MA 入り Pu 金属燃料高速炉ｻｲｸﾙによる革新的核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

本研究は、軽水炉時代が当面、主流と見込まれることを踏まえ、ウランを含まない TRU（プルトニウムとマイナーアクチニド）金属燃料を用いた高速炉により TRU の燃焼効率を極大化し、軽水炉で発生する TRU を最小の高速炉基数にて燃焼することを狙うものである。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、通常のウランを含む TRU 燃焼高速炉に比べ、必要な施設容量（スループット）は 1/5（高速炉）～1/8(サイクル施設)に削減できる。本研究では、このような新しい「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。

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

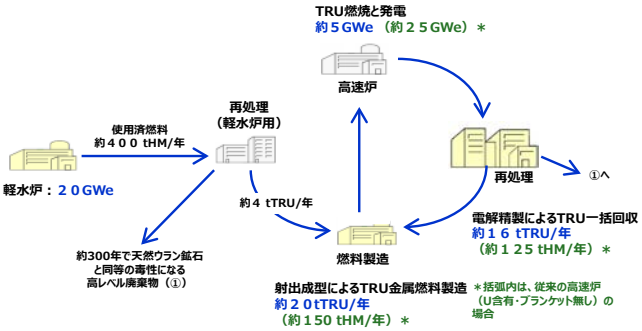


図１　「核廃棄物燃焼システム」概念と導入効果

表１　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、新たな除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

TRU 金属燃料の照射挙動評価等に必要な融点、比熱及び熱伝導率の温度依存性や組成依存性を定式化した。その結果、Pu-Np-Am-Cm-Zr の融点は Pu-Am-Zr にて簡便に評価できる手法を開発した。また、熱伝導率は U を含む通常の金属燃料[Ref.2]に比べ約 4 割程度低下する可能性があることが分かった（図 2 参照。）

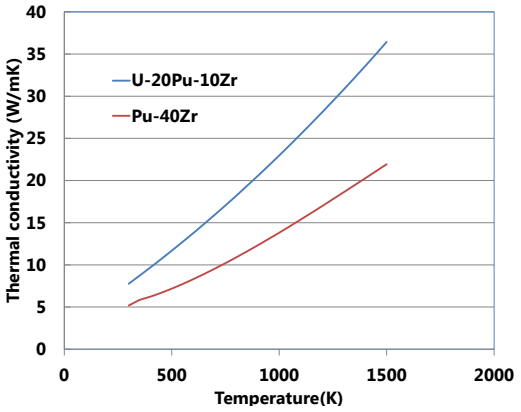
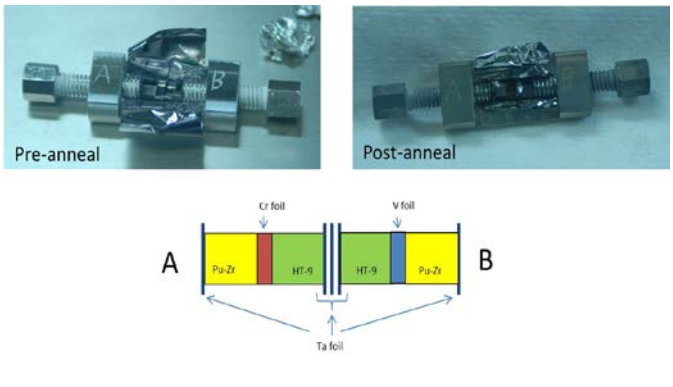
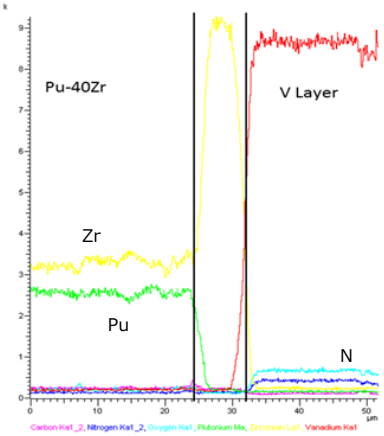


