

JAERI-M

9956

SHE-14 可燃性毒物棒反応度値解析

—VHTR 核設計法の精度検討(5)—

1982年3月

高野 誠・土井 猛*・平野 光将
新藤 隆一

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1982

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

SHE-14可燃性毒物棒反応度値解析
-VHTR核設計法の精度検討(5)-

日本原子力研究所動力炉開発・安全性研究管理部
高野 誠・土井 猛*・平野 光将・新藤 隆一
(1982年1月25日受理)

多目的高温ガス実験炉の核設計法の検証を目的として、平均質臨界実験装置(SHE)で行われた可燃性毒物(BP)棒の反応度値測定解析を、SHE-14体系に対し行った。解析では、DELIGHT-5およびTWO TRAN-IIを用いて、それぞれ中性子スペクトルおよびBP棒反応度値を計算した。BP棒が一本および二本装荷された炉心に対し、解析用モデルをR- θ 形状で作成し、それぞれ三種のBP棒のボロン濃度に対し解析した。

解析により得られたBP棒反応度値は、ボロン濃度が4.27および8.35w/oの場合、実験値と10%以内で一致した。しかし、ボロン濃度が2.11w/oの場合には、20%以上の相違を示した。

* 業務協力員(石川島播磨重工業)

JAERI-M 9956

Analysis of Reactivity Worths of Burnable Poison Rods in SHE-14
- Accuracy Investigation of VHTR Nuclear Design Methods (5) -

Makoto TAKANO, Takeshi DOI*, Nitsumasa HIRANO
and Ryuichi SHINDO

Division of Power Reactor Projects, JAERI

(Received January 25, 1982)

In the report, the reactivity worths of burnable poison (BP) rods, which were measured at Semi-Homogeneous Experimental Assembly (SHE)-14, are analyzed for the purpose of verifying the computer codes and calculational methods employed in the nuclear design of VHTR. The codes, DELIGHT-5 and TWOTRAN-II calculate the neutron spectrum and BP rod worths respectively. Adopting R - θ geometry, SHE-14 with one and two BP rod(s) of three different boron contents are analyzed.

Calculated values of BP rod worths show the disagreements of less than 10% for the boron contents of 4.27% and 8.35%, but more than 20% for that of 2.11%.

Keywords: Critical Assembly, SHE, Burnable Poison,
Reactivity Worth, Calculation, DELIGHT, TWOTRAN,
VHTR, Nuclear Design, Accuracy

*on leave from Ishikawajima-Harima Heavy Ind. Co.

目 次

1. 緒 言	1
2. 実験方法と実験データ	2
3. 実験解析	7
3.1 解析方法	7
3.2 格子計算用データおよび炉心計算用群定数の作成	7
3.3 SHE-14形状とモデル化	8
3.4 解析結果	9
4. 結 論	22
謝 辞	23
参考文献	23

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Experimental method and data	2
3. Analysis of experiment	7
3.1 Analysis method	7
3.2 Data for cell calculation and preparation of group constants for core calculation	7
3.3 Configuration of SHE-14 and modeling	8
3.4 Result	9
4. Conclusion	22
Acknowledgement	23
References	23

1. 緒 言

多目的高温ガス実験炉設計室（以下当室と称す）においては、主に多目的高温ガス実験炉（VHTR）の核設計法および核計算コードの検証を目的として、平均質臨界実験装置（以下SHEと称す）で得られた実験データの解析を行っている。当室で使用している核計算コードのうち、今回の検証の対象としたものは、高温ガス冷却炉・格子燃焼計算コードDELIGHT-5¹⁾、輸送計算コードTWO TRAN-II²⁾、拡散計算コードCITATION³⁾である。

SHEの実験は、日本原子力研究所・炉物理実験研究室（以下炉物理研と称す）で行われており、各種のSHE体系に対し種々の実験が行われている。当室では、炉物理研で行われた実験のうちから上記の目的に相当と考えられる実験ケースを選択し解析を行っている。実際に当室で行われた解析は、臨界質量実験の解析⁴⁾、制御棒値解析^{5, 6)}、中性子束分布解析⁷⁾、可燃性毒物棒反応度値解析、温度係数解析⁸⁾である。これらの解析を通じ、上記計算コードの検証を行う。解析の方針として、可能な限り計算で用いるモデル化された体系を実際の体系に近づけるなど、解析方法により生ずる解析誤差を極力小さくするものとする。これにより、計算コード自体に起因する実験との差違を把握でき、計算コードの検証を行うことができる。

本報では、当室で行った解析のうち可燃性毒物（以下BPと称す）棒の反応度値解析について記述する。炉物理研より得た、SHE-14体系におけるBP棒反応度値測定実験に対し解析を行う^{9, 10)}。実験に使用されたBP棒は、外径54mm、全長1180mmの黒鉛棒であり、その中心部にある直径8.5mm、長さ1140mmの中性子吸収ペレット（以下BPペレットと称す）用挿入穴に、直径8mm、高さ10mmのBPペレットが114個挿入されている。このBPペレット挿入穴にボロン濃度等の異なる各種BPペレットを挿入し、種々の実験を行っている。ここでは、このうちSHE-14にBP棒が、一本および二本挿入された場合についてのBP棒反応度値を解析するものとする。さらに、BPペレット中の B_4C 粒子間の自己遮蔽効果の影響を無視できると思われる、粒径 $\sim 3 \mu m$ の B_4C 粒子を持つBPペレットについてのみ解析を行う。また、BPペレット中のボロン濃度としては、2.11、4.27、8.35w/oの場合について取扱う。したがって、解析ケースとしては、BP棒本数2種類、ボロン濃度3種類であり、計6ケースとなる。

実際の解析では、DELIGHT-5コードおよび、TWO TRAN-IIコードを用いる。DELIGHT-5コードより求めた18群定数を用い、TWO TRAN-IIによりBP棒未挿入体系の実効増倍率を求める。次に、求められる実効増倍率が1.0となるような核分裂当りの中性子収量 ν の値を調整する。この新たな ν の値を用いてBP棒挿入時の実効増倍率を求め、未挿入時との差によりBP棒反応度値を求める。ただし、 ν の値で正確にBP棒未挿入時の実効増倍率が1.0とならないときには、未挿入時の実効増倍率が1.0となるような表示上の規格化を挿入時の実効増倍率に対しても行う。

実験体系のモデル化は、R- θ 形状でBP棒一本および二本の場合それぞれに対し行う。このとき、中心角 θ は 180° まで考慮する必要があり、メッシュ数や計算時間の関係から燃料棒部分は均質化して取扱い、BP棒部分のみ詳細にモデル化している。ここで、TWO TRAN-IIコード

での計算は P_0S_{10} で行い、収束判定条件は中性子束および固有値それぞれに対し 10^{-5} 以下を用いるものとする。

解析の結果、BP 棒一本および二本の場合ともボロン濃度が4.27, 8.35 w/o の場合には、実験値と10%以内で一致している。ボロン濃度が2.11 w/o の時には、20%以上の相違を示している。したがって、ボロン濃度が低く一本のBP 棒の反応度値が小さい場合には、さらに詳細な解析を行う必要があると考えられるものの、本報で示した反応度値の解析手法は、一本のBP 棒のもつ反応度値がある程度以上に大きい場合には妥当であると考えられる。

2. 実験方法と実験データ

炉物理研では、SHE-14体系においてBP 棒反応度値の測定を、ベリオド法および燃料棒置換法で各種行っている。BP ペレット内に含まれる粒状炭化ホウ素 (B_4C 粒子) の粒径が、 $\sim 3 \mu m$, 250~355 μm , 425~710 μm , および710~1000 μm の四種類のものに対する実験を、種々のBP 棒配置パターンに対し行っている。当室での解析では、 B_4C 粒子の自己遮蔽効果の影響が最も小さく無視できることが明らかである、 B_4C 粒子の粒径が $\sim 3 \mu m$ の実験ケースに対し解析を行うこととする。また、挿入されるBP 棒の本数が、一本および二本の場合のみについて解析し、三本以上挿入された実験ケースの解析は行わない。ここで、BP 棒一本とは、SHE の固定側および移動側のそれぞれの対応位置に挿入された、長さ約120cmのもの2本分を示すものとする。ただし、ホウ素含有量については、2.25 w/o, 4.50 w/o, 9.0 w/o の三種のものを総てについて解析を行う。

Table 2.1 に、BP 棒内に入っている中性子吸収ペレットに対するデータを示す。Fig. 2.1 に、BP 棒の形状を示す。また、Fig. 2.2 に、基準状態となるBP 棒の挿入されていないSHE-14体系の燃料棒配置について示す。さらに、Fig. 2.3 および2.4 には、BP 棒がそれぞれ、一本および二本挿入された時の炉心形状について示す。また、実験により得られた、BP 棒反応度値を、Table 2.2 に示す。

Table 2.1 Data for neutron absorbing pellets¹⁰⁾

Content of Boron (w/o)	Height of pellet (mm)	Outer diameter of pellet (mm)	Measured content of Boron (w/o)	Gross density (g/cm ³)
2.25	10.0±0.3	8.0±0.3	2.11±0.06	1.58
4.50	10.0±0.3	8.0±0.3	4.27±0.12	1.61
9.0	10.0±0.3	8.0±0.3	8.35±0.30	1.63

