

JAERI-M

9942

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 核設計法の精度検討(3)—

1982年2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。
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。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, 1981

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 いばらき印刷機

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 核設計法の精度検討(3) —

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13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半均質臨界実験装置(SHE)で行われた臨界時および制御棒挿入時の即発中性子減衰定数測定解析を、SHE-14の体系に対し行った。解析では、DELIGHT-5およびTWOTRAN-IIを用いて、それぞれ中性子スペクトルおよび即発中性子減衰定数を計算した。解析は、各種のR- θ 形状モデルおよびX-Y形状モデルを用いて行い、さらに補正計算も行った。

解析により得られた即発中性子減衰定数は、臨界時で-4.38%、制御棒挿入時で±2%程度の実験値との相違を示した。これより、制御棒挿入時の即発中性子減衰定数解析法および使用した計算コードの妥当性が示された。

* 業務協力員(石川島播磨重工業)

Analysis of Prompt Neutron Decay Constants of
Critical and Control Rod Inserted States of SHE-14
- Accuracy Investigation of VHTR Nuclear Design Methods (3) -

Makoto TAKANO, Takeshi DOI^{*}, Mitsumasa HIRANO and Ryuiti SHINDO

Division of Power Reactor Projects, JAERI

(Received January 13, 1982)

In the report, the prompt neutron decay constants, which were measured at Semi-Homogeneous Experimental Assembly(SHE)-14 of critical and control rod(s) inserted states, 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 respectively neutron spectrum and prompt neutron decay constants with the various models of $R-\theta$ and X-Y geometries.

Calculated values of prompt neutron decay constants show the disagreements of 4.38% for the critical state and about 2% for the control rod(s) inserted states from the measured values. Therefore, it can be said that the method and the codes employed to obtain the prompt neutron decay constants are adequate.

Keywords : Critical Assembly, SHE, Control Rod, Critical, Prompt Neutron Decay Constant, Calculation, DELIGHT, TWOTRAN, VHTR, Nuclear Design, Accuracy

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

目 次

1. 緒 言	1
2. パルス実験と実験データ	3
2.1 動特性方程式とパルス実験	3
2.2 実験データ	4
3. 静的計算コードを用いた即発減衰定数の解析法	12
4. 格子計算用データおよび炉心計算用群定数の作成	18
5. SHE-14形状とモデル化	25
5.1 Model-A	27
5.2 Model-B	35
5.3 Model-CおよびModel-D	43
6. 計算精度の予備的検討	47
6.1 実効増倍率と合成スペクトルの関係	47
6.2 収束判定値と α 固有値計算精度	48
7. 臨界時即発減衰定数(α_c)解析結果と補正	53
8. 制御棒挿入時即発減衰定数解析結果と補正	57
9. 結 論	59
謝 辞	60
参考文献	60

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Pulsed neutron experiment and data	3
2.1 Reactor dynamic equation and pulsed neutron experiment	3
2.2 Experimental data	4
3. Analysis method of prompt neutron decay constant by static reactor code	12
4. Data for cell calculation and preparation of group constant for core calculation	18
5. Configuration of SHE-14 and modeling	25
5.1 Model-A	27
5.2 Model-B	35
5.3 Model-C and model-D	43
6. Verification of calculational accuracy	47
6.1 Effective multiplication factor vs. input spectrum	47
6.2 Convergence criteria vs. calculated value of α	48
7. Result and correction of prompt neutron decay constant at critical	53
8. Result and correction of prompt neutron decay constant for the system with rod	57
9. Conclusion	59
 Acknowledgement	 60
References	60

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、半均質臨界実験装置（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TWOTRAN-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⁾、制御棒価値解析⁵⁾、中性子束分布解析⁶⁾、可燃性毒物棒反応度価値解析⁷⁾、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制御棒価値解析について記述する。炉物理研より得た、SHE-14体系における制御棒実験に対し解析を行う。実験結果は、パルス中性子実験により得られる即発中性子減衰定数（ α 値）および反応度で与えられている。^{9~11)}通常、 α 値から反応度を求める際には、補正計算を行う必要があり、実験値として与えられる反応度には計算による補正が入ってくる。したがって、実験値として得られている反応度は、純粋な実験値と言えない面があり、このため本報では、実験により得られる物理的現象である即発中性子減衰定数の値で、実験と解析を比較することとする。通常、この α 値は負の値であるが、本報では、符号をとり絶対値でこの値を示すこととする。また、制御棒挿入時のみならず、臨界時の体系に対する α 値も求めている。

臨界状態に対する α 値の解析では、まず解析モデルの実効増倍率が1.0となるように核分裂当たりの中性子収量 ν を調整する。次に、この解析モデルの α 固有値をTWOTRANコードにより求める。このとき、TWOTRANへの入力となる即発中性子スペクトルと遅発中性子スペクトルをある割合で加えたスペクトル（以下、合成スペクトルと称す）については、予想 α 値によりその合成割合を求める。

また制御棒挿入時の α 値については、実験が行われた時と同様、制御棒のない基準状態の α 値を求める。解析では、この基準状態が実験値と同一の α 値を持つように ν の値および合成スペクトルで調整する。次に、この解析モデルに制御棒を挿入した時の α 固有値を、TWOTRANコードにより求め実験値との比較を行う。このように、本報の解析では基準状態を実験と合致させてから、臨界時および制御棒挿入時の α 値を求めている。

実験体系のモデル化は臨界時および制御棒1本挿入時には、R- θ 形状で回転対称境界条件を用いれば中心角 $\theta = 60^\circ$ までで表現可能であるが、制御棒3本および6本挿入時には、 $\theta = 120^\circ$

までを考慮する必要がある。したがって解析モデルとしては、 $R-\theta$ 形状で 60° のものと 120° のものを作成する。ここで、燃料棒は体積を保存した扇形で表現し、制御棒については表面積を保存した扇形で表現している。ただし、 $R-\theta$ 形状モデルで燃料周囲にある燃料スリーブやマトリックス管を、その外周にある黒鉛反射体部と区別して取扱うとメッシュ数が多くなりすぎて、計算時間等であまり現実的ではなく、そのため、これらについては黒鉛反射体部と同一の物質であるとしている。このために生じる差異を補正する目的で、メッシュ数が少なくなるように燃料棒配置および制御棒配置を若干調整した $R-\theta$ 形状モデルおよび $X-Y$ 形状モデルを作成している。

即発中性子減衰定数は、DELIGHT-5コードにより作成した18群定数を用いてTWOTRANコードによる P_0S_4 計算により求めている。臨界時の α 値は、 $1/v$ データおよび燃料スリーブとマトリックス管の効果を考慮すると実験値と-4.38%の相違を示す。一方、制御棒挿入時には、実験値と補正後の計算値とでは、約2%程度の相違しか示さず、本報で示す、制御棒挿入時の即発中性子減衰定数の解析法およびTWOTRANコードの本解析法への適用とその精度は十分良好なものであると考えられる。

2. パルス実験と実験データ^{9~11)}

制御棒等の反応度値を測定する方法は各種知られているが、炉物理研ではパルス中性子法による実験で測定が行われている。この方法は、主として炉心中に中性子パルスを入射したときに起こる中性子数の過渡的挙動を測定することにより、各種パラメータを決定しようというものである。

本章では、まずパルス実験をより良く理解するために、中性子パルス入射後の即発モードおよび遅発モードの時間的挙動を、一群一点近似炉動特性方程式を用いて考察する。実際の SHE の実験では、測定を容易なものとするため、通常、中性子パルスを周期的に多数回打ち込んでいる。この打ち込み周期は、SHE の実験では即発モードが十分減衰する時間以上に長いものであり、さらに遅発モードも十分静定する程度の長さである。したがって、ここではパルス実験を原子炉伝達関数のインパルス応答で十分表現可能であると考ええる。

次に、SHE-14 で測定された臨界時と制御棒挿入時の α 値および実験体系等のデータについて示す。^{9,11)}

2.1 動特性方程式とパルス実験

本節では、一群一点近似炉動特性方程式（遅発中性子 6 群）をラプラス変換し、このインパルス応答を逆ラプラス変換することにより即発モードおよび 6 つの遅発モードの時間的挙動と反応度の関係を考察する。

さて、単位インパルス $\delta(t)$ のラプラス変換は、

$$\int_0^{\infty} \delta(t) e^{-st} dt = 1, \quad (2-1)$$

ただし、

$$\delta(t) = \begin{cases} 1 : t = 0 \\ 0 : t > 0, \end{cases}$$

であり、ある伝達関数 $G(s)$ に単位インパルスが入った時の応答 $Y(s)$ は、

$$Y(s) = G(s) \times 1, \quad (2-2)$$

で示される。これを、再び時間領域に戻すためには逆ラプラス変換を行う、つまり、

$$y(t) = \mathcal{L}^{-1} \{ Y(s) \}, \quad (2-3)$$

となる。

ここで、遅発中性子 6 群、エネルギー 1 群、1 点近似炉動特性方程式は次のようである。

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta_T}{\ell} n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i + q(t), \quad (2-4)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\ell} n - \lambda_i C_i, \quad (i = 1, \sim, 6). \quad (2-5)$$

ここで、記号は通常使用されているものと同一である。(2-4), (2-5)式より、入力として $q(t)$ 、出力として $n(t)$ を考えたときの伝達関数 $G_R(s)$ は、

$$G_R(s) = \frac{N(s)}{Q(s)} = \frac{\frac{\ell}{\beta_T}}{s \left\{ \frac{\ell}{\beta_T} + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i/\beta_T - \rho_0}{+\lambda_i} - \frac{\rho_0}{\beta_T} \right\}}, \quad (2-6)$$

となる。よって、入力としてインパルスが入った時の原子炉の応答は、(2-6)式を逆ラプラス変換すれば時間領域で得られる。これは、実際には、

$$n(t) = \sum_{i=1}^7 A_i e^{\alpha_i t}, \quad (2-7)$$

で示される。ただし、 A_i は $G_R(s)$ の留数であり、 α_i は、 $G_R(s)$ の極である。

(2-6)と(2-7)式を用いて原子炉のインパルス応答を求めるプログラムを作成した。これにより、反応度 ρ の値を変化させて、即発モードおよび六つの遅発モード、さらにこれらのモードを総て合成したものの時間時応答を、Figs. 2.1~2.3に示す。これらでは、 $\ell = 1.0078 \times 10^{-3}$ (sec), $\beta = 0.0065$ の値を用いており、Figs. 2.1~2.3で、それぞれ、 $\rho = 0.0, -1.20, -10.0$ (\$) である。これらの図から、反応度の変化と、各モードの変化の様子がわかる。実験において実際に測定されるのは、即発モードと各遅発モードをすべて合成したものである。炉物理研では、測定された合成モードのデータから、ALPHA-Dコード¹⁰⁾を用い即発モードの減衰定数 (α_p) を求めている。さらに、この減衰定数 (α_p) より、修正 Simmons-King 法により反応度を求めている。¹¹⁾

2.2 実験データ^{9~11)}

SHE-14 に対する制御棒反応度値測定のパルス中性子実験は、炉物理研において各種行われており¹¹⁾、ここではその中から比較的解析が容易であると考えられる数種のケースを選定し、解析対象としている。

解析対象としては、まず臨界状態の SHE-14 がある。さらに、制御棒値測定の基準炉心となる制御棒未挿入時の SHE-14、および制御棒が SHE-14 の中心に 1 本入った体系で挿入制御棒の種類異なる 2 種類のケースを解析対象とする。さらに、制御棒が 3 本および 6 本挿入された場合についても解析対象とする。ここで、制御棒の 1 本とは、SHE の固定側および移動側それぞれの対応位置に挿入された長さ約 120 cm のもの 2 本分を示す。SHE-14 の燃料棒および制御棒挿入位置について、Figs. 2.4~2.7 に示す。制御棒の構造については、Fig. 2.8 に示す。

実験により得られた即発減衰定数 (α_p) の値を、Table 2.1 に示す。実験値として得られてい

る反応度の値は本報では解析対象としていないが、これは α_p の値から反応度を求める際には通常補正計算を必要とし、この補正量が場合によっては、かなり大きな影響をするためである。つまり、 α_p より得た反応度の値は、計算による補正のため、実験により得た純粋な測定量であるとは必ずしも言えないからである。本報では、実験による、計算コードの検証を目的としているので、実験により測定される量である α_p の値に対し、計算値との比較を行う。

実験に使用された二種の制御棒データについて、Table 2.2に示す¹¹⁾。制御棒以外のデータについては、臨界質量解析時と同様である⁴⁾。また、制御棒中に含まれる黒鉛には、0.06 w/oの水分および、20 ppm Ash (内ボロン0.1 ppm)が含まれるとしている。また、制御棒中のB₄C粒子直径は、約70 μ 程度である。

Table 2.1 Results of experiment¹¹⁾

Case	Control Rod		Prompt decay constant α_p (exp) [sec ⁻¹]	Error [sec ⁻¹]
	Content of absorber	No. of rods		
1	(Critical system)	None	5.52	±0.12
2	(Standard system)	None	10.73	±0.11
3	B ₄ C 10 w/o	1	78.22	±0.73
4	B 30 w/o	1	84.33	±1.2
5	B 30 w/o	3	157.1	±1.1
6	B 30 w/o	6	209.6	±2.7

Table 2.2 Control rod data

Absorber (Pellet A,B)	Shape	Cylinder
	Inner diameter	30 mm
	Outer diameter	50 mm
Aluminum tube	Full length	1135 mm
	Inner diameter	51 mm
	Outer diameter	53 mm
Pellet type	Full length	1153 mm
	Content of absorber	Gross density
	A	B ₄ C 10 w/o
B	B 30 w/o	1.42 g/cm ³

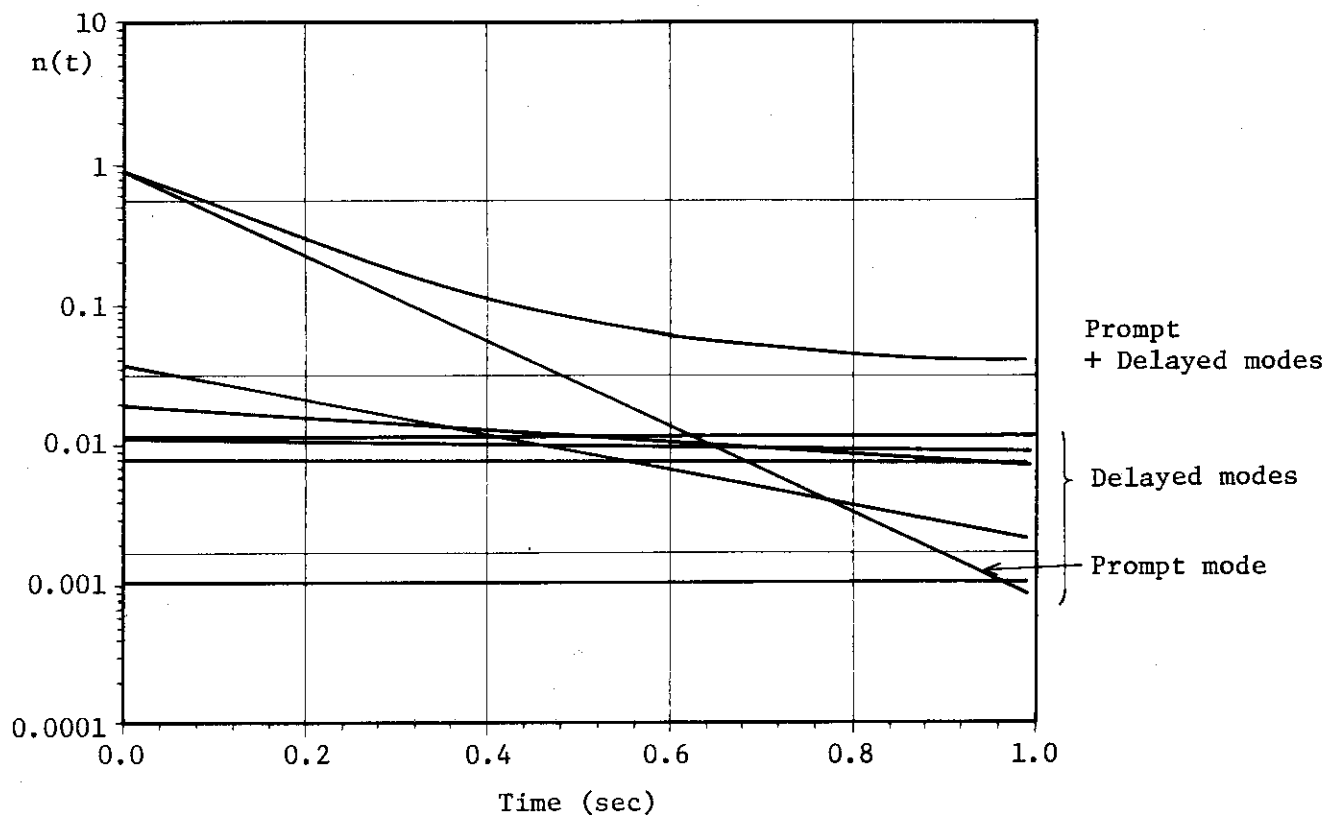


Fig. 2.1 Impulse response of reactor ($\rho = 0$, critical)

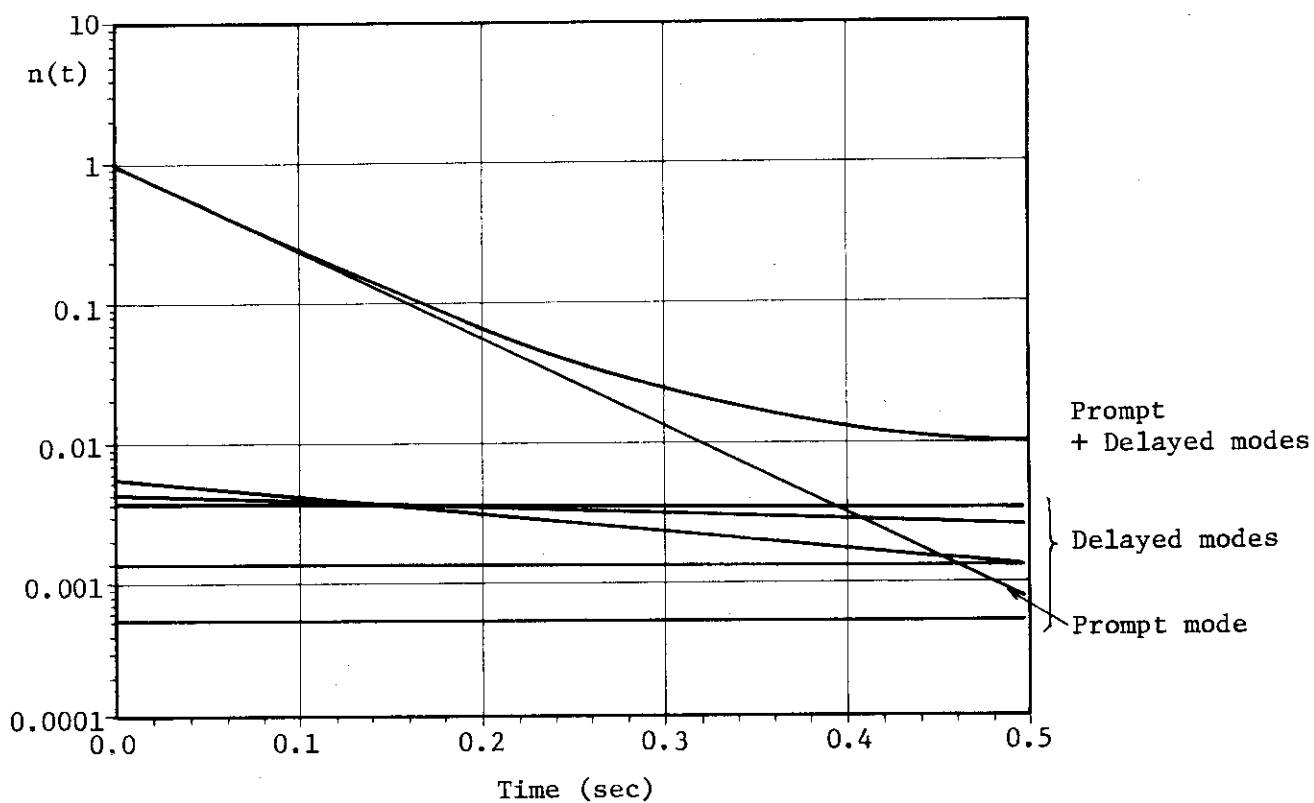


Fig. 2.2 Impulse response of reactor ($\rho = -1.2$ \$)