図 2 Pu-40Zr と U-20Pu-10Zr の熱伝導率比較

(2) TRU 金属燃料被覆管内面耐食試験

TRU 金属燃料の燃焼中の被覆管内面侵食防止に有効と考えられる内面バリア材 Cr 及び V を用いて、Pu-40Zr 金属燃料と同バリア付被覆材の拡散対試験（700℃）を米アイダホ国立研究所にて実施した。その結果、図 3 に V の例を示すとおり、Pu 及び Zr はバリア材内部へ侵入しておらず、両材料とも Pu-Zr 燃料の被覆管内面侵食防止に有効であることが分かった。





Pu-40Zr を用いた内面耐食拡散対試験治具　　耐食試験後の元素分布（V バリア）

図 3 Pu-40Zr の内面耐食拡散対試験治具と試験後の元素分布ラインスキャン結果

(3) 希土類 FP（RE）混入量制限値評価

TRU 金属燃料ではリサイクル時に MA に同伴しやすい RE が多く混入する可能性がある。その量が過大になると燃料製造射出成型時に燃料内で RE が偏在し燃料健全性を損なう懸念がある。このため U-Zr 燃料を用いて、代表的な RE である Ce と Nd の溶解試験（図 4 参照）を実施した。その結果、U-Zr への RE の溶解量は U 金属単体、すなわち燃料主成分への溶解量と同等以上であることが確認され、本研究では TRU 金属燃料の主成分である Pu への RE の溶解量に余裕を見込み、RE の混入量制限は燃料全重量の 2%以下とした。

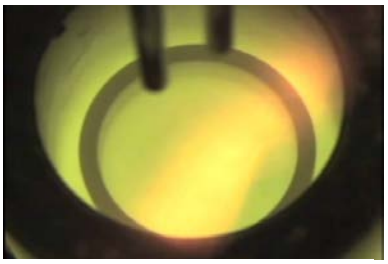


図 4 U-Zr-RE の溶解試験

２．２　再処理開発

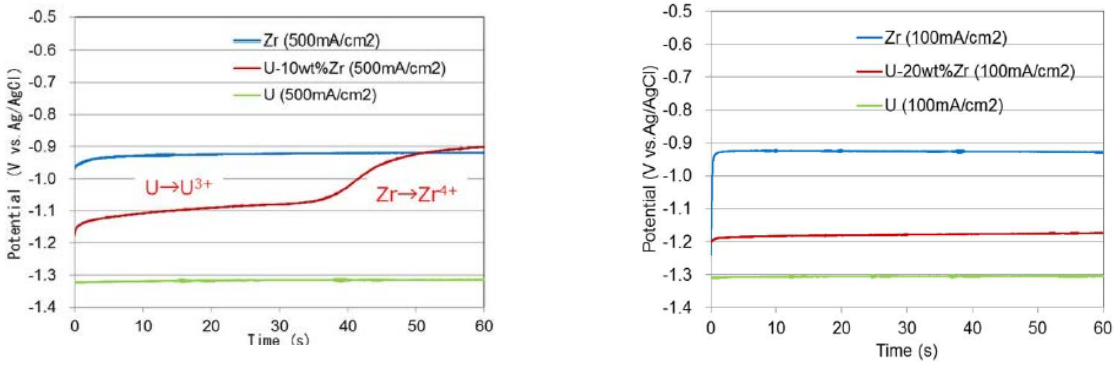
(1) 高除染プロセスの開発

上記 RE 混入量制限を満足させるために電解時の除染性能向上が必要になる可能性がある。このため、通常の金属燃料電解法で用いられる液体 Cd よりも高い TRU/RE 間分離性能が期待できる陰極材料を調査した結果、Ga 及び Bi が有望代替材であることが分かった。また、電解により浴塩中に蓄積する RE を、酸素を含む沈殿材にて酸化物等に転換して沈殿除去することにより、RE(Ce、Sm、Eu、Gd)の除染係数を 10 以上に向上できることが分かった。

