



# 高速増殖炉「もんじゅ」の増殖性能評価 —炉物理試験に基づく評価結果—

西 裕士 山岡 光明\*

敦賀本部 国際技術センター  
\*株式会社 東芝

資料番号 : 4 - 7

Breeding Ratio Evaluation of Monju  
-based on the Core Physics Test-

Hiroshi NISHI Mitsuki YAMAOKA\*

International Cooperation and Technology Development Center, Tsuruga  
Head Office

\*TOSHIBA Corporation

サイクル機構敦賀本部国際技術センターでは、高速増殖炉「もんじゅ」の炉物理試験に基づく増殖性能の評価を進めてきた。「もんじゅ」の増殖性能の評価は、炉物理試験だけでなく、今後の照射後試験結果やその後の再処理結果からも評価することが可能であるが、本研究ではその第一段階として、既に行われた性能試験（炉物理試験）の結果に基づく評価を進めた。その結果、本研究にて新規に考案した半実験式的評価法による増殖比評価値は、従来からのバイアスファクタ評価法に比べ約4%程度大きくなることが判明した。今後は、更に炉定数調整法による評価等を進め、総合的な評価を実施する計画である。

The breeding ratio evaluation of Monju, based on the core physics test, was conducted at the International Cooperation and Technology Development Center, Tsuruga Head Office, JNC. The evaluation showed that the breeding ratio of the Monju core, based on the semi-empirical method, newly developed by the study, is about 4% larger than that, based on the conventional bias-factor method. A comprehensive evaluation of the Monju breeding ratio is under investigation, including an evaluation using core constant adjustment method, for the future core physics test of Monju.

キーワード

増殖比、「もんじゅ」、炉物理試験

Breeding Ratio, Monju, Core Physics Test

## 1. はじめに

高速増殖炉「もんじゅ」は、その試運転・性能試験・運転を通して発電炉としての性能・安全性・信頼性を実証することが期待されている。ここで取り上げる増殖性能は、高速増殖炉の基本的特性の一つであり、燃料増殖機能の実証の観点から確認しておくべき重要な性能のひとつである。

増殖性の指標である増殖比は、一般に核分裂性物質の生成量と消滅量の比として定義される。ただし、ブランケット領域まで含めた全炉心にわたる積分量として与えられるため、直接測定することは、実際問題としては容易ではない。しかし、これまでに我が国の実験炉「常陽」を始めとして世界の先行高速炉が炉心運用管理の実績を積み重

ねてきた経緯を考えるなら、燃料の燃焼に伴う組成変化を適切に予測できることが実証され、言い換えるなら間接的に増殖性が実証されてきたことも事実である。すなわち、「燃料の燃焼に伴う組成変化を予測する」ことは、「核分裂性物質の生成量と消滅量を共に予測する」とほぼ等価であるので、この両者の比として定義される増殖比も同様に適切に予測されてきたことになる。

その一方、国内外を含めて増殖性を直接に実証した実績は少ない。そのためには例えば燃料の照射後試験（Post Irradiation Examination : PIE）のデータ等、炉心内の局所的な測定値を炉心全体にわたって外挿することが必要となるが、それが一般には困難であることがその原因と考えられる。

この観点から「もんじゅ」での測定値を利用して増殖性を直接実証することができれば、その意義は大きい。また、これまでの先行高速炉の運転経験からは、炉心全体としての反応度変化にかかわる燃料の燃焼組成変化は適切に予測できるものの、その内訳、特に炉心全体にわたる分布等については、局所的測定値はあるものの、必ずしも広範な情報が得られている訳ではない。このことは、将来の高速増殖炉の実用化を考える時、技術の汎用性・一般性を確保するために不可避の課題である。これを「もんじゅ」炉心から得られるデータにより解決していくことは、増殖比に限らず、燃焼に伴う燃料組成変化や燃焼反応度欠損の予測技術高度化にも大きく寄与するものである。燃焼に伴う燃料組成の変化は、炉心内の核分裂性物質の全存在量の増減と一対一に対応しており、高速増殖炉を中心とする核燃料サイクル全体の核分裂性物質収支の根幹を成すものである。

これらを背景に、「もんじゅ」炉心の増殖性能評価は、次の3ステップの段階的アプローチにより実施する。「もんじゅ」炉心に関する各種性能試験やその後の運転経験、使用済燃料の照射後試験など、得られる情報量の拡大に応じて、随時評価精度を向上させながら、段階的に評価を進めるものとする。

#### 第1段階：性能試験結果の利用

まず第1段階としては、「もんじゅ」性能試験結果、特に炉心特性試験（臨界特性評価・反応度価値特性評価・出力分布特性評価試験等の炉物理試験）の測定結果及びそれらの解析結果を利用して、核特性予測精度の向上を図りつつ、増殖比を評価する。この方法としては、試験結果を“直接的”に利用する半実験式的評価法、計算コードとの比較によるバイアスファクタ評価法、及び炉定数調整法を逐次適用する。

#### 第2段階：照射後燃料試験(PIE)結果の利用

照射後燃料の一部(ペレット単位)について同位体組成等を測定し、その結果をもとに、燃料物質質量の変化とその変化要因である反応率を調べる。このアプローチも、限られたPIE組成変化測定結果を全炉心レベルにまで精度よく外挿・適用することで、増殖特性を予測しようとするものである。したがって、第1段階と同様3つの評価方法を探り得るので、第1段階の評価結果と整合を取りつつ、精度向上を図りながら評価を進める考えである。

