



「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

金城 秀人 影山 武* 西 裕士

敦賀本部 国際技術センター

*1 原子力システム株式会社

An Upgraded Monju Core Concept for Demonstration of Future FBR Technologies

Hidehito KINJO Takeshi KAGEYAMA* Hiroshi NISHI

International Cooperation and Technology Development Center, Tsuruga Head Office

*1 Nuclear Energy System Inc.

「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、「高速増殖炉サイクル実用化戦略調査研究（FS）」で検討・提案される実用化燃料概念等の事前実証を行うことなどが議論されている。そこで敦賀本部国際技術センターでは、同研究（フェーズⅠ）で提案された太径の実用化燃料概念案に基づき、ピン本数等を調整した「もんじゅ」用の照射集合体仕様を設定し、これを検討中の高度化炉心に部分炉心規模で装荷する実証概念の炉心特性を評価した。

種々の装荷概念を検討した結果、実証用燃料集合体30体程を炉心中心部に装荷する概念では、約5年の照射期間で取出平均燃焼度は目標の15万 MWd/tに達し、最大線出力や燃焼反応度、制御棒価値、ドップラ反応度等の炉心特性・安全特性も大きく変動せず設計上許容し得ることを示し、性能実証試験としての技術的成立性を明らかにした。

Upgrading of the Monju core is planned for increased fuel burn-up and longer operating cycles. It is also proposed that this upgraded core be utilized as an irradiation test bed to demonstrate the performance of the advanced fuel subassembly concepts proposed by the "Feasibility Study on Commercialized Fast Reactor Cycle Systems (FS)".

A conceptual design study has been performed at the International Cooperation and Technology Development Center to investigate the feasibility of demonstrating the commercial FBR fuel subassembly concept proposed in the first phase of the above study.

The specification of the subassembly with an increased fuel pin diameter irradiated in Monju will have fewer pins than the full-scale commercial subassembly due to the smaller wrapper diameter. The effects of loading different numbers of commercial-type subassemblies in different patterns on the major core characteristics have been evaluated along with the reactivity parameters related to core safety.

The results show that in a core loading scheme with up to 30 subassemblies around the core center, the target discharge burn-up of 150GWd/t could be achieved in 5 years, without causing significant drawbacks on the core neutronics and safety aspects, such as the maximum linear power, burnup reactivity, control-rod worth and Doppler reactivity.

Thus the feasibility of demonstrating the performance of the commercial FBR fuel designs of this type in the upgraded core has been confirmed.

キーワード

もんじゅ，高度化炉心，照射機能，炉心特性，高速増殖炉実用化戦略調査研究，高速炉，高燃焼度化，実用化燃料，技術実証，15万 MWd/t

Monju, Upgraded Core, Irradiation, Core Characteristics, Feasibility Study (FS), Fast Reactor, Increased Burnup, Commercial FBR Fuel, Demonstration, 150GWd/t



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
流設計に従事



影山 武

炉心技術開発グループ所属
「もんじゅ」の炉心設計に従
事
第一種放射線取扱主任者



西 裕士

炉心技術開発グループリー
ダ
「もんじゅ」の炉心設計，遠
蔵設計解析業務とその高度
化研究に従事

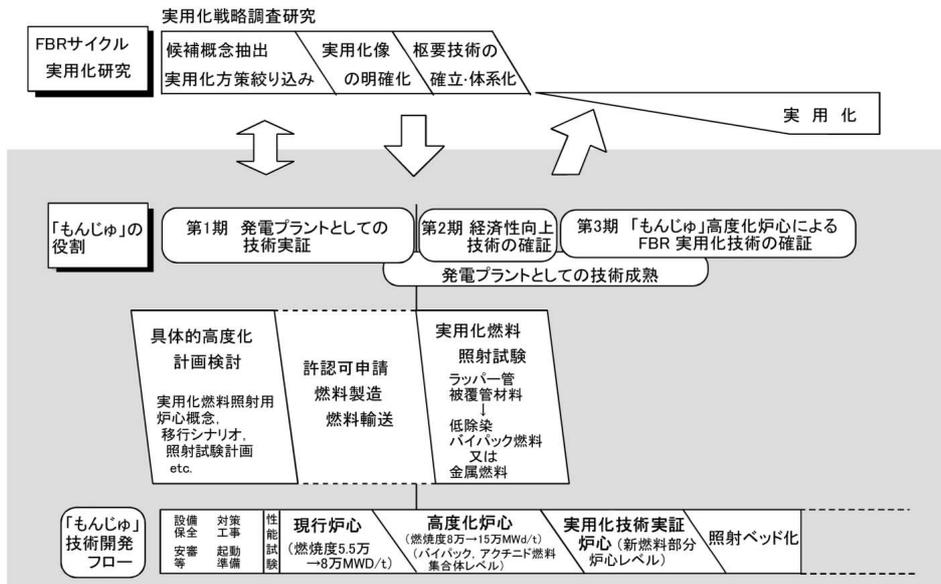
1.はじめに

「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・提案される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いる。また、先の原子力長期計画¹⁾においても、「長期的には、実用化に向けた研究開発によって得られた要素技術等の成果を「もんじゅ」において実証するなど... (略)...もん

じゅを有効に活用していくことが重要である」とその意義、必要性に言及している(図1)。

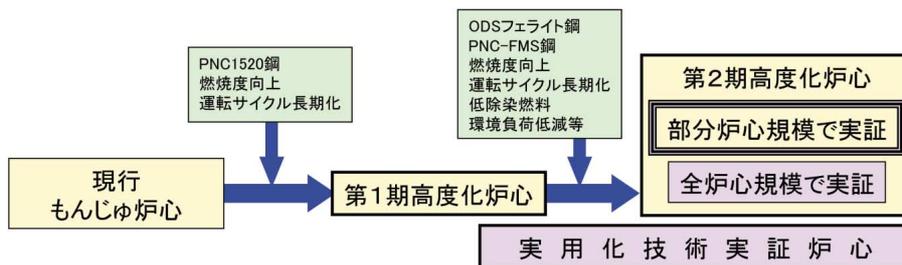
そこで敦賀本部国際技術センターでは、同調査研究で提案される実用化燃料集合体概念を将来の「もんじゅ」高度化炉心に導入し、性能実証試験を行うとの想定で、具体的な実証概念の検討とその技術的成立性についての評価を行った(図2)。