(2) Zr 高含有金属燃料の電解精製試験

TRU 金属燃料の模擬として U-Zr 燃料を用いて、Zr 含有量をパラメータ（10、20、40wt%）とした電解精製試験を実施した。その結果、図 5 に示すように、電流密度を低減することにより、通

常の電解精製と同様、Zr を陽極に残したまま電解精製できる可能性があることが分かった。ただし、U-40wt%Zr では電流密度を大幅に小さくする必要があるため、処理速度向上策として $CdCl_2$ を用いた化学溶解により、U-40wt%Zr を塩中に Zr イオン、U イオンとして溶解させた後、装荷した U 金属との交換反応によって Zr イオンを金属に還元できることも試験により確認した。これに電解精製を組み合わせることでも Zr 高含有金属燃料が処理できる可能性を見出した。



U-10Zr、電流密度 500mA/cm^2　　U-20Zr、電流密度 100mA/cm^2

図 5 Zr 高含有金属燃料の電解精製試験結果（クロノポテンショメトリ結果）

(3) 廃棄物処理技術の開発

Zr 含有量が多い TRU 金属燃料の電解精製後の陽極残留物を想定した金属廃棄物溶融固化試験を実施した。その結果、Zr 割合 30wt%までは 1600℃で溶融固化が可能であり、Zr 割合 40wt%では約 1700℃まで昇温する必要があることが分かった。るつぼ材に関しては、Y_2O_3 は 1700℃でも燃料成分と反応せず、適用可能であることがわかった。更に、固化体試料の浸出挙動評価予備試験を実施し、ガラス固化体（模擬）よりも浸出量が小さい見通しを得た。

２．３　炉心開発

(1) 最適化炉心設計手法の開発

U を含まない TRU 金属燃料炉心ではドップラー効果が大幅に低下するため、その対策が必須であるが、同時にボイド反応度の抑制や燃焼反応度などの炉心性能の確保が重要である。このため、減速材、燃料合金材等の材料選定や装荷量、炉心高さなどの仕様と炉心特性の相関を解析、評価した結果、炉心部の中性子減速能、炉心高さ、燃料合金材捕獲断面積の 3 つの指標にてドップラー係数とボイド反応度が容易に推定できる相関マップを開発した（図 6 参照）。また、炉心安全確保の観点から、ULOF(Unprotected Loss of Flow)、UTOP(Unprotected Transient Over Power)においても燃料溶融及び冷却材沸騰が防止できる、ドップラー係数とボイド反応度への要求条件を明らかにした(図 7 参照)。すなわち、図 7 から安全要求を満たすドップラー係数とボイド反応度の範囲が得られ、それに対応した炉心仕様は図 6 を用いて絞り込むことで最適な炉心が構築できるようになった。尚、これらの検討に用いた TRU 組成は軽水炉取出し後、10 年冷却のもの[*1] であり、TRU 組成や RE 混入量の変動による安全特性等への影響は H28 年度の炉心検討にて評価しており、その結果も踏まえて最適炉心を検討中である。

*1、Np ： Pu ： Am ： Cm ＝ 5.2 ： 87.4 ： 7.0 ： 0.4 (wt.%)

