

BN-600 ハイブリッド炉心の設計検討（I）
－我が国の手法による炉心核熱特性評価－
(研究報告)

2003年6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
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

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

BN-600 ハイブリッド炉心の設計検討 (I)
— 我が国の手法による炉心核熱特性評価 —
(研究報告書)

宇都 成昭*

要旨

ロシアの余剰核兵器解体プルトニウム（以下、解体 Pu と称する）をバイパック燃料製造技術で MOX 燃料にし、現在稼動中の高速炉 BN-600 で燃焼（ハイブリッド化）させる計画について、契約先であるロシア実験機械製造設計局 OKBM との設計作業が完了し、設計図書を入手した。

入手した BN-600 ハイブリッド炉心の設計情報に基づき、我が国の手法を用いて同炉心の核熱特性評価を行った。その結果、最大線出力、炉心平均取出燃焼度、ナトリウムボイド反応度、解体 Pu 処分能力、制御反応度収支の解析結果が、ロシアが設定した設計制限・目標を充足し、かつロシア規則を遵守していることがわかった。

本研究により、ロシアが選定した BN-600 ハイブリッド炉心の炉心・燃料仕様は炉心の核熱設計に関して妥当である可能性を有すること、我が国の手法による評価結果はロシア設計の信頼性向上に寄与し得ることが示された。

* 大洗工学センター システム技術開発部 炉心・燃料システムグループ

Design Study on BN-600 Hybrid Core (I)

- Evaluation of Core Neutronic and Thermalhydraulic Characteristics by Japanese Analysis Methods -
(Technical Report)

Nariaki UTO*

Abstract

A program of disposition of Russian weapon-grade plutonium by containing the plutonium in vibropacked MOX fuel subassemblies and burning them in the BN-600 hybrid reactor core has been progressed. The relevant design works on the BN-600 hybrid core were carried out under the contract between Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC) and OKB Mechanical Engineering (OKBM), Russian public enterprise, and completed. JNC obtained a series of design technical reports.

Japanese analysis methods were adopted to evaluate neutronic and thermal-hydraulic characteristics of the BN-600 hybrid core, based on the design technical data described in the obtained reports. The evaluation results of the key core performances, such as maximum linear heat rate, core-averaged discharge burnup, sodium void reactivity, capability of disposition of weapon-grade plutonium, and reactivity control balance, were found to satisfy the design criteria and/or targets provided by Russia, and meet the Russian rule.

The results of this study showed that the core and fuel specifications determined by Russia can be considered reasonable and proper in terms of neutronic and thermal-hydraulic design, and that the Japanese analysis methods are expected to contribute to increasing reliability of the Russian design works.

* Fuel and Core System Engineering Group, Systems Engineering Technology Division, OEC

目次

要旨

1 序論	1
2 設計の妥当性評価の視点	2
3 我が国の手法による評価のねらい	4
4 BN-600 ハイブリッド炉心の主要仕様	5
5 炉心核特性解析	7
5.1 解析手法	7
5.2 解析結果	9
6 炉心熱特性解析	14
6.1 解析手法	14
6.2 解析結果	14
7 我が国の手法による評価とロシア選定仕様の妥当性	15
8 まとめ	22
9 今後の予定	23
謝辞	24
参考文献	25
付録 1 径方向遮蔽体配置の非対称性について	49
付録 2 各種補正係数と燃料以外の炉心構成要素で生じる出力分担率	55

略語表

略語	正式表現	説明
MOX	Mixed Oxide	混合酸化物
OKBM	OKB Mechanical Engineering	実験機械製造設計局

表リスト

- 表 4-1 BN-600 炉心主要仕様（濃縮ウラン炉心、ハイブリッド炉心）
- 表 5.1-1 中性子エネルギー群構造（70 群、18 群）
- 表 5.2-1 BN-600 ハイブリッド炉心核特性解析結果
- 表 5.2-2 制御棒反応度価値解析結果（ハイブリッド炉心燃焼平衡初期）
- 表 6.1-1 燃料集合体最高温度評価用工学的安全係数
- 表 6.2-1 BN-600 ハイブリッド炉心 炉心流量領域毎の最大集合体出力
- 表 6.2-2 BN-600 ハイブリッド炉心熱特性解析結果

図リスト

- 図 4-1 BN-600 炉心の炉心構成図
- 図 4-2 BN-600 ハイブリッド炉心の炉心構成概念図
- 図 5.1-1 BN-600 ハイブリッド炉心核特性解析フロー
- 図 5.1-2 BN-600 ハイブリッド炉心核特性解析用水平断面図
- 図 5.1-3 BN-600 ハイブリッド炉心核特性解析用 RZ 断面図
- 図 5.2-1 集合体出力分布解析結果（ハイブリッド移行第 1 サイクル初期）
- 図 5.2-2 集合体出力分布解析結果（ハイブリッド移行第 1 サイクル末期）
- 図 5.2-3 集合体出力分布解析結果（ハイブリッド移行第 2 サイクル初期）
- 図 5.2-4 集合体出力分布解析結果（ハイブリッド移行第 2 サイクル末期）
- 図 5.2-5 集合体出力分布解析結果（ハイブリッド移行第 3 サイクル初期）
- 図 5.2-6 集合体出力分布解析結果（ハイブリッド移行第 3 サイクル末期）
- 図 5.2-7 集合体出力分布解析結果（ハイブリッド炉心燃焼平衡初期）
- 図 5.2-8 集合体出力分布解析結果（ハイブリッド炉心燃焼平衡末期）
- 図 6.2-1 BN-600 ハイブリッド炉心集合体番号

1 序論

核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構と称する）は、ロシアの余剰核兵器解体プルトニウム（以下、解体 Pu と称する）をバイパック燃料製造技術で MOX 燃料にし、現在稼動中の高速炉 BN-600 で燃焼させる計画（高速炉オプション）を推進して核軍縮への積極的な協力に努めている。その一環として、解体 Pu を含むバイパック MOX 燃料集合体を BN-600 に部分的に装荷（ハイブリッド化）した炉心について、BN-600 の設計機関であるロシアの国営企業である実験機械製造設計局 OKBM と契約を締結し、国際貢献の観点から設計を実施している。

本報は、我が国の手法を用いて BN-600 ハイブリッド炉心核熱特性解析を行い、その結果をもとにロシアが選定した炉心・燃料仕様の妥当性について評価したものである。

2 章では設計の妥当性を評価するための視点について、3 章では本報で述べる我が国の手法を用いた確認解析のねらいについてそれぞれ整理する。4 章では BN-600 ハイブリッド炉心の主要な炉心仕様について示す。5 章では炉心核、熱特性に関する我が国の解析手法について、6 章ではそれらを用いて得られた解析結果についてそれぞれ述べる。7 章では 2 章で述べた視点に沿って、それら解析結果を基に核熱設計の観点からロシアが選定した炉心・燃料仕様の妥当性について考察・評価し、8 章で全体を総括する。9 章で今後の予定について述べる。

2 設計の妥当性評価の視点

BN-600 ハイブリッド炉心の設計作業は、ロシア OKBM が実施主体として設計を行い、その結果を設計図書としてまとめ、許認可取得申請の手続きをとる、という流れで進められる。この設計図書は、本研究に関する日露間の契約でサイクル機構に納入するよう定められた物件であるとともに、OKBM が許認可取得のための材料として用いるものもある。したがって、契約機関の一方であるサイクル機構としては、将来において OKBM が許認可取得申請を円滑に進められるよう、OKBM の設計の妥当性を確認することが必要となる。そのためには、設計の妥当性を評価するための視点を整理しておく必要がある。

ここでは、以下に示す 4 つの視点が必要であると考える。

(視点 1) 評価手法の妥当性

評価には様々な解析コードやデータ類、さらには数学モデルや物理モデルが用いられるが、それら各々が許認可取得に適するだけの使用実績を有するか、以前に許認可取得に用いられたことがあるか、実験データとの比較等を通じて精度や機能が検証されているか、といった点を確認することが必要である。

(視点 2) ロシアが設定した設計制限・目標の妥当性

設計作業である以上、設計制限因子や達成すべき目標が存在する。これらを設計の実施主体が設定する場合、それらが単なる想像や見込みではなく、照射試験や臨界実験等の試験データに裏付けられたものなのか、あるいは試験データの取得・整備は十分ではないものの、既存炉（BN-600 等）の運転実績や許認可取得実績が反映されたものなのかどうかを確認する必要がある。

(視点 3) ロシア規則の遵守性

(視点 2) と異なり、実施主体の意向によらず、当該国の法律として遵守しなければならない規則が存在する。ロシアにおいては、制御系未臨界度や過渡時被覆管最高温度等に対して規則を設けた核規則が存在するが、こうした規則で定められている要求条件を評価結果が遵守しているかどうかを確認する必要

がある。

(視点 4) ロシアが設定した設計制限・目標の充足性

(視点 2) で述べた設計制限や目標を満足しているかどうかの確認が必要である。評価対象となる設計因子には、最大線出力のように一般の炉心設計でも評価対象とされているものから、解体 Pu 処分性能のように本研究で対象とする炉心に特有のものまで幅広く存在する。後述するように、ロシアでは、冷却材ボイド反応度は核規則で定量的な制限を設けられておらず、設計実施主体である OKBM がこれまでの許認可取得実績を踏まえて独自に制限を設けている。

本報では、以上 4 つの視点に立って、ロシアが選定した炉心・燃料仕様の妥当性を後述する我が国の手法による確認解析結果に基づき評価する。

3 我が国の手法による評価のねらい

前章で整理した設計の妥当性評価のための4つの視点のうち、（視点1）はロシアが用いる手法以外のものも選択肢として存在する。OKBMが許認可取得に用いる評価手法は基本的にはロシア国内で開発・整備されたものであるが、この（視点1）に我が国の手法を適用し、ロシア設計の妥当性を評価しようというのが、ここでいう“我が国の手法による評価”である。すなわち、この評価では、（視点2）～（視点4）で述べたロシア設計で用いられる設計制限・目標やロシア規則については同一のものを用い、評価手法のみ我が国を用いるというものである。

この“我が国の手法による評価”では、使用する核データや解析コード等はロシア側が用いるものと異なる。ところが、そのような異なる手法を用いても評価結果が設計要求条件を満足することを示すことができれば、“我が国の手法による評価”はロシアが進める設計の信頼性を一層高めることに貢献する。また、設計作業である以上、評価結果の中には設計要求条件を必ずしも満足しない項目も生じ得るが、そのような場合においても、単にロシアの設計が不適当であると短絡的に結論付けるのではなく、どの設計項目について評価精度を高めるべきか、といった今後詳細検討により解決すべき重点課題を明確にすることでできる。このことによって、その課題解決方策の提案と合わせ、ロシア設計の信頼性確保に貢献できるといえる。

以上のように、BN-600ハイブリッド炉心に我が国の手法を適用して解析を行なうことには、それによって得られる評価結果をロシアが行う設計の一層の信頼性確保に寄与するねらいがあり、それは将来においてOKBMが申請するBN-600ハイブリッド炉心の許認可取得を我が国として側面から支援することにつながるものである。

4 BN-600 ハイブリッド炉心の主要仕様

表 4-1 に BN-600 炉心の主要仕様を、現行の濃縮ウラン炉心とハイブリッド炉心の両者について示す。

表 4-1 に示すように、BN-600 ハイブリッド炉心は 4 サイクルで運転され、1 サイクルあたりの運転日数は 140 日である。後述するように、MOX 燃料集合体の総数は 91 体であるため、その取替体数は 1 サイクルあたり 22~23 体となる。

MOX 燃料集合体における Pu 富化度は PuO_2 重量比で 20wt%強であり、Pu 同位体組成に占める ^{239}Pu の割合は兵器級 Pu ゆえ 90wt%を超える。解体 Pu 処分性能の指標として $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ の比が重要であり、解体 Pu 処分を可能にするためにはこの値が 0.1 以上になることが必要であると米露間の共同研究により定められている。

現行の BN-600 濃縮ウラン炉心の炉心構成を図 4-1 に示す。BN-600 濃縮ウラン炉心は 369 体の濃縮ウラン燃料集合体から構成され、炉心の周囲を 362 体の径方向ブランケットが取り囲む。濃縮ウラン領域は、内側炉心（低濃縮）、中間炉心（中濃縮）、外側炉心（高濃縮）の 3 領域に分かれており、それぞれの ^{235}U 濃縮度は 17wt%、21wt%、26wt%である。

これに対して、図 4-2 に示すように BN-600 ハイブリッド炉心では、炉心部は BN-600 濃縮ウラン炉心と同様、 ^{235}U 濃縮度がそれぞれ異なる内側炉心、中間炉心、外側炉心の 3 種類に加えて、解体 Pu 処分のために設けられる兵器級 Pu を含む 91 体の MOX 燃料集合体から構成される。これは炉心燃料集合体の総数 394 体のうち約 1/5 に相当する。

ここで、MOX 燃料集合体の装荷について触れる。解体 Pu の処分性能をできるだけ高める観点からは装荷体数が多い方が望ましいが、過剰な装荷はナトリウムボイド反応度の有意な正側へのシフトを招くことが懸念される。91 体という装荷体数はこれらのバランスを考えて設定されたものである。また、その装荷位置については、中性子束レベルが高く、かつ Pu 装荷量を多く（高富化度）することが可能で、それによりできるだけ高い解体 Pu の処分性能を確保する

こと、また、外側炉心では中性子の炉心外漏洩効果が比較的大きいためナトリウムボイド反応度増大への影響が大きくないことを考慮し、図 4-2 にみるよう外側炉心の内側近傍が装荷位置に選定されている。

ところで BN-600 ハイブリッド炉心では、解体 Pu 処分過程において Pu の増殖を抑えるため、BN-600 濃縮ウラン炉心に装荷されている径方向プランケットがスティール (SUS) 遮蔽体および炭化ホウ素 (B_4C) 遮蔽体に置換されている。径方向プランケットが遮蔽体に置換されたことにより、元々径方向プランケットが分担していた出力分が削減されるが、これを補填するために、ハイブリッド炉心においては炉心燃料集合体数が若干増大している (BN-600 炉心 : 369 体、BN-600 ハイブリッド炉心 : 394 体)。

BN-600 ハイブリッド炉心では、BN-600 濃縮ウラン炉心と同様、以下 4 種類の制御棒が用いられる。

① SHR (粗調整棒)

起動時の温度補償や出力補償、運転中の燃焼補償に用いられる。

② CR (微調整棒)

要求される原子炉出力レベルへの調整や、SHR を用いて制御を行なう過程での燃焼補償に用いられる。

③ SCR (スクラム棒)

原子炉を緊急停止するために用いられる。

④ SCR-L : 1 ループスクラム棒

BN-600 ハイブリッド炉心においては 1 次系が 3 ループで構成されるが、そのうちの 1 ループが電源喪失し、原子炉出力を急速に部分出力にまで低下させる必要が生じた場合に用いられる。その他の緊急時においては、SCR とともに本制御棒も炉内に落下する。

5 炉心核特性解析

本章では、前章で述べた炉心・燃料仕様に基づき、BN-600 ハイブリッド炉心の核特性解析を行った。以下に解析手法および解析結果について述べる。

5.1 解析手法

本解析で用いた核特性解析フローを図 5.1-1 に、解析体系図を図 5.1-2 にそれぞれ示す。図 5.1-2 を RZ 体系にモデル化したものを図 5.1-3 に示す。

3 次元体系における計算では図 5.1-2 を、2 次元 RZ 体系における計算では図 5.1-3 をそれぞれ用いた。なお、実際の BN-600 ハイブリッド炉心は遮蔽体配置が非対称となっているが、図 5.1-2 のように体系を対称化することが解析結果に与える影響については付録 1 で考察した。

核定数には JENDL3.2^[1]に基づく 70 群炉定数調整断面積セット ADJ2000^[2]を用い、これに基づいて領域ごとの実効ミクロ断面積を SLAROM^[3]コードにより均質セル体系で求めた（ただし、非均質効果補正計算には、燃料ピンおよびラッパ管の非均質性を等価円柱で考慮した非均質セルモデルを使用）。中性子エネルギー 70 群およびその縮約群数として用いた 18 群構造を表 5.1-1 に示す。

解析項目と各々の項目に適用した解析手法を以下に示す。

(1) ハイブリッド炉心燃焼組成

前述の炉心仕様を基に、ハイブリッド炉心の燃焼平衡初期および末期の領域毎組成を 3 次元六角メッシュ体系燃焼・拡散計算により求めた。中性子エネルギー群数は 18 群、計算コードは CITATION^[4]である。なお、燃焼領域は、水平方向については燃料集合体数分だけ、軸方向は約 10 に分割して設けた。

