

統合炉定数 ADJ2000 の使用に係る
炉定数効果の評価
(研究報告)

2002年11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)
2002

2002年11月

統合炉定数 ADJ2000 の使用に係る炉定数効果の評価

(研究報告書)

庄野 彰¹⁾、千葉 豪¹⁾、沼田 一幸²⁾

要 旨

平成13年度の高速増殖炉サイクル実用化戦略調査研究(以下、「実用化戦略調査研究」と記す)の炉心核特性の検討においては、JENDL-3.2ベースの高速炉用70群炉定数JFS-3-J3.2を種々の臨界実験解析結果によって調整した統合炉定数ADJ2000(70群構造、2001年6月に公開)が使用された。ADJ2000を使用して得られる核特性計算値には、JFS-3-J3.2作成時に使用された重み関数(中性子スペクトル)が検討対象炉心の真の値と異なることによる影響(以下、「炉定数効果」と記す)が含まれているので、より確度の高い設計検討を行うためには炉心概念や核特性によって異なる炉定数効果を考慮する必要がある。

本報告書には、実用化戦略調査研究で検討されている下記8種類の高速炉炉心概念について炉定数効果を評価した結果を示す。評価対象とした核特性は、臨界性、燃焼欠損反応度、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、増殖比である。

[炉定数効果を評価した炉心概念]

- ・ナトリウム冷却酸化物燃料炉心(大型及び中型)
- ・ナトリウム冷却金属燃料炉心(中型) ・鉛ビスマス冷却窒化物燃料炉心(中型)
- ・炭酸ガス冷却酸化物燃料炉心(大型) ・ヘリウム冷却被覆粒子型燃料炉心(大型)
- ・ヘリウム冷却密封ピン型燃料炉心(大型、2種類)

本報告書の内容には、原子力システム㈱が核燃料サイクル開発機構(機構担当部課室:システム技術開発部、中性子工学グループ)との契約により実施した業務成果に関するものを含み、核燃料サイクル開発機構が取りまとめたものである。

1): 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

2): 原子力システム㈱

Evaluation of Nuclear Constant Effects Relating to Application of Unified Cross-Section Set ADJ2000

Akira Shono¹⁾, Go Chiba¹⁾, Kazuyuki Numata²⁾

ABSTRACT

The unified cross-section set ADJ2000, which was produced by adjusting 70-energy-grouped JFS-3-J3.2 (JENDL-3.2-based group constant set) using its analysis accuracy on various critical experiments, had been used in JFY2001 for core design studies in the feasibility study on commercialized fast reactor cycle systems. The ADJ2000 was published in June 2001, having 70 energy group structure as well. Calculated values from ADJ2000 would contain errors ("nuclear constant effects") which come from differences of weighting functions (neutron spectra) between that used for processing JFS-3-J3.2 and that of studied cores. In order to obtain more reliable results, the nuclear constant effects have to be corrected.

Accordingly, nuclear constant effects on various fast reactor core concepts relating to application of unified cross-section set ADJ2000 have been evaluated for several nuclear parameters including criticality, burnup reactivity loss, coolant void reactivity (depressurization reactivity in the case of gas-cooled reactor cores), Doppler reactivity and breeding ratio. Studied cores are listed below.

- # Sodium-cooled MOX-fuelled cores (large-size and middle-size)
- # Sodium-cooled metal-fuelled core (middle-size)
- # Lead-bismuth-cooled nitride-fuelled core (middle-size)
- # Carbon-dioxide-cooled MOX-fuelled core (large-size)
- # Helium-cooled coated-particle-fuelled core (large-size)
- # Helium-cooled enclosed-pin-fuelled core (large-size, 2 designs)

1): Reactor Physics Research Group, System Engineering Technology Division,
O-arai Engineering Center, JNC, Japan

2): Nuclear Engineering System Incorporation

目次

要旨	i
Abstract	ii
目次	iii
表リスト	iv
図リスト	v
第1章 緒言	1
第2章 炉定数効果の定義及び評価方法	2
2.1 炉定数効果の定義	2
2.2 炉定数効果の評価方法	2
第3章 評価対象炉心の概要	7
3.1 ナトリウム冷却大型酸化物燃料炉心	7
3.2 ナトリウム冷却中型酸化物燃料炉心	7
3.3 ナトリウム冷却中型金属燃料炉心	7
3.4 鉛ビスマス冷却中型窒化物燃料炉心	8
3.5 炭酸ガス冷却大型酸化物燃料炉心	8
3.6 ヘリウム冷却被覆粒子型燃料炉心	8
3.7 ヘリウム冷却大型密封ピン型燃料炉心 (H12年度設計)	9
3.8 ヘリウム冷却大型密封ピン型燃料炉心 (H13年度設計)	9
第4章 炉定数効果の評価結果	18
4.1 概要	18
4.2 各炉心概念に関する計算結果	18
第5章 結言	30
参考文献	31
謝辞	32

表リスト

- 表 2.1 燃料物質の核分裂によって生じる FP 核種の個数比及び CITATION-FBR に入力した収率データ
- 表 3.1 ナトリウム冷却大型酸化物燃料炉心 (ABLE 型酸化物燃料 2 領域均質炉心) の主要目
- 表 3.2 ナトリウム冷却中型酸化物燃料炉心 (ABLE 型酸化物燃料 2 領域均質炉心) の主要目
- 表 3.3 ナトリウム冷却中型金属燃料炉心の主要目
- 表 3.4 鉛ビスマス冷却中型窒化物燃料炉心の主要目
- 表 3.5 炭酸ガス冷却大型酸化物燃料炉心の主要目
- 表 3.6 ヘリウム冷却被覆粒子型燃料炉心の主要目
- 表 3.7 ヘリウム冷却密封ピン型燃料炉心 (平成 12 年度設計) の主要目
- 表 3.8 ヘリウム冷却密封ピン型燃料炉心 (平成 13 年度設計) の主要目
- 表 4.1 ナトリウム冷却大型酸化物燃料炉心における炉定数効果
- 表 4.2 ナトリウム冷却中型酸化物燃料炉心における炉定数効果
- 表 4.3 ナトリウム冷却中型金属燃料炉心における炉定数効果
- 表 4.4 鉛ビスマス冷却中型窒化物燃料炉心における炉定数効果
- 表 4.5 炭酸ガス冷却大型酸化物燃料炉心における炉定数効果
- 表 4.6 ヘリウム冷却被覆粒子型燃料炉心における炉定数効果
- 表 4.7 ヘリウム冷却大型密封ピン型燃料炉心 (H12 年度設計) における炉定数効果
- 表 4.8 ヘリウム冷却大型密封ピン型燃料炉心 (H13 年度設計) における炉定数効果

図リスト

- 図 2.1 炭酸ガス冷却炉における実効増倍率の変化 (FP 核種の炉定数の取扱方法による影響チェック)
- 図 4.1 臨界性に関する炉定数効果の比較
- 図 4.2 燃焼欠損反応度に関する炉定数効果の比較
- 図 4.3-1 燃焼に伴う実効増倍率の変化 (ナトリウム冷却中型酸化物燃料炉心)
- 図 4.3-2 燃焼に伴う実効増倍率の変化 (ナトリウム冷却中型酸化物燃料炉心)
- 図 4.3-3 燃焼に伴う実効増倍率の変化 (炭酸ガス冷却大型酸化物燃料炉心)
- 図 4.3-4 燃焼に伴う実効増倍率の変化 (ヘリウム冷却大型密封ピン型燃料炉心 (H12 年度設計))
- 図 4.4 冷却材ボイド反応度に関する炉定数効果の比較 (ガス冷却炉の場合は減圧反応度)
- 図 4.5-1 ナトリウム冷却大型酸化物燃料炉心における JFS-3-3.2 と次世代炉定数の反応度の差
- 図 4.5-2 ZPPR-9(Step5)における JFS-3-J3.2 と次世代炉定数の反応度の差
- 図 4.6 ドップラー反応度に関する炉定数効果の比較

第1章 緒言

平成13年度より開始された実用化戦略調査研究フェーズ2の炉心検討においては、統合炉定数 ADJ2000¹が使用された。ADJ2000は、JENDL-3.2²をベースとして高速増殖原型炉内側炉心の中性子スペクトル（衝突密度スペクトルを全断面積で除して得られる）を用いて70群に縮約された高速炉用群定数 JFS-3-J3.2³を、各種臨界実験解析結果を用いて断面積調整することにより作成されたものである。このため、より信頼性の高い計算値を得るためにには、検討対象炉心と高速増殖原型炉内側炉心の中性子スペクトルの差異が核特性計算値に及ぼす影響（以下、「炉定数効果」と記す。定義は第2章参照）を考慮する必要がある。

本報告書には、高速増殖炉サイクル実用化戦略調査研究⁴（以下、「実用化戦略調査研究」と記す）で検討されている下記8種類の高速炉炉心概念について炉定数効果を評価した結果を示す。評価対象とした核特性は、臨界性、燃焼欠損反応度、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、増殖比である。

[炉定数効果を評価した炉心概念]

- ・ナトリウム冷却酸化物燃料炉心（大型及び中型）
- ・ナトリウム冷却金属燃料炉心（中型）
- ・鉛ビスマス冷却窒化物燃料炉心（中型）
- ・炭酸ガス冷却酸化物燃料炉心（大型）
- ・ヘリウム冷却被覆粒子型燃料炉心（大型）
- ・ヘリウム冷却密封ピン型燃料炉心（大型、2種類）

第2章 炉定数効果の定義及び評価方法

2.1 炉定数効果の定義

統合炉定数 ADJ2000 の調整には種々の核特性に関する解析値と実験値の比 (C/E 値) が使用されたが、JFS-3-J3.2 による解析値をそのまま使用したわけではなく、当時開発段階であった次世代炉定数システム⁵の適用による影響が顕著な核特性についてはその補正を施した C/E 値を、炉定数調整時の入力条件に使用した。次世代炉定数システムでは、構造材核種の共鳴領域をより正確に取り扱うために遮蔽計算用炉定数セットの考え方を参考に基本炉定数のエネルギー群分割を 175 群に詳細化するとともに、約 41keV 以下の共鳴領域においては超微細群[約 10 万群]効果及び異核種間の共鳴干渉効果を考慮した炉定数を、SLAROM-UF コード⁶を用いて作成する。これにより、ADJ2000 は本来 70 群炉定数 JFS-3-J3.2 によって考慮できない性質の誤差をも補正した C/E 値を基にして調整されたことになる。したがって、実用化戦略調査研究で対象となる各種高速炉炉心概念についてできるだけ対象炉心の特性を考慮した核特性を得るには、ADJ2000 を用いて得られる計算値に対して、JFS-3-J3.2 によって考慮できない性質の誤差を補正することが必要になる。この補正は、炉定数の作成プロセスに起因する誤差が核特性に及ぼす効果を是正するために行うものであり、本報告書では「炉定数効果」と呼ぶ。具体的には、評価対象とする炉心概念それぞれについて、核特性毎に、上記次世代炉定数効果を考慮して得られる解析値と JFS-3-J3.2 を用いて得られる解析値の比（または差）を求める。

2.2 炉定数効果の評価方法

評価対象とする 8 種類の炉心概念に関する説明は第 3 章に示す。基本的な考え方として、各炉心概念の解析に必要な情報（すなわち、炉心各領域の原子数密度・形状データ、解析コード入力データセット等）は、それぞれの検討実施元から入手したものを使用した。ただし、解析コードの相違等によりそれらの情報をそのまま使用できない場合には、第 3 章に示す炉心基本仕様をもとに著者らが作成した値を用いた。以下、評価対象とした核特性毎に、評価方法の特徴を示す。

臨界性（実効増倍率）

平衡炉心（初期、末期）の原子数密度を用いて、SLAROM コード⁷ (JFS-3-J3.2) 及び SLAROM-UF コード（次世代炉定数）によりそれぞれ実効マクロ断面積を作成し、実効増倍率を CITATION-FBR コード⁸で計算した。この両者の差を炉定数効果とした。なお、エネルギー群の縮約は行わなかった。

