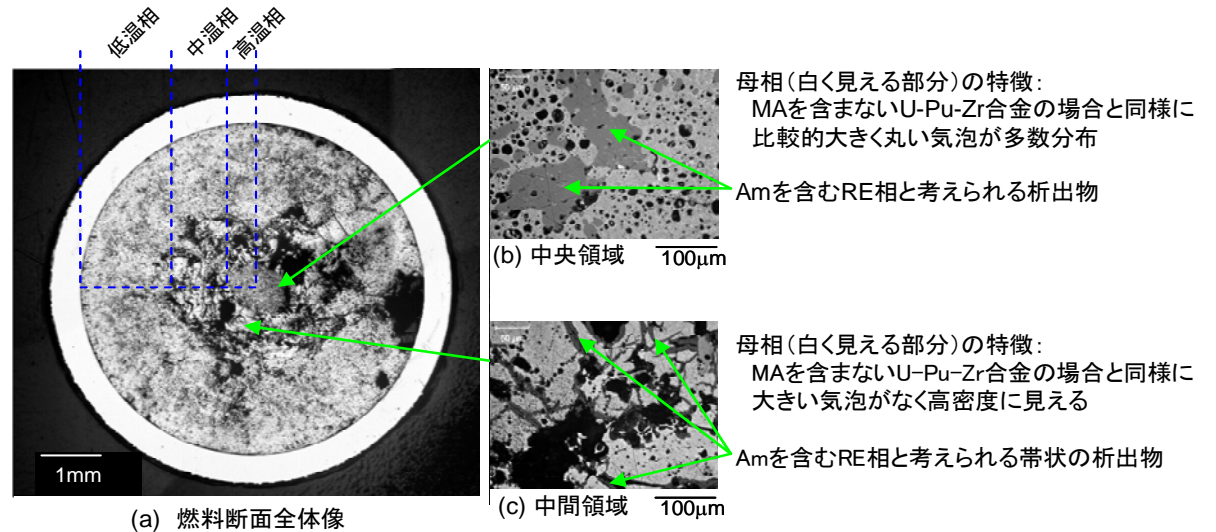
FaCTフェーズI 期における成果

☀ 金属燃料ピンの照射試験により燃料の照射挙動を評価し、健全性を確認

▶ MA含有金属燃料の照射試験

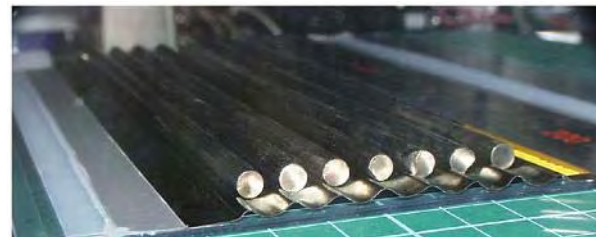
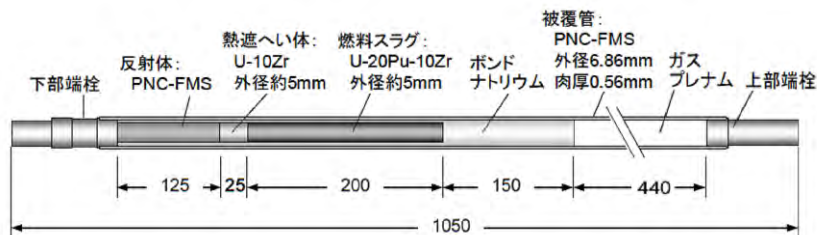
最大で5%のマイナーアクチノイド(MA)及び希土類元素(RE)を添加したU-Pu-Zr合金燃料をフェニックス炉で照射し、燃料破損等の異常を生じることなく、**最大10at%の燃焼度**を達成した

スエリング等の照射挙動が顕著に現れる燃焼度2.5at%まで照射した燃料ピンの照射後試験の結果、核分裂生成ガスの放出率、燃料合金の変形や母相の組織構造などはMAを含まないU-Pu-Zr合金と同等であることが明らかとなった



