

JAERI - M
85-032

軽水減速低濃縮ウラン格子中における
棒状吸収体の反応度効果の測定および解析

1985年3月

村上清信・三好慶典・広瀬秀幸・須崎武則

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 総高野高速印刷

軽水減速低濃縮ウラン格子中における
棒状吸収体の反応度効果の測定および解析

日本原子力研究所東海研究所安全工学部
村上 清信・三好 慶典・広瀬 秀幸・須崎 武則

(1985年1月31日受理)

2.6 w/o UO_2 燃料棒-水減速材格子 (水対燃料体積比 1.83) の円柱炉心を構成し、炉心中央部に挿入した棒状および円筒状吸収体の反応度効果、ならびに棒状吸収体間の距離が変化した場合の中性子相互干渉が反応度に与える効果を実験的に求めた。また、モンテカルロコード (KENO-IV, MULTI-KENO) により臨界体系の中性子実効増倍係数 (K_{eff}) および吸収体反応度効果を計算し、実験値と比較した。

炉心中央に吸収体を挿入した31ケースの臨界実験体系および2本の棒状吸収体を用いた29ケースの相互干渉効果に関する臨界実験体系 (K_{eff} の測定値は何れも 1.000) に対して、計算結果は、それぞれ 0.983~0.999 ならびに 0.978~0.999 であった。

棒状吸収体の反応度値の計算値は、実験値と比較して標準偏差の2倍以内で一致した。

JAERI-M 85-032

Measurements and Analyses on Reactivity Effects of Absorber Rods
in a Light-water Moderated UO₂ Lattices

Kiyonobu MURAKAMI, Yoshinori MIYOSHI,
Hedeyuki HIROSE and Takenori SUZAKI

Department of Nuclear Safety Research,
Tokai Research Establishment, JAERI
(Received January 31, 1985)

Reactivity effects and reactivity-interference effects of absorber rods were measured with a cylindrical core aiming to obtain bench-marks for verification of the calculational methods. The core consisted of 2.6w/o enriched UO₂ fuel rods lattice of which water-to-fuel volume ratio was 1.83. In the experiment, the critical water levels were measured changing neutron absorber content of absorber rods and the distance between two absorber rods in the core center. Monte Carlo codes KENO-IV and MULTI-KENO were used to calculate reactivity worthes of absorber rods. The calculational results of effective multiplication factors ranged from 0.978 to 0.999 for the 60 cases of critical cores with inserted absorber rods. The calculational results of absorber worthes agreed to the experimental results within twice of the standard deviation accompanied with the Monte Carlo calculation.

Keywords: Reactivity Effect, Absorber Rod, Light-water Lattice,
Critical Experiment, Low Enriched Fuel, Reactivity-
Interference Effect, Reactivity Worths, Fuel Rod,

目 次

1. 序	1
2. 実 験	1
2.1 実験装置	1
2.1.1 軽水臨界実験装置	1
2.1.2 燃料棒	2
2.1.3 中性子吸収体	2
2.1.4 ガイドパイプ	2
2.1.5 炉心の構成	2
2.2 測定方法及び結果	2
2.2.1 測定方法	2
2.2.2 吸収体の反応度価値	3
2.2.3 吸収体反応度価値の位置依存性および相互干渉効果	3
3. 解 析	4
3.1 計算方法	4
3.2 計算結果	5
3.2.1 体系の実効増倍係数	5
3.2.2 吸収体の反応度効果	5
4. 結 論	6
謝 辞	7
参考文献	7

Content

1.	Introduction	1
2.	Experiment	1
2.1	Experimental facility	1
2.1.1	Light-water moderated critical assembly	1
2.1.2	Fuel rods	2
2.1.3	Neutron absorbers	2
2.1.4	Guide pipes	2
2.1.5	Core construction	2
2.2	Measurements and results	2
2.2.1	Measurement method	2
2.2.2	Reactivity worthes of absorbers	3
2.2.3	Space dependency for absorber worthes and interference between two absorber rods	3
3.	Analyses	4
3.1	Calculational method	4
3.2	Results	5
3.2.1	Effective multiplication factors of critical cores	5
3.2.2	Reactivity worthes of absorber rods	5
4.	Conculusion	6
	Ackowlegements	7
	Reference	7

1. 序

核燃料サイクルの諸施設における臨界安全性に関する問題に対処するため、臨界安全性実験施設（CSEF）を用いた一連の実験が計画されている。この実験施設においては、溶液状の燃料を用いた臨界実験を行う予定であり、現在臨界実験装置の安全棒や制御棒に関する設計仕様条件を JACS システムに整備されているモンテカルロコード（KENO-N）⁽¹⁾を用いて検討している。

モンテカルロコードによる制御棒の反応度値は、挿入状態と引抜き状態の2つの中性子実効増倍係数（ K_{eff} ）の差として求められる。このような評価においては、次の2つの問題点を明らかにする必要はある。

- ① 制御棒のような局所的に強い中性子吸収の存在する体系に関する K_{eff} の計算精度。
- ② 吸収体の反応度値が小さくなると、当然、 σ の小さい高精度の計算が要求される。求めようとする反応度値に対して必要な σ はどの程度か。あるいは、ある σ に対して得られた反応度値の信頼度はどのように表現されるか。

制御棒設計のための計算手法としてモンテカルロ法を選択した理由は、②の点に関する評価は明らかではないが①の点でモンテカルロ法が優れていると判断したためである。

ベンチマーク解析により主として①に関するモンテカルロ計算コードの精度評価を行うために、軽水臨界実験装置（TCA）を用いて棒状吸収体の反応度効果を実験的に求めた。実験体系は濃縮度 2.6 w/o UO_2 燃料棒の格子配列からなる円柱状炉心で、その炉心中央部の燃料棒4本を除いてテストトラップを設け、この中に強度の異なる円筒状及び棒状吸収体を挿入して臨界水位を測定した。これらの吸収体を含む体系の臨界水位と、吸収体を引抜いた基準の体系における臨界水位との差を以前の実験から得られている微分水位反応度⁽²⁾を用いて反応度に換算した。さらに、同一仕様の吸収棒2本を用いて、吸収棒間の距離を変えた場合の中性子相互干渉が反応度に与える効果も測定した。これらの結果とモンテカルロコードによる計算値とを比較検討し、計算コードの精度評価を行った。

2. 実 験

2.1 実験装置

2.1.1 軽水臨界実験装置（TCA）

TCAは軽水減速低濃縮 UO_2 および PuO_2-UO_2 燃料棒格子の炉物理特性を測定するための臨界実験装置である。炉心は上部開放型の直径 1.8 m、高さ 2.1 m の円筒状ステンレススチール製タンクの中央部に構成される。燃料棒は上方から挿入され、上下2枚の燃料格子板によって固定される。この格子板は実験の種類によって交換することが出来る構造になっており、単純な炉心から複雑な動力炉の模擬炉心まで広範囲な実験が行えるように設計されている。反応度の制御は炉心タンクの水位を制御することによって行われる。

1. 序

核燃料サイクルの諸施設における臨界安全性に関する問題に対処するため、臨界安全性実験施設（CSEF）を用いた一連の実験が計画されている。この実験施設においては、溶液状の燃料を用いた臨界実験を行う予定であり、現在臨界実験装置の安全棒や制御棒に関する設計仕様条件を JACS システムに整備されているモンテカルロコード（KENO-N）⁽¹⁾を用いて検討している。

モンテカルロコードによる制御棒の反応度値は、挿入状態と引抜き状態の2つの中性子実効増倍係数（ K_{eff} ）の差として求められる。このような評価においては、次の2つの問題点を明らかにする必要があるのである。

- ① 制御棒のような局所的に強い中性子吸収の存在する体系に関する K_{eff} の計算精度。
- ② 吸収体の反応度値が小さくなると、当然、 σ の小さい高精度の計算が要求される。求めようとする反応度値に対して必要な σ はどの程度か。あるいは、ある σ に対して得られた反応度値の信頼度はどのように表現されるか。

制御棒設計のための計算手法としてモンテカルロ法を選択した理由は、②の点に関する評価は明らかではないが①の点でモンテカルロ法が優れていると判断したためである。

ベンチマーク解析により主として①に関するモンテカルロ計算コードの精度評価を行うために、軽水臨界実験装置（TCA）を用いて棒状吸収体の反応度効果を実験的に求めた。実験体系は濃縮度 2.6 w/o UO_2 燃料棒の格子配列からなる円柱状炉心で、その炉心中央部の燃料棒4本を除いてテストトラップを設け、この中に強度の異なる円筒状及び棒状吸収体を挿入して臨界水位を測定した。これらの吸収体を含む体系の臨界水位と、吸収体を引抜いた基準の体系における臨界水位との差を以前の実験から得られている微分水位反応度⁽²⁾を用いて反応度に換算した。さらに、同一仕様の吸収棒2本を用いて、吸収棒間の距離を変えた場合の中性子相互干渉が反応度に与える効果も測定した。これらの結果とモンテカルロコードによる計算値とを比較検討し、計算コードの精度評価を行った。

2. 実 験

2.1 実験装置

2.1.1 軽水臨界実験装置（TCA）

TCAは軽水減速低濃縮 UO_2 および PuO_2-UO_2 燃料棒格子の炉物理特性を測定するための臨界実験装置である。炉心は上部開放型の直径 1.8 m、高さ 2.1 m の円筒状ステンレススチール製タンクの中央部に構成される。燃料棒は上方から挿入され、上下2枚の燃料格子板によって固定される。この格子板は実験の種類によって交換することが出来る構造になっており、単純な炉心から複雑な動力炉の模擬炉心まで広範囲な実験が行えるように設計されている。反応度の制御は炉心タンクの水位を制御することによって行われる。

