

JAERI-M

9 4 3 3

多目的高温ガス実験炉における  
制御棒価値評価モデルの検討

1981年4月

大村博志\*

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

多目的高温ガス実験炉における制御棒価値評価モデルの検討

日本原子力研究所 動力炉開発・安全性研究管理部

大村博志\*

(1981年3月3日受理)

本報告書は高温ガス炉に特有な、燃料体に2本を対として挿入される制御棒の反応度を精度良く評価するモデルを得るための検討について述べたものである。

スーパーセル(制御棒の挿入された中央燃料要素とそれを取り囲む6個の標準燃料要素から構成される)と呼ばれる単位格子に対し、 $S_N$ 法やモンテ・カルロ法など数種の輸送計算コードを用いて臨界計算を行なった解析結果に基づいている。

検討は、①燃料体や制御棒の形状の妥当なモデル化法、②炉心計算のための均質化断面積作成法、について核設計の観点から行なわれ、②については新たな補正因子導入の必要性が示された。

なお、格子計算によるものではあるが、相互干渉効果のため制御棒価値が約30%減少すること、制御棒や後備停止系挿入孔からの中性子ストリーミングのため、反応度が1%  $\Delta k/k$  程度減少することも明らかにされた。

---

\* 外来研究員(石川島播磨重工業株式会社)

Study of Control Rod Worth Evaluation Model for VHTR Design

Hiroshi OOMURA\*

Division of Power Reactor Projects, JAERI

(Received March 3, 1981)

Developmental studies of the experimental VHTR have been progressing in JAERI. Described in this report are procedures and results of the studies to get adequate evaluation models for reactivity worth of control rods in twin configuration which are characteristic of the HTGRs.

Multiplication factors for a supercell, which is composed of one central fuel element with control rods and surrounding six standard fuel elements, were analyzed. Use is made of several neutron transport codes based on  $S_N$ , Monte Carlo and other methods.

From the stand point of nuclear design, 1) geometrical modeling of fuel elements and control rods, and 2) validity of usual averaged cross sections for fuel elements in reactor calculation were investigated. Regarding 2), necessity of additional correction is indicated.

Other noteworthy facts deduced from the results of cell calculation are as follows;

- 1) Mutual interaction between control rods decreases their reactivity worth by about 30 %.
- 2) Axial neutron streaming through the holes of control rods and reserve shutdown system decreases the reactivity of the supercell by about 1 %  $\Delta k/k$ .

Keywords ; HTGR, Core Design, Control Rod Worth, Mutual Interaction Effect, Group Constants, Cell Calculation,  $S_N$  Method, Monte Carlo Method, Neutron Streaming Effect.

---

\* On leave from Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

## 目 次

1. 序 論 .....	1
1.1 目 的 .....	1
1.2 対象および条件 .....	2
1.3 手順および結果の概要 .....	3
2. 各種モデル化の効果 .....	18
2.1 群定数の定義について .....	18
2.2 計算コードの違いについて .....	20
2.3 群数の効果 .....	22
2.4 $S_N$ 次数およびメッシュ数の効果 .....	23
2.5 燃料体形状のモデル化の相違による効果 .....	24
3. 制御棒形状のモデル化の効果 .....	37
3.1 円形断面モデル .....	37
3.2 凹凸および多角形断面モデル .....	37
3.3 正方形断面モデル .....	38
4. 制御棒間距離と干渉効果 .....	59
4.1 後備停止系が入らない場合 .....	59
4.2 後備停止系が入った場合 .....	60
5. 遮蔽因子および均質化定数 .....	70
5.1 形状のモデル化と遮蔽因子 .....	70
5.2 均質化定数と格子モデルでの再臨界計算 .....	71
6. 結 論 .....	90
6.1 まとめおよび考察 .....	90
6.2 今後の課題 .....	91
謝 辞 .....	94
参考文献 .....	94
付 録 1. TWOTRAN - II の使用について .....	95
2. TRIPLET の使用について .....	99
3. 制御棒形状と反応度値に対するサーベイ計算例について .....	103
4. 格子計算コード JMSLALOM および DIRK について .....	107

## Contents

1. Introduction .....	1
1.1 Purpose of this study .....	1
1.2 Subject of study and conditions used .....	2
1.3 Procedure and summary of studies .....	3
2. Effects of model components .....	18
2.1 Definition of group constants .....	18
2.2 Differences among codes used in calculation .....	20
2.3 Effect of number of energy groups .....	22
2.4 $S_N$ order and mesh effect .....	23
2.5 Shape of fuel blocks .....	24
3. Effects of the modeling of control rod shape .....	37
3.1 Models of circular cross section .....	37
3.2 Models of concavo-convex and polygon cross section .....	37
3.3 Models of square cross section .....	38
4. Distances between control rods and interference effect .....	59
4.1 Without reserved shutdown system .....	59
4.2 With reserved shut down system .....	60
5. Spatial shielding factors and homogenized group constants .....	70
5.1 Modeling of control rod shape and shielding factors .....	70
5.2 Homogenized group constants and re-calculation of the cell ...	71
6. Conclusion .....	90
6.1 Summary and discussions .....	90
6.2 Problems for further discussion .....	91
Acknowledgement .....	94
References .....	94
Appendix 1. Comments for the user of TWOTRAN-2 .....	95
2. Comments for the user of TRIPLET .....	99
3. Relations between shape of control rods and their reactivity worth .....	103
4. Comments on JMSLALOM and DIRK .....	107

## 図 表 目 次

Table	1.1	ブロックモデルの特徴
	1.2	制御棒モデルの特徴
	1.3	円形および正方形断面制御棒モデルの寸法および構成
	1.4	主な計算ケースおよび得られた実効増倍率
	2.1	燃料体の原子数密度
	2.2	共鳴計算のパラメータ ( $U^{238}$ )
	2.3	制御棒吸収体およびハステロイ-Xの原子数密度
	2.4	散乱, $S_N$ 次数の違いが実効増倍率におよぼす影響
	2.5	TWOTRAN-2 および KENO-4 コードによる実効増倍率の比較
	2.6	50 群エネルギー区分
	2.7	BM <sub>4</sub> および BM <sub>4</sub> - MD <sub>2</sub> モデルにおける中性子漏洩割合
	5.1	制御棒挿入孔内遮蔽因子
	5.2	制御棒吸収体 ( $B_4C + C$ ) 遮蔽因子
	5.3	RSS 吸収体 ( $B_4C + C$ ) 遮蔽因子
	5.4	第 1 群制御型燃料体均質化巨視断面積
	5.5	第 2 群制御型燃料体均質化巨視断面積
	5.6	第 3 群制御型燃料体均質化巨視断面積
	5.7	第 4 群制御型燃料体均質化巨視断面積
	5.8	第 5 群制御型燃料体均質化巨視断面積
	5.9	第 6 群制御型燃料体均質化巨視断面積
	5.10	非均質格子計算および均質化定数を用いた再格子計算で得られた実効増倍率および制御棒価値の比較
	5.11	均質化定数に対し, HOCAF による補正を行なった場合と行なわない場合に, 再格子計算で得られる実効増倍率の比較
	5.12	M <sub>k</sub> -III が心制御棒挿入時の制御型燃料体に対する HOCAF
Fig.	1.1	多目的高温ガス実験炉の炉体横断図
	1.2	多目的高温ガス実験炉 M <sub>k</sub> -III が心スーパーセル概念図
	1.3	多目的高温ガス実験炉の燃料体
	1.4	多目的高温ガス実験炉の制御棒
	1.5	計算に用いたブロックモデルの概形
	1.6	計算に用いた制御棒モデルモデルの概形
	1.7	M <sub>k</sub> -III 炉心スーパーセル断面とそのブロックモデル (BM <sub>2</sub> ) の形状比較
	1.8	制御棒および後備停止系孔間の相互距離を変えたブロックモデルの概形
	1.9	均質化定数を用いた再格子計算モデルメッシュ分割
	2.1	BM <sub>1</sub> - CRS <sub>1</sub> モデルの TWOTRAN-2 用メッシュ分割
	2.2	均質化用重み関数計算モデルおよび TWOTRAN-2 用メッシュ分割

- 2.3 BM<sub>1</sub> - CRS<sub>1</sub>モデル TRIPLET 用メッシュ分割
- 2.4 BM<sub>1</sub> - CRS<sub>1</sub>モデル KENO - 4 計算形状
- 2.5 KENO - 4, TWOTRAN - 2 計算手法比較用モデル体系
- 2.6 BM<sub>2</sub> - CRS<sub>2</sub>モデル TWOTRAN - 2 用メッシュ分割
- 3.1 凹凸断面制御棒モデル間の関係
- 3.2 BM<sub>3</sub> - CRG<sub>1</sub>モデル TWOTRAN - 2 用メッシュ分割
- 3.3 BM<sub>3</sub> - CRG<sub>2</sub>モデル TWOTRAN - 2 用メッシュ分割
- 3.4.1 BM<sub>3</sub> - CRG<sub>15</sub>モデル TRIPLET 用メッシュ分割
- 3.4.2 同上 (細部拡大図)
- 3.5 円形断面制御棒と同じ値を持つ凹凸断面制御棒モデルの一例
- 3.6 BM<sub>3</sub> - CRG<sub>1</sub>モデルの第6群中性子束分布
- 3.7 BM<sub>1</sub> - CRS<sub>1</sub>モデルの第6群中性子束分布
- 3.8 BM<sub>1</sub> - CRS<sub>2</sub>モデルの第6群中性子束分布
- 3.9 BM<sub>2</sub> - CRS<sub>2</sub>モデルの第6群中性子束分布
- 3.10 BM<sub>2</sub> - CRS<sub>3</sub>モデルの第6群中性子束分布
- 3.11 BM<sub>2</sub> - CRS<sub>2</sub>モデルの第1群中性子束分布
- 3.12 BM<sub>3</sub> - CRG<sub>1</sub>モデルの第1群中性子束分布
- 3.13 BM<sub>2</sub> - CRS<sub>2</sub>モデルの第2群中性子束分布
- 3.14 BM<sub>3</sub> - CRG<sub>1</sub>モデルの第2群中性子束分布
- 3.15 BM<sub>2</sub> - CRS<sub>2</sub>モデルの第3群中性子束分布
- 3.16 BM<sub>3</sub> - CRG<sub>1</sub>モデルの第3群中性子束分布
- 3.17 BM<sub>2</sub> - CRS<sub>2</sub>モデルの第4群中性子束分布
- 3.18 BM<sub>3</sub> - CRG<sub>1</sub>モデルの第4群中性子束分布
- 3.19 BM<sub>2</sub> - CRS<sub>2</sub>モデルの第5群中性子束分布
- 3.20 BM<sub>3</sub> - CRG<sub>1</sub>モデルの第5群中性子束分布
- 3.21 BM<sub>1</sub> - CRS<sub>2</sub>モデル TWOTRAN - 2 用メッシュ分割
- 3.22 BM<sub>2</sub> - CRS<sub>3</sub>モデル TWOTRAN - 2 用メッシュ分割
- 3.23 BM<sub>2</sub> - CRS<sub>4</sub>モデル TWOTRAN - 2 用メッシュ分割
- 4.1 BM<sub>3</sub> - GGS - CRG<sub>1</sub>モデル TWOTRAN - 2 用メッシュ分割
- 4.2 BM<sub>3</sub> - GGM - CRG<sub>1</sub>モデル TWOTRAN - 2 用メッシュ分割
- 4.3 BM<sub>3</sub> - GGL - CRG<sub>1</sub>モデル TWOTRAN - 2 用メッシュ分割
- 4.4 BM<sub>3</sub> - GGS - CRG<sub>1</sub>モデルの第6群中性子束分布
- 4.5 BM<sub>3</sub> - GGL - CRG<sub>1</sub>モデルの第6群中性子束分布
- 4.6 スーパーセル中央にCRG<sub>1</sub>モデルを併用したモデルのTWOTRAN - 2 用メッシュ  
分割
- 4.7 1個の制御棒挿入孔にのみCRG<sub>1</sub>モデルを併用したモデルのTWOTRAN - 2 用メ  
ッシュ分割
- 4.8 BM<sub>3</sub> - GGM - RSSモデルの第6群中性子束分布



- 4.9  $BM_3 - GGS - (CRG_1 + RSS)$  モデルの第 6 群中性子束分布
- 4.10  $BM_3 - GGM - (CRG_1 + RSS)$  モデルの第 6 群中性子束分布
- 4.11  $BM_3 - GGL - (CRG_1 + RSS)$  モデルの第 6 群中性子束分布
- 5.1 各モデルに対する制御型燃料体巨視吸収断面積の基準値 ( $BM_3 - CRG_1$  と  $BM_3 - CRG_2$  の平均値) からのずれ
- 5.2 各モデルに対する制御型燃料体巨視生成断面積の基準値 ( $BM_3 - CRG_1$  と  $BM_3 - CRG_2$  の平均値) からのずれ
- 5.3 制御棒間および制御棒と後備停止系間の距離と実効増倍率の関係
- 5.4 制御棒間および制御棒と後備停止系間の距離とその反応度値値の関係
- 6.1 制御棒反応度値評価モデル最適フロー

# 1. 序 論

## 1.1 目 的

多目的高温ガス冷却実験炉の設計は昭和44年以来、試設計、予備設計、基本概念設計、第1次概念設計、システム総合設計と進められてきた。炉心設計に関しては第1次概念設計に際し Mark-III 炉心<sup>1),2)</sup> (以後、Mk-III 炉心と略記) が設定されて以来、安全上や運転上の余裕を増す観点から、その改良の方策を探る検討が行なわれてきた。この Mk-III 炉心は Fig. 1.1 に概略形状を示すように、六角柱状黒鉛ブロックを積み重ねたものである。制御棒もこの六角柱ブロックに、中心から外れた位置に2本を対として挿入され、高温ガス炉に特徴的な形状となっている。このためその相互の干渉が強くなり、制御棒価値の正確な把握には、かなりの難かしさが伴うことになり、これまでの検討でもその精度までは十分に把握されてはいなかった。

本検討はこの Mk-III のスーパーセルと呼ばれる単位格子に対し、種々の形状モデルを設定し、モンテカルロ法を含む数種の設計コードを用いて臨界計算を行ない、比較検討を行なったものである。スーパーセルの形状についてはほぼ十分な取り扱いがなされているといえる。

多目的高温ガス実験炉は、鋼製圧力容器を用いて、冷却材出口温度1000℃を達成しようという目的のため従来の発電炉などとは異なった炉心設計上の問題が発生する。そのうちでも重要なものの1つに反応度停止余裕の問題がある。すなわち、炉容器および炉体の構造などからくる制約条件のために炉心に挿入可能な制御棒本数が少ないこと、および低濃縮ウランを用いることやブロック型燃料体のため連続的な燃料交換方式がとれないことなどから、必要な燃料炉内滞在時間を達成するための炉心初期余剰反応度が比較的大きくなり、その結果、反応度停止余裕が不足気味になるという問題である。したがって反応度制御素子に所定の誤差を考慮した上で反応度停止余裕を十分確保できる設計を行うことが必要であり、計算誤差を把握した評価モデルを確立することは重要な課題となってくる。

炉心設計を行う際に、設計の誤差範囲を正しく知ることは基本的事項である。この誤差を知るには、一般には適当な実験を設計と同手法で解析することが考えられる。しかしながら制御棒価値に関しては以下のような問題点がある。

- ① 深い未臨界度 (約 20 \$ 以上) の実験的測定として、直接、実効増倍率や制御棒価値を測定する方法はない。現在行なわれている測定法は、間接的な測定量から計算を含めた中間的処理を経て必要な量を得る方法<sup>3)</sup> が主で、したがって本来独立であるべき実験誤差と計算誤差の分離に困難がある。
- ② 臨界のごく近傍を除き、超臨界度を実験的に測定する方法がない。

したがって、実験とは独立に、計算に基いて設計誤差を把握するには、現時点では感度解析に頼らざるを得ないと考えられる。この観点からすれば本検討は感度解析の1例としての意義も持つものと考えられることができる。

## 1.2 対象および条件

検討の対象としては、Mk-IIIスーパーセルのうち燃料濃縮度が4%のものとした。これは炉心全体の平均濃縮度に相当するからである。Fig. 1.2にMk-IIIスーパーセルの形状を、またFig. 1.3にスーパーセルを構成する標準型燃料体と制御型燃料体の横断面を、さらにFig. 1.4に制御棒の概略を示す。この対象の形状のモデル化は、解析に2次元SN計算コードTWOTRAN-2<sup>4)</sup>、2次元有限要素法輸送コードTRIPLET<sup>5)</sup>および3次元モンテカルロ計算コードKENO-4<sup>6)</sup>を主として用いることを考慮し、次の方針に従った。

- ① モデル化は制御棒に対するものと、これを除いたブロックに対するものとに分け、各々数種類づつ設定し、これらを組合せて制御棒挿入時のモデルとする。
- ② すべてのモデルは、上記の計算コードのうち、少なくとも1種類のコードでは近似することなく正確に形状を扱えるように設定する。
- ③ 各モデルは単純なものから順次、実際の形状に近づけて行き、個々の近似の影響を把握できるようにする。

以上の方針に基づき設定したブロックに対するモデル（以下ブロックモデルという）、BM<sub>n</sub>（ $n = 1, 6$ ）と制御棒に対するモデル（以下制御棒モデルという）、CRS<sub>n</sub>（ $n = 1, 4$ ）、CRG<sub>n</sub>（ $n = 1, 2$ ）、CRG<sub>15</sub>、CRR<sub>n</sub>（ $n = 1, 2$ ）をFig. 1.5およびFig. 1.6に示す。またFig. 1.7には、BM<sub>2</sub>モデルを例にとり実際のスーパーセルとの形状の比較を与えた。この図において実線はBM<sub>2</sub>モデルを示し、点線は実際のスーパーセルの断面に対応している。Table 1.1およびTable 1.2には、それぞれ各ブロックモデルおよび制御棒モデルの主な特徴をまとめた。なお、参考のため、Table 1.3には円形および正方形断面制御棒モデルの構成および寸法の比較表を示す。以上は対配置された制御棒挿入時のモデルであり、2本の制御棒の中心間距離はMk-III炉心制御型燃料体の設計に合わせて設定した。

さて、これまで述べたブロックモデルとは別に、後備停止系も含めた反応度値の検討のためのブロックモデルとしてBM<sub>3</sub>-GGM、BM<sub>3</sub>-GGS、BM<sub>3</sub>-GGLの3種のモデルも設定した。これらをFig. 1.8に示す。図からわかる通り、2本の制御棒挿入孔および後備停止系孔の中心間距離を変えたモデルであり、制御棒間および制御棒-後備停止系間の干渉効果を検討するために用いられた。

今回の検討では制御棒値の絶対値をおさえるというよりも、モデルの相違に帰因する差異、すなわち相対値に重点をおいたので、ライブラリーについては特に注意は払わず、スペクトル計算にGGC-4<sup>7)</sup>コードを用いた関係で、その内蔵のライブラリーを用いた。GGC-4を用いたのは、非等方散乱を正確に考慮するために、同じ条件でスペクトル計算をして求めたP0、P1、P2定数を必要としたためである。

可燃性毒物については別途、詳細な検討が必要であると考えて、今回の検討においては考慮しないこととした。

### 1.3 手順および結果の概要

今回の検討の様に、種々の形状モデルに対しいくつかの計算コードを用いて臨界計算を行う場合には、結果として得られた実効増倍率の相対値に主として着目するにしても、次に述べる効果について前もって検討を加えておくことが必要である。

- ① 断面積作成法の問題、特に非等方散乱の取り扱い方の効果。これは、制御棒未挿入時についてはあまり重要ではないが、挿入時には重要になると思われるためである。
- ② 各計算コードに固有なパラメータや条件による相違。
- ③ 用いる計算コード間の計算方法の差が実効増倍率におよぼす影響。

したがってまず、第2章においては、制御棒価値評価の各種モデル化の影響を上記の点に重点を置いて検討した。また形状モデルに関しても、ブロックモデルの制御型燃料体の外形の効果と標準型燃料体を均質化して取り扱う効果すなわち、制御棒を挿入する「うつわ」のモデル化に関する効果の検討を行なった。

第3章では、挿入する制御棒の形状の効果に主眼を置いて検討を行なった。輸送近似コードを用いて、円形、正方形、円形に近い凹凸形の各断面を持つモデルでの制御棒価値の相違を比較し、従来の拡散近似による形状効果の理論との対比も行った。

第4章では、対制御棒の中心間距離と反応度価値の関係を、制御棒のみの場合と後備停止系も入った場合に分けて検討を行った。この場合、後備停止系孔のボロンボールの充填率は60%と仮定した。

第5章では主として、 $S_N$ 計算コードTWOTRAN-2を用いて行なった結果を編集して得られた遮蔽因子および均質化定数の比較を行った。均質化定数は各々の形状モデルに対して得られた中性子束を重みとした制御型燃料体のものである。この均質化定数を用いてFig. 1.9に示すモデルで再度、格子臨界計算を行なった。均質化定数については、従来用いられて来た方法によるものも含めて比較した。

Table 1.4に主な計算ケースおよび結果として得られた実効増倍率を示す。ブロックモデルと制御棒モデルの組合せの記号で示せば計算ケースは以下の通りである。

ブロックモデル	制御棒モデル
BM <sub>1</sub>	なし, CRS <sub>1</sub> , CRS <sub>2</sub> ,
BM <sub>2</sub>	なし, CRS <sub>2</sub> , CRS <sub>3</sub> , CRS <sub>4</sub>
BM <sub>3</sub>	なし, CRG <sub>1</sub> , CRG <sub>1.5</sub> , CRG <sub>2</sub>
BM <sub>4</sub>	なし, CRR <sub>1</sub> , CRR <sub>2</sub> ,
BM <sub>5</sub>	なし, CRR <sub>2</sub> ,
BM <sub>6</sub>	なし, CRR <sub>2</sub> ,
BM <sub>3</sub> - GGS	CRG <sub>1</sub> , CRG <sub>1</sub> + RSS
BM <sub>3</sub> - GGM	(CRG <sub>1</sub> ) <sup>注1)</sup> , CRG <sub>1</sub> + RSS, RSS
BM <sub>3</sub> - GGL	CRG <sub>1</sub> , CRG <sub>1</sub> + RSS

(ここでRSSは後備停止系を示す。)

注1) このケースはBM<sub>3</sub> - CRG<sub>1</sub>で代用した。

これらの計算および検討の結果、次のことが明らかになった。

- ① 制御棒値を計算する場合には、中性子の非等方散乱の効果を考慮した定数を用いる必要がある。
- ② Mk-Ⅲ炉心の場合、制御棒挿入孔と後備停止系孔を通して中性子が漏洩するストリーミング現象があるが、格子臨界計算では、反応度を与える影響は約 1.0%  $\Delta k/k$  程度である。したがってこの効果を考慮できない計算コードを用いて制御棒反応度値を計算する場合には注意を要し、何らかの補正を行うことが必要である。
- ③ 円形断面の制御棒を正方形断面で近似する場合、従来の理論通り、<sup>8)</sup>一辺の長さを円の直径の  $(1.18)^{-1}$  倍にするのが良いが、できるなら、円形により近い凹凸形状にすると良い。
- ④ Mk-Ⅲ炉心に挿入される2本の制御棒間の干渉効果により、その反応度値は個々の制御棒値の和より約 25% 低下する。後備停止系も入った場合はこの低下率はさらに大きくなり約 40% になる。
- ⑤ 炉心計算のための均質化定数は、制御棒の挿入された燃料体に対して従来のように、格子計算の中性子束を重みとして算出するだけでは不十分で、さらに補正因子が必要である。この補正因子の値は、主として制御棒間の干渉効果の大きさに依存し、Mk-Ⅲ炉心の場合、0.9 程度になる。

Table 1.1 ブロックモデルの特徴

ブロックモデル I. D	特 徴 (S. B ... 標準型燃料体) (C. B ... 制御型燃料体)
BM <sub>1</sub>	C. B 断面の形状を凸形に、制御棒、後備停止系孔を正方形（体積保存）に近似、C. B の燃料および黒鉛部分を均質化した。 S. B は均質化し、外側形状は長方形にした。
BM <sub>2</sub>	BM <sub>1</sub> との違いは、C. B の燃料および黒鉛部分の区別をしたこと。燃料断面は正方形とした。
BM <sub>3</sub>	BM <sub>2</sub> との違いは、制御棒挿入孔断面をギザギザにし、より円形に近づけたこと。
BM <sub>4</sub>	BM <sub>2</sub> との違いは、制御棒挿入孔断面を円形にしたこと。
BM <sub>5</sub>	C. B 断面の形状を正確に扱った。すなわち、燃料、3個の孔の形状を円形にし、外側形状を六角形とした。
BM <sub>6</sub>	S. B を 12 本の燃料と黒鉛部分とに分けて非均質性をもたせた。ただ燃料のならば方は Mk-Ⅲ炉心と同じではない。3個の孔、燃料の形状は円形とし、C. B の黒鉛部分と S. B の黒鉛部分の巨視断面積は、それぞれの燃料と同じスペクトルを用いて、別々に作成した。

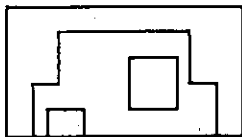



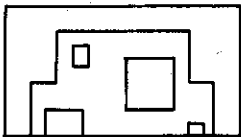


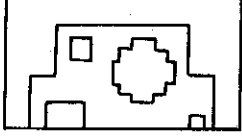


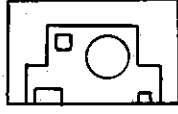




Table 1.2 制御棒モデルの特徴

制御棒モデル I. D	特 徴
CRS <sub>1</sub>	1/2スーパーセルに対し、中心に制御棒をおいて1次元計算を行なって中性子束を計算し、これを重みとして制御棒孔内を均質化して得られた巨視断面積をもつ正方形断面積のグレイ制御棒モデル。
CRS <sub>2</sub>	制御棒孔内を外側ギャップ、(B <sub>4</sub> C + C)吸収体、内側ギャップの3領域に分け、それぞれの断面の面積を保存した正方形断面モデル。内外ギャップは被覆材の Hastelloy-X を体積比で希釈した巨視断面積を持つとしている。
CRS <sub>3</sub>	制御棒孔内を外側ボイド、被覆材、(B <sub>4</sub> C + C)吸収体、内側ギャップの4領域に分け、それぞれの断面の面積を保存した正方形断面モデル。内側ギャップは CRS <sub>2</sub> と同じである。
CRS <sub>4</sub>	外側ギャップ、(B <sub>4</sub> C + C)吸収体、内側ギャップの3領域から成るのは CRS <sub>2</sub> と同じであるが、吸収体については、外部表面積と体積を保存した正方形断面モデル。吸収体の1辺が CRS <sub>2</sub> より約 11.4% 小さくなり、内側ギャップの断面の面積は約 50% になっている。各部分の巨視断面積は CRS <sub>2</sub> と同じものを用いた。
CRG <sub>1</sub>	制御棒孔内を外側ギャップ、吸収体、内側ギャップの3領域に分け、各々の外側の形状を円形に近い凹凸(ギザギザ)形状で近似したモデル。吸収体部分の包絡線が円形をなし、この円の半径が保存されている。したがって吸収体部分の断面の面積は実機の場合の 94.4% となっている。
CRG <sub>2</sub>	吸収体部分の大きさ以外は CRG <sub>1</sub> と同じ。吸収体部分は断面の面積が実機の 105.5% に相当する凹凸形状モデル。
CRG <sub>1.5</sub>	吸収体断面は CRG <sub>1</sub> と CRG <sub>2</sub> のちょうど中間の面積をもち、吸収体の外側形状は実機の円形を 28 角形で近似したモデル。吸収体の形状以外は CRG <sub>1</sub> および CRG <sub>2</sub> に同じ。
CRR <sub>1</sub>	制御棒孔内を外側ギャップ、吸収体、内側ギャップの3領域に分けたこと、および各部分の巨視断面積は CRS <sub>2</sub> に同じ。同心円からなる断面をもつ。
CRR <sub>2</sub>	実際の制御棒の形状をできるだけ再現した円形断面モデル。内側から、被覆材、ボイド、被覆材、吸収体、被覆材、ボイドの6領域からなる。

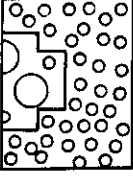

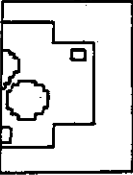

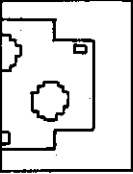

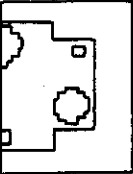

Table 1.3 円形および正方形断面制御棒モデルの寸法および構成

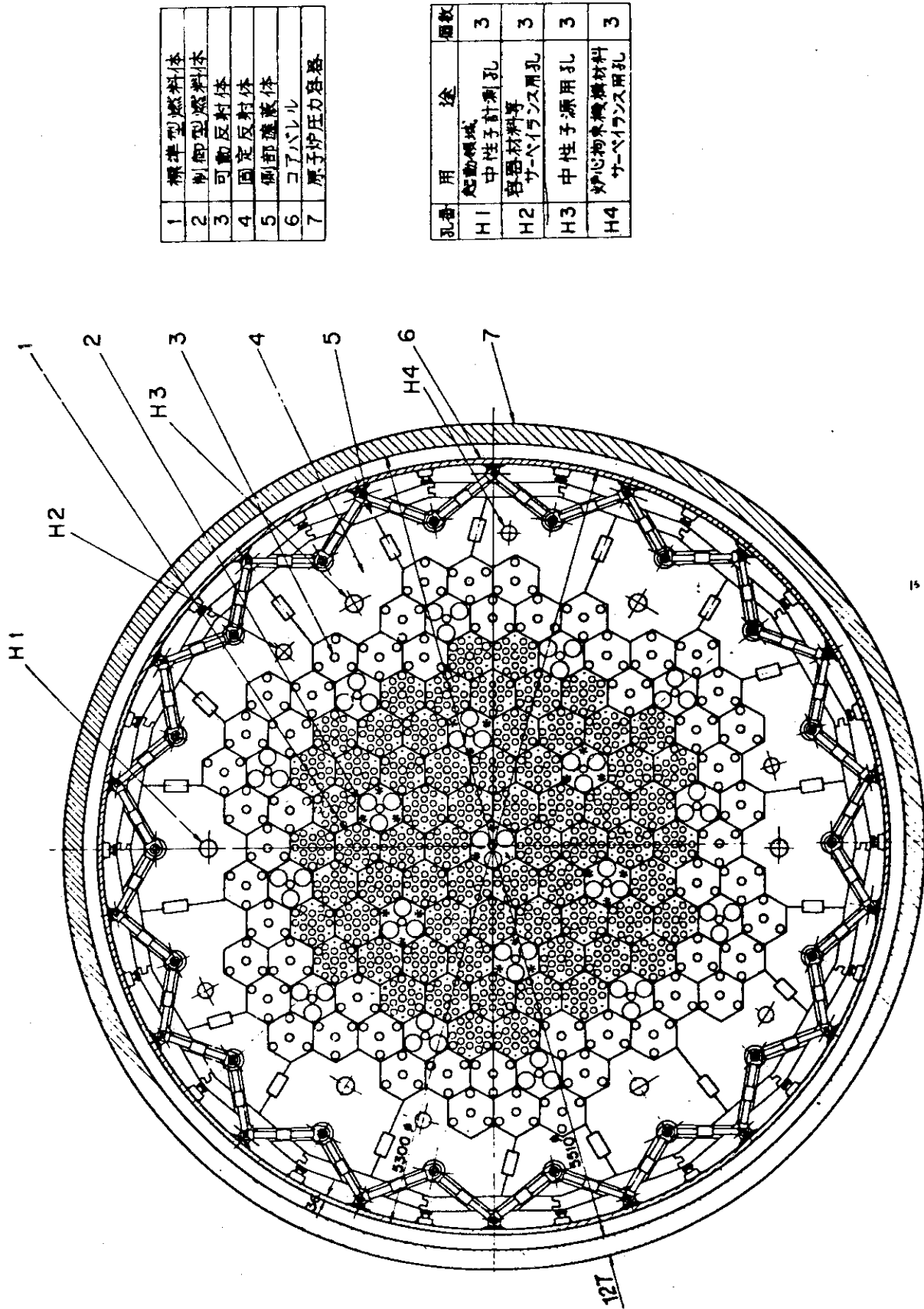
項目 モデル	物質構成 (内側より)	半径もしくは中心から辺までの距離 (cm)	吸収体厚さ (cm)
CRS <sub>1</sub>	1.均質化吸収体	4.6085	—
CRS <sub>2</sub>	1.内側ギャップ ハステロイX:ポイド =0.1534:0.8466	2.437	1.329
	2.吸収体	3.766	
	3.外側ギャップ ハステロイX:ポイド =0.2437:0.7563	4.6085	
CRS <sub>3</sub>	1.内側ギャップ	2.437	1.329
	2.吸収体	3.766	
	3.ハステロイ-X	3.988	
	4.ポイド	4.6085	
CRS <sub>4</sub>	1.内側ギャップ	1.702	1.681
	2.吸収体	3.383	
	3.外側ギャップ	4.6085	
CRR <sub>1</sub>	1.内側ギャップ	2.750	1.500
	2.吸収体	4.250	
	3.外側ギャップ	5.200	
CRR <sub>2</sub>	1.ハステロイ-X	0.450	1.500
	2.ポイド	2.570	
	3.ハステロイ-X	2.750	
	4.吸収体	4.250	
	5.ハステロイ-X	4.500	
	6.ポイド	5.200	

Table 1.4 主な計算ケースおよび得られた実効増倍率

ブロックモデル	制御棒モデル	実効増倍率	使用計算コード	備考		
B M <sub>1</sub> 	未挿入	1.325	TWOTRAN-2			
	CRS <sub>1</sub> 	0.854	TWOTRAN-2			
	同上	0.856	KENO-4			
	同上	0.852	TRIPLET			
	CRS <sub>2</sub> 	0.860	TWOTRAN-2			
	未挿入	1.324	TWOTRAN-2			
	CRS <sub>2</sub> 	0.861	TWOTRAN-2			
	同上	0.861	TWOTRAN-2	S <sub>6</sub>		
	同上	0.861	TWOTRAN-2	メッシュ数1.34倍		
	同上	0.865	KENO-4	6群計算		
B M <sub>2</sub> 	同上	0.867	KENO-4	50群計算		
	CRS <sub>3</sub> 	0.863	TWOTRAN-2			
	CRS <sub>4</sub> 	0.875	TWOTRAN-2	吸収体:等表面積 &等体積		
	ブロックモデル	B M <sub>3</sub> 	未挿入	1.325	TWOTRAN-2	
			同上	1.366	TRIPLET	
			CRG <sub>1</sub> 	0.873	TWOTRAN-2	
			同上	0.890	TRIPLET	
			CRG <sub>2</sub> 	0.861	TWOTRAN-2	
		B M <sub>4</sub> 	未挿入	0.883	TRIPLET	
			同上	0.866	(TWOTRAN-2) 推定値	
未挿入			1.313	KENO-4		
CRR <sub>1</sub> 			0.863	KENO-4		
CRR <sub>2</sub> 			0.870	KENO-4		
B M <sub>5</sub> 	未挿入	1.304	KENO-4			
	CRR <sub>2</sub> 	0.876	KENO-4			



ブロックモデル	制御棒モデル	実効増倍率	使用計算コード	備 考
BM <sub>6</sub> 	未挿入	1.302	KENO-4	
	CRR <sub>2</sub> 	0.862	KENO-4	
BM <sub>3</sub> -GGS 	CRG <sub>1</sub> 	0.895	TWOTRAN-2	
	同上 +RSS	0.837	TWOTRAN-2	RSS: 後備停止系 充てん率60%
BM <sub>3</sub> -GGM 	未挿入 +RSS	0.984	TWOTRAN-2	RSS: 後備停止系 充てん率60%
	CRG <sub>1</sub>  +RSS	0.769	TWOTRAN-2	同 上
BM <sub>3</sub> -GGL 	CRG <sub>1</sub> 	0.861	TWOTRAN-2	
	CRG <sub>1</sub> +RSS	0.737	TWOTRAN-2	RSS: 後備停止系 充てん率60%



1	標準型燃料体
2	制御型燃料体
3	可動反射体
4	固定反射体
5	側部遮蔽体
6	コアバレル
7	原子炉圧力容器

孔番	用途	個数
H1	起動領域 中性子計測孔	3
H2	容器材料等 サーベイランス用孔	3
H3	中性子源用孔	3
H4	炉心物束機構材料 サーベイランス用孔	3

Fig. 1.1 多目的高温ガス実験炉の炉体横断面図

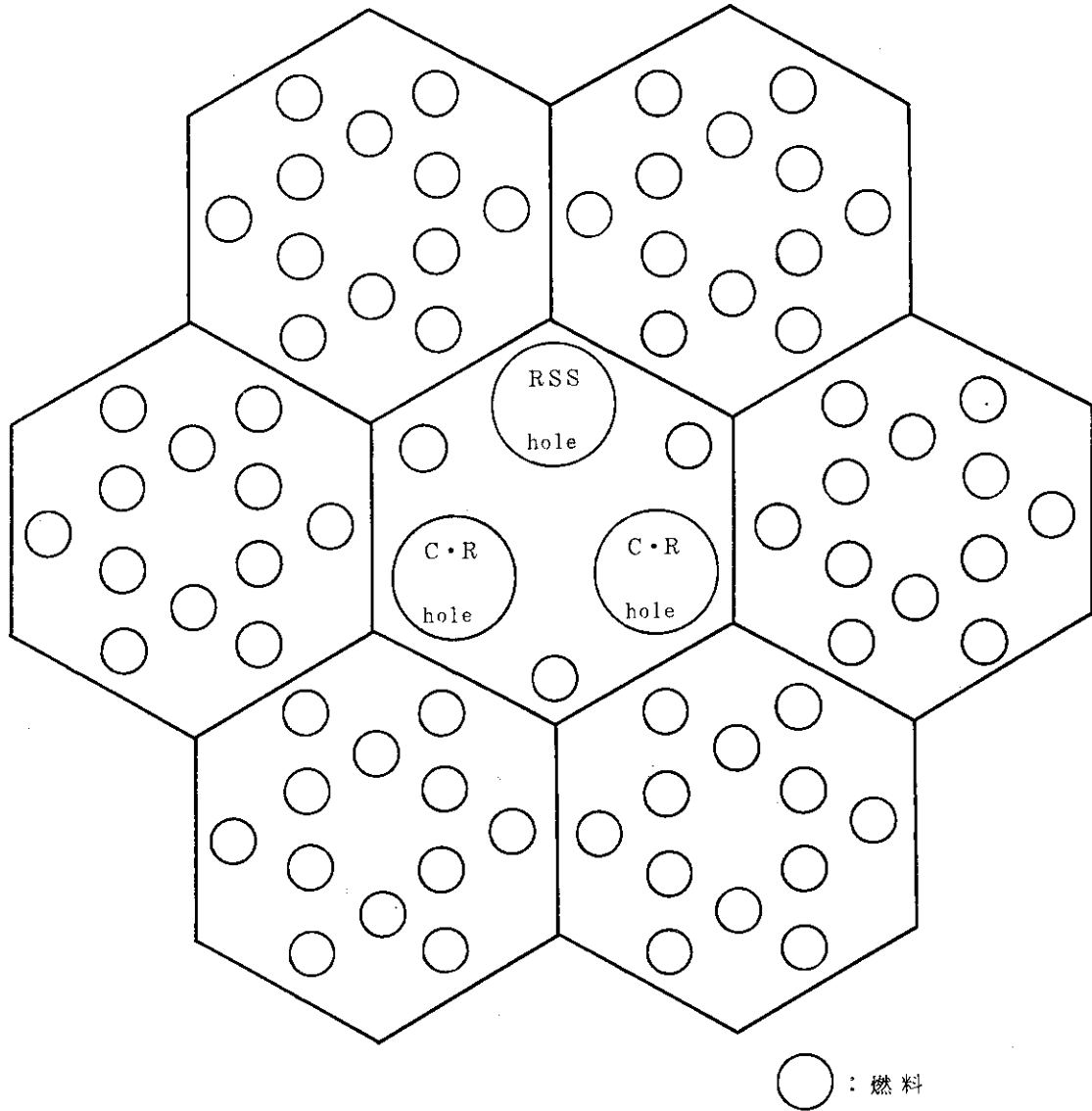


Fig. 1.2 多目炉高温ガス実験炉 Mk-III 炉心スーパーセル概念図

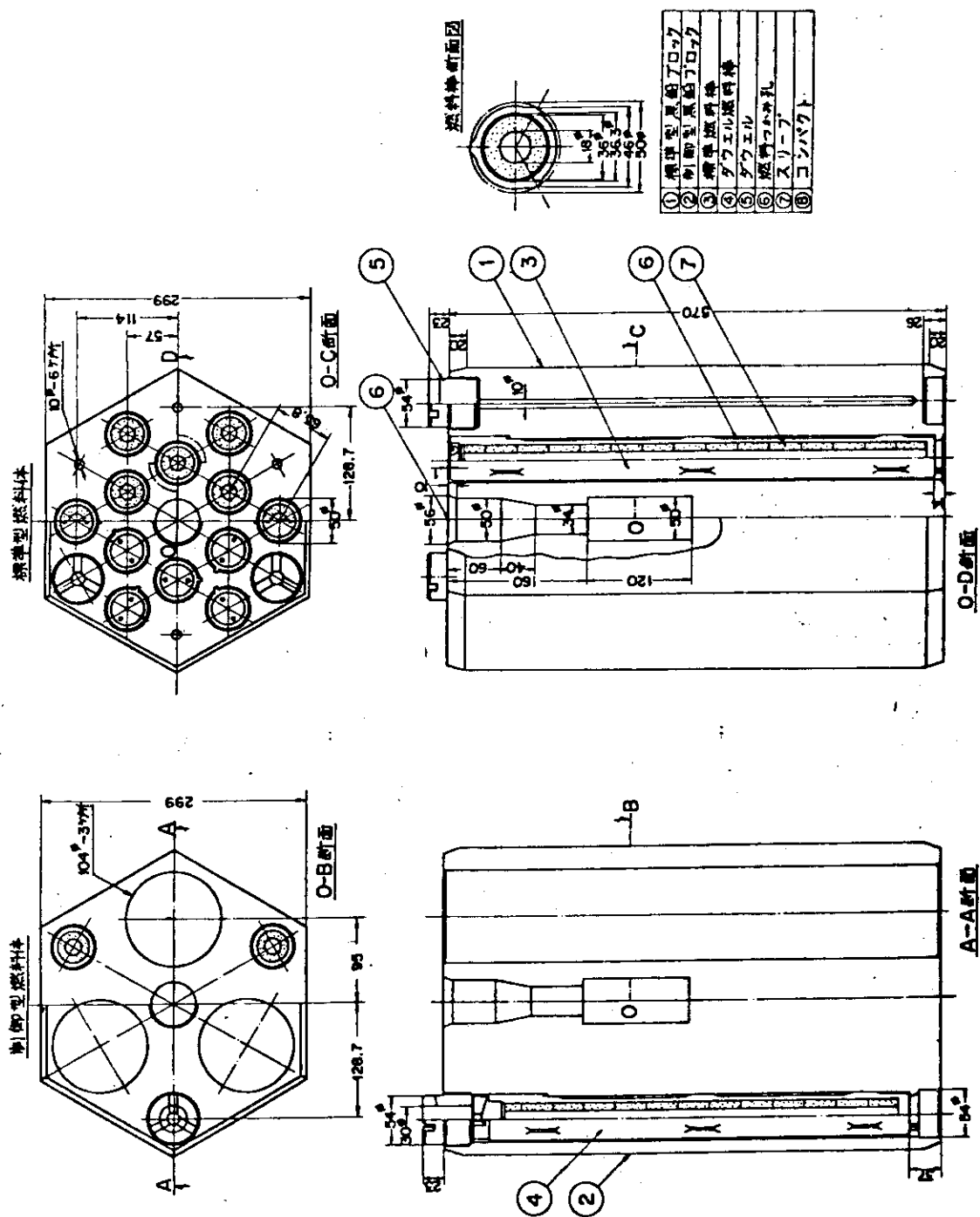


Fig. 1.3 多目的高温ガス実験炉の燃料体

部番	名 称	記号	材 料
1	スパイダ	6	保護内管 94.05mm 肉厚1.5
2	固定リング1	7	ライツア (212)
3	スパイン	8	固定リング2
4	温度検体	9	94.05mm 肉厚1.5 45.05mm 肉厚2
5	保護外管	9	中間スベ-サ-

