

JAERI-Tech

98-021



高温工学試験研究炉(HTTR)臨界試験の予備解析結果
—HTTR核特性解析コードシステムに基づく解析—

1998年6月

藤本 望・野尻直喜・中野正明
竹内光男・藤崎伸吾・山下清信

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、お申し越しください。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おこなっております。

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.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1998

編集兼発行 日本原子力研究所

高温工学試験研究炉(HTTR)臨界試験の予備解析結果
- HTTR核特性解析コードシステムに基づく解析 -

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部

藤本 望・野尻 直喜*・中野 正明
竹内 光男・藤崎 伸吾・山下 清信

(1998年5月25日受理)

本報は、高温工学試験研究炉 (High Temperature Engineering Test Reactor:HTTR) 核特性解析コードシステムの炉心解析モデルの改良と、このモデルを用いて行った臨界試験の予備解析結果について報告するものである。解析モデルは、反応度調整材(BP)の軸方向の装荷パターンをゼブラ状にしたこと並びに燃料体内での径方向位置をモデル化できるよう及び制御棒插入孔等からのストリーミング効果を考慮できるよう改良した。その結果、BP反応度について10%程度評価精度を向上することができた。ストリーミング効果については約1% $\Delta k/k$ の反応度低下であることを確認した。予備解析では、燃料装荷に伴う実効増倍率の変化、中性子検出器の応答確認、逆増倍係数、制御棒反応度値、炉停止余裕、動特性パラメータ、中性子束分布及び出力換算係数に関する解析を行った。更に将来型高温ガス炉の一つの炉型として考えられている環状炉心の特徴について評価した。

本報に示した結果は、既に試験計画及び手順書の作成、検討及び使用前検査に用いている。今後は、この結果と臨界試験結果を比較し、モデル及び試験結果の妥当性の確認を行う計画である。

大洗研究所：〒311-1394 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀3607

* 出向中：科学技術庁

Preliminary Analyses for HTTR's Start-up Physics Tests
by HTTR Nuclear Characteristics Evaluation Code System

Nozomu FUJIMOTO, Naoki NOJIRI*, Masaaki NAKANO,
Mitsuo TAKEUCHI, Singo FUJISAKI and Kiyonobu YAMASHITA

Department of HTTR Project
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received May 25, 1998)

This report presents improvements on a calculation model of nuclear characteristics evaluation code system of the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) and results of preliminary analyses for HTTR's start-up physics tests. The improved calculation model enables one to treat the configuration of zebra type burnable poison (BP) rods, radial position of BP rod in a fuel block and neutron streaming from control rod insertion holes. As the result, the evaluation accuracy of BP reactivity worth has been improved by about 10%. Also it was confirmed that the neutron streaming from control rod insertion holes reduces the reactivity by about $1\% \Delta k/k$. In the preliminary analyses, change in effective multiplication factor during fuel loading, response of temporary and permanent neutron detectors, inverse multiplication factor at critical approach, control rod worth curve, shutdown margin, kinetic parameters, neutron flux distribution in the core and calibration factors for nuclear instrument system have been evaluated with the calculation model. Also nuclear characteristics of annular core which is expected as one of the reactor core type of future HTGRs were discussed. The analytical results were utilized for test program planning and for licensing inspection. The analytical results will be compared with the HTTR's start-up physics test results to validate the calculation model and test results.

Keywords : HTTR, HTGR, Diffusion Calculation, Criticality Tests, Reactivity, Burnable Poison, Neutron Streaming, Control Rod Worth, Shut down Margin, Annular Core

* On loan to Science and Technology Agency

目 次

1.はじめに	1
2.解析コード及び解析モデル	3
2.1 核特性解析コードシステムの概要	3
2.2 炉心解析モデルの改良	3
2.2.1 モデルの改良	3
2.2.2 モデルの効果	5
2.3 最小臨界カラム数	8
3.解析結果	15
3.1 中性子検出器の応答及び逆増倍係数	16
3.1.1 中性子検出器の応答	16
3.1.2 逆増倍係数	17
3.2 過剰反応度	19
3.3 臨界時制御棒位置	19
3.4 制御棒反応度価値及び反応度変化率	20
3.5 炉停止余裕	21
3.6 後備停止系による炉停止余裕	23
3.7 動特性パラメータ	24
3.8 中性子束分布及び核出力校正係数	25
4.まとめ	57
謝辞	57
参考文献	58
付録1	59
付録2	65

Contents

1. Introduction	1
2. Code System and Calculation Model	3
2.1 Outline of Nuclear Characteristics Evaluation Code System	3
2.2 Improvements of Core Calculation Model	3
2.2.1 Improvements of Model	3
2.2.2 Effects of Improved Model to Calculation Results	5
2.3 Expected Number of Fuel Columns at the First Criticality	8
3. Results of Analyses	15
3.1 Neutron Detectors Response and Inverse Multiplication Factors	16
3.1.1 Response of Neutron Detectors	16
3.1.2 Inverse Multiplication Factors	17
3.2 Excess Reactivity	19
3.3 Control Rod Positions at Critical Conditions	19
3.4 Control Rod Worth and Differential Control Rod Worth	20
3.5 Shutdown Margin by Control Rods	21
3.6 Shutdown Margin by Reserved Shut down System	23
3.7 Kinetic Parameters	24
3.8 Neutron Flux Distribution and Calibration Factors for Nuclear Instrumentation System ...	25
4. Conclusion	57
Acknowledgments	57
References	58
Appendix 1	59
Appendix 2	65

1. はじめに

高温工学試験研究炉(High Temperature Engineering Test Reactor : HTTR)はピンインプロック型燃料を用いた高温ガス炉であり、現在初臨界に向けての準備を進めている。

HTTR の炉心解析上の特徴としては、被覆粒子燃料を用いており二重非均質性を有していること、黒鉛減速炉であること、反応度調整材 (BP) を用いていること、制御棒插入孔等からの中性子ストリーミングがあること等がある。これまで設計に用いてきた解析モデルは、これらの特徴を考慮して保守的な評価となるよう作成されている。しかしながら、臨界試験の解析及び炉心管理の精度を高めるためには、As-built の状態に基づきノミナルの値を評価する必要があるため、設計に用いてきた解析モデルをそのまま用いることは困難である。

最小臨界量の予測等の予備解析には、モンテカルロコードを用いることにより精度の高い解析を行うことが可能と考える。しかしながらモンテカルロコードは計算時間がかかること、燃焼解析は現在のところ開発段階であること等から、拡散理論に基づく解析の高度化が必要である。そのため HTTR の設計及び安全評価に用いてきた核設計計算コードシステムを基にした核特性評価コードシステムについて、解析モデルの改良を行い、モンテカルロコードの結果と比較することにより妥当性の検討を行った。

解析モデルの改良は、BP モデルの改良とストリーミングの取扱いの 2 点について行った。BP は、棒の両端に中性子吸収体を配置し中間を黒鉛ペレットとしたゼブラ状の構造となっており、各燃料ブロックに 2 本、ブロックの周辺部に挿入している。この形状を取り扱えるよう BP モデルの改良を行った。ストリーミングについては、制御棒插入孔等の孔からの中性子ストリーミングを直接取り扱えるよう改良を行った。

HTTR の臨界近接においては、燃料をカラム（燃料ブロックを 5 個縦に積み上げたもの）単位で炉心に装荷する。燃料は、予め炉心に装荷されている模擬燃料体と燃料体を置き換える方法により外周から時計回りに装荷する。18 カラム装荷した時点で炉心厚さの薄い環状炉心とする。更にその内側の領域に対称に装荷し、24 カラム装荷した時点で炉心厚さの厚い環状炉心とする。その後、更に燃料を装荷し 30 カラム装荷した初期炉心を構成する。また、環状炉心の特性評価として 18 カラム及び 24 カラム装荷した時点で制御棒校正、中性子束分布、動特性パラメータの測定など各種の炉物理試験を行う計画である。

このように燃料装荷途中において各種の試験を行うことを考慮し、臨界試験の予備解析と

して、燃料装荷に伴う実効増倍率の変化、最小臨界カラム数、過剰反応度、中性子検出器の応答確認、逆増倍係数、制御棒反応度価値、炉停止余裕、動特性パラメータ、中性子束分布及び出力換算係数に関する解析を行った。本報では、HTTR の核特性評価コードシステムの解析モデルの改良と予備解析結果について報告するものである。

2. 解析コード及び解析モデル

2. 1 核特性評価コードシステムの概要

HTTR の核特性評価コードシステム¹⁾の概要を第 2.1.1 図に示す。解析は、燃料格子計算、BP 格子計算及び制御棒格子計算より得られた燃料体、反射体並びに制御棒の群定数及び炉心形状データを用いて炉心特性を評価した。燃料の群定数の作成に当たっては、高温ガス炉用燃料格子特性解析のために開発された DELIGHT-7²⁾を使用する。核データライブラリーは ENDF/B-IV を処理したものを使っているが、Xe、Sm、FP 等の燃焼データは ENDF/B-III から採られている。計算に用いる速中性子群及び熱中性子群の群構造を第 2.1.1 表及び第 2.1.2 表に示す。中性子スペクトル計算は 111 群の多群で行い、燃料格子及び BP 格子の計算は 40 群の少数群で行う。また、この少数群の群定数を更に縮約し、炉心特性計算に用いる縮約群の群定数（6 群）を作成する。BP 及び制御棒の遮蔽効果を含めた縮約群定数作成に当たっては、2 次元 S_N 計算を行う TWOTRAN-II³⁾を使用する。

DELIGHT-7 及び TWOTRAN-II によって得られた炉心計算用縮約群定数セットを使用し、CITATION-1000VP⁴⁾により 3 次元の炉心特性解析を行う。

臨界試験は低温、大気圧の He 霧囲気で行うため、霧囲気条件は 300K、大気圧のヘリウム状態とした。燃焼は考慮しないため Xe 等の FP は存在しないとした。また、解析に用いた原子数密度及び寸法は製造値に基づく値を用いた。動特性パラメータの解析では、遅発中性子と即発中性子の発生エネルギーの違いを考慮するため、12 群で計算を行った。

2. 2 炉心解析モデルの改良

2. 2. 1 モデルの改良

第 2.2.1 図に HTTR の炉心断面と検出器の位置を示す。HTTR の炉心は六角柱状のブロックの積層構造であり仮設及び常設の中性子検出器は炉心の外部に設置されている。第 2.2.2 図に炉心内の制御棒配置を示す。制御棒は炉心内に設けられた制御棒案内カラムに挿入される。炉心の中心から外側に向けて同心円上に配置されており、中心の制御棒を C 制御棒、燃料部に設けられている 6 対を R1 制御棒、炉心外側の可動反射体領域に設けられている制御棒を R2 及び R3 制御棒と呼んでいる。燃料装荷は第 2.2.1 図及び第 2.2.2 図に示すように、炉心外周部から時計回りに装荷し、環状炉心を形成する方法となっている。

HTTR の炉心解析上の特徴として、ゼブラ状の BP 棒を用いていること、BP 棒は各燃料ブロックに 2 本、ブロックの周辺部に挿入されていること、制御棒挿入孔等炉心を貫通する

孔が多数あること等が挙げられる。これらの特徴を考慮して、以下のような解析モデルの改良を行った。

(1) ブロック中の BP 棒配置のモデル化

これまで用いてきた核設計計算コードシステムでは、CITATION-1000VP の炉心特性解析モデルは、1つの燃料ブロックを平面で 6 メッシュに分割したモデル（6 メッシュモデル）となっていた。このモデルでは計算時間等の観点から燃料ブロック内の物質全てがブロック内に均一に分布するとしていたため、BP 棒のブロック内での位置をモデル化することができなかった。そこで、1つの燃料ブロックを平面で 24 メッシュに分割したモデル（24 メッシュモデル）を作成した。このモデルでは、BP 棒 1 本に平面で 2 メッシュ割り当てることにより、ブロック内での BP の位置をモデル化できるようにした。BP 以外の核種はブロック内に均一に分布しているが、BP 中の ^{10}B と ^{11}B は BP 領域として定義している 4 メッシュ(2 本分)の中にのみ存在するとした非均質なモデルとなっている。

24 メッシュモデルの概要と 6 メッシュモデルとの比較を付録 1 に示す。

(2) ゼブラ状 BP のモデル

設計では BP 棒は軸方向に均一となっていたため、BP の断面積セットは DELIGHT の 1 次元円筒モデルで作成していた。しかしながら BP 棒の構造がゼブラ状となったため、DELIGHT では軸方向の形状をモデル化することができない。そのため、TWOTRAN を用いて 2 次元 r-z モデルで BP 棒の実効断面積を作成した。2 次元のモデルとすることにより、軸方向に BP ペレットと黒鉛ペレットが並んでいる形状をモデル化することが可能になった。このモデルの概要を付録 2 に示す。

(3) 中性子ストリーミング効果のモデル化

HTTR の炉心には、制御棒插入孔、後備停止系の炭化ほう素ペレット插入用の孔、上部及び下部可動反射体に設けられている冷却孔がある。6 メッシュモデルではこれらの孔があるブロックは均質化して取り扱っていた。これらの孔からの中性子のストリーミングを考慮するため、制御棒案内カラム、照射カラム及び燃料部上下の可動反射体については、SRAC⁵⁾コードを用いてストリーミング効果を考慮した拡散係数を求めた。この拡散係数は、Benoist モデルの Behrens'項の等方成分 ($D = \frac{1}{3} \sum D_i$) として作成した⁵⁾。

上記の改良を加えたモデルの妥当性を検討するため、燃料装荷に伴う実効増倍率の変化の解析を行い各モデル相互の結果の比較を行った。解析は、6 メッシュモデル及び 24 メッシ

ュモデルで行った。24 メッシュモデルを用いた解析では、制御棒插入孔等からの中性子ストリーミング効果を考慮した拡散係数を用いない場合と用いた場合の解析を行った。制御棒の位置は、R2 制御棒は上限（制御棒位置 3335mm）、その他の制御棒は全引き抜き（制御棒位置 4060mm）の状態としている。解析結果を第 2.2.3 図に示す。また、比較のため、モンテカルロコード MVP⁶⁾による結果を同図中に示す。MVP の解析では、燃料コンパクトは均質とし、被覆粒子燃料の二重非均質性は考慮していない。そのため、第 2.2.3 図に示す値は、MVP の解析結果に被覆燃料粒子の効果として別途 SRAC で評価した 1.2% $\Delta k/k$ を考慮した値である。

24 メッシュモデルの結果を 6 メッシュモデルの結果と比較すると 30 カラムで約 2% Δk の低下となっている。これは 24 メッシュモデルにより BP の位置をより正確に考慮できること及びゼブラ状 BP 棒の吸收断面積をより正確に模擬できることによると考えられる。しかしながら、カラム数が少なくなるにつれ両者の差は小さくなっている。

ストリーミングを考慮した計算は、24 メッシュモデルを用いて、制御棒案内カラム、照射カラム及び冷却孔のある燃料部上下の可動反射体部にストリーミングを考慮した拡散係数を用いている。第 2.2.3 図中の 24 メッシュモデルによる解析結果から、ストリーミングを考慮することにより、約 1% Δk 実効増倍率が低下しており、カラム数が少なくなるにつれ効果が大きくなっている。

しかしながら、いずれの場合もモンテカルロコードの結果に比べて実効増倍率が過大評価となっており、カラム数が少くなるにつれその差は大きくなっている。

上記の効果を検討するため、メッシュ効果とモデルの違いによる BP 反応度価値の効果及び制御棒插入孔等の孔からの中性子ストリーミングを考慮した場合の効果について検討を行った。

2. 2. 2 モデルの効果

(1) メッシュ効果

24 メッシュモデルにおいて、燃料ブロック内に全ての物質を均質に分布させた解析を行い、6 メッシュモデルと比較した。この場合、物質の分布はいずれのモデルでも同じとなるため、メッシュ分割の効果のみを比較することができる。解析に用いたミクロ断面積セットは両者とも 6 メッシュモデル用に作成したものを用いた。解析は、30 カラム、24 カ

ラム及び 18 カラム炉心について行った。メッシュ効果として、両者の差を反応度で評価した。結果を第 2.2.1 表に示す。

同表から、24 メッシュモデルでは 6 メッシュモデルより実効増倍率が増加している。これは、VHTRC の解析結果⁷⁾と同一の傾向である。

カラム数が少なくなるにつれメッシュ効果が大きくなっている。これは、燃料装荷を炉心外周部から行うため、18 カラム及び 24 カラムでは環状炉心となることによると考えられる。環状炉心では、燃料と反射体が接する面積が大きくなる。更に、燃料ブロック内では燃料棒が中心に集まり周辺部は黒鉛の割合が大きくなる構造であるため、環状炉心では炉心の実効的な厚さがブロックの対面間距離より小さくなることから、環状炉心では燃料領域の中性子スペクトルが 30 カラムの状態より柔らかくなると考えられる。柔らかい中性子スペクトルでは ^{235}U の核分裂反応が促進されることとなり、実効増倍率が上昇すると考えられる。カラム数が少ないほどメッシュ効果が大きくなっていることからスペクトルの軟化の効果が重要であると考えられる。

(2) BP 反応度の比較

それぞれのモデルで BP がない状態とある状態の計算を行い、BP 反応度を求め、比較を行った。この場合も、30 カラム、24 カラム及び 18 カラムの炉心について行い、モンテカルロコード MVP の結果との比較を行った。それぞれのモデルでの BP 反応度の比較を第 2.2.2 表に示す。

いずれのモデルでも BP 反応度の値はカラム数に関わらずほぼ一定である。6 メッシュモデルでは約 9% $\Delta k/k$ 、24 メッシュモデルでは約 10% $\Delta k/k$ 、MVP では約 12% $\Delta k/k$ となっている。ここで、VHTRC の実験結果の解析から、HTTR のようにブロックに複数本の BP 棒を装荷した体系において、拡散計算では BP 反応度を 20~10%程度過小評価する傾向があること⁸⁾、MVP では-0.1%~5%程度の誤差内で評価できることが示されている⁹⁾。このため、ここでは MVP の結果を基準として、6 メッシュモデル及び 24 メッシュモデルの BP 反応度の誤差を評価した。結果を第 2.2.3 表に示す。同表から、6 メッシュモデルでは-25%程度の過小評価であるが、24 メッシュモデルでは-11%程度の過小評価となり、改善されていることが分かる。このことは VHTRC の解析で、6 メッシュモデルでは-20%程度の過小評価となるのに対し、24 メッシュモデルでは-11%程度の過小評価と改善されていること⁸⁾と一致する。

また、カラム数が少なくなると誤差が大きくなる傾向にある。これは、BP が燃料ブロックの隅に配置されているため、カラム数の少ない環状炉心では BP が炉心外部の反射体

に接する部分に位置することとなる。よって、メッシュ効果の場合と同様に反射体からの熱化された中性子の流れ込みが大きくなる。このため、24 メッシュモデルでは BP がブロックの外側に配置されているため BP 反応度が大きくなると考えられる。

メッシュ効果の検討でもカラム数が少なくなると効果が大きくなることが明らかとなっている。この原因も反射体からの熱化された中性子の流れ込みによるスペクトルの軟化による効果と考えられることから、環状炉心の解析には、実効断面積を求めるセルモデルの改良が必要となると考えられる。30 カラム炉心では炉心内は燃料で満たされているため、これまで設計に用いてきた無限格子のセルモデルで得られる中性子スペクトルが実際のスペクトルを良く表現しているのに対し、環状炉心では反射体からの熱化された中性子によって、無限格子で得られるスペクトルより柔らかなスペクトルとなっていると考えられる。環状炉心の解析では、このスペクトルを模擬できるようセルモデルを改良すればモンテカルロコードの結果との一致が見られると考えられる。

(3) 制御棒插入孔等からの中性子ストリーミング効果

HTTR では、制御棒案内カラム及び照射カラムに設けている直径 123mm の制御棒插入孔等からと、燃料部上下の可動反射体に設けられている直径 23mm の冷却孔からのストリーミングがある。よって、これらのブロックを均質化してモデル化した場合とストリーミングを考慮した拡散係数を用いた場合の結果を比較し、ストリーミング効果を反応度として評価した。結果を第 2.2.4 表に示す。ここでは、制御棒及び照射カラムからのストリーミング効果、燃料部上下の可動反射体でのストリーミング効果及びこれらの合計の 3 つに分けて評価している。比較の対象として、MVP による、制御棒案内カラム及び照射カラムのストリーミング効果をあわせて示した。MVP の結果は、制御棒案内カラム及び照射カラムを均質なブロックとした場合と制御棒插入孔の形状をそのままモデル化した場合の反応度差として表している。

同表から、制御棒案内ブロック及び照射カラムでのストリーミング効果は約 $1\% \Delta k/k$ であり、ストリーミング効果の大部分を占めていることが分かる。可動反射体の効果は $0.1\% \Delta k/k$ 程度であり、全体の 1 割程度の効果である。ストリーミングを考慮する可動反射体は 30 カラムあり、1 つのブロックに 31 ないし 33 の冷却孔があるが、直径が 23mm と小さいため、制御棒案内ブロック及び照射カラムよりカラム数が多くても効果は小さい。

また、燃料カラム数が少なくなるにつれストリーミング効果は大きくなっている。これは、燃料装荷を炉心外周部から行っているため、カラム数が少ない場合は漏れの大きな体系になっていることによると考えられる。

モンテカルロコードでのストリーミング効果は、30 カラムでは拡散計算と近い値となっているが、18 カラムでは拡散計算より $1\% \Delta k/k$ 程度大きな値となっている。VHTRC の解析では、MVP ではストリーミング効果は 20~25%程度の過大評価となっているが⁹⁾、これはモンテカルロコードの結果の統計誤差が大きいためと考えられる。また、設計では制御棒案内カラムのストリーミング効果として $1.2\% \Delta k/k$ を考慮している¹⁰⁾。ここで結果は設計で用いている値とも一致する。以上から、30 カラムでの拡散計算によるストリーミング効果は妥当な値を示していると考えられる。

2. 3 最小臨界カラム数

全節までの結果を基に、最小臨界カラム数を予測する。

24 メッシュモデルの解析では、BP の反応度を 10%程度過小評価することが問題として挙げられる。また、VHTRC の温度係数の解析から、HTTR の核設計コードシステムは実効増倍率を約 $0.6\% \Delta k$ 過大評価することが示されている¹¹⁾。BP 反応度の誤差 10%は実効増倍率で約 $1\% \Delta k$ の変化に相当する。このため、この二つを考慮すると、30 カラム炉心では解析結果に対し実効増倍率で約 $1.6\% \Delta k$ 低下すると予想される。