(2) 臨界性

CITATION コードを用いた 3 次元三角メッシュ体系拡散計算により、中性子エネルギー群数 18 群で求めた。

この計算結果に対し、付録 2 に示す予備解析で求めた非均質効果、輸送効果、空間メッシュ効果、群縮約効果を補正係数として適用した。

(3) 制御棒反応度価値

CITATION コードを用いた 3 次元三角メッシュ体系拡散計算により、中性子エネルギー群数 18 群で求めた。

この計算結果に対し、付録 2 に示す予備解析で求めた非均質効果、輸送効果、空間メッシュ効果、均質化断面積効果を補正係数として適用した。

(4) ナトリウムボイド反応度

TWOTRAN-II^[5]コードを用いた 2 次元 RZ 体系輸送計算により、中性子エネルギー群数 70 群で求めた。

この計算結果に対し、付録 2 に示す予備解析で求めた非均質効果を補正係数として適用した。

(5) ドップラー係数

CITATION コードを用いた 2 次元 RZ 体系拡散計算により、中性子エネルギー群数 70 群で求めた。

この計算結果に対し、付録 2 に示す予備解析で求めた非均質効果を補正係数として適用した。

(6) 燃焼特性（燃焼反応度、最大線出力、最大高速中性子照射量、燃焼度、出力分布、サイクル物量収支）

CITATION コードを用いた 3 次元三角メッシュ体系拡散計算により、中性子エネルギー群数 18 群で求めた。制御棒挿入深度は、燃焼平衡初期においては SHR,CR はほぼ半挿入状態、SCR,SCR-L は全引き抜き状態とし、燃焼平衡末期においては CR のみほぼ半挿入状態、残りの種類は全引き抜き状態とした。

燃料以外の炉心構成要素で生じる出力 (γ 発熱) については、付録 2 に示す予備解析で求めた結果を適用した。

(7) 動特性パラメータ

CITATION コードを用いた 2 次元 RZ 体系拡散計算により、体系の中性子束

および随伴中性子束を算出し、それらを用いて摂動計算コード PERKY^[6]を用いて求めた。中性子エネルギー群数は 18 群である。

遅発中性子収率と崩壊定数のデータは Tuttle のデータ^[7]、遅発中性子スペクトルは Saphier 達のデータ^[8]を各々用いた。

5.2 解析結果

以下、①～⑫について解析結果を表 5.2-1、表 5.2-2 に示す。

① BN-600 炉心の燃焼反応度：表 5.2-1

BN-600 ハイブリッド炉心の燃焼組成データを得るため、濃縮ウラン燃料からなる BN-600 炉心の燃焼平衡末期における燃焼組成を CITATION コードによる 2 次元 RZ 拡散・燃焼計算により求めた。

燃焼平衡末期の実効増倍率は 0.9966 であり、燃焼反応度は $2.2\% \Delta k/kk'$ となつた。

② ハイブリッド炉心の臨界性：表 5.2-1

燃焼平衡末期における実効増倍率は、メッシュ効果、群縮約効果、輸送効果、燃料非均質効果、中性子ストリーミング効果を合わせた補正係数 1.0140 を考慮し、1.0128 となつた。

③ ハイブリッド炉心の燃焼反応度：表 5.2-1

BN-600 炉心の燃焼計算で得られた燃焼平衡末期における燃焼組成をハイブリッド移行第 1 サイクル初期の燃焼組成として、3 次元六角メッシュ拡散・燃焼計算によりハイブリッド炉心の燃料組成を得た。これを基に、3 次元六角メッシュ拡散計算によりハイブリッド炉心の燃焼反応度を求めた結果、 $2.3\% \Delta k/kk'$ となつた。

本解析結果は後述する制御反応度収支の成立性評価に用いられる。

④ ハイブリッド炉心の最大線出力：表 5.2-1

濃縮ウラン燃料領域においては、中間炉心での値が最大で $439W/cm$ 、MOX 燃料

⑤ ハイブリッド炉心の最大高速中性子照射量 (0.1MeV 以上) : 表 5.2-1

濃縮ウラン燃料領域においては、内側炉心での値が最大で $2.1 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$ 、MOX 燃料領域では $1.8 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$ となった。いずれも取出燃料に対する値である。

⑥ ハイブリッド炉心の燃焼度 : 表 5.2-1

炉心の取出平均燃焼度は約 6.7 万 MWd/t であり、集合体最高燃焼度は濃縮ウラン燃料では中間炉心で最大となり約 7.9 万 MWd/t、MOX 燃料では約 6.7 万 MWd/t となった。

⑦ ハイブリッド炉心の領域別出力分担率 : 表 5.2-1

1 サイクルにわたって炉心部が 95% 近くを占めており、その中でも集合体本数が最も多い内側炉心は 40% 以上を、MOX 燃料領域はその約半分である 20% 近くをそれぞれ占めていることがわかる。

⑧ ハイブリッド炉心の $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 重量比 : 表 5.2-1

ハイブリッド移行第 1 サイクルに装荷し、ハイブリッド炉心の燃焼平衡末期に取り出した MOX 燃料集合体における、装荷時と取出時の $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 重量比はそれぞれ 0.07、0.15 となった。MOX 燃料取出時では解体 Pu 処分に要求される 0.1 以上の条件を満足していることがわかる。

なお、MOX 燃料取出時は 4 サイクル後であるが、表 5.2-1 の結果より $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 重量比が 0.1 となるのはほぼ 2 サイクル後であると考えられる。BN-600 ハイブリッド炉心の設備利用率を現行 BN-600 炉心の設備利用率を参考に 75% 程度と仮定すると、運転開始後約 1 年で解体 Pu を処分できる可能性があるということになる。

⑨ ハイブリッド炉心のナトリウムボイド反応度 : 表 5.2-1

燃焼平衡末期におけるナトリウムボイド反応度は、炉心部及び上部軸方向ブランケット部をボイド化した場合が $0.38\% \Delta k/kk'$ ($0.61\$$)、炉心部のみをボイド化した場合が $0.44\% \Delta k/kk'$ ($0.71\$$) となった。いずれの値も即発臨界のしきい

値である 1\$を下回っている。

なお、これらの算出には非均質効果として-0.0394% $\Delta k/kk'$ を補正量に用いた。

⑩ ハイブリッド炉心のドップラー係数：表 5.2-1

燃焼平衡初期および末期に対し、非均質効果として 1.0544 を補正量に用いて算出した結果、燃焼平衡初期で-7.50、燃焼平衡末期で-8.24（いずれも単位は $\times 10^{-3} \text{Tdk/dT}$ ）となった。燃焼平衡初期の方が燃焼平衡末期よりも絶対値が小さくなっているが、これは燃焼平衡初期では制御棒の挿入による低エネルギー中性子の吸収が大きいため、これら中性子の共鳴吸収効果が妨げられるためと考えられる。

ここで、燃焼平衡末期における炉心部の各領域のドップラー係数の値は以下のようになった（非均質効果補正済み）。

- ・ 内側炉心 : $-4.65 \times 10^{-3} \text{Tdk/dT}$
- ・ 中間炉心 : $-1.05 \times 10^{-3} \text{Tdk/dT}$
- ・ MOX 炉心 : $-1.11 \times 10^{-3} \text{Tdk/dT}$
- ・ 外側炉心 : $-0.65 \times 10^{-3} \text{Tdk/dT}$

これらの絶対値をその各々の領域の集合体本数で除すと、内側炉心、中間炉心、MOX 炉心、外側炉心の順に 0.27、0.18、0.12、0.09 となり（いずれも単位は $\times 10^{-4} \text{Tdk/dT}$ ）、内側炉心、中間炉心、外側炉心の各値の大小関係は ^{235}U 濃縮度の大小関係（内側 < 中間 < 外側）と一意に対応している。MOX 炉心については、核分裂性プルトニウムの組成比が高い兵器級プルトニウムを含んでいるものの、中間炉心と外側炉心のほぼ中間の値を示しており、濃縮ウラン燃料領域と比べて炉心全域にわたるドップラー係数への寄与は特段小さいことにはなっていない。これは、プルトニウム以外の重金属が劣化ウランであるため、燃料中に占める ^{238}U の重量比が 80% 近くを占め、濃縮ウラン領域と大きくは異なることと、濃縮ウラン領域には含まれない ^{240}Pu が数% 含まれており、これがドップラー係数に有意に寄与していることが要因であると考えられる。

⑪ ハイブリッド炉心の実効遅発中性子割合および即発中性子寿命：表 5. 2-1

実効遅発中性子割合は燃焼平衡初期、末期ともに 0.006 を若干上回る値となつた。既往研究によれば、ナトリウム冷却大型 MOX 燃料高速炉炉心の実効遅発中性子割合は 0.0033 程度であるが^[9]、それに比べて本ハイブリッド炉心の値は 2 倍近い大きな値を示している。これは、実効遅発中性子割合の値は炉心に占める主要核分裂性核種の種類に大きく影響され、本ハイブリッド炉心においては主要核分裂性物質が ^{235}U であるためである。

一方、即発中性子寿命をみると、約 $0.43\ \mu\text{s}$ であり、ナトリウム冷却大型 MOX 燃料高速炉炉心を対象とした既往研究で示されている約 $0.37\ \mu\text{s}$ ^[7] と大きな差はない。これは、即発中性子寿命の場合、その支配因子が中性子束と随伴中性子束のエネルギー分布であることと、ナトリウム冷却大型 MOX 燃料高速炉炉心も本ハイブリッド炉心とともにナトリウムを冷却材としているため、これらエネルギー分布に本質的な違いが生じないためである。

⑫ 制御棒反応度価値および未臨界度：表 5. 2-2

燃焼平衡初期を対象に制御棒反応度価値を求めた。

表 5. 2-2 に示した第 1 系統制御棒とは 4 章で説明した SHR と CR、第 2 系統制御棒とは同じく SCR と SCR-L をそれぞれ指す。

第 1 および第 2 系統全制御棒の 1 ロッドスタック時の反応度価値は、補正係数 0.939 を考慮して $7.35\% \Delta k/kk'$ となった。

第 1 系統制御棒の反応度価値は、全数で $5.73\% \Delta k/kk'$ （補正係数 0.956 を考慮）、1 ロッドスタック時で $5.40\% \Delta k/kk'$ （補正係数 0.955 を考慮）となった。

第 2 系統制御棒の 1 ロッドスタック時の反応度価値は、補正係数 0.908 を考慮して $2.01\% \Delta k/kk'$ となった。

これらの結果に基づき、ロシア核規則においてその遵守性評価の対象となっている以下 4 ケースの未臨界度を求めた。

- ・ 燃料交換中における、全制御棒の 1 ロッドスタック条件での未臨界度
- ・ 緊急停止棒引き上げ時における、第 1 炉停止系制御棒の全数挿入条件での未臨界度
- ・ 原子炉運転中における、第 1 炉停止系制御棒の 1 ロッドスタック条件での未

臨界度

- 原子炉運転中における、第2炉停止系制御棒の1ロッドスタック条件での未臨界度

その結果、各ケースの未臨界度は $3.74\% \Delta k/kk'$ 、 $2.12\% \Delta k/kk'$ 、 $1.66\% \Delta k/kk'$ 、 $0.77\% \Delta k/kk'$ となった。

その他、ハイブリッド移行第1サイクル初期からハイブリッド到達炉心燃焼平衡末期における炉心出力分布を図5.2-1～図5.2-8に示す。これらの結果は次章における熱特性解析に用いられる。

6 炉心熱特性解析

6.1 解析手法

本研究では、前章で求めた出力分布を用いて、炉心流量領域ごとにサブチャネル解析により被覆管およびラッパ管の温度を求めた。なお、炉心流量領域数は、内側炉心 2、中間炉心、MOX 炉心がともに 1、外側炉心が 2 の合計 6 である。

被覆管およびラッパ管のホットスポット温度評価に用いる工学的安全係数を表 6.1-1 に示す。

6.2 解析結果

炉心流量領域毎の最大集合体出力を表 6.2-1 に示す。同表の中に示した[]内の数字は最大出力を発生した集合体位置であり、図 6.2-1 に示す集合体番号で表されている。

解析の結果得られた、炉心各流量領域の被覆管およびラッパ管温度を表 6.2-2 に示す。被覆管最高温度は、内側炉心が 708°C、中間炉心が 700°C、MOX 炉心が 708°C、外側炉心が 689°C となった。

7 我が国の手法による評価とロシア選定仕様の妥当性

前章までに得られた解析結果を 2 章で示した 4 つの視点に立って評価するとともに、ロシアが選定した炉心・燃料仕様の妥当性について、3 章で述べたように“我が国の手法による評価”がロシア設計の信頼性向上に寄与し得るかどうかの観点から考察する。

まず、評価対象として、本研究では以下の炉心特性を取り上げた。

- ① 最大線出力
- ② 炉心平均取出燃焼度
- ③ ナトリウムボイド反応度
- ④ 解体 Pu の処分性能 ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 重量比)
- ⑤ 制御反応度収支

上記以外に、被覆管最高温度は熱設計成立性に係わる重要な特性であるが、定格時の被覆管最高温度についてはロシア設計では制限値や規則が設けられていないため、ここでは評価対象外とした。なお、本報で示した被覆管最高温度評価結果については、現在我が国の手法に基づいて行っている「設計基準事象における安全解析」において安全性成立の判断の観点から評価を進めており、評価終了後に結果を報告する予定である。

また、最大高速中性子照射量は、燃料ピンやラッパ管の照射スエリング特性等に影響を及ぼし、燃料設計を行う上で重要な核特性であるが、これについては現在、BN-600 ハイブリッド炉心の物性式に基づく照射特性を評価しており、評価終了後に上記の被覆管最高温度と合わせて報告する予定である。

以下、上記 5 つの特性についてロシア設計が選定した炉心・燃料仕様の妥当性を考察する。

- ①最大線出力
- (視点 1) 評価手法の妥当性

核定数 ADJ2000 を用いた 3 次元三角メッシュ体系による中性子エネルギー 18 群拡散計算は、サイクル機構における実用化戦略調査研究をはじめ、我が国における高速炉炉心標準核設計手法の一つとして定着しており、信頼性が高い。また、解析に用いた CITATION コードは、国内外を問わず、設計から実験解析に至るまで広範囲に用いられているとともに、国内においても「常陽」、「もんじゅ」の許認可取得に用いられ、使用実績が豊富である。このことから、本研究で選定した“我が国の評価手法”は妥当であるといえる。

(視点 2) ロシアが設定した設計制限・目標の妥当性

ロシアでは、OKBM が設計制限として 460W/cm 以下を目安に設定している。これは、既存炉 BN-600 における実績と、それに対する安全余裕を確保することを考慮して設定されたもので、設定根拠が明確である。したがって、設計制限の与え方は妥当であると判断される。

(視点 3) ロシア規則の遵守性

最大線出力についてはロシア規則上の要求条件が存在しないため、本視点は妥当性評価の対象外となる項目である。

(視点 4) ロシアが設定した設計制限・目標の充足性

5 章で示したように、最大線出力の最大値は 439W/cm である。これは、(視点 2) で述べた設計制限の目安値 460W/cm を下回っており、設計制限を充足している。

以上のことから、最大線出力の評価結果については、ロシア設計の信頼性向上に寄与し得ると結論される。

②炉心平均取出燃焼度

(視点 1) 評価手法の妥当性

「①最大線出力」の評価に用いた手法と同一であり、①の(視点 1)と同様、本研究で選定した“我が国の評価手法”は妥当であるといえる。

(視点 2) ロシアが設定した設計制限・目標の妥当性

ロシアでは、OKBM が設計目標として 68,000MWd/t 以上を設定している。これは、既存の BN-600 濃縮ウラン炉心における約 60,000MWd/t を経済性向上の観点から改善するために設けられたものである。BN-600 濃縮ウラン炉心の 3 バッチ燃料交換をハイブリッド炉心では 4 バッチに変更し、炉内滞在日数を増大させる設計が行われていることから、燃焼度の改善は単なる憶測ではなく物理的に予想できることである。したがって、設計目標の与え方は妥当であると判断される。

(視点 3) ロシア規則の遵守性

炉心平均取出燃焼度についてはロシア規則上の要求条件が存在しないため、本視点は妥当性評価の対象外となる項目である。

(視点 4) ロシアが設定した設計制限・目標の充足性

5 章で示したように、炉心平均取出燃焼度は 66,600MWd/t である。これは、(視点 2) で述べた設計目標下限値の 68,000MWd/t を約 2%だけ下回っているが、既存の BN-600 濃縮ウラン炉心の値を上回る結果を示している。