2.1.2 燃料棒

実験に使用した燃料棒は、 ^{235}U 濃縮度 2.6 w/o，ペレット直径 12.5 mm，ペレット密度 10.4 g/cm^3 ，燃料有効部長 144.5 mm で、被覆管はアルミニウムである。燃料棒の詳細を Fig. 1 に示す。

2.1.3 中性子吸収体

この実験に使用した中性子吸収体は、円筒状カドミウム吸収体 3 種類、棒状ボロンカーバイド吸収体 2 種類である。カドミウム円筒吸収体は、アルミニウムのパイプおよび棒の外側に肉厚 0.5 mm のカドミウム板を巻き付けたものであり、外径が 15.33，21.32，29.31 mm (C-1, C-2, C-3 吸収体) である。ボロンカーバイド吸収棒は、外径 14 mm，肉厚 0.5 mm のアルミニウムパイプ、および外径 34 mm，肉厚 3.35 mm のステンレススチールパイプの中にボロンカーバイドの粉末を振動充填したもの (B-1, B-2 吸収体) である。吸収体の詳細を Fig. 2 に示す。以下、カドミウム円筒吸収体、ボロンカーバイド吸収棒のことを Cd 円筒、B₄C 棒と呼ぶ。

2.1.4 ガイドパイプ

吸収体を実際の臨界集合体等における安全棒あるいは制御棒として用いる場合、吸収体の外側にステンレス製の案内管が存在することが多い。この案内管による吸収体の反応度値の変化特性を測定するため、アルミニウム製の肉厚 3.0 mm，内径 32 mm のパイプ (ガイドパイプ A) およびステンレス製の肉厚 2.9 mm，内径 36.7 mm のパイプ (ガイドパイプ B) を用いた。

これらのガイドパイプは、内部に C-1~C-3 および B-1, B-2 吸収体を挿入した状態で、空隙部をボイドあるいは水に置換可能なように、下端がゴム製プラグで封じられている。ガイドパイプの詳細を Fig. 2 に示す。

2.1.5 炉心の構成

炉心タンクの中央部に、燃料棒格子間隔 19.56 mm (水対燃料体積比: 1.83) の燃料格子板を用い、平断面が円形の炉心を構成した。吸収体とガイドパイプを各種組み合せたものの反応度値を測定する場合は、炉心中央の燃料棒 4 本を抜いて作ったテストトラップ (以下 4 トラップという) の中に挿入して臨界水位の測定を行った。棒状吸収体の相互干渉効果等を測定する場合は、炉心中心に対して対称な位置の 2 本の燃料棒を 2 本の B-1 吸収体と置き換え臨界水位の変化を測定した。吸収体反応度測定体系の平断面を Fig. 3 に、相互干渉実験時の棒状吸収体位置を Fig. 4 に、炉心の垂直断面を Fig. 5 に示す。実験を行った炉心の臨界水位を、燃料有効部上端および棒状吸収体上端より低い範囲に保つために、吸収体の種類に応じて平断面寸法の異なる 3 種類の炉心を用いた。したがって、炉心上部は水の無いドライ格子、下部と水平方向がそれぞれ約 30 cm および 65 cm 以上の水反射体という体系である。実験中における炉水温度の変化は、9.9~16.5°C の範囲であった。

2.2 測定方法および結果

2.2.1 測定方法

臨界水位は、原子炉出力が数ワットで一定レベルを保つ様に炉心タンク内水位の調整を行い、その

時の水位を最小目盛が0.2 mmのサーボ・マンメーターにより測定した。吸収体の種類や、棒状吸収体間の距離を変えた場合の基準炉心に対する臨界水位の変化を、以下に示す式を用いて反応度に換算した。

$$\rho = -\frac{C}{2} \cdot \left\{ \left(\frac{1}{H_0 + \lambda} \right)^2 - \left(\frac{1}{H_1 + \lambda} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで ρ : 反応度 (cent)

H_0 : 基準炉心の臨界水位 (cm)

H_1 : 棒状吸収体の種類や、棒状吸収体間の距離を変えた場合の臨界水位 (cm)

λ : 垂直方向の反射体節約 (cm)

C : 比例定数 (cent・cm²)

比例定数および垂直方向の反射体節約は、以前に行った水位と炉周期および出力分布の測定結果から、⁽²⁾
(7.59 ± 0.07) × 10⁶ cent・cm² および 1.22 ± 0.3 cm と得られている。

2.2.2 吸収体の反応度価値

炉心中央部の4トラップ中に挿入した各種の吸収体の反応度価値測定の一覧を Table 1 に示す。同表の Guide pipe 欄中に water もしくは void とあるのは、案内管の内部が水もしくは空気になっていることを表わしている。また、Absorber 欄中に water もしくは void とあるのは、Cd 円筒の内部が水もしくは空気になっていることを表わしており、記載のないものは、Guide pipe の表示と同じである。両欄とも空欄は、ガイドパイプおよび吸収体の無い体系を示しており、基準炉心以外は全て4トラップ付きである。基準炉心としては、全炉心領域が燃料棒で満たされた体系を用いた。Note 欄に Inversion とあるのは、棒状吸収体の上下方向を反対にして測定したものである。これは、B₄C 棒を製作する時に、パイプに振動を与え、上部からボロンカーバイドを充填しているので、ボロンカーバイドの密度が軸方向に様かどうかを調べることを目的としている。測定結果によれば有意な反応度差は認められないので、ほぼ一様に充填されていると考えられる。

炉心Bにおける各種ガイドパイプ中での吸収体の正味の反応度価値を Table 2 に示す。すなわち、ガイドパイプ中に吸収体が無い場合に対して有る場合に炉心に加わる反応度である。このテーブルから、ガイドパイプがステンレススチールの場合、アルミニウムの場合に比べ、吸収体の負反応度価値は、30～40%低下することがわかる。また、Cd 円筒の反応度は、円筒内部の水の有無によって、C-1の場合で12%、C-3の場合で28～49%と大きく変化し、内部の水は負反応度を増加させている。吸収体とガイドパイプ間がボイドの場合と水がある場合とでは、反応度価値に大きな差はない。

2.2.3 吸収体反応度価値の位置依存性および相互干渉効果

炉心中心に対して対称な位置にある燃料棒2本を、B₄C 棒 (B-1 吸収体) に置き換えて、その位置を炉心中央部から外側に変えた一連の実験結果を Table 3 に示す。B₄C 棒の炉心中心からの距離と反応度の関係を Fig. 6 に示す。この図において、炉心中心部では、AC 方向とBD 方向の値に差があるが、これはBD線が炉心中心軸より半ピッチずれているため、各吸収棒の炉心中心からの

距離に比べて、吸収棒間距離が短いことによる。次に、 B_4C 棒間の距離をパラメータとして $\rho_{ar_1, br_2} / (\rho_{ar_1} + \rho_{br_2})$ を求めこれを Fig. 7 に示す。ここで、 ρ_{ar_1, br_2} は B_4C 棒 $B-1a$ および $B-1b$ の 2 本が、炉心の r_1 および r_2 の位置に挿入されている場合の反応度値であり、 ρ_{ar_1} は B_4C 棒 $B-1a$ のみが炉心 r_1 の位置に挿入されている場合、 ρ_{br_2} は B_4C 棒 $B-1b$ のみが炉心 r_2 の位置に挿入されている場合の反応度値である。同一位置における ρ_a と ρ_b の差は 0.5% 以下であった。この図から、2 本の B_4C 棒が約 12 cm 以上離れた場合、両者の間に相互干渉効果は認められない。

3. 解 析

2 章で述べた実験体系に対して、モンテカルロコードによるベンチマーク計算を実施し、体系の実効増倍係数および吸収体の反応度値に関する計算精度の評価を行った。

3.1 計算方法

使用した計算コードは、現在 CSEF の制御棒・安全棒の反応度値解析に用いている原研の JACS システムに内蔵されているモンテカルロコード ($KENO-M$ ³⁾ 及び $MULTI-KENO$ ⁴⁾) である。

多群定数ライブラリーとしては、原研で整備した MGCL-137 群のマスターライブラリーを用いた。MGCL の群定数は遮蔽因子 $f(\sigma_0^j, T)$ と無限希釈断面積 σ_∞^j により表現されている。また中性子スペクトルに関しては、核分裂スペクトル、 $1/E$ スペクトル、及びマクスウェル分布から成る標準スペクトルが内蔵されている。

$KENO-M$ 及び $MULTI-KENO$ コードで用いる巨視的実効断面積 Σ_{eff} は、処理コード MAIL により計算体系の各領域毎に入力された原子個数密度と幾何形状から計算される。

今回の解析では実験体系のうち、炉心中央に 4 トラップを持ち、中心に各種のガイドパイプ付吸収体の挿入された体系に対しては、 $MULTI-KENO$ コードを、また 2 本の棒状吸収体間の相互干渉効果を測定した体系に対しては、 $KENO-M$ コードを各々使用した。

