



# 「もんじゅ」高度化炉心概念の研究 ( )

## - 長期運転サイクル・高燃焼度炉心概念 -

金城 秀人 影山 武\* 石橋 淳一 西 裕士

敦賀本部 国際技術センター

\*原子力システム株式会社

Conceptual Design Study on an Upgraded Future Monju Core ( )  
- Core Concept with Extended Refueling Interval and Increased Fuel Burnup -

Hidehito KINJO Takeshi KAGEYAMA\* Jun ichi ISHIBASHI Hiroshi NISHI

International Cooperation and Technology Development Center, Tsuruga Head Office  
\* Nuclear Energy System Inc.

敦賀本部国際技術センターでは、将来の「もんじゅ」炉心を経済性向上実証の場あるいは世界有数の高速中性子照射場として利用するため、炉心性能向上に関する研究を行っており、この一環として現行炉心の約2倍、「12ヵ月運転サイクル期間・13~15万MWd/t取出燃焼度」を目標とする第2期高度化炉心概念について検討し、炉心諸特性を評価した。

運転サイクル期間延長に伴う燃焼反応度増大、反応度収支の悪化に対処するため、「約7.7mm径×127本、95%高密度、103cm炉心長」の太径長尺ドライバ燃料を導入して内部転換比、燃焼特性を改善し、制御棒吸収体の<sup>10</sup>B濃縮度や吸収体長さも変更して制御棒価値を増加させた炉心概念を構築し、この炉心体系での主要炉心核熱特性を評価した。

その結果、炉心核熱特性や反応度制御特性、ドップラ係数・ボイド反応度等炉心安全特性への影響を抑えつつ、1年連続運転・150GWd/t燃焼度の目標炉心性能が得られ、高度化炉心の成立性を確認した。

*A conceptual design study has been performed at the International Cooperation and Technology Development Center to investigate the feasibility of upgraded future Monju cores with extended refueling intervals of 365efpd/cycle and increased fuel burnup of 150GWd/t. The goal of this study is to demonstrate the possible contribution of Monju to the improved economy and to efficient utilization, as one of the major facilities for fast neutron irradiation.*

*Two design measures have been mainly taken to improve the core fuel burnup and reactivity control characteristics for the extended operating cycle length of 1 year: (1) The driver fuel pin specification with both increased pin diameter of 7.7mm and increased active core height of about 100cm has been chosen to reduce the burnup reactivity swing, (2) The absorber control rod specification has also been changed to enhance the control rod reactivity worth by increasing <sup>10</sup>B-enrichment and absorber length, and to adequately secure the shutdown reactivity margin.*

*The major core characteristics have been evaluated on the core power distribution, safety parameters such as sodium void reactivity and Doppler effect, thermal hydraulics and reactivity control characteristics. The results show that this core could achieve the targeted core performances of 1-year operating cycle as well as 150GWd/t discharged burnup, without causing any significant drawback on the core characteristics and safety aspects.*

*The upgraded core concepts have, therefore, been confirmed as feasible.*

### キーワード

もんじゅ、高度化炉心、燃料燃焼度、長期運転サイクル、<sup>10</sup>B濃縮度、燃焼反応度、炉停止余裕、炉心特性、ドップラ効果、高速炉



金城 秀人

炉心技術開発グループ所属  
「もんじゅ」の炉心設計、熱  
流体力学設計及びその高度化研  
究に従事



影山 武

炉心技術開発グループ所属  
「もんじゅ」の炉心解析及び  
その高度化研究に従事  
第一種放射線取扱主任者



石橋 淳一

炉心技術開発グループ所属  
「もんじゅ」の炉心解析及び  
その高度化研究に従事



西 裕士

炉心技術開発グループ  
グループリーダー  
「もんじゅ」FBRの炉心特  
性解析・運転設計解析及び  
その高度化研究に従事

## 1. はじめに

高速増殖原型炉「もんじゅ」では将来、燃料高燃焼度化や運転サイクル長期化等の炉心性能向上と共に、高次化Pu/TRU燃焼データの取得、あるいは「高速増殖炉サイクル実用化戦略調査研究(FS)」で検討中の実用化燃料概念等の事前実証試験を行うことなどが議論されており、先の原子力長期計画<sup>1)</sup>においても、「もんじゅ」を有効に活用していくことの必要性和意義が言及されている。

そこで敦賀本部国際技術センターでは、将来の「もんじゅ」を今後世界有数の高速中性子場、あるいは経済性向上実証の場として利用するため、炉心の性能向上に関する研究、すなわち「『もんじゅ』高度化炉心」の概念検討を行い、現在までに下記2段階の炉心高度化移行計画案を想定して、主に①第1期高度化炉心概念及び同炉心を用いた照射試験概念の具体化を図ってきた(図1)<sup>2)</sup>。

① 第1期高度化炉心(目標取出燃焼度10万MWd/t, 6ヵ月サイクル, 運転再開後、約5年後に移行)

② 第2期高度化炉心(目標取出燃焼度15万MWd/t, 12ヵ月サイクル, 運転再開後、約10年後に移行)

また、現行炉心からのスムーズな移行形態(移行炉心)やマイナーアクチニド(MA)照射試験概念等についても並行して検討中である。

一方、②第2期高度化炉心概念については、燃料体積比率と炉心長を約10%増した太径・中空・

長尺ドライバ燃料と酸化物分散強化型(ODS)フェライト鋼導入により、取出燃焼度は13~15万MWd/tになる見通しを得たが、目標とする12ヵ月運転サイクル炉心概念の具体化は未検討であり、7~9ヵ月炉心までの検討にとどまっていた。

この12ヵ月(1年)運転サイクル期間については、現行軽水炉(商用炉)では今や1年運転期間が定着しており、高速炉の実用化を考えるならば、「もんじゅ」において1年連続運転の可能性を実証することは、高速炉の実用性、経済性を直接証明する極めて有効な手段となり得る。

さらに、定検間隔13ヵ月以内という現行法規の下での運転稼働率に着目した場合、「もんじゅ」の燃料交換1ヵ月、定検期間3ヵ月を想定すると、年間稼働率は現行炉心(8万MWd/t・5ヵ月炉心)の約72%から80%に増加するのみならず、年間の使用済燃料発生量も概略計算でほぼ60%以下にまで低減でき、また将来の主要な照射試験施設として、高速中性子累積照射量データ等を得るまでの所要照射試験期間も短縮されるなど「もんじゅ」自体の運転経済性向上、廃棄物量低減、照射試験効率向上に大きく寄与することが期待できる。このことから、「もんじゅ」の高速中性子場及び経済性向上実証の場としての利用を考える際に、「①長期(1年)運転サイクル炉心の実証」を従来の「②(13~15万)MWd/t高燃焼度燃料実証」の上位において炉心性能向上を図ることは上記の観点からも自然であり、合理的かつ必然性があると考えられる。

そこで本検討では、前稿<sup>2)</sup>までの「①第1期高度化炉心」を中心とした検討に引き続き、同じくMOX炉心をベースに、現行炉心寸法・形状を大きく変更しない範囲で、「長期運転サイクル化を主眼とする第2期高度化炉心」概念を構築し、その主要炉心特性を評価することにした。

