

JAERI-M
89-039

無限増倍率が1.0未満である核燃料体系の臨界性

1989年3月

荻野 晃久・内藤 俣孝

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

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, 1989

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日青工業株式会社

無限増倍率が1.0未満である核燃料体系の臨界性

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部

荻野 晃久 ・ 内藤 俣孝

(1989年3月14日受理)

中性子無限増倍率 k_{∞} が1.0未満の燃料の周囲に軽水反射体が付くことによって、その体系が臨界に達するかどうかの可能性を検討した。

臨界計算は、軽水および重水反射体付きの二酸化ウラン (UO_2) 燃料平板体系において、 ^{235}U 濃縮度、 UO_2 密度、水対ウラン原子個数比をそれぞれ変えて行った。

反射体の中性子反射による燃料中の中性子エネルギー・スペクトル軟化が体系の臨界性に及ぼす影響を解明するための手がかりとして、中性子スペクトル・ファクター (SF) を考える。

結果として、中性子無限増倍率 k_{∞} が1.0未満のウランやプルトニウム燃料は、もしその周囲に軽水反射体を取り巻いても臨界になることはないことが分かった。

Nuclear Criticality of Fuel Assembly
Having Infinite Multiplication Factor
Less than Unity

Teruhisa OGINO and Yoshitaka NAITO

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

(Received March 14, 1989)

A case study has been made to investigate nuclear criticality could be achieved by locating light-water reflectors surrounding a fuel assembly of which neutron infinite multiplication factor k_{∞} is less than unity.

Nuclear criticality calculations were carried out for slab fuel assemblies consist of uranium dioxide (UO_2) changing enrichment of ^{235}U , density of UO_2 and H/U atomic ratios respectively in case of light-water and heavy-water reflections.

A neutron spectrum factor (SF) is considered to solve the problem as a key to represent softening effect of neutron energy spectrum in the fuel assembly due to neutron reflections by the reflectors.

As a result, it is found that uranium and plutonium fuels of which infinite multiplication factor, k_{∞} , are less than unity can not reach criticality condition even if they are surrounded by light-water reflectors.

Keywords: Neutron Infinite Multiplication Factor, Nuclear Criticality,
Light-water Reflector Effect, Neutron Energy Spectrum

目 次

1. 序	1
2. 現象の分析と方法	2
2.1 スペクトル・ファクターの導入	2
2.2 $k_{\infty} < 1.0$ の体系の臨界性を支配する因子	3
3. 臨界計算に使用した手法	4
3.1 計算方法	4
3.2 計算モデルと計算ケース	4
4. 計算結果	5
4.1 軽水反射体付き体系の場合	5
4.1.1 ^{235}U 濃縮度による k_{eff} と k_{∞} の変化	5
4.1.2 H/U比による k_{eff} と k_{∞} の変化	6
4.2 重水反射体付き体系の場合	6
5. 考 察	7
5.1 スペクトル・ファクターを使つての結果の検討	7
5.2 H/U比によるスペクトル・ファクターの変化	7
5.3 軽水反射体付き体系での結果の検討	8
5.4 重水反射体付き体系での結果の検討	8
5.5 無限平板以外の燃料形状についての検討	9
5.6 UO_2 燃料以外の燃料についての検討	10
6. ま と め	11
謝 辞	12
参考文献	12

Contents

1. Introduction	1
2. Phenomenology and its Analysis Method	2
2.1 Introduction of Spectrum Factor	2
2.2 Parameters Controlling Criticality of Systems of k_{∞} Less than Unity	3
3. Method Used for Criticality Calculation	4
3.1 Calculation Method	4
3.2 Calculation Model and Calculation Cases	4
4. Calculated Results	5
4.1 Results for Light Water Reflector Systems	5
4.1.1 Variation of k_{eff} and k_{∞} with ^{235}U Enrichment	5
4.1.2 Variation of k_{eff} and k_{∞} with H/U Ratio	6
4.2 Results for Heavy Water Reflector Systems	6
5. Discussion and Remarks	7
5.1 Study on Calculated Results by Spectrum Factor	7
5.2 Variation of Spectrum Factors with H/U Atomic Ratio	7
5.3 Study on Calculated Results for Light Water Reflector Systems	8
5.4 Study on Calculated Results for Heavy Water Reflector Systems	8
5.5 Study on Fuel Forms Except Slab Pattern	9
5.6 Study on Fuel Materials Except UO_2	10
6. Conclusion	11
Acknowledgement	12
References	12

1. 序

科学技術庁が1988年に編集した我が国の“臨界安全ハンドブック”¹⁾では、「まず単独に存在する燃料体系(単一ユニット)についての未臨界確認を行い、その後、核燃料が複数存在する場合(複数ユニット)の未臨界確認を行うこと。また、中性子無限増倍率 k_{∞} が1.0以下となる核燃料が単一ユニットとして存在する場合には常に未臨界状態が維持されると考えてよい」との趣旨を述べている。すなわち核燃料施設の単一ユニットにおける臨界管理では、 k_{∞} が1.0以下になるような核燃料物質はその性状及び形状に関係なく臨界になることはないとは判断できるとして

いる。
一方1968年にM.L.Blumeyerは、「低濃縮酸化ウラン燃料体系における k_{∞} が1.0以下であっても、この燃料に重水反射体を付けた中性子実効増倍率 k_{eff} は、臨界超過($k_{eff} > 1.0$)になり得る」²⁾ことを計算で示した。また、E.D.Claytonはその著書“Anomalies of Nuclear Criticality”³⁾(1978年)において、「酸化ウラン燃料の k_{∞} が1.0以下の時、これに軽水反射体を付けると、決定的とは言えないにしても $k_{eff} > 1.0$ となる有限体系を見つけ得るかも知れない」と疑問を投げかけている。

核燃料施設では重水反射体を用いる場合は無く、本報告書では主として有限燃料体系の軽水反射体による影響の問題を取り上げて議論する。そのためには、まず単独に存在する有限燃料体系の k_{eff} と k_{∞} の大小関係が燃料体系の条件によってどのように変わるかについて調べること、そしてその時の臨界性を調べる必要がある。

そこで本報告書は、代表的な単一の無限平板体系をモデルとし、これに十分な厚さの軽水反射体および重水反射体を付けた際の k_{eff} と、同一燃料の k_{∞} との関係について、 UO_2 燃料の²³⁵U濃縮度、 UO_2 密度、H/U原子数比(以下、H/U比という)、平板厚さを変えて調べている。主に軽水反射体付き体系における k_{eff} と k_{∞} の関係を分析し、重水反射体付き体系では $k_{eff} > k_{\infty}$ となる場合があることの確認にとどめている。同時に、これら各燃料体系条件による k_{eff} と k_{∞} の計算結果について、その臨界性をも調べる。さらに、反射体の影響で熱化された中性子エネルギー・スペクトルが、体系の反応度にどの程度寄与するかについての新しい指標を提示し(この指標をスペクトル・ファクター(SF)と呼ぶことにする)、これを用いて各燃料体系について反射体の影響を分析する。そして UO_2 燃料以外の核燃料や無限平板体系以外の燃料形状についても本問題を検討する。

本報告書の構成は、第2章で現象の分析を示し、第3章で計算方法、計算モデルと計算ケースを示す。第4章で結果を報告し、第5章でスペクトル・ファクターを使うなどして結果を検討する。最後の第6章では、まとめとして、単独の軽水反射体付きウラン及びプルトニウム系核燃料は、体系の形状に関係なく、 k_{∞} が1.0未満であれば臨界を越えないことなどについて報告する。

2. 現象の分析と方法

無限増倍率が1.0未満の燃料を単独の反射体付き有限体系にすると臨界となってしまうかどうかについて、次の2点について検討した。

まず第1に、反射体付き有限体系における反射体が、燃料内の中性子エネルギー・スペクトルを熱化し、熱化の効果によって中性子実効増倍率 k_{eff} の方が k_{∞} よりも大きくなることはあるのか。第2に、 $k_{\infty} < 1.0$ である燃料体系の中性子エネルギー・スペクトル熱化の効果によって k_{eff} が1.0より大きくなる体系が存在するかどうかである。

2.1 スペクトル・ファクターの導入

$k_{\infty} < 1.0$ の体系の臨界性を調べるための第1の問題点、つまり反射体による中性子エネルギー・スペクトル熱化の効果によって k_{eff} の方が k_{∞} よりも大きくなるかどうかについて、計算で確かめる手段として次式を導入する。

今、反射体付き有限体系の燃料内における単位時間内の発生中性子数を F 、吸収中性子数を A 、漏れ中性子数を L とし、同燃料が無限に存在する時の中性子増倍率を k_{∞} とする。中性子エネルギー・スペクトル $\phi(E)$ が反射体の影響で熱化されているときの、燃料内での中性子反応率 F/A と、 k_{∞} との比は、熱化の効果として考えることができる。そしてこの比をスペクトル・ファクター SF として下式で定義する。

$$SF \equiv \frac{F/A}{k_{\infty}} \quad (1)$$

ただし、 F/A は次式で表現できる。

$$\frac{F}{A} = \left(\frac{\int \nu \cdot \Sigma_f(E) \phi(E) \cdot dE}{\int \Sigma_a(E) \phi(E) \cdot dE} \right) \quad \text{燃料領域} \quad (2)$$

ここで、 ν は核分裂当りの中性子放出数、 Σ_a は吸収断面積、 Σ_f は核分裂断面積である。

次に、この熱化の効果 SF を用いて中性子実効増倍率 k_{eff} を表現すると、

$$k_{\text{eff}} = \frac{k_{\infty} \cdot SF}{1 + L/A} \quad (3)$$

となり、

$$\frac{k_{\text{eff}}}{k_{\infty}} = \frac{SF}{1 + L/A} \quad (4)$$

となる。つまり k_{∞} と k_{eff} との大小関係は、漏れによる反応度減少 L/A と中性子エネルギー・

スペクトル熱化による反応度増加 SF との競争関係で決まり、 k_{eff} の方が k_{∞} より大きくなるのは熱化効果 SF の方が漏れによる効果 $1 + L/A$ よりも大きい場合に発生すると考えてよい。

よって、 $k_{eff} > k_{\infty}$ とは、

$$SF - 1 > L/A \quad (5)$$

に他ならない。

2.2 $k_{\infty} < 1.0$ の体系の臨界性を支配する因子

$k_{\infty} < 1.0$ の体系の臨界性を調べる第2の問題点、つまり、 $k_{eff} > k_{\infty}$ となる場合に臨界になってしまうかどうかについて、臨界性を決定づけるすべての因子を考える。

まず反射体付き低濃縮 UO_2 燃料について議論する（その他の燃料については後で検討する）。反射体付き低濃縮 UO_2 燃料の中性子実効増倍率 k_{eff} に影響を及ぼす因子は燃料領域の幾何形状、燃料の厚さ、 ^{235}U 濃縮度、 UO_2 密度、減速材種類、減速材対燃料比、反射体種類、反射体厚さの8つである（TABLE 1 参照）。

これらのうち燃料領域の幾何形状については、反射体の熱化の影響が最も大きいと考えられる平板体系（理由については第5章の検討で解説する）とする。燃料厚さと UO_2 密度については、反射体による熱化の影響を大きくするために燃料厚さと UO_2 密度の積を小さくしなければならないことや、体系の臨界近傍を調べるためにはこれを大きくしなければならないことから、現実に即するように UO_2 密度を比較的大きい値（理論密度に近い高い密度）に固定して燃料厚さをパラメータとする。 ^{235}U の濃縮度については、反射体による熱化の影響を大きくするためには濃縮度が小さい方がよく、しかも体系の臨界近傍を調べるためには濃縮度を大きくしなければならないので、 ^{235}U 濃縮度もパラメータとする。減速材種類については熱化の効果の大きい軽水（ H_2O ）を、反射体種類については軽水（ H_2O ）と重水（ D_2O ）を考える。減速材対燃料比について、反射体によるスペクトル熱化の影響を大きくするために、 H/U 比は小さい方がよく、体系を臨界近傍にするためには H/U 比を大きくしなければならないことから、減速材対燃料比はパラメータとする。反射体厚さは、反射体による中性子反射割合及び熱化の影響を大きくするために、十分な厚さと認められている軽水反射体30cm、重水反射体100cmを設定する（TABLE 1 参照）。

このような考え方にもとづき、低濃縮 UO_2 燃料の中性子増倍率を支配するすべての因子のうち、パラメータとして燃料厚さ、 ^{235}U 濃縮度、 H/U 比の3つを選んだ。もしこれらをどのように変化させてみても臨界にならないならば、 UO_2 燃料は反射体の影響下でも、けっして臨界になることはないと言える。

3. 臨界計算に使用した手法

3.1 計算方法

臨界安全性評価コードシステム(JACS)を用いて計算した。このコードシステムは臨界安全解析をするために日本原子力研究所(以下原研)で開発された計算コードシステムである。JACSコードシステムを使って行った今回の計算の流れをFig.1に示す。

あらかじめ多群定数作成コード(MGCL-ACE)で核データ(主にENDF/B-IV)を処理し、多群定数ライブラリ(MGCL)を作成しておく。群数は137群である。この137群MGCLは、Bondarenkoタイプの自己遮蔽因子、無限希釈断面積およびマトリックスから成っている。

まず、多群の巨視的実効断面積セット(Σ_{eff})作成コード(MAIL)に体系の原子個数密度や核種組成、幾何形状を入力して Σ_{eff} を作成する。そしてこの Σ_{eff} を用いて S_n 計算コード(ANISN-JR)により中性子増倍率を計算する(Fig.1参照)。

