

# MA 入り Pu 金属燃料高速炉サイクルによる革新的廃棄物燃焼システムの開発

(受託者) 株式会社東芝

(研究代表者) 有江和夫 原子力先端システム設計部

(再委託先) 一般財団法人電力中央研究所、国立大学法人福井大学、国立大学法人京都大学

(研究期間) 平成26年度～29年度

## 1. 研究の背景とねらい

我が国の軽水炉事業を将来にわたって継続するには、現在の国の方針である高レベル放射性廃棄物の直接地層処分と併せて将来の幅広い選択肢を確保するため、万年オーダーの放射性核種を含む高レベル放射性廃棄物の減容・有害度低減の技術開発を進めることは極めて有意義である。本研究は、軽水炉使用済み燃料より回収したプルトニウムとマイナーアクチニド（以下、TRU と称す）を高速炉で燃焼させることで高レベル放射性廃棄物の毒性を約300年で天然ウラン並みに低減する技術である[Ref. 1]。具体的には、ウランを含まない TRU 金属燃料を用いた高速炉サイクルにより、TRU の燃焼効率を極大化できる新しい「核廃棄物燃焼システム」の工学的見通しを得ることを研究開発目標としている。すなわち、当面、軽水炉時代が主流と見込まれる中、最小の高速炉基数にて軽水炉からの TRU を燃焼処理することを狙いとしており、本研究が目指す全体システム概念およびその効果は図1に示すように、ウランを含む従来の TRU 燃焼高速炉に比べ、必要な施設規模は1/5（高速炉）～1/8（サイクル施設）に削減できる。

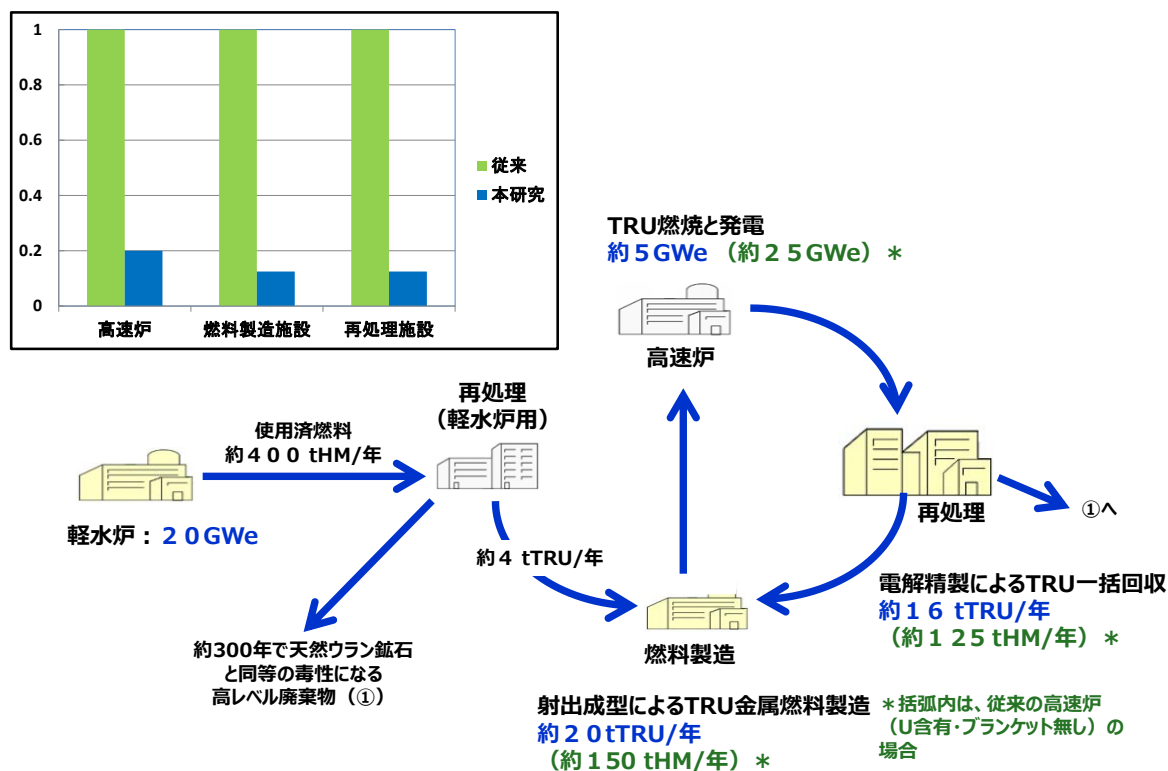


図1 「核廃棄物燃焼システム」概念と導入効果

このため、本研究ではウランを含まない TRU 金属燃料高速炉サイクルの特徴[Ref. 2]である、燃料中の TRU と燃料合金材（通常は Zr）の含有率が高いことに起因した技術課題を表1に示すアプローチにて解決する。

