



原子炉出口温度高温化に適合するナトリウム冷却金属燃料炉心の検討

山館 恵 水野 朋保 杉野 和輝

大洗工学センター システム技術開発部

A Design Study of Sodium Cooled Metal Fuel Core for High Outlet-Temperature

Megumi YAMADATE Tomoyasu MIZUNO Kazuteru SUGINO

System Engineering Technology Division, O-arai Engineering Center

ナトリウム冷却高速炉において、炉心内のPu 富化度を1種類とし、燃料ピン径の変更により径方向出力分布を平坦化する金属燃料炉心概念の炉心設計成立性について検討した。金属燃料は燃料と被覆管との共存性の観点から酸化物燃料に比べると被覆管温度制限値が低いので、従来の金属燃料炉心設計では冷却材温度条件も低く設定されている。しかし、低Pu 富化度1種類とする本炉心概念では燃焼による径方向出力分布の変動が小さくなるという利点が見られ、熱設計が有利となって冷却材温度条件を高くできる。この結果、重元素密度の高い金属燃料の特性を生かした内部転換比の高い炉心概念でかつ、原子炉冷却材出入口温度を酸化物燃料炉心と同程度まで高くできる金属燃料炉心の設計成立見通しが得られた。

また、選定した炉心は内部転換比が高いという優れた特性を持っており、高増殖比、高燃焼度、長期運転サイクルといった炉心設計の柔軟性も高い炉心であることが把握できた。

A design study of sodium cooled metal fuel core was performed. The new core concept studied here has low radial power peaking by applying three regions core configuration with different diameters of fuel pins and the same enrichment of plutonium. The core reveals constant radial power distribution during nominal power operation, which gives the advantage of low cladding maximum temperature or high core outlet temperature with a cladding limit temperature. The core thermal hydraulic design shows that a core outlet temperature as high as that of the oxide fuel core is feasible even in the application of metal fuel pins, which have a lower cladding limit temperature than oxide fuel pins.

The core concept is possible to have additional attractiveness such as high breeding ratio, high burnup, and long-term operation cycle due to its high internal conversion ratio.

キーワード

高速炉, 金属燃料, 出口温度高温化, 燃料ピン径, ナトリウム冷却炉, Pu 富化度1種類, 径方向出力分布平坦化

Fast Reactor; Metal Fuel, High Core Outlet Temperature, Fuel Pin Diameter; Sodium Cooled Reactor; Same Enrichment of Plutonium, Low Radial Power Peaking



山館 恵

炉心・燃料システムグループ所属
高速炉の炉心核設計に従事
ナトリウム冷却炉を担当



水野 朋保

炉心・燃料システムグループ
グループリーダー
実用化戦略調査研究・炉心
燃料検討総括に従事



杉野 和輝

炉心・燃料システムグループ
所属
副主任研究員
炉心設計, 及び炉心設計シ
ステム改良にかかわる業務
に従事

1. はじめに

FBR サイクル実用化戦略調査研究において、多様なFBR サイクルシステムの技術選択肢の内から、有望な候補概念の一つとしてナトリウム冷却高速炉が抽出され、燃料形態としては酸化物燃料、金属燃料の検討が進められている。

我が国におけるナトリウム冷却高速炉の開発では、実験炉「常陽」をはじめ原型炉「もんじゅ」の実機設計及び実証炉設計研究等の設計例があり、いずれも酸化物燃料を用いた炉心概念である。一方、転換率の向上等、高速炉の本質を追究する観点から、重元素密度の高い金属燃料や窒化物燃料も注目されてきた。金属燃料は重元素密度が高く、内部転換比の向上が図れる等の利点がある一方、燃料と被覆管との共存性の観点から被覆管最高温度が制限されるという特性がある。このため、従来概念の金属燃料炉心では冷却材出入口温度が酸化物燃料炉心に比べて50 程度低く、熱効率が低いことが課題の一つとなっている。また、窒化物燃料は金属燃料と同等の核特性を持ち燃料と被覆管との共存性にも課題はないが、海外の例を含めても照射実績、製造実績ともに少なく、良好な特性を得るためには¹⁵Nの濃縮技術も開発課題の一つとなっている。

ここでは実用化戦略調査研究の一環として、これらのうち上記の金属燃料の特徴に着眼し、ナトリウム冷却炉において酸化物燃料炉心と同等の高温温度条件に適合できる金属燃料炉心を検討する。

2. 検討の方針

被覆管最高温度が制限されるという特性を踏まえて原子炉冷却材出入口温度の高温化を図るためには、冷却材の炉心出口温度と被覆管最高温度の差を小さくする方法が考えられる。ここで、被覆管最高温度と冷却材出入口温度(T_{out} , T_{in})の間には以下に示す(1)式の関係が成り立ち、グローバルホットチャンネルファクタ(GHCF)の内訳として、最も大きい因子が集合体出力ピーキングであることが分かる。したがって、炉心出口温度と被覆管最高温度の差を小さくするためには、 F_r 及び F_b を小さくし、径方向出力分布を平坦化することが必要である。

$$[\text{被覆管最高温度}] = T_{in} + \text{GHCF} \times (T_{out} - T_{in}) + T_{Na-Clad} \quad (1)$$

$T_{Na-Clad}$: 冷却材 - 被覆管間温度上昇幅

$$\text{GHCF} = (P_c \cdot F_r \cdot F_b) / (W_c \cdot F_w) \times f_w \times F_{HSF}$$

P_c : 炉心部出力割合

F_r : 炉心内径方向ピーキング係数(1.2~1.4程度)

F_b : 集合体内径方向ピーキング係数(1.0~1.2)