3.2 計算モデルと計算ケース

$k_{eff} > k_{\infty}$ となる体系の存否を確かめる計算のために、 k_{∞} についてはFig.2、 k_{eff} についてはFig.3のようなモデルを考える。両者ともに単独の酸化ウラン(UO_2)無限平板形状である。 k_{∞} 計算の体系境界条件は完全反射である。 k_{eff} 計算では燃料の外側に十分な水反射体(軽水反射体は厚さ30cm、重水反射体は厚さ100cm)を付け、体系の境界条件は真空条件とする(Fig.2, Fig.3参照)。

体系温度は20°Cとし、MGCLは温度別に用意されているもののうちで体系温度に一番近い300 Kのライブラリを用いる。群構造は137群である。

ANISN-JRコードの計算条件をTABLE 2のように設定する。

・計算ケース(1)

無限平板厚さによる k_{eff} と k_{∞} の関係を燃料の ^{235}U 濃縮度を変えて調べる。

濃縮度は2, 3, 4, 5, 6 wt%を用いて、H/U比が0.0の条件について k_{eff} と k_{∞} の計算を行う。 k_{eff} については十分な厚さの軽水反射体付き体系を考える。 UO_2 密度は10.0 g UO_2/cm^3 に固定し、平板厚さは10, 30, 50, 100 cmとする。

・計算ケース(2)

無限平板厚さによる k_{eff} と k_{∞} の関係を燃料のH/U比を変えて調べる。

H/U比は0.01, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0を用いる。ただし、計算ケース(1)の結果から、臨界上最も厳しい濃縮度をもつ体系について(もし $k_{eff} > k_{\infty}$ となる体系がある時には、 $k_{eff} > k_{\infty}$ となる体系のうちで臨界上最も厳しい濃縮度をもつ体系について)、計算する。 k_{eff} については十分な厚さの軽水反射体付き体系を考える。平板厚さは10, 30, 50, 100 cmとし、 UO_2 密度は10.0 g UO_2/cm^3 とする。

・計算ケース(3)

無限平板厚さによる k_{eff} と k_{∞} の関係を十分な厚さの重水反射体を付けた体系について調べる。

計算ケース(1)の結果から、臨界上最も厳しい濃縮度をもつ体系について(もし $k_{\text{eff}} > k_{\infty}$ となる体系がある時には、 $k_{\text{eff}} > k_{\infty}$ となる体系のうちで臨界上最も厳しいウラン密度と濃縮度をもつ体系)、計算する。平板厚さは 10, 30, 50, 100 cm とし、 $10.0 \text{ g UO}_2/\text{cm}^3$ とする。H/U比が 0.0 と 0.1 の場合について調べる。

4. 計算結果

4.1 軽水反射体付き体系の場合

4.1.1 ^{235}U 濃縮度による k_{eff} と k_{∞} の変化 (H/U比 = 0.0)

ケース(1)の結果を Fig. 4 に示す。

Fig. 4 の濃縮度 2 wt % を見てみる。この体系においては、平板厚さが 10 cm より大きい所で常に $k_{\text{eff}} > k_{\infty}$ である。10 cm から増加してきた k_{eff} は 30 cm 付近で最大を示し (k_{eff} の最大値は約 0.62, k_{eff} と k_{∞} の差の最大値は約 6% Δk)、その後 k_{∞} に漸近してゆく (平板厚さ 100 cm での k_{eff} と k_{∞} の差は約 3% Δk)。

Fig. 4 の濃縮度 3 wt % の場合を見てみる。この体系においては、平板厚さが 10 cm の所では明らかに $k_{\text{eff}} < k_{\infty}$ であるが 18 cm 付近で逆転し、その後 $k_{\text{eff}} > k_{\infty}$ となる。 k_{∞} を上回った k_{eff} は平板厚さ 37 cm 付近で最大を示して (k_{eff} は約 0.70) 後、わずかずつ減少しながら k_{∞} に漸近してゆく。

Fig. 4 の濃縮度 4 wt % の場合を見てみる。この体系においては、平板厚さが約 30 cm よりも薄い所で $k_{\text{eff}} < k_{\infty}$ であるが、30 cm より厚くなると逆転して $k_{\text{eff}} > k_{\infty}$ となる。 k_{∞} を上回った k_{eff} は平板厚さ約 45 cm 付近で最大を示して (k_{eff} が約 0.77) 後、徐々に減少しながら k_{∞} に漸近してゆく。

Fig. 4 の濃縮度 5 wt % の場合を見てみる。この体系においては、平板厚さ 40 cm 付近までは明らかに $k_{\text{eff}} < k_{\infty}$ である。平板厚さの変化にともない増加してきた k_{eff} は k_{∞} に近づくとつれて増加率が低下する。そして、 k_{eff} は徐々に増加しながら平板厚さ 60 cm 付近でようやく逆転して $k_{\text{eff}} > k_{\infty}$ となる。 $k_{\text{eff}} > k_{\infty}$ の傾向は 100 cm まで続くが、 k_{eff} が k_{∞} を超える量は 100 cm で高々 0.4% Δk しかない。

Fig. 4 の濃縮度 6 wt % の場合を見てみる。この体系においては、常に $k_{\text{eff}} < k_{\infty}$ である。平板厚さが薄い所の方が k_{eff} と k_{∞} の差は大きく、厚さが増すにつれて k_{eff} は k_{∞} に近づいてゆくが、 k_{∞} を超えない。

本節の Fig. 4 に示す結果から、濃縮度を 2, 3, 4, 5, 6 wt % と段階的に増加させた時の k_{eff} と k_{∞} の関係が次のようにわかる。

体系の濃縮度が高くなるにしたがい k_{eff} も k_{∞} も共に増加する。 k_{eff} が k_{∞} を明らかに超える

・計算ケース(3)

無限平板厚さによる k_{eff} と k_{∞} の関係を十分な厚さの重水反射体を付けた体系について調べる。

計算ケース(1)の結果から、臨界上最も厳しい濃縮度をもつ体系について(もし $k_{\text{eff}} > k_{\infty}$ となる体系がある時には、 $k_{\text{eff}} > k_{\infty}$ となる体系のうちで臨界上最も厳しいウラン密度と濃縮度をもつ体系)、計算する。平板厚さは 10, 30, 50, 100 cm とし、 $10.0 \text{ g UO}_2/\text{cm}^3$ とする。H/U比が 0.0 と 0.1 の場合について調べる。

4. 計算結果

4.1 軽水反射体付き体系の場合

4.1.1 ^{235}U 濃縮度による k_{eff} と k_{∞} の変化 (H/U比 = 0.0)

ケース(1)の結果を Fig. 4 に示す。

Fig. 4 の濃縮度 2 wt % を見てみる。この体系においては、平板厚さが 10 cm より大きい所で常に $k_{\text{eff}} > k_{\infty}$ である。10 cm から増加してきた k_{eff} は 30 cm 付近で最大を示し (k_{eff} の最大値は約 0.62, k_{eff} と k_{∞} の差の最大値は約 6% Δk)、その後 k_{∞} に漸近してゆく (平板厚さ 100 cm での k_{eff} と k_{∞} の差は約 3% Δk)。

Fig. 4 の濃縮度 3 wt % の場合を見てみる。この体系においては、平板厚さが 10 cm の所では明らかに $k_{\text{eff}} < k_{\infty}$ であるが 18 cm 付近で逆転し、その後 $k_{\text{eff}} > k_{\infty}$ となる。 k_{∞} を上回った k_{eff} は平板厚さ 37 cm 付近で最大を示して (k_{eff} は約 0.70) 後、わずかずつ減少しながら k_{∞} に漸近してゆく。

Fig. 4 の濃縮度 4 wt % の場合を見てみる。この体系においては、平板厚さが約 30 cm よりも薄い所で $k_{\text{eff}} < k_{\infty}$ であるが、30 cm より厚くなると逆転して $k_{\text{eff}} > k_{\infty}$ となる。 k_{∞} を上回った k_{eff} は平板厚さ約 45 cm 付近で最大を示して (k_{eff} が約 0.77) 後、徐々に減少しながら k_{∞} に漸近してゆく。

Fig. 4 の濃縮度 5 wt % の場合を見てみる。この体系においては、平板厚さ 40 cm 付近までは明らかに $k_{\text{eff}} < k_{\infty}$ である。平板厚さの変化にともない増加してきた k_{eff} は k_{∞} に近づくとつれて増加率が低下する。そして、 k_{eff} は徐々に増加しながら平板厚さ 60 cm 付近でようやく逆転して $k_{\text{eff}} > k_{\infty}$ となる。 $k_{\text{eff}} > k_{\infty}$ の傾向は 100 cm まで続くが、 k_{eff} が k_{∞} を超える量は 100 cm で高々 0.4% Δk しかない。

Fig. 4 の濃縮度 6 wt % の場合を見てみる。この体系においては、常に $k_{\text{eff}} < k_{\infty}$ である。平板厚さが薄い所の方が k_{eff} と k_{∞} の差は大きく、厚さが増すにつれて k_{eff} は k_{∞} に近づいてゆくが、 k_{∞} を超えない。

本節の Fig. 4 に示す結果から、濃縮度を 2, 3, 4, 5, 6 wt % と段階的に増加させた時の k_{eff} と k_{∞} の関係が次のようにわかる。

体系の濃縮度が高くなるにしたがい k_{eff} も k_{∞} も共に増加する。 k_{eff} が k_{∞} を明らかに超える

体系は、濃縮度が2, 3, 4 wt %の場合であり、平板厚さにともない増加しながら k_{∞} を超えた k_{eff} は、ある厚さの所で最大を示して後、減少しながら k_{∞} に漸近してゆく。 k_{eff} が k_{∞} を明らかに下回るような体系は、濃縮度が6 wt %の場合であり、 k_{eff} は k_{∞} に近づくとしても、 k_{∞} を決して超えない。この時の中性子増倍率は、 k_{∞} が約0.90、 k_{eff} が平板厚さ100 cmで約0.89となり、両方とも未臨界である。濃縮度5 wt %の場合に、平板厚さが50 cmより大きい所で k_{eff} が k_{∞} にはほぼ接するような結果を得たが、これは5 wt %より低い濃縮度での $k_{eff} > k_{\infty}$ の現象と、5 wt %より高い濃縮度での $k_{eff} < k_{\infty}$ の現象との、中間の現象を示している (Fig.4 参照)。

4.1.2 H/U比による k_{eff} と k_{∞} の変化 (^{235}U 濃縮度 = 4 wt %)

計算ケース(2)の結果をFig.5に示す。濃縮度は $k_{eff} > k_{\infty}$ となる体系の中で、臨界上最も厳しい濃縮度の4 wt %を用いて計算した。

Fig.5の濃縮度4 wt %、H/U比が0.01の場合をしてみる。この体系においては、平板厚さ約33 cm以下では $k_{eff} < k_{\infty}$ であり、それ以上になると逆転して $k_{eff} > k_{\infty}$ となる。しかし逆転した後 k_{eff} は k_{∞} を少し超えるだけである (100 cmで k_{eff} と k_{∞} との差は0.82% Δk)。

Fig.5の濃縮度4 wt %、H/U比が0.1 ~ 1.0の場合をしてみる。これらの体系においては、常に $k_{eff} < k_{\infty}$ である。平板厚さが薄い所の方が k_{eff} と k_{∞} との差は大きく、厚さが厚すにつれて k_{eff} は k_{∞} に近づいてゆくが k_{∞} を越えない。

本節のFig.5に示す結果から、H/Uを0.01, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0と段階的に増加させた時の平板厚さによる k_{eff} と k_{∞} の関係が次のようにわかる。

燃料のH/U比が高くなると k_{eff} も k_{∞} も共に増える。 $k_{eff} > k_{\infty}$ となる体系はH/U比が0.01において存在し、この時の k_{eff} や k_{∞} はともに0.8以下である。H/U比が0.1以上の場合には k_{eff} は k_{∞} を超えない。この時の中性子増倍率は k_{∞} が0.8を上回っている。つまり、本節の体系(ウラン密度10.0 g UO_2/cm^3 、濃縮度4 wt %)において、 k_{∞} が0.8を上回るようなときの k_{eff} は常に k_{∞} より低い (Fig.5 参照)。

4.2 重水反射体付き体系の場合

計算ケース(3)の結果をFig.6に示す。 UO_2 密度は10.0 g UO_2/cm^3 を、濃縮度は $k_{eff} > k_{\infty}$ となる体系の中で、臨界上最も厳しい濃縮度の4 wt %を用いて計算した。

H/U比が0.0の場合のこの体系では $k_{eff} > k_{\infty}$ であり、平板厚さが薄い所の方が k_{eff} と k_{∞} の差が大きく、厚さが増すにつれて k_{eff} は減少し k_{∞} に近づいてゆくが、 k_{eff} は k_{∞} よりも平板厚さ100 cmで約22% Δk も大きい。

H/U比が0.1の場合でも、体系の k_{eff} は $k_{eff} > k_{\infty}$ であり、平板厚さが増すにつれて k_{eff} は減少して k_{∞} に近づいてゆくが k_{∞} より大きい。 k_{eff} が k_{∞} を上回る量は平板厚さ100 cmで約14% Δk である。

本節のFig.6の結果から、平板厚さ変化による k_{eff} と k_{∞} の関係が、H/U比が0.0と0.1の場合における重水反射体付き体系について次のようにわかる。

重水反射体付き体系のある条件下では、 $k_{eff} > k_{\infty}$ となる場合がある。 k_{∞} が1.0未満でも、

k_{eff} が 1.0 を越えることがある。この体系の H/U 比が 0.0 から 0.1 に増えると、 k_{eff} も k_{∞} も共に増えるが k_{eff} と k_{∞} との差は減り k_{∞} は k_{eff} に近づく現象を示す (Fig.6 参照)。

