



電力中央研究所における
乾式リサイクル・金属燃料
FBRと小型炉

の研究開発への取り組み

平成14年2月14日

(財)電力中央研究所
井 上 正

1. 先進的核燃料サイクルの要件

- － 経済性：原子炉、再処理、燃料製造
- － 環境負荷低減
 - ・ 長寿命の元素(超ウラン元素など)が核燃料サイクルの外に出ないこと(利用する)；マイナーアクチノイド元素の燃焼
 - ・ 発生する廃棄物自体を低減すること；量の低減
- － 核拡散抵抗性（簡単に軍事に転倒できないこと）
 - ・ 純粋な形でプルトニウム、(ネプツニウム)が取り出せなせない技術であること

2. 先進的核燃料サイクルの開発に向けて

- － All-Japan体制でJNC-電力が一体となってFBRサイクル実用化戦略調査研究を実施：電中研、原研、メーカーも参加
- － 電中研は、乾式リサイクル・金属燃料FBRを提案、実施

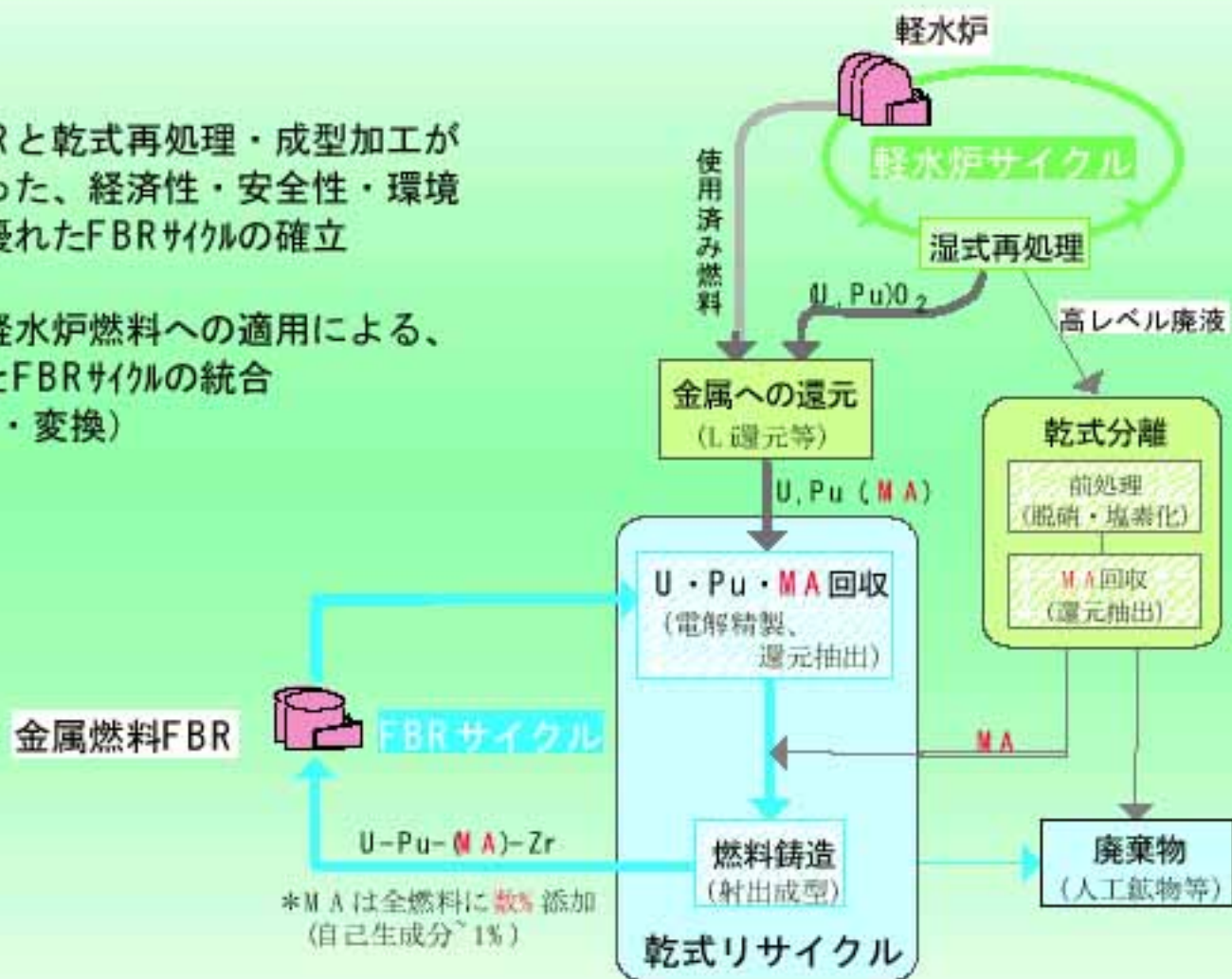
3. 長寿命核種の分離変換(オメガ計画)－原研、JNC、電中研－

- － 合理的な廃棄物処理処分
 - 長々期に亘る不確実性の低減；千年以下と数万年以上
(日：オメガ計画、米：ATW(AAA)計画、欧：ADS計画)

金属燃料FBRサイクル研究開発の目的