#### 第3段階：使用済燃料の再処理結果を使用した総合評価

集合体単位での使用済燃料の再処理後の分析結

果を利用して、核分裂性物質の増減データに基づき、増殖比を総合的に評価する。この段階においても、上記第1、第2段階の結果を参照することで、予測精度の更なる向上を図りつつ評価を進める。

以上の3段階の評価法は、国際技術センターが「もんじゅ」データの活用の観点から提案しているものであり、今後当サイクル機構内部でも議論を深めていく計画のものである。

本研究では、まず第1段階として「もんじゅ」炉心の性能試験結果(炉物理試験結果)を活用して「半実験式的評価法」によって増殖比を評価し、従来からの「バイアスファクタ評価法」による結果と比較する。また、もう一つの評価法である「炉定数調整法」を紹介し、両手法との関連を述べる。

なお、「炉定数調整法」とは、関与する核特性の断面積感度係数(ある特定核種の特定の核断面積を倍・半分に増減させた場合の着目核特性の変動率)、測定・解析誤差、核データ誤差をベースデータとして、重み付きの最小2乗法により炉定数を調整して増殖比を評価するものである。この方法によれば、「もんじゅ」性能試験結果だけではなく、「もんじゅ」の運転(低燃焼度炉心)・試験(照射後試験等)の進捗に伴って得られるデータの精度に合わせて増殖比の評価精度を逐次高めて行くことが可能である。したがって、これを総合的評価手法として「逐次精度向上方策」と位置付ける。

これら手法の詳細と、これを「もんじゅ」の性能試験で得られたデータに適用した場合の結果につき、これまでに得られた成果を以下に紹介する。また、その結果から本研究の今後の進め方を展望する。

## 2. 「もんじゅ」出力分布評価試験の概要と増殖比評価手順

### 2.1 出力分布評価試験の概要

「もんじゅ」性能試験の一環として実施された炉物理試験のうち特に出力分布評価試験<sup>1), 2), 3)</sup>に関して、増殖比評価への適用にかかわる事項を以下にまとめて紹介する。

図1及び図2に「もんじゅ」性能試験における出力分布評価試験の測定概要を示す。

図1に示すように、出力分布評価試験は試験用の特殊な集合体(試験用集合体、試験用遮蔽体)を使用して実施された。炉心燃料タイプの試験用集合体では、炉心燃料の中心7本の燃料要素の代わりに案内管と中性子検出要素が挿入されてい

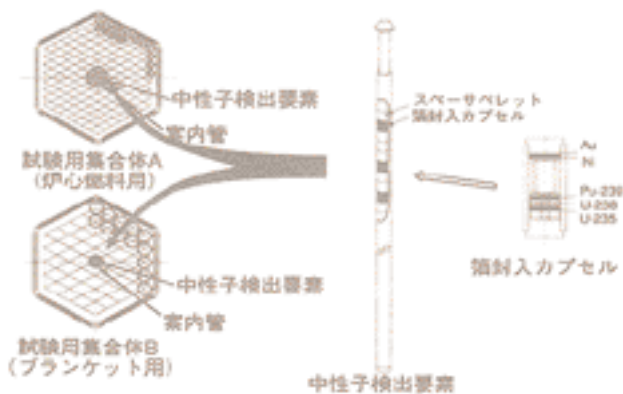


図1 出力分布評価試験用集合体概念図

る。ブランケット燃料タイプの試験用集合体では、中心1本の燃料要素が案内管と中性子検出要素で置換されている。中性子検出要素にはステンレス製のスペーサベレットと箔封入カプセルが挿入されている。

箔封入カプセル内には核分裂箔が挿入され、プルトニウム (Pu) 箔が計200枚、劣化ウラン (DU) 箔及び濃縮ウラン (EU) 箔がペアでそれぞれ262枚、合計724枚が低出力にて試験照射された。測定されたのはPu-239(n,f)核分裂反応率、U-238(n,f) (n, )核分裂・捕獲反応率、U-235(n,f)核分裂反応率である。

測定位置は、図2に代表的な試験用集合体の装荷パターンを示すが、合計6つの装荷パターンにつき試験が実施され、1/12セクター炉心の主要部分をカバーするように配慮されている。すなわち、炉心内集合体配置の対称性を考慮して、実質的にできるだけ広範な集合体をカバーするよう工夫された。

増殖比の評価には、これらの測定結果を活用す

る。ただし、以上の測定装置・測定方法から判る様に、軸方向・半径方向とも離散化された限られた位置での測定とならざるを得ない面があり、測定データの取得されていない位置での反応率分布の推定が重要となる。

## 2.2 増殖比評価式の定義

増殖比は、基本的には炉心全体にわたる核分裂性物質の生成量と消滅量の比として定義される。ただし、中性子バランスの考え方に基づく反応率の比としても定義され、広く使用されている。ここでは、「もんじゅ」性能試験における出力分布評価試験から得られる反応率分布の利用を念頭に、下記の反応率比をベースとする増殖比 (BR) の定義に基づき検討を行う。

$$BR = \frac{\int_{reactor} dV \left[ N_{238} \left( \sigma_c^{(238)} \phi \right) + N_{240} \left( \sigma_c^{(240)} \phi \right) + N_{p8} \left( \sigma_c^{(p8)} \phi \right) \right]}{\int_{reactor} dV \left[ N_{239} \left( \sigma_a^{(239)} \phi \right) + N_{241} \left( \sigma_c^{(241)} \lambda_{41} \right) + N_{235} \left( \sigma_a^{(235)} \phi \right) \right]}$$

.....