5. 考 察

5.1 スペクトル・ファクターを使った結果の検討

2.1 節のスペクトル・ファクター導入式にもとづいて、SF-1 と L/A の大小関係を調べる。その結果を Fig.7, Fig.8 に示す。UO₂ 密度は 10.0 g UO₂/cm³ を、ウラン濃縮度は 4 wt % を、H/U 比は 0.0 を用いて軽水反射体付きと重水反射体付きの場合について計算した。

Fig.7 は軽水反射体付きのときの SF-1 と L/A の関係を示す。平板厚さが約 30cm よりも薄い所で SF-1 < L/A であるが、30cm よりも厚い所では逆転して SF-1 > L/A となる。これは平板厚さ 30cm の所を超えると、中性子エネルギー・スペクトル変化による反応度増倍の方が漏れによる反応度減少よりも大きくなることを計算上で示しており、Fig.4 のウラン密度 10.0 g UO₂/cm³、濃縮度 4 wt %、H/U 比 = 0.0 のときの $k_{\text{eff}} > k_{\infty}$ となる現象と一致している (Fig.7 参照)。

Fig.8 は重水反射体付きの場合における SF-1 と L/A の関係であり、Fig.6 のウラン密度 10.0 g UO₂/cm³、濃縮度 4 wt %、H/U 比 = 0.0 のときの $k_{\text{eff}} > k_{\infty}$ となる現象と一致している (Fig.8 参照)。

以上のことより次のことが言える。

SF を使って k_{eff} と k_{∞} の大小関係を表現した 2.1 節の (5) 式は $k_{\text{eff}} > k_{\infty}$ となる条件を明らかにしている。 $k_{\text{eff}} < k_{\infty}$ となる条件 (5) 式の逆もまた明らかである。

5.2 H/U 比によるスペクトル・ファクターの変化

4.1.2 節では、H/U 比を 0.0 から大きくすると、 $k_{\text{eff}} > k_{\infty}$ の傾向がなくなり、ついには $k_{\text{eff}} < k_{\infty}$ となる結果を得たが、ここでは SF がどのように変わるかについて H/U 比別に調べる。UO₂ 密度とウラン濃度は 10.0 g UO₂/cm³ と 4 wt % を用いた。その結果を Fig.9 に示す。ただし SF = 1.0 とは反射体が存在しても燃料中の中性子エネルギー・スペクトルがほとんど変化しないことを意味する。

どの H/U 比の場合も平板厚さが薄い所で SF が大きく、厚さが増すにつれて SF は減少している。H/U 比が 0.0 のときの SF の値が最も大きい (平板厚さ 10cm 付近で 2.0 を超えている)。

一方、H/U 比が大きければ大きいほど SF は小さくなり、H/U 比が 3.0 では平板厚さ 30cm 以上ではほぼ SF = 1.0 である。とくに H/U 比が 2.0 の場合、SF の値は平板厚さ 10cm の所でも約 1.08 と小さい (Fig.9 参照)。

以上のことより次のことが考えられる。

H/U 比が小さいと SF は大きくなり SF-1 > L/A となる可能性が高くなる。H/U 比が大き

k_{eff} が 1.0 を越えることがある。この体系の H/U 比が 0.0 から 0.1 に増えると、 k_{eff} も k_{∞} も共に増えるが k_{eff} と k_{∞} との差は減り k_{∞} は k_{eff} に近づく現象を示す (Fig.6 参照)。

5. 考 察

5.1 スペクトル・ファクターを使った結果の検討

2.1 節のスペクトル・ファクター導入式にもとづいて、SF-1 と L/A の大小関係を調べる。その結果を Fig.7, Fig.8 に示す。UO₂ 密度は 10.0 g UO₂/cm³ を、ウラン濃縮度は 4 wt % を、H/U 比は 0.0 を用いて軽水反射体付きと重水反射体付きの場合について計算した。

Fig.7 は軽水反射体付きのときの SF-1 と L/A の関係を示す。平板厚さが約 30cm よりも薄い所で SF-1 < L/A であるが、30cm よりも厚い所では逆転して SF-1 > L/A となる。これは平板厚さ 30cm の所を超えると、中性子エネルギー・スペクトル変化による反応度増倍の方が漏れによる反応度減少よりも大きくなることを計算上で示しており、Fig.4 のウラン密度 10.0 g UO₂/cm³、濃縮度 4 wt %、H/U 比 = 0.0 のときの $k_{\text{eff}} > k_{\infty}$ となる現象と一致している (Fig.7 参照)。

Fig.8 は重水反射体付きの場合における SF-1 と L/A の関係であり、Fig.6 のウラン密度 10.0 g UO₂/cm³、濃縮度 4 wt %、H/U 比 = 0.0 のときの $k_{\text{eff}} > k_{\infty}$ となる現象と一致している (Fig.8 参照)。

以上のことより次のことが言える。

SF を使って k_{eff} と k_{∞} の大小関係を表現した 2.1 節の (5) 式は $k_{\text{eff}} > k_{\infty}$ となる条件を明らかにしている。 $k_{\text{eff}} < k_{\infty}$ となる条件 (5) 式の逆もまた明らかである。

5.2 H/U 比によるスペクトル・ファクターの変化

4.1.2 節では、H/U 比を 0.0 から大きくすると、 $k_{\text{eff}} > k_{\infty}$ の傾向がなくなり、ついには $k_{\text{eff}} < k_{\infty}$ となる結果を得たが、ここでは SF がどのように変わるかについて H/U 比別に調べる。UO₂ 密度とウラン濃度は 10.0 g UO₂/cm³ と 4 wt % を用いた。その結果を Fig.9 に示す。ただし SF = 1.0 とは反射体が存在しても燃料中の中性子エネルギー・スペクトルがほとんど変化しないことを意味する。

どの H/U 比の場合も平板厚さが薄い所で SF が大きく、厚さが増すにつれて SF は減少している。H/U 比が 0.0 のときの SF の値が最も大きい (平板厚さ 10cm 付近で 2.0 を超えている)。

一方、H/U 比が大きければ大きいほど SF は小さくなり、H/U 比が 3.0 では平板厚さ 30cm 以上ではほぼ SF = 1.0 である。とくに H/U 比が 2.0 の場合、SF の値は平板厚さ 10cm の所でも約 1.08 と小さい (Fig.9 参照)。

以上のことより次のことが考えられる。

H/U 比が小さいと SF は大きくなり SF-1 > L/A となる可能性が高くなる。H/U 比が大き

いとこの可能性が低い。とくに UO_2 燃料体系の周りを軽水が取り巻いた場合、燃料のH/U比が2.0以上であるならば、軽水反射体が燃料中の中性子エネルギー・スペクトルに与える影響を無視してもよいと思われる。

5.3 軽水反射体付き体系での結果の検討

軽水反射体付き無限平板体系についても、 k_{eff} も k_{∞} も十分1.0未満のとき $k_{\text{eff}} > k_{\infty}$ となる場合があることを得た。また k_{∞} が1.0に近いときには $k_{\text{eff}} < k_{\infty}$ となり、平板厚さの増大にともなってこの関係を保ちながら k_{eff} は k_{∞} に漸近してゆく。つまり、軽水反射体付き無限平板体系において k_{∞} が1.0に近くかつ1.0より小さい場合、 k_{eff} は k_{∞} より小さく k_{∞} を超えない、即ち k_{eff} は1.0より小さくこの体系は未臨界と見てよい。

UO_2 燃料において、平板厚さにとまなう k_{∞} を1.0に近づけるための主要因は、4章の結果から① ^{235}U の濃縮度を上げること、②H/U比を大きくすることである。さらに2.1節スペクトル・ファクターの導入や5.1節スペクトル・ファクターによる結果の検討から、 $k_{\text{eff}} > k_{\infty}$ となる可能性があるのは $\text{SF}-1 > L/A$ となる場合である。よって $k_{\infty} < 1.0$ の体系の臨界性について調べるには $\text{SF}-1$ と L/A の関係をウラン濃縮度とH/U比の変化について分析しなければならない。

5.2節で示したように $\text{SF}-1$ が L/A よりも大きくなるのは UO_2 燃料中の水分(H/U比)が非常に少ない場合であると考えられる。即ち水分が少なければ少ないほど、反射体の存在により $k_{\text{eff}} > k_{\infty}$ となる可能性は高くなる。一方、ウラン濃縮度についてみれば、ウラン濃縮度の低い体系ほど反射体中の水素の影響をうける。

したがってH/U比が小さくウラン濃縮度の低い体系において、 $k_{\text{eff}} > k_{\infty}$ となる可能性が高い。ところがそのような体系は、 k_{∞} が1.0より大幅に小さく、 $k_{\text{eff}} > k_{\infty}$ となり得たとしても、臨界になることはない。つぎにH/U比やウラン濃縮度を増大させると k_{∞} が大きくなり、系も臨界に近づいてゆくが反射体による熱化効果が減少してゆき、或るH/U比やウラン濃縮度以上では $L/A > \text{SF}-1$ となり、 k_{eff} が k_{∞} より大きくなることはない。

以上の検討の結果、 $k_{\infty} < 1.0$ なる軽水反射体付きウラン燃料体系において $k_{\text{eff}} > k_{\infty}$ の特異性は k_{∞} が1.0より十分小さい所で発生するが、 k_{∞} が1.0に近い(濃縮度が高いか燃料中に水を含む)体系においては $k_{\text{eff}} > k_{\infty}$ となることはないと考えられる。

5.4 重水反射体付き体系での結果の検討

重水反射体付き無限平板体系について、Fig.6 で見たように、H/U比が0.0でも0.1でも $k_{\text{eff}} > k_{\infty}$ である。しかし平板厚さ100 cmの所での k_{eff} と k_{∞} は接近している。そこでH/U比をさらに増した場合について調べるため、他の条件は変えずにH/U比のみ0.5と1.0にして平板100 cmで計算してみた。

結果はH/U比が0.5のとき $k_{\text{eff}} = 1.0444$ 、 $k_{\infty} = 1.0038$ であり、H/U比が1.0のとき $k_{\text{eff}} = 1.1398$ 、 $k_{\infty} = 1.1218$ となる。両者ともに依然として $k_{\text{eff}} > k_{\infty}$ である。

このことから次のことが言える。

重水反射体付き無限平板体系において k_{∞} が1.0に近いか、または1.0より小さい場合、 k_{eff} は k_{∞} より大きくなってしまふことがある。

5.5 無限平板以外の燃料形状についての検討

本節では無限平板体系を採用した理由について、この体系が反射体による反応度上昇効果の最も大きいことを球形状との比較によって証明する。

(1) 理論的裏付け

反射体がない場合での中性子漏洩量が近い球半径 R と平板厚さ T が等しい場合について比較する。

反射体が付いた場合の両体系のバックリング B^2 は

$$B^2(\text{球}) = \left(\frac{\pi}{R + \alpha(\text{球})} \right)^2 \quad (6)$$

$$B^2(\text{平板}) = \left(\frac{\pi}{T + 2\alpha(\text{平板})} \right)^2 \quad (7)$$

である。ここで π は円周率、 R は球半径、 T は平板厚さ、 α は

$$\alpha = D \cdot \frac{1 + \beta}{1 - \beta} \quad (8)$$

である。ただし、 β はアルベドであり、

$$\beta(\text{球}) = \frac{1 - 2D(K + 1/R)}{1 + 2D(K + 1/R)} \quad (9)$$

$$\beta(\text{平板}) = \frac{1 - 2KD}{1 + 2KD} \quad (10)$$

(D : 拡散係数、 K : 拡散距離の逆数)

である。よって $\beta(\text{平板})$ の方が $\beta(\text{球})$ よりも大きい。このことの物理的意味は次の通りである。中性子が反射体中へかなりの距離まで進んでから散乱してもどされる確率は、中性子源側の領域に対してその反射体中の中性子から張った立体角に関係する。無限平板の場合にはこの角は 2π に近いものであるが、球の場合は明らかにもっと小さくなってしまふ。そして球の半径 R が無限大になれば予期されるとおり球の式(9)は無限平板に対する式(10)とおなじものになる。したがって標記の検討は、無限平板体系についてのみおこなっておけばよいと考えられるが、反射体の中性子エネルギー熱化の影響を評価するため、球体系において確認計算を行ってみる。

(2) 計算方法及び条件

反射体付の体系において反射体による影響を考慮して、

$$k_{\text{eff}} = \frac{k_{\infty} \cdot SF}{1 + M^2 B^2} = \frac{k_{\infty} \cdot SF}{1 + L/A} \quad (11)$$

SF：中性子エネルギー・スペクトル熱化の効果（燃料内）

L/A：漏れの効果（燃料内）

とすると、

$$\frac{k_{\text{eff}}(\text{球})}{k_{\text{eff}}(\text{平板})} = \frac{SF(\text{球})/SF(\text{平板})}{(1+L/A)(\text{球})/(1+L/A)(\text{平板})} \quad (12)$$

である。よってRとTが等しい場合の球と平板体系のSFやL/A及び k_{eff} を比較検討する。

両体系ともに ^{235}U 濃縮度 4 wt%， UO_2 密度 10.0 g UO_2/cm^3 ，H/U比 0.0，軽水反射体 30 cm が付いているとして計算する。

(3) 結果

Fig. 10 に示すように球体系のL/Aは平板体系のL/Aよりも大きく、SFも球体系の方が大きい。しかし球体系においては常に $L/A > SF - 1$ となり、漏れの効果の方が大きいことがわかる（平板体系では $L/A < SF - 1$ となる場合がある）（Fig. 10 参照）。

同様に Fig. 11 の球体系においては $k_{\text{eff}} < k_{\infty}$ となる（平板体系では $k_{\text{eff}} > k_{\infty}$ となる場合がある）（Fig. 11 参照）。

