

JAERI-M

8847

高温ガス実験炉の反応度余裕の  
確率論的評価方法

1980年5月

金子 義彦

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

高温ガス実験炉の反応度余裕の確率論的評価方法

日本原子力研究所 東海研究所 原子炉工学部  
金子 義彦

(1980年4月9日受理)

反応度余裕に関する安全基準が満足される可能性を設計誤差を考慮して、原子炉の設計段階において定量的に評価するための確率論的手法を提案した。この手法の適用の一例として高温ガス実験炉のいくつかの設計研究炉心について、停止余裕及び運転余裕に関する安全基準が満足される確率と設計値の標準偏差の関係を調査した。MARK-III炉心について、以上の安全基準が、標準偏差の3倍の限界に相当する99.7%以上の確率で満足されるためには、相互の相関を無視した場合、コールドクリーンの炉心の実効増倍率の標準偏差は設計値の0.79%以下であること及び制御棒、可燃性毒物、Xe、Smの毒作用もしくは炉心温度上昇についての反応度値の標準偏差はそれぞれの設計値の5.3%以下であることが必要になることが結論された。また、相互の相関を考慮すると、以上の標準偏差はさらに小さい値になることが必要になる。

JAERI-M 8847

Probabilistic Method for Evaluation of Reactivity Margin of  
Experimental Very High Temperature Reactor

Yoshihiko KANEKO

Division of Reactor Engineering, Tokai Research Establishment, JAERI

(Received April 9, 1980)

A probabilistic method is proposed to evaluate in the core design stage the possibility that the safety criteria in reactivity margin are satisfied, taking into consideration the uncertainties in design calculation. In application of the method to design study cores of Experimental Very High Temperature Reactor, investigations are made for the relation between the design accuracy and the probability that the safety criteria in both shut-down and operation margins are satisfied. In conclusion, for the MARK-III core, with the correlation disregarded, the ratio of the standard deviations to the design values must be less than 0.79 and 5.3 % respectively for the cold clean effective multiplication factor and the reactivity worths of control rods, burnable poisons and core temperature rise, in order that the probability is larger than 99.7 % (three times the sigma limit). With the correlation regarded, the ratios must be considerably smaller.

Keywords: Reactivity Margin, Safety Criteria, Nuclear Reactor, Control Rod, Burnable Poison, Temperature, Xenon Poisoning, Samarium Poisoning, Probabilistic Method

目 次

1. 序 論 .....	1
2. 理 論 .....	2
3. 高温ガス実験炉の反応度余裕の評価 .....	4
3.1 炉心核設計の特徴 .....	4
3.2 変数ベクトルと確率分布 .....	4
3.3 状態ベクトル .....	7
3.4 計算の方法 .....	8
3.5 計算の条件 .....	9
3.6 計算結果 .....	10
4. 結 論 .....	11

Contents

1. Introduction .....	1
2. Theory .....	2
3. Evaluation of reactivity margin of Experimental Very High Temperature Reactor .....	4
3.1 Characteristic feature of core nuclear design .....	4
3.2 Variable vector and probability distribution .....	4
3.3 State vector .....	7
3.4 Method of calculation .....	8
3.5 Condition of calculation .....	9
3.6 Results of calculation .....	10
4. Conclusion .....	11

## 1. 序 論

原子炉はハードの面では、炉心、計測制御系、冷却系、放射線遮蔽、安全保護系、格納容器系などから構成される。これらのハードの構成の内容によって所期の核的及び熱的特性が実現されることになる。一方、原子炉の安全性を確保するために、核的及び熱的特性についての主要な物理量に関して基準が定められている。設計者は、設計値が基準を満足する範囲内で原子炉の設計を行うことを法的にも義務づけられている。ところで、設計値には誤差が含まれているので、真の値が基準を満足するように、余裕をとることがなされている。つまり、余裕が誤差より大きいことが要求される。真の値は原子炉が実際に構成されれば、もちろん、一つの固有なものとして定まるものであり、特性試験によって実測されるものも少くない。しかしながら、設計段階では設計者にはわからないので、真の値は、設計値の周辺に確率分布しているととらえるのが妥当である。その理由は、基礎定数や設計計算手法に誤差があるのに加えて、材料の組成、物理特性及び加工精度にも不確定さがつきまとうからである。真の値が基準を満足することに重点を置き、設計値に過大の誤差を見込んで、あまり保守的に設計を進めると、安全性は確保されても、原子炉の所期の性能を著しく低下させてしまう場合が少くない。したがって、設計された原子炉がどの程度の確かさで安全を保証する基準を満足しているか、定量的に判定することが重要な意味をもって来る。そこで、本論文では、安全性を保持しつつ、高い性能の原子炉の設計を可能にすることを意図して確率論の導入によって、真の値が安全性を保証する基準を満足する割合を確率という形で数値的に表現する手法を提案した。

従来、確率論的に設計の信頼性を評価する手法は、熱設計については ATR などについてある程度試みられているが、核設計の領域にまで拡張したのが今回の仕事である。<sup>(1)</sup>

この論文で提示した手法の適用例として、核的特性のなかでも反応度余裕に関する基準を満す確率を、高温ガス実験炉について計算した。

原子炉の安全保護系について定められている基準としては、最も重要なものとして、ワンロードスタックマージンがある。

基準 1 (停止余裕) : 制御棒の一部がスタックした場合でも、炉を臨界未満にしうること\*

が必要である。

一方、当然のことであるが、運転期間中においては、原子炉としての機能を発揮するために

基準 2 (運転余裕) : 出力温度においては、Xe, Smの毒作用を受けても臨界超過にしうること\*\*

\* 単に臨界未満というだけでなく、実効増倍係数、 $k_{eff}$  が 0.99 以下という基準が適用される場合もある。

\*\* 正確にいうと、過剰反応度が設置許可申請書に記載した値以下であるということになるが、ここでは、簡単のためにこのような条件とした。

が要請される。

本章につづいて、第2章では、確率論の導入に関する定式化を行ったが、反応度余裕にとどまらず、ある程度一般的な問題に対処しうることを念頭においた。第3章では、高温ガス実験炉を解析対象として選び、原研で進めている設計研究で得られた二つの炉心について、以上のこの基準を満足する確率の評価に適用し得ることを示した。最後に、第4章では、確率論の適用にさいして注意すべき点と今後の展望についてのべた。

## 2. 理 論

確率的に変化する変数ベクトル

$$\vec{X} = (X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_{imax})$$

が、あるベクトル値

$$\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_{imax})$$

をとる確率分布を

$$P(\vec{x}) = P(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_{imax}) \text{ とする。}$$