W_c : 炉心部流量配分比

F_w : 集合体流量ピーキング係数(1.1~1.2)

f_w : 集合体内周辺流れ効果係数(1.0~1.1程度)

F_{HSF} : 工学的安全係数(1.2前後)

すなわち、出力分布の空間的变化、時間的变化によるピーク発熱を平坦化することによって、通常運転中は一定とする集合体ごとの流量の無駄を極力削減し、被覆管温度の変化も小さくしようとするものである。

検討の方針としては、重元素密度が高いという金属燃料の利点を生かして、内部転換比が高く燃焼反応度が小さいだけでなく、時間的、空間的な出力分布の変動が極力小さくなる炉心概念を目指す。これにより、酸化物燃料炉心並みの原子炉出口温度高温化に適用可能となり、ブランケットなしで内部転換比を1以上とし、燃料サイクルコストの低減にも期待の持てる金属燃料炉心概念を検討する。

2.1 出力分布変化抑制の方策

出力分布変化抑制の先行設計検討例としては、1987年頃に大型酸化物燃料炉心で検討例のあったk一定とする炉心¹⁾や1994年頃にロシアで設計されたBREST炉心(鉛冷却窒化物燃料炉心)²⁾³⁾がある。これらの考え方を参考として、ナトリウム冷却金属燃料炉心へと応用し、炉心・燃料仕様を選定していく。

大型酸化物燃料炉心の例では燃焼による出力分布変動、反応度損失量を低減させる方策として低Pu富化度1種類で径方向2領域炉心があり、内側炉心/外側炉心の燃料体積比の比率を0.8又は0.6とする概念が検討されている。燃料体積比の変更には、ピン本数又はピン径の変更となっているが、酸化物燃料炉心で燃焼による反応度損失量を0近傍に抑えるには炉心高さの増大(有効長150cm)、ピン太径化に加えラップ管削除(ダクトレス)までもが必要とされており、酸化物燃料を使用する場合は中性子漏えいの少なくなる大型炉でも成立性を見通すのは難しいと報告されている。

一方、ロシアはBREST 300炉心の設計研究としてPu富化度1種類でピン径が異なる3領域の炉

心を検討している。燃料ピン配列ピッチ，燃料ピン本数，集集体配列ピッチは各領域とも同一で，燃料ピン径のみが異なる3領域炉心であり，炉心の内側ほどピン配列ピッチとピン径との比(P/D)が大きくなる。また，中性子反射効果の高い鉛を冷却材とし，ダクトレス集集体概念を採用するとともに重元素密度の高い窒化物燃料を用いており，冷却材流路断面積が大きい。このため，低圧損で燃料体積割合はあまり高くない。炉心有効長は110cmであり，取出平均燃焼度は約70GWd/tと低いものの約10ヵ月の運転サイクルで燃焼反応度は ~ 0 である。Pu富化度が14wt%と低く内部転換比(増殖比)は平均で1.06と比較的コンパクトな炉心で成立している。BREST炉心の特徴的な炉心核特性は，主に重元素密度の高い窒化物燃料の使用によって達成されていると考えられ，同じく重元素密度の高い金属燃料を用いればナトリウム冷却炉でも，ダクト(ラッパ管)付集集体で同等の炉心概念の構築は可能と考え，これを試みることにした。

以上に基づき，採用するのは低Pu富化度1種類の燃料でピン径は領域ごとの3種類とし，出力分布の空間的及び時間的な変化を小さくすることをねらった。(以下，この炉心概念をピン径3領域炉心と略す。)金属燃料では被覆管温度が高いと燃料と被覆管との化学的相互作用が顕著となって，燃料外周部で液相が形成される場合がある。これを防止する観点から燃料スラグと接触する被覆管内面の温度を650程度以下に制限している。このため一般には酸化物燃料に比べて出口温度を低く抑える必要が生じているので，本概念を適用してこの課題の解決を試みた。出力分布の時間的な変化が小さくなれば流量配分設計での無駄流量も減り，酸化物燃料炉心と同等の高温の出口温度でも被覆管温度制限を守ることができる可能性がある。先行設計検討例の炉心と異なる点は，ダクトレス集集体ではなく集集体入口オリフィスとの組合せで適正な流量配分が可能なラッパ管付き集集体とする点である。

2.2 検討の対象及び検討条件

ここでの検討の対象は中規模クラス(300MWe \sim 500MWe程度)の炉心での主要核特性と熱特性である。検討条件は高速炉実用化戦略調査研究における設計要求に準じて設定した。

検討の手順としては，まず予備検討としてBREST 300炉心と同一出力(300MWe)での炉心仕様により，低Pu富化度による臨界性，燃焼反応度，高内部転換特性の検討と径方向出力分布平坦化特性の検討を実施し，ピン径3領域炉心概念による燃料体積率変更の有効性を把握した。

次に，実用化への対応を踏まえたスケールアップとして500MWe出力の炉心概念を検討し，炉心・燃料仕様を選定した。選定した炉心に対して主要な核特性を検討すると同時に，炉心の柔軟性検討として軽微な仕様の変更により，更なる高燃焼度化，超長期運転サイクル化，高増殖炉心化のポテンシャルについても検討した。

また，金属燃料を用いていることからスペクトルが硬くなっており，酸化物燃料炉心よりも核特性の非均質効果が小さいことが予想される。そこで，ポイド反応度等の核特性に対する非均質効果の検討を実施した。