(4) 結論

RとTが等しい時の反射体による反応度上昇効果は平板体系の方が球体系よりも大きいということを理論及び計算で証明できた。即ち、本方法により $k_{\infty} < 1.0$ の UO_2 燃料の臨界性を調べる際には平板体系のみ調べれば十分であると考えられる。

5.6 UO_2 燃料以外の燃料についての検討

反射体の中で減速されて中性子エネルギー・スペクトルが熱化した効果が中性子増倍率にどのように影響を及ぼしているかについて、 UO_2 燃料のみならず他のウラン系やプルトニウム系の核燃料種類をとりあげて検討する。

上記検討のために、H/U比に伴う k_{∞} の変化を Fig. 12～Fig. 19 に示す。これらの図はいずれも均質な各種核燃料を濃縮度別に表現したもので臨界安全ハンドブックから転載した。

Fig. 12～Fig. 19のうち、とくに濃縮度が10%以下のウラン系燃料について、H/U比がH/U < 約 2～10のところでは k_{∞} がH/U比が大きくなるにつれて単調増加している。これは k_{∞} が、減速材増加による中性子エネルギー・スペクトル熱化の効果によって増大しているようすを表している。 k_{∞} の増加の傾向はウラン系燃料でほとんど同様であるが、とくに UO_2 又はU燃料のも

のが最も大きい。

一方、濃縮度が10%以上のウラン系燃料やプルトニウム系燃料の場合は、H/U比がH/U < 約2~10のところでは k_{∞} は単調減少している。即ち、これらの燃料において中性子エネルギー・スペクトルを熱化すると中性子増倍率は減少するのである。

以上の検討の結果、減速材による中性子エネルギー・スペクトル熱化の効果が中性子増倍率の増大に最も寄与するのは、 UO_2 又はU燃料であることが分かった。よって UO_2 燃料の場合についてのみ本問題を検討しておけば十分であり、他の核燃料について検討する必要はない。

なお、 ^{235}U の濃縮度が10%以上のウラン系燃料の場合には、H/U比が100以下で $k_{\infty} > 1.0$ となり、本検討の対象外となる。

ウランとプルトニウムを混合したMOX系燃料のH/U比にともなう k_{∞} の変化は、ウラン系とプルトニウム系燃料の中間の特性を示す (Fig.19) ので検討の必要はないと考える (Fig.12 ~ 19 参照)。

6. ま と め

以上述べたことをまとめると次のようになる。

- (1) 軽水反射体付き UO_2 燃料体系において $k_{eff} > k_{\infty}$ となる場合は確かに存在するが、このとき体系は十分未臨界である。さらに k_{∞} が1.0近くかつ未臨界の場合では、 k_{eff} は k_{∞} を超えないと見なしてよい。つまり k_{∞} が1.0未満であれば軽水反射体が付いても臨界になることはない。
- (2) 重水反射体付き無限平板 UO_2 燃料体系において $k_{eff} > k_{\infty}$ となる場合は存在する。つまり k_{∞} が1.0未満であっても重水反射体付き有限体系は $k_{eff} > 1.0$ すなわち臨界超過となり得る。
- (3) 反射体効果の指標として提示したスペクトル・ファクター(SF)は中性子エネルギー・スペクトル変化による反応度増加を示す上で有効に役立ち、SFを使うことによって体系の k_{eff} と k_{∞} の大小関係を定量的に説明できる。
- (4) k_{∞} が1.0未満であるウラン及びプルトニウム燃料は、いかなる凸形状の場合でも、軽水反射体の影響により臨界になることはない。

のが最も大きい。

一方、濃縮度が10%以上のウラン系燃料やプルトニウム系燃料の場合は、H/U比がH/U < 約2~10のところでは k_{∞} は単調減少している。即ち、これらの燃料において中性子エネルギー・スペクトルを熱化すると中性子増倍率は減少するのである。

以上の検討の結果、減速材による中性子エネルギー・スペクトル熱化の効果が中性子増倍率の増大に最も寄与するのは、 UO_2 又はU燃料であることが分かった。よって UO_2 燃料の場合についてのみ本問題を検討しておけば十分であり、他の核燃料について検討する必要はない。

なお、 ^{235}U の濃縮度が10%以上のウラン系燃料の場合には、H/U比が100以下で $k_{\infty} > 1.0$ となり、本検討の対象外となる。

ウランとプルトニウムを混合したMOX系燃料のH/U比にともなう k_{∞} の変化は、ウラン系とプルトニウム系燃料の中間の特性を示す (Fig.19) ので検討の必要はないと考える (Fig.12~19 参照)。

6. ま と め

以上述べたことをまとめると次のようになる。

- (1) 軽水反射体付き UO_2 燃料体系において $k_{eff} > k_{\infty}$ となる場合は確かに存在するが、このとき体系は十分未臨界である。さらに k_{∞} が1.0近くかつ未臨界の場合では、 k_{eff} は k_{∞} を超えないと見なしてよい。つまり k_{∞} が1.0未満であれば軽水反射体が付いても臨界になることはない。
- (2) 重水反射体付き無限平板 UO_2 燃料体系において $k_{eff} > k_{\infty}$ となる場合は存在する。つまり k_{∞} が1.0未満であっても重水反射体付き有限体系は $k_{eff} > 1.0$ すなわち臨界超過となり得る。
- (3) 反射体効果の指標として提示したスペクトル・ファクター(SF)は中性子エネルギー・スペクトル変化による反応度増加を示す上で有効に役立ち、SFを使うことによって体系の k_{eff} と k_{∞} の大小関係を定量的に説明できる。
- (4) k_{∞} が1.0未満であるウラン及びプルトニウム燃料は、いかなる凸形状の場合でも、軽水反射体の影響により臨界になることはない。

謝 辞

本研究を進めてゆく途中で、有用な解析コード使用の便宜を積極的に図って下さったり理論展開をする中で数々の適切な御助言を下された、日本原子力研究所燃料安全工学部プラント安全解析研究室の片倉純一氏、小室雄一氏、奥野 浩氏、並びに本報告書を御査読いただいた同研究室の野村 靖氏、さらにサンプルデータの準備や解析結果の整理に尽力して下さった袴塚早苗嬢の御協力によって本報告書がまとめられたことをここに記し、合せて著者の心からの謝意を表すものであります。

参 考 文 献

- 1) 科学技術庁原子力安全局核燃料規制課編, "臨界安全ハンドブック", にかん書房, 東京 (1988)。
- 2) M.L.BLUMEYER, " The Effects of Moderating Reflectors on Under-moderated Negative Buckling Cores, " A thesis submitted in partial fulfillment of the Requirements for an MS degree in Nuclear Engineering, University of Washington (1968)。
- 3) E.D.CLAYTON, " Anomalies of Nuclear Criticality, " PNL-SA-4868 Rev. 5, Battelle Memorial Institute, Pacific Northwest Laboratory (June 1979)。

謝 辞

本研究を進めてゆく途中で、有用な解析コード使用の便宜を積極的に図って下さったり理論展開をする中で数々の適切な御助言を下された、日本原子力研究所燃料安全工学部プラント安全解析研究室の片倉純一氏、小室雄一氏、奥野 浩氏、並びに本報告書を御査読いただいた同研究室の野村 靖氏、さらにサンプルデータの準備や解析結果の整理に尽力して下さった袴塚早苗嬢の御協力によって本報告書がまとめられたことをここに記し、合せて著者の心からの謝意を表すものであります。

参 考 文 献

- 1) 科学技術庁原子力安全局核燃料規制課編, "臨界安全ハンドブック", につかん書房, 東京 (1988)。
- 2) M.L.BLUMEYER, " The Effects of Moderating Reflectors on Under-moderated Negative Buckling Cores, " A thesis submitted in partial fulfillment of the Requirements for an MS degree in Nuclear Engineering, University of Washington (1968)。
- 3) E.D.CLAYTON, " Anomalies of Nuclear Criticality, " PNL-SA-4868 Rev. 5, Battelle Memorial Institute, Pacific Northwest Laboratory (June 1979)。

Table 1 Parameters in nuclear criticality calculations

Items	Condition
Geometric form of fuel	Slab
Fuel assembly thickness	Parametrically changed
²³⁵ U enrichment	Parametrically changed
UO ₂ density	10.0 gUO ₂ /cm ³
Moderator	Light-water(H ₂ O)
H/U atomic ratio	Parametrically changed
Reflector	Light-water(H ₂ O) , Heavy-water(D ₂ O)
Reflector thickness	H ₂ O :30cm , D ₂ O :100cm

Table 2 Calculation conditions for ANISN-JR code

Number of energy groups	137
Order of angular quadrature	S 8
Maximum order of scattering	P 1
Decision of convergence	Desired accuracy(ϵ)=1.0*10 ⁻⁵ Point flux convergence criterion =1.0*10 ⁻⁵

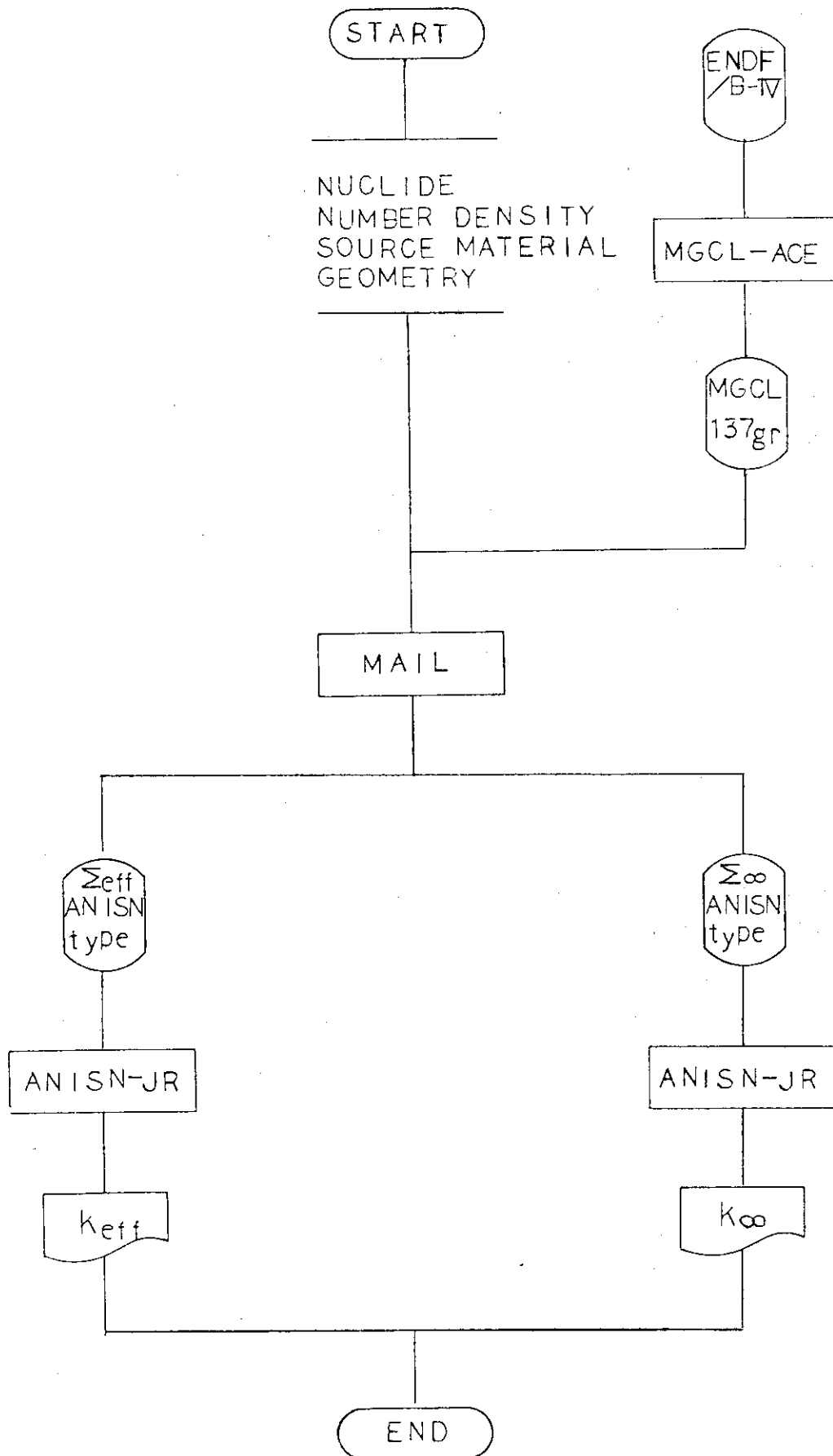


Fig. 1 Flow diagram of the computer code system JACS

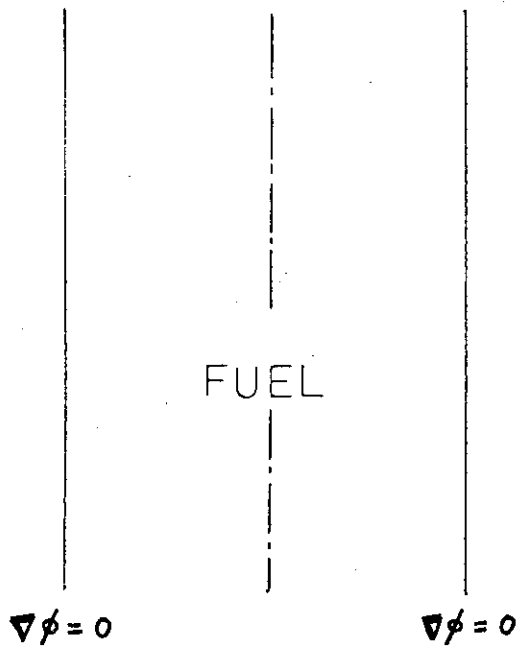


Fig. 2 Calculation model for infinite multiplication factor k_{∞} .
The model is an infinitely-long slab fuel assembly of which boundary is fully reflected.