炉心平均取出燃焼度について目標をどの程度まで充足するかは、ロシアが目指す経済性改善の程度に関係する。本解析で得た 66,600MWd/t という値は、現行 BN-600 濃縮ウラン炉心の燃焼度 60,000MWd/t に比べて 11% 増大しているが、これは目標下限値の 68,000MWd/t に対する不足分約 2% を大きく上回るものである。このようなケースでは、ロシア側の判断により、少なくとも現在の燃焼度に対する有意な改善効果は得られたという意味で、評価結果を許容する可能性があることは十分予想できるものである。したがって、本解析結果はロシア側の判断による若干の目標緩和の可能性の余地を見込んで、目標を充足していると判断する。

以上のことから、炉心平均取出燃焼度の評価結果については、ロシア設計の信頼性向上に寄与し得ると結論される。

③ナトリウムボイド反応度

(視点 1) 評価手法の妥当性

核定数 ADJ2000 を用いた 2 次元 RZ 体系による中性子エネルギー 70 群輸送計算は、サイクル機構における実用化戦略調査研究をはじめ、我が国における高速炉炉心標準核設計手法の一つとして定着しており、信頼性が高い。また、非均質効果がナトリウムボイド反応度において有意となることは、ボイド化という物理現象により変化する中性子輸送挙動が中性子漏洩場の幾何学的構造に影響を受けやすいという物理特性から予想できることである。このため、我が国の高速炉の炉心設計解析においても非均質効果は標準的に導入されている。

解析に用いた TWOTRAN-II コードは、ナトリウムボイド反応度のように中性子の流れが拡散近似では十分に表現しきれない物理現象を精度良く評価するツールとして、国内外の多数の研究機関において利用されてきた経緯があり、使用実績が豊富である。

のことから、本研究で選定した“我が国の評価手法”は妥当であるといえる。

(視点 2) ロシアが設定した設計制限・目標の妥当性

ロシアでは、OKBM が設計制限として 1\$未満を目安に設定している。これは、既に許認可を取得した BN-800 炉の設計で得た考え方に基づいており、設定根拠が明確である。したがって、設計制限の与え方は妥当であると判断される。

(視点 3) ロシア規則の遵守性

ナトリウムボイド反応度についてはロシア規則上の要求条件が存在しないため、本視点は妥当性評価の対象外となる項目である。

(視点 4) ロシアが設定した設計制限・目標の充足性

5 章で示したように、ナトリウムボイド反応度はより大きい値を示している燃焼平衡末期において 0.71\$である。これは（視点 2）で述べた設計制限の目

安値 1\$を下回っており、設計制限を充足している。

以上のことから、ナトリウムボイド反応度の評価結果については、ロシア設計の信頼性向上に寄与し得ると結論される。

④解体 Pu の処分性能 ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 重量比)

(視点 1) 評価手法の妥当性

「①最大線出力」の評価に用いた手法と同一であり、①の（視点 1）と同様、本研究で選定した“我が国の評価手法”は妥当であるといえる。

(視点 2) ロシアが設定した設計制限・目標の妥当性

ロシアでは、OKBM が設計制限として $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 重量比に対し 0.1 以上を設定している。これは、解体 Pu 処分成立条件として国際的（米露協定）に定義されたものであり、設定根拠が明確である。したがって、設計制限の与え方は妥当であると判断される。

(視点 3) ロシア規則の遵守性

$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 重量比についてはロシア規則上の要求条件が存在しないため、本視点は妥当性評価の対象外となる項目である。

(視点 4) ロシアが設定した設計制限・目標の充足性

5 章で示したように、 $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 重量比は MOX 燃料取出時において 0.15 である。これは（視点 2）で述べた設計制限下限値 0.1 を上回っており、設計制限を充足している。

以上のことから、解体 Pu の処分性能の評価結果については、ロシア設計の信頼性向上に寄与し得ると結論される。すなわち、現行のロシア設計においては、我が国の手法による核熱特性評価によれば、BN-600 に MOX 燃料を装荷し解体 Pu を処分することは可能である。

⑤制御反応度収支

(視点 1) 評価手法の妥当性

核定数 ADJ2000 を用いた 3 次元三角メッシュ体系による中性子エネルギー 18 群拡散計算と CITATION コードの適用は、「①最大線出力」の評価で選定した方法と同一であり、信頼性が高い。

制御すべき反応度解析に不確かさを 10%考慮すること、さらに制御棒反応度価値にメッシュ効果、群縮約効果、輸送効果、均質化断面積効果を補正とともに計算予測誤差を 9%考慮することは、実証炉設計やサイクル機構の実用化戦略調査研究を始め、国内の多くの高速炉核設計に用いられている標準的手法である。

のことから、本研究で選定した“我が国の評価手法”は妥当であるといえる。

(視点 2) ロシアが設定した設計制限・目標の妥当性

制御反応度収支については、ロシア核規則において制限が設けられているため、本視点は妥当性評価の対象外となる項目である。

(視点 3) ロシア規則の遵守性

ロシアでは核規則において、制御反応度収支に関し以下の要求項目を遵守することが定められている。

- (a) 燃料交換中において、全制御棒が 1 ロッドスタック条件で $2\% \Delta k/kk'$ 以上の未臨界度を確保すること。
- (b) 緊急停止棒引き上げ時において、第 1 炉停止系制御棒が全数挿入条件で $1\% \Delta k/kk'$ 以上の未臨界度を確保すること。
- (c) 原子炉運転中において、第 1 炉停止系制御棒が 1 ロッドスタック条件で未臨界を確保すること。
- (d) 原子炉運転中において、第 2 炉停止系制御棒が 1 ロッドスタック条件で未臨界を確保すること。

そこで、5 章で示した制御反応度収支の解析結果を上記 4 つの各項目に照ら

して評価した結果、以下の通りとなった。

- (a) 燃料交換中における全制御棒の未臨界度（1 ロッドスタック条件）は 3.74% $\Delta k/kk'$ である。これは 2% $\Delta k/kk'$ を上回っており、核規則における要求を充足している。
- (b) 緊急停止棒引き上げ時における第 1 炉停止系制御棒の未臨界度（全数挿入条件）は 2.12% $\Delta k/kk'$ である。これは 1% $\Delta k/kk'$ を上回っており、核規則における要求を充足している。
- (c) 原子炉運転中における第 1 炉停止系制御棒の未臨界度（1 ロッドスタック条件）は 1.66% $\Delta k/kk'$ である。これは未臨界を確保しており、核規則における要求を充足している。
- (d) 原子炉運転中における第 2 炉停止系制御棒の未臨界度（1 ロッドスタック条件）は 0.77% $\Delta k/kk'$ である。これは未臨界を確保しており、核規則における要求を充足している。

これより、制御反応度収支の評価結果はロシア規則を遵守していると結論される。

（視点 4）ロシアが設定した設計制限・目標の充足性

（視点 2）を妥当性評価の対象外としたことに準じ、本視点も妥当性評価の対象外となる項目である。

以上のことから、制御反応度収支の評価結果については、ロシア設計の信頼性向上に寄与し得ると結論される。

以上、我が国 の手法により BN-600 ハイブリッド炉心の核熱特性を評価した結果、ロシアが選定した炉心・燃料仕様は炉心の核熱設計に関して妥当である可能性があるといえる。また、このことにより、“我が国 の手法による評価”結果はロシア設計の信頼性向上に寄与し、ロシア側における将来の許認可取得を技術的に支援するのに有効な研究成果になり得ると結論できる。

8 まとめ

ロシア OKBM との契約により進めてきた BN-600 ハイブリッド炉心の炉心設計作業に関して、我が国の手法を用いて同炉心の核熱特性評価を行った。その結果、最大線出力、炉心平均取出燃焼度、ナトリウムボイド反応度、解体 Pu 処分能力、制御反応度収支の解析結果が、ロシアが設定した設計制限・目標を充足し、かつロシア規則を遵守していることがわかった。

これにより、ロシアが示した BN-600 ハイブリッド炉心の炉心・燃料仕様は核熱設計に関して妥当である可能性を有することが示された。また、我が国の手法による評価結果はロシア設計の信頼性向上に寄与し得るとともに、ロシア側における将来の許認可取得を技術的に支援するのに有効な研究成果となり得ることが確認できた。

9 今後の予定

現在、本研究と同様に我が国の手法による MOX 燃料集合体および燃料ピンの健全性解析を進めている。その結果を本報で示した 4 つの視点に立って評価し、ロシアが選定した炉心・燃料仕様の妥当性を評価する予定である。これにより、炉心設計、MOX 燃料集合体設計、MOX 燃料ピン設計のすべてについて、我が国の手法による評価結果がロシア設計の信頼性向上に寄与し得ることを示す予定にしている。

また、ロシアが行った炉心設計、MOX 燃料集合体設計、MOX 燃料ピン設計の結果を分析し、その結果と我が国の手法による評価結果を比較し、ロシア設計が妥当であることを確認する予定である。

さらに、振動充填 MOX 燃料ピンの設計に用いる物性式、設計誤差の評価方法およびその与え方等の設計情報を精査し、それらを実用化戦略調査研究を始め、我が国の高速炉炉心・燃料設計に有効に反映する方法について検討を行う予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、ロシア実験機械製造設計局 OKBM の B.A.Vasilyev 氏およびその関係諸氏には、BN-600 ハイブリッド炉心の技術仕様に関して貴重なご助言を賜りました。また、解析作業には（株）日立製作所（現、システム技術開発部炉心・燃料システムグループ）の小川隆氏に多大なるご協力を賜りました。

以上の各諸兄に対し、ここに深謝致します。

参考文献

- [1] T.Nakagawa, et al., "Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-2: JENDL-3.2, *J. Nucl. Sci. Technol.*," 32, P.1259 (Dec. 1995).
- [2] 石川眞、他:「高速炉用統合炉定数ADJ2000の作成」、JNC TN9400 2001-071 (2001年).
- [3] M. Nakagawa, K. Tsuchihashi, "SLAROM : A Code for Cell Homogenization Calculation of Fast Reactor," JAERI 1294 (1984) .
- [4] T. B. FOWLER, et al., "Nuclear Reactor Core Analysis Code : CITATION," ORNL-TM2946, Rev.2 (1971).
- [5] K. D. LATHLOP and F. W. BRINKLEY, "Theory and Use of the TWOTRAN-II Program," LA-4432 (1970)
- [6] 飯島 進、他:「高速炉設計計算用プログラム・2 (2 次元・3 次元拡散摂動理論計算コード : PERKY」、JAERI-M-6993 (1977年).
- [7] R.J.Tuttle, "Delayed Neutron Yield in Nuclear Fission," *Consultants' Mtg. on Delayed Neutron Properties*, IAEA, Vienna, INDC(NDS)-107/G+Special, P.29 (1979).
- [8] D.Saphier, et. al., "Evaluated Delayed Neutron Spectra and Their Importance in Reactor Calculation," *Nucl. Sci. Eng.*, Vol.62, pp660-694 (1977).
- [9] 山館恵、他:「ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討 - 再臨界回避型酸化物燃料炉心の検討 - 」、JNC TN9400 2001-113 (2001年).

表4-1 BN-600炉心主要仕様（濃縮ウラン炉心、ハイブリッド炉心）

項目	単位	濃縮ウラン炉心	ハイブリッド炉心
熱出力	MW	1470	1470
燃料集合体数			
炉心燃料			
濃縮ウラン燃料	体	391	303
MOX燃料	体	0	91
ブランケット燃料	体	362	394
濃縮度(IC/MC/OC)*	wt%	17.0/21.0/26.0	PuO ₂ 重量比：20wt%強
実効運転サイクル長さ	EFPD	160	140
燃料交換バッチ数	—	3	4

* 内側炉心/中間炉心/外側炉心

表5.1-1 中性子エネルギー群構造 (70群、18群)

群	18群		70群		上限エネルギー		下限エネルギー		上限エネルギー		下限エネルギー		レサージー幅
	群	群	群	群	群	群	群	群	群	群	群	群	
1	1	1	10.0 (MeV)	7.7880 (MeV)	0.250	0.250	15	38	961.12 (eV)	748.52 (eV)	582.95	454.00	0.250
	2	2	7.7880	6.0653	0.250	0.250		39	748.52	582.95	454.00	454.00	0.250
2	3	6.0653	4.7237	0.250	0.250	0.250	16	40	582.95	353.58	275.36	275.36	0.250
	4	4	4.7237	3.6788	0.250	0.250		41	454.00	353.58	275.36	275.36	0.250
3	5	3	3.6788	2.8650	0.250	0.250		42	353.58	275.36	214.45	214.45	0.250
	6	2	2.8650	2.2313	0.250	0.250		43	275.36	214.45	167.02	167.02	0.250
4	7	2	2.2313	1.7377	0.250	0.250	17	44	214.45	167.02	130.07	130.07	0.250
	8	1	1.7377	1.3534	0.250	0.250		45	167.02	130.07	101.30	101.30	0.250
5	9	1	1.3534	1.0540	0.250	0.250		46	130.07	101.30	78.893	78.893	0.250
	10	1	1.0540	0.82085	0.250	0.250		47	101.30	78.893	61.442	61.442	0.250
6	11	0	0.82085	0.63928	0.250	0.250		48	78.893	61.442	47.851	47.851	0.250
	12	0	0.63928	0.49787	0.250	0.250		49	61.442	47.851	37.267	37.267	0.250
7	13	0	0.49787	0.38774	0.250	0.250		50	47.851	37.267	29.023	29.023	0.250
	14	0	0.38774	0.30197	0.250	0.250		51	37.267	29.023	22.603	22.603	0.250
7	15	0	0.30197	0.23518	0.250	0.250		52	29.023	22.603	17.603	17.603	0.250
	16	0	0.23518	0.18316	0.250	0.250		53	22.603	17.603	13.710	13.710	0.250
8	17	0	0.18316	0.14264	0.250	0.250		54	17.603	13.710	10.677	10.677	0.250
	18	0	0.14264	0.11109	0.250	0.250		55	13.710	10.677	8.3153	8.3153	0.250
9	19	0	0.11109 (MeV)	0.088517 (MeV)	0.250	0.250	18	56	10.677	8.3153	6.4760	6.4760	0.250
	20	86.517 (keV)	67.379 (keV)	52.475	0.250	0.250		57	8.3153	6.4760	5.0435	5.0435	0.250
9	21	67.379	52.475	40.868	0.250	0.250		58	6.4760	5.0435	3.9279	3.9279	0.250
	22	52.475	40.868	31.828	0.250	0.250		59	5.0435	3.9279	3.0590	3.0590	0.250
10	23	40.868	31.828	24.788	0.250	0.250		60	3.9279	3.0590	2.3824	2.3824	0.250
	24	31.828	24.788	19.305	0.250	0.250		61	3.0590	2.3824	1.8554	1.8554	0.250
11	25	24.788	19.305	15.034	0.250	0.250		62	2.3824	1.8554	1.4450	1.4450	0.250
	26	19.305	15.034	11.709	0.250	0.250		63	1.8554	1.4450	1.1254	1.1254	0.250
11	27	15.034	11.709	9.1188	0.250	0.250		64	1.4450	1.1254	0.87642	0.87642	0.250
	28	11.709	9.1188	7.1017	0.250	0.250		65	1.1254	0.87642	0.68256	0.68256	0.250
12	29	9.1188	7.1017	5.5308	0.250	0.250		66	0.87642	0.68256	0.53158	0.53158	0.250
	30	7.1017	5.5308	4.3074	0.250	0.250		67	0.68256	0.53158	0.41399	0.41399	0.250
13	31	5.5308	4.3074	3.3546	0.250	0.250		68	0.53158	0.41399	0.32242	0.32242	0.250
	32	4.3074	3.3546	2.6126	0.250	0.250		69	0.41399	0.32242	10 ⁻⁵ (eV)	10 ⁻⁵ (eV)	10.65
14	33	3.3546	2.6126	2.0347	0.250	0.250		70	0.32242	0.32242	10 ⁻⁵ (eV)	10 ⁻⁵ (eV)	10.65
	34	2.6126	2.0347										
14	35	2.0347	1.5846	1.2341	0.250	0.250							
	36	1.5846	1.2341	0.96112 (keV)	0.250	0.250							
14	37	1.2341	0.96112 (keV)										

表5.2-1 BN-600ハイブリッド炉心核特性解析結果 (1/3)

