

JAERI-M

87-057

臨界安全解析コードシステム
JACSの計算誤差評価

1987年3月

奥野 浩・内藤 俣孝

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

JAERI-M reports are issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1987

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日青工業株式会社

臨界安全解析コードシステム
J A C S の計算誤差評価

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部
奥野 浩・内藤倣孝

(1987年3月5日受理)

核燃料が未臨界であることを保証する方法として、最小臨界量に安全係数を乗ずる方法が従来しばしば用いられてきた。しかし、安全係数をどのようにして定めるかは不明確である。より合理的な方法として、計算誤差のみを考慮した制限実効増倍率を用いる方法がある。この報告では制限実効増倍率の算出について述べる。

原研で開発した臨界安全解析コードシステム J A C S を用いて 1980 年以降これまでに 1,400 例にも及ぶ検証計算が実施された。このうち、上記制限実効増倍率の算出にあたっては、反射体の付いた単一ユニットの核燃料体系で、複雑な形状のもの及び中性子毒を含むものを除く約 400 例の体系を対象とした。この対象体系を燃料の種類等により 8 つのグループに区分し、検証計算の結果を整理した。グループごとに実効増倍率の分布が得られ、これから制限実効増倍率が算出された。

Evaluation of Calculational Errors
with the Nuclear Criticality Safety Analysis Code System JACS

Hiroshi OKUNO and Yoshitaka NAITO

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

(Received March 5, 1987)

In order to guarantee subcriticality of nuclear fuels, the method to multiply a safety factor to the minimum critical quantities is sometimes adopted. The safety factor is, however, not rationally determined. Therefore, a method to set a limit to the effective neutron multiplication factor is investigated in this report.

Using the nuclear criticality safety analysis code system JACS, about 1,400 cases of validation calculations have been carried out since 1980. We treated 400 cases from the 1,400 as the sample cases of validation calculations which were based on the experimental systems neither of complex geometries nor of neutron poisoning. We divided the 400 cases into 8 groups according to the characteristics of the nuclear fuel materials. From the distribution of the effective neutron multiplication factors in each group, we obtained the limiting value of the effective neutron multiplication factor.

Keywords : Nuclear Criticality Safety, Subcriticality, Safety Factor, Validation Calculation, Single Unit, Reflected, JACS

目 次

1. 序 論	1
2. 臨界計算に伴う誤差の評価方法	2
3. 制限実効増倍率の算出結果	3
4. 考 察	4
謝 辞	5
参考文献	5

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Method for Evaluation of Errors from Nuclear Criticality Calculation	2
3. Results of Calculation	3
4. Discussions	4
Acknowledgment	5
References	5

1. 序 論

核燃料施設の核設計を行う場合に、臨界安全性を保証するのに2つの方法が用いられている。第一の方法は、臨界寸法や臨界質量などの最小臨界値に安全係数を乗じて臨界制限値とする方法である。この方法は古くから我が国で参考にされてきた米国の臨界ハンドブック TID-7016 (第1版)¹⁾やフランスの臨界ハンドブック CEA-R-3114²⁾で採用されてきた。第二の方法は臨界値を得るときに使用した計算または実験の誤差による不確定さだけを見込んで臨界制限値とする方法である。この方法は1978年に改訂された TID-7016 (第2版)³⁾で採用されており、得られた値は未臨界極限值と呼ばれている。最小臨界値については実験も豊富にあるので、第一の方法では比較的容易に臨界制限値を得ることができる。しかし、この方法で使用される安全係数についてはその根拠が論理的に明確にされておらず、合理性に欠ける。これに対し、第二の方法では実験や計算の誤差の評価が面倒であるが、得られる核的制限値の意味は明確となる。それゆえ、ここでは第二の方法を採用することとし、この方法に従って臨界制限値を求める場合に必要となる臨界計算コードシステムの誤差評価について以下で述べる。

原研では、核燃料施設の臨界安全性を評価するのに便利のように臨界安全解析コードシステム JACS⁴⁾を作成した。JACSでは評価済み核データ・ファイル ENDF/B-V⁵⁾を処理することにより、予め Bondarenko 型⁶⁾の多群定数ライブラリ MGCL を作成してある。MGCL のエネルギー群数は137であるが、26群定数も用意されている。JACSには中性子輸送計算コードとして、モンテカルロ法を用いる KENO-V^{7),8)}と S_N 法を用いる ANISN-JR⁹⁾とが用意されており、いずれの型の巨視的断面積も MGCL から作成することができる。このうち特に、KENO-V は核燃料施設で現れる様々な形状の燃料を比較的容易に模擬して計算できるため、頻繁に用いられている。さらに、このような MGCL と KENO-V とを用いた場合の検証計算も1980年以降、積極的に進められ、原研と原子力工学試験センターで実施されたものを併せると1,400余例にも及ぶ¹⁰⁾。これらの検証計算の結果を整理することにより、計算誤差の評価が可能になると考えられる。

同一の計算コードシステムを使用する限りにおいて、同じ体系を解析すると、勿論同じ結果が得られる。また、全く同じではなくても類似の体系ならば、計算誤差にも似たような傾向が現れると考えられる。類似な体系を同じグループとして扱うことによって計算誤差の評価が容易になる。ここで、どこまでを「類似」と見做したらよいかは一意的には決められない。基本的には、実際に現れるどのような体系も必ずどれか一つのグループに属し、かつ、そのグループ分類の結果として、そのグループ内での誤差が似た傾向を示せばよいと考えられる。

グループ分類として、当初は炉物理的分類が試みられた¹¹⁾。すなわち、対象を核分裂量のエネルギー分布及び中性子漏洩量をもとに分類した。しかし、このような炉物理量を用いた分類では、実際に計算するまでどのグループに分類されるかわからず、また、燃料の濃度変化に伴って属するグループが変わるなど、計算上不便な点がある。それゆえ、即物的分類を試みたので、その結果をこの報告書では述べる。まず第2章では、分類の方法も含めて計算誤差評価の方法について記す。

また、制限実効増倍率の算出結果を第3章に、結果に対する考察を第4章にそれぞれ述べる。

なお、本報告書の表2～表10、図7～図14は科学技術庁から受託した「昭和60年度臨界安全解析データ・プログラム整備事業成果報告書」から引用した。

2. 臨界計算に伴う誤差の評価方法

臨界実験体系の中性子実効増倍率（以下、実効増倍率という）に対する検証計算結果を整理することにより、臨界計算コードシステムを使用することに伴う計算誤差の評価方法について以下で述べる。この方法では、まず検証計算の結果を対象とした燃料体系の種類により区分し、次に、区分された各グループ内での実効増倍率の頻度分布に対し統計的手法により、制限実効増倍率を得る。これらについて順に述べる。

検証計算での体系区分として、ここでは反射体の付いた単一ユニットの核燃料体系のうち、複雑な形状のもの及び中性子毒を含むものを除いた体系についての即物的なグループ分類の例を示す。すなわち、核燃料体系の区分として、以下の項目が挙げられる。

- ① 均質又は非均質
- ② ウラン燃料、プルトニウム燃料又は混合燃料
- ③ ウラン濃縮度の高・低（ウラン燃料のみ）

ここに挙げた項目によって核燃料体系は最終的に8つのグループに分類される。グループ名及び各グループに属する体系の数については第3章に述べる。

さて、区分された各グループ内で実効増倍率の頻度分布が得られ、この頻度分布に基づき、実効増倍率に対する制限値が得られる。この様子を図1に示す。すなわち、検証計算で用いたと同じ計算コードシステムにより得られた実効増倍率が、ある制限値 k_c 以下ならば、その対象とした体系は未臨界と判断される。このような実効増倍率に対する制限値を以下では制限実効増倍率と呼ぶ。

制限実効増倍率は以下の方針によって定める。

- (1) 検証計算の結果得られたどの実効増倍率の値 $k_{eff,i}$ も制限実効増倍率の値より大きい（すなわち、 $k_{eff,i} > k_c$ 、 $\forall i$ ）。
- (2) 制限実効増倍率の値は0.98を上回ることはない（すなわち、 $k_c \leq 0.98$ ）。
- (3) 計算コードシステムを使用することによる誤差の傾向を知るには統計的手法を用いる。

このうち、(1)は検証計算の対象である臨界実験体系が誤って未臨界であると判断されないことを保証する上で必要である。また、(2)は安全側に考えて、制限実効増倍率が極度に大きく設定されるのを防ぐためである。以下では(3)について述べる。

区分された各グループ内での $k_{eff,i}$ の誤差の側向を知るため、統計的手法を用いる。まず、各臨界実験体系を一つの標本とし、これをMGCLとKENO-IVの組合せで解析した結果得られる実効増倍率の値 $k_{eff,i}$ を対応する標本値とする。ここでは同一グループに属する標本値は、みな同じ誤差の傾向をもつものと先見的に仮定する。その結果、この誤差分布、さらには標本値の分布は正規分布に従うことになる（その母集団正規分布の平均値を m 、分散を σ^2 とする）。

また、制限実効増倍率の算出結果を第3章に、結果に対する考察を第4章にそれぞれ述べる。

なお、本報告書の表2～表10、図7～図14は科学技術庁から受託した「昭和60年度臨界安全解析データ・プログラム整備事業成果報告書」から引用した。

2. 臨界計算に伴う誤差の評価方法

臨界実験体系の中性子実効増倍率（以下、実効増倍率という）に対する検証計算結果を整理することにより、臨界計算コードシステムを使用することに伴う計算誤差の評価方法について以下で述べる。この方法では、まず検証計算の結果を対象とした燃料体系の種類により区分し、次に、区分された各グループ内での実効増倍率の頻度分布に対し統計的手法により、制限実効増倍率を得る。これらについて順に述べる。

検証計算での体系区分として、ここでは反射体の付いた単一ユニットの核燃料体系のうち、複雑な形状のもの及び中性子毒を含むものを除いた体系についての即物的なグループ分類の例を示す。すなわち、核燃料体系の区分として、以下の項目が挙げられる。

- ① 均質又は非均質
- ② ウラン燃料、プルトニウム燃料又は混合燃料
- ③ ウラン濃縮度の高・低（ウラン燃料のみ）

ここに挙げた項目によって核燃料体系は最終的に8つのグループに分類される。グループ名及び各グループに属する体系の数については第3章に述べる。

さて、区分された各グループ内で実効増倍率の頻度分布が得られ、この頻度分布に基づき、実効増倍率に対する制限値が得られる。この様子を図1に示す。すなわち、検証計算で用いたと同じ計算コードシステムにより得られた実効増倍率が、ある制限値 k_c 以下ならば、その対象とした体系は未臨界と判断される。このような実効増倍率に対する制限値を以下では制限実効増倍率と呼ぶ。

制限実効増倍率は以下の方針によって定める。

- (1) 検証計算の結果得られたどの実効増倍率の値 $k_{eff,i}$ も制限実効増倍率の値より大きい（すなわち、 $k_{eff,i} > k_c, \forall i$ ）。
- (2) 制限実効増倍率の値は0.98を上回ることはない（すなわち、 $k_c \leq 0.98$ ）。
- (3) 計算コードシステムを使用することによる誤差の傾向を知るには統計的手法を用いる。

