

JAERI-Research

95-053



計算値を用いた未臨界度の推定

1995年7月

内藤俣孝・荒川拓也・桜井 淳

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

本レポートは、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、お申し越してください。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。

This report is 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, 1995

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 印刷 いばらき印刷(株)

計算値を用いた未臨界度の推定

日本原子力研究所東海研究所燃料サイクル安全工学部

内藤 淑孝・荒川 拓也・桜井 淳

(1995年7月3日受理)

「計算誤差間接推定法」による中性子増倍率の新しい評価法を提案する。第2章には「計算誤差間接推定法」の考え方及び中性子源増倍法への適用について、第3章には原研の臨界集合体TCAの実験データを基にこの方法の妥当性の検証について記述してある。

連続エネルギーモンテカルロコードMCNP-4Aで計算した中性子増倍率にこの方法を適用し、得られた結果を指数実験法で評価した中性子増倍率と比較した。その結果、両者はよく合うことがわかった。

Estimation of Subcriticality with the Computed Value

Yoshitaka NAITO, Takuya ARAKAWA and Kiyoshi SAKURAI

Department of Fuel Cycle Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 3, 1995)

A new evaluation method of neutron multiplication factor is proposed on theory of calculation error indirect estimation method. The theory and its application to neutron source multiplication method are described in chapter 2, verification test based on experimental data of JAERI critical assembly TCA is described in chapter 3.

This method is applied to neutron multiplication factor calculated by continuous energy Monte Carlo code MCNP-4A and the results are compared with the result evaluated by exponential experiment method. It is concluded that the both results are consistent with each other.

Keywords: Calculation Error Indirect Estimation Method, Neutron Multiplication Factor, Neutron Source Multiplication Method, Critical Assembly TCA, Continuous Energy Monte Carlo Code MCNP-4A, Verification Test

目 次

1. 序 論	1
2. 理 論	2
2.1 計算誤差間接推定法	2
2.2 中性子源増倍法への適用	2
2.3 中性子計数率の誤差と反応度の誤差の関係	5
3. 理論の実験による検証	7
3.1 前回の実験及び計算	7
3.2 実験値と計算値の規格化	7
3.3 $n=16, 14, 11, 8$ における $k_m \pm 3\sigma$	8
4. 討論及び結論	9
謝 辞	10
文 献	11

Contents

1. Introduction	1
2. Theory	2
2.1 Calculation Error Indirect Estimation Method	2
2.2 Application to Neutron Source Multiplication Method	2
2.3 Relation of Neutron Count Rate and Reactivity Errors	5
3. Test of Theory by Experimental Data	7
3.1 Previous Experiment and Calculation	7
3.2 Normalization of Measured and Calculated Values	7
3.3 $k_m \pm 3\sigma$ in $n=16, 14, 11, 8$ Systems	8
4. Discussion and Conclusion	9
Acknowledgements	10
References	11

1. 序 論

近年計算機の進歩により、計算機で種々の量を求めることができるようになってきた。しかしながら計算された結果の妥当性は、何らかの方法によって確認する必要がある。

確認の方法として現在最も多く用いられているのは、答えのわかっている問題を計算コードで解くことにより、計算精度を把握する方法である。このために用意された問題は、「ベンチマーク問題」と呼ばれる。この方法で注意を要するのは、計算の対象としている問題とベンチマーク問題との差異である。両者の距離をどのように計り、対象に対する計算誤差をベンチマーク問題の誤差から如何に推定するかである。

もうひとつの方法は、計算で算出される種々の量の内で答のわかっている量の計算精度から他の算出量の計算誤差を推定する方法である。計算機の計算精度の検証にこの方法を適用した例は無いと思われるが、自然科学の方法論として大昔から行われている演繹的方法がこれに相当すると考えられる。

ここで取り上げるのは後者の方法であり、「計算誤差間接推定法」と呼ぶことにする。

そもそもこの問題を取り上げることになったのは、臨界安全評価の方法を検討するためであった。臨界安全確保の方法としては、計算により臨界とならない条件を定め、その範囲で設計することになっている。

対象とする核燃料が核的に臨界になるかどうかの判定は、対象に対するボルツマンの輸送方程式の最大固有値が1.0以下かどうかで判定される。計算により固有値を求めることは、近年比較的容易になってきたが、その計算結果の妥当性は、ベンチマーク問題を解くことによって判断されている。

設計され製作・設置された核燃料が所定の未臨界度を保持しているかどうかの確認は、行われなないのが通例である。しかしながら近年より一層の安全確保の観点から、設置された核燃料の未臨界度を測定することが検討されている。未臨界度は、計算によって求めることができるが、その場合には、計算結果の妥当性を何らかの方法で示す必要がある。このための方法として「計算誤差間接推定法」を用いることを検討する。

未臨界度を測定する最も簡便な方法は、中性子源増倍法である。しかしながらこの方法では、中性子源と中性子検出器の位置関係を十分に注意する必要があることが指摘されている。このため中性子計数率の測定結果と反応度を結び付ける係数を求めるためにボルツマンの輸送方程式を解く必要が生ずる。方程式を解けば固有値が求まるため、計算結果から係数を求めるのではなく、計算された固有値を直接利用することを考える。そして測定される中性子計数率は、計算精度の検証に利用することとする。

このようにここで提案する方法は、従来の手法を逆立ちさせたものである。この方法が有望と考えられるのは、計算結果の精度が向上したためである。ボルツマン方程式を連続エネルギーモンテ

カルロコードで解くと精度の高い計算結果が得られることを前回の報告書で示した¹⁾。

この報告書では、第2章で「計算誤差間接推定法」について概説するとともに中性子源増倍法への適用方法について示す。第3章では、原研TCA施設を用いて行った実験の結果を解析し、本手法の妥当性を示す。最後に第4章では、本手法と従来法を比較し、本手法の優位を示すとともに今後の発展の可能性について示す。

2. 理 論

2.1 計算誤差間接推定法

「計算誤差間接推定法」について簡単に説明する。この方法は、先に述べたように、測定値のあるもので計算誤差を求めておき、測定値のない量の計算誤差の範囲を推定しようとするものである。図1に示すように、対象Dに測定器Tを作用させて得られた観測量 d とその事象のふるまいの法則を表現する基礎式Rに観測に相当する演算 τ を施して得られる評価量 c を考える。

$$T \cdot D = d \quad \text{または} \quad T_i \cdot D = d_i \quad (1)$$

$$\tau \cdot R = c \quad \text{または} \quad \tau_i \cdot R = c_i \quad (2)$$

i 番目の観測 T_i と τ_i が対応すれば、誤差 ε はつぎのようになる。

$$\varepsilon_i = (d_i - c_i) / d_i \quad (3)$$

間接推定法とは、 ε_i が求まっている時に未知の誤差 ε_x を推定するための方法である。

この方法で最も大切なことは、 ε_x を推定するためにどの測定値を使用したらよいかということである。すなわち ε_i と ε_x の関連が明確なものが望ましい。また評価値 c が中性子増倍率のように体系の積分量であったり、現実には存在しない数学上の固有値のような場合には、直接測定できない量であるため、この方法は特に有効であると考えられる。

2.2 中性子源増倍法への適用

中性子源増倍法とは、中性子計数率の中性子源強度に対する割合と系の中性子増倍率が式(4)の関係にあることを用いて、中性子計数率を測定して中性子増倍率を求める方法である。

$$CR(r_i) = f(r_i, r_o) \cdot S(r_o) / (1 - k) \quad (4)$$

ここで、 $CR(r_i)$: 位置 r_i での中性子計数率

$S(r_o)$: 位置 r_o に置かれた中性子源強度

k : 系の中性子増倍率

$f(r_i, r_o)$: 中性子源と中性子検出器の位置に依存した補正係数

カルロコードで解くと精度の高い計算結果が得られることを前回の報告書で示した¹⁾。

この報告書では、第2章で「計算誤差間接推定法」について概説するとともに中性子源増倍法への適用方法について示す。第3章では、原研TCA施設を用いて行った実験の結果を解析し、本手法の妥当性を示す。最後に第4章では、本手法と従来法を比較し、本手法の優位を示すとともに今後の発展の可能性について示す。

2. 理 論

2.1 計算誤差間接推定法

「計算誤差間接推定法」について簡単に説明する。この方法は、先に述べたように、測定値のあるもので計算誤差を求めておき、測定値のない量の計算誤差の範囲を推定しようとするものである。図1に示すように、対象Dに測定器Tを作用させて得られた観測量 d とその事象のふるまいの法則を表現する基礎式Rに観測に相当する演算 τ を施して得られる評価量 c を考える。

$$T \cdot D = d \quad \text{または} \quad T_i \cdot D = d_i \quad (1)$$

$$\tau \cdot R = c \quad \text{または} \quad \tau_i \cdot R = c_i \quad (2)$$

i 番目の観測 T_i と τ_i が対応すれば、誤差 ε はつぎのようになる。

$$\varepsilon_i = (d_i - c_i) / d_i \quad (3)$$

間接推定法とは、 ε_i が求まっている時に未知の誤差 ε_x を推定するための方法である。

この方法で最も大切なことは、 ε_x を推定するためにどの測定値を使用したらよいかということである。すなわち ε_i と ε_x の関連が明確なものが望ましい。また評価値 c が中性子増倍率のように体系の積分量であったり、現実には存在しない数学上の固有値のような場合には、直接測定できない量であるため、この方法は特に有効であると考えられる。