(a) BN-600炉心の燃焼反応度

項 目		値
実効増倍率	燃焼平衡初期	1.0189
	燃焼平衡末期	0.9966
燃焼反応度 [%Δk/kk']		2.2

(b) ハイブリッド炉心の臨界性

項 目	実効増倍率 (燃焼平衡末期)
基準値	0.9988
補正係数 *	1.0140
補正後の値	1.0128

* 表A2-2参照

(c) ハイブリッド炉心の燃焼反応度

項 目		値
実効増倍率	燃焼平衡初期	1.0245
	燃焼平衡末期	1.0012
燃焼反応度 [%Δk/kk']		2.3

(d) ハイブリッド炉心の最大線出力

領 域	最大線出力 [W/cm]	
	燃焼平衡初期	燃焼平衡末期
内側炉心	405	393
中間炉心	439	406
MOX炉心	430	399
外側炉心	395	357
濃縮ウラン燃料		439
MOX燃料		430

(e) ハイブリッド炉心の最大高速中性子照射量

領域	最大高速中性子照射量 [$\times 10^{23} n/cm^2$]
内側炉心	2.1
中間炉心	1.9
MOX炉心	1.8
外側炉心	1.4

表5.2-1 BN-600ハイブリッド炉心核特性解析結果 (2/3)

(f) ハイブリッド炉心の取出平均燃焼度

領 域		燃焼度 [$\times 10^4$ MWd/t]
炉心	内側炉心	7.25
	中間炉心	7.33
	MOX炉心	5.75
	外側炉心	5.74
	平均	6.66
軸方向 ブランケット	内側炉心	0.41
	中間炉心	0.32
	MOX炉心	0.25
	外側炉心	0.18
	平均	0.32

(g) ハイブリッド炉心の最高燃焼度 (炉心部)

項 目	燃 料	燃焼度 [$\times 10^4$ MWd/t]
集合体	内側炉心	7.76
	中間炉心	7.91
	MOX炉心	6.69
	外側炉心	6.62
燃料要素	内側炉心	7.78
	中間炉心	8.09
	MOX炉心	6.93
	外側炉心	7.23
燃料要素局所	内側炉心	9.64
	中間炉心	10.02
	MOX炉心	8.53
	外側炉心	8.93

(h) ハイブリッド炉心の領域別出力分担率

領 域	出力分担率[%]	
	燃焼平衡初期	燃焼平衡末期
炉心	内側炉心	42.8
	中間炉心	15.9
	MOX炉心	22.1
	外側炉心	15.1
	小 計	95.8
軸方向 ブランケット	上部	0.9
	下部	1.7
	小 計	2.6
炉心及び軸方向ブランケット部合計		98.4
燃料以外の炉心構成要素 *		1.6
合 計		100.0
100.0		100.0

* 表A2-3参照

(i) ハイブリッド炉心の $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 重量比

項目	22体装荷時		22体取出時
	^{239}Pu	^{240}Pu	
重量 [kg]	125.8		106.4
	9.0		15.6
$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 重量比		0.07	0.15

表5.2-1 BN-600ハイブリッド炉心核特性解析結果 (3/3)

(j) ハイブリッド炉心のナトリウムボイド反応度

ボイド領域	時期	項目	単位	ボイド反応度
炉心部および上部軸プランケット部	燃焼平衡初期	計算値 (2次元RZ輸送)	% $\Delta k/kk'$	0.16
			\$	0.25
		非均質効果	% $\Delta k/kk'$	0.13
	燃焼平衡末期	補正後の値 *	\$	0.20
		計算値 (2次元RZ輸送)	% $\Delta k/kk'$	0.42
			\$	0.67
炉心部	燃焼平衡初期	非均質効果	% $\Delta k/kk'$	0.38
		補正後の値 *	\$	0.61
		計算値 (2次元RZ輸送)	% $\Delta k/kk'$	0.20
	燃焼平衡末期		\$	0.31
		非均質効果	% $\Delta k/kk'$	0.17
		補正後の値 *	\$	0.27

* 表A2-2参照 (非均質効果補正量-0.0394% $\Delta k/kk'$ を適用)

(k) ハイブリッド炉心のドップラー係数

時期	ドップラー係数 * [$\times 10^{-3} Tdk/dT$]
燃焼平衡初期	-7.50
燃焼平衡末期	-8.24

* 表A2-2参照 (非均質効果補正係数1.0544を適用)

(l) ハイブリッド炉心の実効遅発中性子割合

時期	実効遅発中性子割合
燃焼平衡初期	0.006451
燃焼平衡末期	0.006192

(m) ハイブリッド炉心の即発中性子寿命

時期	即発中性子寿命 [μs]
燃焼平衡初期	0.4134
燃焼平衡末期	0.4283

表5.2-2 制御棒反応度値解析結果（ハイブリッド炉心燃焼平衡初期）

(a) 制御棒反応度値

項目		制御棒値（% $\Delta k/kk'$ ）	
第1、第2系統 全制御棒 (1ロッドスタック)	補正前	8.61	
	補正後	8.08	
	予測誤差考慮	7.35	
第1系統制御棒	全数挿入	補正前	6.59
		補正後	6.30
		予測誤差考慮	5.73
	1ロッドスタック	補正前	6.21
		補正後	5.93
		予測誤差考慮	5.40
第2系統制御棒(1ロッドスタック)	補正前	2.44	
	補正後	2.21	
	予測誤差考慮	2.01	

(注記) 制御棒値予測誤差(3σ) : 9%

(b) 未臨界度

項目		反応度(% $\Delta k/kk'$)	
燃料交換中の未臨界度 (第1、第2系統 全制御棒)	制御すべき反応度*	温度補償反応度	0.17
		出力補償反応度	0.95
		燃焼反応度	2.49
		合 計	3.61
	制御棒値 (1ロッドスタック)	7.35	
	未臨界度	3.74	
緊急停止棒引き上げ時の未臨界度 (第1系統制御棒)	制御すべき反応度*	温度補償反応度	0.17
		出力補償反応度	0.95
		燃焼反応度	2.49
		合 計	3.61
	制御棒値 (全数挿入)	5.73	
	未臨界度	2.12	
運転中の反応度制御性 (第1系統制御棒)	制御すべき反応度*	Np効果	0.13
		温度補償反応度	0.17
		出力補償反応度	0.95
		燃焼反応度	2.49
		合 計	3.74
	制御棒値 (1ロッドスタック)	5.40	
運転中の反応度制御性 (第2系統制御棒)	制御すべき反応度*	未臨界度	1.66
		Np効果	0.13
		温度補償反応度	0.17
		出力補償反応度	0.95
		合 計	1.25
	制御棒値 (1ロッドスタック)	2.01	
	未臨界度	0.77	

*: 不確かさ10%考慮

表6.1-1 燃料集合体最高温度評価用工学的安全係数

処理	工学的安全係数因子	ΔT_{Na} * 1	ΔT_{film} * 1	ΔT_{clad} * 1	ΔT_{gap} * 2	ΔT_{fuel} * 2
乗 算 処 理	出力分布誤差	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
	炉心熱出力較正誤差	1.00	1.02	1.02	1.02	1.02
	流路変形効果	1.03	1.00	1.00	1.00	1.00
	集合体間流量配分誤差	1.05	1.00	1.00	1.00	1.00
	原子炉出入口温度誤差	1.02	1.00	1.00	1.00	1.00
	ワイヤコンタクト効果	1.00	2.00	1.00	1.00	1.00
統 計 処 理	炉内集合体間流量配分誤差	1.03	1.00	1.00	1.04	1.03
	物性値誤差	1.02	1.30	1.03	1.00	1.00
	各部製造公差	1.03	1.04	1.08	1.00	1.00
	ペレット偏心効果	1.00	1.16	1.20	1.00	1.00
	ペレット製作公差	1.00	1.00	1.00	1.042	1.028
	ペレット熱伝導度誤差	1.00	1.00	1.00	1.00	1.10
	ペレット熱伝達率誤差	1.00	1.00	1.00	1.40	1.00

* 1 既存設計検討炉心ベース

* 2 先行炉ベース

 ΔT_{Na} : 冷却材温度上昇 ΔT_{film} : 膜温度上昇 ΔT_{clad} : 被覆管肉厚内温度上昇 ΔT_{gap} : 燃料ピンギャップ内温度上昇 ΔT_{fuel} : 燃料ピン内温度上昇

表6.2-1 BN-600ハイブリッド炉心 炉心流量領域毎の最大集合体出力

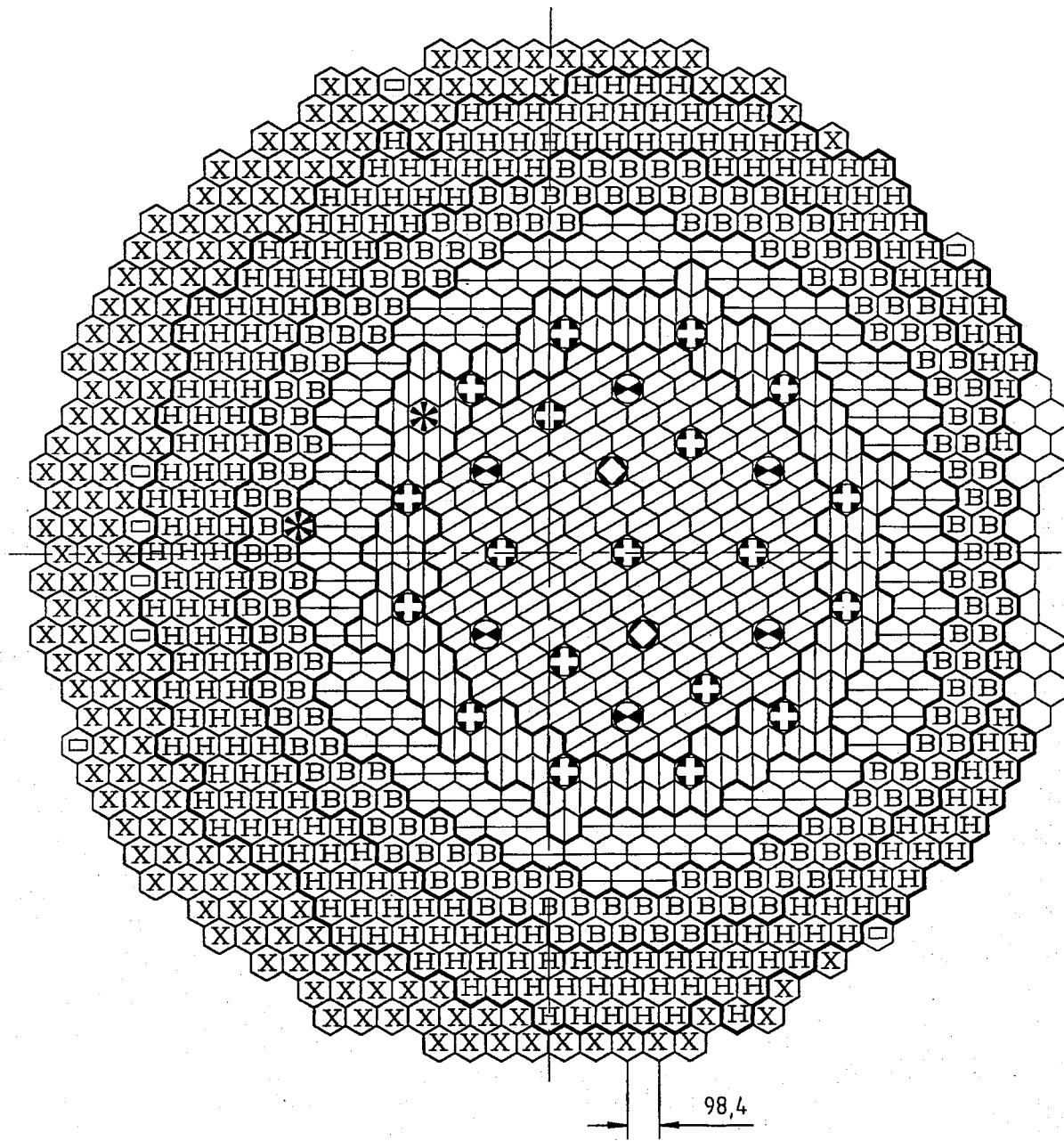
炉心 領域	流量 領域No.	最大集合体出力 (MW)		サイクル最大集合体出力	
		燃焼平衡初期	燃焼平衡末期	出力(MW)	発生時期
内側 炉心	1	4.27 [27]	4.41 [11]	4.41 [11]	燃焼平衡末期
	2	4.04 [190]	4.01 [190]	4.04 [190]	燃焼平衡初期
中間 炉心	3	4.50 [194]	4.40 [239]	4.50 [194]	燃焼平衡初期
MOX 炉心	4	4.39 [298]	4.27 [270]	4.39 [298]	燃焼平衡初期
外側 炉心	5	3.87 [362]	3.62 [362]	3.87 [362]	燃焼平衡初期
	6	3.36 [429]	3.12 [429]	3.36 [429]	燃焼平衡初期

(注記)

[]内は図6.2-1に示した集合体番号

表6.2-2 BN-600ハイブリッド炉心熱特性解析結果

領域	炉心流量配分領域		最大集合体出力 (MW)	被覆管最高温度[肉厚中心]			ラッパ管温度[最大発熱部]			バンドル部圧力損失 (MPa)
	流量領域	集合体体数		バニアル (°C)	ホットスポット (°C)	ホットスポット フアクタ	バニアル (°C)	ホットスポット (°C)	ホットスポット フアクタ	
内側炉心	1	150	4.41	642	707	1.23	434	448	1.21	0.55
	2	22	4.04	645	708	1.23	438	454	1.21	0.47
中間炉心	3	60	4.50	638	700	1.23	435	450	1.21	0.61
MOX炉心	4	91	4.39	644	708	1.23	435	449	1.21	0.56
外側炉心	5	28	3.87	629	689	1.23	427	441	1.21	0.54
	6	43	3.36	621	680	1.23	425	437	1.21	0.45
合計	—	394	—	—	—	—	—	—	—	—



○ — 低濃縮ウラン燃料集合体	136
□ — 中濃縮ウラン燃料集合体	94
△ — 高濃縮ウラン燃料集合体	139
◎ — 内側ブランケット燃料集合体	161
◆ — 外側ブランケット燃料集合体	217
● — スクラム棒	6
◆ — 粗調整シム棒	19
◇ — 微調整棒	2
※ — 中性子源	2
○ — スチール遮蔽体	19
□ — サービス位置	8
× — 貯蔵燃料集合体	163