そのため、まず上記FSのフェーズIで提案された実用化燃料集合体概念案²⁾に基づき、「もんじゅ」照射用集合体仕様を設定し、それらを検討



原子力委員会長期計画策定会議 第三分科会(第6回)資料第3-1号(1999年10月25日)を基に照射試験計画を追記

図1 FBR実用化に向けた「もんじゅ」の役割



最高線出力密度 360W/cm	最高線出力密度 360~440W/cm	炉心安全性試験 MA,FP燃焼実験
サイクル長 5ヵ月	サイクル長 6~8ヵ月	実用化燃料等照射
平均燃焼度 80GWd/t	平均燃焼度 100GWd/t	最高線出力密度 440~480W/cm
		サイクル長 9~12ヵ月
		平均燃焼度 130~150GWd/t

図2 「もんじゅ」炉心高度化計画での本研究の位置付け

中の高度化炉心内に多数体（部分炉心規模で）装荷し、一定期間照射する試験形態（以後これを実用化技術実証炉心概念、略して「実証概念」と呼ぶ。）を複数想定して、その主要な炉心特性を評価した。

ここで検討のベースとする将来の高度化炉心像と移行形態についてはいくつかの考え方があり、現状必ずしも一つの内容に確定した状況にはないが、ここでは当センターで検討中の高度化炉心概念³⁾（取出平均燃焼度：10万 MWd/t（第1期）、13～15万 MWd/t（第2期））を基本とし、この中に多数装荷される照射用実用化燃料の性能実証とその技術的成立性を検討した。なお、本高度化炉心では前回の検討³⁾と同様、原子炉出力・流量、原子炉出入口温度等の基本プラント条件や炉心径、集合体長などは変更せず、燃料ピン径やスタック長、ピン本数等集合体内部の燃料仕様変更のみで炉心性能、照射性能向上を図ることを前提としている。

また、フェーズⅠの結果として提示された実用化燃料概念は暫定仕様であり、今後も変更があり得ることから、本検討ではそれらを「もんじゅ」高度化炉心に導入する場合の炉心特性への影響の上限を把握し、性能実証試験としての技術的な見通しと課題が明確になるようにした。

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した「実証炉心概念」の具体化例と、炉心特性評価結果に基づく技術的成立性について述べる。

2. 実用化技術実証炉心概念の検討手順

2.1 基本条件及び燃料基本仕様の検討

(1) 基本条件（前提条件）⁴⁾⁵⁾

1) プラント基本仕様

検討のベースとなる高度化炉心は、現状の炉心技術、材料の適用で早期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）拡張を伴わず、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。

2) 高度化炉心の構成・燃料仕様条件

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）を前提として以下検討を進める。

3) 炉心・燃料仕様条件

a) 燃料組成

プルトニウム（Pu）同位体組成比⁶⁾

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

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

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）

b) 燃料被覆管材質⁷⁾⁸⁾

改良オーステナイト鋼[PNC1520鋼、15Cr-20Ni鋼（Ti、Nb添加）]及び酸化物分散強化[ODS]フェライト鋼採用により、熱流設計基準である被覆管最高温度を700℃まで許容するものとする。

4) 反応度制御設備上の制限

現在基本概念検討中の、「もんじゅ」長寿命化制御棒（20ヵ月炉内滞在、¹⁰B量増加）を将来導入することを前提に、燃焼反応度制限を3.2%（k/kk'）（現行は2.6%（k/kk'））まで許容する。

(2) 燃料基本仕様の検討

1) 実用化燃料実証用集合体の仕様

実用化燃料実証用集合体の仕様は、実用化戦略調査研究（フェーズⅠ）²⁾で提案された代表的なFBR燃料概念の基本仕様に基づき、これをピン外径8.8mmや燃料スミヤ密度82%、ピン配列ピッチ、炉心長等を極力維持したまま現行ラッパ管内径110.5mmに収納可能なように集合体内ピン本数を減らし、91本ピンバンドル仕様に設定し直した。

この実証用集合体出力を置換前のドライバ燃料並みに維持する場合には、ピン本数の削減割合分（169/91=1.86倍）燃料線出力密度は増大するため、炉心高さを増やすことが必要になる。仮に、最高線出力密度を現行中実ペレットの360 [W/cm] から470 [W/cm]（中空ペレット暫定値）まで許容するとしても、炉心高さは最大で、93cm × (360/470) × (169/91) = 132cm以上にする必要がある。

一方、炉心高さを増やさずにドライバ燃料並みの100cm（後述）以下にする場合には、線出力にほぼ比例して燃料温度が上昇するため、集合体出力を下げ、線出力増大を抑える、すなわち集合体出力を、例えば通常ドライバの70%以下なるようにPu富化度も下げて線出力増加を抑制する必要

がある。なお、実証用集合体出力をこのように下げる場合には、低下幅に相当する欠損反応度補償のため、ドライバ燃料のPu富化度をその分増加させる。

以上のような考え方で設定した実証用集合体仕様を表1に示す。本仕様では現行ラッパ管寸法の制限からピン数を91本まで減らしたため、実効燃料体積比は29.4%となって実用化燃料の値(約35%)からは減少する。ただし、ピン径やスミヤ密度は維持され、実用化時代の太径燃料集合体バンドル形状の模擬性は基本的に確保されることから、今回の主要な性能実証対象を部分炉心規模での15万MWd/t高燃焼度化とすれば、所期の目標は達成され则认为する。

2) ドライバ燃料仕様の検討

高度化炉心のドライバ燃料仕様、特に燃料要素仕様、炉心長等は、基本的には従来³⁾と同様の考え方で設定する。今回の実証概念検討に当たり一部の仕様を見直し、また、一層の燃焼度向上を目指す第2期高度化炉心(13~15MWd/t)の概念検討を行ったので、その基本的考え方を以下にまとめる。

一般に目標燃焼度100~150GWd/tの高燃焼度・長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所要Pu装荷量を算出し、可能な限り燃料体積比率を大きく、Pu富化度を低くして内部転換比を向上させることが必要である。この燃料体積比を実効的に増加させる方法として、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³⁾から分かっている。そこで今回は高燃焼度健全性の観点から燃料スミヤ密度を85%以下に抑え、Pu富化度も上限以下にし、また線出力増加防止のため炉心スタック長を若干延長した、(a)「169本・90%高密度中実ペレット・100cm長尺型」及び(b)「127本・95%高密度太径・中空ペレット・100cm長尺型」ドライバ燃料仕様を設定する。