なお、炉心サイズをほぼ維持しながら運転サイクル期間長期化を図る場合、燃料ピン径や長さの大幅増加なしには内部転換比向上効果はあまり期待できないため、燃焼反応度の大幅増加は避けられず、制御棒反応度収支が厳しくなることが予想される。したがって、本検討では炉心構成やドライバ燃料仕様の見直し・設定とともに、制御棒仕

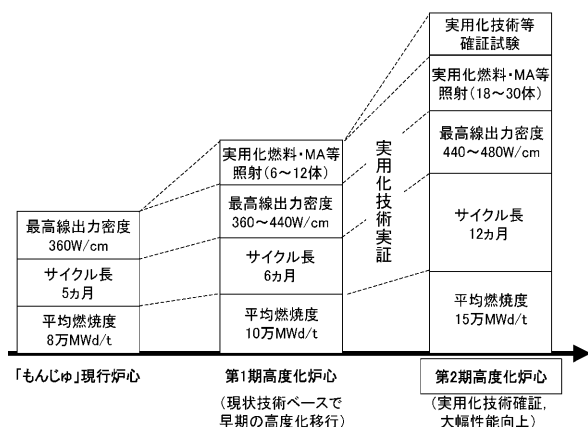


図1 「もんじゅ」高度化炉心への移行イメージ

様変更を含む反応度収支を全面的に見直すことを前提として、炉心概念の構築を図ることにした。

以下、本稿では、将来の「もんじゅ」高度化炉心の一形態として提案する「第2期高度化炉心(長期運転サイクル・高燃焼度炉心)」概念の具体化例と、炉心特性評価結果に基づく技術的成立性及びその実現上の課題等について述べる。

## 2. 高度化炉心概念・仕様検討

### 2.1 基本条件(前提条件)<sup>5)</sup>

#### (1) プラント基本仕様

本稿で検討する高度化炉心は、現行炉心概念の範囲内で、新炉心材料の導入を前提として着実に移行することを主眼とすることから、原子炉熱出力、原子炉出入口温度等の基本プラント条件や原子炉構造、主冷却系設備等の設備改造あるいは炉心サイズ(炉心径、集合体長)拡張を伴わないよう、燃料集合体内部の燃料要素仕様変更のみで性能向上を図ることを基本とする(表1)。

#### (2) 高度化炉心の構成・基本仕様

高度化炉心の構成は、現行炉心と同じ均質2領

域炉心とし、制御棒、中性子遮蔽体等炉心構成要素配置・本数も現行仕様どおりとするが、径ブランケット燃料集合体についてはコスト低減、Pu需給状況等の観点から、削除(反射体等に置換)することを前提として検討を進める。同領域にはMA燃焼試験集合体等の装荷も別途考慮する。

以上のプラント基本仕様、炉心構成及び炉心基本仕様などをまとめて表1に示す。

#### (3) 炉心・燃料仕様条件

##### 1) 燃料組成

##### ① プルトニウム(Pu)同位体組成比<sup>6)</sup>

炉心燃料Pu組成は、以下のとおり、軽水炉燃料の取出燃焼度45GWd/t(炉外期間:10年)相当を想定する。

$$^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}/^{241}\text{Am} \\ = 3.0/52.0/27.0/9.5/7.0/1.5$$

Pu 富化度上限値 32wt%(融点降下や再処理時の溶解性等を考慮に入れて想定)

##### 2) 燃料被覆管材質<sup>7)B)</sup>

高燃焼度条件下での耐スエリング性、高温クリープ強度に優れる酸化物分散強化型[ODS]フェライト鋼を採用する。これにより、熱流設計基準である被覆管最高温度は700℃まで許容できる。

##### 3) 反応度制御系

5% k/k以上と予測される燃焼反応度の増大に対処するため、現在、基本概念を検討中の「もんじゅ」長寿命化制御棒(20ヵ月炉内滞在、ナトリウムボンド型)導入を前提に、吸収体長や<sup>10</sup>B濃縮度の大幅増加により制御棒価値を増加させる。

また、出力補償反応度などその他の所要反応度の内訳も見直す。したがって燃焼反応度としては約5% k/k(現行は2.6% k/k)まで許容できる。

## 2.2 炉心基本仕様の検討

### (1) 炉心燃料仕様

第2期高度化炉心のドライバ燃料仕様、特に燃料要素径や炉心高さ等は、第1期高度化炉心とほぼ同様の考え方で設定するが、12ヵ月サイクルという長期連続運転炉心を実現するため、以下の事項を考慮に入れて設定する。

一般に、燃料燃焼度を平均100~150GWd/tまで増大させながら長期の運転サイクル炉心を実現するには、平衡炉心末期までの運転に必要なPu装荷量の確保を前提に、燃料体積比率と燃料部全長を極力増してPu富化度を低くし、内部転換比を向上

表1 基本プラント仕様・炉心構成

項目	現行高燃焼度炉心	高度化炉心
1. 基本プラント仕様		
(1) 原子炉熱出力 (MWt)	714	
(2) 冷却材		
(a) 原子炉入口温度(℃)	397	
(b) 原子炉出口温度(℃)	529	
(c) 冷却材流量 (t/h)	15,360	
2. 燃料交換		
(1) 燃料交換方式	5バッチ等分散	(4/5)バッチ等分散
(2) 燃焼期間 (EFPD)	148×5	365×4~(4/5)
(3) 取出平均燃焼度 (MWd/t)	約8万	約14~15万
3. 炉心構成		
(1) 炉心型式	均質2領域炉心	
(2) 炉心燃料集合体本数 (内側/外側)(体)	108/90	(78~108)/90 (照射領域30)
(3) ブランケット燃料集合体(体)	174	0 反射体、MA等
(4) 制御棒集合体 (FCR/CCR/BCR) (体)	3/10/6	
4. 炉心基本仕様		
(1) 炉心ドライバ燃料		
・燃料被覆管外径 [mm] × 本数	6.5 × 169	7.65 × 127
・炉心長/上/下軸 ブランケット長 [cm]	93/30/35	103/26/29
(2) 制御棒集合体		
・ <sup>10</sup> B濃縮度 [wt%]	39	65
・吸収体長さ [cm]	80	93

させることが有効である。

このうち、燃料体積比を実効的に増加させる方法としては、燃料ピンの太径化とペレットの高密度化があるが、これらを組み合わせても現行ラッパ管寸法（対面間距離）の拡大なしに実現できる実効燃料比率は、現行の28.4%から30~32%程度が限度であることがこれまでの検討<sup>3)</sup>から分かっている。また、燃料部分延長についても、線出力密度やPu富化度低減に有効である反面、冷却材ボイド反応度の増大抑制や軸方向遮蔽等の点からは、ほぼ10%増の100cm前後とするのが限度である。

そこで長サイクル炉心の燃料仕様は、このような実効燃料体積比や燃料要素長増加の限界を考慮に入れ、さらに、100Gwd/tを超える高燃焼度条件下での燃料健全性、特に燃料ペレットと被覆管相互作用（PCMI）防止の観点から燃料スミヤ密度82%以下に抑え、「約7.7mm太径×127本・95%高密度・中空ペレット・103cm炉心長」の、太径・高密度・長尺ドライバ燃料仕様を設定する。