図 4-1 BN-600 炉心の炉心構成図

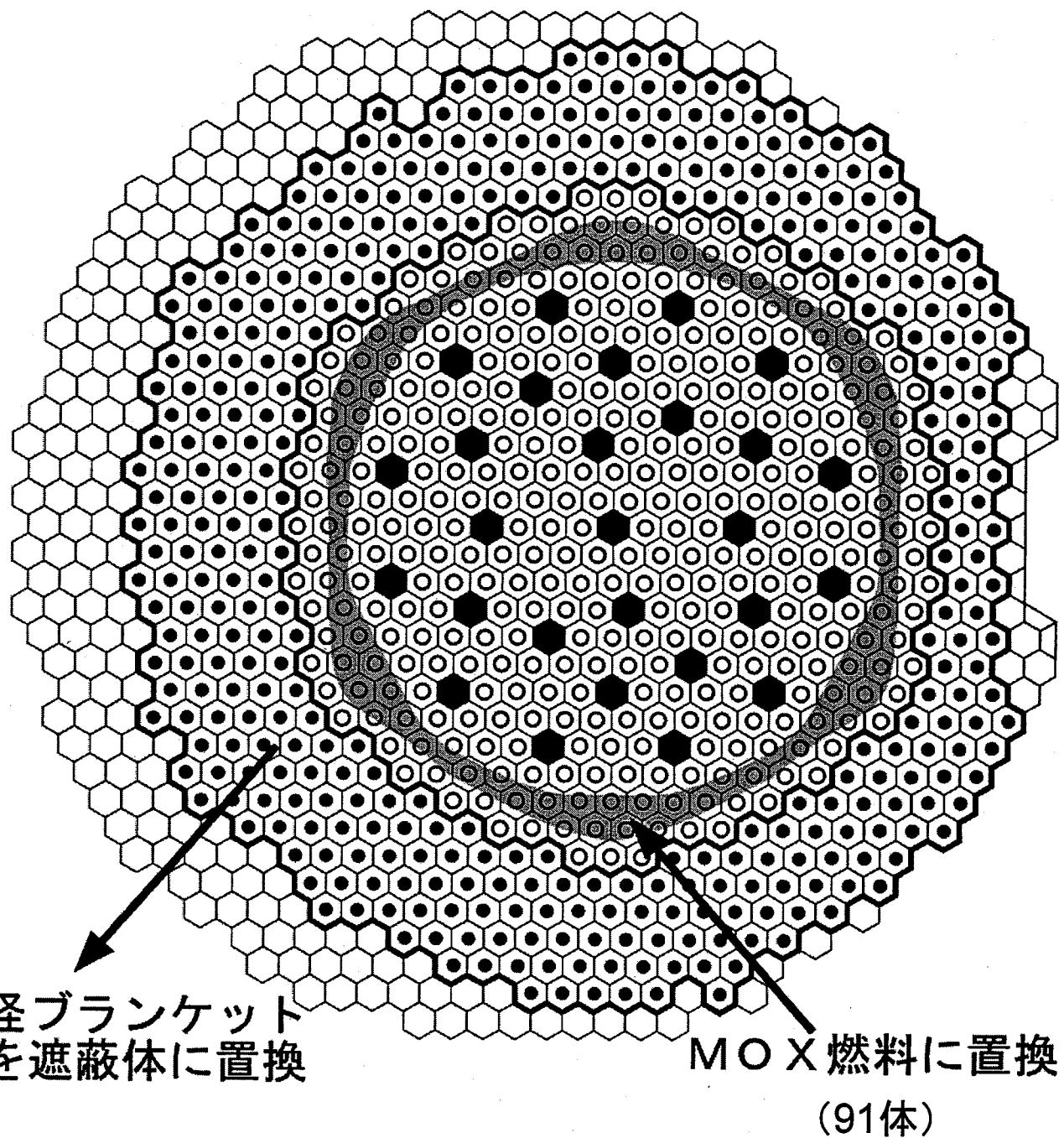


図4-2 BN-600ハイブリッド炉心構成概念図

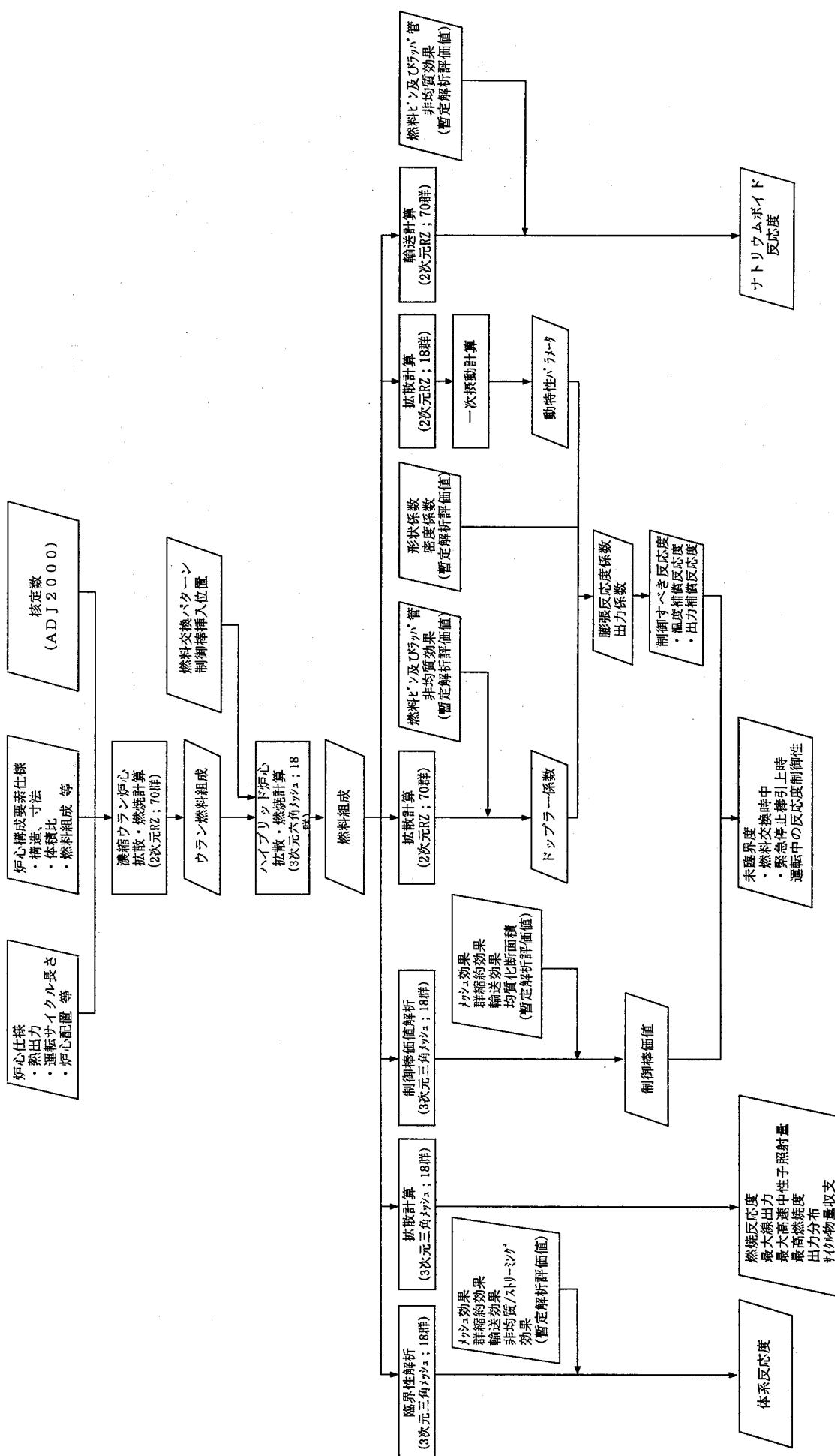
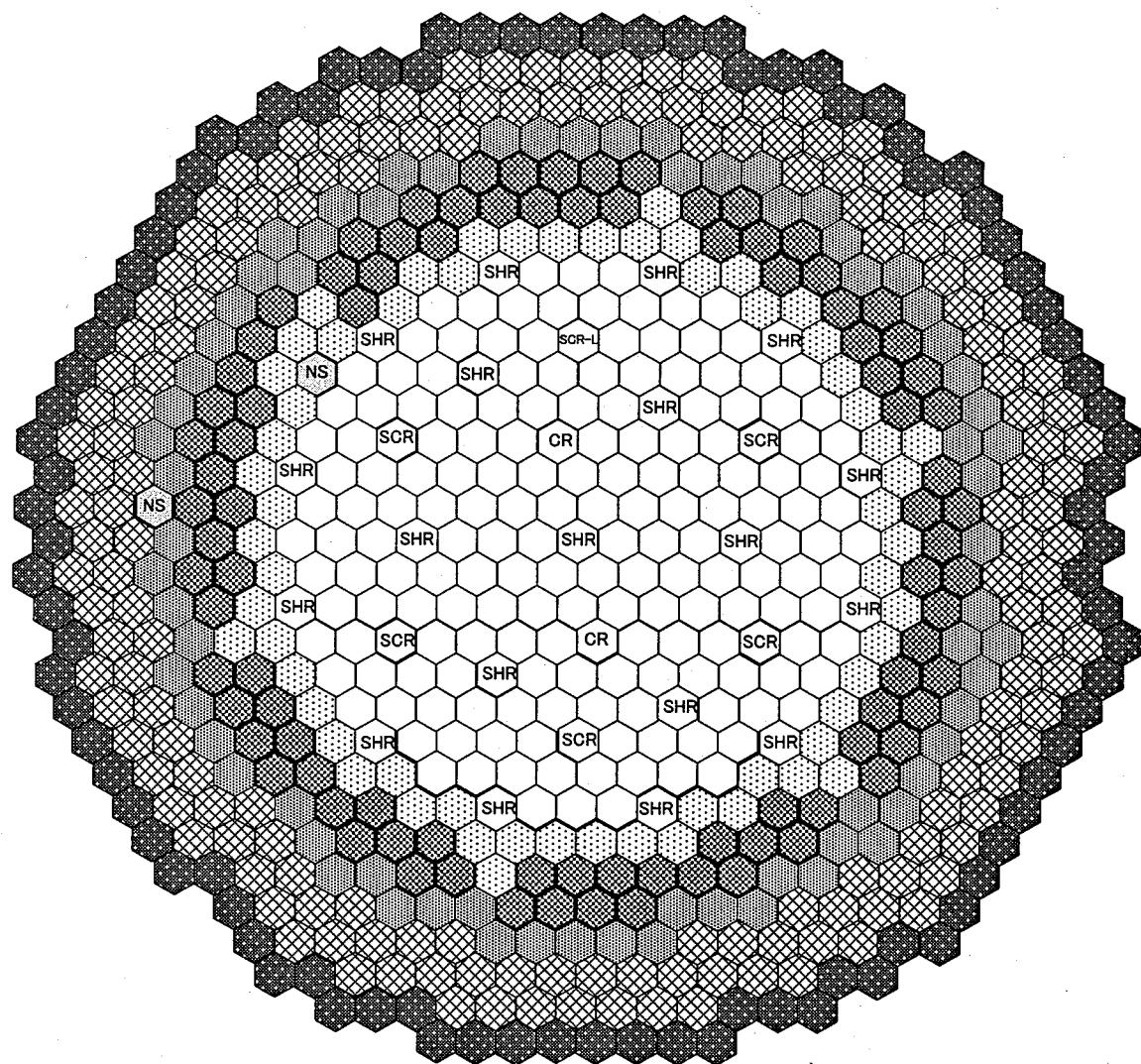
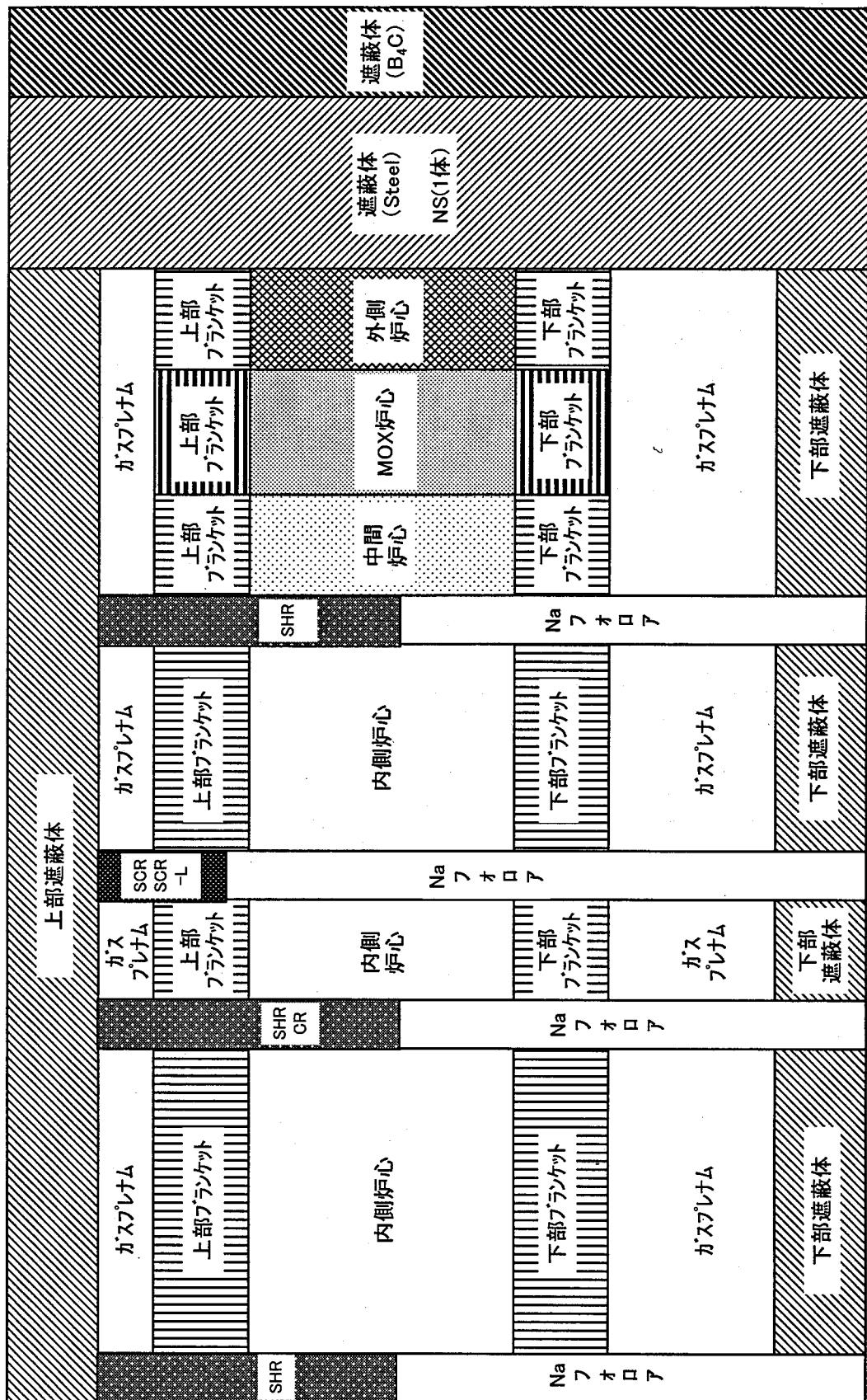


図5.1-1 BN-600ハイブリッド炉心核特性解析フロー



	UO ₂ 燃料集合体（内側炉心）	172 体
	UO ₂ 燃料集合体（中間炉心）	60 体
	MOX燃料集合体	91 体
	UO ₂ 燃料集合体（外側炉心）	71 体
	Shim Rod (SHR)	19 体
	Control Rod (CR)	2 体
	Scram Rod (SCR)	5 体
	Loop Scram Rod (SCR-L)	1 体
	中性子源集合体	2 体
	径方向遮へい体 (Steel)	
	径方向遮へい体 (B ₄ C)	

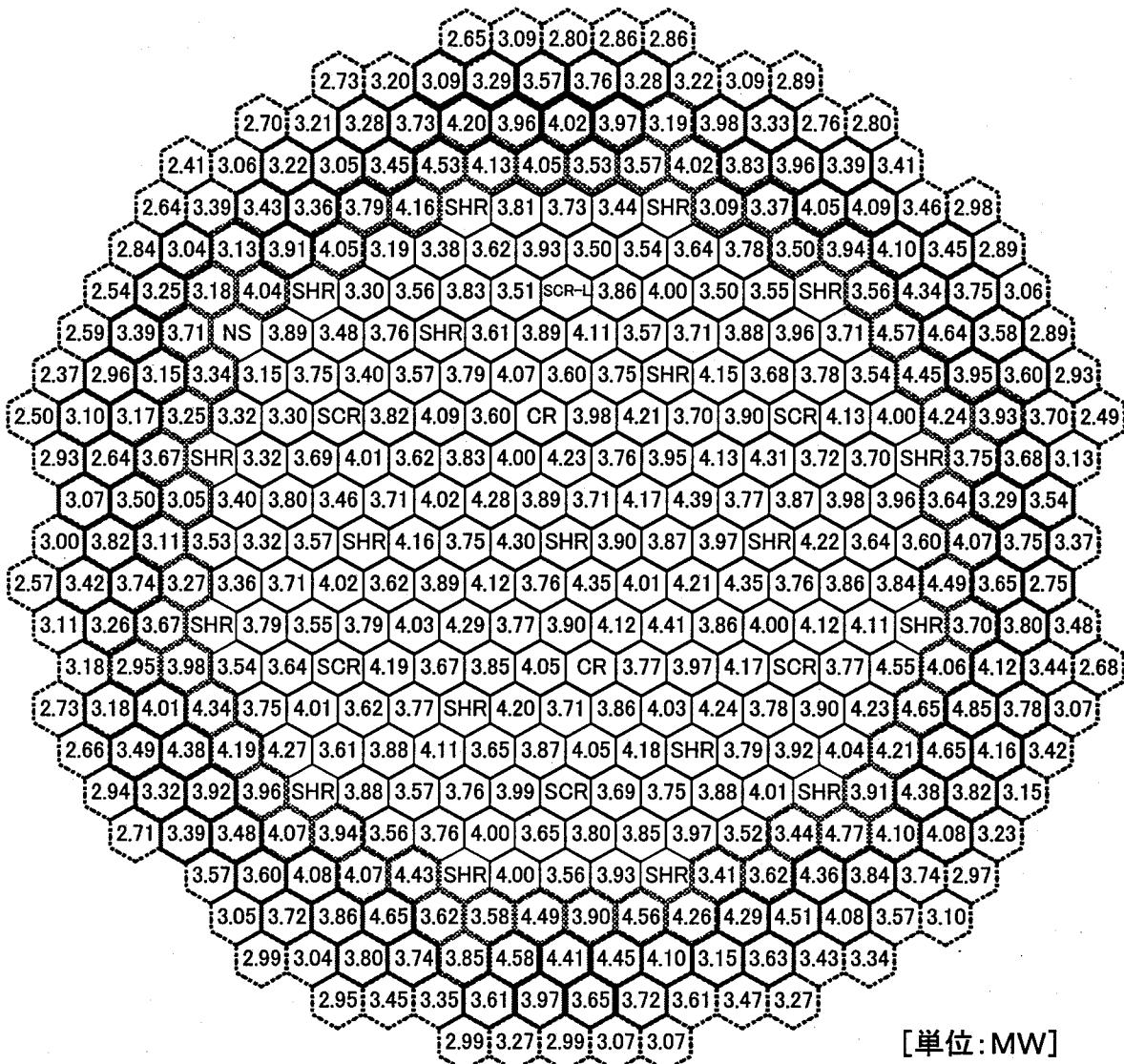
図5.1-2 BN-600ハイブリッド炉心核特性解析用水平断面図



(炉心燃料力を示す量: 約100cm)