表 1 ウランを含まない TRU 金属燃料高速炉サイクルの技術課題と解決アプローチ

項目	技術課題	解決アプローチ
燃料	高Zr含有燃料の融点、熱伝導率等基礎物性が不十分、かつ種々の組成での燃料照射挙動が未確認	熱力学計算により不足する基礎物性を把握
	TRUを多く含むため、Puによる被覆管内面侵食が増加	Pu/TRUを用いた被覆管内面耐食試験により、侵食抑制対策を確立
	再処理時に希土類FP(RE:レアアース)の新燃料への混入が増加し、偏在することで燃料健全性劣化の可能性	RE溶解試験にてREが均一に混合する条件を把握し、燃料健全性劣化の回避策を立案
再処理	高Zr/TRU含有燃料のRE除染性能の向上が必要	既往研究より再処理フローの調整、マスバランスを評価、新たな陰極材料の適用によりRE除染性能向上を達成する
	Zr高含有燃料のアクチニド回収実績が少ない	電解精製試験を実施して各種パラメータを評価し、必要な処理性能が得られることを示す
炉心	既設炉と同程度の炉心安全特性および燃焼期間を満足するTRU金属燃料炉心設計技術及び炉心仕様の確立が必要	研究代表者らの既往研究を基に設計パラメータの最適化を図り、TRU金属燃料炉心の最適化核設計手法を開発する
	燃料溶融時の燃料挙動が従来炉心と異なり、過酷事故影響が厳しくなる可能性がある	最適炉心を対象とした過酷事故解析を行い、過酷事故収束シナリオの見通しを得る
	ドップラー効果増強のための新たな燃料合金材は断面積の不確かさが大きい	加速器による照射試験により、不足データを取得して断面積精度を向上する

## 2. これまでの研究成果

### 2. 1 燃料開発

#### 1) TRU 金属燃料基礎物性評価

Zr 高含有 TRU 金属燃料の燃料照射挙動評価、製造性評価等に必要な基礎物性である融点について、Pu-Zr の合金状態図に基づき Am、Cm、Np を加えた場合の TRU 燃料の融点-組成の関係を定式化した。図 2 に MA を含有した TRU 金属燃料の溶融挙動の詳細計算結果例を示す。その結果、TRU 金属燃料の融点は、組成比がほぼ等価な

Pu-Am-Zr 合金にて概ね推算できることが分かった。[Ref. 3]

#### 2) TRU 金属燃料健全性評価

TRU 金属燃料の特性を把握するため、MA 含有金属燃料の製造及び物性試験の文献を調査し、MA 含有金属燃料の製造時における希土類 FP (RE) の分離や、被覆管との化学相互作用についての知見を整理した。特に TRU 合金では被覆管との化学相互作用が、顕著になる可能性があり、U 燃料でそれが抑制できることが確認されている

Cr、V 内面コーティングのバリア効果について、TRU 金属燃料に対する効果を試験で確認することが必要であること示した。

#### 3) RE 混入量制限値評価

燃料の健全性を確保するためにはリサイクル時に不純物として混入する RE が製造時に過大に偏在しないで均一性を確保する必要がある。このため、TRU よりも RE の溶解度が小さく保守側の U-Zr を対象として、再処理での分離係数が小さい Ce、Nd 量 (RE の代表核種) をパラメータとし

