



「もんじゅ」高度化炉心における MA 照射試験概念の検討

照山 英彦 西 裕士 石橋 淳一 影山 武* 金城 秀人

敦賀本部 国際技術センター

*原子力システム株式会社

A Study on the MA Irradiation Test Concept in the Future "Monju" Upgraded Core

Hidehiko TERUYAMA Hiroshi NISHI Junichi ISHIBASHI Takeshi KAGEYAMA* Hidehito KINJO

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

将来の「もんじゅ」を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、サイクル機構 敦賀本部 国際技術センターでは2段階の高度化炉心移行計画案を検討している。本報告ではこれまでの高度化炉心概念検討に基づき、現行炉心(燃焼度8万 MWd/t, 5ヵ月サイクル)から第1期高度化炉心(燃焼度10万 MWd/t, 6ヵ月サイクル)への具体的移行計画を策定するとともに、高度化炉心での少数体(3~6体)のマイナーアクチニド(MA)照射試験概念を数種類検討し、その主要炉心特性を評価した。MA照射試験集合体は高度化炉心燃料と同一構造とし、燃料ペレットに5wt%のMAを混入(均質装荷)した試験体を設定した。その結果、「もんじゅ」高度化炉心に少数体のMA照射試験集合体を装荷した場合でも、炉心特性への影響を抑えつつ25%以上の有意なMA核変換率を得られることが確認できた。

International Cooperation and Technology Development Center, Tsuruga Head Office, JNC is studying the future "Monju" core upgrading plan in two steps for effective utilization of "Monju" as one of the world's major fast neutron irradiation test beds and for demonstration of the improved economy. This report presents the minor actinides (MA) irradiation test concept in the initial-stage upgraded core based on the previous investigation on the upgraded cores. A transition refueling scheme from the current core to the initial upgraded core is identified and several MA irradiation test rig loading cases in a few assembly scales are described. MA irradiation test rigs were assumed to have the same geometry as the driver fuel subassembly; containing 5wt% MA contents. The results of the major core characteristics evaluation show that a significant MA incineration rate of higher than 25% is achievable, while the influence on the core characteristics remains within the allowable limits.

キーワード

高速増殖炉,もんじゅ,高度化炉心,高燃焼度化,マイナーアクチニド,MA燃焼,移行炉心,照射試験,MEISTER

FBR, Monju, Upgraded Core, Extended Fuel Burnup, MA, MA Incineration, Transition Core, Irradiation Test, MEISTER



照山 英彦

炉心技術開発グループ所属
「もんじゅ」の炉心解析,遮蔽解析業務に従事



西 裕士

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



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



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



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

1. はじめに

高速増殖原型炉「もんじゅ」は、1995年12月8日の2次冷却系からのナトリウム漏えい事故以降、運転を停止している。しかし、「もんじゅ」の基本的使命は、早期に運転を再開してナトリウム取扱い技術を確立するとともに、安全・安定な運転を継続して発電プラントとしての信頼性を実証すること、さらには増殖性等の基本性能を確認することである。また将来的使命は、基本的使命を果たした後、高速増殖炉技術実用化のために、実際の使用条件と同等の高速中性子を提供する場として「もんじゅ」を有効に利用していくことである。

FBR実用化のためには、燃料の高燃焼度化や運転サイクルの長期化などの高性能炉心の達成とともに、高次化Pu/TRU^(注1) 燃焼データの取得、あるいは「高速増殖炉サイクル実用化調査研究(FS)」で検討中の実用化燃料概念等の実証試験を行なうことが必要であり、「もんじゅ」をこれらの中核的施設として利用していくことが重要である。

これらについては、2000年11月に原子力委員会

(注1) TRU: Trans - Uranics, 超ウラン元素: ウラン(U)より原子番号の大きなネプツニウム(Np), プルトニウム(Pu), アメリシウム(Am), キュリウム(Cm)などの元素の総称。プルトニウム及びマイナーアクチニドの総称とも言える。

が策定した先の原子力長期計画¹⁾においても、その必要性と意義が述べられているところである。

そこで敦賀本部 国際技術センターでは、特に将来の「もんじゅ」を世界有数の高速中性子場、あるいは経済性向上の実証の場として利用するため、炉心の性能向上に関する『「もんじゅ」高度化炉心』概念検討を、最優先事項のひとつとして、ここ数年重点的に進めてきた。

これまでの検討では、炉心移行に伴う技術的飛躍をできるだけ少なくするとの考え方で、高度化炉心概念として図1に示すように、炉心を段階的に移行させることを想定している。これに基づき、それぞれの段階に応じた炉心概念を提案した。

すなわち、まず現状技術ベースで早期の高度化が可能で、目標取出燃焼度10万MWd/t、6ヵ月運転サイクルの第1期高度化炉心へ運転再開後5年程度で移行し、その後は、将来の高速増殖炉実用化技術の実証までも視野に入れ、大幅な性能向上を可能とする、目標取出燃焼度15万MWd/t、12ヵ月運転サイクルの第2期高度化炉心へ運転再開後10年程度で移行することを提案している。

具体的には、これまでに第1期高度化炉心の炉心概念や同炉心を用いた少数体規模での照射試験概念の検討²⁾、あるいは第2期高度化炉心の炉心概

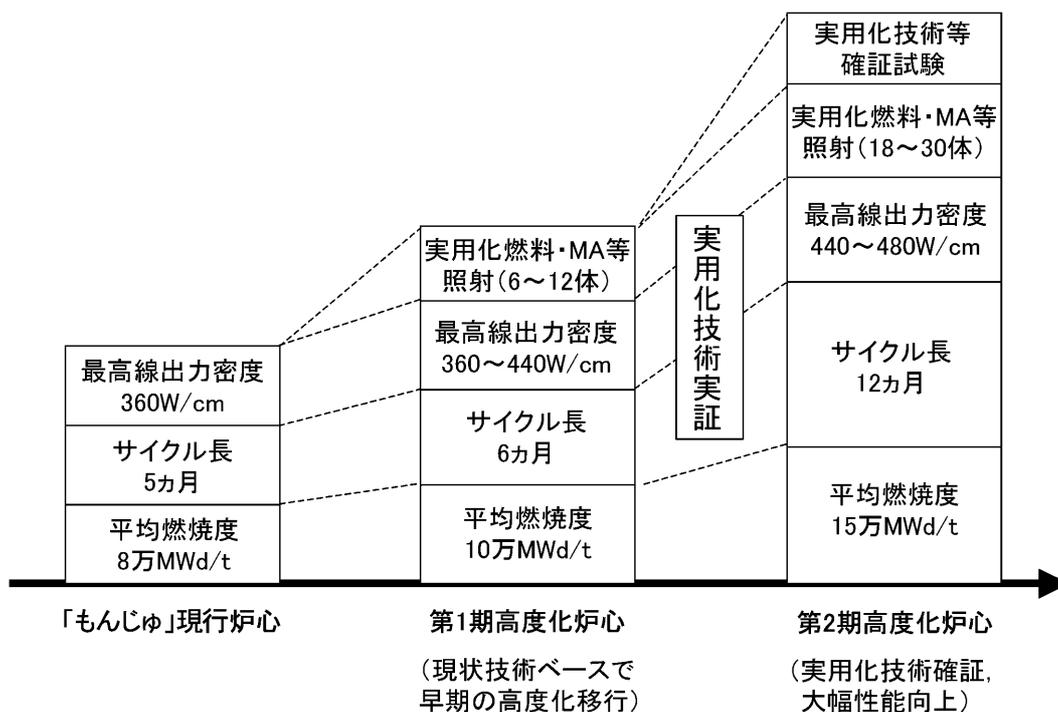


図1 「もんじゅ」高度化炉心への移行イメージ

念や、第1期及び第2期高度化炉心をベースとした取出平均燃焼度15万MWd/tの実用化技術実証用燃料の部分炉心規模での照射概念の検討³⁾、さらには1年連続運転という長期運転サイクル化を主眼とした第2期高度化炉心の概念検討⁴⁾などを実施している。

