

JAERI-Tech

JP0250567

2002-087



高温ガス炉ガスタービン発電システム (GTHTR300) 制御棒反応度価値の詳細評価

2002年11月

中田 哲夫・片西 昌司・高田 昌二・Xing YAN・國富 一彦

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布を行っております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

高温ガス炉ガスタービン発電システム（GTHTR300）制御棒反応度価値の詳細評価

日本原子力研究所大洗研究所核熱利用研究部

中田 哲夫・片西 昌司・高田 昌二・Xing YAN*・國富 一彦

(2002年9月12日受理)

高温ガス炉ガスタービン発電システム（GTHTR300）は、熱出力 600MWe で固有の安全特性を有する高温ガス炉と 50%近い高い熱効率を持つガスタービンを組み合わせてモジュール化することにより、簡素で経済性に優れた発電システムを構築している。

GTHTR300 は、事故時の除熱を効果的にするため、炉心中央部及び燃料領域外側に反射体を設ける環状炉心であり、制御棒はその内側および外側の反射体に挿入される。反射体では熱中性子束が大きく変化しており制御棒反応度価値の正確な評価には詳細な解析が不可欠である。本報告では、詳細な全炉心モデルのモンテカルロ法を用いて、設計に用いた手法が十分な精度を有することを確認した。

Detailed Analysis for a Control Rod Worth of The Gas Turbine High Temperature Reactor
(GTHTR300)

Tetsuo NAKATA, Shoji KATANISHI, Shoji TAKADA,
Xing YAN* and Kazuhiko KUNITOMI

Department of Advanced Nuclear Heat Technology
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai -machi, Higashiibaraki -gun, Ibaraki -ken

(Received September 12, 2002)

GTHTR300 is composed of a simplified and economica l power plant based on an inherent safe 600MWt reactor and a nearly 50% high efficiency gas turbine power conversion cycle.

GTHTR300 core consist of annular fuel region, center and outer side reflectors because of cooling it effectively in depressurized a ccident conditions , and all control rods are located in both side reflectors of annular core . As a thermal neutron spectrum is strongly distorted in reflector regions, an accurate calculation is especially required for the control rod worth evaluation. In this study, we applied the detailed Monte Carlo calculation s of a full core model, and confirmed that our design method has enough accuracy .

Keywords: GTHTR300, Nuclear Design, HTR, Annular Core, Monte Carlo, Control Rod Worth

* Cooperative Staff

目 次

1. 緒言	1
2. 制御棒反応度価値の詳細評価	2
2. 1 GTHTR300 炉心の概要	2
2. 2 燃料体モデル評価	3
2. 3 制御棒中の遮蔽因子の評価（平面モデル）	4
2. 4 全炉心計算による制御棒反応度価値の評価	7
2. 5 拡散計算との比較	9
3. 結言	12
謝辞	12
参考文献	13

Contents

1. Introduction	1
2. Detailed Analysis for Control Rod Worth	2
2. 1 Outline of GTHTR300 Core	2
2. 2 Fuel Block Model Analysis	3
2. 3 Shielding Factor Analysis for Control Rod (Plane Model)	4
2. 4 Detailed Analysis by Full-core Model for Control Rod Worth	7
2. 5 Comparison with Diffusion Calculation	9
3. Conclusion	12
Acknowledgement	12
References	13

This is a blank page.

1. 緒言

現在、日本原子力研究所(以下、原研)では、高温ガス炉ガスタービン発電システム(Gas Turbine High Temperature Reactor: GTHTR300)の設計⁽¹⁾を行っている。GTHTR300は、熱出力600MWtの固有の安全特性を有するブロック型高温ガス炉と50%近い高い熱効率を持つガスタービンシステムを組み合わせてモジュール化した、簡素で経済性に優れた発電システムである。

GTHTR300は、事故時の除熱を効果的にするため、炉心中央部及び燃料領域外側に反射体を設ける環状炉心を構成しており、制御棒はその内側および外側の反射体に挿入される。反射体領域では熱中性子束が大きく変化しており、そこに挿入される制御棒反応度価値を拡散計算のみで正確に評価することは難しく、輸送計算による詳細な評価の適用が不可欠である。GTHTR300の設計においては、Sn輸送計算により制御棒案内カラムを含む周辺7~9カラムの影響を考慮した大型の格子計算を行って制御棒の遮蔽因子を求め、制御棒の実効断面積を計算している⁽²⁾。

本報告では、こうした手法の妥当性を確認すると共に設計の検証など補助的な詳細解析モデルを作成することを目的として、形状を正確に取り扱うことの出来るモンテカルロ法の全炉心モデルを作成し、設計に用いた拡散計算と輸送計算の組合せ手法による制御棒反応度価値や遮蔽因子計算結果の比較を行った。

2. 制御棒反応度価値の詳細評価

2.1 GTHTR300 炉心の概要

GTHTR300 は、炉内構造物黒鉛の大きな熱容量と受動的な炉容器冷却系によって、事故時にも燃料最高温度を 1600°C 以下に維持し、燃料の追加破損が生じることの無い設計としている。この除熱を効果的にするため炉心は燃料カラム数 90 (炉心外径約 5.6m) の環状炉心で、高さ 8m と併せて比較的外表面積の大きな形状となっている。GTHTR300 の主要原子炉諸元を第 2.1 表に、縦横炉心断面を第 2.1 図及び第 2.2 図に示す。

燃料体は、燃料交換期間の短縮や漏れ流量の削減に配慮し、原研の高温工学試験研究炉 (High Temperature Engineering Test Reactor : HTTR) より一回り大きな平径 40.5 cm、高さ 100cm の正六角柱黒鉛ブロック、57 燃料棒の燃料体を使用している。(第 2.3 図参照) なお出力密度が HTTR の約 2 倍の 5.8W/cc であることから、GTHTR300 では、黒鉛スリーブの代わりに燃料コンパクトに薄い黒鉛被覆層を施すことで除熱性能を向上させた新しい一体型燃料⁽³⁾を使用している。(第 2.4 図参照) また制御棒案内ブロック構造を第 2.5 図に示す。

被覆燃料粒子も、取り出し平均燃焼度が 12 万 MWd/t を目標とすることから、バッファー層の厚い直径 $1010 \mu\text{m}$ の大型粒子を採用している。被覆燃料粒子諸元を、第 2.2 表に、燃料体諸元を第 2.3 表に示す。燃料は、二酸化ウランで濃縮度、反応度調整材 (BP) を炉心全体で 1 種類のみ使用している。この単純化で燃料製造、取り扱いを含めた燃料サイクルの経済性向上を図っている。

GTHTR300 の炉心燃料領域は環状であり、制御棒 (CR) は、内外隣接反射体のみに挿入されているが(第 2.6 図参照)、この領域は反射体効果で熱中性子束分布の変動が非常に大きな領域であることから、こうした制御棒の評価が重要となっている。HTTR の測定結果でも、反射体領域に挿入された制御棒の反応度価値が、拡散計算では過小評価される傾向にあった⁽⁴⁾。そのため GTHTR300 の核設計では、HTTR の設計よりも大きな格子領域の Sn 輸送計算で制御棒の遮蔽因子を求めるとともに、モンテカルロ計算による詳細解析を一部併用して制御棒反応度価値を評価している⁽²⁾。

ここでは、GTHTR300 の核設計で用いた設計手法について、全炉心 3 次元モデルモンテカルロ計算との比較によりその妥当性を検討した。以下に検討手順を示す。

- ① モンテカルロ計算の単位構成要素である燃料体 1 体モデルを、格子燃焼特性解析コード DELIGHT-7⁽⁵⁾ の格子特性と比較してモデル化の妥当性を確認する。
- ② 燃料体を並べた平面モデルで炉心を構成し、基準状態の確認を行うとともに、制御棒カラム内の中性子束分布を比較して遮蔽因子の差異を調べる。
- ③ さらに軸方向に積層構造とした全炉心 3 次元モデルのモンテカルロ計算で各種制御棒反応度価値を求める。
- ④ ③の結果を設計の拡散計算手法と比較する。

2. 2 燃料体モデル評価

モンテカルロ計算用に、燃料体 1 体を詳細にモデル化し、無限増倍率（以下、 k_{∞} と略記する）、燃料体内部の中性子束分布、及び反応率分布を求めた。設計で使用した DELIGHT-7 コードの計算結果との比較を行うことで全炉心モデルの基本要素となる本燃料体モデルの妥当性を確認し、以降の平面モデル、全炉心モデルで使用する。

(1) 計算条件、モデル

モンテカルロ計算には、原研で開発された連続エネルギーモンテカルロコード MVP (Version 2.0 β 6)⁽⁶⁾を使用する。ライブラリーは JENDL-3.2 版 MVP ライブラリーを使用し、すべてのケースにおいて未燃焼状態である初期炉心、炉内温度 300 (K) 固定とする。MVP は連続エネルギーであるため任意のエネルギー分割の結果を出力できるが、本検討では、中性子束分布及び反応率分布の出力は、DELIGHT-7 の計算結果と比較することを考慮し、第 2.4 表に示す 40 群の値とした。

モンテカルロ計算用燃料体モデル寸法を第 2.7 図に、燃料棒配置を第 2.8 図に示す。主な寸法は、燃料体平径 40.5cm(ブロック間ギャップ 2mm)、燃料体ブロック高さ 100cm、燃料棒実効長 95cm、燃料棒ピッチ 4.7cm、燃料棒数 57 本である。また、燃料濃縮度 14%、被覆燃料粒子充填率 33.0% として、被覆燃料粒子の二重非均質性もモデル化している。可燃性毒物 (BP) は、ホウ素濃度 0.3%、太さ 44mm、高さ 95cm の円筒とした。燃料体モデル内の黒鉛はすべて IG-11 黒鉛とした。燃料体内 3 ケ所に直径 44mm の BP 挿入孔を、燃料体中心部には燃料掘み孔を考慮している。ダウエルとソケットは、モデル上均一黒鉛領域として扱う。使用した主な諸元を第 2.5 表に、各領域における原子数密度を第 2.6 表に示す。燃料体モデルの外側は、鏡面反射境界と設定した。

燃料体モデルでは、モンテカルロ計算の計算バッチ数は 56 (ただし、初期 3 バッチは増倍率を求める際の統計から除外する)、各バッチにおけるヒストリーナンバーは 10000 とした。

(2) 計算結果

燃料体モデルの計算結果を第 2.7 表に示す。主な燃料棒領域、及び BP 孔領域における中性子エネルギースペクトルを第 2.9 図に、MVP では直接出力分布が出力されないため、 ^{235}U の反応率から換算して求めた出力分布ピーキング係数を第 2.10 図に示す。 k_{∞} は、1.23704 (標準偏差； $\sigma = 0.080\%$) であるため、 3σ を考慮した場合、±0.25% の誤差、中性子束は、最も中性子束の重みが少ない最低エネルギー領域 (0.004eV 以下) では 8.4% (1σ) 誤差があるものの、平均誤差は 0.69% (1σ) で、 ^{235}U の反応率の誤差も 0.5% 以下 (1σ) である。このように統計の不確かさが十分小さいことから、今回設定した計算バッチ数、及びヒストリーナンバーは適切であると判断できる。

また、燃料棒における出力ピーキング係数の分布は、BP からもっとも離れた位置に設置している F13 (第 2.8 図参照) で最大値 1.143 を示し、BP に近接する F10 で最小値 0.912 を示した。全体的に約 10~20% の影響が広い範囲に及んでおり、燃料棒相互の遮

蔽効果と併せて BP の効果は局所的なものではないことが判る。BP による中性子束への影響を確認するために第 2.11 図に BP 孔の中性子束と BP 孔近傍黒鉛領域の中性子束の比を取った BP 遮蔽因子を示す。BP による影響は、熱中性子エネルギー領域で顕著になり、遮蔽因子は平均約 0.5 程度である。MVP と DELIGHT-7 では、BP とその周辺のモデルの扱いが異なるため、直接的に比較することは出来ないが、DELIGHT-7 でも BP 遮蔽因子は概ね平均約 0.5 程度となっておりモデル的に妥当であると判断される。

(3) DELIGHT-7 計算結果との比較

現在設計では、実際の燃料棒近傍の実効ピッチによる格子計算から求める巨視断面積と余剰黒鉛部分の巨視断面積を炉心計算段階で混合する方法を用いている。この方法では、MVP モデルに相当する全体の無限増倍率が求められない。ここでは近似として物量を保存するように余剰黒鉛を含めた平均格子半径のモデルを設定し、DELIGHT-7 コードで計算を行った。第 2.7 表に示すように k_{∞} は 1.2370 であり、MVP による計算結果 1.23704 と非常に良く一致している。

非常に良く一致しているが、今回 MVP 計算に使用している断面積データ JENDL-3.2 は、HTTR の実験値と比較して増倍率が約 1%高い値を示すことが知られていることから、平均格子半径のモデルでの余剰黒鉛の扱いなど DELIGHT-7 の格子モデル化効果と核データの効果等が相殺しているものと考えられる。こうした効果による 1 %レベルの相違は生じて当然とも言えるが、いずれも 1%以下の影響であるため、本項目の目的である MVP による燃料体モデル作成上大きな問題は無く概ね妥当性の確認はできたものと判断される。

2. 3 制御棒中の遮蔽因子の評価（平面モデル）

前記の燃料体モデルを横に配置し、径方向炉心全領域、軸方向 1 燃料体高さをモデル化した平面モデルによって、制御棒反応度価値の評価即ち、制御棒全挿入、制御棒全引き抜き、及びスタンドパイプ 1 カ所スタック状態の計算を実施した。平面モデルは、上下方向に反射境界を設定しているため軸方向長さ無限大に相当する状態の実効増倍率、各カラム平均の中性子束、及び制御棒中の中性子束分布等を算出することになる。結果を設計計算で使用される Sn 輸送計算コード TWOTRAN⁽⁷⁾を用いて求めた制御カラム内における中性子束遮蔽因子と比較することにより、設計の格子モデルと全炉心モデル間の違いや平面モデル作成時の妥当性を確認する。

(1) 計算条件、モデル

平面モデルの計算体系諸元を第 2.8 表に、径方向カラム配置を第 2.12 図に示す。内部可動反射体カラム 55、燃料カラム 90、内側制御カラム（後備炉停止系なし）6、内側制御カラム（後備炉停止系あり）12、外側制御カラム 12 と外側可動反射体、及び固定反射

体から構成される炉心体系である。制御棒カラム及び燃料カラムと接する径方向可動反射体には黒鉛材料として IG-110 を設定し、それ以外の可動反射体には黒鉛材料として IG-11 を設定した。軸方向は、1 燃料体高さで構成する。燃料カラムの諸元は燃料体モデルと同一である。

制御カラムの概略図を第 2.13 図に示す。制御カラムには、制御棒が 2 本入るタイプ 1 と制御棒 1 本と後備炉停止系孔が設置されたタイプ 2、及び制御棒 1 本のみが挿入されるタイプ 3 があり、タイプ 2 とタイプ 3 用の制御棒は同一スタンドパイプ内に収納されており、それぞれが第 2.12 図に示された状態で配置される。(なお第 2.2 図に示すように最終的に GTHTTR300 炉心では、この他に制御カラムタイプ 1 と 2 に出力制御棒を設置しているが、本検討段階では未定であったこと、もともと弱い吸収体で通常時全挿入されており、炉停止にその効果を期待することが出来ないことから、炉停止評価からは除外する。) また後備炉停止系孔内はヘリウムが充満していると設定した。また、制御棒が引き抜かれている場合も同様にヘリウムが充満していると設定した。

平面モデル外側境界は、固定反射体の径方向外側は真空境界を設定し、上下は鏡面反射境界を設定した。平面モデルでは、大型モデルであるため統計精度を向上させるように、モンテカルロ計算のバッチ数は 510 (ただし、初期 10 バッチは増倍率を求める際の統計から除外する)、各バッチにおけるヒストリー数は 20000 とした。

(2) 計算ケース

平面モデルでは、モデルの妥当性確認及び制御棒の中性子遮蔽因子の評価を目的として、制御カラムの状態を変化させた以下の 3 ケースを解析した。

- ・全制御棒引き抜きケース：
すべての制御カラムから制御棒を引き抜く
- ・全制御棒挿入ケース：
すべての制御カラムに制御棒を挿入する
- ・内側 (CRI-2.3) 1ヶ所スタックケース：
全制御棒挿入状態から、同一スタンドパイプ内の内側制御棒 2 本 (タイプ 2 (CRI-2) 及びタイプ 3 (CRI-3) : 第 2.12 図参照) の制御棒を引き抜く

(3) 計算結果

各ケースに対する結果を第 2.9 表に、主な特徴を以下に示す。

① 全制御棒引き抜きケース

全制御棒引き抜きケースにおける軸方向無限大の実効増倍率 (以下 k_{eff} と略記する) は 1.13420 ($\sigma = 0.024\%$) であった。また、第 2.14 図に代表的な位置の燃料カラム (位置対応は、第 2.12 図参照)、及び内外側制御カラムにおける平均スペクトルを示す。制御棒未挿入時には、燃料カラムは場所に依らず平坦でほぼ同じスペクトルを示し、制御カラムで熱中性子束が大きく盛り上がっていることが判る。

