

JAERI-Tech

95-036



高温工学試験研究炉の広領域中性子検出器の  
中性子応答特性

1995年7月

村田 勲・山下清信・新藤隆一・塩沢周策・竹村守雄\*

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、日本原子力研究所技術情報部情報資料課(〒319-11 茨城県那珂郡東海村)あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター(〒319-11 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 Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1995

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 (株)高野高速印刷

高温工学試験研究炉の広領域中性子検出器の中性子応答特性

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

村田 勲・山下 清信・新藤 隆一

塩沢 周策・竹村 守雄\*

(1995年6月1日受理)

H T T Rでは、中性子計装(N I S)として固定反射体内に広領域中性子検出器を圧力容器の外側に出力領域中性子検出器をそれぞれ設置する。このうち、広領域中性子検出器は、30%出力までの計測をカバーすることとなっているが、定格運転時においても検出器を炉外に取り出さなため、100%出力運転時でも検出器がその健全性を保てることを示す必要がある。また、この検出器は、原子炉の未臨界の確認のためにも使用されるため、低温未臨界時に所定レベル以上の計数率を確保できることを確認する必要がある。

本研究では、この確認計算をモンテカルロコードと2次元輸送計算コードによる重ね合わせ法を用いた相対解析により、さらに3次元モンテカルロコードによる絶対値計算により実施した。その結果、現実的な条件(制御棒挿入レベル、30%出力以上では検出器の窒息による数え落としを許すこととする)を考慮することにより、成立解があることが確認できた。すなわち、天然ほう素濃度約1.7~1.9wt%の吸収体を中性子検出器外側に巻き付けることで、検出器入射中性子量を抑えることにより、低温未臨界時には未臨界の確認のために必要な3CPS以上の計数が得られかつ定格運転時に連続装荷した状態でも中性子検出器の健全性を保つことができることがわかった。

Neutron Response Analysis of Wide Range Detector in High Temperature Engineering  
Test Reactor (HTTR)

Isao MURATA, Kiyonobu YAMASHITA, Ryuichi SHINDO  
Shusaku SHIOZAWA and Morio TAKEMURA \*

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

(Received June 1, 1995)

In the HTTR, a wide range and a power range neutron detectors will be installed in the permanent reflector region and outside of reactor pressure vessel, respectively. The wide range detector covers the measurement of output up to 30% power. Since the detector is not drawn out even in a full power operation, it is required to confirm the integrity of the detector during a full power operation. Moreover, this detector is also used for checking subcriticality of the core.

In this study, the reaction rate calculation of the wide range detector was done for both a full power operation and a subcriticality state with a forward-adjoint folding technique and a 3-dimensional Monte Carlo code. From the results, it was confirmed that the integrity of the detector during both full power operation and subcriticality states would be retained by using a proper neutron absorber considering practical conditions such as insertion depth of control rods and detector working power range. The adequate natural boron concentration in the absorber is 1.7~1.9 wt%.

Keywords : HTTR, Nuclear Instrumentation System, Neutron Detector, Wide Range Detector, Power Range Detector, Forward-adjoint Folding Technique, Monte Carlo, Neutron Response

---

\* Kawasaki Heavy Industries, LTD

## 目 次

1. はじめに.....	1
2. HTTRの広領域中性子計装.....	3
3. 中性子検出器の中性子応答特性解析方法 .....	6
3.1 2次元重ね合わせ法 .....	6
3.2 3次元モンテカルロ法 .....	7
4. 中性子検出器の成立性解析条件 .....	9
4.1 2次元重ね合わせ法解析条件 .....	9
4.2 3次元モンテカルロ法解析条件 .....	13
5. 中性子検出器の成立性判定法 .....	43
6. 評価結果 .....	48
6.1 2次元重ね合わせ法によるパラメトリック応答特性 .....	48
6.2 3次元モンテカルロ計算による詳細解析 .....	52
7. 中性子検出器の成立性 .....	83
8. まとめ .....	86
謝 辞 .....	86
参考文献 .....	87
付録A JSD100群定数ライブラリのANISNによる縮約 .....	89
付録B 広領域中性子検出器挿入高さの効果 .....	96
付録C 遮へい体設置による <sup>235</sup> U反応断面積へのスペクトル効果 .....	98
付録D 使用済燃料からの中性子発生効果 .....	101

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Wide Range Neutron Instrumentation System of HTTR .....	3
3. Neutron Response Analysis Method .....	6
3.1 2-dimensional Forward-adjoint Folding Technique .....	6
3.2 3-dimensional Monte Carlo Method .....	7
4. Neutron Response Analysis Condition .....	9
4.1 2-dimensional Forward-adjoint Folding Calculation .....	9
4.2 3-dimensional Monte Carlo Calculation .....	13
5. Criteria of Detector Integrity .....	43
6. Analysis Result .....	48
6.1 Parametric Response Analysis by 2-dimensional Forward-adjoint Folding Technique .....	48
6.2 Precise Response Analysis by 3-dimensional Monte Carlo Method .....	52
7. Discussion of Detector Integrity .....	83
8. Concluding Remarks .....	86
Acknowledgement .....	86
References .....	87
Appendix A Collapsing of JSD100 Group Constants by ANISN .....	89
Appendix B Effect of Detector Loading Height in the Core .....	96
Appendix C Change in $^{235}\text{U}$ Reaction Cross Section due to Neutron Spectrum Change by Neutron Absorber of the Detector .....	98
Appendix D Neutrons Generation in Spent Fuel .....	101

## 1. はじめに

日本原子力研究所は、将来の高温ガス炉の技術基盤の確立と高度化並びに高温工学における先端的基礎研究を目的として、熱出力30MW、原子炉出口冷却材温度950°Cの高温工学試験研究炉（High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)）の建設を進めている<sup>(1)</sup>。HTTRの主要諸元を表1.1に示す。

HTTRでは、原子炉出口冷却材温度が950°Cと高いことから、減速材としては耐熱性が高い黒鉛を、冷却材としては化学的に安定なヘリウムガスを使用している。さらにこの炉は炉内温度が高いことから、HTTRの中性子計装（NIS）としては、炉心内ではなく固定反射体内に広領域系を、圧力容器の外側に出力領域系をそれぞれ設置している。このうち、広領域中性子検出器は、30%出力までの計測をカバーすることとなっているが、定格運転時においても検出器を炉外に取り出さないため、100%出力運転時でも検出器がその健全性を保てることを示す必要がある。また、広領域中性子検出器は、原子炉の未臨界の確認のためにも使用されるため、低温未臨界時に所定レベル以上の計数率を確保できることを確認する必要がある。HTTRでは、これらの条件を満たすべく、中性子源及び広領域中性子検出器の感度等諸元を決定している。

広領域中性子検出器位置における中性子束は、広領域中性子検出器の諸元を決定する上で必要となる物理量であるが、広領域中性子検出器は、炉心から離れて設置されているため、従来の下方散乱のみを取り扱うしゃへい計算手法を用いて（つまりしゃへい設計計算の精度で）の評価では正確ではない。本研究では、NISの照射あるいは計数率への寄与の大きい低エネルギー領域の中性子束を正確に評価するために、中性子検出器及び炉心を含む幅広い領域に対して、反射体黒鉛による上方散乱の効果を考慮して、モンテカルロコードと2次元輸送計算コードによる重ね合わせ法を用いて、炉心計算レベルの精度を持つ中性子検出器位置における反応率の相対値評価を行った。さらに詳細な絶対値解析を実施するために、3次元モンテカルロコードによる計算も実施し、成立するための条件を検討した。

本研究では、複雑な遮へい構造を有するHTTRの炉心から離れた局所的な中性子検出器位置の正確な反応率評価を行うために、最近、原子炉の設計に取り入れられるようになった2次元重ね合わせ法を用い、その特性の傾向を検討すると共に、今後さらに設計への応用が期待される3次元モンテカルロコードにより、詳細な絶対値評価を実施したものであり、2次元重ね合わせ法と3次元モンテカルロコードによる解析を組み合わせた評価はほとんど例が無く今後の同様な原子炉の設計には極めて有用な研究であると考えられる。本報は、これらの評価方法及び結果についてとりまとめたものである。

表 1.1 高温工学試験研究炉の主要諸元

原子炉熱出力	30MW
原子炉入口／出口冷却材温度	395／850～950℃
一次系冷却材圧力	4 MPa
炉心有効高さ	2.9m
炉心等価直径	2.3m
出力密度	2.5MW/m <sup>3</sup>
燃料	低濃縮二酸化ウラン
燃料形式	被覆粒子／黒鉛分散型
ウラン濃縮度	3～10wt%（平均6wt%）／12種類
燃料体	ブロック型
原子炉圧力容器	鋼製（2 1/4 Cr-1 Mo鋼）
主冷却回路数	1 ループ（中間熱交換器及び加圧水冷却器）



## 2. H T T R の広領域中性子計装

原子炉の中性子計装は核分裂によって生ずる中性子が形成する中性子束を直接測定し、核反応に関する情報を速やかに得ることを目的としている。

H T T R の中性子計装は、広領域中性子計装と出力領域中性子計装の2系統からなり、原子炉の起動領域から定格原子炉出力の120%までの中性子束レベルを測定する。それぞれの中性子検出器の装荷位置及び測定出力範囲を図2.1及び図2.2に示す<sup>(2)</sup>。

広領域中性子計装は、中性子検出器に核分裂電離箱を使用しているため原子炉出力の低い起動領域では核分裂計数管としてパルス計数法で、原子炉出力の比較的高い領域では電流のゆらぎを利用したキャンベル法で計測するワイドレンジモニタである。核分裂電離箱は、電極に高濃縮ウランの酸化物を塗布し検出器内には電離ガスとして不活性ガスを封入した中性子検出器である。広領域中性子検出器の構造を図2.3に示す<sup>(2)</sup>。

本解析に使用した、広領域中性子検出器の成立条件は以下の通りである。

低温臨界時		3 cps
定格運転時	中性子束	$10^{11}$ n/cm <sup>2</sup> /sec
	フルエンス	$4 \times 10^{19}$ n/cm <sup>2</sup>

(常温黒鉛カラムにおける検出感度0.1CPS/(n/cm<sup>2</sup>/sec)の場合<sup>(2)</sup>)

なお、フルエンスについては、R & Dでは $10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>まで問題ないことを確認している。また、スペック上は、 $1.6 \times 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup>まで問題ないとされている。本解析では、両値の対数平均値である $4 \times 10^{19}$ を成立条件とした。

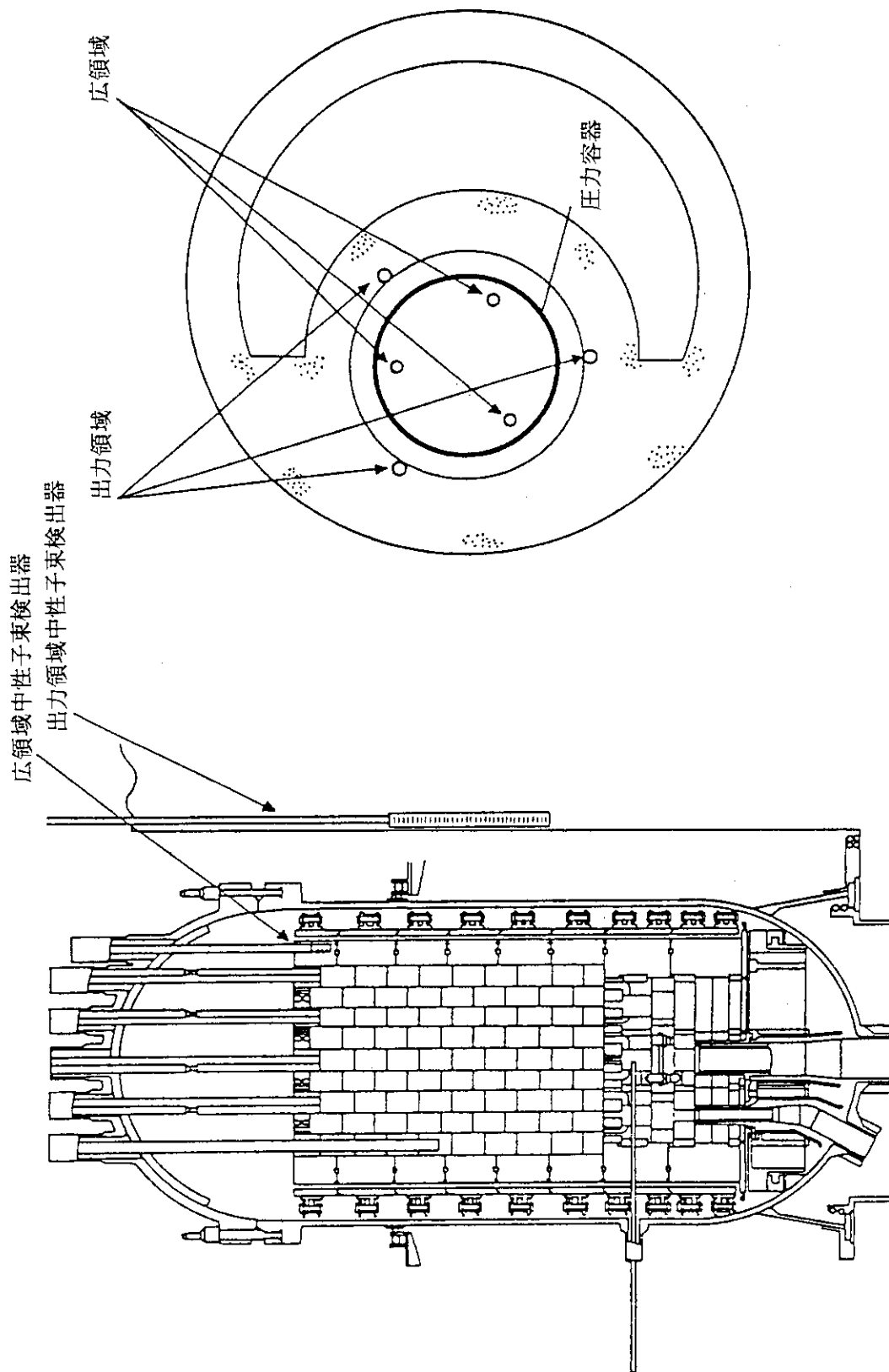


図 2.1 中性子検出器の装荷位置

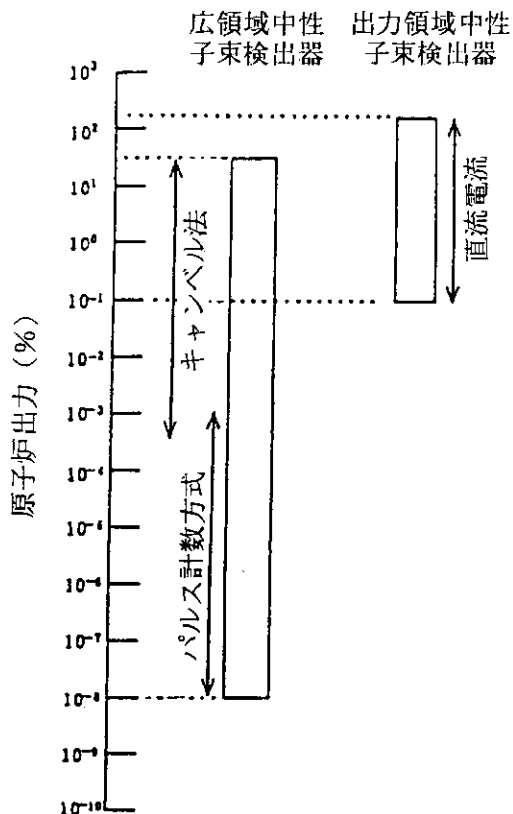


図 2.2 HTTR中性子計装の測定出力範囲

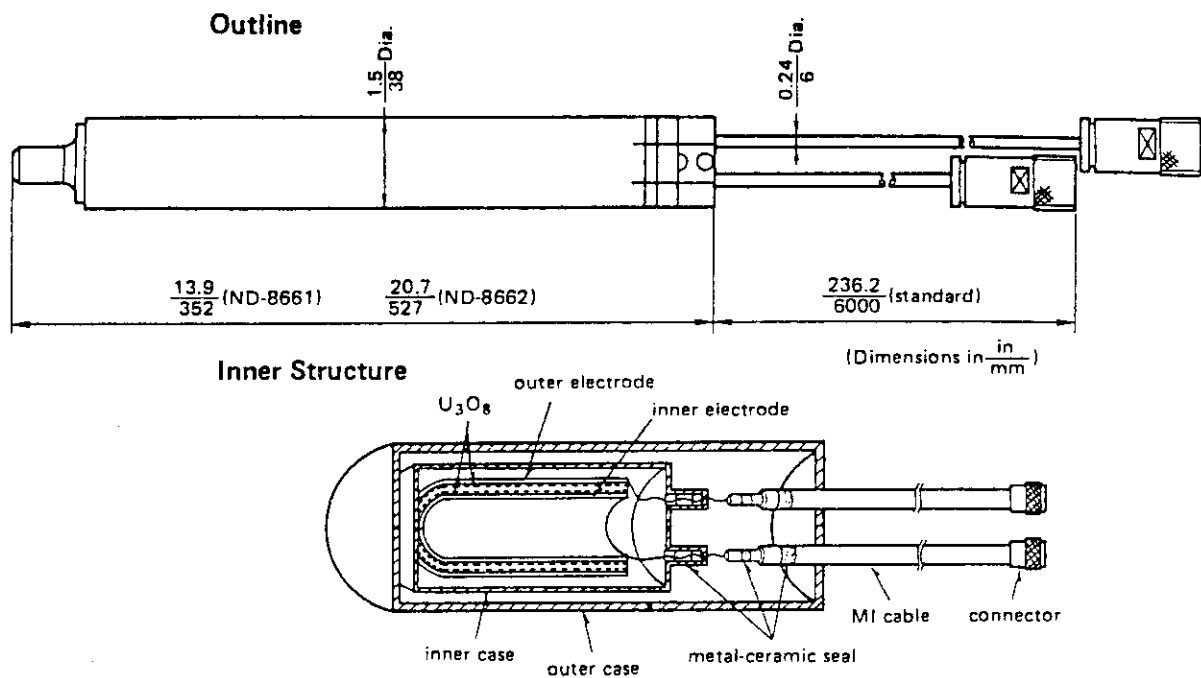


図 2.3 広領域中性子検出器構造図

### 3. 中性子検出器の中性子応答特性解析方法

H T T Rの広領域中性子検出器応答特性解析は、まず、2次元重ね合わせ法によりその設置位置及び吸収体諸元をパラメータとした相対値解析を実施し、成立の可能性を検討した。さらに3次元モンテカルロ計算により絶対値評価を行い、2次元重ね合わせ法の妥当性の確認及び吸収体諸元の決定を行った。

#### 3.1 2次元重ね合わせ法

炉心を中心として形成される中性子束場の周辺に置かれた中性子検出器の応答を求める手法として、2次元重ね合わせ法がある。この方法は、図3.1.1に示すように、炉心を中心とした2次元モデルにおいて、炉心で発生する中性子を線源とした輸送計算から求めた中性子検出器周辺の中性子束 (forward flux) と、中性子検出器の中心軸をモデルの中心軸とした2次元モデルにおいて、中性子検出器の応答関数を線源とした輸送計算から求めた中性子検出器周辺の随伴中性子束 (adjoint flux) とを、中性子検出器を取り囲む面上で積分することにより中性子検出器応答を求めるものである。すなわち、随伴中性子束 $\Phi^*(E, \mu, \Omega)$ は、中性子検出器の応答に将来寄与する能力を表しており、中性子束 $\Phi(E, \mu, \Omega)$ との積は、その位置の中性子束に起因する応答を示すことから、これを中性子検出器を取り囲む閉じた面上で面積分したものが、中性子検出器の全応答量となる。この方法の特徴は、炉心から離れた中性子束を正確に求めることが困難な場所に中性子検出器等が装荷されている場合に、その応答を正確に求めることができることにある。中性子束と随伴中性子束とを重ね合わせる方法は、高速増殖炉の原子炉容器内の1次冷却材中に設置された熱交換器内の2次冷却材の放射化量の評価<sup>(3)</sup>に用いられている他、同様の原理に基づいた手法であるSpace Channel Theory<sup>(4)</sup>は空間の感度解析すなわち、ある応答(観察量)に寄与する粒子の透過経路の評価に適用されているが、設計への適用例は、まだ少ないのが現状である。

本研究では、H T T Rの広領域中性子検出器の挿入位置あるいは必要な吸収体についてのパラメータ解析から、適切な検出器諸元を選定するために、2次元重ね合わせ法を適用し、中性子検出器の<sup>235</sup>U反応率を評価した。この評価のための計算体系の概念図を図3.1.2に示す。すなわち、広領域中性子検出器は、後に説明するとおり(図4.1.4参照)R Z体系にモデル化が可能であり、この2次元解析による随伴中性子束と、炉心近傍をモデル化した中性子束解析体系との解析結果があれば、挿入位置に存在する中性子検出器を炉心を含んだ形で詳細にモデル化した解析を実施することなく、中性子束と随伴中性子束との重ね合わせ計算をやるだけでよい。また、吸収体の諸元が変わる場合には、広領域中性子検出器近傍の小体系での2次元随伴中性子束解析だけを行えば良く、炉心からの大体系での2次元解析を実施する必要がない。

中性子束及び随伴中性子束の計算は、2次元S<sub>N</sub>輸送計算コードDOT-3.5<sup>(5)</sup>により行った。また、重ね合わせは任意の位置において重ね合わせが可能なコードを別途作成し、実施した。

### 3.2 3次元モンテカルロ法

H T T Rの炉心内における広領域中性子検出器の空間的位置を考慮すると2次元モデルでは正確には模擬できない。中性子検出器自体は固定反射体内に120度の間隔で配置されており、また、炉心構成要素自体も120度回転対称で配置されているからである。中性子検出器応答解析の観点からは、特に中性子の線源領域である炉心の最外周領域から中性子検出器までの間に、制御棒案内ブロック（R2、R3制御棒）が存在することが問題となる。すなわち、N I S 応答を支配する熱中性子に対し吸収効果の大きい制御棒が、炉心最外周に隣接する可動反射体領域に局所的に存在しており、

- (1) 炉心から中性子検出器位置まで拡散する熱中性子は制御棒にどれだけ吸収されるか
- (2) 中性子検出器位置の熱中性子は、固定反射体中の高中速エネルギー群の中性子の減速によりもたらされると考えられるが、可動反射体領域の制御棒での吸収には影響されないのか、

等を考えると、本体系の絶対値評価の困難さが理解できる。

以上のことから、本研究では2次元重ね合わせ法を、これらの問題に対し厳密な結果を得るためではなく、中性子検出器成立性を検討するためのパラメータ解析のための近似手法として採用した。これに対し中性子検出器応答を正確に絶対値評価するためには、少なくとも可動反射体領域に存在する制御棒（R2、R3）を解析モデルに取り入れられる3次元計算手法を使用する必要がある。

中性子束の3次元計算手法として一般的に利用されているものに、3次元拡散計算コード（C I T A T I O N<sup>(6)</sup>等）及びモンテカルロコード（M O R S E<sup>(7)</sup>、M C N P<sup>(8)</sup>等）があるが、本研究では、燃料領域から離れた固定反射体深部の中性子束を求めるため、拡散計算法よりも、高中速エネルギー群での非等方散乱を正確に表現できるモンテカルロ法を用いることとした。

また、本研究ではモンテカルロコードの中で最も広く使われているM O R S Eコードを使用することとし、モンテカルロ計算の最大の問題点である膨大な計算時間を短縮するため、Boundary Splitting法を採用した。この手法は、高速増殖炉における炉容器内の1次冷却材中に設置された熱交換器での2次冷却材の放射化量の評価において使用された例がある<sup>(9)</sup>。

$$R = \int_A \Delta R \, ds = \int_A ds \int dE \int (\vec{n} \cdot \vec{\Omega}) \phi^*(E, \vec{s}, \vec{\Omega}) \phi(E, \vec{s}, -\vec{\Omega}) \, d\Omega$$

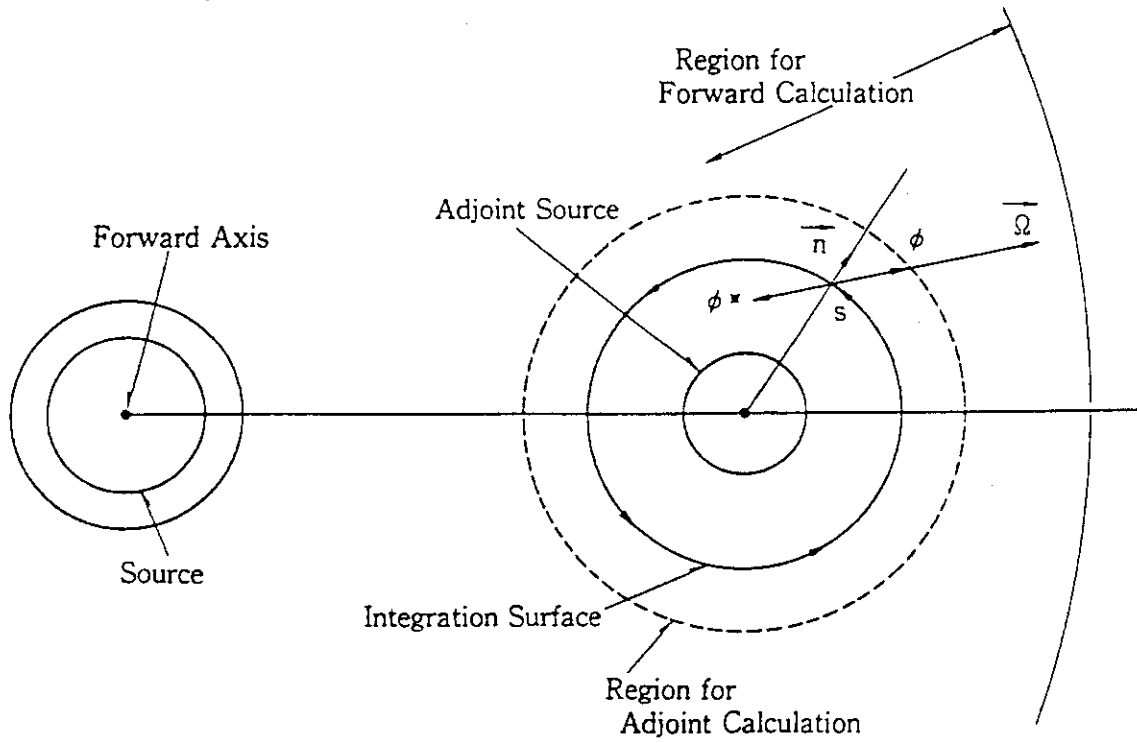


図 3. 1. 1 2次元重ね合わせ法

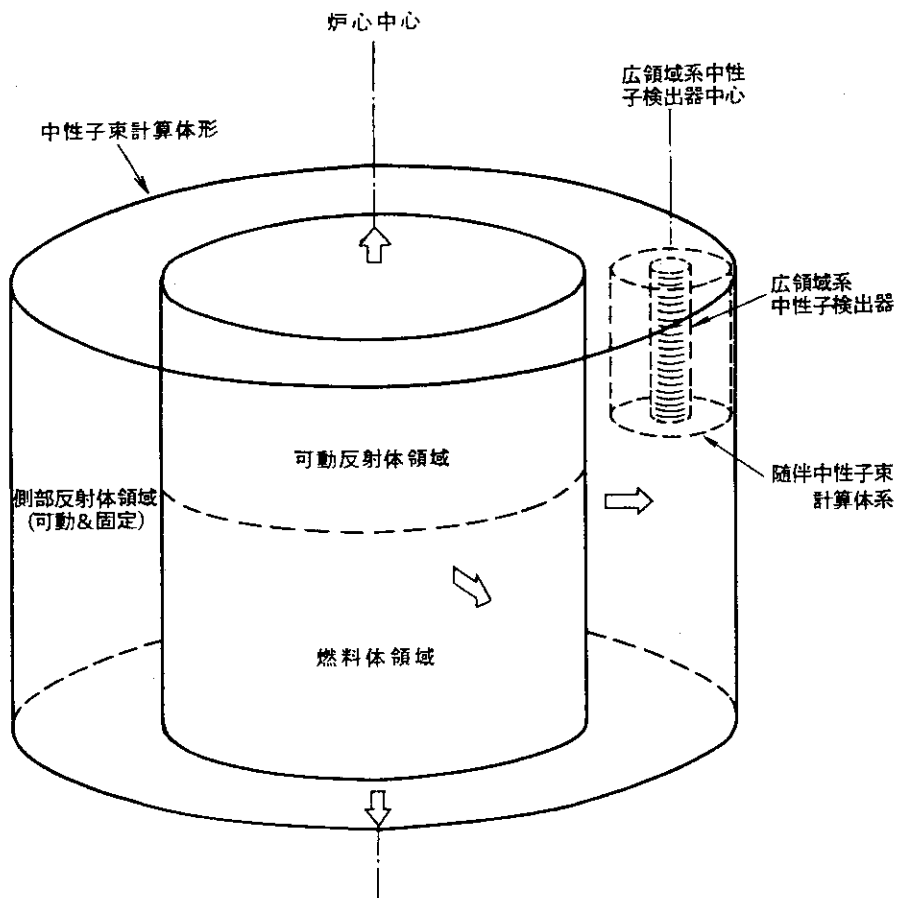


図 3. 1. 2 2次元重ね合わせ体系概念図

## 4. 中性子検出器の成立性解析条件

## 4.1 2次元重ね合わせ法解析条件

2次元重ね合わせ法による解析手順を図4.1.1に示す。本解析の計算条件を以下に説明する。なお、計算モデルと入力線源以外は中性子束と随伴中性子束の計算の条件は同一となっている。

## 4.1.1 輸送計算条件

2次元S<sub>N</sub>コードDOT-3.5による輸送計算条件は以下のとおりである。

- (1)群定数ルジャンドル展開次数 : P<sub>3</sub>
- (2)空間角度分点数 : S<sub>48</sub> (表4.1.1に角度分点及び重みを示す)
- (3)線束収束精度 :  $5 \times 10^{-3}$
- (4)エネルギー群数 : 22群 (表4.1.2に群構造を示す)
- (5)境界条件 左 (対称軸上) : 反射  
右、上、下 : 真空

通常の遮蔽計算では、高エネルギー群から順次低エネルギー群側へ向けてInner iterationだけによる中性子束の各メッシュ点の収束計算だけでよいが、本計算では低エネルギー群から高エネルギー側への中性子の上方散乱効果も評価するためOuter iterationの収束計算も必要である。DOT-3.5コードにおいては、固定線源を入力した計算ではOuter iterationについての収束判定が機能しないため、1回のジョブで適当な回数だけOuter iterationを実行し、最後のOuter iterationにおいて全エネルギー群にわたってInner iterationが1回で収束しているかどうかによりOuter iterationの収束を確認する方法を採った。これが収束していない場合には、リスタート計算を実施しOuter iterationを継続する手順を繰り返した。

## 4.1.2 群定数評価

## (1)群構造設定

従来、HTTRの遮蔽設計では固定反射体が炉心燃料領域から離れていること、また高エネルギー領域の中性子束が重要であることから、中性子束は、遮蔽解析用コードDOT-3.5及び群定数ライブラリJSD-100<sup>(10)</sup>を用いて求めていた。通常、この遮蔽解析用ライブラリは、下方散乱だけが取り扱え、熱エネルギー領域は1群の群構成となっている。JSD-100のエネルギー群構造は、表4.1.3に示すとおりであり100群構造である。このうち0.414eV以下の熱エネルギー領域は1群となっている。また、より詳細な174群構造を持つ代表的遮蔽解析用ライブラリであるVITAMIN<sup>(11)</sup>においても、同様の構造となっている。

一方、HTTRの中性子検出器は核分裂計数管であるため、<sup>235</sup>Uの核分裂を支配する

低エネルギー領域の中性子束が重要となる。しかし、黒鉛領域の低エネルギー領域中性子束は、黒鉛による上方散乱が影響するため、下方散乱だけ扱え、かつ熱エネルギー1群の群構造ライブラリでは、熱中性子束は不正確な評価となる。事実、熱エネルギー領域を複数群構造化し、上方散乱を扱うようにライブラリを修正した結果、黒鉛反射体領域の熱中性子束レベルが、修正以前に比較し半減することが確認されている<sup>(12)</sup>。

従って、本評価では炉心から固定反射体までの中性子束透過において、高エネルギー群での下方散乱を、また、低エネルギー群での黒鉛による上方散乱を、共に正確に取り扱うため、遮蔽計算用ライブラリJSD-100をベースとし、低エネルギー領域は高温ガス炉用1次元セル燃焼計算コードDELIGHT<sup>(13)</sup>のライブラリで置き換えることにした。エネルギー群構造を、表4.1.4に示す。中性子検出器挿入位置の中性子束を評価するため、炉心から反射体外側のB<sub>4</sub>C領域までの広い範囲を計算モデルに入れる必要があり、また上方散乱を取り扱うため、Outer Iterationが必要になることから、従来の遮蔽計算用21群をベースとした。また、低エネルギー群は、黒鉛による上方散乱を評価できる必要最小限、すなわち、2.38eVまで考慮しておけば十分であることから、このエネルギーから下群を3群構造とした。こうして設定した22群のエネルギー群構造が、表4.1.2に示したものである。

なお、HTTR炉心近傍領域は高温となるが、JSD-100において熱エネルギー群の断面積の温度依存性は、 $1/V$ 吸収体+Maxwellの特性を仮定し、これからのずれをWescott correction factorにより補正している。

## (2)群定数作成

22群の群定数の作成手順を図4.1.2に示す。

DELIGHTからの群定数は、HTTR炉心特性解析と同時に、燃料領域は燃料スペクトル、反射体等の各種物質は黒鉛スペクトルの格子計算により作成した。格子計算のエネルギー群数も類似の39群（高エネルギー領域：19群、熱エネルギー領域：20群）とした。温度及び組成を変えた各種格子計算によりマイクロ実効断面積を作成した後、XEDIT<sup>(13)</sup>によりスペクトル縮約して22群のマクロ定数を得た。JSD-100からの群定数は、RADHEAT-V3<sup>(14)</sup>によりマクロ実効断面積を作成し、1次元輸送計算コードANISN<sup>(15)</sup>を用いてスペクトル縮約し22群定数を得た。ANISNによる群定数の縮約については、付録Aに示した。

最終的な22群の定数は、後者の低エネルギー3群の断面積を前者の低エネルギー3群のものに置き換えて作成した。DELIGHTから縮約群で出力する場合には、処理群数のコード上の制限から22群は扱えないため、XEDITによる処理を経由したが、XEDITによる縮約は、P<sub>0</sub>成分のみの処理となっている。低エネルギー3群のP<sub>1</sub>からP<sub>3</sub>成分は、JSD-100の該当群のP<sub>1</sub>からP<sub>3</sub>成分を、P<sub>0</sub>成分のDELIGHTとJSD-100との比により規格化して用いた。得られた22群構造の各遮蔽結合ライブラリの熱群定数の構成を表4.1.5にANISN形式で示した。



なお、ハフニウムはDELIGHT及びJSD-100に断面積が存在しないことから、SRAC<sup>(16)</sup>によりENDF/B-IVに基づく付属ライブラリから22群定数を縮約作成した。