Fig. 8 に JACS コードシステムの計算フローを示す。モンテカルロコードの計算条件は以下の通りである。

① エネルギー群数	137
② 一世代当りの発生中性子数	300
③ 計算世代数	103
④ スキップ世代数	3
⑤ 初期中性子発生分布	平坦
⑥ 中性子平均重み	0.5

吸収体の反応度効果は、一般に全引抜時と全挿入時の体系の反応度差と考えられる。ここではモンテカルロコードによる体系の実効増倍係数 K_{eff} の計算値を用いて、次式により挿入された棒状吸収体の反応度効果を評価した。

距離に比べて、吸収棒間距離が短いことによる。次に、B₄C棒間の距離をパラメータとして $\rho_{ar_1, br_2} / (\rho_{ar_1} + \rho_{br_2})$ を求めこれを Fig. 7 に示す。ここで、 ρ_{ar_1} , ρ_{br_2} は B₄C棒 B-1 a および B-1 b の2本が、炉心の r_1 および r_2 の位置に挿入されている場合の反応度値であり、 ρ_{ar_1} は B₄C棒 B-1 a のみが炉心 r_1 の位置に挿入されている場合、 ρ_{br_2} は B₄C棒 B-1 b のみが炉心 r_2 の位置に挿入されている場合の反応度値である。同一位置における ρ_a と ρ_b の差は0.5%以下であった。この図から、2本のB₄C棒が約12 cm以上離れた場合、両者の間に相互干渉効果は認められない。

3. 解 析

2章で述べた実験体系に対して、モンテカルロコードによるベンチマーク計算を実施し、体系の実効増倍係数および吸収体の反応度値に関する計算精度の評価を行った。

3.1 計算方法

使用した計算コードは、現在 CSEF の制御棒・安全棒の反応度値解析に用いている原研の JACS システムに内蔵されているモンテカルロコード (KENO-N³⁾ 及び MULTI-KENO⁴⁾ である。

多群定数ライブラリーとしては、原研で整備した MGCL-137 群のマスターライブラリーを用いた。MGCL の群定数は遮蔽因子 $f(\sigma_0^J, T)$ と無限希釈断面積 σ_∞^J により表現されている。また中性子スペクトルに関しては、核分裂スペクトル、1/E スペクトル、及びマクスウェル分布から成る標準スペクトルが内蔵されている。

KENO-N 及び MULTI-KENO コードで用いる巨視的実効断面積 Σ_{eff} は、処理コード MAIL により計算体系の各領域毎に入力された原子個数密度と幾何形状から計算される。

今回の解析では実験体系のうち、炉心中央に4トラップを持ち、中心に各種のガイドパイプ付吸収体の挿入された体系に対しては、MULTI-KENO コードを、また2本の棒状吸収体間の相互干渉効果を測定した体系に対しては、KENO-N コードを各々使用した。

Fig. 8 に JACS コードシステムの計算フローを示す。モンテカルロコードの計算条件は以下の通りである。

① エネルギー群数	137
② 一世代当りの発生中性子数	300
③ 計算世代数	103
④ スキップ世代数	3
⑤ 初期中性子発生分布	平担
⑥ 中性子平均重み	0.5

吸収体の反応度効果は、一般に全引抜時と全挿入時の体系の反応度差と考えられる。ここではモンテカルロコードによる体系の実効増倍係数 K_{eff} の計算値を用いて、次式により挿入された棒状吸収体の反応度効果を評価した。

$$\rho (\% \Delta K / K) = \{ (K_1 - K_0) \pm \sqrt{\sigma_{K_1}^2 + \sigma_{K_0}^2} \} \times 100$$

ここで K_0 : 吸収体等 (ガイドパイプ付の場合はガイドパイプを含む) が挿入された臨界体系
に対する K_{eff} 評価値

K_1 : 上記の体系において吸収体等が全引抜きされた体系に対する K_{eff} 計算値

σ_{K_0} : K_0 の 1 標準偏差

σ_{K_1} : K_1 の 1 標準偏差

3.2 計算結果

3.2.1 体系の実効増倍係数

4トラップ中に各種の吸収体とガイドパイプが挿入された体系に対する K_{eff} の計算値を Table 4 及び Fig. 9 に示す。Run 7304 は、吸収体およびガイドパイプの無い 4トラップのみを有する炉心である。計算を行ったのは Cd 円筒および B_4C 棒について各々 17 ケース及び 7 ケースである。

臨界体系に対する MULTI-KENO コードによる K_{eff} の計算値は 0.9807 ~ 0.9962 の範囲であり、 K_{eff} を 1.0 より大きく評価したケースは無かった。また、吸収体の種類や、吸収体近傍の減速条件の相異による系統的な変化は認められなかった。

基準炉心に、1本または2本の B_4C 棒 ($B-1$ 吸収体) が挿入された体系に対するベンチマーク計算結果を Table 5 及び Fig. 10 に示す。計算の対象としたのは、基準炉心 (Run 7366) , 2本の B_4C 棒が BD 方向に挿入された 13 ケース (Run 7353 ~ Run 7365) , AC 方向に挿入された 12 ケース (Run 7367 ~ Run 7378) , および B_4C 棒が 1本の場合 (3 ケース) である。

吸収体等のある臨界体系に対して、KENO-N コードによる K_{eff} の計算値は、0.9870 ~ 0.9959 の範囲に分布し、基準炉心の K_{eff} は 0.9937 であった。

3.2.2 吸収体の反応度効果

表 4 より、4トラップ中に挿入された吸収体等 (ガイドパイプを含む) の反応度効果を 3.1 の(1)式を用いて計算した。結果を Table 6 に示す。ここでは、表 4 のベンチマーク計算を行ったケースのうち、反応度効果の実験値が 1.1% $\Delta K / K$ 以上のものを対象とした。実験により得られたドル単位の反応度を % 単位に換算するに当って、実効遅発中性子発生割合 0.7478%²⁾ を用いた。吸収体の種類で分類すると、Cd 円筒については C-1, C-2, C-3 に関して各々 3, 4, 7 ケース、また B_4C 棒については 7 ケースである。

以上の 23 ケースのうち、10 ケースについての反応度効果は実験値に対して計算値が大き目になった。しかし、モンテカルロコードの統計誤差を考慮すると、実験値と計算値の差が 1 標準偏差 (σ) を超えたのはわずかに 2 ケースで、残りは全て 1 σ 以内で一致した。

棒状吸収体の相互干渉実験に用いた炉心体系における、 B_4C 棒の反応度効果の計算値を Table 7 に示す。計算ケースは、表 6 と同様、反応度効果の実験値が 1.1% $\Delta K / K$ を超えるものを対象とし、AC, BD 方向合わせて 17 ケースである。

表7から分かるように、実験値と計算値を比較すると、17ケース中14ケースが 1σ の範囲で、また残りの3ケースが 2σ の範囲で一致した。棒状吸収体が1本の場合(3ケース)は、 1σ 以内で一致し、最大誤差は $0.61\% \Delta K/K$ であった。

4. 結 論

今回の実験結果から、下記の結論を得た。

- (1) 燃料棒と同じ太さのボロンカーバイド充填アルミ被覆吸収棒の、等価直径43.7 cmの円柱炉心中心における負反応度値は、4トラップ中の水との置換において2.0\$, 中の燃料棒との置換において1.9\$であった。
- (2) CSEFで使用予定の安全棒に近い外径34 mmのボロンカーバイド充填ステンレススチール被覆吸収棒は、同上体系において4トラップ中の水と置換する場合3.6\$, 中空ステンレスガイド中に挿入する場合2.4\$の負反応度値を持った。
- (3) 中空カドミウム円筒の場合、中空部分に水が入ると負反応度値は、12~49%増加した。
- (4) (1)と同一の棒状吸収体が炉心外端から約7 cm以上離れた水反射体中に挿入された場合、その反応度効果は無視出来る。
- (5) (1)と同一の棒状吸収体の相互干渉効果による負反応度値の低下は、2本の棒状吸収体の軸間距離が1格子ピッチの場合約18%, 2格子ピッチの場合8%と小さくなり、約6格子ピッチ以上離れた場合は無視出来る。

解析結果の主要なものを以下に示す。

- (1) 臨界体系に対するベンチマーク計算では、 K_{eff} の誤差は4トラップ付き炉心の場合 $-1.9\% \sim -0.0\%$ 、基準炉心で $-2.3\% \sim -0.0\%$ の範囲であり、吸収体の種類による系統的な差は認められなかった。
- (2) 4トラップ中における吸収体等の水との置換にともなう反応度効果について実験値と解析値を比較すると、カドミウム円筒に関しては $-\sigma \sim +2\sigma$ 、ボロンカーバイド吸収棒に対しては $-\sigma \sim +\sigma$ の範囲で一致した。
- (3) 基準炉心中の燃料棒を1本あるいは2本の棒状吸収体で置換した場合の吸収体反応度値に関しては、解析値は $-\sigma \sim +2\sigma$ の範囲で実験値と一致した。

表7から分かるように、実験値と計算値を比較すると、17ケース中14ケースが 1σ の範囲で、また残りの3ケースが 2σ の範囲で一致した。棒状吸収体が1本の場合(3ケース)は、 1σ 以内で一致し、最大誤差は $0.61\% \Delta K/K$ であった。

