

JAERI-Research

96-045



計算値を用いた未臨界度の推定 (Ⅲ)
— 「計算誤差間接推定法」の指数実験への適用 —

1996年8月

桜井 淳・荒川拓也・山本俊弘・内藤淑孝

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、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。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 Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1996

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 いばらき印刷(株)

計算値を用いた未臨界度の推定 (Ⅲ)
— 「計算誤差間接推定法」の指数実験への適用 —

日本原子力研究所東海研究所燃料サイクル安全工学部

桜井 淳・荒川 拓也・山本 俊弘

内藤 俣孝

(1996年7月19日受理)

「計算誤差間接推定法」では未臨界度予測精度は、 $\rho_m - \rho_c = K (\gamma_{zc}^2 - \gamma_{zm}^2)$ で表される。この式は、未臨界度予測精度は軸方向バックリングの予測精度である ($\gamma_{zc}^2 - \gamma_{zm}^2$) に比例することを意味している。比例定数Kは計算によって求めるが、Kの不確かさが未臨界度予測精度に与える影響は、直接 $\rho_m = -K (\gamma_{zm}^2 + B_z^2)$ によって求めた未臨界度と固有値計算によって求めた ρ_c とを比べる場合に比べてはるかに小さい。したがってKの値は、既算の値を計算によって求めおけば精度は十分に保たれる。もし $\gamma_{zc}^2 = \gamma_{zm}^2$ であれば、 $\rho_c = \rho_m$ となる。TCAの四つの未臨界炉心の実験解析を基にこの方法の信頼性を示すことができた。

Estimation of Subcriticality with the Computed Values (III)

— Application of “Indirect Estimation Method
for Calculation Error” to Exponential Experiment —

Kiyoshi SAKURAI, Takuya ARAKAWA, Toshihiro YAMAMOTO and Yoshitaka NAITO

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

(Received July 19, 1996)

Estimation accuracy for subcriticality on “Indirect Estimation Method for Calculation Error” is expressed in form of $\rho_m - \rho_c = K (\gamma_{zc}^2 - \gamma_{zm}^2)$. This expression means that estimation accuracy for subcriticality is proportional to $(\gamma_{zc}^2 - \gamma_{zm}^2)$ as estimation accuracy of buckling for axial direction. The proportional constant K is calculated, but the influence of the uncertainty of K to estimation accuracy for subcriticality is smaller than in case of comparison for $\rho_m = -K (\gamma_{zm}^2 + B_z^2)$ with calculated ρ_c . When the values of K were calculated, the estimation accuracy is kept enough. If γ_{zc}^2 equal to γ_{zm}^2 , ρ_c equal to ρ_m . Reliability of this method is shown on base of results in which are calculated using MCNP 4A for four subcritical cores of TCA.

Keywords: “Indirect Estimation Method for Calculation Error”, Subcriticality, Estimation Accuracy, Buckling for Axial Direction, TCA, MCNP 4A

目 次

1. 序 論	1
2. 実験法	1
3. 解析法	2
3.1 計算モデル	2
3.2 中性子増倍率の計算	2
3.3 中性子計数率の計算	4
4. 結果の比較	4
5. 討論及び結論	6
謝 辞	7
参考文献	8
付録 MCNP 4 Aによる中性子計数率計算入力	19

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Method	1
3. Analytical Method	2
3.1 Computational Model	2
3.2 Calculation of Neutron Multiplication Factor	2
3.3 Calculation of Neutron Count Rate	4
4. Comparison of Results	4
5. Discussion and Conclusions	6
Acknowledgements	7
References	8
Appendix MCNP 4A Input for Calculation of Neutron Count Rate	19

1. 序 論

筆者らは、「計算誤差間接推定法」¹⁻³⁾ (Indirect Estimation Method for Calculation Error) による計算値を用いた未臨界度の推定法の研究を行っている。

この「計算誤差間接推定法」とは、未臨界体系の「ある物理量」の実測値に対する計算値の誤差を評価し、その誤差を考慮して計算で求めた反応度 ρ に補正を施そうというまったく新しい考え方である。

「ある物理量」として、これまでに中性子計数率空間分布及び中性子減衰定数を対象としてきたが、同様の考え方が指数実験⁴⁾における中性子計数率空間分布の傾きに対しても適用できると考え、TCAの四つの未臨界体系を例に技術の成立性の検討を行った。

基本的な考え方はつぎのとおりである。

中性子計数率空間分布への適用の場合には、中性子計数率の実測値を CR_{m_i} 、その計算値を CR_{c_i} とすれば、実測値に対する計算値の誤差 ε_i は、各々 $\varepsilon_i = (CR_{m_i} - CR_{c_i}) / CR_{m_i}$ となり、実測値で補正された反応度 ρ_m は、計算で求めた反応度を ρ_c とすれば、 $\rho_m = (1 - \varepsilon_i) \rho_c$ 、 $\langle \rho_m \rangle / \rho_c = (\sum CR_{m_i}^2 \cdot \rho_{m_i}) / \sum CR_{m_i}^2$ となる。

中性子減衰定数への適用の場合には、中性子減衰定数の実測値を α_m 、その計算値を α_c 、中性子生成時間を Λ とすれば、実測値で補正された反応度 ρ_m は、 $\rho_m = \rho_c - (\alpha_m - \alpha_c) \Lambda$ となる。

同様に指数実験における中性子計数率空間分布の傾きへの適用の場合、反応度-バックリング換算係数を K 、中性子計数率空間分布の傾きの実測値を $\gamma_{z,m}$ 、その計算値を $\gamma_{z,c}$ とすれば、 $\rho_m - \rho_c = K (\gamma_{z,c}^2 - \gamma_{z,m}^2)$ となる。

今回は、特に $\gamma_{z,m}$ 及び $\gamma_{z,c}$ の精度のよい決め方を検討した。

本報告書は、2. 実験法、3. 解析法、4. 結果の比較、5. 討論及び結論、付録 MCN P 4Aによる中性子計数率計算入力からなる。

2. 実験法

TCAの四つの未臨界体系で指数実験を行い、炉心の軸方向の中性子計数率空間分布の測定を行った。

その実験体系図を図-1~4に示す。図-3は、17×17配列炉心の右最上端の四本の正方燃料棒配列をひとつのセルとして、そのような各々のセルよりランダムに一本の燃料棒を引き抜いた体系である。図-4は、図-3の体系からさらに一本ずつの燃料棒を引き抜いた体系である。

1. 序 論

筆者らは、「計算誤差間接推定法」¹⁻³⁾ (Indirect Estimation Method for Calculation Error) による計算値を用いた未臨界度の推定法の研究を行っている。

この「計算誤差間接推定法」とは、未臨界体系の「ある物理量」の実測値に対する計算値の誤差を評価し、その誤差を考慮して計算で求めた反応度 ρ に補正を施そうというまったく新しい考え方である。

「ある物理量」として、これまでに中性子計数率空間分布及び中性子減衰定数を対象としてきたが、同様の考え方が指数実験⁴⁾における中性子計数率空間分布の傾きに対しても適用できると考え、TCAの四つの未臨界体系を例に技術の成立性の検討を行った。

基本的な考え方はつぎのとおりである。

中性子計数率空間分布への適用の場合には、中性子計数率の実測値を CR_{m_i} 、その計算値を CR_{c_i} とすれば、実測値に対する計算値の誤差 ε_i は、各々 $\varepsilon_i = (CR_{m_i} - CR_{c_i}) / CR_{m_i}$ となり、実測値で補正された反応度 ρ_m は、計算で求めた反応度を ρ_c とすれば、 $\rho_m = (1 - \varepsilon_i) \rho_c$ 、 $\langle \rho_m \rangle / \rho_c = (\sum CR_{m_i}^2 \cdot \rho_{m_i}) / \sum CR_{m_i}^2$ となる。

中性子減衰定数への適用の場合には、中性子減衰定数の実測値を α_m 、その計算値を α_c 、中性子生成時間を Λ とすれば、実測値で補正された反応度 ρ_m は、 $\rho_m = \rho_c - (\alpha_m - \alpha_c) \Lambda$ となる。

同様に指数実験における中性子計数率空間分布の傾きへの適用の場合、反応度-バックリング換算係数を K 、中性子計数率空間分布の傾きの実測値を γ_{zm} 、その計算値を γ_{zc} とすれば、 $\rho_m - \rho_c = K (\gamma_{zc}^2 - \gamma_{zm}^2)$ となる。

今回は、特に γ_{zm} 及び γ_{zc} の精度のよい決め方を検討した。

本報告書は、2. 実験法、3. 解析法、4. 結果の比較、5. 討論及び結論、付録 MCN P 4Aによる中性子計数率計算入力からなる。

2. 実 験 法

TCAの四つの未臨界体系で指数実験を行い、炉心の軸方向の中性子計数率空間分布の測定を行った。

その実験体系図を図-1~4に示す。図-3は、17×17配列炉心の右最上端の四本の正方燃料棒配列をひとつのセルとして、そのような各々のセルよりランダムに一本の燃料棒を引き抜いた体系である。図-4は、図-3の体系からさらに一本ずつの燃料棒を引き抜いた体系である。

UO₂ペレットの濃縮度は2.6重量%で、炉心の格子間隔は1.956 cmである⁶⁾。

中性子源はカルフォルニウム-252であり、軸方向高さZ=0 cm（燃料棒ペレットの最下端位置に相当）に設置した。水位は四つの体系とも100 cmとした。

軸方向の中性子計数率空間分布は、炉心のA位置でウラン-235小型核分裂計数管により5 cm間隔で測定した。

3. 解析法

体系の中性子増倍率及び中性子計数率空間分布は、連続エネルギーモンテカルロコードMCNP 4A⁹⁾で計算した。利用したポイントワイズ中性子断面積は、原研の核融合中性子工学研究室でJENDL-3.2を基に編集したものである⁷⁾。ただし、熱中性子散乱テーブルS(α , β)は、MCNP 4Aの付属ライブラリーに含まれていたものである。

3.1 計算モデル

実験に利用した燃料棒の全長は、187.56 cmであるが、今回モデル化した部分は、これまでの計算例に従い、燃料有効長144.15 cmの部分のみである。これまでの経験から、燃料棒の上下端部のアルミニウムプラグを無視しても、計算結果には影響しないことがわかっている。燃料棒配列の正方断面の周囲および下部には、中性子増倍率の収束状況から判断し、厚さ30 cmの水反射体を想定している。

ペレット直径は1.250 cmであり、密度は10.40 g/cm³（理論密度の94.9%）である。アルミニウム被覆管の内径は1.265 cmであり、肉厚は0.076 cmである。中性子源及び小型核分裂計数管を収めたアルミニウム管（後者のみ中空）の内径・肉厚は、被覆管と同じである。水の温度は20℃であった。

計算に用いた原子個数密度（10²⁴個/cm³単位）は、UO₂に対して、²³⁵U: 6.086 × 10⁻⁴、²³⁸U: 2.255 × 10⁻²、¹⁶O: 4.725 × 10⁻²、被覆管に対して、Al: 5.587 × 10⁻²（エアギャップ部分と均一にしてある）、水に対して、¹H: 6.676 × 10⁻²、¹⁶O: 3.338 × 10⁻²である。空気の部分は、真空とした。

（以上の基本的な数値はすべて文献5より引用した。）

ポイントワイズ中性子断面積については、すべて温度300 Kのものを利用した。

3.2 中性子増倍率の計算

中性子増倍率 k_{eff} の計算においては、標準偏差1 σ を0.3%以下に抑えるため、ヒストリー数は5万とした。粒子数は、バッチ当たり500とし、110バッチの計算をし、そのうち最初の10バッチの結果はスキップした。MCNP 4Aでは、最終的な中性子増倍率は、

UO₂ペレットの濃縮度は2.6重量%で、炉心の格子間隔は1.956 cmである⁵⁾。

中性子源はカルフォルニウム-252であり、軸方向高さZ=0 cm（燃料棒ペレットの最下端位置に相当）に設置した。水位は四つの体系とも100 cmとした。

軸方向の中性子計数率空間分布は、炉心のA位置でウラン-235小型核分裂計数管により5 cm間隔で測定した。

3. 解析法

体系の中性子増倍率及び中性子計数率空間分布は、連続エネルギーモンテカルロコードMCNP 4A⁶⁾で計算した。利用したポイントワイズ中性子断面積は、原研の核融合中性子工学研究室でJENDL-3.2を基に編集したものである⁷⁾。ただし、熱中性子散乱テーブルS(α , β)は、MCNP 4Aの付属ライブラリーに含まれていたものである。

3.1 計算モデル

実験に利用した燃料棒の全長は、187.56 cmであるが、今回モデル化した部分は、これまでの計算例に従い、燃料有効長144.15 cmの部分のみである。これまでの経験から、燃料棒の上下端部のアルミニウムプラグを無視しても、計算結果には影響しないことがわかっている。燃料棒配列の正方断面の周囲および下部には、中性子増倍率の収束状況から判断し、厚さ30 cmの水反射体を想定している。

ペレット直径は1.250 cmであり、密度は10.40 g/cm³（理論密度の94.9%）である。アルミニウム被覆管の内径は1.265 cmであり、肉厚は0.076 cmである。中性子源及び小型核分裂計数管を収めたアルミニウム管（後者のみ中空）の内径・肉厚は、被覆管と同じである。水の温度は20℃であった。

計算に用いた原子個数密度（10²⁴個/cm³単位）は、UO₂に対して、²³⁵U: 6.086 × 10⁻⁴、²³⁸U: 2.255 × 10⁻²、¹⁶O: 4.725 × 10⁻²、被覆管に対して、Al: 5.587 × 10⁻²（エアギャップ部分と均一にしてある）、水に対して、¹H: 6.676 × 10⁻²、¹⁶O: 3.338 × 10⁻²である。空気の部分は、真空とした。

