

黒鉛減速炉心における系統的な
制御棒効果の実験

1969 年 3 月

日本原子力研究所

Japan Atomic Energy Research Institute

日本原子力研究所は、研究成果、調査結果などを JAERI レポートとして、つぎの 4 種に分けそれぞれの通し番号を付し、不定期に刊行しております。

- | | | |
|---------|-------------------------------|-------------|
| 1. 研究報告 | まとめた研究の成果あるいはその一部における重要な結果の報告 | JAERI 1001- |
| 2. 調査報告 | 総説・展望調査の結果などをまとめたもの | JAERI 4001- |
| 3. 年 報 | 研究・開発その他の活動状況などの報告 | JAERI 5001- |
| 4. 資 料 | 施設の概要や手引きなど | JAERI 6001- |

このうち既刊分については「JAERI レポート一覧」にタイトル・要旨をまとめて掲載し、また新刊レポートは「研究成果要旨集」(月刊)で逐次紹介しています。これらの研究報告書に関する頒布・複写・翻訳等についてのお問合せは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）に申しこんでください。

Japan Atomic Energy Research Institute publishes the nonperiodical reports with the following classification numbers:

1. JAERI 1001- Research reports
2. JAERI 4001- Survey reports and reviews
3. JAERI 5001- Annual reports
4. JAERI 6001- Manuals etc.

Requests for the above publications, and reproduction and translation should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan

黒鉛減速炉心における系統的な制御棒効果の実験

要 旨

著者らは、黒鉛減速系あるいは重水減速系に適用できる系統的な制御棒効果解析法を、SN'コードおよび Nordheim Scaletter コードを中心にして確立することを目指し作業を進めている。

本報告書では、この解析法の精度評価をおこなうため、反射体つき20%濃縮ウラン黒鉛減速炉心 SHE に関するパルス中性子法による制御棒効果の実験データについて詳説した。

制御棒効果を決定する主要因子は、(1) 炉心核特性、(2) 中性子吸収材の核種および濃度、(3) 中性子吸収材の形状寸法、(4) 相互干渉、の4つと考え、炉心燃料濃度、制御棒の核種、半径等を系統的に変えた300以上のケースについての実験データを集めた。それによって、これら因子と制御棒効果の定性的な関係を実験的に明らかにした。

1968年11月

日本原子力研究所 東海研究所
原子炉工学部

金子 義彦 秋濃 藤義
黒川 良右 北館 憲二

Measurement of Control Rod Worths in Graphite Moderated Core

Summary

This report describes a systematic compilation of experimental data on the effectiveness of control rod by the use of pulsed neutron technique in a graphite-moderated 20% enriched uranium critical assembly SHE. The data used for the compilation are collected from over 300 experimental cases. The philosophy of the choice of experimental conditions is that essential parameters to determine the effectiveness of control rod should be the following :

1. nuclear characteristics of the cores,
2. kind of nucleus of the neutron absorbing material and its density,
3. geometrical factors of the neutron absorbers of the control rods,
4. mutual interaction among the control rods

The compilation has been performed with the purpose of checking the accuracy of the control rod worth analysis system applicable to graphite-moderated and heavy water-moderated reactors, which is under developments using SN, and Nordheim and Scalettar method.

November 1968

Yoshihiko KANEKO, Fujiyoshi AKINO,
Ryosuke KUROKAWA, Kenji KITADATE
Division of Reactor Engineering
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute

目 次

1. まえがき.....	1
2. 実験体系.....	3
3. 制御棒の構成.....	5
4. 実験方法.....	6
4.1 制御棒効果の表示	6
4.2 実験装置	6
4.3 データ処理	8
5. 測定結果.....	9
5.1 炉心核特性への依存	9
5.2 中性子吸収材の核種と濃度への依存	10
5.3 制御棒の形状への依存	11
5.4 相互干渉効果	12
6. 結 言.....	15
謝 辞.....	16
文 献.....	16
表.....	17
付 錄.....	26

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental assembly.....	3
3. Constitution of Control rod.....	5
4. Experimental method.....	6
4.1 Expression of control rod effectiveness	6
4.2 Experimental apparatus	6
4.3 Data processing	8
5. Results of the measurement	9
5.1 Dependence on nuclear characteristics of core	9
5.2 Dependence on kind of nucleus of the neutron absorbing material and its density.....	10
5.3 Dependence on geometrical factors of the neutron absorbers of control rods	11
5.4 Mutual interaction among control rods	12
6. Conclusion	15
Acknowledgement.....	16
References	16
Tabces	17
Appendix	26

1. まえがき

制御棒効果の解析は炉工学における基本的問題の一つであることは言うまでもない。制御棒効果に関する研究の歴史は古く1940年代に NORDHEIM 等¹⁾の論文が発表されて以来今日まで著者の知るものだけでも50件を越えている。しかしながら、この経過した長い時間のわりには制御棒解析法がその幾何学的因子から発生する数学的複雑さのため、また炉の建設の際には十分すぎる余裕を制御棒効果にとり入れているためであろうか、精密化が遅れているように思われる。最近になって炉の経済性から critical な設計が要求されるようになり、この制御棒効果に関する研究も炉工学研究の中心問題の一つに数えられるようになったようである。

制御棒効果研究の発展のあとをたどると、二つの密接な関連をもつ流れがはつきりしている。つまり

- (1) 制御棒吸収材による中性子吸収および散乱の構造の明確化
- (2) その結果引起される炉全体の中性子束のゆがみを正確に記述する仕事

に要約される。二つの流れの仕事が互に関連をもちつつ個々に進行して、それぞれ成果をおさめているといえよう。

さて(1)に関する仕事は制御棒の中および周辺について輸送方程式を一組あるいは多組近似で解きその漸近解から炉全体の解析に用いる境界条件を求める方向にまとめられている。古くは Davison-Kushneruk の黒色および灰色制御棒の対数微分条件における挿外距離 d に関する論文があり、最近では特に灰色制御棒の中性子吸収のエネルギー依存を精密化した ÜBERALL²⁾ および SPINKS³⁾ の研究、また d の算出時の減速中性子源の存在および減速材の非等方散乱の効果に注目した PELLAND の研究がある。また対数微分条件の使用とは別に HURWITZ-ROE⁴⁾ の吸収面積法があり軽水炉系での多数本制御棒効果の算定に用いる Super cell の考えに発展している。

部分插入制御棒に関する対数微分条件については、簡単な LIGOU⁵⁾ の条件より未だ精密化されていない。かなり粗い近似であることは自明で実験的にも中性子束分布の測定から訂正の必要があると指摘されてはいるが、反応度への寄与の度合については明確でない。

今後の問題としては、個々の理論的解法の精密化の努力と共に、制御棒近傍を別として、炉全体の中性子バランスの記述にはほとんど計算誤差がないような単純な幾何学的配置の制御棒効果の系統的な実験データとの対比により、制御棒近傍の中性子輸送の取扱いについて検討を加え、さらに、少數群近似のさいの境界条件の検討および

訂正について有効な情報を得ることが重要課題してとり上げられるべきであろう。また一方、制御棒近傍の中性子束分布、スペクトル変化を箔放射化法により測定し、これらの基礎的知識を増加させる活動もおこなわなければならないと考えられる。

次に(2)に関する仕事は(1)の研究の結果明かにされた制御棒表面の対数微分条件の値あるいは制御棒を置換した吸収セルを設定して後、炉全体の中性子束分布を拡散近似でいかに求めるかということにつきている。この目的には多くの場合汎用の多次元数值計算コード PDQ 等を使用すれば、原理的には問題がたやすくようと思えるが、計算時間がきわめて長く、その上厳密な幾何学的形状を入力しようとすると空間メッシュ数が膨大となり、実際に解析不能になる場合も少なくない。三次元配置問題については数值解法は現存の計算機の容量からして成功の望みは少ない。そのようなわけで解析的手法を取り入れた近似解法が将来とも有望視されているのが現状である。解析的な手法には

- i) Nordheim-Scalettar 法 (ref. 6, 7, 8, 9, 10, 11)
- ii) 変分法 (ref. 12, 13)
- iii) Super cell 法 (ref. 14)
- iv) Source & Sink 法 (ref. 7)

が提案され、すでに幾何学的因子が簡単な場合にはこれらの方法が制御棒効果を正確に記述しているという実験的な裏付けは少ないのであるが、解法自身の数値的誤差はしだいに少くなっているように見える。この状況にふまえて、とりあげるべき問題の一つとしては、幾何学的因子の簡単な、例えば同一円環上に全長挿入された制御棒群に対する効果についての精密な実験との対比をおこない、計算方法の基本的な部分の精度、適用限界を明確にすることと、幾何学的因子がより複雑な問題、例えば反射体つき炉に部分偏心挿入された制御棒効果について同様の努力がなされるべきであると思われる。

以上述べた現段階におけるすべき研究の判断により本報告書に述べる制御棒効果に関する実験データの集積の仕事が計画され遂行された。

まず、制御棒効果を決定する主要因子は

- I. 炉心核特性（炉心の燃料濃度、炉形式、炉心反射体の構成材料等）
- II. 中性子吸収材の核種および濃度
- III. 中性子吸収材の形状と寸法
- IV. 制御棒相互の干渉

の4つであると考えてよいであろう。本報告ではこの4つの因子を系統的に動かした300 ケース以上の実験データ

タを、反射体つき20%濃縮ウラン黒鉛減速炉心 SHEにおいて集積した結果を述べる。

さて将来完成されるであろう制御棒効果解析の体系化に関する著者の考えは次の Fig.1 に示された通りである。3. に述べる実験データ集積の仕事は A および D に相当する。B に相当する仕事は WDSN コードを規準として平行して進められている。また C, E の仕事は Nordheim-Scalettar 法によるコードを開発中である。

最後に実用炉に用いる制御棒の設計にあたっては核的有利点と機械的化学的強度、熱除去、交換寿命の長さな

どの妥協によって制御棒の構成の微細が決定されるのはいうまでもないが、この研究は核的特性のみに注目しつつ、炉物理的観点から制御棒挿入により中性子バランスがくずれ、反応度抑制効果が発生する構造を究明しようという意図のもとに終始していることをつけ加えたい。

また過去において、系統的な制御棒効果に関する実験データの集積実験は、GE¹⁵⁾ および ANL¹⁶⁾ で、主として軽水炉を対象としておこなわれたものが目立つが、他は実験ケースが50以下であり目的にそぐわないし、とくに黒鉛炉では例に乏しい。

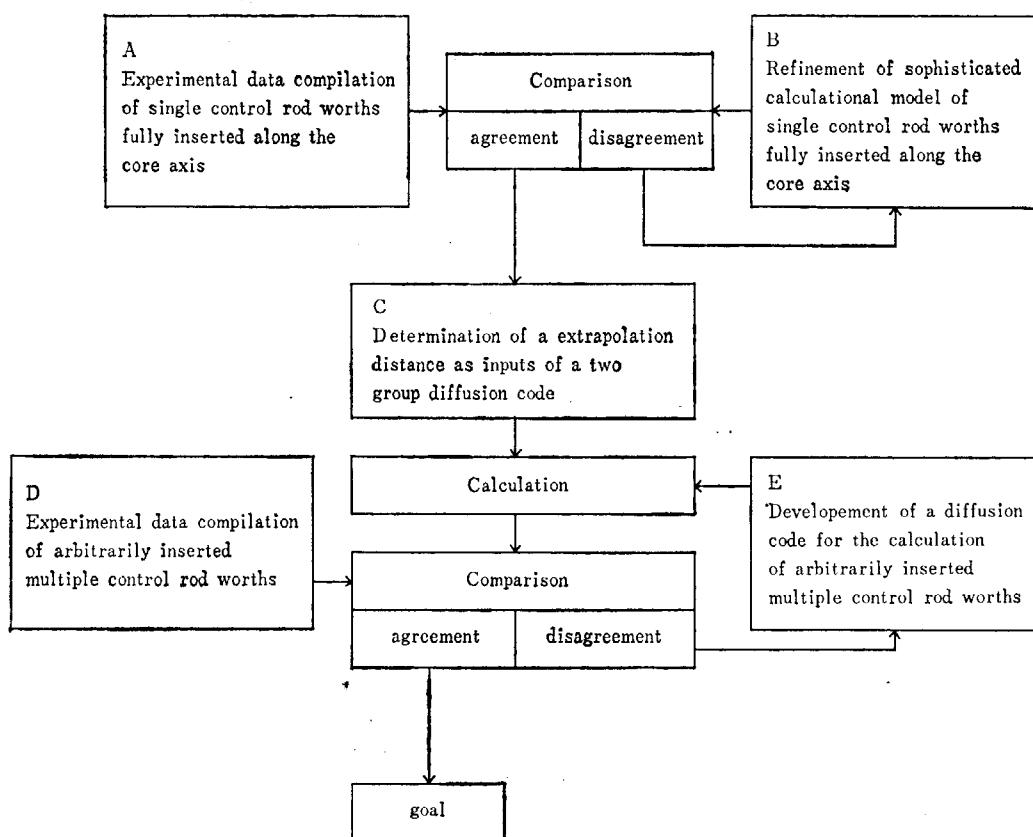


Fig.1 Systematization of calculational method for control rod worths

2. 実験体系

SHE¹⁷⁾ の炉心部は、分散形燃料ペレットと黒鉛ペレットを所定のパターンで黒鉛スリーブ管に装填してつくった燃料棒を、黒鉛マトリックス管に装荷したものである。この炉心部側面を厚さ約 90 cm の黒鉛棒からなる反射体でおおい、全体は一辺 120 cm、高さ 240 cm の正六角柱状をなしている。炉心部の燃料濃度は燃料ペレットと黒鉛ペレットの装填パターンにより変えられ、炭素の ^{235}U に対する原子比が 2226 から 5378 の間変化しうる。この原子比および反射体の構成を変えた 5 コの炉心について実験がおこなわれた。各炉心の核的性質および

幾何学的寸法を TABLE 1 に、燃料装荷の模様の一例を Fig. 2 に示す。

これらの炉心の炉物理的特徴は、黒鉛炉共通の問題のほかに、反射体効果がきわめて強いために臨界量が裸炉の場合の約 7 分の 1 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および熱外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キングができるなどである。これらの現象は $\text{C}/^{235}\text{U}$ 比が小さいほど助長される。箔放射化法によるこの現象に関する実験データの一例を Fig. 3 に示す¹⁸⁾。

