

JAERI-Research

97-003



正の大きな反応度測定  
における修正法の提案

1997年2月

金子義彦・島川聰司・長尾美春  
山下清信・竹内光男・山根 剛

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。  
入手の問合せは、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, 1997

編集兼発行 日本原子力研究所

印 刷 核原子力資料サービス

## 正の大きな反応度測定における修正法の提案

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部

金子 義彦\*・島川 聰司・長尾 美春

山下 清信<sup>+1</sup>・竹内 光男<sup>+1</sup>・山根 剛<sup>+2</sup>

(1997年1月8日受理)

燃料追加法及び中性子吸収置換法を含む、大きな正の反応度を測定する在来の実験方法を炉物理の観点から分析した。その結果、超過倍率が約 15%  $\Delta k$  を超える領域に入るといずれの実験手法共約 20 % もの系統誤差を生ずる可能性のあることがわかった。この問題を克服するために、実験の解釈の修正を提案した。この修正法では、実測される現実炉心の実効増倍率の増分に計算により求める修正因子  $f$  を乗することにより、仮想炉心における実効増倍率の増分に転換してから加算することにより超過倍率が決定される。当然のことながらこの指導原理において修正因子  $f$  は超過倍率ができるだけ正確に求められるものが選択される。修正法を用いると、在来法では避けられなかった系統誤差はほとんど消失する。また、超過倍率の評価は、修正因子  $f$  の計算に使う炉定数の曖昧さにあまり影響を受けない。本報告は修正法の基本的な成立性を記述するものであり、個々の原子炉へ適用する場合は修正因子  $f$  の決定にはもっと詳細な炉心計算が必要である。とりわけ、反応度を発生させる手段の間に相互干渉が強い場合には慎重な対応が要求される。

---

大洗研究所：〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀 3607

\* 特別研究員

<sup>+1</sup> 高温工学試験研究炉開発部

<sup>+2</sup> 東海研究所原子炉工学部

A Proposal of Revised Method for  
Determination of Large Positive Reactivity

Yoshihiko KANEKO\*, Satoshi SHIMAKAWA, Yoshiharu NAGAO  
Kiyonobu YAMASHITA<sup>+1</sup>, Mitsuo TAKEUCHI<sup>+1</sup> and Takeshi YAMANE<sup>+2</sup>

Department of JMTR Project  
Oarai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received January 8, 1997)

Existing experimental methods for determination of large positive reactivity, including the fuel addition method as well as the neutron absorption substitution method were analyzed from a view point of reactor physics. It is found that all the experimental methods are possibly affected to the substantially large systematic error up to  $\sim 20\%$ , when the value of excess multiplication factor comes into the range beyond  $\sim 15\% \Delta k$ . To cope with this difficulty, a revised interpretation method is validly proposed. The revised method evaluates the value of the excess multiplication factor as the accumulation of the consecutive increments of the effective multiplication factor in a virtual core, which are converted from those in an actual core by multiplying a calculated correction factor  $f$  to it. The correction factor  $f$  is to be determined in principle by calculation according to such a guide-line that the value of the excess multiplication factor can be obtained as accurately as possible. Using the revised method, the systematic errors are mostly swept out, and evaluation of the excess multiplication factor is able to be done under little influence of uncertainties in the reactor constants used for calculation of the correction factor  $f$ . The present report describes only the fundamental validity of the revised method, and therefore for detailed core calculations are naturally required for determination of correction factor  $f$  of each reactor under investigation. Especially, careful treatments are

---

\* Science Vistor

<sup>+1</sup> Department of HTTR Project

<sup>+2</sup> Department of Reactor Engineering, Tokai Research Establishment

requested, when mutual interaction effects are strong among the measures, generating the reactivity of a reactor.

Keywords: Experimental Method, Large Positive Reactivity, Excess Multiplication Factor, Actual Core, Virtual Core, Fuel Addition Method, Neutron Absorption Substitution Method, Revised Method, High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) , Japan Materials Testing Reactor (JMTR)

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Fundamental Problems in Existing Methods and A Proposal of Revised Method .....	3
2.1 Fundamental Problems in Existing Methods .....	3
2.2 Proposal of Revised Method .....	6
3. Evaluation of Validity of Revised Method by Numerical Experiments .....	14
3.1 Numerical Experiment .....	14
3.2 Systematic Error .....	16
3.3 Dependence on Accuracy of Reactor Constants for Correction Factor f ..	18
3.4 Application to Operating Reactors .....	19
4. Conclusion .....	20
Acknowledgments .....	21
Reference .....	21
Appendix A Relation between Proposed Fuel Addition Method and Existing One .....	33
Appendix B Relation between Present Revised Method and Eich's Method .....	38
Appendix C Evaluation from Measurement of Large Negative Reactivity .....	44
Appendix D Mutual Interference Effect in Neutron Absorption Substitution Method .....	48
Appendix E Differential and Integral Expression .....	61
Appendix F Detail Data of Numerical Experiments .....	64

## 目 次

1. 序 言 .....	1
2. 基本的問題点と修正法の提案 .....	3
2.1 在来の実験手法の基本的問題 .....	3
2.2 修正法の提案 .....	6
3. 数値実験による修正法の妥当性の評価 .....	14
3.1 数値実験 .....	14
3.2 系統誤差 .....	16
3.3 炉定数の曖昧さが修正因子 $f$ に与える影響 .....	18
3.4 実際の炉心への適用性 .....	19
4. 結 言 .....	20
謝 辞 .....	21
参考文献 .....	21
付録A 在来の燃料追加法と修正法の関係 .....	33
付録B Eich の論文と修正法の関係 .....	38
付録C 負の反応度の測定からの推定 .....	44
付録D 中性子吸収置換法における相互干渉の効果 .....	48
付録E 微分型と積分型表現 .....	61
付録F 数値実験の全データ .....	64

## 1. 序 言

動力炉及び試験研究炉はかなり大きい超過倍率をもっており、炉心の温度上昇、燃料の燃焼並びにXe-Smの毒物効果の乗り越えのほか照射物の挿入による反応度の低下に対処している。そのため、所定の運転に入る前に、コールド・クリーンの状態で、十分な超過倍率をもっているか、またその大きさが、制御棒等で制御しうる範囲に収まっているか確認される。

超過倍率はまた設置許可取得にあたって核的制限値の一項目となっており、使用前検査及び定期検査において実測することになっている<sup>(1)</sup>。

加えて、超過倍率の測定は実験炉・実証炉においては、新型炉の技術の高度化のため実機規模の炉心の特性データを提供するものである<sup>(2)(3)</sup>。

正の大きな反応度の測定に関しては、これまでレビューがなく、系統的な問題点の摘出もされていない。実験物理学講座「原子炉」において負の反応度測定による較正に基づいた手法について記述があるのみである<sup>(4)</sup>。

本論文では在来の実験手法では、かなり大きい系統誤差を生ずる可能性のあること等の基本的問題点を明確にしたうえで、直接測定される炉物理量を最終的に目標としている超過倍率にできるだけ正確に結びつける手法として修正法を提案した。この修正法では、超過倍率という炉物理量は在来の実験手法において適用の対象としている現実の炉心（現実炉心）ではなく、臨界に拘束されない仮想の炉心（仮想炉心）について定義されるという基本的考え方立っている。この報告は、この提案の炉物理的基礎を明示することを目的としている。そのため、正の反応度発生のメカニズムをあまり損わない範囲で、できるだけ単純化したモデルによって修正法の定式化を行った。個々の炉への具体的な適用にあたっては、詳細なモデルの採用がもちろん必要である。修正法の具体的適用により超過反応度が合理的に決定されるようになれば運転サイクルの延長などの炉心管理の効率化も推進されよう<sup>(5)</sup>。

日本原子力研究所で建設を進めている高温工学試験研究炉（HTTR）では、

原子力研究開発利用長期計画において、高温ガス炉技術の高度化を図ることとされており、精度の高い炉心特性データの取得が要求されている<sup>(6)</sup>。超過倍率はその重要な一項目である。H T T Rは、これまでの試験研究炉の中では、最も大きい超過反応度を有しているので、この修正法の考え方により高精度の推定がなされ、この炉の設置目的の一つである高温ガス炉技術の高度化が促進されることを期待している。

## 2. 基本的問題点と修正法の提案

### 2.1. 在来の実験手法の基本的問題

1章で述べたように正の大きな反応度の推定手法の体系化は、あまり進んでいない。個々の原子炉施設で、超過反応度の測定にさいしてそれぞれ工夫をしているのが現状である。現在では、主として燃料追加法<sup>(5)</sup>と中性子吸收置換法<sup>(7)</sup>が用いられている。前者では、臨界炉心に追加する燃料の反応度価値を測定し、その積算として超過反応度が求められる。後者では、臨界炉心に正の反応度を発生する事象を与えると共に、較正ずみの負の反応度を発生する事象を与えて、反応度のバランスから超過反応度が求められる。以上のほか、正の反応度量が小さいとき燃料体価値法が適用されている。

**燃料追加法<sup>(5)</sup>**：最小の臨界状態の最小炉心から燃料体を段階的に追加し、そのつど実効増倍率の増加量  $\Delta k_i$ (現実)を測定する。初期の炉心が構成されたらこれを最大炉心ということにする。以上の現実炉心では  $\Delta k_i$ (現実)の測定が終ったら、直ちにこれを打ち消すだけの制御棒の挿入やホウ酸溶液の注入をするなどの外部中性子吸収を増加させ、炉心を臨界状態に復帰させる。

$\Delta k_i$ (現実)の総和をとり、超過倍率は

$$k_{ex}(\text{現実}) = \sum_{i=1}^{i_{\max}} \Delta k_i (\text{現実}) \quad (1)$$

により与えられると解釈してきた。

**燃料体価値法**：最小炉心から最大炉心を構成するため加える燃料体の位置をあらかじめ特定しておく、最小炉心について、各位置における单一体の燃料体の追加による実効増倍率の増加  $\Delta k_i$ (現実)を測定する。その総和として超過倍率は、

$$k_{ex}(\text{現実}) = \sum_{j=1}^{j_{\max}} \Delta k_j(\text{現実}) \quad (2)$$

により与えられると解釈してきた。

**中性子吸収置換法**：外部中性子吸収が最大になっている最大外部吸収炉心において外部中性子吸収を段階的に減少させて、そのつど、実効増倍率の増分(現実)を測定する。現実炉心では  $\Delta k_s(\text{現実})$  の測定が終ったら、直ちにこれを打消すだけ別種の外部中性子吸収を増加させ炉心を臨界に復帰させる。最初の種類の外部中性子吸収が消失するまで以上の手順をくりかえす。 $\Delta k_s(\text{現実})$  の総和として、超過倍率は

$$k_{ex}(\text{現実}) = \sum_{s=1}^{s_{\max}} \Delta k_s(\text{現実}) \quad (3)$$

により与えられると解釈してきた。

(1) (2) 及び(3) 式の替りに反応度  $\rho$  についての加算則を用いる解釈も用いられている。<sup>(5)</sup>

$k$  の加算則及び  $\rho$  の加算則により求める超過反応度の関係を附録Aで検討したが、いずれの解釈も妥当性はない。

一方、本来の超過倍率の定義からすると、燃料追加法では、燃料体の追加ごとに外部中性子吸収を追加することなく、臨界超過のまま炉心を段階的に大きくしていく仮想炉心についての実効増倍率の増加  $\Delta k_i(\text{仮想})$  の総和として真の超過倍率は、

$$k_{ex} = \sum_{i=1}^{i_{\max}} \Delta k_i(\text{仮想}) \quad (1)'$$

により評価されるべきである。

また、燃料体価値法では、一度加えた燃料体を取り去り、最小炉心にもどすことなく、臨界超過のまま炉心を大きくしていく仮想炉心についての実効増倍率の増分  $\Delta k_j$ (仮想) の総和として、真の超過倍率は、(1)'式と同一の

$$k_{ex} = \sum_{j=1}^{j_{max}} \Delta k_j(\text{仮想}) \quad (2)'$$

により評価されるべきである。

さらに、中性子吸収置換法においても、外部中性子吸収の減少ごとに、別種の中性子吸収を増加させることなく、臨界超過が進行する仮想炉心の実効増倍率の増加  $\Delta k_s$ (仮想) の総和として、真の超過反応度は

$$k_{ex} = \sum_{s=1}^{s_{max}} \Delta k_s(\text{仮想}) \quad (3)'$$

により評価されるべきである。

したがって、これまで在来法において、超過倍率と解釈してきた(1)、(2)及び(3)式で与えられる  $k_{ex}$ (現実) は真の超過倍率  $k_{ex}$  とは、原理的に異なる炉物理量であると理解される。相互の関係の分析から本章の 2.2 で修正法を提案することにするが、その前にわが国における代表的な試験研究炉における適用実績を表 1 にとりまとめた。新しく炉が建設された場合、定常的な利用運転に入る前の使用前検査においては、各炉共おしなべて燃料追加法を採用している。また、定常運転に入ってからの年一回の定期検査では、多くの場合、現実炉心で制御棒どうしで反応度を相殺して求めた制御棒反応度価値曲線を用いて超過倍率を推定している。この手法は本報でいう中性子吸収置換法の分類に入る。

## 2.2 修正法の提案

(1)(2)及び(3)式で与えられる  $k_{ex}$ (現実)は、仮想炉心について定義される真の超過倍率  $k_{ex}$  とは基本的に異った炉物理量であるが、かなり共通した炉物理事象に基礎を置いている。ここでは、 $k_{ex}$ (現実)の要素  $\Delta k$ (現実)に修正因子  $f$  を乗することにより、真の超過倍率  $k_{ex}$  の要素  $\Delta k$ (仮想)に転換されるという指導原理に立って修正法を提案する。この修正因子  $f$  は両者を結びつける炉物理事象の分析から決定される。

修正法では、

$$\Delta k(\text{仮想}) = f \Delta k(\text{現実}) \quad (4)$$

により、修正因子  $f$  を導入する。

したがって、例えば、燃料追加法では、(1)式の代わりに、

$$k_{ex} = \sum_{i=1}^{i_{\max}} f_i \Delta k_i \quad (\text{現実}) \quad (5)$$

が用いられることになる。

ここでは、 $f$  の定式化の対象として平板炉を選び一群拡散理論を適用するという単純なモデル化により修正法の炉物理的基礎をできるだけ明確にするようにつとめた。

また、空間的には原則として1領域としているので、制御棒等があると、その効果は別個に考察する必要がある。

### (1) 燃料追加法

中性子バランスの方程式は

$$-D\nabla^2\phi + \Sigma_a\phi - \frac{\nu\Sigma_f\phi}{k} = 0 \quad (6)$$

であり、ここに

$D$  : 中性子拡散係数（減速時の中性子の広がりを含める）

$\Sigma_a$  : 中性子吸収断面積

$\Sigma_f$  : 中性子核分裂断面積

$\nu$  : 核分裂あたりの中性子発生数

$k$  : 実効増倍率

$\phi$  : 中性子束

(6)式より

$$k = \frac{\nu \Sigma_f}{DB_g^2 + \Sigma_a} \quad (7)$$

ここに、 $B_g^2$ は炉の幾何学的バックリングであり、炉の厚みをLとすると

$$B_g^2 = \left( \frac{\pi}{L} \right)^2 \quad (8)$$

で与えられる。

$L$ は最小炉心 $L_{min}$ から最大炉心の $L_{max}$ まで変化する。

また、 $\Sigma_a$ は燃料や構造材による内部中性子吸収 $\Sigma_{a,in}$ と制御棒の挿入やホウ酸水の注入等の外部中性子吸収 $\Sigma_{a,out}$ の和で与えられ、

$$\Sigma_a = \Sigma_{a,in} + \Sigma_{a,out} \quad (9)$$

であり、最小炉心では $\Sigma_{a,out}=0$ であることからが $\Sigma_a=\Sigma_{a,in}$ となり、 $\Sigma_{a,out}$ は $L$ の增加と共に増加し、 $L_{max}$ では $\Sigma_a=\Sigma_{a,in}+\Sigma_{a,out}$ まで大きくなる。すなわち、最小炉心では、

$$\Sigma_{a,min} = \Sigma_{a,in} \quad (10)$$

最大炉心では、

$$\Sigma_a \max = \Sigma_a \text{in} + \Sigma_a \text{out max} \quad (11)$$

となる。

(7) 式を  $L$  と  $\Sigma_a$  で偏微分すると、それぞれ以下の結果を得る。

$$\frac{\partial k}{\partial L} = k^2 \frac{2DB_g^2}{v\Sigma_f L} \quad (12)$$

および

$$\frac{\partial k}{\partial \Sigma_a} = -k^2 \frac{1}{v\Sigma_f} \quad (13)$$

注意すべきは、現実炉心では、燃料体の追加など  $\Delta k$ (現実)の測定に必要な操作にかかる直前において両式ではいつも、 $k=1$  になるように  $\Sigma_a \text{out}$  を通して  $\Sigma_a$  が調整されていることである。板厚の増分  $\Delta L$  による実効増倍率の増分を打ち消すのに必要な  $\Sigma_a$  の増分  $\Delta \Sigma_a$  は

$$\frac{\partial k}{\partial L} \Delta L + \frac{\partial k}{\partial \Sigma_a} \Delta \Sigma_a = 0 \quad (14)$$

により、決定される。

$L_{\min}$  から  $L_{\max}$  の平板炉の厚み  $L$  の変化に対応する現実炉心の  $\Sigma_a \text{out}$  の増加の総和は(14)式に、(12)、(13)式及び(8)式を代入することにより、

$$\int_0^{\Sigma_a \text{out max}} d \Sigma_a \text{out} = - \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} \frac{(\partial k / \partial L)}{\partial k / \partial \Sigma_a} \cdot dL = \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} \frac{2\pi^2 D}{L^3} \cdot dL = D \left[ \left( \frac{\pi}{L_{\min}} \right)^2 - \left( \frac{\pi}{L_{\max}} \right)^2 \right] \quad (15)$$

が与えられ、中性子吸收の増加は中性子漏洩の減少により相殺されていることが示される。

さてここで、(1) 式の  $k_{ex}$ (現実)の要素である  $\Delta k_i$ (現実)を求める。

$$L \gg \Delta L \quad (16)$$

という前提のもとに、

$$\Delta k_i(\text{仮想}) = \frac{\partial k}{\partial L} \Big|_{k=1} \Delta L_i - \frac{\partial k}{\partial \Sigma_a} \Big|_{k=1} \frac{\Delta L_i}{L} \Sigma_a \text{out} \quad (17)$$

第1項と第2項はそれぞれ板厚の増加の直接的影響と、そのために起る炉心平均の中性子吸收の減少の影響を示している。(12) と(13)式から、 $k = 1$  に注意して、

$$\Delta k_i(\text{現実}) = \frac{2DB_g^2 + \Sigma_a \text{out}}{v\Sigma_f} \cdot \frac{\Delta L_i}{L} \quad (18)$$

となる。

一方、仮想炉心についての  $\Delta k_i$ (仮想)は、(12)式から、

$$\Delta k_i(\text{仮想}) = k^2 \frac{2DB_g^2}{v\Sigma_f} \cdot \frac{\Delta L_i}{L} \quad (19)$$

により与えられる。

そこで、修正因子  $f_i$  は(18)と(19)式から

$$f_i = \frac{k^2 (2DB_g^2)}{2DB_g^2 + \Sigma_a \text{out}} \quad (20)$$

と定まる。

ここで注目すべきことに、上式において分子に  $DB_g^2$  という因子が現れている。この因子は中性子漏洩の割合であり、燃料の追加が進み炉心が大きくなると小さくなる。分母にも同一の因子があるが、 $\Sigma_{a\text{out}}$  が大きくなるので  $DB_g^2$  の変化と相殺し合い、結果として分母の値はあまり変わらない。そのためもともと漏洩が少ない特性の炉心では  $L=L_{\max}$  に近づくと  $DB_g^2$  の因子が極端に小さくなることにより  $f_i$  の低下は顕著になる。一方、もともと漏洩の多い特性の炉心では炉心が拡大しても定められた超過倍率の範囲では、 $DB_g^2$  はあまり小さくならないので  $f_i$  の低下は緩やかである。