具体的な燃料ペレット・要素外径や燃料配列ピッチは、現行バンドル部圧損が増えない範囲でなるべく大きめに設定し、ペレット密度も95%とすることにより、実効燃料体積比は約1割増の31.4%となり、現行の28.4%に比べて内部転換比が向上して燃焼反応度増大抑制が期待できる（図2表2:P.17）。

## (2) 制御棒仕様

運転サイクル期間の長期化により、燃焼に伴う反応度低下、すなわち燃焼反応度が増大し、反応度制御系への要求条件（所要反応度）が厳しくなる。この燃焼反応度（ $B_U$ ）は一般に、

$$B_U \propto (\text{燃焼サイクル期間} / \text{燃料体積比})$$

で示されるように、サイクル期間にほぼ比例して増大し、燃料体積比や燃料長さを増してPu富化度を下げれば内部転換比は向上して低減する。

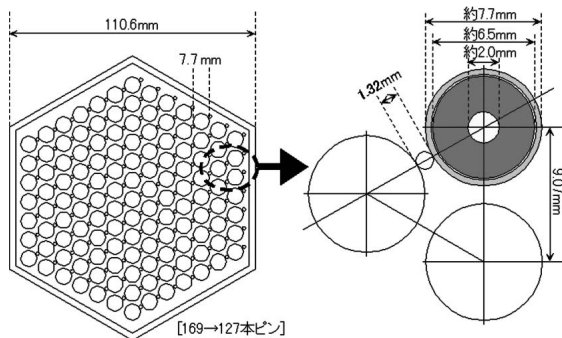


図2 高度化炉心燃料集合体概念

そこで現行ドライバ燃料のPu富化度を増加し、サイクル末期までの運転に必要な核分裂性Pu量を多く与えるのみでサイクル期間を延長すれば、燃焼反応度は6% k/kを超えてしまい、また、燃料体積比が1割程度大きい上記(1)のドライバ燃料を導入しても、約5% k/k近くなると予測される。

一方、所要反応度の減少要因としてはドブプラ反応度の減少に起因する出力補償反応度以外ほとんど見当たらない。さらに、ドライバ燃料の燃料体積比増加はむしろ制御棒反応度値を相対的に減少させ、反応度収支としてはより一層厳しいものになるため、制御棒値を必要分だけ増やすことにし、<sup>10</sup>B装荷量増加策を中心とした制御棒仕様の変更を行うこととし、具体的には<sup>10</sup>B濃縮度と吸収体長さを次のように変更する。

まず、主炉停止系制御棒値（1ロッドスタック時）に着目すると、上記燃焼反応度の増加分約2.5% k/kを吸収するには現行の約8% k/kから約3割増の10.5% k/k程度まで増加する必要があり、制御棒値と<sup>10</sup>B濃縮度に関する既評価例（図3）からこれを満足する<sup>10</sup>B濃縮度を求めると、60wt%以上の範囲にあると予測される。

また、吸収体長については、「もんじゅ」長寿命化制御棒（20ヵ月寿命、ナトリウムボンド型、第5次取替で運用開始予定）として検討中の将来仕様に合わせて、現行の80cmから93cmに延長し、燃料体積比増加による制御棒値の相対的減少分も補うようにした。

この吸収体長も増加することにより、<sup>10</sup>B濃縮度単独で増加した場合に比べて出力歪の増大は幾分緩和されると期待され、最終的にはそれぞれ、<sup>10</sup>B濃縮度：39~65wt%、吸収体長：80~93cmと設定

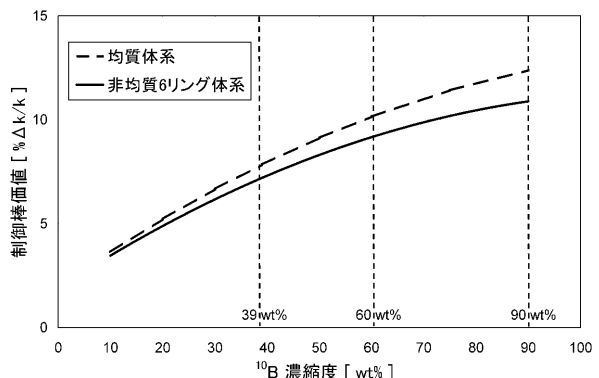


図3 制御棒値の<sup>10</sup>B濃縮度依存性

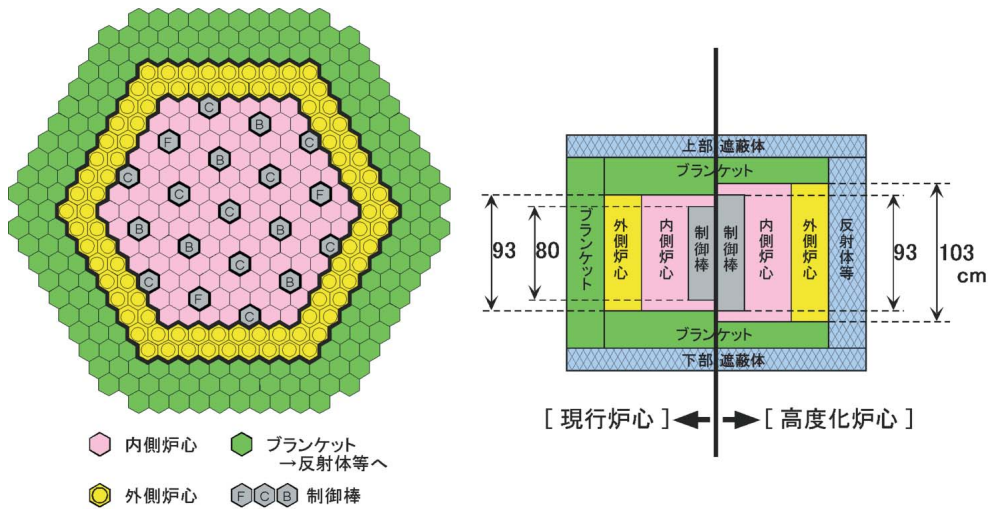


図4 高度化炉心構成・配置図

した(表1)

(3) 炉心構成

以上の考え方に基づき仕様設定したドライバ燃料及び制御棒集合体等から構成される長サイクル・高燃焼度炉心の、標準的な炉心概念・配置(径・軸方向断面)を図4に示す。径方向断面では、Pu需給状況や使用済燃料貯蔵容量、コスト等の観点から径ブランケット燃料を削除し、反射体や照射試験体などに置換する以外、現行炉心と同じ炉心構成・配置であるが、縦断面では、ドライバ炉心長及び制御棒吸収体長を変更(延長)している点が異なる。

なお、将来の実用化燃料照射やMA燃焼消滅試

験などを、第1期高度化炉心に引続いて実施する際の具体的な装荷配置例を図5に示す。

以上の炉心構成、炉心仕様・反応度制御系条件の下、運転サイクル期間:12ヵ月(1年)、取出平均燃焼度:13~15万MWd/tを目指す第2期高度化炉心の主要炉心特性を次節で評価する。

3. 高度化炉心概念の炉心特性評価

3.1 炉心特性評価方法

前節で設定した第2期高度化炉心概念の出力・燃焼特性、実効増倍率、制御棒価値、各種反応度(係数)等の主要炉心特性を、3次元拡散・燃焼解析コードMODIF(旧MOSES)と反応度解析用の拡

