

J A E R I - M

9 9 1 2

S H E - 8 炉心における銅反応率分布の解析  
—— V H T R 核設計法の精度検討 (4) ——

1 9 8 2 年 1 月

土井 猛<sup>\*</sup>・高野 誠・平野 光将・新藤 隆一

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

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、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力広済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領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 高野高速印刷

S H E - 8 炉心における銅反応率分布の解析  
—— V H T R 核設計法の精度検討(4) ——

日本原子力研究所 動力炉開発・安全性研究管理部  
土井 猛\*・高野 誠・平野 光将・新藤 隆一

(1981年12月25日受理)

濃縮ウラン装荷・黒鉛減速臨界集合体S H E (Semi-Homogeneous Critical Experimental Assembly) の実験のうちS H E - 8 炉心を対象に、銅の放射化反応率分布の解析を行ない、実験データと比較・検討した。

解析では、1～3次元拡散計算コードCITATION-2 および2次元輸送計算コードTWO TRAN-2 を用いて18群炉心計算を行ない、得られた中性子束分布と銅の反応断面積の積をエネルギーに關して積分することにより、銅の反応率分布を求めた。炉心計算に必要な断面積は、高温ガス炉格子燃焼計算コードDELIGHT-5 を用いて算出し、銅の反応断面積には、GAM-1 ライブライリー、および $1/v$  データを採用した。

解析の結果、制御棒が挿入されていない体系の反応率分布は、実験データと良く一致した。制御棒が挿入された体系では、拡散計算の場合は、制御棒に極く近い領域での反応率分布に実験データとの相違が見られるものの、それ以外の領域では実験データとほぼ一致した。一方、制御棒近辺の反応率分布を輸送計算により求めたところ、実験データとの良い一致を得ることが出来た。

以上の検討から、銅反応率分布の解析に使用した計算コード、核データおよび計算手法が妥当なものであることが確認された。

---

\* 業務協力員（石川島播磨重工）

An Analysis of Copper Activation Reaction Rate Distribution of SHE-8  
— Accuracy Investigation of VHTR Nuclear Design Methods(4) —

Takeshi DOI\*, Makoto TAKANO, Mitsumasa HIRANO and Ryuiti SHINDO

Division of Power Reactor Projects, JAERI

(Received December 25, 1981)

Reaction rate distribution of copper activation was analyzed for the graphite-moderated Semi-Homogeneous Critical Experimental Assembly SHE-8 with enriched uranium fuel.

Three-dimensional diffusion code CITATION-2 and two-dimensional transport code TWOTRAN-2 were used in the 18group core calculations, and reaction rate distribution was calculated by energy summation of copper cross section multiplied by neutron flux. Cross sections used in the core calculations were obtained from VHTR lattice burn-up code DELIGHT-5, and GAM-I and 1/v data were used for copper cross section.

Calculated results agreed with the experimental data for the core without control rod inserted. For the core with control rod inserted, calculated reaction rate distribution with diffusion theory did not agree well with the experimental results in the region near the control rod, but agreed with the experiment in the other region. Reaction rate distribution calculated by transport theory in the region near the control rod agreed with the experiment.

From the discussion above, the appropriateness of the calculational codes, nuclear data and analytical methods was verified.

Keywords: VHTR, Nuclear Design, Accuracy Analysis, SHE, Critical Experiment, Reaction Rate Distribution, Copper Activation, DELIGHT-5, CITATION-2, TWOTRAN-2

---

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

## 目 次

1. 概要 .....	1
2. 解析方針 .....	2
2.1 炉心計算 .....	2
2.2 反応率分布 .....	2
2.3 断面積の作成 .....	2
3. 銅の放射化断面積 .....	6
3.1 銅の中性子反応 .....	6
3.2 放射化断面積 .....	6
3.3 少数群への縮約 .....	7
4. 解析 .....	10
4.1 解析対象 .....	10
4.2 解析モデル .....	10
4.3 解析結果と検討 .....	10
5. まとめ .....	20
5.1 結論 .....	20
5.2 今後の課題 .....	20
謝 辞 .....	21
参考文献 .....	21

## Contents

1.	Abstract .....	1
2.	Analytical methods .....	2
2.1	Core calculation .....	2
2.2	Reaction rate distribution .....	2
2.3	Preparation of cross section .....	2
3.	Activation cross section .....	6
3.1	Reaction of copper with neutron .....	6
3.2	Activation cross section .....	6
3.3	Collapse into few groups .....	7
4.	Analysis .....	10
4.1	Analytical cases .....	10
4.2	Analytical model .....	10
4.3	Calculated results and discussion .....	10
5.	Results and conclusion .....	20
5.1	Conclusion .....	20
5.2	Future task .....	20
	Acknowledgement .....	21
	Reference .....	21

## 1. 概 要

炉心核設計においては、中性子束分布は反応度と共に重要な物理量である。中性子束分布は直接測定することが出来ないため、臨界実験等で得られるのは特定な物質の反応率分布である。この反応率分布は、物質の反応断面積に中性子束を乗じ、エネルギーに関して和を取ったものであるため、計算により反応率分布を再現するためには、中性子束のエネルギー・空間分布を精度良く求めることの他に、反応を起こす物質の断面積を適切に評価する必要がある。

濃縮ウラン・黒鉛減速臨界集合体S H E - 8 炉心では、体系内に分散した小さな銅ピンの放射化による反応率分布が測定されており、<sup>(1)</sup> 計算手法の精度把握のために、この実験データとともに、銅反応率分布の解析を行なった。

反応率分布は、制御棒が挿入されていない体系、1本の制御棒が炉心中心軸に沿って 90 cm の深さまで挿入されている体系および、2本の制御棒が炉心中心軸に対して対称の位置に 90 cm の深さまで挿入されている体系に関して、体系中心点から径方向および軸方向に対して計算した。

解析には、主に 1～3 次元拡散計算コード C I T A T I O N - 2 を用い、補助的な計算および制御棒遮蔽因子の計算には、<sup>(2)</sup> 2 次元輸送計算コード T W O T R A N - 2 を用いた。また、計算に必要な断面積は高温ガス炉格子燃焼計算コード D E L I G H T - 5 <sup>(3)</sup> から算出した。

<sup>(4)</sup> 銅の反応断面積は、高速領域に G A M - I ライブラリーに含まれる天然銅の ( $n, \gamma$ ) 反応断面積を、熱領域に 0.0253 eV で 4.5 barn <sup>(5)</sup> に規格化した  $1/v$  断面積を適用した。

制御棒が挿入されていない体系の拡散計算による反応率分布は、径方向、軸方向とも実験データと良く一致したが、計算時間・コア容量の制約からメッシュを粗く採った輸送計算では、メッシュ効果のためと思われるが、炉心中央から離れた部分で、実験データとの相違が見られた。

制御棒が中心に 1 本挿入された体系では、拡散計算に制御棒挿入領域の均質化定数を用いているため、制御棒均質化領域内では、原理的に実験データとの不一致が見られるが、制御棒均質化領域以外の部分では、反応率分布は実験データと良く一致した。この体系を輸送コードで計算すると、メッシュ効果のため、炉心中央から離れた部分で相違は大きいが、制御棒近辺での反応率分布は実験データと非常に良く一致した。

制御棒が対称に 2 本挿入された体系は、3 次元計算を行なう必要があり、拡散計算のみ行なったが、制御棒均質化領域以外の部分では、一部のデータを除き、反応率分布は実験データとほぼ一致した。

以上の検討から、解析に使用した計算コード、核データの妥当性が確認出来た他、制御棒均質化定数を用いると、均質化領域以外での反応率分布が比較的精度良く計算出来ること、また、輸送計算では制御棒近辺の反応率分布を非常に良く表現出来ることが判明した。

尚、核設計法の精度検討のために、S H E 臨界実験に対する種々の解析が行なわれており、<sup>(6) (10)</sup> 本解析もその一環として行なったものである。

## 2. 解析方法

### 2.1 炉心計算

中性子束分布は、通常の設計手法に従い、2次元、3次元の18群拡散計算により求め、制御棒が挿入された場合には、制御棒と周囲の燃料棒を単位制御棒格子と想定し、この領域内で制御棒の遮蔽因子を重み関数として均質化した断面積を使用するという方法を用いる。制御棒の遮蔽因子は輸送計算により求める。

SHE-8炉心は、燃料ディスクと黒鉛スリーブを均質化して扱っても、誤差が最も少ない体系であり、反応度的には若干の相違はあるが、中性子束分布の点からは均質化の効果はないものと仮定し、均質燃料炉心としての扱いを行なった。

### 2.2 反応率分布

反応率分布は、中性子束分布に銅の反応断面積を乗じ、エネルギーについて積分したものであり、

$$R(r, Z) = f \sum_{g=1}^{18} \Sigma_{ag}(r) \phi_g(r, Z) \quad (2.1)$$

と表わされる。但し、 $\Sigma_{ag}(r)$ は銅のg群の反応断面積であり、 $\phi_g(r, Z)$ はg群の中性子束である。 $f$ は規格化定数であり、全ての体系を通し、炉心中心軸上の最高点に対して規格化を行なう。

軸方向の反応率分布は、実験により指定されたr座標について求める必要があるが、この点が炉心計算の径方向のメッシュ座標と一致しない場合には、その実験座標点をはさむ2個の計算メッシュ点における中性子束値の直線内挿により該当する点の中性子束値を計算した。

### 2.3 断面積の作成

解析に使用する断面積は、DELIGHT-5コードを用いて算出した。炉心領域の断面積は、単位燃料棒格子の平均中性子スペクトルを用いて、18群に縮約して作成した。反射体の断面積は、黒鉛無限系の中性子スペクトルを用いて縮約した。輸送計算に使用する制御棒の断面積は、燃料棒格子の中性子スペクトルを用いて作成し、制御棒が挿入されたことによる中性子スペクトルの変化の影響は、18群構造に対しては少ないものとして無視した。

単位燃料格子のモデル化をFig.2.1に示す。格子計算および炉心計算に必要な定数を作成するための原子数密度をTable 2.1に示す。制御棒のモデル化をFig.2.2に示す。18群のエネルギー構造をTable 2.2に示す。