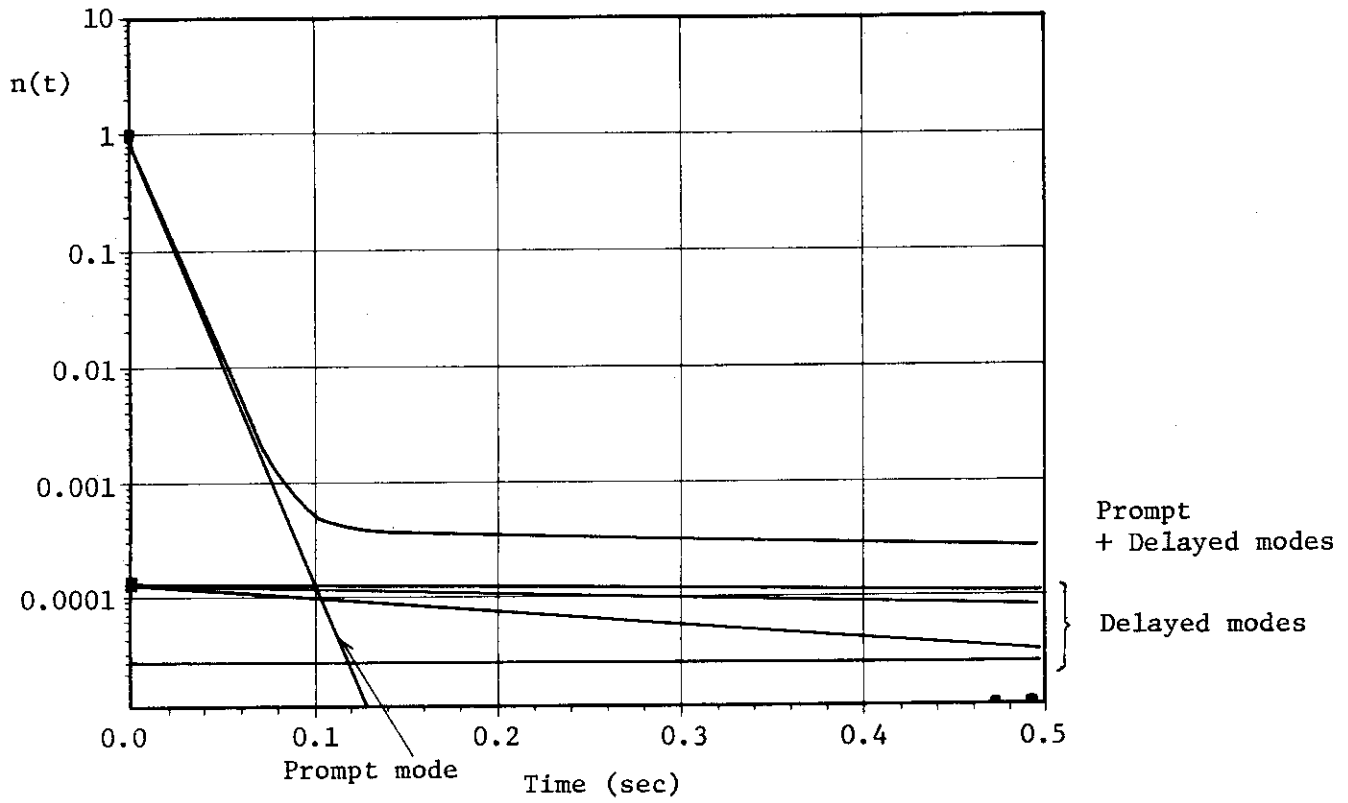


Fig. 2.3 Impulse response of reactor ($\rho = -10.0 \%$)

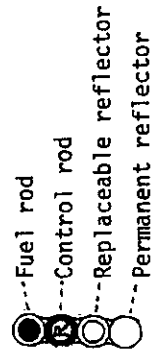
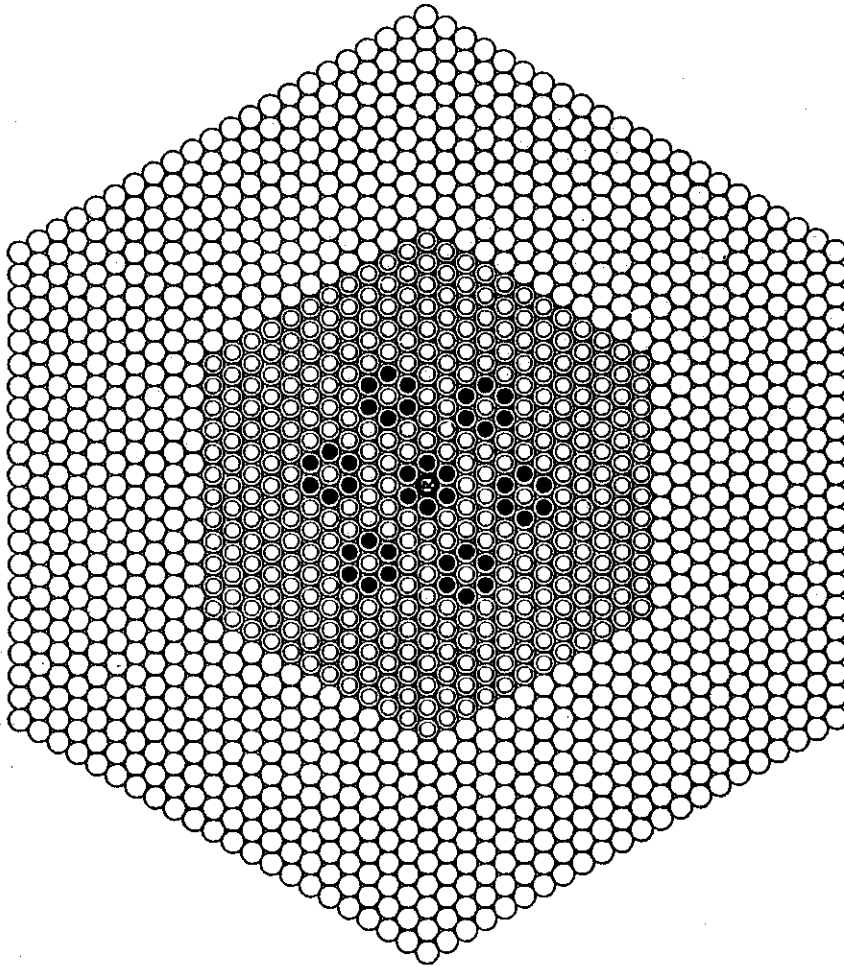


Fig.2.5 SHE-14 configuration with one control rod

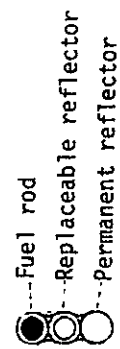
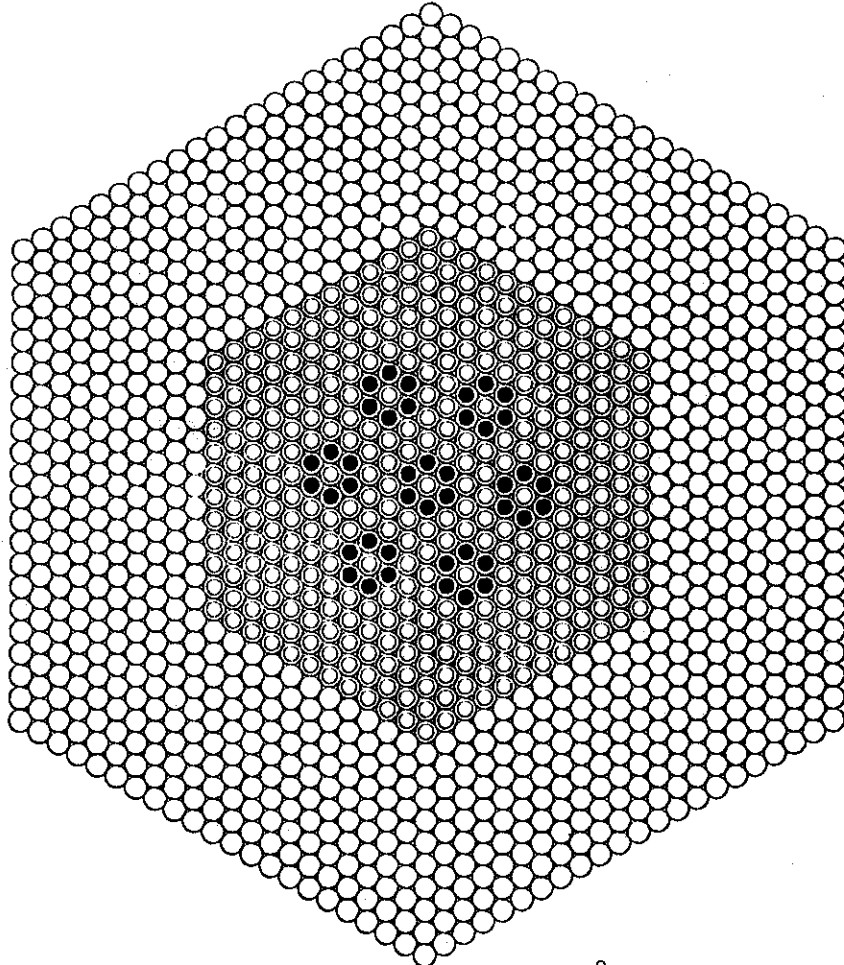


Fig.2.4 SHE-14 configuration without control rod

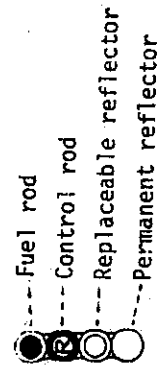
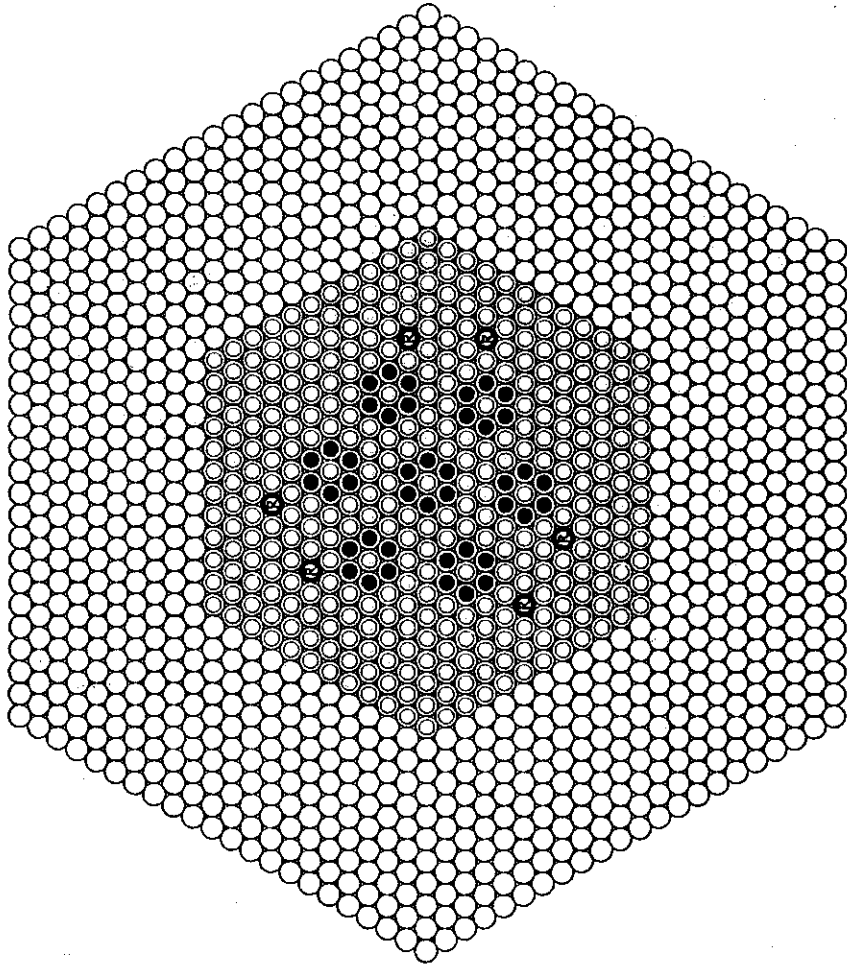


Fig.2.7 SHE-14 configuration with six control rods

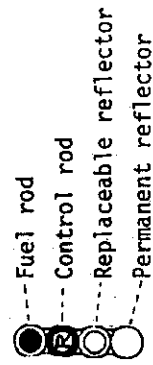
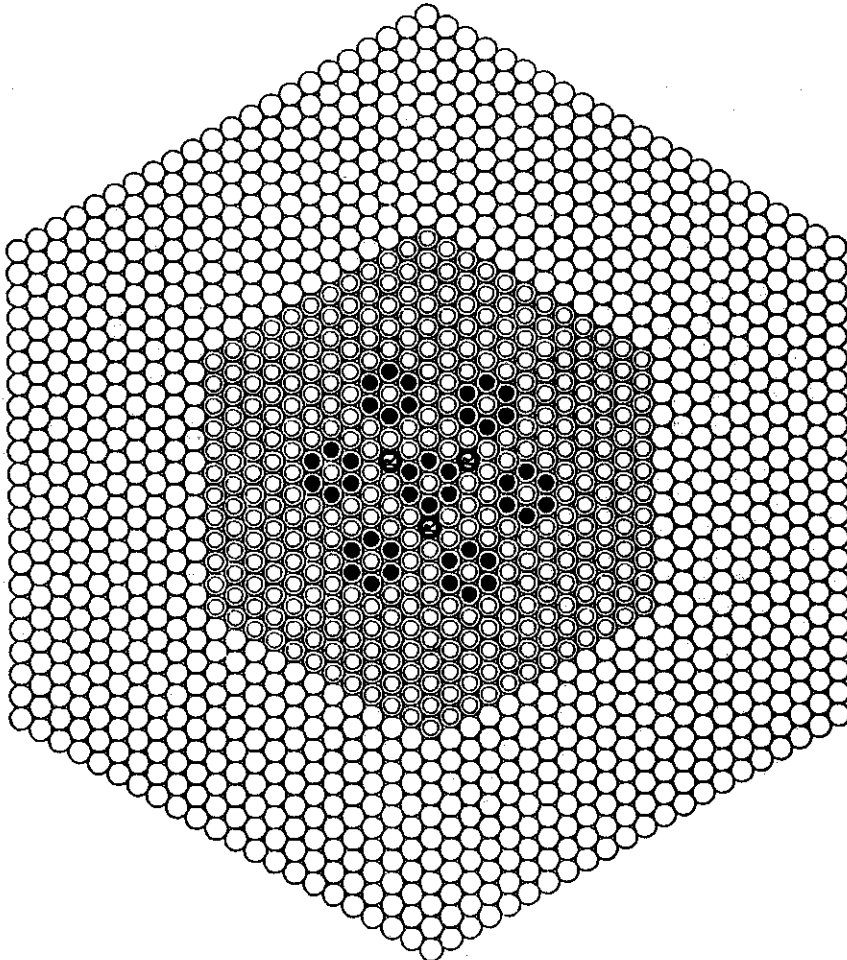


Fig.2.6 SHE-14 configuration with three control rods

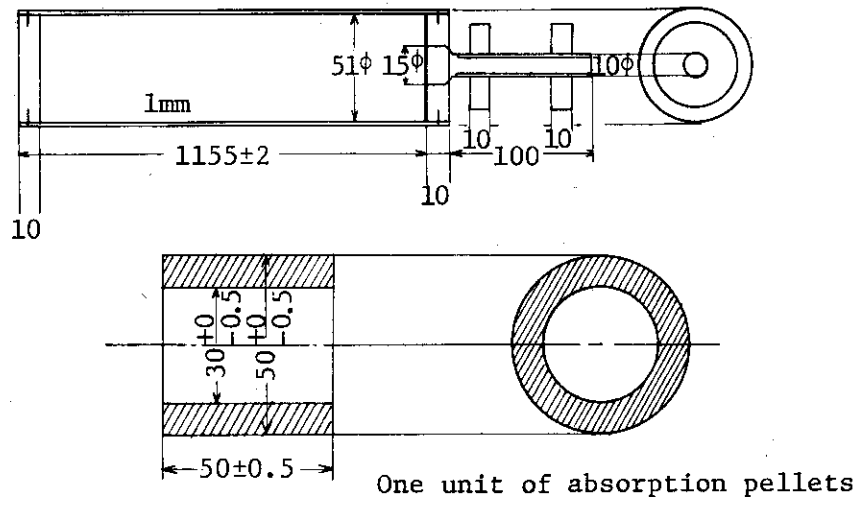


Fig. 2.8 Configuration of control rod (mm)

3. 静的計算コードを用いた即発減衰定数の解析法

即発減衰定数 α_p は、パルス状の中性子源を実験体系内に打ち込んだ後の中性子束の減衰から得られるものである。したがって、 α_p を解析により求める際には、時間依存の動特性方程式を解く必要がある。しかし、通常は動的計算コードを使うことなしに、TWOTRAN コードや CITATION コードのような静的計算コードにより解析が行われる。実際には、これら静的計算コードの入力データである合成スペクトルの値を調整する訳であるが、 α_p の値が小さい場合には、この値の取扱いに多少注意を要する。本章では、これらの点について考察する。

ここで、即発減衰定数について議論するため、時間依存の原子炉方程式を導入する。¹²⁾

$$\begin{cases} [\mathbf{L} + (1 - \beta_T) f_p \mathbf{M}] \vec{\phi} + f_d \lambda \vec{C} = \frac{1}{v} \frac{\partial \vec{\phi}}{\partial t}, & (3-1) \\ \beta \mathbf{M} \vec{\phi} - \lambda \vec{C} = \frac{\partial \vec{C}}{\partial t}. & (3-2) \end{cases}$$

ここで、

\mathbf{M} と \mathbf{L} は、それぞれ生成および消滅を示す行列演算子、 $\vec{\phi}$ と \vec{C} は、それぞれ任意の群の中性子束および、先行核濃度ベクトルである。また、 f_p と f_d はそれぞれ即発および遅発の分裂スペクトルを示し、 β_T は全遅発中性子分率である。 β 、 λ 、 v は、それぞれ遅発中性子分率、遅発中性子先行核崩壊定数および中性子速度を示す。

今、モード法を適用するとして、次式を導入する。

$$\vec{\phi} = \vec{\phi}_i e^{\alpha_i t}, \quad (3-3)$$

$$\vec{C} = \vec{C}_i e^{\alpha_i t}. \quad (3-4)$$

これら二式を、(3-1) と (3-2) 式へ代入すれば、

$$[\mathbf{L} + (1 - \beta_T) f_p \mathbf{M}] \vec{\phi}_i e^{\alpha_i t} + f_d \lambda \vec{C}_i e^{\alpha_i t} = \frac{\alpha_i}{v} \vec{\phi}_i e^{\alpha_i t}, \quad (3-5)$$

$$\beta \mathbf{M} \vec{\phi}_i e^{\alpha_i t} - \lambda \vec{C}_i e^{\alpha_i t} = \alpha_i \vec{C}_i e^{\alpha_i t}, \quad (3-6)$$