2.2 中性子源増倍法への適用

中性子源増倍法とは、中性子計数率の中性子源強度に対する割合と系の中性子増倍率が式(4)の関係にあることを用いて、中性子計数率を測定して中性子増倍率を求める方法である。

$$CR(r_i) = f(r_i, r_o) \cdot S(r_o) / (1 - k) \quad (4)$$

ここで、 $CR(r_i)$: 位置 r_i での中性子計数率

$S(r_o)$: 位置 r_o に置かれた中性子源強度

k : 系の中性子増倍率

$f(r_i, r_o)$: 中性子源と中性子検出器の位置に依存した補正係数

この補正係数 f を適切に求めれば、中性子計数率 CR を測定することにより、系の中性子増倍率 k を式 (4) から求めることができることはよく知られている。また単純な体系では、中性子源と検出器の位置を適切に選べば、 f を求めることは困難ではない。しかしながら少し複雑な体系については、 f を求めるのは簡単でなく、ボルツマン方程式を解く必要が生ずる²⁾。

ここでは、ボルツマン方程式を解いて得られる固有値を用いて系の中性子増倍率を推定する。中性子源のないボルツマン方程式は、固有値問題により、下記の式で演算子表現で与えられる。

$$-D\phi + (1/k)P\phi = 0 \quad (5)$$

中性子源のあるボルツマン方程式は、固定線源問題となり、下記の式で形式的に表現する。

$$-D\phi^s + P\phi^s = S \quad (6)$$

ここで、 D : 消滅演算子

P : 生成演算子

ϕ : 最大固有値に対応する中性子束

ϕ^s : 固定線源のある系の中性子束

S : 中性子源

式 (5) 及び式 (6) にある重み関数 ϕ' を左から作用させ、全位相空間について積分する。

$$-\langle \phi', D\phi \rangle + (1/k) \langle \phi', P\phi \rangle = 0 \quad (7)$$

$$-\langle \phi', D\phi^s \rangle + \langle \phi', P\phi^s \rangle = \langle \phi', S \rangle \quad (8)$$

式 (7) から、

$$\rho = (k-1)/k = 1 - \langle \phi', D\phi \rangle / \langle \phi', P\phi \rangle \quad (9)$$

式 (9) で用いる中性子束 ϕ は、式 (5) の最大固有値に対応する固有ベクトルであり、未臨界体系では測定できない量である。そこで式 (9) の右辺を式 (8) の関係を用いて書き換える。

$$\begin{aligned} \rho &= 1 - \langle \phi', D\phi \rangle / \langle \phi', P\phi \rangle \\ &= \alpha (1 - \langle \phi', D\phi^s \rangle / \langle \phi', P\phi^s \rangle) \\ &= \alpha \langle \phi', S \rangle / \langle \phi', P\phi^s \rangle \end{aligned} \quad (10)$$

従来の方法は、式 (10) を用いて ϕ^s を測定することにより反応度 ρ を求めるものである。ここで全空間にわたり ϕ^s を測定することが困難であるため、 $r = r_i$ の位置での中性子検出器の計数率 $\phi^s(r_i)$ を用いる。したがって全空間の積分値と $r = r_i$ の位置での値との関係が必要となる。

$$\begin{aligned} \rho &= \alpha \langle \phi', S(r_i) \rangle / \langle \phi', P\phi^s \rangle \\ &= \alpha \cdot \beta \langle \phi', S(r_i) \rangle / \langle \phi', P\phi^s(r_i) \rangle \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、

$$\alpha = (1 - \langle \phi', D\phi \rangle / \langle \phi', P\phi \rangle) / (1 - \langle \phi', D\phi^s \rangle / \langle \phi', P\phi^s \rangle)$$

及び、

$$\beta = \langle \phi', P \phi^s(r_i) \rangle / \langle \phi', P \phi^s \rangle \quad (12)$$

α は、固有値問題の解と固定線源問題の解との関連を示すものであり、 ϕ' として式(5)の随伴方程式の解を用いれば1.0になる。 β は、測定位置 r_i の計数率と全空間の計数率との関連を示すものである。これらの関連を求めることは容易ではなく、従来から種々の提案がなされてきた。

ここで提案する方法は、中性子増倍率(反応度)を計算で求め、その精度を中性子計数率の精度から推定しようとするものである。測定値に m 、計算値に c の添字を付ける。

$$\rho_m = \alpha_m \cdot \langle \phi', S(r_o) \rangle_m / \langle \phi', P \phi^s \rangle_m \quad (13)$$

$$\rho_c = \alpha_c \cdot \langle \phi', S(r_o) \rangle_c / \langle \phi', P \phi^s \rangle_c \quad (14)$$

$$\rho_m = \alpha_m / \alpha_c \cdot \langle \phi'(r_o), S(r_o) \rangle_m / \langle \phi'(r_o), S(r_o) \rangle_c \cdot \langle \phi', P \phi^s \rangle_c / \langle \phi', P \phi^s \rangle_m \cdot \rho_c \quad (15)$$

ここで ρ_m が求めるべき量である。 α_m は現実には測定できない量であるが、 α_m / α_c は積分量で検出器位置には依存しない量である。 $\langle \phi'(r_o), S(r_o) \rangle_m / \langle \phi'(r_o), S(r_o) \rangle_c$ は、実際の中性子源強度と計算で使用した強度の比であり、いずれ規格化しなければならない値である。

ある類似の体系で反応度の計算値と実測値が求まっており、その体系のある位置で計数率の実測値と計算値が求まっていれば、その場合の計数率が一致するように規格化する。

式(15)の右辺の項を変形する。

$$\begin{aligned} & (\alpha_m / \alpha_c) \cdot \langle \phi'(r_o), S(r_o) \rangle_m / \langle \phi'(r_o), S(r_o) \rangle_c \\ &= \langle \phi', (-D+P) \phi \rangle_m / \langle \phi', (-D+P) \phi \rangle_c \\ & \quad \cdot \langle \phi', P \phi \rangle_c / \langle \phi', P \phi \rangle_m \\ & \quad \cdot \langle \phi', (-D+P) \phi^s \rangle_c / \langle \phi', (-D+P) \phi^s \rangle_m \\ & \quad \cdot \langle \phi', P \phi^s \rangle_m / \langle \phi', P \phi^s \rangle_c \\ & \quad \cdot \langle \phi', (-D+P) \phi^s \rangle_m / \langle \phi', (-D+P) \phi^s \rangle_c \\ &= \langle \phi', (-D+P) \phi \rangle_m / \langle \phi', P \phi \rangle_m \\ & \quad \cdot \langle \phi', P \phi \rangle_c / \langle \phi', (-D+P) \phi \rangle_c \\ & \quad \cdot \langle \phi', P \phi^s \rangle_m / \langle \phi', P \phi^s \rangle_c \\ &= (\rho_m / \rho_c) \cdot \langle \phi', P \phi^s \rangle_m / \langle \phi', P \phi^s \rangle_c \\ &= (\rho_m / \rho_c) \cdot (\overline{P_m} / \overline{P_c}) \langle \phi', \phi^s \rangle_m / \langle \phi', \phi^s \rangle_c \end{aligned} \quad (16)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \overline{P_m} &= \langle \phi', P \phi^s \rangle_m / \langle \phi', \phi^s \rangle_m \\ \overline{P_c} &= \langle \phi', P \phi^s \rangle_c / \langle \phi', \phi^s \rangle_c \end{aligned} \quad (17)$$

ある体系で中性子計数率の測定値と計算値を一致させるということをつぎのように表現する。

$$\langle \phi', \phi^s \rangle_{om} = \langle \phi', \phi^s \rangle_{oc} \quad (18)$$

その体系での反応度の実測値と計算値の比率を $(\rho_m/\rho_c)_o$ とすると、式 (15) はつぎのようになる。

$$\rho_m = (\rho_m/\rho_c)_o \cdot (\overline{P_m}/\overline{P_c})_o \cdot \langle \phi', P\phi^s \rangle_c / \langle \phi', P\phi^s \rangle_m \cdot \rho_c \quad (19)$$

$\langle \phi', P\phi^s \rangle_c$ と $\langle \phi', P\phi^s \rangle_m$ について式 (17) の表現を用いると、式 (19) はつぎのようになる。

$$\rho_m = (\rho_m/\rho_c)_o \cdot (\overline{P_m}/\overline{P_c})_o / (\overline{P_m}/\overline{P_c}) \cdot \langle \phi', \phi^s \rangle_c / \langle \phi', \phi^s \rangle_m \cdot \rho_c \quad (20)$$

類似の体系においては、つぎの関係が近似的に成立するとする。

$$(\overline{P_m}/\overline{P_c})_o = (\overline{P_m}/\overline{P_c}) \quad (21)$$

この仮定の下で式 (20) はつぎのようになる。

$$\rho_m/\rho_c = (\rho_m/\rho_c)_o \cdot \langle \phi', \phi^s \rangle_c / \langle \phi', \phi^s \rangle_m \quad (22)$$