4. 結 論

今回の実験結果から、下記の結論を得た。

- (1) 燃料棒と同じ太さのボロンカーバイド充填アルミ被覆吸収棒の、等価直径43.7 cmの円柱炉心中心における負反応度値は、4トラップ中の水との置換において2.0\$, 中の燃料棒との置換において1.9\$であった。
- (2) CSEFで使用予定の安全棒に近い外径34 mmのボロンカーバイド充填ステンレススチール被覆吸収棒は、同上体系において4トラップ中の水と置換する場合3.6\$, 中空ステンレスガイド中に挿入する場合2.4\$の負反応度値を持った。
- (3) 中空カドミウム円筒の場合、中空部分に水が入ると負反応度値は、12~49%増加した。
- (4) (1)と同一の棒状吸収体が炉心外端から約7 cm以上離れた水反射体中に挿入された場合、その反応度効果は無視出来る。
- (5) (1)と同一の棒状吸収体の相互干渉効果による負反応度値の低下は、2本の棒状吸収体の軸間距離が1格子ピッチの場合約18%, 2格子ピッチの場合8%と小さくなり、約6格子ピッチ以上離れた場合は無視出来る。

解析結果の主要なものを以下に示す。

- (1) 臨界体系に対するベンチマーク計算では、 K_{eff} の誤差は4トラップ付き炉心の場合 $-1.9\% \sim -0.0\%$ 、基準炉心で $-2.3\% \sim -0.0\%$ の範囲であり、吸収体の種類による系統的な差は認められなかった。
- (2) 4トラップ中における吸収体等の水との置換にともなう反応度効果について実験値と解析値を比較すると、カドミウム円筒に関しては $-\sigma \sim +2\sigma$ 、ボロンカーバイド吸収棒に対しては $-\sigma \sim +\sigma$ の範囲で一致した。
- (3) 基準炉心中の燃料棒を1本あるいは2本の棒状吸収体で置換した場合の吸収体反応度値に関しては、解析値は $-\sigma \sim +2\sigma$ の範囲で実験値と一致した。

謝 辞

この実験の計画および実施にあたり、有意義な御指導、御鞭達をいただきました臨界安全研究室室長小林岩夫氏、およびTCAの運転にあたり、種々御協力下さいました新田一雄氏に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) J.Katakura et al. : Benchmark calculation with the nuclear criticality safety evaluation code system JACS, JAERI-M 9856(1981).
- (2) H.Tsuruta et al. : Critical sizes on light-water moderated UO_2 and PuO_2-UO_2 lattices, JAERI-1254(1978).
- (3) Y.Naito et al. : KENO-IV code benchmark calculation(6), 9201(1980).
- (4) Y.Naito et al. : MULTI-KENO a montecarlo code for criticality safety analysis, JAERI-M 83-049(1983).

謝 辞

この実験の計画および実施にあたり、有意義な御指導、御鞭達をいただきました臨界安全研究室室長小林岩夫氏、およびTCAの運転にあたり、種々御協力下さいました新田一雄氏に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) J.Katakura et al. : Benchmark calculation with the nuclear criticality safety evaluation code system JACS, JAERI-M 9856(1981).
- (2) H.Tsuruta et al. : Critical sizes on light-water moderated UO_2 and PuO_2-UO_2 lattices, JAERI-1254(1978).
- (3) Y.Naito et al. : KENO-IV code benchmark calculation(6), 9201(1980).
- (4) Y.Naito et al. : MULTI-KENO a montecarlo code for criticality safety analysis, JAERI-M 83-049(1983).

Table 1 List of measurements of reactivity worth for an absorber rod with and without a guide pipe

Run no.	Date	Core	Guide pipe	Absorber	Critical water level (mm)	Reactivity (ρ)	Note	
7295	Feb. 28, '84	A			726.6	0	Standard core A With test trap	
7297	Mar. 6, '84	A			756.4	- 35.2		
7298	Mar. 6, '84	A	A-water		763.4	- 43.1		
7299	Mar. 6, '84	A	A-void		795.3	- 76.0		
7301	Mar. 8, '84	A	B-void		920.3	-177.8		
7302	Mar. 8, '84	A	B-water		931.3	-185.0		
7304	Mar. 8, '84	B			510.6	- 31.7	With test trap	
7305	Mar. 8, '84	B	A-void	C-3	618.5	-288.1		
7306	Mar. 14, '84	B	A-void		524.5	- 72.0	Without Cd pipe	
7307	Mar. 14, '84	B	A-water		512.95	- 38.7		
7308	Mar. 14, '84	B	B-void		557.85	-159.0		
7310	Mar. 14, '84	B	B-water		558.05	-157.5		
7311	Mar. 14, '84	B	A-void	C-2	598.95	-250.0		
7313	Mar. 15, '84	B	B-void	C-2	609.55	-271.0		
7314	Mar. 15, '84	B	B-water	C-2	609.75	-271.4		
7315	Mar. 15, '84	B	A-water	C-2	587.1	-225.4		
7316	Mar. 15, '84	B	B-void	C-3	624.5	-299.2		
7318	Mar. 15, '84	B	B-water	C-3	659.45	-358.8		
7319	Mar. 15, '84	B	B-water	C-3 void	621.4	-293.5		
7320	Mar. 15, '84	B	B-water	C-3 void	555.7	-153.8		
7321	Mar. 23, '84	B	A-void	C-1	582.9	-216.4		
7322	Mar. 23, '84	B	B-void	C-1	598.35	-248.8		
7323	Mar. 23, '84	B	B-water	C-1	610.45	-272.8		
7324	Mar. 23, '84	B	A-water	C-1	578.7	-207.2		
7326	Apr. 12, '84	B			500.3	0		Standard core B
7328	Apr. 17, '84	B	A-water	C-3	646.75	-388.0		
7331	Apr. 17, '84	B	B-water	B-2	694.3	-410.7		Inversion
7332	Apr. 17, '84	B	B-water	B-2	689.05	-403.3		
7333	Apr. 17, '84	B	B-void	B-2	691.1	-406.2		
7334	Apr. 17, '84	B		B-2	682.35	-393.7		
7335	Apr. 17, '84	B		C-3	644.6	-334.4		
7336	Apr. 17, '84	B		C-3 void	608.3	-268.6		
7337	Apr. 20, '84	B	A-void	B-1b	604.9	-261.9		
7338	Apr. 20, '84	B	A-void	B-1a	606.6	-265.3		
7339	Apr. 20, '84	B	A-water	B-1a	592.15	-236.0		
7341	Apr. 20, '84	B	B-water	B-1a	624.05	-298.4		
7342	Apr. 20, '84	B	B-void	B-1a	623.35	-297.1		
7343	Apr. 20, '84	B		C-1 void	570.7	-189.3	Inversion With test trap	
7344	Apr. 20, '84	B		C-1	579.0	-207.8		
7345	Apr. 20, '84	B		B-1a	592.15	-236.0		
7346	Apr. 20, '84	B		B-1a	592.05	-235.8		
7349	Apr. 27, '84	B			511.6	- 34.7		
7350	Apr. 27, '84	B	B-void		559.35	-162.4		
7351	Apr. 27, '84	B	B-void	C-3 water	661.5	-362.0		
7387	May 11, '84	C			422.0	- 25.4	With test trap	
7388	May 11, '84	C	B-void		448.6	-116.8		
7389	May 11, '84	C		B-2	506.35	-321.4	Standard core C	
7390	May 11, '84	C			416.7	0		

Table 2 Net worth of negative reactivity of absorbers in guide pipes measured in central 4-trap of core-B

Guide pipe	Negative reactivity worth of guide pipe in test trap (Ø) (without absorber)	Net worth of negative reactivity of absorber (Ø)				
		C - 1	C - 2	C - 3	B - 1	B - 2
Non (water)	—	176.1 157.5*	—	302.7 236.9*	204.3	306.2
A-void	40.3	144.4	178.0	216.1	193.3	—
A-water	7.0	168.5	186.7	299.3	197.4	—
B-void	127.3	89.8	112.0	140.2 199.4**	138.1	247.2
B-water	127.8	113.3	111.9	199.3 134.0*	138.9	243.8

* : With water outside the Cd sheath, but without water inside the holder pipe

** : Without water outside the Cd sheath, but with water inside the holder pipe.

Table 3 List of measurements of reactivity worth of absorber rod depending on location in core and reactivity interference effect between two absorber rods