第 3.1.3 図中に、24 メッシュモデル、ストリーミング考慮の結果から、 $-1.6\% \Delta k$ 補正した結果を細い破線で示している。この場合、24 カラムから 30 カラムの間ではモンテカルロ計算の結果と良く一致している。24 カラム以下では、モンテカルロ計算の結果より高めとなり、その差は約 $1\% \Delta k$ となっている。24 カラム以下の差は、2.2.2 節で検討したように、炉心の中性子スペクトルが軟化したことによる効果と考えられる。

24 メッシュモデル、ストリーミング考慮の場合の最小臨界カラム数は 11 カラムであるか、BP 反応度の誤差等として $-1.6\% \Delta k$ を考慮すると 14 カラムとなる。モンテカルロ計算では、最小臨界カラム数は 16 となっている。

核設計コードシステムによる解析結果は、BP の反応度を過小評価する傾向にあること、ストリーミング効果や BP 反応度はカラム数が少ない状態では誤差が大きくなる傾向にあることが明らかとなっている。このため、最小臨界カラム数の予測値としてはモンテカルロ計算の結果である 16 カラムのほうが信頼性が高いものと考える。

第 2.1.1 表 速中性子群 群構造

群			レサジー (下限)	エネルギー (下限、eV)	群			レサジー (下限)	エネルギー (下限、eV)
1)	2)	3)			1)	2)	3)		
1	1	1	0.25	7.79×10^6	3	35	8.75	1.59×10^3	
		2	0.50	6.07×10^6		36	9.00	1.23×10^3	
		3	0.75	4.72×10^6		37	9.25	961	
		4	1.00	3.68×10^6		38	9.50	748	
		5	1.25	2.87×10^6		39	9.75	583	
	2	6	1.50	2.23×10^6		40	10.00	454	
		7	1.75	1.74×10^6		41	10.25	354	
		8	2.00	1.35×10^6		42	10.50	275	
		9	2.25	1.05×10^6		43	10.75	215	
	3	10	2.50	8.21×10^5		44	11.00	167	
		11	2.75	6.39×10^5		45	11.25	130	
		12	3.00	4.98×10^5		46	11.50	101	
		13	3.25	3.88×10^5		47	11.75	78.9	
2	4	14	3.50	3.02×10^5		48	12.00	61.4	
		15	3.75	2.35×10^5		49	12.25	47.9	
		16	4.00	1.83×10^5		50	12.50	37.3	
		17	4.25	1.43×10^5		51	12.75	29.0	
	5	18	4.50	1.11×10^5		52	13.00	22.6	
		19	4.75	8.65×10^4		53	13.25	17.6	
		20	5.00	6.74×10^4		54	13.50	13.7	
		21	5.25	5.25×10^4		55	13.75	10.68	
	6	22	5.50	4.09×10^4		56	14.00	8.32	
		23	5.75	3.18×10^4		57	14.25	6.48	
		24	6.00	2.48×10^4		58	14.50	5.04	
		25	6.25	1.93×10^4		59	14.75	3.93	
	7	26	6.50	1.50×10^4		60	15.00	3.06	
		27	6.75	1.17×10^4		61	15.25	2.38	
		28	7.00	9.12×10^3		62	15.50	1.86	
		29	7.25	7.10×10^3		63	15.75	1.44	
	8	30	7.50	5.53×10^3		64	16.00	1.125	
		31	7.75	4.31×10^3		65	16.25	0.876	
		32	8.00	3.36×10^3		66	16.50	0.683	
		33	8.25	2.61×10^3		67	16.75	0.532	
	9	34	8.50	2.04×10^3		68	17.00	0.414	

* 1群の上限エネルギーは 10^7 eV である。

1)縮約群

2)少數群

3)多群

第 2.1.2 表 热中性子群 群構造

群			エネルギー (上限、eV)	幅(eV)	群			エネルギー (上限、eV)	幅(eV)
1)	2)	3)			1)	2)	3)		
6	40	1	0.002	0.002	4	28	26	0.55	0.1
		2	0.004	0.002			27	0.65	0.1
	39	3	0.006	0.002		27	28	0.75	0.1
		4	0.008	0.002			29	0.85	0.1
	38	5	0.015	0.007		26	30	0.95	0.1
		6	0.025	0.01			31	0.99	0.04
	37	7	0.035	0.01		25	32	1.01	0.02
		8	0.045	0.01			33	1.03	0.02
	36	9	0.055	0.01		24	34	1.045	0.015
		10	0.065	0.01			35	1.055	0.01
	35	11	0.075	0.01		23	36	1.065	0.01
		12	0.085	0.01			37	1.08	0.015
	34	13	0.105	0.02		22	38	1.10	0.02
		14	0.135	0.03			39	1.16	0.06
5	34	15	0.165	0.03		21	40	1.24	0.08
		16	0.195	0.03			41	1.35	0.11
	33	17	0.225	0.03		22	42	1.45	0.1
		18	0.255	0.03			43	1.55	0.1
	32	19	0.285	0.03		21	44	1.65	0.1
		20	0.295	0.01			45	1.75	0.1
	31	21	0.305	0.01		21	46	1.85	0.1
		22	0.335	0.03			47	1.95	0.1
	30	23	0.35	0.015		21	48	2.05	0.1
		24	0.39	0.04			49	2.15	0.1
	25	25	0.45	0.06			50	2.38	0.23

1)縮約群

2)少數群

3)多群

第 2.2.1 表 6 メッシュモデルと 24 メッシュモデルのメッシュ効果

カラム数	実効増倍率		メッシュ効果 [% $\Delta k/k$]
	6 メッシュモデル	24 メッシュモデル	
30	1.2184970	1.2227019	0.2822
24	1.1889408	1.1971915	0.5797
18	1.1092833	1.1196487	0.8346

第 2.2.2 表 BP 反応度の比較

カラム数	BP 反応度 [% $\Delta k/k$]		
	6 メッシュモデル	24 メッシュモデル	MVP
30	9.07	10.54	11.68
24	8.60	10.17	11.35
18	8.69	10.16	11.63

第 2.2.3 表 BP 反応度のモンテカルロコードの結果に対する誤差

カラム数	誤差 C/E-1* [%]	
	6 メッシュモデル	24 メッシュモデル
30	-22.35	-9.76
24	-24.21	-10.40
18	-25.23	-12.58

* C : 解析結果

E : モンテカルロコード(MVP)の結果

第 2.2.4 表 ストリーミング効果¹⁾の比較

カラム数	ストリーミング効果 [% $\Delta k/k$]			
	制御棒カラム ¹⁾		上下可動反射体 ⁵⁾	上下可動反射体 ⁵⁾
	拡散計算 ²⁾	MVP ³⁾		
30	1.03	1.3	1.12	0.086
24	1.12	-	1.21	0.088
18	1.33	2.3	1.42	0.095

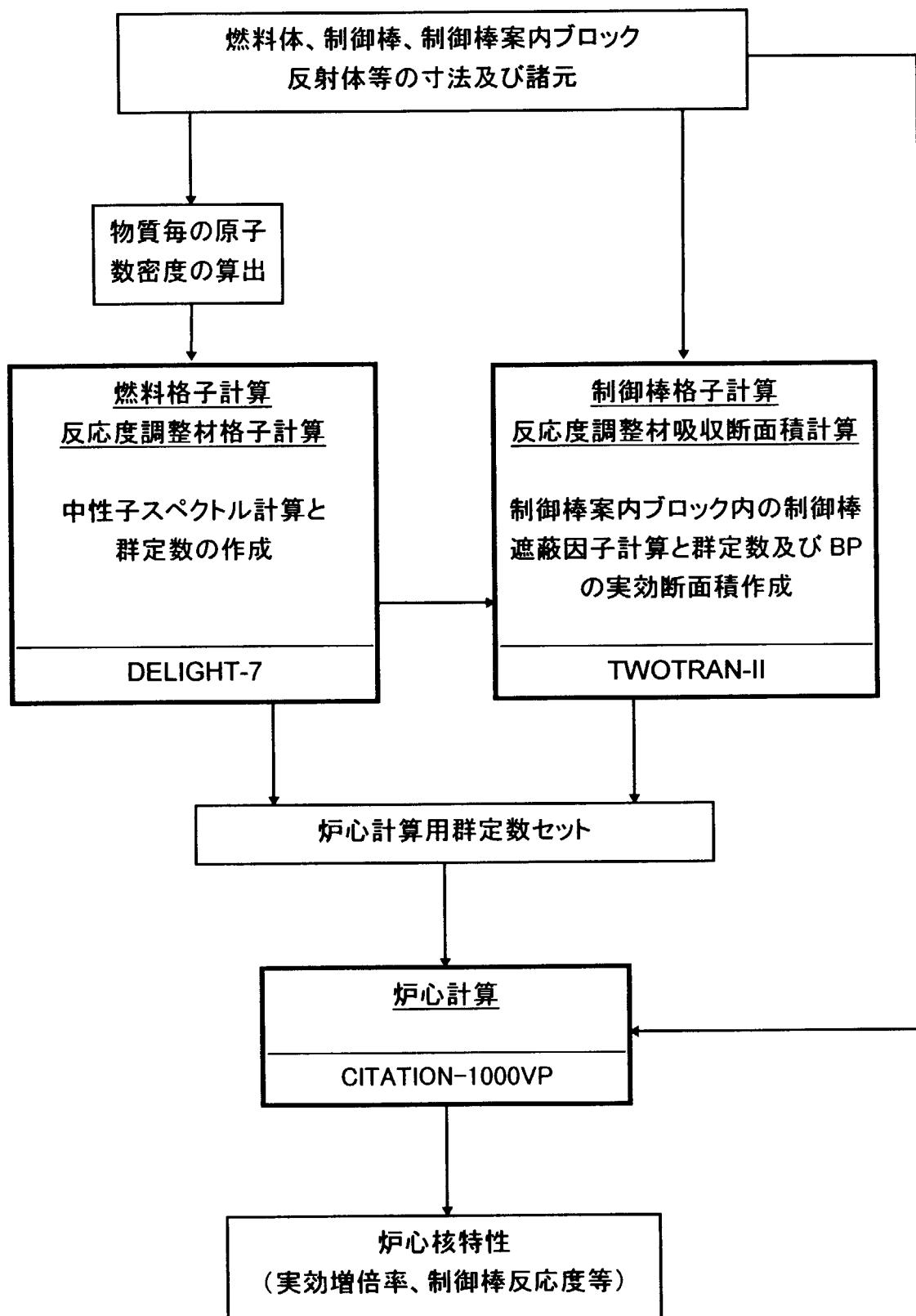
1) 対象部を均質化した場合の拡散係数とストリーミングを考慮した拡散係数を用いた場合の差を反応度変化で表したもの

2) 制御棒案内カラム及び照射カラムでのストリーミングの効果

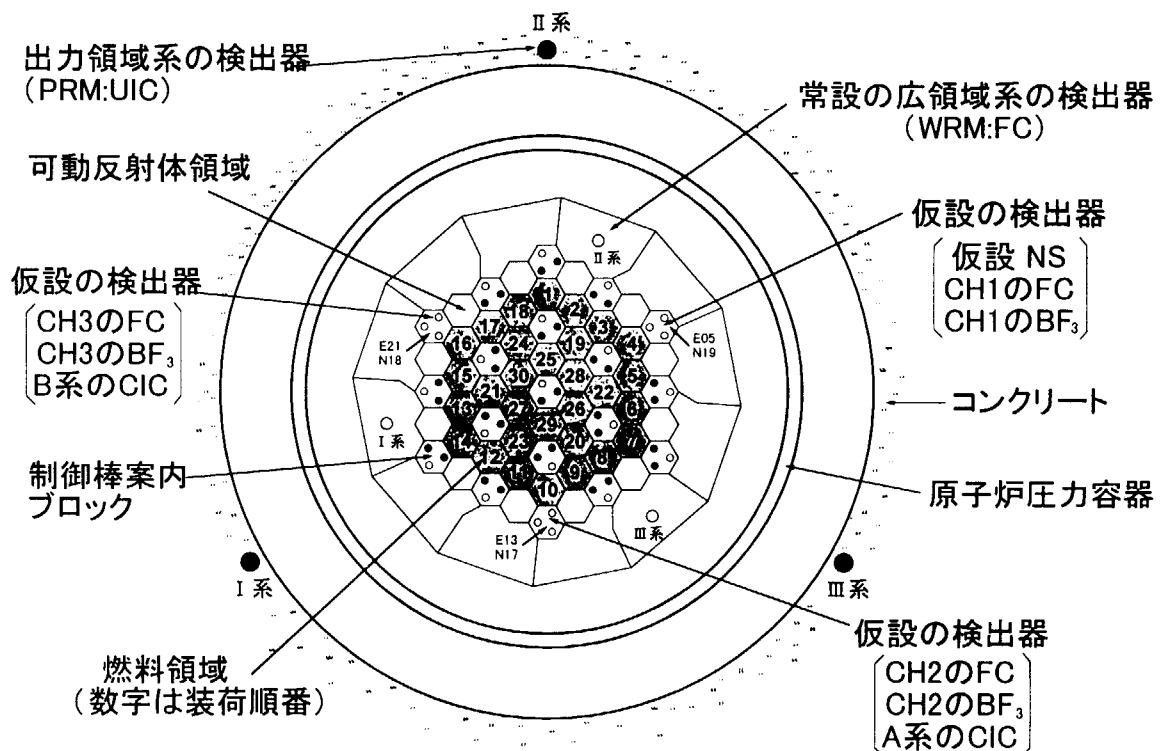
3) 制御棒案内カラム及び照射カラムでのストリーミングの効果

4) 制御棒案内カラム、照射カラム及び燃料領域上下の可動反射体内の冷却孔からのストリーミングの効果

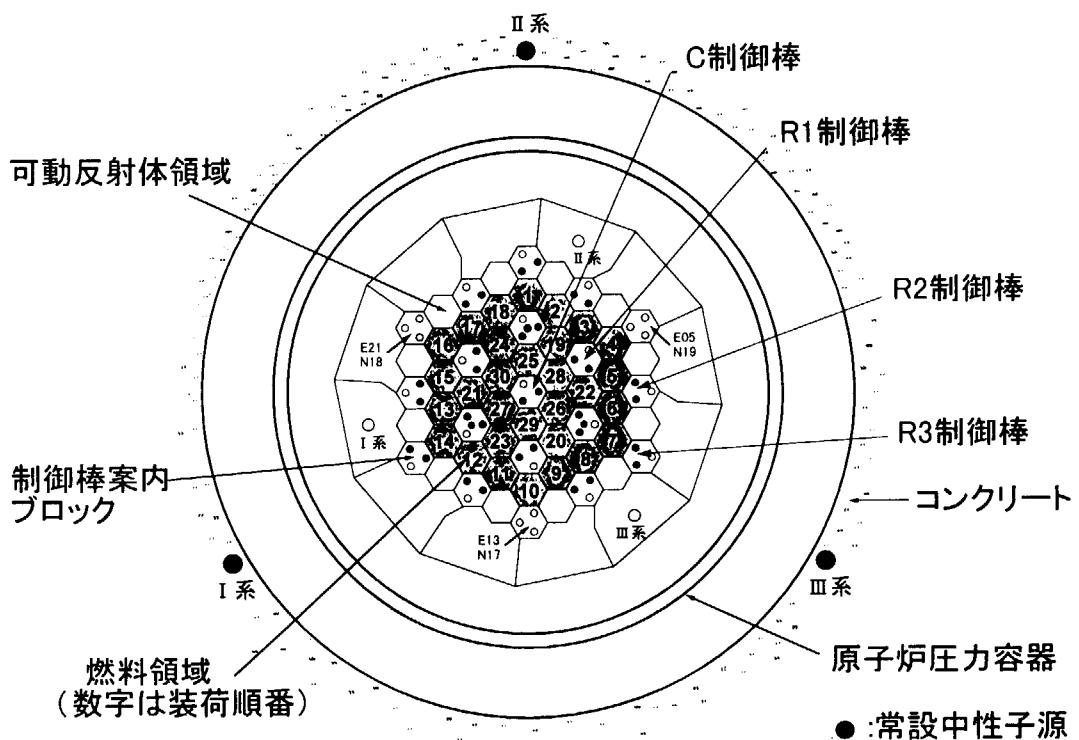
5) 燃料上下の可動反射体の冷却孔でのストリーミングの効果



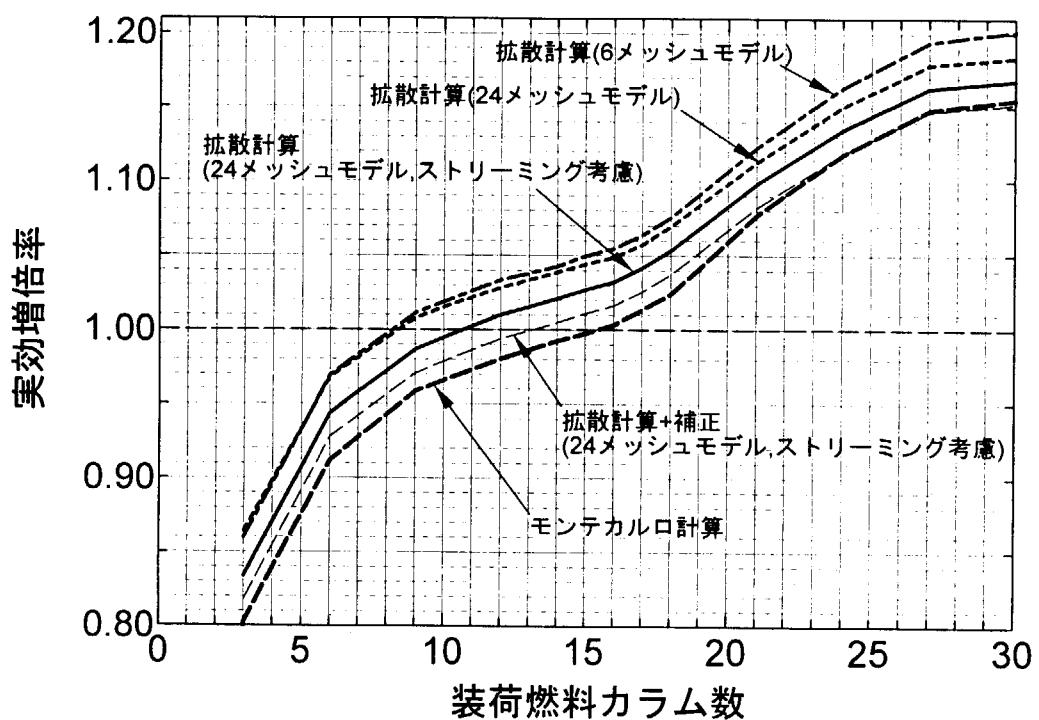
第 2.1.1 図 核特性評価コードシステムの概要



第2.2.1図 燃料装荷順序と検出器の配置



第2.2.2図 炉心内の制御棒配置



第2.2.3図 装荷燃料カラムによる実効増倍率の増加

3. 解析結果

HTTR の臨界試験では、初臨界時及び全炉心構成時に加えて、環状炉心のデータ取得を目的として、18 カラム炉心及び 24 カラム炉心でも制御棒反応度値や中性子束分布等の各種炉物理量の測定を行う計画である。そのため、解析は、18 カラム炉心及び 24 カラム炉心の環状炉心及び 30 カラム炉心を対象とした。燃料は炉心外周部から装荷し、18 カラム装荷した時点で環状炉心とする。更に内側に燃料を装荷し 24 カラムで再度環状炉心を構成し、その後 30 カラムからなる初期炉心を構成する。このため、18 カラム炉心は炉心厚さの薄い環状炉心、24 カラム炉心は炉心厚さの厚い環状炉心となる。

測定は常設の広領域系(WRM)に加えて仮設の中性子検出器を用いる。仮設の中性子検出器は可動反射体領域にある 3 カ所の照射カラムに設置する。

制御棒は、第 2.2.2 図に示すように全部で 16 対設置している。炉心中心の制御棒を C 制御棒、その周りの燃料領域にある制御棒 6 対を R1 制御棒、可動反射体領域にある制御棒を R2 制御棒及び R3 制御棒と呼んでいる。制御棒位置は、燃料領域と下部可動反射体の境界を 0mm として表示する。それぞれの制御棒の駆動範囲は、C、R1 及び R3 制御棒については 0mm から 5220mm、R2 制御棒については 0mm から 3335mm である。

解析は、以下の項目について行った。

- (1) 中性子検出器の応答及び逆増倍係数
- (2) 過剰反応度
- (3) 臨界時制御棒位置
- (4) 制御棒反応度値及び反応度変化率
- (5) 炉停止余裕
- (6) 後備停止系による炉停止余裕
- (7) 動特性パラメータ
- (8) 中性子束分布及び核出力校正係数

これらの解析は、24 メッシュモデルを用い、制御棒案内カラムと照射カラム及び燃料領域上部及び下部の可動反射体でストリーミングを考慮した条件で解析を行った。雰囲気は大気圧のヘリウムとし、温度は 300K 均一とした。

3. 1 中性子検出器の応答及び逆増倍係数

3. 1. 1 中性子検出器の応答

(1) 仮設中性子源を用いた状態での評価

臨界試験は、仮設中性子源を炉心に装荷し、仮設の中性子測定系を用いて行うこととしている。そのため、各炉心状態での仮設中性子源による仮設の中性子測定系の計数率を評価する。対象とする検出器は、仮設 BF₃、仮設 FC、仮設 CIC 及び常設 WRM とする。

仮設中性子源の諸元を第 3.1.1 表に示す。各検出器の主要諸元を第 3.1.2 表に示す。

解析の対象とする炉心は以下の炉心状態とする。

- 1)燃料なし、制御棒全引き抜き
- 2)燃料 18 カラム、制御棒全挿入
- 3)燃料 24 カラム、制御棒全挿入
- 4)燃料 30 カラム、制御棒全挿入

各検出器の計数率は、検出器の位置の熱中性子束（第 4 群から第 6 群）を求め、これに各検出器の感度を掛けることにより評価する。評価用の仮設検出器の軸方向位置は、第 3.1.3 表に示す位置とする。それぞれの検出器及び仮設中性子源の軸方向位置の模式図を第 3.1.1 図に示す。仮設中性子源からの中性子放出数は文献に示されている中性子収率の値¹²⁾をもとに評価した。