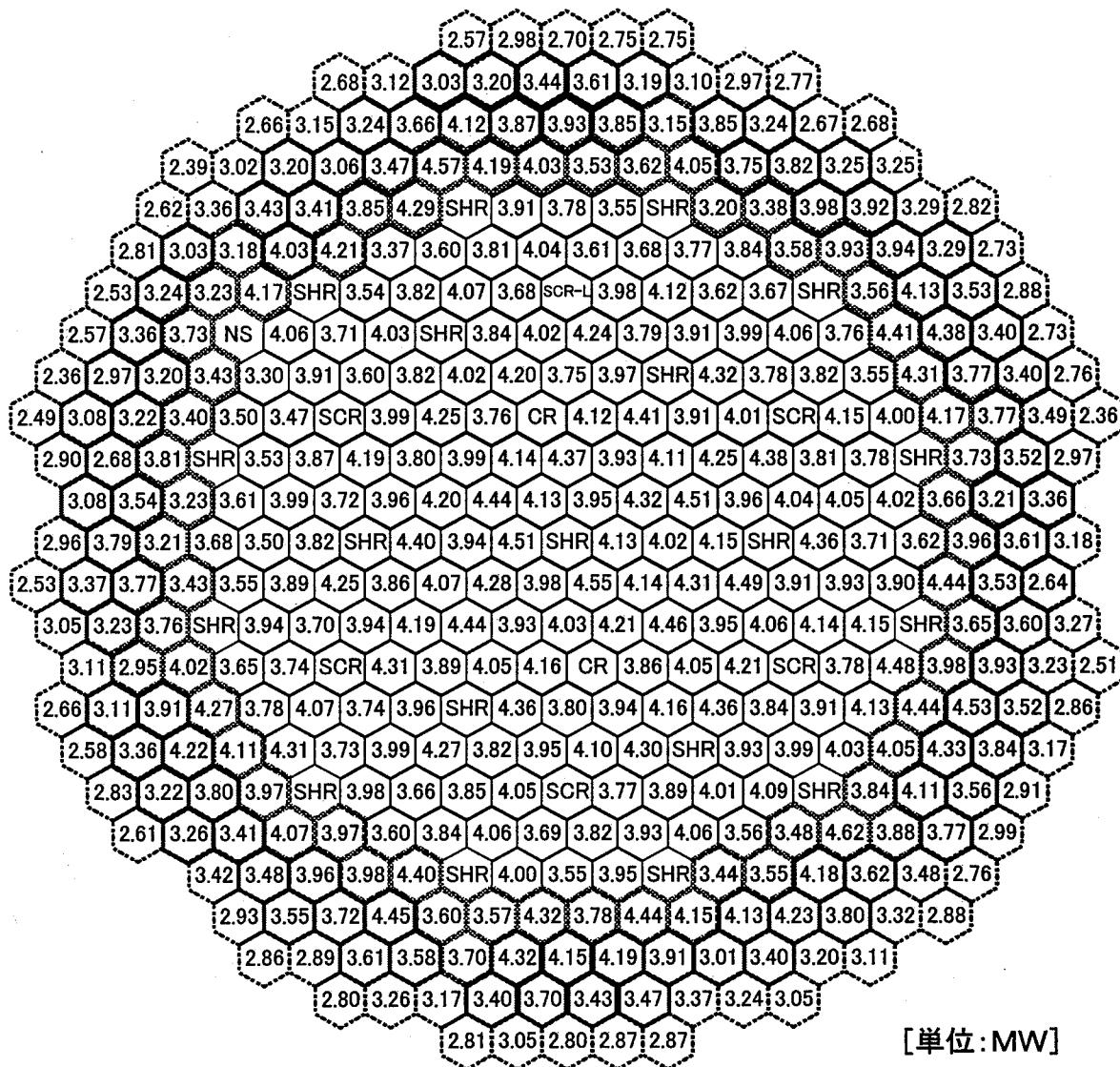
径方向位置 (炉心等価直径: 約210cm)

図5.1-3 BN-600ハイブリッド炉心核特性解析用RZ断面図



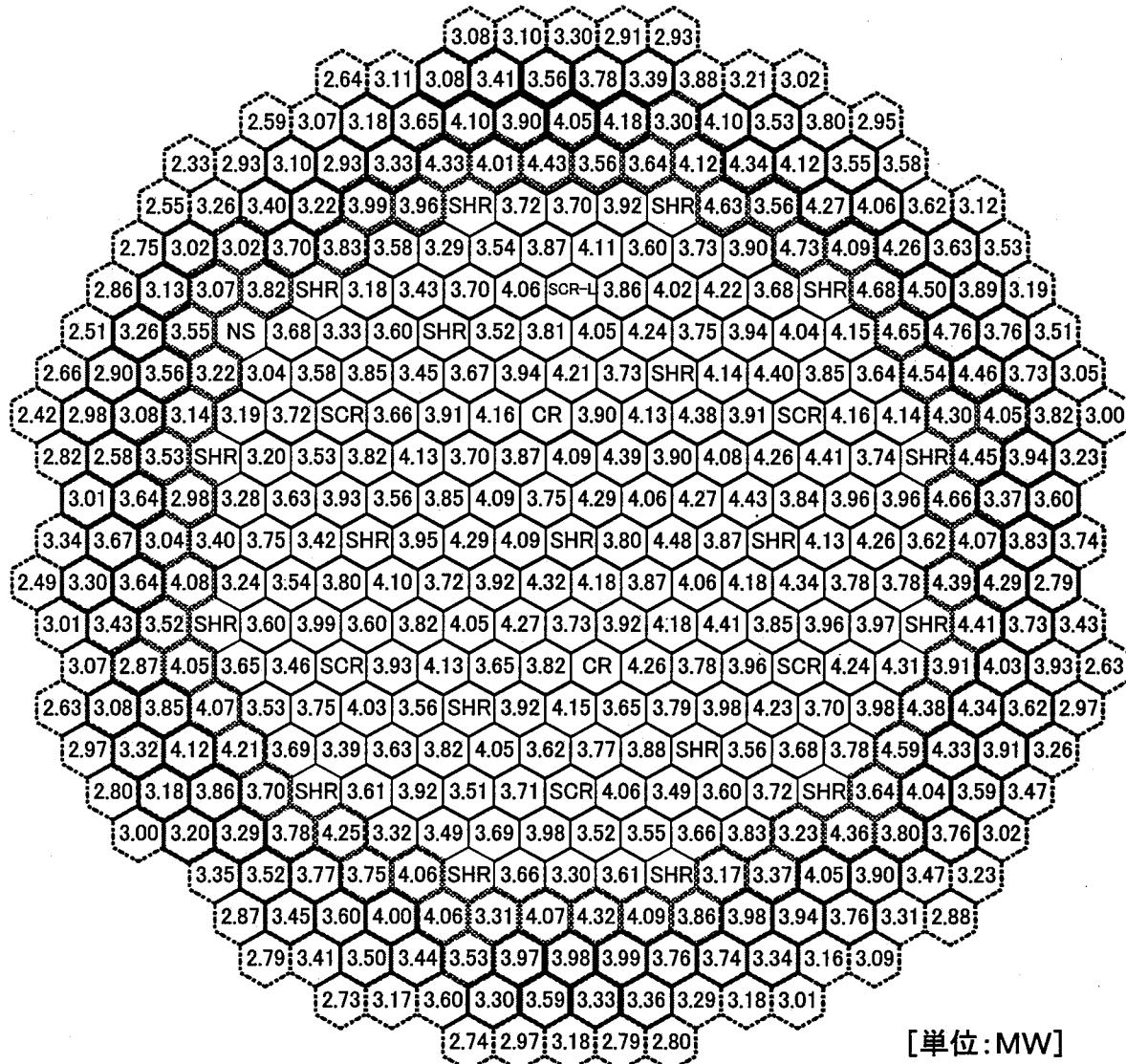
	内側炉心(UO_2 燃料集合体)
	中間炉心(UO_2 燃料集合体)
	外側炉心(MOX燃料装荷領域)
	外側炉心(UO_2 燃料集合体)

図5.2-1 集合体出力分布解析結果（ハイブリッド移行第1サイクル初期）



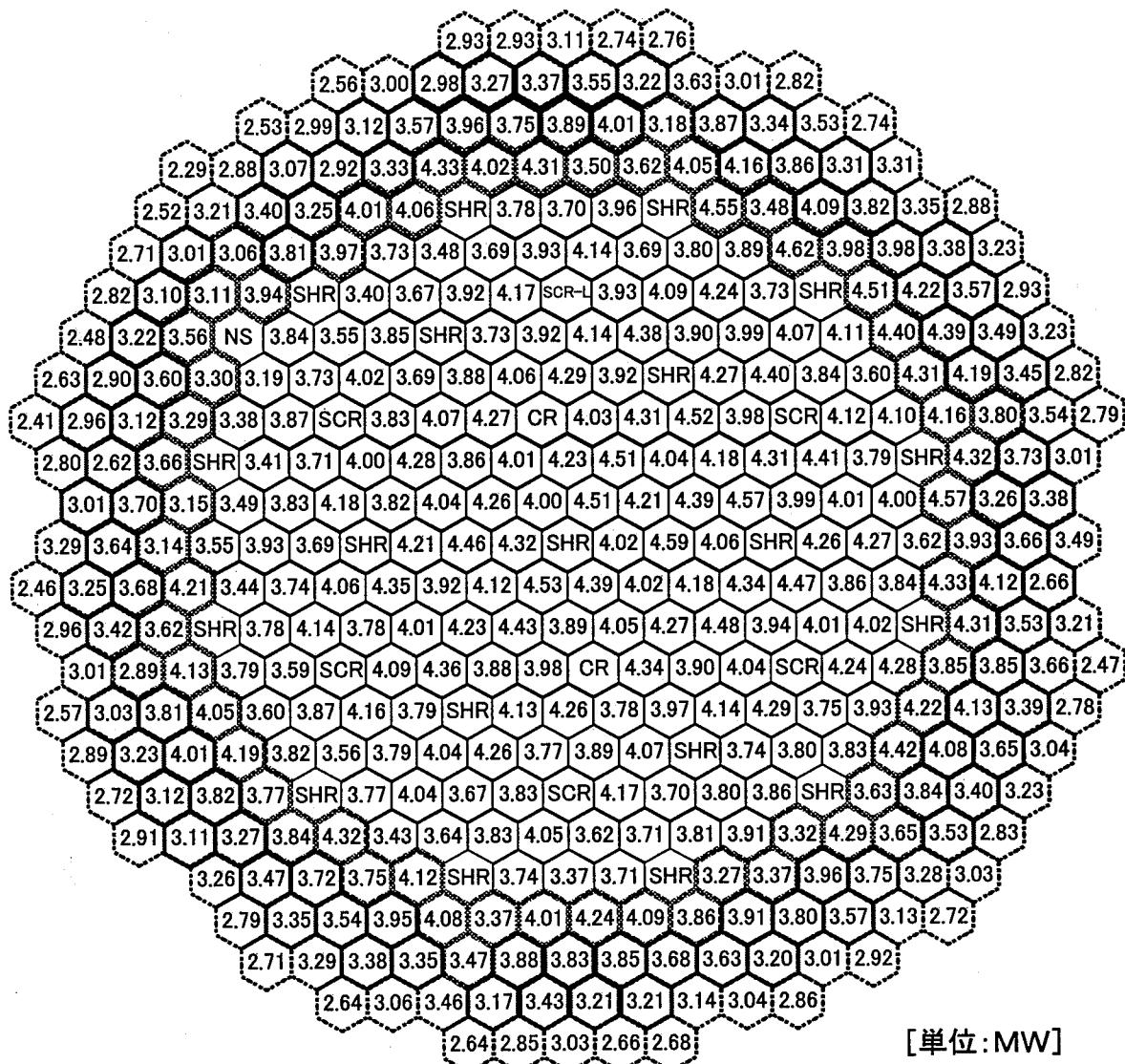
	内側炉心(UO_2 燃料集合体)
	中間炉心(UO_2 燃料集合体)
	外側炉心(MOX燃料装荷領域)
	外側炉心(UO_2 燃料集合体)

図5.2-2 集合体出力分布解析結果（ハイブリッド移行第1サイクル末期）



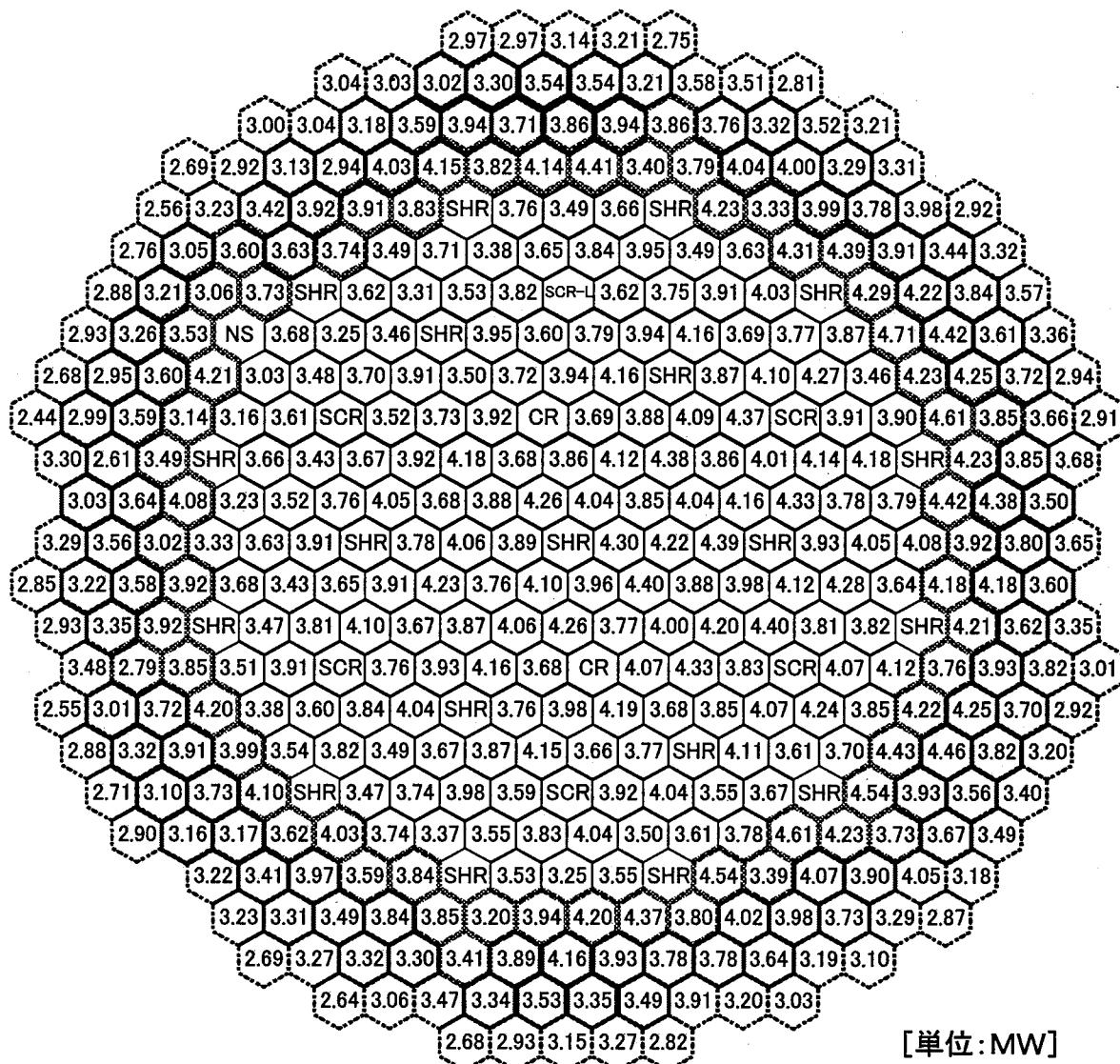
	内側炉心(UO_2 燃料集合体)
	中間炉心(UO_2 燃料集合体)
	外側炉心(MOX燃料装荷領域)
	外側炉心(UO_2 燃料集合体)

