

核燃料サイクルの新しい展開
について

— 乾式リサイクル・金属燃料FBR
酸化物燃料の電解還元 —

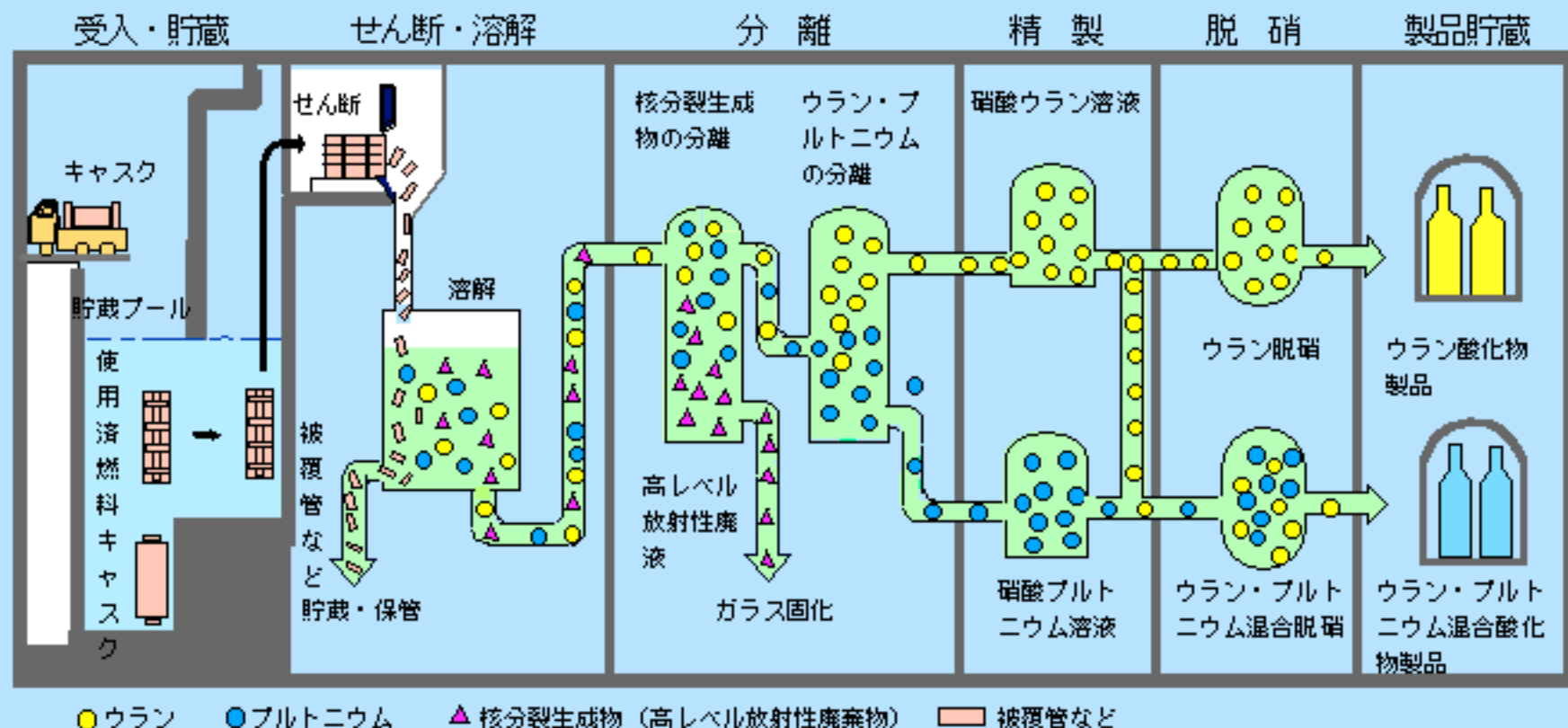
平成14年4月23日
(財)電力中央研究所
井上 正

今なぜ 核燃料サイクルか

1. **日本のエネルギーセキュリティ**
 - ー 電源のベストミックス
 - ー 原子力は超高密度エネルギー源 (基幹電力源として最適)
2. **原子力における資源の有効利用**
 - ー ウランだけ利用：数十年 → プルトニウムも利用：千年以上
3. **原子力もリサイクル社会への適合**
 - ー 使い捨てよりリサイクル(社会的ニーズ)
 - 超ウラン元素(Pu, マイナーアクチノイド元素) の利用
 - 核分裂生成元素の有効利用
4. **今後発生する使用済み燃料への対応**
 - ー 高燃焼度燃料、プルサーマル用使用済み燃料の処理
 - ・ 当面は中間貯蔵：モトリウム → その後の回答についての提示 (複数オプションの保有とそれに向けての着実な取り組み)
 - ・ 直接処分 or 処理して合理的な形態で処分 or リサイクル

核燃料サイクルの確立 は有力なオプションとして不可欠

現状の湿式再処理（ピューレックス法）



- 課題：
- 建設コストが高い。
 - プルトニウムが単独で分離できる技術である。
 - 高レベル廃棄物に長半減期核種（マイナーアクチナイド元素等）が混入する。
 - 廃棄物の低減化。
 - プルサーマル燃料、高燃焼度燃料への対応

乾式リサイクル研究開発の意義

1. 開発目標

安全性、経済性が高く、環境への負荷の少ない燃料サイクルの開発

2. 乾式リサイクル技術の特徴

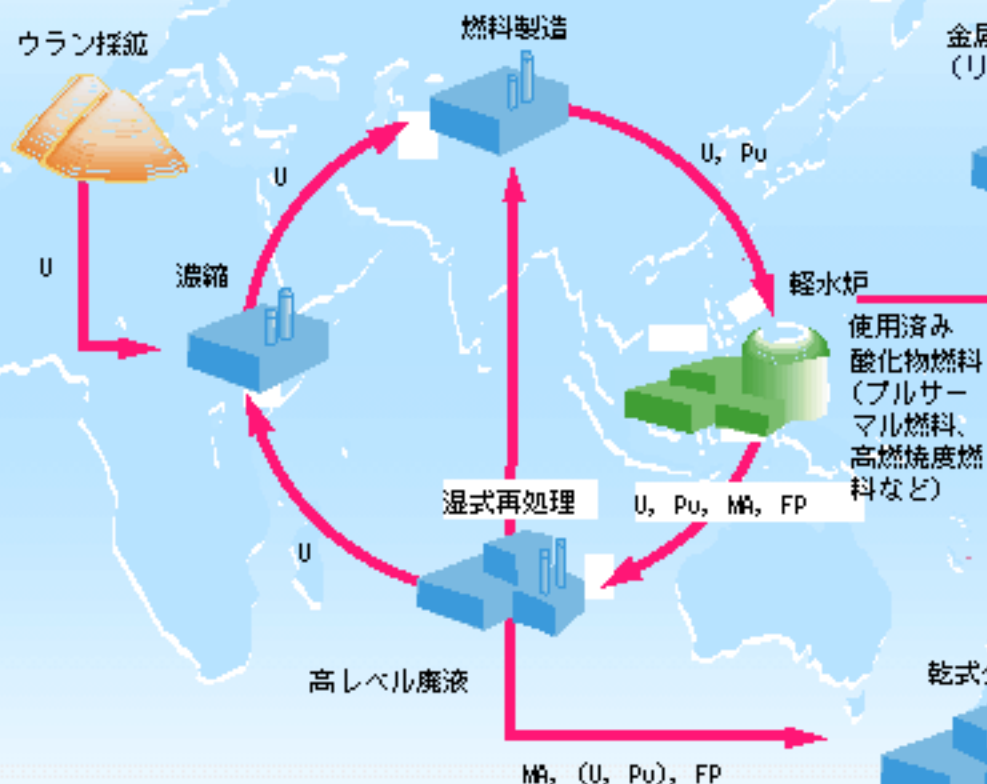
- ・ 乾式法は、経済性、環境への負担の軽減、製品が兵器転用物質として不適など従来法に比べて本質的に勝る利点が多い
- ・ 欠点とみられる点(高温プロセスであることなど)は今後の技術開発により克服可能

