

JAERI-M

9 2 2 3

高温ガス実験炉の模擬炉心(SHE-14炉心)に
おける実験用可燃性毒物棒の反応度の測定

1980年11月

秋濃 藤義・竹内 素允・北舘 憲二
吉藤 久・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）まで、お申しこしください。

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.

高温ガス実験炉の模擬炉心 (SHE-14 炉心) における
実験用可燃性毒物棒の反応度の測定

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

秋 濃 藤 義・竹 内 素 允・北 館 憲 二
吉 藤 久・金 子 義 彦

(1980 年 11 月 10 日 受 理)

高温ガス実験炉の炉心設計の進行と共に、その精度評価が重要な課題となっている。精度の高い設計を行うには正確な核データにもとづいた適正な群定数と、中性子の挙動を物理的に適確にとらえた計算手法を用いることが肝要である。そこで、黒鉛減速 20%濃縮ウラン半均質臨界実験装置 (SHE) に高温ガス実験炉を模擬した SHE-14 炉心を構成して、炉心設計の精度評価に役立てる実験データの取得を行った。

高温ガス実験炉においては反応度補償のために可燃性毒物棒および制御棒を用いる設計になっている。そこで実験炉の炉心設計に採用された可燃性毒物棒と核的に同一な実験用可燃性毒物棒を製作し、その反応度測定を SHE-14 炉心で行った。

実験用可燃性毒物棒を SHE-14 炉心の中心カラム内に 1~3 本挿入し、反応度の測定をペリオド法および燃料棒置換法で行った。

測定結果から B_4C 粒子の自己遮蔽効果により、可燃性毒物棒の吸収ペレット中のホウ素含有量が同じであっても B_4C 粒子の粒径が大きいほど反応度値は小さくなることが明確にされた。また、どの粒径に対しても、反応度はホウ素含有量の対数にほぼ比例することがわかった。

実験値と計算値とは 5% 以内で一致した。このことから B_4C 粒子の自己遮蔽効果および格子体系の非均質性を考慮した臨界計算手法により、可燃性毒物棒の反応度をかなり正確に評価できることがわかった。

Measurement of Reactivity Worths of Burnable Poison
Rods in Enriched Uranium Graphite-Moderated Core
Simulated to High Temperature Gas Cooled Reactor

Fujiyoshi AKINO, Motoyoshi TAKEUCHI, Kenji KITADATE
Hisashi YOSHIFUJI and Yoshihiko KANEKO

Division of Reactor Engineering,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received November 10, 1980)

As the core design for the Experimental Very High Temperature Gas Cooled Reactor progresses, evaluation of design precision has become increasingly important. For a high precision design, it is required to have adequate group constants based on accurate nuclear data, as well as calculation methods properly describing the physical behavior of neutrons. We, therefore, assembled a simulation core for VHTR, SHE-14, using a graphite-moderated 20 %-enriched uranium Semi-Homogeneous Experimental Critical Facility(SHE), and obtained useful experimental data in evaluating the design precision. The VHTR is designed to accommodate burnable poison and control rods for reactivity compensation. Accordingly, the experimental burnable poison rods which are similar to those to be used in the experimental reactor were prepared, and their reactivity values were measured in the SHE-14 core.

One to three rods of the above experimental burnable poison rods were inserted into the central column of the SHE-14 core, and the reactivity values were measured by the period and fuel rod substitution method. The results of the measurements have clearly shown that due to the self-shielding effect of B₄C particles the reactivity value decreases with increasing particle diameter. For the particle diameter, the reactivity value is found to increase linearly with the logarithm of boron content.

The measured values and those calculated are found to agree with each other within 5 %. These results indicate that the reactivity of the burnable poison rod can be estimated fairly accurately by taking into account the self-shielding effect of B₄C particles and the heterogeneity of the lattice cell.

Keywords: Critical Experiment, Reactivity, Burnable Poison Rod, Enriched Uranium, Graphite Moderator, Self-shielding Effect, B₄C Particle

目 次

1. 序 言	1
2. 実験用可燃性毒物棒	1
3. 実験体系	6
4. 実 験	6
4.1 SHE-14 炉心の臨界質量の測定	6
4.2 燃料棒価値の測定	6
4.3 実験用可燃性毒物棒の反応度の測定	7
4.4 測定値の誤差評価	9
5. 計 算	10
6. 討 論	12
7. 結 論	14
謝 辞	14
参考文献	15

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental burnable poison rod	1
3. Experimental assembly	6
4. Experiment	6
4.1 Measurement of critical mass of SHE-14 core	6
4.2 Measurement of fuel rod worth	6
4.3 Measurement of experimental burnable poison rod worth ..	7
4.4 Estimation of experimental error	9
5. Calculation	10
6. Discussion	12
7. Conclusion	14
Acknowledgement	14
Reference	15

1. 序 言

高温ガス実験炉 (Mark-III)¹⁾ においては、燃料交換なしに長期間の運転を行える様に、初期炉心の余剰反応度補償のために可燃性毒物棒を大量に用いている。燃料のウラン濃縮度が 6 w/o, 4 w/o, 2 w/o の燃料体カラムにそれぞれ 3 本, 2 本および 1 本の可燃性毒物棒が挿入される炉心設計になっている。そこで、可燃性毒物棒による反応度補償の炉心設計計算の精度評価に寄与する目的として、実験炉の炉心設計に採用された可燃性毒物棒と核的に同一な実験用可燃性毒物棒を製作し、反応度値の測定を黒鉛減速 20%濃縮ウラン平均質臨界実験装置 (SHE)²⁾ で行った。

高温ガス実験炉の炉設計に採用されている可燃性毒物棒は、 B_4C 粒子 (粒径 $600 \mu m$) と黒鉛粉を混合し焼結したもので、グロス密度約 $1.5 g/cm^3$, ホウ素含有量 4.5 w/o, 直径 8 mm である。そこで、実験用可燃性毒物棒は英国の Harwell 原子力研究所より購入した粒径 425~710 μm の B_4C 粒子と黒鉛粉を混合焼結した直径 8 mm, 高さ 10mm の吸収ペレット 114 個を長さ 1180 mm の黒鉛棒に埋め込んで製作した。実験の主目的は B_4C 粒子の粒径および吸収ペレット中のホウ素含有量の相異による反応度変化について実験データを取得するところにある。そのため、

B_4C 粒子の粒径:	~ 3 μm
	: 250~355 μm
	: 425~710 μm
	: 710~1000 μm
ホウ素含有量	: 2.25 w/o
	: 4.5 w/o
	: 9.0 w/o

のことになった組成の実験用可燃性毒物棒を製作した。

実験は高温ガス実験炉の燃料棒配置を模擬した模擬炉心 SHE-14³⁾ 炉心を SHE に構成し、SHE-14 炉心の中心カラム内に実験用可燃性毒物棒を 1 本, 2 本および 3 本挿入し、反応度値の測定をペリオド法および燃料棒置換法で行った。

2. 実験用可燃性毒物棒

中性子吸収ペレットは粒状炭化ホウ素 (B_4C 粒子) と黒鉛粉の混合物を焼結成型した堅牢なペレットであり直径 8 mm ないし、12 mm, 高さ 10 mm のものである。 B_4C 粒子は英国の Harwell 原子力研究所より購入した B_4C 粒子の粒径 250~355 μm , 425~710 μm , 710~1000 μm のもの、および電気化学工業社製の粒径 ~3 μm の B_4C 粒子を用い、ホウ素含有量は 2.25 w/o, 4.5 w/o および 9.0 w/o のものをそれぞれ作製した。

この中性子吸収ペレットを中空の黒鉛棒に収納して、実験用可燃性毒物棒に仕上げた。

中性子吸収ペレットの寸法，ホウ素濃度および黒鉛棒の寸法等の仕様を Table 1 および Fig. 1 にそれぞれ示した。

Table 1 実験用可燃性毒物棒の仕様

中性子吸収 ペレット	高さ	10 ± 0.3 mm	
	外径	8 ± 0.3 mm 12 ± 0.3 mm	
	密度	1.5 ± 0.2 g/cm ³	
	ホウ素濃度	2.25 ± 0.30 w/o 4.5 ± 0.7 w/o	
		9.0 ± 1.4 w/o	
	スタック長	1140 ± $\frac{0}{2}$ mm	
炭化ホウ素 粒子の粒度	粒径	100 μm 以下 250 ~ 355 μm 425 ~ 710 μm 710 ~ 1000 μm	
	黒鉛粉	高純度黒鉛	
	黒鉛棒	外径	54.0 ± $\frac{0}{0.7}$ mm
		全長	1180 ± 3 mm
密度		1.7 g/cm ³ 以上	
吸収ペレット挿入孔の直径		8.5 ± 0.3 mm 12.5 ± 0.3 mm	
吸収ペレット挿入孔の長さ		1140 ± 2 mm	
本数	吸収ペレット挿入孔の 直径 8.5mm 84 本 吸収ペレット挿入孔の 直径 12.5mm 6 本		