3

- 金属燃料FBRと乾式再処理・成型加工が一体となった、経済性・安全性・環境負荷低減に優れたFBRサイクルの確立
- 乾式技術の軽水炉燃料への適用による、軽水炉サイクルとFBRサイクルの統合 (MAの分離・変換)



乾式リサイクル技術の特徴

4

1. 高い経済性 ⇒改良湿式の1/2以下を目標

- 各機器・施設がコンパクト、スケールデメリット小
(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(群分離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)

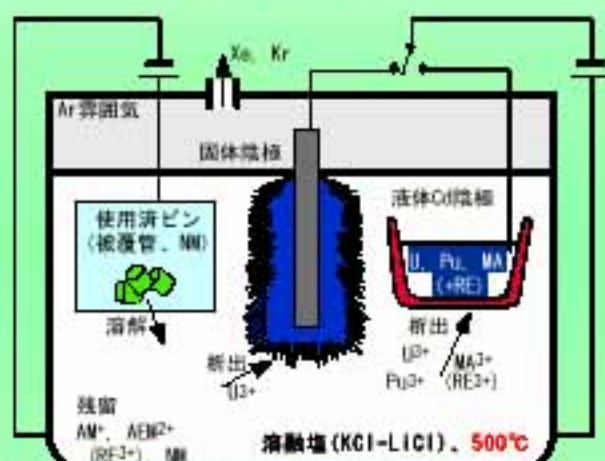
3. 処理対象燃料の融通性が高い

- 酸化物(MOX、高燃焼度)窒化物に適用可

4. 核拡散抵抗性

- 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

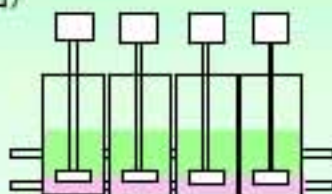


MA: マイナーアクチノイド(Np, Am, Cm), RE: 希土類FP
AM: アルカリ金属FP, AEM: アルカリ土類金属FP

塩処理/TRU回収 (多段抽出)