このうち、(1)は検証計算の対象である臨界実験体系が誤って未臨界であると判断されないことを保証する上で必要である。また、(2)は安全側に考えて、制限実効増倍率が極度に大きく設定されるのを防ぐためである。以下では(3)について述べる。

区分された各グループ内での $k_{eff,i}$ の誤差の側向を知るため、統計的手法を用いる。まず、各臨界実験体系を一つの標本とし、これをMGCLとKENO-Nの組合せで解析した結果得られる実効増倍率の値 $k_{eff,i}$ を対応する標本値とする。ここでは同一グループに属する標本値は、みな同じ誤差の傾向をもつものと先見的に仮定する。その結果、この誤差分布、さらには標本値の分布は正規分布に従うことになる（その母集団正規分布の平均値を m 、分散を σ^2 とする）。

標本数を n 、 i 番目の標本値を k_i と記すとき、標本値の分布はその平均値 \bar{k} 及び分散 s^2 により特徴付けられる (図 1 参照)。なお、ここで

$$\bar{k} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_{\text{eff}, i} \quad (1)$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (k_{\text{eff}, i} - \bar{k})^2, \quad (n \geq 2) \quad (2)$$

である。 \bar{k} 及び s^2 は以下に述べる統計的性質を持つ。

- (1) 標本値の平均値 \bar{k} は平均 m 、分散 $\frac{\sigma^2}{n}$ の正規分布に従う¹²⁾ (図 2 参照)。
- (2) 標本値の分散 s^2 は自由度 $n-1$ の χ^2 分布に従う (図 3 参照) [より厳密には $(n-1)s^2 / \sigma^2$ がこの分布に従う¹²⁾。なお、参考までに標準偏差 s の従う確率分布を図 4 に示す。]
- (3) 定数 μ' をある値 μ 以上に選べば、 $\bar{k} - \mu's$ の従う分布の下側 100 r % の点を k_{eff} の母集団正規分布の下側 100 P % の点 $m - \mu_p \sigma$ より小さくとることができる (図 5 参照)。ここで μ の値は n 、 P 、 r をパラメタとする非心 t 分布により定まる¹³⁾。典型的な P 及び r の値について、標本数 n の増大に伴う μ の値の変化を図 6 に示す。

以上、(1)~(3) に述べた性質を用いると、計算対象が臨界であるか未臨界であるかの判断には、次に挙げる基準に従うとよいことが分る。

- i) 実効増倍率が \bar{k} の値をとったときに、その体系が臨界になる確率は最も高くなる。
- ii) 実効増倍率が $\bar{k} - \mu s$ 以下であれば、その体系が臨界になってしまう確率が P 以下であるということが r の確かさで言える。

臨界超過確率 P 及び信頼度 r を定めるにあたり、参考となるのは使用済軽水炉燃料の貯蔵施設に関する米国の設計基準¹⁴⁾ で、そこではすべての不確実量は 95% の信頼度で 95% の確率をもつ量として表すように定められている。しかし、この報告で対象としている検証計算結果に対して $P=5\%$ 、 $r=95\%$ とすると、上記の(1)の要求が満たされなくなる。すなわち、制限実効増倍率の値より大きいものが現れてしまう。それゆえ、ここでは(1)の要求を満たすように $P=2.5\%$ 、 $r=97.5\%$ と置く。このように P 及び r を設定したときに標本数 n に対する μ の値を表 1 に示す。

3. 制限実効増倍率の算出結果

区分された各グループのグループ名及び制限実効増倍率の値を表 2 に示す。この表で MOX と記したのはウランとプルトニウムの混合酸化物を意味し、MIX と記したのは混合硝酸溶液を意味する。表 2 は臨界安全評価コードシステム JACS のうち、137 群 MGCL と KENO-IV の組合せで反射体付き単一ユニット単純形状体系の臨界計算を行う場合に適用すべきである。これは、反射体付きの比較的単純な形状の燃料体系についての検証計算結果に基づいて頻度分布を作成したからである。

表 2 には参考のため、各頻度分布の平均値、標準偏差及び標本数も併せて示した。また、頻度

標本数を n 、 i 番目の標本値を k_i と記すとき、標本値の分布はその平均値 \bar{k} 及び分散 s^2 により特徴付けられる (図 1 参照)。なお、ここで

$$\bar{k} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_{\text{eff}, i} \quad (1)$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (k_{\text{eff}, i} - \bar{k})^2, \quad (n \geq 2) \quad (2)$$

である。 \bar{k} 及び s^2 は以下に述べる統計的性質を持つ。

- (1) 標本値の平均値 \bar{k} は平均 m 、分散 $\frac{\sigma^2}{n}$ の正規分布に従う¹²⁾ (図 2 参照)。
- (2) 標本値の分散 s^2 は自由度 $n-1$ の χ^2 分布に従う (図 3 参照) [より厳密には $(n-1)s^2 / \sigma^2$ がこの分布に従う¹²⁾。なお、参考までに標準偏差 s の従う確率分布を図 4 に示す。]
- (3) 定数 μ' をある値 μ 以上に選べば、 $\bar{k} - \mu's$ の従う分布の下側 $100r\%$ の点を k_{eff} の母集団正規分布の下側 $100P\%$ の点 $m - \mu_p\sigma$ より小さくとることができる (図 5 参照)。ここで μ の値は n 、 P 、 r をパラメタとする非心 t 分布により定まる¹³⁾。典型的な P 及び r の値について、標本数 n の増大に伴う μ の値の変化を図 6 に示す。

以上、(1)~(3) に述べた性質を用いると、計算対象が臨界であるか未臨界であるかの判断には、次に挙げる基準に従うとよいことが分る。

- i) 実効増倍率が \bar{k} の値をとったときに、その体系が臨界になる確率は最も高くなる。
- ii) 実効増倍率が $\bar{k} - \mu s$ 以下であれば、その体系が臨界になってしまう確率が P 以下であるということが r の確かさで言える。

臨界超過確率 P 及び信頼度 r を定めるにあたり、参考となるのは使用済軽水炉燃料の貯蔵施設に関する米国の設計基準¹⁴⁾ で、そこではすべての不確実量は 95% の信頼度で 95% の確率をもつ量として表すように定められている。しかし、この報告で対象としている検証計算結果に対して $P=5\%$ 、 $r=95\%$ とすると、上記の(1)の要求が満たされなくなる。すなわち、制限実効増倍率の値より大きいものが現れてしまう。それゆえ、ここでは(1)の要求を満たすように $P=2.5\%$ 、 $r=97.5\%$ と置く。このように P 及び r を設定したときに標本数 n に対する μ の値を表 1 に示す。

3. 制限実効増倍率の算出結果

区分された各グループのグループ名及び制限実効増倍率の値を表 2 に示す。この表で MOX と記したのはウランとプルトニウムの混合酸化物を意味し、MIX と記したのは混合硝酸溶液を意味する。表 2 は臨界安全評価コードシステム JACS のうち、137 群 MGCL と KENO-IV の組合せで反射体付き単一ユニット単純形状体系の臨界計算を行う場合に適用すべきである。これは、反射体付きの比較的単純な形状の燃料体系についての検証計算結果に基づいて頻度分布を作成したからである。

表 2 には参考のため、各頻度分布の平均値、標準偏差及び標本数も併せて示した。また、頻度

分布を形成している各標本の値をグループごとに表3から表10に示す。なお、この表の備考欄には計算報告書の番号と燃料形態について記した。

検証計算の結果得られる実効増倍率の頻度分布をグループごとに図7から図14に示す。図中、 \bar{k} は頻度分布の平均値、 s は標準偏差、 k_c は制限実効増倍率である。

4. 考 察

第2章で述べたように、統計的手法により制限実効増倍率を求める場合、標本値（検証計算の結果得られた実効増倍率の値）の分布が正規分布に従っていると仮定した。しかしながら、図8に示したように、均質・U高濃縮系のグループでは標本の頻度分布が双峰型になっており、第2章で述べた統計的手法を用いるためには本来はさらに細かくグループ分けを行う必要があると考えられる。その際、均質・U高濃縮系というグループ分類が非安全側の評価をもたらさないかについて、以下検討する。

表4に従って均質・U高濃縮系グループの標本の内訳をみると、このグループはさらに六弗化ウラン系と硝酸ウラニル水溶液系の2つのサブグループからなっていることが分かる。図8の頻度分布では、六弗化ウラン系を白抜きで、硝酸ウラニル水溶液系を斜線で示している。2つのサブグループでは標本値の傾向に明らかに相異のあること、また、それぞれのサブグループにおける頻度分布は正規分布に近いことがこの図から分る。均質・U高濃縮系グループをこのように2つのサブグループに分割したときの標本数、標本値の平均、標準偏差及び実効増倍率の制限値を表11に示す。この表から明らかなように、六弗化ウラン系サブグループの平均値は均質・U高濃縮系グループ全体の平均値より約1%高く、硝酸ウラニル水溶液系サブグループの平均値はグループ全体の平均値より約1%低い。また、各サブグループの標準偏差はグループ全体の標準偏差より十分小さくなっている。実効増倍率の制限値については、硝酸ウラニル水溶液系サブグループの値が0.953になっている。これはこのグループ全体での制限値0.954の誤差範囲内と考えられる。すなわち、均質・U高濃縮系グループにおいては、これをサブグループに分割しなくても非安全側の評価とはならないと考えられる。

一見しただけでは均質・U高濃縮系グループの場合ほど顕著ではないが、同様の事情が均質・ P_{U_2} 系グループの場合にも見られる。すなわち、表5から明らかなように、均質・ P_{U_2} 系グループの内訳をみるとこのグループはさらに $P_{U_2}O_2$ コンパクト系と硝酸プルトニウム溶液系との2つのサブグループから成っていることが分る。図9の頻度分布では、 $P_{U_2}O_2$ コンパクト系を白抜きで、硝酸プルトニウム溶液系を斜線で示している。この図からも明らかなように、 $P_{U_2}O_2$ コンパクト系サブグループの標本値の平均の方が硝酸プルトニウム溶液系サブグループの標本値の平均より大きくなっている。実際、表12に見るように両サブグループの平均値の差が0.015ある。この表には2つのサブグループに分割したときの標本値の平均のほか標準偏差、標本数及び実効増倍率の制限値を示している。実効増倍率の制限値については、いずれのサブグループにおいても0.980（統計計算によると、低い方の硝酸プルトニウム溶液系でも0.981）なので、均質・ P_{U_2} 系グループにおいても、これをサブグループに分割しなくても非安全側の評価とならないと考えられる。

分布を形成している各標本の値をグループごとに表3から表10に示す。なお、この表の備考欄には計算報告書の番号と燃料形態について記した。

検証計算の結果得られる実効増倍率の頻度分布をグループごとに図7から図14に示す。図中、 \bar{x} は頻度分布の平均値、 s は標準偏差、 k_c は制限実効増倍率である。

4. 考 察

第2章で述べたように、統計的手法により制限実効増倍率を求める場合、標本値（検証計算の結果得られた実効増倍率の値）の分布が正規分布に従っていると仮定した。しかしながら、図8に示したように、均質・U高濃縮系のグループでは標本の頻度分布が双峰型になっており、第2章で述べた統計的手法を用いるためには本来はさらに細かくグループ分けを行う必要があると考えられる。その際、均質・U高濃縮系というグループ分類が非安全側の評価をもたらさないかについて、以下検討する。