燃料追加法の修正法による超過倍率推定の構図を第1図に示した。この図では炉心の構成を示すために燃料体数をY軸に、中性子吸収をX軸にプロットすることとしたうえで、その炉心の実効増倍率の1からの増分をZ軸にプロットしている。ある燃料体の配置に対して、臨界が維持されるように、中性子吸収体を加えた炉心( $k=1$ 、したがって第1図では  $Z=0$  の面上の1点に対応する)にあらためて、燃料体を追加して、発生する  $\Delta k_i$ (現実)を測定し、直ちに、中性子吸収体を追加して臨界にもどす。この  $\Delta k_i$ (現実)に修正因子  $f_i$  を乗じて  $\Delta k_i$ (仮想)に転換する。この手順をくりかえし、 $\Delta k_i$ (仮想)をZ・Y平面に加算プロットして超過倍率を得る。これから述べる他の在来法の修正法についても同様な構図になる。\*

$\Delta k$ (現実)を合理的に  $\Delta k$ (仮想)と結びつけようとする努力はこれまで全くなされなかつたわけではない。Eich は現実炉心、仮想炉心という概念を明確に定義

---

\* 第1図に示すように炉の構成を表現するXY平面上での  $k=1$  の軌跡の1点から、Y軸方向に状態を移すと、つまり、燃料体1体を追加すると現実炉心の実効増倍率は対応して増加する。これが  $\Delta k$ (現実)である。その大きさは大型の試験研究炉では~1% $\Delta k$  である場合が多く、1回の炉周期法で測定できる実効増倍率の増分~0.1% $\Delta k$  よりかなり大きい。そこで、~10回のサブステップに分けて炉周期法を適用する必要がある。この関係は、本文でのべた  $k_{ex}$  を  $\Delta k$ (現実)の測定から求める構図と相似である。

してから分析を開始してはいないが、現実炉心において、 $n$ ステップの燃料体追加がなされかつ中性子吸収体の追加がなされていない状態の実効増倍率が、仮想炉心の  $n$ ステップに対応する実効増倍率の( $n-1$ )ステップに対応する実効増倍率に対する比で与えられるという仮定から反応度対数関係式を導いているが<sup>(8)</sup>、附録Bに明示したように、その妥当性は極めて限られた条件下にのみ存在すると考えられる。

## (2) 燃料体価値法

現実炉心では、炉の厚さは  $L_{min}$  に固定される。

$L_{min}$  に  $\Delta L_j$  を加えたときの実効増倍率の増加  $\Delta k_j$ (現実) は(18)式において  $\Sigma_a out=0$  として

$$\Delta k_j(\text{現実}) = \frac{2DB_g^2}{\nu\Sigma_f L_{min}} \Delta L_j \quad (21)$$

であり、ここに、

$$B_g^2 = \left( \frac{\pi}{L_{min}} \right)^2 \quad (22)$$

である。

一方、仮想炉心では、 $L$  は  $L_{min}$  から  $L_{max}$  まで段階的に  $\Delta L_j$  づつ増加する。実効増倍率の増加は(19)式より

$$\Delta k_j(\text{仮想}) = k^2 \frac{2DB_g^2}{\nu\Sigma_f L} \cdot \Delta L_i \quad (23)$$

で与えられ、(20)式の修正因子は

$$f_j = k^2 \left( \frac{L_{min}}{L} \right)^3 \quad (24)$$

である。

真の超過倍率は(5)式と同等の式で決定される。

ここで、注目すべきは、上式において  $L^3$  が分母に入っていることである。このため、炉心が大きくなると  $L=L_{\max}$  の近傍で修正因子  $f_j$  が急速に小さくなる傾向が生ずるが、その変化は燃料追加法におけるものより大きい。

### (3) 中性子吸収置換法

現実炉心、仮想炉心共、共通の固定した板厚  $L_{fix}$  をもつものとする。すなわち、 $\Sigma_a^{out}$  を最大の  $\Sigma_a^{out max}$  にしたときに臨界とし、仮想炉心では  $\Sigma_a^{out}=0$  まで  $\Delta\Sigma_a^{out s}$  のきざみで減少させる。一方、現実炉心では、 $-\Delta\Sigma_a^{out s}$  の減少に相当する反応度の増加を測定したあと、別種の中性子吸収を  $\Delta\Sigma_a^{out s}$  だけ増加させて、臨界に復帰させる。

$\Delta k_s$ (現実)は(13)式により

$$\Delta k_s(\text{現実}) = -\frac{1}{v\Sigma_f} \cdot \Delta\Sigma_a^{out s} \quad (25)$$

一方、 $\Delta k_s$ (仮想)も同じ式により

$$\Delta k_s(\text{仮想}) = \frac{k^2}{v\Sigma_f} \cdot \Delta\Sigma_a^{out s} \quad (26)$$

で与えられる。

両式から修正因子  $f_s$  は

$$f_s = k^2 \quad (27)$$

で与えられる。したがって、仮想炉心の実効増倍率  $k$  が大きくなるほど、 $f$  は

より乖離し大きくなるが、その傾向は比較的ゆるいものになる。

(13)式から、超過倍率  $k_{ex}$  は

$$k_{ex} = -\frac{1}{v\Sigma_f} \int_{\Sigma_a out max}^0 k^2 d\Sigma_a out \quad (28)$$

により与えられ、さらに(7)式の関係から上式は

$$k_{ex} = v\Sigma_f \left( \frac{1}{DB_{fix}^2 + \Sigma_a in} - \frac{1}{DB_{fix}^2 + \Sigma_a in + \Sigma_a out max} \right) \quad (29)$$

となる。

ここに、 $B_{fix}^2$  は固定した炉心厚さ  $L_{fix}$  に対応する幾何学的バックリングであり、

$$B_{fix}^2 = \left( \frac{\pi}{L_{fix}} \right)^2 \quad (30)$$

である。

また、(25)式を積分することにより得られる以下の式

$$k_{ex}(\text{現実}) = \frac{\Sigma_a out max}{v\Sigma_f} \quad (31)$$

及び(29)式等の関係から真の超過倍率  $k_{ex}$  と在来法の超過倍率  $k_{ex}(\text{現実})$  の間には、単純な関係式

$$k_{ex} = (1 + k_{ex}) \cdot k_{ex}(\text{現実}) \quad (32)$$

が容易に導かれる。この(32)式から、在来の中性子吸収置換法による超過倍率  $k_{ex}(\text{現実})$  より、 $k_{ex}$  は  $(1 + k_{ex})$  という因子だけ大きいことになる。関連する手法と

して、1章で述べたように負の大きな反応度の測定から、超過倍率を推定する方法がある<sup>(4)</sup>。この方法は現実炉心をベースとして、仮想炉心の超過倍率を推定しようとする今回の修正法の提案の一つの拡張に位置づけられる。附録Cにこの未臨界法についての分析を示した。これまでには、炉は1領域の平板炉心と仮定してきたが、このモデルは制御棒などの固体の中性子吸收体が挿入されているような非均質な炉の超過倍率測定法の分析には十分でない。附録Dにおいて2領域の平板炉心について定式化を行い、領域間の干渉効果の影響を検討した。

### 3. 数値実験による修正法の妥当性の評価

#### 3.1 数値実験

修正法の妥当性を評価するため、超過倍率が約 17.7%Δk の試験研究炉について数値実験を行った。この超過倍率の値は、JMTR、HTTR 及び JRR-3M 等の大型の試験研究炉の制限値を参考にして定めたものである。

数値実験に使用した炉定数を第2表に示した。この表は現実炉心に相当する炉定数であり、炉定数 I は標準ケースの炉の炉定数、炉定数 II は標準ケースの炉定数より中性子漏洩が多い炉の炉定数とし、炉定数 III と IV は、想定している炉は標準ケースと中性子漏洩の多い炉であるが、炉定数 I 及び II の精度を低下させた不正確な炉定数とするという位置付けである。ここでは、炉定数 I 及び II を正確な炉定数、炉定数 III と IV を不正確な炉定数と呼ぶこととする。また、各炉定数共、燃料追加法を適用して組み上げた最大の現実炉心を中性子吸収置換法の最大外部吸収炉心としている。

数値実験の手順は、燃料追加法については、最小炉心（板厚  $L_{min}=L_0$ ）から、その 5%ずつ板厚を広げ、20 ステップで最大炉心（板厚  $L_{max}=2L_0$ ）を構成することとした。一方、中性子吸収置換法では、この最大炉心から外部中性子吸収  $\Sigma_aout$

して、1章で述べたように負の大きな反応度の測定から、超過倍率を推定する方法がある<sup>(4)</sup>。この方法は現実炉心をベースとして、仮想炉心の超過倍率を推定しようとする今回の修正法の提案の一つの拡張に位置づけられる。附録Cにこの未臨界法についての分析を示した。これまでには、炉は1領域の平板炉心と仮定してきたが、このモデルは制御棒などの固体の中性子吸收体が挿入されているような非均質な炉の超過倍率測定法の分析には十分でない。附録Dにおいて2領域の平板炉心について定式化を行い、領域間の干渉効果の影響を検討した。

### 3. 数値実験による修正法の妥当性の評価

#### 3.1 数値実験

修正法の妥当性を評価するため、超過倍率が約 17.7%Δk の試験研究炉について数値実験を行った。この超過倍率の値は、JMTR、HTTR 及び JRR-3M 等の大型の試験研究炉の制限値を参考にして定めたものである。

数値実験に使用した炉定数を第2表に示した。この表は現実炉心に相当する炉定数であり、炉定数 I は標準ケースの炉の炉定数、炉定数 II は標準ケースの炉定数より中性子漏洩が多い炉の炉定数とし、炉定数 III と IV は、想定している炉は標準ケースと中性子漏洩の多い炉であるが、炉定数 I 及び II の精度を低下させた不正確な炉定数とするという位置付けである。ここでは、炉定数 I 及び II を正確な炉定数、炉定数 III と IV を不正確な炉定数と呼ぶこととする。また、各炉定数共、燃料追加法を適用して組み上げた最大の現実炉心を中性子吸収置換法の最大外部吸収炉心としている。

数値実験の手順は、燃料追加法については、最小炉心（板厚  $L_{min}=L_0$ ）から、その 5%ずつ板厚を広げ、20 ステップで最大炉心（板厚  $L_{max}=2L_0$ ）を構成することとした。一方、中性子吸収置換法では、この最大炉心から外部中性子吸収  $\Sigma_aout$

を 5%ずつ減少させ 20 ステップで  $\Sigma_{\text{out}}$  を消失させることとした。燃料体価値法については、最小炉心から最大炉心を構成するために加える燃料体を 20 とした。

数値実験の結果を第 3 表に示した。修正因子  $f_i$  については、2.2 で定義したように  $\Delta k_i$ (現実) と  $\Delta k_i$ (仮想) の比である。尚、本章では、(18) 及び(19)式で定義される炉心構成の変化のつど発生する実効増倍率  $k$  の増分には  $\Delta k_i$ (現実)、 $\Delta k_i$ (仮想) のようにダッシュ(’ )) を付けることとする。

現実炉心における  $k_{\text{ex}}$  について、(5)式のための  $\Delta k_i$ (現実) は、

$$\Delta k_i(\text{現実}) = (\Delta k_i(\text{現実}) + \Delta k_{i+1}(\text{現実})) / 2 \quad (33)$$

とした。この理由は、 $\Delta k_i$ (現実) の単なる加算により  $k_{\text{ex}}$ (現実) を求めると、誤差が大きくなるためである（泰イラー展開において 1 次微係数までしか考慮していないため、2 次微係数以降の影響が大きくなることによる）。なお、修正因子  $f_i$  の値は(33)式で与えられる  $\Delta k_i$ (現実) に対する次式で与えられる  $\Delta k_i$ (仮想) の比で定まるとした。

$$\Delta k_i(\text{仮想}) = (\Delta k_i(\text{仮想}) + \Delta k_{i+1}(\text{仮想})) / 2 \quad (34)$$

$i \sim i+1$  の区間において  $f_i$  についても、2 次微係数以降の影響が存在するため、(5)式の修正法の原理式により  $\Delta k_i$ (現実) と修正因子  $f_i$  から評価した超過倍率の値は、臨界方程式の(7)式から直接得られる超過倍率と微小な差を生じているが、問題にならない大きさである。以上、燃料追加法について述べたが中性子吸収置換法についても同様の取扱いを行った。

炉定数 I、II の両方について、修正法による超過倍率と臨界方程式から評価した超過倍率の差異は、燃料追加法について ~0.3% $\Delta k$ 、中性子吸収置換法について ~0.2% であるが、先に述べた  $f_i$  の評価に起因しており、燃料体追加のステップ巾をさらに小さくするなどによりさらなる差異の縮小は容易である。

第2図には、超過倍率の増大による修正因子  $f$  の1からの乖離特性を各実験法について示した。燃料追加法については修正因子  $f$  の超過倍率依存性が中性子漏洩の激しさにより強く影響される。第3図には、燃料追加法について板厚の増大による修正因子  $f$  の1からの乖離と超過倍率の上昇状況を示し、第4図には、中性子吸収置換法について外部中性子吸収の除去による修正因子  $f$  と超過倍率の変化についてまとめ、そして第5図には、燃料追加法と中性子吸収置換法について、仮想炉心及び現実炉心の実効増倍率  $k$  の増分の比較について示した。

また、以上の図表（第3表、第2、3、4、5図）は仮想炉心が所期の実効増倍率をもつまでのプロセスを追ってつくられている。そのため途中の状態（中間炉心）が所期のものであったという解釈も可能であるので、より低い超過倍率の炉心における  $f$  の変化も読み取れる。

### 3.2 系統誤差

いずれの実験手法においても、仮想炉心の実効増倍率  $k=1$  の近傍では  $f \approx 1$  である。しかし、 $k$  が1を超えるに従い、中性子漏洩が激しい炉心に対する燃料追加法による場合を除いたすべての実験手法では  $f$  の1からの乖離が目立つ。燃料追加法については、炉定数 I の中性子漏洩が弱い標準のケースの炉心では、 $k$  が～1.1つまり超過倍率が～10%Δkにおいて、 $f$  は0.83程度にまで下降する。以上の傾向は、超過倍率が大きくなるに従いさらに強調されるため、在来の燃料追加法では、標準ケースの炉の超過倍率の真の値  $k_{ex}=17.7\%Δk$  を約4%Δk、相対値として約21%も過大評価することになる。

燃料追加法については、第2、3図に示されるように  $f$  の  $k$  あるいは板厚  $L/L_{max}$  への依存性は中性子漏洩  $DB_g^2$  の大きさによってパターンが変化する。現実的な超過倍率の範囲内（約20%Δk未満）においては、 $DB_g^2$  が大きい炉心では修正因子  $f$  は1よりわずかに増加する傾向を示し、また  $DB_g^2$  が小さい炉心では  $f$  は単調に減少する傾向を示す。現存する大型の試験・研究炉の多くは炉定数 I の  $DB_g^2 max=0.2$  のケースと炉定数 II の  $DB_g^2 max=0.4$  の範囲にあるため、この範囲

の特性を示すことになると推定される。

中性子吸収置換法については、炉定数 I の標準ケースの炉心に関して、在来法では、超過倍率の値を約  $2.7\% \Delta k$ 、相対値では 18% 程度過小評価することになる。この実験手法では、炉定数 I より中性子漏洩のもっと大きな炉の場合についても炉定数 I の炉の場合と同様の結論になる。この理由は、炉定数 II では炉定数 I と比較して  $\Sigma_{a,in}$  を減少し、その分だけ  $DB_g^2$  を大きくしているだけで、 $\Sigma_{a,out}$  の除去量は両定数で同じく  $0.15v\Sigma_f$  になっていることによる。

燃料追加法について、第 3 図に示される修正因子  $f$  と板厚  $L L_{min}$  との関係について考察する。中性子漏洩効果が弱い標準ケースでは、 $f$  は  $L$  の増加にしたがい単調に下降する。これは、仮想炉心では、炉心の拡大にともない中性子漏洩効果のさらなる段階的減少により、実効増倍率  $k$  の増加量が低減するのに対して、現実炉心では、新しい燃料体の追加による炉心全体で平均した外部中性子吸収  $\Sigma_{a,out}$  の低下による  $k$  の増加要因が併存するので、全体として  $k$  の増加量はあまり低下しないことによる。中性子漏洩効果が激しいケースでは、 $f$  は  $L$  があまり増加していないうちはわずかに上昇するが、 $L$  が大きくなるにつれて下降するようなる。この  $f$  がわずかに増加傾向を示す理由は、まず前述したように、仮想炉心では、外部中性子吸収を追加することなく臨界超過のまま炉心を段階的に大きくしていくが、現実炉心では燃料を 1 体追加する毎に外部中性子吸収を追加し臨界をとるので、この場合、現実炉心では、 $L$  の増加量が少ないうちは、中性子漏洩  $DB_g^2$  の効果が大きく外部中性子吸収  $\Sigma_{a,out}$  の効果がほぼ無視でき、燃料を追加する毎に臨界に調整することによる  $k$  の増加効果がなくなるため、現実炉心の実効増倍率の増加量は仮想炉心のものよりも低下することによる。

燃料体価値法については、第 2、3 図に示すように  $f$  は燃料追加法より低い値を示す。これは燃料の反応度価値の測定を現実炉心の最小炉心で行っているもので、積算される燃料装荷量の増大に起因する燃料の反応度価値の減少効果を無視しているのが主な原因である。

中性子吸収置換法では、第 4 図に示されるように、外部吸収  $\Sigma_{a,out}$  の炉心にお

ける存在量が小さくなるにつれ、 $f$  は仮想炉心の  $k$  と共に 1 から単調に穏やかに増加する。これは  $\Sigma_{a\text{out}}$  が一定量ずつ取り出されると、仮想炉心ではしだいに  $\Sigma_{a\text{out}}$  が小さくなるので、現実炉心に比べて大きな正の反応度の発生が生ずるためである。

### 3.3 炉定数の曖昧さが修正因子 $f$ に与える影響

燃料追加法では、最小炉心において、また中性子吸收置換法では外部吸収が最大の炉心において、それぞれ臨界を経験するので、炉定数の曖昧さが吟味できる。

したがって、修正法の適用にあたって炉定数にはあまり大きな誤差はないと考えて良いであろう。しかし、修正法が、それぞれの原子炉施設で受け入れられるためには、あまり精度の高くない炉定数（不正確な炉定数）を使っても、修正因子  $f$  が高い精度で求められるという保証が要求される。

そこで、炉定数の精度の影響を検討するための炉定数 III では、炉定数 I に比較し、燃料追加法炉心について  $\Sigma_{a\text{in}}$  が  $0.04 v\Sigma_f$  だけ大きく  $D$  が、 $DB_g^2\text{max}$  にして  $0.04 v\Sigma_f$  だけ小さいとした。炉定数 III は炉定数 I と同じ最小臨界の板厚を与えるものの、 $17.7\%\Delta k$  の超過倍率を臨界方程式(7)では約  $4\%\Delta k$  も低く評価してしまう。しかし、 $f$  への影響は低く、燃料追加法の修正法を標準ケースの炉心に適用した場合、超過倍率について約  $0.3\%\Delta k$  の過小評価にしかならない。中性子吸收置換法の修正法についても、炉定数 III では、炉定数 I に比較し、最大外部吸収炉心について  $\Sigma_{a\text{in}}$  が  $0.04v\Sigma_f$  だけ大きく  $\Sigma_{a\text{out}}$  と  $DB_g^2\text{fix}$  がそれぞれ  $0.03 v\Sigma_f$  と  $0.04 v\Sigma_f$  だけ小さくしたのにもかかわらず、超過倍率を約  $0.6\%\Delta k$  過小評価するにとどまっていることがわかった。