#### 4.1.3 2次元解析モデル

##### (1)中性子束計算モデル

広領域中性子検出器挿入位置近傍、すなわち固定反射体領域上部の中性子束を正確に評価するため、径方向は、炉心中心から原子炉圧力容器までを解析対象範囲に含めた。軸方向上部は、ボロン層を含む上部遮蔽体上端までとし、下部は、炉心の軸方向出力分布の非対称性を評価できるように、下部反射体のボロン層下端までを解析対象範囲に含めた。

2次元輸送計算のための解析モデルを、図4.1.3に示す。中央の制御棒案内カラム(C)にある制御棒案内孔及び後備停止系落下孔は、まとめて領域の中心に断面積を保存した一つの円筒型空洞部としてモデル化している。第1リング(R1)領域の6カラムある制御棒案内カラムは、円筒殻としてまとめてモデル化し、制御棒案内孔及び後備停止系落下孔は、やはりまとめて取り扱った。また、第2及び第3リング(R2及びR3)領域の9カラムの制御棒案内カラムも同様のモデル化を行った。図4.1.4には、このモデルにおける各領域の輸送計算用断面積の物質番号の割り当てを示した。

##### (2)随伴中性子束計算モデル

随伴中性子束を評価するための中性子検出器近傍のモデルは、図4.1.5に示すように中性子検出器の中心を座標軸とした詳細な2次元モデル化を行った。このようにモデルの中心軸を中性子束計算と随伴中性子束計算で異なる位置に設定できることが2次元重ね合わせ法の特徴となっている。

#### 4.1.4 物質組成

図4.1.4の物質番号に対応する物質構成を表4.1.6に示す。この表には基本となる物質の存在比のみを示している。基本物質の原子数密度は表4.1.7及び表4.1.8に示すとおりである。燃料体を除くIG-110及びPGXの黒鉛の密度及び不純物量については、定格運転時と低温未臨界時とで各々中性子検出器評価上、保守的となるように、現在までの実績を考慮し、以下のように設定した。

##### IG-110及びPGXの仕様

	密度	ボロン存在量
定格運転時	最小	0
低温未臨界時	最大	最大*

\*: IG-110 ; 1 ppm、PGX ; 5 ppm

## 4.1.5 入力線源

## (1) 中性子束計算線源

## 1) 定格運転時

輸送計算に入力する定格運転時の中性子発生分布は、中性子検出器に近い位置の出力が高い方が保守的な評価となるため、炉心上方向で出力が高くなっている950°C運転、燃焼10日後で、制御棒が誤差分だけ浅めに挿入されている状態の出力分布を選定した。

単位時間当たりの核分裂によって発生する中性子の発生数  $S_n(1/s)$  は次式で求めた。

$$S_n(E_n) = \nu \cdot f \cdot P \cdot N(E_n)$$

ここで、

$E_n$  : 中性子エネルギー (MeV)

$\nu$  : 核分裂当たりの平均中性子発生数 2.43(1/fission)

$f$  : 毎秒1ワット当たりの核分裂数  $3.12 \times 10^{10}$  (fission/(W·s))

$P$  : 原子炉熱出力 30(MW)

$N(E_n)$  : 発生中性子のエネルギースペクトル(Wattの式)

$$= 0.484 \cdot \sinh(2E_n)^{0.5} \cdot \exp(-E_n) \quad (0.075 < E_n < 17 \text{MeV})$$

定格運転時の評価に使用した出力分布を図4.1.6に示す。

## 2) 低温未臨界時

H T T R では、当初実施された概念設計により中性子源の強度を  $^{252}\text{Cf}$ , 300mCi と決められていた。ここでは、これを前提条件として入射線源を作成した。

低温未臨界時に対しては、燃焼0日300K制御棒全挿入状態で、中性子源を入力した C I T A T I O N 3次元計算による炉心領域出力分布を利用し、定格運転時と同様にして中性子発生数を得た。低温未臨界時の出力分布を図4.1.7に示す。なお、低温未臨界時には図4.1.7の燃料体中のウランによる核分裂中性子の他、R<sub>1</sub>制御棒案内カラムに配置された3個の中性子源からの発生中性子も考慮した。線源強度は、 $1.290 \times 10^9$  neutrons/sec (0.1Ci × 3個に対応) であり、燃料1段目相当高さに入力した。

## (2) 随伴中性子束計算線源

重ね合わせに用いる2次元随伴中性子束計算での随伴線源には、 $^{235}\text{U}$ 核分裂反応断面積を使用した。断面積は、黒鉛スペクトルのもとで縮約して作成された。断面積を表4.1.9に示す。この断面積は遮蔽体の設置されていない場合に対応するものであり、各種遮蔽体設置時にはスペクトルの変化に起因する断面積の変化が起こる。6.1.4節では、この補正についても述べた。

## 4.2 3次元モンテカルロ法解析条件

### 4.2.1 群定数及び物質組成

MORSEコードで用いた群定数は、基本的に2次元輸送計算のものと共通である。制御棒についてのみ、以下の方法で新たに群定数を追加作成した。2次元輸送計算に用いた群定数作成方法の考え方と同様に図4.1.2に従って作成した22群遮蔽用定数の内の熱群3群を、表4.2.1の組成の元で炉心計算用の手法により作成した熱群3群のTWO TRAN用 $P_0$ 、 $P_1$ 定数と置き換えた。置き換えに際しては、制御棒領域での熱群定数の吸収断面積が支配的であることから、熱群の $P_2$ 、 $P_3$ 成分は無視した。

また、その他の領域の物質組成は2次元輸送計算と同じものを用いた。

### 4.2.2 3次元解析モデル

図4.2.1に3次元解析のための計算モデルを示す。モデル化は、径方向については、側部遮蔽体まで行った。周方向は、周期境界条件とはせず360度モデルとした。従って、中性子検出器は3カ所ともモデル化できた。垂直方向断面では、2次元輸送計算による中性子束の計算結果に基づき中性子検出器へ寄与する中性子の発生透過経路を考慮して、軸方向は下部可動反射体の上段から固定反射体のボロンピン領域下面相当までをモデル範囲とした。

炉心構成要素は、実体系に従い面間距離36.2cm、高さ58cmの六角形ブロックとしてモデル化し、ブロック内はスミアした。なお、上部遮蔽体は図4.2.2のようにできるだけ忠実にモデル化し、下部の15cmを3次元体系に組み込んだ。また、中性子検出器近傍のモデルは図4.1.5に示すように2次元重ね合わせ計算と同じとした。

予備計算の結果、モンテカルロコードによる3次元計算にはかなりの計算時間が必要であることが分かったため、本計算では、最も計算時間のかからない検出器の遮蔽体のない体系を対象とすることとした。

#### (1)制御棒モデル

制御棒は、その効果を正確に考慮するため、3次元形状をできるだけ忠実にモデル化した。そこで、制御棒1本の断面は図4.2.3に示すように軸方向に一様な円柱状のモデルとした。挿入位置は、反応率計算が保守的となるように次のように設定した。

定格運転時（運転時に考えられる最も引き抜かれた状態）

$C/R_1/R_3$ ：全引き抜き、下端は上部可動反射体の上面

$R_2$ ：下端は燃料領域上面より0.75段引き抜き

低温未臨界時（原子炉スクラム状態）

$C/R_1/R_2/R_3$ ：下端は燃料領域下面位置、上端は燃料領域上面より20cm上

なお、低温未臨界時については、2次元重ね合わせ法との結果比較のため、制御棒を

モデル化しないケースについても3次元計算を実施した。

(2)スプリッティング境界

MORSEによる3次元計算は3.2節でも述べたとおり、計算時間がかかるためBoundary splitting法を採用している。スプリッティングを起こさせる境界については、基本的には各炉心構成要素の境界とした。固定反射体内では本コードの境界面を任意の位置に設定できる機能を使用しN I Sを中心とした同心円上に境界を設定した。領域のランクづけは、炉心からN I S方向に近づくに従って高くなるようにした。

スプリッティング境界及びランクづけを図4.2.4に示した。

表 4.1.1 S<sub>48</sub>角度分点及び重み

No.	$\mu$	$\eta$	Weight
1	-0.30861	-0.95119	0.0
2	-0.21822	-0.95119	0.030247
3	0.21822	-0.95119	0.030247
4	-0.61721	-0.78680	0.0
5	-0.57735	-0.78680	0.022685
6	-0.21822	-0.78680	0.022685
7	0.21822	-0.78680	0.022685
8	0.57735	-0.78680	0.022685
9	-0.81650	-0.57735	0.0
10	-0.78680	-0.57735	0.022685
11	-0.57735	-0.57735	0.023148
12	-0.21822	-0.57735	0.022685
13	0.21822	-0.57735	0.022685
14	0.57735	-0.57735	0.023148
15	0.78680	-0.57735	0.022685
16	-0.97590	-0.21822	0.0
17	-0.95119	-0.21822	0.030247
18	-0.78680	-0.21822	0.022685
19	-0.57735	-0.21822	0.022685
20	-0.21822	-0.21822	0.030247
21	0.21822	-0.21822	0.030247
22	0.57735	-0.21822	0.022685
23	0.78680	-0.21822	0.022685
24	0.95119	-0.21822	0.030247
25	-0.30861	0.95119	0.0
26	-0.21822	0.95119	0.030247
27	0.21822	0.95119	0.030247
28	-0.61721	0.78680	0.0
29	-0.57735	0.78680	0.022685
30	-0.21822	0.78680	0.022685
31	0.21822	0.78680	0.022685
32	0.57735	0.78680	0.022685
33	-0.81650	0.57735	0.0
34	-0.78680	0.57735	0.022685
35	-0.57735	0.57735	0.023148
36	-0.21822	0.57735	0.022685
37	0.21822	0.57735	0.022685
38	0.57735	0.57735	0.023148
39	0.78680	0.57735	0.022685
40	-0.97590	0.21822	0.0
41	-0.95119	0.21822	0.030247
42	-0.78680	0.21822	0.022685
43	-0.57735	0.21822	0.022685
44	-0.21822	0.21822	0.030247
45	0.21822	0.21822	0.030247
46	0.57735	0.21822	0.022685
47	0.78680	0.21822	0.022685
48	0.95119	0.21822	0.030247

表4.1.2 2次元S<sub>N</sub>計算用群構造

群	下限エネルギー (eV)	JSD-100 下限群	DELIGHT 下限群
1	5.4881 × 10 <sup>6</sup>	10	高速群 3*
2	3.3287	15	5*
3	2.0190	20	7*
4	1.2246	25	9*
5	7.4275 × 10 <sup>5</sup>	30	11*
6	4.5049	35	13*
7	2.7324	40	15*
8	1.6573	45	17*
9	6.7379 × 10 <sup>4</sup>	51	20
10	2.4788	55	24
11	9.1188 × 10 <sup>3</sup>	59	28
12	3.3546	63	32
13	1.2341	67	36
14	4.54 × 10 <sup>2</sup>	71	40
15	1.67	75	44
16	4.7851 × 10 <sup>1</sup>	80	49
17	1.371	85	54
18	3.9279 × 10 <sup>0</sup>	90	59
19	2.3824	93	61
20	6.5 × 10 <sup>-1</sup>	98*	熱群 28
21	1.05 × 10 <sup>-1</sup>	99*	14
22	1.0 × 10 <sup>-5</sup>	100*	1

\* 下限エネルギー値が若干不一致

表4.1.3 JSD100ライブラリ群構造

エネルギー単位 eV

----- NEUTRON GROUP -----

GROUP	ENERGY RANGE		GROUP	ENERGY RANGE	
1	1.4918E+07	1.3499E+07	51	8.6617E+04	6.7379E+04
2	1.3499E+07	1.2214E+07	52	6.7379E+04	5.2475E+04
3	1.2214E+07	1.1052E+07	53	5.2475E+04	4.0868E+04
4	1.1052E+07	1.0000E+07	54	4.0868E+04	3.1828E+04
5	1.0000E+07	9.0484E+06	55	3.1828E+04	2.4788E+04
6	9.0484E+06	8.1873E+06	56	2.4788E+04	1.9305E+04
7	8.1873E+06	7.4082E+06	57	1.9305E+04	1.5034E+04
8	7.4082E+06	6.7032E+06	58	1.5034E+04	1.1709E+04
9	6.7032E+06	6.0653E+06	59	1.1709E+04	9.1188E+03
10	6.0653E+06	5.4881E+06	60	9.1188E+03	7.1017E+03
11	5.4881E+06	4.9659E+06	61	7.1017E+03	5.5308E+03
12	4.9659E+06	4.4933E+06	62	5.5308E+03	4.3075E+03
13	4.4933E+06	4.0657E+06	63	4.3074E+03	3.3546E+03
14	4.0657E+06	3.6788E+06	64	3.3546E+03	2.6126E+03
15	3.6788E+06	3.3287E+06	65	2.6126E+03	2.0347E+03
16	3.3287E+06	3.0119E+06	66	2.0347E+03	1.5846E+03
17	3.0119E+06	2.7253E+06	67	1.5846E+03	1.2341E+03
18	2.7253E+06	2.4660E+06	68	1.2341E+03	9.6112E+02
19	2.4660E+06	2.2313E+06	69	9.6112E+02	7.4852E+02
20	2.2313E+06	2.0190E+06	70	7.4852E+02	5.8295E+02
21	2.0190E+06	1.8268E+06	71	5.8295E+02	4.5400E+02
22	1.8268E+06	1.6530E+06	72	4.5400E+02	3.5357E+02
23	1.6530E+06	1.4957E+06	73	3.5357E+02	2.7536E+02
24	1.4957E+06	1.3534E+06	74	2.7536E+02	2.1445E+02
25	1.3534E+06	1.2246E+06	75	2.1445E+02	1.6702E+02
26	1.2246E+06	1.1080E+06	76	1.6702E+02	1.3007E+02
27	1.1080E+06	1.0026E+06	77	1.3007E+02	1.0130E+02
28	1.0026E+06	9.0718E+05	78	1.0130E+02	7.8893E+01
29	9.0718E+05	8.2085E+05	79	7.8893E+01	6.1442E+01
30	8.2085E+05	7.4274E+05	80	6.1442E+01	4.7851E+01
31	7.4274E+05	6.7206E+05	81	4.7851E+01	3.7267E+01
32	6.7206E+05	6.0810E+05	82	3.7267E+01	2.9023E+01
33	6.0810E+05	5.5023E+05	83	2.9023E+01	2.2603E+01
34	5.5023E+05	4.9787E+05	84	2.2603E+01	1.7603E+01
35	4.9787E+05	4.5049E+05	85	1.7603E+01	1.3710E+01
36	4.5049E+05	4.0762E+05	86	1.3710E+01	1.0677E+01
37	4.0762E+05	3.6883E+05	87	1.0677E+01	8.3153E+00
38	3.6883E+05	3.3373E+05	88	8.3153E+00	6.4760E+00
39	3.3373E+05	3.0197E+05	89	6.4760E+00	5.0435E+00
40	3.0197E+05	2.7324E+05	90	5.0435E+00	3.9279E+00
41	2.7324E+05	2.4724E+05	91	3.9279E+00	3.0590E+00
42	2.4724E+05	2.2371E+05	92	3.0590E+00	2.3824E+00
43	2.2371E+05	2.0242E+05	93	2.3824E+00	1.8554E+00
44	2.0242E+05	1.8316E+05	94	1.8554E+00	1.4450E+00
45	1.8316E+05	1.6573E+05	95	1.4450E+00	1.1254E+00
46	1.6573E+05	1.4996E+05	96	1.1254E+00	8.7642E-01
47	1.4996E+05	1.3569E+05	97	8.7642E-01	6.8256E-01
48	1.3569E+05	1.2277E+05	98	6.8256E-01	5.3158E-01
49	1.2277E+05	1.1109E+05	99	5.3158E-01	4.1399E-01
50	1.1109E+05	8.6617E+04	100	4.1399E-01	1.0000E-03

表 4. 1. 4 DELIGHT群構造 (1/2)

群			レサジー	エネルギー	群			レサジー	エネルギー	
1)	2)	3)	(下限)	(下限, eV)	1)	2)	3)	(下限)	(下限, eV)	
1	1	1	0.25	$7.79 \times 10^6$	3	10	35	8.75	$1.59 \times 10^3$	
		2	0.50	$6.07 \times 10^6$			36	9.00	$1.23 \times 10^3$	
		3	0.75	$4.72 \times 10^6$			37	9.25	961	
		4	1.00	$3.68 \times 10^6$			11	38	9.50	748
		5	1.25	$2.87 \times 10^6$				39	9.75	583
	2	6	1.50	$2.23 \times 10^6$	12	40	10.00	454		
		7	1.75	$1.74 \times 10^6$		41	10.25	354		
		8	2.00	$1.35 \times 10^6$	13	42	10.50	275		
	3	9	2.25	$1.05 \times 10^6$		43	10.75	215		
		10	2.50	$8.21 \times 10^5$	44	11.00	167			
		11	2.75	$6.39 \times 10^5$	14	45	11.25	130		
		12	3.00	$4.98 \times 10^5$		46	11.50	101		
	4	13	3.25	$3.88 \times 10^5$	15	47	11.75	78.9		
		14	3.50	$3.02 \times 10^5$		48	12.00	61.4		
		15	3.75	$2.35 \times 10^5$	16	49	12.25	47.9		
		16	4.00	$1.83 \times 10^5$		50	12.50	37.3		
2	5	17	4.25	$1.43 \times 10^5$	17	51	12.75	29.0		
		18	4.50	$1.11 \times 10^5$		52	13.00	22.6		
	6	19	4.75	$8.65 \times 10^4$	18	53	13.25	17.6		
		20	5.00	$6.74 \times 10^4$		54	13.50	13.7		
		21	5.25	$5.25 \times 10^4$	19	55	13.75	10.68		
		22	5.55	$4.09 \times 10^4$		56	14.00	8.32		
	7	23	5.75	$3.18 \times 10^4$	19	57	14.25	6.48		
		24	6.00	$2.48 \times 10^4$		58	14.50	5.04		
		25	6.25	$1.93 \times 10^4$		59	14.75	3.93		
		26	6.50	$1.50 \times 10^4$	20	60	15.00	3.06		
		27	6.75	$1.17 \times 10^4$		61	15.25	2.38		
	8	28	7.00	$9.12 \times 10^3$	3	62	62	15.50	1.86	
		29	7.25	$7.10 \times 10^3$			63	15.75	1.44	
		30	7.50	$5.53 \times 10^3$			64	16.00	1.125	
9	31	7.75	$4.31 \times 10^3$	65	16.25	0.876				
	32	8.00	$3.36 \times 10^3$	66	16.50	0.683				
	33	8.25	$2.61 \times 10^3$	67	16.75	0.532				
	34	8.50	$2.04 \times 10^3$	68	17.00	0.414				

注) 1群の上限エネルギーは $10^7$ eVである。

1)は縮約群、2)は少数群、3)は多群を示す。



表 4.1.4 DELIGHT群構造 (2/2)

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

注) 1)は縮約群、2)は少数群、3)は多群を示す。

表 4.1.5 熱群定数の構成 ( $E_n < 2.38\text{eV}$ )

Position (ANISN 型式)	$P_0$ 成分	$P_1 \sim P_3$ 成分
$\sigma_a$ (吸収断面積) $\nu \sigma_f$ ( $\nu \times$ 核分裂断面積) $\sigma_t$ (全断面積) $\sigma_{g, g+2}$ $\sigma_{g, g+1}$ $\sigma_{g, g}$ (自群散乱断面積) $\sigma_{g, g-1}$ . . . . . $\sigma_{g, g-n}$ (19群からの散乱) . . . . . $\sigma_{g, 1}$	DELIGHT	0.0  $\text{JSD100} \times \left( \frac{\text{DELIGHT}}{\text{JSD100}} \right) P_0$
	JSD100	JSD100

表 4.1.6 物質構成

番号	領域名	温度(K)	物質存在割合	備考
0	ボイド	-	空気 : 1.0	物質、温度等の違いはあるが透過計算上空気て代用可
1~16	燃料体	800~1200	燃料体 : 1.0	表4.1.7参照
17	上部可動反射体 (33ピン)	700	IG-110 : 0.8624	
18	下部可動反射体上段 (33ピン)	1300	IG-110 : 0.8624	黒鉛 1%程度少ないが上部可動反射体と同じとする
19	下部可動反射体下段 (33ピン)	1300	IG-110 : 0.7843	31ピン部にも適用
20	上部可動反射体 (31ピン)	700	IG-110 : 0.8693	
21	下部可動反射体上段 (31ピン)	1300	IG-110 : 0.8693	黒鉛 1%程度少ないが上部可動反射体と同じとする
22~24	側部可動反射体	700~1100	IG-110 : 0.9833	
25	側部可動反射体 (最下段黒鉛)	1100	IG-110 : 1.0	
26	側部可動反射体 (最下段、黒鉛/He)	1100	IG-110 : 0.9349	
27~29	固定反射体	700~900	PGX : 0.9791	
30~34	制御棒案内ブロック	700~1200	IG-110 : 0.9748	C/R孔12.3cmφ × 2 RSS孔12.3cmφ × 1
35	制御棒案内ブロック	1200	IG-110 : 0.9813	C/R孔14.0cmφ × 2 RSS孔12.3cmφ × 1
36	制御棒案内ブロック	1300	IG-110 : 0.9830	C/R孔14.0cmφ × 2
37	制御棒案内ブロック	1300	IG-110 : 1.0	
38	制御棒案内ブロック	1300	IG-110 : 0.9173	
39	上部遮へい体 (CRカラムSUS部)	700	SUS316 : 0.7432	
40	上部遮へい体 (CRカラムボロン部)	700	B <sub>4</sub> C+C : 1.0	B 3wt%
41	上部遮へい体 (燃料カラム側部)	700	SUS316 : 0.7578	
42	上部遮へい体 (燃料カラムSUS流路セル)	700	SUS316 : 0.8456	
43	上部遮へい体 (燃料カラムボロンセル)	700	B <sub>4</sub> C+C : 0.5712 SUS316 : 0.2060	B 3wt%
44	上部遮へい体 (反射体カラムSUS部)	700	SUS316 : 0.7465	
45	上部遮へい体 (反射体カラムボロン部)	700	B <sub>4</sub> C+C : 1.0	B 3wt%
46	固定反射体 (ボロンピソセル)	700	B <sub>4</sub> C+C : 0.4076 PGX : 0.5489	B 3wt%
47, 48	下部可動反射体 (ボロンピソセル)	1100, 1300	B <sub>4</sub> C+C : 0.1672 IG110 : 0.7724	B 1wt%
49	側部遮へい体ボロン層	700	B <sub>4</sub> C+C : 1.0	B 3wt%
50	側部遮へい体背板	700	B <sub>4</sub> C+C : 1.0	
51	原子炉圧力容器	700	SCMV4 : 1.0	
52	上部遮へい体 (CR案内、反射体カラム)	700	SUS316 : 1.0	

表 4.1.1.7 燃料体平均原子数密度 (1/4)  
(基準炉心, 燃焼 0 日)

原子数密度単位: 1/barn

燃料領域 No. 一段数 No.	1-1	1-2	1-3	1-4
温度	1083	1083	1083	1083
K	800	800	800	800
U-235	1.6241(-5)	1.9150(-5)	2.1404(-5)	2.2542(-5)
U-238	2.2330(-4)	2.2043(-4)	2.0369(-4)	2.0257(-4)
B-10 (imp)	2.1282(-8)	2.1282(-8)	2.1144(-8)	2.1144(-8)
B-10	8.8936(-7)	8.8936(-7)	8.8936(-7)	8.8936(-7)
B-11	3.6024(-6)	3.6024(-6)	3.6024(-6)	3.6024(-6)
C-12	7.3314(-2)	7.3314(-2)	7.4103(-2)	7.4103(-2)
O-16	4.7900(-4)	4.7900(-4)	4.5000(-4)	4.5000(-4)
He	5.4826(-5)	5.4826(-5)	5.1861(-5)	5.1861(-5)
Si	2.2293(-4)	2.2293(-4)	2.0942(-4)	2.0942(-4)
物質番号	1	2	3	4

表 4. 1. 7 燃料体平均原子数密度 (2 / 4)  
(基準炉心, 燃焼 0 H)

原子数密度単位: 1 / barn

燃料領域 No. 一段数 No.	2 - 1	2 - 2	2 - 3	2 - 4
温度	1303	1303	1303	1303
K	900	900	900	900
U - 235	1.2605 (-5)	1.5271 (-5)	1.6394 (-5)	1.7988 (-5)
U - 238	2.2690 (-4)	2.2426 (-4)	2.0864 (-4)	2.0707 (-4)
B - 10 (imp)	2.1282 (-8)	2.1282 (-8)	2.1144 (-8)	2.1144 (-8)
B - 10	1.1117 (-6)	1.1117 (-6)	1.1117 (-6)	1.1117 (-6)
B - 11	4.5030 (-6)	4.5030 (-6)	4.5030 (-6)	4.5030 (-6)
C - 12	7.3314 (-2)	7.3314 (-2)	7.4103 (-2)	7.4103 (-2)
O - 16	4.7900 (-4)	4.7900 (-4)	4.5000 (-4)	4.5000 (-4)
He	5.4826 (-5)	5.4826 (-5)	5.1861 (-5)	5.1851 (-5)
Si	2.2293 (-4)	2.2293 (-4)	2.0942 (-4)	2.0942 (-4)
物質番号	5	6	7	8

表 4.1.1.7 燃料体平均原子数密度 (3/4)  
(基準炉心, 燃焼0日)

原子数密度单位: 1/barn

燃料領域 No. 一段数 No.		3-1	3-2	3-3	3-4
温度 K	T <sub>r</sub>	1443	1443	1443	1443
	T <sub>m</sub>	1100	1100	1100	1100
U-235		1.0424(-5)	1.2606(-5)	1.3435(-5)	1.4346(-5)
U-238		2.2906(-4)	2.2690(-4)	2.1157(-4)	2.1067(-4)
B-10 (imp)		2.1282(-8)	2.1282(-8)	2.1144(-8)	2.1144(-8)
B-10		1.1117(-6)	1.1117(-6)	1.1117(-6)	1.1117(-6)
B-11		4.5030(-6)	4.5030(-6)	4.5030(-6)	4.5030(-6)
C-12		7.3314(-2)	7.3314(-2)	7.4103(-2)	7.4103(-2)
O-16		4.7900(-4)	4.7900(-4)	4.5000(-4)	4.5000(-4)
He		5.4826(-5)	5.4826(-5)	5.1861(-5)	5.1851(-5)
Si		2.2293(-4)	2.2293(-4)	2.0942(-4)	2.0942(-4)
物質番号		9	10	11	12

表 4.1.1.7 燃料体平均原子数密度 (4/4)  
(基準炉心, 燃焼 0 日)

原子数密度単位: 1/barn

燃料領域 No. 一段数 No.	4.5-1	4.5-2	4.5-3	4.5-4
温度 T <sub>r</sub>	1443	1443	1443	1443
K	1200	1200	1200	1200
U-235	8.2421(-6)	9.4541(-6)	9.7919(-6)	1.0931(-5)
U-238	2.3122(-4)	2.3002(-4)	2.1518(-4)	2.1405(-4)
B-10 (imp)	2.1282(-8)	2.1282(-8)	2.1144(-8)	2.1144(-8)
B-10	8.8936(-7)	8.8935(-7)	8.8936(-7)	8.8936(-7)
B-11	3.6024(-6)	3.6024(-6)	3.6024(-6)	3.6024(-6)
C-12	7.3314(-2)	7.3314(-2)	7.4103(-2)	7.4103(-2)
O-16	4.7900(-4)	4.7900(-4)	4.5000(-4)	4.5000(-4)
He	5.4826(-5)	5.4826(-5)	5.1861(-5)	5.1851(-5)
Si	2.2293(-4)	2.2293(-4)	2.0942(-4)	2.0942(-4)
物質番号	13	14	15	16

表 4.1.1.8 基本物質原子数密度 (黒鉛) (1/2)

原子数密度 : 1/barn

物質	IG110		PGX		B <sub>4</sub> C+C	
	密度g/cm <sup>3</sup>	1.74	1.81	1.68	1.78	1w/o
B存在割合	—	1ppm	—	5ppm	1w/o	3w/o
B <sup>10</sup>		1.9961 (-8)		9.8151 (-8)	1.8197 (-4)	5.4590 (-4)
B <sup>11</sup>		8.0853 (-8)		3.9756 (-7)	7.3706 (-4)	2.2112 (-3)
C	8.7240 (-2)	9.0750 (-2)	8.4231 (-2)	8.9245 (-2)	8.1900 (-2)	8.0246 (-2)
備考	定格運転用	低温未臨界用	定格運転用	低温未臨界用		



表4.1.8 基本物質原子数密度 (鋼構造物etc) (2/2)

原子数密度 : 1/barn

物質	SUS316	SCMV4	ハフニウム	空気
密度g/cm <sup>3</sup>	7.98	7.8	13.3	1.1771 × 10 <sup>-3</sup>
N				3.8766 (-5)
O				1.0367 (-5)
C <sub>r</sub>	1.5712 (-2)	2.0326 (-3)		
M <sub>n</sub>		3.8475 (-4)		
F <sub>e</sub>	5.8944 (-2)	8.0913 (-2)		
N <sub>i</sub>	9.8258 (-3)			
M <sub>o</sub>	1.2523 (-3)	5.3856 (-4)		
H <sub>r</sub>			4.4873 (-2)	

表 4.1.9  $^{235}\text{U}$ 核分裂断面積 $\sigma_f$  单位 : barn

Gr.	$\nu$	$\sigma_f : 700 \text{ K}$	$\sigma_f : 300 \text{ K}$
1	3.2719	1.2194	1.2194
2	2.8847	1.1787	1.1787
3	2.6876	1.2715	1.2715
4	2.5898	1.2539	1.2539
5	2.5256	1.1637	1.1637
6	2.4827	1.1768	1.1768
7	2.4573	1.2651	1.2651
8	2.4422	1.3843	1.3843
9	2.4318	1.6020	1.6020
10	2.4239	1.9399	1.9399
11	2.4207	2.5574	2.5574
12	2.4195	3.9000	3.9000
13	2.4190	6.2413	6.2413
14	2.4190	1.1262 (+1)	1.1262 (+1)
15	2.4188	1.7658 (+1)	1.7658 (+1)
16	2.4187	2.9827 (+1)	2.9827 (+1)
17	2.4188	4.7986 (+1)	4.7986 (+1)
18	2.4188	4.0834 (+1)	4.0834 (+1)
19	2.4188	2.3158 (+1)	2.3159 (+1)
20	2.4190	4.3063 (+1)	4.1434 (+1)
21	2.4190	1.9534 (+2)	2.0343 (+2)
22	2.4190	4.1624 (+2)	5.1823 (+2)

表 4.2.1 制御棒の物質組織

元素	被覆管のCo1800H	吸収体	吸収体内側
$^{10}\text{B}$	$8.7837 \times 10^{-7}$	$6.2861 \times 10^{-3}$	$1.0681 \times 10^{-7}$
$^{11}\text{B}$		$2.5462 \times 10^{-2}$	
C	$2.9895 \times 10^{-4}$	$6.6683 \times 10^{-2}$	$3.6352 \times 10^{-5}$
Si	$8.5231 \times 10^{-4}$		$1.0364 \times 10^{-4}$
Al	$6.6540 \times 10^{-4}$		$8.0913 \times 10^{-5}$
Fe	$3.7743 \times 10^{-2}$		$4.5895 \times 10^{-3}$
Cr	$1.9336 \times 10^{-2}$		$2.3513 \times 10^{-3}$
Mn	$6.5359 \times 10^{-4}$		$7.9477 \times 10^{-5}$
Ni	$2.6502 \times 10^{-2}$		$3.2226 \times 10^{-3}$