② 全制御棒挿入ケース

全制御棒挿入ケースにおける k_{eff} は 0.95095 ($\sigma = 0.035\%$) であった。また、第 2.15 図に代表的な位置の燃料カラム、及び内外側制御カラムにおける平均スペクトルを示す。制御棒の挿入により外側の燃料カラムのスペクトル分布が内側に比べて高くなつており内側制御棒の影響が外側よりも大きくなっていることが判る。

第 2.16 図には、制御カラム内における制御棒吸収体と黒鉛領域の平均中性子束比を取った遮蔽因子を示す。どの制御棒も遮蔽因子自体は、ほぼ同じであることが判る。また、第 2.17 図に高速、中速、熱群エネルギーの代表として、1 keV、6.67eV、及び 0.025eV における制御カラム吸収体領域、制御カラム黒鉛領域、及び燃料カラム平均中性子束を示す。制御棒を挿入した状態では、黒鉛領域の中性子束と比較して制御棒中の中性子束は 1 keV 付近より低いエネルギー領域で著しく少くなり、0.025eV では燃料カラム平均中性子束と比較して制御カラム吸収体領域の中性子束は 1/300 程度と大きく減少している。

③ 内側 1ヶ所スタックケース

内側 1ヶ所スタックケースにおける k_{eff} は 0.99591 ($\sigma = 0.046\%$) であった。第 2.18 図に制御カラムに隣接した燃料カラム、及び内外側制御カラムにおける平均スペクトルを示す。制御棒が挿入されている領域の制御カラムに隣接した燃料カラム及び制御棒カラムの平均値と比較すると、制御棒が引き抜かれている制御棒カラムだけでなく、隣接した燃料カラムにおいても、制御棒が挿入している領域の等価な位置の中性子束平均値と比較して一桁大きな値を示した。

また、第 2.19 図に制御カラム内における遮蔽因子（吸収体領域と黒鉛領域の平均中性子束比）を示す。全制御棒挿入ケースにおいて求めた遮蔽因子とほぼ一致しており、制御棒挿入カラムの遮蔽因子自体は変化が少ないことが確認される。

第 2.9 表に、全制御棒引き抜きケース、全制御棒挿入ケース、及び内側 1ヶ所スタックケースにおける挿入制御棒反応度価値、スタック制御棒反応度価値を示す。挿入全制御棒反応度価値は、17.0% ($\Delta k/kk'$) であり、内側 1ヶ所スタック時の制御棒反応度価値は 12.2% ($\Delta k/kk'$) である。上記のスペクトル図に示すように、制御棒スタックの影響が広い範囲の燃料スペクトルに影響しているため、スタック反応度価値は 4.8% ($\Delta k/kk'$) と挿入全制御棒反応度価値の 1/3 に近い大きな値となることが確認できた。

なお、本計算では制御棒吸収体物質ホウ素 (^{10}B) での反応率誤差は 1σ で約 0.40% の精度となっているので、全制御棒挿入反応度より 3σ を仮定しても $0.17 \times 0.0040 \times 3 = 0.00204$ 、つまり制御棒領域における中性子束の誤差が k_{eff} に与える影響は約 0.20% 程度である。このことから本モデルで十分な精度で計算できているものと考えられる。

以上の検討より、TWOTRAN による制御棒の中性子遮蔽因子と比較できるデータを MVP の平面モデルからも取得できること、挿入制御棒反応度価値やスタック制御棒反応度価値を比較的容易かつ精度良く取得できることが確認できた。またその統計誤差から、ここで用いた平面モデルの形状モデル化及び計算バッチやヒストリー数設定が妥当であることが確認できた。

2. 4 全炉心計算による制御棒反応度価値の評価

前記の平面モデルを上下に積層配置し、径・軸方向炉心全領域をモデル化した3次元全炉心モデルを作成した。モデル作成に際しては、燃焼計算や制御棒の任意高さ設置にも対応できるように工夫した。この3次元全炉心モデルを使用して、拡散計算との比較に配慮して以下の7種類の解析を実施し、制御棒の反応度価値を求めた。

- ・全制御棒引き抜きケース
- ・全制御棒挿入ケース
- ・内側制御棒全部スタックしたケース
- ・外側制御棒全部スタックしたケース
- ・内側（CRI-2.3）1ヶ所スタックケース
- ・内側（CRI-1）6ヶ所スタックケース
- ・内側（CRI-2.3）6ヶ所スタックケース

（1）計算条件、モデル

3次元全炉心モデルの計算体系諸元を第2.10表に、径軸方向カラム配置を第2.20図に示す。径方向カラム配置は平面モデルと同じであり、燃料体は軸方向に8段設置し、燃料体の上下に設置される80cm高さの上下可動反射体までの領域を計算対象とし、上下可動反射体の外側、及び径方向固定反射体の外側は真空境界とした。制御棒のストロークは830cmとし、制御棒が挿入される場合は下端が燃料体と下部可動反射体の境界とし、上端は燃料体と上部可動反射体の境界から上方30cm引き抜かれるものとした。制御カラムの寸法等は平面モデルと同様である。全炉心計算では、モンテカルロ計算のバッチ数は510（ただし、初期10バッチは増倍率を求める際の統計から除外する）、各バッチにおけるヒストリー数は20000とした。燃料カラムの諸元は燃料体モデルと同一である。

（2）計算ケース

3次元全炉心モデルでは、モデルの妥当性確認、制御棒遮蔽因子の評価及びHTTRの測定で指摘されていた拡散計算における制御棒反応度価値の過小評価傾向などを検討することを目的として、制御カラムの状態を変化させた次の7ケースを計算した。

- ・全制御棒引き抜きケース：
すべての制御カラムから制御棒を引き抜く
- ・全制御棒挿入ケース：
すべての制御カラムに制御棒を挿入する
- ・内側制御棒全部がスタックしたケース：
すべての内側制御棒（タイプ1、タイプ2及びタイプ3すべて、合計18ヶ所：第2.12図参照）を引き抜く
- ・外側制御棒全部がスタックしたケース：

- すべての外側制御棒（タイプ 1、合計 12 ケ所：第 2.12 図参照）を引き抜く
- ・内側（CRI-2.3）1 ケ所スタックケース：
全制御棒挿入状態から、1 ケ所の同一スタンドパイプ内の内側制御棒 2 本（タイプ 2（CRI-2）及びタイプ 3（CRI-3）：第 2.12 図参照）の制御棒を引き抜く
 - ・内側（CRI-1）6 ケ所スタックケース：
全制御棒挿入状態から、同一スタンドパイプ内の内側制御棒 6 ケ所（タイプ 1、合計 6 ケ所：第 2.12 図参照）の制御棒をすべて引き抜く
 - ・内側（CRI-2.3）6 ケ所スタックケース：
全制御棒挿入状態から、同一スタンドパイプ内の内側制御棒 6 ケ所（タイプ 2（CRI-2）及びタイプ 3（CRI-3）、合計 6 カ所：第 2.12 図参照）の制御棒をすべて引き抜く

(3) 計算結果

各ケースに対する結果を第 2.11 表に、主な特性を以下に示す。

① 全制御棒引き抜きケース

全制御棒引き抜きケースにおける k_{eff} は 1.12369 ($\sigma = 0.022\%$) であった。平面モデルにおける全制御棒引き抜きケースの k_{eff} である 1.1342 と比較すると、軸方向のモデル効果により全炉心体系では約 1% Δk 低い値となった。また、第 2.21 図に主な燃料カラム、及び内外側制御カラムにおける平均スペクトルを示す。

② 全制御棒挿入ケース

全制御棒挿入ケースにおける k_{eff} は 0.94406 ($\sigma = 0.029\%$) で、平面モデルにおける全制御棒挿入ケースの k_{eff} である 0.95095 と比較すると、軸方向のモデル効果により全炉心体系では約 0.7% Δk 低い値となった。また、第 2.22 図に主な燃料カラム、及び内外側制御カラムにおける平均スペクトルを、第 2.23 図には制御カラム内における遮蔽因子を示す。当然ながら平面モデルとほとんど同じ結果が得られており解析に異常が無いことが確認できる。

第 2.24 図に 1 keV、6.67 eV、及び 0.025 eV における制御カラム吸収体領域、制御カラム黒鉛領域、及び燃料カラム平均中性子束を示す。制御棒を挿入した状態では、黒鉛領域の中性子束と比較して制御棒吸収体中の中性子束は 1 keV 付近より低いエネルギー領域で著しく低下する傾向は 2 次元計算と同様であり、2 次元計算の結果と比較した遮蔽因子の誤差は最大でも（CRI3）5 群における +4.2%、平均すると +0.7% と非常に良く一致していることが判る。

③ 内側制御棒全部がスタックしたケース

内側制御棒全部がスタックケースにおける k_{eff} は 1.07510 ($\sigma = 0.024\%$) であった。

④ 外側制御棒全部がスタックしたケース

外側制御棒全部がスタックケースにおける k_{eff} は 1.02509 ($\sigma = 0.026\%$) であった。

⑤ 内側（CRI-2.3）1 ケ所スタックケース

内側（CRI-2.3）1 ケ所がスタックしたケースにおける k_{eff} は 0.98933 ($\sigma = 0.034\%$)

であった。平面モデルにおける内側（CRI-2.3）1ヶ所がスタックしたケースにおける k_{eff} の 0.99591 と比較すると、軸方向のモデル効果により全炉心体系では約 0.7% Δk 低い値となった。

⑥ 内側（CRI-1）6ヶ所スタックケース

内側（CRI-1）6ヶ所がスタックしたケースにおける k_{eff} は 0.99222 ($\sigma = 0.027\%$) であった。

⑦ 内側（CRI-2.3）6ヶ所スタックケース

内側（CRI-2.3）6ヶ所がスタックしたケースにおける k_{eff} は 1.01315 ($\sigma = 0.026\%$) であった。

第 2.11 表に各ケースにおける挿入制御棒反応度価値、及び各スタック状態の制御棒反応度価値を示す。全炉心計算による挿入全制御棒反応度価値は 16.9% ($\Delta k/kk'$) であり、CI2.3・1 体スタック時の挿入反応度価値は 12.1% ($\Delta k/kk'$) である。2 次元計算の平面モデルと比較すると、挿入反応度価値は全挿入、CI2.3・1 体スタック状態のいずれも 0.1% ($\Delta k/kk'$) 低い値で、スタック反応度価値は同じ 4.8% ($\Delta k/kk'$) であった。これから体系の実効増倍率に約 1% Δk 程度の違いはあるものの、制御棒反応度価値評価には 2 次元計算で全く問題が無いことが確認できた。

なお 2 次元計算の平面モデルと比較して、3 次元全炉心計算の実効増倍率が低い値を示す原因是、炉心上下方向に可動反射体配置までを考慮しているため、上下や斜め方向への中性子の漏れや吸収が正確に考慮されることによる。

また、各種スタック状態における挿入反応度価値の値を比較すると、以下のことが明らかとなった。

- ・ 内側制御棒全部がスタックケースと外側制御棒全部がスタックケースを比較すると吸収体 1 体あたりの制御棒反応度挿入量は内側制御棒のほうが 2 倍以上大きく、スタック評価では内側制御棒が明らかに重要となることが確認できた。
- ・ 内側（CRI-1）6ヶ所スタックケースと内側（CRI-2.3）6ヶ所スタックケースを比較すると、吸収体 1 体あたりのスタック制御棒価値は CRI-2.3 のほうが僅かに大きく、最大となることが確認できた。
- ・ 内側（CRI-2.3）1ヶ所スタックケースと内側（CRI-2.3）6ヶ所スタックケースを比較すると、1 カ所当たりのスタック制御棒価値は 1ヶ所スタックケースのほうが 4 倍以上大きい値を示す。即ち、1ヶ所スタックの場合のスタック制御棒価値 4.84% ($\Delta k/kk'$) は、6ヶ所スタックの場合の全スタック制御棒価値 7.22% ($\Delta k/kk'$) の約 2/3 に相当することが判る。

2. 5 拡散計算との比較

モンテカルロ法計算コード MVP により得られた上記の実効増倍率と制御棒反応度価値について、炉心設計計算に使用している拡散計算コード CITATION⁽⁸⁾ を用いて求め

効増倍率、及び制御棒反応度価値評価結果との比較を行い、その差異を明らかにする。

GTHTR300 の炉心設計計算では、DELIGHT-7 で作成した格子平均巨視断面積と輸送計算コード TWOTRAN で計算した制御棒吸收体用遮蔽因子を使用して実効巨視断面積を求め、拡散計算コード CITATION の 6 群拡散計算で、炉心の実効増倍率、出力分布、中性子束分布等を求めている⁽²⁾。

本項では、MVP による計算結果とこの拡散計算コードによる実効増倍率、及び制御棒反応度価値を比較する。以下の代表的 4 ケースについて CITATION3 次元計算 (1/6 炉心モデル : 第 2.35 図) を実施し、その差異を評価した。

- ・全制御棒引き抜きケース
- ・全制御棒挿入ケース
- ・内側 (CRI-1) 6 ケ所スタックケース
- ・内側 (CRI-2.3) 6 ケ所スタックケース

結果を第 2.12 表に示す。全制御棒引き抜きケースにおける CITATION の実効増倍率は 1.13781 である。この値は MVP による実効増倍率 1.12369 とは 1.3% の差であり、核データ、メッシュ、群数やモデルが均質と非均質のように多くの違いがあることを考慮すると良く一致している。

全制御棒挿入ケースでは、CITATION の実効増倍率は 0.97442 で、MVP の実効増倍率 0.94406 より 3.2% 高い値となった。それぞれ挿入全制御棒反応度価値は 0.169 ($\Delta k/kk'$) と 0.147 ($\Delta k/kk'$) で、約 13% の違いがある。なお、内側 (CRI-1) 6 ケ所スタックケースと内側 (CRI-2.3) 6 ケ所スタックケースの場合には、両者の違いは 5.8% と 7.3% であり、炉停止余裕評価のようにスタック状態を評価する場合には、設計に使用している拡散計算結果でも 10% 以内の精度となっている。また拡散計算結果はいずれも挿入制御棒反応度価値を小さめに評価しており、保守的であることも確認できた。

次にこれらの差異の要因を確認するため、制御棒の遮蔽因子の比較を行った。第 2.26 図に TWOTRAN2 次元計算における内側制御棒領域 CRI1、CRI2.3 及び外側制御棒領域 CR01.2 制御棒領域のモデル図を示す。遮蔽因子は各カラム単位で設定しているが、CRI2.3 は 2 カラムで平均化し一つの遮蔽因子とした。また CR01 と CR02 には同じ遮蔽因子を用いている。MVP では、TWOTRAN の計算結果と比較するために 6 群にまとめた出力で、カラム毎に領域内の吸収体における軸方向積分中性子束と黒鉛部分における軸方向積分中性子束の比を遮蔽因子とした。5 種類の制御棒領域である CRI1、CRI2、CRI3 (ただし CRI2 と CRI3 に関しては TWOTRAN の計算結果と比較するために平均値も求めている)、CR01、及び CR02 に対して各々遮蔽因子を求めている。

MVP による遮蔽因子計算結果を第 2.13 表に、TWOTRAN による遮蔽因子計算結果を第 2.14 表に示す。第 2.37 図に CRI1 に関する MVP と TWOTRAN の遮蔽因子比較、第 2.38 図に CRI2.3 に関する MVP と TWOTRAN の遮蔽因子比較、そして第 2.39 図に CR01.2 に関する MVP と TWOTRAN の遮蔽因子比較を示す。

各制御棒領域の遮蔽因子を比較すると、内側制御棒領域 CRI1、及び外側制御棒領域 CR01.2 領域のように 1 カラムの領域の場合、TWOTRAN の遮蔽因子が若干小さい値である

あるものの全体的に良く一致している。特に、制御棒反応度価値に影響の大きい4~6群では非常に良く一致している。一方、内側制御棒領域CRI2.3のように、2カラムにまたがる場合は、エネルギー群の傾向は合っているものの絶対値は、TWOTRANの遮蔽因子はMVPの遮蔽因子に比べて60%程度の小さな値である。これは、内側制御棒領域CRI2.3のように吸収効果が広範囲に及ぶ場合には、第2.26図に示すような格子モデル全体にひずみが生じ、モデル境界での平坦な中性子束の境界条件とは異なってしまうためと考えられる。しかしながらこの場合でも前記のように制御棒反応度価値で10%前後であることから大型の環状炉心に対する拡散計算の精度としては悪いものではない⁽⁹⁾。

以上の検討結果は、次のようにまとめられる。

- ・制御棒未挿入状態に対する拡散計算は、核データやモデル効果を含めても約1.3%高めに評価するのみで比較的良い精度である。
- ・制御棒反応度価値の拡散計算結果は、全制御棒挿入状態で約13%、スタック状態で6~7%といずれも10%前後低い評価であり、炉停止余裕等の評価にはいざれも保守的傾向である。
- ・最大価値を持つ内側制御棒領域CRI2.3に対しては、吸収体挿入の影響が広範囲になるため、TWOTRANの遮蔽因子にこうした炉心全体の効果を反映できれば誤差の低下が可能である。

