

2002年12月

高速炉核特性解析における 炉定数高度化の効果に関する検討 (研究報告)

2002年12月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2003

高速炉核特性解析における 炉定数高度化の効果に関する検討

千葉 豪*

要旨

高速炉核特性解析において、従来の炉定数セットを次世代炉定数システムに高度化したことによる核特性への影響(以下、次世代炉定数効果)の評価を行った。対象とした炉心は JUPITER 臨界実験および実用化戦略調査研究で設計された実機炉心である。

JUPITER 臨界実験体系では、Na ボイド反応度、サンプルドッpler反応度に 10%程度の次世代炉定数効果が見られている。その分析を行ったところ、Na ボイド反応度における効果はさまざまな要因が重なり合った結果であること、サンプルドッpler反応度における効果はサンプルと炉心燃料の共鳴干渉効果を正確に取り扱ったことによる効果が主要因であることが分かった。

また、以前に評価された実機炉心における次世代炉定数効果は JFS-3-J3.2 を使用して得られており、JFS-3-J3.2 作成時の重みスペクトルに関する誤りを訂正する効果が含まれていた。今回、その誤りを訂正した炉定数 JFS-3-J3.2R を用いた評価を行い、実機炉心における次世代炉定数効果が臨界実験体系と比べて大きいものではないことを示した。

* 大洗工学センター システム技術開発部 中性子工学グループ

Study on Effects of Development of Reactor Constant in Fast Reactor Analysis

Gou Chiba*

Abstract

Evaluation was carried out about an effect of development of the new generation reactor constant system that substitutes for the JFS library in fast reactor analysis. Analyzed cores were ZPPR in JUPITER critical experiment and several power reactor cores that were designed in the feasibility study.

In the JUPITER analysis, large effects, over 10%, were observed in sodium void reactivity and sample Doppler reactivity. The former resulted from several factors, while the latter was due to an accurate treatment of a resonance interaction effect between Doppler sample and core fuel.

In the previous study, the effect had been evaluated in power reactor cores. The effect included an effect of correction of weighting spectrum because JFS-3-J3.2, which had been made with the incorrect weighting spectrum, was used in the evaluation. In the present study, JFS-3-J3.2R, which had been made with the correct weighting spectrum, was used. It was confirmed that the effect of development of reactor constant in power reactor was not as large as that in critical assembly.

* Reactor Physics Research Group, System Engineering Technology Division,
O-arai Engineering Center, JNC

目次

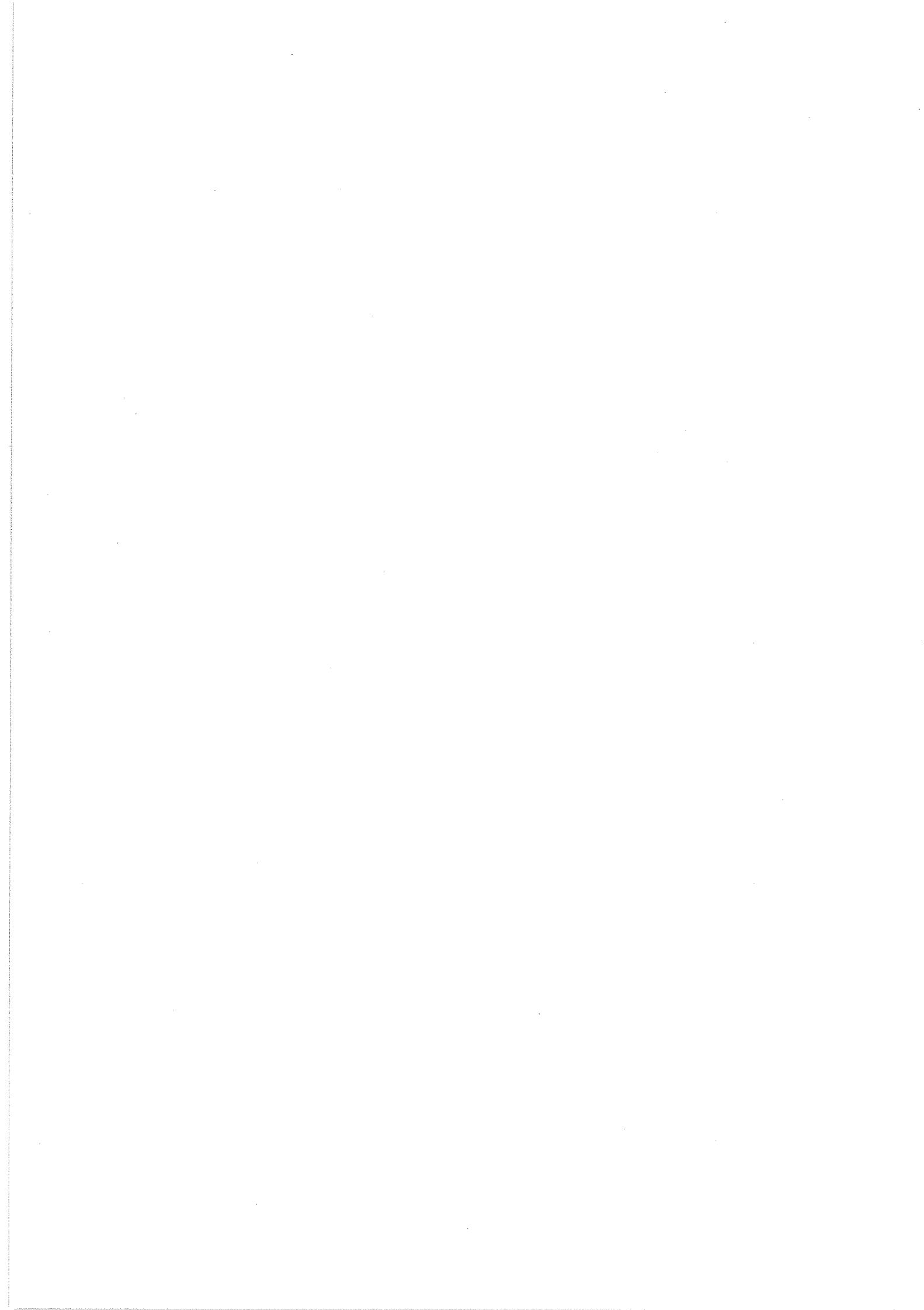
第1章	緒言.....	1
第2章	JUPITER 臨界実験解析における次世代炉定数効果のメカニズム.....	2
2.1	JFS の概要.....	2
2.2	次世代炉定数効果の概略.....	2
2.3	解析結果.....	3
2.4	結果の考察.....	4
2.4.1	臨界性.....	4
2.4.2	Na ボイド反応度.....	4
2.4.3	サンプルドップラー反応度.....	5
2.4.4	実機炉心設計への次世代炉定数効果の反映.....	6
第3章	実機炉心における次世代炉定数効果.....	9
3.1	次世代炉定数効果の評価.....	9
3.2	結果の考察.....	9
第4章	炉定数作成時に用いる重みスペクトルの核特性への影響評価.....	15
4.1	はじめに.....	15
4.2	評価結果.....	15
4.3	まとめ.....	16
第5章	TIMS コードにおける散乱物質質量数の核特性への影響評価.....	19
5.1	はじめに.....	19
5.2	評価結果.....	19
5.3	まとめ.....	20
第6章	結言.....	22
謝辞.....		23
参考文献.....		24

表リスト

- 表 2.1 各核特性における次世代炉定数効果
- 表 2.2 サブグループパラメータを作成したエネルギー領域
- 表 2.3 東捻の方法及びサブグループ法により得られた非均質効果 (ZPPR-9)
- 表 2.4 サンプルドップラー反応度の解析結果
- 表 3.1 実機炉心における次世代炉定数効果
- 表 4.1 70群炉定数による解析結果
- 表 4.2 175群炉定数による解析結果
- 表 4.3 175群炉定数+超微細群による解析結果
- 表 4.4 群構造詳細化の効果
- 表 5.1 TIMS コードにおける入力質量数が核特性解析値に与える影響

図リスト

- 図 2.1 随伴中性子スペクトルの比較
- 図 3.1 中性子スペクトルの比較
- 図 3.2 随伴中性子スペクトルの比較
- 図 3.3 HeTriso 炉心の臨界性における超微細群効果
- 図 3.4 HePin 炉心の臨界性における超微細群効果
- 図 3.5 冷却材ボイド（減圧）反応度における各項の比率
- 図 3.6 PbBi 炉心のドップラー反応度捕獲項のエネルギー成分
- 図 3.7 NaMOX 炉心のドップラー反応度捕獲項のエネルギー成分
- 図 4.1 各炉型における衝突密度スペクトル



1 緒言

我が国では、評価済み核データライブラリを処理して作成された群定数セット、JAERI Fast Set (JFS) を高速炉の核計算に使用しており、豊富な経験を蓄積している。しかし近年、コスト削減および安全係数不確かさ縮小のために核設計精度の向上が要請されているなかで、JFS の潜在的な問題点がいくつか指摘され始めている。