3. 開発の必要性

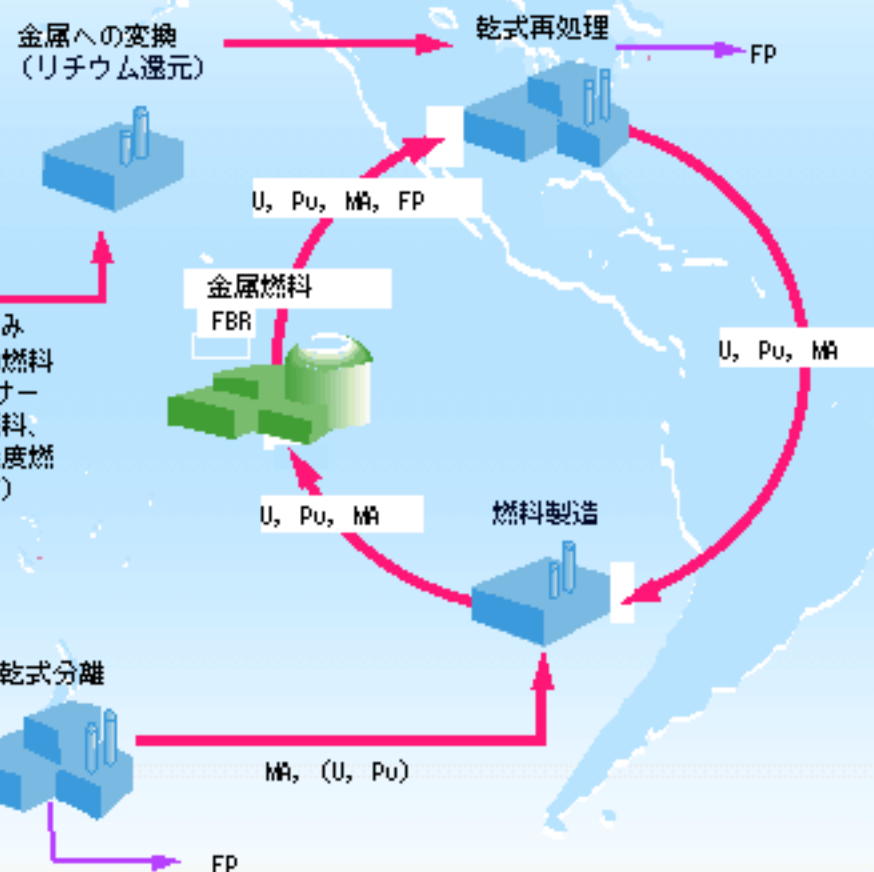
- ・ 原子力の燃料サイクルについて多様な選択肢を用意しておくことが必要
- ・ 今後の燃料サイクルへの要求に対して相対的なポテンシャルが高く、高速炉開発のブレイク・スルー技術として期待
- ・ 使用済み燃料の処理技術としても適用可能性を有する

軽水炉サイクルとFBRサイクルの統合

軽水炉サイクル



乾式リサイクル・金属燃料FBRサイクル



MA(マイナーアクチニド) :
ネプツニウム、アメリシウム、キュリウム

FP: 核分裂生成物

1. 高い経済性 ⇒ 従来法より大幅な低減を目標

- 各機器・施設がコンパクト、
(バッチ処理：サイズは臨界質量で制限される)
- 工程数が少なくプロセスが単純（ただし、高温である）
- 鋳造法によるシンプルな成型加工が可能（射出成型）

2. 廃棄物の低減（環境負荷の低減）

- MAがPuとともに回収（特別な工程を付加する必要がない）
- 溶融塩は放射線で劣化しない（低除染可、溶媒廃棄物少）

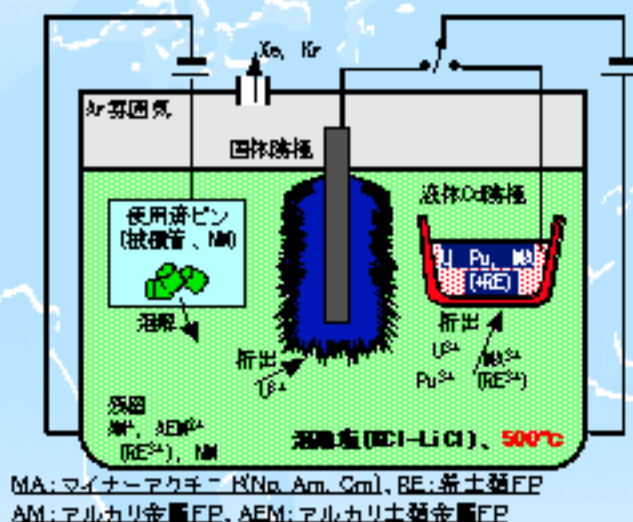
3. 処理対象燃料の融通性が高い

- 金属のみならず酸化物(MOX、高燃焼度) 窒化物に適用可

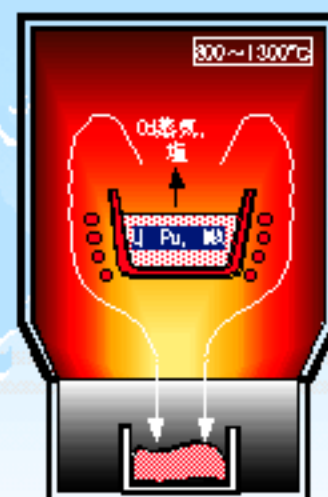
4. 核拡散抵抗性（核物質拡散への配慮）

- 標準的なプロセスではPu, Npの単独回収が困難（U, MAを伴う）
- FP低除染 & MA含有 → 放射能高
- コロケーションに適する（数10t/y規模でも経済的）