燃焼欠損反応度

平衡炉心末期の原子数密度を用いて、SLAROM コード (JFS-3-J3.2) 及び SLAROM-UF コード (次世代炉定数) によりそれぞれ実効マクロ断面積を作成し、7 群に縮約した。これらを用いて、初期炉心組成からの燃焼計算を CITATION-FBR コードで実施し、平衡サイクルにおける燃焼欠損反応度について両者の比を炉定数効果とした。

JFS-3-J3.2 にはランプ化 FP データが用意されており、燃焼計算時に使用できるが、次世代炉定数は JENDL-3.2 オリジナルデータを処理して作成するものであり、ランプ化 FP データを直接作成できない。そこで、ORIGEN2 コードによって代表的な Na 冷却 MOX 燃料大型炉心の燃焼計算を行い、その際に生成する FP 核種の量を求め、中性子吸収反応率の和が総合計の 90%程度(この場合は 90.286%)になるような 34 種類の FP 核種を選定した。これらの核種の名称及び 4 種類の核分裂性物質各 1t の燃焼に伴う発生量を表 2.1 に示す。表中の個数比を約 2.2 倍 ($=100/90.286 \times 2$) した値を、これらの核種に関する収率 (1 核分裂あたり発生する割合) として CITATION-FBR コードに設定した。これら 34 核種についても SLAROM-UF コード (次世代炉定数) により実効マクロ断面積を作成して燃焼計算を行うことにより、次世代炉定数に基づく燃焼計算結果を得た。

なお、このようにランプ化 FP を複数個の代表 FP 核種の和で代用させる手法の妥当性については、JFS-3-J3.2 ベースで炭酸ガス冷却炉心の燃焼計算値の比較(均質 7 群 RZ 体系で 730 日 \times 10 サイクル燃焼)によって検証した。計算結果を図 2.1 に示す。ランプ化 FP を用いた場合と 34 核種の FP を計算に用いた場合とで、実効増倍率は類似の変化傾向を示し、平衡サイクルにおける燃焼欠損反応度に与える影響は 1%程度であった。

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)

平衡炉心初期の原子数密度を用い、燃料領域 (内部ブランケットがある炉心についてはそれも含む) の冷却材元素の原子数密度を 0 にして、SLAROM コード (JFS-3-J3.2) 及び SLAROM-UF コード (次世代炉定数) によりそれぞれボイド状態における実効マクロ断面積を作成した。次に、CITATION-FBR コードで摂動 (冷却材ボイド化) 前後の中性子束を計算し、PERKY コード⁹を用いた厳密摂動計算によりそれぞれ反応度を計算した。こうして得られた反応度の比を炉定数効果とした。なお、ナトリウム冷却中型金属燃料炉心の場合のみ、設計計算時の評価方法と合わせる意味で、燃料領域のラッパ管内のナトリウムだけをボイド化した条件で計算を行った。

ガス冷却炉の場合は、燃料領域だけでなくすべての領域について冷却材ガスの

原子数密度を 0 にすることにより上記と同様のプロセスで減圧反応度を求め、それぞれの炉定数を用いた場合の反応度の比を炉定数効果とした。なお、炭酸ガス冷却大型酸化物燃料炉心の場合は、炭素原子個数を 0 とし、その 2 倍の個数の酸素原子を減らすことにより減圧状態を模擬した。

基本的にエネルギー群の縮約は行わなかったが、ヘリウム冷却被覆粒子型燃料炉心の場合のみ、ヘリウム原子個数を 0 にした場合の SLAROM-UF コード（次世代炉定数）に統一して行った拡散計算が収束しなかった。そこで、ヘリウムの原子数密度を減圧前の 1/100 としたが、状況は変わらなかったので、このケースのみ基本炉定数 70 群と超詳細群を組み合わせたライブラリを用いた。

ドップラー反応度

平衡炉心初期の原子数密度を用い、燃料領域及びブランケット領域の温度を 500K 上昇させ、SLAROM コード (JFS-3-J3.2) 及び SLAROM-UF コード（次世代炉定数）によりそれぞれ温度上昇状態における実効マクロ断面積を作成した。次に、CITATION-FBR コードで摂動（温度上昇）前後の中性子束を計算し、PERKY コードを用いた厳密摂動計算によりそれぞれ反応度を計算した。こうして得られた反応度の比を炉定数効果とした。設計担当機関によっては、温度上昇対象領域に存在する核種のうち燃料核種のみ温度上昇させた解析を行った場合があるが、本評価で使用した SLAROM コード及び SLAROM-UF コードでは同一領域では一定温度を設定するため、すべての核種について温度上昇させた計算となっている。なお、鉛ビスマス冷却中型窒化物燃料炉心の場合のみ、温度上昇させる範囲を燃料領域のみとした。

増殖比

平衡炉心初期の原子数密度を用い、SLAROM コード (JFS-3-J3.2) 及び SLAROM-UF コード（次世代炉定数）によりそれぞれ実効断面積を作成した。それぞれの炉定数について、CITATION-FBR コードで中性子束を計算し、実効ミクロ断面積、原子数密度、及び各領域の体積を乗じて増殖比を算定し、その比を炉定数効果とした。

表2.1 燃料物質の核分裂によって生じるFP核種の個数比及びCITATION-FBRに投入した収率データ
(使用コードORIGEN-2)

核種	燃料物質の核分裂によって生じる個数比				CITATION-FBRで投入した収率データ				
	Na-MOX大型炉 炉心燃料部	U-235	U-238	Pu-239	Pu-241	U-235	U-238	Pu-239	Pu-241
AG109	8.488E-03	5.495E-04	5.914E-03	9.106E-03	1.221E-02	1.217E-03	1.310E-02	2.017E-02	2.705E-02
CD111	1.719E-03	1.993E-04	1.127E-03	1.656E-03	3.391E-03	4.415E-04	2.497E-03	3.668E-03	7.512E-03
CS133	3.195E-02	3.139E-02	3.189E-02	3.212E-02	3.130E-02	6.953E-02	7.064E-02	7.115E-02	6.934E-02
CS134	1.356E-03	1.435E-03	1.157E-03	1.457E-03	1.449E-03	3.179E-03	2.563E-03	3.228E-03	3.210E-03
CS135	3.564E-02	3.196E-02	3.491E-02	3.612E-02	3.560E-02	7.080E-02	7.733E-02	8.001E-02	7.886E-02
EU153	1.774E-03	7.063E-04	1.760E-03	1.720E-03	2.091E-03	1.565E-03	3.899E-03	3.810E-03	4.632E-03
EU154	4.393E-04	1.892E-04	3.652E-04	4.591E-04	5.762E-04	4.191E-04	8.090E-04	1.017E-03	1.276E-03
I127	2.080E-03	1.246E-03	1.679E-03	2.464E-03	1.435E-03	2.760E-03	3.719E-03	5.458E-03	3.179E-03
I129	6.901E-03	4.183E-03	6.533E-03	7.649E-03	4.840E-03	9.266E-03	1.447E-02	1.694E-02	1.072E-02
MO100	3.224E-02	3.118E-02	3.261E-02	3.231E-02	3.123E-02	6.907E-02	7.224E-02	7.157E-02	6.918E-02
MO95	2.126E-02	2.965E-02	2.141E-02	2.177E-02	1.837E-02	6.568E-02	4.743E-02	4.822E-02	4.069E-02
MO97	2.518E-02	2.847E-02	2.596E-02	2.533E-02	2.253E-02	6.307E-02	5.751E-02	5.611E-02	4.991E-02
MO98	2.815E-02	2.989E-02	2.867E-02	2.853E-02	2.538E-02	6.621E-02	6.351E-02	6.320E-02	5.622E-02
ND143	2.060E-02	2.668E-02	2.078E-02	2.015E-02	2.143E-02	5.910E-02	4.603E-02	4.464E-02	4.747E-02
ND145	1.450E-02	1.737E-02	1.549E-02	1.377E-02	1.504E-02	3.848E-02	3.431E-02	3.050E-02	3.332E-02
ND146	1.376E-02	1.559E-02	1.483E-02	1.299E-02	1.460E-02	3.453E-02	3.285E-02	2.878E-02	3.234E-02
PD105	2.383E-02	5.497E-03	2.189E-02	2.412E-02	2.830E-02	1.218E-02	4.849E-02	5.343E-02	6.269E-02
PD106	1.494E-02	2.410E-03	1.063E-02	1.607E-02	2.213E-02	5.339E-03	2.355E-02	3.560E-02	4.902E-02
PD107	1.369E-02	1.482E-03	1.065E-02	1.368E-02	2.130E-02	3.283E-03	2.359E-02	3.030E-02	4.718E-02
PD108	1.122E-02	1.050E-03	7.698E-03	1.127E-02	1.983E-02	2.326E-03	1.705E-02	2.497E-02	4.393E-02
PM147	6.288E-03	6.064E-03	7.183E-03	5.725E-03	6.375E-03	1.343E-02	1.591E-02	1.268E-02	1.412E-02
PR141	2.462E-02	2.797E-02	2.502E-02	2.455E-02	2.362E-02	6.196E-02	5.542E-02	5.438E-02	5.232E-02
RH103	2.953E-02	1.463E-02	2.929E-02	3.015E-02	2.854E-02	3.241E-02	6.488E-02	6.420E-02	7.082E-02
RU101	2.940E-02	2.433E-02	2.935E-02	2.965E-02	2.874E-02	5.390E-02	6.502E-02	6.568E-02	6.366E-02
RU102	3.481E-02	2.459E-02	3.396E-02	3.535E-02	3.566E-02	5.447E-02	7.523E-02	7.831E-02	7.899E-02
RU104	3.125E-02	1.121E-02	2.898E-02	3.197E-02	3.501E-02	2.483E-02	6.420E-02	7.082E-02	7.755E-02
SM147	2.599E-03	2.823E-03	2.421E-03	2.629E-03	3.050E-03	6.253E-03	5.363E-03	5.824E-03	6.756E-03
SM149	5.085E-03	3.930E-03	5.602E-03	4.721E-03	5.458E-03	8.706E-03	1.241E-02	1.046E-02	1.209E-02
SM151	3.163E-03	1.623E-03	3.256E-03	3.042E-03	3.537E-03	3.595E-03	7.213E-03	6.739E-03	7.835E-03
SM152	3.688E-03	1.786E-03	3.409E-03	3.729E-03	4.375E-03	3.956E-03	7.552E-03	8.260E-03	9.691E-03
TC99	2.754E-02	2.642E-02	2.840E-02	2.758E-02	2.549E-02	5.853E-02	6.291E-02	6.109E-02	5.647E-02
XE131	1.950E-02	1.496E-02	1.872E-02	2.099E-02	1.537E-02	3.314E-02	4.147E-02	4.650E-02	3.405E-02
XE132	2.626E-02	2.324E-02	2.627E-02	2.696E-02	2.367E-02	5.148E-02	5.819E-02	5.972E-02	5.243E-02
ZR93	1.884E-02	3.033E-02	2.105E-02	1.839E-02	1.489E-02	6.719E-02	4.663E-02	4.074E-02	3.298E-02