今後は、拡散計算のメッシュ分割や群数などのモデル詳細化効果の確認や核データの効果、BP配置と制御棒の干渉効果などの確認を進めると共に、MVPのような詳細計算結果を合理的に反映できる手法の開発が、課題として考えられる。

3. 結言

GTHTR300 では、制御棒は環状炉心の両側の反射体領域に挿入される。反射体領域では熱中性子束が大きく変化しており、そこに挿入される制御棒の価値を拡散計算のみで正確に評価することは難しく、輸送計算による詳細な評価の適用が不可欠である。

本報告では、連続エネルギーモンテカルロ法コード MVP を使用して、設計に用いた拡散計算と輸送計算の組合せ手法との比較を行った。なおこうした大型モデルの作成に際してはモデル化の間違いが考えられるため、ここでは単位燃料体モデルの作成、それを平面状に配置した平面モデルの作成、さらにそれを軸方向に積層して全炉心モデルを作成するという段階的手順の採用と各段階での比較計算を通じて誤りを排除することに努めた。

最終的な全炉心モデルの解析や設計に用いた拡散計算と輸送計算の組合せ手法との比較から以下の結果が得られた。

- ・制御棒未挿入状態は、両者約 1.3% の違いであり、6 メッシュ／ブロック均質の拡散計算でも比較的良い精度で評価できている。
- ・MVP を使用しても TWOTRAN による遮蔽因子と同様の制御棒遮蔽因子の作成が可能であり、炉心全体に中性子束分布が歪むような場合を除けば TWOTRAN 遮蔽因子は、ほぼ 10% 以内の精度で評価できていることが確認できた。
- ・制御棒反応度価値は、全制御棒挿入状態で約 13%、スタック状態で 6~7% といずれも 10% 前後拡散計算結果が低い結果であり、炉停止余裕等の評価にはいずれも保守的傾向である。
- ・平面モデルでも、実効増倍率は約 $1\% \Delta k$ 高めに評価するものの、制御棒反応度価値評価には全く問題なく、全炉心モデルとほぼ同じ結果が得られる。

以上の結果、設計に用いた拡散計算と輸送計算の組合せ手法が十分な精度と保守性を持っていることを確認し、炉停止余裕など詳細な結果が必要な場合には、本全炉心モデルや平面モデルの適用が可能であることも確認できた。

謝辞

本検討を行うに当り、ご指導いただいた塩沢周策核熱利用研究部長、解析に協力いただいた川崎重工業株式会社の渡部隆、佐藤学の両氏に感謝いたします。

参考文献

- (1) 国富一彦、片西昌司、塩沢周策：日本原子力学会誌、43、1085（2001）。
- (2) 中田哲夫、片西昌司、高田昌二、Xing YAN、國富一彦：JAERI-Tech 2002-066、「高温ガス炉ガスタービン発電システム（GTHTR300）の核設計」（2002）。
- (3) 山下清信、中野正明、野尻直喜、藤本望、沢和弘、中田哲夫、渡部隆：JAERI-Tech 97-055、「高温工学試験研究炉(HTTR)の高性能炉心概念の検討」（1997）。
- (4) 藤本望、野尻直喜、高田英治、斎藤賢司、小林正一、澤畠洋明、石仙繁：JAERI-Tech 2000-091、「HTTR 出力上昇試験での臨界制御棒位置と温度係数—中間報告—」（2001）。
- (5) 新藤隆一、山下清信、村田勲：JAERI-M90-048、「高温ガス炉・格子燃焼特性解析コード－DELIGHT-7－」（1990）。
- (6) 森 貴正、中川正幸：JAERI-DATA/Code 94-007、「MVP/GMVP 連続エネルギー法及び多群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード」（2000）。
- (7) K. D. Lathrop and F. W. Brinkley, "TWOTRAN-II: An Interfaced Exportable Version of the TWOTRAN Code for Two-Dimensional Transport", LA-484-MS (1973).
- (8) T. B. Fowler, D. R. Vondy, G. W. Cunningham, "NUCLEAR REACTOR CORE ANALYSIS CODE: CITATION", ORNL-TM-2496, Rev.2 (1971).
- (9) 山下清信、新藤隆一、村田勲、渡部隆：JAERI-M 88-245、「VHTRC の実験データに基づく高温工学試験研究炉の核設計計算手法の精度検討」（1988）。

第 2.1 表 GTHT300 原子炉主要諸元

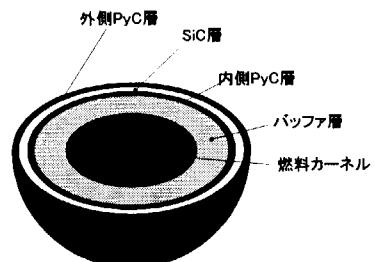
項目	GTHT300	単位	備考
原子炉熱出力	600	MW	
原子炉入口冷却材温度	587	°C	
原子炉出口冷却材温度	850	°C	
冷却材圧力	7	MPa	
冷却材流量	437	kg/s	
取り出し平均燃焼度	11.2	万MWd/t	
燃焼期間/バッチ	730	Days	
燃料交換期間	30	Days	
バッチ数	2		
燃料交換方式	サンドイッチシャッフル リング		2年毎に1/2炉心燃料交換
燃料体型式	一体型燃料		ピンインブロック
燃料体材料	IG11相当		
初期濃縮度	14	wt%	
残存濃縮度	5.05	wt%	
燃料種類数	1		目標4%以下 粒子充填率、BPも1種類のみ 第2.2表参照
燃料粒子	SiC被覆粒子		
カーネル直径	550	μm	
粒子直径	1010	μm	
粒子充填率	33	%	
ブロック半径	40.5	cm	
燃料ピン数	57		第2.3表参照 外側に1mm厚さの被覆
コンパクト外径	2.4	cm	
コンパクト高さ	約 8	cm	
コンパクト厚さ	0.75	cm	
冷却口内径	3.9	cm	
冷却材流路幅	0.65	cm	
BP	3	本/体	
ホウ素濃度	0.3	%	
直径	4.4	cm	
長さ	95	cm	
ブロック間ギャップ	0.2	cm	
ブロック高さ	100	cm	燃料実効長95cm
ブロック段数	8	段	
燃料領域高さ	800	cm	
軸方向可動反射体高さ	約80	cm	
軸方向可動反射体段数	2	段	上1+下1段
上部遮蔽体	40	cm	
内側可動反射体	55	カラム	
内側制御カラム	18	カラム	
内側合計カラム数	73	カラム	
燃料カラム数	90	カラム	
外側可動反射体	36	カラム	
外側制御カラム	12	カラム	
外側合計カラム数	48	カラム	
固定反射体等価厚さ	60.5	cm	冷却材流路孔を含む
圧力容器内径	約7.6	m	
炉心平均出力密度	5.8	W/cm ³	

第 2.2 表 被覆燃料粒子諸元

項目	単位	600MWt	密度(g/cm ³)
燃料核直径	μm	550	10.8
バッファー層厚さ	μm	140	1.15
内側PyC層厚さ	μm	25	1.85
SiC層厚さ	μm	40	3.2
外側PyC層厚さ	μm	25	1.85
被覆燃料粒子直径	μm	1010	
燃料体積比		0.16	

PyC : Pyrolytic carbon

SiC : Silicon carbide



第 2.3 表 燃料体寸法諸元

項目	単位	燃料体各寸法
燃料ピン数		57
ピン配列数		9
コンパクト内径	cm	0.90
コンパクト厚さ	cm	0.75
コンパクト外径	cm	2.40
黒鉛被覆層内径	cm	2.40
黒鉛被覆層厚さ	cm	0.10
黒鉛被覆層外径	cm	2.60
冷却材流路幅	cm	0.65
冷却口内径	cm	3.90
燃料ピンリガメント	cm	0.80
燃料ピンピッチ	cm	4.70
ブロックリガメント	cm	2.02
ブロック平径	cm	40.50
		平径40.5cm

第 2.4 表 DELIGHT エネルギー群構造

詳細群				縮約群	
番号	上限エネルギー (eV)	レサジー	ΔU	番号	上限エネルギー (eV)
1	1.00E+07	0.00E+00	1.25E+00	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	1.00E+07
2	2.87E+06	1.25E+00	7.54E-01		1.83E+05
3	1.35E+06	2.00E+00	9.97E-01		9.61E+02
4	4.98E+05	3.00E+00	1.00E+00		2.38E+00
5	1.83E+05	4.00E+00	5.00E-01		6.50E-01
6	1.11E+05	4.50E+00	9.98E-01		1.05E-01
7	4.09E+04	5.50E+00	1.25E+00		1.00E-05
8	1.17E+04	6.75E+00	7.49E-01		
9	5.53E+03	7.50E+00	9.97E-01		
10	2.04E+03	8.50E+00	7.53E-01		
11	9.61E+02	9.25E+00	7.50E-01	11 12 13 14 15 16 17 18 19 20	
12	4.54E+02	1.00E+01	5.01E-01		
13	2.75E+02	1.05E+01	4.99E-01		
14	1.67E+02	1.10E+01	7.50E-01		
15	7.89E+01	1.17E+01	4.99E-01		
16	4.79E+01	1.22E+01	5.02E-01		
17	2.90E+01	1.28E+01	4.99E-01		
18	1.76E+01	1.33E+01	5.00E-01		
19	1.07E+01	1.37E+01	1.00E+00		
20	3.93E+00	1.47E+01	5.02E-01		
21	2.38E+00	1.53E+01	2.52E-01	21 22 23 24 25 26 27	
22	1.85E+00	1.55E+01	2.44E-01		
23	1.45E+00	1.57E+01	2.76E-01		
24	1.10E+00	1.60E+01	5.13E-02		
25	1.05E+00	1.61E+01	5.41E-02		
26	9.90E-01	1.61E+01	1.52E-01		
27	8.50E-01	1.63E+01	2.68E-01		
28	6.50E-01	1.65E+01	3.68E-01		
29	4.50E-01	1.69E+01	2.51E-01		
30	3.50E-01	1.72E+01	1.38E-01		
31	3.05E-01	1.73E+01	6.78E-02		
32	2.85E-01	1.74E+01	2.36E-01		
33	2.25E-01	1.76E+01	3.10E-01		
34	1.65E-01	1.79E+01	4.52E-01		
35	1.05E-01	1.84E+01	3.36E-01	35 36 37 38 39 40	
36	7.50E-02	1.87E+01	3.10E-01		
37	5.50E-02	1.90E+01	4.52E-01		
38	3.50E-02	1.95E+01	8.47E-01		
39	1.50E-02	2.03E+01	1.32E+00		
40	4.00E-03	2.16E+01	5.99E+00		
	1.00E-05	2.76E+01			

第 2.5 表 燃料体モデルの計算体系諸元

燃料体モデル諸元	値
燃料体平径 (cm)	40.7
燃料体高さ (cm)	100
燃料有効長 (cm)	95
燃料ピンピッチ (cm)	4.7
燃料ピン本数 (cm)	57
燃料コンパクト内半径 (cm)	0.45
燃料コンパクト外半径 (cm)	1.20
燃料スリーブ外半径 (cm)	1.30
冷却孔外半径 (cm)	1.95
燃料カーネル半径 (cm)	0.0275
バッファ層外半径 (cm)	0.0415
I-PyC外半径 (cm)	0.0440
SiC層外半径 (cm)	0.0480
O-PyC層外半径 (cm)	0.0505
BP孔半径 (cm)	2.20
ハンドリング孔半径 (cm)	2.05
被覆燃料粒子充填率	33%
濃縮度	14%
BP濃縮度	0.3%

第 2.6 表 燃料体モデル計算用原子数密度

核種	原子量	燃料カーネル	バッファー層	高密度黒鉛層	SiC
U235	235.04392	3.4142E-03			
U238	238.05078	2.0708E-02			
B10	10.0129	1.1911E-07			
B11	11.0093	4.8244E-07			
C	12.0110		5.7658E-02	9.2755E-02	4.8061E-02
O	15.9994	4.8243E-02			
He	4.0026				
Si	28.0855				4.8061E-02
		濃縮度14% 密度10.8g/cm ³	密度1.15g/cm ³	密度1.85g/cm ³	密度3.2g/cm ³

核種	原子量	黒鉛ブロック	黒鉛ブロック	ヘリウム	制御棒吸収体	固定反射体
		IG11 ^{*1}	IG110 ^{*1}		B4C+C	PGX ^{*1}
U235	235.04392					
U238	238.05078					
B10	10.0129	5.8560E-08	9.7600E-09		6.2861E-03	5.6664E-08
B11	11.0093	2.3720E-07	3.9533E-08		2.5462E-02	2.2952E-07
C	12.0110	8.8744E-02	8.8744E-02		6.6683E-02	8.5871E-02
O	15.9994					
He	4.0026			1.7372E-03		1.7372E-05
Si	28.0855					
		密度1.77g/cm ³ 不純物B、3ppm	密度1.77g/cm ³ 不純物B、0.5ppm	7MPa 300K	密度1.9g/cm ³ 吸収体B、30%	密度1.73g/cm ³ 不純物B、3ppm ホウ素率 1%

*1 黒鉛材料銘柄名

第 2.7 表 燃料体モデル計算結果

項目	無限増倍率	不確かさ
	k_{∞}	1σ
MVP燃料体モデル	1.23704	0.0796%
DELIGHTブロック平均格子モデル	1.23700	—

第 2.8 表 平面モデルの計算体系諸元

平面モデル諸元	値
燃料カラム	90
制御棒カラム(タイプ1)	18
制御棒カラム(タイプ2)	6
制御棒カラム(タイプ3)	6
内側可動反射体力カラム	55
外側可動反射体力カラム	36
カラムピッチ (cm)	40.7
炉心半径 (cm)	371.0
軸方向高さ (cm)	100.0

第 2.9 表 各ケースの実効増倍率と制御棒反応度価値
(平面モデル)

	全制御棒引き抜き	全制御棒挿入	内側1ヶ所スタック
軸方向無限大 実効増倍率	1.13420	0.95095	0.99591
統計誤差	0.0238%	0.0348%	0.0463%
反応度価値 ($\Delta k/kk'$)	-	17.0%	12.2%

第 2.10 表 全炉心モデルの計算体系諸元

全炉心体系諸元	値
燃料カラム	90
制御棒カラム(タイプ1)	18
制御棒カラム(タイプ2)	6
制御棒カラム(タイプ3)	6
内側可動反射体カラム	55
外側可動反射体カラム	36
燃料体段数	8
カラムピッチ (cm)	40.7
上下可動反射体高さ (cm)	80.0
炉心半径 (cm)	371.0
炉心高さ (cm)	800.0

第 2.11 表 各ケースの実効増倍率と制御棒反応度価値
(全炉心モデル)

	全制御棒 引き抜き	全制御棒 挿入	全内側制御棒 スタック	全外側制御棒 スタック	内側制御棒 C2.3-1ヶ所 スタックケース	内側制御棒 C1-6ヶ所 スタックケース	内側制御棒 C2.3-6ヶ所 スタックケース
実効増倍率	1.12369	0.94406	1.07510	1.02509	0.98933	0.99222	1.01315
統計誤差(σ)	0.022%	0.029%	0.024%	0.026%	0.034%	0.027%	0.026%
反応度価値($\Delta k/kk'$)	-	16.9%	4.0%	8.6%	12.1%	11.8%	9.7%
MVP2次元による 実効増倍率	1.13420	0.95095	-	-	0.99591	-	-
MVP2次元による 反応度価値($\Delta k/kk'$)	-	17.0%	-	-	12.2%	-	-