表4に従って均質・U高濃縮系グループの標本の内訳をみると、このグループはさらに六弗化ウラン系と硝酸ウラニル水溶液系の2つのサブグループからなっていることが分かる。図8の頻度分布では、六弗化ウラン系を白抜きで、硝酸ウラニル水溶液系を斜線で示している。2つのサブグループでは標本値の傾向に明らかに相異のあること、また、それぞれのサブグループにおける頻度分布は正規分布に近いことがこの図から分る。均質・U高濃縮系グループをこのように2つのサブグループに分割したときの標本数、標本値の平均、標準偏差及び実効増倍率の制限値を表11に示す。この表から明らかなように、六弗化ウラン系サブグループの平均値は均質・U高濃縮系グループ全体の平均値より約1%高く、硝酸ウラニル水溶液系サブグループの平均値はグループ全体の平均値より約1%低い。また、各サブグループの標準偏差はグループ全体の標準偏差より十分小さくなっている。実効増倍率の制限値については、硝酸ウラニル水溶液系サブグループの値が0.953になっている。これはこのグループ全体での制限値0.954の誤差範囲内と考えられる。すなわち、均質・U高濃縮系グループにおいては、これをサブグループに分割しなくても非安全側の評価とはならないと考えられる。

一見しただけでは均質・U高濃縮系グループの場合ほど顕著ではないが、同様の事情が均質・ P_u 系グループの場合にも見られる。すなわち、表5から明らかなように、均質・ P_u 系グループの内訳をみるとこのグループはさらに $P_u O_2$ コンパクト系と硝酸プルトニウム溶液系との2つのサブグループから成っていることが分る。図9の頻度分布では、 $P_u O_2$ コンパクト系を白抜きで、硝酸プルトニウム溶液系を斜線で示している。この図からも明らかなように、 $P_u O_2$ コンパクト系サブグループの標本値の平均の方が硝酸プルトニウム溶液系サブグループの標本値の平均より大きくなっている。実際、表12に見るように両サブグループの平均値の差が0.015ある。この表には2つのサブグループに分割したときの標本値の平均のほか標準偏差、標本数及び実効増倍率の制限値を示している。実効増倍率の制限値については、いずれのサブグループにおいても0.980（統計計算によると、低い方の硝酸プルトニウム溶液系でも0.981）なので、均質・ P_u 系グループにおいても、これをサブグループに分割しなくても非安全側の評価とならないと考えられる。

謝 辞

この仕事を進める上で、計算結果検討ワーキンググループ(核燃料施設安全性研究委員会 臨界ハンドブック専門部会)で有益な御意見を頂戴しました。田仲昇グループリーダーをはじめグループ員の方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) " Nuclear Safety Guide, " TID-7016, Rev.1, U.S. Atomic Energy Commission (1961).
- 2) " Guide de Criticité ", CEA-R3114, Commissariat A L'Énergie Atomique (1967).
- 3) J.T.Thomas (ed.), " Nuclear Safety Guide, Revision 2 , " NUREG/CR-0095, U.S.Nuclear Regulatory Commission (1978).
- 4) J.Katakura, Y.Naito and Y.Komuro, " Development of the Computer Code System JACS for Criticality Safety, " Trans. Am. Nucl. Soc. 41 (1982) 329 .
- 5) Y.Naito et al. , " MGCL-PROCESSOR : A Computer Code System for Processing Multigroup Constants Library MGCL, " JAERI-M9396 (1981).
- 6) I.I.Bondarenko (ed.), " Group Constants for Nuclear Reactor Calculations, " Consultants Bureau, New York (1964) .
- 7) G.E.Whitesides and N.F.Cross, " KENO-A Multigroup Monte Carlo Criticality Program, " CTC-5 (1969) .
- 8) L.M.Petrie and N.F.Cross, " KENO W - An Improved Monte Carlo Criticality Program, " ORNL-4938 (1975) .
- 9) W.W.Engle, Jr., " A Users Manual for ANISN, A One Dimensional Discrete Ordinates Transport Code With Anisotropic Scattering, " K-1693 (1967) .
- 10) Y.Nomura et al., " Benchmark Calculations by the Nuclear Criticality Safety Analysis Code System JACS (KENO-W, MGCL) " , JAERI 1303 (1986) and references therein.
- 11) Y.Naito, J.Katakura and M.Yokota, " A Study on a Nuclear Criticality Safety Evaluation Technique, " Trans. Am. Nucl. Soc. 41 (1982) 330 .
- 12) 小針規宏, 「 確率・統計入門 」, 岩波書店 (1973) .
- 13) D.B.Owen, " Factors for One-Sided Tolerance Limits and for Variables Sampling Plans, " SCR-607 (1963) .

謝 辞

この仕事を進める上で、計算結果検討ワーキンググループ(核燃料施設安全性研究委員会 臨界ハンドブック専門部会)で有益な御意見を頂戴しました。田仲昇一グループリーダーをはじめグループ員の方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) " Nuclear Safety Guide, " TID-7016, Rev.1, U.S. Atomic Energy Commission (1961).
- 2) " Guide de Criticité ", CEA-R3114, Commissariat A L'Énergie Atomique (1967).
- 3) J.T.Thomas (ed.), " Nuclear Safety Guide, Revision 2, " NUREG/CR-0095, U.S.Nuclear Regulatory Commission (1978).
- 4) J.Katakura, Y.Naito and Y.Komuro, " Development of the Computer Code System JACS for Criticality Safety, " Trans. Am. Nucl. Soc. 41 (1982) 329 .
- 5) Y.Naito et al. , " MGCL-PROCESSOR : A Computer Code System for Processing Multigroup Constants Library MGCL, " JAERI-M9396 (1981).
- 6) I.I.Bondarenko (ed.), " Group Constants for Nuclear Reactor Calculations, " Consultants Bureau, New York (1964) .
- 7) G.E.Whitesides and N.F.Cross, " KENO-A Multigroup Monte Carlo Criticality Program, " CTC-5 (1969) .
- 8) L.M.Petrie and N.F.Cross, " KENO W - An Improved Monte Carlo Criticality Program, " ORNL-4938 (1975) .
- 9) W.W.Engle, Jr., " A Users Manual for ANISN, A One Dimensional Discrete Ordinates Transport Code With Anisotropic Scattering, " K-1693 (1967) .
- 10) Y.Nomura et al., " Benchmark Calculations by the Nuclear Criticality Safety Analysis Code System JACS (KENO-W, MGCL) " , JAERI 1303 (1986) and references therein.
- 11) Y.Naito, J.Katakura and M.Yokota, " A Study on a Nuclear Criticality Safety Evaluation Technique, " Trans. Am. Nucl. Soc. 41 (1982) 330 .
- 12) 小針現宏, 「確率・統計入門」, 岩波書店 (1973) .
- 13) D.B.Owen, " Factors for One-Sided Tolerance Limits and for Variables Sampling Plans, " SCR-607 (1963) .

- 14) " American National Standard Design Requirements for Light Water Re-actor Spent Fuel Storage Facilities at Nuclear Power Plants," ANSI/ANS-57.2-1983 (1983) .
- 15) 片倉純一他, 「 臨界安全評価コードシステム JACS のベンチマーク計算 », JAERI-M 9859 , 日本原子力研究所 (1981) .
- 16) 片倉純一他, 「 KENO-IV コードベンチマーク計算(3) (UF₆充填シリンダーの平面配列) », JAERI-M 9025 , 日本原子力研究所 (1980) .
- 17) 野村靖他, 「 KENO-IV コードベンチマーク計算(5) (硝酸ウラニル水溶液のシリンダ群又はタンク) 」 JAERI-M 9108 , 日本原子力研究所 (1980) .
- 18) 小室雄一他, 「 KENO-IV コードベンチマーク計算(2) (PuO₂ -UO₂ -ポリスチレンのコンパクトのブロック積み) », JAERI-M 9105 , 日本原子力研究所 (1980) .
- 19) 小室雄一他, 「 KENO-IV コードベンチマーク計算(10) (軽水型原子炉臨界集合体による臨界実験) », JAERI-M 9147 , 日本原子力研究所 (1980) .
- 20) 野村靖他, 「 KENO-IV コードベンチマーク計算(7) (プルトニウム富化燃料棒の三角格子配列) », JAERI-M 9079 , 日本原子力研究所 (1980) .

表1 標本数 n に対する μ の値 ($r = 97.5\%$, $p = 2.5\%$)

n	μ	n	μ	n	μ	n	μ	n	μ	n	μ
		51	2.529	101	2.340	151	2.263	205	2.216	675	2.095
2	62.558	52	2.522	102	2.338	152	2.261	210	2.212	700	2.093
3	12.816	53	2.515	103	2.335	153	2.260	215	2.209	725	2.090
4	7.710	54	2.509	104	2.333	154	2.259	220	2.206	750	2.088
5	5.975	55	2.503	105	2.331	155	2.258	225	2.203	775	2.086
6	5.111	56	2.497	106	2.329	156	2.257	230	2.200	800	2.084
7	4.592	57	2.491	107	2.327	157	2.256	235	2.197	825	2.082
8	4.243	58	2.486	108	2.325	158	2.255	240	2.195	850	2.080
9	3.992	59	2.480	109	2.324	159	2.254	245	2.192	875	2.078
10	3.801	60	2.475	110	2.322	160	2.253	250	2.189	900	2.076
11	3.650	61	2.470	111	2.320	161	2.252	255	2.187	925	2.075
12	3.528	62	2.465	112	2.318	162	2.251	260	2.185	950	2.073
13	3.427	63	2.460	113	2.316	163	2.250	265	2.182	975	2.072
14	3.342	64	2.456	114	2.314	164	2.249	270	2.180	1000	2.070
15	3.268	65	2.451	115	2.313	165	2.248	275	2.178	1500	2.049
16	3.204	66	2.447	116	2.311	166	2.247	280	2.176	2000	2.037
17	3.148	67	2.442	117	2.309	167	2.246	285	2.174	3000	2.023
18	3.099	68	2.438	118	2.308	168	2.245	290	2.172	5000	2.008
19	3.054	69	2.434	119	2.306	169	2.244	295	2.170	10000	1.994
20	3.014	70	2.430	120	2.304	170	2.243	300	2.168	∞	1.960
21	2.978	71	2.426	121	2.303	171	2.242	305	2.166		
22	2.945	72	2.422	122	2.301	172	2.241	310	2.164		
23	2.914	73	2.418	123	2.299	173	2.241	315	2.162		
24	2.887	74	2.415	124	2.298	174	2.240	320	2.161		
25	2.861	75	2.411	125	2.296	175	2.239	325	2.159		
26	2.837	76	2.408	126	2.295	176	2.238	330	2.157		
27	2.815	77	2.404	127	2.293	177	2.237	335	2.156		
28	2.794	78	2.401	128	2.292	178	2.236	340	2.154		
29	2.775	79	2.398	129	2.290	179	2.235	345	2.153		
30	2.757	80	2.394	130	2.289	180	2.235	350	2.151		
31	2.740	81	2.391	131	2.288	181	2.234	355	2.150		
32	2.723	82	2.388	132	2.286	182	2.233	360	2.148		
33	2.708	83	2.385	133	2.285	183	2.232	365	2.147		
34	2.694	84	2.382	134	2.283	184	2.231	370	2.146		
35	2.680	85	2.379	135	2.282	185	2.230	375	2.144		
36	2.667	86	2.377	136	2.281	186	2.230	380	2.143		
37	2.655	87	2.374	137	2.279	187	2.229	385	2.142		
38	2.643	88	2.371	138	2.278	188	2.228	390	2.141		
39	2.632	89	2.368	139	2.277	189	2.227	395	2.139		
40	2.621	90	2.366	140	2.276	190	2.226	400	2.138		
41	2.611	91	2.363	141	2.274	191	2.226	425	2.133		
42	2.601	92	2.361	142	2.273	192	2.225	450	2.127		
43	2.592	93	2.358	143	2.272	193	2.224	475	2.123		
44	2.583	94	2.356	144	2.271	194	2.223	500	2.118		
45	2.574	95	2.353	145	2.270	195	2.223	525	2.114		
46	2.566	96	2.351	146	2.268	196	2.222	550	2.110		
47	2.558	97	2.349	147	2.267	197	2.221	575	2.107		
48	2.550	98	2.346	148	2.266	198	2.220	600	2.104		
49	2.543	99	2.344	149	2.265	199	2.220	625	2.101		
50	2.535	100	2.342	150	2.264	200	2.219	650	2.098		