〔注〕

$$\sigma_a = \sigma_c + \sigma_f$$

$\left( \sigma_a^{(239)} \phi \right)$  ; エネルギー積分を示す。

$\int_{reactor} dV [---]$  ; [---] 内の特性値の空間積分を示す。

ここで、

$N_{238}$  : U238 number density

$\sigma_c^{(238)}$  : U238 capture cross section  
: neutron flux

$N_{240}$  : Pu240 number density

$\sigma_c^{(240)}$  : Pu240 capture cross section

$N_{p8}$  : Pu238 number density

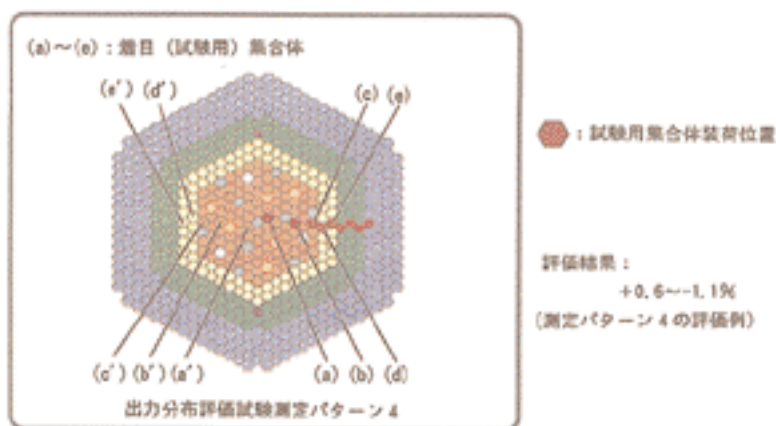


図2 出力分布評価試験における試験用集合体装荷位置及び中性子束分布歪み評価例

- $\sigma_c^{(p8)}$  : Pu238 capture cross section
- $N_{239}$  : Pu239 number density
- $\sigma_a^{(239)}$  : Pu239 absorption cross section
- $N_{241}$  : Pu241 number density
- $\sigma_a^{(241)}$  : Pu241 absorption cross section
- $N_{235}$  : U235 number density
- $\sigma_a^{(235)}$  : U235 absorption cross section

一方、炉物理試験では中性子束レベルが定格運転中のレベルに比べると一万分の1程度と低い(0.01%定格出力相当程度)。そのため、出力レベルに比例しないPu-241の崩壊定数<sub>41</sub>を含む上記式では、出力分布試験の箔照射から得られる反応率(及びそれらの比)から増殖比を組み立てると、出力レベルの絶対値が結果に影響する。すなわち、出力レベルに応じて増殖比が変動することになる。

そこでここでは、瞬時増殖比(instantaneous breeding ratio)の主要部分である出力レベルに依存しない下記の式で以後の検討を行うこととする。下記の式では、式に比べ分母にPu-241の崩壊による減少分を含まないため、試験条件(出力レベル)の影響を排除することができる。実際の定格出力時の増殖比については、Pu-241の崩壊の影響は小さいので、別途補正項として扱うものとする。

$$BR = \frac{\int_{reactor} dV \left[ N_{238} \left( \sigma_c^{(238)} \phi \right) + N_{240} \left( \sigma_c^{(240)} \phi \right) + N_{p8} \left( \sigma_c^{(p8)} \phi \right) \right]}{\int_{reactor} dV \left[ N_{239} \left( \sigma_a^{(239)} \phi \right) + N_{241} \left( \sigma_c^{(241)} \phi \right) + N_{235} \left( \sigma_a^{(235)} \phi \right) \right]}$$

.....

### 2.3 増殖比評価手順

出力分布評価試験における箔の照射・測定計画と整合を取り、増殖比評価のための基本手順を検討する。前述の以下の3つの評価方法による増殖比評価手順の概要フローを図3に示す。

半実験式的評価法

バイアスファクタ評価法

炉定数調整法

図中に示すように、これらの増殖比評価は以下の手順にて実施する。

反応率分布測定結果の吟味並びに誤差評価

出力分布評価試験にて測定した反応率分布測定データは、前記3評価手法のいずれの場合にも、増殖比評価の基礎データとして利用する。

したがって、まず測定したデータの検討・吟味と誤差評価を実施し、これを評価の基本とする。

試験用集合体の利用に伴う中性子束歪みの補正

上記の反応率分布測定データは、通常の燃料集合体とは異なる特殊な試験用集合体を用いて測定されている。その結果、このような試験用集合体を装荷しない通常の(クリーンな)炉心における反応率とは若干のズレを生じている。

測定データを直接利用する増殖比評価においては、先ずこれらの効果を詳細な解析計算により補正することで、通常の試験用集合体の装荷されていない(クリーンな)炉心における反応率分布を求める。