Harwell 原子力研究所より購入した B₄C 粒子および電気化学工業社製の B₄C 粒子のミルシートを Table 2 に示した。

B₄C 粒子の粒径分布は B₄C 粒子を顕微鏡観察から 200 個の B₄C 粒子の粒径を測定し粒径分布図を求めた。各 B₄C 粒子の粒径分布図を Fig. 2 に示した。また，顕微鏡観察による写真を Photo. 1 に示した。

Fig. 2 に示されているように 710~1000 μm の B₄C 粒子は約 70% 以上が 720~900 μm の範囲の粒径をもっており，平均粒径は 810 μm と決定された。425~710 μm および 250~355 μm の B₄C 粒子に対しては同様に，平均粒径 560 μm および 270 μm と決定された。

一方，電気化学工業社製の B₄C 粒子は LOT. No 1200 で粒径 ~ 3 μm が約 70% 以上をしめている。

製作された中性子吸収ペレット中のホウ素濃度は次の二方法で測定された。その第一の方法は各々の種類のペレット中からペレット 5 個をサンプリングし，B₂O₃ 電位差滴定方法による化学分析から求めた。第 2 の方法は中性子吸収ペレットの製造時において，混合すべき黒鉛粉と B₄C 粒子の重量をペレット 1 個毎にメトラー直示天秤で測定し，混合し製作したもので，製造時におけ

Table 2 B₄C 粒子のミルシート

(1) 電気化学工業社製品

電気化学工業株式会社 大田工場	作成年月日	1978. 8. 1
LOT No 1200-405	名 称	DENKA BORON

chemical Analysis

Total B : 77.3 %

Total C : 21.1 "

B₂O₃ : 0.26 "

Fe : 1110 ppm

Ti : 35 "

Co : 30 "

Cu : 43 "

Mn : 14 "

Na : 40 "

(2) A.E.R.E., Harwell 原子力研究所製品

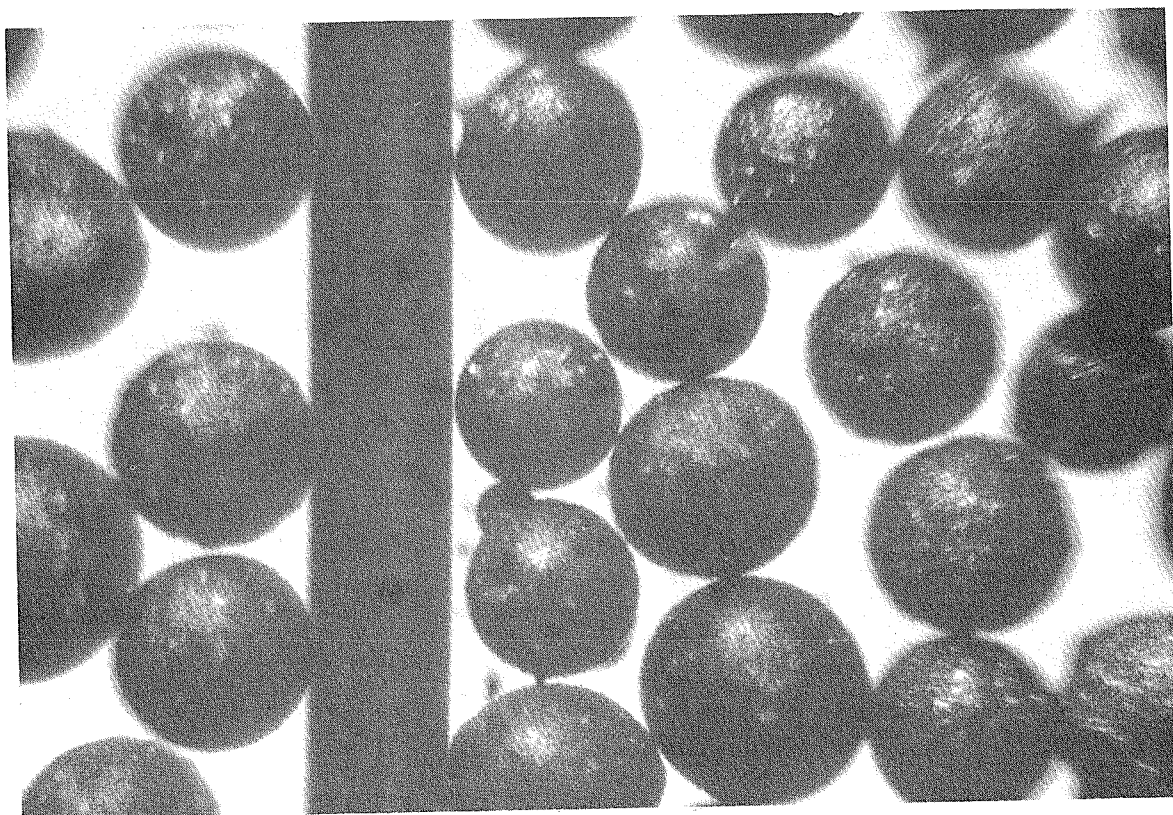
Chemical composition

Size fraction (μm)	Carbon (wt. per cent)	Boron (wt. per cent)
250-355	21.45	78.5
425-710	21.4	78.6
710-1000	21.2	78.6

Purity

Size fraction (μm)	Fe	Si	Mg	Cr	Ni	Cu	Ti
250-355	0.1	0.1	0.002	0.01	0.02	0.01	0.01
425-710	0.1	0.1	0.001	0.01	0.02	0.01	0.01
710-1000	0.1	0.1	0.002	0.02	0.03	0.01	0.01

Impurity contents shown are in percent by weight



↑
Ni wire : 200 μm

Photo. 1 Grain size of B_4C particles (250~355 μm)

る B_4C 粒子の重量減少は無いものとし、製作された中性子吸収ペレットの重量の測定値から換算して求めた。しかし化学分析法においては分析精度上の問題がからむこと、等から、中性子吸収ペレットに含まれるホウ素含有量は、化学分析結果と重量の測定値から換算した結果との平均値としTable 3に示した。Table 4に中性子吸収ペレット50個の平均のグロス密度を示した。

以上の中性子吸収ペレット114個を外径54.0mm全長1180mm、吸収ペレット挿入孔の直径8.5mmまたは12.5mmの高純度黒鉛棒に挿入して実験用可燃性毒物棒を製作した。

Table 3 実験用可燃性毒物棒の中性子吸収ペレットのホウ素含有量
(単位 w/o)

濃度(w/o) \ 粒径	B_4C 粒子の粒径 (μm)			
	~3	250~355	425~710	710~1000
2.25	2.11±0.06	2.27±0.06	2.29±0.05	2.27±0.10
4.50	4.27±0.12	4.48±0.11	4.53±0.13	4.42±0.09
9.0	8.35±0.30	8.66±0.16	8.79±0.16	9.08±0.15
9.0	—	—	9.00±0.21	—

Table 4 中性子吸収ペレットのグロス密度

濃度(w/o) \ 粒径	B_4C 粒子の粒径 (μm)			
	~3	250~355	425~710	710~1000
2.25 (直径 8mm)	1.58	1.53	1.51	1.52
4.50 (直径 8mm)	1.61	1.53	1.54	1.54
9.0 (直径 8mm)	1.63	1.53	1.52	1.56
9.0 (直径 12mm)	—	—	1.53	—

3. 実験体系

実験を行った半均質臨界実験装置 (SHE) は、水平2分割型で $1/2$ 集合体は一辺が約137cmの六角柱で長さ120cmであり、移動側架台を固定側架台に接近させて臨界に到達させる。燃料棒は黒鉛中に分散した20%濃縮酸化ウラン半均質ペレットを燃料鞘に挿入したものである。

高温ガス実験炉の炉心の1カラム内の燃料棒配置として、第1リングに6本、第2リングに6本の合計12本の燃料棒が挿入されている。この燃料棒配置を模擬した炉心をSHE臨界実験装置に構成した。この高温ガス実験炉の模擬炉心SHE-14炉心において、実験用可燃性毒物棒の反応度測定の実験を行った。

SHE-14炉心の燃料棒配置をFig.3に示したが、SHE-14炉心の特徴は、

- i) カラム当りの $C/^{235}U$ 原子比が7158で、実験炉の9340(ウラン濃縮度4w/o)に近いこと。
- ii) カラム半径も実験炉の299mmに対し、SHE-14炉心で283mmと近いこと。