$\vec{X}$  の要素  $X_i$  が相互に独立に変化する場合  $X_i$  が  $x_i$  という値をとる確率を  $P_i(x_i)$  とすれば、

$$P(\vec{x}) = \prod_{i=1}^{imax} P_i(x_i) \quad (1)$$

一方、 $\vec{X}$  の要素  $X_i$  が相関をもって変化する場合

$$P(\vec{x}) = \left[ \prod_{i=1}^{imax} P_i(x_i) \right] \cdot C(\vec{x}) \quad (2)$$

とかける。

ここに、

$C(\vec{x})$  は相関の度合を示す関数であって

$$C(\vec{x}) = \frac{P(\vec{x})}{\prod_{i=1}^{imax} P_i(x_i)} \quad (3)$$

になるように、定められることが必要である。

また、相関の有無にかかわらず、 $x$  の全変域を積分領域として、

$$\int_{-\infty}^{+\infty} P(\vec{x}) d\vec{x} \equiv \int_{-\infty}^{+\infty} P(\vec{x}) dx_1 dx_2 \dots dx_i \dots dx_{imax} \quad (4)$$

= 1 になっている。

$\vec{x}$  が決定すると、原子炉の特性を示す状態ベクトル

$$\vec{S} (S_1(\vec{x}), S_2(\vec{x}), \dots, S_j(\vec{x}), \dots, S_{jmax}(\vec{x}))$$

が解析ないし数値モデルにより一意的に決定される。

状態ベクトル $\vec{S}$ の要素 $S_j$ はいうまでもなく $\vec{x}$ の関数であって、

$$S_j(\vec{x}) = S_j(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_{i_{\max}}) \quad (5)$$

である。

状態関数ベクトル $\vec{S}$ の期待値 $\bar{S}$ は、 $S_j$ の規待値を要素とするベクトルで定義されて

$$\bar{S} = (\bar{S}_1, \bar{S}_2, \dots, \bar{S}_j, \dots, \bar{S}_{j_{\max}})$$

となり、 $\bar{S}_j$ は $S_j(\vec{x})$ の $P(\vec{x})$ についての平均

$$\bar{S}_j = \int_{-\infty}^{+\infty} S_j(\vec{x}) P(\vec{x}) d\vec{x} \quad (6)$$

により与えられる。

原子炉設計においては、状態関数ベクトルが核的、熱的特性に関して、安全上定められた基準を満足しなければならない。そのためには、 $\vec{S}$ の要素 $S_j(\vec{x})$ が、基準を満足する領域 $S_j^+$ に入っていることが必要である。

つまり、

$$S_j(\vec{x}) \in S_j^+ : \text{基準 } j \text{ を満足する} \quad (7)$$

$$S_j(\vec{x}) \notin S_j^+ : \text{基準 } j \text{ を満足しない}$$

直列形システムとして安全であるためには、 $S_j(x)$ の全てが基準を満足しなければならない。原子炉システムとして、安全である確率 $P$ は

$$P = \int_{\vec{S} \in S^+} P(\vec{x}) d\vec{x} \quad (8)$$

ここに、積分領域としては、 $S_j^+$ つまり、 $S_j$ について基準を満足する領域に限定している。

以上の議論から、安全でない確率 $P'$ は

$$P' = 1 - P \quad (9)$$

で与えられることになる。

一方、並列形システムとして安全であるためには $S_j(\vec{x})$ のいずれかが基準を満足しなければならない。

状態ベクトル $S_j(\vec{x})$ について基準を満足しない確率 $P'_j$ は

$$P'_j = \int_{S_j(x) \notin S_j^+} P_j(\vec{x}) d\vec{x} \quad (10)$$



原子炉システムとして、安全である確率はPは

$$P = 1 - \prod_{j=1}^{j_{\max}} P'_j \quad (11)$$

### 3. 高温ガス実験炉の反応度余裕の評価

#### 3.1 炉心核設計の特徴

高温ガス実験炉は、平均4 w/o 濃縮Uを用い約2年間燃料交換することなしに熱出力50MWで運転されることを目標に、日本原子力研究所を中心に研究開発が進められている<sup>(2)</sup>。この炉の特徴とされる性能は、1000°Cの冷却材He ガスが得られることである。被覆粒子U燃料の最高温度が約1350°C(公称値)以下という制約条件の下でこの性能を実現するため、核燃設計においては次のような基本構造を採用した。

(1) 炉心は縦長の円柱形状とし、冷却材流路を長くすることをはかる。

(2) 冷却材の入口である炉頂部に向って、U濃縮度を段階的に高めることにより、出力分布を炉頂部寄りに高めて冷却材の温度上昇を促進する。

核設計に関して、以上の基本構造と低濃縮Uを使用することから、いくつかの重要な課題が提起されているが、反応度余裕については、

(1) 初期炉心の余剰反応度が必然的に大きくなり、可燃性毒物の大量使用が必要になる。約2年間にわたる炉の反応度の変動範囲を把握するためには、可燃性毒物の反応度値を極めて正確に評価しなければならないこと及び

(2) 炉心に挿入できる制御棒が少くなり、その全反応度値が小さくなる。そのため、制御棒の反応度値の予測精度を高めて、特に初期炉心においてワンロードスタックマージンを確認しておく必要があること。

が要請されている。

反応度余裕の評価を行ったのは、第一次概念設計炉心(MARK III)とその改良炉心(選定炉心A)であるが、以後、第一炉心及び第二炉心ということにする\*。

#### 3.2 変数ベクトルと確率分布

変数ベクトル $\vec{X}$ の成分を次のように定める。

$X_1$  : 初期炉心の常温における実効増倍率

$X_2$  : 一部がスタック状態の制御棒の全反応度値

$X_3$  : 可燃性毒物の反応度値

\* JAERI-M 8399 多目的高温ガス実験炉, MARK III炉心の検討, 安野ほか P208, 第1次概念設計炉心(MARK III), 選定炉心A

$X_4$  : Xe及びSmの毒作用の反応度値

$X_5$  : 炉心の温度上昇に関する反応度値

以上の変数ベクトル  $X$  の核設計計算値  $\vec{x}_c (x_{1c}, x_{2c}, \dots, x_{ic}, \dots, x_{imaxc})$  は,  $X$  の期待値  $\bar{x} (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_i, \dots, \bar{x}_{imax})$  に相当すると理解することができる。

真の値  $x$  の確率分布を 2. の確率論の手法により求めることにする。直の値  $\vec{x}$  は, 設計値  $\vec{x}_c$  の周りに, 正規分布をしていると仮定する。