以上の検討から、炉定数にかなりの誤差があっても、精度の高い超過倍率が決定されるとの見通しを得た。

### 3.4 実際の炉心への適用性

この修正法の現実の炉への適用にあたっては、炉心構成の各段階における複雑な形状に対処して、実効増倍率  $k$  の増分  $\Delta k_i$ (現実)と  $\Delta k_i$ (仮想)を計算しなければならない。しかし、最近では並列計算機や Engineering WorkStation (EWS)等の普及により、決定論的計算は一層迅速に処理されるようになり、また、モンテカルロ法の全炉心計算への適用が実際的に可能になるなど計算環境の改善が著しく、この修正法の適用は炉管理の現場で実際に受け入れられる状態にある。

#### 4. 結 言

この研究から以下に述べる結論が得られた。

- (1) 正の大きな反応度の推定に関して、在来の実験の解釈には炉物理の観点から基本的問題があり、超過倍率が $\sim 15\% \Delta k$ を超える領域ではかなり大きな系統誤差が生ずる可能性がある。そこで、燃料追加法、燃料体価値法及び中性子吸収置換法の各手法に対して、共通した考えにもとづく修正法を提案した。この修正法では、在来の手法の炉心構成の変化のつど発生する現実炉心の実効増倍率  $k$  の増分  $\Delta k$ (現実)に修正因子  $f$  を乗じて対応する本来超過倍率が定義される仮想炉心での増分  $\Delta k$ (仮想)に転換する。 $\Delta k$ (仮想)の総和として超過倍率を評価するという指導原理による修正法を提案した。 $f$  の選択にあたっては、炉物理の知識からできるだけ正確に  $\Delta k$ (仮想)を得ることが第一に優先される。
- (2) 修正法の炉物理的基礎を固めるために、平板炉を対象として、一群拡散理論によって定式化を行った。さらに、数値実験から、在来手法の主力である燃料追加法と中性子吸収置換法の両方共、求める超過倍率が 15%  $\Delta k$  を超える領域に入ると相対値で 18% 程度の系統誤差が生ずる可能性があるが、修正法によればこの系統誤差をほとんど消失させるができる。
- (3) この修正法によると、炉定数にかなりの曖昧さがあっても、あまり影響されることなく高精度で超過倍率を推定できる。また、修正因子  $f$  の決定には、炉心構成の各ステップについて実効増倍率  $k$  の計算が必要であるが計算環境の整備が進んでおり、炉管理の現場にとって、実行可能になってきていると判断される。
- 4) 修正法では  $f$  の正確な評価が前提である。燃料追加法では、適用上基本的にあまり困難な問題はないと考えられる。中性子吸収置換法では反応度を発生させる手段相互の間に干渉効果がなければ比較的簡単に  $f$  を求めることができる。しかし、干渉が存在すると  $f$  の評価は複雑になり現実炉心と共に仮

想炉心の数値シミュレーションによる詳細解析が必要になる。

### 謝 辞

本報告書の作成に際し、多大なご協力を頂きました茂木春義・H T T R 技術開発室長、大杉俊隆・炉物理研究室長及び掛札和弘・計画課長、並びに内容について貴重なご意見を頂きました東海研修センターの新藤隆一氏に深く感謝します。

### 参 考 文 献

- 1) Aizawa, O.: "Experiments and Analyses on the Excess Reactivity Adjustments" Proceedings of the International Conference of Reactor Physics and Reactor computations, TEL AVIV (1994)
- 2) 沖元 豊, 沢田周作, 鈴木隆之, 中島文明: “高速増殖もんじゅの建設（その 62）もんじゅ初期炉心における制御棒価値の測定” 日本原子力学会, 1995 春の年会 (1995)
- 3) 動力炉・核燃料開発事業団: 常陽 Vol.2 (1980), Vol.9 (1983)
- 4) 伏見康治責任編集: 実験物理学講座 29 「原子炉」 共立出版社 (1972)
- 5) 小森芳広, 島川聰司, 小向文作, 長尾美春, 明石一朝, 桜井文雄: “J M T R 低濃縮燃料炉心の特性試験結果” JAERI-Tech 95-020(1995)
- 6) 日本原子力研究所: 高温工学試験研究の現状 (1994)
- 7) Kowata, Y.& Fukumura, N.: Nucl. Sci Eng. 99, 299~312(1988)
- 8) Eich, W.J., et al.: Nucl. Sci, Eng., 24, 272~283(1966)

想炉心の数値シミュレーションによる詳細解析が必要になる。

### 謝　　辞

本報告書の作成に際し、多大なご協力を頂きました茂木春義・H T T R 技術開発室長、大杉俊隆・炉物理研究室長及び掛札和弘・計画課長、並びに内容について貴重なご意見を頂きました東海研修センターの新藤隆一氏に深く感謝します。

### 参　考　文　献

- 1) Aizawa, O.: "Experiments and Analyses on the Excess Reactivity Adjustments" Proceedings of the International Conference of Reactor Physics and Reactor computations, TEL AVIV (1994)
- 2) 沖元 豊, 沢田周作, 鈴木隆之, 中島文明: “高速増殖もんじゅの建設（その 62）もんじゅ初期炉心における制御棒価値の測定” 日本原子力学会, 1995 春の年会 (1995)
- 3) 動力炉・核燃料開発事業団: 常陽 Vol.2 (1980), Vol.9 (1983)
- 4) 伏見康治責任編集: 実験物理学講座 29 「原子炉」 共立出版社 (1972)
- 5) 小森芳広, 島川聰司, 小向文作, 長尾美春, 明石一朝, 桜井文雄: “J MTR 低濃縮燃料炉心の特性試験結果” JAERI-Tech 95-020(1995)
- 6) 日本原子力研究所: 高温工学試験研究の現状 (1994)
- 7) Kowata, Y.& Fukumura, N.: Nucl. Sci Eng. 99, 299～312(1988)
- 8) Eich, W.J., et al.: Nucl. Sci, Eng., 24, 272～283(1966)

想炉心の数値シミュレーションによる詳細解析が必要になる。

### 謝　　辞

本報告書の作成に際し、多大なご協力を頂きました茂木春義・H T T R 技術開発室長、大杉俊隆・炉物理研究室長及び掛札和弘・計画課長、並びに内容について貴重なご意見を頂きました東海研修センターの新藤隆一氏に深く感謝します。

### 参　考　文　献

- 1) Aizawa, O.: "Experiments and Analyses on the Excess Reactivity Adjustments" Proceedings of the International Conference of Reactor Physics and Reactor computations, TEL AVIV (1994)
- 2) 沖元 豊, 沢田周作, 鈴木隆之, 中島文明: "高速増殖もんじゅの建設(その62)もんじゅ初期炉心における制御棒価値の測定" 日本原子力学会, 1995春の年会 (1995)
- 3) 動力炉・核燃料開発事業団: 常陽 Vol.2 (1980), Vol.9 (1983)
- 4) 伏見康治責任編集: 実験物理学講座 29 「原子炉」 共立出版社 (1972)
- 5) 小森芳広, 島川聰司, 小向文作, 長尾美春, 明石一朝, 桜井文雄: "J M T R 低濃縮燃料炉心の特性試験結果" JAERI-Tech 95-020(1995)
- 6) 日本原子力研究所: 高温工学試験研究の現状 (1994)
- 7) Kowata, Y.& Fukumura, N.: Nucl. Sci Eng. 99, 299~312(1988)
- 8) Eich, W.J., et al.: Nucl. Sci, Eng., 24, 272~283(1966)

第1表 国内の試験・研究炉における超過反応度測定の現状

## (a) 使用前検査

炉名	測 定 方 法
JRR-3M	燃料追加法：燃料1体毎に臨界制御棒位置の差分を求め、対応する反応度の増加を合計する。
JMTR	原則的に上と同じ
JOYO	原則的に上と同じ

## (b) 定期検査

炉名	測 定 方 法
JRR-2	中性子吸収置換法：制御棒反応度価値曲線より算出する。
JRR-3M	原則的に上と同じ
JRR-4	原則的に上と同じ
NSRR	原則的に上と同じ
JMTR	燃料追加法：使用前検査と同じ
JOYO	中性子吸収置換法：制御棒反応度価値曲線より算出する。

第2表 数値実験のための板状炉の炉定数 ( $v\Sigma_t$ を単位にする)

炉定数 I (中性子漏洩の弱い炉の正確な炉定数)

(a) 燃料標準ケース追加法炉心		最小炉心	最大炉心
板厚 L	L	$L_{min} = L_o$	$L_{max} = 2L_o$
核分裂断面積 $v\Sigma_t$	1	1	1
吸收断面積(内部) $\Sigma_{in}$	0.8	0.8	0.84
吸收断面積(外部) $\Sigma_{out}$	0	0.15*	0.12*
中性子漏洩	$DB_g^2$	0.2	0.05

(b) 燃料体価値法炉心\*\*

		最小炉心	最大炉心
板厚 L	L	$L_{min} = L_o$	$L_{max} = 2L_o$
核分裂断面積 $v\Sigma_t$	1	1	1
吸收断面積(内部) $\Sigma_{in}$	0.8	0.8	0.84
吸收断面積(外部) $\Sigma_{out}$	0.2	0.05	0.12*
中性子漏洩	$DB_g^2$	0.2	0.05

(c) 中性子吸収位置換法炉心

		最小外部吸収炉心	最大外部吸収炉心
板厚 L	L	$L_{min} = 2L_o$	$L_{max} = 2L_o$
核分裂断面積 $v\Sigma_t$	1	1	1
吸收断面積(内部) $\Sigma_{in}$	0.8	0.8	0.84
吸收断面積(外部) $\Sigma_{out}$	0.15	0.15*	0.12*
中性子漏洩	$DB_g^2$	0.05	0.05

炉定数 II (中性子漏洩の強い炉の正確な炉定数)

(a) 燃料追加法炉心		最小炉心	最大炉心
板厚 L	L	$L_{min} = L_o$	$L_{max} = 2L_o$
核分裂断面積 $v\Sigma_t$	1	1	1
吸收断面積(内部) $\Sigma_{in}$	0.6	0.6	0.6
吸收断面積(外部) $\Sigma_{out}$	0	0.15*	0.15*
中性子漏洩	$DB_g^2$	0.4	0.25

\* 仮想炉心について  $\Sigma_{out}=0$   
 \*\* 現実炉心は最小炉心のみであり、最大炉心は仮想炉心に対してである。  
 \*\*\* 不正確な炉定数：修正法に対する炉定数の感度解析のために設定した精度の低下を想定した炉定数。

炉定数 III (中性子漏洩の弱い炉の不正確な炉定数\*\*\*)

(a) 燃料追加法炉心		最小炉心	最大炉心
板厚 L	L	$L_{min} = L_o$	$L_{max} = 2L_o$
核分裂断面積 $v\Sigma_t$	1	1	1
吸收断面積(内部) $\Sigma_{in}$	0.8	0.84	0.84
吸收断面積(外部) $\Sigma_{out}$	0	0	0.12*
中性子漏洩	$DB_g^2$	0.16	0.04

(b) 中性子吸収位置換法炉心		最小外部吸収炉心	最大外部吸収炉心
板厚 L	L	$L_{min} = 2L_o$	$L_{max} = 2L_o$
核分裂断面積 $v\Sigma_t$	1	1	1
吸收断面積(内部) $\Sigma_{in}$	0.8	0.84	0.84
吸收断面積(外部) $\Sigma_{out}$	0.12	0.12	0.12*
中性子漏洩	$DB_g^2$	0.04	0.04

炉定数 IV (中性子漏洩の強い炉の不正確な炉定数\*\*\*)

(a) 中性子吸収位置換法炉心 (2領域炉心)		最小外部吸収炉心	最大外部吸収炉心
板厚 L	L	$L_{min} = 2L_o$	$L_{max} = 2L_o$
核分裂断面積 $v\Sigma_t$	1	1	1
吸收断面積(内部) $\Sigma_{in}$	0.6	0.6	0.6
吸收断面積(外部) $\Sigma_{out}$	0	0.15*	0.15*
中性子漏洩	$DB_g^2$	0.4	0.25

(b) 中性子吸収位置換法炉心 (2領域炉心)		最小外部吸収炉心	最大外部吸収炉心
板厚 L	L	$L_{min} = 2L_o$	$L_{max} = 2L_o$
核分裂断面積 $v\Sigma_t$	1	1	1
吸收断面積(内部) $\Sigma_{in}$	0.6	0.6	0.6
吸收断面積(外部) $\Sigma_{out}$	0.15	0.12	0
中性子漏洩	$DB_g^2$	0.25	0.24

第3表 板状炉の超過倍率推定数値実験

(a) 燃料追加法 ( $DB_s^2 \max = 0.2 \nu \Sigma_i$ ) ・その1

板状炉	板厚 L	最小炉心		中間炉心1		中間炉心2		中間炉心3		中間炉心4		最大炉心
		L=L <sub>0</sub>	i=1	L=1.2L <sub>0</sub>	i=5	L=1.6L <sub>0</sub>	i=9	L=1.8L <sub>0</sub>	i=13	L=2L <sub>0</sub>	i=max	
核分裂面積	$\nu \Sigma_i$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
吸収断面積 (内部)	$\Sigma_{in}$	0.8	0.84	0.8	0.84	0.8	0.84	0.8	0.84	0.8	0.84	0.84
吸収断面積 (外部)	$\Sigma_{out}$	0.00000	0.00000	0.06111	0.04889	0.97960	0.07837	0.12188	0.09750	0.13827	0.11062	0.15000
中性子の漏洩	$DB_s^2 = D\left(\frac{\pi}{L}\right)^2$	0.20000	0.16000	0.13889	0.11111	0.10204	0.08163	0.07813	0.06250	0.06173	0.04938	0.05000
実効増倍率 (仮想)	k	1.00000	1.00000	1.06509	1.05140	1.10860	1.08503	1.13879	1.10803	1.16046	1.12438	1.17647
修正因子	$f = k^2 \left(1 + \frac{\Sigma_{out}}{2DB_s^2}\right)^{-1}$	1.00000	1.00000	0.92985	0.90610	0.83040	0.79547	0.72856	0.68974	0.63522	0.59633	0.55363
$\Delta k(\text{現実})_i = \frac{1}{\nu \Sigma_i L} (2DB_s^2 + \Sigma_{out}) \Delta L$	0.01600	0.01600	0.01412	0.01130	0.01079	0.00863	0.00869	0.00695	0.00727	0.00582	0.00625	0.00500
$\Delta k(\text{仮想})_i = k(\text{仮想})^2 \frac{2DB_s^2}{\nu \Sigma_i L} \Delta L$	0.01600	0.01600	0.01313	0.01024	0.00896	0.00686	0.00633	0.00480	0.00462	0.00347	0.00346	0.00258
$\Delta k(\text{現実})_i = \frac{\Delta k(\text{現実})_i + \Delta k(\text{現実})_{i+1}}{2}$	0.01908	0.01526	0.01362	0.01090	0.01048	0.00839	0.00849	0.00679	0.00713	0.00570		
$\Delta k(\text{仮想})_i = \frac{\Delta k(\text{仮想})_i + \Delta k(\text{仮想})_{i+1}}{2}$	0.01897	0.01512	0.01251	0.00973	0.00857	0.00656	0.00608	0.00460	0.00445	0.00334		
正確な炉定数による k <sub>ex</sub>	$k_{ex} = \sum_{i=1}^{i=\max-1} \Delta k(\text{現実})_i$	在来の評価法による見かけ上の超過倍率 $k_{ex} (\text{現実}) = 21.378\% \Delta k$										
正確な炉定数により 求めた修正因子 f <sub>i</sub> による 修正法による超過倍率	$f_i = \sum_{i=1}^{i=\max-1} f_i \Delta k(\text{現実})_i$	$k_{ex} = 17.889\% \Delta k$										
不正確な炉定数によ り求めた修正因子 f <sub>i</sub> による修正法による超過倍率	$f_i = \sum_{i=1}^{i=\max-1} f_i \Delta k(\text{現実})_i$	$k_{ex} = 17.316\% \Delta k$										
正確な炉定数による	$k = \frac{\nu \Sigma_i}{DB_s^2 + \Sigma_i}$	臨界方程式から評価した超過倍率	$k_{ex} = 17.647\% \Delta k$									
不正確な炉定数による	$k = \frac{\nu \Sigma_i}{DB_s^2 + \Sigma_i}$	臨界方程式から評価した超過倍率	$k_{ex} = 13.636\% \Delta k$									

太い枠内の数値は不正確な炉定数による結果  
断面積は  $\nu \Sigma_i$  を単位とする。

\*1  $\Delta k(\text{現実})_i$  は正確な炉定数によるものである  
\*2 不正確な炉定数：修正法に対する炉定数の感度解析のために設定した精度の低下を想定した炉定数  $\Delta L = L_o \times \frac{1}{20} = 0.05L_o$

第3表 板状炉の超過倍率推定数値実験

(a) 燃料追加法 ( $DB_k^2 \max = 0.4 \nu \Sigma_i$ )・その2

板状炉	板厚L	最小炉心		中間炉心1		中間炉心2		中間炉心3		中間炉心4		最大炉心 $L=1.265L_0$ , $i=\max$
		$L=L_0$ , $i=1$	$L=1.053L_0$ , $i=5$	$L=1.106L_0$ , $i=9$	$L=1.159L_0$ , $i=13$	$L=1.212L_0$ , $i=17$	$L=1.265L_0$ , $i=17$	$L=1.212L_0$ , $i=17$	$L=1.265L_0$ , $i=17$	$L=1.265L_0$ , $i=17$	$L=1.265L_0$ , $i=17$	
核分裂面積 $\nu \Sigma_i$		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
吸收断面積 (内部) $\Sigma_a$ in		0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
吸收断面積 (外部) $\Sigma_a$ out		0.00000	0.03925	0.07300	0.10222	0.12770	0.15004					
中性子の漏洩 $DB_i^2 = D\left(\frac{\pi}{L}\right)^2$		0.40000	0.36075	0.32700	0.29778	0.27230	0.24996					
実効増倍率 (仮想) $k$		1.00000	1.04086	1.07875	1.11386	1.14639	1.17652					
修正因子 $f = k^2 \left(1 + \frac{\Sigma_{a\text{out}}}{2DB_i^2}\right)^{-1}$		1.00000	1.02748	1.04685	1.05893	1.06459	1.06468					
$\Delta k(\text{現実})_i = \frac{1}{\nu \Sigma_i L} (2DB_i^2 + \Sigma_{a\text{out}}) AL$		0.01060	0.00957	0.00871	0.00798	0.00735	0.00681					
$\Delta k(\text{現実})_i = k(\text{現実})^2 \frac{2DB_i^2}{\nu \Sigma_i L} \Delta L$		0.01060	0.00984	0.00912	0.00845	0.00782	0.00725					
$\Delta k(\text{現実})_i = \frac{\Delta k(\text{現実})_i + \Delta k(\text{現実})_{i+1}}{2}$		0.01046	0.00946	0.00861	0.00789	0.00728						
$\Delta k(\text{現実})_i = \frac{\Delta k(\text{仮想})_i + \Delta k(\text{仮想})_{i+1}}{2}$		0.01050	0.00974	0.00903	0.00837	0.00775						
正確な評価による $k_{ex}$		$\sum_{i=1}^{i_{\max}-1} \Delta k(\text{現実})_i$		在來の評価法による見かけ上の超過倍率		$k_{ex}$ (現実) = 16.906% $\Delta k$						
正確なが定数による $k_{ex}$		$\sum_{i=1}^{i_{\max}-1} f_i \Delta k(\text{現実})_i$		修正法による超過倍率		$k_{ex}$ = 17.623% $\Delta k$						
正確なが定数による	$k = \frac{\nu \Sigma_L}{DB_i^2 + \Sigma_a}$	臨界方程式から評価した超過倍率		$k_{ex}$ = 17.652% $\Delta k$								
断面積は $\nu \Sigma_i$ を単位とする。		$\Delta L = 0.265L_0 \times \frac{1}{20} = 0.01325L_0$										

