

プルトニウム燃焼高温ガス炉を実現するセキュリティ強化型安全燃料開発

(受託者) 国立大学法人東京大学

(研究代表者) 岡本孝司 大学院工学系研究科

(再委託先) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、富士電機株式会社、
原子燃料工業株式会社

(研究期間)平成26年度～29年度

1. 研究開発の背景とねらい

福島第一事故を受けて、炉心溶融を起こすことが物理的に困難な本質的安全原子炉の重要性が再認識されている。高温ガス炉は、電源などが全て喪失しても、物理現象によって「止まる」「冷やす」「閉じ込める」を担保することができる極めて安全性の高い原子炉である。この安全な高温ガス炉を用いて、燃焼によりプルトニウム (Pu) インベントリを減らす技術の確立は、国際社会及び我が国における核セキュリティ上も重要である。原子炉で Pu を燃焼させるにあたっては、核不拡散の観点から、燃料の製造、運転、廃棄のすべての状況において、Pu が抽出できない仕組みが必要である。また、Pu を効率良く、大量に燃焼させるためには、500 GWd/t という通常のウラン (U) 燃料の10倍以上の燃焼度が必要である。

我が国は、高温ガス炉で用いる被覆粒子燃料の製造において、製造時の破損率を従来 (米国や独国で製造された被覆粒子燃料) の約 1/100 に低減する優れた製造技術を高温工学試験研究炉¹⁾ (HTTR: High Temperature engineering Test Reactor) の燃料製造技術開発を通じて確立した。本研究では、照射時においても従来に比べて破損率低減を可能とするとともに核セキュリティの観点からも優れる被覆粒子燃料を開発し、Pu 燃焼高温ガス炉システム²⁾の安全性と核セキュリティの両立を図る (図1)。

これまでに、直接処分時の安全性の観点から、主に軽水炉に装荷する Pu 燃料の母材として化学的に不活性な YSZ (Yttria-Stabilized Zirconia) に着目した研究が行われてきた。本研究では、核不拡散の観点から、高温ガス炉に装荷する Pu 燃料の母材として YSZ に着目した。被覆粒子燃料の燃料母材に YSZ を用い、燃料核を PuO₂-YSZ とすることで不活性燃料化による核拡散抵抗性の強化を図る。さらに、照射時の燃料破損の主な原因である遊離酸素の内圧上昇を抑制する ZrC 層と不活性燃料を組み合わせ、セキュリティ強化型安全燃料 (図2) を開発し、Pu 燃焼高温ガス炉に装荷する。この Pu 燃焼高温ガス炉を実現するには、以下を実施する必要がある。

- 1) セキュリティと安全の定量的な評価
- 2) セキュリティ強化型安全燃料の成立性評価と炉心核熱設計
- 3) Pu 燃焼高温ガス炉の安全評価
- 4) セキュリティ強化型安全燃料の試作と製造試験
- 5) 実燃料製造試験

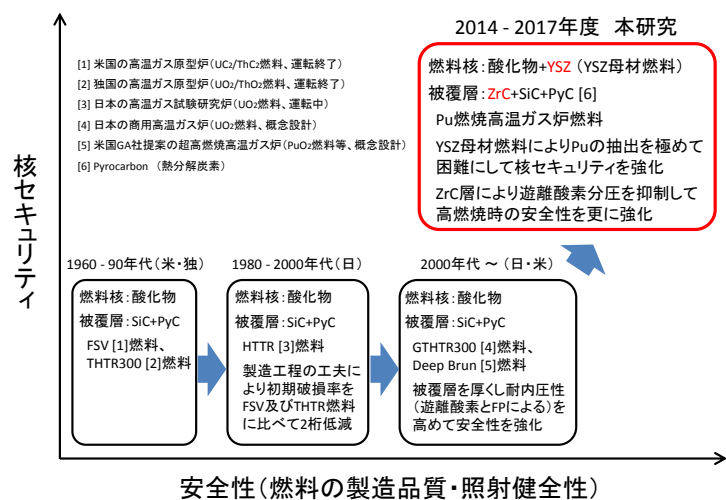


図1 被覆粒子燃料の研究における本研究の位置付け

6) 高燃焼照射試験

このうち、本研究では 1)~4)を行う。本研究の実施により、セキュリティと安全性を両立した Pu 燃焼高温ガス炉の実現に必要な基盤技術を確立することができる。以下に、本研究の具体的な実施概要を述べる。

1) セキュリティと安全の定量的な評価

高温ガス炉のシビアアクシデントについて検討を進めるとともに、軽水炉で進められているセキュリティ PRA (Probabilistic Risk Assessment) を参考にして Pu 燃焼高温ガス炉のセキュリティ上の課題をまとめ、対策を考察する。