つまり,  $x_i$  の  $x_{ic}$  の周りの分散を  $\sigma_i$  として,

$$P_i(x_i) dx_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-\frac{1}{2\sigma_i^2}(x_i - x_{ic})^2} dx_i \quad (12)$$

$$P(\vec{x}) = \prod_{i=1}^{imax} P_i(x_i) \cdot C(\vec{x})$$

$P(\vec{x})$  を把握するための確実な方法は, 原子炉の炉心を模擬した炉心を臨界実験装置に構成して,  $\vec{x}$  を測定して, 測定値を得, 計算値と比較することである。一方, 測定値には測定誤差があるので,  $P(\vec{x})$  の決定には, 慎重であらねばならない。

一つのある程度確かな  $P(\vec{x})$  の決定方法としては, 次のようなものが考えられる。

次の量はすべて臨界実験にかかわるものとして,

$x_i$  = 真の値

$x_{ic}$  = 計算値

$\sigma_{ic}$  =  $x_i$  の  $x_{ic}$  の周りの確率分布  $P'(x_i)$  の標準偏差

$x_{im}$  = 測定値

$\sigma_{im}$  =  $x_{im}$  の  $x_i$  の周りの確率分布  $P''(x_{im})$  の標準偏差

つまり,

$$P'(x_i) dx_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{ic}} e^{-\frac{1}{2\sigma_{ic}^2}(x_i - x_{ic})^2} dx_i \quad (13)$$

$$P''(x_{im}) dx_{im} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{im}} e^{-\frac{1}{2\sigma_{im}^2}(x_{im} - x_i)^2} dx_{im} \quad (14)$$

すると, 測定値が  $x_{im}$  であり, 真の値が  $x_i$  である確率分布は

$$\begin{aligned} & P'(x_i) dx_i \times P''(x_{im}) dx_{im} \\ &= \frac{1}{2\pi\sigma_{ic}\sigma_{im}} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{1}{\sigma_{ic}^2}(x_i - x_{ic})^2 + \frac{(x_{im} - x_i)^2}{\sigma_{im}^2}\right]} dx_i dx_{im} \end{aligned} \quad (15)$$

したがって,  $x_{im}$  の  $x_{ic}$  の周りの確率分布の分散  $\sigma_{m-c}^2$  は

$$\begin{aligned} & \sigma_{m-c}^2 = \\ & \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x_{im} - x_{ic})^2 P'(x_i) P''(x_{im}) dx_i dx_{im} \end{aligned}$$

$$= \sigma_{ic}^2 + \sigma_{im}^2 \quad (16)$$

ここで、 $\sigma_{m-c}^2$  は、実験と計算の比較から評価しうる量であって、\*平方誤差の自乗で与えられる。また、 $\sigma_{im}^2$  は測定誤差にもとづくものであるが、誤差をもたらす原因が解明されていて、定量的に把握されている成分  $\sigma_{im1}^2$  と誤差をもたらす原因が解明されて居らず定量的な把握が困難である成分  $\sigma_{im2}^2$  の和で与えられると考えることができる。

$$\sigma_{im}^2 = \sigma_{im1}^2 + \sigma_{im2}^2 \quad (17)$$

(15)式より、得られる

$$\sigma_{ic}^2 = \sigma_{m-c}^2 - \sigma_{im}^2 \quad (18)$$

という関係より  $\sigma_{ic}^2$  を評価すると、 $\sigma_{im2}^2$  の成分まで除去してしまい、 $\sigma_{ic}^2$  を過小評価する。やや、保守的であるが、実効的な  $\sigma_{iceff}^2$  として、

$$\sigma_{iceff}^2 = \sigma_{ic}^2 + \sigma_{im2}^2 = \sigma_{m-c}^2 - \sigma_{im1}^2 \quad (19)$$

により、 $x_i$  と  $x_{ic}$  の間の標準偏差を評価する方式の方が妥当であると判断される。つまり、

$$\sigma_i^2 = \sigma_{iceff}^2$$

次に、臨界実験の模擬炉心と実験炉の炉心の相異を考慮する必要があるので、以上で定めた  $\sigma_{iceff}^2$  より若干大きな値にしなければならない。その程度は、炉心間の相異の程度によってきまって来るが、これを  $d$  という因子で表現して、

$$\sigma_i^2 = d \sigma_{iceff}^2 \quad (20)$$

再び議論をもとにもどして、

$$P_i(x_i) dx_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-\frac{1}{2\sigma_i^2}(x_i - x_{ic})^2} dx_i \quad (21)$$

とする。

$P(\vec{x})$  は以上で定めた  $P_i(x_i)$  より (2) 式によって決定する。

すなわち

$$P(\vec{x}) = \left[ \prod_{i=1}^{imax} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \right] e^{-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{imax} \left( \frac{x_i - x_{ic}}{\sigma_i} \right)^2} \cdot C(\vec{x}) \quad (22)$$

\* 平方誤差

誤差の自乗平均を平方誤差という。これを  $\mu^2$  で表わすと、

$$\mu^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 x^2} x^2 dx = \frac{1}{2h^2}$$

$$\frac{1}{2\sigma^2} = h^2 \quad \text{であるから}$$

$$\mu^2 = \sigma^2$$

つまり、誤差の自乗平均は標準偏差に等しい。

X の相互相関を示す関数  $C(\vec{x})$  として

(1) 相関がない場合の

$$C(\vec{x}) \equiv 1, \tag{23}$$

のほかに,

(2)  $X_2, X_3$  及び  $X_4$  に相関がある場合

(i)  $(x_2 - x_{2c}), (x_3 - x_{3c}), (x_4 - x_{4c})$  の全ての符号が一致した場合

$$C(\vec{x}) = 4 \tag{24}$$

$$\left( \because \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} P_2(x_2) P_3(x_3) P_4(x_4) C(\vec{x}) dx_2 dx_3 dx_4 = 1 \right)$$

その他の場合

$$C(\vec{x}) = 0 \tag{25}$$

及び

(ii) 22式が次のように表現される場合

$$P(\vec{x}) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}} \sqrt{|M|}} \exp \left[ -\frac{1}{2|M|} \times \sum_{i,i'=1}^{i \max} |M_{i,i'}| (x_i - x_{ic}) (x_{i'} - x_{i'c}) \right] \tag{26}$$

ここに、 $M$ は  $x_i, x_{i'}$  の  $x_{ic}, x_{i'c}$  からの変位にかかわる共分散  $\lambda_{ii'}$  のはる行列を、 $|M|$ はその行列式をそれぞれ表現している。また、 $|M_{i,i'}|$ は  $\lambda_{ii'}$  の補行列式である。

相関を考慮した理由は、 $X_2, X_3, X_4$  はいずれも、炉心内の中性子吸収体の反応度価値であるため、核データ、計算方法に共通のものがあることを考慮したことによる。