第3表 板状炉の超過倍率推定数値実験

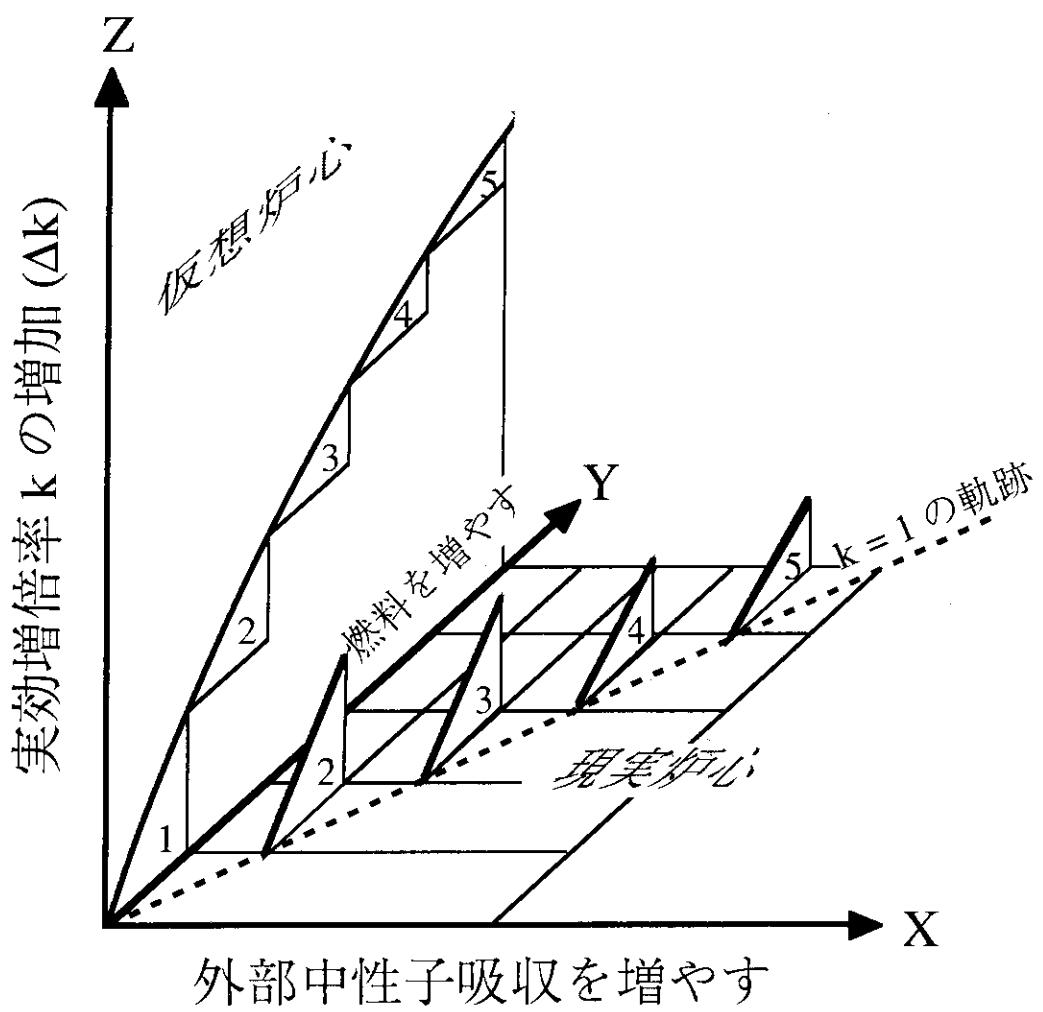
(b) 燃料価値法

	最小炉心、 $L=L_0$ , $i=1$	中間炉心、1 $L=1.2L_0$ , $i=5$	中間炉心、2 $L=1.4L_0$ , $i=9$	中間炉心、3 $L=1.6L_0$ , $i=13$	中間炉心、4 $L=1.8L_0$ , $i=17$	$L=2.0L_0$ , $i=\max$
板状炉	板厚 $L$	$L=L_0$	$L=1.2L_0$	$L=1.4L_0$	$L=1.6L_0$	$L=1.8L_0$
核分裂面積 $\nu \Sigma_t$		1	1	1	1	1
吸収断面積 (内部) $\Sigma_a$ in	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
吸収断面積 (外部) $\Sigma_a$ out	—	—	—	—	—	—
中性子の漏洩 $DB_t^2 = D \left( \frac{\pi}{L} \right)^2$	0.20000	0.13889	0.10204	0.07813	0.06173	0.05000
実効増倍率 (仮想) $k$	1.00000	1.06509	1.10860	1.13879	1.16046	1.17647
修正因子 $f = k^2 \left( \frac{L_{\min}}{L} \right)^3$	1.00000	0.65649	0.44788	0.31661	0.23091	0.17301
$\Delta k(\text{現実})_i = \frac{2DB_t^2 \max}{\nu \Sigma_t L_{\min}} \Delta L$	0.02000	0.02000	0.02000	0.02000	0.02000	0.02000
$\Delta k(\text{仮想})_i = k(\text{仮想})^2 \frac{2DB_t^2}{\nu \Sigma_t L} \Delta L$	0.02900	0.01313	0.00896	0.00633	0.00462	0.00346
$\Delta k(\text{現実})_i = \frac{\Delta k(\text{現実})_i + \Delta k(\text{現実})_{i+1}}{2}$	0.02000	0.02000	0.02000	0.02000	0.02000	0.02000
$\Delta k(\text{仮想})_i = \frac{\Delta k(\text{仮想})_i + \Delta k(\text{仮想})_{i+1}}{2}$	0.01897	0.01251	0.00857	0.00608	0.00445	—
正確なが定数による $k_{ex}$	$k_{ex} = \sum_{i=1}^{i=\max-1} f_i \Delta k(\text{現実})_i$	在來の評価法による見かけ上の超過倍率	$k_{ex}$ (現実)	$= 40.000\% \Delta k$	修正法による超過倍率	修正法による超過倍率
正確なが定数による $k_{ex}$	$k_{ex} = \sum_{i=1}^{i=\max-1} f_i \Delta k(\text{現実})_i$	修正法による超過倍率	$k_{ex}$	$= 18.490\% \Delta k$	臨界方程式から評価した超過倍率	$k_{ex}$
正確なが定数による 断面積	$k = \frac{\nu \Sigma_t}{DB_t^2 + \Sigma_s}$	断面積は $\nu \Sigma_t$ を単位とする。 $\Delta L = L_0 \times \frac{1}{20} = 0.05L_0$	$k$	$= 17.647\% \Delta k$	—	—

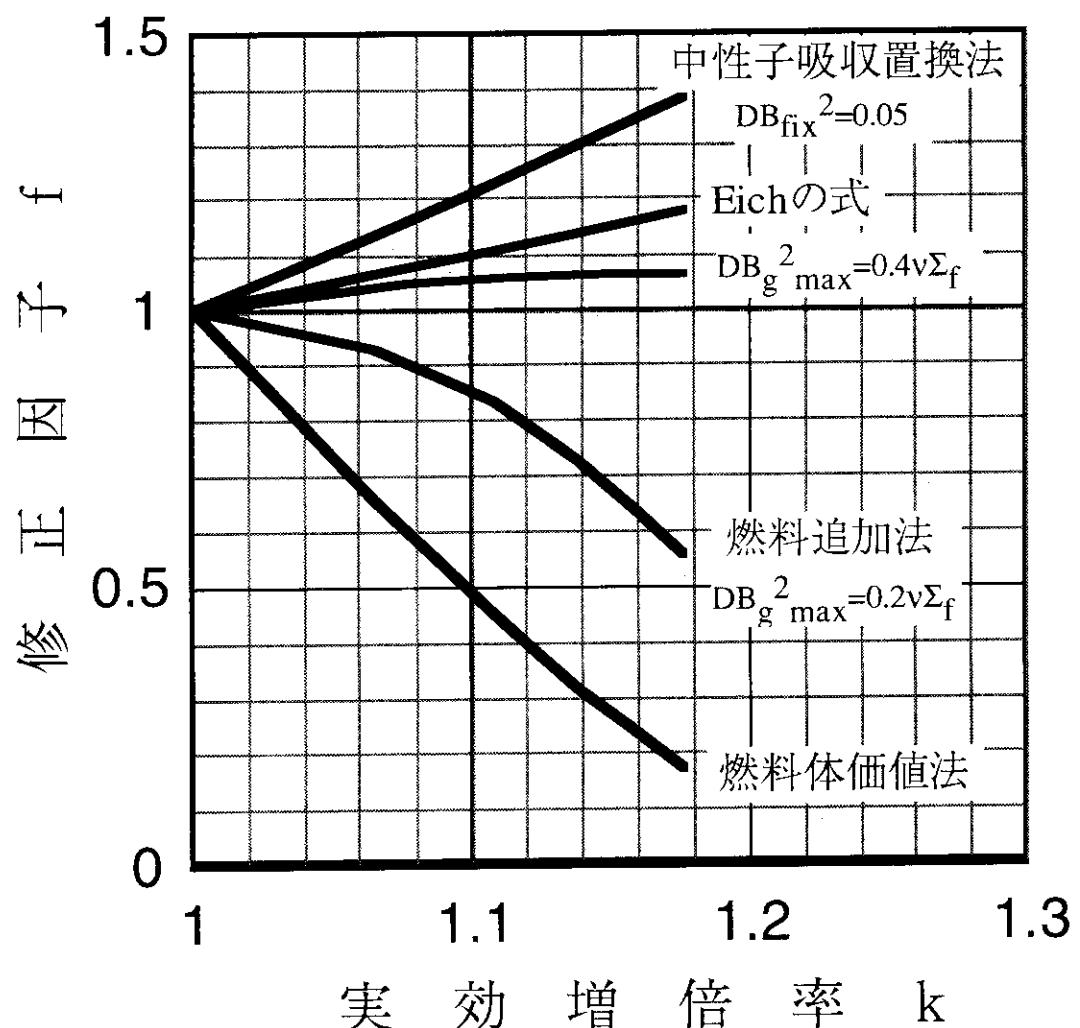
第3表 板状炉の超過倍率推定数値実験

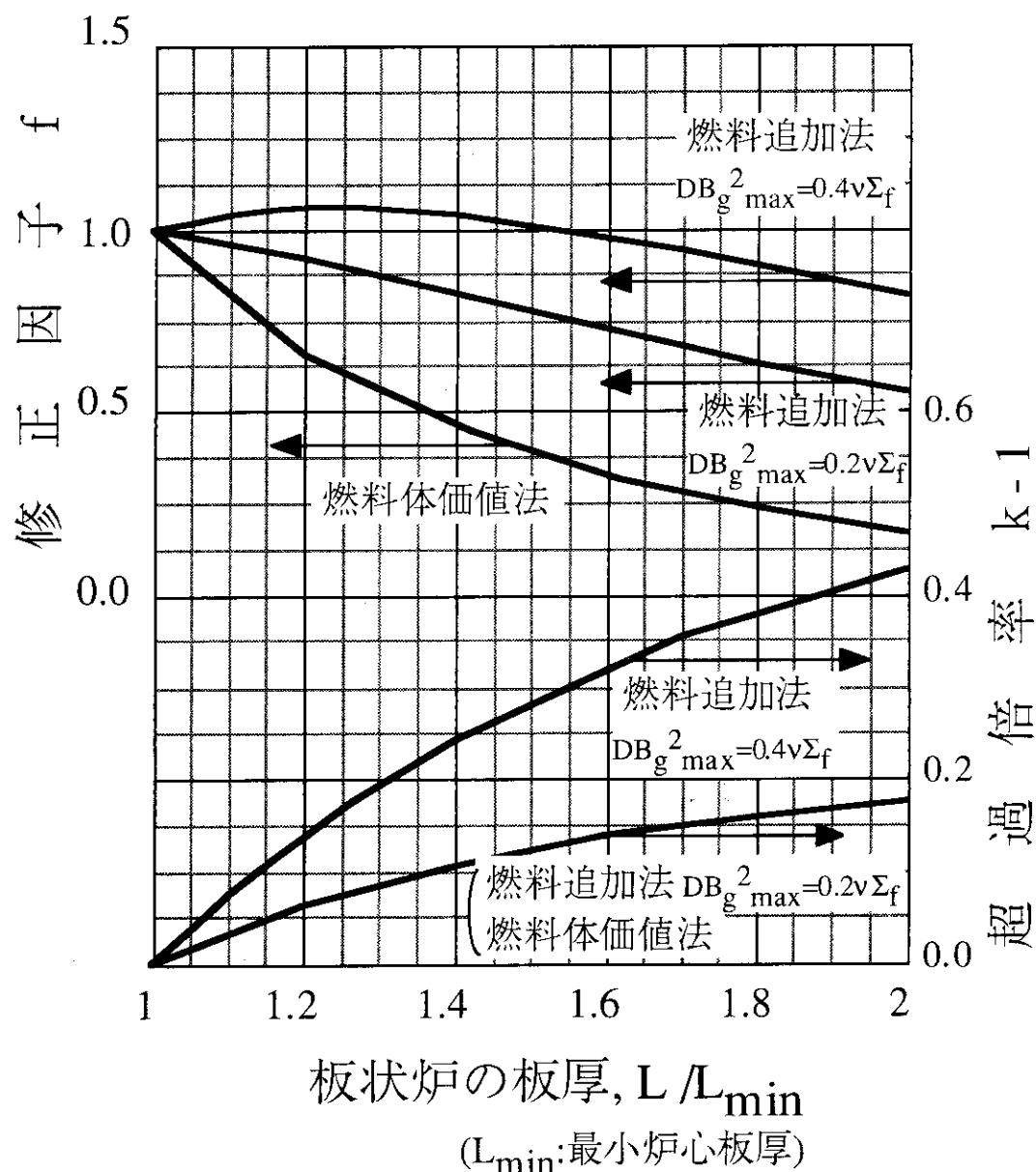
(c) 中性子吸収置換法

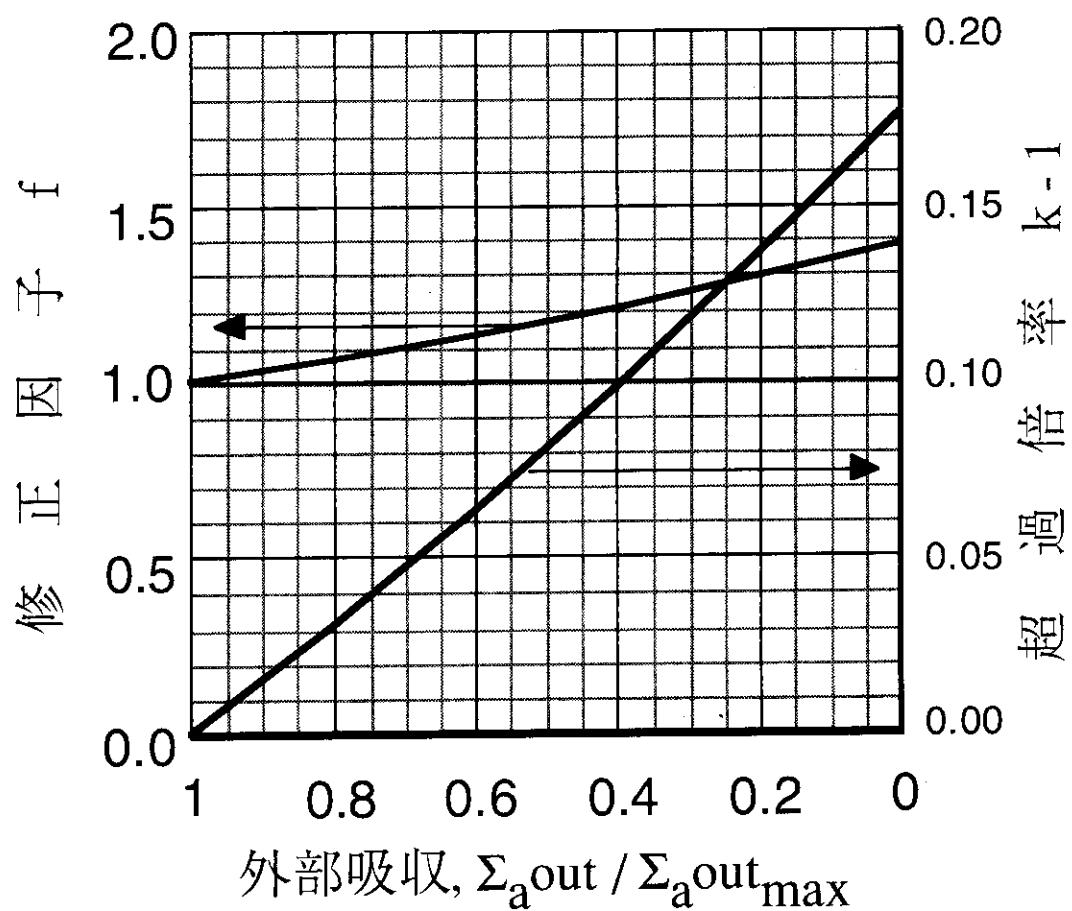
板状炉	板厚 L	最大外部吸収炉心、 $L=2L_0$ , $i=1$			中間炉心、 $i=5$ $L=2L_0$			中間炉心、 $i=9$ $L=2L_0$			中間炉心、 $i=13$ $L=2L_0$			中間炉心、 $i=17$ $L=2L_0$			最小外部吸収炉心、 $i=\max$		
		$\nu \Sigma_f$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
吸収断面積 (内部)	$\Sigma_{in}$	0.8	0.84	0.8	0.84	0.8	0.84	0.8	0.84	0.8	0.84	0.8	0.84	0.8	0.84	0.8	0.84		
吸収断面積 (外部)	$\Sigma_{out}$	0.15000	0.12000	0.09600	0.09000	0.07200	0.06000	0.04800	0.03000	0.02400	0.01600	0.00900	0.00400	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000		
中性子の漏洩	$DB_i^2 = D \left( \frac{\pi}{L} \right)^2$	0.05000	0.04000	0.05000	0.04000	0.05000	0.04000	0.05000	0.04000	0.05000	0.04000	0.05000	0.04000	0.05000	0.04000	0.04000	0.04000		
実効増倍率 (仮想)	k	1.00000	1.00000	1.03093	1.02459	1.06383	1.05042	1.09890	1.07759	1.13636	1.10619	1.17647	1.13636						
修正因子	$f = k(\text{仮想})^2$	1.00000	1.00000	1.06281	1.04979	1.13173	1.10338	1.20758	1.16119	1.29132	1.22367	1.38408	1.29132						
$\Sigma_{out}/\Sigma_{in}$		1.00000	1.00000	0.80000	0.80000	0.60000	0.60000	0.40000	0.40000	0.20000	0.20000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000		
$\Delta k(\text{現実})_i = \frac{1}{\nu \Sigma_f} \Delta \Sigma_i$		0.00750	0.00600	0.00750	0.00600	0.00750	0.00600	0.00750	0.00600	0.00750	0.00600	0.00750	0.00600	0.00750	0.00600	0.00600	0.00600		
$\Delta k(\text{仮想})_i = k(\text{仮想})^2 \frac{1}{\nu \Sigma_f} \Delta \Sigma_i$		0.00750	0.00600	0.00797	0.00630	0.00849	0.00662	0.00906	0.00697	0.00968	0.00734	0.01038	0.00775						
$\Delta k(\text{現実})_i = \frac{\Delta k(\text{現実})_{i+1}}{2} + \Delta k(\text{現実})_{i+1}$		0.00750	0.00600	0.00750	0.00600	0.00750	0.00600	0.00750	0.00600	0.00750	0.00600	0.00600	0.00600	0.00600	0.00600	0.00600	0.00600		
$\Delta k(\text{仮想})_i = \frac{\Delta k(\text{仮想})_{i+1}}{2} + \Delta k(\text{仮想})_{i+1}$		0.00756	0.00604	0.00803	0.00634	0.00856	0.00666	0.00913	0.00701	0.00977	0.00739								
正確なが定数による $k_{ex}$		$k_{ex} = \sum_{i=1}^{max} \Delta k(\text{現実})_i$																	
正確なが定数により 求めた修正因子 $f_i$ による		$k_{ex} = \sum_{i=1}^{max} f_i \Delta k(\text{現実})_i$																	
不正確なが定数により り求めた修正因子 $f_i$ による		$k_{ex} = \sum_{i=1}^{max} f_i \Delta k(\text{現実})_i$																	
正確なが定数による 正確なが定数による		$k = \frac{\nu \Sigma_f}{DB_i^2 + \Sigma_i}$																	
不正確なが定数による 太い枠内の数値は不正確なが定数による結果		$k = \frac{\nu \Sigma_f}{DB_i^2 + \Sigma_i}$																	
断面積は $\nu \Sigma_f$ を単位とする。		$k_{ex} = 17.503\% \Delta k$																	
断面積は $\nu \Sigma_f$ を単位とする。		$k_{ex} = 13.636\% \Delta k$																	
太い枠内の数値は不正確なが定数による結果		$*1 \Delta k(\text{現実})_i$ は正確なが定数によるものである。 $*2$ 不正確なが定数: 修正法に対するが定数の感度解析のために設定した精度の低下を想定したが定数。																	