FP除去

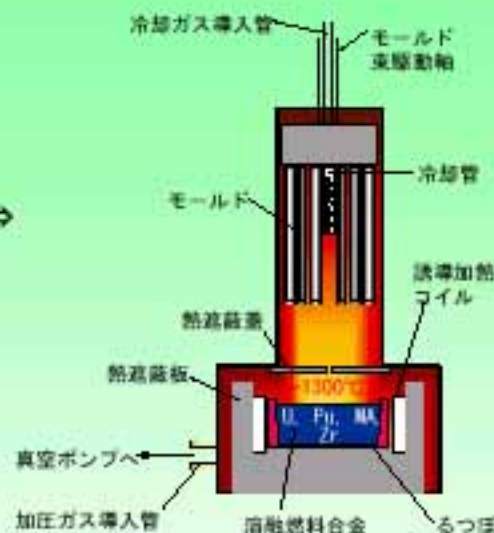
(t'オキソ吸蔵→固化) ⇒



陰極処理



射出成型



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





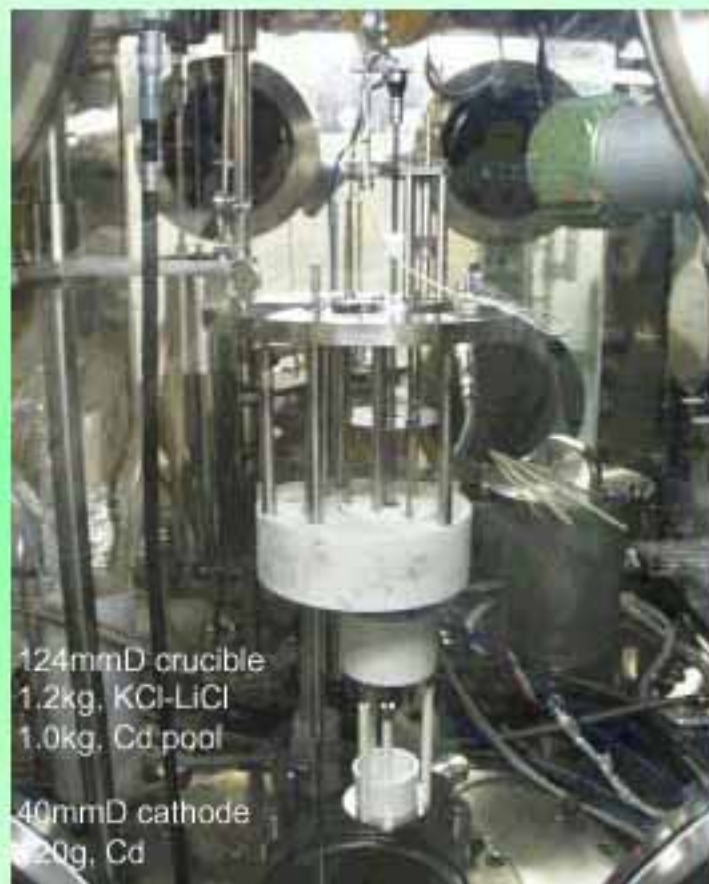
陽極(U-Pu-Zr)を用いて陰極に析出させたウラン金属

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

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%)