Table 2.1 Atomic number densities of SHE-8

Nuclide	Atomic densities for cell calculation		Atomic densities for core calculation			Atomic densities of control rod	
	Fuel disk	Graphite sleeve	Homogeneous fuel	Replaceable reflector	Permanent reflector	Absorber	Homogeneous mixture of Al tube, matrix tube and void
<sup>235</sup> U	8.4 4 6 1 - 5	—	3.4 4 0 4 - 5	—	—	—	—
<sup>238</sup> U	3.3 6 7 1 - 4	—	1.3 7 1 6 - 4	—	—	—	—
<sup>10</sup> B	2.9 4 9 4 - 9	1.6 7 5 2 - 9	2.0 3 9 9 - 9	1.5 9 4 9 - 9	1.6 0 3 3 - 9	1.6 4 5 0 - 3	9.6 4 6 4 - 1 0
<sup>11</sup> B	1.2 8 2 3 - 8	7.5 1 6 5 - 9	8.9 8 5 4 - 9	7.1 5 6 5 - 9	7.1 9 4 1 - 9	7.1 5 2 0 - 3	4.3 2 8 3 - 9
<sup>12</sup> C	9.4 7 7 7 - 2	8.0 7 1 9 - 2	7.9 0 0 7 - 2	7.6 8 5 2 - 2	7.7 2 5 6 - 2	9.3 3 0 3 - 2	4.6 4 8 1 - 2
<sup>16</sup> O	8.9 4 7 9 - 4	3.2 8 8 8 - 5	3.8 1 9 6 - 4	3.1 8 4 0 - 5	3.1 9 5 0 - 5	3.7 3 4 5 - 5	2.2 5 4 8 - 5
S i	2.0 2 4 8 - 7	—	—	—	—	—	—
A l	6.3 2 2 8 - 8	—	—	—	—	—	5.8 0 4 2 - 3
F e	6.1 0 9 4 - 8	—	2.4 8 8 6 - 8	—	—	—	—
C r	2.1 8 7 3 - 8	—	—	—	—	—	—
M n	2.0 7 0 1 - 8	—	—	—	—	—	—
N i	1.9 3 7 1 - 8	—	—	—	—	—	—
M o	2.3 7 0 9 - 8	—	—	—	—	—	—
W	3.0 9 3 2 - 8	—	—	—	—	—	—
C d	2.0 2 3 7 - 1 0	—	8.2 4 3 3 - 1 1	—	—	—	—
N	—	2.0 4 3 9 - 6	4.6 1 3 8 - 6	3.8 1 2 7 - 6	3.6 2 8 3 - 6	3.7 5 4 4 - 6	—
H	7.9 6 5 5 - 5	6.4 6 7 7 - 5	6.4 9 2 1 - 5	6.1 6 3 2 - 5	6.1 9 5 0 - 5	7.4 6 8 4 - 5	3.7 6 0 9 - 5

(Note)  $8.4 \cdot 10^{-5}$  means  $8.4 \cdot 10^{-5} \times 10^6$

Table 2.2 Energy boundaries of 18 groups

Energy boundaries of fast region			Energy boundaries of thermal region		
Group No	Upper	Lower	Group No	Upper	Lower
1	$1.0 \times 10^7$	$1.83 \times 10^5$	1 0	2.38	1.85
2	$1.83 \times 10^5$	$1.17 \times 10^4$	1 1	1.85	1.45
3	$1.17 \times 10^4$	$9.61 \times 10^2$	1 2	1.45	1.10
4	$9.61 \times 10^2$	$1.30 \times 10^2$	1 3	1.10	1.045
5	$1.30 \times 10^2$	$4.79 \times 10^1$	1 4	1.045	0.65
6	$4.79 \times 10^1$	$1.76 \times 10^1$	1 5	0.65	0.255
7	$1.76 \times 10^1$	6.48	1 6	0.255	0.085
8	6.48	3.93	1 7	0.085	0.035
9	3.93	2.38	1 8	0.035	0.0

(Note) Unit in eV

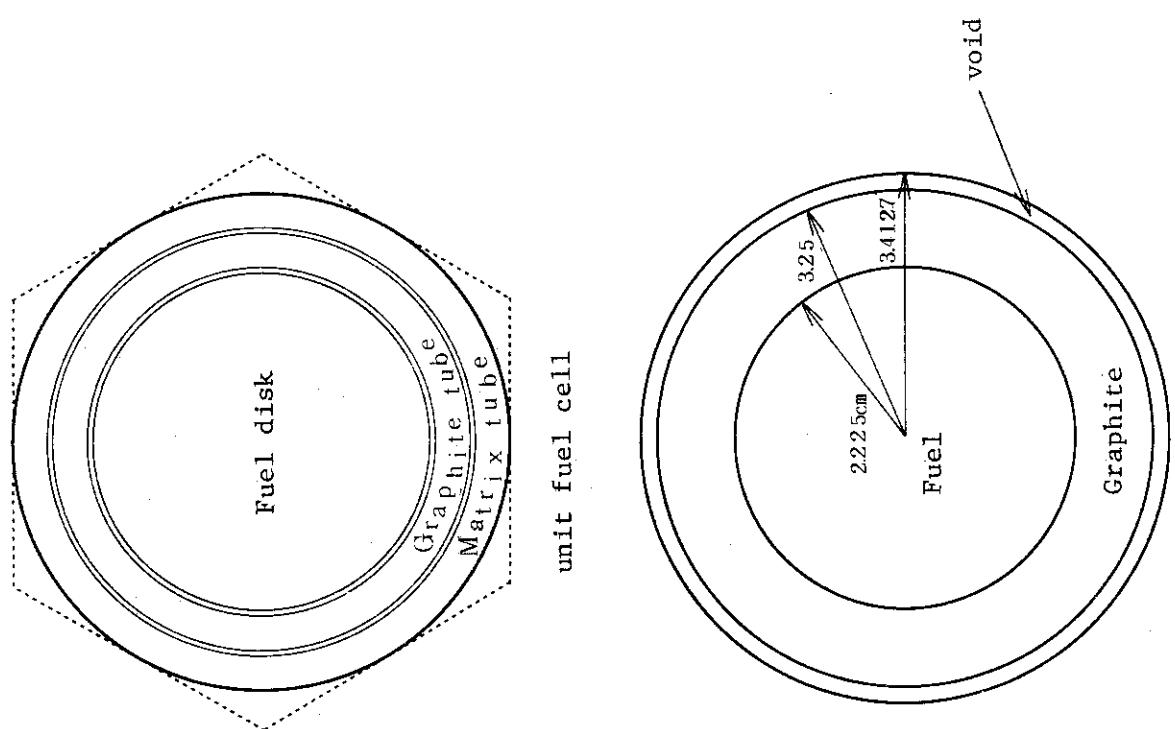


Fig.2.1 Unit fuel cell of SHE-8  
Modeled unit fuel cell

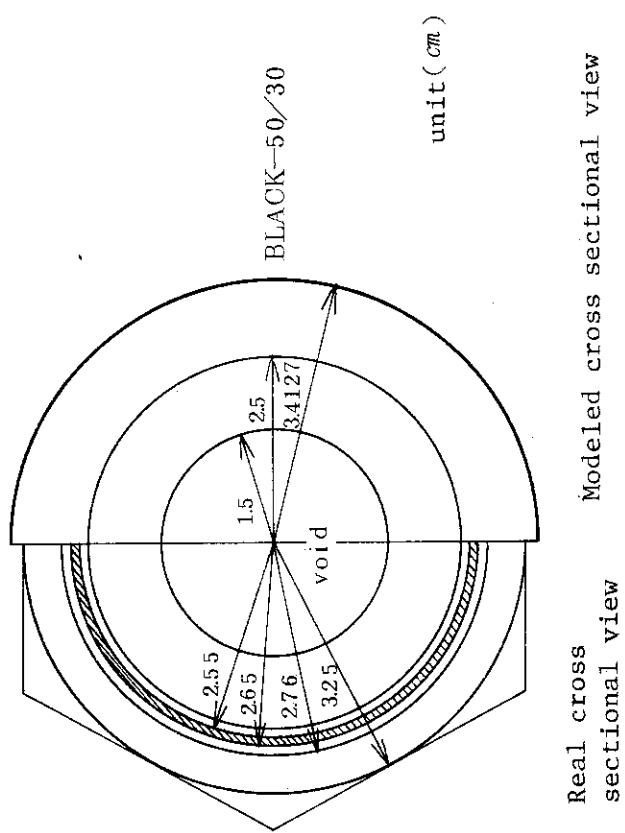


Fig.2.2 Cross sectional view of control rod

### 3. 銅の放射化断面積

#### 3.1 銅の中性子反応

天然の銅は、 69.1 %の<sup>63</sup>Cuと30.9 %の<sup>65</sup>Cuから成り、 中性子を捕獲することにより、 それぞれ<sup>64</sup>Cu, <sup>66</sup>Cuに変わり、 Fig. 3.1 に示すごとく半減期 12.8 時間および 5.1 分で  $\beta$ 崩壊を行なった後、  $\gamma$ 線を放出して基底状態に達する。従って、 実験後の冷却時間が 3.4 時間であることから、  $\gamma$ 線の計測は大部分<sup>63</sup>Cuからの寄与であり、 <sup>65</sup>Cuからの寄与は  $4 \times 10^{-18}$  まで低下する。

しかし、 高速領域では、 <sup>63</sup>Cu, <sup>65</sup>Cuとも弾性散乱以外の反応、 例えば、  $(n, n')$ ,  $(n, 2n)$ ,  $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$ ,  $(n, np)$ ,  $(n, n\alpha)$  等が起こるようになり、 特に数 MeV以上では  $(n, 2n)$  反応が顕著となる。 $(n, 2n)$  反応が起こると<sup>63</sup>Cu, <sup>65</sup>Cuはそれぞれ、 <sup>62</sup>Cu, <sup>64</sup>Cuに変わり、 半減期 9.8 分、 12.8 時間で  $\beta$ 崩壊した後、  $\gamma$ 線を放出する。従って、 実験で計測された  $\gamma$ 線には、 <sup>63</sup>Cu ( $n, \gamma$ ) による寄与の他に、 <sup>65</sup>Cu ( $n, 2n$ ) による寄与が含まれている。以上のことから、 速領域の天然銅の放射化断面積としては、 厳密には<sup>63</sup>Cu ( $n, \gamma$ ) 反応断面積に 0.691 を乗じたものと、 <sup>65</sup>Cu ( $n, 2n$ ) 反応断面積に 0.301 を乗じたものの和を用いるのが適当である。

熱領域の天然銅の放射化断面積としては、 速領域との接合を考え、 <sup>63</sup>Cu ( $n, \gamma$ ) 反応断面積に 0.691 を乗じたものを採用する必要がある。