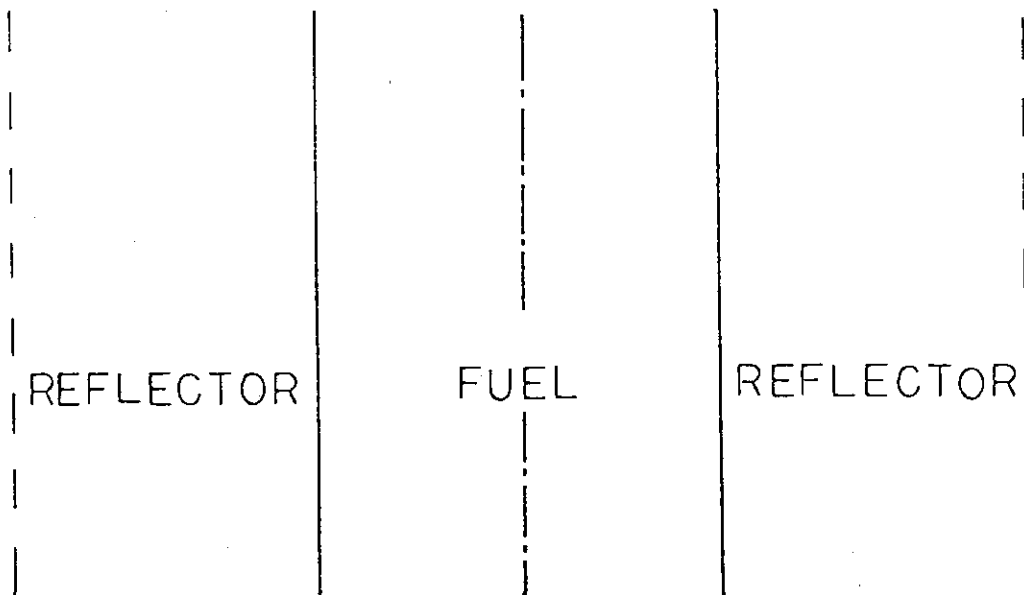


Fig. 3 Calculation model for effective multiplication factor k_{eff} .
The model is an infinitely-long slab fuel assembly surrounded by reflectors of which boundary condition is vacuum.

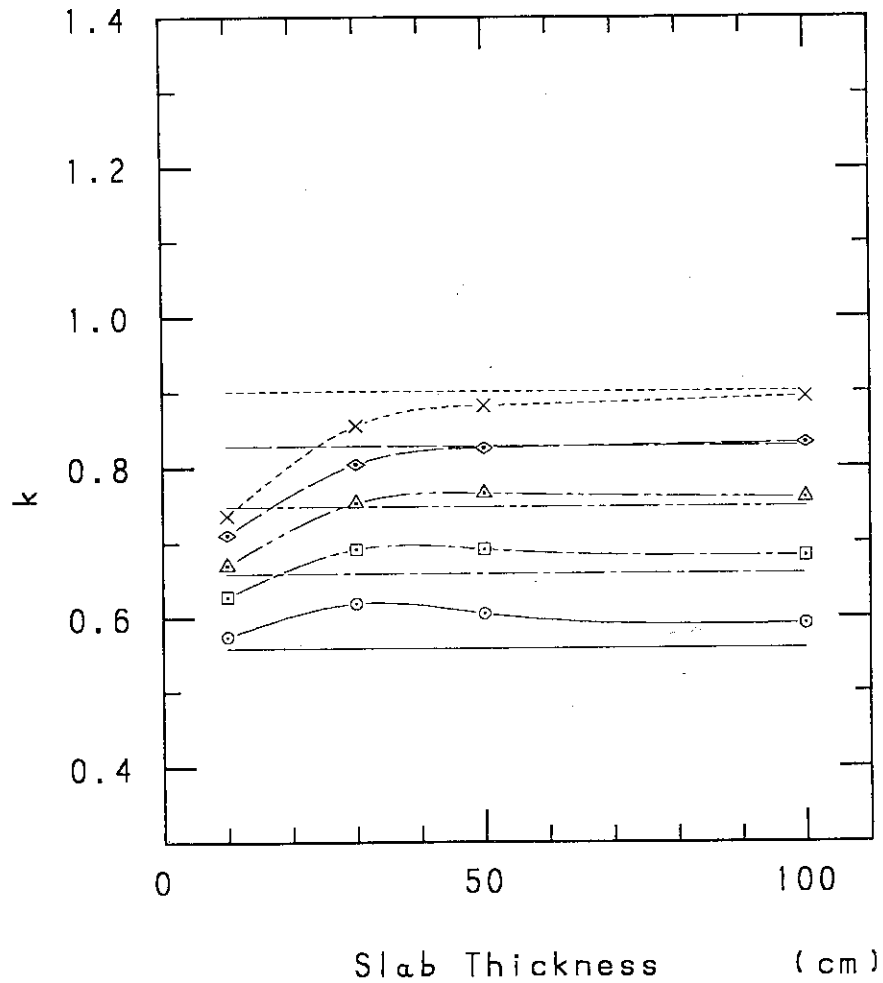


Fig. 4 Variations of k vs. slab thickness

UO_2 density: $10.0 \text{ gUO}_2/\text{cm}^3$

H/U ratio : 0.0

Reflector : light-water 30cm

- \odot — : k_{eff} , 2.0wt% ^{235}U enriched
- : k_{∞} , 2.0wt% ^{235}U enriched
- - - \square - - - : k_{eff} , 3.0wt% ^{235}U enriched
- - - - - : k_{∞} , 3.0wt% ^{235}U enriched
- - - \triangle - - - : k_{eff} , 4.0wt% ^{235}U enriched
- - - - - : k_{∞} , 4.0wt% ^{235}U enriched
- - - \diamond - - - : k_{eff} , 5.0wt% ^{235}U enriched
- - - - - : k_{∞} , 5.0wt% ^{235}U enriched
- - - \times - - - : k_{eff} , 6.0wt% ^{235}U enriched
- - - - - : k_{∞} , 6.0wt% ^{235}U enriched

The k_{eff} is calculated for a slab fuel surrounded by light-water reflector on both sides.

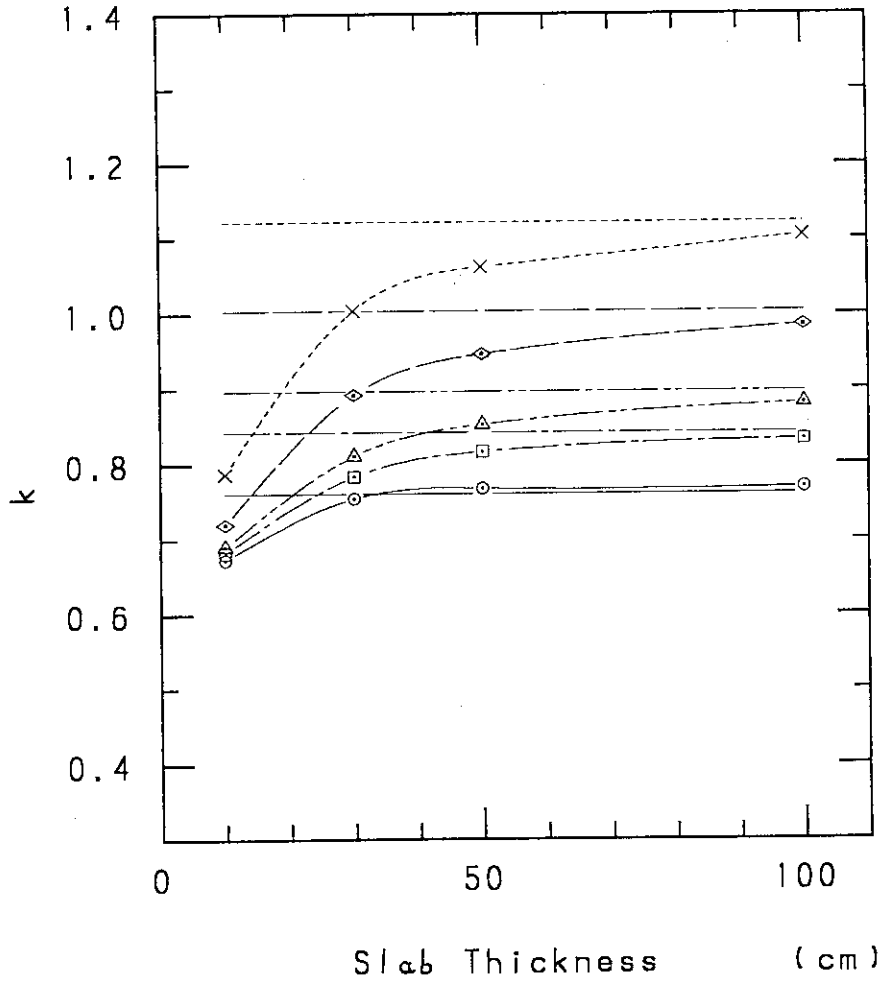


Fig. 5 Variations of k vs. slab thickness

UO₂ density : 10.0 gUO₂/cm³

²³⁵U enrichment: 4.0 wt%

Reflector : light-water 30cm

- ○ — : k_{eff} , H/U ratio = 0.01
- — — : k_{∞} , H/U ratio = 0.01
- - - □ - - - : k_{eff} , H/U ratio = 0.1
- - - - - : k_{∞} , H/U ratio = 0.1
- - - △ - - - : k_{eff} , H/U ratio = 0.2
- - - - - : k_{∞} , H/U ratio = 0.2
- - - ◇ - - - : k_{eff} , H/U ratio = 0.5
- - - - - : k_{∞} , H/U ratio = 0.5
- - - X - - - : k_{eff} , H/U ratio = 1.0
- - - - - : k_{∞} , H/U ratio = 1.0

The k_{eff} is calculated for a slab fuel surrounded by light-water reflector on both sides.

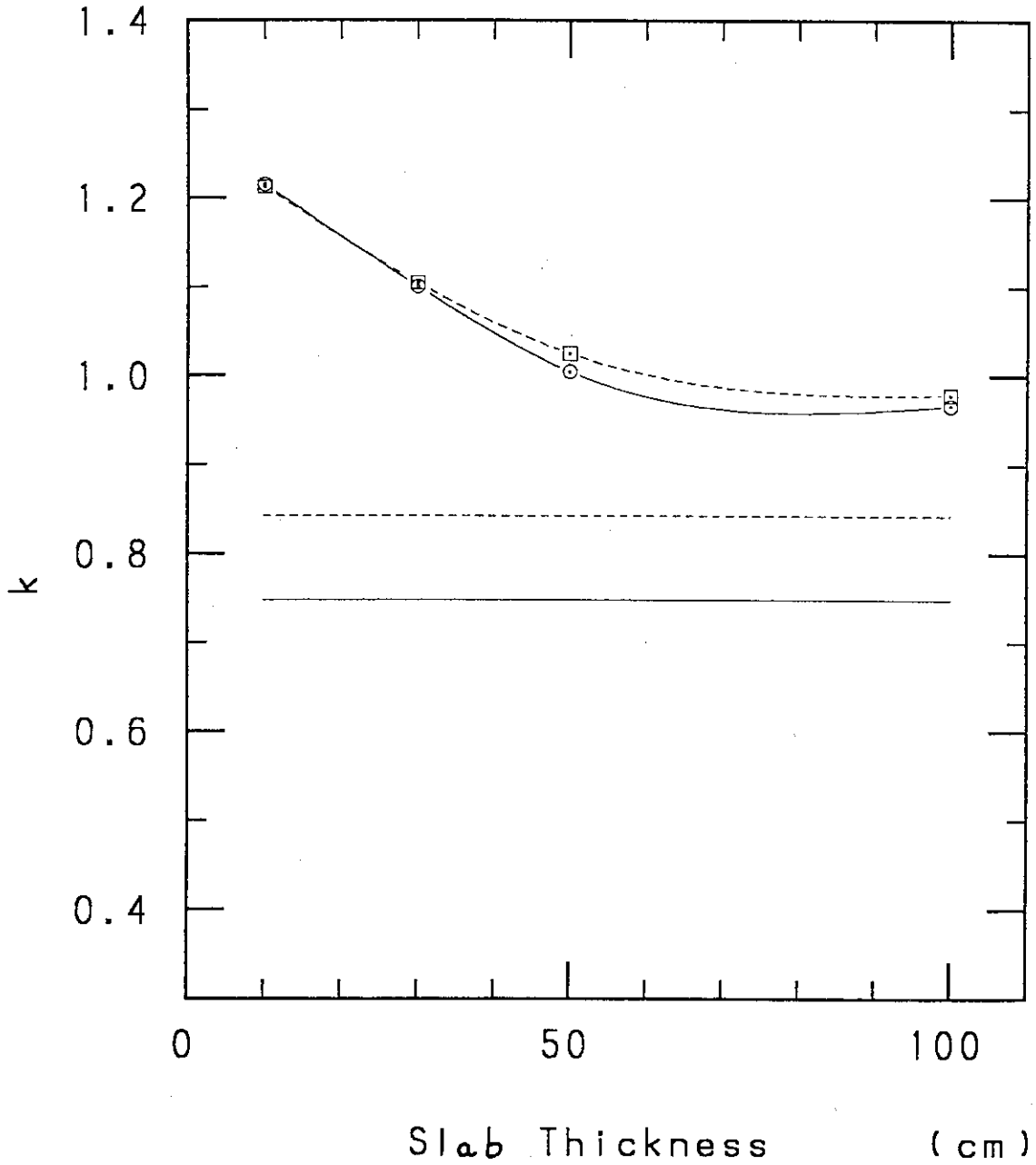


Fig. 6 Variations of k vs. slab thickness

UO₂ density : 10.0 gUO₂/cm³

²³⁵U enrichment: 4.0 wt%

Reflector : heavy-water 100cm

— ⊙ — : k_{eff} , H/U ratio = 0.0

———— : k_{∞} , H/U ratio = 0.0

---- ⊠ ---- : k_{eff} , H/U ratio = 0.1

----- : k_{∞} , H/U ratio = 0.1

The k_{eff} is calculated for a slab fuel surrounded by heavy-water reflector on both sides.