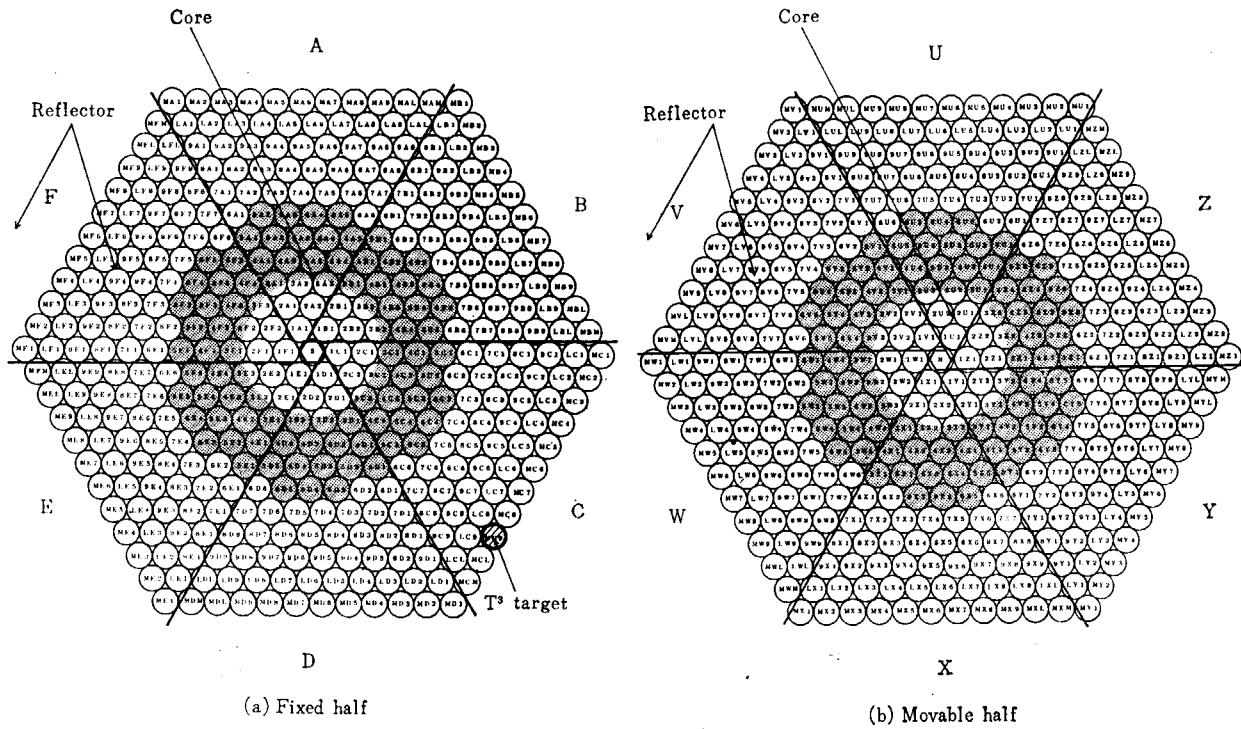


Fig. 2 Fuel loading pattern of SHE-5

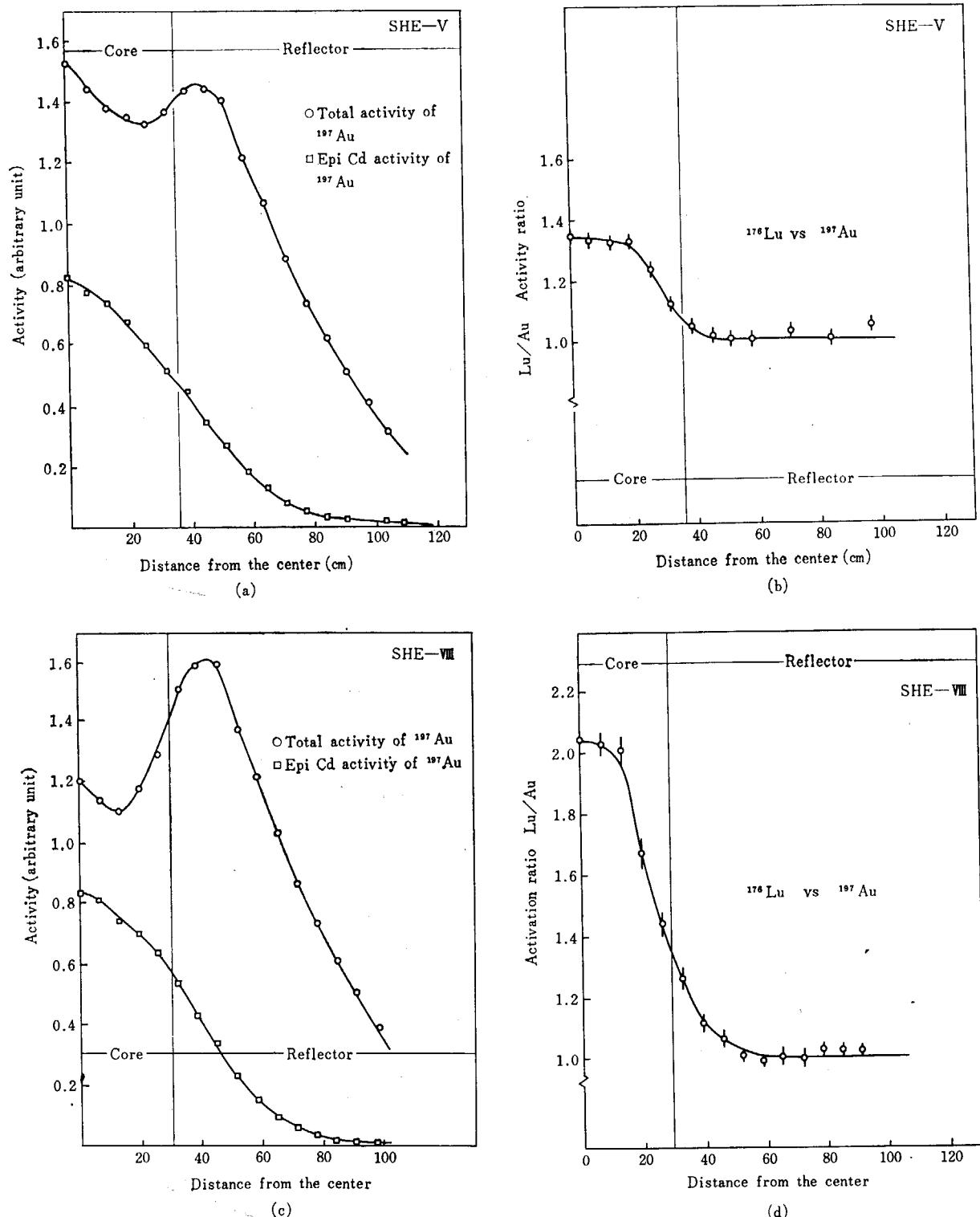


Fig. 3 Spatial distribution of foil activation

3. 制御棒の構成

さきに述べた制御棒効果決定の主要因子のうち

II. 中性子吸収材の核種および濃度

III. 中性子吸収材の形状と寸法

を系統的に変えるため、種々の実験用制御棒が用意された。中性子吸収材の核種として、断面積のエネルギー依存の形の制御棒効果に対する影響を知るため、 $1/v$ 吸収の硼素、非 $1/v$ で熱中性子吸収が主であるカドミウムおよび熱外領域で共鳴吸収を示すインジウムが一部使用された。さらに中性子吸収材の濃度の効果を調べるために、B₄C と黒鉛粒を均質に混合し加圧成型したペレッ

トを制御棒のミート部分に用いることとし、このペレットの黒鉛粒と B₄C 粒の混合比を 7 段階変えた灰色制御棒が製作された。B₄C の割合が低いものは熱中性子にも灰色であり、高いものは 100 eV 程度の熱外中性子に対して黒色であるようにその混合比が選ばれた。また制御棒の形状については円柱あるいは中空円柱に限定し直径のみを変化させた。

実験に用いられた種々の実験用制御棒の名称とその構成を付録に示す。

4. 実験方法

4.1 制御棒効果の表示

制御棒効果を測定する方法はよく知られているようにパルス法、ペリオド法、弯曲法、および逆増倍法などがある。制御棒の反応抑制効果が小さい場合はペリオド法が最も信頼できるが、その値がドル単位で扱うほど大きくなると、パルス法の方が精度が優れるようになることは良く知られている。本研究では、測定する反応度量が約 50\$ から 30\$ の広範囲にわたっているので測定法としては全面的にパルス法を採用した¹⁹⁾。

ところで、よく知られているように、パルス法といえども、直接測定にかかる基本モードの即発中性子崩壊定数から反応度量を求める実験理論の信頼性が、10\$ 程度までであることがわかっている。また、即発中性子崩壊定数 α_0 を高未臨界系の臨界未満度の表示量として用いることの妥当性が明確にされているので¹⁹⁾、制御棒插入による α_0 の値の増加から定まる次の二つの炉物理量 $\Delta\alpha_1$, $\Delta\alpha_2$ を制御棒効果の表示量とした。

$$\Delta\alpha_1 = \alpha - \alpha_0 \quad \dots \quad (1)$$

$$\Delta\alpha_2 = \frac{\Delta\alpha_1}{\alpha_c} \quad \dots \quad (2)$$

ここに

α_c : 臨界状態の崩壊定数

α_0 : 制御棒挿入前の状態の崩壊定数

α : 制御棒挿入後の状態の崩壊定数

である。

$\Delta\alpha_2$ の値はそれが小さいとき数値的には、ドル単位で表わした反応度量に近似的に一致していることは SIMMON²⁰⁾ 等の示した通りである。また $\Delta\alpha_1$ を制御棒価値の表示量として用いることの利点の一つは、実効遅発中性子比 β_{eff} に含まれている 5% の誤差が相殺される形で核計算しうることはあまり指摘されていないが重要である。

次に (1), (2) 式で表示される $\Delta\alpha_1$, $\Delta\alpha_2$ の数値は一般に臨界に近い系において測定した場合の方がいくらか大きくなることが実験的に判明しているが、実際実験をおこなった炉心により各々その臨界未満度が異っている。そこで理論計算値との対比に便利なように、臨界状態を標準状態とする補正された $\Delta\alpha_1$ の値を併記することにした。

4.2 実験装置

200 kV コックロフト形パルス中性子発生装置を用い

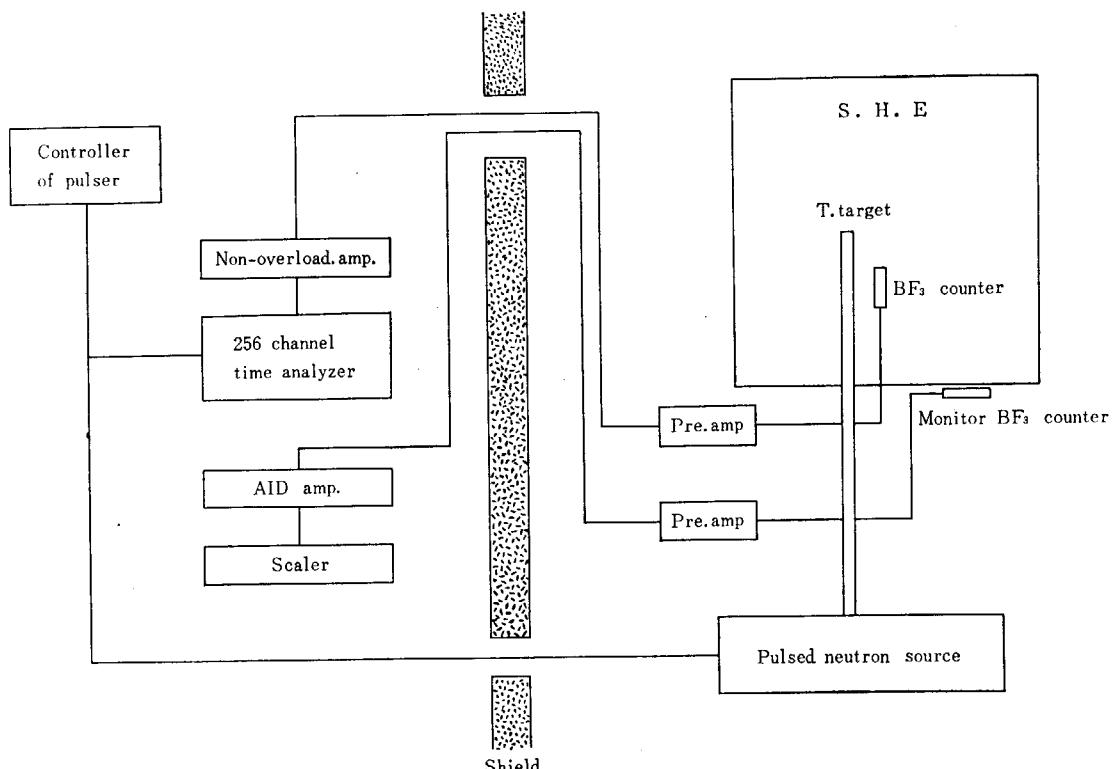


Fig. 4 Block diagram for the pulsed neutron experiment

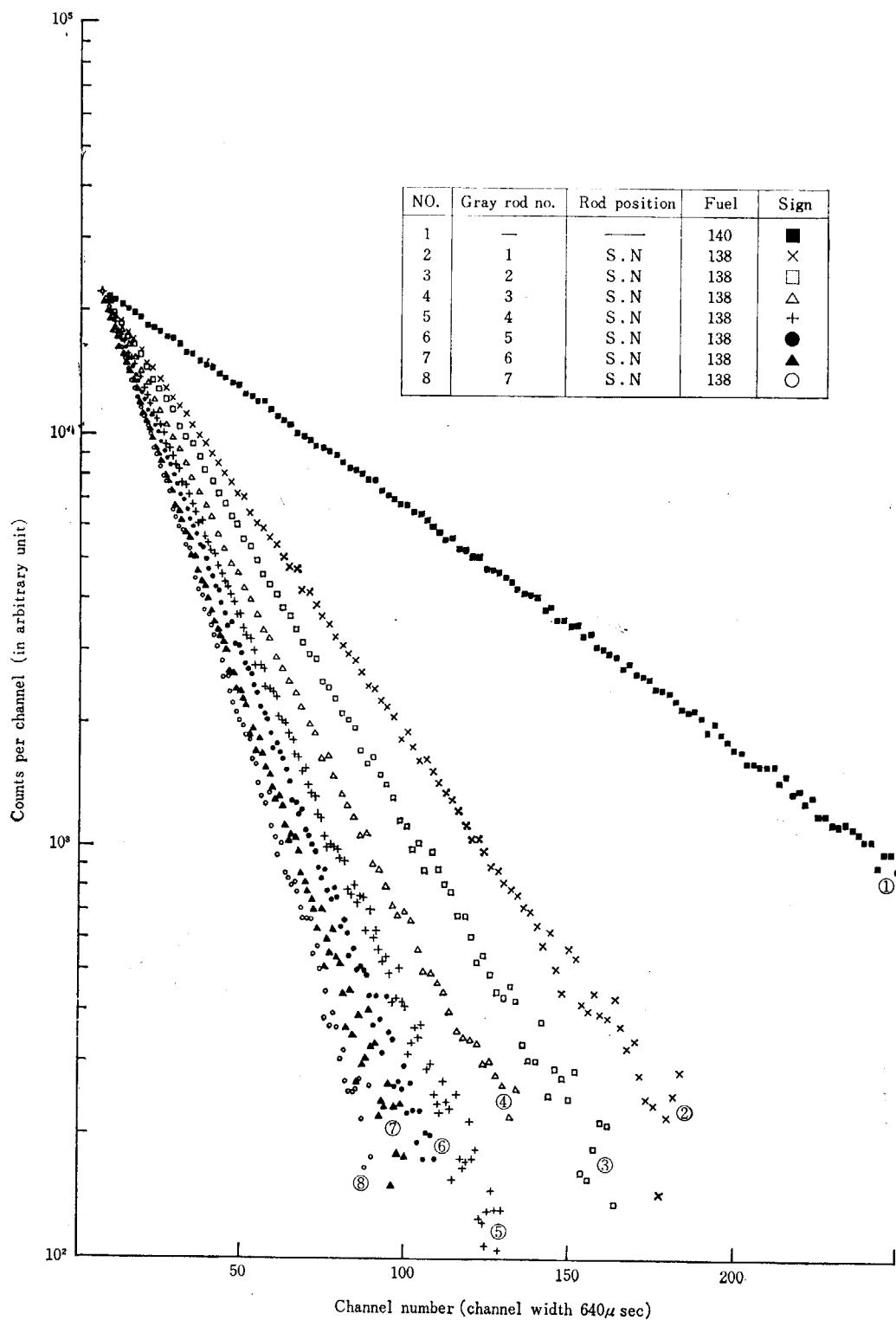


Fig. 5 Prompt neutron decay in gray rods inserted SHE-8

て、炉心二分割面で炉心部に隣接した反射体領域の(MC 9)の位置にあるトリチウムターゲットをパルス巾 $100\mu\text{s}$ 、くりかえし周波数 $0.1\sim10\text{ pps}$ の重水素イオンビームで衝撃し、パルス当たり約 10^6 箇の 14MeV パルス中性子を発生させた²¹⁾。1ケース当たりのパルス中性子打込み回数は $10^3\sim10^4$ で所要時間約20分であった。パルス中性子の投入によって起る中性子密度の生成消滅の時間変化を、理論的に最も純粹に即発中性子基本モードを観測できる位置(6B2 かつ 30cm 炉心中央面より引込んだところ)²²⁾に $1''$ 直径の BF_3 カウンタ(日立 EB-125)を置き検出した。検出された中性子パルスは、増幅され弁別されその時間分布が TMC 256 チャンネル時間分析器により測定された。測定系のブロック図を Fig.4 に示す。測定系の分解時間はダブルパルス発生器を使い約 $3\mu\text{s}$ と測定されたが、この実験のように、計数率の大きな変化が短時間に起る場合には、不確定の要素もあるのでパルス中性子打込み後約 20 ms 経過した後約 10^4cps 以下になるようにパルス中性子発生量を調整した。

4.3 データ処理

一例として Fig.5 に示すような時間分析器に記録された中性子密度の生成・消滅のデータから基本モードの即発中性子崩壊定数 α_0 を導き出すには、空間高調波成分の除去、バックグラウンドの決定および計数損失補正をおこなう必要がある。基本モードの即発中性子崩壊が十分純粹に観測できるまでの待ち時間は一般には、炉形式、

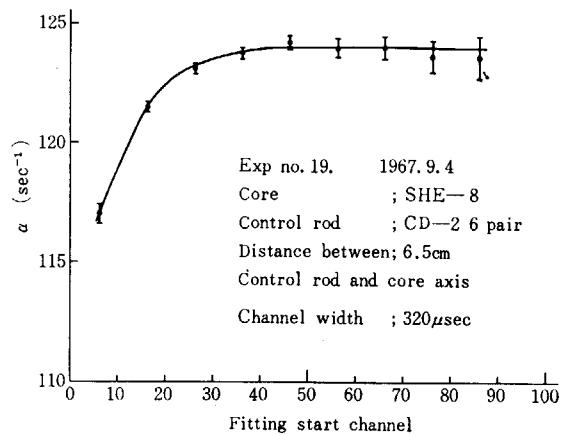


Fig. 6 Variation of α with fitting start time

パルス中性子投入位置と検出器位置等の状況で定まる。本実験では、種々の待ち時間をとった場合の最小自乗法による α_0 の最確値の飽和の状態を調べてみると一例として約 20 ms で飽和していることが Fig.6 より明かなので、この値を全データ処理に用いた。この 20 ms という値はモード展開法による理論的予想値とはほぼ一致している²²⁾。待ち時間より後の時間分析のデータを次の条件のもとに最小自乗法により処理して、 α および標準偏差を IBM 7044 を使い算出した。