2.3 中性子計数率の誤差と反応度の誤差の関係

中性子束と反応度の間には式 (22) の関係がある。実際に計数率が規格化されるのは、少数の点の位置である。空間を I 個に分割し、各分割領域で 1 点ずつ計数率が測定されたとする。

$$\begin{aligned} \rho_m &= (\rho_m/\rho_c)_o \cdot (\sum_i \langle \phi', \phi^s_{ci} \rangle) / (\sum_i \langle \phi', \phi^s_{mi} \rangle) \cdot \rho_c \\ &= (\rho_m/\rho_c)_o \cdot (\sum_i W_i CR_{ci} / \sum_i W_i CR_{mi}) \cdot \rho_c \end{aligned} \quad (23)$$

ただし計数率 CR は、中性子束 ϕ^s に比例するとする。 W_i は ϕ' を領域 i について体積積分した値である。計数率の誤差 ε を下記の式で表現する。

$$\varepsilon_i = (CR_{mi} - CR_{ci}) / CR_{mi} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \rho_m &= (\rho_m/\rho_c)_o \cdot \{ \sum_i W_i (1 - \varepsilon_i) CR_{mi} \} / \sum_i W_i CR_{mi} \cdot \rho_c \\ &= (\rho_m/\rho_c)_o \cdot (\sum_i W_i CR_{mi} - \sum_i W_i \varepsilon_i CR_{mi}) / \sum_i W_i CR_{mi} \cdot \rho_c \\ &= (\rho_m/\rho_c)_o \cdot (1 - \overline{\varepsilon}) \cdot \rho_c \end{aligned} \quad (25)$$

ここで、

$$\overline{\varepsilon} = \sum_i W_i \varepsilon_i CR_{mi} / \sum_i W_i CR_{mi} \quad (26)$$

式 (24) と (25) の関係は、実測値の誤差 ε_i がわかれば、評価値 ρ の誤差が推定できることを意味している。このことは、反応度の計算誤差を推定するためには計数率の計算誤差を求めることが有効であることを示している。

通常の中性子源増倍法では反応度は、計数率の逆数で表現されるため、このアナロジーから以下の量を導入する。

$$\rho_{mi} = (\rho_m / \rho_c)_0 \cdot (CR_{ci} / CR_{mi}) \cdot \rho_c \quad (27)$$

反応度は、全空間の積分量として表現されるものであるが、 ρ_{mi} は i 点での計数率 CR_{mi} の測定値から推定される反応度という意味である。

式 (24) を用いて式 (27) を書き直すとつぎのようになる。

$$\rho_{mi} = (\rho_m / \rho_c)_0 \cdot (1 - \varepsilon_i) \cdot \rho_c \quad (28)$$

また式 (27) を用いて式 (23) を書き直すとつぎのようになる。

$$\rho_m = \frac{\sum_i W_i CR_{mi} \rho_{mi}}{\sum_i W_i CR_{mi}} \quad (29)$$

式 (27) で定義した ρ_{mi} を W_i 、 CR_{mi} を重みとして平均したものが求めるべき反応度になる。重み関数 W_i としては式 (5) の随伴方程式の解を用いることが望ましいので、ここでは、その位置での計数率と支配領域の体積との積 $CR_{mi} \cdot V_i$ を用いることにする。式 (29) は、つぎのようになる。

$$\rho_m = \frac{\sum_i \rho_{mi} CR_{mi}^2 \cdot V_i}{\sum_i CR_{mi}^2 \cdot V_i} \quad (30)$$

つぎに観測点の位置及び数について考察する。式 (26) に示すように各点の誤差の平均が反応度の計算誤差となる。測定点の数を増しても誤差 ε は小さくなるとは限らない。一般に中性子の密度勾配の変化の大きいところでは、計算精度が悪くなる場合が多いため、そのような場所を避け、密度勾配の変化の小さいところで測定することが望ましい。しかしながら計算結果がある点で実測値とよく一致していても、他の点で一致が悪ければ精度としてはあまりよいことにはならない。

平均値 ρ_m に対する推定反応度 ρ_{mi} の分散は、統計現象ではないため、意味付けは困難であるが、平均値 ρ_m の変動の範囲のめやすとなると考えられる。測定点の数が無限大の時の ρ_m の値を $\rho_{m\infty}$ とする。測定点の数が I の時の平均値を ρ_{mI} とする。 $\rho_{m\infty}$ がある信頼度と確率で下記の範囲に入る $\mu(I)$ が与えられるとする。

$$\rho_{m\infty} = \rho_{mI} \pm (I) \cdot \sigma_I \quad (31)$$

$$\sigma_I^2 = \frac{\sum_{i=1}^I CR_{mi} V_i (\rho_{mi} - \rho_{mI})^2}{\sum_{i=1}^I CR_{mi} V_i} \quad (32)$$

この $\rho_{m\infty}$ を推定値として求めることにする。なお第 3 章では、上記方法で求めた ρ_m を用いて、中性子増倍率 k_m を下記の関係を用いて求めている。

$$k_m = 1 / (1 - \rho_m) \quad (33)$$

3. 理論の実験による検証

3.1 前回の実験及び計算

今回提案した理論の妥当性を検証するため、先に公表した研究報告書¹⁾の実験データと計算結果を利用した。

前回の実験では、原研の臨界実験装置(TCA)を用いて、図2のような5種類の正方配列炉心($n=17, 16, 14, 11, 8$)を構成し、異なる炉心水位の組合せで15体系の軸方向中性子計数率空間分布を²³⁵U小型核分裂計数管を利用して測定した。各体系の反応度は、指数実験により決定した。

その実験解析では、連続エネルギーモンテカルロコードMCNP-4A³⁾とJENDL-3から編集したポイントワイズ中性子断面積⁴⁾を用いて、中性子実効増倍率と軸方向中性子計数率空間分布を計算した。後者については、外部等方点線源のオプション⁵⁾において、トラックレングス・エスティメータを利用して計算した。

3.2 実験値と計算値の規格化

今回の検証では、実験及び計算とも、炉心水位112.5cmにおける各体系の中性子実効増倍率と軸方向中性子計数率空間分布の値を利用した。

まず各体系の軸方向中性子計数率空間分布の実験値を同一の図にプロットする。つぎに計算値についても同様にする。計算値は、炉心条件を考慮した絶対値で算出していないため、 $n=17$ 炉心の実験値に規格化する。図3は、規格化した時の両者の分布をしめたものである。表1は、規格化した時のそれらの値を基に、 ϵ_i 、 k_{mi} (ϵ_i と ρ_c から計算した中性子増倍率)、 k_m の平均値(k_{mi} を計数表で重み付けした平均値)、その標準偏差、 $k_m \pm 3\sigma$ を計算した結果をまとめたものである。

$n=17$ 炉心においては、炉心下端からの距離 $z=98.6$ cmでの測定値を除くどの測定点で規格化しても全体的によく合うことがわかる。中性子実効増倍率の計算値は、指数実験から求めたその値に規格化してある。そのため k_m の σ はゼロ、 $k_m \pm 3\sigma$ は k_m となっている。この規格化は、指数実験から求めた中性子実効増倍率とMCNP-4Aによる計算値との間に、核データによる系統的な0.6%の差が生じていることを確認してから行った。両者の差がランダムな場合には、今回のように単純な補正ではなく、もっと他の要因まで考慮しなければならない。

$n=17$ 炉心の軸方向中性子計数率空間分布の計算値の標準偏差は、5~8%であるが、今回の計算ではこの誤差まで考慮しておらず、すべて平均値で処理した。表1のCR_{0.1}は、いくぶんまらめである。(以下同様)。測定値と計算値の分布が異なる場合には、規格化に当たって、一点だけで

なく、すべての点のデータを最小自乗法で処理した方がよい。

3.3 $n=16, 14, 11, 8$ における $k_m \pm 3\sigma$

図4は、 $n=17$ で規格化した時の $n=16$ の軸方向中性子計数率空間分布の実験値と計算値を比較したものである。表2は、それらの値を基に、 ε_i 、 k_{mi} 、 k_m の平均値、その標準偏差、 $k_m \pm 3\sigma$ を計算した結果をまとめたものである。

$n=16$ 炉心では、 $z=13.6\text{cm}$ での ε_i が0.560と大きいため、 k_{mi} が他よりもはるかに大きく、 k_m の平均値を高くしている。 k_m の平均値は、指数実験の値よりもいくぶん高いものの、それでもよく一致している。指数実験の値は、 $k_m \pm 3\sigma$ の範囲に入っている。

今回の計算では、 $z=13.6\text{cm}$ の位置のデータを除外せずにそのまま利用したが、このような計算を行う場合、炉心の最下端や最上端に近い位置のデータは計算精度があまりよくないため、むしろ炉心中心に近いピーク近傍のものだけを利用した方がよい結果が得られる。

図5は、 $n=17$ で規格化した時の $n=14$ の軸方向中性子計数率空間分布の実験値と計算値を比較したものである。表3は、それらの値を基に、 ε_i 、 k_{mi} 、 k_m の平均値、その標準偏差、 $k_m \pm 3\sigma$ を計算した結果をまとめたものである。軸方向中性子計数率空間分布の計算値の標準偏差は、9~13%とあまりよくない。外部等方点線源の計算においては、その計算に時間がかかるが、それでもトラックレングス・エスティメータを利用する場合には、標準偏差を10%以下に抑えておいた方がよい。