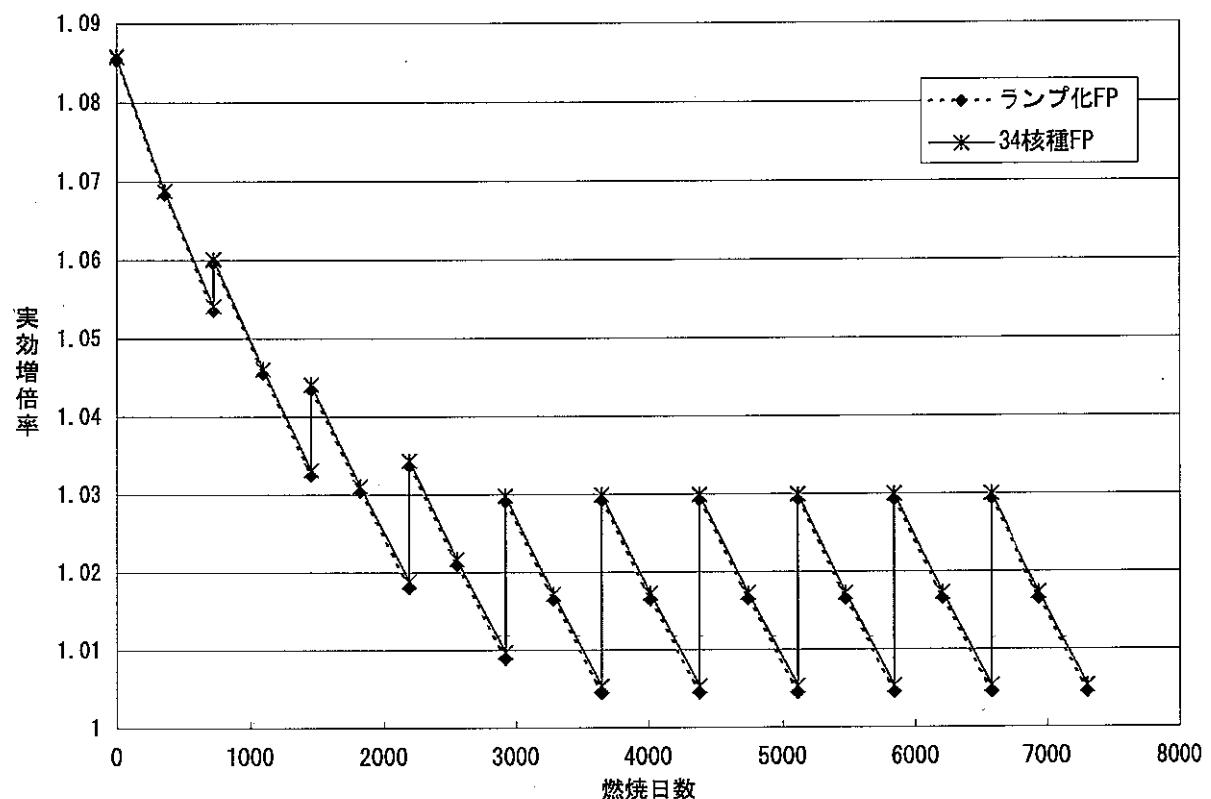


図2.1 炭酸ガス冷却炉における実効倍率の変化
(FP核種の炉定数の取扱方法による影響チェック)

第3章 評価対象炉心の概要

実用化戦略調査研究の炉心設計検討は様々な冷却材、燃料種別、炉サイズの炉心概念を対象としている。今回の炉定数効果の評価においては、平成12年度に終了したフェーズ1の検討成果^{10, 11}を基本とし、さらに平成13年度に開始したフェーズ2の検討作業¹²の進捗を考慮して下記に示す炉心概念を評価対象炉心に選定した。以下に、各炉心概念の概要を記す。なお、表3.1～表3.8に示す核特性計算値は、平成12年度設計によるものについては統合炉定数 ADJ98¹³ (JFS-3-J3.2)に基づいて調整されたものだが、調整に使用した C/E 値の数や共分散等が ADJ2000 とは異なる)、平成13年度設計によるものについては統合炉定数 ADJ2000 に基づく計算値である。

3.1 ナトリウム冷却大型酸化物燃料炉心¹⁰

世界各国で数多くの建設・設計研究例がある炉型として、ナトリウムを冷却材とし燃料に U-Pu 混合酸化物（以下、「MOX」）燃料を用いスケールメリットによる経済性向上を追求した電気出力 150 万 kW の炉心である。実用化戦略調査研究では、炉心崩壊事故を想定しても再臨界を生じることがないこと（再臨界回避）を設計条件にしており、この達成のために内部ダクト付き集合体及び軸プランケット削除型集合体（ABLE 型集合体）が検討され、ABLE 型集合体については均質炉心に加えて内部プランケットを持つ非均質炉心も検討された。本評価では、ABLE 型集合体を使用した 2 領域均質炉心を対象とした。この炉心は、炉心有効長を 80cm に低減して炉心を扁平化することによりナトリウムボイド反応度を低減し、軸プランケットペレットの一部を削除することにより、炉心損傷時の溶融燃料の炉心外排出経路を確保している。本炉心概念の主要目を表3.1に示す（平成12年度設計の炉心を用いたので、文献10より引用した）。

3.2 ナトリウム冷却中型酸化物燃料炉心¹²

ナトリウム冷却 MOX 燃料炉心のモジュール効果による経済性向上を期待して検討された電気出力 50 万 kW の炉心である。本評価では、ABLE 型集合体を使用した 2 領域均質炉心を対象とした。本炉心は、平成13年度の検討において、実効運転期間 18 ヶ月及び炉心取出平均燃焼度 150GWd/t を達成するために平成12年度設計の仕様を一部変更している。本評価には、平成13年11月時点における仕様を用いた。同時点における本炉心概念の主要目を表3.3に示す。

3.3 ナトリウム冷却中型金属燃料炉心¹⁴

本炉心は、ロシアの BREST 炉心（鉛冷却・窒化物燃料炉心）の検討結果を考

察し、燃料材料に重金属密度の高い金属燃料を採用して内部転換比を向上させ、燃焼反応度劣化を小さくして出力分布平坦化を追求し、冷却材には経験豊富なナトリウムを使用することにより、魅力のある中型炉概念を創出する目的で検討が進められている。燃料は3領域に分けるが、Pu富化度は一定であり、燃料ピン径とバッチ数を適切に定めることにより出力分布の平坦化及び炉心平均燃焼度の増加を図る。径方向及び軸方向のブランケットを設けずに内部転換比約1.0を確保することとしている。本評価には、平成14年1月時点における仕様を用いた。同時点における本炉心概念の主要目を表3.3に示す。

3.4 鉛ビスマス冷却中型窒化物燃料炉心¹¹

重金属冷却材使用時の原子炉構造の耐震性、及び鉛冷却の場合の高温下メンテナンスの困難さを勘案して、鉛ビスマスを冷却材とした中型炉が検討されている。増殖性確保のために燃料形態は窒化物燃料とし、プラント建設費低減と流量喪失スクラム失敗事象の完全排除を狙う観点から自然循環方式が優先的に検討された。本評価では、この鉛ビスマス冷却中型窒化物燃料炉心を対象に選定した。本炉心概念の主要目を表3.4に示す（平成12年度設計の炉心を用いたので、文献11より引用した）。

3.5 炭酸ガス冷却大型酸化物燃料炉心¹¹

炉心取出平均燃焼度150GWd/t、増殖比1.2程度を目標とした炭酸ガス冷却の酸化物燃料炉心であり、熱出力は3600MWである。炉心高さを120cm、上下に各40cmの軸ブランケットを設けることにより、径ブランケット削除時においても増殖比約1.0を確保した。炉心圧損制限条件を満足しつつ熱輸送量を確保するために燃料ピン配列ピッチと燃料ピン径の比(P/D)が1.4以上となり、Na冷却炉の値(1.2程度)より大きいため、増殖比を確保するためには炉心サイズが増大する。本炉心の等価直径は5.9mであり、同一出力クラスのNa冷却炉(5.0m弱)に比べて大きく、重金属インベントリも1.4倍程度となっている。本炉心概念の主要目を表3.5に示す（平成12年度設計の炉心を用いたので、文献11より引用した）。

3.6 ヘリウム冷却被覆粒子型燃料炉心¹²

経済性向上のためにガスタービン直接発電を可能とする炉心概念として、高温安定性に優れたヘリウムを冷却材とし、熱容量が大きいために事故時の緩やかな事象進展が期待できる被覆粒子型燃料を採用した炉心概念である。平成12年度設計では燃料体積比が約9%と小さいことに起因して増殖性が低くかつ炉心が大きいという問題点があった。平成13年度設計では燃料集合体設計を見直すことにより燃料体積比を約16%に向上させた結果、炉心サイズ(高さ)を低減し、かつ増殖比約1.2を達成するように改良が試みられている。本評価においては、平成13

年 12 月時点における仕様を用いた。同時点における本炉心概念の主要目を表 3.6 に示す。

3.7 ヘリウム冷却大型密封ピン型燃料炉心 (H12 年度設計)¹¹

3.6 の炉心と同様に直接発電を可能とする炉心概念として、ヘリウムを冷却材としてピン型燃料炉心を実現するために、被覆材に高融点金属合金であるニオブ基合金 (Nb-1%Zr-C、融点 2000°C 程度を期待) を想定し、燃料要素表面にはリブ加工を施して燃料被覆管温度の低減を図った。被覆粒子型燃料炉心とは異なり、炉心崩壊事故 (CDA) に対しては工学的安全設備で対応することとしている。高増殖性を狙う観点から窒化物燃料を採用している。本炉心概念の主要目を表 3.7 に示す (平成 12 年度設計の炉心を用いたので、文献 11 より引用した)。

3.8 ヘリウム冷却大型密封ピン型燃料炉心 (H13 年度設計)¹²

3.7 と同様の炉心概念のもとに、燃料ピン被覆材や他の構造材を Nb 合金に比して中性子吸収断面積が小さい Si₃Zr₅ に変更した。また、自然循環による崩壊熱除去性能を向上して ATWS 時に燃料健全性を確保するために、ピンピッチを拡げた (P/D を 1.21 から 1.65 とした)。この結果、Pu 富化度は 5~7w/o 増加したが、20 ヶ月運転サイクル×6 バッジ燃料交換で、炉心取出平均燃焼度 150GWd/t 及び増殖比約 1.1 を達成している。

表3.1 ナトリウム冷却大型酸化物燃料炉心(ABLE型酸化物燃料 2領域均質炉心)の主要目
(平成12年度設計)

項 目		仕様または計算値	備 考
基 本 条 件 ・ 炉 心 構 成	出力(MWe/MWth)	1,500/3,570	
	運転サイクル長さ(日)	517	
	燃料交換バッチ (炉心/内部ブランケット/径ブランケット)	4 / - / 4	
	炉心高さ(cm)	80	
	軸ブランケット厚さ(cm)(上部/下部)	35 / 35	
	炉心等価直径(cm)(炉心/径ブランケット)	476 / 545	
	遮蔽体外接円径(cm)	633	
	燃料集合体数(体) (内側炉心/外側炉心/内部ブラ/径ブラ)	316 / 266 / - / 198	
炉 心 燃 料 仕 様	制御棒本数(本) (主系/後備系)	40/15	
	炉心材料(被覆管/ラッパ管)	ODS鋼/PNC-FMS	炉心燃料のスミア 密度は82%TD
	燃料ピン外径(mm)/被覆管肉厚(mm)	8.5/0.5	
	ワイヤ径(mm)	1.48	
	燃料ピンピッチ/燃料ピン外径(P/D)	1.18	
	集合体当たり燃料ピン本数(本)	271	
	ラッパ管外対面間距離(mm)	176.7	
炉 心 主 要 特 性	ラッパ管肉厚(mm)	4.4	
	集合体配列ピッチ(mm)	179.7	
	Pu富化度(wt%)(内側炉心/外側炉心)	21.1 / 24.9	
	炉心部取出平均燃焼度(MWd/t)	149,000	
	燃焼反応度(%Δk/kk')	3.06	
	最大線出力密度(W/cm)	431	
	ピーク高速中性子フルエンス($\times 10^{23}$ n/cm ²)	4.8	
	増殖比(平衡中期)	1.17	

TRU組成比: $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}/^{237}\text{Np}/^{241}\text{Am}/^{243}\text{Am}/^{244}\text{Cm}$

= 1.1/54.1/32.1/4.3/3.9/0.5/2.0/1.0/1.0

FP混入率: 2.0 v/o

表3.2 ナトリウム冷却中型酸化物燃料炉心(ABLE型酸化物燃料 2領域均質炉心)の主要項目
(平成13年11月時点の暫定値)