表2 JACSの計算誤差評価表(反射体付き単純形状ユニット用)

グループ名	制限値	頻度分布		
		平均値	標準偏差	標本数
均質・U低濃縮	0.965	0.986	0.008	40
均質・U高濃縮	0.954	0.985	0.013	68
均質・Pu	0.980	1.008	0.011	71
均質・MOX	0.980 × 2	1.013	0.008	45
均質・MIX *1	0.980	1.010	0.008	10
非均質・U低濃縮	0.978	0.995	0.007	88
非均質・Pu	0.964	1.004	0.010	9
非均質・MOX	0.980	0.997	0.007	58
計				389

*1 MIX とは、 $UO_2(NO_3)_2 - Pu(NO_3)_4$ 系をいう。

*2 頻度分布に基づいた統計計算のみによると 0.992 である。

表3 JACSの検証計算結果(その1-均質・U低濃縮系)

No.	k_{eff}	σ	備	考
1	0.976	.003	No. 1	
2	0.976	.003	2	
3	0.977	.003	3	
4	0.972	.003	4	
5	0.990	.003	5	
6	0.989	.003	6	JAERI-1303 ¹⁰⁾ , (*)
7	0.995	.003	7	Table 3.A. 8.1
8	0.998	.002	9	UO ₂ F ₂ 水溶液
9	0.989	.003	10	(Al製またはSUS製)
10	0.989	.003	11	
11	0.974	.002	12	
12	0.991	.003	13	
13	0.987	.002	14	
14	0.987	.002	15	
15	0.987	.002	16	
16	0.994	.002	17	
17	0.984	.003	No. 1	
18	0.984	.003	2	
19	0.985	.003	3	
20	0.986	.003	4	
21	0.987	.003	5	
22	0.986	.003	6	
23	0.982	.003	7	JAERI-1303 ¹⁰⁾ , (*)
24	0.978	.003	15	Table 3.A. 9.1
25	0.974	.003	16	UO ₂ F ₂ 水溶液
26	0.975	.003	17	(SUS製円筒容器)
27	0.981	.003	18	
28	0.980	.004	19	
29	0.983	.003	20	
30	0.976	.003	21	
31	0.977	.003	22	
32	0.990	.003	23	
33	0.981	.003	24	
34	1.000	.006	Case 3 1)	
35	0.986	.005	2)	

表 3 (続き)

No.	k_{eff}	σ	備	考
36	1.006	.004	Case 3 1)	JAERI-M 9859 ¹⁵⁾
37	0.987	.005	2)	U ₃ O ₈ パッケージ (Al 製罐入り) 尚, 1) はコンクリート反射体 2) はプラスチック反射体
38	1.000	.004	1)	
39	0.987	.005	2)	
40	0.994	.004	2)	

(*) 文献 10) では 1 世代当りの中性子数を 300 にとっているのに対して, ここでは 1 世代当りの中性子数を 600 にとった。

表4 JACSの検証計算結果(その2-均質・U高濃縮系)

No.	k_{eff}	σ	備	考
1	1.007	.004	No.23	JAERI-M 9025 ¹⁶⁾ UF ₆ シリンダーの配列 (ポリエチレン反射体付き)
2	0.988	.004	24	
3	0.993	.004	25	
4	1.010	.005	26	
5	0.999	.004	No.27	
6	0.996	.004	28	
7	0.991	.004	29	
8	0.987	.004	No.30	
9	0.992	.004	32	
10	0.996	.004	33	
11	1.000	.004	34	
12	0.996	.004	35	
13	0.979	.005	36	
14	0.981	.004	37	
15	0.986	.004	38	
16	0.986	.004	39	
17	1.001	.004	No.41	JAERI-M 9025 ¹⁶⁾ UF ₆ シリンダーの配列 (コンクリート反射体付き)
18	0.993	.004	42	
19	0.995	.004	43	
20	1.006	.004	44	
21	0.997	.004	No.47	
22	0.993	.005	49	
23	0.999	.004	50	
24	0.982	.004	No.56	
25	0.986	.004	57	
26	1.000	.004	58	
27	0.989	.004	59	
28	0.988	.004	61	
29	0.992	.004	62	
30	0.999	.005	No.63	
31	0.991	.004	64	
32	0.996	.005	65	
33	1.000	.004	No.67	
34	1.001	.005	68	
35	1.000	.004	69	

表 4 (続き)

No.	k_{eff}	σ	備 考
36	0.996	.005	No.70]
37	0.969	.006	No.11]
38	0.964	.006	12]
39	0.977	.006	13]
40	0.966	.005	15]
41	0.983	.006	16]
42	0.973	.006	17 JAERI-M 9108 ¹⁷⁾
43	0.975	.006	18 } 硝酸ウラニル水溶液入り単一タンク
44	0.977	.006	19 } (コンクリート反射体付き)
45	0.995	.006	20]
46	0.976	.006	21]
47	0.987	.005	22]
48	0.982	.005	23]
49	0.978	.006	24]
50	0.967	.006	No.25]
51	0.961	.005	26]
52	0.976	.006	28]
53	0.969	.006	29]
54	0.978	.005	30]
55	0.977	.006	31]
56	0.978	.006	32]
57	0.973	.005	33]
58	0.965	.006	34 JAERI-M 9108 ¹⁷⁾
59	0.970	.006	35 } 硝酸ウラニル水溶液入り単一タンク
60	0.984	.005	36 } (プラスチック反射体付き)
61	0.968	.005	37 } 尚, 反射体の位置はまちまちである。
62	0.971	.007	38]
63	0.968	.005	39]
64	0.964	.005	40]
65	0.985	.006	41]
66	0.974	.005	42]
67	0.971	.005	43]
68	0.969	.005	45]

表5 JACSの検証計算結果(その3-均質・Pu系)

No.	k_{eff}	σ	備	考	
1	1.027	.005	No. 1	JAERI-1303 ¹⁰⁾ Table 3.A.4.1 PuO ₂ -ポリスチレンコンパクト (プレキシングラスの反射体付き)	
2	1.020	.005	2		
3	1.028	.005	3		
4	1.022	.005	4		
5	1.020	.006	5		
6	1.019	.005	6		
7	1.020	.005	7		
8	1.008	.005	10		
9	1.004	.005	11		
10	1.004	.004	12		
11	1.004	.005	13		
12	1.005	.004	14		
13	1.016	.004	15		
14	1.018	.004	No. 1		JAERI-1303 ¹⁰⁾ Table 3.A.4.2 PuO ₂ -ポリスチレンコンパクト
15	1.023	.005	2		
16	1.018	.005	3		
17	1.021	.004	4		
18	1.034	.005	No. 1	JAERI-1303 ¹⁰⁾ Table 3.A.4.3 非減速PuO ₂ コンパクト	
19	1.026	.005	2		
20	1.025	.005	3		
21	1.028	.005	4		
22	1.013	.005	5		
23	1.003	.004	No. 1	硝酸プルトニウム溶液	
24	1.014	.004	2		
25	0.999	.004	3		
26	0.996	.004	4		
27	1.001	.004	5		
28	0.998	.004	6		
29	0.995	.004	7		
30	0.995	.003	8		
31	0.995	.003	9		
32	1.001	.005	No. 1 (水反射体)		
33	0.993	.006	2 (")		
34	0.981	.005	3 (")		
35	0.996	.005	4 (")		

表 5 (続き)

No.	k_{eff}	σ	備	考
36	1.000	.004	No. 5 (水反射体)	JAERI-1303 ¹⁰⁾ Table 3.A.11.2 硝酸プルトニウム溶液
37	1.017	.005	6 (")	
38	1.018	.005	7 (")	
39	1.010	.006	8 (コンクリート反射体)	
40	1.021	.005	9 (")	
41	1.001	.005	10 (パラフィン反射体)	
42	1.014	.005	11 (")	
43	0.998	.005	12 (")	
44	1.009	.006	13 (")	
45	1.013	.005	14 (")	
46	1.003	.005	15 (")	
47	0.999	.005	16 (")	
48	1.007	.006	17 (")	
49	1.012	.005	18 (")	
50	0.999	.005	20 (")	
51	0.999	.005	21 (")	
52	1.003	.005	22 (コンクリート反射体)	
53	1.001	.005	23 (")	
54	1.002	.005	24 (")	
55	0.986	.005	25 (")	
56	1.003	.005	26 (")	
57	1.014	.004	27 (")	
58	1.015	.005	28 (")	
59	1.010	.005	29 (")	
60	1.009	.005	32 (")	
61	1.005	.005	33 (")	
62	0.998	.004	34 (水反射体)	
63	0.984	.005	35 (")	
64	0.995	.005	36 (")	
65	0.995	.005	39 (")	
66	0.998	.005	42 (SUS 反射体)	
67	1.003	.004	43 (コンクリート反射体)	
68	1.009	.005	44 (水反射体)	
69	1.013	.004	45 (")	
70	1.013	.005	46 (")	
71	1.005	.005	47 (")	

表6 JACSの検証計算結果(その4-均質・MOX系)

No.	k_{eff}	σ	備考
1	1.025	.005	No. 1 } JAERI-M 9105 ¹⁸⁾ 33 } PuO ₂ -UO ₂ -ポリスチレンコンパクト
2	1.021	.005	
3	1.016	.004	No. 1 } JAERI-1303 ¹⁰⁾ 2 } Table 3.A.3.1 3 } PuO ₂ -UO ₂ -ポリシンコンパクト 4 }
4	1.017	.004	
5	1.019	.005	
6	1.022	.004	
7	1.009	.004	No. 3 } 4 } 5 } 6 } 7 } 8 } 9 } JAERI-1303 ¹⁰⁾ 10 } Tables 3.A.2.1 ~ 3.A.2.3 11 } PuO ₂ -UO ₂ -ポリスチレンコンパクト 12 } 13 } 14 } 15 } 16 } 17 }
8	0.998	.004	
9	1.011	.005	
10	1.002	.004	
11	1.004	.004	
12	1.002	.004	
13	1.002	.004	
14	1.002	.005	
15	1.007	.004	
16	1.007	.004	
17	0.996	.004	No. 1 } 2 } JAERI-1303 ¹⁰⁾ 3 } Tables 3.A.2.4 ~ 3.A.2.6 4 } PuO ₂ -UO ₂ -ポリスチレンコンパクト 5 } 6 } 7 } 8 } 9 } 15 } 16 } 17 } 18 } 19 }
18	1.022	.005	
19	1.020	.005	
20	1.012	.004	
21	1.015	.004	
22	1.004	.005	
23	1.003	.005	
24	1.019	.005	
25	1.008	.005	
26	1.011	.005	
27	1.011	.006	
28	1.013	.005	
29	1.006	.005	
30	1.003	.005	
31	1.015	.006	
32	1.025	.005	
33	1.016	.005	
34	1.019	.005	
35	1.026	.005	