半実験式的評価法による評価

以上のデータに基づき、半実験式的評価法によ

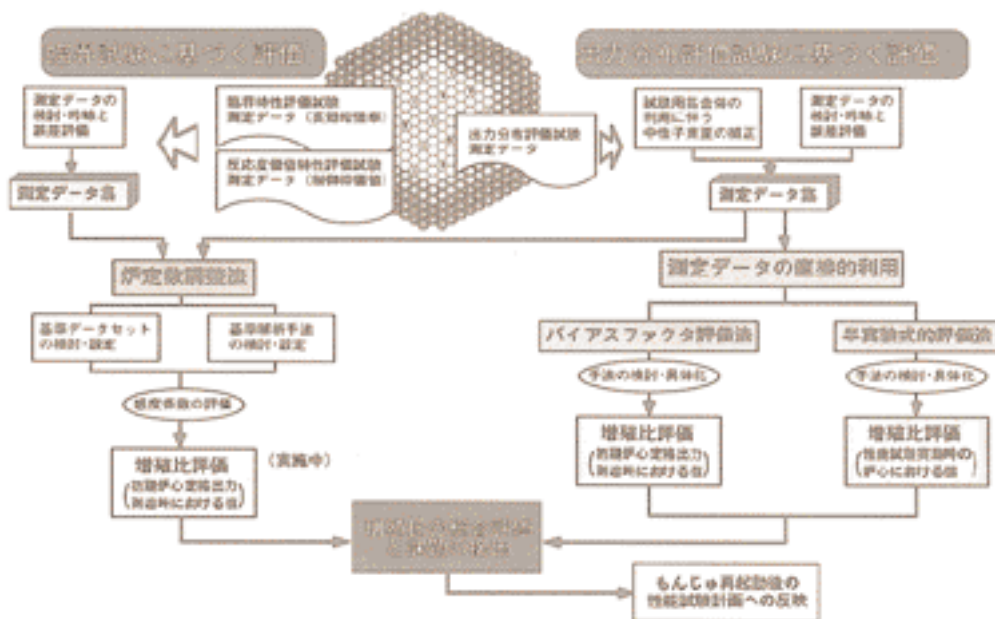


図3 増殖比の性能試験に基づく計算評価フロー図

り増殖比を評価する。具体的方法は後述するが、前記の様に「データの取得されていない点における反応率分布の推定」が重要なポイントであり、本研究ではこの点の解決策として「スペクトルインデックス法」を考案し、適用した。

#### バイアスファクタ評価法による評価<sup>4)</sup>

バイアスファクタ評価法は、上記と同様に反応率分布測定データを基に増殖比を評価したものであるが、解析計算により得られる各測定点での反応率計算値(C)と実際の測定値(E)との比(C/E値)をバイアスファクタとして求め、これを解析計算で得られる増殖比解析値に適用することで増殖比を評価するものである。この場合にもデータの取得されていない位置におけるバイアスファクタの内外挿が必要となるが、これについては従来からの一般的な方法である空間的補完法(バイアスファクタが炉心内の位置座標に応じて連続的に変化すると想定した空間的フィッティング法)が使用された。また、炉内の中性子束歪みの効果も、従来からの一般的な手法である決定論的方法(モンテカルロ法ではない従来からの解析方法)により解析評価されている。

その結果、「もんじゅ」初装荷炉心初期の増殖比は1.18と評価された。

#### 炉定数調整法による評価<sup>5)</sup>

本手法は、既述の様に反応率分布データだけでなく、臨界特性評価試験データや制御棒反応度値特性評価試験データ等の、反応度関連測定データも利用して炉定数を調整し、調整済みの炉定数を用いて増殖比を評価する方法である。この方法では、「もんじゅ」の試験データだけでなく、過去の各種の臨界実験データも同時に反映させることが可能であり、より汎用性・一般性のある手法と位置付けられる。また、今後新たなデータが得られた時点で、逐次それらを炉定数調整の基礎データとして取り込むことができる。

炉定数調整法の手法自体やそれに基づく統合炉定数作成などは、大洗工学センターシステム技術開発部にて研究開発が進められており、最新の評価済み核データライブラリJENDL-3.2に基づく統合炉定数作成が完了したところである<sup>6),7)</sup>。

## 2.4 反応率分布測定結果の補正

出力分布評価試験により得られた反応率分布測定データを利用して、炉心全体の積分特性である増殖比を求める。ただし、前述の吟味・誤差評価及び補正として、その前に以下の3種類の補正を実施する。

第1は、箔の不純物及び線計測に基づく補正であり、第2は、性能試験体系で測定された反応率分布をもとに、試験用の特殊な集合体の装荷されない「通常の炉心燃料集合体のみで構成される炉心体系」に対する反応率分布を組み立てるための補正である。また、第3の補正は、「性能試験炉心状態」と「運転開始時点における定格出力状態」との違いを補正するものである。

### 第1の補正

#### 1) 核分裂箔の組成に基づく不純物補正

測定に使用したプルトニウムPu箔や劣化ウランDU箔には、不純物としての同位体(Pu-240やU-235)が微量ながら含まれているので、これら微量不純物元素の測定結果への影響を補正する。

#### 2) 重量較正

$Pu-239(n,f)$ 、 $U-238(n, \gamma)$ 、 $(n,f)$ 、 $U-235(n,f)$  反応率分布は、箔の中のPu-239、U-238、U-235の重量較正の結果に基づき、核子当たりの反応率となるよう換算・補正する。

#### 3) 箔の線計測における絶対値測定結果の補正

箔の線計測に際しての、箔の厚さによる線の自己遮蔽効果や数え落とし補正等、線計測に関するデータの補正を実施する。また、各中性子検出箔の線計測は、箔毎に異なる時刻に実施せざるを得ないので、箔の実効的崩壊定数を内外挿し、すべての箔を同一時刻に測定したものと想定した場合の計測値に換算・補正する。

### 第2の補正

出力分布評価試験で使用された中性子検出要素と箔封入カプセルの使用に伴う補正としては、次の2点の補正を実施する。これらは、照射された箔の線計測結果を基本に、通常の炉心燃料のみから構成される炉心体系(試験用集合体が装荷されていない体系)の反応率分布を求めるための補正である。

通常の炉心燃料集合体より燃料の少ない試験用集合体を装荷していることに起因する中性子束分布への影響。

中性子検出要素中に箔を設置していることにより、箔の実効的な断面積が通常の燃料中の実効断面積と異なることの影響。

### 第3の補正

第3の補正は、増殖比評価の対象とする炉心の運転状態の選択と関係する。例えば、増殖比の評価対象を「初期炉心の運転開始時点における定格出力状態」とすると、炉心構成は初期炉心構成体系と同じであるが、制御棒挿入位置は出力分布評価試験時と異なるものとなる。また、定格出力状