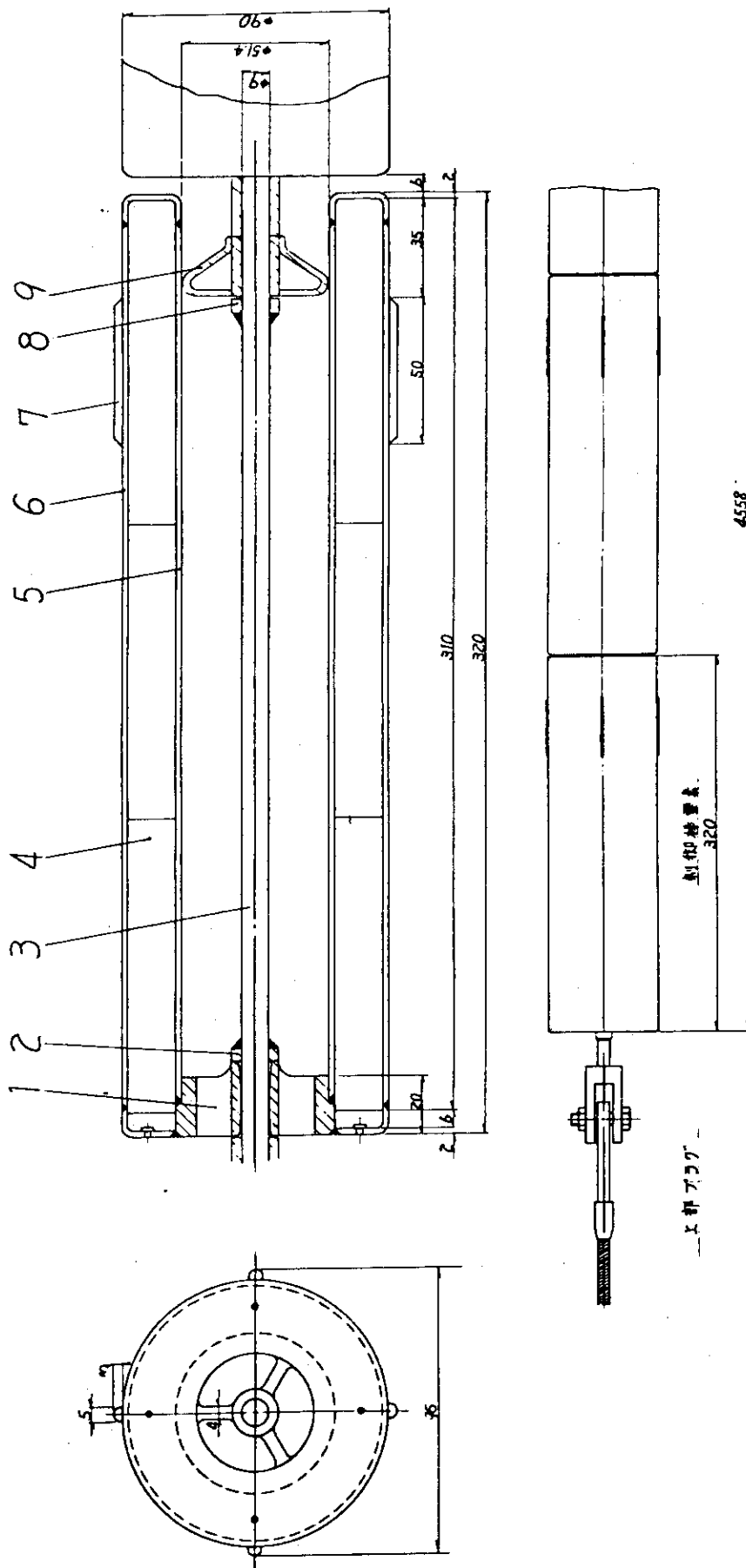


Fig. 1.4 多目的高温ガス実験炉の制御棒

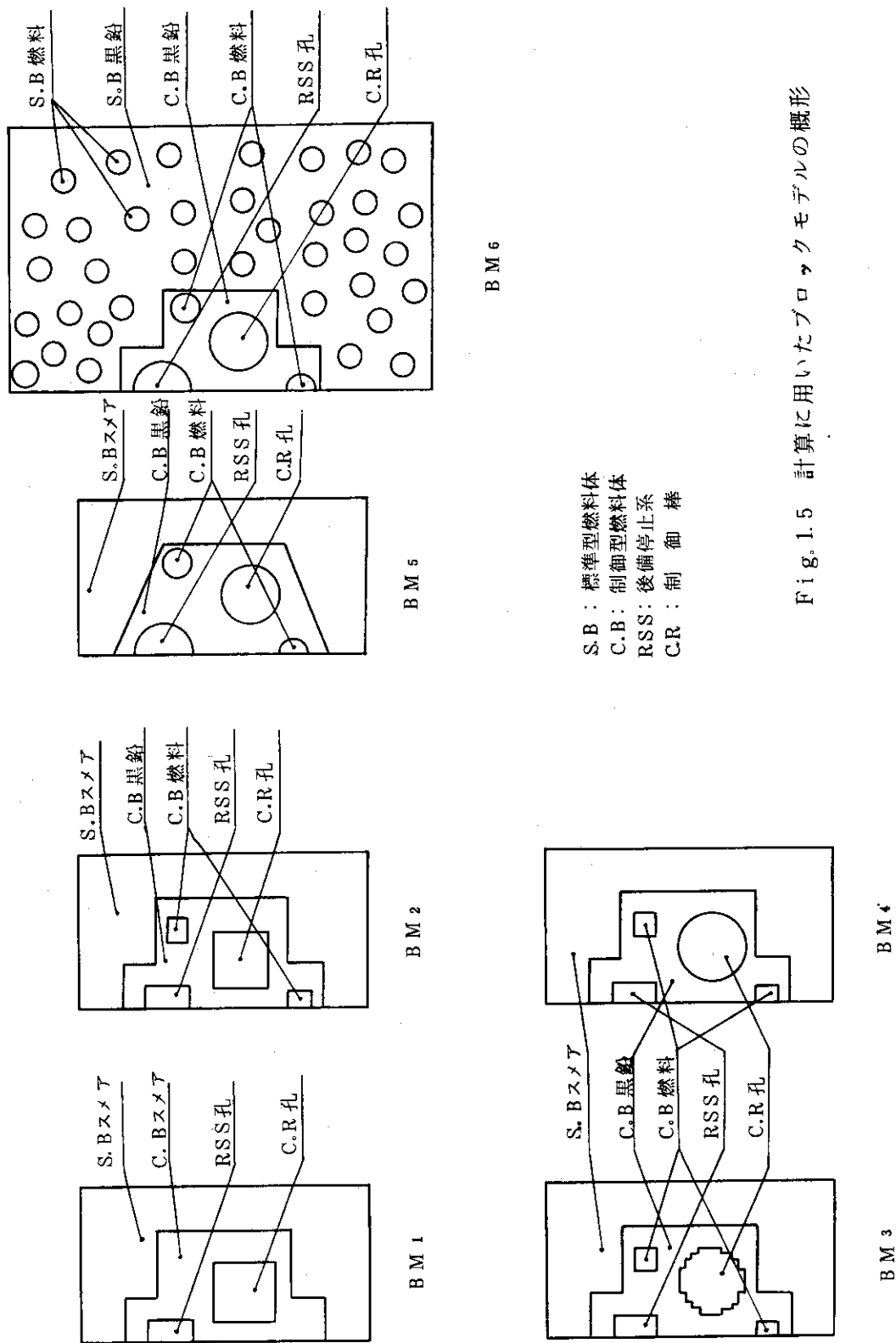


Fig. 1.5 計算に用いたブロックモデルの概形

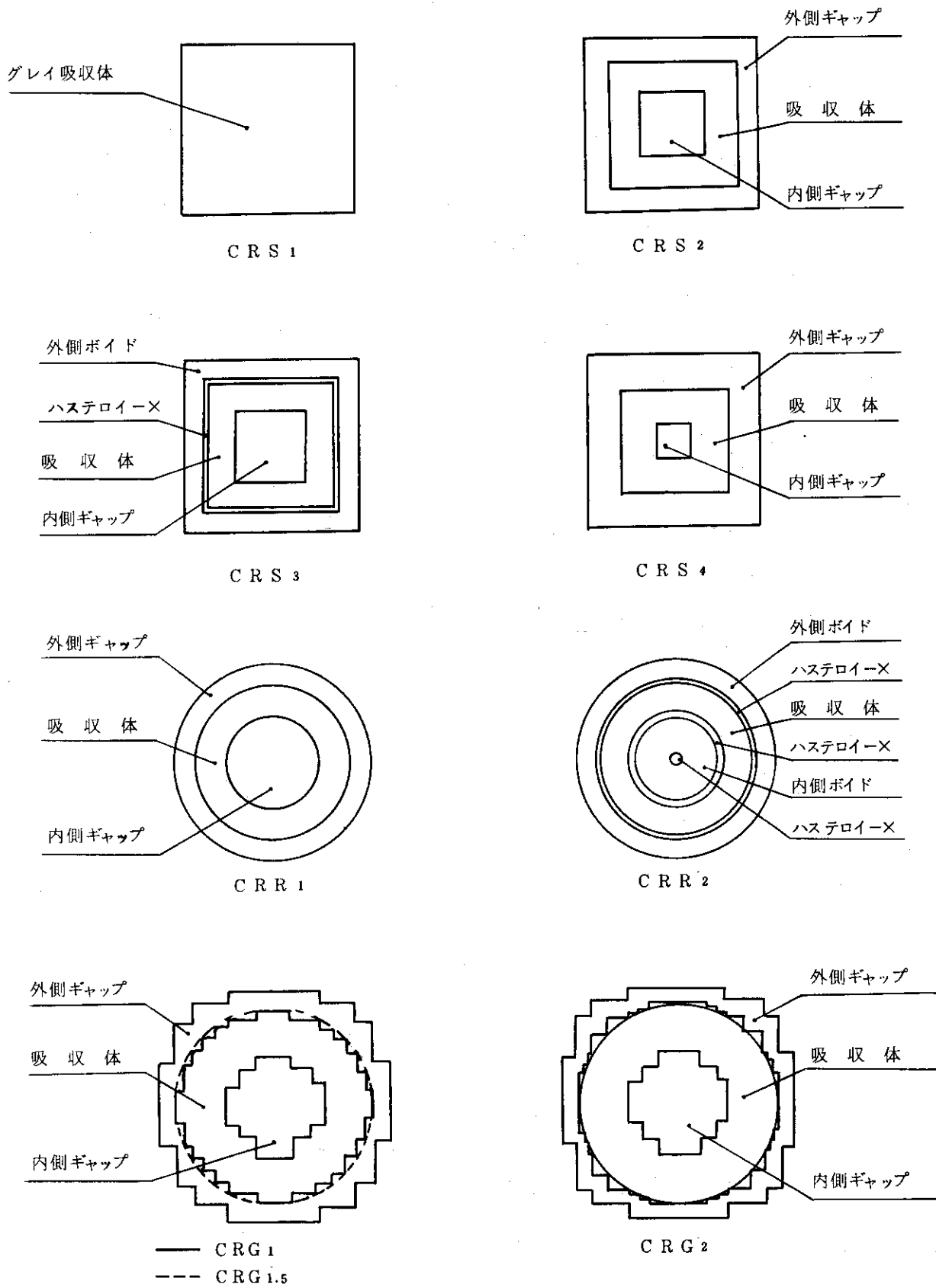


Fig. 1.6 計算に用いた制御棒モデルの概形

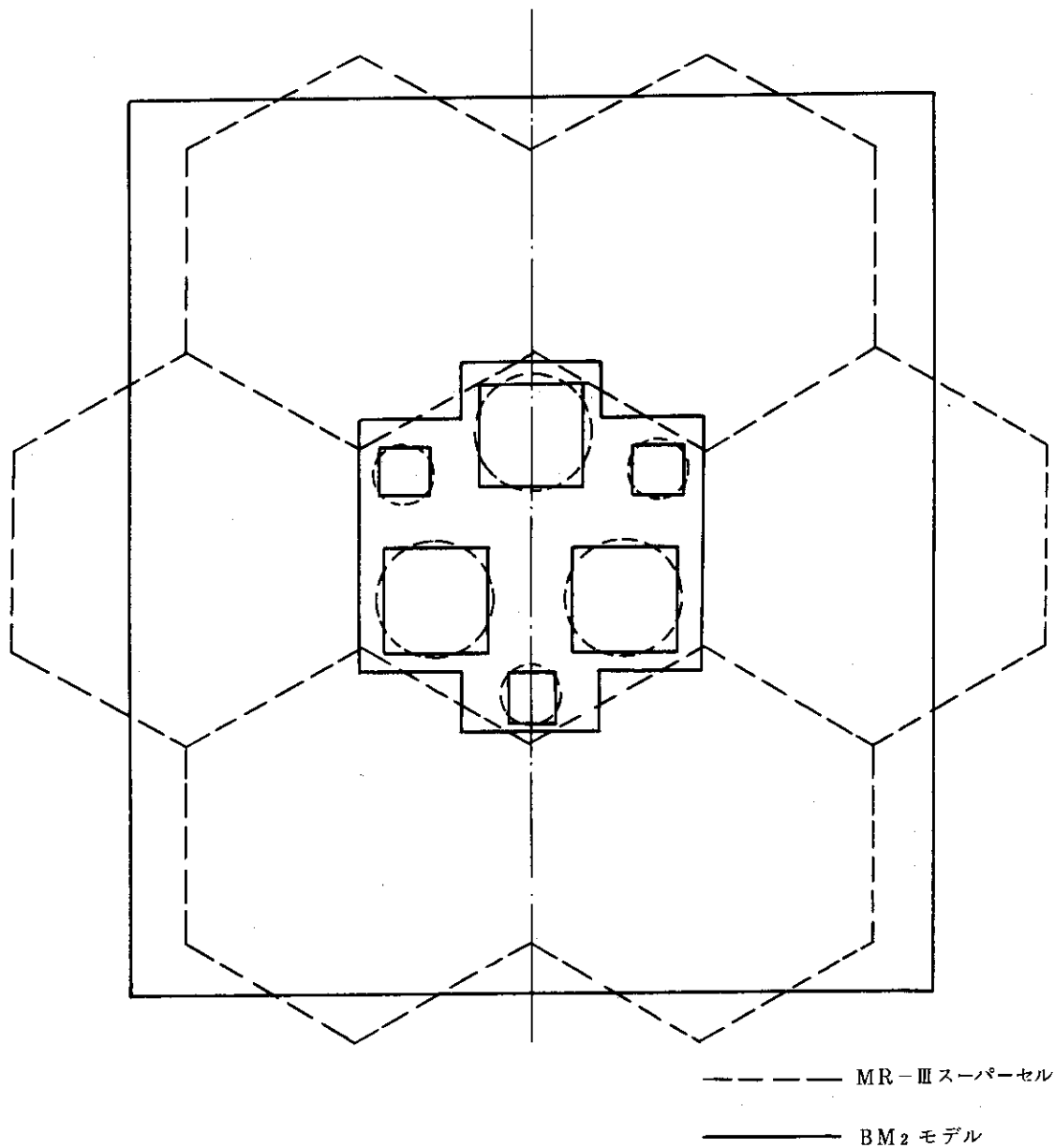


Fig. 1.7 Mk-III炉心スーパーセル断面とそのブロックモデル(BM<sub>2</sub>)の形状比較



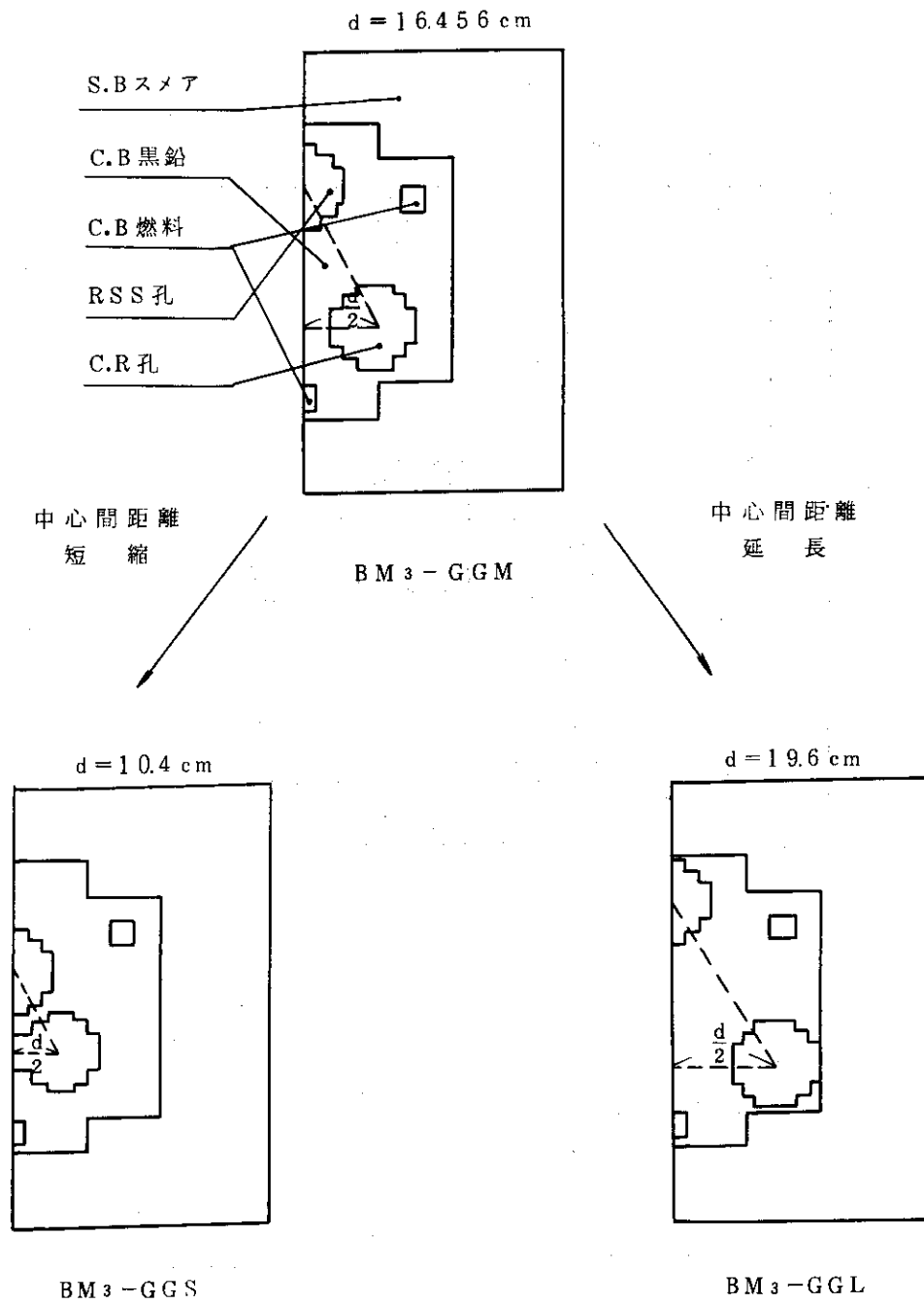


Fig. 1.8 制御棒および後備停止系孔間の相互距離を変えたブロックモデルの概形

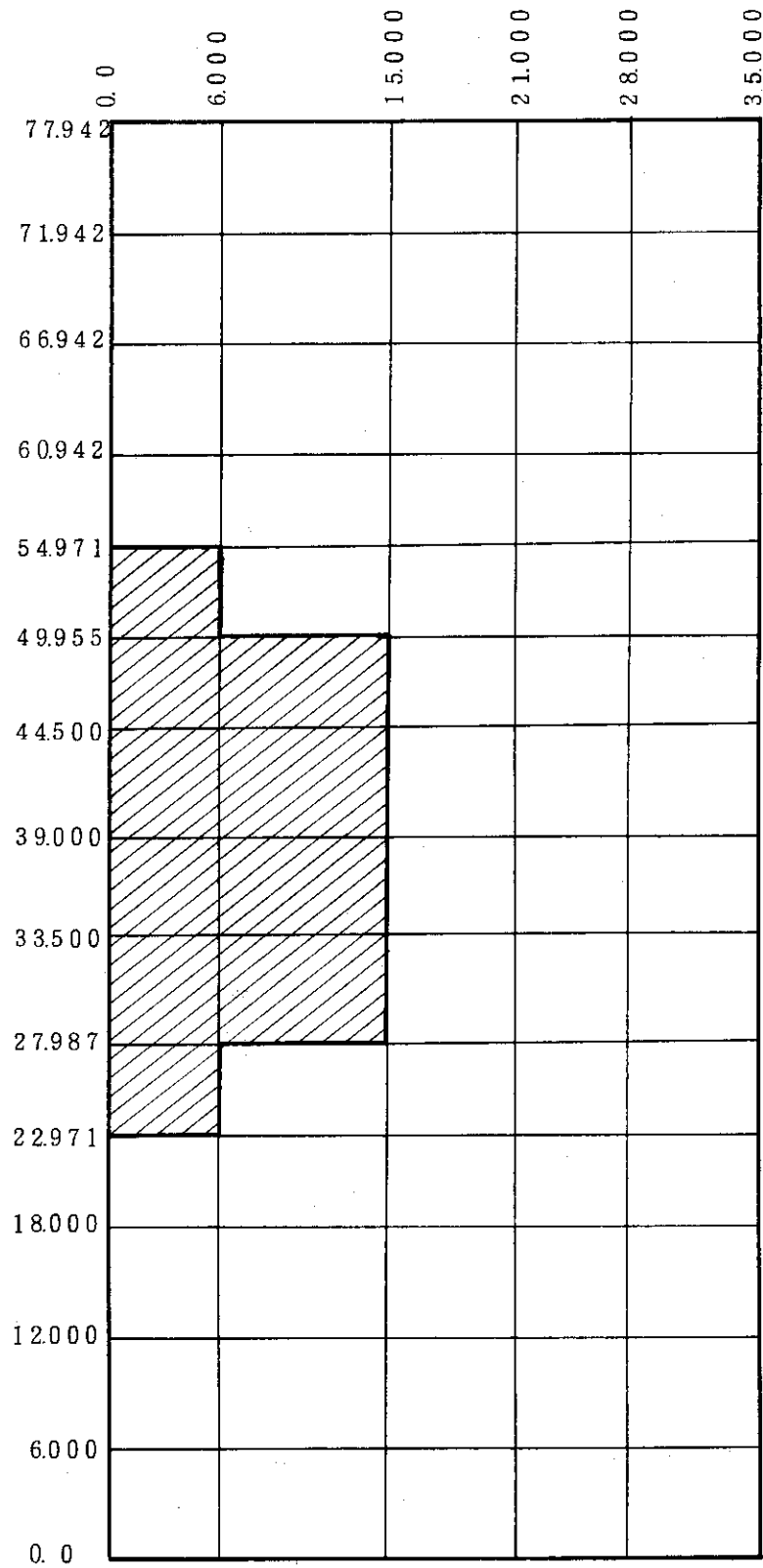


Fig. 1.9 均質化定数を用いた再格子計算モデルメッシュ分割

## 2. 各種モデル化の効果

### 2.1 群定数の定義について

計算に用いた定数は中性子スペクトル計算コード GGC-4 で得られた 6 群 P 2 定数に「EXTENDED PL TRANSPORT 近似<sup>9)</sup>」を行なって作成した 6 群 P 1 定数である。(以後、この近似を行なった定数は、EXT. PL 定数と略記する。) 通常、原子炉の臨界計算を行なう場合には、P<sub>0</sub> 定数で十分だとされている。特に非等方散乱を考慮すべき場合でも、全断面積を輸送断面積で置き換え、差を自群内散乱断面積の増減で調整する輸送近似と呼ばれる補正を行えばよいものとされている。しかしながら輸送近似を行なう際には、臨界計算をどの理論に基づいた計算コードで行うかにより、輸送断面積としていくつかの定義のうち最良のものを選択する必要がある。今回の計算で用いたコードのうち、TWOTRAN-2、および TRIPLET は S<sub>N</sub> 計算コードであり、以下に示す EXT. PL 近似の輸送断面積を用いなければならない。

$$\sigma_{Tr} = \sigma_{l+1, g} - \sum_{g'=1}^G \sigma_{l+1, g \rightarrow g'} \quad (2.1)$$

但し、

$$\sigma_{l, g}(\underline{r}) \equiv \frac{\int_g \sigma_T(\underline{r}, E) \phi_L(\underline{r}, E) dE}{\phi_{l, g}(\underline{r})}$$

$$\sigma_{l, g \rightarrow g'} \equiv \frac{\int_g \phi_L(\underline{r}, E) \int_{g'} \sigma_L(\underline{r}; E \rightarrow E') dE' dE}{\phi_{l, g}(\underline{r})}$$

$$\phi_{l, g}(\underline{r}) = \int_g \phi_L(\underline{r}, E) dE$$

$$\phi_L(\underline{r}, E) = 2\pi \int_{-1}^1 P_L(\mu) \Phi(\underline{r}, \mu, E) d\mu$$

- $\sigma_T$  : 全断面積
- $P_L(\mu)$  : ルジャンドル多項式
- $\Phi$  : 角度束
- $g$  : エネルギー群を示す添字

実際には GGC-4 も含め P<sub>N</sub> 近似の中性子束の L 番目の成分を重みとした  $\sigma_{l, g}$  を計算するスペクトル計算コードはなく、また P<sub>0</sub> 成分では次の関係式

$$\sigma_{Tr}^g (= \sigma_T) = \sigma_a^g + \sum_{g'=1}^G \sigma_{g \rightarrow g'} \quad (2.2)$$

但し  $\sigma_a^g$  : g 群の吸収断面積

を満足する必要があるので、今回の検討では次の形で、EXT.P<sub>0</sub>, EXT.P<sub>1</sub> 定数をそれぞれ定義した。

① EXT. P<sub>0</sub> 定数

$$\sigma_{Tr} = \sigma_{0,g} - \sum_{g'=1}^G \sigma_{1,g \rightarrow g'} \quad (2.3)$$

$$\sigma_{g \rightarrow g}^0 = \sigma_{0,g \rightarrow g} - \sum_{g'=1}^G \sigma_{1,g \rightarrow g'} \quad (2.4)$$

② EXT. P<sub>1</sub> 定数

$$\sigma_{Tr} = \sigma_{0,g} - \sum_{g'=1}^G \sigma_{2,g \rightarrow g'} \quad (2.5)$$

$$\sigma_{g \rightarrow g}^0 = \sigma_{1,g \rightarrow g} - \sum_{g'=1}^G \sigma_{2,g \rightarrow g'} \quad (2.6)$$

$$\sigma_{g \rightarrow g}^1 = \sigma_{1,g \rightarrow g} - \sum_{g'=1}^G \sigma_{2,g \rightarrow g'} \quad (2.7)$$

但し、 $\sigma_{g \rightarrow g}^N$ : EXT. P<sub>1</sub> 定数の P<sub>N</sub> 成分の自群内散乱断面積

以上のようにして作成した定数の妥当性を検討するために BM<sub>1</sub> - CRS<sub>1</sub> モデルに対し、Fig. 2.1 に示すメッシュ分割で TWOTRAN-2 を用い計 10 ケースの計算を行なった。これらのケースに対する計算条件は次の通りである。まず、GGC-4 によるスペクトル計算は高速領域、熱領域共に P 1 近似で行った。炉心のバックリングは軸方向の燃料装荷長 400 cm に相当する軸方向形状バックリングを用い、燃料温度は 1200 °K、減速材温度は 1050 °K に設定し、通常の運転時を仮定した。標準型燃料体と制御型燃料体のスペクトル計算に用いた原子数密度および <sup>238</sup>U の共鳴計算に用いたパラメータを、それぞれ Table 2.1, Table 2.2 に示す。また制御棒を構成する Hastelloy-X 製の被覆管および (B<sub>4</sub>C+C) 吸収体の巨視断面積は制御型燃料体のスペクトルを使用し、Table 2.3 に示す原子数密度を用いて作成した。制御棒モデル CRS<sub>1</sub> は制御棒挿入孔内を均質化したモデルである。その P<sub>2</sub>, P<sub>1</sub>, P<sub>0</sub>, EXT.P<sub>1</sub>, EXT.P<sub>0</sub> 各定数は 1 次元円柱半径方向中性子束から作った重み関数を用いて加重平均し作成した。中性子束は Fig. 2.2 に示すモデルに対し、TWOTRAN-2 を用いて 2 次元 r-θ 計算 (θ 方向は 1 メッシュなので結果的には 1 次元計算になる。) を行なって得た。参考までに平均自由行程を示すと以下の様になる。

標準型燃料体	: 約 2.5 cm
制御型燃料体	: 約 2.4 cm
制御棒	: 約 1.9 cm

Fig. 2.1 に示したメッシュ巾はこれらに比較して十分小さいことがわかる。

Table 2.4 に計算の条件とともに計算で得られた実効増倍率およびその相対値を示す。TWOTRAN-2 の計算では収束判定基準を  $1.0 \times 10^{-3}$  と設定したので、誤差として、実効増倍率で約 0.001 程度、割合にして最大 0.2 % は見込む必要があると思われる。したがって P<sub>2</sub>, S<sub>6</sub> 計算を行なったケース 1 の場合と一致しないと考えられるのはケース 2, ケース 9, ケース 10 だけである。本節の検討の目的からは多少はずれるが、TWOTRAN-2 で計算を行う場合、

用いる定数と $S_N$  次数の関係がある程度わかる。すなわち同じ定数を用いた場合、 $S_N$  次数を増やせば実効増倍率は小さくなってケース 1 の値に近づき、精度は増す。EXT.P 1 定数を用いた場合には $S_6$  と $S_8$  の差はほとんどないけれども、この両者と $S_4$  の場合には若干差が生じる。P1 定数では $S_4$  と $S_6$  の差はほとんどないけれども、EXT.P1 定数の場合も考え合わせて、非等方散乱を P 1 成分まで考慮して行う計算では $S_6$  近似が適当と思われる。ケース 9 とケース 10 は他のケースに比較して相違が大きい。ケース 9 は輸送近似を行っていない $P_0$  定数を用いており、ケース 1 に比較して 1.6 % 実効増倍率が大きくなる。ケース 10 は輸送断面積として次式で定義されたものを用い輸送近似を行なった場合である。

$$\sigma_{Tr}(E) = \sigma_t(E) - \frac{\int_0^\infty \sigma_s^{(1)}(E' \rightarrow E) \phi_1(E') dE'}{\phi_1(E)} \quad (2.8)$$

但し

$$\begin{aligned} \phi_1(E) &: \text{中性子束の P 1 成分} \\ \sigma_s^{(1)}(E' \rightarrow E) &: \text{散乱断面積の P 1 成分} \end{aligned}$$

この定義は拡散理論に基づいており、拡散計算を行なう場合には有効と思われるが輸送計算を行なった場合はケース 1 に比較して実効増倍率が 2.4 % も大きくなる。誤差が、まったく輸送近似を行っていないケース 9 より大きいことから、補正の意味を失っていることがわかる。

結局、 $BM_1 - CRS_1$  モデルに対する検討では、EXT.P 1, P 1, EXT.P 0 各定数の間に差と呼べるほどのものはないことがわかった。以後の検討は、KENO-4 コードは P 1 形式の定数が必要なこと、さらにモデルが複雑になることを考えて、すべて EXT.P 1 定数で行うが、必要に応じてこれと同等のものとして EXT.P 0 定数を用いることにした。なお、TWOTRAN-2 を用いる計算では P 1 形式の定数を用いる場合は $S_6$ 、P 0 形式の定数に対しては $S_4$  計算を行うことに統一した。

KENO-4 コードに対しては、この EXT.P 1 定数を TWOTRAN フォーマットから KENO フォーマットに変換して使用した。

## 2.2 計算コードの違いについて

本検討には、1.2 で述べた様に主として次の 3 種の計算コードを用いた。

- ① TWOTRAN-2
- ② TRIPLET
- ③ KENO-4

いずれのコードも基礎になる方程式はボルツマンの輸送方程式であるが、解く手法に違いがある。①および②は作成者も重複しており、①が格子状のメッシュをダイヤモンド差分近似を用いて解くのに対し、②はバンド状三角メッシュを有限要素法を用いて解くという違いはあるが多くの類似もしくは共通点を持つ。例えば入力形式が良く似ており、断面積のフォーマットもまったく同じであり、 $S_N$  定数も同じものが組み込まれている。ただ、②は①に比べて計算の条件を指

定するオプションがやや多い。例えばバックリングは各メッシュに対して指定できるし、加速法を用いる単位を選択する必要がある。有限要素法を用いる関係で、角度束を近似する多項式の次数についても入力で指定する。いくつかのパラメータの効果については、付録2を参照のこと。なおこの①と②は、強い吸収体を含む体系に対して加速法の用い方を誤ると収束しないことがある。この点については付録1を参照のこと。③はモンテカルロ法による臨界計算コードで、これまでに使用実績も多いが、平均ウエイト、世代数、1世代あたりの中性子数など結果にかなり影響をおよぼすパラメータもある。今回の検討では平均ウエイトについては、最も効率が良いとされている0.5を用い、世代数と1世代あたりの中性子数としては、体系の複雑さも考慮してそれぞれ105、1000とした。世代数を105という半端な数にしたのは、最初の5世代を計算結果を得るための統計操作から除外するためである。したがって合計のヒストリー数は10万となり、大雑把な計算では誤差の割合は  $\sqrt{1 \times 10^5} / 1 \times 10^5 \approx 3 \times 10^{-3}$  程度におさまると考えられる。なお③においては形状を本来3次元的に取り扱うことができ、バックリング近似は行う必要がない。

さて以上の3種の計算コードの計算手法の差が実効増倍率におよぼす効果を検討するためBM<sub>1</sub>-CRS<sub>1</sub>モデルに対し、同じ定数を用いて、TRIPLETおよびKENO-4による計算を行なった。このBM<sub>1</sub>-CRS<sub>1</sub>モデルは、TWO TRAN-2も含め、いずれのコードでもX-Y断面形状は正確に取り扱うことができる。ただ高さ方向については、KENO-4では3次元形状を正確に取り扱かえるが、他のコードでは形状バックリングとして考慮している。TRIPLET用のメッシュ分割をFig. 2.3に、またKENO-4用形状をFig. 2.4に示す。

各コードで計算された実効増倍率は以下の通りである。

- TWO TRAN - II :  $k_{\text{eff}} = 0.854$
- TRIPLET :  $k_{\text{eff}} = 0.852$
- KENO - 4 :  $k_{\text{eff}} = 0.856$   
 $\pm 0.004$ <sup>注1)</sup>

KENO-4による計算値は必ず標準偏差 $\sigma$ を伴って表現される。TRIPLETによる計算では、収束判定基準が  $1.0 \times 10^{-3}$ 、角度束は1次式で近似し、細メッシュ単位の加速を行ない、メッシュ境界では角度束の不連続性を許した。3者の値はTWO TRAN-2による値を中心に $\pm 0.2\%$ 程度の誤差で一致している。ただKENO-4で得られた値は、統計処理された結果であり、99.7%信頼区間で考えれば0.844~0.868となり0.856を中心に $\pm 1.4\%$ 程度の巾をもつのでこの点、注意する必要がある。

TRIPLETによる計算結果は、このBM<sub>1</sub>-CRS<sub>1</sub>モデルに関する限り、TWO TRAN-2やKENO-4の結果と良く一致している。ところが、角度束を近似する多項式の次数、加速法、角度束に対するメッシュ境界における条件などの選び方を検討するために行った簡単な(ただし、強吸収体を含む)体系に対する試計算において、1部の条件の変更で実効増倍率が最大約7%変動した。これについては付録2に概要をまとめた。さらに後に述べるように、BM3モデルに対する計算において、TWO TRAN-2で得た実効増倍率より2~3%高い値を示した。以上の事実

注1) 標準偏差、以後KENO-4の結果はすべてこの標準偏差を併記する。

から  $BM_1 - CRS_1$  の結果については、モデルの単純さおよび計算条件の選び方による一致と判断し、TRIPLET については、今後の検討に際し、補助的にのみ用いることとした。

KENO-4 の結果は TWOTRAN-2 の結果と、標準偏差による巾はあるにせよ、良く一致している。ところが前に述べた様に TWOTRAN-2 においては、バックリング近似を用いているので、軸方向を無限大にして 2 次元コードでも正確に形状を扱えるモデルに対し両者の比較をしておく必要がある。Fig. 2.5 にモデルの形状を示す。1 辺 30 cm の正方形断面を持つ燃料の中心に、1 辺 3 cm の正方形断面吸収体が入っている単純な形状である。燃料としては標準型燃料体を均質化したものを用い、吸収体はボロン濃度を 30 w/o, 6 w/o, 15 w/o として用いた。計算はこの 3 種の体系の他に燃料のみの体系を加え、計 8 ケース実施した。得られた実効増倍率および差の相対値を Table 2.5 に示す。計算は EXT.P 1 定数を用い、両コードについて以下の条件で計算した。

TWOTRAN - 2	:	$S_6$ , 6 群, 反射境界条件 収束判定基準 $1.0 \times 10^{-3}$
KENO - 4	:	約 70,000 ヒストリー 6 群, 鏡映反射条件 1 世代 1000 ヒストリー

Table 2.5 の結果から、吸収体を含まない体系に対しては、両コード間に計算手法の違いによる差はなく、又吸収体を含む場合には約 1% の差が生じ、TWOTRAN-2 は KENO-4 に比べ、実効増倍率を高め評価することがわかる。 $BM_1 - CRS_1$  モデルに対する両コードの一致については、TWOTRAN-2 において軸方向のもれをバックリング近似で考慮したことによると考えられる。したがって、TWOTRAN-2 を用いても、Mk-III 炉心に関してバックリング近似を行なえば、KENO-4 を用いた場合に対し、実効増倍率の差が 0.2% 以下になると考えられる。ただ前述のごとく、KENO-4 コードにおける標準偏差は設計余裕を見積るときは、一応考慮することが望ましいと考えられる。

### 2.3 群数の効果

本検討においては、計算はすべて高速群 3 群、熱群 3 群の計 6 群で行なった。エネルギー分割は以下に示す通りである。

第 1 群	:	14.918 MeV ~ 0.183 MeV
第 2 群	:	0.183 MeV ~ 6.476 eV
第 3 群	:	6.476 eV ~ 2.38 eV
第 4 群	:	2.38 eV ~ 1.44 eV
第 5 群	:	1.44 eV ~ 0.65 eV
第 6 群	:	0.65 eV ~ 0.0 eV

GGC-4 コード内ではスペクトル計算を高速領域 99 群、熱領域 101 群で行い、結合して計 50 群まで縮約群断面を作成することができる。したがって 6 群計算の妥当性を確認する意味で同じモデルに対し、同じ条件で 50 群計算を行なった。計算コードとしては KENO-4 を用い

た。実際は標準偏差を伴わない $S_N$ 計算コードを用いるべきであるが、反復計算を行うコードでは群数を増加させると計算時間が飛躍的に増すためである。KENO-4においては、計算に先立ち、断面積から衝突時にエネルギーや方向を決定するのに用いる確率テーブルを用意しておくので、群数がいくら増えても、計算時間はほとんど変わらない。Table 2.5に50群エネルギー分割を示す。<sup>注)</sup>計算は $BM_2 - CRS_2$ モデルに対し、1世代の中性子数1000個、で約90世代行なった。得られた実効増倍率は次の通りである。

$$6 \text{ 群計算} : k_{\text{eff}} = 0.8649 \pm 0.0039$$

$$50 \text{ 群計算} : k_{\text{eff}} = 0.8670 \pm 0.0036$$

標準偏差を考慮するなら両者は十分良い一致を示しているし、平均値のみでも差は0.2%である。したがって強吸収体を含むかなり複雑な体系についても、6群計算を行えば50群計算とほぼ同等であることが確認され、群数が少いことによる誤差はほとんどないと考えられる。群数を5群以下にすることについては今後の問題ではあるが、制御棒価値の解析には群数をこれ以上少なくすると、誤差は増えていくと考えられる。

#### 2.4 $S_N$ 次数およびメッシュ数の効果

これまでの検討からもわかるように、本検討においてはTWOTRAN-2を最も頻繁に用いた。そこで、このコードを用いる際の $S_N$ 次数とメッシュ数の効果について、 $BM_2 - CRS_2$ モデルに対し検討を行なった。 $S_N$ 次数については2.1で述べた通り、 $BM_1 - CRS_1$ モデルのように強吸収体を含まず、比較的簡単な体系については $S_6$ で十分である。しかしながら強吸収体を含む場合についても確認しておく必要がある。メッシュ効果についても、この強吸収体の部分を2通りにメッシュ分割し、計算結果に変化のないことを確かめた。

$BM_2 - CRS_2$ モデルについて、 $S_N$ 次数以外はまったく同じ条件で行った計算で得られた実効増倍率は以下の通りである。

$$S_6 : k_{\text{eff}} = 0.8611$$

$$S_8 : k_{\text{eff}} = 0.8607$$

したがって $S_N$ 次数については、 $S_6$ で十分であるといえる。

メッシュ効果の検討に用いた2通りのメッシュ分割をFig. 2.6に示す。この図の実線の物質メッシュに対し、平均自由行程より小さなメッシュ巾を設定すると細メッシュ数は、x方向48コ、y方向78コで計3744コとなる。制御棒吸収体部分の細メッシュ数が多いのはこの部分の平均自由行程が約1.8mmと小さいからである。一方、吸収体の内側では、実際はほとんど中性子束が0になるので、点線で示した物質メッシュを加え、細メッシュを吸収体の表面以外では減らした。新しい細メッシュ数はカッコ内に示した。こうすることによりメッシュ数はx方向40、y方向70の計2800個となる。以上2種類のメッシュ分割に対し、他の条件をすべて同じにして行った計算で得られた実効増倍率は次の通りである。

$$2800 \text{ メッシュ} : k_{\text{eff}} = 0.8611$$

$$3744 \text{ メッシュ} : k_{\text{eff}} = 0.8613$$

注) なお、この表における太線は6群分割を示す。



以上により、次の5ケースの計算はすべて、この2800個の細メッシュからなるメッシュ分割を用いて行なった。参考までに計算時間を示すと、FACOM-M200計算機で次の通りである。

2800メッシュ : 11分03秒

3744メッシュ : 14分23秒

## 2.5 燃料体形状のモデル化の相違による効果

これまでは主として計算手法に関する検討を行なったが本節においては、スーパーセルのモデルのうち、制御棒挿入孔以外の部分、すなわち、制御棒を挿入すべき「うつわ」の部分のモデル化の違いによる効果に対して検討を行う。

Fig. 1.5に示したように、ブロックモデルはBM<sub>1</sub>からBM<sub>6</sub>まで6種類設定した。またその特徴はTable 1.2に示した通りである。いずれのモデルも各部分の体積および制御棒挿入孔の中心間距離については保存し、その位置についてはできるだけ互いの相対位置を守るように設定した。これらのブロックモデルに対し、制御棒未挿入の状態の実効増倍率を計算した。計算はBM<sub>1</sub>, BM<sub>2</sub>, BM<sub>3</sub>各モデルに対してはTWOTRAN-2を用い、BM<sub>4</sub>, BM<sub>5</sub>, BM<sub>6</sub>各モデルについてはKENO-4を用いた。

BM<sub>1</sub> : keff = 1.325

BM<sub>2</sub> : keff = 1.324

BM<sub>3</sub> : keff = 1.325

BM<sub>4</sub> : keff = 1.3127 ± 0.0045

BM<sub>5</sub> : keff = 1.3047 ± 0.0041

BM<sub>6</sub> : keff = 1.3020 ± 0.0025

BM<sub>1</sub>, BM<sub>2</sub>, BM<sub>3</sub>の各モデルについてはまったく差は生ぜず、したがって制御型燃料体を燃料と黒鉛に分けて非均質に扱っても、均質に扱った場合と同じである。また制御棒挿入孔の形状が少々異なった程度では制御棒未挿入時の実効増倍率については変わらないことがわかる。さて以上のTWOTRAN-2のモデルに比べ、KENO-4で計算したモデルは実効増倍率が一様に低い。BM<sub>3</sub>モデルに比較して、BM<sub>4</sub>モデルは0.9%、BM<sub>5</sub>モデルは1.5%、BM<sub>6</sub>モデルは1.7%低い値が得られている。BM<sub>1</sub>とBM<sub>2</sub>, BM<sub>5</sub>とBM<sub>6</sub>各組のように同じ計算コードを用いた場合にはほとんど差がない点、およびBM<sub>3</sub>とBM<sub>4</sub>モデルでは実効増倍率で1%も差がでるほどはモデル自身に差がないと考えられることから、この差は計算コード自身の計算手法に起因したものと考えられる。すなわち、TWOTRAN-2を用いてX-Y 2次元計算を行なってもZ方向のもれは、体系全体の形状バックリングでしか考慮されないが、実際は体積の4.67%を占める制御棒挿入孔および後備停止系孔(計算ではボイドとして扱っている)を通して中性子が漏洩するストリーミング現象があると思われる。KENO-4においては、原子炉内の中性子のふるまいを3次元的に模擬でき、したがってこのストリーミング効果も正しく取り扱うことができた結果、低い実効増倍率を与えると解釈することも可能である。そこで、このストリーミング現象の存否を確認するために、次の、形状もしくは物質を変更した3種のモデルに対し、KENO-4を用いて計算し、これまでのモデルに対する結果と合わせて比較検討した。

- ① BM<sub>4</sub>モデルに対し、制御型燃料体の黒鉛部分と孔の部分を均質化し、制御型燃料体を燃料部分と実際よりも密度の低い黒鉛部分の2領域で構成したモデル。このモデルはBM<sub>4</sub>-MD<sub>1</sub>モデルと呼称する。
- ② BM<sub>6</sub>モデルに対し、①と同様、黒鉛部分と孔を均質化したモデル。このモデルはBM<sub>6</sub> - MD<sub>1</sub>モデルと呼称する。
- ③ BM<sub>4</sub>モデルに対し、制御棒挿入孔および後備停止系孔の部分を黒鉛と同じ散乱断面積をもつ仮想的な物質で満たしたモデル。この物質の吸収断面積は0.0とした。この物質中では、中性子の吸収はなく、散乱および減速が行なわれることになる。このモデルをBM<sub>4</sub> - MD<sub>2</sub>モデルと呼称する。

これら3種のモデルの実効増倍率は次の通りである。

$$\text{BM}_4 - \text{MD}_1 : k_{\text{eff}} = 1.3254 \pm 0.0048$$

$$\text{BM}_6 - \text{MD}_1 : k_{\text{eff}} = 1.3135 \pm 0.0019$$

$$\text{BM}_4 - \text{MD}_2 : k_{\text{eff}} = 1.3246 \pm 0.0044$$

これらの値は、変更前のBM<sub>4</sub>やBM<sub>6</sub>モデルの実効増倍率に比較して、各々、0.97%、0.88%、0.91%増加しており、また、BM<sub>4</sub> - MD<sub>1</sub>、BM<sub>4</sub> - MD<sub>2</sub>モデルに対する値がTWOTRAN-2を用いたBM<sub>1</sub>、BM<sub>2</sub>、BM<sub>3</sub>モデルに対する値と一致している。Table 2.7にBM<sub>4</sub>モデルとBM<sub>4</sub> - MD<sub>2</sub>モデルの中性子漏洩割合の比較を示す。この表中「孔を通しての漏洩」の値は制御棒挿入孔および後備停止系孔を通して漏洩する中性子の割合である。BM<sub>4</sub> - MD<sub>2</sub>モデルでは全漏洩の5.34%であるのに対し、BM<sub>4</sub>モデルでは、12.86%に達している。これらの結果から、両コードの計算結果の違いに対する上述の予想通り、実効増倍率を1%程度減少させるストリーミング現象の存在はほぼ確実であると考えられる。ただ本検討の対象はあくまでも、Mk - III炉心のスーパーセルであり、今後、全炉心を対象とした詳細な検討が望まれる。

さて、BM<sub>4</sub>、BM<sub>5</sub>モデルの実効増倍率の差は約0.6%であるが、これは制御型燃料体を凸型に近似することの影響と考えられる。BM<sub>4</sub>、BM<sub>5</sub>両モデル間にはこの他に、制御型燃料体中の燃料棒の形状および、後備停止系孔の形状の相違もあるが、この影響はほとんどないと考えられる。前者についてはBM<sub>1</sub>およびBM<sub>2</sub>モデルの実効増倍率の差がなく、また後者についてはBM<sub>2</sub>モデルとBM<sub>3</sub>モデルの間に差がないことから類推できるからである。