ただし、これらはいずれも現行炉心から高度化炉心へ移行した後の炉心概念に関する検討であった。そこで本報告では、より近未来の想定として、現行炉心から第1期高度化炉心への具体的移行計画（燃料交換計画）を検討した。また、この移行開始と同時にマイナーアクチニド（MA）照射試験を少数体規模で開始できるような照射試験概念の具体化を図った。さらに、その主要炉心特性について評価し、技術的成立性及びその実現上の課題等につき検討した。

マイナーアクチニド：Minor Actinide, MA〔Np, Am, Cmなどの微量アクチニド元素のこと。（従来の再処理ではU, Pu回収後の高レベル廃棄物中に廃棄されていたが、将来はU, Puと同様にこれら元素も回収して炉内で燃焼させることが考えられている。）〕

2. 高度化炉心概念・仕様

本章では、従来検討した高度化炉心概念の燃料仕様、制御棒仕様、炉心構成などの基本仕様を改めて整理した。さらに、これに基づいて現行炉心

から次に移行する第1期高度化炉心の仕様を選定し直した。基本的には従来検討した高度化炉心仕様を踏襲したが、一部必要に応じて見直した。

2.1 基本仕様（従来検討仕様の整理）⁵⁾⁶⁾

(1) プラント基本仕様

第1期高度化炉心は、被覆管に新材料を導入することを前提として、現状技術ベースで着実に早期移行することを主眼とした。そのため、燃料集合体内部の燃料要素仕様の変更のみで性能向上を図ることを基本としている。これにより、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、あるいは炉心径、集合体長さといった炉心サイズの拡張など、プラント基本仕様の変更は不要とすることを前提としている。

(2) 高度化炉心の構成・基本仕様

第1期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・本数も現行炉心仕様どおりとしている。ただし、径ブランケット燃料集合体については、製造コスト、Pu需給状況等の観点から、削除し中性子遮蔽体に置換することを前提に検討するものとした。この場合、設計条件としても炉心部出力分担率や燃焼欠損反応度などの点で、より厳しくなるので、保守側の検討条件になると考える。従来検討した高度化炉心仕様を表1に示す。

表1 従来策定の「もんじゅ」高度化炉心仕様

	現行炉心 (80GWd/t)	第1期高度化炉心 (100GWd/t)		第2期高度化炉心 (150GWd/t)
		169本ピン中実	127本ピン中空	
被覆管外径/肉厚 [mm] (材質)	6 5/0 47 (PNC316)	(PNC1520)	7 65/0 51 (PNC1520)	(ODSフェライト)
ペレット外径/内径 [mm], 密度 [%TD]	5 4/- , 85	5 4/- , 90	6 47/2 0 , 95	
スミヤ密度/実効燃料体積比 [%]	80 .1/28 4	84 9/30 .1	81 8/31 0	
炉心長/上ブラ/下ブラ [cm]	93/30/35	100/27/31		103/26/29
Pu ^{fiss} 富化度 (内側/外側) [wt%]	約16/約21	15 5/19 5	14 6/18 8	15 .1/19 6
Pu同位体組成比 [%] (²³⁸ Pu/ ²³⁹ Pu/ ²⁴⁰ Pu/ ²⁴¹ Pu/ ²⁴² Pu/ ²⁴¹ Am)	0 /58/24/14/ 4 / 0	3 /52/27/9 5 / 7 /1 5		
制御棒(調整棒)吸収体部長さ [cm], B-10濃縮度 [%]	80, 39	93, 41		
運転サイクル期間 [日]	148 × 5	194 × 5	199 × 5	275 × 5

(3) 炉心仕様

1) ドライバ燃料仕様

第1期高度化炉心のドライバ燃料仕様としては、これまでに下記2種類のオプションを策定している。

(a) 169本高密度(90%)中実ペレット燃料

- ・ピン径6.5mm
- ・ペレット径5.4mm
- ・実効燃料体積比30.1%
- ・炉心高さ100cm

(b) 127本高密度(95%)太径中空ペレット燃料

- ・ピン径7.65mm
- ・ペレット径(外径/内径)6.47mm/2.0mm
- ・実効燃料体積比31.0%
- ・炉心高さ100cm

2) 燃料組成

(a) プルトニウム(Pu)同位体組成比⁷⁾

炉心燃料のPu同位体組成比としては、取出燃焼度45GWd/t(炉外期間:10年)相当の軽水炉燃料を再処理して回収したPuの組成とし、以下のとおり想定した。

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

(b) 全Pu富化度上限値

全Pu富化度(Pu^{total})については、融点降下や再処理時の溶解性等を考慮し、制限値を32wt%以下とした。

3) 燃料被覆管材質⁸⁾⁹⁾

第1期高度化炉心では、現在開発中の改良オー

ステナイト鋼(PNC1520鋼, 15Cr-20Ni鋼〔Ti, Ni添加〕)を採用することとした。これにより、熱流設計条件である被覆管最高温度は700℃まで許容し得るものとした。

4) 反応度制御系

将来の高度化炉心移行時には、現在基本概念検討中であるナトリウムボンド型の制御棒で20ヵ月炉内滞在可能な「もんじゅ」長寿命化制御棒が導入される計画である。この長寿命化制御棒が高度化炉心に導入されることを前提とした。なお、同制御棒では、B₁C吸収材ペレットスタック長を80cmから93cmへ延長し、¹⁰B濃縮度も39%から41%へ向上させることとしている。

2.2 本検討における高度化炉心仕様

本検討における第1期高度化炉心仕様は、基本的に従来検討した炉心燃料仕様を踏襲するものとして、表2のように設定した。

(1) ドライバ燃料仕様

前述のように第1期高度化炉心のドライバ燃料仕様としては、以下2種類のオプションがある。

- ① 169本高密度(90%)中実ペレット燃料
- ② 127本高密度(95%)太径中空ペレット燃料

本検討では、②の「127本高密度(95%)太径中空ペレット燃料」を第1候補として選定した。

早期の炉心移行、燃料供給や許認可取得性などを重視すれば、現行炉心とほぼ同じ炉心燃料仕様である①が優位である。しかし、本検討では第1期から第2期高度化炉心への連続性を優先して、