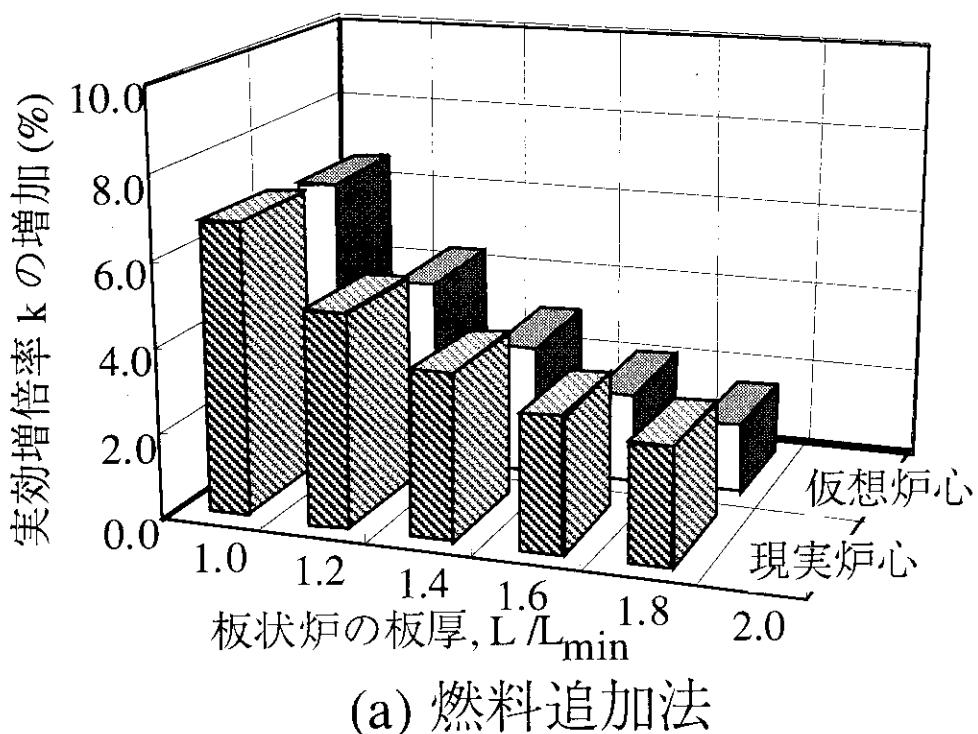


第1図 修正した燃料追加法による超過倍率決定の概念図

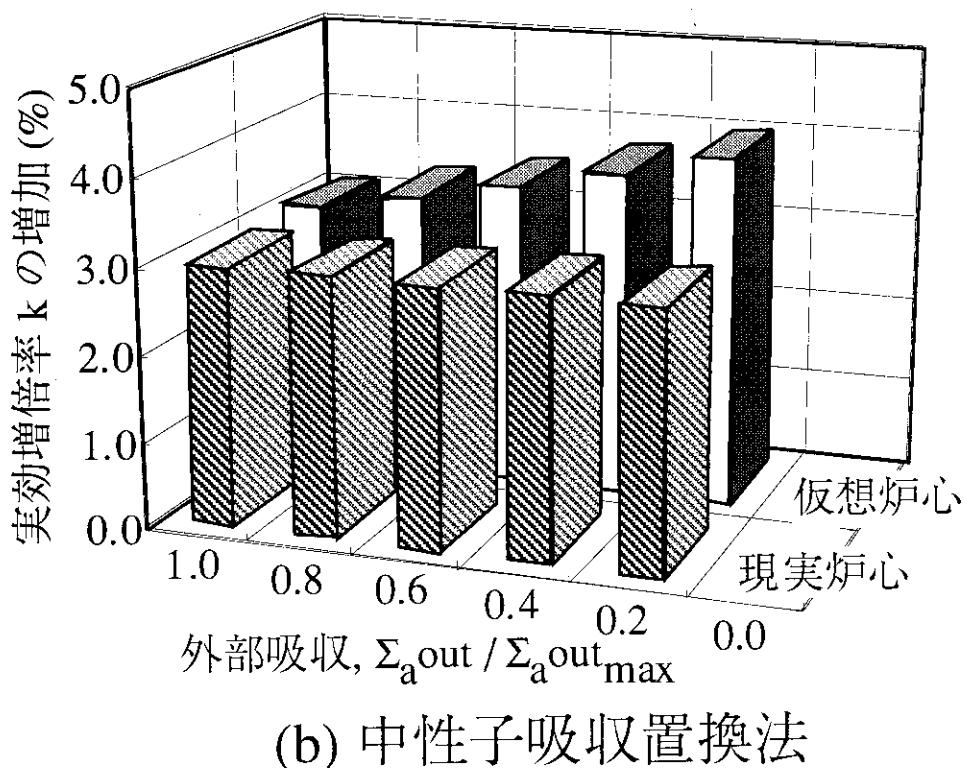
第2図 種々の超過倍率実験手法における修正因子  $f$  と実効増倍率  $k$  の関係

第3図 燃料追加法及び燃料体価値法における修正因子  $f$  と板状炉の板厚の関係

第4図 修正因子  $f$  と外部中性子吸収  $\Sigma_a^{out}$  の関係（中性子吸収置換法）



(a) 燃料追加法



(b) 中性子吸収置換法

第5図 燃料追加法及び中性子吸収置換法による超過倍率推定の数値実験

## 付録 A 在来の燃料追加法と修正法の関係

### 1. 基本的関係式

現実炉心においては、燃料体数  $i_{\min}$  で外部中性子吸收体なしの臨界状態において燃料体を 1 体増加させ、発生する反応度  $\rho_{i \min+1}$  を測定する。このあと、吸收体を加え臨界にもどす。この操作を繰りかえして、燃料体数を  $i_{\max}$  とする。そのようにして、各ステップでこの反応度が  $\rho_{i \min+1}, \dots, \rho_{i \max}$  として得られる。

以上のように、現実炉心における炉物理量にはこの附録Aの中ではダッシュ(‘)をつけることにする。

仮想炉心においては、燃料体の数はやはり  $i_{\min}$  から  $i_{\max}$  まで対応して増加するが、吸收体の添加はないので、実効増倍率はステップ毎に大きくなる。

諸量の変化を下記にまとめる。

・ステップ	1	N
・燃料体	$i_{\min} \rightarrow i_{\min+1}$	$i_{\max-1} \rightarrow i_{\max}$
・反応度	$\rho_{i \min+1}$	$\rho_{i \max}$
・実効増倍率増分	$\Delta k_{i \min+1}$	$\Delta k_{i \max}$
・実効増倍率	$k_{i \min}$	$k_{i \max}$

仮想炉心では諸量の定義から次の関係式が成立する。

$$\left. \begin{aligned}
 \Delta k_{i \min+1} &= k_{i \min+1} - k_{i \min} \\
 \Delta k_{i \min+2} &= k_{i \min+2} - k_{i \min+1} \\
 \Delta k_{i \max} &= k_{i \max} - k_{i \max-1} \\
 \\ 
 \rho_{i \min+1} &= \frac{1}{k_{i \min}} - \frac{1}{k_{i \min+1}} \\
 \rho_{i \min+2} &= \frac{1}{k_{i \min+1}} - \frac{1}{k_{i \min+2}} \\
 \rho_{i \max} &= \frac{1}{k_{i \max-1}} - \frac{1}{k_{i \max}}
 \end{aligned} \right\} \quad (A1)$$

一方、現実炉心では、次の関係式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} \Delta k'_{i \min+1} &= k'_{i \min+1} - 1 \\ \Delta k'_{i \min+2} &= k'_{i \min+2} - 1 \\ \rho'_{i \min+1} &= \frac{1}{1 - \frac{1}{k'_{i \min+1}}} \\ \rho'_{i \min+2} &= \frac{1}{1 - \frac{1}{k'_{i \min+2}}} \end{aligned} \right\} \quad (A2)$$

したがって、

$$\begin{aligned} \rho' &= \sum_{i=i \min+1}^{i \max} \rho'_i \\ &= \frac{1}{1 - \frac{1}{k'_{i \max}}} \end{aligned}$$

## 2. 在来法との比較検討

### 2.1 $\Delta k$ (現実) $\equiv \Delta k$ (仮想) の指導原理による転換

現実炉心における燃料数  $i-1$  から  $i$  へのステップにおける実効増倍率の増分

$\Delta k'_i$  は反応度  $\rho'_i$  と以下の式で結びつけられる。

$$\Delta k'_i = \rho'_i \cdot k'_i \quad (A3)$$

この式が成立するのは臨界状態から燃料体を挿入するからである。

(A3)式より、現実炉心では、

$$\Delta k'_i = \frac{\rho'_i}{1 - \rho'_i} \quad (A4)$$

になる。

ここで、仮想炉心における燃料数  $i-1$  から  $i$  へのステップにおける実効倍率の増分  $\Delta k_i$  が  $\Delta k'_i$  と等しいという指導原理のもとに転換する。

$$\Delta k_i \equiv \Delta k'_i \quad (A5)$$

これにより、超過倍率  $k_{ex}$  は

$$\begin{aligned} k_{ex} &= \sum_{i=i_{\min}+1}^{i_{\max}} \Delta k_i \\ &= \sum_{i=i_{\min}+1}^{i_{\max}} \Delta k'_i \end{aligned} \quad (A6)$$

(A4)式をつかって

$$k_{ex} = \sum_{i=i_{\min}+1}^{i_{\max}} \frac{\rho'_i}{1 - \rho'_i} \quad (A7)$$

## 2.2 $\rho'$ (現実)= $\rho$ (仮想)の指導原理の写像

現実炉心における燃料体数  $i-1$  から  $i$  へのステップにより生ずる反応度  $\rho'_i$  は仮想炉心での反応度の  $\rho_i$  と等しいとして写像する。

$$\rho_i \equiv \rho'_i \quad (A8)$$

これにより、超過反応度  $\rho_{ex}$  は

$$\begin{aligned} \rho_{ex} &= \sum_{i=i_{\min}+1}^{i_{\max}} \rho_i \\ &= \sum_{i=i_{\min}+1}^{i_{\max}} \rho'_i \end{aligned} \quad (A9)$$

ここで、 $\rho_{ex}$  を  $k_{ex}$  に変換する。

$$k_{ex} = \frac{1}{1 - \rho_{ex}} \sum_{i=i_{min}+1}^{i_{max}} \rho'_i \quad (A10)$$

(A9)式より

$$\rho_{ex} > \rho'_i \quad (A11)$$

なので、(A7)式と(A10)式を比較すると、2.2 の方法の方が 2.1 の方法より大きな超過倍率を与えることがわかる。

### 3. 修正法としての解釈

現実炉心での  $\rho'_i$  の測定値を、そのまま仮想炉心に写像する。

$$\rho_i \equiv \rho'_i \quad (A12)$$

この方式における修正法として  $f$  はどのようにになっているか検討した。

$$\rho'_i = \frac{\Delta k'_i}{1 + \Delta k'_i} \quad (A13)$$

$$\rho_i = \frac{\Delta k_i}{1 + \sum_{i=i_{min}+1}^i \Delta k_i} \quad (A14)$$

(A14)式を(A8)式に代入

$$\Delta k_i = f_i \cdot \Delta k'_i \quad (A15)$$

より

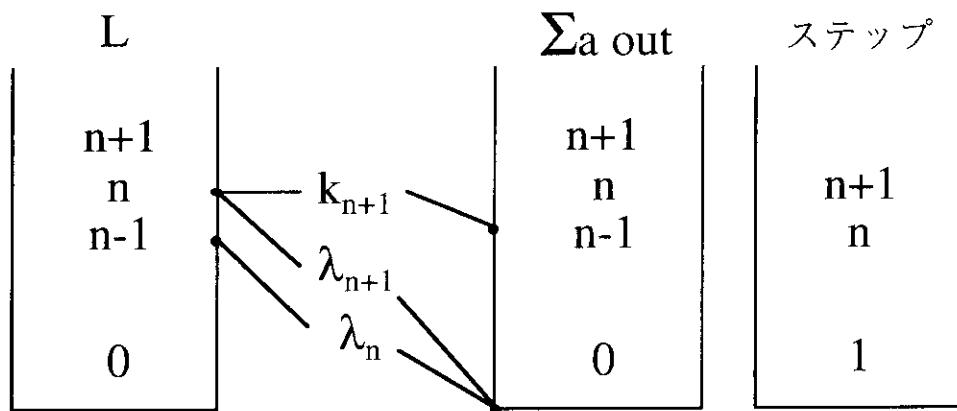
$$f_i = \frac{1 + \sum_{i=i_{\min}+1}^i \Delta k_i}{1 + \Delta k'_i} \quad (A16)$$

$f_i$  は当然のごとく、1より大きくなる場合が多い。

## 付録 B Eich の論文と修正法の関係

## 1. 基礎量の定義と関係

基礎量

仮想炉心について、ステップ  $n$  の状態について

$$\lambda_n = \frac{v\Sigma_f}{DB_{g,n}^2 + \Sigma_a in} \quad (B1)$$

$$B_{g,n}^2 = \left( \frac{\pi}{L_n} \right)^2 \quad (B2)$$

$$L_n = (n-1)\Delta L + L_0 \quad (B3)$$

$$\lambda_n = \frac{v\Sigma_f}{D\left(\frac{\pi}{L + (n-1)\Delta L}\right)^2 + \Sigma_a in} \quad (B4)$$

$$\lambda_{n+1} = \frac{v\Sigma_f}{D\left(\frac{\pi}{L + n\Delta L}\right)^2 + \Sigma_a in} \quad (B5)$$

また、 $dL$  が十分小さいとき、

$$\lambda_{n+1} = \lambda_n + \left. \frac{\partial \lambda}{\partial L} \right|_{\lambda=\lambda_n} dL \quad (B6)$$

ここで、

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \lambda}{\partial L} &= \frac{\partial \lambda}{\partial DB_g^2} \cdot \frac{\partial DB_g^2}{\partial B_g} \cdot \frac{\partial B_g}{\partial L} \\
 &= \frac{(-1)v\Sigma_f}{(DB_g^2 + \Sigma_a)^2} \cdot 2DB_g \cdot (-1) \left( \frac{\pi}{L^2} \right) \\
 &= \frac{\lambda^2}{v\Sigma_f} \cdot 2DB_g^2 \cdot \frac{1}{L}
 \end{aligned} \tag{B7}$$

(B6)式に代入して、ステップnの状態における微分であることを着目して

$$\lambda_{n+1} = \lambda_n + \frac{\lambda_n^2}{v\Sigma_f} \cdot 2DB_{g,n}^2 \cdot \frac{\Delta L}{L_n} \tag{B8}$$

一方、現実炉心では、燃料を追加するごとに  $\Sigma_a$ out を適量増加させて臨界を実現させている。ステップnにおいては、

$$1 = \frac{v\Sigma_f}{D \left( \frac{\pi}{H + (n-1)\Delta H} \right)^2 + \Sigma_a \text{in} + \Sigma_a \text{out}, n} \tag{B9}$$

$\Sigma_a$ out,n はステップnでのそれまで外部から加えた吸収量の積算値でいう。この状態から、炉巾を  $\Delta L$  増やしたときの実効増倍率  $k_{n+1}$  は

$$k_{n+1} = 1 + \left. \frac{\partial k}{\partial L} \right|_{\text{critical}} \Delta L + \left. \frac{\partial k}{\partial \Sigma_a} \right|_{\text{critical}} \Delta \Sigma_a \text{out} \tag{B10}$$

ここで、右辺の第2項は  $dL$  による実効増倍率の直接変化量を示す。さらに、第3項は、 $\Sigma_a$ out が単独変数として変化したのではなく  $dL$  の変化にともない、 $\Sigma_a$ out がその分うすめられた効果を示す。

$$\left. \frac{\partial k}{\partial L} \right|_{\text{critical}} = \frac{1}{v\Sigma_f} \cdot 2DB_{g,n}^2 \cdot \frac{1}{L_n} \tag{B11}$$

$$B_{g,n}^2 = \left( \frac{\pi}{L + (n-1)\Delta L} \right)^2 \quad (B12)$$

$$\left. \frac{\partial k}{\partial \Sigma_a} \right|_{\text{critical}} = -\frac{1}{v \Sigma_f} \quad (B13)$$

(B11)と(B13)式を(B10)式に代入し、ステップ n を添字として

$$k_{n+1} = 1 + \frac{1}{v \Sigma_f} \left( 2DB_{g,n}^2 + \Sigma_a \text{out},n \right) \frac{\Delta L}{L} \quad (B14)$$

## 2. Eich の(35)式（等比級数）の成立性

Eich は論文の中で、

$$k_{n+1} = \left( \frac{\lambda_{n+1}}{\lambda_n} \right) \quad (B15)$$

が成立すると仮定している。<sup>(8)</sup>

(B15)式の左辺は(B14)式の右辺により与えられる。

一方、(B8)式より

$$(15) \text{式の右辺} = 1 + \frac{2\lambda_n DB_{g,n}^2}{v\Sigma_f} \cdot \frac{\Delta L}{L} \quad (B16)$$