### 3.3 状態ベクトル

つぎに、評価すべき対象となる状態ベクトル量

$S(S_1, S_2, \dots, S_j, \dots, S_{j \max})$  としては、

$$\begin{aligned} S_1 &= \text{常温において、制御棒の一部がスタックしたときの初期炉心の実効増倍率, } k_{\text{eff } 1} \\ &= X_1 + X_2 + X_3 \end{aligned} \tag{27}$$

及び

$$\begin{aligned} S_2 &= \text{出力温度において、Xe 及び Sm の毒作用により反応度が減少した初期炉心の} \\ &\quad \text{実効増倍率, } k_{\text{eff } 2} \\ &= X_1 + X_3 + X_4 + X_5 \end{aligned} \tag{28}$$

の二つをとりあげた。

初期炉心について評価した理由は、高温ガス実験炉の特性として、核燃料の燃焼に従い、可燃性毒物の燃焼も進行して、停止余裕及び運転余裕とも確保し易くなるからである。

基準1 (停止余裕) から

$$S_1^+ = \{ S_1 \mid S_1 < 1 \} \quad (29)$$

基準2 (運転余裕) から

$$S_2^+ = \{ S_2 \mid S_2 > 1 \} \quad (30)$$

第1炉心と第2炉心について、直列システムとして反応度余裕に関する基準 (29) 及び (30) を満足する確率を求めた。用いたパラメータを Table 1 にまとめた。

### 3.4 計算の方法

(22)式から(28)式で示された確率分布を  $(x_1, x_2, \dots, x_{imax})$  のはる位相空間で一様に求め状態ベクトルである(27)式と(28)式で示される実効増倍率について、頻度をプロットし、基準を満足領域と満足しない領域について区分けするという方法をとった。

(22)式ないし(28)式で表現される多次元の正規分布については、 $S_j$  を変数とする一次元の正規分布に変換して、計算を進めた。<sup>(3)</sup> 状態ベクトルの成分

$S_j$  が  $s_j$  をとる確率分布は、 $s_j$  の設計値を  $s_{jc}$  として、

$$P(s_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(s_j - s_{jc})^2}{2\sigma^2}} \quad (31)$$

ここに、 $\sigma^2$  は相関がない場合には、

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^{imax} \sigma_i^2$$

一方、相関がある場合には、

$$\sigma^2 = \sum_{i, i'=1}^{imax} \lambda_{ii'} \quad (32)$$

で表現されることを利用し、<sup>(3)</sup> (8)式から、

基準1 (停止余裕) を満足する確率は、

$$\int_{-\infty}^1 P(s_1) ds_1 \quad (33)$$

基準2 (運転余裕) を満足する確率は

$$\int_1^{\infty} P(s_2) ds_2 \quad (34)$$

より、正規分布の数値表を使って求めた。

一方、(24)、(25)式で表現される相関のある場合については、数値積分により求めた。

## 3.5 計算の条件

- (1) 数値積分の場合の
- $X_i$
- の変域；設計値
- $x_{ic}$
- を中心に，標準偏差
- $\sigma_i$
- の 3 倍を変域とした。

$$x_i = \{ x_i \mid |x_i - x_{ic}| < 3\sigma_i \} \quad (35)$$

- (2) 標準偏差と共分散
- $\sigma_i, \lambda_{ii'}$
- ；

- (i) 低い精度の設計\*，基礎的な臨界実験との対比が十分行なわれていなくて
- $X_i$
- の計算精度が明確にされていない場合を想定して，コールドクリーンの炉心の実効増倍率
- $X_1$
- については，
- $\sigma_1$
- は設計値
- $x_{1c}$
- の 1.5%，そのほかの反応度値については
- $\sigma_i$
- は
- $x_{ic}$
- の 10% と仮定した\*。

$$\frac{\sigma_1}{x_{1c}} = 0.015, \quad (36)$$

$$\frac{\sigma_i}{x_{ic}} = 0.1 \quad (i \neq 1)$$

- (ii) 高い精度の設計\*，詳細な模擬炉心についての臨界実験から
- $X_i$
- の計算精度が明確にされている場合を想定して，

$$\frac{\sigma_1}{x_{1c}} = 0.0075 \quad (37)$$

$$\frac{\sigma_i}{x_{ic}} = 0.05 \quad (i \neq 1)$$

- (iii)
- $\lambda_{ii'}$
- ：

$\lambda_{ii} = \sigma_i^2$  とし  $\sigma_i$  としては Table 1 の値を使用することとした。また，同じ  $\sigma_i$  について，

$i = 2, 3, 4$  について  $\lambda_{ii'} = \frac{\sigma_i \sigma_{i'}}{2}$  より共分散を評価すると仮定した。

つまり，(32) 式の総括した分散  $\sigma^2$  は

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \sum_{i, i'=1}^{imax} \lambda_{ii'} \\ &= (\sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_4 + \sigma_4 \sigma_2) + \sum_{i=1}^{imax} \sigma_i^2 \end{aligned}$$

で与えられると仮定した。

\* この論文では，炉心設計の精度と安全基準が満足される確率との間の関係を定式化して確率的に把握することを意図している。現在の高温ガス実験炉の炉心設計精度については，今後ますます充実させていく計画がある。臨界実験との対比という方法によって，明確になっていくと考えられる。また，炉心設計手法の向上により，一層精度の向上がすすめられていくであろう。ここでは，設計精度の代表例として，低い精度と高い精度の設計という二つのレベルを仮定しているが，これは上記の設計精度と安全基準が満足される確率との間の関係について，理解を深めるために想定したものにすぎない。

(3) 確率  $P(\bar{x})$  の数値積分の方法(i)  $X_i$  の変域  $6\sigma_i$  を40等分メッシュ点分割

(ii) 積分計算は梯形積分公式による

## (4) 基準を満足することの判定:

基準1つまり(29)式が満足される場合、基準2(30)式が満足されない場合が生ずる。その逆もある。しかしながら、基準1と2の両方を同時に満足しない場合は、極めて稀有で無視してよいことは物理的考察から明確である。以上の理由から、基準1及び2の判定を独立に行って求めたいずれかを満足しない確率の和が、どちらかを満足しない確率と近似した。

## (5) 計算ケースの選択:

第一炉心について、低い精度及び高い精度の設計の場合を主たる計算ケースとして選び、相関の影響を低い精度の設計の場合について調べた。また、第二炉心については、低い精度の設計の場合のみを計算ケースとした。計算ケースの分類をTable 1に示した。