第 2.12 表 MVP 計算と拡散計算結果の比較

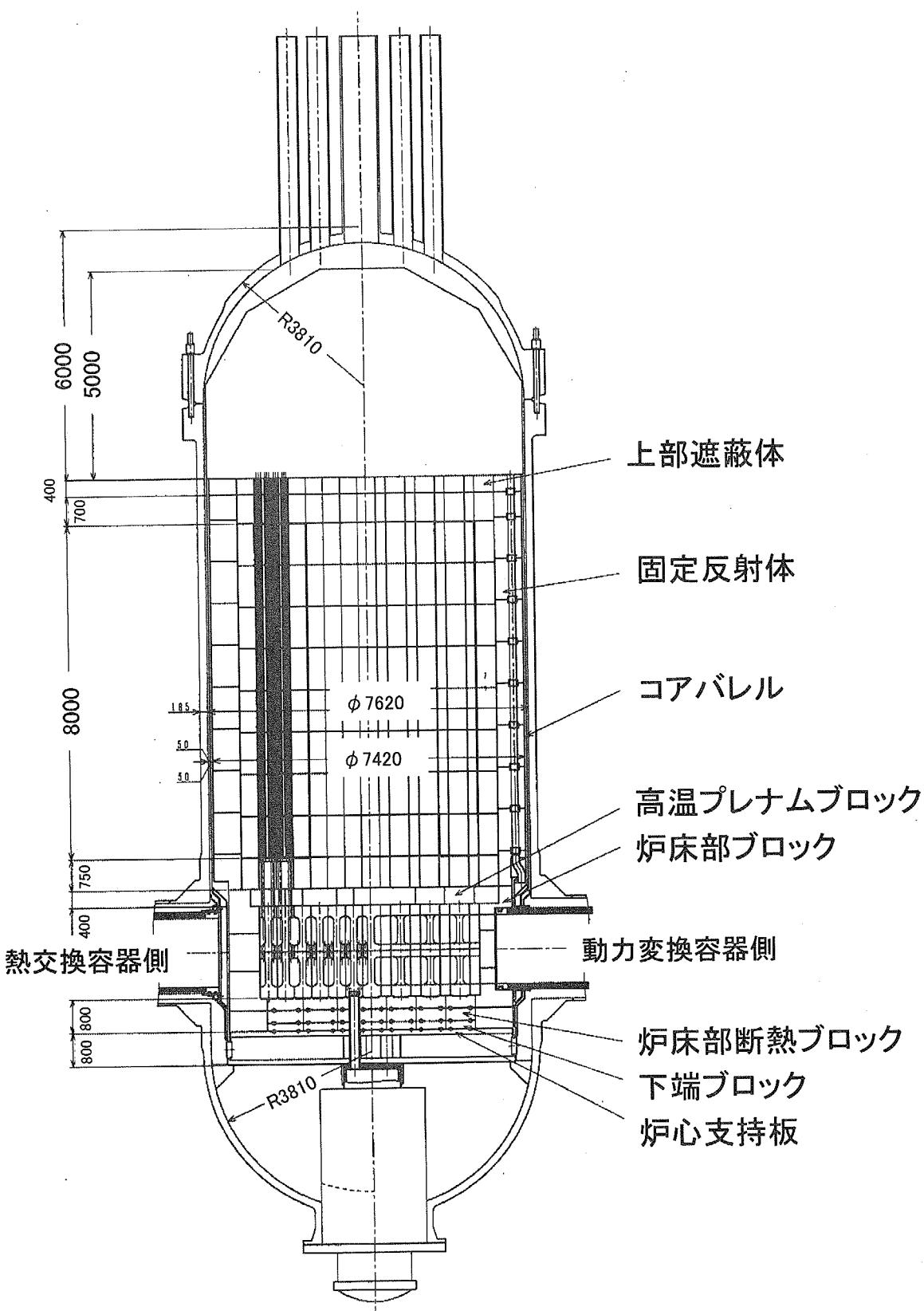
項目	全制御棒 引き抜き	全制御棒 挿入	内側制御棒 CRI11-6体 スタック	内側制御棒 CRI2.3-6体 スタック
MVP3次元計算 実効増倍率	1.12369	0.94406	0.99222	1.01315
統計誤差(σ)	0.022%	0.029%	0.027%	0.026%
MVP3次元計算による 反応度価値($\Delta k/kk'$)	-	16.9%	11.8%	9.7%
CITATION3次元計算 実効増倍率	1.13781	0.97442	1.01018	1.03214
CITATION3次元計算による 反応度価値($\Delta k/kk'$)	-	14.7%	11.1%	9.0%
MVPに対するCITATION3次元計算の 実効増倍率の誤差($\Delta k/kk'$)	1.1%	3.3%	1.8%	1.8%
MVPに対するCITATION3次元計算の 反応度価値の誤差の割合	-	-13.0%	-5.8%	-7.3%

第 2.13 表 MVP による遮蔽因子計算結果

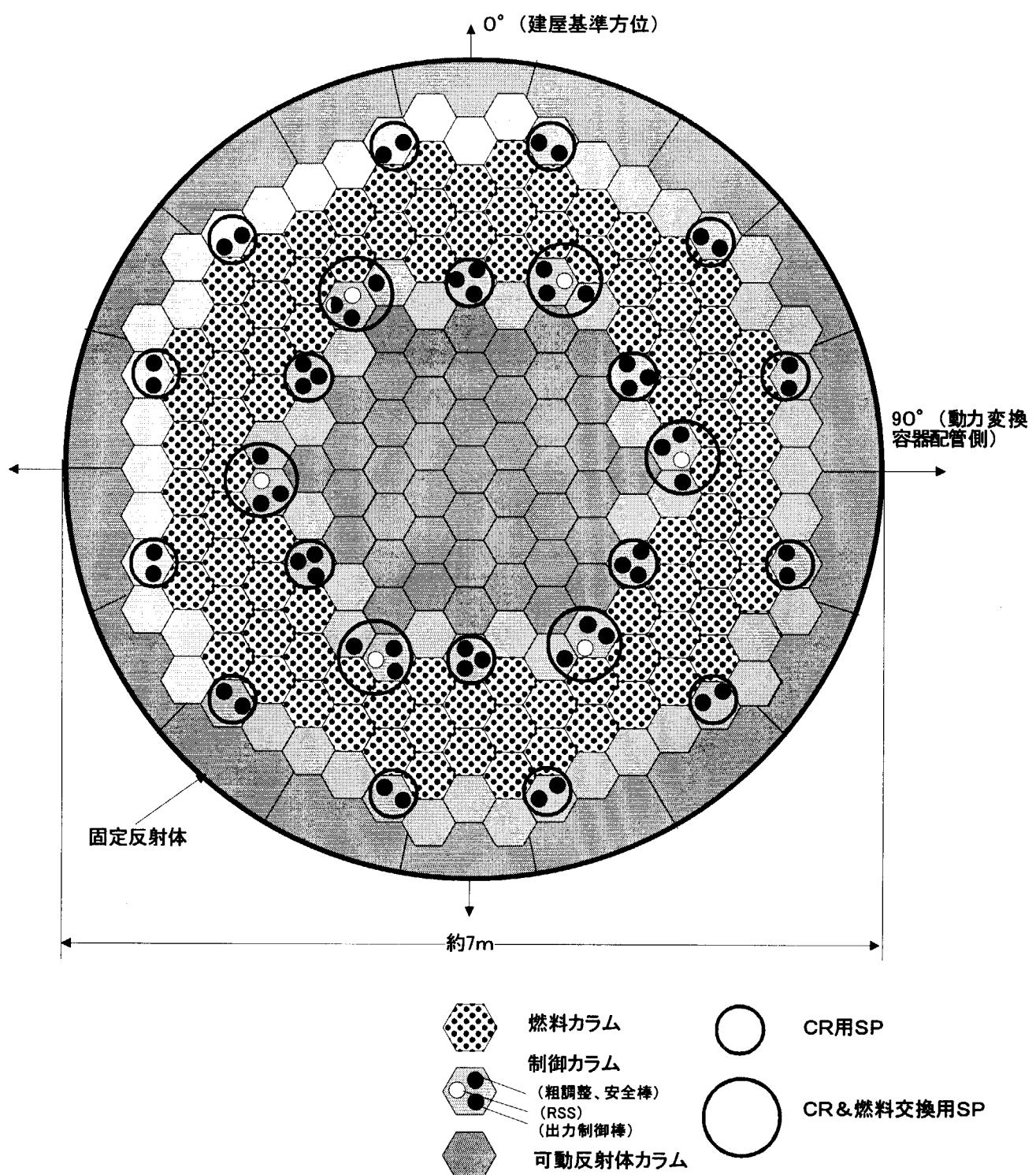
エネルギー 群数	CRI1	CRI2	CRI3	CRI2、CRI3 平均	CRO1	CRO2	CRO1、CRO2 平均
1群	1.30E+00	1.40E+00	8.34E-01	1.06E+00	1.35E+00	1.36E+00	1.35E+00
2群	1.06E+00	1.12E+00	6.94E-01	8.64E-01	1.13E+00	1.14E+00	1.13E+00
3群	2.56E-01	2.43E-01	1.50E-01	1.85E-01	2.86E-01	2.87E-01	2.86E-01
4群	2.54E-02	2.24E-02	1.44E-02	1.72E-02	3.01E-02	2.95E-02	2.98E-02
5群	9.66E-03	8.67E-03	5.89E-03	6.84E-03	1.18E-02	1.18E-02	1.18E-02
6群	2.71E-03	2.26E-03	2.25E-03	2.25E-03	3.39E-03	3.42E-03	3.40E-03

第 2.14 表 TWOTRAN による遮蔽因子計算結果

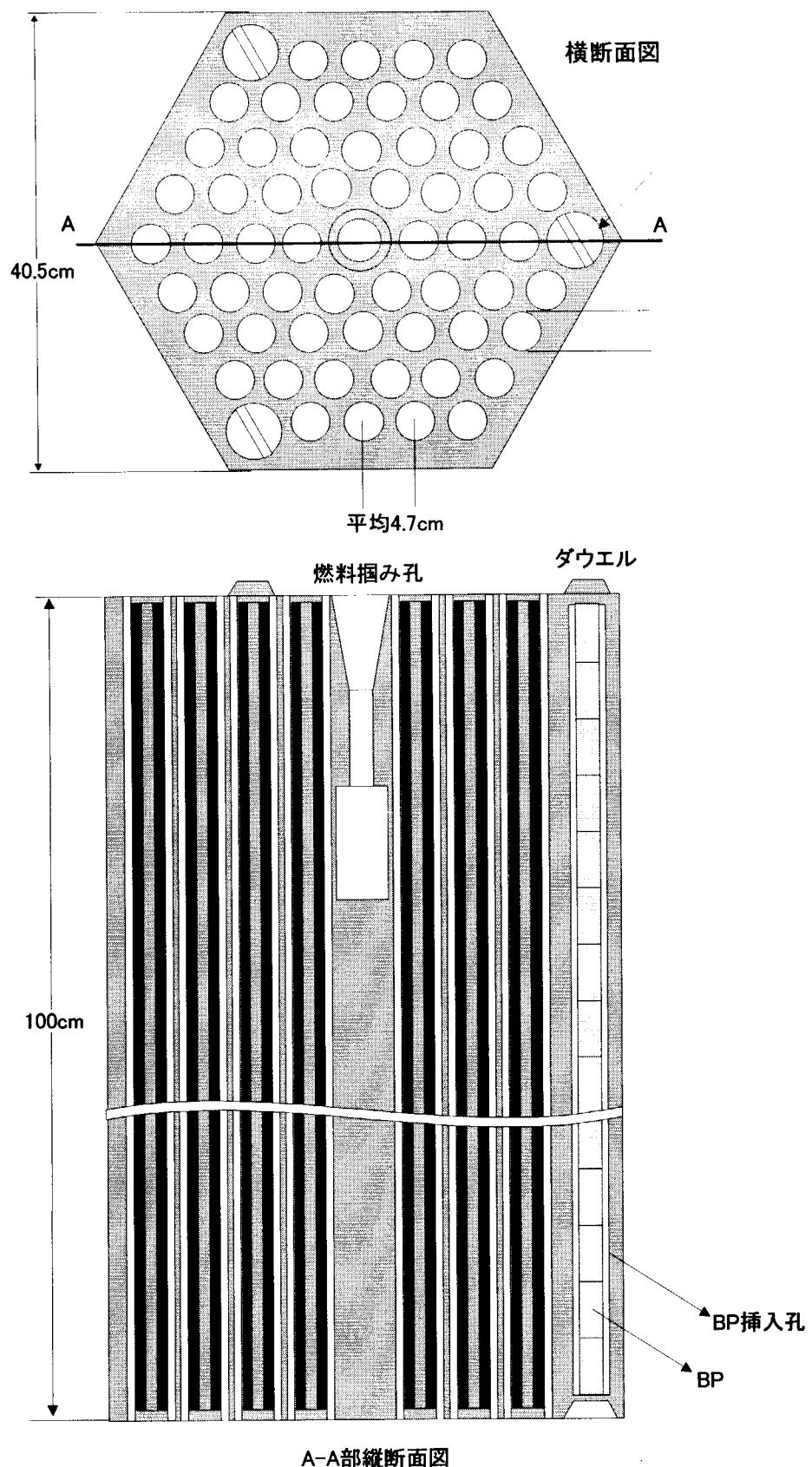
エネルギー 群数	CRI1	CRI2、CRI3 平均	CRO1、CO2
1群	1.20E+00	7.22E-01	1.25E+00
2群	9.45E-01	5.24E-01	9.97E-01
3群	1.60E-01	6.82E-02	1.77E-01
4群	3.00E-02	1.27E-02	3.39E-02
5群	8.77E-03	4.09E-03	9.88E-03
6群	2.93E-03	1.54E-03	3.40E-03