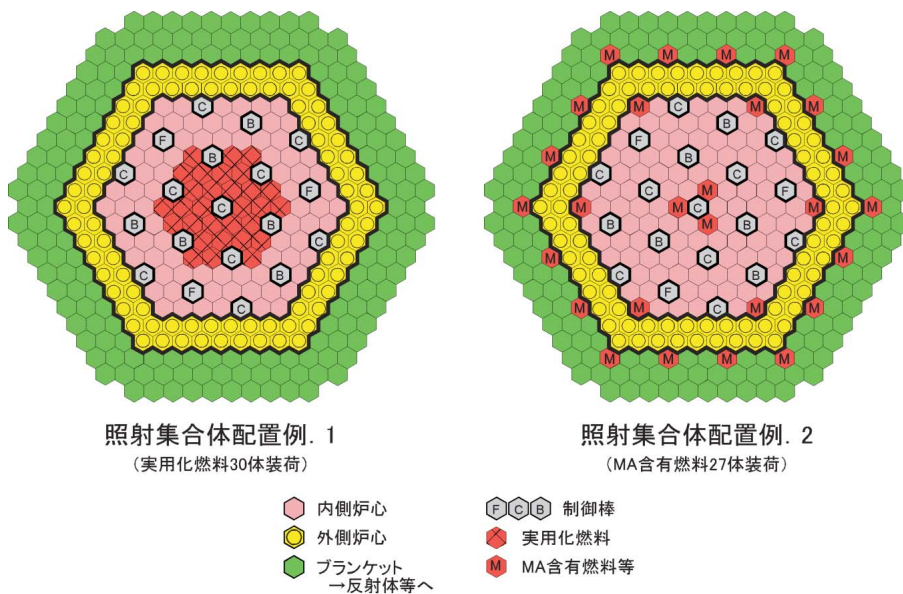


図5 高度化炉心 照射集合体配置例

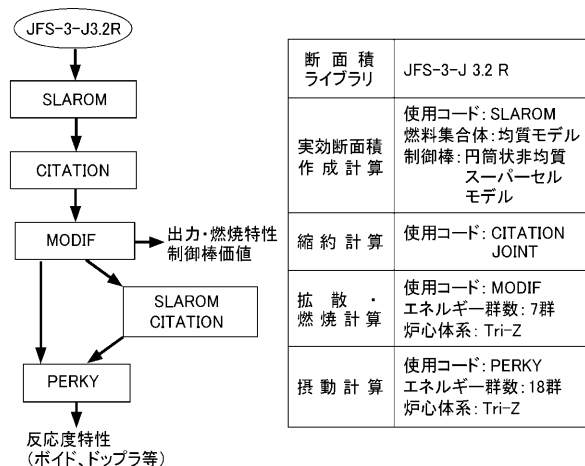


図6 解析フローと計算方法

散摂動計算PERKYコードシステムにより求める<sup>10),11),12)</sup>。

本コードシステムの核特性評価手順を図6に、各炉心特性計算の要点を以下に示す。

#### (1) Pu 富化度調整

Pu 富化度は現行 8 万 MWd/t 高燃焼度炉心の核分裂性Pu 装荷量をベースに、燃焼度、実効燃料体積比や炉心高さ、出力分担比の相違分で補正し、更に平衡炉心の燃焼末期においても運転余裕やバイト反応度(微調整棒による微小な負荷変動補償)等を含む余剰反応度( $0.3\% \ k/k, k_{eff} = 1.003$ )を有し、かつ内側炉心と外側炉心のピーク出力比が平坦化するよう、それぞれのPu 富化度(初期値)を与える。

#### (2) 出力分布・燃焼特性

3次元拡散燃焼計算(7群, Tri-Z)により、平衡炉心初期及び末期の実効増倍率、出力分布(集合体出力、最高線出力密度)、燃焼欠損反応度を求める。

なお、制御棒挿入深度は、現行設計と同様に燃焼計算と出力分布計算用とで異なる深度を設定し、出力分布計算では集合体出力を保守側に大きく評価するため、サイクル初期についても中途挿入に加え全引抜(Na フォロワー)の二通りを想定する。

#### (3) 反応度及び反応度係数

ドブプラ係数、冷却材ポイド反応度等は、多群(18群)・3次元Tri-Z体系での一次摂動計算により求める。なお、冷却材ポイド反応度については設置許可申請書及び次節3.2(3)以降で述べるように、「もんじゅ」は冷却材の沸騰を防止する設計となっており、炉心がポイド化することはないが、ポイド化を仮想する非現実的な条件での反応度変

化を、炉心特性把握の一環として評価する。

#### (4) 制御棒価値と反応度収支評価

制御棒挿入体系と引抜体系での実効増倍率 $k_1$ 、 $k_2$ を拡散計算により求め、下式より反応度変化量である制御棒価値( )を計算する。

$$= (k_2 - k_1) / (k_1 \times k_2)$$

$k_1$ : 制御棒挿入体系での実効増倍率

$k_2$ : 制御棒引抜体系での実効増倍率

### 3.2 炉心特性評価結果

運転サイクル期間: 12ヵ月(1年)、取出平均燃焼度: 13~15万 MWd/t を目指す炉心概念として、下記3ケースについての炉心特性を評価する。

- ① 1年×(4/5)サイクル, MOX, 燃焼度: 150GWd/t
- ② 1年×(4/4)サイクル, MOX, 燃焼度: 140GWd/t
- ③ 1年×(6/6)サイクル, 金属, 燃焼度: 150GWd/t

ケース②, ③は基準の炉心を①として、それとの比較評価用に設定するケースであり、②は燃焼反応度や冷却材反応度低減のために、Pu 富化度や目標燃焼度を若干切下げ、③はMOX燃料炉心で1年連続運転する際の燃焼反応度増大を抑制するために、重金属密度の高い金属燃料に置換して、その影響を評価するものである。なお、①については制御棒価値を増加させた炉心体系により、あらためて燃焼反応度を求め、反応度収支を評価した。

上記炉心の主要仕様と平衡炉心状態での出力分布・燃焼特性、制御棒反応度価値、ドブプラ係数及び冷却材ポイド反応度等を表2に示す。

各特性の要点は以下の(1)~(4)のとおりである。

#### (1) 出力分布・燃焼特性

1) 各炉心概念のドライバ燃料の核分裂性Pu 富化度 $Pu^{fiss}$  [内側/外側炉心]は、前記3.1(1)の燃焼度や燃料体積比・炉心高さで補正した初期設定値に余裕として若干(数%)高めにとり、それぞれ、[15.3/20.8](①MOX), [15.0/20.4](②MOX), [11.6/14.8](③金属)とすることにより、平衡炉心各サイクル末期の余剰反応度( $k_{eff} > 1.003$ )が確保されることを確認した。いずれのケースも、ドライバ燃料の燃料体積比や炉心長を増やした分、 $Pu^{fiss}$  富化度としては現行炉心より低めの設定が可能であり、内部転換比は向上する。

また、平衡炉心各サイクルのドライバ燃料集合体の取出平均燃焼度は15.0~15.1万 MWd/t (①, ③), 13.9万 MWd/t (②)となり、目標燃焼度に到達するまでの所要照射期間は、内側炉心で4年、