表2 本検討での第1期高度化炉心仕様及びMA照射試験集合体仕様

	現行炉心 (80GWd/t)	第1期高度化炉心 (100GWd/t)	MA照射試験集合体
燃料ピン形	169本ピン中実	127本ピン中空	
被覆管外径/肉厚[mm](材質)	6.5/0.47 (PNC316)	7.65/0.51 (PNC1520)	
ペレット外径/内径[mm], 密度[%TD]	5.4/- , 85	6.47/2.0, 95	
スミヤ密度/実効燃料体積比[%]	80.1/28.4	81.8/31.0	
炉心長/上ブラ/下ブラ[cm]	93/30/35	103/26/29	
Pu ^{iss} 富化度(内側/外側)[wt%]	約16/約21	14.6/18.8	
Pu同位体組成比[%] (²³⁸ Pu/ ²³⁹ Pu/ ²⁴⁰ Pu/ ²⁴¹ Pu/ ²⁴² Pu/ ²⁴¹ Am)	0/58/24/14/4/0	3/52/27/9.5/7/1.5	
制御棒(調整棒)吸収体部長さ[cm], B-10濃縮度[%]	80, 39	93, 39	-
MA添加割合[wt%]	-	-	5
MA組成比[%](Np/Am/Cm)	-	-	58/39.3/2.7
運転サイクル期間[日]	148×5	191×5(内側) 191×6(外側)	191×5

②を選定した。燃焼度が13~15万 MWd/tの高燃焼度で、運転サイクルが1年の長期運転炉心である第2期高度化炉心の実現には、太径・中空ペレット燃料が有利だからである。

なお、この観点から、本検討では、炉心高さを100cmから103cmに、上部軸ブランケット高さを27cmから26cmに、下部軸ブランケット高さを31cmから29cmに変更した。すなわち、炉心高さも第2期高度化炉心に合わせるものとした。

なお、燃料仕様については、これにこだわることなく、状況に応じ柔軟に複数のオプションを選択できることが重要である。したがって、今後は①の「169本高密度(90%)中実ペレット燃料」のドライバ燃料オプションについても継続して検討を進める予定である(詳細は後述)。

(2) 反応度制御系

本検討においても、前述の長寿命化制御棒の導入を前提とした。しかし、B₂C吸収材ペレットスタック長を80cmから93cmへ延長するのみとし、¹⁰B濃縮度は現行制御棒と同様の39%のままとした。第1期高度化炉心では運転サイクル期間が現行炉心の5ヵ月から6ヵ月に延長になるため燃焼欠損反応度が増大し、反応度収支が厳しくなることが予想される。ただし、B₂C吸収材ペレットスタック長の延長のみで吸収できる可能性もあることから、本検討では¹⁰B濃縮度は現行制御棒と同様の39%のままとし、まずは反応度価値を評価することとした。

(3) その他

その他の燃料組成や被覆管材質などは従来検討した炉心仕様と同様である。

2.3 MA照射試験集合体仕様

本検討では、第1期高度化炉心への移行と同時にMA照射試験の開始を想定している。そのための、MA照射試験用集合体は、基本的に通常のドライバ燃料と同一の寸法・形状仕様とし、燃料ペレットに5wt%のMAを混入するものとした。MAの核種ごとの同位体組成比としては、燃焼度33GWd/tの軽水炉使用済燃料を取出し5年後に再処理して得られる組成を想定した。なお、実用化戦略調査研究(FS¹⁰)などで検討中の将来の再処理方式では、MA以外に希土類元素成分などの一部FP核種も混入した低除染燃料も想定されている。ただし、ここではまずMAのみを想定し、そ

の核変換率を評価するものとした。

3. 高度化炉心移行計画の検討

3.1 移行炉心(燃料交換様式)概念

取出平均燃焼度8万 MWd/tの現行「もんじゅ」炉心は、内側炉心燃料、外側炉心燃料ともに、炉内滞在期間が5サイクルとなる5バッチ分散燃料交換方式であり、運転サイクル期間は約5ヵ月の148日としている。

これに対し、本検討の移行炉心では、プラント稼働率向上を目指して、運転サイクル期間を約6ヵ月の191日に延長した。また、取出平均燃焼度約10万 MWd/tを達成するため、燃料交換バッチ数(炉内滞在サイクル数)も内側炉心燃料は5バッチ、外側炉心燃料は6バッチの多重(可変)バッチ燃料交換パターンとした。これは、外側炉心燃料は内側炉心燃料に比べ燃焼スピードが遅いことから、同じ炉内滞在期間では、内側炉心燃料との平均燃焼度に大きな差異を生ずるためである。

高度化炉心への移行計画(燃料交換計画)のイメージを図2に示す。高度化炉心への移行が始まる時点を第1サイクルとして、内側炉心燃料については、第1サイクルで全体の2/5を交換し、次サイクル以降では1/5ずつ交換するものとした。また、外側炉心燃料は第1サイクルで全体の2/6を交換し、次サイクル以降では1/6ずつ交換するものとした。このような燃料交換方式にすることにより、現行炉心燃料については、内側炉心燃料は移行開始第3サイクル末期で、外側炉心燃料は第4サイクル末期ですべて取り出されることとなり、第1期高度化炉心は第6サイクル末期で平衡炉心に到達する。

これは、従来どおりの燃料交換様式を前提とすると、高度化炉心への移行開始前から装荷されていた現行炉心燃料の集合体最大燃焼度が、運転サイクル期間の延長により、制限値である約94,000 MWd/tを超えるおそれがあるため、高度化炉心への移行が開始される時点で内側炉心燃料の2/5、外側炉心燃料の2/6と通常よりも多くの燃料交換を行うことで対処したものである。

3.2 MA照射試験概念

MA照射試験用集合体の炉心への装荷本数については、炉心特性への影響を最小限度に抑える観点から、3~6体という小数体の装荷を想定した。

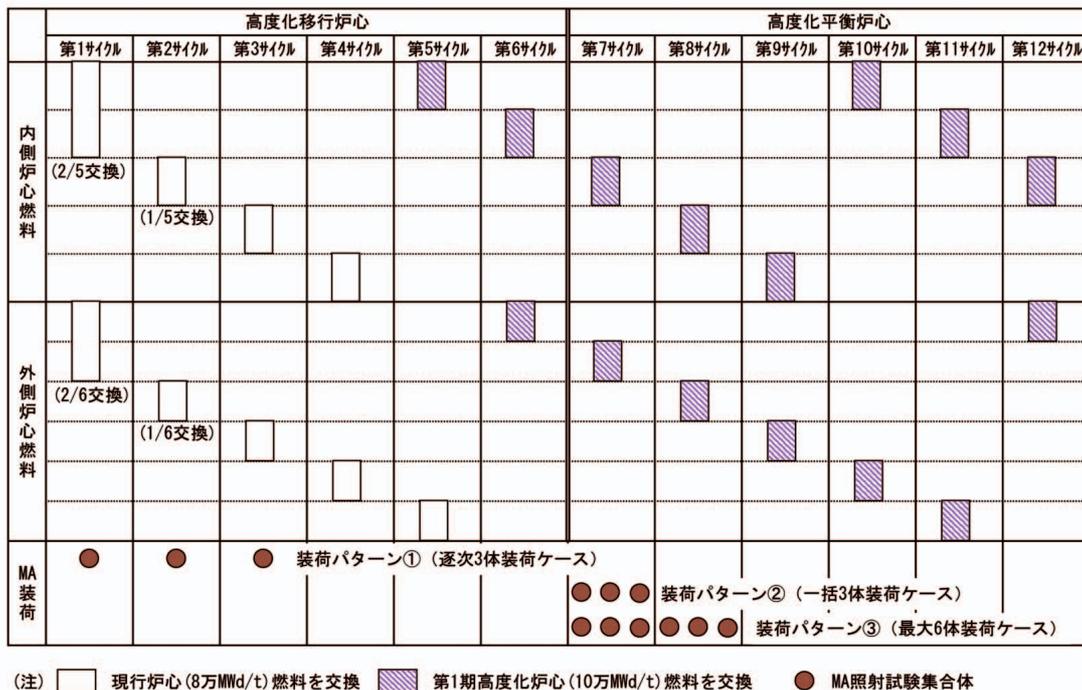


図2 高度化炉心への移行計画(燃料交換計画)イメージ図

炉内装荷位置については、MA核変換率の点で中性子束が高い方が有利であるので、基本的に炉心中心近傍に装荷するものとした。ただし、燃料交換パターンに応じて装荷位置を微調整した。