$n=14$ 炉心では、 $n=16$ 炉心と同様、 $z=13.6\text{cm}$ で ε_i が-1.22、さらに $z=23.6\text{cm}$ でも ε_i が-0.754と大きいため、 k_{mi} が他よりもはるかに小さく、 k_m の平均値を低くしている。 k_m の平均値は、指数実験の値よりもいくぶん低いものの、それでも比較的よく一致している。指数実験の値は、 $k_m \pm 3\sigma$ の範囲に入っている。

図6は、 $n=17$ で規格化した時の $n=11$ の軸方向中性子計数率空間分布の実験値と計算値を比較したものである。表4は、それらの値を基に、 ε_i 、 k_{mi} 、 k_m の平均値、その標準偏差、 $k_m \pm 3\sigma$ を計算した結果をまとめたものである。

$n=11$ 炉心では、 $n=14$ 炉心と同様、 $z=13.6\text{cm}$ で ε_i が-3.518、 $z=23.6\text{cm}$ で ε_i が-2.776、さらに $z=98.6\text{cm}$ で ε_i が-3.032と大きいため、 k_{mi} が他よりも極端に小さく、 k_m の平均値を低くしている。 k_m の平均値は、計算値よりもいくぶん低いものの、指数実験の値は、 $k_m \pm 3\sigma$ の範囲に入っている。

図7は、 $n=17$ で規格化した時の $n=8$ の軸方向中性子計数率空間分布の実験値と計算値を比較したものである。表5は、それらの値を基に、 ε_i 、 k_{mi} 、 k_m の平均値、その標準偏差、 $k_m \pm 3\sigma$ を計算した結果をまとめたものである。

$n=8$ 炉心においては、 $n=16$ 及び $n=14, 11$ 炉心と異なり、 $z=13.6$ 及び $23.6, 98.6\text{cm}$ での ε_i がさほど大きくない。 k_m の平均値は、計算値よりもいくぶん高いものの、指数実験の値は、 $k_m \pm 3\sigma$ の範囲に入っている。

$n=11$ および8炉心の場合、 k_m の平均値は、計算値のみならず指数実験の値からも外れる方向に修正されている。しかしながら両者とも指数実験の値は、 $k_m \pm 3\sigma$ の範囲に入っている。特に $n=11$ においては、中性子計数率の実験値と計算値の差が大きいが、今後は計算法を改善して計算値の標準偏差を数パーセントまで下げて同様の比較を行う予定である。

4. 討論及び結論

計算技術の向上により、計算で対象とする系の中性子増倍率を求めることが可能になってきている。しかしながら計算結果の妥当性は、何らかの方法で検証しなければならない。このため今回は、「計算誤差間接推定法」を用いて計算誤差を推定した。計算誤差が推定できるということは、計算値から真の値を推定できるということであり、この方法で中性子増倍率を推定し、指数実験法で求めた実測値と比較した。

その結果は、第3章に示したようにほぼ満足したものであり、この手法が現実に適用できる可能性を示せたと考えている。ただし今回使用した計算コード(MCNP-4A)は、現時点では多くの計算時間を要するため、必ずしも満足できるものではなかった。将来、並列計算機が発達すれば、さらにより結果が得られるものと期待できる。なおこの方法のために使用する計算コードは、何でもよいが、従来の多群差分法による計算コードであるとメッシュ巾の取り方や群定数の作り方等のモデルの設定により計算誤差が変化するため、今回は使用しなかった。また将来は、未臨界確認技術に応用したいと考えており、核燃料施設の複雑な種々の体系に対しても適用できるように連続エネルギーモンテカルロ法による計算コードを用いた。

従来の中性子源増倍法との差異は、第1章序論に記したように、従来法では補正係数¹⁾の導出がわずらわしいことに主として依存している。この理由はふたつある。ひとつは、中性子増倍率(または反応度)が固有値問題の解として定義されるのに対し、測定値の中性子計数率は、固定中性子線源問題の解であることによる。この変換のため、式(12)に示す補正係数 α が必要になる。いまひとつは、中性子増倍率は全空間の積分値であるのに対し、測定値が空間の特定の位置の値を示すため、全空間と測定位置とを関連付ける補正係数 β が必要となる。

これに対して今回の方法は、計算で求めた中性子増倍率を基礎にして確からしい中性子増倍率を求めるため、対応関係が単純である。またその補正に使用する中性子束も、実測及び計算ともに固定中性子源の値であるため、対応が明確である。以上の理由により本手法は、計算機がさらに発展するであろう21世紀の技術手法としては有力と考える。

この手法は、従来の中性子源増倍法で補正係数の導出のために使用していた計算を逆に主にすえ、中性子計数率の測定値を補正のために使用するという逆転の発想になっている。この発想をしたことにより、式(25)に示すように中性子計数率の誤差と反応度の誤差の関係が非常に単純であることがわかった。このことは、炉物理研究者が中性子増倍率を求めるのに中性子源増倍法を見出したことと関連する。すなわち従来の成果として導出された手法には、それなりの明確な理由が

$n=11$ および8炉心の場合、 k_m の平均値は、計算値のみならず指数実験の値からも外れる方向に修正されている。しかしながら両者とも指数実験の値は、 $k_m \pm 3\sigma$ の範囲に入っている。特に $n=11$ においては、中性子計数率の実験値と計算値の差が大きいが、今後は計算法を改善して計算値の標準偏差を数パーセントまで下げて同様の比較を行う予定である。

4. 討論及び結論

計算技術の向上により、計算で対象とする系の中性子増倍率を求めることが可能になってきている。しかしながら計算結果の妥当性は、何らかの方法で検証しなければならない。このため今回は、「計算誤差間接推定法」を用いて計算誤差を推定した。計算誤差が推定できるということは、計算値から真の値を推定できるということであり、この方法で中性子増倍率を推定し、指数実験法で求めた実測値と比較した。

その結果は、第3章に示したようにほぼ満足したものであり、この手法が現実に適用できる可能性を示せたと考えている。ただし今回使用した計算コード(MCNP-4A)は、現時点では多くの計算時間を要するため、必ずしも満足できるものではなかった。将来、並列計算機が発達すれば、さらにより結果が得られるものと期待できる。なおこの方法のために使用する計算コードは、何でもよいが、従来の多群差分法による計算コードであるとメッシュ巾の取り方や群定数の作り方等のモデルの設定により計算誤差が変化するため、今回は使用しなかった。また将来は、未臨界確認技術に応用したいと考えており、核燃料施設の複雑な種々の体系に対しても適用できるように連続エネルギーモンテカルロ法による計算コードを用いた。

従来の中性子源増倍法との差異は、第1章序論に記したように、従来法では補正係数¹⁾の導出がわずらわしいことに主として依存している。この理由はふたつある。ひとつは、中性子増倍率(または反応度)が固有値問題の解として定義されるのに対し、測定値の中性子計数率は、固定中性子線源問題の解であることによる。この変換のため、式(12)に示す補正係数 α が必要になる。いまひとつは、中性子増倍率は全空間の積分値であるのに対し、測定値が空間の特定の位置の値を示すため、全空間と測定位置とを関連付ける補正係数 β が必要となる。

これに対して今回の方法は、計算で求めた中性子増倍率を基礎にして確からしい中性子増倍率を求めるため、対応関係が単純である。またその補正に使用する中性子束も、実測及び計算ともに固定中性子源の値であるため、対応が明確である。以上の理由により本手法は、計算機がさらに発展するであろう21世紀の技術手法としては有力と考える。

この手法は、従来の中性子源増倍法で補正係数の導出のために使用していた計算を逆に主にすえ、中性子計数率の測定値を補正のために使用するという逆転の発想になっている。この発想をしたことにより、式(25)に示すように中性子計数率の誤差と反応度の誤差の関係が非常に単純であることがわかった。このことは、炉物理研究者が中性子増倍率を求めるのに中性子源増倍法を見出したことと関連する。すなわち従来の成果として導出された手法には、それなりの明確な理由が

あったのである。発想を逆転することにより、このことが見えてくることは興味深いことである。

今回検証したのは、臨界集合体TCAを用いた単純な炉心についてである。この場合には、従来の中性子源増倍法に使用する補正係数を求めることもそんなに困難ではない。今後は、従来法の適用が困難な複雑な体系について、今回の方法の妥当性を検証する予定である。

今回提案した方法は、対象の素性が明確で計算できる場合に適用できる。これは、核燃料が設置された時に期待される未臨界度が確保されていることを確認するのに使用できる。しかしながら状態が変化した時の監視に利用する方法について検討する。

表6に今回解析したTCAの17×17体系の計算例を示す。計算は、正しい濃縮度を入力した場合と濃縮度が10%少ないと誤って入力した場合のふたとおりについて行った。後者の計算では、中性子増倍率は0.9686と小さく算出されたが、中性子計数率も実測値より小さく算出されたため、その誤差で補正した中性子増倍率は0.995とほぼ真値になった。この関係を用いることにより、中性子計数率の変化から反応度の変化を推定することができることを意味する。この変化が、濃縮度によるものか、他の原因によるものかを判定するためには、別の情報が必要と思われるが、それは今後の課題である。