表2 高度化炉心仕様・炉心特性

仕様・特性	炉心	現行炉心 (80GWd/t)	第2期高度化炉心 (MOX燃料)		第2期高度化炉心 ③金属燃料
			①150GWd/t炉心	②140GWd/t炉心	
被覆管外径 / 肉厚 [mm]【材質】		6.5/0.47 (PNC316)	7.7/0.51 (ODSフェライト)		
ペレット外径 / 内径 [mm]、密度 [%TD]		5.4 / - , 85	6.5/2.0, 95		
スミヤ密度 / 実効燃料体積比 [%]		80.1/28.4	82.1/31.3		75.0/26.8
炉心長 / 上 / 下軸ブランクセット [cm]		93/30/35	103/26/29		
Pu <sup>iss</sup> 富化度 (内 / 外側) [wt%]		約16/約21	15.3/20.8	15.0/20.4	11.6/14.8
取出平均燃焼度 [GWd/t <sub>HM</sub> ]		80	151	139	150
所要照射日数 [日]		148 × 5	365 × (4/5)	365 × 4	365 × 6
燃焼反応度 [% k/k]		2.6	5.0	4.9	3.2
最高線出力密度 (内 / 外) [W/cm]		360/350	444/463	423/455	444/409
制御棒価値 <sup>*1</sup> [% k/k]		約8.0	7.2 (10.2) <sup>*2</sup>	7.2	6.6
ボイド反応度 <sup>*3</sup> [×10 <sup>-4</sup> k/k]		1.1~1.5	2.1	2.0	2.9
ドッブラ係数 [×10 <sup>-3</sup> Tdk/dT]		-(5.7~7.6)	-4.9	-5.0	-3.1

\* 1): 主炉停止系1ロッドスタック時 \* 2): <sup>10</sup>B濃縮度、吸収体長さ増加時  
\* 3): 1炉心燃料集合体最大ボイド反応度 (あえてボイド化を仮想して求めた参考値)

外側炉心では5年であるが、ケース③(金属燃料)では約6年が必要であり、MOX燃料の約1.3倍の重金属装荷量にほぼ比例して増大する。

2) 燃焼反応度は当初予想したとおり、現行値(2.6% k/k)から大きく増大し、MOX燃料炉心では約5% k/kとほぼ倍増する。このままでは反応度収支が成立しないため、後述するように、制御棒価値を増加させて反応度収支の再評価を行う。

3) 出力分布特性のうち、(内側/外側)炉心の集合体最大出力は4.80/4.57[MW]であり、現行炉心の最大出力値: 4.73/4.14[MW]からの増加は1.5%程度である。これは被覆管最高温度上昇換算で約4%であり、流量配分上も問題はない。金属燃料③では4.89[MW]となるが5.0[MW]を下回る。

また、最高線出力密度は463[W/cm]であり、暫定目標の470[W/cm]を下回るなど当初予測より小さい結果となった。これは、新旧燃料の出力差が大きい高燃焼度状態で、かつ制御棒価値の増加した炉心体系では、出力分布歪、特に最高線出力密度の増大が懸念されたが、内外Pu富化度比率の適正化や制御棒吸収体の炉心長に対する相対長さが増加したことにより、制御棒挿入時の出力分布歪が径・軸方向とも緩和されたためと考えられる。また、もとより炉心高さを10%増加(93/103cm)したことも線出力増大抑制に寄与している。

なお、上記最高線出力密度では、高密度・高熱伝導の中空ペレットを想定することから、燃料最高温度は許容範囲(116%過出力時で2,650以下)

にある。

## (2) 制御棒価値と反応度収支の成立性

主炉停止系制御棒価値(ワンロッドスタック時)は7.2% k/kとなり、現行炉心設計値(7.8~8.0% k/k)から8~10%(相対比)低下する。これは、高度化炉心ドライバ燃料の実効燃料体積比(28.4/31%)と炉心高さ増加を合わせた核分裂性物質全量の増加に対し、制御棒の吸収効果が相対的に低下するためである。高密度の金属燃料炉心③では更に15%以上減少し、6.6% k/kになる。

したがって、制御棒価値減少と燃焼反応度増大に対処するため、前節2.2)に示した制御棒価値増加策をとることにし、<sup>10</sup>B濃縮度と吸収体長さを増加した制御棒を含む炉心体系で再評価したところ、制御棒価値(標準値)は当初目標の10% k/kを超え、設計余裕10%を含む最小値は9.2% k/kとなる。

なお、別途評価した初期炉心の制御棒価値解析によると、本解析コードの3次元(TriZ)・7群拡散計算値(C)は実測値(E)を約5%過大評価する(C/E=1.05)ため、この分をマイナス側への補正として見込むとすると、9.2% k/k × 0.05、約0.5% k/kだけ制御棒価値(最小値)は下がることになるが、もともと現行の設計誤差はC/Eと外挿誤差及び余裕分を含めて10%に切上げているため、反応度バランス上はこの設計誤差の余裕に含まれるものとした。

一方、所要反応度のうちの出力補償反応度は、ドッブラ係数減少が主因となって0.2% k/k(約

10%)ほど減少する(後述)。また、その他設計誤差・余裕反応度についても、将来は合理化・低減の可能性はあるが、当面は現行設計どおりとする。

以上を含めて制御棒反応度の内訳を表3にまとめる。制御棒価値最小値は所要反応度(最大値)を上回り、反応度収支として成立する。

後備炉停止系制御棒については、所要反応度に燃焼補償分を含まず、炉停止余裕反応度がもともと大きく、制御棒価値の低下分も吸収可能であることから、現仕様のままでも余裕を持って成立する。表3には現行制御棒仕様に基づく値を示した。

### (3) 各種反応度特性

炉の動特性、安全性に影響する主要な反応度のうち、代表的なものとしてドップラ反応度(係数)を、また参考として冷却材ボイド反応度を摂動計算により評価した。

1) ドップラ係数は、主に $^{238}\text{U}$ 共鳴吸収の変動の影響を受ける。まず、MOX燃料をベースとした検討ケース①、②(それぞれ150GWd/t, 140GWd/t)では、燃料体積比増加と炉心長尺化によりPu富化度が若干下がり、 $^{238}\text{U}$ 量が相対的に増える負の効果よりも、燃焼が進んで蓄積FP吸収によるスペクトル硬化が上回った結果、現行炉心設計値： $-5.7 \times 10^{-3} \text{Tdk/dT}$ から約15%減の $-(4.9 \sim 5.0) \times 10^{-3} \text{Tdk/dT}$ まで低下した。これは現行の設計範囲を下回るが、安全評価で見込む設計余裕(30%)の範囲にはある。この点については、今後より詳細な評価が必要である。

金属燃料置換のケース③では、炉心部分のスペクトル硬化が加速されてさらに30%程小さくなり、絶対値は $-3.1 \times 10^{-3} \text{Tdk/dT}$ と現行値の半分程度まで減少し、もはや設計余裕に収まる領域で

はない。

2) 冷却材ボイド反応度については、設置許可申請書にも示されているように、「もんじゅ」は冷却材の沸騰を防止する設計となっており、炉心がボイド化することはないが、あえてボイド化を仮想する非現実的条件での反応度変化を、1炉心燃料集合体の最大反応度として求めた結果、MOX燃料ケース①では、 $2.1 \times 10^{-4} \text{ k/k}$ となり、現行設計値から約40%増加する。