(1) MA照射試験用集合体装荷パターン

本検討では、高度化炉心移行開始と同時に、数体のMA照射試験用集合体を炉心内に逐次装荷するケースと高度化炉心が平衡に達してから数体のMA照射試験用集合体を炉心内に一括装荷するケースについて実施した。

すなわち、MA照射試験用集合体装荷パターンとしては、

- ① 炉心移行開始と同時に逐次1体ずつ計3体装荷するケース、
- ② 高度化炉心が平衡に達してから一括3体装荷するケース、
- ③ 同じく平衡に達してから3体ずつ2回で計6体装荷するケース、

の3種類を想定した。なお、MA照射試験用集合体は、いずれの装荷パターンでも5サイクル照射後に取り出すものとした。MA照射試験集合体の装荷時期を図2に、装荷位置を図3に示す。

なお、将来のMA燃焼方式としては、再処理・燃料製造方法との組合せにより、これ以外にも各種方式が考えられる。ここでは、代表例として、

炉心燃料にMAを均一混合して燃焼させる方式を前提とした。MA含有率としては、現状実用化戦略調査研究(FS)にて想定されている最大値5wt%¹⁰⁾を想定した。

これ以外にも、例えばMAだけを分離抽出し、MgOなどの不活性母材に30wt%程度のMAを混合して、径ブランケット領域に装荷・燃焼させる方式なども考えられる。ただし、この場合の炉心特性への影響は、炉心燃料にMAを均一混合して炉心領域に数体装荷した場合に比べ小さい¹¹⁾。よって、本検討では、より炉心特性への影響が大きい、炉心燃料にMAを均一混合して炉心領域に数体装荷するMA照射試験概念を代表例として選定した。

4. 高度化炉心移行概念の特性評価

4.1 炉心特性評価方法

前節で想定した高度化炉心移行概念の実効増倍率(余剰反応度)、出力・燃焼特性、制御棒価値、各種反応度(係数)等の主要炉心特性は、基本的にはパソコン版対話型「もんじゅ」炉心特性解析システムMEISTER¹²⁾により評価した。なお、冷却材ボイド反応度については、3次元拡散・燃焼解析コードMODIF(旧MOSES)^{3),14)}と反応度解析用の拡散摂動計算PERKY¹⁵⁾コードシステムにより評価した。炉定数としては、JENDL 3.2に基づく

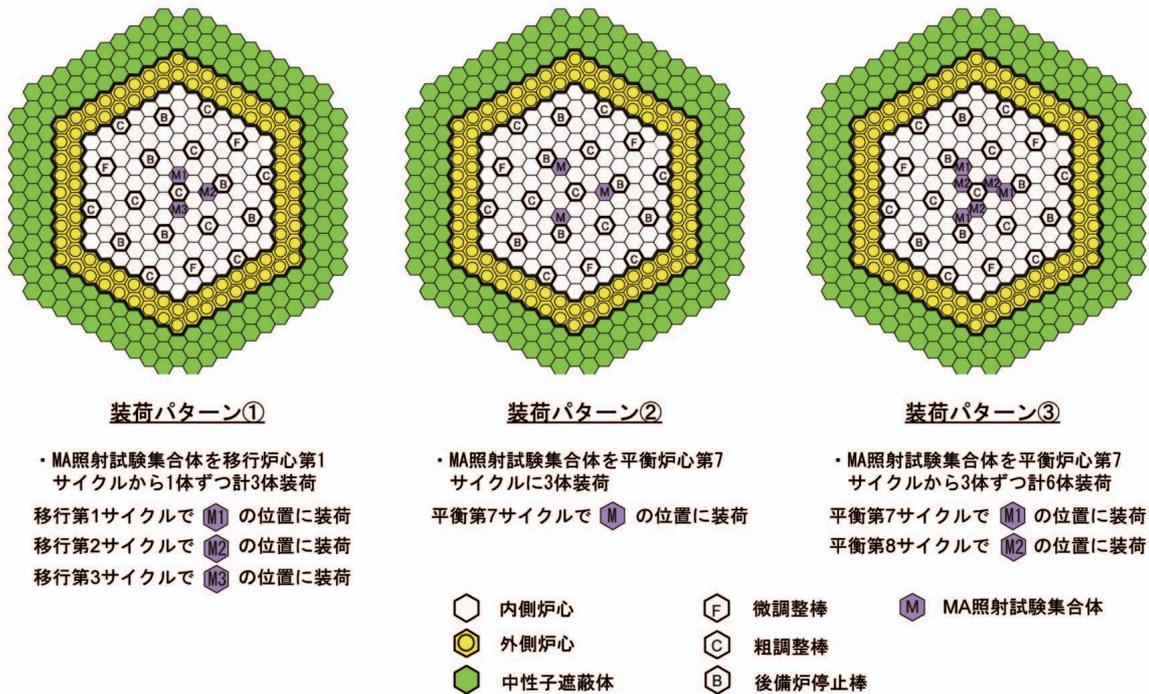


図3 MA照射試験体の装荷パターン

JFS 3 J3 2R¹⁶)を使用した。

評価対象は、現行炉心から高度化炉心への移行期間である移行炉心の6サイクル、及び高度化炉心が平衡に達した後の平衡炉心の6サイクルであり、計12運転サイクルとした。なお、そのためのベースとして、現行炉心の平衡サイクルに至るまでの仮想的な計6運転サイクルについても模擬計算を実施しており、本検討では合計18運転サイクルにわたる一連の燃焼計算を実施した。

炉心特性計算の要点を以下に示す。

(1) Pu 富化度調整 (実効増倍率及び余剰反応度)

所要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、出力分担比の相違を補正して推定する。さらに、各運転サイクルの燃焼末期においても、運転余裕やバイト分(微調整棒による微小な負荷変動追従制御を可能とするために制御棒をある程度炉心内に挿入しておくための反応度補償)等を含む余剰反応度(0.3% k/k' , k_{eff} 1.003)が確保できるように、それぞれのPu富化度の初期値を与える。なお、内側炉心と外側炉心のピーク出力比が平坦化されるように、内外炉心のPu富化度を微調整する。