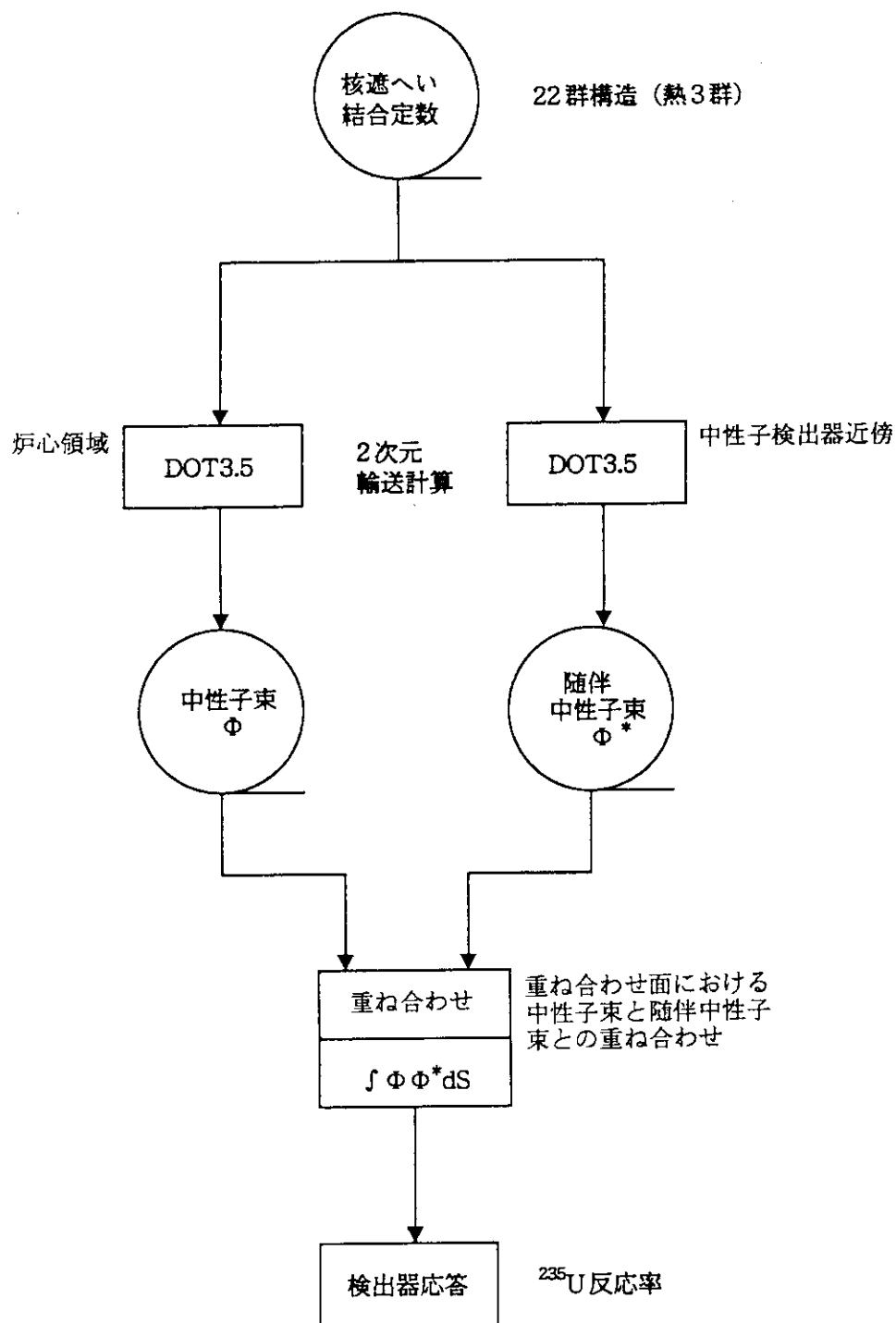


図 4. 1. 1 2次元重ね合わせ法解析手順

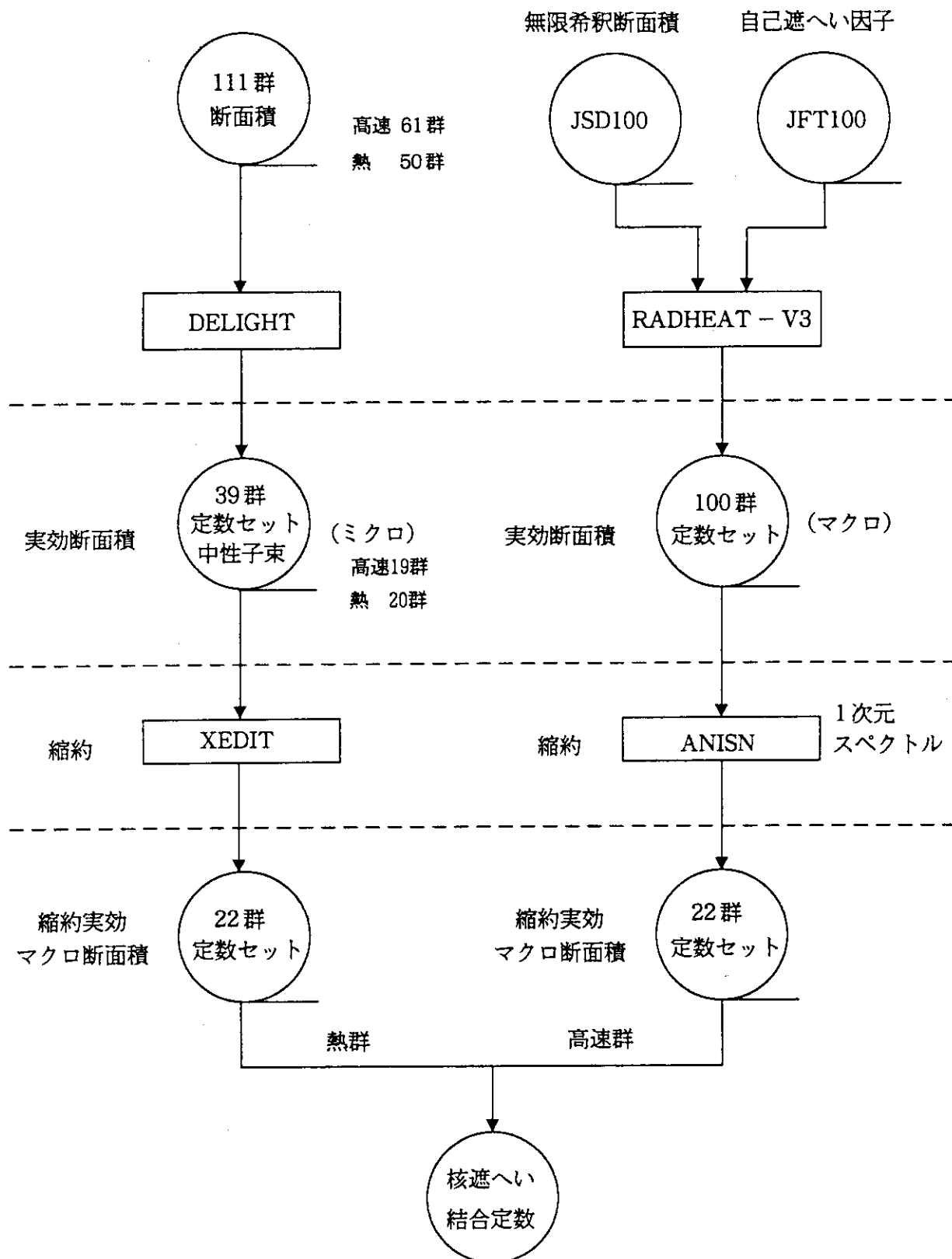


図4.1.2 群定数作成手順



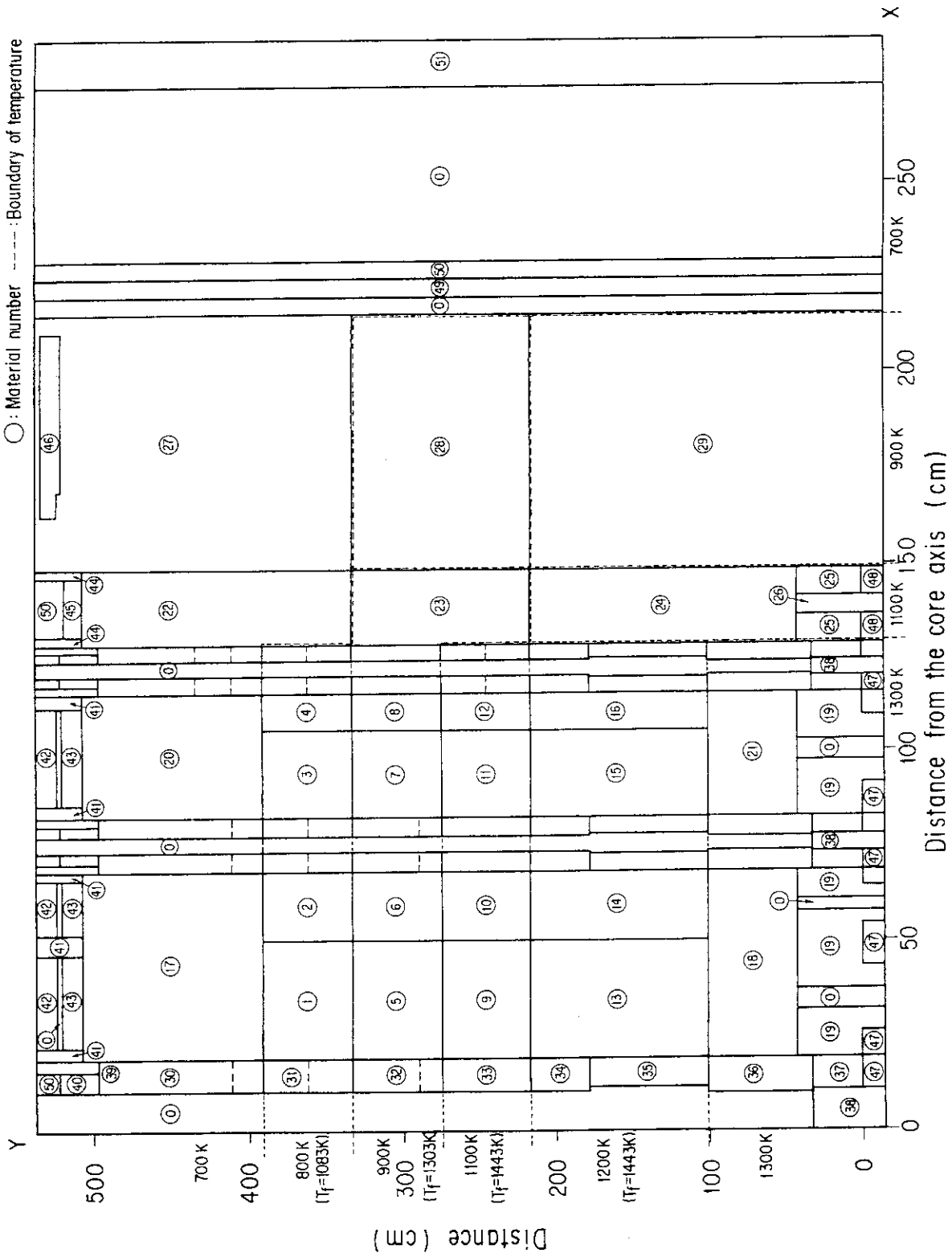
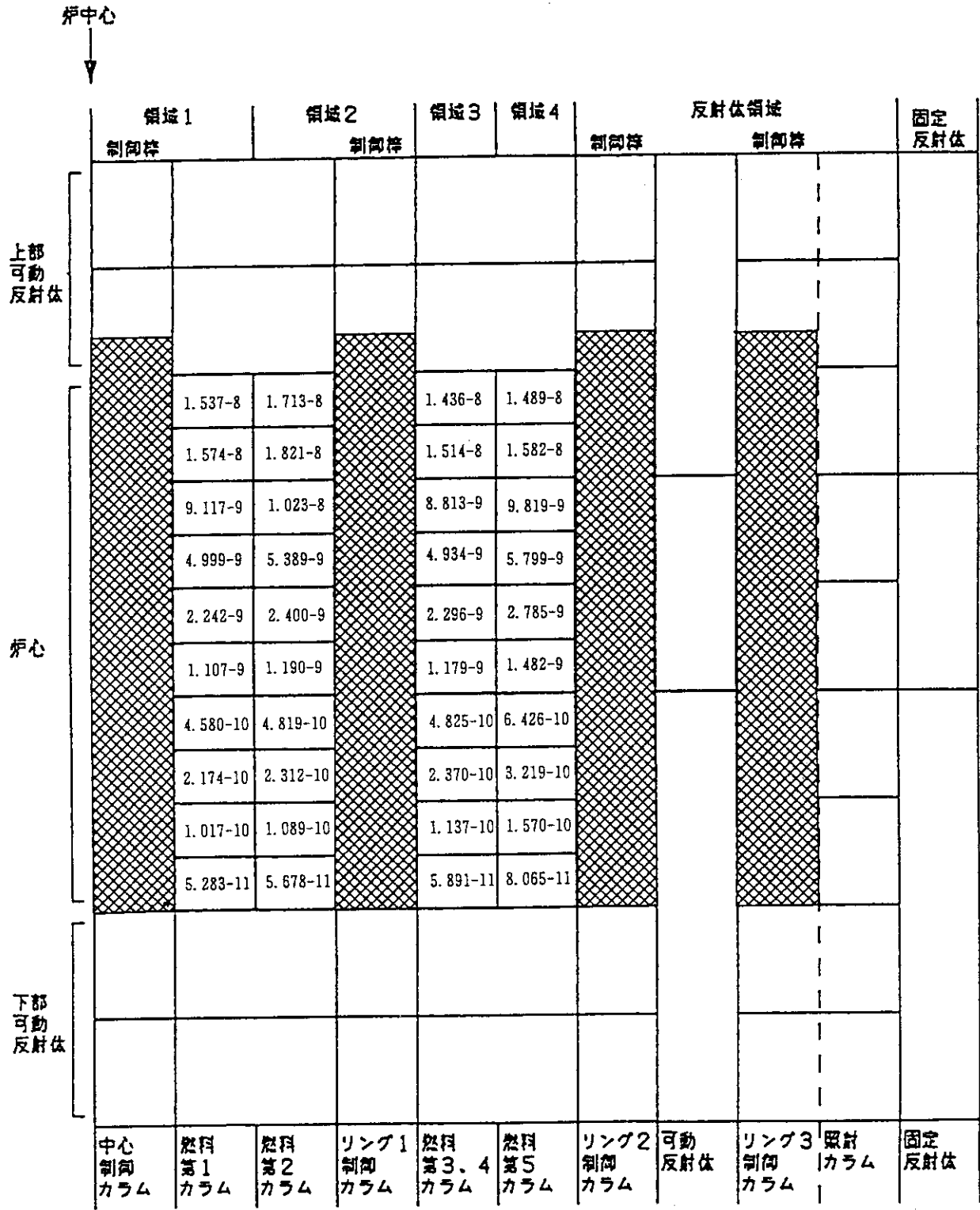


図 4.1.4 2次元解析モデル (物質指定)









単位：w/cc

図4.1.7 低温未臨界炉心出力分布  
(燃焼0日, 中性子源あり)

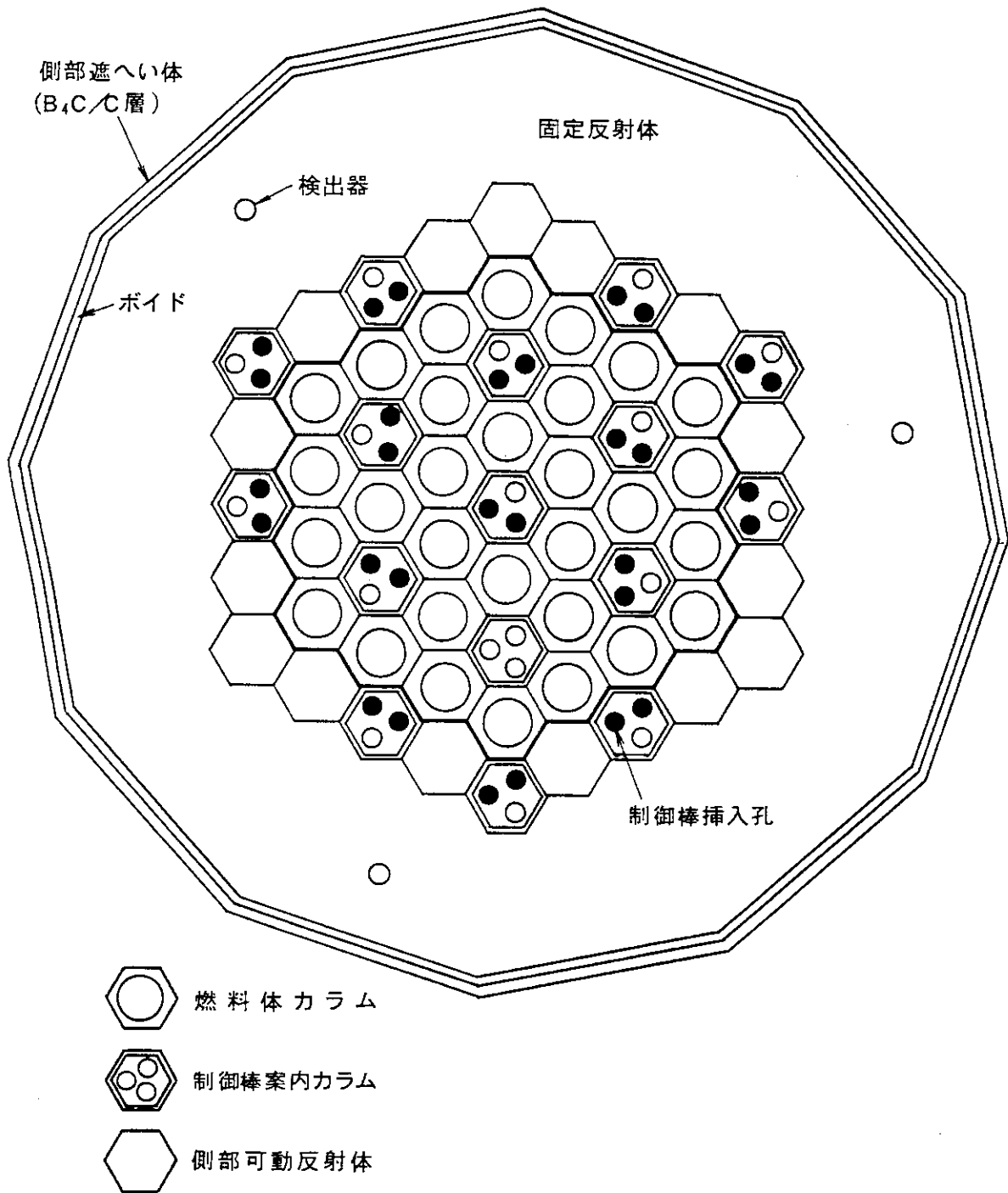
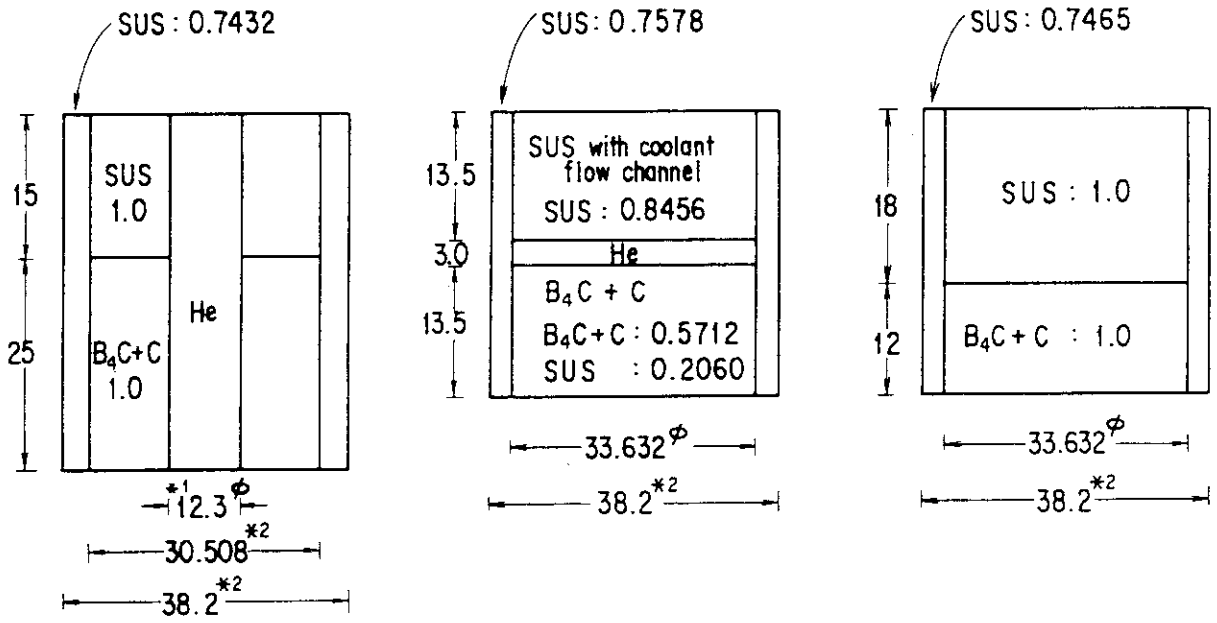


図4.2.1 炉心3次元モンテカルロ計算体系



(a) Control rod guide column

(b) Fuel column

(c) Replaceable reflector column

\* 1 : Axis of the coolant channel in the model is placed at the actual location

\* 2 : Across the flats

Unit : cm

図 4. 2. 2 炉心上部遮へい体の 3 次元モデル

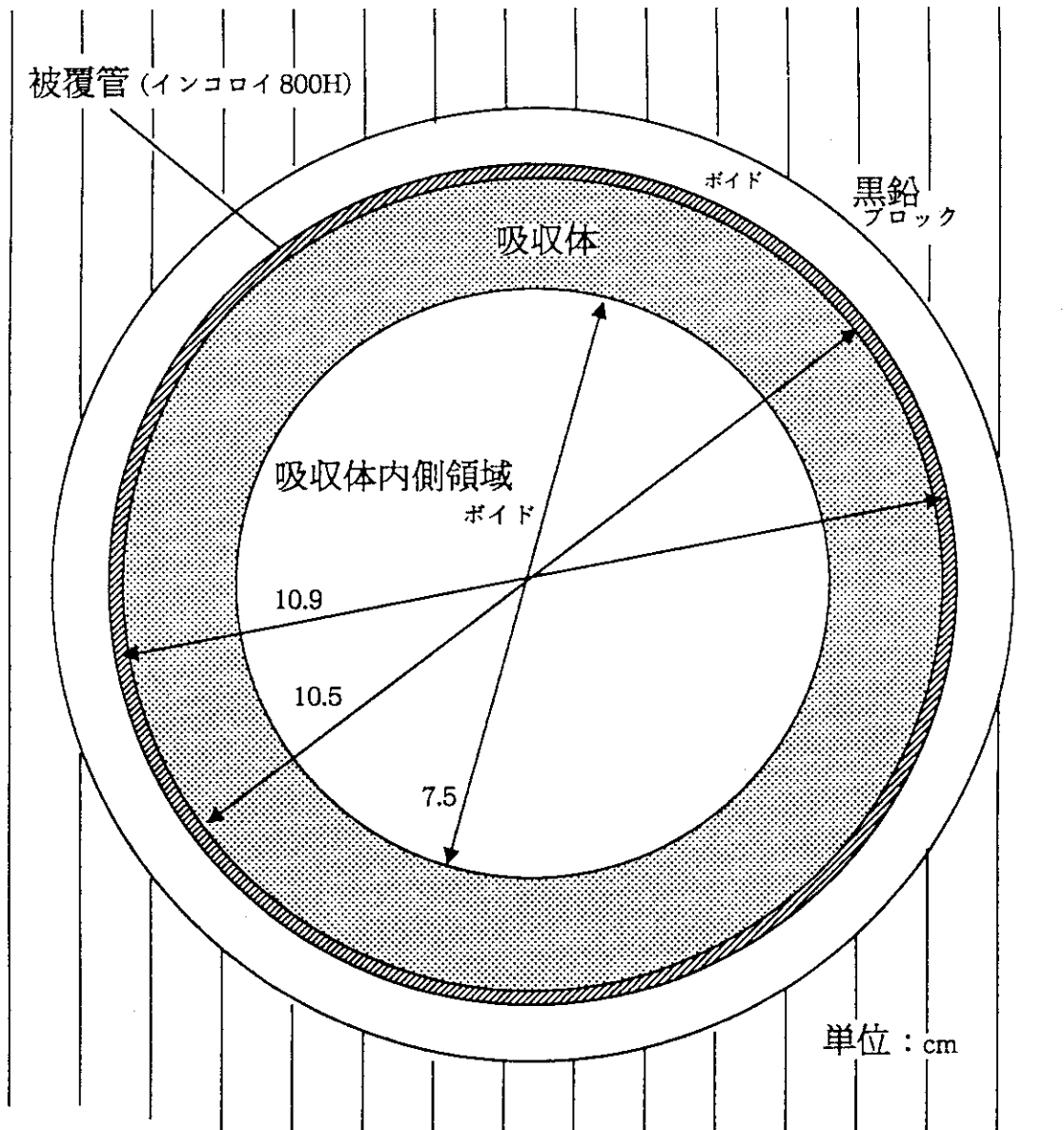


図 4. 2. 3 制御棒計算モデル

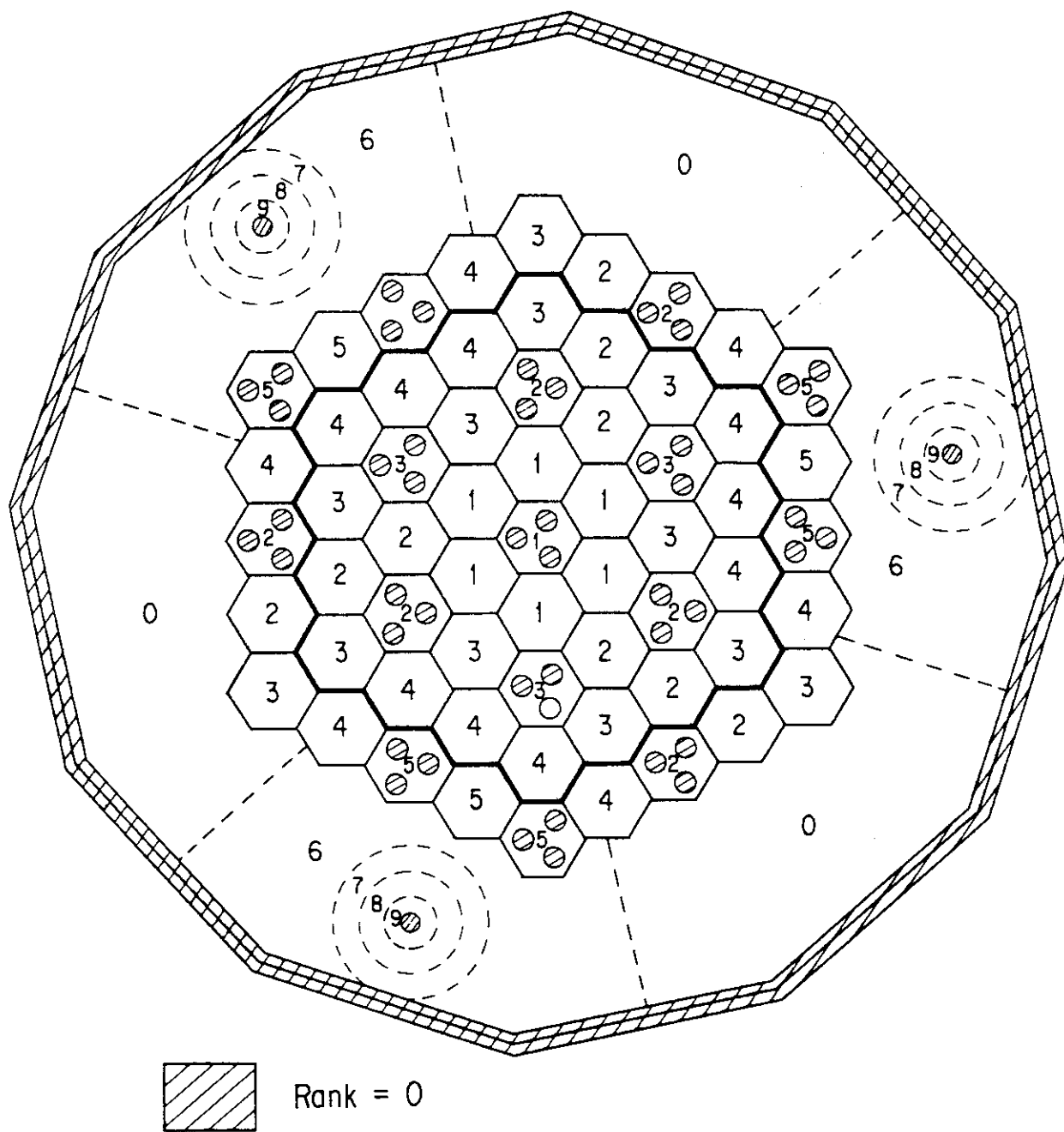


図4.2.4 スプリッティング境界とランク付け (燃料体1段断面) (1/3)

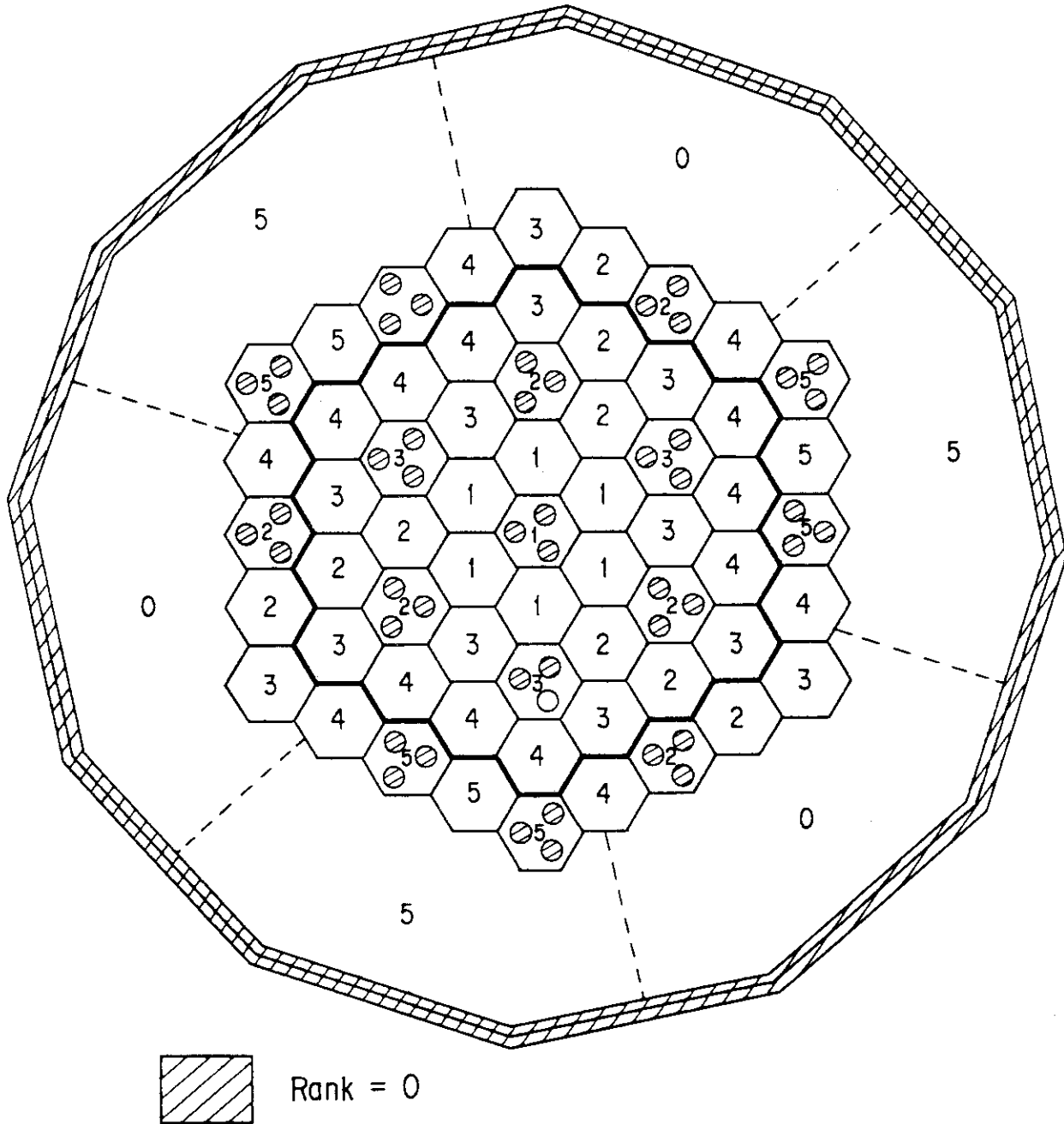


図4.2.4 スプリッティング境界とランク付け (燃料体2/3段断面) (2/3)

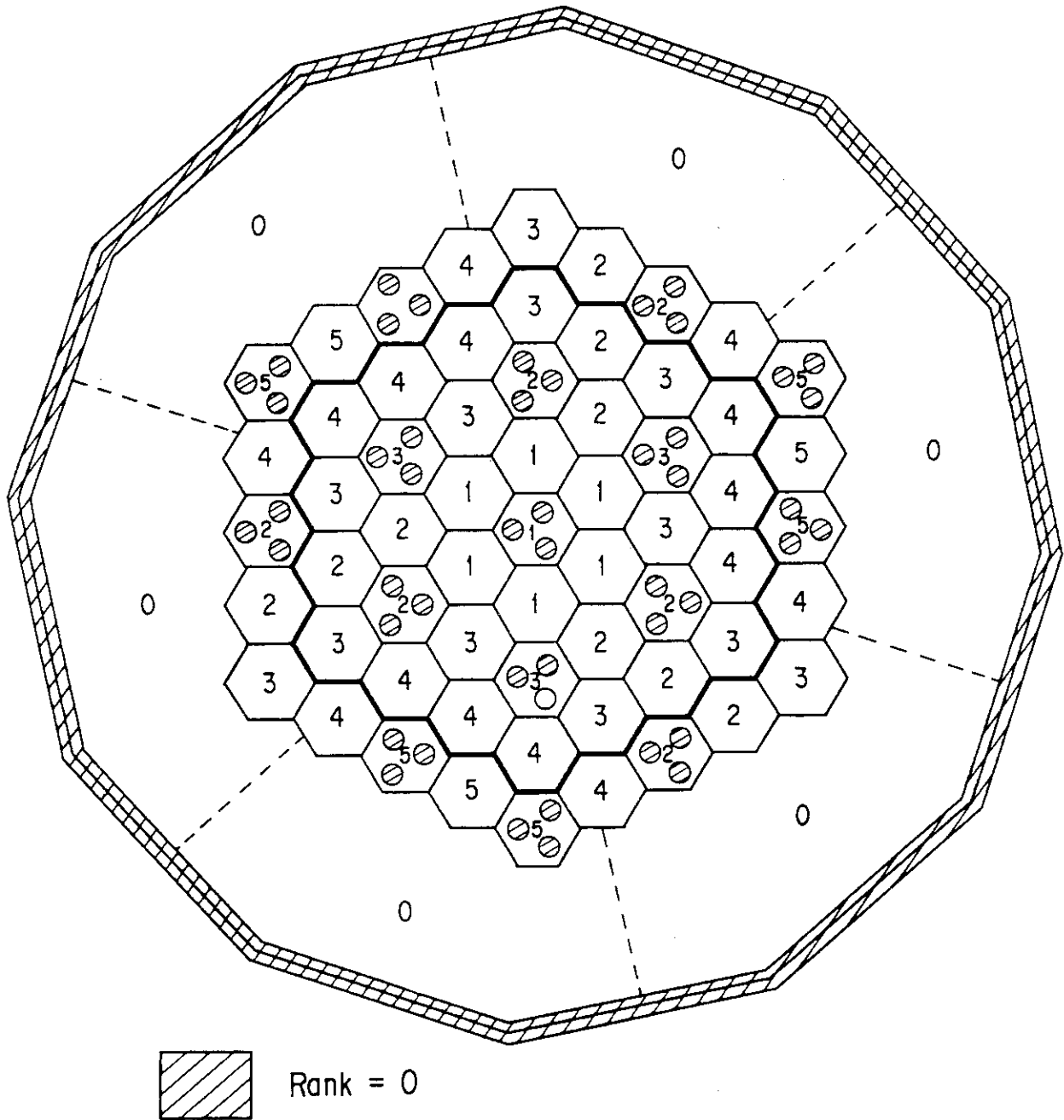


図4.2.4 スプリッティング境界とランク付け (燃料体4/5段断面) (3/3)



## 5. 中性子検出器の成立性判定法

広領域中性子検出器の成立性の判定は、2章で述べた設計条件に基づいて実施した。検出器は、標準線源により試験が行われているものを使用することとしているが、標準線源である熱中性子カラムは、HTTRと温度条件等が異なる。試験は常温黒鉛カラムで実施されており、判定条件は、このスペクトルの違いも考慮して設定した。

なお、成立性はフルエンスについても考慮する必要があるが、フルエンスの制限については、反応率ではなく中性子束の絶対値で判断して良いため2章に示したとおり、 $4 \times 10^{19}(\text{n/cm}^2)$ である。

## (1) 定格運転時

広領域NISとして利用する中性子検出器の照射に対する上限は、HTTRと標準線源で感度が異なるため、中性子束ではなく計数率で考える必要がある。上限計数率は、2章より

$$\text{最大計数率 } C_{\text{max}} < 10^{10} \text{ cps}$$

となる。ここで検出感度 $\eta_s$ は

$$\eta_s = 0.1 \text{ cps} / (\text{n/cm}^2/\text{sec})$$

上記測定時の中性子スペクトルと、HTTR炉心でのNIS挿入位置での中性子スペクトルとの違いを考慮し、広領域NISでの $^{235}\text{U}$ の核分裂反応率としての上限値 $R_{\text{max}}$ は、次のように設定することができる。

HTTR炉心でのNIS挿入位置での計数率 $C_H$ と中性子束 $\Phi_H$ の間には、次の関係式が成立する。

$$C_H = K_H \int \int \Sigma_f \Phi_H dE dV = \eta_H \int \Phi_H dE \quad (5.1)$$

ここで、 $K_H$ ： $^{235}\text{U}$ の核分裂反応率から計数率への変換係数

$\Sigma_f$ ： $^{235}\text{U}$ のマクロ核分裂断面積

$\eta_H$ ：HTTRスペクトル $\Phi_H$ における検出感度

この時、変換係数 $K$ は次のように表されることになる。

$$K_H = \eta_H / \overline{V \Sigma_{f,h}} \quad (5.2)$$

ここで、 $V$ ：検出器有感部体積

$\overline{\Sigma_{f,h}}$ ：HTTRスペクトルにおける $^{235}\text{U}$ の実効マクロ核分裂断面積  
(有感部平均温度：700K)

