

JAERI - M
88-160

中性子輸送に関する十分な反射体厚さと
隔離厚さ

1988年8月

酒井 友宏*・内藤 倣孝・小室 雄一

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。

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, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 いばらき印刷(株)

中性子輸送に関する十分な反射体厚さと隔離厚さ

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部

酒井友宏^{*}・内藤倣孝・小室雄一

(1988年7月28日受理)

核燃料取扱施設の臨界安全性評価に利用できる「十分な反射体厚さ」及び「隔離厚さ」を求める方法について検討した。はじめに、特定の例を対象に詳細な臨界計算を行い、「十分な反射体厚さ」及び「隔離厚さ」を求めることを試みた。次に、詳細計算によって得られた反射体（隔離体）の厚さと中性子増倍係数の関係を利用して、「十分な反射体厚さ」と「隔離厚さ」を簡便に求められる二つの式を、一群拡散近似を用いて導出した。この式を用いて、「十分な反射体厚さ」と「隔離厚さ」を設定するひとつの新しい方法を提案した。

この簡便式に反射体の中性子移動距離を代入すると、「十分な反射体厚さ」が得られる。また、燃料の実効増倍係数、無限増倍係数及び隔離体の中性子移動距離から、「隔離厚さ」を容易に計算できる。

この報告書は、電源開発促進対策特別会計法に基づく科学庁からの受託として行った研究成果の一部である。

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方字白根2-4

* 日本情報サービス㈱

Full Reflector Thickness and Isolation Thickness
on Neutron Transport

Tomohiro SAKAI*, Yoshitaka NAITO and Yuichi KOMURO

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

(Received July 28, 1988)

A method to determine "full reflector thickness" and "isolation thickness", which is utilized for criticality safety evaluation on nuclear fuel facilities, was proposed in this paper. Firstly, a calculation was tried to obtain the two kinds of thicknesses from the result of criticality calculations for a specific case. Then, two simple equations which calculates the two kinds of thicknesses were made from the relation between reflector (or isolator) thickness and k_{eff} , and one-group diffusion theory. Finally, we proposed a new method to determine the thicknesses.

From the method we proposed, "full reflector thickness" and "isolation thickness" can be obtain using the equations and migration length of the reflector (or isolator) and infinite and effective multiplication factor of the fuel.

Keywords: Full Reflector Thickness, Isolation Thickness, Criticality Safety, JACS, Nuclear Fuel Facility, Reflector Factor

The work was performed under contract with Atomic Energy Bureau of Science and Technology Agency of Japan.

* Japan Information Service, LTD.

目 次

1. 序	1
2. 定 義	2
2.1 十分な反射体厚さ	2
2.2 隔離厚さ	2
3. 計 算	5
3.1 対 象	5
3.2 手 法	5
3.3 計算モデル, 計算条件	6
3.4 結 果	6
4. 考 察	7
4.1 反射体 (隔離体) 厚さと反射体効果係数の関係	7
4.2 有限長体系と無限長体系の反射体効果係数の比較	11
4.3 無限円柱, 球, 配列体系の反射体効果係数	11
5. 一般体系の十分な反射体厚さ, 隔離厚さ及び許容隔離厚さ (水, 普通コンクリート)	12
5.1 十分な反射体厚さ	12
5.2 隔離厚さ	13
5.3 許容隔離厚さ	13
6. 結 論	15
謝 辞	15
参考文献	16

Contents

1. Introduction	1
2. Definition	2
2.1 Full Reflector Thickness	2
2.2 Isolation Thickness	2
3. Calculation	5
3.1 Case	5
3.2 Problem Set up	5
3.3 Model and Condition for Calculation	6
3.4 Result	6
4. Discussions	7
4.1 Relationship between Reflector (Isolator) Thickness and Reflector Factor	7
4.2 Comparison of Reflector Factor between Infinitely and Finitely Long Systems	11
4.3 Reflector Factor of Infinitely Long Cyliner, Sphere and Array of Unit	11
5. Full Reflector Thickness, Isolation Thickness and Allowable Isolation Thickness of General System (Water, Ordinary Concrete)	12
5.1 Full Reflector Thickness	12
5.2 Isolation Thickness	13
5.3 Allowable Isolation Thickness	13
6. Conclusions	15
Acknowledgement	15
References	16