（以上の基本的な数値はすべて文献5より引用した。）

ポイントワイズ中性子断面積については、すべて温度300 Kのものを利用した。

3.2 中性子増倍率の計算

中性子増倍率 k_{eff} の計算においては、標準偏差1 σ を0.3%以下に抑えるため、ヒストリー数は5万とした。粒子数は、バッチ当たり500とし、110バッチの計算をし、そのうち最初の10バッチの結果はスキップした。MCNP 4Aでは、最終的な中性子増倍率は、

衝突エスティメータ $k^{c.eff}$ 及び吸収エスティメータ $k^{a.eff}$ 、トラックレングス・エスティメータ $k^{TL.eff}$ を組合わせた「共分散加重組合せエスティメータ」⁶⁾ で評価している。

$$k^{c.eff} = (1/N) \sum_i W_i \left[\sum_k f_k \cdot \nu_k \cdot \sigma_{Fk} / \sum_k f_k \cdot \sigma_{Tk} \right] \quad (1)$$

$$k^{a.eff} = (1/N) \sum_i W_i \cdot \nu_k \left[\sigma_{Fk} / (\sigma_{Ak} + \sigma_{Fk}) \right] \quad (2)$$

$$k^{TL.eff} = (1/N) \sum_i W_i \cdot \rho \cdot d \cdot \sum_k f_k \cdot \nu_k \cdot \sigma_{Fk} \quad (3)$$

ここで、

- i : サイクル当たりの全衝突に対する和 (衝突)
- i : k^{th} アイソトープにおける捕獲イベントに対する和 (吸収)
- i : 全中性子経路に対する和 (トラックレングス)
- k : i^{th} の衝突に含まれる全アイソトープに対する和
- σ_{Tk} : ミクロ全断面積
- σ_{Fk} : ミクロ核分裂断面積
- σ_{Ak} : 核分裂を除くミクロ吸収断面積
- ν_k : 核分裂当たり発生する即発あるいは全中性子の平均数
- f_k : 核種 k の割合
- N : 公称線源サイズ
- W_i : 粒子ウエイト
- ρ : セルの原子密度
- d : 最終イベントからの経路トラックレングス

中性子増倍率の計算に影響する不確定要因には、ウラン濃縮度 ($\pm 0.01 \text{ wt. } \%$)、ウランペレット密度 ($\pm 0.05 \text{ g/cm}^3$)、ウランペレット直径 ($\pm 0.05 \text{ mm}$)、燃料被覆管の直径 ($\pm 0.005 \text{ mm}$) 及び肉厚 ($\pm 0.005 \text{ mm}$)、燃料棒格子ピッチ ($\pm 0.02 \text{ mm}$)、燃料棒のアルミニウム製下部プラグのモデル化省略、水反射体の厚さ、プール水の温度、水位の設定 ($\pm 0.3 \text{ mm}$)、中性子断面積の編集温度 (300 K) などが考えられる⁸⁾。

今回設定した条件では、これらの影響はすべて無視できる⁸⁾。いちばん影響すると考えられるプール水の温度についても、今回のすべての実験は、同一時期に実施されており、実際の温度変化は、 $20.3 \pm 0.4 \text{ }^\circ\text{C}$ の範囲に入っており、影響は無視できる。

この計算に要した時間は、Sunワークステーション (Sparc-20) を利用した場合、体系にもよるが、1ケース当たり5万ヒストリーで約1時間であった。

3. 3 中性子計数率の計算

この計算は、MCNP 4Aの外部固定点線源⁹⁾のオプションで実施した。

中性子計数率CRは、つぎの式に示すとおり、中性子スペクトル $\Phi(E)$ にウラン-235の核分裂断面積 $\sigma_f(E)$ 及び小型核分裂計数管の検出効率 $\eta(E)$ をかけて積分したものである。

$$CR = \int \Phi(E) \cdot \sigma_f(E) \cdot \eta(E) dE \quad (4)$$

中性子計数率の約90%は熱中性子束によるもので、残り約10%は熱外中性子束によるものである。その精度は、中性子スペクトルの熱中性子部分の精度によって決まる。そのため、熱中性子束の標準偏差を1~2%に抑えるために、ヒストリー数は最低100万までとした。(ただし20万ヒストリーの結果についても参考にした。)

この計算においては、トラックレングス・エスティメータを利用して中性子束 Φ^{TL} を求めた。

$$\Phi^{TL} = W \cdot T_1 / V \quad (5)$$

ここで、W : 粒子ウエイト

T_1 : トラックレングス (cm) = 通過時間 × 速度、V : 体積 (cm³)

この計算においては、小型核分裂計数管を収めたアルミニウム管の内面とZ=0から5cm間隔で定義されたZ面との囲む20個のシリンダー領域を定義し、それをトラックレングス・エスティメータのセルとした。

実験に利用した小型核分裂計数管の直径は0.62cm、有効長は2.5cmであるが、計算では精度を上げるために一桁大きいセルを定義した。しかしながらこの計算の目的が中性子束の絶対値を求めることではなく、中性子計数率空間分布の傾き γ_z のみ問題としているため、このような計算条件を設定しても結果には影響しない。

この計算に要した時間は、Sunワークステーション (Sparc-20) を利用した場合、体系にもよるが、1ケース当たり100万ヒストリーで約1日であった。もし小型核分裂計数管と同じ大きさのトラックレングス・エスティメータを定義していたならば、同程度の精度を得るには1ケース当たり10日もかかっていたはずである。

4. 結果の比較

実験体系の中性子増倍率は、指数実験の結果及びMCNP 4Aにより推定した。

実験体系の反応度 $\rho = (k_{eff} - 1) / k_{eff}$ は、指数実験の理論より、つぎの式で表せる。

$$\rho = -K (\gamma_z^2 + B_z^2) \quad (6)$$

3. 3 中性子計数率の計算

この計算は、MCNP 4Aの外部固定点線源⁹⁾のオプションで実施した。

中性子計数率CRは、つぎの式に示すとおり、中性子スペクトル $\Phi(E)$ にウラン-235の核分裂断面積 $\sigma_f(E)$ 及び小型核分裂計数管の検出効率 $\eta(E)$ をかけて積分したものである。

$$CR = \int \Phi(E) \cdot \sigma_f(E) \cdot \eta(E) dE \quad (4)$$

中性子計数率の約90%は熱中性子束によるもので、残り約10%は熱外中性子束によるものである。その精度は、中性子スペクトルの熱中性子部分の精度によって決まる。そのため、熱中性子束の標準偏差を1~2%に抑えるために、ヒストリー数は最低100万までとした。(ただし20万ヒストリーの結果についても参考にした。)

この計算においては、トラックレングス・エスティメータを利用して中性子束 Φ^{TL} を求めた。

$$\Phi^{TL} = W \cdot T_1 / V \quad (5)$$

ここで、W : 粒子ウエイト

T_1 : トラックレングス (cm) = 通過時間 × 速度、V : 体積 (cm³)

この計算においては、小型核分裂計数管を取めたアルミニウム管の内面とZ=0から5cm間隔で定義されたZ面との囲む20個のシリンダー領域を定義し、それをトラックレングス・エスティメータのセルとした。

実験に利用した小型核分裂計数管の直径は0.62cm、有効長は2.5cmであるが、計算では精度を上げるために一桁大きいセルを定義した。しかしながらこの計算の目的が中性子束の絶対値を求めることではなく、中性子計数率空間分布の傾き γ_{zc} のみ問題としているため、このような計算条件を設定しても結果には影響しない。

この計算に要した時間は、Sunワークステーション (Sparc-20) を利用した場合、体系にもよるが、1ケース当たり100万ヒストリーで約1日であった。もし小型核分裂計数管と同じ大きさのトラックレングス・エスティメータを定義していたならば、同程度の精度を得るには1ケース当たり10日もかかっていたはずである。

4. 結果の比較

実験体系の中性子増倍率は、指数実験の結果及びMCNP 4Aにより推定した。

実験体系の反応度 $\rho = (k_{eff} - 1) / k_{eff}$ は、指数実験の理論より、つぎの式で表せる。

$$\rho = -K (\gamma_z^2 + B_z^2) \quad (6)$$

ここで、 K ：バックリングー反応度換算係数 (cm^2)、 γ_z^2 ：炉心軸方向のバックリング (cm^{-2})、 B_z^2 ：炉心軸方向の形状バックリング (cm^{-2}) である。 $B_z^2 = (\pi / (H + \lambda_z))^2$ であり、ここで H ：炉心高さ (cm)、 λ_z ：軸方向外挿距離⁹⁾ ($H \leq 144 \text{ cm}$ において 12.2 cm 、 $H > 144 \text{ cm}$ において 13 cm) である。 K と γ_z の関係については、利用しやすいようにつぎのような式でフィッティングした。(ここで使用した数字の根拠は文献4に示されている。) フィッティングの信頼度は、99.9%である。

$$K = 5863.6 \gamma_z^3 - 233.54 \gamma_z^2 + 21.879 \gamma_z + 31.462 \quad (7)$$

四つの体系において指数実験で求めた中性子計数率空間分布をそれらに対応する20万ヒストリーの場合の計算結果とともに図-5~12に示す。同様にそれら四つの体系の実測値とそれらに対応する100万ヒストリーの場合の計算結果についても図-13~20に示す。

実測値及び計算値ともそれらの絶対値に意味があるのではなく、空間分布の傾きのみに興味があるので、計算値については実測値に規格化していない。

図-6、8、10、12、14、16、18、20には、実測値と計算値のフィッティング結果が示してある。フィッティングの信頼度 R も示してある。フィッティング結果については、 $CR \propto \exp(-\gamma_z \cdot z)$ の形の式で示してある。ただし実測値についても図-6と14、図-8と16、図-10と18、図-12と20ではフィッティングの条件をいくぶん変えてあるためにわずかな差が生じているが、いずれの体系においても後者の結果の方がよいと判断される。

四つの体系に対して式(6)と(7)から求めた実験解析の結果及びMCNP 4Aでの固有値 k_{eff} を整理して表-1に示す。

表-1 各体系の炉心軸方向の形状バックリング B_z^2 及び炉心軸方向のバックリング γ_z^2 、バックリングー反応度換算係数 K 、指数実験の反応度から求めた中性子増倍率 k_m 、MCNP 4Aでの固有値 k_c

実験体系	B_z^2	γ_{zm}^2	γ_{zc}^2	K	k_m	k_c
17X17-7X7	7.84-4	1.12-3	1.12-3	32.3	0.942	0.951
17X17-12X12	7.84-4	8.23-3	8.24-3	35.9	0.755	0.762
17X17- α	7.84-4	2.99-3	2.98-3	32.9	0.890	0.894
17X17- β	7.84-4	9.22-3	9.20-3	36.6	0.732	0.725

5. 討論及び結論

TCAでは、水平方向の幾何学的バックリング B_g^2 が材料バックリング B_m^2 よりも大きな未臨界炉心の下端に中性子源を設置すれば、軸方向に指数関数的に減衰する中性子計数率分布CRが得られる。この計数率分布を測定して減衰定数 γ_z (γ_z^2 : 軸方向バックリング)を求めることができる。

各体系とも軸方向の各測定点のCRについては、 γ_z の精度のよい決定を行うためには少なくとも1000以上の計数が望ましい。測定値をフィッティングした図-6、8、10、12からわかるとおり、この条件はほぼ満たされているものの、図-8ではもう少し計数を多くする必要があったように思える。それでもフィッティングの信頼度RはR=99~100%になっている。今後同様の実験においては、理想的には測定により時間をかけて各測定点とも計数を少なくとも数千程度まで高める必要がある。

体系の未臨界度 ρ_m は、 $\rho_m = -K(\gamma_{zm}^2 + B_z^2)$ で表されることが示されている¹⁾。ここでKは実験的に直接求めることができない量であって、計算によって評価する必要がある。したがって指数実験を用いた未臨界度予測精度では、厳密には固有値計算によって求めた未臨界度 ρ_c と ρ_m との比較は行えない。

「計算誤差間接推定法」では未臨界度予測精度は、 $\rho_m - \rho_c = K(\gamma_{zc}^2 - \gamma_{zm}^2)$ で表される。この式は、未臨界度予測精度は軸方向バックリングの予測精度である($\gamma_{zc}^2 - \gamma_{zm}^2$)に比例することを意味している。比例定数Kは計算によって求めるが、Kの不確かさが未臨界度予測精度に与える影響は、直接 $\rho_m = -K(\gamma_{zm}^2 + B_z^2)$ によって求めた未臨界度と固有値計算によって求めた ρ_c とを比べる場合に比べてはるかに小さい。したがってKの値は、既算の値を計算によって求めておけば精度は十分に保たれる。もし $\gamma_{zc}^2 = \gamma_{zm}^2$ であれば、 $\rho_c = \rho_m$ となる。

T. Yamamoto¹⁰⁾は、臨界でのKの値が炉心構成及び温度、強い吸収体の有無に関わらずほぼ一定(厳密には変化が非常に小さい)であることを示している。式(7)は正方配列炉心の条件で評価したものであるが、今回の四つの未臨界非正方配列炉心に適用しても支障ないと考えられる。そのことは表-1の結果からも説明できる。

四つの体系の $\rho_m - \rho_c = K(\gamma_{zc}^2 - \gamma_{zm}^2)$ の値及び k_c への補正量を表-2に示す。 $\gamma_{zc}^2 - \gamma_{zm}^2 \approx 0$ であり、 k_c への補正量はゼロになる。MCNP 4Aによる γ_z の計算値は、実験的に求めた値に非常によく一致しており、「計算誤差間接推定法」によれば、MCNP 4AとJENDL-3.2の組合せによる未臨界の予測精度は非常に高いことがわかる。正方配列炉心のKを今回のような非正方配列炉心に適用しても¹¹⁾、正方配列炉心への適用と同程度の精度が得られることがわかった。

