

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) 東芝エネルギーシステムズ株式会社

(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. 参照)を表1に示すアプローチにて解決する。

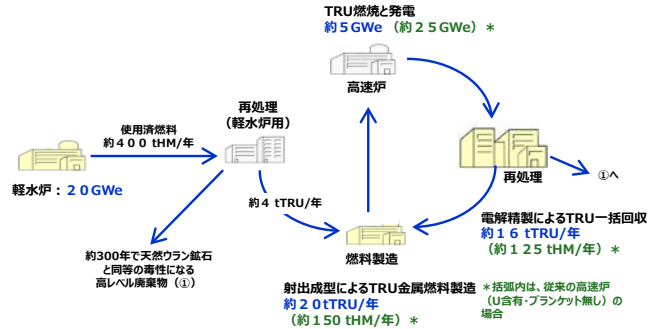


図1 「核廃棄物燃焼システム」概念と導入効果

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、新たな除染材料の適用により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
	燃料溶解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

Ref.: K. Arie et. al., "TRU Burning Fast Reactor Cycle Using Uranium-free Metallic Fuel", ICAPP2014, April 6-9, 2014.

2. これまでの研究成果

2.1 燃料開発

(1) TRU金属燃料健全性評価

H27年度に評価・整備したTRU金属燃料の熱伝導率等の物性に基づき、TRU金属燃料炉心(2.3(1)参照)の燃料健全性を照射挙動解析コードALFUSにて評価した。その結果、被覆管内面バリア材が機能すれば被覆管の累積損傷和(CDF)は1.0を十分下回り、燃料健全性は確保できる見通しを得た(図2)。

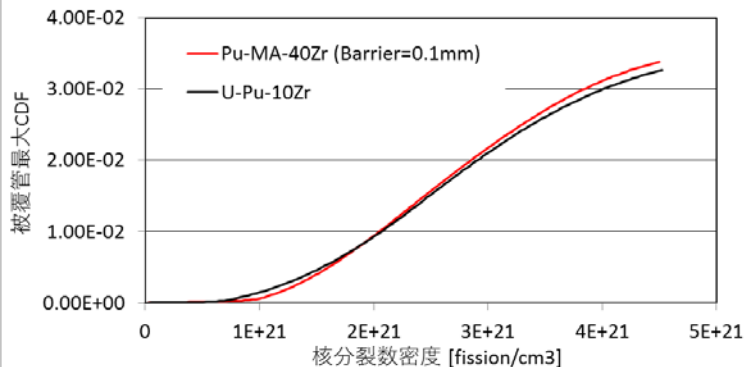


図2 被覆管最大 CDF の解析結果

は従来のフローシートと同じく熔融塩中に蓄積し、最終的にはソーダライト廃棄物として処分される。

(2) Zr 高含有燃料の電解精製試験

Zr 含有率が高い金属燃料の電解処理の成立性を確認するため、H28 年度は TRU 模擬物質として U-Zr を用いて計 6 回の電解試験等を実施した。U の活性を高めた 700℃での U の優先的溶解電解試験では、従来の 500℃の場合と同様に、電流密度を極めて低く抑える必要があり、U の優先的溶解は処理速度の観点から現実的でないことが分かった。

次に U-Zr の同時溶解電解試験を実施したところ、熔融塩中の Zr 濃度が低い場合、U 濃度が高い陰極析出物が得られた。継続して電解すると塩中の Zr 濃度が上昇し、析出物の Zr 割合が多くなるが、電解を停止して一定時間静置すると U と Zr イオンの交換反応により塩中の Zr イオンは金属として Cd 中に移行するため、析出物中の Zr 割合を抑制しつつ高濃度の U を陰極析出できる見通しを得た。(図 5)

化学抽出法では、化学的に U-Zr を溶解させた Cd 中に $ZrCl_4$ を添加して U を熔融塩中に UCl_3 として抽出すると、Zr は Cd 中に留まり塩中の Zr 濃度は抑制できることを確認した。すなわちこの熔融 Cd 中への燃料の溶解と電解を組み合わせれば、Zr 割合を低く抑えた燃料を回収できる可能性があることが分かった。

Pu など TRU の塩化物生成自由エネルギーは U よりも大きいため、これらの結果から TRU-Zr 燃料でも Zr 割合を抑制しつつ TRU が回収できると考えられる。

(3) Zr 高含有燃料陽極溶解挙動の解析

Zr 高含有燃料に適した拡散パラメータを既存の陽極モデルに適用し、U-Zr 合金を用いて行った電気化学測定結果を利用して種々の電解工程の運転条件における TRU 及び Zr の溶解挙動を予測評価した。その結果、合金中の Zr 含有比が増加するにつれて残留 Zr 層中における実効的拡散係数は低下し、処理速度が大幅に低下することが予測された。また、アクチニドと Zr の同時溶解を許容した場合、安定した燃料合金溶解を継続することが可能な条件は、アクチニドではなく Zr の溶解電流上限値によって定まり、 $ZrCl_4$ の拡散係数と溶解度により評価可能であることが分かった。