1. 序

複数の核燃料物質ユニットで構成される体系（複数ユニット）の臨界安全性評価は、二つの段階を経て行われる。初めに個々のユニット（単一ユニット）の安全性評価が行われるが、ユニットの近傍に反射体がある場合には、安全側の仮定として「十分な厚さの反射体」をユニットの外周に設定した計算モデルが使われる。単一ユニットの安全性が確認されると、複数ユニットの安全性評価へと進む。ただし、各ユニット間の中性子相互作用が、無視できる程度に小さくて、各ユニットが核的に孤立しているとみなせれば、その必要はない。孤立させるには、ユニット間に中性子隔離体を設置する方法、ユニット間の距離を広げる方法などがある。本書では、前者によって孤立化を達成するのに最低限必要な隔離体の厚さを「隔離厚さ」、同じく後者を「隔離距離」と呼ぶ。

初めに述べた事情から十分な反射体厚さ、隔離厚さ、隔離距離が前もってわかっているならば、安全性評価は明解にあるいは簡便になるが、表1に示す隔離厚さの比較例からも明らかのように、これらの値は文献によって異なり（表1では、コンクリートの場合に文献間の違いがいちじるしい。）、選択に迷う。また、表2に示すような実験に基づく隔離厚さの報告例もあるが、ある特定の実験の結果をすべての評価対象に適用できるのか疑問である。

本書では、水及び普通コンクリートの十分な反射体厚さと隔離厚さの計算結果を報告するとともに、一般の体系の十分な反射体厚さと隔離厚さを合理的かつ簡便に算出する新しい方法を導出した。

2章ではこの二つの値の定義を述べる。3章では燃料間の反射体（隔離体）厚さを変えて、それぞれの実効増倍係数を求め、その結果にもとづいて二の値の算出を実際に試みる。4章では無限平板燃料を対象に、反射体（隔離体）厚さと3章でとりいれた反射体効果係数 RF とを一群拡散近似で関係づけることを試みる。得られた関係式をもとにして、無限平板以外の形状の燃料の反射体厚さと RF の関係についても立入る。5章では、4章で得られた関係式を一般化して、十分な反射体厚さ、隔離厚さ、許容隔離厚さを計算できる簡易式を導出する。6章で結論を述べる。

2. 定 義

2.1 十分な反射体厚さ

十分な反射体厚さとは、それ以上厚くしても系の実効増倍係数がほとんど変わらないと認めらるる最小の反射体の厚さである。この定義をさらに具体化するために、反射体効果係数 (Reflector Factor, RF) という値を導入する。RF を次のように定義する。

$$RF = \left| \frac{k(R) - k(\infty)}{k(\infty)} \right| \quad (1)$$

ここで、

$k(R)$: 厚さ R の反射体が付いた系の実効増倍係数

$k(\infty)$: 無限に厚い反射体が付いた系の実効増倍係数

反射体の厚さ R が小さいあいだは、反射体効果が低いために、RF は大きな値を示す。R が大きくなるにしたがってRF は小さくなる。さらにR が大きくなると、反射効果が飽和して $k(R) \doteq k(\infty)$ になり、RF はきわめて小さくなる。RF がある小さな値 ϵ 以下になるような最小の反射体厚さを、「十分な反射体厚さ」と定義する。 ϵ は、実効増倍係数計算の精度を勘案し、 $1.0 \times 10^{-3} \Delta k/k$ とする。

2.2 隔離厚さ

「隔離厚さ」とは、隣接する系の間隔離体を設置して、臨界性の観点から各々を孤立させようとするときに必要な最小の隔離体の厚さである。各系の間隔離厚さ以上の厚さの隔離体があれば、臨界安全性評価は系ごとに行えばよく、またその際に対象系以外の系からの核的影響は無視できる。