図5.2-3 集合体出力分布解析結果（ハイブリッド移行第2サイクル初期）



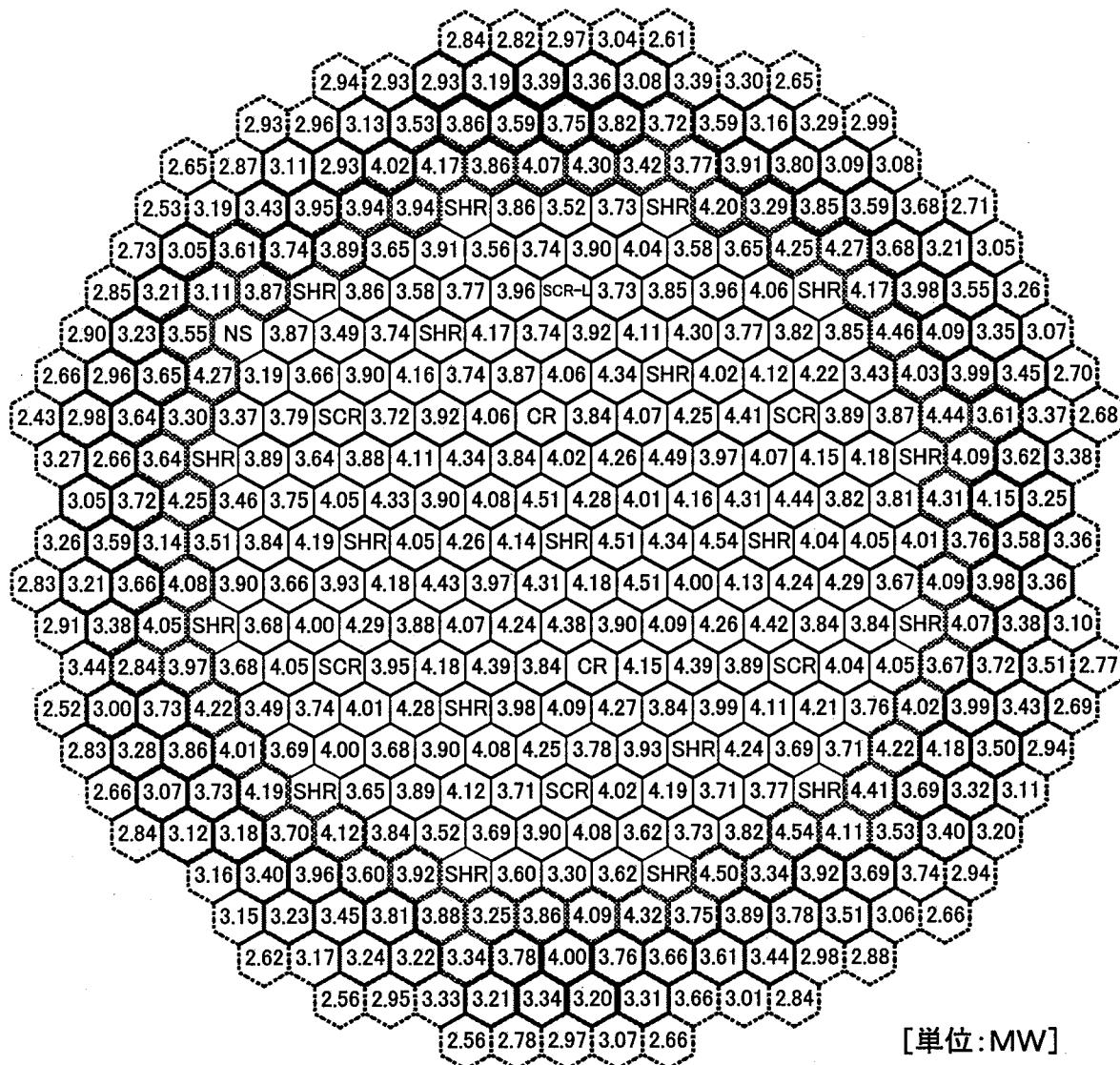
	内側炉心(UO_2 燃料集合体)
	中間炉心(UO_2 燃料集合体)
	外側炉心(MOX燃料装荷領域)
	外側炉心(UO_2 燃料集合体)

図5.2-4 集合体出力分布解析結果（ハイブリッド移行第2サイクル末期）



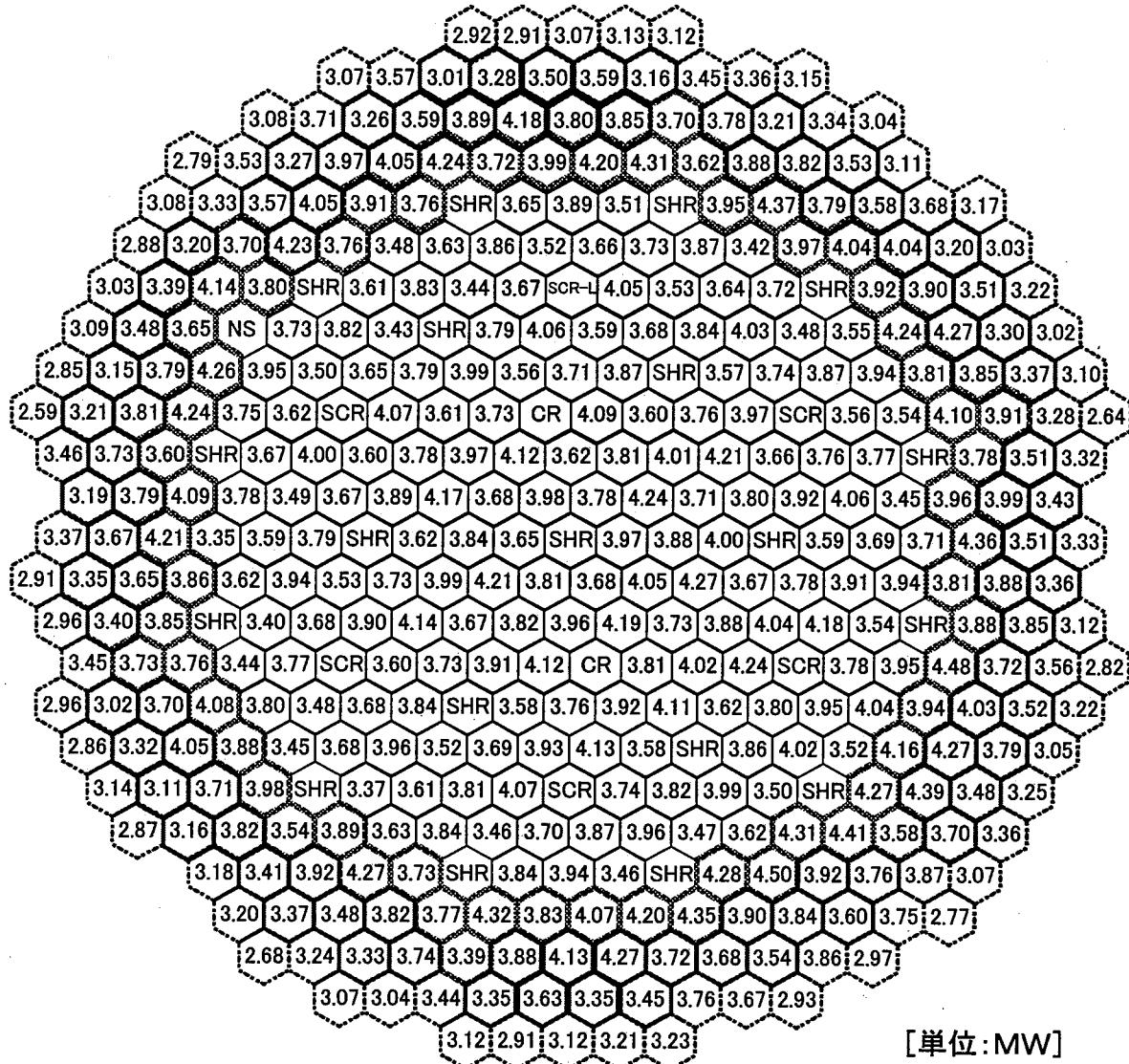
	内側炉心(UO_2 燃料集合体)
	中間炉心(UO_2 燃料集合体)
	外側炉心(MOX燃料装荷領域)
	外側炉心(UO_2 燃料集合体)

図5.2-5 集合体出力分布解析結果（ハイブリッド移行第3サイクル初期）



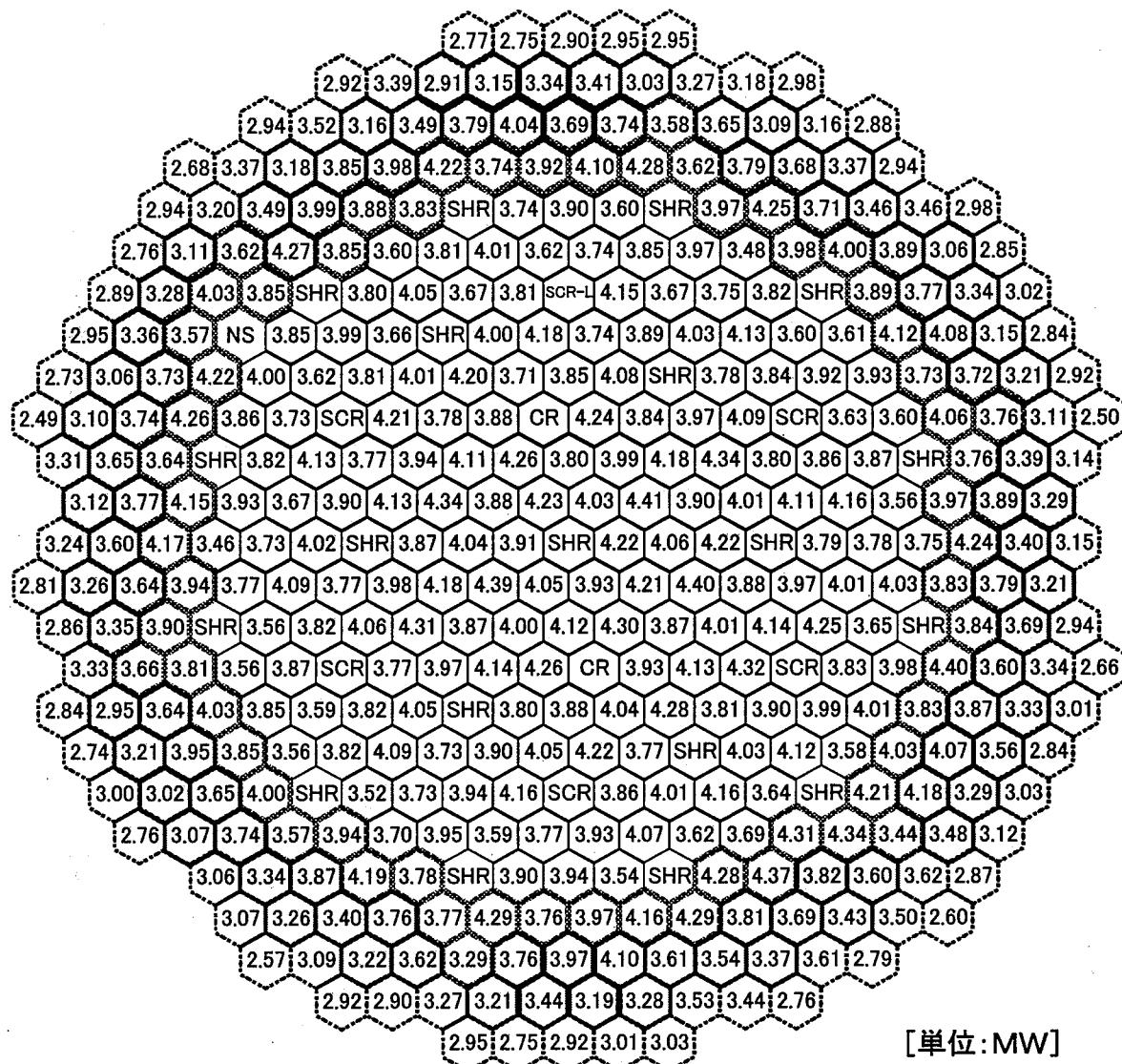
	内側炉心(UO_2 燃料集合体)
	中間炉心(UO_2 燃料集合体)
	外側炉心(MOX燃料装荷領域)
	外側炉心(UO_2 燃料集合体)

図5.2-6 集合体出力分布解析結果（ハイブリッド移行第3サイクル末期）



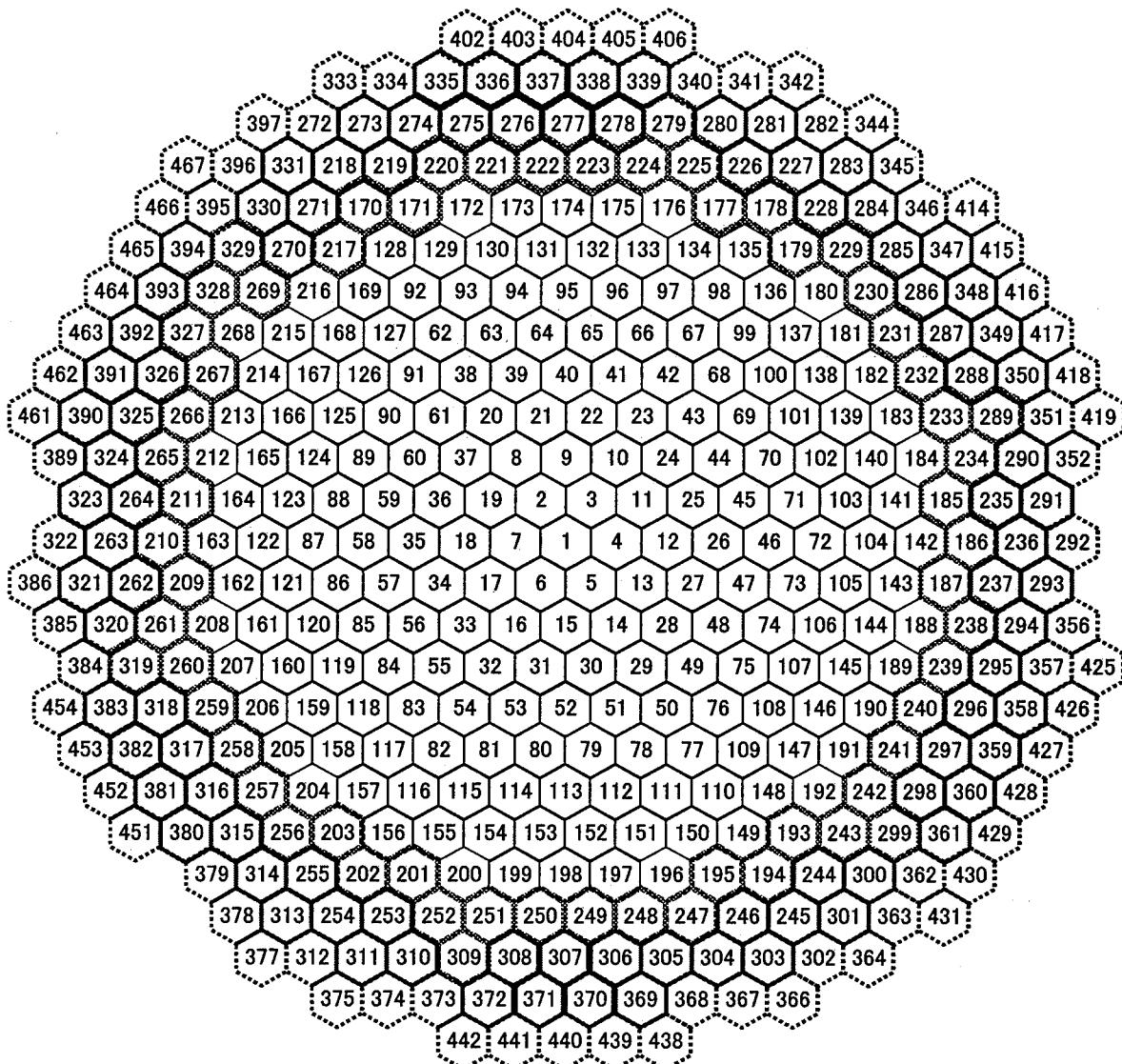
	内側炉心(UO_2 燃料集合体)
	中間炉心(UO_2 燃料集合体)
	外側炉心(MOX燃料装荷領域)
	外側炉心(UO_2 燃料集合体)

図5.2-7 集合体出力分布解析結果（ハイブリッド炉心燃焼平衡初期）



	内側炉心(UO_2 燃料集合体)
	中間炉心(UO_2 燃料集合体)
	外側炉心(MOX燃料装荷領域)
	外側炉心(UO_2 燃料集合体)