従って、HTTR炉心での挿入位置の $^{235}\text{U}$ 核分裂反応率の上限値は次のようになる。

$$\begin{aligned} R_{\text{max}} &= C_{\text{max}} / K_H \\ &= C_{\text{max}} \cdot \overline{V \Sigma_{f,h}} / \eta_H \end{aligned} \quad (5.3)$$

ここで、標準線源とHTTRの雰囲気温度の違いを考慮すると、HTTR炉心挿入位置では標準線源の熱中性子カラムに比べ、熱中性子のエネルギー分布が高エネルギー側に偏っていることから、検出感度 $\eta_H$ は標準線源熱中性子カラムより低くなり、

$$\eta_H < \eta_s = 0.1$$

となる。

つまり、 $R_{max}$ は保守的に、

$$R_{max} = 10^{11} \cdot V \cdot \overline{\Sigma_{f,h}} < C_{max} \cdot V \cdot \overline{\Sigma_{f,h}} / \eta_H$$

となる。HTTRに対する $^{235}\text{U}$ の実効マクロ断面積 $\overline{\Sigma_{f,h}}$ は以下のように計算により求めることができる。

HTTRの黒鉛スペクトルの格子計算から作成した $^{235}\text{U}$ の核分裂断面積は、表4.1.9に示した。22群の断面積を1群化した結果、実効ミクロ断面積は表5.1に示すように $2.96 \times 10^2$  (barn)となる。また、検出器の有感部体積及び $^{235}\text{U}$ の存在量0.12gを考慮すると、 $NV = 3.0742 \times 10^{-4}$  (1/barn)となる。以上より、

$$\overline{\Sigma_{f,h}} = \overline{\sigma_{f,h}} \cdot N \cdot V = 9.1 \times 10^{-2}$$

であるから、

$$R_{max} = 9.1 \times 10^9$$

となる。

## (2)低温未臨界時

広領域NISは、低温未臨界時において、中性子源の存在により、3 cps以上の計数率を示すことが必要である。従って、 $^{235}\text{U}$ の核分裂反応率下限値 $R_{min}$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} R_{min} &= C_{min} / K_c \\ &= C_{min} \cdot V \cdot \overline{\Sigma_{f,c}} / \eta_c \end{aligned} \quad (5.4)$$

ここで、 $C_{min}$ : 低温未臨界時最小必要計数率 (= 3 cps)

$\overline{\Sigma_{f,c}}$ : 標準線源スペクトルにおける $^{235}\text{U}$ の実効マクロ核分裂断面積  
(有感部平均温度: 300K)

$\eta_c$ : 標準線源スペクトルにおける検出感度

HTTR炉心は室温であることから、NIS挿入位置の中性子スペクトルは標準線源スペクトルのものと等しいと考えても良い。従って、検出感度は、

$$\eta_c = \eta_s = 0.1$$

となる。

定格運転時と同様、 $^{235}\text{U}$ の実効マクロ断面積 $\overline{\Sigma_{f,c}}$ は計算により求められる。

表5.2に示す結果を用い1群の実効マイクロ断面積は $4.22 \times 10^2$ (barn)となる。従って、

$$\overline{\Sigma_{f,c}} = \overline{\sigma_{f,c}} \cdot N \cdot V = 1.3 \times 10^{-1}$$

であるから、

$$R_{min} = 3.89$$

となる。

以上のことから、HTTR広領域NISの $^{235}\text{U}$ の核分裂反応率Rの上下限は、次のように設定した。

$$3.89(\text{低温未臨界時}) < R < 9.1 \times 10^9(\text{定格運転時}) \quad (5.5)$$

表5.1 黒鉛スペクトルでの<sup>235</sup>U 1群化断面積 (700K) $\sigma_r$  単位 : barn

Gr.	$\phi$ (nv)	$\sigma_r$ (barn)	$\sigma_r \phi$
1	2.7535 (-4)	1.2194	3.3576 (-4)
2	6.7579 (-4)	1.1787	7.9655 (-4)
3	1.6445 (-3)	1.2715	2.0910 (-3)
4	2.1683 (-3)	1.2539	2.7188 (-3)
5	2.0998 (-3)	1.1637	2.4435 (-3)
6	1.9124 (-3)	1.1768	2.2505 (-3)
7	1.7414 (-3)	1.2651	2.2030 (-3)
8	1.6061 (-3)	1.3843	2.2233 (-3)
9	2.2852 (-3)	1.6020	3.6609 (-3)
10	2.7717 (-3)	1.9399	5.3768 (-3)
11	2.7059 (-3)	2.5574	6.9201 (-3)
12	2.6821 (-3)	3.9000	1.0460 (-2)
13	2.6737 (-3)	6.2413	1.6687 (-2)
14	2.6703 (-3)	1.1262 (+1)	3.0073 (-2)
15	2.6687 (-3)	1.7658 (+1)	4.7124 (-2)
16	3.3348 (-3)	2.9827 (+1)	9.9467 (-2)
17	3.3341 (-3)	4.7986 (+1)	1.5999 (-1)
18	3.3331 (-3)	4.0834 (+1)	1.3610 (-1)
19	1.3328 (-3)	2.3158 (+1)	3.0865 (-2)
20	4.3298 (-3)	4.3063 (+1)	1.8645 (-1)
21	4.6125 (-1)	1.9534 (+2)	9.0101 (+1)
22	4.9251 (-1)	4.1624 (+2)	2.0500 (+2)
計	1.0		2.9585 (+2)

$$\tilde{\sigma}_r = \frac{\sum_{i=1}^{22} \sigma_r \phi}{\sum_{i=1}^{22} \phi} = 2.9585 \times 10^2$$

注) 黒鉛組成は表4.1.8のPGXとする。

表5.2 黒鉛スペクトルでの<sup>235</sup>U 1 群化断面積 (300K) $\sigma_r$  単位 : barn

Gr.	$\phi$ (nv)	$\sigma_r$ (barn)	$\sigma_r \phi$
1	7.8709 (-4)	1.2194	9.5978 (-4)
2	1.9370 (-3)	1.1787	2.2831 (-3)
3	4.6916 (-3)	1.2715	5.9654 (-3)
4	6.1688 (-3)	1.2539	7.7351 (-3)
5	5.9643 (-3)	1.1637	6.9407 (-3)
6	5.4237 (-3)	1.1768	6.3826 (-3)
7	4.9318 (-3)	1.2651	6.2392 (-3)
8	4.5438 (-3)	1.3843	6.2900 (-3)
9	6.4590 (-3)	1.6020	1.0347 (-2)
10	7.8299 (-3)	1.9399	1.5189 (-2)
11	7.6422 (-3)	2.5574	1.9544 (-2)
12	7.5744 (-3)	3.9000	2.9540 (-2)
13	7.5504 (-3)	6.2413	4.7124 (-2)
14	7.5407 (-3)	1.1262 (+1)	8.4923 (-2)
15	7.5356 (-3)	1.7658 (+1)	1.3306 (-1)
16	9.4159 (-3)	2.9827 (+1)	2.8085 (-1)
17	9.4121 (-3)	4.7986 (+1)	4.5165 (-1)
18	9.4063 (-3)	4.0834 (+1)	3.8401 (-1)
19	3.7599 (-3)	2.3159 (+1)	8.7076 (-2)
20	1.1306 (-2)	4.1434 (+1)	4.6845 (-1)
21	9.8833 (-2)	2.0343 (+2)	2.0106 (+1)
22	7.7129 (-1)	5.1823 (+2)	3.9971 (+2)
計	1.0		4.2187 (+2)

$$\bar{\sigma}_r = \frac{\sum_{i=1}^{22} \sigma_r \phi}{\sum_{i=1}^{22} \phi} = 4.2187 \times 10^2$$

注) 黒鉛組成は表4.1.8のPGXとする。

## 6. 評価結果

中性子検出器応答特性解析は、定格運転時には検出器入射中性子束の上限値を満たし、同時に低温未臨界時には中性子源により未臨界を確認できる条件を検討するために実施した。そのために、まず2次元重ね合わせ法によりその設置位置及び吸収体諸元をパラメータとした相対値解析を実施し、検出器の有感出力幅を検討した。さらに、3次元モンテカルロ計算による絶対値解析を実施し、必要な吸収体の諸元を検討し、併せて2次元重ね合わせ法との比較を実施した。ここでは、これらの結果について説明する。

## 6.1 2次元重ね合わせ法によるパラメトリック応答特性

2次元重ね合わせ法によるパラメトリック応答特性解析は以下のケースについて実施した。

- ①基本モデル（遮蔽体無し）
- ②基本モデル+1.0cm-tB<sub>4</sub>C+C(天然ほう素濃度1wt%)
- ③基本モデル+1.0cm-tB<sub>4</sub>C+C(天然ほう素濃度3wt%)
- ④基本モデル+1.0cm-tハフニウム
- ⑤基本モデル+0.5cm-tハフニウム

なお、遮へい体としては、1つは温度上昇を考慮してほう素を選択した。また、LWRで通常用いられるハフニウムも候補として選択した。

## 6.1.1 輸送計算結果

定格運転時における中性子束及び随伴中性子束の計算結果を図6.1.1～図6.1.6に示した。また、低温未臨界時における中性子束及び随伴中性子束の計算結果を図6.1.7～図6.1.12に示した。なお、等高線図の群構造は以下の通りである。

高速群	第1群～第8群	(14.918MeV～165.73keV)
中速群	第9群～第19群	(165.73keV～2.3824eV)
熱群	第20群～第22群	(2.3824eV以下)

## 6.1.2 炉心及び遮へい設計計算との比較

本計算結果の中性子束を広領域中性子検出器位置において従来のHTTR設計における炉心計算(6群)及び遮へい計算(21群)と比較した。結果を表6.1.1及び図6.1.13に示す。

遮へい設計計算に比べ本計算結果は高中速群がファクター4程度高くなっている。本計算では、広領域中性子検出器の応答を保守的に評価するため、上方向に偏った状態の炉心出力分布のもとで全炉心を対象とした計算を実施していること、また、本計算では中央以外の制御棒案内ブロックもモデルに含んでいる(制御棒はモデル化されていないため、ボイドの占める体積が大きくなっている)こと等が原因と考えられる。高中速群を一致させると、4.1節で議論したとおり熱群の多群構造化による上方散乱効果の導入の

効果があったことを示す結果となる。

また、同じ出力分布の炉心計算と比較すると、中速群がファクター2程度低くなっているが、逆に熱群はファクター2程度高くなっている。これは、高中速群での定数の違い（JSD-100とDELIGHT）が原因と考えられる他、熱群が高くなっている要因として制御棒が本計算ではモデル化されていないことも考えられる。

本結果から、広領域中性子検出器の応答を解析するための計算としては十分保守的なものとなっており、かつ、遮へい及び炉心設計結果との比較から、十分妥当な結果を与えていると判断できる。

### 6.1.3 $^{235}\text{U}$ 反応率計算

#### (1) 重ね合わせ面の位置

本来、重ね合わせ法の原理によると、重ね合わせ面を線源領域（FowardとAdjointの両線源）の中間にとれば、反応率は中性子束及び随伴中性子束の重ね合わせ面位置によらず一定となる。

ここでは、 $\text{B}_4\text{C}+\text{C}$  (B:3wt%) 遮へい体を取り上げ、重ね合わせ面の位置と反応率の相関を明らかとした。表6.1.2及び表6.1.3は定格運転時及び低温未臨界時における広領域中性子検出器の $^{235}\text{U}$  反応率計算結果である。これらの反応率は、広領域中性子検出器より19cm離れた位置に重ね合わせ面をとって求めたが、この周辺で5cm間隔で重ね合わせ面を変えて反応率を求めてみた。この結果を図6.1.14に示した。

図において、25cm近傍で反応率の変化に変曲点が生じているが、重ね合わせ面が中性子束計算モデル（図4.1.2）において固定反射体から外側に位置するようになるためと考えられる。すなわち、随伴中性子束は固定反射体中で評価されているのに対し、重ね合わせ面上の広領域中性子検出器後方の中性子束はボイド領域のもので、減衰が固定反射体より小さくなっているため、 $\phi\phi^*$ は固定反射体が続いている場合より高くなっている。この変曲点位置より前半だけでの反応率の変化に着目すると、ほぼ25cm近傍で反応率が安定するようになることが分かる。25cmより内側前半部でのわずかな反応率の変化は、重ね合わせ面上の各メッシュ点位置での随伴中性子束と重ね合わせるべき中性子束を2次元計算結果から位置及び角度について内外挿して求めるため、その時の数値計算誤差が原因で生じていると推定される。これらの結果から重ね合わせ面の半径を19cmとした。

#### (2) $^{235}\text{U}$ 反応率

表6.1.2は定格運転時における広領域中性子検出器の $^{235}\text{U}$  反応率計算結果である。中性子検出器の軸方向挿入位置は中性子検出器有感部下端が上部可動反射体の上段と下段の境界にある場合である。表6.1.2から、いずれの遮へい構造案においても、 $^{235}\text{U}$  反応率は21及び22群、従って、0.65eV以下の熱中性子によってもたらされており、21群は最も寄与が大きく、22群に比較してファクター2程度大きいことが分かる。

表6.1.3は低温未臨界時における広領域中性子検出器の $^{235}\text{U}$  反応率計算結果である。表から、いずれの遮へい構造案においても、 $^{235}\text{U}$  反応率はやはり21及び22群の熱中性子によってもたらされていることが分かる。低温未臨界時では22群の寄与が最も大きく、

遮へい体構造によりファクター5から2程度、21群より大きくなっている。この定格運転時との寄与の違いは、熱中性子のマックスウェル分布の温度依存性によるものである。

以上からいずれの結果も、低エネルギーを1群ではなく多群で表すことにより上方散乱を考慮できるようにしたことが、より正しい結果を与えていることを示している。なお、中性子検出器挿入高さについては、検出器の線形性の観点から、既に決定されているが、その効果を調べた。結果を付録Bに示す。

### (3) $\phi\phi^*$ 空間分布

中性子束 $\phi$ 及び随伴中性子束 $\phi^*$ の各位置での積 $\phi\phi^*$ は、その位置の中性子からの反応率への寄与の総量を表すものである。広領域中性子検出器中心軸から19cm離れた重ね合わせ面での $\phi\phi^*$ の空間分布を調べると、図6.1.15に示す等高線図が得られた。

この等高線図から、広領域中性子検出器の $^{235}\text{U}$ 反応率は、炉心中心軸方向からのものが最も大きく、角度が離れるに従い小さくなり、後方からの寄与は無視できる程度であることが分かる。また、中性子束は広領域中性子検出器の斜め下方向で高いため、重ね合わせ面での $\phi\phi^*$ 分布は、高速及び中速群では広領域中性子検出器より下の方でピークが生じているが、反応率への寄与を支配している熱群は、広領域中性子検出器に最も近くなる位置、すなわち広領域中性子検出器と同じ高さレベルにピークがある。

これらの結果は、広領域中性子検出器に適切な遮へい体を施す場合に、どの位置にどの程度の遮へいを設置すればよいかを知る有力な情報となると考えられる。

#### 6.1.4 広領域中性子検出器遮へい体諸元

広領域中性子検出器有感部周辺の遮へい体の各構造について、定格運転時から低温未臨界時までの $^{235}\text{U}$ 反応率の変化の範囲を示すと図6.1.16のようになる。なお、同図には、 $\text{B}_4\text{C}/\text{C}$ 遮へい体の場合について $^{235}\text{U}$ の断面積の遮へい体が存在することにより変化する効果を補正した結果も示した。詳細は付録Cに示す。

低温未臨界時については、中性子源である $^{252}\text{Cf}$ の半減期2.638年に基づく3年(減衰率0.455)崩壊後の反応率を示した。図から $\text{B}_4\text{C}/\text{C}$ 遮へい体では、ボロン含有率と共に反応率が低下していくが、5%程度でほぼ遮へい効果が飽和すると予想される。さらに反応率を低下させるには、ハフニウムが有効である。また、定格運転時と低温未臨界時との反応率の幅は、9桁程度であるが、有感部周辺の遮へい体による遮へい効果が大きくなるにつれ、この幅は増加する傾向にある( $\text{B}_4\text{C}/\text{C}$ 遮へい体(ほう素濃度3wt%)の場合、遮へい体無しの場合に比べ、幅は2.4倍ほど広がる)。従って、反応率基準を満たすため、遮へい体の遮へい効果を大きくしなければならない場合には、基準の上下限を同時に満たす成立範囲がせばめられることとなる。

本計算結果は、 $S_N$ 計算において制御棒が正確にモデル化されていないなどの効果があり、相対的な傾向を見るための解析となっているが反応率の幅は議論できる。すなわち、

\*: 但し、輸送計算誤差と吸収体の減損効果については、考慮していない。7章には、そこまで踏み込んだ検討結果を示した。



図の曲線からハフニウム、 $B_4C+C$ 両者共に成立する可能性のあることを示している\*。次節において絶対値評価を実施することにより、具体的な吸収体諸元を決定できる。なお、HTTRでは、遮へい体の製作性と設置位置の温度条件を考慮し検討した結果、現状は $B_4C/C$ 遮へい体を設置する可能性が高い。従って、本報では、次節以降 $B_4C/C$ 遮へい体に絞って検討結果を示す。

## 6.2 3次元モンテカルロ計算による詳細解析

モンテカルロ計算は、最も計算時間のかからない遮へい体無しの場合について実施し、その絶対値変換係数により他の結果を補正することとした。

モンテカルロコードMORSEによる計算は、1バッチ当たりの中性子発生数を250個とし、広領域中性子検出器位置での $^{235}\text{U}$ 反応率が20%以下の統計精度が得られるまで、リスタート機能を使いバッチの積み上げを行った。この結果、遮へい体のない場合の中性子検出器位置における $^{235}\text{U}$ 反応率は表6.2.1に示すようになった。低温未臨界時においては、中性子源から発生する中性子とこれにより燃料体で増倍発生する中性子とを比較すると、広領域中性子検出器反応率への寄与は後者の方が約4倍高くなっていることが確認された。

表6.2.1には第4章での2次元重ね合わせ法による反応率評価結果も併せて示した。3次元モンテカルロ法による評価結果をこれと比較すると、定格運転時で約2/3倍、低温未臨界時で約1/4倍となっている。3次元計算が2次元計算より低い結果となっているのは、前者は制御棒の挿入状態を正確に模擬しているのに対し、後者はRZモデルの制約により制御棒はモデルから省略され、その挿入による中性子吸収効果が無視されていることが大きな要因と考えられる。定格運転時に比べ低温未臨界時の方が低くなっているのは、前者では $R_2$ を除く制御棒が全引き抜き状態としており、制御棒の挿入効果が小さいことによるためと考えられる。なお、低温未臨界時のモンテカルロ計算において、制御棒をモデルから無視し2次元計算と同一条件とした場合でも、やはり2次元計算に比べ約3/5倍の結果となっている。これから逆に、単に制御棒挿入のモデル化の有無だけでなく、制御棒案内ブロックのモデル化の違い等も、両手法の結果の差に寄与していることが推定される。

次に、広領域中性子検出器応答特性についてまとめる。

6.1節での2次元重ね合わせ法による、広領域中性子検出器反応率の検出器まわり遮へい体設置効果のパラメータ計算結果、及び本章でのモンテカルロ計算結果から、図6.2.1の相関図がまとめられる。

6.1節では、輸送計算による相対値は条件を満たす可能性があることを示していたが、モンテカルロコードによる計算では、絶対値が下がること、そして、反応率の上下限値の幅が広がる結果を示すこととなった。反応率の幅については、遮へい体無しでは成立するが、遮へい体を3cm厚とすると成立解はないことが分かった。遮へい体無しでもっと絶対値を下げる工夫を実施するか、遮へい体を2cm程度付け、成立解を探すかする必要があり、前者については、その検討結果を付録Bに示した。検出器の設置位置を上下に移動させた場合の感度を調べたが、絶対値を1桁下げるために配置を100cm以上動かす必要があり、非現実的である。いずれにしても絶対値の議論をする場合には、輸送計算誤差や吸収体の減損効果を考慮する必要があり、さらに厳しくなることとなる。次章には、この解析結果を踏まえて、広領域中性子検出器の成立性を検討した結果を示す。

表 6.1.1.1 有感部中心位置における中性子束

	中性子束 n/cm <sup>2</sup> /sec		
	炉心計算 (6群)	今回計算 (22群)	遮へい計算 (21群) **3
高速群 — 0.166 keV **1	7.09 × 10 <sup>7</sup>	1.01 × 10 <sup>8</sup>	2.65 × 10 <sup>7</sup>
中速群 — 2.38 eV **2	1.15 × 10 <sup>9</sup>	6.74 × 10 <sup>8</sup>	1.59 × 10 <sup>8</sup>
熱群	7.63 × 10 <sup>11</sup>	1.86 × 10 <sup>12</sup>	7.43 × 10 <sup>11</sup>

\* 1 : 炉心計算は 0.183 keV  
 \* 2 : 遮へい計算は 1.13 eV  
 \* 3 : 総調設ベース (2次元モデル、出力分布が異なる)

表6.1.2 検出器遮へい体と反応率 (定格運転)

エネルギー群	遮 蔽 体				( f i s s i o n / s e c )	
	無 し	B <sub>4</sub> C + C ( B 1w/o)	B <sub>4</sub> C + C ( B 3w/o)	Hafnium (1.0cm 厚)	Hafnium (0.5cm 厚)	
1	4.46 × 10 <sup>6</sup>	1.69 × 10 <sup>5</sup>	6.77 × 10 <sup>5</sup>	1.33 × 10 <sup>5</sup>	3.68 × 10 <sup>5</sup>	
2	4.61 × 10 <sup>6</sup>	1.72 × 10 <sup>5</sup>	6.73 × 10 <sup>5</sup>	1.26 × 10 <sup>5</sup>	3.67 × 10 <sup>5</sup>	
3	5.35 × 10 <sup>6</sup>	1.98 × 10 <sup>5</sup>	7.63 × 10 <sup>5</sup>	1.37 × 10 <sup>5</sup>	4.15 × 10 <sup>5</sup>	
4	1.03 × 10 <sup>7</sup>	3.80 × 10 <sup>5</sup>	1.46 × 10 <sup>6</sup>	2.55 × 10 <sup>5</sup>	7.91 × 10 <sup>5</sup>	
5	9.27 × 10 <sup>6</sup>	3.41 × 10 <sup>5</sup>	1.31 × 10 <sup>6</sup>	2.25 × 10 <sup>5</sup>	7.06 × 10 <sup>5</sup>	
6	7.74 × 10 <sup>6</sup>	2.85 × 10 <sup>5</sup>	1.09 × 10 <sup>6</sup>	1.87 × 10 <sup>5</sup>	5.89 × 10 <sup>5</sup>	
7	6.73 × 10 <sup>6</sup>	2.47 × 10 <sup>5</sup>	9.52 × 10 <sup>5</sup>	1.62 × 10 <sup>5</sup>	5.12 × 10 <sup>5</sup>	
8	6.23 × 10 <sup>6</sup>	2.29 × 10 <sup>5</sup>	8.83 × 10 <sup>5</sup>	1.49 × 10 <sup>5</sup>	4.73 × 10 <sup>5</sup>	
9	1.10 × 10 <sup>7</sup>	4.05 × 10 <sup>5</sup>	1.56 × 10 <sup>6</sup>	2.60 × 10 <sup>5</sup>	8.33 × 10 <sup>5</sup>	
10	1.33 × 10 <sup>7</sup>	4.87 × 10 <sup>5</sup>	1.88 × 10 <sup>6</sup>	3.09 × 10 <sup>5</sup>	9.98 × 10 <sup>5</sup>	
11	1.53 × 10 <sup>7</sup>	5.63 × 10 <sup>5</sup>	2.18 × 10 <sup>6</sup>	3.51 × 10 <sup>5</sup>	1.15 × 10 <sup>6</sup>	
12	1.82 × 10 <sup>7</sup>	6.66 × 10 <sup>5</sup>	2.57 × 10 <sup>6</sup>	4.05 × 10 <sup>5</sup>	1.35 × 10 <sup>6</sup>	
13	2.17 × 10 <sup>7</sup>	7.92 × 10 <sup>5</sup>	3.04 × 10 <sup>6</sup>	4.66 × 10 <sup>5</sup>	1.59 × 10 <sup>6</sup>	
14	2.59 × 10 <sup>7</sup>	9.39 × 10 <sup>5</sup>	3.56 × 10 <sup>6</sup>	5.20 × 10 <sup>5</sup>	1.86 × 10 <sup>6</sup>	
15	3.08 × 10 <sup>7</sup>	1.10 × 10 <sup>7</sup>	4.10 × 10 <sup>6</sup>	5.46 × 10 <sup>5</sup>	2.11 × 10 <sup>6</sup>	
16	4.65 × 10 <sup>7</sup>	1.65 × 10 <sup>7</sup>	5.91 × 10 <sup>6</sup>	7.27 × 10 <sup>5</sup>	3.04 × 10 <sup>6</sup>	
17	5.68 × 10 <sup>7</sup>	1.96 × 10 <sup>7</sup>	6.66 × 10 <sup>6</sup>	7.04 × 10 <sup>5</sup>	3.43 × 10 <sup>6</sup>	
18	6.90 × 10 <sup>7</sup>	2.33 × 10 <sup>7</sup>	7.38 × 10 <sup>6</sup>	5.63 × 10 <sup>5</sup>	3.77 × 10 <sup>6</sup>	
19	4.83 × 10 <sup>7</sup>	1.60 × 10 <sup>7</sup>	4.85 × 10 <sup>6</sup>	4.09 × 10 <sup>5</sup>	2.73 × 10 <sup>6</sup>	
20	1.81 × 10 <sup>8</sup>	6.20 × 10 <sup>7</sup>	1.93 × 10 <sup>7</sup>	1.61 × 10 <sup>6</sup>	1.06 × 10 <sup>7</sup>	
21	7.99 × 10 <sup>8</sup>	2.74 × 10 <sup>8</sup>	8.31 × 10 <sup>7</sup>	7.90 × 10 <sup>6</sup>	5.15 × 10 <sup>7</sup>	
22	4.89 × 10 <sup>10</sup>	1.57 × 10 <sup>10</sup>	4.35 × 10 <sup>9</sup>	3.74 × 10 <sup>8</sup>	2.73 × 10 <sup>9</sup>	
計	1.29 × 10 <sup>11</sup>	4.32 × 10 <sup>10</sup>	1.27 × 10 <sup>10</sup>	1.17 × 10 <sup>9</sup>	7.92 × 10 <sup>9</sup>	

表6.1.3 検出器遮へい体と反応率 (低温未臨界)

エネルギー群	体				
	無	遮	蔽	Hafnium (1.0cm 厚)	Hafnium (0.5cm 厚)
	無	B <sub>4</sub> C+C (B 1w/o)	B <sub>4</sub> C+C (B 3w/o)	Hafnium (1.0cm 厚)	Hafnium (0.5cm 厚)
1	2.17 × 10 <sup>-2</sup>	5.87 × 10 <sup>-3</sup>	1.83 × 10 <sup>-3</sup>	3.88 × 10 <sup>-4</sup>	9.47 × 10 <sup>-4</sup>
2	2.07 × 10 <sup>-2</sup>	5.50 × 10 <sup>-3</sup>	1.66 × 10 <sup>-3</sup>	3.35 × 10 <sup>-4</sup>	8.61 × 10 <sup>-4</sup>
3	2.32 × 10 <sup>-2</sup>	6.08 × 10 <sup>-3</sup>	1.81 × 10 <sup>-3</sup>	3.50 × 10 <sup>-4</sup>	9.31 × 10 <sup>-4</sup>
4	4.41 × 10 <sup>-2</sup>	1.15 × 10 <sup>-2</sup>	3.39 × 10 <sup>-3</sup>	6.38 × 10 <sup>-4</sup>	1.74 × 10 <sup>-3</sup>
5	3.91 × 10 <sup>-2</sup>	1.02 × 10 <sup>-2</sup>	3.01 × 10 <sup>-3</sup>	5.58 × 10 <sup>-4</sup>	1.54 × 10 <sup>-3</sup>
6	3.24 × 10 <sup>-2</sup>	8.41 × 10 <sup>-3</sup>	2.50 × 10 <sup>-3</sup>	4.59 × 10 <sup>-4</sup>	1.27 × 10 <sup>-3</sup>
7	2.80 × 10 <sup>-2</sup>	7.27 × 10 <sup>-3</sup>	2.17 × 10 <sup>-3</sup>	3.95 × 10 <sup>-4</sup>	1.10 × 10 <sup>-3</sup>
8	2.58 × 10 <sup>-2</sup>	6.69 × 10 <sup>-3</sup>	2.00 × 10 <sup>-3</sup>	3.61 × 10 <sup>-4</sup>	1.01 × 10 <sup>-3</sup>
9	4.53 × 10 <sup>-2</sup>	1.18 × 10 <sup>-2</sup>	3.51 × 10 <sup>-3</sup>	7.38 × 10 <sup>-4</sup>	1.77 × 10 <sup>-3</sup>
10	5.43 × 10 <sup>-2</sup>	1.41 × 10 <sup>-2</sup>	4.21 × 10 <sup>-3</sup>	6.27 × 10 <sup>-4</sup>	2.12 × 10 <sup>-3</sup>
11	6.26 × 10 <sup>-2</sup>	1.62 × 10 <sup>-2</sup>	4.85 × 10 <sup>-3</sup>	8.32 × 10 <sup>-4</sup>	2.42 × 10 <sup>-3</sup>
12	7.38 × 10 <sup>-2</sup>	1.91 × 10 <sup>-2</sup>	5.69 × 10 <sup>-3</sup>	9.51 × 10 <sup>-4</sup>	2.83 × 10 <sup>-3</sup>
13	8.79 × 10 <sup>-2</sup>	2.26 × 10 <sup>-2</sup>	6.68 × 10 <sup>-3</sup>	1.08 × 10 <sup>-3</sup>	3.30 × 10 <sup>-3</sup>
14	1.05 × 10 <sup>-1</sup>	2.68 × 10 <sup>-2</sup>	7.75 × 10 <sup>-3</sup>	1.18 × 10 <sup>-3</sup>	3.80 × 10 <sup>-3</sup>
15	1.25 × 10 <sup>-1</sup>	3.14 × 10 <sup>-2</sup>	8.82 × 10 <sup>-3</sup>	1.19 × 10 <sup>-3</sup>	4.25 × 10 <sup>-3</sup>
16	1.89 × 10 <sup>-1</sup>	4.69 × 10 <sup>-2</sup>	1.25 × 10 <sup>-2</sup>	1.50 × 10 <sup>-3</sup>	5.97 × 10 <sup>-3</sup>
17	2.32 × 10 <sup>-1</sup>	5.63 × 10 <sup>-2</sup>	1.39 × 10 <sup>-2</sup>	1.29 × 10 <sup>-3</sup>	6.47 × 10 <sup>-3</sup>
18	2.84 × 10 <sup>-1</sup>	6.71 × 10 <sup>-2</sup>	1.50 × 10 <sup>-2</sup>	7.98 × 10 <sup>-4</sup>	6.82 × 10 <sup>-3</sup>
19	2.00 × 10 <sup>-1</sup>	4.63 × 10 <sup>-2</sup>	9.66 × 10 <sup>-3</sup>	5.85 × 10 <sup>-4</sup>	4.96 × 10 <sup>-3</sup>
20	4.91 × 10 <sup>-1</sup>	1.14 × 10 <sup>-1</sup>	2.37 × 10 <sup>-2</sup>	1.51 × 10 <sup>-3</sup>	1.26 × 10 <sup>-2</sup>
21	8.81 × 10 <sup>1</sup>	2.22 × 10 <sup>1</sup>	4.83	3.90 × 10 <sup>-1</sup>	2.84
22	4.70 × 10 <sup>2</sup>	1.06 × 10 <sup>2</sup>	1.79 × 10 <sup>1</sup>	8.77 × 10 <sup>-1</sup>	9.92
計	5.60 × 10 <sup>2</sup>	1.29 × 10 <sup>2</sup>	2.28 × 10 <sup>1</sup>	1.28	1.28 × 10 <sup>1</sup>

表 6.2.1 中性子検出器反応率の3次元計算結果

	MORSE計算による 反応率 (FSD)	DOT計算による 反応率	MORSE / DOT
定格運転時	$8.4772 \times 10^{10}$ ( 0.0711 )	$1.29 \times 10^{11}$	0.657
低温未臨界時 (CR挿入)	$1.3879 \times 10^2$ ( 0.0740 ) [ 燃料体 $1.097 \times 10^2$ (0.0916) 中性子源 $2.911 \times 10^1$ (0.0739) ]	$5.60 \times 10^2$	0.248
低温未臨界時 (CR未挿入)	$3.1858 \times 10^2$ ( 0.0688 ) [ 燃料体 $2.313 \times 10^2$ (0.0835) 中性子源 $8.729 \times 10^1$ (0.1184) ]	$5.60 \times 10^2$	0.569

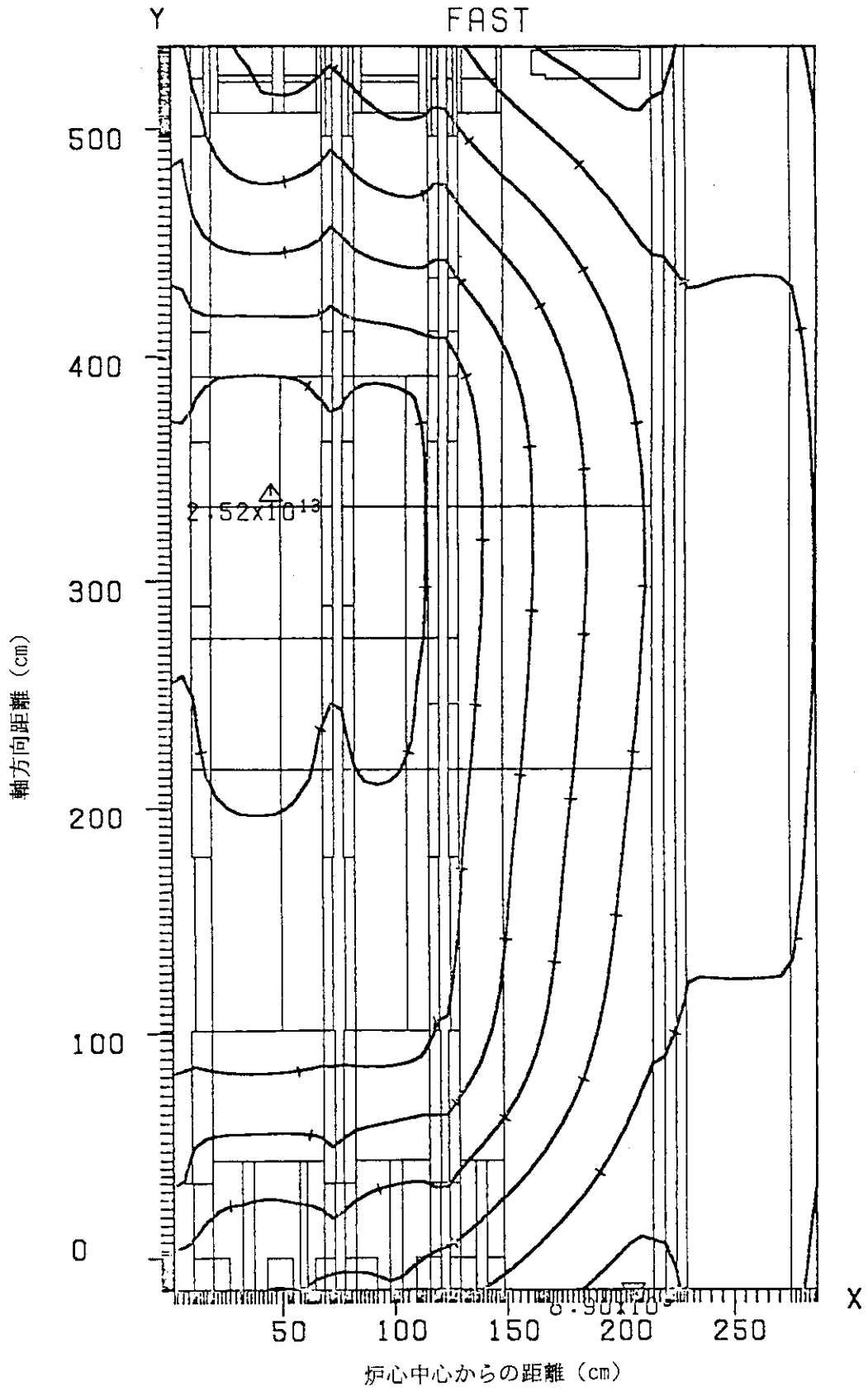


図6.1.1 中性子束等高線図 (定格運転時, 高速群) (1/3)