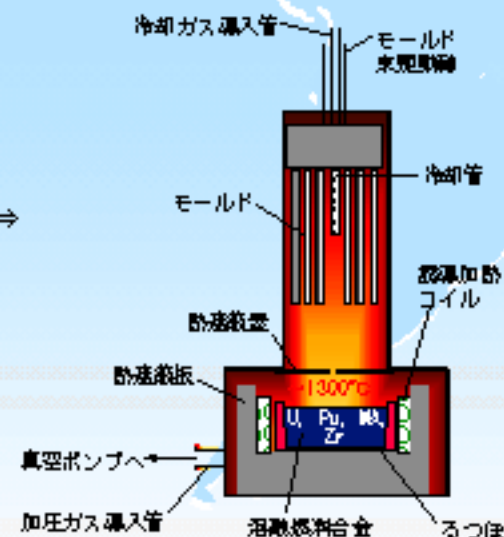
電解精製（ウランプルトニウムなどの回収）



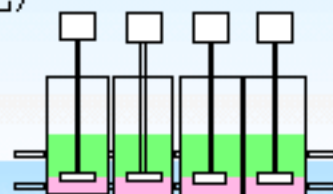
陰極処理（回収物と塩、Cdの分離）



射出成型（回収物からの燃料製造）

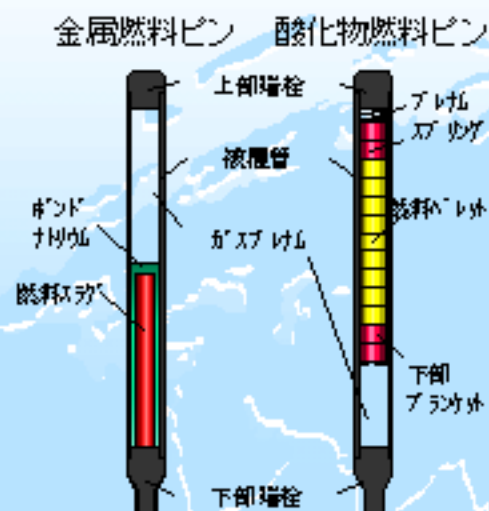


残留TRU回収 (多段抽出)



FP除去

(セオライト吸蔵→固化) ⇒



各種の高速炉燃料の特性例
(平均燃焼度を揃えた1600MW炉心の燃料)

	酸化物 (U, Pu)O ₂	金属 U-Pu-Zr	窒化物 (U, Pu)N
理論密度(g/cc)	11.1	15.8	14.3
重金属密度(g/cc)	3.72	4.72	4.88
熱伝導率(W/m・K)	3.9	23.8	17.3
融点(°C)	2750	~1100	~2600
照射スエリング	中	大	小

・高密度、
・高熱伝導度

・低融点、
・変形、再組織化大

1. 優れた実用性の見通し

(a) 実用的条件を達成可能

- ・炉心出口温度>500°C
- ・最大線出力~500W/cm
- ・取出平均>100MW d/kg

(ANL照射実績、電中研での設計研究から)

2. リサイクルと一体となって最も魅力が発揮される

(a) 炉心の高性能化

- ・高出力密度
→コンパクト化
- ・良好な中性子経済
→燃料所要量の大幅低減
→高い増殖性能の実現
→**MARS**に柔軟に対応

<酸化物燃料炉心との比較>

- ⇒約20%有利
- ⇒30~40%以上低減(ブランク半減)
- ⇒増倍時間半減

(電中研での設計研究から)

(b) 安全性の向上

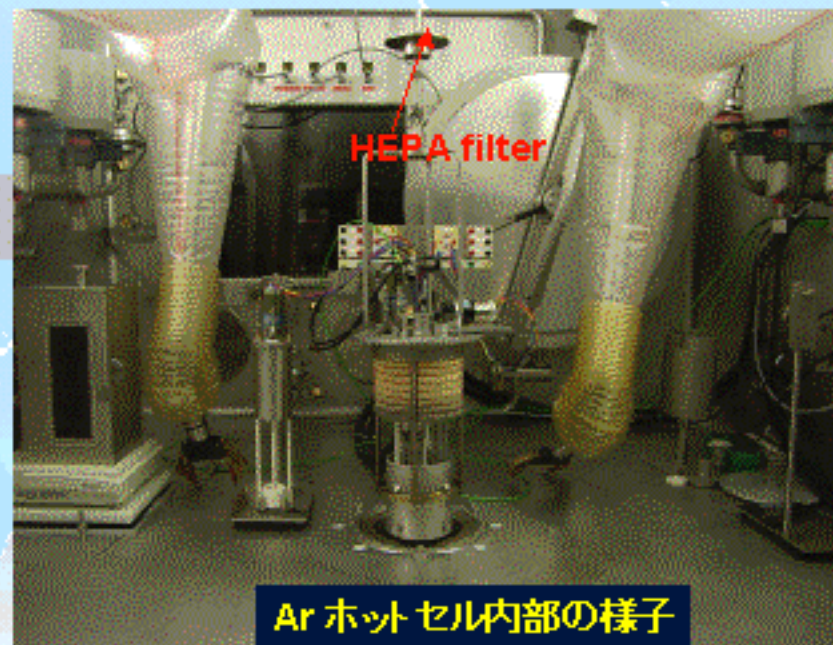
- ・燃料温度低→受動的安全性確保に有利

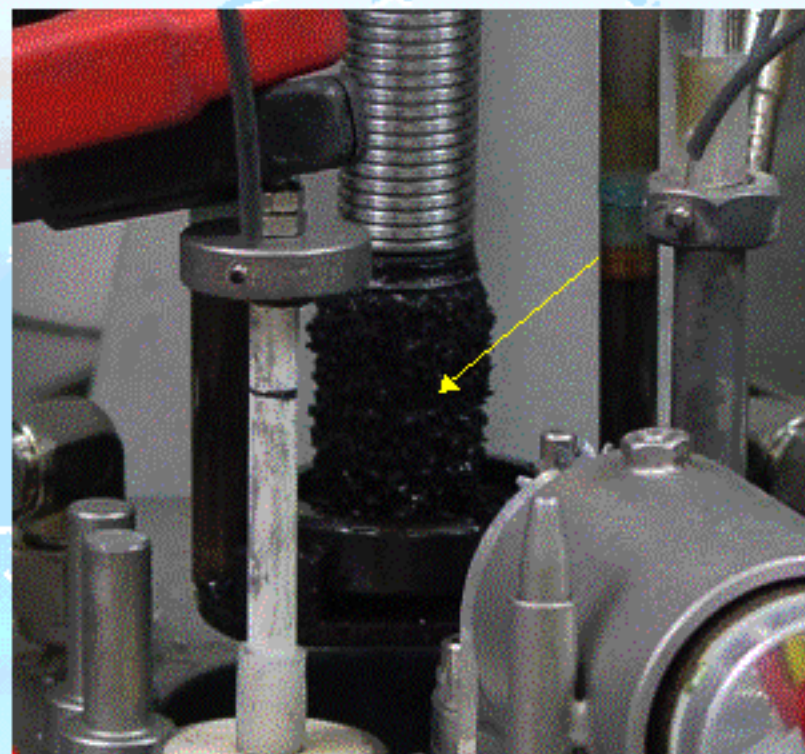
(FBR-IIでのデモ、電中研での過渡解析から)