#### 3.2 放射化断面積

##### (i) 速領域

DELI GHT-5 コードのマスター・ライブラリーには、 天然銅の吸収断面積が準備されているが、 これには Fig. 3.2 に示されるように  $(n, \gamma)$  の他に  $(n, n')$ ,  $(n, 2n)$ ,  $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$  等の反応断面積が加えられている。従って、 速領域の放射化断面積としては、 DELI GHT ライブラリーのものを直接使用することは適当ではない。そこで、 <sup>65</sup>Cu の存在比は <sup>63</sup>Cu の半分以下であり、 また <sup>65</sup>Cu ( $n, 2n$ ) 反応断面積は中性子スペクトルの重みを考慮すると反応率分布への寄与は <sup>63</sup>Cu ( $n, \gamma$ ) 反応断面積より少ないため、 速領域の放射化断面積として、 DELI GHT ライブラリーと同じ群構造を持つ G A M - I ライブラリーの天然銅の  $(n, \gamma)$  反応断面積を採用した。

##### (ii) 热領域

熱領域の放射化断面積は <sup>63</sup>Cu ( $n, \gamma$ ) に対するものである。熱領域では銅の断面積は  $1/v$  依存性を持つため、 0.0253 eVにおいて 4.5 barn に規格化したものを探用した。

$1/v$  依存性を持つ断面積は、 次のように多群定数化した。

$$\sigma(E) = \sigma_0 \sqrt{\frac{E_0}{E}} \quad (3.1)$$

$$E_0 = 0.0253 \text{ eV}$$

$$\sigma_0 = 4.5 \text{ barn}$$

$$\bar{\sigma}_g = \frac{1}{4E_g} \int_{E_g^L}^{E_g^U} \sigma_0 \sqrt{\frac{E_0}{E}} dE = \frac{2\sigma_0 \sqrt{E_0}}{\sqrt{E_g^L} + \sqrt{E_g^U}} \quad (3.2)$$

$E_g^L$  : g 群の下限エネルギー値 (eV)

$E_g^U$  : g 群の上限エネルギー値 (eV)

### 3.3 少数群への縮約

速領域 61 群、熱領域 50 群の銅放射化断面積は、次のように 18 群に縮約される。

$$\bar{\sigma}_g^F = \frac{\sum_{k=g_L}^{g_U} \sigma_k \phi_k \Delta U_k}{\sum_{k=g_L}^{g_U} \phi_k \Delta U_k} : \text{(速領域)} \quad (3.3)$$

$$\bar{\sigma}_g^T = \frac{\sum_{\ell=g_L}^{g_U} \sigma_\ell \phi_\ell \Delta E_\ell}{\sum_{\ell=g_L}^{g_U} \phi_\ell \Delta E_\ell} : \text{(熱領域)} \quad (3.4)$$

但し、 $k$ 、 $\ell$  はそれぞれレサジー群、エネルギー群を表わす指標であり、 $\sigma_k$ 、 $\phi_k$  と  $\sigma_\ell$ 、 $\phi_\ell$  は、それぞれ、速領域と熱領域の放射化断面積、中性子スペクトルである。 $\Delta U_k$ 、 $\Delta E_\ell$  はレサジーアップ、エネルギーアップである。 $g_L$ 、 $g_U$  は  $g$  群が属する、多群構造における下限および上限群番号である。

銅の放射化断面積は、燃料格子スペクトルおよび黒鉛無限系スペクトルで 18 群に縮約した 2 種類を作成し、それぞれ炉心領域、反射体領域の反応率を計算するのに使用する。

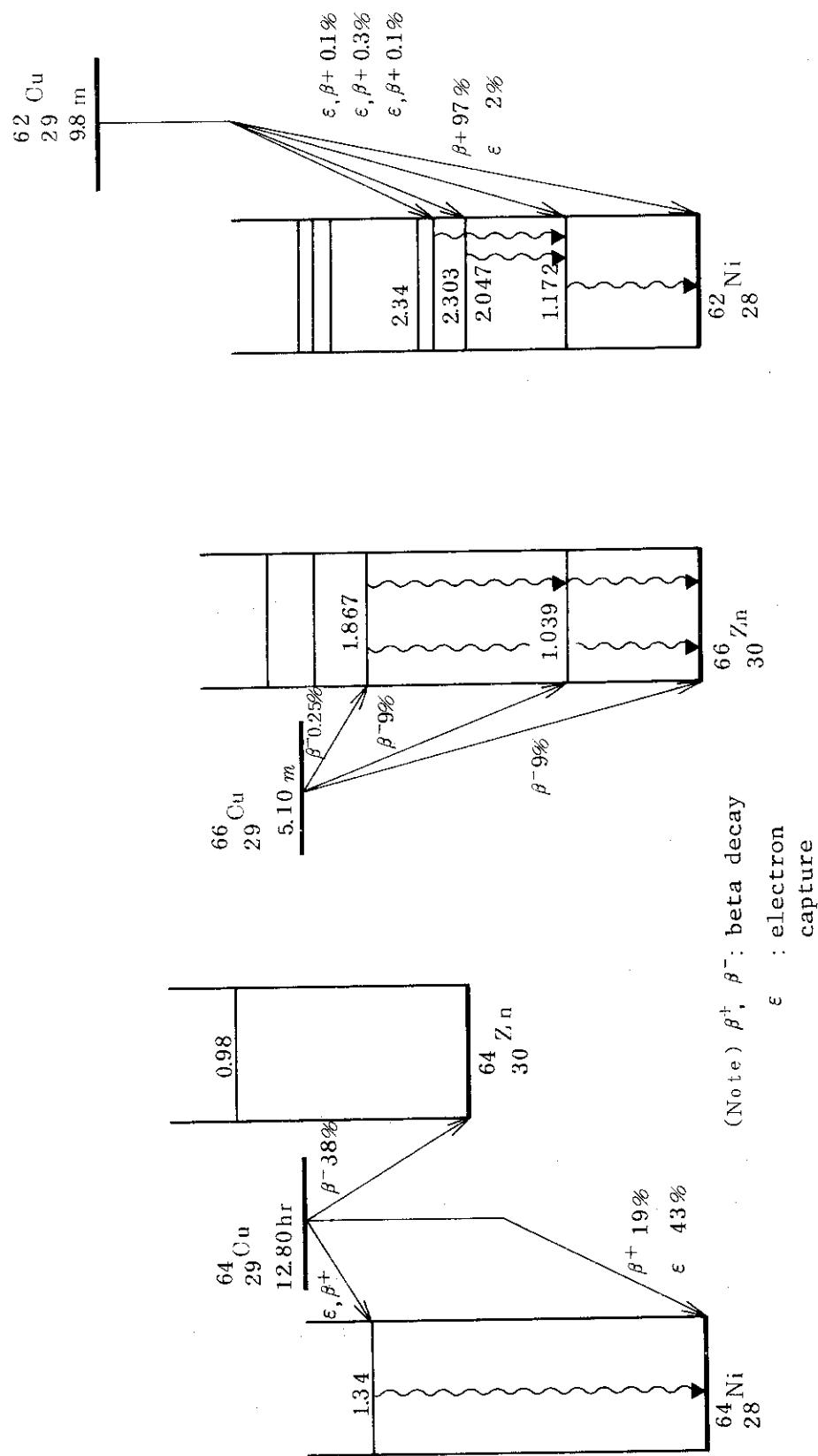


Fig. 3.1 Level scheme of activated copper

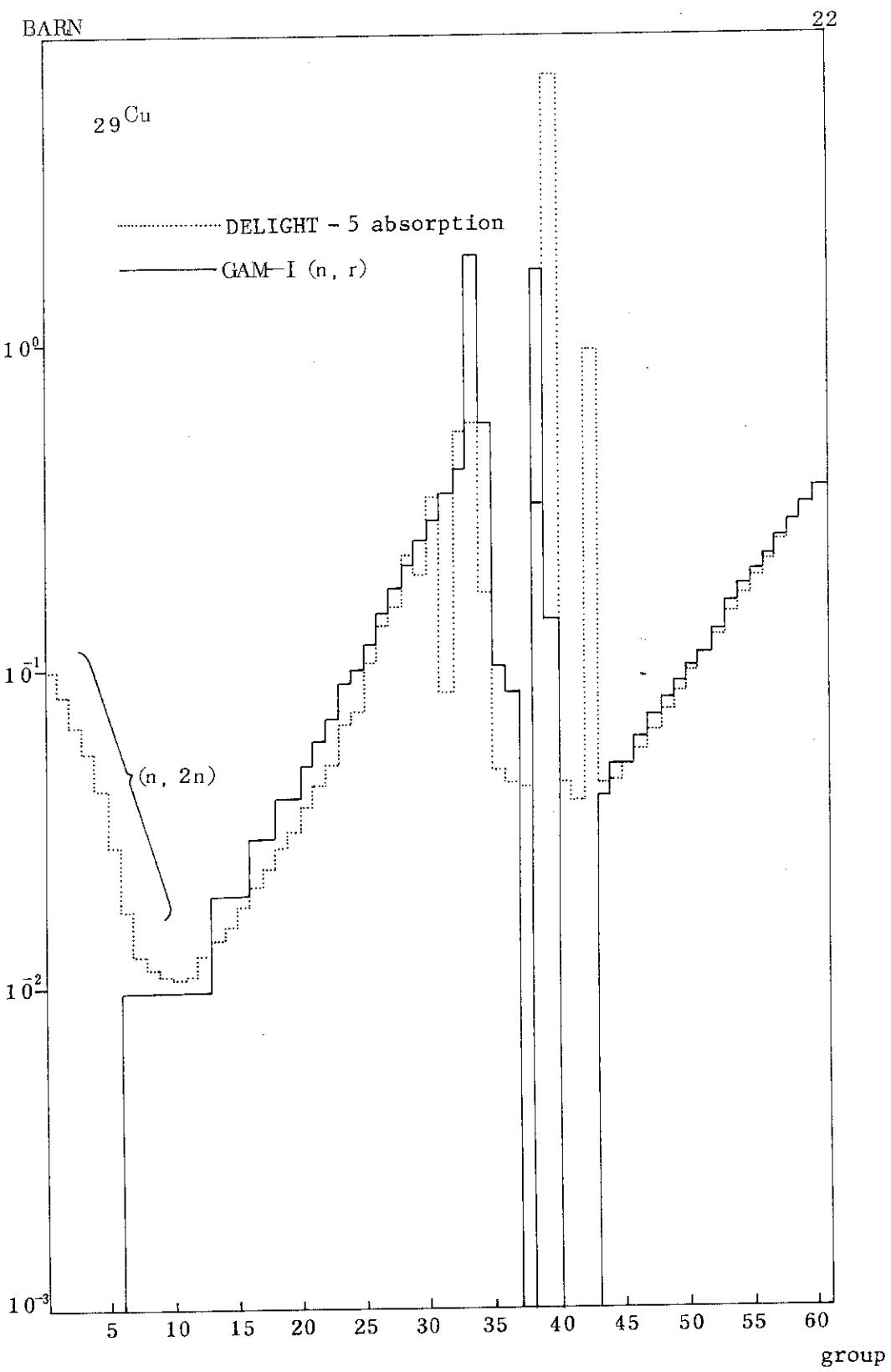


Fig. 3.2 Absorption cross section of copper (fast region)

