

分離変換C&R 進捗状況 一核変換サイクルー

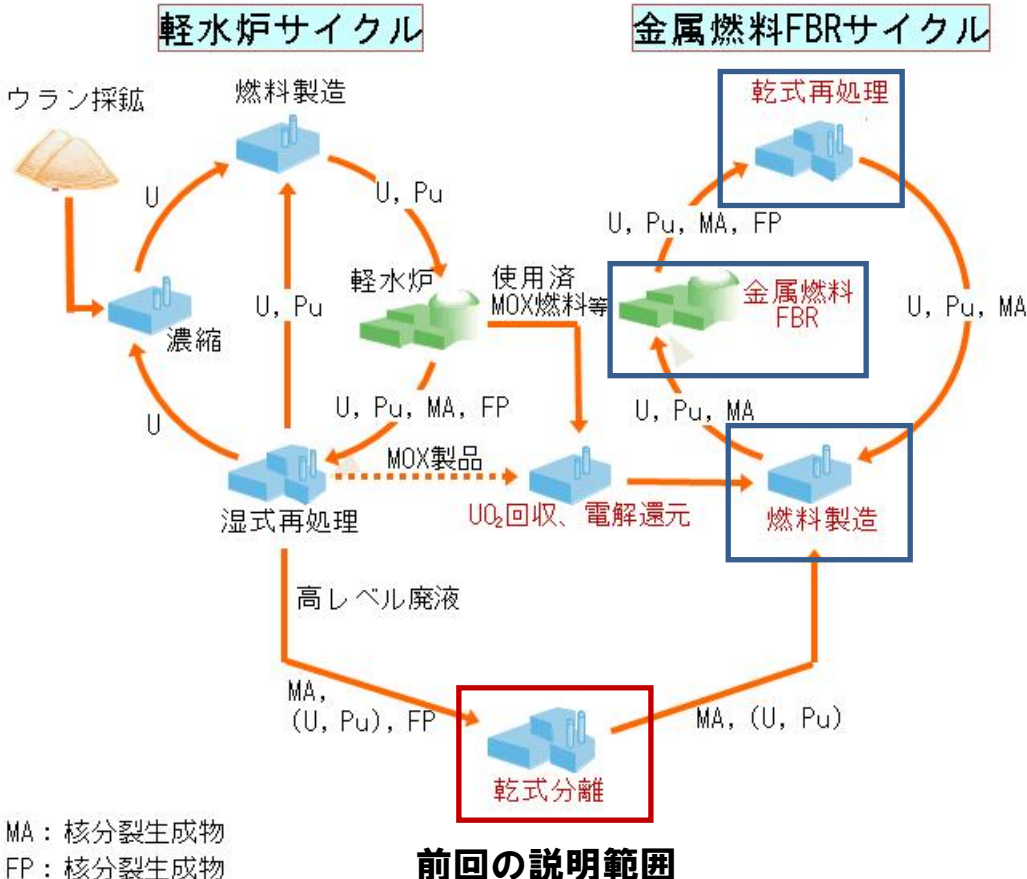


平成20年12月12日
(財)電力中央研究所



TRUの分離と金属燃料サイクル

- 湿式再処理から発生する高レベル廃液から乾式法によりウラン(U)、超ウラン元素(TRU)を分離(分離技術-1)
- U、TRUは燃料製造工程に供給して、金属燃料とする。
- 金属燃料高速炉で燃焼させる
- 使用済み燃料は乾式再処理で処理して、その製品は再び燃料製造工程に供給する(分離技術-2)
- 軽水炉サイクルで発生するTRUを金属燃料サイクルに閉じ込める



前回の説明範囲

今回の説明範囲

今後の研究開発の進め方

(分離変換に関する研究開発の現状と今後の進め方(原子力委員会バックエンド対策専門部会報告書より))

第5章：今後の研究開発の進め方

(1)分離変換技術と核燃料サイクル

- 分離変換技術は、核燃料サイクルと不可分である。核燃料サイクルの検討にあたっては、**サイクルのどの部分にどのような分離変換機能を持たせることが核燃料サイクルとして最適か**の視点の検討が望まれる
- 核燃料サイクルの検討の場に対し、**核燃料サイクルへの分離変換技術システムの導入シナリオを示すとともに、そのためのシステムを設計し、必要な要素技術を確認することである。**
- これまでの研究開発は、プロセスやシステムの設計に必要な基礎データを取得するための基礎研究が中心であり、**本技術の経済性を高い信頼性をもって評価できる段階にない。**
- 今後、将来の核燃料サイクルにおいて具体的な位置づけがおこなわれるよう、**システムの全体構成について研究開発**を行うべきである。
- その際、**技術の実現可能性や経済性をはじめ、研究開発の実施体制及び要因、資金、施設などの観点からフィージビリティスタディの実施が重要である。**

(2)システム設計研究と要素技術開発

- 省略

今後の研究開発の進め方(2)

(分離変換に関する研究開発の現状と今後の進め方(原子力委員会バックエンド対策専門部会報告書より))

第5章：今後の研究開発の進め方(続き)

(3)当面の進め方

- 我が国で研究開発が進められている**発電用高速炉利用型と階層型**とは、それぞれに特徴があり、核燃料サイクルのオプションに多様性を与えるものであることから、**当面は双方の技術開発を進める**ことが適当である。
- 目標は、実現性のある核燃料サイクルへの**分離変換技術システムの導入シナリオを検討し、必要な技術を確認**することにある。
- 今後は、システム設計や分離変換技術の**導入シナリオの検討を進める**。そのシナリオに従って、**一連のプロセスが成立することを実証するための基礎試験を進めるとともに、成立性が実証されたシステムについて安全性等に関するデータを取得するための工学試験を実施する**

(4)実施体制

- コンセプト、炉系、システム等に違いはあっても、本技術に係る研究開発は共通課題が多く、3機関には研究開発成果の蓄積があることから、**3機関は協力を一層進め**、共通課題の解決に当たるべきである
- 国内機関とも協力して**既存の研究施設を活用**するなど効率的に研究開発を進めること
- 本技術に係る様々な研究開発について国際協力を進める動きがあることから、これらの枠組みに積極的に参加するとともに、**海外の研究施設を利用するなどして、効率的に研究開発を進めるべき**

**前回（2000年）のC&Rから大きく進展した課題
－燃料製造、核変換、燃料処理－**

- ①燃料製造：前回C&R時点で終了**
- ②核変換：MA含有燃料の照射、照射後試験（進行中）**
- ③乾式再処理：化学プロセス確認試験、要素技術の工学装置開発**
- ④活性金属等に対する耐食材料の開発、高温の融体の輸送技術開発**

今回の報告事項

燃料製造

- MA含有合金の特性
- MA含有燃料の製造

核変換

- MA含有燃料の照射
- MA含有合金燃料の照射後試験

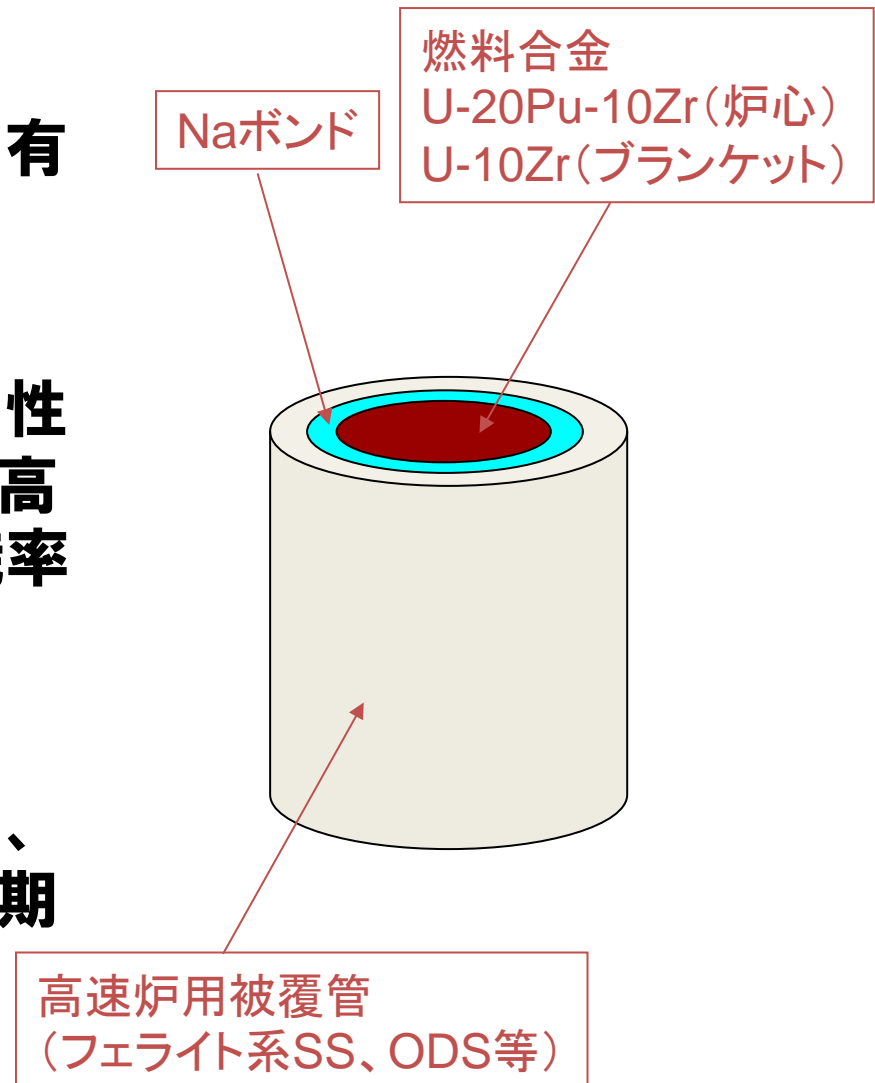
燃料処理（核変換サイクル）

- 乾式再処理
 - ー化学プロセスの開発
 - ーPuを用いた試験、実燃料によるホット試験
 - ー工学化技術開発
 - ー融体移送技術
- 使用済み塩処理
 - ーゼオライトカラムによる塩の精製
 - ーゼオライト → ソーダライト固化
- 高温耐食材料の開発

まとめ

金属燃料FBRの特徴

- 高い熱伝導性に起因する高い固有安全性
- 高い中性子エネルギー、高い中性子束のため酸化物燃料に比べて高いマイナーアクチニド(MA)燃焼率(変換率)
- 乾式再処理と射出成型に整合し、経済的な燃料サイクルの実現が期待できる



燃料製造

燃料製造

• MA(Np, Am, Cm) 金属の製造

- NpO_2 , Am_2O_3 , CmO_2 からの還元
- 燃料合金とMAならびに希土類混合溶解

• MA含有合金(U-Pu-Zr-MA) の特性

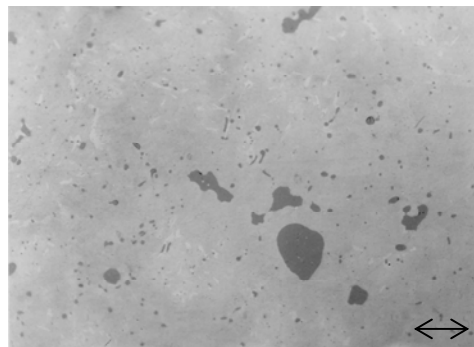
- 金属組織中でのAm,Cm,希土類元素の分布
- 熱伝導度
- 熱膨張率
- 照射条件を模擬した温度勾配下でのMA元素の再分布挙動
- 照射温度条件模擬下でのMA元素のNaへの溶解挙動
- 燃料合金とステンレス被覆材との化学的相互作用

• MA含有燃料の製造

- U-Pu-Zr
- U-Pu-Zr-MA-RE (RE:希土類元素)
- U-Pu-Zr-MA

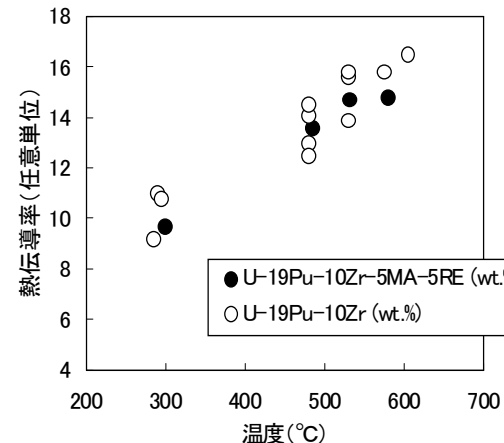
MAならびに希土類元素を添加した根拠とその合金の物性研究

1. 軽水炉燃料再処理の高レベル廃液(FP濃度高、MA濃度低)からMAを回収する
⇒ 実験結果から、**回収MAには同程度あるいはそれ以下の重量の希土類元素FP (RE) が随伴**すると判断
2. 回収したMAは、高速炉用の金属燃料(ウラン-プルトニウム-ジルコニウム; U-Pu-Zr)に添加する
⇒ **MAは、ウラン(U)、プルトニウム(Pu)とともに高速炉でリサイクルし、廃棄物としない**
3. 燃料合金の物性研究 <EU超ウラン元素研(ITU)との共同研究で実施>
 - ・高レベル廃液からの回収組成を模擬したMA、RE試料を作って用いた
 - ・**U-Pu-Zr-MA合金: アーク溶解で均一な合金が得られる**(MA添加割合25%まで確認)
 - ・**U-Pu-Zr-MA-RE合金: 添加量2%程度まで均一に溶解、5%でも均質な合金が製造可能**
熱伝導や弾性などの特性はU-Pu-Zrとほぼ同様⇒ **U-Pu-Zr-MA-RE合金を、燃料として使用できると判断**



2%のMAと2%のREを装荷したU-Pu-Zr燃料合金の金相写真

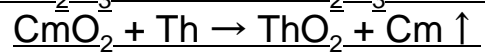
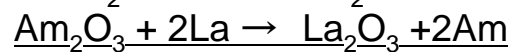
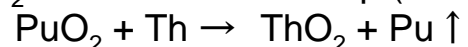
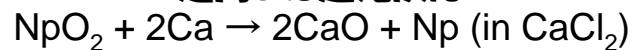
100 μm