(2) 出力分布・燃焼特性

移行炉心各運転サイクル初期及び末期の実効増倍率、集合体出力や最高線出力密度などの出力分布、燃焼欠損反応度は、それぞれの燃料交換パターンを模擬した3次元3角メッシュ拡散燃焼計算により求める。なお、3次元3角メッシュ拡散燃焼計算では、エネルギー群18群、集合体当たり24メッシュ分割の計算条件とした。

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する。また、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は、本来の中途挿入状態に加え、仮想的な全引き抜き状態を想定することとする。

(3) 反応度及び反応度係数

ドブハラ係数は、上記同様、各運転サイクルを想定し、計算条件をエネルギー群18群、集合体当たり24メッシュ分割とした3次元3角メッシュ拡散計算により求め、これを補正して摂動計算相当の解析値とした。なお、補正量は、現行炉心体系で得られている拡散計算(MEISTER)結果と摂動計算(PERKY)結果の比とした。また、冷却材ボイド反応度は、多群(18群)・3次元3角メッシュ体系での一次摂動計算により求める。

(4) 制御棒価値と反応度収支評価

現行「もんじゅ」炉心では、最も反応度効果の大きい制御棒1本が完全に引き抜かれ挿入されない状態でも速やかに炉を停止し、反応度停止余裕を持つように設計されている。

高度化炉心においても同様の設計条件を適用し、制御棒価値と反応度収支評価を行うものとする。

すなわち、主炉停止系13本のうち、12本は全挿入され、最も反応度効果の大きい調整棒1本は完全に引き抜かれ挿入されない体系（主炉停止系1ロッドスタック時）での実効増倍率 k_1 と主炉停止系13本すべてが完全に引き抜かれた体系での実効増倍率 k_2 を、上記と同様に計算条件をエネルギー群18群、集合体当たり24メッシュ分割とした3次元3角メッシュ拡散計算により求める。これより、次式に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

なお、MEISTERシステムでは、制御棒の体系非均質モデルや燃料集合体のセル非均質効果などの最新モデルをオプションとして選択することも可能である。ただし、ここではこれまでの手法との整合性にも配慮して、制御棒の非均質性はセル計算にて考慮し、燃料は均質セル計算とする従来モデルを使用した。

4.2 炉心特性評価結果

取出平均燃焼度が8万MWd/tである現行「もんじゅ」炉心から、取出平均燃焼度が10万MWd/tの第1期高度化炉心への移行概念としては、以下4ケースを設定し炉心特性を評価する。

1) 基準ケース（基準移行炉心ケース）

現行炉心から高度化炉心への移行のみで、MA照射試験用集合体を装荷しない、炉心移行の基準となるケース。

2) 移行ケース①（逐次3体装荷ケース）

上記基準ケースをベースに、高度化炉心移行第1サイクルから、各サイクル1体ずつMA照射試験用集合体を装荷していき、最大3体まで装荷するケース。

3) 移行ケース②（一括3体装荷ケース）

上記基準ケースをベースに、高度化炉心が平衡に達する第7サイクルで、一括してMA照射試験用集合体3体を装荷するケース。

4) 移行ケース③（最大6体装荷ケース）

同じく、高度化炉心平衡第7サイクルで3体、第8サイクルで3体の計6体のMA照射試験用集合体を装荷するケース。

ケース①から③は、それぞれ「3.2 MA照射試験概念」で述べたMA照射試験用集合体装荷パターン①から③に対応する。これらの比較により、MA照射試験用集合体装荷の影響を評価する。

上記の各ケースについて、移行炉心及び平衡炉心各運転サイクルにおける実効増倍率（余剰反応度）出力分布・燃焼特性、制御棒反応度価値、ドップラ係数及び冷却材ボイド反応度等を評価した。結果をまとめて表3に示す。

特性の要点を以下(1)から(5)に要約する。

(1) MA燃焼特性

以上のMA照射試験用集合体を装荷したケースにおいては（移行ケース①から③）、装荷位置によって若干の差異はあるものの、いずれも取出し時に25%以上のMA核変換率が得られることが確認できた。なお、MA核変換率は、炉内に装荷した時点でのMA(N_p, A_m, C_m)の重量と5サイクル($5 \times 191日 = 955$ EFPD)燃焼後のMAの重量の比である。すなわち、このような照射試験を実施すれば、元々5wt%程度含有されていたMAは、照射後には3.7wt%程度に減少するものと予測された。これは、照射後試験(PIE: Post Irradiation Examination)により核種及び同位体組成比を分析すれば、炉内照射データとして有意な組成変化が測定できる可能性を示唆するものと考えられる。

また、この場合の炉心特性への影響も、以下に述べるように軽微なものであり、本概念の技術的成立性について見通しを得ることができた。

(2) 実効増倍率（余剰反応度）

1) Pu富化度と余剰反応度

各炉心移行ケースの内側炉心及び外側炉心の核分裂性Pu富化度 Pu^{fiss} は、それぞれ14.6/18.8(内側/外側)[wt%]とした。これは、現行炉心のPuインベントリをベースに、既述のように燃焼度や燃料体積比、炉心高さの違いを考慮して推定したものである。これにより、各運転サイクル末期において所要の余剰反応度($k_{eff} > 1.003$)が確保できることを確認した。この時の内側炉心及び外

表3 高度化炉心移行概念の炉心特性解析結果

	現行炉心	第1期高度化炉心					
		基準ケース (移行炉心)	基準ケース (平衡炉心)	移行ケース ① (移行炉心) - MA装荷 様式① -	移行ケース ① (平衡炉心) - MA装荷 様式① -	移行ケース ② (平衡炉心) - MA装荷 様式② -	移行ケース ③ (平衡炉心) - MA装荷 様式③ -
取出し平均燃焼度 ($\times 10^4$ MWd/t)	8		9.7		9.7	9.7	9.7
照射日数(d)	148 \times 5	191 \times 5(内側) 191 \times 6(外側)					
燃焼欠損反応度 (% k/kk')	2.6	3.5	2.8	3.4	2.8	2.8	2.8
集集体最大出力(MW) (内側/外側)	4.73/4.14	4.90/4.30	4.89/4.34	5.02/4.30	5.00/4.35	4.88/4.34	4.92/4.34
集集体最大線出力(W/cm) (内側/外側)	360/350	459/442	454/447	471/450	465/447	453/445	456/445
累積高速中性子照射量 ($\times 10^{23}$ n/cm ² ·s)	2.20	2.60	2.60	2.61	2.61	2.60	2.60
ドップラ係数 ($\times 10^{-3}$ Tdk/dt)	-5.7	-5.8	-5.7	-5.8		-5.6	-5.5
ポイド反応度*1 ($\times 10^{-4}$ k/kk')	1.5	1.8	2.0	1.8		2.0	2.0
制御棒価値(最小値)*2 ($\times 10^{-2}$ k/kk')	7.0	7.3	7.2	7.3		7.2	7.1
MA核変換率(%) (5 Cy燃焼後)				26~27		27	25~27

* 1 1炉心燃料集集体最大ポイド反応度 * 2 主炉停止系1ロッドスタック時(最小値)

(注) MA装荷様式 : 移行第1サイクルから1体ずつ3体装荷, MA装荷様式 : 平衡第7サイクルで3体一括装荷,
MA装荷様式 : 平衡第7サイクルで3体, 平衡第8サイクルで3体の計6体装荷であり, いずれも5サイクル燃焼後取出し