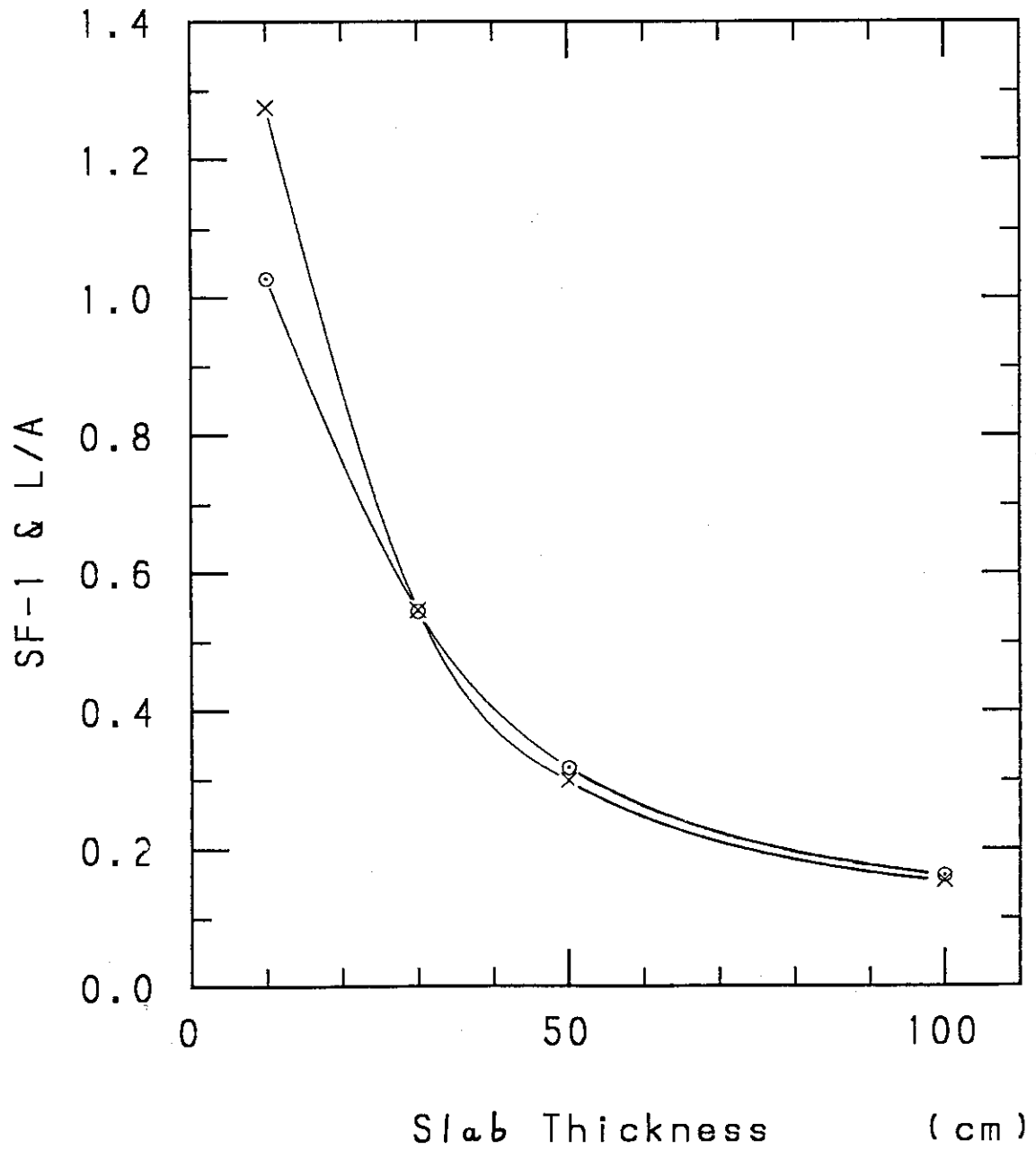


Fig. 7 Variations of SF-1 and L/A vs. slab thickness

UO₂ density : 10.0 gUO₂/cm³

²³⁵U enrichment: 4.0 wt%

H/U ratio : 0.0

Reflector : light-water 30cm

— ○ — : SF-1

— x — : L/A

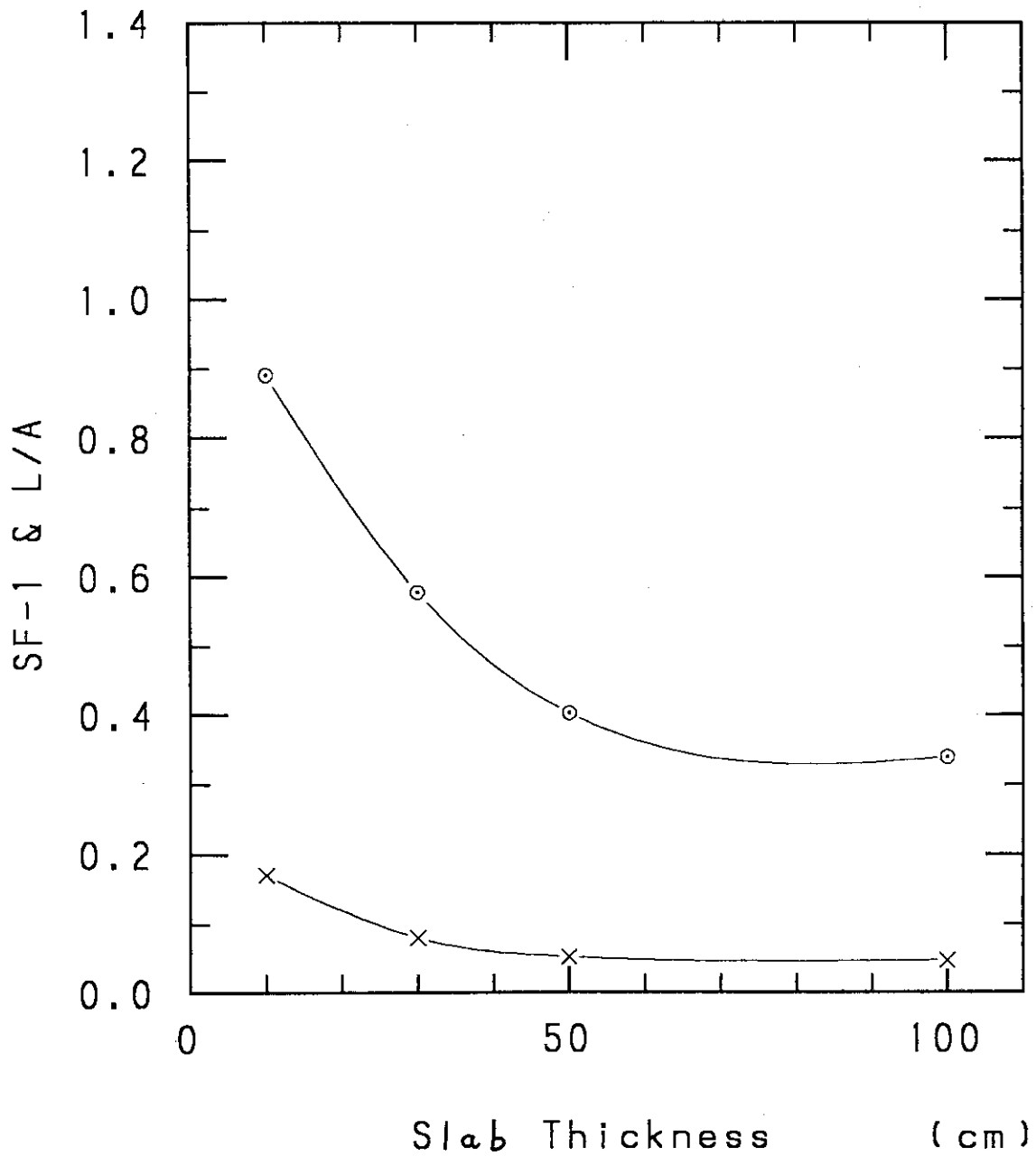


Fig. 8 Variations of SF-1 and L/A vs. slab thickness

UO₂ density : 10.0 gUO₂/cm³

²³⁵U enrichment: 4.0 wt%

H/U ratio : 0.0

Reflector : heavy-water 100cm

— ○ — : SF-1

— × — : L/A

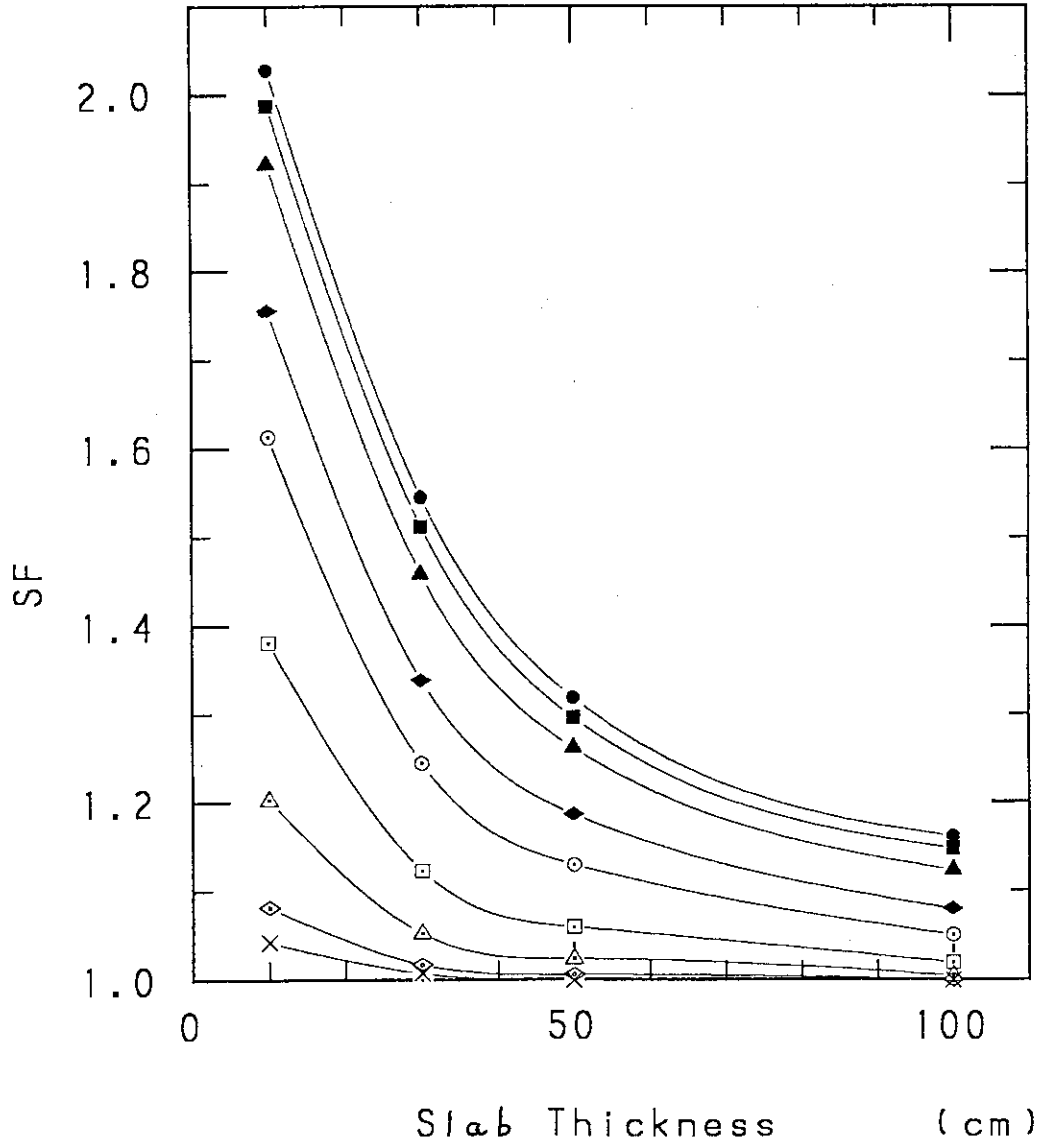


Fig. 9 Variations of SF vs. slab thickness

UO₂ density : 10.0 gUO₂/cm³

²³⁵U enrichment: 4.0 wt%

Reflector : light-water 30cm

- ● — : SF, H/U ratio = 0.0
- ■ — : SF, H/U ratio = 0.01
- ▲ — : SF, H/U ratio = 0.03
- ◆ — : SF, H/U ratio = 0.1
- ⊙ — : SF, H/U ratio = 0.2
- □ — : SF, H/U ratio = 0.5
- △ — : SF, H/U ratio = 1.0
- ◇ — : SF, H/U ratio = 2.0
- × — : SF, H/U ratio = 3.0