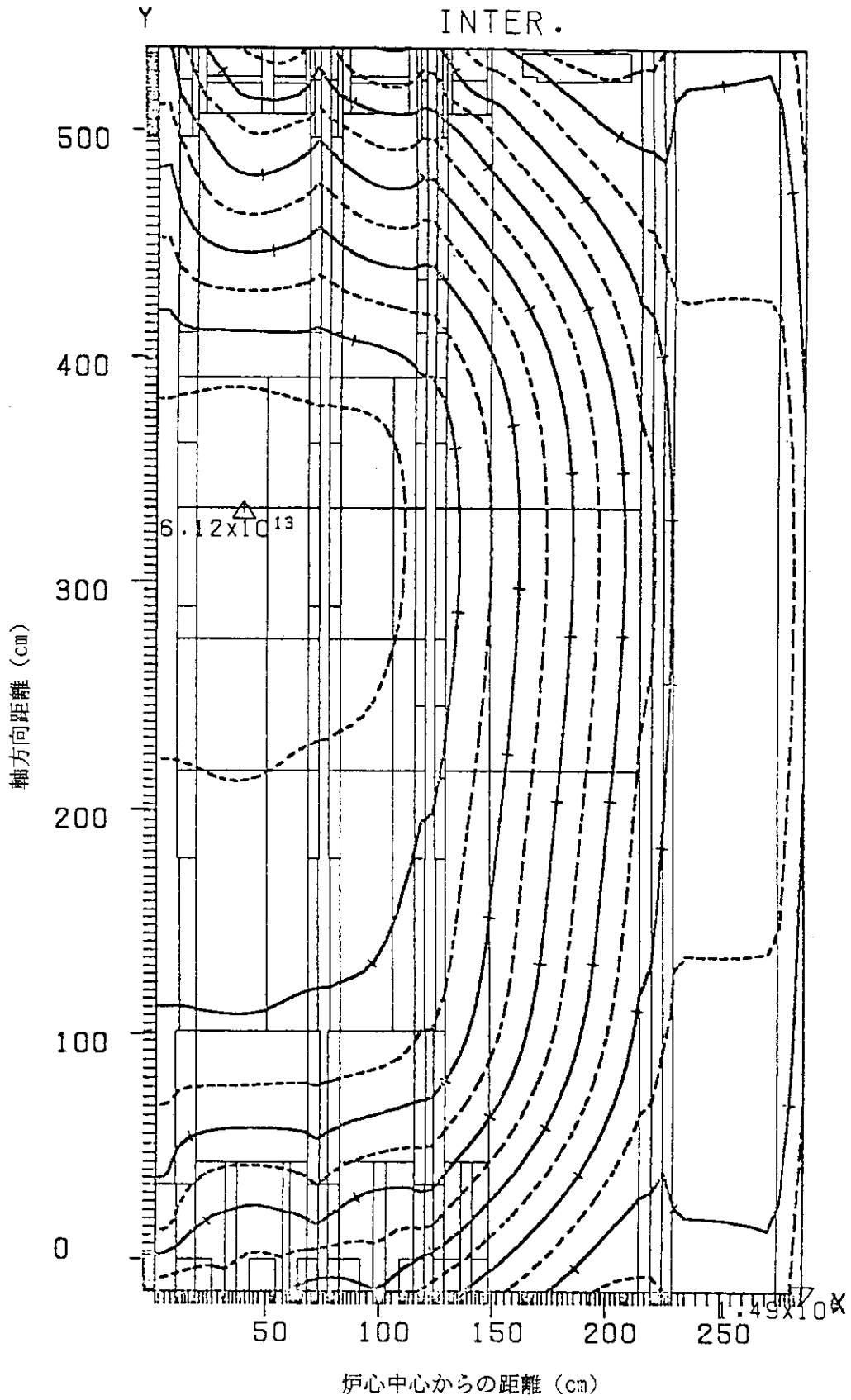


図6.1.1 中性子束等高線図 (定格運転時, 中速群) (2/3)



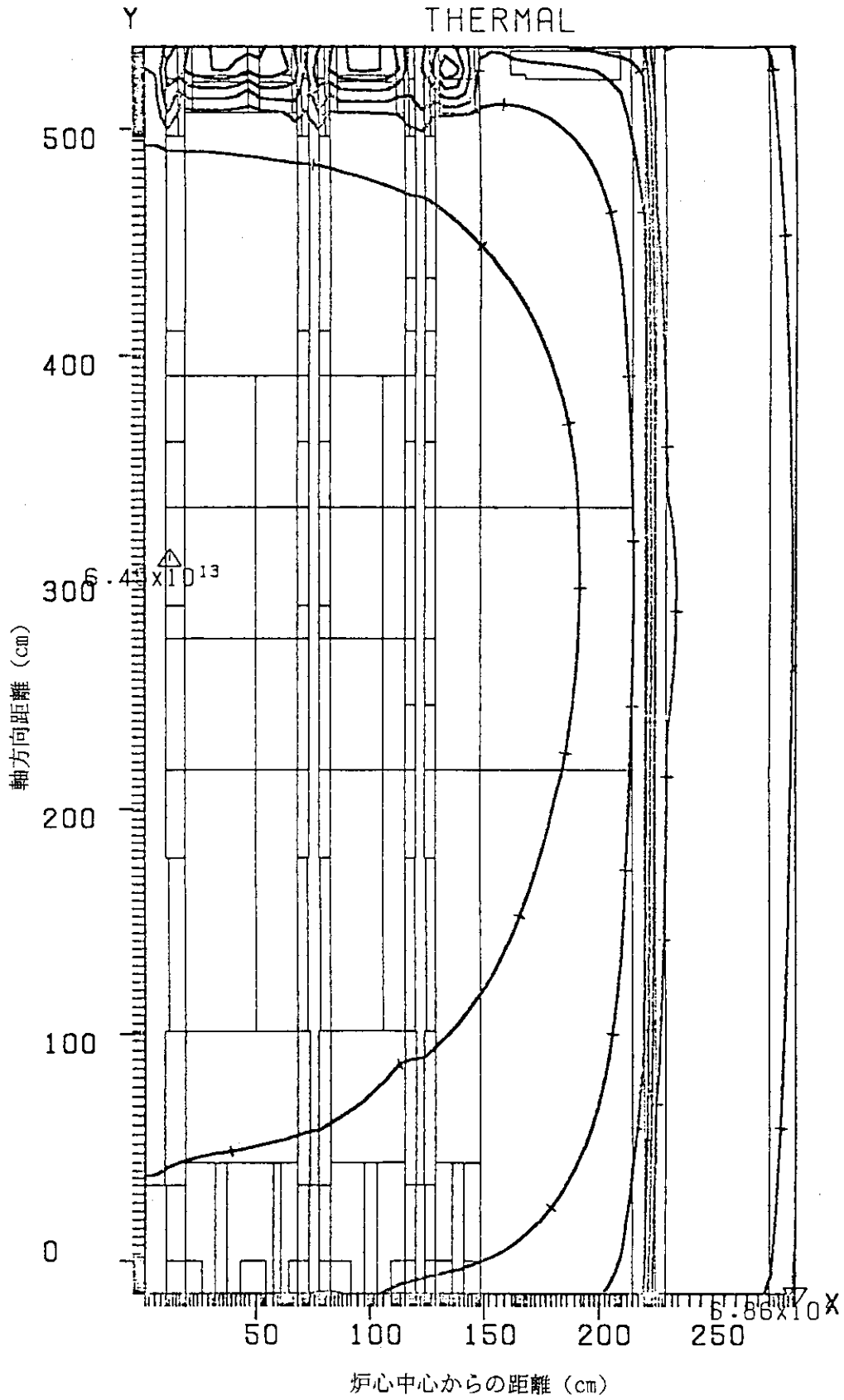


図 6. 1. 1 中性子束等高線図 (定格運転時, 熱群) (3 / 3)

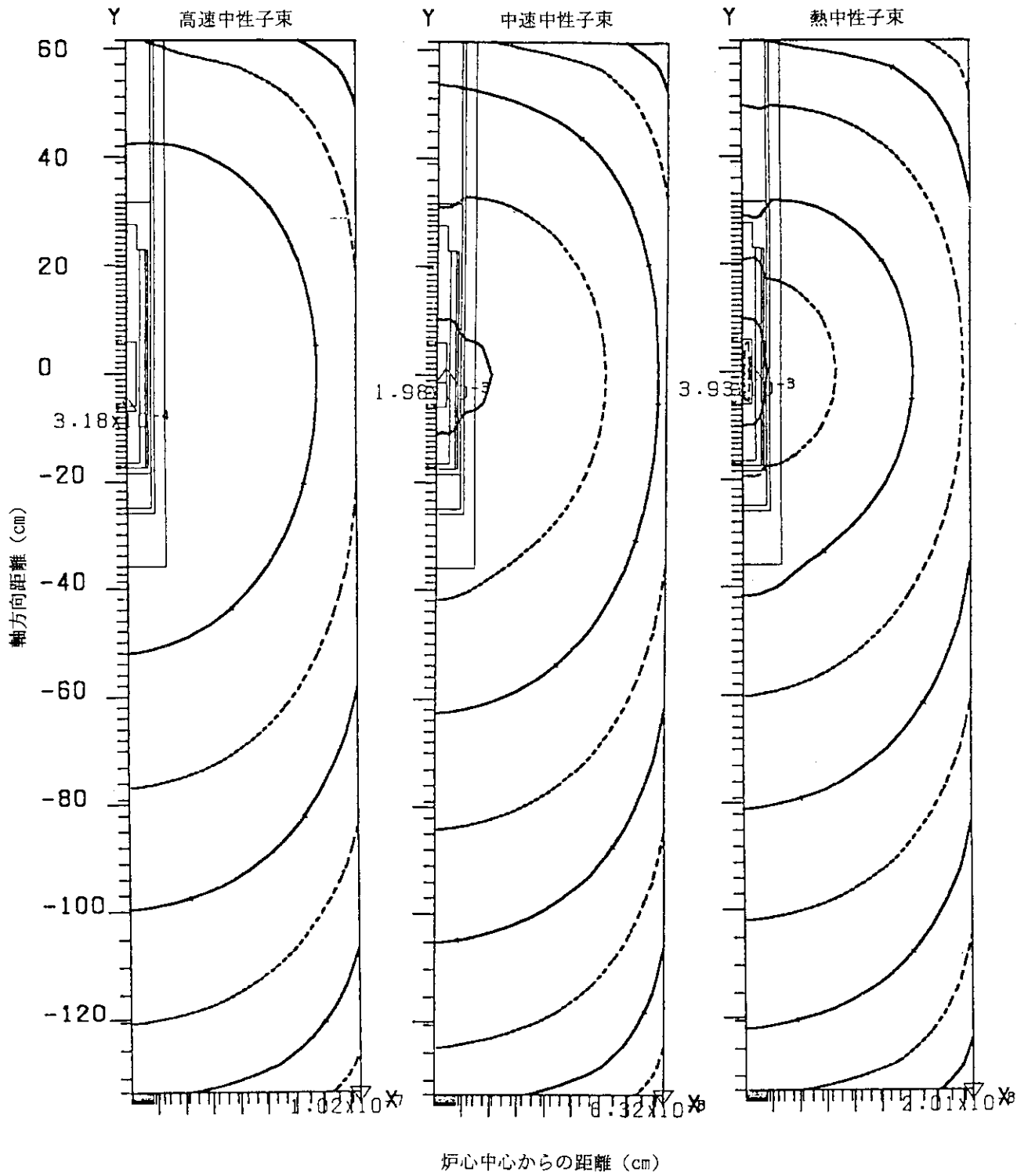


図 6.1.2 随伴中性子束等高線図 (定格運転時)

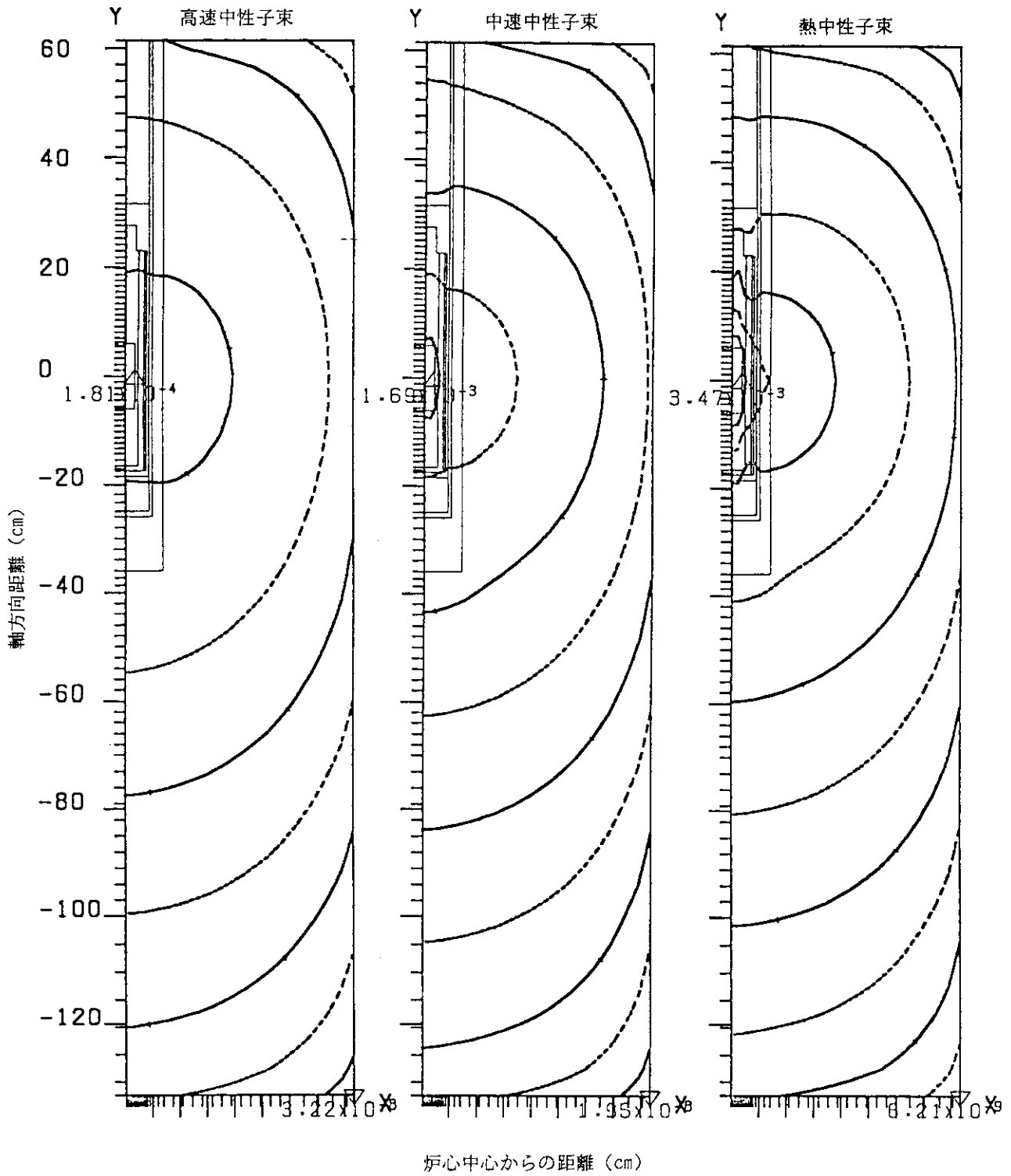


図6.1.3 随伴中性子束等高線図 (定格運転時)  
 -B<sub>4</sub>C+C (B 1 wt%) 遮へい体-

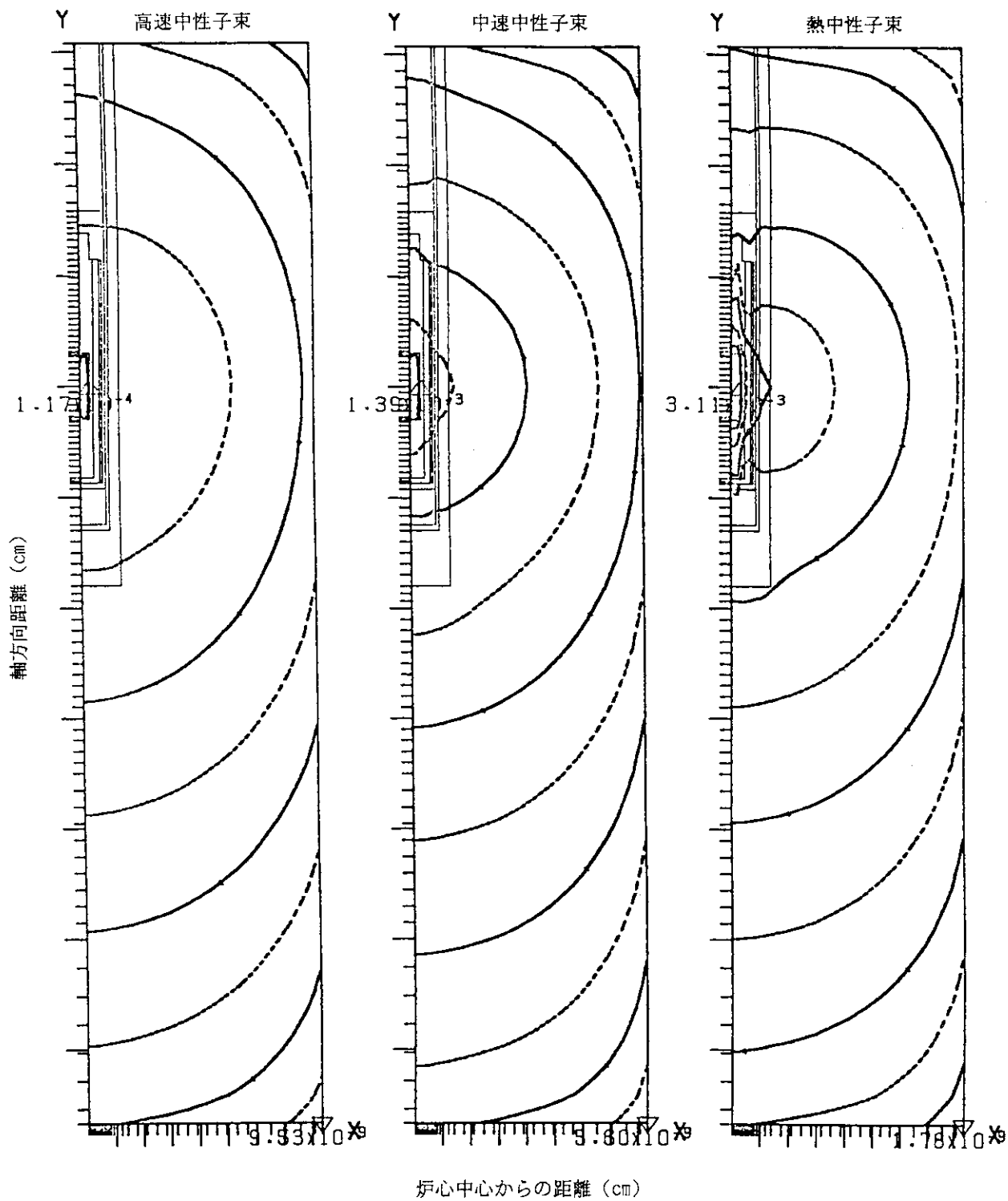


図6.1.4 随伴中性子束等高線図 (定格運転時)  
 - $B_4C+C$  (B 3wt%) 遮へい体-

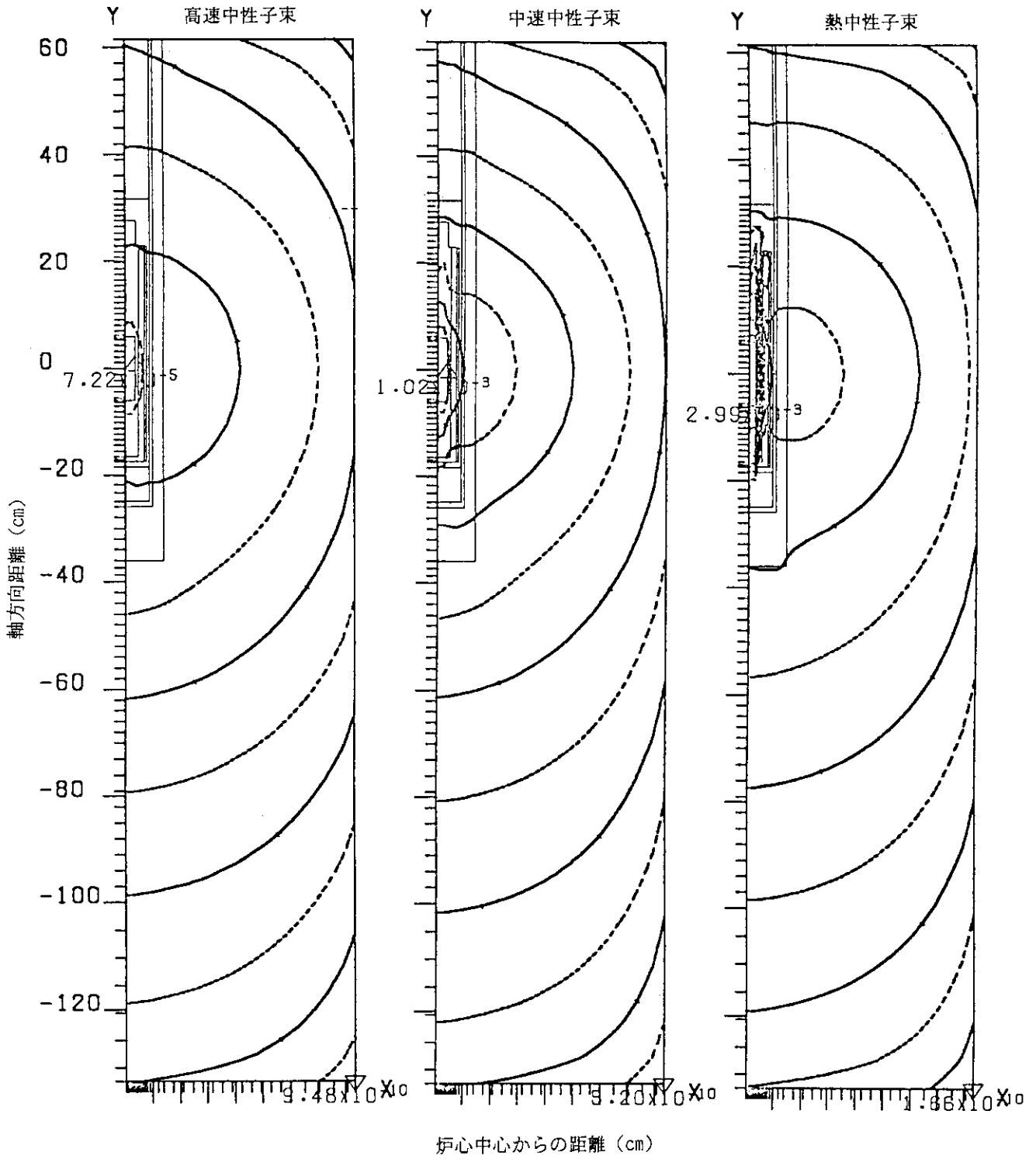


図6.1.5 随伴中性子束等高線図 (定格運転時)  
 —Hf (1 cm-t) 遮へい体—

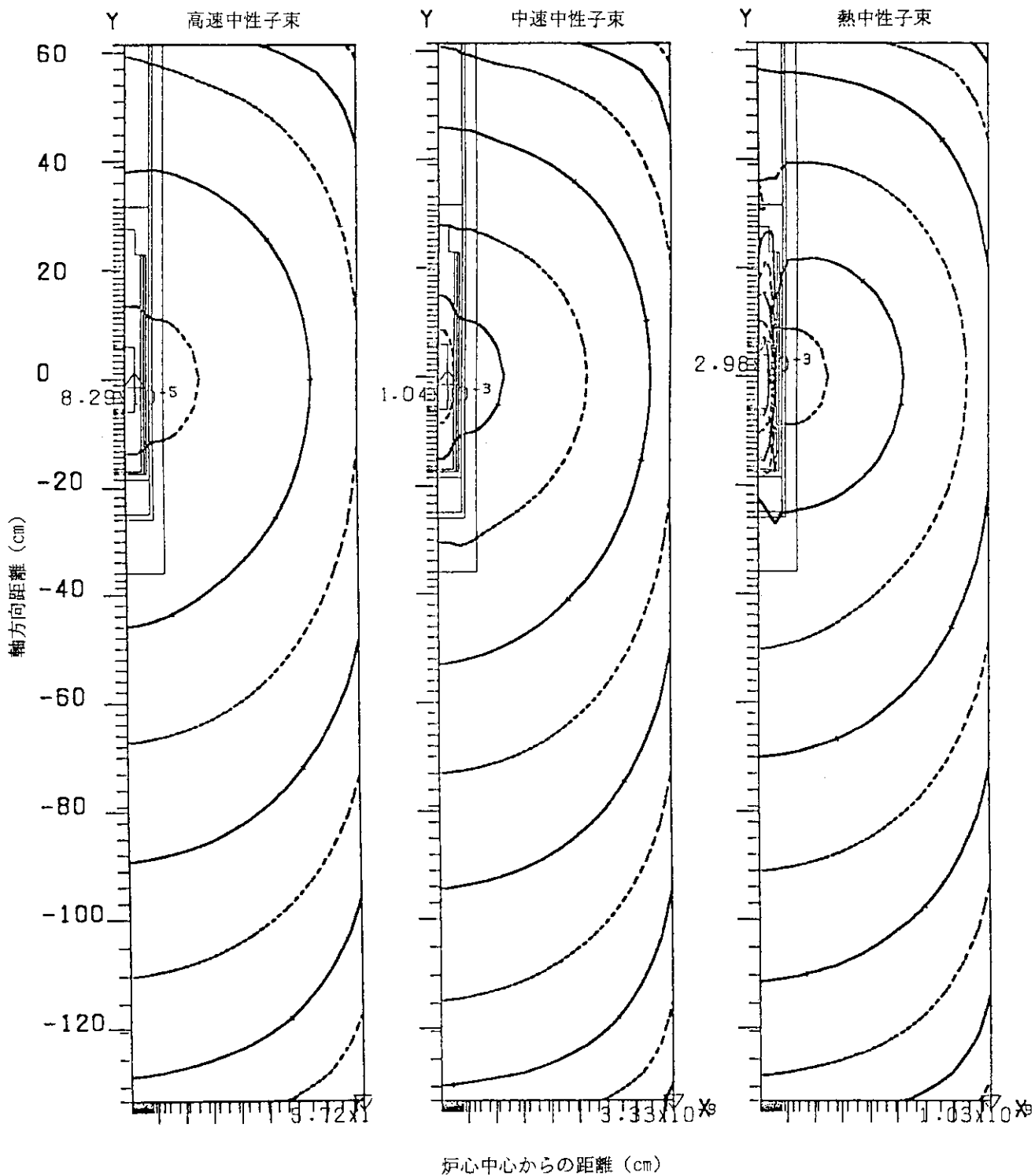


図6.1.6 随伴中性子束等高線図 (定格運転時)  
 —Hf (0.5cm-t) 遮へい体—

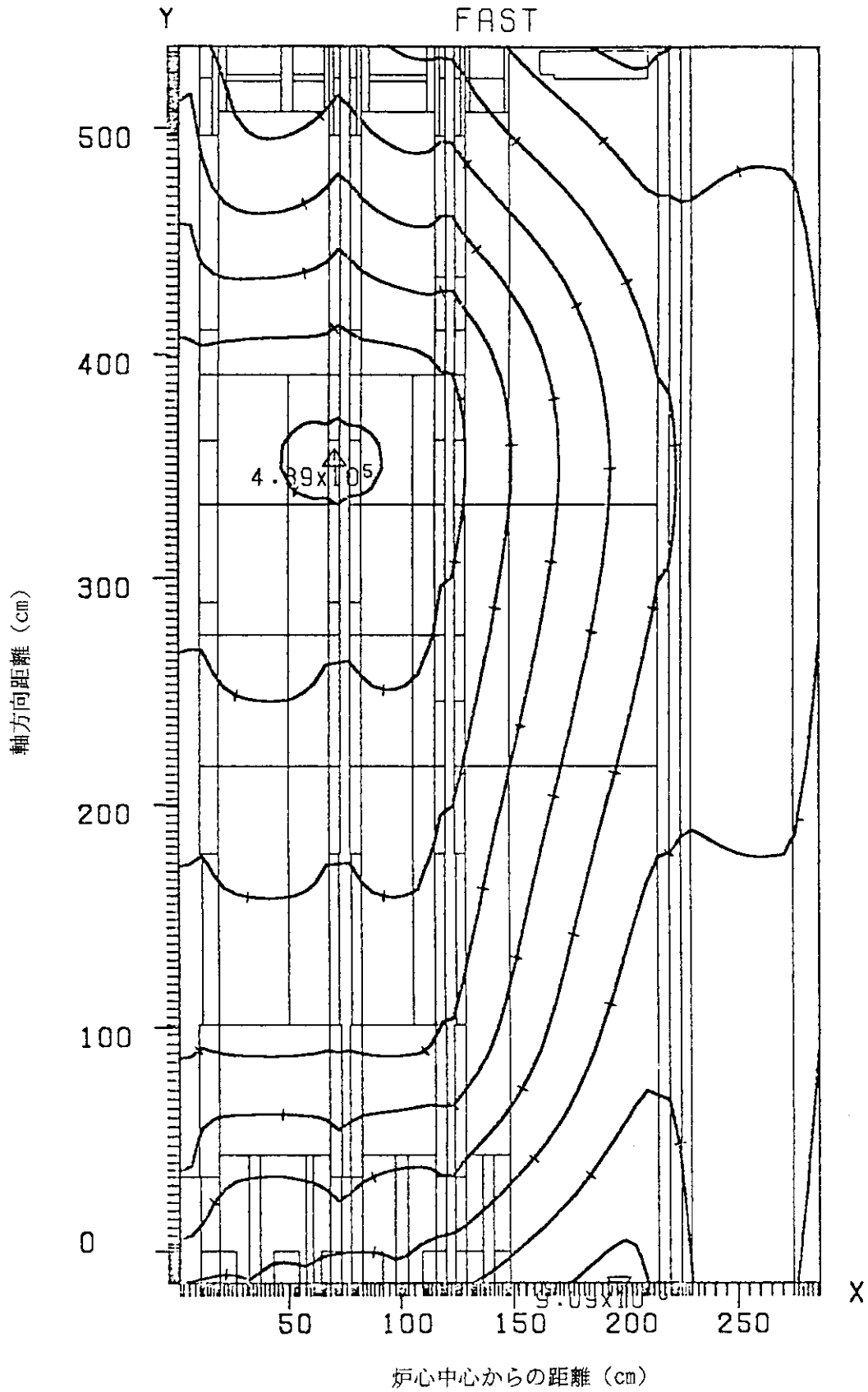


図6.1.7 中性子束等高線図 (低温未臨界時, 高速群) (1/3)

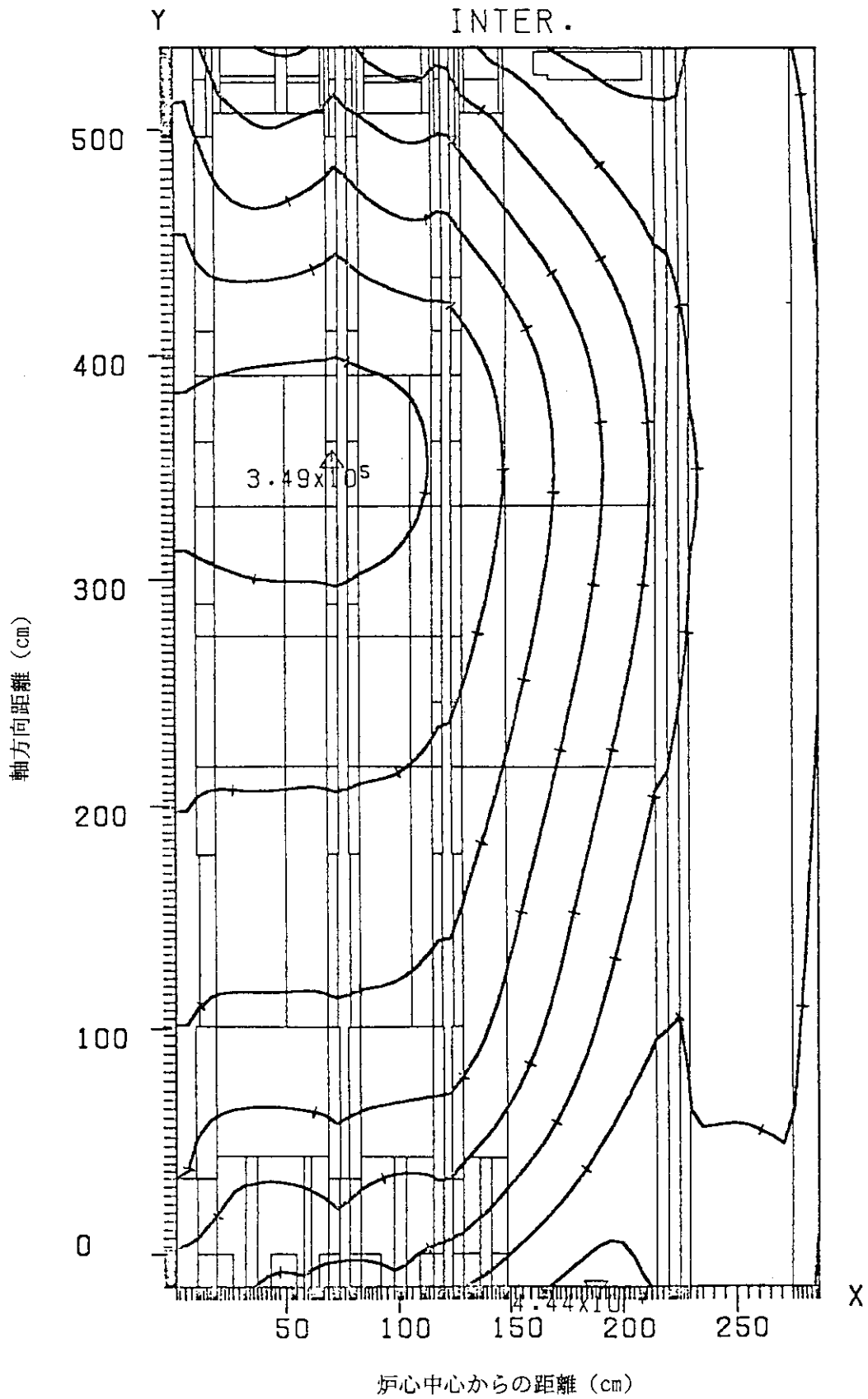


図 6.1.7 中性子束等高線図 (低温未臨界時, 中速群) (2/3)