それぞれの炉心についての各検出器の応答の予測結果を第 3.1.4 表から第 3.1.7 表に示す。

なお、燃料なし、制御棒全引き抜きの状態については既に実測値が得られているため¹³⁾、第 3.1.4 表にその結果をあわせて示す。

第 3.1.4 表から、BF₃ 系統は測定値と比較して高めの評価結果となっているが、カウント数のオーダーはあっており、チャンネル間の大小関係も測定値と同様の傾向である。FC 系統も測定値より高めの値であるが、ほぼ同じオーダーの結果となっている。CIC 系統は、中性子フルエンスが検出器の計測範囲以下であるため、実測値は零となっている。WRM については、I 系は測定値以下、II 系及び III 系は測定値より高めとなっている。しかしながら、WRM の位置は炉心から離れた位置であること、仮設中性子源に一番近い II 系が最も高い値となっていることから、ここで得られた解析結果はほぼ妥当な値であると考える。

(2) 常設の中性子源を装荷した状態の評価

臨界試験終了後、仮設中性子源及び仮設の中性子検出器を取り外し、常設の中性子源を炉心に装荷することとなっている。このとき、常設の中性子源によって全制御棒挿入時にWRMで得られるカウント数の予測のための解析を行った。

常設の中性子源は強度 0.1Ci の ^{232}Cf のものを 3 個用いている。設置場所は、第 2.2.2 図に示す R1 制御棒カラムの上から 3 段目の制御棒案内ブロックのつかみ孔の下部に設置する。中性子源からの単位時間あたりの中性子放出数は、文献に示されている中性子収率の値¹²⁾を基に評価した。

解析は、30 カラム炉心の制御棒全挿入状態で評価した。解析結果を第 3.1.8 表に示す。同表から、いずれの WRM でも 400cps 以上となっている。第 3.1.4 表で、WRM の応答予測値は実測値より 1 衍程度高い値を示していることを考慮しても、本設の中性子源を装荷した状態では、WRM は制御棒引き抜きの条件である 3cps より十分高いカウント数を得られると考えられる。

3. 1. 2 逆増倍係数

HTTR の臨界近接では、逆増倍係数を測定しながら最小臨界カラム数を予測しつつ燃料装荷を行うこととしている。逆増倍係数は 0 カラム、6 カラム、9 カラム、12 カラム、14 カラム及び 15 カラム装荷した時点で測定することとしている。そのため、臨界近接時の逆増倍係数を評価した。拡散計算では、2.3 章で述べたように 11 カラムで臨界となっている。しかしながら最小臨界カラム数の予測値は 16 カラム(モンテカルロ計算に基づく)であるため、16 カラムが最小臨界となる場合の逆増倍係数を評価する必要がある。そのため、逆増倍係数の評価についてのみ BP 中の ^{10}B の原子数密度を増大させ、16 カラムで臨界となるよう調整して解析を行った。なお、この調整は逆増倍係数評価のためだけについて行っている。これ以外の解析では BP 中の ^{10}B の原子数密度は設計値の値としており、臨界カラム数をモンテカルロ計算の結果と合わせるための調整は行っていない。

逆増倍係数は仮設検出器及び WRM の計数率から評価した。装荷燃料カラムと各検出器でのカウント数予測値を第 3.1.9 表に示す。ここに示す値は、第 6 群の熱中性子束から評価している。ここで得られたカウント数をもとに逆増倍係数を評価した。0 カラムを基準としたときの BF₃、FC 及び WRM での逆増倍係数をそれぞれ第 3.1.2 図から第 3.1.4 図に示す。CIC は、第 3.1.4 表に示すように 0 カラムでの出力電流が 0 となっている。このため、0 カラムを基準とした逆増倍係数の曲線を書くことができないため省略している。第 3.1.2 図か

ら第 3.1.4 図に示すように、0 カラムを基準とした場合、0 カラムから 6 カラムの間の計数率の変化が 1 枝もしくは 2 枝の増加となっているため逆増倍係数の変化が大きくなってしまい、6 カラム以降の逆増倍係数の変化が極端に小さくなる。この状態では最小臨界量の予測は困難である。

次に、6 カラムを基準とした場合の BF_3 、FC、CIC 及び WRM の各検出器により得られる逆増倍係数を第 3.1.5 図から第 3.1.8 図に示す。この場合、6 カラム以降のカウント数の変化が極端に大きくないため、臨界までの逆増倍係数の変化を観察することができる。

第 3.1.5 図に示すように、 BF_3 の CH 2 の逆増倍係数は燃料が 6 カラムから 9 カラムに増えた時点で大きく減少している。これは、環状に燃料を装荷しているので、CH 2 の近傍に燃料が装荷されたため他のチャンネルより大きく変化したと考えられる。CH 1 は 9 カラムから 12 カラムの時点で CH2 の結果と交差している。CH 1 は仮設中性子源を設置してあるカラムであるため、燃料の装荷が離れた場所で行われている場合は計数率の変化が小さくなることによると考えられる。

9 カラム以降では、上に凸な曲線と下に凸な曲線とになって最小臨界カラム数である 16 カラムで零に近づいている。3 チャンネルの平均値で見ると、9 カラム以降はほぼ直線的に減少し 16 カラムで零に近づいている。このことから、逆増倍係数の平均の値を求めることによって最小臨界量の予測が可能であるといえる。

FC、CIC についても第 3.1.6 図及び第 3.1.7 図に示すように BF_3 とほとんど同じ結果となっている。これは燃料装荷がカラム単位で行われるため、燃料カラム数が変わっても軸方向の中性子束分布はほとんど変化せず、同じカラム内での検出器の軸方向位置を変えてもほとんど同じ結果を与えることによると考えられる。

WRM は BF_3 、FC 及び CIC とは異なり固定反射体領域に設けているため、第 3.1.8 図に示すように曲線の形がやや異なっている。III 系は最初に燃料が装荷される位置に近いため変化が緩やかであり、I 系及び II 系は近くに燃料が装荷される時点で変化が急激になっている。ここでも 3 チャンネルの平均値を取ることにより最小臨界量の予測が可能である。

更に、9 カラムを基準とした場合の BF_3 、FC、CIC 及び WRM の各検出器により得られる逆増倍係数を第 3.1.9 図から第 3.1.12 図に示す。いずれの検出器においても曲線のばらつきが小さくなり、かつ直線的に変化しており最小臨界量の予測が可能であることが分かる。

また、6 カラム及び 9 カラムを基準とした仮設の中性子検出器についての平均、WRM についての平均及び全ての検出器について平均した逆増倍係数を第 3.1.13 図及び第 3.1.14 図に示す。両図から、平均の逆増倍係数は 9 カラム以降ほぼ直線的に減少するため、臨界カラム数の予測が可能なことが分かる。

第 3.1.15 図に、12 カラムを基準とした場合の BF_3 の逆増倍曲線を示す。同図では、曲線のばらつきが少なく、ほぼ一直線上に重なっているが、15 カラムでの逆増倍係数の値が少ないカラム数を基準とした場合より高くなっている。ここで、同じ BF_3 の結果で、基準となるカラム数を変えた第 3.1.5 図、第 3.1.9 図及び第 3.1.15 図を比較してみる。カラム数が少ない状態を基準とした場合、曲線のばらつきは大きいが、臨界近傍での逆増倍係数の値は零に近くなっている。これに対し、基準とするカラム数が大きい場合は曲線のばらつきが小さく、最小臨界カラム数の外挿が容易になっているが、臨界近傍での逆増倍係数の値が大きくなっている。

以上の点から、装荷カラム数が増えるに従って基準とするカラム数を変えた逆増倍曲線を作成して互いを比較することにより、臨界カラム数を精度よく推定できると考える。

3. 2 過剰反応度

30 カラム炉心、24 カラム炉心及び 18 カラム炉心について、過剰反応度を評価した。第 3.2.1 表に結果を示す。同表に示すように 30 カラムでの過剰反応度は $14.3\% \Delta k/k$ であり、設置許可申請書に記載されている核的制限値 $16.5\% \Delta k/k$ を下回っている。

3. 3 臨界時制御棒位置

HTTR の運転では、R3 制御棒は常に上限とし、C、R1 及び R2 制御棒をそろえた状態で運転することとしている。そのため、各炉心での臨界制御棒位置は、R3 制御棒を上限とし、他の制御棒をそろえた状態の解析を複数行い、臨界となる制御棒位置を内挿により評価した。併せて、以降の解析の基準となる解析用の臨界制御棒位置を求めた。24 メッシュモデルでの制御棒案内カラムの軸方向分割は 1 ブロックあたり 4 分割 (14.5cm) となっているため、解析用臨界制御棒位置は 14.5cm の倍数となっている。結果を第 3.3.1 表に示す。また、それぞれの炉心で、R3 を上限とし C、R1 及び R2 制御棒をそろえた状態での制御棒位置と実効増倍率の関係を第 3.3.1 図に示す。以降の解析は、第 3.3.1 表に示す解析用制御棒位置を基準として行った。

同図から、カラム数が少なくなるにつれ過剰反応度が小さくなるため、臨界制御棒位置は浅くなっている。

3. 4 制御棒反応度価値及び反応度変化率

(1) 制御棒反応度価値

それぞれの炉心について、ある1対の制御棒を全ストローク移動させ、これ以外のC、R1及びR2制御棒を3. 3節で求めた解析用臨界制御棒位置とした場合の制御棒反応度価値を評価した。それぞれの炉心について、各制御棒1対が全挿入状態から全引き抜きとした場合の反応度価値を第3.4.1表に示す。また、それぞれの炉心についての制御棒反応度価値曲線を第3.4.1図から第3.4.3図に示す。

30カラム炉心ではC制御棒が最大反応度価値を有している。カラム数が少なくなるにつれ、C制御棒の反応度価値は小さくなり、24カラム及び18カラムではR1制御棒の反応度価値が最大になる。18カラム及び24カラムでは、C制御棒の反応度価値が大きく低下しているが、R2及びR3の反応度価値はカラム数が少なくなるにつれ増加している。

これらの効果を検討するため、各炉心について半径方向の中性子束分布及び随伴中性子束分布を評価した。第3.4.4図に各炉心での高速群及び熱群の熱中性子束分布を、第3.4.5図に各炉心での高速群及び熱群の随伴中性子束分布を示す。両図では、それぞれの最大値について規格化した結果を示している。第3.4.6図に評価断面を示す。分布の軸方向評価位置は、燃料ブロックの上から3段目の下部である。

30カラム炉心では、炉心中心は制御棒案内カラムであるが、この部分も反射体として示している。いずれの炉心でも、熱群の中性子束は反射体部で高く、燃料部で低くなっている。30カラム炉心及び24カラム炉心では炉心中心部で熱群の中性子束が最大となっているが、18カラム炉心では炉心内側の反射体領域での吸収の効果により炉心中心より周辺部で最大となっている。高速群の中性子束は、燃料部で高く、反射体領域で低くなっている。

随伴中性子束分布については、30カラム炉心では高速群及び熱群とも炉心中心で高く、周辺部に向けて低下している。24カラム炉心及び18カラム炉心では、炉心中心で熱群の随伴中性子束が低下し、燃料領域で最大となっている。これは、環状炉心になると炉心中心のC制御棒の反応度価値が低下し、R1制御棒の反応度価値が最大となることに対応している。

(2) 制御棒反応度変化率

(1)節で求めた制御棒反応度価値曲線から評価した制御棒反応度変化率を第3.4.7図から第3.4.9図に示す。

30カラム炉心では、1対の制御棒の有する反応度価値が大きくかつ他の制御棒が深く挿入されているため、炉心の下部で大きな反応度変化率となっている。カラム数が少くなるにつれ臨界制御棒位置が浅くなり、最大反応度変化率の生じる位置が浅くなっている。1対

の制御棒の反応度値も減少するため、最大値も小さくなっている。

(3) 反応度添加に必要な制御棒移動距離

HTTR では、逆運動特性法（IK 法）により制御棒値の測定を行うこととしている。このとき、制御棒は約 $0.08\% \Delta k/k$ の反応度変化に相当する長さを目安に操作することとしている。このため、各炉心状態において各制御棒で $0.08\% \Delta k/k$ の反応度変化に相当する制御棒移動量を求めた。30 カラム、24 カラム及び 18 カラムにおける、各制御棒での $0.08\% \Delta k/k$ の反応度変化に相当する制御棒移動量を第 3.4.10 図から第 3.4.12 図に示す。

30 カラム炉心では R3 制御棒の有する反応度値が小さいため、 $0.08\% \Delta k/k$ の反応度を添加するためには 20cm 以上の引き抜きが必要となる。制御棒の駆動速度は 1cm/s なので、20cm の引き抜きには 20 秒かかることとなりこのような状態では IK 法による反応度測定は困難であろう。このため、30 カラム炉心では R3 制御棒の反応度値測定には置換法による測定とする必要があると考えられる。

24 カラム及び 18 カラムでは各制御棒の有する反応度値の差が小さくなるので各制御棒毎のばらつきは小さくなる。しかしながら、制御棒を下端まで挿入した状態及び臨界制御棒位置より引き抜いた状態では $0.08\% \Delta k/k$ の反応度添加に必要な制御棒移動量が大きくなっている。このように制御棒移動距離が大きな領域では、置換法により制御棒反応度を測定する必要があると考える。

3. 5 炉停止余裕

臨界試験において炉停止余裕の測定は、全制御棒を挿入した状態の炉停止余裕を逆運動特性法もしくは遅れ積分法により測定することとしている。ワンロッドスタックの状態の炉停止余裕は、全制御棒を挿入した状態の炉停止余裕の測定値から、最大の反応度値を有する制御棒の反応度を差し引くことにより評価することとしている。また、使用前検査においては、制御棒校正曲線から得られる各制御棒の反応度値を足しあわせることにより評価することとしている。そのため、それぞれの方法に対応した炉停止余裕を評価した。

(1) 解析による炉停止余裕（臨界試験での方法による評価）

炉停止余裕の評価として、各炉心毎に全制御棒挿入及びワンロッドスタックありの状態の解析を行った。評価は、制御棒の反応度制御能力と、炉停止余裕の 2 種類を評価した。

i) 制御棒の反応度制御能力

ここでは、制御棒の反応度制御能力を評価するため、制御棒全引き抜き状態と全挿入状態の実効増倍率から制御棒反応度を評価した。スタッツする制御棒は全て全引き抜き位置にあるとしている。

各炉心の、スタッツする制御棒毎の反応度制御能力を第 3.5.1 表に示す。30 カラム炉心ではここでは R1 制御棒がスタッツした状態が最も小さい反応度制御能力となっている。24 カラム炉心では、R1 制御棒スタッツ状態が最も小さな反応度制御能力となる。18 カラム炉心では環状炉心の外側にある R2 制御棒スタッツの状態が最も小さな反応度制御能力となっている。

ii) 炉停止余裕

ここでは、臨界状態と制御棒全挿入状態の実効増倍率から炉停止余裕を評価した。スタッツする制御棒は全引き抜き状態にあるとしている。

各炉心の、スタッツする制御棒毎の炉停止余裕を第 3.5.2 表に示す。30 カラム炉心及び 24 カラム炉心では R1 制御棒スタッツ状態が最も小さな炉停止余裕となる。18 カラム炉心では R2 制御棒スタッツ状態が最も小さな炉停止余裕となる。また、スタッツなしの状態と比較して、C、R1 及び R2 がスタッツした状態の炉停止余裕は大きく変化している。これは、制御棒相互の干渉効果が大きいことによる。また、いずれの炉心でも R3 がスタッツした状態の炉停止余裕はスタッツなしの値に近くなっている、R3 の効果は比較的小さいことを示している。

また、臨界試験では、落下法により測定した全制御棒挿入状態の炉停止余裕の測定値から最大反応度値を有する制御棒の反応度を差し引くことによりワンロッドスタッツ状態の炉停止余裕を評価することも計画している。この方法による炉停止余裕を併せて第 3.5.2 表に、ワンロッドスタッツとして示す。30 カラム炉心では C 制御棒スタッツ状態、24 カラム炉心及び 18 カラム炉心では R1 制御棒のスタッツ状態である。

(2) 使用前検査の評価法による炉停止余裕

使用前検査では、制御棒反応度値測定で得られた各対毎の反応度値を足しあわせることにより炉停止余裕を求めるとしている。そこで、この方法に従い評価したそれぞれの炉心についての炉停止余裕を以下に示す。各制御棒の反応度値は、第 3.4.1 表に示す臨界状態(解析用臨界制御棒位置)にある制御棒が補償する反応度として、第 3.4.1 図から第 3.4.3 図に示す制御棒反応度値曲線から求めた。これらの制御棒の有する反応度値を合計して

炉停止余裕を評価した。ワンロッドスタック状態の炉停止余裕は、前記の方法で評価した炉停止余裕から、スタックする制御棒が有する全反応度値を差し引くことにより求めた。スタックする制御棒は、最大反応度値を有する制御棒とした。具体的には 30 カラム炉心では C 制御棒、18 カラム炉心及び 24 カラム炉心では R1 制御棒である。結果を第 3.5.3 表に示す。この場合、制御棒の干渉効果を考慮していないため、(1)で求めた炉停止余裕より小さな値となっている。

使用前検査の判断基準は、「最大反応度値を有する制御棒 1 対が未挿入の状態で炉停止余裕が $0.01 \Delta k/k$ 以上であること」となっている。第 3.5.3 表に示すように、30 カラム炉心の炉停止余裕はスタックありの状態で $0.01 \Delta k/k$ 以上であり、判断基準を満たしている。

3. 6 後備停止系による炉停止余裕

後備停止系による炉停止余裕は、後備停止系の作動により炉心に加えられる反応度（後備停止系の反応度制御能力）から温度補償分の反応度を引くことにより求めることとしている。また、使用前検査の判断基準として、「後備停止系を作動させた場合、炉心の実効増倍率を 0.99 以下にできること」となっている。よって、後備停止系による炉停止余裕として、後備停止系作動時の実効増倍率を反応度により求めた。

(1) 解析に用いたデータ

解析に使用したデータのうち、後備停止系に関するデータを第 3.6.1 表に示す。同表に示したもの以外のデータは実測値に基づくものを用いた。

(2) 解析用の炭化ほう素ペレットの装荷高さ及び ^{10}B 装荷量

第 3.7.1 表に示した値から、後備停止系の炭化ほう素ペレットの装荷高さは 289cm となる。解析に用いるモデルでは、軸方向のメッシュ高さが 14.5cm となっているため、解析で用いる装荷高さは 19 メッシュ分の 275.5cm とした。このときの後備停止系 1 基あたりの ^{10}B 装荷量は 2.20kg となる。この値は、実測値の下限値 2.65kg 及び実測値の平均値 2.67kg を十分下回る値となっており、保守的な解析条件である。

(3) 炉停止余裕及び実効増倍率の評価

後備停止系の反応度制御能力は、低温状態における制御棒が上限位置で後備停止系が未作動の状態と、低温状態における制御棒が上限位置で後備停止系作動後の実効増倍率から後備

停止系の反応度制御能力を評価した。後備停止系による炉停止余裕は、この反応度制御能力から温度効果分として $0.09 \Delta k/k$ 引いた値とした。

後備停止系作動時の炉心の実効増倍率 k は、後備停止系による炉停止余裕 ρ から、以下の式によって求めた。

$$k = \frac{1}{1 + \rho}$$

評価結果を第 3.6.2 表に示す。解析から、後備停止系の反応度制御能力は $0.25 \Delta k/k$ である。この値から温度効果分として高温試験運転時の制御すべき反応度としての $0.09 \Delta k/k$ を差し引くと、低温状態での後備停止系による炉停止余裕となる。この値が $0.16 \Delta k/k$ となる。よって、上式から、後備停止系の作動により炉心の実効増倍率は 0.86 となり、判断基準を満足する。

3. 7 動特性パラメータ

遅発中性子は即発中性子に比較して生成エネルギーが低いため、減速過程において遅発中性子の炉心から漏れる確率は即発中性子の確率より小さくなる。このことにより炉心の実効遅発中性子割合は核分裂性核種の遅発中性子割合よりも大きくなる。よって、動特性パラメータの解析においては、遅発中性子と即発中性子の生成エネルギーの違いを考慮することが重要である。そのため、高速群のエネルギー分割を細かくした 12 群の縮約群を用いて炉心特性解析を行い動特性パラメータを評価した。12 群の縮約群を作成するため、少数群も 45 群としている。解析に用いた速中性子群及び熱中性子群の群構造を第 3.7.1 表及び第 3.7.2 表に示す。ここで用いた群構造では、速中性子群の高エネルギー側を細かく分割している。熱中性子領域の分割は、第 2.1.2 表に示したものと同じである。

^{235}U の遅発中性子のデータは Keepin が評価したデータに基づいている。具体的には、1 核分裂あたり発生する遅発中性子数を 0.0165 としている²⁾。これ以外のデータは ENDF/B-IV に基づいている。

各炉心での実効遅発中性子割合 β_{eff} 、各群毎の $\beta(i)$ 、 $\beta(i)/\beta_{eff}$ 、崩壊定数 λ_i 及び中性子寿命 τ を第 3.7.3 表から第 3.7.5 表に示す。これらの結果から、カラム数が減少するにつれ β_{eff} は大きくなっている。これは、炉心の形状が変わり漏れの効果が大きくなるため、即発中性子より低いエネルギーで生成する遅発中性子が、減速の過程で漏れが小さくなる効果が強調されることによるものと考えられる。

カラム数が少なくなるにつれ、中性子寿命は長くなっている。1 群拡散理論では、漏れの

ある体系での中性子寿命は以下のように表すことができる。

$$I = P_{NL} \left(\frac{1}{v \Sigma_a} \right)$$

ここで、

- I : 中性子寿命
- P_{NL} : 中性子の漏れない確率
- v : 中性子速度
- Σ_a : 巨視的吸収断面積

カラム数が少なくなると漏れの大きな体系となるため、 P_{NL} は小さくなる。また、燃料内のウラン量は減少するため Σ_a は小さくなる。カラム数が減少するにつれ中性子寿命が大きくなるのは、燃料に吸収される中性子が減少するため、 Σ_a が小さくなることにより中性子寿命が大きくなると考えられる。

3. 8 中性子束分布及び核出力校正係数

(1) FC による中性子束分布及び核出力校正係数

臨界特性試験では、93%濃縮ウランを用いた核分裂計数管(FC)を照射カラム内で軸方向に移動して中性子束分布を測定する。この測定結果に対応するよう、照射カラム (E05) の FC が入る照射孔の位置に ^{235}U を少量入れ、この部分の出力密度の軸方向分布を規格化することにより評価した。第 3.8.1 図から第 3.8.3 図にそれぞれの炉心についての中性子束分布を示す。なお、FC の軸方向の位置を EL で表した図を第 3.8.4 図から第 3.8.6 図に示す。FC の軸方向の移動範囲は照射カラムに設けられた孔の範囲であるため、測定可能な範囲は EL.22.61m 以上の範囲である。