態では燃料温度が上昇するために、ドップラーブロードニング（共鳴吸収領域における実効的な吸収断面積の増大）効果により増殖比も影響を受ける。この炉心状態での増殖比を評価するためには、性能試験における出力分布評価試験時との違いを補正することが必要となる。

解析計算により以上の補正量を評価したところ、性能試験時に比べて初装荷炉心運転開始時の定格出力状態における増殖比は、約3%大きくなることが判明した。したがって、前述のバイアスファクタ評価法による「もんじゅ」初装荷炉心初期の増殖比評価値1.18は、性能試験時に換算すると1.15に相当することになる。

すなわち、バイアスファクタ評価法では、先ず性能試験時の試験用集合体の装荷された低出力状態の炉心を対象として、解析計算により各試験用集合体内測定位置における反応率を求め、計算結果と測定データとの比としてバイアスファクタを評価している。次に、同じく解析計算により、試験用集合体が装荷されていない、炉出力が100%定格出力に到達した状態の炉心における増殖比計算値を求め、これに上記のバイアスファクタを適用することで初装荷炉心初期の増殖比を評価している（バイアスファクタ評価法では、この両炉心でバイアスファクタが同じになることを暗黙の仮定としている）。したがって、前述のような性能試験時と出力上昇時の炉心状態の差異が既に補正された結果として、初装荷炉心初期の増殖比が与えられている。よって、この両者の炉心状態の差異を補正することにより、逆に性能試験時における増殖比に換算することができる。

### 3. 試験用集合体装荷の影響補正

2.4項「反応率分布測定結果の補正」に記載の各種補正の内、ここでは特に第2の補正につき詳述する。

#### 3.1 炉心全体としての中性子束分布歪み補正

炉心内に試験用集合体を装荷したことによる炉心全体としての中性子束分布の歪み量について、解析計算によりこのような試験用集合体を装荷した炉心と装荷しない炉心を模擬し、両者の中性子束を比較評価した例を図2に示す。

図中に示すように、この例では試験用集合体の装荷により、中性子束分布は最大+0.6～-1.1%程度歪んでいる。したがって、各測定データの利用に際しては、この様な炉心全体としての中性子束の歪みの影響を排除するよう考慮する。

なお、本研究では、以上の様な炉心全体の解析計算には各集合体当たり24メッシュ分割、エネルギー群分割18群の詳細解析モデルを使用することを基本とした。従来は、集合体当たり1～6メッシュ分割、エネルギー群分割7群程度が通常使用されているが、これに比べ空間・エネルギー離散化近似精度を10倍以上に高精度化することで、解析計算上の誤差をできるだけ排除する。

今回採用した上記詳細解析モデルによれば、従来別途必要であった制御棒吸収体の均質モデル化近似補正（中性子吸収材が中心部に偏在する制御棒を、そのような空間的偏在を均質化してモデル化することにより生ずる解析モデル上の近似補正。制御棒反応度値換算で約-15%程度の補正となる）が不要となり、非均質制御棒モデルにより直接この効果を再現できることが判明した。このことは、制御棒挿入による軸方向中性子束の歪み効果を解析モデルとして直接模擬できることを意味しており、解析計算上の誤差低減に今回のモデルが大きく寄与するものであることを示している。

また、解析計算においては、軸方向反応率分布の精確な模擬の観点から、試験時の制御棒挿入深度を忠実に再現するとともに、制御棒反応度値も実測値と等価となるよう解析計算の入力データに用いる吸収材装荷量を調整した。

#### 3.2 集合体内の局所の中性子束分布歪み補正

以上のような炉心全体としての中性子束分布の歪みに加え、試験用集合体内ではより局所的な中性子束分布の歪みを生じている。

すなわち、通常の燃料集合体では本来燃料要素が存在する集合体中心部にステンレス鋼製の案内管や中性子検出要素が存在するために、試験用集合体内ではこれらが減速・吸収材の役割を果たす。その結果、中性子検出箔の設置される中性子検出要素位置における中性子束は、通常の燃料集合体内に比べスペクトルは局所的に軟らかくなり（低エネルギー側にシフトし）、また空間分布にも局所的な歪みを生じる。さらに、中性子検出箔の周囲に核燃料物質が存在しないために、箔の実効的核断面積を支配する自己遮蔽因子（例えば、Pu-239のような同一の元素が一箇所に集中的に存在すると、共鳴吸収領域などで中性子が選択的に吸収される結果、そのエネルギー領域の中性子が全体に減少し、見掛け上吸収断面積が小さくなる効果）にも影響を生ずる。