BM<sub>4</sub>モデルとBM<sub>6</sub>モデルの実効増倍率には0.8%の相異がある。これは標準型燃料体を均質化したことによるものである。

これまでは制御棒未挿入時のブロックモデルの実効増倍率について検討してきたが、次に各ブロックモデルに代表的な制御棒モデルを併用し、その実効増倍率や制御棒反応度値におよぼす影響を調べる。制御棒モデルとしてはCRS<sub>2</sub>モデルとCRR<sub>2</sub>モデルを選んだ。ブロックモデルと制御棒モデルの組合せおよび得られた実効増倍率は次の通りである。なおBM<sub>3</sub>モデルについてはBM<sub>2</sub>モデルと同等と考えられるので検討はしなかった。

$$\text{BM}_1 - \text{CRS}_2 : k_{\text{eff}} = 0.860$$

$$\text{BM}_2 - \text{CRS}_2 : k_{\text{eff}} = 0.861$$

$$\text{BM}_4 - \text{CRS}_2 : k_{\text{eff}} = 0.8698 \pm 0.0030$$

$$BM_5 - CRR_2 : k_{eff} = 0.8764 \pm 0.0037$$

$$BM_6 - CRR_2 : k_{eff} = 0.8617 \pm 0.0020$$

また、各ブロックモデルに対して計算され CRS<sub>2</sub> および CRR<sub>2</sub> モデルの反応度値 ( $\Delta k_{eff}$ ) は次の通りである。

CRS <sub>2</sub>	— BM <sub>1</sub>	:	0.465
	— BM <sub>2</sub>	( BM <sub>3</sub> )	: 0.463
CRR <sub>2</sub>	— BM <sub>4</sub>	( BM <sub>3</sub> )	: 0.443
	— BM <sub>5</sub>	:	0.428
	— BM <sub>6</sub>	:	0.440

BM<sub>1</sub> - CRS<sub>2</sub> モデルと BM<sub>2</sub> - CRS<sub>2</sub> モデルの実効増倍率の差は 0.1%、CRS<sub>2</sub> の反応度値についても 0.4% 程度であり、TWOTRAN-2 を用いた計算において、ブロックモデルの差が制御棒反応度値に与える影響はほとんどないと考えられる。

KENO-4 で計算を行った CRR<sub>2</sub> モデルを用いた 3 ケースのうち、BM<sub>3</sub> - CRR<sub>2</sub> の実効増倍率は BM<sub>6</sub> - CRR<sub>2</sub> に比較して約 0.9% 高く、制御棒未挿入時の場合の約 0.8% 高いのと同様の傾向を示し、したがって CRR<sub>2</sub> モデルの制御棒値としては約 0.7% の差が生じる結果になるが、BM<sub>4</sub> モデルに挿入した CRR<sub>2</sub> モデルは BM<sub>5</sub> に挿入した場合に比べ約 3.5% の反応度値増加がみられる。この相違の原因は制御型燃料体の形状に起因すると考えられる。すなわち BM<sub>4</sub> モデルにおいては、制御型燃料体を凸形に近似しており、六角形の場合と比較すると、制御棒に標準型燃料体が近接することになり、吸収が増加するためであろう。但しモンテカルロ法による計算には統計誤差も介在するので、この点も考慮しておく必要がある。

さて、以後の検討は、サーベイ的要素が大きいため、KENO-4 は用いず、主として TWOTRAN-2 を用いるので、次の事実注目しておくことが必要である。

- ① 形状的には最も正確である BM<sub>6</sub> モデルに比較して、BM<sub>4</sub> (BM<sub>3</sub>) モデルは、制御棒未挿入時に、実効増倍率を約 0.8% 大きく評価する。また BM<sub>4</sub> - CRR<sub>2</sub> モデルは BM<sub>6</sub> - CRR<sub>2</sub> モデルに比較して実効増倍率を約 0.9% 大きく評価し、その結果制御棒モデル CRR<sub>2</sub> の反応度値は約 0.7% 大きく評価される。
- ② BM<sub>6</sub> モデルに対し KENO-4 を用いて行った計算で得られた実効増倍率に比較し、BM<sub>1</sub>、BM<sub>2</sub>、BM<sub>3</sub> モデルに対して TWOTRAN-2 を用いて得た値は約 1.8% 大きい。このうち約 0.9% はストリーミングの効果を TWOTRAN-2 が考慮できないためであり、残りは標準型燃料体を均質化したことによる効果である。

Table 2.1 燃料体の原子数密度

番号 \ 項目	核種	標準型燃料体 (S.B)	制御型燃料体 (C.B)
1	U <sup>235</sup>	$8.48074 \times 10^{-6}$	$2.04830 \times 10^{-6}$
2	U <sup>238</sup>	$2.00971 \times 10^{-4}$	$4.85392 \times 10^{-5}$
3	O <sup>16</sup>	$4.19030 \times 10^{-4}$	$1.01206 \times 10^{-4}$
4	C <sup>12</sup>	$7.91706 \times 10^{-2}$	$5.66661 \times 10^{-2}$
5	Si	$1.95336 \times 10^{-4}$	$4.717833 \times 10^{-5}$
6	B <sup>10</sup>	$2.08635 \times 10^{-8}$	$1.34576 \times 10^{-8}$
7	H	$5.20036 \times 10^{-7}$	$1.25616 \times 10^{-7}$

Table 2.2 共鳴計算のパラメータ (U<sup>238</sup>)

項目	燃料体種類	標準型燃料体	制御型燃料体
	燃 料 体 温 度 (°K)		1200.0
平 均 コ ー ド 長 $\ell$ (cm)		2.5935	同 左
ダンコフ補正係数 C		0.0234	$1.0124 \times 10^{-3}$
( $\sigma_M$ ) <sub>eff</sub> 注1) (b)		392.08	396.73
共鳴核種の燃料粒子内の原子数密度		$1.85308 \times 10^{-3}$	同 左
燃料棒内の共鳴核種 1 コ 当 た り の 散 乱 断 面 積 $\sigma_m$ (b)		188.87	同 左

注1)  $\sigma_m + \frac{1-C}{No\ell} + \sigma_p$

Table 2.3 制御棒吸収体およびハステロイ-Xの原子数密度

物質 \ 項目	核種	原子数密度5 ( N/b-cm )
制御棒吸収体 ( B <sub>4</sub> C +C )	B <sup>10</sup>	$0.593785 \times 10^{-2}$
	C	$0.666885 \times 10^{-1}$
ハステロイ-X	Cr	$2.098 \times 10^{-2}$
	Fe	$1.643 \times 10^{-2}$
	Ni	$4.215 \times 10^{-2}$
	Mo	$4.651 \times 10^{-3}$
	W	$1.618 \times 10^{-4}$

Table 2.4 散乱,  $S_N$  次数の違いが実効増倍率におよぼす影響

ケース番号	散乱次数	$S_N$ 次数	実効増倍率	相対値	備考
1	P2	6	0.8521	1.000	
2	P1	4	0.8552	1.004	EXT.Trans. appr
3	P1	6	0.8538	1.002	同上
4	P1	8	0.8535	1.0016	同上
5	P1	4	0.8538	1.002	
6	P1	6	0.8525	1.0005	
7	P0	4	0.8534	1.0015	EXT.Trans. appr
8	P0	6	0.8519	0.9998	同上
9	P0	4	0.8660	1.016	
10	P0	6	0.8729	1.0244	コード内で輸送補正

臨界計算コード : TWOTRAN-2

定数作成コード : GGC-4

EXT.Trans. appr :  $S_N$  コード用輸送補正断面積

Table 2.5 TWOTRAN-2 および KENO-4 コードによる実効増倍率の比較

コード名 吸収体 $B_4C$ 濃度(w/o)	KENO-4 (K)	TWOTRAN-2 (T)	$\frac{T-K}{T}$
0.0	1.3841 ± 0.0033	1.384	+0.00
1.5	0.8993 ± 0.0022	0.909	+0.0107
6.0	0.7449 ± 0.0017	0.749	+5.47 × 10 <sup>-3</sup>
30.0	0.6435 ± 0.0017	0.650	+0.01

Table 2.6 50群エネルギー区分

群	F A S T		群	T H E R M A L	
	上限 (ev)	下限 (ev)		上限 (ev)	下限 (ev)
1	1.4918 7	1.0000 7	26	2.38	2.10
2	1.0000 7	6.7032 6	27	2.10	1.78
3	6.7032 6	4.4933 6	28	1.78	1.44
4	4.4933 6	3.0119 6	29	1.44	1.15
5	3.0119 6	2.0190 6	30	1.15	1.09
6	2.0190 6	1.3534 6	31	1.09	1.05
7	1.3534 6	9.0718 5	32	1.05	0.98
8	9.0718 5	6.0810 5	33	0.98	0.91
9	6.0810 5	4.0762 5	34	0.91	0.80
10	4.0762 5	2.7324 5	35	0.80	0.65
11	2.7324 5	1.8316 5	36	0.65	0.575
12	1.8316 5	1.2277 5	37	0.575	0.49
13	1.2277 5	5.2475 4	38	0.49	0.46
14	5.2475 4	1.3305 4	39	0.46	0.414
15	1.9305 4	7.0017 3	40	0.41	0.34
16	7.1017 3	2.1126 3	41	0.34	0.30
17	2.6126 3	9.1112 2	42	0.30	0.26
18	9.6112 2	3.3358 2	43	0.26	0.22
19	3.5358 2	1.0007 2	44	0.22	0.14
20	1.3007 2	4.8851 1	45	0.14	0.09
21	4.7851 1	1.7603 1	46	0.09	0.07
22	1.7603 1	1.6677 1	47	0.07	0.04
23	1.0677 1	6.7760 0	48	0.04	0.0150
24	6.4760 0	3.2279 0	49	0.0150	0.0050
25	3.9279 0	2.8824 0	50	0.0050	0.0

Table 2.7 BM<sub>4</sub> および BM<sub>4</sub> - MD<sub>2</sub> モデルにおける中性子漏洩割合

モデル 群 項目	BM <sub>4</sub>		BM <sub>4</sub> - MD <sub>2</sub>	
	全漏洩	孔を通しての漏洩 <small>注1)</small>	全漏洩	孔を通しての漏洩
1	$6.51802 \times 10^{-3}$	$4.93581 \times 10^{-4}$ ( 7.57 %)	$5.18304 \times 10^{-3}$	$1.94453 \times 10^{-4}$ ( 3.75 %)
2	$1.38711 \times 10^{-2}$	$1.86204 \times 10^{-3}$ ( 13.42 %)	$1.03498 \times 10^{-2}$	$5.77095 \times 10^{-4}$ ( 5.58 %)
3	$1.09415 \times 10^{-3}$	$1.68075 \times 10^{-4}$ ( 15.36 %)	$7.86169 \times 10^{-4}$	$3.80553 \times 10^{-5}$ ( 4.84 %)
4	$8.46845 \times 10^{-4}$	$1.36287 \times 10^{-4}$ ( 16.09 %)	$7.03884 \times 10^{-4}$	$9.28545 \times 10^{-5}$ ( 13.19 %)
5	$3.27624 \times 10^{-3}$	$1.10438 \times 10^{-3}$ ( 33.71 %)	$2.10975 \times 10^{-3}$	$3.66668 \times 10^{-4}$ ( 17.38 %)
6	$1.85372 \times 10^{-2}$	$1.91316 \times 10^{-3}$ ( 10.32 %)	$1.47662 \times 10^{-2}$	$5.40386 \times 10^{-4}$ ( 3.66 %)
計	$4.41436 \times 10^{-2}$	$5.67752 \times 10^{-3}$ ( 12.86 %)	$3.38987 \times 10^{-2}$	$1.80951 \times 10^{-3}$ ( 5.34 %)
実効増倍率	1.3127 ± 0.0045		1.3246 ± 0.0044	
全吸収	$9.60297 \times 10^{-1}$		$9.66283 \times 10^{-1}$	

$$3 (\text{Xsec of C.R. hole}) / \text{Xsec. of Supercell} = 0.0467$$

( ) 内は全漏洩に対する百分率

注1) 実際は孔はないが、孔に相当する部分の意味である。

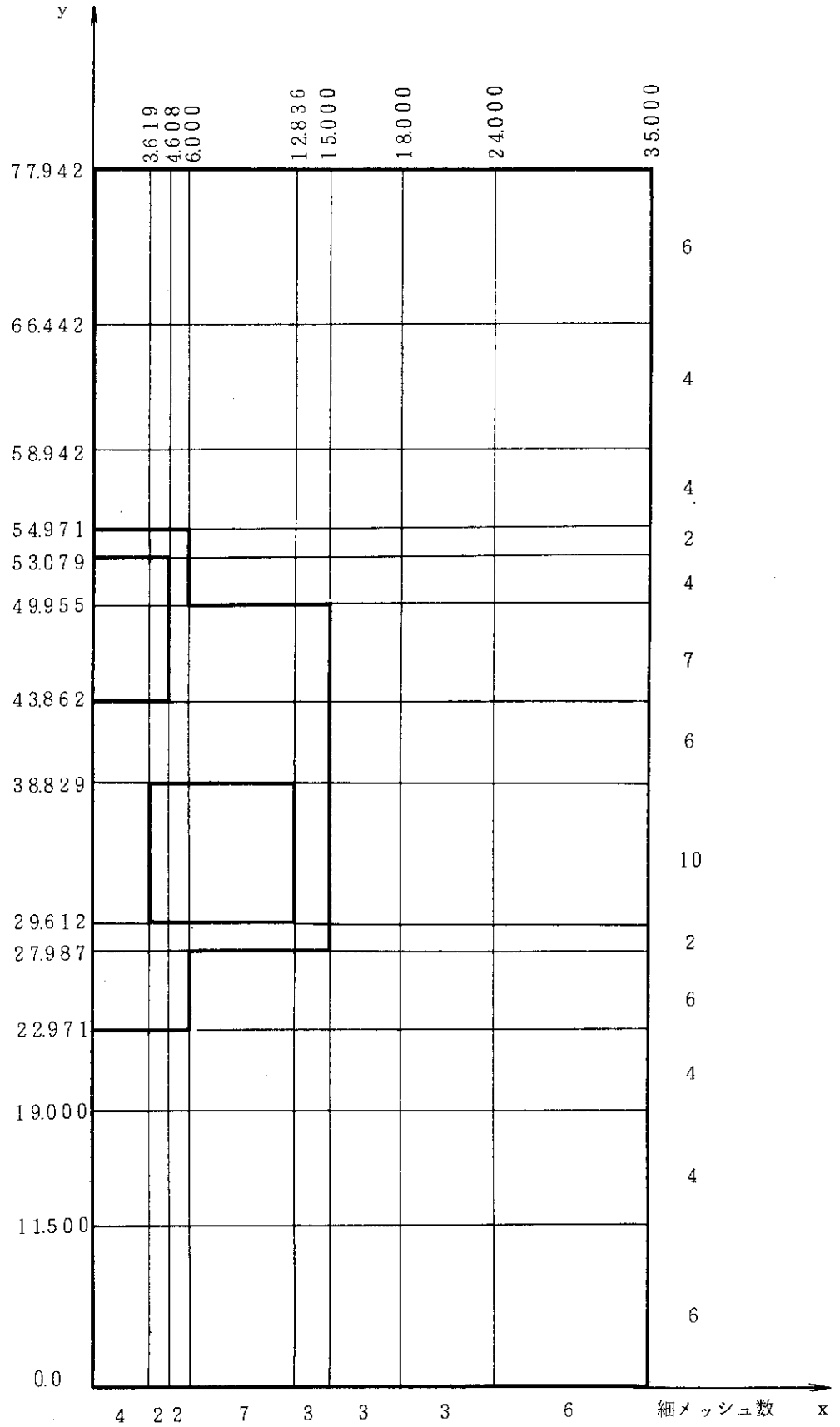
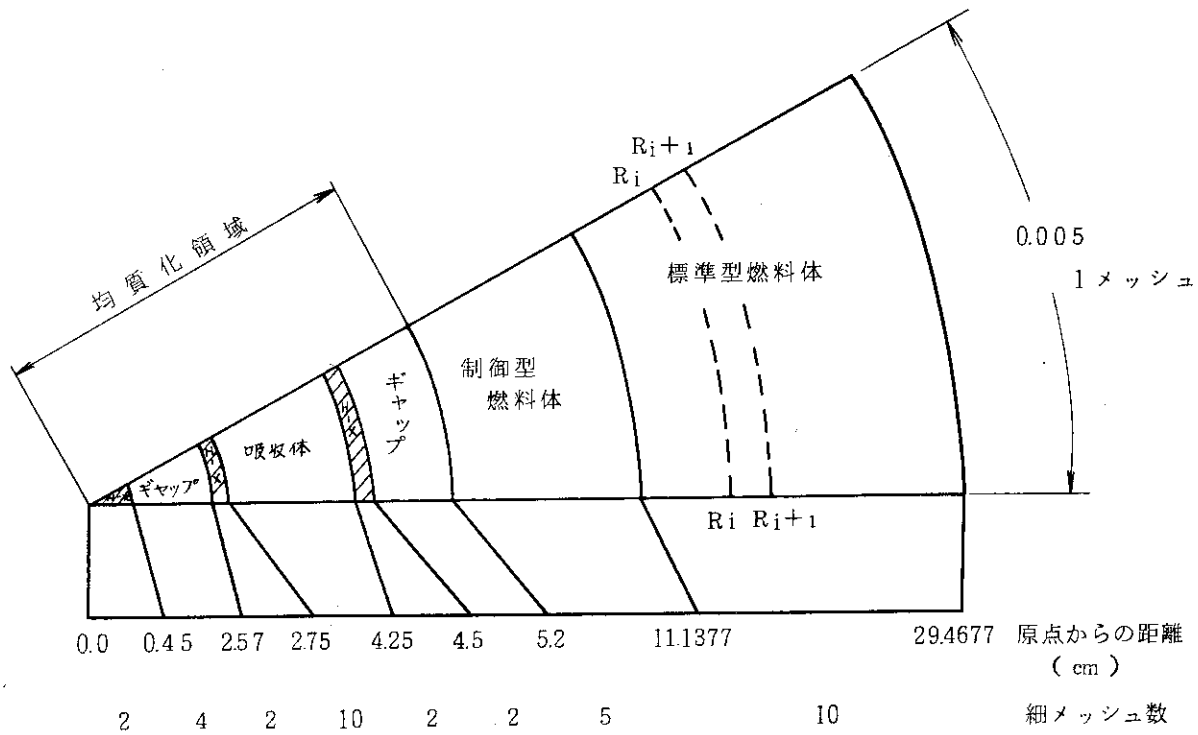


Fig. 2.1  $BM_1-CRS_1$ モデルのTWOTRAN-2用メッシュ分割  
 (  $36 \times 65 = 1950$  Meshes )



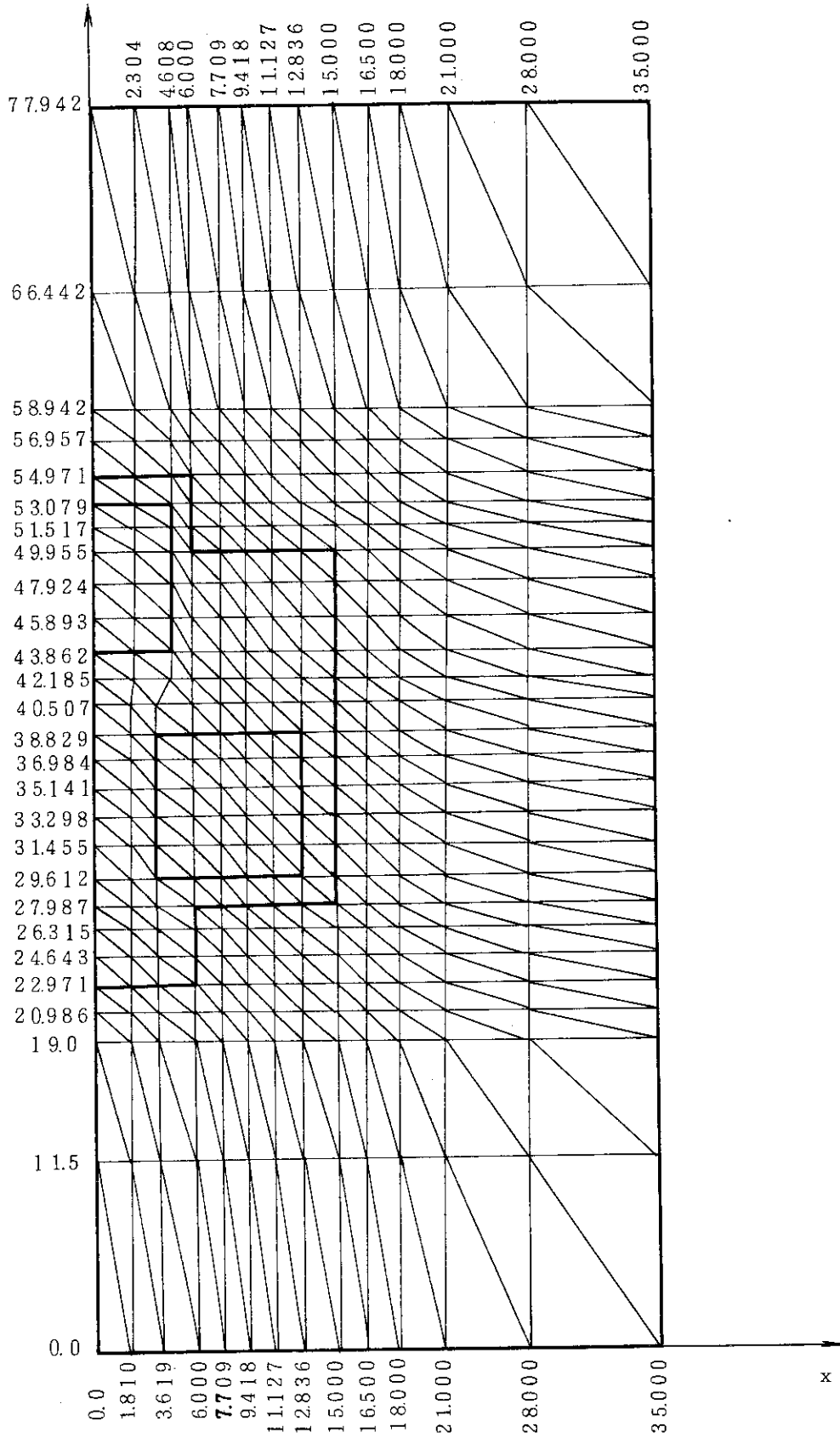


$R_i$  : 細メッシュ半径

$\phi_i$  :  $(R_i, R_{i+1})$  区間の中性子束

$\phi_i (R_{i+1} - R_i^2)$  : 重み関数

Fig. 2.2 均質化用重み関数計算モデルおよびTWO TRAN-2用メッシュ分割



BM<sub>1</sub>-CRS<sub>1</sub>モデル

Fig. 2.3 TRIPLET用メッシュ分割

(26 × 26 = 676メッシュ)

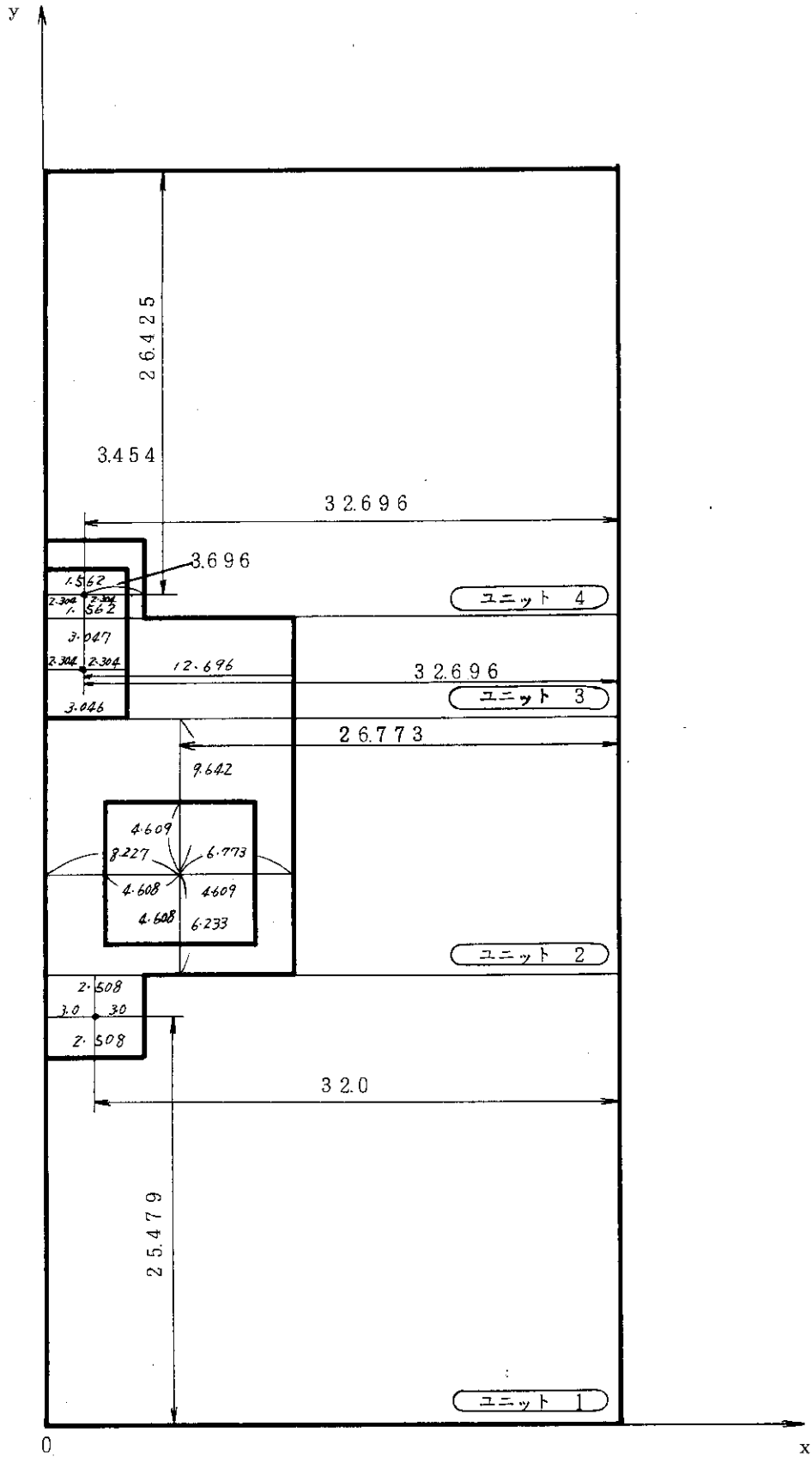


Fig. 2.4 BM<sub>1</sub>-CRS<sub>1</sub> モデル  
KENO-4 計算形状

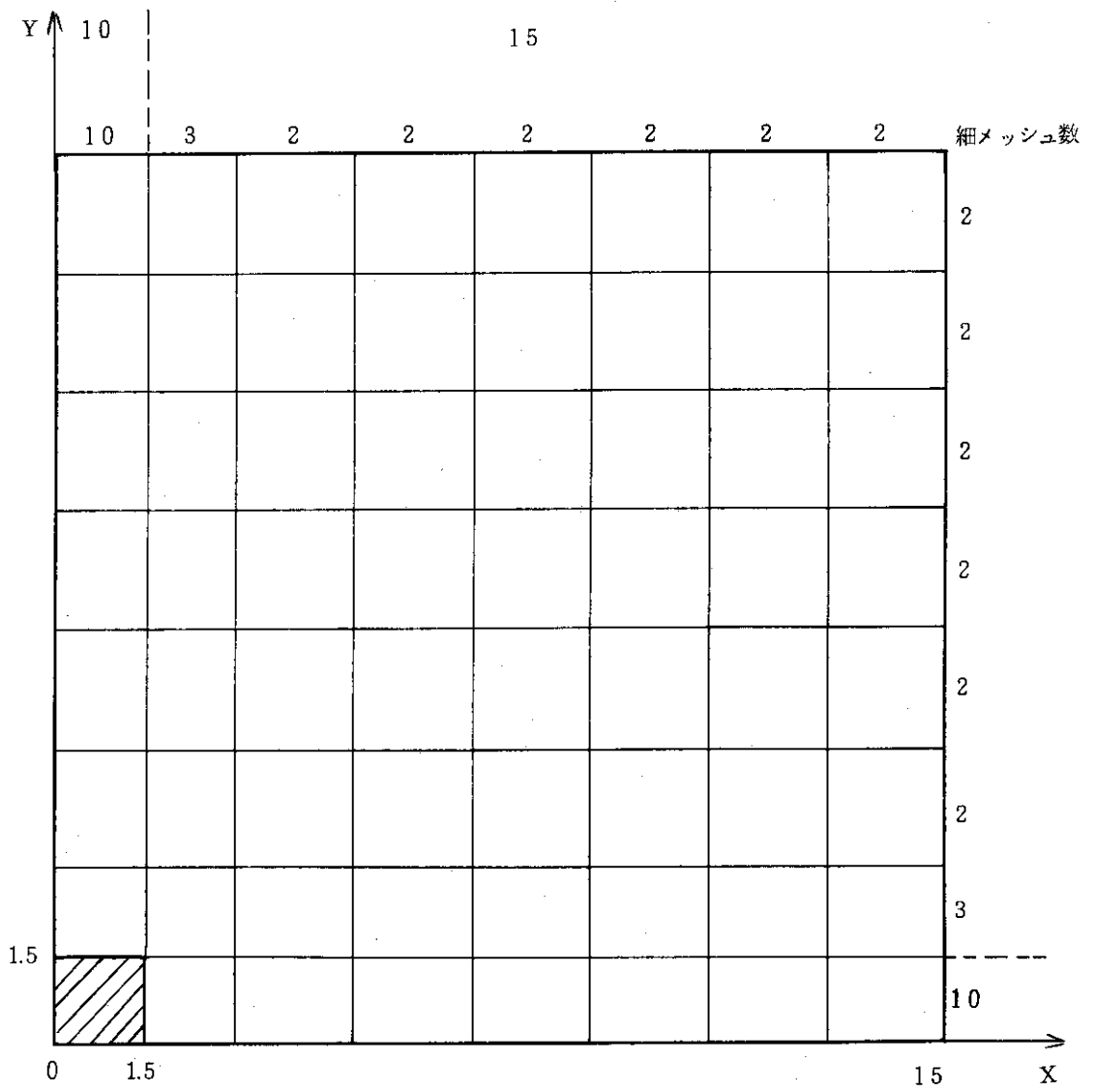


Fig. 2.5 KENO-4, TWOTRAN-2 計算手法比較用モデル体系  
(各境界ではすべて反射境界条件を用いた。)

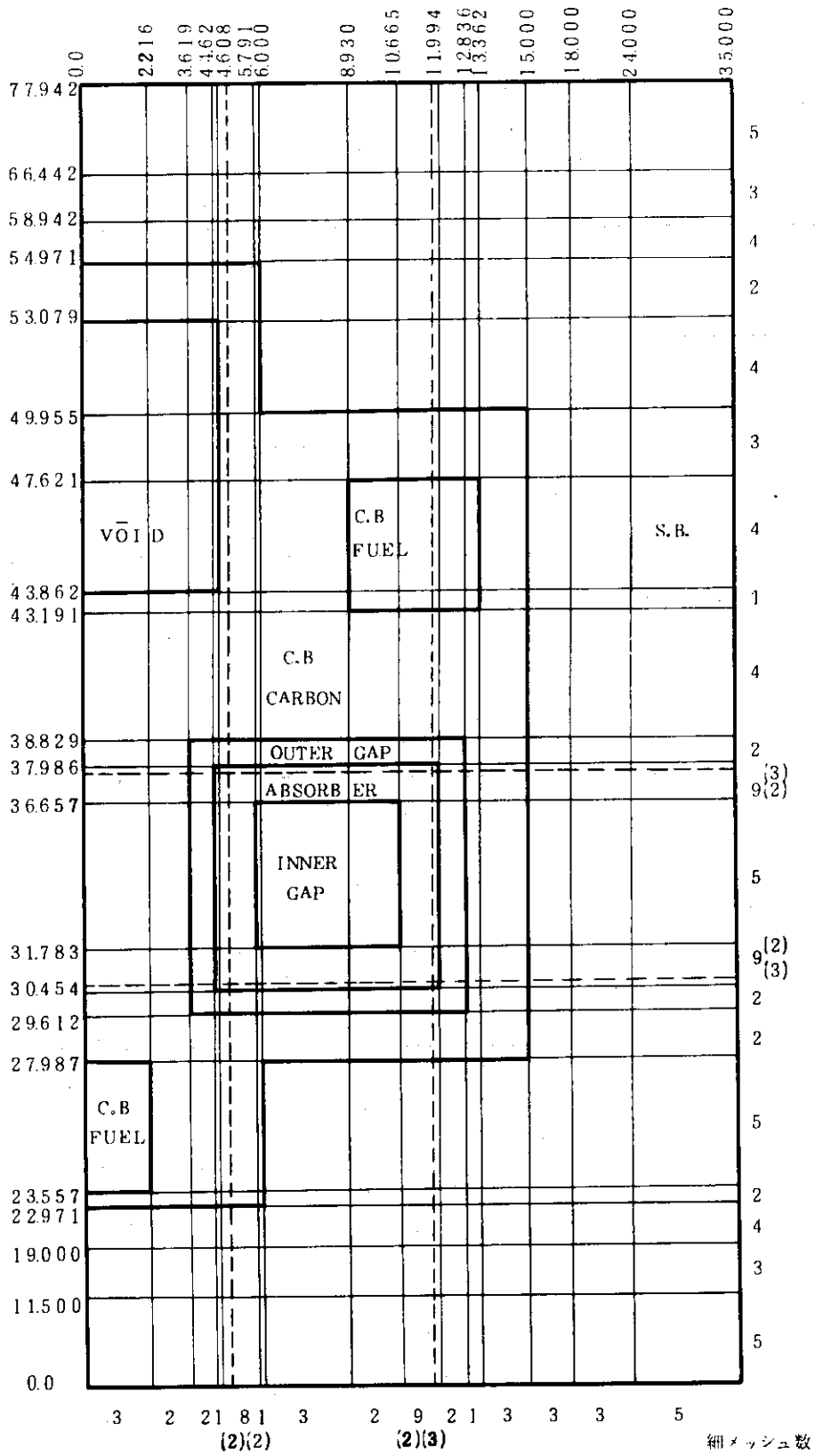


Fig. 2.6 BM<sub>2</sub>-CRS<sub>2</sub>モデルTWO TRAN-2用メッシュ分割

### 3. 制御棒形状のモデル化の効果

#### 3.1 円形断面モデル

検討対象として設定した制御棒モデルのうち、円形の断面を持つのは  $CRR_1$  および  $CRR_2$  モデルである。Mk-III 炉心に挿入される制御棒の断面をほぼ正確に表現した  $CRR_2$  モデルに対し、 $CRR_1$  は (B4C+C) 吸収体の形状のみを正確に反映し、その内外はギャップと被覆管を均質化してモデル化していることは、Table 1.3 に述べた通りである。計算対象となる炉心の、中心からずれた位置にある円形断面の制御棒を形状的に正確に扱える計算コードは今回採用したコードのうちでは KENO-4 のみであり、これを用いて計算した。ブロックモデル  $BM_4$  に挿入した  $CRR_1$  および  $CRR_2$  モデルの制御棒値はそれぞれ  $0.450 \Delta k_{eff}$  および  $0.443 \Delta k_{eff}$  である。前者は後者より、約 1.6% 制御棒値を大きく見積っている。中性子に対しては吸収体として作用する Hastelloy-X 製の被覆管とギャップを中性子束による重みを考慮することなく、単に体積比で均質化したこと、および被覆管の表面積より、外側ギャップの表面積が大きくなったことなどが原因として考えられる。ただ、後述するが、 $BM_2 - CRS_2$  モデルと  $BM_2 - CRS_3$  モデルに対して得られた制御棒反応度値の差は 0.4% 程度であるので、モンテカルロ計算による統計誤差も含まれている可能性がある。

#### 3.2 凹凸および多角形断面モデル

円形の断面を持つ制御棒をできるだけ正確に近似し、しかも TWOTRAN-2 の 2 次元 X-Y 座標を用い計算できるように設定したのが、 $CRG_1$ 、 $CRG_2$  モデルであり、またこの両モデルの中間に位置するのが、 $CRG_{15}$  モデルである。この 3 者の関係を Fig. 3.1 に示す。制御棒挿入孔および内側ギャップ外形は共通であり、吸収体外形が異なっている。 $CRG_1$  においては、凹凸形状の外側を包絡する線がもとの円形形状に近く、また  $CRG_2$  では凹凸形状の内側包絡線がもとの形状に近い。この両者の中間にあり、凹凸形状をうめる様に多角形にしたモデルが  $CRG_{15}$  である。メッシュ分割の都合上、各部分の体積は、もとの場合と比較して次の様になっている。

モデル	内側ギャップ	吸収体	制御棒孔
$CRG_1$	+ 1.1 %	- 5.6 %	+ 0.3 %
$CRG_{15}$	+ 1.1 %	+ 0.9 %	+ 0.3 %
$CRG_2$	+ 1.1 %	+ 5.5 %	+ 0.3 %

$CRG_{15}$  モデルは吸収体を 28 角形で近似しておりもとの形状をほぼ正確に再現していると考えて良い。

$BM_3$  ブロックモデルにこれらの制御棒モデルを併用した体系について TWOTRAN-2 および

TRIPLETコードで制御棒価値を計算した。BM<sub>3</sub>-CRG<sub>1</sub>およびBM<sub>3</sub>-CRG<sub>2</sub>体系に対するTWO-TRAN用メッシュ分割およびBM<sub>3</sub>-CRG<sub>15</sub>体系に対するTRIPLET用メッシュ分割をそれぞれFig. 3.3, Fig. 3.4に示す。得られた実効増倍率および制御棒価値は各コードに対し次の通りである。

◦ TWOTRAN-2

BM <sub>3</sub>	:	keff = 1.325
BM <sub>3</sub> - CRG <sub>1</sub>	:	keff = 0.873 (0.452)
( BM <sub>3</sub> - CRG <sub>15</sub>	:	keff = 0.866 (0.459) )
BM <sub>3</sub> - CRG <sub>2</sub>	:	keff = 0.861 (0.464)

◦ TRIPLET

BM <sub>3</sub>	:	keff = 1.366
BM <sub>3</sub> - CRG <sub>1</sub>	:	keff = 0.890 (0.476)
BM <sub>3</sub> - CRG <sub>15</sub>	:	keff = 0.883 (0.483)

TRIPLETを用いて得られた実効増倍率はTWOTRAN-2によって得られた値より、制御棒未挿入時では3.1%、BM<sub>3</sub>-CRG<sub>1</sub>モデルでは1.9%大きく、前節で述べたKENO-4による値から考えても大きすぎると思われる。また制御棒挿入時よりも未挿入時の方が過大評価の割合が大きいのでCRG<sub>1</sub>の制御棒価値を5%程度大きく与えており、絶対値自身はかなり誤差があると考えられ、使い方を吟味する必要がある。

さて、TWOTRAN-2ではBM<sub>3</sub>-CRG<sub>15</sub>モデルの体系を正確には扱えないが、TRIPLETで計算したBM<sub>3</sub>-CRG<sub>1</sub>とBM<sub>3</sub>-CRG<sub>15</sub>体系の比から計算したBM<sub>3</sub>-CRG<sub>15</sub>体系の実効増倍率は上記の( )内に示したように0.866となる。この値はTWOTRAN-2によるBM<sub>3</sub>-CRG<sub>1</sub>とBM<sub>3</sub>-CRG<sub>2</sub>体系の実効増倍率から吸収体の体積をもとに比例計算した値と一致するからである。したがってBM<sub>3</sub>-CRG<sub>15</sub>体系もしくはこれと同等と考えられるBM<sub>4</sub>-CRR<sub>1</sub>体系をTWOTRAN-2で臨界計算すれば実効増倍率として0.866が得られると推定するのは十分根拠あることと考えられる。またCRR<sub>1</sub>制御棒モデルと同等の価値をもつ凹凸型制御棒モデルとしてはCRG<sub>1</sub>とCRG<sub>2</sub>の中間に位置するモデルが考えられ、その凹凸の数はCRG<sub>1</sub>やCRG<sub>2</sub>で良いと思われる。1例をFig. 3.5に示す。

Fig. 3.6には参考のためにBM<sub>3</sub>-CRG<sub>1</sub>モデルに対する第6群中性子束分布を示す。この図中の等高線値はTWOTRAN-2で計算された中性子束の常用対数を取り10を加えた値であり、中性子束は体系の全核分裂中性子数を1にするように規格化した値である。制御棒付近は急激に中性子束が減衰し、吸収体の表面で中性子が吸収されるのがわかる。またこの程度の凹凸を持つモデルであれば吸収効果はほとんど円形の場合と同じと考えても良いであろう。後備停止系孔の部分はボイドとして扱っているので平坦な分布となっており、かなり中性子分布をゆがめている点は、出力分布に影響する可能性もあり注意を要する。

### 3.3 正方形断面モデル

TWOTRAN-2などの臨界計算コードを用いる際には体系をメッシュ分割して扱う場合が多い。したがって円形断面の制御棒も等価な正方形断面を持つものとして扱うと形状の入力に都合が良

い。ただ等価な価値を持たせるための近似法は、確立されているわけではなく、また体系の形状、組成にも依存する。本節では  $BM_1$ ,  $BM_2$  各ブロックモデルに正方形断面をもつ制御棒モデル、 $CRS_1$ ,  $CRS_2$ ,  $CRS_3$ ,  $CRS_4$  を併用した場合の実効増倍率や中性子束分布の比較を行ない、制御棒モデルとしての妥当性の検討を行なった。ブロックモデルの制御棒挿入孔については、前にも述べた通り断面面積およびその中心間距離を保存してある。制御棒モデルの特徴については、Table 1.3 に述べた通りで  $CRS_1$  は制御棒孔内を均質化したグレイ制御棒モデル、 $CRS_2$  モデルは  $CRR_1$  を等体積の正方形断面モデルにしたもの、 $CRS_3$  は  $CRR_2$  を正方形断面を持つようにしたモデルである（但し、吸収体内部は  $CRS_2$  と同じ）。 $CRS_2$ ,  $CRS_3$  モデルは吸収体の部分の体積のみを保存したモデルであるが、 $CRS_4$  モデルは吸収体表面積も保存したモデルであり、そのため内側のギャップの体積が約 50% 減少し、その結果外側ギャップの体積が増加している。各ケースに対して TWOTRAN-2 を用いて得られた実効増倍率と制御棒価値は以下の通りである。

$BM_1 - CRS_1$	: $k_{eff} = 0.854 (0.471)$
$BM_1 - CRS_2$	: $k_{eff} = 0.860 (0.465)$
$BM_2 - CRS_2$	: $k_{eff} = 0.861 (0.464)$
$BM_2 - CRS_3$	: $k_{eff} = 0.863 (0.462)$
$BM_2 - CRS_4$	: $k_{eff} = 0.875 (0.450)$

前節で述べたように  $BM_2$  (これは  $BM_3$  と同等と考えて良い) -  $CRR_1$  体系を TWOTRAN-2 で計算すれば実効増倍率は 0.866 になると推定されるので、この値を基準にすれば  $BM_2 - CRS_3$  以外の各ケースの実効増倍率と各制御棒モデルの価値の増減関係は以下の通りである。

モデル	実効増倍率	制御棒価値
$BM_1 - CRS_1$	- 1.4 %	+ 2.6 %
$BM_1 - CRS_2$	- 0.7 %	+ 1.3 %
$BM_2 - CRS_2$	- 0.6 %	+ 1.1 %
$BM_2 - CRS_4$	+ 1.0 %	- 2.0 %

一次元中性子束を重みとして均質化したグレイ制御棒モデルは制御棒価値をかなり過大に見積る傾向にある。また熱中性子は制御棒吸収体の表面で吸収されるにしても、等表面積モデルは制御棒価値を過小に見積ることがわかる。

Fig. 3.7 ~ Fig. 3.10 にはそれぞれ、 $BM_1 - CRS_1$ ,  $BM_1 - CRS_2$ ,  $BM_2 - CRS_2$ ,  $BM_2 - CRS_3$  各体系に対する第 6 群中性子束の分布を示す等高線図を示す。等高線値は Fig. 3.6 と同様に TWOTRAN-2 で計算された値の常用対数に 10 を加えた値である。Fig. 3.6 の  $BM_3 - CRS_1$  に対する中性子束分布図も含めて、これらの図の比較から次の事がわかる。

- ① 制御棒の近傍を除けば、セル全体の熱中性子束分布は、制御棒断面の形状や中性子吸収の局所的な強弱によって変わることはない。(もちろん、後者については制御棒全体としての吸収効果が等しいという前提がある時に限る。)



② 制御棒の近傍および制御棒内における熱中性子束分布は、当然のことであるが、制御棒の形状を反映する。

③ 制御棒の干渉効果は、等高線値 8.0 の線のくびれ方から判断する限りでは、正方形断面モデルの方が円形もしくは円形に近い断面のモデルより大きいと推定される。

制御棒価値について考えると、CRG<sub>15</sub>モデルに比較してCRS<sub>2</sub>は過大に、CRS<sub>4</sub>は過少になる。制御棒吸収体に相当する正方形の外側の1辺はCRS<sub>2</sub>では7.533 cm、CRS<sub>4</sub>では6.676 cmであるので、この辺の長さに着目し比例計算してCRG<sub>15</sub>と等価値をもつ正方形モデルの1辺をもとめると7.190 cmとなる。拡散理論に基づいた理論によれば周囲の物質の拡散距離に比してその一辺の長さが十分小さな正方形断面を持つ制御棒はその辺の長さの1.1804倍の直径を持つ円形断面の制御棒に置き換えても良いとされている。グラファイトの拡散距離は50 cm～90 cm程度であるので直径8.5 cmの制御棒は一辺7.20 cmの正方形断面制御棒と等価であることになり、上記の計算と良く一致する。今回対象とした制御棒は中空であるので、理論の対象となった中実のものとは異なるが、強吸収体であれば中心付近の吸収体はほとんど中性子を吸収することはなく、したがって両者の差がほとんどないこと、および干渉効果に及ぼす影響はあまり大きなものではないため一致したものと思われる。したがって円形断面の制御棒をその直径の $(1.18)^{-1}$ 倍の一辺をもつ正方形で近似することは、十分な妥当性をもつといえよう。