この反応度増加は燃焼度増大に伴う核分裂性生成物(FP)の蓄積によるスペクトル硬化と炉心高さ延長による軸方向漏えい減少が主因であり、同一運転期間(サイクル日数)のまま燃焼度を若干(150 140GWd/t)下げたケース②ではやや抑制される。また、金属燃料のケース③ではスペクトル硬化がより進んで $2.9 \times 10^{-4} \text{ k/k}$ となり、現行設計最大値( $1.5 \times 10^{-4} \text{ k/k}$ )からほぼ倍増する。

このように、基準にしたMOX燃料炉心では、長サイクル運転ではなく燃焼度増大が主因となって、30~40%増加するが絶対値は6¢以下と小さい。

### (4) 熱流力特性(流量配分評価、被覆管最高温度)

前項(1)の出力分布・燃焼特性評価における集合体出力分布に基づき、熱流力特性を評価した。

1) 流量領域ごと最大発熱集合体に着目して炉心流量配分評価を行ったところ、被覆管最高温度を700以下にする必要流量合計値は現行値を約150kg/sec下回り、炉心部全流量に余裕が生じる(表4)。すなわち、現行炉心部流量のままでも流量配分は成立する。これは主に、ODS被覆管最高温度を700まで許容し得ること、及び出力分布平坦化効果などが各流量領域の集合体最大出力増加分の合計を上回った結果であり、約7%の径ブラ

表3 制御棒反応度バランス

[ 制 御 棒 系 統 ] [ 項 目 ]	現 行 平 衡 炉 心*1		高度化炉心(1年・150GWd/t炉心)	
	主炉停止系 (1ロッドスタック)	後備炉停止系 (1ロッドスタック)	主炉停止系 (1ロッドスタック)	後備炉停止系 (1ロッドスタック)
出 力 補 償	1.7	1.7	1.5	1.5
燃 焼 補 償	2.6	-	5.0	-
炉 の 反 応 度 誤 差	1.0	-	1.0	-
運 転 余 裕	0.3	-	0.3	-
所要反応度合計(最大値)	5.6	1.7	7.8	1.5
制 御 棒 価 値 (最小値)	7.0	5.8	9.2	5.3
炉 停 止 余 裕	1.4	4.1	1.4	3.8

単位：% k/k

\* 1) 設置許可申請書(添付書類 八)記載値



表4 集合体出力，流量及び被覆管最高温度

炉心領域		現行炉心				高度化炉心						
流量領域	集合体本数	最高線出力密度 (W/cm)	集合体出力 (MW)	被覆管温度 (°C)	集合体流量 (kg/sec)	最高線出力密度 (W/cm)	集合体出力 (MW)	被覆管温度 (°C) <sup>*1</sup>	必要流量 (kg/sec) <sup>*2</sup>	流量増減分 (kg/sec)	集合体流量 (kg/sec)	被覆管温度 (°C)
1	18	357	4.73	666	21.35	444	4.80	670	19.23	-38.07	20.08	687
2	12	348	4.46	667	20.04	427	4.55	672	18.22	-21.87	19.02	687
3	24	336	4.20	666	19.04	414	4.34	675	17.47	-37.75	18.24	687
4	24	319	3.91	666	17.67	404	4.12	680	16.53	-27.37	17.26	687
5	30	306	3.71	667	16.47	376	3.80	674	15.03	-43.13	15.69	687
6	42	349	4.14	664	19.24	463	4.57	692	18.71	-22.05	19.54	687
7	18	303	3.39	667	16.17	409	3.92	709	16.66	8.85	17.39	687
8	30	282	3.19	674	14.64	391	3.73	721	15.65	30.28	16.34	687
炉心部領域流量増減分 (kg/sec)									-151.11			

\* 1 : 現集合体流量のまま算出した被覆管温度  
 \* 2 : 被覆管温度を700 °C以下にするための集合体必要最小流量

ンケット出力補償分と，出力ミスマッチの増大分を余裕をもって吸収できたことを示す。

なお，集合体必要流量算出に当たり，許認可時の炉心熱流設計コード<sup>13)</sup>で計算された現行炉心の被覆管最高温度をベースに，最大発熱集合体出力の変化分により補正した。ここで，今回設定の127本太径ピンバンドル仕様の集合体内流量分布特性係数（周辺流れ係数）は，91本以上では現行設計値(Fw = 1.13)と同じであることを確認し，工学的安全係数（HSF）その他の高温点因子の増加要因は特になく，現設計値どおりとした。

2) 必要流量合計値に生じた余裕約150kg/secは

炉心部全流量約3,540 [kg/s] の約4%に相当し，仮にこの流量増分比率を各流量領域に均等に振り分けると，被覆管最高温度は12~13 °C低下して，ほぼ一律の687 °C前後となる（図7）。なお，燃焼度の高い内側領域（第1，2層）には流量を若干上乘せして更に685 °C以下とすることも可能であり，調整範囲内にある。

4. 検討・考察

以上の炉心特性評価結果を基に，当初の目標性能(12ヵ月サイクル運転や150GWd/t高燃焼度化)の充足性，最高線出力密度やドップラ係数，冷却

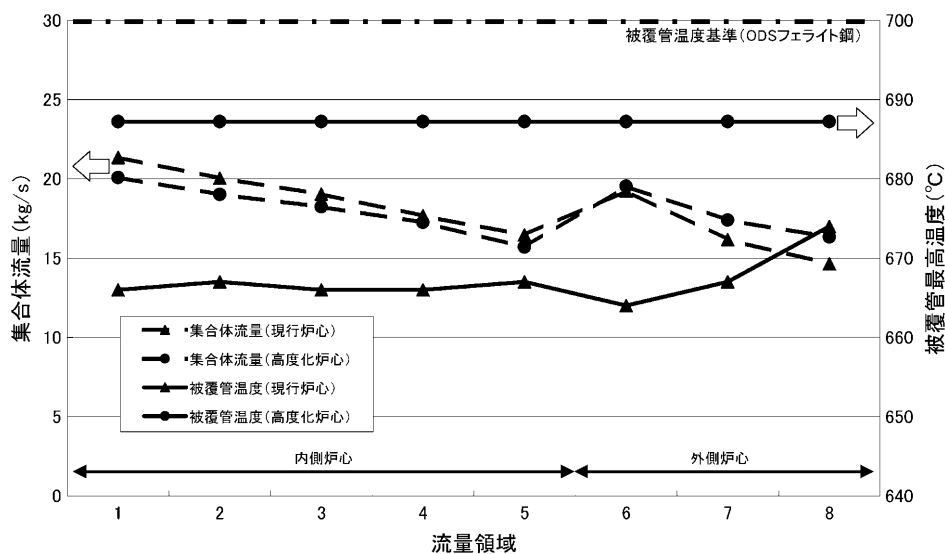


図7 集合体流量配分と被覆管最高温度

材ポイド反応度などの主要な炉心特性への影響、長サイクル化で最も問題になる制御棒反応度収支の成立性と課題、あるいは将来、本炉心への移行を実現するための課題や確認事項等の観点から、あらためて検討・考察する。