があげられる。

高温ガス実験炉は平均4%濃縮ウラン燃料に対し、SHEは20%濃縮ウラン燃料を用いている。この濃縮度の相違は、炉心の大きさおよび核群定数的には非均質体系の ^{238}U の共鳴吸収効果に影響するものと考えられる。しかし、黒鉛減速という共通点から中性子の挙動に関する基本的特性はほとんど共通しており、高温ガス実験炉の炉物理について普遍的な理解を増進出来ると考えている。

4. 実験

4.1 SHE-14炉心の臨界質量の測定

SHE-14炉心の臨界近接は標準的な方法で行なった。あらかじめ、炉心部のマトリックス管には炉心用黒鉛棒を装荷しておき、中心カラムから逐次外側のカラムに向けて燃料棒と置換した。燃料棒の装荷段階毎に炉心外に配置したBF₃カウンター(20th century 5EB 70/6)により中性子増倍度を測定し、未臨界を確認してから順次燃料棒を増やして臨界に到達させた。この中性子増倍度の逆数をFig.4に示した。測定結果からSHE-14炉心の最小臨界燃料棒数は86.94本であった。炉心に挿入されているPNS延長管、安全棒・制御棒挿入孔および残部の反応度補正を行った後の理想状態の臨界燃料棒数は84.81本(等価炉心半径=39.58cm)であり、 ^{235}U で4.96kgの臨界質量となった。

4.2 燃料棒価値の測定

実験用可燃性毒物棒の反応度をペリオド法および燃料棒置換法で測定するために、まず、SHE

臨界集合体の固定側および移動側の運転用制御棒の反応度校正曲線をペリオド法で測定した。炉心に装荷される燃料棒の装荷位置による燃料棒の価値の相異を調べるために、装荷燃料棒数 87 本の装荷炉心を基準炉心とし、移動側の 7W7, 7X7, 7U7 または 7Z7 に、固定側の 7A7 にそれぞれ燃料棒を装荷した場合の場所依存の燃料棒価値をペリオド法で求めた制御棒の反応度校正曲線から求めた。測定結果を下記に示したが装荷位置による反応度の相異は数セントあり、7A7 に装荷された場合の燃料棒価値が若干低めであるのは、固定側の制御棒が約 7 cm の距離はなれた 9A7 に挿入されている影響と思われる。

測定した移動側の位置に対応する固定側の位置に装荷される燃料棒価値は炉心の対称性から、7A7 以外は同等の価値を有しているものと見なした。

燃料棒価値の測定値

装荷燃料棒位置	価値(ϕ)
7W7	50.5 ± 2.4
7X7	53.1 ± 2.4
7U7	52.2 ± 2.4
7Z7	51.2 ± 2.4
7A7	45.2 ± 2.4

4.3 実験用可燃性毒物棒の反応度の測定

SHE-14 炉心の中心カラム内に 2 で述べた 1 3 種類の実験用可燃性毒物棒を各々 1 本、2 本あるいは 3 本挿入し反応度測定を行った。

実験用可燃性毒物棒を 1 本挿入した位置は SHE-14 炉心の中心カラムで炉心軸から 13.0 cm の距離の 2B1-2V1 (Fig.3 参照) であり黒鉛棒と交換して挿入した。高温ガス炉ではカラムの中心軸から 12.9 cm の位置に挿入されることになっているのでカラム内での位置は同等である。また 2 本挿入の場合は 1 本挿入位置と、中心軸に対して 120° 回転した 2F1-2Z1 に挿入した。この実験用可燃性毒物棒の相互間距離は 22.52 cm であり、高温ガス実験炉の 22.3 cm とかなりよく一致した配置となっている (Fig.5 参照)。同様に 3 本挿入の場合はカラムの中心軸対称に中心軸からの距離 13.0 cm の位置に配置した。

測定は基準装荷燃料棒数 88 本の基準炉心に、各実験用可燃性毒物棒を挿入し、反応度の大きさに対して 4.2 で測定した燃料棒位置に燃料棒を装荷し臨界点を求めた。

可燃性毒物棒の反応度をペリオド法および燃料棒置換法より求めた測定結果を Table 5, Fig. 6 にそれぞれ示した。この測定結果から、

- 1) 可燃性毒物棒の反応度は中性子吸収ペレット中のホウ素含有量の対数に比例して増加すること。
 - 2) 可燃性毒物棒 2 本の反応度は 1 本の反応度のほとんど 2 倍になっている。したがって可燃性毒物棒の相互間距離 22.5 cm では相互干渉効果は無視出来る程小さい。
 - 3) 中性子吸収ペレット中のホウ素濃度が同じホウ素濃度であっても、 B_4C 粒子の粒径が大きい程、 B_4C 粒子の自己遮蔽効果により反応度は小さくなる。
- 等のことが認められた。

Table 5.1 実験用可燃性毒物棒の反応度の測定値

(単位 ϕ)

ホウ素濃度 w/o	カラム当り の本数	B ₄ C 粒子の粒径 (μ m)			
		~3	250~355	425~710	710~1000
2.25 (直径 8mm)	1 本	*1 118.5±4.2	*2 122.7±4.2	104.1±4.2	88.0±3.4
	2 本	236.6±5.4	244.3±5.4	202.3±5.4	174.8±4.8
	3 本	—	—	303.1±5.9	—
4.50 (直径 8mm)	1 本	193.1±4.8	171.9±4.2	*3 147.9±4.5	136.7±4.2
	2 本	391.2±6.8	348.8±6.4	295.5±5.9	277.2±5.9
	3 本	—	—	440.3±7.2	—
9.0 (直径 8mm)	1 本	254.3±5.4	228.9±5.4	214.6±5.4	193.8±4.8
	2 本	519.2±8.0	471.9±7.6	431.2±7.2	390.1±6.8
	3 本	—	—	—	—
9.0 (直径 12mm)	1 本	—	—	345.8±6.5	—

(*1) 2回の測定値 119.4±4.2(ϕ)と 117.5±4.2(ϕ)の平均値(*2) 2回の測定値 121.1±4.2(ϕ)と 124.2±4.2(ϕ)の平均値(*3) 2回の測定値 147.3±4.8(ϕ)と 148.5±4.2(ϕ)の平均値

Table 5.2 実験用可燃性毒物棒の相互干渉効果

ホウ素濃度 w/o	カラム当り の本数	B ₄ C 粒子の粒径 (μm)			
		~3	250~355	425~710	710~1000
2.25	1 本	1.000	1.000	1.000	1.000
	2 本	0.999	0.996	0.972	0.993
	3 本	—	—	0.964	—
4.50	1 本	1.000	1.000	1.000	1.000
	2 本	1.013	1.015	0.999	1.006
	3 本	—	—	0.993	—
9.0	1 本	1.000	1.000	1.000	1.000
	2 本	1.021	1.031	1.006	1.010
	3 本	—	—	—	—

$$\text{相互干渉効果} = \frac{\text{多数本の反応度}}{\text{本数} \times \text{1本当りの反応度}}$$

4.4 測定値の誤差評価

可燃性毒物棒の反応度をペリオド法および燃料棒置換法で測定を行ったが、反応度の測定誤差となる要因の項目として

- (i) ペリオド法による制御棒の反応度校正曲線および臨界制御棒位置の誤差による反応度誤差
- (ii) 臨界実験装置の固定側と移動側との密着距離の相異による反応度誤差
- (iii) 燃料棒中の ²³⁵U の量および装荷位置の相異による反応度誤差
- (iv) 炉心の温度変化による反応度誤差

が考えられる。

そこで、各項目について誤差評価を行う。

(i) 制御棒の反応度校正の測定は、臨界の制御棒位置から制御棒を 30~40mm の長さを急速に引抜き、SHE核計装の第 1 channel の出力上昇をレコーダーに記録し出力が 2 倍に到達する倍増時間をストップウォッチで測定して逆時間方程式から反応度を求めた。この倍増時間の測定誤差を 1 秒間とした場合の反応誤差は約 5φ の反応度に対し 0.03φ の誤差となり、制御棒校正の全反応度、約 50φ に対し、高々 0.3φ 以下の誤差となる。

また臨界点の確認は第 1ch. の出力変動を 1% 以内で維持するための制御棒位置の変動は 0.1~0.2 mm の範囲であり、この制御棒の変動による反応度誤差は約 0.01φ 以下であり無視できる。

(ii) SHE 臨界実験装置の臨界近接は移動側 1/2 集合体を固定側 1/2 集合体に密着させて行うため、密着距離の相異による反応度誤差がある。密着距離の再現性は、指示計で $0.14\text{mm} \pm_{0.05}^{0.1}$ mm の範囲にある。集合体の密着距離 1mm (移動側と固定側とのギャップの距離) の間隔の反応度減少は約 8φ と推測される。したがって、臨界近接ごとの密着距離の相異を 0.1mm とすると反応