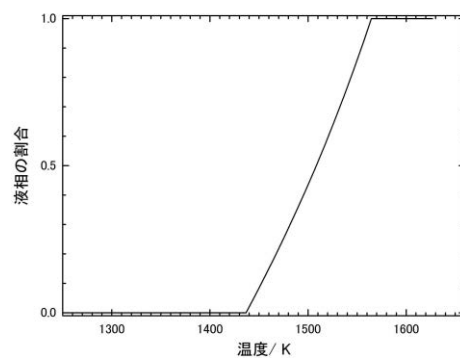


図 2 2.2Np-54.6Pu-7.0Am-1.2Cm-35wt%Zr の溶融挙動計算結果

た予備的溶解試験を実施した。その結果、Ce は燃料への溶解が支配的であり、Nd は Zr への溶解が支配的であること等が明らかになった。

## 2. 2 再処理開発

### 1) 高除染プロセスの開発

通常の電解精製法のプロセスフローシートに基づき検討した結果、電解精製時の塩浴処理頻度を従来の約 5 倍にすることにより RE の除染性能は約 4 倍に向上し、また Cd 陰極の代替材として Bi あるいは Ga を用いれば更に除染性能は数倍向上できることが分かった。

### 2) Zr 高含有燃料の電解精製試験

電解精製時の燃料溶解特性、燃料と Zr の分離性能、解処理速度等を評価するための電解精製試験に用いる Zr 高含有燃料試料として、U-40%Zr 及び U-20%Zr 金属燃料を製造するとともに (図 3 参照)、同電解精製試験装置を設計・製作した。

### 3) 廃棄物処理技術の開発

Zr 含有率が高い陽極残留物 (廃棄物) の処理試験装置を設計・製作し、予備試験により機能を確認した。(図 4 参照)

## 2. 3 炉心開発

### 1) 最適化炉心設計手法の開発

炉心高さ、減速材、燃料合金、バーナブルポイズン等の炉心仕様とドップラー係数、ボイド反応度、燃焼反応度等の炉心特性の相関を解析、分析した。その結果、ドップラー係数は 1keV 以下の低エネルギー中性子割合、ボイド反応度は炉心からの中性子漏洩割合、燃焼反応度は取出燃焼度にて、概ね相関関係があることが分かった。しかし、いずれもその他の因子の影響が未解明であり、引き続き検討中である。図 5 には、ドップラー係数の場合の例を示す。[Ref. 4]

### 2) 合金材のドップラー効果の測定

ドップラー効果増強が期待できる Nb 等の燃料合金代替材の共鳴吸収中性子量を京都大学原子炉実験所中性子発生装置にて測定し、代替材のドップラー効果の精度向上を図る。その実