表7は、今回の研究で得られた結果のまとめである。表6及び表7から判断して目標とした問題点は、ほぼ解決できたと考えている。

未臨界度を推定する方法は、中性子源増倍法だけではなく、パルス中性子法もしばしば用いられる。この方法に対しても中性子増倍率と同じ論法が使用できる。基礎式は下に示すものであり、測定値は中性子減衰定数 ω である。

$$\partial \phi / \partial t = V (-D + P) \phi^s = \omega \phi^s \quad (34)$$

$$\{-D + (1/k) P\} \phi = 0 \quad (35)$$

ω の計算値の実測値に対する誤差を用いて、計算で求まる中性子増倍率 k を修正することにより系の中性子増倍率が推定できる。この例についても、今後、有効性を確認する予定である。

最後にここで提案した「計算誤差間接推定法」は、未臨界の推定にのみ使用できるものではなく、一般的な方法論であると考えている。この方法を他の分野に適用し、この方法の中に含まれる基本的な法則についても研究したい。

謝 辞

本報告書のドラフト原稿は、燃料サイクル安全工学部臨界安全研究室の須崎武則氏に見ていただき、問題点を指摘していただいた。最終原稿は、同室山本俊弘氏に査読していただいた。ここに記し感謝の言葉としたい。

あったのである。発想を逆転することにより、このことが見えてくることは興味深いことである。

今回検証したのは、臨界集合体TCAを用いた単純な炉心についてである。この場合には、従来の中性子源増倍法に使用する補正係数を求めることもそんなに困難ではない。今後は、従来法の適用が困難な複雑な体系について、今回の方法の妥当性を検証する予定である。

今回提案した方法は、対象の素性が明確で計算できる場合に適用できる。これは、核燃料が設置された時に期待される未臨界度が確保されていることを確認するのに使用できる。しかしながら状態が変化した時の監視に利用する方法について検討する。

表6に今回解析したTCAの17×17体系の計算例を示す。計算は、正しい濃縮度を入力した場合と濃縮度が10%少ないと誤って入力した場合のふたとおりについて行った。後者の計算では、中性子増倍率は0.9686と小さく算出されたが、中性子計数率も実測値より小さく算出されたため、その誤差で補正した中性子増倍率は0.995とほぼ真値になった。この関係を用いることにより、中性子計数率の変化から反応度の変化を推定することができることを意味する。この変化が、濃縮度によるものか、他の原因によるものかを判定するためには、別の情報が必要と思われるが、それは今後の課題である。

表7は、今回の研究で得られた結果のまとめである。表6及び表7から判断して目標とした問題点は、ほぼ解決できたと考えている。

未臨界度を推定する方法は、中性子源増倍法だけではなく、パルス中性子法もしばしば用いられる。この方法に対しても中性子増倍率と同じ論法が使用できる。基礎式は下に示すものであり、測定値は中性子減衰定数 ω である。

$$\partial \phi / \partial t = V (-D + P) \phi^s = \omega \phi^s \quad (34)$$

$$\{-D + (1/k) P\} \phi = 0 \quad (35)$$

ω の計算値の実測値に対する誤差を用いて、計算で求まる中性子増倍率 k を修正することにより系の中性子増倍率が推定できる。この例についても、今後、有効性を確認する予定である。

最後にここで提案した「計算誤差間接推定法」は、未臨界の推定にのみ使用できるものではなく、一般的な方法論であると考えている。この方法を他の分野に適用し、この方法の中に含まれる基本的な法則についても研究したい。

謝 辞

本報告書のドラフト原稿は、燃料サイクル安全工学部臨界安全研究室の須崎武則氏に見ていただき、問題点を指摘していただいた。最終原稿は、同室山本俊弘氏に査読していただいた。ここに記し感謝の言葉としたい。

文 献

- 1) 桜井 淳、須崎武則、荒川拓也、内藤倣孝：中性子源増倍法による未臨界度の推定、JAERI-Research 95-022 (1995).
- 2) G. Ingram, A.D. Knipe and B.M. Franklin: Development of Subcritical Monitoring Techniques using the DIMPL Reactor, Proc. Int. Topical Meeting on Safety Margin in Criticality Safety, San Fransisco, California, Nov. 26~30 (1989).
- 3) J.F. Briesmeister, Ed.: MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4A, LA-12625 (1993).
- 4) 小迫和明、大山幸夫、前川 洋：FSXLIB-J3；JENDL-3に基づくMCNP用連続エネルギー断面積ライブラリー、JAERI-M 91-187 (1991).
- 5) 文献1)のpp. 3-51及び3-124参照.

表1 17×17体系の計算例

計算条件

体系=17×17

水位=112.5cm

指数実験 $k_m=0.998$ MCNP-4A計算 5万ヒストリー $k_c=0.99218 \pm 0.00280$ 200万ヒストリー 中性子計数率

炉心下端からの距離 (cm)	13.6	23.6	43.6	63.6	83.6	98.6
中性子計数率測定値 $CR_{m,i}$	61759	83343	111545	110921	82487	47160
中性子計数率計算値 $CR_{c,i}$	62000	84000	111500	111000	83000	43000
σ	8%	6%	5%	6%	6%	8%
ϵ_i	-0.00390	-0.00788	0.000403	-0.000712	-0.00622	0.0882
$k_{m,i}$	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998
k_m 平均値	0.998 (指数実験の k に完全に一致)					
σ	0					
$k_m \pm 3\sigma$	0.998					

表2 16×16体系の計算例

計算条件

体系 = (16×16) + 4

水位 = 112.5 cm

指数実験 $k_m = 0.980$ MCNP-4A計算 5万ヒストリー $k_c = 0.97419 \pm 0.00328$ 200万ヒストリー 中性子計数率

炉心下端からの距離 (cm)	13.6	23.6	43.6	63.6	83.6	98.6
中性子計数率測定値 CR _{mi}	5685	8458	13295	13686	8687	4517
中性子計数率計算値 CR _{ci}	2500	7500	11000	14000	7500	5500
ϵ_i	0.560	0.113	0.173	-0.0229	0.137	-0.218
k_{mi}	0.991	0.982	0.983	0.980	0.983	0.984
k_m 平均値	0.982 (指数実験 k にほぼ一致)					
σ	0.00256					
$k_m \pm 3\sigma$	0.974 ~ 0.990 (指数実験の k はこの範囲にある)					

表3 14×14体系の計算例

計算条件

体系=14×14

水位=112.5cm

指数実験 $k_m=0.920$

MCNP-4A計算 5万ヒストリー $k_c=0.90884 \pm 0.00325$ 50万ヒストリー 中性子計数率

炉心下端からの距離 (cm)	13.6	23.6	43.6	63.6	83.6	98.6
中性子計数率測定値 CR_m	1127	1996	4705	5227	2246	993
中性子計数率計算値 CR_c	2500	3500	4700	5200	2000	1000
σ	(12%)	(10%)	(10%)	(9%)	(10%)	(13%)
ε_i	-1.22	-0.754	0.0011	0.0052	0.110	-0.0072
$k_{m,i}$	0.827	0.858	0.914	0.914	0.923	0.913
k_m 平均値	0.910 (指数実験のkに近づく)					
σ	0.0193					
$k_m \pm 3\sigma$	0.854~0.966 (指数実験のkはこの範囲にある)					

表4 11×11体系の計算例

計算条件

体系=11×11

水位=112.5cm

指数実験 $k_m=0.812$

MCNP-4A計算 5万ヒストリー $k_c=0.80423 \pm 0.00317$ 50万ヒストリー 中性子計数率

炉心下端からの距離 (cm)	13.6	23.6	43.6	63.6	83.6	98.6
中性子計数率測定値 CR _{mi}	332	662	2968	3536	871	248
中性子計数率計算値 CR _{ci}	1500	2500	4000	3000	1000	1000
ϵ_i	-3.518	-2.776	-0.348	0.152	-0.148	-3.032
k_{mi}	0.484	0.529	0.759	0.828	0.787	0.512
k_m	0.791 (指数実験 k_m からはずれる方向)					
σ	0.0561					
$k_m \pm 3\sigma$	0.523~0.959 (指数実験の k はこの範囲にある)					

表5 8×8体系の計算例

計算条件

体系=8×8

水位=112.5cm

指数実験 $k_m=0.672$

MCNP-4A計算 5万ヒストリー $k_c=0.67677 \pm 0.00243$ 50万ヒストリー 中性子計数率

炉心下端からの距離 (cm)	13.6	23.6	43.6	63.6	83.6	98.6
中性子計数率測定値 CR _{m i}	88	280	2331	3114	379	79
中性子計数率計算値 CR _{c i}	100	300	2500	2500	400	100
ϵ_i	-0.120	-0.0714	-0.0676	0.197	-0.0554	-0.266
$k_{m i}$	0.656	0.666	0.667	0.727	0.669	0.628
k_m	0.694 (指数実験のkより大きい方向へずれる)					
σ	0.0288					
$k_m \pm 3\sigma$	0.602~0.788 (指数実験のkはこの範囲にある)					

表6 17×17体系で濃縮度を変えた場合の計算例

計算条件

体系=17×17

水位=112.5cm

指数実験 $k_m=0.998$

MCNP-4A計算 正しい濃縮度 200万ヒストリー $k_c=0.99385\pm0.00048$ 200万ヒストリー 中性子計数率

MCNP-4A計算 濃縮度10%減 200万ヒストリー $k_c=0.96855\pm0.00057$ 200万ヒストリー 中性子計数率

炉心下端からの距離 (cm)	13.6	23.6	43.6	63.6	83.6	98.6
中性子計数率測定値 CR _{mi}	61759	83343	111545	110921	82487	47160
中性子計数率計算値 CR _{ci}	12700	15300	22300	20900	18300	10300
ϵ_i	0.794	0.816	0.800	0.812	0.778	0.782
k_{mi}	0.995	0.995	0.995	0.995	0.994	0.994
k_m	0.995 (指数実験のkに近づく方向)					
σ	0.000450					
$k_m \pm 3\sigma$	0.994~0.996 (指数実験のkはこの範囲に入らない)					