Fig. 3.11～Fig. 3.20には、BM<sub>2</sub>-CRS<sub>2</sub>、BM<sub>3</sub>-CRG<sub>1</sub>両体系に対する第1群から第5群までの中性子束分布を等高線図で示す。等高線値は、第1、第2群についてはTWO TRAN-2で計算された中性子束を単に100倍した値、それ以外の群については第6群の場合と同様である。これらの図から次のことがわかる。

- ① どの群においても、制御棒の近傍を除いて、制御棒の形状が中性子束分布の形状におよぼす影響は大きなものではない。
- ② 制御棒の近傍では、中性子分布が、第1群を除いて、制御棒の形状を反映したものになっている。
- ③ 第1群の中性子束分布は、その分布形状に、制御棒の形状によると思われる影響はとくに表われず、高速中性子吸収断面積が小さいことがわかる。

なお参考のため、BM<sub>1</sub>-CRS<sub>2</sub>、BM<sub>2</sub>-CRS<sub>4</sub>モデルに対し、TWO TRAN-2を用いて臨界計算を行なった際のメッシュ分割図を、それぞれ、Fig. 3.21、Fig. 3.22、Fig. 3.23に示す。BM<sub>1</sub>-CRS<sub>1</sub>についてはFig. 3.21と同じメッシュ分割を用い、物質の指定のみを変えた。

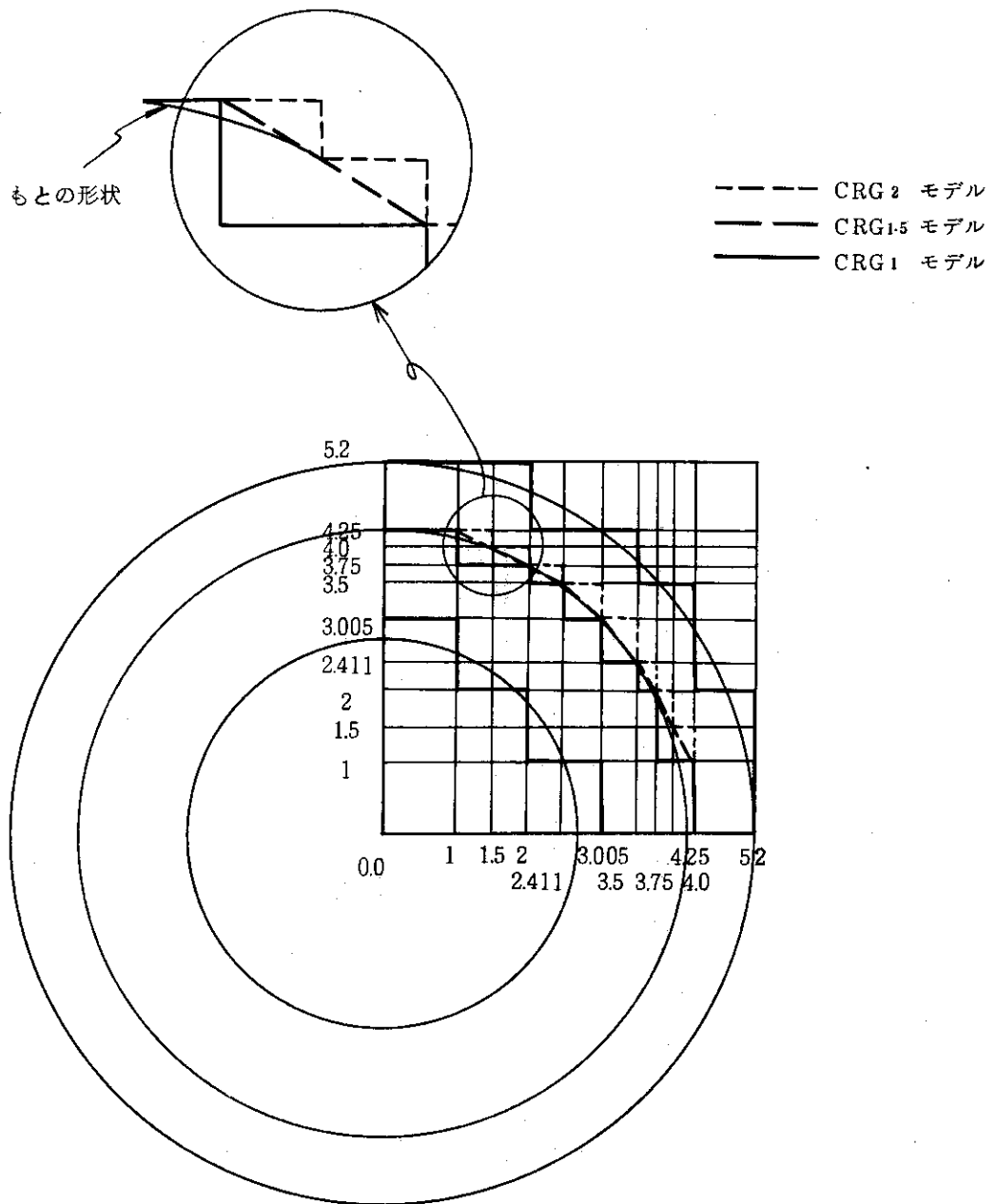


Fig. 3.1 凹凸断面制御棒モデル間の関係





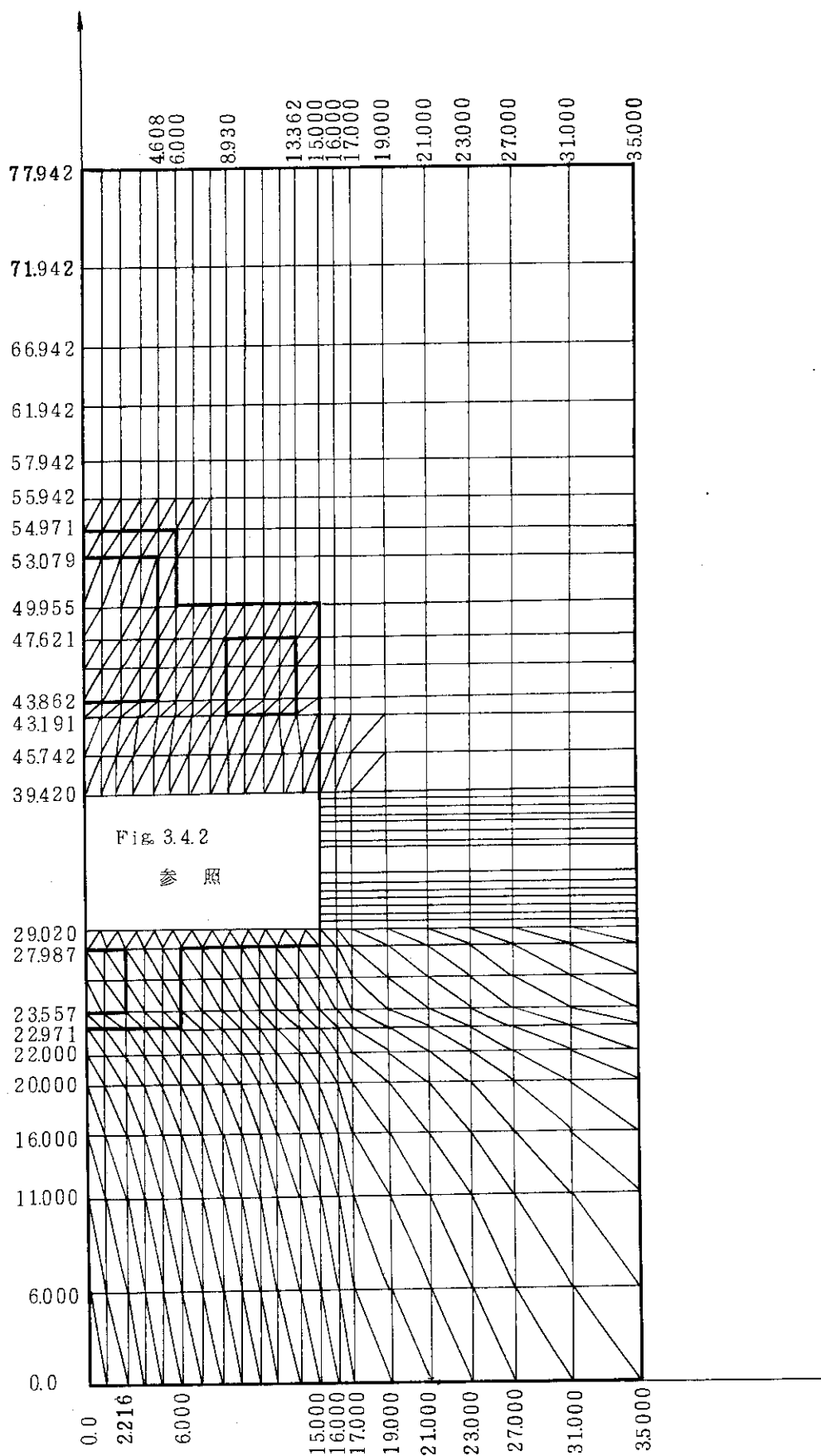


Fig. 3.4.1 BM<sub>3</sub>-CRG<sub>15</sub> モデルTRIPLET用メッシュ分割

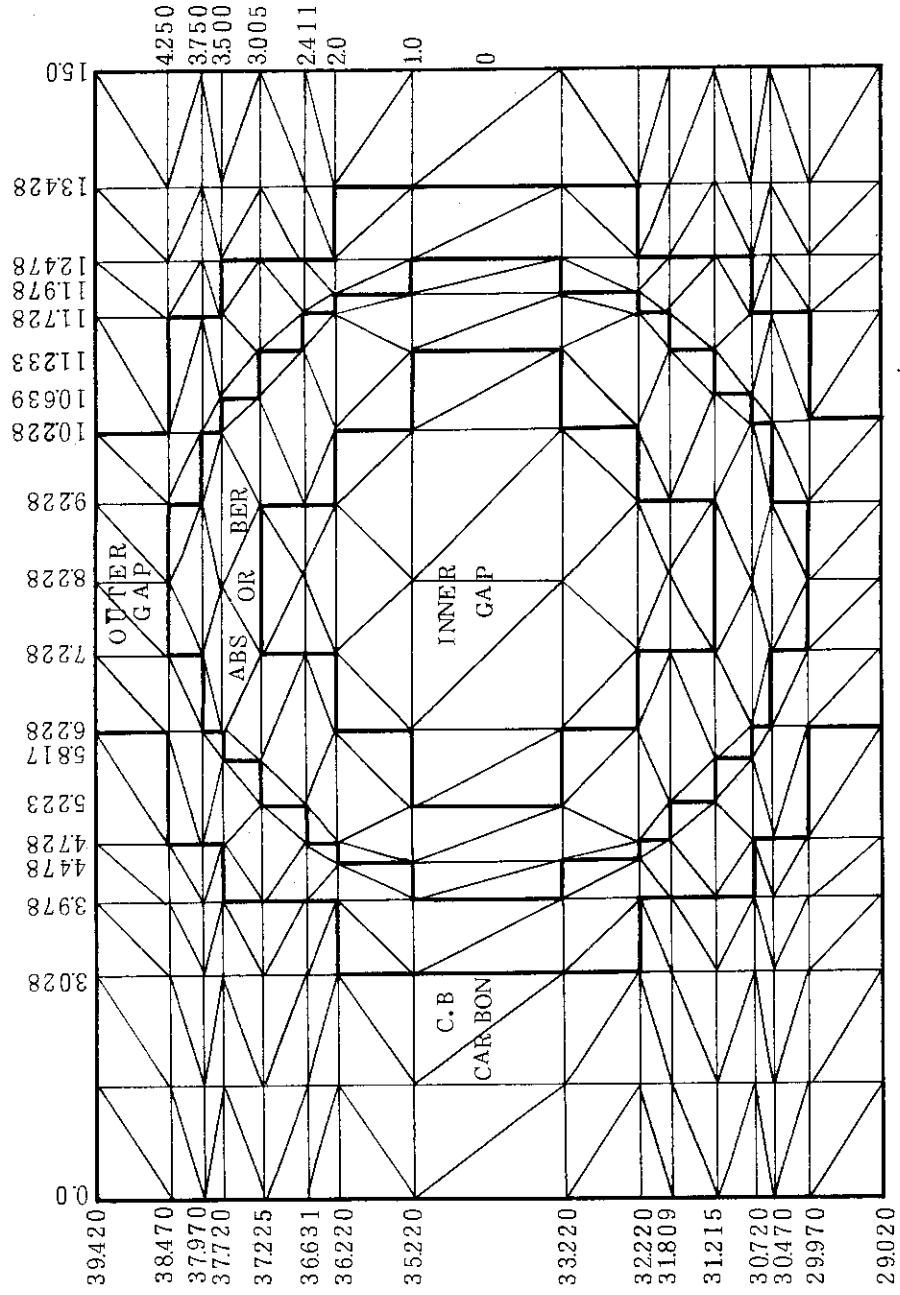
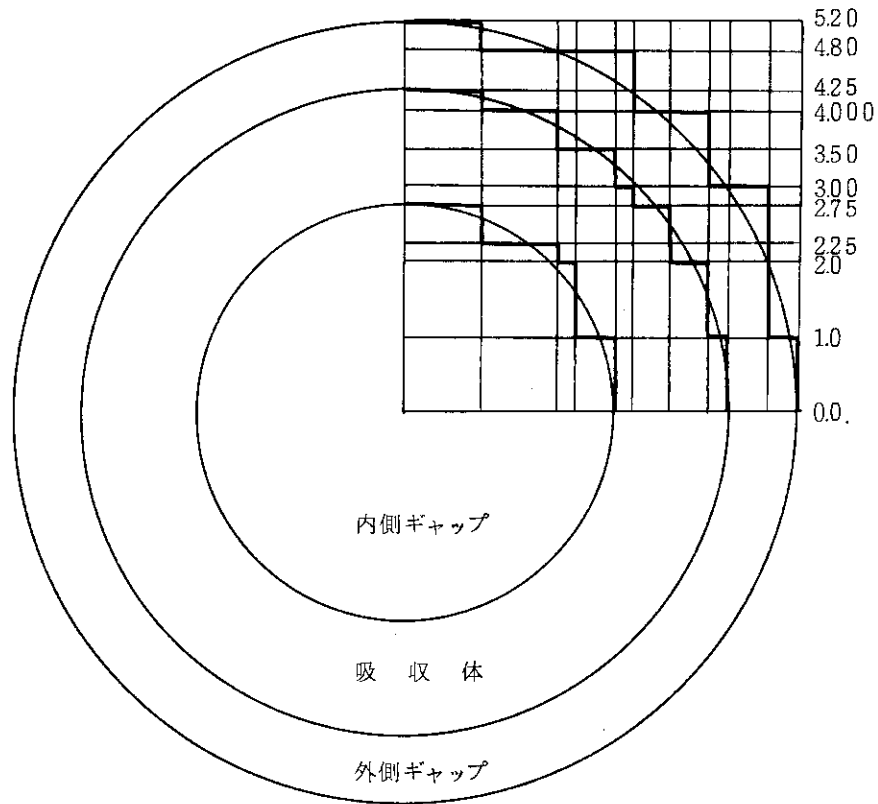


Fig. 3.4.2 BM<sub>3</sub> - CRG<sub>15</sub> モデル制御棒付近 TRIPLET 用メッシュ分割



- 吸収体       $14.25 \times 4 \text{ cm}^2$       ←  $4.25^2 \pi = 56.745 \text{ cm}^2$   
 (1.0045倍)
- 内側ギャップ       $24.0 \text{ cm}^2$       ←  $2.75^2 \pi = 23.7583 \text{ cm}^2$   
 (1.01倍)
- C.R孔       $86.4 \text{ cm}^2$       ←  $5.2^2 \pi = 84.9487 \text{ cm}^2$   
 (1.017倍)

Fig. 3.5 円形断面制御棒と同じ値を持つ凹凸断面制御棒モデルの一例

Table F.1 各国のデータ・バンク・システム

国名	機関名	概要	現状	コード化システム		データ	入力方法及び入力方法	データ・ソース	計算機システム		主要項目、出力	その他
				プラント・システム・コンポ・ネット	故障・修復・保守				ハード・ウェア	データ構造媒体		
西	GRS/RWE	プラント・機器等の信頼性解析	開発中 (モナルケース実行中)	現在AKZ & BES システム, 将来KKS システム	報告書記述, 故障モード, 原因に関する情報は開発中	原子炉スタック(GRS)の信頼性専門家との協力あり)一括処理 (テレプロセッシング考慮)	GRS, RWE, プラント・コンポ・ネットの製造業者	Siemens 40045 AMDAL	データ構造媒体 索引順次編成 ディスク	故障率, 修復率, 信頼性	システム運用は計算機部門による	
仏	EdF SRDF	プラント・機器等の信頼性解析	開発中 (予備試験)	Septen & AMN システム(時代物)	地域レベルでは現場で収集された生データ, 国のレベルでは処理済データ	原子炉スタック (信頼性専門家との協力あり), 地域レベルではテレプロセッシング, 国レベルでは一括処理	EdF	IBM 370/155 IBM 370/168 (国レベル)	階層構造編成 ディスク	平均値, 最大/最小値, 中央値, 故障率, 修復率		
英	UKAEA/SRS SYREL	プラント・機器等の信頼性解析, プラントの稼働率等	運営中	十進数コード (自社開発)	階層型コード	原子炉スタック (信頼性専門家)の援助による一括処理 (カード・テープ, ディスク?)	参加機関製造業者, 公開データ	ICL 2980	順次編成 テープ, ディスク	平均値, 最大/最小値, 信頼性, 故障率, 修復率	参加機関との契約	
伊	ENEL	プラント・機器等の信頼性解析	予備運営 (本システム準備中)	現在, 英数字コード及びMPL, 将来階層型コード (自社開発)	開発中	現場で収集された生データ	ENEL, 製造業者	Honeywell 6630 & Terminalnet 300	順次編成 直接編成 テープ, ディスク	平均値, 信頼性, 故障率, 修復率		
伊	CNEN LER/EDIM	異常故障, 各国のプラント情報の収集	運営中 (一部中断)	英数字コード (自社開発)	英数字コード (自社開発)	原子炉部門のスタッフ一括処理 (カード, テープ)	各国より直接 IAEA 経由 ENEL	IBM 3031	索引順次編成 テープ, ディスク	情報検索結果	システム運用は計算機部門による	
米	CEC JRC-ISPR ERDS	各国の異常故障, 機器故障, 機器信頼性, データの収集及び統合	開発中 (予備試験)	英数字・階層型コード (自社開発)	英数字・階層型コード (自社開発)	計算機部門スタッフ一括処理 (カード, テープ)	各国データバンク公開データ	IMS ADABAS	階層構造編成 テープ, ディスク	情報検索結果	システム運用は NIH との契約による	
米	NRC LER	異常故障, 情報の収集, 分析	運営中	英数字コード (NPRDSと同じ)	英数字コード (NRRDSと同じ)	電力よりの生データ	電力会社	米国立衛生研究所 (NIH) IBM大型機		異常故障分析結果	システム運用は計算機部門による	
米	SwRI NPRDS	プラント・機器等の信頼性解析	運営中	英数字・階層型コード (自社開発)	英数字コード (自社開発)	参加電力より収集された生データ	参加電力会社	IBM 4331	テープ, ディスク	機器等の故障分析結果, 統計処理結果	システム運用, 計算機部門による	
H	NMCC NMCC-V2	原子炉施設の核物質管理	運営中	英数字・階層型コード (自社開発)	施設, 核物質等}のコード	各施設より収集された生データ	各施設一括処理 (カード, テープ, ディスク)	外部計算センターの IBM 370/168	索引順次編成 ディスク	法律に基づく報告書等	システム運用は外部計算センターとの契約による	
IAEA	INIS	科学技術分野の文献検索	運営中	英数字・階層型コード (自社開発)	文献検索用キー・ワード	各国の提供機関一括処理 (テープ)	全世界各国	STAIRS	索引順次編成 ディスク	情報検索結果		

注1. この表の内容は1977年末のデータに基づいており, 一部今回の調査により更新及び追加してある。 (7-2)  
 注2. コード化システム欄の "AKZ", "BES", "KKS", "Septem & AMN" 及び "MPL" はコード化システム名であり, 正式名称不明。  
 注3. 計算機システム欄のデータ・ベース・マネジメント・システムに関する補足説明は付録H.3参照。