出力換算係数は、照射カラム (E05) の FC が入る照射孔の位置の熱中性子束の最大値と FC の検出効率から以下の式で評価した。

$$C = \frac{P_{cal}}{\phi_{cal} \times \varepsilon}$$

ここで、

- C : 出力換算係数[W/cps]
- P_{cal} : 解析での原子炉出力[W]

- ϕ_{cal} : FCが入る照射孔の位置の熱中性子束の最大値[nv]
 ε : FCの感度[cps/nv]

この値を用いると、原子炉出力は以下の式で表すことができる。

$$P = C \times count$$

ここで、

- P : 原子炉出力[W]
 C : 出力換算係数[W/cps]
 $count$: 軸方向評価位置における FC の計数率[cps]

各炉心での出力換算係数と軸方向評価位置（燃料領域下端からの距離）を第 3.8.1 表に示す。同表に示す軸方向評価位置は、熱中性子束が最大となる位置である。カラム数が少なくなると制御棒の挿入深さが浅くなるため、中性子束が最大となる位置は、カラム数が少なくなるにつれ上方へ移動していることが分かる。

(2) CIC 及び WRM による出力の評価

臨界試験では、WRM のカウント数が 40000cps を超えると原子炉スクラム信号の手動ブロックが解除され原子炉はスクラムする。また、制御棒校正は IK 法で行うが、このときの原子炉出力は CIC で測定することとしている。よって、WRM で 40000cps となる原子炉出力と、CIC での出力換算係数を評価した。

第 3.8.2 表に WRM で 40000cps となる出力をそれぞれの炉心について示す。同表から、カラム数が少くなるにつれ WRM で 40000cps となる出力が小さくなっている。

炉心の外径はいずれの炉心も同じであるので、カラム数が変わっても炉心の外側の中性子束分布は大きく変わることはない。しかしながら、カラム数が増えるにつれ炉心内部の燃料の量が増えてくる。このため、WRM の位置で 40000cps となる原子炉出力は、カラム数が多いほど高くなる。

CIC の出力換算係数は以下の式により評価した。

$$C = \frac{P_{cal}}{\phi_{cal} \times \varepsilon}$$

ここで、

- C : 出力換算係数[W/A]
- P_{cal} : 解析での原子炉出力[W]
- ϕ_{cal} : CIC 位置の熱中性子束[nv]
- ε : CIC の感度[A/nv]

この値を用いると、原子炉出力は以下の式で表すことができる。

$$P = C \times count$$

ここで、

- P : 原子炉出力[W]
- C : 出力換算係数[W/A]
- $count$: CIC の出力[A]

第 3.8.3 表に、各炉心での CIC による出力換算係数を示す。カラム数が少なくなるにつれ出力換算係数は大きくなっている。これは WRM で 40000cps となる出力の評価の場合と同様に、炉心の外径が同じであり、検出器が炉心の外側にあるためであると考えられる。但し、CIC は炉心の外周部に隣接して設置されているため、24 カラムと 18 カラムの差が小さくなっていると考えられる。

第 3.1.1 表 仮設中性子源の諸元

種類	$^{241}\text{Am-Be}$
強度	$1.48 \times 10^{11}\text{Bq}$
寸法	$\phi 28\text{mm} \times 25.4\text{mm}$
炉内位置	装荷カラム E05 軸方向位置 EL. 24.73m (燃料領域下端からの距離 2320mm)

第 3.1.2 表 検出器の種類と主要諸元

名称	種類	数量	寸法	感度
仮設 BF ₃	BF ₃ 比例計数管	3	$\phi 25\text{mm} \times 348\text{mm}$	2.5cps/nv
仮設 FC	核分裂計数管	3	$\phi 6.2\text{mm} \times 25\text{mm}^*$	$3.38 \times 10^{-3}\text{cps/nv}$
仮設 CIC	γ 線補償型電離箱	2	$\phi 50.8\text{mm} \times 305\text{mm}$	$2.3 \times 10^{-14}\text{A/nv}$
常設 WRM	核分裂計数管電離箱	3	$\phi 38\text{mm} \times 120^*\text{mm}$	0.1cps/nv $1.6 \times 10^{-14}\text{A/nv}$

*Active length

第 3.1.3 表 仮設中性子源及び仮設検出器の評価用軸方向位置

カラム (ストド・パイプ No.)	検出器	評価用軸方向位置*	
		EL 表示(m)	燃料領域下端から の距離(mm)
E05 (N-19)	BF ₃ CH 1 FC CH 1	22.79	380
E-13 (N-17)	BF ₃ CH 2 FC CH 2	24.15	1740
	CIC CH A	23.28	870
E-21 (N-18)	BF ₃ CH 3 FC CH 3	23.45	1040
	CIC CH B	23.28	870

*各検出器の下端位置

第 3.1.4 表 燃料未装荷、制御棒全引き抜き状態での各検出器の応答予測と実測値

検出器	熱中性子束 [nv]	カウント数[cps] (CIC は電流値[A])	測定値[cps] (CIC は電流値[A])
BF ₃ CH 1	2.067×10^2	5.2×10^2	3.1×10^2
BF ₃ CH 2	3.803×10^1	9.5×10^1	5.0×10^1
BF ₃ CH 3	1.873×10^1	4.7×10^1	2.2×10^1
FC CH 1	1.689×10^2	5.7×10^{-1}	2.3×10^{-1}
FC CH 2	3.683×10^1	1.2×10^{-1}	2.0×10^{-2}
FC CH 3	1.751×10^1	5.9×10^{-2}	2.0×10^{-2}
CIC CH A	1.614×10^1	3.7×10^{-13}	0.0×10^0
CIC CH B	1.584×10^1	3.7×10^{-13}	0.0×10^0
WRM I 系	1.328×10^0	1.3×10^{-1}	3.3×10^{-1}
WRM II 系	6.109×10^1	6.1×10^0	5.3×10^{-1}
WRM III 系	1.429×10^1	1.4×10^0	3.3×10^{-1}

第 3.1.5 表 18 カラム、制御棒全挿入での各検出器の応答予測

検出器	熱中性子束 [nv]	カウント数[cps] (CIC は電流値[A])
BF ₃ CH 1	1.781×10^2	4.6×10^2
BF ₃ CH 2	1.350×10^1	3.4×10^1
BF ₃ CH 3	4.533×10^0	1.1×10^0
FC CH 1	1.422×10^2	4.8×10^{-1}
FC CH 2	1.271×10^1	4.3×10^{-2}
FC CH 3	4.064×10^0	1.4×10^{-2}
CIC CH A	3.969×10^0	9.1×10^{-14}
CIC CH B	3.974×10^0	9.1×10^{-14}
WRM I 系	5.474×10^{-1}	5.5×10^{-2}
WRM II 系	6.527×10^1	6.5×10^0
WRM III 系	9.583×10^0	9.6×10^{-1}

第 3.1.6 表 24 カラム、制御棒全挿入での各検出器の応答予測

検出器	熱中性子束 [nv]	カウント数[cps] (CIC は電流値[A])
BF ₃ CH 1	2.902×10^2	7.3×10^2
BF ₃ CH 2	2.661×10^1	6.7×10^1
BF ₃ CH 3	1.081×10^1	2.7×10^1
FC CH 1	2.376×10^2	8.0×10^{-1}
FC CH 2	2.527×10^1	8.5×10^{-2}
FC CH 3	9.804×10^0	3.3×10^{-2}
CIC CH A	9.520×10^0	2.2×10^{-13}
CIC CH B	9.256×10^0	2.1×10^{-13}
WRM I 系	1.270×10^0	1.3×10^{-1}
WRM II 系	7.687×10^1	7.7×10^0
WRM III 系	1.282×10^1	1.3×10^0

第 3.1.7 表 30 カラム、制御棒全挿入での各検出器の応答予測

検出器	熱中性子束 [nv]	カウント数[cps] (CIC は電流値[A])
BF ₃ CH 1	2.934×10^2	7.3×10^2
BF ₃ CH 2	3.534×10^1	8.8×10^1
BF ₃ CH 3	1.508×10^1	3.8×10^1
FC CH 1	2.405×10^2	8.1×10^{-1}
FC CH 2	3.355×10^1	1.1×10^{-1}
FC CH 3	1.368×10^1	4.6×10^{-2}
CIC CH A	1.284×10^1	3.0×10^{-13}
CIC CH B	1.272×10^1	2.9×10^{-13}
WRM I 系	1.914×10^0	1.9×10^{-1}
WRM II 系	7.791×10^1	7.8×10^0
WRM III 系	1.373×10^1	1.4×10^0

第 3.1.8 表 常設の中性子源を装荷した状態での WRM の計数率予測
(30 カラム炉心、全制御棒挿入状態)

チャンネル	カウント数 [cps]
I 系	4.7×10^2
II 系	4.7×10^2
III 系	4.7×10^2

第 3.1.9 表 臨界近接時の各検出器の計数率予測

	各検出器の予測カウント数 [cps] (CIC は A)					
	0 カラム	6 カラム	9 カラム	12 カラム	14 カラム	15 カラム
BF ₃ CH 1	4.7×10^2	5.6×10^3	1.0×10^4	1.7×10^4	3.3×10^4	1.2×10^5
BF ₃ CH 2	8.6×10^1	1.1×10^3	7.8×10^3	2.9×10^4	7.0×10^4	2.8×10^5
BF ₃ CH 3	4.8×10^1	1.1×10^3	2.0×10^3	4.2×10^3	1.5×10^4	8.9×10^4
FC CH 1	5.2×10^{-1}	6.9×10^0	1.3×10^1	2.2×10^1	4.1×10^1	1.5×10^2
FC CH 2	1.1×10^{-1}	1.4×10^0	1.0×10^1	3.8×10^1	9.4×10^1	3.8×10^2
FC CH 3	6.2×10^{-2}	1.5×10^0	2.6×10^0	5.5×10^0	1.9×10^1	1.2×10^2
CIC CH A	3.4×10^{-13}	5.3×10^{-12}	3.7×10^{-11}	1.7×10^{-10}	4.3×10^{-10}	1.7×10^{-9}
CIC CH B	3.3×10^{-13}	8.8×10^{-12}	1.5×10^{-11}	3.1×10^{-11}	1.0×10^{-10}	5.9×10^{-10}
WRM I 系	1.4×10^{-1}	1.5×10^0	3.3×10^0	1.5×10^1	7.6×10^1	3.9×10^2
WRM II 系	5.5×10^{-2}	3.4×10^1	4.7×10^1	7.0×10^1	1.2×10^2	4.0×10^2
WRM III 系	1.3×10^{-2}	9.6×10^0	3.8×10^1	8.3×10^1	1.7×10^2	6.3×10^2

第 3.2.1 表 過剰反応度

	過剰反応度 [% $\Delta k/k$]
30 カラム炉心	14.4
24 カラム炉心	11.9
18 カラム炉心	5.1

第 3.3.1 表 臨界制御棒位置

	臨界制御棒位置* [mm]	解析用臨界制御棒位置* [mm]
30 カラム炉心	1490 ($k=1.0$)	1450 ($k=0.9948$)
24 カラム炉心	1800 ($k=1.0$)	1740 ($k=0.9918$)
18 カラム炉心	2500 ($k=1.0$)	2465 ($k=0.9962$)

*制御棒位置：燃料領域と下部可動反射体領域の境界が 0mm である。

第 3.4.1 表 制御棒 1 対の反応度価値

	制御棒反応度価値* [% $\Delta k/k$]			
	C	R1	R2	R3
30 カラム炉心	4.9	3.3	1.2	0.51
24 カラム炉心	3.2	3.4	1.5	0.69
18 カラム炉心	1.9	2.7	1.7	0.92

*制御棒を解析用臨界制御棒位置に保持し、当該制御棒の全挿入及び全引き抜き状態から評価した反応度価値

表 3.5.1 表 制御棒の反応度制御能力

	反応度制御能力 (% $\Delta k/k$)		
	30 カラム炉心	24 カラム炉心	18 カラム炉心
全制御棒挿入	47.8	53.6	56.3
C スタック	35.1	50.7	54.8
R1 スタック	33.3	36.2	41.3
R2 スタック	42.2	43.6	40.2
R3 スタック	46.8	51.8	52.0

表 3.5.2 表 炉停止余裕

	炉停止余裕 (% $\Delta k/k$)		
	30 カラム炉心	24 カラム炉心	18 カラム炉心
全制御棒挿入	33.4	41.8	50.2
C スタック	20.7	38.8	49.7
R1 スタック	18.9	24.4	36.2
R2 スタック	27.8	31.7	35.1
R3 スタック	32.4	39.9	46.9
ワンロッドスタック*	28.6	38.4	47.5

*臨界試験の方法(落下法)による評価

第 3.5.3 表 使用前検査の評価法による炉停止余裕

	炉停止余裕 (% $\Delta k/k$)		
	30 カラム炉心	24 カラム炉心	18 カラム炉心
全制御棒挿入	26.3	27.9	27.6
スタックあり	21.4	24.5	24.9

第 3.6.1 表 後備停止系による炉停止余裕の評価に用いたデータ

項目	データ	備考
ペレットの データ	天然 B の濃度	30.2wt%
	^{10}B の存在比	18.4wt%
	密度	1.89g/cm ³
	寸法	ϕ 12.6mm × 12.6mm
ペレット個数	14,000 個／基	
ペレット充填率	64%	実験値
作動する後備停止系の基数	16	

第 3.6.2 表 後備停止系による炉停止余裕及び実効増倍率

後備停止系の反応度制御能力	0.25 $\Delta k/k$
高温試験運転時の制御すべき反応度	0.09 $\Delta k/k$
低温状態の炉停止余裕	0.16 $\Delta k/k$
実効増倍率	0.86

第 3.7.1 表 動特性パラメータ計算用速中性子群群構造（縮約群 12 群モデル）

群			レサジー (下限)	エネルギー (下限、eV)	群			レサジー (下限)	エネルギー (下限、eV)
1)	2)	3)			1)	2)	3)		
1	1	1*	0.25	7.79×10^6	9	35	8.75	1.59×10^3	
		2	0.50	6.07×10^6		19	36	9.00	1.23×10^3
		3	0.75	4.72×10^6		37	9.25	961	
		4	1.00	3.68×10^6		38	9.50	748	
		5	1.25	2.87×10^6		39	9.75	583	
	2	6	1.50	2.23×10^6		40	10.00	454	
		7	1.75	1.74×10^6		41	10.25	354	
2	3	8	2.00	1.35×10^6	21	42	10.50	275	
	4	9	2.25	1.05×10^6		43	10.75	215	
	5	10	2.50	8.21×10^5		44	11.00	167	
3	6	11	2.75	6.39×10^5		45	11.25	130	
	7	12	3.00	4.98×10^5		46	11.50	101	
4	8	13	3.25	3.88×10^5	22	47	11.75	78.9	
	9	14	3.50	3.02×10^5		48	12.00	61.4	
5	10	15	3.75	2.35×10^5		49	12.25	47.9	
	11	16	4.00	1.83×10^5		50	12.50	37.3	
6	12	17	4.25	1.43×10^5	23	51	12.75	29.0	
	13	18	4.50	1.11×10^5		52	13.00	22.6	
7	14	19	4.75	8.65×10^4		53	13.25	17.6	
	15	20	5.00	6.74×10^4		54	13.50	13.7	
		21	5.25	5.25×10^4		55	13.75	10.68	
8	16	22	5.50	4.09×10^4	24	56	14.00	8.32	
		23	5.75	3.18×10^4		57	14.25	6.48	
		24	6.00	2.48×10^4		58	14.50	5.04	
		25	6.25	1.93×10^4		59	14.75	3.93	
		26	6.50	1.50×10^4		60	15.00	3.06	
	17	27	6.75	1.17×10^4		61	15.25	2.38	
		28	7.00	9.12×10^3	25	62	15.50	1.86	
		29	7.25	7.10×10^3		63	15.75	1.44	
	18	30	7.50	5.53×10^3		64	16.00	1.125	
		31	7.75	4.31×10^3		65	16.25	0.876	
		32	8.00	3.36×10^3		66	16.50	0.683	
		33	8.25	2.61×10^3		67	16.75	0.532	
		19	8.50	2.04×10^3		68	17.00	0.414	

* 1 群の上限エネルギーは 10^7 eV である。

1)縮約群

2)少数组

3)多群

第 3.7.2 表 動特性パラメータ計算用熱中性子群群構造（縮約群 12 群モデル）

群			エネルギー (上限、eV)	幅(eV)	群			エネルギー (上限、eV)	幅(eV)
1)	2)	3)			1)	2)	3)		
12	45	1	0.002	0.002	10	33	26	0.55	0.1
		2	0.004	0.002			27	0.65	0.1
	44	3	0.006	0.002		32	28	0.75	0.1
		4	0.008	0.002			29	0.85	0.1
	43	5	0.015	0.007		31	30	0.95	0.1
		6	0.025	0.01			31	0.99	0.04
	42	7	0.035	0.01		30	32	1.01	0.02
		8	0.045	0.01			33	1.03	0.02
	41	9	0.055	0.01		34	34	1.045	0.015
		10	0.065	0.01			35	1.055	0.01
	40	11	0.075	0.01		29	36	1.065	0.01
		12	0.085	0.01			37	1.08	0.015
	39	13	0.105	0.02		38	38	1.10	0.02
		14	0.135	0.03			39	1.16	0.06
11	39	15	0.165	0.03		28	40	1.24	0.08
		16	0.195	0.03			41	1.35	0.11
	38	17	0.225	0.03		27	42	1.45	0.1
		18	0.255	0.03			43	1.55	0.1
	37	19	0.285	0.03		27	44	1.65	0.1
		20	0.295	0.01			45	1.75	0.1
	36	21	0.305	0.01		26	46	1.85	0.1
		22	0.335	0.03			47	1.95	0.1
	35	23	0.35	0.015			48	2.05	0.1
		24	0.39	0.04		26	49	2.15	0.1
		25	0.45	0.06			50	2.38	0.23

- 1)縮約群
2)少數群
3)多群

第 3.7.3 表 30 カラム炉心の動特性パラメータ

$\beta_{eff} = 7.060 \times 10^{-3}$ $l = 1.24 \times 10^{-3}$ $k_{eff} = 0.9988$			
群	$\beta(i)$	$\beta(i)/\beta_{eff}$	λ_i (sec ⁻¹)
1	1.883×10^{-4}	2.667×10^{-2}	0.0127
2	9.110×10^{-4}	1.290×10^{-1}	0.0317
3	2.872×10^{-3}	4.068×10^{-1}	0.115
4	1.326×10^{-3}	1.879×10^{-1}	0.311
5	1.493×10^{-3}	2.115×10^{-1}	1.40
6	2.692×10^{-4}	3.813×10^{-2}	3.87

第 3.7.4 表 24 カラム炉心の動特性パラメータ

$\beta_{eff} = 7.067 \times 10^{-3}$ $I = 1.55 \times 10^{-3}$ $k_{eff} = 0.9970$			
群	$\beta(i)$	$\beta(i)/\beta_{eff}$	λ_i (sec ⁻¹)
1	1.881×10^{-4}	2.662×10^{-2}	0.0127
2	9.110×10^{-4}	1.289×10^{-1}	0.0317
3	2.875×10^{-3}	4.068×10^{-1}	0.115
4	1.328×10^{-3}	1.879×10^{-1}	0.311
5	1.495×10^{-3}	2.116×10^{-1}	1.40
6	2.697×10^{-4}	3.817×10^{-2}	3.87

第 3.7.5 表 18 カラム炉心の動特性パラメータ

$\beta_{eff} = 7.104 \times 10^{-3}$ $I = 1.82 \times 10^{-3}$ $k_{eff} = 1.0020$			
群	$\beta(i)$	$\beta(i)/\beta_{eff}$	λ_i (sec ⁻¹)
1	1.888×10^{-4}	2.657×10^{-2}	0.0127
2	9.153×10^{-4}	1.288×10^{-1}	0.0317
3	2.890×10^{-3}	4.068×10^{-1}	0.115
4	1.335×10^{-3}	1.880×10^{-1}	0.311
5	1.503×10^{-3}	2.116×10^{-1}	1.40
6	2.718×10^{-4}	3.823×10^{-2}	3.87

第 3.8.1 表 各炉心毎の E05 カラム FC 装荷位置での出力換算係数

	出力換算係数 [W/cps]	軸方向評価位置 [mm]
30 カラム炉心	2.0×10^{-4}	652.5
24 カラム炉心	1.8×10^{-4}	942.5
18 カラム炉心	1.7×10^{-4}	1522.5