これらの効果を解析計算にて評価した結果の一

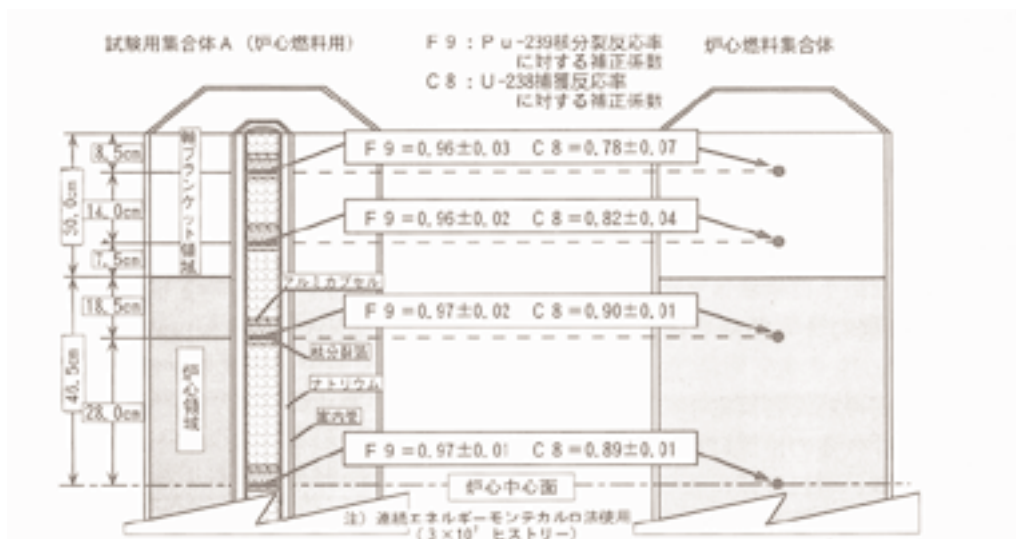


図4 試験用集合体による反応率測定データの補正係数（評価例）

例を図4に示す。

図中に示す様に、増殖比評価で特に重要となるPu-239の核分裂反応率（F9）及びU-238の捕獲反応率（C8）についていえば（増殖比は、基本的にはC8/F9の比として与えられる）、比較的広いエネルギー領域に吸収断面積を持つPu-239核分裂反応率（F9）では3～4%とそれ程大きな補正は必要ないが、特に低エネルギー側に大きな吸収断面積を持つU-238捕獲反応率（C8）については、特にスペクトルの軟化するブランケット領域において最大20%以上の補正が必要となる。

この効果をできるだけ厳密に評価するため、本研究では連続エネルギーモンテカルロ法を採用した。すなわち、日本原子力研究所にて開発された最新の連続エネルギーモンテカルロ計算コード：MVP<sup>8)</sup>と、これに対応する最新の評価済み核データライブラリ：JENDL-3.2を利用することとした。

連続エネルギーモンテカルロ法は、従来離散化近似（エネルギーや空間座標のような連続物理量を、計算機による解析計算に好都合なように、エネルギー群分割や空間メッシュ分割などして離散化量で近似すること）が必要であったエネルギー分布・空間分布を一切の近似を排してモデル化できることが特徴であり、これらの離散化近似の導入による解析計算上の誤差を排除できることから、今回採用したものである。ただし、モンテカルロ法の宿命として、計算結果には統計誤差が付随する。この統計誤差を低減させるには、モンテカルロ計算における発生中性子数（ヒストリー数）を実用的に可能な限り確保することが必要であ

る。

本研究では、この統計誤差低減のために、従来100万ヒストリー程度が通常であったものを、最大3,000万ヒストリーまでの詳細なモンテカルロ計算を実施し、可能な限り高精度な結果を得ることに努めた（この場合、統計誤差（標準偏差）は100万ヒストリーの場合の1/5以下となる）。

### 3.3 スペクトルインデックス法の導入

出力分布評価試験にて取得した計1,000点近い反応率分布測定データについて、以上の補正を施すことで、試験用集合体を装荷しない通常の（クリーンな）炉心体系における反応率分布測定データを得ることができる。しかし、それだけでは増殖比評価には十分ではない。既述のように、これら反応率分布測定データの取得されていない位置における反応率分布を推定することが必要である。

そのために、本研究においては「スペクトルインデックス法」と呼ぶ方法を導入する。この方法は、以上の補正済みデータを、以下の3つの反応率比を「スペクトルインデックス」として、整理することを基本とする。すなわち、

C8 / F9 : U-238捕獲反応とPu-239核分裂反応の反応率比

F8 / F9 : U-238核分裂反応とPu-239核分裂反応の反応率比

F5 / F9 : U-235核分裂反応とPu-239核分裂反応の反応率比

の3反応率比である。これらの反応には、それぞれの反応断面積に独自のエネルギー依存性があ

る。そのため、この3反応率比を独立変数として測定データを整理することにより、それぞれのデータが、その中性子スペクトル依存性を考慮した形で整理されることになる。

次に、この結果に基づき、上記3変数のスペクトルインデックスを独立変数とする位相空間において、それぞれの反応率を従属変数とした回帰分析を実施し、いわば最小自乗法フィッティングにより各反応率の連続的分布曲面を推定・評価する。

このようにして得られた各反応率のフィッティング曲面を用いて、任意の位置における反応率を推定する。推定には、着目位置における前記3つのスペクトルインデックスを解析計算にて求め、これに対応する反応率を当該位置における反応率推定値とする。

以上の方法は、本研究にて初めて導入されたもので、従来の空間的補完法に比べると、スペクトルインデックスを導入することにより、炉物理的観点からの一般性・汎用性が確保できる点がある（反応率比分布は、本来空間座標ではなく、その点における中性子スペクトルに依存するとの炉物理的観点からの合理性）。

#### 4. 「もんじゅ」炉心の増殖比評価

##### 4.1 スペクトルインデックス法によるデータの補完<sup>9)</sup>

以上のスペクトルインデックス法により推定した反応率比分布を、実際に測定された反応率データと比較した結果の例を図5に示す。

図中に示す様に、増殖比評価で特に重要となるC8/F9反応率比のP/E値（推定値と実測値との比）はほぼ1.0となっており、本手法（スペクトルインデックスを独立変数とする反応率フィッティング曲面）が妥当な結果を与えることが分かる。これに基づき、本来測定値のない炉内の任意位置における反応率を当該位置におけるスペクトルインデックスに基づいて推定する。