度にあたる誤差は約 0.8 ϕ 程度と推定される。²⁾

(iii) 燃料棒 1 本中には U ディスクが 115 枚挿入されている。U ディスク中の UO_2 含有量の相異は 2.936 ± 0.036 (g)^(*) の範囲にあり、燃料棒の相異による反応度への誤差は 1.2% 程度となる。したがって燃料棒価値が約 50 ϕ の場合に 0.6 ϕ 程度の誤差をあたえることになる。燃料棒装荷位置による反応度価値の変化は、移動側の各装荷位置に燃料棒を装荷して反応度価値の測定を行ったので、装荷位置の相異による反応度価値の誤差は、(i)および(ii)における測定誤差の範囲内であり無視出来ると考えられる。

(iv) この一連の実験は約 1 ヶ月間以上の長期間にわたり行ったので、実験開始時の炉心温度は約 17°C であったのが、終了時には約 22°C まで上昇していた。

実験開始時の炉心温度約 17°C での基準状態の装荷炉心の余剰反応度は 54.10 ϕ であった。また、炉心温度約 21°C での基準状態の装荷状態の装荷炉心の余剰反応度は 54.00 ϕ であったことから、炉心温度約 5°C の変化に対する反応度変化の誤差は (i) および (ii) の測定誤差の範囲内で無視出来ると考えられる。

以上の測定誤差の評価から

- (i) 制御棒校正曲線の反応度の測定誤差として 0.3 ϕ
 - (ii) 臨界近接時の移動側と固定側との密着距離の相異による反応度誤差として 0.8 ϕ
 - (iii) 炉心に装荷する燃料棒の相異に対する反応度誤差として 0.6 ϕ
- の合計 1.7 ϕ が臨界近接時の臨界量の測定誤差となる。

5. 計 算

実験用可燃性毒物棒がカラム当り 1～3 本挿入された SHE-14 炉心の中心カラムの断面図を Fig. 7 に示した。この実験体系の正六角形のカラムを等価な面積の円柱化に近似した計算体系のカラムを同様に Fig. 7 に示した。ここで実験用可燃性毒物棒の位置は、計算コードの制約上からカラムの中心軸から 12.63cm の位置に配置され、実験体系の 13.0cm より約 3.7mm 内側になっているが、(現在は計算コードが改良され、実験体系どおりにあつかえる) 燃料棒の位置および燃料ディスクの大きさは実験体系と同一とした非均質体系として、カラム当りの群定数を衝突確率法を持った LAMP コードシステムで、⁴⁾ 以下にのべる手順で熱中性子 1 群および速中性子群 3 群の定数を作成した。

まず、カラム内のマトリックス間の空気ギャップは平均化して黒鉛領域とした。実験解析にあたっては、実効増倍係数を計算することとし、実験用可燃性毒物棒が挿入されていない SHE-14 炉心と、この炉心に B_4C 粒子の粒径 600 μm 、ホウ素濃度 4.5 w/o の可燃性毒物棒が中心カラム内に、1 本、2 本および 3 本挿入された体系について行った。

(*) U ディスク 25 枚ごとの UO_2 含有量の最大値 (74.3 g) と最小値 (72.5 g) から U ディスク 1 枚当りの UO_2 含有量に換算した値である。

i) 熱中性子群定数

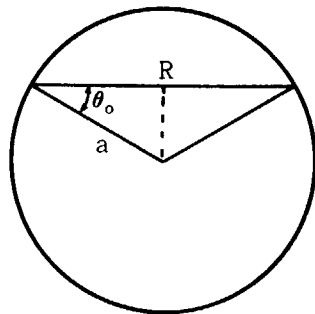
熱中性子エネルギー領域 (0 ~ 0.683eV) を 30 群に分割し、黒鉛減速材の熱中性子散乱モデルには、Young-Koppel モデルの散乱則 $S(\alpha, \beta)$ (ENDF/A ファイル⁵⁾, $T=296$ °K) を、⁶⁾ ^{235}U , ^{238}U , O, B 等の熱中性子散乱モデルに自由ガスモデルをそれぞれ採用し PIXSE コードを用い 30 群の熱中性子散乱断面積を計算した。

一方、C, U, O, B 等の吸収断面積および ^{235}U の核分裂断面積は ENDF/B-3 ファイル⁷⁾ から THESEC コード⁸⁾ で求めた。

ここで B_4C 粒子の自己遮蔽効果を Case-Hoffmann 等の方法⁹⁾ で、 B_4C 粒子を球形とし、

$$P_0 = \frac{3\ell}{4a} \int_0^{2a} \left(1 - e^{-\frac{R}{\ell}}\right) \frac{R}{2a^2} dR$$

$$= \frac{3}{8(a/\ell)^3} \left[2\left(\frac{a}{\ell}\right)^2 - 1 + \left(1 + \frac{2a}{\ell}\right)e^{-\frac{2a}{\ell}} \right]$$



Sphere

- ここで、
 a : 球の半径
 P_0 : escape probability
 ℓ : mean free path
 R : chord length

より考慮した自己遮蔽効果 $S(E)$ を Fig.8 に示した。

以上の 30 群の巨視的散乱断面積および吸収断面積等を用い、衝突確率法を用いた LAMP コードでカラム内の熱中性子スペクトルを計算し、このスペクトルを重率としカラム平均の 30 群の群定数を、同様に黒鉛反射体の 30 群の群定数をそれぞれ作成した。

炉心領域および反射体領域の 30 群の群定数、および熱中性子源分布を一次元拡散コード TUD⁴⁾ に入力し、炉心-反射体 2 領域円柱炉心体系として空間依存熱中性子スペクトルを求め、これを重率として炉心領域および反射体領域の熱中性子 1 群の定数を作成した。

ii) 速中性子群定数

速中性子エネルギー領域 0.683eV ~ 10 MeV を 66 群に分割された GAM-I タイプのデータライブラリーを採用し、衝突確率法を用いた LAMP コードシステム (FAXSE-CLUP-PIJF-EDIT) で速中性子エネルギー群 33 群のカラム平均の巨視的断面積を作成した。

ここで、 ^{235}U および ^{238}U の実効共鳴積分は、分離領域について、ENDF/B-3 ファイルの共鳴パラメータを用い非均質性を考慮し衝突確率法のCLUP-RICMコードで計算した。

iii) 臨界計算

i) および ii) で求められた熱中性子群 1 群および速中性子群 33 群、合計 34 群で、炉心を円柱化近似でおきかえ、中心カラム-炉心-反射体 3 領域とし一次元拡散コード TUD で臨界計算を行った。

臨界計算は、まず、カラムに実験用可燃性毒物棒が挿入されていない SHE-14 炉心について行い、次に、中心カラム(等価半径 14.88cm)に実験用可燃性毒物棒が 1 本、2 本、および 3 本挿入された体系 SHE-14-B 1, -B 2, -B 3 炉心についてそれぞれ行った。この臨界計算結果

Table 6 実験用可燃性毒物棒の反応度の計算値
(4.5w/o, 600 $\mu\text{mB}_4\text{C}$ 粒子)

	可燃性毒物棒数	k_{eff}	$\rho(\$)$
SHE-14	0	1.0261*	-
SHE-14-B 1	1	1.0161	1.446
SHE-14-B 2	2	1.0051	3.050
SHE-14-B 3	3	0.99813	4.097

* SHE-14 炉心の半径 40.00 cm

および可燃性毒物棒の反応度を Table 6 および Fig. 6 に示したが、中心カラムに 1 本および 2 本挿入の可燃性毒物棒の反応度の計算値は 4% 以内で実験値と一致した。また、3 本挿入の場合でも計算値と実験値とは 7% 以内で一致した。したがって、確率論的に評価した高温ガス実験炉¹⁰⁾における炉心設計の要請精度の 1 σ レベルで 5% という値をだいたい満足しているといえる。

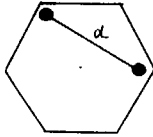
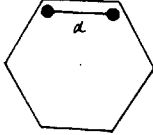
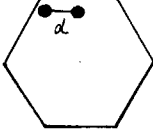
6. 討 論

実験用可燃性毒物棒がカラム内に 1 本、2 本および 3 本挿入された場合の相互間距離は 22.52 cm である。

Table 5 の測定結果より、どの種類の実験用可燃性毒物棒に対しても、相互間の干渉効果は無視出来ることが明確になった。

さらに、実験用可燃性毒物棒(ホウ素濃度 4.5 w/o, B_4C 粒子の粒径 560 μm (平均))の相互間距離を 13.0cm および 6.5 cm と変えて、相互干渉効果を調べてみた。測定結果を Table 7 に示したが、可燃性毒物棒の相互間距離が 13.0cm の場合、約 2% の shadowing 効果が見られるが、反応度測定の実験誤差約 1~2% であり干渉効果は誤差の範囲内であり無視出来ると思われるが、可燃性毒物棒の相互間距離が 6.5 cm の場合、約 4% の shadowing 効果になることが明確にされた。これから、高温ガス実験炉において、6 w/o 濃縮ウラン燃料ブロックに 3 本の可燃性毒物棒が挿