第1に、共鳴エネルギー領域の取扱いに近似が導入される点が挙げられる。JFS を用いた格子計算では、共鳴核種の自己遮蔽効果を考慮する際に、着目核種以外の核種の断面積を群内で一定値と仮定する。従って、その核種の断面積が共鳴構造を有している場合は、核種間の共鳴干渉効果が無視されることになる。

第2に、炉定数作成時に用いられる縮約重みスペクトルの任意性が存在する点である。JFS は重みスペクトルとして原型炉級高速炉心（中型 Na 冷却 MOX 燃料炉心）の衝突密度スペクトルを用いて作成されている。従って、JFS をその重みスペクトルとそれほど違いのないスペクトルを有する炉心の解析に適用するのであれば大きな問題はない。しかし、現在進行中の実用化戦略調査研究 (F/S) においては、中型 Na 冷却 MOX 燃料炉と大きくスペクトルの異なる炉が検討されており、それらの核計算に JFS を用いる場合には、縮約重みスペクトルと解析体系のスペクトルの不整合による誤差が生じることが懸念される。

現在、これらの JFS の欠点を克服するために、核燃料サイクル開発機構では「次世代炉定数システム」を開発している。このシステムは、より細かい群構造を有する基本炉定数（将来的に 900 群程度を想定）に加えて、共鳴エネルギー領域に対しての超微細群炉定数（10 万群程度で、個々の共鳴ピークを正確に表現できる）を併せもち、これを解析に適用することで前述の JFS の欠点は解消される見込みである。これまで、プロトタイプの次世代炉定数システムを、いくつかの臨界実験解析や F/S で設計した実機炉心に対して適用⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾し、炉定数高度化の効果を定量的に把握している。

本報告書では、その効果のメカニズムを定性的に把握することを目的とする。第2章では、JUPITER 臨界実験解析における炉定数高度化の効果のメカニズムを考察し、第3章では実機炉心における次世代炉定数効果の評価、およびその考察を行う。また、第4章で炉定数作成時の重みスペクトルに焦点を絞った検討を、第5章では補足として炉定数作成コードでユーザーが行う入力値の依存性についての評価を行い、第6章でこれらをまとめることとする。

2 JUPITER 臨界実験解析における次世代炉定数効果のメカニズム

2.1 JFS の概要

JFS は、日本原子力研究所で開発された高速炉用炉定数セットであり、無限希釈断面積、散乱マトリクス及び自己遮蔽因子を内蔵した Bondarenko 型のものである。最近、JENDL-3.2に基づくものとして JFS-3-J3.2R⁽⁴⁾ が公開されており、最新の評価済み核データライブラリ JENDL-3.3 に対応する JFS-3-J3.3 も、近いうちに原研より公開される予定である。

JFS は炉定数作成コードである NJOY コード⁽⁵⁾、TIMS コード⁽⁶⁾を用いて作成される。

NJOY コードは軽核および軽中重核と、重核の滑らかなエネルギー領域（非分離共鳴領域よりも高いエネルギー領域）の処理を担当しており、共鳴による中性子スペクトルのひずみは NR 近似を用いて評価される。NR 近似のもとで、中性子エネルギースペクトルは次式で表現される。

$$\phi(E) = \frac{C(E)}{\Sigma_t(E)} \quad (1)$$

$C(E)$ は体系のマクロ的なスペクトルであり、JFS では原型炉級高速炉心（すなわち Na 冷却 MOX 燃料炉心）の衝突密度スペクトルを用いている。

一方、重核の共鳴領域の処理に関しては TIMS コードが用いられる。TIMS コードは非分離共鳴領域においてはモンテカルロ法を用いて擬似的に共鳴を作成し、分離共鳴領域と同様の扱いとしたうえで、超微細群の減速方程式を解いて直接中性子スペクトルを求める。NJOY コードでも非分離共鳴領域の取り扱いは可能であるが、TIMS コードはより厳密に取り扱えるという位置付けとなっている。

2.2 次世代炉定数効果の概略

前章で概略的に述べた、JFS から次世代炉定数システムに炉定数を高度化することの効果（以下、次世代炉定数効果）として考えられるものを以下に列挙する。

- 共鳴自己遮蔽効果の評価で、着目核種以外の核種の断面積形状を正確に考慮することができる。すなわち共鳴干渉効果をとりいれた実効断面積を作成することができる（以下、共鳴干渉効果）。
- 炉定数を作成する際に用いる縮約スペクトルの依存性を排除することができる（以下、重みスペクトルに関する効果）。JFS では Na 冷却 MOX 燃料炉心（以下、NaMOX 炉心）の燃料領域における衝突密度スペクトルを用いているため、他の炉心や、同じ NaMOX 炉心といえども燃料領域とスペクトルが異なると考えられるブランケット領域やボイド化領域などで、誤差が生じる可能性がある。
- 非均質格子計算では東捨の方法⁽⁷⁾を用いて自己遮蔽効果を評価しているが、最近の検討で東捨の方法が誤差を拡大させるケースがあることが報告されている⁽⁸⁾。次世代炉定数システムでは共鳴領域において超微細群計算により直接中性子スペクトル

を計算するため、東捻の方法に関わる誤差を排除することができる（以下、東捻法の誤差解消効果）。

- 基本炉定数の群構造を詳細化することで、幅の広い共鳴に対して、格子計算レベルでしかその構造を考慮できなかったものが、体系計算で考慮することが可能となる。例えば構造材核種の共鳴のウインドウ構造に関する情報は JFS では体系計算に反映されることはなかったが、次世代炉定数システムではそれが可能となる。

次世代炉定数効果は大まかに、基本炉定数の群構造を詳細化した効果（以下、詳細群効果）と共鳴領域を厳密に解く効果（以下、超微細群効果）に分けることができる。詳細群効果は上記の 2、4 点目、後者の効果は 1、2、3 点目の効果からなる。詳細群効果は、そのメカニズムを把握することが難しいため、本章では超微細群効果のメカニズム解明に重きを置いて議論を進めることとする。

2.3 解析結果

解析の対象として、JUPITER 臨界実験の中から、均質炉心 (ZPPR-9)、径方向非均質炉心 (ZPPR-13A)、軸方向非均質炉心 (ZPPR-17A) を選定した。体系モデルは 2 次元 RZ モデルを用いて、拡散計算により核特性値（臨界性、Na ボイド反応度、サンプルドップラー反応度）を算出した。格子モデルは均質、非均質、両方で計算を行った。本報告書では次世代炉定数効果のメカニズムの把握が目的であるため、核特性値の変化にのみ着目した。使用したライブラリは JFS-3-J3.2R および JENDL-3.2 に基づく次世代炉定数である。次世代炉定数の基本炉定数は VITAMIN-J175 群構造のものを使用した。

解析結果を表 2.1 に示す。超微細群効果は従来の JFS-3-J3.2R を使用して得た結果と JFS-3-J3.2R に加えて 41keV 以下に超微細群計算を適用して得た結果の比較、詳細群効果は JFS-3-J3.2R と超微細群計算によって得た結果と、175 群炉定数と超微細群計算によつて得た結果の比較により得た。臨界性については差を、反応度については比を、それぞれ効果として定義した。臨界性は両効果で最大 0.1%dk を超える程度と、それほど大きいものではない。一方、Na ボイド反応度、サンプルドップラー反応度では、超微細群効果が 10% 程度と大きく現れており、そのメカニズムの把握が非常に重要となる。

超微細群効果は前述の通りいくつかの要因に分類され、それらを分離して評価する必要がある。そのうち、東捻法の誤差解消効果については、格子計算手法にサブグループ法を適用することで、その定量的評価が可能である。サブグループ法計算システムは最近になりサイクル機構で部分的に整備された⁽⁸⁾ため、それを用いて東捻の方法が核特性値にどの程度の誤差を生じさせているかを評価した。サブグループ法を適用した核種は U-238、Pu-239、Pu-240、Fe、Na、Ni、Cr の 7 核種である。パラメータの作成を行ったエネルギー領域を表 2.2 に示す。なお、今回用いたサブグループパラメータにはパラメータ作成誤差が存在するため、単純に東捻の方法による解析値と比較することは難しい。そこで、均質格子、非均質格子とともに、JFS およびサブグループパラメータを用いて核特性値をそれぞれ計算し、非均質補正値として両手法を比較することとした。また、現状のサブグループ法計算システムの制約により、バックリングはゼロ、Bonoist の異方性拡散係数は中性子束重みの全断面積より計算した。ZPPR-9 の臨界性と Na ボイド反応度に関し

て計算を行った。結果を表 2.3 に示す。

2.4 結果の考察

2.4.1 臨界性

表 2.1 より、超微細群効果は最大で 0.1%dk 程度現れており、非均質格子モデルの方が均質モデルに比べて正の効果となっている。この格子モデルによる効果の違いは、非均質格子モデルにおける超微細群効果に東捻法の誤差解消効果が含まれていることによるものである。表 2.3 からは、サブグループ法により得られた非均質効果が従来の東捻の方法のものと比べて 0.1%dk 程度大きいことが示されており、東捻の方法は実効増倍率を過少評価していることが分かる。それは、ZPPR-9 における非均質格子モデルの超微細群効果が均質格子モデルのそれと比べ大きくなっているその程度 (0.08%dk) が、表 2.3 で示された格子計算手法の違いの程度とおおむね一致することから裏付けられる。これらのことから、超微細群効果のうち、共鳴干渉効果と重みスペクトルに関する効果は、均質、非均質格子モデル両方で同様に現れるということが予測される。