表-2 $\rho_m - \rho_c = K (\gamma_{zc}^2 - \gamma_{zm}^2)$ の値及び k_c への補正量

実験体系	$\rho_m - \rho_c$	k_c への補正量
17x17-7x7	0	0
17x17-12x12	3.55-4	0
17x17- α	-3.29-4	0
17x17- β	-7.32-4	0

謝 辞

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は、指数実験を含む未臨界実験技術についてご指導いただいた。同研究室室長の三好慶典氏には、本報告書の原稿の査読をしていただいた。ここに記し感謝の言葉としたい。

表-2 $\rho_m - \rho_c = K (\gamma_{zc}^2 - \gamma_{zm}^2)$ の値及び k_c への補正量

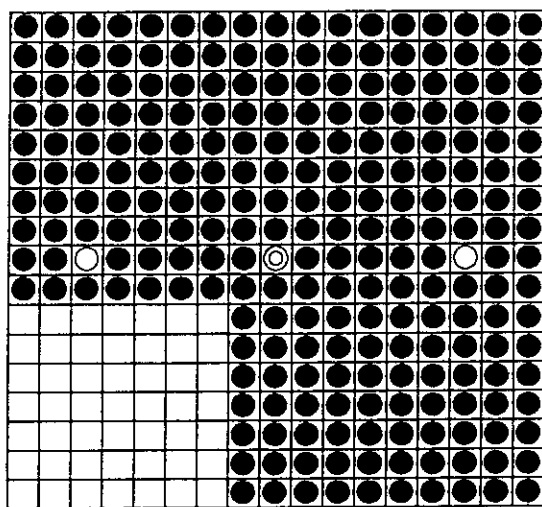
実験体系	$\rho_m - \rho_c$	k_c への補正量
17x17-7x7	0	0
17x17-12x12	3.55-4	0
17x17- α	-3.29-4	0
17x17- β	-7.32-4	0

謝 辞

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は、指数実験を含む未臨界実験技術についてご指導いただいた。同研究室室長の三好慶典氏には、本報告書の原稿の査読をしていただいた。ここに記し感謝の言葉としたい。

参 考 文 献

- 1) 内藤倣孝、荒川拓也、桜井 淳：計算値を用いた未臨界度の推定 (I)、JAERI-Research 95-053 (1995)。
- 2) 桜井 淳、荒川拓也、内藤倣孝：計算値を用いた未臨界度の推定 (II)、JAERI-Research 96-008 (1996)。
- 3) Y. Naito, T. Yamamoto, T. Arakawa and K. Sakurai: Estimation of Subcriticality of TCA Using Indirect Estimation Method for Calculation Error、炉物理国際会議PHYSOR96への提出論文 (1996)。
- 4) T. Suzaki: Subcriticality Determination of Low-Enriched UO_2 Lattices in Water By Exponential Experiment, J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 28, No. 12, pp. 1067-1077 (1991)。
- 5) H. Tsuruta, et al. : Critical Sizes of Light Water Moderated UO_2 and PuO_2-UO_2 Lattices, JAERI 1254 (1978)。
- 6) J. F. Briesmeister, Ed. : MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4A, LA-12625 (1993)。
- 7) 小迫和明、大山幸夫、前川 洋：FSXLIB-J3R2；JENDL-3. 2に基づくMCNP用連続エネルギー断面積ライブラリー、JAERI-Data/Code 94-020 (1994)。
- 8) Y. Miyoshi, T. Arakawa and T. Yamamoto: Critical Arrays of Low Enriched UO_2 Fuel Rods with Volume Ratio Ranging from 1.5 to 3.0, (to be published)。
- 9) 文献6) のpp. 3-51及び3-124参照。
- 10) T. Yamamoto: Computational Study on the Buckling-Reactivity Conversion Factor on Light Water Moderated UO_2 Core, JAERI-M 93-170 (1993)。
- 11) 桜井 淳、荒川拓也、内藤倣孝：指数実験法の複雑配列炉心への適用性の検討、JAERI-Research 95-082 (1995)。

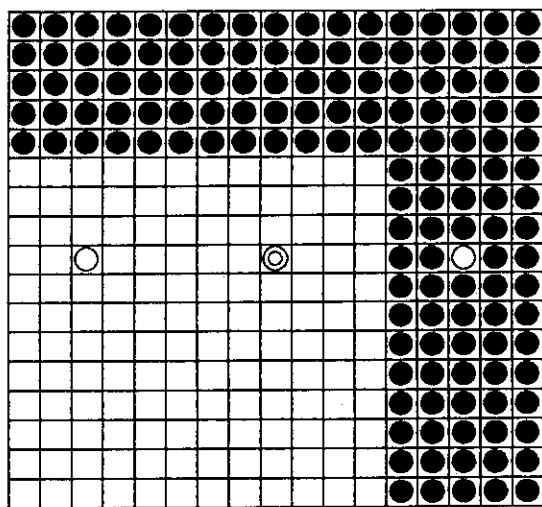


- 燃料棒
- 検出器用中空パイプ
- ◎ 中性子源

C

A

図-1 17×17-7×7体系



C

A

図-2 17×17-12×12体系

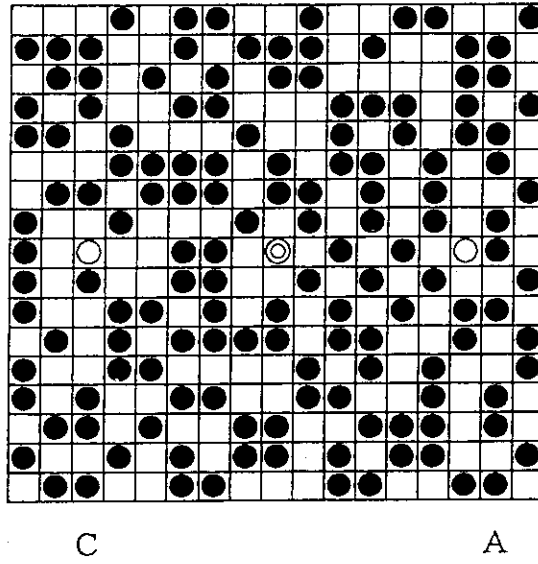


図-3 17×17- α 体系

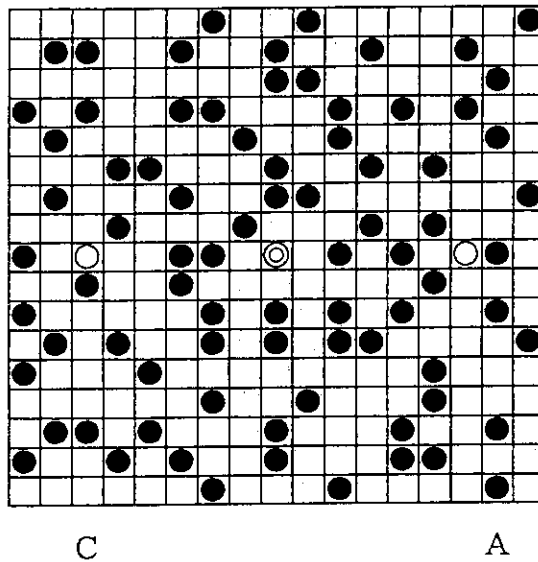


図-4 17×17- β 体系

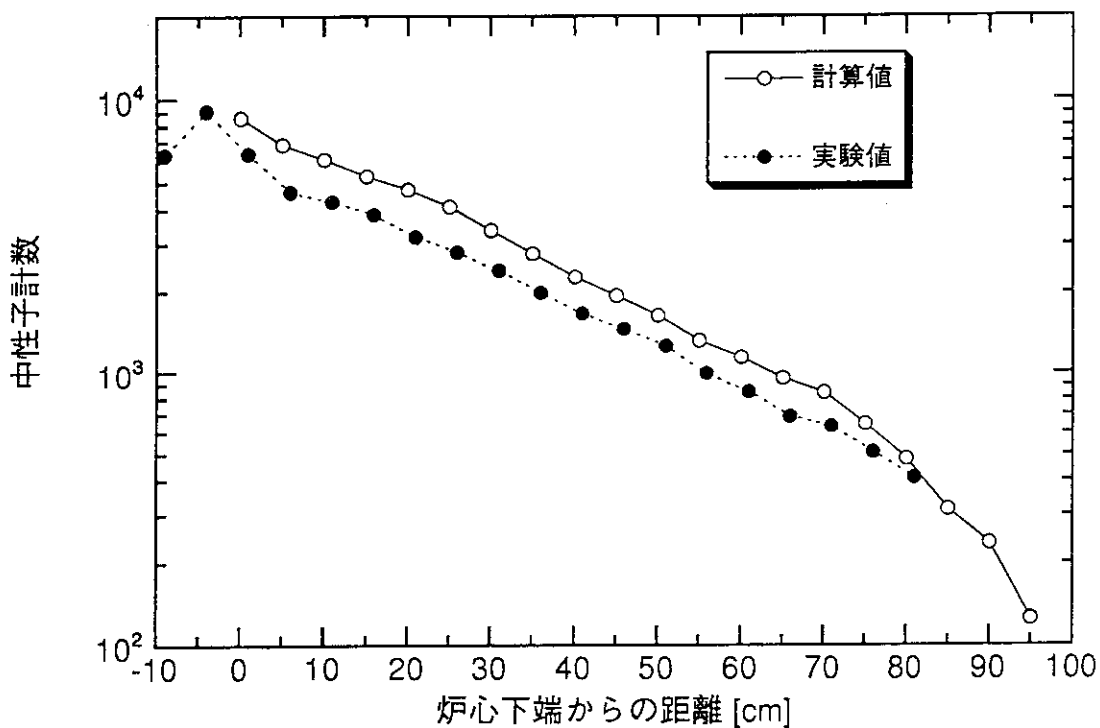


図-5 17×17-7×7体系の検出器 Aにおける中性子計数
(水位 100cm、中性子線源位置 0.0cm、20万ヒストリー)

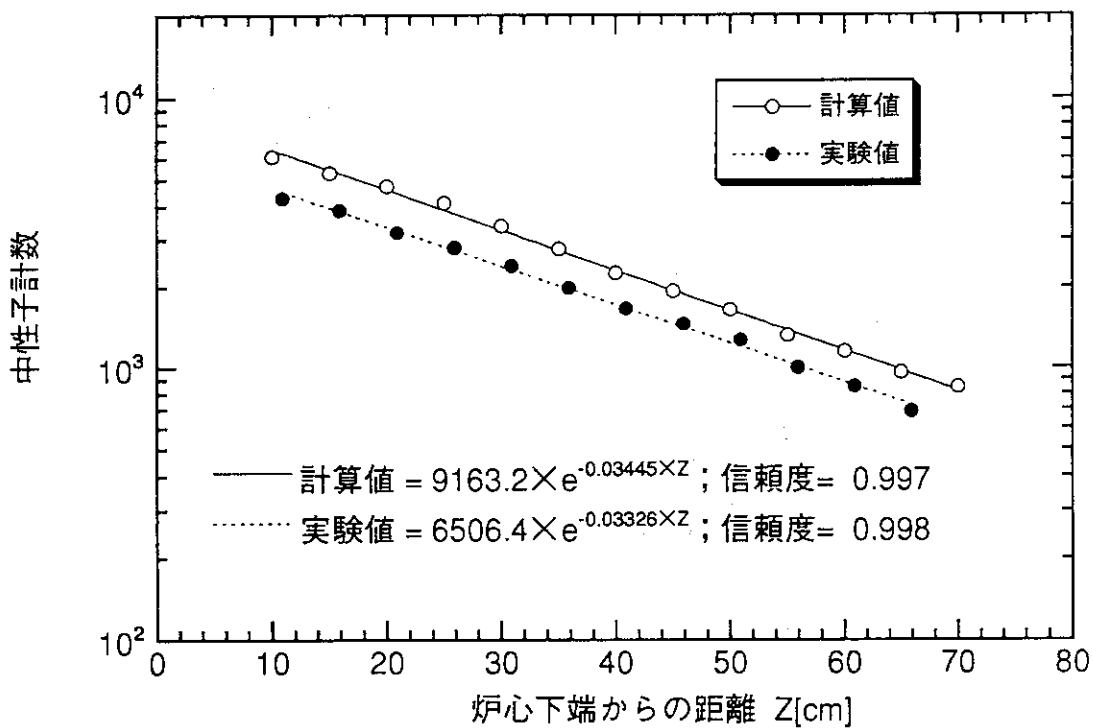


図-6 17×17-7×7体系のフィッティング結果
(水位 100cm、中性子線源位置 0.0cm、20万ヒストリー)