(c) 乾式リサイクルに最も良く適合

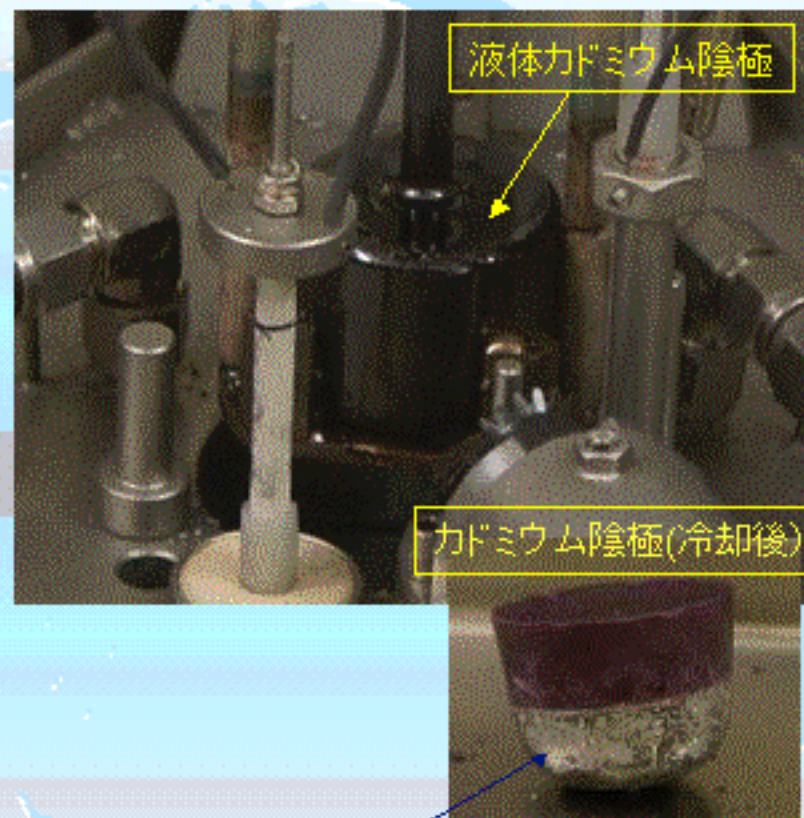
ホットセルでの実証試験 (1999～)

U-Pu-Zr-MA合金を用いた電解精製、TRU分離
照射済み燃料を用いた乾式リサイクル実証試験
実HLWからのTRU分離実証試験





陽極(U-Pu-Zr)を用いて陰極に析出させたウラン金属



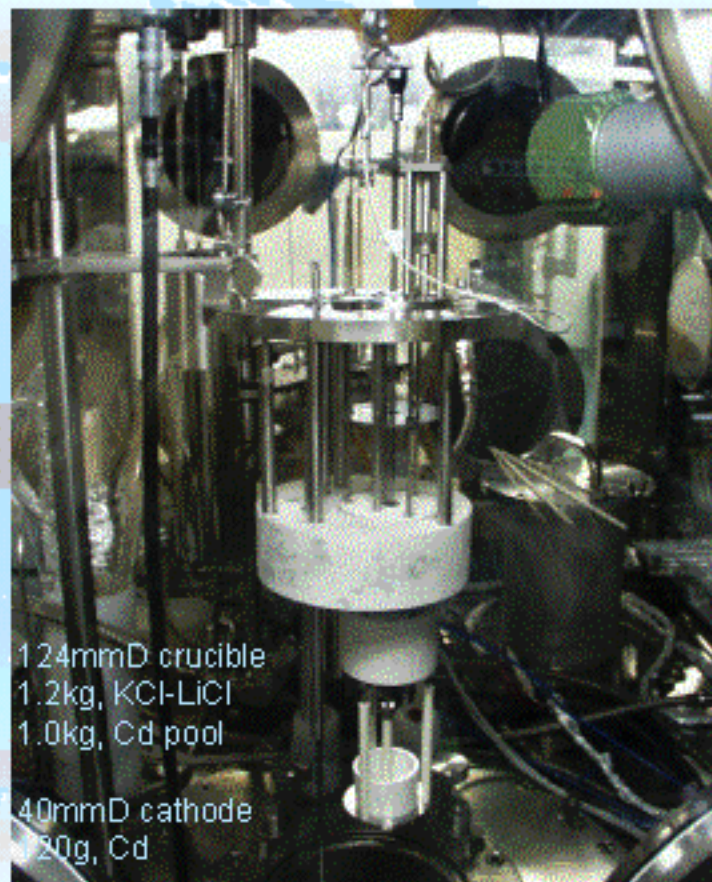
カドミウム陰極中に回収されたプルトニウムとアメリシウム
3.18wt%-Pu, 0.06wt%-U, 0.008wt%-Am

原研との共同研究(1995～)

Arグローブボックス中での、U, Pu, MA を用いた
電解精製の基礎的試験
(陰極処理による燃料合金製造
→照射用燃料製造も計画中)



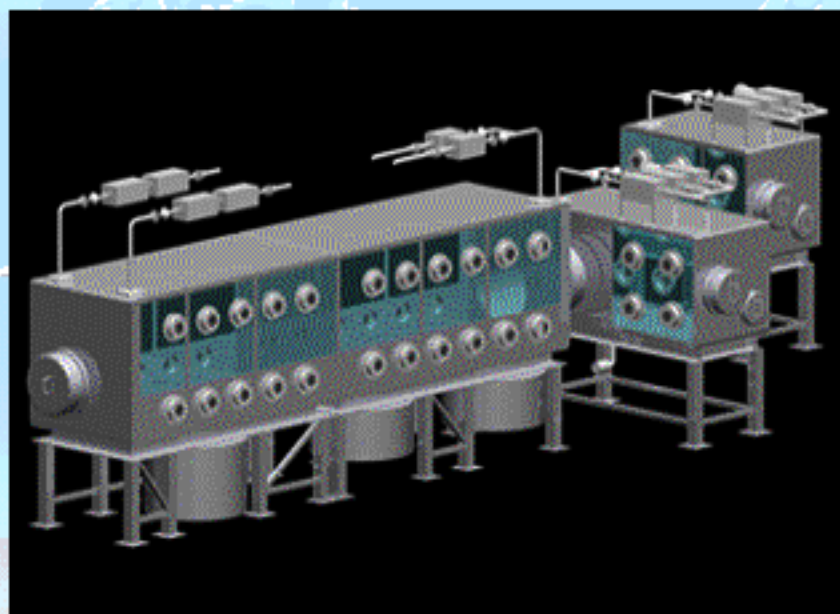
Arグローブボックスの外観



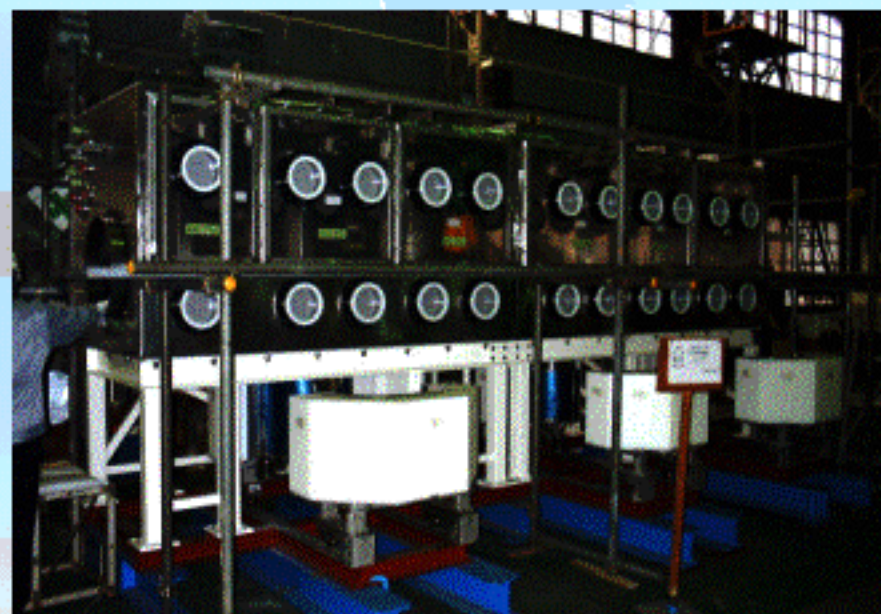
124mmD crucible
1.2kg, KCl-LiCl
1.0kg, Cd pool
40mmD cathode
20g, Cd