側炉心の全Pu富化度 Pu^{Total} は,それぞれ23.7/30.6
(内側/外側)[wt%]となり,当初の富化度制限
値32wt%以下を満足できることが確認できた。

なお,従来手法との整合性もあって今回は適用
しなかったが,MEISTERシステムでは性能試験解
析結果などに基づくE/C補正機能を利用すること
が可能である。この場合には,Pu富化度は更に下
方修正されると考えられる。事実,現行炉心の設
計想定に基づく解析評価結果によれば,現行炉心
運転サイクル末期の実効増倍率は0.993(ノミナル
計算値)となっている。これは,今回のようなE/C
補正をしないノミナル計算では,実効増倍率が過
少評価傾向,すなわち所要Pu富化度が過大評価傾
向となることを意味する。この点については,E/C
補正法^{注2)}の外挿適用性や統合炉定数^{注3)}の適用な
ども含めて,今後総合的に検討していきたい。

(注2) E/C補正法:臨界実験や性能試験データを解析計算で模擬して,
あらかじめ計算値Cと実測値Eとの比をバイアスファクタC/E値と
して求めておき,得られた計算値Cに同ファクタの逆数E/C値を乗
ずることによって,実体系の最確値を精度良く予測する方法のこと。

(注3) 統合炉定数:各種臨界実験データなどに基づき,データ精度
に応じた重み付き最小自乗法,すなわち炉定数調整法により調整し
た核定数のことで,これにより積分実験結果を,バイアス補正によ
らず,直接計算で精度良く再現できるとされる。

2) 燃焼欠損反応度

各運転サイクルの燃焼欠損反応度は,燃焼期間
の延長に伴い,現行炉心の燃焼欠損反応度2.6%
k/kk'から若干増大する。特にMA照射試験用集
合体を装荷しない基準ケースでは,移行炉心の第1
サイクルにおいて,最大約3.5% k/kk'と相対比
で約35%程度の増加となる。第1期高度化炉心で
は,運転サイクル期間148日を191日へ約30%延長
しており,この増分は燃焼期間の延長にほぼ対応
している。

以上の結果,このままでは反応度収支が成立し
ない可能性がある。本検討では,制御棒のB,C吸
収材ペレットスタック長を現行炉心の80cmから
93cmに延長しているため,制御棒価値は若干増加
する傾向となる。したがって,後述の制御棒価値
の解析結果と併せて判断することとする。

なお,MA照射試験用集集体を装荷した場合に
は,一般に燃焼欠損反応度は改善傾向となる。し
かし,本検討では3~6体という少数体のMA照
射試験用集集体の装荷としているため,MA照射
試験用集集体を装荷しない基準ケースとほぼ同じ
燃焼欠損反応度となった。

(3) 出力分布・燃焼特性

1) 集合体最大出力

出力分布特性のうち、内側及び外側炉心燃料の集合体最大出力は、MA照射試験用集合体を装荷しない基準ケースで最大4.90MW/4.30MW(内側/外側)となった。これは現行炉心の最大出力:4.73MW/4.14MW(内側/外側)に比べ約4%弱の増加に相当する。すなわち、被覆管最高温度換算で約11%の上昇となる。現行炉心の被覆管最高温度は675℃であるから、今回検討における被覆管最高温度許容値700℃以下は満足される。

なお、MA照射試験用集合体を装荷したケースでは、移行ケースの影響が最大となり、上記集合体最大出力が5.02MW/4.34MW(内側/外側)まで増大する結果となった。ただし、これは基準ケースに比べ、2%以内の増加にしか相当しない。すなわち、被覆管最高温度換算で5%程度以内の上昇にとどまる。したがって、その影響は許容範囲内と判断される。

2) 最高線出力密度

内側及び外側炉心燃料の最高線出力密度は、基準ケースで459W/cm/447W/cm(内側/外側)であり、暫定目標として想定した470W/cm以下を達成できた。これは、内外Pu富化度比率の適正化や、炉心高さを93cmから103cmへ11%増加していることが寄与しているものと推定される。

なお、上記最高線出力密度の暫定目標は、高密度・高熱伝導の中空ペレットを前提に、燃料最高温度の制限値である116%過出力時で2,650℃以下に納まるよう設定したものである。

また、MA照射試験用集合体を装荷した場合の内側及び外側炉心燃料の最高線出力密度は移行ケース①が最大となり、それぞれ471W/cm/450W/cm(内側/外側)と、基準ケースの3%増以内に納まった。すなわち、暫定目標の470W/cm以下をおおむね満足できる結果が得られた。

3) 取出平均燃焼度と累積高速中性子照射量

以上いずれのケースにおいても、第1期高度化炉心における平衡炉心での取出平均燃焼度は約9.7万MWd/tとなり、目標の10万MWd/tを達成できる見通しを得た。厳密には目標の取出平均燃焼度10万MWd/tに3%程度足りないが、運転サイクル日数を本検討の191日から197日に延長すれば10万MWd/tを達成できる。

また、この時の累積高速中性子照射量は増大す

る傾向となるが、最大でも $2.6 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$ に納まる。これは、燃料の炉内滞在期間が現行炉心では148日×5サイクルであったものが、第1期高度化炉心では内側炉心が191日×5サイクル、外側炉心が191日×6サイクルで、それぞれ内側炉心で約30%、外側炉心で約55%滞在期間が延長となる結果である。ただし、現行炉心の累積高速中性子照射量 $2.2 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$ (ノミナル計算値)に比べ相対比で約20%増であり、取出平均燃焼度の向上分にほぼ比例している。なお、完全に比例しないのは、高度化炉心のドライバ燃料は実効燃料体積比が現行炉心に比べ約9%増加しているため、中性子束レベルが下がったことが影響しているものと考えられる。したがって、おおむね妥当な結果と考える。

(4) 制御棒価値と反応度収支

主炉停止系の制御棒価値(1ロッドスタック時)は、移行炉心より平衡炉心の方が小さく、7.2% k/k'程度(最小値)となった。これは、MA照射試験用集合体装荷の有無には、ほぼ依存しない。すなわち、現行炉心の制御棒価値7.0% k/k'(最小値)に比べると、0.2% k/k'と若干ではあるが、制御棒価値は増加する。

第1期高度化炉心では、ドライバ燃料の実効燃料体積比が9%向上し、炉心高さが11%延長されていることにより核分裂性物質全インベントリが増加するので、制御棒の中性子吸収効果は相対的に低下傾向となる。しかし、制御棒のB₄C吸収材ペレットスタック長を80cmから93cmに延長したことにより、同吸収効果は逆に増加傾向となる。この両者が相殺しあった結果、上記の微増となったものと理解される。

所要反応度のうちの燃焼補償反応度は、前述のように燃焼欠損反応度が2.6%から3.5% k/k'へ0.9% k/k'増加するので、その分だけ増加させる必要がある。これは制御棒価値の増加分0.2% k/k'だけでは吸収しきれない。

したがって、制御棒のB₄C吸収材ペレットスタック長の延長だけでなく、制御棒吸収材ペレット中の¹⁰B濃縮度を増加させることが必要と考える。ただし、増強すべき反応度価値は、相対比でせいぜい現行の10%増程度であるから、十分対応可能な範囲と判断される。

