

# 凸型炉心形状による再臨界防止固有安全高速炉に関する研究開発

(受託者) 学校法人五島育英会 東京都市大学

(研究代表者) 高木直行 東京都市大学大学院共同原子力専攻/工学部原子力安全工学科

(再委託先) 国立大学法人東北大学、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

(研究期間) 平成 27 年度～30 年度

## 1. 研究の背景とねらい

高速炉炉心部の燃料要素が溶融し、下部軸ブランクett 上面に堆積すると想定した場合、従来の円柱炉心形状では、一般に再臨界状態となる。本研究では、大型酸化物高速炉を対象に、炉心形状の工夫（断面形状が中央で高い凸型炉心）や、燃料溶融時に中性子自己遮蔽効果が低減して中性子吸収率が增大する軸芯燃料を用いることにより、炉心固有の特性によって再臨界を防止する固有安全高速炉炉心の検討を目的としている。

高速炉の炉心は最大反応度体系として設計されないため、燃料溶融が生じ冷却材が排除されると、燃料凝集や中性子スペクトル硬化により反応度が增大する。よって現在の大型炉設計(JSFR)では、燃料溶融時に溶融燃料を炉外へ排出する集合体構造(FAIDUS)が検討されている。FAIDUSの有効性は解析・実験の両面から確認されつつあるが、燃料排出のための内部ダクトを集合体へ導入することによる、出力分布の歪み、集合体製造の困難さ、燃料交換時の回転非対称性などが課題として考えられる。一方、基本的な設計パラメータである炉心形状の工夫や中性子吸収物質の有効な活用により、溶融燃料堆積時にも再臨界とならないような方策追及により、高速炉の固有安全性を向上する可能性について検討している。

## 2. これまでの研究成果

大型酸化物高速炉を対象に、炉心形状の工夫（断面形状が中央で高い凸型炉心）や、燃料溶融時に中性子自己遮蔽効果が低減して中性子吸収率が增大する軸芯燃料を用いることにより、炉心固有の特性によって再臨界を防止する固有安全高速炉炉心の検討をおこなった。

以下に研究開発の項目別に述べる。

### (1) 再臨界解析評価及び凸型炉心設計

本研究の基本概念は、健全時の炉心形状を一般的な円筒（パンケーキ）型から中性子漏洩の少ない凸型とすることにより炉心崩壊に伴う幾何学的バックリング  $B_g^2$  の増大幅を大きくし、コンパクション反応度  $\rho_c$  を負とすることである。炉心形状という極めて基本的な炉心仕様の工夫により過酷事故時の燃料凝集の問題を緩和する検討である。

図 1-1 は JAEA を中心に検討されている JSFR(Japan Sodium-cooled Fast Reactor)相当の出力を持つ大型高速炉心を対象に、炉心コンパクション（溶融した炉心構成材料が落下し冷却材である Na を排除してその高さを減じること）による  $B_g^2$  の変化を、球型炉心、円筒型炉心そして凸型（および上下凸型）炉心について示している。反応度評価の結果、球、円筒ともに  $\rho_c$  は正となるが、内側炉心を外側より高くした凸型炉心では、健全時の  $B_g^2$  を円筒炉心よりも低減でき、 $\rho_c$  を負値とすることができた。