	項目	仕様または計算値	備考
基本条件・炉心構成	出力(MWe/MWth)	500/1,190	
	運転サイクル長さ(日)	540	
	燃料交換バッチ (炉心/内部ブランケット/径ブランケット)	4/-/4	
	炉心高さ(cm)	90	
	軸ブランケット厚さ(cm)(上部/下部)	35/35	
	炉心等価直径(cm)(炉心/径ブランケット)	270/333	
	遮蔽体外接円径(cm)	409	
	燃料集合体数(体) (内側炉心/外側炉心/内部ブラ/径ブラ)	114/114/-/126	
炉心燃料仕様	制御棒本数(本)(主系/後備系)	16/9	
	炉心材料(被覆管/ラッパ管)	ODS鋼/PNC-FMS	炉心燃料のスミア 密度は82%TD
	燃料ピン外径(mm)/被覆管肉厚(mm)	8.5/0.5	
	ワイヤ径(mm)	1.48	
	燃料ピンピッチ/燃料ピン外径(P/D)	1.18	
	集合体当たり燃料ピン本数(本)	217	
	ラッパ管外対面間距離(mm)	150.5	
炉心主要特性	ラッパ管肉厚(mm)	4.0	
	集合体配列ピッチ(mm)	161.5	
	Pu富化度(wt%)(内側炉心/外側炉心)	21.0/27.7	
	炉心部取出平均燃焼度(MWd/t)	148,000	
	燃焼反応度(%Δk/kk')	3.2	
	最大線出力密度(W/cm)	430	
	ピーク高速中性子フルエンス($\times 10^{23}$ n/cm ²)	4.48	

TRU組成比: $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}/^{237}\text{Np}/^{241}\text{Am}/^{243}\text{Am}/^{244}\text{Cm}$

= 1.1/54.1/32.1/4.3/3.9/0.5/2.0/1.0/1.0

FP混入率; 2.0 v/o

表3.3 ナトリウム冷却中型金属燃料炉心の主要目

(平成14年1月時点の暫定値)

	項目	仕様または計算値	備考
基本条件・炉心構成	出力(MWe/MWth)	500/1,190	
	運転サイクル長さ(日)	518	
	燃料交換バッチ (燃料領域毎に異なる)	3~10	
	炉心高さ(cm)	100	
	軸ブランケット・径ブランケット	無し	
	炉心等価直徑(cm)	約280	
	遮蔽体外接円径(cm)	約400	
	燃料集合体数(体) (内側炉心/中間炉心/外側炉心)	58/60/138	
	制御棒本数(本) (主系/後備系)	16/9	
炉心燃料仕様	炉心材料(被覆管/ラッパ管)	ODS鋼/PNC-FMS	炉心燃料のスミア密度は75%TD
	燃料形態	U-Pu-Zr(10%)	ボンド材: Na
	燃料ピン外径(mm)	9.0~10.0	
	スペーサ	グリッド式	
	燃料ピンピッチ(mm)	11.5	
	集合体当たり燃料ピン本数(本)	169	
	ラッパ管外対面間距離(mm)	約160	
	ラッパ管肉厚(mm)	5.0	
炉心主要特性	集合体配列ピッチ(mm)	約163	
	Pu富化度(wt%)	約14	
	炉心部取出平均燃焼度(MWd/t)	約12万	
	燃焼反応度(%Δk/kk')	約0.8	
	最大線出力密度(W/cm)(平衡末期)	445	
	ピーク高速中性子フルエンス($\times 10^{23} n/cm^2$)	5.1	
	増殖比(平衡中期)	約1.0	
炉心部Naボイド反応度(\$) (平衡末期)*		約8.0	

TRU組成比: $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}/^{237}\text{Np}/^{241}\text{Am}/^{243}\text{Am}/^{244}\text{Cm}$
 $= 1.1/54.1/32.1/4.3/3.9/0.5/2.0/1.0/1.0$

FP混入率: 2.0 v/o

* ラッパ管内側のみボイド化、非均質効果0.90

表3.4 鉛ビスマス冷却中型窒化物燃料炉心の主要目
(平成12年度設計)

項目	仕様または計算値
熱出力 (MW)	1053
電気出力 (MW)	400
炉心出入口温度 (°C)	492 / 312
運転サイクル長さ (月)	19
燃料交換バッチ数	10
炉心型式	Pu富化度均質2領域
炉心高さ (cm)	70
軸ブランケット厚さ (cm)	35 / 35
径ブランケット厚さ (層)	2
炉心等価直径 (m)	4.8
燃料形態	窒化物燃料
燃料ピン外径 (mm)	6.5
燃料ピン配列ピッチ/ピン径比(P/D)	1.48
集合体配列ピッチ (mm)	218.4
Pu富化度 (wt%)	22.1 / 27.3
燃焼反応度 (%Δk/kk')	1.6
増殖比 [平衡中期]	1.19
最大線出力 (W/cm)	約120
炉心部取出平均燃焼度 (MWd/t)	153,000
ピーク高速中性子フルエンス ($\times 10^{23} / \text{cm}^2$)	5.5
炉心部ドップラ係数 ($\times 10^{-3} \text{Tdk/dT}$)	-1.8
炉心部冷却材ボイド反応度 (\$)	6.0

TRU組成比: $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}/^{237}\text{Np}/^{241}\text{Am}/^{243}\text{Am}/^{244}\text{Cm}$
 $= 1.1/54.1/32.1/4.3/3.9/0.5/2.0/1.0/1.0$

FP混入率: 2.0 v/o

表3.5 炭酸ガス冷却大型酸化物燃料炉心の主要目
(平成12年度設計)

項目	仕様または計算値
原子炉熱出力 (MW)	3600
一次系冷却材圧力 (MPa)	4.2
炉心型式	Pu富化度2領域均質炉心
燃料型式	被覆管封入型(外表面リブ加工)
運転サイクル長さ (月)	24
燃料交換バッチ数	5
炉心高さ (cm)	120
軸ブランケット厚さ (cm) 上／下	40 / 40
径ブランケット厚さ (層)	2層
燃料ピン外径 (mm)	7.3
P/D (ピンピッチ/ピン径比)	1.42
燃料体積比 (%)	30.5
集合体配列ピッチ (mm)	221.6
炉心等価直径 (m)	5.9
遮蔽体外接円径 (m)	8.7
Pu富化度 (wt%) 内側/外側	19.8 / 28.0
燃焼反応度 (%Δk/kk')	2.7
増殖比 [平衡中期]	1.20
最大線出力 (W/cm)	約180
ピーク高速フルエンス ($\times 10^{23}/\text{cm}^2$)	5.1
炉心部取出平均燃焼度 (MWd/t)	155,000
炉心部ドップラ係数 ($\times 10^{-3}\text{Tdk/dt}$)	-5.0
炉心部冷却材ボイド(全喪失)反応度 (\$)	1.2

TRU組成比: $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}/^{237}\text{Np}/^{241}\text{Am}/^{243}\text{Am}/^{244}\text{Cm}$
 $= 1.1/54.1/32.1/4.3/3.9/0.5/2.0/1.0/1.0$

FP混入率: 2.0 v/o

表3.6 ヘリウム冷却被覆粒子型燃料炉心の主要目
(平成13年12月時点の暫定値)

	項目	仕様または計算値
炉心基本仕様	原子炉熱出力 (MWt)	2400
	電気出力 (MWe)	1124
	炉心出入口温度 (°C)	850/460
	冷却材圧力 (MPa)	6
	炉心等価直径(m)	5.64
	炉心高さ (m)	1.8
主要な核特性	軸ブランケット高さ(上/下) (m)	0.4/0.4
	Pu富化度(内側/外側) (wt.%)	17.1/22.6
	炉心取出平均燃焼度 (MWd/t)	96,000
	燃焼反応度損失 (% Δk/kk')	0.34
	運転サイクル長さ (EFPM)	18.7
	バッチ数 (バッチ)	7
	体積比(%) 燃料核	16.2
	被覆層材	18.85
	構造材(SiC)	8.0
	冷却材(He)	56.95
	増殖比 (-)	1.21
	原子炉倍増時間 (年)	48
	複合システム倍増時間 (年)	48
	平均出力密度 (W/cc)	53
	最大高速中性子束(E>0.1MeV)(n/cm ² sec)	0.78×10^{15}
	最大高速フルエンス(E>0.1MeV)(n/cm ²)	2.7×10^{23}
	ドップラ係数 ($\times 10^{-3}$ Tdk/dT)	-8.8
	He減圧反応度(輸送補正考慮)(\$)	0.94

TRU組成比: $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}/^{237}\text{Np}/^{241}\text{Am}/^{243}\text{Am}/^{244}\text{Cm}$

= 1.1/54.1/32.1/4.3/3.9/0.5/2.0/1.0/1.0

FP混入率 ; 2vol%

表3.7 ヘリウム冷却密封ピン型燃料炉心(平成12年度設計)の主要目

	項目	特性
炉心基本仕様	原子炉熱出力 (MWt)	2400
	電気出力 (MWe)	1080
	炉心出入口温度 (°C)	850/460
	冷却材圧力 (MPa)	6
	炉心等価直径 (m)	4.89
	遮蔽体外接円径 (m)	6.85
	炉心高さ (m)	1.2
燃料仕様	軸プランケット高さ(上/下) (m)	0.4/0.4
	[燃料ピン]	
	燃料形態	窒化物燃料(中空燃料)
	炉心材料(被覆管/ラッパ管)	Nb合金
	燃料ピン全長 (cm)	320
	燃料ピン内径/外径 (cm)	1.00/1.10
	燃料ピンピッチ (cm)	1.331
	燃料ペレット内径/外径 (cm)	0.328/0.979
	スマア密度 (%TD)	80
	粗面長(リブ長) (cm)	80.0 (炉心領域上部側)
集合体	[集合体]	
	集合体全長 (cm)	600
	ラッパ管内対面間距離 (cm)	19.71
	集合体配列ピッチ (cm)	20.71
	集合体当たり燃料ピン本数 (本)	214
主要な核特性	Pu富化度(内側/外側) (wt.%)	17/21
	炉心取出平均燃焼度 (MWd/t)	137,000
	燃焼反応度損失 (%Δk/kk')	2.2
	運転サイクル長さ (EFPM)	23.1
	バッチ数 (バッチ)	6
	体積比(%) 燃料	38.5
	冷却材	46.6
	構造材	14.9
	増殖比 (-)	1.2
	原子炉倍増時間 (年)	64
	複合システム倍増時間 (年)	67
	最大線出力(平均線出力) (W/cm)	455 (294)
	最大高速中性子束(E>0.1 MeV) (n/cm ² sec)	1.82 × 10 ¹⁵
	最大高速中性子照射量 (E>0.1 MeV, n/cm ²)	6.66 × 10 ²³
	ドップラ係数 (× 10 ⁻³ Tdk/dT)	-2.0
	He減圧反応度 (\$)	0.51

TRU組成比: $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}/^{237}\text{Np}/^{241}\text{Am}/^{243}\text{Am}/^{244}\text{Cm}$
 $= 1.1/54.1/32.1/4.3/3.9/0.5/2.0/1.0/1.0$

FP混入率: 2.0 v/o

表3.8 ヘリウム冷却密封ピン型燃料炉心(平成13年度設計)の主要目
(平成14年2月時点の暫定値)

	項目	特性
炉心基本様	原子炉熱出力 (MWt)	2400
	電気出力 (MWe)	1169
	炉心出入口温度 (°C)	850/460
	冷却材圧力 (MPa)	6.0
	炉心等価直径 (m)	5.0
	炉心高さ (m)	1.2
燃料仕様	軸ブランケット高さ(上/下) (m)	0.4/0.4
	[燃料ピン]	
	燃料形態	塗化物燃料(¹⁵ N, 中空燃料)
	炉心材料(被覆管/ラッパ管)	Si ₃ Zr ₅
	燃料ピン内径/外径 (cm)	0.90/0.99
	燃料ピンピッチ (cm)	1.633
	燃料ペレット内径/外径 (cm)	0.360/0.881
	スミア密度 (%TD)	75
	粗面長(リブ長) (cm)	120 (有効発熱部)
	[集合体]	
	集合体全長 (cm)	600
	ラッパ管内対面間距離 (cm)	24.46
	集合体配列ピッチ (cm)	25.46
	集合体当たり燃料ピン本数 (本)	214
主要な核特性	Pu富化度(内側/外側) (wt.%)	22.4/28.0
	炉心取出平均燃焼度 (MWd/t)	149,000
	燃焼反応度損失 (%Δk/kk')	2.8
	運転サイクル長さ (EFPM)	20
	バッチ数 (バッチ)	6
	体積比(%) 燃料	24.3
	冷却材	66.6
	構造材	9.1
	増殖比 (-)	1.07
	原子炉倍増時間 (年)	155
	複合システム倍増時間 (年)	161
	最大線出力 (W/cm)	448
	最大高速中性子束(E>0.1 MeV) (n/cm ² sec)	1.5×10^{15}
	最大高速中性子照射量 (E>0.1 MeV, n/cm ²)	4.8×10^{23}
	ドップラ係数 ($\times 10^{-3}$ Tdk/dT)	-1.5
	He減圧反応度 (\$)	-1.4