での計算は P_0S_{10} で行い、収束判定条件は中性子束および固有値それぞれに対し 10^{-5} 以下を用いるものとする。

解析の結果、BP 棒一本および二本の場合ともボロン濃度が4.27, 8.35 w/o の場合には、実験値と10%以内で一致している。ボロン濃度が2.11 w/o の時には、20%以上の相違を示している。したがって、ボロン濃度が低く一本のBP 棒の反応度値が小さい場合には、さらに詳細な解析を行う必要があると考えられるものの、本報で示した反応度値の解析手法は、一本のBP 棒のもつ反応度値がある程度以上に大きい場合には妥当であると考えられる。

2. 実験方法と実験データ

炉物理研では、SHE-14体系においてBP 棒反応度値の測定を、ペリオド法および燃料棒置換法で各種行っている。BP ペレット内に含まれる粒状炭化ホウ素 (B_4C 粒子)の粒径が、 $\sim 3 \mu m$, 250~355 μm , 425~710 μm , および710~1000 μm の四種類のものに対する実験を、種々のBP 棒配置パターンに対し行っている。当室での解析では、 B_4C 粒子の自己遮蔽効果の影響が最も小さく無視できることが明らかである、 B_4C 粒子の粒径が $\sim 3 \mu m$ の実験ケースに対し解析を行うこととする。また、挿入されるBP 棒の本数が、一本および二本の場合のみについて解析し、三本以上挿入された実験ケースの解析は行わない。ここで、BP 棒一本とは、SHEの固定側および移動側のそれぞれの対応位置に挿入された、長さ約120cmのもの2本分を示すものとする。ただし、ホウ素含有量については、2.25 w/o, 4.50 w/o, 9.0 w/o の三種のもの総てについて解析を行う。

Table 2.1に、BP 棒内に入っている中性子吸収ペレットに対するデータを示す。Fig. 2.1に、BP 棒の形状を示す。また、Fig. 2.2に、基準状態となるBP 棒の挿入されていないSHE-14体系の燃料棒配置について示す。さらに、Fig. 2.3および2.4には、BP 棒がそれぞれ、一本および二本挿入された時の炉心形状について示す。また、実験により得られた、BP 棒反応度値を、Table 2.2に示す。

Table 2.1 Data for neutron absorbing pellets¹⁰⁾

Content of Boron (w/o)	Height of pellet (mm)	Outer diameter of pellet (mm)	Measured content of Boron (w/o)	Gross density (g/cm ³)
2.25	10.0±0.3	8.0±0.3	2.11±0.06	1.58
4.50	10.0±0.3	8.0±0.3	4.27±0.12	1.61
9.0	10.0±0.3	8.0±0.3	8.35±0.30	1.63

Table 2.2 Measured values of burnable poison (BP) reactivity worth¹⁰⁾

No. of BP rod(s)	Content of boron in BP (w/o)	Reactivity worth (ϕ)
1	2.11	118.5 \pm 4.2
	4.27	193.1 \pm 4.8
	8.35	254.3 \pm 5.4
2	2.11	236.6 \pm 5.4
	4.27	391.2 \pm 6.8
	8.35	519.2 \pm 8.0