U-19Pu-10Zr-5MA-5RE(wt.%)合金とU-19Pu-10Zr合金の熱伝導率の比較

アメリシウム (Am)、キュリウム (Cm) 金属の製造

適用した還元反応

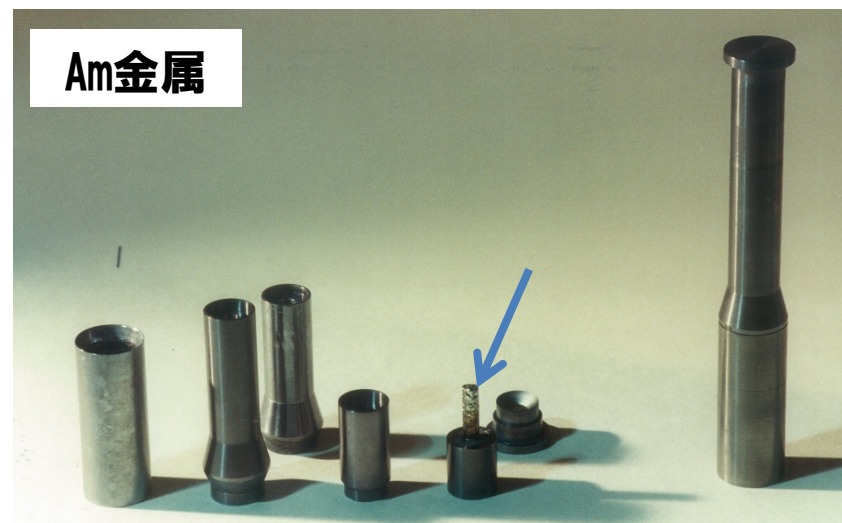


還元セル

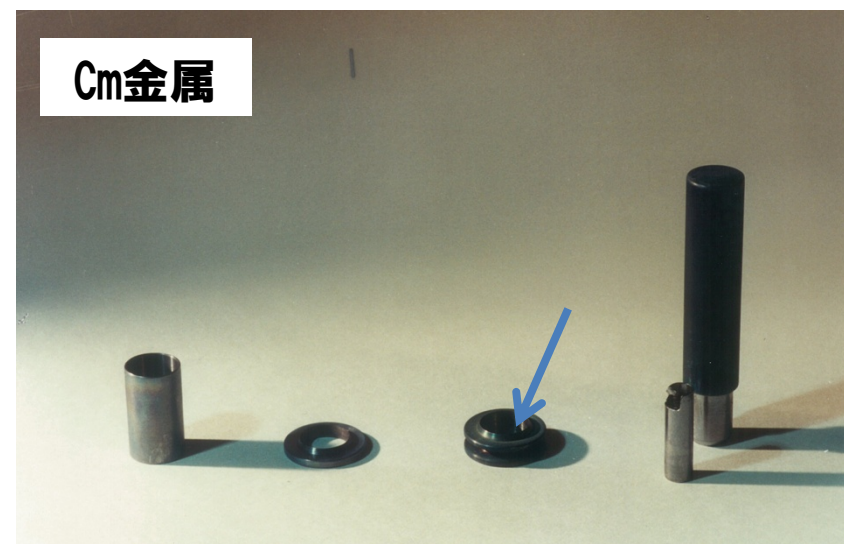
ヒーター

電極

MA酸化物の金属への還元装置



Am金属

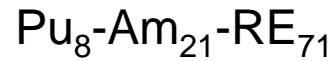


Cm金属

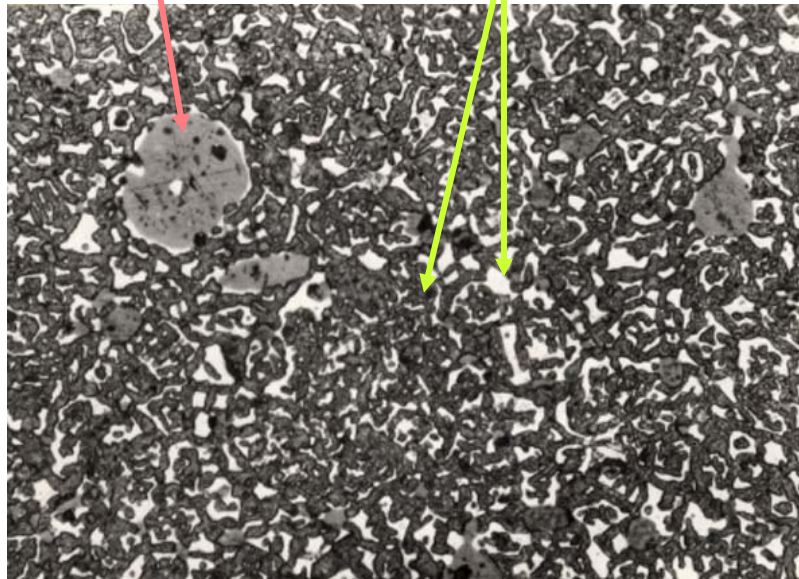
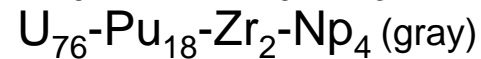
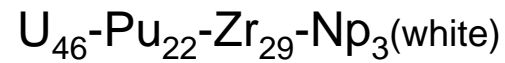


MA含有合金の金属組織

(析出物)

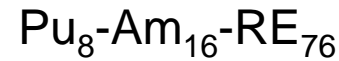


(2組成の母相)

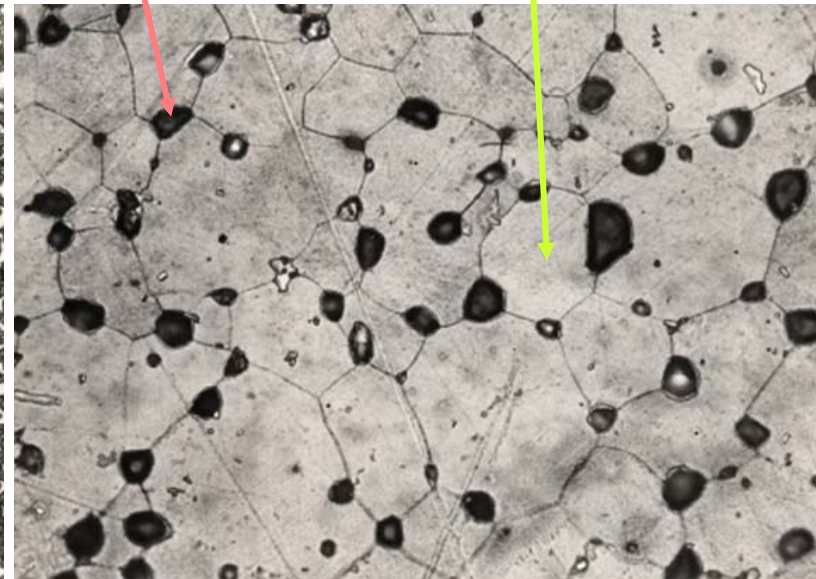
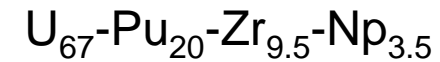


773K

(析出物)



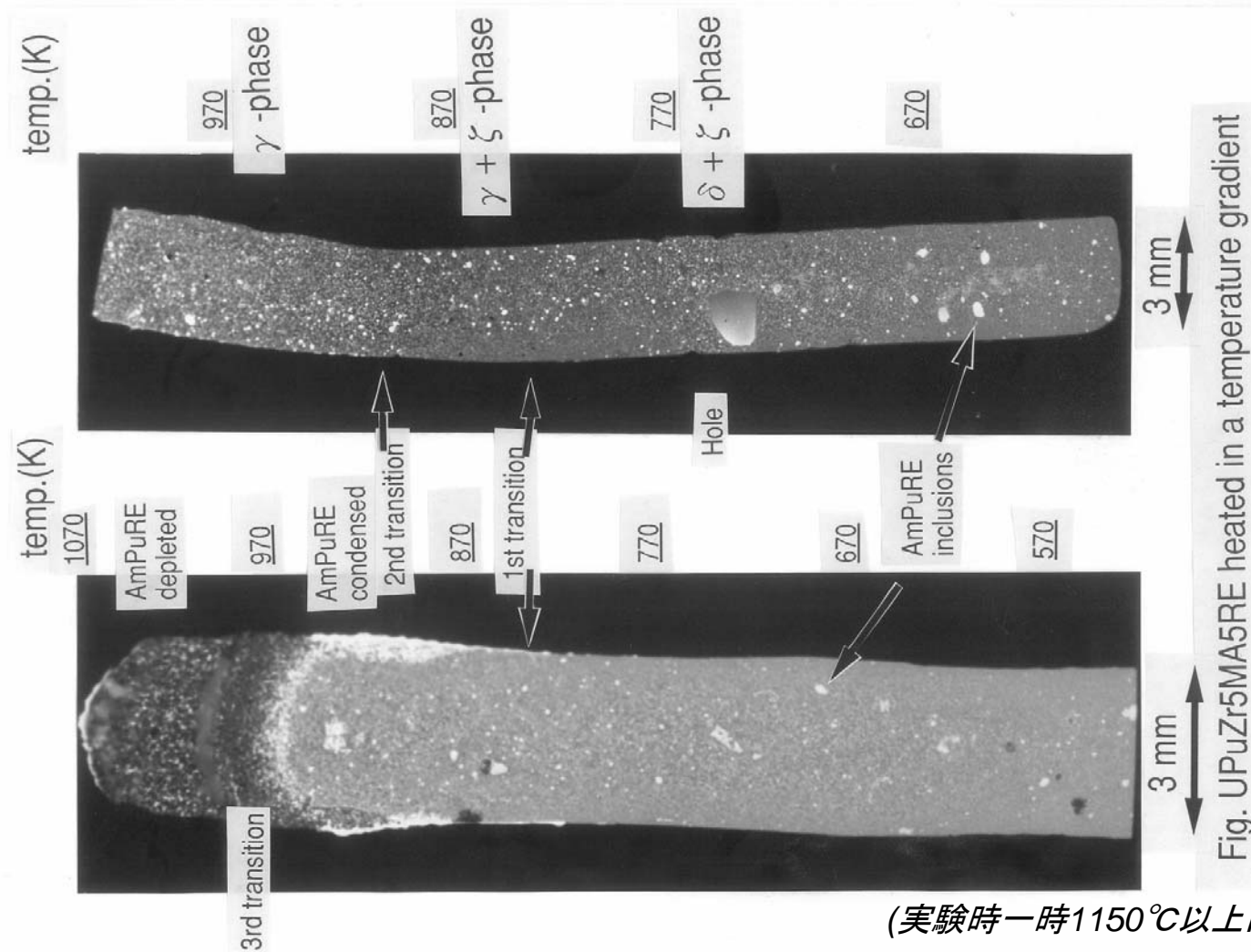
(母相)



973K

$\text{U}_{67}\text{-Pu}_{19}\text{-Zr}_{10}\text{-MA}_5\text{-RE}_5$ 合金の金属組織
(#Composition was determined by EPMA)

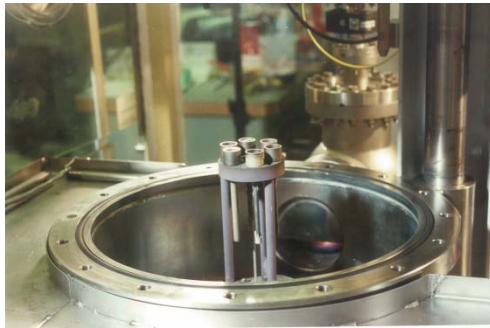
温度勾配下でのU-Pu-Zr-MA-RE合金中のアメリカシウムの再分布



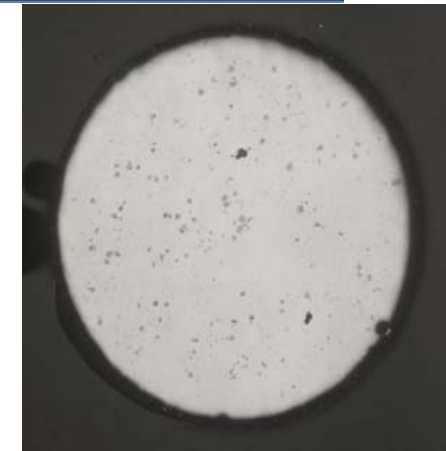
本来Amは合金中に均質にミクロレベルで均質に分散、REはAmと同一挙動
高温になりすぎると高温部から蒸発し中温度域に蓄積 (下部写真)

(注) 白いスポット: Amの高濃度域

MA元素、希土類元素組成を含有する金属燃料と組織観察



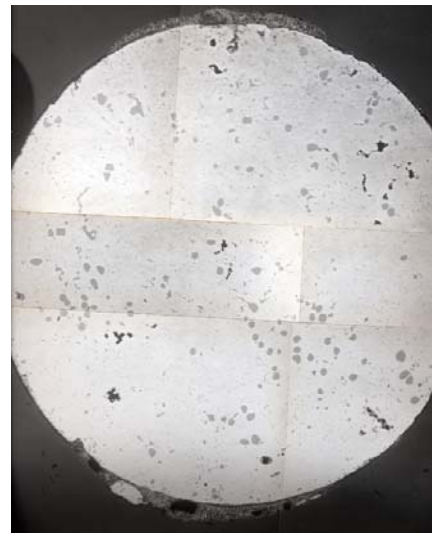
金属燃料棒製造装置



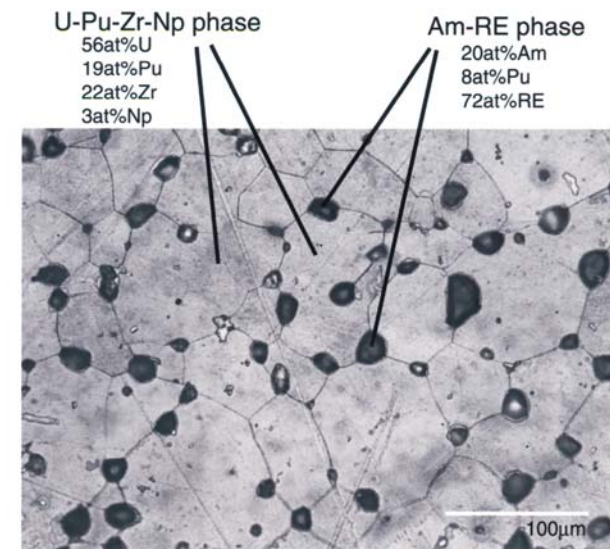
U-Pu-Zr-MA2%-RE2%



U-Pu-Zr-MA5%



U-Pu-Zr-MA5%-RE5%



U-Pu-Zr-MA5%-RE5%を973Kで3日間熱処理した後の微細組織



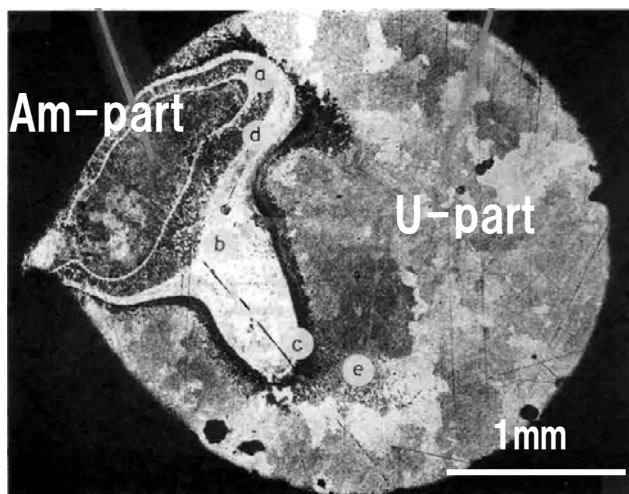
核変換TRU燃焼のための合金燃料設計と製造の基盤技術開発 (H18-20)

【目的】

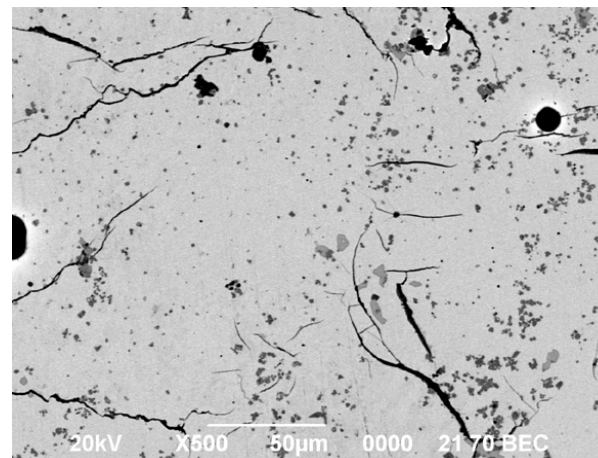
TRU含有合金の物性データベースを構築し、
U-Pu-Zr-MA合金燃料として成立する組成
範囲を明らかにする。また、その製造のた
めの基盤技術を確立する。

【代表的な成果】

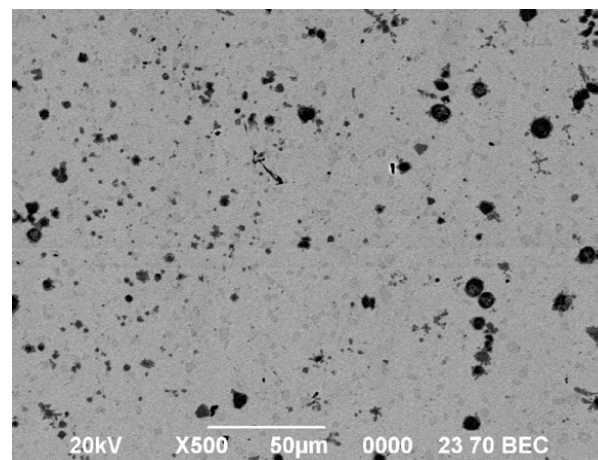
ほとんど相互固溶しないU-Amに対して、
Puが共存することで、混合性が大きく向上
するため、燃料合金が成型できる見通しを
得た。



アーク溶解後のU-Am合金試料
(相互にほとんど溶解していない)



U-45Pu-5Am合金試料 (焼鈍:923K,50時間)