隔離厚さの定義をより明確にするためには、系の孤立についてあらかじめ議論する必要がある。いま、隣接する二つの系を想定し、その核的孤立について考えてみる。二つの系の中性子の収支は次のように表現できる。

$$\begin{bmatrix} -D_1 + \frac{1}{\lambda} P_1 & T_{2-1} \\ T_{1-2} & -D_2 + \frac{1}{\lambda} P_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix} = 0 \quad (2)$$

ここで、

D : 消滅演算子,

P : 生成演算子,

T : 輸送演算子,

ϕ : 中性子束,

λ : 固有値,

1, 2 : 系の番号を表す添字,

$(\phi_1, \phi_2)'$: 最大固有値に属する固有ベクトル。

孤立化条件とは輸送演算子Tが無視できるほど小さくなることで、理論的には次のように書ける。

$$\begin{bmatrix} -D_1 + \frac{1}{\lambda} P_1 & 0 \\ 0 & -D_2 + \frac{1}{\lambda} P_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

式(3)が満足されれば、系1と系2は各々独立で、それぞれの固有値と固有ベクトルをもつことができる。

ここで、隔離厚さと十分な反射体厚さの違いに注意しなければならない。後者は反射体の系の外側は真空と仮定しているのに、前者は外側に何があるか規定しないことである。つまり、外側の条件に関係なく系の内側の固有値が決まる条件を求めなければならない。

式(2)をエネルギーE、空間r及び角度 Ω について積分すると、

$$\begin{aligned} & \int (-D_1 + \frac{1}{\lambda} P_1) \phi_1 d\tau \cdot \int (-D_2 + \frac{1}{\lambda} P_2) \phi_2 d\tau \\ & = \int T_{2-1} \phi_2 d\tau \cdot \int T_{1-2} \phi_1 d\tau \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $d\tau = dE \cdot dr \cdot d\Omega$ である。

完全に孤立した二つの系の固有値を各々 λ_1, λ_2 (但し、 $\lambda \cong \lambda_1 \cong \lambda_2$) とすると、式(3)から、

$$\lambda_1 = \frac{\int P_1 \phi_1' d\tau}{\int D_1 \phi_1' d\tau} \quad (5.1)$$

$$\lambda_2 = \frac{\int P_2 \phi_2' d\tau}{\int D_2 \phi_2' d\tau} \quad (5.2)$$

を得る。ここで、 $(\phi_1', \phi_2)'$ は孤立化した二つの系の固有ベクトルである。孤立化条件をほぼ満足している系では、 ϕ' を ϕ で置き換えても式(5.1)及び式(5.2)は近似的に成立する。すなわち、

$$\lambda_1 \cong \frac{\int P_1 \phi_1 d\tau}{\int D_1 \phi_1 d\tau} \quad (6.1)$$

$$\lambda_2 \cong \frac{\int P_2 \phi_2 d\tau}{\int D_2 \phi_2 d\tau} \quad (6.2)$$

式(6.1)及び式(6.2)を式(4)に代入すると、次式を得る。

$$\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_2} \right) = \frac{\int T_{1-2} \phi_1 d\tau}{\int P_1 \phi_1 d\tau} \cdot \frac{\int T_{2-1} \phi_2 d\tau}{\int P_2 \phi_2 d\tau} = \eta \quad (7)$$

η は中性子相互干渉の強さの程度を表す。 $\omega = 1/\lambda$, $\delta \equiv \omega_1 - \omega_2$ として式 (7) を次のように書き直す。ただし, $\omega_2 \geq \omega_1 \geq \omega$ とする。

$$(\omega - \omega_1)(\omega - \omega_2) = (\omega - \omega_1)(\omega - \omega_1 - \delta) = \eta \quad (8)$$