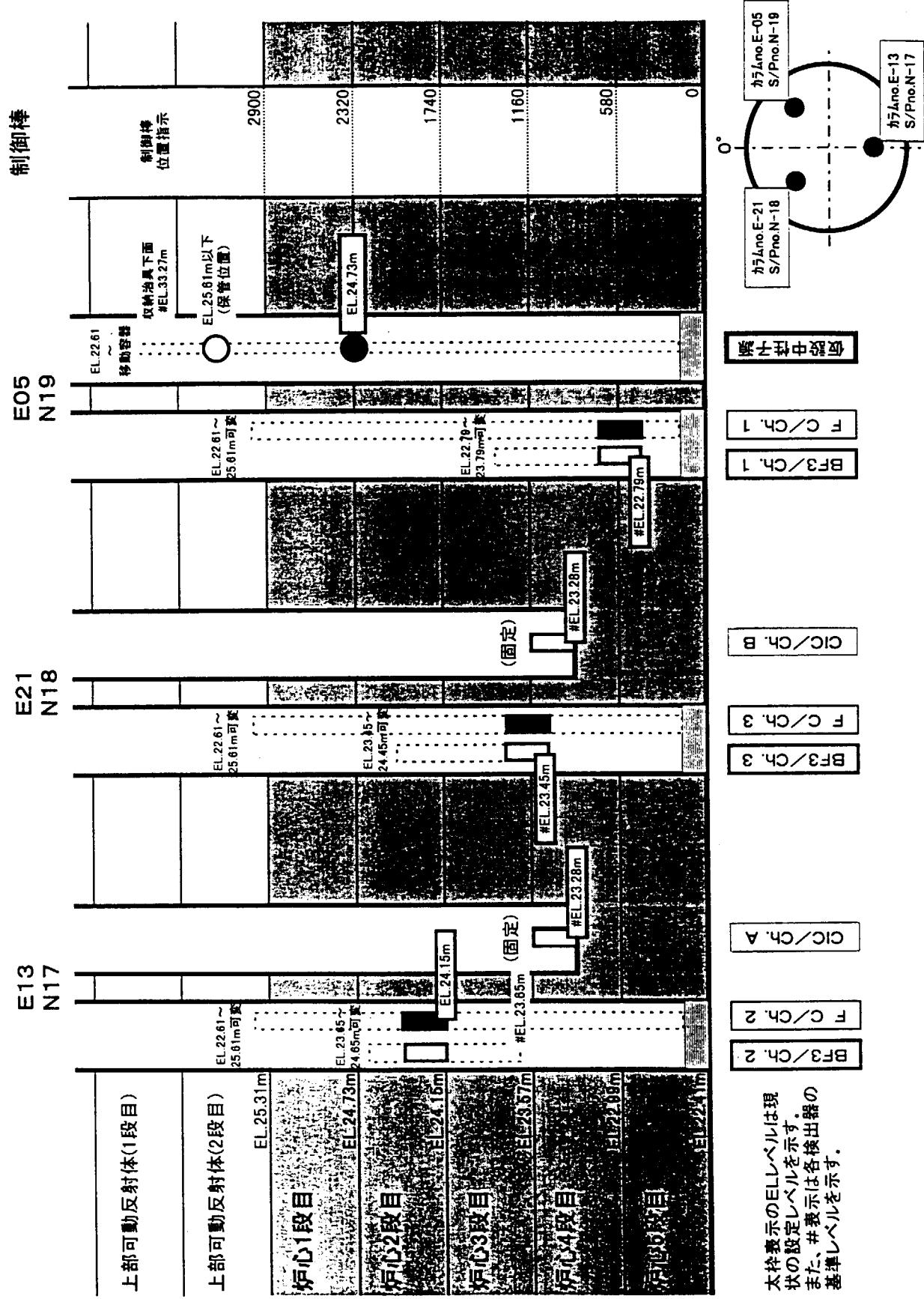
注：炉心出力=FC の計数率 × 出力換算係数

第 3.8.2 表 WRM で 40000cps となる出力

	WRM で 40000cps となる出力 [W]
30 カラム炉心	87
24 カラム炉心	51
18 カラム炉心	14

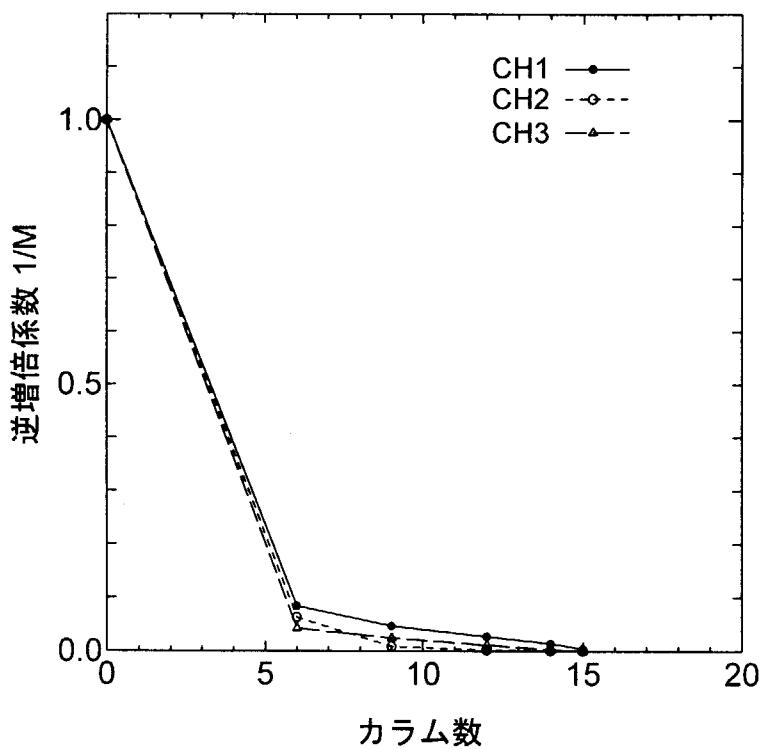
第 3.8.3 表 CIC での出力換算係数

	チャンネル	出力換算係数 [W/A]
30 カラム炉心	CH A	3.0×10^7
	CH B	3.0×10^7
24 カラム炉心	CH A	2.5×10^7
	CH B	2.5×10^7
18 カラム炉心	CH A	2.6×10^7
	CH B	2.6×10^7

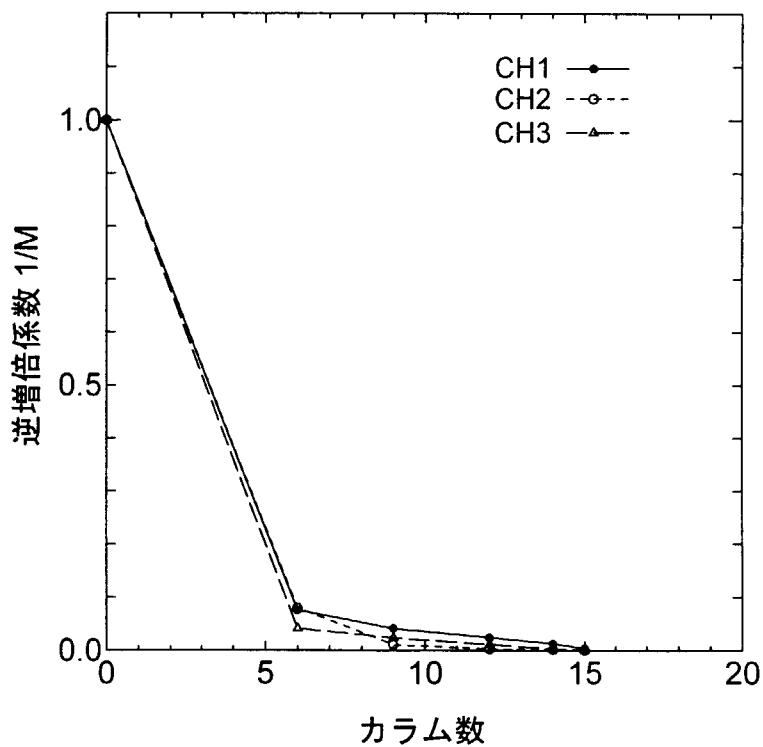


注) 太枠表示のELレベルは現状の設定レベルを示す。
また、#表示は各検出器の基準レベルを示す。

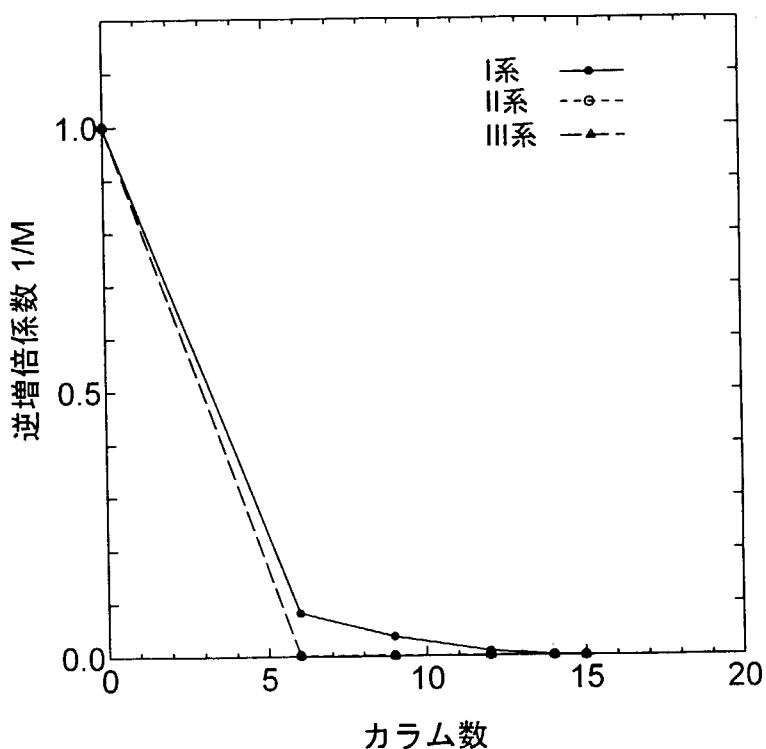
第3.1.1図 仮設中性子検出器及び仮設中性子源の配置設定
(炉心内軸方向)