最後に，選定した炉心の熱特性，流量配分特性の検討を実施し，高温プラントへの適合性の検討を実施した。

3. 炉心核特性検討

前記，検討の方針，条件等に基づいてピン径3領域炉心により出力分布の時間的，空間的变化の小さい炉心仕様を検討し，酸化物燃料炉心並みの高温条件に適合可能となるような炉心概念を検討した。また，内部転換比が高いという核特性のポテンシャルを生かした炉心の柔軟性についても検討した。

3.1 予備検討

ピン径3領域炉心概念の予備検討として，まず最初にBREST 300炉心と同一の出力(300MWe)でのパラメータサーベイ計算を実施した。解析条件は下記のとおりである。

- ・原子炉出力：700MWt (300MWe)
- ・炉心等価直径/高さ：270cm/100cm
- ・ピン径比(内側/中間/外側)：0.88/0.93/1.0
[BREST炉心と同一比として暫定]
- ・燃料形態：U TRU Zr [Zr:10wt%]の多元合金
- ・スミア密度：75%TD
- ・燃料組成：高速炉多重リサイクルTRU組成
 $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}/^{237}\text{Np}/^{241}\text{Am}/$
 $^{243}\text{Am}/^{244}\text{Cm} = 1.1/54.1/32.1/4.3/3.9/$
 $0.5/2.0/1.0/1.0$

(上記重量比のTRU組成に低除染再処理によるFPの混入(2 Vol%)も考慮するものとした)

- ・ 取出燃焼度：約70GWd/tを目標
- ・ 運転サイクル長さ：10ヵ月以上

なお、炉心配置は図1に示すとおりであり、出力分布平坦化の観点から3領域全体の集合体体数は、おおよそ(内側+中間) = (外側)とする場合が適切であることがわかった。

Pu富化度をパラメータとした燃焼特性解析の結果を図2及び図3に示す。Pu富化度を13.5wt%程度まで低下させると、燃焼度70GWd/t程度までの範囲で実効増倍率の変化(燃焼による反応度変化)がほぼ0となり、内部転換比も1.0以上となることが分かる。これらの特性は低Pu富化度で臨界性が保たれる炉心概念であることから、²³⁸Uの割合が多いために内部転換比が向上し、燃焼反応度も減少するものである。TRU組成割合が異なると内部転換比1.0以上を達成するためのPu富化度は若干変動するが、基本的な傾向は同様である。

また、この場合の径方向出力分布を見ると、図4に示すように燃焼度0~74GWd/tの間でほとんど変化していないことから、本概念の有効性が把握できた。

3.2 中型炉(500MWe級)の炉心仕様検討

予備検討の結果、ピン径3領域炉心概念の有効性が把握できたことから、続いて実用化への対応を踏まえたスケールアップとして500MWe出力の炉心を検討し、炉心・燃料仕様を選定した。検討の条件としては、酸化物燃料炉心と同一の冷却材

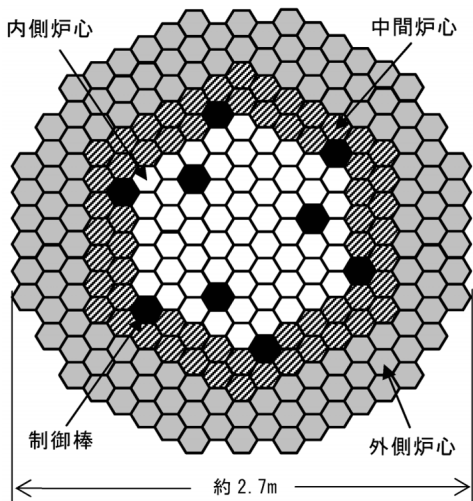


図1 パラメータサーベイ計算時の炉心配置

温度とし、FBR実用化戦略調査研究の設計要求に沿って炉心部取出燃焼度150GWd/t等を目標としている。下記に主な条件を示す。

- ・ 原子炉出力：1,190MWt (500MWe)
- ・ 冷却材出入口温度：550 / 395 (酸化物燃料炉心並み)
- ・ 炉心等価直径：280cm (同クラスの酸化物燃料炉心並み)