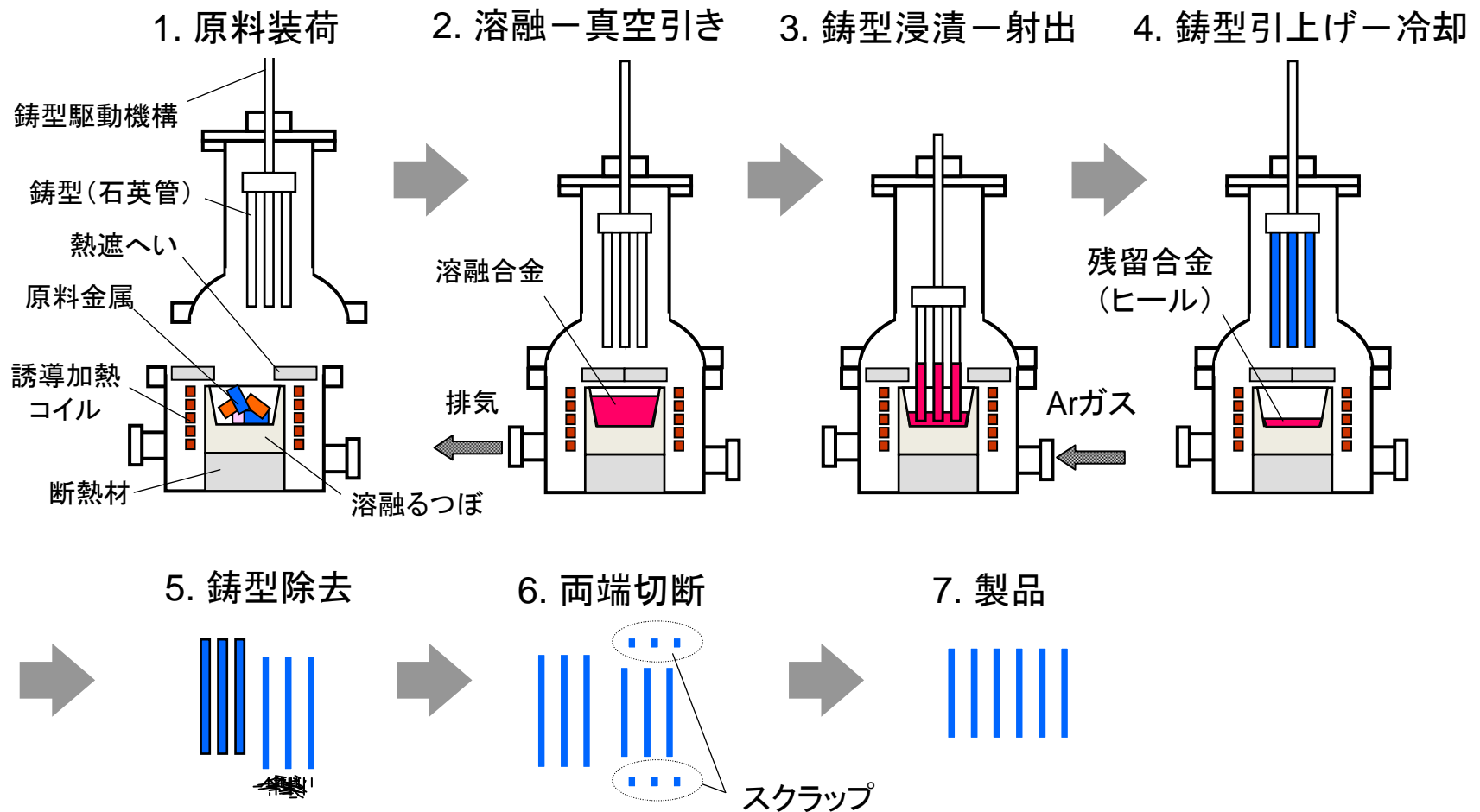
U-64Pu-7Am合金試料 (焼鈍:791K,50時間)

JST公募事業で実施



工学規模での金属燃料製造技術（射出鑄造）

➤ 射出鑄造法による燃料スラグの製造



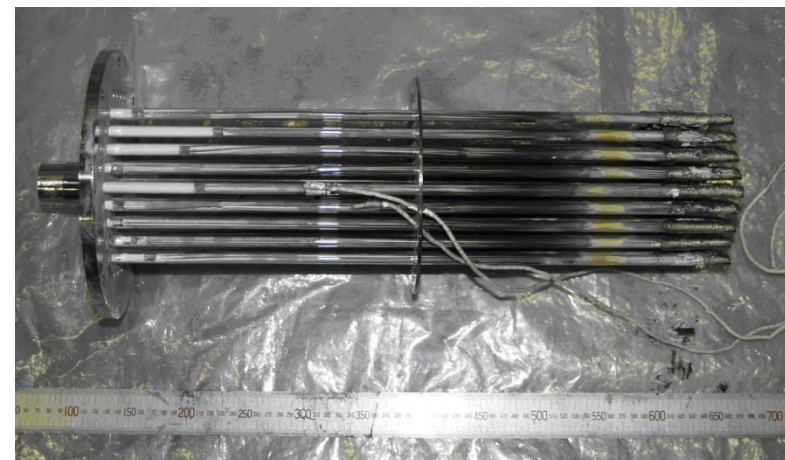
工学規模の金属燃料射出鑄造装置



射出成型試験設備の外観

20kgのU-Zrを溶解

→ 50本以上の合金スラグを射出
(6mm-φ, 500mm-L)
(ヒール残量 < 溶解量の30%)



射出後のモールド束

付記:U-Zr- (0.5-1%) RE、や白金族系元素を入れた合金の射出鑄造試験も実施

電源開発促進対策特別会計法に基づく文部科学省からの受託事業として、電力中央研究所が実施した平成15年度「金属燃料の乾式再処理プロセスの合理化に関する技術開発」の成果です



核変換

核変換

- MA含有燃料の照射(仏高速炉フェニックス)
- MA含有合金燃料の照射後試験
 - ー非破壊検査(フェニックスのホットセル)
 - ーフェニックス(仏マルクール)からEU超ウラン元素研(独カールスルーエ)への輸送(2回完了、1回予定)
 - ー破壊検査
 - 燃焼度測定
 - FPガス分析
 - 金属組織
 - MA元素の分布挙動
 - MA元素の濃度(核変換率)

仏高速炉フェニックス

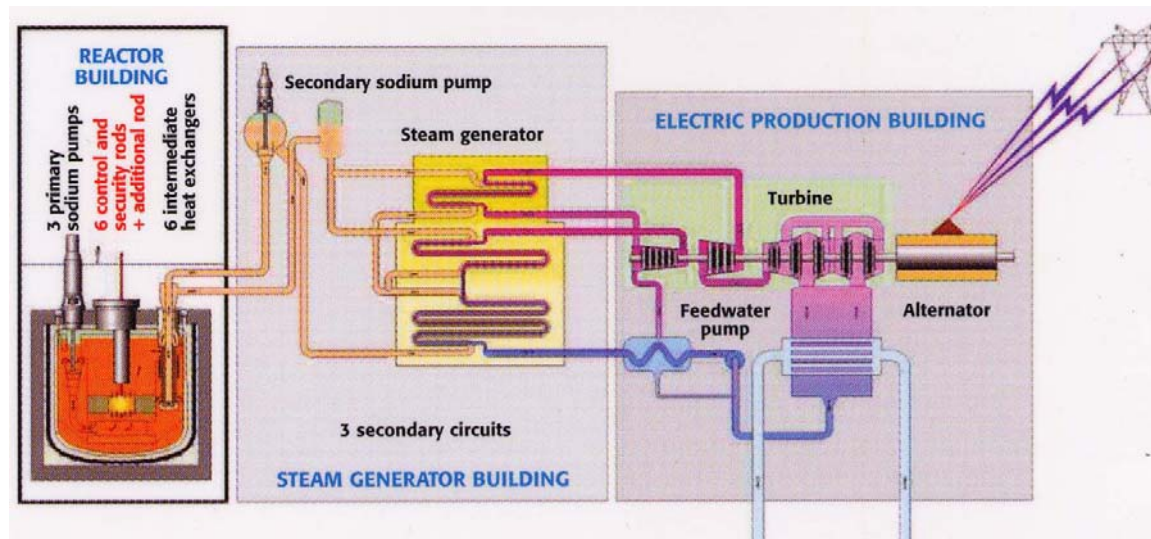
南仏マルクール、ローヌ河畔
ナトリウム冷却タンク型高速原型炉
混合酸化物燃料、出力250MWe
1974.7年運転開始
(2003.9運転再開、2008年閉鎖予定)



原子炉建屋

蒸気発生器建屋

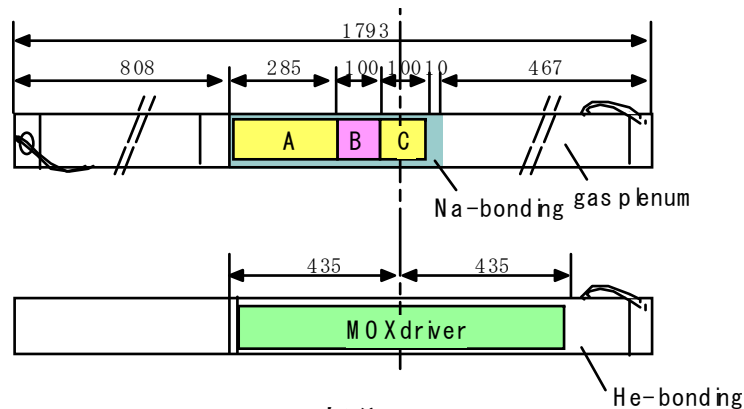
タービン発電機建屋



(ローヌ川)

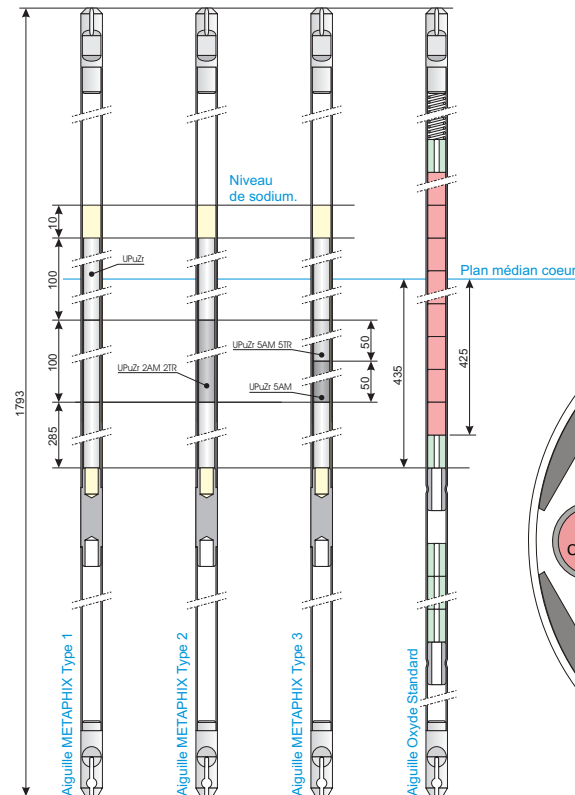
MA添加燃料ピンと照射キャプセル

- ・ 3 種類の金属燃料ピン
- ・ 金属燃料
 - U-Pu-Zr
 - U-Pu-Zr +2MA2RE
 - U-Pu-Zr +5MA
 - U-Pu-Zr +5MA5RE
- ・ ナトリウムボンド
- ・ 17 の標準燃料ピン

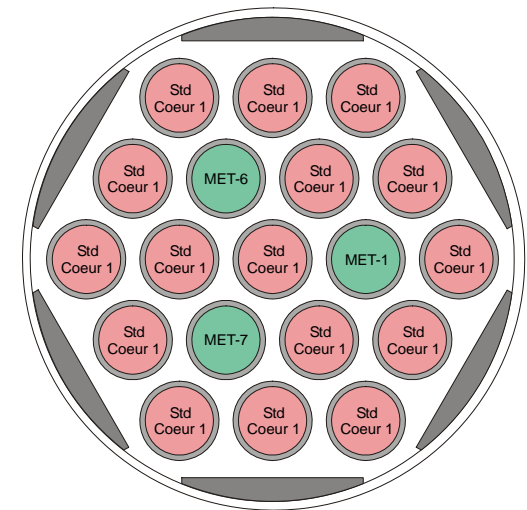


A, C : U-Pu-Zr 部分
 B : U-Pu-Zr-MA-RE 部分
 燃料ピン径 = 6.55mm
 被覆管材 = 15/15Ti cw

(a) ピン内の金属燃料の配置



(b) ピンの外観図

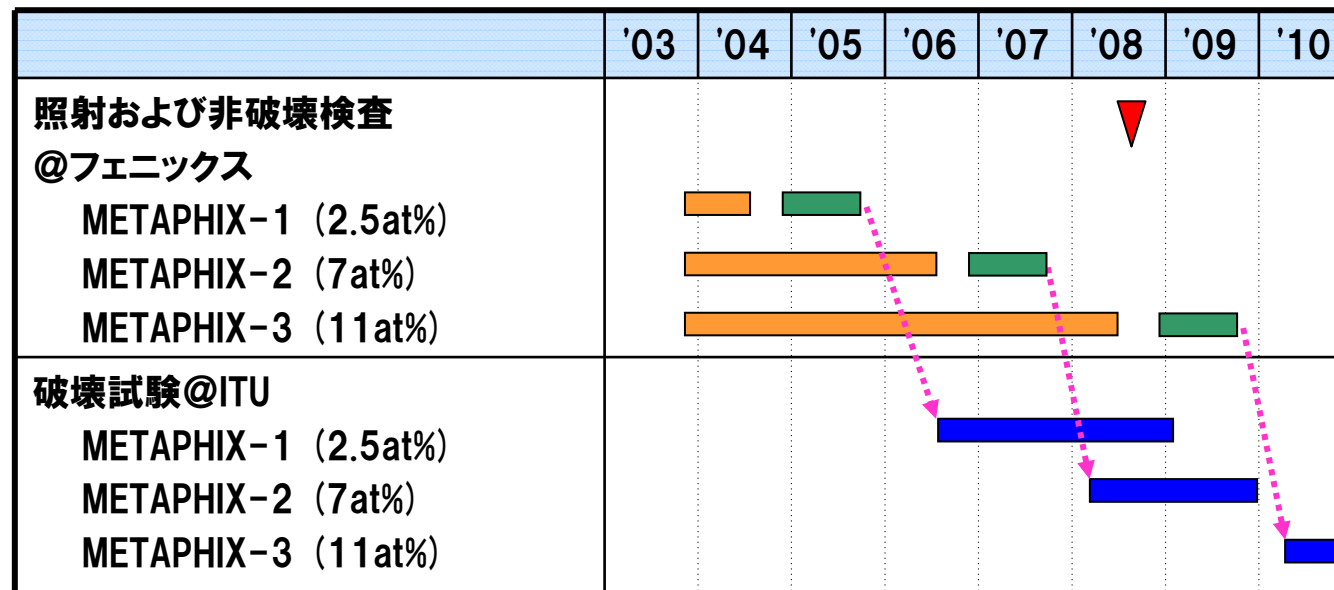


(c) 照射キャプセル



MA添加金属燃料ピンのフェニックス照射試験計画

- MA核変換の実証、MA含有低除染燃料の照射挙動の把握が目的
- 1994年までに試験燃料製造、2003年に仏国Phenix炉にて照射開始
 - 2008年6月に照射を終了、最高燃焼度約11at.%を達成



H. Ohta, et al, Proc. GLOBAL 2005, Tsukuba, Oct.9-13 (2005).

フェニックスでの照射条件

	METAPHIX-1	METAPHIX-2	METAPHIX-3*
照射期間 [day]	193	574	965
線出力密度 [W/cm]	273-323	258-313	205-275
被覆管最高温度 [°C]	551-555	522-541	-
取出しピーク燃焼度 [at.%]	2.5-2.7	6.6-7.2	9.6-10.5
高速中性子照射量 [10^{22}cm^{-2}]	3.4	9.8	16.0

*: CEAによる2008年3月時点での評価値(照射は2008年5月に終了)



燃料処理

燃料処理(乾式再処理)

- **再処理**

- 化学プロセスの開発
- Puを用いた試験、実燃料によるホット試験
- 工学化技術開発
- 融体移送技術

- **使用済み塩処理**

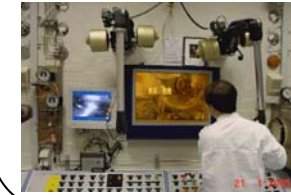
- ゼオライトカラム
- 電解により使用済み塩中のFPを処理

- **高温耐食材料の開発**

乾式リサイクル技術に関する主要技術

全体に関わる研究: 詳細マスバランスの確定

- Puを用いた連続プロセス試験(JAEA-CPF: 自主)
- EBR-II照射燃料中元素の電解槽内分布(INL: 文科省)
- フェニックス照射金属燃料の乾式再処理(ITU: 自主)



フェニックスで照射した
MA入り金属燃料 (自主)



固体陰極/U高速電解
(文科省受託)



金属廃棄物処理
(JST受託)



陰極処理(Cd蒸留)
(文科省受託)



常陽照射用U-Pu-Zr金属製造
(自主/JAEA共研)

