

JAERI-M
6701

実験用制御棒が挿入された黒鉛減速炉心
SHE-8における中性子束分布の測定
と解析

1976年9月

秋濃 藤義・北館 憲二・金子 義彦

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

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

実験用制御棒が挿入された黒鉛減速炉心SHE-8における
中性子束分布の測定と解析

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

秋濃藤義・北館憲二・金子義彦

(1976年8月12日受理)

高温ガス実験炉では、燃料温度を制限値以下に保ちながら所期の冷却材ガス出口温度を確保することが要求される。そのため、炉心における出力分布を最適化する必要があり、同時に制御棒挿入時の出力分布の空間変動に対する核計算の予測精度をあらかじめ実証しておく必要がある。そこで、SHE-8炉心(黒鉛減速20%濃縮ウラン平均質体系、 $C_{235}/U = 2226$)に、実験炉の予備設計に採用された制御棒と形状や炭化ボロン濃度が同じである実験用制御棒を挿入し、3次元出力分布の歪みを銅の放射化法によって測定した。制御棒の配置は次の4ケースとした。

ケース1；基準状態の炉心

ケース2；炉心軸上に1本実験用制御棒が挿入された炉心

ケース3；炉心軸から偏心した位置に1本実験用制御棒が挿入された炉心

ケース4；ケース3の位置と炉心軸対称に2本実験用制御棒が挿入された炉心

一方、3次元2群拡散Source-Sink法により、中性子束分布を計算し銅の放射化量を求め実験と比較した。実験・計算の一致は炉心内部ではかなり良く、軸方向の高温点因子についていうと平均1.2%、最高でも3%の相違にとどまり、ほぼ核設計に対する要求精度を満しているものと判断される。しかし、半径方向についていうと、5%以上の実験・計算の相違が高温点因子についてあり核計算精度の向上が必要であることがわかった。

Measurement of the Neutron Flux Distribution
in Graphite-moderated Core SHE-8 Inserted with
Experimental Control Rods

Fujiyoshi AKINO, Kenji KITADATE
and Yoshihiko KANEKO

Division of Reactor Engineering, Tokai, JAERI

(Received April 12, 1976)

A very-high temperature gas cooled reactor is so designed to attain the desired outlet coolant gas temperature under the limiting maximum temperature of fuel elements. Optimization in the spatial power distribution is thus necessary by suitable arrangement of the control rods and fuel exchange program. In this respect, high accuracy in calculation of the spatial power distribution is required. In this report, experiment and calculation are compared for a 20 % enriched uranium loaded and graphite moderated core, SHE-8. Induced activity of the copper pins were measured for the following four core configurations:

- Case 1 : standard core without control rods
- Case 2 : a single control rod inserted along the core axis
- Case 3 : a single control rod inserted off the core axis
- Case 4 : two control rods inserted symmetrically along the
core axis

The experimental control rods used are the pellets of a cold pressed homogeneous mixture of carbon and B_4C powders contained in thin-walled aluminum tubes. The diameter of the experimental control rods and their B_4C content are the same as in the preliminary core design of UHTGR by JAERI. Calculation of the neutron flux distribution was made by the three-dimensional two-group source-sink method. Agreement between experiment and calculation is fairly good, so the axial peaking factor can be estimated within the error of 1 ~ 3 %. Discrepancies in the radial peaking factor are large, however, about 5 %.

目 次

1	序 言	1
2	実 験	2
2.1	実験体系	2
2.2	実験用制御棒	2
2.3	銅ピンの放射化量の測定	3
3	実験解析	13
3.1	SHE体系の核定数	13
3.2	実験用制御棒の直線外挿距離	14
3.3	銅の放射化断面積	14
3.4	中性子束分布の計算方法	15
3.5	測定値と計算値との比較	16
4	討 論	22
5	結 論	24
	文 献	25

1 序 言

高温ガス実験炉では、出力の局所的なピーキングを避けて平坦化し、できるだけ高い温度で運転することが要求される。したがって、炉設計の段階で、出力配分の計算の予測精度を高めることが重要であって、2次元、3次元の炉心中性子束分布計算コードの整備が進められている。大型電子計算機の活用により詳細な炉心解析が可能になってはいるが、これらの計算結果を全く正しいものとして実際の本設計にとりかかると問題があり、精度の吟味が不可欠である。その目的のためには、実験と比較することにより、炉定数、計算手法の適否を判断するというやり方が最も確かであるので、臨界実験データの必要な理由がここにある。実験炉で炉心出力分布が最も歪むのは、燃焼が始らない、つまり、制御棒が炉心に一番深く挿入され反応度が押えられている状態である場合が多い。もちろん、制御棒引抜き計画や、燃料、可燃性毒物の燃焼状況にも依存してくるであろうが、制御棒が深く挿入されているときの出力分布の歪みから発生する高温点因子の計算は、核計算技術の中でも最も精度の高いものが要求される課題である。そこで、黒鉛減速の臨界実験装置、SHEに、実験用制御棒を挿入した状態で臨界にして、出力の歪みを実測する実験を開始した。今回の報告は、SHE-8炉心におけるものであるが、現在SHE-T-1炉心について実験もひきつづき行なわれており次回に報告される予定である。実験用制御棒は実験炉の第2次予備¹⁾設計炉心に使用された制御棒を核的に模擬することを目的として、黒鉛にB₄C粒を均質に10w/oの濃度で混合させ冷間圧縮して作成したものである。SHE-8炉心は、炉心部の燃料濃度は^C/²³⁵U 原子比2226であって、Mark III炉心²⁾よりかなり濃度が高いが、トリウムの装荷を想定すると、このくらいの濃度の炉心になると考えられる。

出力分布を測定するには、²³⁵U 箔や核分裂計数管の計数、あるいは臨界実験装置の燃料要素の核分裂生成物からのガンマ線の分布を測定するのが直截的であるが、ここでは銅ビンの放射化量の分布を測定することにした。銅は、熱中性子吸収断面積が小さく自己遮蔽現象が起きにくいこと、熱中性子放射化量の共鳴吸収による熱外中性子放射化量に対する比がかなり燃料要素中の²³⁵Uの核分裂におけるものと数量的に近いことから、銅の放射化分布はかなり良く出力の空間分布を表現していると考えられる。

2 実験

2.1 実験体系

実験を行った平均質臨界集合体の炉心構成は炉心番号，SHE-8体系である。20%濃縮酸化ウランを黒鉛中に分散した平均質燃料を使用し， $C/^{235}U$ 原子数比は炉心部で2226である。SHEは水平2分割型集合体であり，一辺約120 cm，高さ240 cmの六角柱状をしている。中心部が炉心で直径約59.4 cmで周辺は厚さ約99.5 cmの黒鉛反射体でかこまれている³⁾。SHE-8体系の臨界量は燃料棒数146.4本， ^{235}U 換算で8.69 kgであり，高温ガス炉の第2回の予備設計炉心の直径110 cmと比較するとかなり小型の炉心になっている。

SHE-8炉心の基準状態の炉心の燃料装荷の様態をFig.1に示す。この炉心の炉物理的特徴は，黒鉛炉共通の問題のほか，濃縮ウランを使用していることの特質として反射体が極めて有効に働き，臨界量が裸炉の場合の約7分の1程度であること，炉心部から反射体部にかけてかなりはげしい熱中性子スペクトルおよび熱外中性子スペクトルの空間変化があること，および反射体部に大きな熱中性子束のピークができることなどがあげられる。これらは制御棒効果の決定にも強い影響を有しているので核計算の際，特に注意を払う必要がある。

出力分布の測定を行った実験用制御棒の配置の実験体系は，

ケース1); 基準状態の炉心

ケース2); 炉心軸上に1本実験用制御棒が移動側 $1/2$ 集合体背面より90 cmの深さで中途挿入された炉心

ケース3); 炉心軸からの距離17.2 cmの偏心した位置に1本実験用制御棒が同様に中途挿入された炉心

ケース4); ケース3の位置と炉心軸対称に2本実験用制御棒が同様に中途挿入された炉心
実験用制御棒の尾部はSHEの安全棒等の固定用架台に強固に固定した支持機構に連結されていて，地震等により脱着することがないようにになっている。

ケース1), 2), 3)および4)の実験体系の炉心断面図をFig.2, 3, 4 および5に示した。またこれらの図には銅ピンの設定位置も記した。ケース1)の体系における銅ピンの設定位置であるA, B, C点は炉心領域であり，特にA点は炉心軸の附近における測定点であり，ケース2)で実験用制御棒が炉心軸に挿入された場合には制御棒表面近くの軸方向の測定点となる。またC点は炉心領域-反射体領域の境界近くの測定点で，D, EおよびF点は反射体領域内にある。

同様にケース3) および4)の実験体系についても，銅ピンは実験用制御棒の表面(CおよびE点)，炉心領域内(C, D, E, H) および反射体領域内(A, B, F, G)に設置された。

2.2 実験用制御棒

実験に使用された実験用制御棒⁴⁾は，高温ガス実験炉の炉心設計に採用されたものと核的には同一であることをめざし，反応度効果評価用の核計算コードの信頼性が評価されるよう留意した。またFig.6のようなアルミニウム製外筒部にFig.7に示す吸収体ペレットをち密に

装填したものである。外筒部は外径53mm，内径51mm，肉厚1mm，長さ1155mmのアルミニウム円筒に固定用の尾がついたものである。吸収体ペレットはFig.7に示すように外径50mm，内径30mm，高さ50mmの中空円筒形のものであり，天然黒鉛粒中の B_4C 粒の混合濃度はメーカ側は9.75w/oという数値を原研側は分析センターにて分析し，10.26w/oという数値を得ている。この数値は仕様の10.0w/oの上下にばらついているが，平均的には10.0w/oになっていることは，吸収ペレットの製造工程から考えて確かであろう。