電解精製試験装置

Arグローブボックスでの、一連の小規模試験
(MOX試料還元、電解、合金回収、再酸化
; 今夏に稼動の予定)

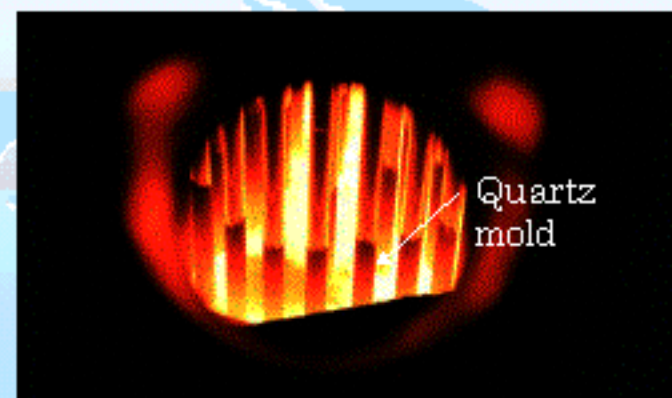


試験設備鳥瞰図(完成図)

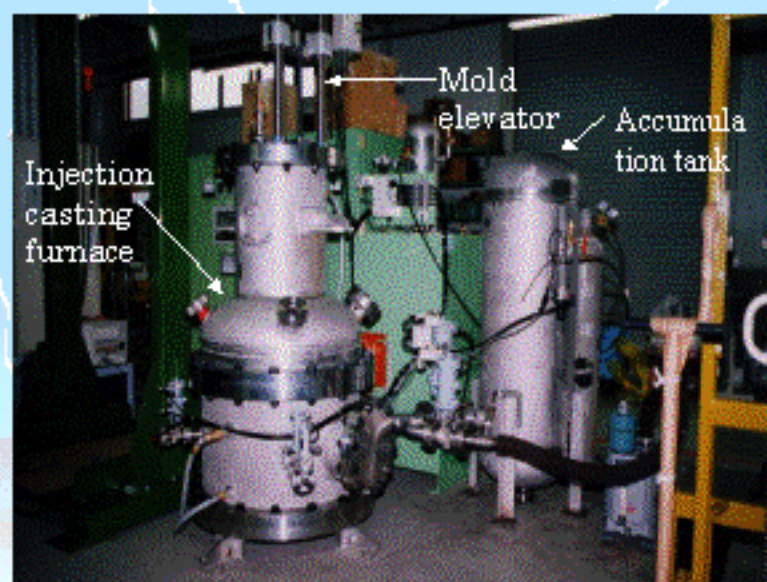


Arグローブボックスの外観

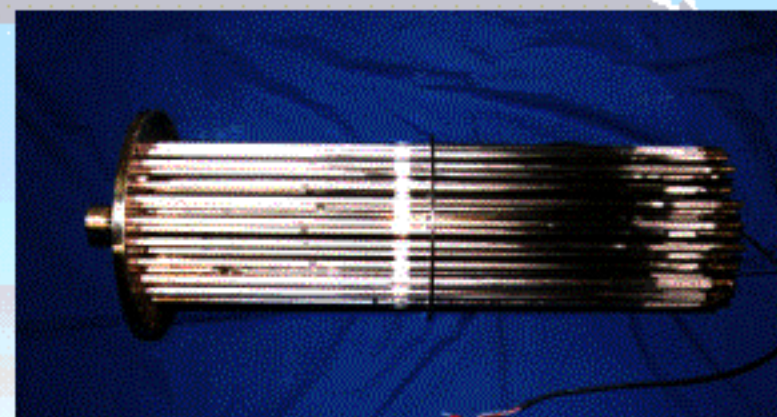
20kgのU-Zrを溶解
→ 50本以上の合金スラグを射出
(6mm- ϕ , 500mm-L)
(ヒール残量 < 溶解量の30%)



射出中の炉内



射出成型試験設備の外観



射出後のモールド束

酸化物燃料の電解還元処理の目的(新技術開発)

- # 軽水炉から発生する使用済みMOX燃料,高燃焼度燃料を、電解還元処理して高速炉用燃料の原料を産み出すこと

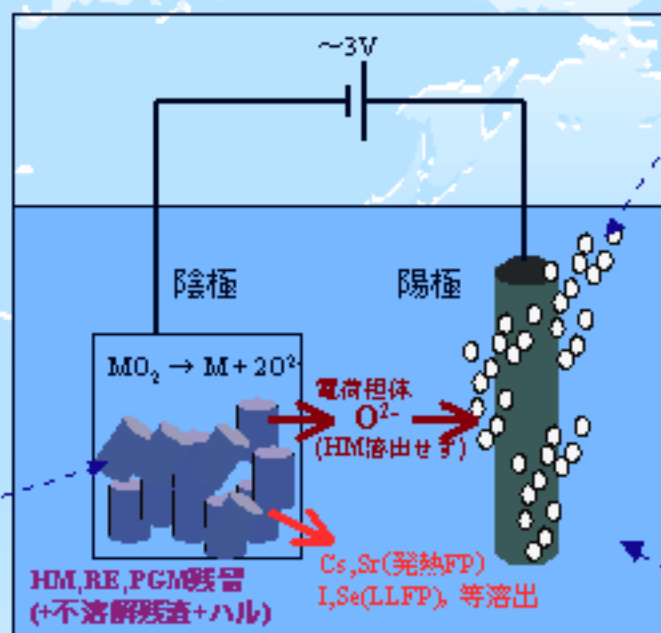
ポイント:使用済み燃料から要らないものだけを除く
という発想

電解還元法の概念

使用済み
酸化物燃料
(特にLWR-MOX燃料)

解体/せん断

使用済み酸化物燃料



O_2 又は CO_2 の発生

HM(+REP GM)
(+ハル)