となる。(3-6) 式より \vec{C}_i を求め、(3-5) 式へ代入して整理すれば、

$$[(\mathbf{L} - \frac{\alpha_i}{v} \mathbf{I}) + f_p \mathbf{M}] \vec{\phi}_i = 0. \quad (3-7)$$

ただし、ここで、 \mathbf{I} は単位行列であり、

$$f_i = (1 - \beta_T) f_P + f_d \beta - \frac{\alpha_i f_d \beta}{\alpha_i + \lambda}, \quad (3-8)$$

である。

通常の静的計算コードでは、定常状態のみを取扱っており、即発および遅発中性子の時間的挙動の差異は考慮しておらず、両者とも同等に取扱われている。つまり、静的計算コードでは、実効増倍率は、即発と遅発を合成した形の α 値がゼロ、つまり定常であるとして、(3-7)式により、

$$[\mathbf{L} + \frac{1}{k_{\text{eff}}} f_s \mathbf{M}] \vec{\phi} = 0, \quad (3-9)$$

が得られ、これより k_{eff} が求められる。ここで、 $\vec{\phi}$ は、 $\alpha_i = 0$ に対応する $\vec{\phi}_i$ を示す。ここで f_s は(3-8)で、 $\alpha_i = 0$ とおき、

$$f_s = (1 - \beta_T) f_P + f_d \beta \quad (3-10)$$

で示される。

次に、静的計算コードを用いて即発中性子減衰定数 α_p を求める際には、 α 固有値計算又はポイズンサーチ機能を利用する。つまり、

$$\alpha_p \gg \lambda, \quad (3-11)$$

であるとして、(3-7)と(3-8)式により、

$$[(\mathbf{L} - \frac{\alpha_p}{v} \mathbf{I}) + (1 - \beta_T) f_P \mathbf{M}] \vec{\phi} = 0, \quad (3-12)$$

を解くことにより、 α_p を求めている。静的計算コードでは通常、(3-12)式中の $(1 - \beta_T) f_P$ の値を、合成スペクトルとして与えることができる。ここで、(3-11)の仮定が成立しない場合には、合成スペクトルは、(3-8)式で示される値を使用する必要がある。つまり、 α_p を求めるために、

$$[(\mathbf{L} - \frac{\alpha_p}{v} \mathbf{I}) + f'_P \mathbf{M}] \vec{\phi} = 0, \quad (3-13)$$

$$f'_P = (1 - \beta_T) f_P + f_d \beta - \frac{\alpha_p f_d \beta}{\alpha_p + \lambda}, \quad (3-14)$$

を解く必要がある。

つまり、静的計算コードで α_p の値を求める際、結果として得られる α_p 値が λ に比べ十分大きいものであるときには、コードの入力データとなる合成スペクトルは即発中性子の分裂スペクトル f_P のみを用いて、 $(1 - \beta_T) f_P$ で表現できる。一方、 α_p の値が λ に近いような場合には(3-14)式で見られるように、遅発中性子のスペクトル f_d も必要となることがわかる。さらに、(3-13)、(3-14)式より明らかなように、 f'_P の値を求める際に α_p の値が必要となる。したがって、両式を満足する α_p を求めるためには α_p と f'_P の値について繰り返し計算を行う必要があると考えられる。

臨界時の SHE-14 を解析すると、実効増倍率は完全に 1.0 にはならず多少の誤差を生じる。そこで本解析では、SHE-14 の臨界状態に対する即発減衰定数を求める際には、この体系の実効増倍率が 1.0 となるように、核分裂当りの中性子収量 ν の値を調整することとする。このようにして、解析用の臨界状態を作成し、その α 固有値つまり即発減衰定数を求める。ここで、 ν の値の調整は TWOTRAN コードで直接取扱うことができないので、実際の入力となる合成スペクトルの値に、あるファクターを掛けて調整する。これは、 ν の値の調整と等価である。

臨界時の即発減衰定数 α_p を求める実際的手順は以下ようになる。

- ①即発減衰定数 α_p を求めようとする体系の実効増倍率を計算する。このとき用いる合成スペクトルは、DELIGHT-5 コードより得られるものを直接使用する。これは、(3-9) 式を解くことに相当する。
- ②上で得られた実効増倍率の値で、(3-10) 式中の f_p および f_d を除した値を求める。これらの値を用いることにより、解析用の臨界状態が得られる。つまり、これらの値により(3-10)式で f_s を求め再び (3-9) 式により実効増倍率を求めれば、その値は 1.0 となるはずである。この操作は、 ν を調整して臨界状態を作成したのと等価である。
- ③次に、 α_p 計算用の合成スペクトルとして、②で求めた f_p と f_d の値および適当な α_p 推定値により、(3-14) 式を用いて f'_p を求める。
- ④上で求めた f'_p を使用し、(3-13) 式による α 固有値計算を行う。計算結果により得られた α_p 値と、③で使用した α_p 推定値が異なる場合には、③→④の繰り返し計算を行う。

ここで、④の段階で必要となる $1/\nu$ データに、 α_p の値が直接依存し注意を要する。これは (3-13) 式等から明らかである。実際には、TWOTRAN コードを用いた α 固有値計算ではデータとして $1/\nu$ データが必要であるが、各物質ごとに異なる $1/\nu$ データを与えることができない。したがって、炉心全体の $1/\nu$ データを適切に与える必要がある。予備的検討として、DELIGHT-5 コードにより、単位格子モデルを種々変化させ中性子速度(ν)データを求めた。Fig. 3.1 に各種格子モデルを、Table 3.1 に得られた ν データを示す。臨界状態の即発減衰定数 α_p を求める際には、 $1/\nu$ データとして燃料領域に対するもの (case 1) を使用し、後に補正を行うものとする。

次に制御棒挿入時の即発減衰定数 α_p を求める際には、まず実験時の基準炉心に対応する解析用基準状態を作成する。つまり、 $\alpha_p = 10.73$ となる状態を作り出す。この解析用基準状態に対し制御棒を挿入し、制御棒挿入時の α_p 値を計算する。実際の計算手順は以下のである。

- ①解析用基準状態が、実験時の基準状態と等しい即発減衰定数 ($\alpha_p = 10.73$) を持つようにするため (3-14) 式へ $\alpha_p = 10.73$ (実際に代入する値は、 -10.73 である) を代入し、 f'_p の値を求める。
- ②次に、上で求めた f'_p を用い、 $\alpha_p = 10.73$ である状態の実効増倍率を計算する。得られた実効増倍率で f'_p を除したものを、新たな合成スペクトルとして α 固有値計算をすれば、 $\alpha_p = 10.73$ となるはずである。
- ③制御棒の挿入された状態の合成スペクトルを求める。これは、制御棒挿入体系の予想される α_p 値に対する合成スペクトルを (3-14) 式より求め、さらに、この値を ②で得た実効増倍率で除すことにより得られる。

④上で求めた合成スペクトルを用い、制御棒挿入時の α 固有値計算を行う。得られる値が、制御棒挿入時の即発減衰定数 α_p となる。通常この α_p 値は、 $\alpha_p \gg \lambda$ の条件が成立する程度のものであり、臨界時の α_p 値を求める際に行った、 α_p 値と合成スペクトルの値の繰り返しは必要ない。

ここで、制御棒挿入時の解析時には、 $\alpha_p = 10.73$ となる基準状態を、 $1/v$ データも含めて作成しているので、 $1/v$ データの変化による解析値への影響は、ほとんど無視できるものと考えられる。

さらに、①、②の手順については、TWOTRANコードの持つ以下のような機能を利用している。つまり、TWOTRANコードでは、

$$\left[\left(\mathbf{L} - \frac{\alpha_p}{v} \mathbf{I} \right) + \frac{1}{k_{eff}} f_p' \mathbf{M} \right] \phi = 0 \quad (3-15)$$

なる式の、 α_p 値又は k_{eff} 値の一方を入力データの値で固定し、他方の値を求めることが可能である。したがって、(3-14)式で用いる α_p 値と同一の値を、(3-15)式中の α_p 値へ代入し、 k_{eff} を求められる。得られた k_{eff} でさらに、使用した f_p' を除いて新たな合成スペクトルとすれば、(3-15)式において $k_{eff} = 1.0$ のときの、 α_p 値が10.73である状態が作成されたことになる。実際には、 $PV = -10.73$ という値を、TWOTRANコードに入力して計算を行う。

Table 3.1 Neutron velocity by DELIGHT-5

Neutron energy	Neutron velocity v (cm/sec)				
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
fast	1.78335+7	4.11265+7	9.10108+7	1.66633+7	3.99376+7
thermal	3.69471+5	1.61619+6	1.84576+6	2.56079+5	1.61966+6
Group 1	1.1389+9	1.1399+9	1.1419+9	1.1392+9	1.1402+9
2	2.8065+8	2.8172+8	2.8390+8	2.8061+8	2.8170+9
3	7.5182+7	7.5974+7	7.7577+7	7.5138+7	7.5945+7
4	2.4961+7	2.5469+7	2.6462+7	2.4930+7	2.5447+7
5	1.2146+7	1.2266+7	1.2486+7	1.2140+7	1.2263+7
6	7.3775+6	7.4939+6	7.6926+6	7.3633+6	7.4833+7
7	4.4776+6	4.5890+6	4.7570+6	4.4661+6	4.5818+6
8	3.0933+6	3.1151+6	3.1445+6	3.0932+6	3.1154+6
9	2.4090+6	2.4301+6	2.4545+6	2.4090+6	2.4304+6
10	1.9978+6	2.0038+6	2.0107+6	1.9978+6	2.0039+6
11	1.7660+6	1.7735+6	1.7832+6	1.7660+6	1.7736+6
12	1.5497+6	1.5583+6	1.5673+6	1.5495+6	1.5583+6
13	1.4289+6	1.4292+6	1.4295+6	1.4289+6	1.4292+6
14	1.2498+6	1.2743+6	1.2937+6	1.2496+6	1.2746+6
15	8.6328+5	9.5006+5	9.6614+5	8.4925+5	9.5035+5
16	4.9797+5	5.9011+5	5.7080+5	4.6820+5	5.9015+5
17	3.2512+5	3.4209+5	3.3674+5	3.1942+5	3.4201+5
18	1.8668+5	1.8373+5	1.7535+5	1.7631+5	1.8356+5
k _{eff}	1.6243	0.045534	0.022143	3.0630-34	4.6427-37

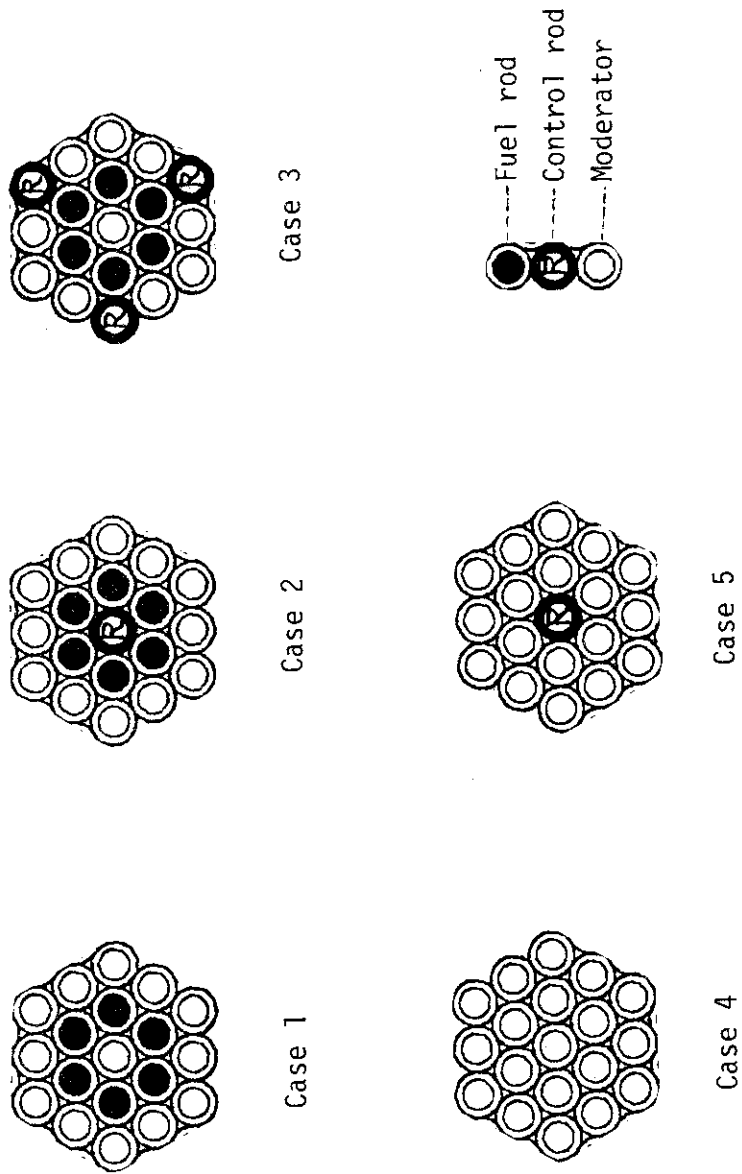


Fig.3.1 Cell models for DELIGHT-5 to obtain $1/v$ data

4. 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. 4.1に示すようなものを考える。また Table 4.1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。

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

$$\bar{\ell}_{in} = 2R = 2 \times 5.0040 = 10.008. \quad (4-2)$$

$$\bar{\ell} = \bar{\ell}_{out} - \bar{\ell}_{in} = 4.7898. \quad (4-3)$$

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。

$$\sigma_M = \frac{\Sigma_p^{eff}}{N_o^{eff}} + \frac{1-C}{N_o^{eff} \cdot \bar{\ell}}. \quad (4-4)$$

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 4.2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. 4.2およびTable 4.3に示す。実際には、DELIGHT-5コードでスペシヤルマテリアルとして各物質毎の群定数を作成する。Table 4.4に、燃料ディスク部、スリーブとマトリックス管部、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を示す。これらは、臨界質量解析時に用いた、X-Yモデル用の原子数密度と同一である⁴⁾。また、制御棒については、解析では三物質領域から構成されるとしたが、これらは、中央部の空気ボイド領域、吸収体領域、アルミ管とマトリックス管領域である。ただし制御棒軸方向に存在するゴムスペーサー等は無視している。吸収体領域の原子重量密度と原子数密度を、Table 4.5に、さらに、空気ボイド領域、アルミパイプとマトリックス管領域に対するものをTable 4.6に示す。

Table 4.1 SHE-14 Atomic number densities for unit cell calculation
($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)

Nuclide	Nuclide ID number	Region 1	2	3	4	5	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 4.2 Atomic number densities and potential scattering cross sections of fuel disk

Nuclide	Atomic number density ($n \times 10^{24}/\text{cm}^3$) (A)	Potential scattering cross section (barn) (B)	(A) \times (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

$$N_o^{\text{eff}} = 3.3671 \times 10^{-4} \quad \Sigma_p^{\text{eff}} = 4.5459 \times 10^{-1} \text{ (cm}^{-1}\text{)}$$

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

Table 4.3 Energy structure of 18 groups

Group number	Energy range of each fast group		Group number	Energy range of each thermal group	
	Upper limit	Lower limit		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 4.4 Atomic number densities of SHE-14 core
($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)

Nuclide	Fuel region SHE-14	Fuel sleeve and matrix tube region	Reflector region	
			Replaceable	Permanent
U ²³⁵	8.0942 -5	—	—	—
U ²³⁸	3.2268 -4	—	—	—
B ¹⁰	2.9002 -9	1.4038 -9	1.5949 -9	1.6033 -9
B ¹¹	1.2619 -8	6.2990 -9	7.1565 -9	7.1941 -9
C ¹²	9.4377 -2	6.7644 -2	7.6852 -2	7.7256 -2
O ¹⁶	8.5893 -4	2.9344 -5	3.1840 -5	3.1950 -5
Fe	5.8548 -8	—	—	—
Cd	1.9394 -10	—	—	—
N	—	8.0251 -6	3.8127 -6	3.6283 -6
H	7.9177 -5	5.4103 -5	6.1632 -5	6.1950 -5

Table 4.5 Atomic number densities of absorber region in control rod

	Nuclide	Absorption pellet	
		B ₄ C 10 w/o	B 30 w/o
Atomic weight density (g/cm ³)	B ¹⁰	2.7350 -2	7.3698 -2
	B ¹¹	1.3074 -1	3.5230 -1
	C ¹²	1.8608	0.9934
	O ¹⁶	9.9210 -4	5.2966 -4
	H ¹	1.2500 -4	6.6737 -5
Atomic number density ($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)	B ¹⁰	1.6450 -3	4.4327 -3
	B ¹¹	7.1520 -3	1.9272 -2
	C ¹²	9.3303 -2	4.9810 -2
	O ¹⁶	3.7345 -5	1.9938 -5
	H ¹	7.4684 -5	3.9874 -5

Table 4.6 Atomic number densities of void and matrix tube regions in control rod

Region	Nuclide	Atomic number density ($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)
Void (air)	O	1.1012 -5
	N	3.8968 -5
	H	1.1152 -6
Aluminum and matrix tubes	B ¹⁰	9.6464 -10
	B ¹¹	4.3283 -9
	C	4.6481 -2
	O	2.2548 -5
	Al	5.8042 -3
	N	3.7544 -6
	H	3.7609 -5