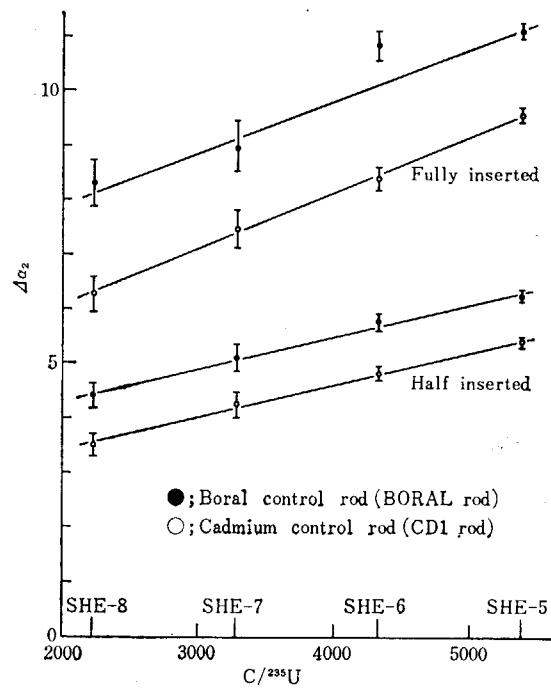
- i) あてはめ関数
 $\text{const. } e^{-\alpha_0 t} + \text{const.} \dots \dots \dots \quad (3)$
- ii) 待ち時間
約 20 ms
- iii) 重み関数はチャンネルの計数値の逆数をとること

5. 測定結果

300 ケースを上まわる実験データの全体を、第1章に述べた制御棒効果を決定する4つの主要因子ごとに整理して記録した。

5.1 炉心核特性への依存

$C/^{235}U$ 比の値が最も大きな炉心核特性を示している



といえよう。そこでカドミウム制御棒とボラル制御棒の制御棒効果を $C/^{235}U$ 比が 2226 より 5378 までの異なる円柱あるいは円環炉心の SHE-5, 6, 7, 8 および 9 について測定した結果を TABLE 2 と Fig.7 に示す。制御棒は炉心軸に沿って全長あるいは 1/2 插入されている。

これらの実験データを検討してみると単純な経験則がほぼ成立することがわかる。つまり制御棒効果を $\Delta\alpha_2$

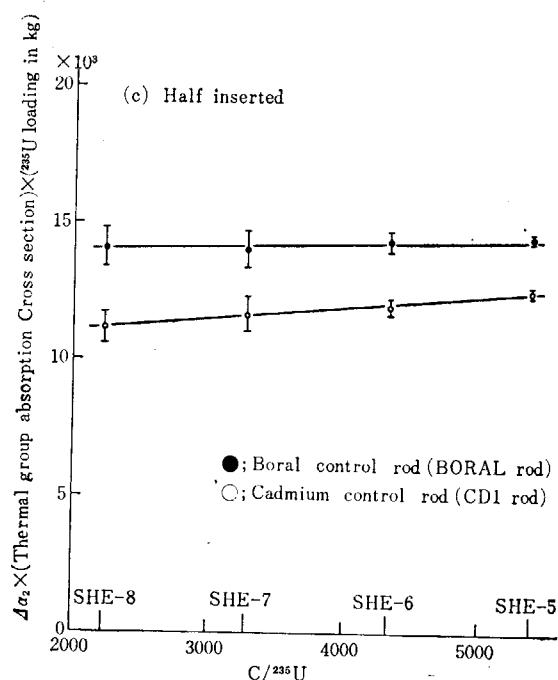
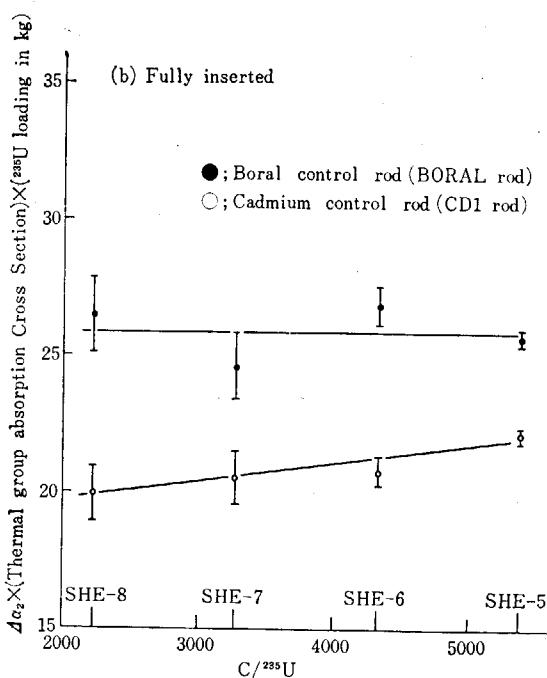


Fig.7 Relation between worths of boral and cadmium control rods and $C/^{235}U$

で表わした場合、臨界質量と²³⁵Uの熱中性子吸收断面積の積に逆比例するという事実がわかった。

$$\Delta\alpha_2 \propto \frac{1}{(\text{熱中性子吸收断面積}) \times (\text{臨界質量})} \quad \dots \quad (4)$$

この様子を Fig. 8 と 9 に示す。またボラル制御棒はカドミウム制御棒より制御棒効果は20から30%大きくその傾向は C/²³⁵U 比の小さな炉心ほど激しいことがわかる。

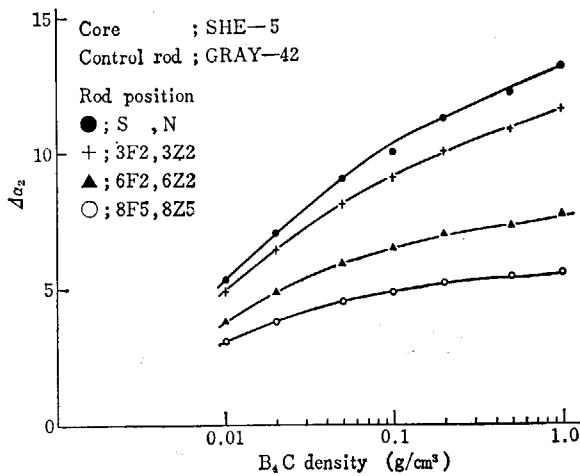


Fig. 8 Worths of gray control rods with diameter of 42mm

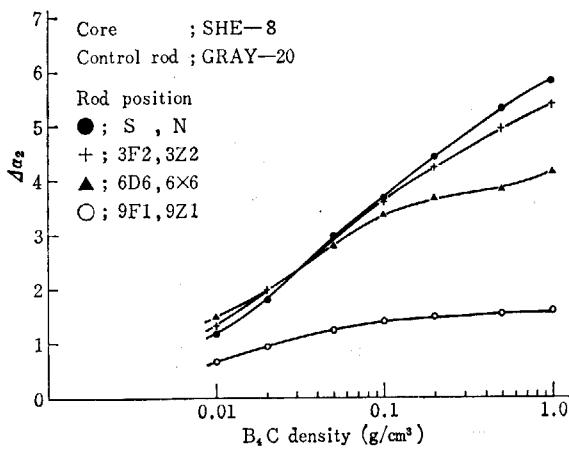
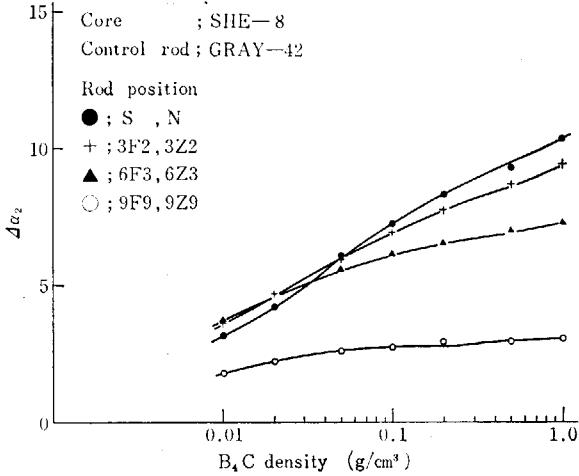


Fig. 9 Worths of gray control rods with diameter of 20mm

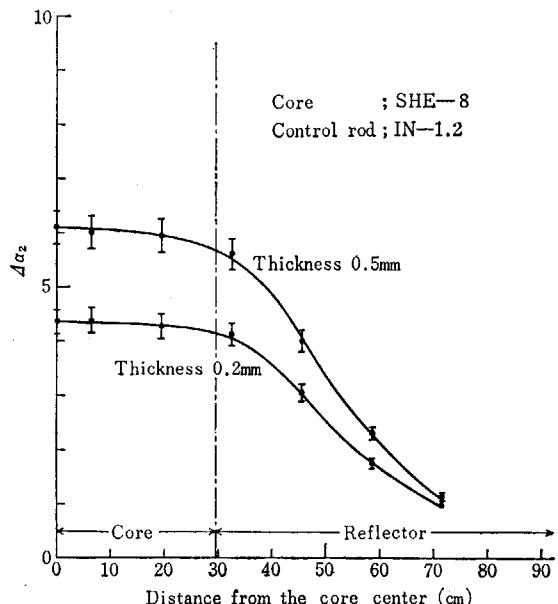


Fig. 10 Worths of indium control rods

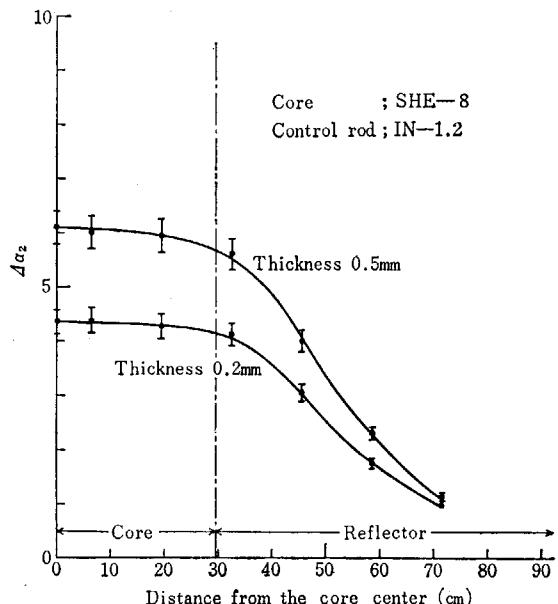
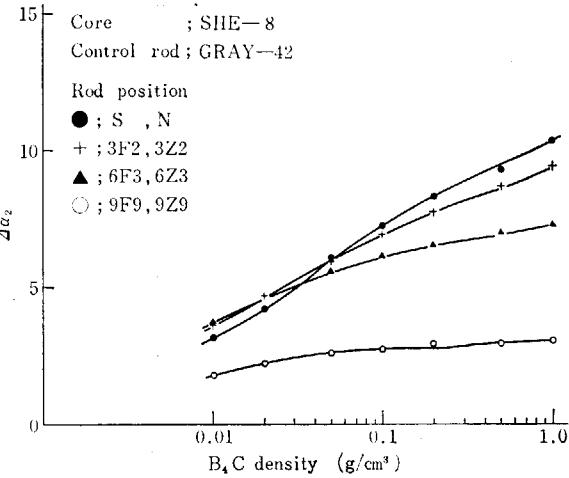
5.2 中性子吸收材の核種および濃度への依存

5.1 でわかったことであるが、制御棒効果の炉心核特性への依存の様子は(4)式で表わされる程度であってそれほど強いものでないので、以後の実験ケースの選択にあたっては、原則として一つの制御棒に対して、C/²³⁵U 比が最大の SHE-5 と最小の SHE-8 の二つの炉心について測定すればよいということにした。

中性子吸收材の核種は硼素、カドミウムおよびインジ

ウムの3種類である。カドミウム制御棒についてはすでに 5.1 に述べてあるのでここでは B₄C を吸収材として灰色の程度が7段階あり、かつ直径が42mmと20mmの灰色制御棒の効果とインジウム箔を吸収材として用い、その厚さが0.5mmと0.2mmのインジウム制御棒の効果について述べる。

まず灰色制御棒の効果の SHE-5 および SHE-8 において測定した結果を Fig. 8 と 9 および TABLE 3 と 4 に示した。



制御棒挿入位置を炉心軸から反射体部まで変えたのは挿入位置やそこでの熱中性子束対熱外中性子束の比の影響を知ることをねらったものである。これらの実験結果から次のような定性的な結論が得られた。

- i) 炉心軸に挿入された灰色制御棒効果 $\Delta\alpha_2$ は B_4C 濃度の対数におおむね比例する。
- ii) 反射体部に挿入された場合は、両者の間には比例

関係はなく、飽和の傾向が強い。

- iii) 空間的に制御棒効果が最大になる位置は $C/^{235}U$ 比の大きな SHE-5 では、全ての場合炉心軸である。ところが $C/^{235}U$ 比の小さな SHE-8 では、 B_4C 濃度の大きい場合は炉心軸で効果は最大になるが、 B_4C 濃度の薄い場合は多少偏心した位置で最大になる。

次にインジウム制御棒の効果の測定値を Fig.10 および TABLE 5 に示した。

5.3 中性子吸収材の形状と寸法への依存

本研究では、この因子については、制御棒の直径と挿入距離についてのみ調べられた。後者の挿入距離については、5.1 と 5.4 で全長挿入と 1/2 挿入の場合の比較データが示されているのでここでは省くこととし、前者の制御棒の内径と制御棒効果の関係の実験データについてのみ述べることにする。

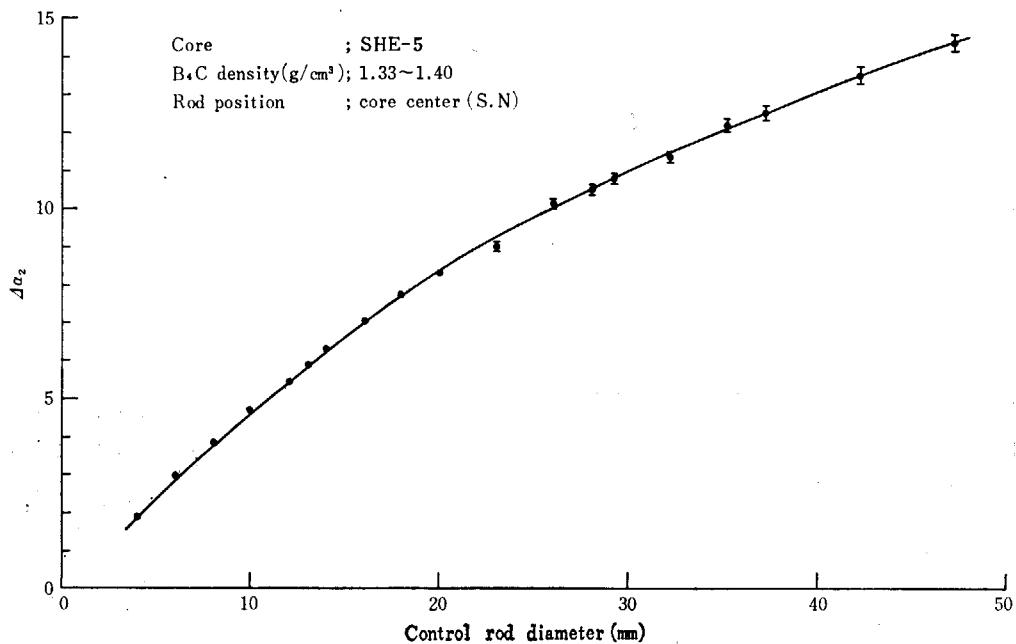


Fig. 11 Worths of B_4C control rods with various diameters

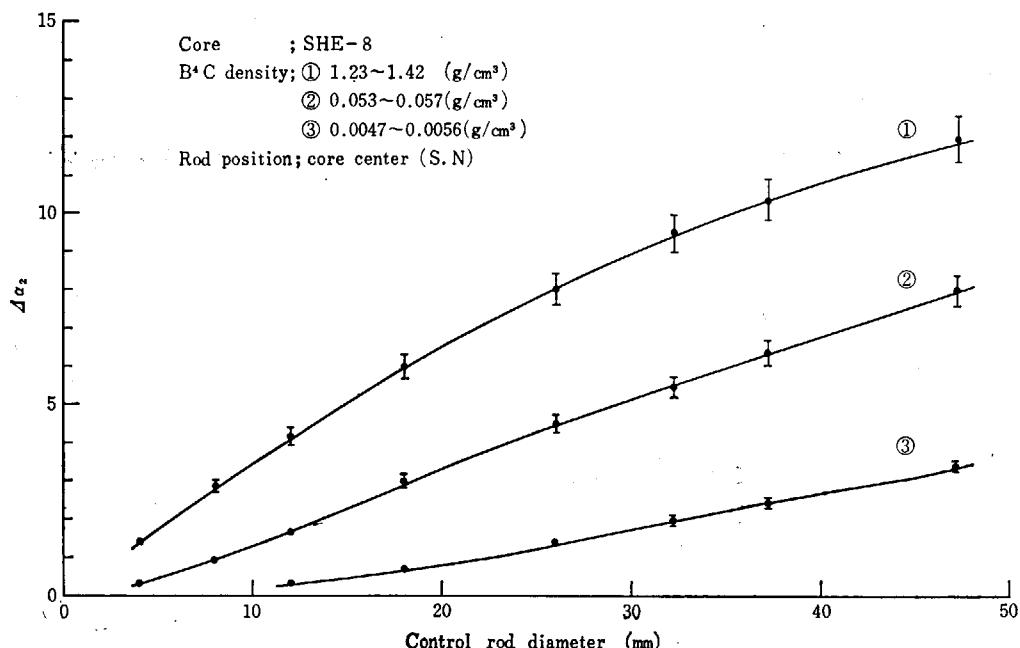


Fig. 12 Worths of gray control rods with various diameters

まずアルミニウム管に B_4C を充填して作った制御棒の直径に対する制御棒効果の変化を、SHE-5 炉心で測定した結果について述べる。直径の変化範囲は 4mm から 47.2mm で 19 段階変化させた。測定結果を Fig.11 および TABLE 6 に示す。

