

# 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、下部軸ブランケット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、燃料の軸芯位置に中性子吸収材を配置することで、燃料健全時には、自己遮蔽効果で中性子経済への影響は小さく、一方、燃料溶融時には、燃料と混合して中性子吸収率が增大するように工夫し、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

平成 28 年度には炉心形状（炉心径、内側炉心高さ、外側炉心高さ等）、組成（Pu 富化度、燃料要素径、燃料体積比等）をパラメータとして、燃料溶融前後の実効増倍率を評価し、負のコンパクション反応度を達成し再臨界を防止できる凸型炉心仕様を設定した。

[1] また図 1-1 に示すように健全時の炉心形状を中性子漏洩のより小さい球に近い形状とすることにより負のコンパ

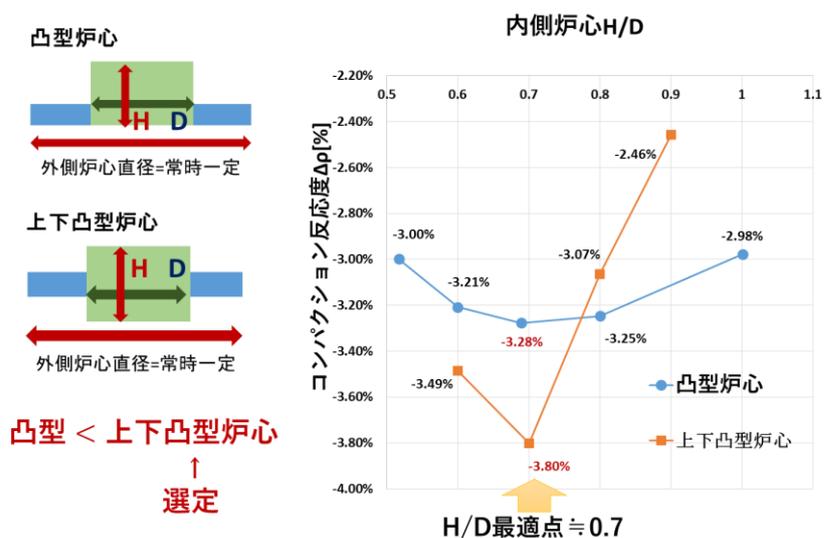


図1-1 凸型及び上下凸型炉心のコンパクション反応度と $H_{in}/D_{in}$ の関係

クション反応度の効果が大きくなることが確認できたため、「上下凸型炉心」を選定した。但しこの炉心は内側炉心の炉心高さの増加により、内側炉心の出力分担率が外側炉心よりも大きく、出力分布の平坦化が困難となる為、Pu 富化度領域を増加させるとともに、集合体ピン本数を 271 本から 331 本に増加することで、最大線出力条件を満足しつつコンパクト化反応度がより負に出来る上下凸型の「基準炉心」を設定できた。解析にはモンテカルロコード MVP、ライブラリは JENDL-4.0 を用いた。

この基準炉心の問題点としては、健全時の臨界性が低下し、臨界性と出力平坦化の両者を成立させるのは難しい<sup>[3]</sup> ことに加え、熱流設計上では、内側炉心の燃料集合体冷却材流量が JSFR の 2.6 倍、燃料要素長が 1.7 倍となるため、圧損が 2.99MPa と JSFR (0.2MPa) に比べ非常に大きくなる事である。

そこで平成 29 年度には、下記の 5 つの観点【①低圧損化を図るため出力の高い炉心中心で流路面積拡大させる。②溶融プール高さ減でコンパクト化反応度をより負にするため燃料インベントリを減少させる。③燃焼による出力変動を抑制するために均一 Pu 富化度を採用する。④リロケーション中の再臨界を回避するため、外側炉心から沸騰溶融させる。⑤線出力制限の観点から径方向出力分布を平坦化させる】から、均一 Pu 富化度で炉心内側ほど細径化した燃料(図 1-2 参照)を用いた炉心(径方向 4 領域)を検討した。

表 1-1 に標準的な円柱型の炉心である JSFR 相当炉心と上下凸型炉心の仕様及びコンパクト化反応度と炉心圧損の結果を示す。細径ピン採用の Case1 は Pu

富化度 24%、Case2 は Pu 富化度を 35%とし、更に細径化したケースである。

本研究でベースとした JSFR 相当炉心では 2.07% $\Delta\rho$  の正のコンパクト化反応度が印加されるのに対し、上下凸型炉心では細径ピン採用時の Case1, Case2 でそれぞれ-2.3% $\Delta\rho$  および-1.2% $\Delta\rho$  の負の反応度が印加されることが示せた。炉心圧損もそれぞれ 0.82MPa、0.20MPa (JSFR 並) が得られた。