また、第1炉心について、基準1(停止余裕)及び基準2(運転余裕)の両方を満足する確率の $\sigma_i/x_{ic}$ つまり設計精度への依存の様子を低い精度の設計と高い精度の設計の間についても調べた。このとき、 $\sigma_i/x_{ic}$ は、 $\sigma_i/x_{ic}(i \neq 1)$ と比例して変化するという条件づけを行った。

## 3.6 計算結果

計算結果をTable 1と2に一括して示した。

## (1) 相関を考慮しない場合

低い精度の設計によれば、基準1(停止余裕)と2(運転余裕)の両方を満足する確率は、第1炉心について90.22%、第2炉心について92.99%である。第2炉心は、第1炉心の改良として余裕を大きく設計している成果が一応表れているが改善巾はさして大きくない。これは、基準2(運転余裕)を満足する確率が第2炉心では第1炉心より低下していることによる。

高い精度の設計によれば、基準1(停止余裕)及び2(運転余裕)の両方を満足する確率は、第1炉心について99.8%、第2炉心について99.9%以上となり、ほとんど確実に基準は満足されると判断して良い。

以上の議論の理解を深めるために、基準1及び2にかかわる状態の実効増倍率 $k_{eff1}$ 及び $k_{eff2}$ の確率分布を第一炉心についてFig. 1からFig. 4に示した。

低い精度の設計の場合は確率分布は設計値の $k_{eff1}$ ないし $k_{eff2}$ を中心として、巾広くなっており、基準を満足しない $k_{eff}$ の領域にまで可成りのびている。

高い精度の設計の場合には、確率分布の巾は小さく基準を満足しない $k_{eff}$ への領域へのはみ出しはほとんどない。

## (2) 相関を考慮した場合

第1炉心について、低い精度の設計を行った場合基準1(停止余裕)及び基準2(運転余裕)の両方が満足される確率は、(24)と(25)式ないし(26)式によって相関を考慮することによって、それぞれ82.87%ないし86.56%に減少する。また、高い精度の設計の場合は、相関の影響はさして大きくない。

### (3) 計算精度

(i) 相関を (24), (25) 式で考慮する場合、数値計算が必要になる。

$X_i$  の積分領域が  $\{x_i \mid |x_i - x_{ic}| < 3\sigma_i\}$  に限定されていること、及びこの区間でのメッシュ数が計算時間からの制約から40に設定したことの二つ事由が確率の数値計算上の誤差となる。しかし、前者は、 $x_i$  が上記の領域をはみ出す確率が0.27%以下なので、基準を満足しない確率が非常に小さくとも、なお精度が要求されない限り問題にならない。後者の原因による誤差としては、第1炉心の標準精度設計において、基準1（停止余裕）を満足する確率が0.6%以内で正規分布表による結果と一致したので、この程度と考えられる。

(ii) 計算精度は、以上の数値計算上の誤差より、実際は用いる標準偏差  $\sigma_i$  の選定に強く依存する。標準偏差  $\sigma_i$  には  $\pm 20\%$  くらいの不確定さが存在すると仮定すると、第1炉心の低い精度の設計で、基準1（停止余裕）を満足する確率は  $(92.6 \pm 3.7)\%$  の中で変化する。

## 4. 結 論

(1) 確率論の手法の応用により、核・熱特性に関する主要な物理量が、原子炉の安全性を確保するための基準を満足する割合を数値的に表現する方法を提示した。

(2) 高温ガス実験炉の核設計について、反応度余裕に関する基準を満足する確率と設計値の標準偏差の関係を調査した。第1炉心と第2炉心について、低い精度の設計と高い精度の設計の代表例として各要素の反応度値の標準偏差を設計値の10%ないし5%と仮定して、停止余裕及び運転余裕に関する基準を満足する確率を計算した。高い精度の設計の場合、両方の炉心について以上の基準を満足する確率は相関を考慮しない場合99.8%以上である。

(3) 以上の基準を満足する確率は標準偏差の選択に極めて強く依存する。したがって、その選択にあたっては、実証されたものを用いることが望ましい。

(4) 各要素の反応度値の設計誤差の相互相関も重要な因子となる。この相関の影響の考慮は確率の数値積分の際、比較的簡単に取扱うことが可能である。

(5) 今回の反応度余裕に関する解析経験から、一般的に基準を満足する確率を数値計算する場合、独立な変数の数は、計算時間から制約される。したがって、原子炉システム全体の安全性を論ずるためには、判断すべき事象を因果関係から階層的に整理し、隣り合う階層の間の数値的ないし解析的にモデル化された問題の集りに縮約し、原子炉システムを直列形システムないし並列形システムの集りとして取扱うことが必要になる。

(6) 高温ガス実験炉の設置許可にかかわる安全審査においては、反応度余裕に関する安全基準を満足する確率は、これまで核燃料取扱施設の臨界安全性の信頼性の評価にあたってしばしば用いられて来たところの設計値の周りに  $3\sigma$  の誤差を見込むという方法に準拠して考えた場合、99.7%以上であることが要請されることになる。この要請を満足するためには第1炉心について、Fig. 5より、反応度値の標準偏差は設計値の5.3%より小さいことが必要となり、ほとんど高い精度の設計における5%に近い。



## 謝 辞

今回の仕事は、ある意味で信頼性評価の分野のものであり、専門家の篠原慶邦原子炉制御研究室長に長時間にわたり討論していただいた。また、高温ガス実験炉の炉心設計を担当している動安部多目的炉設計研究室の副主任研究員新藤隆一及び平野光将及び外来研究員の大村博志（石川島播磨）の三氏には、計算パラメータについて詳しい情報の提供のほか、本論文を精読してもらい有役な意見をいただいた。ここに記して、謝意を表します。

## 文 献

- (1) 小堀哲雄 ほか：“ATR 確率論的熱設計手法の開発(I)” 炉物理・炉工学分科会（1979）
- (2) 青地哲男 ほか：日本原子力学会誌，19〔12〕，806（1977）  
ないし  
安野武彦 ほか：JAERI-M 8399（1979）  
（多目的高温ガス実験炉，MARK-III 炉心の検討）
- (3) M. FISE : Probability Theory and Mathematical Statistics, John Wiley & Sons, Inc. New York・London（1963）

Table 1 Results of probability calculation satisfying criteria 1 (one rod stack margin) or 2 (operation margin)