Table 7 中心カラム内における実験用可燃性毒物棒
(ホウ素濃度 4.5 w/o, B_4C 粒子の粒径
560 μm) の相互間距離の相異による反応
度変化

相互間距離 (d)	実験値 (k)	挿入位置
22.5 cm	295.5	
13.0 cm	290.6	
6.5 cm	284.2	

入されているので、隣接ブロック間での可燃性毒物棒間の距離は 7.6 cm であり可燃性毒物棒は若干の shadowing 現象になると思われる。

次に、Table 4, 5 の実験用可燃性毒物棒の反応度の実験値と計算値の比較から、カラム内に 1 本、2 本の可燃性毒物棒が挿入された両者の反応度の相異は 2~3% であり B_4C 粒子の自己遮蔽効果および、非均質性を考慮して群定数を作成すれば、計算はかなりよく可燃性毒物棒の反応度を予測出来ることがわかった。しかし、カラム内に 3 本挿入された場合の計算値が約 7% 実験値より低く見積っている。この理由は計算においてカラムの周囲の境界条件に等方反射条件を採用しカラム平均の群定数を作成したため、この群定数は隣接カラムの可燃性毒物棒の相互干渉効果を考慮して作成された群定数に対応するところとなり計算値が若干小さくなったと思われる。

Fig. 6 の測定結果の中でホウ素濃度 2.25 w/o, B_4C 粒子の粒径 $\sim 3 \mu m$ の可燃性毒物棒の反応度と粒径 $\sim 270 \mu m$ の可燃性毒物棒の反応度との差が小さいことがわかるが、再実験結果も同様であった。また、ホウ素濃度についても再化学分析結果も誤差の範囲であり、ペレット製造のときの成形圧力 (2.1 ton/cm² 以下) による B_4C 粒子の破砕は破砕テストの結果からないと考えられる。このことから、両者の実験用可燃性毒物棒の反応度の差の小さいことは、詳細な計算結果との対比からさらに検討する必要がある。

SHE に、全部のカラムについて、カラム当たり 2 本の実験用可燃性毒物棒 (ホウ素濃度 4.5 w/o, B_4C 粒子の粒径 $\sim 560 \mu m$) が挿入された SHE-B2 炉心を構成し臨界実験を行った。

SHE-B2 炉心の燃料棒装荷図を Fig. 9 に示したが、臨界は 13 カラム (燃料棒数 156 本 (^{235}U 9.24 kg), 挿入実験用可燃性毒物棒 52 本 (固定側と移動側との和)) で到達した。この炉心の理想状態の臨界燃料棒数は制御棒、安全棒の挿入孔、PNS 延長管の反応度および余剰反応度の補正を行い 150.1 本 (等価炉心半径 52.65 cm) となった。臨界計算は 5 において述べた計算方法と同様にして行った。関連データのまとめとして実験用可燃性毒物棒が挿入されていない SHE-14

炉心、および可燃性毒物棒がカラム当り1本、2本および3本挿入されたSHE-B 1, SHE-B 2 およびSHE-B 3炉心の臨界質量をFig.10に示した。

SHE-14炉心において実験値と計算値とは実効増倍係数 k_{eff} で1.8%, SHE-B 2においては1.6%といずれも計算値が実験値より大きくなっている。両炉心の差つまり実験用可燃性毒物棒の反応度による臨界質量の増加分の計算値は約5.2%実験値より大きくなっているが、多数本の実験用可燃性毒物棒の反応度をかなり正確に予測出来たといえよう。

なお、非均質装荷炉心であるSHE-14, SHE-B 1, B 2及びB 3炉心の臨界質量の計算を二次元計算等によって行い計算精度を高めておく必要がある。

7. 結 論

黒鉛減速20%濃縮ウラン平均質臨界実験装置に、高温ガス炉の模擬炉心であるSHE-14炉心を構成し、炉心領域の中心カラム内に可燃性毒物棒を挿入し、その反応度値の測定をペリオド法および燃料棒価値置換法で行なった。

実験に用いた可燃性毒物棒は高温ガス実験炉の炉心設計に採用された可燃性毒物棒と核的に同一なものである。即ち、 B_4C 粒子の粒径 $\sim 560\mu m$ でホウ素含有量4.5w/oの中性子吸収ペレットおよび B_4C 粒子の粒径 $\sim 3\mu m$, $\sim 270\mu m$, $\sim 810\mu m$ でホウ素含有量2.25w/o, 9.0w/oで、直径が8mmないし12mmの合計13種類の中性子吸収ペレットの実験用可燃性毒物棒を製作して反応度変化を測定した。

測定結果から、以上のパラメータの範囲では、

1. 反応度は吸収ペレット中のホウ素含有量の対数に比例して増加すること。
2. 吸収ペレット中のホウ素含有量が同じであっても B_4C 粒子の粒径が大きい程 B_4C 粒子の自己遮蔽効果により反応度が小さくなること。

が認められた。また、測定結果と計算結果との比較からは、

3. B_4C 粒子の自己遮蔽効果および格子の非均質性を考慮し、臨界計算を行えば、カラムあたり1本ないし2本の可燃性毒物棒の反応度値を約5%以内の誤差で予測出来ることがわかった。したがって、以上の計算精度は高温ガス実験炉における可燃性毒物棒の反応度の要請設計計算精度である1 σ レベルでいって5%という値を十分に満足しているといえる。

謝 辞

この研究は多目的高温ガス実験炉の研究開発計画の一環として行なわれた。研究を進めるにあたっては、多目的炉設計研究室新藤隆一氏から助言と激励をいただいた。理論計算を行うにあたり炉物理実験研究室室長後藤頼男氏、および同研究室員土橋敬一郎氏から助言をいただいた。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 青地哲男, 他 : JAERI-M 6895 (1976)
- 2) 井上和彦, 他 : JAERI-1032 (1962)
- 3) 金子義彦, 他 : JAERI-1257 (1978)
- 4) Tsuchihashi, K.: JAERI-1259 (1979)
- 5) Young, J. A. and Koppel, J.U : J. Chemical Physics, Vol. 42(1) p 357 (1965)
- 6) Honeck, H.C. : BNL-8381 (1965)
- 7) Honeck, H.C. : BNL-50066 (T-467) (1967)
- 8) 土橋敬一郎, 藤田嘉久 : Internal Report (1973)
- 9) Case, K.M. et al : "Introduction to the Theory of Neutron Diffusion", Vol. 1 p23 (1953)
- 10) 金子義彦 : JAERI-M 8847 (1980)