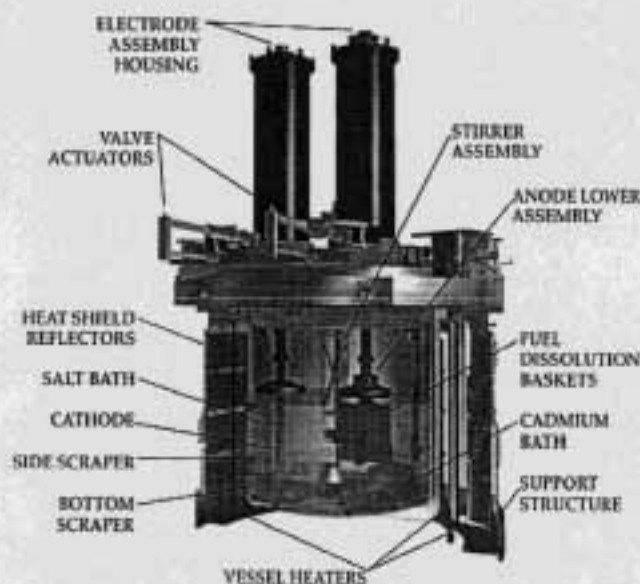


射出成型試験設備の外観



射出後のモールド束

Increasing Driver Fuel Throughput in Mark-IV Electrorefiner



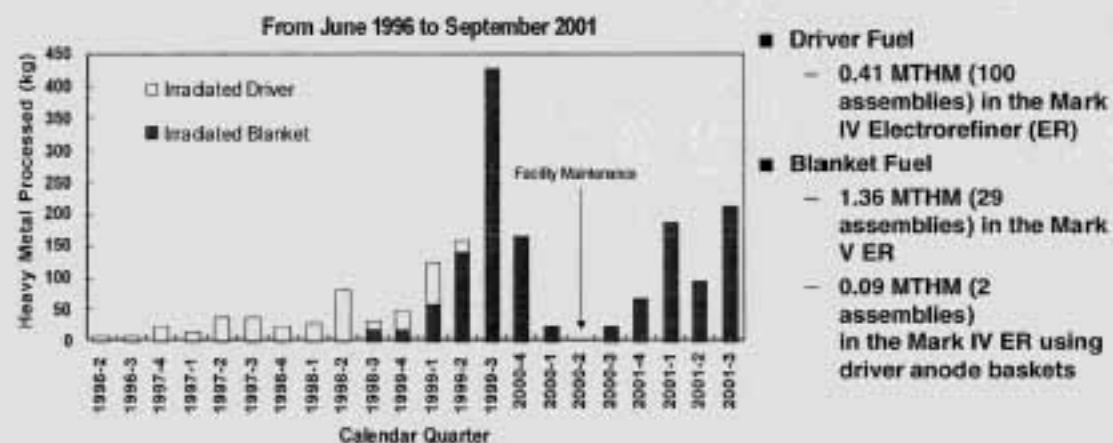
ER: Electrorefiner

- Increase Mark-IV ER loading
- Increase by 50% the number of assemblies processed between ER batch closeouts.

Argonne National Laboratory



Spent Fuel Processing in Mark-IV and Mark-V Electrorefiners to Date



MTHM: Metric tons heavy metal

Argonne National Laboratory



電解還元法のプロセス概念 -軽水炉燃料(UO_2 , MOX)や高燃焼度燃料の簡易処理(基礎研究)-

12

特徴: 燃料成分を全量溶解させることなく処理できる

高速炉ドライバー燃料の製造:

回収した燃料原料に湿式再処理等からの製品を電解還元して添加しPu富化度を調整

使用済み酸化物燃料

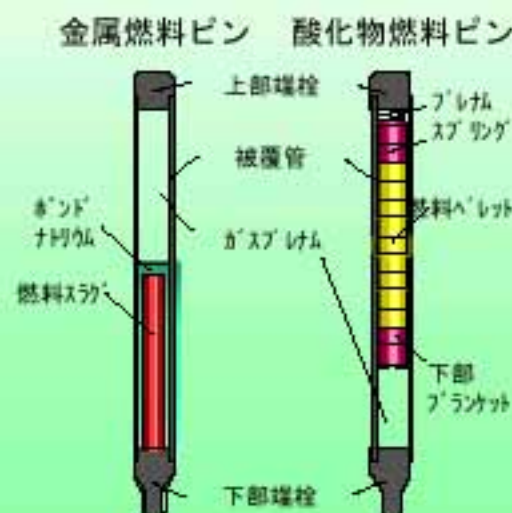


高速炉用燃料原料

ブランケット燃料の簡易製造:

軽水炉使用済み酸化物燃料を電解還元し、高速炉ブランケットに転換

注: 必要に応じ電解還元後に生成物を金属電解工程に廻し本格的な再処理も可能



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>100MWd/kg

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
→**MAリサイクル**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 (ブレンケット半減)
- ⇒増倍時間半減