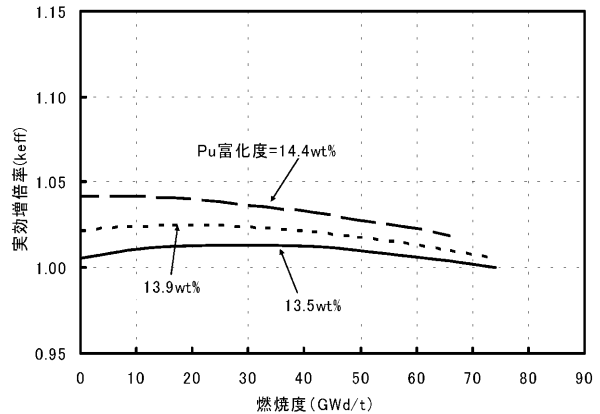


図2 燃焼による実効増倍率の変化

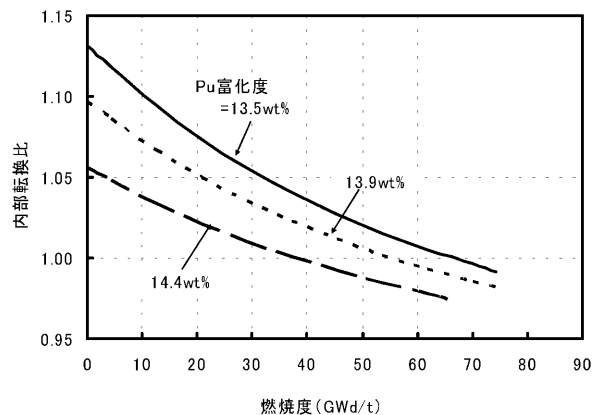


図3 燃焼による内部転換比の変化

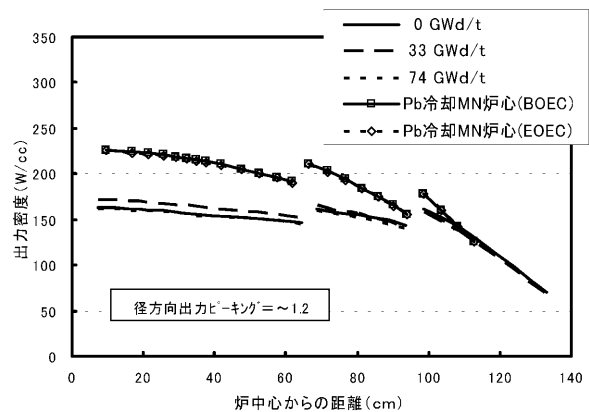


図4 径方向出力分布の比較

- ・ピン径：3領域で領域ごとにピン径を変更
- ・燃料形態：U TRU Zr [Zr: 10wt%]の多元合金
- ・スミア密度：75%TD
- ・燃料組成：高速炉多重リサイクルTRU組成
 $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}/^{237}\text{Np}/^{241}\text{Am}/$
 $^{243}\text{Am}/^{244}\text{Cm} = 1.1/54.1/32.1/4.3/3.9/$
 $0.5/2.0/1.0/1.0$
 (上記重量比のTRU組成に低除染再処理によるFPの混入(2Vol%)も考慮するものとした)
- ・取出燃焼度：150GWd/tを目標
- ・運転サイクル長さ：18ヵ月程度目標
- ・高速中性子照射量： $5 \times 10^{27}\text{n/m}^2$ 以下を目安
($E > 0.1\text{MeV}$)
- ・被覆管内面最高温度：650 (液相形成防止)

上記の条件に基づいた検討の結果、選定したピン径3領域概念によるナトリウム冷却金属燃料中型炉心の仕様を表1に示す。また、炉心配置図を図5に示す。燃料ピン径の比は内側/中間/外側0.89/0.94/1.00であり、集合体数比は0.42/0.44/1.00となった。本概念検討の参考としたBREST炉心(鉛冷却)と比べると、ナトリウム冷却であるために中性子漏えい効果が大きく、外側炉心燃料集合体数を多くする必要があった。

3.3 主要核特性検討結果

外側炉心燃料の集合体数を多くして集合体割合が(外側炉心) > (内側炉心 + 中間炉心)となる選定炉心の主要核特性の検討結果を表2に示す。

表1 ピン径3領域炉心(中型500MWe)の燃料仕様

項目	単位	仕様			
		内側炉心	中間炉心	外側炉心	
燃料	材質	-	U TRU Zr		
被覆管	材	-	ODS鋼		
	外径	mm	9.2	9.7	
	内径	mm	8.12	8.56	
燃料要素	肉厚	mm	0.54	0.57	
	全長	mm	2.050		
	燃料カラム長さ(炉心)	mm	1.000		
	上部ガスプレナム長さ	mm	1.000		
スペーサ	燃料スミア密度	%TD	75.0		
	材	-	PNC FMS鋼		
	型式	-	グリッド		
ラッパ管	段数	-	6		
	材	-	PNC FMS鋼		
	外対面幅	mm	162.2		
集合体	内対面幅	mm	152.2		
	肉厚	mm	5.0		
	燃料ピン本数	-	169		
	燃料ピンピッチ	mm	11.6		
	外周ピンラッパ管ギャップ	mm	1.03	0.78	
	ラッパ管間ギャップ	mm	3.8		
	集合体配列ピッチ	mm	166.0		
	体積比	燃料*	%	36.7	40.8
		(実効)	%	(27.5)	(30.6)
		被覆管	%	10.4	11.6
ラッパ管		%	11.4	11.4	
構造材		%	21.8	23.0	
冷却材	%	41.5	36.3		
炉心等価直径/遮蔽体外接円径		m	2.84/4.00		