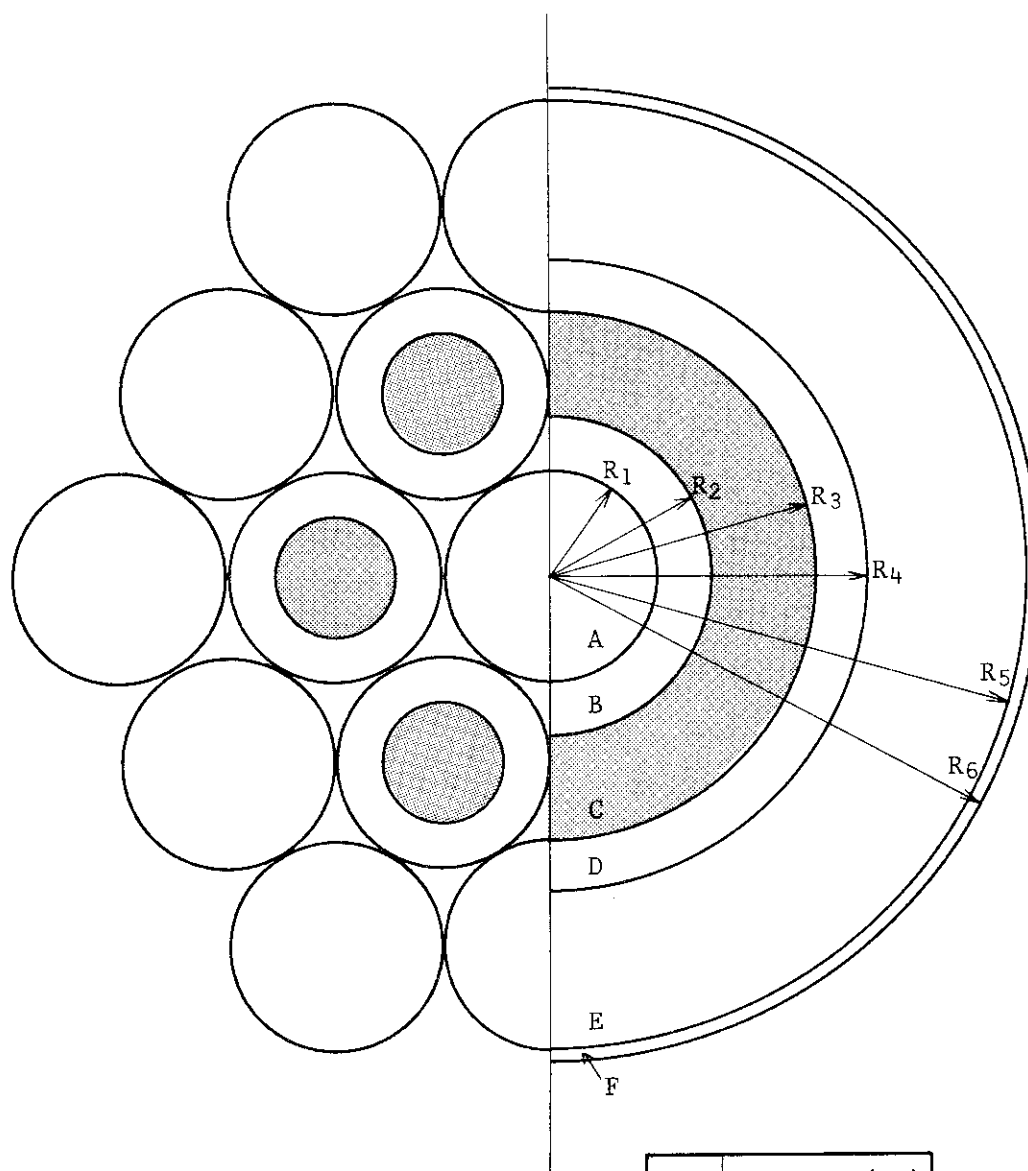


Fig. 4.1 SHE-14 Unit cell

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

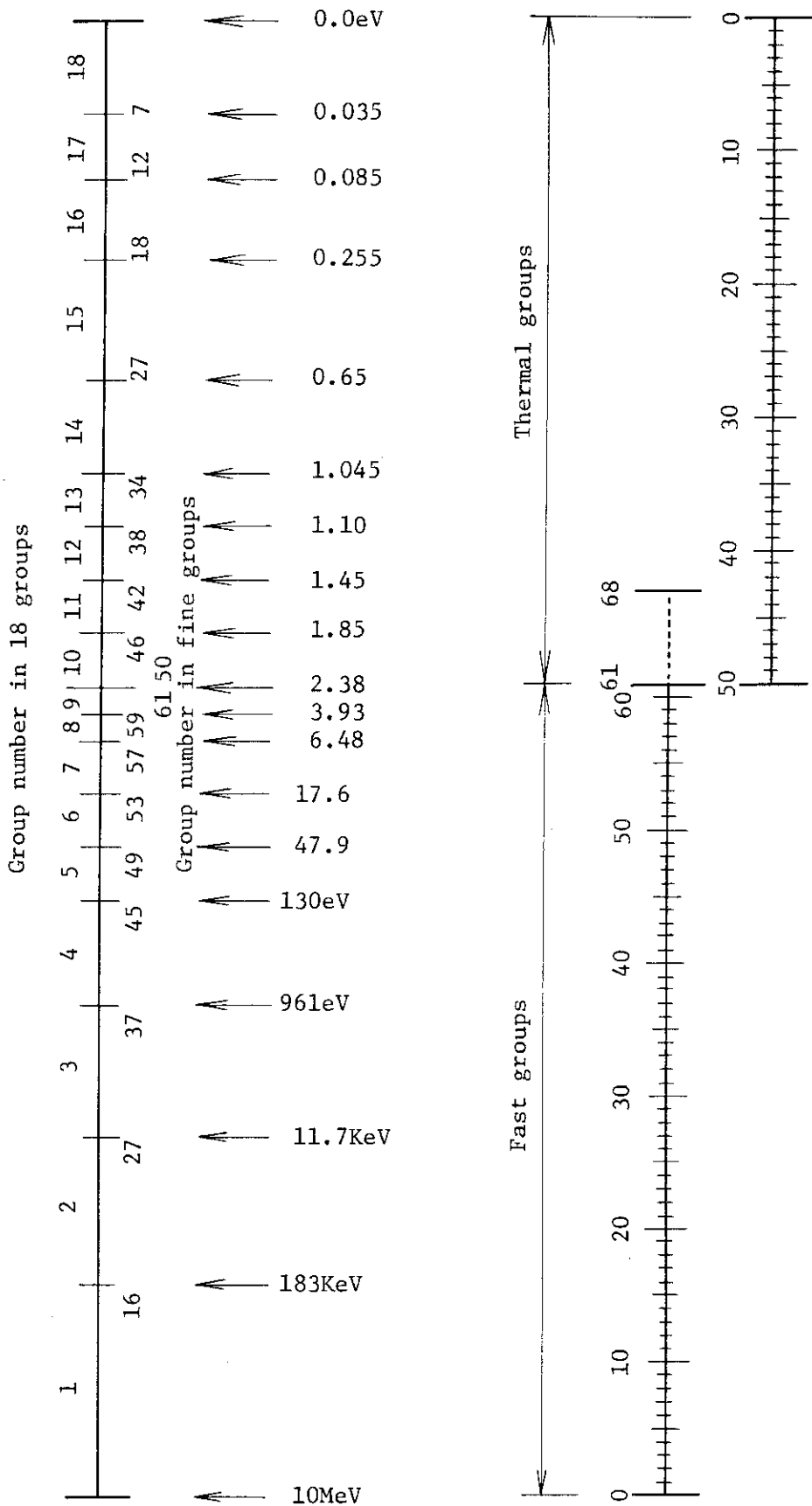


Fig. 4.2 Energy structure of 18 groups

5. SHE-14形状とモデル化

SHE-14形状は、制御棒未挿入時の体系では、 θ 方向60度部分のみを考えれば、その回転対称性から体系全体を十分表現できると考えられる。同様に、制御棒一本挿入時も、 θ 方向60度部分のみ考慮すれば十分である。一方、制御棒3本および6本挿入状態では、燃料リングと制御棒配置に対する回転対称軸が異なり、 θ 方向で120度まで考慮する必要がある。したがって、TWOTRANコードでの解析形状は、臨界状態、基準状態および制御棒一本挿入状態に対し、 θ 方向60度のR- θ 形状で表現する。制御棒三本および六本挿入状態に対しては θ 方向120度のR- θ 形状で表現する。ここで、燃料ディスク部は、R- θ メッシュで記述可能な等体積の扇形で表現する。制御棒についても、その表面積をできる限り保存した扇形で表現する。ここで、燃料ディスク部外周に存在するスリーブやマトリックス管まで考慮したモデルを、R- θ 形状で作成することが困難なため、これらに対応する部分は可動反射体と同一物質であると仮定する。以上のようなモデルを、Model-Aとする。

次に、Model-Aでは無視されていた、スリーブとマトリックス管の影響について補正するために、Model-B, C, Dを導入する。R- θ 形状では考慮できなかったスリーブとマトリックス管は、X-Y形状で容易に表現可能である。しかし、SHE-14の制御棒挿入体系は、外周燃料リングと制御棒の回転対称軸が異なり、 $\frac{1}{4}$ 又は $\frac{1}{2}$ 炉心のX-Y形状で表現できない。したがって外周燃料リングおよび制御棒位置を、中心燃料リングに対しそれぞれ異った角度だけ少しずつ回転させた体系を考え、これに対しX-Y形状モデルを作成する。制御棒のない状態および1本挿入状態に対してはX-Y形状の $\frac{1}{4}$ 炉心モデルで、三本および六本挿入状態に対してはX-Y形状の $\frac{1}{2}$ 炉心モデルで、スリーブおよびマトリックス管の有無による効果を考慮する。実際には、スリーブおよびマトリックス管を考慮せず、これらを可動反射体部の物質と同一としたX-Y形状モデルであるModel-Cと、スリーブとマトリックス管部を考慮したX-Y形状モデルであるModel-Dとの解析結果を比較することにより、これらの効果について考慮する。ここで、Model-CとDでは、メッシュ構成は同一となっており、スリーブとマトリックス管領域に対する物質割当てが異なっている。また、外周燃料リングおよび制御棒位置の変更による効果を補正するため、R- θ 形状のModel-Bを導入する。これは、Model-Cと同一のものを、R- θ 形状で表現したものであり、Model-Aとの比較により、外周燃料リングおよび制御棒位置の変更による効果を補正可能である。これらのモデルについての特徴をTable 5.1に示す。

Table 5.1 Features of Model-A, B, C and D

Model	No. of control rods	Geometry	Considered width of angle	Position of fuel and control rods	Sleeve and matrix tube	Shape of control rod
A ₀	0	R - θ	60°	Realistic	None	-
A ₁	1	"	"	"	"	Realistic
A ₃	3	"	120°	"	"	Square
A ₆	6	"	"	"	"	"
B ₀	0	R - θ	60°	Adjusted	None	-
B ₁	1	"	"	"	"	Realistic
B ₃	3	"	"	"	"	Square
B ₆	6	"	"	"	"	"
C ₀	0	X - Y	90°	Adjusted	None	-
C ₁	1	"	"	"	"	Square
C ₃	3	"	180°	"	"	"
C ₆	6	"	"	"	"	"
D ₀	0	X - Y	90°	Adjusted	Considered	-
D ₁	1	"	"	"	"	Square
D ₃	3	"	180°	"	"	"
D ₆	6	"	"	"	"	"

5.1 Model-A

Model-Aは、 $R-\theta$ 形状を用いSHE-14の燃料棒および制御棒の配置を正確に模擬したものである。ただし、燃料棒（燃料ディスク）の形状は、等体積の扇形で表現し、制御棒は等表面積の扇形で表現している。さらに、SHE-14体系の中心に一本の制御棒が存在する場合には体積および表面積とも実際と等しい円環形状で表現している。なお、制御棒を等表面積の扇形状で表現したことによる体積変化を、吸収体の原子数密度の調整で補正するということを行っている。Model-Aは、 $R-\theta$ 形状であり、制御棒の軸方向の構造については取扱えず、吸収ペレットは240 cm連続して存在するものと仮定する。これは、Model-B~Dについても同様である。制御棒領域の中心部にある空気ボイド部、外周部にあるマトリックス管部は、Model-A~Dのすべてにおいて考慮しているが、燃料外周のスリーブおよびマトリックス管については、Model-Aでは、可動反射体と同物質であるとしている。これは、 $R-\theta$ 形状でのメッシュ作成が困難なためである。

計算用 $R-\theta$ 形状を、制御棒本数が、0, 1, 3, 6本の場合をすべて包含するように作成し、物質の割当てを変えて、それぞれのケースを一つの計算モデルで解析することが考えられるが、実際にこのような計算モデルを作成し解析してみると、メッシュ数が多くなりすぎて計算時間が非常に長くなり実用的でないことが判明している。したがって、Model-Aとしては、制御棒が1本、3本、6本の場合の三種の計算形状を作成する。制御棒の挿入されていない、臨界状態および基準状態に対しては、制御棒1本挿入時の計算形状で、物質の割当てを変えて使用する。制御棒が、0本および1本挿入時の計算形状としては、 θ 方向60度までを考慮すれば良く、Figs. 5.1, 5.2の様である。一方、制御棒が、3本および6本の場合には、燃料棒の外周リングと制御棒配置に対する回転対称軸が異なるため、 θ 方向120度まで考慮する必要がある。制御棒本数が、3本および6本のときの計算形状は、それぞれ、Figs. 5.3, 5.4とFigs. 5.5, 5.6のようになる。

各燃料棒を、半径の等しい位置にあるものについて、A~Gまでのグループに分類し、それぞれのグループに対して、 $R-\theta$ モデル上での、内側および外側半径の値さらに中心角を求め、これをTable 5.2に示す。これが、Model-Aの3種の計算形状を作成するための基礎データである。ところで、TWOTRANコードでは、CITATIONコードで用いられているようなメッシュオーバーレイの概念がなく、物質の割当てが複雑である。そこで、CITATIONコードのようなオーバーレイ形式の入力を行い、TWOTRANコード用の物質割合データを作成するプログラムを作成して使用している。また、使用した境界条件は、 θ 方向については、周期的境界条件であり、 R 方向については真空境界条件となっている。

Table 5.2 Fundamental data to construct R- θ geometry of Model-A

Group of fuel	Inner radius (cm)	Outer radius (cm)	Central angle (radian)	Central angle (TWOTRAN $\theta^\circ/360^\circ$)
A	20.4750	24.3883	0.35436	5.6398 -2
B	21.3987	25.3100	0.17027	2.7099 -2
C	26.3136	30.2176	0.14094	2.2432 -2
D	27.7716	31.6740	0.13409	2.1340 -2
E	31.7692	35.6686	0.11829	1.8827 -2
F	32.3903	36.2891	0.11617	1.8488 -2
G	4.3651	8.5689	0.57210	9.1053 -2

No. of control rod		Inner radius (cm)	Outer radius (cm)	Central angle (radian)	Central angle (TWOTRAN $\theta^\circ/360^\circ$)
1	Void	0.0	1.5	—	—
	Absorber	1.5	2.5	—	—
	Matrix tube	2.5	3.4128	—	—
3	Void	11.9248	14.4745	0.19197	3.0553 -2
	Absorber	10.8558	15.1868	0.31822	5.0646 -2
	Matrix tube	9.6446	15.9833	0.45048	7.1696 -2
6	Void	41.3326	43.8763	0.059616	9.4882 -3
	Absorber	40.4480	44.6930	0.099310	1.5806 -2
	Matrix tube	39.4778	45.5523	0.14168	2.2549 -2
	Void	44.2105	46.7539	0.055850	8.8888 -3
	Absorber	43.3285	47.5724	0.093040	1.4808 -2
	Matrix tube	42.3629	48.4343	0.13275	2.1128 -2

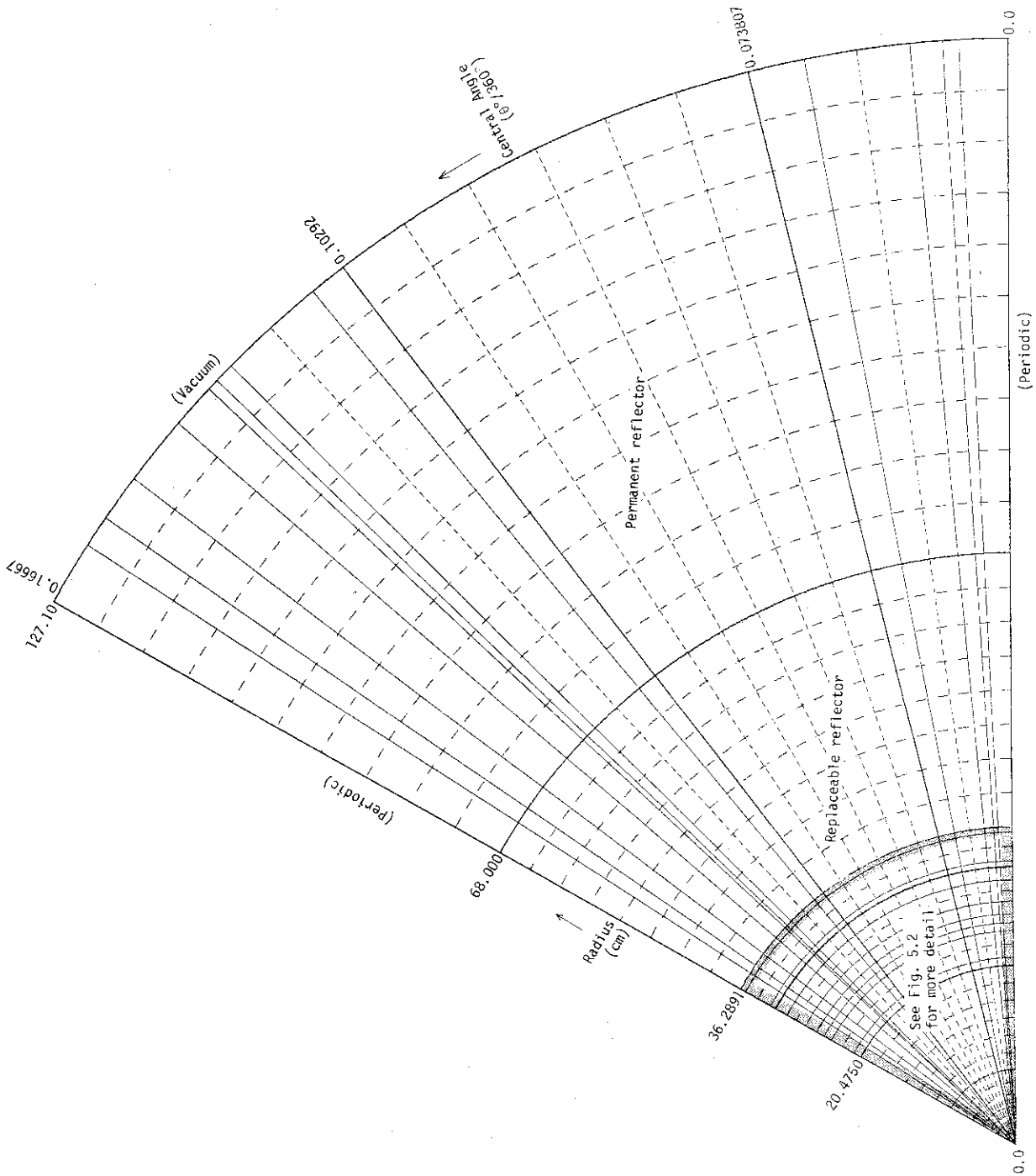


Fig. 5.1 Model-A with/without one rod.

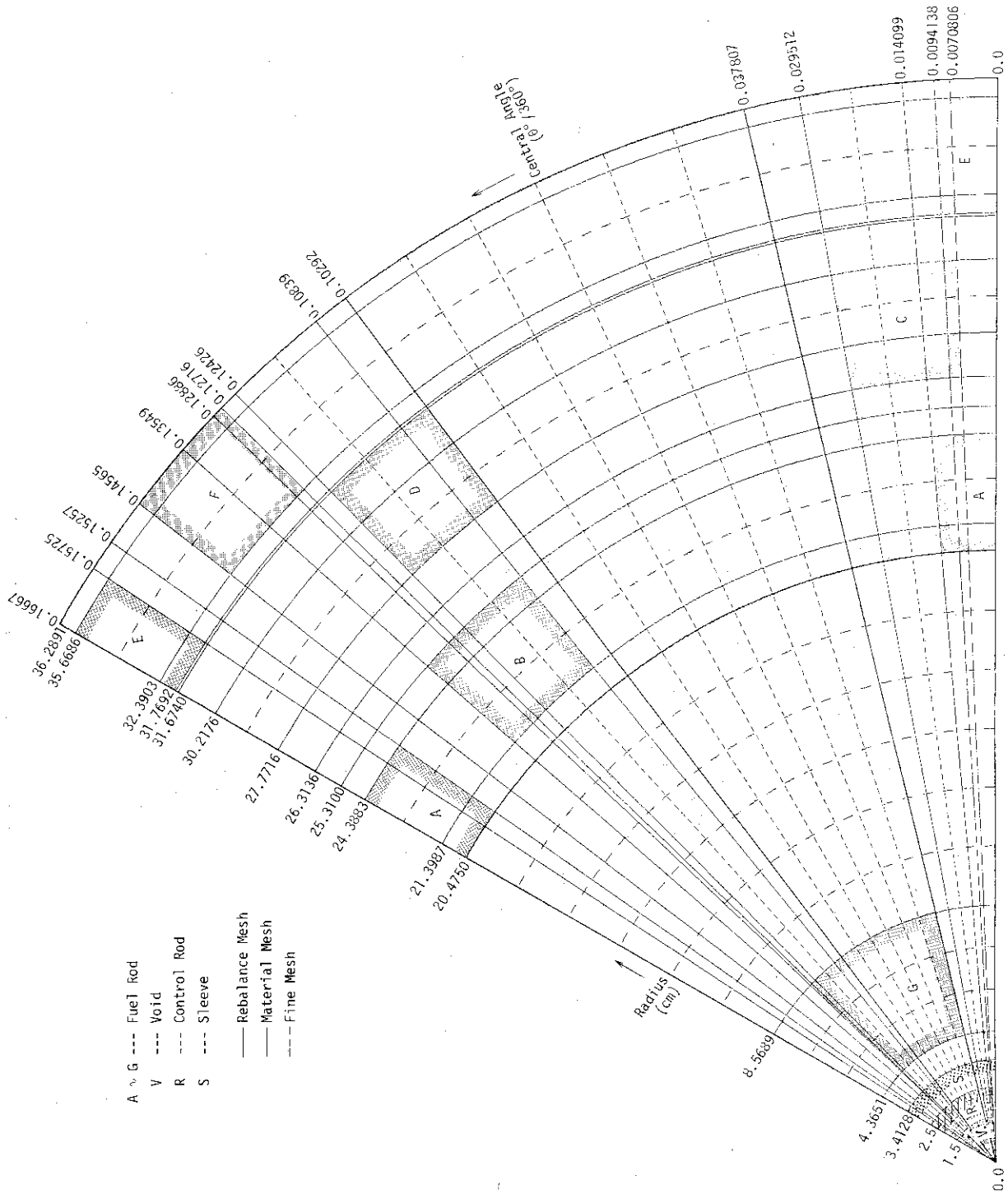


Fig. 5.2 Magnification of Fig. 5.1.