(b) 安全性の向上

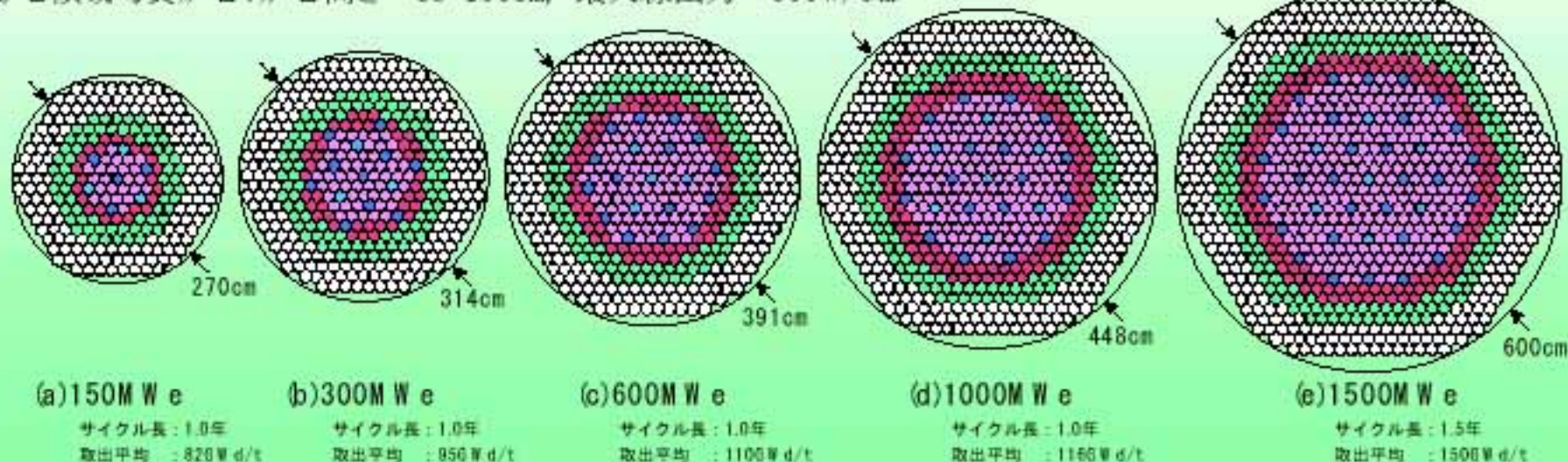
- ・燃料温度低→受動的安全性確保に有利

(c) 乾式リサイクルに最も良く適合

金属燃料炉心の設計例

14

(1) 2領域均質炉心: 炉心高さ=85-100cm, 最大線出力=500W/cm



(2) 径方向非均質炉心: 炉心高さ=120cm, 最大線出力=350W/cm



- ・大型炉 小型炉まで、運転サイクル ≥ 1 年 & 高燃焼度が可能
- ・300MWe以下の小型炉では、径費均質配置により出力を平坦化して、燃焼反応度を低減することが得策である。

燃料中にはMAと等量の希土類元素が混入すると仮定

1. MA含有金属燃料の特性

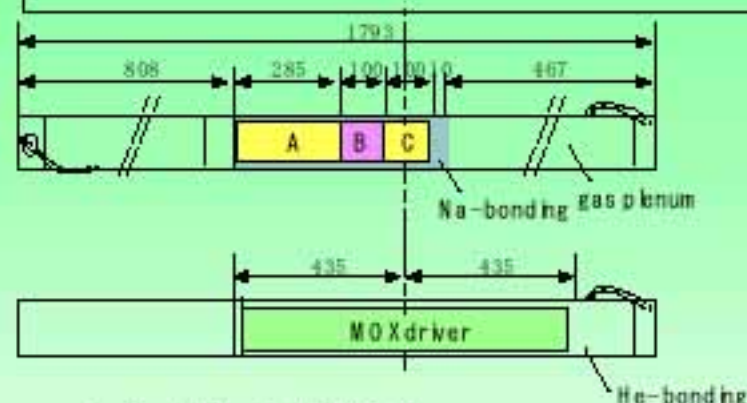
(MA の組成 = LWR使用済み燃料中の組成)

- MAとMA, MAとU,Puの相互溶解度
- 希土類元素混入の影響
2%MA-2%REまで; かなり均質の混合
5%MA-5%REまで; MA-希土類元素相の形成
- 熱伝導度、熔融温度等の測定
- 燃料合金と被覆管との化学的相互作用の把握 (800C まで)

2. 照射用試験燃料ピンの製造

(PHENIX炉 – METAPHIX 計画)

- U-Pu-Zr合金、MA金属の製造
(MA酸化物の金属への転換)
- 溶解法によるMA含有合金の製造とNaボンドピンへの封入



A, C : U-Pu-Zr 標準合金
B : U-Pu-Zr-MA-RE 合金
単位 = mm, ピン直径 = 6.55mm
被覆管材 = 15/15Ti cw