但し、径方向出力分布の平坦化のため、インポートランスの高い内側炉心の TRU 富化度を低下させ外側を

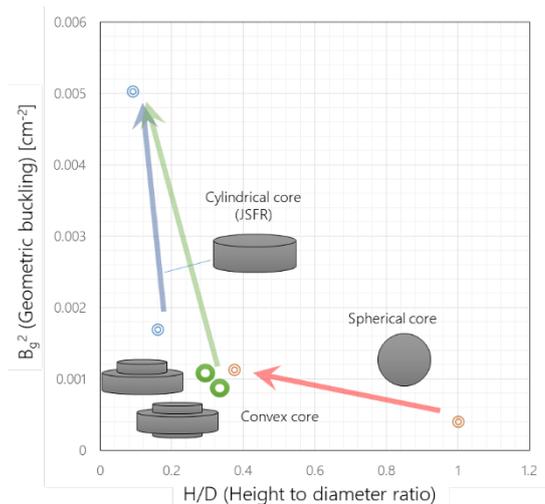


図 1-1 炉心崩壊に伴う幾何学的バックリングの変化

増加すると、炉心反応度が著しく低下し  $\rho_c$  は正に転じたため、全炉心で TRU 富化度を一定とし炉心内側ほどピン径を細くするピン径調整型上下凸型炉心(Graded pin-size convex core)を最終仕様とした。その集合体断面図を図 1-2 に、表 1-1 に従来の円柱型炉心とピン径調整型上下凸型炉心の主要特性の結果を示す。

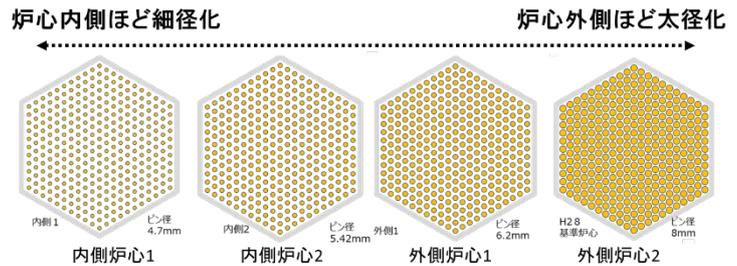


図 1-2 ピン径調整型燃料集合体断面図

表 1-1 従来炉心との主要特性の比較

項目	従来炉心 (円柱型炉心)	ピン径調整型 上下凸型炉心
内側炉心高さ/直径(Hin/Din)	0.162	0.7
炉心高さ(cm)	80	158.5/52
TRU富化度(%IC/OC)	18.3/22.9	30
ピン径(IC1/IC2/OC1/OC2)(mm)	8.8	5.0/5.79/6.63/7.24
ピン本数	271	331
コンパクト化反応度(% $\Delta\rho$ )	3.9 (11.5\$)	-0.7 (-1.9\$)
炉心圧損(MPa)	0.18	0.23
HMインベントリ(ton)	45	25
増殖比(EOC)	1.17	1.09
燃焼反応度(% $\Delta\rho$ /年)	2.3	7.1
サイクル長(月)(燃焼反応度 < 3.5% $\Delta\rho$ )	18	6

また更なる負の  $\rho_c$  追求としてコンパクト化後の  $B_g^2$  を更に増大させるため、熔融炉心プールが炉心直径を超えて広がる径方向ブランケット下部削除炉心(Core with short length radial blankets)や、内側炉心下部軸ブランケット領域へ中性子反射体と中性子吸収材を配置することにより内側炉心のみ熔融時にも吸収材混合により負の  $\rho_c$  投入となる内側炉心下部吸収体配置炉心

(Core with lower axial reflector and absorber)を提案し、その効果を評価した。両概念とも、凸型炉心比べて JSFR への設計インパクトを小さく抑えつつ、-20\$程度の負のコンパクト化反応度投入となる見通しを得た。以上より高速炉炉心はさらなる炉心高度化を図ることにより、炉心崩壊時後の再臨界やエネルギー放出を緩和できる事が明らかになった。

## (2) 凸型炉心に関わる炉心・安全特性検討

(1)の上下凸型炉心と円柱型炉心の外側炉心に酸化ガドリニウムの軸芯燃料を装荷した場合のコンパクト化反応度及び炉心安全特性を検討した。その結果を表 2-1 に示す。

コンパクト化反応度は上下凸型炉心ではさらなる負の反応度となり、円柱型炉心ではコンパクト化反応度は正から負にでき

表 2-1 上下凸型炉心と円柱型炉心の軸芯燃料利用の効果の結果

項目	上下凸型炉心		円柱型炉心	
	軸芯無	軸芯有	軸芯無	軸芯有
コンパクト化反応度 (% $\Delta\rho$ )	-0.7	-2.1	3.9	-1.7
ドップラー反応度 ( $10^{-3}\Delta\rho / (\Delta T/T)$ )	-9.5	-8.9	-8.9	-8.1
ナトリウムボイド反応度 (% $\Delta\rho$ )	0.8	0.6	1.6	1.7
増殖比	1.09	1.1	1.17	1.21
燃焼反応度 (% $\Delta\rho$ /年)	7.1	8.3	2.3	2.3