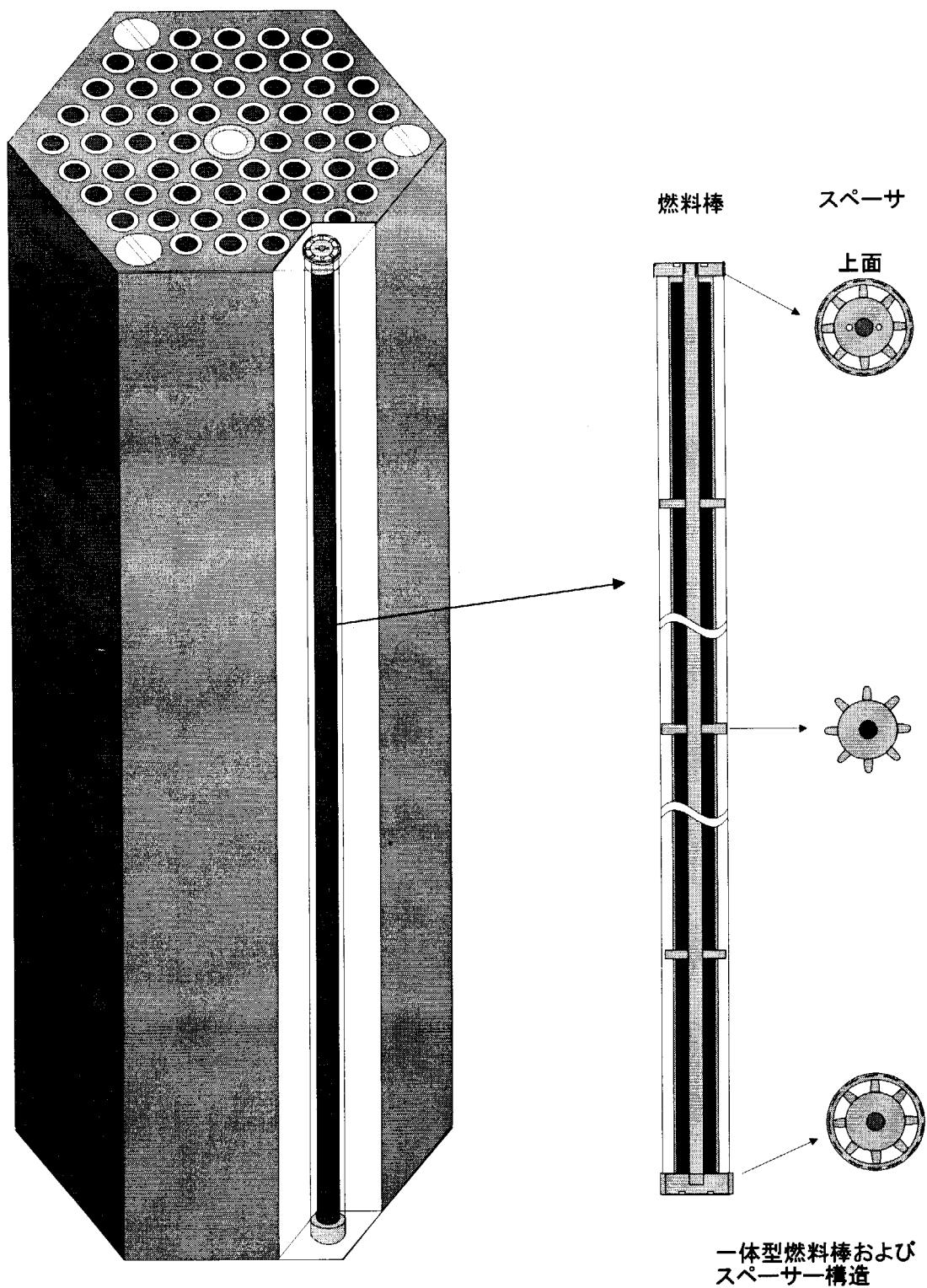
第2.1図 GT-HTR300原子炉縦断面図



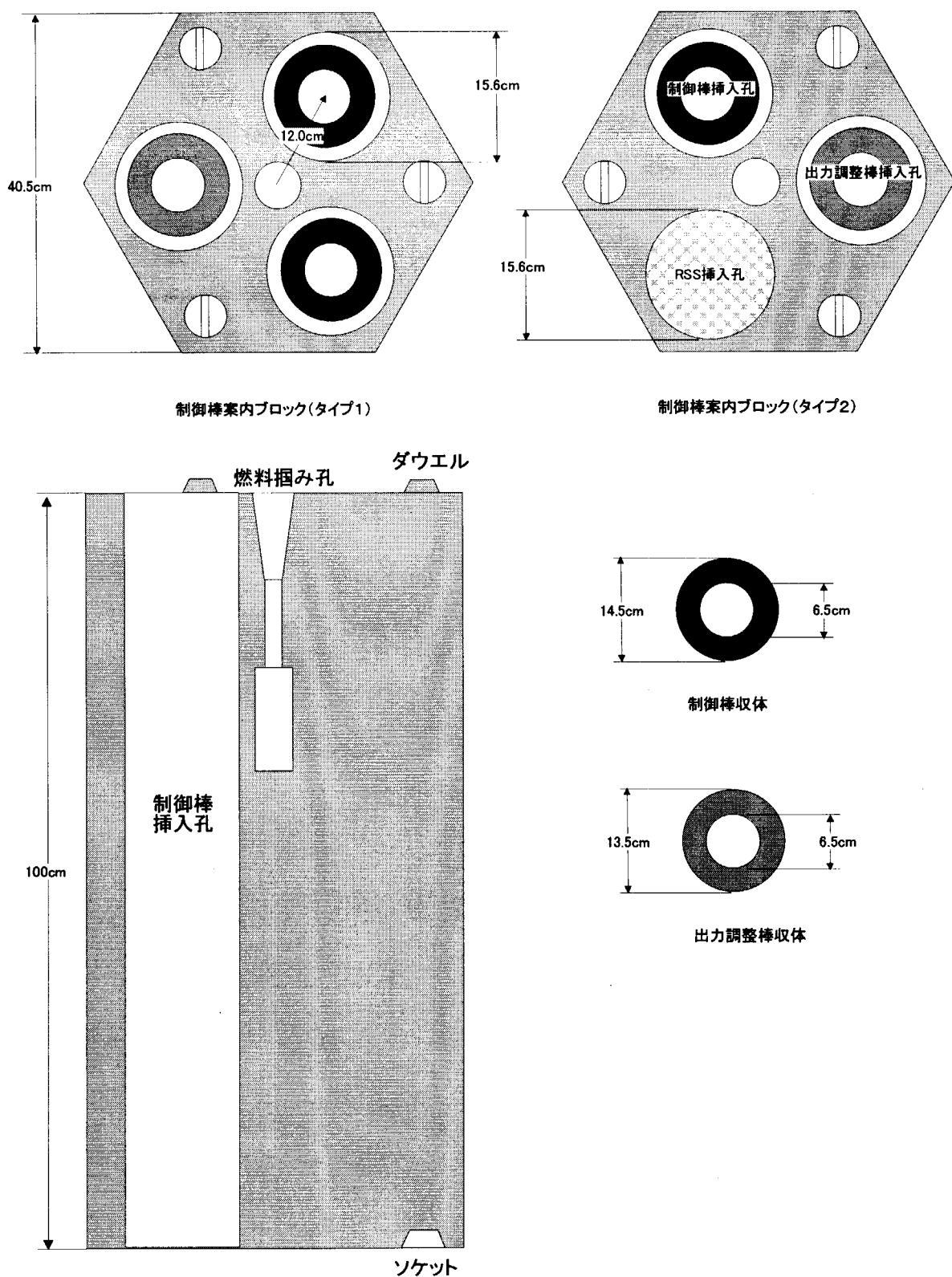
第2.2図 GTHTTR300炉心横断面図



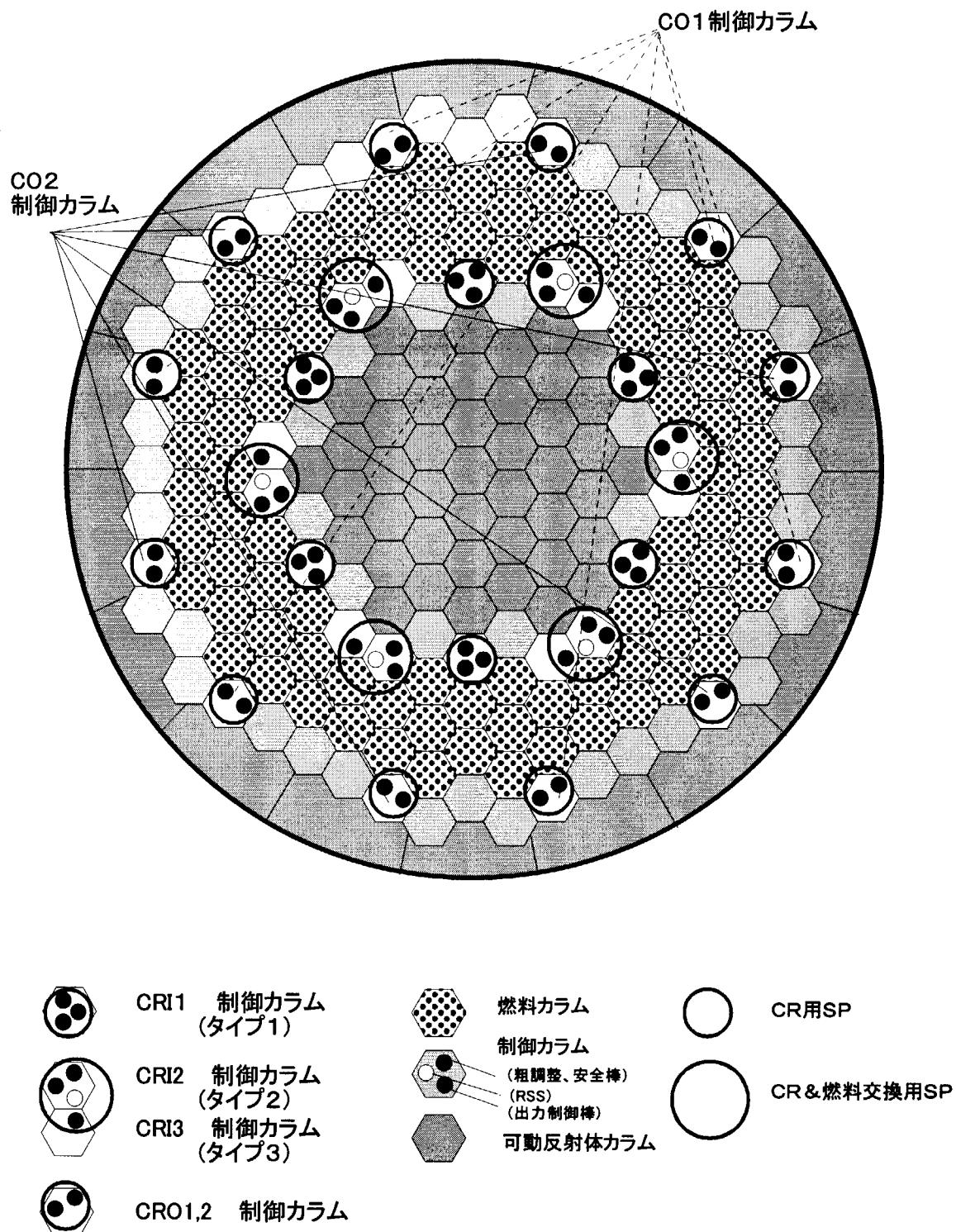
第 2.3 図 燃料体構造概念図



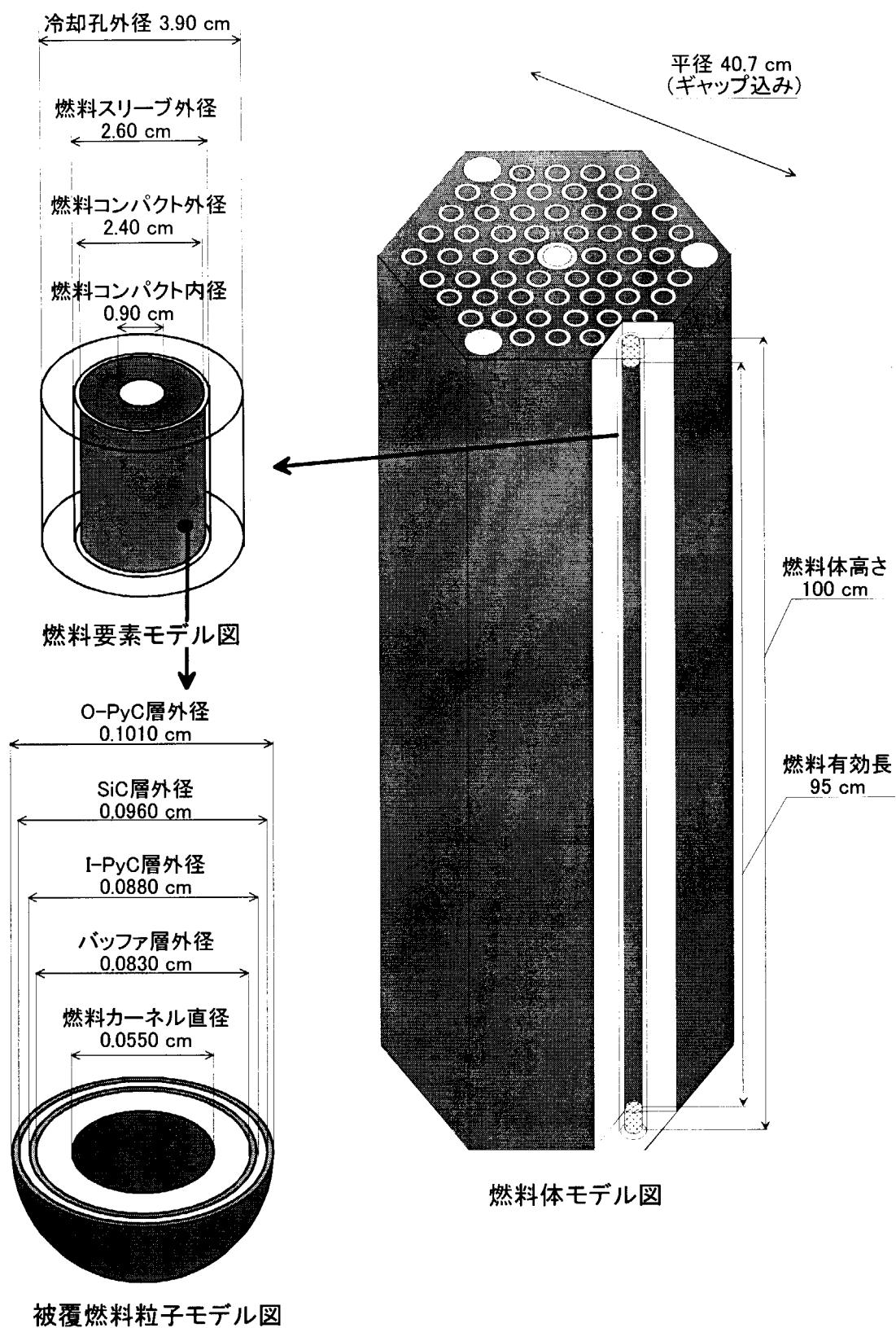
第2.4図 一体型燃料棒構造概念図



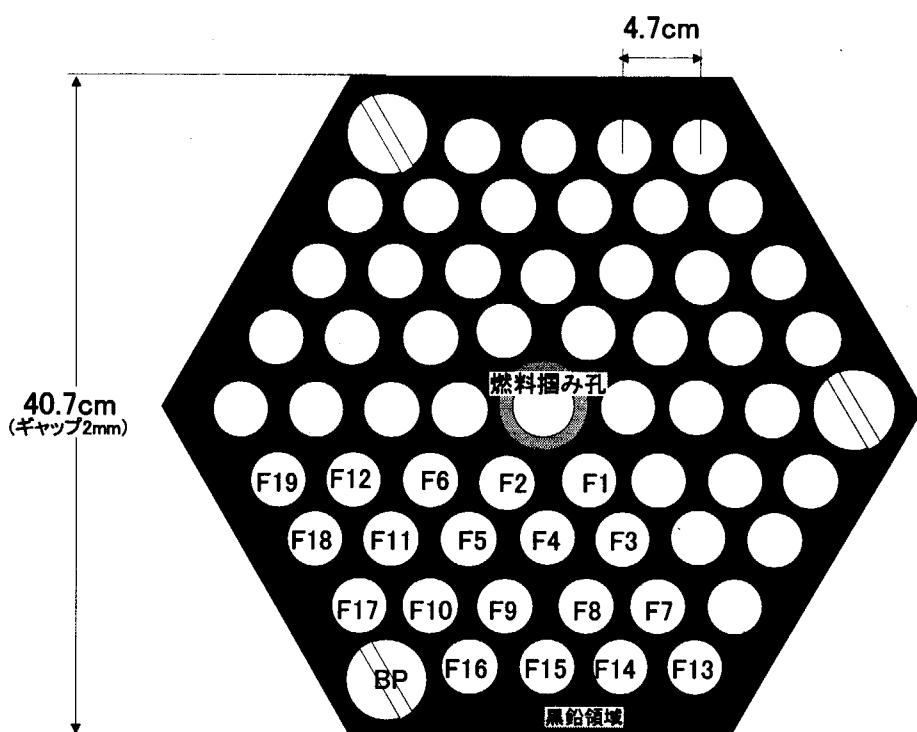
第2.5図 制御棒案内ブロック概念図



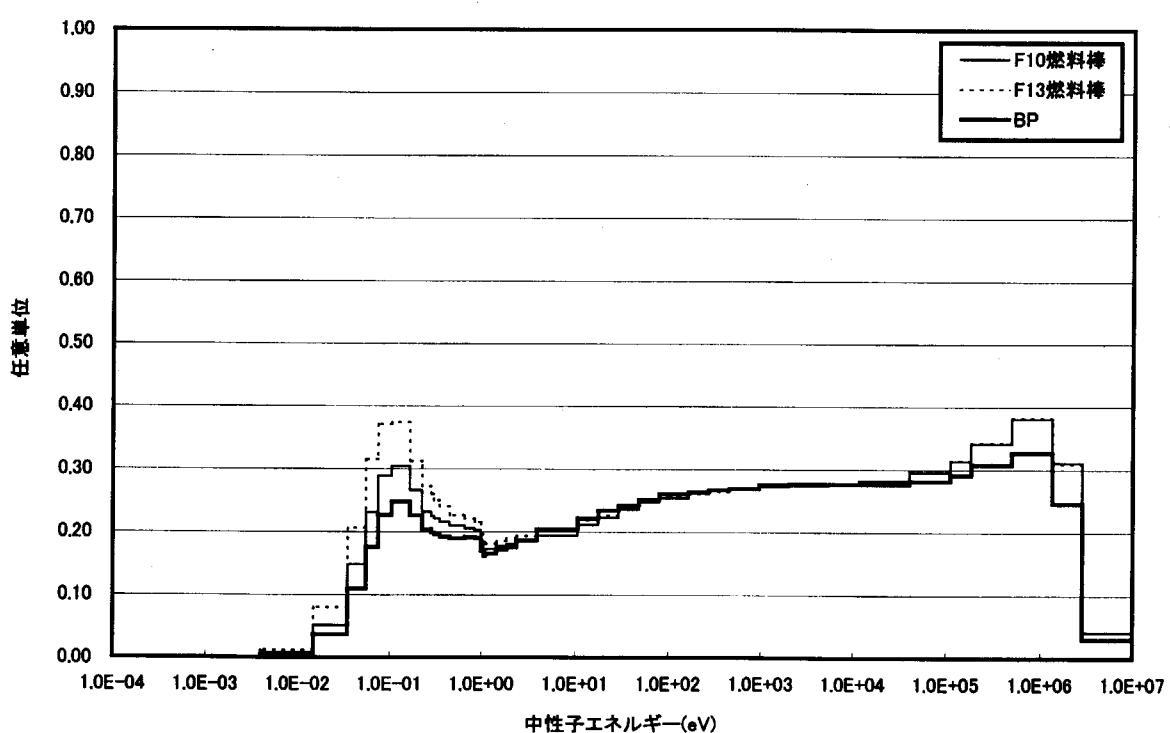
第2.6図 制御カラム配置図



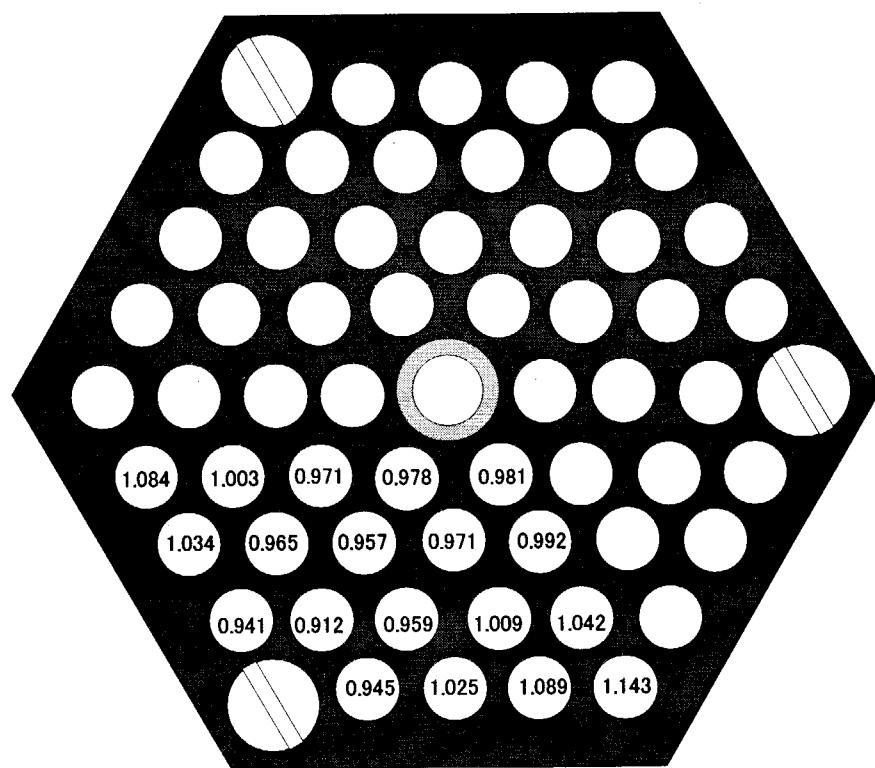
第2.7図 MVP用燃料体モデル主要寸法



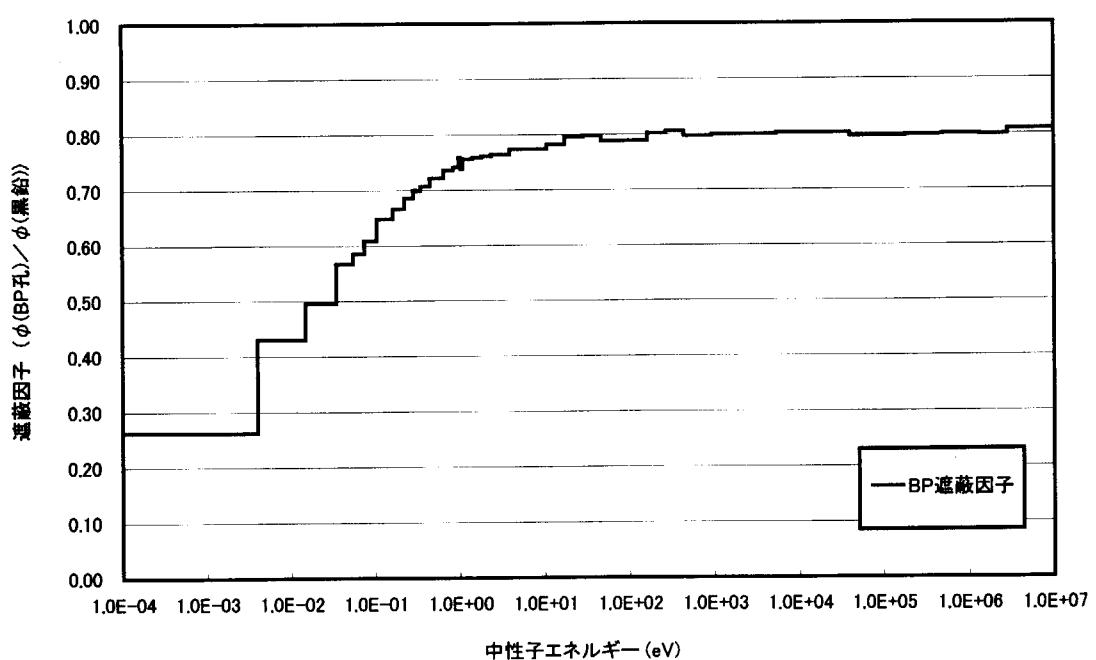