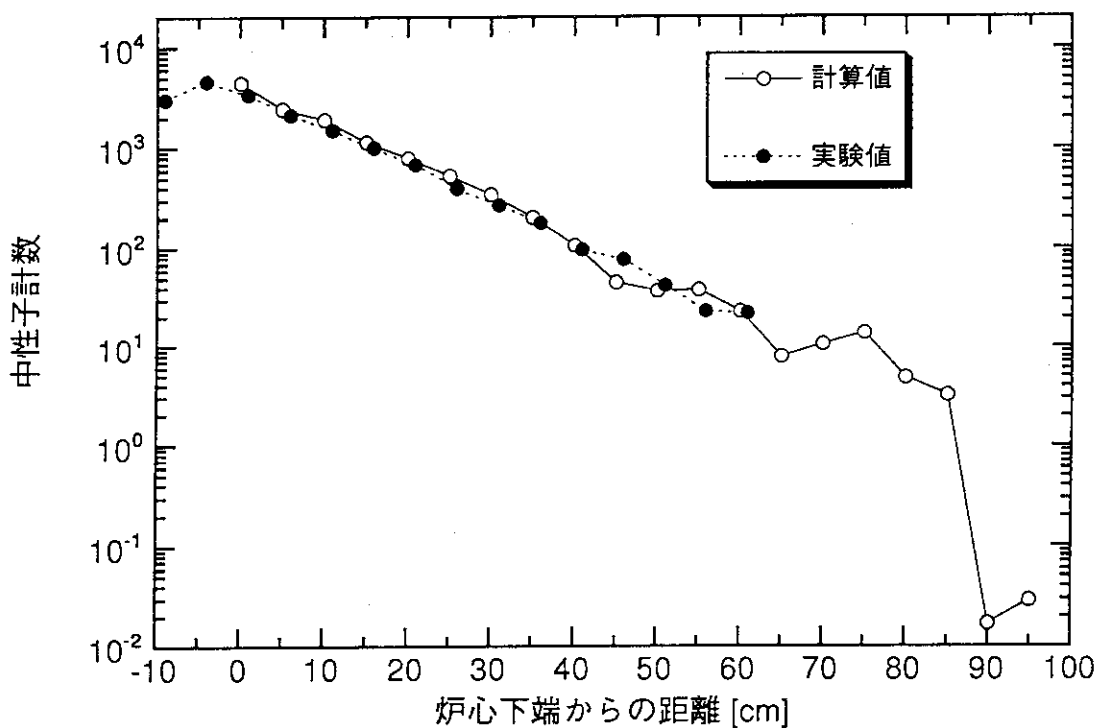


図-7 17×17-12×12体系の検出器 Aにおける中性子計数
(水位 100cm、中性子線源位置 0.0cm、20万ヒストリー)

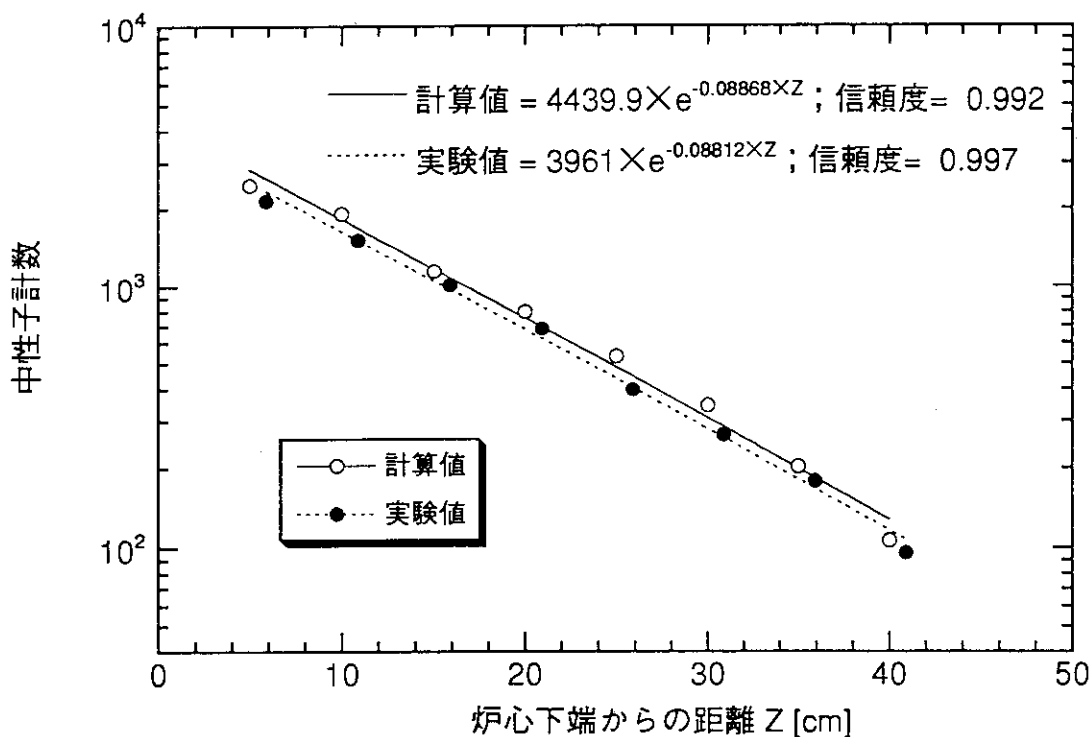


図-8 17×17-12×12体系ののフィッティング結果
(水位 100cm、中性子線源位置 0.0cm、20万ヒストリー)

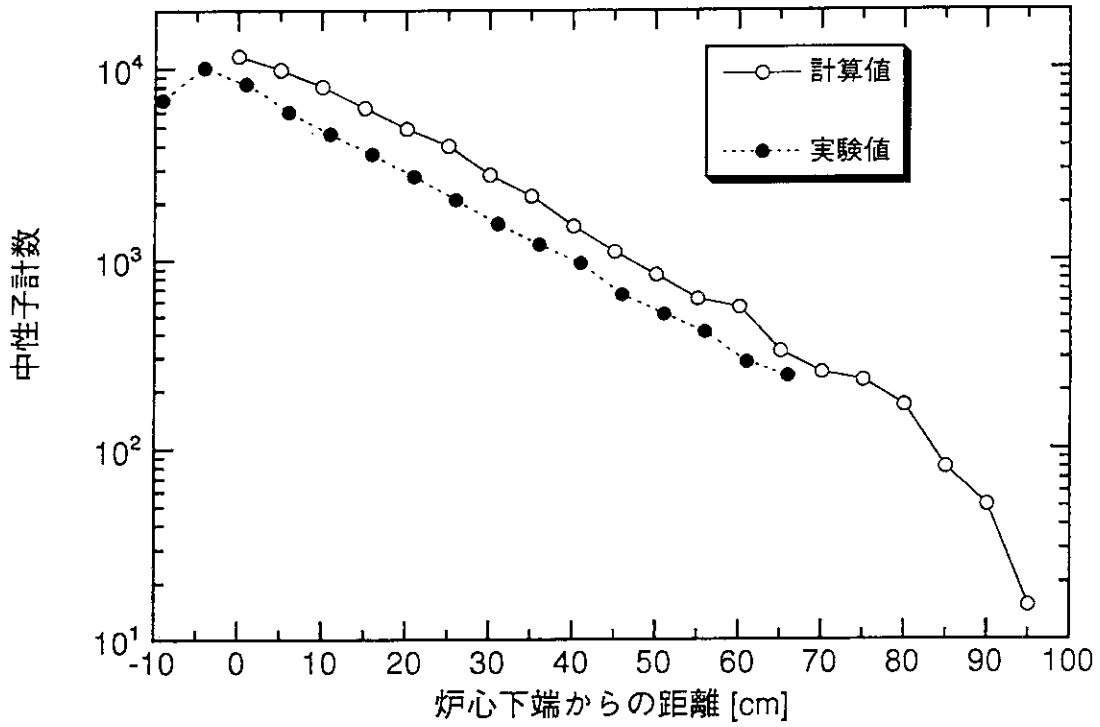


図-9 17×17-α体系の検出器 Aにおける中性子計数
(水位 100cm、中性子線源位置 0.0cm、20万ヒストリー)

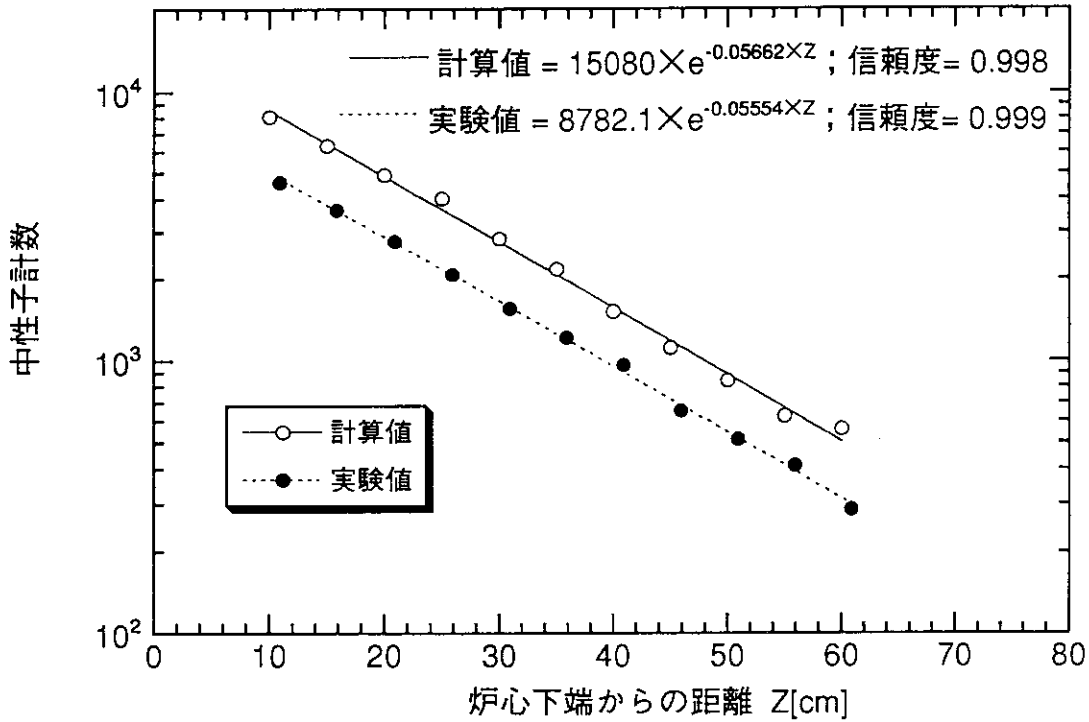


図-10 17×17-α体系のフィッティング結果
(水位 100cm、中性子線源位置 0.0cm、20万ヒストリー)

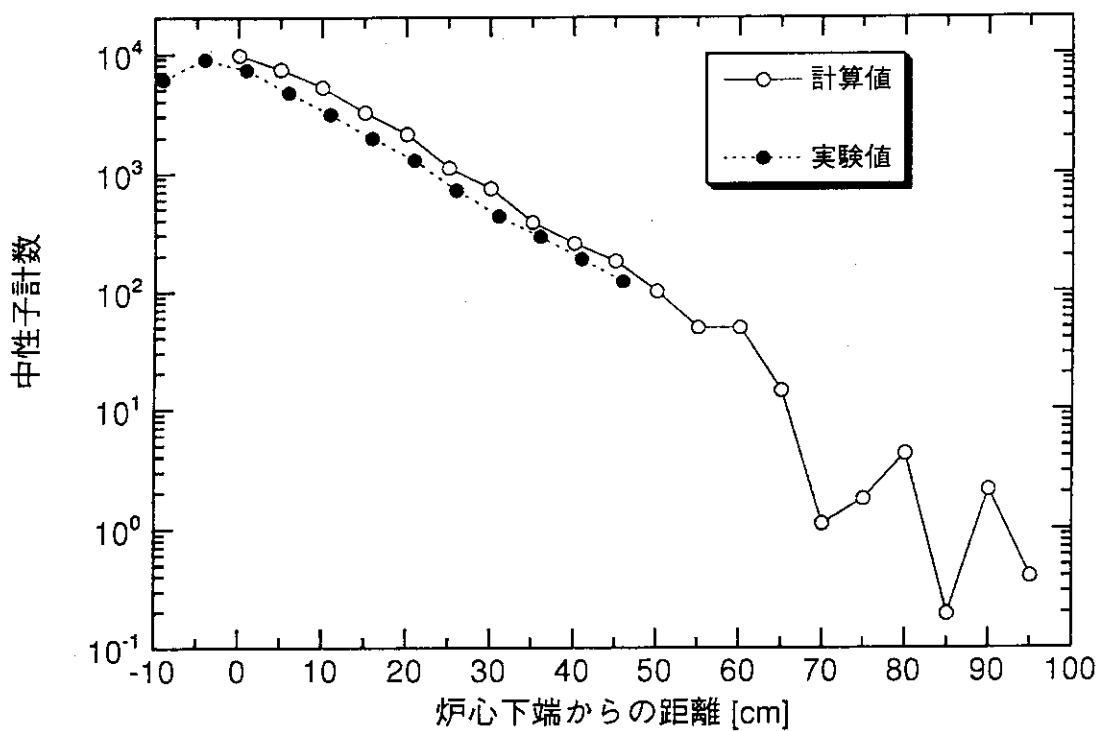


図-1.1 17×17-β体系の検出器 Aにおける中性子計数
(水位 100cm、中性子線源位置 0.0cm、20万ヒストリー)