上記(a)の中実高密度ペレット仕様では10万MWd/t高燃焼度条件下でのPCMI抑制を念頭に入れ、燃料スミヤ密度を実績のある85%以下にするため、ペレット焼結密度(対理論密度比(%TD))はこれまでに検討した92%から90%に下げ、実効燃料体積比は現行の28.4%から30%と約6%の相対的增加にとどめる。一方、(b)の太径中空仕様ではバンドル部圧損が増加しないピン径(7.65mm)にとどめるが、82%スミヤ密度を維持したままペレット密度を95%までとれるため実効燃料体積比は31~32%まで増加でき、内部転換比向上により燃焼度の一層の増大を図る。以上の考え方で設定したドライバ燃料から構成される高度化炉心の概要を、性能実証概念の検討に先立ち、次節で説明する。

2.2 高度化炉心(基準炉心)の概要

実用化燃料実証用集合体を多数装荷・照射し、

表1 もんじゅ炉心装荷用照射集合体仕様

項目	実用化戦略調査研究 [FS()] 実用化燃料概念	もんじゅ炉心装荷用 照射試験集合体 ^{*1}
集合体燃料ピン本数 [本]	331	91
集合体配列ピッチ [mm]	201	115.6
被覆管材	ODSフェライト鋼	
被覆管外径/肉厚 [mm]	8.8/0.6	
炉心燃料スミヤ密度 [%TD]	82 (MOX), 75 (Metal)	
ペレット外径/内径 [mm], 密度 [%TD]	-	7.4/2.2, 95 ^{*2}
実効燃料体積比 [%]	35.2 (MOX)	29.3 (MOX), 26.8 (Metal)
炉心長/上ブラ/下ブラ [cm]	100/40/40	100/27/31
Pu富化度 [wt%]	25.8 (富化度1領域)	19.5 (内側) / 31.5 (外側)
炉内滞在日数	570日 × 4 (炉心部)	184日 × 10~15
取出平均燃焼度 [GWd/t _M]	147	150

* 1: ピン径, スミヤ密度, 炉心長はFS (ABLE型MOX・径非均質)仕様を維持 * 2: スミヤ密度(82%)から暫定

その性能実証を行うための基準の炉心としては、「大洗FBRサイクルシンポジウム(2001年9月)」等で提案された「もんじゅ」炉心基本移行工程(案)に基づく下記高度化炉心を想定する。

第1期高度化炉心(取出燃焼度10万MWd/t, 6ヵ月サイクル, 2010年頃の移行を想定)

第2期高度化炉心(取出燃焼度15万MWd/t, 12ヵ月サイクル, 2020年頃の移行を想定)

これらはいずれも径ブランケットの削除と照射機能向上も前提にしており, 性能目標になるべく近づくよう概念の具体化を図る。

高度化炉心への移行イメージを図2に示す。

それぞれの炉心概念(仕様)と主要炉心特性を表2に示し, 要点を以下に延べる。

(1) 第1期高度化炉心の概要

第1期高度化炉心は上述のように, PNC1520鋼被覆管で平均燃焼度10万MWd/tの約6ヵ月サイクル炉心とするため, ドライバ燃料仕様としては下記2種類のオプションを用意する。

(a) 169本高密度(90%)中実燃料

100~103cm 炉心長, 6.5mm ピン径
〔前仕様³⁾の炉心長(93cm)と密度(92%)を変更〕

(b) 127本高密度(95%)太径中空燃料

100~103cm 炉心長, 7.65mm ピン径
(ペレット外径/内径: 6.47/2.0mm)

いずれのオプションも, 約6.5ヵ月×5サイクル(分散バッチ)燃焼運転で, 約10万MWd/tの高燃焼度平衡炉心に到達する。

実効燃料体積比では1%ほど高い127本高密度(95%)太径中空ドライバ燃料炉心の方が燃焼反応度, 制御棒価値は若干小さく, 最高線出力密度も増大するが, いずれも設計上許容し得る範囲〔360W/cm(中実燃料), 480W/cm(中空燃料)〕にある。

冷却材ボイド反応度については, 設置許可申請書に示すように, 「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, 仮にボイド化したとの仮想的な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評価した。本炉心では, 燃焼度増大に伴う核分裂性生成物(FP)蓄積によるスペクトル硬化と炉心高さ延長により, やや増加する傾向にあるがその絶対値は0.019% k/kk'と十分に小さい。

ドップラ反応度については, Pu富化度を下げた²³⁸U装荷量が相対的に増えた効果と, 燃焼が進み蓄積FP吸収によるスペクトル硬化効果が相殺し合った結果, 現行炉心設計値(-5.7×10⁻³Tdk/dt)からの変化は2%以下である。

(2) 第2期高度化炉心の概要

第2期高度化炉心は, ODSフェライト鋼被覆管で取出平均燃焼度13~15万MWd/t, 運転サイクル

表2 高度化炉心仕様・炉心特性

仕様・特性	現行炉心 (80GWd/t)	第1期高度化炉心 (100GWd/t)		第2期高度化炉心 (130GWd/t)
		169本ピン中実	127本ピン中空	
被覆管外径/肉厚 [mm I 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 ^{fss} 富化度(内/外側)[wt%]	約16/約21	15.5/19.5	14.6/18.8	15.1/19.6
取出平均燃焼度 [GWd/t _{HM}]	80	101(95) ^{*3}	100(93) ^{*3}	130
所要照射日数 [日]	148×5	194×5	199×5	275×5
燃焼反応度 [% k/kk']	2.6	2.9	2.8	3.8
最大線出力(内/外側)[W/cm]	360/350	336/330	450/431	441/431
制御棒価値 ^{*1} [% k/kk']	7.0	6.3	6.3	6.2
ボイド反応度 ^{*2} [×10 ⁻⁴ k/kk']	1.1~1.5	1.9	1.8	1.9
ドップラ係数 [×10 ⁻³ Tdk/dT]	-(5.7~7.6)	-5.6	-5.7	-5.3

*1: 主炉停止系1ロッドスタック時(最小値), *2: 1炉心燃料集合体最大ボイド反応度, *3: 照射日数184×5(日)の場合

長期化（5～9～12ヵ月炉心）、径ブランケット削除、照射用スペース（6～12体分）の確保等を具備すべき要件（目標性能）とする。このためドライバ燃料仕様は前記の127本高密度（95%）太径中空燃料にして、平衡炉心サイクル末期までの余剰反応度を維持するためPu富化度を第1期炉心より高めに設定する。