第 2.8 図 MVP 燃料体モデルと燃料配置



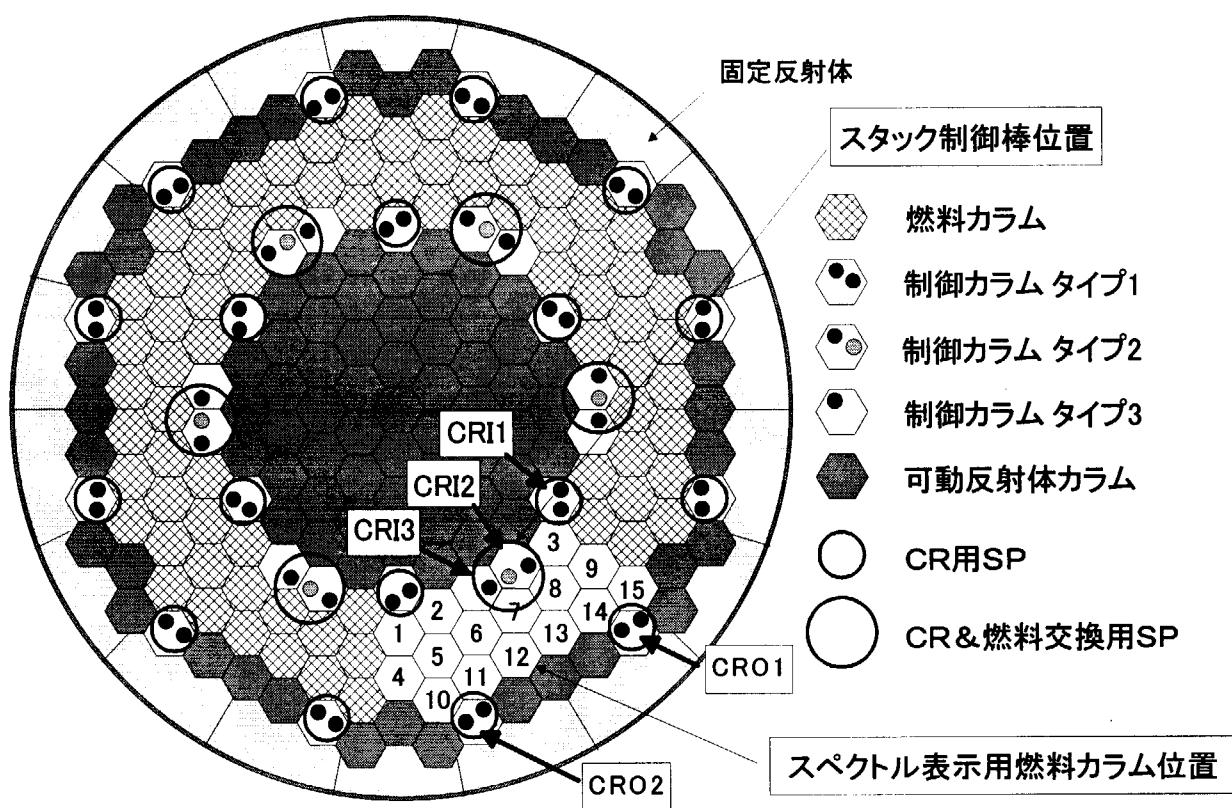
第 2.9 図 燃料体内代表位置のスペクトル分布



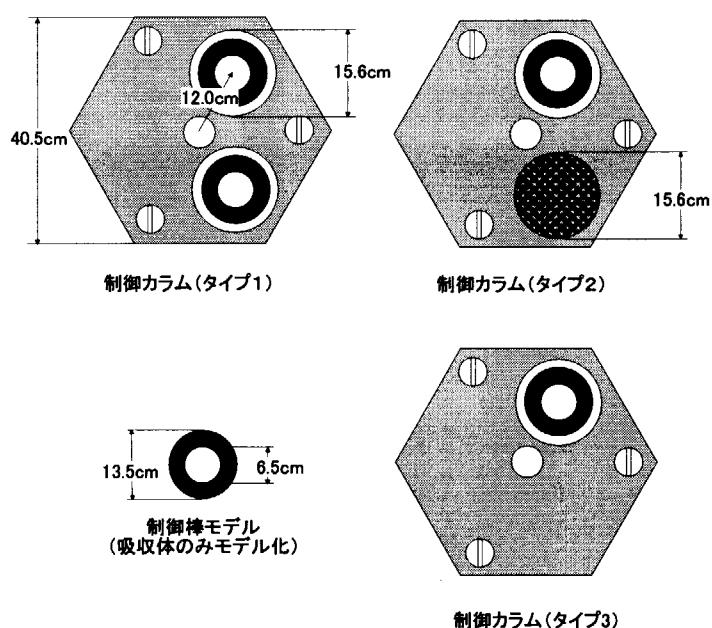
第 2.10 図 燃料棒単位の出力ピーキング係数
(MVP 燃料体モデル)



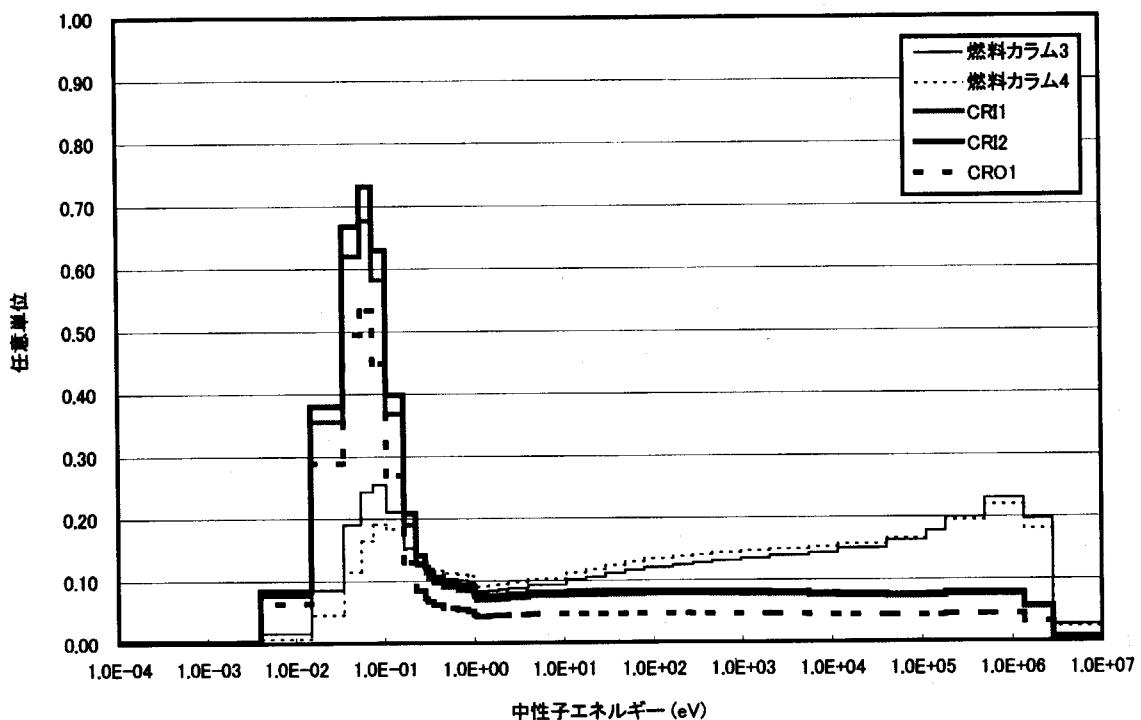
第 2.11 図 BP 遮蔽因子のエネルギー変化



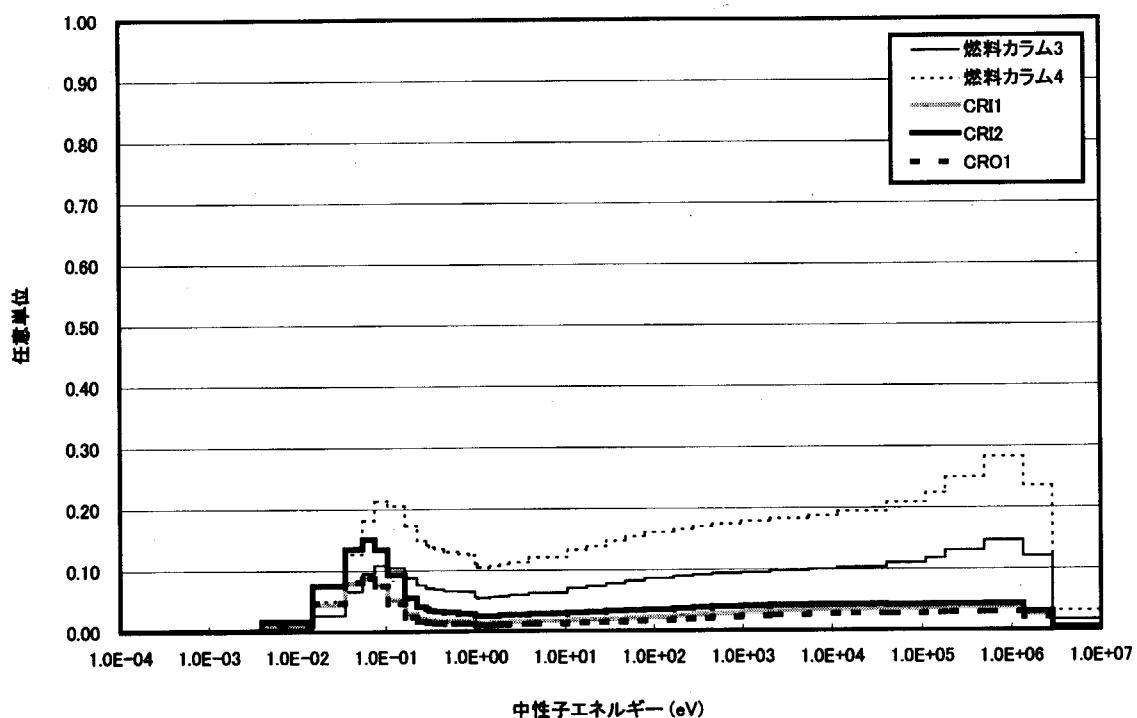
第 2.12 図 全炉心平面モデル



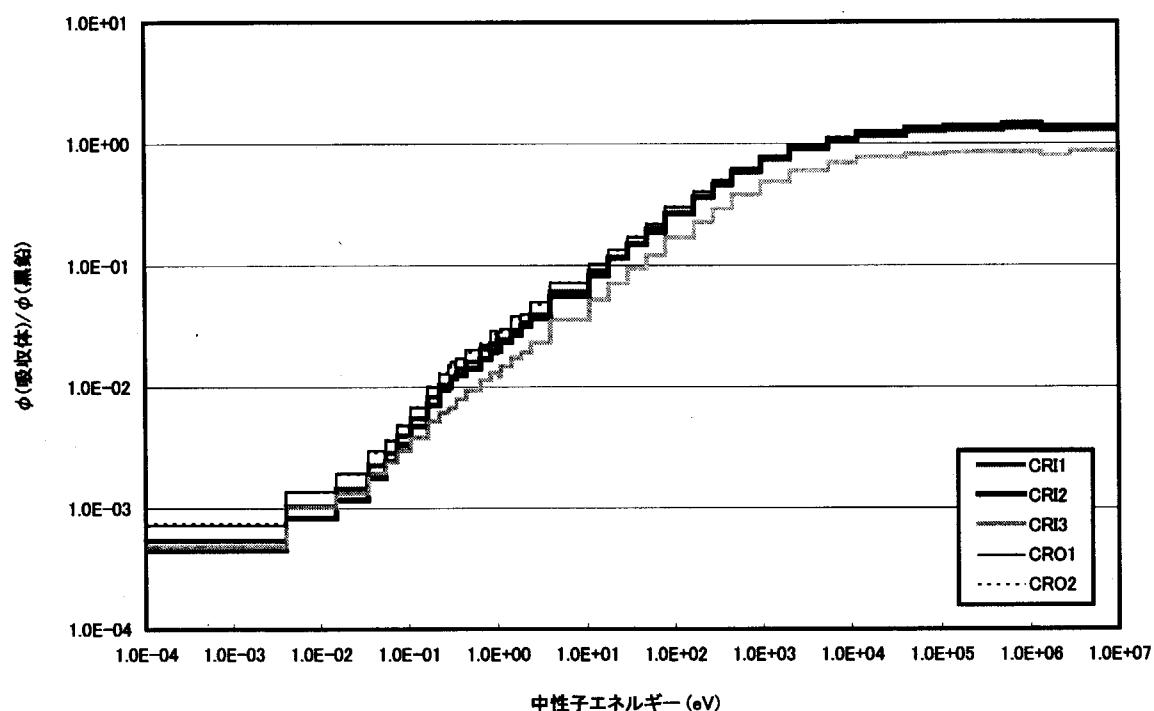
第 2.13 図 制御棒カラムモデル



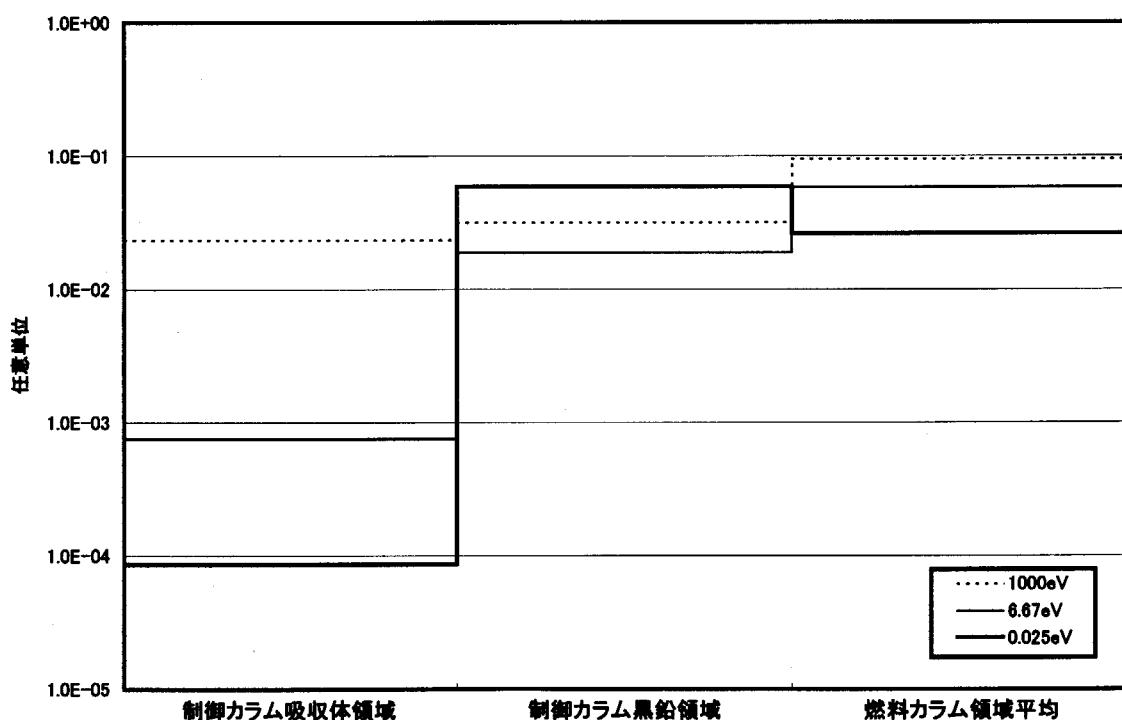
第 2.14 図 スペクトル分布(全制御棒引き抜きケース)