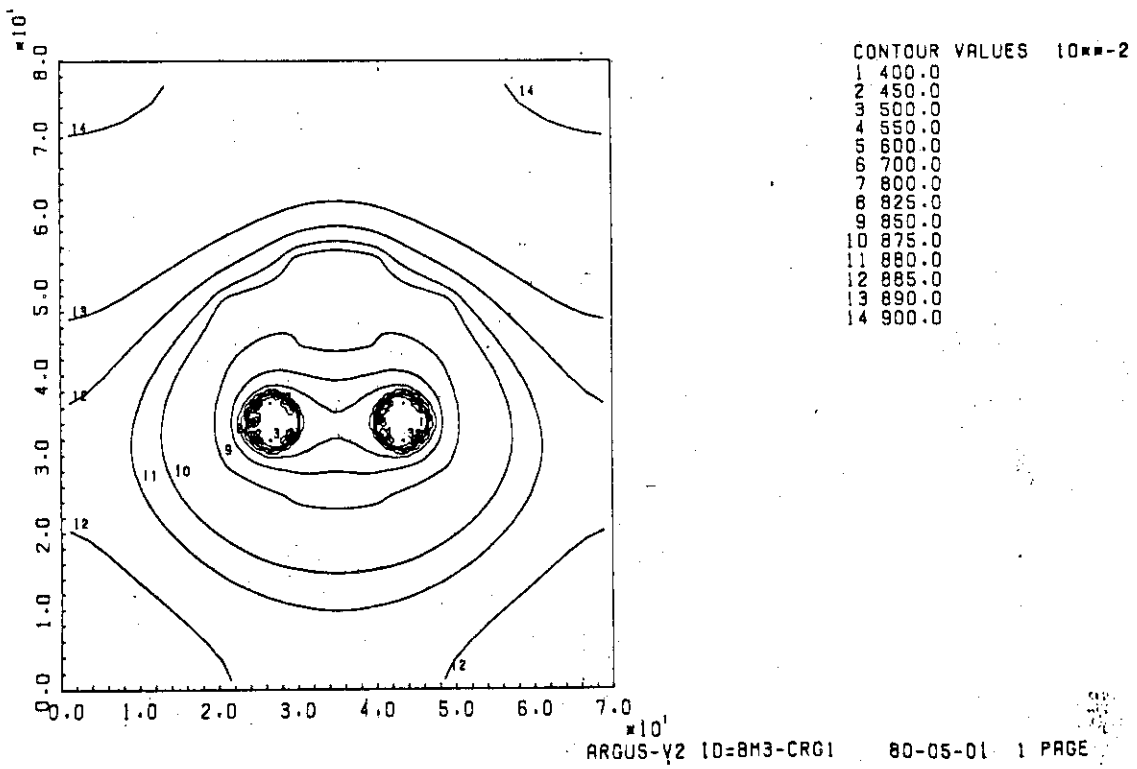


Fig. 3.6 BM<sub>3</sub>-CRG<sub>1</sub>モデルの第6群中性子束分布

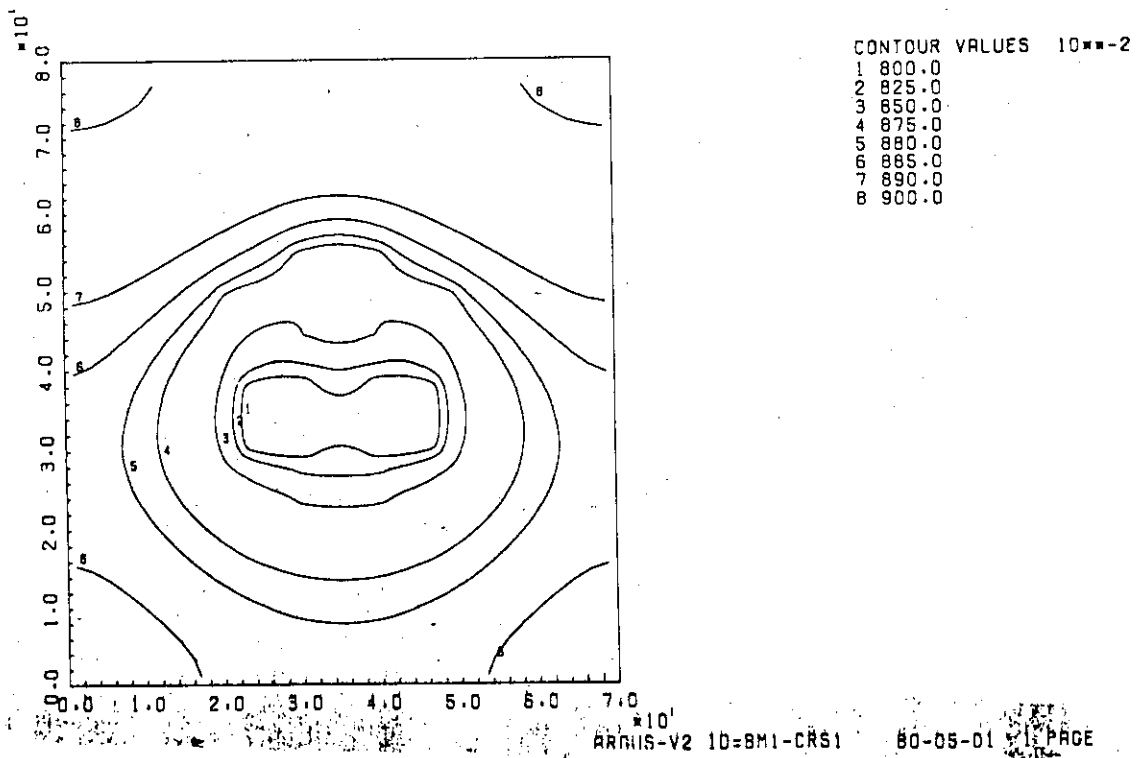


Fig. 3.7 BM<sub>1</sub>-CRS<sub>1</sub>モデルの第6群中性子束分布

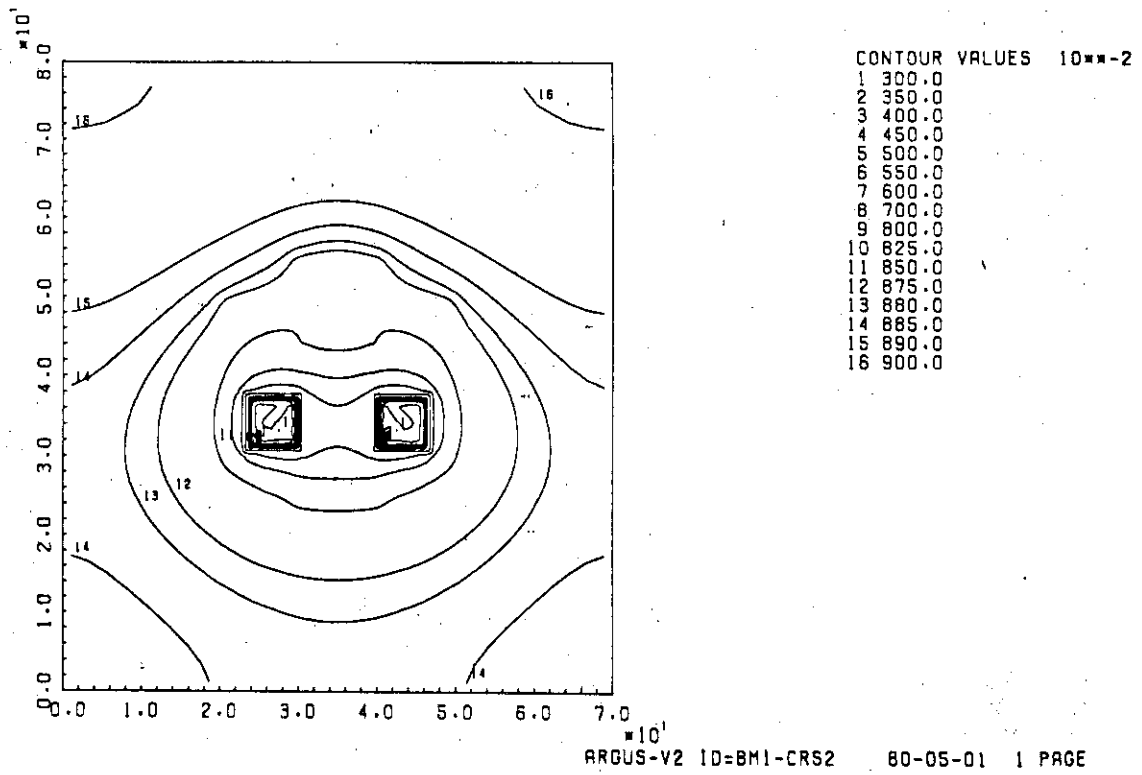


Fig. 3.8 BM<sub>1</sub>-CRS<sub>2</sub>モデルの第6群中性子束分布

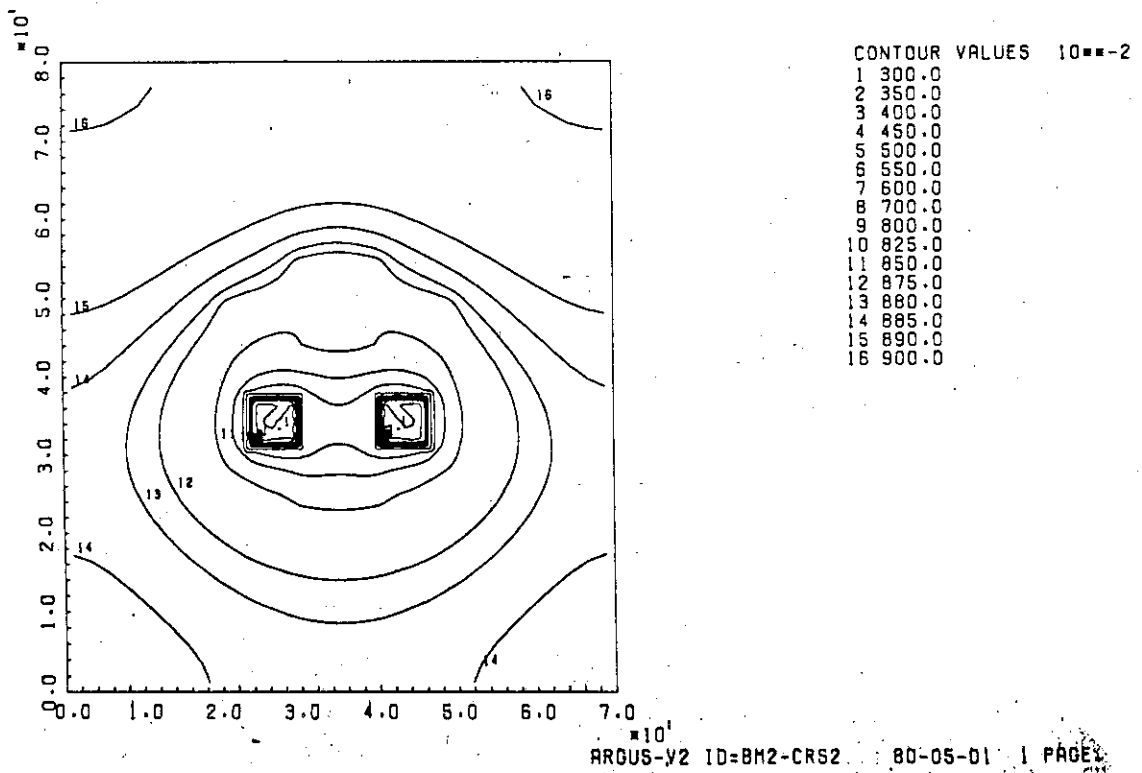


Fig. 3.9 BM<sub>2</sub>-CRS<sub>2</sub>モデルの第6群中性子束分布

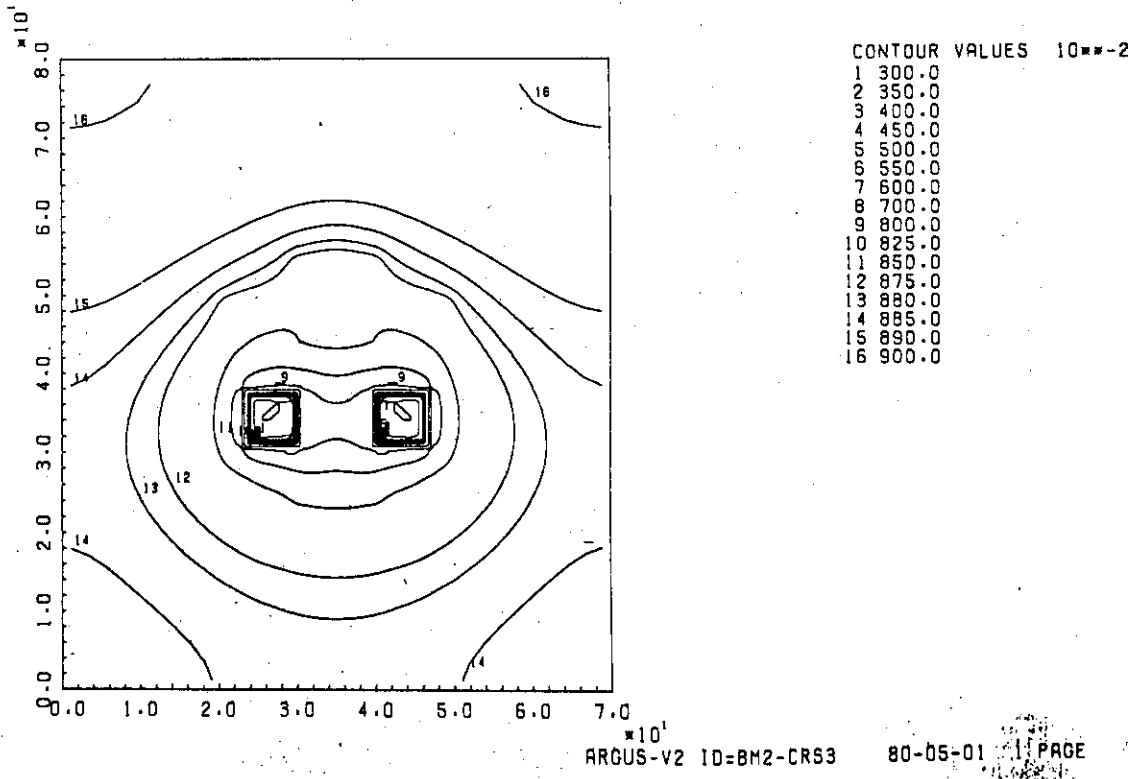


Fig.3.10 BM<sub>2</sub>-CRS<sub>3</sub>モデルの第6群中性子束分布

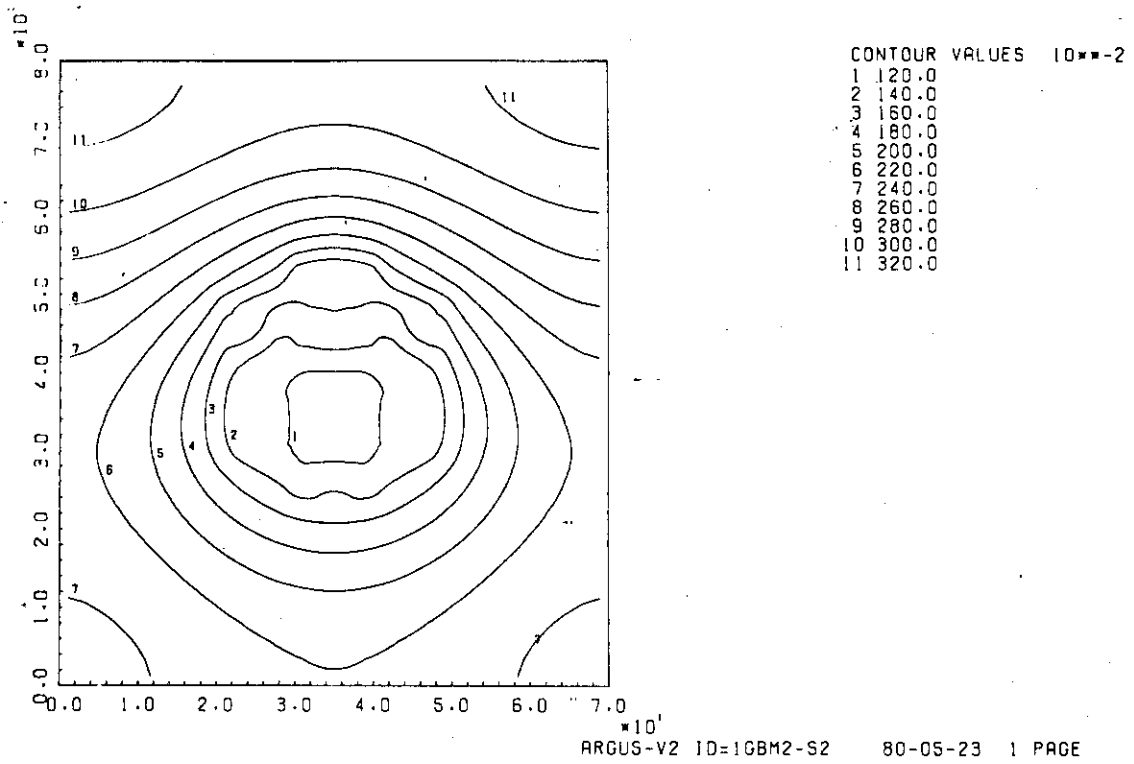


Fig.3.11  $BM_2$ - $CRS_2$  モデルの第 1 群中性子束分布

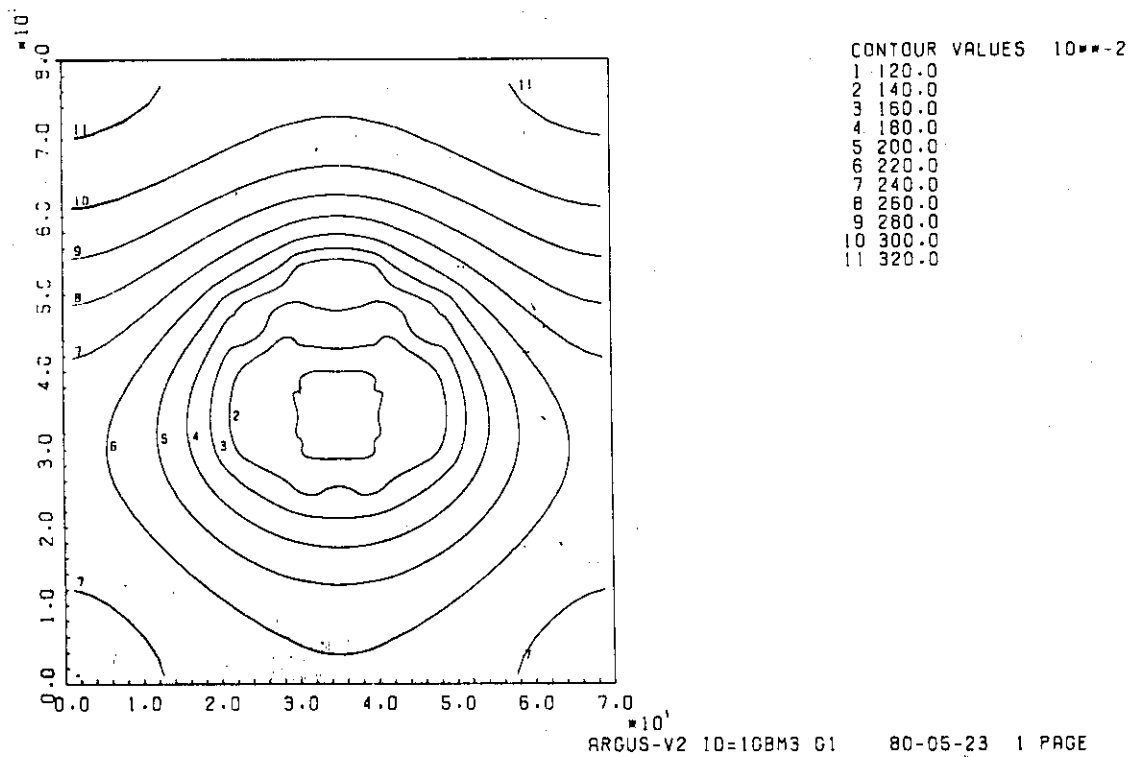


Fig.3.12  $BM_3$ - $CRG_1$  モデルの第 1 群中性子束分布

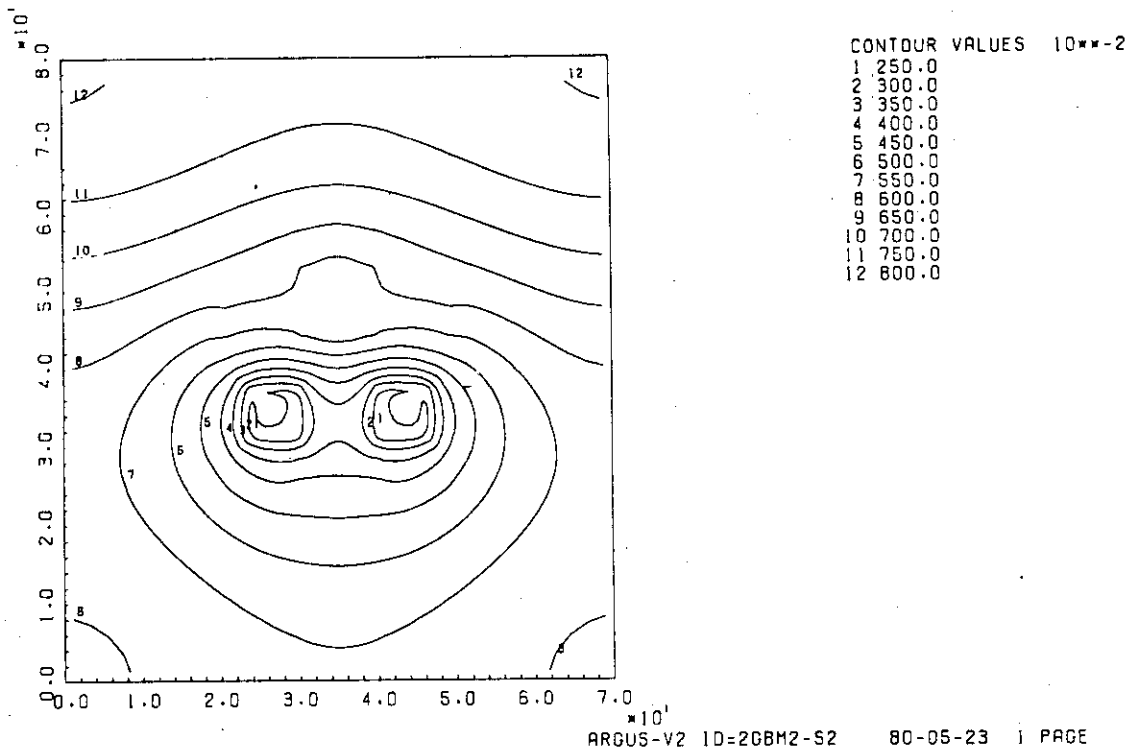


Fig.3.13 BM<sub>2</sub>-CRS<sub>2</sub>モデルの第2群中性子束分布

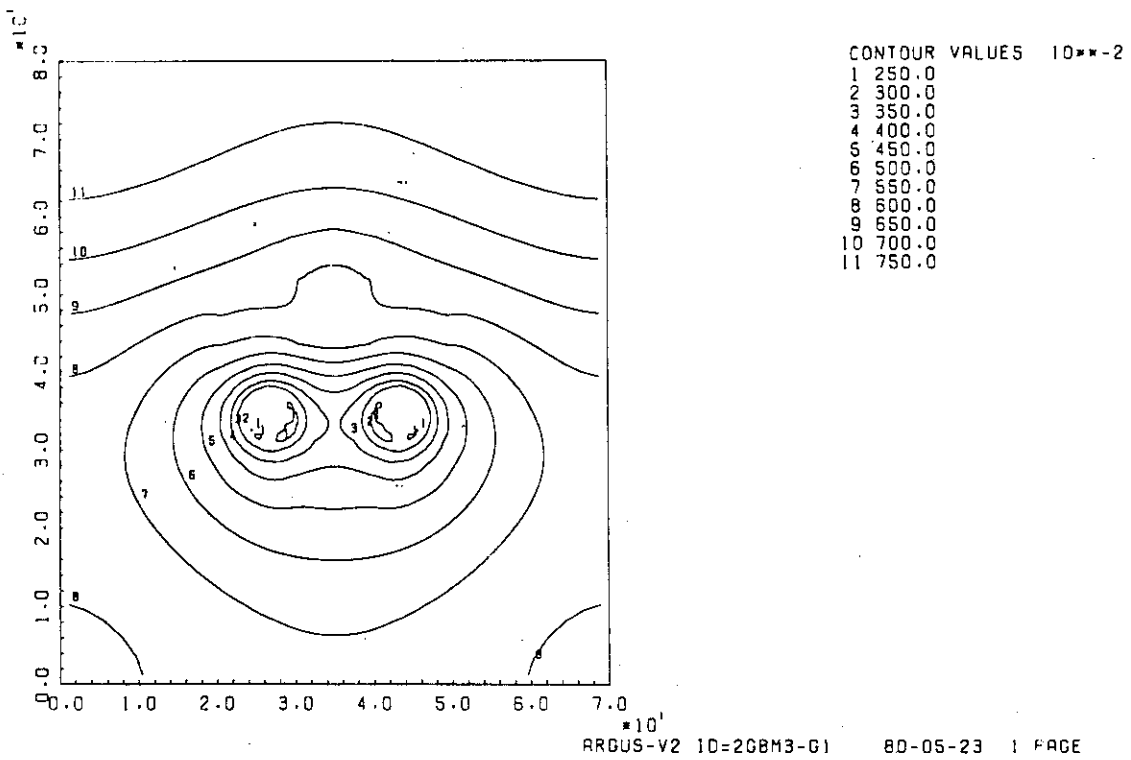


Fig.3.14 BM<sub>3</sub>-CRG<sub>1</sub>モデルの第2群中性子束分布

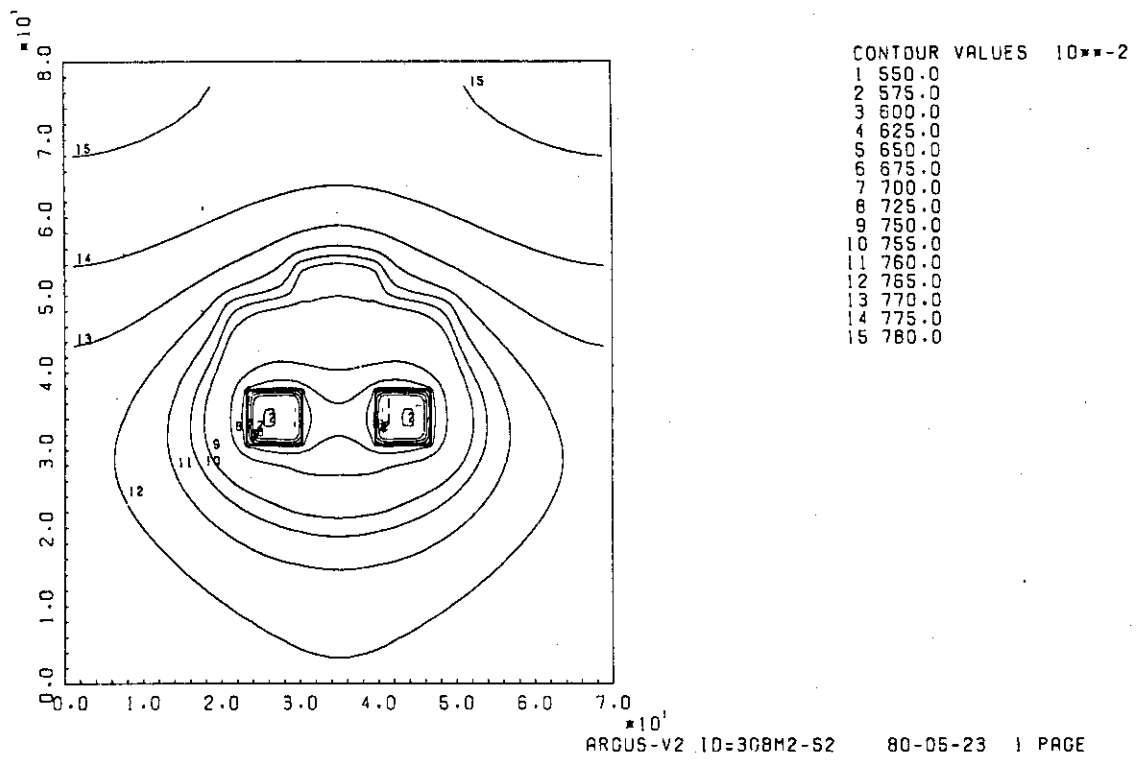


Fig. 3.15 BM<sub>2</sub>-CRS<sub>2</sub>モデルの第3群中性子束分布

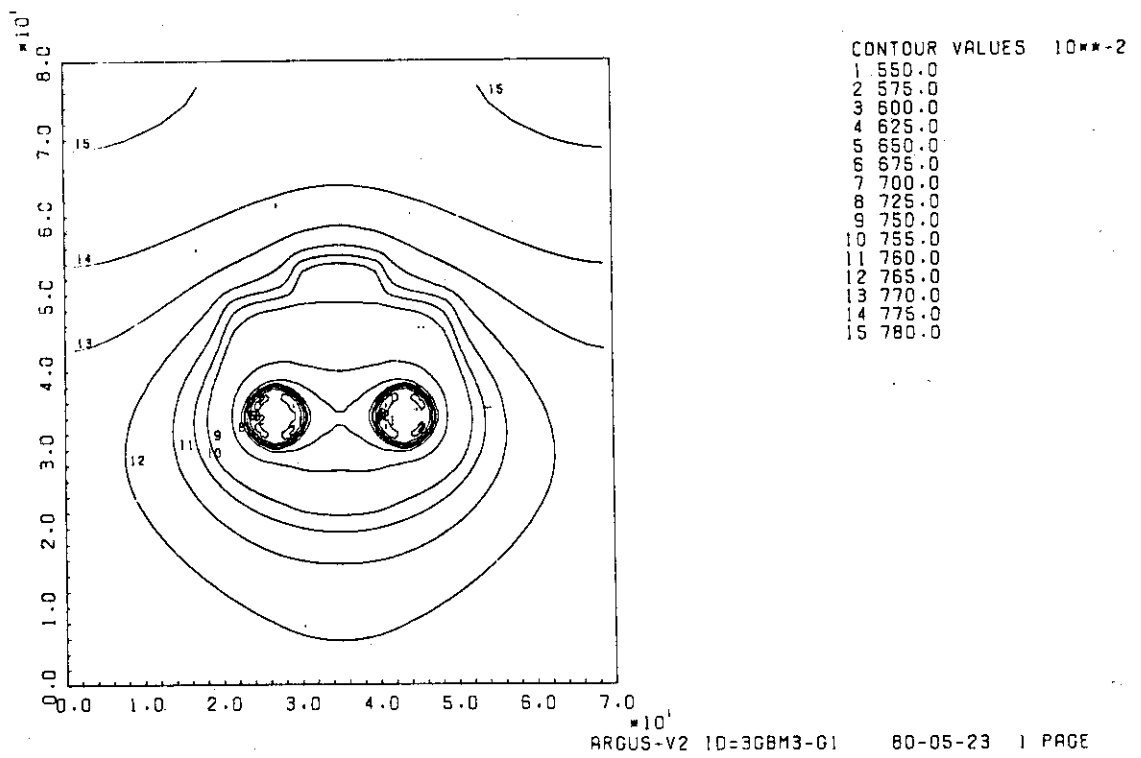


Fig. 3.16 BM<sub>3</sub>-CRG<sub>1</sub>モデルの第3群中性子束分布

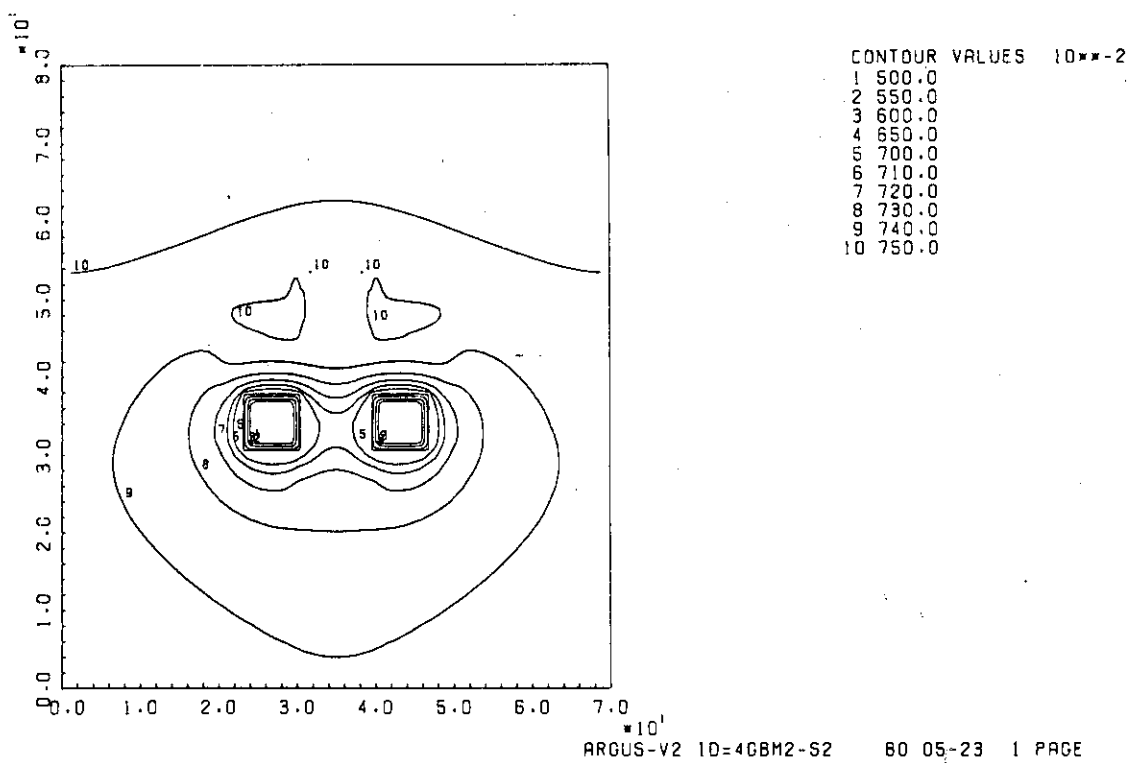


Fig.3.17 BM<sub>2</sub>-CRS<sub>2</sub>モデルの第4群中性子束分布

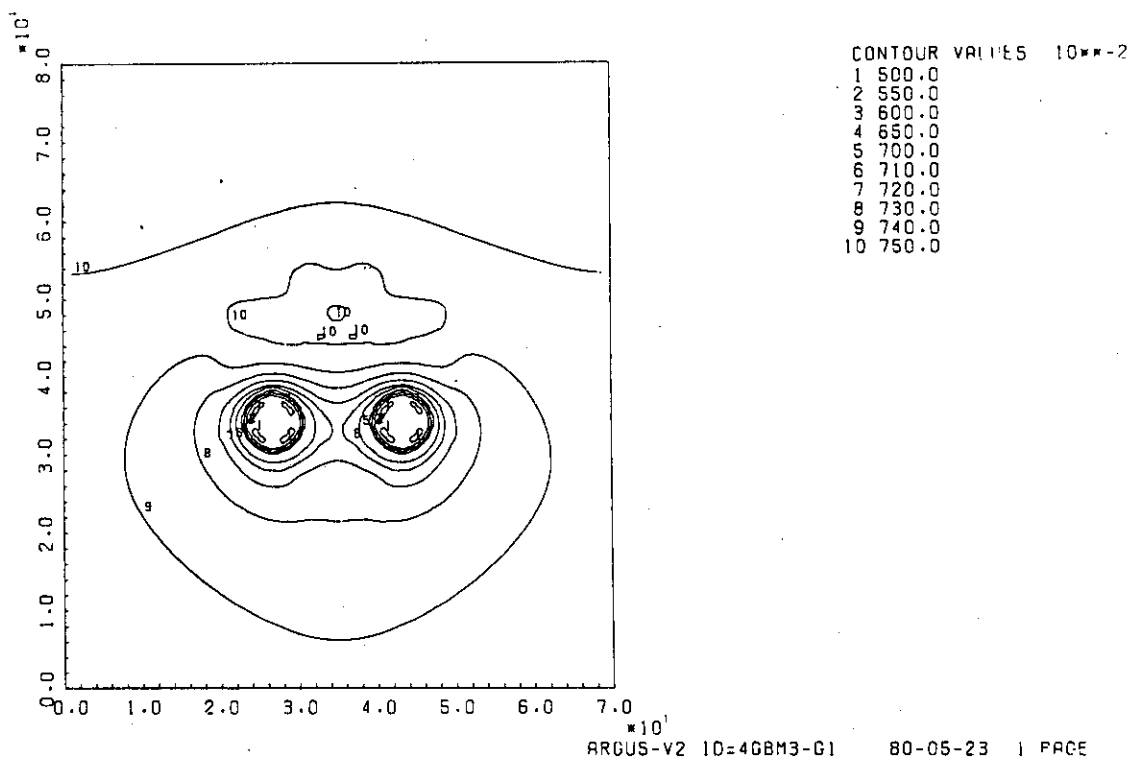


Fig.3.18 BM<sub>3</sub>-CRG<sub>1</sub>モデルの第4群中性子束分布

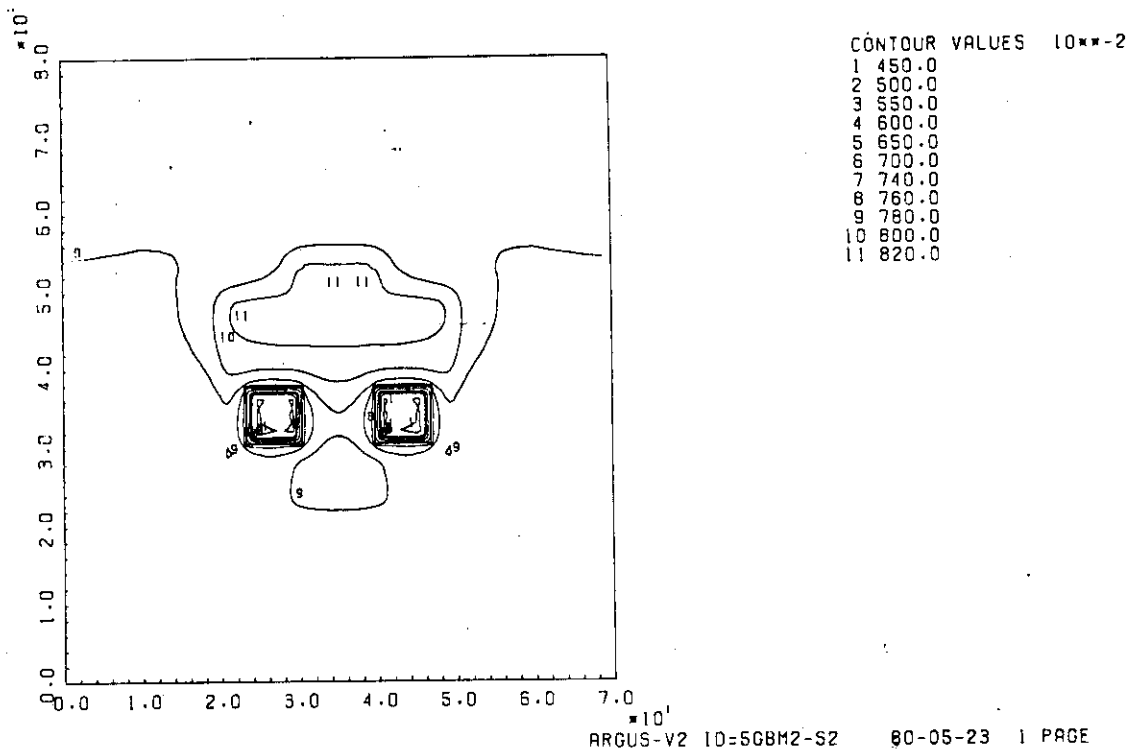


Fig.3.19  $BM_2 - CRS_2$  モデルの第 5 群中性子束分布

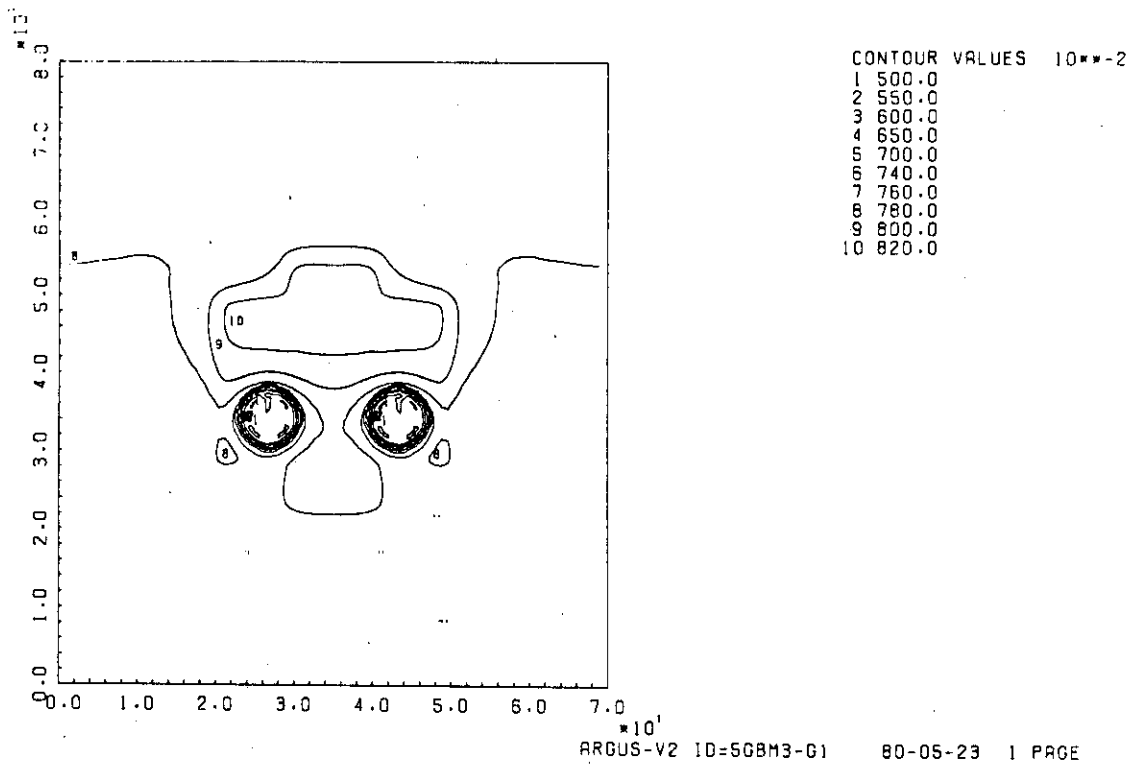


Fig.3.20  $BM_3 - CRG_1$  モデルの第 5 群中性子束分布



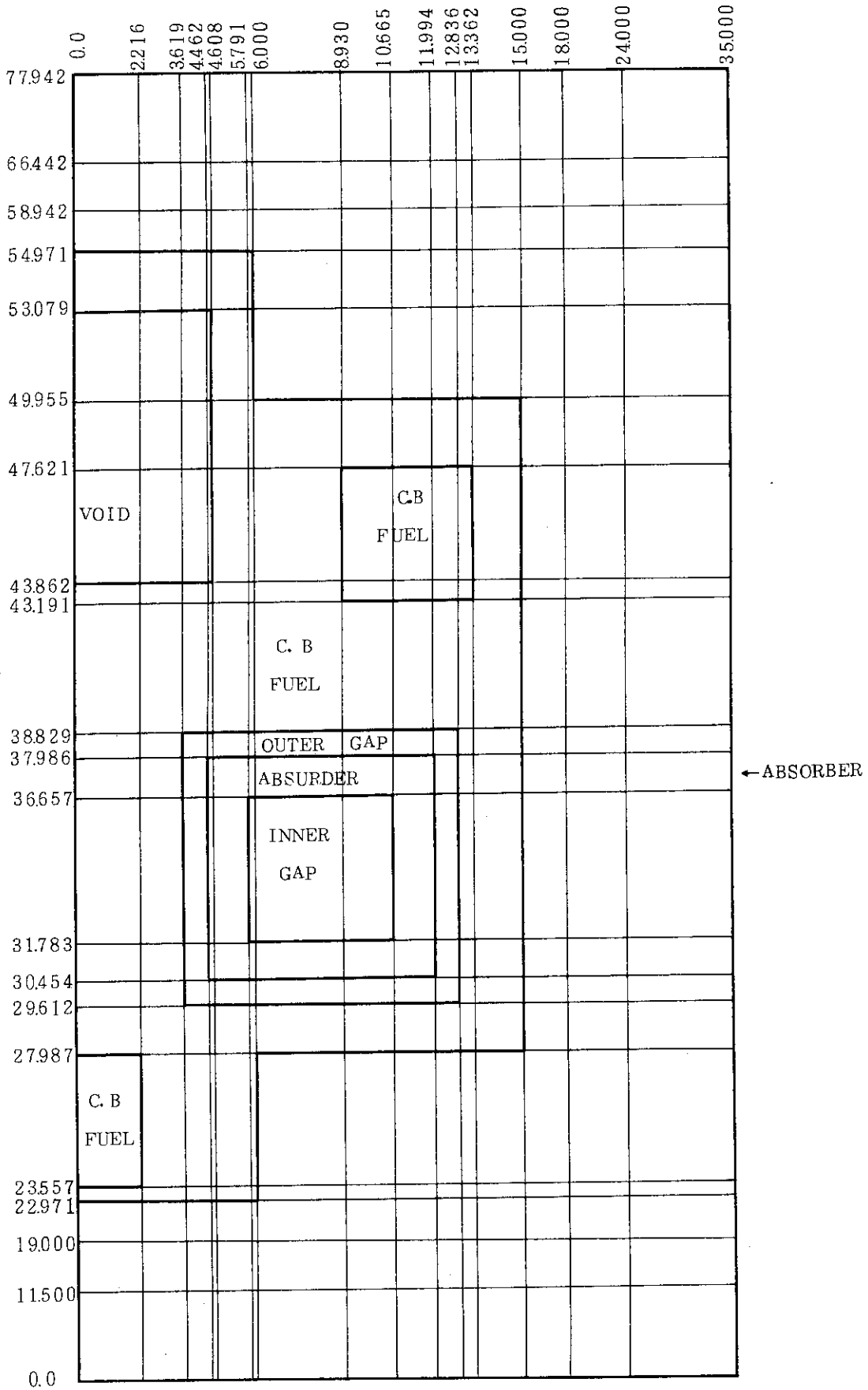


Fig. 3.21 BM<sub>1</sub>-CRS<sub>2</sub> モデルTWOTRAN-2用メッシュ分割

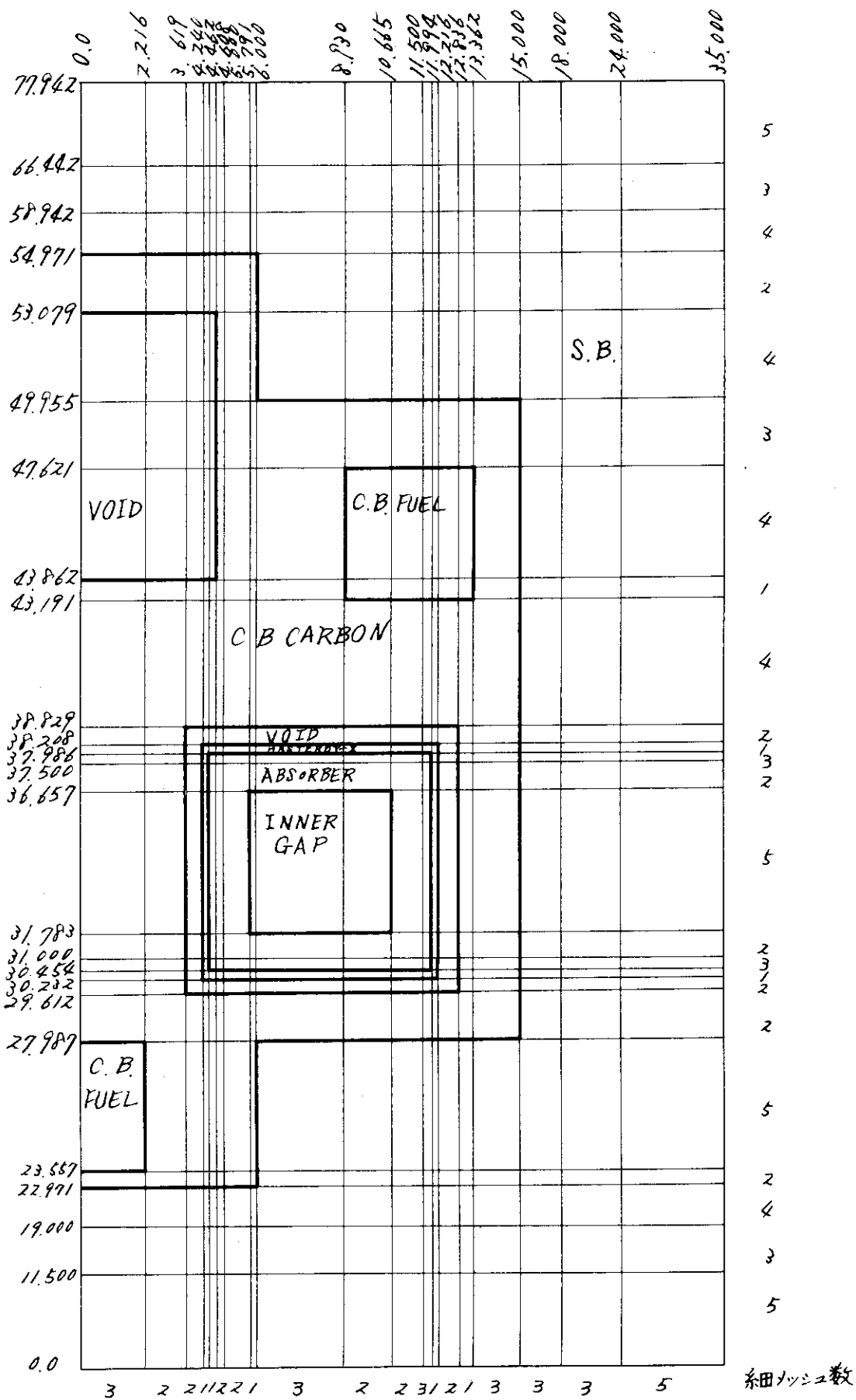


Fig. 3.22 BM2-CRS3モデルTWOTRAN-2用メッシュ分割

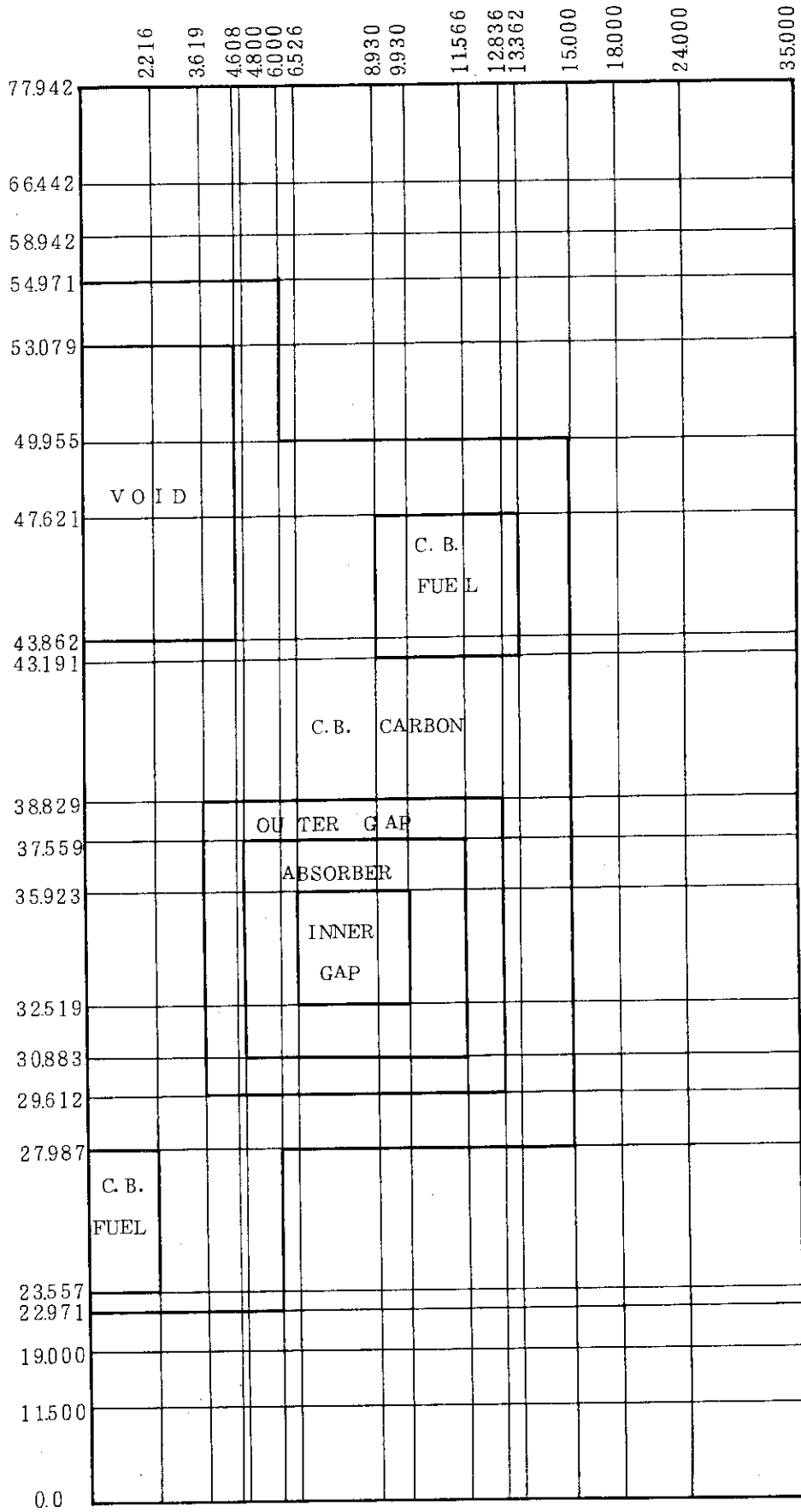


Fig. 3.23 BM<sub>2</sub>-CRS<sub>4</sub> モデル TWOTRAN-2 用メッシュ分割

## 4. 制御棒間距離と干渉効果

### 4.1 後備停止系が入らない場合

炉心に挿入された対制御棒の干渉効果は、当然のことながら、両制御棒間の距離に最も大きく依存すると考えられる。また後備停止系が作動してボロンボールが投入された場合には結果的に3本の制御棒が挿入されたのと同様となり、この場合にも干渉効果を検討する必要がある。本節においては後備停止系が入らない通常の運転状態で2本の制御棒のみが挿入された場合の干渉効果を検討し、次節において後備停止系も作動した場合の検討を行なう。

検討に用いる制御棒モデルとしては、TWOTRAN-2を用いて計算すること、および干渉効果をできるだけ忠実に再現するために円形に近い断面を持つことが望ましいことから、CRG<sub>1</sub>を選んだ。ブロックモデルとしては制御棒の中心間距離を変えてFig. 1.7に示した3種のモデル、BM<sub>3</sub>-GGS, BM<sub>3</sub>-GGM, BM<sub>3</sub>-GGLを設定した。各モデルにおいて制御棒中心間距離はそれぞれ、10.4cm, 16.456cm, 19.6cmとなっている。BM<sub>3</sub>-GGMモデルは後備停止系孔の形状を除けば、BM<sub>3</sub>モデルと同じである。BM<sub>3</sub>-GGSモデルはできるだけ3個の孔を中心側に近づけた場合、BM<sub>3</sub>-GGLモデルはできるだけ離れた場合である。Fig. 4.1, Fig. 4.2, Fig. 4.3にはそれぞれのブロックモデルに対し制御棒モデルCRG<sub>1</sub>を併用した体系のメッシュ分割を示す。これらの体系に対して計算された実効増倍率は以下の通りである。但しBM<sub>3</sub>-GGM-CRG<sub>1</sub>体系は実際には計算せず、BM<sub>3</sub>-CRG<sub>1</sub>体系に対する値を用いた。

$$\text{BM}_3\text{-GGS-CRG}_1 \quad : \quad k_{\text{eff}} = 0.895$$

$$\text{BM}_3\text{(-GGM)-CRG}_1 \quad : \quad k_{\text{eff}} = 0.873$$

$$\text{BM}_3\text{-GGL-CRG}_1 \quad : \quad k_{\text{eff}} = 0.861$$

制御棒価値 ( $\Delta k$ ) を求めると、上記3ケースに対し、各々、0.430, 0.452, 0.464 となり、制御棒間隔が近くなるにつれ、負の干渉効果が強くなることがわかる。通常、黒鉛の熱中性子拡散距離は50cm以上ある。それ故最も制御棒中心間距離の大きい場合でも高々20cm程度である Mk-III炉心のスーパーセルにおいては、吸収領域の重なりあいのため、制御棒の効果は互いに弱めあうことになる。Fig. 4.4 および Fig. 4.5 には各々 BM<sub>3</sub>-GGS-CRG<sub>1</sub> および、BM<sub>3</sub>-GGL-CRG<sub>1</sub> 体系において計算された第6群中性子束分布を示す。Fig. 3.6の BM<sub>3</sub>-CRG<sub>1</sub> 体系に対する図と合わせて比較すれば、制御棒間隔が大きくなるにしたがって干渉は小さくなるが中心間距離19.6cm (BM<sub>3</sub>-GGL) 程度では、まだ干渉がなくならないこと、および、間隔がせばまれば干渉が大きくなり、周囲の分布が同心円形になり、一本の制御棒のようになっていく様子がうかがえる。

さて、干渉効果の大きさを定量的に知るためには、干渉のない場合の実効増倍率を計算する必要がある。そこで制御棒1本の反応度価値を知るために、スーパーセルの中心にCRG<sub>1</sub>モデルを併用した体系および2個の制御棒挿入孔のうち1本にCRG<sub>1</sub>モデルを併用した体系に対して実効増倍率を計算した。体系のメッシュ分割図をそれぞれFig. 4.6, Fig. 4.7に示す。得られた実効

増倍率はそれぞれ、1.009, 1.022であり、また反応度値は0.316 $\Delta$ k, 0.303 $\Delta$ kであった。中心に挿入された制御棒の反応度値は、実際の挿入孔の制御棒値よりも約4.3%大きくなっている。

さて、最初は制御棒1本の反応度値を一律に0.303 $\Delta$ kとし、干渉効果がない場合の対制御棒値は0.606 $\Delta$ kであるとして、干渉効果による制御棒値減少の割合を算出すると次の様になる。

$$BM_3 - GGS - CRG_1 : 29.0\%$$

$$BM_3 - (GGM) - CRG_1 : 25.4\%$$

$$BM_3 - GGL - CRG_1 : 23.4\%$$

実際には制御棒1本の値は中心に近づくほど大きくなる。もし反応度値が中心からの距離に比例して減少すると仮定するとBM<sub>3</sub>-GGSの体系に1本挿入された制御棒値は0.307 $\Delta$ k, BM<sub>3</sub>-GGLに対しては、0.301 $\Delta$ kとなるので、これらの値を仮定すると、干渉効果による制御棒値減少の割合は次の様になる。

$$BM_3 - GGS - CRG_1 : 30.0\%$$

$$BM_3 - GGL - CRG_1 : 22.9\%$$

なお参考のために、中心に制御棒を置いた1次元計算で得られる値の計算も行った。Fig. 2.2に示す体系に対してTWOTRAN-2を用い、RS<sub>6</sub>計算で得られた実効増倍率は0.783であった。またFig.2.2の図の制御型燃料体の外型を15.751cm, 標準型燃料体の外径を41.6735cmにした体系に対しては1.095が得られた。これらは体積比のみに注目すれば、スーパーセルに対し、それぞれ制御棒1本, 2本挿入に対応する。絶対値も、干渉効果(15.1%)も2次元モデルを用いた計算と大巾に異なり、このスペクトルを用いて作成した均質化断面の精度も良いものではないと思われる。

#### 4.2 後備停止系が入った場合

Mk-III 炉心で後備停止系が作動した場合には、ボロン濃度30 w/o で外径10mmの球形をしたB4Cと黒鉛粉末混合焼結体が後備停止系孔に落下する。ボロンボールの充填率は正確にはわからないが、本検討においては、60%を仮定し、巨視断面積としては制御棒吸収体のそれを一律に0.6倍したものをを用いた。臨界計算は前節同様、各体系に対し、Fig.4.1, Fig. 4.2, Fig. 4.3に示したメッシュ分割で、TWOTRAN-2を用いて行なった。得られた実効増倍率および2本の制御棒も含めた全反応度値は次の通りである。

ブロックモデル	後備停止系	制御棒	実効増倍率	全値(Δk)
BM <sub>3</sub> -GGS	ON	IN	0.837	0.488
BM <sub>3</sub> -GGM	ON	OUT	0.984	0.341
	ON	IN	0.769	0.556
BM <sub>3</sub> -GGL	ON	IN	0.373	0.588

後備停止系のみが作動した場合についてはBM<sub>3</sub>-GGMブロックモデルに対してのみ行なったが他のブロックモデルに対しても大きくは変わらないであろう。

さて、干渉効果のない場合の反応度値は、後備停止系（以後RSSと略記する）の値を  $0.341\Delta k$ 、1本の制御棒の値を  $0.303\Delta k$ として各ケースに対し  $0.947\Delta k$ であるので干渉効果による反応度値減少は次に示すように大きなものとなる。

$$BM_3 - GGS - (CRG_1 + RSS) : 48.5\%$$

$$BM_3 - GGM - (CRG_1 + RSS) : 41.3\%$$

$$BM_3 - GGL - (CRG_1 + RSS) : 37.9\%$$

また前節で検討したように、制御棒モデル  $CRG_1$  の2本分の、干渉効果による減少分も含めた反応度値は  $BM_3 - GGS$ 、 $BM_3 - GGM$ 、 $BM_3 - GGL$  各ブロックモデルに対してそれぞれ、 $0.430\Delta k$ 、 $0.452\Delta k$ 、 $0.464\Delta k$ である。したがって制御棒2本とRSSの干渉という観点からみれば、干渉効果による反応度値減少は以下の通りである。

$$BM_3 - GGS - (CRG_1 + RSS) : 36.7\%$$

$$BM_3 - GGM - (CRG_1 + RSS) : 29.9\%$$

$$BM_3 - GGL - (CRG_1 + RSS) : 27.0\%$$

Fig. 4.8 ~ Fig. 4.11には、後備停止系が入った場合の各ケースに対する第6群中性子束分布を示す。制御棒の挿入されていない  $BM_3 - GGM - RSS$  モデル (Fig. 4.8) では、制御型燃料体の形状を反映して、同心円状の分布はRSSのごく近傍に限られているが  $BM_3 - GGS - (CRG_1 + RSS)$  モデル (Fig. 4.9) においては2本の制御棒と後備停止系の干渉効果のため1体化し、制御型燃料体自体が1本の制御棒のように動き、その外側ではきれいな同心円状の中性子束分布が得られている。 $BM_3 - GGM - (CRG_1 + RSS)$  (Fig. 4.10)、 $BM_3 - GGL - (CRG_1 + RSS)$  (Fig. 4.11) と孔の中心間距離が大きくなるにつれ中性子束分布が同心円状からずれていく様子がわかるであろう。