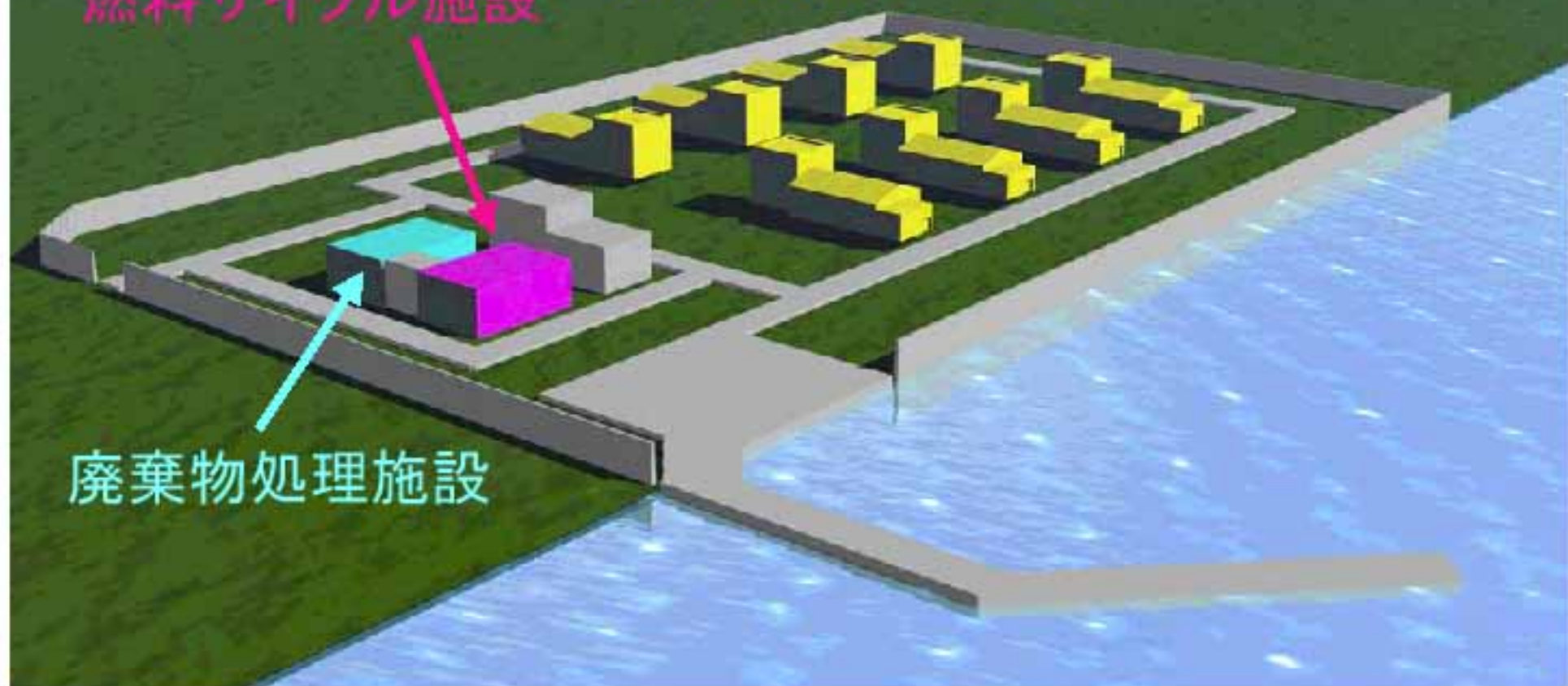
原子炉と燃料サイクル施設の隣接立地

16

金属燃料小型FBR
(32.5万kWe × 8基)