## 4. 解 析

### 4.1 解析対象

銅反応率分布の解析は3種類の体系、すなわち、制御棒が挿入されていない体系、1本の制御棒が炉心中心軸に沿って90cmの深さまで挿入されている体系および、2本の制御棒が炉心中心軸に対称の位置に90cmの深さまで挿入されている体系を対象に行なった。

No.	制御棒本数	炉心領域要素数	炉心等価半径[cm]
1	0	72	28.958
2	中心1本	79	30.524
3	対称2本	83	31.464

3種類の実験体系をFig. 4.1に示す。

### 4.2 解析モデル

炉心は全て均質燃料として扱った。形状はR-Z座標あるいはR-θ-Z座標で表わし、炉心、可動反射体および固定反射体は、等体積の円柱で近似した。

制御棒が挿入された場合には、制御棒とその周囲の燃料棒6本からなる制御棒の単位格子を想定し、輸送計算から求めた吸収体の遮蔽因子を考慮して、格子内での均質化定数を作成した。この定数を拡散計算の中で均質化領域に適用することにより、制御棒挿入を模擬した。制御棒遮蔽因子は、Fig. 4.2に示された形状モデルに基づいて、TWOTRAN-2コードを用いて計算した。

制御棒未挿入体系の形状モデルをFig. 4.3に示す。制御棒が中心に1本挿入された体系の拡散計算形状モデルをFig. 4.4に示す。同体系の輸送計算形状モデルをFig. 4.5に示す。制御棒が対称に2本挿入された体系の拡散計算形状の横断面をFig. 4.6に、その縦断面をFig. 4.7に示す。

### 4.3 解析結果と検討

#### (1) 制御棒未挿入体系

制御棒が挿入されていない体系の、中心点から径方向に沿った反応率分布をFig. 4.8に示す。反応率分布は、炉心の中心に最も近い実験点に規格化した。可動反射内の最高点付近にわずか

な実験データとの差が見られるが、概して、一致は非常に良い。

同体系の軸方向反応率分布をFig. 4.9に示す。規格化は、 $R = 3.3$ における反応率分布の最高点に対して行なった。この規格化点の実験値は、軸方向に余弦分布を仮定した場合より若干高くなっている、その分だけ外側の反応率分布が実験値よりやや大きな値となっているが、これは、規格化に際しての処理上の問題である。全体的に実験データとの一致は良い。

輸送計算による制御棒未挿入体系の径方向および軸方向の反応率分布をFig. 4.10, Fig. 4.11に示す。径方向反応率分布は、可動反射体内の最高点から外周方向に向けて、実験値より若干下回る。一方、軸方向の反応率分布は、軸方向中心点と外端部の中間付近で実験値より大きくなり、ふくらみ気味となる。これは、輸送計算におけるメッシュ間隔が広いために起こるメッシュ効果ではないかと思われるが、更に検討が必要であろう。

#### (ii) 制御棒中心1本挿入体系

制御棒が中心に1本挿入された場合の拡散計算による反応率分布をFig. 4.12に示す。拡散計算では制御棒領域の均質化定数を用いているため、制御棒近辺の反応率分布は原理的に実験データとの相違が見られるが、均質化領域から少し離れると、拡散理論でも反応率分布は良く再現される。炉心から遠く離れた反射体では、反応率分布は実験値よりやや大きく評価されるが、全体的に、反応率分布は実験データとほぼ一致する。

同体系を輸送計算で解析した場合の反応率分布をFig. 4.13に示す。反応率分布は、Fig. 4.11で見られたような、ふくらみのため、実験データとの一致はあまり良くないが、制御棒近辺での反応率分布は、実験データとの一致は非常に良い。

#### (iii) 制御棒対称2本挿入体系

制御棒が2本対称に挿入された体系の反応率分布をFig. 4.14に示す。反応率分布を実験と比較すると、拡散計算のため、制御棒の極く近くでの一致は良くないが、炉心内の他の場所では、一致は良い。反射体内での反応率分布( $R = 4.8.3$ )は、実験値との相違が非常に大きく、他の解析例では相対的誤差が高々数%程度であったのに対し、この場合には約10%にも達する。

この点の相違だけが特に大きい理由は今後解明していく必要があろう。

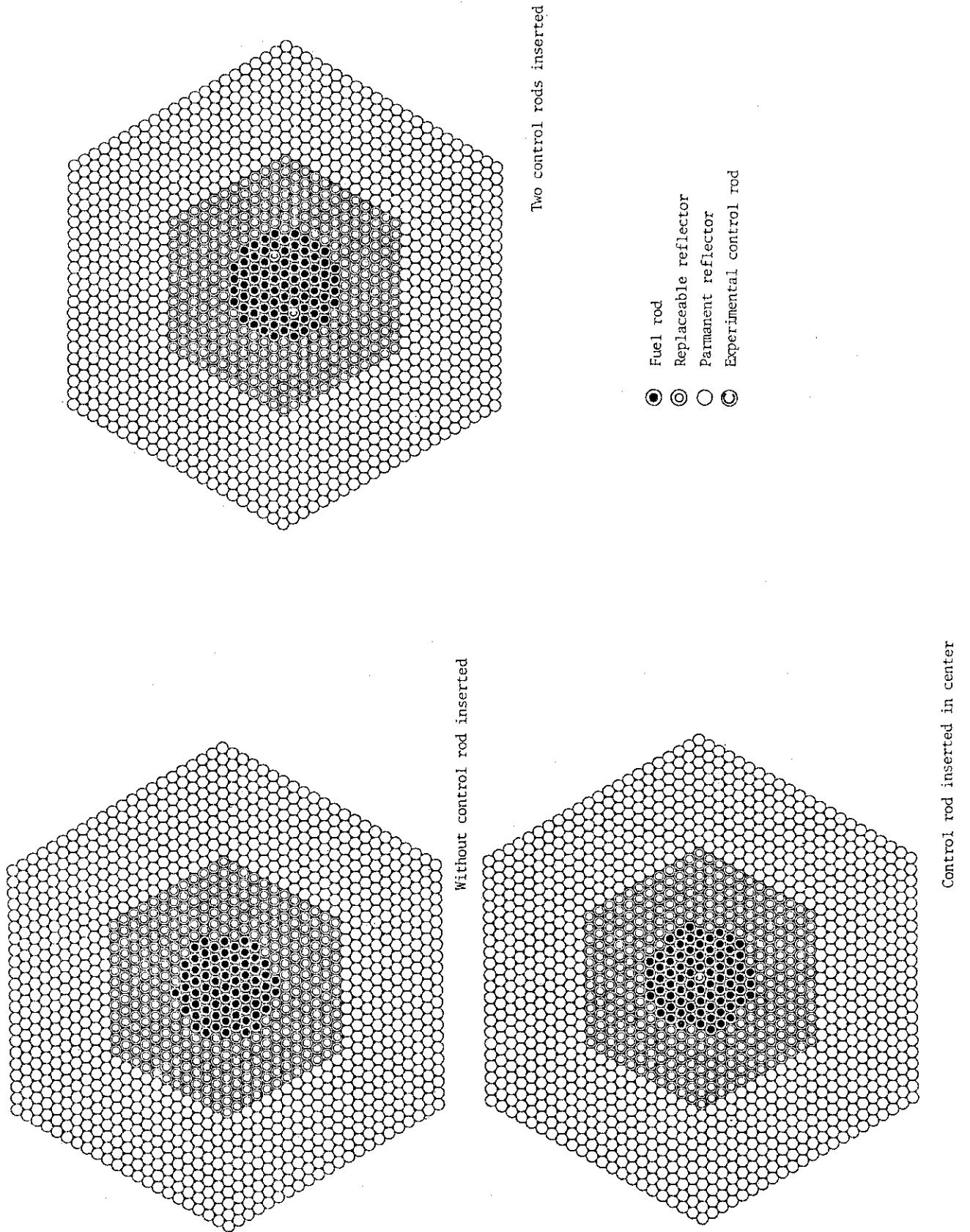


Fig.4.1 Experimental configuration of SHE-8

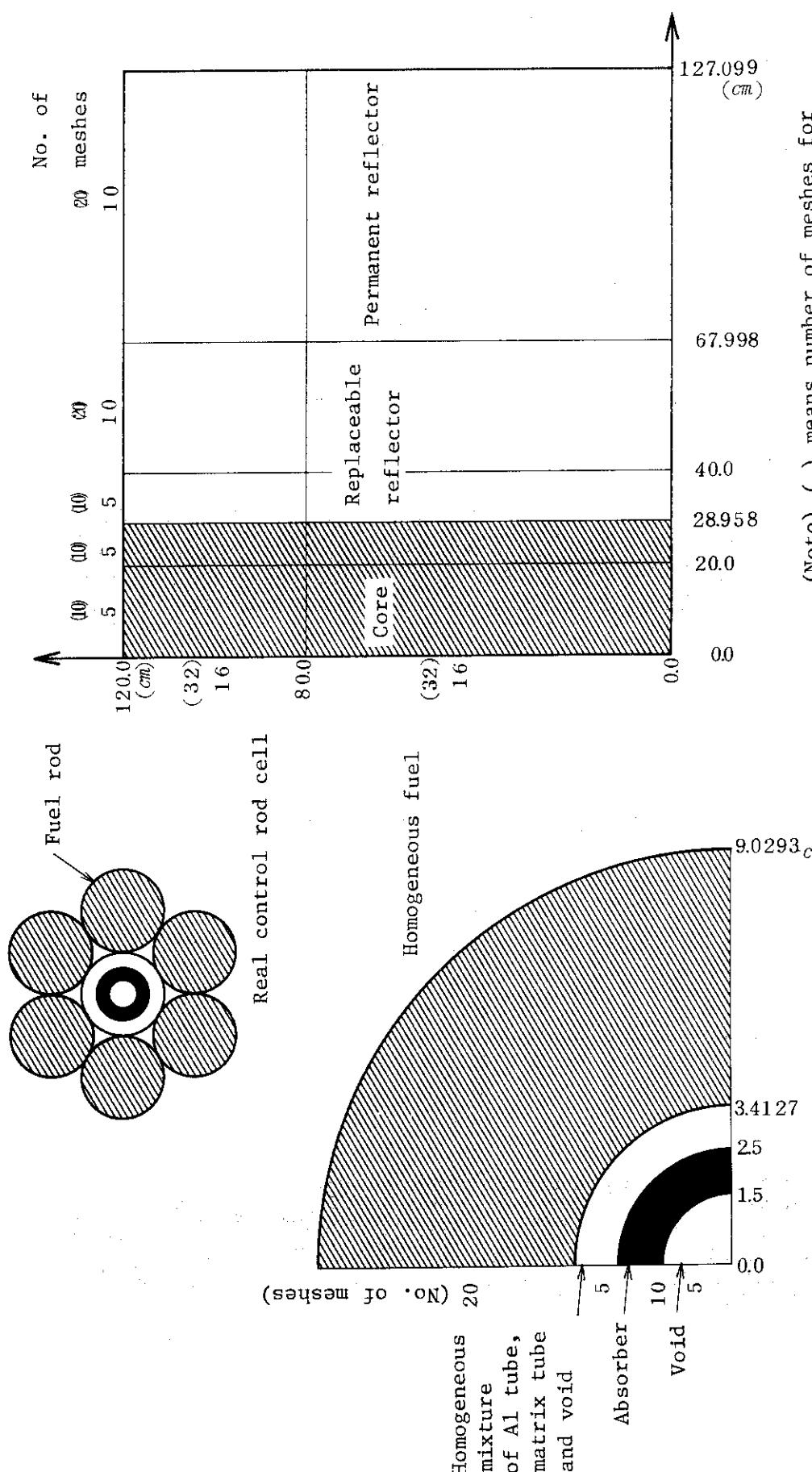
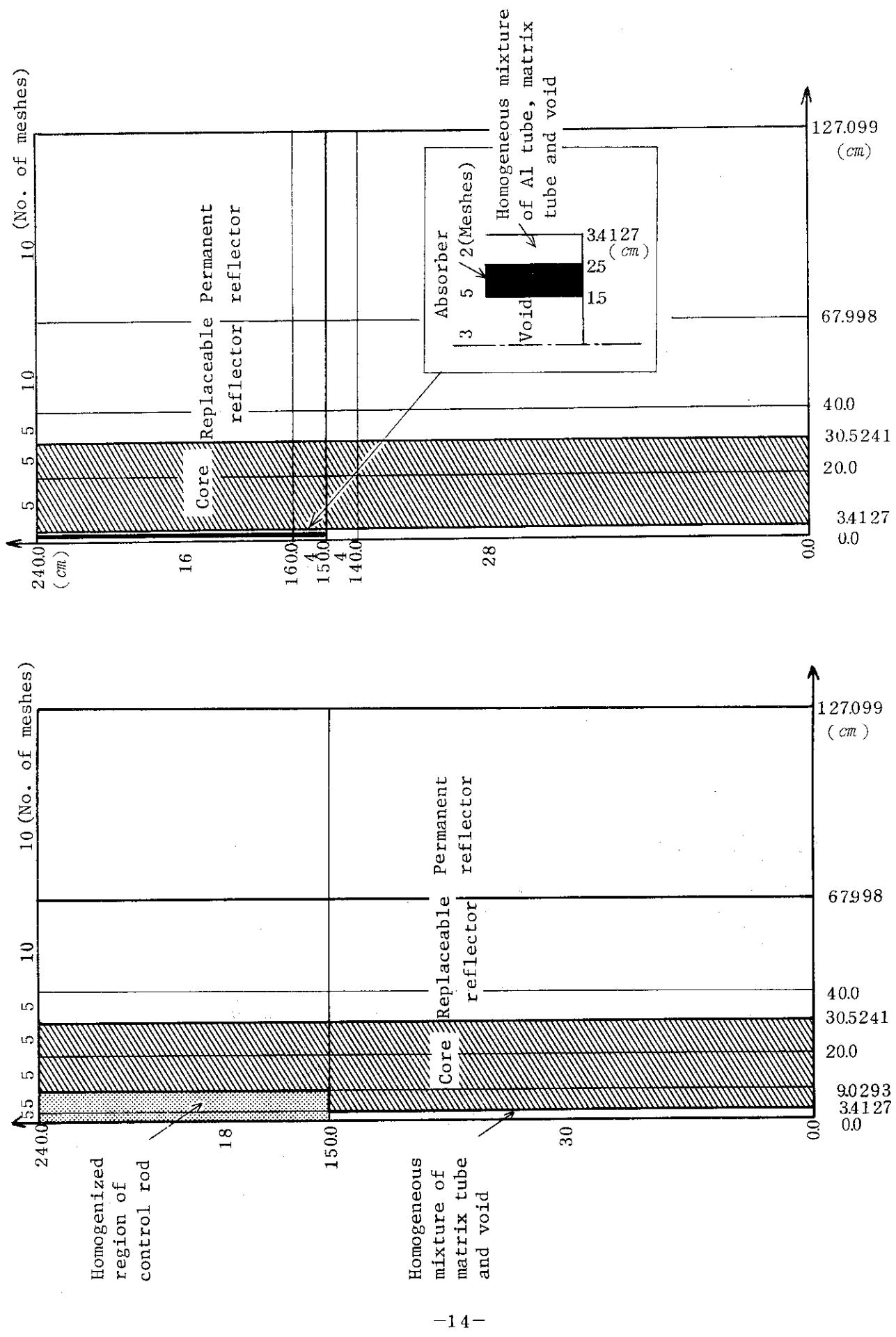


Fig.4.2 Calculational geometry of control rod shielding factor

Fig.4.3 Calculational geometry of core without control rod inserted



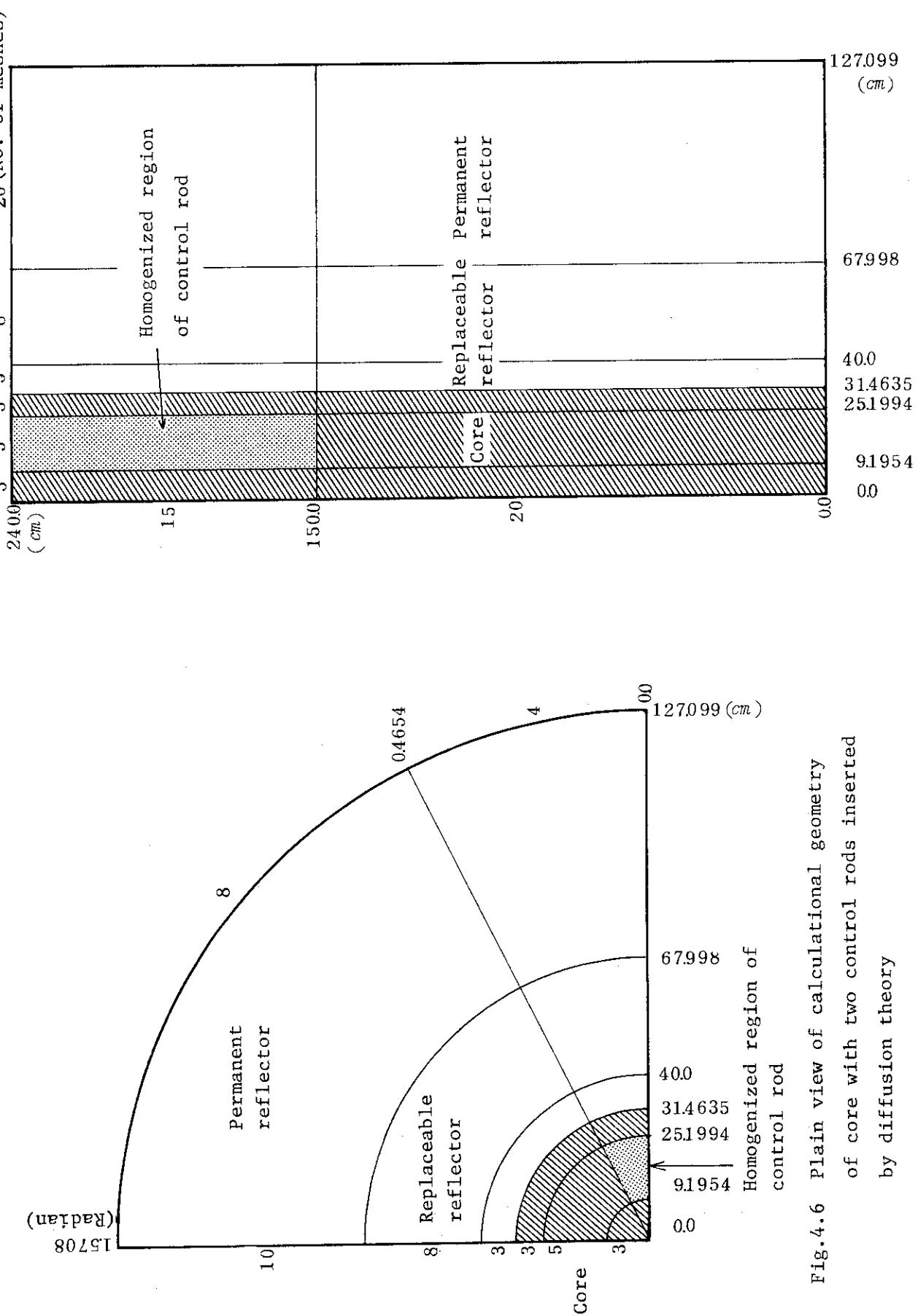


Fig.4.6 Plain view of calculational geometry of core with two control rods inserted by diffusion theory

Fig.4.7 Vertical view of calculational geometry of core with two control rods inserted by diffusion theory

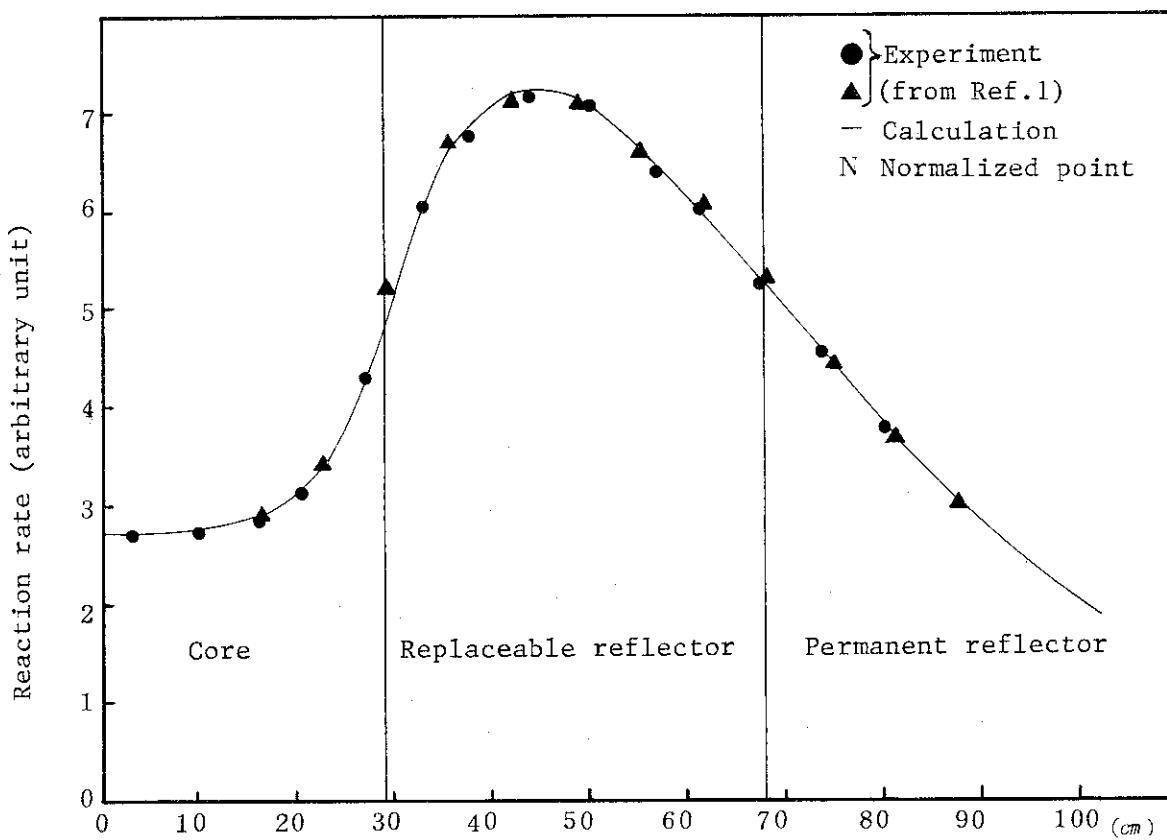


Fig.4.8 Radial reaction rate distribution of core without control rod inserted by diffusion calculation

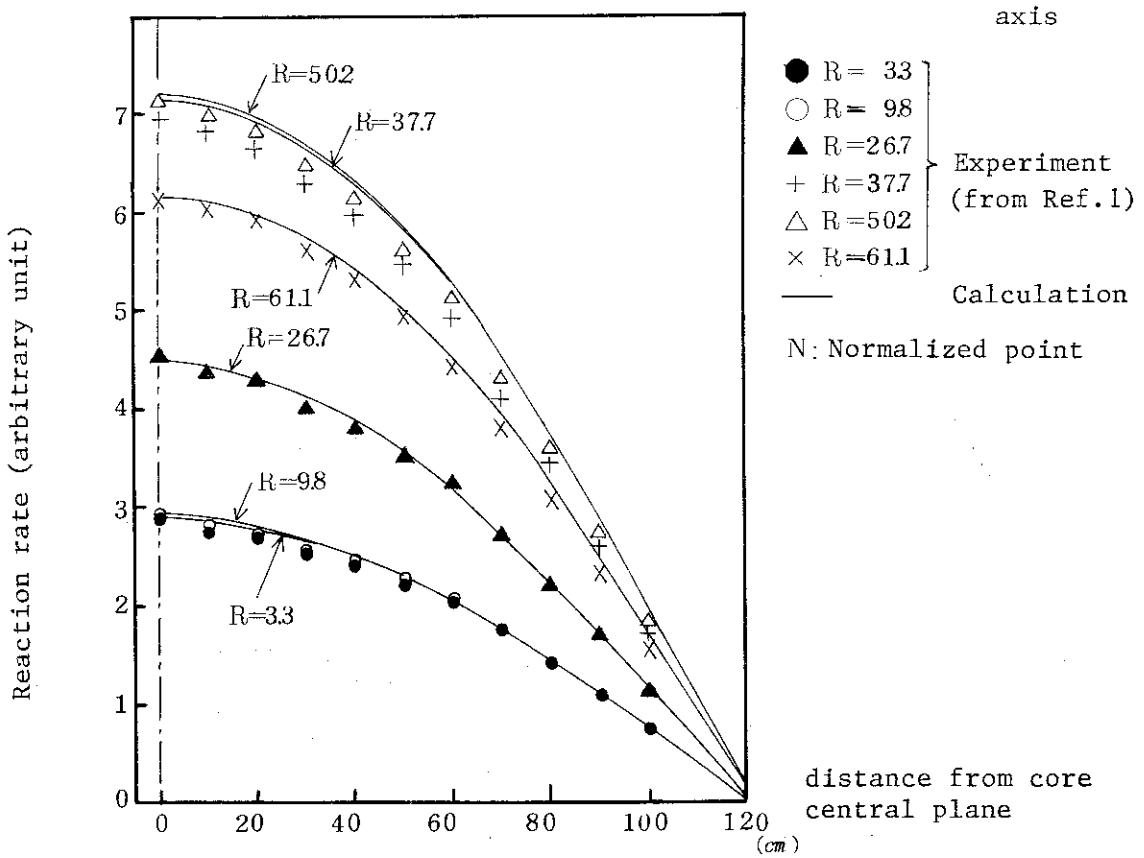


Fig.4.9 Axial reaction rate distribution of core without control rod inserted by diffusion calculation

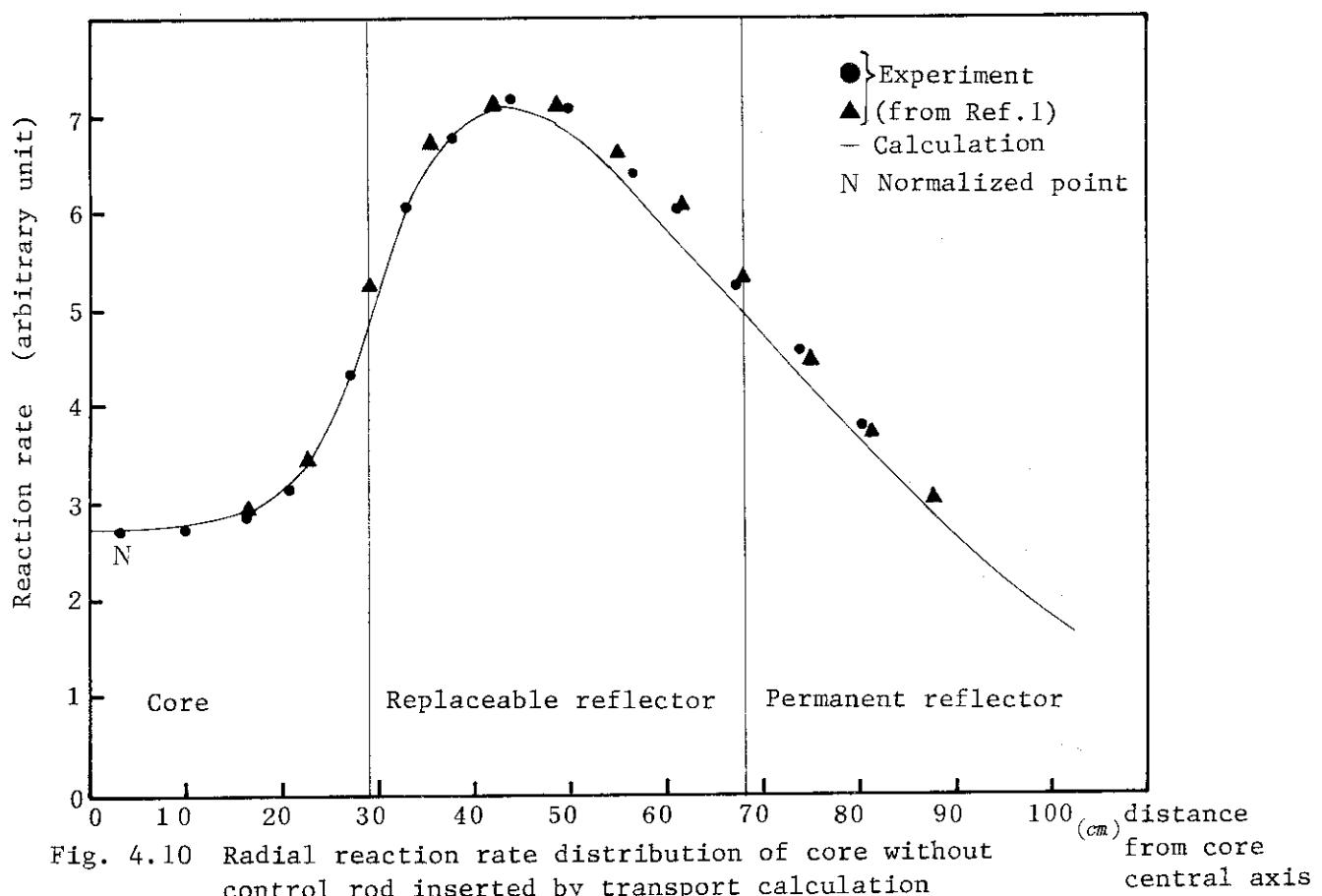


Fig. 4.10 Radial reaction rate distribution of core without control rod inserted by transport calculation