使用済金属燃料

解体・剪断

電解精製

陰極処理

新金属燃料

燃料製造
(射出鑄造)

向流多段抽出
(アクチノイド回収)

ゼオライトカラム
(FPの除去)

塩廃棄物
固化体製造

新U、新Zr

工学規模U-Zr燃料製造試験
(文科省受託)

塩素化

脱硝

高レベル廃液

還元

新MOX粉末

向流多段抽出試験(文科省受託)



廃棄物固化試験
(文科省受託)

実HLW脱硝塩素化試験(自主)

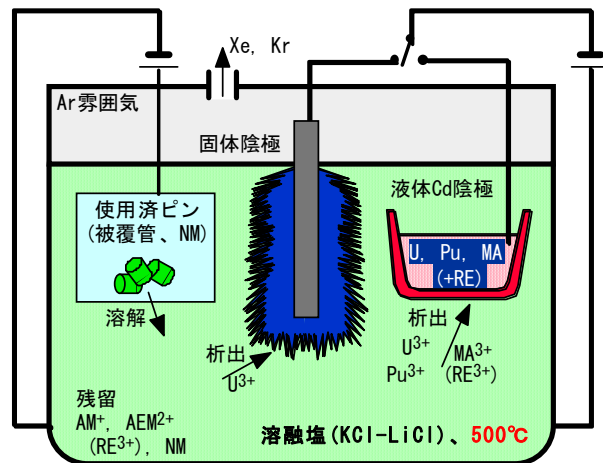
乾式再処理技術の主要工程

解体・せん断

使用済燃料(炉心、ブランケット)

集合体組み立て

Naボンディング、被覆管封入

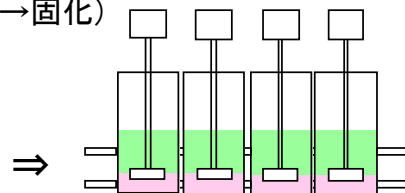


陰極処理(溶媒分離)

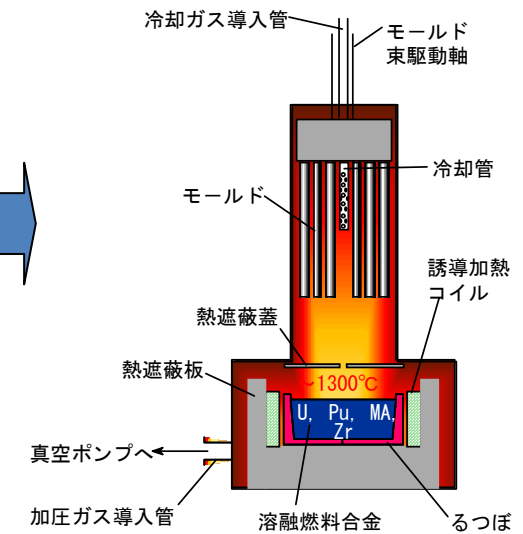
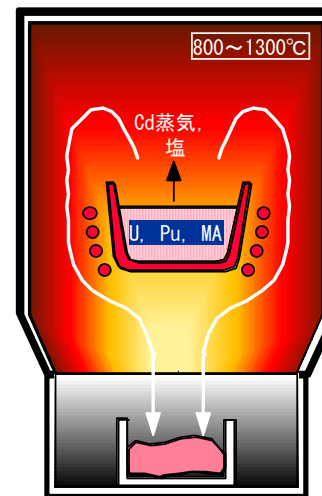
燃料製造(射出成型)

電解精製(溶解・FP分離)

FP除去
(ゼライト吸蔵→固化)



塩処理(TRU回収)



アクチニド、希土類元素の酸化還元電位

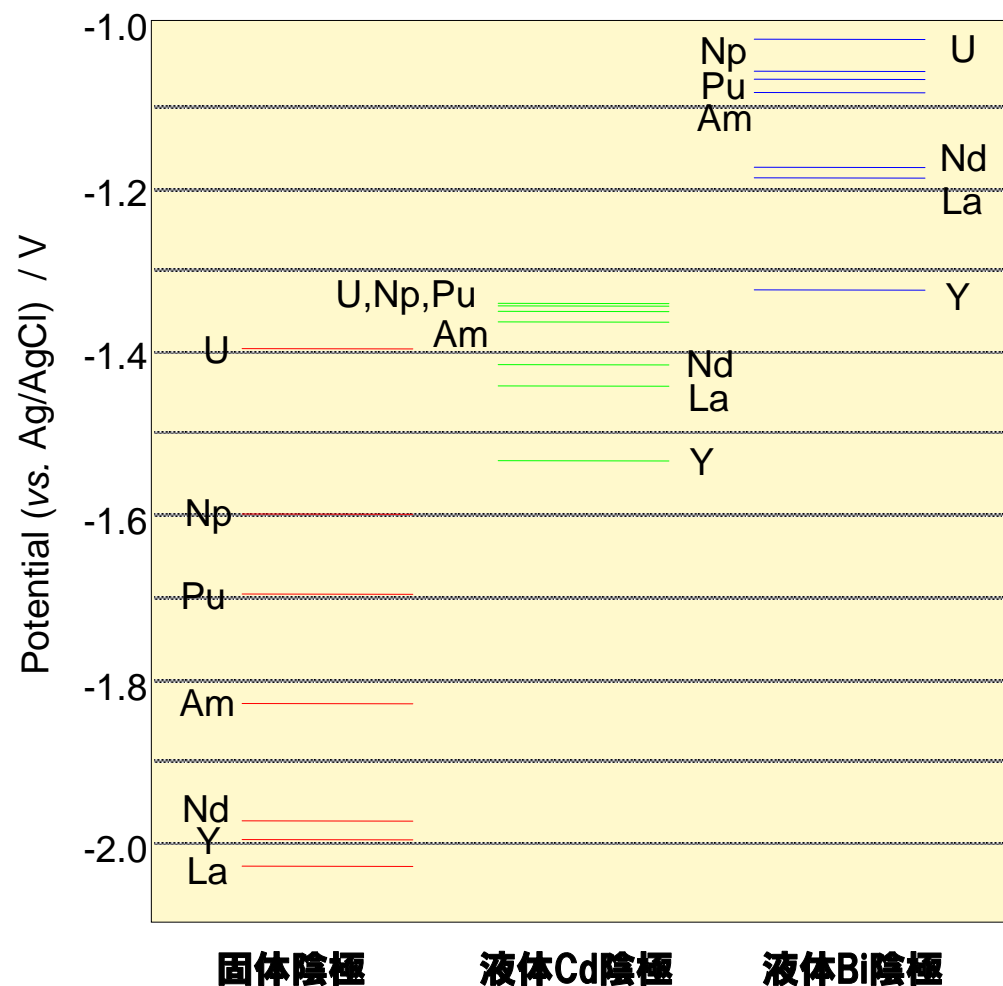


Table Separation factors of actinide and rare earth elements with respect to Nd

	Solid cathode	Cd cathode	Bi cathode
U	2.0×10^{11}	25	1300
Np	2.1×10^7	28	200
Pu	2.7×10^5	18	130
Am	710	10	67
Y	0.37	0.0053	0.0012
La	0.090	0.28	0.59
Nd	1	1	1

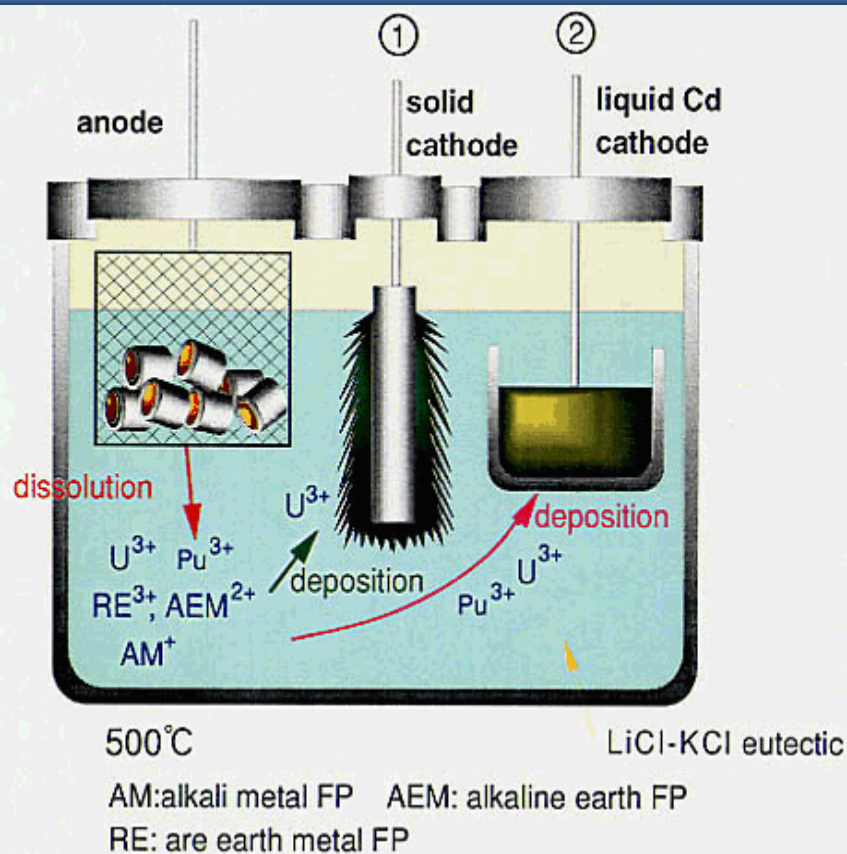
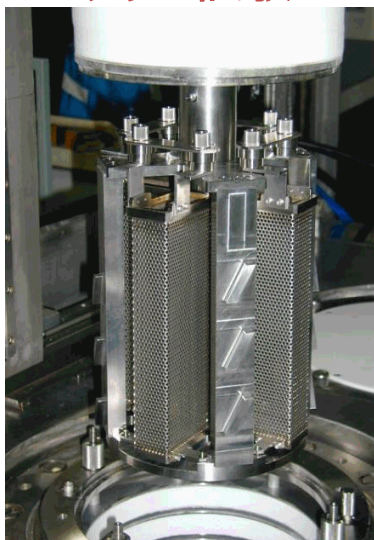
Fig. Reduction potentials of actinide and rare earth elements for the solid cathode, liquid Cd cathode and liquid Bi cathode in LiCl-KCl eutectic salt at 773 K.
($X_{M \text{ in salt}} = X_{M \text{ in Cd}} = X_{M \text{ in Bi}} = 0.001$)

Y.Sakamura *et al.*, *Proc. GLOBAL'99*, August 29-Sept. 3, 1999, Jackson Hole, WY, USA.

電解精製/電解槽開発

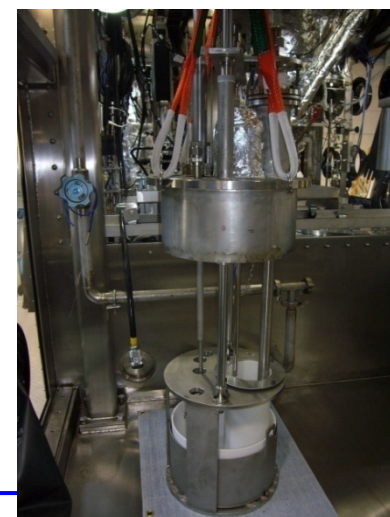
陽極/固体陰極開発

ウラン試験

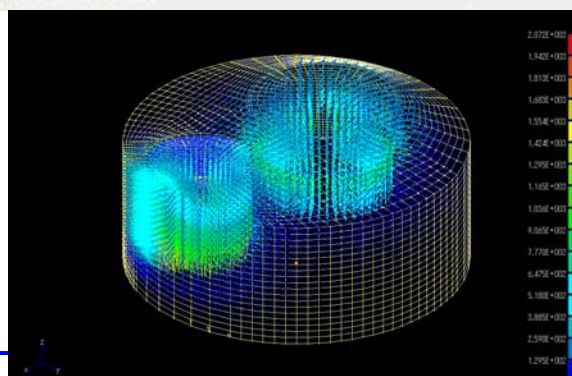


液体カドミウム陰極

模擬組成試験



シミュレーション コード開発



電解精製技術の開発 —Pu回収技術—

F/S施設設計で仮定されている液体Cd陰極
へのアクチニド回収速度

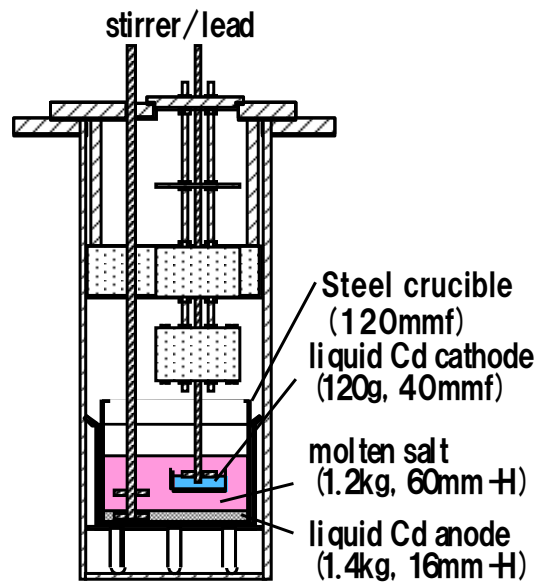
: 1.2t-An/y (電解精製装置1基あたり)

→ 陰極電流密度に換算すると

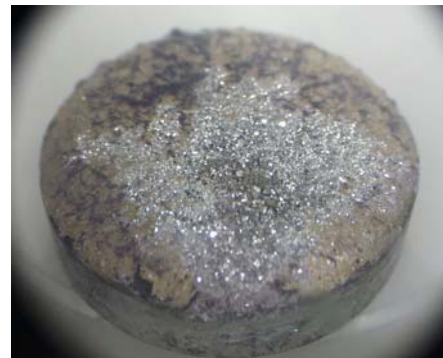
約125mA/cm²

Puを用いた電解精製試験の目的

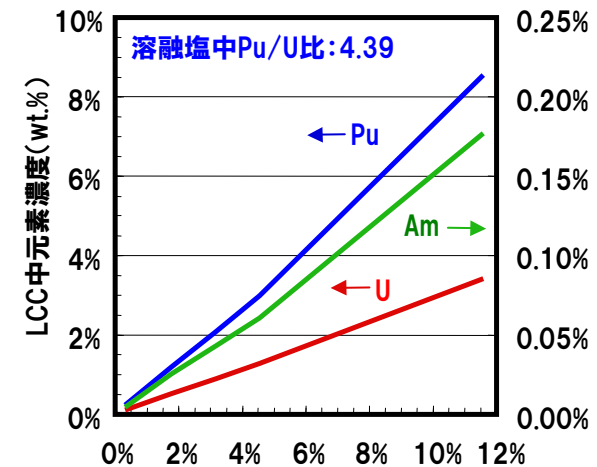
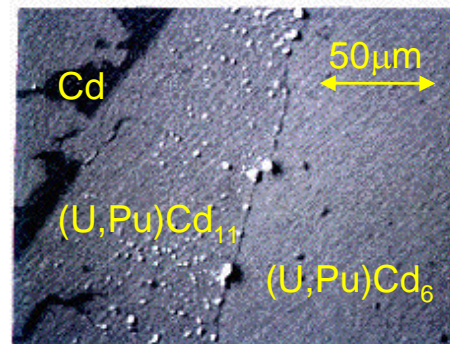
- ・るつぽ材料、攪拌方法などの条件最適化
- ・上記回収速度目標値の達成
- ・溶融塩中U/Pu比、共存希土類FPの影響把握



Pu用の電解精製試験装置
(U,Puを100g使用)



回収された液体Cd陰極インゴット
(Cd: 120g、回収U+Pu: 14.7g)

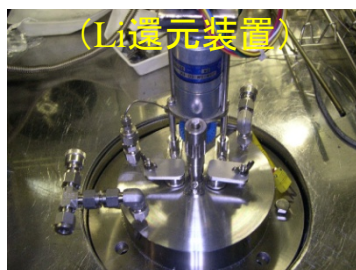
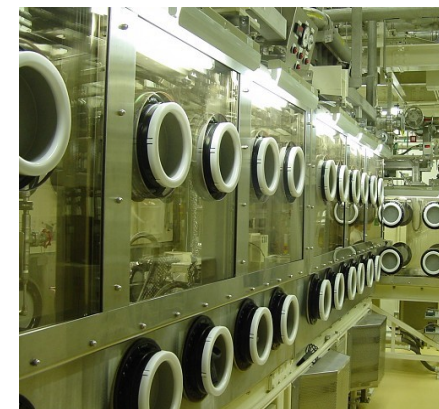