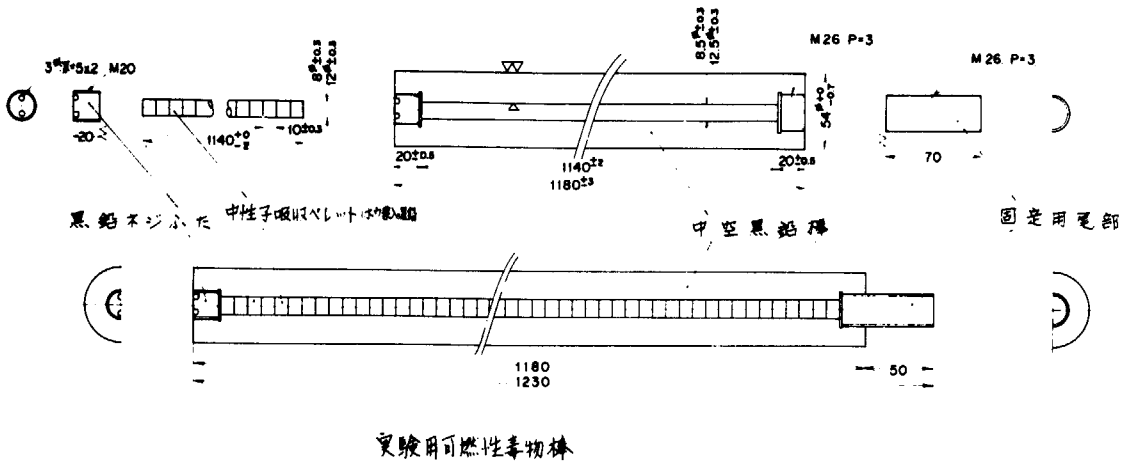


Fig. 1 Cross section of experimental burnable poison rod

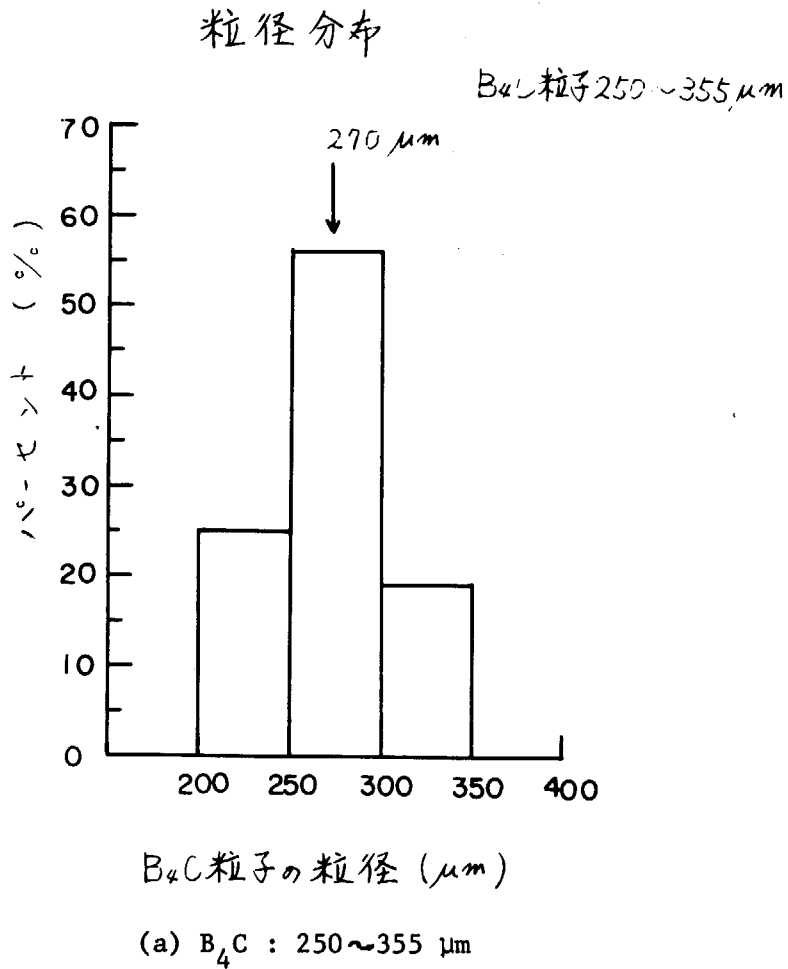


Fig. 2 Distribution of size of the B₄C particles

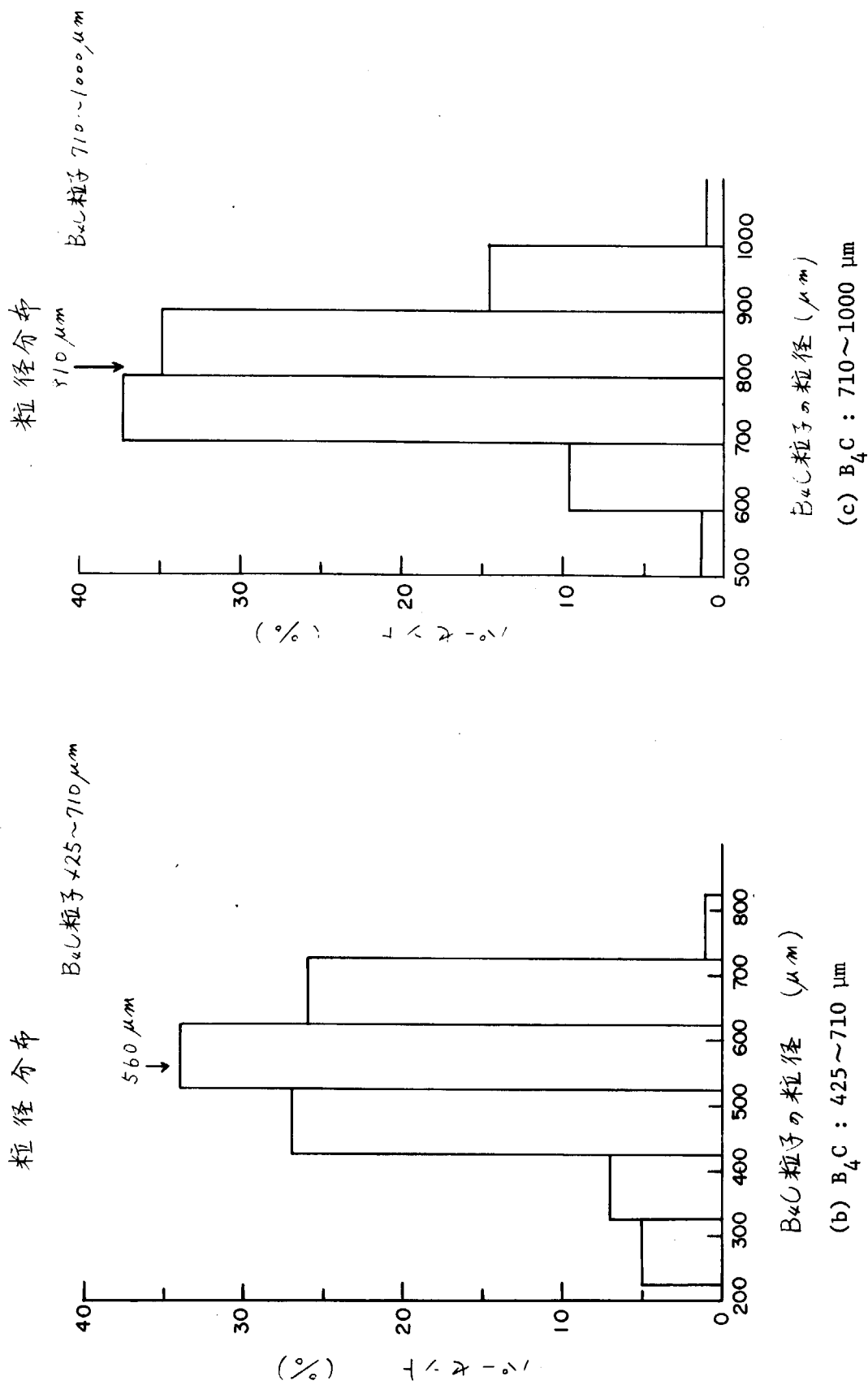
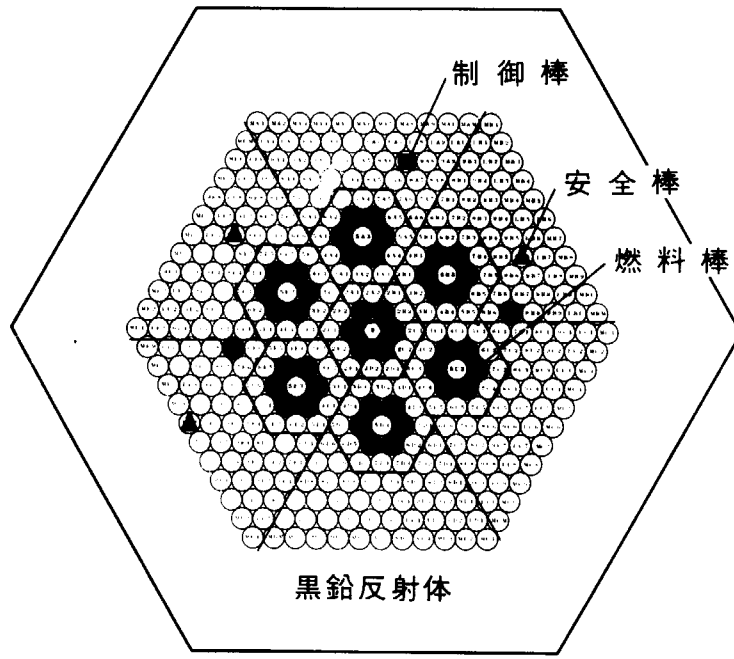


Fig. 2 Distribution of size of the B_4C particles



(固定側1/2集合体断面図)