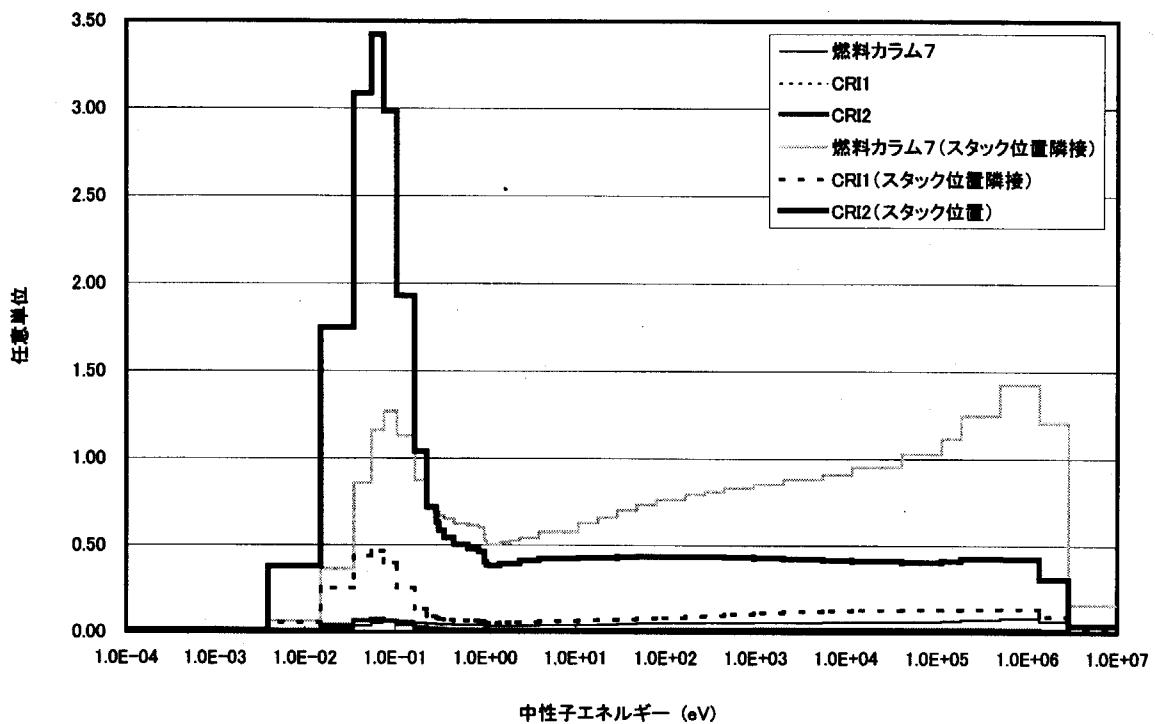
第 2.15 図 スペクトル分布(全制御棒挿入ケース)



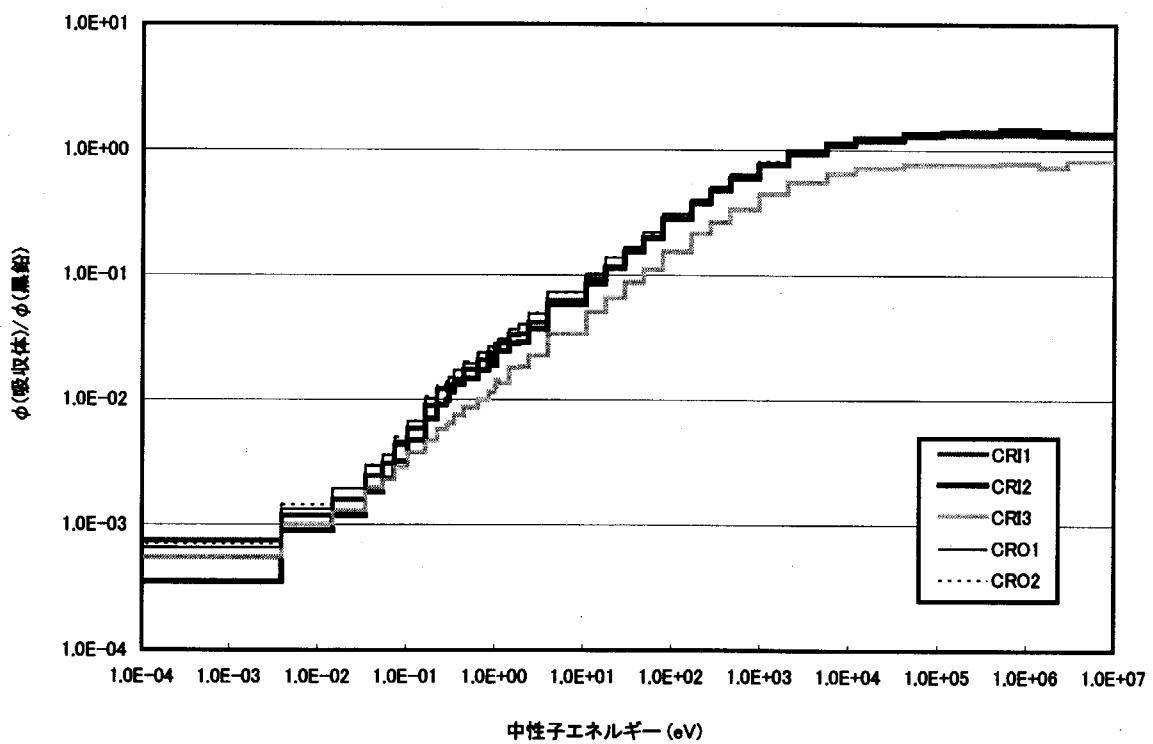
第 2.16 図 制御棒カラムにおける吸収体領域と黒鉛領域の中性子束比率
(全制御棒挿入ケース)

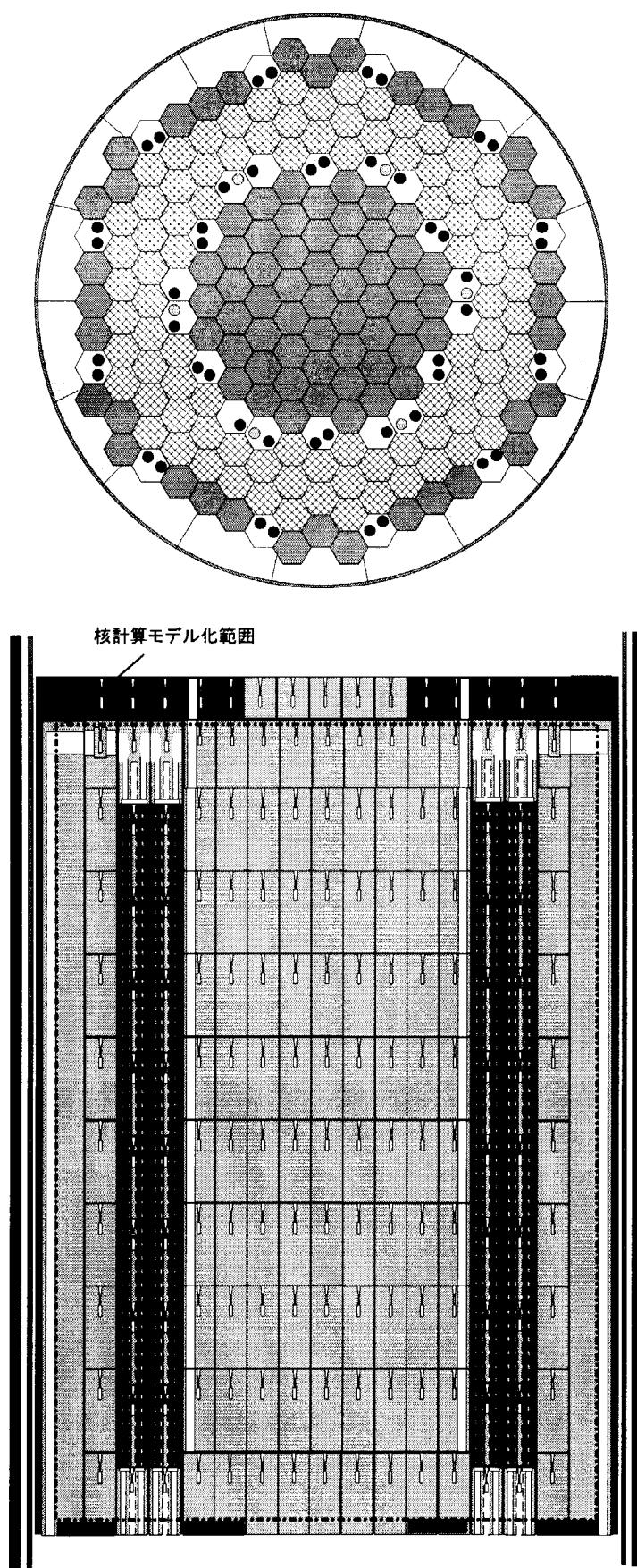


第 2.17 図 制御棒カラム及び燃料カラムにおける中性子束分布(全制御棒挿入ケース)

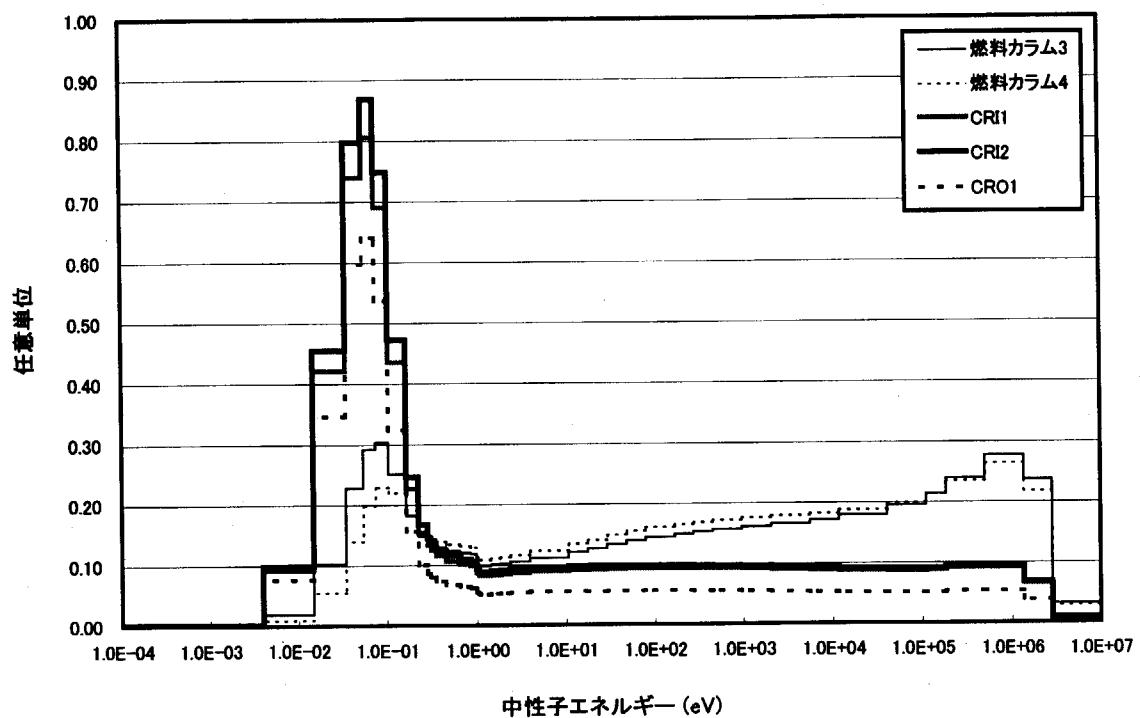


第 2.18 図 スペクトル分布(スタックケース)

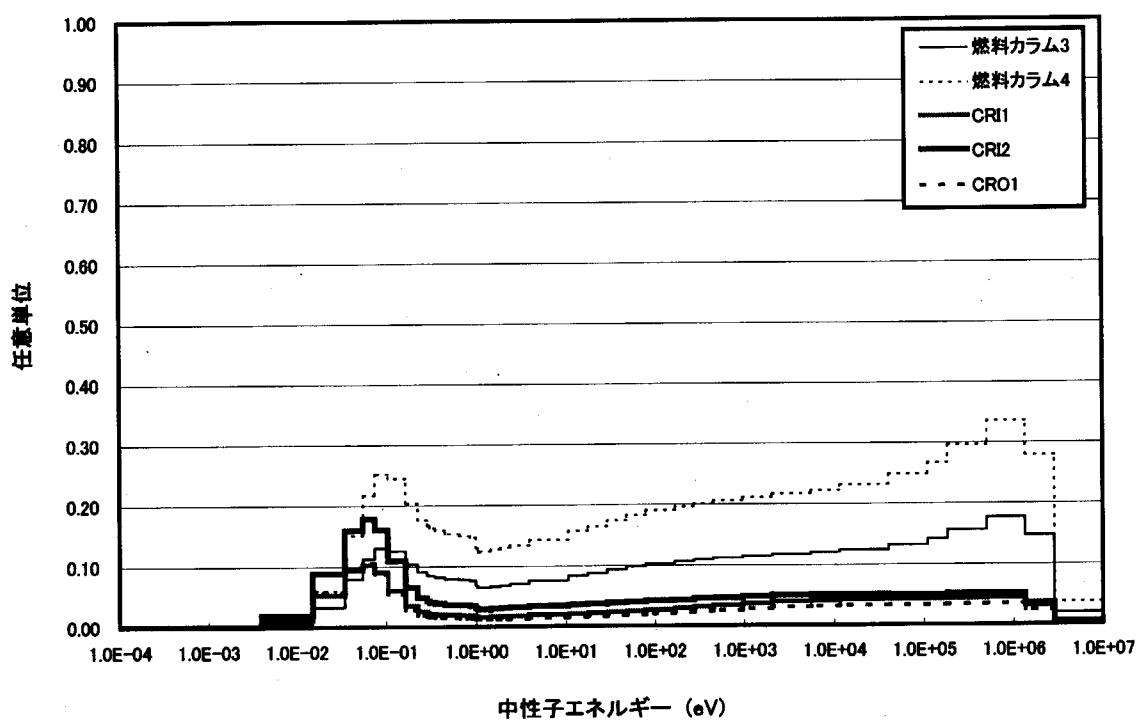
第 2.19 図 制御棒カラムにおける吸収体領域と黒鉛領域の中性子束比率
(スタックケース)