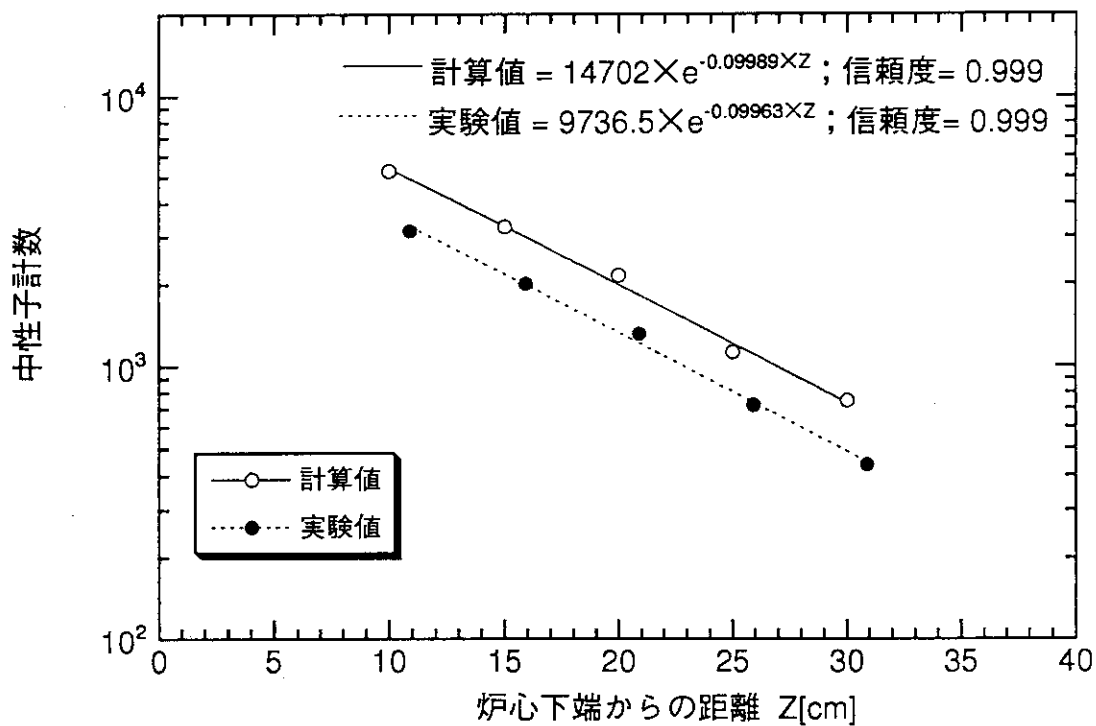


図-1.2 17×17-β体系のフィッティング結果
(水位 100cm、中性子線源位置 0.0cm、20万ヒストリー)

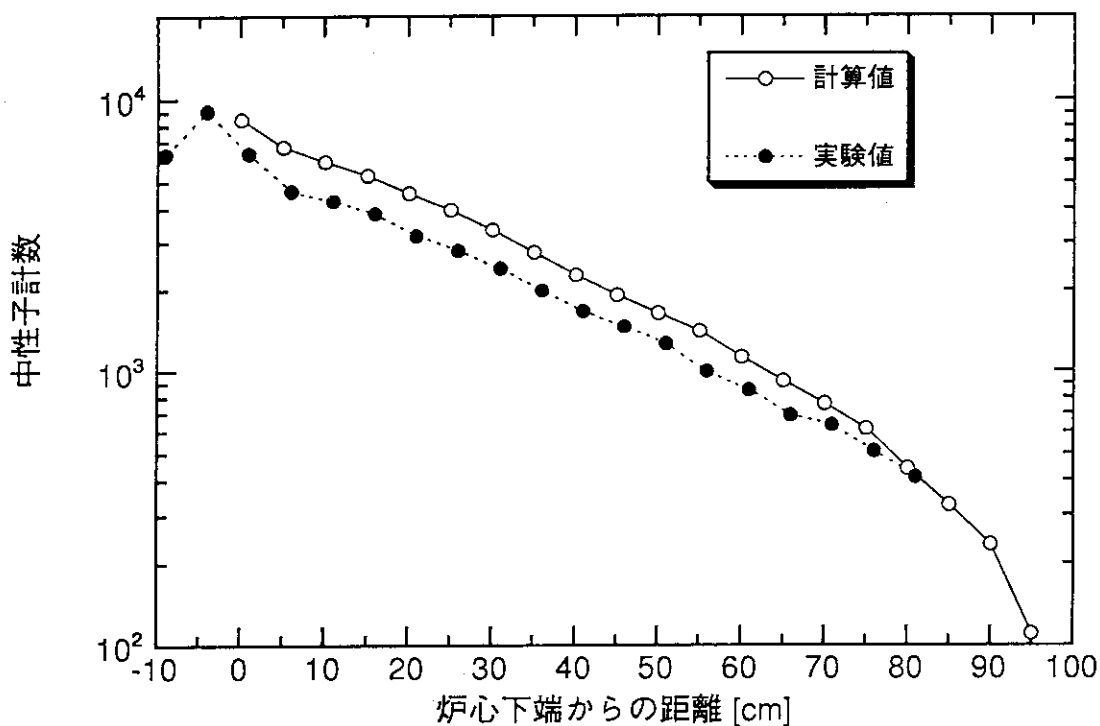


図-13 17×17-7×7体系の検出器 Aにおける中性子計数
(水位 100cm、中性子線源位置 0.0cm、100万ヒストリー)

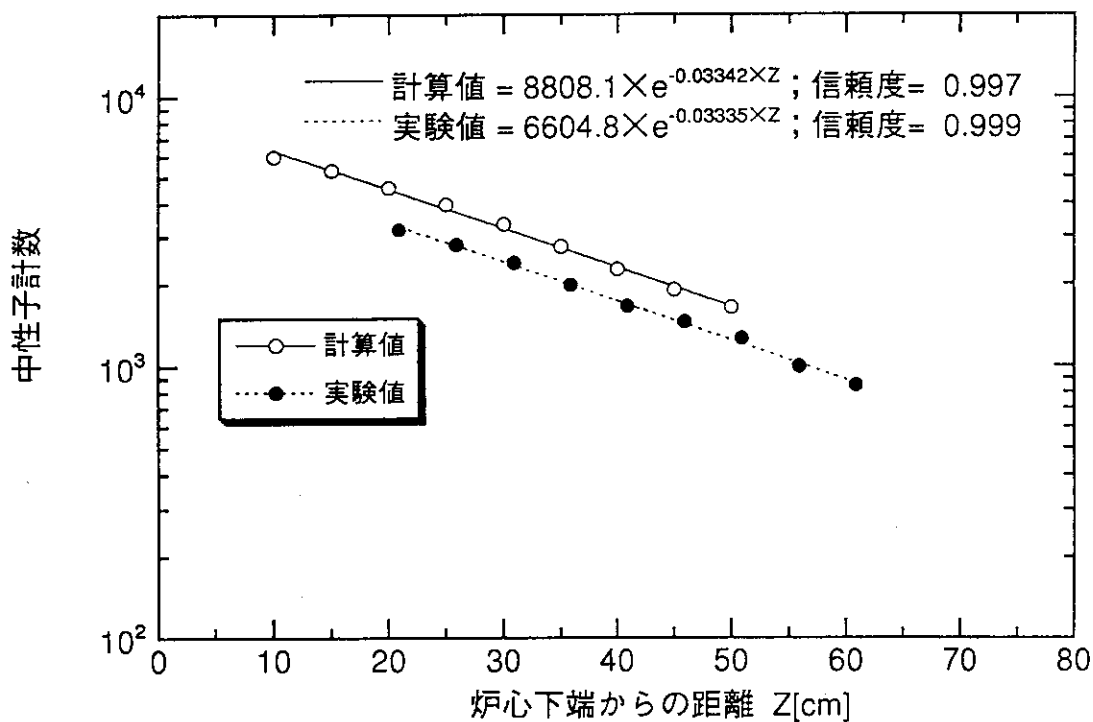


図-14 17×17-7×7体系のフィッティング結果
(水位 100cm、中性子線源位置 0.0cm、100万ヒストリー)

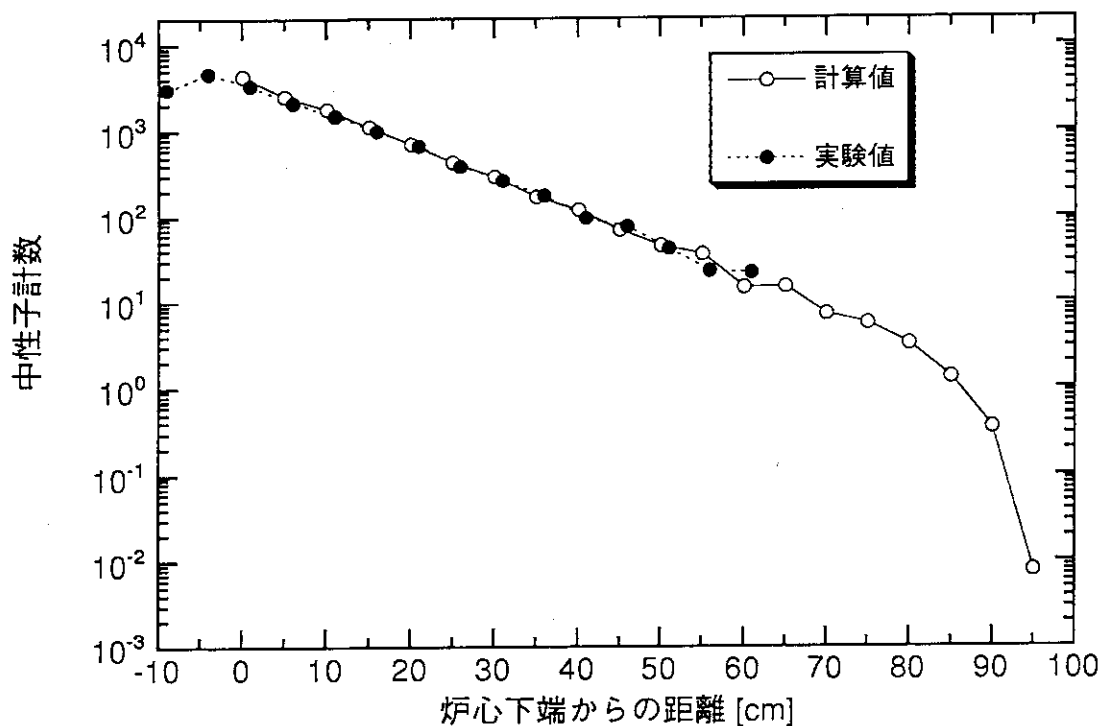


図-15 17×17-12×12体系の検出器 Aにおける中性子計数
(水位 100cm、中性子線源位置 0.0cm、100万ヒストリー)

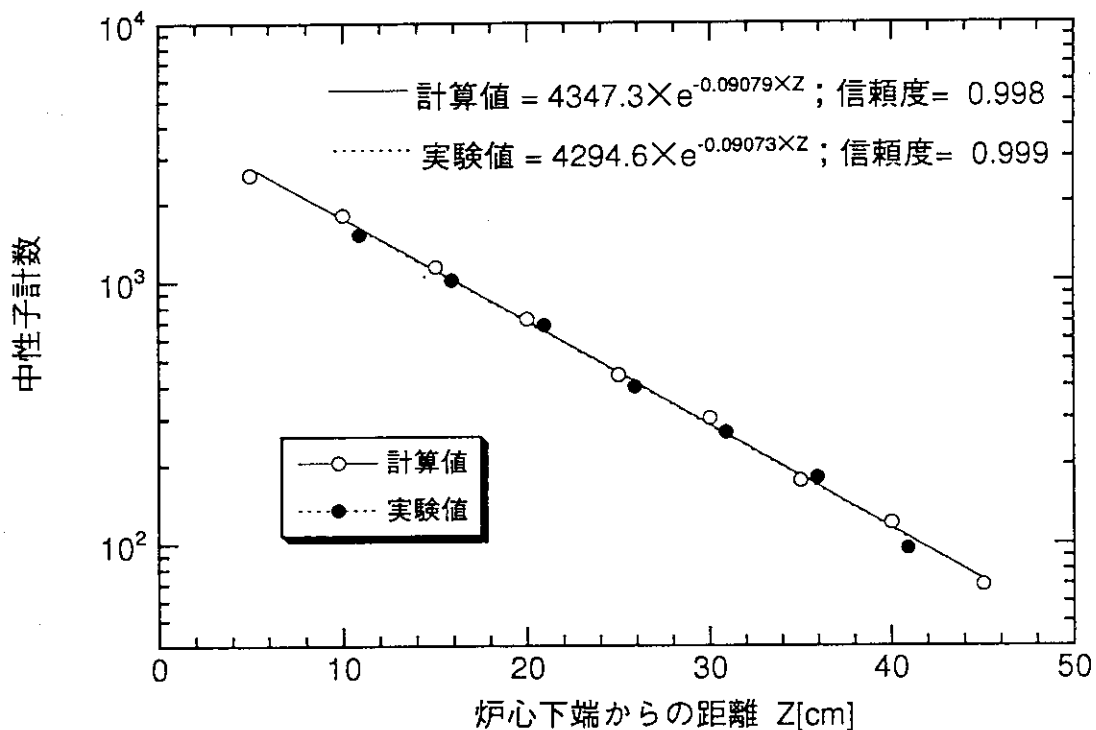


図-16 17×17-12×12体系のフィッティング結果
(水位 100cm、中性子線源位置 0.0cm、100万ヒストリー)