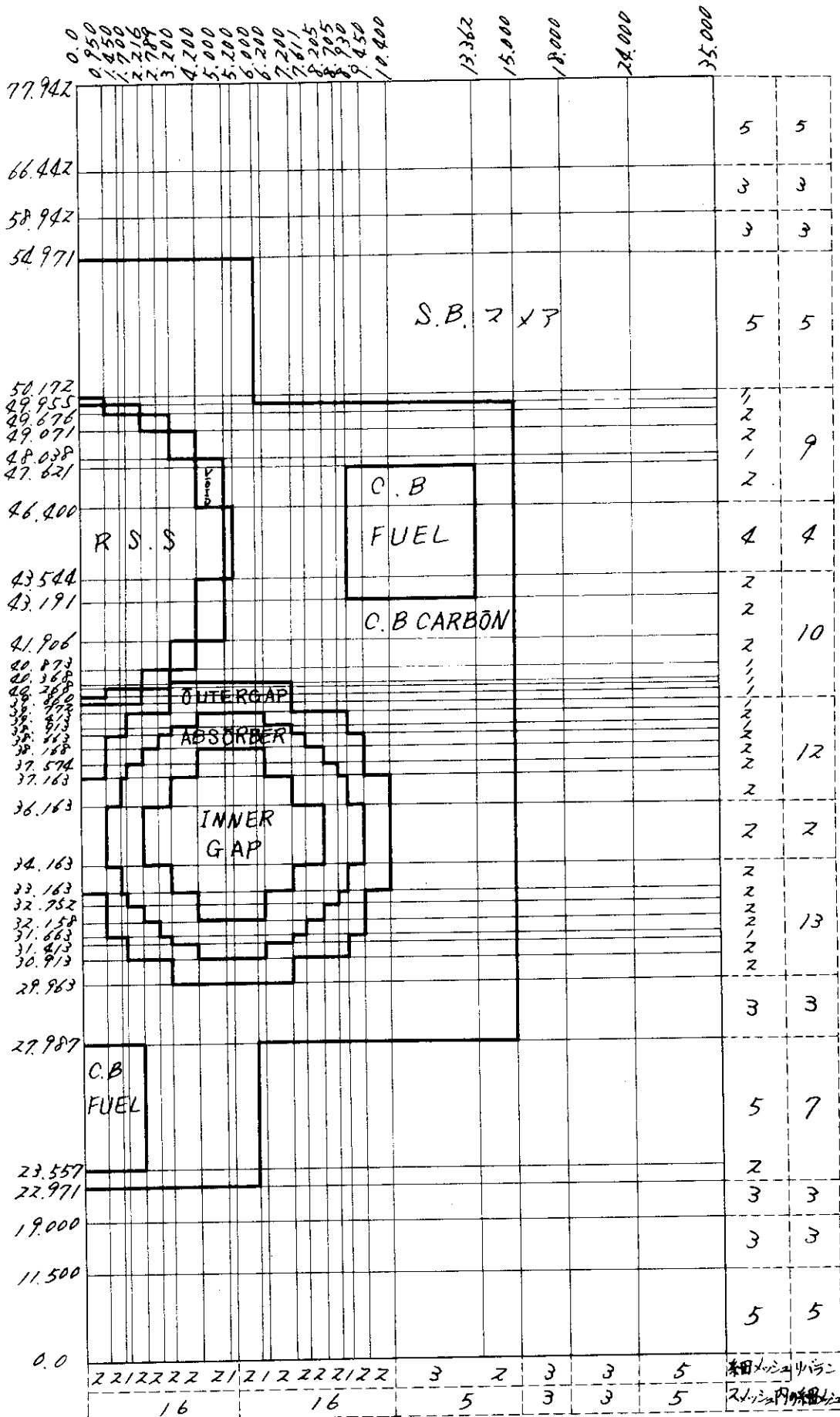


Fig. 4.1 BM<sub>3</sub>-GGS - CRG<sub>1</sub>モデルTWOTRAN-2用メッシュ分割

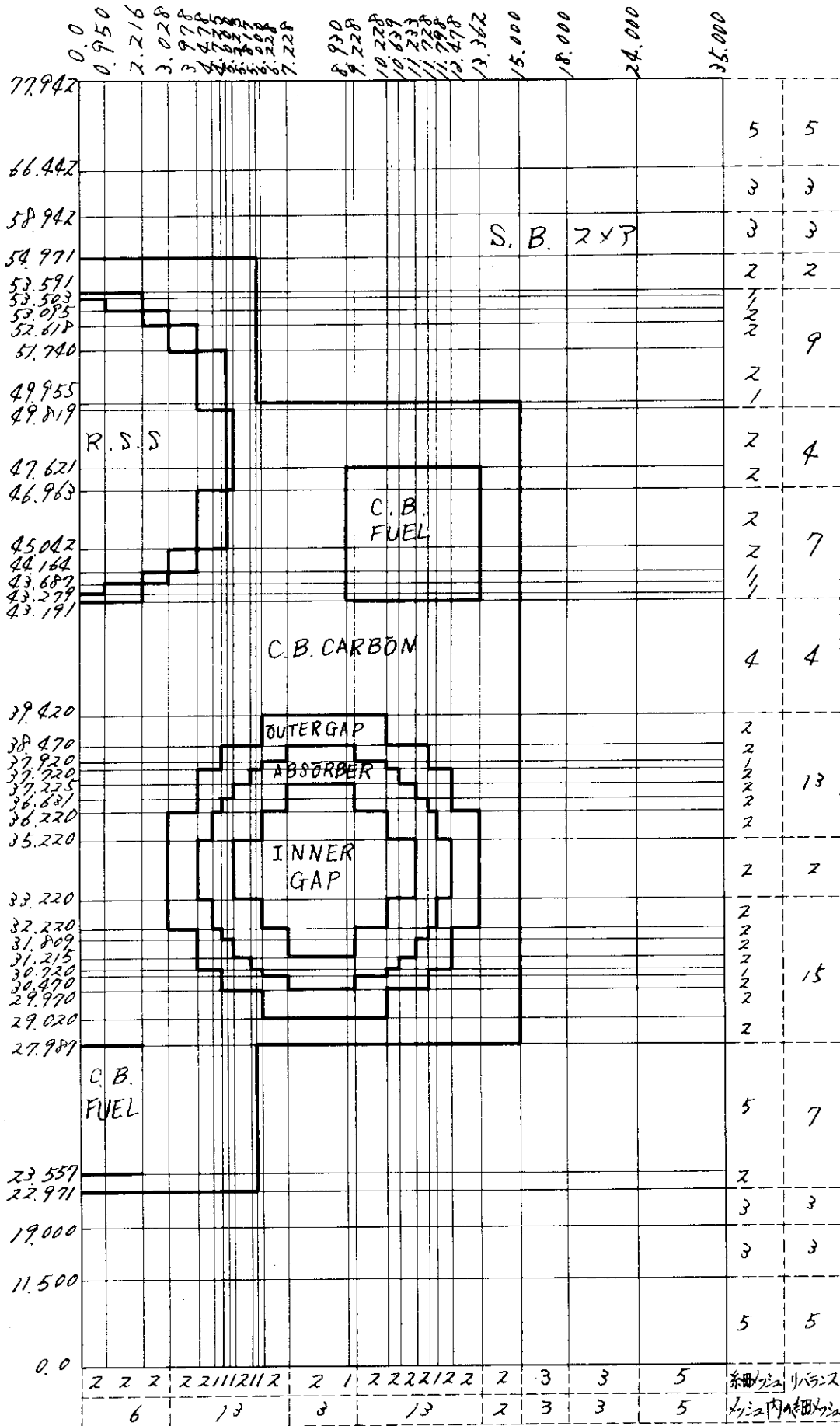


Fig.4.2 BM3-GGM-CRG1モデルTWOTRAN-2用メッシュ分割



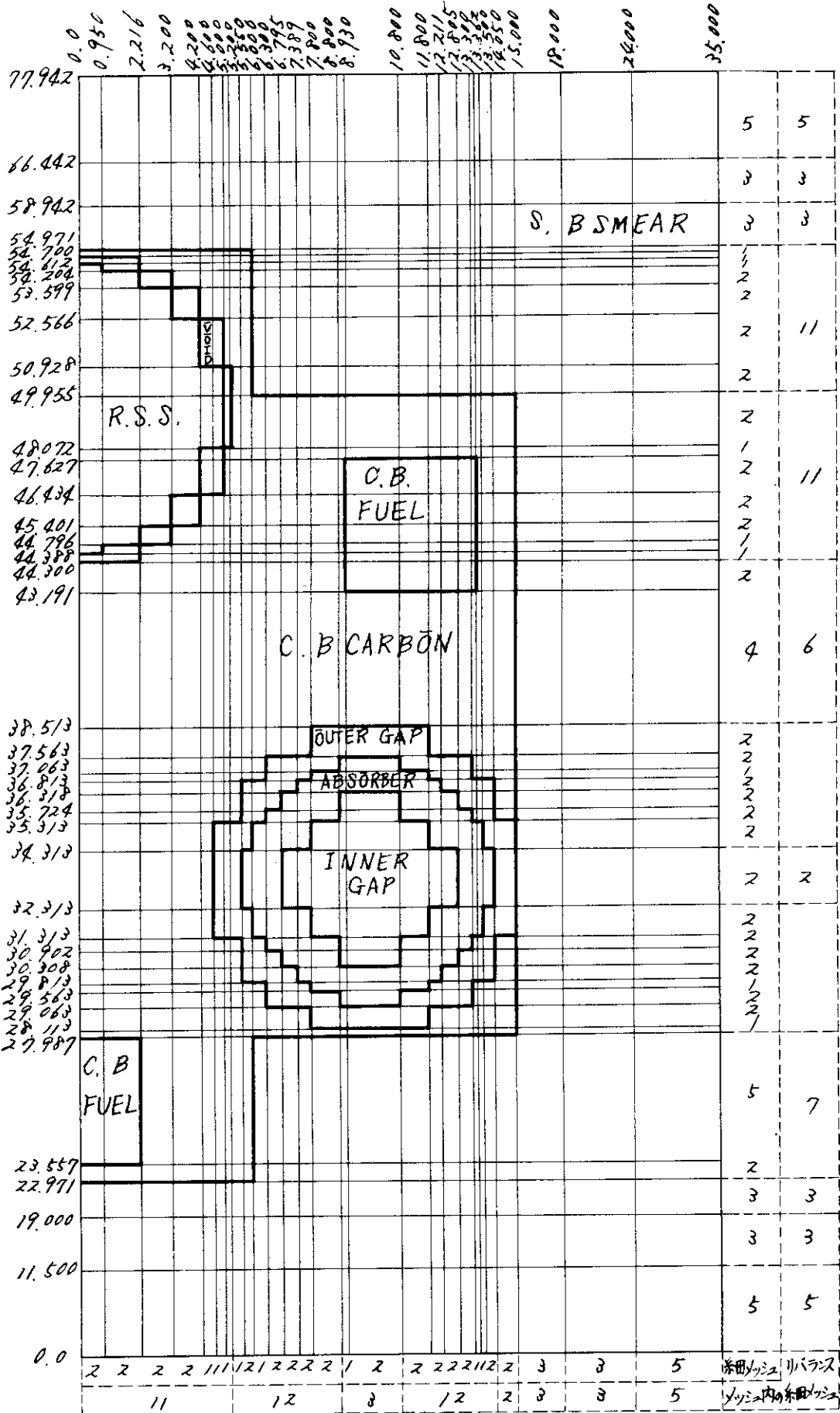


Fig. 4.3 BM3-GGL-CRG1モデルTWOTRAN-2用メッシュ分割

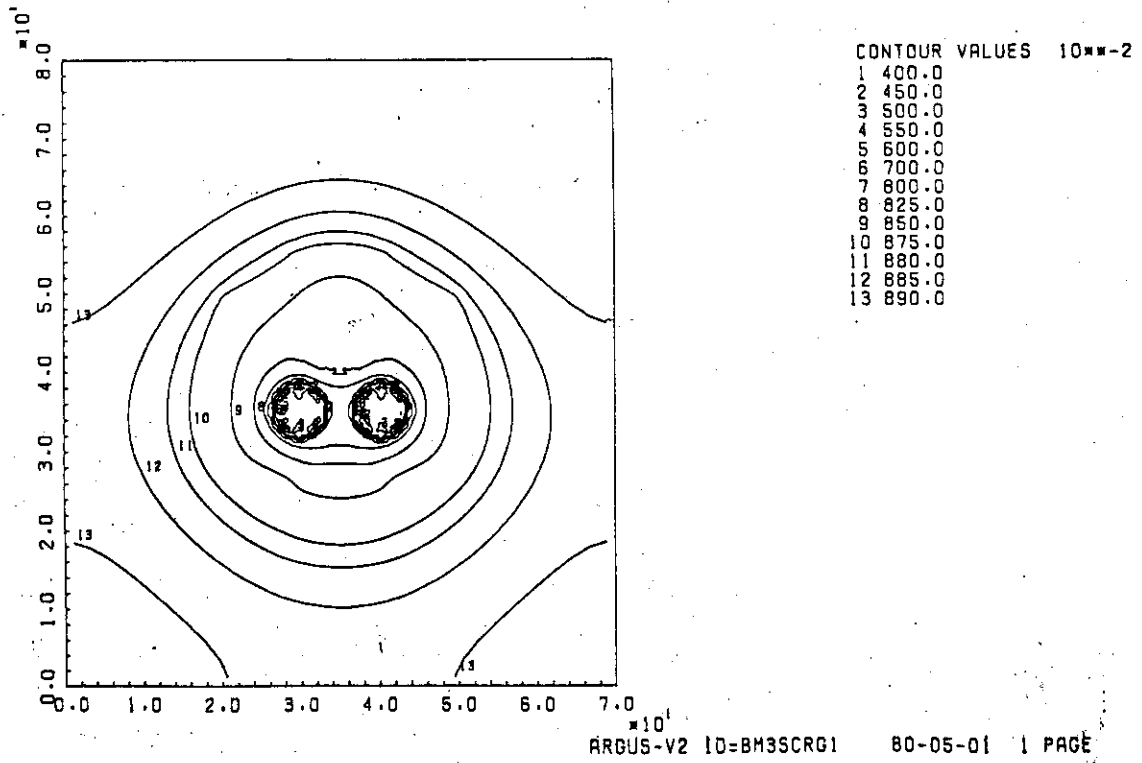


Fig. 4.4 BM<sub>3</sub>-GGS-CRG<sub>1</sub>モデルの第6群中性子束分布

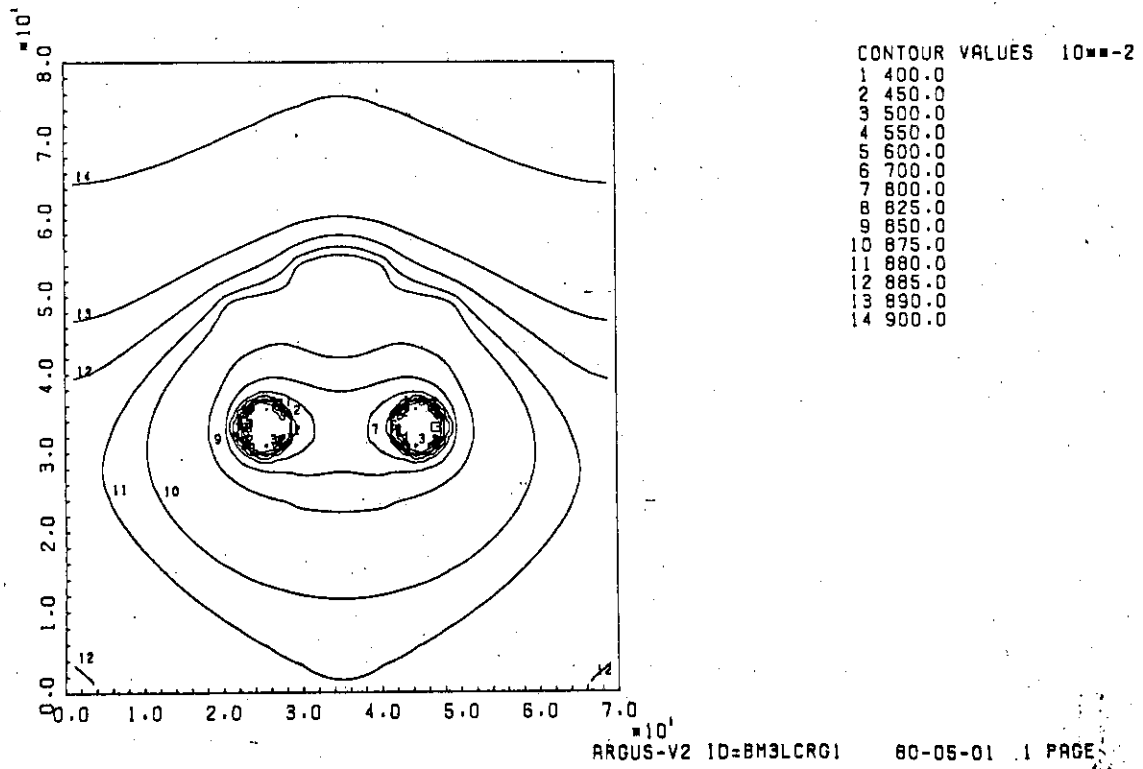


Fig. 4.5 BM<sub>3</sub>-GGL-CRG<sub>1</sub>モデルの第6群中性子束分布

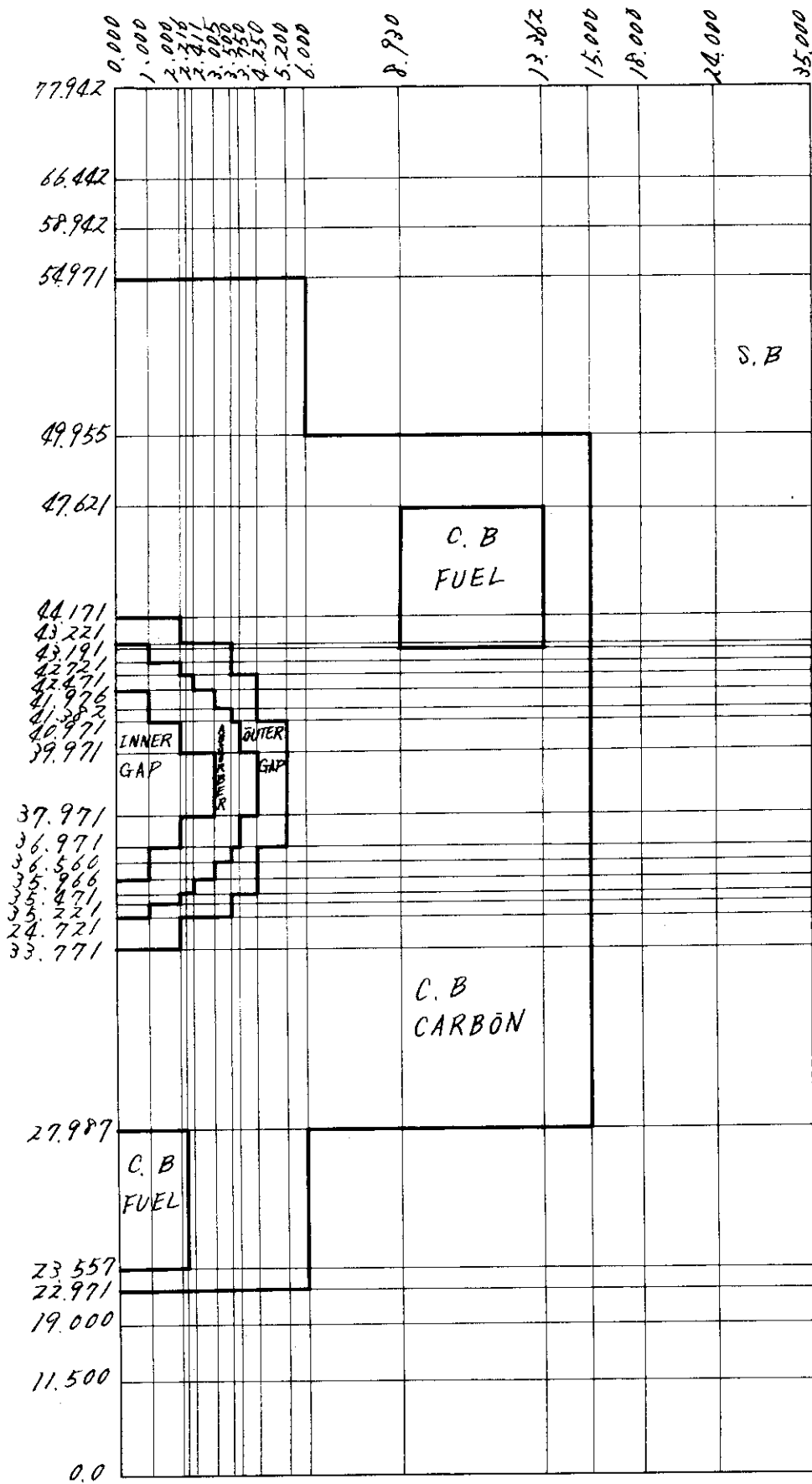


Fig. 4.6 スーパーセル中央にCRG<sub>1</sub>モデルを併用したモデルの TWOTRAN-2用メッシュ分割

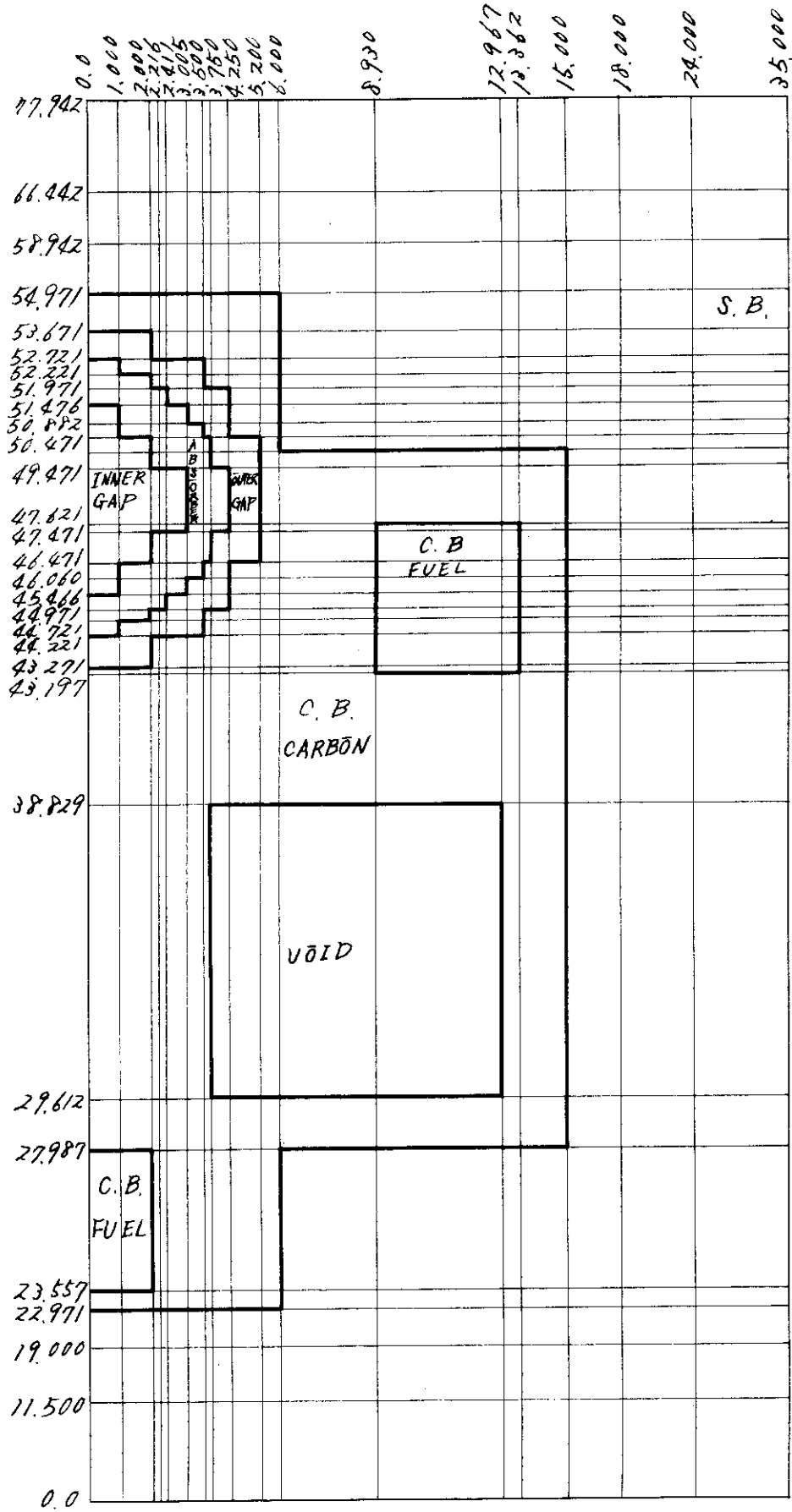


Fig. 4.7 1個 of 制御棒挿入孔にのみCRG<sub>1</sub>モデルを併用したモデルのTWOTRAN-2用メッシュ分割

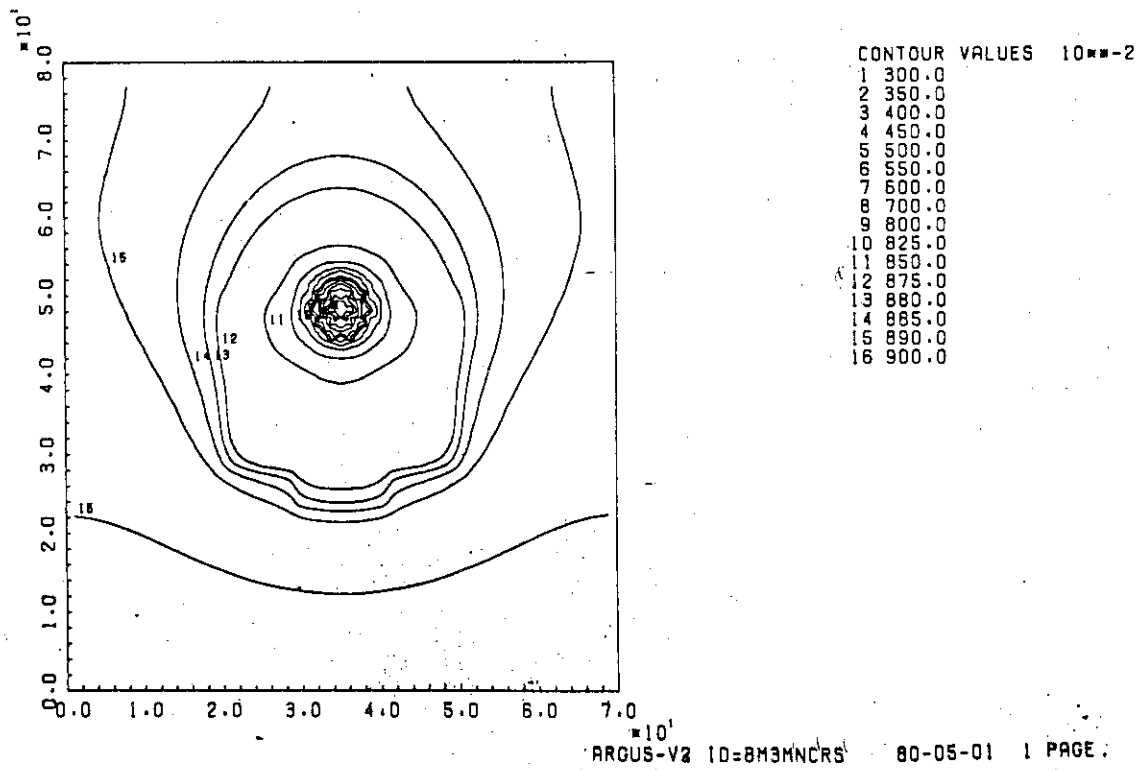


Fig. 4.8 BM<sub>3</sub>-GGM-RSSモデルの第6群中性子束分布

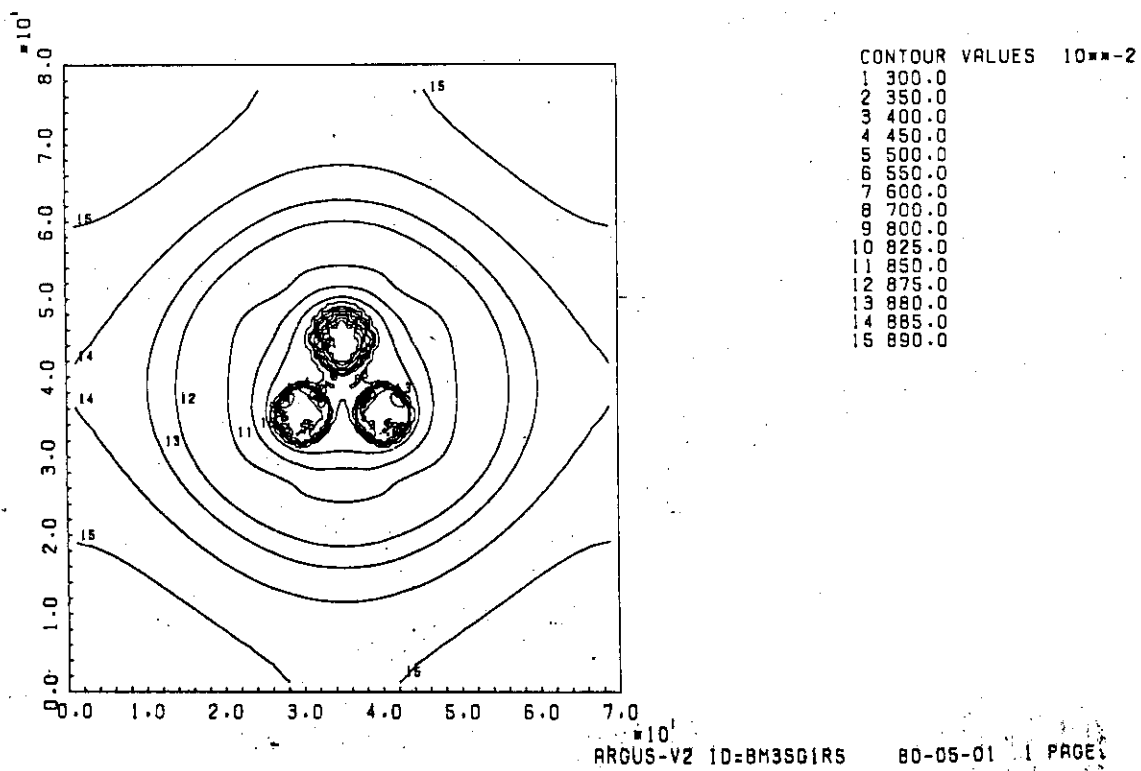


Fig. 4.9 BM<sub>3</sub>-GGS-(CRG<sub>1</sub>+RSS)モデルの第6群中性子束分布

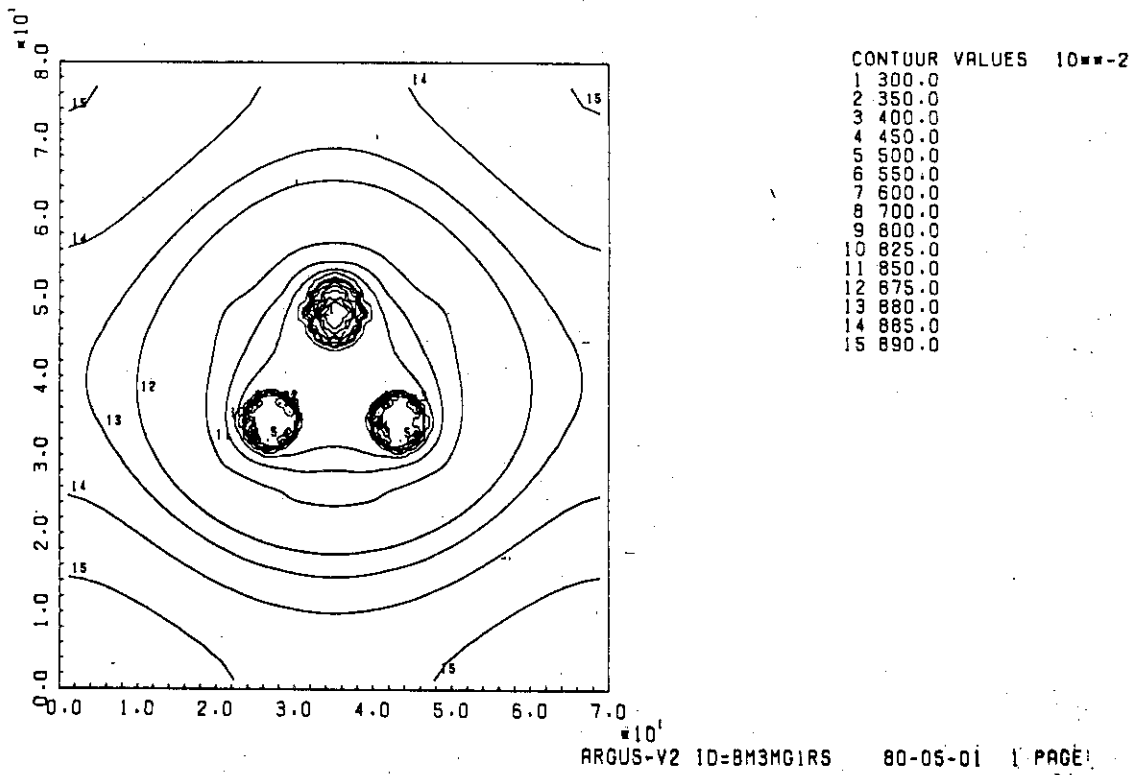


Fig.4.10 BM<sub>3</sub>-GGM-(CRG<sub>1</sub>+RSS)モデルの第6群中性子束分布

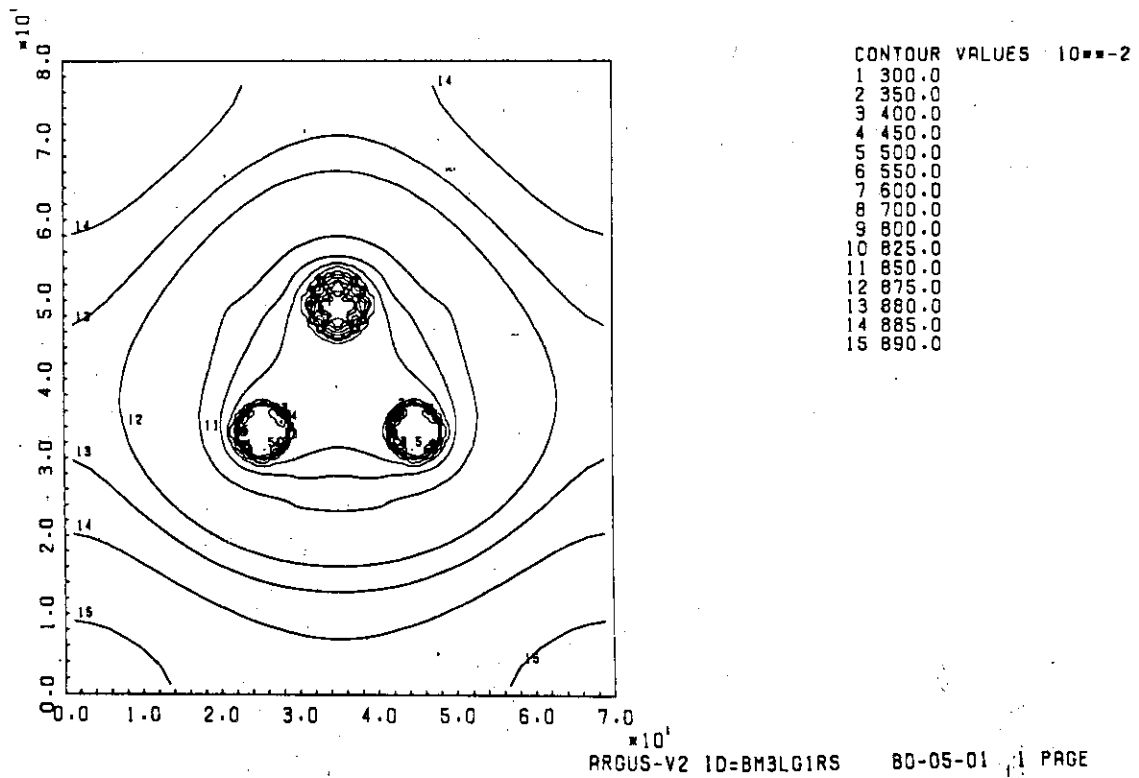


Fig.4.11 BM<sub>3</sub>-GGL-(CRG<sub>1</sub>+RSS)モデルの第6群中性子束分布

## 5. 遮蔽因子および均質化定数

### 5.1 形状のモデル化と遮蔽因子

TWOTRAN-2 を用いて臨界計算を実施したケースについては、各メッシュの中心における群ごとの中性子束が計算される。したがってこれらの中性子束を編集することにより、空間遮蔽因子を計算することは容易である。Table 5.1 ~ Table 5.3 にはそれぞれ、制御棒挿入孔内全域、制御棒吸収体および後備停止系吸収体の制御型燃料体に対する空間遮蔽係数 (S. f.) を各モデル別に示す。第  $g$  群に対する遮蔽係数  $S. f.(g)$  の定義は、該当する物質 (もしくは部分) の平均中性子束  $\bar{\phi}_g$  の、制御型燃料体全体の平均中性子束  $\bar{\phi}_g^{CB}$  の比として与えられる。

$$S. f.(g) = \bar{\phi}_g / \bar{\phi}_g^{CB} \quad (5.1)$$

Table 5.1 に与えた制御棒挿入孔内全域に対する値をみると次の特徴がある。

- ①  $BM_1 - CRS_1$  と  $BM_1 - CRS_2$  両モデルを比較すると第 1 群以外は前者の方がかなり大きい。これは第 1 群の中性子吸収量が大きなものではなく、したがって均質化した灰色制御棒でもその吸収割合を正確に再現できるが、第 2 群以降においては、 $CRS_1$  モデルは  $CRS_2$  モデルに比較し、制御棒孔内全体の中性子吸収量を少なく評価していることを示している。ところが実効増倍率をみると  $BM_1 - CRS_1$  の方が低く、これは孔の周囲の中性子束を低下させる働きが  $CRS_2$  に比較して大きいためと考えられる。このことは、Fig. 3.7 の  $BM_1 - CRS_1$  モデルと Fig. 3.8 の  $BM_1 - CRS_2$  モデルの第 6 群中性子束分布を示す図で値が 8.0 に対応する等高線の位置を比較することによってある程度確認できる。
- ②  $BM_1 - CRS_2$  と  $BM_2 - CRS_2$  の各群の値はほぼ一致し、したがってブロックモデル  $BM_1$  と  $BM_2$  の形状の違いが中性子スペクトルに影響を及ぼすことはない。
- ③  $BM_2 - CRS_3$  においては、 $BM_2 - CRS_2$  に比較し全体的に大きな値となっている。これは、 $CRS_3$  モデルにおいて、制御棒外側部分をボイドとしているため、この部分の中性子束が高いためである。
- ④  $BM_2 - CRS_4$  は  $BM_2 - CRS_2$  に比べ第 1.2 群を除いて大きな値をとるのは、外側ギャップが大きいためである。
- ⑤  $BM_3 - CRG_2$  は  $BM_3 - CRG_1$  に比較して値が小さい。これは  $CRG_2$  の方が吸収体の外形が大きいからである。 $CRG_1$  モデルについては、その中心間距離によって値が変わる。干渉効果の大きな  $BM_3 - GGS$  ブロックモデルと併用した場合には第 6 群中性子束の S. f. は小さく、中心間距離が大きくなるにつれて、S. f. は大きくなる。第 5 群の S. f. については第 6 群と逆の傾向を示すが、これは、第 5 群中性子束分布が第 6 群中性子束分布のように、制御棒の位置だけに大きく依存するのではなく、燃料部分や RSS 孔との干渉もあるかなり複雑な形状になるからであろう。第 5 群中性子束分布については Fig. 3.20 に示されているが、制御棒、燃料および RSS 孔の間に干渉のあることがわかる。
- ⑥ 制御棒の中心間距離が小さい場合には、後備停止系が入っても、S. f. 値の大きな変化はない

が、中心間距離が大きい場合には、大巾に増加する。これは制御棒2本とRSSが挿入された場合には、制御型燃料体の中性子束全体が大巾に低下することにより相対的に制御棒孔内のS. f. 値が増大する効果が、各吸収体間の距離が長いほど顕著であるためである。

Table 5.2には制御棒吸収体のみのS. f.値を与える。Table 5.1の値に比較すると、当然ではあるが、第1群を除き、かなり小さい。その他の特徴としては次のものがある。

- ①  $BM_1 - CRS_2$ ,  $BM_2 - CRS_2$ ,  $BM_2 - CRS_3$ , および  $BM_3 - CRG_1$  と  $BM_3 - CRG_2$  の平均値 ( $BM_3 - CRG_{1.5}$  に相当する。) の間に差はない。
- ② 上記Table 5.1に対する特徴⑤および⑥はTable 5.2に対してもあてはまる。
- ③  $BM_2 - CRS_4$  は  $BM_2 - CRS_2$  に比較して、第1群を除きやや小さな値をとる。これは吸収体の厚さが大きいためであると考えられる。

Table 5.3には後備停止系吸収体のS. f.を示した。制御棒との距離が大きくなるにつれて、値が増加していく傾向のあることがわかる。

空間遮蔽因子に各モデル、各群について相違があるのは当然であるが、問題とすべきは、その空間遮蔽因子を用いて作成された均質化巨視断面積の差であり、さらにその差が、炉心の実効増倍率におよぼす影響であろう。これについて次節で検討する。

## 5.2 均質化定数と格子モデルでの再臨界計算

本節においては、格子計算によって得られた中性子束を重みとして作成した制御型燃料体の均質化巨視断面積の相互比較、およびこれを用いて、スーパーセル均質化モデルの格子臨界計算を行なって得られた実効増倍率の比較検討について述べる。制御型燃料体の均質化巨視断面積は次の定義に従って計算した。

$$\bar{X}_t^g = \frac{\sum_i^M \phi_i^g V_i X_t^{g(i)}}{\sum_i^M \phi_i^g V_i} \quad (5.2)$$

$$\bar{X}_{g \rightarrow g'} = \frac{\sum_i^M \phi_i^g V_i X_{g \rightarrow g'}(i)}{\sum_i^M \phi_i^g V_i} \quad (5.3)$$

- 但し、 $\bar{X}_t^g$  : 群  $g$ , タイプ  $t$  の均質化巨視断面積  
 $X_t^{g(i)}$  : 群  $g$ , タイプ  $t$ , メッシュ  $i$  の物質の巨視断面積  
 $\bar{X}_{g \rightarrow g'}$  : 群  $g$  から  $g'$  への均質化遷移断面積  
 $X_{g \rightarrow g'}(i)$  : メッシュ  $i$  の物質の遷移断面積  
 $\phi_i^g$  : 群  $g$ , メッシュ  $i$  における中性子束  
 $V_i$  : メッシュ  $i$  の体積  
 $t$  : 断面積のタイプ (吸収, 生成, 核分裂 etc )



M : 制御型燃料体の細メッシュ数

但し、 $X_t^g(i)$ 、 $X_{g \rightarrow g'}(i)$ については、非均質格子計算で用いた $P_1$ 定数からEXT.  $P_0$ 定数を作成し、これを用いた。

Table 5.4 ~ 5.9 に群ごとの均質化巨視断面積のうち、吸収断面積と生成断面積について各ケースの比較を示す。この表には、従来簡易計算用コードとして用いられてきた、JMSLALOM<sup>10)</sup> および DIRK<sup>11)</sup> による計算結果も制御棒挿入体系について示した。<sup>注1)</sup> さらに Fig. 5.1 と Fig. 5.2 にはそれぞれ、基準ケース (BM<sub>3</sub>-CRG<sub>1</sub> と BM<sub>3</sub>-CRG<sub>1</sub> モデルの平均) に対する吸収断面積と生成断面積の相対値を、制御棒挿入モデルに対して示した。これらの図表から次の事がわかる。

#### I. 制御棒挿入モデルについて

- ① TWOTRAN-2 で計算したケースについては、吸収断面積はほぼ基準ケースの±10%以内におさまる。JMSLALOMを用いた場合には、2, 4, 5群で20%以上、またDIRKを用いた場合には、1群以外の群で30%~60%も吸収断面積が大きくなる。
- ② TWOTRAN-2 用モデルのうち、グレイ制御棒挿入モデルであるBM<sub>1</sub>-CRS<sub>1</sub> および等表面積制御棒挿入モデルであるBM<sub>2</sub>-CRS<sub>4</sub> の両ケースを除けば、吸収断面積は基準ケースの±5%程度におさまる。
- ③ TWOTRAN-2 で計算したケースについては、3~6群の吸収断面積の基準ケースからのずれの様子は良くにている。1, 2群では様子がかかなり異なるが、CRS<sub>3</sub>の吸収断面積が小さくなるのは、被覆材の Hastelloy-X をギャップに均質化していないためであり、CRS<sub>4</sub>の値が大きいのは、外側ギャップの体積がCRS<sub>2</sub>, CRG<sub>2</sub>等に比較して大きいためであると考えられる。
- ④ 生成断面積に着目すると、BM<sub>2</sub> および BM<sub>3</sub> ブロックモデルを併用したケースは基準ケースと非常に良く一致するが、BM<sub>1</sub>モデルおよびJMSLALOM, DIRKを用いた計算では、特に熱群でかなり小さくなる。これは、格子計算モデルの段階で制御型燃料体の燃料部分と黒鉛部分を均質化しているためと考えられる。

#### II. 後備停止系のみが入ったモデルについて

- ① 吸収断面積は基準ケースの50%程度になり、制御棒が1本挿入された場合と同程度の効果を持つことがわかる。
- ② 生成断面積が熱群では、約20%基準ケースより小さい。ところがFig. 3.6 と Fig. 4.8 を比較すれば燃料棒の部分の中性子束は基準ケースの方が高いと推測される。したがって制御棒を2本挿入した基準ケースは後備停止系のみが入った場合に比較して、制御型燃料体の空間遮蔽係数が少くとも20%は小さいことになる。

#### III. 制御棒が挿入され、後備停止系も入ったモデルについて

- ① 吸収断面積の大きさは、各挿入孔間の距離  $d$  によって異なってくる。比較的一様に近い中性子束分布を持つ第1群では、 $d = 10.4\text{cm}$ のとき43%、 $16.456\text{cm}$ のとき51%、 $19.6\text{cm}$ のとき61%増程度でいずれも基準ケースの1.5倍程度であるが、エネルギーの低い群になるにつれ増加の程度が大きくなり、 $d = 19.6\text{cm}$ のときの6群では200%増にもなる。
- ② 生成断面積の大きさは第1群ではほとんど変わらず、第2群以下では大きくなるが最大1.5

注1) これらの計算に用いた定数は(5.2)、(5.3)式の $X_t^g(i)$ 、 $X_{g \rightarrow g'}(i)$ と同じものである。

倍程度 ( $d = 19.6$  cm, 第6群)である。また, 第2, 4, 5群においては  $d = 19.6$  cmの場合よりも  $d = 16.456$  cmのときの方が大きくなる。

さて, 以上の様な特徴をもつ各ケースに対する制御型燃料体均質化定数と, 各ケースに共通に使用した標準型燃料体均質化定数を用い, Fig. 1.8に示したモデルについて臨界計算を行なった。計算には再びTWOTRAN-2を用い,  $S_n$  次数は  $S_4$  とした。得られた実効増倍率, 制御棒価値および, 元のケースに対するこれらの値を Table 5.10に比較して示す。この表にはまた, もとのケースの実効増倍率に対して, 均質化定数を用いた場合の実効増倍率の減少の割合および, 制御棒価値の増加の割合も与えた。次のような特徴があることがわかる。

- ① TWOTRAN-2で計算したモデルは, 制御棒中心間距離の大きなケースを除き, 均質化断面積を用いると元のケースに較べ, 実効増倍率は低く, したがって制御棒価値が高くなる傾向がある。JMSLALOMやDIRKを用いた場合はこの逆の傾向, すなわち実効増倍率の高くなる傾向がある。
- ② 制御棒のみ挿入された, 中心間距離 16.456 cmのモデルでは, 実効増倍率の低下は一様に 1.6%~1.7%である。この割合は制御棒中心間距離が小さくなれば大きくなり, 中心間距離が大きくなれば小さくなる。
- ③ 後備停止系のみが入った場合のモデルにおいては均質化定数を用いても, もとのケースの実効増倍率と非常に近い(1%以内の差)値が得られる。
- ④ 制御棒が挿入され, 後備停止系も入ったモデルにおいては, 制御棒間および制御棒, 後備停止系孔間の距離が大きい場合には, 実効増倍率は均質化定数を用いても, もとの非均質計算と1%以内の差しか生じないが距離が小さい場合には, 制御棒のみ挿入のケースよりも大きな差が生じる。

制御型燃料体にあいた3つの  $104^\phi$  の孔(制御棒挿入孔および後備停止系孔)の相互間隔の重要性は以上でも明らかであるが, その間隔  $d$  がもとのモデルおよび均質化定数を用いたケースの実効増倍率や制御棒価値におよぼす影響は, Fig. 5.3およびFig. 5.4に示した  $d$  の関数としての実効増倍率および制御棒価値をみればより明確になろう。これらの図で実線はもとの非均質モデルに対する値を示し, 点線は均質化定数を用いたモデルに対する値である。実効増倍率は制御棒のみ挿入の場合でも, 後備停止系も合わせた場合でも  $d$  が大きくなるにつれ減少する。後者では  $d = 10.4$  cmの場合と  $d = 19.6$  cmの場合の差は 11.5%, 前者でも 3.8%である。一方, 均質化定数を用いた(ブロックスメア)モデルにおいてはこの差はそれぞれ 7.6%,  $-0.1\%$  と大巾に減少する。制御棒価値についてもこれに伴ない, もとの非均質モデルではそれぞれ, 20.5%, 7.9%が, 均質化定数を用いたモデルでは, 11.4%,  $-0.2\%$  と差の大巾な減少を示す。すなわち, 今回検討に用いたTWOTRAN-2用の非均質モデルのように, かなり詳細なモデルで格子計算を行なっても2本以上制御棒を挿入したブロックの均質化定数はその制御棒間隔が特定の値をとる時以外は適切なものとはいえないと思われる。実際, Fig. 5.3, Fig. 5.4においては, 制御棒のみ挿入のケースでは均質化定数を用いて計算した実効増倍率, 制御棒価値の値は,  $d$  によらずほぼ一定であり, したがって均質化定数を用いて正確な値を計算できるのは点線と実線が交わる点の  $d$  の値を制御棒中心間距離とする場合のみである。もちろん, これは均質化定数を用いた再格子計算であり, 炉心計算を行なえば差は縮まる可能性はあるが, もしそうであっても妥当な定数を

用いたことにはならないといえよう。結局妥当な均質化定数を得る為には格子計算を行なって得た均質化定数に適当な係数をかけてもとの格子計算の場合の実効増倍率を再現する様、補正を行うことが必要になる。この係数については、モデルの構成要素のうち、主として制御棒や他の強吸収体相互間の距離に依存する。したがって、今後の問題として、制御棒もしくは強吸収体の本数およびこれらの相互間の距離の関数としてこの係数の表を用意しておくのが望ましい。本検討の対象としたスーパーセルで、制御棒挿入時と、制御棒が挿入されかつ後備停止系も入った時の係数 (Homogenized cross section adjustment factor HOCAF と呼称する。) は次の通りである。

制御棒のみ挿入	: 0.893
制御棒+後備停止系	: 0.766

制御棒挿入時の各モデルで格子計算を行なって作成した均質化定数にHOCAFとして0.893を乗じた新定数を用い、TWOTRAN-2で再格子計算した結果は元の格子計算の結果と非常に良く一致する。この一致の様子はTable 5.11に示すとおりである。

Table 5.12には、燃料濃縮度および温度を変えた時のHOCAFの例を示す。この値は制御棒のみ挿入された場合で、非均質計算の制御棒形状はFig. 3.5に示したものをを用いた。定数はすべてスペクトル計算コードDELIGHT-4<sup>12)</sup>を用いて作成した $P_0$ 定数で、 $S_n$ 次数は $S_4$ である。HOCAFはFig. 1.9で示したメッシュ分割に対し、TWOTRAN-2を用いて濃度サーチを行い、計算した。この表を見るとHOCAFの値は、燃料濃縮度が高いほど、また温度が低いほど大きいが、これらに依存する部分は最大1.5%程度であり、Mk-III炉心の制御棒配置に対しては0.900としてよいことがわかる。この値を用いることで実効増倍率に及ぼす影響は0.2%以下であると推定される。

Table 5.1 制御棒挿入孔内遮蔽因子

項目 ブロック モデル	制御棒モデル	実効増倍率	空間遮蔽因子					
			第1群	第2群	第3群	第4群	第5群	第6群
B M <sub>1</sub>	CRS <sub>1</sub>	0.854	0.8996	0.6436	0.2655	0.2357	0.2105	0.2116
	CRS <sub>2</sub>	0.860	0.9000	0.6294	0.2075	0.1780	0.1588	0.1555
B M <sub>2</sub>	CRS <sub>2</sub>	0.861	0.8900	0.6280	0.2062	0.1774	0.1588	0.1540
	CRS <sub>3</sub>	0.863	0.9812	0.7262	0.3466	0.3011	0.2774	0.3040
	CRS <sub>4</sub>	0.875	0.8918	0.6276	0.2789	0.2563	0.2343	0.2302
	CRG <sub>1</sub>	0.873	0.8961	0.6468	0.2357	0.2066	0.1847	0.1802
B M <sub>3</sub>	CRG <sub>2</sub>	0.861	0.8869	0.6084	0.1934	0.1665	0.1482	0.1441
	CRG <sub>1</sub>	0.895	0.9057	0.6568	0.2183	0.2194	0.2105	0.1703
B M <sub>3</sub> -G G S	CRG <sub>1</sub>	0.837	0.9112	0.6509	0.2100	0.2178	0.2129	0.1642
B M <sub>3</sub> -GGS+RSS	CRG <sub>1</sub>	0.769	0.9734	0.7954	0.3478	0.3163	0.2900	0.2862
B M <sub>3</sub> -GGM+RSS	CRG <sub>1</sub>	0.861	0.9176	0.6331	0.2543	0.2001	0.1607	0.1921
B M <sub>3</sub> -GGL+RSS	CRG <sub>1</sub>	0.737	1.0525	0.8320	0.4366	0.3472	0.2697	0.3755