電解に伴う液体Cd陰極組成の変化

JAEAとの共同研究「超ウラン元素の乾式リサイクルに関する基盤研究」成果

乾式再処理プルトニウム試験（プロセス連続試験）

目的：酸化物燃料を出発物質とする、還元⇒電解⇒蒸留⇒製品化の連続プロセス試験に基づく、成立性確認と物質収支の把握



（Li還元装置）



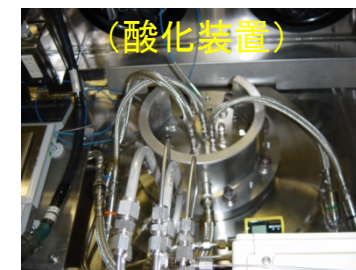
（電解精製装置）



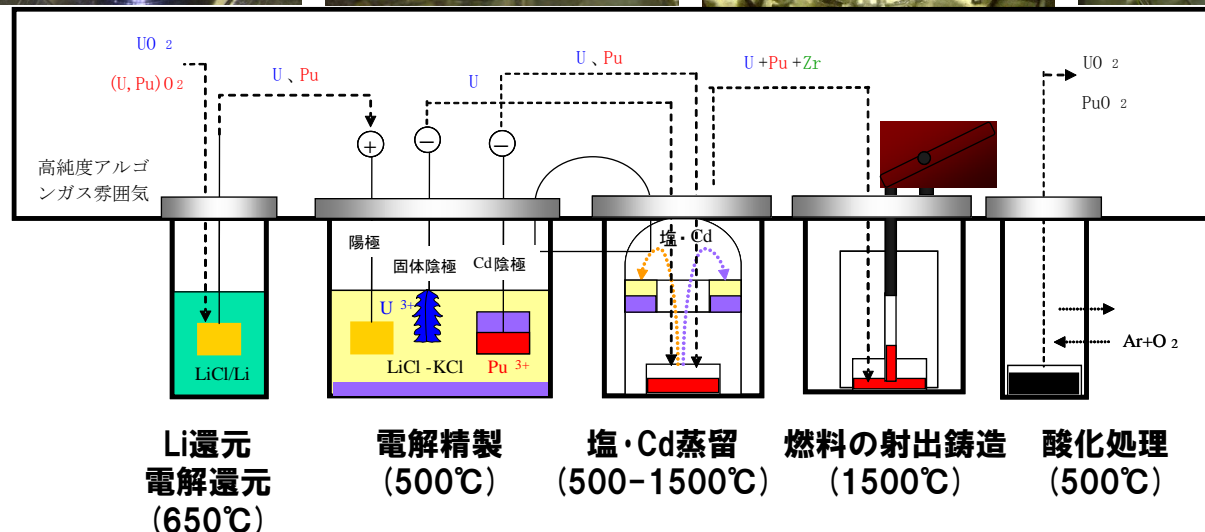
（蒸留装置）



（燃料射出成型装置）

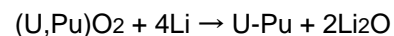
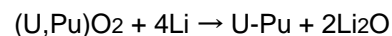
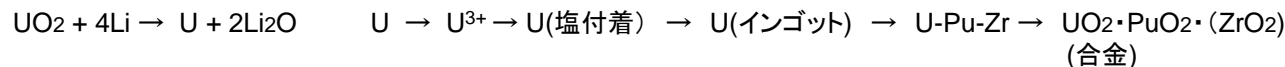


（酸化装置）



GBXの仕様

アルゴン雰囲気：8.3m³
 取扱最大放射能量：2.22x10⁸ Bq
 最大取扱核物質質量：220g (Pu+U²³⁵)



JAEAとの共同研究成果

28



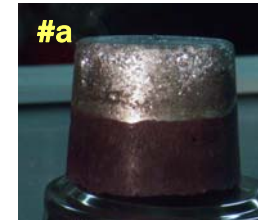
MOXペレットからのプロセス連続試験



電解還元により金属に転換されたMOXペレット

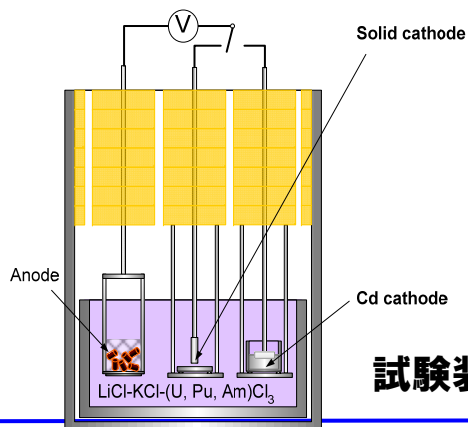
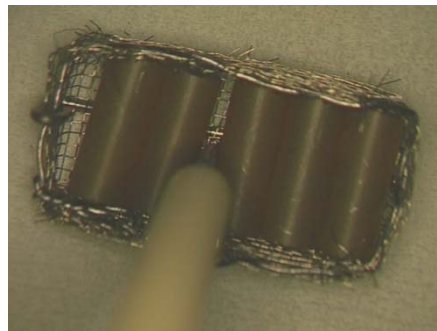


固体陰極に回収されたウラン

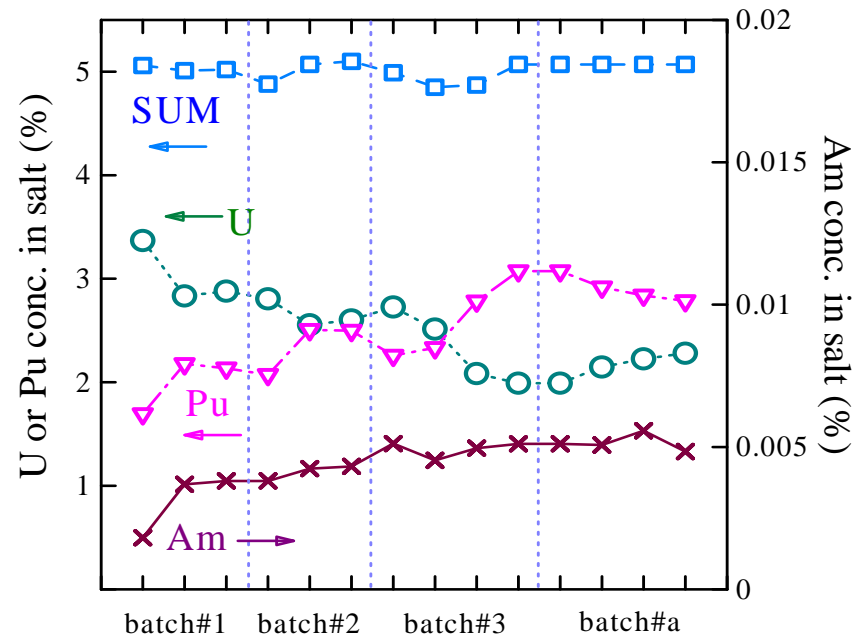


液体陰極に回収されたウラン+
プルトニウム+アメリシウム

Pu impurity : <0.1ppm
Am impurity : ~0.5ppm



試験装置



連続試験中の溶融塩中のアクチニドの濃度



回収されたウラン金属



回収されたウラン、プルトニウム合金

JAEAとの共同研究成果

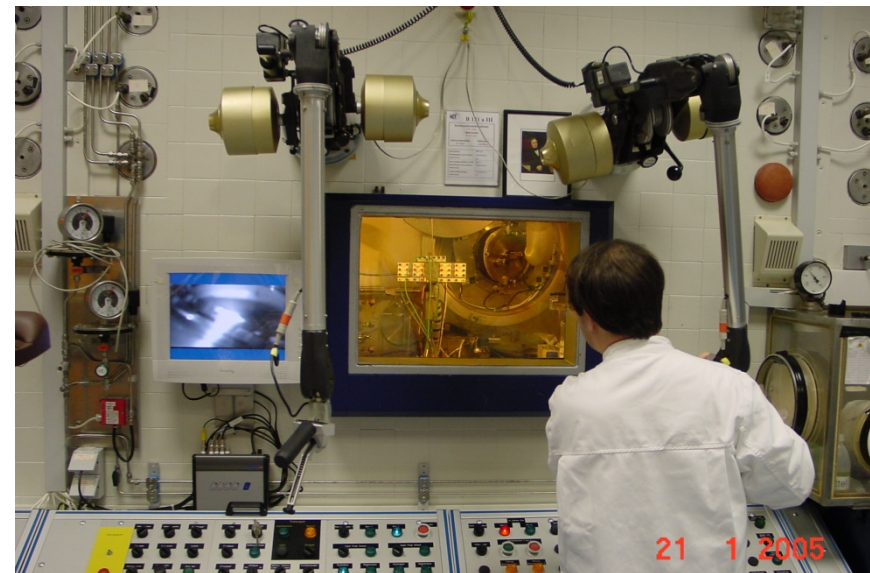
EU超ウラン元素研究所に設置したホット試験施設 －実廃液・照射燃料試験設備－



試験装置の概観

1999～ 乾式分離試験(HLW脱硝・塩素化・MA分離)
2001～ 酸化物燃料還元技術開発
2007～ 照射燃料による乾式再処理試験

超ウラン元素研究所(ITU)との共同研究、1名を派遣



ホットセル外観

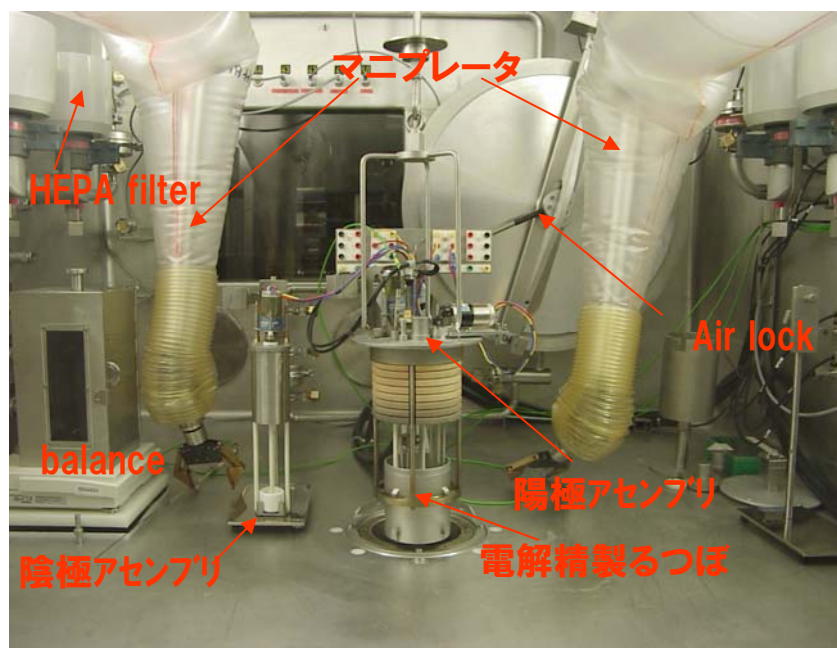


(セル内部)

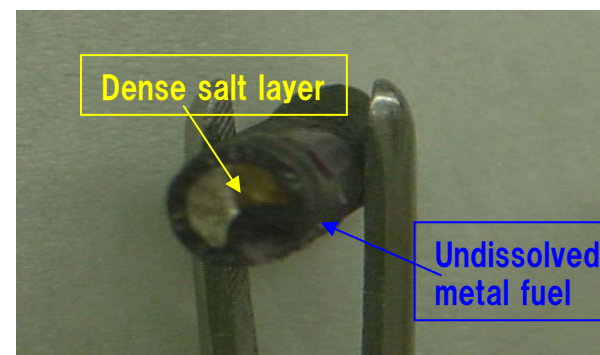
ITUとの共同研究成果

電解精製 —U-Pu-Zr燃料試験—

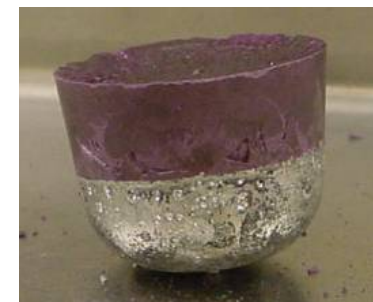
Phenix照射用のU-Pu-Zr燃料の一部を利用した小規模電解精製試験
⇒ 陽極での燃料溶解、陰極でのU, Pu析出挙動を確認



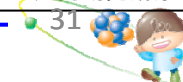
電解精製試験装置 (ITU)



電解精製後の燃料試験片



ITUとの共同研究成果



電解精製工学技術の開発 —U回収速度の向上(1)—

F/S施設設計(棒状陰極／陽極個別配置)
で仮定されているU回収速度
: 6.4t-U/y (電解精製装置1基あたり)
→電極構造物単位体積あたりに換算すると
 $\text{約}8.8\text{g-U/h}\cdot\ell$

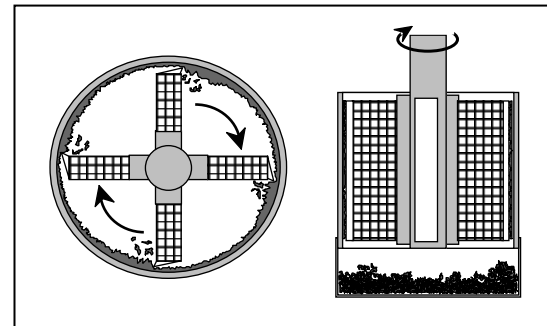


0.73kg-U

CRIEPI-Toshiba test result

析出物掻き取り式電極開発による達成目標

- ・施設設計上の目標値の4倍の処理速度
($35.2\text{g-U/h}\cdot\ell$)
- ・貴金属FPの除染性能確保

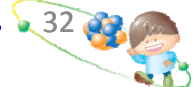


電解槽内径:380mm
陰極内径:250mm
電極占有体積:約25ℓ
使用塩浴(LiCl-KCl)量:60kg
装荷U量:最大10kg程度／バッチ
最大電解電流:900A

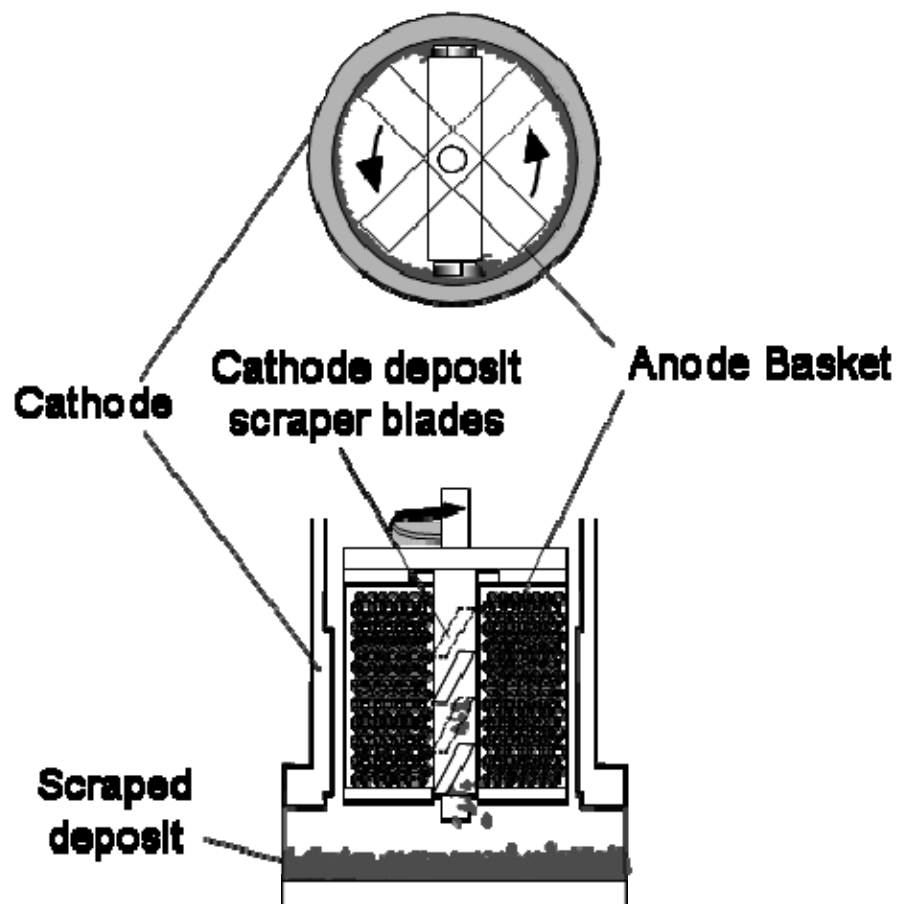
工学規模電解精製試験装置



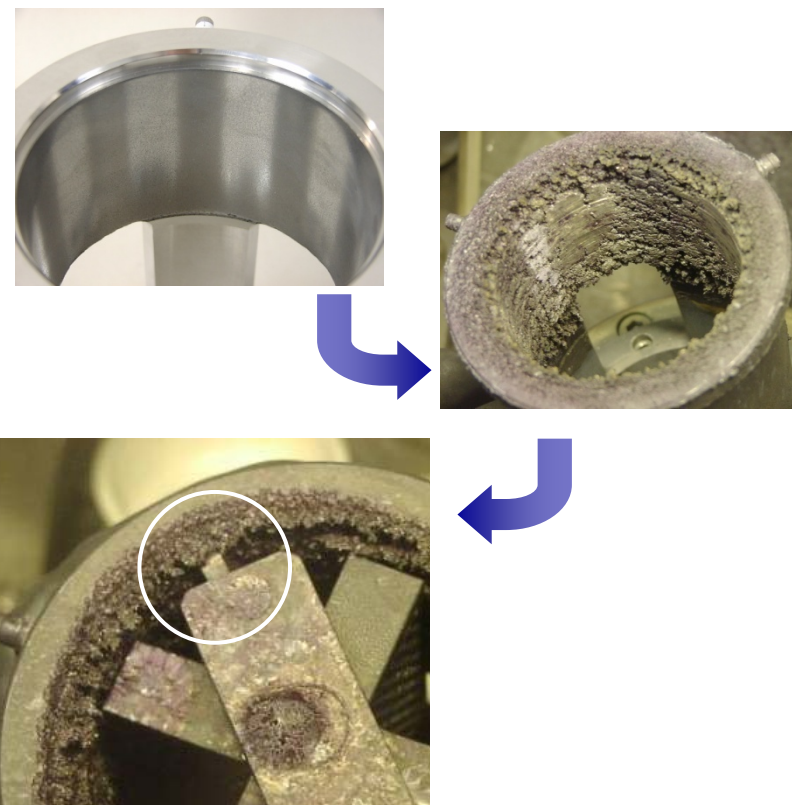
文科省委託事業「金属燃料の乾式再処理プロセスの合理化に関する技術開発」成果



電解精製工学技術の開発 —U回収速度の向上(2)—



電解精製槽の概念図
(剥ぎ取り治具付)