陰極処理

燃料原料

減容貯蔵

Puの添加
成分調整

高速炉へ

塩廃棄物

廃塩固化

電解還元

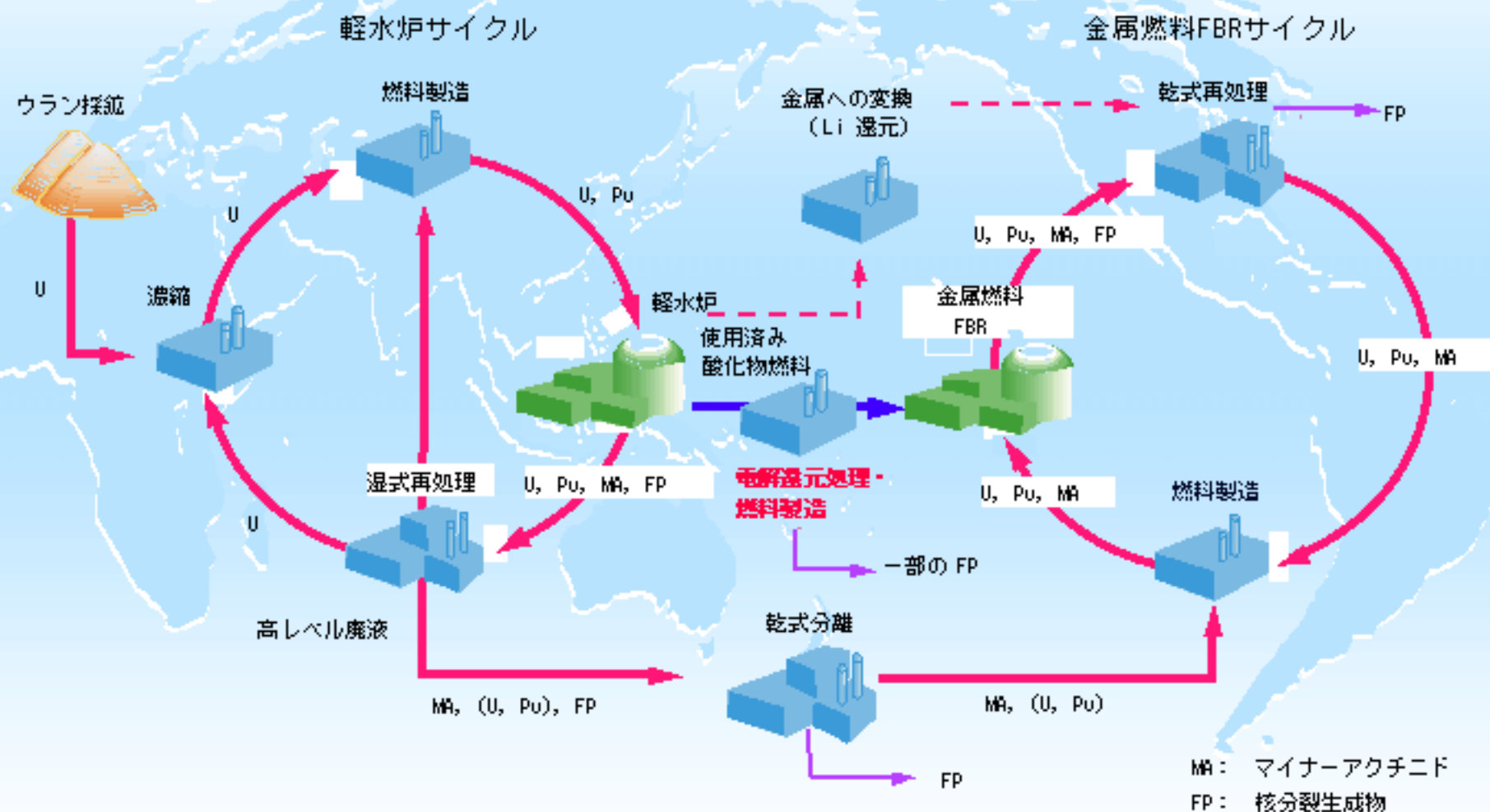
(電気化学的に酸化物から
酸素を除去して金属へ転換)

FP処理(粗除染):

発熱性FP(Cs, Sr)や
長寿命FP(I, Se)を分離し,
高レベル廃棄物として処分

減容貯蔵:必要に応じて
(ハルごと)インゴット化して,
使用済み燃料としてでなく,
次世代燃料の原料として
減容貯蔵

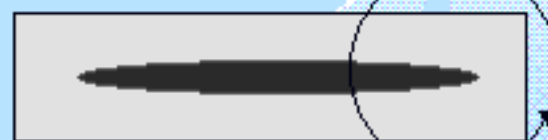
● 電解還元処理を用いた軽水炉サイクルとFBRサイクルの統合



試験結果

—使用済み燃料を模擬した UO_2 の還元後の形態—

試験後試料の模式図

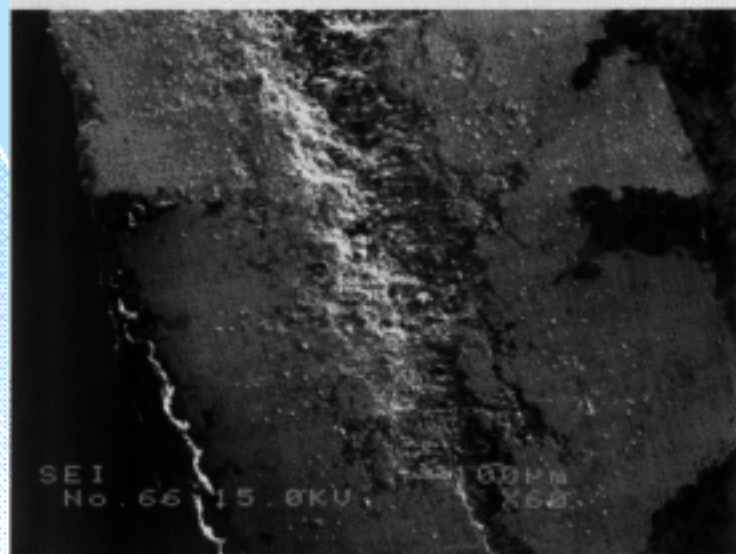


拡大

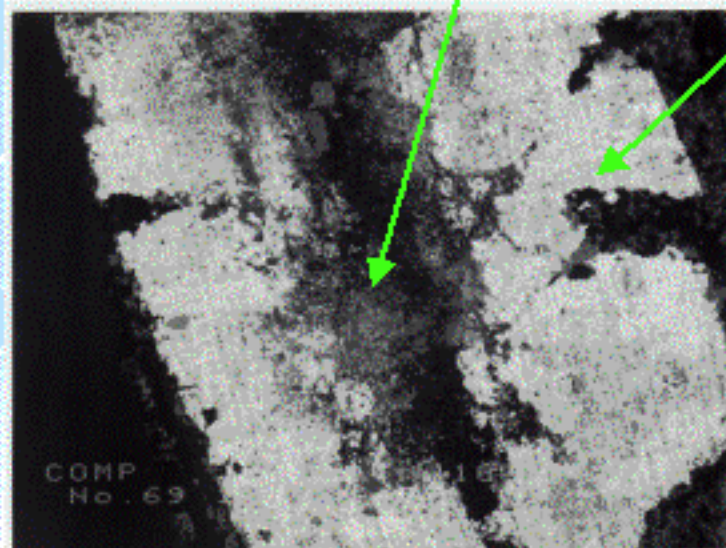
還元物は外側に凝集
未還元部分はよりポラスに

未還元 UO_2

U金属



二次電子線像



反射電子線像

1mm

電解還元処理後の元素の分布

- 電解還元プロセスにおける元素分布
(模擬使用済み酸化物ペレット試験結果より)

MA(マイナーアクチニド):ネプツニウム、アメリシウム、キュリウム

U,Pu,MA: 還元され陰極に混合物として残留
希土類元素,貴金属に属する核分裂生成物:
還元されU,Pu,MAと共存

燃料原料として高速炉へ

Cs,Sr,Ba,I,Se,Te,Eu,Sm,Sb等の核分裂生成物:
塩浴中に溶出されU,Pu等から分離(粗除染)