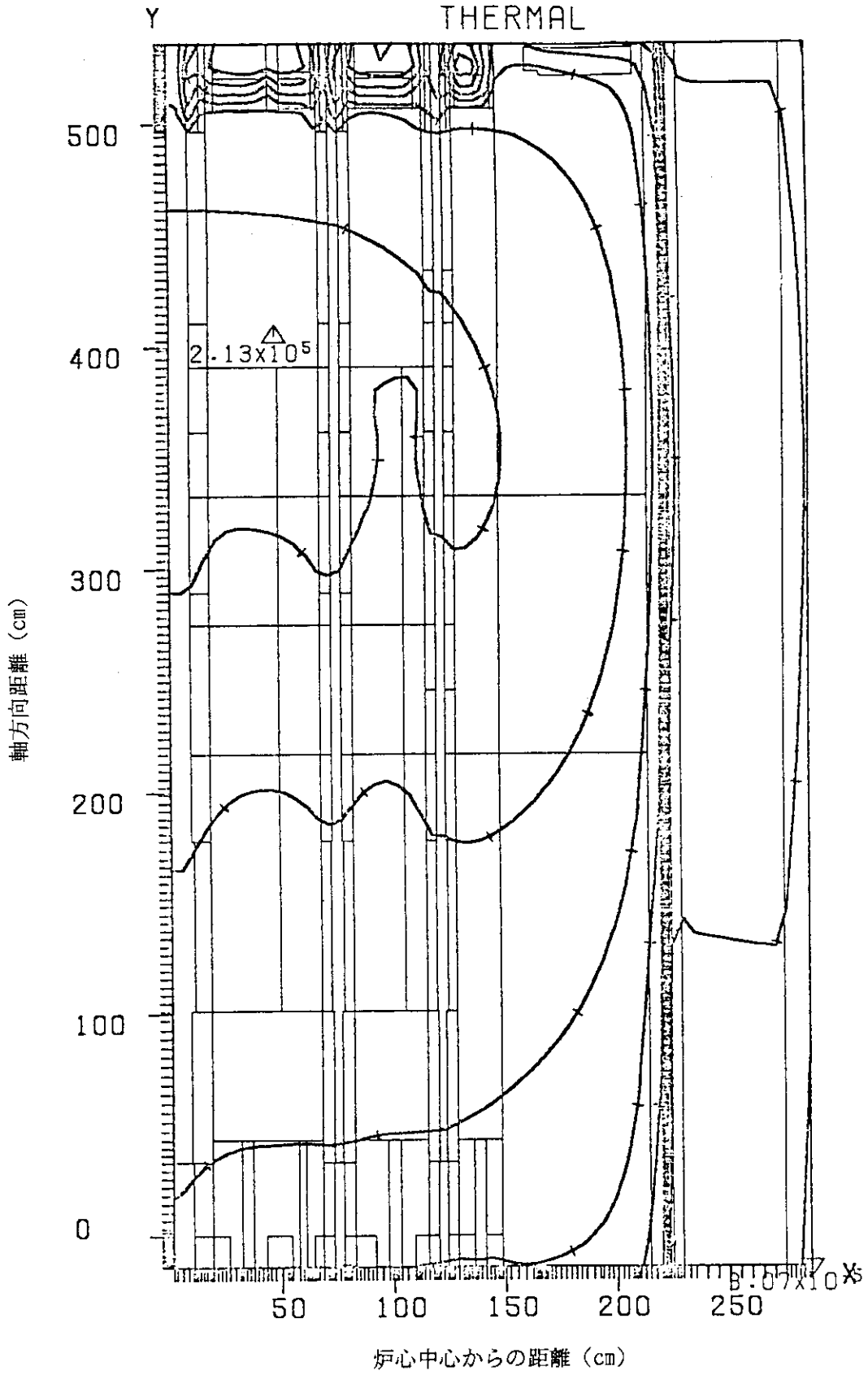


図 6. 1. 7 中性子束等高線図 (低温未臨界時, 熱群) (3 / 3)

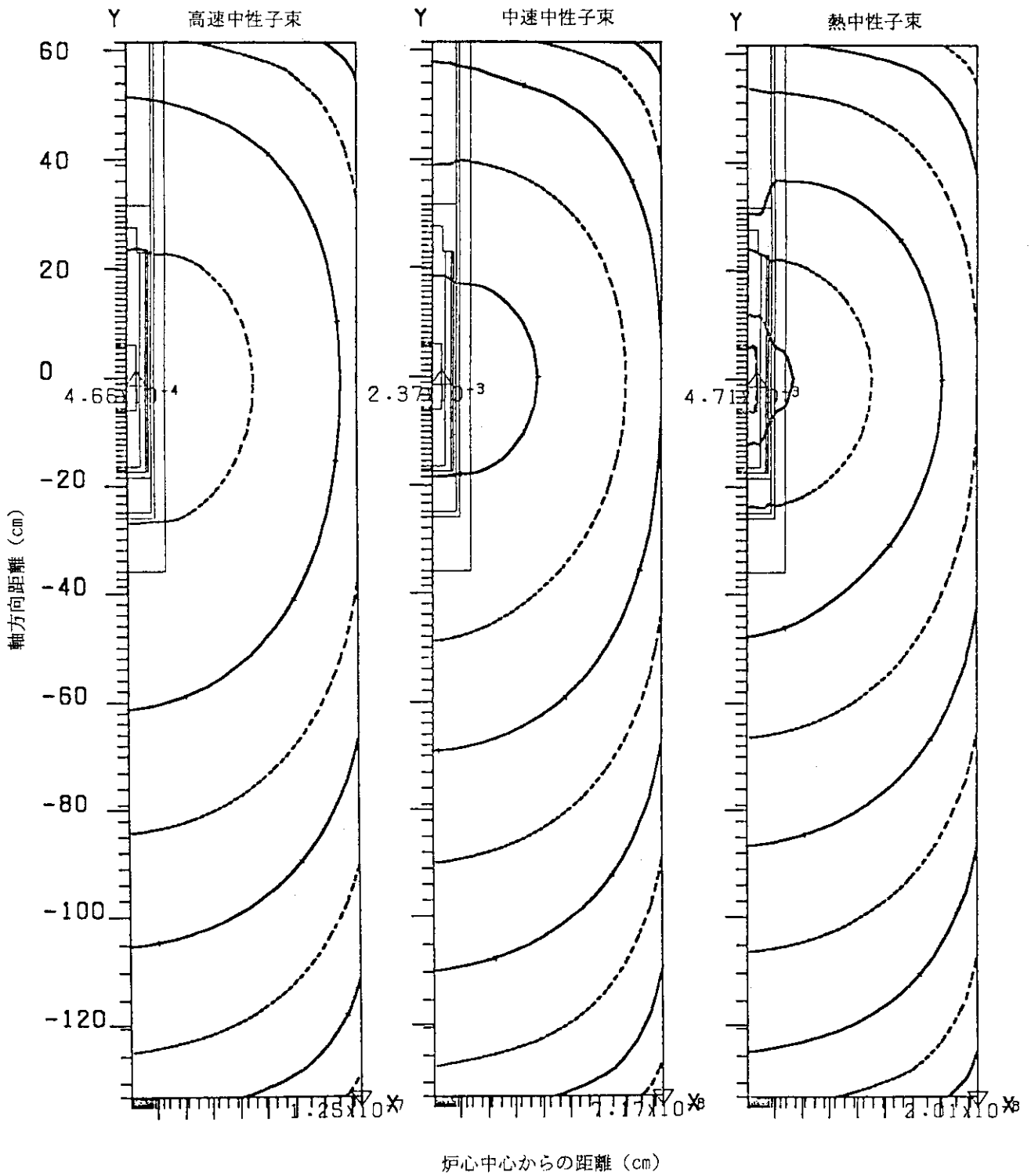


図 6. 1. 8 随伴中性子束等高線図 (低温未臨界時)

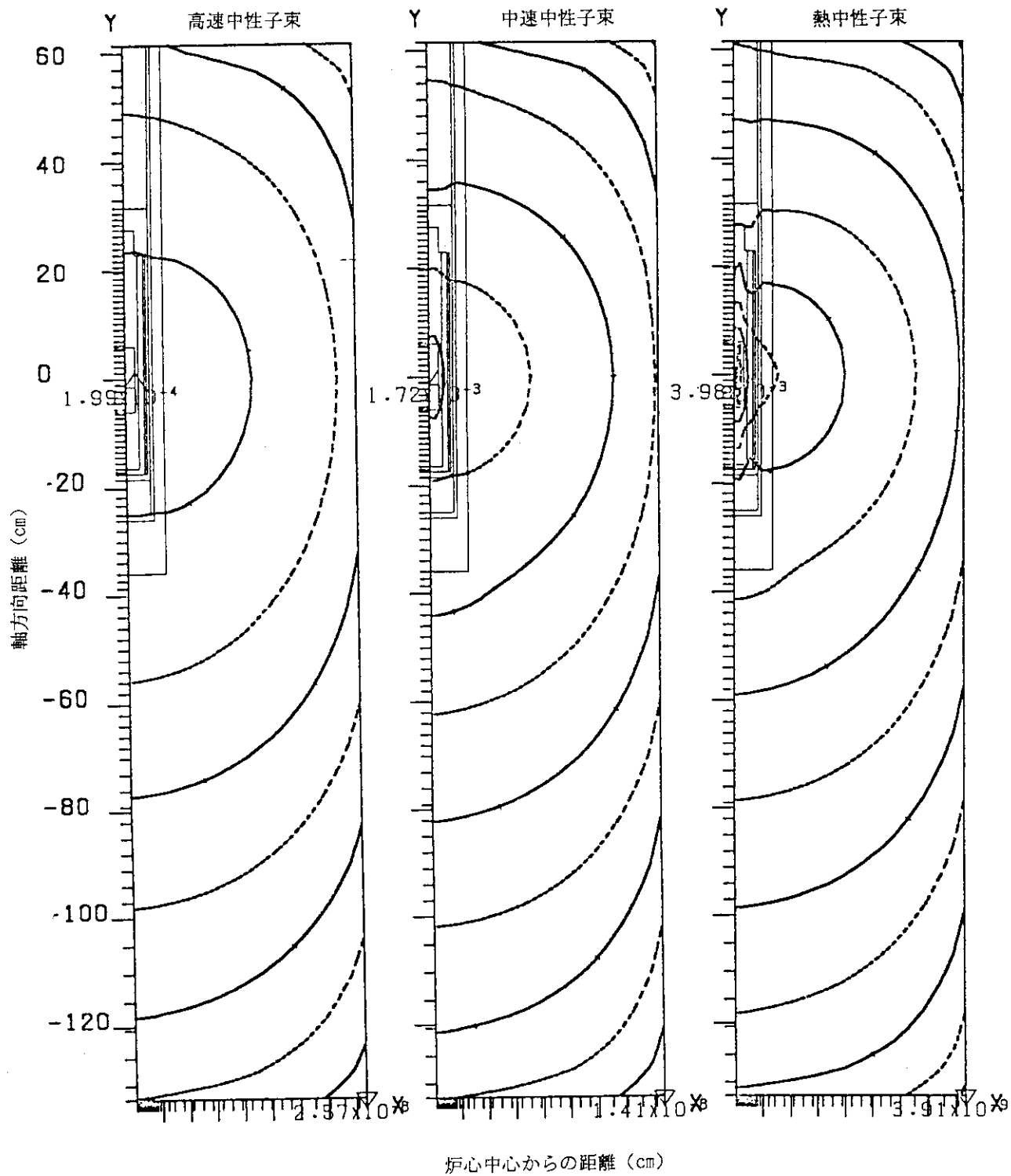


図6.1.9 随伴中性子束等高線図 (低温未臨界時)  
 - $B_4C+C$  (B 1wt%) 遮へい体-

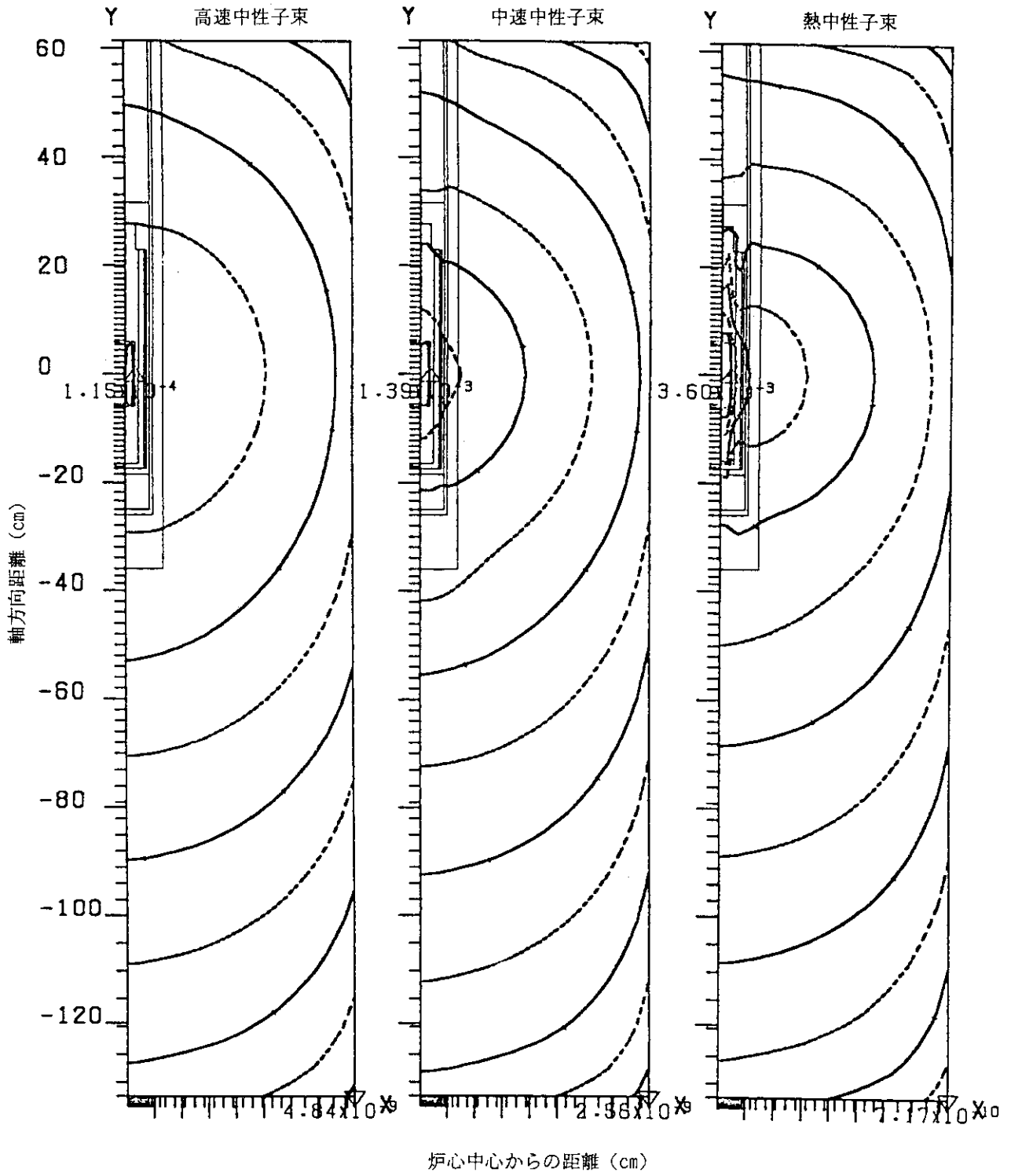


図 6. 1. 10 随伴中性子束等高線図 (低温未臨界時)  
 -B<sub>2</sub>C+C (B 3 wt%) 遮へい体-

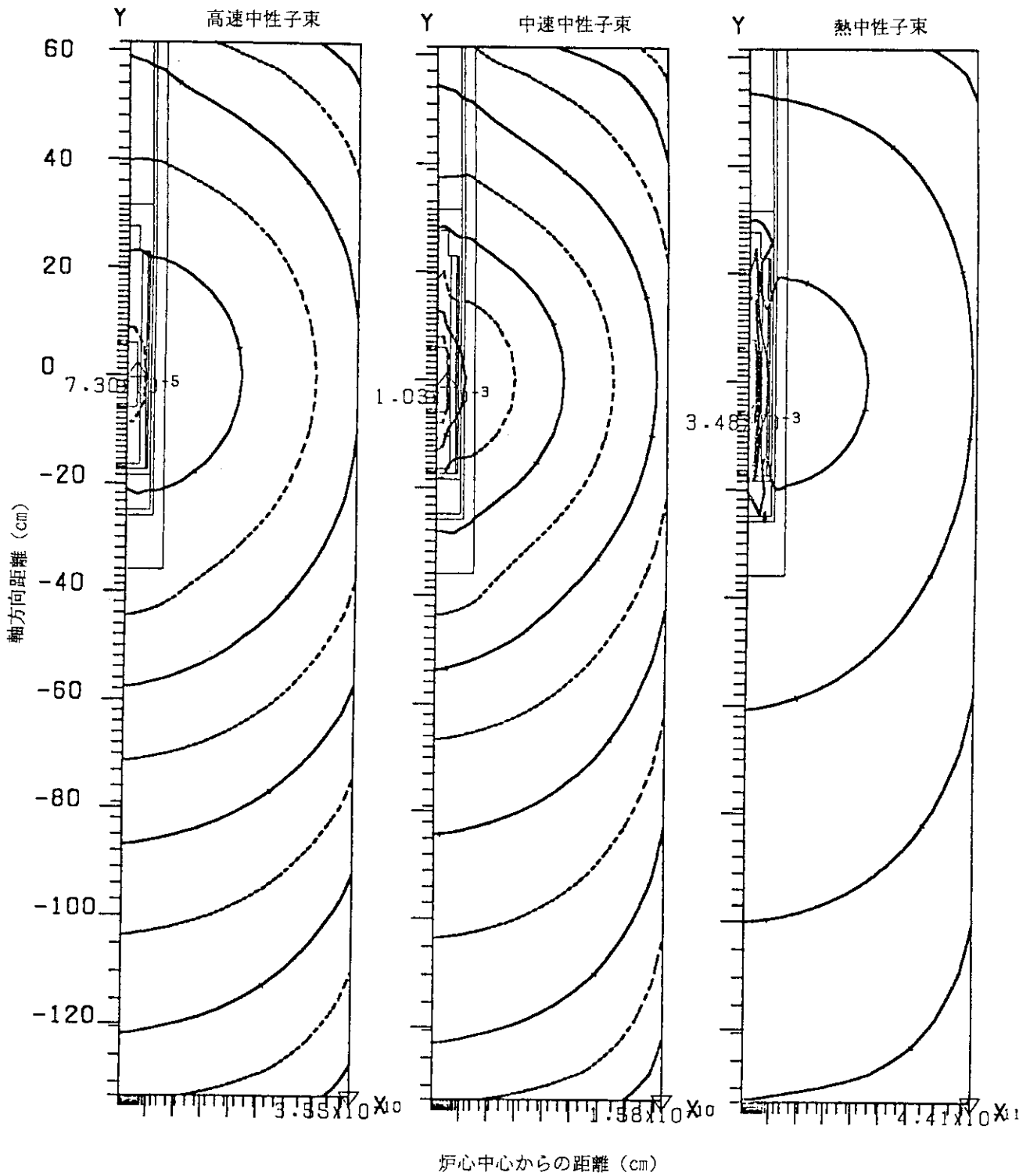


図6.1.11 随伴中性子束等高線図 (低温未臨界時)  
 -Hf (1 cm-t) 遮へい体-

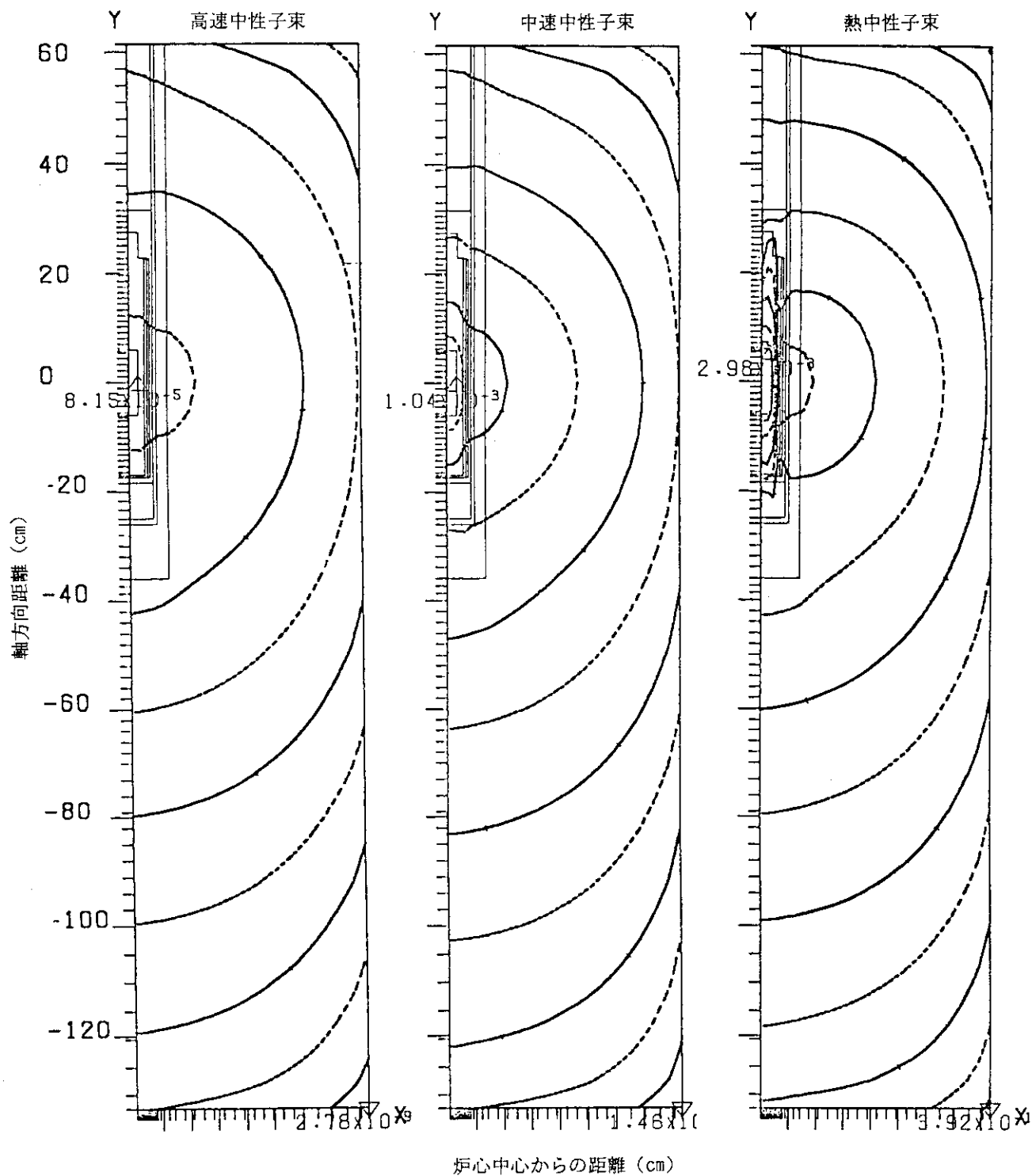


図 6.1.12 随伴中性子束等高線図 (低温未臨界時)  
 —Hf (0.5cm-t) 遮へい体—

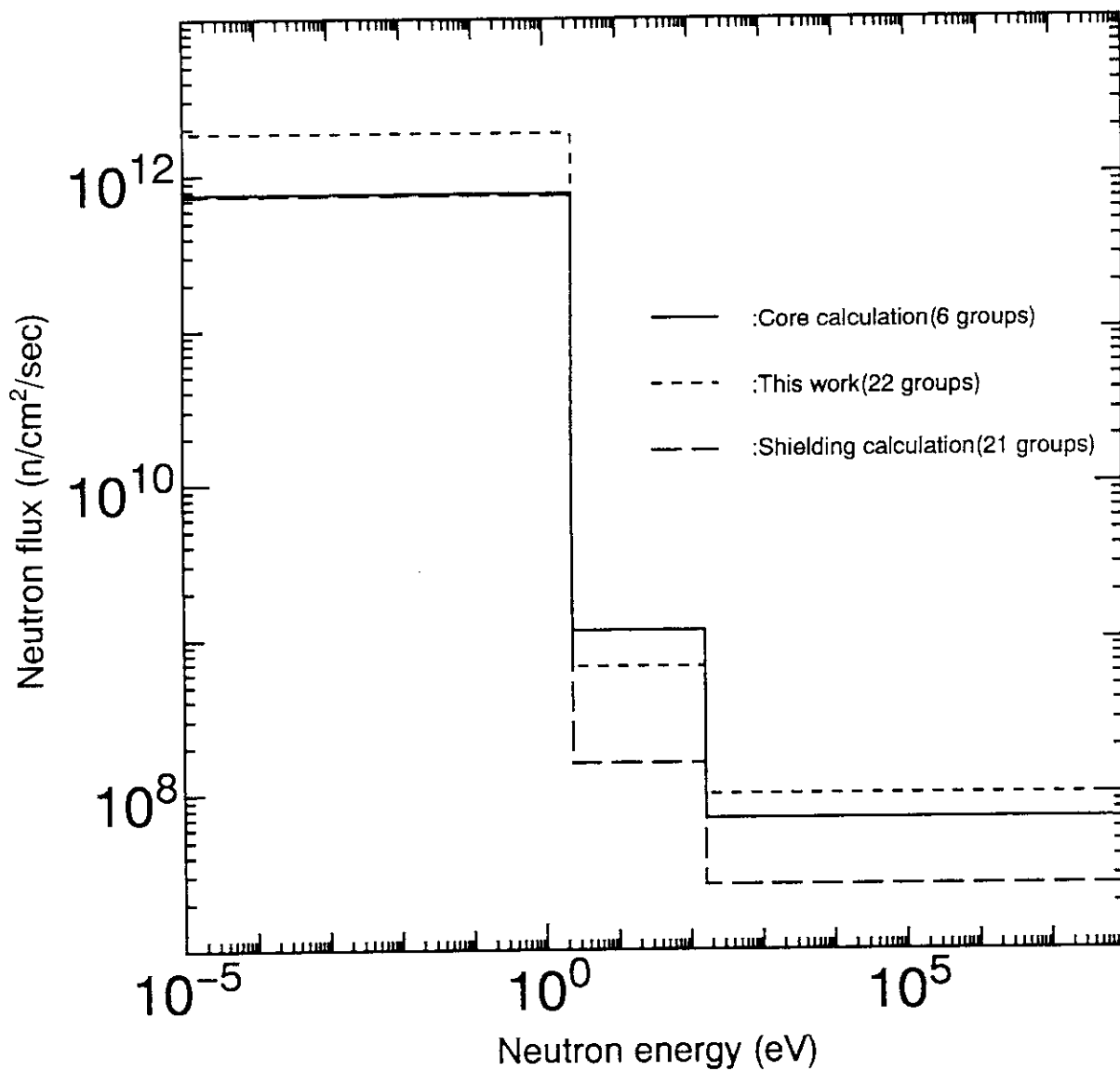


図6.1.13 広領域系検出器位置での中性子束

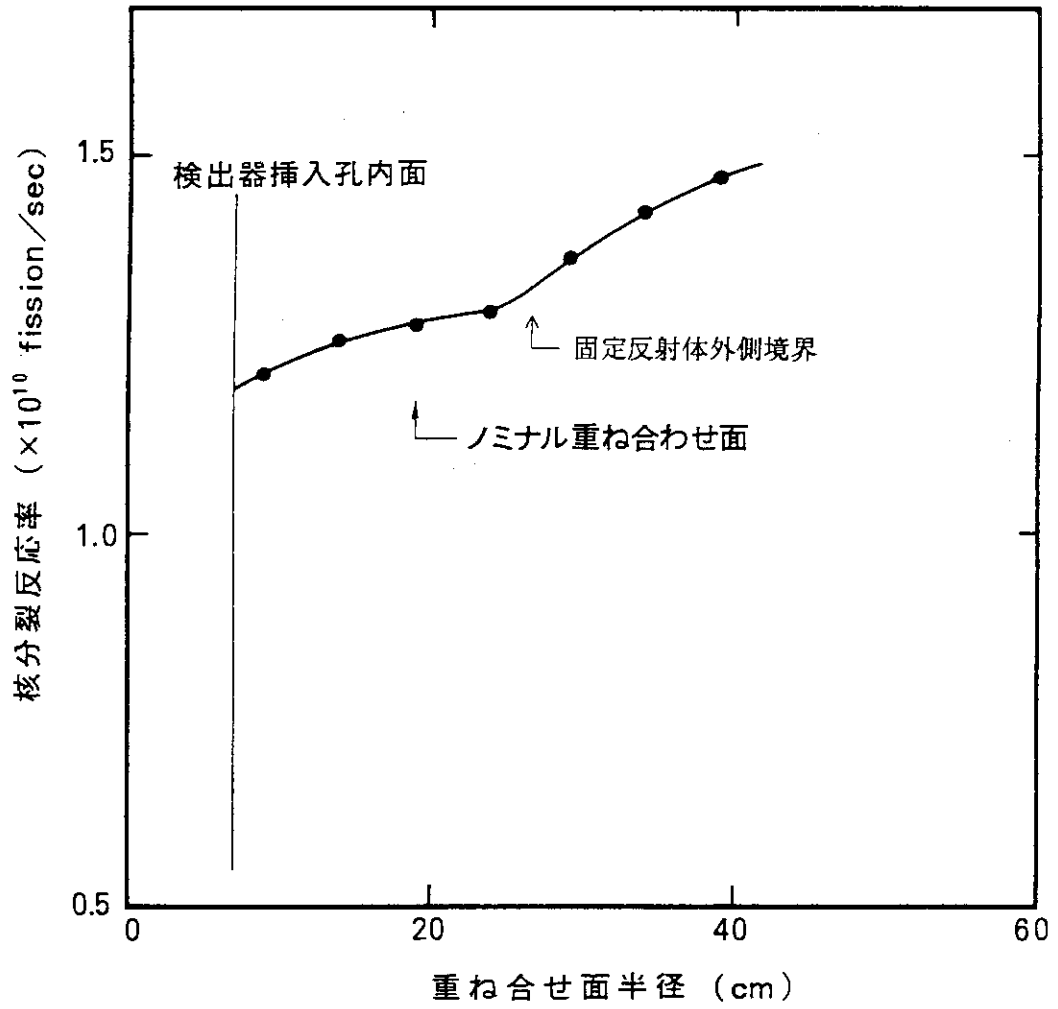


図6.1.14 重ね合わせ面位置と反応率相関  
( $B_4C+C$  (B 3 wt%) 遮へい体を用いた場合)