高温ガス実験炉の模擬炉心(SHE-14炉心)の燃料棒装荷図

Fig. 3 Cross section of SHE-14 core in critical fuel loading pattern

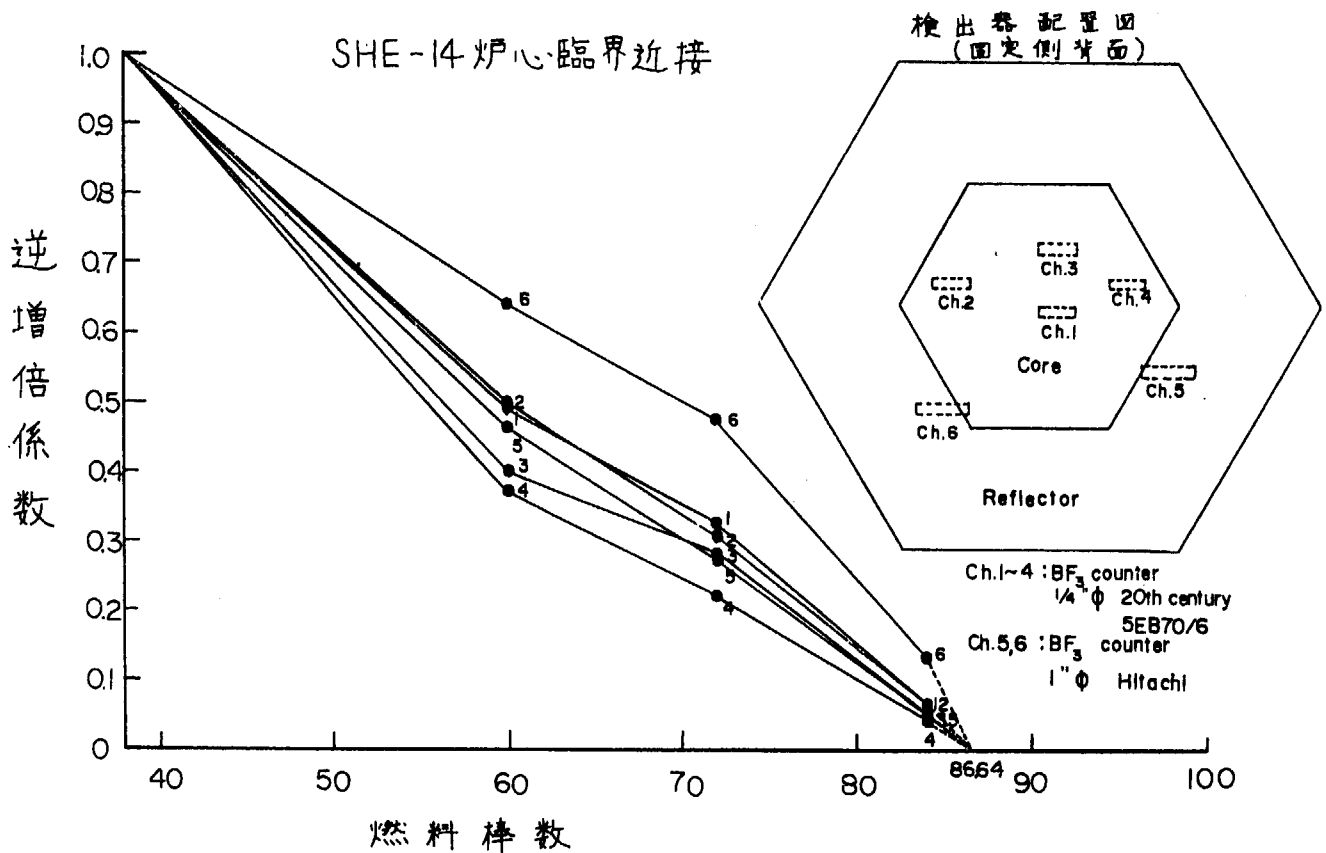


Fig. 4 Inverse multiplication measured with each counting channels versus number of fuel rods loading in SHE-14 core

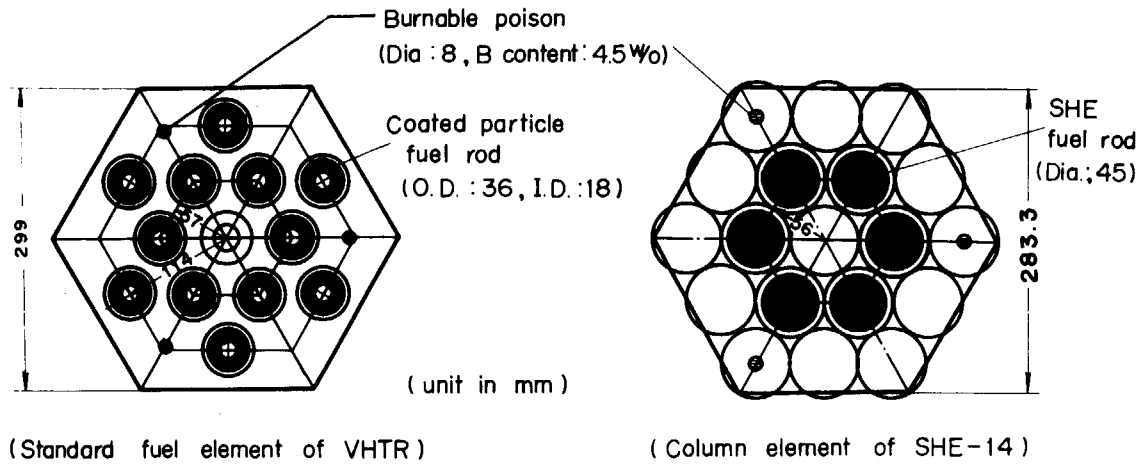


Fig. 5 Cross sections of standard fuel element of VHTR and column element of SHE-14 core

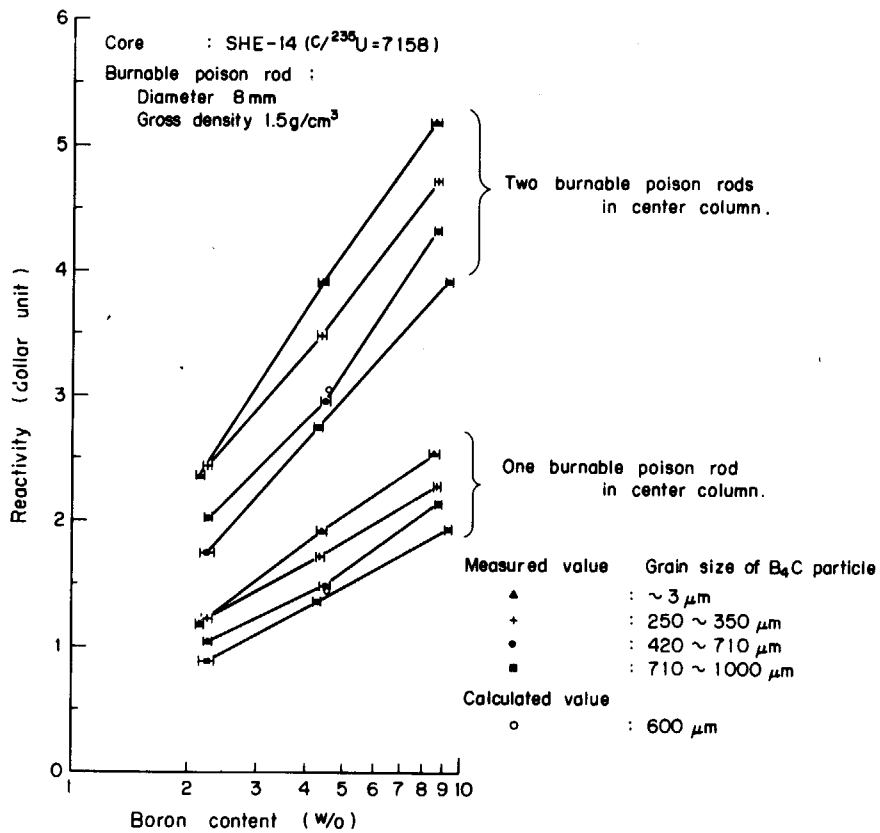


Fig. 6 Reactivity worths of burnable poison rods in central column of SHE-14 core