▶ 金属燃料「常陽」照射試験の準備

被覆管最高温度600℃以上における健全性確認を目的とした「常陽」照射試験を計画、燃料製造技術を開発するとともに、試験燃料ピンを設計した。設工認を受けて、**U-20wt%Pu-10wt%Zr合金燃料スラグ**を射出鑄造法により製造、試験燃料ピン6本の組立を完了した。



U-20%Pu-10%Zr合金スラグ



金属燃料製造試験設備
(大洗燃研棟)

FaCTフェーズI期における成果

☀ 金属燃料炉心の特長を生かすための高性能炉心設計を実施

▶ 反応度係数の改善

◎ 低ボイド反応度炉心の設計

FSのフェーズIIで構築したナトリウム冷却大型金属燃料高出口温度型炉心をベースとして、燃料ピン径や内外炉心集合体数等をパラメータとした炉心特性解析を行い、ナトリウムボイド反応度を大幅に低減した炉心の成立性を確認した。

項目		FSフェーズII炉心	低ボイド反応度炉心
炉心仕様	出力 [MWt]	3530	←
	炉心高さ [cm]	95	75
	燃料ピン径 (ワイヤ径) [mm]	7.2 (1.26)	8.5 (1.00)
	Zr含有率 [内/外炉心, %]	10.0/6.0	←
	燃料集合体数 [内/外炉心]	297/348	150/495
炉心特性	Pu富化度* [%]	13.1	12.2
	燃焼反応度 [%Δk/k k']	1.3	0.7
	燃焼度 [GWd/t]	98.2	96.6
	増殖比 [-]	1.0	1.0
	冷却材ボイド反応度 [\$]	8.5	6.2

▶ 高性能炉心の検討

◎ 従来の魅力を上回る炉心の設計

上記の低ボイド反応度炉心(高冷却材炉心出口温度、ブランケットなし)をベースに、金属燃料仕様の制限を緩和した場合を想定して、従来の魅力(高増殖あるは低Pu装荷量など)を上回る炉心概念を検討した。その結果、

- ・ブランケットなしで増殖比1.3を達成する炉心、
 - ・炉内Pu装荷量を従来(4.7t/GWe)の約2/3に低減できる炉心
- など種々の炉心概念が得られた。

項目		高増殖炉心	低Pu装荷量炉心
炉心仕様	出力 [MWt]	3530	←
	炉心高さ [cm]	150	92
	燃料ピン径 (ワイヤ径) [mm]	8.5 (1.00)	8.0 (1.45)
	Zr含有率 [内/外炉心, %]	6.0/6.0	←
	燃料集合体数 [内/外炉心]	240/525	168/195
炉心特性	Pu富化度* [%]	7.4/8.3	10.5/14.5
	初装荷Pu-f重量 [t/GWe]	7.6	3.1
	増殖比 [-]	1.3	1.0
	ボイド反応度 [\$]	8.0	7.9
	バンドル部圧損 [MPa]	0.4	0.4

*: 高速炉多重リサイクルTRUを装荷

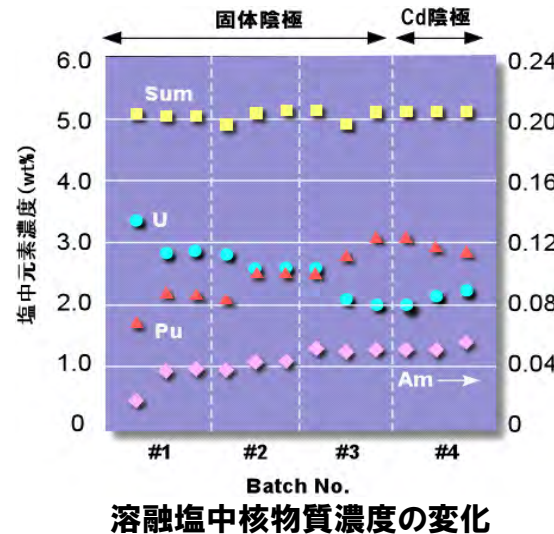
FaCTフェーズI 期における成果

▶ 一連のプロセス連続試験

酸化物燃料から、Uの95%、Puの100%を合金として回収出来ることを確認した。さらに、U-Pu-Zr金属燃料を陽極溶解し、U,Puを陰極回収する電解条件の最適化を行った。