一方、詳細群効果については、その現れ方が格子モデルによりわずかに異なっているが、最大でも 0.1%dk 程度である。

超微細群効果と詳細群効果を足し合わせた次世代炉定数効果は ZPPR-9、ZPPR-17A では 0.2%dk 程度、ZPPR-13A では 0.1%弱程度となる。

2.4.2 Na ボイド反応度

表 2.1 より、超微細群効果が大きく現れており、ZPPR-9 のボイドステップ 6 では 8% にまで達している。この効果は、Na ボイド反応度の非漏洩項に現れたものが、漏洩項との相殺によりトータルの反応度として拡大されて現れたものである。非漏洩項に関して要因分析をしたところ、散乱成分での変化が主であることが分かった。摂動論における反応度の g 群の散乱成分 ρ^g は次の式で計算される。

$$\rho^g = \frac{1}{I_p} \sum_{g'} \phi^{g*} (\psi^{g'} - \psi^g) \delta \Sigma_s^{g \rightarrow g'} \quad (2)$$

式中の記号の説明は省略するが、中性子スペクトル、随伴中性子スペクトルのエネルギーに対する勾配、散乱断面積の変化の積が摂動反応度の散乱成分となる。詳細な検討の結果、この散乱成分に現れる超微細群効果は、随伴中性子スペクトルの形状の変化を介して現れることが分かった。随伴中性子スペクトルを図 2.1 に示すが、約 10keV から下のエネルギー領域で、超微細群効果によりスペクトルの形状が変化していることが分かる。これらのことは文献 (2) でも同様に見られている。

均質、非均質格子で超微細群効果の現れ方が臨界性と同様に異なっている (ZPPR-9 のボイドステップ 6 について、超微細群効果は均質格子モデルでは 4% 程度に対して非均質格子モデルでは 8% 程度)。この原因としてまず挙げられるのが、両モデル間で非漏洩項と漏洩項の相殺度合いが異なる点である。非均質格子モデルでは、中性子のストリーミング効果を扱うことで、均質モデルに比べ漏洩項を大きく評価するため、非漏洩項の変化がトータルの反応度の変化により大きく伝播される。従って、非均質格子モデルでは超微細

群効果が大きくなっている。また、非漏洩項における超微細群効果自体も1%程度異なっているが、これは東捻法の誤差解消効果が非均質格子モデルには含まれるからである。表2.3より、サブグループ法は東捻の方法に比べて1%程度非漏洩項を小さく評価しており、非均質格子における超微細群効果はその分（東捻法の誤差解消効果の分）、均質格子よりも大きくなっている。

また表2.1より、詳細群効果は逆に漏洩項に現れているが、超微細群効果ほど大きなものではないことが分かる。

2.4.3 サンプルドップラー反応度

サンプルドップラー反応度は、炉中心に温度の異なるドップラーサンプル (UO_2) を交互に挿入した際に生じる反応度である。サンプルは炉心燃料中に設置されるため、その実効断面積を計算する際には炉心燃料中に含まれる U-238 からの自己遮蔽効果への寄与を取り入れなければならない。しかし、炉心燃料とサンプルの温度が異なるため、JFS を用いた解析では孤立系として評価するしか方法がなかった。

次世代炉定数システムでは、サンプルと炉心燃料の温度の違いを考慮した計算が可能である。ここで、以下のモデルを設定して反応度を計算した。

- 1、JFSによる孤立円筒モデル
- 2、JFSによるスーパーセルモデル（サンプルを炉心燃料で巻いたモデル）。ただし、サンプル昇温時（1000K）の炉心燃料温度を1000Kとした（実際は300K）。これにより東捻の方法の導入が可能となる
- 3、次世代炉定数システム（基本炉定数は70群）によるスーパーセルモデル。サンプル昇温時の炉心燃料温度は1000K
- 4、次世代炉定数システム（基本炉定数は70群）によるスーパーセルモデル。サンプル昇温時の炉心燃料温度は300K
- 5、4、の条件に加えて、すべての格子に対して次世代炉定数システムを適用（1から4ではサンプル以外の格子はJFSで実効断面積を作成している）

これらの結果より、孤立円筒モデルからスーパーセルモデルにした効果（1と2の比）、超微細群にしたことによる効果と東捻の方法の近似を排除した効果（2と3の比）、サンプルと炉心燃料の温度が異なることにより生じる共鳴干渉を考慮する効果（3と4の比）、サンプル以外の格子に次世代炉定数システムを適用したことにより、サンプル位置での中性子束場、随伴中性子束場が変化したことによる効果（4と5の比）が分かる。結果を表2.4に示す。なお、表中の右の欄には、ひとつ上のケースに対する反応度の比を示す。これより、サンプルと炉心燃料の温度の違いにより生じる U-238 の共鳴干渉効果がもっとも大きく、4%程度あることが分かる。なお、詳細群効果は無視できる程度であった。

以上のように、サンプルドップラー反応度における超微細群効果は、温度の異なる炉心燃料中に設置されたドップラーサンプルの実効断面積をより厳密に作成することによる効果である。これは、サンプルドップラー反応度特有の効果であるといえる。

2.4.4 実機炉心設計への次世代炉定数効果の反映

これまで、JUPITER 臨界実験解析における次世代炉定数効果のメカニズムの解明を試みてきた。その結果、以下のことが分かった。

- 臨界性においては、超微細群効果のうち共鳴干渉効果と重みに関わる効果は格子モデルによらない。また、詳細群効果は格子モデルによってわずかに異なる。
- Na ボイド反応度においても、非漏洩項において、超微細群効果のうち共鳴干渉効果と重みに関わる効果は格子モデルによらない。
- Na ボイド反応度に見られた大きい超微細群効果は、非漏洩項に現れた効果が漏洩項との相殺により拡大されて現れたものである。
- サンプルドップラー反応度に見られた大きい超微細群効果は、サンプルドップラー反応度解析に特有に現れるものである。

これらのことから、実機炉心における次世代炉定数効果は、均質格子モデルで大まかに評価することが可能であることが分かった。ただし、詳細群効果が格子モデルによりわずかに異なること、及び用いた非均質格子計算手法自体が核特性値に誤差を生じさせる場合は次世代炉定数効果を非均質格子モデルベースで考慮することによりその誤差を解消することが可能となることから、より厳密に次世代炉定数効果を考慮する場合は非均質格子モデルにて評価することが望ましい。

表 2.1 各核特性における次世代炉定数効果

臨界性	格子モデル	超微細群効果(%dk)			詳細群効果(%dk)		
ZPPR-9	均質	0.04			0.00		
	非均質	0.12			0.07		
ZPPR-13A	均質	-0.01			-0.09		
	非均質	0.08			-0.01		
ZPPR-17A	非均質	0.14			0.06		

Naボイド反応度	格子モデル	ボイドステップ	超微細群効果			詳細群効果		
			non-L	L	Total	non-L	L	Total
ZPPR-9	Homo	Step 6	0.980	1.005	0.965	1.003	1.019	0.994
	Hetero	Step 5	0.968	1.001	0.940	1.004	1.009	1.000
	Hetero	Step 6	0.970	1.001	0.918	1.004	1.008	0.998
ZPPR-13A	Hetero	Step 3	0.985	1.009	0.967	1.009	1.029	0.994

サンプルドップラー反応度	超微細群効果	詳細群効果
ZPPR-9 (300K->1000K)	1.090	1.000

*Na ボイド反応度における「non-L」「L」はそれぞれ非漏洩項、漏洩項を示す。

表 2.2 サブグループパラメータを作成したエネルギー領域

	エネルギー群上限	エネルギー領域上限
U-238	22	52.475 (keV)
Pu-239	29	9.1188 (keV)
Pu-240	23	40.868 (keV)
Fe	7	2.2313 (MeV)
Cr	7	2.2313 (MeV)
Ni	7	2.2313 (MeV)
Na	7	2.2313 (MeV)

*一部のエネルギー群でパラメータが得られなかった反応がある。

表 2.3 東捻の方法及びサブグループ法により得られた非均質効果 (ZPPR-9)

臨界性	東捻の方法	サブグループ法	差(反応度は比)
	0.01076	0.01145	0.00069
Naボイド反応度 (Void step 5)	Non-L	0.915	0.902
	L	1.582	1.582
	Total	0.713	0.700
Naボイド反応度 (Void step 6)	Non-L	0.915	0.901
	L	1.615	1.616
	Total	0.608	0.596