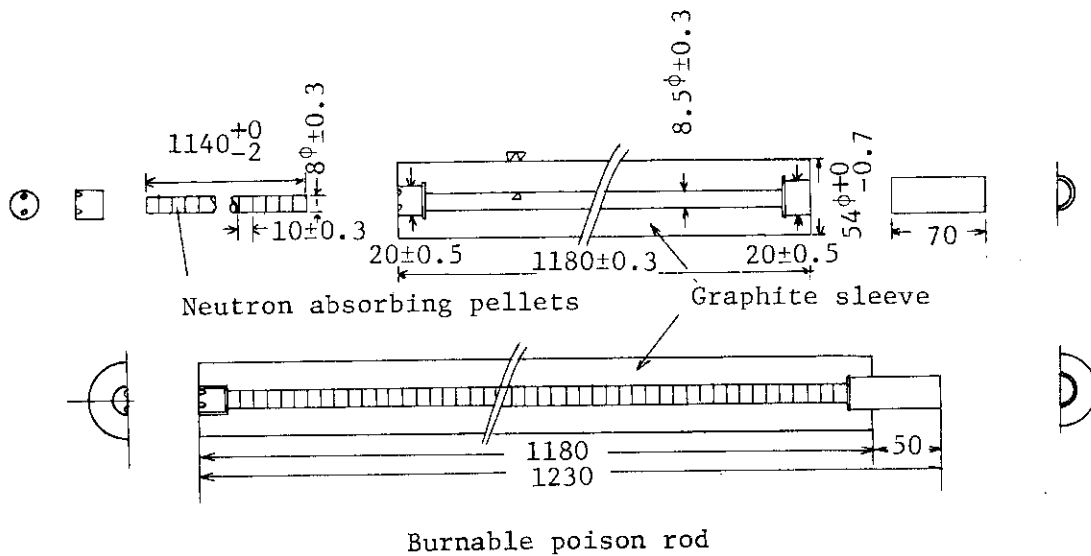


Fig. 2.1 Cross section of experimental burnable poison rod¹⁰⁾

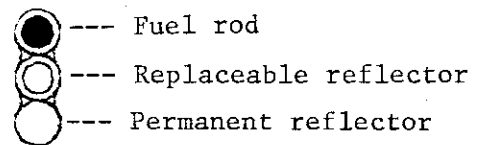
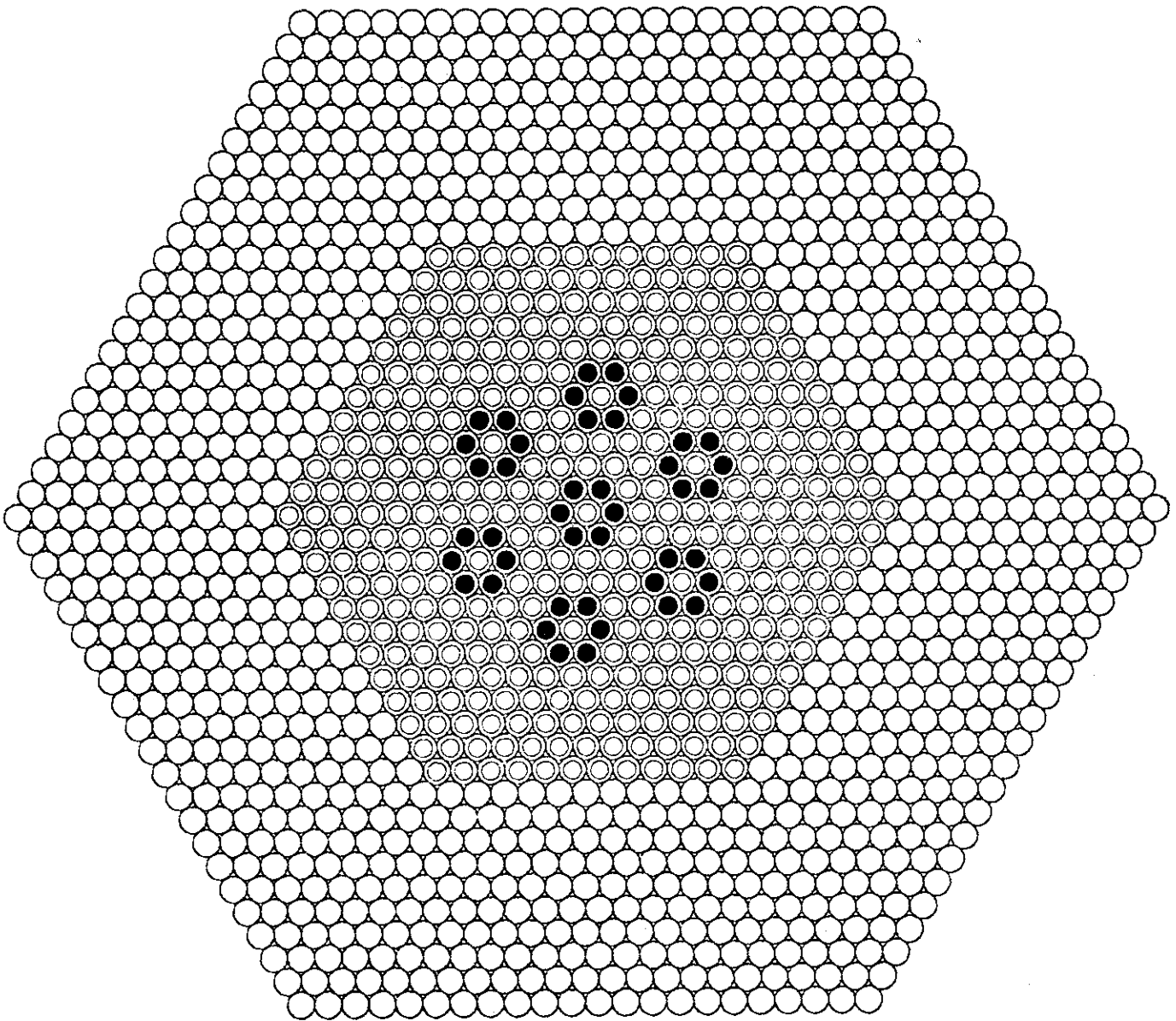
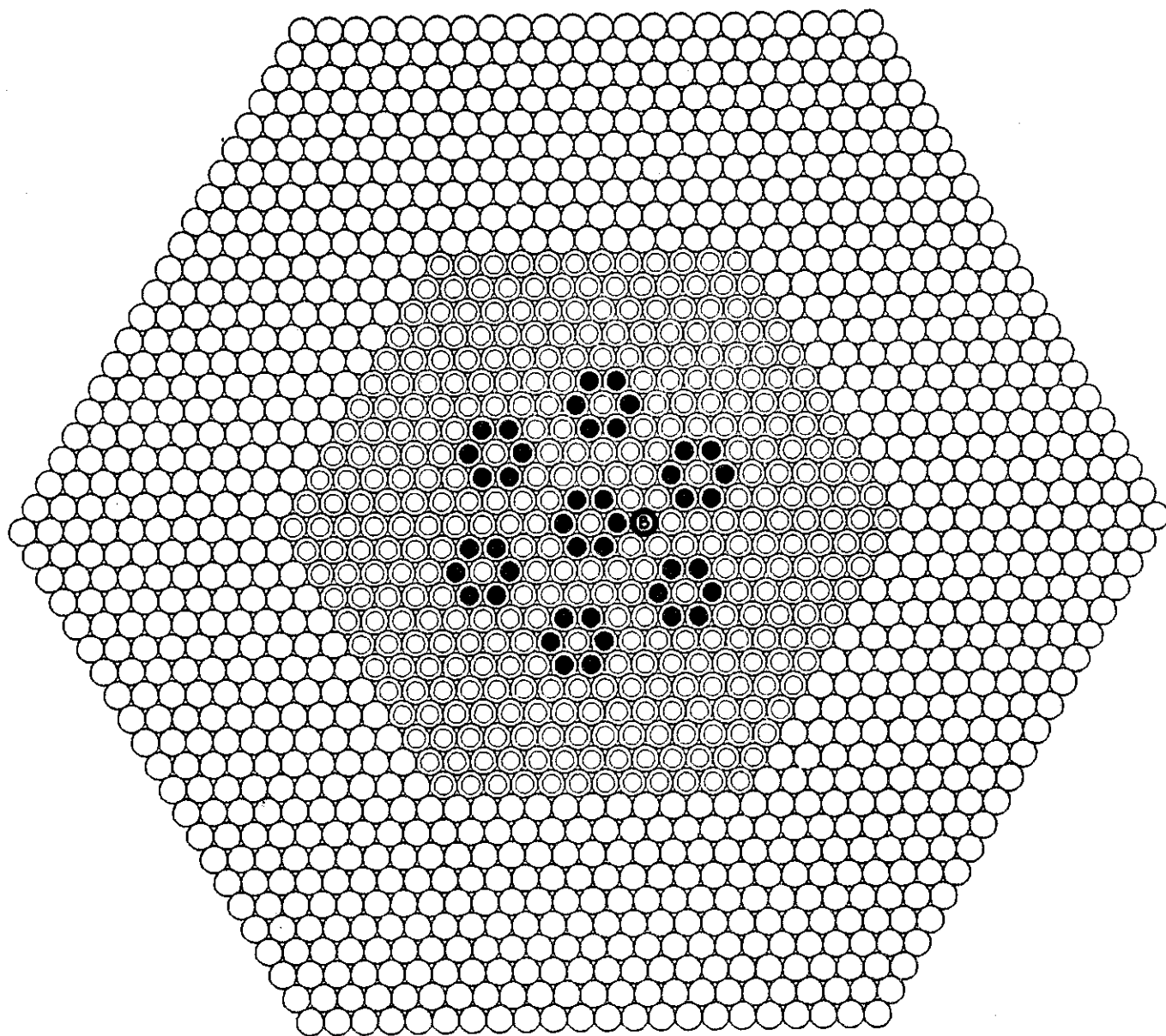
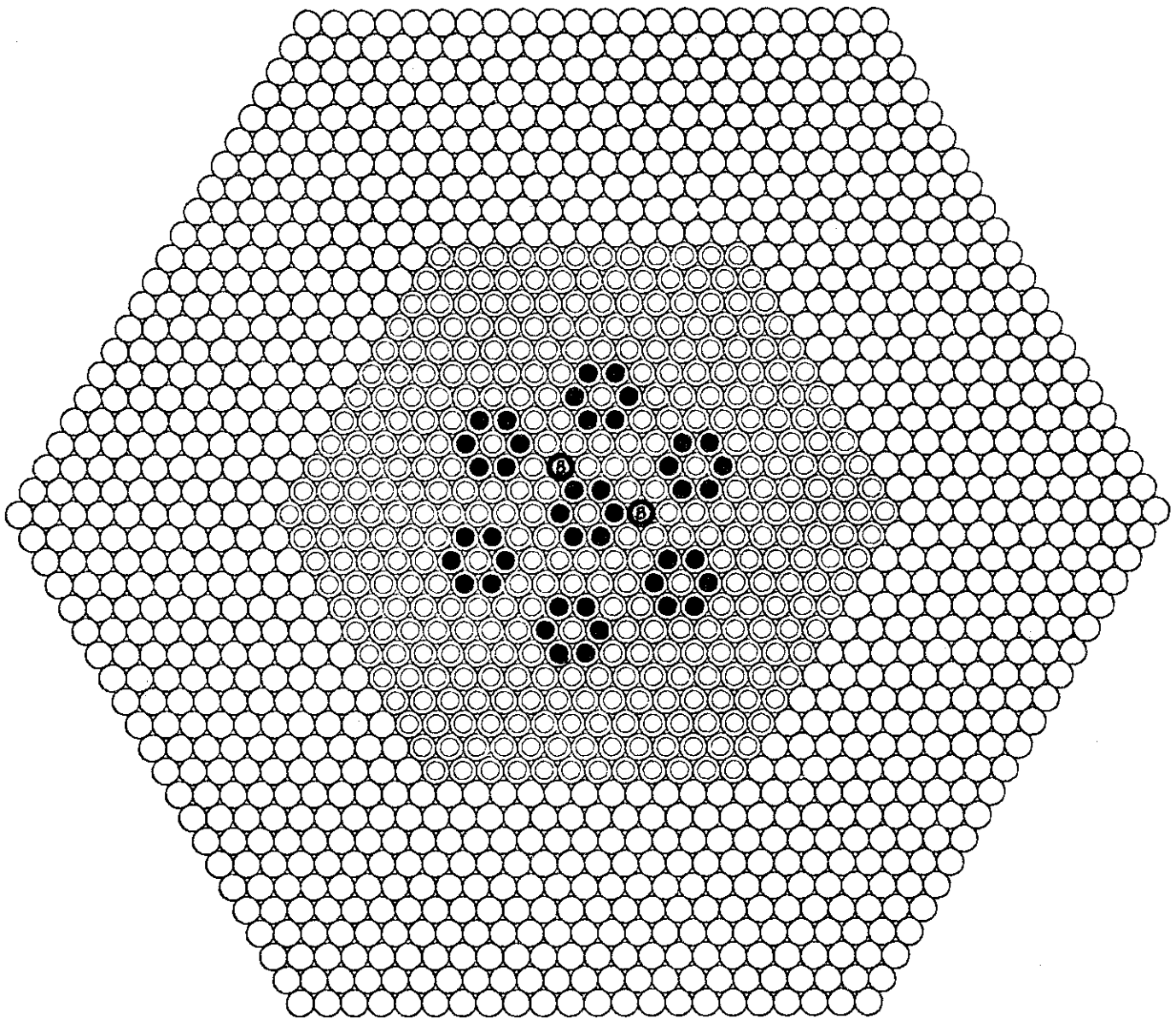


Fig. 2.2 SHE-14 configuration without BP rods.



- --- Fuel rod
- ⓑ --- BP rod
- --- Replaceable reflector
- --- Permanent reflector

Fig. 2.3 SHE-14 configuration with one BP rod.



- --- Fuel rod
- ⊙ --- BP rod
- --- Replaceable reflector
- --- Permanent reflector

Fig. 2.4 SHE-14 configuration with two BP rods.