この結果から制御棒効果は直径に比例して増大するが $\Delta\alpha_2$ が 7 度程から飽和の傾向が始ることがわかる。実際炉の制御に使用される制御棒の直径は $\Delta\alpha_2$ が 7 以下の場合なので、この比例関係があるという事実は炉設計上大変参考になるであろう。

同様の実験を SHE-5 より熱外反応の多い SHE-8 炉心において、 B_4C 濃度が 3 種類の制御棒群についておこなった。測定結果を Fig.12 および TABLE 7 に示す。この測定結果から、 B_4C 濃度が最も高い制御棒群 (GRA

り、shadowing あるいは antishadowing の現象が起ることは、種々の原子炉について経験されていることがある。しかしながら、これらの相互干渉の現象が、どのような制御棒の配置のときどれくらいの強さの干渉効果があるかという系統的な実験データの集積はきわめて乏しいのが現状である。ここでは、このような問題を解決する目的でおこなった実験データの集積について述べることにする。

まず次のようにパラメータを動かした。

(1) 制御棒としては以下の種類を選んだ。

- a) 热および热外中性子吸収が最も強い B_4C 充填制御棒、(B_4C-S5 および B_4C-S8 棒)
- b) 热中性子吸収が主であるカドミウム制御棒(CD-2 棒)

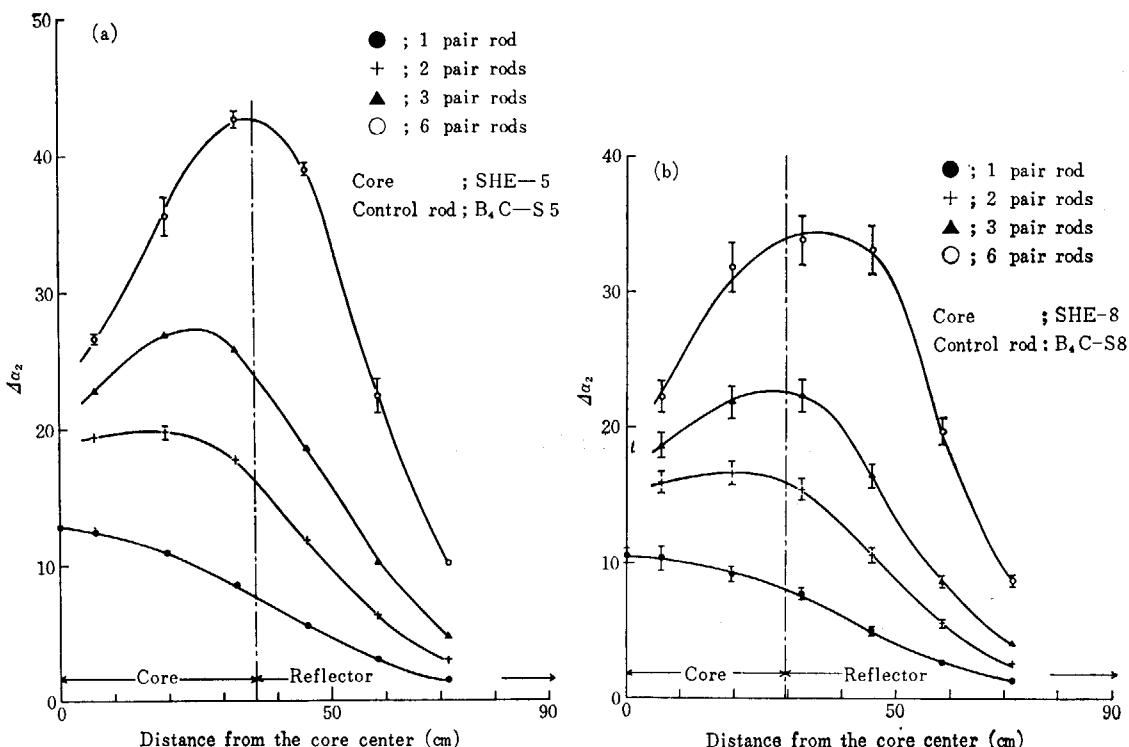


Fig. 13 Worths of fully inserted multiple B_4C control rods

Y-R-17 より GRAY-R-24) については、SHE-5 炉心の実験結果とほぼ同様に、最初は半径に比例して反応度効果は増加するが途中から飽和の傾向が加る。一方、 B_4C 濃度が低い他の 2 つの制御棒群 (B_4C 濃度約 $0.055g/cm^3$ の GRAY-9 より GRAY-16、および約 $0.0055g/cm^3$ の GRAY-1 より GRAY-8 までの制御棒) の場合は両者の比例関係は全範囲でかなり良いことがわかる。

5.4 相互干渉効果

多数本挿入された制御棒の間には相互に干渉効果があ

c) a) よりも B_4C 濃度が低く熱外中性子に対して灰色の灰色制御棒 (GRAY-204 棒)

(2) 制御棒の配置は以下のとおりとした。

1 本、2 本、3 本、あるいは 6 本一組の制御棒を炉心軸からの距離を変化させるという、いわゆる一重環配置とした。またこれらの全長挿入時と部分挿入時の相互干渉の相違を調べるために、 B_4C 充填制御棒についてのみ部分挿入時の相互干渉効果を測定した。

(3) 炉心は U-235 濃度の最も高い SHE-8 炉心を主体として、補足的に U-235 濃度の最も低い SHE-5 について測定をおこなった。

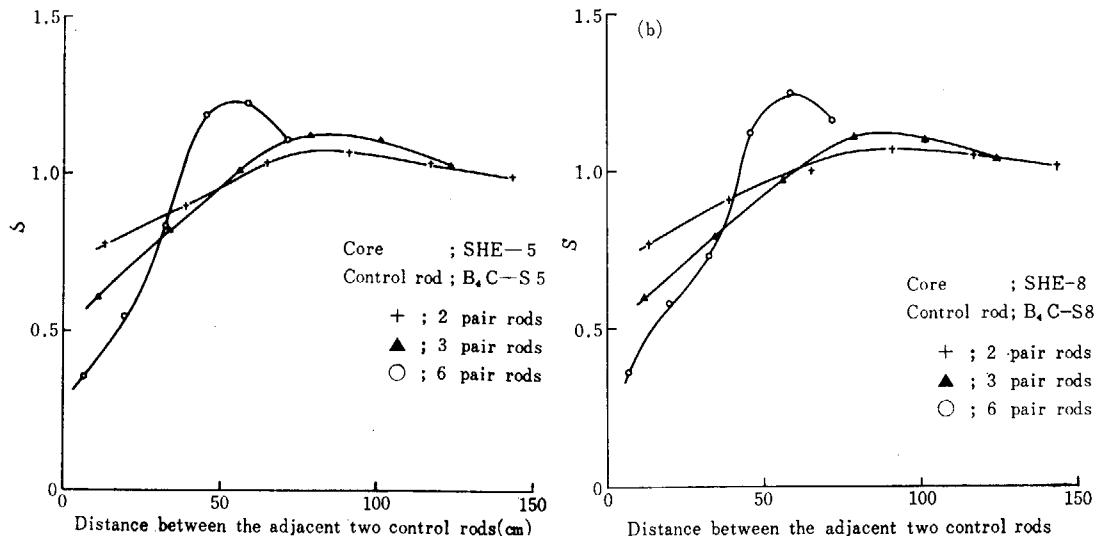
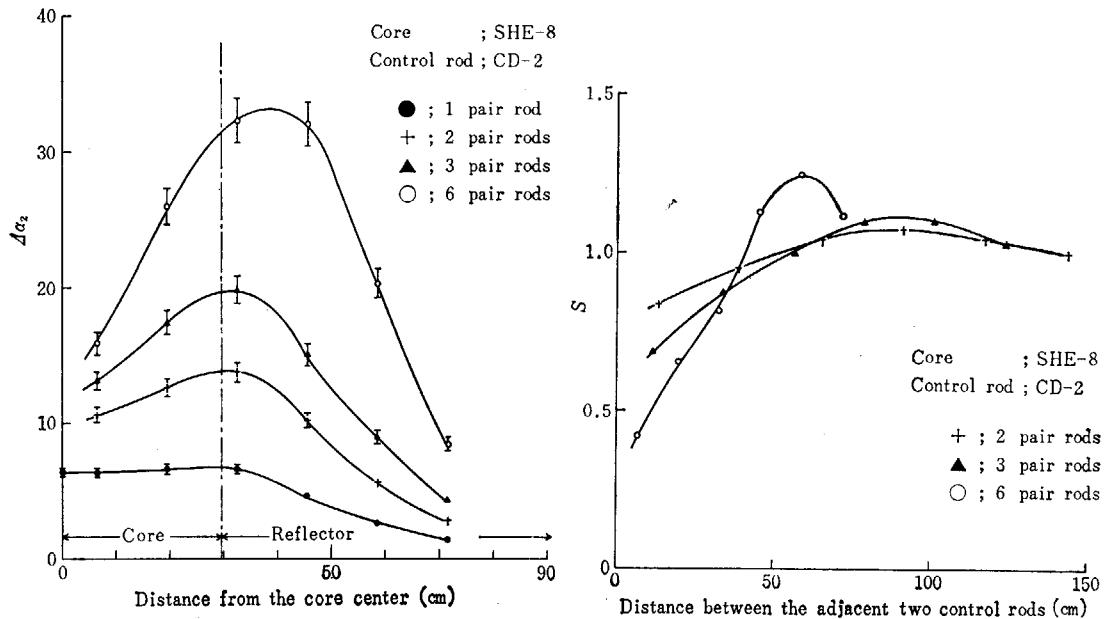
Fig. 14 Interaction among the fully inserted B₄C control rods

Fig. 15 Worths of fully inserted multiple cadmium control rods

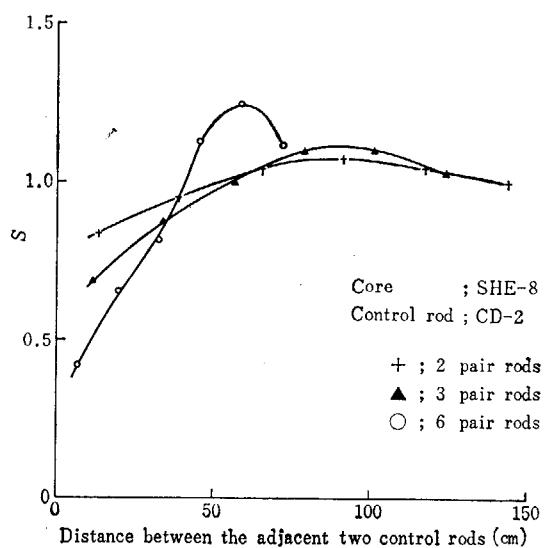


Fig. 16 Interaction among fully inserted multiple control rods

さて測定結果をまとめるときに、干渉効果の程度を示す量として、次のように interference factor S を定義すると便利である。

$$S = \frac{\Delta\alpha_1(N)}{N\Delta\alpha_1(1)} \quad \dots \quad (5)$$

ここで

$\Delta\alpha_1(1)$; 1 本の制御棒の効果

$\Delta\alpha_1(N)$; N 本の制御棒の効果

このように定義すると、 S が 1 より大きいときは anti-shadowing を、 S が 1 より小さいときは shadowing を表わしていることになる。

全長插入 B₄C 充填制御棒効果に関する測定結果を Fig. 13 および TABLE 8 に示した。全長插入カドミウム製制御棒に関する測定結果を Fig. 15, 16 および TABLE 9 に、

全長插入灰色制御棒に関する測定結果を Fig. 17, 18 および TABLE 10 に示した。

部分插入 B₄C 充填制御棒効果に関する測定結果を Fig. 19, 20 および TABLE 11 に示した。

Fig. 16 から 25 までから次のような相互干渉効果に関する定性的な結論が得られる。

i) 制御棒間の距離

制御棒間の距離について着目すると、まず予期されていたことであるが、全ケースについて制御棒相互距離が近いと shadowing 現象が起る。一方その相互距離が大きくなるとしだいにその現象は弱まり、antishadowing 現象が逆に起るようになる。さらに相互距離が大きくなるとこの現象も弱まり消失する。shadowing から anti-

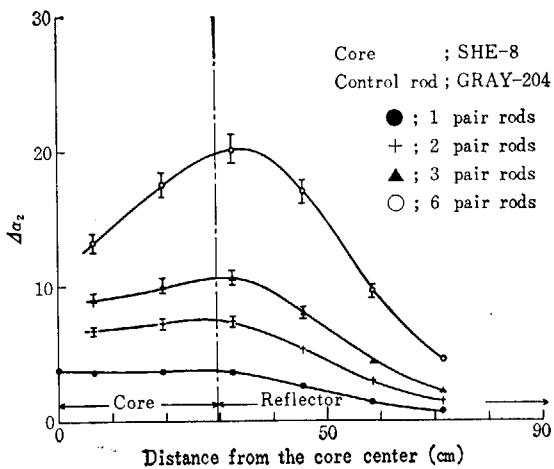


Fig. 17 Worths of fully inserted multiple gray control rods

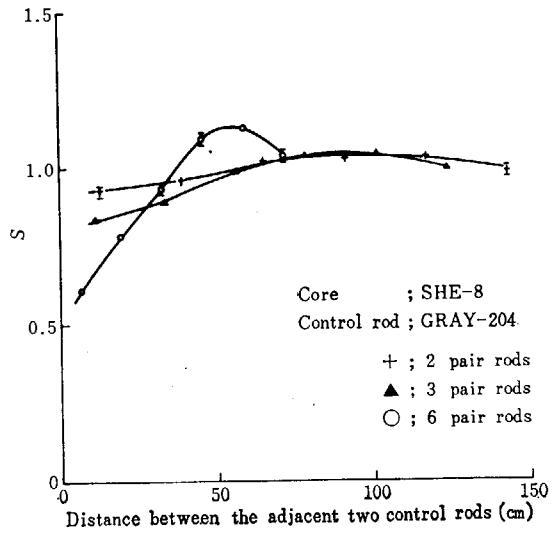


Fig. 18 Interaction among the fully inserted gray control rods

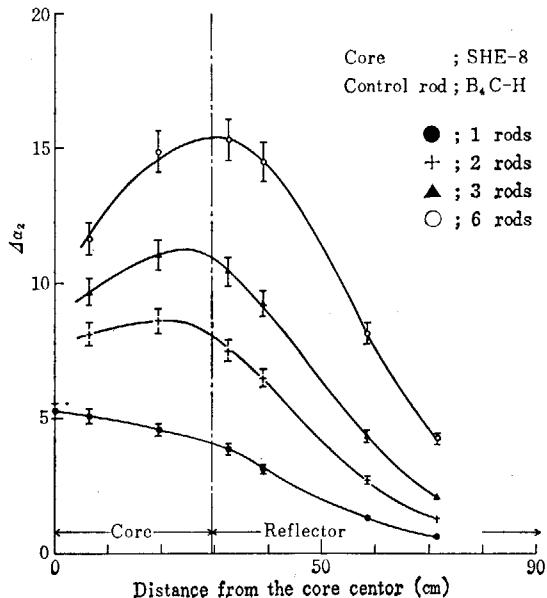


Fig. 19 Worths of half inserted multiple B₄C control rods

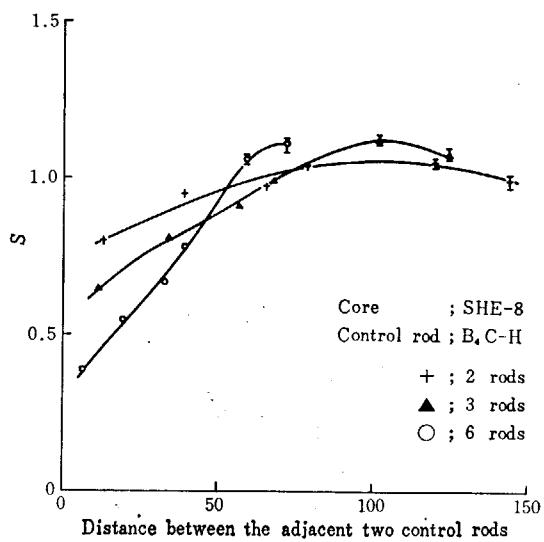


Fig. 20 Interaction among half inserted B₄C control rods

shadowing に転ずる相互距離は制御棒の種類によりあまり変わらず、SHE-8 では全長挿入時には 2 あるいは 3 本挿入のとき 55 から 60cm, 6 本挿入ときこれより短い 40cm 程度である。これらの距離は燃料濃度の薄い SHE-5 ではやや短くなるが大差はない。一方、部分挿入の時には 6 本挿入のとき shadowing の起る相互距離の領域が広く、antishadowing に転ずる距離は約 50cm である。

ii) 相互干渉の大きさ

相互干渉の大きさを interference factor S で表現

した場合、 S の値の 1 からの変差がその大きさを示していると考えてよいであろう。antishadowing および shadowing の起る領域での S の 1 からの変差は灰色制御棒、カドミウム制御棒、B₄C 充填制御棒の順に大きくなる。また本数については、6 本の場合に最も激しい相互干渉が起り S の値は 1.25 にも達するが 3 本、2 本の場合の順に相互干渉は弱くなる。部分挿入の特徴はさきに述べたことの他に shadowing の激しさは強いが antishadowing のそれは弱いということである。