TRU組成比: ²³⁸Pu/²³⁹Pu/²⁴⁰Pu/²⁴¹Pu/²⁴²Pu/²³⁷Np/²⁴¹Am/²⁴³Am/²⁴⁴Cm

= 1.1/54.1/32.1/4.3/3.9/0.5/2.0/1.0/1.0

FP混入率: 2.0 v/o

第4章 炉定数効果の評価結果

4.1 概要

評価対象とした8種類の炉心概念について、炉定数効果を算出した結果をそれぞれ、表4.1～表4.8に示す。表中の「補正值」の欄には、次世代炉定数による計算値とJFS-3-J3.2による計算値の差（もしくは比）を記載した。ADJ2000に基づく計算値に対する補正值の目安を与える量、の意味合いである。なお、燃焼欠損反応度については、絶対値が小さい炉心の場合に「比」で算出した補正值が大きく1.0から離れる場合があるので、「差」がどの程度かを備考欄に記載した。以下、JUPITER臨界実験データ（ZPPR-9, 13A, 17A炉心）に関する炉定数効果⁵も引用・比較しつつ、核特性毎に計算結果の特徴を記す。

4.2 各炉心概念に関する計算結果

臨界性

臨界性に関する炉定数効果のうち平衡サイクル初期（BOEC）における計算値を図4.1にまとめた。3種類のナトリウム冷却炉、鉛ビスマス冷却中型窒化物燃料炉心、及び炭酸ガス冷却大型酸化物燃料炉心については、-0.3～-0.5% Δ k/kk'程度の値を示したのに対し、3種類のヘリウム冷却炉は絶対値が小さい傾向を示した。すなわち、ヘリウム冷却被覆粒子型燃料炉心では約-0.24% Δ k/kk'であり、2種類のヘリウム冷却大型密封ピン型燃料炉心ではいずれも絶対値が0.1% Δ k/kk'以下であった。いずれの炉心についても、平衡サイクル末期（EOEC）とBOECの炉定数効果の差は0.1% Δ k/kk'以下であった。

ナトリウム冷却酸化物燃料炉心のモックアップであるZPPR炉心（3種類）の炉定数効果はいずれも絶対値が小さい（0.15% Δ k/kk'以下）傾向を示しており、今回評価対象とした2種類のナトリウム冷却酸化物燃料炉心の値（約-0.5% Δ k/kk'）と傾向が異なる。この一因として、後述するNaボイド反応度に関する炉定数効果の考察により、Pu同位体組成の相違が考えられる。

燃焼欠損反応度

燃焼欠損反応度に関する炉定数効果を図4.2にまとめた。炉定数効果（比）は、ほとんどの炉心で0.97～1.01と1.0に近い値を示したが、ナトリウム冷却中型金属燃料炉心及びヘリウム冷却被覆粒子型燃料炉心は、それぞれ1.16及び1.29という値を示した。いずれの炉心も、燃料中の重金属密度を増加させて内部転換比を向上させることにより燃焼欠損反応度を0.4% Δ k/kk'以下に低減した炉心であ

るため、二種類の炉定数で計算した値の比としては増加したものと思われる。図 4.2 に示す炉定数効果（差）によれば、燃焼欠損反応度に生じる差（絶対値～）は 8 種類の炉心すべてについて $0.1\% \Delta k/kk'$ 以下であり、炉心設計検討に大きな影響を及ぼさない範囲であると言えよう。

図 4.3-1～図 4.3-4 に、4 種類の炉心概念について燃焼に伴う実効倍率の変化を示した。いずれの結果においても、2 種類の炉定数に基づく実効倍率の差は燃焼期間を通じてほぼ一定であり、燃焼の進行に伴って増減する傾向は小さいことを確認した。

冷却材ボイド反応度（ガス冷却炉の場合は減圧反応度）

冷却材ボイド反応度（ガス冷却炉の場合は減圧反応度）に関する炉定数効果を図 4.4 にまとめた。図より、炉定数効果は炉心概念によって異なり、0.97～1.11 の範囲で変化した。

また、ナトリウム冷却酸化物燃料炉心のモックアップである ZPPR 炉心（2 種類）の炉定数効果はいずれも 1.0 より 10%程度小さい値（0.874 及び 0.931）を示すのに対し、今回評価対象とした 2 種類のナトリウム冷却酸化物燃料炉心の値は、1.003 及び 0.996 であり、傾向が大きく異なる。ZPPR 炉心と設計検討体系の間に見られたこの差異に関する特徴を調べるために、二種類の炉定数に基づく Na ボイド反応度の成分を非漏洩項及び漏洩項に分けてプロットした図を、図 4.5-1 及び図 4.5-2 に示す。いずれの体系においても、漏洩項については使用する炉定数の影響は見られない。非漏洩項については、ZPPR-9 の場合、約 10keV 以下で次世代炉定数を用いることによる低下傾向が見られ、これが 1.0 より小さめの炉定数効果をもたらすことに寄与している様子がうかがえるのに対し、ナトリウム冷却大型酸化物燃料炉心の場合は、このエネルギー領域の成分が小さいため、顕著な炉定数効果をもたらさないことがわかる。

このような相違をもたらす原因として Pu 同位体組成の相違が考えられる。すなわち、Pu239 の純度で比較すると、ZPPR 炉心は 90w/o 以上と高い組成であるのに対し、ナトリウム冷却大型酸化物燃料炉心では表 3.1 に示すように約 54% であり高次 Pu やマイナーアクチニド（MA）核種が多く含まれている。また、FP 核種の存在も相違点の一つである。これらの相違を取り除くことによる影響を以下の計算により調査した。まず、ナトリウム冷却大型酸化物燃料炉心において、Pu239 及びウラン同位体以外の重核種をすべて Pu239 に置換し、FP を除いた上で Na ボイド反応度の炉定数効果を算出したところ、0.88 となり、上記の ZPPR 炉心における値と同等の値が得られた。次に、ZPPR-9 炉心における Pu 同位体組成を今回対象としているナトリウム冷却大型酸化物燃料炉心で用いられた組成に置換して Na ボイド反応度の炉定数効果を算出したところ、0.976 となり、大幅に

1.0に近づく傾向が確認された。これらの調査結果より、Puに関して設計研究で想定している組成と ZPPR のような臨界実験装置で使用された組成が異なることによって炉定数効果に差異が生じることが確認できた。

冷却材ボイド反応度は、スペクトル硬化による核分裂中性子発生数の増大・中性子吸収反応の減少・炉心からの中性子漏洩の増大等が複雑に関連し合い、関連するエネルギー領域も広範に及ぶことから、高次 Pu 核種、MA、及び FP 核種の影響を個別に調査するのは系統的な方法に基づいて詳細な分析を行う必要がある。炉心概念によって炉定数効果が変化する原因を分析し、新たな設計概念が提示された場合に確度の高い推測値を速やかに得るためにには、これらのメカニズムに対する分析を将来実施する必要がある。

ドップラー反応度

ドップラー反応度に関する炉定数効果を図 4.6 にまとめた。ナトリウム冷却中型金属燃料炉心が 1.075 と最小、鉛ビスマス冷却中型窒化物燃料炉心が 1.227 と最大の値を示すこと、またその他の炉心概念では 1.11～1.15 の範囲の値を示すことがわかった。2 種類のナトリウム冷却酸化物燃料炉心の値(いずれも 1.137)は、同じ炉心概念の臨界実験である ZPPR-9 の値 (=1.14_o 298K～794Kへの温度変化時の評価値を使用) と同等であった。

増殖比

表 4.1～表 4.8 より、増殖比に関する炉定数効果は、8 種類の炉心概念に関する値が 0.992～1.003 の範囲にあり、きわめて 1.0 に近いことがわかった。

表4.1 ナトリウム冷却大型酸化物燃料炉心における炉定数効果

核特性	評価時期	JFS-3-J3.2	次世代炉定数	補正值	備考
臨界性 (k-eff)	平衡サイクル初期	1.02878	1.02384	-0.494	補正值の単位は% Δk
	平衡サイクル末期	0.99928	0.99417	-0.511	
燃焼欠損反応度 (% Δk/kk')	平衡サイクル	2.7704	2.7512	0.993	差は-0.02%Δk
Naボイド反応度 (% Δk/kk')	平衡サイクル初期	2.5015	2.5086	1.003	
ドップラー反応度 (% Δk/kk')	平衡サイクル初期	-0.19233	-0.21871	1.137	
増殖比	平衡サイクル初期	1.241	1.243	1.001	

表4.2 ナトリウム冷却中型酸化物燃料炉心における炉定数効果

核特性	評価時期	JFS-3-J3.2	次世代炉定数	補正值	備考
臨界性 (k-eff)	平衡サイクル初期	1.02301	1.01784	-0.517	補正值の単位は% Δk
	平衡サイクル末期	0.98878	0.98349	-0.529	
燃焼欠損反応度 (% Δk/kk')	平衡サイクル	3.2804	3.2598	0.994	差は-0.02%Δk
Naボイド反応度 (% Δk/kk')	平衡サイクル初期	2.0845	2.0771	0.996	
ドップラー反応度 (% Δk/kk')	平衡サイクル初期	-0.18444	-0.20964	1.137	
増殖比	平衡サイクル初期	1.239	1.242	1.002	

表4.3 ナトリウム冷却中型金属燃料炉心における炉定数効果

核特性	評価時期	JFS-3-J3.2	次世代炉定数	補正值	備考
臨界性 (k-eff)	平衡サイクル初期	0.99338	0.98999	-0.340	補正值の単位は% Δk
	平衡サイクル末期	0.99016	0.98667	-0.349	
燃焼欠損反応度 (% Δk/kk')	平衡サイクル	-0.33532	0.38911	1.160	差は0.05%Δk
Naボイド反応度 (% Δk/kk')	平衡サイクル初期	3.4617	3.5415	1.023	
ドップラー反応度 (% Δk/kk')	平衡サイクル初期	-0.19246	-0.20695	1.075	
増殖比	平衡サイクル初期	1.088	1.080	0.992	

表4.4 鉛ビスマス冷却中型窒化物燃料炉心における炉定数効果

核特性	評価時期	JFS-3-J3.2	次世代炉定数	補正值	備考
臨界性 (k-eff)	平衡サイクル初期	0.99118	0.98662	-0.454	補正值の単位は% Δk
	平衡サイクル末期	0.97868	0.97406	-0.462	
燃焼欠損反応度 (% Δk/kk')	平衡サイクル	1.230	1.200	0.976	差は-0.03%Δk
冷却材ボイド反応度 (% Δk/kk')	平衡サイクル初期	2.261	2.454	1.085	
ドップラー反応度 (% Δk/kk')	平衡サイクル初期	-0.1073	-0.1316	1.227	
増殖比	平衡サイクル初期	1.323	1.328	1.003	

表4.5 炭酸ガス冷却大型酸化物燃料炉心における炉定数効果

核特性	評価時期	JFS-3-J3.2	次世代炉定数	補正值	備考
臨界性 (k-eff)	平衡サイクル初期	1.03355	1.02915	-0.439	補正值の単位は% Δk
	平衡サイクル末期	1.00843	1.00398	-0.446	
燃焼欠損反応度 (% Δk/kk')	平衡サイクル	2.394	2.391	0.999	差は-0.01%Δk以下
冷却材減圧反応度 (% Δk/kk')	平衡サイクル初期	0.4226	0.4688	1.109	
ドップラー反応度 (% Δk/kk')	平衡サイクル初期	-0.1595	-0.1837	1.152	
増殖比	平衡サイクル初期	1.241	1.243	1.001	