3. 実験解析

3.1 解析方法

解析には、DELIGHT-5 コードおよび TWOTRAN-II コードを用いる。まず、DELIGHT-5 コードにより求められる中性子スペクトルを用いて、TWOTRAN-II コード用の 18 群定数を求める。次に、この 18 群定数を用い、BP 棒一本および二本用の計算モデルそれぞれに対し、TWOTRAN-II コードによる P_0S_{10} 計算で実効増倍率を求めてゆく。BP 棒の有無による実効増倍率の差を求め、これを BP 棒反応度値とする。計算精度は、収束条件を中性子束および固有値に対し共に 10^{-5} とすることにより十分であるとし、摂動計算は特に行わない。ここで、反応度をドル単位で表示する際に必要となる実効遅発中性子分率 β 値は、炉物理研で使用している値である、 $\beta = 0.00684$ を用いる。

本報では、SHE-14 体系全体を、輸送計算コード TWOTRAN-II で取扱っているが、これよりも、さらに簡便で計算時間のかからない方法として BP 棒付近のみの断面積を輸送計算で処理し、この断面積を用い CITATION コードで拡散計算を行い、BP 棒反応度値を求めることが考えられる。このような方法を用いて行った当室の予備的解析では、実験値との相違がかなり大きくなってしまふことが判明している。したがって、本報では、拡散計算を用いた解析手法の精度検討を行う前段階として、BP 棒および体系全体を同時に輸送計算コード TWOTRAN-II で解析することとする。

3.2 格子計算用データおよび炉心計算用群定数の作成

炉心計算用群定数は、単位格子の概念により DELIGHT-5 コードで求めた中性子スペクトルを用いて作成する。SHE-14 の単位格子として、Fig. 3.1 に示すようなものを考える。また、Table 3.1 には、単位格子計算用原子数密度を、DELIGHT-5 コードへの入力形式で示す。ここで、燃料棒中に存在する黒鉛ディスクについては無視しており、これについては、燃料棒に均質化していない。これに対応して、軸方向バックリング高さは、黒鉛ディスクを除いた燃料ディスクのみの高さとし、230 cm という値を用いている。したがって、軸方向バックリング値は、 $B_g^2 = (\pi/h)^2$ より、 $B_g^2 = 1.8657 \times 10^{-4}$ となる。さらに、燃料棒 6 本ずつで構成される燃料部を円環形状と考えた際に、この円環の外側と内側に対して得られる平均コード長の差を、SHE-14 の平均コード長と仮定する。つまり、円環の外側に対する平均コード長 $\bar{\ell}_{out}$ と内側に対する $\bar{\ell}_{in}$ により次のようにして求める。

$$\bar{\ell}_{out} = \frac{4V}{S} = \frac{4 \times (7.3989)^2 \pi}{7.3989 \times 2\pi} = 14.7978, \quad (3-1)$$

$$\bar{\ell}_{in} = 2R = 2 \times 5.0040 = 10.008, \quad (3-2)$$

$$\bar{\ell} = \bar{\ell}_{out} - \bar{\ell}_{in} = 4.7898 \quad (3-3)$$

さらに、NUATOMコードで求められたダンコフ係数 $C (= 0.0007)$ を用い、実効散乱断面積 σ_M を次式により求める。

$$\sigma_M = \frac{\Sigma_P^{eff}}{N_O^{eff}} + \frac{1-C}{N_O^{eff} \cdot \bar{\ell}} \quad (3-4)$$

ここで、 Σ_P^{eff} は、燃料ディスク内核種による燃料ディスク平均のポテンシャル散乱断面積、 N_O^{eff} は共鳴核種の燃料ディスク内平均原子数密度である。Table 3.2 に Σ_P^{eff} および N_O^{eff} の値を示す。これより、実効散乱断面積 σ_M は、1969.7 barn と計算され、この値を、DELIGHT-5 コードへの入力とする。また、燃料および減速材温度としては、300°K を用いている。

このようにして得られた単位格子の中性子スペクトルにより、TWOTRAN コード用の縮約断面積を作成する。縮約は、高速群、熱群ともそれぞれ9群ずつの計18群であり、エネルギー群構造については、Fig. 3.2 および Table 3.3 に示す。実際には、DELIGHT-5 コードで、スペシャルマテリアルとして、各物質毎の群定数を作成する。Table 3.4 に、燃料部、可動反射体部、固定反射体部のそれぞれに対する原子数密度および、ボロン濃度の異なる三種のBPペレットに対する原子数密度を示す。BPペレット周囲の黒鉛部は、可動反射体黒鉛と同一であるとして解析を行う。

3.3 SHE-14 形状とモデル化

TWOTRAN-II コードで用いる計算形状は、BP棒のみに詳細に着目し、その周囲に存在する燃料棒の配置パターンは、BP反応度値が小さいことから、本解析には重要な影響を与えないものと考え、燃料棒は均質化して取扱うこととする。実際の計算形状は、 $R-\theta$ 形状で表現される均質化燃料領域内に、BPペレット部およびBP棒の黒鉛部が存在することになる。ここで、BP棒のペレット部およびその周囲の黒鉛棒部の体積を保存するようにしてモデル化を行っている。BPペレットの表面積でなく体積を保存したのは、使用されているBPのボロン濃度が比較的うすく、中性子の吸収がBPの表面だけでなく、BP内部でもかなり生じていると考えられ、制御棒のモデル化と多少異なると思われるからである。

BP棒一本および二本の場合とも、回転対称性の関係から、 $R-\theta$ 形状で中心角 $\theta = 180^\circ$ まで考慮する必要がある。このため、本モデル中に個々の燃料棒を表現するようにメッシュを作成すると、メッシュ数が多くなり実際的な意味で処理可能な計算時間では収束は望めない。このことは、先の制御棒挿入時の即発中性子減衰定数解析の際に明らかとなっており⁶⁾、このことから

も、燃料棒を均質化して取扱うことが望ましい。

Figs. 3.3, 3.4に、BP一本挿入時の計算形状を示す。また、Figs. 3.5, 3.6には、二本挿入時に対する計算形状を示す。

3.4 解析結果

先に述べた手順により、TWO TRAN-IIコードを用いて実効増倍率を計算する。Table 3.5に、本解析で行った計算ケースを示す。

まず初めに、計算ケース1~4で収束判定値 10^{-5} による実効増倍率を、BP棒未挿入の状態に対し求める。ただし、実効増倍率を一回の計算により、 10^{-5} の収束判定条件で求めることは多少困難である。したがって、先ず計算ケース1および2で 10^{-4} の収束判定条件で一度計算を行い、その際に得られる中性子分布を初期値として収束判定条件 10^{-5} による実効増倍率の計算を行う(計算ケース3, 4)。このような方法を用いることにより、中性子束分布の初期値を与えない場合よりも、計算時間をかなり短縮可能であり、さらに収束せず発散してしまうケースも減少する。ここで、炉心の計算形状としてはBP棒挿入時のものを用い、BPペレット部分の物質としては黒鉛を割合合せて計算する。BP棒一本および2本挿入時の計算形状は異なるので、これらそれぞれに対し実効増倍率を求めている。

次に、計算ケース3, 4で得られた実効増倍率で、核分裂当りの中性子収量 ν の値を除し、計算モデル上の臨界状態を想定する。確認のため、この基準となる臨界状態の実効増倍率を計算したのが計算ケース5および6である。解析では、この臨界状態に対しBP棒を挿入した場合の実効増倍率の減少分を、BP棒反応度価値としている。次に、BP棒一本および二本の挿入時の実効増倍率を計算ケース7~12で求めている。

得られた結果を、Table 3.6に示す。これより、BP棒のボロン濃度が小さくなる程、計算値と実験値の相違が大きくなることがわかる。ただし、ボロン濃度が、2.11w/oの場合を除き、BP棒一本および二本の場合とも計算値と実験値の相違は10%以内であり、比較的精度の良い解析であると言えよう。ここで、参考のため、TWO TRAN-IIコードの収束判定条件のうち、中性子束に対するものについてのみ、 10^{-5} から 10^{-4} とした場合の計算結果を、Table 3.7に示す。先のTable 3.6と比較すれば、収束判定値をこれ以上厳しくても、計算結果はそれほど変化しないであろうことがわかる。したがってさらにより計算精度を得るためには、モデル化等の改良を計る必要がある。

Table 3.1 SHE-14 atomic number densities for unit cell calculation
($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)

Nuclide	Nuclide ID Number	Region 1	Region 2	Region 3	Region 4	Region 5	Region 6
U235	5			8.4461 -5			
U238	8			3.3671 -4			
B10	28	1.7587 -9	1.4038 -9	2.9494 -9	1.1675 -9	1.7587 -9	
B11	29	7.8913 -9	6.2990 -9	1.2823 -8	5.2384 -9	7.8913 -9	
C	30	8.4743 -2	6.7644 -2	9.4777 -2	5.6254 -2	8.4743 -2	
O	31	3.3979 -5	2.9344 -5	8.9479 -4	2.6258 -5	3.3979 -5	1.1012 -5
Si	33			2.0248 -7			
Al	37			6.3228 -8			
Fe	38			6.1094 -8			
Cr	39			2.1873 -8			
Mn	40			2.0701 -8			
Ni	41			1.9371 -8			
Mo	43			2.3709 -8			
W	44			3.0932 -8			
Gd	46						
Cd	47						
				2.0237-10			
N	49	2.0328 -7	8.0247 -6		1.3235 -5	2.0328 -7	3.8968 -5
H	50	6.7846 -5	5.4381 -5	7.9655 -5	4.5412 -5	6.7846 -5	1.1152 -6

Table 3.2 Atomic number densities and potential scattering cross sections of fuel disk