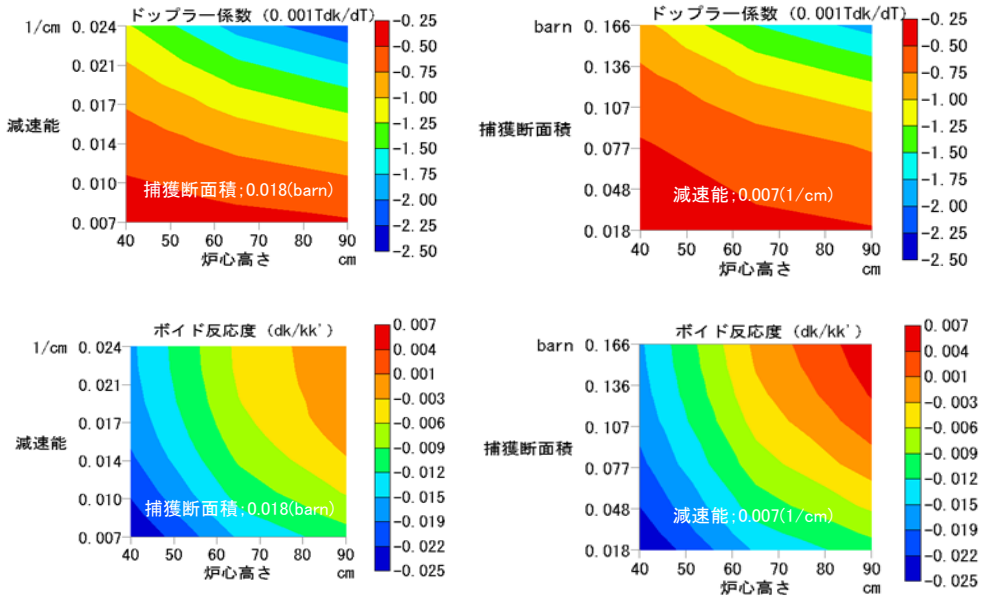


図 6 ドップラー係数及びボイド反応度と炉心仕様の相関マップ

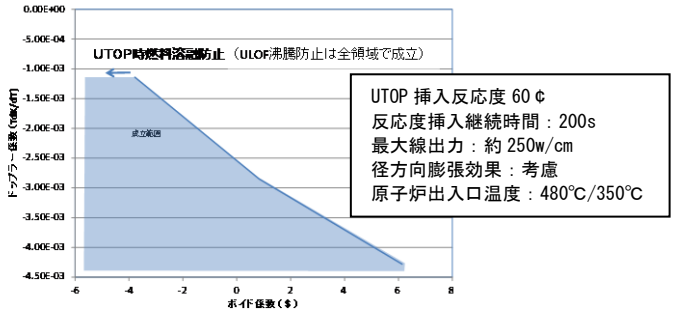


図 7 炉心安全領域成立図

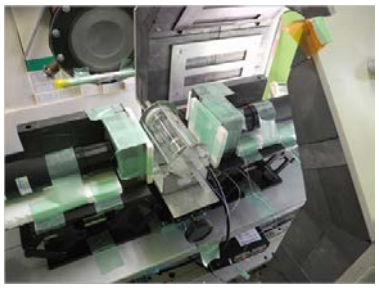


図 8 ドップラー効果測定体系

(2) 燃料代替合金材のドップラー効果測定

ドップラー係数を改善するための新たな燃料合金材のひとつである Mo を対象として、京大炉 LINAC にてパルス中性子を用いたドップラー効果測定予備試験を実施した。その結果、BGO 検出器周りのしゃへい材の導入、配置の工夫等によりドップラー効果による中性子反応率変化を精度よく測定できる見通しを得た（図 8 参照）。

３．今後の研究

これまでの前半 2 年間の本研究により、U を含まない TRU 金属燃料高速炉システムの成立性に関わる重要課題解決の見通しは得られつつある。残りの 2 年間にて、最適な炉心概念を構築するとともに、高 Zr 含有 TRU 金属燃料再処理の実用性や導入シナリオなど工学的な側面も含め計画通り研究を実施し、当初の目標を達成する予定である。

４．参考文献

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

(2) M.C. Billone, et. al., “Status of fuel element modeling codes for metallic fuels”, Int. Conf. on Reliable Fuels for Liquid Metal Reactors, Tucson, September 7-11, 1986.