(4) 廃棄物処理技術の開発

TRU 金属燃料電解後の陽極バスケットに残留する金属廃棄物 (RE 等は熔融塩中に残留するため金属廃棄物には含まれない) の固化体試料 (SUS-20wt%Zr および SUS-36wt%Zr に模擬貴金属 FP を加えたもの) を作成して、高純度水を用いて最長 140 日の浸出挙動試験を実施した。その結果、ガラス固化体からの Si の規格化浸出率と比較して 1 桁程度小さく、十分な安定性がある

ことを確認した(図 6)。熔融するつぼ材と熔融金属との反応抑制等の観点から総合すると固化工程の運転条件は、組成：SUS-20wt%Zr、熔融温度 1600℃がより適切と評価した。



U:89% Zr:11%

図 5 電解回収 U

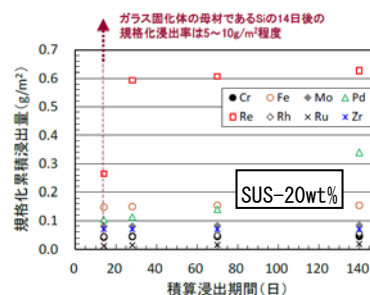


図 6 金属固化体浸出試験結果

2.3 炉心開発

(1) TRU 金属燃料炉心の構築

H27 年度に開発した炉心最適化設計手法を用いて、U を含まない TRU 金属燃料炉心を構築した(図 7)。この炉心では、燃料集合体への減速材(BeO)ピン導入、炉心高さ低減(55cm)、低線出力化(最大 210w/cm)等により、制御棒誤引抜事故時や一次系冷却材流量喪失事故時にスクラム失敗を想定しても燃料熔融や冷却材沸騰はなく、ボイド反応度も 1\$以下と高い安全性を確保しつつ、U がいないことから優れた TRU 燃焼効率が実現可能であることを確認した。また、燃料集合体中の燃料ピンと減速材ピンの配置の工夫により、従来の U を含む金属燃料炉心と同様、過酷事故時には燃料分散等により起因過程で炉内終息できる見通しを得た。

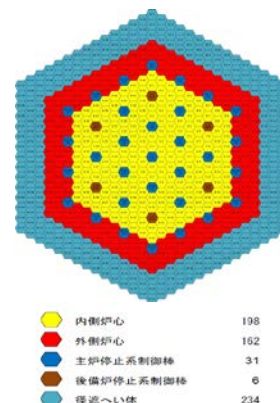


図 7 TRU 燃料炉心

(2) 合金材のドップラー効果の測定

ドップラー効果を増強できる燃料代替合金材のドップラー効果評価精度向上のため、代替合金材候補の Mo に対して温度 300K と 600K で飛行時間測定 (TOF 測定) を実施した(図 8)。その結果、エネルギー 10eV-1000eV に存在する Mo のドップラー効果による共鳴吸収の反応率変化が測定できた。測定誤差は Mo 試料厚さ 0.5mm で 18%以内、厚さ 3mm では 3%以内であった。また、この測定体系でのドップラー効果による解析値と実験値は実験誤差の範囲内で一致し、解析誤差は 20%以内であることを確認した。

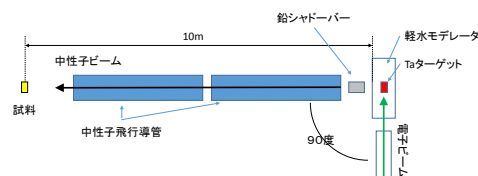


図 8 共鳴吸収反応率測定体系

2.4 「核廃棄物燃焼システム」の検討

軽水炉 20GWe から発生する TRU を、2.3(1)で構築した TRU 燃焼金属燃料高速炉により燃焼処理する場合に必要な炉、再処理及び燃料製造の各施設容量を評価するとともに、当システムの導入シナリオを検討した。その結果、必要な炉の規模は約 5GWe、再処理及び燃料製造の必要処理容量はそれぞれ約 12tHM/年、約 16tHM/年となり、最小限の高速炉サイクル施設にて軽水炉 20Gwe からの年間 4t の TRU を燃焼処理できることを確認した。システム導入時は、TRU 燃焼高速炉の導入に合わせて小規模の再処理及び製造施設を段階的に増設するのではなく、将来必要な処理量に対応した規模の施設を初期段階から導入するほうが経済的であることが分かった。

3. 今後の研究

これまでの 3 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を構築、具体化した。電解再処理評価は TRU 模擬物質として U-Zr を用いた試験に基づいているが、塩化物生成自由エネルギーは U より TRU のほうが大きいため、電解時の燃料と Zr の分離は TRU のほうが容易と考えられること等から、当システムの成立見通しを得た。最終年度の今年度は、残された技術課題の最終的な詰めを行うとともに、サイクル施設の経済性を含め総合評価を実施中である。また、TRU や Pu を用いた確認試験なども含め、工学実証段階で必要になる試験計画を立案し、実現に向けた道筋を示す予定である。