また、以上の手法による試験用集合体補正係数を適用した解析結果の一例を図6に示す。

図中には、炉中心近傍の集合体におけるU-238捕獲/Pu-239核分裂反応率比分布のC/E値につき、補正をした場合としない場合の軸方向分布を示した。これより分かるように同反応率比分布の予測には試験用集合体内の中性子束歪補正が重要であり、炉心部で約7%、軸ブランケットでは15~20%の補正が必要となる。補正によりC/E値は1.0に近づくことから、本補正法の有効性が示

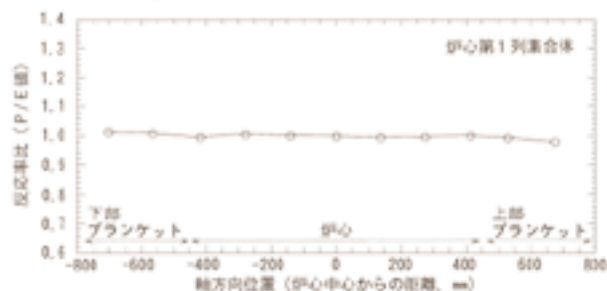


図5 反応率比P/E値\*軸方向分布  
(U238捕獲/Pu239核分裂)

\* ) スペクトルインデックス法による推定値Pと実測値Eの比

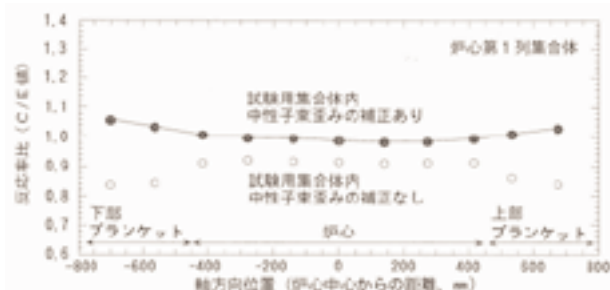


図6 反応率比C/E値軸方向分布  
(U238捕獲/Pu239核分裂)

唆される。

なお、以上のC/E値の評価においては、試験用集合体内での反応率測定値に前述の中性子束歪補正を施した結果を測定値(E)とし、解析計算により求めた当該位置における反応率を計算値(C)として、両者の比をC/E値としている。

##### 4.2 「もんじゅ」炉心の増殖比<sup>10)</sup>

以上の手法により推定された炉心内任意位置での反応率比に基づき、これを炉心全体にわたって積分することにより、「もんじゅ」炉心の増殖比を評価した結果を表1に示す。

表1 増殖比評価結果(試験温度200 での値)

積分領域	本手法 (測定値利用)	解析値 (JENDL-3.2 70群)
炉心	0.59	0.59
径ブランケット	0.39	0.37
軸ブランケット	0.21	0.21
全炉心	1.19 (±8%)	1.16

注) 増殖比=A/B, A=(U-238, Pu-238, Pu-240捕獲反応率),  
B=(Pu-239, Pu-241, U-235吸収反応率)  
増殖比は定格運転時には0.03程度増加する。

表中に示すように、本手法による増殖比評価値（試験温度200における値）は1.19となった。予測誤差は8%であり、測定値の誤差が約6%を占めている。一方、JENDL-3.2 / 70群ライブラリーによる解析値は1.16であり、本手法との差は主に半径方向ブランケット領域における増殖比の違いから生じている。既述の様に、従来手法であるバイアスファクタ法による予測値も1.15（試験温度200換算）となっている。すなわち、本手法では従来知見よりも約4%高い増殖比が得られた。その主な原因は、前述の様に放射化箔位置における微細な中性子スペクトルが影響する径ブランケット試験用集合体における中性子束歪補正の違いにあることが示唆される。

なお、前述の補正を施さずに反応率測定データをそのまま使用した場合、増殖比評価値は1.33となり、補正した結果よりも約14%大きくなった。このことは、前述の中性子束分布の歪み補正が今回の評価に支配的な役割を果たすことを示している。本研究では、この補正量評価に連続エネルギーモンテカルロ法を使用することで、解析計算上の近似誤差を極力排除した。しかも、従来に比べ約30倍のヒストリー数を確保することにより、モンテカルロ計算特有の統計誤差の低減を図った。また、スペクトルインデックス法を導入することで、炉心領域に比べ統計誤差が大きくなるブランケット領域外周部等の精度を補足するとともに、炉心内の任意の位置における反応率を炉物理的合理性を持たせて内外挿した。しかも、内外挿のための炉心全体の解析計算には、各集合体当たり24メッシュ分割、エネルギー群分割18群と、従来に比べ10倍以上高精度化した詳細解析モデルを使用した。したがって、この点については十分な精度が確保されていると考えるが、前述のように、

誤差の範囲内ではあるものの従来の評価値と差異を生じているため、今後とも検討が必要である。

### 5. 今後の展開

以上のように、これまでに得られた結果によると、半実験式的評価法による増殖比評価値は、バイアスファクタ評価法による評価値に比べ約4%程度大きくなった。差異の原因については、引き続き検討が必要であるが、さらにもう一つの評価法である炉定数調整法による評価を進めることが今後の展開の一つの方向として考えられる。