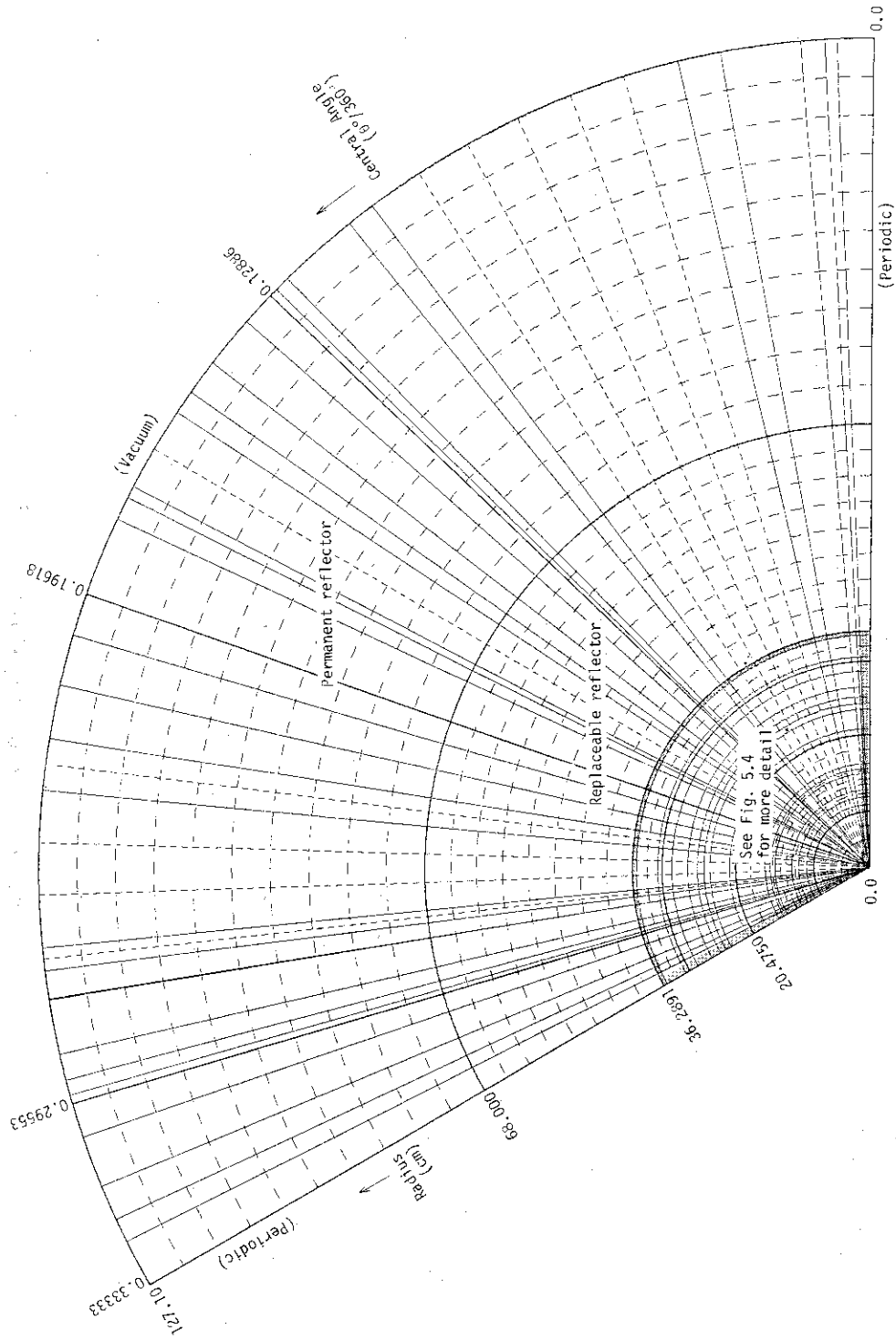


Fig. 5.3 Model A with 3 rods.

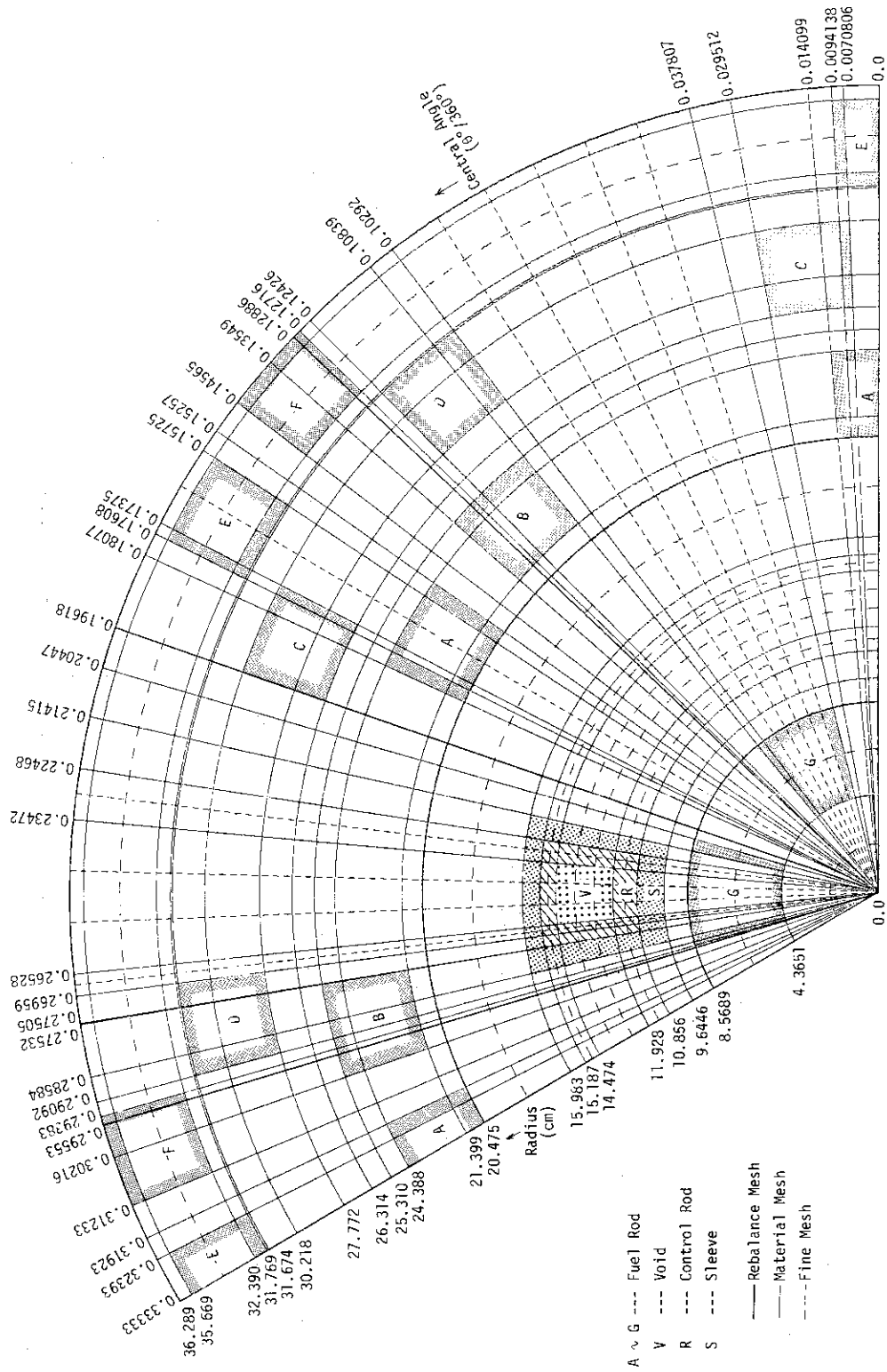


Fig. 5.4 Magnification of Fig. 5.3.

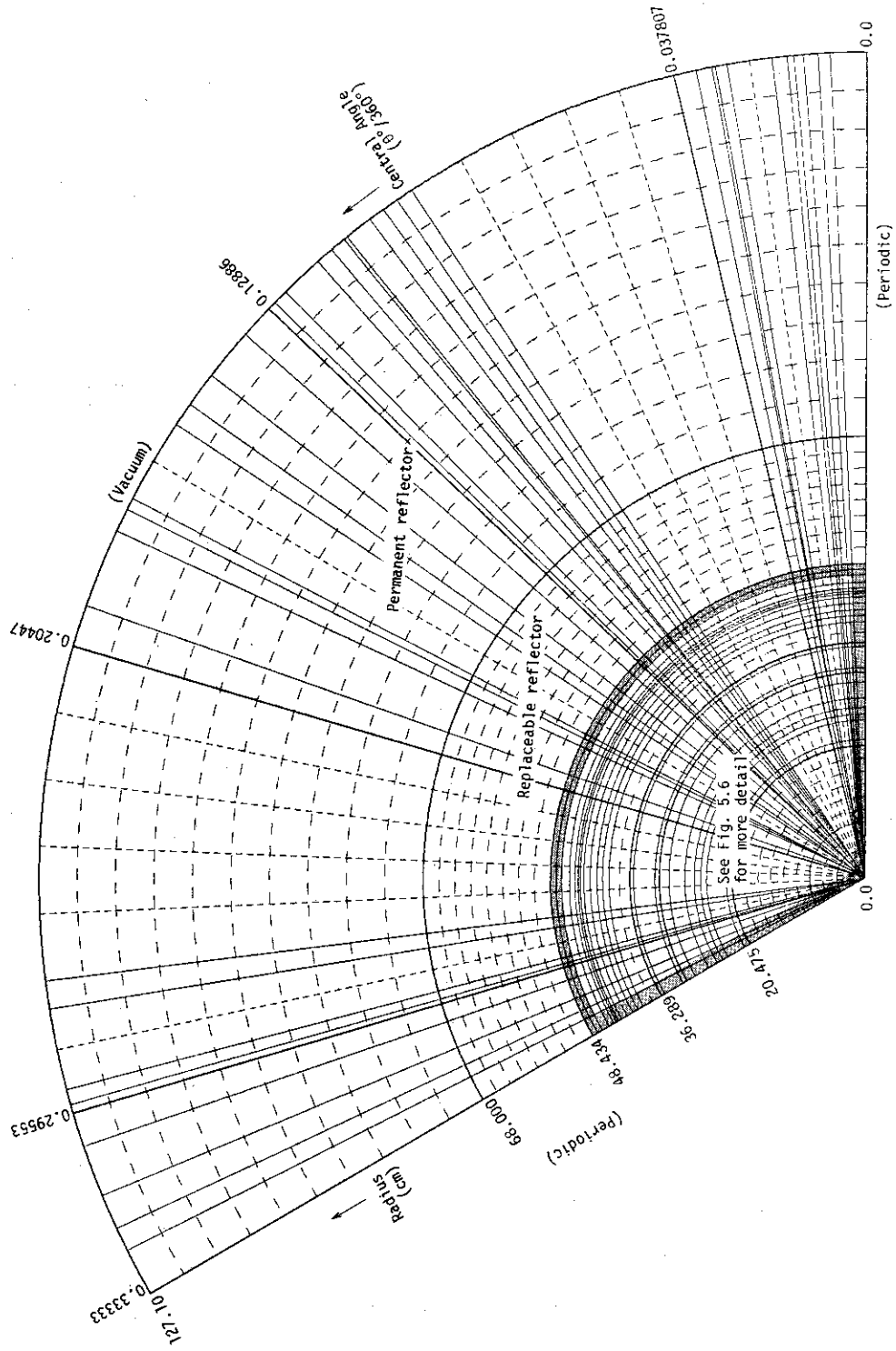


Fig. 5.5 Model-A with 6 rods.

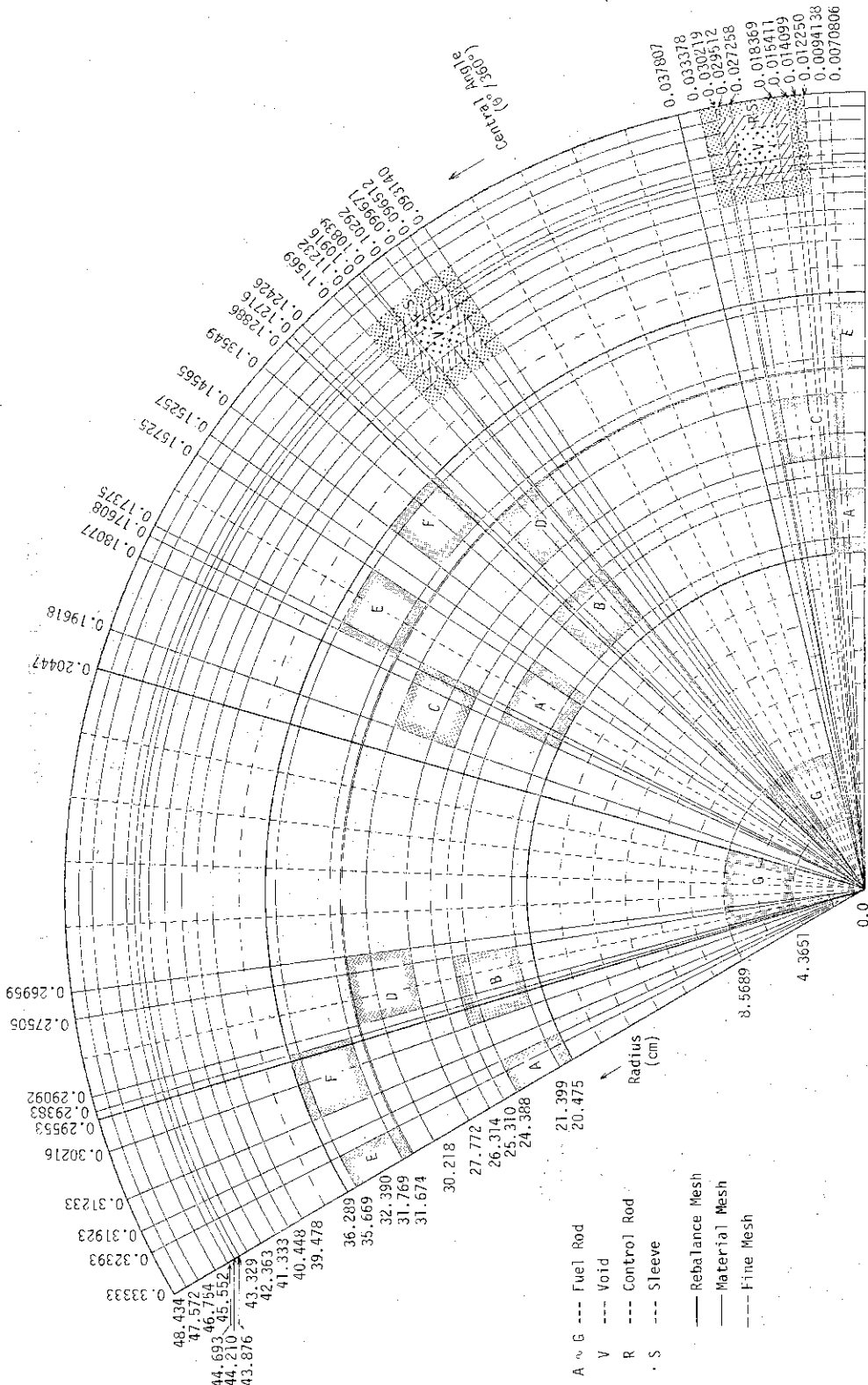


Fig. 5.6 Magnification of Fig. 5.5.

5.2 Model-B

このモデルは、 $R-\theta$ 形状であり、Model-Aと比較することにより、燃料棒の外周リングと制御棒配置の位置を変化させたことによる解析への影響について考慮することができる。燃料棒や制御棒の形状等の取扱いは、Model-Aと同様である。ただし、燃料棒の外周リングと制御棒の回転対称軸が等しくなるよう調整された体系のモデル化であるため、制御棒本数が、3本および6本の場合でも、 θ 方向60度のみを考慮すれば十分である。ただし、この時、 θ 方向境界条件は反射境界条件を用いる。Model-Bの計算形状作成用基本データを、Table 5.3に示す。また計算形状をFigs. 5.7~5.12に、制御棒0、1本、制御棒3本、および制御棒6本の場合について示す。

Table 5.3 Fundamental data to construct R- θ geometry of Model-B

Group of fuel	Inner radius (cm)	Outer radius (cm)	Central angle (radian)	Central angle (TWOTRAN $\theta^\circ/360^\circ$)
A	20.7094	24.6221	0.17537	2.7912 -2
B	26.8690	30.7724	0.13825	2.2003 -2
C	31.9255	35.8246	0.11775	1.8741 -2
D	4.3651	8.5689	0.57210	9.1053 -2

No. of control rod		Inner radius (cm)	Outer radius (cm)	Central angle (radian)	Central angle (TWOTRAN $\theta^\circ/360^\circ$)
1	Void	0.0	1.5	—	—
	Absorber	1.5	2.5	—	—
	Matrix tube	2.5	3.4128	—	—
3	Void	11.9248	14.4745	0.19197	3.0553 -2
	Absorber	10.8558	15.1868	0.31822	5.0646 -2
	Matrix tube	9.6446	15.9833	0.45048	7.1696 -2
6	Void	42.4341	44.9777	0.058116	9.2494 -3
	Absorber	41.5506	45.7951	0.096813	1.5408 -2
	Matrix tube	40.5822	46.6554	0.13813	2.1983 -2

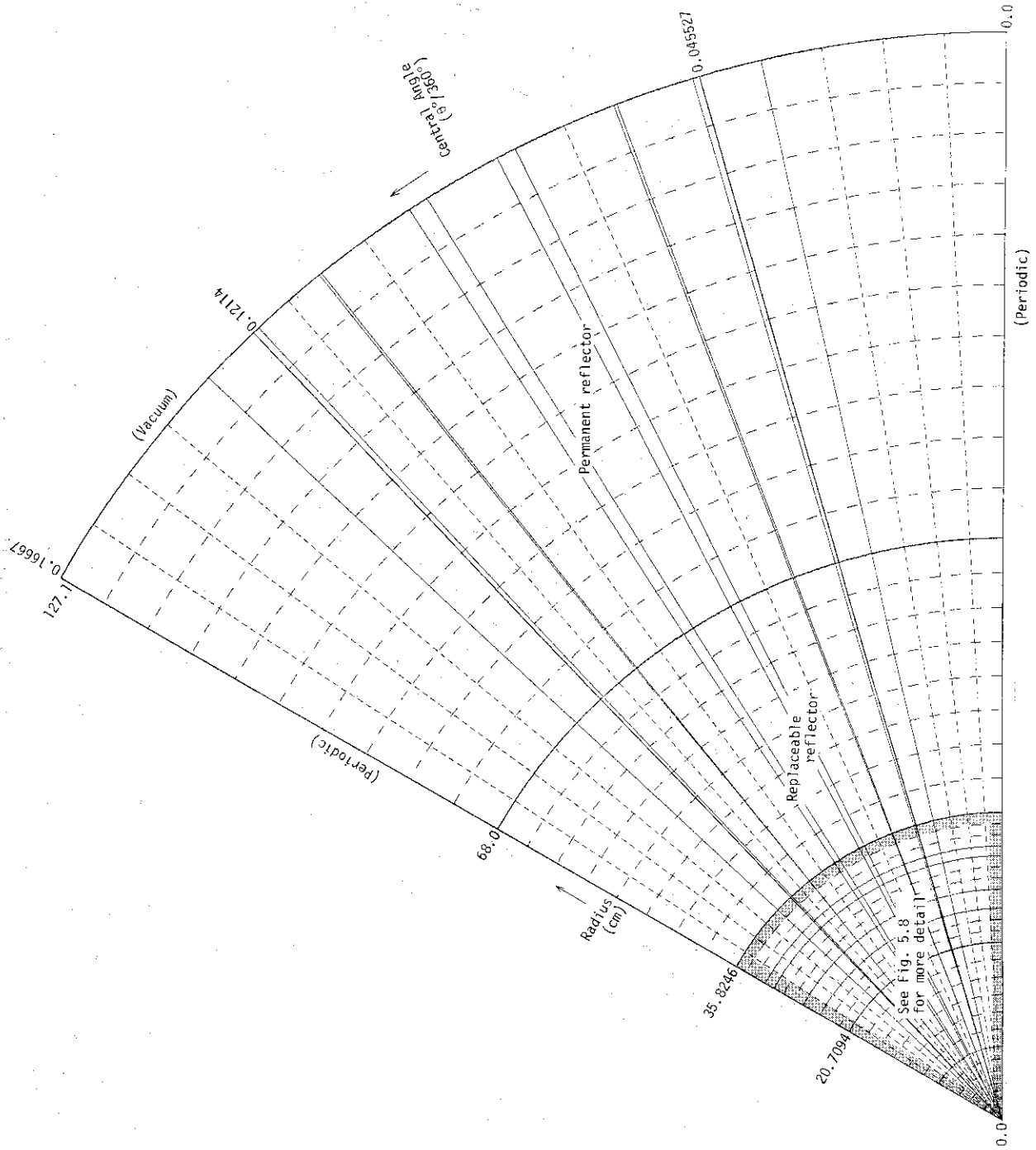


Fig. 5.7 Model-B with/without one rod.

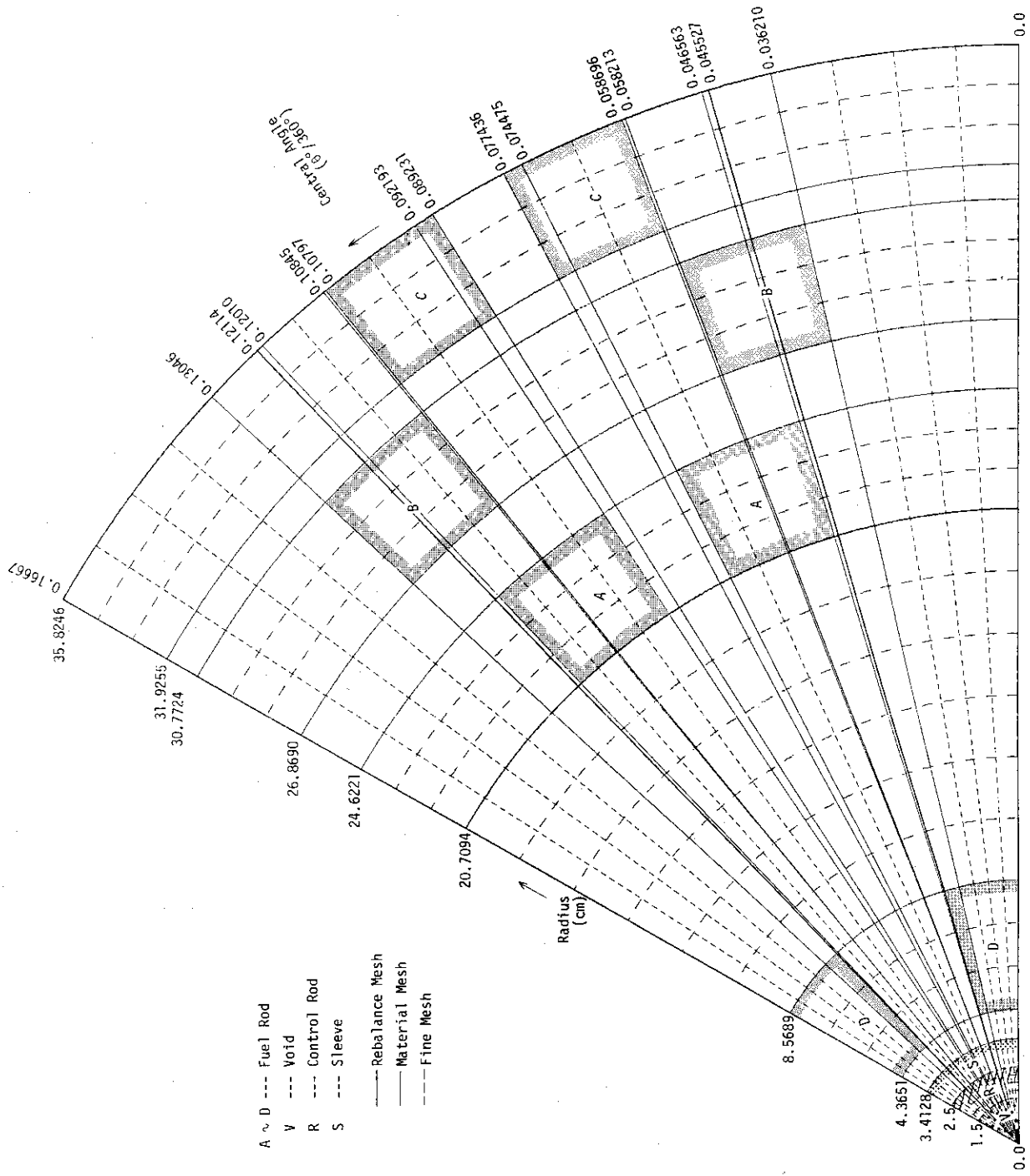


Fig. 5.8 Magnification of Fig. 5.7.

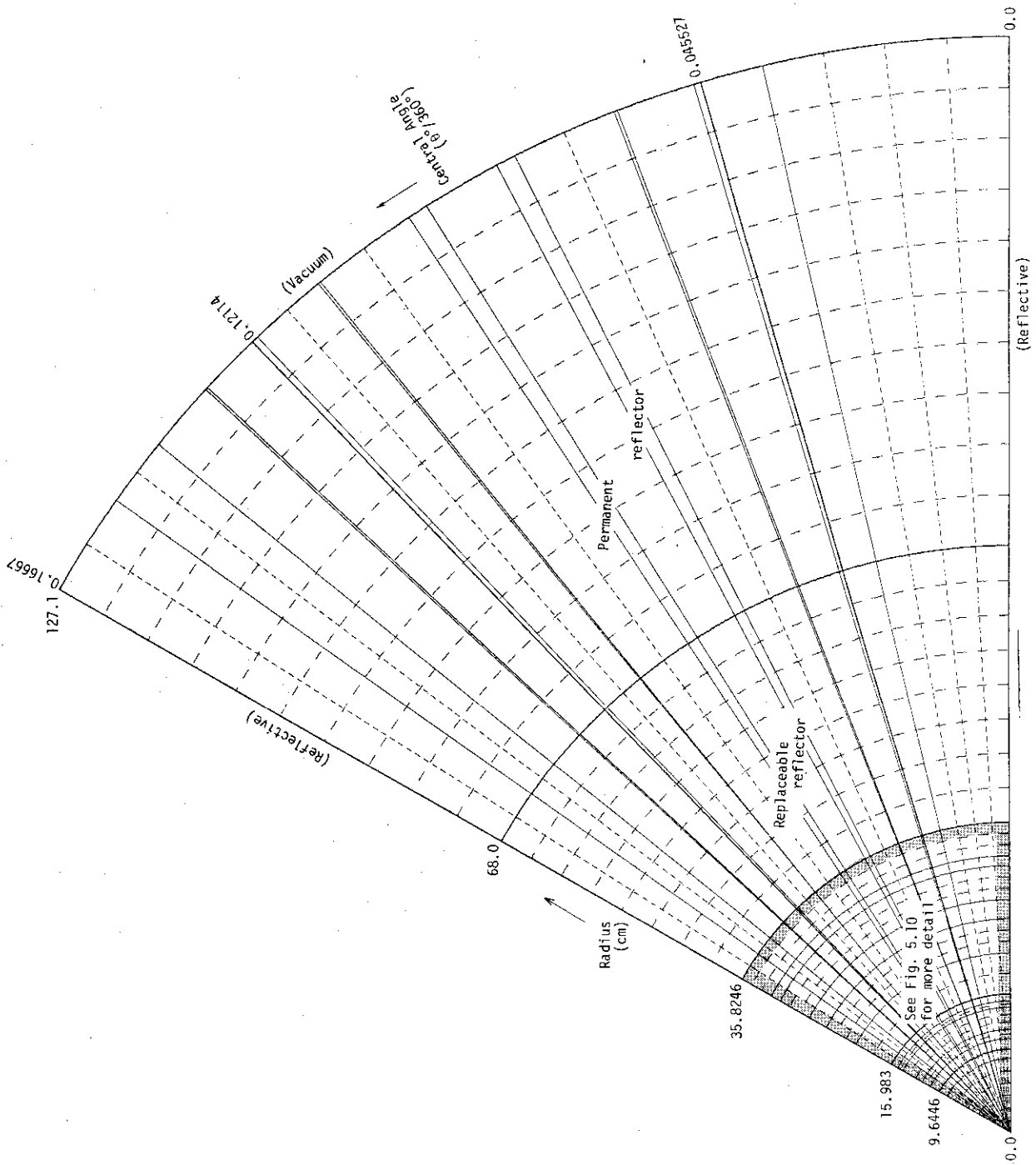


Fig. 5.9 Model-B with 3 rods.

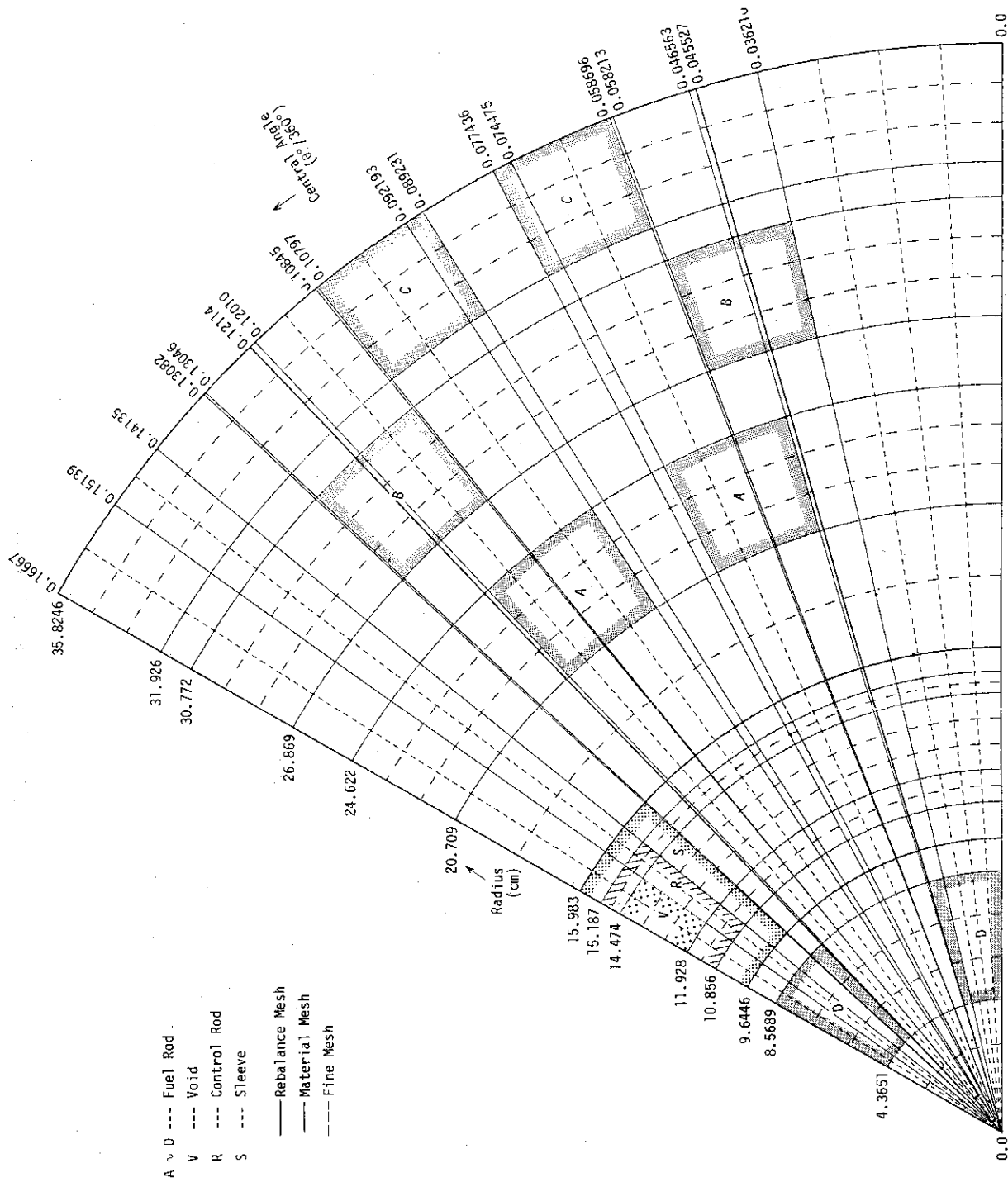


Fig. 5.10 Magnification of Fig. 5.9.

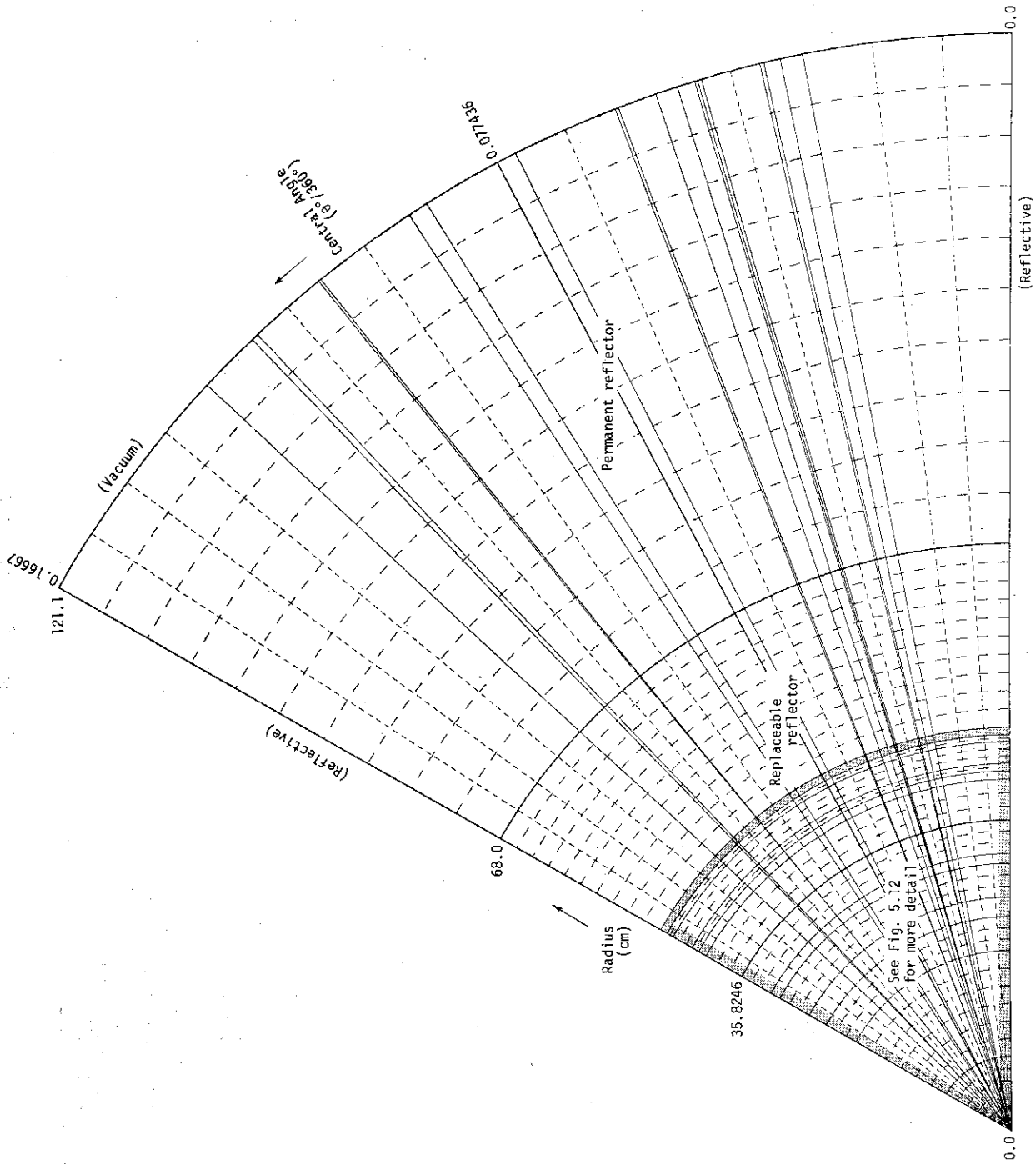


Fig. 5.11 Model-B with 6 rods.