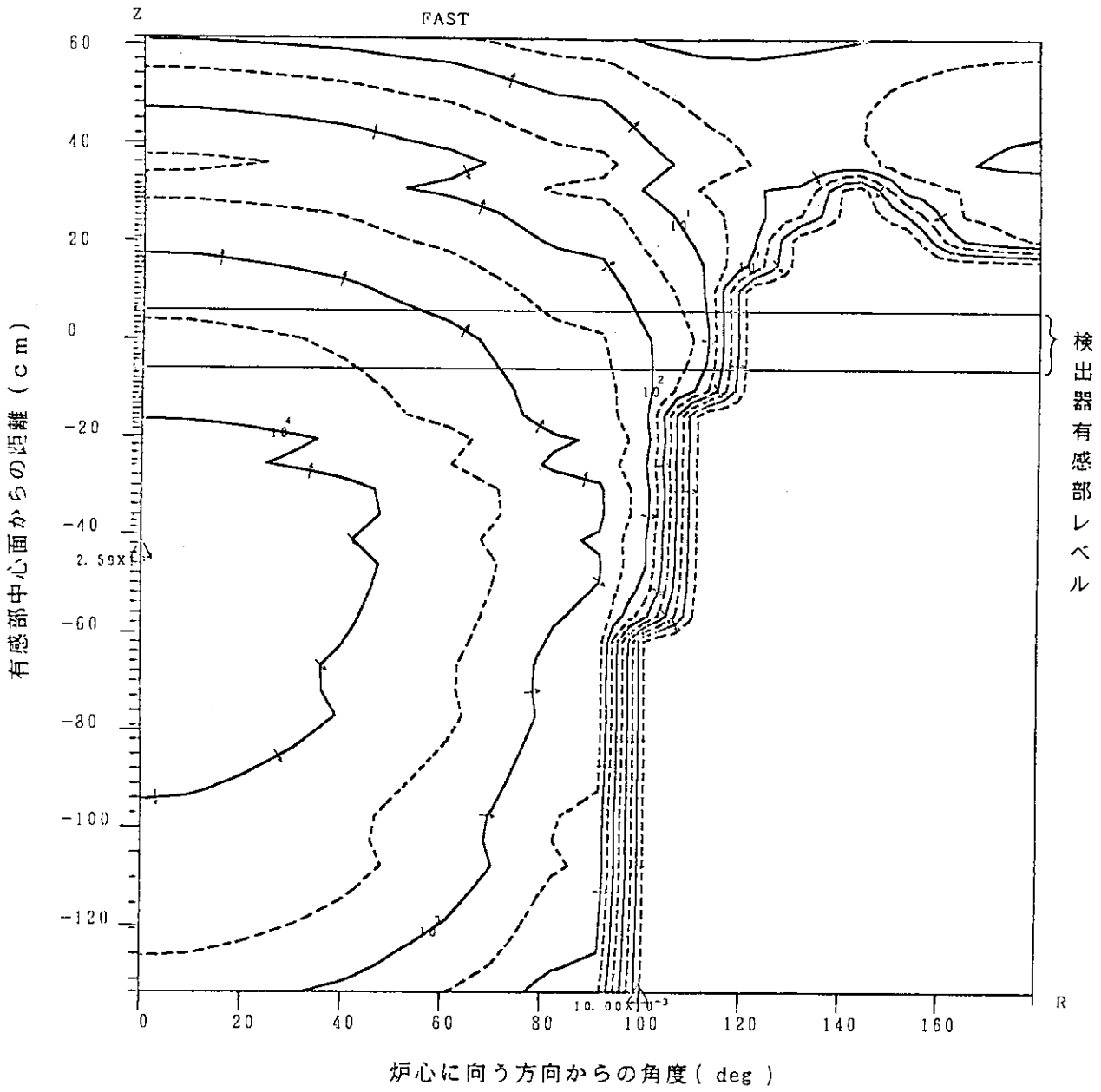


図6.1.15 重ね合わせ面における寄与率分布 (定格運転時, 高速群) (1/6)  
 -B<sub>4</sub>C+C (B 3wt%) 遮へい体-

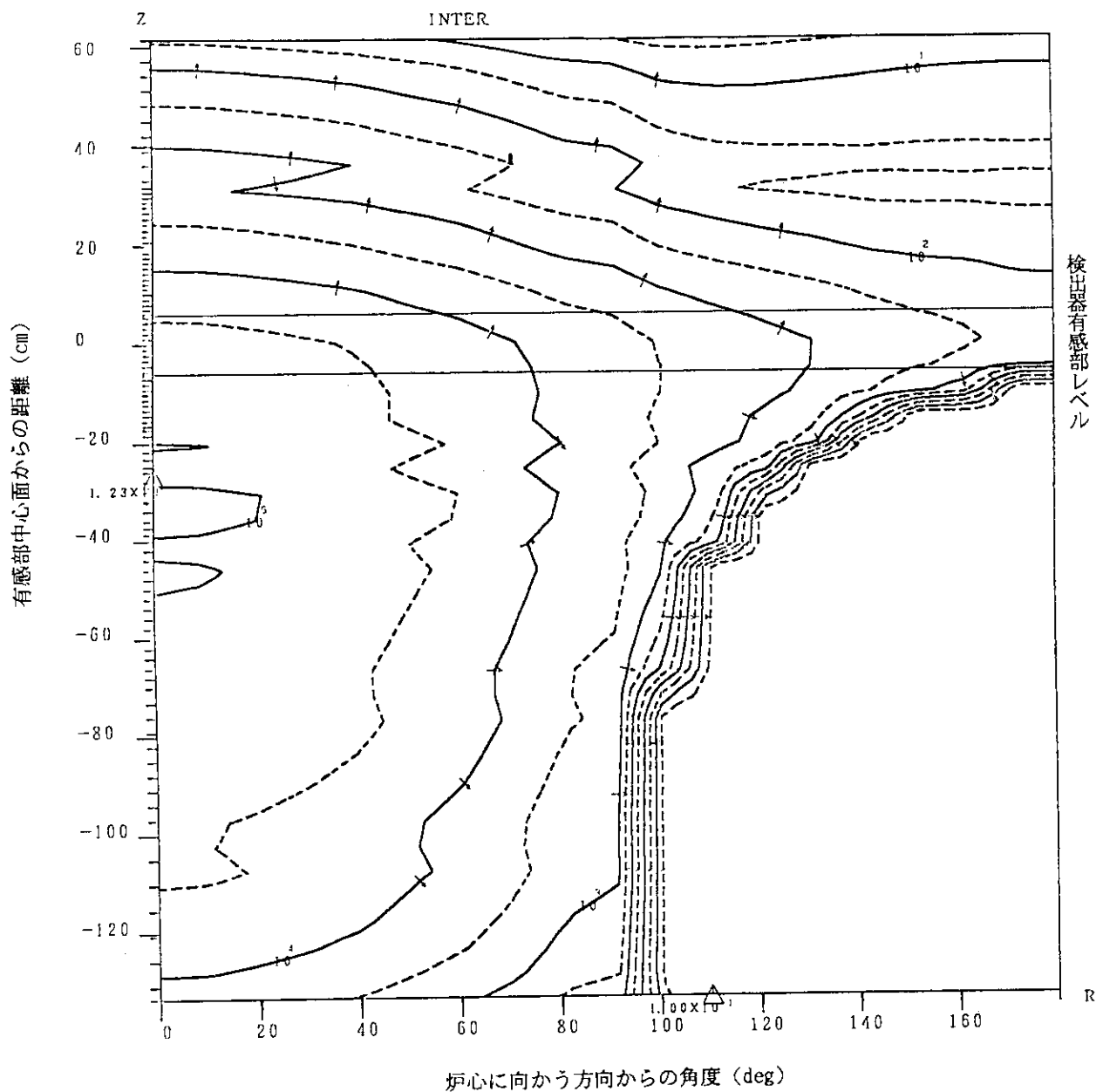


図6.1.15 重ね合わせ面における寄与率分布 (定格運転時, 中速群) (2/6)  
 -B<sub>4</sub>C+C (B 3wt%) 遮へい体-

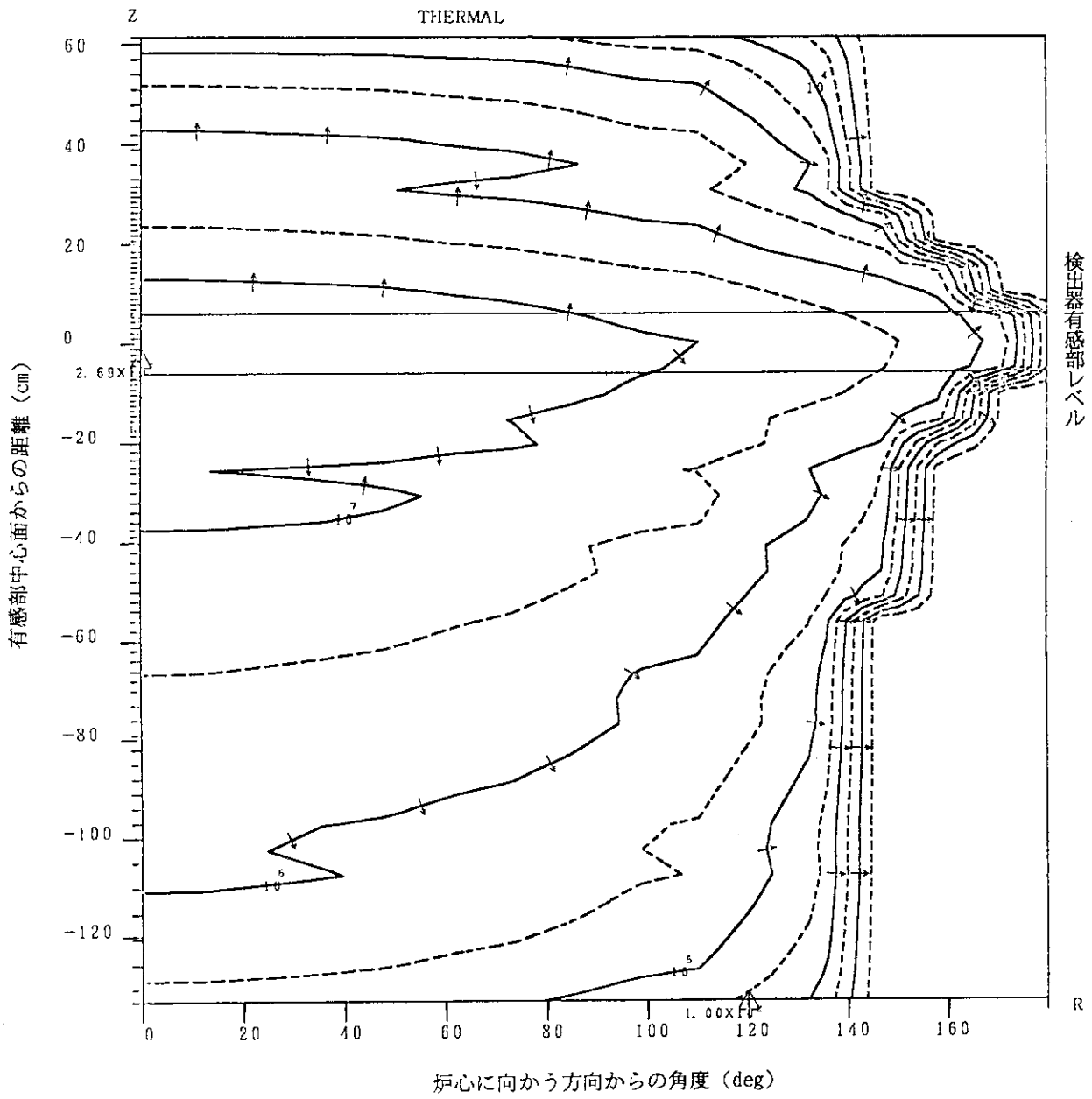


図6.1.15 重ね合わせ面における寄与率分布 (定格運転時, 熱群) (3/6)  
 - $B_4C+C$  (B 3wt%) 遮へい体-

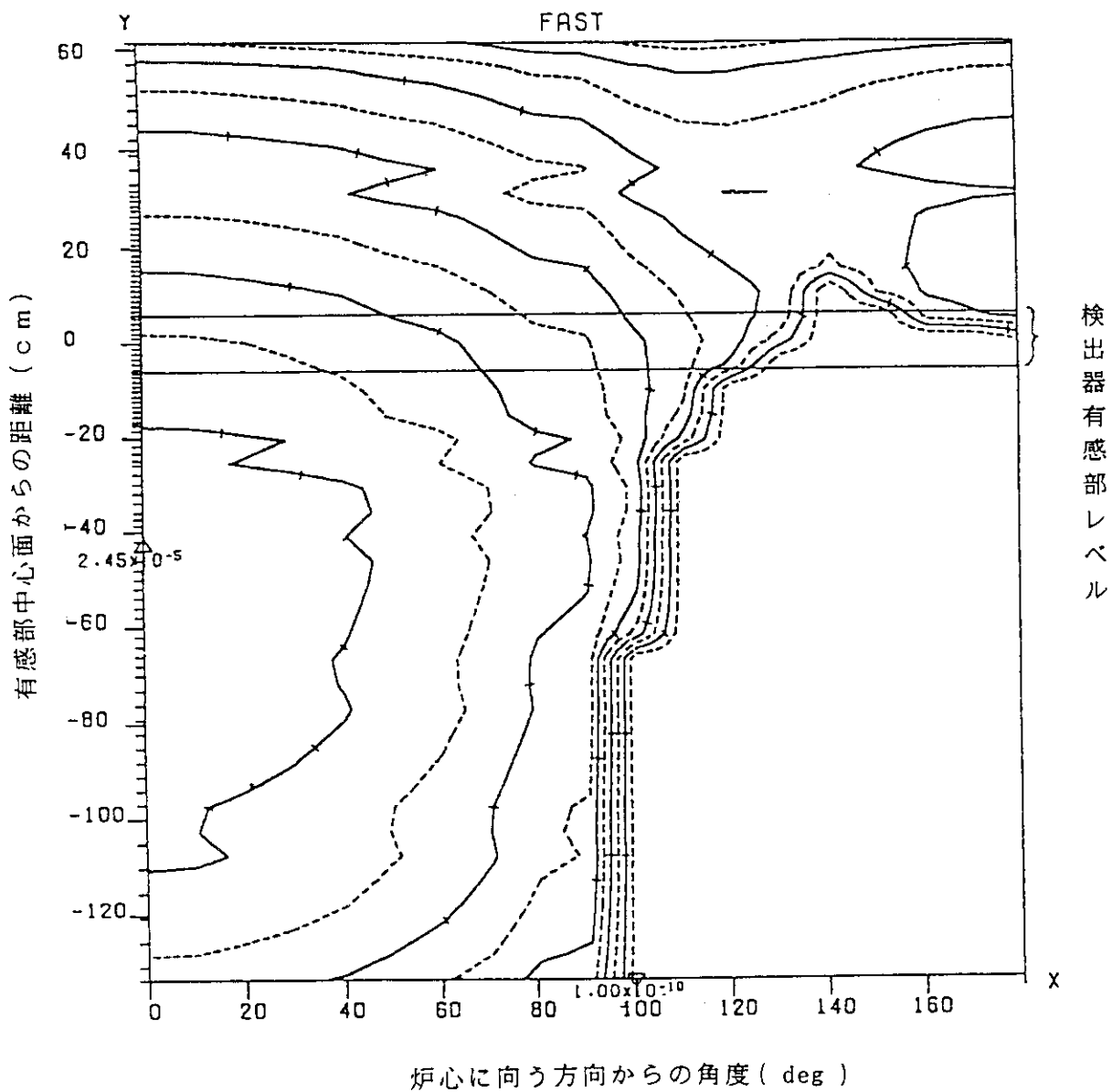


図6.1.15 重ね合わせ面における寄与率分布 (低温未臨界時, 高速群) (4/6)  
 -B<sub>4</sub>C+C (B 3wt%) 遮へい体-

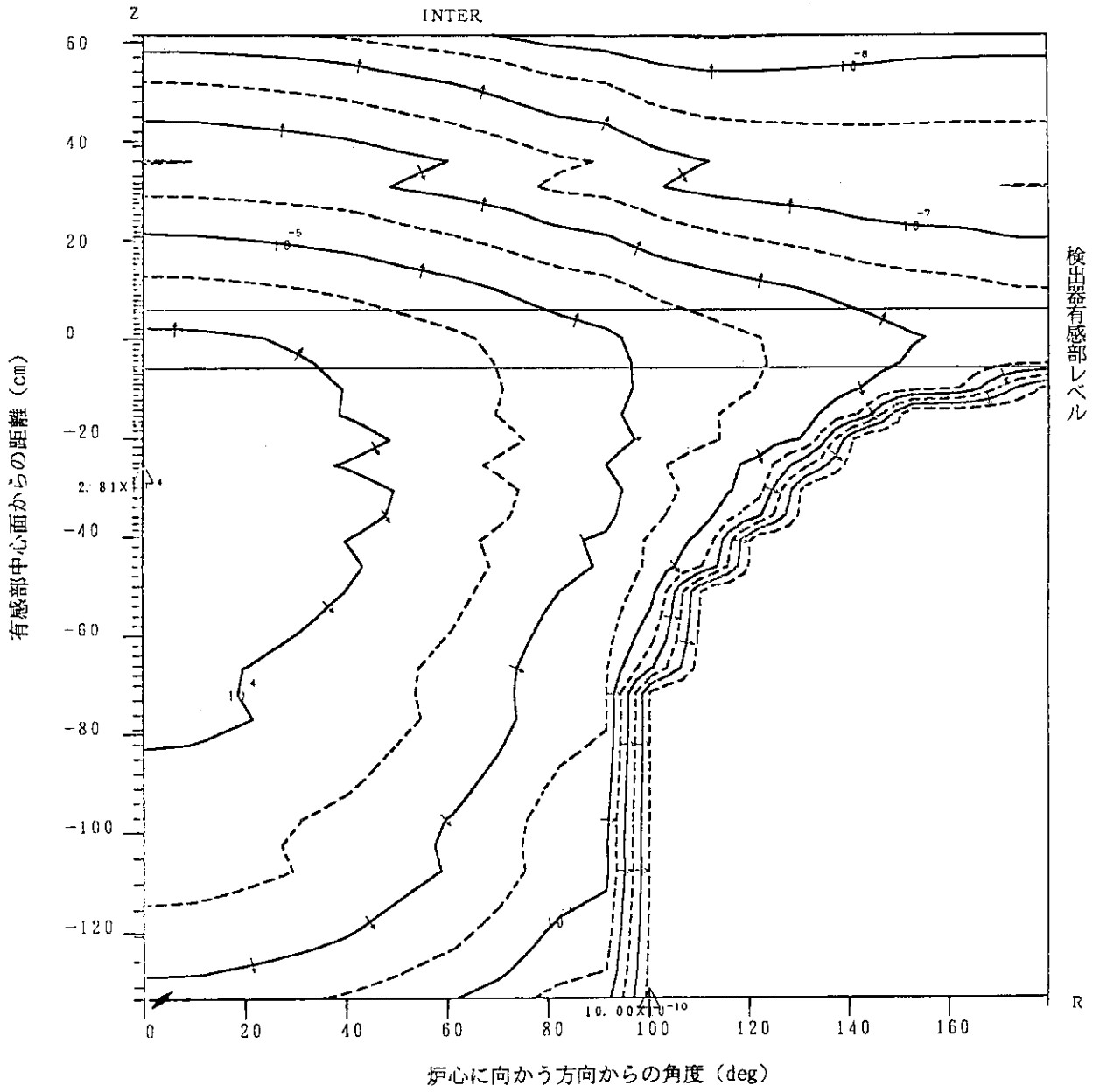


図6.1.15 重ね合わせ面における寄与率分布 (低温未臨界時, 中速群) (5/6)  
 -B<sub>4</sub>C+C (B 3wt%) 遮へい体-

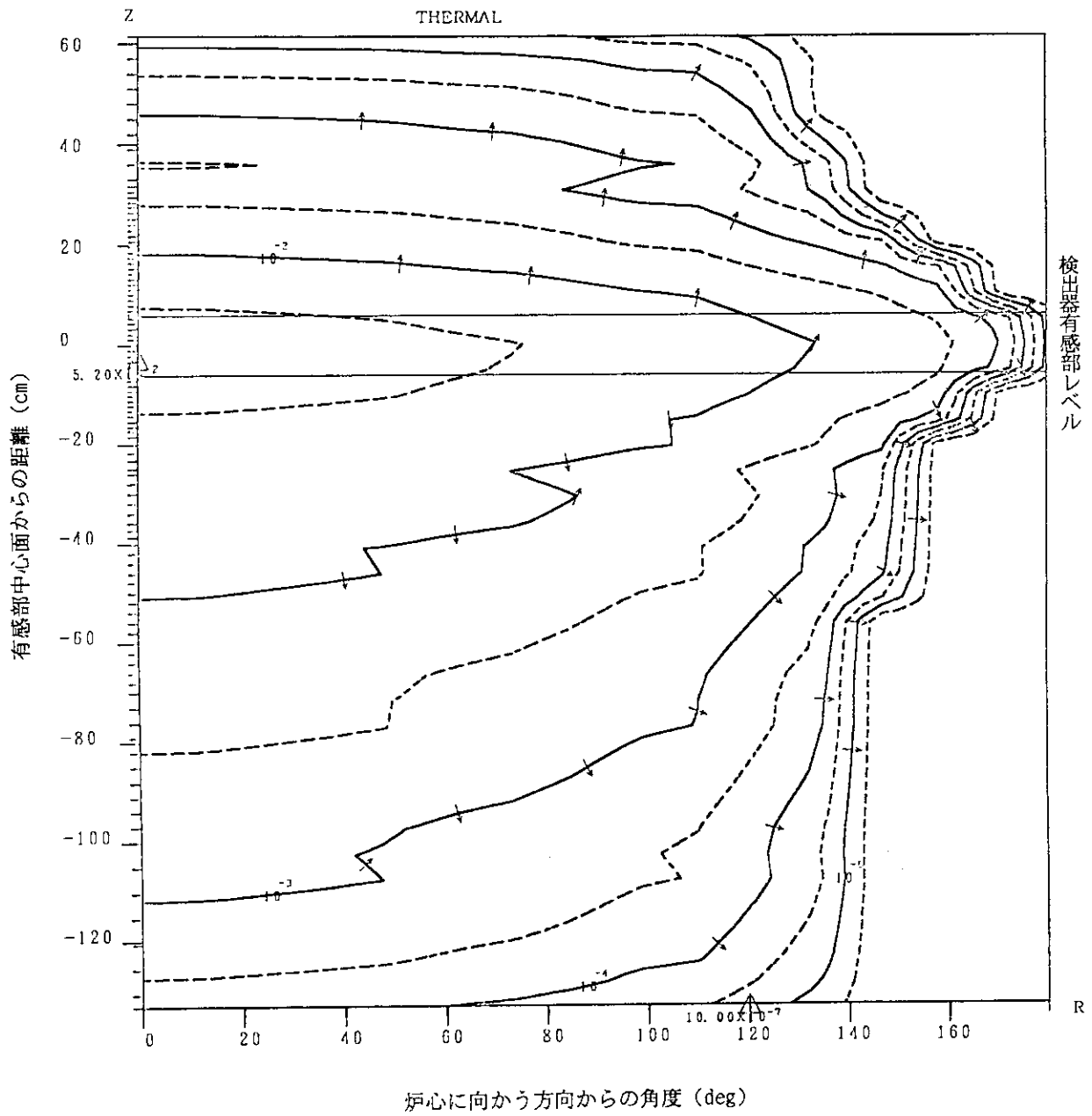


図6.1.15 重ね合わせ面における寄与率分布 (低温未臨界時, 熱群) (6/6)  
 - $B_4C+C$  (B 3wt%) 遮へい体-

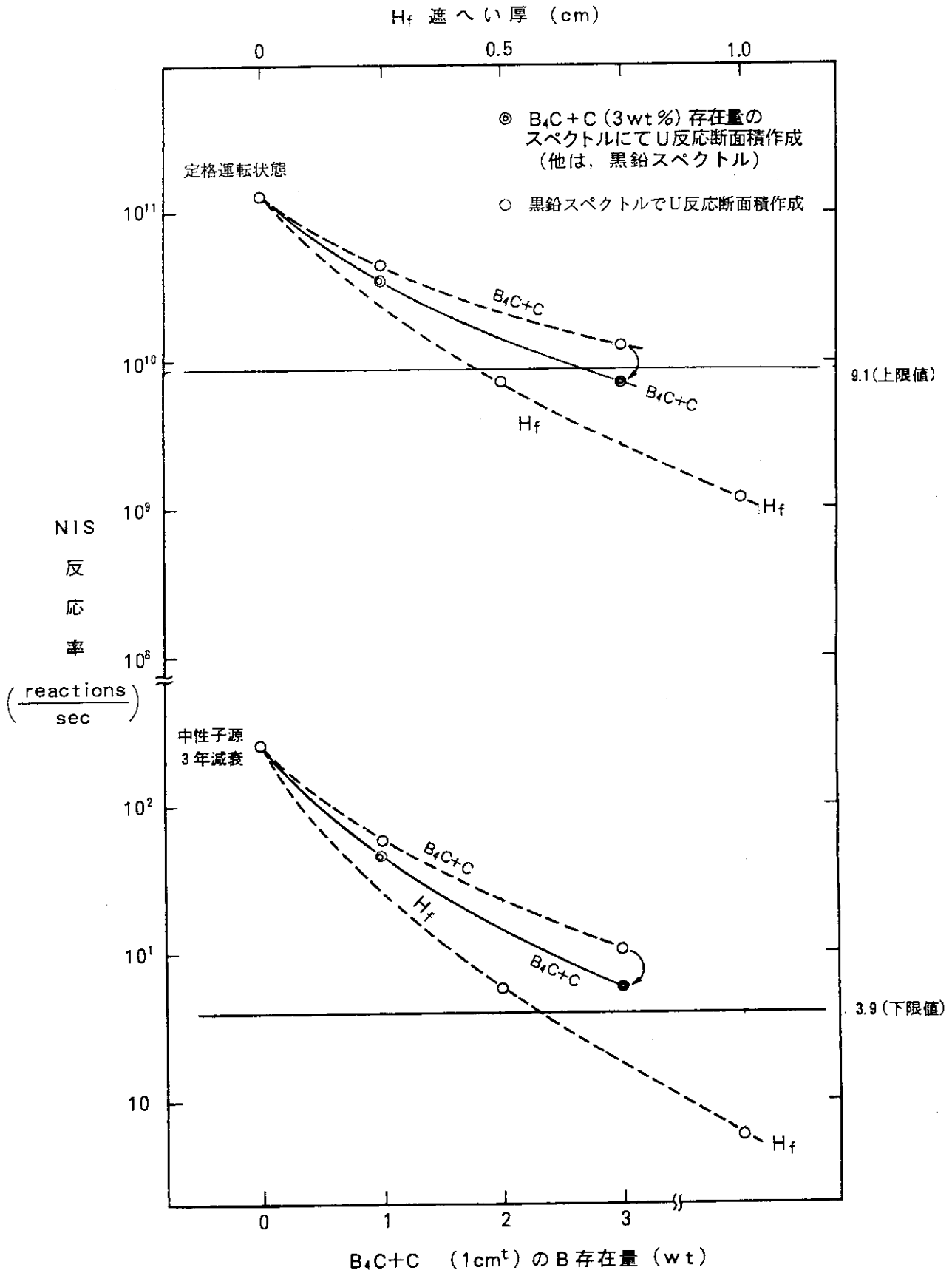


図 6. 1. 16 中性子検出器反応率パラメータ計算結果  
— 2次元重ね合わせ法による —

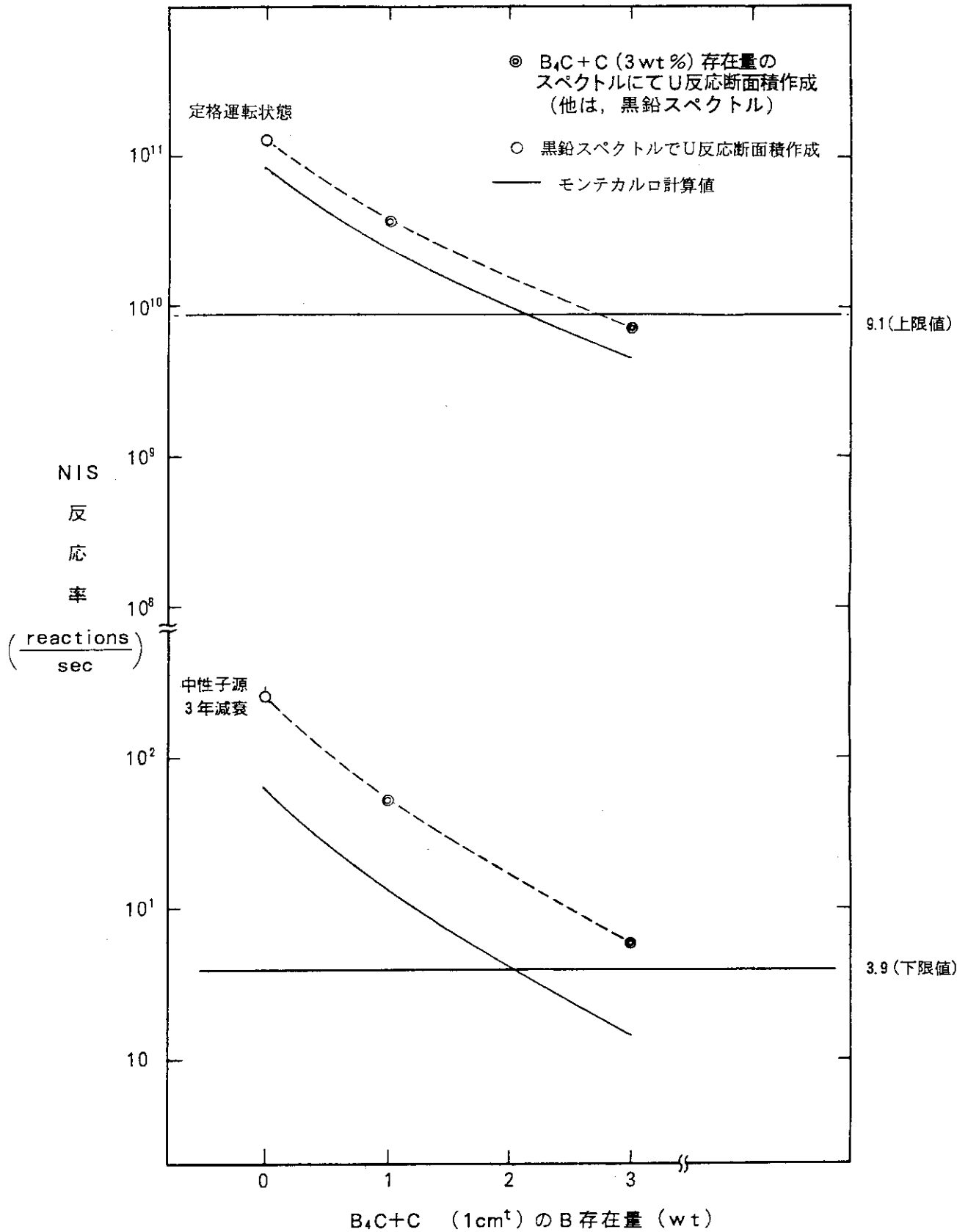


図 6. 2. 1 中性子検出器の遮へい体と反応率との相関



## 7. 中性子検出器の成立性

## (1)中性子束

6章に示したとおり、モンテカルロコードによる結果から中性子検出器の有感幅が制限値を上回ることから、中性子検出器を成立させることは困難であることが分かった。ここでは、運転パターン等、運用を考慮し、成立させる方法を検討した。具体的には、燃焼に伴う制御棒の引き抜きを、本解析では保守的に常に全引き抜き状態と仮定していたが、燃焼依存の制御棒位置を考慮することとしたこと、また、中性子束の上限値については、保守的な定格運転状態ではなく、中性子検出器の使用上限出力レベルである30%出力状態をその制限値としたこと（元々30%以上の出力においても、線形性は失われるが、その機能は期待されていた。ここでは、30%以上の出力時にはその指示値は正しい値を示さないことを許すこととした）を考慮した。

表7.1に成立性の検討結果を示す。表の結果は、6章で示した応答特性解析結果では明らかにほう素濃度が3wt%では低温未臨界時に制限値を満たさないことが分かる。また、反応率の幅はその制限値を上回っており、ほう素濃度を変更しても成立する解はない。そこで、まず制御棒の挿入レベルを全引き抜きから、実際の設計値レベルに変更した。これにより、燃焼初期においては制御棒の挿入位置レベルが、燃料と上部可動反射体の境界位置（B）へと下がることとなり、検出器位置の中性子束は減少することとなる。その効果は、0.6であり、出力運転時の解析結果が下がり反応率幅は改善され、たとえ輸送計算誤差（1.7）を考慮しても制限値におさまることが分かった。しかし、燃焼末期においては、中性子源が減衰することから、低温未臨界時における解析結果がさらに小さくなり、また、出力運転時の評価に対しては、制御棒レベルは設計値でもB-0.75段まで抜けており、その効果は0.75に留まるため、反応率幅は制限値を下回することは不可能である。なお、燃焼末期には、線源として使用済燃料からの中性子も考えられるが、その効果は約5%と小さく、結果を改善するほどではない（付録D参照）。

出力レベルを定格運転状態として評価することは、その条件で成立するときには、広領域中性子検出器では、定格運転時まで検出器は窒息等が起こることなく測定できることを示している。しかし、広領域中性子検出器は通常30%までの測定にしか使用しない。30%以上の出力に対しては、広領域中性子検出器に期待しないこととすると、解析結果はさらに70%減少することとなる。制御棒の効果と両方を考慮し、さらに輸送計算誤差及び吸収体の減損効果を考慮すると、反応率の幅は、 $2.0 \times 10^3$ となり、燃焼末期においても、反応率幅の制限値を下回ることとなる。

この場合に成立するほう素濃度は、1.7~1.9wt%となり、この時に、低温未臨界時には未臨界の確認のために必要な3CPS以上の計数が得られ、かつ、30%出力を超えない範囲で検出器は正常に機能することが確認できた。

## (2)中性子フルエンス

中性子検出器は定格時も炉内に装荷されているため、中性子フルエンスが制限値以下であることを確認する必要がある。

2章に示したとおり、中性子フルエンスの上限値は、 $4 \times 10^{19}$ である。以下に、上記の最も厳しい条件下においても、中性子フルエンスは制限値以下になることを示す。

2次元輸送計算による遮へい体がない場合の広領域中性子検出器の有感部中心における中性子束は、表6.1.1から $1.86 \times 10^{12}$ (n/cm<sup>2</sup>/sec)である。これに、モンテカルロ計算による補正、0.66(図6.2.1参照)、制御棒挿入効果の補正0.75、輸送計算誤差1.7及び広領域中性子検出器まわりの遮へい体による遮へい効果0.13~0.22(ほう素濃度下限値1.7wt%と遮へい体無しとの反応率の比0.13(図6.2.1参照)及びほう素最大減損割合0.62による反応率の増加1.7(図6.2.1参照)を考慮したもの)を考慮することにより、広領域中性子検出器の有感部中心における中性子フルエンスは、検出器の交換を2年(現状の計画)と仮定すると、 $0.76 \sim 1.3 \times 10^{19}$ n/cm<sup>2</sup>となり、制限値を下回る。また、5年(検出器の寿命)としても、 $3.2 \times 10^{19}$ n/cm<sup>2</sup>であり、制限値を満たす。

以上のことから、中性子のフルエンスの観点からは、定格運転時に検出器を炉外に取り出すことなく連続装荷した場合でも検出器の寿命までの間、健全性を保つことができることが確認できた。

表 7.1 NIS成立性検討結果

	燃焼日数	出力(%)	制御棒バール	効果	出力運転時	低温未臨界時	反応率幅
限界値	-	-	-	-	$\leq 9.1 \times 10^9$	$\geq 3.9$	$\leq 2.3 \times 10^9$
応答特性解析結果	-	100	B-2	-	$4.75 \times 10^9$	$1.46^{*3}$	$3.25 \times 10^9$
① 制御棒挿入効果	0~400	-	B	0.6	$2.9 \times 10^9$	$1.9^{*2} \sim 3.2^{*1}$	$0.91^{*1} \sim 1.5^{*2} \times 10^9$
	末期	-	B-0.75	0.75	$3.6 \times 10^9$	$1.46^{*3}$	$2.5 \times 10^9$
② 動作出力の考慮	-	30	-	0.3	$1.4 \times 10^9$	$1.46^{*3}$	$9.6 \times 10^8$
	末期	30	B-0.75	0.225	$1.1 \times 10^9$	$1.46^{*3}$	$7.5 \times 10^8$
①+②							

\*1: 燃焼初期、\*2: 燃焼440日、\*3: 燃焼末期

注) ほう素濃度は全て3 wt%、ほう素遮へい体の減損効果(燃焼末期で0.62)は未考慮、輸送計算誤差(1.7)も未考慮

## 8. まとめ

H T T Rの広領域中性子検出器の健全性の確認評価をモンテカルロコードと2次元輸送計算コードによる2次元重ね合わせ法及び3次元モンテカルロコードにより実施した。その結果、2次元重ね合わせ法による解析により、適切な吸収体を検出器に巻くことにより、健全性を保つことができる可能性があることが示された。さらに3次元モンテカルロコードにより絶対値計算を実施した結果、2次元解析による中性子束計算値の絶対値は見直され、成立させることは困難であることが分かった。

成立性としては、より現実的な条件（制御棒挿入レベル、30%出力以上では検出器の窒息による数え落としを許す）が考察された。その結果、天然ほう素濃度約1.7~1.9wt%の吸収体を用い、中性子検出器入射中性子量を抑えることにより、低温未臨界時には未臨界の確認のために必要な3 CPS以上の計数が得られかつ定格運転時に連続装荷した状態でも中性子検出器の健全性を保つことができることがわかった。

## 謝辞

本検討に当たっては、高温工学試験研究炉開発部プラント開発室川崎幸三氏をはじめとするH T T R開発部の皆様から多くの助言を頂いた。深く感謝いたします。また、本報告書をまとめるに当たりご指導いただいた高温工学試験研究炉開発部長飛岡利明氏（現、大洗研究所長）、同調査役田中利幸氏（現、高温工学試験研究炉開発部長）に、原稿の整理などに快く協力して下さった川崎聡子さんに深く感謝いたします。

## 8. まとめ

H T T Rの広領域中性子検出器の健全性の確認評価をモンテカルロコードと2次元輸送計算コードによる2次元重ね合わせ法及び3次元モンテカルロコードにより実施した。その結果、2次元重ね合わせ法による解析により、適切な吸収体を検出器に巻くことにより、健全性を保つことができる可能性があることが示された。さらに3次元モンテカルロコードにより絶対値計算を実施した結果、2次元解析による中性子束計算値の絶対値は見直され、成立させることは困難であることが分かった。

成立性としては、より現実的な条件（制御棒挿入レベル、30%出力以上では検出器の窒息による数え落としを許す）が考察された。その結果、天然ほう素濃度約1.7~1.9wt%の吸収体を用い、中性子検出器入射中性子量を抑えることにより、低温未臨界時には未臨界の確認のために必要な3 CPS以上の計数が得られかつ定格運転時に連続装荷した状態でも中性子検出器の健全性を保つことができることがわかった。

## 謝辞

本検討に当たっては、高温工学試験研究炉開発部プラント開発室川崎幸三氏をはじめとするH T T R開発部の皆様から多くの助言を頂いた。深く感謝いたします。また、本報告書をまとめるに当たりご指導いただいた高温工学試験研究炉開発部長飛岡利明氏（現、大洗研究所長）、同調査役田中利幸氏（現、高温工学試験研究炉開発部長）に、原稿の整理などに快く協力して下さった川崎聡子さんに深く感謝いたします。

## 参考文献

- (1) S. Saito et al., "Design of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)," JAERI 1332, Japan Atomic Energy Research Institute (1994).
- (2) 川崎 幸三, 中川 繁昭 他, 私信
- (3) D. B. Bartine, "The Status of Reactor Shielding Research in the United States," Proceedings of the Sixth International Conference on Radiation Shielding, 1, 526, Japan Atomic Energy Research Institute (1983).
- (4) M. L. Williams, W. W. Engle, Jr., "The Concept of Spatial Channel Theory Applied to Reactor Shielding Analysis," Nucl. Sci. Eng. 62, 92 (1977).
- (5) F. R. Mynatt, W. A. Rhoades et al., "The DOT III Two-dimensional Discrete Ordinates Transport Code," ORNL-TM-4280, Oak Ridge National Laboratory (1973).
- (6) T. B. Fowler, D. R. Vondy and G. W. Cunningham, "Nuclear Reactor Core Analysis Code : CITATION," ORNL-TM-2496, Oak Ridge National Laboratory (1971).
- (7) E. A. Straker, P. N. Stevens et al., "The MORSE Code- A Multigroup Neutron and Gamma-ray Monte Carlo Transport Code," ORNL-4585, Oak Ridge National Laboratory (1970).
- (8) J. Briesmeister (Ed.), "MCNP- A General Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport, Version 3A," LA-7396-M, Rev. 2 (1986).
- (9) L. B. Levitt, "The Application of Monte Carlo Methods to the Design of In-vessel Shielding in a Large LMFBR," Trans. Am. Nucl. Soc., 39, 768 (1981).
- (10) 小山 謹二 他, "遮へい材料の群定数 - 中性子100群・ガンマ線20群・P<sub>s</sub>近似 -, " JAERI-M 6928, 日本原子力研究所 (1977).
- (11) R. W. Roussin et al., "The CTR Processed Multigroup Cross Section Library for Neutronics Studies," ORNL/RSIC-37 (197 ).
- (12) K. Mohri, I. Suzuki et al., "Effect of Thermal Group Constants in VHTR Shielding Analysis," Proceedings of the Sixth International Conference on Radiation Shielding, 1, 142, Japan Atomic Energy Research Institute (1983).
- (13) 新藤 隆一, 山下 清信, 村田 勲, "高温ガス冷却炉・格子燃焼特性解析コード - DELIGHT-7," JAERI-M 90-048, 日本原子力研究所 (1990).
- (14) K. Koyama et al., "RADHEAT-V3, A Code System for Generating Coupled Neutron and Gamma-ray Group Constants and Analyzing Radiation Transport," JAERI-M 7155, Japan Atomic Energy Research Institute (1977).
- (15) W. W. Engle, Jr., "A USERS MANUAL FOR ANISN; A One Dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic Scattering," K-1693, Union Carbide

Corporation(1967).