ることが明らかになった。また、ドップラー反応度とナトリウムボイド反応度は、軸芯有りと軸芯無しでは、円柱型炉心、上下凸型炉心とも大きな差はなく安全性は両者おおきな差がないことが明らかになった。燃焼反応度は、上下凸型炉心では軸芯燃料導入時は若干大きくなり、サイクル期間の縮小等の対策が必要であるが、円柱型炉心では大きな差は生じていなかった。以上より軸芯燃料は、コンパクト化反応度を低下させることから安全性の向上に寄与できることを示した。

### (3)再臨界防止用軸芯燃料の開発

高速炉炉心において損傷事故が発生した場合を想定し、予め燃料ペレットの軸芯部に中性子吸収体を装填し、燃料溶融時に均質に分散させて再臨界を防止する軸芯燃料について検討した。燃料母材は MOX 燃料を想定し、軸芯部の中性子吸収体は主要な中性子吸収材を候補として、燃料溶融温度における物性及化学的な特徴により選択した。中性子吸収材の候補は、ホウ素 (B)、ハフニウム (Hf)、サマリウム (Sm)、ユウロピウム (Eu)、ガドリニウム (Gd) 及びジスプロシウム (Dy) の単体又は酸化物等の化合物となるが、MOX 燃料の通常時の軸芯部温度を最高 2000°C と想定しこれよりも融点が高いこと、燃料溶融温度を 2800°C と想定しこれよりも沸点が高いことを条件として B、 $B_4C$ 、Hf、 $HfO_2$  及び  $Gd_2O_3$  を抽出した。さらに、これらの中から MOX 燃料の酸素との反応や地殻中含量を考慮し、最終的に  $Gd_2O_3$  を軸芯燃料用の中性子吸収材に選定した。

この  $Gd_2O_3$  を溶融燃料中に均質に分散・混合させるためには、軸芯部に装荷する形態が重要となる。溶融燃料に対する中性子吸収体の混合、分散性を検討するため、模擬物質を用いて相互固溶性に着目した液相同士の混合性試験、液相と固相粒子の混合分散性試験を行った。その結果、液相同士の混合は相互に固溶性がある場合に可能となるが、大きな攪拌力を必要とする場合があることが明らかとなった。また、液相中への固相粒子の混合・分散については、固相粒子の密度や粒径が影響するが、適切な粒径選択によって均質な分散が期待できることが明らかとなった。これらのことから、 $Gd_2O_3$  を溶融燃料中へ確実に分散させるために粒子状とし、燃料溶融温度で固相とするために高融点金属であるタングステン (W) で被覆して軸芯部に装荷することとした。被覆材のタングstenは通常運転時には MOX 燃料と接触するが、酸化せずに安定であることが熱力学的考察から予想される。さらに、軸芯燃料は通常運転時には長期間高温下で保持されるため、粒子同士が固着して燃料溶融時の分散を妨げてしまう可能性があるが、これについては W 被覆の最表面を炭化タングsten (WC) とすることにより溶融燃料と同じ融点にし、固着しても燃料溶融時には溶融して分離するようにした。

粒子状態で MOX 燃料の軸芯部に装填された  $Gd_2O_3$  は、燃料が溶融すると溶融燃料の移動や溶融燃料との密度差によって拡散し、分散する。そのため、W 被覆  $Gd_2O_3$  粒子の密度は分散・混合において重要な点となり、溶融燃料よりも大きく設定する必要があるが固液混合の模擬実験から明らかになっている。W 被覆  $Gd_2O_3$  粒子の密度は W の厚さを変えることにより粒子としての密度を増減させることが可能であり、100 $\mu m$  径の粒子を想定した場合、W 被覆を 10 $\mu m$ 、WC を 1 $\mu m$  に設定することによって MOX 燃料よりも約 20% 密度の大きい粒子とすることができる。