表4.6 ヘリウム冷却被覆粒子型燃料炉心における炉定数効果

核特性	評価時期	JFS-3-J3.2	次世代炉定数	補正值	備考
臨界性 (k_{-eff})	平衡サイクル初期	0.98365	0.98130	-0.236	補正值の単位は% Δk
	平衡サイクル末期	0.97967	0.97823	-0.144	
燃焼欠損反応度 (% $\Delta k/kk'$)	平衡サイクル	0.3123	0.4032	1.291	差は0.09% Δk
冷却材減圧反応度 (% $\Delta k/kk'$)	平衡サイクル初期	0.3052	0.3124	1.023	
ドップラー反応度 (% $\Delta k/kk'$)	平衡サイクル初期	-0.4909	-0.5473	1.115	
増殖比	平衡サイクル初期	1.353	1.340	0.991	

表4.7 ヘリウム冷却大型密封ピン型燃料炉心 (H12年度設計) における炉定数効果

核特性	評価時期	JFS-3-J3.2	次世代炉定数	補正值	備考
臨界性 (k_{-eff})	平衡サイクル初期	1.02094	1.02146	0.052	補正值の単位は% Δk
	平衡サイクル末期	1.00199	1.00246	0.046	
燃焼欠損反応度 (% $\Delta k/kk'$)	平衡サイクル	1.8612	1.8131	0.974	差は-0.05% Δk
冷却材減圧反応度 (% $\Delta k/kk'$)	平衡サイクル初期	-0.1790	-0.1739	0.972	
ドップラー反応度 (% $\Delta k/kk'$)	平衡サイクル初期	-0.1121	-0.1264	1.128	
増殖比	平衡サイクル初期	1.256	1.259	1.002	

注) JFS-3のNb-93は重み関数訂正後の値を使用した

表4.8 ヘリウム冷却大型密封ピン型燃料炉心 (H13年度設計) における炉定数効果

核特性	評価時期	JFS-3-J3.2	次世代炉定数	補正值	備考
臨界性 (k_{-eff})	平衡サイクル初期	1.03347	1.03332	-0.014	補正值の単位は% Δk
	平衡サイクル末期	1.00743	1.00718	-0.025	
燃焼欠損反応度 (% $\Delta k/kk'$)	平衡サイクル	2.6537	2.6882	1.013	差は0.03% Δk
Naボイド反応度 (% $\Delta k/kk'$)	平衡サイクル初期	-0.5979	-0.5812	0.972	
ドップラー反応度 (% $\Delta k/kk'$)	平衡サイクル初期	-0.0782	-0.0869	1.112	
増殖比	平衡サイクル初期	1.111	1.109	0.999	

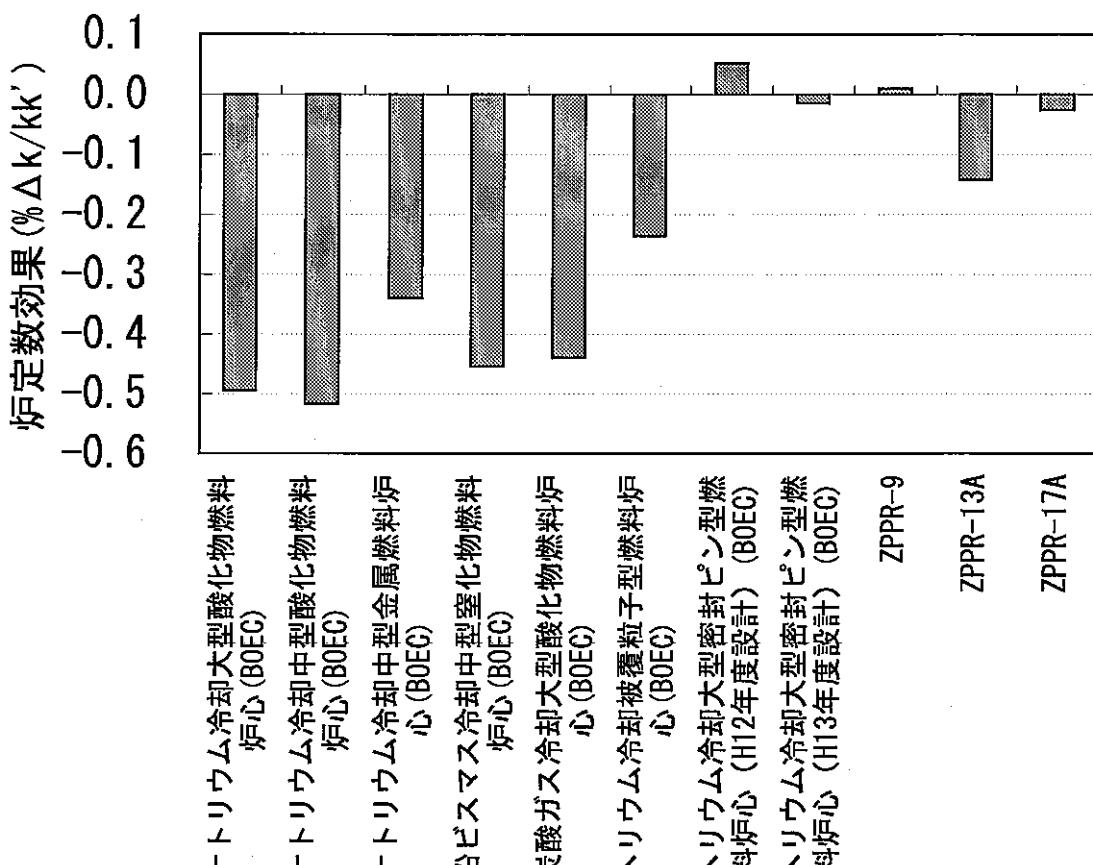


図4.1 膜界性に関する炉定数効果の比較

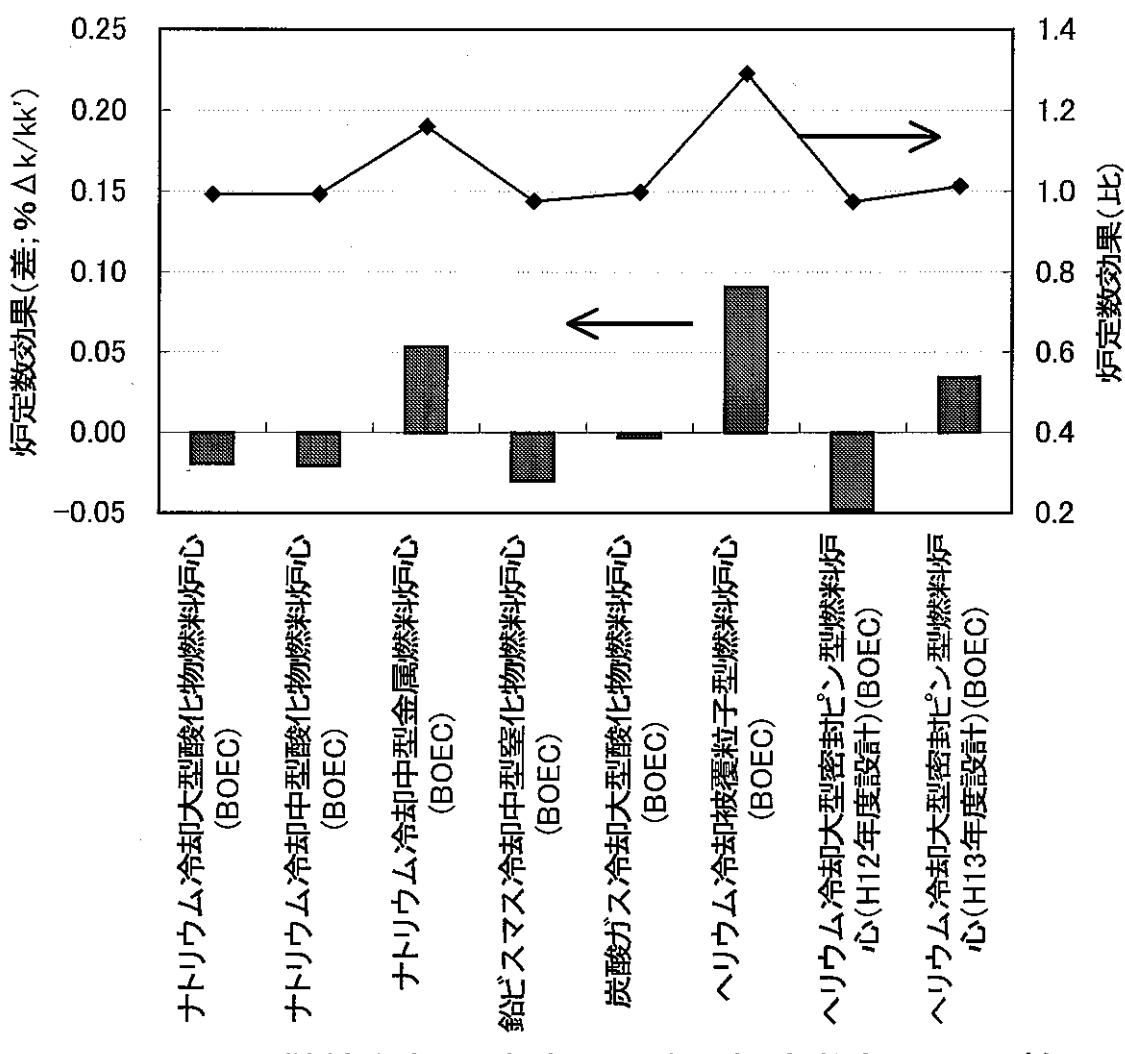


図4.2 燃焼欠損反応度に関する炉定数効果の比較

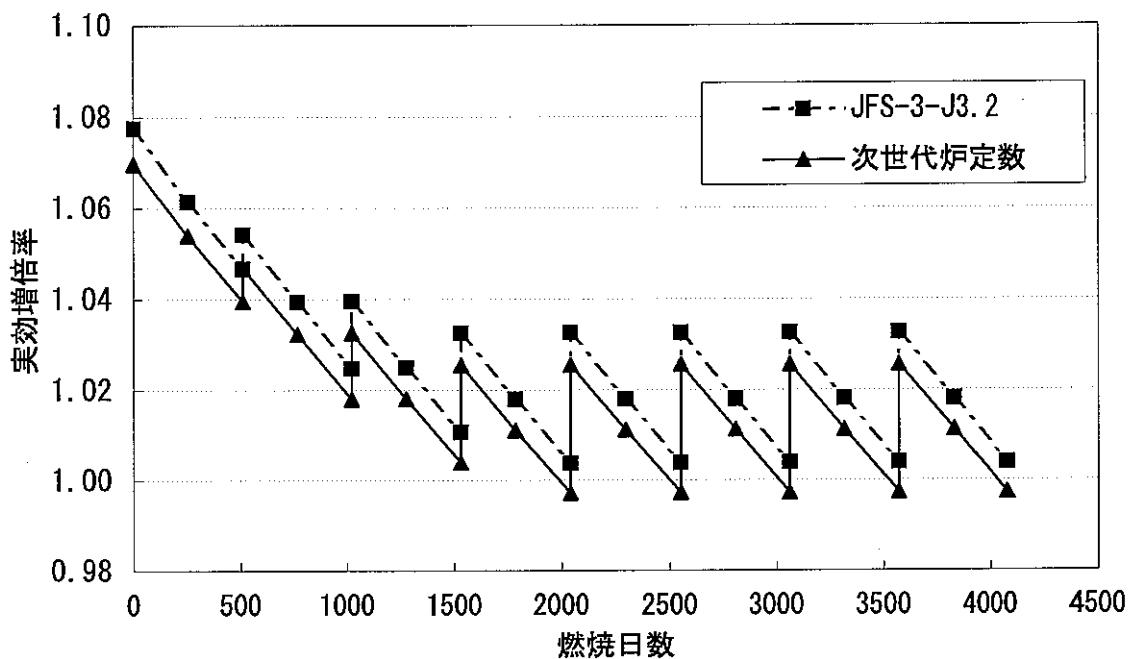


図4.3-1 燃焼に伴う実効増倍率の変化
(ナトリウム冷却中型酸化物燃料炉心)