Core No.	$X_1$ ( $\sigma_1$ )	$X_2$ ( $\sigma_2$ )	$X_3$ ( $\sigma_3$ )	$X_4$ ( $\sigma_4$ )	$X_4$ ( $\sigma_5$ )	Calculation	Computation	Probability satisfying Criteria (%)	Probability not satisfying Criteria (%)	$k_{effc}$
1	1.335 (0.02003)	-0.2192 (0.02192)	-0.1650 (0.0165)	0	0	disregarded	analytic	92.63 (Criteria 1)	7.37 (Criteria 1)	0.9508
2						regarded in C( $\bar{x}$ )	numerical	86.37 (89.63)* (Criteria 1)	13.63 (10.37)* (Criteria 1)	
3	1.335 (0.010015)	-0.2192 (0.01096)	-0.1650 (0.00826)	0	0	disregarded	analytic	99.81 (99.42)* (Criteria 1)	0.19 (0.58)* (Criteria 1)	
4	1.335 (0.02003)	0	-0.180 (0.018)	-0.05 (0.005)	-0.05 (0.005)	disregarded	analytic	97.59 (Criteria 2)	2.41 (Criteria 2)	1.055
5						regarded in C( $\bar{x}$ )	numerical	96.50 (96.93)* (Criteria 2)	3.50 (3.07)* (Criteria 2)	
6	1.335 (0.010015)	0	-0.180 (0.009)	-0.05 (0.0025)	-0.05 (0.0025)	disregarded	analytic	99.99 (99.99)* (Criteria 2)	0.01 (0.01)* (Criteria 2)	
7	1.309 (0.01964)	-0.238 (0.0238)	-0.135 (0.0135)	0	0	disregarded	analytic	97.12 (Criteria 1)	2.88 (Criteria 1)	0.936
8	1.309 (0.00982)	-0.238 (0.0119)	-0.135 (0.0068)	0	0			99.99 (Criteria 1)	0.01 (Criteria 1)	
9	1.309 (0.01964)	0	-0.138 (0.0138)	-0.035 (0.0035)	-0.091 (0.0091)			95.87 (Criteria 2)	4.13 (Criteria 2)	
10	1.309 (0.00982)	0	-0.138 (0.0069)	-0.035 (0.0018)	-0.091 (0.00455)			99.98 (Criteria 2)	0.02 (Criteria 2)	1.045

\* These probability values are obtained respect to the case considering correlations between  $X_i$  through covariance  $\lambda_{ij}$ , with use of Eq. (26).

\*\* "regarded in C ( $\bar{x}$ )" means that correlation is taken into account with use of Eqs. (24) and (25).

Table 2 Probabilities satisfying both of criteria 1 and 2 (one rod stack margin) and 2 (operation margin)

Core	Design accuracy	Correlation**	Probability satisfying Criteria 1 and 2 (%)
I	low $\frac{\sigma_i}{x_{ic}} = 10\%$	disregarded	90.22
	high $\frac{\sigma_i}{x_{ic}} = 5\%$	regarded	82.87* (86.56)
II	low $\frac{\sigma_i}{x_{ic}} = 10\%$	disregarded	99.80* (99.41)
	high $\frac{\sigma_i}{x_{ic}} = 5\%$	disregarded	92.99
			99.97

\* Probabilities shown in blanket indicate that these values are obtained respect to the case considering correlations between  $X_i$  through covariance  $\sigma_{ii}$ , with use of Eq. (26).

\*\* Correlation is taken into account with use of Eqs. (24) and (25), using numerical integration.

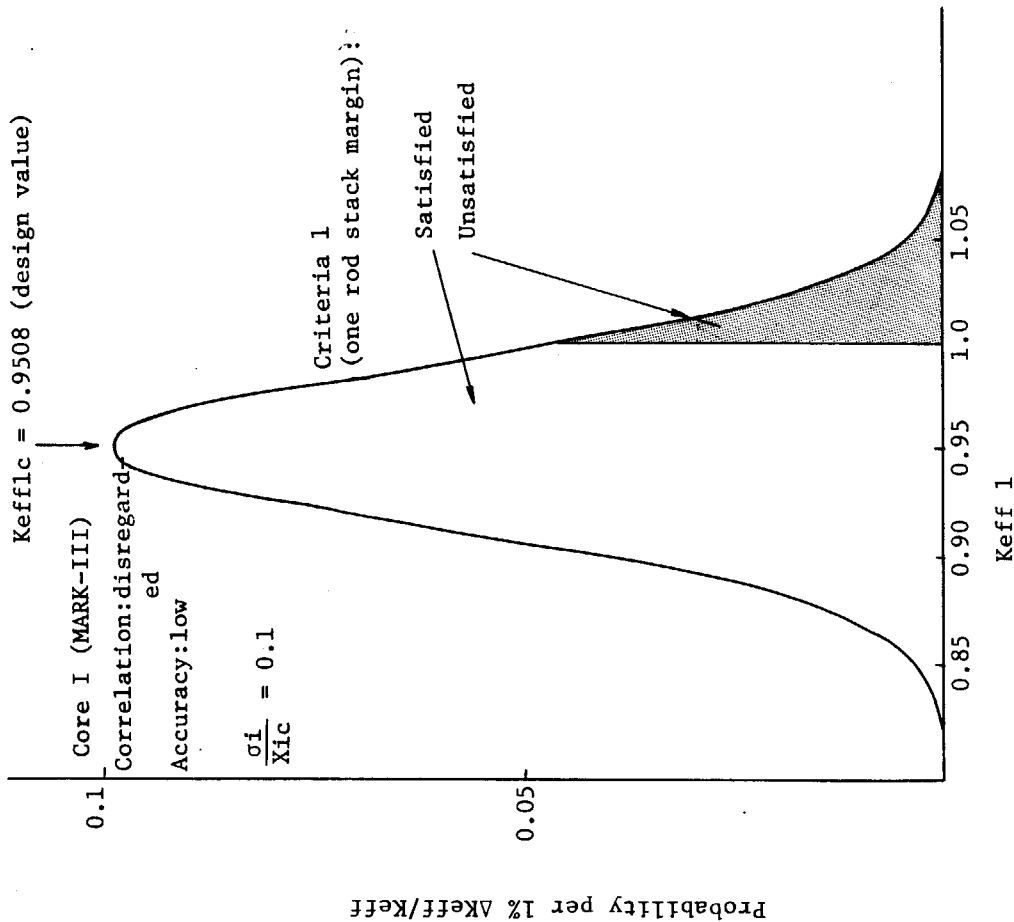
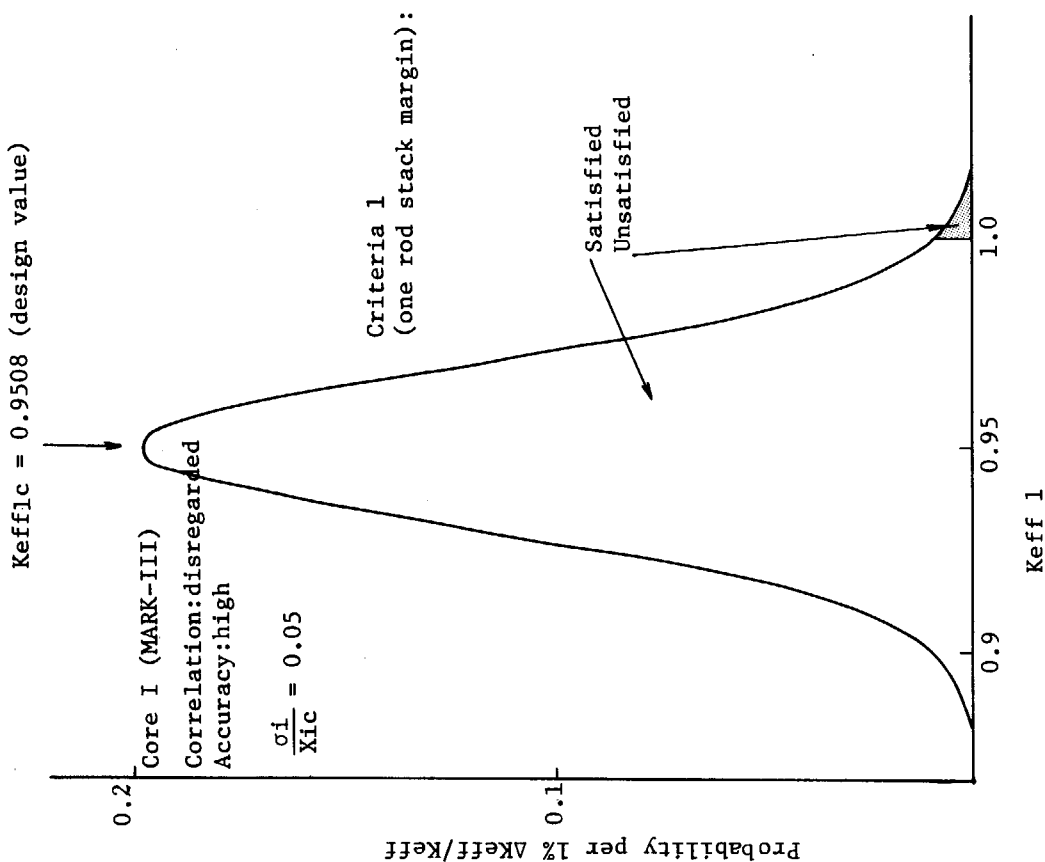