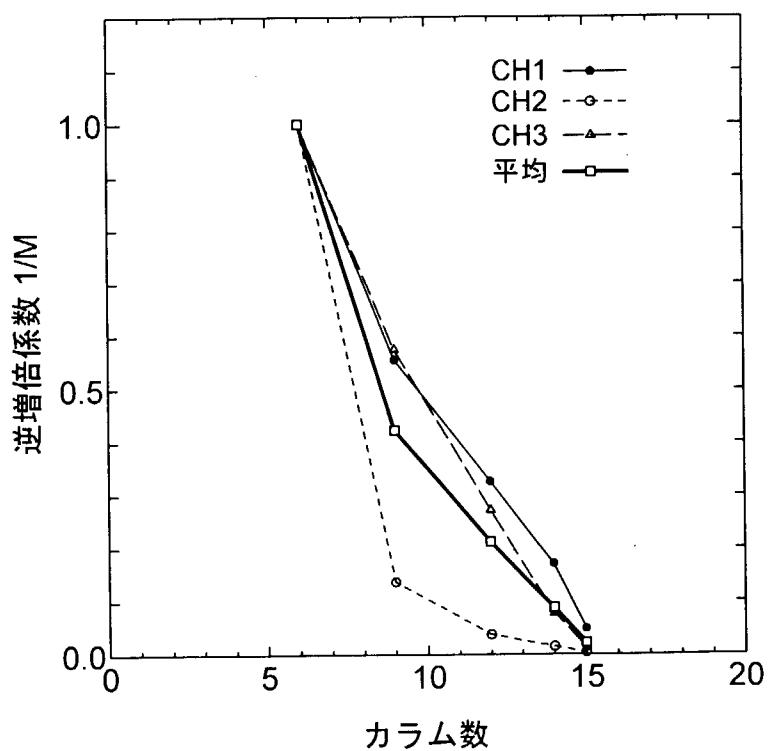
第3.1.2図 0カラムを基準としたBF₃による1/M曲線

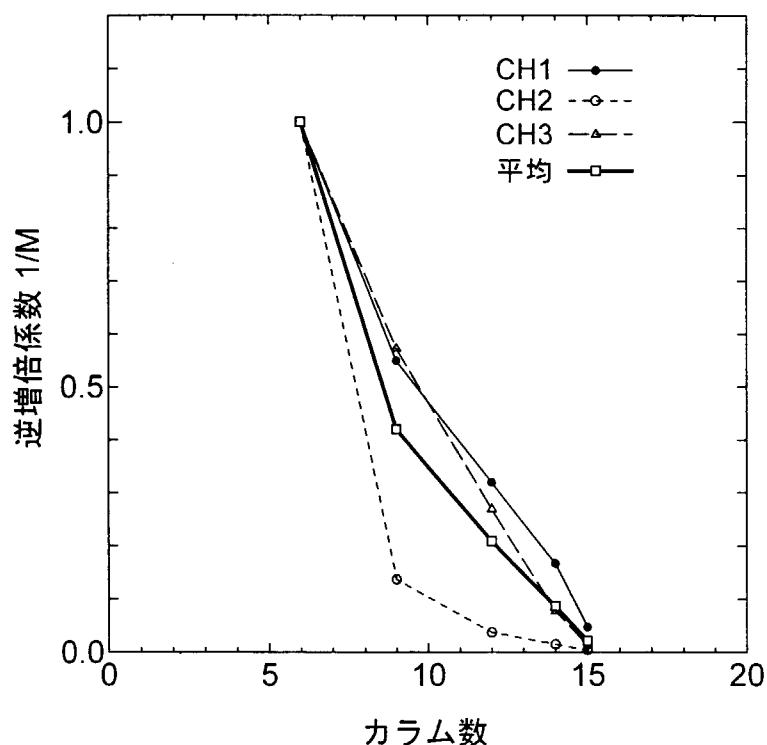


第3.1.3図 0カラムを基準としたFCによる1/M曲線

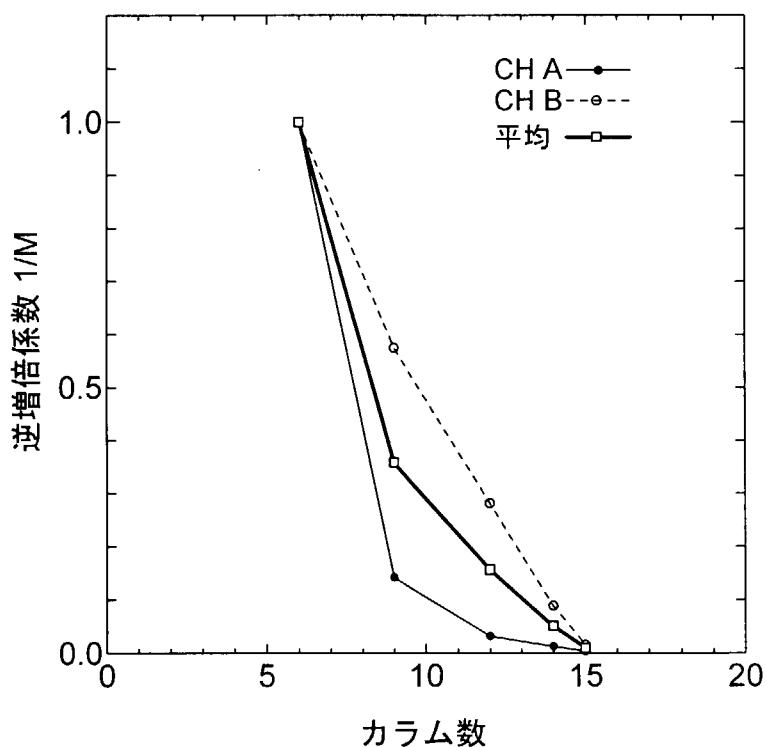


第3.1.4図 0カラムを基準としたWRMによる1/M曲線

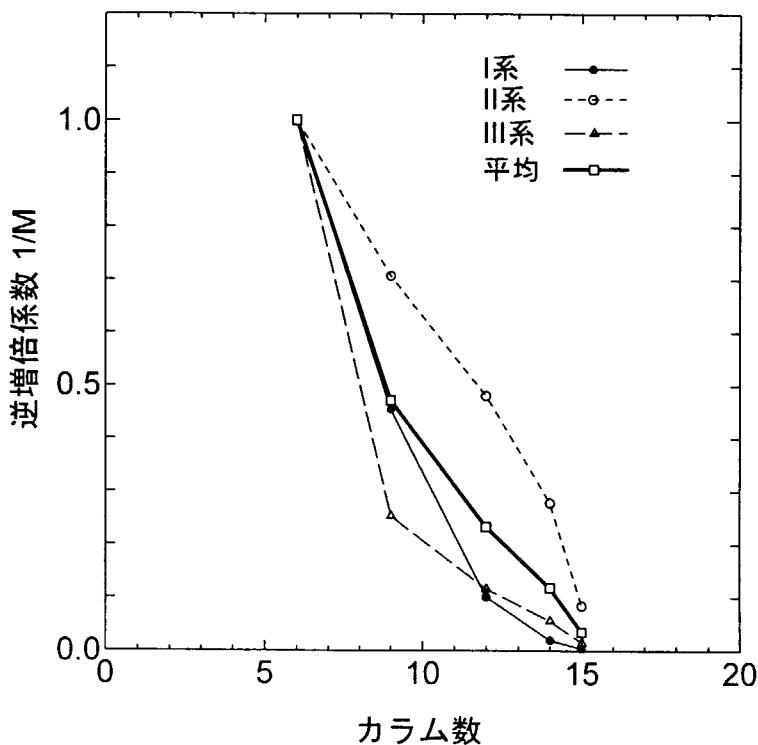
第3.1.5図 6カラムを基準としたBF₃による1/M曲線



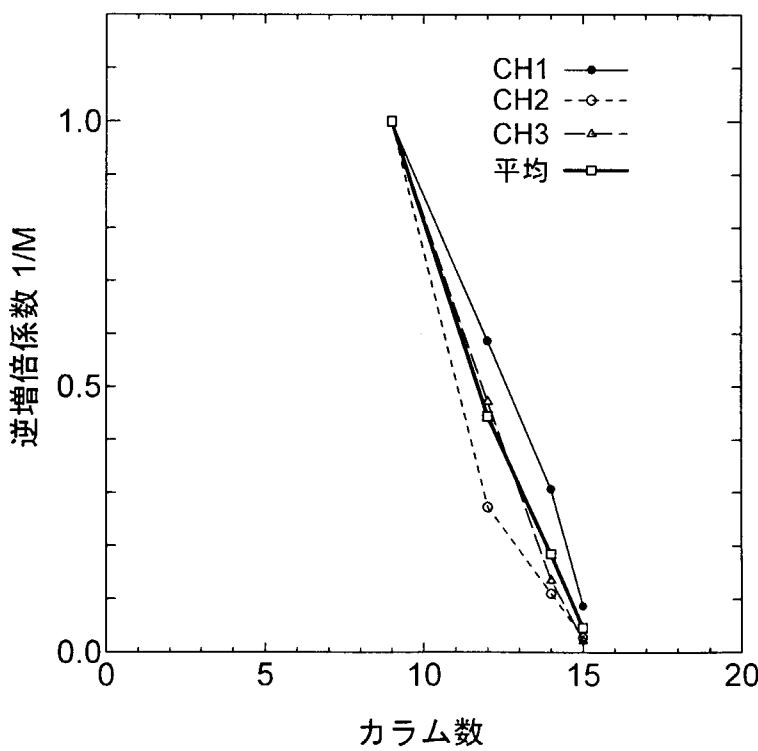
第3.1.6図 6カラムを基準としたFCによる1/M曲線

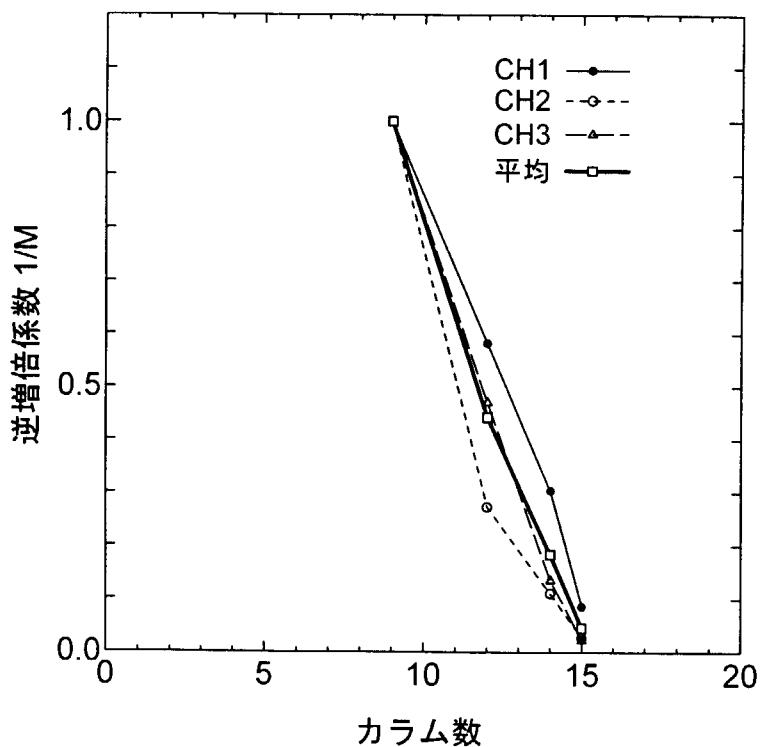


第3.1.7図 6カラムを基準としたCICによる1/M曲線

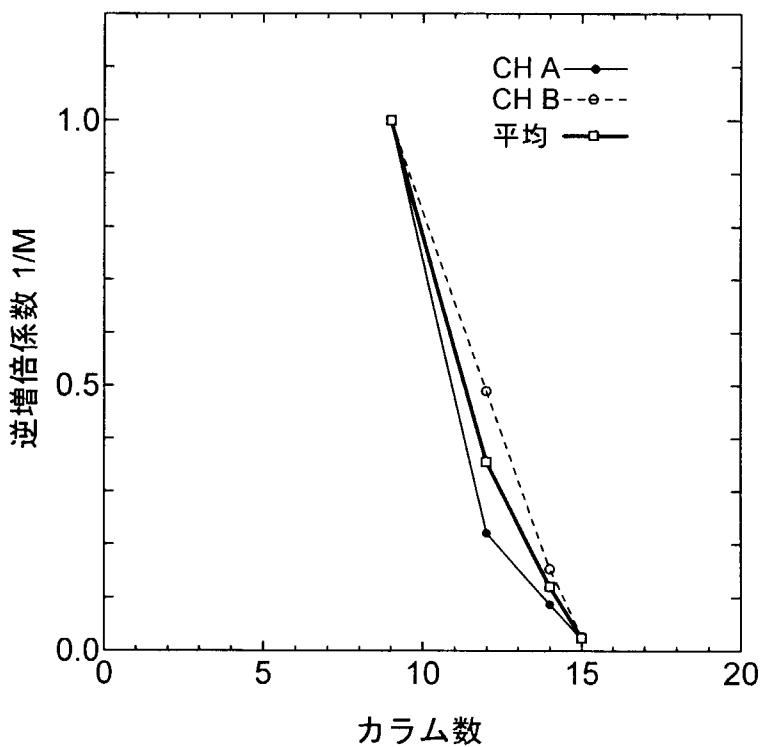


第3.1.8図 6カラムを基準としたWRMによる1/M曲線

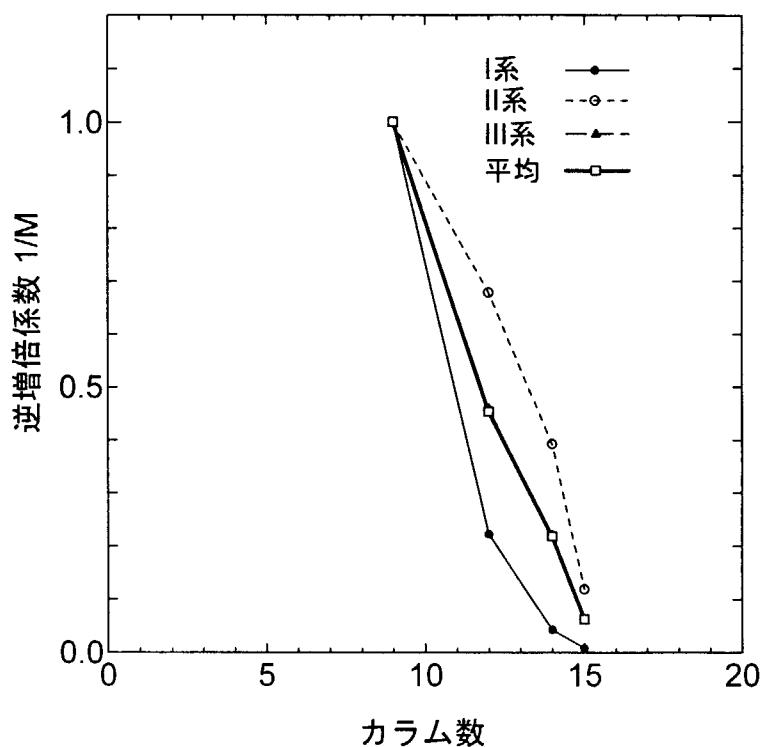
第3.1.9図 9カラムを基準としたBF₃による1/M曲線



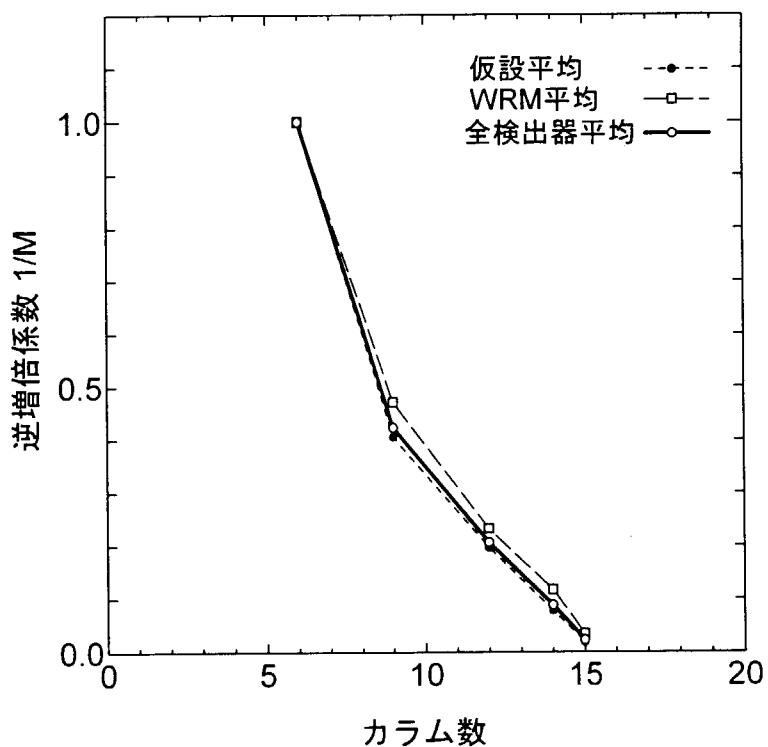
第3.1.10図 9カラムを基準としたFCによる1/M曲線



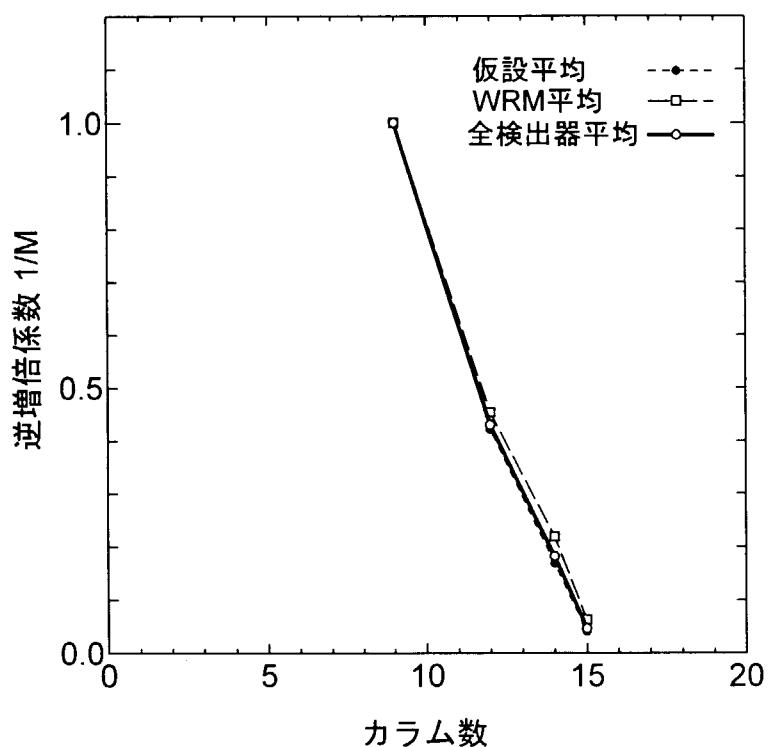
第3.1.11図 9カラムを基準としたCICによる1/M曲線



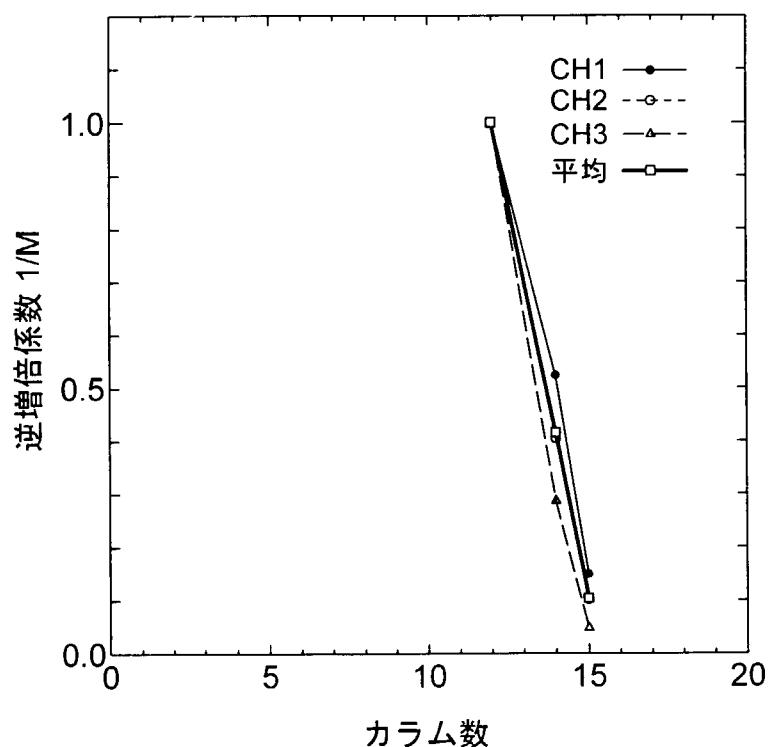
第3.1.12図 9カラムを基準としたWRMによる1/M曲線

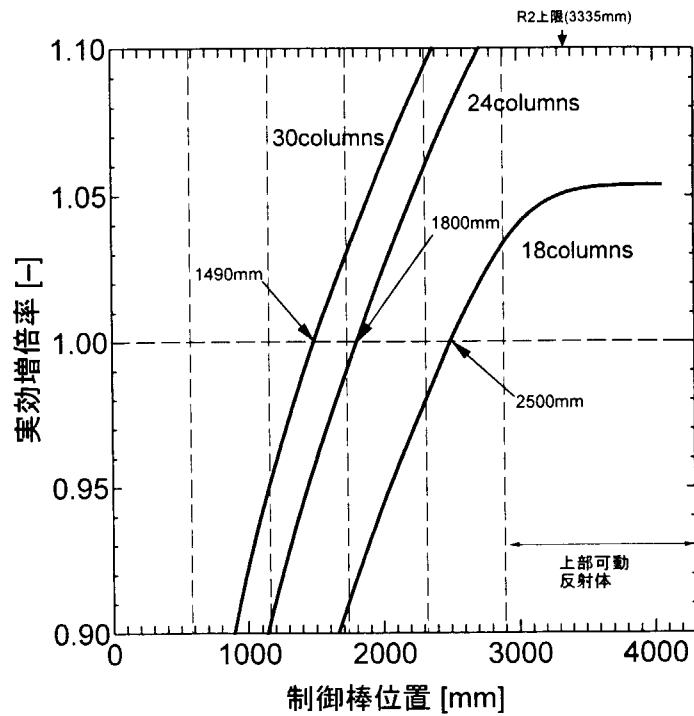


第3.1.13図 6カラムを基準とした平均の1/M曲線

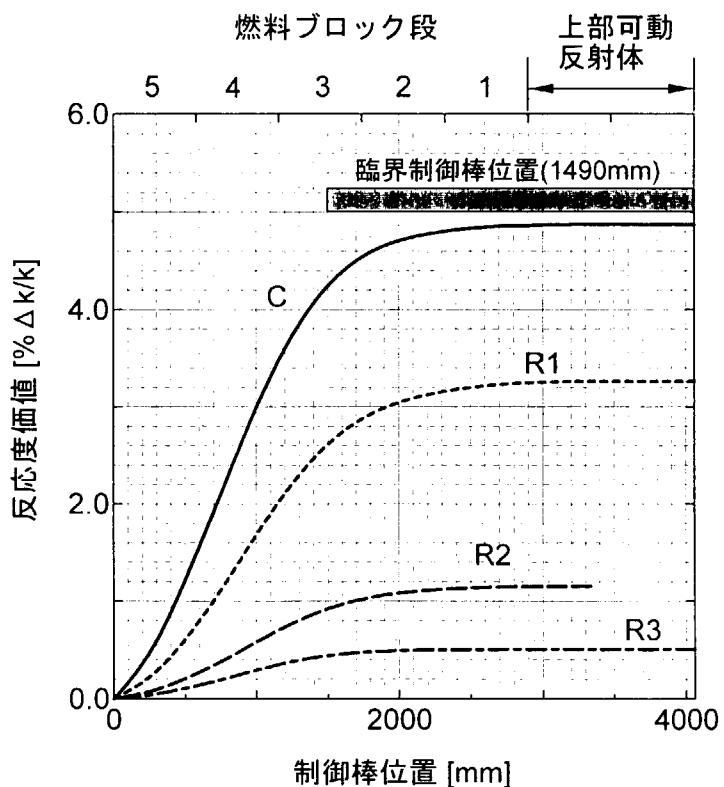


第3.1.14図 9カラムを基準とした平均の1/M曲線

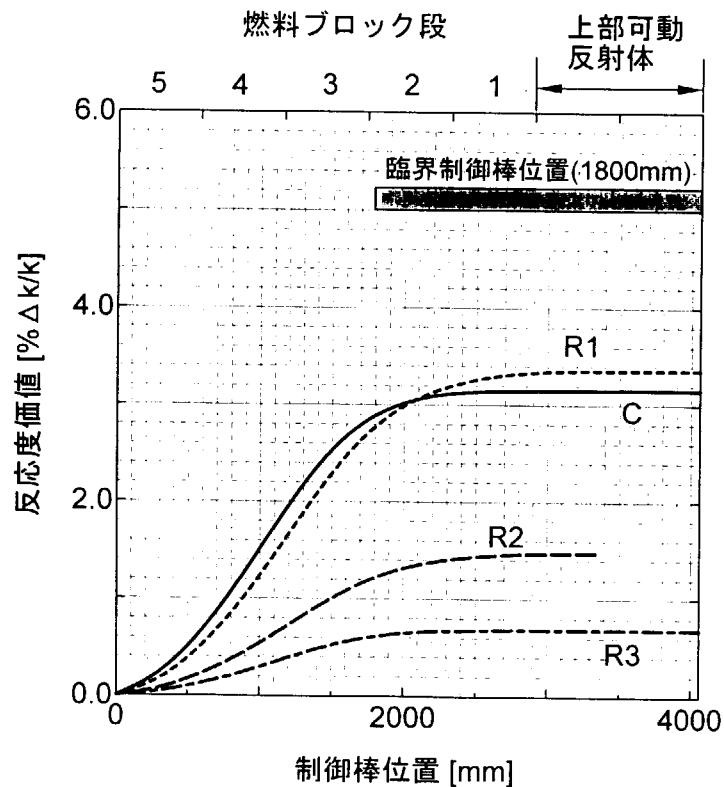
第3.1.15図 12カラムを基準としたBF₃による1/M曲線



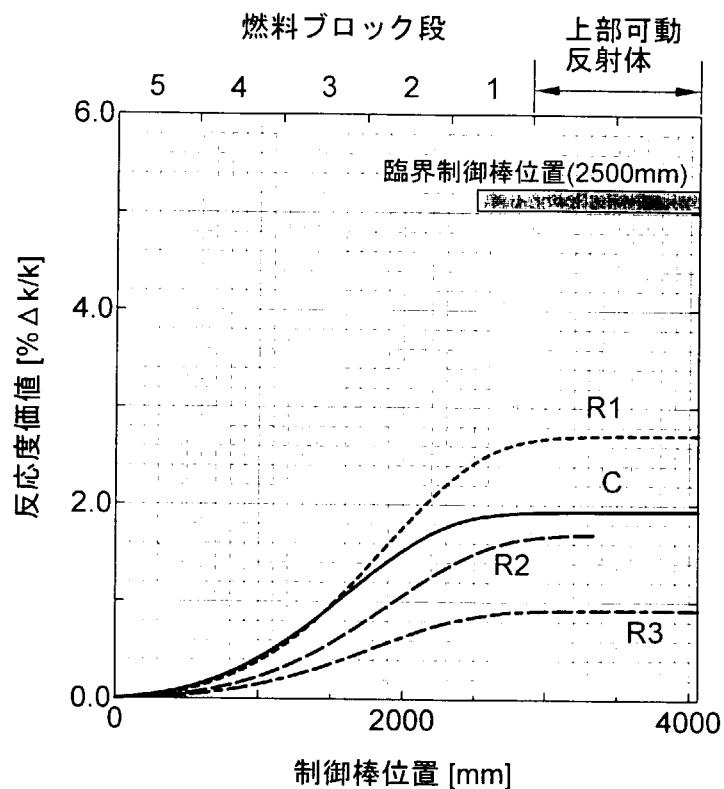
第3.3.1図 制御棒をそろえた状態での制御棒位置と実効増倍率の関係



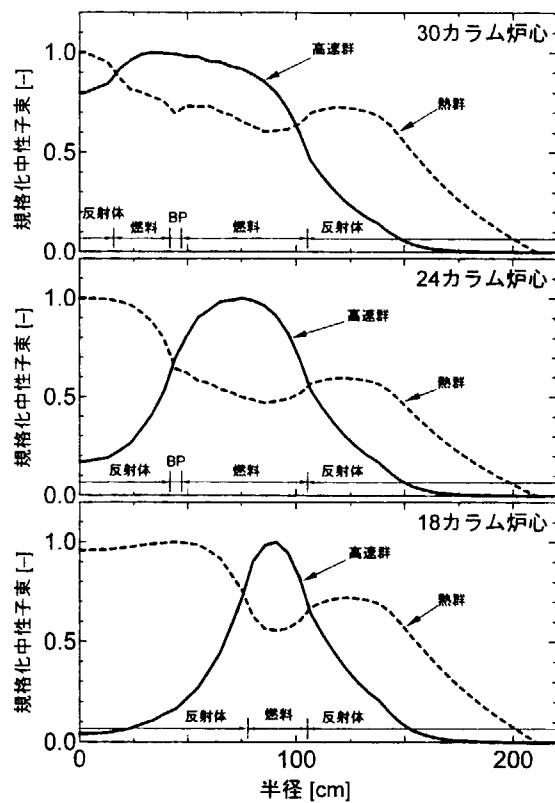
第3.4.1図 30カラム炉心での制御棒反応度価値曲線



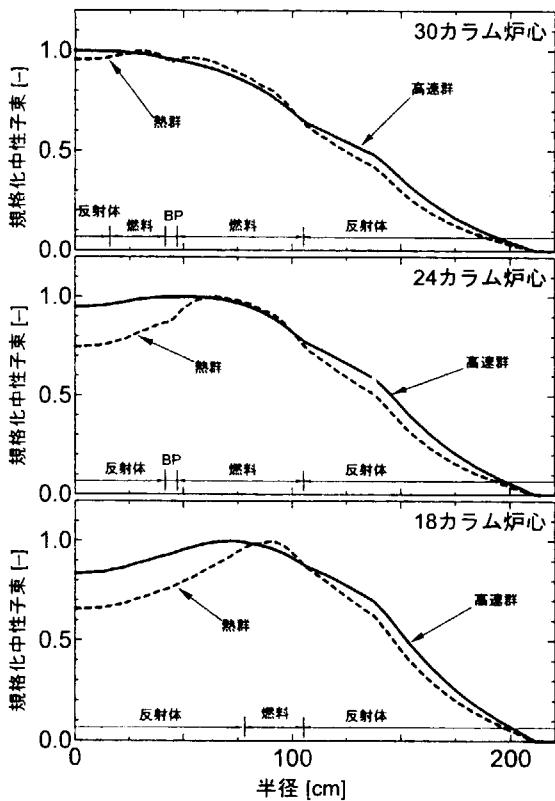
第3.4.2図 24カラム炉心での制御棒反応度価値曲線



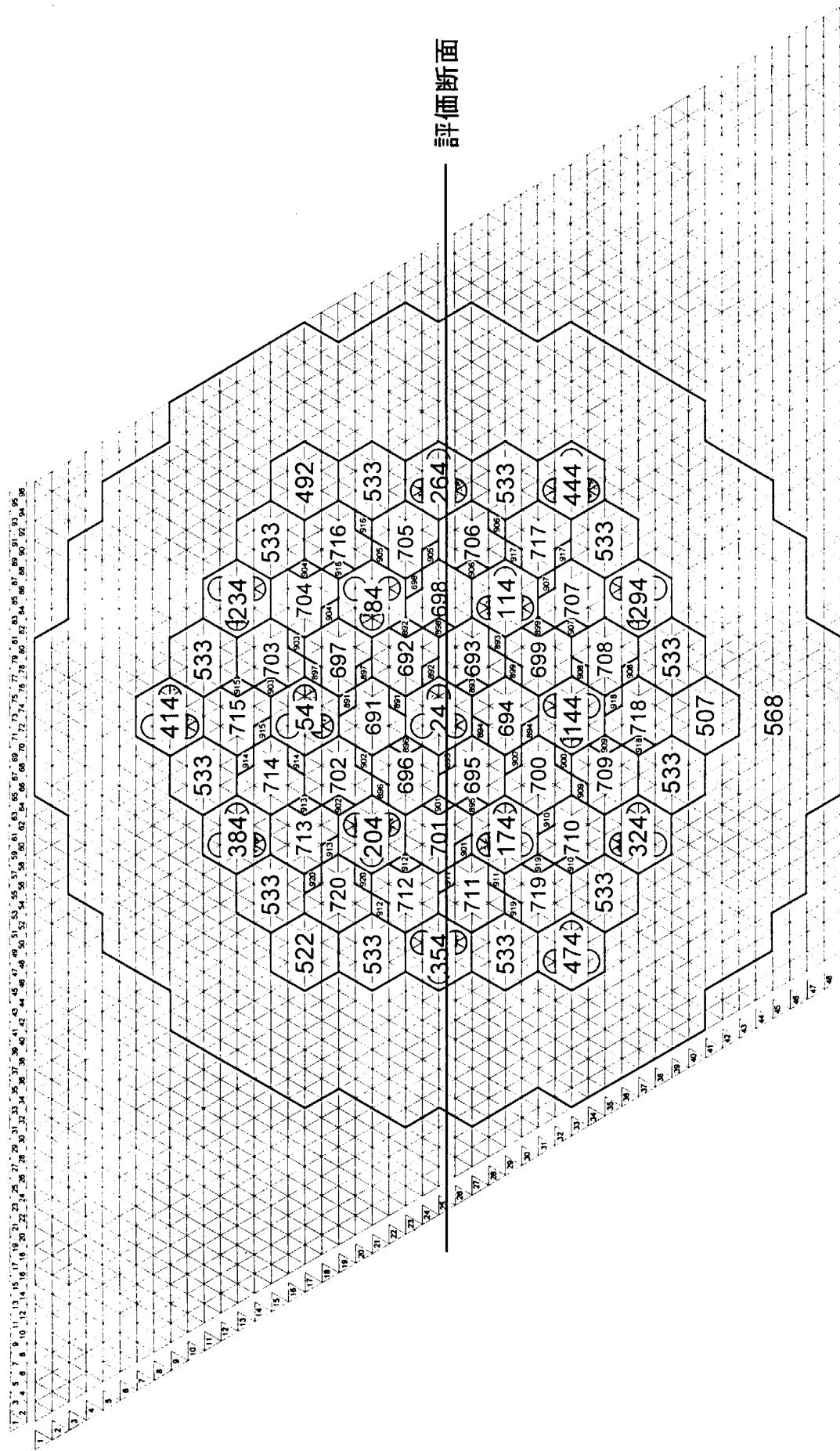
第3.4.3図 18カラム炉心での制御棒反応度価値曲線



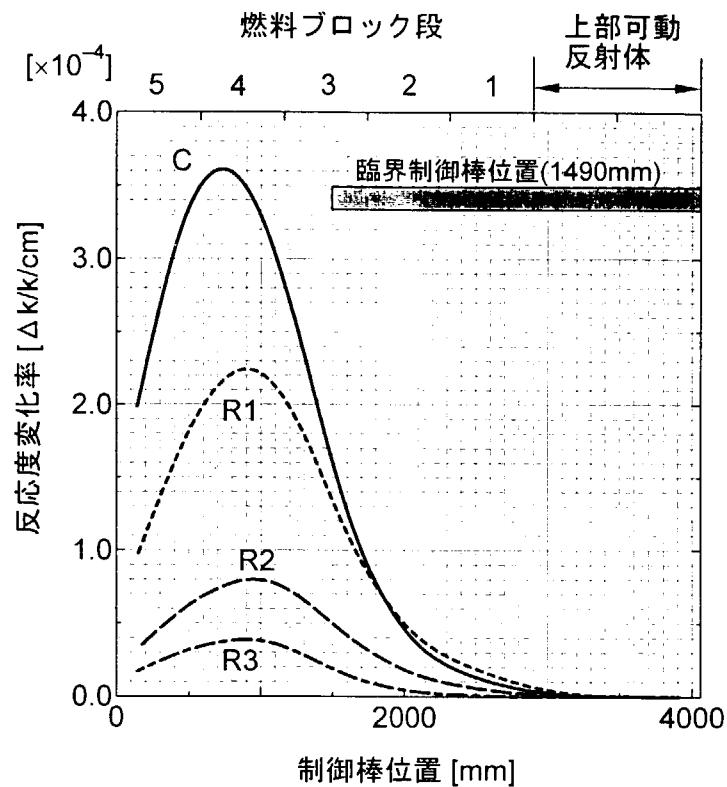
第3.4.4図 各炉心における高速群及び熱群中性子束の半径方向分布



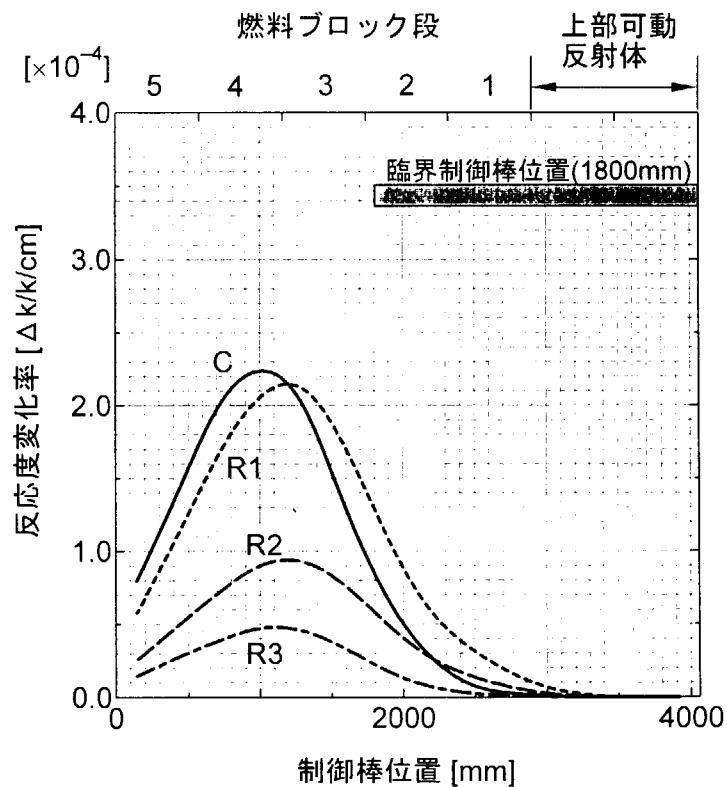
第3.4.5図 各炉心における高速群及び熱群随伴中性子束の半径方向分



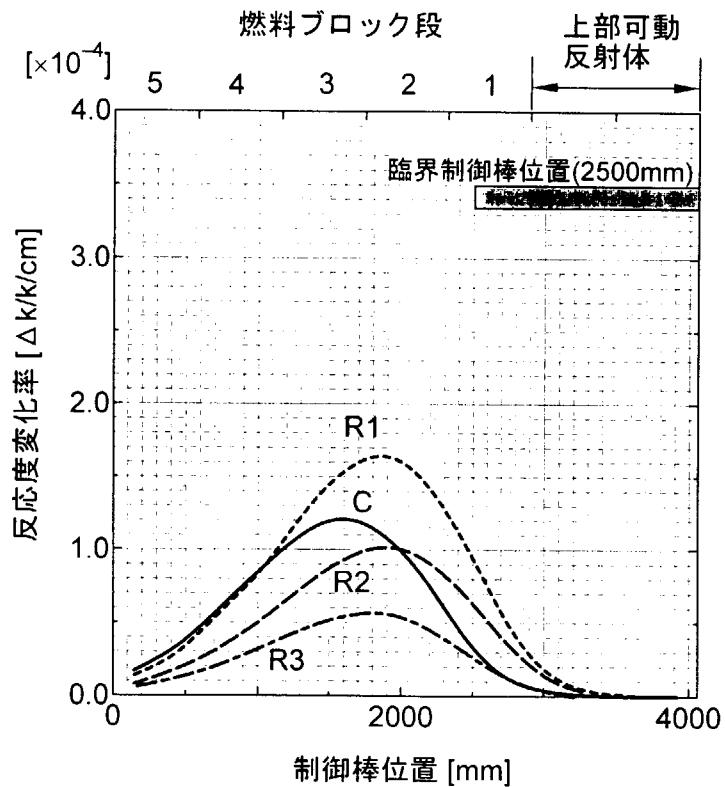
第3.4.6図 中性子束分布評価断面



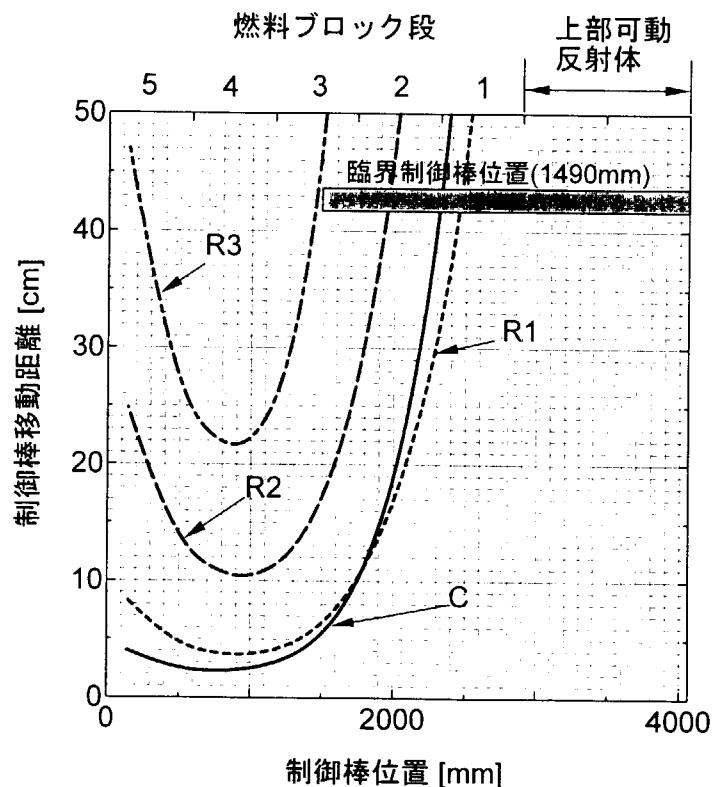
第3.4.7図 30カラム炉心での制御棒反応度変化率曲線

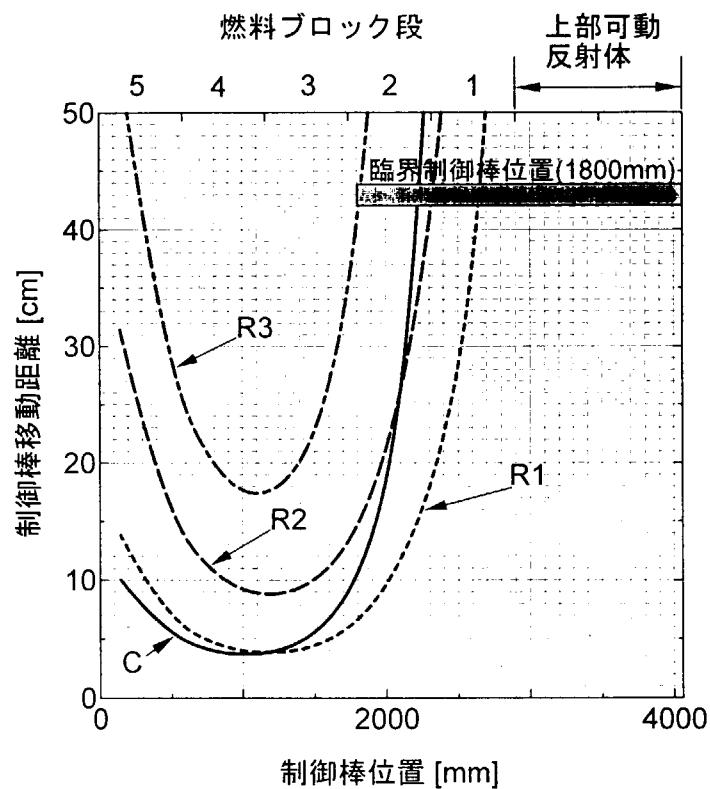


第3.4.8図 24カラム炉心での制御棒反応度変化率曲線

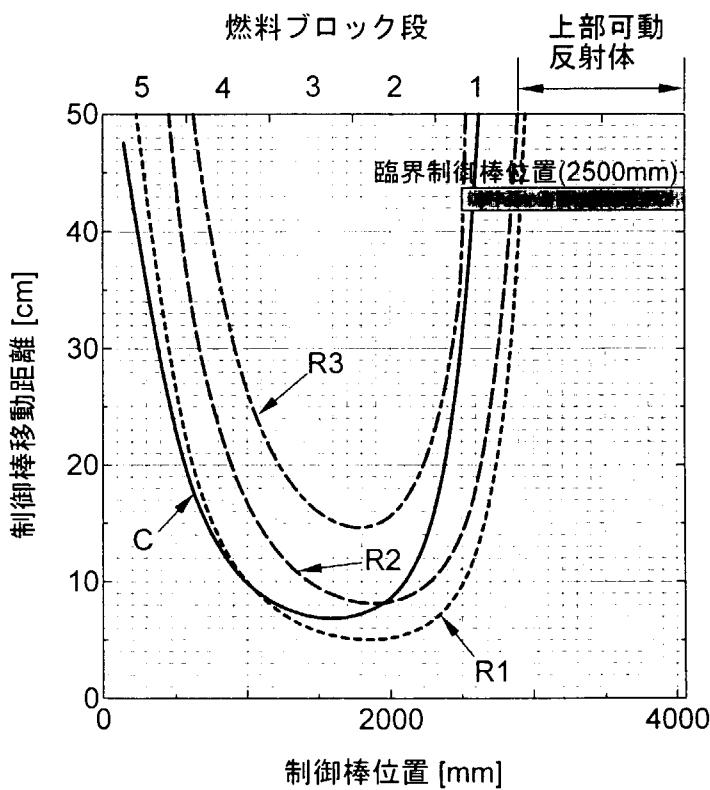


第3.4.9図 18カラム炉心での制御棒反応度変化率曲線

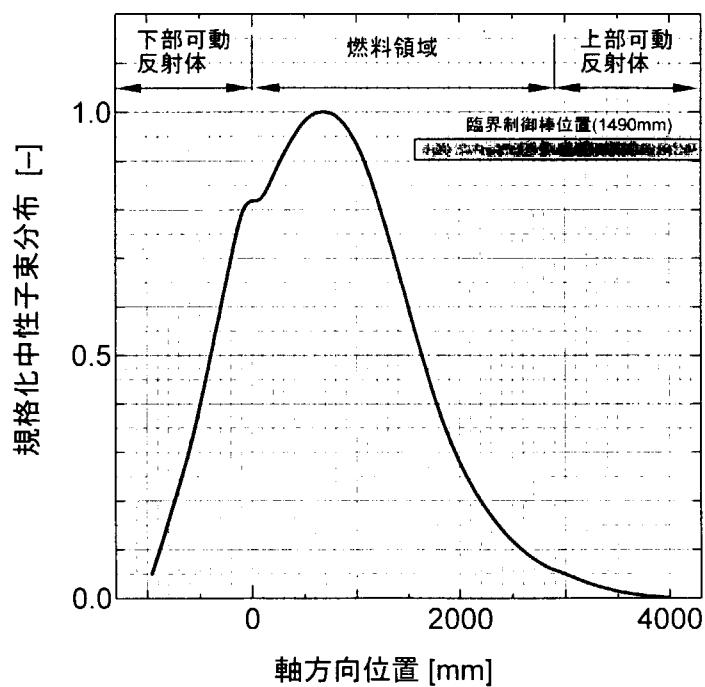
第3.4.10図 30カラム炉心における0.08% $\Delta k/k$ の反応度変化に
対応する制御棒移動距離



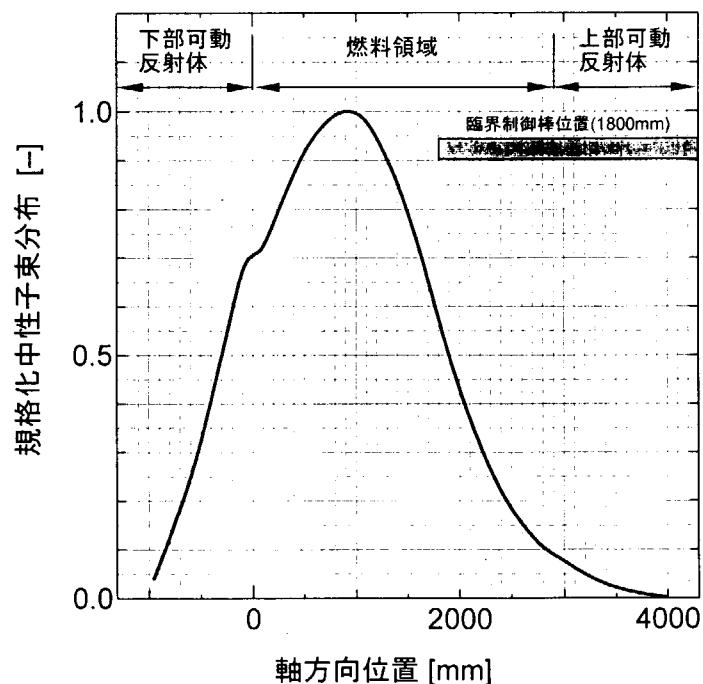
第3.4.11図 24カラム炉心における $0.08\% \Delta k/k$ の反応度変化に
対応する制御棒移動距離



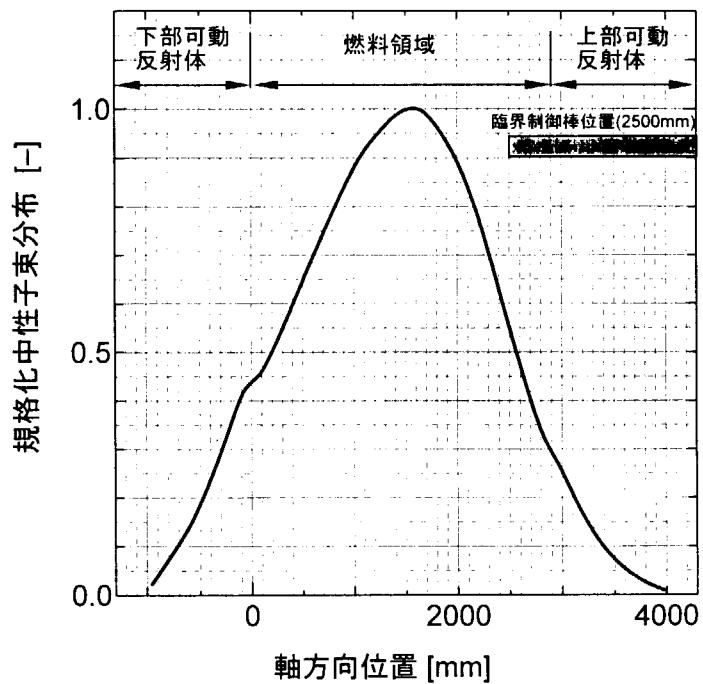
第3.4.12図 18カラム炉心における $0.08\% \Delta k/k$ の反応度変化に
対応する制御棒移動距離



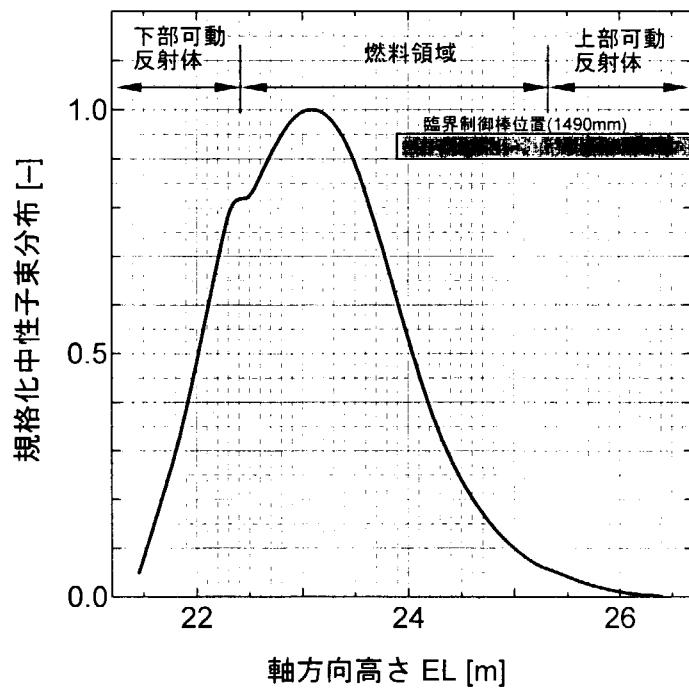
第3.8.1図 30カラム炉心におけるE05カラム内FC挿入位置での軸方向中性子束分布（制御棒位置表示）



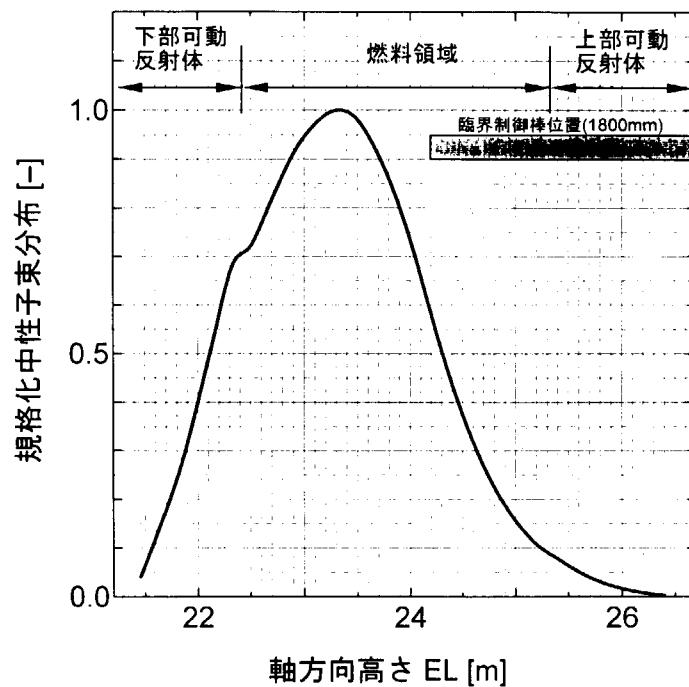
第3.8.2図 24カラム炉心におけるE05カラム内FC挿入位置での軸方向中性子束分布（制御棒位置表示）



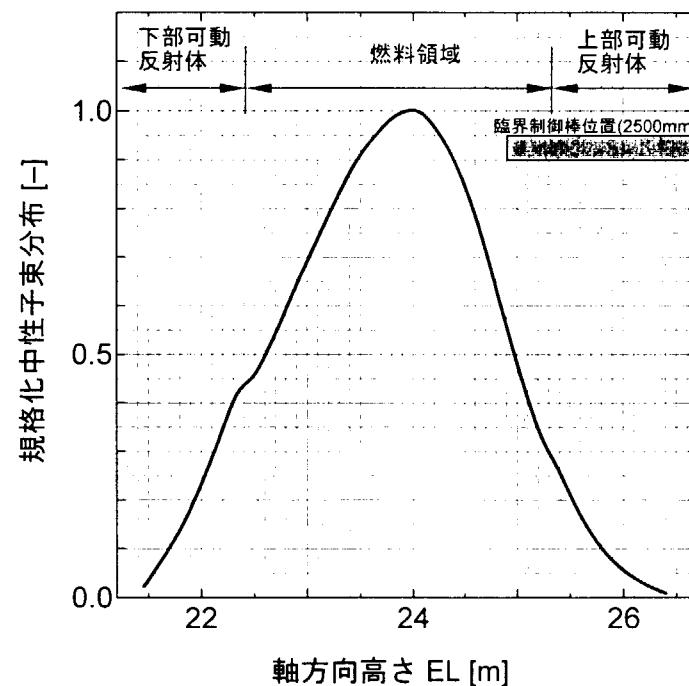