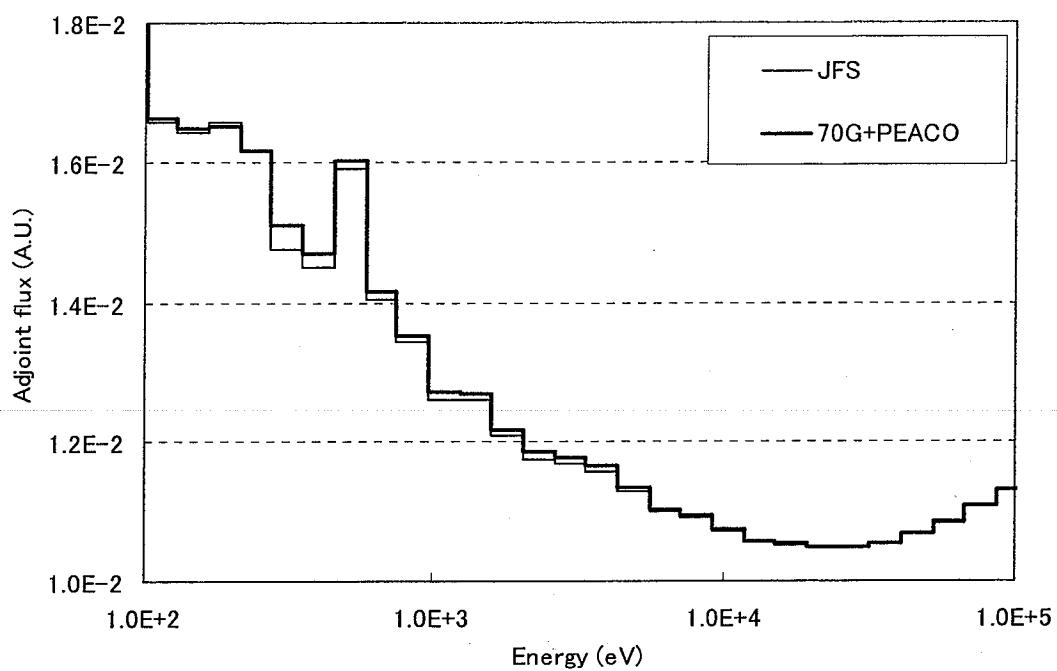


図 2.1 随伴中性子スペクトルの比較

表 2.4 サンプルドップラー反応度の解析結果

ケース	反応度 (dk/kk')	効果	備考
1	-2.889E-06		
2	-2.925E-06	1.012	孤立円筒→スーパーセル
3	-2.976E-06	1.017	東捨法→超微細群計算
4	-3.098E-06	1.041	異なる温度間の共鳴干渉効果
5	-3.156E-06	1.019	他の領域における超微細群効果

3 実機炉心における次世代炉定数効果

3.1 次世代炉定数効果の評価

これまで、F/S で設計された実機炉心において次世代炉定数効果が評価されている⁽³⁾。しかしこの評価においては、JFS として JFS-3-J3.2 が使用されている。JFS-3-J3.2 はその作成時に用いられた重みスペクトルに誤りがあったため、評価された次世代炉定数効果には「炉定数作成時の重みスペクトルの誤りを訂正した効果」が含まれていることになる（これについては文献(9)(10)に詳しい）。本報告書では、訂正した重みスペクトルを用いて作成された JFS-3-J3.2R を使用して、炉定数高度化の効果としての次世代炉定数効果の評価を再度行った。解析の対象とした実機炉心は、文献(3)のなかから、

- ナトリウム冷却酸化物燃料大型炉心（以下、NaMOX 炉心）
- 鉛ビスマス冷却窒化物燃料中型炉心（以下、PbBi 炉心）
- ヘリウム冷却密封ピン型燃料大型炉心（平成 12 年度設計、以下、HePin 炉心）
- ヘリウム冷却被覆粒子型燃料大型炉心（以下、HeTiso 炉心）

の 4 炉心（初装荷時の組成）とした。本報告書では、次世代炉定数効果の程度を把握するという目的から、格子モデルは均質とした。評価対象とした核特性は、臨界性、冷却材ボイド反応度（ガス冷却炉の場合は冷却材減圧反応度）、ドップラー反応度である。なお、計算は拡散理論をベースに行った。得られた結果を表 3.1 に示す。

文献(3)で求められた次世代炉定数効果は、臨界性で 0.5%dk/k 程度、ドップラー反応度で 15% 程度と非常に大きいものであったが、今回の結果ではそのように大きな効果が見られなかった。従って、文献(3)における次世代炉定数効果は、主に JFS-3-J3.2 の重みスペクトルの訂正効果に由来していることが明らかとなった。

3.2 結果の考察

次世代炉定数効果のうち詳細群効果は、主に重みスペクトルに関する効果に主要因があると考えられ、この点の検討は第 4 章で行うこととする。

はじめに臨界性に着目する。超微細群効果は実効断面積を介して積分核特性に反映される。超微細群効果による実効断面積の変化が臨界性に与える影響の大きさは、摂動論から、その実効断面積のエネルギー一群における中性子束、随伴中性子束の大きさに比例する。超微細群効果は PEACO ルーチンを適用する共鳴エネルギー領域で現れることから、中性子スペクトル、随伴中性子スペクトルが軟らかくなるほど、効果が大きくなるといえる。そこで、本報告書で取り上げた 4 種の実機炉心と JUPITER 実験の ZPPR-9 炉心の燃料領域における中性子スペクトル、随伴中性子スペクトルをそれぞれ図 3.1、図 3.2 に示す（ただし、実機に関しては平衡初期組成のものである）。図より、ZPPR-9 炉心、HeTiso 炉心は両スペクトルともに共鳴エネルギー領域でそのレベルが高く超微細群効果が現れやすいといえ、HePin 炉心はその逆となることが分かる。超微細群効果を摂動と考えたときの摂動反応度の各成分のエネルギー分布を、HeTiso 炉心、HePin 炉心について

図 3.3、図 3.4 にそれぞれ示す。HeTriso 炉心においては、各反応断面積は超微細群効果により変化を受け反応度を生じているが、それが相殺することによりトータルとしての反応度が小さくなっていることが分かる。また、HePin 炉心では上述の理由から、各反応、各エネルギー群について超微細群効果は小さい。

冷却材ボイド（減圧）反応度は、以下の理由から実効断面積の変化による影響が大きく現れやすい。まず、非漏洩項と漏洩項がお互い相殺し合い、その差で反応度が決まるという点である。従って、散乱断面積、捕獲断面積の変化が非漏洩項に影響を与えた場合、トータルとしての反応度には拡大されて伝播されることになる。図 3.5 には各炉心の非漏洩項と漏洩項の絶対値の割合を示す（各炉心について、非漏洩項を 1 として規格化している）。ZPPR-9（ボイドステップ 6）については、均質、非均質格子モデル両方の値を示した。なお、文献(11)では、ガス冷却炉の減圧反応度の拡散理論による評価では漏洩項を過大評価することが示してあるため、輸送理論により得られたもの（文献(11)より引用）も併せて示した。ZPPR-9 や PbBi 炉心のように両項の相殺の度合いが大きい炉心では、反応度における超微細群効果が生じやすくなる。たとえば非漏洩項が 1% 変化した場合、NaMOX 炉心ではトータルの反応度が 2% 程度変化するのに対し、相殺度合いの大きい PbBi 炉心では 5% も変化することになる。それが PbBi 炉心に大きく次世代炉定数効果が現れている理由である。また、非漏洩項のうちでもっとも支配的である散乱成分は、(2) 式で示したように随伴中性子スペクトルのエネルギーについての勾配に比例している。従って、断面積変化が随伴中性子スペクトルの形状に影響を与えると、反応度への大きなインパクトとなって現れる。

ドップラー反応度における超微細群効果を、PbBi 炉心と NaMOX 炉心について図 3.6、図 3.7 にそれぞれ示す。この図より、各エネルギー群における各項の変化に系統性は見られず、それらが相殺しあっていることが分かる。