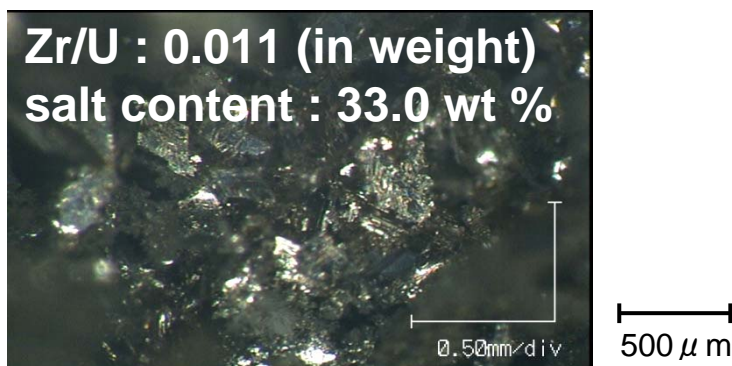


治具の刃により析出したウラン金属をは
ぎとっている様子

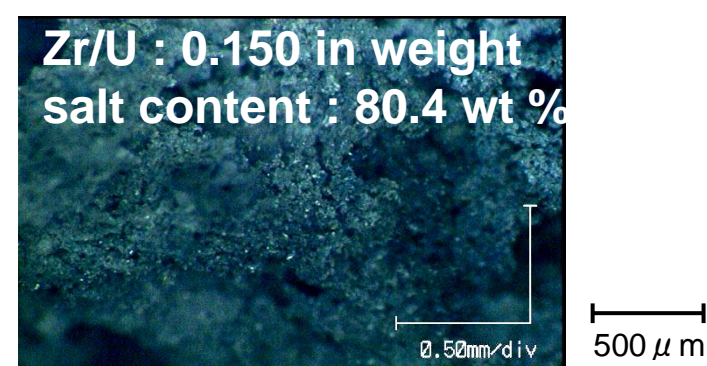
(Cathode deposit was pressed to cathode by
scraper blades)

はぎとられた金属は電解槽底部で回収

電解精製工学技術の開発 —U回収速度の向上(3)—

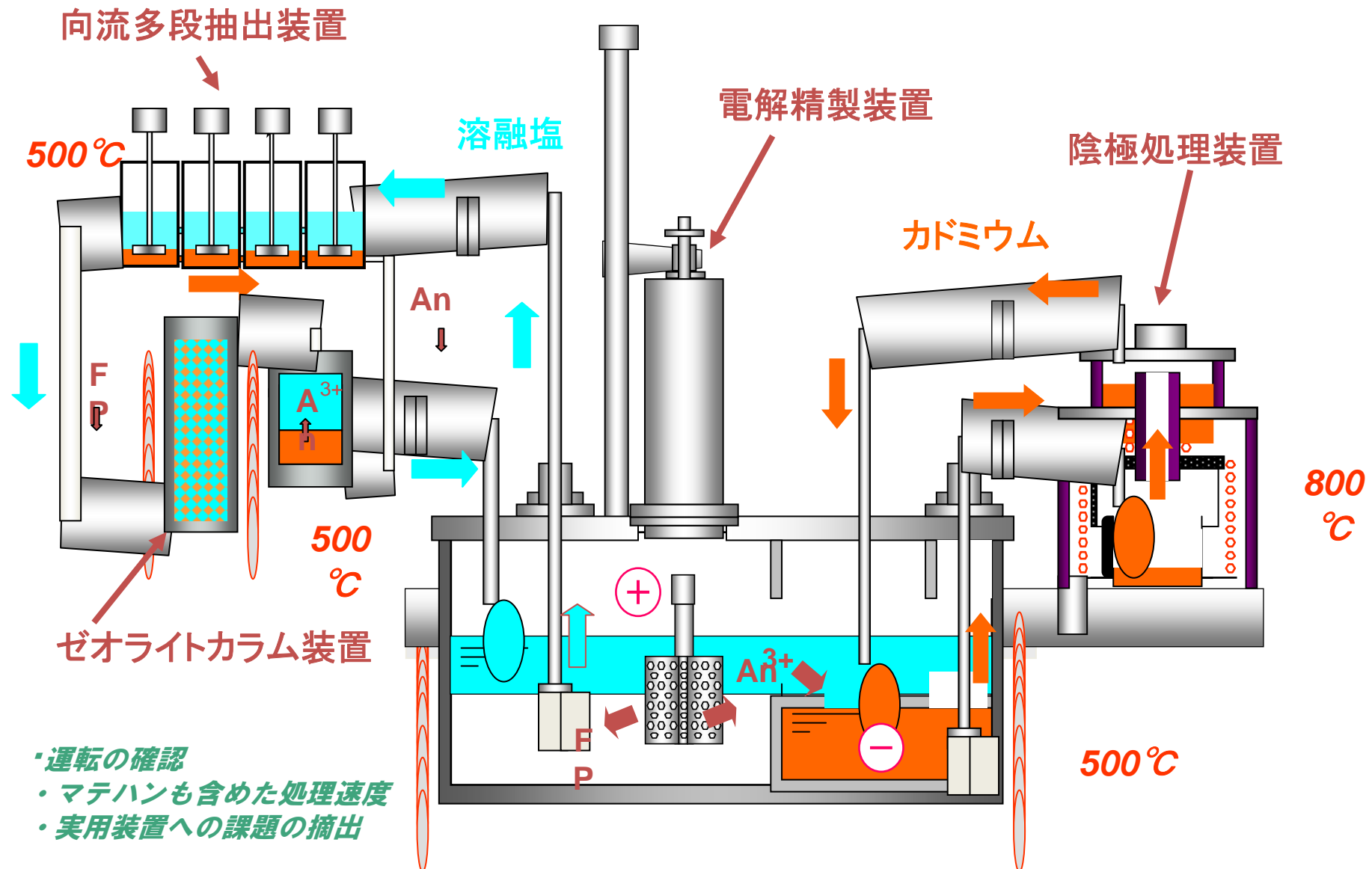


Collected product after 1st scraper operation (most U-rich product)

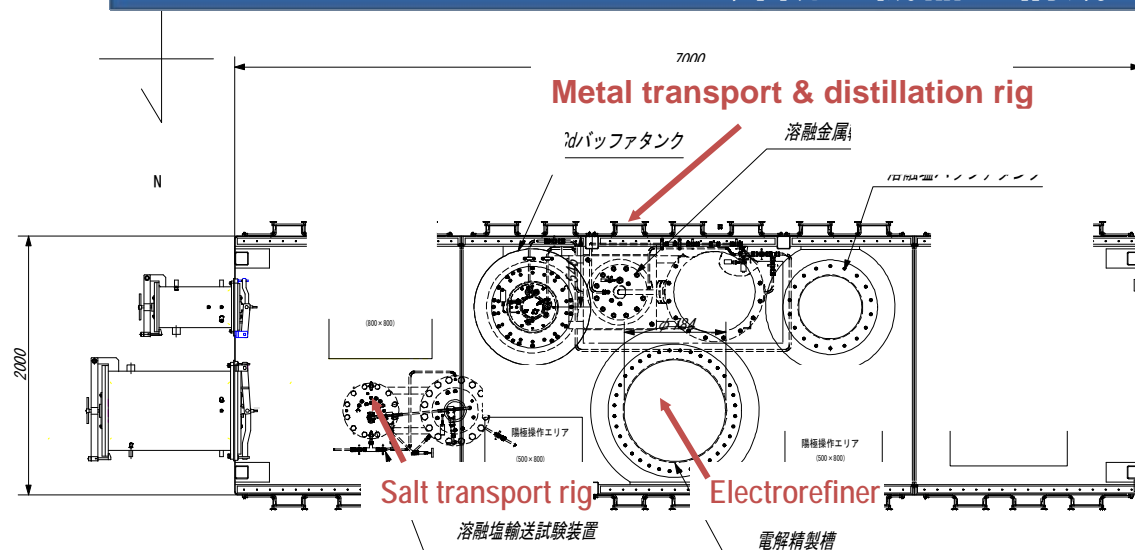


Collected product after 3rd scraper operation

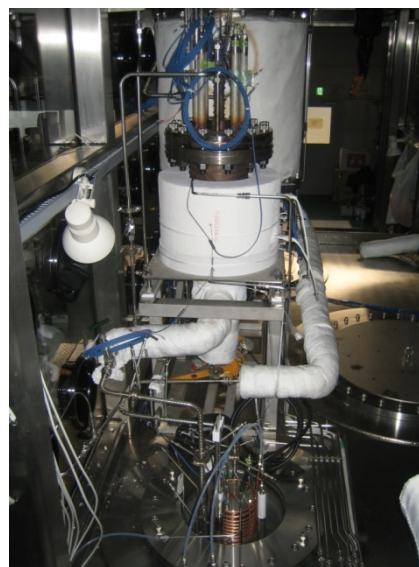
融体遠隔移送装置・高速度処理技術の開発
 — 電解精製装置、陰極処理装置、抽出器、ゼオライトカラムの設計・製作・試験 —



融体遠隔移送装置・高速度処理技術の開発 —GBX外観と機器の構成—



塩移送リグ

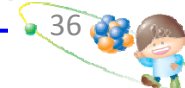


金属移送・蒸留装置



大型アルゴン雰囲気グローブボックス

MEXT公募、2004～



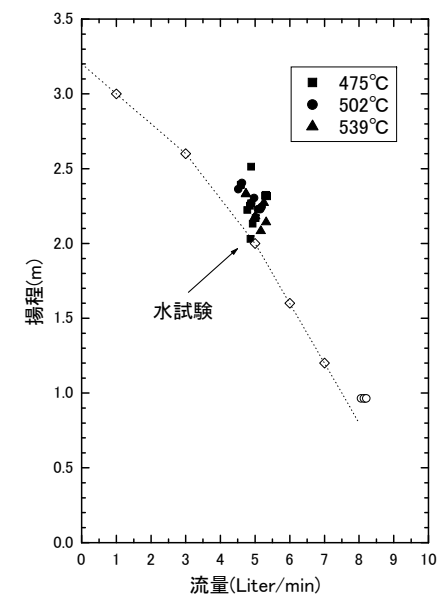
融体遠隔移送装置・高速度処理技術の開発 —GBX外観と機器の構成—



溶融塩輸送試験での溶融塩の吐き出し



配管からの溶融塩の漏れ



遠心ポンプでの揚程と流速の関係

MEXT公募、2004～

融体遠隔移送装置の開発 — 電解精製装置、溶融Cd移送・蒸留試験 —

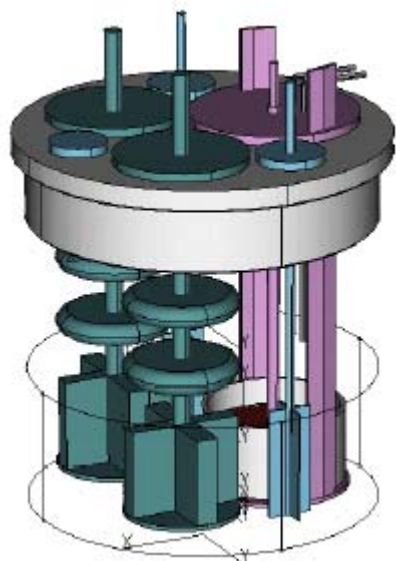
平成19年度の目標

模擬物質(Puと物性の近いGd)を用いた試験により、
成立性と処理速度を評価する。

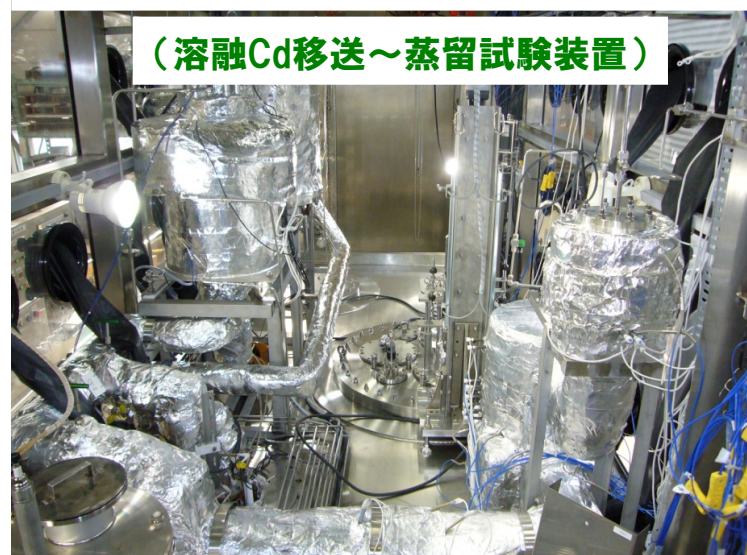
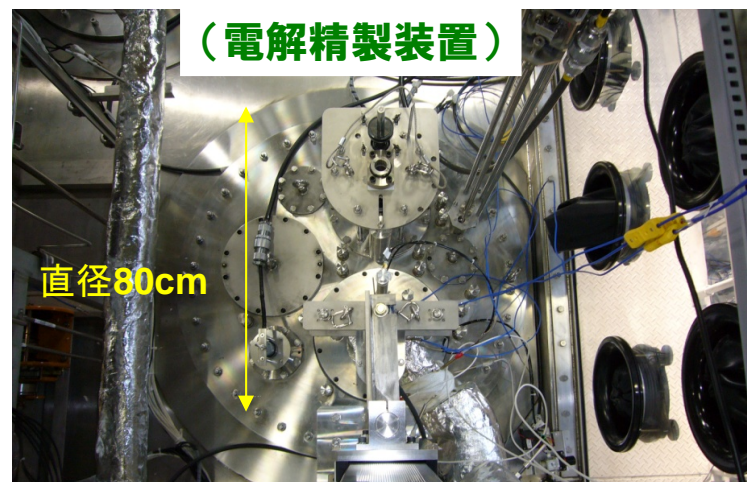
成果

陰極に回収したGdを溶融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。

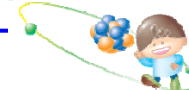
大型装置での電解速度(電流密度)と溶融Cd-Gdの輸送速
度を評価し、概念設計検討によりその処理速度を評価。