式 (8) を $|\omega - \omega_1|$ について解くと,

$$|\omega - \omega_1| = \frac{1}{2} \left| \frac{-4\eta}{\delta \pm \sqrt{\delta^2 + 4\eta}} \right| \leq \sqrt{\eta} \quad (9)$$

になる。この式から, $|\omega - \omega_1|$ の最大値は $\sqrt{\eta}$ で, これは $\delta = 0$ のときに成立することが明らかである。 $\delta = 0$ とは $\omega_1 = \omega_2$, すなわち, 系 1 の固有値 λ_1 と系 2 の固有値 λ_2 が等しいことを意味する。

二つの系の固有値が等しい場合に, 体系全体の固有値と各系の固有値との差が最大になることがわかった。さて, 孤立化条件とは各系の固有値が系の集合である体系全体の固有値に一致することであるから, 体系全体の固有値と各系の固有値の差が最大になる (同じ系が隣接している) 場合を対象とすれば, そのような対象から得られた孤立化条件はいかなるものにも適用できることになる。

隔離厚さを, 十分な反射体厚さと同様に RF を用いて定義する。上に述べたような理由から, 隔離体を介してその両側に同じ系があるものとする。

$$RF = \left| \frac{k(2R) - k(\infty)}{k(\infty)} \right| \quad (10)$$

ここで,

$k(R)$: 注目する系と同一の (固有値の等しい) 系が, 厚さ $2R$ の隔離体をはさんで存在するときの体系全体の実効増倍係数,

$k(\infty)$: $2R$ を無限に厚くしたときの体系全体の実効増倍係数。

RF が判定値 ϵ 以下になる最小の隔離体の厚さ $2R$ を, 隔離厚さと定義する。 ϵ は, 計算の精度等を考えて, $3 \times 10^{-3} \Delta k/k$ とする。

3. 計 算

3.1 対 象

燃料, 反射体 (隔離体) にそれぞれ次のものを想定した。

- 燃 料
- ① 濃縮度 100 wt%, ウラン濃度 18.9 gU/cm^3 の均質 $\text{U-H}_2\text{O}$ ^{註1)} (タイプA)
 - ② 濃縮度 100 wt%, ウラン濃度 0.1 gU/cm^3 の均質 $\text{U-H}_2\text{O}$ ^{註1)} (タイプB)
 - ③ 濃縮度 5 wt%, ウラン濃度 2 gU/cm^3 の均質 $\text{U-H}_2\text{O}$ ^{註1)} (タイプC)

- 反射体
- ① 20℃の軽水
- (隔離体)
- ② 普通コンクリート

普通コンクリートの組成を表3に示す。燃料と反射体 (隔離体) の原子個数密度を表4に示す。これらの燃料, 反射体 (隔離体) を組合せて, 表5にある19ケースの体系を計算の対象として設定した。各ケースの設定理由を以下に示す。

ケース①～ケース⑧: 燃料領域の中性子エネルギースペクトルが十分な反射体厚さと隔離厚さに及ぼす効果を調べる。

ケース⑨～ケース⑫: 燃料の寸法が十分な反射体厚さと隔離厚さに及ぼす効果を調べる。

ケース⑬～ケース⑯: 有限体系と無限体系の十分な反射体厚さと隔離厚さの違いを調べる。

ケース⑰～ケース⑲: 配列の大きさが隔離厚さに及ぼす効果を, 円柱ユニットを例に調べる。

3.2 手 法

図1にしたがって計算の手法を概説する。

ステップ①: 反射体厚さ R (隔離厚さ $2R$) を変化させて, それぞれの実効増倍係数 $k(R)$ を計算する。

ステップ②: 各 R に対する R_F を計算する。

ステップ③: 判定値 ϵ 以下になる最小の R を求め, 十分な反射体厚さ (隔離厚さの場合は $2R$) とする。

ステップ①の計算には, 臨界安全性評価コードシステム JACS¹⁾ を用いた。はじめに, 多群定数ライブラリー MGCL (137群, 300 K) と燃料及び反射体 (隔離体) の原子個数密度を MAIL²⁾ に入力して, それぞれの実効巨視的断面積を作成する。次に, この断面積と体系の形状情報に基づいて臨界計算を行い, 体系の実効増倍係数を求める。この計算には, 一次元 Sn プログラム ANISN-JR³⁾ (ケース①～ケース⑫) とモンテカルロ臨界計算プログラム KENO-M⁴⁾ (ケース⑬～ケース⑲) を用いた。ステップ②の計算には2章の式(1)を用いた。