表 6 (続き)

No	k_{eff}	σ	備	考
36	1.012	.005	No. 20	
37	1.020	.005	21	
38	1.021	.004	27	
39	1.016	.005	28	
40	1.010	.004	29	
41	1.015	.004	30	
42	1.007	.005	31	
43	1.025	.004	32	
44	1.018	.005	33	
45	1.016	.004	34	

表 7 JACS の検証計算結果 (その 5 - 均質・MIX系)

No	k_{eff}	σ	備	考
1	1.015	.005	No. 1	硝酸 (U + Pu) 混合溶液
2	1.022	.005	2	
3	1.008	.006	3	
4	1.005	.005	4	
5	1.002	.004	5	
6	1.021	.005	6	
7	1.013	.004	7	
8	1.007	.004	8	
9	0.999	.004	9	
10	1.013	.004	10	

表 8 JACS の検証計算結果 (その 6 - 非均質・U 低濃縮系)

No	k_{eff}	σ	備	考
1	0.990	.004	Case 2, No 1	
2	1.015	.004	2	JAERI-M 9859 ¹⁵⁾
3	1.016	.004	3	UO ₂ 燃料棒の軽水内における
4	0.998	.004	4	最近接貯蔵
5	0.996	.004	5	
6	1.006	.004	6	
7	0.994	.004	7	
8	1.005	.004	8	
9	1.002	.004	9	
10	1.010	.004	10	
11	1.012	.004	11	
12	0.993	.004	12	
13	0.996	.004	13	
14	0.998	.004	14	
15	1.006	.004	15	
16	0.995	.004	16	
17	1.003	.004	17	
18	1.006	.003	18	
19	1.008	.004	19	
20	1.009	.003	20	
21	1.006	.003	21	
22	0.991	.004	Case 10, No 1	
23	0.986	.004	2	JAERI-M 9859 ¹⁵⁾
24	0.994	.004	3	UO ₂ 燃料棒を軽水内で
25	0.980	.003	4	三連クラスター状に配列
26	0.983	.004	5	
27	0.980	.004	6	
28	0.990	.003	7	
29	0.984	.004	8	
30	0.988	.004	9	
31	0.991	.004	10	
32	0.997	.004	11	
33	0.995	.004	12	
34	1.002	.004	13	
35	0.999	.004	14	

表 8 (続 き)

No	k_{eff}	σ	備	考
36	0.994	.004	Case 10, No 15	
37	0.991	.004	16	
38	1.003	.004	17	
39	1.003	.004	18	
40	0.997	.004	19	
41	0.983	.004	20	
42	0.996	.003	(1.50 U, Pattern 18)	
43	1.000	.003	(" , " 20)	JAERI-M 9147 ¹⁹⁾
44	0.999	.003	(" , " 22)	Table 12
45	0.993	.003	(" , " 24)	U(2.6)O ₂ - 軽水の炉心体系
46	0.995	.003	(" , " 26)	
47	0.995	.003	(" , " 28)	
48	0.990	.003	(" , " 29)	
49	0.994	.003	(1.83 U, " 1)	
50	0.991	.003	(" , " 2)	
51	0.992	.003	(" , " 3)	
52	0.986	.003	(" , " 4)	
53	0.992	.003	(" , " 6)	
54	0.997	.003	(" , " 7)	
55	0.998	.003	(" , " 8)	
56	0.991	.003	(" , " 9)	
57	0.993	.003	(" , " 10)	
58	0.985	.003	(" , " 12)	
59	0.991	.003	(" , " 13)	
60	0.992	.003	(" , " 14)	
61	0.994	.003	(" , " 15)	
62	0.993	.003	(" , " 16)	
63	0.991	.003	(" , " 18)	
64	0.996	.003	(" , " 19)	
65	0.993	.004	(" , " 20)	
66	0.993	.003	(" , " 21)	
67	0.999	.003	(" , " 22)	
68	0.993	.003	(" , " 23)	
69	0.993	.003	(" , " 24)	
70	0.990	.003	(" , " 25)	

表 8 (続き)

No.	k_{eff}	σ	備	考
71	0.991	.003	(2.48 U, Pattern 11)	
72	0.991	.003	(" , " 13)	
73	0.992	.003	(" , " 15)	
74	0.992	.003	(" , " 18)	
75	0.989	.003	(" , " 20)	
76	0.993	.003	(3.00 U, " 5)	
77	0.989	.003	(" , " 11)	
78	0.990	.003	(" , " 13)	
79	0.988	.003	(" , " 15)	
80	0.990	.003	(" , " 17)	
81	0.990	.003	(" , " 18)	
82	0.994	.004	(1.50 U, Pattern 104)	JAERI-M 9147 ¹⁹⁾ Table 14
83	0.998	.004	(" , " 108)	
84	0.996	.004	(" , " 111)	U(2.6) O ₂ -軽水の炉心体系 (水ギャップあり)
85	0.999	.004	(" , " 112)	
86	0.994	.004	(3.00 U, " 101)	
87	0.994	.004	(" , " 105)	
88	0.998	.004	(" , " 109)	

表 9 JACS の検証計算結果 (その 7 - 非均質・Pu 系)

No.	k_{eff}	σ	備	考
1	0.999	.004	No 16	
2	0.985	.004	17	JAERI-M 9079 ²⁰⁾ Al-Pu 合金燃料棒を軽水プール内で三角格子 状に配列
3	1.005	.004	18	
4	1.010	.004	19	
5	1.011	.003	20	
6	1.022	.003	21	
7	0.998	.005	22	
8	1.000	.004	23	
9	1.004	.005	24	

表10 JACS の検証計算結果 (その8 - 非均質・MOX系)

No	k_{eff}	σ	備	考
1	1.001	.003	(2.42 PU, Pattern 24)	
2	0.994	.003	(" , " 25)	JAERI-M 9147 ¹⁹⁾
3	1.000	.003	(" , " 26)	Table 13
4	0.994	.003	(" , " 26)	PuO ₂ -U(natural)O ₂ -軽水の炉心体系
5	0.995	.003	(" , " 26)	
6	0.996	.003	(" , " 26)	
7	0.996	.003	(" , " 27)	
8	0.994	.003	(" , " 28)	
9	0.998	.003	(" , " 28)	
10	0.996	.003	(" , " 28)	
11	0.997	.003	(2.98 PU, " 21)	
12	0.997	.003	(" , " 22)	
13	0.996	.003	(" , " 22)	
14	0.998	.003	(" , " 22)	
15	1.006	.003	(" , " 22)	
16	0.999	.003	(" , " 23)	
17	1.001	.003	(" , " 23)	
18	0.999	.003	(" , " 23)	
19	0.995	.003	(" , " 23)	
20	0.995	.003	(" , " 24)	
21	0.995	.003	(" , " 25)	
22	0.997	.003	(" , " 26)	
23	0.993	.003	(" , " 27)	
24	0.996	.003	(" , " 28)	
25	1.002	.003	(" , " 28)	
26	0.993	.003	(4.24 PU, " 19)	
27	0.992	.003	(" , " 20)	
28	0.996	.003	(" , " 20)	
29	0.985	.003	(" , " 20)	
30	1.000	.003	(" , " 20)	
31	0.991	.003	(" , " 21)	
32	0.991	.003	(" , " 22)	
33	0.995	.003	(" , " 22)	
34	1.001	.003	(" , " 22)	
35	0.999	.003	(" , " 22)	

表10 (続き)

No	k_{eff}	σ	備	考
36	0.999	.003	(4.24 PU, Pattern 23)	
37	0.993	.003	(" , " 24)	
38	0.993	.003	(" , " 26)	
39	0.991	.003	(" , " 28)	
40	0.994	.003	(" , " 28)	
41	0.992	.003	(5.55 PU, " 21)	
42	0.997	.003	(" , " 22)	
43	1.000	.003	(" , " 22)	
44	0.985	.003	(" , " 23)	
45	0.990	.003	(" , " 23)	
46	0.990	.002	(" , " 24)	
47	0.996	.003	(" , " 25)	
48	0.992	.003	(" , " 26)	
49	1.010	.004	Case 6, No 3R JAERI-M 9859 ¹⁵⁾	軽水内の UO ₂ -PuO ₂
50	0.995	.005	No 27	燃料棒
51	0.991	.004	28	
52	1.026	.004	29	JAERI-M 9079 ²⁰⁾
53	0.994	.005	36	UO ₂ -PuO ₂ -軽水
54	1.004	.004	37	(Zr 被覆管, 三角格子配列)
55	1.006	.004	38	
56	1.010	.005	39	
57	1.006	.005	40	
58	1.011	.004	41	

表11 均質・U高濃縮系グループのサブグループに関する標本値の統計分布

サブグループ名	標本数	平均	標準偏差	制限値
六弗化ウラン系	36	0.994	0.007	0.975
硝酸ウラニル水溶液系	32	0.974	0.008	0.953
均質・U高濃縮系全体	68	0.985	0.013	0.954

表12 均質・P_u系グループのサブグループに関する標本値の統計分布

サブグループ名	標本数	平均	標準偏差	制限値
P _u O ₂ コンパクト系	22	1.018	0.009	0.980 *1
硝酸プルトニウム溶液系	49	1.003	0.009	0.980 *2
均質・P _u 系全体	71	1.008	0.011	0.980