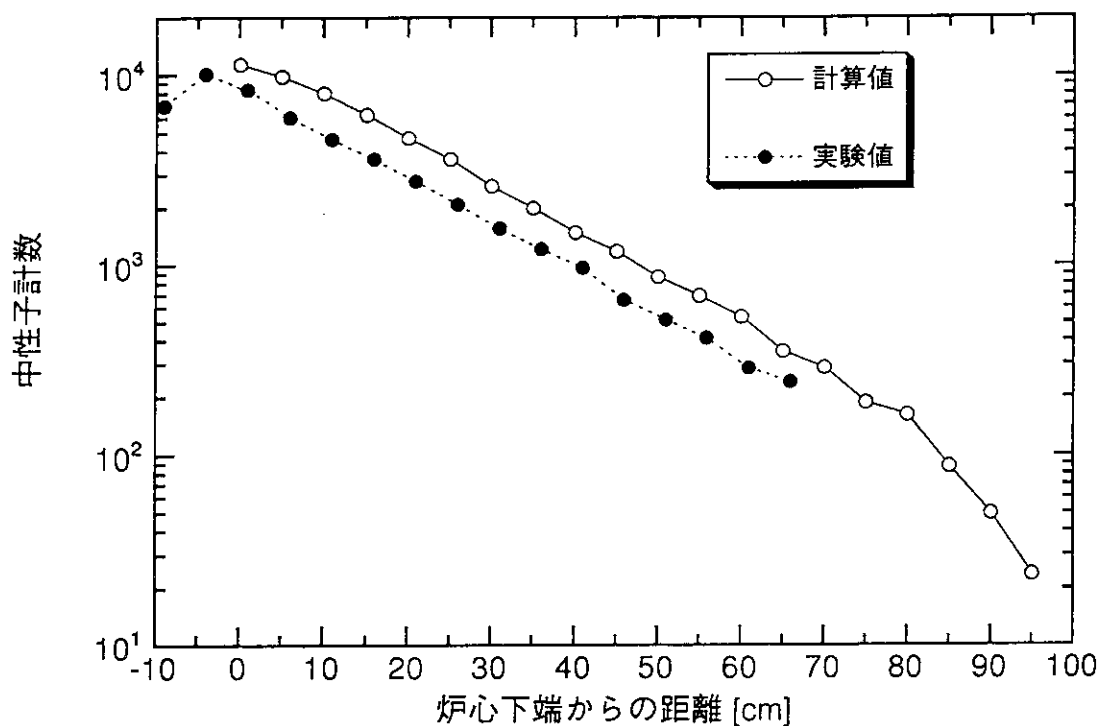


図-17 17×17- α 体系の検出器 Aにおける中性子計数
(水位 100cm、中性子線源位置 0.0cm、100万ヒストリー)

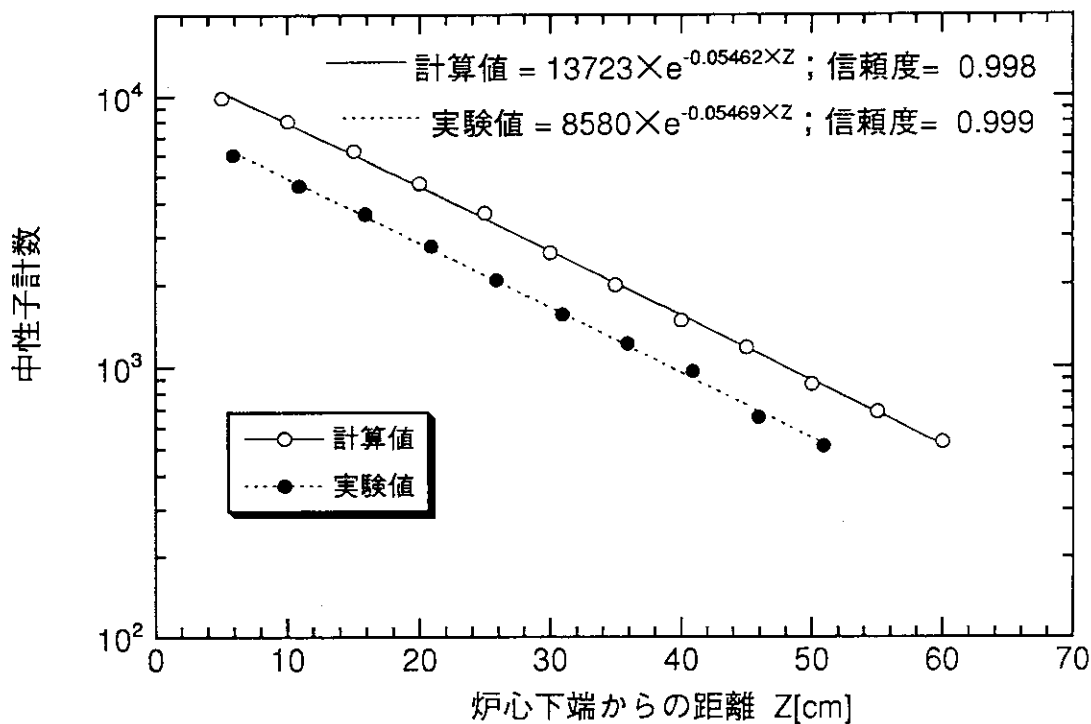


図-18 17×17- α 体系のフィッティング結果
(水位 100cm、中性子線源位置 0.0cm、100万ヒストリー)

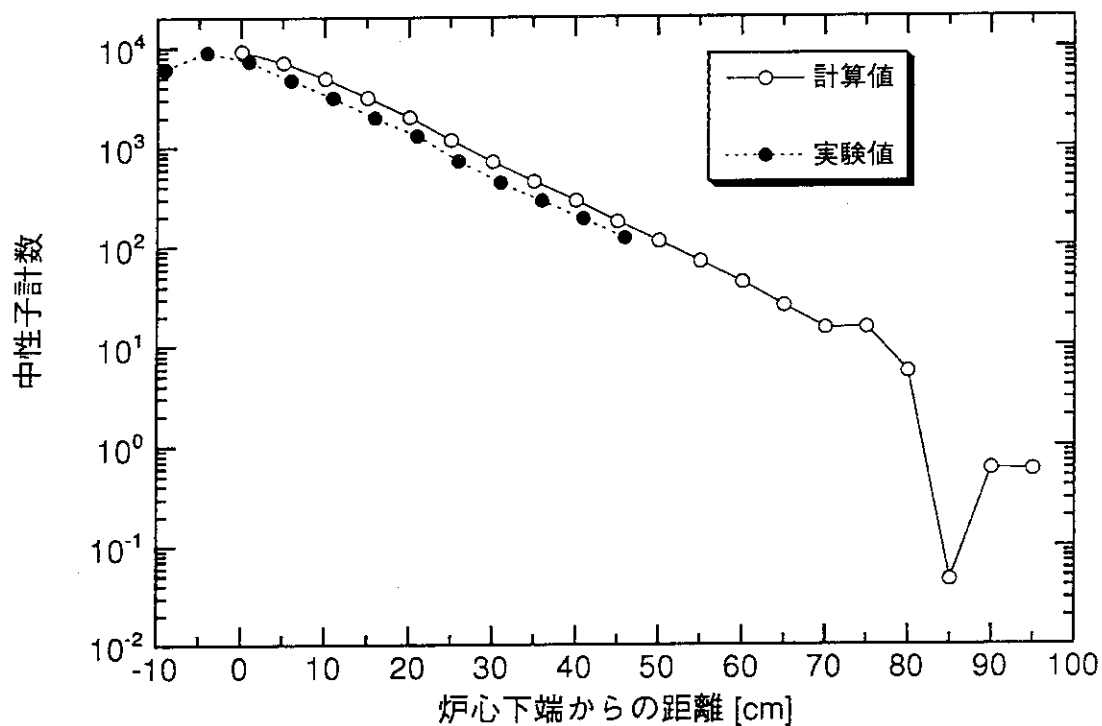


図-19 17×17-β体系の検出器 Aにおける中性子計数
(水位 100cm、中性子線源位置 0.0cm、100万ヒストリー)

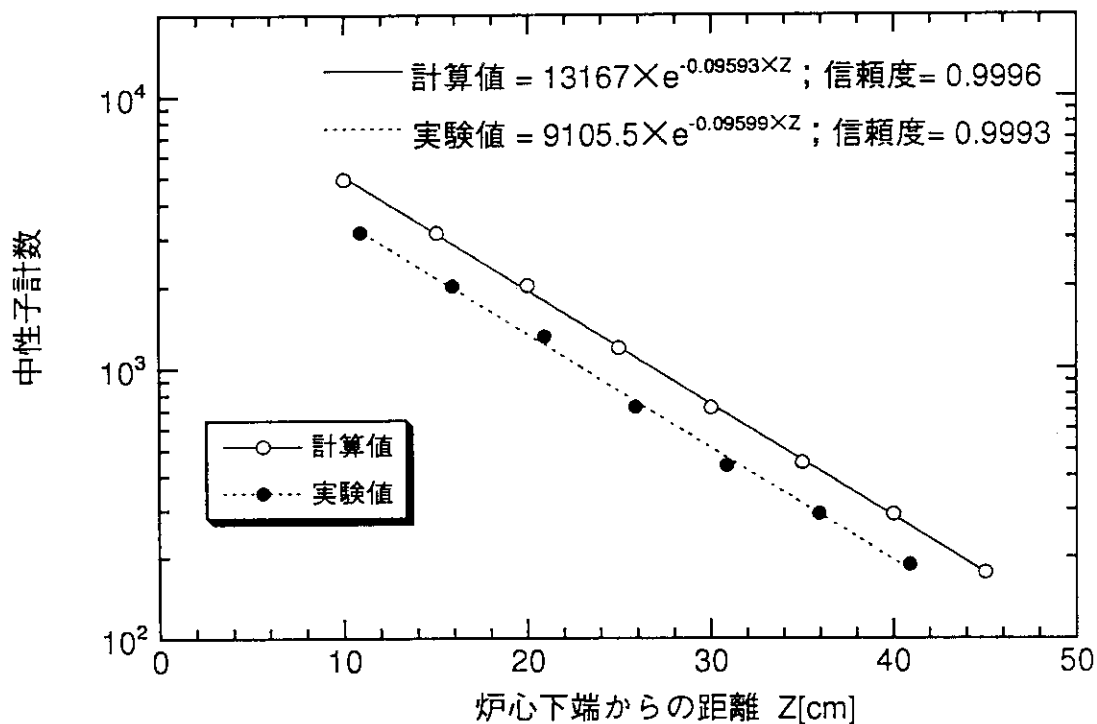


図-20 17×17-β体系のフィッティング結果
(水位 100cm、中性子線源位置 0.0cm、100万ヒストリー)

付録 MCNP 4Aによる中性子計数率計算入力

- (1) $17 \times 17 - 7 \times 7$ 体系
- (2) $17 \times 17 - 12 \times 12$ 体系
- (3) $17 \times 17 - \alpha$ 体系
- (4) $17 \times 17 - \beta$ 体系

```

file name=tr2-04
c single 17* 17 - 7* 7
c critical water level 100.0(cm)
c lattice pitch 1.956(cm);U(2.6)02
c reflect water 30.000(cm)
c
c cellcards
c
1 1 7.040860e-2 -7 10 -12 imp:n=1 u=1
2 2 5.587000e-2 7 -8 10 -12 imp:n=1 u=1
3 3 1.001400e-1 8 10 -11 imp:n=1 u=1
4 4 -0.0012 8 11 -12 imp:n=1 u=1
5 0 1 -2 3 -4 5 -6 imp:n=1 u=2 lat=1
fill=-16:0 -16:0 0:0
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 $1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 $2
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 $3
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 $4
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 $5
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 $6
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 $7
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 $8
1 1 3 1 1 1 1 1 5 1 1 1 1 1 3 1 1 $9
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 $10
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 4 4 4 4 4 4 $11
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 4 4 4 4 4 4 $12
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 4 4 4 4 4 4 $13
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 4 4 4 4 4 4 $14
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 4 4 4 4 4 4 $15
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 4 4 4 4 4 4 $16
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 4 4 4 4 4 4 $17
6 0 21 -22 23 -24 25 -26 imp:n=1 fill=2
7 3 1.001400e-1 #6 (31 -32 33 -34 35 -36) imp:n=1
8 4 -0.0012 #6 #7 -99 imp:n=1
c track length estimator cell
9 4 -0.0012 -7 41 -42 imp:n=1 u=3
10 4 -0.0012 -7 42 -43 imp:n=1 u=3
11 4 -0.0012 -7 43 -44 imp:n=1 u=3
12 4 -0.0012 -7 44 -45 imp:n=1 u=3
13 4 -0.0012 -7 45 -46 imp:n=1 u=3
14 4 -0.0012 -7 46 -47 imp:n=1 u=3
15 4 -0.0012 -7 47 -48 imp:n=1 u=3
16 4 -0.0012 -7 48 -49 imp:n=1 u=3
17 4 -0.0012 -7 49 -50 imp:n=1 u=3
18 4 -0.0012 -7 50 -51 imp:n=1 u=3
19 4 -0.0012 -7 51 -52 imp:n=1 u=3
20 4 -0.0012 -7 52 -53 imp:n=1 u=3
21 4 -0.0012 -7 53 -54 imp:n=1 u=3
22 4 -0.0012 -7 54 -55 imp:n=1 u=3
23 4 -0.0012 -7 55 -56 imp:n=1 u=3
24 4 -0.0012 -7 56 -57 imp:n=1 u=3
25 4 -0.0012 -7 57 -58 imp:n=1 u=3
26 4 -0.0012 -7 58 -59 imp:n=1 u=3
27 4 -0.0012 -7 59 -60 imp:n=1 u=3
28 4 -0.0012 -7 60 -61 imp:n=1 u=3
29 4 -0.0012 -7 61 -62 imp:n=1 u=3
30 like 2 but imp:n=1 u=3
31 like 3 but imp:n=1 u=3
32 like 4 but imp:n=1 u=3
33 3 1.001400e-1 10 -11 imp:n=1 u=4
34 4 -0.0012 11 -12 imp:n=1 u=4
35 3 1.001400e-1 -7 10 -11 imp:n=1 u=5
36 4 -0.0012 -7 11 -12 imp:n=1 u=5
37 like 2 but imp:n=1 u=5
38 like 3 but imp:n=1 u=5
39 like 4 but imp:n=1 u=5