B_4C 粒は，電気化学工業製のものであって，粒度100~200メッシュ，全ホウ素量の78.6%，全炭素量20.8%，鉄分0.06%のものである。

2.3 銅ピンの放射化量の測定

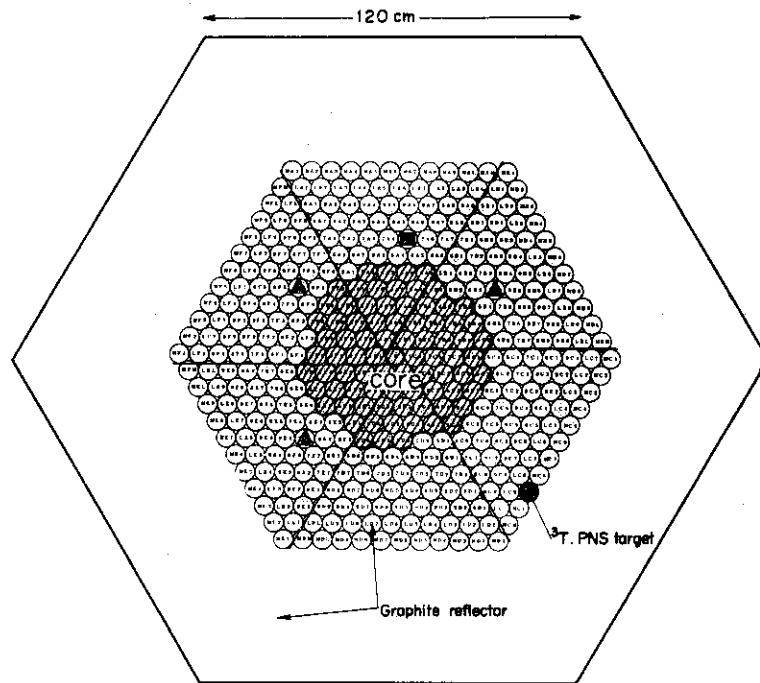
出力分布の測定は銅ピンを用いた放射化法によって行った。銅ピンは直径2mmの銅のワイヤーを長さ10mmに切断したもので，各銅ピンの感度較正はあらかじめ重量測定をして重量に比例するとしてきだめた。またSHE炉心への銅ピンの設定は直径1.5mm，厚さ0.2mmのアルミニウム管を用い，これに10cm間隔に銅ピンを取り付け，炉心を構成するマトリックス管間の空隙部に挿入した後，10W，2時間の条件でSHEの運転を行った。

銅は69.1%の ^{63}Cu と30.9%の ^{65}Cu よりなるが，中性子吸収によって生成する ^{64}Cu と ^{66}Cu は各々12.8時間と5.1分の半減期で γ 線を放出して減衰していく。

^{66}Cu の消滅をまって ^{64}Cu の崩壊に原因する陽電子のannihilationの γ 線や ^{64}Ni の励起レベルからの1.34MeVの γ 線及びその散乱 γ 線等のクロスな γ 線のうち0.1MeV以上のものをNaI(Tl)検出器で計数して， ^{63}Cu の放射化量を評価した。

^{64}Cu の崩壊のレベルスキームをTable 1⁵⁾に，銅ピンの γ 線の測定系のブロック図をFig.8に，またNaI(Tl)シンチレーション検出器による波高分布をFig.9にそれぞれ示した。

Fig.10に銅ピンの放射化量の時間的減衰曲線を示した。



- key
- ▲ ; Safety rod
 - ; Control rod

Fig. 1 Fuel loading pattern of SHE-8

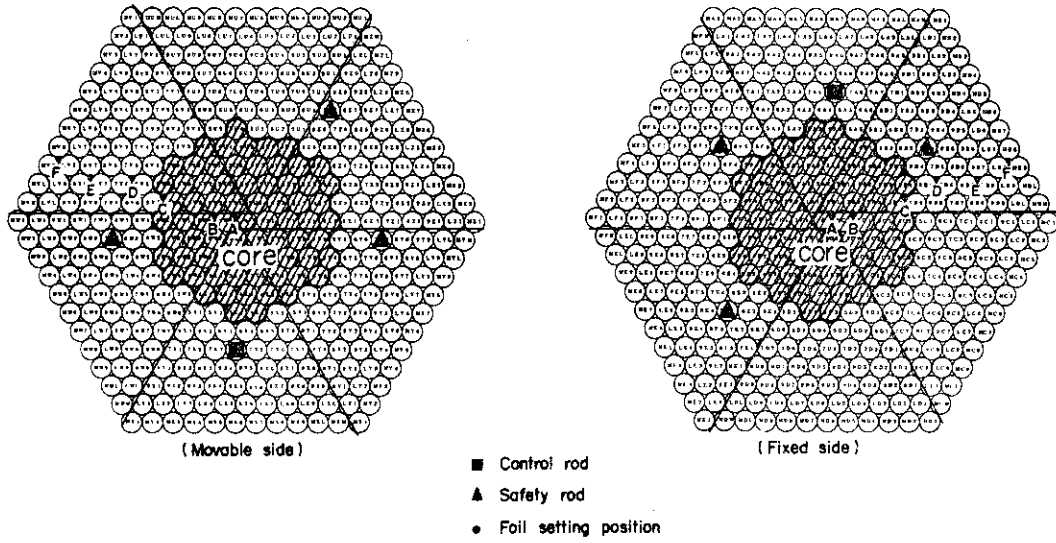


Fig. 2 (a) Foil setting positions for measurements of axial neutron flux distribution in SHE-8
(standard core)

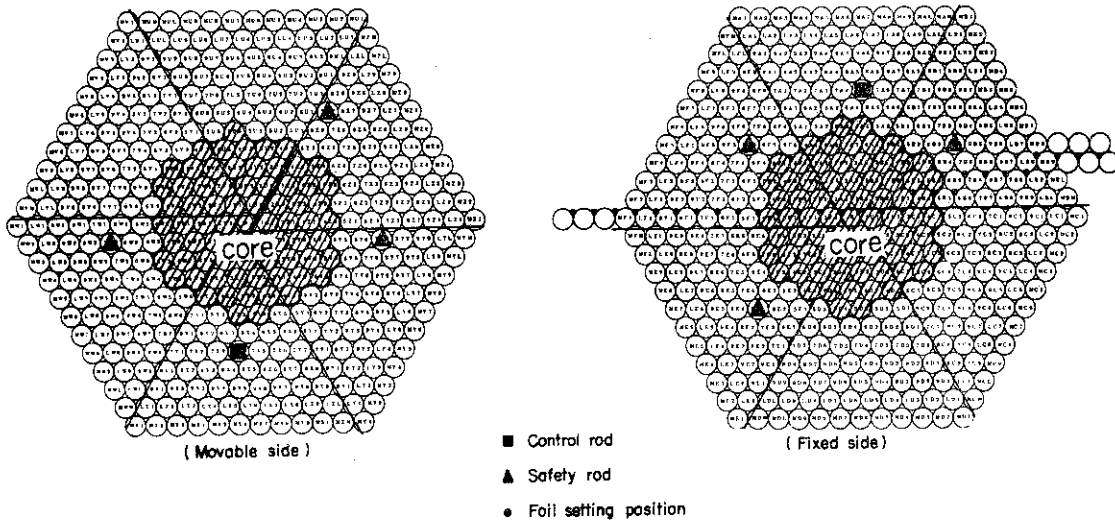


Fig. 2 (b) Foil setting positions for measurements of radial neutron flux distribution in SHE-8
(standard core)

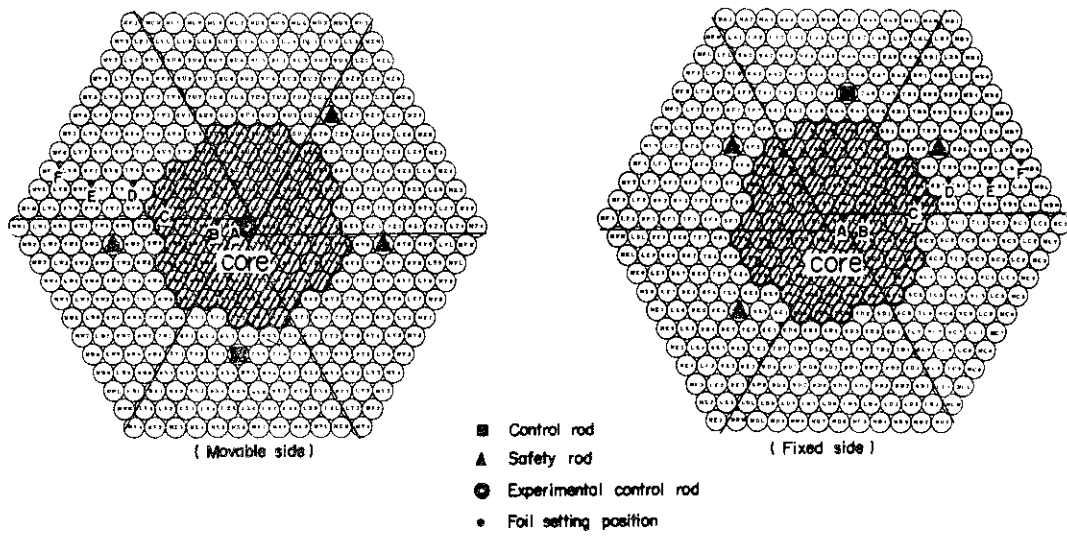


Fig.3(a) Foil setting positions for measurement of axial neutron flux distribution SHE-8 core inserted with one experimental control rod along the core center axis

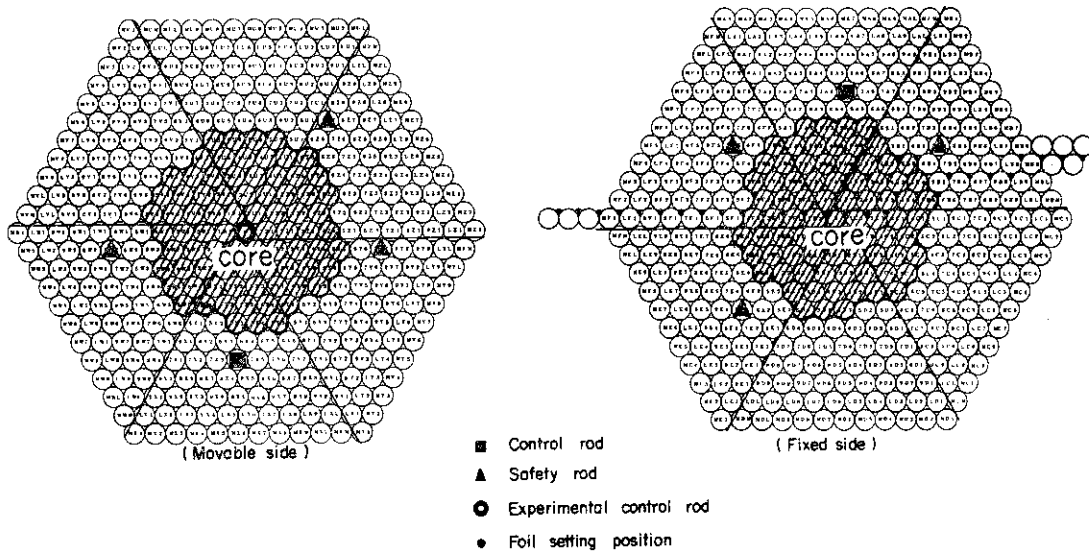


Fig.3 (b) Foil setting positions for measurement of radial neutron flux distribution in SHE-8 core inserted with one experimental control rod along the core center axis

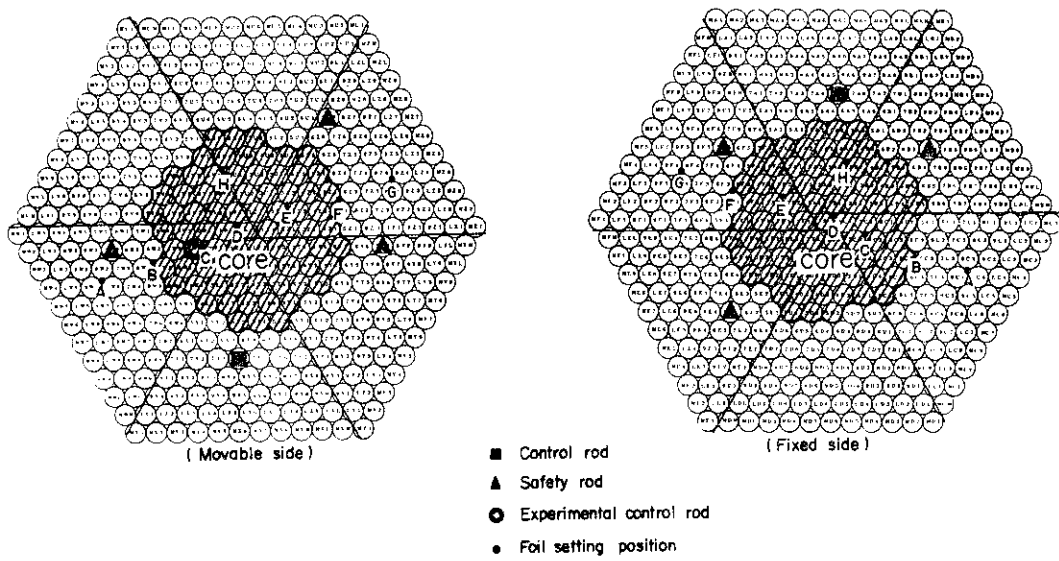


Fig. 4 (a) Foil setting positions for measurement of axial neutron flux distribution in SHE-8 core inserted with one experimental control rod along the off core center axis

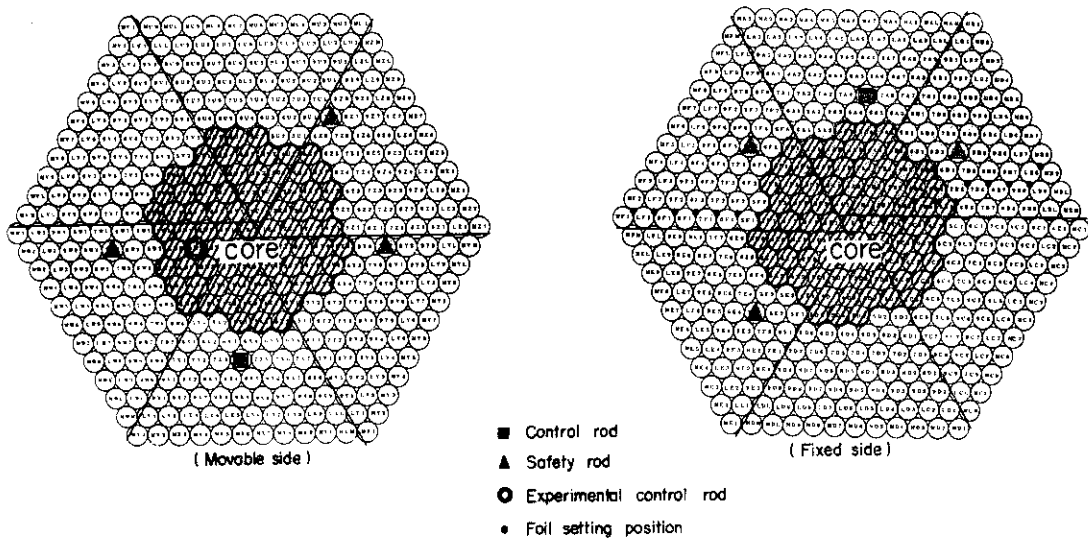


Fig. 4 (b) Foil setting positions for measurement of radial neutron flux distribution in SHE-8 core inserted with one experimental control rod inserted along the off core center axis

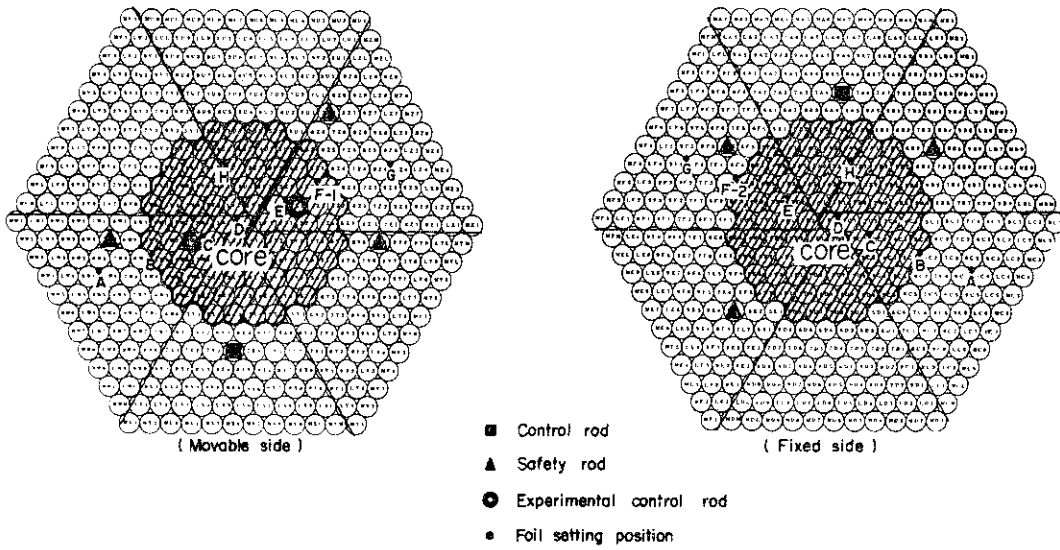


Fig.5 (a) Foil setting positions for measurement of axial neutron flux distribution in SHE-8 core inserted with two experimental control rods

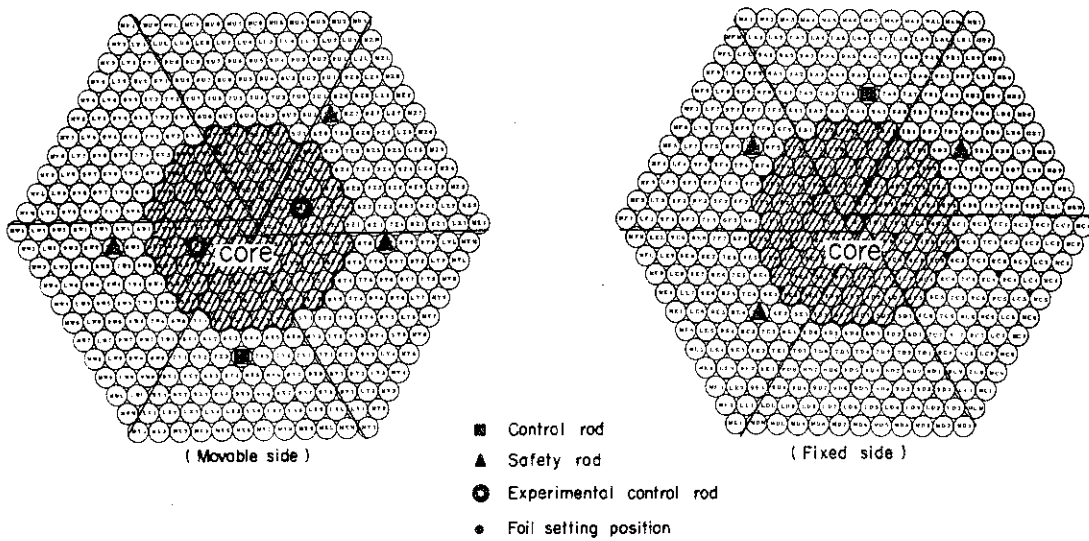


Fig. 5 (b) Foil setting positions for measurement of radial neutron flux distribution in SHE-8 core inserted with two experimental control rods

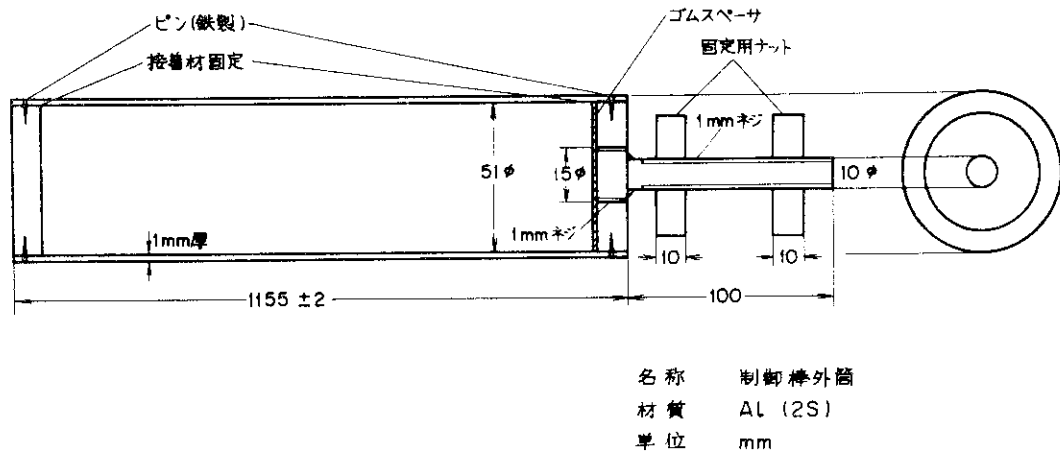


Fig. 6 Aluminum cylinder used for control rod.

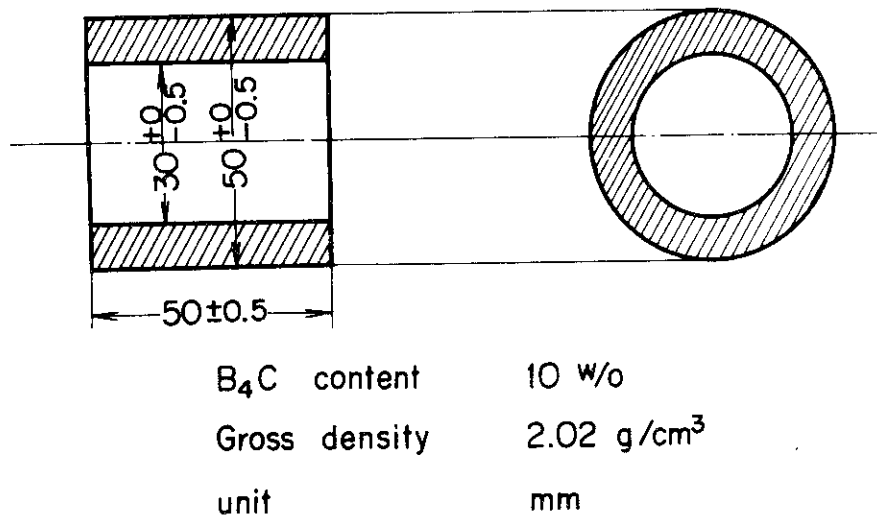
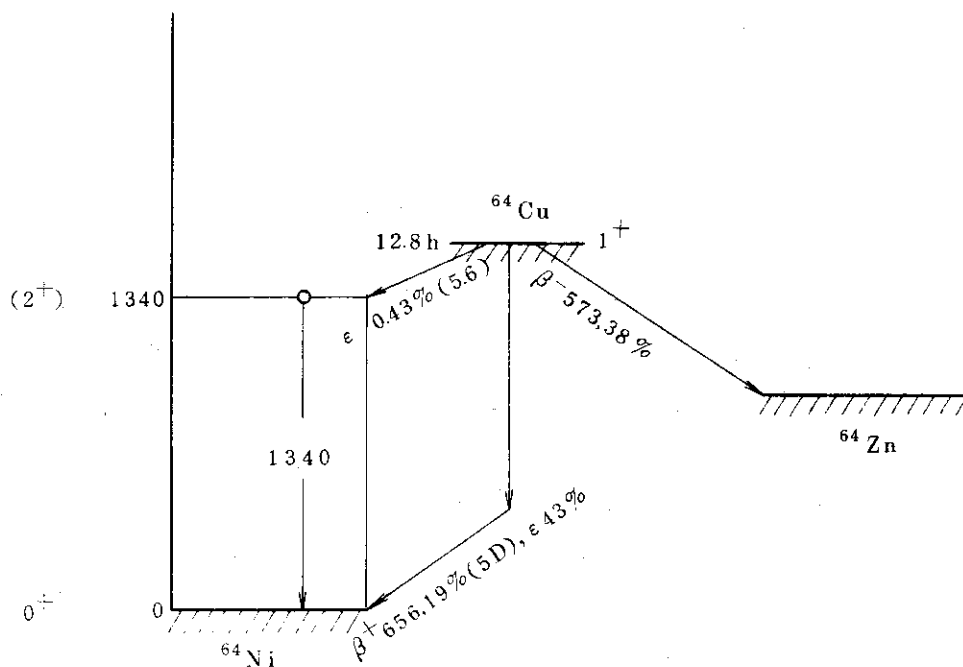


Fig. 7 Neutron absorber pellet used for control rods

Table 1 Cross section of copper for thermal neutrons

Element Isotope (%)	Thermal cross section (2200m/sec)						
	σ_{abs}	σ_{act}		σ_{coh}	$\sigma_{fa} \left(\frac{A+1}{A}\right)^2$	$\bar{\sigma}_s$	
$^{29}_{29}\text{Cu}$	3.77 ± 0.03				$7.4 \pm 0.2 (+)$	8.0 ± 0.1	7.2 ± 0.7
Cu^{63} (69.1)	4.5 ± 0.1	12.8 h	4.3 ± 0.2	5.7 ± 0.3			
Cu^{65} (30.9)	2.2 ± 0.2	5.15 m	1.8 ± 0.4	1.55 ± 0.6			



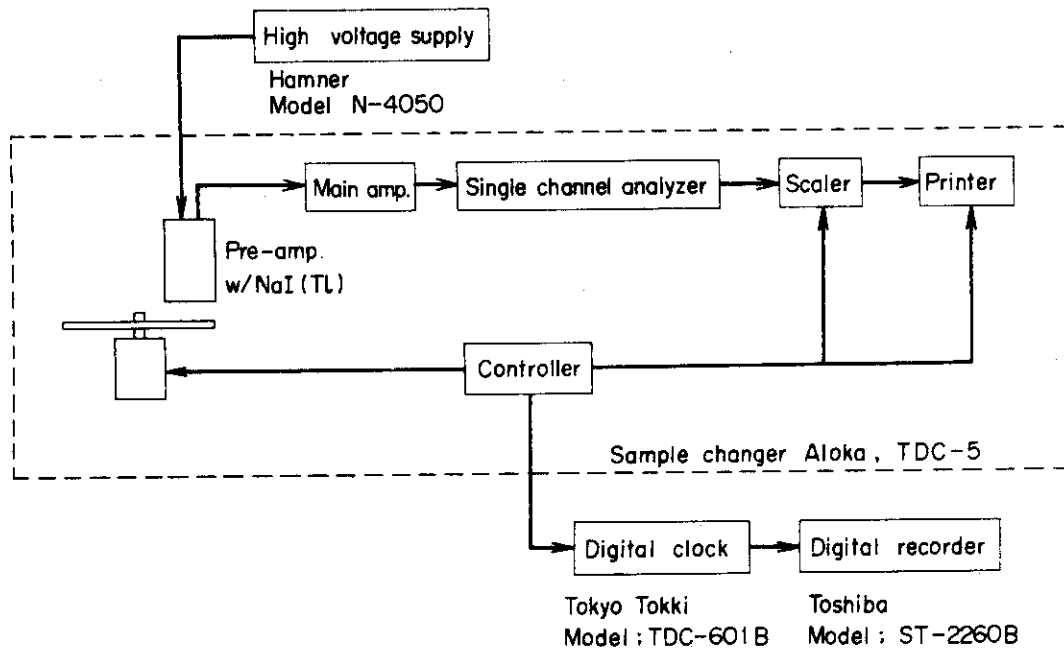


Fig. 8 Block diagram for the activation of copper pins

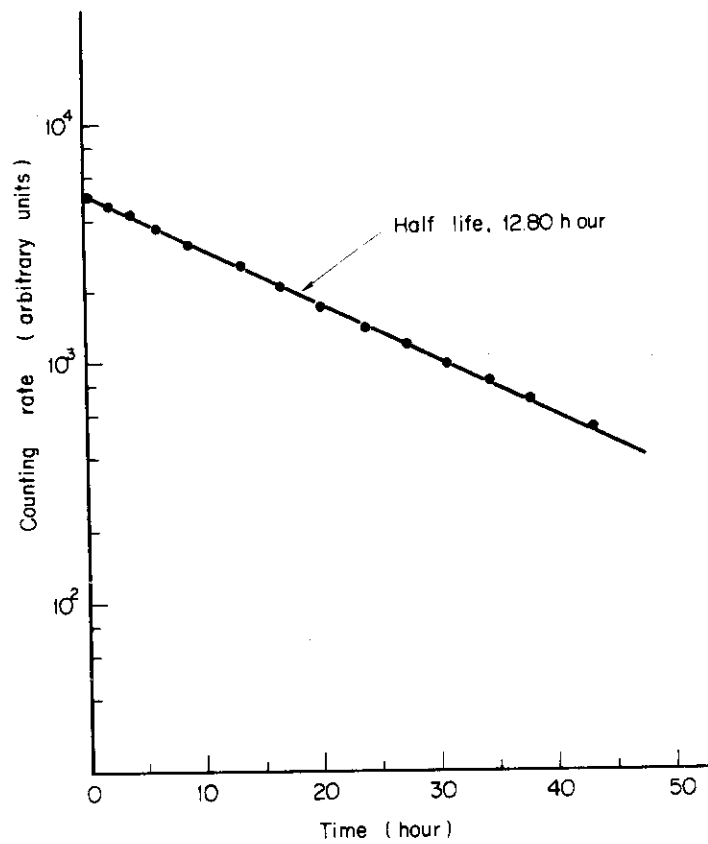


Fig. 10 Decay curve of the activity of copper pins

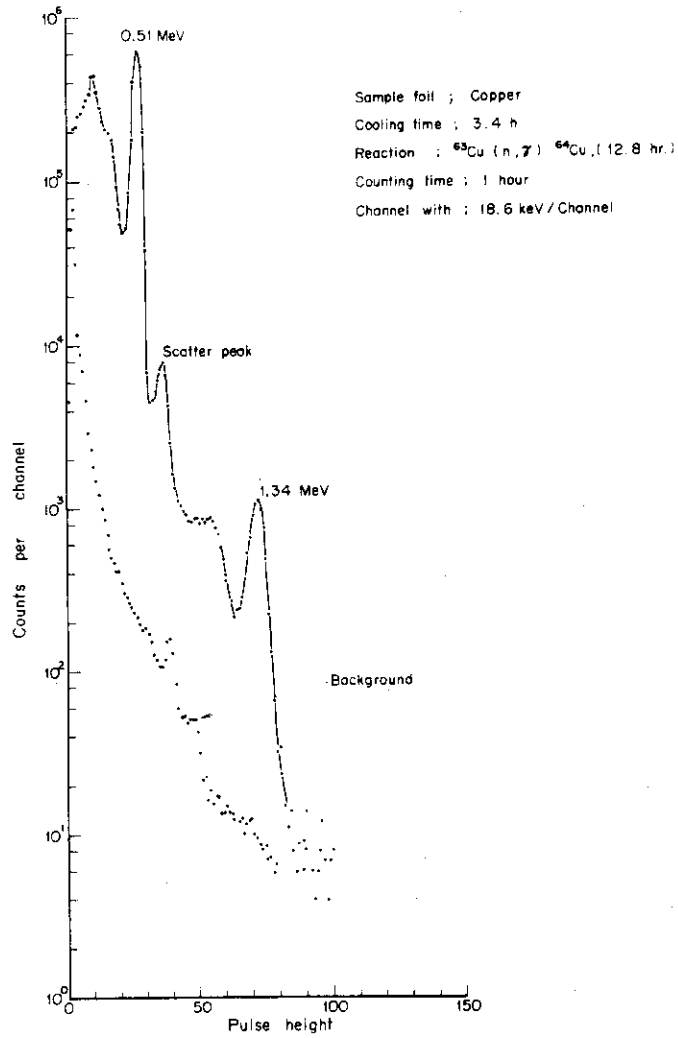


Fig. 9 Pulse height distribution of copper pins

3 実験解析

3.1 SHE体系の群定数⁶⁾

熱中性子領域については、黒鉛に対し、Young-Koppel modelの散乱則 $S(\alpha, \beta)$ (ENDF/A file, $T=296^\circ\text{K}$)を用い、 ^{235}U , ^{238}U , HおよびOに対しては自由ガスmodelを用い、多群の熱中性子散乱断面積をPIXSEコードで作成し、一次元拡散コードTUDで空間依存中性子スペクトルを計算し、各反応について平均を行い炉心領域および反射体領域の熱中性子群定数を作成した。なおC, U等の吸収断面積はDCCP fileの値を使用しPI2コードで求められている。Fig. 11にSHE-8体系のTUDコードでの計算結果の熱中性子スペクトルを示した。

一方、速中性子領域については $0.683\text{eV}\sim 10\text{MeV}$ のエネルギー範囲を66群に分けたGAM-Iライブラリーから計算コードFAXSEで33群の炉心領域および反射体領域の速中性子群定数を作成し、その後熱中性子群1群とを組み合わせ34群2領域で一次元拡散TUDコードで、臨界計算を行い、速中性子スペクトルを求めこれを重率とする平均で、1群の速中性子群定数を作成した。なお ^{235}U および ^{238}U の実効共鳴積分はENDF/B-IIライブラリーからRICMコードで計算された。TUDコードで計算されたSHE-8体系の炉心軸における速中性子スペクトルをFig. 12に示した。以上の手順で求めた2群2領域のSHE-8体系の群定数を以下に示した。

(1) 実験体系

$$\text{SHE-8} (\text{C}/^{235}\text{U} = 2226)$$

炉心領域 原子筒数密度

$$N^{235} = 0.3599 \times 10^{20} \text{ケ/cm}^3$$

$$N^{238} = 0.1435 \times 10^{21} \text{ケ/cm}^3$$

$$N^c = 0.802 \times 10^{23} \text{ケ/cm}^3$$

反射体領域 原子筒数密度

$$N^c = 0.7741 \times 10^{23} \text{ケ/cm}^3$$

等価臨界半径 $r = 29.28 \text{ cm}$

(燃料棒147本相当)

(2) 群定数

$$D_{1c} = 1.2077$$

$$D_{2c} = 0.80241$$

$$\Sigma_{1c} = 0.25110 \times 10^{-2}$$

$$\Sigma_{2c} = 0.15394 \times 10^{-1}$$

$$1/v_{1c} = 0.10602 \times 10^{-6}$$

$$1/v_{2c} = 0.27578 \times 10^{-5}$$

$$p = 0.80812$$

$$k_{\infty} = 1.5488$$

$$D_{1r} = 1.1356$$

$$D_{2r} = 0.83807$$

$$\Sigma_{1r} = 0.41666 \times 10^{-2}$$

$$\Sigma_{2r} = 0.28025 \times 10^{-3}$$

$$1/v_{1r} = 0.10602 \times 10^{-6}$$

$$1/v_{2r} = 0.37495 \times 10^{-5}$$

$H = 240 \text{ cm}$ (炉心高さ)

$R = 129.2 \text{ cm}$ (反射体半径)

$r_c = 29.28 \text{ cm}$ (炉心半径)

計算された臨界半径が実験の等価臨界半径 29.28 cm に一致するようになり、核分裂断面積については $\nu \Sigma_{f1} = 0.94385 \times 10^{-3}$, $\nu \Sigma_{f2} = 0.28719 \times 10^{-1}$ から $\nu \Sigma_{f1} = 0.91860 \times 10^{-3}$, $\nu \Sigma_{f2} = 0.27951 \times 10^{-1}$ に ν は調整されている。

3.2 実験用制御棒の直線外挿距離

Davison-Kushneriuk⁷⁾の直線外挿距離の式は円柱形の制御棒に対して求められたものであり、今問題にしている中空円筒形に対しては、そのまま適用するわけにいかない。そこでまず、制御棒のホウ素の濃度を平均して中空部分をうすめ円柱にしたとしてのホウ素の濃度を採用することにした。つまり、平均化したホウ素の箇数密度 $= 0.5644 \times 10^{22} \text{ ケ/cm}^3$ また、ホウ素の中性子吸収群定数は TUD コードの出力で与えられた $0 \sim 0.683 \text{ eV}$ 間 30 群の炉心の中心における熱中性子スペクトルにより $1/\nu$ 断面積を平均したものである。

ホウ素の中性子吸収群定数 $= 405$ バーン

したがって制御棒の実効熱中性子吸収断面積は $\Sigma_a = 2.286 \text{ cm}^{-1}$ である。制御棒の半径が 2.5 cm であるので熱中性子に対してはこの実験用制御棒は十分黒体と考えてよい⁸⁾

黒体の制御棒の直線外挿距離は、制御棒の周囲の λ_{tr} と制御棒の半径とから、Davison-Kushneriuk の式で決定することができて、SHE-8 炉心の炉心領域に挿入された制御棒の直線外挿距離は

$$\lambda(\text{black}) = 2.311 \text{ cm} \quad \text{となる。}$$

さらに、微小ではあるが制御棒の gray の度合を加味された、

$$\lambda(\text{gray}) = 2.3307 \text{ cm}$$

を熱中性子群の直線外挿距離として使うことにした。

一方、速中性子群に対する直線外挿距離は、制御棒が 1 本炉心軸上に全長挿入された場合における即発中性子崩壊定数 α の増分の実測値と計算値 (2 群拡散計算) が一致するように定めるといふ半実験的な方法を採用した⁴⁾。

速中性子群の制御棒の直線外挿距離 λ_1 の決定条件;

$$\alpha - \alpha_c \text{ の実測値} \equiv \alpha - \alpha_c \text{ の計算値} \quad (1)$$

ここに、 α_c は臨界における α の値を示す。(1)式より速中性子群に対する直線外挿距離は $\lambda_1 = 12.52 \text{ cm}$ と決定した。

3.3 銅の放射化断面積

銅の放射化量を求めるために、銅の熱中性子群および速中性子群の実効放射化断面積を求める必要がある。まず、熱中性子群に対する銅の実効放射化断面積は、熱中性子群のカットオフエネルギー 0.683 eV 以下を $1/\nu$ 吸収断面積と考え、これを炉心および反射体領域において、それぞれの熱中性子スペクトル (Fig. 11) で平均し求めた。

一方、速中性子に対する銅の放射化断面積は、まず炉心部については、銅の共鳴エネルギー

レベル・パラメータ(ENDF/B-III ファイル)⁹⁾を用い、2 mm 直径の無限円筒とし、RICM¹⁰⁾コードで共鳴積分を計算し、かつFAXSEコードの出力として求められた33群の速中性子スペクトル(Fig.12)の平均で求めた。反射体領域に対しては0.683 eV以上を1/Eスペクトルとして、やはり自己遮蔽効果を考慮して銅の実効放射化断面積を求めた。

以上の方法で求められた熱中性子群および速中性子群に対する銅の実効放射化断面積を下記に示した。

	炉心領域	反射体領域
σ_2 (熱中性子群)	2.298 バーン	3.124 バーン
σ_1 (速中性子群)	0.1344 バーン	0.2141 バーン

3.4 中性子束分布の計算方法

中性子束分布の計算は3.1において作成された2群2領域のSHE-8体系の核定数を用い、Nordheim-Scalettar法¹¹⁾による2群拡散コードCRÖDER¹²⁾で行った。このコードは円筒形炉心、あるいはそれをとりまく反射体のいずれかに同時に挿入された多数本制御棒の反応度効果および中性子束分布を計算することができる。

中性子バランスの方程式；

炉心において、

$$D_{1c} \nabla^2 \phi_{1c} - (\Sigma_{1c} + \Sigma'_{1c}) \phi_{1c} + \frac{k_{\infty}}{p} \Sigma_{2c} \phi_{2c} = 0 \quad (2)$$

$$D_{2c} \nabla^2 \phi_{2c} - \Sigma_{2c} \phi_{2c} + p \Sigma_{1c} \phi_{1c} = 0 \quad (3)$$

反射体中において

$$D_{1r} \nabla^2 \phi_{1r} - (\Sigma_{1r} + \Sigma'_{1r}) \phi_{1r} = 0 \quad (4)$$

$$D_{2r} \nabla^2 \phi_{2r} - \Sigma_{2r} \phi_{2r} + \Sigma_{1r} \phi_{1r} = 0 \quad (5)$$

境界条件

炉心反射体境界において、

$$D_{1c} \text{grad } \phi_{1c} = D_{1r} \text{grad } \phi_{1r} \quad (6)$$

$$D_{2c} \text{grad } \phi_{2c} = D_{2r} \text{grad } \phi_{2r} \quad (7)$$

反射体の挿外表面において

$$\phi_{1r} = 0 \quad (8)$$

$$\phi_{2r} = 0 \quad (9)$$

制御棒表面の対数微分条件

$$\left. \frac{\partial \phi_1}{\partial \rho} \right|_{\text{rod surface}} = \frac{1}{\lambda_1} \phi_1 \quad (10)$$

$$\left. \frac{\partial \phi_2}{\partial \rho} \right|_{\text{rod surface}} = \frac{1}{\lambda_2} \phi_2 \quad (11)$$

また中途挿入の場合の制御棒表面の境界条件はLigou の導入した方法¹³⁾と同じく、制御棒挿入位置まで(10), (11)式を適用することとし、そこからさきは(10), (11)式の右辺を零とした。

2.1において述べたケース2), 3)および4)の実験体系は実験用制御棒が挿入された場合の、半径方向の高調波の展開項数および軸方向の展開項数は第10項までを採用した。

3.5 測定値と計算値との比較

3.4において計算された中性子束分布および3.3の銅の放射化断面積とから、銅の放射化量Rは、次式

$$R = \phi_1 \sigma_1 + \phi_2 \sigma_2 \quad (12)$$

より求められた。ここで、

- ϕ_1 ; 速中性子束分布
- σ_1 ; 銅の実効速中性子断面積
- ϕ_2 ; 熱中性子束分布
- σ_2 ; 銅の実効熱中性子断面積

である。

実験と計算の比較にあたって、銅の放射化量の実験値と計算値との規格化は、各実験体系のパターン毎の、炉心領域内の全測定位置における放射化量の測定値の和と計算値との和が一致するように行った。

$$\text{規格化定数} = \frac{\sum_{\text{炉心領域}} R_i \text{ (計算値)}}{\sum_{\text{炉心領域}} R_i \text{ (測定値)}} \quad (13)$$

各実験パターンの軸方向の測定値と計算値との比較をFig.13~16に示した。半径方向については、固定側集合体の密着面から10 cm 引込んだ断面について実験を行った。

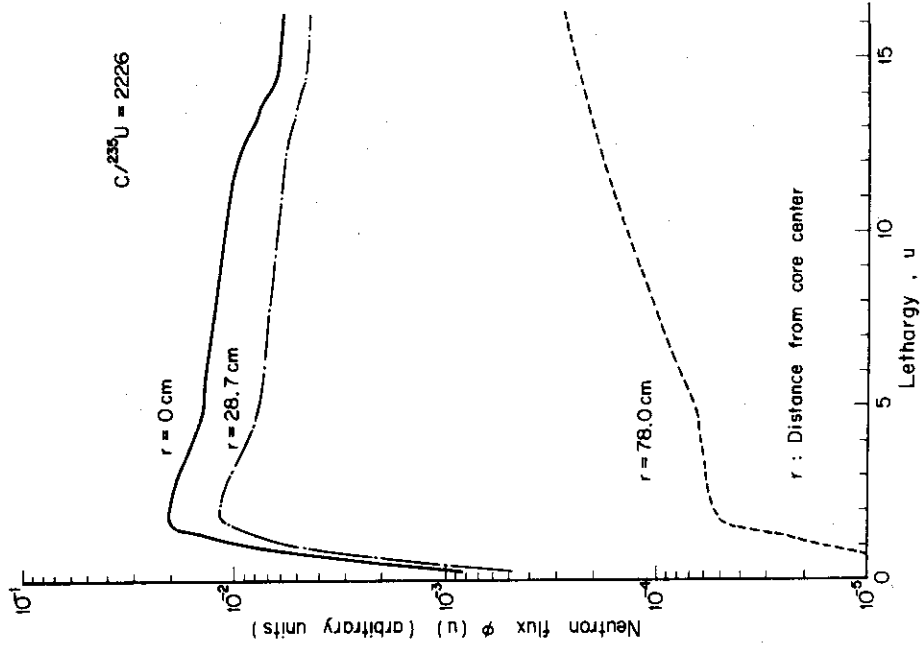


Fig.12 Fast neutron spectra in SHE-8 core

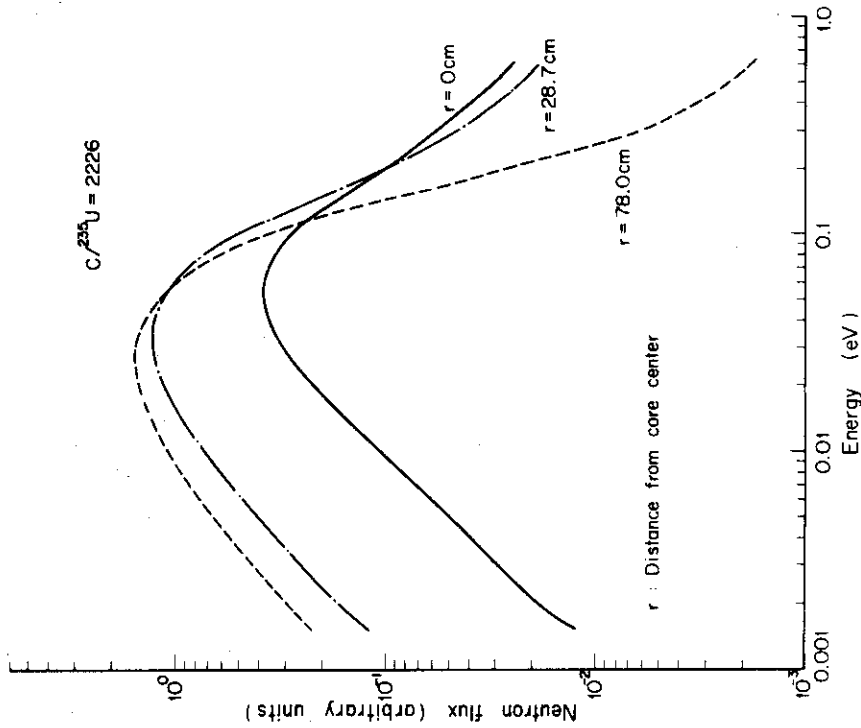


Fig.11 Thermal neutron spectra in SHE-8 core

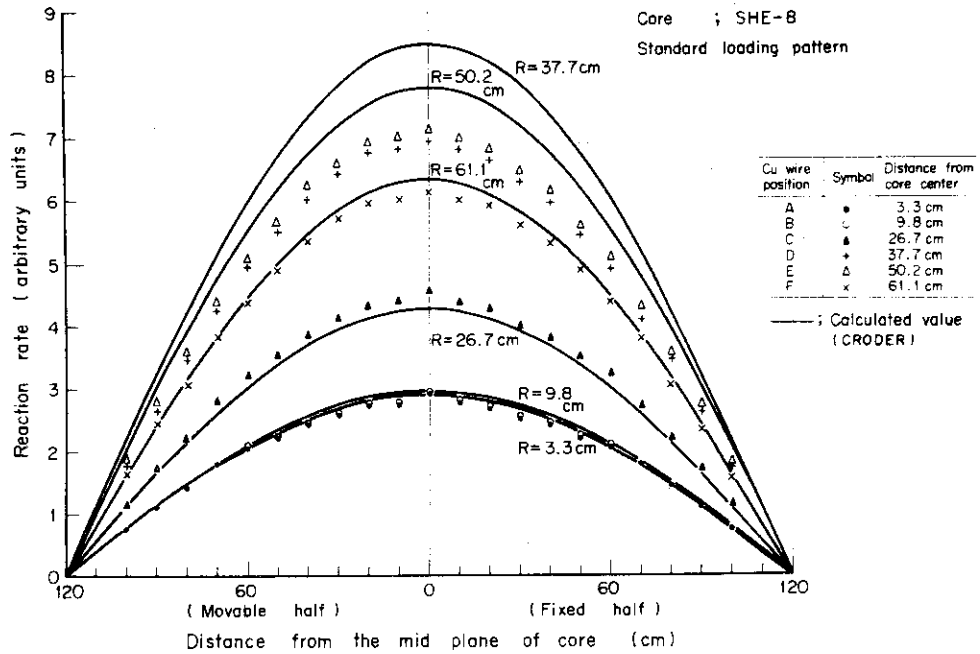
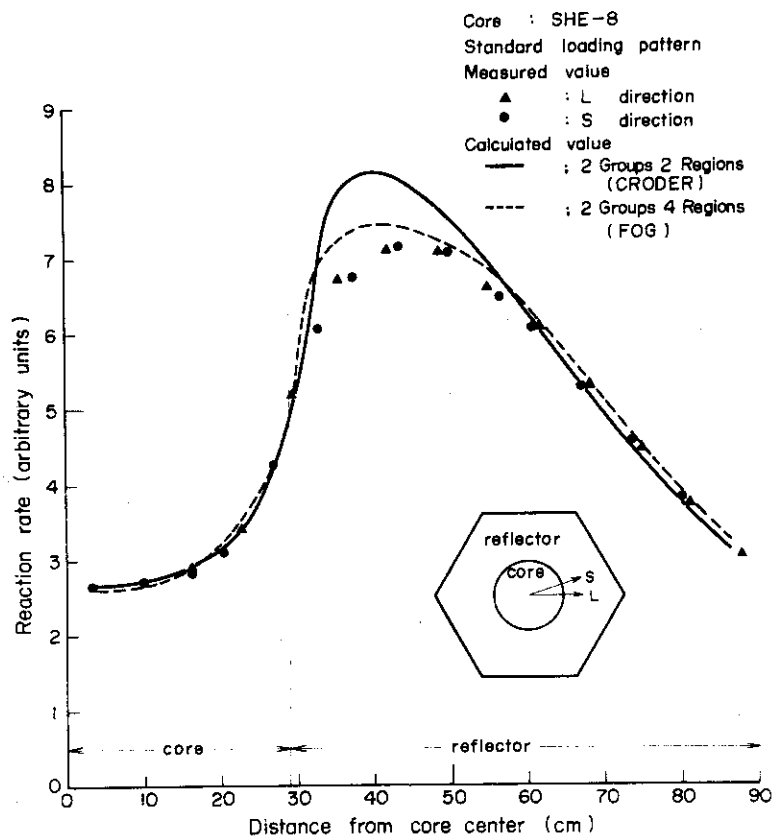


Fig.13 (a) Comparison between measurement and calculation for the power distribution in the SHE-8 core



(b) measurement was done at the distance of 10cm from the mid plane in fixed half

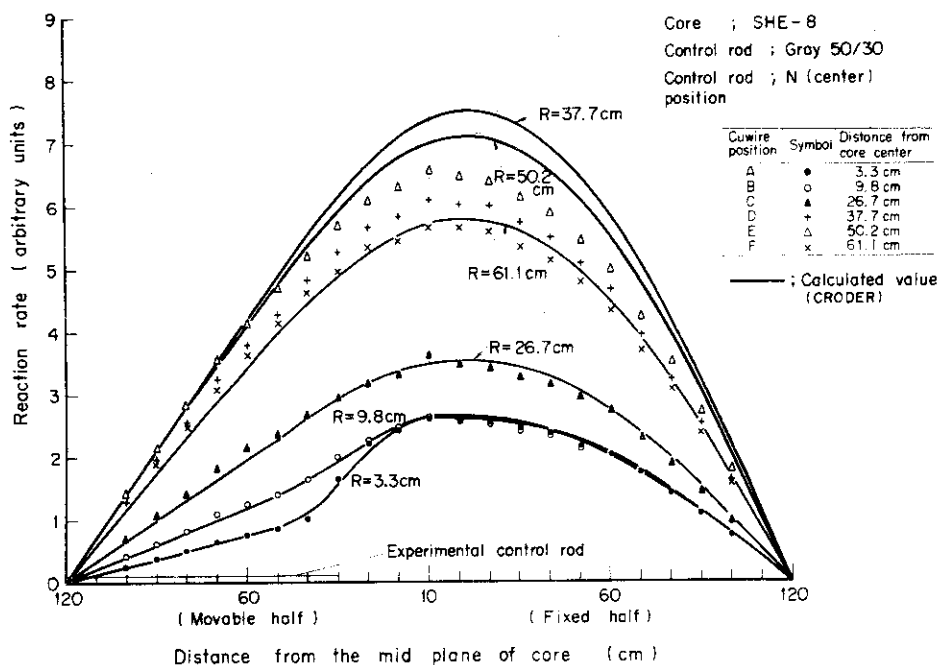
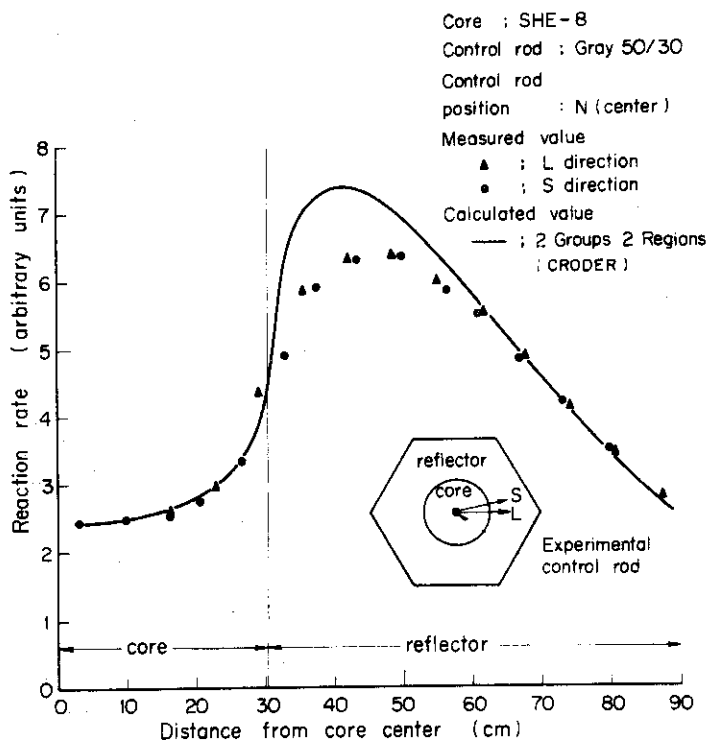


Fig.14 (a) Comparison between measurement and calculation for the power distribution in the SHE-8 Core inserted with one experimental control rod along the core center axis



(b) measurements was done at the distance of 10cm from the mid plane in fixed half

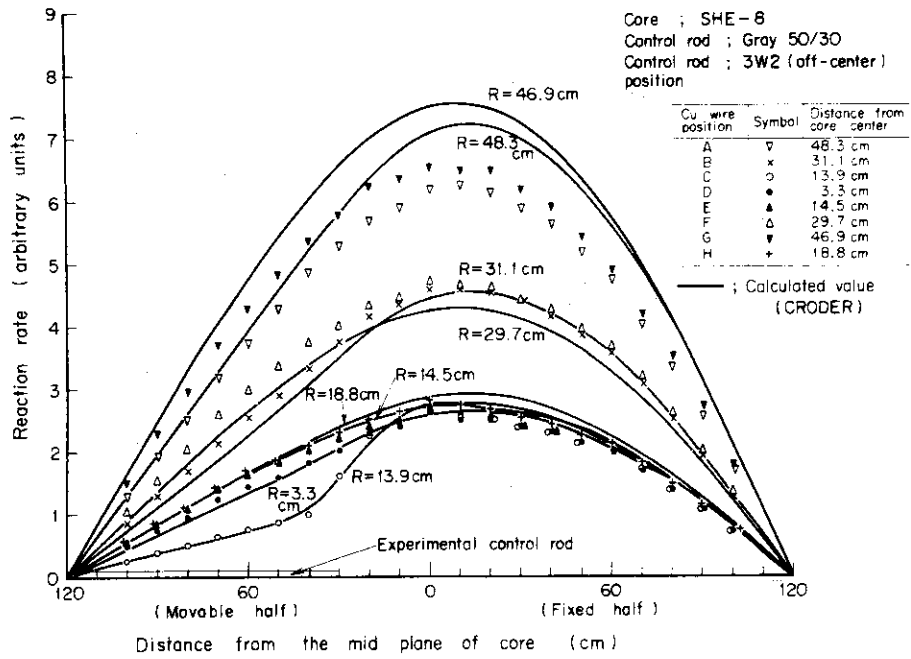
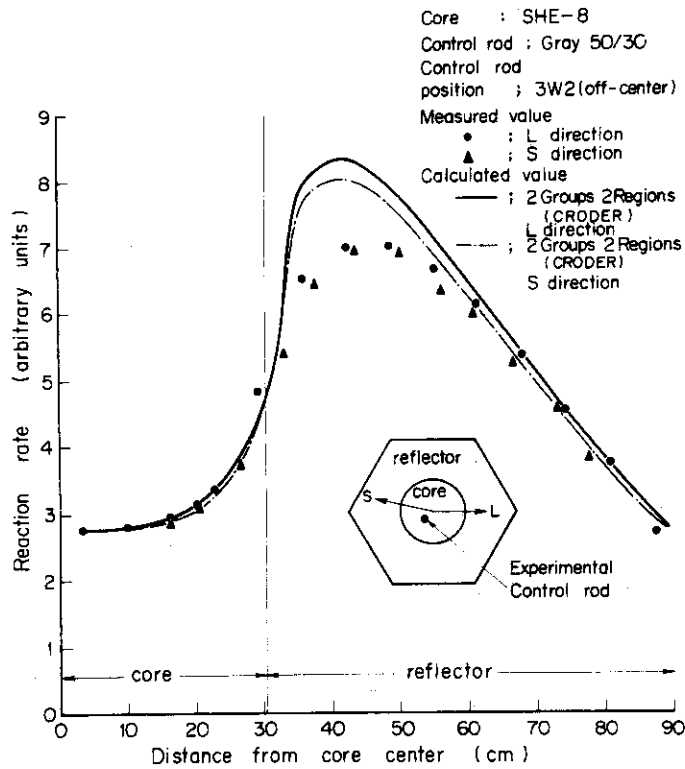


Fig. 15 (a) Comparison between measurement and calculation for the power distribution in the SHE-8 core inserted with one control rod along the off core center axis



(b) measurements was done at the distance of 10 cm from the mid plane in fixed half