電解槽概念図



MEXT公募、2004～



塩処理・固化、高温耐食材料の開発

使用済み塩の精製

- ゼオライトカラムへの通液によるFP元素の除去

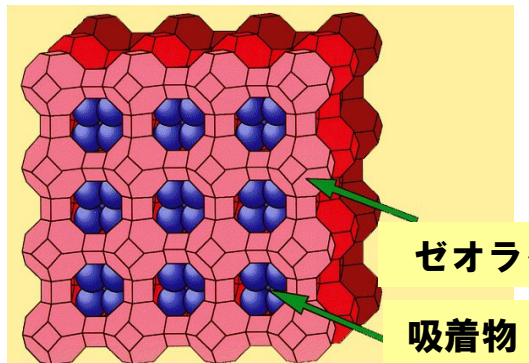
使用済み塩の固化

- FP除去後の塩の人工鉱物固化
- FPの鉛への回収とガラス固化(革新技術)

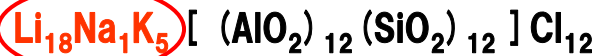
高温耐食材料の開発

- 塩蒸留用るつぼの開発
- 射出鑄造用るつぼの開発

ゼオライトへのFP元素の吸着試験



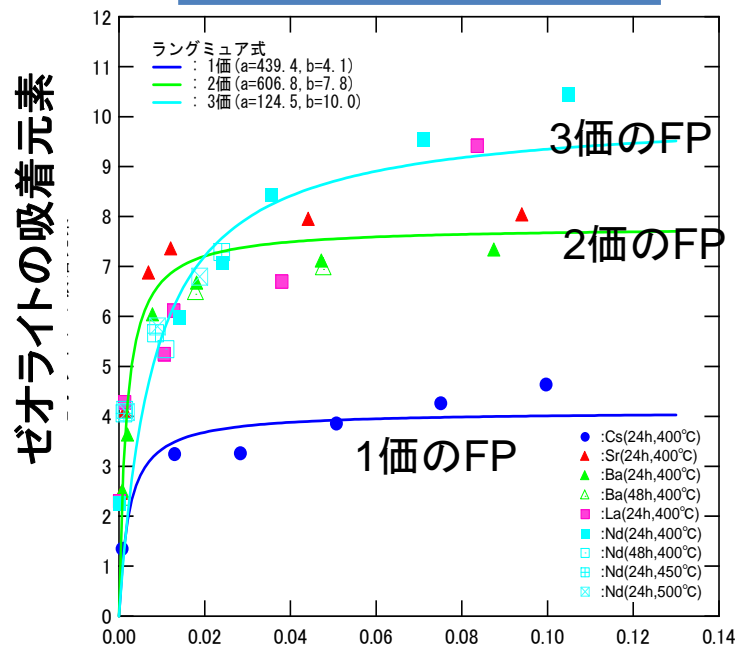
低Naゼオライトの代表的な組成



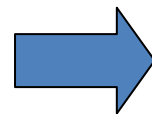
*ゼオライト単位セル当たりのFP元素の当量(12molSi当たり)

使用済塩中のFPイオンと置換し、
FPがゼオライトに吸着

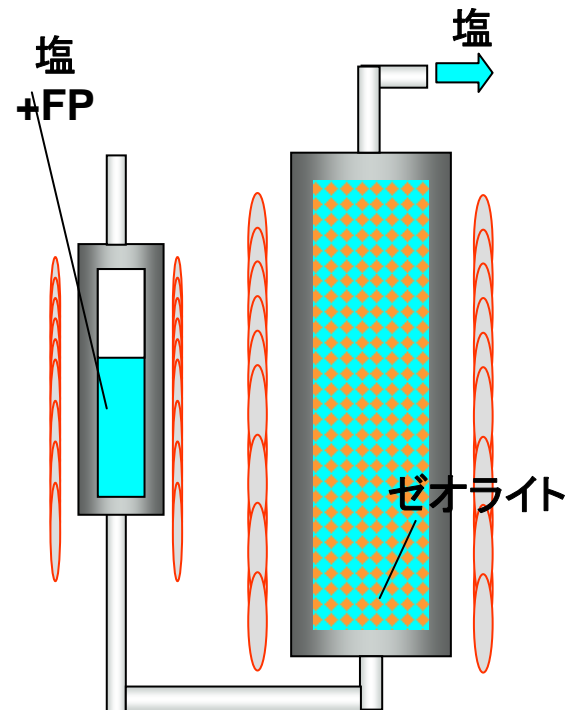
バッチ試験



○ 吸着性能の向上
 ○ 処理速度の向上



ゼオライトカラム試験



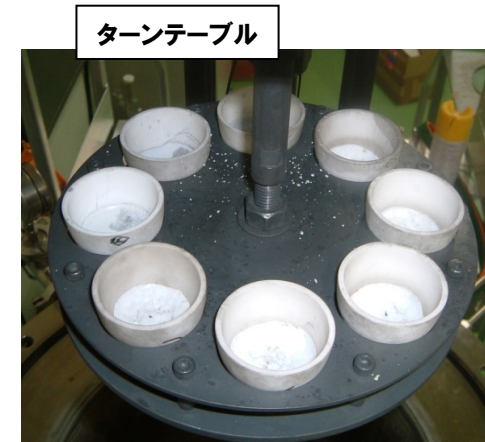
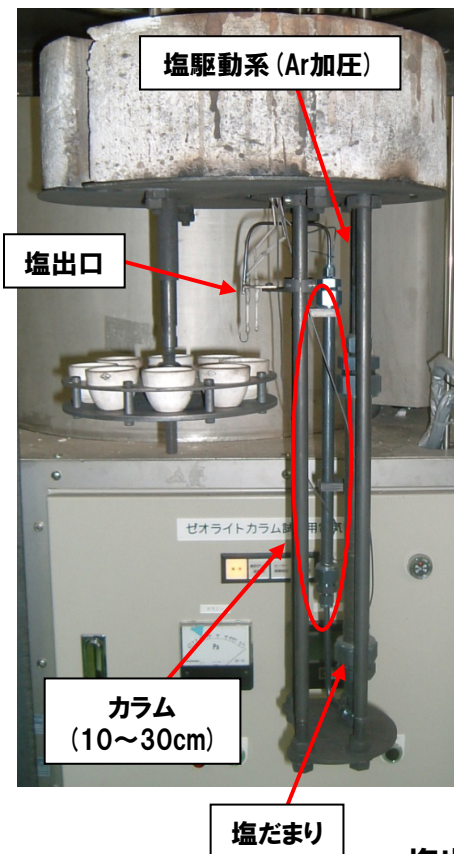
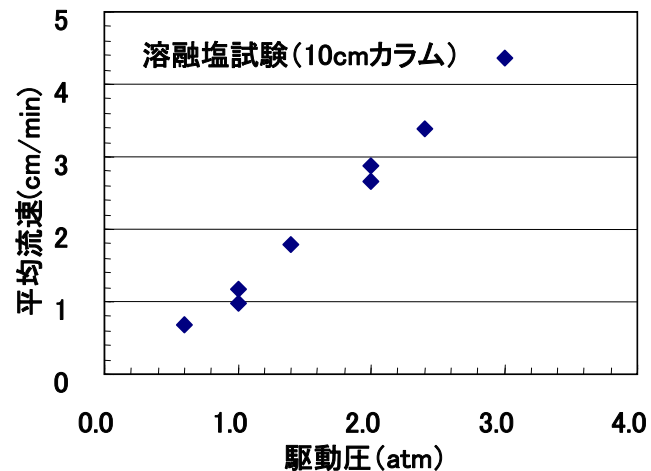
溶融塩中のFPイオン

ゼオライトカラムの開発

中規模カラム試験装置(～100g/hr)による、
カラム性能(イオン交換速度)を評価する。



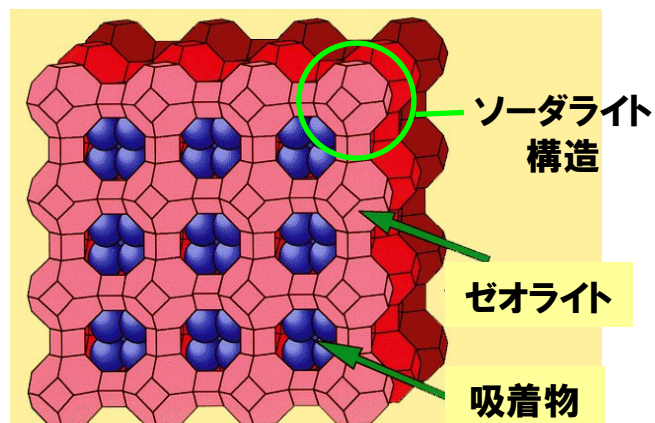
カラム運転条件(圧力、ゼオライト装荷方法
等)を絞り込み、イオン交換試験に着手。



塩出口に配置したターンテーブルと液位センサーにより
吐出塩を分取し、塩組成の変化を測定



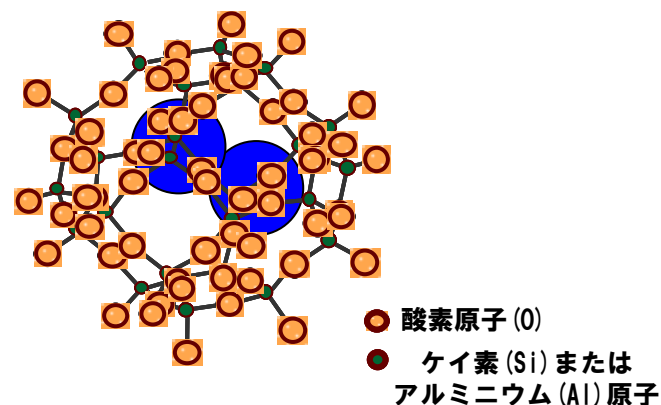
ガラス結合ソーダライト固化体の製造試験



新ゼオライト、
ガラス原料を添加



昇温 & 加圧



ソーダライトのカゴ構造内に
FP塩化物が取り込まれ、
ガラス結合ソーダライト固化体に



HIP法によるガラス結合ソーダライト
(最高860℃、100MPa)



PC法によるガラス結合ソーダライト
(最高910℃、700kgf/m²)

- いずれの方法でも均質な固化体を製造
- 製造した固化体の対浸出性は、ガラス固化体と同等以上

射出鑄造工程用るつぼの開発(1)

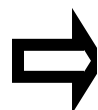
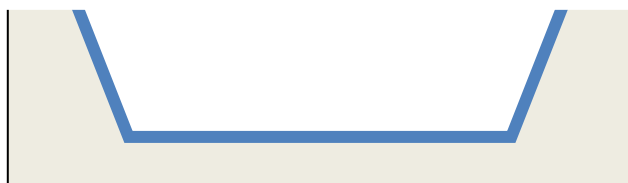
【背景】

従来の黒鉛にイットリア塗布したるつぼでは黒鉛がイットリアと反応すること、再塗布時のブラスト処理により黒鉛の減肉が大きいことが、黒鉛の再使用回数が限定される(10回程度) 廃棄物発生量の増加

【対策】

タングステンがイットリアと反応しないこと、硬度が高いことより、
黒鉛に炭化ジルコニウム塗布; + ; タングステンにイットリア塗布
の複層るつぼを開発し、再使用回数を増大させ廃棄物量を低減する

単層るつぼ
黒鉛にイットリア(緑色)塗布
金属燃料溶解時の基盤保護



複層るつぼ
中間に炭化ジルコニウム(黄色)
とタングステン(青色)の層追加



射出鑄造工程用多層るつぼの開発(2)

【試験】

ウラン溶解試験にてイットリアがタングステン基盤を保護することを確認
実機形状のるつぼの製作および高繰返し加熱試験にてるつぼ材料間
の反応、るつぼの変形損傷が無いことを確認

【結論】

るつぼの高繰返し再使用の可能性があり廃棄物が低減すると判断



タングステン外観
寸法:150mm上部径、
55mm高、2mm厚
上:外面
下:イットリア除去後
の内面



黒鉛＋炭化ジルコニウム塗布
の内面 寸法:170mm外径,66mm高



高繰返し試験(800℃-1,600℃、150回)後のるつぼ材料の外観

国内外機関との連携による研究の推進

京都大学原子炉実験所（熊取）
○還元、電解、抽出の基礎試験



日本原子力研究開発機構（東海）
○CPFでの乾式再処理プロセス試験



原子燃料工業（東海）
○U-Zr燃料の工学規模鑄造試験



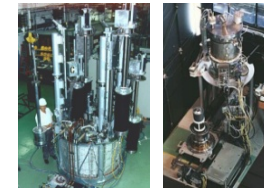
EC超ウラン元素研究所（独）
○MA含有金属燃料の製造
○実燃料、HLWでの乾式試験



↑
↓
**フェニックス
（CEA/仏）**



アイダホ国立研究所（米）
○実使用済金属燃料の再処理試験における物質分布



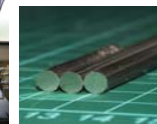
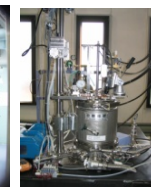
カワサキ（明石）
○工学規模TRU抽出試験（コールド）



東 芝（川崎）
○工学規模ウラン電解試験



日本原子力研究開発機構（大洗）
○常陽照射用金属燃料の製造試験



まとめ

燃料製造

- 5%程度までのMA含有金属燃料の物性を測定することにより成立性を確認した
- フェニックス炉での照射試験のためMA無、2wt%、5wt%含有する金属燃料棒を溶解により作成した

核変換

- 2003年末から2008年にかけて3種類の金属燃料を、低、中、高燃焼度まで仏高速炉フェニックスで照射した
- 非破壊検査によりいづれの燃料とも健全に燃焼したことを確認した
- MA含有燃料の照射特性もこれまで実施した観察項目内では、通常のU-Pu-Zr合金燃料と特段の差は認められなかった
- MAの核変換挙動は今後測定する予定である

燃料処理(乾式再処理)

- 化学プロセスとしての成立性は確認した。現在使用済み燃料、フェニックス照射燃料を使った小規模でのリサイクル試験を予定している
- 主要な工程について実用規模で利用できる装置開発を行っており、一部のプロセスについては初期の目標以上(電解精製による回収速度)を達成した
- 遠隔運転が可能な融体移送方法を開発している
- 1000℃以上の高温プロセス(塩、カドミウム蒸留、射出燃料製造)に利用できる多層構造のるつぼの開発を行った

今後の課題等

本技術に関する今後の課題

- MA変換挙動の確認(フェニックス照射燃料)と金属燃料照射実績の蓄積(常陽照射)
 - 工学規模の装置開発と実証試験
 - 処理容量の増大化方策(10-20トン規模から数十トン規模へ)
 - システムの安全性確保の論理とそのデータの取得
 - 核物質管理法の構築
 - 経済性評価
-
- 今後の本技術の我が国での位置づけ(現在は基礎、基盤技術として電中研独自の投資(一部提案型公募研究利用)で実施)
 - 本研究開発に対する国内における連携の強化
 - 国内での乾式・金属燃料開発に関する施設は整ってなく、今後本研究開発を実施するためには、国内での関連施設整備が望まれる

関連事項

- 米国は次世代燃料サイクル技術として湿式、乾式双方を同等に位置づけ研究開発を実施している(湿式法より乾式法の技術基盤が米国にはあり)、但し次期政権下での取組姿勢は未確認
- インド、中国、(韓国)は本乾式プロセスを高速炉燃料処理の主プロセスと位置づけ、積極的な研究開発を展開している

補足資料

金属燃料開発の経緯と現状

➤ 現在実施中または準備中の世界の主要な燃料照射試験

照射炉	実施機関	特徴	燃料形態	組成	現状
常陽(日)*	JAEA	MA含有MOX	酸化物	(U,Pu,MA) O ₂	照射中
	JAEA	もんじゅ燃料	酸化物	(U,Pu,Am) O ₂	照射終了
	JAEA	ODS被覆管燃料	酸化物	(U,Pu) O ₂	準備中
	電中研-JAEA	金属燃料	金属	U-Pu-Zr	準備中
ATR(米)**	INL	MA含有燃料 (AFC-2)	酸化物	(U,Pu,MA) O ₂	照射中
			金属	U-Pu-Zr-MA-RE	照射中
Phenix(仏)**	電中研-ITU	MA含有金属燃料	金属	U-Pu-Zr-MA-RE	照射終了
BOR-60(露)	JAEA-RIAR	ODS被覆管燃料	酸化物顆粒	(U,Pu) O ₂ -U	照射中