であるので、(B15)式を成立するためには(B10)式の右辺において

$$\Delta\Sigma_a \text{out } n = 0 \quad (B17)$$

であると共に、(B16)の右辺で

$$\lambda_n = 1 \quad (B18)$$

とすることが要求される。(B17)式の条件はプール全体に一様に毒物を各ステップで加えるという方式をとるので、新たな燃料体の追加は直接的に炉心の吸収断面積の実効的な減少を引き起こさないという状況を想定している。つまり、 $k_{n+1}-1$  は水位あるいは炉心の大きさ  $\Delta L$  の変更のみで生ずると解釈できる場合に適用可能であることを示している。 $\lambda_n = 1$  の条件、(B18)式は超過倍率が小さい範囲では近似的に適用可能であることを示している。

### 3. 修正法の提案と Eich の式の関係

修正法では、実測される実効増倍率の増分

$$k_{n+1}(\text{現実}) = k_{n+1} - 1$$

に修正因子  $f_{n+1}$

$$f_{n+1} = \Delta k_{n+1}(\text{仮想}) / \Delta k_{n+1}(\text{現実}) \quad (\text{B19})$$

をかけて、 $k_{n+1}(\text{仮想})$ に転換することを主張していて、この問題では、

(B14)式と(B8)式により、

$$f_{n+1} = \frac{\lambda_n^2 \cdot 2DB_{g,n}^2}{2DB_{g,n}^2 + \sum_a out, n} \quad (\text{B20})$$

となる。

さて、Eich の論文の(35)式の仮定を示す。(B15)式から、

$$(k_{n+1}-1) \lambda_n = \lambda_{n+1} - \lambda_n$$

である。この関係式から、

$$\begin{aligned} f_{n+1} &= \Delta k_{n+1}(\text{仮想}) / \Delta k_{n+1}(\text{現実}) \\ &= \frac{\lambda_{n+1} - \lambda_n}{k_{n+1} - 1} \\ &= \lambda_n \end{aligned} \quad (\text{B21})$$

としていることに相当する。

もし一様なポイゾニングが実現されていて、新燃料の追加が、Lの増加はもたらすものの新燃料も同じ程度でポイゾニングされてしまうという前提の下でも  $f_{n+1}$  は修正法を適用すれば(B20)式から、

$$f_{n+1} = \lambda_n^2 \quad (B22)$$

になり、(B21)式は成立せず系統的な誤差の発生をもたらす。また、制御棒の挿入を一様な中性子吸収におきかえるのは、炉物理モデル的に無理がある。

Eich は(B15)式の仮定の下に、次の反応度対数関係式(logarithmic eigen value relationships)を導いている。

$$\begin{aligned} \rho_{ex} &= \frac{\lambda_{i_{\max}} - 1}{\lambda_{j_{\max}}} \\ &= 1 - e^{-\sum_{i=i_{\min}+1}^{i_{\max}} \rho_i} \end{aligned} \quad (B23)$$

この評価式は、 $\rho_i \equiv \rho'_i$  ((A8)式) と  $\Delta k_i \equiv \Delta k'_i$  ((A5)式) を指導原理とする評価値の中間の超過反応度を与える場合が多い。

## 付録C 負の反応度の測定からの推定

### 1. 目 標

軽水炉等で用いられている手法である。正の反応度の発生事象（正方向事象）を打ち消すことのできる負の反応度の発生事象（負方向事象）を用意する。そして両事象が完全に打ち消しあっている臨界の炉心に、同量の負方向事象をさらに加え実効増倍率を低下させる効果について較正する。以上の手順により、正方向事象による正の反応度発生量を推定する実験手法である。

例えば、正方向事象には、制御棒の引抜きがあり、負方向事象には減速材の軽水へのホウ酸の注入や炉心水位の低下がある。但し、両方向事象間に相互干渉がないことが前提である。

### 2. 測定法の原理

一様な板状炉心について1群拡散理論で解析する。炉心の巾を $2L$ とすると、実効増倍率 $k$ は、本文の(7)式と同じく

$$k = \frac{v\Sigma_f}{\Sigma_a \text{in} + \Sigma_a \text{out} + DB_g^2} \quad (\text{C1})$$

で与えられる。

ここに、

$$DB_g^2 = D \left( \frac{\pi}{2L} \right)^2$$

である。

外部中性子吸収 $\Sigma_a \text{out}$ は

$$\Sigma_a \text{out} = \Sigma_a \text{out}_{,1} + \Sigma_a \text{out}_{,2} \quad (\text{C2})$$

であり、

$\Sigma_a \text{out}_{,1}$ ：正方向事象の中性子吸収断面積で、事象の発生に対応して正の値から 0 を示す、

$\Sigma_a \text{out}_{,2}$ ：負方向事象の中性子吸収断面積で、事象の発生に対応して 0 から正の値を示す。

まず、臨界炉心 1 で正方向、負方向の両事象共発生していないとする。

$$1 = \frac{v\Sigma_f}{\Sigma_a \text{in} + \Sigma_a \text{out}_{,1} + DB_g^2} \quad (\text{C3})$$

つぎに、臨界炉心 2 では正方向・負方向の両事象が発生しているとする。

$$1 = \frac{v\Sigma_f}{\Sigma_a \text{in} + \Sigma_a \text{out}_{,2} + DB_g^2} \quad (\text{C4})$$

(C3)、(C4)式から

$$\Sigma_a \text{out}_{,1} = \Sigma_a \text{out}_{,2} \quad (\text{C5})$$

となる。

臨界炉心 1 の超過倍率  $k_{ex,1}$  は(C1)式で  $\Sigma_a \text{out} = 0$  として、

$$k_{ex,1} = \frac{v\Sigma_f}{\Sigma_a \text{in} + DB_g^2} - 1$$

さらに、 $v\Sigma_f$ について、(C3)式を代入して

$$k_{ex,1} = \frac{\Sigma_a \text{out}_{,1}}{\Sigma_a \text{in} + DB_g^2} \quad (\text{C6})$$

となる。

また超過反応度  $\rho_{ex,1}$  は、

$$\rho_{ex,1} = \frac{k_{ex,1}}{k} = \frac{\Sigma_a out,1}{v\Sigma_f} \quad (C7)$$

ここで、臨界炉心 2 にさらに同量の負方向事象を発生させ中性子吸收断面積を  $\Sigma_a out,2$  から  $2\Sigma_a out,2$  にする。これにより、臨界未満炉心 2 ができる。

臨界未満炉心 2 の実効増倍率  $k_{sub,2}$  の 1 からの低下  $k_{sub,2}-1$  は、

$$\begin{aligned} k_{sub,2}-1 &= \frac{v\Sigma_f}{\Sigma_a in + 2\Sigma_a out,2 + DB_g^2} - 1 \\ &= \frac{-\Sigma_a out,2}{\Sigma_a in + 2\Sigma_a out,2 + DB_g^2} \end{aligned} \quad (C8)$$

で与えられる。

したがって、負の反応度  $\rho_{sub,2}$  は

$$\rho_{sub,2} = \frac{k_{sub,2}-1}{k_{sub,2}} = \frac{-\Sigma_a out,2}{v\Sigma_f} \quad (C9)$$

(C5)式の関係を用いて、かつ(C7)と(C9)式から

$$\rho_{ex,1} = -\rho_{sub,2} \quad (C10)$$

つまり臨界未満炉心 2 の負の反応度を測定して、符号を変えると、臨界炉心 1 の超過反応度を得ることになる。

現実炉心である臨界炉心 1 に外部中性子吸收  $\Sigma_a out,2$  を追加したときに実測される負の反応度  $\rho_{sub,2}$  をそのまま、臨界炉心 1 から外部中性子吸收  $\Sigma_a out,1$  を取り除いた仮想炉心の反応度、つまり臨界炉心 1 の超過反応度とするという指導原

理にのっとって、2章でいう  $\Delta k$ (現実)の  $\Delta k$ (仮想)への写像を行う妥当性が証明された。この場合、修正因子  $f$  を、

$$f = \Delta k(\text{仮想}) / \Delta k(\text{現実}) = \frac{-\left(\Sigma_a \text{in} + 2\Sigma_a \text{out}_{,2} + DB_g^2\right)}{\Sigma_a \text{in} + DB_g^2} \quad (\text{C11})$$

としていることに相当する。

負の反応度の測定は、即発・遅発中性子モード間の動的歪や空間高調波の影響により精度が制約されるが、空間積分法を適用すればパルス中性子実験法等により、-50 ドル程度まで、約 5 % の誤差の範囲で実施できるとされている。超過反応度は +20 ドル程度の領域にあるので、誤差は数 % 以内で決定できる可能性がある。これは、0.7%  $\Delta k$  に相当する誤差であり、燃料追加法より若干大きな誤差になる。

但し、 $f$  の決定にあたっては正・負方向事象間の相互干渉効果についての検討を要する。

## 付録 D 中性子吸收置換法における相互干渉の効果

### 1. 目 的

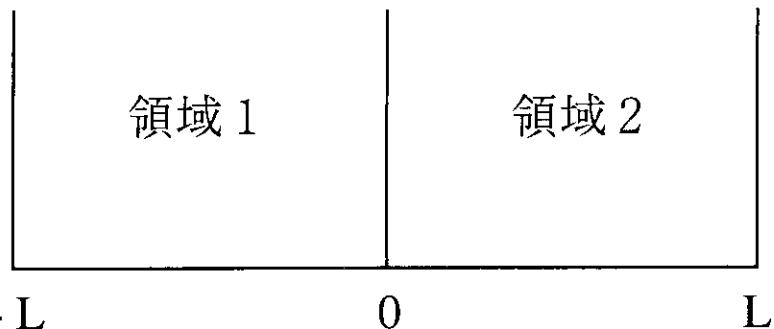
中性子吸收置換法について、外部吸収が均質に入った板状炉という一領域のモデルから炉心を二分割して二領域のモデルに変更して、一方あるいは両方の領域に外部吸収が加わるとして解析した。

実際の原子炉では、多数の制御棒のうち、特定の一本を引き抜いて、その反応度価値を求め、同等の幾何学的位置にある本数を乗ずるという操作を必要なだけ繰り返して超過倍率を求めるという一種の中性子吸收置換法が適用される場合がある。ここでは、外部吸収に相互干渉がある場合、提案した修正法が有効に使えるか、見通しをつけることを目的とした。

### 2. 二領域系における修正法の定式化

#### 2.1 炉心のモデルと臨界条件

炉心を以下のようにモデル化する。



また、炉物理量の対応領域は、添字 1, 2 で記号の右下に示すこととした。

中性子バランスの方程式は

領域 1

$$-D \frac{d^2\phi}{dx^2} + \left( \Sigma_{a1} - \frac{v\Sigma_f}{k} \right) \phi = 0 \quad (D1)$$

から

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} + B_{m1}^2 \phi = 0 \quad (D2)$$

ここに、 $B_{m1}^2$ は物質バックリングで

$$B_{m1}^2 = \left( \frac{v\Sigma_f}{k} - \Sigma_{a1} \right) / D \quad (D3)$$

領域 2

$$-D \frac{d^2\phi}{dx^2} + \left( \Sigma_{a2} - \frac{v\Sigma_f}{k} \right) \phi = 0 \quad (D1')$$

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} + B_{m2}^2 \phi = 0 \quad (D2')$$

$$B_{m2}^2 = \left( \frac{v\Sigma_f}{k} - \Sigma_{a2} \right) / D \quad (D3')$$

ここで、もし  $\Sigma_{a2}$  が  $\Sigma_{a1}$  より小さくて

$$\Sigma_{a2} = \Sigma_{a1} (1-\epsilon) \quad (D4)$$

であれば、

$$B_{m2}^2 = B_{m1}^2 + \epsilon \Sigma_{a1} / D \quad (D3'')$$

境界条件として

$x$  が  $-L$  及び  $L$  で中性子束が零になることから、

$$\phi_1 = A_1 \sin B_{m1}(x+L) \quad (D5)$$

$$\phi_2 = A_2 \sin B_{m2}(x-L) \quad (D6)$$

また、 $x=0$  で中性子束が連続であることから

$$A_1 \sin B_{m1} L = A_2 \sin(-B_{m2} L) \quad (D7)$$

さらに、 $x=0$  で中性子流が連続であることから

$$A_1 B_{m1} \cos B_{m1} L = A_2 B_{m2} \cos(-B_{m2} L) \quad (D8)$$

これより  $B_{m1}$  と  $B_{m2}$  を通して  $k$  を決定する臨界方程式は

$$\begin{vmatrix} \sin B_{m1} L & \sin(-B_{m2} L) \\ B_{m1} \cos B_{m1} L & B_{m2} \cos(-B_{m2} L) \end{vmatrix} = 0 \quad (D9)$$

(i) 領域 1, 2 が同じ炉定数をもつ場合

(D9)式より

$$\sin 2B_{m1} L = 0 \quad (D10)$$

但し、 $B_m = B_{m1} = B_{m2}$  であることから、

$$\begin{aligned} B_{m1}^2 &= B_{m2}^2 \\ &= \left(\frac{\pi}{2L}\right)^2 \\ &= B_g^2 \end{aligned} \quad (D11)$$

ここに  $B_g^2$  は幾何学的バックリングである。

(D3)式により

$$k = \frac{v\Sigma_f}{DB_g^2 + \Sigma_a} \quad (D12)$$

臨界のときの  $\Sigma_a$  を  $\Sigma_{ac}$  と記すことにより、

$$1 = \frac{v\Sigma_f}{DB_g^2 + \Sigma_{ac}} \quad (D13)$$

(D12)と(D13)式から、 $\Sigma_a$  を領域 1、2 の両方で一様に減らして

$$\Sigma_a = \Sigma_{ac}(1-\epsilon) \quad (D14)$$

として、生ずる反応度  $\rho_{1,2}$  は、

$$\begin{aligned} \rho_{1,2} &= 1 - \frac{1}{k} = 1 - \frac{DB_g^2 + \Sigma_{ac}(1-\epsilon)}{v\Sigma_f} \\ &= \frac{\epsilon\Sigma_{ac}}{v\Sigma_f} \end{aligned} \quad (D15)$$

## (ii) 領域 1, 2 が異なる炉定数をもつ場合

領域 1 の  $\Sigma_{ac}$  は変えないで、領域 2 の  $\Sigma_{ac}$  のみ  $\epsilon\Sigma_{ac}$  だけ減らすことにする。中性子は相対的に領域 2 の方により多く集まるようになり、 $B_{m2}$  は( $\pi/2L$ )より大きく、 $B_{m1}$  は( $\pi/2L$ )より小さくなる。このとき発生する反応度を定性的に把握するために以下の近似的な手法による解析を行う。

(D9)式より、臨界方程式は粗い近似であるが、

$$\left| \frac{B_{m1} - B_{m2}}{B_{m1} + B_{m2}} \right| \ll 1 \quad (D16)$$

の前提の下に、

$$\sin(B_{m1} + B_{m2})L = 0 \quad (D17)$$

したがって、

$$B_{m1} + B_{m2} = \pi/L \quad (D18)$$

一方、(D3')式から

$$(B_{m1} + B_{m2})(B_{m1} - B_{m2}) = -\varepsilon \Sigma_{ac}/D \quad (D19)$$

(D17)式の助けを得て

$$B_{m1} - B_{m2} = -\frac{L}{\pi} \left( \varepsilon \frac{\Sigma_{ac}}{D} \right) \quad (D20)$$

ここで整理して、 $B_{m1}$  と  $B_{m2}$  は次式で与えられる。

$$B_{m1} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\pi}{L} - \frac{L}{\pi} \left( \varepsilon \frac{\Sigma_{ac}}{D} \right) \right\} \quad (D21)$$

$$B_{m2} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\pi}{L} + \frac{L}{\pi} \left( \varepsilon \frac{\Sigma_{ac}}{D} \right) \right\} \quad (D22)$$

この二領域系で生ずる反応度  $\rho_{12}$  は

$$\rho_{12} = \frac{k-1}{k} = 1 - \frac{DB_{m1}^2 + \Sigma_{ac}}{v\Sigma_f}$$

で与えられ、 $B_{m1}$  が(D21)式で与えられることから

$$\rho_{12} = 1 - \frac{D \left( \frac{\pi}{2L} \right)^2 + D\Delta^2 + \Sigma_{ac}}{v\Sigma_f}$$

さらに(D13)式を用いて

$$\rho_{12} = -\frac{D\Delta^2}{v\Sigma_f} \quad (D23)$$

ここに、(D21)式から

$$\begin{aligned} \Delta^2 &= B_{m1}^2 - \left( \frac{1}{2} \right)^2 \left( \frac{\pi}{L} \right)^2 \\ &= \left( \frac{1}{2} \right)^2 \left\{ -2 \left( \frac{\epsilon \Sigma_{ac}}{D} \right) + \left( \frac{L}{\pi} \right)^2 \left( \frac{\epsilon \Sigma_{ac}}{D} \right)^2 \right\} \end{aligned} \quad (D24)$$

(D24)式を(D23)式に代入して

$$\rho_{12} = \frac{\epsilon \Sigma_{ac}}{2v\Sigma_f} \left\{ 1 - \frac{1}{8} \frac{\epsilon \Sigma_{ac}}{D \left( \frac{\pi}{2L} \right)^2} \right\} \quad (D25)$$

問題の対称性から

$$\rho_{12} = \frac{\epsilon \Sigma_{ac}}{2v\Sigma_f} \left\{ 1 - \frac{1}{8} \frac{\epsilon \Sigma_{ac}}{D \left( \frac{\pi}{2L} \right)^2} \right\} \quad (D26)$$

(D25), (D26)式と(D15)式から、

$$\rho_{12} + \rho_{1'2'} = \rho_{12'} \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{8} \frac{\epsilon \Sigma_{ac}}{D \left( \frac{\pi}{2L} \right)^2} \right\} \quad (D27)$$

### 3. 数値実験

炉定数として、本文第2表について中性子漏洩の強い炉心について、正確な炉定数を用いることとして、

$$\left. \begin{aligned} v\Sigma_f &= 1 \\ \Sigma_a in &= 0.6 \\ \Sigma_a out &= 0.15 \\ DB_{fix}^2 &= D \left( \frac{\pi}{2L_o} \right)^2 = 0.25 \\ \epsilon &= \Sigma_a out / (\Sigma_a in + \Sigma_a out) \\ &= 0.15 / (0.6 + 0.15) \\ &= 0.2 \end{aligned} \right\} \quad (D28)$$

また、

$$\begin{aligned} \Sigma_a &= \Sigma_a in + \Sigma_a out \\ &= 0.75 \end{aligned} \quad (D29)$$

であり、最大外部吸収炉心では実効増倍率はもちろん1である。

また、最小外部吸収炉心では  $\Sigma_a out$  が消失して

$$\Sigma_a = \Sigma_a in = 0.6$$

であり、実効増倍率は(D12)式より 1.1765 になる。

また、いうまでもないことに  $\epsilon$  は最大外部吸収炉心から  $\Sigma_a out$  を完全にとり

去ることを想定して定めた。

さて、ここで2領域炉心の解析を始める。両領域共、 $\Sigma_{a\text{out}}$  を加えられていく最大外部吸収炉心から、領域2についてのみ  $\Sigma_{a\text{out}}$  を取り去ると、臨界超過になり、その反応度は(D25)式に第2表の炉定数を代入して

$$\rho_{12'} = 0.06938 \quad (\text{D30})$$

となる。このとき実効増倍率  $k_{12'}$

$$\begin{aligned} k_{12'} &= \frac{1}{1 - 0.06938} \\ &= 1.0746 \end{aligned} \quad (\text{D31})$$

となる。したがって、現実炉心での第一ステップにおける実効増倍率の増分  $\Delta k_1$ (現実)は仮想炉心での  $\Delta k_1$ (仮想)と同一として良いから

$$\begin{aligned} \Delta k_1(\text{現実}) &= 0.07455 \\ \Delta k_1(\text{仮想}) &= 0.07455 \end{aligned} \quad ) \quad (\text{D32})$$