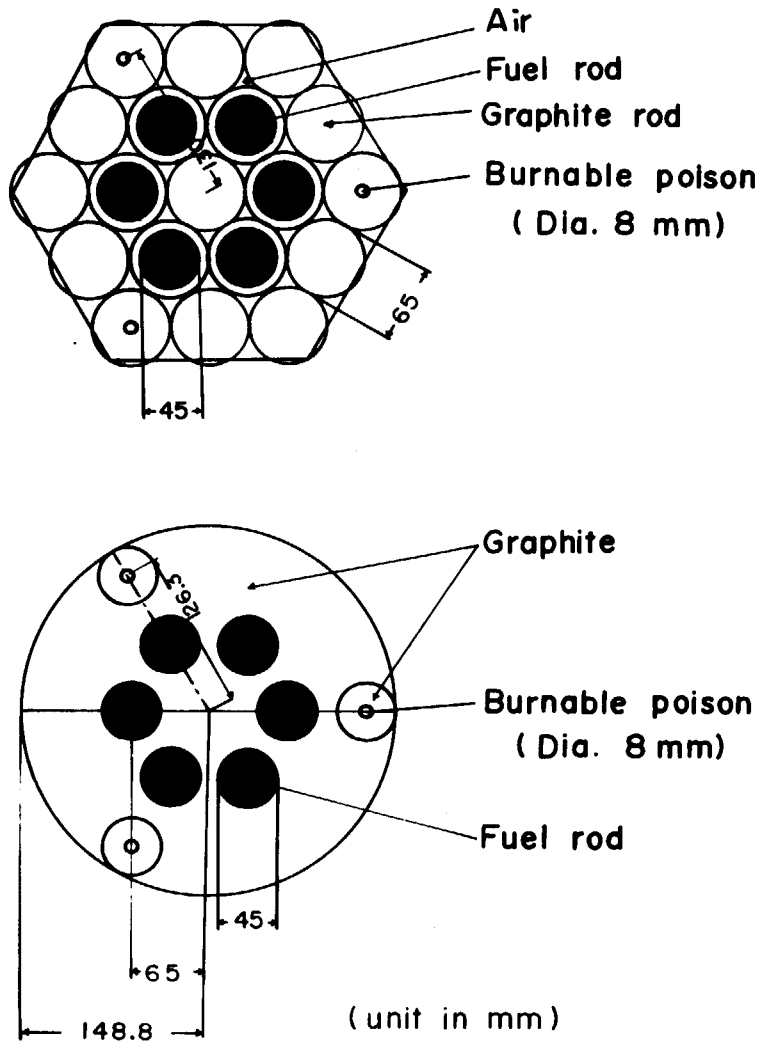


Fig. 7 Modification of experimental column by cylindrical approximation method in calculation

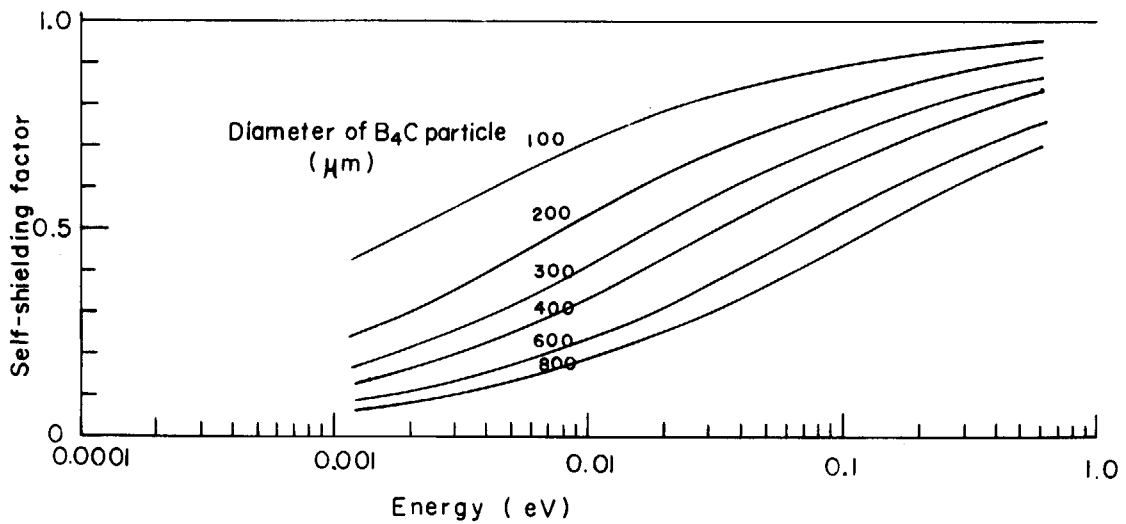


Fig. 8 Calculated values of self-shielding factor of B_4C particle by Case-Hoffmann-Placzek's method

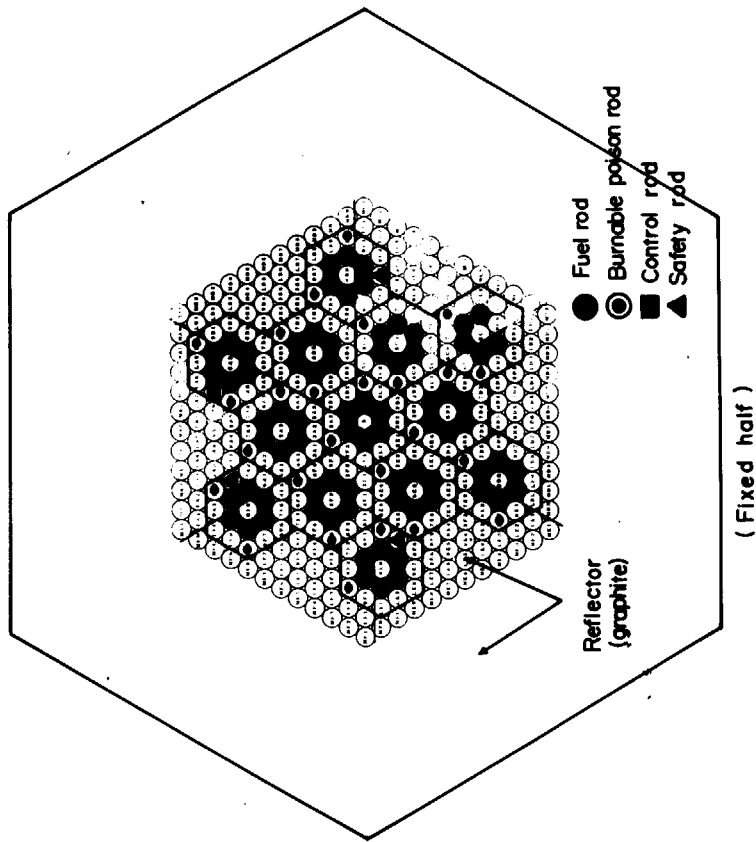
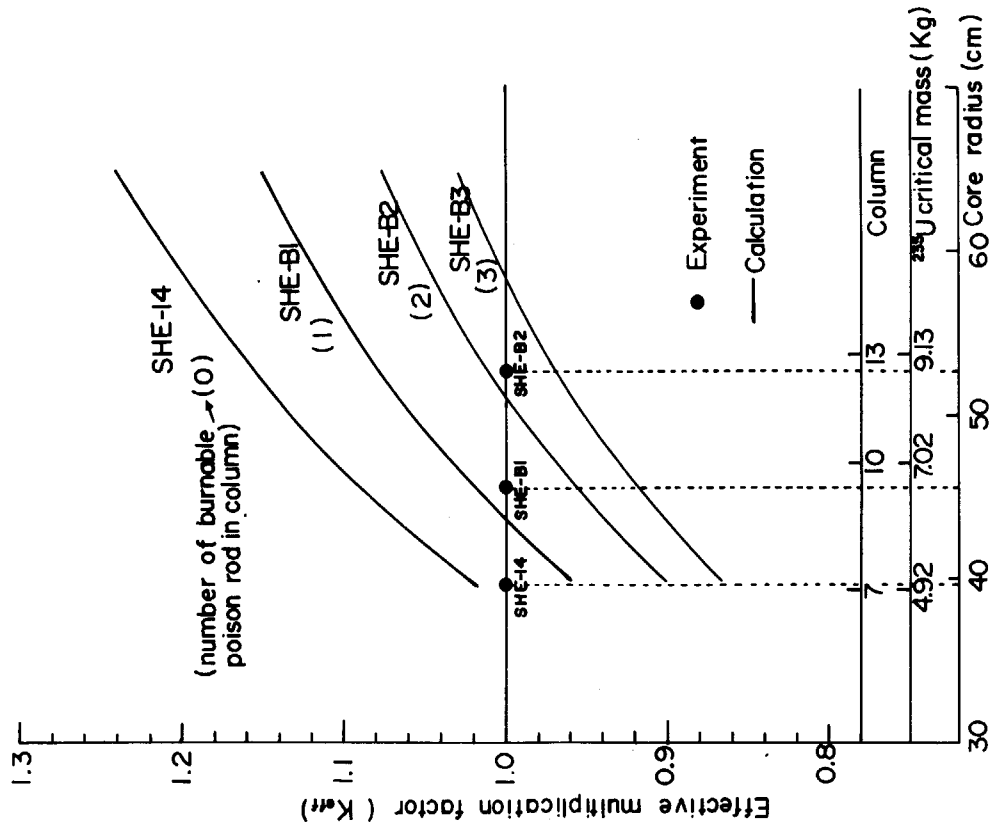


Fig. 9 Cross section of SHE-B2 core in critical fuel loading pattern

Fig. 10 Critical mass of 20% enriched uranium graphite moderated cores simulated to VHTR