2) セキュリティ強化型安全燃料の成立性評価と炉心核熱設計

HTTR の研究開発を通じて確立した既存の UO_2 被覆粒子燃料の内圧破損挙動解析コードを改造し、高燃焼度 (500 GWd/t) を達成可能な $\text{PuO}_2\text{-YSZ}$ 被覆粒子燃料の設計仕様 (燃料核直径、被覆層厚さなど) を検討する。また、Pu 燃焼高温ガス炉の、核的 (反応度温度係数、炉停止余裕など) および熱的 (燃料最高温度) な成立性を評価する。

3) Pu 燃焼高温ガス炉の安全評価

Pu 燃焼高温ガス炉における MA (Minor Actinide) の蓄積を考慮した崩壊熱の評価手法や原子炉温度挙動などの評価手法を整備するとともに、代表的な事故事象を摘出して安全解析を実施し、燃料温度と原子炉压力容器温度の観点から安全上の成立性を評価する。

4) セキュリティ強化型安全燃料の試作と製造試験

$\text{PuO}_2\text{-YSZ}$ の化学特性に近い $\text{CeO}_2\text{-YSZ}$ を用いた模擬燃料核の製造試験を、添加材濃度や粘度、滴下条件などの製造条件を変えて行い、最適な燃料核製造条件を検討する。また、 $\text{CeO}_2\text{-YSZ}$ 模擬燃料核を用いた ZrC 被覆試験を、流動条件や原料ガス組成などの蒸着条件を変えて行い、最適な被覆条件を検討する。さらに、ZrC を被覆した $\text{CeO}_2\text{-YSZ}$ 模擬燃料核を用いた SiC 及び熱分解炭素被覆試験を行い、ZrC/SiC 被覆粒子燃料 (セキュリティ強化型安全燃料) の最適な製造条件を検討する。

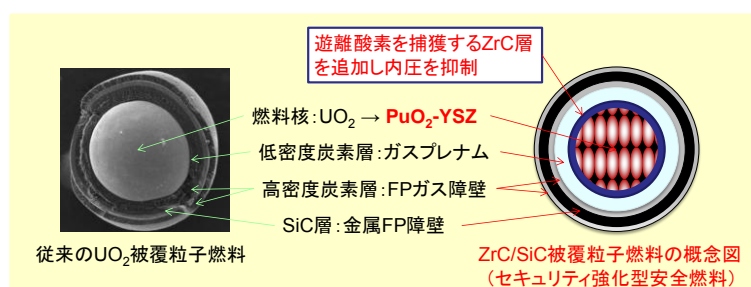


図2 従来の UO_2 被覆粒子燃料とセキュリティ強化型安全燃料 (ともに直径は約 1 mm)

2. これまでの研究成果

1) セキュリティと安全の定量的な評価

過去から現在までの国内・国外の原子力施設における核セキュリティ事例を調査した。その中で高温ガス炉の核セキュリティ構築のために参考となる高温ガス炉に関する事例、および核燃料

物質（高濃縮 U または Pu）に関する事例を抽出・分類し、核燃料物質の盗取（Thefts）の事例は多数存在し妨害破壊行為（Sabotages）よりも多いこと、内部脅威者の関わる事例が多数を占めること、および盗取発生の共通原因は計量システムを操作（誤情報登録など）できる内部脅威者の存在であることが分かった。

米国、ドイツにおける PRA を調査し、高温ガス炉では本質的かつ受動的な安全特性のため炉心損傷はなく、レベル 3 相当の PRA 評価が行われること、リスクはきわめて低いが、1 次冷却材リーク、地震、および蒸気発生器リークの事象が敷地外放出の可能性があることがわかった。

2) セキュリティ強化型安全燃料の成立性評価と炉心核熱設計

被覆粒子燃料の内圧計算に必要な ^{239}Pu と ^{241}Pu の核分裂割合、および安定 FP (Fission Product) 希ガスの核分裂収率を調べるとともに、これらの値を用いて安定 FP 希ガスの分圧が計算できるように内圧解析コード Code-B-2³⁾を改造した。また、SRAC/COREBN⁴⁾による Pu 燃焼高温ガス炉の核特性解析に用いる 3 次元全炉心モデルを作成した。

3) Pu 燃焼高温ガス炉の安全評価

SWAT コード⁵⁾を用いて Pu 燃焼高温ガス炉、同じ炉心形状で同出力の U 燃料を装荷した高温ガス炉について崩壊熱を評価した。Pu 燃焼高温ガス炉では、燃焼により発生する MA や高次の Pu の量が少ないため、その崩壊熱はウラン燃料を装荷した高温ガス炉の約 86%と小さい値となった（図 3）。したがって崩壊熱除去の観点からは、Pu 燃焼高温ガス炉は U 燃料を装荷した高温ガス炉に比べて同等以上の安全性を有することが分かった。