*1 統計計算によると0.993である。

*2 " 0.981 " 。

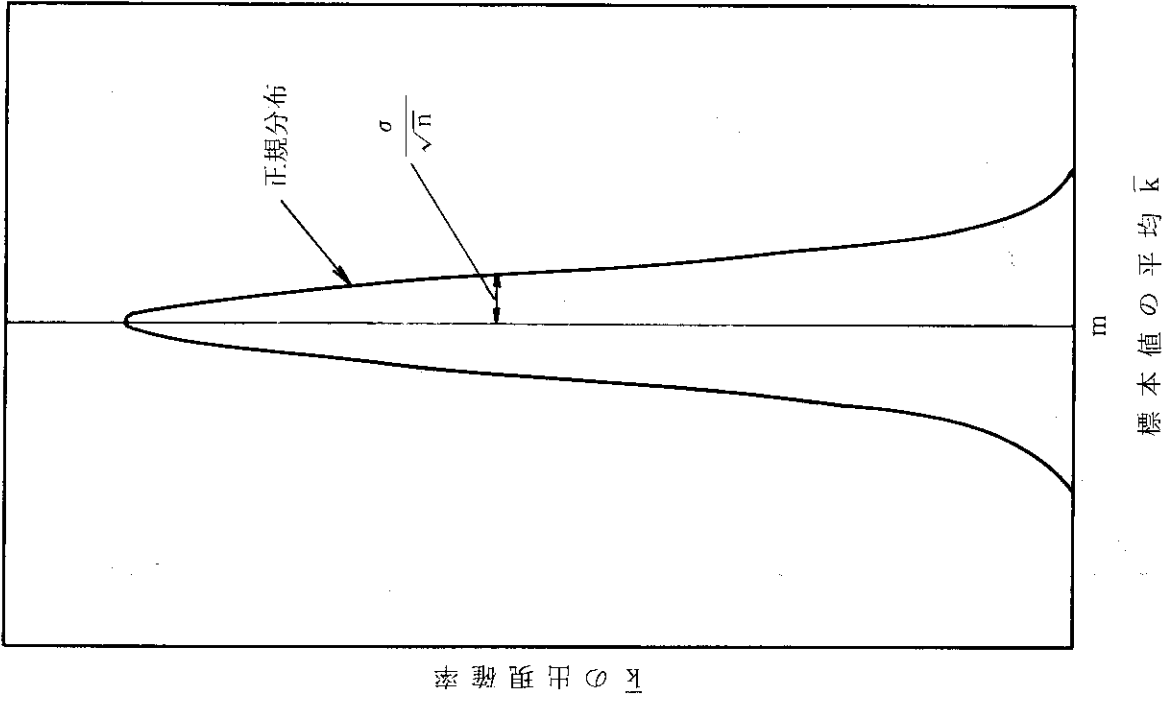


図2 標本値の平均 \bar{k} の従う確率分布

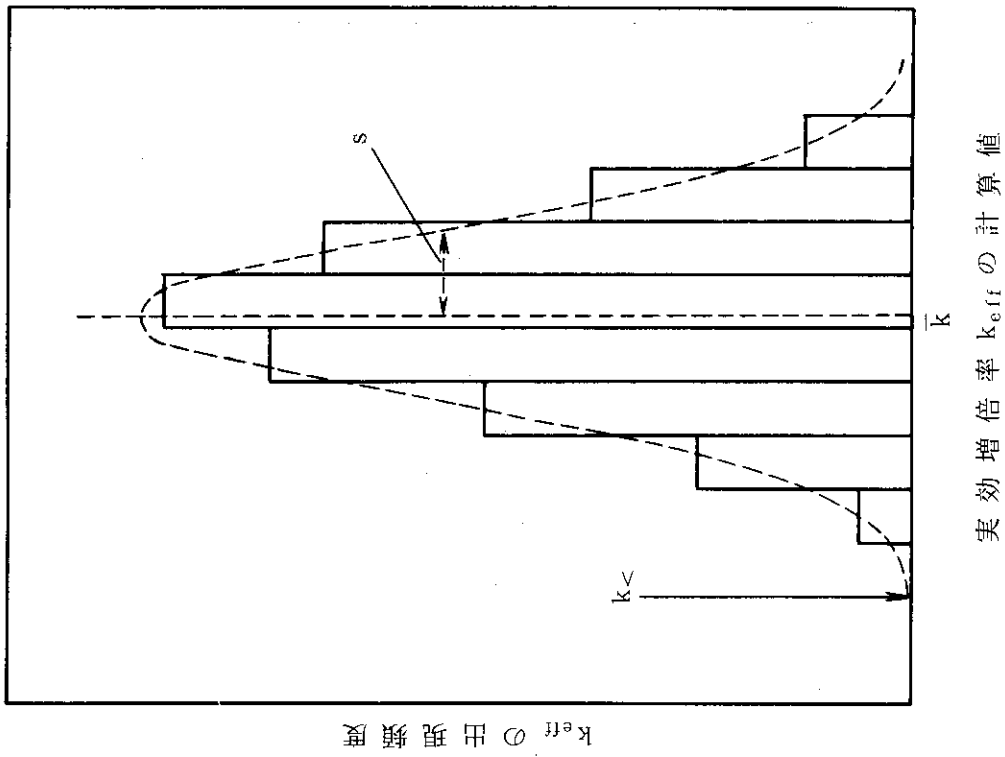


図1 さまざまな臨界体系を計算コードシステムで解析して得られる実効増倍率 k_{eff} の頻度分布と制限実効増倍率 $k_{<}$ の模式図 (\bar{k} は頻度分布の平均値, s は標準偏差)