6. 結 言

制御棒効果を決定する主要因子は 1, 2 に述べたように

- I. 炉心核特性
- II. 中性子吸収材の核種と濃度
- III. 制御棒の形状
- IV. 相互干渉効果

であると考え、パルス中性子法によりこれらの主要因子を系統的に変化された 300 ケース以上の高精度の実験デ

ータを集積することができた。これらの結果から、制御棒に関する核的因子と反応度効果の関係について種々の定性的な結論が得られた。今後これらの実験データを基準として、各種の制御棒効果解析法の精度を検討し、制御棒挿入により中性子バランスがくずれ反応度抑制効果が発生する構造を究明すると共に、Fig.1 に示した体系的な制御棒効果解析法の確立を計りたい。

謝　　辞

実験の遂行にあたり、動力炉開発管理室長（当時計測制御研究室長）天野昇、炉物理実験研究室長 坂田肇、

大阪大学助教授 住田健二の三氏に多大の援助をいたしましたので、ここに深謝いたしたい。

References

- 1) NORDHEIM L. E. and SCALETTAR, R. S. ; MDDC-42 (1946)
- 2) ÜBERALL H. ; *Nucl. Sci. Eng.* 7, 288 (1959)
- 3) SPINKS N. ; *ibid*, 22, 87 (1965)
- 4) HURWITZ H. and ROE, G. M. ; *J. Nucl. Energy* 2, 85 (1955)
- 5) LIGOU J. ; *Nucl. Sci. Eng.* 11, 26 (1961)
- 6) ENGINOL J. B. ; Physics and Material Problem of Reactor Control Rod 3 (1963)
- 7) DÖDERLEIN J. M. and NISHIHARA, H. ; *ibid* 19
- 8) CARMICHAEL B. M. ; LA-3194 (1965)
- 9) CARLVIK I. ; 2nd-Geneva Conference P/152 (1957)
- 10) NOSOV V. I. ; Reactor Science and Technology Vol. 16, 277 (1962)
- 11) SINYUTIN G. V. ; 2nd-Geneva Conference P/2465 (1957)
- 12) GYFTOPOULOUS E. ; *Nucl. Sci. Eng.* 6, 135 (1957)
- 13) NAKAMURA S and MITZUI, H. ; Physics and Material Problem of Reactor Control Rod 79 (1963)
- 14) BRUSA M. L. and PIERAZZI, L. ; *ibid* 267 (1963)
- 15) KEAR and RUDERMAN ; GEAP-3937 (1952)
- 16) ISKENDERIAN H. P. ; ANL-7303 (1967)
- 17) INOUE K. et al. ; JAERI 1032 (1962)
- 18) IIZUMI M. ; JAERI-memo 1389 (1962)
- 19) KANEKO Y. and SUMITA K. ; *J. Nucl. Sci. Technol.* (Tokyo) 4, 400 (1967)
- 20) SIMMON B. E. & KING, J. S. ; *Nucl. Sci. Eng.* 3, 595 (1958)
- 21) SUMITA K. et al. ; *J. Nucl. Sci. Technol.* (Tokyo) 4, (No. 7) 328 (1967)
- 22) AMANO F. ; *J. Atomic Energy Soc. Japan* 9, 7(1967)

TABLE 1 The physical and nuclear properties of the different core configurations of SHE

Configuration	C/ ²³⁵ U	Number of loaded fuel rods at delayed critical	Critical mass in ²³⁵ U (kg)	Inner reflector R_1 (cm)	Core radius R_2 (cm)	Core length H_1 (cm)	α_c
SHE-5	5378	219	5.29	0	35.7	240	5.73 ± 0.07
SHE-6	4328	196	5.95	0	33.8	240	5.86 ± 0.15
SHE-7	3276	173	6.99	0	31.8	240	6.48 ± 0.29
SHE-8	2226	147	8.69	0	29.3	240	6.74 ± 0.35
SHE-9	5378	298	7.20	44.4	60.8	240	3.86 ± 0.34

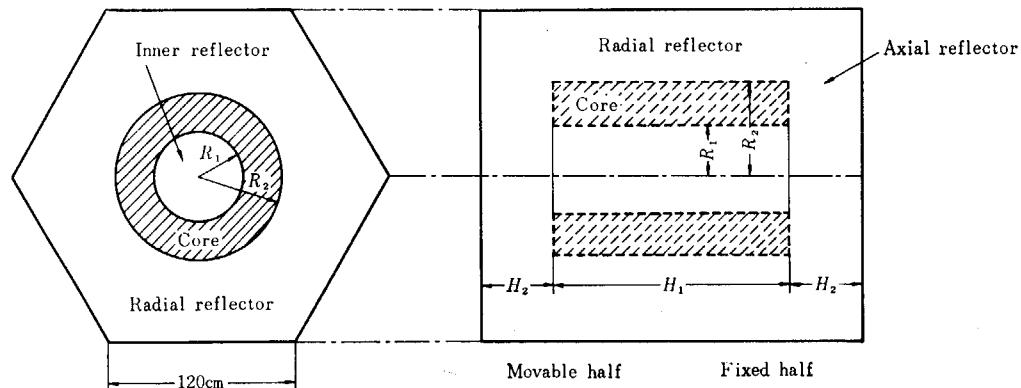


TABLE 2 Worths of cadmium and boral control rods

Core	Critical fuel rods number	Loaded fuel rods number	Control rod	Rod position	Prompt neutron decay constant at standard state	$\Delta\alpha_1$ (sec ⁻¹)	$\Delta\alpha_1$ extrapolated to critical state	$\Delta\alpha_2$ (sec ⁻¹)	$\Delta\alpha_2$ extrapolated to critical state
SHE-5	219	214	—		12.28 ± 0.04				
		212	VOID, CD-1	S, N		30.31 ± 0.14	30.95	5.29 ± 0.07	5.40
		212	CD-1, CD-1	S, N		53.71 ± 0.21	54.82	9.37 ± 0.12	9.57
		212	VOID, BORAL	S, N		35.09 ± 0.15	35.79	6.12 ± 0.08	6.25
		212	BORAL, BORAL	S, N		62.47 ± 0.27	63.63	10.09 ± 0.14	11.11
SHE-6	196	192	—		12.23 ± 0.03				
		190	CD-1, VOID	S, N		27.83 ± 0.08	28.27	4.75 ± 0.12	4.82
		190	CD-1, CD-1	S, N		48.40 ± 0.41	49.15	8.26 ± 0.22	8.39
		190	BORAL, VOID	S, N		33.29 ± 0.17	33.78	5.68 ± 0.15	5.77
		190	BORAL, BORAL	S, N		62.58 ± 0.31	63.51	10.68 ± 0.28	10.84
SHE-7	173	172	—		23.34 ± 0.22				
		170	CD-1, VOID	S, N		27.45 ± 0.87	27.45	4.24 ± 0.23	4.24
		170	CD-1, CD-1	S, N		48.38 ± 0.57	48.38	7.47 ± 0.35	7.47
		170	BORAL, VOID	S, N		33.02 ± 0.43	33.02	5.10 ± 0.24	5.10
		170	BORAL, BORAL	S, N		58.04 ± 1.15	58.04	8.96 ± 0.44	8.96
SHE-8	147	146	—		25.43 ± 0.04				
		144	CD-1, VOID	S, N		23.47 ± 0.10	23.51	3.48 ± 0.18	3.49
		144	CD-1, CD-1	S, N		42.06 ± 0.11	42.13	6.24 ± 0.32	6.25
		144	BORAL, VOID	S, N		29.67 ± 0.11	29.73	4.40 ± 0.23	4.41
		144	BORAL, BORAL	S, N		55.84 ± 0.15	55.95	8.29 ± 0.43	8.30
SHE-9	298	296	—		5.33 ± 0.58				
		296	CD-1, C	S, N		15.56 ± 0.59	15.76	4.03 ± 0.39	4.08
		296	CD-1, CD-1	S, N		31.71 ± 0.62	32.10	8.22 ± 0.74	8.32
		296	BORAL, C	S, N		15.01 ± 0.59	15.21	3.89 ± 0.38	3.94
		296	BORAL, BORAL	S, N		31.36 ± 0.58	31.75	8.12 ± 0.73	8.23

TABLE 3 Worths of gray control rods with diameter of 42 mm

Core	Critical fuel rod number	Loaded fuel rod number	Control rod	Rod position	Prompt neutron decay constant at standard state	$\Delta\alpha_1$ (sec ⁻¹)	$\Delta\alpha_1$ extrapolated to critical state	$\Delta\alpha_2$	$\Delta\alpha_2$ extrapolated to critical state	
SHE-5	219	214	—	S, N	11.21 ± 0.04	30.22 ± 0.21	30.80	5.27 ± 0.07	5.38	
		212	GRAY-42-1	S, N		39.75 ± 0.21	40.57	6.94 ± 0.09	7.08	
		212	GRAY-42-2	S, N		50.80 ± 0.35	51.85	8.87 ± 0.12	9.05	
		212	GRAY-42-3	S, N		56.67 ± 0.39	57.83	9.89 ± 0.14	10.09	
		212	GRAY-42-4	S, N		63.19 ± 0.27	64.47	11.03 ± 0.14	11.25	
		212	GRAY-42-5	S, N		68.63 ± 0.33	70.03	11.98 ± 0.16	12.22	
		212	GRAY-42-6	S, N		74.00 ± 0.39	75.51	12.92 ± 0.17	13.18	
		212	GRAY-42-7	S, N						
SHE-5	219	214	—	3F2, 3Z2	12.49 ± 0.05	27.81 ± 0.16	28.39	4.85 ± 0.07	4.96	
		212	GRAY-42-1			36.32 ± 0.16	37.02	6.34 ± 0.08	6.46	
		212	GRAY-42-2			45.59 ± 0.26	46.52	7.96 ± 0.11	8.12	
		212	GRAY-42-3			51.05 ± 0.25	52.10	8.91 ± 0.12	9.09	
		212	GRAY-42-4			56.34 ± 0.33	57.50	9.83 ± 0.13	10.04	
		212	GRAY-42-5			61.00 ± 0.26	62.22	10.65 ± 0.14	10.86	
		212	GRAY-42-6			65.00 ± 0.27	66.28	11.34 ± 0.15	11.57	
		214	GRAY-42-7			21.67 ± 0.12	22.14	3.78 ± 0.05	3.86	
		214	GRAY-42-1	6F2, 6Z2		27.47 ± 0.16	28.05	4.79 ± 0.07	4.90	
		214	GRAY-42-2			33.22 ± 0.24	33.92	5.80 ± 0.08	5.92	
		214	GRAY-42-3			36.42 ± 0.17	37.18	6.36 ± 0.08	6.49	
		214	GRAY-42-4			39.06 ± 0.21	39.88	6.82 ± 0.09	6.96	
		214	GRAY-42-5			40.95 ± 0.26	41.77	7.15 ± 0.10	7.29	
		214	GRAY-42-6			43.18 ± 0.23	44.05	7.54 ± 0.10	7.69	
		214	GRAY-42-7			17.30 ± 0.12	17.65	3.02 ± 0.04	3.08	
		214	GRAY-42-1			21.45 ± 0.13	21.92	3.74 ± 0.05	3.83	
		214	GRAY-42-2			25.56 ± 0.15	26.09	4.46 ± 0.06	4.55	
		214	GRAY-42-3			27.46 ± 0.17	28.04	4.79 ± 0.07	4.89	
		214	GRAY-42-4			29.31 ± 0.16	29.89	5.12 ± 0.07	5.22	
		214	GRAY-42-5			30.62 ± 0.18	31.20	5.34 ± 0.07	5.45	
		214	GRAY-42-6			31.27 ± 0.64	31.91	5.46 ± 0.13	5.57	
		214	GRAY-42-7							
SHE-8	147	140	—	S, N	20.63 ± 0.04	21.05 ± 0.17	21.61	3.12 ± 0.17	3.21	
		138	GRAY-42-1			27.90 ± 0.26	28.64	4.14 ± 0.22	4.25	
		138	GRAY-42-2			40.15 ± 0.27	41.26	5.96 ± 0.31	6.12	
		138	GRAY-42-3			47.34 ± 0.40	48.64	7.02 ± 0.37	7.22	
		138	GRAY-42-4			54.81 ± 0.54	56.29	8.13 ± 0.43	8.35	
		138	GRAY-42-5			61.15 ± 0.61	62.81	9.07 ± 0.48	9.32	
		138	GRAY-42-6			68.20 ± 0.63	70.05	10.12 ± 0.53	10.39	
		140	GRAY-42-7			11.77 ± 0.09	12.05	1.75 ± 0.09	1.79	
		140	GRAY-42-1	9F9, 9Z9		14.63 ± 0.11	15.00	2.17 ± 0.11	2.23	
		140	GRAY-42-2			17.05 ± 0.11	17.52	2.53 ± 0.13	2.60	
		140	GRAY-42-3			17.94 ± 0.12	18.40	2.66 ± 0.14	2.73	
		140	GRAY-42-4			19.18 ± 0.12	19.74	2.85 ± 0.15	2.93	
		140	GRAY-42-5			19.37 ± 0.14	19.93	2.87 ± 0.15	2.96	
		140	GRAY-42-6			20.10 ± 0.14	20.65	2.98 ± 0.16	3.06	
		140	GRAY-42-7							
SHE-8	147	140	—	3F2, 3Z2	18.87 ± 0.05	33.72 ± 0.29	24.37	3.52 ± 0.19	3.62	
		138	GRAY-42-1			31.53 ± 0.17	31.66	4.68 ± 0.24	4.70	
		138	GRAY-42-2			40.61 ± 0.26	40.78	6.03 ± 0.32	6.05	
		138	GRAY-42-3			46.72 ± 0.29	46.92	6.93 ± 0.36	6.96	
		138	GRAY-42-4			51.90 ± 0.37	52.13	7.70 ± 0.40	7.73	
		138	GRAY-42-5			58.43 ± 0.43	58.67	8.67 ± 0.46	8.71	
		138	GRAY-42-6			63.54 ± 0.45	63.82	9.43 ± 0.49	9.47	
		140	GRAY-42-7			25.22 ± 0.14	25.32	3.74 ± 0.20	3.76	
		140	GRAY-42-1	6F3, 6Z3		31.55 ± 0.15	31.68	4.68 ± 0.24	4.70	
		140	GRAY-42-2			37.61 ± 0.22	37.77	5.58 ± 0.29	5.60	
		140	GRAY-42-3			41.38 ± 0.22	41.56	6.14 ± 0.32	6.17	
		140	GRAY-42-4			44.06 ± 0.20	44.25	6.54 ± 0.34	6.57	
		140	GRAY-42-5			46.89 ± 0.46	47.09	6.96 ± 0.37	6.99	
		140	GRAY-42-6			48.77 ± 0.21	48.97	7.24 ± 0.38	7.27	
		140	GRAY-42-7							