高レベル廃棄物処理・固化へ

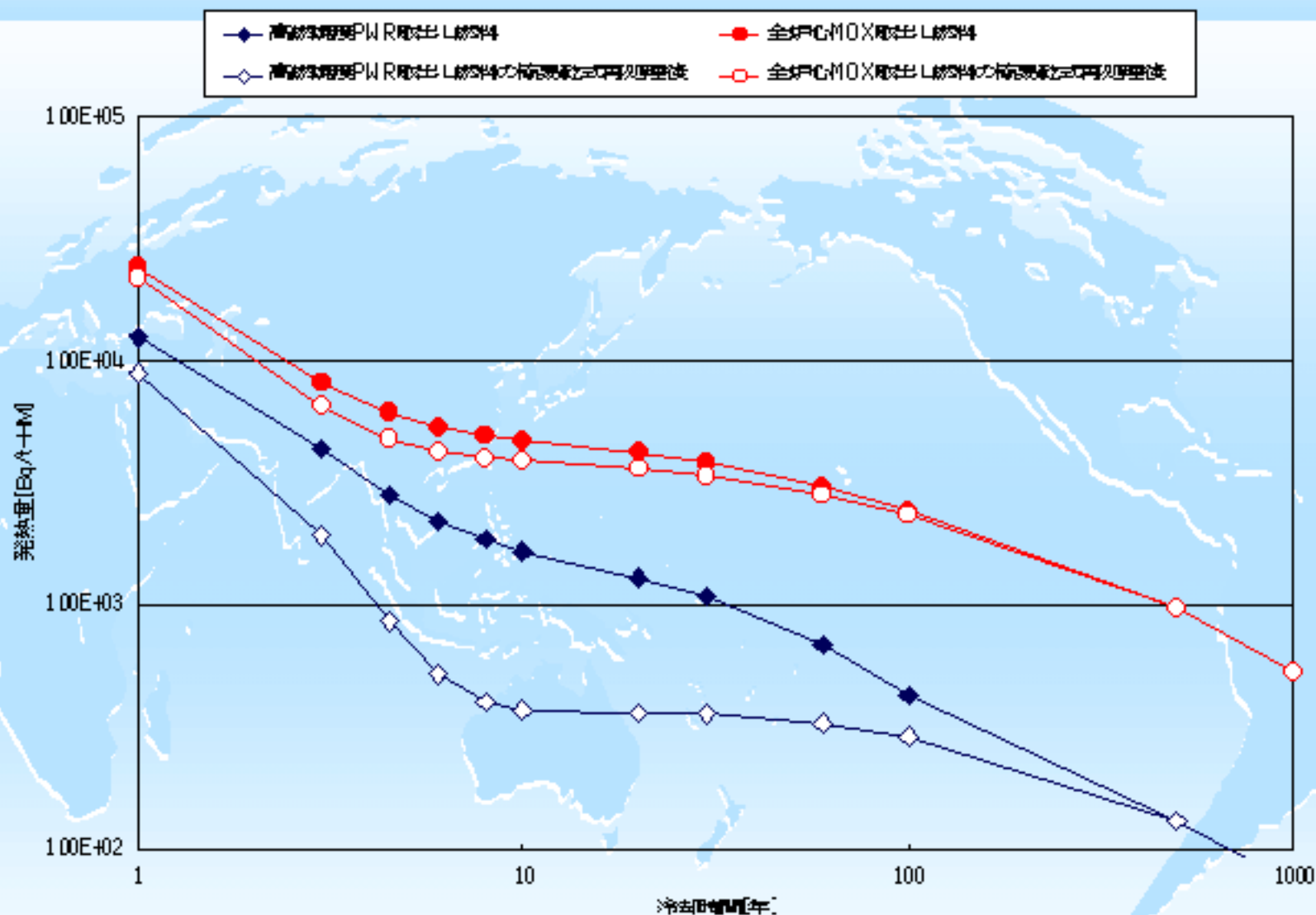
特徴

- 使用済み燃料を全量溶解する必要がないため
 - ープロセスが極めて簡単である(工程が大幅に簡素化)
 - ー施設が小規模になる
 - ーウラン,プルトニウム,マイナーアクチノイドの回収率が高く(原理的にはほぼ100%)
- 酸素のみを除去する単純な処理法であり, 様々な形態の酸化物燃料(軽水炉MOX, 高燃焼度燃料, MOX製品, 研究炉燃料, 等)に適用可能
- 製品は金属であり, 高速炉用の燃料として使用できる(長期貯蔵等に必要となれば, 酸化物への転換も可能)
- 現行再処理施設との調和(再処理から発生するPuO₂を利用)
- 使用済み燃料を全量溶解しないこと, また常にプルトニウムが, ウランや超ウラン元素, 一部のFPと一体で存在するため核拡散抵抗性の観点から課題が少ない。



特徴(続き)

- ♪ 今後の技術開発によっては、軽水炉燃料をハルごと処理して金属燃料成分として有効利用が可能
- ♪ 本処理によって発熱性の核分裂生成物の多くが除去できる(使用済み燃料から製品だけを取り出して貯蔵できる) 今後経済性等の評価が重要
 - － 発熱量が20－75%程度低減可能
- ♪ 放射性ヨウ素が他の核分裂生成物と一体としてI高レベル廃棄物で処理できる