表7 計算結果のまとめ

体系	指数実験 k	MCNP k_c	k_m 平均値	$k_m \pm 3\sigma$
17x17	0.998	0.992	0.998	0.998
16x16	0.980	0.974	0.982	0.974~0.990
14x14	0.920	0.909	0.910	0.854~0.966
11x11	0.812	0.804	0.791	0.523~0.959
8x8	0.672	0.677	0.694	0.602~0.788

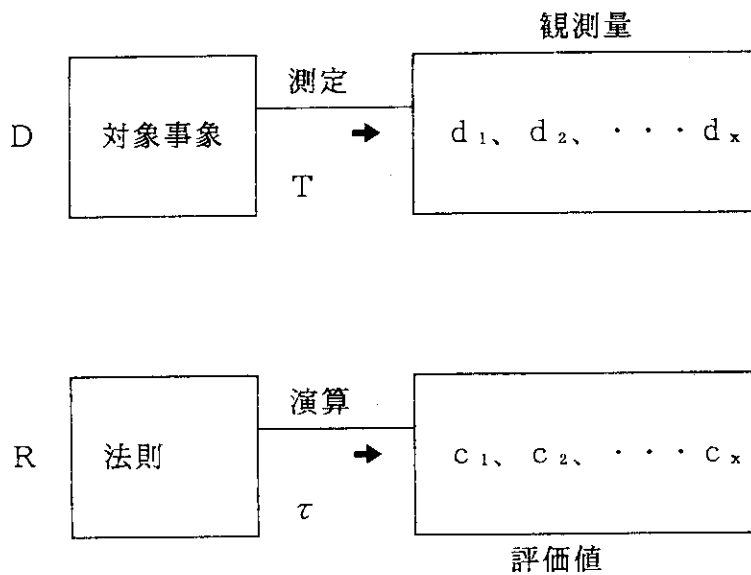
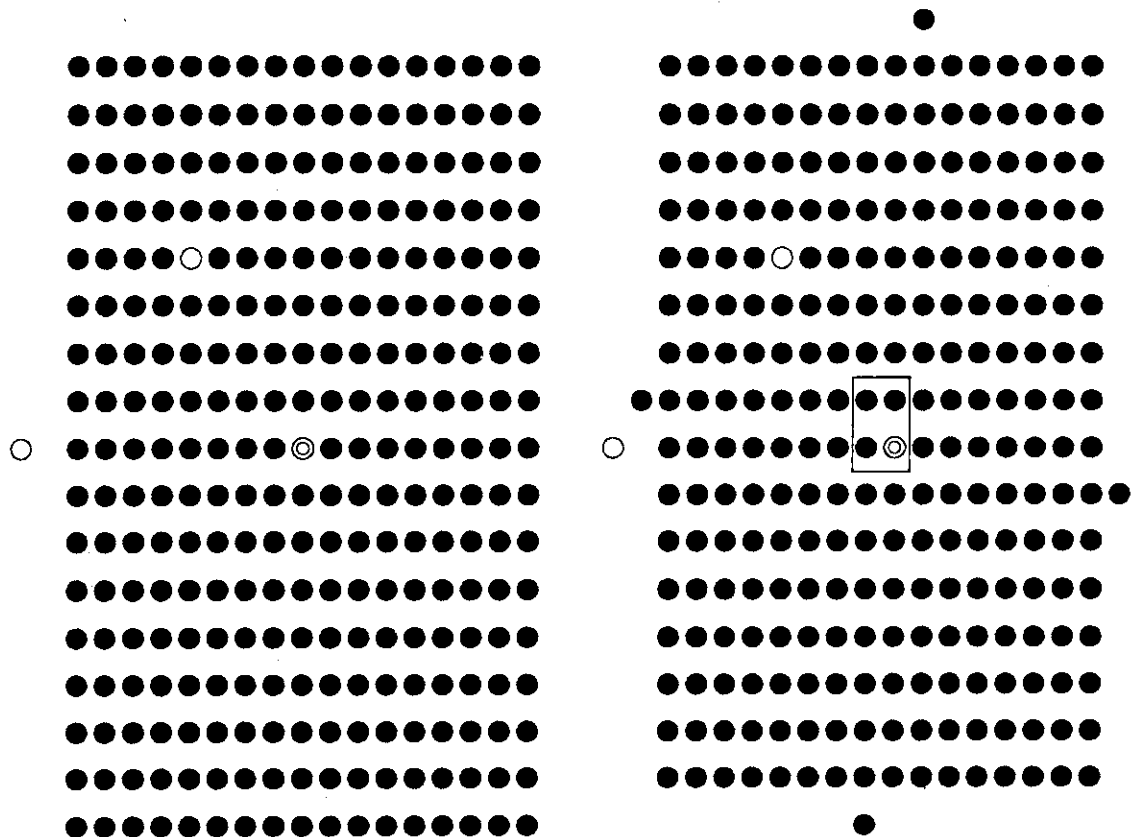
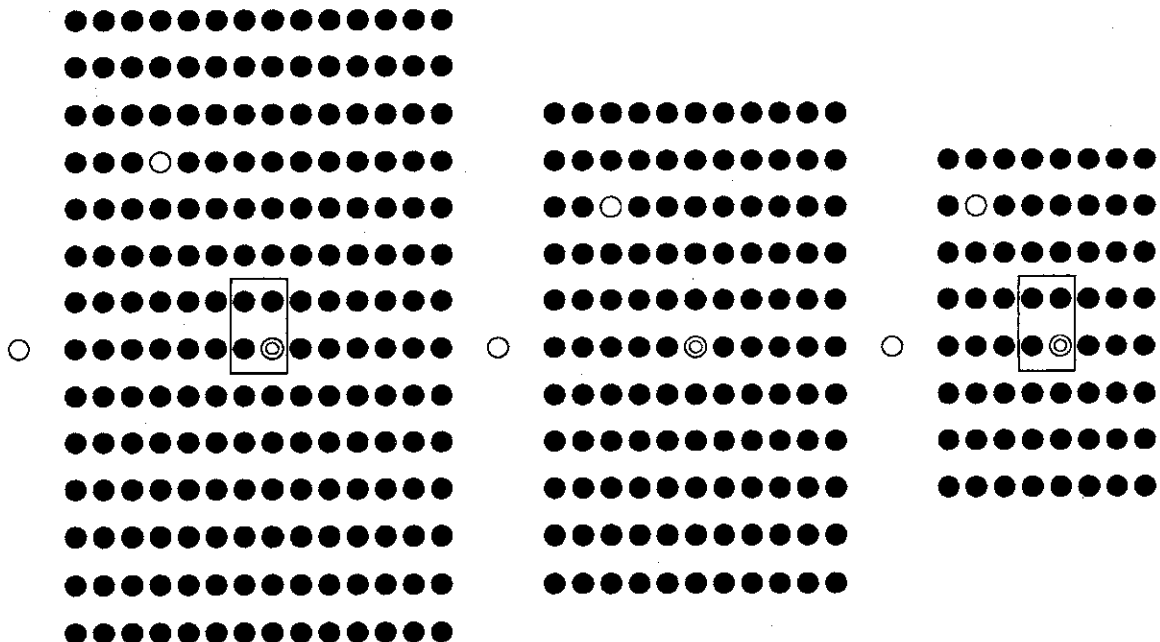