Run no.	Date	Absorber rod position	Absorber rod	Critical water level (mm)	Reactivity (ρ)	Note
7352	May 1, '84			501.25	0	Standard core
7353	May 1, '84	B- 1,D- 1	B-1b,B-1a	631.55	-308.9	
7354	May 1, '84	B- 1,D- 2	B-1b,B-1a	650.5	-341.3	
7355	May 1, '84	B- 2,D- 2	B-1b,B-1a	656.05	-350.3	
7356	May 1, '84	B- 2,D- 3	B-1b,B-1a	654.2	-347.3	
7357	May 1, '84	B- 3,D- 3	B-1b,B-1a	651.95	-343.7	
7358	May 1, '84	B- 4,D- 4	B-1b,B-1a	637.1	-318.6	
7359	May 1, '84	B- 5,D- 5	B-1b,B-1a	619.2	-286.4	
7360	May 1, '84	B- 6,D- 6	B-1b,B-1a	600.6	-250.3	
7361	May 1, '84	B- 7,D- 7	B-1b,B-1a	581.15	-209.6	
7362	May 2, '84	B- 8,D- 8	B-1b,B-1a	560.6	-161.8	
7363	May 2, '84	B- 9,D- 9	B-1b,B-1a	545.55	-124.6	
7364	May 2, '84	B-10,D-10	B-1b,B-1a	532.7	- 90.9	
7365	May 2, '84	B-11,D-11	B-1b,B-1a	526.25	- 73.1	
7366	May 2, '84			501.5	0	Standard core
7367	May 2, '84	A- 1,C- 1	B-1b,B-1a	649.35	-338.6	
7368	May 2, '84	A- 1,C- 2	B-1b,B-1a	657.8	-352.3	
7369	May 2, '84	A- 2,C- 2	B-1b,B-1a	656.8	-350.7	
7370	May 2, '84	A- 3,C- 3	B-1b,B-1a	639.95	-322.7	
7371	May 2, '84	A- 4,C- 4	B-1b,B-1a	611.0	-270.0	
7372	May 2, '84	A- 5,C- 5	B-1b,B-1a	584.0	-214.9	
7373	May 2, '84	A- 6,C- 6	B-1b,B-1a	556.9	-152.9	
7374	May 2, '84	A- 7,C- 7	B-1b,B-1a	537.3	-103.2	
7375	May 8, '84	A- 8,C- 8	B-1b,B-1a	526.0	- 70.7	
7376	May 8, '84	A- 9,C- 9	B-1b,B-1a	511.0	- 27.4	
7377	May 8, '84	A-10,C-10	B-1b,B-1a	504.35	- 7.1	
7378	May 8, '84	A-11,C-11	B-1b,B-1a	502.4	- 1.1	
7379	May 8, '84			502.05	0	Standard core
7380	May 8, '84	B-12,D-12	B-1b,B-1a	515.75	- 41.4	
7381	May 8, '84	B-13,D-13	B-1b,B-1a	508.25	- 19.1	
7382	May 8, '84	B-14,D-14	B-1b,B-1a	504.25	- 6.8	
7383	May 8, '84	C- 1	B-1a	572.5	-187.8	
7384	May 8, '84	C- 1	B-1b	572.05	-186.8	
7385	May 8, '84	C- 2	B-1b	568.5	-178.7	
7386	May 8, '84	C- 3	B-1b	560.1	-158.9	

Table 4 Effective neutron multiplication factors of 4-trap cores

Run no.	Guide pipe	Absorber	Effective multiplication factor K_{eff}		Core height (mm) *
			With absorber and guide pipe	Without absorber	
7304			0.98355±0.00487		510.6
7305	A-void	C-3	0.99893±0.00396	1.00698±0.00441	618.5
7306	A-void		0.98631±0.00455	0.98027±0.00397	524.5
7307	A-water		0.99358±0.00410	0.98507±0.00469	512.95
7308	B-void		0.98457±0.00447	1.00233±0.00417	557.85
7310	B-water		0.98843±0.00410	0.99948±0.00389	558.05
7311	A-void	C-2	0.98920±0.00424	1.00983±0.00409	598.95
7313	B-void	C-2	0.98614±0.00453	1.01324±0.00405	609.55
7314	B-water	C-2	0.98215±0.00393	1.00315±0.00478	609.75
7315	A-water	C-2	0.98768±0.00465	1.00041±0.00437	587.1
7316	B-void	C-3	0.99169±0.00440	1.01296±0.00399	624.5
7318	B-water	C-3	0.98783±0.00431	1.01287±0.00426	659.45
7319	B-water	C-3 void	0.98616±0.00416	1.01548±0.00432	621.4
7321	A-void	C-1	0.98805±0.00458	1.00623±0.00448	582.9
7322	B-void	C-1	0.99193±0.00430	1.01293±0.00426	598.35
7323	B-water	C-1	0.99107±0.00415	1.01017±0.00414	610.45
7328	A-water	C-3	0.99139±0.00422	1.01489±0.00400	646.75
7333	B-void	B-2	0.98461±0.00493	1.02779±0.00454	691.1
7334		B-2	0.98901±0.00431	1.01782±0.00392	682.35
7335		C-3	0.98811±0.00433	1.01312±0.00411	644.6
7336		C-3 void	0.98631±0.00367	1.01165±0.00399	608.3
7337	A-void	B-1b	0.98923±0.00445	1.00926±0.00405	604.9
7339	A-water	B-1a	0.98449±0.00412	1.00116±0.00397	592.15
7341	B-water	B-1a	0.98782±0.00392	1.00516±0.00377	624.05
7342	B-void	B-1a	0.99161±0.00519	1.00745±0.00438	623.35
7343		C-1 void	0.98070±0.00519	0.99365±0.00413	570.7
7344		C-1	0.99619±0.00473	1.00064±0.00454	579.0
7345		B-1a	0.98709±0.00390	1.00116±0.00397	592.15
7359			0.98313±0.00368		
7350	B-void		0.98596±0.00450	0.99967±0.00472	559.35
7351	B-void	C-3 water	0.98642±0.00457	1.01963±0.00434	661.5

* : Water level of the core for calculation which is equal to the critical water level of the core with absorber

Table 5 Effective neutron multiplication factor of cores with B_4C absorber rods

Run no.	Absorber rod position	Effective multiplication factor K_{eff}		Core height (mm)
		With absorber	Without absorber	
7355	B- 1,D- 1	0.99303±0.00407	1.01635±0.00467	631.55
7354	B- 1,D- 2	0.99081±0.00474	1.01901±0.00403	650.50
7355	B- 2,D- 2	0.98584±0.00418	1.01867±0.00406	656.05
7356	B- 2,D- 3	0.99587±0.00416	1.02112±0.00375	654.20
7357	B- 3,D- 3	0.99399±0.00452	1.01514±0.00425	651.95
7358	B- 4,D- 4	0.98659±0.00430	1.02077±0.00429	637.10
7359	B- 5,D- 5	0.99020±0.00448	1.01173±0.00400	619.20
7360	B- 6,D- 6	0.98993±0.00416	1.00903±0.00409	600.60
7361	B- 7,D- 7	0.98822±0.00398	1.01411±0.00490	581.15
7362	B- 8,D- 8	0.98820±0.00370	1.00460±0.00443	560.60
7363	B- 9,D- 9	0.98969±0.00428	0.98917±0.00463	545.55
7364	B-10,D-10	0.99473±0.00420	0.99861±0.00417	532.70
7365	B-11,D-11	0.99233±0.00412	1.00023±0.00395	526.25
7366		0.99372±0.00417		501.50
7367	A- 1,C- 1	0.98852±0.00472	1.00976±0.00458	649.35
7368	A- 1,C- 2	0.98968±0.00413	1.01727±0.00386	657.80
7369	A- 2,C- 2	0.98871±0.00420	1.02013±0.00484	656.80
7370	A- 3,C- 3	0.99196±0.00451	1.01523±0.00394	639.95
7371	A- 4,C- 4	0.99259±0.00388	1.01431±0.00381	611.00
7372	A- 5,C- 5	0.98701±0.00389	1.00134±0.00443	584.00
7373	A- 6,C- 6	0.98143±0.00405	1.00126±0.00439	556.90
7374	A- 7,C- 7	0.99212±0.00387	0.99221±0.00395	537.30
7375	A- 8,C- 8	0.99912±0.00441	0.99166±0.00430	526.00
7376	A- 9,C- 9	0.98128±0.00403	0.99101±0.00449	511.00
7377	A-10,C-10	0.97826±0.00432	0.98837±0.00469	504.35
7378	A-11,C-11	0.98496±0.00495	0.97992±0.00487	502.40
7378	C- 1	0.99496±0.00429	1.00294±0.00434	572.50
7385	C- 2	0.99019±0.00410	0.99853±0.00387	568.50
7385	C- 3	0.98349±0.00405	0.99935±0.00418	560.10

Table 6 Reactivity worth of absorbers in 4-trap

Run no.	Guide pipe	Absorber	Reactivity worth of absorber and guide pipe (% δ K)		
			Experiment	Calculation	(C-E)/Sigma
7308	B-void		1.189	1.776±0.611	0.96 *
7310	B-water		1.178	1.105±0.565	-0.13 *
7311	A-void	C-2	1.870	2.063±0.589	0.33 *
7313	B-void	C-2	2.027	2.710±0.408	1.67 **
7314	B-water	C-2	2.030	2.100±0.619	0.11 *
7315	A-water	C-2	1.686	1.273±0.638	-0.64 *
7316	B-void	C-3	2.237	2.127±0.594	-0.19 *
7318	B-water	C-3	2.684	2.504±0.606	-0.30 *
7319	B-water	C-3 void	2.195	2.932±0.599	1.23 **
7321	A-void	C-1	1.618	1.818±0.641	0.31 *
7322	B-void	C-1	1.861	2.100±0.605	0.40 *
7323	B-water	C-1	2.040	1.910±0.586	-0.22 *
7328	A-water	C-3	2.901	2.350±0.581	-0.95 *
7334		B-2	2.944	2.871±0.582	-0.12 *
7335		C-3	2.501	2.509±0.597	0.01 *
7336		C-3 void	2.009	2.534±0.542	0.97 *
7337	A-void	B-1b	1.958	2.003±0.601	0.07 *
7339	A-water	B-1a	1.765	1.667±0.572	-0.17 *
7341	A-water	B-1a	2.231	1.734±0.543	-0.92 *
7342	B-void	B-1a	2.222	1.584±0.679	-0.94 *
7343		C-1 void	1.416	1.295±0.663	-0.18 *
7345		B-1a	1.765	1.407±0.557	-0.64 *
7350	B-void		1.214	1.371±0.652	0.24 *
7351	B-void	C-3 water	2.707	3.321±0.630	0.97 *