TABLE 4 Worths of gray control rods with diameter of 20 mm

Core	Critical fuel rod number	Loaded fuel rod number	Control rod	Rod position	Prompt neutron decay constant at standard state	$\Delta\alpha_1$ (sec ⁻¹)	$\Delta\alpha_1$ extrapolated to critical state	$\Delta\alpha_2$	$\Delta\alpha_2$ extrapolated to critical state
SHE-8	147	140	—		19.16 ± 0.05				
		138	GRAY-20-1	S, N		7.69 ± 0.08	7.87	1.14 ± 0.06	1.17
		138	GRAY-20-2	S, N		11.86 ± 0.10	12.23	1.76 ± 0.09	1.82
		138	GRAY-20-3	S, N		19.57 ± 0.14	20.13	2.90 ± 0.15	2.99
		138	GRAY-20-4	S, N		24.17 ± 0.17	24.82	3.59 ± 0.19	3.68
		138	GRAY-20-5	S, N		29.15 ± 0.20	29.89	4.33 ± 0.23	4.44
		138	GRAY-20-6	S, N		35.02 ± 0.38	35.95	5.20 ± 0.28	5.33
		138	GRAY-20-7	S, N		38.19 ± 0.41	39.20	5.67 ± 0.30	5.82
		138	GRAY-20-1	3F2, 3Z2		8.80 ± 0.08	9.08	1.31 ± 0.07	1.35
		138	GRAY-20-2	3F2, 3Z2		13.09 ± 0.10	13.46	1.94 ± 0.10	2.00
		138	GRAY-20-3	3F2, 3Z2		19.65 ± 0.13	20.21	2.92 ± 0.15	3.00
		138	GRAY-20-4	3F2, 3Z2		23.85 ± 0.15	24.49	3.54 ± 0.19	3.63
		138	GRAY-20-5	3F2, 3Z2		27.82 ± 0.18	28.56	4.13 ± 0.22	4.24
		138	GRAY-20-6	3F2, 3Z2		32.36 ± 0.21	33.29	4.80 ± 0.25	4.94
		138	GRAY-20-7	3F2, 3Z2		35.28 ± 0.15	36.21	5.23 ± 0.27	5.37
		140	GRAY-20-1	6D6, 6X6		9.91 ± 0.11	10.18	1.47 ± 0.08	1.51
		140	GRAY-20-2	6D6, 6X6		13.27 ± 0.12	13.64	1.97 ± 0.10	2.02
		140	GRAY-20-3	6D6, 6X6		18.30 ± 0.13	18.86	2.72 ± 0.14	2.80
		140	GRAY-20-4	6D6, 6X6		22.05 ± 0.17	22.69	3.27 ± 0.17	3.37
		140	GRAY-20-5	6D6, 6X6		24.07 ± 0.19	24.72	3.57 ± 0.19	3.67
		140	GRAY-20-6	6D6, 6X6		24.97 ± 0.20	25.71	3.71 ± 0.20	3.82
		140	GRAY-20-7	6D6, 6X6		27.33 ± 0.12	28.07	4.06 ± 0.21	4.17
		140	GRAY-20-1	9F1, 9Z1		4.42 ± 0.08	4.51	0.66 ± 0.04	0.67
		140	GRAY-20-2	9F1, 9Z1		6.27 ± 0.08	6.45	0.93 ± 0.05	0.96
		140	GRAY-20-3	9F1, 9Z1		8.25 ± 0.10	8.43	1.22 ± 0.07	1.25
		140	GRAY-20-4	9F1, 9Z1		9.36 ± 0.09	9.64	1.39 ± 0.07	1.43
SHE-8	147	140	—		19.07 ± 0.04				
		140	GRAY-20-5	9F1, 9Z1		9.77 ± 0.09	10.05	1.45 ± 0.08	1.49
		140	GRAY-20-6	9F1, 9Z1		10.19 ± 0.09	10.47	1.51 ± 0.08	1.55
		140	GRAY-20-7	9F1, 9Z1		10.47 ± 0.10	10.75	1.55 ± 0.08	1.60

TABLE 5 Worths of indium control rods

Core	Critical fuel rod number	Loaded fuel rod number	Control rod	Rod position	Prompt neutron decay constant at standard state	$\Delta\alpha_1$ (sec ⁻¹)	$\Delta\alpha_1$ extrapolated to critical state	$\Delta\alpha_2$	$\Delta\alpha_2$ extrapolated to critical state	Distance from the core center
SHE-8	147	140	—		19.45 ± 0.04					
		138	IN-1	S, N		28.58 ± 0.15	29.32	4.24 ± 0.22	4.35	0
		138	IN-1	1F1, 1Z1		28.75 ± 0.25	29.58	4.27 ± 0.23	4.39	6.5
		138	IN-1	3F1, 3Z1		28.13 ± 0.21	28.87	4.17 ± 0.22	4.28	19.5
		140	IN-1	5F1, 5Z1		27.03 ± 0.27	27.77	4.01 ± 0.21	4.13	32.5
		140	IN-1	7F1, 7Z1		19.90 ± 0.15	20.46	2.95 ± 0.16	3.04	45.5
		140	IN-1	9F1, 9Z1		11.37 ± 0.09	11.65	1.69 ± 0.09	1.73	58.5
		140	IN-1	MF1, MZ1		6.33 ± 0.07	6.52	0.94 ± 0.05	0.97	71.5
SHE-8	147	140	—		19.93 ± 0.03					
		138	IN-2	S, N		39.82 ± 0.22	40.93	5.91 ± 0.31	6.07	0
		138	IN-2	1F1, 1Z1		39.43 ± 0.22	40.54	5.85 ± 0.31	6.01	6.5
		138	IN-2	3F1, 3Z1		38.94 ± 0.17	40.06	5.78 ± 0.30	5.94	19.5
		140	IN-2	5F1, 5Z1		36.77 ± 0.25	37.79	5.46 ± 0.29	5.61	32.5
		140	IN-2	7F1, 7Z1		26.12 ± 0.13	26.86	3.88 ± 0.20	3.99	45.5
		140	IN-2	9F1, 9Z1		15.04 ± 0.08	15.41	2.23 ± 0.12	2.29	58.5
		140	IN-2	MF1, MZ1		7.43 ± 0.10	7.62	1.10 ± 0.06	1.13	71.5

TABLE 6 Worths of B₄C control rod with various diameters

Core	Critical fuel rod number	Loaded fuel rod number	Control rod	Rod position	Prompt neutron decay constant at standard state	$\Delta\alpha_1$ (sec ⁻¹)	$\Delta\alpha_1$ extrapolated to critical state	$\Delta\alpha_2$	$\Delta\alpha_2$ extrapolated to critical state
SHE-5	219	214	—	S, N	12.48±0.21				
		214	B ₄ C-R-1	S, N		10.57±0.26	10.80	1.84±0.05	1.89
		214	B ₄ C-R-2	S, N		16.60±0.29	16.95	2.90±0.06	2.96
		214	B ₄ C-R-3	S, N		21.48±0.33	21.95	3.75±0.07	3.83
		214	B ₄ C-R-4	S, N		26.33±0.29	26.86	4.60±0.08	4.69
		214	B ₄ C-R-5	S, N		30.58±0.55	31.16	5.34±0.12	5.44
		214	B ₄ C-R-6	S, N		33.02±0.24	33.72	5.76±0.08	5.89
		214	B ₄ C-R-7	S, N		35.23±0.25	35.92	6.15±0.09	6.27
		214	B ₄ C-R-8	S, N		39.64±0.25	40.46	6.92±0.10	7.06
		214	B ₄ C-R-9	S, N		43.53±0.26	44.40	7.60±0.10	7.75
		214	B ₄ C-R-10	S, N		46.78±0.23	47.71	8.16±0.11	8.33
		214	B ₄ C-R-11	S, N		50.64±0.37	51.69	8.84±0.13	9.02
		214	B ₄ C-R-12	S, N		56.95±0.31	58.12	9.94±0.13	10.14
		214	B ₄ C-R-13	S, N		59.06±0.32	60.28	10.31±0.14	10.52
		214	B ₄ C-R-14	S, N		60.78±0.32	62.00	10.61±0.14	10.82
		214	B ₄ C-R-15	S, N		63.98±0.31	65.26	11.17±0.15	11.39
		214	B ₄ C-R-16	S, N		68.60±0.35	70.00	11.97±0.16	12.22
		214	B ₄ C-R-17	S, N		70.44±0.40	71.89	12.29±0.17	12.55
		214	B ₄ C-R-18	S, N		76.06±0.45	77.63	13.27±0.18	13.55
		214	B ₄ C-R-19	S, N		80.89±0.63	82.52	14.12±0.21	14.40

TABLE 7 Worths of gray control rods with various diameters

Core	Critical fuel rod number	Loaded fuel rod number	Control rod	Rod position	Prompt neutron decay constant at standard state	$\Delta\alpha_1$ (sec ⁻¹)	$\Delta\alpha_1$ extrapolated to critical state	$\Delta\alpha_2$	$\Delta\alpha_2$ extrapolated to critical state
SHE-8	147	140	—		16.72±0.04				
		140	GRAY-R-1	S, N		0.183±0.007	0.183	0.0272±0.001	0.0272
		140	GRAY-R-9	S, N		1.78 ± 0.01	1.87	0.264±0.014	0.278
		140	GRAY-R-17	S, N		9.16 ± 0.01	9.44	1.36 ± 0.07	1.40
		140	GRAY-R-2	S, N		0.394±0.025	0.394	0.059±0.005	0.059
		140	GRAY-R-10	S, N		6.07 ± 0.01	6.07	0.901±0.047	0.928
		140	GRAY-R-18	S, N		18.66 ± 0.01	19.22	2.77 ± 0.14	2.85
		140	GRAY-R-3	S, N		2.06 ± 0.01	2.15	0.305±0.016	0.319
		140	GRAY-R-11	S, N		10.86 ± 0.01	11.14	1.61 ± 0.08	1.65
		140	GRAY-R-19	S, N		27.36 ± 0.01	28.10	4.06 ± 0.21	4.17
		140	GRAY-R-4	S, N		4.48 ± 0.01	4.57	0.664±0.035	0.678
		140	GRAY-R-12	S, N		19.56 ± 0.01	20.11	2.90 ± 0.15	2.98
		140	GRAY-R-20	S, N		39.17 ± 0.02	40.28	5.81 ± 0.30	5.98
		140	GRAY-R-5	S, N		9.01 ± 0.01	9.28	1.34 ± 0.07	1.38
		140	GRAY-R-13	S, N		29.44 ± 0.01	30.28	4.37 ± 0.23	4.49
		140	GRAY-R-21	S, N		52.47 ± 0.03	53.95	7.79 ± 0.40	8.00
		140	GRAY-R-6	S, N		12.81 ± 0.01	13.18	1.90 ± 0.10	1.96
		140	GRAY-R-14	S, N		35.76 ± 0.02	36.69	5.31 ± 0.28	5.44
		140	GRAY-R-22	S, N		61.96 ± 0.03	63.62	9.19 ± 0.48	9.44
		140	GRAY-R-7	S, N		15.80 ± 0.01	16.27	2.35 ± 0.12	2.41
		140	GRAY-R-15	S, N		41.63 ± 0.02	42.74	6.18 ± 0.32	6.34
		140	GRAY-R-23	S, N		67.75 ± 0.04	69.60	10.05 ± 0.52	10.33
		140	GRAY-R-8	S, N		22.13 ± 0.01	22.77	3.28 ± 0.17	3.38
		140	GRAY-R-16	S, N		52.12 ± 0.02	53.51	7.73 ± 0.40	7.94
		140	GRAY-R-24	S, N		78.28 ± 0.03	80.22	11.61 ± 0.60	11.90

TABLE 8 Worths of fully inserted multiple control rods

Core	Critical fuel rod number	Loaded fuel rod number	Control rod	Rod position	Prompt neutron decay constant at standard state	$\Delta\alpha_1$ (sec ⁻¹)	$\Delta\alpha_1$ extrapolated to critical state	$\Delta\alpha_2$	$\Delta\alpha_2$ extrapolated to critical state	Interference factor S	Distance from the core axis	Distance between the adjacent two rods
SHE-5	219	214	B ₄ C-S5-1	—	11.25±0.04	71.88±0.28	73.28	12.54±0.16	12.79	0	6.5	6.5
	212	212	B ₄ C-S5-1	S, N 1F1, 1Z1	70.09±0.41	71.49	12.23±0.17	12.48	10.75±0.13	10.97	19.5	19.5
	212	212	B ₄ C-S5-1	3F1, 3Z1	61.60±0.11	62.88	8.36±0.11	8.53	5.37±0.07	5.48	32.5	32.5
	212	212	B ₄ C-S5-1	5F1, 5Z1	47.89±0.18	48.88	17.09±0.08	17.44	2.98±0.04	3.04	45.5	45.5
	214	214	B ₄ C-S5-1	7F1, 7Z1	30.75±0.09	31.39	1.49±0.02	1.52	19.04±0.30	19.43	77.8±0.009	71.5
	214	214	B ₄ C-S5-1	9F1, 9Z1	17.09±0.08	17.44	8.53±0.08	8.70	6.21±0.08	6.33	0.900±0.020	39.0
	214	214	B ₄ C-S5-1	MF1, MZ1	109.1±1.1	111.3	19.35±0.48	19.75	17.36±0.25	17.71	1.038±0.009	32.5
	210	210	B ₄ C-S5-1,-2	1F1, 1Z1, 1C1, 1W1	110.9±2.4	113.2	99.46±0.75	101.5	11.53±0.16	11.76	1.074±0.007	91.0
	210	210	B ₄ C-S5-1,-2	3F1, 3Z1, 3C1, 3W1	35.56±0.18	36.26	2.98±0.04	3.04	1.001±0.001	71.5	117.0	117.0
	210	210	B ₄ C-S5-1,-2	5F1, 5Z1, 5C1, 5W1	17.06±0.08	17.41	127.9±0.8	130.5	22.32±0.30	22.78	1.035±0.007	143.0
	214	214	B ₄ C-S5-1,-2	7F1, 7Z1, 7C1, 7W1	66.04±0.41	67.37	1.49±0.02	1.52	0.608±0.005	6.5	45.5	45.5
	214	214	B ₄ C-S5-1,-2	9F1, 9Z1, 9C1, 9W1	145.1±1.0	148.0	103.8±0.4	105.9	18.12±0.23	18.48	1.125±0.005	56.3
	214	214	B ₄ C-S5-1,-2	MF1, MZ1, MC1, MW1	127.9±0.8	130.5	57.06±0.53	58.22	9.96±0.15	10.16	1.113±0.011	78.8
	208	208	B ₄ C-S5-1,-2,-3	1F1, 1Z1, 1B1, 1V1, 1D1, 1X1	151.0±1.1	154.1	26.36±0.38	26.89	25.32±0.35	25.83	1.031±0.008	101.3
	208	208	B ₄ C-S5-1,-2,-3	3F1, 3Z1, 3B1, 3V1, 3D1, 3X1	145.1±1.0	148.0	26.36±0.17	26.89	4.60±0.06	4.69	1.031±0.012	123.8
	208	208	B ₄ C-S5-1,-2,-3	5F1, 5Z1, 5B1, 5V1, 5D1, 5X1	103.8±0.4	105.9	149.2±1.2	152.2	26.03±0.38	26.56	0.355±0.004	6.5
	214	214	B ₄ C-S5-1,-2,-3	7F1, 7Z1, 7B1, 7V1, 7D1, 7X1	57.06±0.53	58.22	56.71, 1A1, 1B1, 1V1, 1C1, 1W1, 1D1, 1X1, 1E1, 1Y1	200.1±7.9	34.92±1.44	35.61	0.541±0.021	19.5
	214	214	B ₄ C-S5-1,-2,-3	9F1, 9Z1, 9B1, 9V1, 9D1, 9X1	239.8±2.2	244.4	41.84±0.64	42.67	38.26±0.54	39.01	1.188±0.009	45.5
	202	202	B ₄ C-S5-1,-2,-3,-4,-5,-6	MF1, MZ1, MB1, MV1, MD1, MX1	219.2±1.5	223.5	125.7±7.3	128.2	21.93±1.30	22.38	1.225±0.071	58.5
	202	202	B ₄ C-S5-1,-2,-3,-4,-5,-6	3F1, 3Z1, 3A1, 3U1, 3B1, 3V1, 3C1, 3W1, 3D1, 3X1, 3E1, 3Y1	56.71±0.33	57.87	9.90±0.13	10.10	1.109±0.012	71.5	71.5	71.5
	214	214	B ₄ C-S5-1,-2,-3,-4,-5,-6	5F1, 5Z1, 5A1, 5U1, 5B1, 5V1, 5C1, 5W1, 5D1, 5X1, 5E1, 5Y1	219.2±1.5	223.5	9F1, 9Z1, 9A1, 9U1, 9B1, 9V1, 9C1, 9W1, 9D1, 9X1, 9E1, 9Y1	56.71, MA1, MU1, MB1, MV1, MC1, MW1, MD1, MX1, ME1, MY1	0	0	0	0