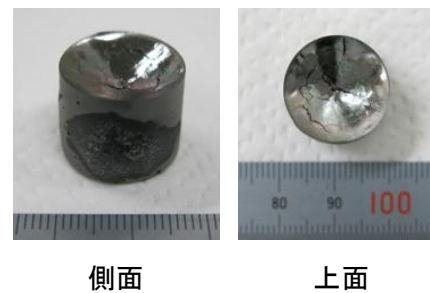


図 3 U-40%Zr 燃料の外観

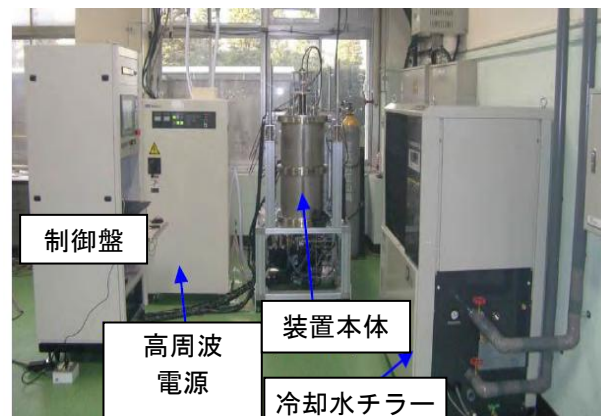


図 4 廃棄物処理試験装置の外観

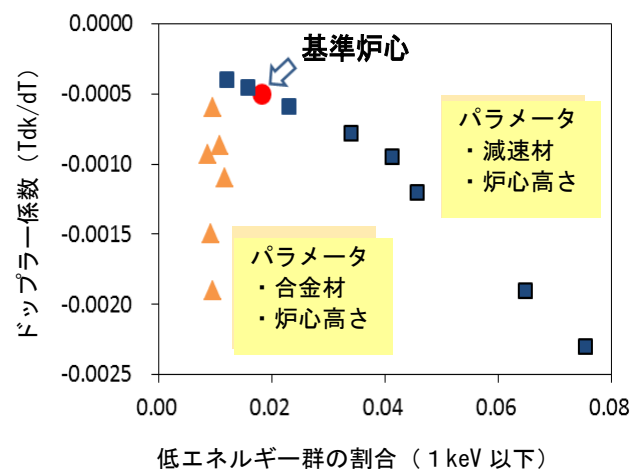


図 5 スペクトルとドップラー係数の相関

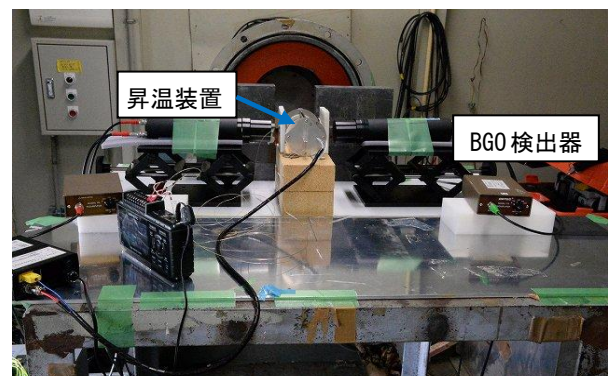


図 6 ドップラー効果測定装置外観

験

予備解析により、中性子吸収量を定量できる見通しを得た。

また試験に用いる昇温装置を整備し、所定の機能を予備試験にて確認した。(図6 参照)

### 3. 今後の展望

#### 3.1 燃料開発

U を含まない TRU 金属燃料の基礎物性を模擬試験も含めて明らかにするとともに、燃焼時の被覆管内面腐食を抑制するためのバリア材(Cr,V)の性能を Pu や MA を用いた試験により確認する。更に、これらの結果を踏まえ、機構論的燃料挙動解析コード等を用いて燃料目標燃焼度 30% 確保の見通しを得る。また、燃料製造性や健全性確保の観点から新燃料への希土類 FP (RE) の混入量制限値を明らかにするとともに、それが満足できることを確認する。

#### 3.2 再処理開発

上記 RE 混入量制限を満足する高除染電解精製プロセスを新たな陰極材料の採用、熔融塩浴処理頻度の増強などにより開発する。また、U-Zr 高含有燃料を用いた電解精製試験により Zr 高含有燃料の電解精製の可能性や燃料分離性能等の見通しを明らかにする。更に、これらの結果に基づき、TRU 回収率 99.9%にできる乾式再処理のフローシートを確立するとともに、U を含まない TRU 金属燃料特有の陽極残留物の熔融固化・浸出試験、塩浴からの RE の沈殿挙動、更には RE 沈殿物のゼオライト固化試験を実施し、再処理廃棄物の処理技術を開発する。

#### 3.3 炉心開発

炉心仕様と炉心特性の相関関係を明らかにし、その結果に基づき TRU 金属燃料炉心の最適化核設計手法を開発するとともに、その手法を用いて最適炉心を構築する。また、過酷事故時の炉内終息の見通しを得る。燃料合金代替材については、Nb 等の温度変化時の共鳴吸収中性子量を測定し、代替材のドップラー効果の評価精度±20%を目指す。

#### 3.4 「核廃棄物燃焼システム」の検討

上記各研究成果を踏まえ、TRU 金属燃料高速炉サイクルによる「核廃棄物処理システム」の導入シナリオと主要システム概念を具体化し、実用化に必要な実証試験計画を立案する。

### 4. 参考文献

(1) 総合資源エネルギー調査会基本政策分科会第7回会合 資料1“今後の原子力政策について”、p.45、資源エネルギー庁、平成25年10月

(2) K. Arie et. al., “TRU Burning Fast Reactor Cycle Using Uranium-free Metallic Fuel”, ICAPP2014, Charlotte, April 6-9, 2014.

(3) Y. Arita et. al, “Innovative TRU Burning Fast Reactor Cycle Using Uranium-free TRU Metal Fuel (2) Fundamental Properties of Uranium-free TRU-Zr Metal Fuel”, Global2015, Paris, September 21-24, 2015.

(4) K, Arie et. al., “Innovative TRU Burning Fast Reactor Cycle Using Uranium-free TRU Metal Fuel (1) Overview and Progress of Core Design Study”, Global2015, Paris, September 21-24, 2015.