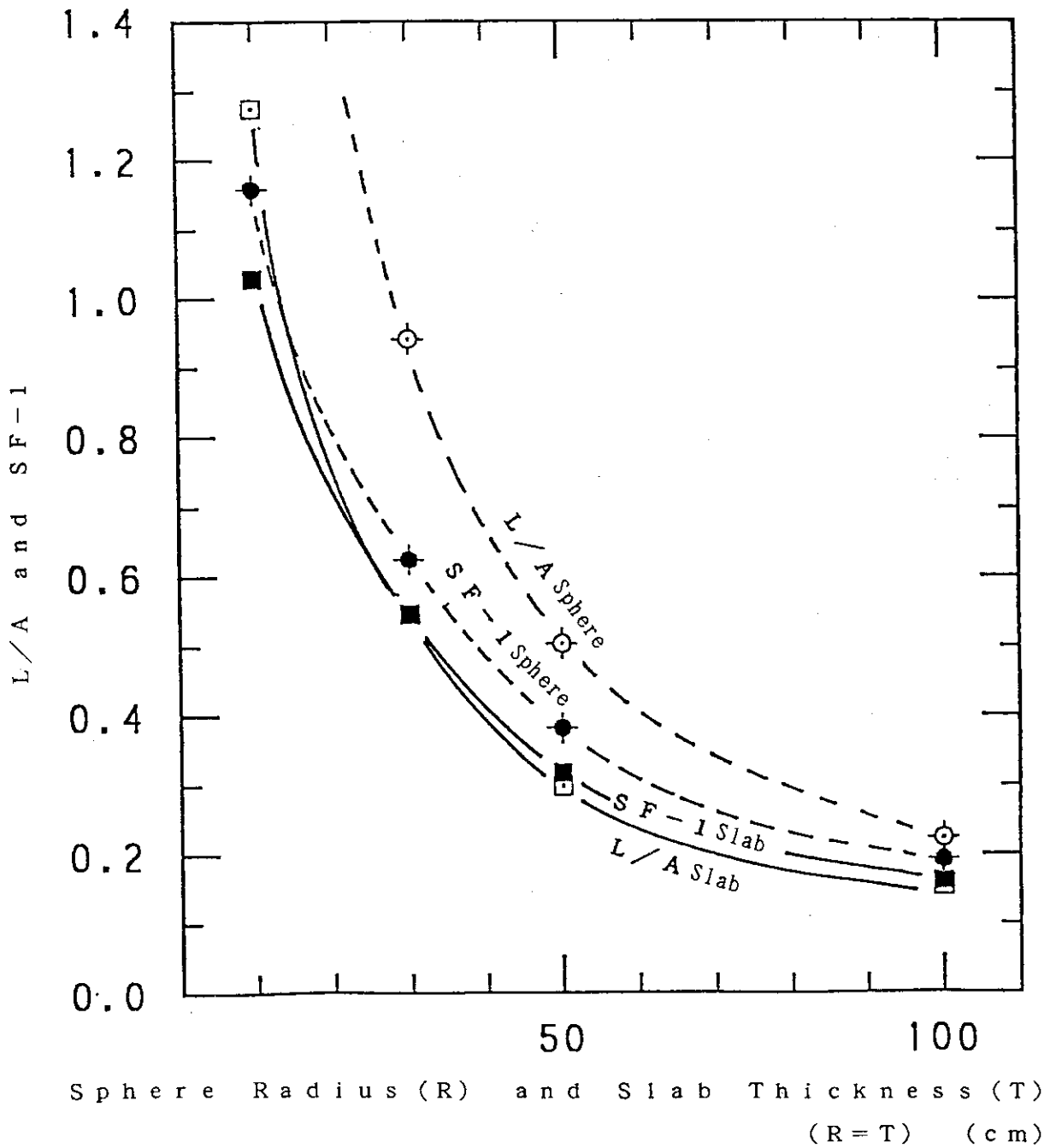


Fig. 10 Variations of SF-1 and L/A vs. sphere radius and slab thickness

UO₂ density : 10.0 gUO₂/cm³

²³⁵U enrichment: 4.0 wt%

H/U ratio : 0.0

Reflector : light-water 30cm

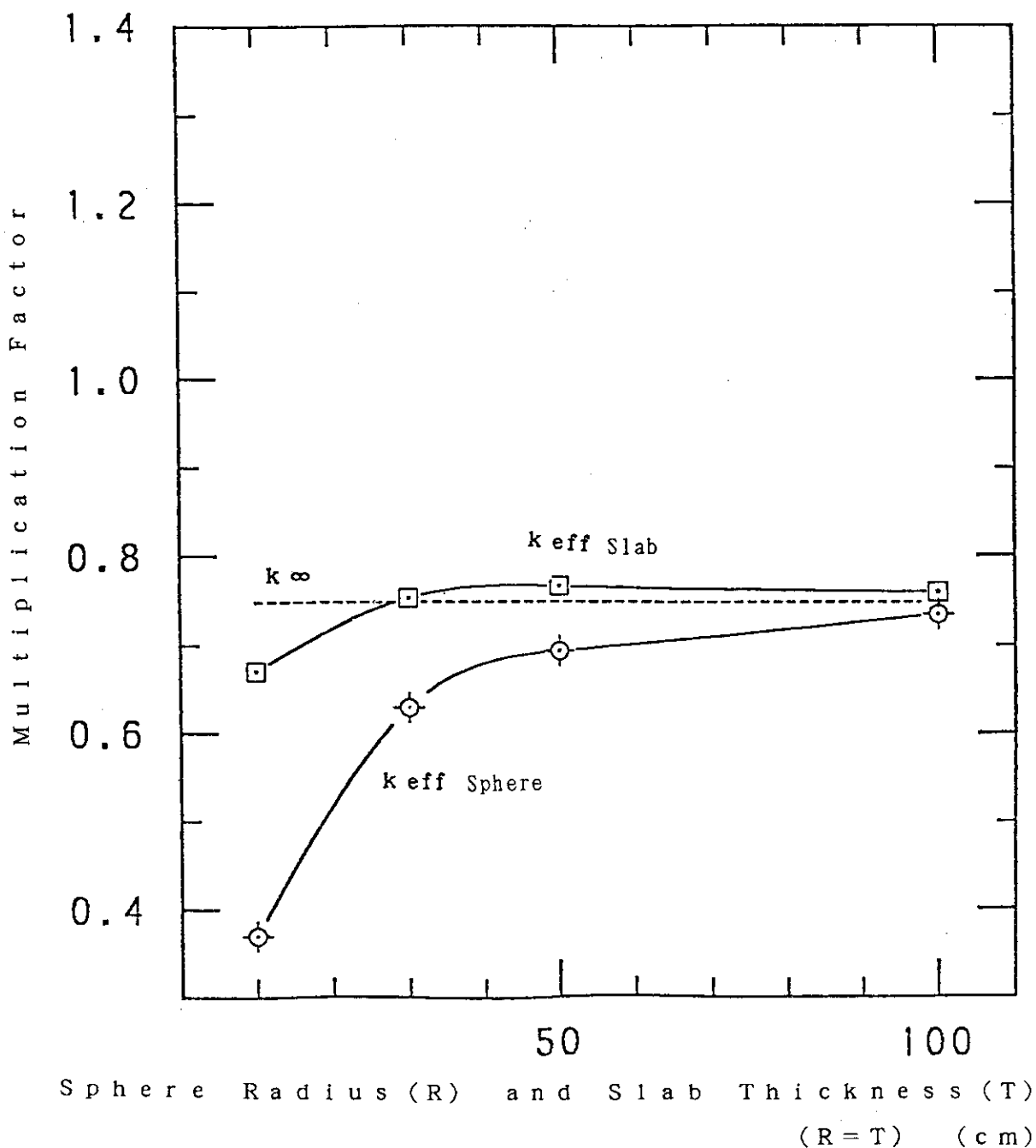


Fig. 11 Variations of k_{eff} and k_{∞} vs. sphere radius and slab thickness

UO_2 density : 10.0 gUO_2/cm^3
 ^{235}U enrichment: 4.0 wt%
 H/U ratio : 0.0
 Reflector : light-water 30cm

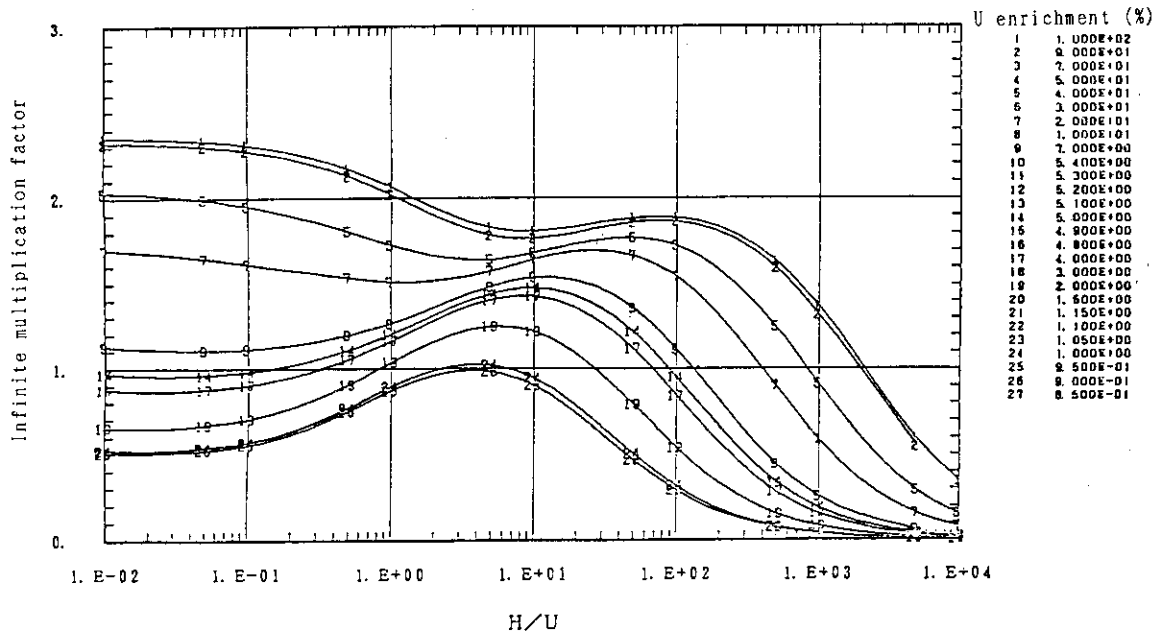


Fig. 12 k_{∞} variations of U-H₂O (homogeneous)

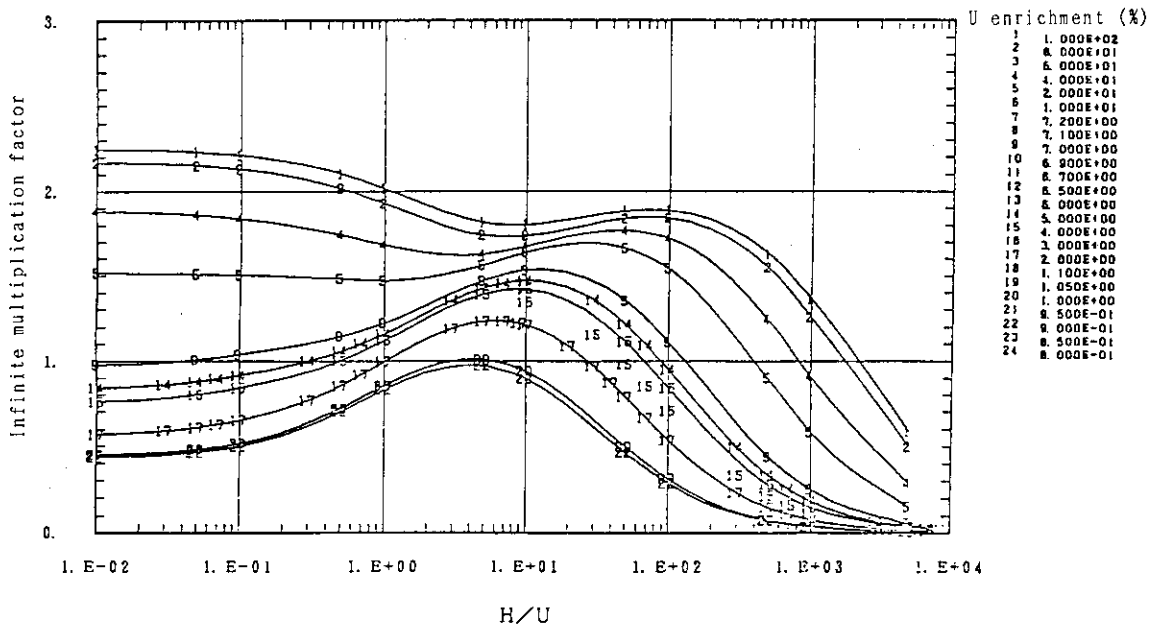


Fig. 13 k_{∞} variations of UO₂-H₂O (homogeneous)