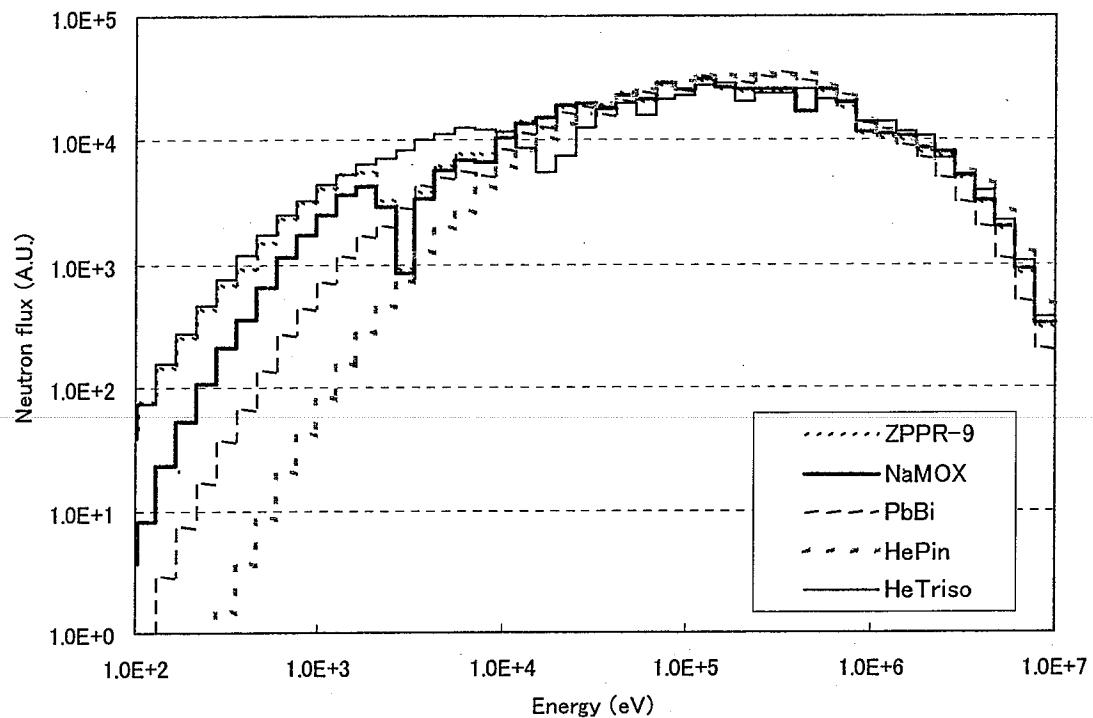


図 3.1 中性子スペクトルの比較

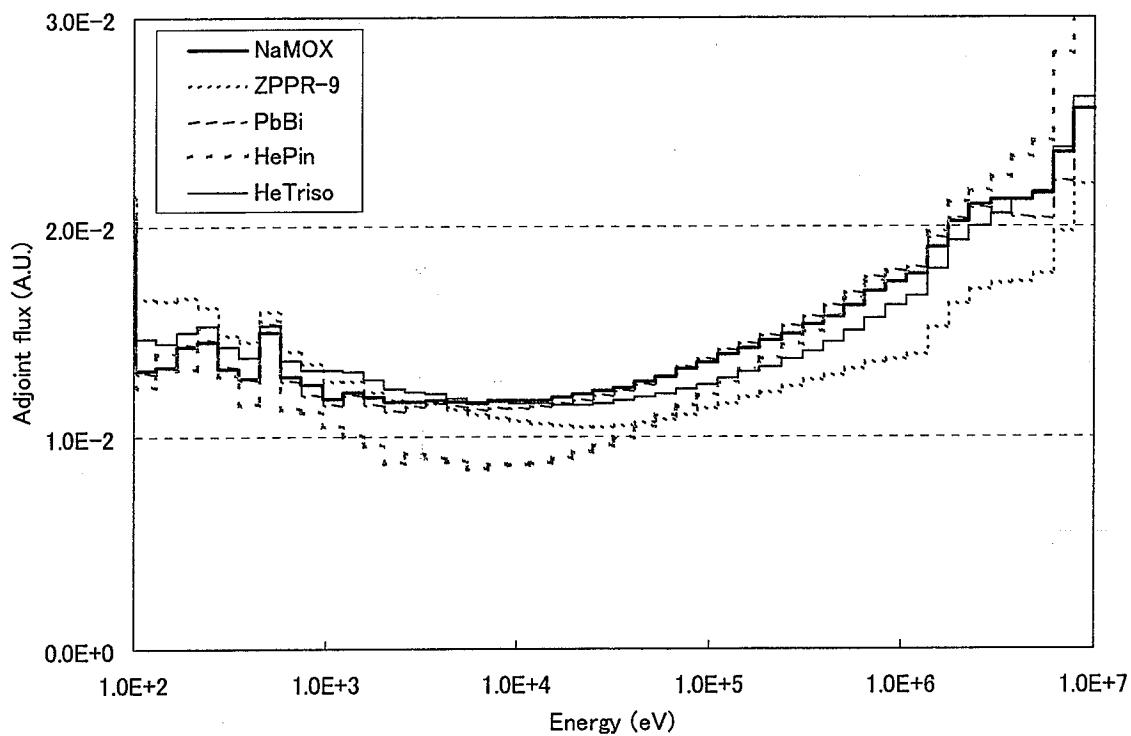


図 3.2 随伴中性子スペクトルの比較

表 3.1 実機炉心における次世代炉定数効果

		70群	70群+超微細群	超微細群効果	175群+超微細群	詳細群効果
NaMOX	臨界性	1.07137	1.07089	-0.00048	1.07081	-0.00008
	冷却材ボイド反応度	2.05E-02	2.05E-02	1.00	2.01E-02	0.98
	ドップラー反応度	-2.03E-03	-1.99E-03	0.98	-2.00E-03	1.01
PbBi	臨界性	1.05409	1.05320	-0.00089	1.05271	-0.00049
	冷却材ボイド反応度	1.07E-02	1.12E-02	1.05	1.16E-02	1.04
	ドップラー反応度	-1.25E-03	-1.29E-03	1.03	-1.30E-03	1.01
HePin	臨界性	1.07308	1.07305	-0.00003	1.07493	0.00188
	冷却材減圧反応度	-2.35E-03	-2.35E-03	1.00	-2.34E-03	1.00
	ドップラー反応度	-1.10E-03	-1.10E-03	1.00	-1.10E-03	1.00
HeTriso	臨界性	0.98934	0.98957	0.00023	0.99127	0.00170
	冷却材減圧反応度	2.00E-03	1.99E-03	1.00	1.99E-03	1.00
	ドップラー反応度	-5.36E-03	-5.43E-03	1.01	-5.43E-03	1.00
ZPPR-9	臨界性	0.98494	0.98536	0.00042	0.98535	-0.00001
	冷却材ボイド反応度	1.52E-03	1.47E-03	0.97	1.46E-03	0.99