当面の目標取出燃焼度を、早期達成の観点から可能性の高い113万 MWd/tとすると、炉内照射期間は約9ヵ月（275日）×5サイクルあるいは約6.5ヵ月（196日）×7サイクル運転（15万 MWd/tでは、196日×8サイクル）で目標燃焼度に到達する。主要炉心特性を同じく表2に示す。

6.5ヵ月サイクル炉心では燃焼反応度、制御棒価値は現行炉心に比べて若干減少し、最大線出力はピン本数を127本に減らしているために増大するが、いずれも設計上許容し得る範囲（前出480W/cm以下）にある。9ヵ月サイクル炉心では燃焼反応度が約1% k/kk増加するが、現行反応度収支の設計余裕合理化と制御棒¹⁰B濃縮度増加策により、将来的には反応度収支の成立範囲にある。

また冷却材ボイド反応度は、FPの蓄積によりスペクトル硬化が更に進行するが、10万 MWd/t燃焼度の第1期高度化炉心からの増加はわずかである。ドブブラ反応度については、Pu富化度を増して²³⁸U装荷量が相対的に減ったため、現行炉心設計値（ -5.7×10^{-3} Tdk/dt）から約8%減少する。

2.3 実用化技術実証概念の検討（装荷概念の検討）

第2.1節にて設定された実証用集合体を高度化炉心に装荷するに当たり、以下の方針にしたがって複数の概念を想定する。

1) 今回実証すべき性能は、特定の集合体単体の

最大燃焼度や中性子照射量もあるが、炉心の広い領域での取出平均燃焼度が主眼となることから、なるべく多数の実証用集合体を対象とし、少なくとも数十体規模の部分炉心を用いた「工学規模での照射実証」を想定する。

2) ただし、多数の実証用集合体装荷に伴うドライバ燃料への負担や炉心全体への外乱（出力ピーキングなど）を極力抑え、また実証用集合体自身の照射期間中の健全性も確保されるように装荷体数の上限を設定する。この観点から装荷体数（N）の上限としては、前出の実証用集合体出力比（ドライバ燃料の70%）と、残りのドライバによる出力負担（補償）の上限を5%までとすれば、 $0.3 \times N / (198 - N) \leq 0.05$ 、すなわちN=30体が一つの目安となる。ただし、炉心高さ変更等の対策もあり、実証用集合体仕様やその集合体出力抑制比によってはこの限りではない。

3) 実証用集合体の所要照射期間（炉内滞在期間）をなるべく短縮し、取出平均燃焼度15万 MWd/tの早期達成の観点から、炉内装荷位置を選定する。

4) 実証用集合体自身をドライバ相当燃料として併用することも考える（燃料製造コストやドライバ燃料の供給状況を考慮）。

5) 今後実用化集合体のピン径や炉心高さ等の仕様が多少変更されても、その影響はあらかじめ保守側に評価された炉心特性値に包絡されるよう、装荷本数と装荷位置の組合せを設定する。

以上の方針に則り、性能実証概念（実証炉心概念）の具体化を図り、各々の炉心特性への影響を評価する。

以下に実証概念の具体化例を示し、その概要（着眼点）と炉心概念を表3、図3に示す。

表3 実証概念（炉心内装荷概念）と着眼点

実証炉心概念	実証集合体炉心内装荷概念	着眼点
実証概念(1)	・内側炉心にMOX燃料30体 ・184日×10サイクル	・炉中心装荷、照射期間短縮 ・標準的な部分炉心装荷概念
実証概念(2)	・外側炉心にMOX燃料90体 ・184日×15サイクル	・部分炉心での最大実証体数 ・ドライバ相当燃料として装荷
実証概念(3)	・内側炉心に金属燃料30体 ・184日×12サイクル	・「MOX 金属燃料」の影響確認 ・燃焼特性向上効果
実証概念(4)	・内側炉心に金属燃料30体 （第2期高度化炉心ベース） ・275日×8サイクル	・長サイクル炉心の燃焼特性向上 ・先進燃料技術の継続実証

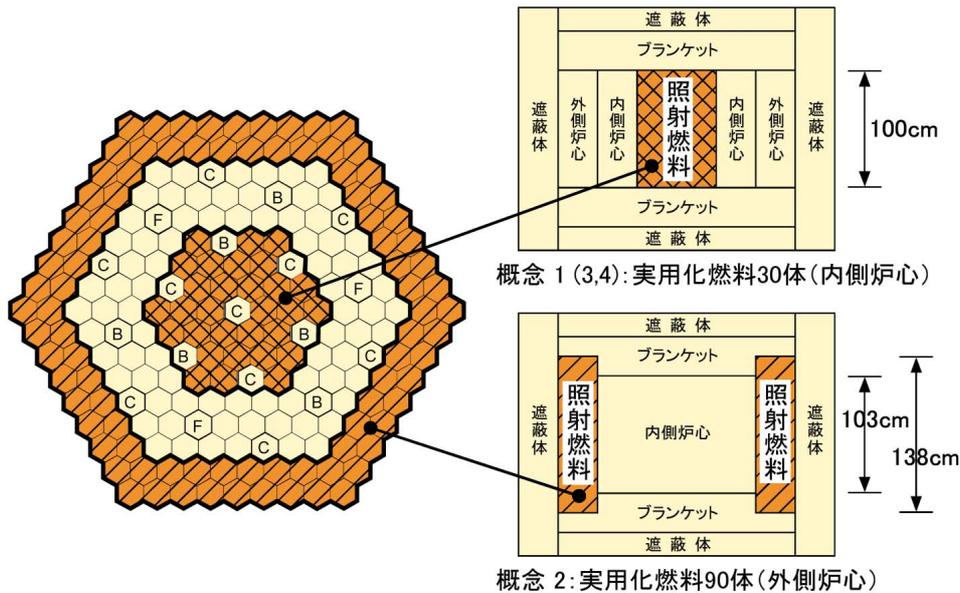


図3 実証用照射集合体の炉心内装荷概念図

(1) [実証炉心概念 1] <内側30体>

第1期高度化炉心(10万MWd/t平均取出燃焼度)の平衡炉心をベースに、

- ・実証用集合体(MOX)を内側炉心に30体装荷
- ・炉内照射期間:約6ヵ月(184日)×10サイクル燃焼させる。

サイクル長さは、上述のドライバ燃料領域の出力分担増加5%に対応して表2の日数より約10日短い184日とし、炉内照射期間は、実証用集合体領域出力分担(推定値)と重金属量の比から求める。