註1) 金属ウランと水の均質混合物

3.3 計算モデル、計算条件

臨界計算用のための体系モデルを図2から図4に示す。計算条件を表6と表7に示す。

3.4 結果

ステップ①の結果を表8から表16に示す。これらの中から代表して、表10（ケース⑤、⑥）及び表11（ケース⑦、⑧）の $k(R)$ の変化の様子を図5及び図6に示す。

ステップ②の結果を表17から表23、図7から図13に示す。これらの結果から、反射体（隔離体）厚さの増加に伴ってRFは指数関数的に減少することが確かめられる（ただし、燃料と反射体の境界を除く）。

ステップ③の結果を表24に示す。表中の十分な反射体厚さ、隔離厚さは次のようにして求めた。反射体（隔離体）厚さに対するRFの変化を次式で表す。

$$RF = A_1 e^{-\frac{2}{A_2} R} \quad (\text{反射体の場合}) \quad (11.1)$$

$$RF = A_1 e^{-\frac{2}{A_2} (2R)} \quad (\text{隔離体の場合}) \quad (11.2)$$

ここで、

A_1, A_2 : 定数,

R : 反射体厚さ,

$2R$: 隔離体厚さ。

最小二乗法により各ケースの A_1 及び A_2 を求め、表24を得た。これらの定数を式(11.1)、式(11.2)に代入して、

$$RF = \epsilon = 3 \times 10^{-3} \Delta k / k$$

を満足する十分な反射体厚さ及び隔離厚さを計算し、表25に示す結果を得た。

4. 考 察

図7から図13より、全ケースとも反射体厚さ（隔離厚さ）の増加にともなってRFが指数関数的に減少することがわかる（ただし、燃料と反射体の境界を除く）。減少の様子（線の勾配）は、反射体（隔離体）の組成には依存するが、燃料の組成や形状との相関は弱い。3章の計算結果から得られたこのような知見を、本章で具体的に考察してみる。

4.1 反射体（隔離体）厚さと反射体効果係数の関係

十分な反射体厚さ及び隔離厚さを定義するために、RFという量を2章で導入した。RFを、反射体（隔離体）の厚さが十分な反射体厚さ（隔離厚さ）を下回った場合の反応度変化を表す量と見ることもできる。もしもRFが 10^{-2} の反射体付き体系があると仮定すると、その体系の実効増倍係数は反射体を無限に厚くしたときの実効増倍係数よりも1パーセント小さい。

2章では実効増倍係数を使ってRFを表現したが、本節では反射体（隔離体）の移動面積と燃料のバックリングを使ってRFを表現することを、図2を例に試みる。一群拡散近似により燃料及び反射体領域の中性子束を求める。各領域の拡散方程式は次のように書ける。

$$\text{燃料領域} : \nabla^2 \phi_c(x) + B_c^2 \phi_c(x) = 0 \quad (12.1)$$

$$\text{反射体領域} : \nabla^2 \phi_r(x) - K_r^2 \phi_r(x) = 0 \quad (12.2)$$

ここで、

- ϕ_c : 燃料領域の中性子束、
- ϕ_r : 反射体領域の中性子束、
- B_c^2 : 燃料領域の形状バックリング、
- K_r : $(= 1/M_r^2 + B_r^2)$ 、
- x : 厚さ方向の位置座標。

