

高い固有安全性・核不拡散性を有する軽水炉用燃料の研究
—U₃Si₂ 燃料—

Performance evaluation of light water reactor fuel in inherent safety and non-proliferation features
—U₃Si₂ fuel—

*藤縄 主税¹, 相楽 洋¹, 韓 治暎¹

¹東京工業大学

本研究では、事故耐性燃料のひとつであるシリサイド燃料(U₃Si₂ 燃料)を軽水炉で使用することを想定し、基本核特性・安全性・核不拡散性について従来の UO₂ 燃料との比較により評価を行った。

キーワード：事故耐性燃料, シリサイド燃料, 核拡散抵抗性, 核セキュリティ, 不正利用価値

1. 緒言

東京電力(株)福島第一原子力発電所事故を受け、世界的に軽水炉の安全性向上が求められている。従来の軽水炉の性能を損なうことなく、燃料そのものの物性により原子炉の固有の安全性を向上させた事故耐性燃料の研究開発が行われている。本研究では、事故耐性燃料のひとつである U₃Si₂ 燃料を用いた高安全性・高中性子経済性に加え、高核不拡散性の達成を同時に目指した軽水炉の成立条件を明らかにする。

2. 研究手法

まず、中性子輸送計算コード MVP^[1]、燃焼計算コード MVP-BURN を用いて、典型的な PWR 燃料仕様に基に作成した 2 次元ピンセルモデルにおいて、ウラン濃縮度(4.11wt%)及び幾何形状を固定した 1 バッチ燃焼条件での U₃Si₂ 燃料の核特性を従来の UO₂ 燃料と比較する。核データライブラリには JENDL-4.0 を用いる。次に、U₃Si₂ 燃料を使用した場合の反応度係数(燃料温度係数、減速材温度係数、減速材密度係数)及び定常運転時の一次元熱伝導解析により燃料要素内の温度分布を導出し、核的安全性及び熱的安全性評価をそれぞれ行う。また、核不拡散性評価として対国家並びに対非国家主体を想定し、核物質の物性そのものによる核爆発装置(NED)への転用困難性を示す Material Attractiveness(不正利用価値)^[2]を用い評価する。

3. 結果及び考察

図 1 に U₃Si₂ 燃料と UO₂ 燃料の燃焼反応度曲線を示す。U₃Si₂ 燃料を使用した場合では特徴である高い ²³⁵U 密度によって、燃焼初期における中性子利用率は約 6% 増加し、 $k_{\infty} = 1$ となる最大取出燃焼期間が UO₂ 燃料に比べて約 17%増加し、U₃Si₂ 燃料の中性子経済優位性を明らかにした。核的安全性評価では、U₃Si₂ 燃料の全て反応度係数は UO₂ 燃料と同等の値になった。熱的安全性評価では、U₃Si₂ 燃料の高熱伝導率により、定常運転時の燃料中心温度を 300℃以上低下させ、燃料ペレット内の温度勾配が大幅に減少した。核不拡散性として、NED 製造を目的とした非国家主体の脅威を想定した U₃Si₂ 燃料の不正利用価値の評価結果例を表 1 に示す。NED の設計製造を妨げる取得・処理・製造各段階での核物質物性値を評価し、その影響の度合いを参照基準値と比較しながら 4 段階(High, Medium, Low, Very Low、High が最も不正利用価値が高いことを意味する)で評価した。U₃Si₂ 新燃料集合体の評価結果として、低濃縮ウラン(4.11wt%)を用いるため濃縮設備の所有を想定しない脅威では有限の裸臨界量(BCM)を持つ金属 U 球を製造できず、更に U と Si の分離工程(化学処理+遠心分離による不溶解性 Si 分離処理^[3])を要するため、全工程を通じて不正利用価値は Very Low となった。U₃Si₂ 使用済燃料集合体の評価結果として、冷却期間依存の高線量率、及び Pu 単体分離のための多段の化学処理及び Si 分離工程が必要であり、取得及び処理工程において不正利用価値は Very low 及び Low となった。以上よりシリサイド燃料の中性子経済性、安全性及び核不拡散性向上効果を定量的に示した。今後、本燃料特性を更に活かすため、Pu を含むシリサイド燃料評価を実施する予定である。

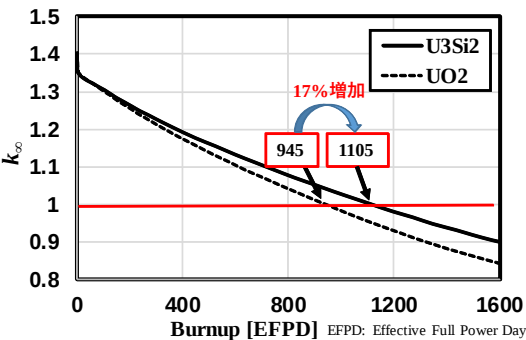


図 1: U₃Si₂ 及び UO₂ 燃料の燃焼度反応曲線

表 1:NED 製造を目的とした非国家主体の脅威を想定した不正利用価値評価結果例

評価対象物	最終使用 形態	取得段階の評価項目			処理段階の評価項目	製造段階の評価項目	
		対象重量[kg]	取得時間[min]	放射線量[Gy/h@1m]	処理時間と複雑さ	臨界量(BCM)[kg]	崩壊熱量[W/BCM]
U ₃ Si ₂ 新燃料集合体 (0 GWd/MTU)	金属U球	N/A (評価対象外)	N/A	N/A	Si分離工程+濃縮を要 する (VL)	∞ (VL)	N/A
U ₃ Si ₂ 使用済燃料集合体 (48 GWd/MTU, 10年冷却)	金属Pu球	675/1体 (M)	~ 20 (M)	~ 30 (VL)	FP+Si分離工程 (L)	21.5 (H)	458 (H)

参考文献 [1] JAERI-1348 (2005). [2] C. G. Bathke et al., Global 2013 (2013). [3] C.Eysseric et al., RRFM2014, Transactions

*Chikara Fujinawa¹, Hiroshi Sagara¹ and Chi Young Han¹

¹Tokyo Institute of Technology