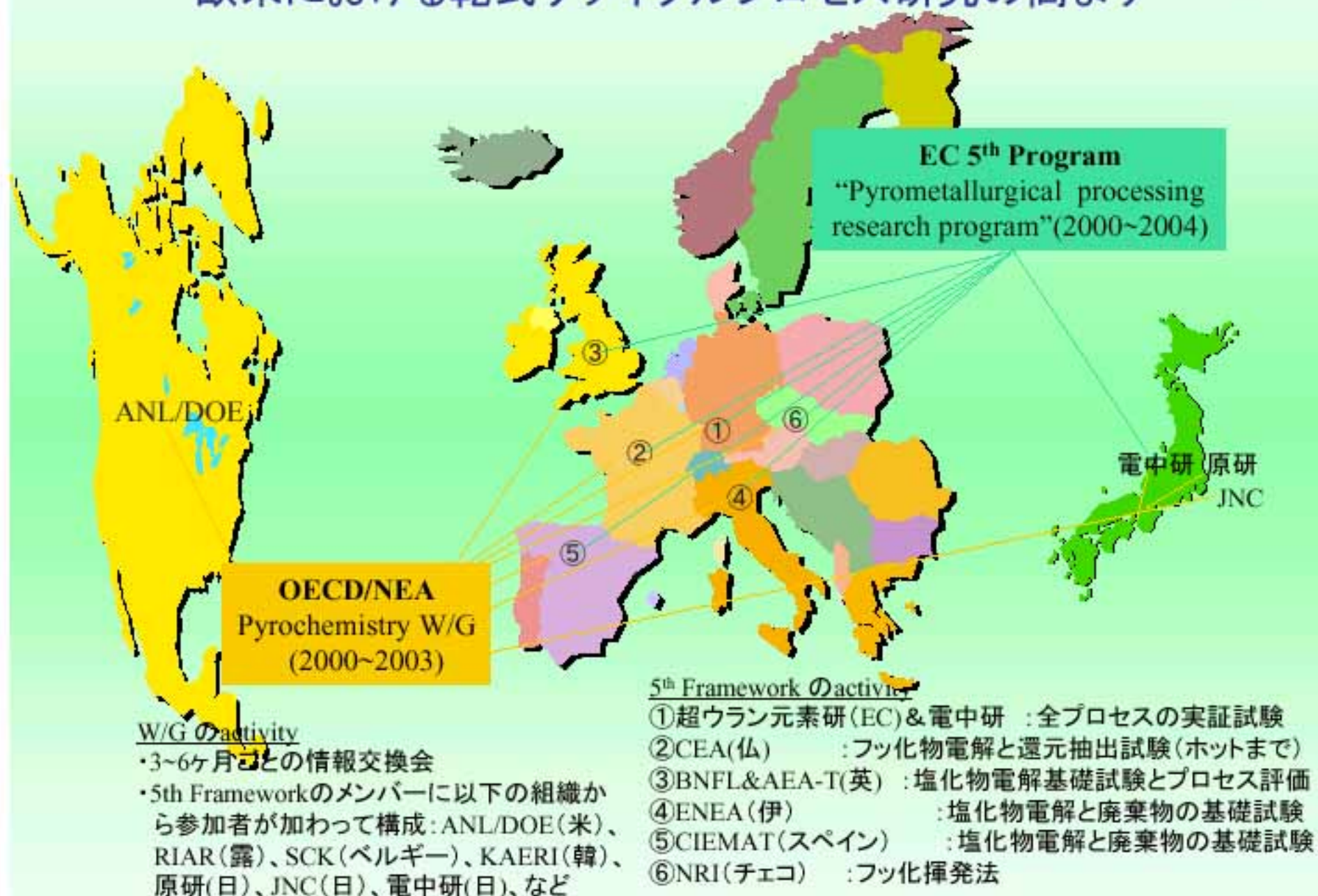
燃料サイクル施設

廃棄物処理施設



欧米における乾式リサイクルプロセス研究の高まり

17



小型高速炉(1/2)