*現在トラブル停止中 **上記の他、ターゲット燃料の照射試験など実施中

MA添加燃料を装荷した大型均質炉心の特⼒

	高速炉 リサイクル燃料	2%MA 添加燃料	5%MA 添加燃料
Pu富化度 [wt.%]	14.5	14.1	13.6
MA添加率 [wt.%]	0.5	2.0	5.0
MA変換率 ^{*1} [wt.%]	-	45.4	50.8
ボイド反応度 ^{*2} [\$]	7.9	8.4	9.2
ドップラー係数[10 ⁻³ Tdk/dt]	-4.1	-3.8	-3.2

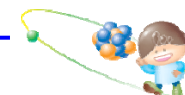
^{*1} : (MA装荷量-MAX取出量)/MA装荷量 × 100%

^{*2}:ドライバ燃料領域のダクト内冷却材ナトリウムを全てボイド化。ピン非均質効果を考慮。

仮想的な炉心損傷事故時における即発臨界回避のための
ボイド反応度目安制限値 ~10\$^{注)}。

大型均質炉心では、炉心安全性の観点から、MA添加率を
5wt.%以下に抑えるべき。

^{注)}電力中央研究所研究報告T01002(2002)



内部ブランケットを装荷した大型非均質炉心によるMA変換特性の比較

MA添加率 [wt.%]	2.0	5.0	10.0	30.0
Pu富化度 [wt.%]	19.8	19.4	18.6	15.0
増殖比	1.10	1.10	1.06	1.02
ボイド反応度* [\$]	5.1	5.6	6.5	10.1
ドップラー係数 [10^{-3}Tdk/dt]	-4.1	-3.6	-2.9	-1.4

*:ドライバー燃料領域のダクト内冷却材ナトリウムを全てボイド化。
ピン非均質効果を考慮。

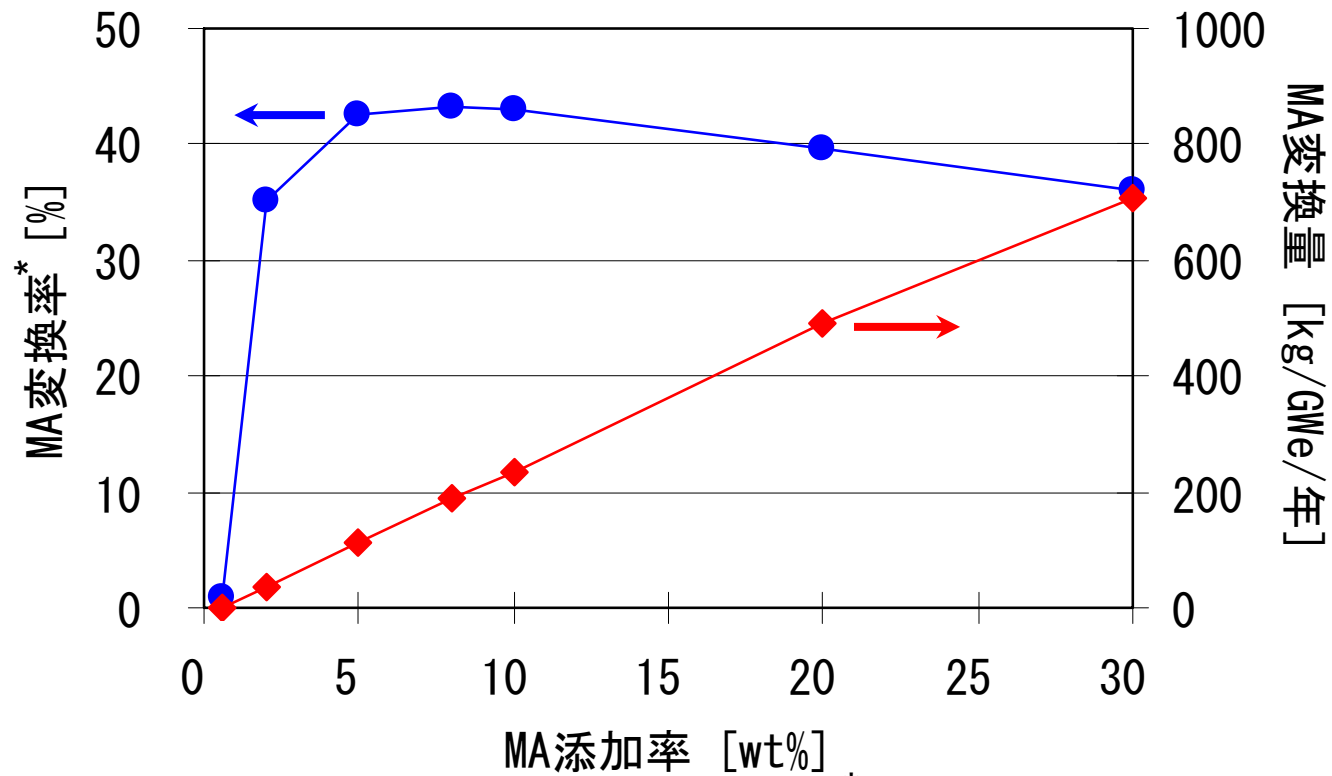
内部ブランケットを装荷した大型非均質炉心では、

~30wt.%以下までボイド反応度は実用的な範囲に収まる

一方、ドップラー係数が大幅に低減

→ 詳細な過渡解析に基づく評価が必要

大型非均質装荷炉心によるMA変換特性解析結果



*: $(\text{MA装荷量} - \text{MA取出量}) / \text{MA装荷量} \times 100\%$,

MA添加率(装荷量)の増加に伴い、MA変換量は増加。
一方、MA変換率は5-10wt.%のMA添加率でピークに。
(高濃度MA添加炉心では、炉内中性子束が低下)

金属燃料の制作 (常陽照射試験計画)

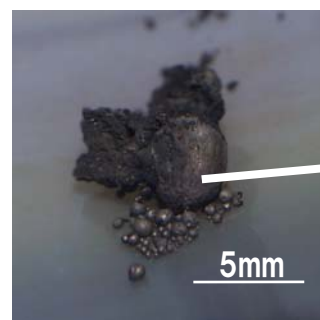
- 原子力機構大洗に設置した、電解精製・射出鑄造等の試験装置を活用
- 先月、初めてU-Pu-Zrの射出試験を実施
- 2007年度までに10ピン程度製作し、照射開始(低・中・高燃焼度で取出、分析)



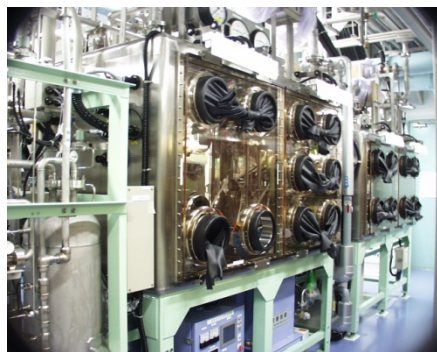
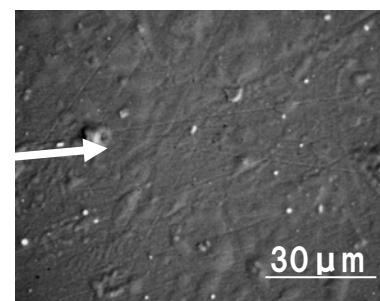
陰極析出物など
(Cd-Pu-U合金)



Cd蒸留分離装置



U-Puインゴット



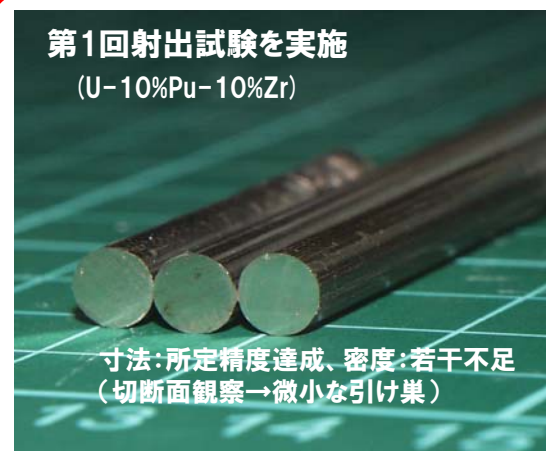
(燃料製造グローブボックス)



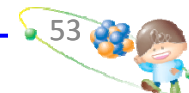
射出鑄造装置



第1回射出試験を実施
(U-10%Pu-10%Zr)



寸法: 所定精度達成、密度: 若干不足
(切断面観察→微小な引け巣)



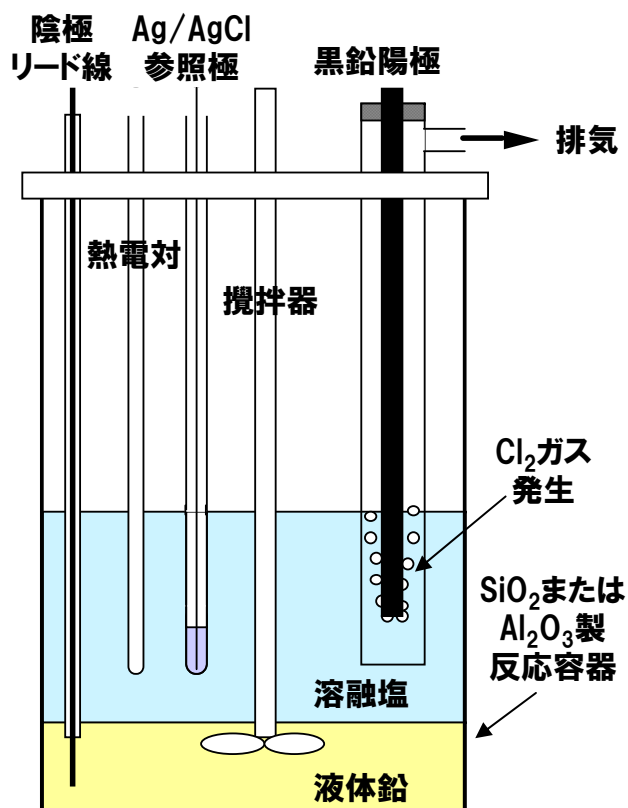
塩廃棄物処理法の開発: ガラス固化のための酸化物転換

目的

アルカリ、アルカリ土類、希土類金属FPを含む塩化物廃棄物からガラス固化体を製造する。

ガラス固化体の製造手順

- ① 熔融塩電解により、液体鉛中に活性金属元素を抽出（陽極では塩素ガス発生）
- ② 活性金属-鉛合金を酸素と反応させて、活性金属を酸化物スラグ相に抽出
- ③ 酸化物スラグ相からガラス固化体を製造



$$D_M = \frac{X_{M \text{ in Metal}}}{X_{M \text{ in Salt}}}$$

D: Distribution coefficient
X: Mole fraction

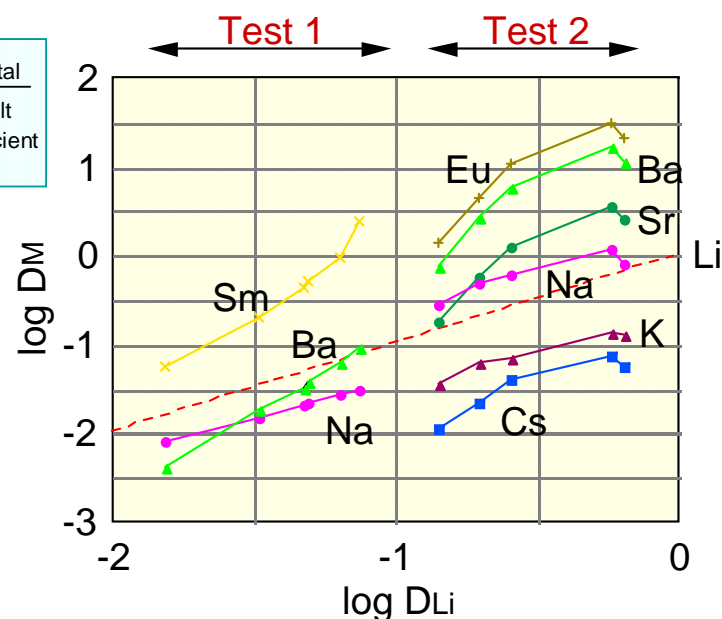


図 電解時における活性金属の熔融塩/液体鉛間の分配

まとめ

- ・希土類及びアルカリ土類金属元素は鉛中に抽出されやすい。
- ・Cs及びKは塩中に残留する。
- ・塩中のCs組成が大きくなるとCsも鉛中に回収される。
- ・固体陰極を用いればNaが選択的に回収される。

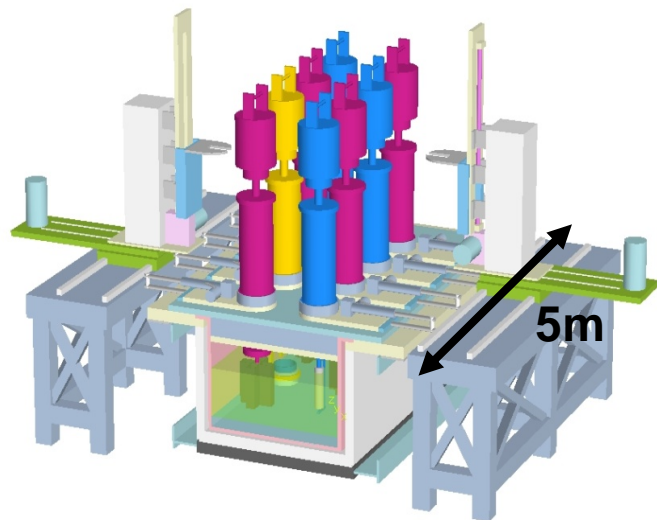
図 鉛陰極を用いた電解装置 (600-700℃)

実用電解精製装置の概念設計

38tHM/yの処理速度を有する乾式再処理プロセス機器の概念設計検討

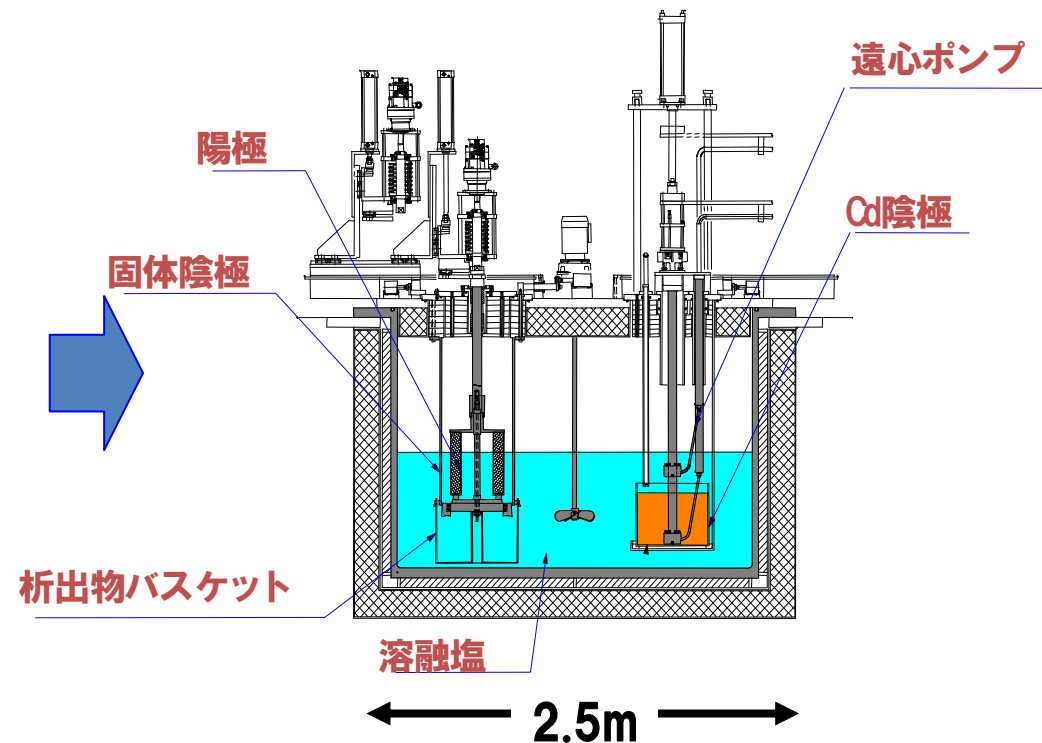
○FSフェーズIIでの設計

4極対
(L:5.0m×W:2.4m×H:3.9m) × 5基



○今回の開発成果等を反映した設計

2極対
(L:2.5m×W:2.5m×H:3.1m) × 2基



アルゴンホットセルの容積が約30%低減