H = 510.6mm : Critical height of standard core (Run no. : 7304)

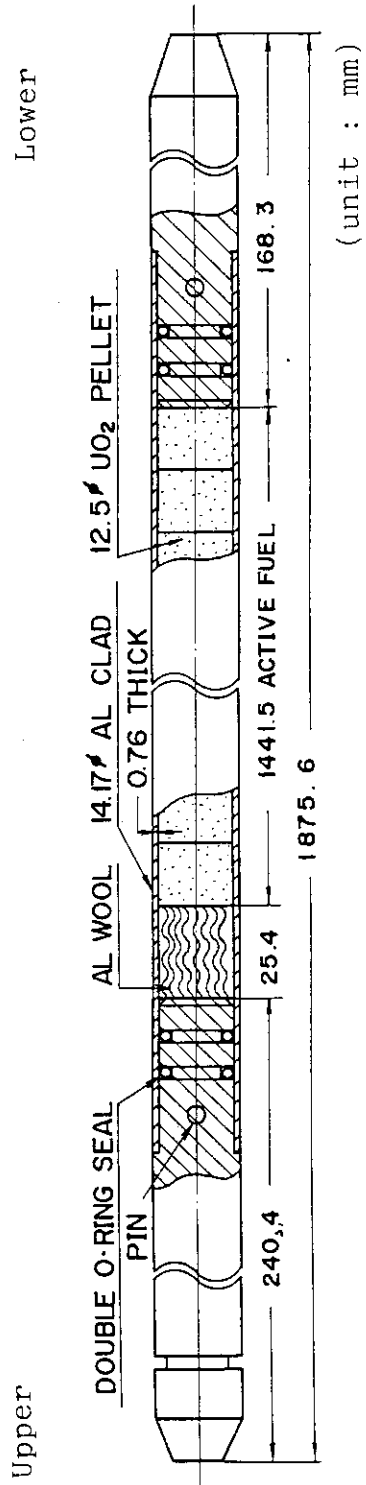
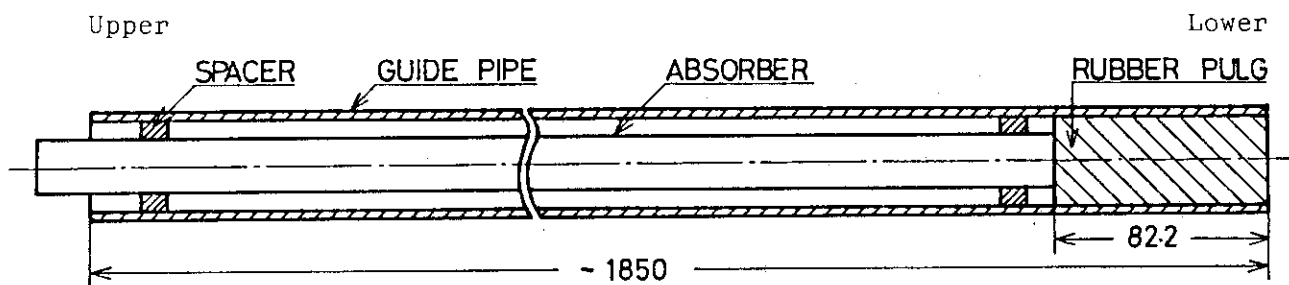
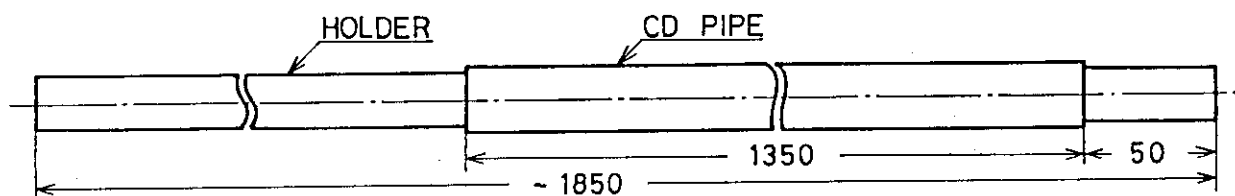


Fig. 1 Specifications of fuel rod



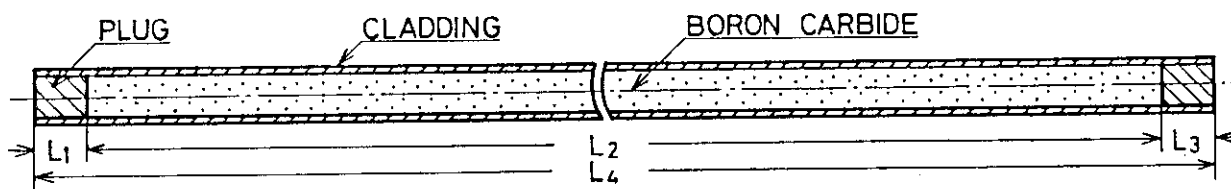
Guide pipe A : Aluminium, O.D. : 38, I.D. : 32
Guide pipe B : Stainless steel, O.D. : 42.5, I.D. : 36.7

(1) Guide pipes



Absorber rod	Holder	Cd pipe
C - 1	Al pipe, O.D. : 14, I.D. : 13	O.D. : 15.33, I.D. : 14.33
C - 2	Al rod, O.D. : 20	O.D. : 21.32, I.D. : 20.32
C - 3	Al pipe, O.D. : 28, I.D. : 25	O.D. : 29.31, I.D. : 28.31

(2) Absorber tubes



Absorber rod	Cladding	B_4C content	Length			
			L1	L2	L3	L4
B - 1a	Al, O.D. : 14, I.D. : 13	1.180 g/cm ³	105.7	1727.3	50.0	1883.0
B - 1b	Al, O.D. : 14, I.D. : 13	1.180 g/cm ³	104.3	1728.4	50.0	1882.7
B - 2	SUS, O.D. : 34, I.D. : 27.3	1.165 g/cm ³	10.7	1980.7	10.6	2002.0

(3) Absorber rods

(unit : mm)