SHE-8	147	146	B _C -S8-1	—	S,N 1F1,1Z1	8.94±0.02	70.37±0.20 69.23±0.31	70.50 69.36	10.44±0.54 10.27±0.88	10.46 10.29	0 6.5
			B _C -S8-1	—	3F1,3Z1		61.54±0.24	61.65	9.13±0.48	9.15	19.5
			B _C -S8-1	—	5F1,5Z1		51.54±0.19	51.63	7.65±0.40	7.66	32.5
			B _C -S8-1	—	7F1,7Z1		33.25±0.09	33.31	4.98±0.26	4.94	45.5
			B _C -S8-1	—	9F1,9Z1		17.61±0.05	17.64	2.61±0.14	2.62	58.5
			B _C -S8-1	—	MF1,MZ1		8.42±0.05	8.44	1.25±0.07	1.25	71.5
			B _C -S8-1	—	1F1,1Z1,1C1,1W1		107.2 ±0.6	107.40	15.90±0.83	15.94	0.77±0.004
			B _C -S8-1,-2	—	3F1,3Z1,3C1,3W1		111.4 ±0.7	111.60	16.54±0.87	16.56	0.91±0.005
			B _C -S8-1,-2	—	5F1,5Z1,5C1,5W1		103.6 ±0.6	103.79	15.37±0.80	15.40	1.00±0.006
			B _C -S8-1,-2	—	7F1,7Z1,7C1,7W1		70.95±0.28	71.08	10.53±0.55	10.55	1.07±0.004
			B _C -S8-1,-2	—	9F1,9Z1,9C1,9W1		37.04±0.11	37.11	5.50±0.29	5.51	1.05±0.003
			B _C -S8-1,-2	—	MF1,MZ1,MC1,MW1		17.10±0.07	17.13	2.54±0.13	2.54	1.02±0.004
			B _C -S8-1,-2,-3	—	1F1,1Z1,1B1,1V1,1D1,1X1		125.3 ±0.8	125.5	18.59±0.97	18.63	0.60±0.004
			B _C -S8-1,-2,-3	—	3F1,3Z1,3B1,3V1,3D1,3X1		146.3 ±1.5	146.6	21.70±1.2	21.75	0.79±0.008
			B _C -S8-1,-2,-3	—	5F1,5Z1,5B1,5V1,5D1,5X1		150.0 ±1.8	150.3	22.26±1.2	22.30	0.97±0.011
			B _C -S8-1,-2,-3	—	7F1,7Z1,7B1,7V1,7D1,7X1		110.6 ±0.6	110.6	16.4 ±0.9	16.44	1.11±0.006
			B _C -S8-1,-2,-3	—	9F1,9Z1,9B1,9V1,9D1,9X1		57.92±0.18	58.03	8.59±0.45	8.61	1.10±0.003
			B _C -S8-1,-2,-3	—	MF1,MZ1,MB1,MV1,MD1,MX1		26.28±0.06	26.33	3.90±0.20	3.91	1.04±0.002
			B _C -S8-1,-2,-3,-4,-5,-6	—	1F1,1Z1,1A1,1U1,1B1,1V1, 1C1,1W1,1D1,1X1,1E1,1Y1		149.7 ±1.2	150.0	22.2 ±1.2	22.25	0.36±0.003
			B _C -S8-1,-2,-3,-4,-5,-6	—	3F1,3Z1,3A1,3U1,3B1,3V1, 3C1,3W1,3D1,3X1,3E1,3Y1		213.7 ±4.2	214.1	31.7 ±1.8	31.76	0.58±0.011
			B _C -S8-1,-2,-3,-4,-5,-6	—	5F1,5Z1,5A1,5U1,5B1,5V1, 5C1,5W1,5D1,5X1,5E1,5Y1		227.1 ±2.4	227.5	33.7 ±1.8	33.76	0.73±0.008
			B _C -S8-1,-2,-3,-4,-5,-6	—	7F1,7Z1,7A1,7U1,7B1,7V1, 7C1,7W1,7D1,7X1,7E1,7Y1		222.8 ±3.3	223.2	33.1 ±1.8	33.12	1.12±0.016
			B _C -S8-1,-2,-3,-4,-5,-6	—	9F1,9Z1,9A1,9U1,9B1,9V1, 9C1,9W1,9D1,9X1,9E1,9Y1		132.3 ±0.8	132.5	19.6 ±1.0	19.67	1.25±0.007
			B _C -S8-1,-2,-3,-4,-5,-6	—	MF1,MZ1,MA1,MA1,MB1,MV1, MC1,MW1,MD1,MX1,ME1,MY1		58.43±0.19	58.54	8.67±0.45	8.69	1.16±0.004

TABLE 9 Worths of fully inserted multiple cadmium control rods

Core	Critical fuel rod number	Loaded fuel rod number	Control rod number	Rod position	Prompt neutron decay constant at standard state	$\Delta\alpha_1$ (sec ⁻¹)	$\Delta\alpha_2$	$\Delta\alpha_2$ -extrapolated to critical state	$\Delta\alpha_2$ -extrapolated to critical state	Interference factor S	Distance from the core axis	Distance between the adjacent two rods
SHE-8	147	140	—	S, N 1F1, 1Z1	20.16±0.06	41.80±0.23	42.91	6.20±0.32	6.37	0	6.5	6.5
	138	138	CD-2	42.78	6.18±0.32	6.35	19.5	19.5	19.5	19.5	32.5	32.5
	138	138	CD-2	44.75	6.46±0.34	6.64	45.5	45.5	45.5	45.5	45.5	45.5
	140	140	CD-2	44.53	6.43±0.34	6.61	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5
	140	140	CD-2	31.97	4.62±0.24	4.74	45.5	45.5	45.5	45.5	45.5	45.5
	140	140	CD-2	18.26	2.64±0.14	2.71	58.5	58.5	58.5	58.5	58.5	58.5
	140	140	CD-2	9.49	1.37±0.77	1.41	71.5	71.5	71.5	71.5	71.5	71.5
	136	136	CD-2	71.50	10.33±0.55	10.61	0.836±0.009	0.836±0.009	0.836±0.009	6.5	13.0	13.0
	136	136	CD-2	85.02	12.28±0.64	12.61	0.951±0.006	0.951±0.006	0.951±0.006	19.5	39.0	39.0
	140	140	CD-2	92.77	13.39±0.70	13.76	1.042±0.007	1.042±0.007	1.042±0.007	32.5	65.0	65.0
	140	140	CD-2	68.81	9.94±0.52	10.21	1.075±0.010	1.075±0.010	1.075±0.010	45.5	91.0	91.0
	140	140	CD-2	38.31	5.53±0.29	5.68	1.047±0.009	1.047±0.009	1.047±0.009	58.5	117.0	117.0
	140	140	CD-2	19.10	2.75±0.15	2.83	1.006±0.013	1.006±0.013	1.006±0.013	71.5	143.0	143.0
SHE-8	147	140	—	88.28	12.73±0.67	13.10	0.686±0.005	0.686±0.005	0.686±0.005	6.5	11.3	11.3
	134	134	CD-2	117.5	16.96±0.88	17.43	0.875±0.005	0.875±0.005	0.875±0.005	19.5	33.8	33.8
	140	140	CD-2	133.7	19.30±1.02	19.84	1.001±0.012	1.001±0.012	1.001±0.012	32.5	56.3	56.3
	140	140	CD-2	106.1	15.30±0.80	15.04	1.104±0.009	1.104±0.009	1.104±0.009	45.5	78.8	78.8
	140	140	CD-2	60.36	8.71±0.45	8.96	1.099±0.010	1.099±0.010	1.099±0.010	58.5	101.3	101.3
	140	140	CD-2	29.13	4.21±0.22	4.32	1.027±0.012	1.027±0.012	1.027±0.012	71.5	123.8	123.8
	128	128	CD-2	106.8	15.42±0.80	15.85	0.416±0.003	0.416±0.003	0.416±0.003	6.5	6.5	6.5
	128	128	CD-2	175.1	25.29±1.32	25.98	0.652±0.005	0.652±0.005	0.652±0.005	19.5	19.5	19.5
	140	140	CD-2	218.2	31.51±1.64	32.37	0.817±0.006	0.817±0.006	0.817±0.006	32.5	32.5	32.5
	140	140	CD-2	216.3	31.24±1.63	32.09	1.127±0.007	1.127±0.007	1.127±0.007	45.5	45.5	45.5
	140	140	CD-2	136.9	19.77±1.03	20.31	1.247±0.012	1.247±0.012	1.247±0.012	58.5	58.5	58.5
	140	140	CD-2	63.32	9.15±0.48	9.40	1.115±0.013	1.115±0.013	1.115±0.013	71.5	71.5	71.5

TABLE 10 Worths of fully inserted multiple gray control rods

Core	Critical fuel rod number	Loaded fuel rod number	Control rod	Rod position	Prompt neutron decay constant at standard state	$\Delta\alpha_1$	$\Delta\alpha_1$ extrapolated to critical state	$\Delta\alpha_2$	$\Delta\alpha_2$ extrapolated to critical state	$\Delta\alpha_2$ extrapolated to critical state	Distance from the core axis	Distance between the adjacent two control rods
SHE-8	147	140	—	S, N	19.04±0.04	24.60±0.23	25.24	3.65±0.19	3.75	0	6.5	6.5
		138	GRAY-204-1	1F1, 1Z1	23.71±0.22	24.36	3.52±0.19	3.61	3.61	3.61	19.5	19.5
		138	GRAY-204-1	3F1, 3Z1	24.60±0.22	25.25	3.65±0.19	3.75	3.75	3.75	32.5	32.5
		138	GRAY-204-1	5F1, 5Z1	23.76±0.09	24.41	3.53±0.18	3.62	3.62	3.62	45.5	45.5
		140	GRAY-204-1	7F1, 7Z1	17.10±0.16	17.56	2.54±0.13	2.61	2.61	2.61	58.5	58.5
		140	GRAY-204-1	9F1, 9Z1	9.37±0.10	9.65	1.39±0.07	1.43	1.43	1.43	71.5	71.5
		140	GRAY-204-1	MF1, MZ1	4.82±0.07	5.00	0.72±0.04	0.74	0.74	0.74	13.0	13.0
		136	GRAY-204-1,-2	1F1, 1Z1, 1C1, 1W1	43.83±0.74	45.03	6.50±0.36	6.68	6.68	6.68	6.5	6.5
		136	GRAY-204-1,-2	3F1, 3Z1, 3C1, 3W1	47.25±0.41	48.55	7.01±0.37	7.20	7.20	7.20	39.0	39.0
		140	GRAY-204-1,-2	5F1, 5Z1, 5C1, 5W1	48.50±0.21	49.80	7.20±0.38	7.39	7.39	7.39	65.0	65.0
		140	GRAY-204-1,-2	7F1, 7Z1, 7C1, 7W1	35.12±0.20	36.04	5.21±0.27	5.35	5.35	5.35	91.0	91.0
		140	GRAY-204-1,-2	9F1, 9Z1, 9C1, 9W1	19.35±0.14	19.90	2.87±0.15	2.95	2.95	2.95	117.0	117.0
		140	GRAY-204-1,-2	MF1, MZ1, MC1, MW1	9.49±0.08	9.77	1.41±0.07	1.45	1.45	1.45	143.0	143.0
SHE-8	147	140	—		19.20±0.05							
		134	GRAY-204-1,-2,-3	1F1, 1Z1, 1B1, 1V1, 1D1, 1X1	59.28±0.38	60.95	8.80±0.46	9.04	9.04	9.04	6.5	6.5
		134	GRAY-204-1,-2,-3	3F1, 3Z1, 3B1, 3V1, 3D1, 3X1	66.03±0.41	67.89	9.80±0.51	10.07	10.07	10.07	19.5	19.5
		140	GRAY-204-1,-2,-3	5F1, 5Z1, 5B1, 5V1, 5D1, 5X1	70.00±0.61	71.94	10.39±0.55	10.67	10.67	10.67	32.5	32.5
		140	GRAY-204-1,-2,-3	7F1, 7Z1, 7B1, 7V1, 7D1, 7X1	53.03±0.24	54.51	7.87±0.41	8.09	8.09	8.09	56.3	56.3
		140	GRAY-204-1,-2,-3	9F1, 9Z1, 9B1, 9V1, 9D1, 9X1	29.25±0.19	30.09	4.34±0.23	4.46	4.46	4.46	45.5	45.5
		140	GRAY-204-1,-2,-3	MF1, MZ1, MB1, MV1, MD1, MX1	14.30±0.10	14.67	2.12±0.11	2.18	2.18	2.18	78.8	78.8
		128	GRAY-204-1,-2,-3,-4,-5,-6	1F1, 1Z1, 1B1, 1V1, 1D1, 1X1, 1A1, 1U1, 1C1, 1W1, 1E1, 1Y1	86.56±0.47	88.97	12.84±0.67	13.20	13.20	13.20	101.3	101.3
		128	GRAY-204-1,-2,-3,-4,-5,-6	3F1, 3Z1, 3B1, 3V1, 3D1, 3X1, 3A1, 3U1, 3C1, 3W1, 3E1, 3Y1	115.2 ±0.8	118.3	17.09±0.89	17.56	17.56	17.56	123.8	123.8
		140	GRAY-204-1,-2,-3,-4,-5,-6	5F1, 5Z1, 5B1, 5V1, 5D1, 5X1, 5A1, 5U1, 5C1, 5W1, 5E1, 5Y1	132.1 ±2.6	135.7	19.60±1.09	20.14	20.14	20.14	6.5	6.5
		140	GRAY-204-1,-2,-3,-4,-5,-6	7F1, 7Z1, 7B1, 7V1, 7D1, 7X1, 7A1, 7U1, 7C1, 7W1, 7E1, 7Y1	111.7 ±1.6	114.8	16.58±0.89	17.03	17.03	17.03	45.5	45.5
		140	GRAY-204-1,-2,-3,-4,-5,-6	9F1, 9Z1, 9B1, 9V1, 9D1, 9X1, 9A1, 9U1, 9C1, 9W1, 9E1, 9Y1	63.08±0.47	64.84	9.36±0.49	9.62	9.62	9.62	58.5	58.5
		140	GRAY-204-1,-2,-3,-4,-5,-6	MF1, MZ1, MB1, MV1, MD1, MX1, MA1, MU1, MC1, MW1, ME1, MY1	29.90±0.22	30.73	4.44±0.23	4.56	4.56	4.56	71.5	71.5