Table 5.2 制御棒吸収体 (B<sub>4</sub>C+C) 遮蔽因子

項目 ブロック モデル	制御棒モデル	実効増倍率	遮蔽因子					
			第 1 群	第 2 群	第 3 群	第 4 群	第 5 群	第 6 群
B M <sub>1</sub>	CRS <sub>1</sub>	0.854	0.8996	0.6436	0.2655	0.2357	0.2105	0.2116
	CRS <sub>2</sub>	0.860	0.8956	0.5872	0.09513	0.05977	0.04135	0.02889
	CRS <sub>2</sub>	0.861	0.8853	0.5860	0.09455	0.05959	0.04137	0.02863
	CRS <sub>3</sub>	0.863	0.8856	0.5797	0.09259	0.05857	0.04069	0.02808
B M <sub>2</sub>	CRS <sub>4</sub>	0.875	0.8988	0.5583	0.08115	0.05205	0.03633	0.02478
	CRG <sub>1</sub>	0.873	0.8893	0.5956	0.09702	0.06159	0.04275	0.02953
	CRG <sub>2</sub>	0.861	0.8809	0.5666	0.08576	0.05388	0.03738	0.02593
	CRG <sub>1</sub>	0.895	0.8942	0.6017	0.08868	0.06411	0.04798	0.02735
B M <sub>3</sub> -G G S	CRG <sub>1</sub>	0.837	0.90106	0.5971	0.08545	0.06363	0.04843	0.02636
	CRG <sub>1</sub>	0.769	0.9567	0.7260	0.1426	0.09403	0.06648	0.04688
B M <sub>3</sub> -G G L	CRG <sub>1</sub>	0.861	0.8950	0.5741	0.1002	0.05668	0.03529	0.03008
	CRG <sub>1</sub>	0.737	1.02678	0.7507	0.1727	0.09915	0.05939	0.05920
B M <sub>3</sub> -GGL+RSS	CRG <sub>1</sub>	0.737	1.02678	0.7507	0.1727	0.09915	0.05939	0.05920

Table 5.3 R S S 吸収体 (B<sub>4</sub>C+C) 遮蔽因子

項目 ブロック モデル	制御棒モデル	実効増倍率	空間遮蔽因子					
			第 1 群	第 2 群	第 3 群	第 4 群	第 5 群	第 6 群
B M <sub>3</sub> - G G M	なし	0.984	0.8286	0.4860	0.06716	0.04018	0.02762	0.01958
B M <sub>3</sub> - G G S	CRG <sub>1</sub>	0.837	0.8941	0.5669	0.07392	0.05394	0.04149	0.02265
B M <sub>3</sub> - G G M	CRG <sub>1</sub>	0.769	0.9385	0.6473	0.1166	0.07115	0.04862	0.03768
B M <sub>3</sub> - G G L	CRG <sub>1</sub>	0.737	0.9855	0.6682	0.1355	0.07574	0.04705	0.04564

Table 5.4 第1群制御型燃料体均質化巨視断面積

種 類	項 目 ケース名	吸収断面積 ( $\Sigma_a$ )		生成断面積 ( $v\Sigma_f$ )		備 考
		絶 対 値	相 対 値	絶 対 値	相 対 値	
制 御 棒 未 挿 入	B M <sub>1</sub>	1.5737E-5	—	2.5477E-5	—	
	B M <sub>2</sub>	1.4613E-5	—	2.3666E-5	—	
	B M <sub>3</sub>	1.5769E-5	—	2.5526E-5	—	
制 御 棒 挿 入	BM <sub>1</sub> -CRS <sub>1</sub>	3.3529E-4	1.0053	2.5726E-5	0.9331	
	BM <sub>1</sub> -CRS <sub>2</sub>	3.3655E-4	1.0091	2.5735E-5	0.9334	
	BM <sub>2</sub> -CRS <sub>2</sub>	3.3403E-4	1.0015	2.7573E-5	1.0001	
	BM <sub>2</sub> -CRS <sub>3</sub>	2.9848E-4	0.8949	2.7573E-5	1.0001	
	BM <sub>2</sub> -CRS <sub>4</sub>	3.4728E-4	1.0413	2.7628E-5	1.0021	
	BM <sub>3</sub> -CRG <sub>1</sub>	3.2240E-4	0.9667	2.7531E-5	0.9985	
	BM <sub>3</sub> -CRG <sub>2</sub>	3.4463E-4	1.0333	2.7611E-5	1.0015	
	BM <sub>3</sub> GGS-CRG <sub>1</sub>	3.2491E-4	0.9742	2.7413E-5	0.9943	
	BM <sub>3</sub> GGL-CRG <sub>1</sub>	3.2799E-4	0.9834	2.7482E-5	0.9968	
	基 準 ケ ー ス	3.3352E-4	1.0000	2.7571E-5	1.0000	BM <sub>3</sub> -CRG <sub>1</sub> BM <sub>3</sub> -CRG <sub>2</sub> の平均
後 備 停 止 系	BM <sub>3</sub> GGM-RSS	1.5425E-4	0.4625	2.7356E-5	0.9922	
制 御 棒 + 後 備 停 止 系	BM <sub>3</sub> GGS-CRG <sub>1</sub> +RSS	4.7559E-4	1.4260	2.7722E-5	1.0055	
	BM <sub>3</sub> GGM-CRG <sub>1</sub> +RSS	5.0306E-4	1.5083	2.7738E-5	1.0061	
	BM <sub>3</sub> GGL-CRG <sub>1</sub> +RSS	5.3731E-4	1.6110	2.7781E-5	1.0076	
制 御 棒 挿 入	JMSLALOM	3.257 E-4	0.9766	2.674 E-5	0.9699	
	DIRK	3.6938E-4	1.1075	2.7223E-5	0.9874	

Table 5.5 第2群制御型燃料体均質化巨視断面積

項目 種類 ケース名		吸収断面積 ( $\Sigma_a$ )		生成断面積 ( $v\Sigma_f$ )		備考
		絶対値	相対値	絶対値	相対値	
制御棒 未挿入	BM <sub>1</sub>	1.5029E-4	—	4.5446 E-5	—	
	BM <sub>2</sub>	1.3282E-4	—	4.0170 E-5	—	
	BM <sub>3</sub>	1.3861E-4	—	4.1867 E-5	—	
制御棒 挿入	BM <sub>1</sub> -CRS <sub>1</sub>	6.8928E-3	1.0137	4.8352 E-5	0.9400	
	BM <sub>1</sub> -CRS <sub>2</sub>	6.9118E-3	1.0165	4.8553 E-5	0.9439	
	BM <sub>2</sub> -CRS <sub>2</sub>	6.9078E-3	1.0159	5.1509 E-5	1.0014	
	BM <sub>2</sub> -CRS <sub>3</sub>	6.6848E-3	0.9831	5.1388 E-5	0.9990	
	BM <sub>2</sub> -CRS <sub>4</sub>	6.6753E-3	0.9817	5.1416 E-5	0.9996	
	BM <sub>3</sub> -CRG <sub>1</sub>	6.4197E-3	0.9441	5.1021 E-5	0.9919	
	BM <sub>3</sub> -CRG <sub>2</sub>	7.1800E-3	1.0559	5.1852 E-5	1.0081	
	BM <sub>3</sub> GGS-CRG <sub>1</sub>	6.4917E-3	0.9547	5.1825 E-5	1.0075	
	BM <sub>3</sub> GGL-CRG <sub>1</sub>	6.1735E-3	0.9079	5.0208 E-5	0.9761	
	基準ケース	6.7999E-3	1.000	5.1437 E-5	1.0000	BM <sub>3</sub> -CRG <sub>1</sub> BM <sub>3</sub> -CRG <sub>2</sub> の平均
後備停止系	BM <sub>3</sub> GGM-RSS	3.7166E-3	0.5466	4.7395 E-5	0.9214	
制御棒 + 後備停止系	BM <sub>3</sub> GGS-CRG <sub>1</sub> +RSS	1.0612E-2	1.5606	5.6910 E-5	1.1064	
	BM <sub>3</sub> GGM-CRG <sub>1</sub> +RSS	1.2561E-2	1.8472	5.7802 E-5	1.1237	
	BM <sub>3</sub> GGL-CRG <sub>1</sub> +RSS	1.2988E-2	1.9100	5.7330 E-5	1.1146	
制御棒 挿入	JMSLALOM	8.539 E-3	1.2558	4.843 E-5	0.9415	
	DIRK	8.7858E-3	1.2920	5.0209 E-5	0.9761	



Table 5.6 第3群制御型燃料体均質化巨視断面積

種類	項目 ケース名	吸収断面積 ( $\Sigma a$ )		生成断面積 ( $v\Sigma f$ )		備考
		絶対値	相対値	絶対値	相対値	
制御棒 未挿入	B M <sub>1</sub>	4.5001E-4	—	9.9138 E-5	—	
	B M <sub>2</sub>	3.7696E-4	—	8.3076 E-5	—	
	B M <sub>3</sub>	4.0443E-4	—	8.8440E-5	—	
制御棒 挿入	BM <sub>1</sub> -CRS <sub>1</sub>	1.5762E-2	1.0861	1.1338 E-4	0.8872	
	BM <sub>1</sub> -CRS <sub>2</sub>	1.5160E-2	1.0446	1.1519 E-4	0.9013	
	BM <sub>2</sub> -CRS <sub>2</sub>	1.5129E-2	1.0424	1.2872 E-4	1.0072	
	BM <sub>2</sub> -CRS <sub>3</sub>	1.4788E-2	1.0189	1.2784 E-4	1.0003	
	BM <sub>2</sub> -CRS <sub>4</sub>	1.3423E-2	0.9249	1.2540 E-4	0.9812	
	BM <sub>3</sub> -CRG <sub>1</sub>	1.4150E-2	0.9750	1.2693 E-4	0.9932	
	BM <sub>3</sub> -CRG <sub>2</sub>	1.4876E-2	1.0250	1.2866 E-4	1.0067	
	BM <sub>3</sub> GGS - CRG <sub>1</sub>	1.3007E-2	0.8962	1.2943 E-4	1.0128	
	BM <sub>3</sub> GGL - CRG <sub>1</sub>	1.4615E-2	1.0070	1.2366 E-4	0.9676	
	基準ケース	1.4513E-2	1.000	1.2780 E-4	1.000	BM <sub>3</sub> -CRG <sub>1</sub> BM <sub>3</sub> -CRG <sub>2</sub> の平均
後備停止系	BM <sub>3</sub> GGM - RSS	7.3032E-3	0.5032	1.0864 E-4	0.8501	
制御棒 + 後備停止系	BM <sub>3</sub> GGS - CRG <sub>1</sub> + RSS	2.0136E-2	1.3874	1.4876 E-4	1.1640	
	BM <sub>3</sub> GGM - CRG <sub>1</sub> + RSS	3.2541E-2	2.2422	1.6864 E-4	1.3196	
	BM <sub>3</sub> GGL - CRG <sub>1</sub> + RSS	3.8761E-2	2.6708	1.7473 E-4	1.3672	
制御棒 挿入	JMSLALOM	1.438 E-2	0.9908	1.210 E-4	0.9390	
	DIRK	2.0972E-2	1.4450	1.1873 E-4	0.9290	

Table 5.7 第4群制御型燃料体均質化巨視断面積

種類	項目 ケース名	吸収断面積( $\Sigma a$ )		生成断面積( $v\Sigma_f$ )		備考
		絶対値	相対値	絶対値	相対値	
制御棒 未挿入	BM <sub>1</sub>	1.0325E-4	—	7.3912 E-5	—	
	BM <sub>2</sub>	9.4163E-5	—	6.7467 E-5	—	
	BM <sub>3</sub>	9.8445E-5	—	6.8534 E-5	—	
制御棒 挿入	BM <sub>1</sub> -CRS <sub>1</sub>	1.4192E-2	1.0937	8.4592 E-5	0.8586	
	BM <sub>1</sub> -CRS <sub>2</sub>	1.3565E-2	1.0454	8.6009 E-5	0.8730	
	BM <sub>2</sub> -CRS <sub>2</sub>	1.3537E-2	1.0432	9.9467 E-5	1.0096	
	BM <sub>2</sub> -CRS <sub>3</sub>	1.3291E-2	1.0243	9.8754 E-5	1.0023	
	BM <sub>2</sub> -CRS <sub>4</sub>	1.2061E-2	0.9295	9.6447 E-5	0.9789	
	BM <sub>3</sub> -CRG <sub>1</sub>	1.2674E-2	0.9767	9.7829 E-5	0.9930	
	BM <sub>3</sub> -CRG <sub>2</sub>	1.3277E-2	1.0232	9.9217 E-5	1.0070	
	BM <sub>3</sub> GGS-CRG <sub>1</sub>	1.3201E-2	1.0173	9.9951 E-5	1.0145	
	BM <sub>3</sub> GGL-CRG <sub>1</sub>	1.1692E-2	0.9010	9.4166 E-5	0.9558	
	基準ケース	1.2976E-2	1.0000	9.8523 E-5	1.0000	BM <sub>3</sub> -CRG <sub>1</sub> BM <sub>3</sub> -CRG <sub>2</sub> の平均
後備停止系	BM <sub>3</sub> GGM-RSS	6.1680E-3	0.4753	8.1715 E-5	0.8294	
制御棒 +	BM <sub>3</sub> GGS-CRG <sub>1</sub> +RSS	2.1257E-2	1.6382	1.1868 E-4	1.2046	
	BM <sub>3</sub> GGM-CRG <sub>1</sub> +RSS	3.0051E-2	2.3159	1.3705 E-4	1.3910	
	後備停止系 BM <sub>3</sub> GGL-CRG <sub>1</sub> +RSS	3.1814E-2	2.4518	1.3651 E-4	1.3856	
制御棒 挿入	JMSLALOM	1.607 E-2	1.2384	8.958 E-5	0.9092	
	DIRK	2.0519E-2	1.5813	8.8465 E-5	0.8979	

Table 5.8 第5群制御型燃料体均質化巨視断面積

種 類	項 目 ケース名	吸収断面積 ( $\Sigma_a$ )		生成断面積 ( $\nu\Sigma_f$ )		備 考
		絶 対 値	相 対 値	絶 対 値	相 対 値	
制 御 棒 未 挿 入	B M <sub>1</sub>	2.0753E-4	—	2.7203 E-4	—	
	B M <sub>2</sub>	1.9867E-4	—	2.6129 E-4	—	
	B M <sub>3</sub>	2.0022E-4	—	2.5962 E-4	—	
制 御 棒 挿 入	BM <sub>1</sub> - CRS <sub>1</sub>	1.3312E-2	1.0790	3.1188 E-4	0.8313	
	BM <sub>1</sub> - CRS <sub>2</sub>	1.2819E-2	1.0391	3.1678 E-4	0.8443	
	BM <sub>2</sub> - CRS <sub>2</sub>	1.2861E-2	1.0425	3.7883 E-4	1.0097	
	BM <sub>2</sub> - CRS <sub>3</sub>	1.2634E-2	1.0241	3.7594 E-4	1.0020	
	BM <sub>2</sub> - CRS <sub>4</sub>	1.1599E-2	0.9402	3.6751 E-4	0.9796	
	BM <sub>3</sub> - CRG <sub>1</sub>	1.2071E-2	0.9784	3.7266 E-4	0.9933	
	BM <sub>3</sub> - CRG <sub>2</sub>	1.2602E-2	1.0215	3.7769 E-4	1.0067	
	BM <sub>3</sub> GGS - CRG <sub>1</sub>	1.3527E-2	1.0965	3.7724 E-4	1.0055	
	BM <sub>3</sub> GGL - CRG <sub>1</sub>	1.0030E-2	0.8130	3.6162 E-4	0.9639	
	基 準 ケ ー ス	1.2337E-2	1.0000	3.7518 E-4	1.0000	BM <sub>3</sub> -CRG <sub>1</sub> BM <sub>3</sub> -CRG <sub>2</sub> の平均
後備停止系	BM <sub>3</sub> GGM - RSS	5.8124E-3	4.7114	3.0629 E-4	0.8164	
制 御 棒 + 後備停止系	BM <sub>3</sub> GGS - CRG <sub>1</sub> + RSS	2.2091E-2	1.7906	4.5561 E-4	1.2144	
	BM <sub>3</sub> GGM - CRG <sub>1</sub> + RSS	2.8565E-2	2.3154	5.4350 E-4	1.4486	
	BM <sub>3</sub> GGL - CRG <sub>1</sub> + RSS	2.6317E-2	2.1332	5.3973 E-4	1.4386	
制 御 棒 挿 入	JMSLALOM	1.780 E-2	1.4428	3.288 E-4	0.8764	
	DIRK	2.0811E-2	1.6869	3.2617 E-4	0.8694	

Table 5.9 第6群制御型燃料体均質化巨視断面積

種類	項目 ケース名	吸収断面積 ( $\Sigma a$ )		生成断面積 ( $v\Sigma_f$ )		備考注1) keff
		絶対値	相対値	絶対値	相対値	
制御棒 未挿入	BM <sub>1</sub>	3.3513E-4	—	4.8772 E-4	—	1.325 (1.318)
	BM <sub>2</sub>	2.7542E-4	—	4.0227 E-4	—	1.324 (1.316)
	BM <sub>3</sub>	3.0780E-4	—	4.3408 E-4	—	1.325 (1.317)
制御棒 挿入	BM <sub>1</sub> -CRS <sub>1</sub>	1.4701E-2	1.0909	5.5850 E-4	0.8711	0.854 (0.840)
	BM <sub>1</sub> -CRS <sub>2</sub>	1.4097E-2	1.0461	5.6772 E-4	0.8855	0.860 (0.845)
	BM <sub>2</sub> -CRS <sub>2</sub>	1.4016E-2	1.0401	6.4597 E-4	1.0075	0.861 (0.846)
	BM <sub>2</sub> -CRS <sub>3</sub>	1.3728E-2	1.0187	6.4162 E-4	1.0007	0.863 (0.849)
	BM <sub>2</sub> -CRS <sub>4</sub>	1.2618E-2	0.9363	6.2938 E-4	0.9816	0.875 (0.860)
	BM <sub>3</sub> -CRG <sub>1</sub>	1.3191E-2	0.9789 (1.00)*	6.3760 E-4	0.9945 (1.00)*	0.873 (0.858)
	BM <sub>3</sub> -CRG <sub>2</sub>	1.3761E-2	1.0211	6.4470 E-4	1.0055	0.861 (0.846)
	BM <sub>3</sub> GGG-CRG <sub>1</sub>	1.2277E-2	(0.9307)*	6.5122 E-4	(1.0214)*	0.895 (0.861)
	BM <sub>3</sub> GGL-CRG <sub>1</sub>	1.3451E-2	(1.0197)*	6.1855 E-4	(0.9701)*	0.861 (0.862)
	基準ケース	1.3476E-2	1.0000	6.4115 E-4	1.0000	BM <sub>3</sub> -CRG <sub>1</sub> BM <sub>3</sub> -CRG <sub>2</sub> の平均
後備停止系	BM <sub>3</sub> GGM-RSS	6.4532E-3	0.4789	5.4004 E-4	0.8423	0.984 (0.977)
制御棒 + 後備停止系	BM <sub>3</sub> GGG-CRG <sub>1</sub> +RSS	1.8949E-2	1.4061 (1.5435)*	7.5031 E-4	1.1703 (1.1522)*	0.837 (0.791)
	BM <sub>3</sub> GGM-CRG <sub>1</sub> +RSS	3.2545E-2	2.4150 (2.4672)*	8.8208 E-4	1.3758 (1.3834)*	0.769 (0.744)
	BM <sub>3</sub> GGL-CRG <sub>1</sub> +RSS	4.0434E-2	3.0004 (3.0060)*	9.3800 E-4	1.4630 (1.5164)*	0.737 (0.731)
制御棒	JMSLALOM	1.406 E-2	1.0433	6.005 E-4	0.9366	0.753 (0.823)
挿入	DIRK	2.0965E-2	1.5557	5.8952 E-4	0.9195	0.739 (0.791)
		*の値は BM <sub>3</sub> -CRG 1を基準 とした相 対値		*の値は BM <sub>3</sub> -CRG 1を基準 とした相 対値		(注1) ( )内の値 は、均質化断面 積を用いた値

Table 5.10 非均質格子計算および均質化定数を用いた再格子計算で得られた実効増倍率および制御棒価値の比較

項目 ブロック モデル	制御棒	keff	<sup>BS</sup> * keff	Δkeff	<sup>BS</sup> Δkeff	<sup>BS</sup> keff-keff	<sup>BS</sup> Δkeff-Δkeff
						keff	Δkeff
BM <sub>1</sub> 1.325 (1.318)	CRS <sub>1</sub>	0.854	0.840	0.471	0.478	0.016	0.015
	CRS <sub>2</sub>	0.860	0.845	0.465	0.473	0.017	0.017
BM <sub>2</sub> 1.324 (1.316)	CRS <sub>2</sub>	0.861	0.846	0.463	0.470	0.017	0.015
	CRS <sub>3</sub>	0.863	0.849	0.461	0.467	0.016	0.013
	CRS <sub>4</sub>	0.875	0.860	0.449	0.456	0.017	0.016
BM <sub>3</sub> 1.325 (1.317)	CRG <sub>15</sub>	0.866	0.852	0.459	0.465	0.016	0.013
	CRG <sub>1</sub>	0.873	0.858	0.452	0.459	0.017	0.015
	CRG <sub>2</sub>	0.861	0.846	0.464	0.471	0.017	0.015
	GGS CRG <sub>1</sub>	0.895	0.861	0.430	0.456	0.038	0.060
	GGL CRG <sub>1</sub>	0.861	0.862	0.464	0.455	-0.0012	-0.019
	GGM RSS	0.984	0.977	0.341	0.340	0.007	-0.003
	GGS CRG <sub>1</sub> +RSS	0.837	0.791	0.488	0.526	0.055	0.078
	GGM CRG <sub>1</sub> +RSS	0.769	0.744	0.556	0.573	0.033	0.031
	GGL CRG <sub>1</sub> +RSS	0.737	0.731	0.588	0.586	0.008	-0.003
(1.317)	JMSLALOM	0.753	0.823	-	0.494	-	-
(1.317)	DIRK	0.739	0.791	-	0.526	-	-

注1) \*印の欄およびブロックモデルの欄の( )内の値は均質化C. B 断面積を用い、TWOT-RANでP<sub>0</sub>S<sub>4</sub>計算を行なった結果である。

Table 5.11 均質化定数に対しHOCAFによる補正を行った場合と行わない場合に再格子計算で得られた実効増倍率の比較

格子計算 モデル	実効増倍率		
	非均質詳細格子計算	均質化定数使用ケース	HOCAF補正定数使用ケース
BM <sub>1</sub> -CRS <sub>1</sub>	0.854	0.840	0.855
BM <sub>1</sub> -CRS <sub>2</sub>	0.860	0.845	0.860
BM <sub>2</sub> -CRS <sub>2</sub>	0.861	0.846	0.861
BM <sub>2</sub> -CRS <sub>3</sub>	0.863	0.849	0.864
BM <sub>2</sub> -CRS <sub>4</sub>	0.875	0.860	0.875
BM <sub>3</sub> -CRG <sub>2</sub>	0.861	0.846	0.861

Table 5.12 Mk-III炉心制御棒挿入時の制御型燃料体に対するHOCAF

燃料濃縮度 (w/o)	温 度 (°K)		均質化計算で得られた 実効増倍率	HOCAF
	燃 料	減速材		
5.0	300	300	1.0325	0.9129
	400	400	1.0274	0.9089
	900	600	0.9666	0.9080
	1200	900	0.9244	0.9067
4.0	300	300	0.9772	0.9106
	400	400	0.9728	0.9074
	900	600	0.9070	0.9063
	1200	900	0.8617	0.9057
3.0	300	300	0.9037	0.9102
	400	400	0.8986	0.9065
	900	600	0.8234	0.9047
	1200	900	0.7752	0.9040
	1500	1200	0.7360	0.9000
2.5	300	300	0.8514	0.9094
	400	400	0.8466	0.9057
	1200	900	0.7178	0.9032
	1500	1200	0.6781	0.9000
2.0	300	300	0.7823	0.9087
	400	400	0.7795	0.9050
	1200	900	0.6459	0.9025
	1500	1200	0.6078	0.9000

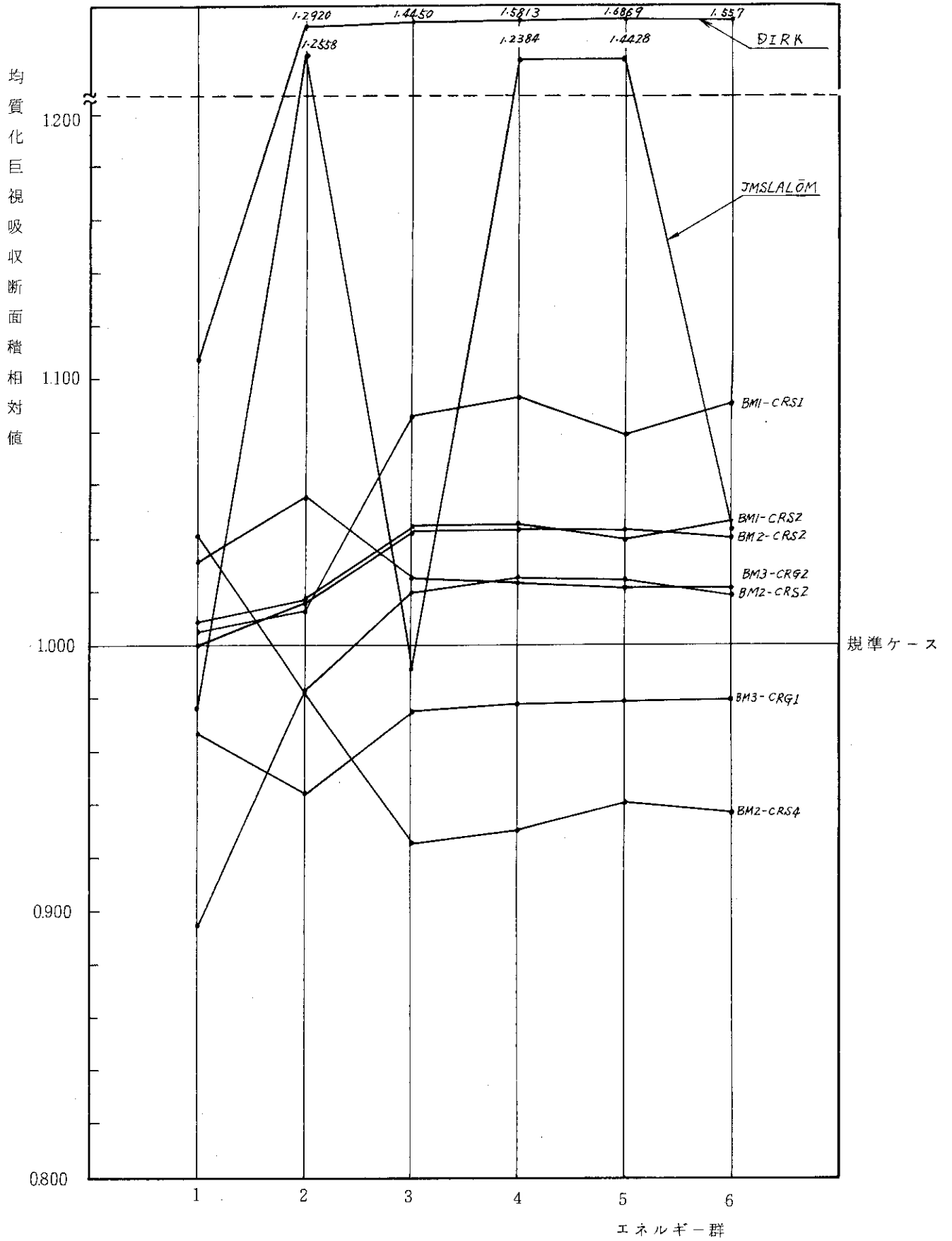


Fig. 5.1 各モデルに対する制御型燃料体巨視吸収断面積の基準値  
 (BM<sub>3</sub>-CRG<sub>1</sub>とBM<sub>3</sub>-CRG<sub>2</sub>の平均値)からのずれ。



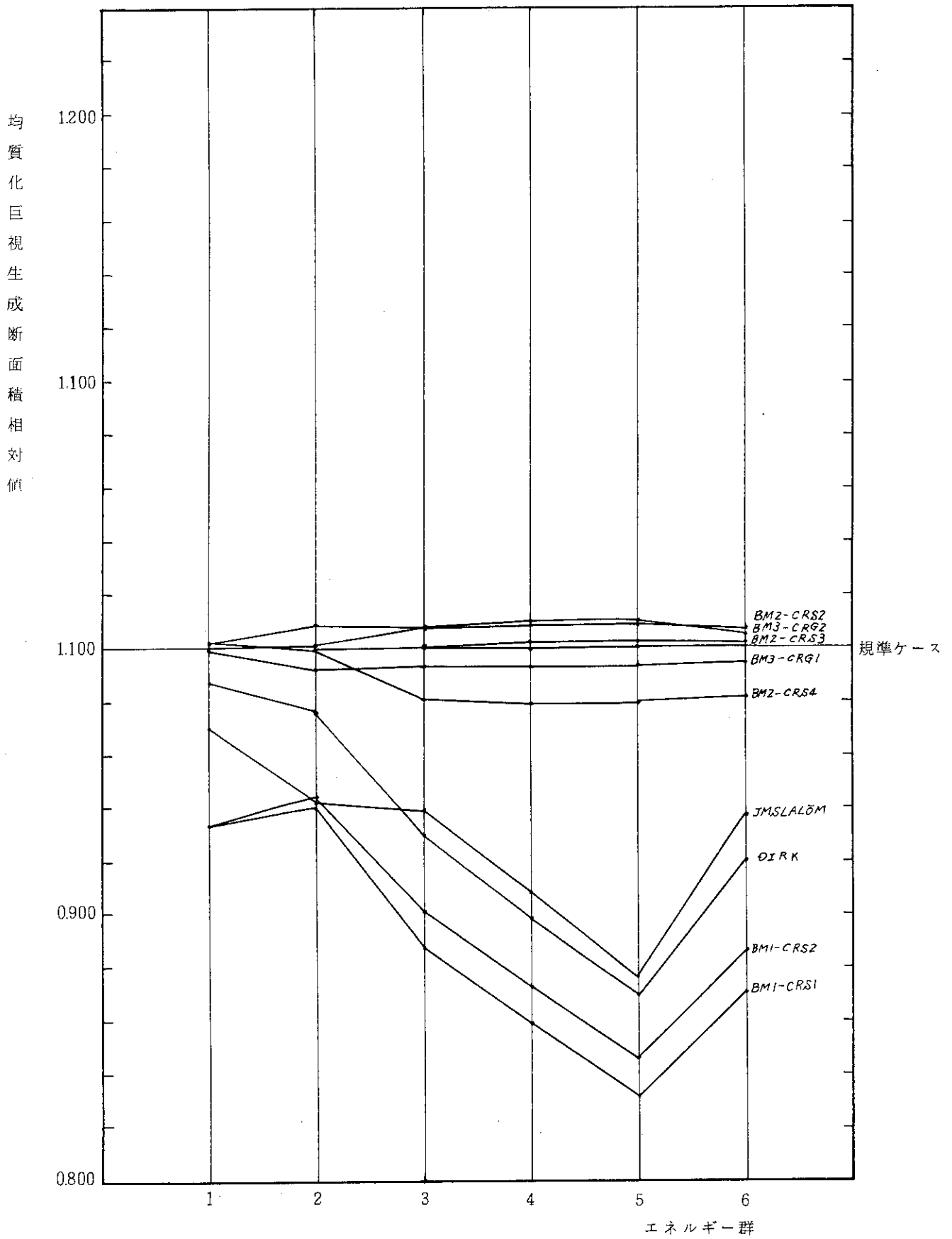


Fig. 5.2 各モデルに対する制御型燃料体巨視生成断面積の基準値 (BM<sub>3</sub>-CRG<sub>1</sub>とBM<sub>3</sub>-CRG<sub>2</sub>の平均値)からのずれ。

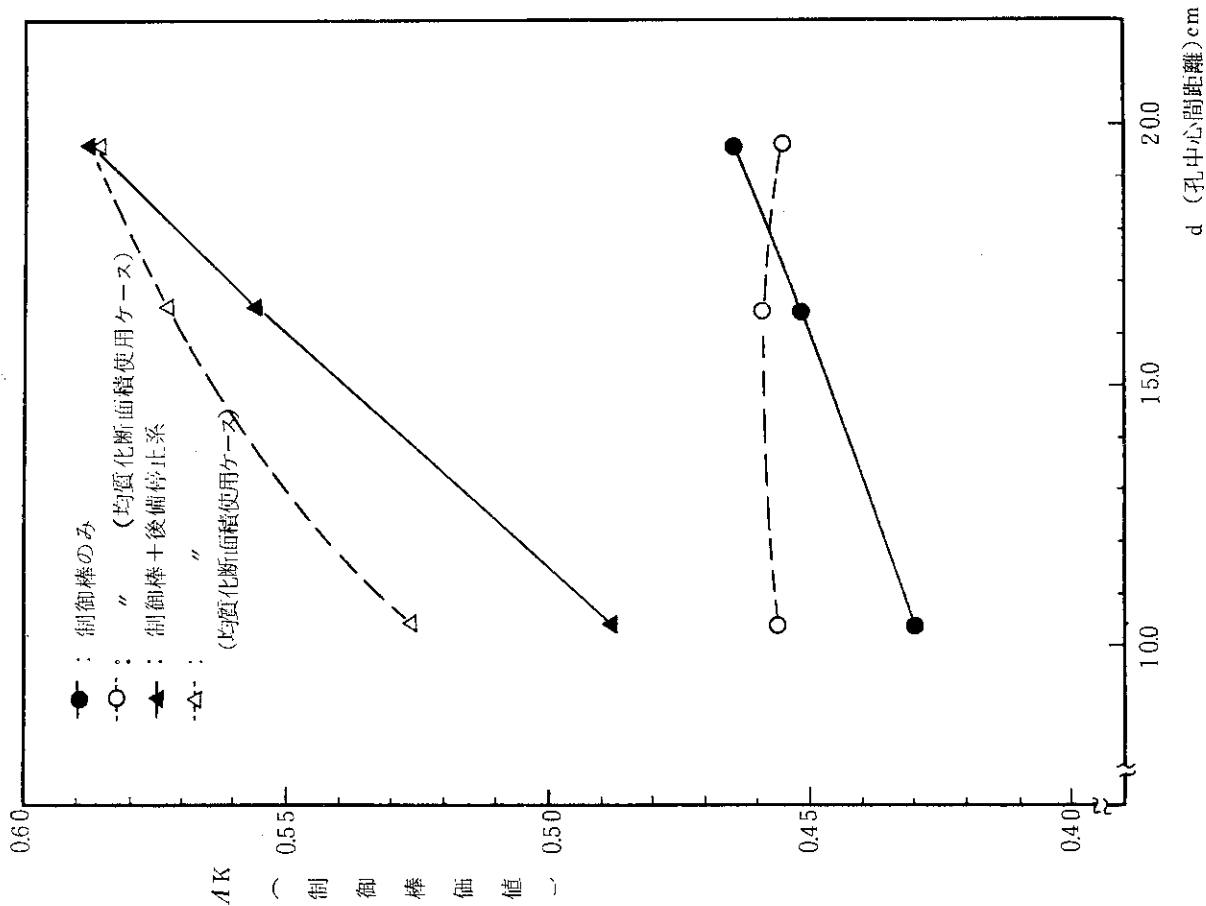


Fig. 5.4 制御棒間および制御棒と後備停止系間の距離とその反応度価値の関係

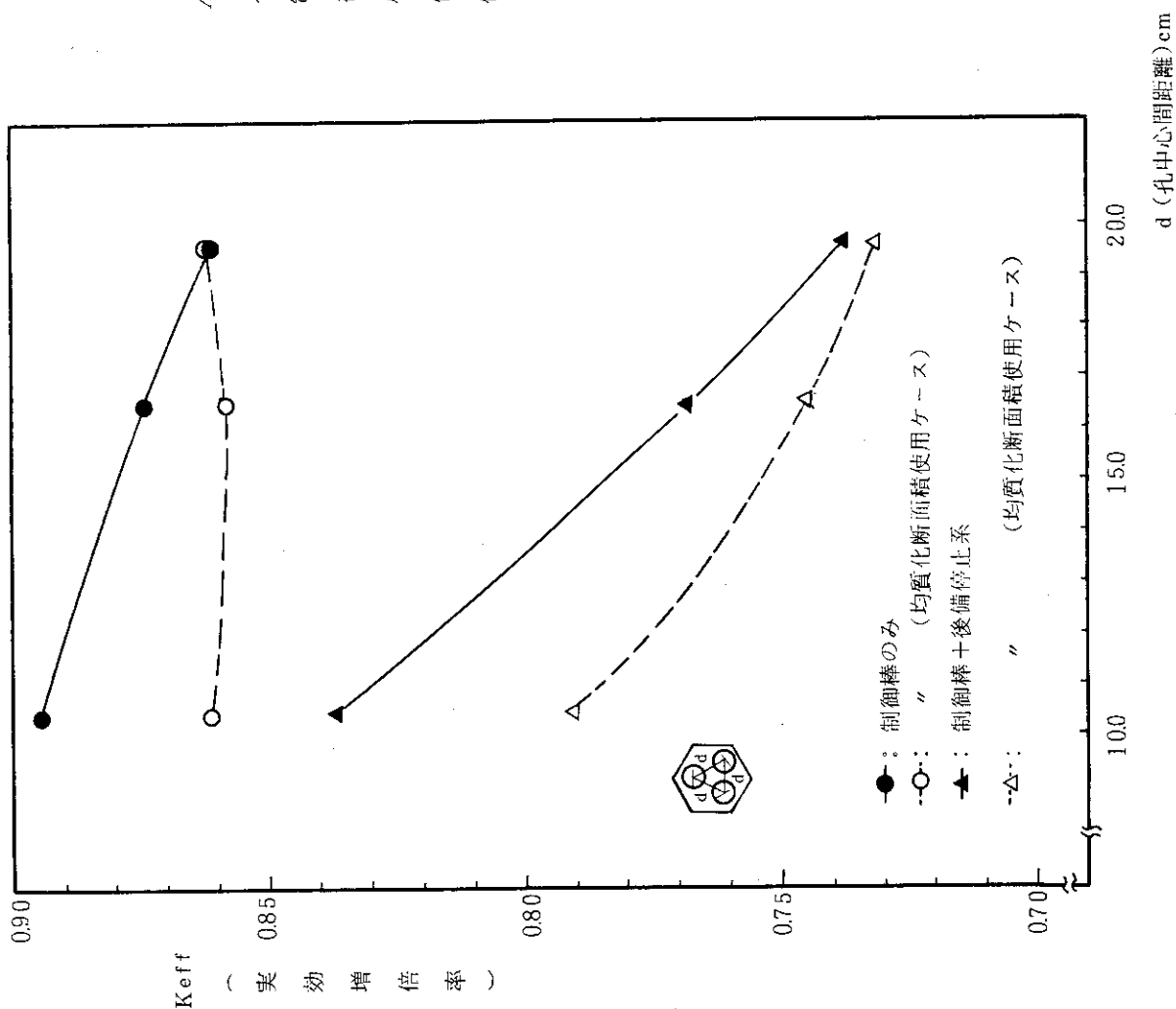


Fig. 5.3 制御棒間および制御棒と後備停止系間の距離と実効増倍率の関係

## 6. 結 論

### 6.1 まとめおよび考察

これまで検討した結果をまとめると次のとおりである。

- ① 制御棒値を計算する際の群定数には注意が必要である。すなわち使用計算コードに合った形式で、非等方散乱の効果を考慮した定数を用いるべきである。
- ② Mk-Ⅲ炉心スーパーセルの制御棒未挿入時における実効増倍率をTWOTRAN-2で計算すると、同じ形状に対してKENO-4で計算した場合に比べ、約1%高くなる。これは制御棒挿入孔および後備停止系孔による中性子ストリーミング効果を考慮できないためである。
- ③ KENO-4を用いて計算した、最も形状的に正確と考えられるモデル(BM<sub>6</sub>モデルおよびCRR<sub>2</sub>モデル)に比較し、TWOTRAN-2で計算したモデル(BM<sub>3</sub>モデルおよびCRG<sub>1.5</sub>モデルかFig. 3.5に示すモデル)は制御棒未挿入時および制御棒挿入時に対し、実効増倍率をそれぞれ1.8%、0.5%程度大きく評価する。前者のうち約0.9%は上記②で述べたストリーミングによるものであり、残りは、標準型燃料体を均質化したことによる効果である。制御棒挿入時の実効増倍率との差から制御棒反応度値を計算する場合は、したがってこれらの事実を考慮する必要がある。
- ④ 円形断面の制御棒を計算する際、正方形で近似する場合には、その最外形状の1辺の長さを円の直径の $(1.18)^{-1}$ 倍にすると妥当な実効増倍率が得られる。
- ⑤ Mk-Ⅲ炉心に挿入される2本の制御棒間の干渉効果はかなり大きく、反応度値は個々の制御棒値の和より約25%低下する。制御型燃料体内で可能な限り離してもなお約23%低下する。
- ⑥ 後備停止系が入った場合の干渉効果による反応度値の低下はさらに大きく、個々の反応度値の和よりも約40%低下する。
- ⑦ 格子計算により作成した均質化定数は、これを用いて再度同様の格子計算を行なうと、もとの格子計算で得られた実効増倍率とは、一般に、異なった値となる。この傾向は強吸収体を含む体系、特に複数の吸収体が相互に干渉する体系について顕著である。例えばMk-Ⅲ炉心については、TWOTRAN-2で計算した場合には約1.7%低い値となり、JMSLALOMで得た定数を用いてTWOTRAN-2で再格子計算を行なうと約9.3%高くなる。DIRKとTWOTRAN-2を用いた計算においても約7.0%高くなる。したがって炉心計算に用いる均質化定数を作成する場合、制御棒挿入燃料体に対しては、中性子束を重みとして各構成物質の断面積を平均化するだけでは十分でなく、補正因子をかけあわせる操作が必要になる。この補正因子(HOCAFと呼称する)は燃料濃縮度や温度に大きくは依存せず、制御棒(や後備停止系)間の距離に大きく依存すると考えられる。Mk-Ⅲ炉心に関してはこのHOCAFの値は制御棒挿入時に対しては0.9である。

今回の検討は格子計算に限られ、したがって炉心計算としては平面的に無限な体系に限って行

なわれたが、今後は炉心計算に対して検討を行うことが必要である。

制御棒価値を計算する場合に、TWOTRAN-2のような2次元コードや軸方向の拡散係数を径方向のものとは別に取り扱うことの出来ないCITATIONのような3次元コードを用いる場合は注意が必要であろう。すなわち制御棒未挿入時の実効増倍率を計算する際にストリーミング現象を考慮できないため、過大評価をする傾向があることを念頭に置く必要がある。

円形断面の制御棒を正方形断面に近似する際、1辺を円の直径の $(1.18)^{-1}$ 倍にすることは体積では0.914倍、表面積では1.08倍にすることになる。強吸収体はその表面で熱中性子の大部分を吸収することは、制御棒付近の第3群～第6群中性子束分布から明らかである。第2群についても、その分布に制御棒の形状が反映されてはいるが、その表面で急激に低下する様子はない。したがって制御棒の内部で吸収される中性子もかなりあると考えられる。第1群の中性子束分布には制御棒形状はまったく影響されていない。したがってこの群の中性子吸収量は吸収体の体積に依存することになる。結局、群ごとの吸収割合と全吸収量の関係から上記のような近似法が妥当とされているのであろう。

反応度を制御する際、各反応度制御系の反応度価値を単純に加算することによって、それらがすべて同時に系に付加された場合の価値を見積ることは許されない。特に制御棒や後備停止系のように個々の反応度価値の大きなものや、干渉効果が大きなものについては、そのすべてを含む体系の臨界計算をする必要がある。

炉心計算に用いる定数を作成する場合に、格子計算を行い中性子束のエネルギースペクトルだけでなく、空間分布も考慮して均質化定数を作成しても、必ずしも制御棒価値の計算の際に最適な定数とはならないことがある。したがって均質化定数を全体として補正する均質化定数補正因子(HOCAF)という考え方が、設計作業においては特に、重要になろう。部分的に吸収断面積のみの補正を行うことなども考えられるが、断面相互のバランスが変化し、スペクトル分布にも影響するであろう。全体として補正する場合には、スペクトルは詳細な非均質格子計算で得られたものを正確に反映し、周囲の燃料体に対し、均質化領域全体の空間遮蔽因子を考慮することに相当するといえよう。

Fig. 6.1に制御棒や後備停止系の反応度価値評価モデルとして適当と思われる手順を示す。この図に示すように、スペクトル計算コードにおいては、TWOTRAN-2のような格子臨界計算を行うSn計算コード用EXTENDED  $P_0$ 定数と拡散計算用に通常用いられる輸送補正  $P_0$ 定数および  $P_1$ 定数を出力できるのが望ましい。最初にTWOTRAN-2を用いEXTENDED  $P_0$ 定数で中性子束分布の詳細計算を行なう。次にこの中性子束分布を用いて拡散計算用  $P_0$ 定数と均質化し、さらにCITATIONを用いてTWOTRAN-2による格子計算と同じ実効増倍率を得られるようなHOCAFを求めて補正を行ない最終的な炉心計算用定数とするのである。

## 6.2 今後の課題

本検討においては、炉心計算において最も妥当と考えられる均質化定数の作成手順も含め、主として格子計算における制御棒価値評価モデルについて考察した。今後は炉心のどの位置にある制御棒の価値も正確に(設計に耐えられる範囲の精度を持つこと)評価できる評価モデルの作成

が必要であろう。基本的には本検討で述べた方法で制御棒挿入深さに応じて各燃料ブロックごとの均質化定数を作成し、炉心計算を行えば良いと思われる。したがって炉心計算に用いる計算コードの選定や、精度検討が必要である。このためには、いくつかのケースにつき全炉心を均質化定数を用いずに、詳細な領域分割で臨界計算を行う必要がある。このための計算コードとしてはモンテ・カルロ計算コードKENO-4が考えられる。もちろん時間がかかること、統計処理をするために標準偏差を伴った量となることなど不都合な点もあるが、時間をかけることで解決すると思われる。またTHREETRAN<sup>13)</sup>などの3次元輸送計算コードが今後使用できるようになれば、これらを用いることも考えられる。

炉心計算を行うまでに必要な計算コードは現在では十分な精度をもつものがそろっていると思われる。問題はこれらを効率良く利用できるコードシステムとしての整備にあると思われる。したがって今後はインターフェイスコードを整備し、結果の図示まで含めてできるだけ自動化したシステムの開発に重点を置くべきであろう。