最終的な再臨界防止用軸芯燃料の仕様として、中性子吸収体を  $Gd_2O_3$  の表面に W を被覆し、その最表面を WC とした直径 100 $\mu m$  の粒子とし、直径 2 mm の中心空孔を持つ MOX 燃料の軸芯部に装填することによって、燃料溶融時に溶融燃料中に分散して再臨界防止を可能とする軸芯燃料とすることができる。

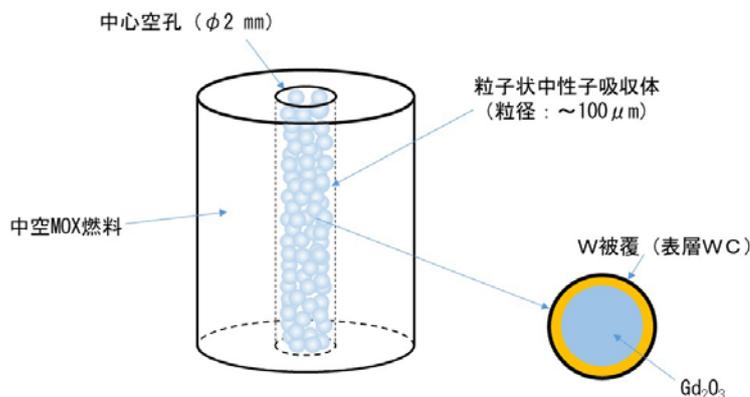


図 3-1 軸芯燃料の最終仕様案

#### (4) 研究推進

プロジェクトの円滑な進行を実現するために定期的に会合を開催し、進捗状況の確認と問題点の議論を行った。また研究会では、炉物理・炉心専門家(九州大学大学院工学研究院エネルギー量子工学部門の守田幸路教授、東京工業大学の関本博名誉教授)、炉心崩壊事故解析の専門家(電力中央研究所・研究アドバイザーの故 遠藤實氏)、FBR 炉心安全解析の専門家(三菱FBRシステムズ(株)スペシャル・アドバイザーの小山和也氏)を招き、これまでの検討結果や今後の検討方針について意見交換を行うとともに、炉心損傷の事象進展やコンパクション反応度のさらなる低減のための炉心形状の新しいアイデアについても議論し、有意義な助言を得た。また平成 28 年度には高速炉安全に関する専門家会議の開催し、米国の高速炉開発を先導してきた元米国原子力学会会長の Alan E. Waltar 博士をはじめ、国内の高速炉安全に関する専門家を招聘し、10 月 27 日東京都市大学世田谷キャンパスにおいて ” A Topical Expert Meeting on Re-criticality Free SFR Concepts during HCDA ” と題する会合を開催し、本研究を含む HCDA 関連テーマについて集中的に議論をおこない多くの知見が得られた。

これまでの成果を含め本研究と関連する新しい概念の炉心については、日本原子力学会「2018 年秋の大会」及び「2019 年春の年会」並びに ICONE2018 (International Conference on Nuclear Engineering) 及び ICANSE2018 (International Conference on Advances in Nuclear Science and Engineering) の国際会議で発表し、また「2019 年秋の大会」には、これまでの研究成果を、東京都市大学、東北大学、日本原子力研究開発機構でシリーズ発表を行い、固有安全高速炉に係る本研究開発を引き続き精力的に進めていることを国内外に示すことができた。

本研究の内、炉心形状の工夫による再臨界回避については、博士後期課程社会人学生のテーマとして研究を行い、「炉心崩壊事故時の再臨界を回避する高速スペクトル炉心概念に関する研究」と題する博士論文としてまとめ、2019 年 3 月に博士(工学)の学位記が授与された。その成果は Energy Procedia Volume131(2017)に掲載され、また Annals of Nuclear Energy127(2019)に投稿した論文は 2020 年 5 月に発行された。