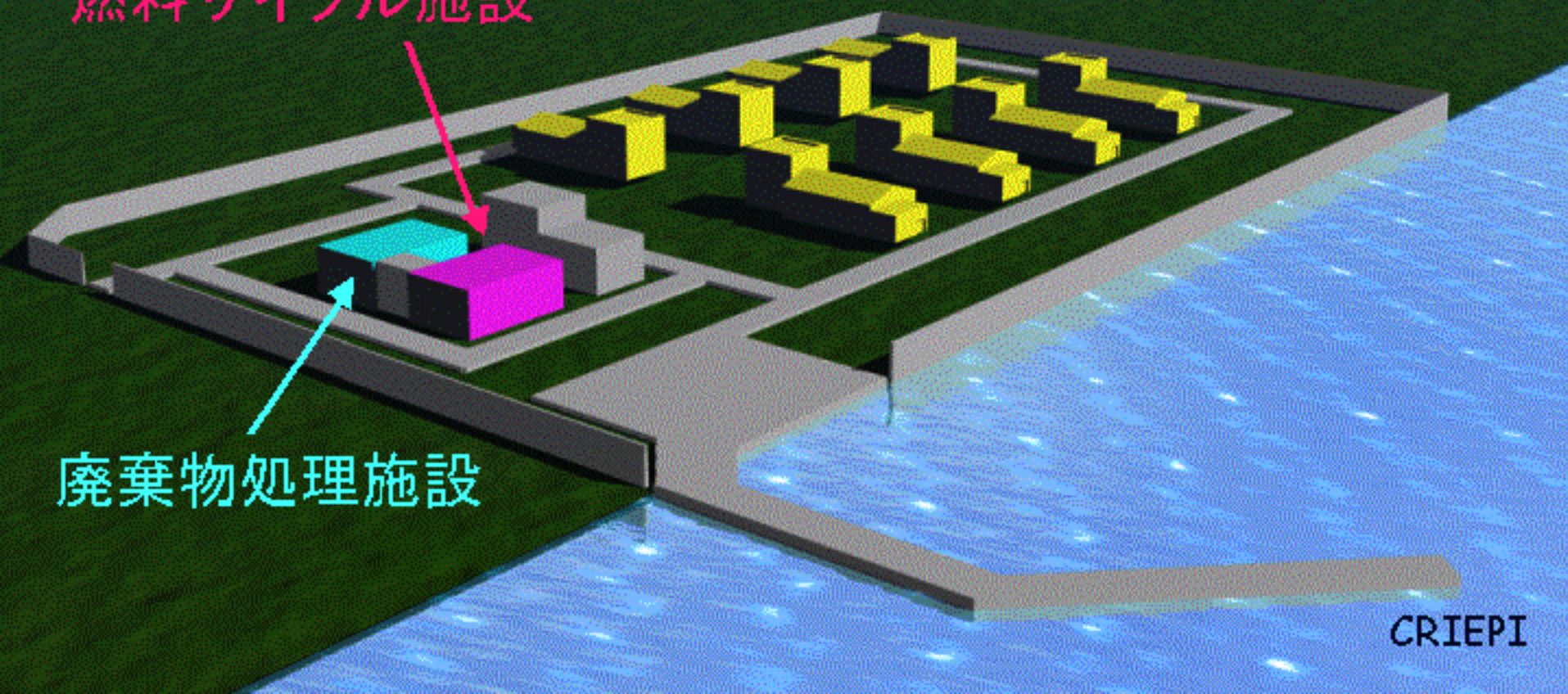
電解還元法による使用済み燃料中の発熱量の低減

原子炉と燃料サイクル施設の隣接立地

金属燃料小型FBR
(32.5万kWe × 8基)

燃料サイクル施設

廃棄物処理施設



我が国の先進的核燃料サイクルの検討体制

1. 原子力委員会研究開発専門部会革新炉検討会

- ・革新炉、先進核燃料サイクル研究開発の方向性と開発の進め方

2. 高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究

- ・各種シナリオ、技術についてフィージビリティ検討
- ・燃料サイクルの面からは、湿式、乾式を使った燃料処理法について実用化研究に向けて有力な技術を選定
- ・ **All Japan体制**：サイクル開発機構-電力が一体となって推進
：電力中央研究所、日本原子力研究所、メーカーも参加

3. 経済産業省、文部科学省の公募型研究

米国

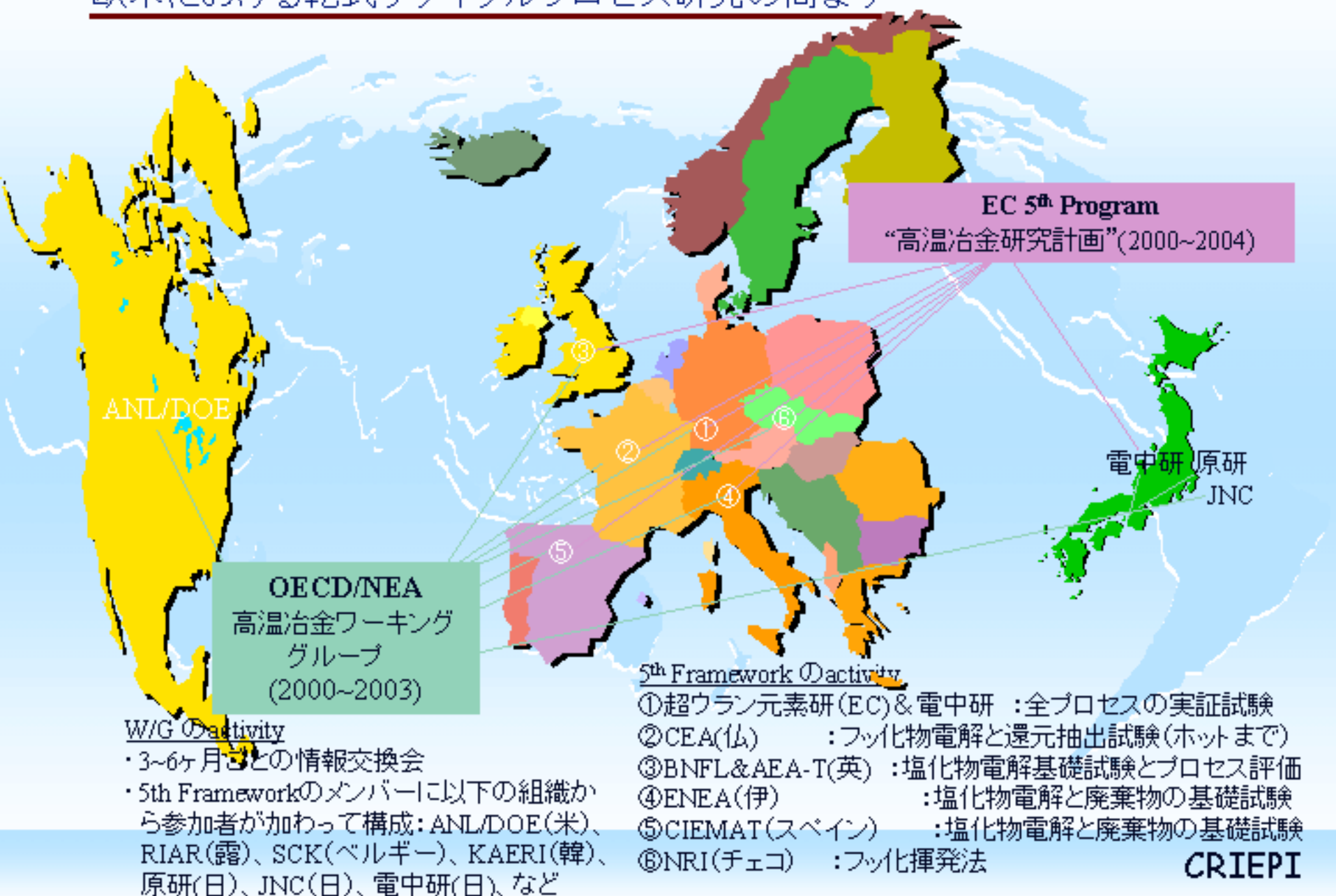
- － **NERI (Nuclear Energy Research Initiative)**
革新的な原子力システム、技術の芽を生み出す
- － **ATW (Accelerator Transmutation of Waste)**
加速器を用いたPuや超ウラン元素の燃焼
- － **FCF (Fuel Conditioning Facility)**での使用済み燃料処理実証
乾式法を用いたEBR-2使用済み燃料の集合体単位での処理試験

欧州

- － **ADS (Accelerator Driven System)**
加速器を用いたPuや超ウラン元素の燃焼
Prof.Rubbiaがプログラムを先導、6カ国が共同

何れのシステムに於いても乾式処理を主要技術として研究に着手

韓国などアジア諸国が日本に協力を求めている



結語：新しい核燃料サイクルとは

1. エネルギーセキュリティの確保
 - －資源の有効利用；プルトニウムの利用(リサイクル)
2. 先進的燃料サイクルに求められる要件
 - －安全性の高い施設であること
 - －経済性：システムや施設がコンパクト
 - －環境負荷の低減：Puだけでなく超ウラン元素(TRU)も利用、廃棄物量の低減
 - －核拡散抵抗性があること：Puなどが単独で抽出できないこと
3. 新しい核燃料サイクル(先進的リサイクル技術)システム
 - －炉と燃料形態、リサイクルシステムが効率よくシステム化されていること

核燃料サイクルに複数の選択肢を保有

電中研では乾式リサイクル・金属燃料FBR、酸化物の電解還元技術を提案

4. 国際的に認知されるシステム
5. 開発姿勢(体制)：一国まして一機関ですべての技術開発は無意味
 - －国内、国際協力と分業 (特に共通要素技術)

これまで(日本)：ホット研究重い、施設の柔軟運用困難
(建物主義)