*被覆管内面で定義した体積比。(実効)はスミア密度を考慮した場合。

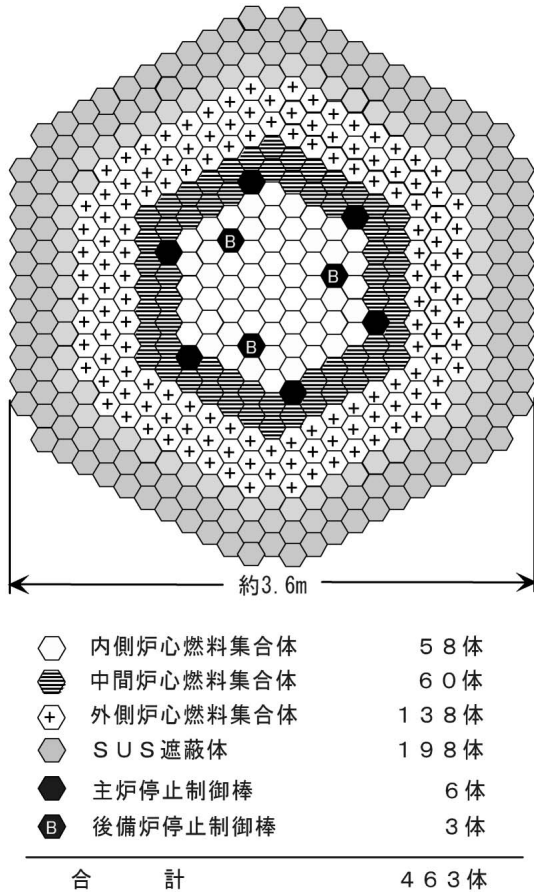


図5 ピン径3領域炉心(中型500MWe)の炉心配置

燃焼反応度は0.6% k/kk' と0近傍にはならないものの、1% k/kk' 以下であり十分に小さい結果となった。また、Pu 富化度が約14wt%と低い結果、炉心の内部転換比が高く、ブランケットなしで1.03の増殖比となっている。しかし、一方では中性子スペクトルが硬いために高速中性子照射量が高くなってしまふ。このため、選定した炉心では燃料交換バッチに変則バッチを採用した。すなわち、中性子束レベルの高い内側炉心ではバッチ数を小さくし、中性子束レベルの低い周辺ではバッチ数を大きくすることとした。この結果、高速中性子照射量の平坦化が図られるが、高速中性子照射量を $5 \times 10^{27}n/m^2(E > 0.1MeV)$ 以下を目安に制限すると、燃料交換バッチ数を変則(内側<外側)としても取出平均燃焼度は約110GWd/t程度が上限となった。図6には選定した炉心の径方向出力分布を示す。

3.4 炉心の柔軟性

以上により、ピン径3領域炉心概念により径方向出力分布を平坦化するナトリウム冷却金属燃料

表2 ピン径3領域炉心(中型500MWe)の主な核特性

炉心高さ(mm)	1,000	
燃料ピン径 [内側/中間/外側](mm)	9.2/9.7/10.3	
集合体配列ピッチ(mm)	166.0	
炉心平均体積割合(%)	燃料(実効)	31.9
	構造材	23.6
	冷却材	33.9
	ボンド材Na	10.6
原子炉熱出力(MW)	1,190	
運転サイクル長さ(月)	18	
燃料交換バッチ数 [内側/中間/外側]	3・4 / 4 / 4・5・8	
Pu 富化度 (wt%)	14.0	
取出平均燃焼度 [内側/中間/外側/平均](GWd/t)	114/117/100/107	
燃焼反応度 (% k/kk')	0.55	
増殖比(-)	平衡初期	1.049
	平衡末期	1.007
	平均	1.028
炉心部平均線出力(W/cm)	275	
最大線出力(W/cm)*1 [内側/中間/外側]	平衡初期	430/433/427
	平衡末期	435/434/426
出力分担率(%) [内側/中間/外側]	平衡初期	27.2/27.3/45.5
	平衡末期	27.5/27.2/45.3
最大高速中性子束 [平衡中期]($\times 10^{16}n/cm^2s$)*2	3.1/2.7/2.4	
最大高速中性子フルエンス ($\times 10^{27}n/m^2$)*2	5.3/5.0/5.1	
初装荷核分裂性Pu重量(t/GWe)	4.7	

* 1 : 3次元解析値、* 2 : $E > 0.1MeV$

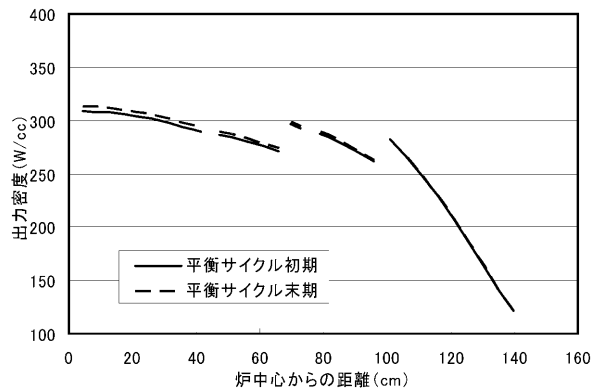


図6 ピン径3領域炉心(中型500MWe)の径方向出力分布

炉心は、ブランケットなしで内部転換比1.0以上を達成し、燃焼反応度も1% k/kk' 以下という核特性に優れた炉心が成立する可能性があることが把握できた。次に、本炉心概念の柔軟性の検討として、大幅な仕様の変更はしないで高増殖比、更なる高燃焼度化、長期サイクル化といった炉心特性の変更に対応が可能かどうかを検討した。表3

表3 炉心の柔軟性解析結果比較

項目	炉心	基準炉心 (33で検討)	高増殖 炉心	高燃焼度 炉心	超長期運転 サイクル炉心
炉心径(m)		2.8	2.8	3	3
炉心高さ(cm)		100	90	100	100
軸ブラ長さ(cm) [上/下]		-	40/5	-	-
サイクル長さ (月)		18	18	18	60
燃交バッチ平均		4.4	4.4	7.2	1.3
燃焼反応度 (% k/kk')		0.6	0.3	0.6	1
取出平均燃焼度 (GWd/t)		107	110(77)*	150	96
増殖比(-)		1.03	1.2	1.01	1.07
高速中性子照射量 (n/m ²][E>0.1MeV]		5.3×10 ²⁷	5.3×10 ²⁷	7.3×10 ²⁷	5.3×10 ²⁷

*：炉心部及び(ブランケットを含む全体平均)

に炉心の柔軟性検討の結果として前記33で選定した炉心と比較して示す。

(1) 高増殖比炉心の検討

増殖比に対する柔軟性検討としては、前記33の炉心に軸ブランケットのみを付加する場合の主要な核特性を概略検討した。Puの需要が高い場合(高速炉導入初期など)に想定される1.2程度の高増殖比を目標として軸ブランケット厚さと炉心高さをパラメータとした検討を実施した。(なお、下部軸ブランケットの厚さは万一の炉心損傷時の熔融燃料排出のために5cmに固定し、上部軸ブランケットの厚さをパラメータとした。)