(2) [実証炉心概念 2] <外側90体>

同じく第1期高度化炉心をベースに、

- ・実証用集合体(MOX)を外側炉心に90体装荷
- ・炉内照射期間:約6ヵ月(184日)×15サイクル燃焼させる。

この場合には、実証用集合体炉心長を約3割増加させて集合体出力抑制比は変えない(1.0)ので、残りのドライバへの出力負担上限から決まる装荷体数制限はなく、ドライバ相当燃料として併用する。ただし、重金属装荷量が増加することで所要照射日数は増加する。

(3) [実証炉心概念 3,4] <金属,内側30体>

第1期及び第2期高度化炉心(13~15万MWd/t取出平均燃焼度)の平衡炉心を対象に、

- ・内側炉心に実証用集合体30体装荷(金属燃料)
- ・炉内照射期間:

1) 約6ヵ月(184日)×12サイクル燃焼

(第1期高度化炉心ベース)

2) 約9ヵ月(275日)×8サイクル 燃焼

(第2期高度化炉心ベース)

ここで、第2期高度化炉心での性能実証を想定するのは、金属燃料の実用化時期、試験集合体としての供給可能性や時期などを、第1期高度化炉心移行時期よりも更に先になることを想定してのことであり、また、ドライバ燃料を含めた炉心全体の平均燃焼度を極力15万MWd/tに近付け、更に9ヵ月サイクル炉心の燃焼反応度改善を狙うとの観点から検討したものである。

3. 実証概念の炉心特性評価

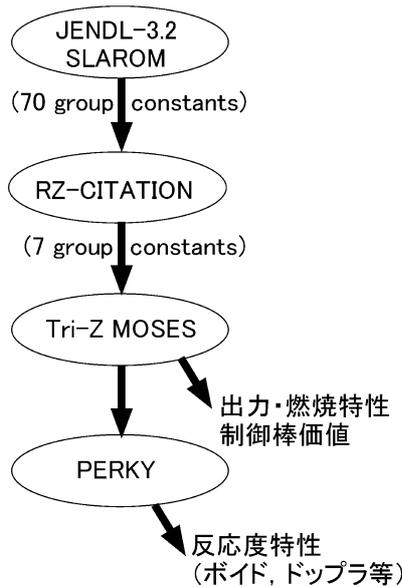
3.1 炉心特性評価方法

高度化炉心及び各性能実証概念(実用化実証炉心概念)の、出力分布・燃焼特性、実効増倍率、制御棒価値、各種反応度(係数)等の主要炉心特性は、3次元拡散・燃焼解析コードMOSESと反応度解析用の拡散摂動計算PERKYコードシステムにより求める^{9),10)}。

本コードシステムの核特性評価手順を図4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制御棒バイト分の余剰反応度(0.3% k/kk' , 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



群定数セット	JFS-3-J 3.2 (Y9510,127核種)
格子計算	使用コード: SLAROM 燃料集合体: 均質モデル 制御棒: 円筒状非均質 スーパーセルモデル
縮約計算	使用コード: CITATION JOINT
体系計算 (拡散計算)	使用コード: MOSES エネルギー群数: 7群 炉心体系: Tri-Z
摂動計算	使用コード: PERKY エネルギー群数: 18群 炉心体系: Tri-Z

図4 解析フローと計算方法

平坦化するように、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、平衡炉心燃焼初期から末期の実効増倍率, 出力分布(集合体出力, 最大線出力), 燃焼欠損反応度を求めた。

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し、出力分布計算では集合体出力を保守的に大きく評価するため、サイクル初期については中途挿入と全引抜(Naフォロー)の二通りを想定する。

(3) 反応度及び反応度係数

ドップラ係数, 冷却材ボイド反応度等は, 多群(18群)・3次元Tri-Z体系での一次摂動計算により求めた。なお、後者は前節2.2(1)で述べたように、「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、仮にボイド化したとの仮想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

各性能実証概念(実用化実証炉心概念)の、出力分布・燃焼特性, 制御棒反応度価値, ドップラ及び冷却材ボイド反応度等の主要炉心特性を表4にまとめる。

各特性の要点は以下(1)~(4)のとおりである。

(1) 出力分布・燃焼特性

1) 各実証炉心概念のドライバ燃料及び実証用燃料の核分裂性Pu 富化度は, 3.1(1)で設定した初期値に, 実用化集合体出力抑制補償分(30体装荷で約5%)を見込んで若干高めに与えることで, 平衡炉心各サイクルの必要余剰反応度($k_{eff} > 1.003$)が確保されることを確認した。

想定Pu 同位体組成比に対応する全Pu 富化度[内/外炉心(実証用集合体)]は[28.1/31.7, (19.5)], [25.5/-, (31.5)], [28.1/31.7, (14.5)], 「実証概念4」では[26.5/31.9, (15.0)]であり, いずれも上限として想定した32wt%以内である。また, 実証用集合体部の取出平均燃焼度はいずれも15万MWd/t(ペレット最大では約20万MWd/t)に到達し, 所要照射日数はそれぞれ約5年(MOX30体), 7年(MOX(外側)90体), 6年(金属燃料30体)となる。

2) 燃焼反応度は各ケースとも現行値(2.6% k/kk')より増加するが, 9ヵ月サイクル炉心ベースの「実証概念4」を除き6ヵ月運転サイクルを維持するので3.0% k/kk' を超えることはない。金属燃料集合体装荷では, この領域