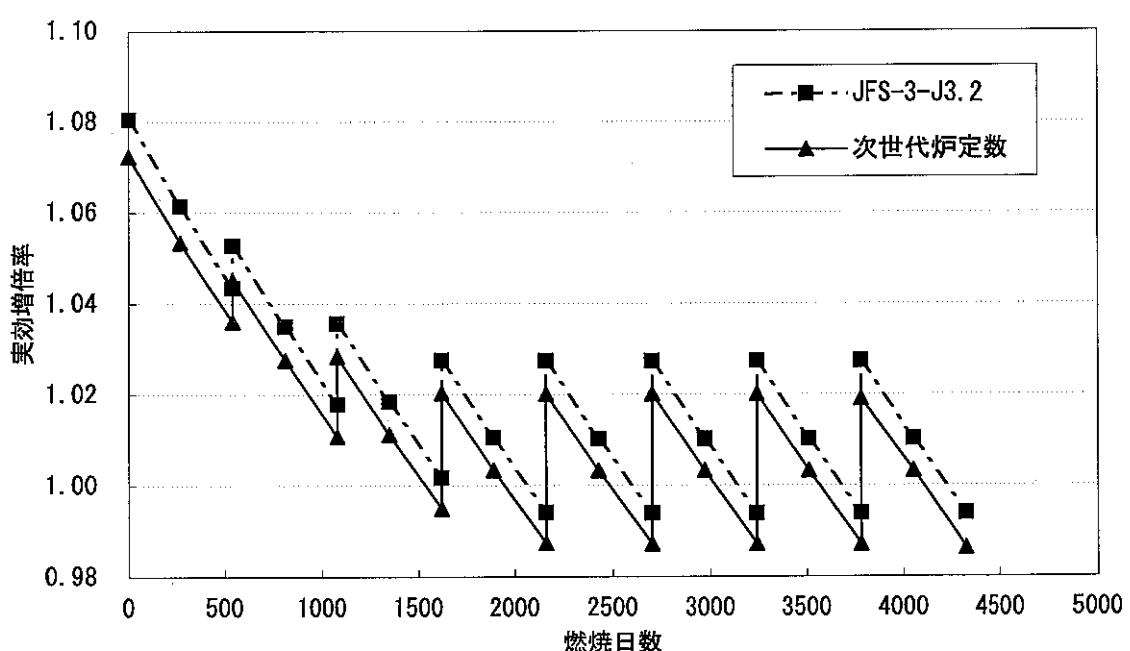


図4.3-2 燃焼に伴う実効増倍率の変化
(ナトリウム冷却中型酸化物燃料炉心)

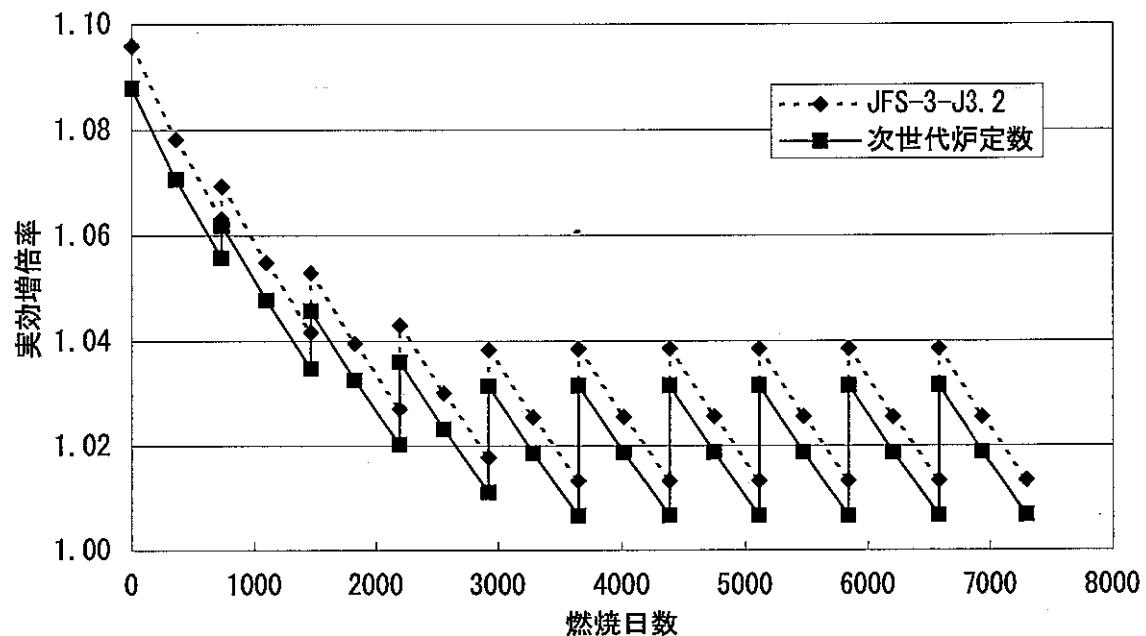


図4.3-3 燃焼に伴う実効増倍率の変化
(炭酸ガス冷却大型酸化物燃料炉心)

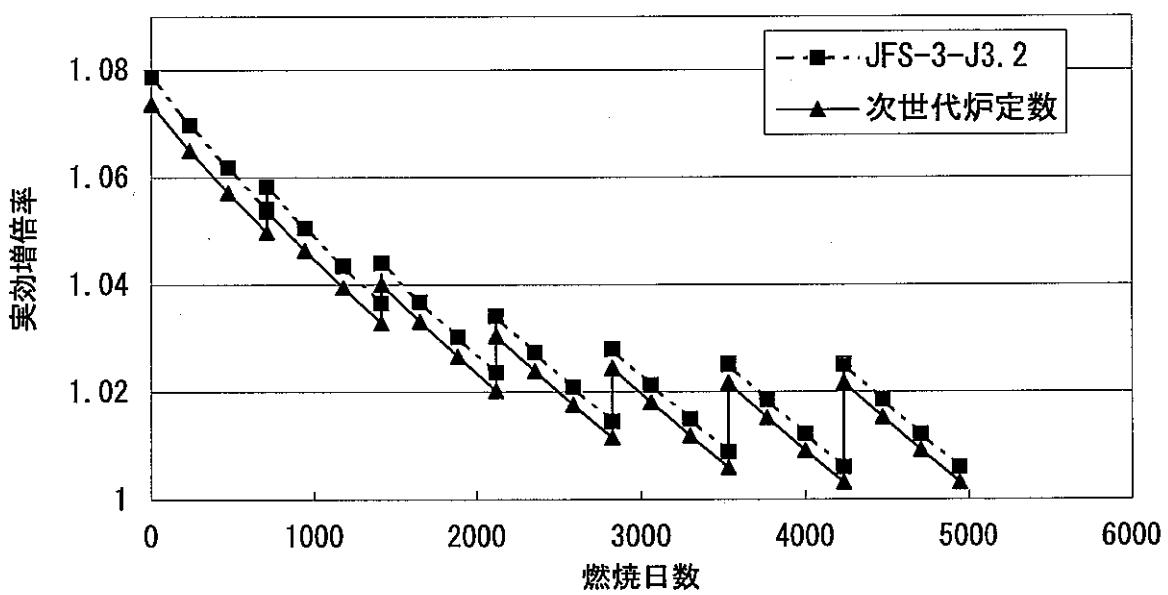


図4.3-4 燃焼に伴う実効増倍率の変化
(ヘリウム冷却大型密封ピン型燃料炉心 (H12年度設計))

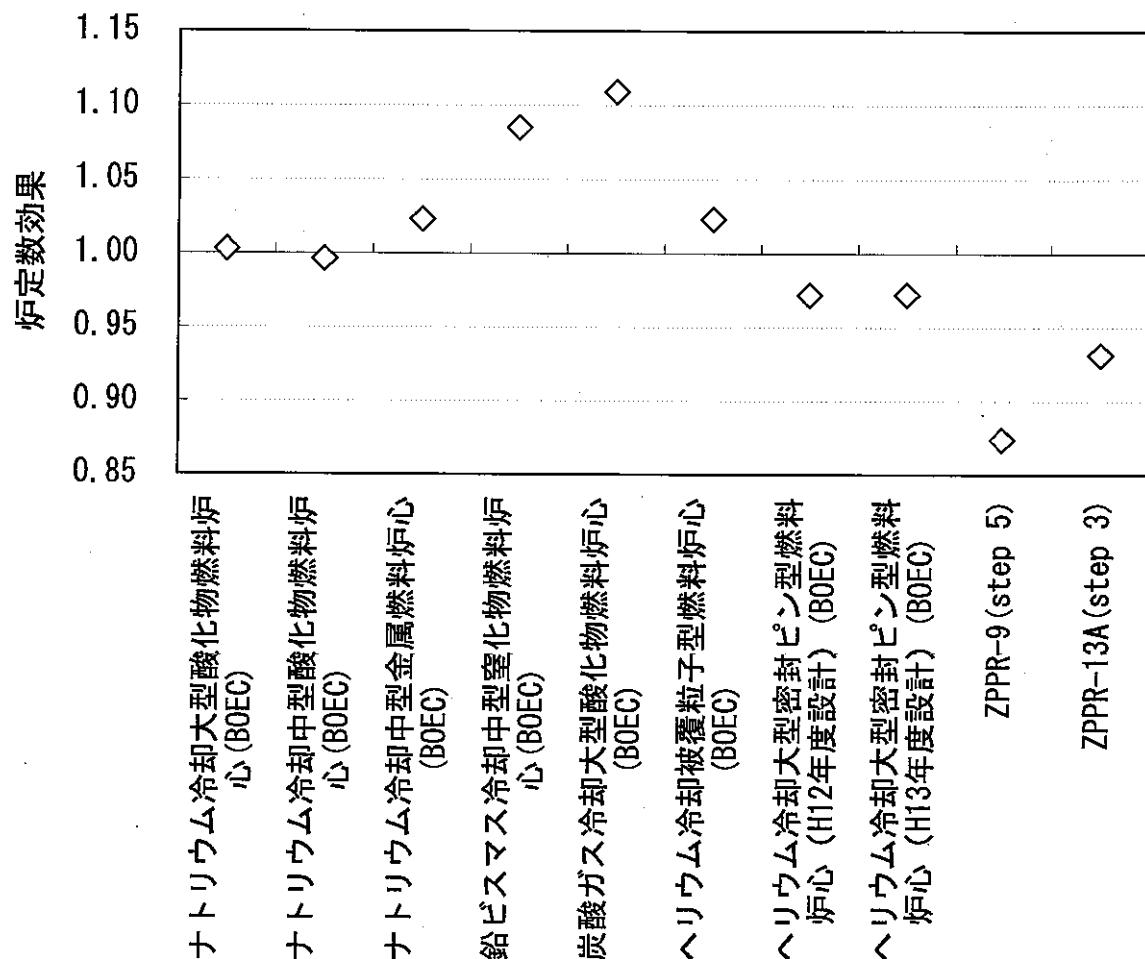


図4.4 冷却材ボイド反応度に関する炉定数効果の比較
(ガス冷却炉の場合は減圧反応度)