Fig. 2 Specifications of guide pipes and absorbers

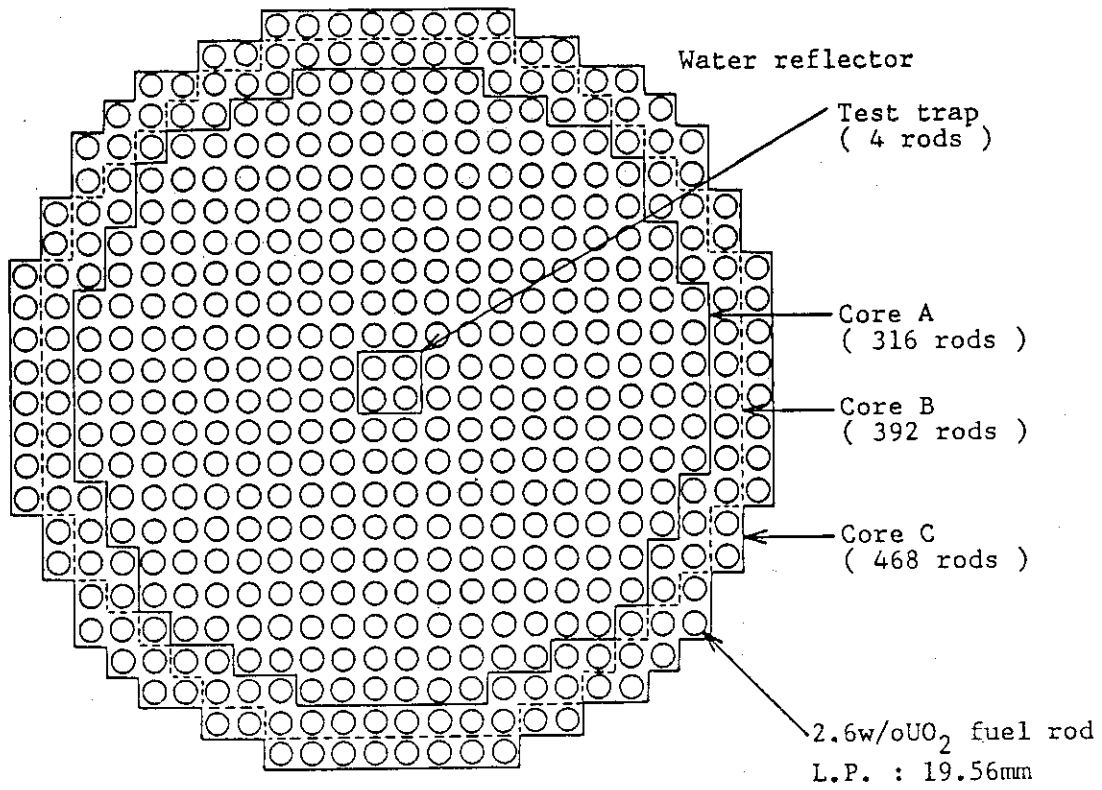


Fig. 3 Plan view of the 4-trap cylindrical core with 4-trap

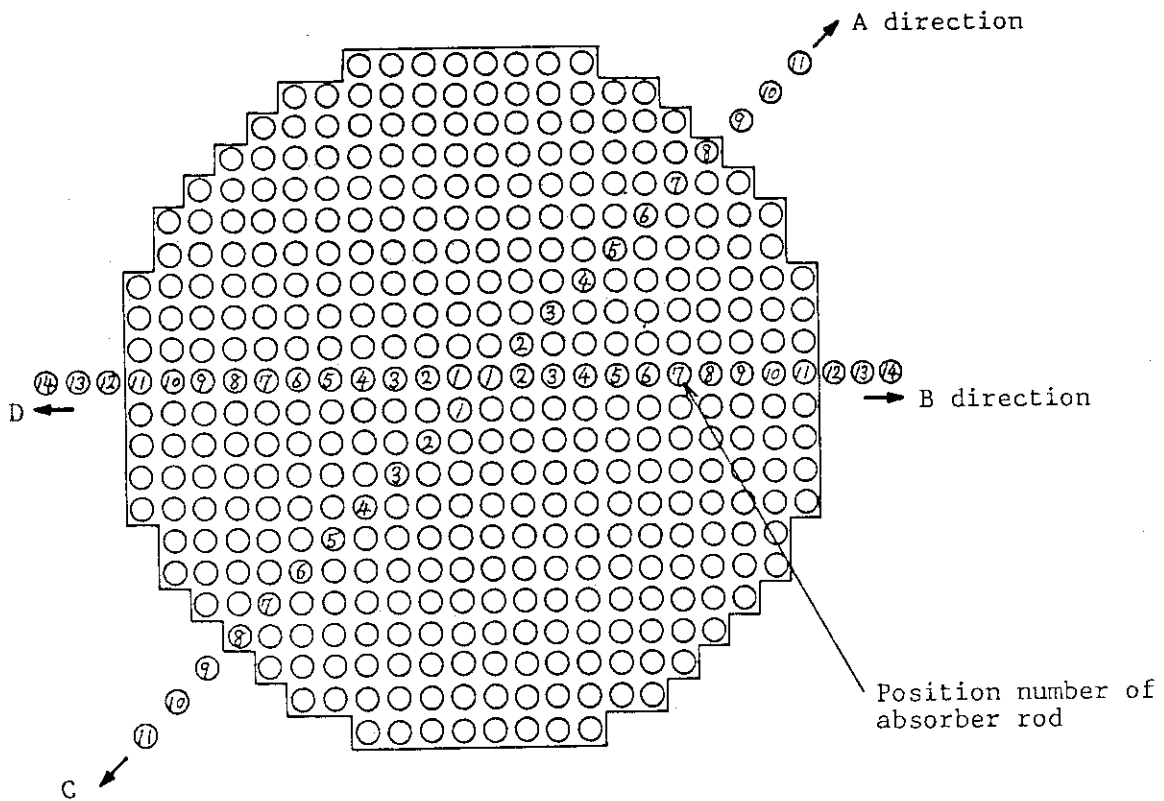


Fig. 4 Plan view of the standard core-B

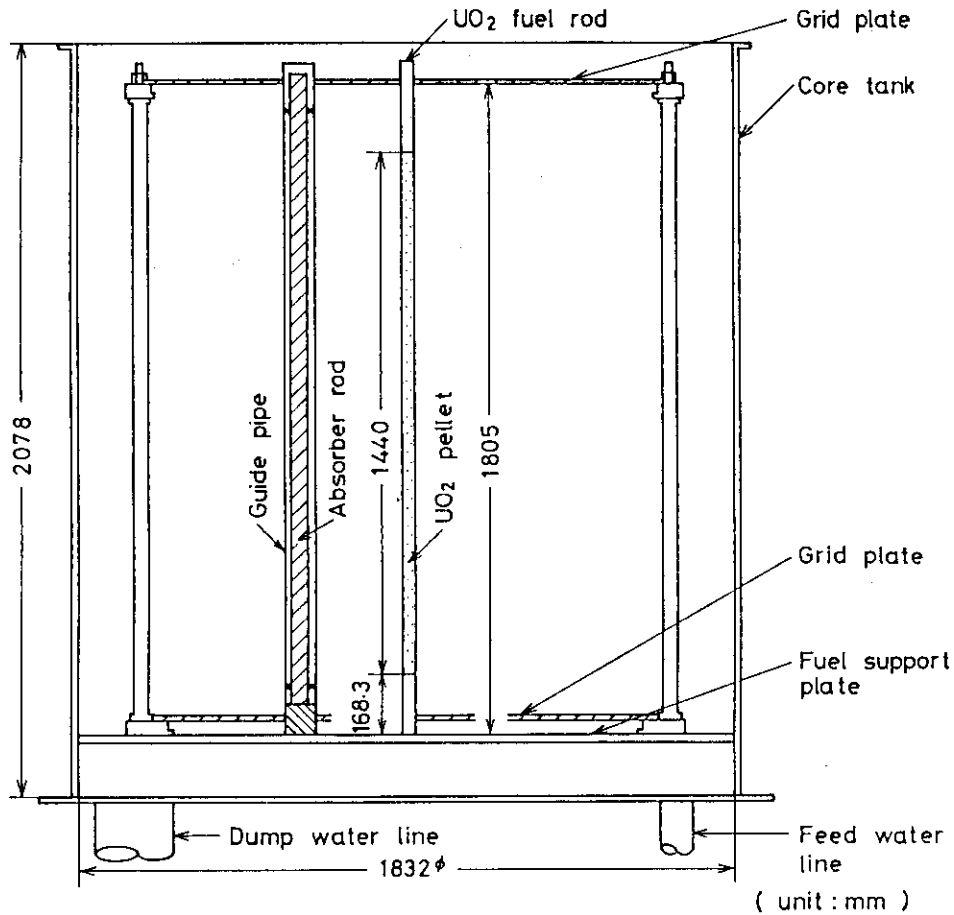


Fig. 5 Vertical arrangement of fuel rods and absorber rods

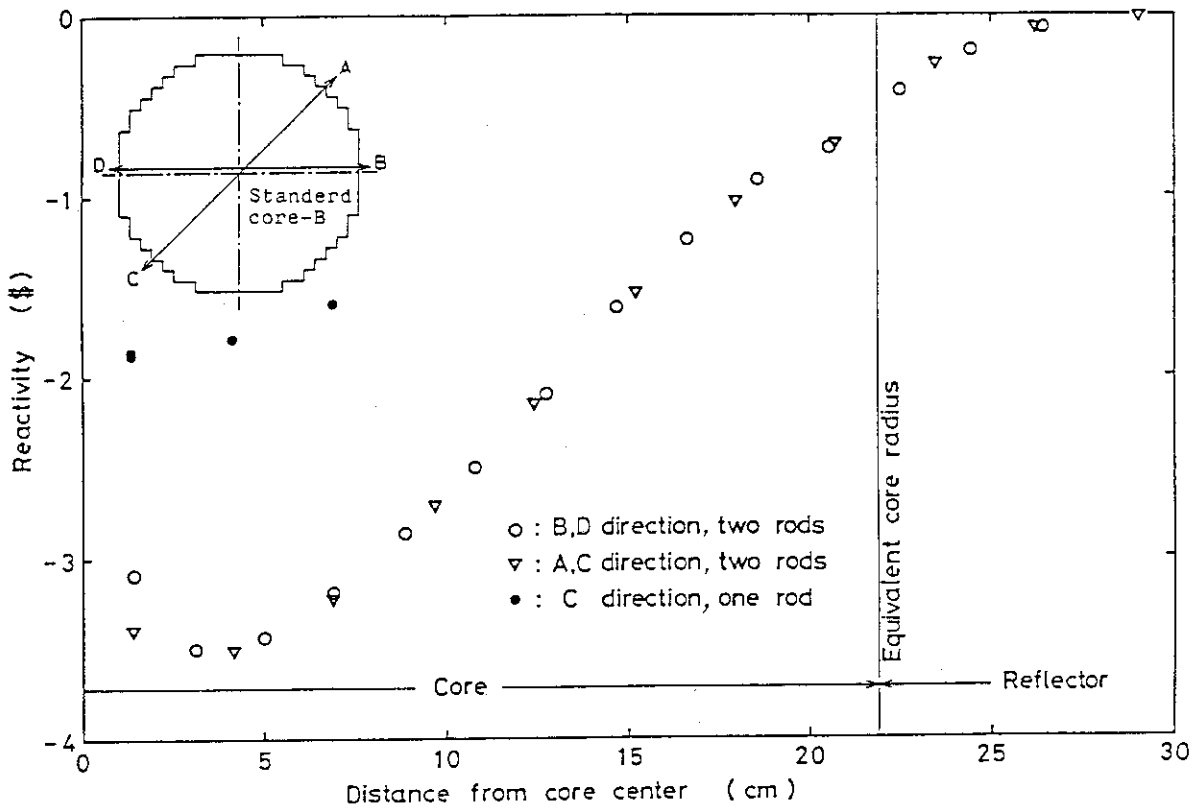


Fig. 6 Reactivity worth of absorber rods as function of distance from core center to their inserted position. Open circles and triangles show two-rod worth inserted symmetric positions against core center-lines, while, closed shows one-rod worths.