Nuclide	Atomic number density ($\times 10^{24}/\text{cm}^3$) \AA	Potential scattering cross section (barn) $\text{\textcircled{B}}$	$\text{\textcircled{A}} \times \text{\textcircled{B}}$ (cm^{-1})
U ²³⁵	8.4461 -5	14.3	1.2778 -3
U ²³⁸	3.3671 -4	8.3	2.7947 -3
O ¹⁶	8.9479 -4	3.7	3.3107 -3
C ¹²	9.4777 -2	4.7	4.4545 -2
Si	2.0248 -7	1.7	3.4422 -7
B ¹⁰	2.9494 -9	4.0	1.1798 -8
H	7.9655 -5	22.0	1.7524 -3
Total			4.5459 -1

$$N_{\text{eff}} = 3.3671 \times 10^{-4} \quad \Sigma_{\text{p}}^{\text{eff}} = 4.5459 \times 10^{-1} \text{ (cm}^{-1}\text{)}$$

($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)

Table 3.3 Energy structure of 18 groups

Energy range of each fast group			Energy range of each thermal group		
Group number	Upper limit	Lower limit	Group number	Upper limit	Lower limit
1	1.0×10^7	1.83×10^5	10	2.38	1.85
2	1.83×10^5	1.17×10^4	11	1.85	1.45
3	1.17×10^4	9.61×10^2	12	1.45	1.10
4	9.61×10^2	1.30×10^2	13	1.10	1.045
5	1.30×10^2	4.79×10^1	14	1.045	0.65
6	4.79×10^1	1.76×10^1	15	0.65	0.255
7	1.76×10^1	6.48	16	0.255	0.085
8	6.48	3.93	17	0.085	0.035
9	3.93	2.38	18	0.035	0.0

* Unit eV

Table 3.4 Atomic number densities of SHE-14 core and burnable poison (BP) rod
($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)

Nuclide	SHE-14 Homogenized core model			Burnable poison rod			
	Fuel region	Replaceable reflector region	Permanent reflector region	BP (2.11 w/o)	BP (4.27 w/o)	BP (8.35 w/o)	Graphite
U ²³⁵	3.4405-5	---	---	---	---	---	---
U ²³⁸	1.3716-4	---	---	---	---	---	---
B ¹⁰	2.0399-9	1.5949-9	1.6033-9	3.4668-4	7.1492-4	1.4153-3	1.5949-9
B ¹¹	8.9854-9	7.1565-9	7.1941-9	1.5072-3	3.1083-3	6.1537-3	7.1565-9
C ¹²	7.9007-2	7.6852-2	7.7256-2	7.7506-2	7.7234-2	7.4859-2	7.6852-2
O ¹⁶	3.8196-4	3.1840-5	3.1950-5	3.1692-5	3.2293-5	3.2695-5	3.1840-5
Fe	2.4886-8	---	---	---	---	---	---
Cd	8.2433-11	---	---	---	---	---	---
N	4.6138-6	3.8127-6	3.6283-6	---	---	---	3.8127-6
H	6.4921-5	6.1632-5	6.1950-5	6.3380-5	6.4584-5	6.5386-5	6.1632-5

Table 3.5 Calculated cases for analysis of SHE-14 BP rod worth

Case No.	No. of BP rod(s)	Content of Boron(w/o)	Employed values of TWOTRAN parameters										CPU time (min)	Calculated value keff	BP rod worth (\$)	C/E-1.0 (%)	Guessed flux (case No.)
			SN	DPS	XLAX	EV	EVM	XLAL	XLAH	POD	X1	X2					
1	1	NONE	10	10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	0.0	0.1	0.1	0.5	1.0	0.96723	0.03277	0.87	1.08366	—	—	—
2	2	NONE	10	"	"	1.02	0.02	0.1	0.5	1.0	0.96723	0.03277	135	1.08436	—	—	—
3	1	NONE	10	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	1.02	0.02	0.1	0.5	1.0	0.96723	0.03277	96	1.08347	—	—	1
4	2	NONE	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	103	1.08247	—	—	2
5	1	NONE	10	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	0.9	0.02	0.1	0.5	1.0	0.89272	0.03024	53	0.99992	—	—	3
6	2	NONE	"	"	"	"	"	"	"	"	0.89354	0.03027	66	0.99991	—	—	4
7		2.11	10	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	0.9	0.02	0.1	0.5	1.0	0.89272	0.03024	118	0.99002	1.45	22.3	3
8	1	4.27	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	126	0.98550	2.11	9.27	"
9		8.35	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	138	0.98144	2.71	6.57	"
10		2.11	10	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	0.9	0.02	0.1	0.5	1.0	0.89354	0.03027	109	0.98020	2.88	21.7	4
11	2	4.27	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	129	0.97126	4.19	7.11	"
12		8.35	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	143	0.96328	5.36	3.24	"

Table 3.6 Result of BP rod(s) worth analysis

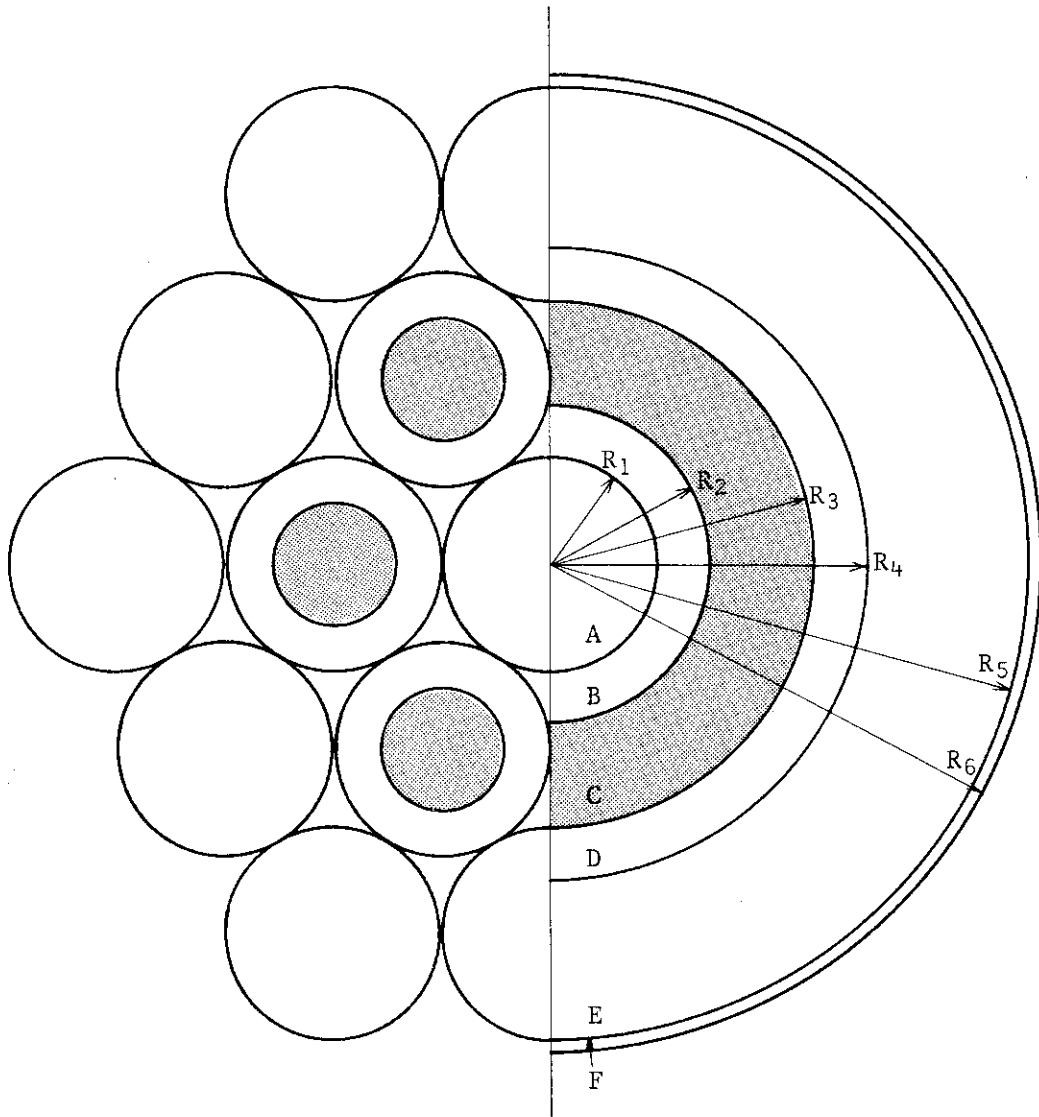
No. of BP rod(s)	Content of Boron(w/o)	k _{eff} (Calculated)	k _{eff} (Normalized)	BP rod worth		Experiment (\$)	C/E-1.0 (%)
				Δ k _{eff}	\$		
1	NONE	0.99992	1.00000	—	—	—	—
	2.11 w/o	0.99002	0.99010	0.00990	1.45	1.185	22.3
	4.27 w/o	0.98550	0.98558	0.01442	2.11	1.931	9.27
	8.35 w/o	0.98144	0.98152	0.01848	2.71	2.543	6.57
2	NONE	0.99991	1.00000	—	—	—	—
	2.11 w/o	0.98020	0.98029	0.01971	2.88	2.366	21.7
	4.27 w/o	0.97126	0.97135	0.02865	4.19	3.912	7.11
	8.35 w/o	0.96328	0.96337	0.03663	5.36	5.192	3.24