Uが酸素ゲッターとして作用し、Puの物質収支がほぼ100%となる傾向が確認された。また生成したU酸化物(ドロス)の回収手法を確立した。

- ☀ 未照射MOXペレットを出発物質とし、還元～電解～蒸留までの一連のプロセス成立性を確認、物質収支を評価
- ☀ 陽極溶解や液体Cd陰極等の個々の工程の性能を評価



▶ 照射燃料を用いた小規模乾式プロセス試験

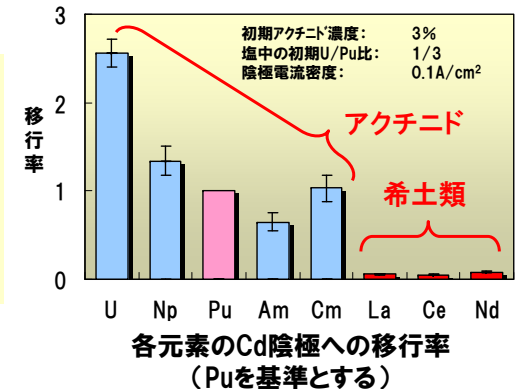
遠隔対応の小型乾式再処理装置を製作し、Ar雰囲気ホットセル内にて商用軽水炉照射済MOX燃料から電解還元と電解精製でU,Pu,MAを回収することに成功した。

また、切断したPhenix照射MA含有金属燃料を対象とした電解精製試験を開始した。



▶ Cd陰極の性能評価試験

U,Pu,MA (Np,Am,Cm) を含む溶融塩からPu+MA(Np,Am,Cm)を一括回収できることを確認。また、溶融塩中の希土類のCd陰極への移行率は小さくアクチニドと分離できることが示された



主要工程機器開発(工学規模機器の成立性)

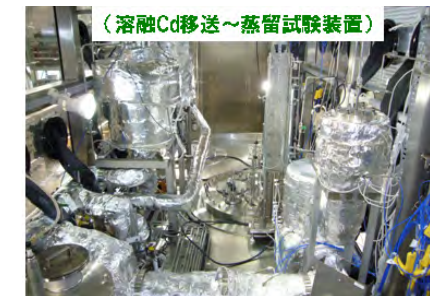
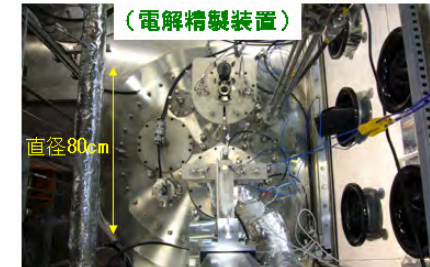
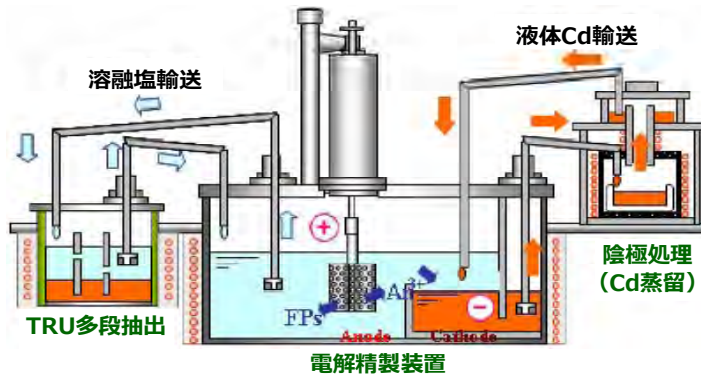
FaCTフェーズI 期における成果