Fig. 2 Keff of start up core at room temperature , stacked with specified control rods

Fig. 1 Keff of start up core at room temperature , stacked with specified control rods

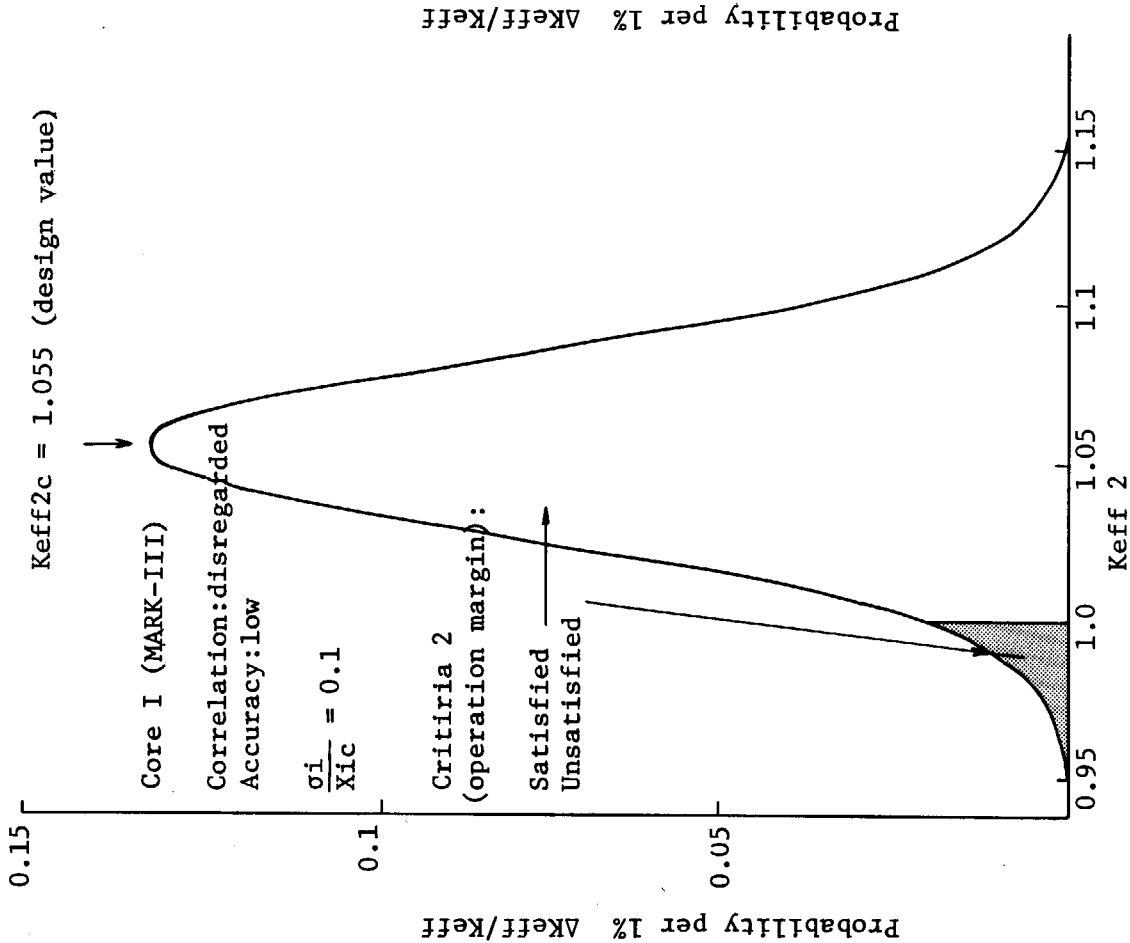
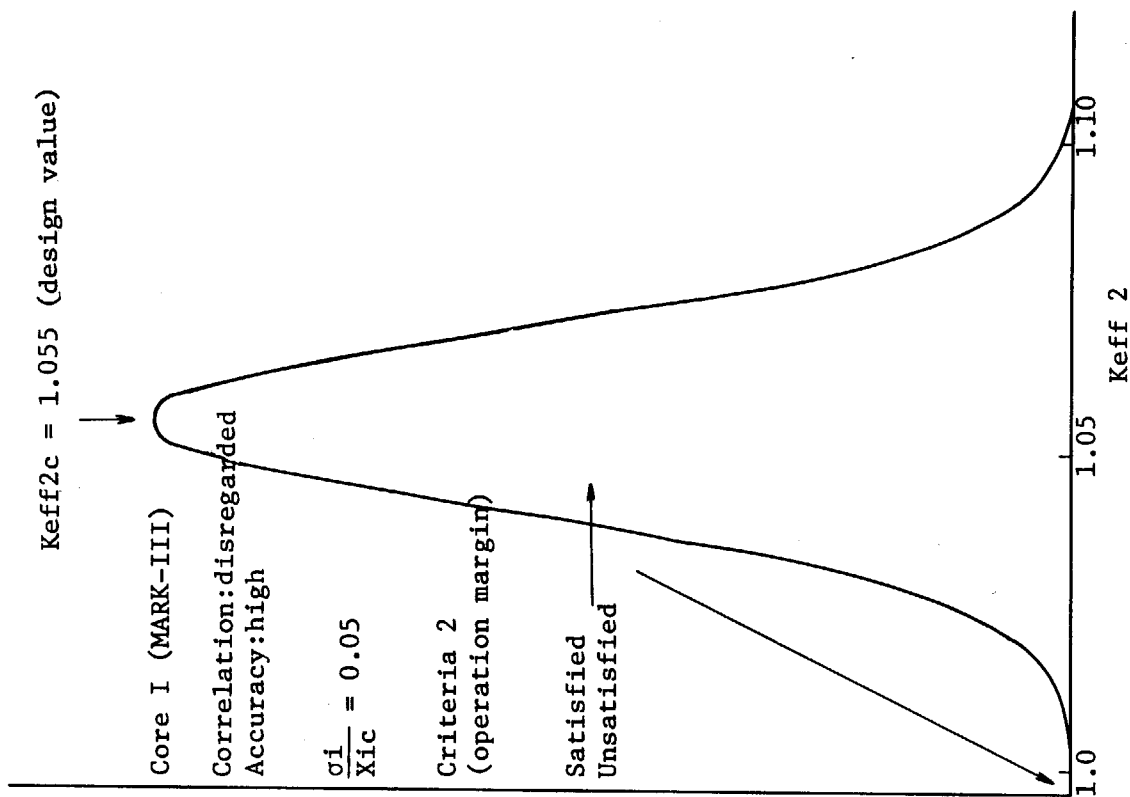