(5) 各種反応度特性

1) ドップラ係数

炉のプラント動特性や安全特性には、各種反応度フィードバック特性が関係する。このうち、主要な反応度特性の代表例として、ドップラ反応度(係数)を評価した。ドップラ係数は、主に²³⁸Uによる共鳴吸収反応に支配される。この共鳴吸収反応は、大略10keVオーダ以下の低エネルギー領域で起きる。そのため、炉内の中性子スペクトルが硬化すると、低エネルギー側中性子比率が減少し、ドップラ係数は減少傾向となる。

今回の検討では、MA照射試験用集合体を装荷しない基準ケースのドップラ係数は $-5.7 \sim -5.8 \times 10^{-3} \text{Tdk/dT}$ と、現行炉心の $-5.7 \times 10^{-3} \text{Tdk/dT}$ に比べ、相対比で約2%の微増にとどまった。これは、実効燃料体積比の向上によるPu富化度の低下が、高燃焼度化によるスペクトル硬化効果を緩和した結果によるものと考えられる。

さらにMA照射試験用集合体を装荷したケースでの同係数は、 $-5.5 \times 10^{-3} \text{Tdk/dT}$ と相対比で最大約4%低下する。MA装荷の影響は小さいが、これはMA照射試験用集合体の装荷本数が最大でも6体と少ないためであろう。

いずれにせよ、元々のドップラ係数に対する設計余裕(30%)に比べれば、これら変動幅は小さいので、炉のプラント動特性や安全特性への影響も軽微と推定される。

2) 冷却材ポイド反応度

上記ドップラ係数とともに、炉心特性の参考として冷却材ポイド反応度を評価した。「もんじゅ」炉心では、設置許可申請書⁵⁾でも述べられているように、冷却材の沸騰を防止する設計となっており、冷却材がポイド化することはない。しかし、ここでは炉心特性把握の一環として、あえてポイド化を仮想して非現実的な条件での反応度変化、すなわち1炉心燃料集合体最大ポイド反応度を評価した。

冷却材ポイド反応度は、大別すると次の二つの効果に支配される。一つは、中性子漏えい増大効果であり、もう一つは中性子スペクトル硬化効果である。前者は、負の反応度効果をもたらす、後者は、正の反応度効果をもたらす。最終的な冷却材ポイド反応度は、これら両者の相殺した結果として与えられる。

今回の検討では、MA照射試験用集合体を装荷

しない基準ケースでの冷却材ポイド反応度は $1.8 \sim 2.0 \times 10^{-4} \text{ k/kk'}$ と、現行炉心の $1.5 \times 10^{-4} \text{ k/kk'}$ に比べ、約20%~30%増加している。これは、炉心高さの増大による漏えい効果の減少と燃焼度の向上に伴うスペクトル硬化によるものと理解される。

なお、MA照射試験用集合体を装荷したケースでも、同反応度は最大 $2.0 \times 10^{-4} \text{ k/kk'}$ であり、MA照射試験用集合体を装荷しない場合からほとんど変化はなかった。MA装荷による冷却材ポイド反応度の影響は小さいが、これはMA照射試験用集合体の装荷本数が最大でも6体と少ないためと考えられる。

いずれにせよ、冷却材ポイド反応度は、仮想的炉心崩壊事故時の燃料溶融後再臨界時におけるエネルギー放出量と密接な関係にある。したがって、この点の影響などについて、更に詳細確認しておくことが必要と考える。

5. 今後の展開

以上の炉心特性評価結果を基に、本検討において検討した第1期高度化炉心への移行計画とMA照射試験計画につき、改めて考察を進める。

本検討では、より近未来の想定として現行炉心から第1期高度化炉心への具体的移行計画(燃料交換計画)を検討し、炉心特性を評価した。その結果、出力分布特性などは目標として設定した制限値以下となり、技術的成立性を見通しを得た。

また、この移行開始と同時にMA照射試験概念の具体化を図り、その炉心特性を評価した結果、25%以上のMA核変換効率を得られ、かつ、MA装荷による炉心特性への影響も軽微であることを確認できた。

ただし、以上の移行計画やMA照射試験概念は6ヵ月運転サイクル、燃焼度10万MWd/tの第1期高度化炉心をベースにしているため、これまでの高度化炉心概念検討の結果からも明らかなように、制御棒反応度収支やポイド反応度等に検討の余地がある。

本章では、高度化炉心移行概念やMA照射試験概念にかかわる技術的成立性と確認事項、あるいは将来、実際に炉心移行を実現するための今後の展開等を、以下に整理する。

(1) 炉心移行・MA照射実現のための今後の展開
以上のような炉心移行やMA照射試験の実現に

は、今後以下のような展開を図る必要がある。

1) MA照射試験用集合体製造・輸送・搬入方法
まず、MA照射試験用集合体の装荷を前提とする場合、それに伴う固有の要請がある。

第一に、MA照射試験集合体の製造についてであり、照射試験用集合体を製造すること自体が、国内の既存の設備では困難なことである。この点については、国際協力を前提とした海外施設の利用や、東海RETF施設の改造を前提とした段階的実証試験計画など、幅広く可能性を検討していく必要がある。

第二に、MA照射試験集合体の輸送・搬出についてであり、「もんじゅ」サイトにMA照射試験集合体を搬入する際には、崩壊熱や放射線レベルが通常の新燃料に比べ高くなるため、通常とは異なる特別の搬入ルートを検討する必要がある。

2) 被覆管照射データの蓄積整備

本検討の「もんじゅ」高度化炉心では、被覆管材料に現在開発中の改良オーステナイト鋼（PNC1520鋼）の使用を前提としている。このPNC1520鋼は、現在仏国フェニックス炉での照射試験や実験炉「常陽」での照射試験が進められている状況にある。これらの照射試験を計画どおり着実に推進し、許認可取得に十分な照射データを早期に蓄積整備することが必要である。

3) 中空ペレット燃料照射データの蓄積整備

本検討では、高度化炉心燃料として、実効的な燃料体積比の増大を図ると同時に、最高線出力密度の向上を可能とするため、中空高密度ペレットの採用を前提としている。

したがって本中空高密度ペレットについても、許認可取得に十分な照射データを早期に蓄積整備することが必要である。

4) 太径高密度中空燃料

本検討の高度化炉心燃料としては、上記のように従来と異なる太径ピン高密度中空ペレット仕様を想定しており、照射データの蓄積・整備に加え、本計画を実現させるためには、燃料製造の準備が必要となる。

このような準備は、規模にもよるが、許認可まで含めて考えれば相応の準備期間が必要となる。したがって、高度化炉心への移行を早期に実現するためには、例えば当面は現行の中実燃料をベースにペレット密度だけを向上させた燃料で高度化炉心へ移行し、その後太径高密度中空の高度化燃

料へ移行するなどの柔軟な対応も検討していく必要がある。

5) 安全解析一式の見直し

本検討での高度化炉心へ実際に移行するためには、まず設置変更許可申請して安全審査を受け直す必要があると思われる。

なぜなら本計画では、現行炉心の延長線上とはいえ、安全解析に関連する炉心の基本仕様・特性がほぼ全面変更となり、前述の仮想的炉心崩壊事故だけでなく、被ばく評価まで含めた安全解析を一式見直す必要があるからである。