炉心高さは10cm短くなり90cmとなるが、軸ブランケットの厚さは上部：40cm / 下部：5cmであり、この時の炉心平均の増殖比は1.17となる。すなわち、本炉心概念では軸方向ブランケットのみの配置で約1.2の増殖比達成が見込まれ、増殖比に対する柔軟性が確認できた。

(2) 高燃焼度炉心の検討

高燃焼度炉心の検討としては、前記の選定炉心で制限した高速中性子照射量が材料開発により制限されなくなる場合を想定して、炉心取出平均燃焼度150GWd/tを可能とする炉心仕様を検討した。選定炉心の仕様のまま燃焼期間を延ばして燃焼度を増加させると、Pu富化度が大きくなり転換比が低下して内部転換比1.0以上を満足出来なくなるため、各領域の燃料ピン径を増加して、炉心等価直径を約3mまで増加する炉心・燃料仕様を設定した。

炉心配置は前記の選定炉心と同一であるが、燃料ピン径、集合体配列ピッチが大きくなるため燃料物量が多くなり、同じ18ヵ月運転であるが燃料交換バッチ数が平均4バッチ7.2バッチとなって照射期間が長くなっている。Pu富化度が13.7wt%と約14wt%以下であるため内部転換比1.0以上を確保出来ている。

したがって、若干の炉心径の増加により約150GWd/tの取出平均燃焼度達成は見込めることが分かった。なお、参考までに、高速中性子照射量は燃焼度の増加にほぼ比例して増えており $7.3 \times 10^{27} \text{ n/m}^2$ (E > 0.1MeV)となる。

(3) 超長期運転サイクル炉心の検討

超長期運転サイクル炉心の検討としては、そのポテンシャルを模索する観点から、60ヵ月(5年)をターゲットとしてサーベイ計算を行い、内部転換比1.0以上の炉心概念成立可能性を検討した。運転サイクルの長期化には、まず、燃料交換バッチ数の削減が考えられるが、選定炉心の仕様のままでは最大でも内側炉心の3バッチの部分のみを1バッチとして、54ヵ月(=18ヵ月×3)である。このため、炉心特性を維持するためには燃料物量の増加が必要と考えられ、前記(2)で検討した更なる高燃焼度化を図った炉心と同様の方向での検討となる。そこで、前記の高燃焼度化仕様の炉心で内側炉心領域の燃料交換バッチ数を1バッチとし、60ヵ月運転を想定した場合の核特性を概略評価した。

Pu富化度が13.4wt%と約14wt%以下になり、内部転換比1.0以上を確保できている。また、燃焼反応度も1% k/kk'以下になり、制御棒反応度収支も成立の見通しである。したがって、若干の炉心径の増加により、60ヵ月の長期運転サイクル炉心の成立性は見込めることが分かった。

4. 金属燃料炉心における非均質効果の検討

現行の炉心設計検討では、燃料、構造材、冷却材からなる燃料集合体の構造に対し、各領域の組成を体積加重により均質化して取り扱い(均質モデル)均質組成に基づく核特性を算出した後に非均質効果補正を施すことにより、均質組成の使用に伴う核特性誤差の低減を図っている。そして、非均質効果補正、すなわち、燃料集合体の構造をより正確に取り扱うことによる補正としては便宜的に酸化燃料炉心に対する補正值が使用されて

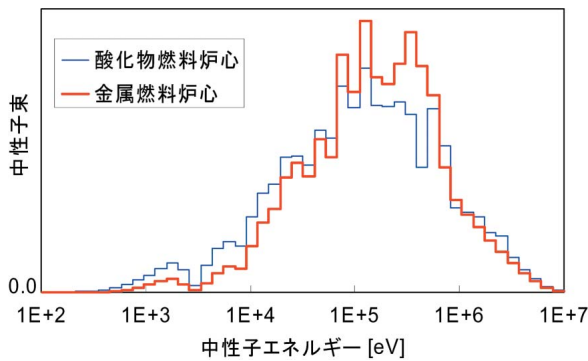


図7 酸化燃料炉心と金属燃料炉心の中性子束スペクトルの比較

いる。他方、金属燃料炉心では、燃料中に酸素が含まれていないことから、酸化燃料炉心と比較して中性子の減速度合いが小さく、図7に示すように中性子束スペクトルの硬化が見られる。このことは、金属燃料炉心では酸化燃料炉心と比較して、中性子の平均自由行程がより長くなることを意味しており、非均質効果が低下することが予測される。Naポイド反応度やドブプラ反応度といった炉心の安全性にかかわる核特性の非均質効果は、一般に大きいことが知られており、その評価が重要である。そこで、金属燃料炉心設計の信頼性向上を目的として、金属燃料炉心の核特性に対する非均質効果の評価を行った。

4.1 評価方法

評価対象炉心として、まず前章で検討したピン径3領域炉心を取り上げるが、ピン径が3種類となっており、従来の炉心仕様とは異なる。従来の炉心概念とはピン径1種類、Pu富化度2種類とす

る概念である。そこで、比較のために従来型均質2領域炉心についても同出力の炉心仕様を設定して非均質効果の評価を併せて行い、比較検討を行うこととする。

非均質効果の評価は、均質モデルと非均質モデルに基づく格子計算により実効断面積を用意し、それぞれの断面積を用いた核特性解析結果を比較することにより行う。

対象としている炉心の燃料集合体は、ピン周辺(ペレット 被覆管 冷却材)とラッパ管周辺(燃料ピンの集合 ラッパ管 冷却材)の二重非均質構造を有している。この二重非均質性の取扱いにおいては、計算コストの観点から現時点では現実的ではないものの、計算精度の観点から燃料集合体構造を直接取り扱うことが可能である2次元格子計算がふさわしい。しかしながら、モンテカルロ法計算により、図8にその模式を示す1次元多重リングモデルを用いても、高速炉の解析には十分な精度を有することが確認されている⁴⁾。そこで、今回の非均質格子計算においても、計算負荷の少ない1次元多重リングモデルを適用する。