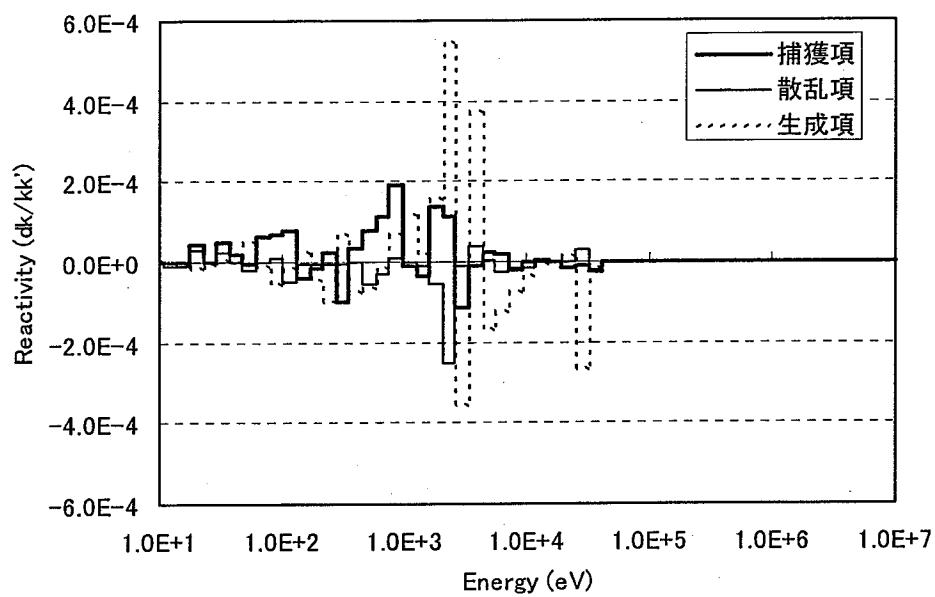


図 3.3 HeTriso 炉心の臨界性における超微細群効果

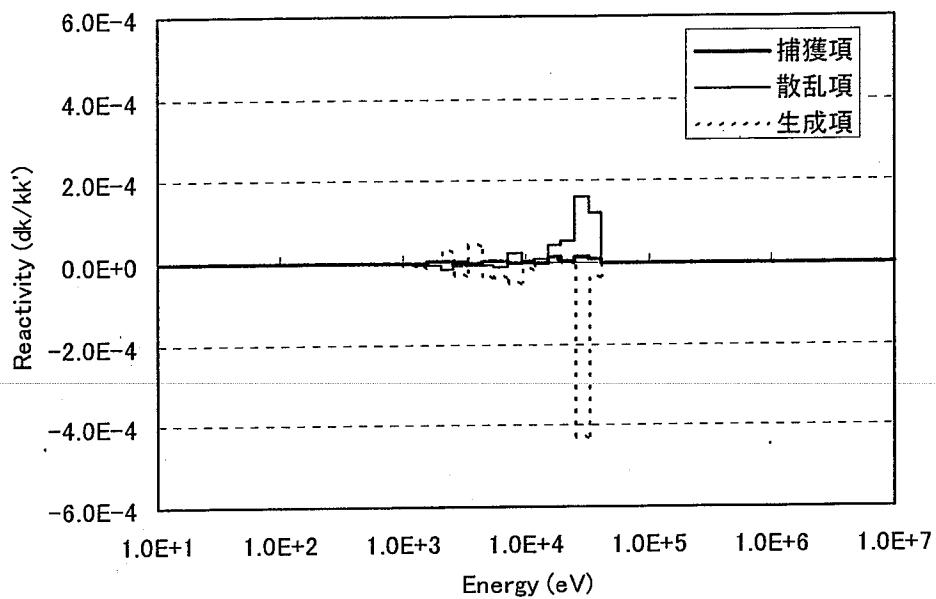


図 3.4 HePin 炉心の臨界性における超微細群効果

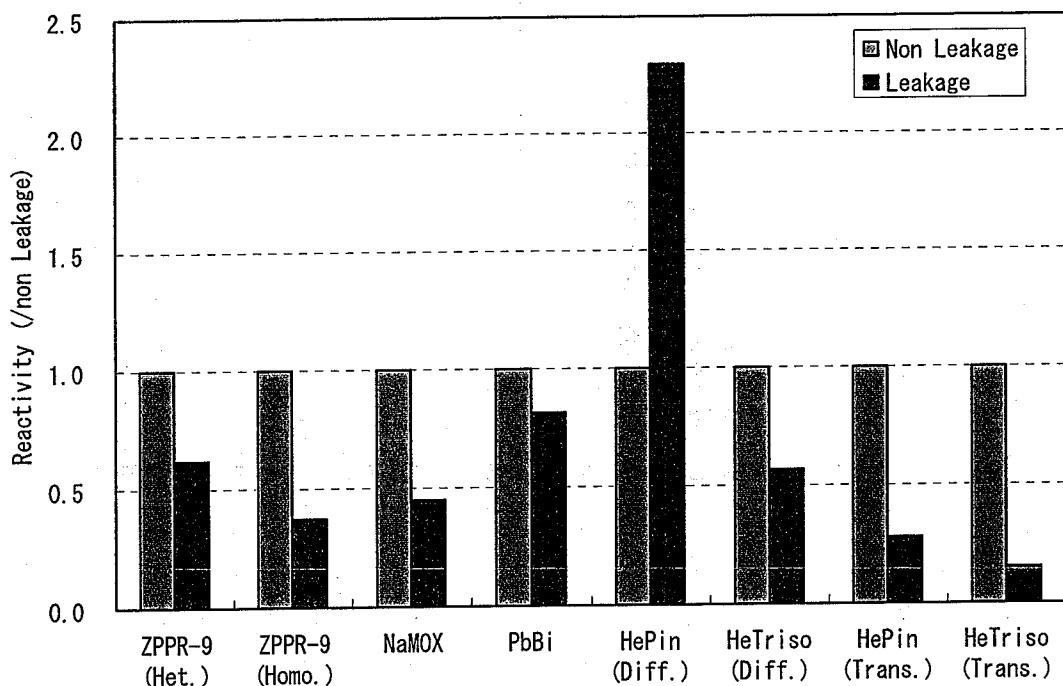


図 3.5 冷却材ボイド（減圧）反応度における各項の比率

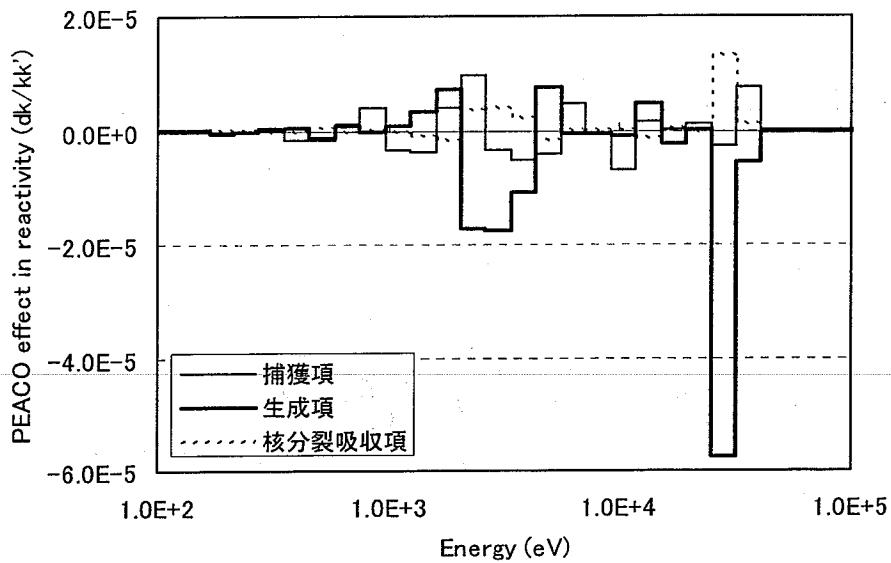


図 3.6 PbBi 炉心のドップラー反応度における超微細群効果

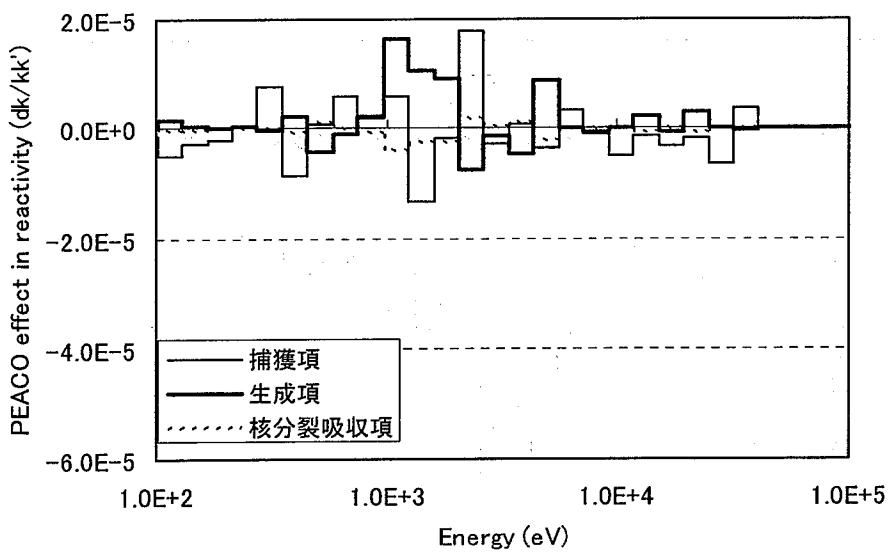


図 3.7 NaMOX 炉心のドップラー反応度における超微細群効果

4 炉定数作成時に用いる重みスペクトルの核特性への影響評価

4.1 はじめに

前章では実機における次世代炉定数効果の評価を行った。その結果、臨界性、冷却材ボイド（減圧）反応度、ドップラー反応度において、（一部のケースを除いて）大きな次世代炉定数効果は見られなかった。ただし、前章で評価した次世代炉定数効果はいくつかの効果が複合するものであるため、そのおのおのの効果が偶然打ち消しあっている可能性も否定できない。本章では、次世代炉定数効果のうち、炉定数作成時の重みスペクトルの影響が排除される効果に関して定量的な評価を行う。また、本報告で用いているプロトタイプ次世代炉定数システム（基本炉定数が VITAMIN-J 型 175 群構造）が、重みに関する効果を考慮するうえで十分な群構造であるかを評価する。

4.2 評価結果

はじめに、448 群構造（40.868keV から 20MeV までをレサジー幅 0.0155 の詳細エネルギー一群に等分割、40.868keV 以下は JFS と同様にレサジー幅 0.25 で等分割）の炉定数を NJOY コードにより作成した。その際の重みは $1/E + \text{核分裂スペクトル}$ とした（群構造が細かいため、重みスペクトルの依存性はないものと考えられる）。その 448 群炉定数を基本炉定数とした次世代炉定数システムにより（すなわち 40.868keV 以下は超微細群計算）、9598 群の衝突密度スペクトルを計算することができる。なお、この超微細群衝突密度スペクトルはヒストグラム構造となるが、NJOY の入力では線形内挿とした。群構造が詳細であるためこの近似は妥当であると考える。このような方法で、NaMOX 炉心、PbBi 炉心、HePin 炉心、HeTriso 炉心おののの、初装荷状態の燃料領域の均質組成において衝突密度スペクトルを作成した。それらを図 4.1 に示す。そして、それらを用いて NJOY コードにより 4 種類の 70 群炉定数を作成した（重核種に関しては、JFS-3-J3.2R で用いられた TIMS コードによる処理結果を用いた）。

4 種類の 70 群炉定数を用いて、実機 4 炉心の初装荷状態の臨界性、冷却材ボイド（減圧）反応度、ドップラー反応度を求めた（反応度は直接計算により求めた）。結果を表 4.1 に示す。表中の（MAX-MIN）とあるのは、その核特性値がもっとも大きいものと小さいものとの差（反応度は比）をとったものである。表より、70 群炉定数における縮約スペクトルの依存性は、冷却材ボイド（減圧）反応度で最大 4%程度、ドップラー反応度で最大 7%程度であった。JFS は NaMOX 炉心のスペクトルで作成されているため、NaMOX 炉心のスペクトルで作成された炉定数による計算値との差（比）が、従来の JFS を用いた解析手法における縮約スペクトルの不整合がもたらす誤差といえる。その結果、各核特性について大きな違いはみられなかった。これは、NaMOX 炉心の衝突密度スペクトルが図 4.1 から分かるように 4 つのスペクトルの中で中間的な分布をしているため、NaMOX 炉心のスペクトルで作成した炉定数を用いた場合は縮約スペクトルの不整合による誤差が現れにくいことに起因すると考えられる。