第3.8.3図 18カラム炉心におけるE05カラム内FC插入位置での軸方向中性子束分布（制御棒位置表示）



第3.8.4図 30カラム炉心におけるE05カラム内FC插入位置での軸方向中性子束分布（EL表示）



第3.8.5図 24カラム炉心におけるE05カラム内FC挿入位置での軸方向中性子束分布(EL表示)



第3.8.6図 18カラム炉心におけるE05カラム内FC挿入位置での軸方向中性子束分布(EL表示)

4.まとめ

HTTRの解析精度の向上を目標として、解析モデルの改良を行い、モンテカルロ計算との比較により解析モデルの精度の検討を行った。解析モデルの改良により、BP反応度についてこれまで設計に用いてきたモデルと比較して10%程度の精度の向上を図った。更に、制御棒挿入孔等からのストリーミング効果を直接取り扱うことができるよう解析モデルを改良し、ストリーミング効果が初期炉心で約 $1\%\Delta k/k$ であることを確認した。

ここで改良した解析モデルを用いて、燃料装荷に伴う実効増倍率、最小臨界カラム数及び逆増倍曲線の評価を行い、30カラム炉心、24カラム炉心及び18カラム炉心について、過剰反応度、臨界制御棒位置、制御棒反応度値、制御棒反応度変化率、炉停止余裕、後備停止系による炉停止余裕、動特性パラメータ、中性子束分布及び出力換算係数の解析を行った。これらの解析を通して、逆増倍係数を測定することにより初回臨界カラム数を精度良く予測できること、HTTRの環状炉心では炉心中心よりも燃料に隣接する位置にある制御棒の反応度値が大きくなること等の知見が得られた。

ここで得られたデータは臨界試験計画や試験手順を詳細化する上でも有益なものであった。今後臨界試験結果との比較を行いモデル及び試験結果の妥当性を検討する。更に、モデルの改良を図り詳細な解析を行い出力上昇試験に関する解析を進めるとともに、環状炉心の特性評価を進めていくこととした。

謝辞

本解析を行うにあたり、武藏工業大学原子力研究所金子義彦教授、高温工学試験研究炉開発部安藤弘栄氏、及び同部 HTTR 技術開発室の室員各位からはデータの提供や貴重な助言を頂いた。また、エネルギーシステム研究部炉物理研究室の秋濃藤義主任研究員及び山根剛副主任研究員の両氏からは貴重な助言を頂いた。また高温工学試験研究炉開発部長田中利幸氏及び同部 HTTR 技術開発室長茂木春義氏からは助言と励ましの言葉を頂いた。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) K. Yamashita, et al., "Nuclear Design of the High-Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)", Nucl. Sci. Eng., 122, 212 (1996).
- 2) 新藤 他、「高温ガス冷却炉・格子燃焼特性解析コード・DELIGHT-7-」、JAERI-M 90-48 (1990).
- 3) K. D. Lathrop and F. W. Brinkley, "TWOTRAN-II: An Interfaced Exportable Version of the TWOTRAN Code for Two-Dimensional Transport," LA-484-MS, Los Alamos National Laboratory (1973).
- 4) 原田、山下、「高温工学試験研究炉の炉心核特性解析コード CITATION-1000VP」、JAERI-M 89-135 (1989).
- 5) 奥村 他、「SRAC95;汎用核計算コードシステム」、JAERI-DATA/Code 96-015 (1996).
- 6) 森、中川、「MVP/GMVP 連続エネルギー法及び多群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード」、JAERI-DATA/Code 94-007、(1994).
- 7) 山下 他、「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」、JAERI-M 88-245、(1988).
- 8) 藤本 他、私信.
- 9) 野尻 他、「VHTRC 炉物理実験の解析によるモンテカルロコード MVP の精度評価－臨界時の実効増倍率、反応度調整材反応度、ボイド反応度－」、JAERI-Tech 97-060、(1997).
- 10) 山下 他、私信.
- 11) K. Yamashita, et al., "Analysis of Overall Temperature Coefficient of Reactivity of the VHTRC-1 Core with a Nuclear Design Code System for the High-Temperature Engineering Test Reactor", Nucl. Sci. Eng. 110, 177 (1992).
- 12) G. Knoll,(木村 阪井訳)、「放射線計測ハンドブック」、日刊工業新聞社、昭和 57 年.
- 13) 竹内 他、私信.