表 1-1 炉心の核熱特性の比較

	JSFR相当炉心 (円柱型)	上下凸型炉心		
		基準炉心	均一Pu富化度及び細径ピン採用	
			Case1	Case2
内側炉心の高さ/直径(Hin/Din)	0.152	0.7	同左	同左
炉心高さ[cm](IC/OC)	75	158.5/52	同左	同左
Pu富化度[%]	22.6	16.2/18.3/18.7/22.8	24	35
ピン径[mm](ic1/ic2/oc1/oc2)	8.8	8.0	6.41/6.93/7.31/8.0	4.7/5.42/6.2/6.76
ピン本数	271	331	同左	同左
コンパクト化反応度[% $\Delta\rho$ ]	2.07	-0.56	-2.3	-1.2
炉心圧損[MPa]	0.2	2.99	0.82	0.2

## (2) 凸型炉心に関わる炉心・安全特性検討

凸型炉心において、事故時の安全性に影響するナトリウムボイド反応度及びドップラー反応度を

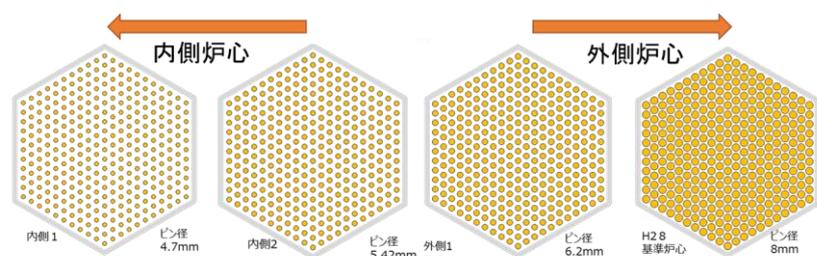


図1-2 内側細径-外型太径ピン炉心の集合体断面図

モンテカルロコード MVP を用いて解析し、従来の JSFR 相当炉心（円柱型）の特性と比較した。基準凸型炉心は上下凸型炉心（表 1-1 細径ピン採用時 Case2 対応）とし、外側炉心の上下はプレナム領域となっている。全炉心ボイド反応度及びドップラー反応度係数の解析結果を表 2-1 に示す。

ナトリウムボイド反応度は円柱型に比べ本上下凸型炉心は 1.2 倍となった。円柱型に比べ、上下凸型炉心の内側炉心高さは約 2 倍であるが、外側炉心燃料上下のプレナム部のボイド化の効果により差は小さくなったものと考えられる。また、ドップラー反応度係数は炉心部の燃料核種の温度変化による反応度変化より求めた。上下凸型炉心は円柱型より炉心高さが高く中性子スペクトルが柔らかいためドップラー反応度係数は大きくなっているものと考えられる。

ケース	炉心	状態	内側炉心高さ(m)	外側炉心高さ(m)	ナトリウムボイド反応度	ドップラー係数
					(% Δ ρ)	(Δ ρ / Δ T/T)
1	JSFR相当炉心(円柱型)	健全	0.75	0.75	1.47	-6.90E-03
2	上下凸型炉心(Case2)	健全	1.585	0.52	1.81	-8.60E-03

(\*) MVP計算よりβ<sub>eff</sub>=0.4%(健全時)とする。

### (3) 再臨界防止用軸芯燃料の開発

再臨界防止軸芯燃料の構造を明らかにするため、燃料母相とともに中性子吸収成分も熔融する液液混合を想定し、熔融液相同士の混合状態に関する基礎的データを取得した。熔融液相同士の混合性について相互の溶解性に着目し、U または Pu と中性子吸収成分との間での金属間化合物の形成の有無が類似する二元系の模擬金属を用いた熔融試験を実施した。表 3-1 に示す U または Pu と中性子吸収成分との関係に類似する二元系模擬金属を高温に加熱して熔融させ、冷却後の固相組織における両金属成分の分布を組織観察及び元素分析により調査した。

UまたはPuと中性子吸収成分	金属間化合物の形成の有無	類似する模擬二元系
Dy-Pu	×	Fe-Cu
Eu-U	×	Fe-Mg
Eu-Pu	×	
Gd-Pu	×	Fe-Cu Fe-Mg
B-U	○	Fe-AL AL-Cu AL-Mg Cu-Mg
B-Pu	○	

この熔融試験の結果より、図 3-1 に示すような金属間化合物を形成する二元系では固相組織に両金属成分が分散しており、これより液相時においても両成分の混合が期待できるものと推測された。一方、図 3-2 に示す金属間化合物の形成が無い二元系では、それぞれの組織が単独の組成で形成されていることから液相時の混合性も低いものと推測される。中性子吸収成分として Gd、Eu、Dy を想定すると、MOX 燃料成分の U や Pu と金属間化合物の形成が無い場合、液相時の混合性は期待し難いものと考えられる。