TABLE II Worths of half inserted multiple BC control rods

Core	Critical fuel rod number	Loaded fuel rod number	Control rod	Rod position	Prompt neutron decay constant at standard state	$\Delta\alpha_1$	$\Delta\alpha_2$	$\Delta\alpha_2$ extrapolated to critical state	Distance from the core center	Distance between the adjacent two control rods
					19.53 ± 0.04	34.46 ± 0.18	35.39	5.11 ± 0.27	5.25	0
SHE-8	147	140	B_4C-H-1	N	33.09 ± 0.18	34.02	4.91 ± 0.26	5.05	6.5	6.5
					29.80 ± 0.17	30.64	4.42 ± 0.23	4.55	19.5	
					25.15 ± 0.16	25.89	3.73 ± 0.20	8.84	32.5	
					20.42 ± 0.14	20.98	3.03 ± 0.16	3.11	39.0	
					8.39 ± 0.09	8.67	1.25 ± 0.07	1.29	58.5	
					4.21 ± 0.08	4.30	0.63 ± 0.04	0.64	71.5	
					19.69 ± 0.05	53.09 ± 0.25	54.57	7.88 ± 0.41	8.10	6.5
					56.47 ± 0.52	58.05	8.38 ± 0.44	8.61	9.948 ± 0.010	39.0
SHE-8	147	140	$B_4C-H-1,-2$	1Z1, 1W1	49.07 ± 0.31	50.46	7.28 ± 0.38	7.49	9.976 ± 0.009	32.5
					42.40 ± 0.24	43.60	6.29 ± 0.33	6.47	1.038 ± 0.009	39.0
					17.65 ± 0.12	18.11	2.62 ± 0.14	2.69	1.052 ± 0.013	58.5
					8.36 ± 0.09	8.55	1.24 ± 0.07	1.27	0.993 ± 0.022	71.5
				2Z1, 9W1	63.49 ± 0.42	65.25	9.42 ± 0.49	9.68	0.640 ± 0.006	6.5
					72.34 ± 0.56	74.38	10.73 ± 0.56	11.04	0.809 ± 0.008	19.5
					68.35 ± 0.42	70.20	10.14 ± 0.53	10.42	0.906 ± 0.008	32.5
					60.63 ± 0.32	62.30	9.00 ± 0.47	9.24	0.990 ± 0.009	39.0
				3Z1, 3W1, 3X1	28.35 ± 0.14	29.09	4.21 ± 0.22	4.32	1.126 ± 0.013	58.5
					13.62 ± 0.08	13.99	2.02 ± 0.11	2.08	1.078 ± 0.021	71.5
					76.47 ± 0.43	78.60	11.35 ± 0.59	11.66	0.385 ± 0.003	6.5
					97.55 ± 0.82	100.24	14.47 ± 0.76	14.87	0.546 ± 0.006	19.5
				5Z1, 5W1, 5X1	100.5 ± 0.5	103.3	14.92 ± 0.78	15.32	0.666 ± 0.005	32.5
					95.16 ± 0.52	97.75	14.12 ± 0.74	14.50	0.777 ± 0.007	39.0
					53.36 ± 0.35	54.84	7.92 ± 0.41	8.14	1.060 ± 0.013	58.5
					27.86 ± 0.23	28.60	4.13 ± 0.22	4.24	1.103 ± 0.023	71.5
SHE-8	147	140	$B_4C-H-1,-2,-3$	1Z1, 1W1, 1X1	1Z1, 1U1, 1V1, 1W1, 1X1, 1Y1					6.5
					3Z1, 3U1, 3V1, 3W1, 3X1, 3Y1					
					5Z1, 5U1, 5V1, 5W1, 5X1, 5Y1					
					6Z1, 6U1, 6V1, 6W1, 6X1, 6Y1					
				9Z1, 9W1, 9X1	9Z1, 9U1, 9V1, 9W1, 9X1, 9Y1					
					MZ1, MW1, MX1					
					1Z1, 1U1, 1V1, 1W1, 1X1, 1Y1					
					3Z1, 3U1, 3V1, 3W1, 3X1, 3Y1					
				MZ1, MU1, MV1, MW1, MX1, MY1	MZ1, MU1, MV1, MW1, MX1, MY1					
					1Z1, 1U1, 1V1, 1W1, 1X1, 1Y1					
					3Z1, 3U1, 3V1, 3W1, 3X1, 3Y1					
					5Z1, 5U1, 5V1, 5W1, 5X1, 5Y1					
SHE-8	147	140	$B_4C-H-1,-2,-3,-4,-5,-6$	1Z1, 1U1, 1V1, 1W1, 1X1, 1Y1	1Z1, 1U1, 1V1, 1W1, 1X1, 1Y1					6.5
					3Z1, 3U1, 3V1, 3W1, 3X1, 3Y1					
					5Z1, 5U1, 5V1, 5W1, 5X1, 5Y1					
					6Z1, 6U1, 6V1, 6W1, 6X1, 6Y1					
				9Z1, 9W1, 9X1	9Z1, 9U1, 9V1, 9W1, 9X1, 9Y1					
					MZ1, MU1, MV1, MW1, MX1, MY1					
					1Z1, 1U1, 1V1, 1W1, 1X1, 1Y1					
					3Z1, 3U1, 3V1, 3W1, 3X1, 3Y1					
SHE-8	147	140	$B_4C-H-1,-2,-3,-4,-5,-6$	1Z1, 1U1, 1V1, 1W1, 1X1, 1Y1	1Z1, 1U1, 1V1, 1W1, 1X1, 1Y1					6.5
					3Z1, 3U1, 3V1, 3W1, 3X1, 3Y1					
					5Z1, 5U1, 5V1, 5W1, 5X1, 5Y1					
					6Z1, 6U1, 6V1, 6W1, 6X1, 6Y1					
				9Z1, 9W1, 9X1	9Z1, 9U1, 9V1, 9W1, 9X1, 9Y1					
					MZ1, MU1, MV1, MW1, MX1, MY1					
					1Z1, 1U1, 1V1, 1W1, 1X1, 1Y1					
					3Z1, 3U1, 3V1, 3W1, 3X1, 3Y1					
SHE-8	147	140	$B_4C-H-1,-2,-3,-4,-5,-6$	1Z1, 1U1, 1V1, 1W1, 1X1, 1Y1	1Z1, 1U1, 1V1, 1W1, 1X1, 1Y1					6.5
					3Z1, 3U1, 3V1, 3W1, 3X1, 3Y1					
					5Z1, 5U1, 5V1, 5W1, 5X1, 5Y1					
					6Z1, 6U1, 6V1, 6W1, 6X1, 6Y1					
				9Z1, 9W1, 9X1	9Z1, 9U1, 9V1, 9W1, 9X1, 9Y1					
					MZ1, MU1, MV1, MW1, MX1, MY1					
					1Z1, 1U1, 1V1, 1W1, 1X1, 1Y1					
					3Z1, 3U1, 3V1, 3W1, 3X1, 3Y1					
SHE-8	147	140	$B_4C-H-1,-2,-3,-4,-5,-6$	1Z1, 1U1, 1V1, 1W1, 1X1, 1Y1	1Z1, 1U1, 1V1, 1W1, 1X1, 1Y1					6.5
					3Z1, 3U1, 3V1, 3W1, 3X1, 3Y1					
					5Z1, 5U1, 5V1, 5W1, 5X1, 5Y1					
					6Z1, 6U1, 6V1, 6W1, 6X1, 6Y1					
				9Z1, 9W1, 9X1	9Z1, 9U1, 9V1, 9W1, 9X1, 9Y1					
					MZ1, MU1, MV1, MW1, MX1, MY1					
					1Z1, 1U1, 1V1, 1W1, 1X1, 1Y1					
					3Z1, 3U1, 3V1, 3W1, 3X1, 3Y1					

付 錄

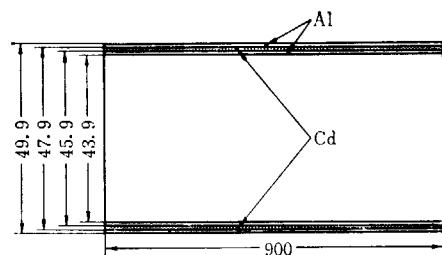
ここでは、実験に使用された各種の制御棒の

- i) 幾何学的寸法
- ii) 中性子吸収材の核種と濃度
- iii) 被覆材の材料

について、詳述した。ただし、理論計算のさい是非必要と思われる内容に限定し、構造の細部についてははぶいている。また寸法は mm 単位で全て統一した。

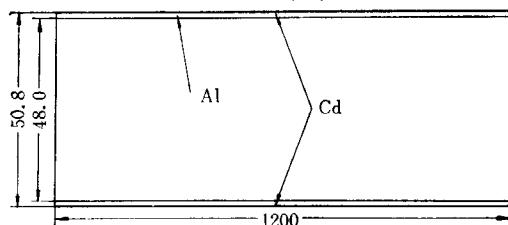
1. カドミウム制御棒

TABLE A-1 (上)



Name ; Cadmium rod CD-1
Neutron absorber ; Cd
Absorber thickness ; 1 mm
Cladding ; Al

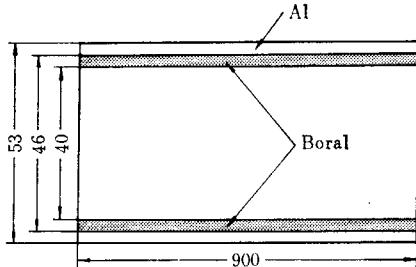
TABLE A-1 (下)



Name ; Cadmium rod CD-2
Neutron absorber ; Cd
Absorber thickness ; 0.60mm
Cladding ; Al

2. ポラル制御棒

TABLE A-2

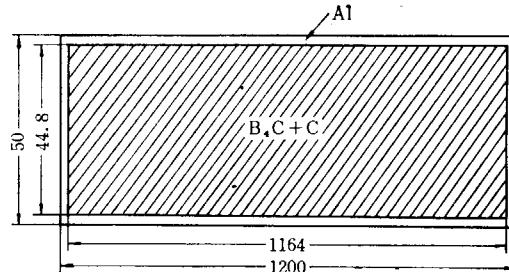


Name ; Boral rod BORAL
Neutron absorber ; B₄C (23.5 w.t. %)
Absorber thickness ; 3 mm
Cladding ; Al

3. 灰色制御棒

3.1 直径 42 mm の灰色制御棒

TABLE A-3



Name ; Gray rod with diameter of 42mm

GRAY-42

Neutron absorber ; B₄C (Total length of absorber is 1160 mm)

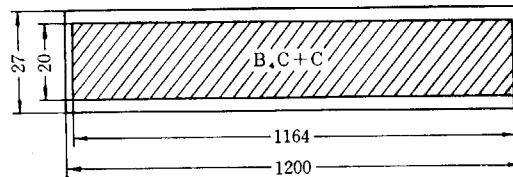
Cladding ; Al

Name	B ₄ C density (g/cm ³)
GRAY-42-1	0.0099 0.0099
GRAY-42-2	0.0199 0.0199
GRAY-42-3	0.0496 0.0497
GRAY-42-4	0.0994 0.0994
GRAY-42-5	0.199 0.199
GRAY-42-6	0.495 0.495
GRAY-42-7	0.985 0.987

3.2 直径 20 mm の灰色制御棒

(GRAY-20 および GRAY-204)

TABLE A-4



Name ; Gray rod with diameter of 20mm

GRAY-20

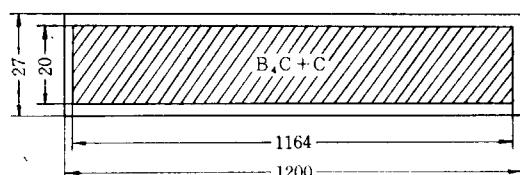
Neutron absorber ; B₄C (Total length of absorber is 1160 mm)

Cladding ; Al

Name	B ₄ C density (g/cm ³)
GRAY-20-1	0.0099 0.0100
GRAY-20-2	0.0195 0.0196
GRAY-20-3	0.0497 0.0500
GRAY-20-4	0.0977 0.1001
GRAY-20-5	0.1998 0.1997
GRAY-20-6	0.4965 0.4996
GRAY-20-7	0.9890 0.9941

3.3 干渉効果測定に用いた灰色制御棒

TABLE A-4



Name ; Gray rods GRAY-204

Neutron absorber ; B₄C (Total length of absorbers
is 1160 mm)

Cladding ; Al

Name	B ₄ C density (g/cm ³)
GRAY-204-1	0.1001 0.1001
GRAY-204-2	0.0999 0.1000
GRAY-204-3	0.1001 0.1001
GRAY-204-4	0.0977 0.0978
GRAY-204-5	0.0975 0.0977
GRAY-204-6	0.0977 0.0977

Name	Diameter R (mm)	Cladding thickness T (mm)	B ₄ C density (g/cm ³)
B ₄ C-R-1	4	1	1.38
B ₄ C-R-2	6	1	1.37
B ₄ C-R-3	8	1	1.36
B ₄ C-R-4	10	1	1.36
B ₄ C-R-5	12	1	1.40
B ₄ C-R-6	13	1	1.36
B ₄ C-R-7	14	1	1.37
B ₄ C-R-8	16	1	1.38
B ₄ C-R-9	18	1	1.36
B ₄ C-R-10	20	1	1.33
B ₄ C-R-11	23	1	1.36
B ₄ C-R-12	26	1	1.40
B ₄ C-R-13	28	1	1.34
B ₄ C-R-14	29.2	1.4	1.32
B ₄ C-R-15	32.2	1.4	1.34
B ₄ C-R-16	35.2	1.4	1.34
B ₄ C-R-17	37.2	1.4	1.32
B ₄ C-R-18	42.2	1.4	1.36
B ₄ C-R-19	47.2	1.4	1.34

4. インジウム制御棒

TABLE A-6

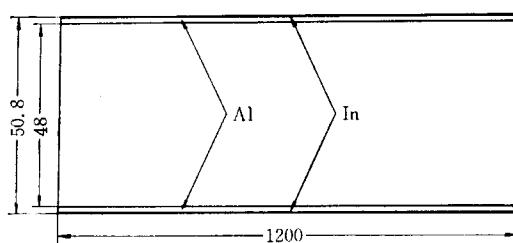
Name ; Indium rod IN-1 IN-2
Neutron absorber ; In In
Absorber thickness ; 0.2mm 0.5mm5. B₄C 制御棒5.1 直径の異なる B₄C 制御棒

TABLE A-7

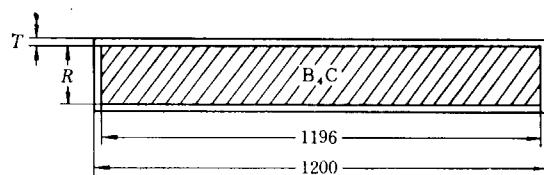
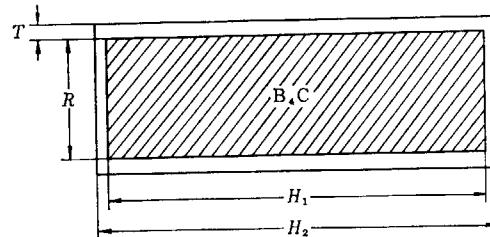
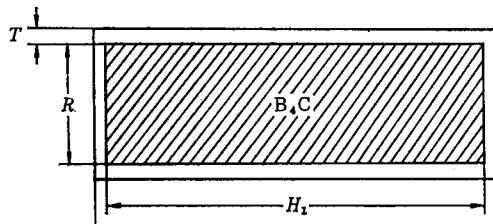
Name ; B₄C rod with various diameter B₄C-R
Neutron absorber ; B₄C
Cladding ; Al5.2 干渉効果測定に用いた B₄C 制御棒
(B₄C-S 5, B₄C-S 8 および B₄C-H)

TABLE A-8

Name ; B₄C rod B₄C-S 5
Neutron absorber ; B₄C
Cladding ; Al

Name	H_1 (mm)	H_2 (mm)	R (mm)	T (mm)	B ₄ C density (g/cm ³)
B ₄ C-S 5-1	812 812	854 854	43.7 43.7	4.2 4.2	0.954 0.836
B ₄ C-S 5-2	812 812	854 854	43.7 43.7	4.2 4.2	1.00 0.869
B ₄ C-S 5-3	812 812	854 854	43.7 43.7	4.2 4.2	1.17 0.881
B ₄ C-S 5-4	900 900	905 905	46.9 46.9	3.8 3.8	1.19 1.33
B ₄ C-S 5-5	900 812	905 854	46.9 43.7	3.8 4.2	1.33 1.20
B ₄ C-S 5-6	815 900	820 905	43.7 48.0	4.2 1.0	1.38 1.27

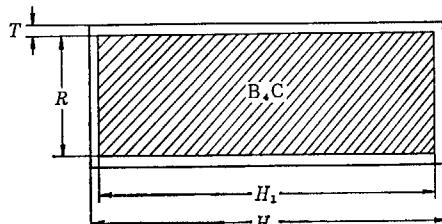
TABLE A-9



Name ; B₄C rod B₄C-S8
Neutron absorber ; B₄C
Cladding ; Al

Name	H ₁ (mm)	H ₂ (mm)	R (mm)	T (mm)	B ₄ C density (g/cm ³)
B ₄ C-S8-1	812 812	854 854	43.7 43.7	4.2 4.2	1.02 0.868
B ₄ C-S8-2	812 812	854 854	43.7 43.7	4.2 4.2	0.872 0.937
B ₄ C-S8-3	812 812	854 854	43.7 43.7	4.2 4.2	0.917 0.875
B ₄ C-S8-4	812 812	854 854	43.7 43.7	4.2 4.2	0.903 1.12
B ₄ C-S8-5	900 900	905 905	46.9 46.9	3.8 3.8	1.04 1.13
B ₄ C-S8-6	900 1200	905 1205	46.9 46.9	3.8 3.8	1.01 1.06

TABLE A-10



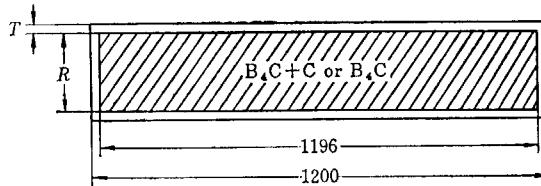
Name ; B₄C rod B₄C-H
Neutron absorber ; B₄C
Cladding ; Al

Name	H ₁ (mm)	H ₂ (mm)	R (mm)	T (mm)	B ₄ C density (g/cm ³)
B ₄ C-H-1	812	854	43.7	4.2	1.00
B ₄ C-H-2	812	854	43.7	4.2	0.878
B ₄ C-H-3	812	854	43.7	4.2	1.05
B ₄ C-H-4	812	854	43.7	4.2	0.913
B ₄ C-H-5	812	854	43.7	4.2	1.00
B ₄ C-H-6	812	854	43.7	4.2	0.926

6. 灰色制御棒

6.1 直径の異なる灰色制御棒

TABLE A-11



Name ; Gray rod with various diameter GRAY-R
Neutron absorber ; B₄C
Cladding ; Al

Name	R (mm)	T (mm)	B ₄ C density (g/cm ³)
GRAY-R-1	4	1	0.0047
GRAY-R-2	8	1	0.0056
GRAY-R-3	12	1	0.0054
GRAY-R-4	18	1	0.0055
GRAY-R-5	26	1	0.0055
GRAY-R-6	32.2	1.4	0.0056
GRAY-R-7	37.2	1.4	0.0056
GRAY-R-8	47.2	1.4	0.0055
GRAY-R-9	4	1	0.053
GRAY-R-10	8	1	0.055
GRAY-R-11	12	1	0.057
GRAY-R-12	18	1	0.056
GRAY-R-13	26	1	0.056
GRAY-R-14	32.2	1.4	0.054
GRAY-R-15	37.2	1.4	0.056
GRAY-R-16	47.2	1.4	0.056
GRAY-R-17	4	1	1.42
GRAY-R-18	8	1	1.40
GRAY-R-19	12	1	1.40
GRAY-R-20	18	1	1.40
GRAY-R-21	26	1	1.40
GRAY-R-22	32.2	1.4	1.40
GRAY-R-23	37.2	1.4	1.40
GRAY-R-24	47.2	1.4	1.23