```

```

40      0                               99                               imp:n=0

c
c  surface cards (origin x=0.9780 y=0.9780 z=0.0)
c  parallepiped
  1  px    0.00000
  2  px    1.95600
  3  py    0.00000
  4  py    1.95600
  5  pz    0.00000
  6  pz   144.15000

c
c  cylinder
c
  7  c/z  0.9780 0.9780 0.6250
  8  c/z  0.9780 0.9780 0.7085
c  track length estimator c/z
  9  c/z  0.9780 0.9780 0.3100

c
c  critical water level= 100.000(cm)
 10  pz   0.0
 11  pz  100.000
 12  pz   144.15
c  pitch* 17=33.25200(cm)
c  (33.25200*33.25200*144.15)
c  parallepiped
 21  px    0.00001
 22  px   33.25199
 23  py    0.00001
 24  py   33.25199
 25  pz    0.00001
 26  pz   144.14999

c
c  water refract= 30.000(cm)
c  parallepiped
 31  px  -29.99999
 32  px   63.25199
 33  py  -29.99999
 34  py   63.25199
 35  pz  -29.99999
 36  pz   99.99999

c
c  track length estimator cell pz
 41  pz   0.0
 42  pz   5.0
 43  pz  10.0
 44  pz  15.0
 45  pz  20.0
 46  pz  25.0
 47  pz  30.0
 48  pz  35.0
 49  pz  40.0
 50  pz  45.0
 51  pz  50.0
 52  pz  55.0
 53  pz  60.0
 54  pz  65.0
 55  pz  70.0
 56  pz  75.0
 57  pz  80.0
 58  pz  85.0
 59  pz  90.0
 60  pz  95.0
 61  pz 100.0
 62  pz 144.15

```

```

c   outer world
99  s   16.626 16.626 72.075 150.0

c
c   data cards
c
mode n           $ transport neutrons only
c
c   material cards
c
c   U(2.6)O2 pellet
m1  92235.37c 6.086e-4           $ U-235
    92238.37c 2.255e-2           $ U-238
    8016.37c 4.725e-2           $ 0

c
c   Al cladding (with an air gap)
m2  13027.37c 5.587e-2           $ Al

c
c   water(300k)
m3  1001.37c 6.676e-2           $ H
    8016.37c 3.338e-2           $ 0
mt3  lwtr.01t

c
c   air (0.0012 g/cm3) jaeri-m6928
m4  1001.37c -0.001
    6012.37c -0.0126
    7014.37c -75.5
    8016.37c -23.2
m235 92235.37c 1

c
c   default energy bins; hansen-roach structure
e0  1.0e-7 4.0e-7 1.0e-6 3.0e-6 1.0e-5 3.0e-5 1.0e-4 5.5e-4 3.0e-3
    1.7e-2 0.1 0.4 0.9 1.4 3.0 20.0

c
c   tallies
fc4  total fission cross section in u=3
c
f4:n  ( 9<5 [-14 -8 0]<6) (10<5 [-14 -8 0]<6) (11<5 [-14 -8 0]<6)
      (12<5 [-14 -8 0]<6) (13<5 [-14 -8 0]<6) (14<5 [-14 -8 0]<6)
      (15<5 [-14 -8 0]<6) (16<5 [-14 -8 0]<6) (17<5 [-14 -8 0]<6)
      (18<5 [-14 -8 0]<6) (19<5 [-14 -8 0]<6) (20<5 [-14 -8 0]<6)
      (21<5 [-14 -8 0]<6) (22<5 [-14 -8 0]<6) (23<5 [-14 -8 0]<6)
      (24<5 [-14 -8 0]<6) (25<5 [-14 -8 0]<6) (26<5 [-14 -8 0]<6)
      (27<5 [-14 -8 0]<6) (28<5 [-14 -8 0]<6)
fm4  (1.0 235 -6)

c
sdef  erg=d1 pos=16.626 16.626 0.0 wgt=1
c
spl  -3 1.025 2.926
c
prdmp j 200000 1 3
c
nps  1000000
totnu
c
print -100 -110 -175

```



```

file name=tr2-06
c   single 17* 17 - 12* 12
c   critical water level 100.0(cm)
c   lattice pitch 1.956(cm);U(2.6)02
c   reflect water 30.000(cm)
c
c   cellcards
c
1   1 7.040860e-2      -7      10      -12      imp:n=1 u=1
2   2 5.587000e-2      7  -8  10      -12      imp:n=1 u=1
3   3 1.001400e-1      8  10 -11      imp:n=1 u=1
4   4 -0.0012          8      11 -12      imp:n=1 u=1
5   0                  1  -2  3  -4  5  -6  imp:n=1 u=2 lat=1
      fill=-16:0 -16:0 0:0
      1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 $1
      1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 $2
      1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 $3
      1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 $4
      1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 $5
      1 1 1 1 1 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 $6
      1 1 1 1 1 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 $7
      1 1 1 1 1 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 $8
      1 1 3 1 1 4 4 4 5 4 4 4 4 4 3 4 4 $9
      1 1 1 1 1 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 $10
      1 1 1 1 1 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 $11
      1 1 1 1 1 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 $12
      1 1 1 1 1 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 $13
      1 1 1 1 1 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 $14
      1 1 1 1 1 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 $15
      1 1 1 1 1 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 $16
      1 1 1 1 1 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 $17
6   0                  21 -22 23 -24 25 -26  imp:n=1      fill=2
7   3 1.001400e-1      #6 (31 -32 33 -34 35 -36) imp:n=1
8   4 -0.0012          #6 #7 -99      imp:n=1
c   track length estimator cell
9   4 -0.0012          -7      41      -42      imp:n=1 u=3
10  4 -0.0012          -7      42      -43      imp:n=1 u=3
11  4 -0.0012          -7      43      -44      imp:n=1 u=3
12  4 -0.0012          -7      44      -45      imp:n=1 u=3
13  4 -0.0012          -7      45      -46      imp:n=1 u=3
14  4 -0.0012          -7      46      -47      imp:n=1 u=3
15  4 -0.0012          -7      47      -48      imp:n=1 u=3
16  4 -0.0012          -7      48      -49      imp:n=1 u=3
17  4 -0.0012          -7      49      -50      imp:n=1 u=3
18  4 -0.0012          -7      50      -51      imp:n=1 u=3
19  4 -0.0012          -7      51      -52      imp:n=1 u=3
20  4 -0.0012          -7      52      -53      imp:n=1 u=3
21  4 -0.0012          -7      53      -54      imp:n=1 u=3
22  4 -0.0012          -7      54      -55      imp:n=1 u=3
23  4 -0.0012          -7      55      -56      imp:n=1 u=3
24  4 -0.0012          -7      56      -57      imp:n=1 u=3
25  4 -0.0012          -7      57      -58      imp:n=1 u=3
26  4 -0.0012          -7      58      -59      imp:n=1 u=3
27  4 -0.0012          -7      59      -60      imp:n=1 u=3
28  4 -0.0012          -7      60      -61      imp:n=1 u=3
29  4 -0.0012          -7      61      -62      imp:n=1 u=3
30  like 2 but                          imp:n=1 u=3
31  like 3 but                          imp:n=1 u=3
32  like 4 but                          imp:n=1 u=3
33  3 1.001400e-1      10 -11      imp:n=1 u=4
34  4 -0.0012          11 -12      imp:n=1 u=4
35  3 1.001400e-1      -7      10      -11      imp:n=1 u=5
36  4 -0.0012          -7      11      -12      imp:n=1 u=5
37  like 2 but                          imp:n=1 u=5
38  like 3 but                          imp:n=1 u=5
39  like 4 but                          imp:n=1 u=5

```

```

40      0                               99                               imp:n=0

c
c  surface cards (origin x=0.9780 y=0.9780 z=0.0)
c  parallepiped
1  px   0.00000
2  px   1.95600
3  py   0.00000
4  py   1.95600
5  pz   0.00000
6  pz  144.15000

c
c
c  cylinder
c
7  c/z  0.9780 0.9780 0.6250
8  c/z  0.9780 0.9780 0.7085
c  track length estimator c/z
9  c/z  0.9780 0.9780 0.3100

c
c  critical water level= 100.000(cm)
10 pz  0.0
11 pz 100.000
12 pz  144.15
c  pitch* 17=33.25200(cm)
c  (33.25200*33.25200*144.15)
c  parallepiped
21 px  0.00001
22 px  33.25199
23 py  0.00001
24 py  33.25199
25 pz  0.00001
26 pz 144.14999

c
c  water refract= 30.000(cm)
c  parallepiped
31 px -29.99999
32 px  63.25199
33 py -29.99999
34 py  63.25199
35 pz -29.99999
36 pz  99.99999

c
c  track length estimator cell pz
41 pz  0.0
42 pz  5.0
43 pz 10.0
44 pz 15.0
45 pz 20.0
46 pz 25.0
47 pz 30.0
48 pz 35.0
49 pz 40.0
50 pz 45.0
51 pz 50.0
52 pz 55.0
53 pz 60.0
54 pz 65.0
55 pz 70.0
56 pz 75.0
57 pz 80.0
58 pz 85.0
59 pz 90.0
60 pz 95.0
61 pz 100.0
62 pz 144.15

```

```

c   outer world
99  s   16.626 16.626 72.075 150.0

c
c   data cards
c
mode n           $ transfort neutrons only
c
c   material cards
c
c   U(2.6)02 pellet
m1  92235.37c 6.086e-4           $ U-235
     92238.37c 2.255e-2           $ U-238
     8016.37c 4.725e-2           $ 0
c
c   Al cladding (with an air gap)
m2  13027.37c 5.587e-2           $ Al
c
c   water (300K)
m3  1001.37c 6.676e-2           $ H
     8016.37c 3.338e-2           $ 0
mt3  lwtr.01t
c
c   air (0.0012 g/cm3) jaeri-m6928
m4  1001.37c -0.001
     8012.37c -0.0126
     7014.37c -75.5
     8016.37c -23.2
m235 92235.37c 1
c
c   default energy bins; hansen-roach structure
e0  1.0e-7 4.0e-7 1.0e-6 3.0e-6 1.0e-5 3.0e-5 1.0e-4 5.5e-4 3.0e-3
     1.7e-2 0.1 0.4 0.9 1.4 3.0 20.0
c
c   tallies
fc4  total fission cross section in u=3
c
f4:n  ( 9<5 [-14 -8 0] <6) (10<5 [-14 -8 0] <6) (11<5 [-14 -8 0] <6)
      (12<5 [-14 -8 0] <6) (13<5 [-14 -8 0] <6) (14<5 [-14 -8 0] <6)
      (15<5 [-14 -8 0] <6) (16<5 [-14 -8 0] <6) (17<5 [-14 -8 0] <6)
      (18<5 [-14 -8 0] <6) (19<5 [-14 -8 0] <6) (20<5 [-14 -8 0] <6)
      (21<5 [-14 -8 0] <6) (22<5 [-14 -8 0] <6) (23<5 [-14 -8 0] <6)
      (24<5 [-14 -8 0] <6) (25<5 [-14 -8 0] <6) (26<5 [-14 -8 0] <6)
      (27<5 [-14 -8 0] <6) (28<5 [-14 -8 0] <6)
fm4  (1.0 235 -6)
c
sdef  erg=d1 pos=16.626 16.626 0.0 wgt=1
c
spl  -3 1.025 2.926
c
prdmp j 200000 1 3
c
nps  1000000
totnu
c
print -100 -110 -175

```

```

file name=tr3-10
c single 17* 17 : 142 fuel rods
c critical water level 100.0(cm)
c lattice pitch 1.956(cm);U(2.6)O2
c reflect water 30.000(cm)
c
c cellcards
c
1 1 7.040860e-2 -7 10 -12 imp:n=1 u=1
2 2 5.587000e-2 7 -8 10 -12 imp:n=1 u=1
3 3 1.001400e-1 8 10 -11 imp:n=1 u=1
4 4 -0.0012 8 11 -12 imp:n=1 u=1
5 0 1 -2 3 -4 5 -6 imp:n=1 u=2 lat=1
fill=-16:0 -16:0 0:0
1 4 4 1 1 4 4 1 4 4 1 1 4 1 4 4 4 $1
4 1 1 4 4 1 4 1 1 1 4 1 4 4 1 1 1 $2
4 1 1 4 4 4 4 1 1 4 1 4 1 4 1 1 4 $3
1 4 1 4 1 1 1 4 4 4 1 1 4 4 1 4 1 $4
4 1 1 4 1 4 1 4 4 1 4 4 4 1 4 1 1 $5
4 1 4 1 4 1 1 4 1 4 1 1 1 1 4 4 4 $6
1 4 4 1 4 1 4 1 1 4 1 1 4 1 1 4 1 4 $7
4 1 4 1 4 1 4 1 4 1 4 4 4 1 4 4 1 $8
4 1 3 4 1 4 1 4 5 4 1 1 4 4 3 4 1 $9
1 4 4 1 4 1 4 1 4 4 1 1 4 4 1 4 1 $10
4 1 1 4 1 4 1 4 1 4 1 4 1 1 4 4 1 $11
1 4 1 4 4 1 1 4 1 1 1 1 4 1 4 1 4 $12
1 4 4 1 4 1 4 1 4 4 4 4 1 1 4 4 1 $13
4 1 4 1 4 4 1 1 4 4 1 1 4 4 1 4 1 $14
4 1 4 1 1 1 4 4 1 1 4 4 1 4 1 1 4 $15
1 4 4 1 1 4 1 4 1 1 4 1 4 1 4 4 1 $16
4 1 1 4 4 1 1 4 4 4 1 1 4 4 1 1 4 $17
6 0 21 -22 23 -24 25 -26 imp:n=1 fill=2
7 3 1.001400e-1 #6 (31 -32 33 -34 35 -36) imp:n=1
8 4 -0.0012 #6 #7 -99 imp:n=1
c track length estimator cell
9 4 -0.0012 -7 41 -42 imp:n=1 u=3
10 4 -0.0012 -7 42 -43 imp:n=1 u=3
11 4 -0.0012 -7 43 -44 imp:n=1 u=3
12 4 -0.0012 -7 44 -45 imp:n=1 u=3
13 4 -0.0012 -7 45 -46 imp:n=1 u=3
14 4 -0.0012 -7 46 -47 imp:n=1 u=3
15 4 -0.0012 -7 47 -48 imp:n=1 u=3
16 4 -0.0012 -7 48 -49 imp:n=1 u=3
17 4 -0.0012 -7 49 -50 imp:n=1 u=3
18 4 -0.0012 -7 50 -51 imp:n=1 u=3
19 4 -0.0012 -7 51 -52 imp:n=1 u=3
20 4 -0.0012 -7 52 -53 imp:n=1 u=3
21 4 -0.0012 -7 53 -54 imp:n=1 u=3
22 4 -0.0012 -7 54 -55 imp:n=1 u=3
23 4 -0.0012 -7 55 -56 imp:n=1 u=3
24 4 -0.0012 -7 56 -57 imp:n=1 u=3
25 4 -0.0012 -7 57 -58 imp:n=1 u=3
26 4 -0.0012 -7 58 -59 imp:n=1 u=3
27 4 -0.0012 -7 59 -60 imp:n=1 u=3
28 4 -0.0012 -7 60 -61 imp:n=1 u=3
29 4 -0.0012 -7 61 -62 imp:n=1 u=3
30 like 2 but imp:n=1 u=3
31 like 3 but imp:n=1 u=3
32 like 4 but imp:n=1 u=3
33 3 1.001400e-1 10 -11 imp:n=1 u=4
34 4 -0.0012 11 -12 imp:n=1 u=4
35 3 1.001400e-1 -7 10 -11 imp:n=1 u=5
36 4 -0.0012 -7 11 -12 imp:n=1 u=5
37 like 2 but imp:n=1 u=5
38 like 3 but imp:n=1 u=5
39 like 4 but imp:n=1 u=5