表4 実証炉心概念の炉心特性

仕様・特性	実証概念(1) 内側30体装荷 (MOX)	実証概念(2) 外側90体装荷 (MOX)	実証概念(3) 内側30体装荷 (Metal)	実証概念(4) 内側30体装荷 (Metal) 130GWd/tベース
燃料要素数 外径 [mm]	169 - 6.5 [91 - 8.8]			127 - 7.65 [91 - 8.8]
スミヤ密度 / 実効燃料体積比 [%]	[82.1, 29.3]		[75.0, 26.8]	
炉心長 / 上ブラ / 下ブラ [cm]	[100 / 27 / 31]	[138 / 9 / 11]	[100 / 27 / 31]	[103 / 26 / 29]
Pu ^{fiss} 富化度 (内 / 外側) [wt%]	[12.0] 17.3 / 19.5	15.7 / [19.4]	[8.9] 17.3 / 19.5	[9.2] 16.3 / 19.6
取出平均燃焼度 [GWd/t _{HM}]	102 [159]	106 [153]	98 [149]	136 [153]
所要照射日数 [日]	[184 × 10]	[184 × 15]	[184 × 12]	[275 × 8]
燃焼反応度 [% k/kk ⁻¹]	2.9	2.8	2.7	3.7
最大線出力 (内 / 外側) [W/cm]	[451] 342 / 338	373 / [482]	[455] 332 / 333	[476] 431 / 450
制御棒価値 ^{*1} [% k/kk ⁻¹]	6.2	6.4	6.1	6.1
ポイド反応度 ^{*2} [× 10 ⁻⁴ k/kk ⁻¹]	1.7	2.2	2.0	2.1
ドッブラ係数 [× 10 ⁻³ Tdk/dT]	- 5.5	- 5.6	- 5.0	- 4.9

[]: 実用化実証用集合体データ, * 1: 主炉停止系1ロッドスタック時(最小値), * 2: 1炉心燃料集合体最大ポイド反応度

での内部転換比が良いので全体としての燃焼反応度は0.2% k/kk⁻¹ほど下がり、現行炉心並みとなる。

3) 最高線出力密度(ドライバ燃料)は、「実証概念2」を除き炉心長を100cmとしたことにより現行炉心並みの360 [W/cm]以下に収まる。実証用集合体領域の線出力密度も460 [W/cm]以下であり、高密度・高熱伝導の中空ペレットを想定すれば燃料最高温度は許容範囲(116%過出力時で2.650以下)にある。ただし「実証概念4」では470 [W/cm]を超えるので、裕度確保のためにはPu富化度の微調整が望ましい。

外側90体装荷の「実証概念2」では、元々実証用集合体の集合体出力をドライバ燃料並みに保ったまま91本の少数ピンバンドル構成とせざるを得ないことに加え、新旧燃料の出力 mismatches が拡大して、新燃料集合体出力や線出力密度も大きく増大する。そのため、炉心長を130cm以上に再設定するなど出力分担の調整を図ったが、それでも結果的に480 [W/cm]をやや上回った。またドライバ燃料の線出力も370 [W/cm]以上に増加するが、燃料最高温度としてはほぼ許容範囲にある。

(2) 制御棒価値と反応度収支の成立性

主炉停止系制御棒のワンロッドスタック時反応度価値(設計余裕を含む最小値)は6.3~6.0% k/kk⁻¹であり、現行値(7.0% k/kk⁻¹)から11~

15%低下する。これは、実証用集合体を含む高度化炉心全体の実効燃料体積比(30.1%)及びPu^{fiss}富化度(核分裂性Pu富化度)の増減分はほぼ相殺し合うが、炉心高さ増加分だけ吸収体部の効果が相対的に低下したためである。Pu富化度を増やして燃焼度を13万MWd/tまで上げた第2期高度化炉心に金属燃料30体を装荷した「実証概念4」では更に低下する。ただしこの場合でも、燃焼反応度は大きく増加しない。また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0.3% k/kk⁻¹ほど減少する(後述)。このことから、制御棒の¹⁰B濃縮度増加による制御棒価値増加などの対策を考慮すれば、反応度収支上はそれほど厳しくはなく、成立の見込みはあるといえる³⁾。

後備炉停止系制御棒については、もともと余裕が大きいので、本炉心においても十分な余裕を持って成立する。

(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ブラ反応度(係数)と冷却材ポイド反応度を摂動計算により評価した。

1) ドッブラ係数は主に²³⁸U共鳴吸収の変動の影響を受ける。まず検討のベースとした第1期高度化炉心(100GWd/t)では100cm炉心長尺化でPu富化度を下げて²³⁸U量が相対的に増えた効果

と、燃焼が進み蓄積FP吸収によるスペクトル硬化効果が相殺し合った結果、現行炉心設計値 (-5.7×10^{-3} Tdk/dt) からほとんど変化しない。

ドライバ燃料のPu富化度がやや高い「実証概念 1, 2」でも、部分炉心での15万 MWd/t高燃焼度化によるFP増大効果は予想通り小さく、高度化炉心からの変化幅は5%以下、係数は -5.4×10^{-3} Tdk/dtにとどまる。

金属燃料を装荷する「実証概念 3」ではこの部分のスペクトル硬化により絶対値が15%程小さくなり、第2期高度化炉心ベースの「実証概念 4」も、これに燃焼度増大の効果が若干上乗せされ、 -5.1×10^{-3} Tdk/dtまで減少する。いずれにしても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。今後詳細評価を含む検討が必要である。

2) 冷却材ボイド反応度については、仮想的な状態として炉心部全体のボイド反応度に着目すると、各ケースとも実証用集合体の15万 MWd/t高燃焼度化に伴う蓄積FP量の増加や炉心長尺化、及び金属燃料のスペクトル硬化等のプラス側の増加要因が重なって、炉心全体では増大する傾向にある。ただし「実証概念 1」では実証用集合体領域のPu富化度を下げたことによってFP蓄積に伴うスペクトル硬化効果が抑制され、ほとんど変化しない。金属燃料に置換した「実証概念 3, 4」ではスペクトル硬化の程度が増えるが、炉心部全体としての増加は7%程度である。外側90体装荷の「実証概念 2」では大幅な炉心長尺化により増大することも懸念されたが、ボイド反応度寄与の小さい外側炉心領域への装荷のため長尺化の影響は小さく、炉心全体ではほとんど変化しない。

以上を確認した上で設置許可申請書に記載の、1炉心燃料集合体の最大ボイド反応度を求めると、何れのケースも $1.8 \sim 2.2 \times 10^{-4}$ k/kk' の範囲にあり、最も大きい「実証概念 2, 4」で高度化炉心を15%前後上回るが絶対値は十分小さい。ただし、これらの反応度特性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、仮想的炉心崩壊事故を敢えて想定した場合の事象推移にも影響し得るので、許認可までには改めてその影響を把握、確認することが望ましい。