18

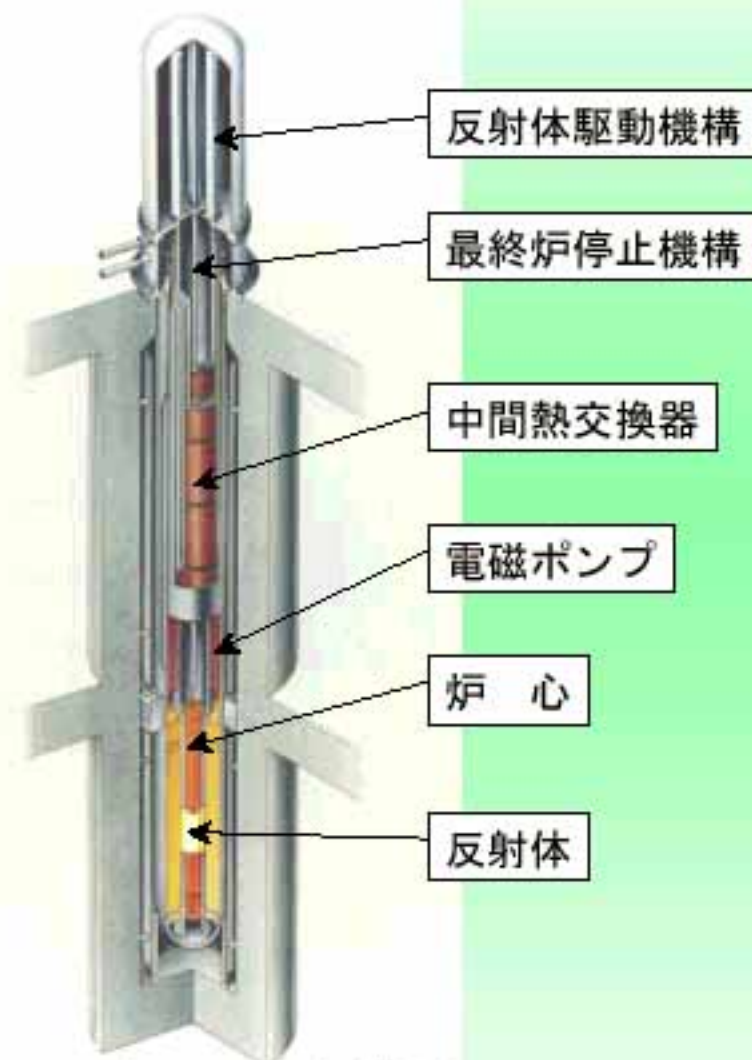
概要 (昭和63年～平成9年)
分散電源として適用するため、小型化する
ほど導入が容易になる高速炉固有の安全特
性を活用した小型高速炉概念を具体化した

設計の基本方針

冷却材ボイド反応度を含めてすべての反応度
係数が炉心寿命中にわたって負とする
想定しうるすべての初期異常時に原子炉停止
系の負作動を仮定しても炉心が損傷しない
非常用電源および動的な崩壊熱除去系に依存
しない設計 (RVACS)

原子炉系統側から制御・調整機器を削除
制御棒および制御棒駆動機構を使わない単純
な燃焼制御

原子炉機器の保守・点検作業の最小化
一括工場製作による高品質確保と建設後期の
短縮



4S炉の原子炉構造

早期実用化に向けた設計検討(平成12年～)

主な課題

- 長尺燃料 (4 m)
試験照射や燃料組み立てが困難
- 2次系以降のシステム
ナトリウム-水反応
ナトリウム火災

対策

先行炉なみ (1 ~ 1.5 m)

新型SGによる2次系削除
(タンク型炉)

関係機関と協力して実施

金属燃料(U-Pu-Zr)の実用化がクリティカルパス

さらなる早期実用化を目指す

濃縮ウラン金属燃料(U-Zr)による可能性

1. 革新的原子力システムの構築

- －炉と燃料形態、リサイクルシステムが効率的に整合していること
- －合理的な廃棄物処理、処分システムになっていること
- －核燃料サイクルに複数の選択肢を保有すること

電中研では **乾式リサイクル・金属燃料FBR** を提案

2. 研究開発目的と目標の明確化

- －明確なる目的を持った炉、リサイクルシステム
- －定量的な目標の設定

3. 研究開発環境の整備

- －産、官、学いずれもが研究開発を実施し易い体制、施設インフラの整備
- －少ない資本投資でR&D、実用化ができる方策の検討が不可欠（安全規制の見直しも含む）

4. 国内外との協力体制

- －産、官、学の有機的な連携：得意な分野を分担した実質的な協力による開発、産業界活性化への支援
- －効率的な国外機関との連携：海外インフラの利用、役割分担のもとでの相互協力

1. プロセス技術開発

- －プロセス要素技術の確立
- －プロセス技術の実証(一連プロセス、実燃料使用による実証)
- －プロセスフローの構築

2. 実用装置開発、施設設計

- －実用プロセスのフローシートの確立
- －プロセスロスの低減化
- －工学規模装置の開発(機器開発と処理効率の向上)
- －実用装置の設計と実用施設の設計
- －高温耐食材料の選定、開発

4. 実用化付帯技術

- －遠隔操作概念の構築と遠隔操作技術
- －高温融体移送、ハンドリング技術

5. 安全確保、核物質管理技術

- －安全確保：施設の安全確保の考え方の構築とその技術開発
- －核物質管理技術：計量管理の考え方の構築と計量技術の開発