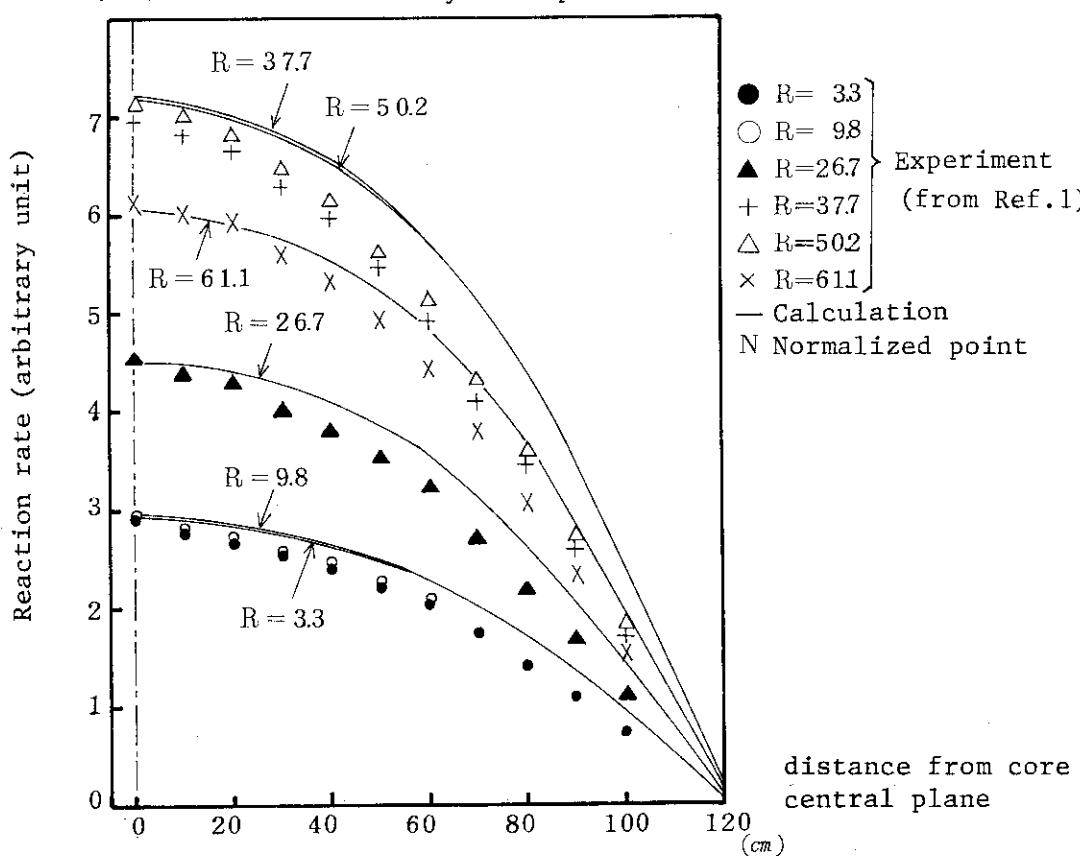


Fig. 4.11 Axial reaction rate distribution of core without control rod inserted by transport calculation

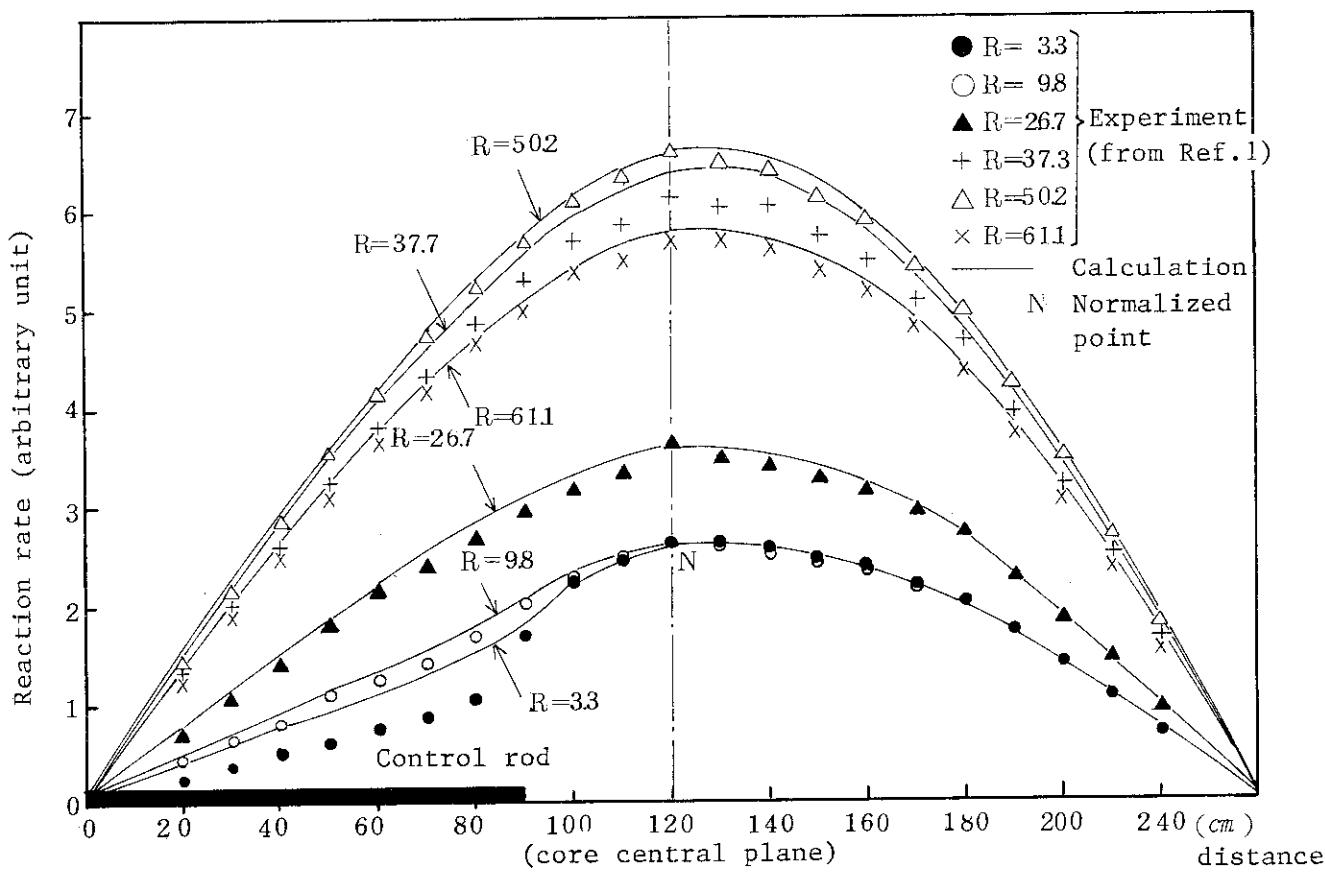


Fig. 4.12 Axial reaction rate distribution of core with control rod inserted by diffusion calculation

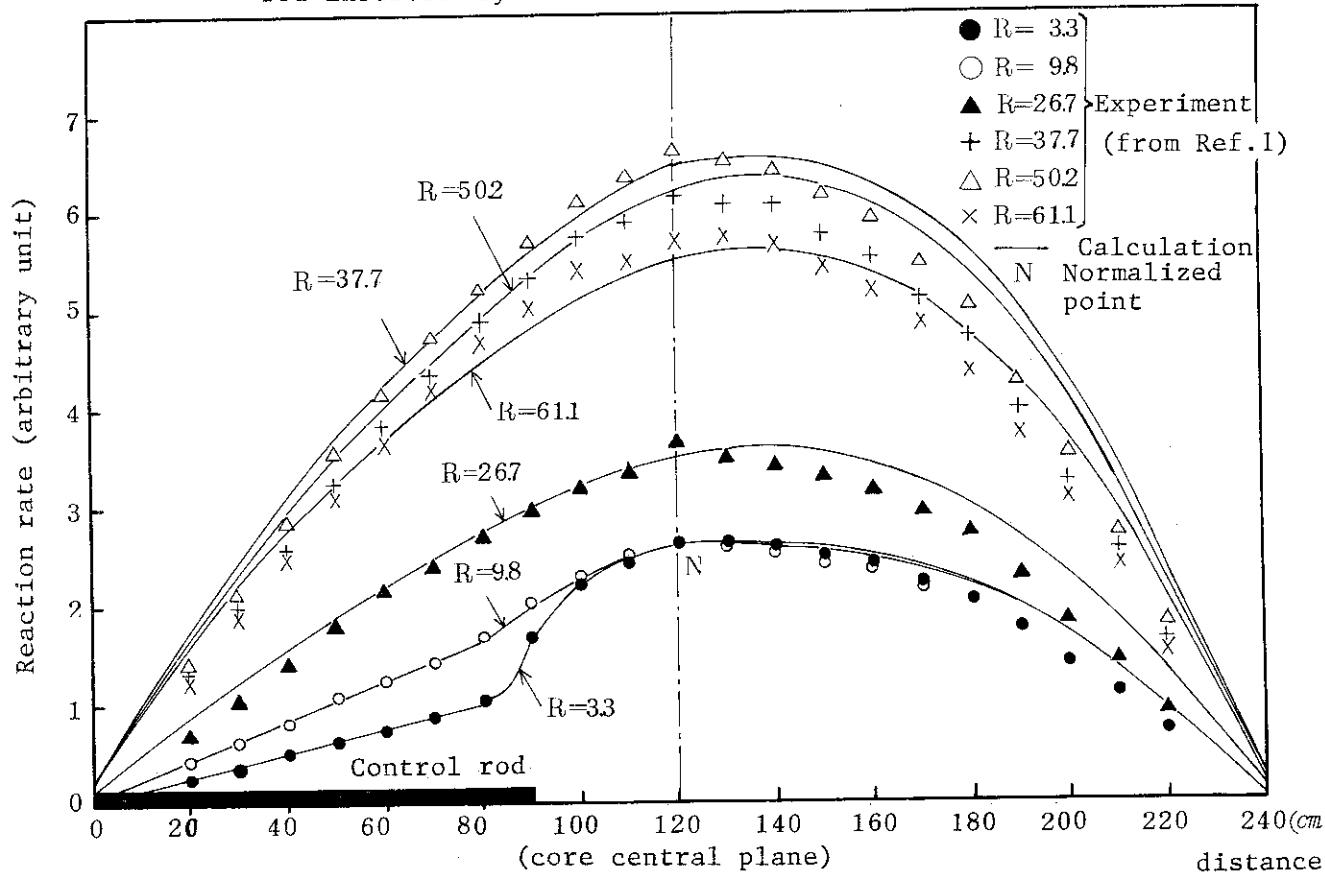


Fig. 4.13 Axial reaction rate distribution of core with control rod inserted by transport calculation