以上のように、実際の高度化炉心への移行開始時期から逆算して、相当前から準備を進めておくことが今後の展開を考える上での重要な事項である。

(2) 炉心特性上の確認事項

1) 制御棒反応度収支

既述のように、本移行計画では運転サイクル期間を約30%延長した結果、燃焼欠損反応度も相対比で約30%増大した。一方、本検討では制御棒のB,C吸収材ペレットスタック長を80cmから93cmに延長し、制御棒反応度値をその分増強している。ただし、燃焼欠損反応度が0.9% k/kk'と約30%増加しており、この増加分までは吸収しきれないので、更に制御棒反応度を増加させる必要がある。

したがって、高度化炉心への移行に際しては、制御棒吸収材ペレット中¹⁰B濃縮度を現行の39%から増加させるなどの反応度値増強策を採用することが必要となる。これは、現在基本概念検討中の「もんじゅ」長寿命化制御棒でも、既に計画されているので、それを更に補強することにより達成できる。増強すべき反応度値は、相対比でせいぜい現行の10%増程度である。したがって、十分対応可能な範囲と判断される。

なお、制御棒値増加により、制御棒誤引き抜時の最大反応度添加率や制御棒誤落下時の出力分布歪量など、安全評価にかかわる特性への影響が生じる。この安全評価への影響については、制御棒値増加の影響以外にも、その基本となる炉心基本仕様・特性がほぼ全面改定となるので、その影響も含めて早目に確認しておくことが望ましい。

2) 冷却材ボイド反応度

本炉心移行計画では、上記のように炉心高さを約11%延長し、炉心燃料の取出平均燃焼度も現行

約8万MWd/tから約10万MWd/tへと相対比で約20%向上させている。その結果、既述のように、冷却材ボイド反応度が現行炉心に比べ、約20%~30%増加する結果となった。しかし、1集合体ボイド反応度は最大でも5セント程度(2.0×10^{-4} k/kk')と、許容し得る範囲内にあると考える。

ただし、実用化戦略調査研究(FS)などでは、念のため安全余裕を確認する位置づけとは言え、仮想的炉心崩壊事故時の過大なエネルギー放出を避けるためには、冷却材ボイド反応度(全炉心)を5~6ドル以下にする必要があるとしている。以上の結果は、この点に影響する可能性があるため、仮想的炉心崩壊事故時の事象推移の早期確認が望ましい。なお、同事象の解析条件となる燃料ペレット密度や最高線出力密度等の炉心基本仕様・特性が変更となるので、同事象推移の確認はこの点からも必要である。

6. おわりに

冒頭にも述べたように、「もんじゅ」炉心の性能向上に関する研究としては、これまでも各種検討を実施してきている。その結果、運転再開後の「もんじゅ」炉心では、例えば実用化技術実証用の燃料集合体を部分炉心規模で照射するなど、将来の高速増殖炉技術の実用化に寄与し得る有効利用が可能であることを、技術的根拠とともに例示している。これより、「もんじゅ」は実際の使用条件と同等の高速中性子を提供する場合として、将来有効に活用できることを明確化した。

本報告では、以上の研究成果にかんがみ、より近未来の想定として、現行炉心から次期高度化炉心への具体的移行計画を検討した。

その結果、取出平均燃焼度約8万MWd/t・運転サイクル期間148日の現行炉心から、同燃焼度約10万MWd/t・同サイクル期間191日の次期高度化炉心へ、技術的な成立性を損なうことなく移行できることを明確化することができた。

ここで提案した次期高度化炉心への移行計画は、取出平均燃焼度及び運転サイクル期間、いずれの点でも現行炉心に比べ約1.3倍以内程度の性能向上達成にとどまる。しかし、現状技術ベースで早期に実現可能な、堅実な移行概念であり、近未来の想定としては適切なものとする。

また、炉心移行開始と同時に、3~6体程度のMA照射試験用集合体を装荷した場合の影響につ

いても明らかにした。その結果、この程度の装荷本数であれば、炉心特性への影響は軽微であること、また、MA核変換率についても、25%以上の有意な組成変化を期待できることが判った。

以上のことから、本報告において提案した炉心移行計画は、実際の「もんじゅ」炉心で実現可能な現実的計画であると言える。ただし、実際の炉心移行に際しては、今後の展開を考えておく必要がある。

技術的側面としては、制御棒反応度価値の増強対策、仮想的炉心崩壊事故時の挙動確認が必要となるが、これは技術的な検討や対応で可能と考える。

他方、被覆管(PNC1520鋼)照射データの蓄積整備や中空ペレット燃料照射データの蓄積整備、太径高密度中空燃料製造の準備やMA照射試験用集合体の製造・輸送・搬入方法の確立等は、技術的な検討だけにとどまらない事項である。

これらの事項を考えれば、まず次期高度化炉心概念のあるべき姿について広く議論を進め、具体的スケジュールを明確にした上で、安全解析のベースとなる基本設計に着手する必要がある。それと併行して、プロジェクト全体の総合的スケジュールを策定し、段階的炉心移行も視野に入れて、幅広く柔軟に可能性を探りつつ早期の炉心移行を目指す必要がある。そのためには、炉心だけでなく燃料、安全、遮蔽など幅広い分野の検討が必要であり、目標に向かっての一致協力した努力が必要であろう。特に、燃料材料開発と燃料製造は、炉心移行の重要な律速因子となる。

実際の炉心移行を考えれば、基本設計から始まって、安全解析、安全審査と許認可取得、燃料製造・輸送・搬入・装荷など、相当以前から準備を進めておく必要がある。

終わりにあたって、前述した「もんじゅ」が果たすべき使命を達成するため、地元のご理解を得た上で、「もんじゅ」の運転を早期に再開し、安全・安定した運転実績を重ねていきたい。

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) 金城秀人, 影山武, 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) 金城秀人, 影山武, 他: “「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 - ”, サイクル機構技報 No.18 (2003)
- 5) 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.8 3 1~ (1980)
- 6) 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)
- 7) 林秀行, 山館恵, 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)
- 8) I.Shibahara “ Development of in core materials for fast breeder reactors”, Radiation Effects & Defects in Solids, Vol.144, p.233-235 (1998)
- 9) 堀雅夫監修: “ 基礎高速炉工学 ” 日刊工業新聞社 (1993).
- 10) 鈎孝幸, 佐藤和二郎, 他: “ 高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究の概要 - ”, サイクル機構技報 No.12別冊 (2001)
- 11) 尾下博教, 西裕士, 他: “もんじゅ炉心に於ける MA 燃焼システムの検討”, (日本原子力学会2000年春の年会)
- 12) 北野彰洋, 照山英彦, 他: “ パソコン版対話型もんじゅ炉心特性解析システムの開発 ”, サイクル機構技報 No.15 (2002)
- 13) H.Tsunoda et al. “ MOSES Upgrading and Installation ()”, JNC TJ8400 99 057 (1999)
- 14) 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)
- 15) 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 M6993 (1977)
- 16) 千葉豪, 沼田一幸, 他: “ JFS 3 J3.2の重み関数訂正による核特性への影響評価 ”, TN9400 2001 109 (2001)