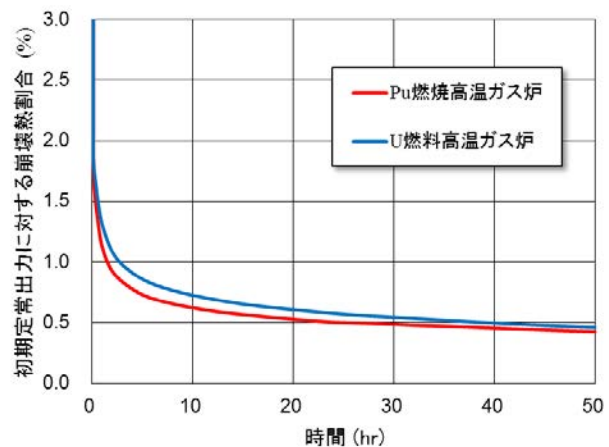


図 3 崩壊熱の比較

4) セキュリティ強化型安全燃料の試作と製造試験

CeO₂-YSZ 模擬燃料核の製造試験、TRISO (Tri-Isotropic) 被覆試験、ZrC 層が施された PuO₂-YSZ TRISO 燃料の検査方法、および ZrC 層の作製試験に関する検討を行った。

CeO₂-YSZ 模擬燃料核の製造試験に関して、硝酸セリウムを用いた先行試験を実施しセリウム (Ce) のゲル化を確認した。また、滴下装置をはじめ、各種機器の整備および試運転を行い所定の性能を確認した。TRISO 被覆試験に用いる流動床装置の整備および試運転を行うとともに、TRISO 被覆粒子の試作試験を行って、最適な被覆条件の設定に必要なガス流量などのデータを取得した。ZrC 層が施された PuO₂-YSZ TRISO 燃料の検査項目に対する既存の HTTR 燃料検査手法の適用性を検討し、新たに検査手法の開発が必要な検査項目を抽出した。ZrC 層被覆装置に既設のガス検知器などインターロック装置、電気炉、臭化物ガス供給装置および排気ガス処理装置について、経年劣化した部品を補修するとともに、装置の試運転を行って正常に動作することを確認した。

3. 今後の展望

1) セキュリティと安全の定量的な評価

PuO₂からのPuO₂-YSZ被覆粒子燃料製造工程における仮想PP (Physical Protection) システムから抽出したターゲットセットについて、Pu 盗取および妨害破壊行為により臨界に至るシナリオを構築する。

平成26年度に調査したPRA報告書について、重要度解析によるリスクへの寄与が大きい因子の分析や、環境への放射能放出要因の検討を進める。さらに核セキュリティで弱点となる可能性が高いと考えられる炉心の輻射伝熱冷却性能に着目して検討を行う。

2) セキュリティ強化型安全燃料の成立性評価と炉心核熱設計

核分裂反応で発生する遊離酸素とZrCの反応を考慮した被覆粒子燃料の内圧解析を、整備したCode-B-2を用いて行い、その結果を用いて高燃焼度の達成が可能な被覆粒子燃料を設計する。また、Pu燃焼高温ガス炉の燃料温度計算手法を整備するとともに、SRAC/COREBNによる全炉心計算および燃料温度計算を行い、核的および熱的な成立性を評価する。

3) Pu燃焼高温ガス炉の安全評価

Pu燃焼高温ガス炉の代表的な事故事象を抽出するとともに、安全解析手法のうち、減圧事故やスクラム失敗事象などを対象にした原子炉温度挙動や再臨界挙動を解析する手法を整備して、予備解析を実施する。

4) セキュリティ強化型安全燃料の試作と製造試験

溶液条件、滴下条件、熱処理条件などの製造条件を変えたCeO₂-YSZ模擬燃料核の製造試験を実施し、製造条件パラメータと模擬燃料核の各種物性の相関を調べてPuO₂-YSZ燃料核の適切な製造条件を検討する。温度、原料ガス濃度・流量、処理時間などの運転条件を変えたSiCを含む四重被覆層の作製試験を行い、最適な運転条件の検討に用いるデータを取得する。平成26年度に実施したPuO₂-YSZ被覆粒子燃料の検査技術に関する調査検討結果を用いて検査技術試験を行い、適用性を評価する。

YSZ模擬球上へのZrC被覆試験を、被覆温度を高めに設定して原料分解効率を高めた条件で開始し、CeO₂-YSZ模擬燃料核への最適なZrC被覆条件について検討を行う。

4. 参考文献

- 1) Y. Fukaya, et al., J. Nucl. Sci. Technol., vol.51, No.6 (2014).
- 2) S. Saito, et al., JAERI 1332 (1994).
- 3) 相原純 他, JAEA-Data/Code 2012-030 (2013).
- 4) 奥村啓介 他, JAEA-Data/Code 2007-004 (2007).
- 5) 須山賢也 他, JAERI-Data/Code 2009-002 (2009).