4. 検討・考察

以上の炉心特性評価結果を基に、炉心の安全性や運転性能に直接かかわる最高線出力密度や諸反応度特性、あるいは所要照射期間等に注目して各実証概念の特徴を比較すると図5のようになる。図はベースとした第1期高度化炉心の反応度特性や許容線出力密度値〔中空ペレットで460W/cm(暫定)〕、通常ドライバ燃料の場合の15万 MWd/t燃焼度到達期間(約4年)等を基準としてその変化を示しており、六角形状はなるべく小さい(中心部に向かう)ことが望ましい。これより、高度化炉心を用いて実用化燃料等の性能実証試験を実施した場合に、

炉心への外乱の程度やそれが許容範囲内か性能実証確認までの所要照射期間が現実的か等といった観点から、各実証概念の技術的成立性について検討する。

(1) 実証概念 1

1) 内側炉心領域に実証用集合体(MOX)30体を装荷した「実証概念 1」では、炉内滞在期間約5年で目標取出平均燃焼度15万 MWd/t(ペレット最大では約20万 MWd/t)に到達する。一方、仮に高度化炉心のドライバ燃料だけで15万 MWd/t燃焼度まで通常運転すると想定した場合でも、本来要する照射期間として1,500日前後、4年と1~2ヵ月が必要であり、燃料体積比の大きい別の太径ドライバ燃料では4年半近い照射期間が必要となる。これらを考慮すれば、5年という照射期間は出力密度の低い太径実証用燃料の照射日数としては大幅な増加とは言えず、15万 MWd/tの高燃焼度実証試験期間としては止むを得ないものと判断される。

2) 炉心特性へ与える影響のうち、実証用集合体の最高線出力密度が450W/cm近くにまで上昇するが、高密度中空ペレット燃料を想定すれば燃料最高温度は基準値(燃料融点)を上回ることはない。ドライバ燃料の最高線出力密度も現行の360W/cmを下回っており問題はない。

また、燃焼反応度はほとんど変わらず、制御棒値が若干(0.2% k/kk')低下するが、反応度収支上はほぼ許容範囲にある。更に主要な炉心安全パラメータである冷却材ボイド反応度、ドップラ反応度に関しても、数%オーダーと微小な変化範囲にある。

3) 以上、所要照射期間は合理的かつ妥当な長

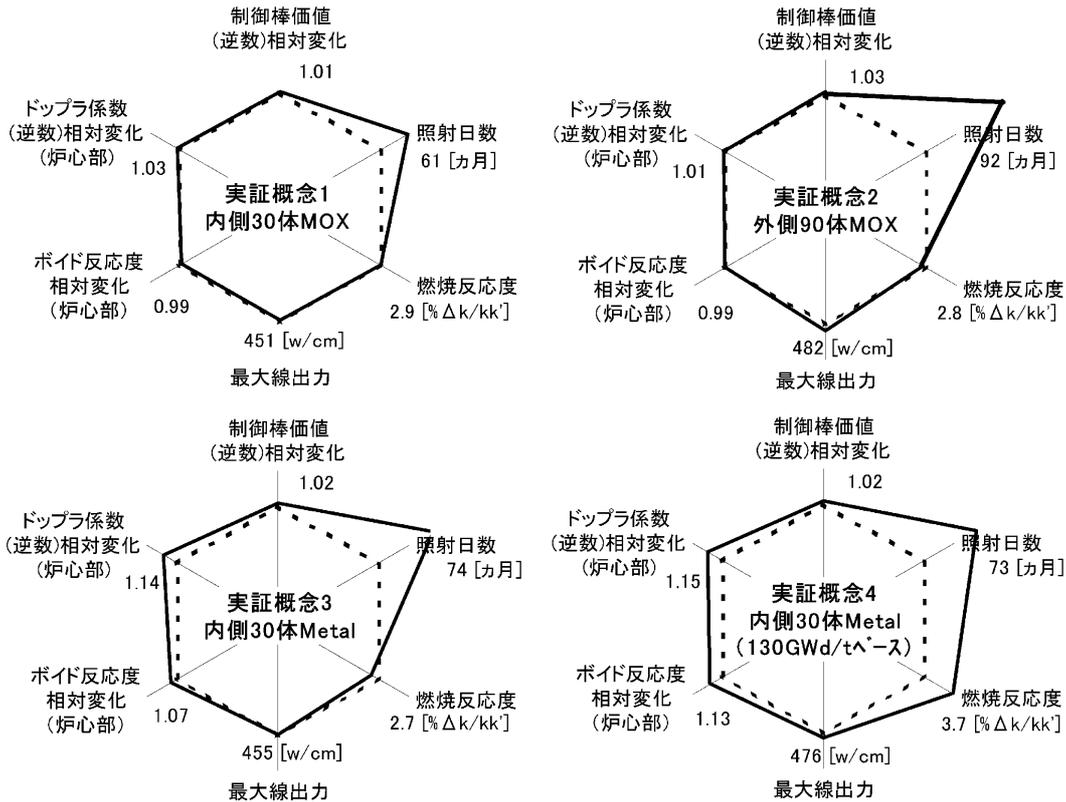


図5 実証概念の特性比較

たとみなせる5年で15万 MWd/t 燃焼度達成が可能なこと、炉心特性への影響がほぼ許容範囲にあることから、性能実証概念としての技術的成立性は高いと判断される。

(2) 実証概念 2

1) 外側炉心領域に(MOX)実証用集合体90体を装荷した「実証概念 2」では、所要照射期間は大幅に増加し、実証用集合体の15万 MWd/t 燃焼度到達には7年が必要となる。これは通常ドライバ燃料の場合の15万 MWd/t 燃焼度達成期間(4年)に比べても2倍近い長期間となるため、所要期間短縮のための検討が必要となる。

2) 炉心特性への影響のうち、出力分布・燃焼特性では実証用集合体の最高線出力密度が480W/cmを超え、ドライバ燃料の最高線出力密度も高密度中実ペレット燃料のほぼ上限の375W/cmに近づくため、燃料最高温度の裕度がほとんどなくなる。

燃焼反応度は若干(0.1% k/kk')改善され、制御棒価値はほとんど変化しないため、反応度収支としては、「実証概念 1」よりはわずかに改善される。

また、冷却材ボイド反応度、ドップラ反応度

等は、「実証概念 1」と同様に数%オーダーで変化するが設計余裕の範囲内である。

3) したがって、7年近い長期の照射期間を要すること、最高線出力密度が増大して燃料温度上の余裕がなくなること、及び実証用集合体の炉心長を限度一杯に延長せざるを得ないことから、ドライバ燃料としての活用(併用)はあるとしても、性能実証概念としての技術的成立性は低く、更なる検討が必要であると判断される。