Convergence criteria : flux < 10⁻⁵, k_{eff} < 10⁻⁵

Table 3.7 Reference result

No. of BP rod(s)	Content of Boron(w/o)	k _{eff} (Calculated)	k _{eff} (Normalized)	BP rod worth		Experiment (\$)	C/E-1.0 (%)
				Δ k _{eff}	\$		
1	NONE	1.08380	1.00000	—	—	—	—
	2.11	1.07305	0.990081	0.009919	1.450	1.185	22.4
	4.27	1.06821	0.985615	0.014385	2.103	1.931	8.91
	8.35	1.06382	0.981565	0.018435	2.695	2.543	5.98
2	NONE	1.08279	1.00000	—	—	—	—
	2.11	1.06257	0.981326	0.018674	2.730	2.366	15.4
	4.27	1.05309	0.972571	0.027429	4.010	3.912	2.51
	8.35	1.04453	0.964665	0.035335	5.166	5.192	-0.502

Convergence criteria : flux < 10⁻⁴, k_{eff} < 10⁻⁵



R ₁	3.2500 (cm)
R ₂	5.0040
R ₃	7.3989
R ₄	9.3248
R ₅	14.619
R ₆	14.876

Fig. 3.1 SHE-14 Unit cell

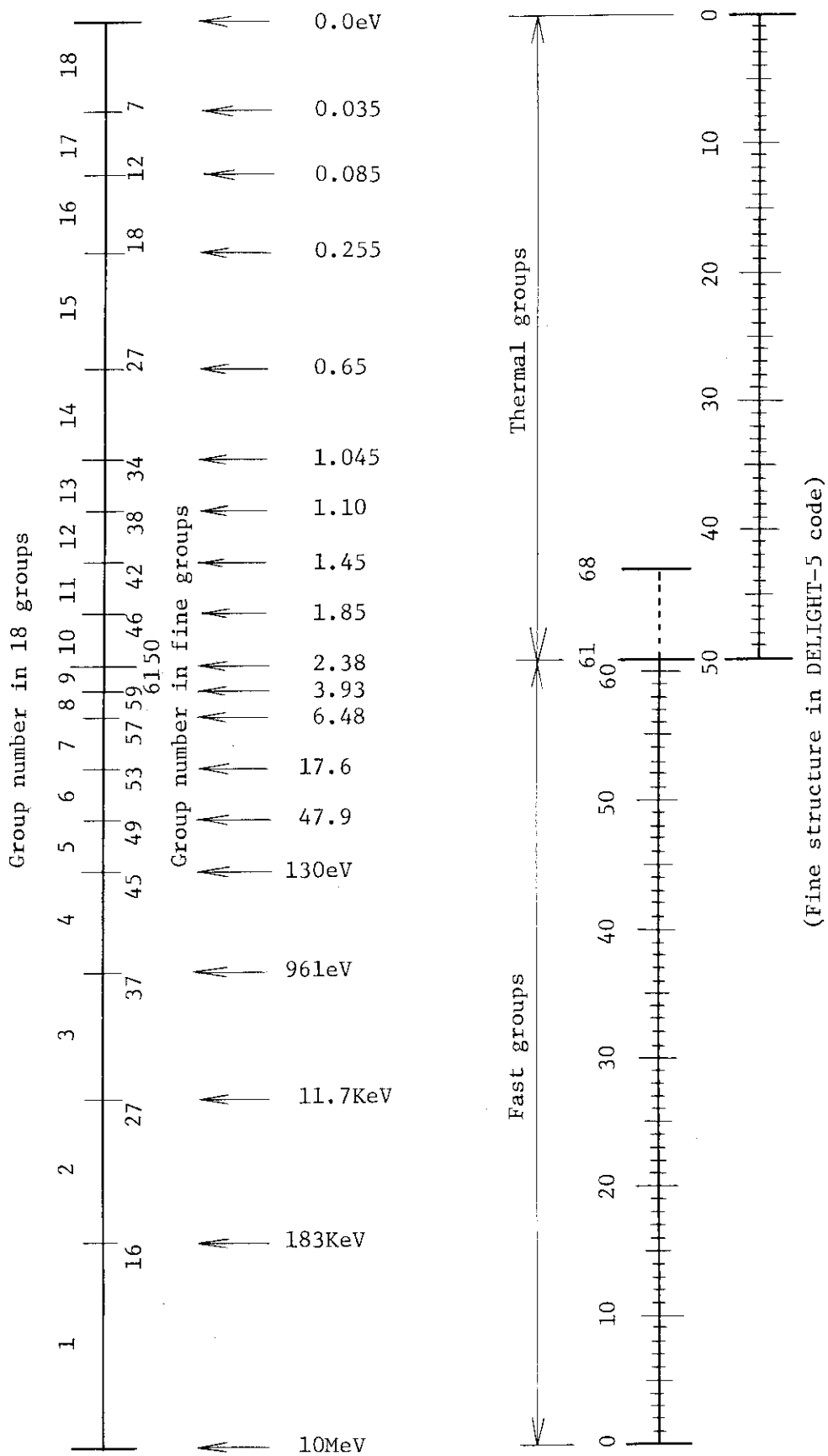


Fig. 3.2 Energy structure of 18 groups

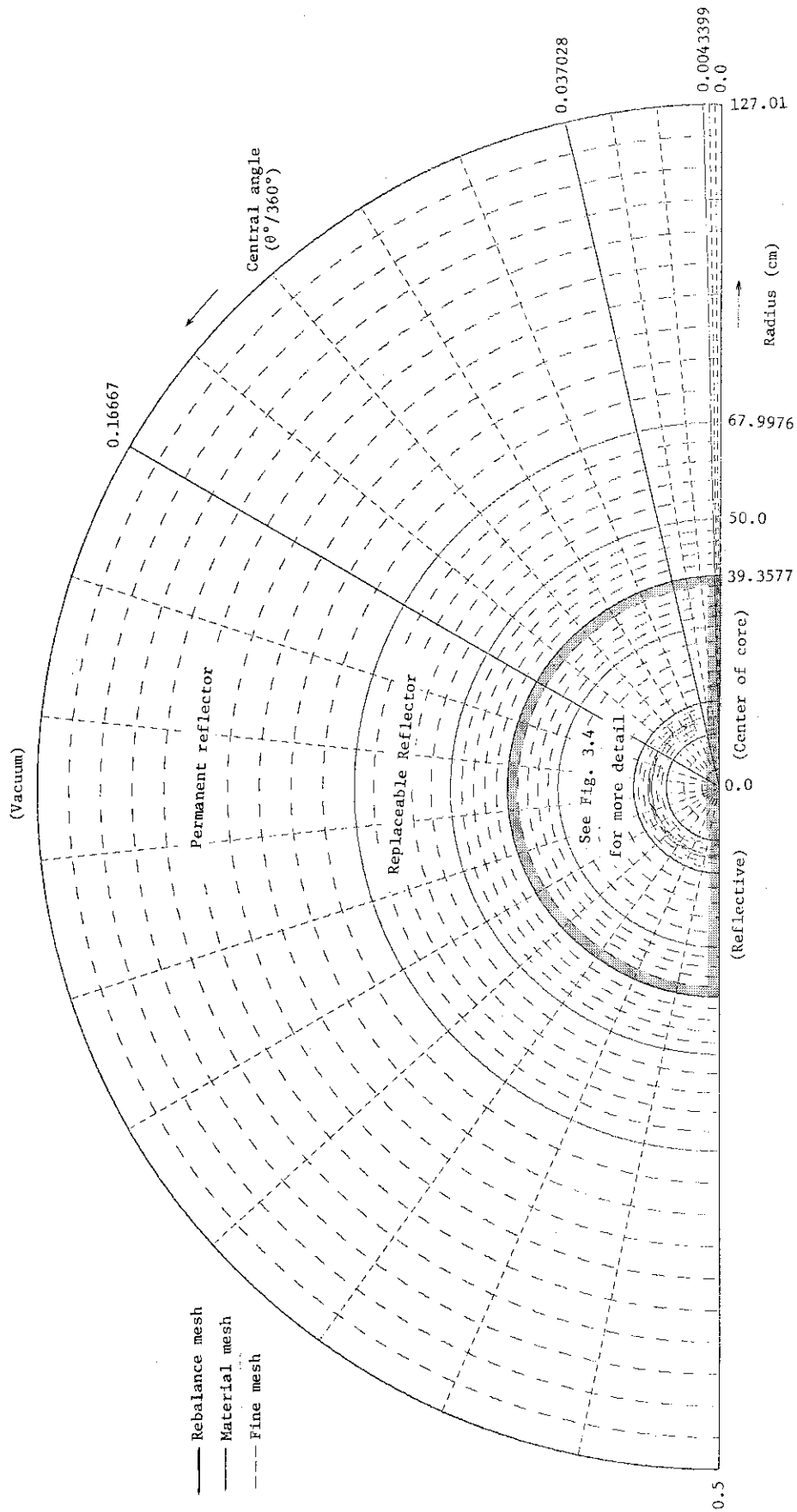


Fig. 3.3 SHE-14 R- θ model with one BP rod.