#### (1) 目標性能達成の見通し

運転サイクル期間の大幅延長とドライバ燃料の高燃焼度化に関し、当初目標とした12ヵ月連続運転、全ドライバ燃料取出し平均で約150GWd/tとなることを平衡炉心の各サイクルにおいて確認した。これにより、運転稼働率向上や燃料コスト低減による経済性向上を、将来「もんじゅ」で直接実証できる見通しを得た。

12ヵ月連続運転は、内部転換性能向上を狙った太径・中空・長尺化・低Pu富化度（高燃料体積比・長尺化）のドライバ燃料導入と、制御棒仕様（<sup>10</sup>B濃縮度、吸収体長）を変更して制御棒価値を増し、反応度収支を大きく見直すことによって可能であり、設計対応として有効であると言える。また、燃料取出燃焼度は12ヵ月×4サイクル運転では139GWd/t、外側炉心のみ5サイクル（5年）滞在させる（4/5）可変バッチ燃交方式では151GWd/tになるので、まずは（4/4）等分散バッチ運転で確認し、燃焼実績を重ねた後に（4/5）可変バッチに移行するのが、より現実的な炉心運用と言える。

なお、本炉心領域内に将来の実用化燃料概念やTRU燃焼試験集合体等を装荷・照射する場合（図5）は、装荷本数に応じてドライバ燃料のPu富化度を若干高め（最大5%程度、実用化燃料30体分に相当）に設定することにより、サイクル末期の余剰反応度は確保され、出力分布など主要炉心特性への影響は許容範囲にあることは前年度評価等で確認されている<sup>2)</sup>。

(2) 出力・燃焼特性のうち、MOX燃料の燃焼反応度については、上記の内部転換比を高めた太径・長尺化燃料を導入しても、MOX燃料では予想どおり現行炉心から倍増する結果となり、制御棒価値増加策での対応が必要となった。

一方内部転換比の高い金属燃料では、期待したとおりの3% k/k程度に収まり、燃焼反応度の大幅増大という問題は回避されるが、同時に、制御棒価値も1% k/k程低下し、またドップラ係数やポイド反応度などの炉心特性の大幅悪化が課題である。

(3) 出力分布特性については、当初懸念されたような、燃焼期間の大きく異なる新旧燃料混在による出

力ミスマッチや、制御棒価値増加炉心体系での過大な出力歪は発生せず、集合体最大出力、最高線出力密度ともに温度評価上の許容範囲にある。

これは、内外Pu富化度比率が適切に設定され、出力分布がより平坦化されたことや、10%程度の炉心高さ・吸収体長さ延長により、局所的な出力増加が抑制された結果である。なお、最高線出力密度463 [ W/cm ] については、中空ペレット燃料を想定しているため燃料融点を超えることはないが、移行炉心や照射試験規模によっては線出力が増大する可能性にも留意すべきである。

(4) 上記炉心出力分布に基づく熱流力特性評価（概略検討）の結果、炉心燃料集合体必要流量合計値で約150kg/sec、炉心全流量の約4%の余裕が生じる。すなわち、現行炉心部流量のままでも炉心流量配分として成立する。

これは各領域内被覆管最高温度を、現行PNC316被覆管材の675 からODS鋼の700 まで許容することで生じる余裕25 集合体流量換算で8%以上の余裕が、各領域の集合体最大出力の増加分合計を上回ったことと、Pu富化度比調整により出力分担が外側にシフトして出力分布が一層平坦化された効果が重なったためである。このことは、炉心燃料部による約7%の径プランケット出力補償分と、出力ミスマッチの増大分を、流量配分の大幅な変更なしで吸収できることを示している。

なお、今後の詳細評価により出力分布が最終的に確定した段階で、燃焼度の高い領域には流量を若干上乘せして被覆管温度を下げるなど、高燃焼度状態での燃料健全性確保を一層考慮した、きめ細かい炉心流量配分評価も必要となろう。

(5) 主要な炉心反応度特性であるドップラ係数、ポイド反応度は、ともに運転サイクル長期化よりも、むしろ高燃焼度化に伴う蓄積FP吸収によるスペクトル硬化が主要因となり影響を受ける。

MOX燃料ケース①②のドップラ係数は燃焼度増加に伴い低下し、現行炉心の範囲(  $-(5.7 \sim 7.6) \times 10^{-3} \text{Tdk/dT}$  ) を約15%下回るが、現行設計の余裕30%の範囲内である。許認可段階までには、例えば更に太径化・長尺化してPu富化度を下げ、<sup>238</sup>Uの比率を増す等の燃料仕様の工夫による特性改善と、より詳細な評価が必要である。

また、ポイド化を仮想して参考値として求めた、1炉心集合体最大ポイド反応度については、30~40%増加するが、絶対値は6φ以下と十分小さい。

なお、同反応度特性については、一般に運転時の異常な過度変化時や事故時の炉心挙動だけでなく、安全余裕確認のため、仮想的炉心崩壊事故(HCDA)をあえて想定した場合の事象推移にも影響し得るので、許認可までにはさらにその影響を把握、確認するとともに、その低減方策、例えば線出力を増大させない範囲での炉心短尺化や、低スペクトルシフト化などの検討が望ましい。

#### (6) 制御棒反応度収支

i) 制御棒反応度収支の議論に先立ち、ここでもう一度燃焼反応度低減の可能性について言及する。2.2節で述べたように、燃料要素127本を収納できる「7.7mm径(95%密度・中空)、約100cm炉心長」のMOXドライバ燃料仕様では実効燃料体積比は31%~32%が限界であり、7.8mm径(33%)までとれたとしても燃焼反応度低減幅は0.2% k/k以下である。

仮に、ピン本数を127から91本、ピン径を9.5mm以上に太径化した場合の燃料体積比は35~36%となるが、それでも燃焼反応度の低減幅は1% k/k程度であり、制御棒で補償すべき燃焼反応度としては約4% k/kと依然厳しい範囲にある。そのため、制御棒価値増加を中心とする制御棒反応度収支自体の大幅な見直しに至ったものである。

ii) 上記により見直した反応度制御系の収支については、制御棒価値増加策採用と所要反応度の一部見直しにより、制御棒価値(最小値) 所要反応度合計(最大値)すなわち、制御棒の有する反応度価値は、設計誤差を考慮しても制御すべき反応度合計(所要反応度)を上回る見通しである。今後更に、性能試験データを反映した現行設計誤差(10%)の合理化・見直しや、所要反応度のうちの反応度誤差吸収分(1% k/k)や炉停止余裕反応度(1.4% k/k)の切詰め等に踏み込めば、反応度バランス上は一層の裕度が確保されると期待される。

iii) 上記以外に今後留意すべき点として、設置許可申請書記載値変更がある。このうち制御棒価値の増加により最大反応度添加率も約30%増加する見込みであり、添十解析の制御棒引抜事故解析関連で再評価が必要となる。その他の設置許可申請書記載値変更については後の(8)項に述べる。

#### (7) 金属燃料炉心への置換について

将来、仮にMOX燃料から金属燃料へと置換される場合の技術的成立性を検討する。

前述(2)のように燃焼反応度増大は期待どおり

大きく緩和されるが、それでも燃焼補償反応度は約0.6% k/k増加し、同時に制御棒価値も約1% k/k低下するので、反応度収支としては約1.6% k/k悪化する。これは、MOX燃料の反応度収支悪化分の半分近くもあり、制御棒価値を増加する等、何らかの対応が依然必要となる。