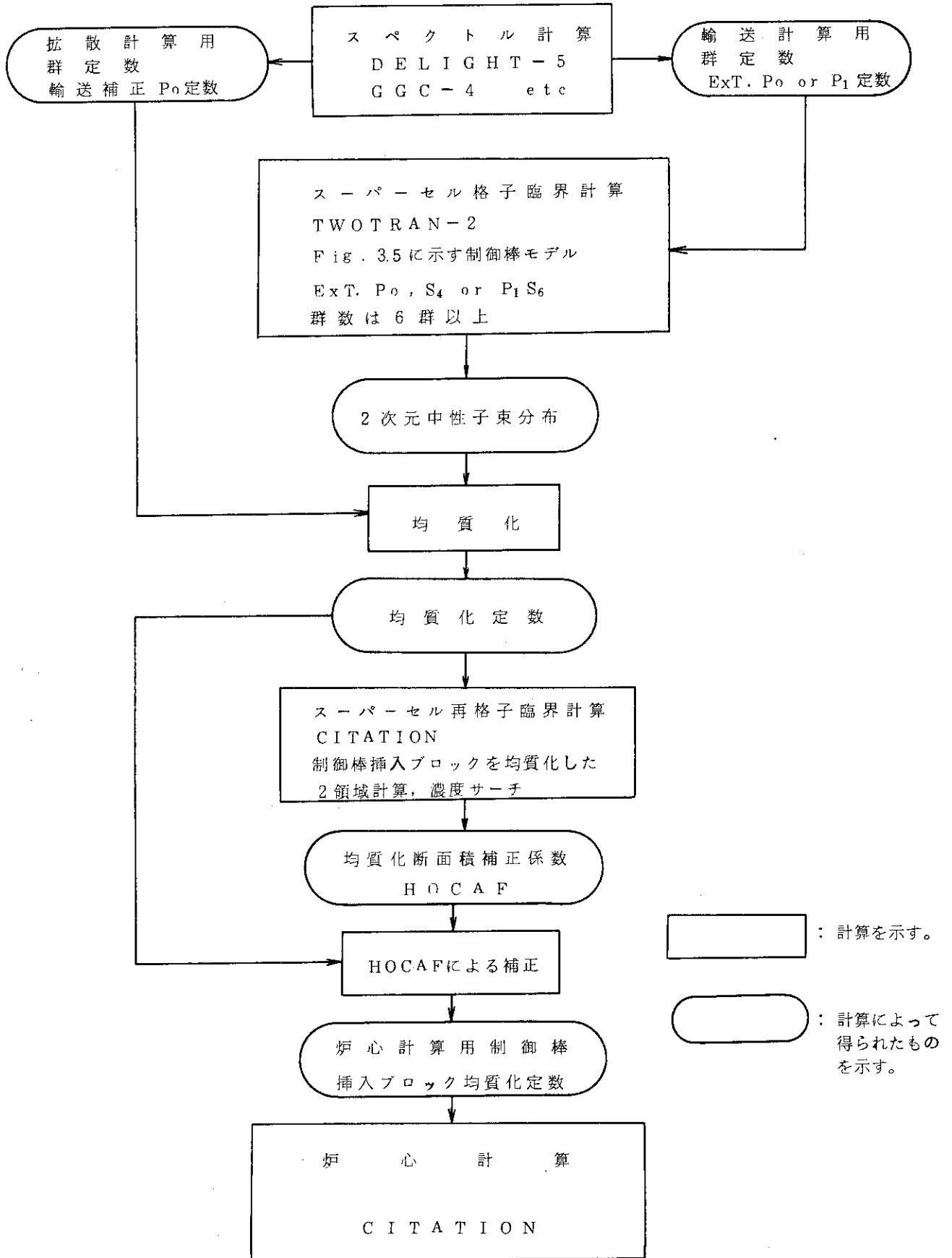


Fig. 6.1 制御棒反応度値評価モデル最適フロー

## 謝 辞

本報告書をまとめるにあたり、多目的高温ガス実験炉設計室の新藤隆一、平野光将両副主任研究員に種々の御指導や御助言をいただいた。ここに深く感謝致します。

原子炉工学部炉物理実験研究室の土橋敬一郎副主任研究員には群定数の使用に関して有益な御助言をいただき、また原子炉システム研究室の筒井恒夫氏には各種の計算コードを使用するうえで便宜を計っていただいた。さらに核融合研究部理論解析研究室の竹田辰興室長には図形処理コードシステム ARGUS の使用を快諾していただいた。ここに謝意を表します。

最後に、著者が外来研究員として原研に滞在する間、種々の御配慮をいただいた、安野武彦室長を始めとする多目的高温ガス実験炉設計室の室員の皆様に心からの謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 青地哲男他：“多目的高温ガス実験炉の炉心参考設計Mark-Ⅲ”，JAERI-M 6895 (1976)
- 2) 安野武彦他：“多目的高温ガス実験炉・Mark-Ⅲ炉心の検討”，JAERI-M8399 (1979)
- 3) 金子義彦他：“濃縮ウラン黒鉛減速炉心の臨界実験”，JAERI 1275 (1978)
- 4) Lathrop K.D. and Brinkley F.W.: "TWOTRAN-II : An Interfaced, Exportable Version of the TWOTRAN Code for Two-Dimensional Transport", LA-4848-MS (1973)
- 5) Reed W.H., Hill T.R., Brinkley F.W. and Lathrop K.D.: "TRIPLET : A Two-Dimensional Multi-group, Triangular Mesh, Planar Geometry, Explicit Transport Code", LA-5428-MS (1973)
- 6) Petrie L.M. and Cross N.F.: "KENO-IV — An Improved Monte Carlo Criticality Program", ORNL-4938 (1975)
- 7) 筒井恒夫他：“GGC-4コードによる多群群定数作成とその検討”，JAERI-M5991 (1975)
- 8) Anderson W.K. and Theilacker J.S.: "Neutron Absorber Materials for Reactor Control", USAEC (1962)
- 9) Bell G.I. and Glasstone S.: "Nuclear Reactor Theory", Van Nostrand, Princeton N.J. (1970), Chap. 5.
- 10) 新藤隆一：“一次元円筒格子群定数計算コード—JMSLALOM—”，私信 (1979)
- 11) 新藤隆一・平野光将・深井佑造・長浜文夫：“対配置制御棒反応度価値解析用コードDIRKの使用マニュアル”，JAERI-M 8553 (1979)
- 12) 新藤隆一・平野光将・南多善：“高温ガス冷却炉・格子燃焼計算コード—DELIGHT-4”，JAERI-M 8097 (1979)
- 13) Walters W.F., O'Dell R.D. and Brinkley F.W. Jr, "THRETRAN (hex, Z) User's Manual", LA-8089-M (1979)

## 謝 辞

本報告書をまとめるにあたり、多目的高温ガス実験炉設計室の新藤隆一、平野光将両副主任研究員に種々の御指導や御助言をいただいた。ここに深く感謝致します。

原子炉工学部炉物理実験研究室の土橋敬一郎副主任研究員には群定数の使用に関して有益な御助言をいただき、また原子炉システム研究室の筒井恒夫氏には各種の計算コードを使用するうえで便宜を計っていただいた。さらに核融合研究部理論解析研究室の竹田辰興室長には図形処理コードシステム ARGUS の使用を快諾していただいた。ここに謝意を表します。

最後に、著者が外来研究員として原研に滞在する間、種々の御配慮をいただいた、安野武彦室長を始めとする多目的高温ガス実験炉設計室の室員の皆様に心からの謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 青地哲男他：“多目的高温ガス実験炉の炉心参考設計Mark-III”，JAERI-M 6895 (1976)
- 2) 安野武彦他：“多目的高温ガス実験炉・Mark-III炉心の検討”，JAERI-M 8399 (1979)
- 3) 金子義彦他：“濃縮ウラン黒鉛減速炉心の臨界実験”，JAERI 1275 (1978)
- 4) Lathrop K.D. and Brinkley F.W.: "TWOTRAN-II : An Interfaced, Exportable Version of the TWOTRAN Code for Two-Dimensional Transport", LA-4848-MS (1973)
- 5) Reed W.H., Hill T.R., Brinkley F.W. and Lathrop K.D.: "TRIPLET : A Two-Dimensional Multi-group, Triangular Mesh, Planar Geometry, Explicit Transport Code", LA-5428-MS (1973)
- 6) Petrie L.M. and Cross N.F.: "KENO-IV — An Improved Monte Carlo Criticality Program", ORNL-4938 (1975)
- 7) 筒井恒夫他：“GGC-4コードによる多群群定数作成とその検討”，JAERI-M 5991 (1975)
- 8) Anderson W.K. and Theilacker J.S.: "Neutron Absorber Materials for Reactor Control", USAEC (1962)
- 9) Bell G.I. and Glasstone S.: "Nuclear Reactor Theory", Van Nostrand, Princeton N.J. (1970), Chap. 5.
- 10) 新藤隆一：“一次元円筒格子群定数計算コード—JMSLALOM—”，私信 (1979)
- 11) 新藤隆一・平野光将・深井佑造・長浜文夫：“対配置制御棒反応度価値解析用コードDIRKの使用マニュアル”，JAERI-M 8553 (1979)
- 12) 新藤隆一・平野光将・南多善：“高温ガス冷却炉・格子燃焼計算コード—DELIGHT-4—”，JAERI-M 8097 (1979)
- 13) Walters W.F., O'Dell R.D. and Brinkley F.W. Jr, "THREETRAN (hex, Z) User's Manual", LA-8089-M (1979)



## 付録1. TWOTRAN-2 の使用について

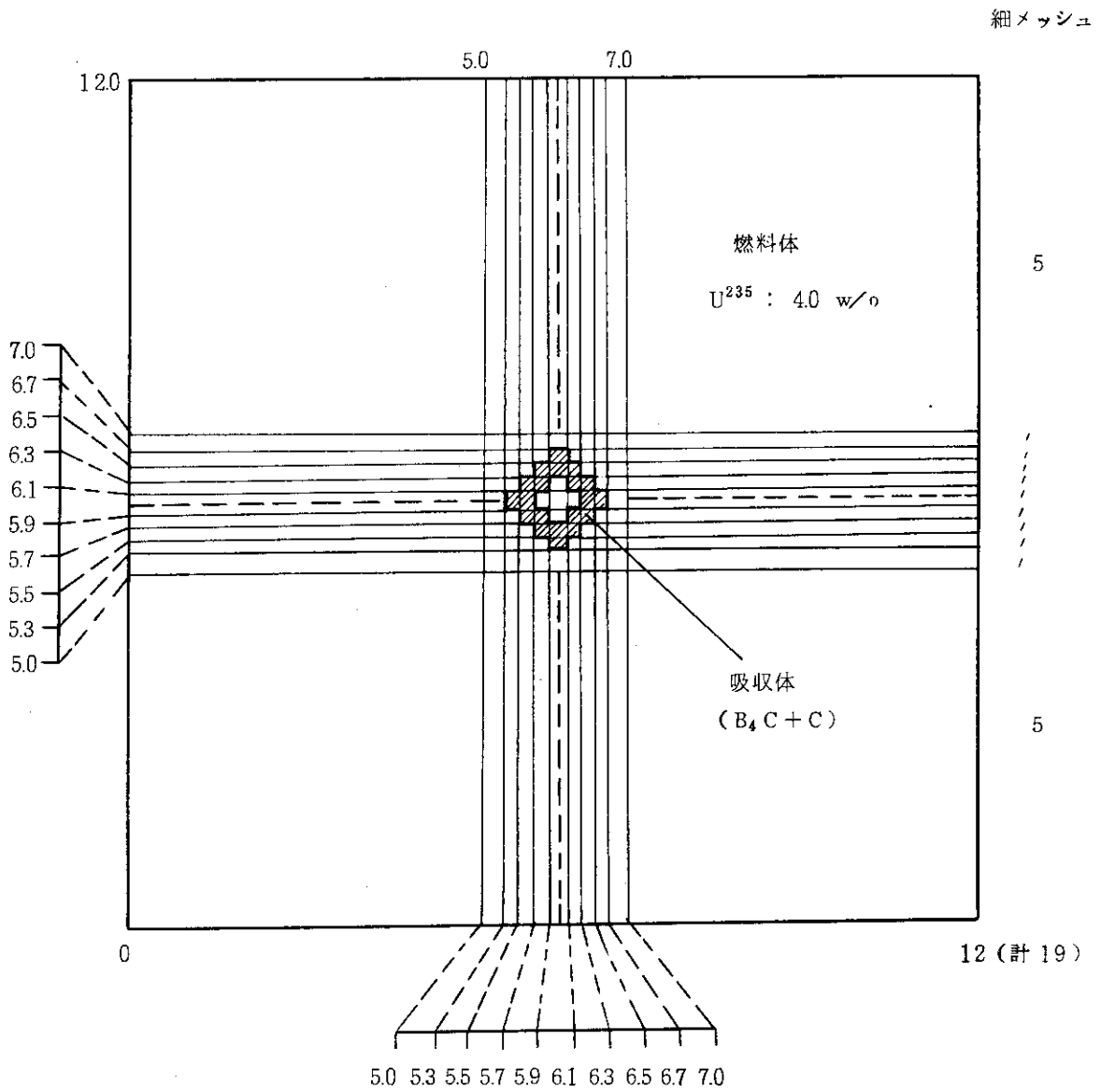
SN 計算コード TWOTRAN-2 を用いて臨界計算を行なう場合に、制御棒のように強い吸収体を含む体系については、固有値が収束の過程で振動を起し、多大な計算時間を費やしても振動が終結しないことがしばしば起きたようである。この現象が生じる原因は単に収束加速法の不安定性にあり、これを逃れるためには、加速法である粗メッシュ再釣り合い法を行うためのメッシュを物質メッシュとは別に設けてやれば良い。このことを意味する記述はマニュアルにもあるが見落とされがちなので、ここであえて言及するとともに、再釣り合いメッシュの効用の簡単な例を示すことにする。

Fig. A. 1.1 の 1 に示す体系に対し、2 に示す様な再釣り合いメッシュを設けずに計算した場合は、Fig. A. 1.2 に示すように、いくら outer ITERATION をくり返しても収束しない。ところが再釣り合いメッシュを設置した場合には、Fig. A. 1.3 に示すように順調に収束してしまう。ちなみに計算時間は、FACOM-F230-75 の C.P.U 時間で前者が 15 分経過してもなお初期と同様の振動をくり返していたのに対し、後者はわずか 90 秒であった。

コード内で行なわれる収束判定法や加速理論の詳細はここではくり返さないが、再釣り合いメッシュは、熱群中性子束の概形を予想し、各メッシュ内では中性子束を一定としても、グロスな分布が再現できるように設置すると良い。ここに示した例についていえば、吸収体の部分でのみ中性子束は低下し、その他はほぼ一定と考えられるので、吸収体全体を包含した領域を 1 メッシュとするように再釣り合いメッシュを設けた。中性子束が大きく変化する部分を細かく切りきざむ再釣り合いメッシュは設けるべきではないのは明らかであろう。

本文中でも比較的複雑な体系に対しては参考のために再釣り合いメッシュもあわせて示した。なおインナーイテレイションの打ち切り回数については、かなり複雑な形状をもつ体系においても、30 回程度で十分であろう。

1. 計算対象とした体系および物質メッシュ



2. 再釣り合いメッシュ

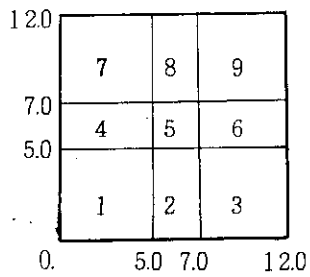


Fig. A. 1.1 TWOTRAN サンプル計算形状

TIME IN MINUTES	OUTER ITERATIONS	INNER ITERATIONS TOTAL/BY GROUP	NEUTRON BALANCE	EIGENVALUE	EIGENVALUE SLOPE	LAMBDA	REBALANCE CONVERGENCE
0.0	0	0	0.0	4.99999999E-01	0.0	0.0	0.0
3.17E-01		1 29					
5.67E-01		2 51	1.20E-03				
1.33E-01		3 12					
1.00E-01		4 10					
1.17E-01		5 10					
5.50E-01		6 51	1.59E-03				
1.80E+00	1	163	2.62759095E-06	3.28036509E-01	0.0	2.68918946E-01	2.24602162E-01
2.00E-01		1 18					
4.00E-01		2 40					
6.67E-02		3 5					
5.00E-02		4 5					
3.33E-02		5 4					
4.17E-01		6 38					
2.97E+00	2	110	1.91258859E-05	3.56250569E-01	0.0	1.07619896E+00	1.36272609E-02
2.00E-01		1 19					
4.67E-01		2 45					
5.00E-02		3 5					
3.33E-02		4 4					
5.00E-02		5 4					
3.33E-01		6 32					
4.10E+00	3	109	7.56674705E-06	3.63612987E-01	0.0	1.02066639E+00	6.78718090E-03
1.67E-01		1 16					
3.67E-01		2 36					
5.00E-02		3 5					
3.33E-02		4 3					
3.33E-02		5 4					
3.33E-02		6 3					
4.80E+00	4	67	2.41923783E-06	3.66032317E-01	0.0	1.00665357E+00	7.96985626E-03
1.67E-01		1 17					
4.33E-01		2 42					
5.00E-02		3 5					
5.00E-02		4 4					
3.33E-02		5 4					
3.33E-01		6 32					
5.88E+00	5	104	1.53552309E-06	3.66498045E-01	0.0	1.00127238E+00	7.84663856E-03
1.83E-01		1 18					
4.33E-01		2 43					
6.67E-02		3 5					
3.33E-02		4 4					
5.00E-02		5 5					

Fig.A.1.2 TWOTRAN 収束状況 (再釣り合いメッシュなし)

TIME IN MINUTES	OUTER ITERATIONS	INNER ITERATIONS TOTAL/BY GROUP	NEUTRON BALANCE	EIGENVALUE	EIGENVALUE SLOPE	LAMBDA	REBALANCE CONVERGENCE
0.0	0	0	0.0	4.99999999E-01	0.0	0.0	0.0
8.33E-02		1					
1.50E-01		2					
1.00E-01		3					
1.00E-01		4					
1.00E-01		5					
1.50E-01		6					
7.00E-01	1	71	2.75973206E-06	3.33122059E-01	0.0	2.68135972E-01	2.43566006E-01
5.00E-02		1					
1.67E-02		2					
5.00E-02		3					
3.33E-02		4					
5.00E-02		5					
1.67E-02		6					
9.17E-01	2	23	-5.95978156E-06	3.62292096E-01	0.0	1.06645876E+00	1.98282897E-02
5.00E-02		1					
1.67E-02		2					
3.33E-02		3					
3.33E-02		4					
1.67E-02		5					
5.00E-02		6					
1.12E+00	3	19	-3.42950712E-04	3.66639822E-01	0.0	1.01200062E+00	2.19374895E-04
1.67E-02		1					
1.67E-02		2					
1.67E-02		3					
1.67E-02		4					
3.33E-02		5					
1.67E-02		6					
1.23E+00	4	11	5.75161152E-06	3.67655508E-01	0.0	1.00277024E+00	8.94963741E-05
1.67E-02		1					
0.0		2					
1.67E-02		3					
0.0		4					
1.67E-02		5					
1.67E-02		6					
1.30E+00	5	6	-1.00648566E-06	3.67946892E-01	0.0	1.00079256E+00	4.50313091E-05

Fig.A.1.3 TWOTRAN 収束状況 (再釣り合いメッシュあり)

## 付録2. TRIPLETの使用について

TRIPLETコードは平面2次元、多群三角メッシュ有限要素法輸送計算コードで機能、インプット形式などがTWOTRANとほとんど同一ともいえるコードである。ただ、TWOTRANのように長方形メッシュに対しダイヤモンド差分式を解くのではなく、一辺が $x$ 軸に平行な三角形メッシュを用い、角度束を低次の多項式で近似して有限要素法が用いられる点が異なっている。これに付随して、インプット形式がやや異なる点がある。TWOTRANと同一のパラメータ、例えば群数、SN次数などについては特にTRIPLETを用いる場合に吟味する必要はないが、次のパラメータについては、その効果を知る必要がある。

- ① メッシュ数（三角形の大きさ）
- ② セル間のカップリング（メッシュ境界で角度束の不連続性を認めるか否か）
- ③ 再釣り合い加速法を用いる単位（whole or fine mesh）
- ④ 角度束を表現する多項式の次数（NP）

そこで、均質な燃料体の中心に中空の六角柱形状をした強吸収体が挿入され場合に、上記①～④の条件を変えて計19ケースの計算を行なった。Fig. A. 2.1にTR-SAMP-1からTR-SAMP-7まで7種類のメッシュ分割を示す。TR-SAMP-1は必要最小限のメッシュ数にした場合、TR-SAMP-2および3は吸収体付近のメッシュ数を増加させた場合、TR-SAMP-4および5は吸収体を細かくメッシュ分割した場合、TR-SAMP-6, 7は吸収体以外の部分のメッシュ数を増加させた場合である。臨界計算によって得られた実効増倍率を計算条件とともにTable A. 2.1に示す。この表にはFACOM 230-75で要したC. P. U時間も同時に示した。なお計算における収束の判定条件はすべて $1 \times 10^{-3}$ とした。この表から次の事実がわかる。

- ① メッシュ数、NP、セル間のカップリング、再釣り合い加速法の適用領域の違いにより、実効増倍率に最大7.5%の差が生じる。
- ② メッシュ数が増加すると実効増倍率の値は改善される方向に変化するが、TR-SAMP-3～TR-SAMP-5を比較してわかるように、吸収体やその内側のメッシュを増やしても、実効増倍率には影響しない。
- ③ NPを増やせば、実効増倍率の値は改善される。但しこのことにより計算時間は飛躍的に増大する。例えばTR-SAMP-1のメッシュ分割の場合、NP=2, 3になるとそれぞれ、NP=1の場合の6.3倍、16.3倍の時間が必要であり、またTR-SAMP-7の場合にはNP=2にすると、NP=1の場合の10.8倍の時間を要する。
- ④ 加速法を細メッシュ単位で行なう場合には、付録1で示したTWOTRANの例と同様に、収束しない場合がある。全体系で再釣り合い加速を行なう場合には、収束の不安定性は生じない。なお、どちらの場合でも収束するTR-SAMP-1の例でも、実効増倍率の値に0.5%程度の差が生じる。
- ⑤ 計算の過程で、セル境界における角度束の不連続性を認める方法が一般に用いられるが、すべて連続として取り扱う場合と実効増倍率の差が3%程度生じる場合がある。

以上のように TRIPLET は、用いる計算条件によって、実効増倍率にかなりの差が生じることがわかった。今後このコードを用いる場合には以上の様な事実を認識したうえで用いる必要がある。大雑把な言い方をすればメッシュの数をふやすよりは、NP の値を大きくし、セル間のカップリングについては不連続条件、加速法については体系全体について行うことにより、最も有効に用いることができると考えられる。

Table A.2.1 TRIPLETを用いて得られた実効増倍率

右肩の数字はC.P.U時間を示し、( )内の数字はTR-SAMP-7, NP=2の値を基準とした相対値を示す。すべて6群P1S6計算である。

CRなし keff=1.324

セル間の リンアップ	ケース		TR-SAMP-1	TR-SAMP-2	TR-SAMP-3	TR-SAMP-4	TR-SAMP-5	TR-SAMP-6	TR-SAMP-7
	加速法		14Meshes	39Meshes	54Meshes	89Meshes	102Meshes	76Meshes	333Meshes
1	不連続	whole	26秒 0.541 (0.925)	60秒 0.549 (0.938)	81秒 0.562 (0.961)	122秒 0.562 (0.961)	164秒 0.562 (0.961)	114秒 0.565 (0.966)	147秒 0.576 (0.985)
	連続	fine	32秒 0.544 (0.930)	収束せず	---	---	---	---	---
1	不連続	whole	16秒 0.564 (0.964)	---	---	---	---	---	---
	連続	fine	不安定 (マニュアルより)	---	---	---	---	---	---
1	不連続	whole	171秒 0.574 (0.981)	447秒 0.573 (0.979)	---	---	---	---	1590秒 0.585 (1.000)
	連続	fine	203秒 0.577 (0.986)	収束せず	---	---	---	---	---
3	不連続	whole	---	---	---	---	---	---	---
	連続	fine	520秒 0.582 (0.995)	---	---	---	---	---	---

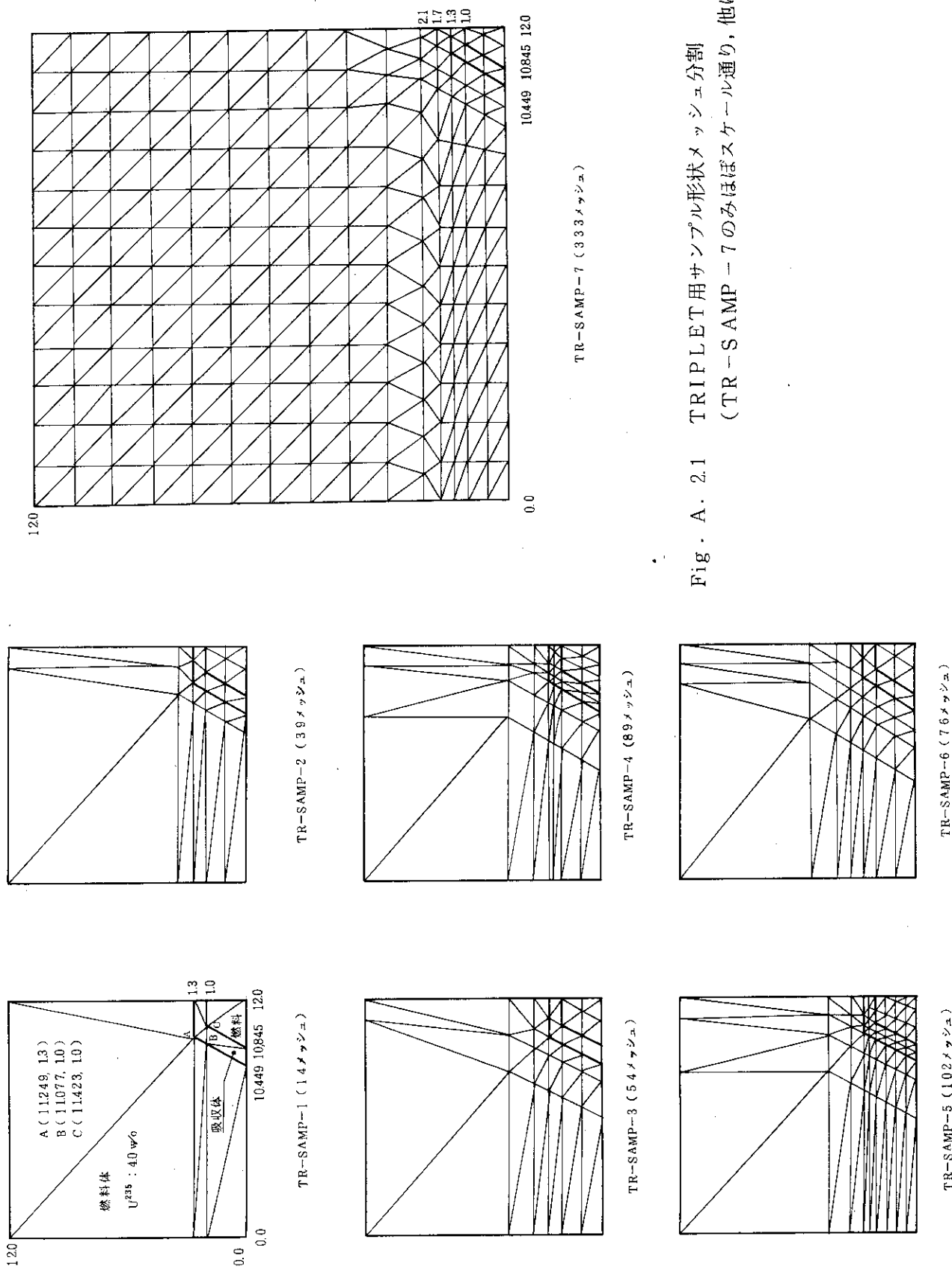


Fig. A. 2.1 TRIPLET用サンプル形状メッシュ分割  
(TR-SAMP-7のみはぼスケール通り, 他は概略)



### 付録3. 制御棒形状と反応度値に対する サーベイ計算例について

制御棒反応度値を計算する場合、その形状近似法が反応度値に与える効果を検討するために、モンテ・カルロ計算コードKENO-4を用いて、合計10ケースの計算を行なった。Fig. A.3.1に対象とした体系の断面形状と、得られた実効増倍率を示す。これらはいずれも高さ400 cmの無限平板形状の均質な燃料体中に一定の間隔で制御棒が全挿入されている体系で、図示された形状は、その単位セルの断面である。Table A.3.1に計算された制御棒反応度値と制御棒に吸収される中性子の割合を、又Table A.3.2には、その群ごとの内わけを示す。これらの表から次の事実がわかる。

- ① 円形断面の制御棒のケース2に比較し、体積を保存して、形状を正方形にしたケース3、形状を長方形にしたケース4は、表面積が増加する。この場合、速中性子の吸収割合はほとんど変化しないが、熱中性子の吸収割合が増加する。
- ② ケース2に比較して、表面積を保存して、形状を正方形にしたケース5、長方形にしたケース6は体積が減少する。この場合、速中性子の吸収割合は減少するが、熱中性子については、大きな変化はない。
- ③ 上記①および②に類似した現象が、ケース8、ケース9、ケース10の比較でも見られる。
- ④ ケース2の制御棒の内側の吸収体を取り除いたケース7の場合をケース2に比較すると、速中性子の吸収はかなり減少するが、熱中性子については大巾な変化はない。

これらの事実から判断するなら、大雑把な傾向として、速中性子の吸収は体積が関係し、熱中性子については表面積に依存することがいえる。なお、この計算に用いた燃料部分の熱中性子拡散距離は約20 cmであるのでケース2～ケース7については、制御棒間の干渉効果の影響がある可能性もある。

中性子吸収割合から簡単な比例計算を行なえば、半径2 cmの円形断面制御棒モデルと同等な吸収能力を持つための正方形断面制御棒の1辺は約3.43 cmになり、円の直径の $(1.17)^{-1}$ 倍となりほぼ拡散理論の結果と一致する。

結局、制御棒反応度値を計算する場合に、制御棒断面の形状を実際の形状から変えてモデル化する際には、単に、体積や表面積を保存するというだけでは一般には不適當で、精度、体系のスペクトル、周囲の物質の拡散距離、干渉効果などを考慮したうえで、慎重にモデルを決定すべきであろう。

Table A. 3. 1 制御棒反応度値および制御棒による中性子吸収割合

ケース	制御棒反応度 値 ( $\Delta k$ )	中性子吸収割合 <sup>*</sup> (%)	制御棒断面形状
2	0.766	48.4	半径 2 cm の円
3	0.781	49.6	等体積正方形 3.545 cm $\times$ 3.545 cm
4	0.816	51.0	等体積長方形 2.047 cm $\times$ 6.140 cm
5	0.731	45.5	等表面積正方形 $\pi$ cm $\times$ $\pi$ cm
6	0.713	44.0	等表面積長方形 1.571 cm $\times$ 4.712 cm
7	0.755	47.5	中空円 OD 2 cm $\times$ ID 0.8 cm
8	0.103	5.79	半径 2 cm の円
9	0.104	5.99	等体積正方形 3.545 cm $\times$ 3.545 cm
10	0.091	5.28	等表面積正方形 $\pi$ cm $\times$ $\pi$ cm

\* 全体系で吸収される中性子のうち制御棒で吸収される割合。  
(吸収+もれ)を100%としている。

注) ケース2~ケース7は単位セル一辺が 30 cm  
ケース8~ケース10は " 100 cm

Table A.3.2 制御棒内で吸収される群毎の中性子吸収割合 (%)

ケース	1	2	3	4	5	6
2	0.216	16.1	2.84	1.43	2.48	25.3
3	0.212	16.2	2.99	1.55	2.52	26.1
4	0.217	16.6	3.23	1.77	2.70	26.5
5	0.174	13.6	2.66	1.44	2.43	25.2
6	0.131	11.3	2.77	1.55	2.45	25.8
7	0.189	14.7	2.85	1.39	2.49	25.9
8	0.0152	1.44	0.255	0.160	0.278	3.64
9	0.0174	1.43	0.289	0.136	0.281	3.84
10	0.0131	1.07	0.226	0.118	0.264	3.59


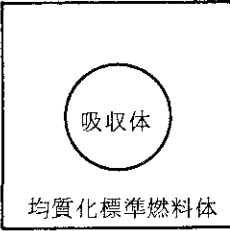
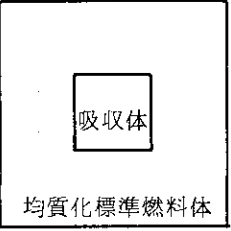

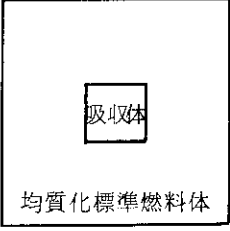
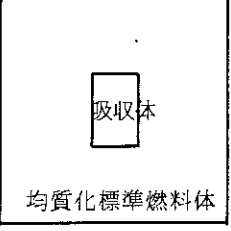
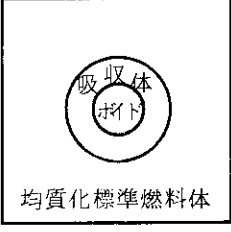
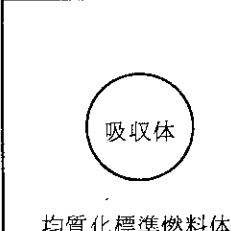
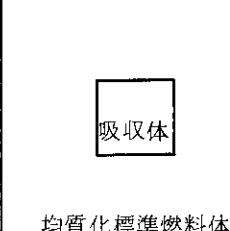

 <p>均質化標準燃料体</p> <p><math>k_{eff} = 1.343 \pm 0.006</math> ケース 1</p>	<p>円筒</p>  <p>均質化標準燃料体</p> <p>吸収体半径 2 cm</p> <p><math>k_{eff} = 0.577 \pm 0.003</math> ケース 2</p>	<p>等体積角柱</p>  <p>均質化標準燃料体</p> <p>吸収体 3.545 cm × 3.545 cm</p> <p><math>k_{eff} = 0.562 \pm 0.003</math> ケース 3</p>
<p>等体積角柱</p>  <p>均質化標準燃料体</p> <p>吸収体 2.047 cm × 6.14 cm</p> <p><math>k_{eff} = 0.527 \pm 0.003</math> ケース 4</p>	<p>等表面積角柱</p>  <p>均質化標準燃料体</p> <p>吸収体 <math>\pi</math> cm × <math>\pi</math> cm</p> <p><math>k_{eff} = 0.612 \pm 0.003</math> ケース 5</p>	<p>等表面積角柱</p>  <p>均質化標準燃料体</p> <p>吸収体 1.571 cm × 4.712 cm</p> <p><math>k_{eff} = 0.630 \pm 0.003</math> ケース 6</p>
<p>中空円筒</p>  <p>均質化標準燃料体</p> <p>吸収体 外半径 2 cm 内半径 0.8 cm</p> <p><math>k_{eff} = 0.588 \pm 0.003</math> ケース 7</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ケース 1~ケース 7 1辺 30 cm × 400 cm 角柱形燃料体</li> <li>• ケース 8~ケース 10 1辺 100 cm × 400 cm 角柱形燃料体</li> <li>• いずれも X-Y 断面を示す</li> <li>• 境界条件 ±X, ±Y 方向反射, ±Z 方向: 真空</li> <li>• 1世代 300<sub>μ</sub> × 105 世代</li> </ul>	
<p>円筒</p>  <p>均質化標準燃料体</p> <p>吸収体半径 2 cm</p> <p><math>k_{eff} = 1.240 \pm 0.003</math> ケース 8</p>	<p>等体積角柱</p>  <p>均質化標準燃料体</p> <p>吸収体 3.545 cm × 3.545 cm</p> <p><math>k_{eff} = 1.239 \pm 0.003</math> ケース 9</p>	<p>等表面積角柱</p>  <p>均質化標準燃料体</p> <p>吸収体 <math>\pi</math> cm × <math>\pi</math> cm</p> <p><math>k_{eff} = 1.252 \pm 0.003</math> ケース 10</p>

Fig. A. 3.1 計算体系および得られた実効増倍率

## 付録4. 格子計算コードJMSLALOMおよびDIRKについて

第5章で検討したように、衝突確率法を用いた簡易格子計算、群定数作成コードJMSLALOMやDIRKで制御棒挿入時の制御型燃料体均質化断面積を作成すると、制御棒価値を過大に評価する傾向のあることがわかった。Table 5.10を見ると、再格子計算の際、TWOTRAN-2を用いて定数を作成した基準ケース(BM<sub>3</sub>-CRG<sub>1.5</sub>モデル)に比べ、JMSLALOMを用いた場合には6.2%、DIRKを用いた場合には13.1%も制御棒価値を過大評価している。均質化断面積の値については、例えば、Fig. 5.1に示すように吸収断面積を過大に評価すること(特にDIRKは極端である)およびFig. 5.2に示すように生成断面積を過少に評価するなどの特徴がある。これはJMSLALOMのような一次元計算では十分に空間中性子束分布を考慮できないこと、またDIRKにおいてはモデルに問題があることを示している。JMSLALOMにおける格子形状モデルはFig. 2.2に示した中心に制御棒のある円柱モデルである。又、DIRKにおける形状は、Fig. A.4.1に示すような制御棒対挿入の効果を考慮できるものである。

さて、この両コードとも、生成断面積を過少に算出するのは、BM<sub>1</sub>ブロックモデルを用いたTWOTRAN-2の場合と同様、制御型燃料中で燃料と黒鉛を均質化して扱ったためであろう。また吸収断面積については、両者とも、(特にDIRKでは著るしいが)過大に算出している。これは生成断面積は過少に算出することから考え、吸収体もしくは制御棒被覆材の空間遮蔽係数を過大に評価するためであろう。JMSLALOMは本来1次元コードであるので簡易計算コードとして用い方を注意すれば良いと思われるが、DIRKについては、形状モデルそのものに改良の余地があると考えられる。特に制御棒挿入孔以外の制御型燃料体を1領域とし、中性子束分布を平坦と仮定していることが最大の問題であろう。Fig. A.4.1にDIRKを用いた格子計算で得られた実効増倍率と制御棒中心間距離の関係を示す。この図中●印で示した値は制御型燃料体内を衝突確率法で解き、その外側の標準型燃料体部分は拡散方程式を解く通常の方法で得られた値であり、○印で示したのは制御型燃料体中、両制御棒のすぐ外側に、Fig. A.4.1に破線で示した、仮想境界を設置し、その外側2領域を拡散理論で計算して得た値である。前者は制御型燃料体の制御棒挿入孔を除いたすべての部分で中性子束が平坦になるのに比べ、後者においては、破線の外側では制御型燃料体内でも中性子の平坦でない分布が得られることになる。このような用い方をすることで、実効増倍率が大幅に増加し、したがって制御棒価値は減少することから考えて、DIRKにおいてはこの制御型燃料体を多領域に分割できるモデルに改良する必要があることは明らかであろう。

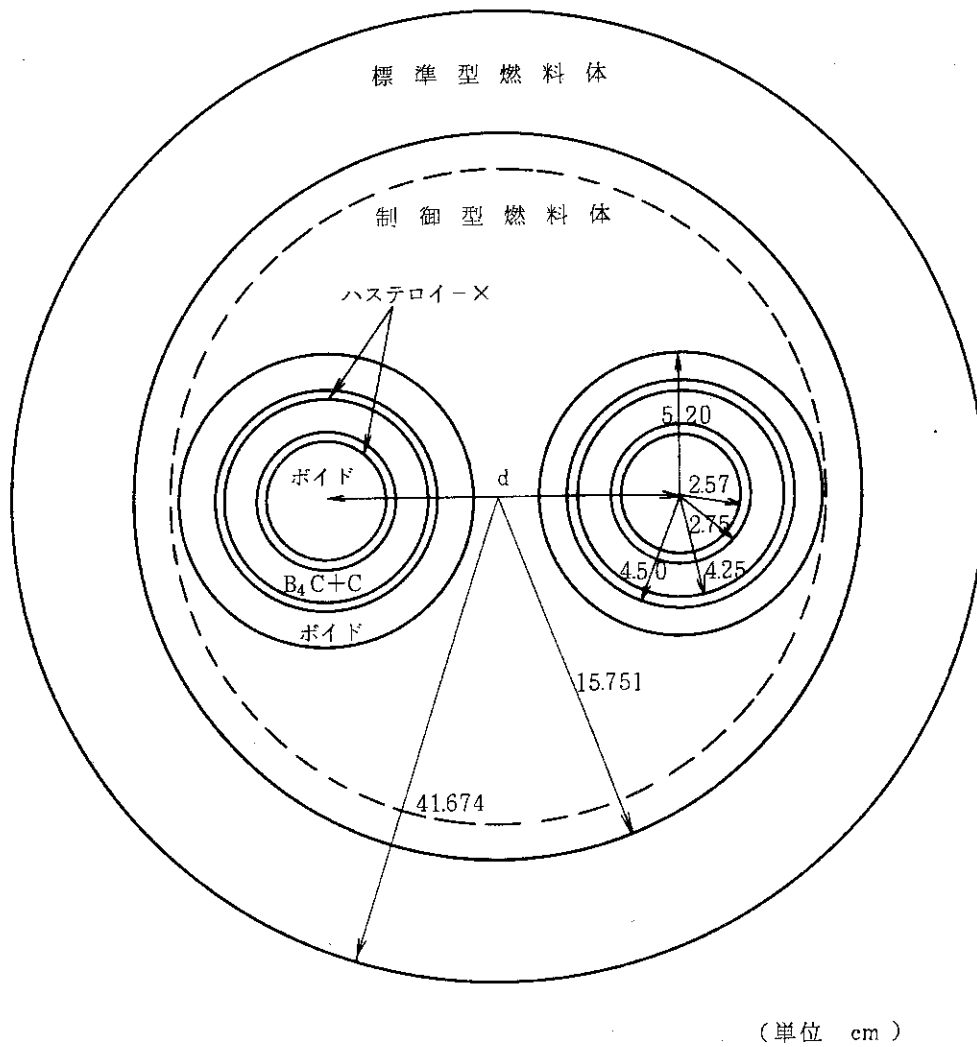


Fig.A.4.1 DIRK 計算形状 (破線は仮想境界を示し、この内側を衝突確率法で、外側を拡散計算で解く。)

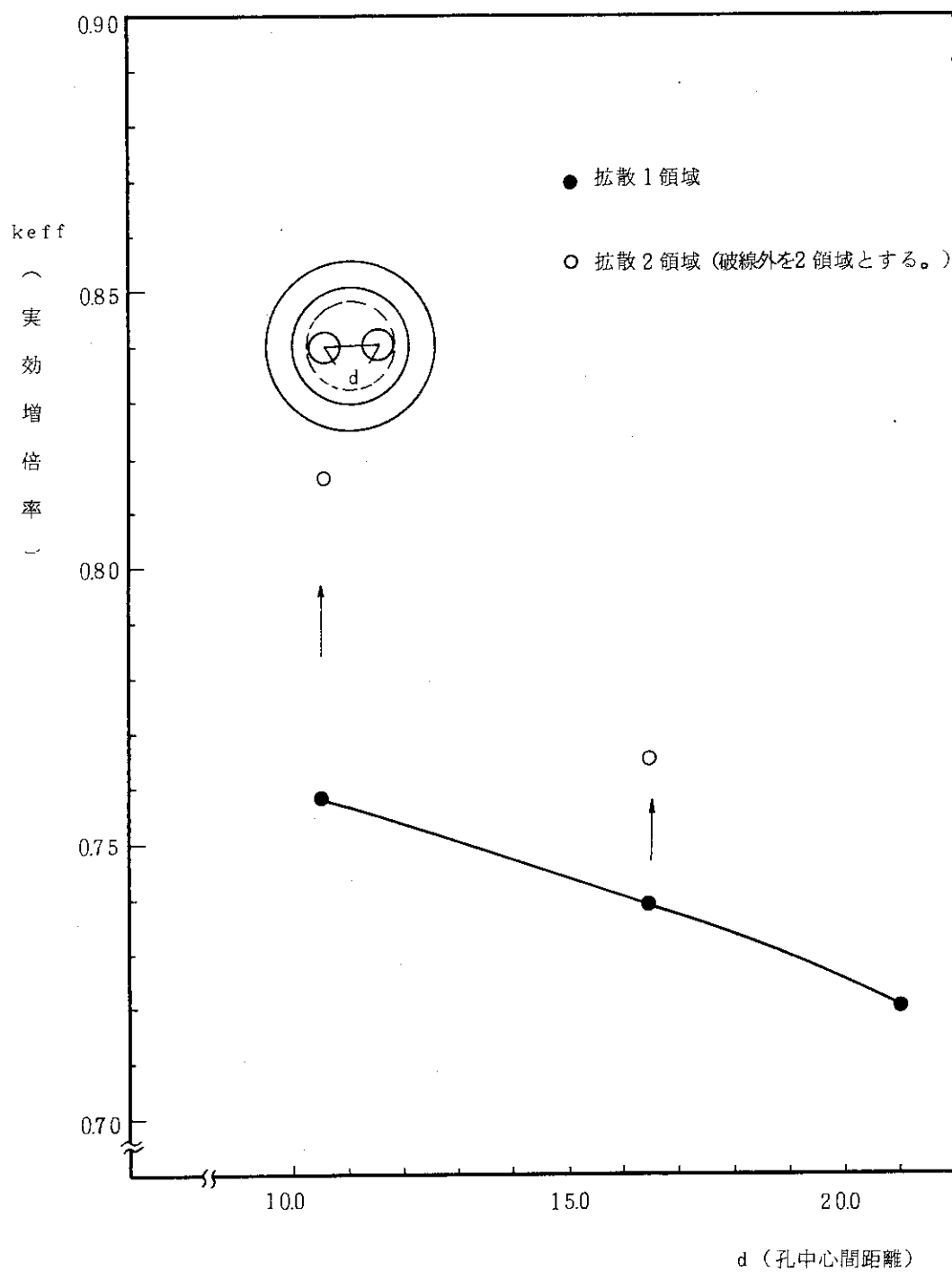


Fig. A. 42 DIRK で計算された制御棒中心間距離と実効増倍率の関係