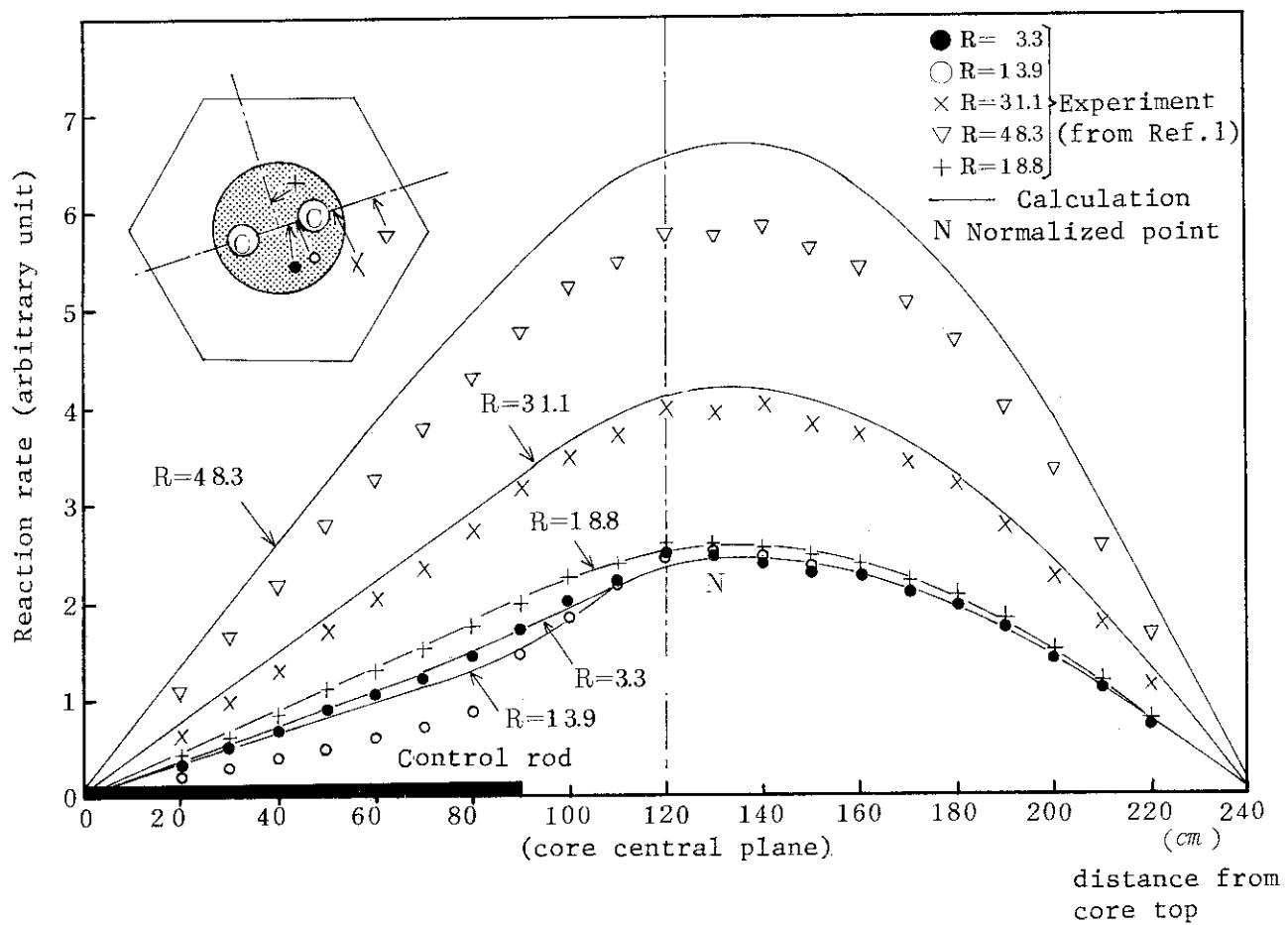


Fig. 4.14 Axial reaction rate distribution of core with two control rods inserted by diffusion calculation

## 5. まとめ

### 5.1 結論

銅反応率分布は、中性子束のエネルギー分布、空間分布および銅の放射化断面積の精度に依存するため、個々の評価は慎重に行なう必要がある。銅の放射化断面積を近似的に選択したにもかかわらず、全ての体系において比較的実験データとの一致が良かったのは、 $^{65}\text{C}$ (n, 2n)反応の寄与が少ないと加えて解析手法、解析に使用したデータが適切なものであったためであると思われる。

制御棒未挿入体系では、径方向の炉心と反射体との境界付近における反応率分布の立上がりや、軸方向の余弦分布は非常に良く実験を模擬している。

制御棒が挿入された場合、制御棒近辺の反応率分布は輸送計算により非常に良く実験データと一致する。また輸送計算から求めた遮蔽因子を用いて作成した制御棒領域均質化定数を拡散計算に適用すると、均質化領域以外の部分での反応率分布は実験データを良く再現することが出来る。従って、通常の設計手法を用いても、制御棒挿入時の中性子束分布は比較的精度良く計算されることが確認された。

以上の検討から、銅反応率分布の解析に使用した計算コード、核データおよび解析手法が妥当なものであることを確認することが出来た。

### 5.2 今後の課題

今後、同様の解析を更に精度良く行なうために念頭に入れるべき点を以下に述べる。

#### (i) 銅の放射化断面積

本解析では、高速領域に天然銅の(n, r)断面積を、熱領域に $^{63}\text{Cu}$ の $1/v$ 断面積を採用したが、厳密には、3.1節で述べたように、 $^{63}\text{Cu}$ の(n, r)断面積と $^{65}\text{Cu}$ の(n, 2n)断面積を重ね合わせたものを使用するのが適当である。

#### (ii) 炉心計算

拡散計算では、炉心と反射体の境界付近での反応率分布をより正確に扱うためには、燃料棒と黒鉛棒を個々に表現することが出来るTr-Z座標あるいはHex-Z座標を用いる方が良い。

全炉心の輸送計算を行なう場合、メッシュ数を多くし、メッシュ効果を低くすることが必要である。

#### (iii) メッシュ点の内挿

炉心計算に用いたメッシュ座標の直線内挿により実験点における中性子束値を求めたが、この内挿に、前後4点による3次曲線等を用いることにより、急激な中性子束の空間変化や、メッシュ間隔の広い炉心計算に対しても精度良く反応率分布が計算出来る。

## (IV) 反応率分布の規格化

本解析では、炉心中心軸に沿った反応率の最高点に対して規格化を行なったため、その点に対する測定誤差の影響を直接受けやすいが、このことを改善するためには、体系全体の反応率分布の総和で規格化する必要がある。この方法により、計算値と実験値の相違を定量的に評価することが可能となる。

## 謝 詞

本解析を行なうに際して、SHEに関する詳細なデータを提供して下さいました原子炉工学部・炉物理実験研究室の金子義彦室長および秋濃藤義氏に深く感謝いたします。

## 参 考 文 献

- (1) 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」 J AERI -1257  
(1977)
- (2) T.B.Fowler "Nuclear Reactor Core Analysis Code : CITATION"  
ORNL-TM-2496 (1971)
- (3) K.D.Lathrop "TWOTRAN-II : An Interfaced Exportable Version of the TWOTRAN Code for Two-Dimensional Transport" LA-4848-MS  
(1973)
- (4) 新藤隆一、他「高温ガス冷却炉・格子燃焼計算コードDELIGHT-4」 J AERI -M 8097 (1979)
- (5) J.S.Dudek "GAM-I : A Consistent P1 Multigroup Code for the Calculation of Fast Neutron Spectra and Multigroup Constants"  
GA-1850 (1961)
- (6) 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)-」  
J AERI -M 9955 (1982)
- (7) 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)-」 J AERI -M 9911 (1982)
- (8) 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)-」 J AERI -M 9942 (1982)
- (9) 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)-」 J AERI -M 9956 (1982)
- (10) 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)-」，私信

## (IV) 反応率分布の規格化

本解析では、炉心中心軸に沿った反応率の最高点に対して規格化を行なったため、その点に対する測定誤差の影響を直接受けやすいが、このことを改善するためには、体系全体の反応率分布の総和で規格化する必要がある。この方法により、計算値と実験値の相違を定量的に評価することが可能となる。

## 謝 詞

本解析を行なうに際して、SHEに関する詳細なデータを提供して下さいました原子炉工学部・炉物理実験研究室の金子義彦室長および秋濃藤義氏に深く感謝いたします。

## 参 考 文 献

- (1) 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」 J AERI -1257  
(1977)
- (2) T.B.Fowler "Nuclear Reactor Core Analysis Code : CITATION"  
ORNL-TM-2496 (1971)
- (3) K.D.Lathrop "TWOTRAN-II : An Interfaced Exportable Version of  
the TWOTRAN Code for Two-Dimensional Transport" LA-4848-MS  
(1973)
- (4) 新藤隆一, 他「高温ガス冷却炉・格子燃焼計算コードDELIGHT-4」 J AERI -M  
8097 (1979)
- (5) J.S.Dudek "GAM-I : A Consistent P1 Multigroup Code for the  
Calculation of Fast Neutron Spectra and Multigroup Constants"  
GA-1850 (1961)
- (6) 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)-」  
J AERI -M 9955 (1982)
- (7) 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)-」 J AERI -M 9911 (1982)
- (8) 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)-」 J AERI -M 9942 (1982)
- (9) 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)-」 J AERI -M 9956 (1982)
- (10) 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)-」, 私信

## (iv) 反応率分布の規格化

本解析では、炉心中心軸に沿った反応率の最高点に対して規格化を行なったため、その点に対する測定誤差の影響を直接受けやすいが、このことを改善するためには、体系全体の反応率分布の総和で規格化する必要がある。この方法により、計算値と実験値の相違を定量的に評価することが可能となる。

## 謝 詞

本解析を行なうに際して、SHEに関する詳細なデータを提供して下さいました原子炉工学部・炉物理実験研究室の金子義彦室長および秋濃藤義氏に深く感謝いたします。

## 参 考 文 献

- (1) 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)
- (2) T.B.Fowler "Nuclear Reactor Core Analysis Code : CITATION"  
ORNL-TM-2496 (1971)
- (3) K.D.Lathrop "TWOTRAN-II : An Interfaced Exportable Version of  
the TWOTRAN Code for Two-Dimensional Transport" LA-4848-MS  
(1973)
- (4) 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)
- (5) J.S.Dudek "GAM-I : A Consistent P1 Multigroup Code for the  
Calculation of Fast Neutron Spectra and Multigroup Constants"  
GA-1850 (1961)
- (6) 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)
- (7) 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)
- (8) 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)
- (9) 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)
- (10) 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)-」, 私信