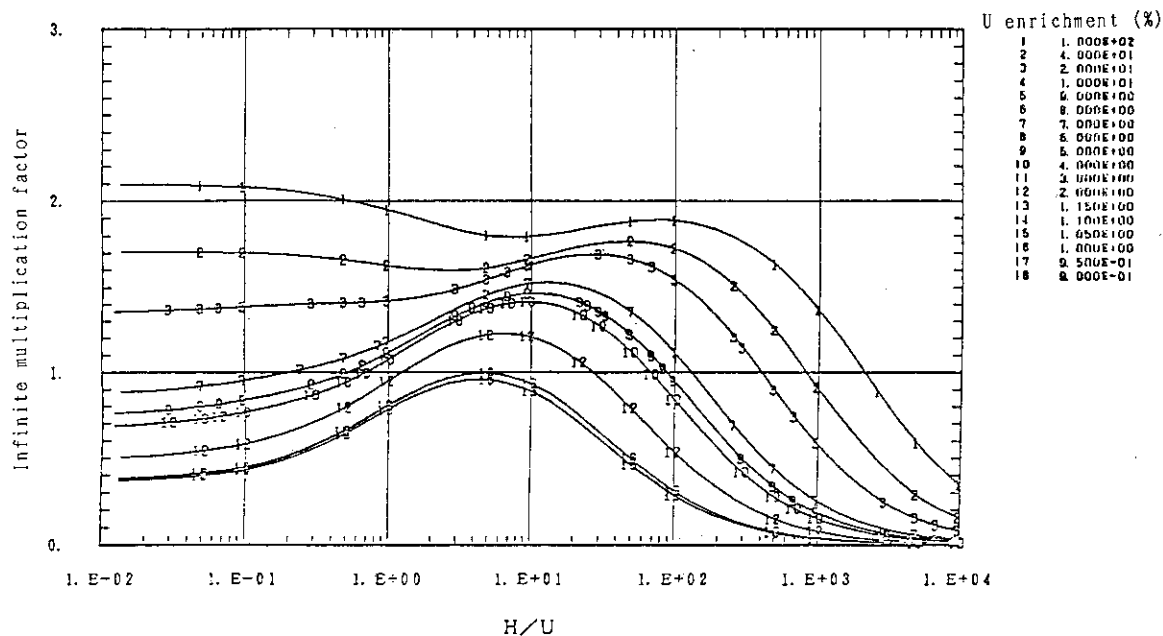


Fig. 14 k_{∞} variations of UO_2-F_2 solution (homogeneous)

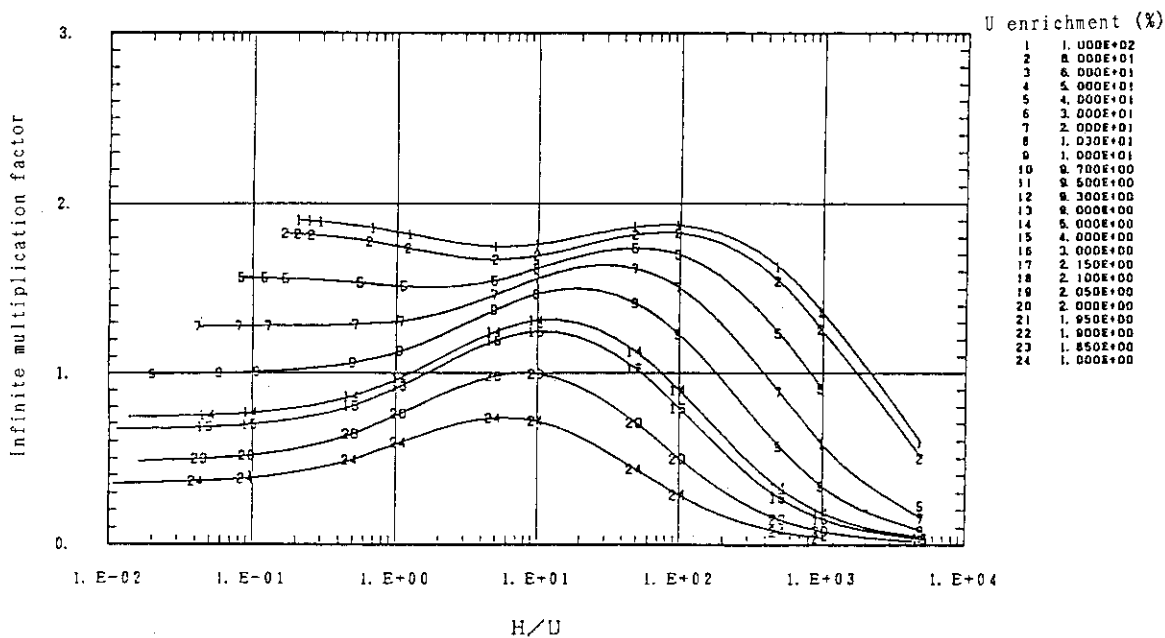


Fig. 15 k_{∞} variations of $UO_2(NO_3)_2$ solution (homogeneous)

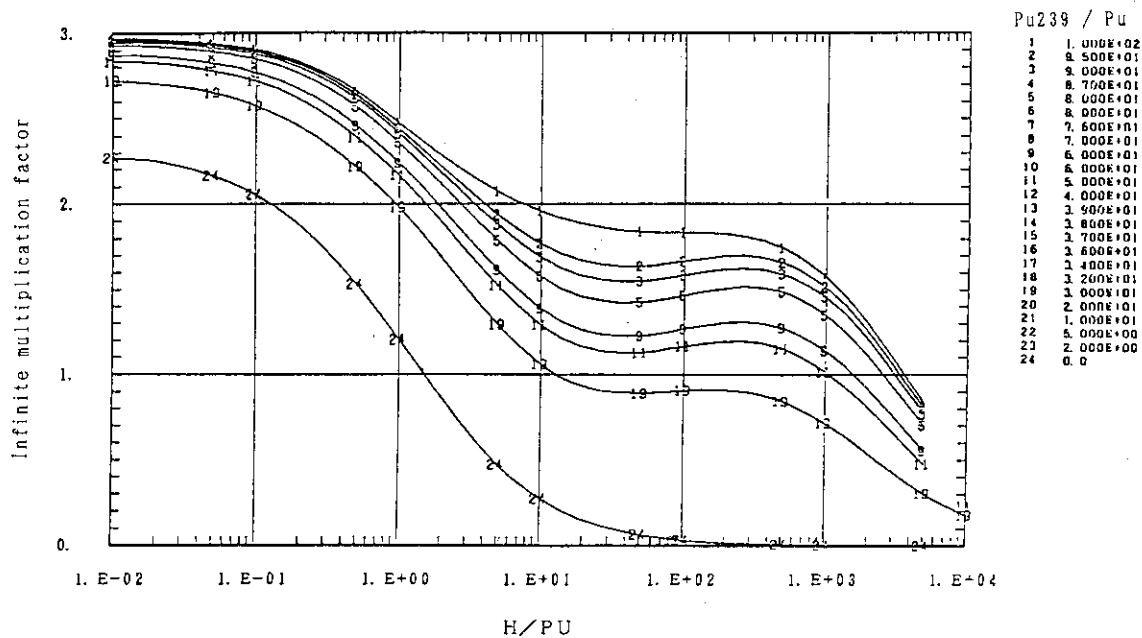


Fig. 16 k_{∞} variations of Pu-H₂O (homogeneous)

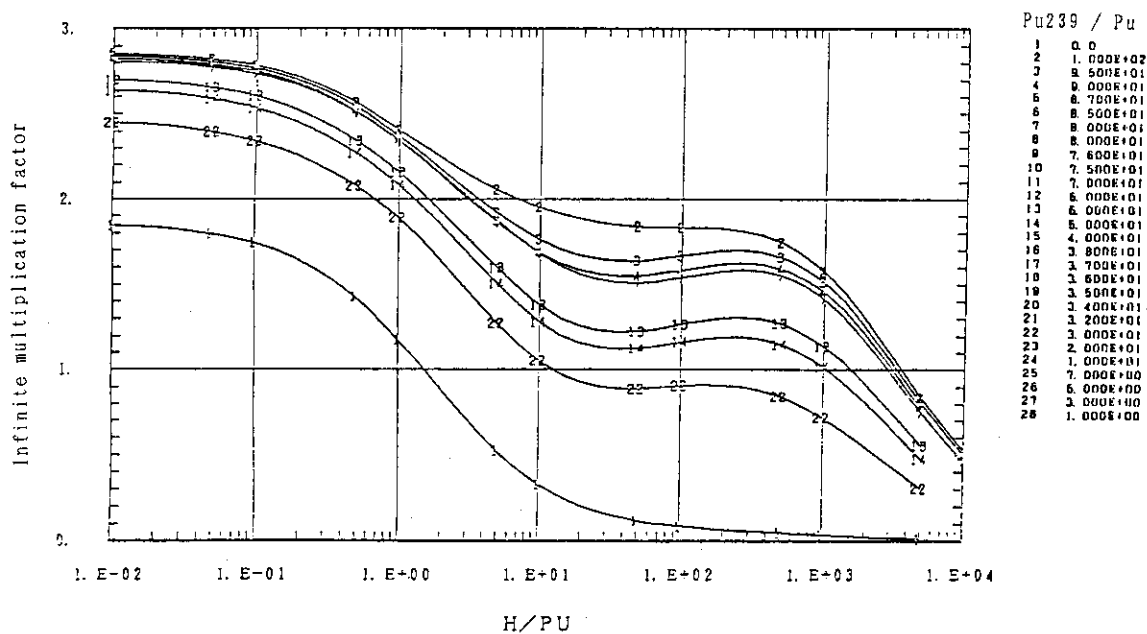


Fig. 17 k_{∞} variations of PuO₂-H₂O (homogeneous)

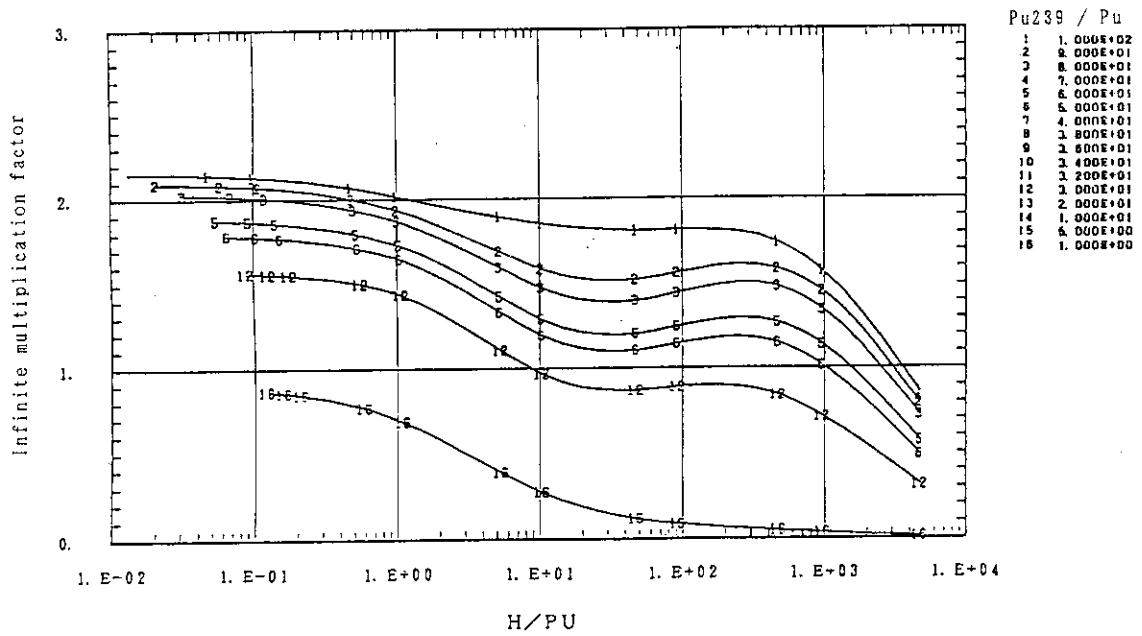


Fig. 18 k_{∞} variations of $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ solution (homogeneous)

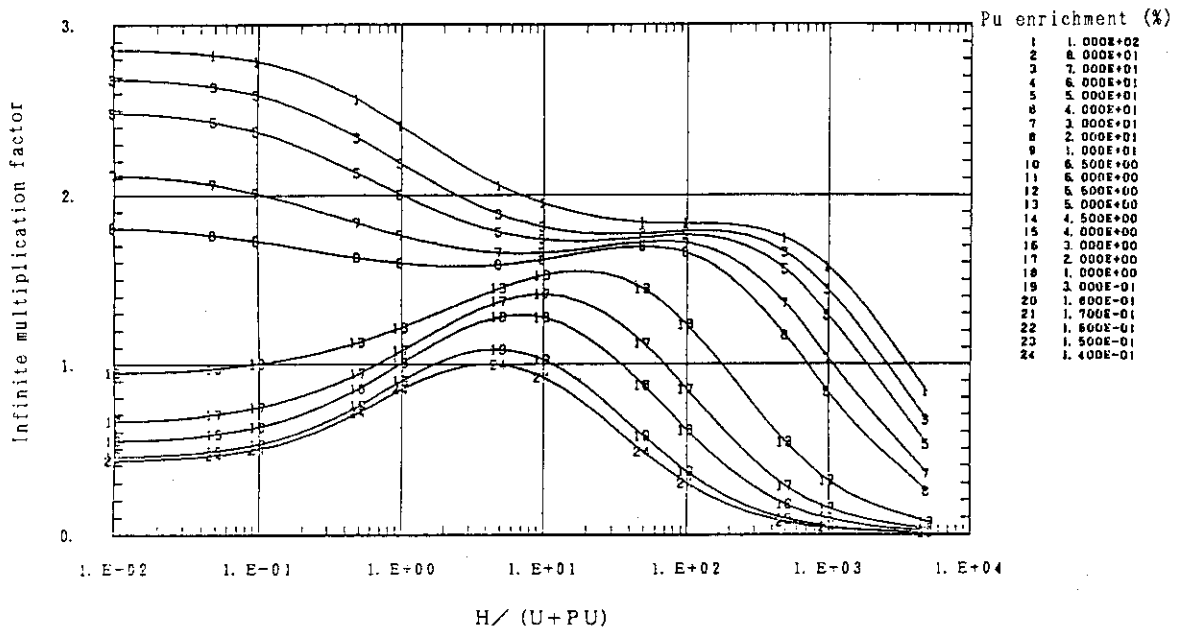


Fig. 19 k_{∞} variations of $\text{PuO}_2 \cdot \text{UO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ (homogeneous, natural uranium, ^{239}Pu 100% plutonium)