図5.2-8 集合体出力分布解析結果（ハイブリッド炉心燃焼平衡末期）



	内側炉心領域
	中間炉心領域
	MOX炉心領域
	外側炉心領域

図6.2-1 BN-600ハイブリッド炉心集合体番号

付録 1 径方向遮蔽体配置の非対称性について

5 章で述べたように、BN-600 ハイブリッド炉心の炉心構成は、径方向遮蔽体の配置が非対称となっているが、本研究ではこれを対称配置にモデル化して解析した。

そこで、このモデル化が 6、7 章の評価結果に与える影響について検討した。

図 A1-1 に、ハイブリッド炉心燃焼平衡初期について径方向遮蔽体の配置を非対称とした場合の炉心出力分布を、5.2 節で示した径方向遮蔽体を対称とした場合の炉心出力分布と合わせて示す。

図 A1-1において、径方向遮蔽体を非対称とした場合の炉心出力分布は、径方向遮蔽体（スチール製）が厚い側の出力が高く歪んだ形状を示している。

この歪みによる炉心特性への影響をみるため、6 章で評価した炉心特性のうち最大線出力への影響を評価した。

表 A1-1 に、径方向遮蔽体の配置を非対称とした場合の最大線出力と最大集合体出力を、径方向遮蔽体を対称とした場合の解析結果と合わせて示す。

表 A1-1において、径方向遮蔽体を非対称とした場合の最大線出力は 458W/cm²（中間炉心）であり、径方向遮蔽体を対称とした場合に比較して約 4%大きな値を示している。

また、径方向遮蔽体を非対称とした場合の最大集合体出力は、径方向遮蔽体を対称とした場合に比較して、内側炉心では約 5%低く、中間および MOX 炉心ではほぼ同等、外側炉心では約 7%大きな値を示している。

以上により、径方向遮蔽体の非対称配置を考慮した場合としない場合とでは、最大線出力と最大出力集合体に有意な差があることが示された。

そこで、以上の評価結果が 7 章で示したロシアが選定した炉心・燃料仕様の妥当性評価結果に与える影響について考察する。

① 最大線出力

径方向遮蔽体の非対称配置を考慮した場合の最大線出力 458W/cm はロシアが設定した設計制限目安である 460W/cm 以下を充足している。したがって、最大線出力については、径方向遮蔽体の非対称配置を考慮した場合でもロシアが選定した炉心・燃料仕様の妥当性評価結果に影響を与えることはない。

② 炉心平均取出燃焼度

③ ナトリウムボイド反応度

④ 解体 Pu の処分性能 ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ の重量比)

これらはいずれも炉心全域の積分量で表される特性である。そのため、径方向遮蔽体の非対称配置により炉心出力分布に歪みが生じたとしても、炉心全体への寄与を積分することにより、歪みが生じない場合に比べて有意な差は生じないと考えられる。したがって、これらの炉心特性については、径方向遮蔽体の非対称配置を考慮することがロシアが選定した炉心・燃料仕様の妥当性評価結果に与える影響は小さいといえる。

⑤ 制御反応度収支

径方向遮蔽体の非対称配置により、炉心出力分布のみならず中性子束分布および随伴中性子束分布にも歪みが生じることになる。第1次近似として制御棒反応度価値は中性子束分布と随伴中性子束分布の積に比例するため、これらの空間分布の歪みにより各制御棒における反応度価値も変わることになる。

制御棒反応度価値も上記②~④と同様に炉心積分特性であるが、通常の炉心設計と同様に BN-600 ハイブリッド炉心においても制御棒は各系統でほぼ対称配置されるため、各系統または両系統を各々全数挿入した場合については、制御棒反応度価値は中性子束分布、随伴中性子束分布の歪みによる影響は小さいと考えられる。ところが、個々の制御棒の反応度価値は中性子束分布、随伴中性子束分布が大きく影響するため、これらに歪みが生じると反応度価値もその影響を受けて変化する。特にワンロッドスタック条件の制御反応度収支の評価結果が影響を受けることになる。

そこで、5章で評価したワンロッドスタック条件での制御棒未臨界度への影

響を考察する。ここではその影響を、スタッツクを仮定した制御棒の反応度価値（以下、最大反応度価値と称する）が中性子束分布と随伴中性子束分布の歪みの積だけ増大し、その分だけワンロッドスタッツク条件での制御棒未臨界度が低下するとして評価した。

概略評価として、中性子束分布の歪み割合は出力分布の歪み割合に等しいとし、かつ随伴中性子束も中性子束と同じ割合だけ歪むと仮定すると、最大反応度価値は、

$$1.07^2 = 1.145 \approx 1.15 \text{ 倍}$$

となる。したがって、最大反応度価値の 15%だけ未臨界度が低下する。

ここで、最大反応度価値は、表 5.2-2 の第 1 系統制御棒における全数挿入時の制御棒反応度価値と 1 ロッドスタッツク条件での制御棒反応度価値の差と考え、

$$5.73 - 5.40 = 0.33\% \Delta k/kk'$$

となる。したがって、その 15%に相当する $0.05\% \Delta k/kk'$ が未臨界度の低下幅となる。

この低下幅を考慮すると、表 5.2-2 に示したケースのうち、ワンロッドスタッツク条件で評価した以下の未臨界度は次のように減少する。

- ・ 燃料交換中における、全制御棒の 1 ロッドスタッツク条件での未臨界度
: $3.69\% \Delta k/kk'$
- ・ 原子炉運転中における、第 1 炉停止系制御棒の 1 ロッドスタッツク条件での未臨界度 : $1.61\% \Delta k/kk'$
- ・ 原子炉運転中における、第 2 炉停止系制御棒の 1 ロッドスタッツク条件での未臨界度 : $0.72\% \Delta k/kk'$

いずれのケースも、ロシア核規則における要求条件を満たしている。したがって、制御反応度収支についても、径方向遮蔽体の非対称配置を考慮することが

ロシアが選定した炉心・燃料仕様の妥当性評価結果に与える影響は小さいといえる。

以上の考察結果により、径方向遮蔽体の非対称配置に伴う炉心出力分布の歪みは、7章で行ったロシアが選定した炉心・燃料仕様の妥当性評価結果に有意な影響を与えないと結論される。

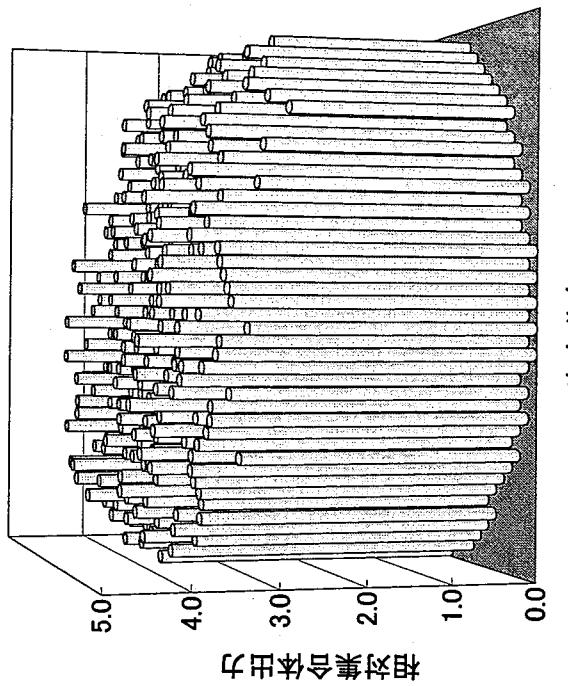
なお、径方向遮蔽体の非対称配置を考慮することで、それを考慮しない場合に比べ最大出力集合体が最大で7%近く増大することを示したが、これにより被覆管最高温度が数%程度増大することが予想される。したがって、熱設計に与える影響が懸念されるが、実際の原子炉運転においては、制御棒挿入深度を調整するなどの方法で出力分布を平坦化できる可能性があり、熱設計への影響を抑えることは可能であると考えられる。

また、径方向遮蔽体の非対称配置を考慮することで炉心出力分布が歪むことにより、最大高速中性子照射量が増大し、炉心構成材料の健全性を含む燃料設計に影響を与えることが懸念される。ただし、これについても、制御棒挿入深度の調整等による出力分布の平坦化を図ることで高速中性子束の空間分布歪みを抑え、燃料設計に与える影響を抑えることは可能であると考えられる。

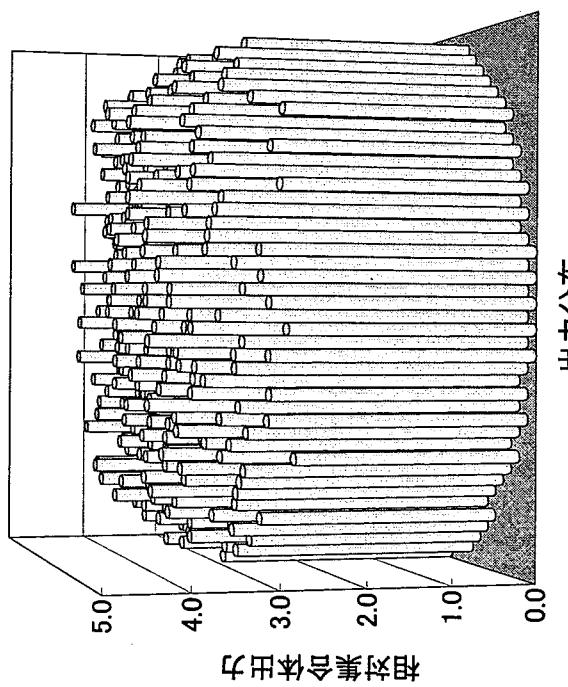
表A1-1 反射体非対称配置炉心の最大線出力及び最大集合体出力
(ハイブリッド炉心／燃焼平衡初期)

項 目	領 域	反射体非対称配置炉心 *	反射体対称配置炉心
最大線出力 (W/cm)	内側炉心	406 (0.3%)	405
	中間炉心	458 (4.4%)	439
	MOX炉心	437 (1.5%)	430
	外側炉心	418 (5.6%)	395
最大集合体出力 (MW)	内側炉心	4.06 (-4.8%)	4.27
	中間炉心	4.48 (-0.4%)	4.50
	MOX炉心	4.42 (0.6%)	4.39
	外側炉心	4.13 (6.6%)	3.87

* ()内は反射体対称配置炉心との差



(1) 反射体対称配置炉心



(2) 反射体非対称配置炉心

図 A1-1 反射体対称及び非対称配置炉心の出力分布（ハイブリッド炉心／サイクル初期）

付録 2 各種補正係数と燃料以外の炉心構成要素で生じる出力分担率

本研究を行う前に、BN-600 ハイブリッド炉心特性を予備的に把握するため、表 A2-1 に示す暫定仕様を用いて予備的な炉心特性解析を行った。本研究において用いた各種補正係数、および燃料以外の炉心構成要素で生じる出力分担率にはこの予備解析で得られた値を適用した。

予備解析に用いた炉心体系図は本解析で用いたものと同じである。燃料以外の炉心構成要素で生じる出力 (γ 発熱) は 2 次元 RZ 体系 γ 線輸送計算により求めた。

補正係数の解析結果を表 A2-2 に、領域別出力分担率の解析結果を表 A2-3 にそれぞれ示す。燃料以外の炉心構成要素で生じる出力分担率は 1.6% である。

ここで対象とした補正係数は以下の通りである。

- 臨界性：メッシュ効果、群縮約効果、輸送効果、燃料非均質効果、中性子ストリーミング効果
- ドップラー係数：燃料非均質効果
- ナトリウムボイド反応度：燃料非均質効果
- 制御棒反応度価値：メッシュ効果、群縮約効果、輸送効果、制御棒均質化断面積効果

なお、本研究の解析で用いた各種仕様と予備解析で用いたものとの間には、 ^{235}U 濃縮度、Pu 同位体組成比等にわずかな違いが見られるが、その大きさは補正係数や γ 発熱の解析精度に本質的な影響を与えるものではないと考えられる程度に小さなものである。したがって、予備解析で求めた補正係数を本研究に適用することは妥当であると判断される。

表A2-1 BN-600ハイブリッド炉心 主要仕様（予備解析）

項目	単位	仕様
熱出力	MW	1470
燃料集合体数		
炉心燃料		
濃縮ウラン燃料	体	303
MOX燃料	体	91
ブランケット燃料	体	394
Pu富化度	wt%	約20wt%
実効運転サイクル長さ	EFPD	145
燃料交換バッチ数	—	4

表A2-2 各種補正係数（予備解析）（1/2）

(a) 臨界性（実効増倍率）に対する補正（サイクル末期）

項目	実効増倍率に対する補正係数				
	濃縮ウラン炉心	移行第1サイクル	移行第2サイクル	移行第3サイクル	ハイブリッド炉心
メッシュ効果	0.9993	0.9993	0.9992	0.9992	0.9992
群縮約効果	1.0002	1.0002	1.0002	1.0001	1.0001
輸送効果	1.0109	1.0109	1.0109	1.0107	1.0108
燃料非均質効果	1.0053	1.0053	1.0054	1.0054	1.0054
ストリーミング効果	0.9985	0.9985	0.9985	0.9985	0.9985
合 計	1.0142	1.0142	1.0142	1.0139	1.0140

(b) ドップラー係数の非均質効果補正（ハイブリッド炉心）

時期	計算モデル [CIRATION 70群]	実効増倍率		ドップラー反応度 (% $\Delta k/kk'$)	非均質効果 補正係数
		基準炉心	温度上昇炉心		
燃焼平衡初期	集合体 均質モデル	0.9930	0.9910	-0.20	1.054
	集合体 非均質モデル	0.9978	0.9956	-0.21	
燃焼平衡末期	集合体 均質モデル	1.0016	0.9993	-0.22	1.054
	集合体 非均質モデル	1.0067	1.0043	-0.24	

表A2-2 各種補正係数（予備解析）(2/2)

(c) ナトリウムボイド反応度の非均質効果補正（炉心部ボイド化／ハイブリッド炉心）

時期	計算モデル [CIRATION 70群]	実効増倍率		ボイド反応度 (%Δk/kk')	非均質効果 補正量 (%Δk/kk')
		基準炉心	ボイド炉心		
燃焼平衡初期	集合体 均質モデル	0.9929	0.9931	0.021	-0.031
	集合体 非均質モデル	0.9977	0.9976	-0.010	
燃焼平衡末期	集合体 均質モデル	1.0014	1.0033	0.182	-0.038
	集合体 非均質モデル	1.0066	1.0080	0.144	

(d) ナトリウムボイド反応度の非均質効果補正（炉心部+上部軸ブランケット ボイド化／ハイブリッド炉心）

時期	計算モデル [CIRATION 70群]	実効増倍率		ボイド反応度 (%Δk/kk')	非均質効果 補正量 (%Δk/kk')
		基準炉心	ボイド炉心		
燃焼平衡初期	集合体 均質モデル	0.9929	0.9926	-0.032	-0.031
	集合体 非均質モデル	0.9977	0.9971	-0.063	
燃焼平衡末期	集合体 均質モデル	1.0014	1.0024	0.095	-0.039
	集合体 非均質モデル	1.0066	1.0071	0.056	

(e) 制御棒反応度価値に対する補正（ハイブリッド炉心サイクル初期）

項目	全制御棒 (1ロッドスタッ ク)	第1系統制御棒		第2系統制御棒 (1ロッドスタッ ク)
		全数挿入	1ロッドスタッ ク	
メッシュ効果	1.023	1.020	1.020	1.031
群縮約効果	0.997	0.999	0.999	0.998
輸送効果	0.947	0.961	0.959	0.923
均質化断面積	0.972	0.976	0.976	0.956
合計	0.939	0.956	0.955	0.908

表A2-3 BN-600ハイブリッド炉心 領域別出力分担率（予備解析）

[単位: %]

領域		燃焼平衡初期	燃焼平衡末期
炉心	内側炉心	42.3	44.1
	中間炉心	15.7	15.4
	MOX炉心	22.0	20.6
	外側炉心	15.8	14.5
	小計	95.7	94.6
軸方向ブランケット	上部	0.9	1.5
	下部	1.7	2.2
	小計	2.7	3.8
炉心及び軸ブランケット部 合計		98.4	98.4
上下遮蔽体		0.1	0.1
上下ガスプレナム		0.0	0.0
径方向遮蔽体	第1層 (スチール)	0.3	0.3
	第2層 (スチール)	0.2	0.2
	第3層 (B_4C)	0.9	0.9
制御棒 (中性子源を含む)		0.1	0.1
燃料以外の炉心構成要素 合計		1.6	1.6
合 計		100.0	100.0