式(12.1)及び式(12.2)を解くと、

$$\phi_c(x) = C_1 \cos B_c x \quad (13.1)$$

$$\phi_r(x) = C_2 \sinh K_r (\delta - x) \quad (13.2)$$

を得る。 C_1 、 C_2 、 δ は任意の定数である。

まず十分な反射体厚さについて考える。外挿距離を含む反射体厚さRの位置で中性子束がゼロになる、すなわち、

$$\phi_r\left(\frac{T}{2} + R\right) = 0 \quad (14)$$

である。したがって、式(13.2)と式(14)より、

$$\phi_r(x) = C_2 \sinh K_r \left(\frac{T}{2} + R - x\right) \quad (15)$$

を得る。また、燃料領域と反射体領域の境界における中性子束及び中性子の流れに関する連続の条件から、

$$\phi_c \left(\frac{T}{2} \right) = \phi_r \left(\frac{T}{2} \right) \quad (16)$$

$$D_c \frac{d}{dx} \phi_c(x) \Big|_{x=T/2} = D_r \frac{d}{dx} \phi_r(x) \Big|_{x=T/2} \quad (17)$$

である。\$D_c\$、\$D_r\$ はそれぞれ燃料、反射体の拡散係数である。式(13.1)、式(15)及び式(16)から、

$$C_1 \cos \left(B_c \frac{T}{2} \right) = C_2 \sinh (K_r R) \quad (18)$$

また、式(13.1)、式(15)及び式(17)から、

$$-D_c C_1 B_c \sin (B_c x) = -D_r C_2 K_r \cosh (K_r R) \quad (19)$$

である。式(19)を式(18)で割ると、

$$D_c B_c \tan \left(B_c \frac{T}{2} \right) = D_r K_r \coth (K_r R) \quad (20)$$

を得る。この式は、一群拡散近似にもとづく臨界方程式である。\$B_c \cdot T/2\$ が小さい場合にはこの式の左辺は、

$$D_c B_c \tan \left(B_c \frac{T}{2} \right) \approx D_c B_c \left(B_c \frac{T}{2} \right) = D_c B_c^2 \frac{T}{2} \quad (21)$$

と近似できる。よって、式(20)と式(21)から

$$B_c^2 = \frac{2 D_r K_r}{D_c T} \coth (K_r R) \quad (22)$$

を得る。また、式(22)を \$k_{eff} = k_{\infty} / (1 + M_c^2 B_c^2)\$ に代入すると、

$$k(R) = \frac{k_{\infty}}{1 + M_c^2 \frac{2 D_r K_r}{D_c T} \coth (K_r R)} \quad (23)$$

と書ける。以上で、RFを反射体の移動面積と燃料のバックリングで表すための準備ができた。

反射体が無限に厚い場合の実効増倍係数 \$k(\infty)\$ は、式(23)より、

$$k(\infty) = \frac{k_{\infty}}{1 + M_c^2 \frac{2 D_r K_r}{D_c T}} \quad (24)$$

である。式(23)及び式(24)をRFの定義式、式(1)、に代入すると、RFを表す式が得られる。

$$\begin{aligned} RF &= \frac{k(\infty) - k(R)}{k(\infty)} \\ &= \frac{\frac{k_{\infty}}{1 + M_c^2 \frac{2 D_r K_r}{D_c T}} - \frac{k_{\infty}}{1 + M_c^2 \frac{2 D_r K_r}{D_c T} \coth (K_r R)}}{\frac{k_{\infty}}{1 + M_c^2 \frac{2 D_r K_r}{D_c T}}} \end{aligned}$$

$$= \frac{2 M_c^2 D_r K_r}{D_c T + 2 M_c^2 D_r K_r \coth(K_r R)} \{ \coth(K_r R) - 1 \}$$

$\coth x = 1 + 2e^{-2x} / (1 - e^{-2x})$ であることを利用して、上式を単純化することを試みる。

$$\begin{aligned} RF &= \frac{2 M_c^2 D_r K_r}{D_c T + 2 M_c^2 D_r K_r \coth(K_r R)} \{ \coth(K_r R) - 1 \} \\ &= \frac{C_4}{C_3 + C_4 \left(1 + \frac{2 e^{-2K_r R}}{1 - e^{-2K_r R}} \right)} \cdot \frac{2 e^{-2K_r R}}{1 - e^{-2K_r R}} \end{aligned}$$