### 3. 今後の展望

(1) 炉心形状を従来の円筒型から凸型に変更することは、コンパクション反応度の観点では好ましい効果をもたらすことが分かったが、サイクル長の短縮の他、燃料集合体製造や集合体湾曲挙動の複雑化、燃料交換パターンの自由度低減など、従来炉心には無い課題が生じうる。炉心設計へのインパクトを最小化し、負のコンパクション反応度を達成する炉心設計として、炉心形状をドラスティックに変更させない方策(径ブランケット下部削除集合体や炉心下部中性子吸収体配置など)の有効性や実効性の検討も必要である。

(2) 軸芯燃料に関しては、熔融した場合、炉心全体に均質に混ざるかが課題である。模擬的実験を検討することが必要である。また、軸芯燃料の熔融時の挙動については、安全性解析コードでの評価も必要である。

(3) 軸芯燃料のフィージビリティについてはほぼ確認でき、実現可能性が見通せたと考える。実用に向けた今後の課題は、実物質を用いたい被覆粒子(WC+W 被覆 Gd203 粒子)や軸芯燃料ペレットの製造性確認と実物質による熔融時の分散挙動の検証である。

#### 4. 参考文献

- [1] Keiko Chitose, Hiroyasu Mochizuki and Naoyuki Takaki : “Thermal-hydraulic Feasibility Study of a Convex shaped Fast Reactor Core” , 5th International Symposium on Innovative Nuclear Energy Systems, INES-5, Tokyo Institute of Technology, JAPAN (2016)
- [2] Eiichi Suetomi , Satoshi Nakano, Hiroki Takezawa and Naoyuki Takaki : “Core geometry for recriticality prevention against CDA in sodium-cooled fast reactor” , 5th International Symposium on Innovative Nuclear Energy Systems, INES-5, Tokyo Institute of Technology, JAPAN (2016)
- [3] K.Chitose and N.Takaki: “Convex shaped FBR core with graded size pins to prevent re-criticality during Core Disruptive Accident” , Annals of Nuclear Energy 127, p364-371(2019)
- [4] Toshio Wakabayashi, Makoto Takahashi, Naoyuki Takaki, Yoshiaki Tachi and Mari Yano:” Conceptual Study on Recriticality Prevention Core Having Duplex Pellets with Neutron Absorber in Outer Core in a Fast Reactor” Science and Technology of Nuclear Installations, vol. 2019, Article ID 2753789, 6 pages, 2019
- [5] K.Chitose, Y.Tachi, T.Wakabayashi and N.Takaki : “Geometry Survey on the Convex Shaped Core for Recriticality Prevention against CDA in Sodium-cooled Fast Reactor” Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE2018), London, England, 22-26 Jul. 2018
- [6] T.Mochimaru, K.Chitose and N.Takaki : “Study on the core shape of intrinsic safe fast reactor preventing re-criticality” , Int. Conf.on Advances in Nuclear Science and Engineering (ICANSE2018), Bandung, Indonesia, 29-30 Nov.2018
- [7] 日本原子力学会「2017年 春の年会」
- 【2F19】 Na 冷却高速炉における CDA 時再臨界を回避する炉心形状の検討
- [8] 日本原子力学会「2018年 春の年会」3件
- 【2F19】 凸型炉心形状による再臨界防止固有安全高速炉に関する研究開発(1)
- 【2F20】 凸型炉心形状による再臨界防止固有安全高速炉に関する研究開発(2)
- 【2F21】 凸型炉心形状による再臨界防止固有安全高速炉に関する研究開発(3)
- [9] 日本原子力学会「2018年 秋の大会」
- 【3L11】 再臨界防止固有安全高速炉の炉心形状に関する研究
- [10] 日本原子力学会「2019年 春の年会」
- 【1K05】 再臨界防止固有安全高速炉の炉心形状に関する研究(その2)
- [11] 日本原子力学会「2019年 秋の大会」3件
- 【3J07】 凸型炉心形状による再臨界防止固有安全高速炉に関する研究開発(4)
- 【3J08】 凸型炉心形状による再臨界防止固有安全高速炉に関する研究開発(5)
- 【3J09】 凸型炉心形状による再臨界防止固有安全高速炉に関する研究開発(6)