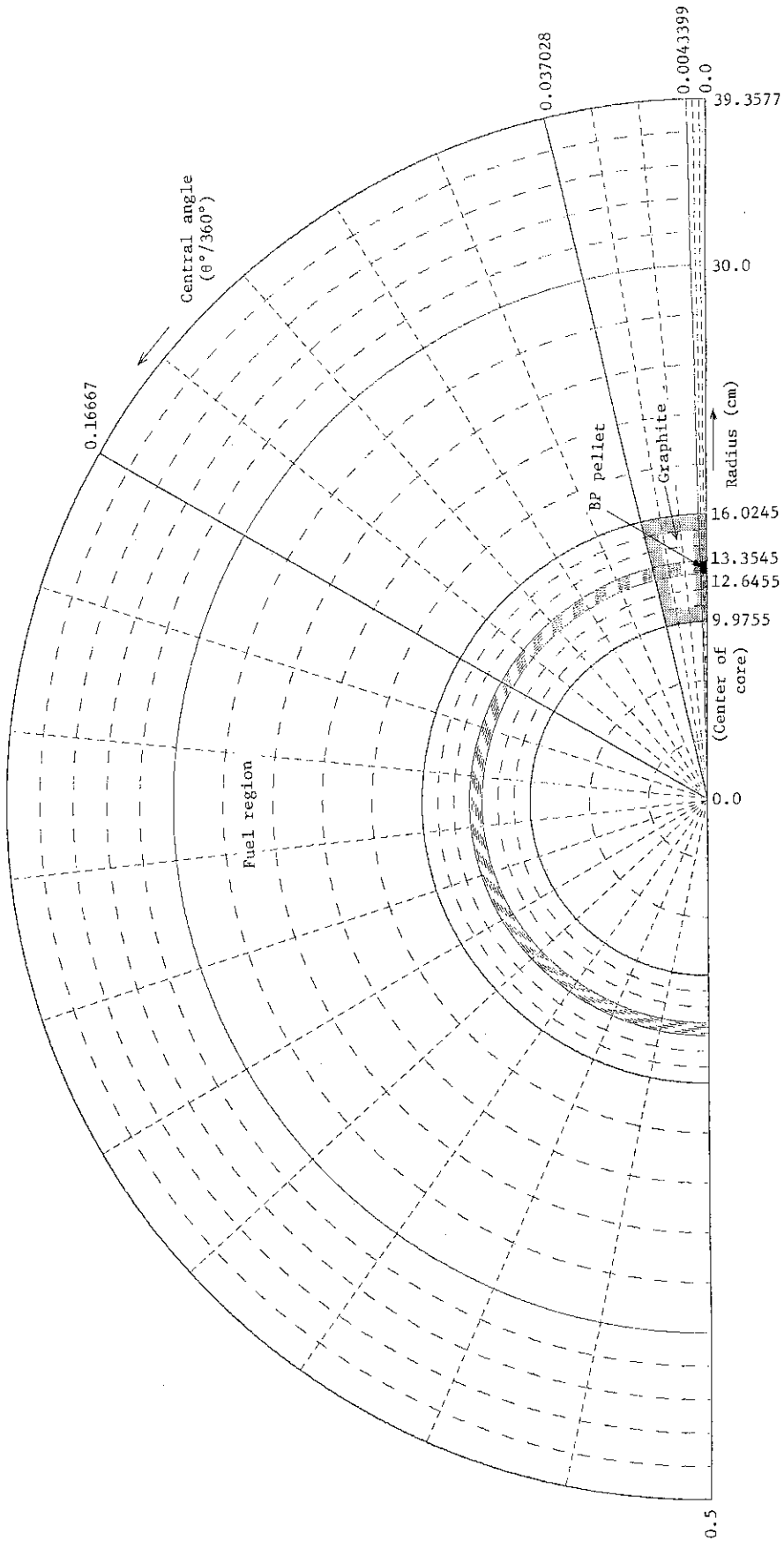


Fig. 3.4 Magnification of Fig. 3.3

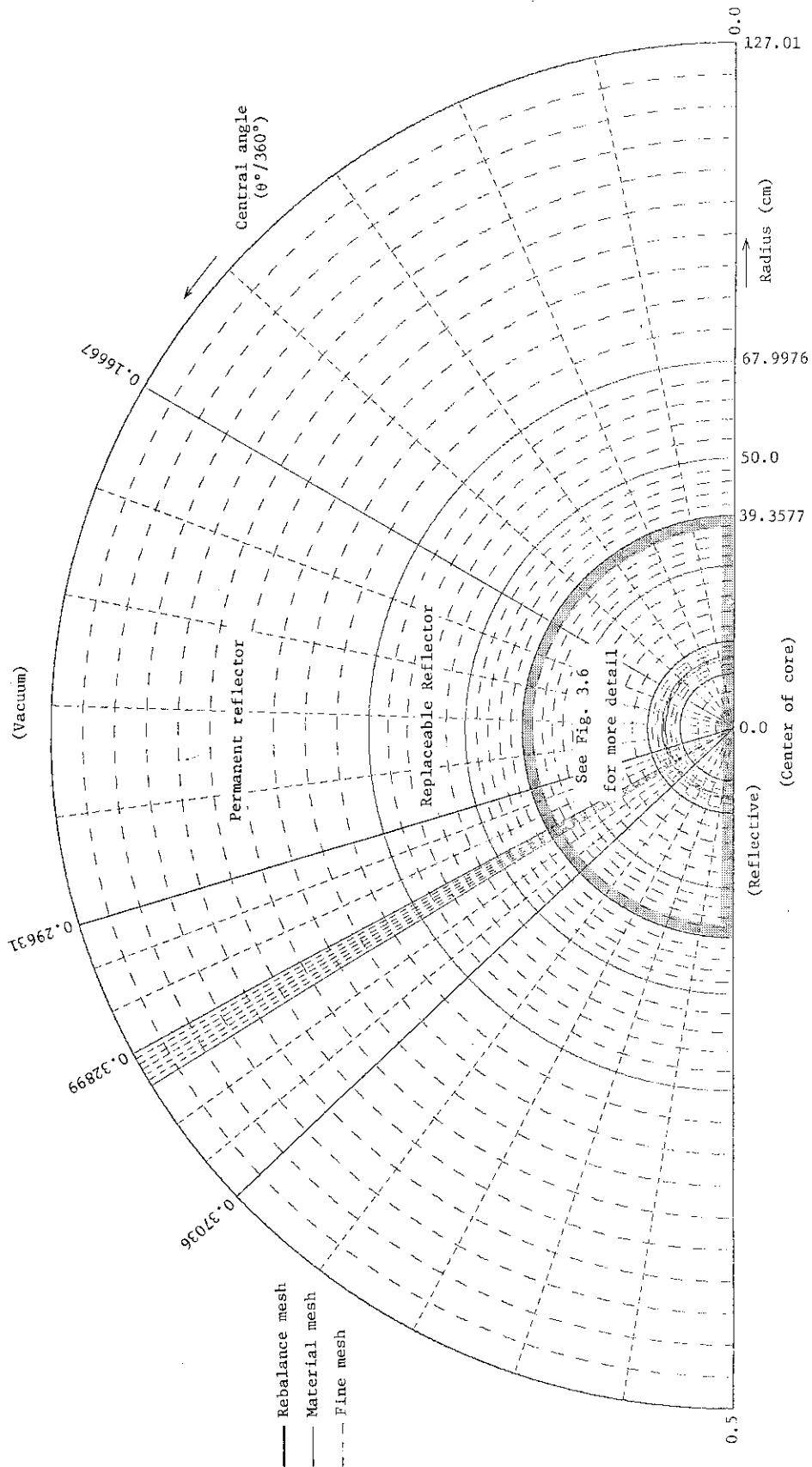


Fig. 3.5 SHE-14 R-θ model with two BP rods.