図1 計算誤差間接推定法の概念図



(a) $n = 17$ (●燃料棒、◎中性子源用Al管、○計数管用Al管) (b) $n = 16$

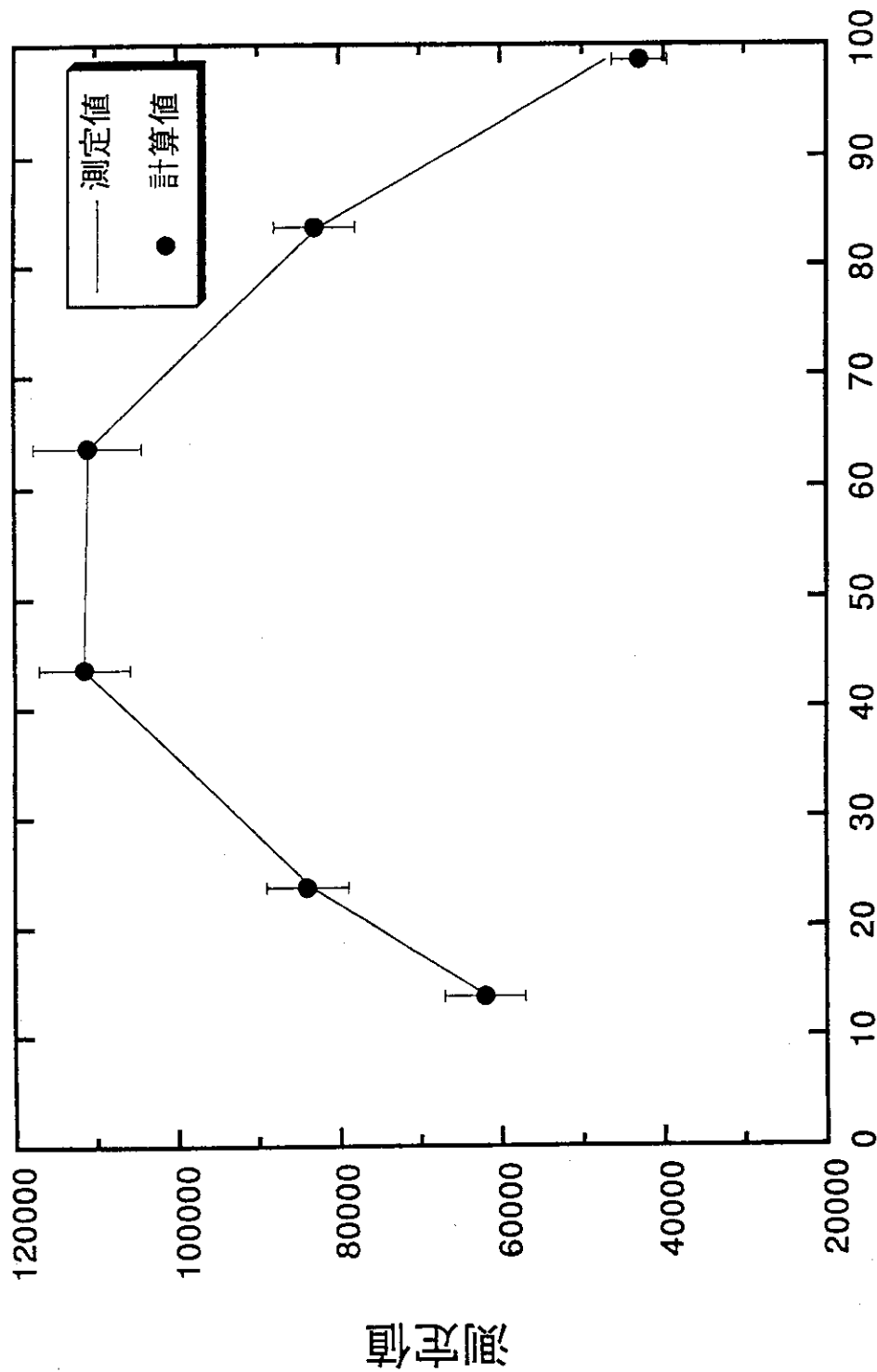


(c) $n = 14$

(d) $n = 11$

(e) $n = 8$

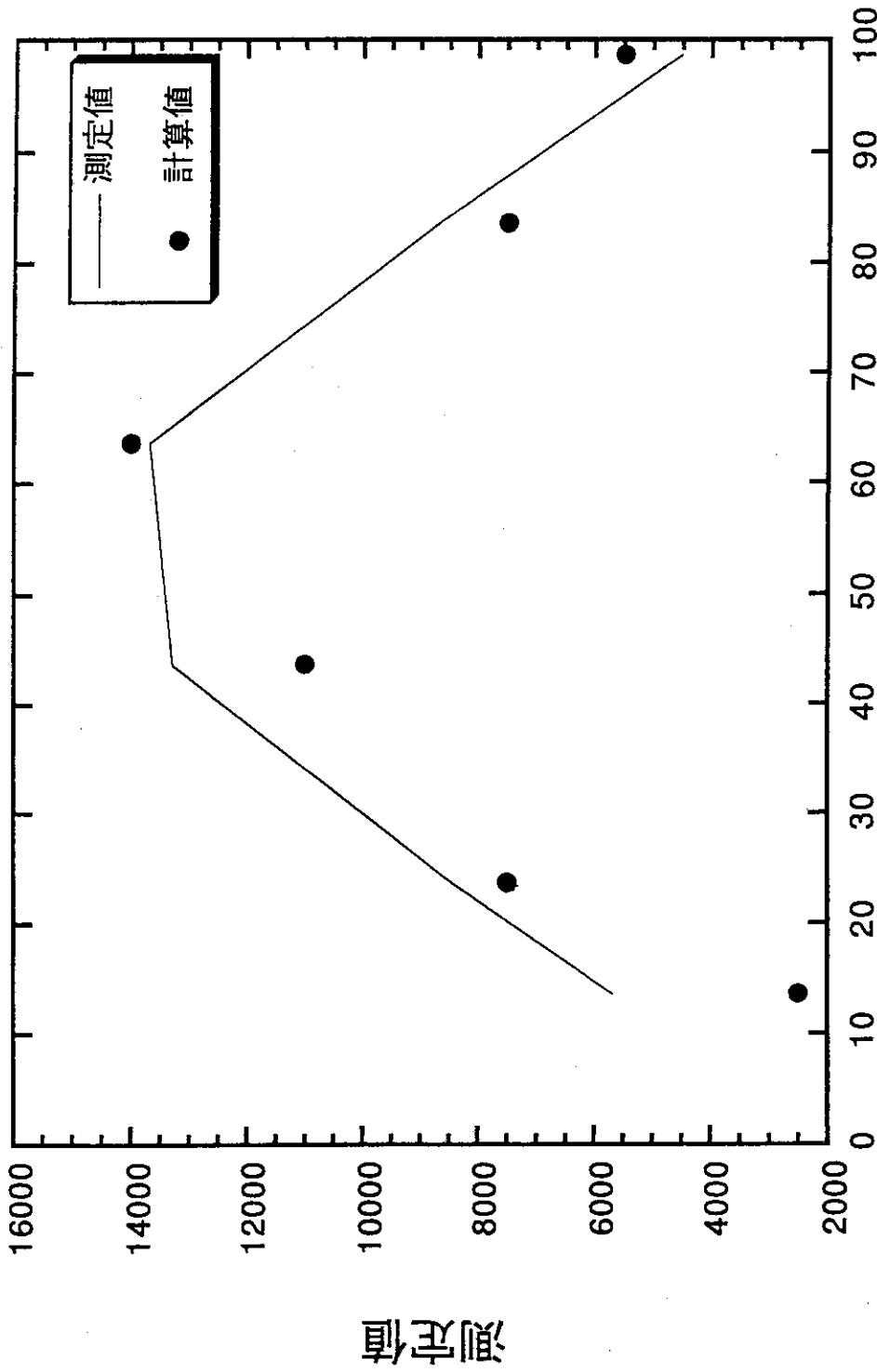
図2 TCAで構成した5体系の正方断面炉心 ($n=16, 14, 8$ では、中性子源は、 \square 部分の中心にアルミニウム管を置き、その中に設置した。)