▶ 工学規模装置と高温融体 移送システムの評価

融液移送型処理概念について、実機の約1/4スケールでのプロセス処理速度(電解速度、輸送速度、蒸留速度)を測定し、設計に反映できる知見を取得

☀ 主要工程の工学規模装置を試作し、成立性及び機器性能を評価

陰極に回収したGd (Puと物性が近い) (熔融Cd-Gd)をほぼ100%の物質収支で液輸送し、陰極処理により金属Gdが回収できることを実証
大型装置での電解速度(電流密度)と熔融Cd-Gdの輸送速度を評価し、概念設計検討により処理速度を評価



▶ 電解還元～射出鑄造の工学規模装置の成立性評価

5kg-U/バッチ規模(1トン/年に相当)の主要工程(電解還元、電解精製、塩蒸留、射出鑄造)のプロセス連続試験により、各工学機器性能の実証および回収率の評価等を実施



FaCTフェーズI期における成果

【高レベル廃棄物(HLW)発生量の削減】

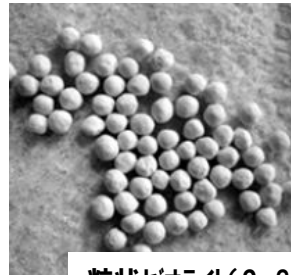
- ☀ ゼオライト技術の改良でHLW発生量削減の見通し
- ☀ 新たな手法(リン酸塩転換法)の原理確認

▶ ゼオライトカラムの実証

イオン交換挙動、カラム駆動圧と流速の関係等のデータを取得し、工学装置の設計に反映



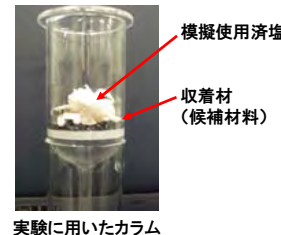
工学規模カラム試験装置



粒状ゼオライト(2-3mmφ)

▶ リン酸塩転換法による使用済み溶融塩精製技術

溶融塩中に蓄積するFPを分離回収し、鉄リン酸塩ガラスにより固化する技術の原理確認を実施



実験に用いたカラム

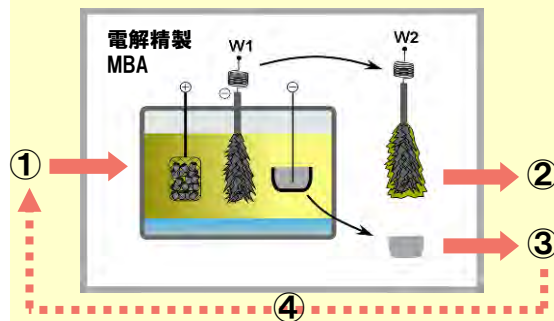
各種候補材料によるCs, Srの収着率の評価

収着材成分	収着対象FP名	収着率 (%)		
		リン酸塩転換なし	リン酸塩転換操作後	
Fe ₂ O ₃ -P ₂ O ₅	Cs (CsCl)	19.7	23.6	
K ₂ O-Fe ₂ O ₃ -P ₂ O ₅		26.0	14.5	
K ₂ O-Fe ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃ -P ₂ O ₅		11.8	18.9	
K ₂ O-BaO-Fe ₂ O ₃ -P ₂ O ₅		7.0	29.9	
Fe ₂ O ₃ -P ₂ O ₅	Sr (SrCl ₂)	8.8	33.0	
K ₂ O-Fe ₂ O ₃ -P ₂ O ₅		0.0	29.4	
K ₂ O-Fe ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃ -P ₂ O ₅		1.6	37.7	
K ₂ O-BaO-Fe ₂ O ₃ -P ₂ O ₅		10.0	34.6	
Fe ₂ O ₃ -P ₂ O ₅	Cs, Sr, 及び Laの混合物 (塩化物)	Cs	19.3	46.3
		Sr	26.8	51.3
		La	91.5<	91.4<