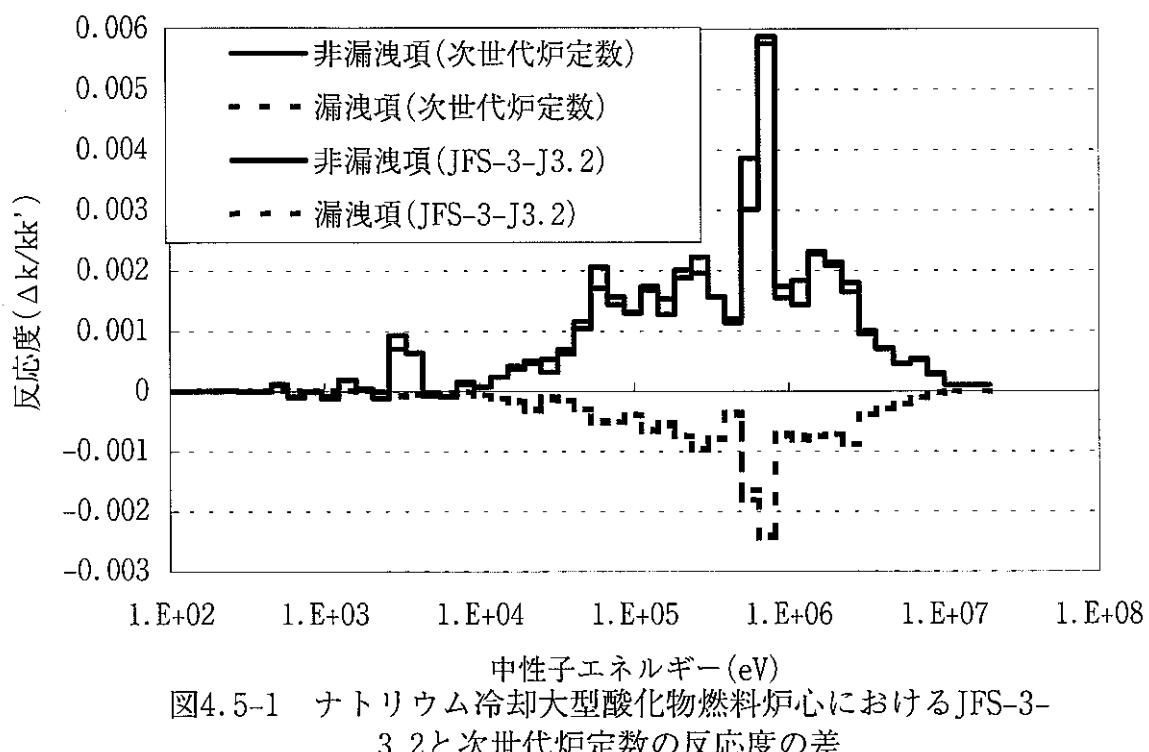


図4.5-1 ナトリウム冷却大型酸化物燃料炉心におけるJFS-3-3.2と次世代炉定数の反応度の差

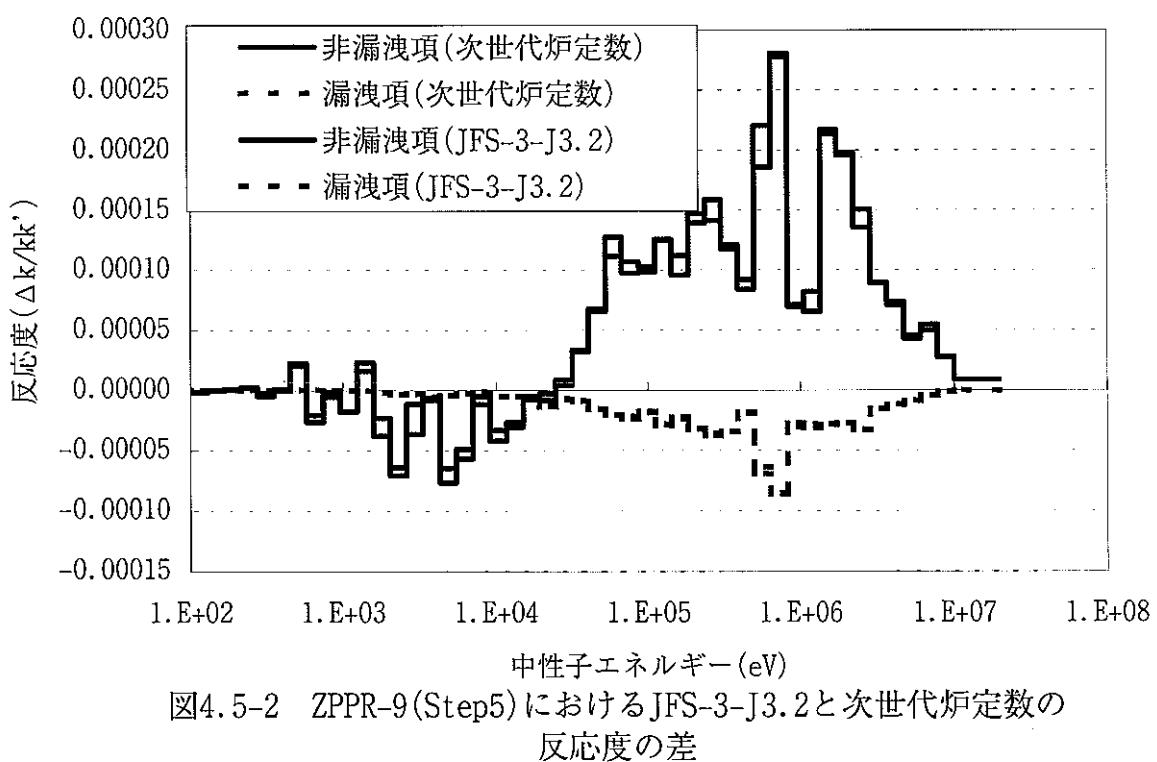


図4.5-2 ZPPR-9(Step5)におけるJFS-3-J3.2と次世代炉定数の反応度の差

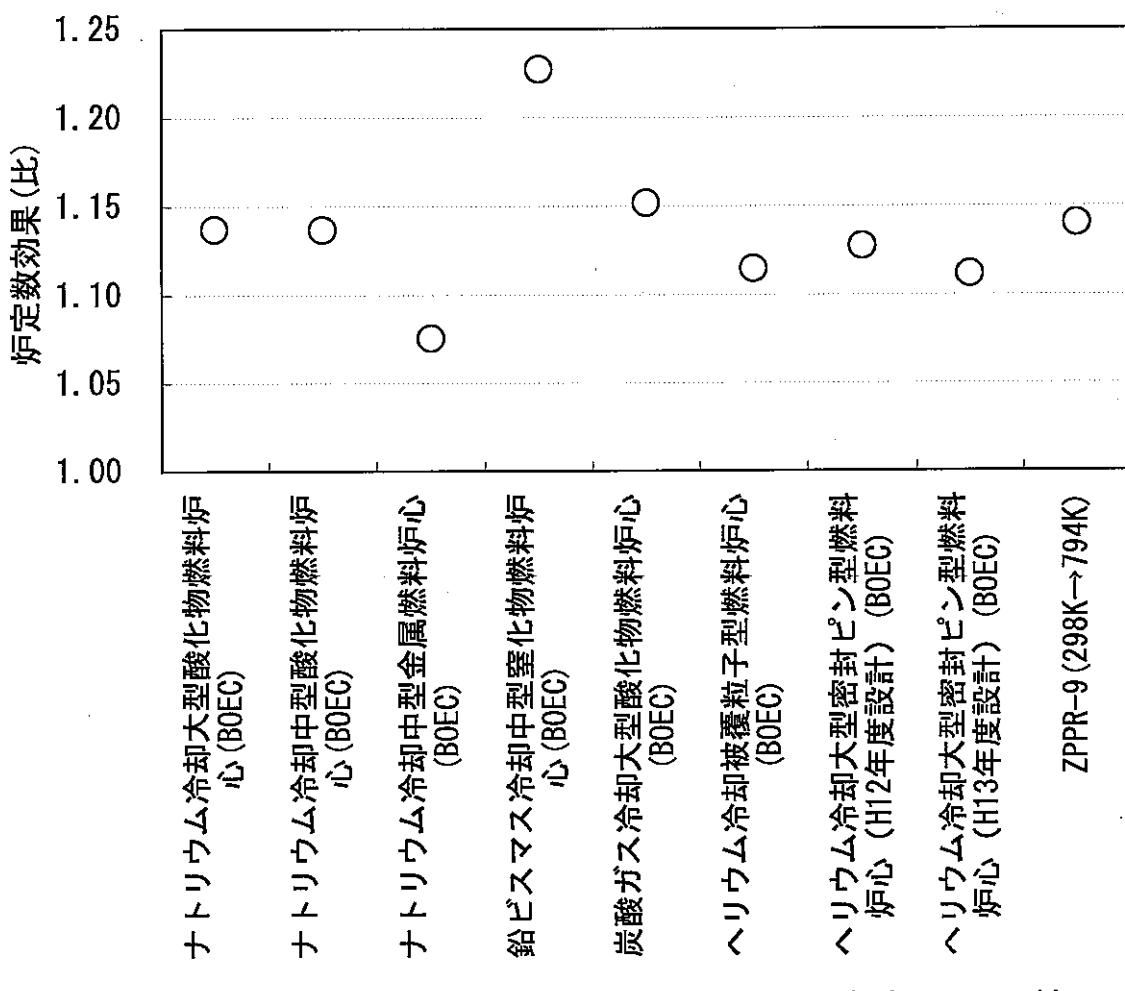


図4.6 ドップラー反応度に関する炉定数効果の比較

第5章 結言

実用化戦略調査研究で検討されている8種類の高速炉炉心概念を対象に、臨界性、燃焼欠損反応度、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、増殖比について、統合炉定数 ADJ2000 の使用に係る炉定数効果を評価した。その結果、炉定数効果は核特性及び炉心概念によって異なること、また臨界実験体系と設計体系との間にも差異が存在することが明らかになった。これらの評価結果が炉心設計検討に及ぼす影響の程度は、検討内容の詳細度に依存するが、新たな炉心概念の検討に先立って炉定数効果を予測したり、新たな臨界実験解析等によつて解析精度の向上を実現するためには、炉定数効果が発生するメカニズムの分析・把握が不可欠である。今後、炉定数効果をいくつかの因子に分解して詳細に分析することにより、炉心概念毎・核特性毎にその発生原因と大きさを把握していく予定である。

参考文献

-
- ¹ 石川眞、他、「高速炉用統合炉定数 ADJ2000 の作成」、JNC TN9400 2001-071、(2001 年 6 月)
 - ² T. Nakagawa, et al.: "Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-2: JENDL 3.2", Journal of Nuclear Science and Technology 32, p1259(1995)
 - ³ 高野秀機、他、:「速中性子エネルギー領域群定数作成コードシステム :TIMS-PGG」、JAERI-M 82-072 (1982 年 7 月)
 - ⁴ 鈎孝幸、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、pp.5-18、(2001 年 9 月)
 - ⁵ 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 年 8 月)
 - ⁶ 金子邦男、「次世代炉定数の整備」、JNC TJ9400 2000-005、(2000 年 3 月)
 - ⁷ 中川正幸、他、:「SLAROM : A Code for Cell Homogenization Calculation of Fast Reactor」、JAERI 1294 (1984 年)
 - ⁸ 中川正幸、他、「高速炉の核特性解析コードシステム」、JAERI-M 83-066、日本原子力研究所 (1983 年 4 月)
 - ⁹ 飯島進、他、「高速炉設計計算プログラム・2 (2 次元・3 次元拡散擾動理論計算コード : PERKY)」、JAERI-M 6993、日本原子力研究所 (1977 年 2 月)
 - ¹⁰ 林秀行、他、「各種燃料形態・炉心に関する設計評価(1)一ナトリウム冷却炉心の検討一」、サイクル機構技報 No.12 別冊、pp.55-67、(2001 年 9 月)
 - ¹¹ 林秀行、他、「各種燃料形態・炉心に関する設計評価(2)一重金属冷却炉心、ガス冷却炉心及び小型炉心の検討及び総合評価一」、サイクル機構技報 No.12 別冊、pp.69-82、(2001 年 9 月)
 - ¹² 核燃料サイクル開発機構、日本原子力発電株式会社、「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究 (フェーズ II) 2001 年度成果報告書」、JNC TN1400 2002-001、(2002 年 8 月)
 - ¹³ 横山賢治、他、「JENDL-3.2 に基づく大型高速炉用統合炉定数の整備」、JNC TN9400 99-042、(1999 年 4 月)
 - ¹⁴ 山館恵、他、「ナトリウム冷却高温プラントに適合する金属燃料炉心の検討」、日本原子力学会 2002 年秋の大会、いわき明星大学、2002 年 9 月 14 日～16 日、M34、pp410

謝 辞

炉定数効果を評価する対象とした高速炉炉心仕様の選定及び解析に必要な情報の入手については、高速増殖炉サイクル実用化戦略調査研究の炉心検討に活用する観点から、大洗工学センター／システム技術開発部／炉心・燃料システム Gr の杉野和輝副主任研究員に多大な尽力をいただいた。ここに謹んで感謝の意を表する。