```

```

40      0                               99                               imp:n=0

c
c  surface cards (origin x=0.9780 y=0.9780 z=0.0)
c  parallepiped
1  px    0.00000
2  px    1.95600
3  py    0.00000
4  py    1.95600
5  pz    0.00000
6  pz   144.15000

c
c  cylinder
c
7  c/z  0.9780 0.9780 0.6250
8  c/z  0.9780 0.9780 0.7085
c  track length estimator c/z
9  c/z  0.9780 0.9780 0.3100

c
c  critical water level= 100.000(cm)
10 pz  0.0
11 pz 100.000
12 pz  144.15
c  pitch* 17=33.25200(cm)
c  (33.25200*33.25200*144.15)
c  parallepiped
21 px  0.00001
22 px 33.25199
23 py  0.00001
24 py 33.25199
25 pz  0.00001
26 pz 144.14999

c
c  water refract= 30.000(cm)
c  parallepiped
31 px -29.99999
32 px  63.25199
33 py -29.99999
34 py  63.25199
35 pz -29.99999
36 pz  99.99999

c
c  track length estimator cell pz
41 pz  0.0
42 pz  5.0
43 pz 10.0
44 pz 15.0
45 pz 20.0
46 pz 25.0
47 pz 30.0
48 pz 35.0
49 pz 40.0
50 pz 45.0
51 pz 50.0
52 pz 55.0
53 pz 60.0
54 pz 65.0
55 pz 70.0
56 pz 75.0
57 pz 80.0
58 pz 85.0
59 pz 90.0
60 pz 95.0
61 pz 100.0
62 pz 144.15

```

```

c   outer world
99  s   16.626 16.626 72.075 150.0

c
c   data cards
c
mode n           $ transfort neutrons only
c
c   material cards
c
c   U(2.6)O2 pellet
m1  92235.37c 6.086e-4           $ U-235
    92238.37c 2.255e-2           $ U-238
    8016.37c 4.725e-2           $ 0
c
c   Al cladding (with an air gap)
m2  13027.37c 5.587e-2           $ Al
c
c   water(300K)
m3  1001.37c 6.676e-2           $ H
    8016.37c 3.338e-2           $ 0
mt3  lwtr.01t
c
c   air (0.0012 g/cm3) jaeri-m6928
m4  1001.37c -0.001
    6012.37c -0.0126
    7014.37c -75.5
    8016.37c -23.2
m235 92235.37c 1
c
c   default energy bins; hansen-roach structure
e0  1.0e-7 4.0e-7 1.0e-6 3.0e-6 1.0e-5 3.0e-5 1.0e-4 5.5e-4 3.0e-3
    1.7e-2 0.1 0.4 0.9 1.4 3.0 20.0
c
c   tallies
fc4  total fission cross section in u=3
c
f4:n  ( 9<5 [-14 -8 0]<6) (10<5 [-14 -8 0]<6) (11<5 [-14 -8 0]<6)
      (12<5 [-14 -8 0]<6) (13<5 [-14 -8 0]<6) (14<5 [-14 -8 0]<6)
      (15<5 [-14 -8 0]<6) (16<5 [-14 -8 0]<6) (17<5 [-14 -8 0]<6)
      (18<5 [-14 -8 0]<6) (19<5 [-14 -8 0]<6) (20<5 [-14 -8 0]<6)
      (21<5 [-14 -8 0]<6) (22<5 [-14 -8 0]<6) (23<5 [-14 -8 0]<6)
      (24<5 [-14 -8 0]<6) (25<5 [-14 -8 0]<6) (26<5 [-14 -8 0]<6)
      (27<5 [-14 -8 0]<6) (28<5 [-14 -8 0]<6)
fm4  (1.0 235 -6)
c
c   sdef erg=d1 pos=16.626 16.626 0.0 wgt=1
c
spl  -3 1.025 2.926
c
prdmp j 200000 1 3
c
nps  1000000
totnu
c
print -100 -110 -175

```

```

file name=tr3-14
c single 17* 17 : 80 fuel rods
c critical water level 100.0(cm)
c lattice pitch 1.956(cm);U(2.6)O2
c reflect water 30.000(cm)
c
c cellcards
c
1 1 7.040860e-2 -7 10 -12 imp:n=1 u=1
2 2 5.587000e-2 7 -8 10 -12 imp:n=1 u=1
3 3 1.001400e-1 8 10 -11 imp:n=1 u=1
4 4 -0.0012 8 11 -12 imp:n=1 u=1
5 0 1 -2 3 -4 5 -6 imp:n=1 u=2 lat=1
fill=-16:0 -16:0 0:0
1 4 4 4 4 4 4 1 4 4 1 4 4 4 4 4 4
4 4 1 4 4 1 4 4 1 4 4 1 4 4 1 1 4
4 1 4 4 4 4 4 1 1 4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 1 4 1 4 1 4 4 4 1 1 4 4 1 4 1
4 1 4 4 4 4 1 4 4 1 4 4 4 4 4 1 4
4 4 4 1 4 1 4 4 1 4 4 4 1 1 4 4 4
1 4 4 4 4 4 4 1 1 4 4 1 4 4 4 1 4
4 4 4 1 4 1 4 4 4 1 4 4 4 1 4 4 4
4 1 3 4 1 4 1 4 5 4 1 1 4 4 3 4 1
4 4 4 1 4 4 4 4 4 4 4 1 4 4 1 4 4
4 1 4 4 1 4 1 4 1 4 1 4 4 4 4 4 1
1 4 4 4 4 1 1 4 1 4 1 4 4 1 4 1 4
4 4 4 1 4 4 4 4 4 4 4 4 1 4 4 4 1
4 4 4 1 4 4 4 1 4 4 1 4 4 4 4 4 4
4 1 4 4 1 4 4 4 1 4 4 4 1 4 1 1 4
4 4 4 1 1 4 4 4 1 4 4 1 4 1 4 4 1
4 1 4 4 4 1 4 4 4 4 1 4 4 4 4 4 4
6 0 21 -22 23 -24 25 -26 imp:n=1 fill=2
7 3 1.001400e-1 #6 (31 -32 33 -34 35 -36) imp:n=1
8 4 -0.0012 #6 #7 -99 imp:n=1
c track length estimator cell
9 4 -0.0012 -7 41 -42 imp:n=1 u=3
10 4 -0.0012 -7 42 -43 imp:n=1 u=3
11 4 -0.0012 -7 43 -44 imp:n=1 u=3
12 4 -0.0012 -7 44 -45 imp:n=1 u=3
13 4 -0.0012 -7 45 -46 imp:n=1 u=3
14 4 -0.0012 -7 46 -47 imp:n=1 u=3
15 4 -0.0012 -7 47 -48 imp:n=1 u=3
16 4 -0.0012 -7 48 -49 imp:n=1 u=3
17 4 -0.0012 -7 49 -50 imp:n=1 u=3
18 4 -0.0012 -7 50 -51 imp:n=1 u=3
19 4 -0.0012 -7 51 -52 imp:n=1 u=3
20 4 -0.0012 -7 52 -53 imp:n=1 u=3
21 4 -0.0012 -7 53 -54 imp:n=1 u=3
22 4 -0.0012 -7 54 -55 imp:n=1 u=3
23 4 -0.0012 -7 55 -56 imp:n=1 u=3
24 4 -0.0012 -7 56 -57 imp:n=1 u=3
25 4 -0.0012 -7 57 -58 imp:n=1 u=3
26 4 -0.0012 -7 58 -59 imp:n=1 u=3
27 4 -0.0012 -7 59 -60 imp:n=1 u=3
28 4 -0.0012 -7 60 -61 imp:n=1 u=3
29 4 -0.0012 -7 61 -62 imp:n=1 u=3
30 like 2 but imp:n=1 u=3
31 like 3 but imp:n=1 u=3
32 like 4 but imp:n=1 u=3
33 3 1.001400e-1 10 -11 imp:n=1 u=4
34 4 -0.0012 11 -12 imp:n=1 u=4
35 3 1.001400e-1 -7 10 -11 imp:n=1 u=5
36 4 -0.0012 -7 11 -12 imp:n=1 u=5
37 like 2 but imp:n=1 u=5
38 like 3 but imp:n=1 u=5
39 like 4 but imp:n=1 u=5

```

```

40      0                               99                               imp:n=0

c
c   surface cards (origin x=0.9780 y=0.9780 z=0.0)
c   parallelepiped
  1   px   0.00000
  2   px   1.95600
  3   py   0.00000
  4   py   1.95600
  5   pz   0.00000
  6   pz  144.15000

c
c   cylinder
c
  7   c/z  0.9780 0.9780 0.6250
  8   c/z  0.9780 0.9780 0.7085
c   track length estimator c/z
  9   c/z  0.9780 0.9780 0.3100

c
c   critical water level= 100.000(cm)
10   pz  0.0
11   pz 100.000
12   pz  144.15
c   pitch* 17=33.25200(cm)
c   (33.25200*33.25200*144.15)
c   parallelepiped
21   px   0.00001
22   px  33.25199
23   py   0.00001
24   py  33.25199
25   pz   0.00001
26   pz 144.14999

c
c   water refrect= 30.000(cm)
c   parallelepiped
31   px -29.99999
32   px  63.25199
33   py -29.99999
34   py  63.25199
35   pz -29.99999
36   pz  99.99999

c
c   track length estimator cell pz
41   pz  0.0
42   pz  5.0
43   pz 10.0
44   pz 15.0
45   pz 20.0
46   pz 25.0
47   pz 30.0
48   pz 35.0
49   pz 40.0
50   pz 45.0
51   pz 50.0
52   pz 55.0
53   pz 60.0
54   pz 65.0
55   pz 70.0
56   pz 75.0
57   pz 80.0
58   pz 85.0
59   pz 90.0
60   pz 95.0
61   pz 100.0
62   pz 144.15

```



```

c   outer world
99  s   16.626 16.626 72.075 150.0

c
c   data cards
c
mode n           $ transfort neutrons only
c
c   material cards
c
c   U(2.6)O2 pellet
m1  92235.37c 6.086e-4           $ U-235
    92238.37c 2.255e-2           $ U-238
    8016.37c  4.725e-2           $ 0

c
c   Al cladding (with an air gap)
m2  13027.37c 5.587e-2           $ Al

c
c   water(300K)
m3  1001.37c 6.676e-2           $ H
    8016.37c 3.338e-2           $ 0
mt3  lwtr.01t

c
c   air (0.0012 g/cm3) jaeri-m6928
m4  1001.37c -0.001
    6012.37c -0.0126
    7014.37c -75.5
    8016.37c -23.2
m235 92235.37c 1

c
c   default energy bins; hansen-roach structure
e0  1.0e-7 4.0e-7 1.0e-6 3.0e-6 1.0e-5 3.0e-5 1.0e-4 5.5e-4 3.0e-3
    1.7e-2 0.1 0.4 0.9 1.4 3.0 20.0

c
c   tallies
fc4  total fission cross section in u=3
c
f4:n  ( 9<5 [-14 -8 0]<6) (10<5 [-14 -8 0]<6) (11<5 [-14 -8 0]<6)
      (12<5 [-14 -8 0]<6) (13<5 [-14 -8 0]<6) (14<5 [-14 -8 0]<6)
      (15<5 [-14 -8 0]<6) (16<5 [-14 -8 0]<6) (17<5 [-14 -8 0]<6)
      (18<5 [-14 -8 0]<6) (19<5 [-14 -8 0]<6) (20<5 [-14 -8 0]<6)
      (21<5 [-14 -8 0]<6) (22<5 [-14 -8 0]<6) (23<5 [-14 -8 0]<6)
      (24<5 [-14 -8 0]<6) (25<5 [-14 -8 0]<6) (26<5 [-14 -8 0]<6)
      (27<5 [-14 -8 0]<6) (28<5 [-14 -8 0]<6)
fm4  (1.0 235 -6)

c
sdef  erg=d1 pos=16.626 16.626 0.0 wgt=1
c
spl  -3 1.025 2.926
c
prdmp j 50000 1 3
c
nps  200000
totnu
c
print -100 -110 -175

```