前章では次世代炉定数効果を、基本炉定数を VITAMIN-J 型 175 群構造としたプロトタ

イプ次世代炉定数システムによって算出してきた。ところが炉定数の縮約スペクトルの影響がこのプロトタイプ次世代炉定数システムで完全に排除されるかは明確に示されていない。

そのため、超微細群計算を行わないエネルギー領域（41keV以上）のVITAMIN-J型群構造が縮約スペクトルの影響を完全に排除しているかの確認を行った。70群炉定数の作成に用いた4種の衝突密度スペクトルの41keV以下をすべてNaMOX炉心のものとし、その4種のスペクトルでVITAMIN-J型炉定数を作成した。そしてそれを用いて4種の実機炉心に対し同様の解析を行った。結果を表4.2に示す。表より、どの炉定数を用いても臨界性では0.1%以下、反応度では1%以下の違いとなっており、41keV以上ではVITAMIN-J型群構造は縮約スペクトルの影響を排除できるということが明らかとなった。念のため、F/Sにおける次世代炉定数効果を算出した炉定数（ $1/E + \text{核分裂スペクトルを重みとして作成}$ ）とそれぞれの炉心のスペクトルを用いて作成した炉定数を基本炉定数とした（いずれもVITAMIN-J型群構造）次世代炉定数システムにより解析を行った。結果を表4.3に示すが、いずれの炉心も2種類の炉定数で有意な差を示さないことが分かる。

これらの結果より、プロトタイプ次世代炉定数システムにより得られた次世代炉定数効果が、縮約スペクトルの任意性を排除できていることが明らかとなった。

加えて、70群構造から175群構造に群構造を詳細化する効果を把握するため、追加解析を行った。前章で算出した群構造詳細化効果には、縮約スペクトルに関する誤差が低減された効果も含まれていたが、今回の解析では純粋に群構造詳細化の効果を抽出することができる。方法はそれぞれの実機炉心の縮約スペクトルにて70群炉定数、175群炉定数を作成し、それを用いて解析する、というものである。結果を表4.4に示すが、特に大きな効果は見受けられなかった。最終的に次世代炉定数システムは基本炉定数の群数を900群程度まで増加させる予定であるが、この結果から外挿すると、これらの核特性にはそれほど大きなインパクトとはならないことが予想され、群構造詳細化に関しても、プロトタイプ次世代炉定数システムで十分な補正値を算出できるものと考えられる。

4.3 まとめ

次世代炉定数効果における重みに関する効果についての評価を行った。従来の70群構造の炉定数では縮約スペクトルの影響が大きく現れるが、NaMOX炉心の縮約スペクトルで作成した炉定数はそのスペクトルの性格から、他のスペクトルを有する炉心に適用しても核特性評価上大きな相違を生じさせないということが分かった。また、これまで次世代炉定数効果の算出に用いてきたプロトタイプ次世代炉定数システムは、縮約スペクトルの影響を排除するという観点からは十分な群構造であることを示した。

本章では次世代炉定数効果をいくつかの要因に分離して評価したが、そのおのおのの効果自体がそれほど大きなものではないことを明らかにした。

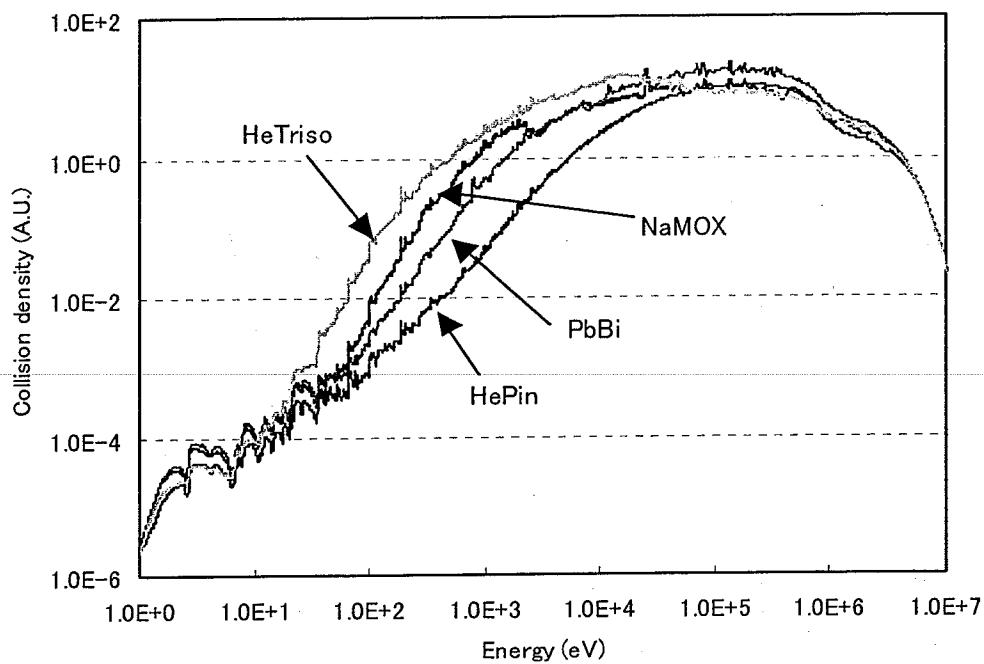


図 4.1 各炉型における衝突密度スペクトル

表 4.1 70 群炉定数による解析結果

解析対象	炉定数作成に用いた重みスペクトル				NaMOX重みに 対する相違	(MAX-MIN)
	NaMOX	PbBi	HePin	HeTriso		
NaMOX (V)	0.07076	1.06974	1.07023	1.07032		0.00102
	-2.05E-02	2.08E-02	2.09E-02	2.08E-02		1.02
	-2.07E-03	-2.07E-03	-1.95E-03	-2.01E-03		1.06
PbBi (V)	1.05346	1.05227	1.05298	1.05229	-0.00119	0.00119
	1.08E-02	1.11E-02	1.09E-02	1.12E-02	1.02	1.04
	-1.25E-03	-1.24E-03	-1.18E-03	-1.26E-03	0.99	1.07
HePin (V)	1.07253	1.07195	1.07273	1.07197	0.00020	0.00077
	-2.35E-03	-2.35E-03	-2.34E-03	-2.36E-03	1.00	1.01
	-1.10E-03	-1.11E-03	-1.08E-03	-1.11E-03	0.98	1.02
HeTriso (V)	0.98860	0.98750	0.98721	0.98844	-0.00016	0.00139
	1.99E-03	1.99E-03	1.99E-03	2.02E-03	1.01	1.02
	-5.37E-03	-5.36E-03	-5.19E-03	-5.36E-03	1.00	1.03

*表中の (V) は冷却材ボイド (減圧) 反応度、(D) はドップラー反応度を示す。

表 4.2 175 群炉定数による解析結果

解析対象	炉定数作成に用いた重みスペクトル				(MAX-MIN)
	Na-MOX	He-Pin	He-Triso	Pb-Bi	
Na-MOX (V) (D)	1.06958	1.06954	1.06959	1.06964	0.00009
	2.03E-02	2.03E-02	2.03E-02	2.03E-02	1.00
	-2.20E-03	-2.20E-03	-2.20E-03	-2.20E-03	1.00
HePin (V) (D)	1.07365	1.07355	1.07359	1.07370	0.00015
	-2.34E-03	-2.34E-03	-2.34E-03	-2.34E-03	1.00
	-1.23E-03	-1.23E-03	-1.23E-03	-1.23E-03	1.00
He-Triso (V) (D)	0.99116	0.99119	0.99119	0.99118	0.00003
	1.99E-03	1.99E-03	1.99E-03	1.98E-03	1.01
	-5.48E-03	-5.49E-03	-5.49E-03	-5.49E-03	1.00
Pb-Bi (V) (D)	1.05245	1.05218	1.05231	1.05257	0.00039
	1.11E-02	1.12E-02	1.12E-02	1.10E-02	1.01
	-1.31E-03	-1.31E-03	-1.31E-03	-1.30E-03	1.00

表 4.3 175 群炉定数+超微細群による解析結果

解析対象	炉定数作成時に用いた重みスペクトル		差(反応度は比)
	解析対象の衝突密度スペクトル	1/E+fission	
Na-MOX (V) (D)	1.07012	1.07037	0.00025
	2.02E-02	2.02E-02	1.00
	-2.04E-03	-2.03E-03	1.00
HePin (V) (D)	1.07473	1.07493	0.00021
	-2.52E-03	-2.53E-03	1.00
	-1.09E-03	-1.11E-03	1.01
He-Triso (V) (D)	0.99005	0.99110	0.00105
	2.00E-03	1.99E-03	1.00
	-5.26E-03	-5.32E-03	1.01
Pb-Bi (V) (D)	1.05277	1.05271	-0.00006
	1.09E-02	1.11E-02	1.02
	-1.21E-03	-1.22E-03	1.01