(3) 実証概念 3, 4

1) 「実証概念 1」のMOX燃料を金属燃料に置換した「実証概念 3」(ベースは同じく10万 MWd/t炉心)では、所要照射期間は2割ほど長期化し、実証用集合体の15万 MWd/t 燃焼度到達に約6年が必要となる。これは通常ドライバ燃料による同一燃焼度達成期間(4年)の1.5倍近い長期間となるが、重金属装荷量の多い金属燃料としては止むを得ない面もあると考えられる。

2) ただし炉心特性への影響のうち、実証用集合体部の内部転換比が高いために炉心全体の燃焼特性(燃焼反応度)が0.2% k/kk'ほど改善され、反応度収支も「実証概念 1」に比べ向上

する。

一方、冷却材ポイド反応度、ドブプラ反応度はスペクトル硬化により最大で15%程度劣化するが、安全評価上の設計余裕(±30%)の範囲内である。

3)したがって、所要照射期間は同じ30体装荷の「実証概念 1」よりも1年増加して約6年で15万MWd/t燃焼度に到達するものの燃焼反応度特性がかなり改善し、その他の炉心安全特性もほぼ許容範囲にあると考えられる。このことから、何らかの照射期間短縮の工夫や対策、例えば線出力に留意しつつ炉心を短尺化し、重金属装荷量を減らして照射時間を短縮することなどを前提とすれば、将来的には性能実証概念としての技術的成立性はあると判断される。

このことは、平均燃焼度13~15万MWd/tの第2期高度化炉心に装荷する「実証概念 4」でも同様であり、9ヵ月以上の長期サイクル運転による燃焼反応度増大が、内部転換比の高い金属燃料装荷によって若干抑制される利点や、照射期間の長期化を許容あるいは短縮の見込みが得られれば、より先進的な性能実証概念として、技術的な成立性とその意義はあると判断される。ただし、最高線出力密度の点からは、Pu富化度の微調整を含む仕様の一部見直しが望ましい。

以上、各実証概念の特徴、技術的成立見直しについて考察した。

5. おわりに

実用化戦略調査研究で検討・提案されるFBR燃料概念等の性能実証試験を、将来の「もんじゅ」高度化炉心で行うとの想定で、「もんじゅ」に適合する実証用集合体仕様と炉心内装荷概念(実証炉心概念)を複数考案し、その炉心特性や所要試験期間等の評価を行い、性能実証試験としての技術的成立性を検討した。

まず、同研究のフェーズIで提案された実用化燃料仕様(案)に基づき、燃料ピン径(8.8mm)、燃料スミヤ密度(82%)、炉心有効長(100cm)及び燃料形態(MOX/Metal)等の基本的な仕様は維持しつつ、現行ラッパ管内径:110.5mmに収納できる91本ピンバンドルの実証用集合体仕様を設定した。

次に、これらの実証用集合体を数十体規模(部

分炉心規模)で装荷し、その性能を実証するための基準となる炉心として、「169本・90%高密度中実ペレット・100cm炉心長」及び「127本・95%高密度中空・太径ペレット・100cm炉心長」ドライバ燃料から構成される高度化炉心概念を新たに構築し、平衡炉心の主要特性を評価した。

更に、部分炉心規模での15万MWd/t燃焼度到達に着目した具体的な装荷形態、すなわち性能実証概念(実証炉心概念)を複数考案し、3次元炉心燃焼解析によりその炉心諸特性を評価した。

これらの炉心特性評価結果や所要照射期間などから、各実証概念の特徴、技術的成立性を評価検討し、以下のような見通しを得た。

- ・内側炉心にMOXの実証用集合体30体を装荷する「実証概念 1」では、照射期間約5年で目標燃焼度15万MWd/t(ペレット最大で20万MWd/t)に到達し、最高線出力密度、制御棒反応度収支、各種反応度(係数)等も許容範囲にあり、早期に実現可能性の高い実証試験として技術的成立性がある。
- ・外側炉心にドライバ相当燃料として90体装荷の「実証概念 2」では、目標燃焼度到達に7年以上の照射期間を要し、最高線出力密度抑制のため炉心の大幅延長が必要なことから、ドライバ燃料としての活用はあるとしても技術的成立性は低く、更なる検討が必要である。
- ・内側炉心に金属燃料の実用化集合体30体装荷の「実証概念 3」では、目標燃焼度到達に6年の照射期間(MOX燃料の1.2倍)を要するが、燃焼特性が改善され、他の炉心特性も許容範囲にあること、あるいは運転サイクル長期化のポテンシャルが大きいこと等から、今後燃焼期間短縮の工夫等を前提にすれば、中長期的な先進的概念の実証試験としてその技術的成立性はあると考える。
- ・「実証概念 4」についても最高線出力密度の裕度改善などを前提に、ほぼ同様の見通しである。

今後の検討課題としては、前節4.にて考察したように、各実証概念の炉心特性への影響(外乱)緩和方策の検討が必要であり、また、これらの試験実施に当たっては、高度化炉心そのものへの移行計画の具体化検討も早期に行うべきである。

その上で、取出平均燃焼度向上以外の性能実証項目、例えば将来のFBR実用化燃料が志向す

る12ヵ月以上の運転サイクル，高次化Pu/TRU
 燃焼・消滅，低除染燃料導入，再臨界排除機構，
 受動的炉停止機構等の実証形態の具体化を図る
 こと，及び全炉心規模でのよりいっそうの高燃
 焼度化と運転サイクル長期化を志向する第2期
 高度化炉心概念について，検討を更に進めるこ
 となども必要と考えられる。

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) 池上，林，他：“実用化戦略調査研究(フェーズI) 炉心・燃料(燃料形態)の技術検討書 - 平成11年度報告 - ”，PNC TY9400 2000 021 (2000)。
- 3) 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)。
- 4) 動力炉・核燃料開発事業団：“高速増殖原型炉「もんじゅ」発電所 原子炉設置許可申請書 本文及び添付書類(八)”，p 8 3 1～(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) H. Tsunoda et al.：“MOSES Upgrading and Installation (II)”，JNC TJ8400 99 057 (1999)。
- 10) 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)。