

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 (米国や独り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
- 6) 高燃焼照射試験



図 1 被覆粒子燃料の研究における本研究の位置付け

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 PuO_2 -YSZ 被覆粒子燃料の設計仕様 (燃料核直径及び被覆層厚さなど) を検討する。また、Pu 燃焼高温ガス炉の、核的 (反応度温度係数及び炉停止余裕など) 及び熱的 (燃料温度) 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、燃料温度と原子炉圧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

PuO_2 -YSZ の化学特性に近い CeO_2 -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、 CeO_2 -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 CeO_2 -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

核セキュリティ事例調査・抽出結果を参考に、Pu 燃焼高温ガス炉に関わる①脅威の抽出、②ターゲットセットの抽出、③プロテクトセットの抽出、④シナリオの構築、の 4 つを実施した。Pu 燃焼高温ガス炉の燃料製造工場及び高温ガス炉プラント本体の物理的防護システムを提案し、これに枢要区域同定手法を用いることで核セキュリティ上の脆弱点解析を行った。その結果、Pu

燃焼高温ガス炉では核セキュリティ上の高度な脆弱性が無い設計が可能であることが分かった。

高温ガス炉におけるシビアアクシデント事象について検討を進めた。インサイダーを考慮した場合、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対する評価を行った。具体的には、高温ガス炉用微粒等方性黒鉛の輻射率の測定を行い、現行の 0.8 が安全側であることを確認するとともに、空気侵入過渡実験装置を考案し、酸素濃度をパラメータとして過渡温度変動データを取得した。原子炉過渡事象解析コード RELAP5 に酸化反応モデルを導入して評価を行った。

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

核分裂反応に伴い燃料核（直径：300 μm ～600 μm ）から放出される遊離酸素の捕獲に必要な ZrC 層の厚さを、全ての ZrC が遊離酸素と反応すると仮定して検討した。その結果、平均燃焼度 500 GWd/t の場合、燃料核から放出される遊離酸素の全量を捕獲するための ZrC 層厚さは 6 μm ～12 μm であることが分かった。

径方向の燃料領域の幅を薄くした Pu 燃焼高温ガス炉（GTHTR300³⁾に Pu 燃料を装荷した炉心）について核熱成立性を検討した。その結果、反応度温度係数、炉停止余裕及び通常運転時の燃料温度はいずれも制限値を満たし、核熱成立性を確認した。

3) Pu 燃焼高温ガス炉の安全評価

Pu 燃焼高温ガス炉の固有安全特性を確保しつつ、炉出力増加の可能性のあるかを調査するために、原子炉温度挙動解析により炉心の寸法形状等が設計基準事象である減圧事故時の燃料温度に与える影響を求め、燃料温度制限を満たす寸法形状等を検討した。また、炉心検討により得られた温度係数データ等を用いて、反応度異常事象の予備解析を行った。

既往の U 炉心と同程度の炉心幅にし、出力分布を最適化することにより、炉出力を 600 MW 程度まで増加できる可能性があることが分かった。また、反応度異常事象として、スタンドパイプ破断による制御棒飛び出し事故時の予備解析を行い、Pu 炉心は U 炉心に比べて出力上昇、燃料温度上昇が大きくなる傾向があることが分かった。

4) セキュリティ強化型安全燃料の試作と製造試験

ZrC 被覆試験試料である CeO₂-YSZ 模擬燃料核の製造条件として、昨年度までに見出した各種条件を基に湿潤ゲル粒子の洗浄工程条件等を最適化し、CeO₂-YSZ 模擬燃料核を製作した。

CeO₂-YSZ 模擬燃料核を想定した小径粒子への TRISO (Tri-Isotropic) 被覆試験及び ZrC 被覆が施された粒子への TRISO 被覆試験を行い、Pu の模擬物質としてセリウム (Ce) を用いるセキュリティ強化型安全燃料の製造試験に備えることが出来た。また、粒子流動試験を行い、被覆粒子製造における適切な粒子流動条件を明らかにした。

検査技術開発は、昨年度までに実施した調査検討結果に加え、Pu を取り扱うことを想定した調査を行うとともに、真球度測定等について従来法との比較試験を行い、検査技術として適用できる見通しを得た。

YSZ 粒子直径 400 μm 、粒子装荷量 100 g の条件で流動試験を実施し、定比 ZrC 定常被覆温度下においては、ガス流量 8 L/min において製造時の被覆層の破損が生じにくい安定流動状態が得

られることが分かった。また、YSZ 模擬燃料核への ZrC 層被覆試験を粒子装荷量 100 g の条件で実施し、厚さ 21 μm の ZrC 層の取得に成功するとともに、定比 ZrC 被覆の再現性を確認した。

3. 今後の研究

1) セキュリティと安全の定量的な評価

高温ガス炉における安全対策が人為的に機能喪失した場合に、「公衆への放射性物質放出に至るか否か」を評価し、またその改善策を提案する。

基礎的な試験及び解析により黒鉛の輻射伝熱特性を検討し、全ての強制冷却が喪失する事故時の炉心冷却性能を評価して、核セキュリティ起因の事象に対しても Pu 燃焼高温ガス炉の安全性が高いことを定量的に示す。さらに、最終年度のとりまとめとして、ライフサイクル全体を見通したセキュリティと安全性の両立について評価を行う。

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

内圧破損を防ぐために必要な ZrC 被覆層の厚さに関する検討結果を用いて、PuO₂-YSZ 被覆粒子燃料の設計仕様（燃料核直径、TRISO 被覆の厚さなど）を決める。

これまでに実施した核熱成立性評価及び安全評価の結果を用い炉心核熱設計の検討を進めて Pu 燃焼高温ガス炉の仕様を決めるとともに、Pu 燃焼高温ガス炉の導入シナリオを策定してシステムの成立性を評価する。

3) Pu 燃焼高温ガス炉の安全

炉心核熱設計により定められた原子炉/炉心諸元に対し、平成 26 年度に整備した崩壊熱評価手法や平成 27、28 年度に整備した安全解析手法を用いて安全解析を実施し、燃料温度と原子炉圧力容器温度がいずれも安全上の判断基準を超えず、原子炉設計が成立していることを確認する。

4) セキュリティ強化型安全燃料の試作と製造試験

これまでに取得した試験データに基づいて設定した滴下条件及び熱処理条件により、ZrC 被覆試験用試料として CeO₂-YSZ 模擬燃料核を製作する。また、これまでに取得した試験データに基づいて設定した被覆条件により、ZrC 被覆された CeO₂-YSZ 模擬燃料核に TRISO 被覆を行い、Pu の模擬物質として Ce を用いたセキュリティ強化型安全燃料を製作するとともに、セキュリティ強化型安全燃料模擬コンパクトを試作し、物性値等を調査する。加えて、これまでに実施した検査技術開発の検討結果を基に検査技術試験及び適用性評価を行う。

臭化物 ZrC 化学蒸着法に基づき、ZrC 被覆試験装置へ装荷した CeO₂-YSZ 模擬燃料核への ZrC 被覆試験を行い、ZrC 層及び CeO₂-YSZ 境界面の材料特性データ（厚さ、密度、定比性など）を取得し、ZrC 化学蒸着条件との相関について検討する。

4. 参考文献

- 1) S. Saito, et al., JAERI 1332 (1994).
- 2) Y. Fukaya, et al., J. Nucl. Sci. Technol., vol.51, No.6 (2014).
- 3) 中田, 他, 日本原子力学会和文論文誌, Vol.2, No.4 (2003)