付録 1

24 メッシュモデルと 6 メッシュモデルについて

1. はじめに

HTTR の解析用として、これまで 1 ブロックを 6 メッシュ（平面）に分割したモデル（6 メッシュモデル）を用いてきた。しかしながら、VHTRC の解析を通してより詳細なメッシュによる解析が必要であることが明らかになったため、1 ブロックを 24 メッシュ（平面）に分割したモデル（24 メッシュモデル）を作成した。ここでは、それぞれのモデルの概要について述べる。

2. モデルの概要

2. 1 6 メッシュモデル

6 メッシュモデルの領域分割の概念図を第 1 図に、燃料部の断面図を第 2 図に示す。本モデルの特長は以下の通りである。

- 1) 制御棒案内カラムは、全長にわたり軸方向について 1 ブロックを 4 メッシュに分割し、制御棒の位置の変化による反応度変化をより正確に評価できるようにしている。
- 2) 制御棒案内カラムは平面では均質としているが、軸方向について 1 ブロックを 4 分割している。このことにより制御棒の位置変化による反応度変化を全ストロークにわたって細かく評価できるようにしている。
- 3) 照射カラムは各カラムごとにモデル化し、照射カラムに装荷する測定装置による効果を考慮しやすくしている。
- 4) 各領域の原子数密度を、ブロックの種類ごとにグループとして整理することにより、多量のデータを効率よく整理できるようにした。
- 5) 燃料領域は、燃焼による原子数密度の変化を考慮する必要がないので 1 ブロックを 1 領域とし、データの入力、整理を効率的に行えるようにしている。

2. 2 24 メッシュモデル

6 メッシュモデルでは、燃料ブロック中の BP の位置は考慮せず、BP 中の物質は燃料ブロック内に均一に分布しているとしている。燃料ブロック内の BP の位置を考慮するため、6 メッシュモデルを改良して 24 メッシュモデルを作成した。24 メッシュモデルの領域分割の概念図を第 3 図に、燃料部の断面図を第 4 図に示す。本モデルの特長は以下の通りである。

- 1) 燃料ブロック、可動反射体等の六角柱状のブロックは、水平面を 24 メッシュに分割してある。燃料ブロックは、BP を含まない燃料部（燃料部）と BP を含む燃料部（BP

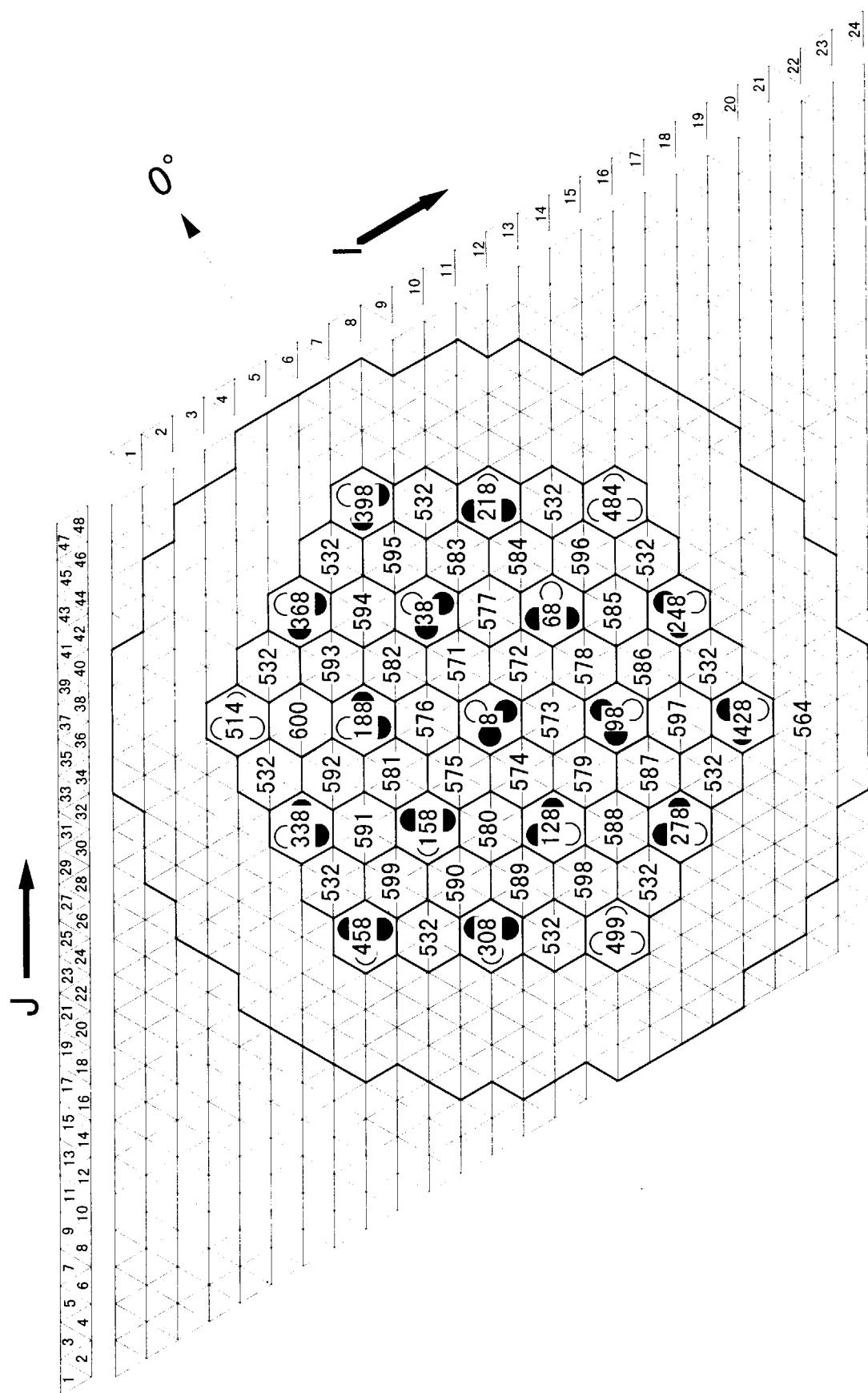
部)に分けています。BP部は1本のBP棒に対し2メッシュを割り当てているため、1ブロックにつき合計4メッシュとなっている。このことにより、燃料ブロック中のBPの位置をモデル化することが可能である。軸方向については4分割のみとしている。このため、軸方向については均質なBP棒として取り扱うこととしている。

- 2) 燃料領域は、燃焼による原子数密度の変化を考慮しないとして1ブロックを軸方向に1領域とし、データの入力、整理を効率的に行えるようにした。
- 3) 燃料ブロックの領域番号は571から720と771から920としている。571から720は燃料部、771から920はBP部としている。ある燃料部に対応するBP部は領域番号で200番違いとすることにより対応をわかりやすくしている。なお、領域番号721から770までは欠番となっている。将来、照射領域などに割り当てることが可能である。
- 4) 反射体部、照射カラム及び制御棒案内カラムの領域番号は6メッシュモデルと同一であり、モデルの移行を容易にしている。燃料ブロックについても燃料部の領域番号は6メッシュモデルと同様の領域番号となるようにしている。

A カラム位置		A01	C01	C03	C05	C07	C09	C11	E03	E07	E11	E15	E19	E23	E01	E09	E13	E05	E17	E21	(1)	
B L 反射体	1	526	31	61	91	121	151	181	527	211	241	271	301	331	361	391	421	451	481	511	562	
D 1段目 L	2		32	62	92	122	152	182		212	242	272	302	332	362	392	422	452			B (4)	
E 2段目 L	3	571	38	68	98	128	158	188	583	213	243	273	303	333	363	393	423	453			B (5)	
F 3段目 L	4	~576	39	69	99	129	159	189	595	214	244	274	304	334	364	394	424	454	482	512	563	
G 4段目 L	5	528	34	64	94	124	154	184		215	245	275	305	335	365	395	425	455			C (1)	
H 5段目 L	6		35	65	95	125	155	185	529	216	246	276	306	336	366	396	426	456	483	513	(8)	
I 反射体	7	37	67	97	127	157	187		217	247	277	307	337	367	397	427	457			(9)		
J CR	8	571	577	38	68	98	128	158	188	218	248	278	308	338	368	398	428	458	484	514	564	
K R1	9		39	69	99	129	159	189	583	219	249	279	309	339	369	399	429	459			(10)	
L R2	10	~582	40	70	100	130	160	190	~594	220	250	280	310	340	370	400	430	460	485	500	515	
M R3	11	601	607	42	72	102	132	162	192	613	625	221	251	281	311	341	371	401	431	461		
N R4	12		43	73	103	133	163	193		222	252	282	312	342	372	402	432	462	486	501	516	
O R5	13	~612	44	74	104	134	164	194	~624	223	253	283	313	343	373	403	433	463			(13)	
P R6	14	~606	45	75	105	135	165	195	~630	224	254	284	314	344	374	404	434	464	487	502	517	
Q R7	15		46	76	106	136	166	196	643	225	255	285	315	345	375	405	435	465			(14)	
R R8	16	631	637	47	77	107	137	167	197	643	655	226	256	286	316	346	376	406	436	466	488	503
S R9	17		48	78	108	138	168	198	~654	227	257	287	317	347	377	407	437	467			(15)	
T R10	18	~636	49	79	109	139	169	199	~660	228	258	288	318	348	378	408	438	468			(16)	
U R11	19	~642	50	80	110	140	170	200	685	229	259	289	319	349	379	409	439	469			(17)	
V R12	20	661	667	51	81	111	141	171	201	673	685	230	260	290	320	350	380	410	440	470	490	505
W R13	21		52	82	112	142	172	202	~684	231	261	291	321	351	381	411	441	471			(18)	
X R14	22	~666	53	83	113	143	173	203	~690	232	262	292	322	352	382	412	442	472			(19)	
Y R15	23		54	84	114	144	174	204	703	233	263	293	323	353	383	413	443	473			(20)	
Z R16	24	691	697	55	85	115	145	175	205	715	724	234	264	294	324	354	384	414	444	474	492	507
A R17	25		56	86	116	146	176	206	~714	235	265	295	325	355	385	415	445	475			(21)	
B R18	26	~696	57	87	117	147	177	207	~720	236	266	296	326	356	386	416	446	476			(22)	
C R19	27		58	88	118	148	178	208	559	237	267	297	327	357	387	417	447	477			(23)	
D R20	28		59	89	119	149	179	209		238	268	298	328	358	388	418	448	478			(24)	
E R21	29	558	60	90	120	150	180	210		239	269	299	329	359	389	419	449	479			(25)	
F R22	30		560	540	541	542	543	544	545	561	546	547	548	549	550	551	538	552	553	554	556	557
G R23	31	539		560						240	270	300	330	360	390	420	450	480	495	510	525	569
H R24	32		561																		(32)	
I R25	33		562																		(33)	
J R26	34		563																		(34)	
K R27	35		564																		(35)	
L R28	36		565																		(36)	
固定反射体 (黒色吸収体: 第721領域)																						

第1図 6メッシュモデルにおける領域配置概念図

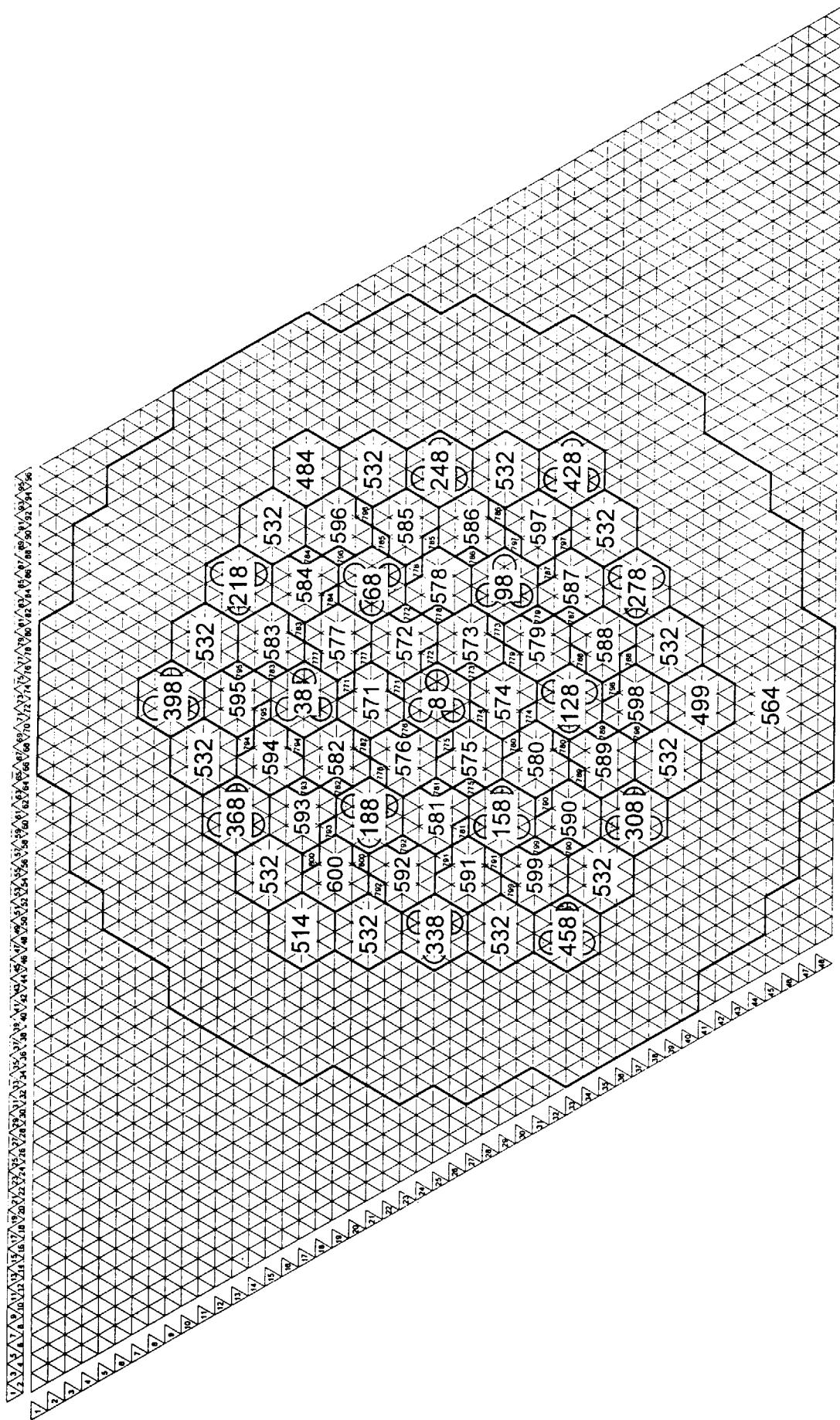
(n): 軸方向メッシュ番号



第2図 6メッシュモデルにおける燃料領域(C-C断面)領域配置図

第3図 24メッシュモデルにおける領域配置概念図

(n) 軸方向メッシュ番号



第4図 24メッシュモデルにおける燃料領域(C-C断面)領域配置図

付録 2 TWOTRAN による BP のミクロ吸収断面積評価用解析 モデルについて

1. はじめに

24 メッシュモデルでは、BP 棒の形状を考慮できること等から、BP 中の ^{10}B のミクロ実効吸収断面積を TWOTRAN で評価することとしている。ここでは、ミクロ断面積評価用の TWOTRAN の解析モデルについて述べる。

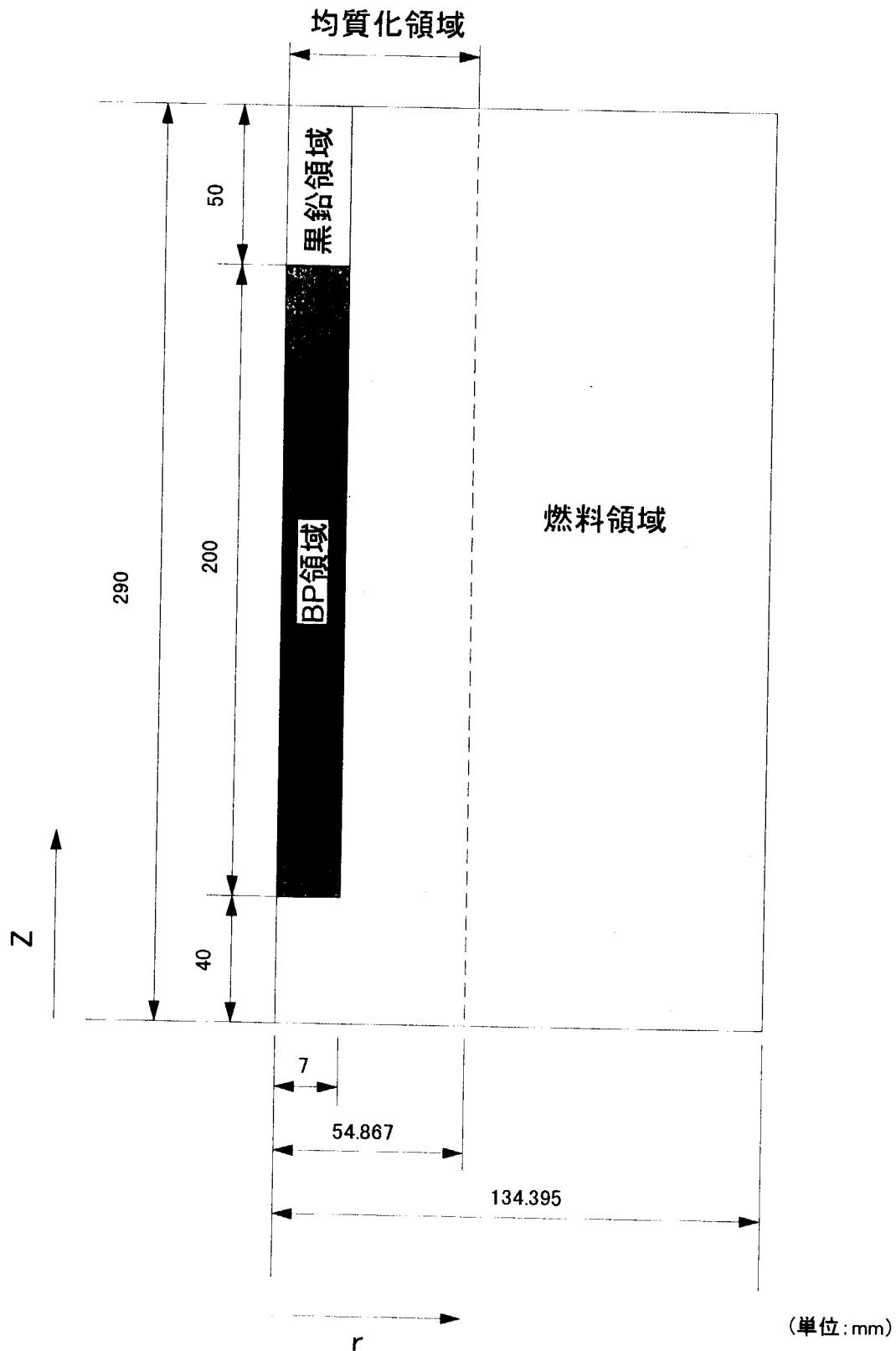
2. 解析手法及びモデル

解析は、TWOTRAN により BP を含む単位セルの中性子束分布を求め、これをもとに 24 メッシュモデルの BP 領域に適用する実効ミクロ断面積を評価する。

単位セルは燃料ブロック中の BP の配置を考慮して第 1 図のように定めた。モデルは r-Z 2 次元モデルである。BP は燃料ブロックに 2 本装荷されているため、セルの半径はセルの断面積が燃料ブロックの平断面積の半分となるように定めた。セルの高さは燃料ブロックの半分の 29cm とした。セルは、燃料領域、BP 領域及び黒鉛領域からなる。燃料領域のマクロ断面積は、DELIGHT で平均化した燃料のマクロ断面積を用いている。BP 領域及び黒鉛領域のマクロ断面積は、DELIGHT の少数组ミクロ断面積を用いて XEDIT で作成した。

均質化領域は、断面積が 24 メッシュモデルの BP 領域の断面積に等しくなるよう定めている。

このセルで中性子束分布の解析を行い、得られた中性子束を用いて BP 中の ^{10}B の吸収断面積を均質化領域内で平均化し、ミクロ断面積を求める。この断面積を用いて、DELIGHT で求めた燃料の断面積セットの中の BP 中の ^{10}B のミクロ吸収断面積を書き換える。つまり、ミクロ吸収断面積のみ TWOTRAN で求め、これ以外は DELIGHT で求めた値を用いることになる。



第1図 TWOTRANによるBPの吸収断面積評価用計算セル

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、放熱束	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	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開催理事会指令では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	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
0.101325	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
1.33322 × 10 ⁻⁴	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
6.89476 × 10 ⁻³	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 ²⁴	= 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	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹		1	100		1	3876		1	100
	3.7 × 10 ¹⁰	1		0.01	1		2.58 × 10 ⁻⁴	1		0.01	1

高温工学試験研究炉(HHTTR)臨界試験の予備解析結果
—HHTTR核特性解析コード・システムに基づく解析—