Fig. 3 Keff of start up core at operating temperature , poisoned with Xe and Sm

Fig. 4 Keff of start up core at operating temperature , poisoned with Xe and Sm

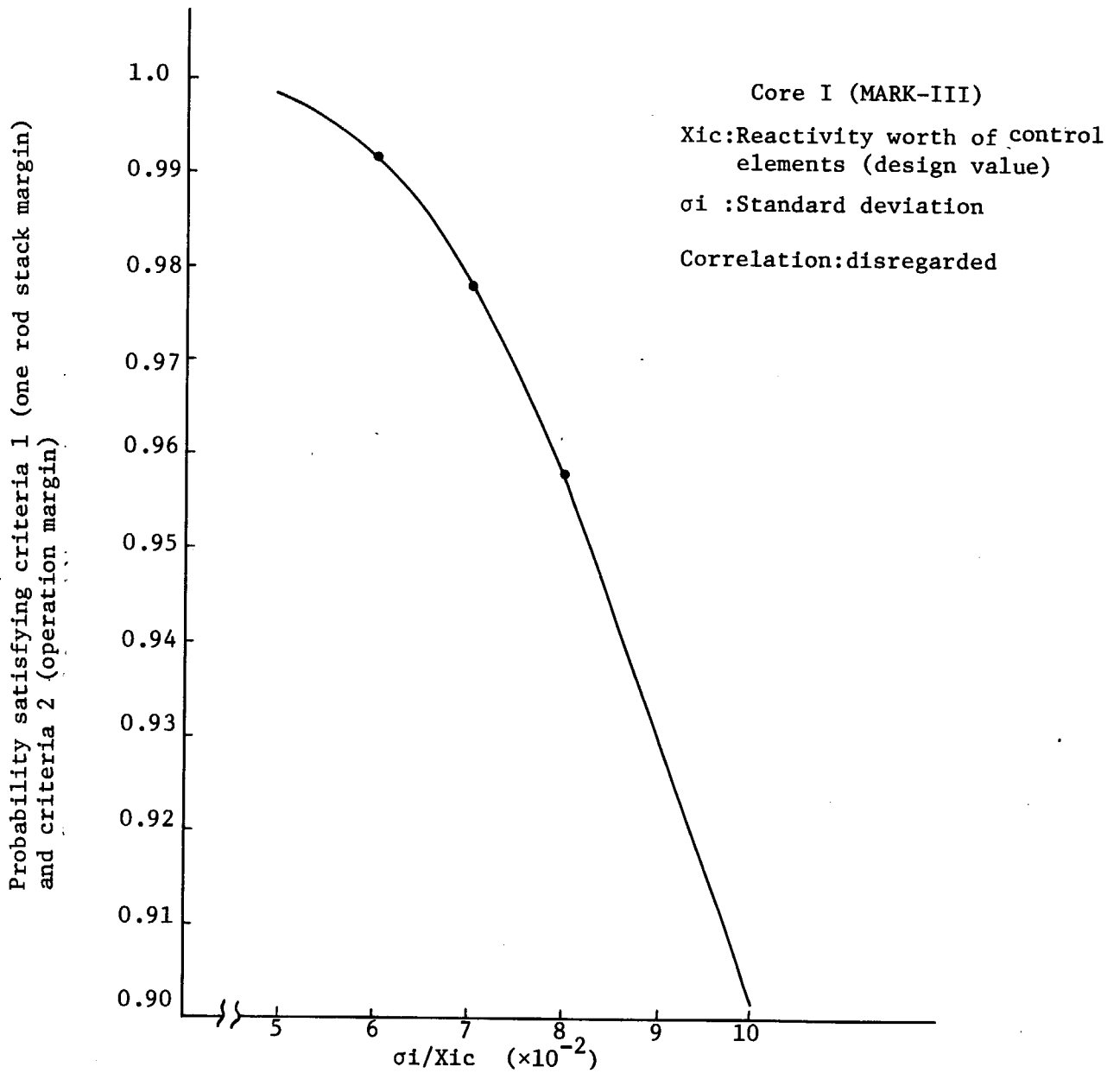


Fig. 5 Dependence of probability satisfying criteria 1 (one rod stack margin) and 2 (operation margin) on the ratio of standard deviation to design reactivity worth of control elements