さらに、非均質格子計算においては、Naポイド状態の実効断面積計算に注意を払う必要がある。すなわち、ポイド領域が存在する体系に対して通常の格子計算手法を用いると、拡散係数が異常な値となることが知られており、臨界実験解析ではポイド領域を周辺の構造材とスミアするモデルが用いられている。そこで、今回のNaポイド反応度の計算においても、臨界実験解析と同様に、非Naポイド状態も含め被覆管とラッパ管内の冷却材をスミアするモデルを採用することとした。

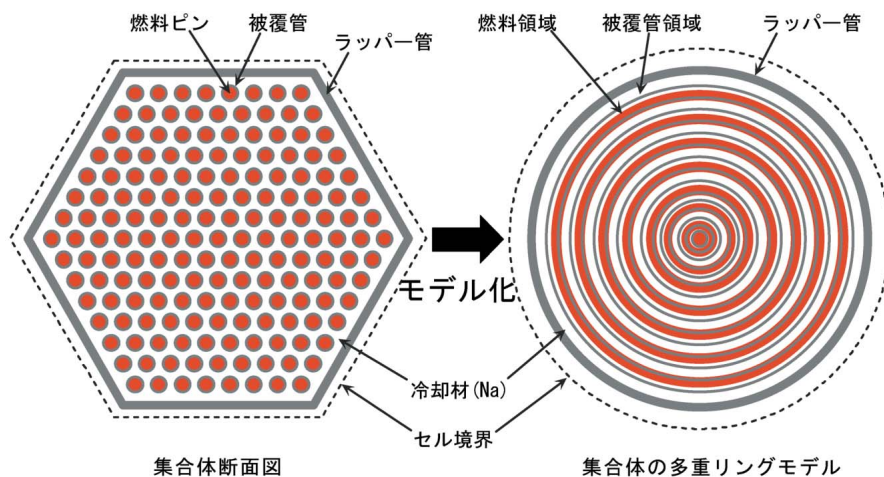


図8 二重非均質構造燃料集合体の1次元多重リングモデル化

4.2 評価結果

ピン径3領域炉心及び従来型均質2領域炉心それぞれについて、臨界性、Naボイド反応度、ドップラ反応度の非均質効果の解析を行った。解析結果を表4に示す。2種類の金属燃料炉心間で非均質効果の相違は特に見られず、臨界性は+0.3% k程度、Naボイド反応度は0.96程度、ドップラ反応度は1.04程度である。また、従来より用いられている酸化燃料炉心での結果との比較に関しては、予測どおりに、いずれの核特性についても非均質効果の低下が見られている。このことから、酸化燃料炉心の非均質効果を金属燃料炉心に適用することは、非安全側の評価につながることであり、炉心設計に対して今回評価した非均質効果の反映が不可欠であることが分かる。

5. 冷却材高温条件での炉心熱特性検討

選定炉心における熱流力特性評価として冷却材流量配分を検討し、酸化燃料炉心と同一の出入口温度(550/395)の場合で流量領域ごとの被覆管最高温度を検討した。

流量配分の検討は核特性評価による3次元出力分布解析結果を用い、それぞれ下記の条件、制限目安で評価した。

<流量配分評価時>

- ・1次系全流量に対する炉心流量割合：約95% (制御棒、径方向遮蔽体、炉壁冷却等に5%を配分と設定)
- ・周辺流れ効果係数 (内側/中間/外側):1.00/1.03/1.11
- ・被覆管ホットスポットファクタ：1.18
- ・被覆管内面温度制限条件：650以下

ここで、周辺流れ効果係数については、グリッドスペースを想定し、外周サブチャンネルの流路断面積を低減して合理化を図り、出口温度高温化

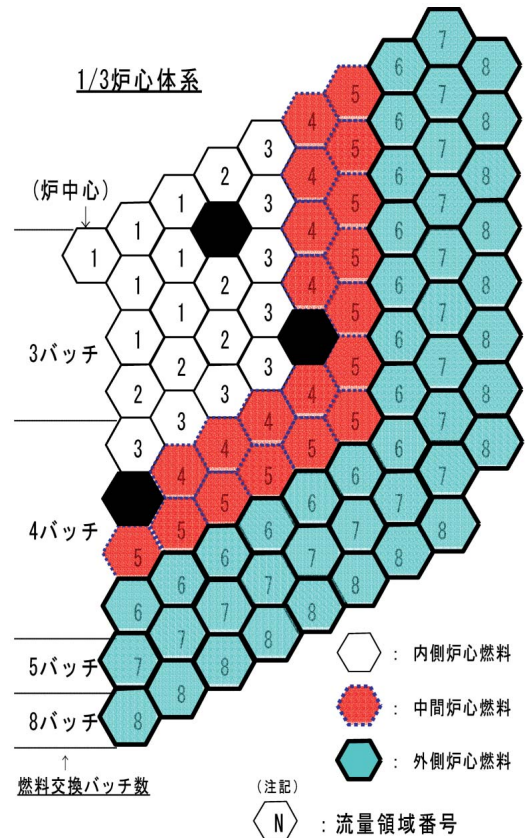


図9 流量領域番号と燃料交換バッチ数

達成に寄与している。

図9に流量領域区分を示す。集合体最大出力が同程度となった内側炉心の3層をひとまとめにし、他は各層ごとに流量領域を区分して内側炉心3領域、中間炉心2領域、外側炉心3領域の合計8領域である。表5に、各流量領域の集合体数、集合体流量、及び被覆管最高温度等の炉心熱流力特性を示す。表5より、被覆管内面最高温度はいずれの流量領域でも650であり、条件を満足する。また、集合体流量の最大値は25.7kg/sであり、このときの燃料バンドル部圧力損失は0.17MPaで設計条件を満足する。表6には、各炉心領域の出力ピーキング係数と流量配分検討結果を示す。集合体出力ピーキング係数と集合体内径方向ピーキング係数が低減できた結果、GHCFが約1.5程度に抑制され、被覆管内面温度が制限条件を満足できた。