表 4.4 群構造詳細化の効果

	70群	175群	詳細群効果
NaMOX (V) (D)	1.07053	1.06982	-0.00070
	2.06E-02	2.02E-02	0.98
	-2.16E-03	-2.16E-03	1.00
PbBi (V) (D)	1.05242	1.05271	0.00029
	1.09E-02	1.10E-02	1.01
	-1.32E-03	-1.34E-03	1.01
HePin (V) (D)	1.07230	1.07386	0.00156
	-2.34E-03	-2.34E-03	1.00
	-1.22E-03	-1.22E-03	0.99
HeTriso (V) (D)	0.98970	0.99095	1.00126
	2.00E-03	2.00E-03	1.00
	-5.50E-03	-5.49E-03	1.00

5 TIMS コードにおける散乱物質質量数の核特性への影響評価

5.1 はじめに

JFS は NJOY コードと TIMS コードにより作成されるが、TIMS コードにおける仮想散乱物質の質量数は NaMOX 炉心の中性子減速を模擬するように $A=30$ と固定されている。JFS を適用する炉心が幅広くなっている現在、TIMS コードの質量数の違いが核特性解析値に与える影響を把握しておく必要があることから、本章ではその影響の定量的評価を行った。

5.2 評価結果

解析を行う炉心を、NaMOX 炉心、PbBi 炉心、HePin 炉心、HeTiso 炉心の 4 炉心（初装荷状態）とする。それぞれの炉心における中性子減速を模擬するような散乱物質の質量数は次の式で決定した。

$$\bar{\xi} = \frac{\sum \sigma_{el}^i N^i \xi^i}{\sum \sigma_{el}^i N^i} \quad (3)$$

$$\xi^i = \ln \frac{E}{\alpha E} = 2 \ln \left(\frac{A^i + 1}{A^i - 1} \right) \quad (4)$$

A^i は核種 i の質量数、 N^i は数密度、 σ_{el}^i は 1 群に縮約した弾性散乱断面積をそれぞれ示す。弾性散乱で増加するレサジーの絶対値の平均が $\bar{\xi}$ であり、それに対応する質量数を求めた。求めた組成はいずれの炉心についても内側燃料組成である（ただし、U-238 と Pu-239 を除いた）。その結果、おのおのの炉心において中性子減速を模擬する仮想散乱物質の質量数は、NaMOX 炉心、HePin 炉心では 30、PbBi 炉心では 65、HeTiso 炉心では 23 となった。HeTiso 炉心には構造材中に炭素が多く含まれているため、冷却材が同じである HePin 炉心と比べてより減速されやすい体系となっている。

NaMOX 炉心の衝突密度スペクトルを用いた NJOY コードと、仮想散乱物質の質量数を 3 通りに変えた TIMS コード（R-因子は考慮しない）により、3 種類の炉定数を作成した。そして、臨界性、冷却材ボイド（減圧）反応度、ドップラー反応度を、おのおのの炉心について求めた。結果を表 5.1 に示す。表中の（MAX-MIN）は、核特性値の最大値と最小値の差（反応度は比）をとったものである。結果より、TIMS コードにおける散乱物質の質量数は核特性に有意な差を生じていないことが分かる。なお、中性子スペクトルが軟らかい炉心ほど重核の寄与が大きくなるため、質量数の影響がわずかであるが大きめでている。

縮約される際に用いられる中性子スペクトルのマクロ的なエネルギー分布は、核種の散乱除去断面積に大きく影響を与える。重核種はその質量数が大きいことから散乱除去断面積は構造材核種などに比べて小さくなるため、中性子スペクトルのマクロ的な分布の変化の影響は受けにくい。そのことからも、得られた結果は説明できる（ただし、極端に質量数を大きくした場合は中性子スペクトルのミクロ的な分布も影響を大きく受ける可能性があり、各反応断面積が大きく変化することも考えられる）。

5.3 まとめ

TIMS コードにおける散乱物質の質量数を変えた数種類の炉定数を作成し、質量数の違いが核特性に与える影響を評価した。その結果、その影響は無視できる程度であることが明らかになった。

5.1 TIMS コードにおける入力質量数が核特性解析値に与える影響

	A=23	A=30	A=65	(MAX-MIN)
Na-MOX (V) (D)	1.07175	1.07172	1.07144	0.00031
	2.05E-02	2.05E-02	2.07E-02	1.01
	-1.97E-03	-1.98E-03	-1.98E-03	1.00
HePin (V) (D)	1.07284	1.07288	1.07309	0.00024
	-2.35E-03	-2.35E-03	-2.35E-03	1.00
	-1.08E-03	-1.08E-03	-1.07E-03	1.01
He-Triso (V) (D)	0.99035	0.99020	0.98973	0.00063
	1.96E-03	1.95E-03	1.98E-03	1.01
	-5.28E-03	-5.29E-03	-5.31E-03	1.00
Pb-Bi (V) (D)	1.05420	1.05420	1.05423	0.00003
	1.07E-02	1.07E-02	1.07E-02	1.00
	-1.21E-03	-1.21E-03	-1.21E-03	1.00

6 結言

高速炉核特性解析において、従来の炉定数セット JFS を次世代炉定数システムに高度化した効果の定量的、定性的評価を行った。

はじめに、JUPITER 臨界実験体系における次世代炉定数効果のメカニズムを考察した。その結果、臨界性、Na ボイド反応度における次世代炉定数効果は、共鳴干渉を考慮する効果や、非均質格子計算手法の誤差を排除する効果など、複数の要因が重なったものであることを示した。また、サンプルドップラー反応度においては 10%程度の次世代炉定数効果が見られたが、これは高温のサンプルと常温の炉心燃料との U-238 の共鳴干渉効果を考慮することに起因しており、サンプルドップラー反応度特有の効果であることが分かった。これらの分析より、次世代炉定数効果は均質格子モデルでもある程度の把握が可能であることも示した。

実機炉心に対しても同様に次世代炉定数効果の評価を行った。以前行われた評価では、臨界性、ドップラー反応度で大きな効果が見られたが、今回はそれと比べて小さなものとなつた。従って、以前評価された実機炉心における次世代炉定数効果の主要因は、JFS-3-J3.2 作成時の重みスペクトルが訂正された効果であることが明らかとなった。

次世代炉定数効果のうち、炉定数作成に用いる重みスペクトルの依存性に関する評価を行った。その結果、JFS のように粗い群構造の炉定数では、縮約重みスペクトルの違いが核特性解析値に影響を与えるが、JFS のように NaMOX 炉心のものを使用した場合はそのスペクトルの中間的性格から、核特性値に影響が現れにくいことが分かった。また、基本炉定数を 175 群とした次世代炉定数システムでは重みスペクトルの任意性が排除されることを示した。

加えて、JFS の作成に用いられる TIMS コードにおける、仮想散乱物質質量数の核特性への影響を評価した。その結果、散乱物質の質量数は核特性に有意な影響を与えないことが分かった。

今回、実機炉心における次世代炉定数効果を評価したところ、現在の設計解析の精度と比較して設計値に大きなインパクトを与えるものではないことが分かり、実機解析における JFS の妥当性が確認できた。ただし、この結果がすべての炉型に適用できると断言できるというものではないため、新しい炉心を設計した際には均質格子モデルを用いて次世代炉定数効果を大まかに把握しておくべきと考える（その評価は特に時間を要するものではない）。設計作業の進捗により数%のオーダーの精度を目標とする場合には、非均質格子モデルを用いて厳密に次世代炉定数効果を算出すべきであろう。

謝辞

本報告書の作成において、システム技術開発部中性子工学グループ羽様平副主任研究員には有益な助言を頂くとともに、計算結果に関する議論に時間を割いて頂きました。ここに深い感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 杉野和輝：「次世代炉定数システムを用いた JUPITER 臨界実験解析」、JNC TN9400 2001-091 (2001).
- (2) 羽様平、他：「BFS 臨界実験解析-BFS-62-3A 及び BFS-62-4 炉心の解析-」、JNC TN9400 2002-036(2002).
- (3) 庄野彰、他：「統合炉定数 ADJ2000 の使用に係る炉定数効果の評価」、JNC TN9400 2002-062 (2002).
- (4) 千葉豪、沼田一幸：「JENDL-3.2に基づく高速炉用炉定数 JFS-3-J3.2R の作成」、JNC TN9400 2001-124 (2002).
- (5) R. E. MacFarlane, D. W. Muir : "The NJOY Nuclear Data Processing System, version 91", Los Alamos National Laboratory report LA-12740-M (1994).
- (6) H.Takano, Y.Ishiguro and Y.Matsui : "TIMS-1:A Processing Code for Production of Group Constants of Heavy Resonant Nuclei", JAERI 1267 (1980).
- (7) T. Tone : "A Numerical Study of Heterogeneity Effects in Fast Reactor Critical Assemblies", Journal of Nuclear Science and Technology 12[8], p.467 (1975).
- (8) 千葉豪：「高速炉格子計算手法の比較研究」、JNC TN9400 2002-057 (2002).
- (9) 千葉豪、沼田一幸：「JFS-3-J3.2 の重み関数訂正による核特性への影響評価」、JNC TN9400 2001-109 (2001).
- (10) 千葉豪、他：「高速炉用炉定数 JFS-3-J3.2 の改訂」、日本原子力学会和文論文誌 1[4], p.335 (2002).
- (11) 杉野和輝：「ガス冷却高速炉の炉心核特性の非均質効果・輸送効果の評価」、JNC TN9400 2002-050 (2002).