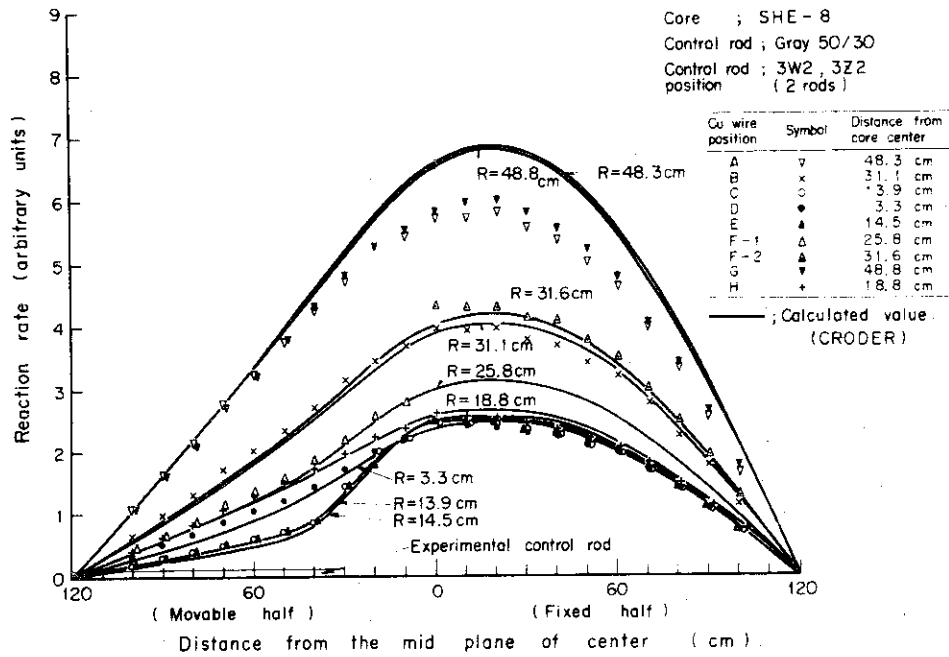
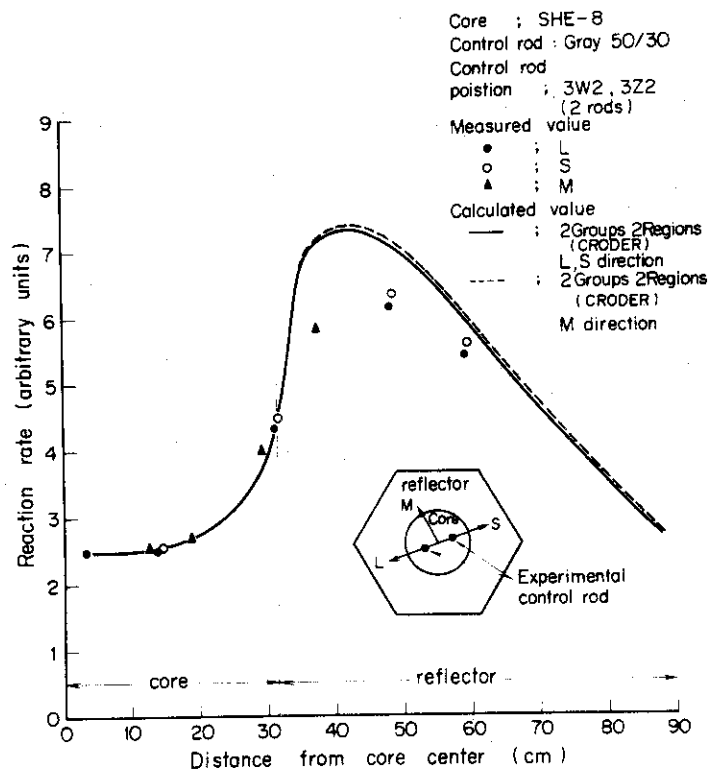


Fig. 16 (a) Comparison between measurement and calculation for the power distribution in the SHE-8 core



(b) measurements was done at the distance of 10cm from the mid plane in fixed half.

4 討 論

4つの実験パターンの出力分布の測定結果と計算結果とをFig.13からFig.16に示したが、まず共通して炉心領域以内では、非常によく一致することがわかるが、同時に、反射体領域においては一致はあまりよくない。

炉心部における軸方向の出力分布Rに対する実験値と計算値の比較を軸方向高温点因子について行った。軸方向高温点因子は各測定Z方向のチャンネルごとの出力分布の平均値に対する最大値の比として定義される。

$$\text{軸方向高温点因子, } P_z = \frac{\text{Rの最大値}}{\text{Rの平均値}} \quad (4)$$

両集合体の密着面より10cm 固定側 $\frac{1}{2}$ 集合体に入った断面での半径方向の出力分布に対しても、同様に半径方向高温点因子 P_r を定義し、実験と計算の比較を行った。但し、半径方向については、測定点の代表する体積で重みをつけた値を使用している。

これらの結果をTable 2にまとめた。軸方向高温点因子に対しては、実験値と計算値の不一致は、平均で1.2%、最高で3%以内であった。

一方、半径方向高温点因子についての実験値と計算値との不一致の大きさは、ケース2)および3)に対し11~8%になった。

炉心反射体境界域から反射体部における不一致の理由としては、制御棒表面における対数微分条件の不適性のほか、熱中性子化の問題がある。出力分布の計算は2群2領域で行っているが、中性子の熱化現象の空間依存性を正確に記述することができていないので、炉心-反射体の境界近傍の群定数および銅の実効放射化断面積の精度の低下が考えられる。そこで、炉心領域を2領域、反射体領域を2領域にした群定数を作成し2群4領域(炉心-炉心-反射体-反射体)という条件で中性子束分布をFOGコードで再計算した。ケース1)の半径方向の出力分布をFig.13(b)に示したが、炉心反射体境界領域および反射体領域内での測定値との一致はかなり改善される。

もう一度、全体的に出力分布の歪みに対する実験値と計算値の比較をふりかえてみると、計算値の方が歪みを過大評価する傾向がいずれの制御棒パターンにも現われている。この傾向は、制御棒の反応度の面にも共通して現われている。つまり、ベリオド法により 19.22ϕ と測定されている1本の燃料棒価値からsubstitution法により求められた制御棒価値の実験値および計算値は、下記のとおりであるが、計算値の方が約20%大きくなっている。

実験体系パターン	実験値	計算値
2)	2.71\$	3.34\$
3)	2.28\$	3.06\$
4)	4.31\$	5.31\$

最後に、基準状態における出力分布は、Fig.13(a)から、軸方向の出力分布はcos分布によくあてはまる。これはSHE-8体系は円柱炉心側面反射体つき体系で、軸方向には反射体がないため、当然のことである。

Table 2 高温点因子における実験・計算の比較

実験用制御棒 の配置	軸 方 向		半 径 方 向	
	測定位置 (炉心軸からの 距離 (cm))	計算値 $(\frac{\text{計算値}}{\text{実験値}}-1)\times 100$	測定位置	計算値 $(\frac{\text{計算値}}{\text{実験値}}-1)\times 100$
ケース 1 (挿入なし)	A 3.3	+1.4	炉心中央から10 cm 炉心背面に ずれた面	-5.5 (-4.5) ^①
	B 9.8	+0.5		
	C 26.7	+1.0		
ケース 2 (炉心中心軸 に沿って1本 中途挿入)	A 3.3	+1.1	炉心中央から10 cm 炉心背面に ずれた面	-11.0
	B 9.8	+1.9		
	C 26.7	-2.3		
ケース 3 (偏心して1 本中途挿入)	C 13.9	-1.1	炉心中央から10 cm 炉心背面に ずれた面	-7.5
	D 3.3	0		
	E 14.5	-2.4		
	F 29.7	0		
ケース 4 (炉心中心軸 対称に2本中 途挿入)	B 31.1	+2.9	炉心中央から10 cm 炉心背面に ずれた面	-0.4
	C 13.9	-0.6		
	D 3.3	+0.5		
	E 14.5	-0.5		
	H 18.8	+0.7		

註①：2群4領域による計算

5 結 論

黒鉛減速20%濃縮ウラン体系のSHE-8体系に、高温ガス実験炉の予備設計に採用された制御棒と形状、寸法や炭化ボロン濃度が同じである実験用制御棒を挿入し、3次元的な出力分布の歪みを銅の放射化法によって測定し、3次元2群拡散理論による計算値と比較した。

実験用制御棒の配置は、

- ケース1) ; 実験用制御棒の挿入されない基準状態の炉心
- ケース2) ; 実験用制御棒が炉心軸上に1本90cm 長(炉心の長さの $\frac{3}{8}$ 長)挿入された炉心
- ケース3) ; 炉心軸からの距離17.2cmの偏心した位置に実験用制御棒(挿入長90cm)が1本挿入された炉心
- ケース4) ; ケース3)の位置で炉心軸対称に2本実験用制御棒が挿入された炉心のケースである。

全ケースに共通して軸方向の高温点因子については、計算の方が過大になるが、平均で1.2%、最大で3%以内であって十分、炉心設計に対する要望を満足しているように判断される。一方、半径方向の高温点因子については、計算の方が~10%過小評価していて、炉設計への要望の範囲をややこえるのでないかと考えられる。これは制御棒表面における対数微分条件の不適合のほか炉心反射体境界域での中性子減速熱化の空間依存性に対する取扱いが2群・2領域という拡散計算では不十分であることに主たる原因があるように考え、炉心および反射体を2領域づつにして全部で4領域にして、制御棒の挿入されていない基準炉心のケース1)について再計算したら、半径方向の高温点因子に対する実験・理論の不一致は、5.5%から4.5%に減少した。熱中性子までの減速の詳細な取扱いとしては、熱外1群ではなく、2群以上にすることが課題となった。

以上の議論から、炉定数の決定を適切に行い、かつ半実験的に決定した制御棒表面における対数微分条件を使用することにより、2群拡散という比較的簡単な計算方法によっても、かなりよく3次元的な出力分布を記述し得ることが結論された。

謝 辞

平均値臨界実験装置の運転、銅箔の放射化量の測定にあたって、炉物理実験研究室黒川良右氏の多大な協力を得た。

文 献

- 1) 能沢正雄, 他; 多目的高温ガス実験炉第2次予備設計(1972)
- 2) "多目的高温ガス炉研究開発の現状"(1975)
- 3) Inoue, K. et al; JAERI-1032(1962)
- 4) 金子義彦, 他; JAERI-M 4971(1972)
- 5) Hughes, J.D. and Schwartz, B.R.; BNL-325(1958)
- 6) 秋濃藤義, 他; to be published in JAERI-M Report
- 7) Davison, B. and Kushneriuk, S.; TPI-45(1947)
- 8) Kushnerink, S. and McKay, C.; CRT-566(1954)
- 9) Honeck, C.H.; BNL-50066(T-467)(1966)
- 10) Mizuta, H. et al; JAERI-1134(1967)
- 11) Nordheim, L.E. and Scalettar, R.S.; MDDC-42(1946)
- 12) 井上修二, 他; JAERI-memo 4351(1971)
- 13) Ligou, J; Nucl. Sci. Eng. 11, 26-38(1961)