(16)K.Tsuchihashi et al., "Revised SRAC Code System," JAERI 1302, Japan Atomic Energy Research Institute(1986).

## 付録 A JSD100 群定数ライブラリのANISNによる縮約

JSD100 群定数ライブラリは、100群構造であるため、これを22群に縮約する必要がある。このため図4.1.3の2次元モデルの炉心中心面及び第一燃料領域カラムの軸方向に対応した図A.1の一次元モデルにより、100群の中性子スペクトルをANISNコードにより計算し、これを重みとして各領域の基本物質毎に群定数の縮約を行った。

1次元計算による中性子束分布の結果を図A.2及び図A.3に示す。なお、1次元 $S_N$ 輸送計算のための入力パラメータは、次のように設定した。

- ・ルジャンドル展開次数  $P_0$
- ・空間角度分点数  $S_0$
- ・中性子束収斂精度 0.01%

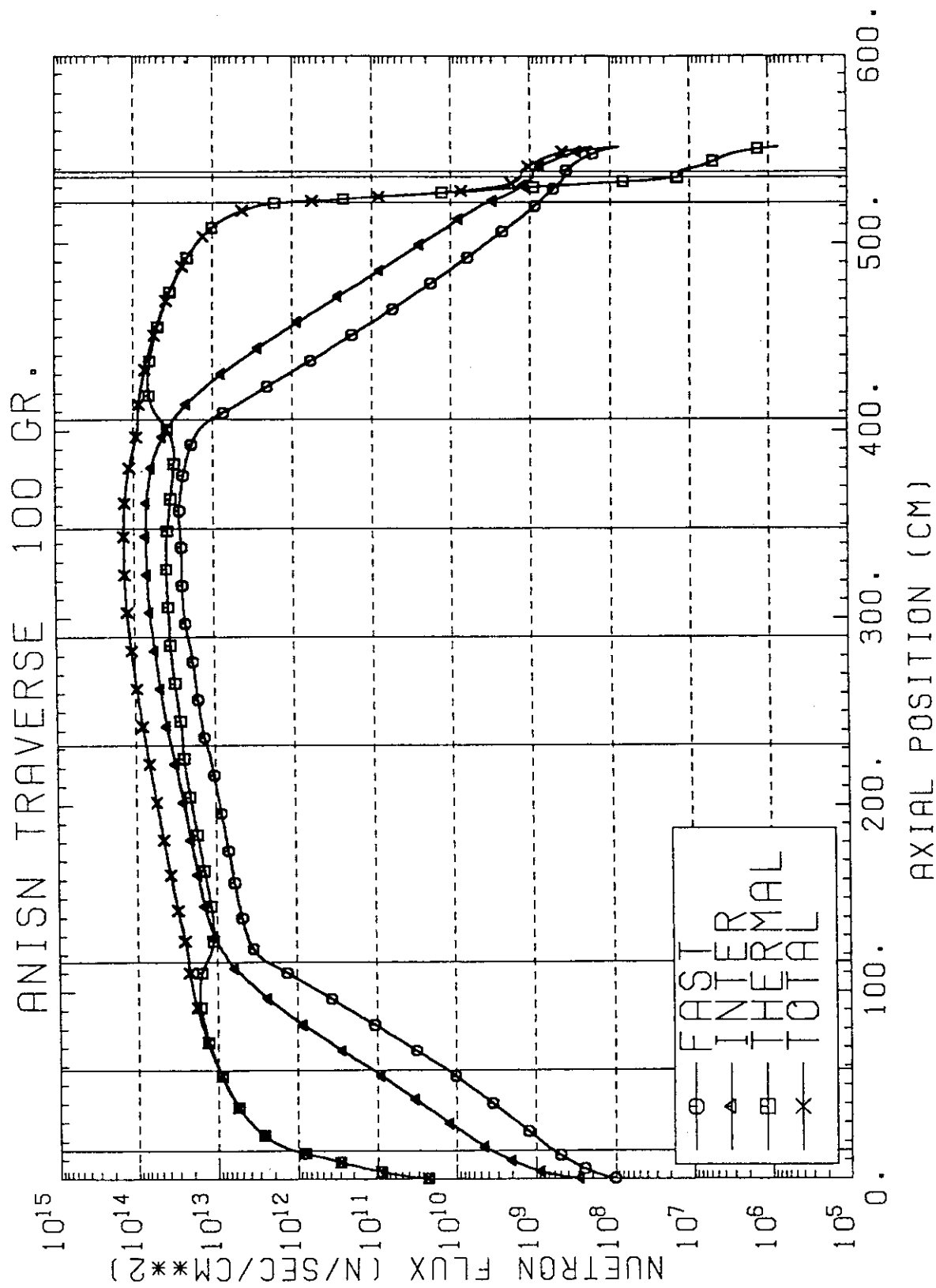


138	287.2	圧力容器	⑫	10	1.22	
128	275.0	ボイド	①	5	9.074	
123	229.63	SUS	⑪	2	2.25	
121	225.13	B <sub>4</sub> C + C	⑩	10	0.5	
111	220.13	SUS	⑨	1	0.15	
110	219.98			1	0.98	
	219.0	— ボイド —	①	2	2.01	
107	214.98	固定反射体	⑧	40	1.664	
67	148.44	可動反射体	⑦	10	1.953	
57	128.91	制御棒黒鉛	②	2	2.28	
55	124.35	ボイド	①	2	2.09	
53	120.17	制御棒黒鉛	②	3	1.53	
50	115.61	燃料体 (第4領域)	⑥	4	1.57	出力分布 に対応
46	105.82	燃料体 (第3領域)	⑤	9	3.88	
37	82.85	制御棒黒鉛	②	2	2.455	
35	77.94	ボイド	①	2	2.25	
33	73.44	制御棒黒鉛	②	2	2.455	
31	68.53	燃料体 (第2領域)	④	8	1.87	出力分布 に対応
23	50.29	燃料体 (第1領域)	③	14	2.75	
9	19.01	制御棒黒鉛	②	4	2.09	
5	10.65	ボイド	①	5	2.13	
	0.0					
積算 メッシュ 数	距離 (cm)		領域 番号	メッシュ 分割数	メッシュ 幅 (cm)	

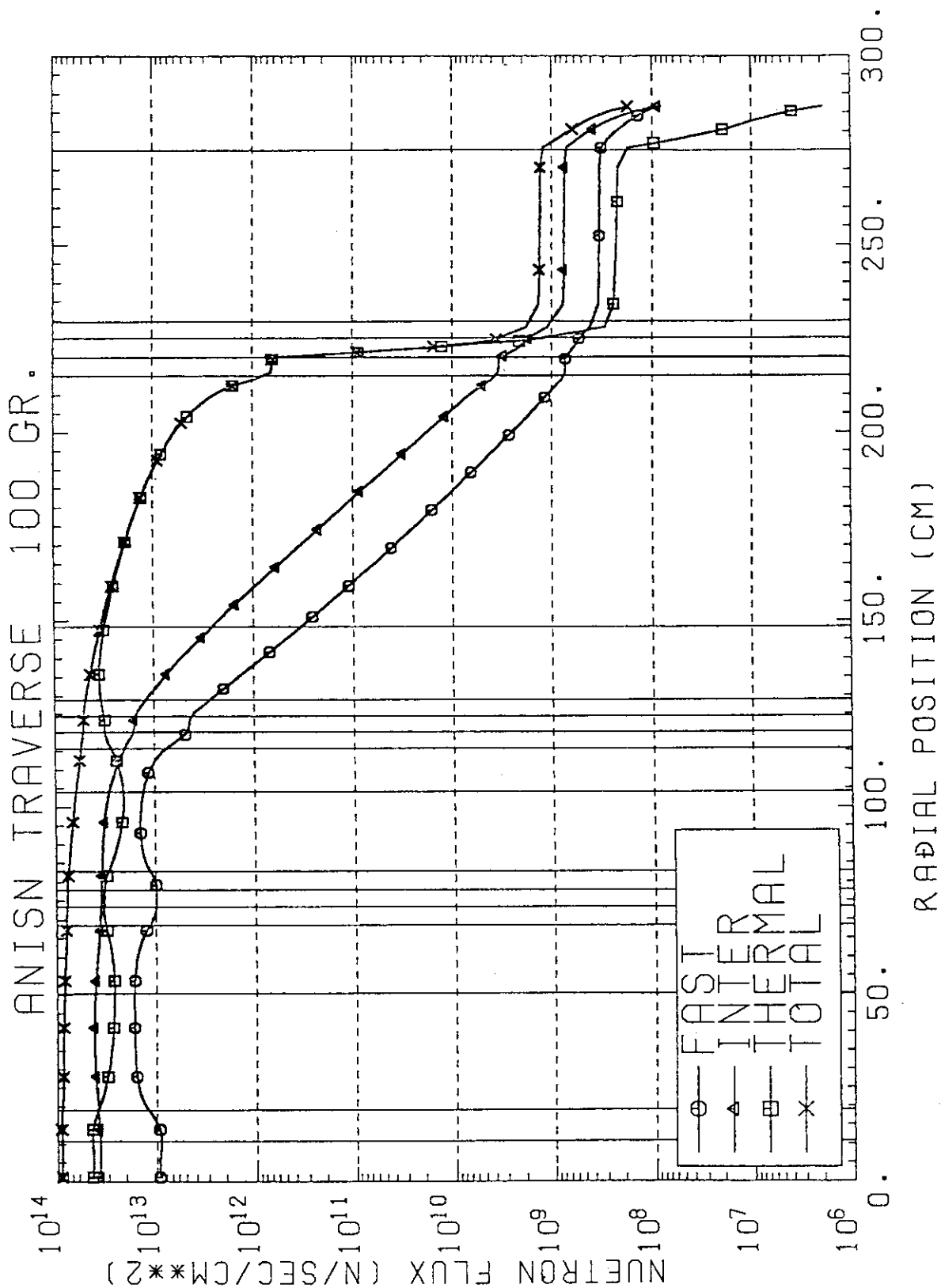
図A.1 JSD100縮約のための1次元径方向計算モデル (1/2)

271	552.0	SUS	⑪	14	0.964
257	538.5	ボイド	⑩	3	1.667
254	535.5	—	—	4	0.5
	533.5	SUS + B <sub>4</sub> C	⑨	9	1.0
	524.5	—	—	5	0.5
236	522.0	—	—	1	1.0
	521.0	上部可動反射体	⑧	50	2.3
185	406.0	燃料体 (1 段目)	⑦	28	2.071
157	348.0	燃料体 (2 段目)	⑥	20	2.9
137	290.0	燃料体 (3 段目)	⑤	20	2.9
117	232.0	—	—	20	2.9
	174.0	— 燃料体 (4, 5 段目)	④	28	2.071
69	116.0	下部可動反射体	③	25	2.32
44	58.0	下部可動反射体	②	20	2.1
	16.0	—	—	1	1.0
23	15.0	—	—	4	0.5
	13.0	— B <sub>4</sub> Cピン部	①	15	0.733
	2.0	—	—	4	0.5
	0.0	—	—		
積算 メッシュ ユ数	距離 (cm)		領域 番号	メッシュ ユ分割 数	メッシュ 幅 (cm)

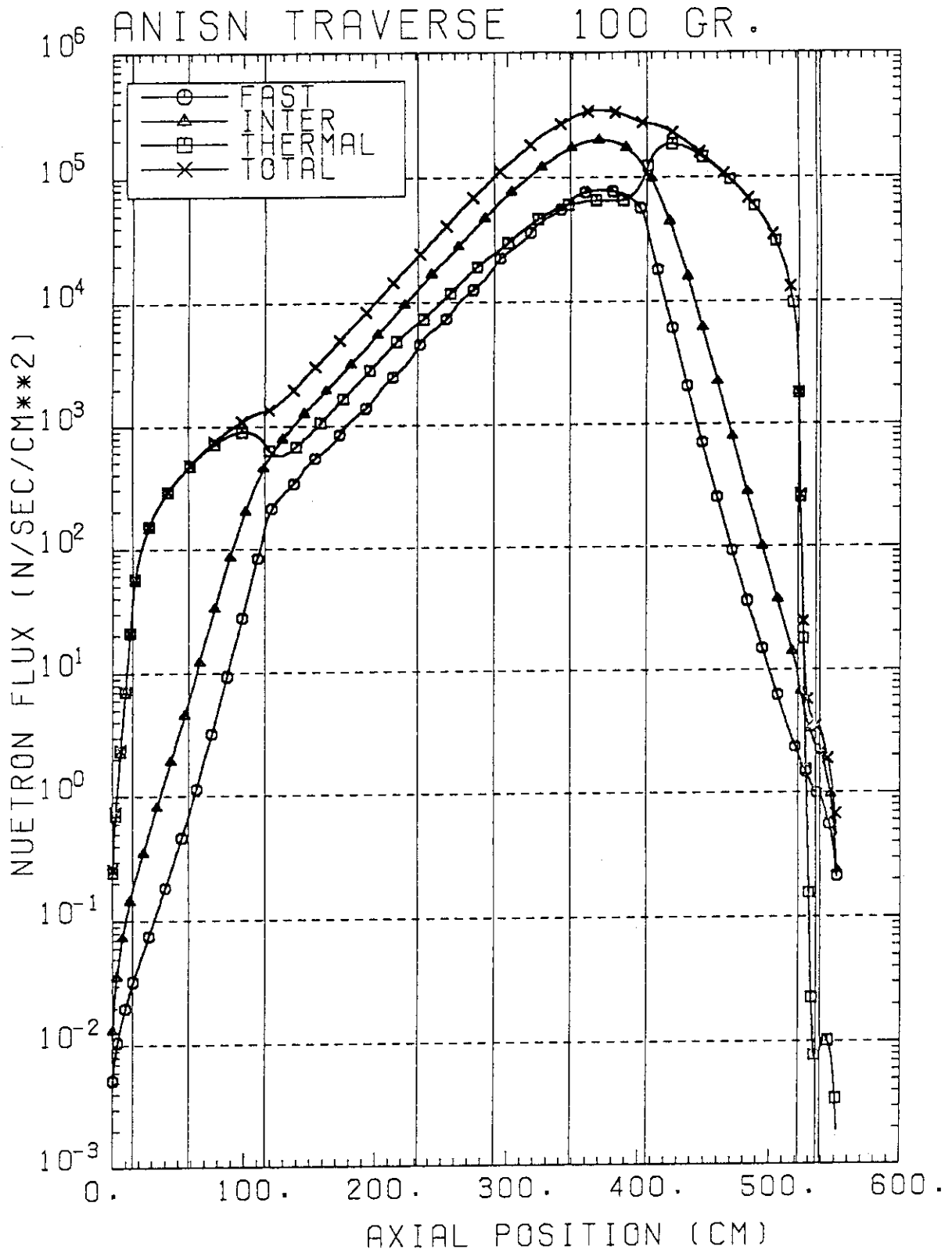
図A.1 JSD100縮約のための1次元軸方向計算モデル (2/2)



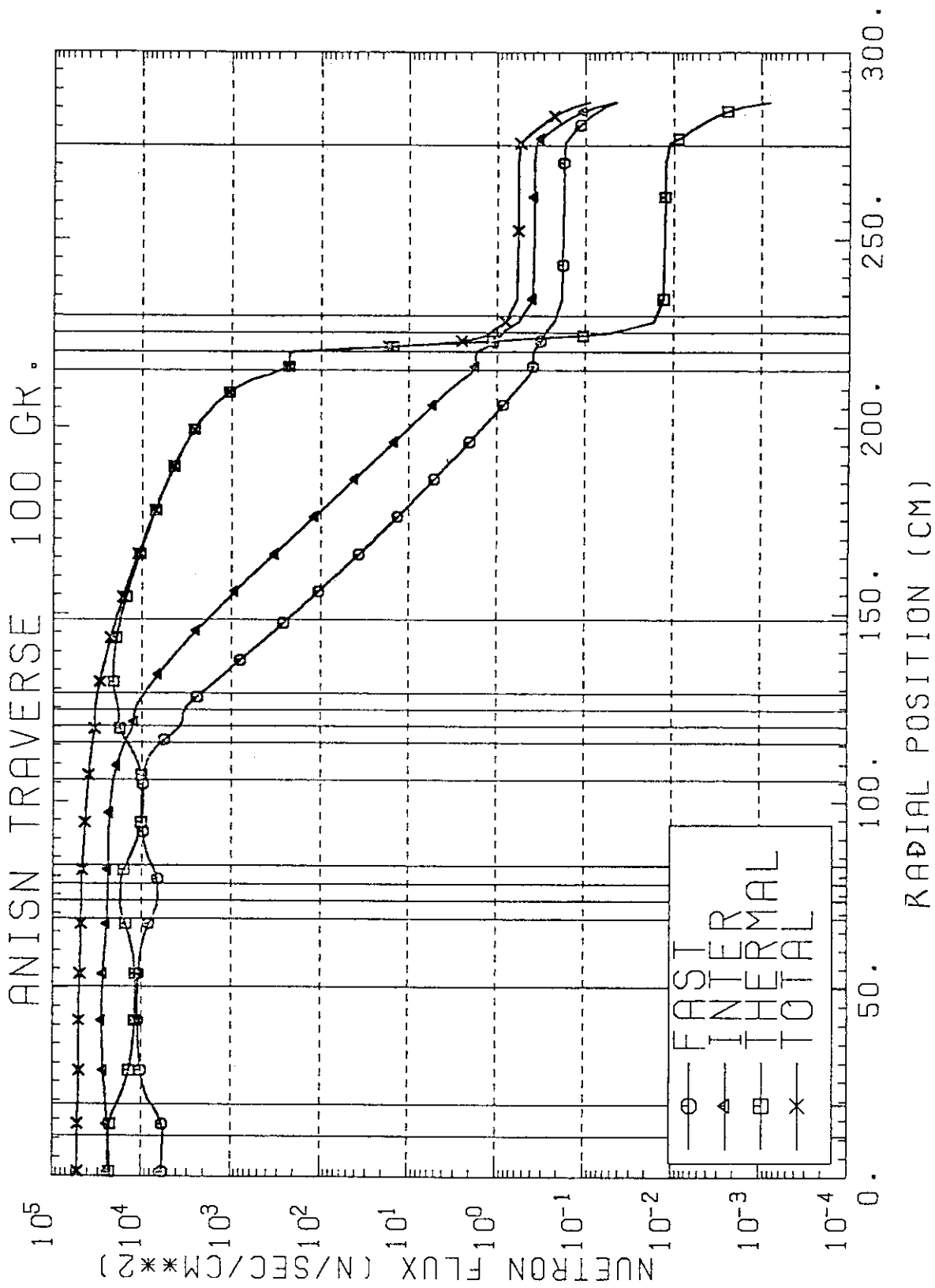
図A.2 1次元計算中性子束分布 (定格運転, 軸方向) (1/2)



図A.2 1次元計算中性子束分布 (定格運転, 径方向) (2/2)



図A.3 1次元計算中性子束分布 (低温未臨界, 軸方向) (1/2)

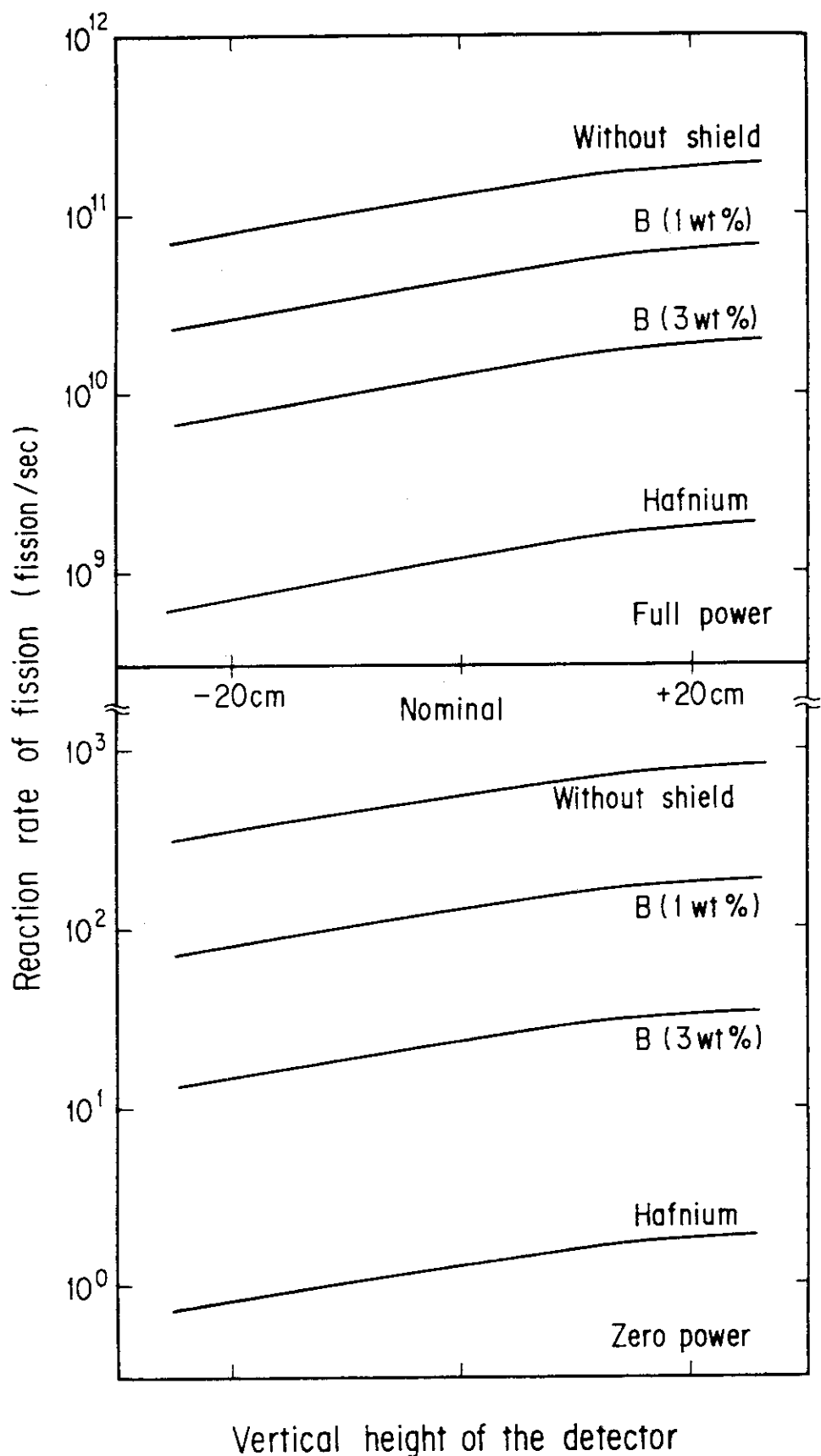


図A.3 1次元計算中性子束分布 (低温未臨界, 径方向) (2/2)

## 付録 B 広領域中性子検出器挿入高さの効果

広領域中性子検出器の挿入高さについては、中性子検出器の応答の線形性を保つという観点から既に決定されているが、この高さの変化による感度について調べた。

定格運転時については、中性子検出器有感部の挿入高さを基本案のものから±20cm軸方向に移動した場合の反応率の変化を、 $B_4C + C$  (B 1%) 遮へい体について計算した。これは、2次元計算結果の中性子束と随伴中性子束とを高さを変えて重ね合わせた。この結果、遮へい体のない場合に、中性子検出器位置を20cm深く挿入すると反応率は、46%増加し、20cm引き抜くと37%減少した。中性子検出器設置位置近傍の中性子スペクトルは、固定反射体固有のものとなっていると考えられることから、中性子検出器挿入高さと反応率との相関は、図B.1のようになる。



図B. 1 検出器の設置深さと核分裂反応率との相関



付録 C 遮へい体設置による $^{235}\text{U}$ 反応断面積へのスペクトル効果

重ね合わせに用いる2次元随伴中性子束計算での随伴線源には、 $^{235}\text{U}$ 核分裂反応断面積を使用している。この断面積は、黒鉛スペクトルのもとで縮約作成した値(表4.1.9)を適用している。しかし、この断面積は遮へい体の設置されていない場合に対応するものであり、遮へい体設置時の評価を精度良く行うには、この遮へい体透過後のスペクトルを用いて縮約作成した $^{235}\text{U}$ 反応断面積を用いる必要がある。

以下に、この効果がどの程度であるかを、最もほう素富化度の高い(3 wt%)  $\text{B}_4\text{C} + \text{C}$ 遮へい体の場合について検討した。遮へい体を設置した状態の検出器を黒鉛中心に模擬したセル計算を実施し、中性子検出器内のスペクトルを用いて $^{235}\text{U}$ 核分裂反応断面積を縮約し、22群の定数を作成した。得られた断面積を表C.1に示した。この断面積を随伴中性子束計算の線源とした場合、最終的に得られる $^{235}\text{U}$ 核分裂反応率を表C.2に示した。遮へい体のない場合の反応断面積(表4.1.9)と比較すると、20~21群は50以下に低下しており、22群は700K(定格運転時)で76%、300K(低温未臨界時)で60%に低下している。この結果、定格運転時及び低温未臨界時共に $\text{B}_4\text{C} + \text{C}$ (3 wt%)遮へい体設置時のスペクトルを $^{235}\text{U}$ 断面積作成に反映したものは、黒鉛スペクトルより作成した $^{235}\text{U}$ 断面積を用いたものに比べ、43%反応率が低下することが分かった。なお、 $^{235}\text{U}$ 反応率の図(図6.1.15)には、この結果を補正した結果も併せて示した。

表C.1 遮へい体透過スペクトルによる<sup>235</sup>U核分裂反応断面積 $\sigma_f$  単位 : barn

Gr.	$\sigma_f$ : 700 K	$\sigma_f$ : 300 K
1	1.6342	1.6342
2	1.6619	1.6619
3	1.6617	1.6617
4	1.4941	1.4941
5	1.3228	1.3228
6	1.2853	1.2853
7	1.3361	1.3361
8	1.4289	1.4289
9	1.6254	1.6254
10	1.9488	1.9488
11	2.5576	2.5576
12	3.8880	3.8880
13	6.2104	6.2104
14	1.1117 (+1)	1.1117 (+1)
15	1.7388 (+1)	1.7388 (+1)
16	2.7901 (+1)	2.7901 (+1)
17	4.7230 (+1)	4.7230 (+1)
18	5.2534 (+1)	5.2534 (+1)
19	2.5808 (+1)	2.5808 (+1)
20	2.0341 (+1)	2.0192 (+1)
21	9.0074 (+1)	8.9082 (+1)
22	3.1443 (+2)	3.1248 (+2)

表C.2 遮へい体透過スペクトルを考慮したU反応率

( fission / sec )

エネルギー群	定格運転		低温未臨界	
	遮へい体無し レスポンス	B 3w/oまきつけ時 レスポンス	遮へい体無し レスポンス	B 3w/oまきつけ時 レスポンス
1	6.77 × 10 <sup>5</sup>	5.19 × 10 <sup>5</sup>	1.83 × 10 <sup>-3</sup>	1.43 × 10 <sup>-3</sup>
2	6.73 × 10 <sup>5</sup>	5.11 × 10 <sup>5</sup>	1.66 × 10 <sup>-3</sup>	1.29 × 10 <sup>-3</sup>
3	7.63 × 10 <sup>5</sup>	5.75 × 10 <sup>5</sup>	1.81 × 10 <sup>-3</sup>	1.39 × 10 <sup>-3</sup>
4	1.46 × 10 <sup>6</sup>	1.09 × 10 <sup>6</sup>	3.39 × 10 <sup>-3</sup>	2.59 × 10 <sup>-3</sup>
5	1.31 × 10 <sup>6</sup>	9.81 × 10 <sup>5</sup>	3.01 × 10 <sup>-3</sup>	2.30 × 10 <sup>-3</sup>
6	1.09 × 10 <sup>6</sup>	8.23 × 10 <sup>5</sup>	2.50 × 10 <sup>-3</sup>	1.91 × 10 <sup>-3</sup>
7	9.52 × 10 <sup>5</sup>	7.19 × 10 <sup>5</sup>	2.17 × 10 <sup>-3</sup>	1.66 × 10 <sup>-3</sup>
8	8.83 × 10 <sup>5</sup>	6.68 × 10 <sup>5</sup>	2.00 × 10 <sup>-3</sup>	1.54 × 10 <sup>-3</sup>
9	1.56 × 10 <sup>6</sup>	1.18 × 10 <sup>6</sup>	3.51 × 10 <sup>-3</sup>	2.70 × 10 <sup>-3</sup>
10	1.88 × 10 <sup>6</sup>	1.43 × 10 <sup>6</sup>	4.21 × 10 <sup>-3</sup>	3.24 × 10 <sup>-3</sup>
11	2.18 × 10 <sup>6</sup>	1.66 × 10 <sup>6</sup>	4.85 × 10 <sup>-3</sup>	3.73 × 10 <sup>-3</sup>
12	2.57 × 10 <sup>6</sup>	1.95 × 10 <sup>6</sup>	5.69 × 10 <sup>-3</sup>	4.37 × 10 <sup>-3</sup>
13	3.04 × 10 <sup>6</sup>	2.31 × 10 <sup>6</sup>	6.68 × 10 <sup>-3</sup>	5.11 × 10 <sup>-3</sup>
14	3.56 × 10 <sup>6</sup>	2.69 × 10 <sup>6</sup>	7.75 × 10 <sup>-3</sup>	5.88 × 10 <sup>-3</sup>
15	4.10 × 10 <sup>6</sup>	3.07 × 10 <sup>6</sup>	8.82 × 10 <sup>-3</sup>	6.59 × 10 <sup>-3</sup>
16	5.91 × 10 <sup>6</sup>	4.34 × 10 <sup>6</sup>	1.25 × 10 <sup>-2</sup>	9.13 × 10 <sup>-3</sup>
17	6.66 × 10 <sup>6</sup>	4.71 × 10 <sup>6</sup>	1.39 × 10 <sup>-2</sup>	9.58 × 10 <sup>-3</sup>
18	7.38 × 10 <sup>6</sup>	4.87 × 10 <sup>6</sup>	1.50 × 10 <sup>-2</sup>	9.46 × 10 <sup>-3</sup>
19	4.85 × 10 <sup>6</sup>	2.95 × 10 <sup>6</sup>	9.66 × 10 <sup>-3</sup>	5.45 × 10 <sup>-3</sup>
20	1.93 × 10 <sup>7</sup>	1.10 × 10 <sup>7</sup>	2.37 × 10 <sup>-2</sup>	1.31 × 10 <sup>-2</sup>
21	8.31 × 10 <sup>9</sup>	4.60 × 10 <sup>9</sup>	4.83 × 10 <sup>1</sup>	2.51 × 10 <sup>1</sup>
22	4.35 × 10 <sup>9</sup>	2.58 × 10 <sup>9</sup>	1.79 × 10 <sup>1</sup>	1.03 × 10 <sup>1</sup>
計	1.27 × 10 <sup>10</sup>	7.23 × 10 <sup>9</sup>	2.28 × 10 <sup>1</sup>	1.29 × 10 <sup>1</sup>

## 付録 D 使用済燃料からの中性子発生効果

使用済燃料の自発核分裂及び ( $\alpha, n$ ) 反応により放出される中性子の強度を、中性子源により引き起こされる燃料の核分裂により放出される中性子の強度と比較すると次のようになる。

使用済燃料 (35GWd/t) :  $3.336 \times 10^6$  n/sec/block

低温未臨界時核分裂 :  $7.431 \times 10^7$  n/sec/block

(中性子検出器位置に最も近い燃料の出力

$1.489 \times 10^{-8}$  w/ccから算出)

これより、使用済燃料からの中性子発生効果は、中性子源によりもたらされる核分裂中性子の5%程度と見積もられ、中性子源の時間減衰(3年減衰率は0.455)を補うには小さすぎる事が明らかとなった。