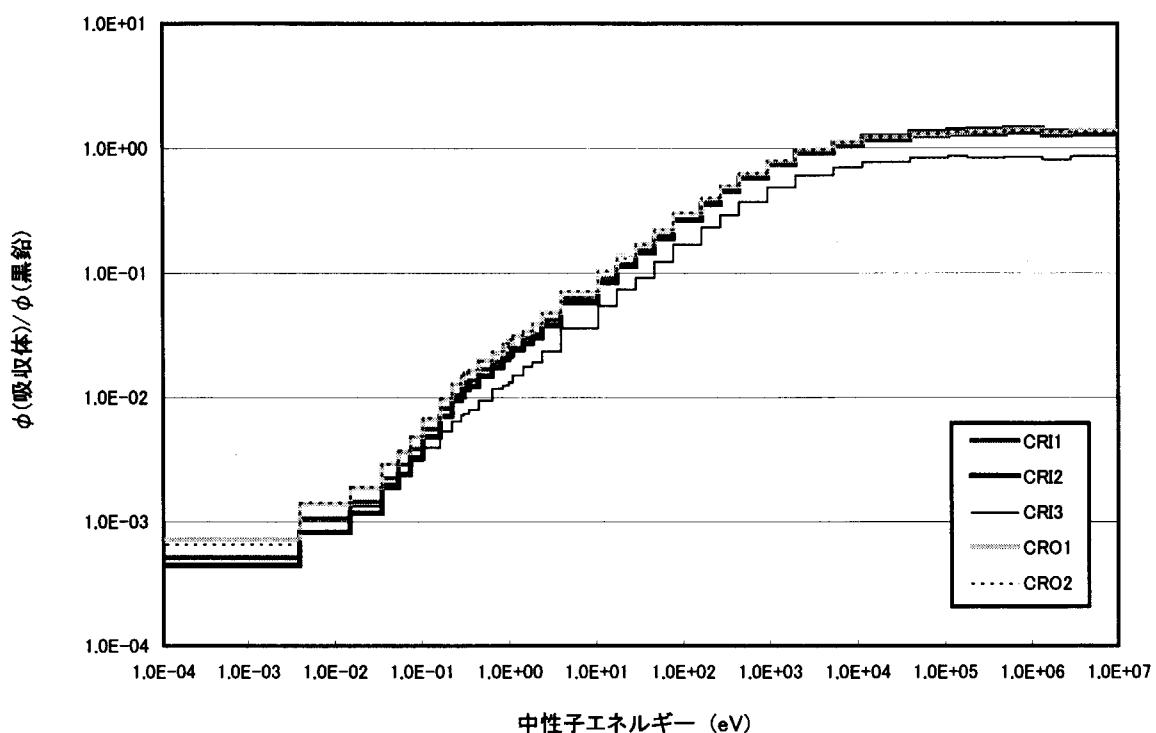
第 2.20 図 3 次元全炉心モデル概念図



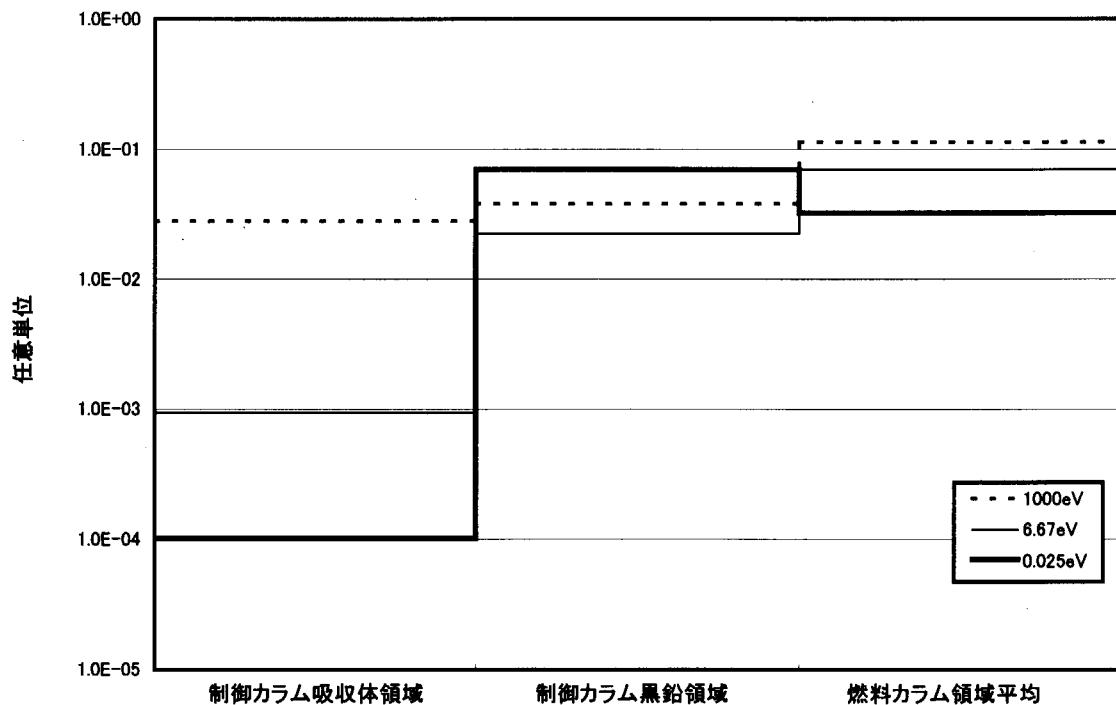
第 2.21 図 スペクトル分布(全制御棒引き抜きケース)



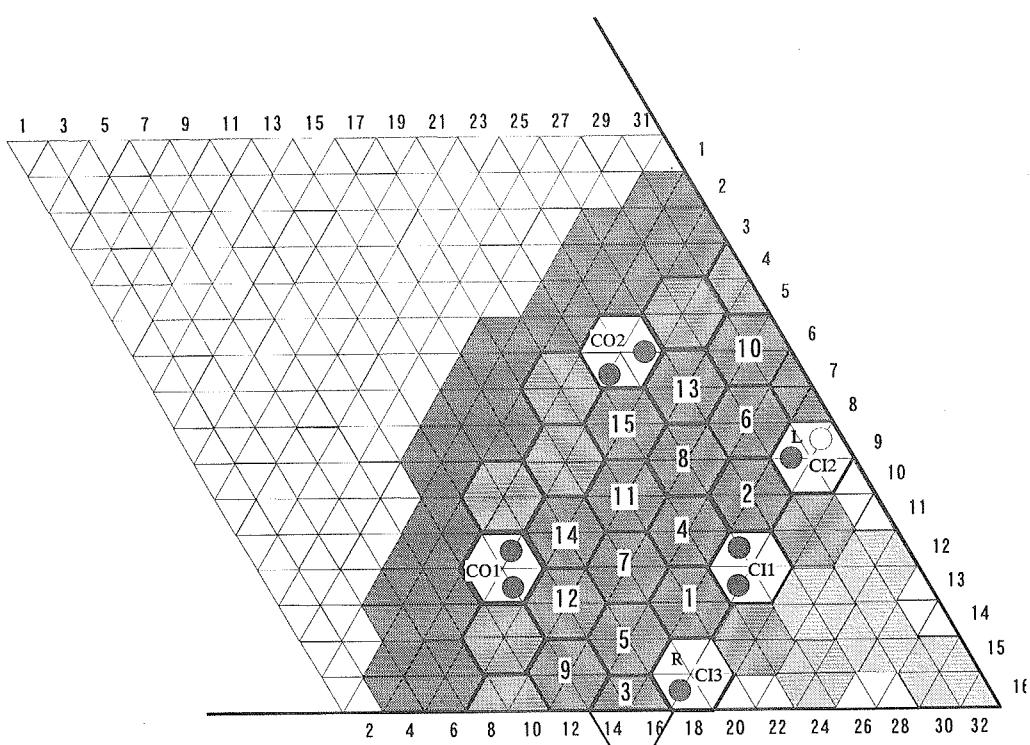
第 2.22 図 スペクトル分布(全制御棒挿入ケース)



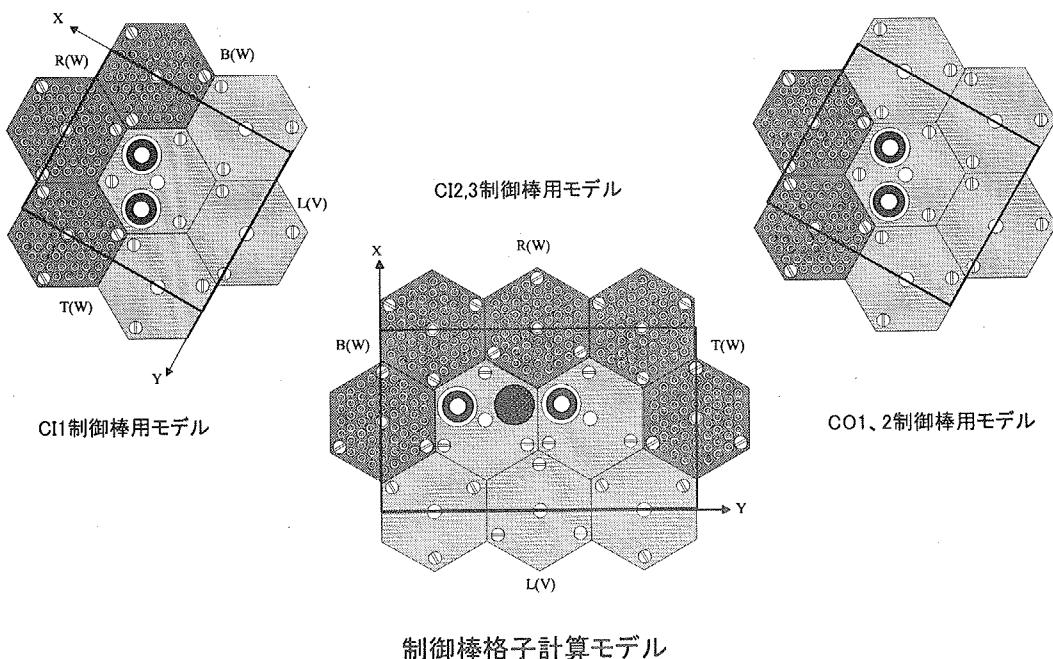
第 2.23 図 制御棒カラムにおける吸収体領域と黒鉛領域の中性子束比率
(全制御棒插入ケース)



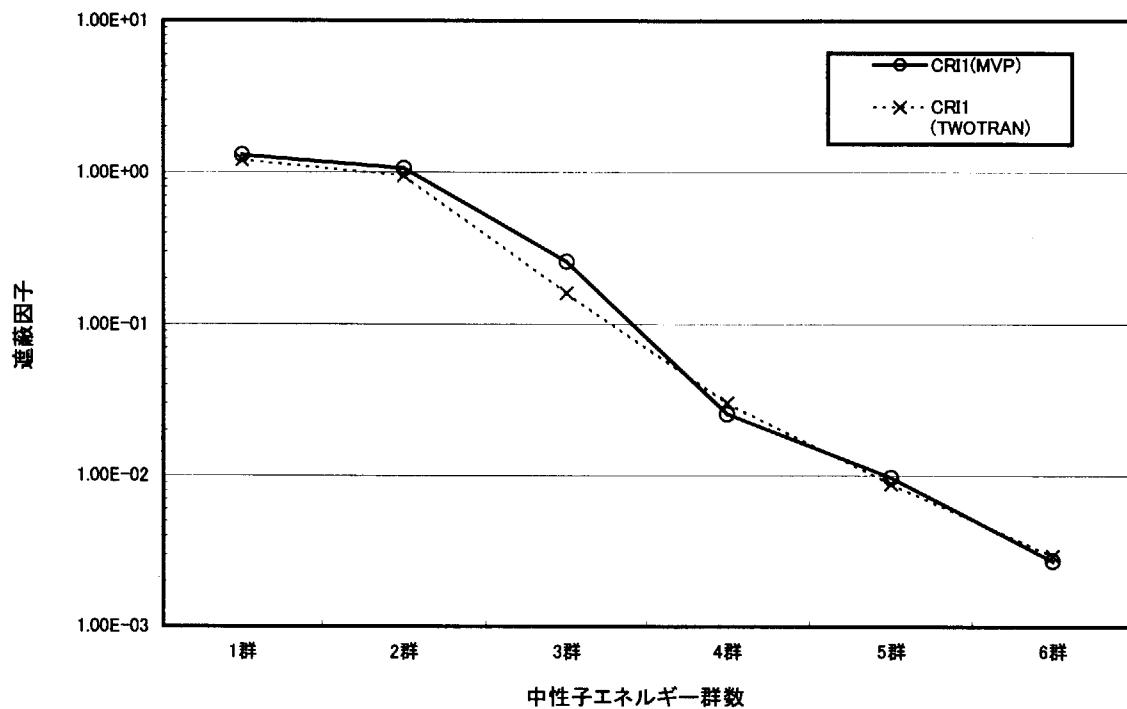
第 2.24 図 制御棒カラム及び燃料カラムにおける中性子束分布(全制御棒插入ケース)



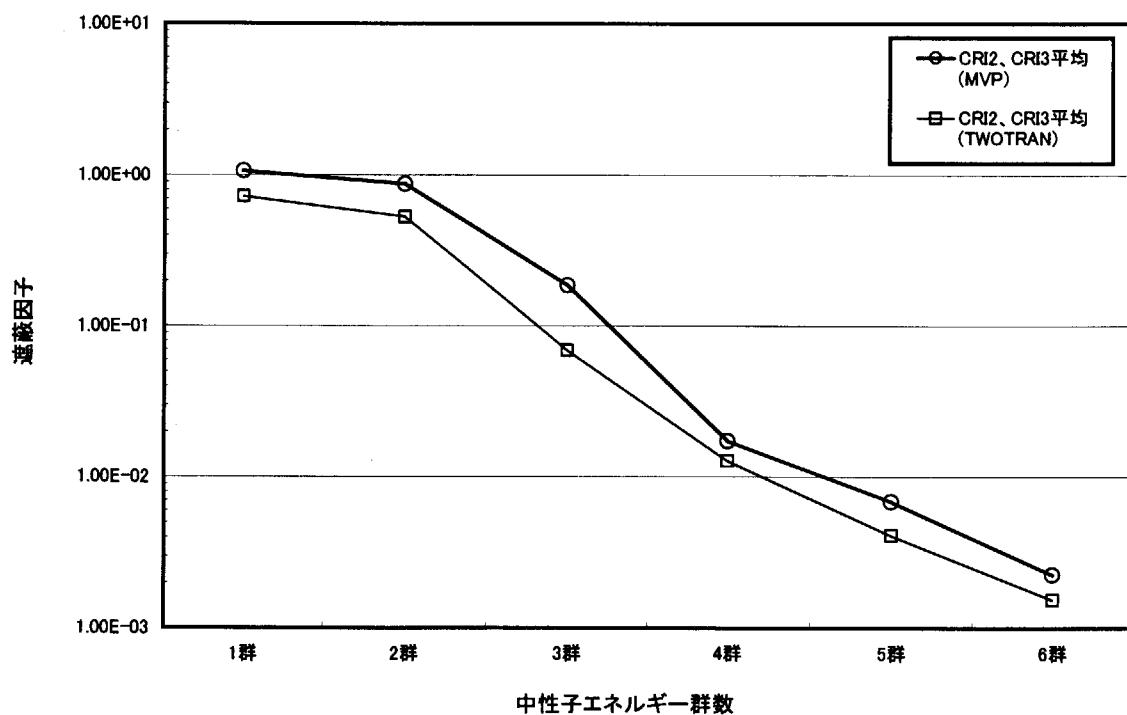
第 2.25 図 拡散計算用 1/6 炉心モデル断面図



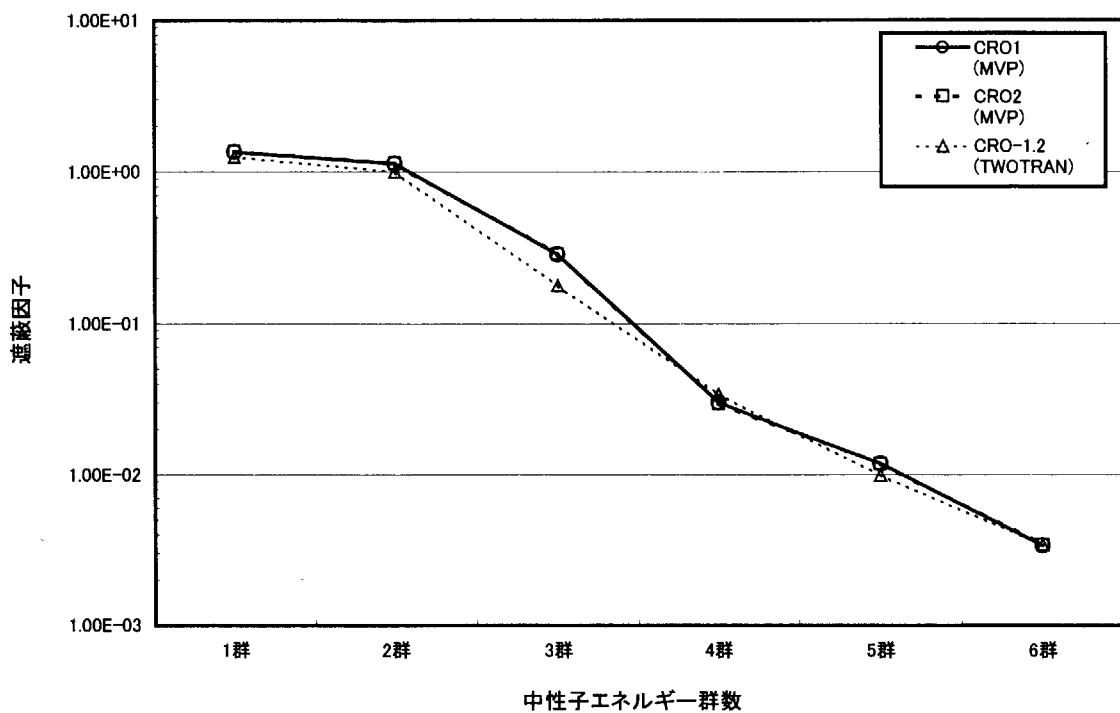
第 2.26 図 TWOTRAN 用格子計算モデル図



第 2.27 図 CRI1 に関する MVP と TWOTRAN の遮蔽因子比較



第 2.28 図 CRI2.3 に関する MVP と TWOTRAN の遮蔽因子比較



第 2.29 図 CRO1.2 に関する MVP と TWOTRAN の遮蔽因子比較

This is a blank page.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名 称	記 号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC関係理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換 算 表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ボアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	= 4.184 J(熱化学)
9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	= 4.1855 J(15 °C)	
3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵	= 4.1868 J(国際蒸気表)	
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS(仏馬力)	
1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	= 75 kgf·m/s	
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 735.499 W	
1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1		

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

高溫ガス炉ガスター／ン発電システム（GTHTR300）制御棒反応度価値の詳細評価

R100
古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています