

JAERI-M
9955

SHE 臨界質量実験の解析
—VHTR 核設計法の精度検討(1)—

1982年3月

高野 誠・土井 猛*・平野 光将
新藤 隆一・大村 博志**

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。
入手の問い合わせは、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 臨界質量実験の解析
—VHTR 核設計法の精度検討(1)—

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
大村 博志**

(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、半均質臨界実験装置(SHE)で行われた臨界質量実験の解析を、SHE-8, 12, 13, 14の各体系に対し行った。解析では、DELIGHT-5およびCITATIONを用いて、それぞれ中性子スペクトルおよび実効増倍率を計算した。実効増倍率の計算は、二次元のR- θ モデルおよび二種のTriangularモデル、さらに三次元のTriangular-Zモデルを用いて行った。次に補正計算を、軸方向バックリング効果、モデル化による効果、輸送効果等に対して行った。

解析により得た実効増倍率は、実験値と約1~3%程度の相違を示した。このため、実験炉の設計に用いている核設計コードのより精密な検証を行うためには、さらに詳細な解析が必要であり、特に、体系のモデル化法、縮約群定数作成法、中性子スペクトル計算時のバックリング値の三点に注目して解析する必要があることが指摘された。

* 業務協力員 (石川島播磨重工(株))

** 外来研究員 (石川島播磨重工(株))

Analysis of Criticality Experiments at SHE

— Accuracy Investigation of VHTR Nuclear Design Methods (1) —

Makoto TAKANO, Takeshi DOI*, Ryuichi SHINDO
and Hiroshi OOMURA*

Division of Power Reactor Projects, JAERI

(Received January 25, 1982)

In the report, the criticality experiments, which were conducted for the core configurations of Semi-Homogeneous Experimental Assembly (SHE)-8,12,13,14, 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 CITATION calculate the neutron spectrum and the effective multiplication factor respectively. Each system of SHE is modeled by twodimensional R-Z, Triangular and threedimensional Triangular-Z geometries. Various effects such as axial buckling, modeling and the difference between diffusion and transport are also taken into account.

Calculated values of effective multiplication factor show the disagreement of 1-3% from the values of experiments approximately. Therefore the analysis is considered to be inadequate to the verification and more precise analysis is required with the emphasis on how to model the system, condense the group constants and guess the buckling value for spectrum calculation.

Keywords: Critical Assembly, SHE, Criticality, Effective Multiplication Factor, Calculation, DELIGHT, CITATION, TWOTRAN, VHTR, Nuclear Design, Accuracy

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

** visiting researcher from Ishikawajima-Harima Heavy Ind. Co.

(Sep. 1979 - Dec. 1980)

目 次

1. 緒 言	1
2. 半均質臨界実験装置 (SHE) の概要	3
3. SHE 臨界質量実験データ	10
4. 格子計算用データおよび炉心計算用群定数の作成	17
4.1 原子数密度の計算	17
4.2 格子計算用データ	17
4.3 炉心計算用群定数の作成	18
5. 実効増倍率の計算	37
5.1 R-Z モデル	37
5.2 Tri モデル I	38
5.3 Tri-Z モデル	39
5.4 Tri モデル II	40
5.5 燃料棒モデル化の補正と結果	40
6. 各種補正計算	60
6.1 軸方向バックリング効果	60
6.2 モデル化の効果	62
6.3 輸送効果	63
6.4 その他の効果	64
6.5 SHE-8 に対する全体的補正	65
7. 結 論	79
謝 辞	81
参考文献	81

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Brief description of Semi-Homogeneous Experimental Assembly (SHE)	3
3. Data of criticality experiments at SHE	10
4. Data for cell calculation and preparation of group constants for core calculation	17
4.1 Calculation of atomic number density	17
4.2 Data for cell calculation	17
4.3 Preparation of group constants for core calculation	18
5. Calculation of effective multiplication factor	37
5.1 R-Z model	37
5.2 Tri(I) model	38
5.3 Tri-Z model	39
5.4 Tri(II) model	40
5.5 Results and correction to fuel rods modeling	40
6. Calculation for correction	60
6.1 Effect of axial buckling	60
6.2 Effect of modeling	62
6.3 Transport effect	63
6.4 Other effects	64
6.5 Overall correction to SHE-8	65
7. Conclusion	79
Acknowledgement	81
References	81

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-5、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、制御棒価値解析^{4, 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臨界質量解析について記述する。炉物理研より得た、SHE-8, 12, 13, 14体系に関するデータに基づき、各体系の実効増倍率を計算し実験値との比較を行う。ところで、SHE-14体系を除き、各体系は解析に都合のよい回転対称性を持っていない。そのため、解析用に数本の燃料棒を仮想的に挿入又は除去し、60回転対称性を持った炉心を想定する。この時の実効増倍率は、各体系へそれぞれ燃料棒を、挿入又は除去した位置における実験により求められた燃料棒価値を用いて計算する。この値を実験値と考え、計算値との比較を行う。ここで行う臨界質量解析では、中性子スペクトル計算にDELIGHT-5コードおよび実効増倍率の計算にCITATIONコードを用いる。

計算に必要な群定数は、DELIGHT-5コードにより18群で作成する。また、実効増倍率の計算は、SHE各体系それぞれに対し、4種類のモデルを用いて行う。これらは、R-Zモデル、TriモデルI、Tri-Zモデル、TriモデルIIである。R-Zモデルでは、燃料棒と黒鉛減速材を均質化しこれを燃料領域として円柱で近似し、さらにその外周に黒鉛の反射体領域が存在する構成である。また、CITATIONコードで使用可能な三角メッシュを用いたTriモデルIでは、燃料棒と可動反射体黒鉛棒を区別して取扱える。さらに、TriモデルIIでは、燃料棒を燃料ディスクと、その外周の黒鉛部に区別して取扱える。TriモデルIは三角メッシュを用いた二次元計算であり、これに軸方向のモデル化の影響について検討するためさらに高さ方向を考慮したのが、Tri-Zモデルである。

これらのモデルによる計算の他に、さらに各種補正を目的とした計算も行う。これらは、軸方向バックリング効果、体系モデル化の効果、輸送効果等である。軸方向バックリング効果の計算では、新たに燃料棒軸方向についても均質化して取扱ったR-Z'モデルを導入し、この効果について詳細な議論を行う。また、体系モデル化の効果では、主に燃料棒の形状や体積の保存につい

て議論し、X-Yモデルも導入する。輸送効果では、TWOTRANコード特有の収束条件と計算結果との関係について記し、さらに、補正量を定める。DELIGHT-5コードの持つ縮約群定数に対する群数の効果およびエネルギー構造の効果については別の機会で議論することとして本報では取扱っていない。

上記、四種類のモデルを用いて解析した結果は、SHE-8, 12, 13, 14に対し、臨界からそれぞれ1.6, 2.8, 3.4, 2.9%, 計算値の方が大きい値を示している。これらの値は、R-Z, Tri (I), Tri (II), Tri-Zモデルを用いて、燃料棒の体積および表面積に関する実験体系と解析モデルとの相異を内挿により補正して求めたものである。さらに、各種補正計算により得た補正値を考慮すると、SHE-8に対し、計算値は実験値より1.26%大きい値を示している。

燃料棒のモデル化に伴い生じる燃料棒体積変化については、上記のような内挿により、実効増倍率に与える効果を補正している。この内挿の妥当性について検討するために導入した、SHE-8のX-Yモデル計算結果より、この方法では良好な結果を得ることが困難であることが指摘されている。そのため、燃料棒形状をさらに詳細に取扱えるモデルを作成する必要がある。また、本報では検討していない、DELIGHT-5コードの持つ縮約群数の相違により生じる実効増倍率への効果についても検討する必要がある。また、同コードで、縮約群定数作成時に入力値として用いた格子に対するバックリング値についても、さらに詳細な検討を必要とする。このように、本報で示した解析にはモデル化等において、未だ不十分な点が残っている。したがってこれらの点について考慮したさらに詳細な解析を行った後に、多目的高温ガス実験炉の核設計法および核計算コードの検証を行うことが可能となるものと考ええる。

2. 半均質臨界実験装置(SHE)の概要⁹⁾

SHE (Semi-Homogeneous Experimental Assembly) は、移動側架台を固定側架台に接近させてゆき、両架台上の炉心面を接合することにより臨界実験体系とする装置である。水平二分割型に属する本装置は、両架台上にある鋼鉄製枠内に配置された多数の黒鉛棒および燃料棒により炉心を構成するものである。両架台上に設置されている炉心部は、六角柱状であり、六角形の一辺の長さは約 136.5 cm であり、長さは 120 cm である。Fig. 2.1 に、SHE の両架台および $1/2$ 集合体を示す。また、Fig. 2.2 には、六角柱集合体の断面について示す。同図中、中央部の円環状部分は、黒鉛の中空マトリックス管であり、397 本存在する。このマトリックス管内に、燃料棒や黒鉛棒を挿入することで、任意のパターンを持つ炉心を構成することができる。このマトリックス管部の外周を 990 本の反射体用黒鉛棒が取り囲んでいる。さらに、Fig. 2.3 に示されるように、この反射体用黒鉛棒の外周を、これら黒鉛棒を保持するためのアルミニウム製の案内管が一層取り巻いている。この外周に鋼鉄製枠が存在し全体を支持している。制御棒は、各 $1/2$ 集合体に、一本ずつ取り付けられており、さらに安全棒も 3 本ずつ取り付けられている。

燃料棒は、直径 4.45 cm、厚さ 1 cm の燃料 (UO_2) ディスク、トリウムディスクおよび黒鉛ディスクの組み合わせで構成されている。黒鉛ディスクには、さらに厚さが、0.5 cm のものも使用される。これらのディスクを組み合わせて種々のタイプの燃料棒を構成しうる。ディスクはまず燃料鞘と呼ばれる黒鉛製パイプ内に収められ、この燃料鞘が、マトリックス管内へ挿入されるようになっている。今回行った一連の解析では、燃料棒中にトリウムディスクを含まず総て Fig. 2.4 に示すようなタイプの燃料棒を使用している。各燃料棒は、115 枚の燃料ディスクを含んでいる。SHE では燃料棒本数を、移動側および固定側の両架台上のものを別個のものとして数える。つまり、燃料棒本数は、長さ 120 cm のものを 1 本として数える。同図中には、さらに、両架台上の反射体用黒鉛棒、マトリックス管、燃料棒の入らないマトリックス管部に挿入される可動反射体用黒鉛棒および燃料鞘等の寸法をも示している。また、Fig. 2.5 には、直径 6.5 cm の円柱を一つの要素とする燃料要素、可動反射体要素、固定反射体要素（マトリックス管部周囲に存在する反射体用黒鉛棒）等に対する半径および断面積について示している。

各種原子数密度を求める際に必要となるデータとして Table 2.1 および Table 2.2 に示す値を、最新のデータとして得ている。ここで、水分含有率および空気についてのデータは予測値である。

この章に示されたデータは、炉物理研より得た最新のものである¹⁰⁾。

Table 2.1 Data for calculation of atomic number density

Fuel disk	Diameter	4.45 cm
	Height	1.00 cm
	Weight	32.355 g/disk
	UO ₂ weight	2.938 g/disk
	O/U ratio	2.03
	Water content	0.06 w/o (graphite) 0.03 w/o (UO ₂)
	Enrichment (U ²³⁵ /U)	19.85 w/o
Graphite	Density	1.7 g/cm ³
	Water content	0.06 w/o
	Ash	<20 ppm
	Boron content	0.1 ppm
Air	Density (25°C, 760 mmHg)	1.184×10 ⁻³ g/cm ³
	Steam (25°C, humidity 70%)	1.6681×10 ⁻⁵ g/cm ³
	Composition of air	N ₂ ... 76.545 w/o O ₂ ... 23.455 w/o

Table 2.2 Impurities in UO₂

Enrichment (U ²³⁵ /U)		19.85 w/o	
O/U ratio		2.03	
Impurity : (ppm)			
Ag	< 0.2	F	< 100
Cd	< 0.2	Ni	10
In	< 2	Ca	< 50
Ti	< 15	Co	< 5
Fe	30	Mn	< 10
Al	15	Mg	< 10
Cr	< 10	Zn	< 15
Mo	20	Sn	< 2
W	< 50	Cu	< 6
Si	< 50	Pb	2
B	< 0.5	V	< 1

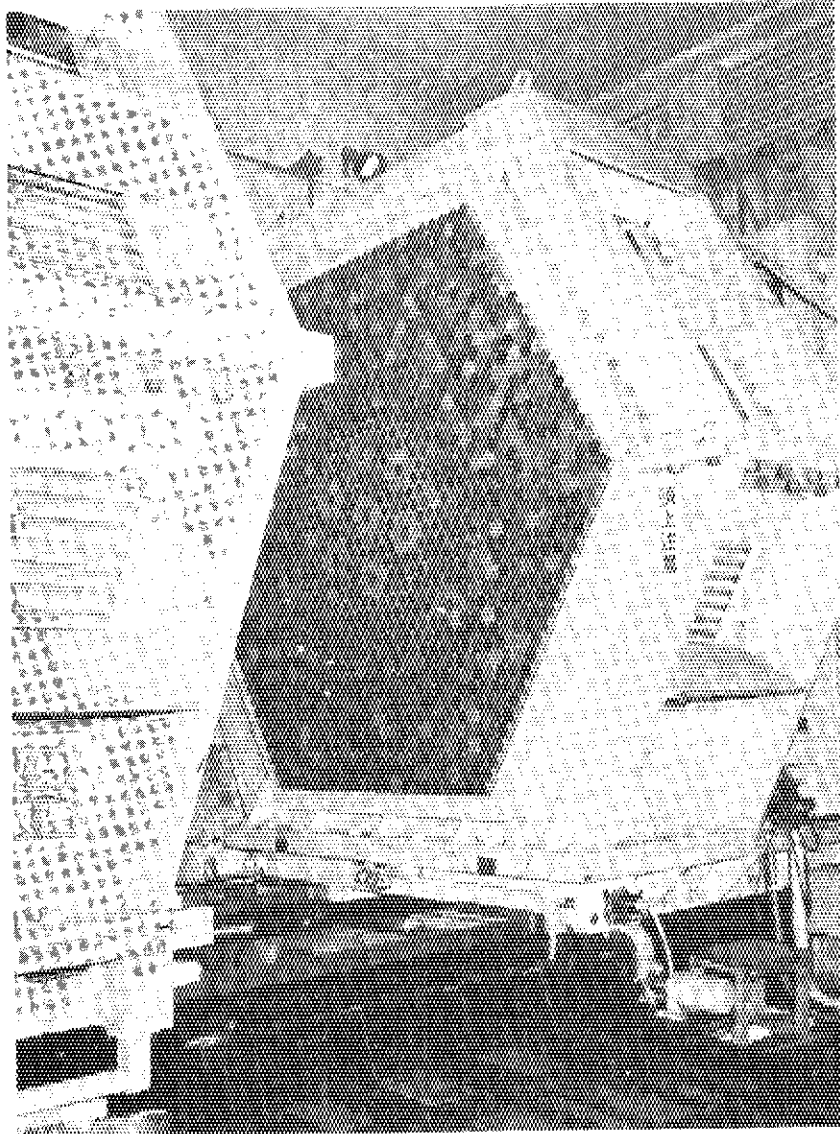
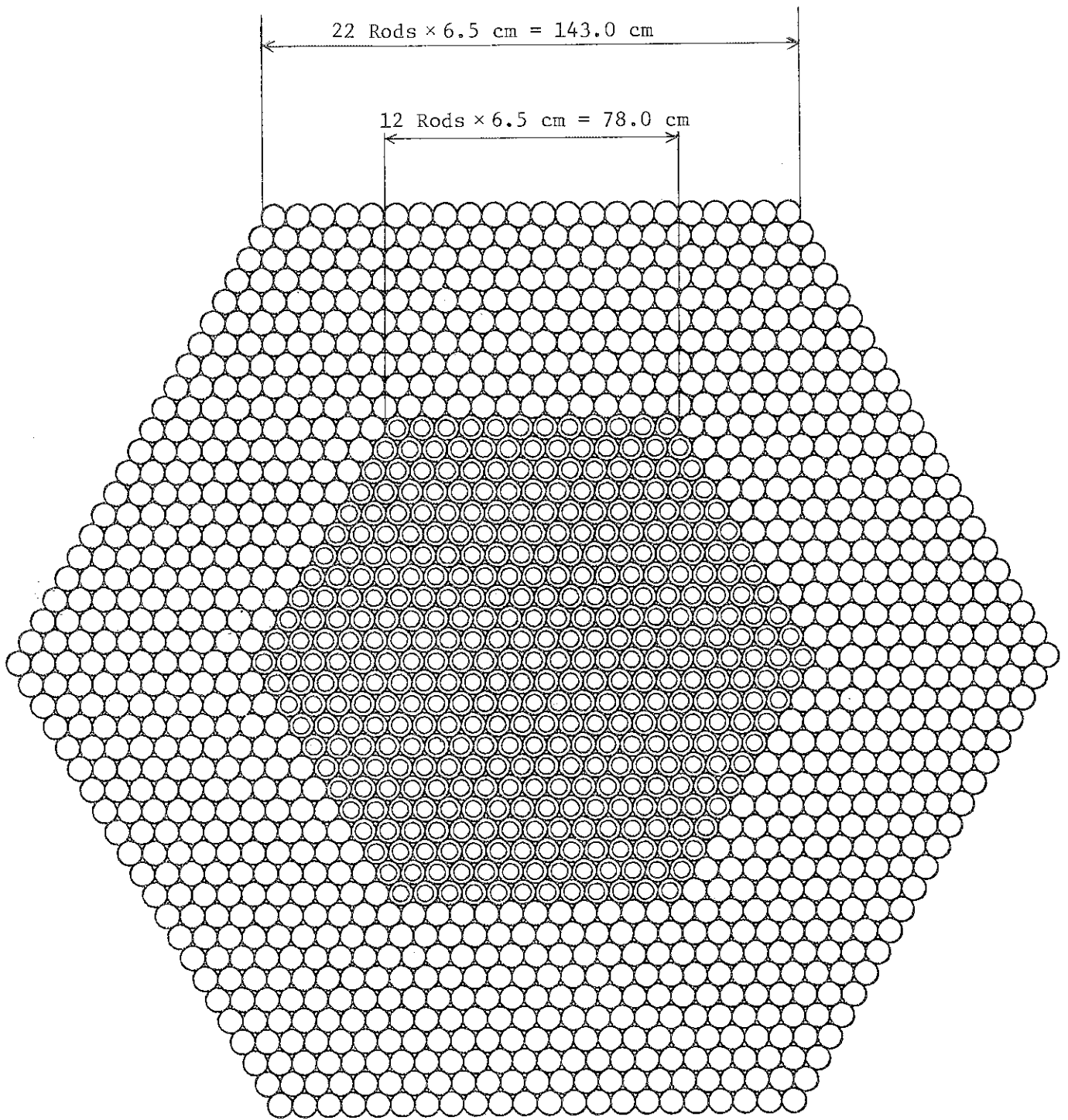


Fig. 2.1 Semi-homogeneous experimental assembly





-  Matrix tube region
(Replaceable reflector region)
-  Permanent reflector region

Fig. 2.2 Matrix tube and permanent reflector regions

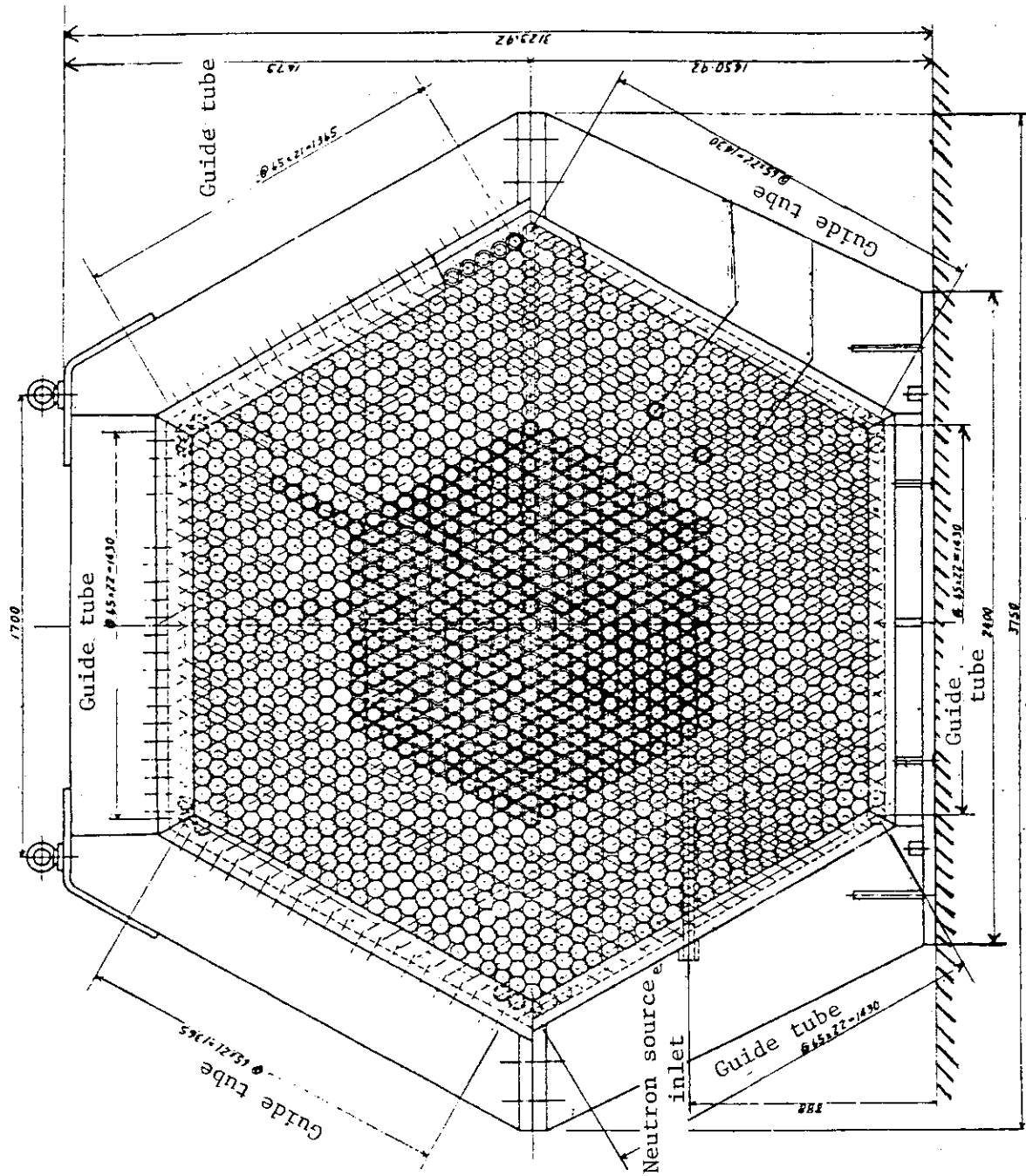


Fig. 2.3 Semi-homogeneous experimental assembly

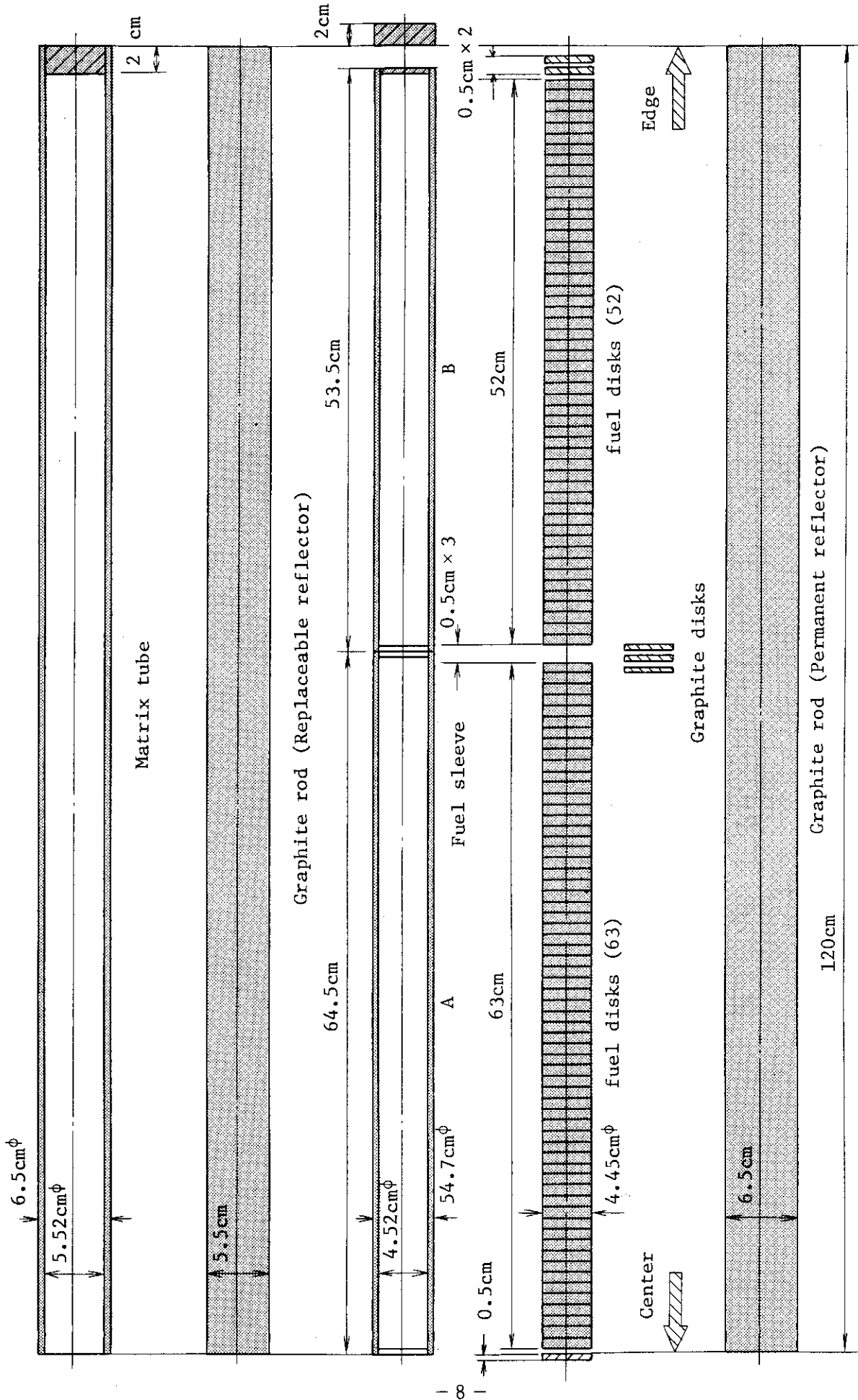
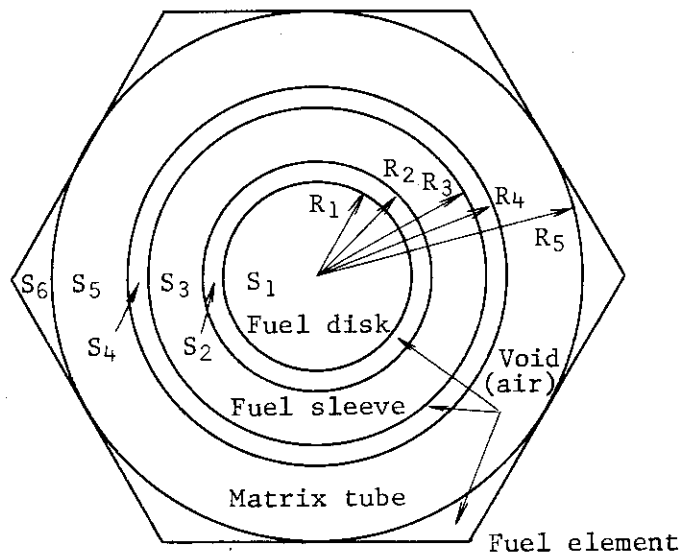
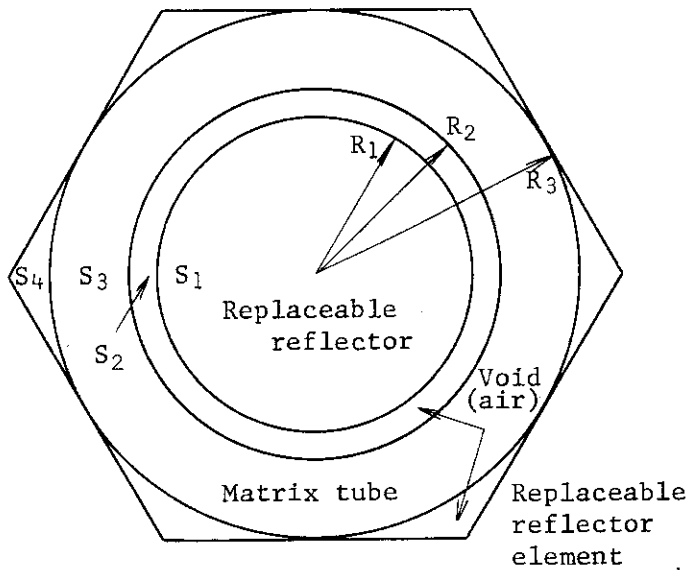


Fig. 2.4 Structures of fuel and graphite elements



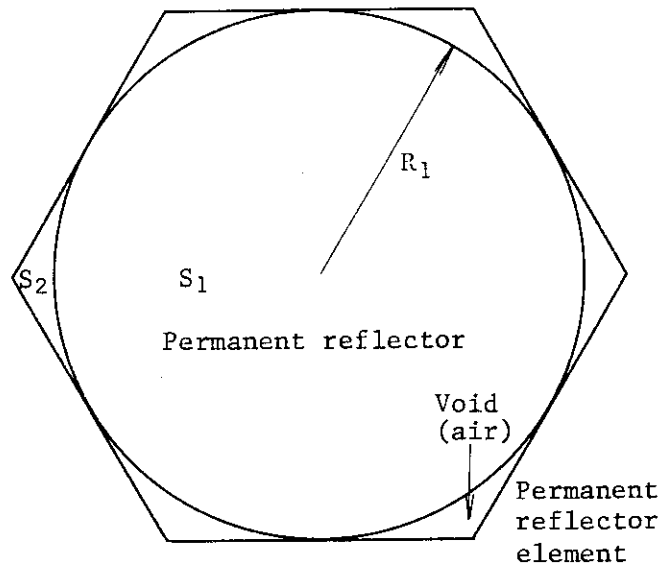
Radius	(cm)
R ₁	2.225
R ₂	2.260
R ₃	2.735
R ₄	2.760
R ₅	3.250

Area	(cm ²)
S ₁	15.553
S ₂	0.49315
S ₃	7.4538
S ₄	0.43160
S ₅	9.2517
S ₆	3.4077
Total	36.5908cm ²
$\sqrt{S/\pi}$	3.4128cm



Radius	(cm)
R ₁	2.750
R ₂	2.760
R ₃	3.250

Area	(cm ²)
S ₁	23.758
S ₂	0.1732
S ₃	9.2518
S ₄	3.4078
Total	36.5908cm ²
$\sqrt{S/\pi}$	3.4128cm



Radius	(cm)
R ₁	3.250

Area	(cm ²)
S ₁	33.183
S ₂	3.4078
Total	36.5908cm ²
$\sqrt{S/\pi}$	3.4128cm

Fig. 2.5 Cross sectional views of three elements

3. SHE臨界質量実験データ⁹⁾

炉物理研で行われたSHEの臨界実験では、SHE中央部のマトリックス管部にあらかじめ挿入された黒鉛棒を、中心部より外側に向かって一本ずつ燃料棒と交換して行き臨界点を求めている。このとき達成された臨界状態では、各種挿入物の反応度を打ち消すため、燃料棒本数は理想的な臨界状態より多めになっている。ここで、各種挿入物とは、制御棒や安全棒挿入用の空孔、パルス中性子発生装置のエクステンションチューブ、臨界時に残存している制御棒の一部やBF₃カウンター等である。これら各種挿入物による反応度効果を、実験により得た各種校正曲線と、各種位置における燃料棒の反応度値により補正し、挿入物のない理想状態における燃料棒整数本状態に対する実効増倍率の値を求めている。Table 3.1には炉物理研より得た、SHE-8, 12, 13, 14の燃料棒整数本状態に対する実効増倍率の値を示す。ここで、SHE-8, 12, 13, 14の各体系に対する燃料棒挿入位置については、それぞれFigs. 3.1, 3.2, 3.3, 3.4に示す。同図中、解析時の便利のために設けた(A)と(B)部は、実際の実験体系ではそれぞれ可動反射体用黒鉛棒および燃料棒がマトリックス管内に挿入されている。ただし、これらの図は、移動側架台および固定側架台のうち移動側架台を、両架台の接合面側から見た時のものである。

燃料棒整数本状態のSHE形状では、SHE-14を除き、いずれも60回転対称性がなく解析しにくい形状となっている。ここでは、燃料棒整数本状態の実効増倍率を求めた際に使用した燃料棒反応度値を利用して、SHE-8, 12, 13の各体系が、60回転対称となるよう燃料棒本数と配置を調整する。Table 3.2に、炉物理研より得た¹⁰⁾燃料棒反応度値のうちからSHE-8, 12, 13の各体系について、それぞれ5V3, 6V1, LV9の位置に対するものを示す。また、実効全遅発中性子生成率(β_{eff})の値としては、同様に炉物理研より得た0.00684という値を用いている。各燃料棒のマトリックス管部での位置を、Fig. 3.5に示す。ただし、SHE-12に対して得た6V1の位置については多少不明確性があるとの情報を炉物理研より得ているが、本報では解析結果には大きな影響を与えないものとして取扱っている。これらの値を用いて、SHE-8に対しては、Fig. 3.1の(A)部へ2本(固定、移動側へそれぞれ2本ずつで計4本)の燃料棒を仮想的に挿入することで、60回転対称となるよう調整し、この時の実効増倍率を求める。ここで、SHE-8の5V3の位置での燃料棒値は、回転対称性を考慮して、(A)の位置である5W4と5Z4での値と等しいものと仮定する。同様の方法で、SHE-12には、6本の燃料棒を追加し、SHE-13では、(B)の位置にある燃料棒を除去した仮想的な体系を考える。このような方法により、60回転対称性を持たせた時の実効増倍率は、Table 3.3に示すような値となる。以後、実験と計算との比較は、同表の値を実験値と考えて行う。ここで、実験を行った時の室温を、Table 3.4に示す。ただし、解析では室温(体系の温度)は300°Kであると仮定する。この温度と同表中に示された実験体系の温度との差は、最大値でも約20°C程度であり温度差による実効増倍率への影響は無視できるものとしている。

Table 3.1 SHE effective multiplication factor k_{eff} (Experiment)

SHE	No. of fuel rods	k_{eff}
8	142	1.00064
12	80	1.00170
13	76	0.99952
14	84	0.99721

Table 3.2 SHE fuel rod worth (Experiment)

SHE	Position of fuel rod	Fuel rod worth
8	5V3	18.6(¢)
12	6V1	45.8
13	LV9	43.9

$$\beta_{eff} = 0.00684$$

Table 3.3 Effective multiplication factor k_{eff} of 60° rotational symmetry system

SHE	k_{eff} (Experiment)	Fuel rod worth	No. of added rods	Compensation	k_{eff} (60° symmetry)
8	1.00064	18.6(¢)	4	0.0051	1.0057
12	1.00170	45.8	6	0.0188	1.0205
13	0.99952	43.9	-2	-0.00601	0.99351
14	0.99721	—	—	—	0.99721

Table 3.4 Temperature of reactor room

	SHE-8	SHE-12	SHE-13	SHE-14
°C	24.9~25.2	7.3~7.8	14.0~14.2	10.5~10.8
Average temperature °K	298.05	280.55	287.1	283.65

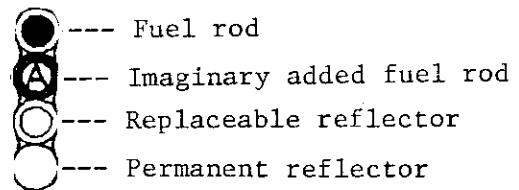
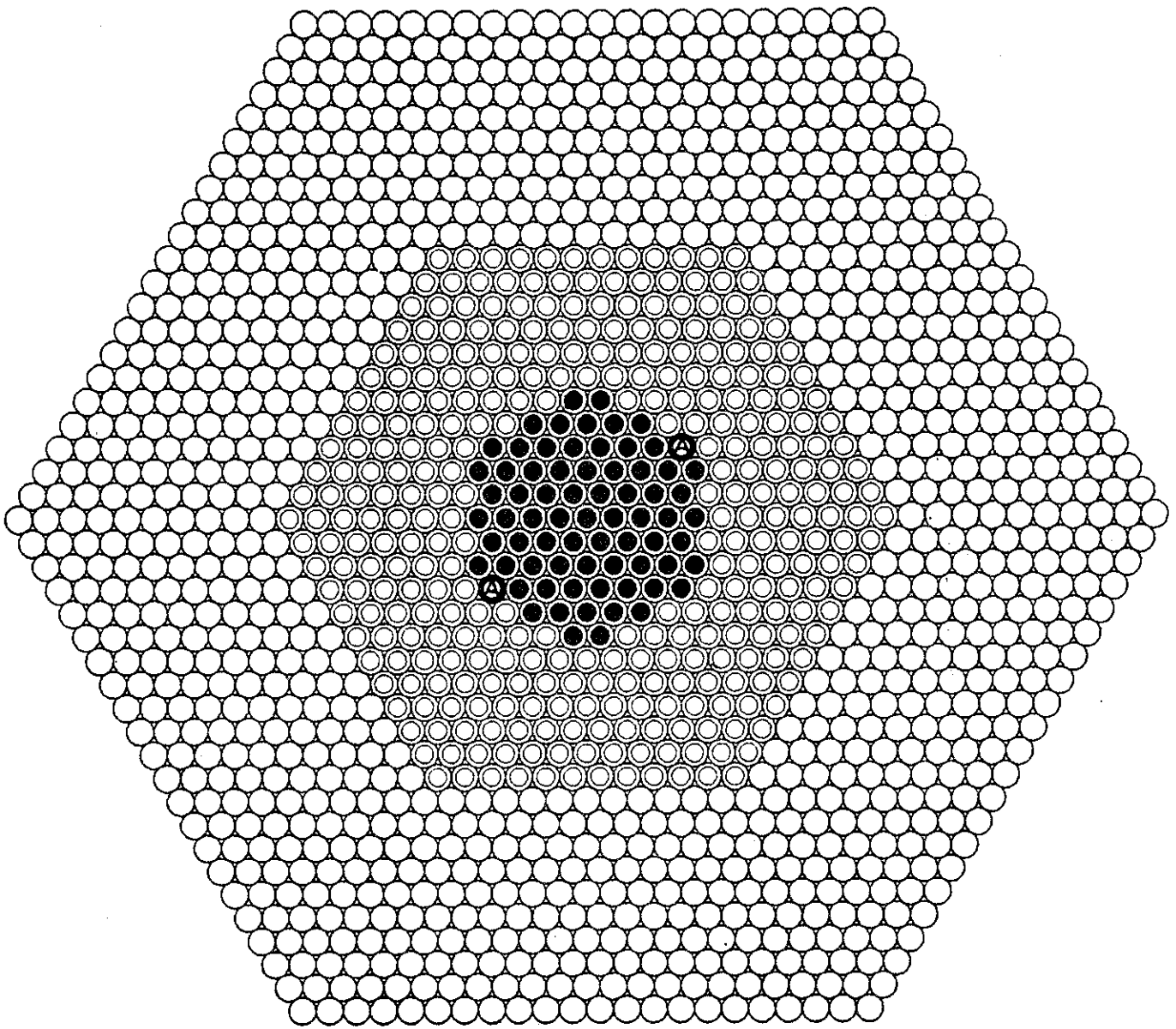
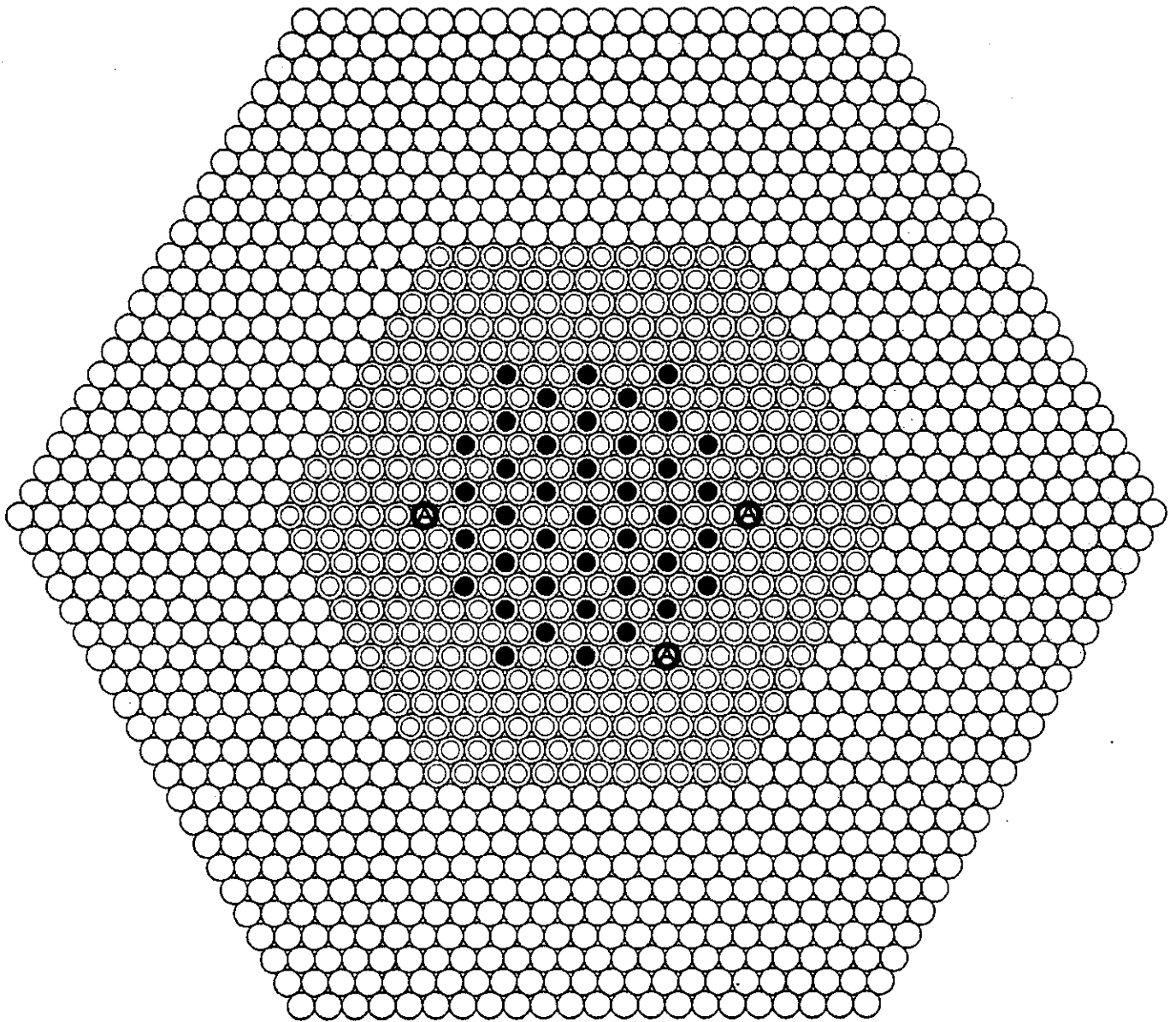


Fig. 3.1 SHE-8 experimental and analytical configurations







-  --- Fuel rod
-  --- Imaginary added fuel rod
-  --- Replaceable reflector
-  --- Permanent reflector

Fig. 3.2 SHE-12 experimental and analytical configurations

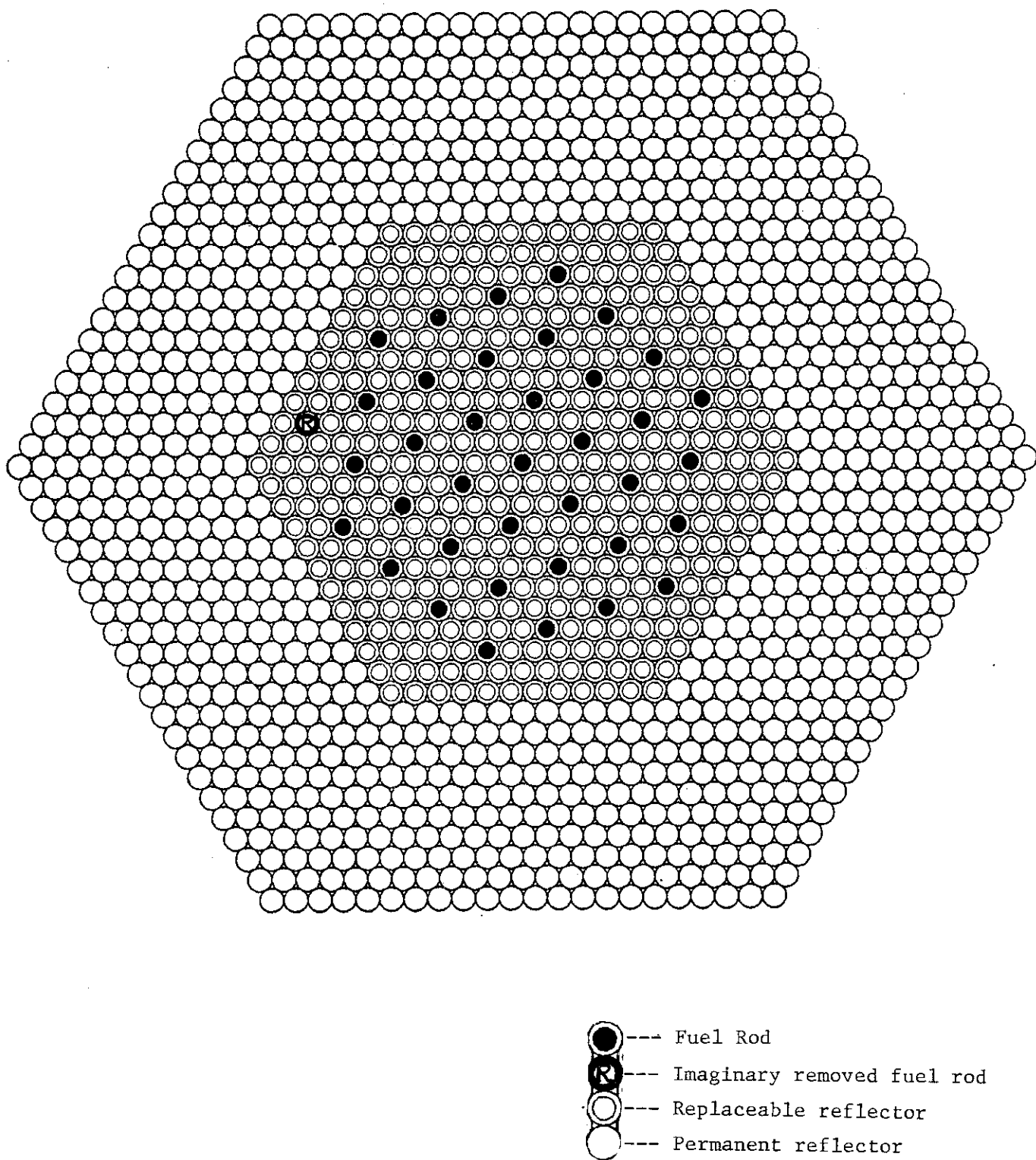


Fig. 3.3 SHE-13 experimental and analytical configurations

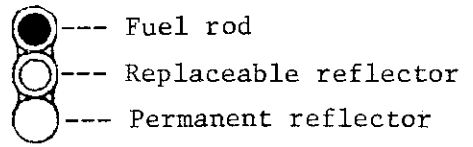
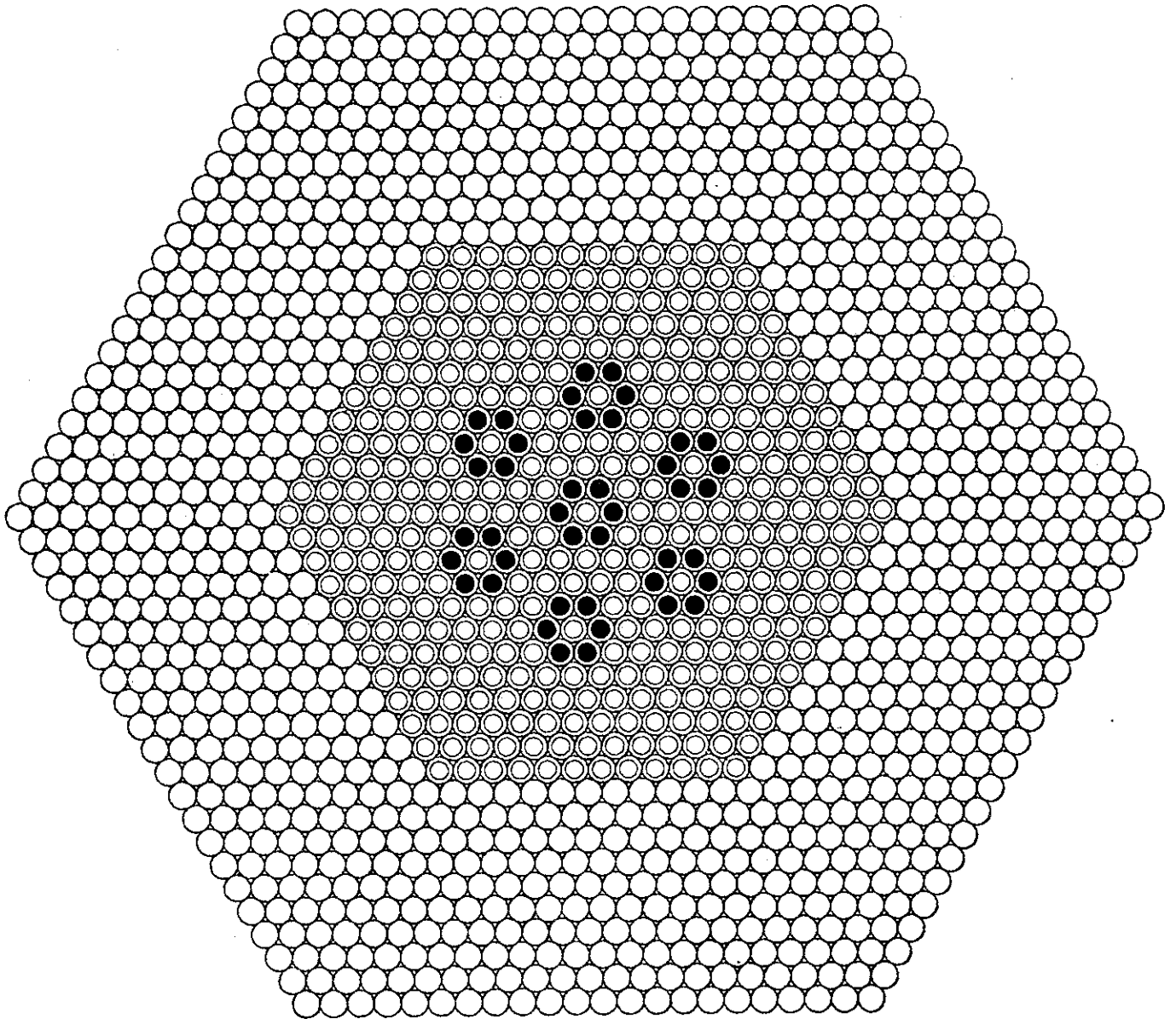
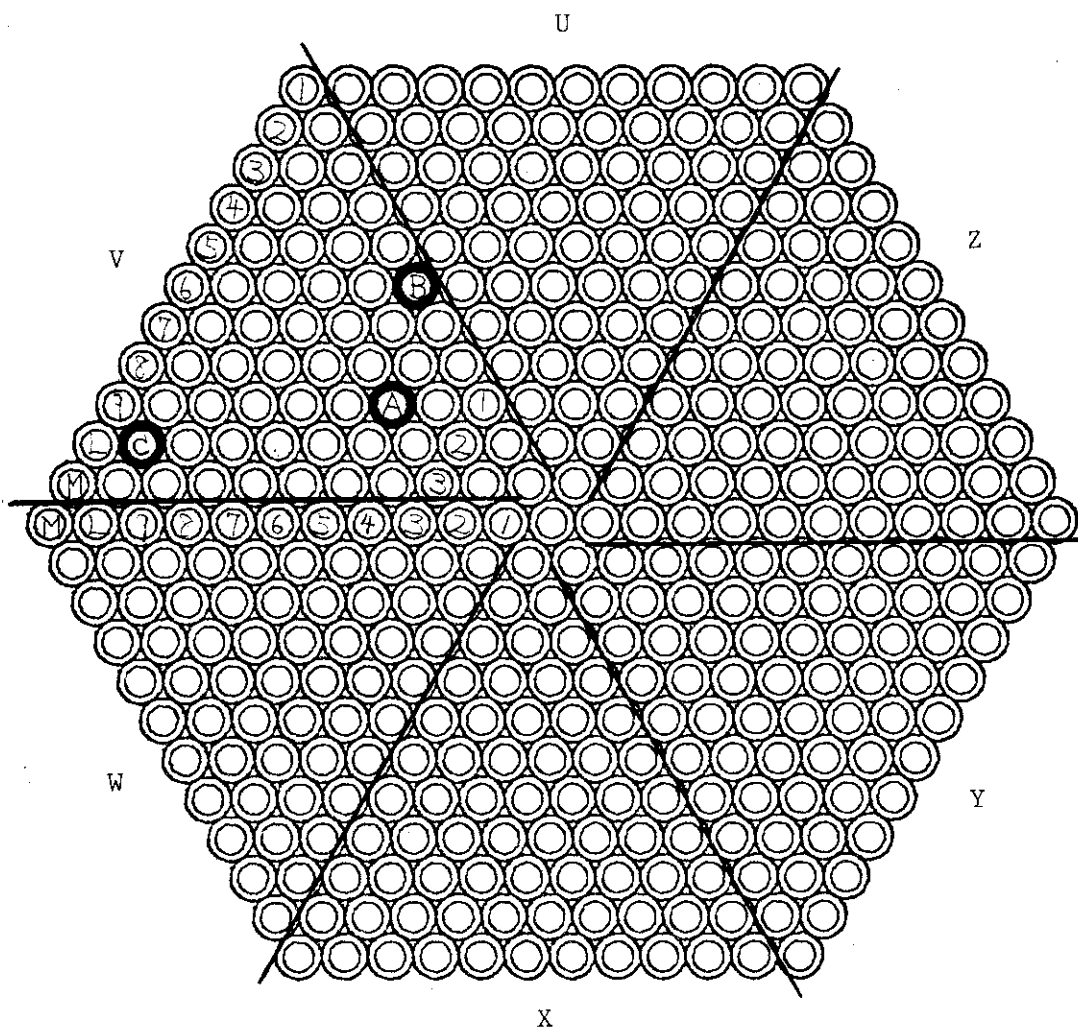


Fig. 3.4 SHE-14 experimental and analytical configurations



- A --- 5V3' (SHE-8)
- B --- 6V1 (SHE-12)
- C --- LV9 (SHE-13)

Fig. 3.5 Positions of rod worth measurements

4. 格子計算用データおよび炉心計算用群定数の作成

4.1 原子数密度の計算

本節では、燃料ディスク、黒鉛および空気の3種類の物質につき、それらを構成する各元素の原子数密度を計算し、その値を示す。これら3種類の物質を適当に混合することにより、後の解析で必要となる各種領域の原子数密度を容易に得ることが可能である。

計算の際に必要なアボガドロ数は最新の値と思われる、 0.602252×10^{24} という値を使用する。また、ボロン中の B^{10} と B^{11} の存在比は文献によりバラツキがあるが、ここでは1980年版理科年表による、 $B^{10} \dots 18.7 \text{ w/o}$ 、 $B^{11} \dots 81.3 \text{ w/o}$ という値を用いる。ここで、計算の際の基本データとしては、2章に示されたものを使用したが、酸化ウラン中の不純物量のうち不等号で示されている量については、等号と考えてその最大量が含まれていると仮定する。

Tables 4.1, 4.2, 4.3にそれぞれ、燃料ディスク、黒鉛、空気に含まれる各元素の原子重量密度および原子数密度を示す。

4.2 格子計算用データ

本節では、炉心計算用群定数作成時に必要となる中性子スペクトルの計算用データについて示す。ここでは、単位格子の概念に基づき、中性子スペクトルを求めており、当室で開発したDELIGHT-5コードを使用している。

SHE-8, 12, 13, 14に対し、それぞれFigs. 4.1, 4.2, 4.3, 4.4に示すような単位格子を考える。単位格子は円筒形状にモデル化されており、各円環部分に対して、4.1節で求めた値を利用して原子数密度を求める方法も同図中に示す。さらに、Tables 4.4, 4.5, 4.6, 4.7には、SHE-8, 12, 13, 14の各体系に対する単位格子計算用原子数密度を、DELIGHT-5コードの入力形式で示している。ここで、燃料棒の軸方向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、 $B_g^2 = 1.8657 \times 10^{-4} (\text{cm}^{-2})$ となる。

ここで、DELIGHT-5コードへの入力値としてさらに必要となるダンコフ係数、平均コード長、実効散乱断面積等については、NUATOMコードにより得た値を用いる。Table 4.8にSHE-8, 12, 13に対するNUATOMコードへの入力値および出力値を示す。ただし、SHE-14については、NUATOMコードより得られる計算結果を直接適用できないので、燃料棒6本ずつで構成される燃料部を円環形状と考え、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。

Table 4.9 に、SHE-14 に対する、 Σ_p^{eff} および N_o^{eff} の値を示す。これらから、SHE-14 に対する実効散乱断面積 σ_M は、1969.7 barn と計算され、この値を、DELIGHT-5 コードへの入力としている。

SHE-8, 12, 13, 14 の各体系に対する格子計算の結果を、Table 4.10 に示す。ここでは、DELIGHT-5 コードより得られる。実効共鳴積分および無限増倍率、実効増倍率の値をそれぞれの体系について示している。

4.3 炉心計算用群定数の作成

本節では、拡散計算コード CITATION に用いる断面積の作成について述べる。

4.2 節で示した格子計算用データに基づき、SHE-8, 12, 13, 14 各体系に対する単位格子の中性子スペクトルを計算し、これにより縮約群定数を種々の解析用モデルに対し作成する。縮約は、高速群、熱群ともそれぞれ9群づつの計18群であり、エネルギー群構造については、Fig. 4.5 および Table 4.11 に示す。また、このときの U^{235} 核分裂スペクトルを、Table 4.12 に示す。

CITATION コードを用いた実効増倍率の計算は、R-Z モデル、Triangular (Tri) モデル2種、Tri-Z モデルの計4種類のモデルについて、各SHEの体系に対して行っている。さらに、各種検討および補正用として、X-Y モデル、R- θ モデル等も導入している。各モデルの詳細については、第5章に示す。ここでは、炉心計算用群定数作成の際に必要な、各モデルそれぞれの物質領域における原子数密度を Tables 4.13~4.18 に示す。CITATION コードの入力となる群定数は、DELIGHT-5 でスペシャルマテリアルとして作成する。これら各表に示した原子数密度を求める際に使用する4.1節に示した燃料ディスク、黒鉛、空気に含まれる各元素の原子数密度の混合割合について Tables 4.19~4.24 に示す。この値は、各物質領域での、燃料ディスク、黒鉛および空気の体積割合を示すものである。ただし、Table 4.21のうち、燃料領域、

スリーブおよびマトリックス管領域の二領域では、混合割合の合計が、100%にはなっていない。これは、TriモデルIIでは、これら二領域部分の体積を保存したモデル化を行うことが困難であったために、総原子数が各領域で保存されるよう調整したためである。

Table 4.1 Atomic weights and number densities of various nuclides in fuel disk

Nuclide	Atomic weight	Atomic weight density (g/cm ³)	Atomic number density (n×10 ²⁴ /cm ³)
U ²³⁵	235.0439	3.2963-2	8.4461-5
U ²³⁸	238.0508	1.3309-1	3.3671-4
B ¹⁰	10.01294	4.9036-8	2.9494-9
B ¹¹	11.00931	2.3441-7	1.2823-8
C ¹²	12.01115	1.8902	9.4777-2
O ¹⁶	15.9994	2.3771-2	8.9479-4
Si ²⁸	28.086	9.4426-6	2.0248-7
Al ²⁷	26.9815	2.8327-6	6.3228-8
Fe ¹⁹	55.847	5.6653-6	6.1094-8
Cr ⁵²	51.996	1.8884-6	2.1873-8
Mn ⁵⁵	54.9380	1.8884-6	2.0701-8
Ni ⁵⁹	58.71	1.8884-6	1.9371-8
Mo ⁹⁶	95.94	3.7769-6	2.3709-8
W ¹⁸⁴	183.85	9.4426-6	3.0932-8
Cd ¹¹²	112.40	3.7769-8	2.0237-10
H ¹	1.0080	1.3332-4	7.9655-5

Table 4.2 Atomic weights and number densities of graphite

Nuclide	Atomic weight	Atomic weight density (g/cm ³)	Atomic number density (n×10 ²⁴ /cm ³)
B ¹⁰	10.01294	2.9393-8	1.7679-9
B ¹¹	11.00931	1.4501-7	7.9326-9
C ¹²	12.01115	1.6990	8.5187-2
O ¹⁶	15.9994	9.0586-4	3.4099-5
H ¹	1.0080	1.1414-4	6.8195-5

Table 4.3 Atomic weights and number densities of air

Nuclide	Atomic weight	Atomic weight density (g/cm ³)	Atomic number density (n×10 ²⁴ /cm ³)
O ¹⁶	15.9994	2.9252-4	1.1012-5
N ¹⁴	14.0067	9.0629-4	3.8968-5
H ¹	1.0080	1.8666-6	1.1152-6

Table 4.4 SHE-8 atomic number densities for unit cell calculation ($\text{nx}10^{24}/\text{cm}^3$)

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			2.9494 -9	1.6752 -9		
B11	29			1.2823 -8	7.5165 -9		
C	30			9.4777 -2	8.0719 -2		
O	31			8.9479 -4	3.2888 -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				2.0439 -6		3.8968 -5
H	50			7.9655 -5	6.4677 -5		1.1152 -6

Table 4.5 SHE-12 atomic number densities for unit cell calculation ($\text{n} \times 10^{24} / \text{cm}^3$)

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			2.9494 -9	1.6752 -9		1.7587 -9
B11	29			1.2823 -8	7.5165 -9		7.8913 -9
C	30			9.4777 -2	8.0719 -2		8.4743 -2
O	31			8.9479 -4	3.2888 -5	1.1012 -5	3.3979 -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			7.9655 -5	2.0439 -6	3.8968 -5	2.0328 -7
H	50				6.4677 -5	1.1152 -6	6.7846 -5

Table 4.6 SHE-13 atomic number densities for unit cell calculation ($n \times 10^{24} / \text{cm}^3$)

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			2.9494 -9	1.6752 -9		1.6546 -9
B11	29			1.2823 -8	7.5165 -9		7.4244 -9
C	30			9.4777 -2	8.0719 -2		7.9729 -2
O	31			8.9479 -4	3.2888 -5	1.1012 -5	3.2620 -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				2.0439 -6	3.8968 -5	2.4964 -6
H	50			7.9655 -5	6.4677 -5	1.1152 -6	6.3897 -5

Table 4.7 SHE-14 atomic number densities for unit cell calculation ($n \times 10^{24}/\text{cm}^3$)

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			
BiO	28	1.7587 -9	1.4038 -9	2.9494 -9	1.1675 -9	1.7587 -9	
Bi1	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			2.0237 -10			
Cd	47						
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 4.8 Dancoff coefficient and effective scattering cross section for unit cell calculation
(Input and output of NUATOM code)

		SHE-8	SHE-12	SHE-13	
Fuel rod	Weight ratio (%)	U ²³⁵	1.5845	1.5845	1.5845
		U ²³⁸	6.3979	6.3979	6.3979
		O ¹⁶	1.1427	1.1427	1.1427
		C ¹²	90.862	90.862	90.862
		Si	4.5391-4	4.5391-4	4.5391-4
		B ¹⁰	2.3572-6	2.3572-6	2.3572-6
		H	6.4087-3	6.4087-3	6.4087-3
Density (g/cm ³)		2.0803	2.0803	2.0803	
Radius (cm)		2.2250	2.2250	2.2250	
Mean chord length (cm)		4.45	4.45	4.45	
Moderator	Weight ratio (%)	O ¹⁶	5.7737-2	5.5522-2	5.5349-2
		C ¹²	99.924	99.932	99.933
		B ¹⁰	1.7282-6	1.7288-6	1.7289-6
		H	6.7414-3	6.7278-3	6.7267-3
	Density (g/cm ³)		1.3502	1.5042	1.5177
Radius (cm)		3.4128	5.9111	9.0293	
Dancoff coefficient		0.24233	0.01400	0.00073	
Effective scattering cross section (barn)		1847.6	2000.0	2008.8	

Table 4.9 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

$$N_0^{\text{eff}} = 3.3671 \times 10^{-4} \quad \Sigma_P^{\text{eff}} = 4.5459 \times 10^{-1} \text{ (cm}^{-1}\text{)}$$

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

Table 4.10 Result of cell calculation by DELIGHT-5

	SHE-8	SHE-12	SHE-13	SHE-14
C/U ²³⁵	2198	6489	15071	6847
Effective resonance integral (barn)	103.20	106.11	106.66	105.54
k_{∞}	1.5337	1.7662	1.7870	1.7731
k_{eff}	1.4385	1.6193	1.5924	1.6243

Table 4.11 Energy structure of 18 groups (eV)

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

Table 4.12 Fission spectrum of U^{235} in 18 groups

Group number	Fraction
1	0.96723
2	0.032769
3~18	0.0
Total	1.00000

Table 4.13 Atomic number densities for R-Z model calculation ($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)

Nuclide	Fuel region				Reflector regions	
	SHE-8	SHE-12	SHE-13	SHE-14	Replaceable	Permanent
	U ²³⁵	3.5901-5	1.1967-5	5.1287-6	1.1336-5	—
U ²³⁸	1.4312-4	4.7708-5	2.0446-5	4.5193-5	—	—
B ¹⁰	2.0608-9	1.7558-9	1.6686-9	1.7477-9	1.5949-9	1.6033-9
B ¹¹	9.0722-9	7.8200-9	7.4622-9	7.7867-9	7.1565-9	7.1941-9
C ¹²	7.9178-2	7.7896-2	7.7529-2	7.7858-2	7.6852-2	7.7256-2
O ¹⁶	3.9721-4	1.5370-4	8.4129-5	1.4729-4	3.1840-5	3.1950-5
Fe	2.5969-8	8.6564-9	3.7098-9	8.2000-9	—	—
Cd	8.6019-11	2.8674-11	1.2289-11	2.7162-11	—	—
N	4.6130-6	3.9568-6	3.7691-6	3.9408-6	3.8127-6	3.6283-6
H	6.5125-5	6.3007-5	6.2402-5	6.2949-5	6.1632-5	6.1950-5

Table 4.14 Atomic number densities for Tri(I) model calculation ($n \times 10^{24}/\text{cm}^3$)

Nuclide	Fuel region SHE-8~14	Reflector regions	
		Replaceable	Permanent
U ²³⁵	3.4404-5	—	—
U ²³⁸	1.3716-4	—	—
B ¹⁰	2.0399-9	1.5949-9	1.6033-9
B ¹¹	8.9854-9	7.1565-9	7.1941-9
C ¹²	7.9007-2	7.6852-2	7.7256-2
O ¹⁶	3.8196-4	3.1840-5	3.1950-5
Fe	2.4886-8	—	—
Cd	8.2433-11	—	—
N	4.6138-6	3.8127-6	3.6283-6
H	6.4921-5	6.1632-5	6.1950-5

Table 4.15 Atomic number densities for Tri(II) model calculation ($n \times 10^{24}/\text{cm}^3$)

Nuclide	Fuel region SHE-8~14	Fuel sleeve and matrix tube region	Reflector regions	
			Replaceable	Permanent
U ²³⁵	1.3762-4	—	—	—
U ²³⁸	5.4864-4	—	—	—
B ¹⁰	4.9310-9	1.0760-9	1.5949-9	1.6033-9
B ¹¹	2.1456-8	4.8290-9	7.1565-9	7.1941-9
C ¹²	1.6046-1	5.1858-2	7.6852-2	7.7256-2
O ¹⁶	1.4604-3	2.2496-5	3.1840-5	3.1950-5
Fe	9.9547-8	—	—	—
Cd	3.2974-10	—	—	—
N	—	6.1523-6	3.8127-6	3.6283-6
H	1.3462-4	4.1690-5	6.1632-5	6.1950-5

Table 4.16 Atomic number densities for Tri-Z model calculation ($n \times 10^{24}/\text{cm}^3$)

Nuclide	Fuel region SHE-8,14	Reflector regions	
		Replaceable	Permanent
U ²³⁵	3.5901-5	—	—
U ²³⁸	1.4312-4	—	—
B ¹⁰	2.0608-9	1.5949-9	1.6033-9
B ¹¹	9.0722-9	7.1565-9	7.1941-9
C ¹²	7.9178-2	7.6852-2	7.7256-2
O ¹⁶	3.9721-4	3.1840-5	3.1950-5
Fe	2.5969-8	—	—
Cd	8.6019-11	—	—
N	4.6130-6	3.8127-6	3.6283-6
H	6.5125-5	6.1632-5	6.1950-5

Table 4.17 Atomic number densities for X-Y model calculation ($n \times 10^{24}/\text{cm}^3$)

Nuclide	Fuel region SHE-8,14	Fuel sleeve and matrix tube region	Reflector regions	
			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 4.18 Atomic number densities for R-Z' and R-θ models calculation ($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)

Nuclide	Fuel region SHE-8	Reflector region	
		Replaceable	Permanent
U ²³⁵	3.4404-5	—	—
U ²³⁸	1.3716-4	—	—
B ¹⁰	2.0399-9	1.5949-9	1.6033-9
B ¹¹	8.9854-9	7.1565-9	7.1941-9
C ¹²	7.9007-2	7.6852-2	7.7256-2
O ¹⁶	3.8196-4	3.1840-5	3.1950-5
Fe	2.4886-8	—	—
Cd	8.2433-11	—	—
N	4.6138-6	3.8127-6	3.6283-6
H	6.4921-5	6.1632-5	6.1950-5

Table 4.19 Material mixture ratios of each region in R-Z model (%)

SHE		Fuel disk	Graphite	Air
Fuel region	8	42.506	45.655	11.838
	12	14.169	75.677	10.154
	13	6.0723	84.254	9.6724
	14	13.422	76.464	10.113
Reflector regions	Replaceable	—	90.216	9.7841
	Permanent	—	90.690	9.3110

Table 4.20 Material mixture ratios of each region in Tri(I) model (%)

SHE-8~14		Fuel disk	Graphite	Air
Fuel region		40.734	47.426	11.840
Reflector regions	Replaceable	—	90.216	9.7841
	Permanent	—	90.690	9.3110

Table 4.21 Material mixture ratios of each region in Tri(II) model (%)

SHE-8~14		Fuel disk	Graphite	Air
Fuel disk		162.94	7.0846	—
Fuel sleeve and matrix tube region		—	60.875	15.788
Reflector regions	Replaceable	—	90.216	9.7841
	Permanent	—	90.690	9.3110

Table 4.22 Material mixture ratios of each region in Tri-Z model (%)

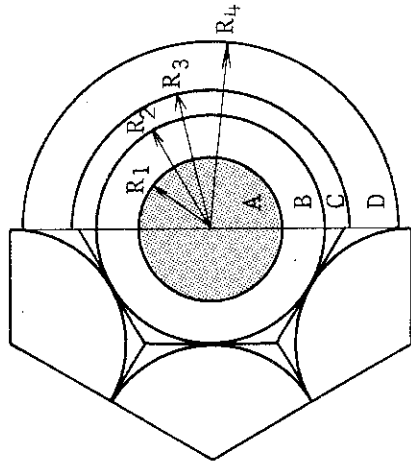
SHE-8~14		Fuel disk	Graphite	Air
Fuel region		42.506	45.655	11.838
Reflector regions	Replaceable	—	90.216	9.7841
	Permanent	—	90.690	9.3110

Table 4.23 Material mixture ratios of each region in X-Y model (%)

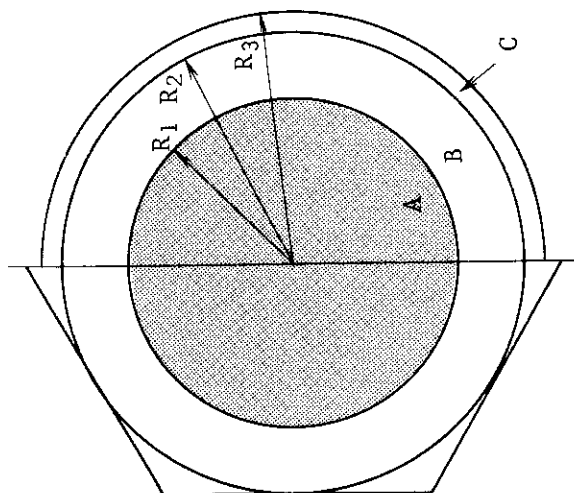
SHE-8, 14		Fuel disk	Graphite	Air
Fuel region		95.833	4.1667	—
Fuel sleeve and matrix tube region		—	79.406	20.594
Reflector regions	Replaceable	—	90.216	9.7841
	Permanent	—	90.690	9.3110

Table 4.24 Material mixture ratios of each region in R-Z' and R- θ models (%)

SHE-8		Fuel disk	Graphite	Air
Fuel region		40.734	47.426	11.840
Reflector regions	Replaceable	—	90.216	9.7841
	Permanent	—	90.690	9.3110



R1	2.2250 (cm)
R2	3.2500
R3	3.7170
R4	5.9111



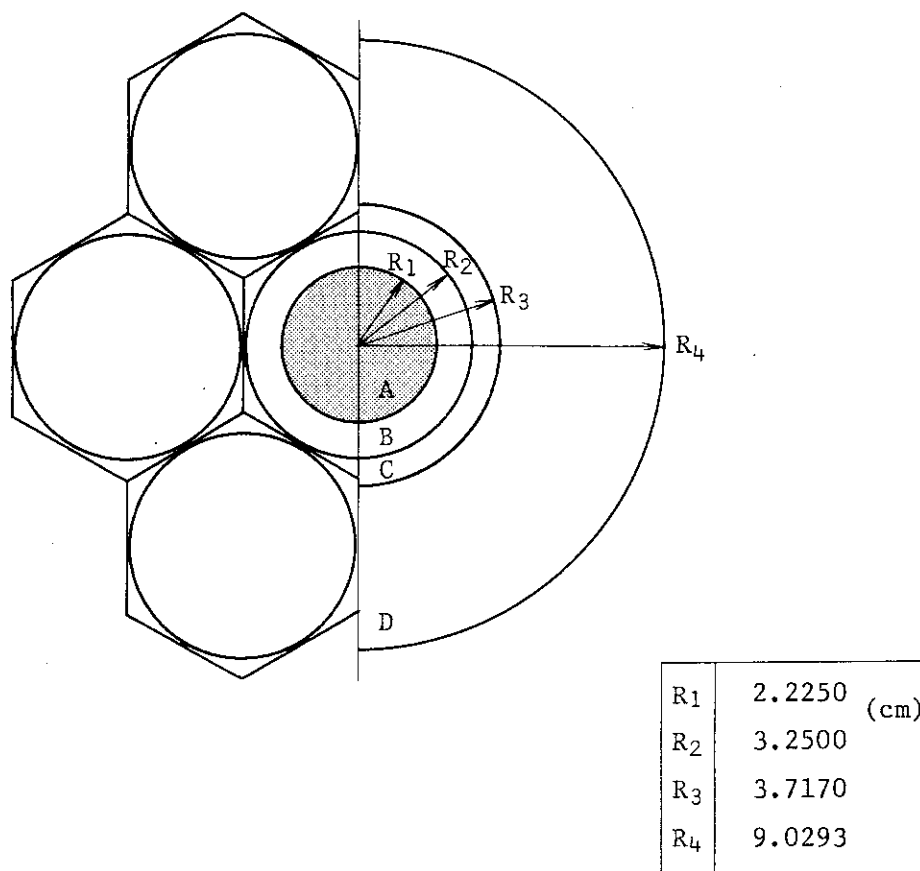
R1	2.2250 (cm)
R2	3.2500
R3	3.4128

DELIGHT region No.	Weighting factors of atomic number density calculation in each region
A	Fuel disk × 100%
B	Graphite × 94.755% + Air × 5.2452%
C	Air × 100%

Fig. 4.1 Unit cell configuration for SHE-8

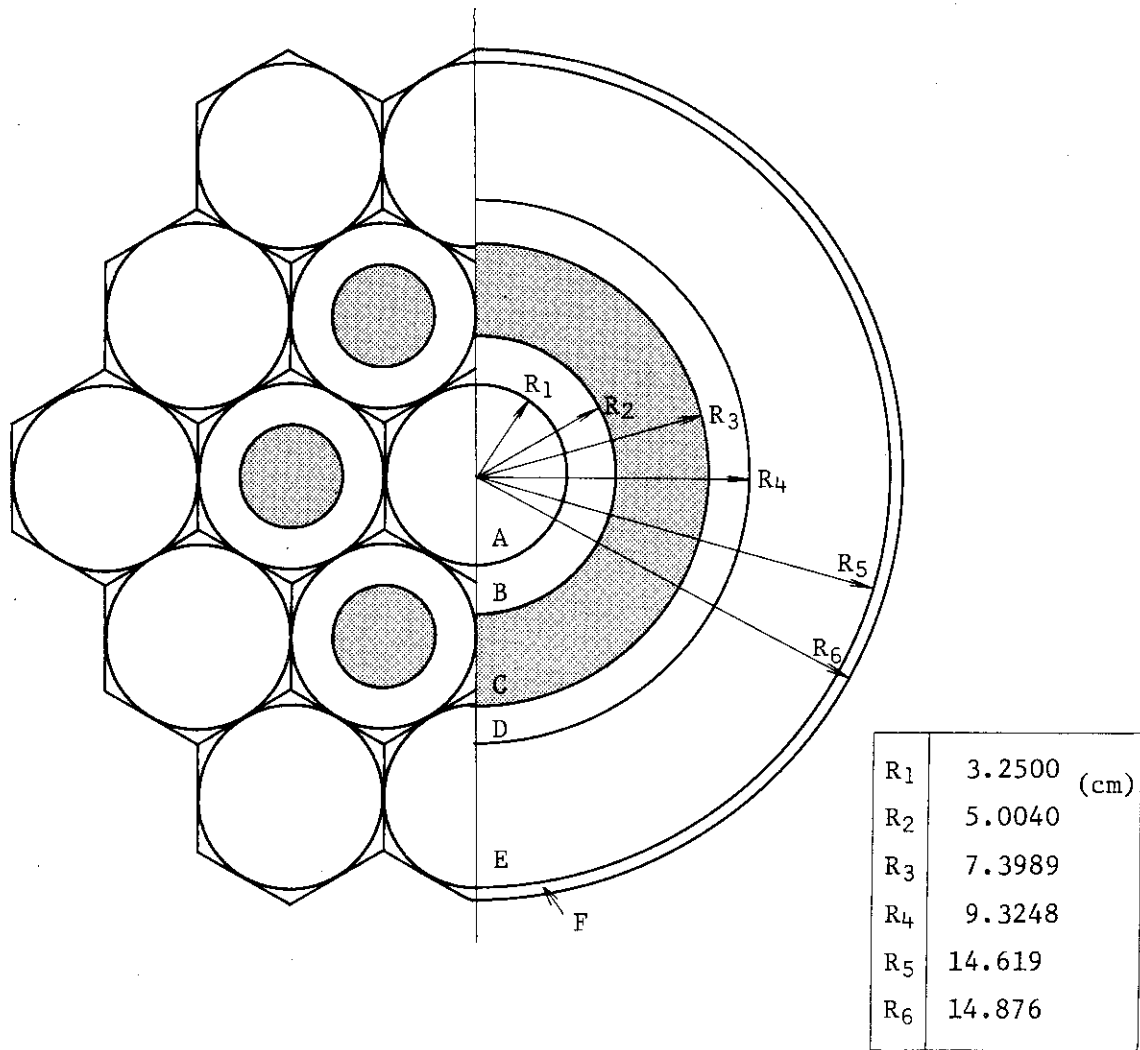
DELIGHT region No.	Weighting factors of atomic number density calculation in each region
A	Fuel disk × 100%
B	Graphite × 94.755% + Air × 5.2452%
C	Air × 100%
D	Graphite × 99.478% + Air × 0.52166%

Fig. 4.2 Unit cell configuration for SHE-12



	DELIGHT region No.	Weighting factors of atomic number density calculation in each region
A	3	Fuel disk × 100%
B	4	Graphite × 94.755% + Air × 5.2452%
C	5	Air × 100%
D	6	Graphite × 93.593% + Air × 6.4063%

Fig. 4.3 Unit cell configuration for SHE-13



	DELIGHT region No.	Weighting factors of atomic number density calculation in each region
A	1	Graphite × 99.478% + Air × 0.52166%
B	2	Graphite × 79.406% + Air × 20.593%
C	3	Fuel disk × 100%
D	4	Graphite × 66.036% + Air × 33.964%
E	5	Graphite × 99.478% + Air × 0.52166%
F	6	Air × 100%

Fig. 4.4 Unit cell configuration for SHE-14

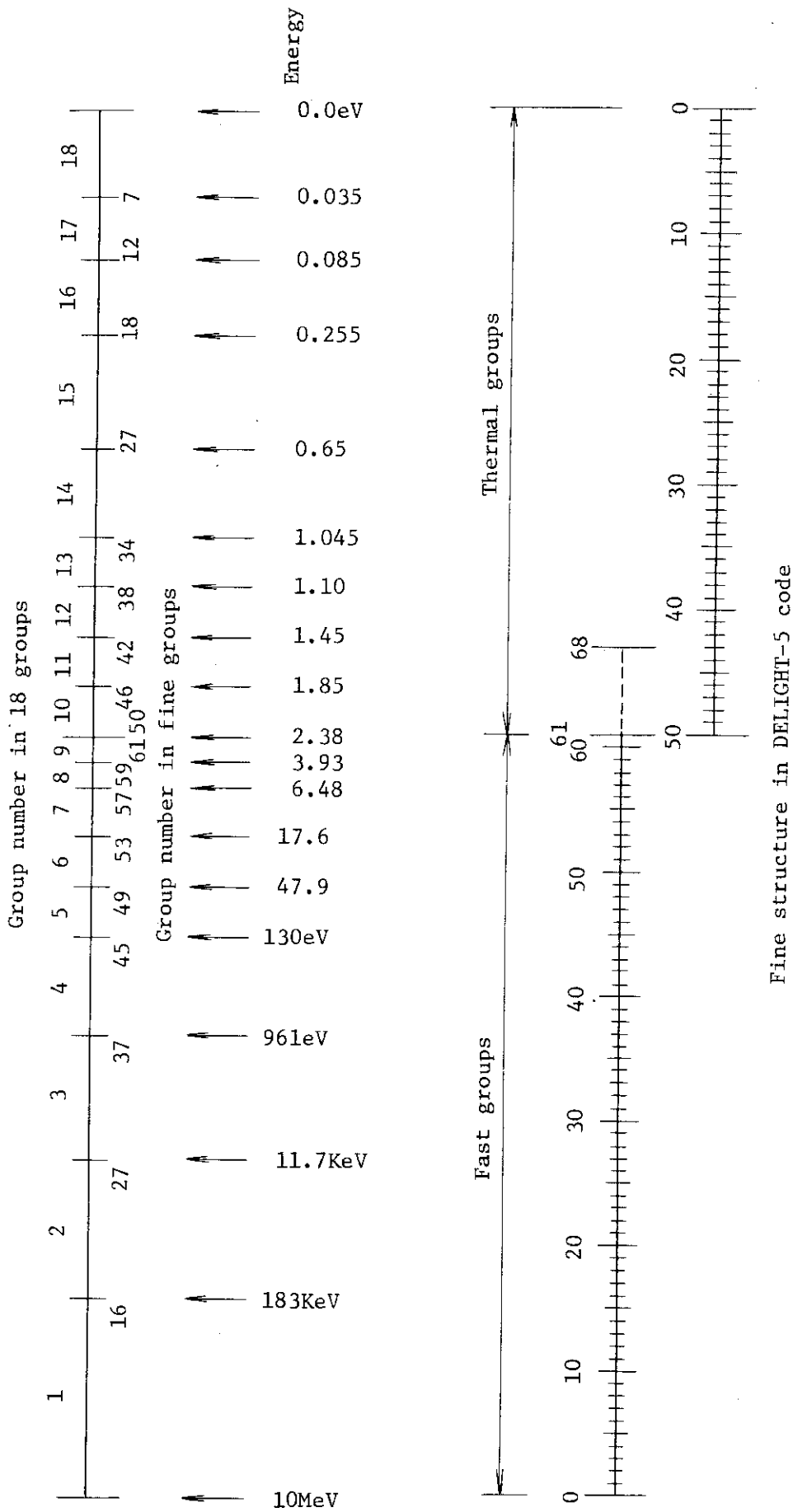


Fig. 4.5 Energy structure of 18 groups

5. 実効増倍率の計算

本章では、SHE-8, 12, 13, 14の各体系に対する実効増倍率を、R-Zモデル、TriモデルI、TriモデルII、Tri-Zモデルの4種類のモデルに対し計算した結果について述べる。計算は、拡散計算コードCITATIONを用いて行い、第3章で説明した60°回転対称炉心に換算した実効増倍率の実験値と比較する。

5.1 R-Zモデル

このモデルでは、各燃料棒一本一本を区別することなく、単位格子の集合を均質化して燃料領域としている。ただし、燃料棒Z軸方向に存在する黒鉛ディスクについては均質化していない。このとき、SHE-8, 12, 13, 14に対し、R-Zモデルの物質領域構成は総て同様のものとなり、Fig. 5.1に示すように、燃料、可動反射体、固定反射体の三物質領域から構成される。SHE各体系に対するR方向およびZ方向メッシュおよび物質割当については、同図中のA-A'断面およびB-B'断面について示せば十分であるので、これらについてTables 5.1~5.5に示す。メッシュ間隔は、黒鉛中での中性子平均自由行程に近いと考えられる2cmを最大のものとする。ただし、SHE-8中性子束分布測定の実験⁹⁾により、燃料領域と反射体領域の境界から前後10cm程度は、特に中性子束分布の変化が激しいので(Fig. 5.2)、SHE各体系とも、この部分については、メッシュ間隔を0.5cmとしている。また、可動反射体領域と固定反射体領域では、空気ボイド部体積が僅か異なるのみで物質境界として中性子束変化には大きな影響を与えないと思われるが、一応この境界の前後5cmづつを、1cmのメッシュ間隔とする。Z軸方向のメッシュ構成は、SHE各体系に対し同一である。Fig. 5.2からも明らかなように、Z軸方向の中性子束が大きく変化するところは特に見られない。ただし、物質境界となる黒鉛部や外側境界付近は多少メッシュ間隔を小さくしている。

このようなR-Zモデルに対し4.3節で求めた18群定数を用いて、CITATIONコードにより実効増倍率の計算を行う。収束判定条件としては、中性子束変化に対し、 10^{-4} 以下、実効増倍率に対しては 10^{-5} 以下という値を使用する。この収束条件は、特に断らない限り総てのCITATIONコードによる実効増倍率の計算に適用されている。Table 5.6に、R-Zモデルの計算結果を示す。同表には、CITATIONコードの出力として得られる中性子の生成と消滅に関する情報のうち、消滅項について中性子バランスも示している。ここでは、Total LeakageとAbsorptionの和が単位量(1.0)となるようにして各値を表示する。また、計算値を第3章で求めた実験値で割った値が、仮想的に実験体系を臨界であるとした際の、CITATIONコードによる計算値であると考え、この値の1.0よりのずれを百分率で表示している。この値を、計算と実験の差を示す指標と考えることができる。表中では、(C/E)-1.0として表示されている欄である。ただし、C/Eとは、(Calculated Value)/(Experimental Value)の意味である。同表から、SHE-8, SHE-12, SHE-14, SHE-13の順序で、Absorptionの割合が減じ

Leakage の割合が増大している。この順序は、Table 4.10 に示した、 C/U^{235} の値から説明できると考えられる。つまり、 C/U^{235} の値が大きくなるほど、吸収されて消滅する中性子の割合が小さくなるということである。また、R 方向と Z 方向のもれを比較すると R 方向のもれが、先程と同じ順序で増大するのがわかる。これは、 C/U^{235} の効果もあるが、むしろ均質燃料領域としたための等価燃料領域半径の大きさによるものであると考えられる。つまり、燃料領域半径が大きくなれば、燃料領域の表面積が増大し、さらに燃料領域と真空境界の間の距離が短くなるので R 方向 Leakage が増大したものと考えられる。この R-Z モデルでは、元来 Fig. 3.1 に示したように燃料領域がほぼ均質領域と言える SHE-8 を除き、 $\{(C/E)-1.0\}$ の値がかなり大きく、さらに詳細なモデル化が必要であることがわかる。

5.2 Tri モデル I

先の R-Z モデルでは、実験体系のモデル化が特に燃料棒に対し、あまり妥当なものとは言えない。そこで、本節では、燃料ディスク、スリーブおよびマトリックス管までを均質化した燃料棒を考え、これを一本一本独立して表現できるモデルを作成することにより、SHE-12, 13, 14 の実際の燃料棒配置を計算に反映させることを考えた。このために、CITATION コードで使用可能な Triangular (Tri) メッシュを使用する。この Tri メッシュを六つ使用した六角形状を一つの形状単位とすることにより、燃料ディスク、スリーブおよびマトリックス管までを均質化した燃料棒、可動反射体要素および固定反射体要素を、それぞれ一本ずつ独立に表現可能となる。ここで、R-Z モデルでは考慮した Z 軸方向に存在する数枚の黒鉛ディスクは、燃料棒中に均質化し、CITATION コードの計算は 2次元で行う。このために必要となる軸方向形状バックリング値として、 $B_g^2 = (\pi/h)^2$ を用い、Z 軸方向長さ 240 cm にさらに外挿距離 3.72 cm を加えた値である 243.72 cm に対応するバックリング値、 $1.6616 \times 10^{-4} \text{ (cm}^{-2}\text{)}$ を用いる。Tri モデル I のメッシュおよび物質領域構成を、SHE-8, 12, 13, 14 の各体系に対し、それぞれ Figs. 5.3 ~ 5.6 に示す。SHE の各実験体系は、第 3 章で述べたように、 60° 回転対称となるよう再構成されており、計算モデルは各体系の 60° 部分のみをモデル化し、残りの 300° 部分については、 60° 回転対称境界条件を用いれば表現されるものとして取扱う。固定反射体領域の外側については、CITATION コードに内蔵されている Black Absorber を用いて、外挿境界条件を表現する。

Tri モデル I を用い、4.3 節で求めた 18 群定数による CITATION コードの計算結果を Table 5.7 に示す。Tri モデル I に対する中性子バランスは、先の R-Z モデルの場合とは異なり CITATION コードの計算結果から直接求めることができない。そのため、計算より得られた Black Absorber 領域での吸収および左方と右方のもれの量の合計を、R 方向のもれと考え、この値を同表では、R 方向 Leakage として示している。一方、吸収量 (Net Absorption) は、計算により得られる全吸収量から Black Absorber 内での吸収量を差し引いた値となる。

前節の R-Z モデルと比較して、Tri モデル I では、 $\{(C/E)-1.0\}$ の値に、SHE 各体系とも改善が見られる。特に、SHE-13 と SHE-14 では、それぞれ 4.72% および、3.42% も減少している。先の Table 5.6 と Table 5.7 の中性子バランスを比較すると、もれの割合が、SHE 各体系とも増大しているのがわかる。ただし、SHE-8 については、燃料棒領域の全体の大きさ

および形状が、R-ZモデルとTriモデルIでは類似しているため $\{(C/E)-1.0\}$ の値も0.08%位しか変化しなかったものと考えられる。また、SHE-12では、1.29%の変化が見られるが、SHE-13, 14ほど大きな変化ではない。つまり、SHE-12に対する、このTriモデルIでは、多少非均質にしたための効果が見られるが、R-Zモデルのような均質燃料棒モデルとあまり差が出ず、燃料棒のモデル化は、まだTriモデルIでは不十分であると考えられる。

5.3 Tri-Zモデル

これまでの計算で、SHE各体系では、もれの実効増倍率への効果はかなり大きいものであることが明らかとなり、もれの効果をどのように計算モデルへ反映させるかが、今後の解析上重要となってきた。本節のTri-Zモデルでは、TriモデルIおよび、次節で示すTriモデルIIで共通に用いている軸方向形状バックリング値が、どの程度忠実に軸方向のもれを表現しているかを検討するために作成した計算モデルである。CITATIONコードを用い、Tri-Zメッシュモデルによる三次元拡散計算を、4.3節で求めた18群定数によりSHE各体系に対し行っている。Triangularメッシュの構成は、SHE各体系に対してTriモデルIと同一である。Z軸方向には、燃料棒中に存在する黒鉛ディスクの非均質性を考慮し、先のR-Zモデルで考慮したZ軸と同様の物質構成となっている。実際には、計算機の容量の関係で、R-ZモデルのようにZ軸方向のメッシュ幅は小さくとれず、Table 5.8に示すようなZ軸方向メッシュ分割となっている。ただし、中性子束強度の変化が大きいZ軸方向の外挿境界付近では、細かいメッシュ分割となっている。

計算結果をTable 5.9に示す。中性子バランスは、TriモデルIと同様の方法で算出している。先のTriモデルIの $\{(C/E)-1.0\}$ 値と比較すれば、SHE-13では、1.59%もTri-Zモデルの方が大きな値を示している。ここで、中性子バランスを比較すると、Tri-Zモデルの方がもれの割合が小さくなっているのがわかる。したがって、SHE-13では通常の軸方向形状バックリング値では、軸方向のもれの効果を過大に評価してしまう可能性がある。これと関連して、単位格子のスペクトル計算時に用いた形状バックリング値も不適當なものとなってくると考えられる。したがって、適切な軸方向形状バックリング値を見出すためには、〔格子計算……TriモデルI……Tri-Zモデル〕間の繰り返し計算を行い、TriモデルIとTri-Zモデルの実効増倍率が等しくなるような軸方向バックリング値を求める必要がある。また、SHE-12と14では、両体系の C/U^{235} 値が、ほぼ等しいにもかかわらず、それぞれ先のTriモデルIよりも、0.41および0.06%の $\{(C/E)-1.0\}$ 値の減少を示し、互いに多少異っている。SHE-12とSHE-14では、燃料棒の配置パターンが異っており、これが、0.41と0.06%の相異の主たる原因であると考えれば、SHE-8やSHE-13の計算ケースとも比較して、次のようなことが言える。つまり、平板状の裸の炉に対するバックリング値($B_g^2 = (\pi/h)^2$)は、燃料棒を密に集合させた体系ほど妥當な値となってくる。

5.4 Tri モデルII

このモデルでは、燃料棒の形状をさらに詳細に取扱うため、Tri モデルIのメッシュ数を両方向とも倍にしたものであり、これまでのモデルでは均質化していた燃料ディスクおよび、スリーブとマトリックス管を別々に取扱えるものである。このモデルにより、燃料棒の非均質性の効果をさらに詳細に考慮できる。

このTri モデルIIのメッシュ構成は、SHE 全体系に対し、Fig. 5.7に示すようなものであり、SHE 各体系に対する燃料部および減速材部（スリーブとマトリックス管を均質化）の配置を同図中の破線部分の拡大図として、Figs. 5.8～5.11示す。ここで、CITATIONコードでは、三角メッシュの間隔を自由に選択することができず、総て一定となっており計算機容量との関係から、燃料部体積および減速材部体積を保存することができない。そのため、Tri モデルIIでは燃料部および減速材部は実際のものより、それぞれ0.58813倍および1.3044倍の体積となっている。ここでは各部での総原子数を保存しており、そのため原子数密度は実際とは異なる値となっている。

Tri モデルIと同様の境界条件とZ軸方向形状バックリング値により、CITATIONコードで18群の計算を行った結果が、Table 5.10である。この結果より各体系とも、もれの効果がTri モデルIと比べ増大し、それとともに $[(C/E) - 1.0]$ 値も小さな値となっている。これは主に燃料棒形状が、Tri モデルIより小さくなったためであると考えられる。

5.5 燃料棒モデル化の補正と結果

これまでに用いた計算モデルでは、燃料部（燃料ディスク部）は実際のものと同じの体積とはなっておらず、本節では、この効果の補正を行っている。

ここでは、R-Zモデル、Tri モデルI、Tri モデルIIの燃料部体積および燃料部表面積を横軸に取り、 $[(C/E) - 1.0]$ 値を縦軸にとったグラフを作り内挿により実際の体積および表面積に対する $[(C/E) - 1.0]$ の値を求める。燃料部体積については、各モデルで用いた燃料部のR方向の断面積の総和をもって燃料部体積指標とする。また、表面積については、燃料部外周長さの総和をもって表面積指標とする。つまり、どちらの指標も、燃料棒長さの値を乗じていない値となっている。これらの値をTable 5.11に示す。さらに、Figs. 5.12～5.14に、各種内挿用グラフを示す。内挿により得た $[(C/E) - 1.0]$ 値の代表値として、三種の内挿用グラフより得た値の平均値をとれば、SHE-8, 12, 13, 14に対し、それぞれ、1.6, 2.8, 3.4, 2.9%となる。

これまでに計算した各モデルおよび内挿により得た、 $[(C/E) - 1.0]$ の値をTable 5.12にまとめて示す。さらに、Fig. 5.15には、 C/U^{235} を横軸に取ったグラフを示す。

以前行われた解析¹¹⁾では、SHE-8, 12, 13, 14に対し実験値と計算値の相違はそれぞれ2.5, 2.1, 3.3, 2.7%であることが報告されている。本報の解析と比解すると、SHE-8, 12, 13, 14で-0.9, -0.7, +0.1, +0.2%となることがわかる。SHE-8, 12で多少改善されたものの実験値との比較においては依然2～3%程度の相違があり、使用した断面積、モデル化等についてさらに検討する必要があると考えられる。

Table 5.1 Cross section along A-A' of SHE-8 R-Z model (Total number of meshes:101)

Radial distance (cm)	0	18.0	19.0	29.0	29.159	29.5	39.0	63.0	68.0	73.0	127.0	127.1
Interval (cm)	18.0	1.0	10.0	0.159	0.341	9.5	24.0	5.0	5.0	54.0	0.1	
Mesh interval (cm)	2.0	1.0	0.5	0.159	0.341	0.5	2.0	1.0	1.0	2.0	0.1	
No. of meshes	9	1	20	1	1	19	12	5	5	27	1	
Material	Fuel region			Replaceable reflector region				Permanent reflector region				

Table 5.2 Cross section along A-A' of SHE-12 R-Z model (Total number of meshes:101)

Radial distance (cm)	0	26.0	27.0	38.5	38.762	39.0	47.0	63.0	68.0	73.0	127.0	127.1
Interval (cm)	26.0	1.0	11.5	0.262	0.238	8.0	16.0	5.0	5.0	54.0	0.1	
Mesh interval (cm)	2.0	1.0	0.5	0.262	0.238	0.5	2.0	1.0	1.0	2.0	0.1	
No. of meshes	13	1	23	1	1	16	8	5	5	27	1	
Material	Fuel region			Replaceable reflector region				Permanent reflector region				

Table 5.3 Cross section along A-A' of SHE-13 R-Z model (Total number of meshes:99)

Radial distance (cm)	0	46.0	54.5	54.923	55.0	66.0	68.0	73.0	127.0	127.1
Interval (cm)	46	8.5	0.423	0.077	11.0	2.0	5.0	54.0	0.1	
Mesh interval (cm)	2.0	0.5	0.423	0.077	0.5	1.0	1.0	2.0	0.1	
No. of meshes	23	17	1	1	22	2	5	27	1	
Material		Fuel region			Replaceable reflector region		Permanent reflector region			

Table 5.4 Cross section along A-A' of SHE-14 R-Z model (Total number of meshes:101)

Radial distance (cm)	0	28.0	29.0	39.0	39.358	39.5	49.0	63.0	68.0	73.0	127.0	127.1
Interval (cm)	28.0	1.0	10.0	0.358	0.142	9.5	14.0	5.0	5.0	54.0	0.1	
Mesh interval (cm)	2.0	1.0	0.5	0.358	0.142	0.5	2.0	1.0	1.0	2.0	0.1	
No. of meshes	14	1	20	1	1	19	7	5	5	27	1	
Material		Fuel region			Replaceable reflector region		Permanent reflector region					

Table 5.5 Cross section along B-B' of SHE-8, 12, 13, 14 R-Z models
(Total number of meshes:79)

Axial distance (cm)	0	0.5	2.0	60.0	61.5	63.5	65.0	67.0	115.0	117.0	120.0
Interval (cm)	0.5	1.5	58.0	1.5	2.0	1.5	2.0	2.0	48.0	2.0	3.0
Mesh interval (cm)	0.5	0.5	2.0	1.5	0.5	0.5	0.5	0.5	2.0	0.5	0.5
No. of meshes	1	3	29	1	4	3	4	4	24	4	6
Material	Graphite		Fuel region	Graphite	Fuel region	Graphite	Fuel region	Graphite	Fuel region	Graphite	

Table 5.6 Results of R-Z model calculations

	SHE-8	SHE-12	SHE-13	SHE-14
Axial leakage	0.13007	0.13576	0.13557	0.13609
Radial leakage	0.13707	0.14656	0.16062	0.14736
Total leakage	0.26714	0.28232	0.29619	0.28345
Absorption	0.73286	0.71768	0.70381	0.71655
k_{cal}	1.0322	1.0792	1.0898	1.0794
k_{exp}	1.0057	1.0205	0.99351	0.99721
C/E-1.0 (%)	2.63	5.75	9.69	8.24

Table 5.7 Results of Tri(I) model calculations

		SHE-8	SHE-12	SHE-13	SHE-14
Neutron balance	Absorption in black absorber	0.13210	0.14295	0.16282	0.14279
	Left leakage	0.00442	0.00478	0.00545	0.00479
	Upper leakage	0.00442	0.00478	0.00545	0.00479
	Total absorption	0.86126	0.85308	0.84644	0.85110
	B_g^2 loss	0.12990	0.13735	0.14266	0.13932
	Radial leakage	0.14094	0.15251	0.17372	0.15237
	Net leakage	0.27084	0.28986	0.31638	0.29169
	Net absorption	0.72916	0.71013	0.68362	0.70831
k_{cal}		1.0330	1.0660	1.0429	1.0453
k_{exp}		1.0057	1.0205	0.99351	0.99721
C/E-1.0 (%)		2.71	4.46	4.97	4.82

Table 5.8 Cross section along Z-axis of SHE-8, 12, 13, 14 Tri-Z models (Fuel region)

Axial distance (cm)	0	0.5	63.5	65.0	117.0	120.0
Interval (cm)	0.5	63.0	1.5	52.0	3.0	
Mesh interval (cm)	0.5	15.75	1.5	6.5	3.0	
No. of meshes	1	4	1	8	1	
Material	Graphite	Fuel	Graphite	Fuel	Graphite	

Table 5.9 Results of Tri-Z model calculations

		SHE-8	SHE-12	SHE-13	SHE-14
Neutron balance	Absorption in black absorber	0.13181	0.15119	0.15837	0.14544
	Left leakage	0.00441	0.00506	0.00531	0.00487
	Upper leakage	0.00441	0.00506	0.00531	0.00487
	Total absorption	0.86310	0.86768	0.85100	0.85142
	Bg ² loss	0.12808	0.12220	0.13838	0.13884
	Radial leakage	0.14063	0.16131	0.16899	0.15518
	Net leakage	0.26871	0.28351	0.30737	0.29402
	Net absorption	0.73128	0.71649	0.69263	0.70598
k _{cal}		1.0347	1.0618	1.0587	1.0447
k _{exp}		1.0057	1.0205	0.99351	0.99721
C/E-1.0 (%)		2.88	4.05	6.56	4.76

Table 5.10 Results of Tri(II) model calculations

		SHE-8	SHE-12	SHE-13	SHE-14
Neutron balance	Absorption in black absorber	0.13324	0.14584	0.16318	0.14805
	Left leakage	0.00446	0.00488	0.00547	0.00496
	Upper leakage	0.00446	0.00488	0.00548	0.00496
	Total absorption	0.85250	0.84637	0.84263	0.84270
	Bg ² loss	0.13857	0.14386	0.14642	0.14738
	Radial leakage	0.14216	0.15561	0.17413	0.15797
	Net leakage	0.28073	0.29947	0.32055	0.30535
	Net absorption	0.71926	0.70053	0.67945	0.69465
k _{cal}		1.0168	1.0413	1.0203	1.0182
k _{exp}		1.0057	1.0205	0.99351	0.99721
C/E-1.0 (%)		1.10	2.04	2.70	2.10

Table 5.11 Index of fuel volume and surface

		SHE-8	SHE-12	SHE-13	SHE-14
No. of fuel rods (n)		73	43	37	42
Fuel volume index	Experiment ($n \times \pi r^2$)	1135	668.8	575.5	653.2
	R-Z model	2671	4720	9476	4866
	Tri(I) model	2671	1573	1354	1537
	Tri(II) model	667.8	393.3	338.5	384.2
Fuel surface index	Experiment ($n \times 2\pi r$)	1020	601.0	517.0	587.0
	R-Z model	183.2	243.5	345.1	247.3
	Tri(I) model	1563	920.0	792.0	899.0
	Tri(II) model	782.7	461.0	396.7	450.0

Table 5.12 Values of [(C/E)-1.0] (%) from each model and interpolation

		SHE-8	SHE-12	SHE-13	SHE-14
Calculated	R-Z model	2.63	5.75	9.69	8.24
	Tri(I) model	2.71	4.46	4.97	4.82
	Tri-Z model	2.88	4.05	6.56	4.76
	Tri(II) model	1.10	2.04	2.70	2.10
Interporated	Volume (by 2 cases)	1.5	2.6	3.2	2.7
	Volume (by 3 cases)	1.7	3.0	3.6	3.1
	Surface (by 2 cases)	1.6	2.8	3.4	3.0
Average		1.6	2.8	3.4	2.9

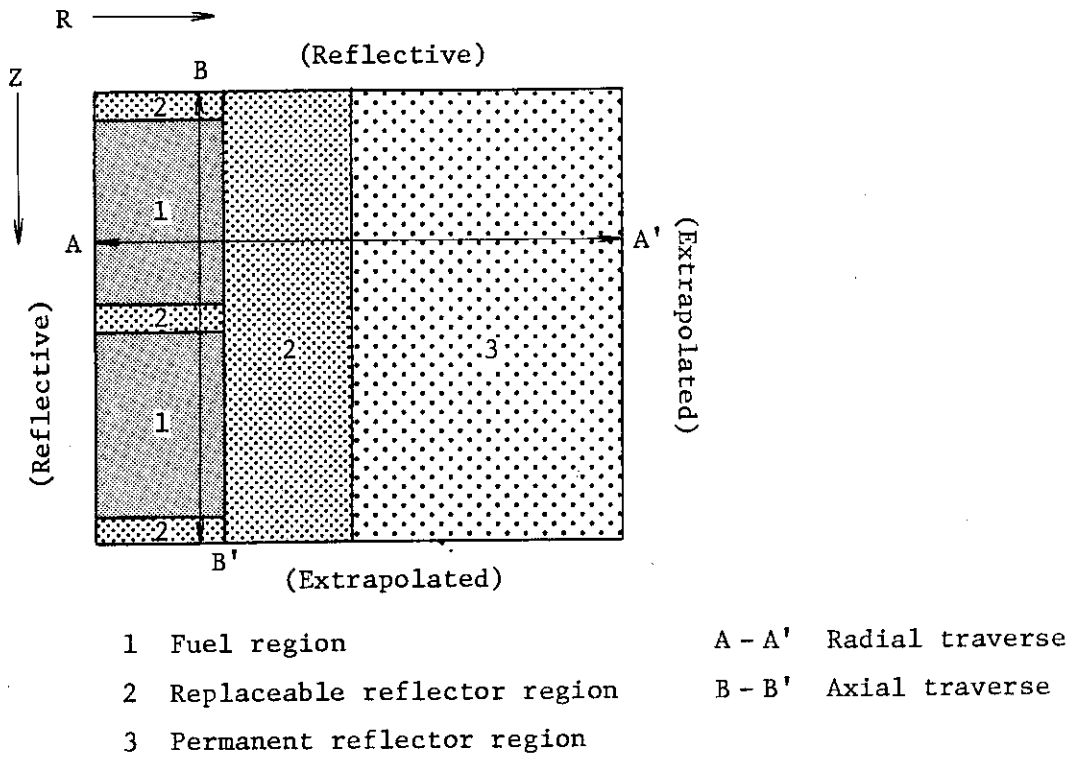


Fig. 5.1 Material regions in R-Z model (SHE-8,12,13,14)

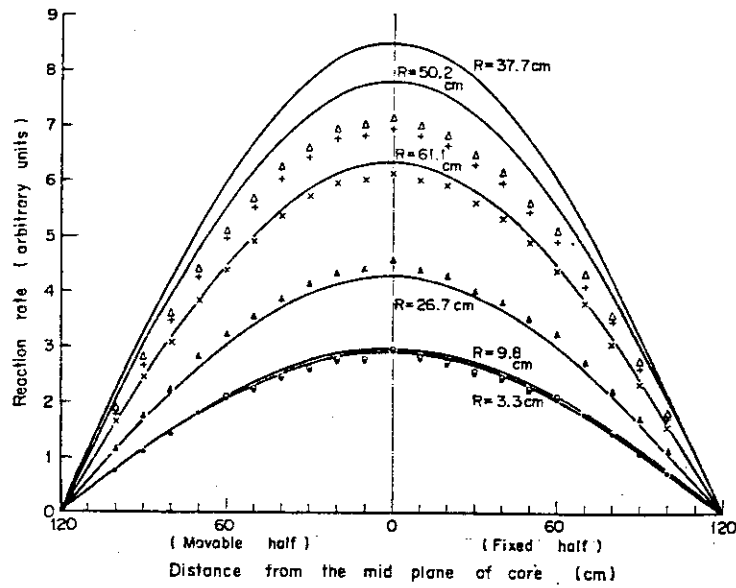
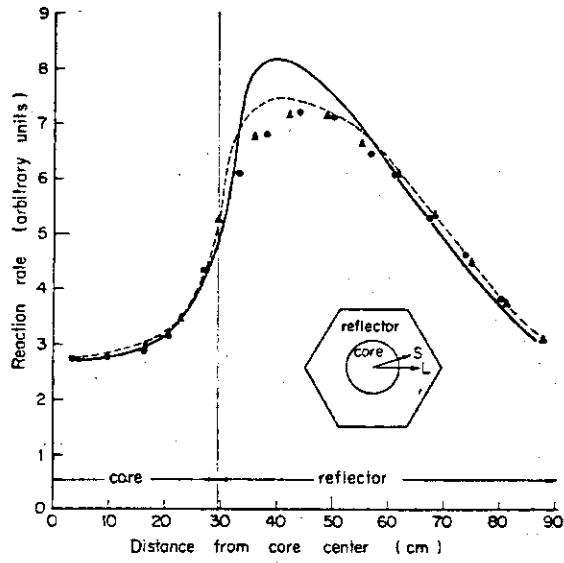


Fig. 5.2 Neutron flux distribution in SHE-8 ⁹⁾

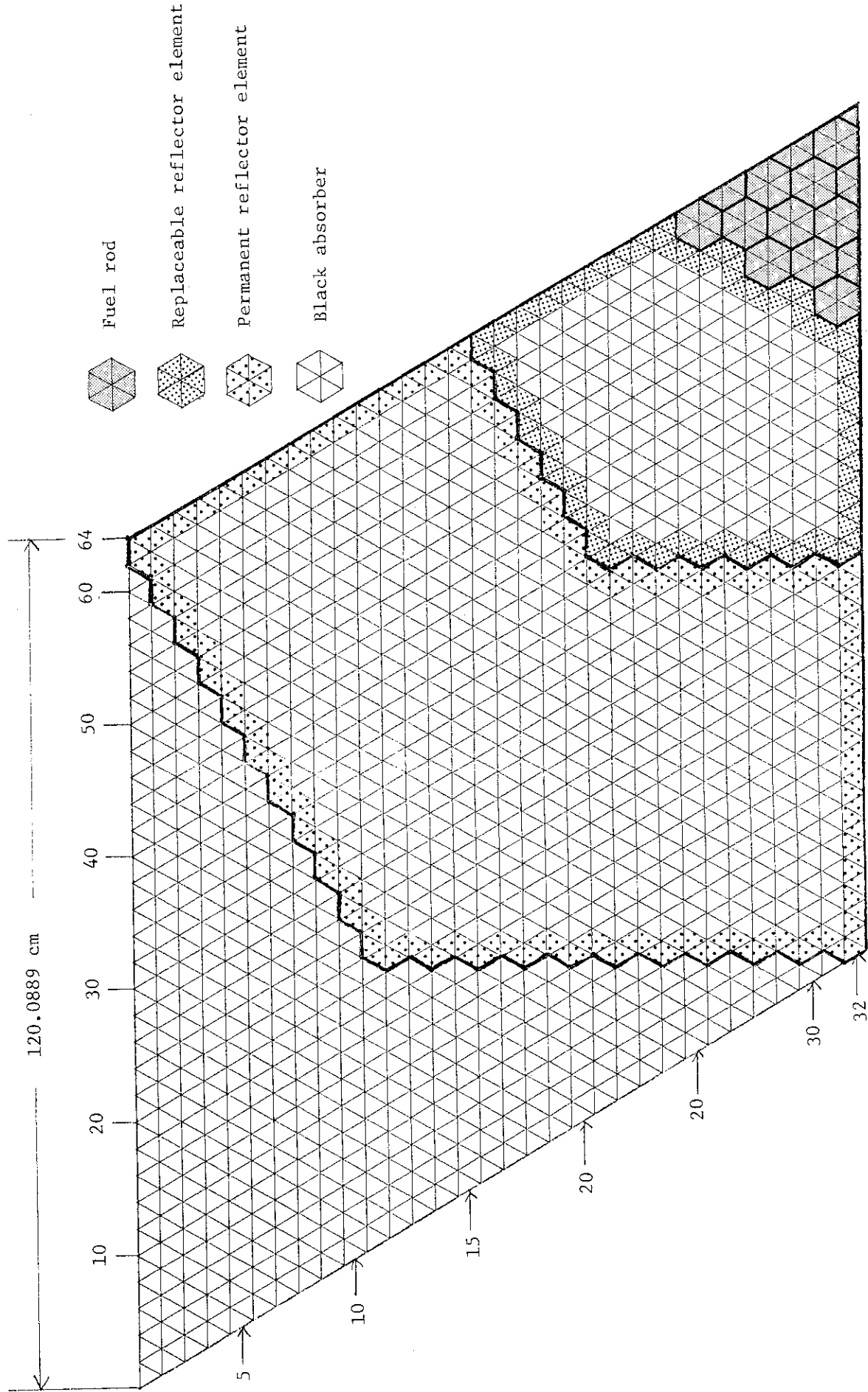


Fig. 5.3 Material regions in SHE-8 Tri(I) model

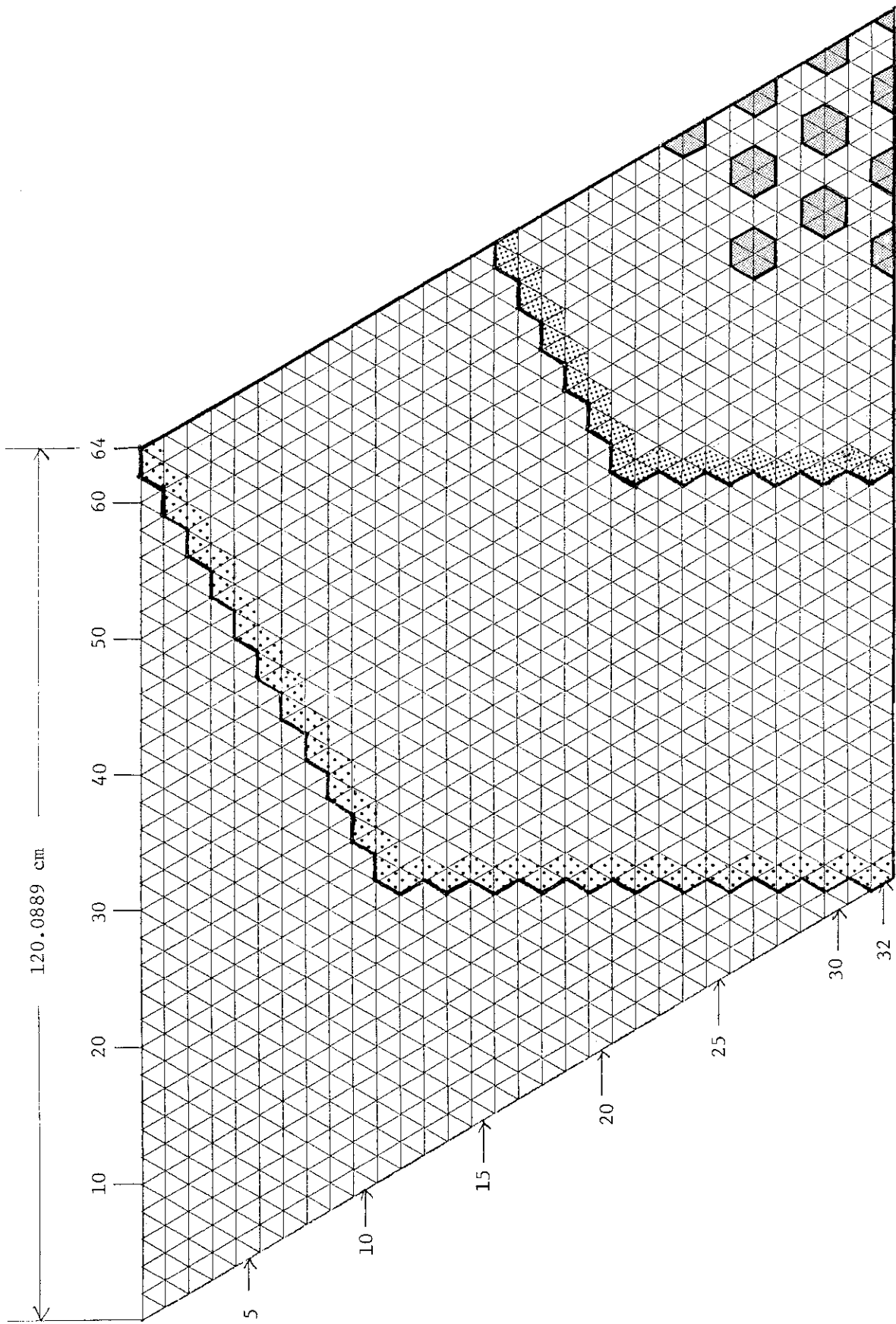


Fig. 5.4 Material regions in SHE-12 Tri(I) model

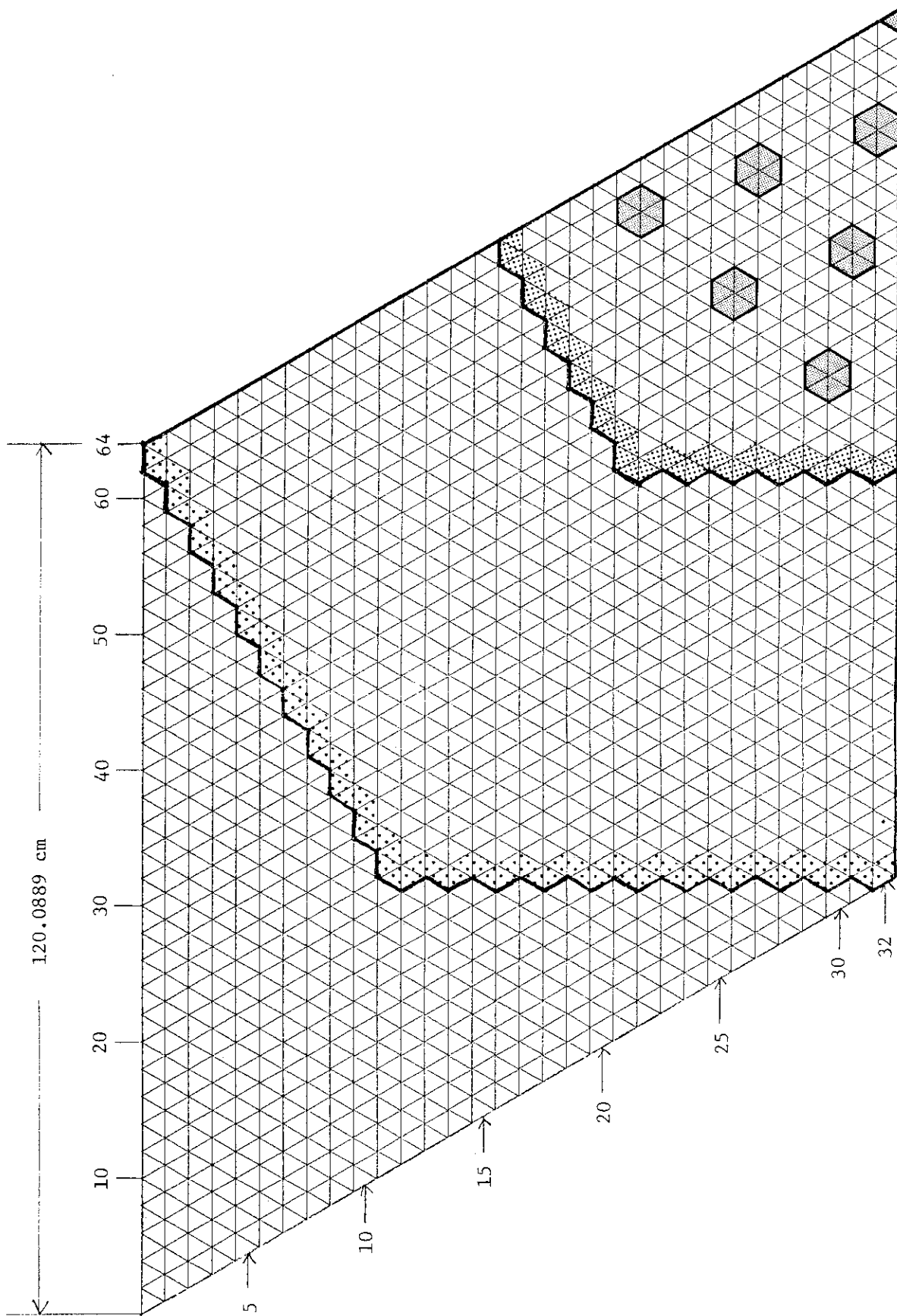


Fig. 5.5 Material regions in SHE-13 Tri(I) model

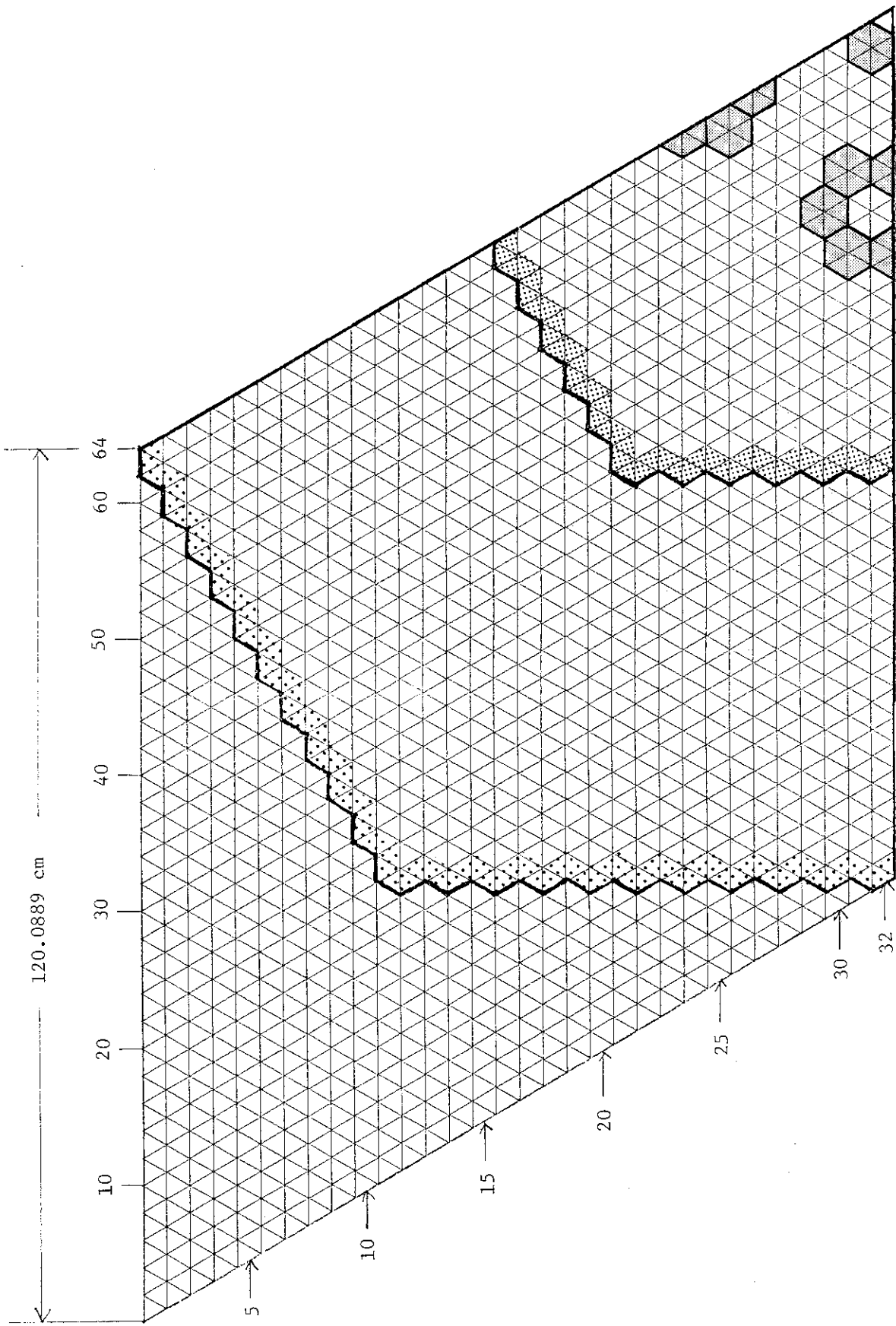


Fig. 5.6 Material regions in SHE-14 Tri(I) model

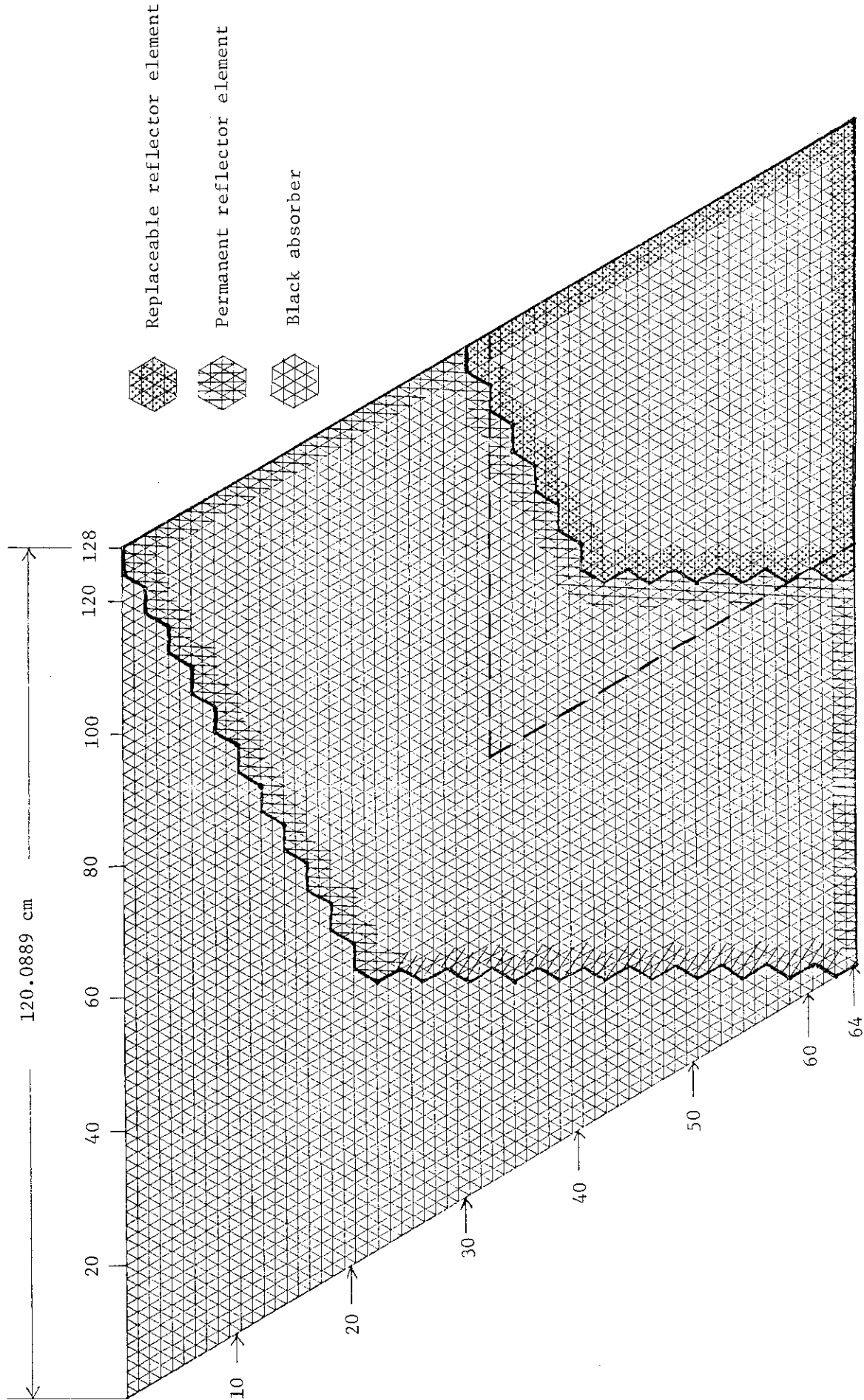


Fig. 5.7 Material regions in SHE-8, 12, 13, 14 Tri(II) models

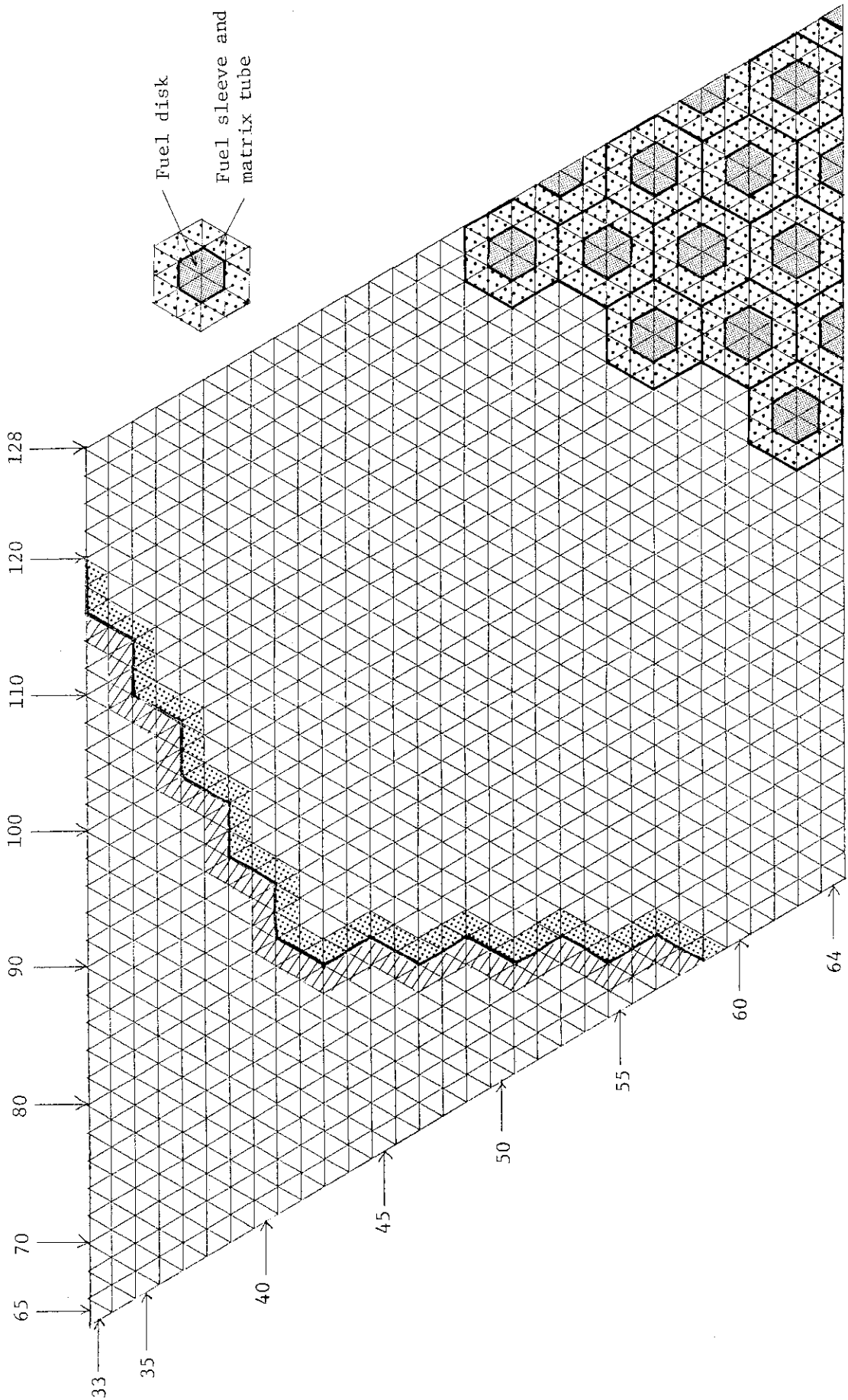


Fig. 5.8 Magnified material regions in SHE-8 Tri(II) model

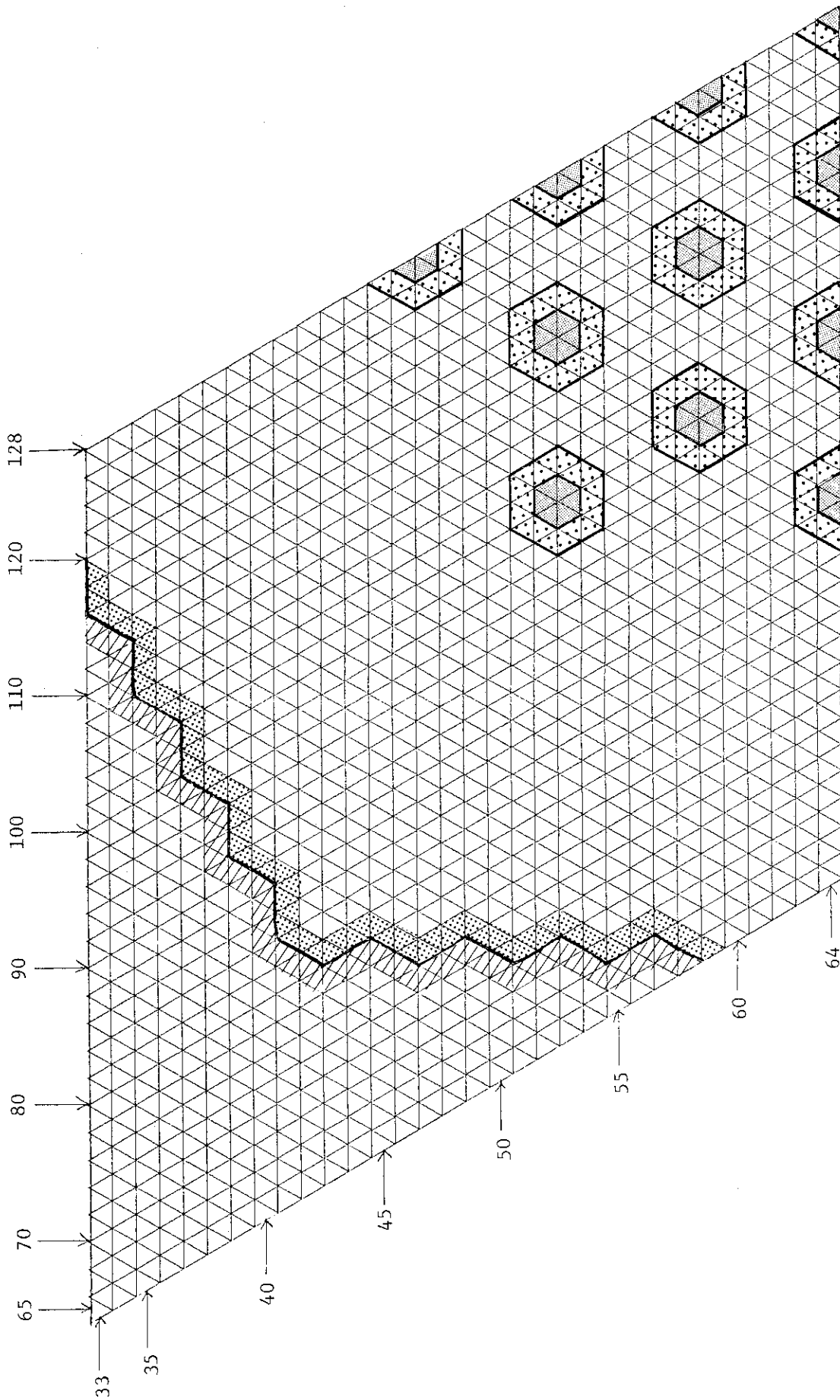


Fig. 5.9 Magnified material regions in SHE-12 Tri(II) model

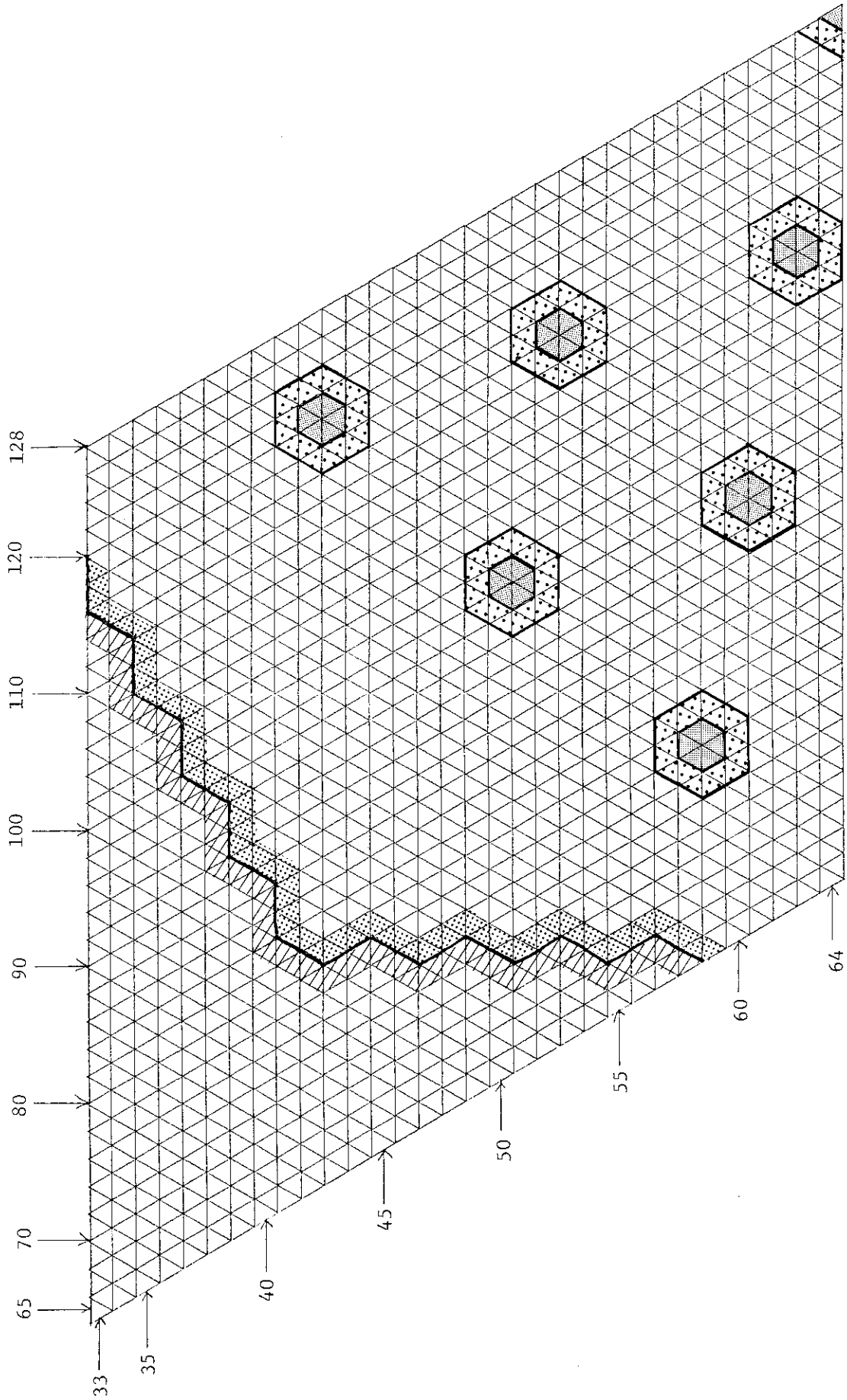


Fig. 5.10 Magnified material regions in SHE-13 Tri(II) model

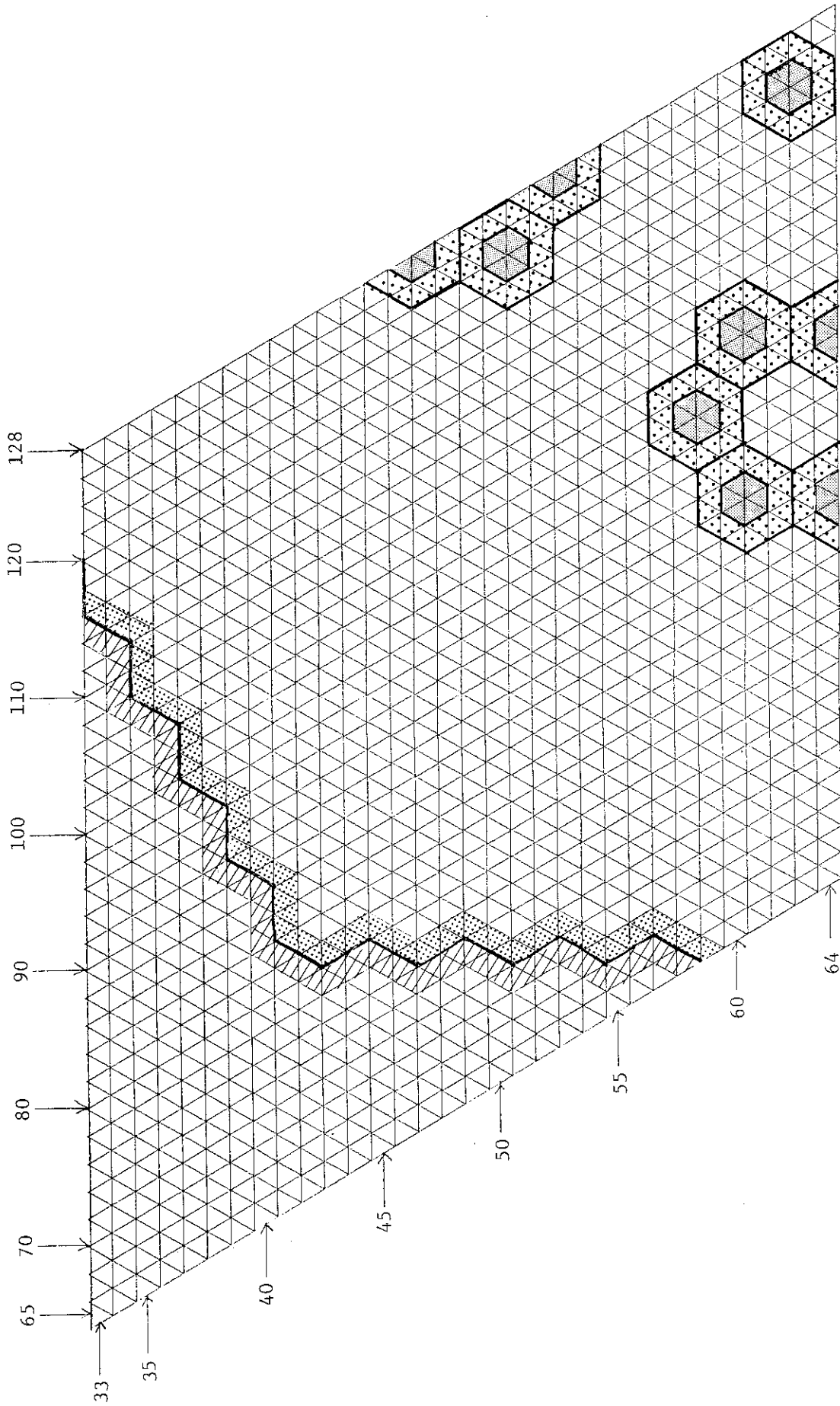


Fig. 5.11 Magnified material regions in SHE-14 Tri(II) model

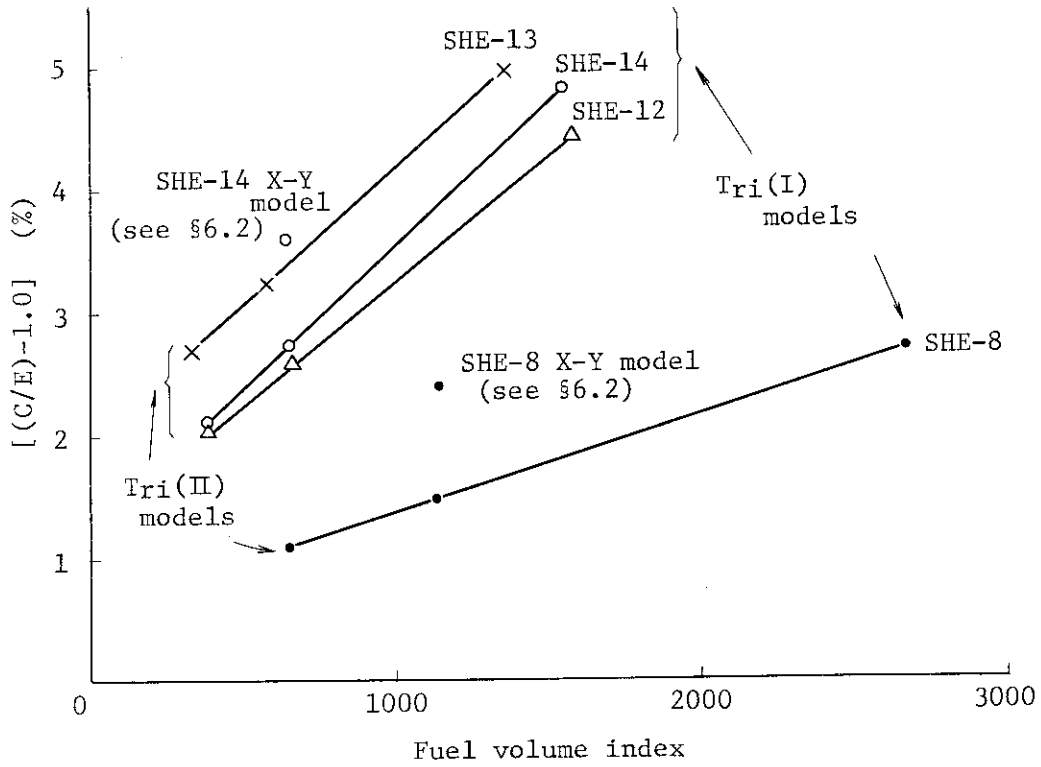


Fig. 5.12 Interpolation by Tri(I) and Tri(II) models (Volume)

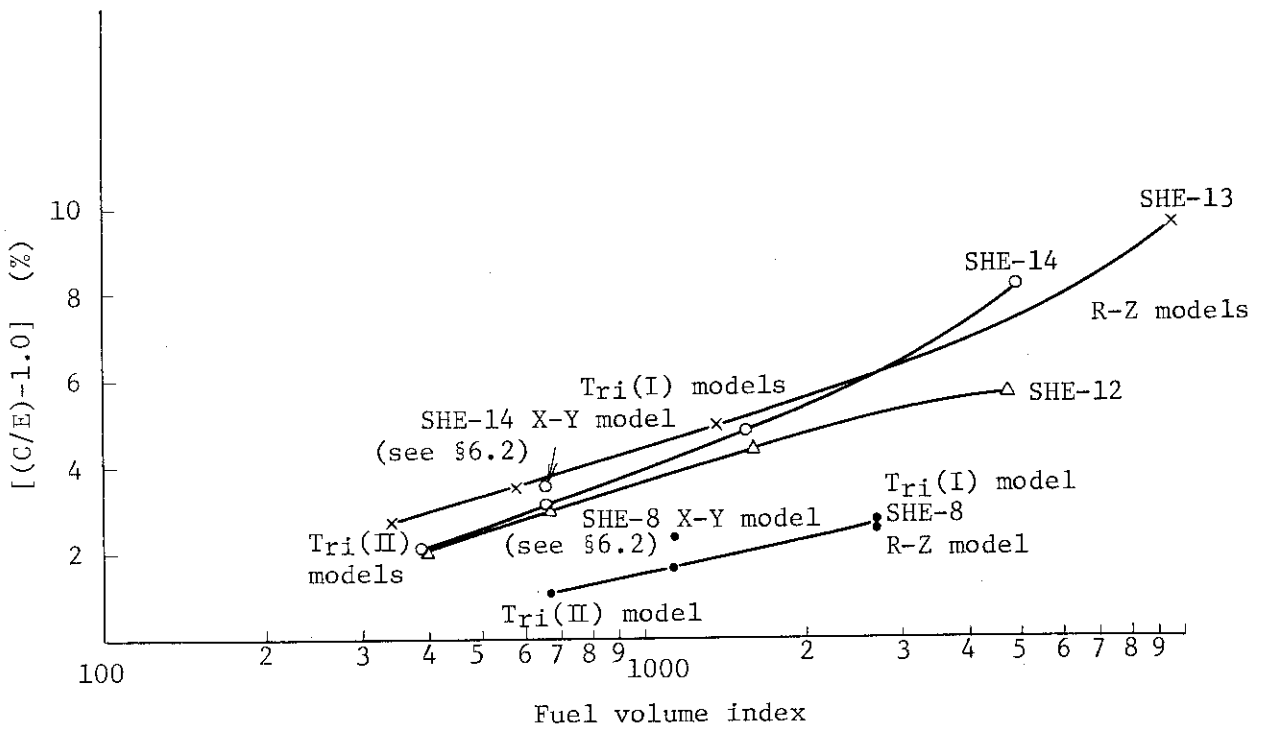


Fig. 5.13 Interpolation by R-Z, Tri(I) and Tri(II) models (Volume)

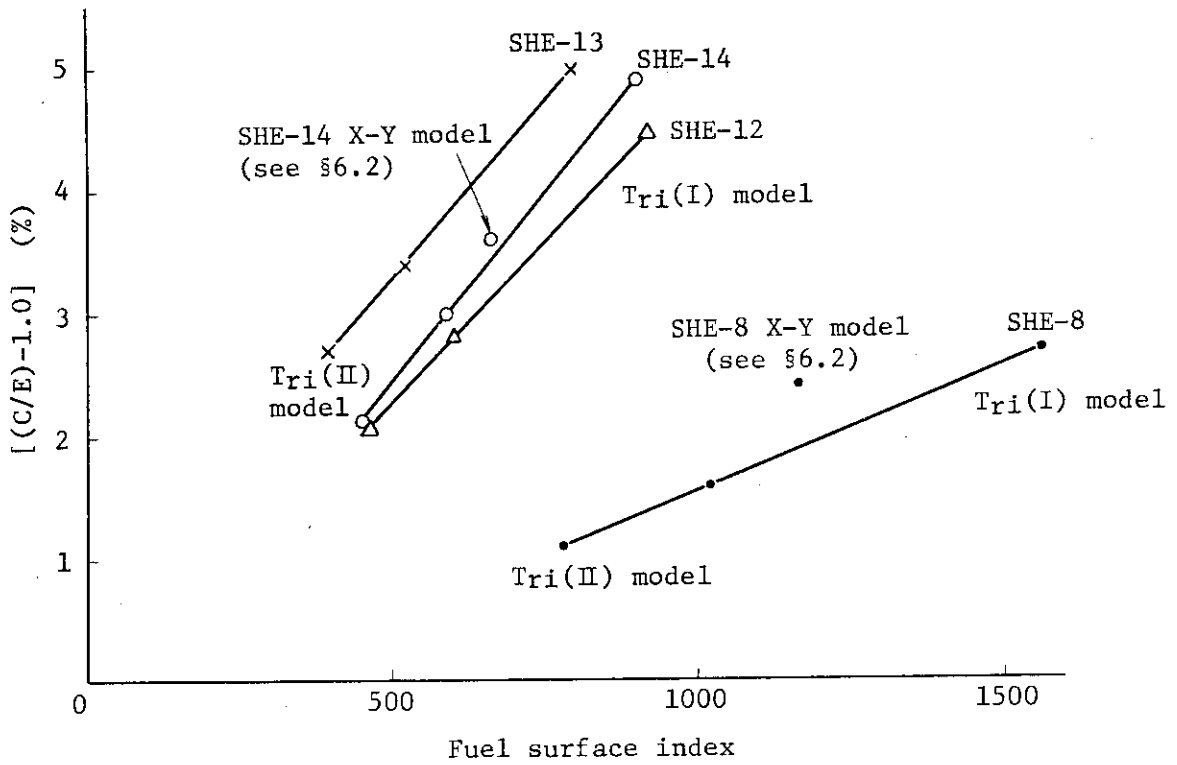


Fig. 5.14 Interpolation by Tri(I) and Tri(II) models (Surface)

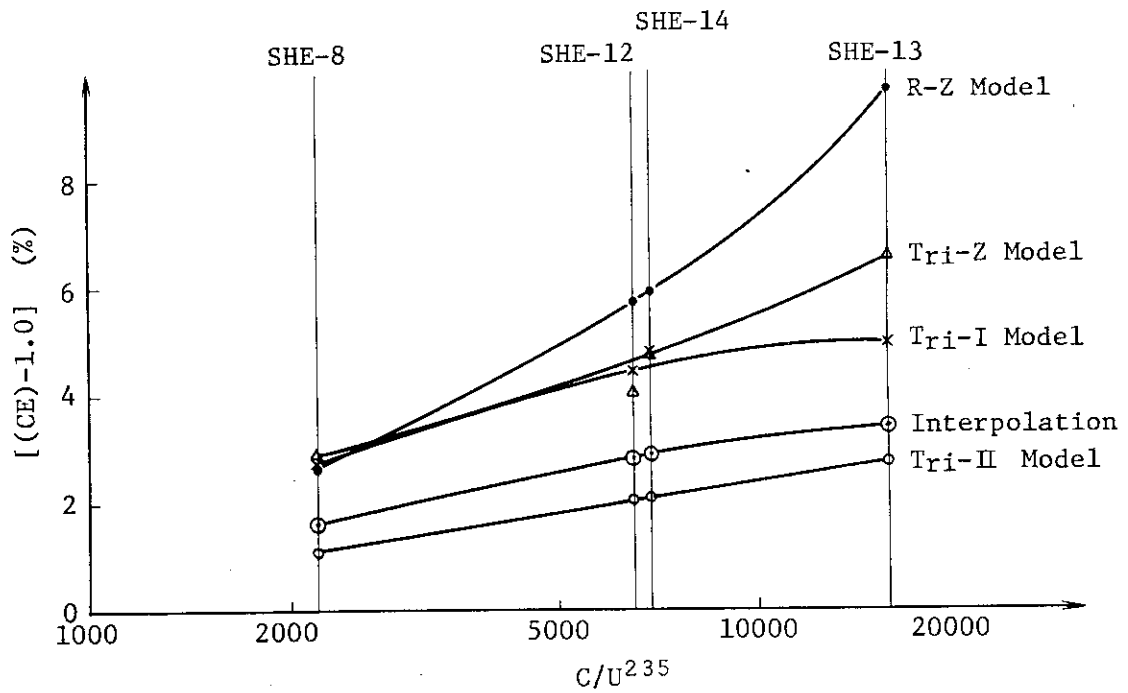


Fig. 5.15 Comparison of $[(C/E)-1.0]$ v.s. $C/U^{2.35}$ values

6. 各種補正計算

前章の計算と内挿により得られた実効増倍率を補正するための要因は各種存在すると思われるが、主なものとして以下のようなものが考えられる。

- a. 前節の計算は総て拡散計算コード CITATION で行われており、燃料と減速材、体系と外界との境界付近の輸送効果については考慮していない。
- b. SHE 体系は、半径の等しい円柱状要素を多数組合わせて炉心が構成されている。各要素間には、三角形の空気ボイド部が存在しており、体積にして全体の約 9.3% を占めている。このボイドを通して軸方向にストリーミングによりもれる中性子の効果は本解析では考慮していない。
- c. SHE 各体系を、CITATION コードで計算するために行ったモデル化による効果。R-Z モデル, Tri モデル I, Tri モデル II, Tri-Z モデルとも一長一短があり、形状の完全なモデル化は困難である。また、固定反射体外周の鉄棒等は、これらのモデルに考慮されていない。
- d. 拡散計算時のメッシュ効果。
- e. 拡散計算時のエネルギー群数およびそのエネルギー構造による効果。
- f. 軸方向形状バックリング値の妥当性。
- g. 18 群定数を作成する際に、燃料および反射体領域とも、炉心スペクトルで縮約したための効果。

本章では、これらのうち、b のストリーミング効果については、モデル化が困難であり、ここでは検討していない。詳細な解析には、形状の取扱いに制約の少ないモンテカルロ計算コード等を導入する必要がある。また、e の群数および群構造の効果については、別の機会に詳細な議論をするものとして、本報では取扱っていない。以下の節においては、a ~ g の項目中から上の b および e を除いた項目について議論する。まず、f の軸方向形状バックリング効果、c のモデル化の効果および a の輸送効果について、それぞれ 6.1, 6.2, 6.3 節で詳細な議論を行い、次に残りの d, g およびその他の効果について、6.4 節で議論する。

6.1 軸方向バックリング効果

軸方向バックリング値については前章で述べたように、Tri モデル I と Tri-Z モデルを比較することにより、SHE-13 で特にその効果の大きいことが判明している。ここではモデル化の比較的容易な SHE-8 体系に対する、軸方向バックリング値について考察する。

前章で説明した Tri モデル I と Tri-Z モデルの結果を比較すれば、軸方向バックリング値の妥当性に対するおおよその見当はつくが、両モデルでは燃料棒軸方向に存在する黒鉛ディスクの取扱いが異なり、さらに、Tri-Z モデルでは、計算機容量の関係から Z 軸方向のメッシュ間隔が最大 15.75 cm と粗く、両者の比較による軸方向バックリング効果の詳細な議論には多少無理があるものと考えられる。そこで、前章の R-Z モデルでは非均質に取扱っていた黒鉛ディスク

を、ここでは軸方向バックリング値のみについて議論するため、軸方向に均質化したモデルを作成する。この新たなモデルを、R-Z'モデルとし、さらに、このモデルと物質構成の等しいR- θ モデルを作成する。これら両モデルを比較することにより、前章で用いた軸方向バックリング値の妥当性について検討する。

計算条件として、群定数はこれまでと同様の18群定数を用いている。群定数作成用原子数密度は、燃料部について軸方向に均質化しているTable 4.18に示したものを使用する。メッシュ数は、両モデルとも41×24に統一している。特にR方向については、メッシュ数およびメッシュ間隔とも、両モデルで等しくしている。また、均質化燃料領域等価半径(29.159 cm)、可動反射体領域等価半径(68.0 cm)、固定反射体領域等価半径(127.1 cm)は、前章のR-Zモデルで使用したものと同一であり、黒鉛ディスクの均質化による効果についても検討可能である。

軸方向バックリング効果は、本R-Z'モデルおよびR- θ モデルにより、拡散計算同様、輸送計算でも検討している。そのため、R方向のメッシュに対するデータは各メッシュ点毎に与えている。つまり、CITATIONおよびTWOTRAN両計算コードに内蔵されている、ある与えられた距離をある与えられたメッシュ点数で分割する方法が、R方向に対し両コード内で等距離又は等体積のどちらの方法で分割されているかが明確でなく、メッシュ点位置の差異による結果の相異を避けるために行っている。ただし、Z方向および θ 方向については、距離と体積による分割の方法による差異はないので、両計算コードでの自動分割されたメッシュ点位置は等しいものと考えられ先のような考慮は不用である。ここで、計算の収束判定値は、これまで同様、CITATION、TWOTRAN両コードとも、中性子束に対し、 10^{-4} 以下、固有値に対し、 10^{-5} 以下としている。R-Z'およびR- θ モデル計算形状を、Fig. 6.1に示し、メッシュ構成を、同図中A-A', B-B', C-C'の各断面について、Table 6.1に示す。

実際の計算時に使用したバックリング値は、CITATIONコードに対しては、前章と同じ値(1.6616×10^{-4})を用いている。一方、TWOTRANコードの場合には、炉心高さを入力することになっており、高さ240 cmを入力とし、S₂による計算を行う。計算結果をTable 6.2に示す。同表中、TWOTRANコードでの中性子バランスは、R-Zモデル計算時には、Z方向LeakageとしてVertical Leakage、R方向には、Horizontal Leakageの値を採用している。R- θ モデル計算時には、軸方向のもれによる損失項が不明であり、TWOTRANコードによるR- θ モデルの中性子バランスは、多少不完全なものとなっている。

同表の結果より、CITATIONコードの計算に用いたバックリング値による実効増倍率への効果は、0.01%程度であり、これまで使用してきた軸方向バックリング値は、妥当であると考えられる。一方、TWOTRANコードの場合には0.13%程度の差異があり、CITATIONコードの場合よりも大きいことがわかる。TWOTRANコードでは、バックリング高さ h_{Bg} を入力すると、

$$\sigma_a, h_{Bg} = \frac{\sigma_t}{3} \left(\frac{\pi}{h_{Bg} \cdot \sigma_t + 1.4209} \right)^2 \quad (6-1)$$

なる式を用いた計算が行われるようになっているが²⁾、より良いR- θ とR-Zモデルとの一致を得るには、この高さをうまく調整する必要がある。次に同表の結果を前章で計算した、R-Z、

Tri (I), Tri-Z 各モデルの値と比較してみる。Tri モデル I の実効増倍率を, 0.0001だけ増加させ, 1.0331 をバックリング効果補正後の値とすれば, R-Z と R-Z' モデル間および, Tri (I) と Tri-Z モデル間の実効増倍率の差はそれぞれ, 0.0015, 0.0016 と, かなり良い一致を示している。これらの値は, 上の二組のモデルに共通した相異, つまり, 燃料棒軸方向に存在する黒鉛ディスクの取扱いの差による効果であると考えられる。燃料棒軸方向に存在する黒鉛ディスクを非均質に取扱った, R-Z や, Tri-Z モデルの方が, 均質化を行った R-Z' や, Tri (I) モデルよりも実効増倍率を, 0.0015~0.0016 程度大きくすることがわかる。一方, R-Z と Tri-Z モデル間および, R-Z' と Tri (I) モデル間を比較すると, それぞれ, -0.0025 および -0.0024 の実効増倍率の差が見られる。この二組のモデルに共通の差異は, 燃料領域および反射体領域の形状である。つまり, R-Z や R-Z' モデルのように両領域を円柱で近似した際には, Tri-Z や Tri-I モデルのようなモデル化に対し, 実効増倍率は, 0.0025~0.0024 の増加となる。以上の関係を Table 6.3 に示す。さらに, これらの比較から, Tri-Z モデルの軸方向メッシュ最大間隔 15.75 cm は, 実効増倍率の値を大きく変化させる程, 長すぎるものではないことがわかる。

以上のことから, 軸方向バックリング効果としては, SHE-8 体系について, これまで使用してきたバックリング値は妥当であると言えよう。ただし, 同じ SHE-8 体系でも, 本節で扱ったモデルは総て燃料領域が均質なものであるので, Tri モデル II のように, 燃料とスリーブ等が区別されたモデルでも妥当であるかどうかは問題が残る。さらに, SHE-8 以外の体系についても, 同様の検討が必要であろう。

参考のため, TWOTRAN 計算により得られる R-Z' モデルの中性子束分布を, 第 2, 8, 15, 16, 18 群について, それぞれ, Figs. 6.2~6.6 に示す。

6.2 モデル化の効果

SHE 各体系のモデル化を行う際, 各集合体要素間の間隙空気部を通してもれるストリーミング効果を CITATION コードで考慮することは, 形状的にも困難である。本節では, この効果以外によるもれの効果とモデル化形状について考察する。

まず, 前節で議論した軸方向バックリング効果を補正した R-Z' モデルの実効増倍率および, Tri モデル I および II の実効増倍率をそれぞれ比較し, モデル化による実効増倍率への効果について考察する。さらに, モデル化に伴う燃料棒体積の増減と実効増倍率の効果をより詳細に議論するために, 燃料棒体積を正確に保存した, SHE-8 の X-Y モデル形状を作成し, 他のモデルと燃料棒体積以外は同一の条件で, CITATION コードによる実効増倍率を求め, 比較を行う。X-Y モデルの形状を, Figs. 6.7, 6.8 に示す。また, 計算結果を, Table 6.4 に示す。同表ではさらに, SHE-14 の可燃性毒物棒反応度値解析の際に基準炉心として用いた, SHE-14 炉心 1/2 X-Y モデルの CITATION コードによる実効増倍率計算結果も同時に示している。このとき, 収束判定は従来のモデルに対するものより中性子束, 実効増倍率に対し, 一桁づつきびしいものとなっており, それぞれに対し 10^{-5} および 10^{-6} 以下という値を使用している。

SHE-8 および 14 につき, R-Z' モデル (SHE-14 では R-Z モデル), Tri モデル I, Tri-Z モデル, X-Y モデル, Tri モデル II の各モデル実効増倍率計算結果を比較のため,

Table 6.5 に示す。同表中、Tri モデル I と、Tri-Z モデルに見られる相異は、前節での議論のように燃料棒軸方向に存在する黒鉛ディスクの非均質効果によるものと考えられる。この効果は、SHE-8 で、非均質性を考慮した際、実効増倍率を、0.0016 増加させるが、SHE-14 では逆に、0.0006 の減少となる。ただし、同表中の SHE-14 に対する実効増倍率には SHE-8 に対するものと異なり、前節で議論した軸方向バックリング効果についての補正がなされておらず、この効果も同時に混在する。また、R-Z モデルおよび Tri-Z モデルを除けば、燃料棒軸方向の構成は同様であり、各モデル間の相異は総て半径方向に対するモデル化形状の相異による効果であると考えられる。ここで、SHE-8 の R-Z' モデルと、Tri (I) モデルの実効増倍率を比較すると、0.24 % も異っている。これら両モデルでは、外周の形状をそれぞれ円と六角柱で表現し、さらに燃料部の形状を、R-Z' モデルでは円柱で表現し、Tri (I) モデルでは、円に近い六角形の集合体で表現している。これだけの形状の相異で、0.23 % の差を生じており、SHE-1 体系では、特に全体の形状を実際に忠実にモデル化する必要があると考えられる。

次に、燃料棒の形状について、Tri モデル I および II と X-Y モデルによって考察する。X-Y モデルに対する燃料棒体積指標および燃料棒表面積指標により、前章の Figs. 5.12~5.14 へ実効増倍率をプロットしてみれば、図中の内挿用直線および曲線から、かなり離れてしまうことがわかる。前章で求めた内挿値と比較すると、SHE-8 では、1.6 % から 2.42 % へと 0.82 % の増加を示し、SHE-14 では、2.9 % から 3.61 % へと 0.71 % の増加を示している。ただし、X-Y モデルでは、SHE 外周形状および燃料棒等の各集合体要素形状を総て、正方形又は長方形で近似しており、このための効果も多少あるものと考えられ、X-Y モデルによる実効増倍率を計算値として採用するのは困難である。したがって、燃料棒のモデル化に対しては、その形状および体積を、さらに正確に取扱える計算モデルを作成し、これまでの燃料棒モデル化形状と比較検討する必要がある。

以上より、燃料棒形状の取扱いに対しては、これまでの計算モデルでは実効増倍率を詳細に議論する際に多少不十分な面があり、今後、燃料棒形状および体積さらに体系全体の形状も保存できる計算モデルを作成する必要がある。

6.3 輸送効果

本節では、拡散計算および輸送計算を、それぞれ CITATION コードと TWOTRAN コードを用いて行い、両コードより得られる実効増倍率を比較し、輸送効果について考察する。実際には、輸送計算を実効増倍率が変化しなくなるまで、 S_n 次数を増加させて行い (P_0 計算)、このときの変化分を輸送効果と考え、拡散計算で求めた実効増倍率を補正する。

計算は、6.1 節で使用した SHE-8 の R-Z' モデルを用いて行う。このモデルを用いた CITATION コードによる拡散計算では、実効増倍率は 1.0307 であり、このときの中性子束および固有値に対する収束条件は、それぞれ 10^{-4} および 10^{-5} 以下である。これと同様の収束条件で、TWOTRAN コードによる輸送計算を S_2 、 S_4 について行う。このときの計算結果を、Table 6.6 に示す。これから、 S_2 と S_4 による実効増倍率の差は、0.9 % もあり多少大きい。また、 S_4 計算で得られた実効増倍率は、1.0313 であり、拡散計算により得た値 1.0307 と非常に近い値と

なっている。したがって、輸送効果の補正は、 S_4 計算を拡散計算と対応させて行うのが適当であると考えられる。よって、 S_6 , S_8 , ……等の計算を行い、実効増倍率の変化が見られなくなる所まで S_n 次数を増加させ、そのときの実効増倍率と S_4 のものとの差をとって、輸送効果の補正值とする。

このように、拡散計算と輸送計算により得られる実効増倍率を直接比較せず、輸送計算値の相対変化分により輸送効果を議論しているのは、TWOTRAN コードで絶対的精度の良い実効増倍率を求めるのが比較的困難なためである。経験上、収束判定値が中性子束および実効増倍率の両者に対し、 10^{-5} 以下であれば十分な精度で実効増倍率を得ることができる。しかし、このような収束条件に対し必要な計算時間は多くの場合、数時間から十数時間となり実際的ではない。通常このような場合、収束判定値を少しゆるくして計算が行われるが、TWOTRAN コードでは収束判定値があまくなると、計算値の絶対的精度を保証することが困難となる傾向が見られる。このことは、Table 6.6 と 6.7 の計算結果を比較することによりわかる。つまり、収束判定値が中性子束、実効増倍率に対しそれぞれ 10^{-4} , 10^{-5} 以下であるとき、計算値は S_2 に対し 1.0403, S_4 に対し 1.0313 であるが、一方、収束判定値がそれぞれ 10^{-3} , 10^{-4} 以下と一桁変化した時、計算値は 1.0297, 1.0193 となり、実効増倍率が 1% 以上変動してしまうのがわかる。このことから、TWOTRAN コードでは、収束判定値をかなり厳しくしない限り、得られる実効増倍率の絶対的精度を、その収束条件で示される桁まで保証することは困難であると言える。

一方、先の二表で、 S_2 と S_4 の計算値の差を収束判定値と比較すると、中性子束に対し 10^{-4} , 実効増倍率に対し 10^{-5} 以下の場合、この差は 0.0090 である。また一桁、判定値をゆるくした場合にも、この差は 0.0104 となりほぼ等しい。したがって、 S_n の変化による実効増倍率の変化分は、収束判定値に大きく左右されないと仮定し、Table 6.7 の S_4 と S_{10} の実効増倍率の差、-0.11% を輸送効果による補正值とする。

6.4 その他の効果

SHE の可動反射体黒鉛棒の両端には通常エンドキャップという黒鉛製のフタがなされていないなければならない。しかし、多くの可動反射体黒鉛棒に対し、このエンドキャップが実験時に取り付けられていない場合もあり、このときには可動反射体部全長が、240 cm より多少短くなったのと同様の状況になっている。実際のエンドキャップは形状が複雑でモデル化が困難であり、ここでは SHE-8 体系の R-Z モデルにおいて、可動反射体部の両端を 3 cm ずつ短かくし全長を 234 cm として、計算を行っている。計算結果を Table 6.8 に示す。同表により、エンドキャップのない場合は、実効増倍率が多少小さくなるのがわかる。この効果に対する炉物理研での実験も行われており、SHE のどの体系かは不明であるが、0.3% 実効増倍率が減少することがわかっている。計算値も同じく、0.3% の減少を示しており、エンドキャップ効果として、-0.3% を採用する。

メッシュ効果については前章で使用したモデルのうち、R-Z, Tri (I), Tri (III) モデルについては、メッシュ間隔は十分小さく特に問題とはならないと考えられる。Tri-Z モデルについては、Z 軸方向メッシュが最大で 15.75 cm もあり、多少間隔が大きいが、先の 6.1 節の議論により

実効増倍率への影響は殆んどない。また、本章で用いた、R-Z'モデルやX-Yモデルについては、同一モデルによる相対比較が主目的であったので、メッシュ効果に対し十分な注意を払っていない。しかし、メッシュ間隔はR-Z'モデルで最大5 cm、X-Yモデルで最大14 cmであり、先のTri-Zモデルの例と合わせ、特に大きな問題とはならぬものと考えられる。

さらに、各種実験データのバラツキ等による効果については、先に検討しており、結果のみをTable 6.9に示す¹²⁾。本表中より、補正用項目として、固定反射体領域外周にある鉄棒の効果と、炉心と反射体でのスペクトルの相異による効果を採用する。これらは、それぞれ+0.08%、-0.17%の補正量となる。

6.5 SHE-8に対する全体的補正

6.1節より6.4節までにおいて議論した補正項と補正量をTable 6.10に示す。正味の補正量は、-0.34%であり、Table 5.12に示された内挿によるSHE-8の、 $[(C/E)-1.0]$ 値は、+1.26%となる。

Table 6.1 Cross sections along A-A', B-B' and C-C' of SHE-8 R-Z' and R-θ models

(1) Cross section along A-A' of R-Z' and R-θ models

Radial distance (cm)	0	27.5	29.159	30.0	65.0	68.0	70.0	125.0	127.1
Interval (cm)	27.5	1.659	0.841	35.0	3.0	2.0	55.0	2.1	
Mesh interval (cm)	2.5	1.659	0.841	2.5	3.0	2.0	5.0	2.1	
No. of meshes	11	1	1	14	1	1	11	1	
Material	Fuel region		Replaceable reflector region			Permanent reflector region			

(Total number of meshes:41)

(2) Cross section along B-B' of R-Z' model

Axial distance (cm)	0	120.0
Interval (cm)	120.0	
Mesh interval (cm)	5.0	
No. of meshes	24	
Material	Permanent reflector region	

(Total number of meshes;24)

(3) Cross section along C-C' of R-θ model

Angle θ (Radian)	0	0.7854
Interval (Radian)	0.7854	
Mesh interval (Radian)	3.2725-2	
No. of meshes	24	
Material	Permanent reflector region	

(CITATION)

Angle θ (θ°/360°)	0	0.125
Interval (θ°/360°)	0.125	
Mesh interval (θ°/360°)	5.2083-3	
No. of meshes	24	
Material	Permanent reflector region	

(TWOTRAN)

Table 6.2 Results of R-Z' and R-θ model calculations

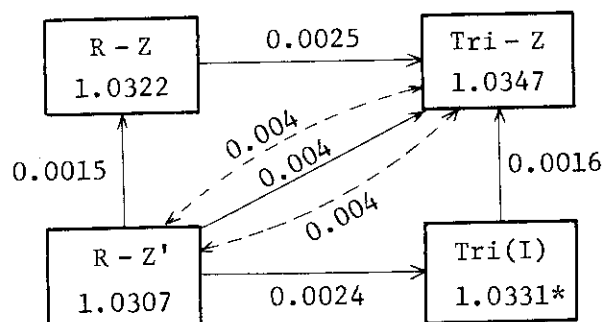
Calculational code		CITATION		TWOTRAN	
SHE-8 model		R-Z'	R-θ	R-Z'	R-θ
Neutron balance	Axial leakage*	0.13096	0.13132	0.13403	—
	Radial leakage	0.13766	0.13750	0.12946	(0.13247)
	Total leakage	0.26862	0.26882	0.26349	—
	Absorption	0.73138	0.73118	0.73620	(0.86683)
k _{cal}		1.0307	1.0306	1.0403	1.0417
k _{exp}		1.0057	1.0057	1.0057	1.0057
C/E-1.0 (%)		2.49	2.48	3.44	3.58
(R-θ)/(R-Z) (%)		99.99		100.13	

* Corresponds to Bg² loss in R-θ model

Table 6.3 Relation of k_{eff} values among SHE-8 R-Z, R-Z', Tri(I) and Tri-Z models

Model	k _{cal}	Model	k _{cal}
R-Z	1.0322	Tri(I)	1.0331*
R-Z'	1.0307	Tri-Z	1.0347
Difference	0.0015	Difference	0.0016

Model	k _{cal}	Model	k _{cal}
Tri-Z	1.0347	Tri(I)	1.0331*
R-Z	1.0322	R-Z'	1.0307
Difference	0.0025	Difference	0.0024



* Δk value of 0.0001 is added to compensate the effect of axial buckling.

Table 6.4 Results of SHE-8, 14 X-Y model calculations

System		SHE-8	SHE-14
Neutron balance	Bg ² loss	0.13608	0.14802
	Radial leakage	0.12836	0.14149
	Total leakage	0.26444	0.28951
	Absorption	0.73557	0.71049
k _{cal}		1.0299	1.0332
k _{exp}		1.0057	0.99721
C/E-1.0 (%)		2.41	3.61

Table 6.6 Results of SHE-8 R-Z' model calculations by TWOTRAN

Order of S _n		S ₂	S ₄
Neutron balance	Axial leakage	0.13403	0.13422
	Radial leakage	0.12946	0.13408
	Total leakage	0.26349	0.26830
	Absorption	0.73620	0.73141
k _{cal}		1.0403	1.0313
k _{exp}		1.0057	1.0057
C/E-1.0 (%)		3.44	2.55
CPU time (min)		18	41

(Convergence criteria: flux < 10⁻⁴, k < 10⁻⁵)

Table 6.5 Calculated results from various models of SHE-8 and SHE-14

SHE-8 model		R-Z'	Tri(I)	Tri-Z	X-Y	Tri(II)
Neutron balance	Axial leakage*	0.13096	0.12990	0.12808	0.13608	0.13857
	Radial leakage	0.13766	0.14094	0.14063	0.12836	0.14216
	Total leakage	0.26862	0.27084	0.26871	0.26444	0.28073
	Absorption	0.73138	0.72916	0.73128	0.73557	0.71926
k_{cal}		1.0307	1.0331**	1.0347	1.0300**	1.0169**
k_{exp}		1.0057	1.0057	1.0057	1.0057	1.0057
C/E-1.0 (%)		2.49	2.72	2.88	2.42	1.11
Fuel volume index		2671	2671	2671	1135	667.8
Fuel surface index		183.2	1563	1563	1152	782.7

SHE-14 model		R-Z	Tri(I)	Tri-Z	X-Y	Tri(II)
Neutron balance	Axial leakage*	0.13609	0.13932	0.13884	0.14802	0.14738
	Radial leakage	0.14736	0.15237	0.15518	0.14149	0.15797
	Total leakage	0.28345	0.29169	0.29402	0.28951	0.30535
	Absorption	0.71655	0.70831	0.70598	0.71049	0.69465
k_{cal}		1.0794	1.0453	1.0447	1.0332	1.0182
k_{exp}		0.99721	0.99721	0.99721	0.99721	0.99721
C/E-1.0 (%)		8.24	4.82	4.76	3.61	2.10
Fuel volume index		4866	1537	1537	653.2	384.2
Fuel surface index		247.3	899.0	899.0	662.5	450.0

* Corresponds to B_g^2 loss in R- θ model

** Δk value of 0.0001 is added to compensate the effect of axial buckling

Table 6.7 Results of SHE-8 R-Z' model calculations by TWOTRAN

Order of Sn		S ₂	S ₄	S ₆	S ₈	S ₁₀
Neutron balance	Axial leakage	0.1487	0.1491	0.1493	0.1493	0.1493
	Radial leakage	0.1245	0.1292	0.1297	0.1299	0.1300
	Total leakage	0.2732	0.2783	0.2790	0.2792	0.2793
	Absorption	0.7254	0.7199	0.7193	0.7191	0.7190
k _{cal}		1.0297	1.0193	1.0185	1.0182	1.0181
CPU time (min)		8	17	31	51	74

(Convergence criteria : flux < 10⁻³, k < 10⁻⁴)

Table 6.8 Result of end cap effect calculation by SHE-8 R-Z model

End caps		Considered	None
Neutron balance	Axial leakage	0.13007	0.13294
	Radial leakage	0.13707	0.13655
	Total leakage	0.26714	0.26949
	Absorption	0.73286	0.73051
k _{cal}		1.0322	1.0291
k _{exp}		1.0057	1.0057
C/E-1.0 (%)		2.63	2.33
End cap effect (%)		-0.30	

Table 6.9 Results of parametric survey on various data from critical assembly SHE-8¹²⁾

Parameter Description		Used Value		Deviation A* (DELIGHT-4)	Deviation B* (CITATION)
1. O/U ratio	A	2.01	0%	0%	0%
	B	2.02	+0.5	+0.007	0
	C	2.03	+1.0	+0.02	+0.01
2. Diameter of Matrix Tube	A	6.50 cm	0%	0%	0%
	B	6.52	+0.3	0%	-0.01
3. Weight of UO ₂ and UO ₂ -disk	A	UO ₂ 2.938g disk 32.36g	0% 0%	0%	0%
	B	UO ₂ 3.0 disk 32.4	+2.1 +0.1	-0.4	0
4. Enrichment (U ²³⁵ /U)	A	19.70 w/o	0%	0%	0%
	B	19.85	+0.8	+0.05	+0.1
	C	20.00	+1.5	+0.10	+0.2
5. Graphite Density	A	1.68 g/cm ³	0%	0%	0%
	B	1.70	+1.2	+0.2	+0.6
	C	1.73	+3.0	+0.5	+1.4
6. Content of H ₂ O in graphite	A	0.0 w/o	0%	0%	0%
	B	0.06	+0.06	+0.5	+0.3
	C	0.12	+0.12	+1.0	+0.6
7. Content of Impurities in graphite (Varying the content of Cd)	A	Cd 0.0 ppm		0%	0%
	B	0.1		-0.01	-0.08
	C	1.0		-0.18	-0.81
	D	10.0		-1.8	-6.97
	E	19.5		-3.5	-12.0
8. Difference of Neutron Spectrum between Core and Reflector regions.	A	None		—	0%
	B	Considered		—	-0.17
9. Iron Casing around Reflector region**	A	None		—	0%
	B	Considered		—	+0.08
10. Scattering kernel of Hydrogen	A	Nelkin model		0%	0%
	B	Free Gas model		+0.007	+0.01

Table 6.9 (Continued)

Parameter Description		Used Value	Deviation A* (DELIGHT-4)	Deviation B* (CITATION)
11. Cavity in graphite structure***	A	0 v/o	0%	0%
	B	Disk Graphite 7.2 other Graphite 19.24	-0.03	-0.26
12. Void for Control Rod Insertion Holes in Reflector	A	None	0%	0%
	B	Considered	-0.5%	-0.71%

* Deviation of the multiplication factor from the standard
utilizing the value of the specification

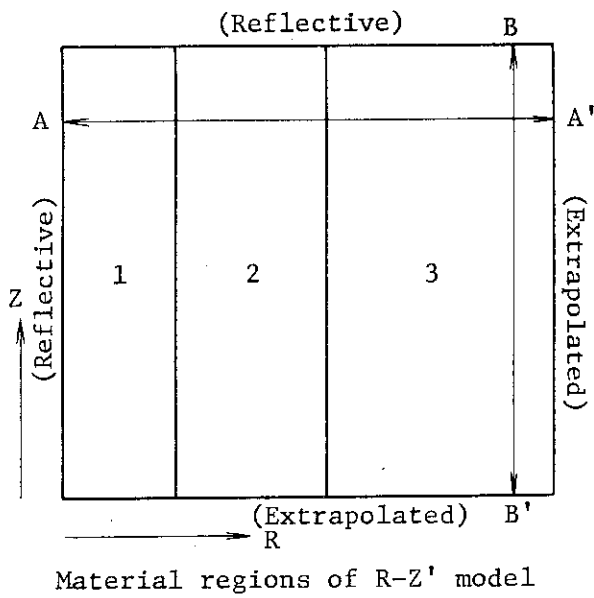
$$\left(\frac{k_{\text{eff}} - k_{\text{eff}}(\text{standard})}{k_{\text{eff}}(\text{standard})} \times 100\% \right)$$

** Assumed the pure iron plate of 2 cm thickness

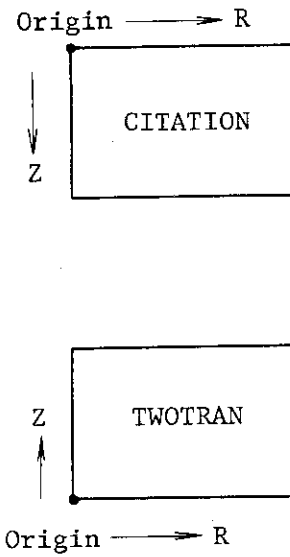
*** The volume of cavity was calculated from the difference of
graphite densities between the measurement using Helium and
usual way.

Table 6.10 Various compensations

Correction term	Value of compensation
Axial buckling	+0.01
Axial heterogeneity of fuel rod	+0.15
Transport	-0.11
End cap	-0.30
Iron casing around permanent reflector	+0.08
Spectrum difference between core and reflector regions	-0.17
Total	-0.34

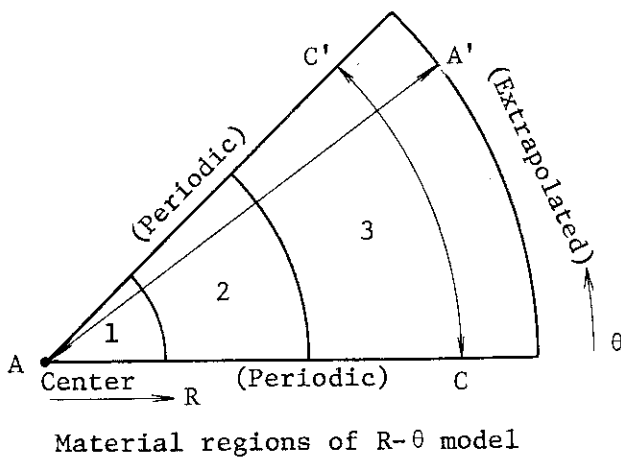


Material regions of R-Z' model

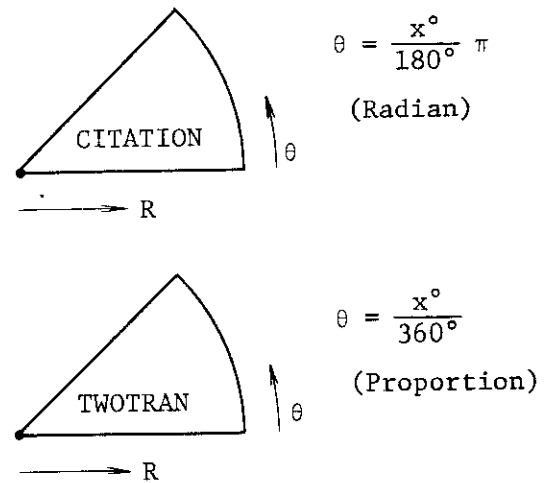


Difference in describing R-Z geometry

- 1 Fuel region
- 2 Replaceable reflector region
- 3 Permanent reflector region



Material regions of R-θ model



Difference in describing R-θ geometry

Fig. 6.1 Configurations of SHE-8 R-Z' and R-θ models

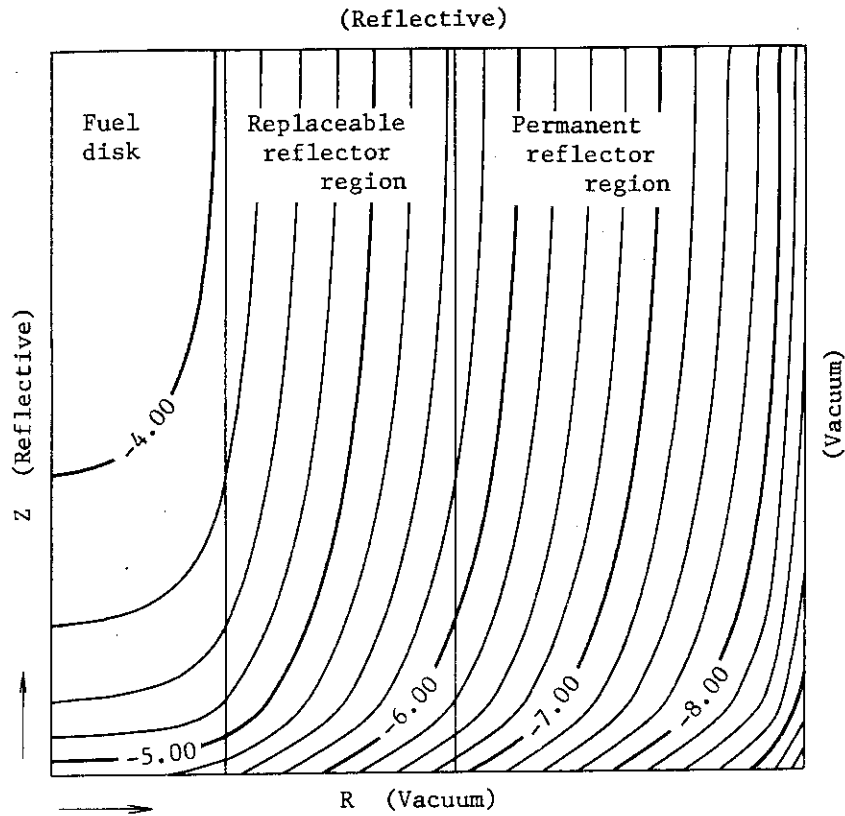


Fig. 6.2 Distribution of 2nd-group (183~11.7 KeV) flux in SHE-8 (R-Z' model)

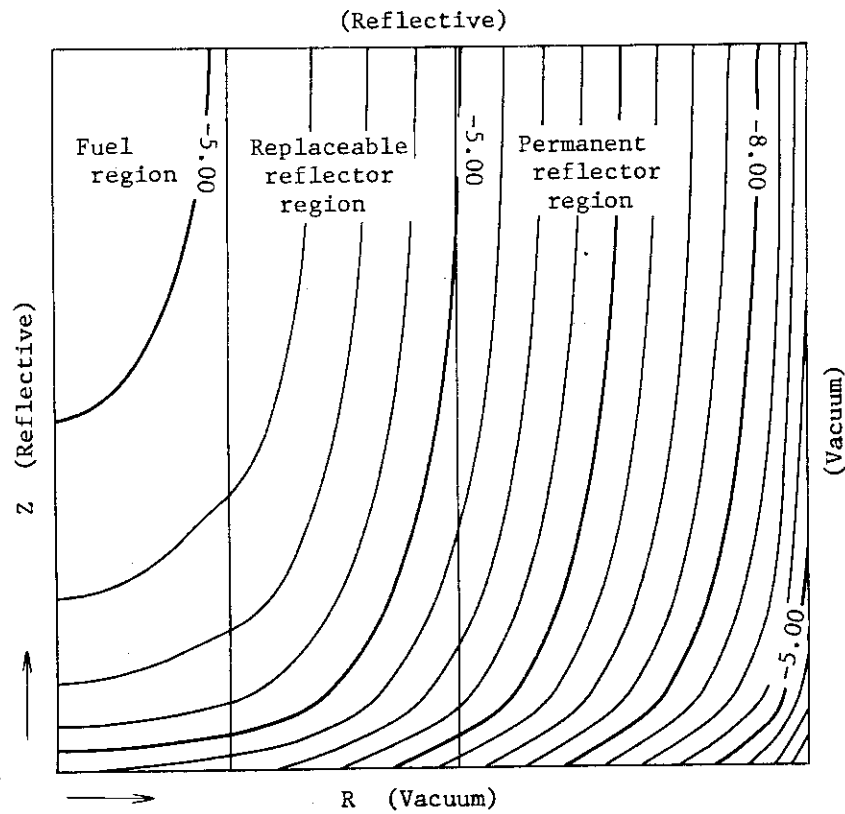


Fig. 6.3 Distribution of 8th-group (6.48~3.93 eV) flux in SHE-8 (R-Z' model)

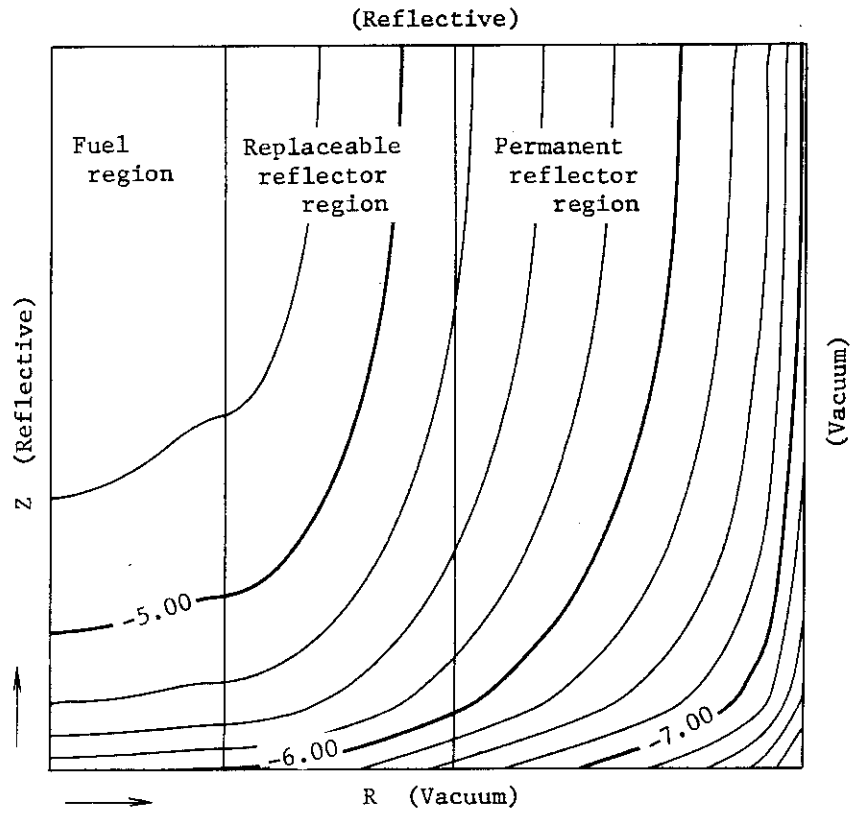


Fig. 6.4 Distribution of 15th-group ($0.65 \sim 0.255$ eV) flux in SHE-8 (R-Z' model)

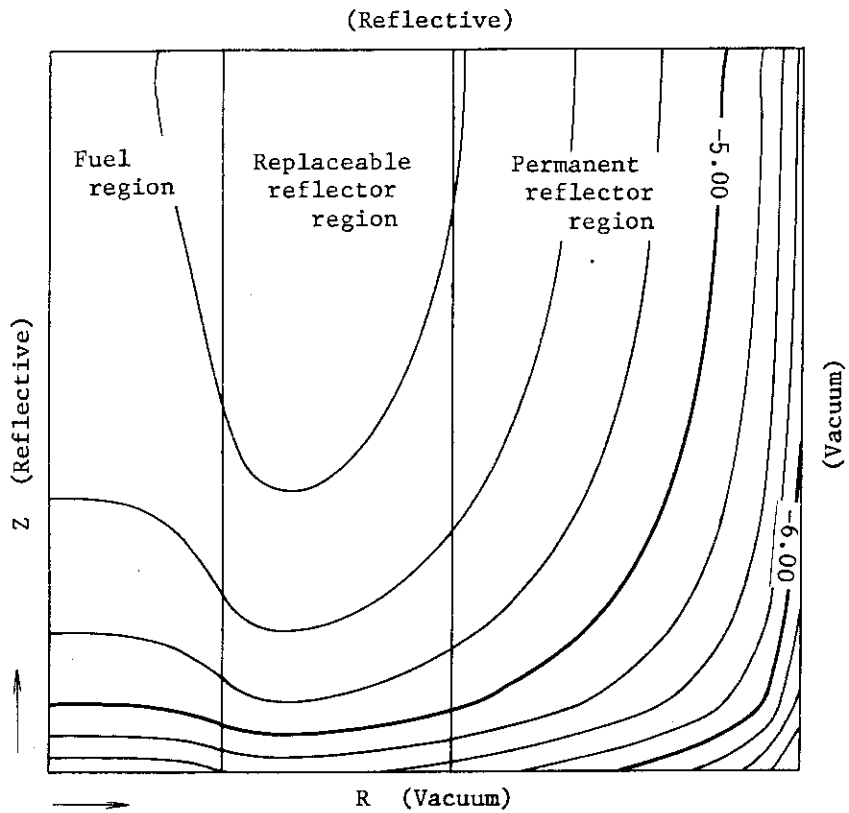


Fig. 6.5 Distribution of 16th-group ($0.255 \sim 0.085$ eV) flux in SHE-8 (R-Z' model)

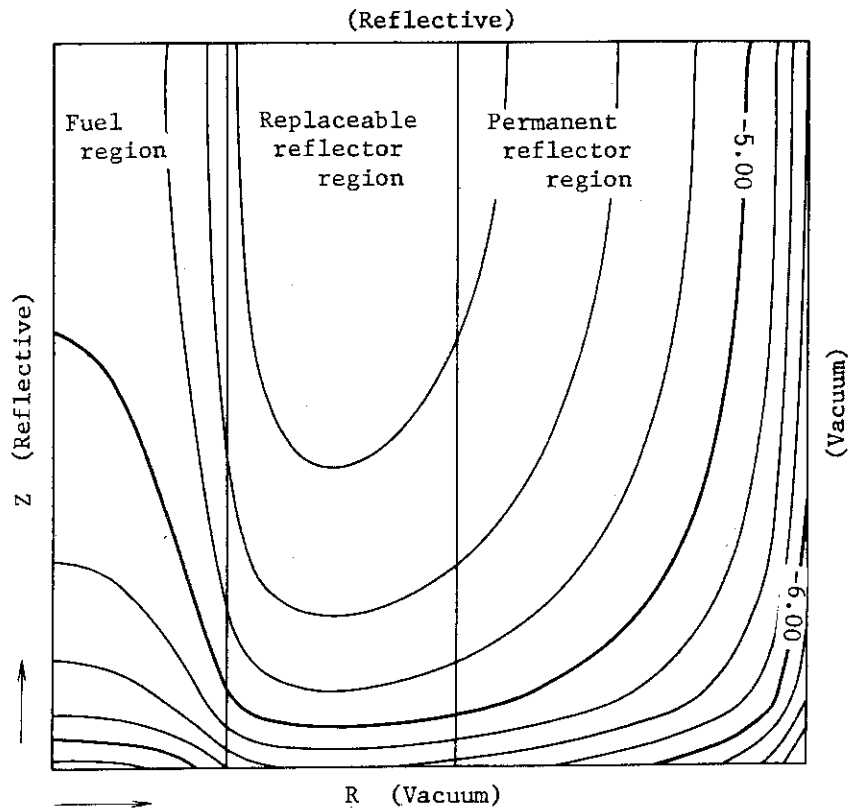


Fig. 6.6 Distribution of 18th-group (0.035~0.0 eV) flux in SHE-8 (R-Z' model)

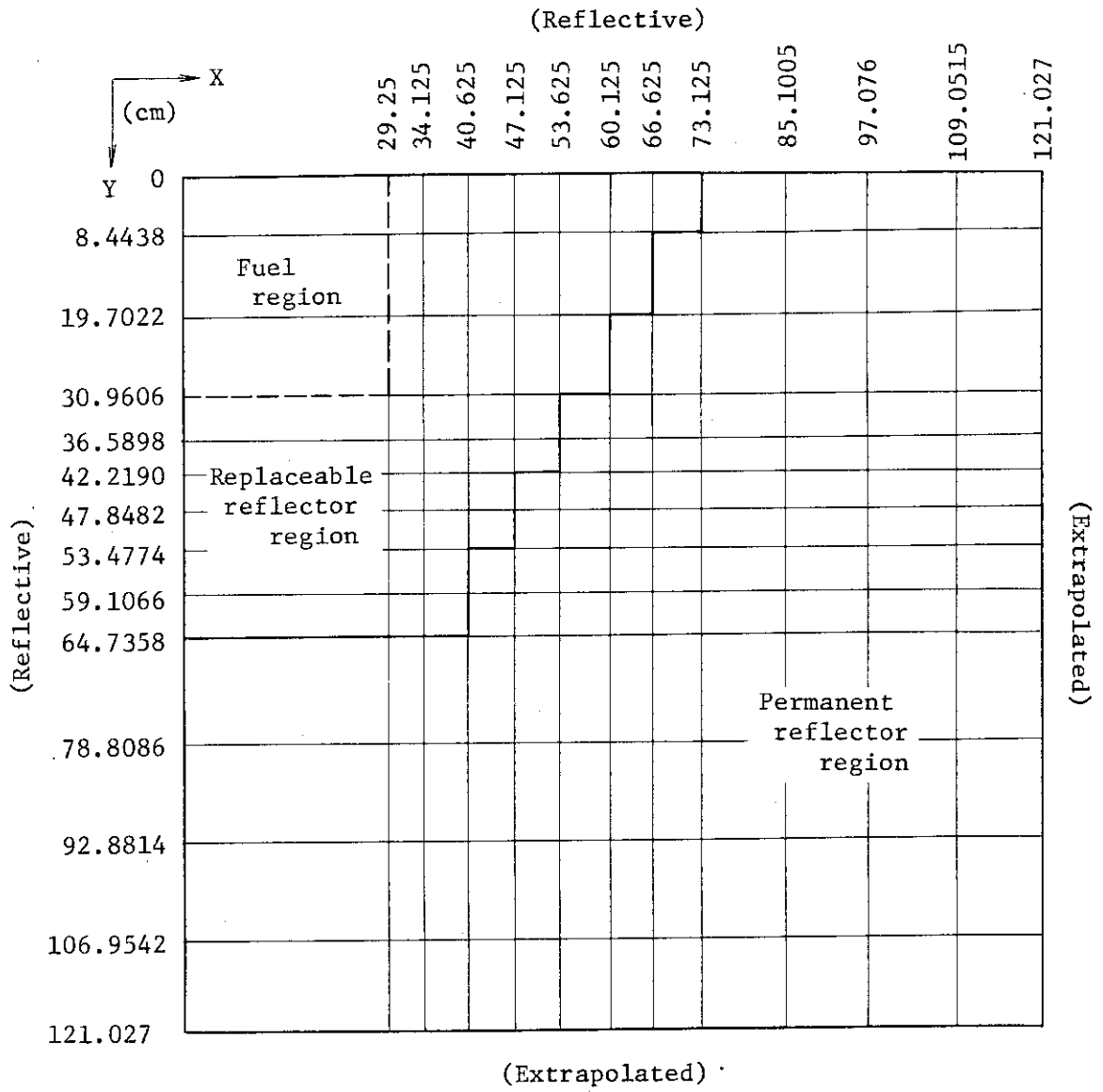


Fig. 6.7 Material regions of SHE-8 X-Y model

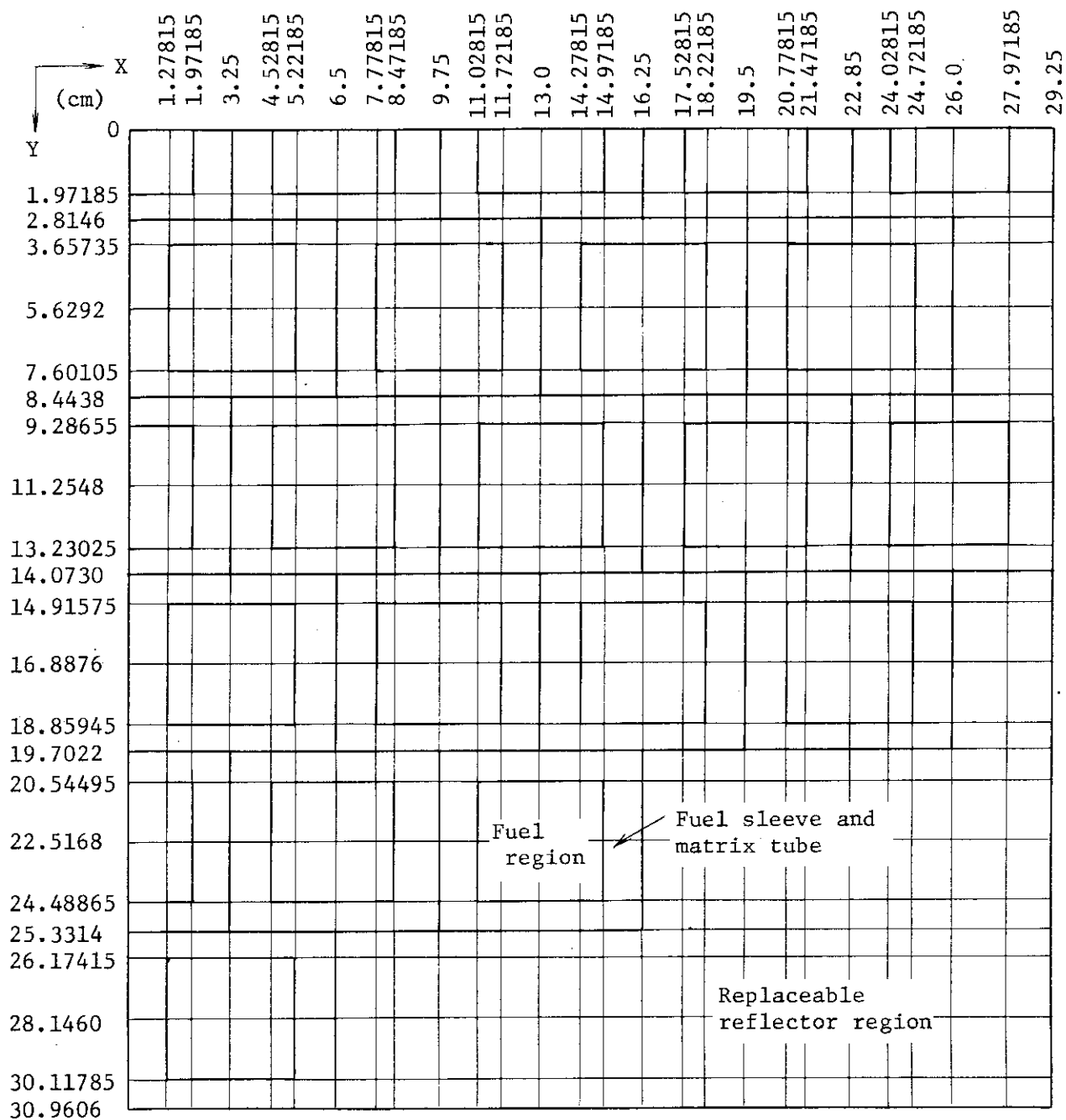


Fig. 6.8 Magnified material regions of SHE-8 X-Y model (Fuel region)

7. 結 論

解析により得られた実効増倍率は、モデル化による燃料棒体積変化の効果を除くために行った内挿による補正後で、SHE-8, 12, 13, 14 に対し、 $[(C/E)-1.0]$ の値で、それぞれ 1.6, 2.8, 3.4, 2.9% である。SHE-8 に対する各種補正を行った後では、 $[(C/E)-1.0]$ の値が 1.6% から 1.26% となる。しかしながら、これらの値は実験との差がかなり大きいと考えられ、ここで核計算コードの妥当性について検討することは多少困難であり、さらに良好な解析法について考慮する必要がある。

解析に使用した四種類のモデルと、その計算結果を比較すると、燃料棒を詳細に取扱うほど実験との差が小さくなるのがわかる。この傾向は先の Fig. 5.15 に見られるように、 C/U^{235} の値が大きくなる程、顕著に現われる。つまり、SHE-13, 14, 12, 8 の順に、モデル化の効果が大きく出ている。この効果は主に、中性子の体系外へのもれによるものであると考えられる。Table 7.1 では、第 5 章で示した計算結果の表より、Net Leakage の項を%で示している。これから、R-Z, Tri (I), Tri (II) と、燃料棒の形状を詳細に取扱うほど、もれの割合が増大し実効増倍率が下がると考えられる。燃料棒形状の取扱いで、もれの項がこのように変化するのは、SHE 体系では衝突確率法に見られるような直進性の中性子が多く存在しているものと考えられる。つまり、SHE 体系が小型であることから、燃料より外へ出た高エネルギーの中性子は、あまり散乱をせず直線的に進行し、その多くが体系外へもれてゆくものと考えられる。したがって、燃料棒については、できる限り実際に近い体積および形状（表面積）を持ったモデルを作成することが望ましい。先の X-Y モデルでは、燃料体積は保存されていたが燃料形状および全体の形状がともに長方形であり、難点がある。このため、Tri モデル II よりさらに細かい三角メッシュモデルを考えることができる。96×192 の三角メッシュモデルでは、燃料ディスク部体積を、約 4% だけの相異でモデル化できる。今後、このモデルによる詳細な計算を行うことが望ましい。

さらに、DELIGHT-5 コードの持つ縮約群定数に対する群数効果については本報では取り上げなかったが、予備的解析では本効果は無視できないものであることが判明しており、今後、詳細な検討が予定されている。SHE-8 の R-Z' モデルを用いた予備的計算では、群数を 18 群から 8 群に少なくすることにより、実効増倍率の値が約 2% 近くも大きくなることが判明している。一方、参照用として行った、GGC-IV コードによる群定数では、このような効果はあまり大きくなく、いずれの状況に対しても 0.3% 程度の変化でしかない。したがって、DELIGHT-5 コードのこのような特性については、今後、十分に検討する必要がある。

また、縮約群定数作成時に、DELIGHT-5 コードの入力となるバックリング値については、本報では、SHE の軸方向のもれに対するバックリング値しか入力していないが、半径方向に対するもれをも含むバックリング値を入力することが望ましい。予備的解析では、SHE の軸方向および半径方向の両方のもれを考慮したときのバックリング値は、軸方向の場合より、約一桁大きなものとなることが判明している。これにより、群定数のうち拡散係数が増大し、もれの効果が大きくなり、実効増倍率が減少するものと考えられる。予備的解析として軸方向および半径

方向の両方のもれを考慮したバックリング値を DELIGHT-5 コードへ入力して作成した18群定数を用いると、SHE-8で約1.5%程度、実効増倍率が減少することが判明している。

今後、以上の三点に特に注目した解析を行う必要があるものとする。

Table 7.1 Net leakage of R-Z, Tri(I), Tri(II) models (%)

Model	SHE-8	SHE-12	SHE-13	SHE-14
R-Z	26.7	28.2	29.6	28.3
Tri(I)	27.1	29.0	31.6	29.2
Tri(II)	28.1	29.9	32.1	30.5

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) 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)
- (5) 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)
- (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) 秋濃藤義, 私信 (1980).
- (11) 土井 猛, 他「高温ガス炉核設計用計算コードの精度検討—臨界実験データ (SHE, 等) の解析—」内部資料 (1978).
- (12) 「多目的高温ガス炉プログレスレポート第 18 号 (昭和 54 年 10 月~昭和 55 年 9 月)」内部資料 (1981).

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) 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)
- (5) 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)
- (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) 秋濃藤義, 私信 (1980).
- (11) 土井猛, 他「高温ガス炉核設計用計算コードの精度検討—臨界実験データ (SHE, 等) の解析—」内部資料 (1978).
- (12) 「多目的高温ガス炉プログレスレポート第 18 号 (昭和 54 年 10 月~昭和 55 年 9 月)」内部資料 (1981).