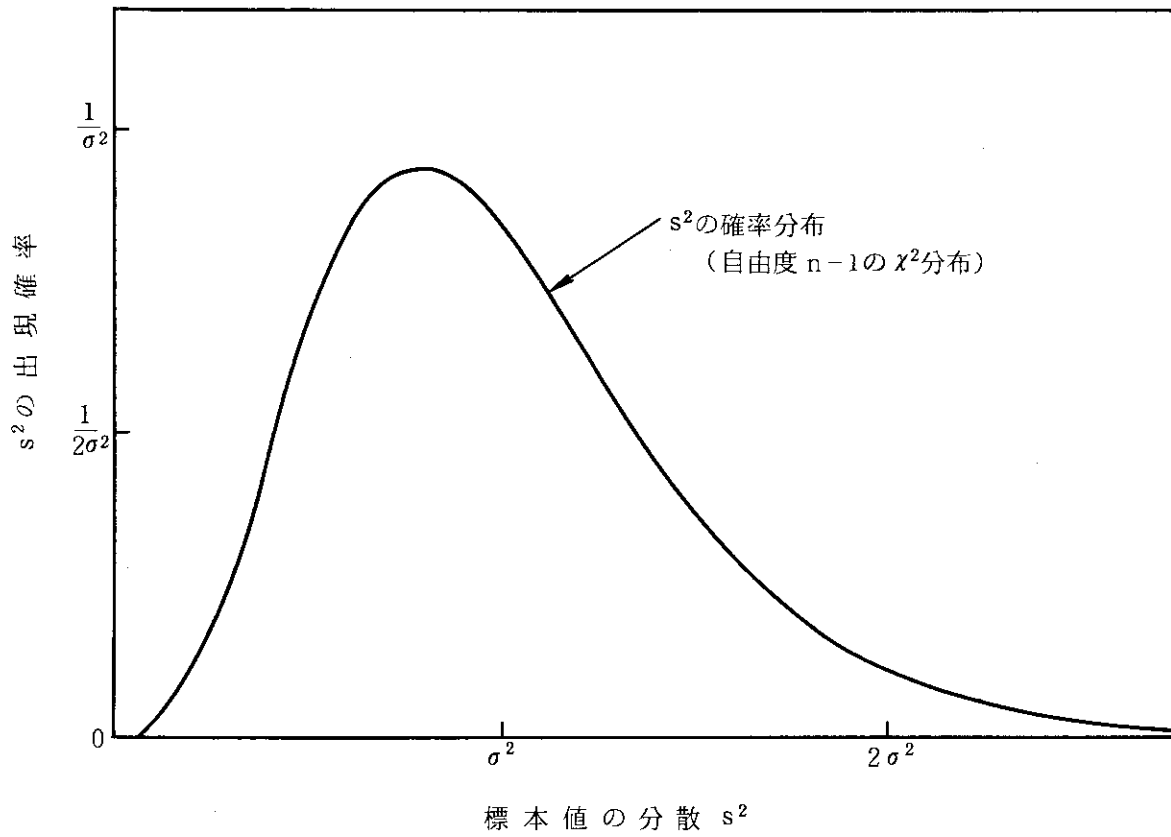


図3 標本値の分散 S^2 の従う確率分布

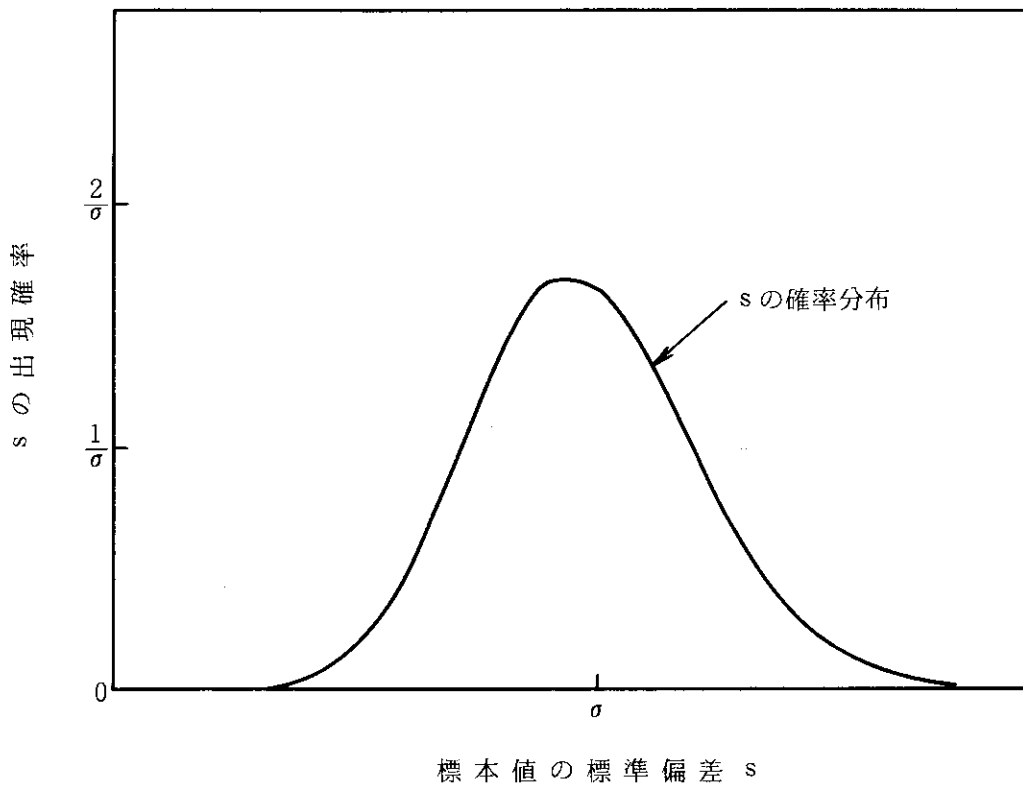


図4 標本値の標準偏差 s の従う確率分布

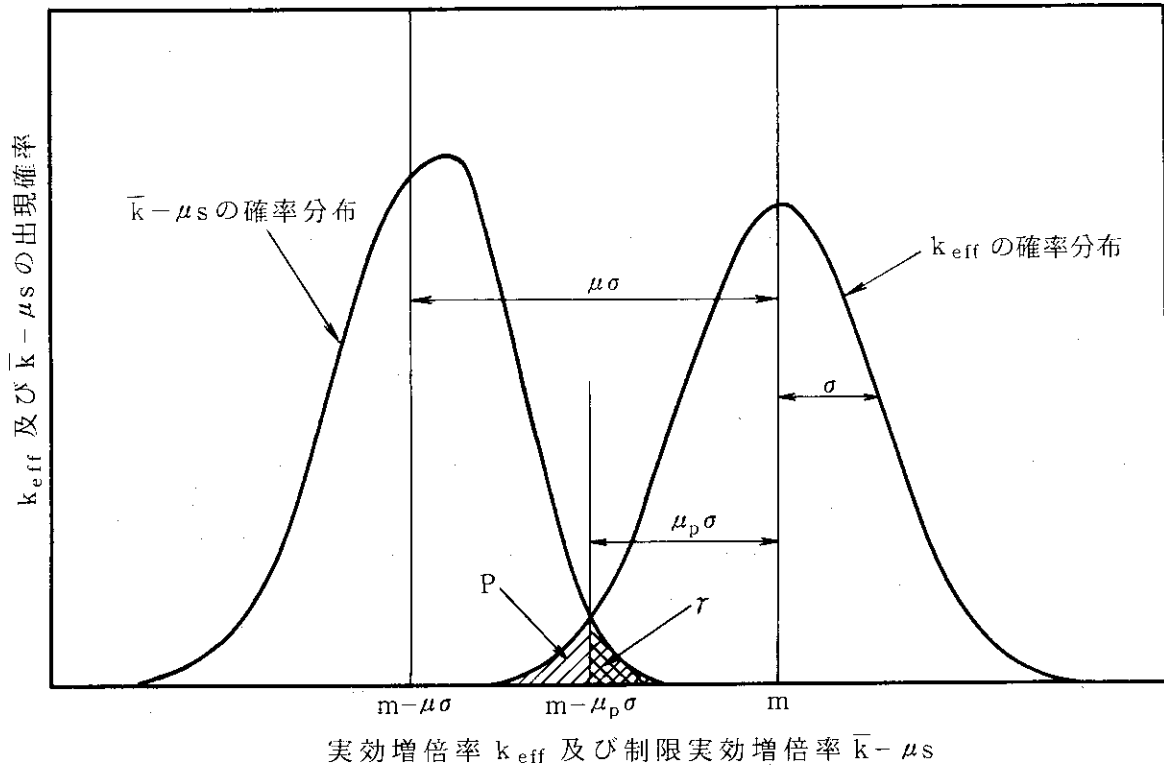


図5 実効増倍率 k_{eff} 及び制限実効増倍率 $\bar{k} - \mu_s$ の従う確率分布

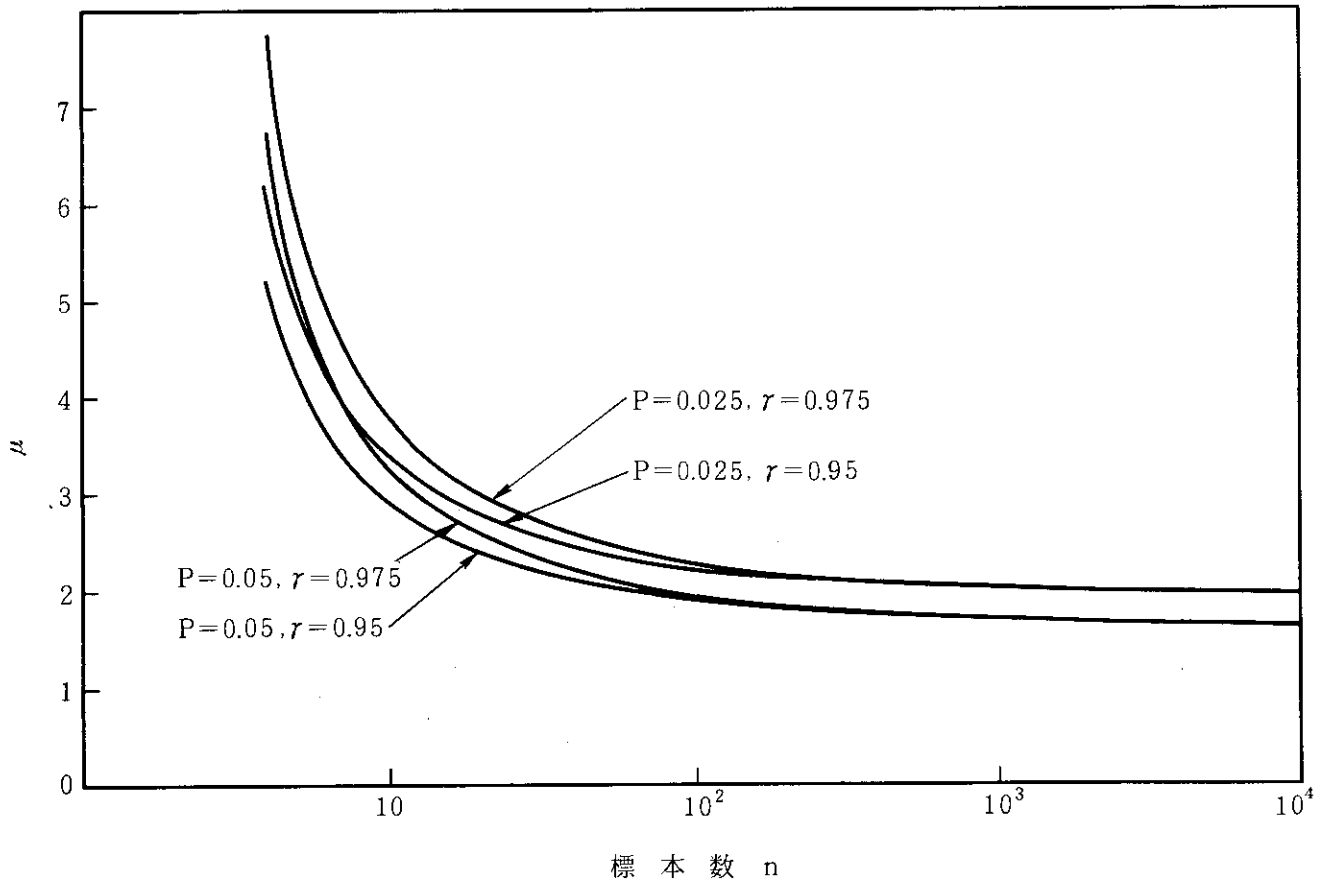


図6 標本数 n の増大に伴う μ の値の変化 ($P=2.5\%, 5\%$; $\gamma=97.5\%, 95\%$)

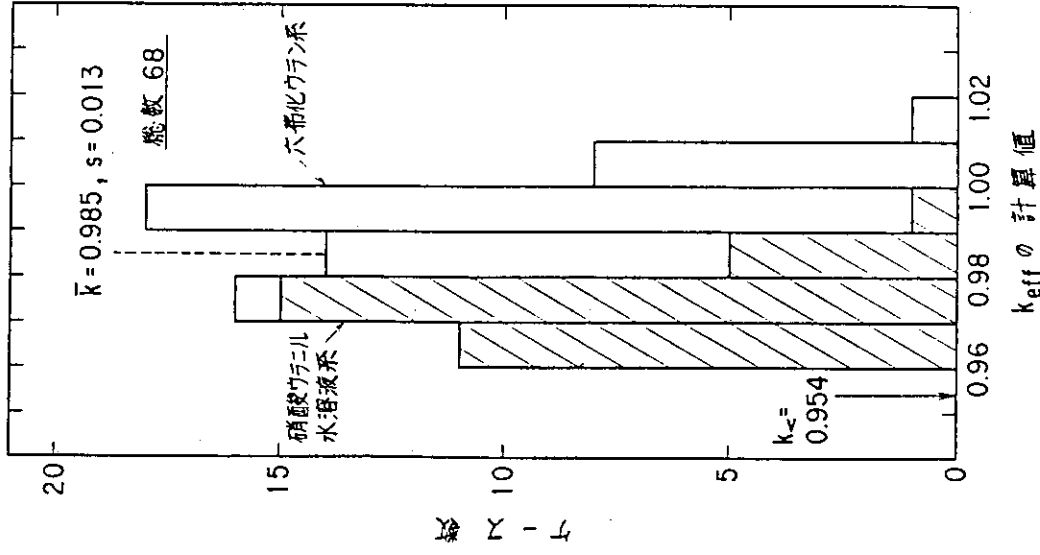


図8 臨界実験体系に対するJACSの検証計算結果頻度分布
(その2 - 均質・U高濃縮系)

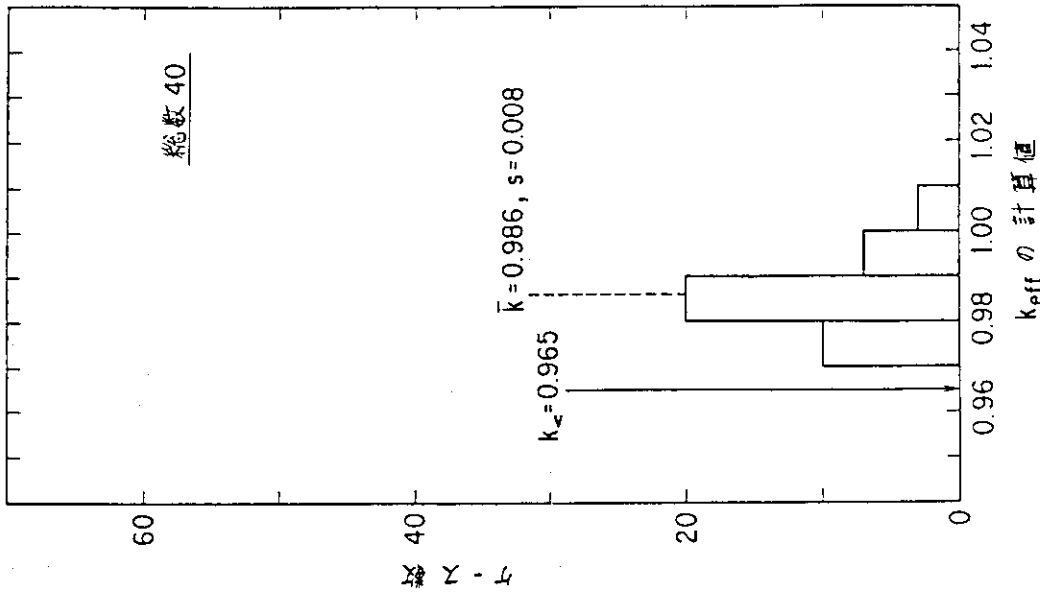


図7 臨界実験体系に対するJACSの検証計算結果頻度分布
(その1 - 均質・U低濃縮系)

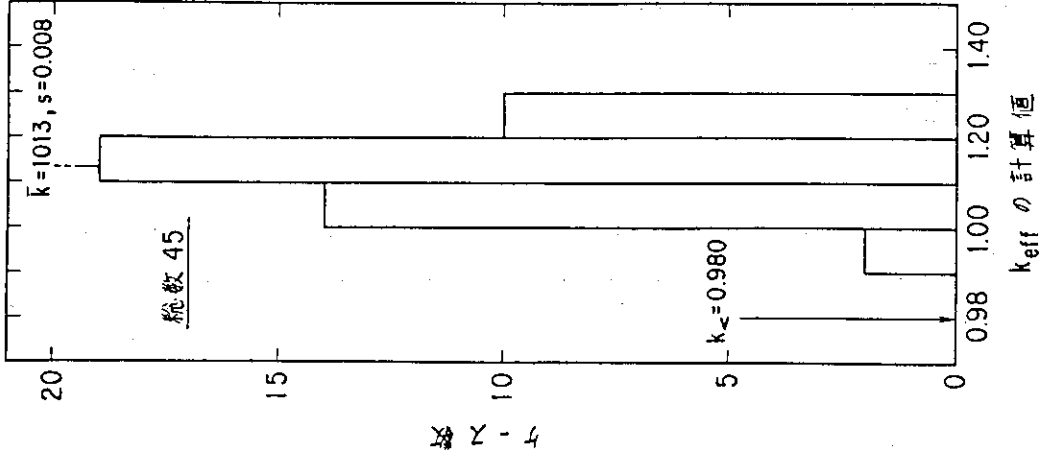


図9 臨界実験体系に対するJACSの検証計算結果頻度分布
(その3 - 均質・Pu系)