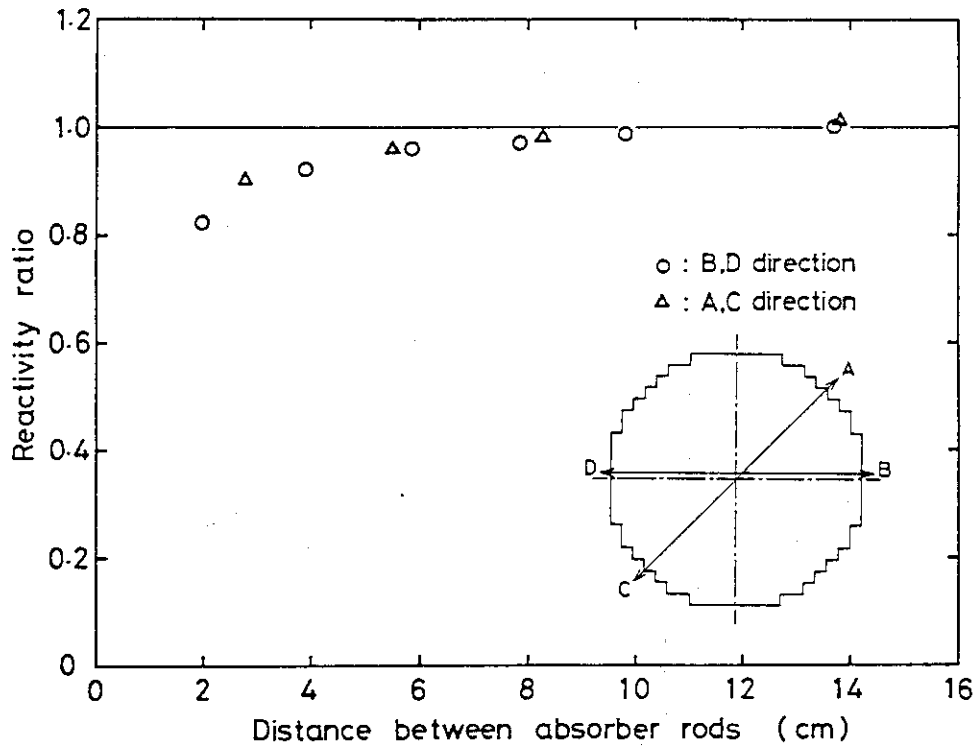


Fig. 7 Change of reactivity-interference effect $\rho_{ar1,br2}/(\rho_{ar1}+\rho_{br2})$ vs. distance between two absorber rods.

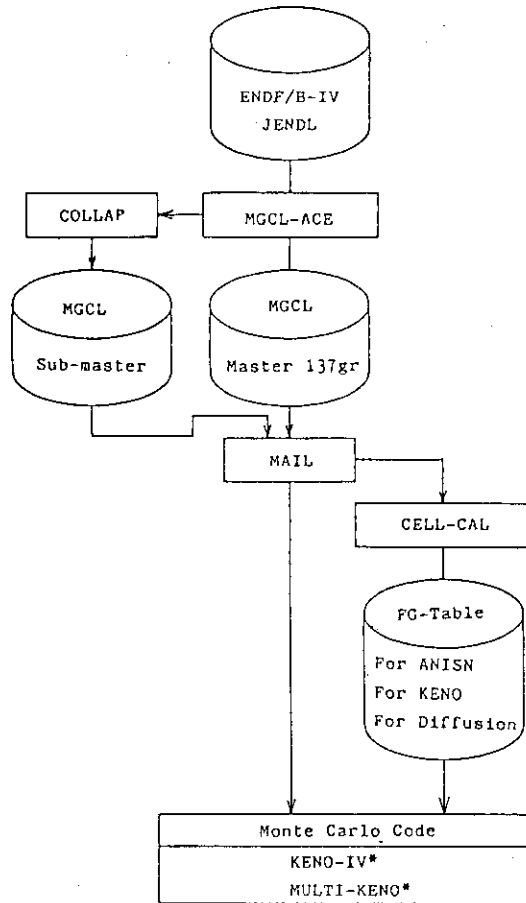


Fig. 8 General calculation flow

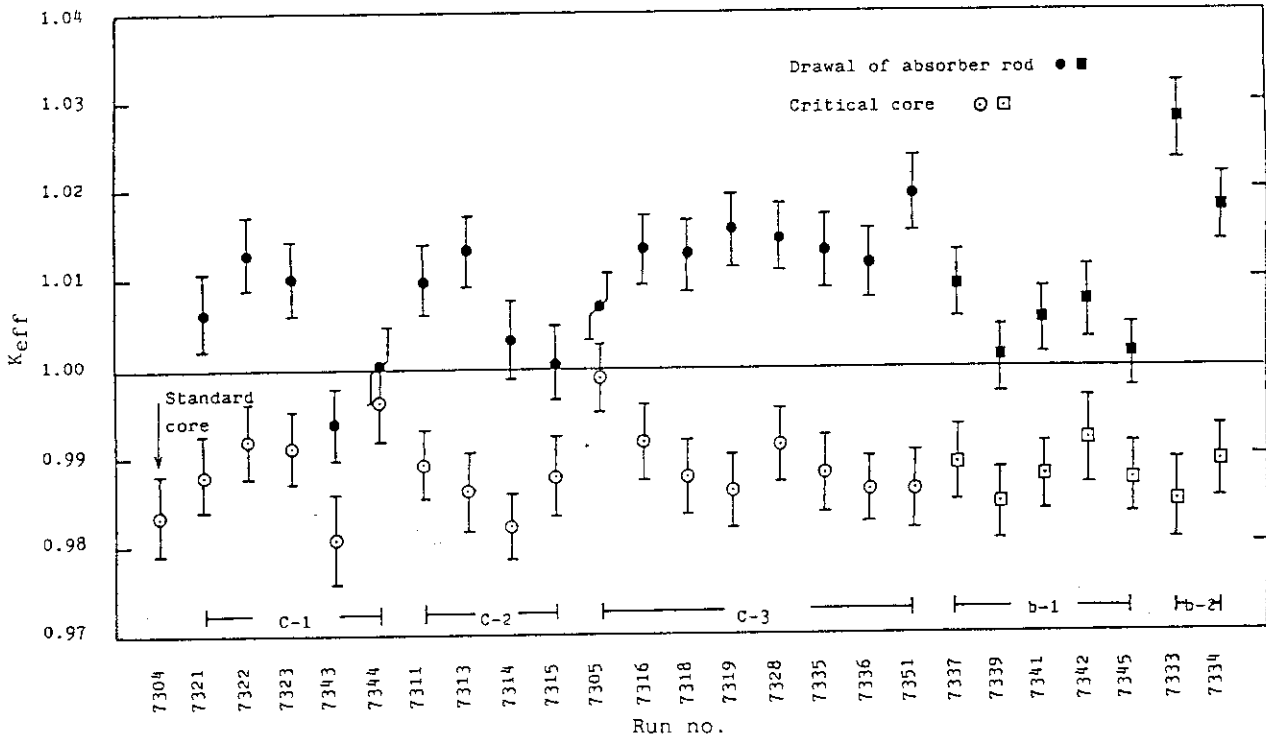


Fig. 9 Effective neutron multiplication factor calculated by MULTI-KENO (Standard core-B with absorber)

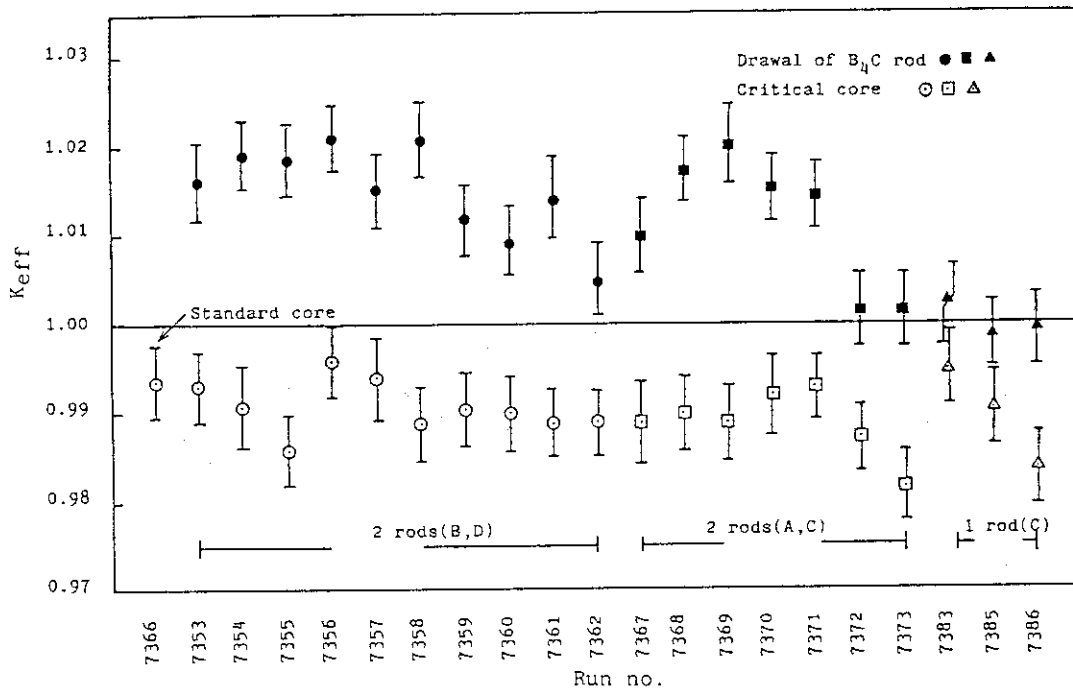


Fig. 10 Effective neutron multiplication factor calculated by MULTI-KENO (Standard core-B with 1 or 2 absorber rods)