反応率分布測定の不確かさを現状評価値の約8%とすると、炉定数は主として臨界特性や制御棒反応度評価等のより精度の高い反応度測定データに基づき調整されることが、これまでの数値実験の結果から分かっている（炉定数調整法では、各測定データの測定精度に応じて炉定数への反映に重み付けがされるため）。その結果、同手法による増殖比評価値は、半実験式的評価法による評価値はもちろん、バイアスファクタ評価法による評価値よりも更に小さくなることも想定される。この点は、炉定数調整のデータベースとして、「もんじゅ」性能試験を始め過去の炉物理実験のデータをどの様に反映するか等、データベースの取り方にも依存する。したがって、これらの点を含めて検討を進めることが考えられる。

また、「もんじゅ」再起動後は、前述の様に使用済燃料の照射後試験（PIE）を実施し、そのデータから増殖比を評価することが考えられる。したがって、この点についても計画の具体化が必要である。PIEデータの利用による増殖比評価については、以前実験炉「常陽」にても試みられたこ

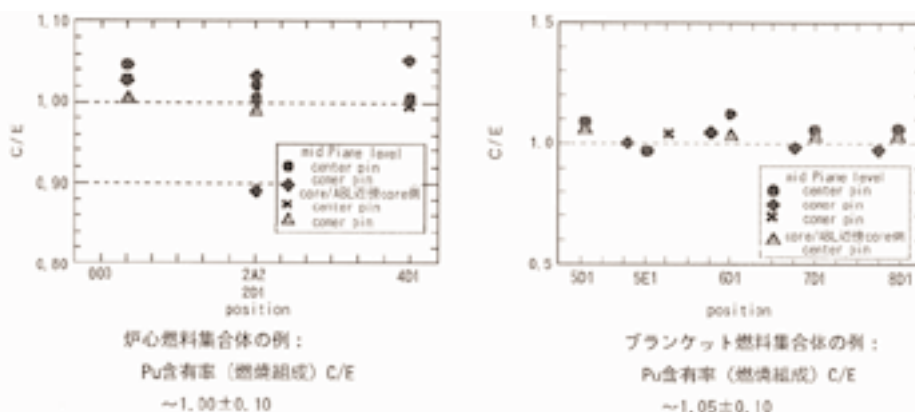


図7 「常陽」MK- 炉心におけるPIEデータの解析計算例

とがあり、使用済燃料ペレットの分析結果に基づいて、反応率分布の空間フィッティングによる増殖比評価が試行されている<sup>11)</sup>。本研究でもこれを参考にする計画である。現在、「常陽」のPIEデータに基づく予備的評価を進めている。その一環としてPIE分析結果の解析計算による再現を試みた結果の一例を図7に示す。

図中に示すように、この結果から次のことが分かる。すなわち、PIEデータに基づく増殖比評価では、微少(数%以下)な燃料組成の変化に基づき評価を実施することとなるので、測定データの精度が結果に大きく影響する。「常陽」の例では、実測された燃料組成を解析計算の結果と比較したところ、C/E値に±10%程度のばらつきを生じた。すなわち、所要の測定精度を確保するためには、事前に十分な計画の検討が必要であり、例えば比較対照用の新燃料ペレットの確保と精密組成測定の実施等、計画の具体化検討を必要とする。したがって、これらも含めた総合的検討を実施して行きたい。

## 6. おわりに

以上のように、「もんじゅ」炉心の増殖比評価については、今後とも継続的な検討が必要と考えられる。ただし、これら検討を進めるにあたっては、サイクル機構内部でも関係各部署の協力が必要であり、関連各位と今後調整して進めていきたい。

なお、本研究は、これまでに多くの関係者のご

尽力があつて、ここまで進めてくることができたものである。ここに本紙面をお借りして、関係各位のご尽力に敬意を表すると共に、改めて感謝の意を表したい。

## 参考文献

- 1) 椎名 他：「高速増殖原型炉もんじゅの建設(その63)出力分布評価概要」, 日本原子力学会1995年春の大会予稿集, p.126.
- 2) 宇佐美 他：「高速増殖原型炉もんじゅの建設(その64)出力分布評価測定結果」, 日本原子力学会1995年春の大会予稿集, p.127.
- 3) 宇佐美 他：「高速増殖原型炉もんじゅの建設(その69)出力分布評価測定結果 : 反応率測定値に基づく出力分布の予備的評価」, 日本原子力学会1995年秋の大会予稿集, p.6.
- 4) 宇佐美 他：「高速増殖原型炉もんじゅの建設(その70)出力分布評価測定結果 : 反応率測定値に基づく増殖比の予備的評価」, 日本原子力学会1995年秋の大会予稿集, p.7.
- 5) 西 他：「高速増殖炉炉心特性の解析精度向上方策に関する予備的検討 炉定数調整法の適用による逐次精度向上法」, 日本原子力学会1996年春の年会予稿集, p.8.
- 6) 石川：「大型炉核設計精度の評価 - 炉定数調整法の適用 -」, PNC TN 9410 93-131 (1993).
- 7) 石川 他：「JENDL-3.2に基づく大型高速炉用統合炉定数の整備」, JNC TNレポート(1999).
- 8) 森, 中川：「MVP/GMVP連続エネルギー法及び多群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード」, JAERI-Data/Code 94-007 (1994).
- 9) 川島 他：「炉物理試験結果に基づく反応率分布予測手法の開発( ) - 半実験式的反応率比評価手法 -」, 日本原子力学会1999年秋の大会.
- 10) 西 他：「炉物理試験結果に基づく反応率分布予測手法の開発( ) - 初期炉心・増殖比評価への適用結果と燃焼炉心での応用に向けて -」, 日本原子力学会1999年秋の大会.
- 11) 原 他：「常陽MK- の燃焼特性解析」, PNC TN9410 90-036 (1990).