炉心下端からの距離 cm

17×17体系；水位112.5cm

図3 17×17体系における中性子計数率の実験値と計算値の比較



炉心下端からの距離 cm

(16×16)+4体系；水位112.5cm

図4 16×16体系における中性子計数率の実験値と計算値の比較

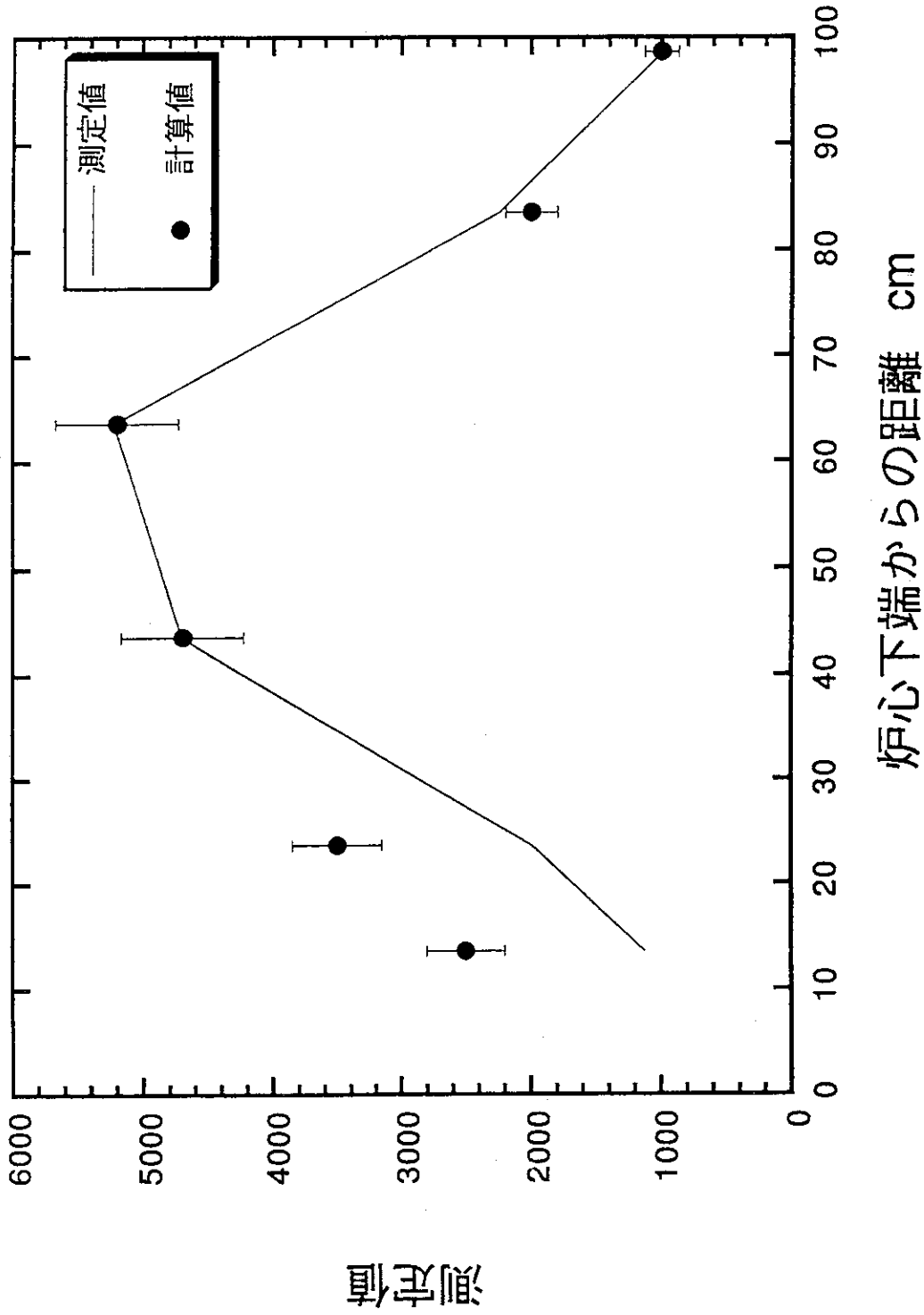
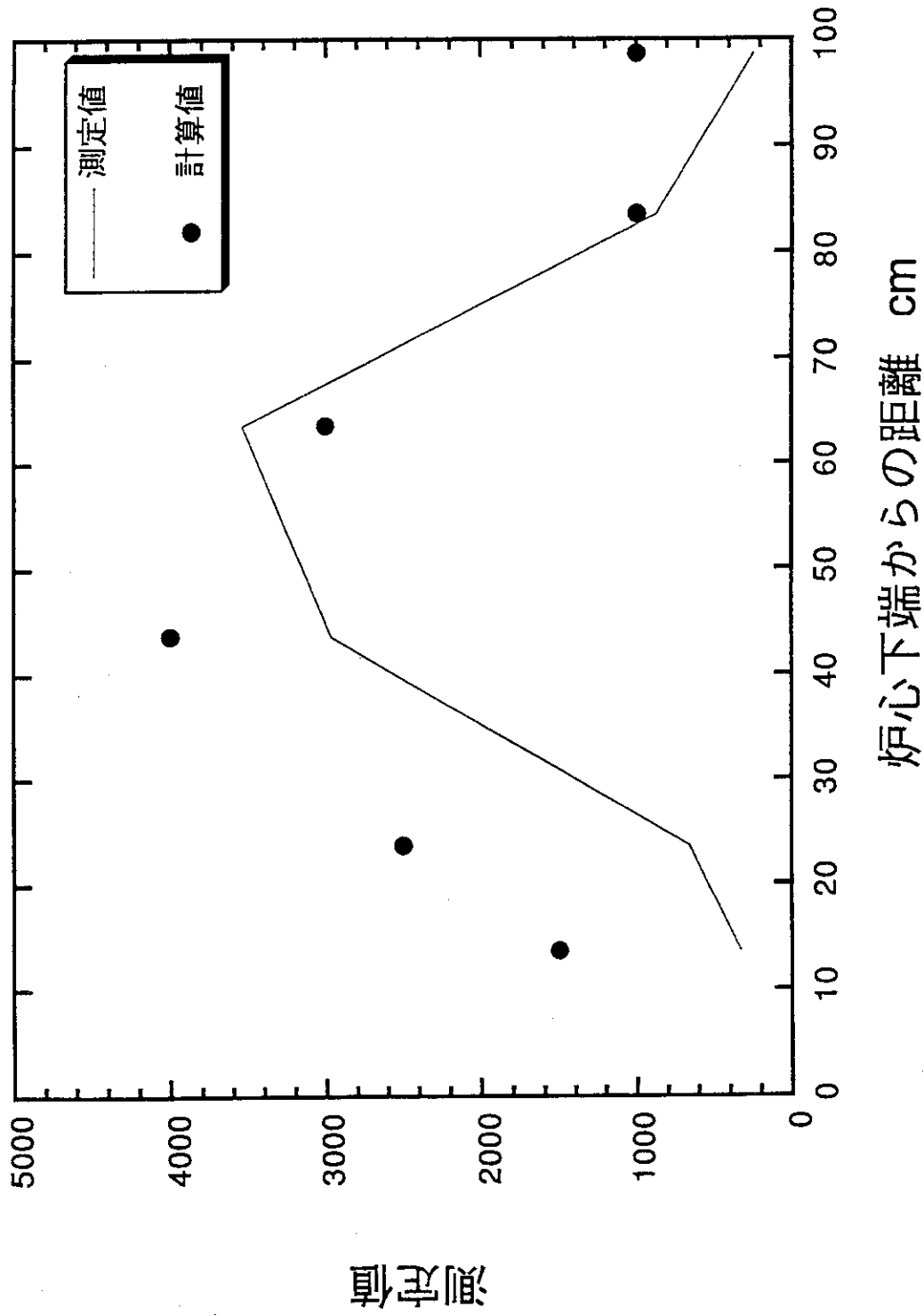


図5 14×14体系における中性子計数率の実験値と計算値の比較



11×11体系；水位112.5cm

図6 11×11体系における中性子計数率の実験値と計算値の比較

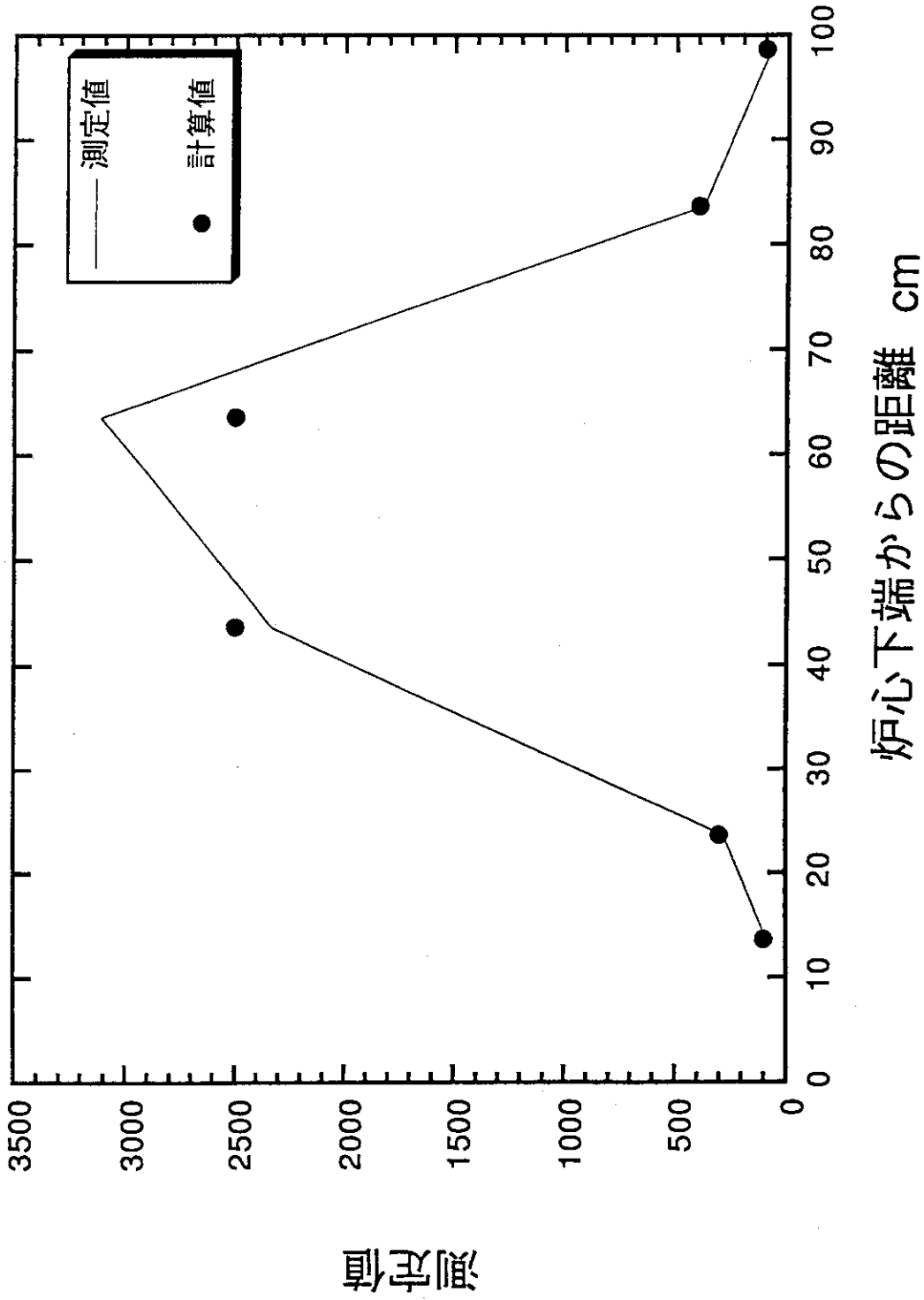


図7 8×8体系における中性子計数率の実験値と計算値の比較