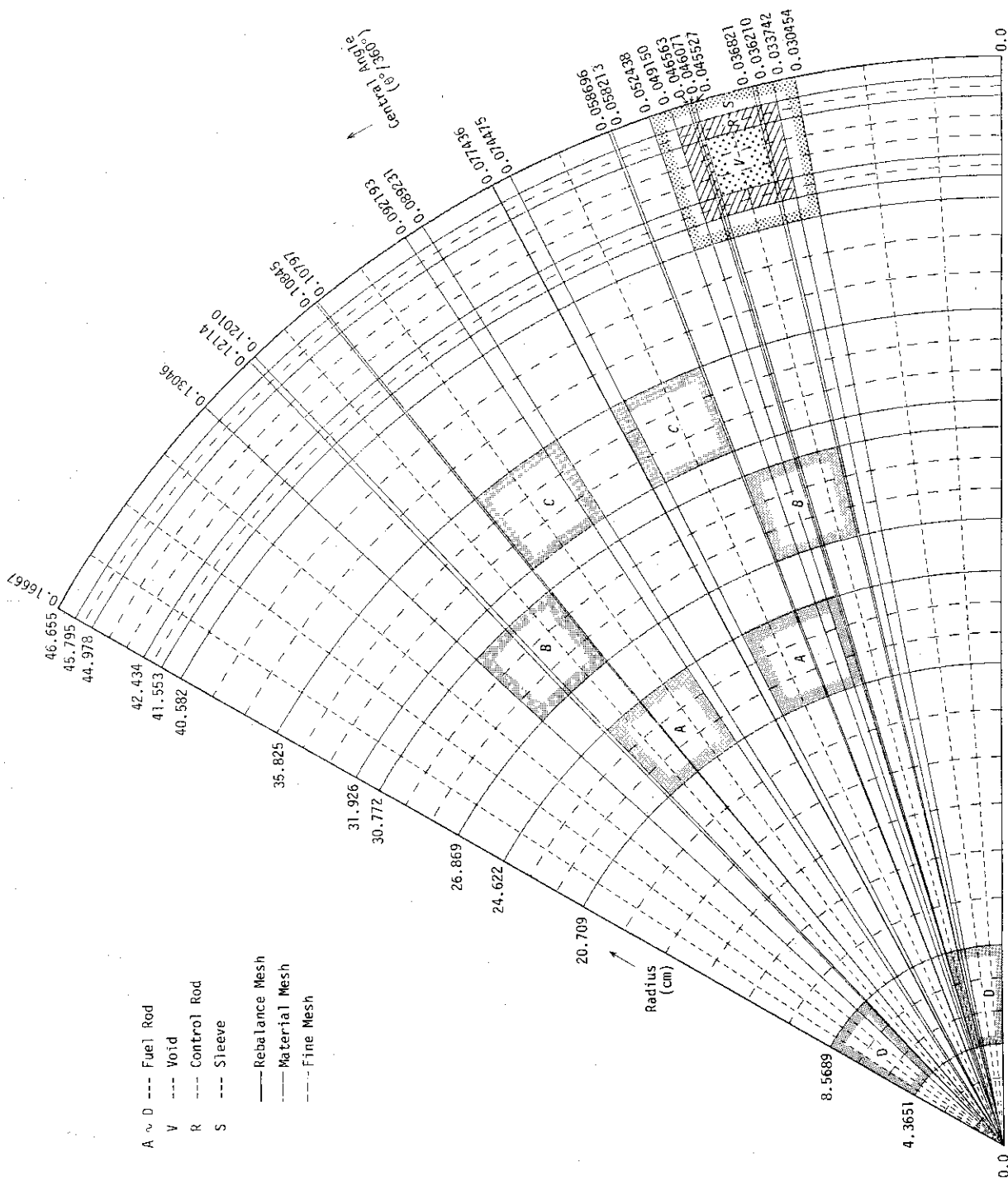


Fig. 5.12 Magnification of Fig. 5.11.

5.3 Model-C および Model-D

Model-C と Model-D は、燃料スリーブとマトリックス管部の物質を可動反射体部の物質で置き換えたことによる効果を見るために使用する。両モデルのメッシュ構成は同一であり、スリーブとマトリックス管部の物質割当てを変えて解析を行うことにより、この効果について考慮することができる。ここで、燃料ディスク部は、等体積の正方形で表現し、スリーブとマトリックス管部は等体積の長方形で表現している。制御棒（吸収体部）については、 $R-\theta$ 形状モデルと同様、表面積を保存した正方形で表現する。制御棒本数が 0 と 1 本であるときには、 $X-Y$ 形状で $1/4$ 炉心をモデル化し、3 本および 6 本の際には、 $1/2$ 炉心をモデル化する必要がある。Figs. 5.13, 5.14 に、制御棒 0 本および 1 本挿入の場合の計算形状について示す。また、制御棒 3 本および 6 本時のメッシュ構成を Table 5.4 に示す。

Table 5.4 Mesh Data for Model-C and D with 3 or 6 rods

Direction	Y (cm)	X (cm)	Mesh No.	Y (cm)	X (cm)	Mesh No.	Y (cm)	X (cm)
	0.0	0.0						
1	11.9755	1.2709		114.527	33.7752		140.87385	
	23.951	1.97185		115.7979	35.74705		142.152	
	35.9265	2.1182		115.80515	36.5898		144.12385	
	47.902	2.8146		116.49885	39.4044		145.402	
5	54.402	3.65735	40	116.6452	40.1008	75	146.68015	
	60.902	5.6292		117.777	40.9481		148.652	
	67.402	6.47195		118.9088	42.219		149.7838	
	73.902	7.60105		119.74885	43.4899		149.93015	
	75.527	8.4438		119.7561	44.3372		150.62385	
10	76.6588	9.1402	45	121.027	45.0336	80	150.6311	
	77.5061	9.9875		122.2979	47.8482		151.902	
	78.777	10.41565		122.30515	53.4774		153.1729	
	80.0479	11.2584		123.1452	59.1066		153.87385	
	80.402	12.10115		124.277	64.7358		154.0202	
15	80.8932	12.5293	50	125.55515	78.8086	85	155.152	
	82.027	13.3766		126.24885	92.8814		161.652	
	86.902	14.073		127.527	106.9542		168.152	
	88.18015	16.04485		129.152	121.027		174.652	
	90.152	16.8876		129.49885			181.152	
	91.43015	17.73035	55	130.2838		90	187.652	
	92.12385	19.7022		130.777			194.152	
	93.402	20.54495		131.1311			206.1275	
	95.37385	21.67405		131.9088			218.103	
	96.652	22.5168		132.402			230.0785	
25	97.93015	24.48865	60	132.7561		95	242.054	
	99.902	25.3314		133.6729				
	101.18015	26.17415		134.027				
	101.87385	28.146		134.5202				
	103.152	28.8424		135.2979				
	105.12385	29.6897	65	135.652				
30	106.402	30.11785		136.1452				
	111.277	30.9606		136.93015				
	112.4088	31.80335		137.277				
	112.55515	32.2315		138.902				
35	113.2561	33.0788	70	140.18015				

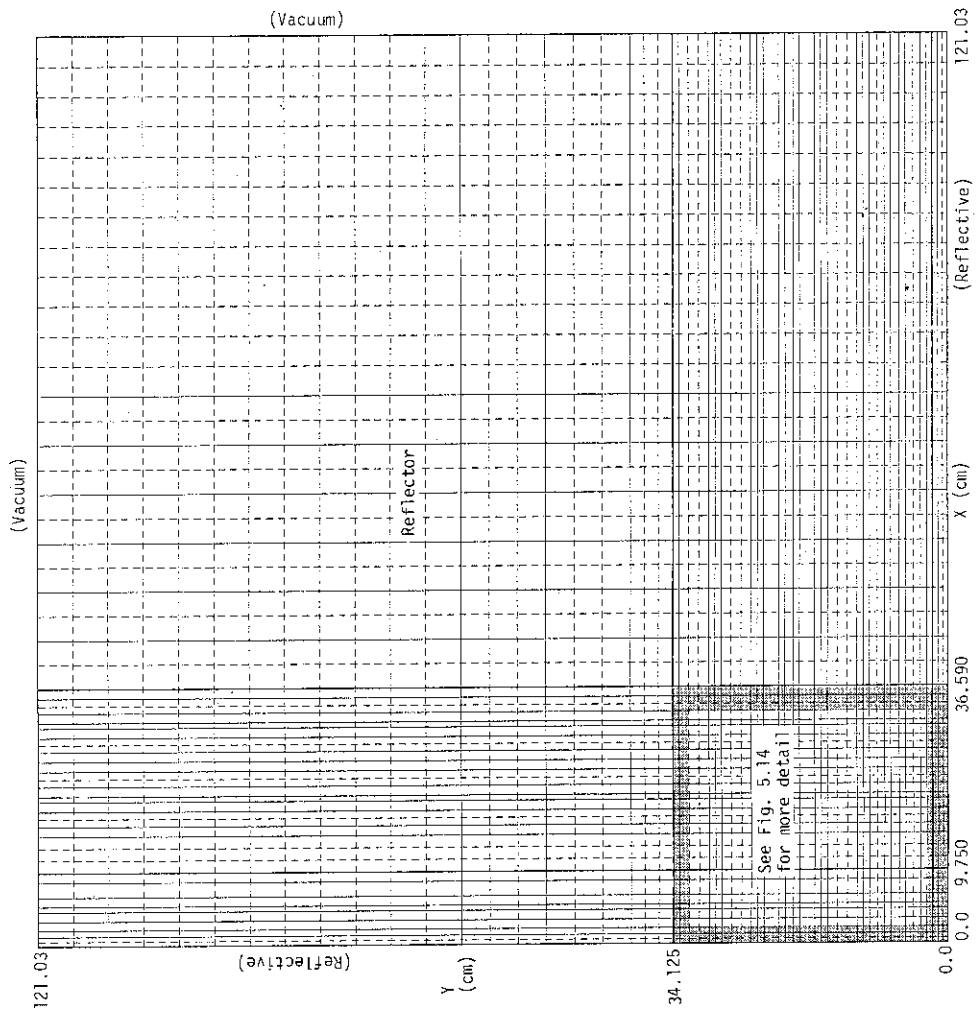


Fig. 5.13 Model-C and D with/without one rod.

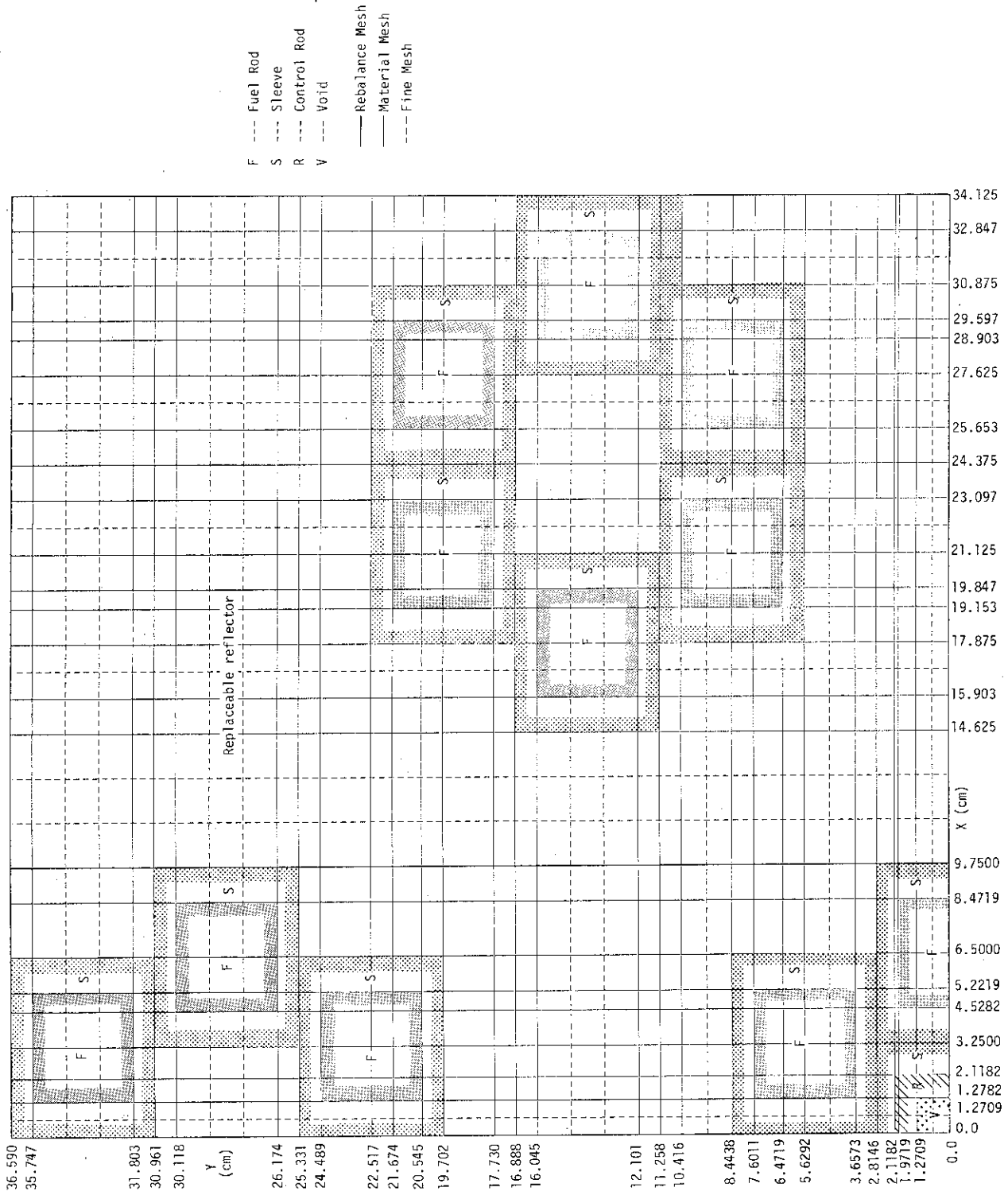


Fig. 5.14 Magnification of Fig. 5.13.

6. 計算精度の予備的検討

本章では、第4章で示した計算手順が実際にTWOTRANコードを使用して実現可能であるかどうかについて検証するとともに、計算精度についても検討する。つまり、ある体系の実効増倍率を求めて、この値で計算に使用した合成スペクトルの値を除し、この新たな合成スペクトルを用いれば、臨界状態を模擬（実効増倍率の値が1.0となる体系を得られる）できるという点や、TWOTRANコードを用いて α 固有値計算を行う際に用いる収束判定値と、得られる α 値の計算精度について検討する。

6.1 実効増倍率と合成スペクトルの関係

TWOTRANコードで、(3-9)式、つまり、

$$\left[\mathbf{L} + \frac{1}{k_{\text{eff}}} f_s \mathbf{M} \right] \vec{\phi} = 0, \quad (6-1)$$

で示される、 k_{eff} と f_s の関係が実際に保たれているかどうかを、実際の計算により検証する。

ここでは、次のような手順で計算を行う。まず、ある合成スペクトルに対し、収束判定条件を 10^{-2} 、 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} と変化させながら、それぞれのケースに対する実効増倍率を計算する。これにより、収束判定値と実効増倍率の精度の関係について見る事ができる。ここで、収束判定値が、 10^{-3} 以下であるケースに対しては、一桁大きい収束判定値を用いて行った計算で得られている中性子束を、初期中性子束（ゲス）として入力している。さらに、TWOTRANコードの入力パラメータであるEV, EVM, XLALも収束判定値に応じ適当に変化させ、また収束判定値は、EPSとXLAXの両方に同一の値を使用する。

次に、収束判定値を、 10^{-5} として求めた実効増倍率の値で合成スペクトルの値を除し、この値を新たな合成スペクトルとして実効増倍率を求める計算を行う。この計算で、実効増倍率が1.0となれば、TWOTRANコードにおいて、(6-1)式で示される k_{eff} と f_s の関係を利用できることが確認されたことになる。計算結果を、Table 6.1に示す。計算モデルとしては、Model-Bの制御棒なしのものを使用する。同表より、収束判定値を 10^{-5} として求めた実効増倍率により調整した合成スペクトルにより再び、 10^{-5} の収束判定値で実効増倍率を計算すると、その値が、0.9999049となり、 10^{-5} の収束判定値で計算する限り、(6-1)式の k_{eff} と f_s の関係は良く保たれていることがわかる。

一方、収束判定値と実効増倍率の精度との関係では、あまり直接的関係が見られず、収束判定値を一桁小さくしたからと言って、必ずしも、一桁精度の高い実効増倍率が求められるという訳でもないことがわかる。したがって、実効増倍率の値自体を議論する際には、できる限り小さな収束判定値を使用する必要がある。

6.2 収束判定値と α 固有値計算精度

実効増倍率 k_{eff} を計算する際に、TWOTRAN コードでは次式

$$\left[\mathbf{L} + \frac{\lambda}{k_{\text{eff}}} f \mathbf{M} \right] \vec{\phi} = 0, \quad (6-2)$$

において k_{eff} の値を種々パラメトリックに変化させ、 λ が 1.0 となるよう k_{eff} の値を求め、それを解としている。ここで収束判定値は、 $|1-\lambda|$ の値に対して用いられている。したがって、実効増倍率の計算では、得られる k_{eff} の値の計算精度は、用いた収束判定値に直接依存する。

一方、 α 固有値計算の際には、

$$\left[\left(\mathbf{L} - \frac{\alpha}{v} \mathbf{I} \right) + \frac{\lambda}{1.0} f \mathbf{M} \right] \vec{\phi} = 0, \quad (6-3)$$

なる式において、実効増倍率計算時と同様に λ が 1.0 かどうかで収束判定を行っている。しかし同式を見ればわかるように、 α 固有値と λ 値は、先の k_{eff} 値と λ 値のような直接的関係がなく、ある条件下では、収束判定値をかなり小さいものにしなければ、満足できる精度の α 値を求めることができない。(6-3) 式中、 \mathbf{L} の値に比べ、 α/v の値が小さいときには、精度良く α 値を求めることが困難であることがわかる。Table 6.2 に、燃料領域および可動反射体領域のマクロ吸収断面積 Σ_a および中性子速度 v (cm/s) およびその逆数 $1/v$ の値を、18 群に縮約したもののについて示している。同表より、燃料部の Σ_a と $1/v$ では、4~6 桁、可動反射体領域に対しては、2~6 桁程度の差があることがわかる。よって、 α 値が小さい場合には、 α/v の値は、 Σ_a に比べ非常に小さく、(6-3) 式の第一項全体の値が、 α 値の変化に対し、ほとんど変化しないことになり、精度良く α 固有値を求めることが非常に困難であることが予想される。

このため、実際に TWOTRAN コードによる計算を行い、 α 値の計算精度を検討する。さらにここで用いる方法により、第 3 章で示した制御棒挿入時の α 値計算手順の妥当性についても検討できる。方法としては、まず、 α 値としてそれぞれ 5.0, 10.73, 100.0 を TWOTRAN コードへパラメータとして入力し、この時の実効増倍率を、それぞれ 10^{-5} , 10^{-5} , 10^{-4} の収束判定値を用いて求める。次に、これらの計算で用いた合成スペクトルを得られたそれぞれの実効増倍率で除して、これを新たな合成スペクトルとする。さらに、この新たな合成スペクトルを使用した α 固有値計算を、 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} と収束判定値を変化させながら行う。このようにして、 α 値が、5.0, 10.73, 100.0 である場合に対し、どの程度の収束判定値を用いれば精度の良い α 値が求められるかについて考察できる。

この方法を式で見れば、 α が 5.0 の場合には、まず、

$$\left[\left(\mathbf{L} - \frac{5.0}{v} \mathbf{I} \right) + \frac{\lambda}{k_{\text{eff}}} f \mathbf{M} \right] \vec{\phi} = 0, \quad (6-4)$$

を解き、 k_{eff} を求める。次に

$$f' = \frac{f}{k_{\text{eff}}}, \quad (6-5)$$

として,

$$\left[\left(\mathbf{L} - \frac{\alpha}{v} \mathbf{I} \right) + \frac{\lambda}{1.0} \mathbf{f}' \mathbf{M} \right] \vec{\phi} = 0, \quad (6-6)$$

により, α 固有値計算を行うものであり, (6-6) 式より得られる α 値が, 5.0 からどの程度ずれるかにより, 計算精度を検討できる。計算結果を, Tables 6.3, 6.4 に示す。これより, α 固有値計算では, 予想される α 値の大きさにより収束判定値を適当に選ぶ必要のあることがわかる。つまり, α 値が 5 ~ 10 程度の場合には, 収束判定値は, 10^{-5} 程度を用い, α 値が 100 程度の場合には, 10^{-4} 位の収束判定値を用いれば, $\pm 1\%$ 程度の精度が期待できそうであることがわかる。

Table 6.1 The value of effective multiplication factor vs. the values of convergence criteria and synthesized spectrum

Case No.	Convergence Criteria		Parameter of TWOTRAN Code					Effective Multiplication Factor k_{eff}	CPU Time (min)
	EPS	XLAX	EV	EVM	XLAL	Flux Guess (Case No.)	Factor to Synthesized Spectrum		
1	10^{-2}	10^{-2}	0.0	10^{-1}	10^{-1}	-	1.0	0.98666	5.2
2	10^{-3}	10^{-3}	0.9867	10^{-2}	10^{-2}	1	1.0	1.0425	6.7
3	10^{-4}	10^{-4}	1.0425	10^{-3}	10^{-2}	2	1.0	1.0423	7.6
4	10^{-5}	10^{-5}	1.0423	10^{-4}	10^{-3}	3	1.0	1.0409	15.5
5	10^{-5}	10^{-5}	1.0423	10^{-4}	10^{-3}	4	$\frac{1}{1.0409}$	0.9999049	12.0

Table 6.2 Values of Σ_a , v and $1/v$

Group No.	Fuel region Σ_a (cm^{-1})	Replaceable reflector region Σ_a (cm^{-1})	Neutron velocity v (cm/sec)	$1/v$ value (sec/cm)
1	2.16×10^{-4}	2.00×10^{-5}	1.13×10^9	8.85×10^{-10}
2	3.19×10^{-4}	2.41×10^{-8}	2.80×10^8	3.57×10^{-9}
3	9.79×10^{-4}	5.61×10^{-7}	7.51×10^7	1.33×10^{-8}
4	3.13×10^{-3}	2.59×10^{-6}	2.49×10^7	4.02×10^{-8}
5	7.71×10^{-3}	5.33×10^{-6}	1.21×10^7	8.26×10^{-8}
6	1.79×10^{-2}	8.78×10^{-6}	7.37×10^6	1.36×10^{-7}
7	2.21×10^{-2}	1.44×10^{-5}	4.47×10^6	2.23×10^{-7}
8	4.04×10^{-3}	2.09×10^{-5}	3.09×10^6	3.24×10^{-7}
9	2.82×10^{-3}	2.69×10^{-5}	2.40×10^6	4.17×10^{-7}
10	2.49×10^{-3}	3.24×10^{-5}	1.99×10^6	5.03×10^{-7}
11	1.73×10^{-3}	3.67×10^{-5}	1.76×10^6	5.68×10^{-7}
12	5.16×10^{-3}	4.18×10^{-5}	1.54×10^6	6.49×10^{-7}
13	9.35×10^{-3}	4.53×10^{-5}	1.43×10^6	6.99×10^{-7}
14	5.71×10^{-3}	5.18×10^{-5}	1.25×10^6	8.00×10^{-7}
15	1.27×10^{-2}	7.51×10^{-5}	8.63×10^6	1.16×10^{-6}
16	2.18×10^{-2}	1.30×10^{-4}	4.98×10^5	2.01×10^{-6}
17	3.57×10^{-2}	1.98×10^{-4}	3.25×10^5	3.08×10^{-6}
18	6.76×10^{-2}	3.45×10^{-4}	1.87×10^5	5.34×10^{-6}

Table 6.3 α value used as PIVOT vs. Effective multiplication factor

α value (sec^{-1})	Convergence Criteria (EPS,XLAX)	Effective Multiplication Factor
5.0	10^{-5}	1.03995
10.73	10^{-5}	1.04939
100.0	10^{-4}	1.23108

Table 6.4 Precision of Calculated α vs. Convergence criteria

Convergence criteria (EPS,XLAX)	Anticipated values of α (sec^{-1})		
	5.0	10.73	100.0
10^{-3}	2.030 —	6.742 (37.17%)	93.43 (6.57)
10^{-4}	4.283 (14.34%)	9.920 (7.55%)	100.85 (0.85)
10^{-5}	4.994 (0.12%)	10.76 (0.28%)	(Calculated) (Error)

7. 臨界時即発減衰定数 (α_c) 解析結果と補正

第3章で述べたような手順により、臨界時の即発中性子減衰定数 α_c を求める。まず、Model-A ~ D のそれぞれに対する実効増倍率を収束判定値 10^{-5} により求める。ただし、Model-D では 10^{-5} の収束判定条件により収束させることが困難であったので、Model-C と Model-D の比較により考慮可能であるスリーブとマトリックス管の α_c 値への影響について十分な考察ができない。この効果については、次章で示す制御棒1本挿入時の、Model-C と Model-D の相異により、補正を行ってみるものとする。

TWOTRAN コードの入力となる合成スペクトルを計算する際に用いる α 値と、この合成スペクトルを入力して得られる TWOTRAN 計算結果である α 値との相違は、第3章で述べたような繰返し手法にはよらず、次のような方法を用いて対処している。つまり、実験により得られた α_p の値である 5.52 の両側、ここでは、5.0 と 6.0 の値に対し、合成スペクトルを計算し、それぞれについて TWOTRAN コードによる α 固有値計算を行う。得られた結果を横軸にし、縦軸には、分裂スペクトル計算時に使用した α 値をとったグラフを作成する。このグラフを内挿して、分裂スペクトル計算時の α 値と、計算結果の α 値が等しくなる点を見出し、この値を求める α_c 値とする。このグラフおよび、計算結果を、それぞれ、Fig. 7.1 および Table 7.1 に示す。ただし TWOTRAN コードでの輸送計算は、臨界時および制御棒挿入時ともに P_0S_4 で行っている。同表より、Model-A で、 $[C/E-1.0]$ 値が、1.87%、Model-B で、1.32% であり、実験と良い一致を示している。

ここで、TWOTRAN コードの入力である $1/v$ データは、DELIGHT-5 コードで SHE-14 燃料格子スペクトル計算時に得られたものを使用している。第3章で述べたように、臨界時の α 値は、 $1/v$ データに直接依存する。そのため、反射体領域の $1/v$ データを DELIGHT-5 コードにより作成し、燃料格子の $1/v$ データにより得られる α 値と比較する。まず、燃料格子の $1/v$ データを用いて、第3章に示した方法により α 値が 5.0 になる状態を作成する。この状態に対し、 $1/v$ データだけを反射体領域のものと入れ換え、再び α 値の計算を行う。両者を比較することにより、 $1/v$ データの α 値への効果の考察や、先に得られた計算結果の補正を試みる。

計算により、 $\alpha = 5.0$ となるような状態を作成したところ、実際には、 $\alpha = 4.9938$ となり、この状態で、 $1/v$ データを、第3-1表のケース4のものと交換し反射体領域の $1/v$ データを使用すると、 $\alpha = 4.7753$ となる。したがって、燃料格子の $1/v$ データを使用すると、反射体領域のものを使用した時より、 α 値は、4.58% 大きな値となることがわかる。ここで、これら2つの α 値を炉心中の燃料格子部体積と、反射体領域部体積で重みづけを行ってみる。燃料領域等価半径は、39.358 cm であり、体系全体の半径は、127.1 cm であるから、体積で重みづけした時の $\bar{\alpha}$ 値は、

$$\bar{\alpha} = \frac{4.9938 \times (39.358)^2 \pi + 4.7753 \times \{ (127.1)^2 - (39.358)^2 \} \pi}{\pi (127.1)^2} \quad (7-1)$$

$$= 4.7963,$$

となる。したがって、体積で重みづけした $\bar{\alpha}$ 値は、燃料格子に対する $1/v$ データを使用した α 値より、-3.95%程度変化する。

次に、燃料スリーブおよびマトリックス管の効果についての補正を行う。Model-CおよびDの計算がうまく収束しなかったので、本章では詳細な議論はできないが、次章の計算結果を流用し補正を行ってみる。SHE-14の体系の中心に1本の制御棒が挿入された場合の α 値は、Model-CおよびDについて求められている。制御棒の B_4C 含有量が10w/oの場合に対し、Model-CおよびDで、 α 値はそれぞれ78.122および、76.034である。B含有量が30w/oの制御棒が挿入された際には、それぞれ、86.004および84.153である。これより、燃料スリーブおよびマトリックス管を考慮すると、-2.75%、-2.20%程度それぞれ変化する。両者の平均値である、-2.48%を、燃料スリーブおよびマトリックス管の効果であると考え、制御棒の無い臨界体系にも適用できると仮定する。先の $1/v$ データの相違による補正量、-3.95%と合成すると、-6.33%の補正量となり、Model-Aで得られた α 値5.623に補正を行うと、5.27となり $[(C/E)-1.0]$ は、-4.53%となる。これらの補正についてTable 7.2に示す。

ここで、Table 7.1のModel-AとBの計算結果に、ほとんど相違が見られないことから、解析を容易にするために行った、燃料棒配置パターンの変更による効果は無視できることがわかる。

Table 7.1 Results of prompt neutron decay constants for critical SHE-14

Model	Effective multiplication factor (k_{eff})	α_{c1} (1) (sec^{-1})	α_{c2} (2) (sec^{-1})	Interpolated value α_{cal} (sec^{-1})	Experiment α_{exp} (sec^{-1})	[C/E - 1.0] (%)
A	1.04113	5.5024	5.8149	5.623	5.52	1.87
B	1.04089	5.4569	5.8065	5.593	5.52	1.32
C	1.04113	---	---	---	---	---
D	(1.03229)	---	---	---	---	---

(1) The value of α to synthesize prompt and delayed neutron spectrum is 5.0.

(2) The value of α to synthesize prompt and delayed neutron spectrum is 6.0.

Table 7.2 Correction of prompt neutron decay constant

Correction term	Correction (%)	Corrected α (sec ⁻¹)	[C/E - 1.0] (%)
1/v data	-3.95	5.40	-2.17
Fuel sleeve and matrix tube	-2.48	5.48	-0.7
Total effect	-6.33	5.27	-4.53

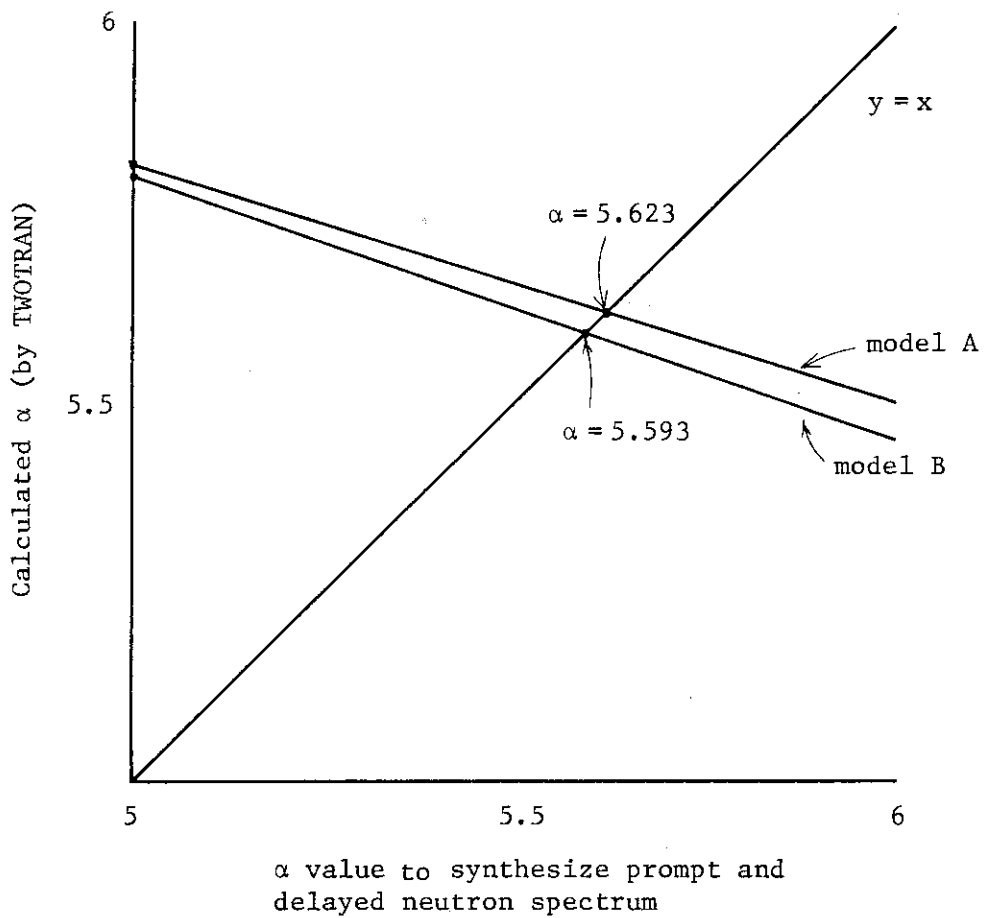


Fig. 7.1 Figure to interpolate the value of α

8. 制御棒挿入時即発減衰定数解析結果と補正

第3章で示した手順により、制御棒挿入時の即発中性子減衰定数を求める。まず、 $\alpha = 10.73$ となる基準状態を解析モデル上に再現するため、TWOTRAN コードの入力パラメータであるPVへ-10.73を入力し、Model-A~Dの制御棒未挿入時の実効増倍率を収束条件 10^{-5} で求める。求めた実効増倍率と、実験値である α 値を $\pm 5\%$ 変化させた値とにより、合成スペクトルの値を計算する。この合成スペクトルを用い、制御棒挿入体系に対する α 値をTWOTRANコードにより求める。合成スペクトル計算に使用した α 値と、TWOTRANコードによる α 値が一致する点を、前章同様グラフにて求める。ただし、実際には、制御棒挿入時の α 値は、臨界時の α 値に比較して、かなり大きく、 $\pm 5\%$ 程度の変化は、殆んど合成スペクトルの値に変化を与えない。したがって、合成スペクトル計算時に使用した α 値の、TWOTRANコード計算結果への効果は無視できるため、グラフによる α 値の決定は不要である。

解析結果を、Table 8.1に示す。同表より、実験値の α 値の95%の値で求めた合成スペクトル(1)と、105%の値で求めた合成スペクトル(2)とを用いて得られた二つの α 値には、ほとんど相違のないことがわかる。

次に、燃料スリーブとマトリックス管による効果の補正を行う。前章で述べたように、制御棒中心一本の場合に得られたModel-CとDの α 値の相違により補正し、補正量は-2.48%である。補正後は、実験値と約 $\pm 2\%$ 程度の差を示す。この補正については、Table 8.2に示す。

ここで、Table 8.1の制御棒一本の場合には、Model-BとCを比較することにより、円柱状制御棒を等表面積の角柱状制御棒で近似したことによる効果が、ほとんど見られないことがわかる。ただし、Model-BとCでは、反射体の外周形状が円柱状と角柱状であるという相違があるので多少詳細な議論には無理がある。また、制御棒3本、6本の場合では、Table 8.2の結果で、制御棒1本の場合と $\{(C/E) - 1.0\}$ の値が逆の傾向を示している。これは、制御棒を角柱で表現するときに、R- θ モデルでは、正確な角柱は表現できず、そのために多少表面積が実際より大きくなってしまったためであると考えられる。また、前章同様、燃料棒配置パターンの変更による効果は無視できるものであることが、Model-AとBの計算結果を比較することによりわかる。

Table 8.1 Results of prompt neutron decay constants for SHE-14 with control rod(s) (sec^{-1})

Model			A	B	C	D
Effective multiplication factor of standard state			1.0504	1.0503	1.0520	1.0397
	Rod type	No. of rods				
Spectrum (1)	B ₄ C 10 w/o	1	78.726	78.903	78.122	76.034
	B 30 w/o	1	84.918	85.196	86.004	84.153
	B 30 w/o	3	164.33	164.54	---	---
	B 30 w/o	6	220.12	221.92	---	---
Spectrum (2)	B ₄ C 10 w/o	1	78.703	78.778	---	76.291
	B 30 w/o	1	85.131	85.278	---	---
	B 30 w/o	3	---	164.22	---	---
	B 30 w/o	6	---	---	---	---

Spectrum (1) : The value of α to synthesize prompt and delayed neutron spectrum is 95% of experimental value.

Spectrum (2) : The value of α to synthesize prompt and delayed neutron spectrum is 105% of experimental value.

Table 8.2 Correction of prompt neutron decay constants (sec^{-1})

No. of Rod	1	1	3	6
Rod Type	B ₄ C 10 w/o	B 30 w/o	B 30 w/o	B 30 w/o
Calculated (Model-A)	78.726	84.918	164.33	220.12
Experiment	78.22	84.33	157.1	209.6
C/E - 1.0 (%)	0.65	0.70	4.60	5.02
Corrected (-2.48%)	76.774	82.812	160.25	214.66
C/E - 1.0 (%)	-1.85	-1.80	2.01	2.41

9. 結 論

Table 9.1に、臨界時および制御棒1本、3本、6本挿入時の計算値と実験値の差異および、補正後の値と実験値の差異をそれぞれ100分率で示している。同表より、制御棒挿入時の場合については、補正後の値が、 $\pm 2\%$ 程度の相違しか示しておらず、かなり精度の良い解析であると考えられる。したがって、制御棒の反応度値を、即発減衰定数で解析する場合には、本報で用いた解析手法および計算コード(TWOTRAN)で十分な精度が得られるものと考えられる。ただし、解析用の基準状態を、合成スペクトルにより調整しているため、断面積の作成に用いたDELIGHT-5コードの絶対的精度検討に関する議論は本解析で行うことはできない。

一方、臨界時に対しては、実験と解析の相異が、 -4.53% であり、比較的大きい。計算値を補正する要因として、 $1/v$ データによるものと、燃料スリーブとマトリックス管によるものを考慮しているが、両者のうち、 $1/v$ データによる補正の割合が大きい。 $1/v$ データによる補正を行わず燃料スリーブとマトリックス管による補正のみ行った場合には、実際と解析との相異は、 -0.7% となる。このように、 $1/v$ データに起因する補正量がかなり大きく、第7章に示した補正法よりも、さらに詳細な方法を考える必要がある。この方法として、体積平均だけでなく、中性子束分布を考慮した重みづけを行うことが考えられる。

また、解析を容易にするために行った、円柱制御棒の等表面積角柱状制御棒での近似や、燃料棒配置パターンの変更による解析への影響は、ほとんど無視できるものであることが判明している。

今後、さらに詳細な解析を行う際には、メッシュ総数の少ないModel-Bに、スリーブおよびマトリックス管部を考慮したモデルを作成し、解析を行うのが望ましい。ただし、制御棒3本および6本の場合には、その表面積を正確に保存した形状をR- θ モデル上に作成する必要がある。

なお、本報で用いた詳細な解析手法を、SHEより炉心も大きく形状も複雑な多目的高温ガス実験炉の設計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を関連づける解析が今後必要となろう。

Table 9.1 Values of [(C/E)-1.0] (%)

Rod Type	—	B ₄ C 10 w/o	B 30 w/o	B 30 w/o	B 30 w/o
No. of Rod(s)	None	1	1	3	6
Calculated	1.87	0.65	0.70	4.60	5.02
Corrected	-4.38	-1.85	-1.80	2.01	2.41

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及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-M8097 (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価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) 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).
- (7) 高野誠, 他「SHE-14 可燃性毒物棒反応度価値の解析-VHTR 核設計法の精度検討(5)-」 JAERI-M 9956 (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) 大久保収二, 金子義彦, 秋濃藤義, 「パルス中性子実験データ解析コード ALPHA-D」, JAERI-M 4525 (1971).
- (11) 秋濃藤義, 私信 (1980).
- (12) C. A. Preskitt, E. A. Nephew, "Interpretation of Pulsed-Source Experiments in the Peach Bottom HTGR", Nucl. Sci. Eng. 29, 283-295 (1967).

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及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-M8097 (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価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) 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).
- (7) 高野誠, 他「SHE-14 可燃性毒物棒反応度価値の解析-VHTR 核設計法の精度検討(5)-」 JAERI-M 9956 (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) 大久保収二, 金子義彦, 秋濃藤義, 「パルス中性子実験データ解析コード ALPHA-D」, JAERI-M 4525 (1971).
- (11) 秋濃藤義, 私信 (1980).
- (12) C. A. Preskitt, E. A. Nephew, "Interpretation of Pulsed-Source Experiments in the Peach Bottom HTGR", Nucl. Sci. Eng. 29, 283-295 (1967).