で与えられる。

次に、領域2について  $\Sigma_{a\text{out}}$  をもどした後、今度は領域1について  $\Sigma_{a\text{out}}$  を取り出すと反応度  $\rho_{12'}$  を生ずるが、 $\rho_{12'}$  と等しいので

$$\Delta k_2(\text{現実}) = 0.07455$$

であり、

$$\Delta k_1(\text{現実}) + \Delta k_2(\text{現実}) = 0.1491 \quad (\text{D33})$$

となる。

仮想炉心では、領域2について  $\Sigma_{a\text{out}}$  をもどすことなくつづいて領域1につい

ての  $\Sigma_a \text{out}$  を取り出す。このときの反応度  $\rho_{12'}$  は(D15)式から求められ、第2表の炉定数を代入して

$$\rho_{12'} = 0.15 \quad (\text{D34})$$

であり、実効増倍率の増分に換算すると、

$$\Delta k_1(\text{仮想}) + \Delta k_2(\text{仮想}) = 0.1765 \quad (\text{D35})$$

になる。ここで(D32)式の  $\Delta k_1(\text{仮想})$  を代入すると、

$$\begin{aligned} \Delta k_2(\text{仮想}) &= 0.1765 - 0.07455 \\ &= 0.10195 \end{aligned} \quad (\text{D36})$$

となり、 $\Delta k_2(\text{仮想})$  は  $\Delta k_1(\text{仮想})$  よりかなり大きくなる。修正因子  $f$  を両段階について求めると(D32)式を用いて、

$$\begin{aligned} f_1 &= \Delta k_1(\text{仮想}) / \Delta k_1(\text{現実}) \\ &= 1 \end{aligned} \quad (\text{D37})$$

であり、

また、(D36)式により

$$\begin{aligned} f_2 &= \Delta k_2(\text{仮想}) / \Delta k_2(\text{現実}) \\ &= 1.367 \end{aligned} \quad (\text{D38})$$

となる。 $\Sigma_a \text{out}$  による  $f_2$  と超過倍率の変化を第D 1図に示した。

外部吸収が強くこれを取り去ったときの超過倍率が大きいほど、第2ステップの修正因子  $f_2$  は1から乖離して非常に大きくなる。

注目すべきことに(D16)式が成立する範囲においてであろうが、 $\rho_{12'}$  あるいは

$\rho_{1,2}$  を定める(D25)式において、相互干渉の効果は括弧内の第2項に現れてくるが、 $\epsilon = \Sigma_a \text{out} / \Sigma_a$  に比例する。臨界状態から領域1, 2 のいずれかの中性子吸収  $\Sigma_a \text{out}$  を取り去ったときに生ずる反応度は、両方の領域から中性子吸収  $\Sigma_a \text{out}$  を取り去ったときに生ずる反応度の  $1/2$  より小さくなり、その傾向は  $\epsilon$  が大きいほど激しくなっている。そのため、仮想炉心についてであるが、残った領域から  $\Sigma_a \text{out}$  を取り出すとき生ずる反応度は両方の領域から  $\Sigma_a \text{out}$  を取り去ったとき生ずる反応度の  $1/2$  を超える。以上の考察は中性子の漏れの強い炉心についてであるが、中性子の漏れの弱い炉心では、 $f_2$  の1からの乖離はもっと大きくなる傾向がある。一方、ここでは  $k = 17.7\%$  もの大きな正の反応度を2段階で発生させているが、実際の炉への適用はもっと多数の段階を踏むので、 $f$  の1からの乖離は制限される。

次に、この修正法は、修正因子  $f_2$  の評価に用いる炉定数の精度にあまり依存しない。すでに述べたように、最大外部炉心の超過倍率は、正確とした第2表の炉定数による(D34)式の  $\rho_{1,2}$  より

$$k_{\text{ex}} = 17.65 \% \Delta k \quad (\text{D39})$$

となる。一方、不正確とした炉定数を用いた修正因子を用いても、

$$k_{\text{ex}} = 17.06 \% \Delta k \quad (\text{D40})$$

になり、若干差異があるが微少である。修正因子  $f_2$  を考えない本文(3)式に基づく在来法では  $f_2 = 1$  としているので、

$$k_{\text{ex}} = 14.91 \% \Delta k \quad (\text{D41})$$

となり、本当の値( $17.65 \% \Delta k$ )より、絶対値で  $2.74 \% \Delta k$  相対値で約  $16\%$  も低い。また、不正確な炉定数で計算により(D12)式で求めた超過倍率は  $13.64 \% \Delta k$  にし

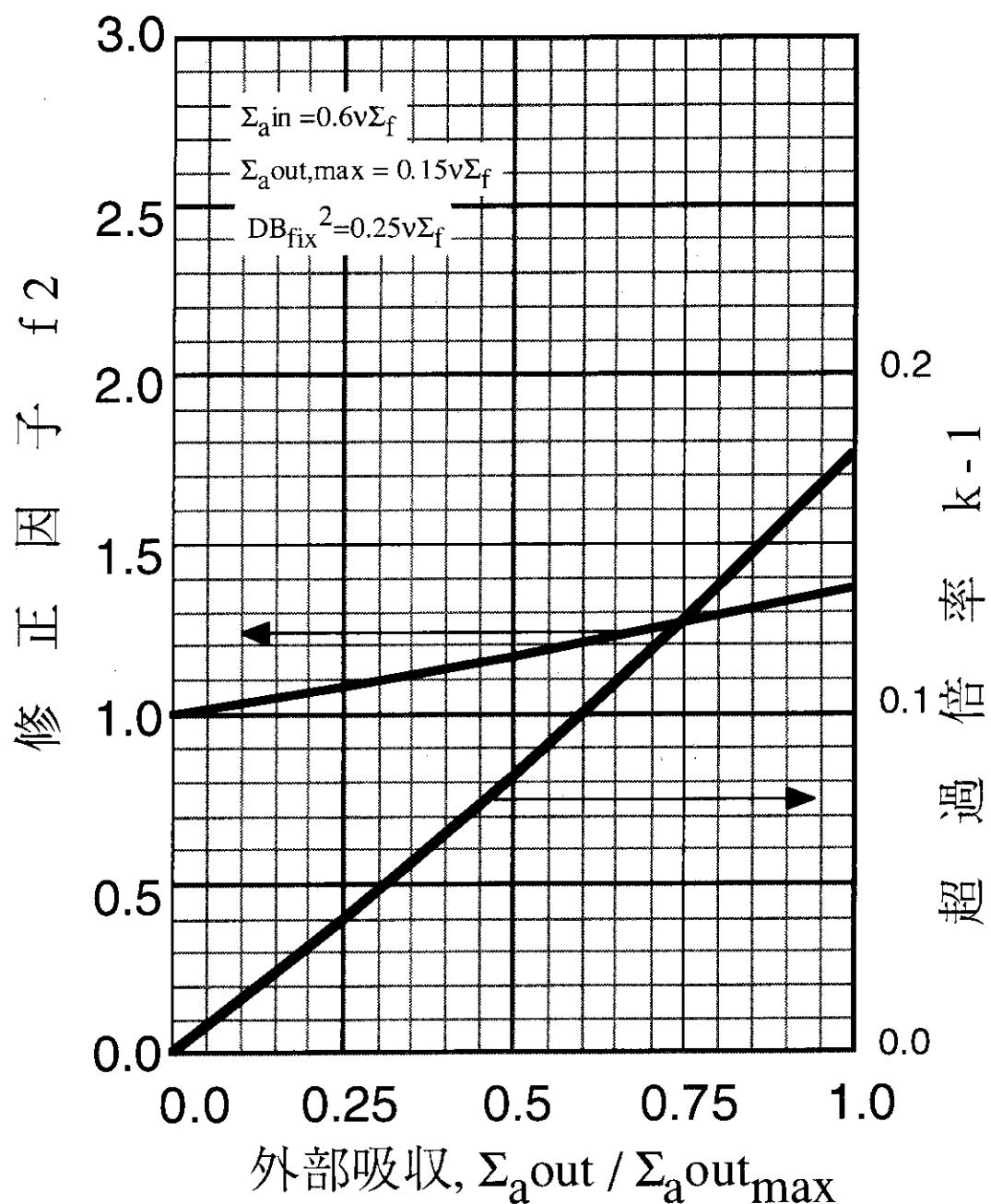
かならない。中性子の漏洩が弱く領域間の相互干渉効果が大きい2領域炉心での超過倍率推定のための中性子吸収置換法における修正法の提案は在来法による系統誤差を大巾に縮小できる可能性がある。

第D1表 2領域板状炉心の超過倍率推定数値実験

		最大外部吸収炉心		中間炉心1		中間炉心2		中間炉心3		最外部吸収炉心	
板状炉	板厚 L	L=2L <sub>0</sub>									
核分裂断面積 $\nu \Sigma_i$	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1
吸収断面積 (内部) $\Sigma_{\text{in}}$	0.6	0.64	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
吸収断面積 (外部) $\Sigma_{\text{out}}$	0.15	0.12	0.125	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075
$\epsilon = \Sigma_{\text{a}} \text{out} / \Sigma_{\text{a}}$	0.20	0.15789	0.1579	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111
中性子の漏洩 $DB_{\text{le}}^2 = D \left( \frac{\pi}{L} \right)^2$	0.25	0.24	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
実効増倍率 k	1	1	1	1.03896	1.08108	1.1268	1.1765	1.1765	1.1765	1.1765	1.1765
$\rho_{12} = \frac{\epsilon \Sigma_a}{2 \sqrt{\Sigma_i}} \times \left( 1 - \frac{1 - \epsilon \Sigma_a}{8 DB_g^2} \right)$	0.06938	0.05625	0.053088	0.036093	0.036093	0.018397	0.018397	0.018397	0.018397	0.018397	0.018397
$\Delta k_1(\text{現実})$ $\Delta k_1(\text{仮想}) = \Delta k_1(\text{現実})$ $\Delta k_2(\text{現実}) = \Delta k_1(\text{現実})$	0.07455	0.05960	0.056064	0.037445	0.037445	0.018742	0.018742	0.018742	0.018742	0.018742	0.018742
$\rho_{12} = \frac{\epsilon \Sigma_a}{\sqrt{\Sigma_i}}$	0.15	0.12	0.11250	0.074999	0.074999	0.037498	0.037498	0.037498	0.037498	0.037498	0.037498
$\Delta k_2(\text{仮想}) = (k(\text{仮想}) - 1) - \Delta k_1(\text{仮想})$	0.10192	0.07676	0.070696	0.043635	0.043635	0.020222	0.020222	0.020222	0.020222	0.020222	0.020222
$f_1 = \Delta k_2(\text{仮想}) / \Delta k_2(\text{現実})$	1.3671	1.288	1.2609	1.1653	1.1653	1.0786	1.0786	1.0786	1.0786	1.0786	1.0786
在来法／修正法 $2(1+f_2)^{-1}$	0.8449	0.8742	0.8846	0.9237	0.9237	0.9625	0.9625	0.9625	0.9625	0.9625	0.9625
$2\Delta k_1(\text{現実})$ [在来法の超過倍率]	0.1491	0.1491*	0.11213	0.07489	0.07489	0.03748	0.03748	0.03748	0.03748	0.03748	0.03748
$\Delta k_1(\text{仮想}) + \Delta k_2(\text{仮想})$ [修正法の超過倍率]	0.1765	0.1706*	0.12676	0.08108	0.08108	0.038962	0.038962	0.038962	0.038962	0.038962	0.038962

太い枠の中は不正確な假定数による結果  
 \*測定により求められる量  $\Delta k_1(\text{現実})$  と  $\Delta k_2(\text{現実})$  については正確な炉定数を用いた計算により求めめた。

断面積については  $\nu \Sigma_i$  を単位とする。

第D 1 図 2領域板状炉心の修正因子  $f_2$

## 付録E 微分型と積分型表現

### 1. 微分型表現

本論文では微分型の表現を探っている。  
現実炉心の  $k$  は  $L$  を  $\Sigma_a \text{out}$  を変数として、

$$k = \frac{v\Sigma_f}{\Sigma_a \text{in} + \Sigma_a \text{out} + DB^2} \quad (\text{E1})$$

これより、 $L$  の積分  $\Delta L$  として生ずる  $\Sigma_a \text{out}$  の増分に原因する  $k$  の  $\Delta k$  は、

$$\Delta k = \left. \frac{\partial k}{\partial L} \right|_{k=1} \Delta L + \left. \frac{\partial k}{\partial \Sigma_a} \right|_{k=1} \Delta \Sigma_a \text{out} \quad (\text{E2})$$

より与えられる。

ただし、

$$\frac{\Delta L}{L} \ll 1, \quad \frac{\Delta \Sigma_a \text{out}}{\Sigma_a \text{out}} \ll 1 \quad (\text{E3})$$

が前提であるので、

$$\Delta \Sigma_a \text{out} = -\frac{\Delta L}{L} \Sigma_a \text{out} \quad (\text{E4})$$

となる。\*

$n$  ステップ状態を以下に定義する。

\*  $\Delta \Sigma_a \text{out} = -\frac{\Delta L}{L + \Delta L} \Sigma_a \text{out}$  が厳密には正しいが、(E3)式の前提から(E4)式となる。

$$\left. \begin{aligned} L_n &= (n - 1) \Delta L + L \quad (n=1) \\ 1 &= \frac{v \Sigma_f}{\Sigma_a \text{in} + \Sigma_a \text{out}, n + DB_n^2} \\ B_{fn}^2 &= \left( \frac{\pi}{L_n} \right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (E5)$$

$\Delta L$  の増加により生ずる超過倍率は、

$$\Delta k_{n+1} = k_{n+1} - 1 = \left. \frac{\partial k}{\partial L} \right|_{k_n=1} \Delta L + \left. \frac{\partial k}{\partial \Sigma_a \text{out}} \right|_{k_n=1} \Delta \Sigma_a \text{out} \quad (E6)$$

仮想炉心では(E1)式で  $\Sigma_a \text{out} = 0$  として、

$$\lambda = \frac{v \Sigma_f}{\Sigma_a \text{in} + DB^2} \quad (E7)$$

$n$  ステップで対応する仮想炉心の実効倍率  $\lambda_n$  は、この式で  $B^2 = B_n^2$  とすればよい。 $n+1$  ステップと  $n$  ステップの実効倍率の差は、

$$\Delta k_{n+1}(\text{仮想}) = \left. \frac{\partial \lambda}{\partial L} \right|_{\lambda=\lambda_n} \Delta L \quad (E8)$$

(E6)式と(E8)式から、修正因子  $f_{n+1}$  は

$$\begin{aligned} f_{n+1} &= \Delta k_{n+1}(\text{仮想}) / \Delta k_{n+1}(\text{現実}) \\ &= \frac{\left. \frac{\partial \lambda}{\partial L} \right|_{\lambda=\lambda_n} \Delta L}{\left( \left. \frac{\partial k}{\partial L} \right|_{k_n=1} \Delta L + \left. \frac{\partial k}{\partial \Sigma_a \text{out}} \right|_{k=1} \Delta \Sigma_a \text{out} \right)} \end{aligned} \quad (E9)$$

このアプローチの特徴は、 $\Delta L/L \rightarrow 0$  を仮定しているので、実際の実験手順との対応に注意を要する。一方、 $L$  を変数としたときの  $k$  や  $f$  の動きを見通しよく与える解析的表現を可能にしており、実験手法の概念の表現に適している。

## 2. 積分型表現

もう一つのアプローチである積分型表現を探ると、(E5)式においてステップ  $n$  での炉定数が定められているので、

$$\Delta k_{n+1}(\text{仮想}) = \Delta k_{n+1} - 1 \quad (\text{E10})$$

ここに、

$$k_{n+1} = \frac{v\Sigma_f}{\Sigma_a \text{in} + \Sigma_a \text{out}, n + DB_{n+1}^2} \quad (\text{E11})$$

一方、 $n+1$  ステップと  $n$  ステップの仮想炉心の実効倍率の差として  $\Delta k_{n+1}(\text{仮想})$  は、

$$\Delta k_{n+1}(\text{仮想}) = \lambda_{n+1} - \lambda_n \quad (\text{E11})$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} \lambda_n &= \frac{v\Sigma_f}{\Sigma_a \text{in} + DB_n^2} \\ \lambda_{n+1} &= \frac{v\Sigma_f}{\Sigma_a \text{in} + DB_{n+1}^2} \end{aligned} \right\} \quad (\text{E12})$$

であるので、

$$f_{n+1} = \Delta k_{n+1}(\text{仮想}) / \Delta k_{n+1}(\text{現実}) \quad (\text{E13})$$

となる。

この積分型アプローチの特徴は、 $\Delta L/L \rightarrow 0$  の前提を必要とせず、実際の実験操作に良く対応していることである。但し、 $f_{n+1}$  が単純な解析式にならず、結果が  $\Delta L$  に依存するので、体系固有の特性を表現するのにやや不適なところがあるので、本論文では微分型の表現を中心に記述した。

## 付録 F 数値実験の全データ

本文第3表に関する詳細なデータをまとめたものである。

第F1表 数値実験の全データ

(a) 燃料追加法 ( $DB_s^2 \max = 0.2 \nu \Sigma_d$ ) ・ その1

正確な炉定数

 $\Delta L = 0.05$  $\Sigma_{\text{out}} = 0.8$  $L: L_o \sim 2L_o$  $DB_s^2 \max = 0.2$ 

最小炉心	i	$\Sigma \Delta L_i$	$DB_s^2$	$\Delta k(\text{仮想})_i$		$\Sigma_{\text{out}}$	修正因子 f	実効増倍率( $\Delta k_{\text{eff}}$ )	$\Delta k(\text{仮想})$	$\Delta k(\text{現実})$	$f \Delta k(\text{現実})$
				0.20000	0.02000						
中間炉心 1	1	0.00000	0.18141	0.01794	0.01816	0.01839	1.00000	1.00000	0.01897	0.01908	0.01908
	2	0.05000	0.16529	0.01613	0.01660	0.03471	0.97123	1.01895	0.01703	0.01738	0.01717
	3	0.10000	0.15123	0.01453	0.01527	0.04877	0.95171	1.03596	0.01533	0.01594	0.01548
	4	0.15000	0.13889	0.01319	0.01412	0.06111	0.92985	1.05127	0.01383	0.01470	0.01399
中間炉心 2	5	0.20000	0.12800	0.01189	0.01312	0.07200	0.90630	1.07759	0.01251	0.01362	0.01266
	6	0.25000	0.11834	0.01079	0.01224	0.08166	0.88159	1.08892	0.01134	0.01268	0.01149
	7	0.30000	0.10974	0.00982	0.01147	0.0926	0.85617	1.09922	0.01031	0.01186	0.01045
	8	0.35000	0.10204	0.00896	0.01079	0.09796	0.83040	1.10860	0.00939	0.01113	0.00953
中間炉心 3	9	0.40000	0.09512	0.00819	0.01018	0.10488	0.80455	1.11716	0.00857	0.01048	0.00870
	10	0.45000	0.08889	0.00750	0.00963	0.11111	0.77885	1.12500	0.00719	0.00938	0.00731
	11	0.50000	0.08325	0.00688	0.00914	0.11675	0.75347	1.13219	0.00661	0.00891	0.00672
	12	0.55000	0.07813	0.00633	0.00869	0.12188	0.72856	1.13879	0.00608	0.00849	0.00618
最大炉心	13	0.60000	0.07346	0.00584	0.00829	0.12654	0.70422	1.14487	0.00561	0.00810	0.00571
	14	0.65000	0.06920	0.00539	0.00792	0.13080	0.68051	1.15048	0.00519	0.00775	0.00527
	15	0.70000	0.06531	0.00498	0.00758	0.13469	0.65750	1.15566	0.00480	0.00743	0.00488
	16	0.75000	0.06173	0.00462	0.00727	0.13827	0.63522	1.16046	0.00445	0.00713	0.00453
中間炉心 4	17	0.80000	0.05844	0.00429	0.00698	0.14156	0.61368	1.16491	0.00414	0.00685	0.00421
	18	0.85000	0.05540	0.00399	0.00672	0.14460	0.59291	1.16904	0.00385	0.00660	0.00391
	19	0.90000	0.05260	0.00371	0.00648	0.14740	0.57290	1.17289	0.00359	0.00636	0.00365
	20	0.95000	0.05000	0.00346	0.00625	0.15000	0.55563	1.17647			