6. おわりに

以上の結果、低Pu富化度1種類でピン径3領域として内部転換比1.0以上を目指したナトリウム冷却金属燃料中型炉心を検討し、その核設計、熱流力設計の成立性を確認することができた。

表4 金属燃料炉心の非均質効果解析結果

炉心		核特性	臨界性	Naボイド反応度	ドップラ反応度
金属燃料炉心	ピン径3領域		0.27% k	0.961	1.042
	従来型均質2領域*		0.29% k	0.964	1.045
酸化燃料炉心			0.45% k	0.904	1.048

*比較のために同出力で仕様を設定した炉心

表5 ピン径3領域炉心(中型500MWe)の流量配分及び熱流力特性(原子炉入口/出口温度=395/550)

領域	集合体層No.	流量領域		炉心流量配分							
		番号	燃料体数	集合体出力 [最大] (MW)	集合体流量 (kg/s)	領域流量 (kg/s)	ホットスポット温度()		周辺流れ 効果係数	バンドル部 圧損 (MPa)	P/F** (MW/kg/s)
内側炉心	1	1	19	6.10	25.1	476.9	620	650 (1.18)	1.00	0.05	0.24
	2			6.03			619	648 (1.18)	1.00	0.05	0.24
	3			5.92			616	644 (1.18)	1.00	0.05	0.24
	4	2	15	5.79	23.9	358.5	622	650 (1.18)	1.00	0.05	0.24
	5	3	24	5.56	22.9	549.6	623	650 (1.18)	1.00	0.04	0.24
中間炉心	6	4	24	5.94	25.3	607.2	624	650 (1.18)	1.03	0.08	0.23
	7	5	36	5.51	23.5	846.0	626	650 (1.18)	1.03	0.07	0.23
外側炉心	8	6	42	5.54	25.7	1079.4	629	650 (1.18)	1.11	0.17	0.22
	9	7	48	4.56	21.7	1041.6	631	650 (1.18)	1.11	0.13	0.21
	10	8	48	3.36	16.6	796.8	633	649 (1.18)	1.11	0.08	0.20
合計	-	-	256	1 287.35	-	5 656.0**2	-	-	-	-	-

* 1 集合体出力 / 流量比

* 2 燃料集合体に配分可能な流量 = 5760 (kg/s) [燃料以外への流量配分 = 5%]

表6 各領域ごとの出力ピーキング係数と流量配分検討結果

項目	内側炉心	中間炉心	外側炉心
集合体出力ピーキング係数	1.31	1.28	1.19
集合体内径方向出力ピーキング係数	1.00	1.02	1.05
炉心集合体流量ピーキング係数	1.12	1.12	1.14
燃料集合体周辺流れ効果係数	1.00	1.03	1.11
GHCF (グローバルホットチャンネルファクタ)	1.47	1.49	1.52
冷却材ホットスポット温度()	620	624	629
被覆管内面ホットスポット温度()	650	650	650
GHSF (グローバルホットスポットファクタ)	1.66	1.66	1.65

内部転換比1.0以上で燃焼反応度が小さく、時間的及び空間的な出力分布の変動の小さい炉心を構築した結果、金属燃料炉心の課題であった原子炉冷却材出口温度を酸化燃料並みの550程度とすることが可能となる見通しが得られた。

また、一方では軸方向ブランケット装荷や炉心径の若干の増加等の比較的小さな仕様変更により、高増殖比達成や長期運転サイクル化等のポテンシャルを持った柔軟性のある炉心であるとの検討結果が得られた。さらに、金属燃料炉心では中性子スペクトルが硬いことに起因して、酸化燃料炉心と比べて非均質効果が小さいことも確認できた。

今後は、炉心安全特性の検討を進めるとともに、より合理的な炉心・燃料仕様への改良方策を検討していく予定である。

参考文献

- 1) 渡 孔男: "酸化燃料を用いた大型高速炉の高燃焼度炉心概念の提案と炉心構成の最適化", 日本原子力学会誌, Vol. 29, No. 10, pp. 913~928 (1987).
- 2) V.V. Orlov et al.: "Mononitride Fuel and Large Scale Nuclear Power Industry", Proc. Of Tech. Con. Meet. Studies on Fuels with Low Fission Gas Release, Moscow, RDIPE, 1-4 Oct., IAEA TECDOC 970 (1996).
- 3) V.V. Orlov, et al.: "Physical Characteristics of Lead Cooled Fast Reactor", Proc. Of Top. Meet. Advances in Reactor Physics, vol. 1, Knoxville, TN., USA, 11-15 Apr (1994).
- 4) 杉野和輝, 関根 隆, 他: "モンテカルロ法の高速炉解析への適用, モンテカルロ法による粒子シミュレーションの現状と課題", 日本原子力学会「モンテカルロ法による粒子シミュレーション」研究専門委員会編 (2002).