【保障措置/計量管理技術開発】

- ☀ 金属電解法特有の保障措置概念を検討
- ☀ 高精度で溶融塩中の核物質インベントリを分析する手法を検討







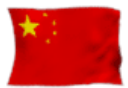
▶ 新たな保障措置概念の提案



- ① 燃焼度計算と代表サンプル分析により入量を確定
 - ② 重量差(W2-W1), 溶融塩の密度, 核物質濃度から出量を確定
 - ③ サンプル分析により出量を確定
 - ④ 溶融塩密度, 核物質濃度, ②, ③の値を①にフィードバック
- ※ 全ての分析作業はこのMBA内で実施

▶ 電解槽インベントリの計量技術

- ▶ 溶融塩中核物質質量(濃度分析)
 - INL電解槽の分析や、CPF試験でのPu分析により電解槽内での分布や分析精度を確認
- ▶ 溶融塩量(密度、液面(容積)測定)
 - 基礎実験により必要とされる精度で密度・液面測定ができる技術的な見通しを得た
- ▶ 析出物重量測定(ロードセル)
 - コールド実験により電極析出物重量の測定が可能である結果を得た

	開発状況	我が国の技術開発との関係
 米	豊富なインフラと研究開発実績を保有 EBR II・FFTFにおける照射試験、EBR-II隣接 ホットセルにおいて照射済金属燃料3.5トンを処 理済、工学規模でU・Pu・MA一括回収をホット実 証、廃棄物固化体のDOE認可を受け、工学規模 の固化体製造技術を開発中	☆ 過去にANL/INLと金属燃料サイクルに関する共 同研究を実施 ☆ 同一の燃料概念・燃料サイクルプロセスを指向し ており、照射試験データや照射済燃料を使用し た工学規模試験の成果は我が国の金属燃料サ イクル実用性評価の根拠となり得る
 欧  仏	CEAはMAターゲット燃料リサイクル技術のオブ ションとして研究 ITUは電中研と共同で乾式再処理試験用ホット セル設備(ケツソン)を開発	☆ MA含有金属燃料の照射後試験と小規模再処 理ホット試験を電中研-ITU共同研究として実施 、国内では早期着手困難な試験を先行的に実 施
 露	金属燃料サイクルの開発計画はないものの、独 自の乾式再処理技術を有し、韓国等の試験を 受託実施	☆ Cmを用いた電解基礎試験を委託実施、国内で は早期に取得困難なデータを先行的に取得
 韓	将来の金属燃料サイクル実用化を指向。すでに 数十kg規模のホット試験施設を完成させ、実燃 料試験は米国の許可待ち。2028年に60万kW 金属燃料高速実証炉を運開の計画	★ 協力関係なし
 印	2020年以降100万kW級金属燃料高速炉を順 次導入予定。実験室規模～工学規模の研究を 展開中	★ 協力関係なし
 中	2028年に金属燃料高速実証炉の運開を計画	★ 協力関係なし