正確な炉定数 在來の評価法による見かけ上の超過倍率

 $k_{\text{eff}}(\text{現実}) =$ 

修正法による超過倍率

 $21.37778 \% \Delta k$ 

臨界方程式から評価した超過倍率

 $17.88888 \% \Delta k$ k<sub>ex</sub> = $17.64706 \% \Delta k$

第F1表 数値実験の全データ

(a) 燃料追加法 ( $DB_s^2 \max = 0.16 \nu \Sigma_i$ ) ・ その2 $\Delta L = 0.05$  $\Sigma_{s,in} = 0.84$  $L : L_o \sim 2L_o$  $DB_s^2 \max = 0.16$ 

最小炉心 i	$\Sigma \Delta L_i$	$DB_s^2$	$\Delta k(\text{仮想})$		$\Sigma_{s,out}$	修正因子 f	実効増倍率( $k_{eff}$ )	$\Delta k(\text{仮想})$	$\Delta k(\text{現実})$	$f_i \Delta k(\text{現実})^{**}$
			$\Delta k(\text{仮想})$	$\Delta k(\text{現実})$						
中間炉心 1	1	0.00000	0.01600	0.01424	0.01453	0.00000	1.00000	0.98019	1.01510	0.01526
	2	0.05000	0.14512	0.01272	0.01328	0.02777	0.95741	0.92836	0.01205	0.01704
	3	0.10000	0.13223	0.01139	0.01222	0.03902	0.93249	1.04060	0.01081	0.01526
	4	0.15000	0.12098	0.01111	0.01024	0.04889	0.90610	1.05140	0.00973	0.01370
中間炉心 2	5	0.20000	0.11111	0.010240	0.00922	0.01050	0.05760	0.87881	1.06112	0.00878
	6	0.25000	0.10240	0.009467	0.00834	0.00980	0.06533	0.85105	1.06989	0.00795
	7	0.30000	0.09779	0.00755	0.00918	0.07221	0.82318	1.07783	0.00721	0.00916
	8	0.35000	0.08779	0.00686	0.00863	0.07837	0.79547	1.08503	0.00656	0.00834
中間炉心 3	9	0.40000	0.08163	0.00625	0.00814	0.08390	0.76813	1.09158	0.00598	0.00761
	10	0.45000	0.07610	0.00571	0.00770	0.08889	0.74132	1.09756	0.00547	0.00696
	11	0.50000	0.07111	0.00523	0.00731	0.09340	0.71516	1.10303	0.00501	0.00638
	12	0.55000	0.06660	0.00480	0.00695	0.09750	0.68974	1.10803	0.00460	0.00679
中間炉心 4	13	0.60000	0.06250	0.00441	0.00663	0.10123	0.66512	1.11263	0.00424	0.00648
	14	0.65000	0.05877	0.00406	0.00633	0.10464	0.64133	1.11687	0.00391	0.00620
	15	0.70000	0.05536	0.00375	0.00606	0.10776	0.61840	1.12077	0.00361	0.00594
	16	0.75000	0.05224	0.00347	0.00582	0.11062	0.58633	1.12438	0.00334	0.004425
最大炉心	17	0.80000	0.04938	0.00321	0.00559	0.11325	0.57512	1.12771	0.00310	0.00394
	18	0.85000	0.04675	0.00300	0.00538	0.11568	0.55476	1.13081	0.00288	0.00366
	19	0.90000	0.04432	0.00287	0.00518	0.11792	0.53524	1.13369	0.00268	0.00341
	20	0.95000	0.04208	0.00277	0.00500	0.12000	0.51653	1.13636	0.00241	0.00309

\*\*\* :  $f_i$ : 不正確な炉定数、 $\Delta k$ (現実); 正確な炉定数不正確な炉定数  
不正確な炉定数  
不正確な炉定数  
正確な炉定数

$$\begin{aligned} k_{eff}(\text{現実}) &= \\ k_{eff} &= 17.10222 \% \Delta k \\ k_{eff} &= 17.31618 \% \Delta k \\ k_{eff} &= 13.63636 \% \Delta k \\ k_{eff} &= 17.64706 \% \Delta k \end{aligned}$$

\* 修正法に対する炉定数の感度解析のために設定した精度の低下を想定した炉定数  $k_{eff}$ 。

第F1表 数値実験の全データ

(a) 燃料追加法 ( $DB_g^2 \max = 0.4 \times \Sigma$ ) - ゼロ 3 $\Delta L = 0.01325$  $\Sigma_{\text{in}} = 0.6$  $L : L_0 \sim 1.265L_0$  $DB_g^2 \max = 0.4$ 

最小炉心	i	$\Sigma \Delta L$	$DB_g^2$	$\Delta k(\text{仮想})$	$\Delta k(\text{現実})$	$\Sigma_{\text{out}}$	修正因子 f	実効増倍率(仮想) $k_{\text{eff}}$	$\Delta k(\text{仮想})$	$\Delta k(\text{現実})$	$f \Delta k(\text{現実})$
中間炉心 1	1	0.00000	0.40000	0.01060	0.01060	0.00000	1.00000	1.00000	0.01050	0.01046	0.01046
	2	0.01325	0.38961	0.01040	0.01033	0.01039	1.00767	1.01050	0.01031	0.01019	0.01027
	3	0.02650	0.37961	0.01021	0.01006	0.02039	1.01481	1.02081	0.01012	0.00994	0.01008
	4	0.03975	0.37000	0.01002	0.00981	0.03000	1.02140	1.03093	0.00993	0.00969	0.00990
	5	0.05300	0.36075	0.00984	0.00957	0.03925	1.02748	1.04086	0.00974	0.00946	0.00972
中間炉心 2	6	0.06625	0.35184	0.00965	0.00934	0.04816	1.03305	1.05060	0.00956	0.00923	0.00954
	7	0.07950	0.34325	0.00947	0.00912	0.05675	1.03813	1.06016	0.00938	0.00902	0.00936
	8	0.09275	0.33498	0.00929	0.00891	0.06502	1.04272	1.06954	0.00921	0.00881	0.00919
	9	0.10600	0.32790	0.00912	0.00871	0.07300	1.04685	1.07875	0.00903	0.00861	0.00902
	10	0.11925	0.31931	0.00895	0.00852	0.08069	1.05052	1.08778	0.00886	0.00842	0.00885
中間炉心 3	11	0.13250	0.31188	0.00878	0.00833	0.08812	1.05375	1.09664	0.00869	0.00824	0.00868
	12	0.14575	0.30471	0.00861	0.00815	0.09529	1.05655	1.10533	0.00853	0.00806	0.00852
	13	0.15900	0.29778	0.00845	0.00798	0.10222	1.05893	1.11386	0.00837	0.00789	0.00836
	14	0.17225	0.29108	0.00829	0.00781	0.0892	1.06091	1.12223	0.00821	0.00773	0.00820
	15	0.18550	0.28461	0.00813	0.00765	0.11539	1.06251	1.13044	0.00805	0.00757	0.00805
中間炉心 4	16	0.19875	0.27836	0.00798	0.00750	0.12164	1.06373	1.13849	0.00790	0.00742	0.00790
	17	0.21200	0.27230	0.00782	0.00735	0.12770	1.06459	1.14639	0.00775	0.00728	0.00775
	18	0.22525	0.26645	0.00768	0.00721	0.13355	1.06510	1.15414	0.00760	0.00714	0.00760
	19	0.23850	0.26078	0.00753	0.00707	0.13922	1.06528	1.16174	0.00746	0.00700	0.00746
	20	0.25175	0.25528	0.00739	0.00694	0.14472	1.06513	1.16920	0.00732	0.00687	0.00732
最大炉心	21	0.26500	0.24996	0.00725	0.00681	0.15004	1.06468	1.17652			

正確な炉定数 在来の評価法による見かけ上の超過倍率

 $k_{\text{eff}}(\text{現実}) =$ 

$$k_{\text{eff}} = \frac{k_{\text{eff}}(\text{現実})}{k_{\text{eff}}(\text{仮想})} = \frac{16.90593 \% \Delta k}{17.62275 \% \Delta k}$$

$$k_{\text{eff}} = \frac{k_{\text{eff}}(\text{現実})}{k_{\text{eff}}(\text{仮想})} = \frac{17.65192 \% \Delta k}{17.65192 \% \Delta k}$$

第F1表 数値実験の全データ

(b) 燃料体価値法 ( $DB_s^{\gamma}$  max = 0.2,  $\Sigma_r$ )
 $\Delta L = 0.05$   
 $\sum_{an} = 0.8$   
 $L_c : L_o - 2L_o$   
 $DB_s^{\gamma}$  max = 0.2

	i	$\Sigma \Delta L_i$	$DB_s^{\gamma}$	$\Delta k(\text{仮想})_i$	$\Delta k(\text{現実})_i$	修正因子 f	実効増倍率(仮想) $k_{ex}$	$\Delta k_f(\text{仮想})$	$\Delta k_f(\text{現実})$	$f_i \Delta k_i(\text{現実})$
最小炉心	1	0.00000	0.20000	0.02000	0.02000	1.00000	1.01895	0.01897	0.02000	0.02000
	2	0.05000	0.18141	0.01794	0.02000	0.89688	0.91703	0.01703	0.02000	0.01794
	3	0.10000	0.16529	0.01613	0.02000	0.89632	0.91533	0.01533	0.02000	0.01613
	4	0.15000	0.15123	0.01453	0.02000	0.72667	1.05127	0.01383	0.02000	0.01453
中間炉心 1	5	0.20000	0.13889	0.01313	0.02000	0.63649	1.06509	0.01251	0.02000	0.01313
	6	0.25000	0.12800	0.01189	0.02000	0.59453	1.07759	0.01134	0.02000	0.01189
	7	0.30000	0.11834	0.01079	0.02000	0.5971	1.08892	0.01031	0.02000	0.01079
	8	0.35000	0.10974	0.00982	0.02000	0.49109	1.09922	0.00939	0.02000	0.00982
中間炉心 2	9	0.40000	0.10204	0.00896	0.02000	0.44788	1.10860	0.00857	0.02000	0.00896
	10	0.45000	0.09512	0.00819	0.02000	0.40938	1.11716	0.00784	0.02000	0.00819
	11	0.50000	0.08889	0.00750	0.02000	0.37500	1.12500	0.00719	0.02000	0.00750
	12	0.55000	0.08325	0.00688	0.02000	0.34422	1.13219	0.00661	0.02000	0.00688
中間炉心 3	13	0.60000	0.07813	0.00633	0.02000	0.31661	1.13879	0.00608	0.02000	0.00633
	14	0.65000	0.07346	0.00584	0.02000	0.29178	1.14487	0.00561	0.02000	0.00584
	15	0.70000	0.06920	0.00539	0.02000	0.26941	1.15048	0.00519	0.02000	0.00539
	16	0.75000	0.06531	0.00498	0.02000	0.24920	1.15566	0.00480	0.02000	0.00498
	17	0.80000	0.06173	0.00462	0.02000	0.23091	1.16046	0.00445	0.02000	0.00462
中間炉心 4	18	0.85000	0.05844	0.00429	0.02000	0.21432	1.16491	0.00414	0.02000	0.00429
	19	0.90000	0.05540	0.00399	0.02000	0.19925	1.16904	0.00385	0.02000	0.00399
	20	0.95000	0.05260	0.00371	0.02000	0.18553	1.17289	0.00359	0.02000	0.00371
最大炉心	21	1.00000	0.05000	0.00346	0.02000	0.17301	1.17647			

正確な炉定数 在來の評価法による見かけ上の超過倍率  
 修正法による超過倍率  
 隣界方程式から評価した超過倍率

$k_{ex}(\text{現実}) =$   
 $k_{ex} =$   
 $k_{ex} =$

40.00000 %  $\Delta k$   
 18.49038 %  $\Delta k$   
 17.64706 %  $\Delta k$

(c) 中性子吸収置換法・その1

 $\Sigma_{\text{an}} = 0.8$  $\Sigma_{\text{act}} = 0.15$  $\Delta \Sigma_{\text{act}} = 0.0075$  $DB_{\text{fix}}^2 = 0.05$ 

第F1表 数値実験の全データ

$i$	$\Sigma_{\text{act}} / \Sigma_{\text{act,max}}$	$\Delta k(\text{仮想})$	$\Delta k(\text{現実})$	$\Sigma_{\text{act}}$	$f$	$k_{\text{eff}}(\text{仮想})$	$\Delta k(\text{仮想})$	$\Delta k(\text{現実})$	$f \cdot \Delta k(\text{現実})$
最大外部吸収炉心1	1	1.00000	0.00750	0.15000	1.00000	1.00000	0.00756	0.00750	0.00750
	2	0.95000	0.00761	0.00750	0.14250	1.01517	0.00756	0.00750	0.00761
	3	0.90000	0.00773	0.00750	0.13500	1.01523	0.00779	0.00750	0.00773
	4	0.85000	0.00785	0.00750	0.12750	1.01657	0.00791	0.00750	0.00785
中間炉心1	5	0.80000	0.00797	0.00750	0.12000	1.01657	0.00793	0.00803	0.00750
	6	0.75000	0.00810	0.00750	0.11250	1.01944	0.03896	0.00816	0.00810
	7	0.70000	0.00822	0.00750	0.10500	1.01946	1.04712	0.00829	0.00822
	8	0.65000	0.00835	0.00750	0.09750	1.111389	1.05541	0.00842	0.00835
中間炉心2	9	0.60000	0.00849	0.00750	0.09000	1.13173	1.06383	0.00856	0.00849
	10	0.55000	0.00863	0.00750	0.08250	1.15001	1.07239	0.00870	0.00863
	11	0.50000	0.00877	0.00750	0.07500	1.16874	1.08108	0.00884	0.00877
	12	0.45000	0.00891	0.00750	0.06750	1.18792	1.08992	0.00898	0.00891
中間炉心3	13	0.40000	0.00906	0.00750	0.06000	1.20758	1.09890	0.00913	0.00906
	14	0.35000	0.00921	0.00750	0.05250	1.22774	1.10803	0.00929	0.00921
	15	0.30000	0.00936	0.00750	0.04500	1.24840	1.11732	0.00944	0.00936
	16	0.25000	0.00952	0.00750	0.03750	1.26959	1.12676	0.00960	0.00952
中間炉心4	17	0.20000	0.00968	0.00750	0.03000	1.29132	1.13636	0.00977	0.00968
	18	0.15000	0.00985	0.00750	0.02250	1.31362	1.14613	0.00994	0.00985
	19	0.10000	0.01002	0.00750	0.01500	1.33650	1.15607	0.01011	0.01002
	20	0.05000	0.01020	0.00750	0.00750	1.35998	1.16618	0.01029	0.01020
最小外部吸収炉心	21	0.00000	0.01038	0.00750	0.00000	1.38408	1.17647		
			0.18542	0.15750					

正確な炉定数 在來の評価法による見かけ上の超過倍率

$$k_{\text{ex}}(\text{現実}) = k_{\text{ex}} = k_{\text{ex}} =$$

修正法による超過倍率  
臨界方程式から評価した超過倍率

第F1表 数値実験の全データ

(c) 中性子吸収置換法・その2

不正確な炉定数\*

$$\sum_{\text{kin}} = 0.84$$

$$\sum_{\text{out}} = 0.12$$

$$\Delta \sum_{\text{out}} = 0.006$$

$$\text{DB}_{\text{in}}^2 = 0.04$$

	i	$\Sigma_{\text{out}}/\Sigma_{\text{out max}}$	$\Delta k(\text{仮想})_i$	$\Delta k(\text{現実})_i$	$\Sigma_{\text{out}}$	修正因子 f	実効増倍率(仮想) $k_{\text{eff}}$	$\Delta k_i(\text{仮想})$	$\Delta k_i(\text{現実})$	$f_i \Delta k_i(\text{現実})^{***}$
最大外部吸収炉心	1	1.00000	0.00600	0.00600	0.12000	1.00000	1.00000	0.00604	0.00600	0.00750
	2	0.95000	0.00607	0.00600	0.11400	1.01211	1.00604	0.00611	0.00600	0.00759
	3	0.90000	0.00615	0.00600	0.10800	1.02444	1.01215	0.00618	0.00600	0.00768
	4	0.85000	0.00622	0.00600	0.10200	1.03700	1.01833	0.00626	0.00600	0.00778
	5	0.80000	0.00630	0.00600	0.09600	1.04979	1.02459	0.00634	0.00600	0.00787
	6	0.75000	0.00638	0.00600	0.09000	1.06281	1.03933	0.00642	0.00600	0.00797
中間炉心 1	7	0.70000	0.00646	0.00600	0.08400	1.07608	1.03734	0.00650	0.00600	0.00807
	8	0.65000	0.00654	0.00600	0.07800	1.08960	1.04384	0.00658	0.00600	0.00817
	9	0.60000	0.00662	0.00600	0.07200	1.10338	1.05042	0.00666	0.00600	0.00828
	10	0.55000	0.00670	0.00600	0.06600	1.11742	1.05708	0.00675	0.00600	0.00838
	11	0.50000	0.00679	0.00600	0.06000	1.13173	1.06383	0.00683	0.00600	0.00849
	12	0.45000	0.00688	0.00600	0.05400	1.14632	1.07066	0.00692	0.00600	0.00860
中間炉心 2	13	0.40000	0.00697	0.00600	0.04800	1.16119	1.07759	0.00701	0.00600	0.00871
	14	0.35000	0.00706	0.00600	0.04200	1.17635	1.08460	0.00710	0.00600	0.00882
	15	0.30000	0.00715	0.00600	0.03600	1.19182	1.09170	0.00720	0.00600	0.00894
	16	0.25000	0.00725	0.00600	0.03000	1.20758	1.09890	0.00729	0.00600	0.00906
	17	0.20000	0.00734	0.00600	0.02400	1.22367	1.10619	0.00739	0.00600	0.00918
	18	0.15000	0.00744	0.00600	0.01800	1.24007	1.11359	0.00749	0.00600	0.00930
最小外部吸収炉心	19	0.10000	0.00754	0.00600	0.01200	1.25681	1.12108	0.00759	0.00600	0.00943
	20	0.05000	0.00764	0.00600	0.00600	1.27389	1.12867	0.00770	0.00600	0.00955
	21	0.00000	0.00775	0.00600	0.00000	1.29132	1.13636			

\*\*\* :  $f_i$  不正確な炉定数、 $\Delta k_i(\text{現実})$  : 正確な炉定数

正確な炉定数 在來の評価法による見かけ上の超過倍率  
 $k_{\text{ex}}(\text{現実}) =$   
 修正法による超過倍率  
 路界方程式から評価した超過倍率  
 不正確な炉定数  
 路界方程式から評価した超過倍率  
 正確な炉定数

15.00000 %  $\Delta k$   
 $k_{\text{ex}} =$   
 16.93656 %  $\Delta k$   
 $k_{\text{ex}} =$   
 13.63636 %  $\Delta k$   
 $k_{\text{ex}} =$   
 17.64706 %  $\Delta k$

\* 修正法に対する炉定数の感度解析のために設定した精度の低下を想定した炉定数。