軸芯燃料の基本構造として軸芯位置に配置する中性子吸収体の形状は、燃料熔融時の分散性を高めるために粒子状とすることが有望である。また、中性子吸収体の構造としては燃料熔融時に固相を維持させる場合には Gd、Eu、Dy の各粒子を高融点の W で被覆する被覆粒子とすることや高融点の W や Re をそのまま中性子吸収体とする高融点金属粒子が候補となる。

なお、燃料熔融時の液相同士の混合性についてはまだ知見が少ないため、最終的な中性子吸収

体成分や構造の選定には更なる検討が必要である。

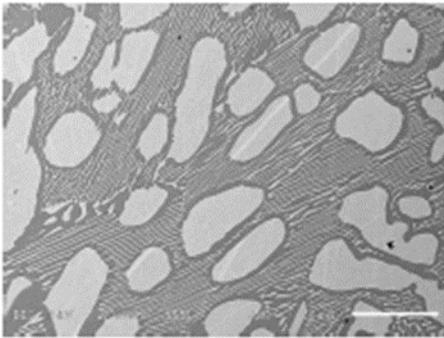


図 3-1 金属間化合物を形成する Fe-AL 系の合金組織  
(白色と灰色の2相がともに Fe-AL 組成)

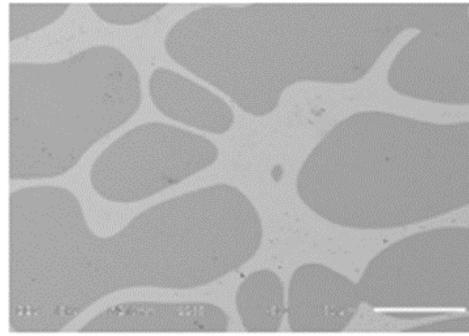


図 3-2 金属間化合物を形成しない Fe-Cu 系の合金組織  
(白色と灰色の2相はそれぞれ Fe、Cu の単体組成)

#### (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 INES-5 で発表した本プロジェクトに関する論文<sup>[1]・[2]</sup>は、本年 INES-5 の Energy Procedia (EP) に掲載予定である。更にインドで開催された炉物理会議 (ARP-2017) にて インディラ・ガンディー原子力研究所 (IGCAR) の高速炉専門家と意見交換を行い、助言を得た。

#### 3. 今後の研究 (継続課題の場合)

(1) 「再臨界解析評価及び凸型炉心設計」では、最終的には、Pu 富化度を 30%程度とし、最外側炉心領域のピン径は JSFR 並の 8mm、最内側炉心領域は EBR を参考に 4.5mm とし、炉心圧損は原型炉並の 0.4MPa 程度まで許容し、径方向出力分布を最適化し、欠損反応度、増殖比、ナトリウムボイド反応等が、バランスよく成立する炉心の構築を目指す。

(2) 「凸型炉心に関わる炉心・安全特性検討」では、凸型炉心、上下凸型炉心に軸芯燃料を適用した場合の燃料溶融時の挿入反応度の検討を行うとともに、これらの炉心に軸芯燃料を適用した場合の炉心・安全特性の検討も行う。

(3) 「再臨界防止軸芯燃料の開発」では、最終的な再臨界防止軸芯燃料の仕様を明らかにするため、これまでに得られた知見に基づき溶融燃料中の中性子吸収体の混合・分散挙動を推測するための模擬試験を実施する。液液混合については各液相の粘性の違いに、固液混合については液相の粘性と固相粒子の粒径に着目し混合性を調査する。これらの試験結果から燃料溶融時の混合に効果的な中性子吸収体仕様を明らかにし、その仕様に基づく模擬軸芯燃料の溶融試験によって軸芯燃料仕様の有効性を検証する。

#### 4. 参考文献

(1) Suetomi, E., Nakano, S., Takezawa, H., Takaki, N., “Core Geometry for Recriticality Prevention against CDA in Sodium-Cooled Fast Reactor” Proc. 5th Int. Symp. on Innovative Nuclear Energy Systems (INES-5), Tokyo, October 31–November 2, 2016

(2) Chitose, K., Mochizuki, H., Takaki, N., “Thermal-hydraulic Feasibility Study of a Convex shaped Fast Reactor Core” Proc. 5th Int. Symp. on Innovative Nuclear Energy Systems (INES-5), Tokyo, October 31–November 2, 2016

(3) 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, 仲野 智\*, 末富 英一、高木 直行、竹澤 宏樹 (\*東京都市大学)