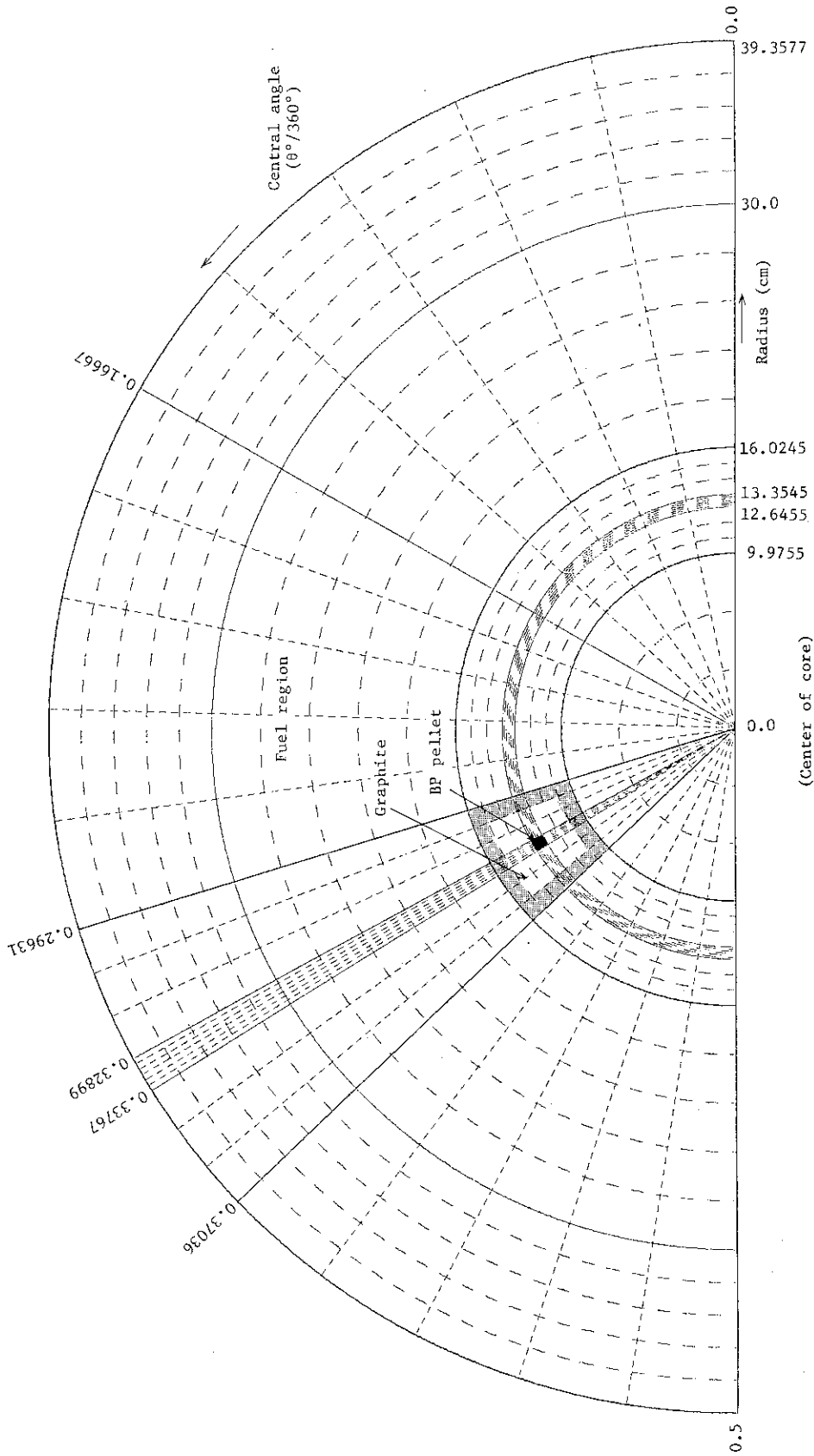


Fig. 3.6 Magnification of Fig. 3.5.

4. 結 論

BP 棒反応度値の計算値と実験値の相違を、Table 4.1 に100分率で示している。同表より、BP ペレット中ボロン濃度が2.11w/o の場合を除き、すべて10%以内の差異に収まっており、計算モデルが単純であることを考慮すれば、比較的精度の良い解析であると言える。

ボロン濃度が小さくなるにつれ、実験値との相違が大きくなるのは、BP 棒反応度値を未挿入および挿入時の実効増倍率の差から求めているため、ボロン濃度が小さくなるにつれ、実効増倍率の差の値自体も小さくなり相対的に、得られる値に含まれる誤差の割合が大きくなることによると考えられる。さらに、本報では、BP 棒部分のみ詳細にモデル化を行い、燃料棒部については均質化している。したがって、BP 棒と、近接燃料棒との相互作用による効果は実際とは異なり、この効果が、実効増倍率の差の小さい場合に相対的に大きく影響してくるものと考えられる。

したがって、今後さらに詳細な解析を行うためには、摂動計算により有効桁の多い計算値を得るようにし、モデル化では少なくともBP 棒周囲に存在する燃料棒は均質化せずに取扱うことが望ましい。また、BP ペレットおよびBP 棒黒鉛部のメッシュ数を増加させて、さらに計算誤差を小さくすることも必要であろう。また、実験ケースのうち、BP 棒三本挿入時炉心のように、回転対称性からモデル化を簡単にできるものを選択することも重要であると思われる。

本報で用いたBP 棒に対する解析手法を、多目的高温ガス実験炉の核設計法に直接適用することは困難であり、本解析手法と実験炉核設計手法の間を関連づける、BP 棒部を均質化した解析等が今後必要となろう。

Table 4.1 Values of [(C/E)-1.0] (%)

Content of Boron (w/o)	No. of PB rod(s)	[(C/E)-1.0] (%)
2.11	1	22.3
	2	21.7
4.27	1	9.27
	2	7.11
8.35	1	6.57
	2	3.24

謝 辞

本報告書で使用した実験データについては、原子炉工学部炉物理実験研究室の金子義彦室長および秋濃藤義氏に提供していただいた。さらに両氏には、解析を始めるに際して長時間に渡り行った討論にも参加していただき、各種の情報を得ることができた。ここに深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 新藤隆一, 他「高温ガス冷却炉・格子燃焼計算コード DELIGHT-4」
JAERI-M 8097 (1979)
- (2) K. D. Lathrop, " TWOTRAN-II : An Interfaced Exportable Version of the TWOTRAN Code for Two-Dimensional Transport ", LA-4848-MS (1973).
- (3) T. B. Fowler, " Nuclear Reactor Core Analysis Code : CITATION ", ORNL-TM-2496 (1971).
- (4) 高野誠, 他「SHE 臨界質量実験の解析-VHTR 核設計法の精度検討(1)」,
JAERI-M-9955 (1982)
- (5) 土井猛, 他「SHE-8 炉心の制御棒反応度値および臨界時即発中性子減衰定数の解析-VHTR 核設計法の精度検討(2)」
JAERI-M-9911 (1982)
- (6) 高野誠, 他「SHE-14 臨界時および制御棒挿入時の即発中性子減衰定数解析-VHTR 核設計法の検討(3)」
JAERI-M-9942 (1982)
- (7) 土井猛, 他「SHE-8 炉心における銅反応率分布の解析-VHTR 核設計法の精度検討(4)」
JAERI-M-9912 (1982)
- (8) 土井猛, 他「SHE-14 炉心における温度上昇に伴う反応度変化の解析-VHTR 核設計法の精度検討(6)」 内部資料 (1982)
- (9) 金子義彦, 秋濃藤義, 他「濃縮ウラン黒鉛減速炉心の臨界実験」,
JAERI-1257 (1977).
- (10) 秋濃藤義, 他「高温ガス実験炉の模擬炉心 (SHE-14 炉心) における実験用可燃性毒物棒の反応度の測定」,
JAERI-M-9223 (1980).

謝 辞

本報告書で使用した実験データについては、原子炉工学部炉物理実験研究室の金子義彦室長および秋濃藤義氏に提供していただいた。さらに両氏には、解析を始めるに際して長時間に渡り行った討論にも参加していただき、各種の情報を得ることができた。ここに深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 新藤隆一, 他「高温ガス冷却炉・格子燃焼計算コード DELIGHT-4」
JAERI-M 8097 (1979)
- (2) K. D. Lathrop, " TWOTRAN-II : An Interfaced Exportable Version of the TWOTRAN Code for Two-Dimensional Transport ", LA-4848-MS (1973).
- (3) T. B. Fowler, " Nuclear Reactor Core Analysis Code : CITATION ", ORNL-TM-2496 (1971).
- (4) 高野誠, 他「SHE 臨界質量実験の解析-VHTR 核設計法の精度検討(1)」,
JAERI-M-9955 (1982)
- (5) 土井猛, 他「SHE-8 炉心の制御棒反応度値および臨界時即発中性子減衰定数の解析-VHTR 核設計法の精度検討(2)」
JAERI-M-9911 (1982)
- (6) 高野誠, 他「SHE-14 臨界時および制御棒挿入時の即発中性子減衰定数解析-VHTR 核設計法の検討(3)」
JAERI-M-9942 (1982)
- (7) 土井猛, 他「SHE-8 炉心における銅反応率分布の解析-VHTR 核設計法の精度検討(4)」
JAERI-M-9912 (1982)
- (8) 土井猛, 他「SHE-14 炉心における温度上昇に伴う反応度変化の解析-VHTR 核設計法の精度検討(6)」 内部資料 (1982)
- (9) 金子義彦, 秋濃藤義, 他「濃縮ウラン黒鉛減速炉心の臨界実験」,
JAERI-1257 (1977).
- (10) 秋濃藤義, 他「高温ガス実験炉の模擬炉心 (SHE-14 炉心) における実験用可燃性毒物棒の反応度の測定」,
JAERI-M-9223 (1980).