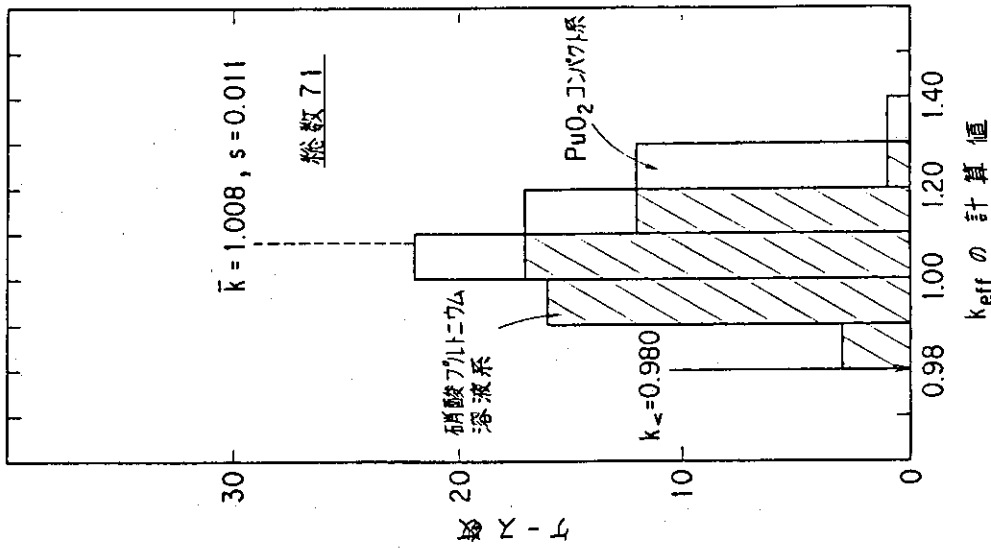


図10 臨界実験体系に対するJACSの検証計算結果頻度分布
(その4 - 均質・MOX系)

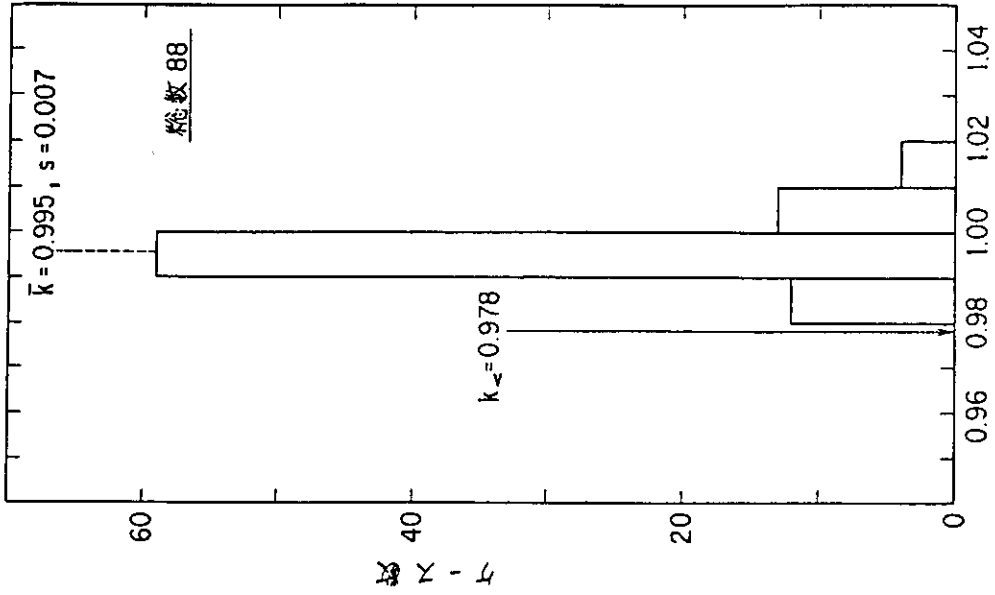


図12 臨界実験体系に対するJACSの検証計算結果頻度分布
(その6 - 非均質・U低濃縮系)

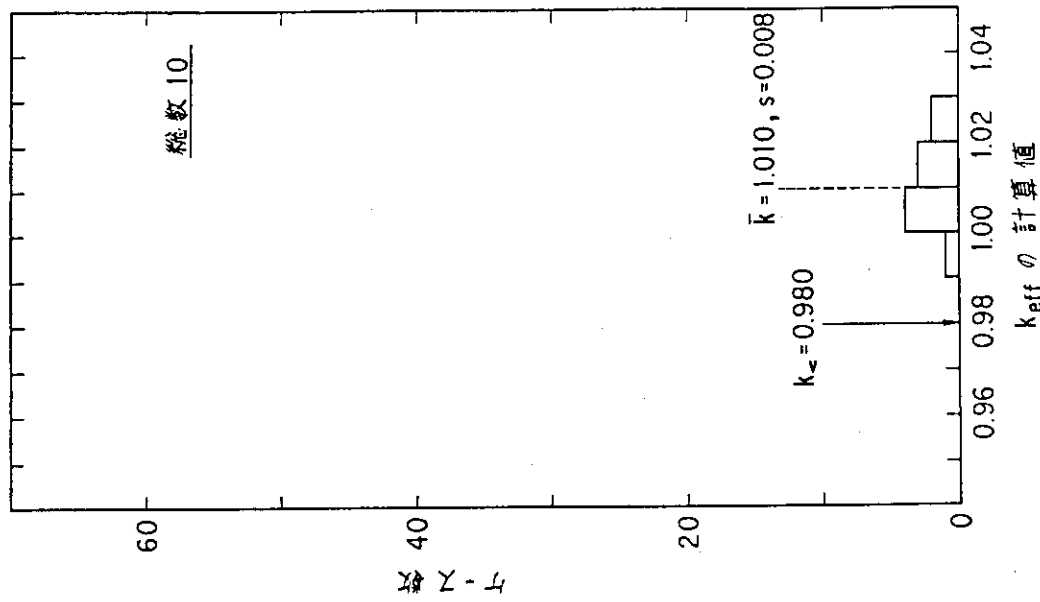


図11 臨界実験体系に対するJACSの検証計算結果頻度分布
(その5 - 均質・MIX系)

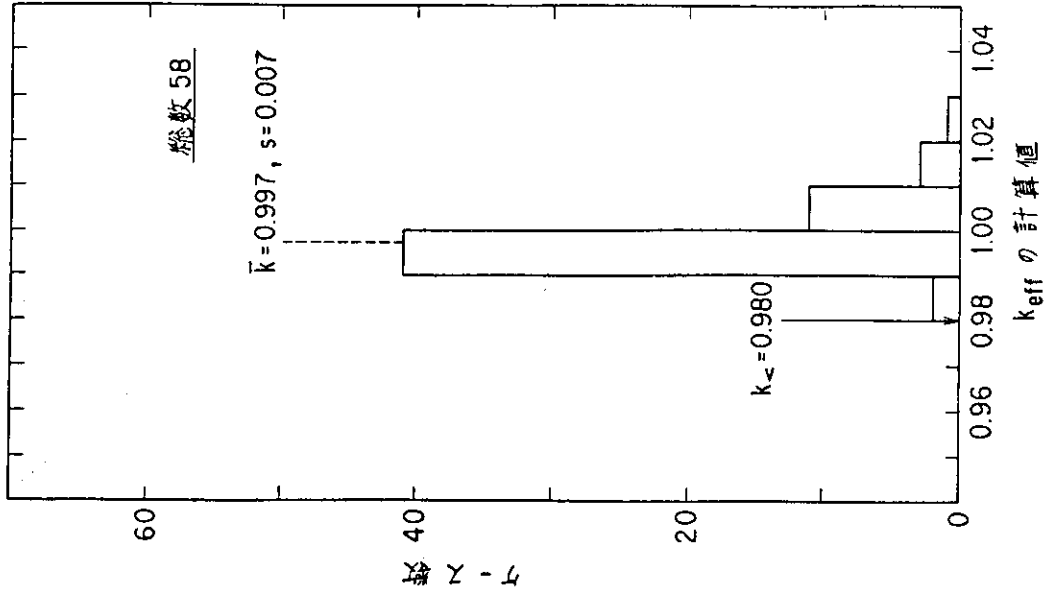


図13 臨界実験体系に対する JACS の検証計算結果頻度分布
(その7-非均質・Pu系)

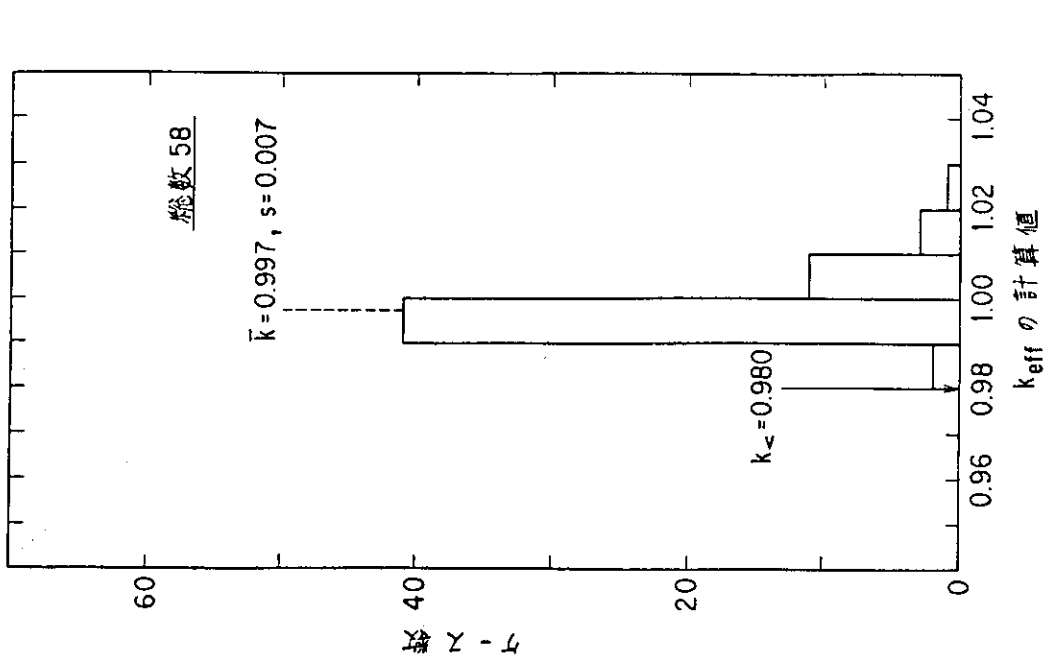


図14 臨界実験体系に対する JACS の検証計算結果頻度分布
(その8-非均質・MOX系)