FaCTフェーズ I 期における成果のまとめ

区分	実用化に向けた課題	2005年度までの到達点	2006～2010年度の進捗	今後の課題
金属燃料 ピンの照 射試験	国内金属燃料製造技 術の確立	工学規模U-Zr射出鑄造試験 開始(20kg/バッチ)	実用的な品質と製造効率の工学規模実証(U-Zr)、 U-Pu-Zr燃料製造技術開発、ナトリウムボンディング 技術開発	MA含有燃料製造技術開発、遠 隔・自動機器開発
	① 高温・高燃焼度まで の照射性能確認と国内 照射実績 ② MA含有金属燃料の 照射性能確認	① 照射挙動解析コード開発、 燃料合金特性試験、「常陽」キ ャプセル照射試験計画立案 ② MA含有金属燃料要素製造 、Phenix炉で照射開始	① 「常陽」キャプセル照射試験用U-Pu-Zr金属燃料 要素の設計、設工認取得、照射用燃料ピン6本の製 造を完了(「常陽」停止のため照射は未着手) ② MAを最高5wt%含む金属燃料9本のPhenix炉での 照射を完了、最高燃焼度10at.%達成、照射後試験を 実施中	① 「常陽」キャプセル照射試験 による高温健全性の実証、オー プンコア照射試験、集集体照射 試験 ② MA添加金属燃料の照射健 全性とMA核変換の実証
炉心設計	金属燃料の特長を活か した炉心概念構築	小型～大型金属燃料炉心概 念の構築、特性解析	ブランケットなしで増殖率1.3を達成、炉内Pu装荷量 を従来の約2/3に抑制など、種々の炉心概念構築	金属燃料FBR導入シナリオを考 慮した炉心概念の構築
主要工程 機器開発 (HLW発生 量低減を 含む)	【プロセスフローシート】 ① 金属燃料の乾式再 処理プロセス構築 ② 酸化物燃料の乾式 再処理プロセス構築 ③ 廃棄物処理プロセス 構築	① 非照射U,Pu, MAで基礎デ ータ整備、基本プロセスを構築 ② 未照射MOXで基礎データ 整備、基本プロセス提案 ③ 基礎データを取得し、模擬 物質でプロセス検討	① 非照射金属燃料の小規模プロセス試験によりU、 Pu、Amの回収率100%を達成、照射済金属燃料の 小規模電解精製試験により各元素の挙動を確認 ② 軽水炉照射済MOXからのU,Pu,MAの回収を実証 ③ 模擬陽極残渣を熔融固化して模擬金属廃棄物を 試作と高い耐浸出性の確認、ゼオライトカラムの成立 性確認と模擬塩廃棄物固化体の高い耐浸出性の確 認	① 高燃焼度照射済金属燃料 でのプロセス実証 ② 前処理を含めたプロセス最 適化、ホット実証 ③ ホット試験のFP性状・分布に 基づくプロセス最適化、実廃棄 物でのプロセス実証
	【工学規模機器開発】 ① 主要プロセス機器の 開発 ② 周辺技術開発	① 主要プロセス機器のスケ ールアップ試験着手 ② 高温融体輸送試験着手、 塩中濃度モニタなど計量技術 開発着手	① 主要プロセスの工学規模装置を設計・製作、コー ルド試験、U試験により、処理速度等を評価。 ② 遠心ポンプ等による実用的な流速(1～3L/分) での輸送制御性を確認	① 信頼性向上と自動・遠隔技 術の開発、工学ホット実証。 ② 信頼性向上と遠隔保守・補 修技術の開発
保障措置 ・計量管 理技術	計量管理技術開発	基礎データを整備し、非照射 U,Pu, MAで挙動・回収条件の 把握。基本プロセス構築	INL実規模電解装置内の物質分布、Pu試験、ホット 試験の分析値から、99%以上の高い物質収支を確認	計量実績の蓄積、実用規模処 理容量の計量管理概念構築

研究開発の総括とまとめ

- FaCT開始以降、国内では、電中研を中心に研究開発が進められた結果、開発の一部に遅れが見られるものの、MA含有金属燃料の照射後試験、電解精製プロセスの小規模ホット試験、主要プロセス機器の工学規模開発など、**ホット試験や工学規模機器開発へと着実な進展**した。
- 国外では、米、韓、印などにおいて開発が進展
- 国内外で研究が進展する一方、実用上の致命的な欠陥は見いだされていない
- 主概念に比して増殖特性等の面で魅力があることは変わらない
 - ▶ 海外の開発状況、今後の国際協力、国際展開を考慮すると、我が国が金属燃料サイクルに係わる技術ポテンシャルを保持しておくことが適切
 - ▶ 2015年頃までの間に、金属燃料サイクルに関する我が国の方針を判断するための情報を揃えることが必要

- 今後の技術的な課題としては、国内照射試験の展開、ホット試験によるプロセス実証、信頼性向上に向けた機器開発、廃棄物固化体の性能実証、計量管理概念構築など、長期を要する課題が挙げられる。



2011年度以降も、電中研の協力のもと、FaCTの一環として、

- **基盤的な研究を継続**するとともに、
- **国際協力**による研究や情報の収集を実施する必要がある