上記に加え、ドブプラ係数、ポイド反応度等の炉心反応度特性の低下も無視し得ない課題であり、さらに従来から指摘される低燃料融点や、被覆管との共晶問題等も、依然課題として残ることに留意すべきである。

#### (8) 高度化炉心移行・実現上の課題

以上の検討・考察を通じて本炉心の基本性能、炉心特性や反応度収支についてはほぼ成立の見通しを得たが、実際に本炉心へ移行するには種々の課題や確認すべき事項が考えられる。そのうちの主たる項目を以下に列挙する。

i) 炉心仕様(Pu富化度や炉心長さ、制御棒仕様)や炉心特性値などで現行炉心からの変更箇所がかなりあり、それらの妥当性を確認するとともに安全ロジックを構築して許認可に備える必要がある。

ii) 上記に関連して設置許可申請書記載値の主なものは、炉心仕様ではPu富化度、炉心高さ、燃料密度、<sup>10</sup>B濃縮度や吸収体長等であり、炉心特性では最高線出力密度、燃料被覆管最高温度、諸反応度(係数)、制御棒価値・反応度添加率及び反応度収支表などであり、今後の詳細評価が必要である。また、ドブプラ係数、ポイド反応度等の改善方策検討も必要となろう。

iii) その他、許認可取得に必要なデータとして、ODS燃料被覆管材や中空ペレットの照射データ、<sup>10</sup>B濃縮度や吸収体長さを増加した新制御棒仕様についても、炉内先行試験によるデータ蓄積を図ることが必要である。なお、中空ペレットについては、SPXやPFR等先行海外炉での照射実績入手とともに、「常陽」での照射試験データの蓄積評価を継続し、新制御棒仕様についても、「常陽」に引き続き「もんじゅ」での使用経験、実績を積むことが望まれる。

以上、本炉心概念の特徴と、目標性能達成の見通し、炉心特性への影響とその許容範囲、反応度制御性、本炉心への移行・実現上の諸課題などについて考察した。その結果、本炉心概念は将来の「もんじゅ」高度化炉心概念の一つとして、現在の

ほぼ2倍の炉心性能向上が期待でき、炉心諸特性、安全特性への影響も許容範囲にすることができ、成立するとの見通しを得た。

## 5. おわりに

将来の「もんじゅ」炉心の性能向上に関する研究の一環として、現行炉心性能の約2倍、「12ヵ月運転サイクル期間・13~15万MWd/t取出平均燃焼度」を目標とする第2期高度化炉心概念について検討し、炉心諸特性を評価した。

運転サイクル期間を現行の5ヵ月から12ヵ月(1年)に増加すると燃焼反応度増大が問題となり、この反応度収支の悪化に対処するため、①内部転換比向上のため、「約7.7mm径×127本、95%高密度、103cm炉心長」の太径長尺ドライバ燃料を導入して燃焼反応度増大を可能な限り抑制し、制御棒価値増加策として「 $^{10}\text{B}$ 濃縮度：39.65wt%、吸収体長：80.93cm」へと制御棒仕様を変更し、基準となる炉心を構成した。また、第1期高度化炉心(10万MWd/t燃焼度、6ヵ月サイクル運転期間)と同じく径ブランケット燃料を削除し、同領域及び炉心領域内へのMA燃焼集集体装荷など、種々の照射試験を実施できるようにPu富化度に若干の余裕(上乘せ)分を考慮した仕様とした。

この燃料基本仕様、制御棒仕様・特性を変更した体系での炉心特性を評価した結果、以下の事項を確認した。

i) 当初目標とした12ヵ月連続運転、全ドライバ燃料取出平均で約150GWd/tとなることを平衡炉心の各サイクルにおいて確認した。

ii) 反応度制御系の充足性については、制御棒価値(最小値) 所要反応度合計(最大値)すなわち、制御棒の有する反応度価値が、設計誤差を考慮しても制御すべき反応度合計(所要反応度)を上回り、反応度収支としてほぼ成立する。

iii) 炉心諸特性への影響のうち、出力分布特性(集集体最大出力、最高線出力密度等)については、ともに温度評価上の許容範囲にある。

iv) ドップラ係数、Naボイド反応度等、炉心反応度特性への影響も許容範囲に収まる。

以上の検討、考察の結果、本炉心概念の炉心性能、炉心核熱特性、安全特性とも満足すべき範囲にあり、現行炉心のほぼ2倍の性能を有する高度化炉心の一つとして成立し、実現の可能性がある。

今後の課題としては、本炉心で新たに導入した、

「太径・高密度中空ペレット・長尺」ドライバ燃料概念や反応度価値増強型制御棒概念の健全性確認試験、同じく導入を前提としたODS燃料被覆管材の照射データ蓄積を図って許認可取得に備えることが望まれる。また、一部の炉心特性改善策の検討とその効果について、詳細評価による確認評価が必要であり、同様に炉心仕様・炉心特性変更に伴う設置許可申請書記載値変更個所の確認解析、安全解析一式なども行う必要がある。

さらに、今回検討した内部転換比向上と制御棒反応度収支改善策以外にも検討範囲を広げ、幅広い視点からの革新的な概念を導入してその成立性、実現性を引続き検討することが望まれる。

## 参考文献

- 1) 原子力委員会：“原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画”，第2部 第3章 5.高速増殖炉サイクル技術の研究開発の在り方と将来展開，p.37~(2000)
- 2) 金城秀人，横堀仁：“「もんじゅ」高度化炉心概念の検討”，サイクル機構技報 No.7(2000)
- 3) 金城，影山，他：“「もんじゅ」高度化炉心における実用化技術実証概念の検討”，サイクル機構技報 No.14(2001)
- 4) 動力炉・核燃料開発事業団：“高速増殖原型炉「もんじゅ」-原子炉設置許可申請書 本文及び添付書類(八)”，p.831~(1980)
- 5) F.Nakashima, Y.Kaise et al.：“Core Performance and Characteristics of the Prototype Fast Breeder Reactor MONJU”，FR '91, Kyoto, Vol. II, P8.2.1~9(1991)
- 6) 林，山館，他：“各種燃料形態・炉心に関する設計評価(1)-ナトリウム冷却炉心の検討-”，サイクル機構技報 No.12別冊(2001)
- 7) I.Shibahara：“Development of in-core materials for fast breeder reactors”，Radiation Effects & Defects in Solids, Vol.144, p.233-235(1998)
- 8) 堀雅夫監修：“基礎高速炉工学”日刊工業新聞社(1993)。
- 9) T.Kageyama et al.：“Aspects of control rod design in Monju upgraded cores”，(日本原子力学会2000年秋の大会)
- 10) H.Tsunoda et al.：“MOSES Upgrading and Installation(II)”，JNC TJ8400 99 057(1999)
- 11) 宇佐美，板垣，他：“3次元拡散燃焼設計コードMODIFの整備と検証(1)”，(日本原子力学会2002年春の年会)
- 12) 飯島進，吉田弘幸，他：“高速炉設計用計算プログラム・2(2次元・3次元拡散摂動理論計算コード：PERKY)”，JAERI M 6993(1977)
- 13) 三菱原子力工業：“「高速増殖炉熱設計計算コードの概要」MAPI F002”(1981.10)