ここで、 $C_3 = D_c T$ 、 $C_4 = 2 M_c^2 D_r K_r$ である。R が十分に大きければ、さらに単純になり、

$$RF \doteq C \cdot e^{-2K_r R} \tag{25}$$

を得る。C は定数である。式 (25) は $e^{-2K_r R} \ll 1.0$ の場合に成立する。ここで、

$$K_r^2 = 1 / M_r^2 + B^2,$$

M_r^2 : 反射体の移動面積、

B_1^2 : 燃料のバックリング (平板の厚さ方向と直角をなす方向のバックリング)。

式(25)のグラフは片対数紙上では $-2K_r$ の傾きをもつ直線になる。また、無限平板の場合、式(25)のグラフは $B_1^2 = 0$ なので片対数紙上では $-2/M_r$ の傾きをもつ直線になる (ただし、いずれも燃料に近い部分を除く)。

次に隔離厚さについて同様の検討を試みる。この場合には、平板状の燃料と隔離体が交互に並び無限の層を形成していると考えられるので、式 (13.2) に対して境界条件

$$\left. \frac{d}{dx} \phi_r(x) \right|_{x=T/2+R} = 0$$

を設定できる。この条件の下に式 (13.2) を δ について解くと、 $\delta = T/2 + R$ になる。よって式 (13.2) は次のように書ける。

$$\phi_r = C_3 \cosh K_r \left(\frac{T}{2} + R - x \right) \tag{26}$$

式 (13.1)、式 (26) 及び連続の条件式 (16)、式 (17) より次の臨界方程式を得る。

$$D_c B_c \tan \left(B_c \frac{T}{2} \right) = D_r K_r \tanh(K_r R) \tag{27}$$

以下、十分な反射体厚さの RF を検討した時と同様の処理を行うと、

$$RF = \frac{k(R) - k(\infty)}{k(\infty)} = \frac{1 - \tanh(K_r R)}{C_5 + \tanh(K_r R)}$$

になる。 $\tanh x = 1 - 2e^{-2x} / (1 + e^{-2x})$ なので、

$$RF = \frac{\frac{2 e^{-2K_r R}}{1 + e^{-2K_r R}}}{C_5 + 1 - \frac{2 e^{-2K_r R}}{1 + e^{-2K_r R}}}$$

R が十分に大きければ、

$$RF = C' \cdot e^{-2K_r R} = C' \cdot e^{-K_r (2R)} \quad (28)$$

になる。ここで、 $2R$ は隔離厚さである。横軸を $2R$ 、縦軸（対数目盛）を RF とする片対数紙上では式(28)のグラフは、 $-K_r$ の傾きを持つ直線になる。

さて、図7から図13に示した計算結果でも、 RF は反射体（隔離体）厚さの増加にともなってほぼ一定の傾きで直線的に減少している。ANL-5800⁵⁾に記載されている水の中性子移動距離 $M_r = 5.93 \text{ cm}$ を用いると、 RF の傾きは、

$$-2K_r = -2/M_r = -0.337 \text{ (反射体)}$$

$$-K_r = -1/M_r = -0.168 \text{ (隔離体)}$$

になる。無限平板燃料間の水隔離体の RF の傾き（ $-A_2/2$ ）を表24の中から抜き出してみると、それぞれ、

$$\text{ケース①} \quad -0.175$$

$$\text{ケース⑤} \quad -0.185$$

$$\text{ケース⑨} \quad -0.182$$

である。これら三つの平均は -0.181 で、前述した文献にもとづく値 -0.168 に近い。一方、無限平板燃料の周囲の水反射体の RF の傾きはそれぞれ、

$$\text{ケース②} \quad -0.441$$

$$\text{ケース⑥} \quad -0.441$$

$$\text{ケース⑩} \quad -0.461$$

で、 -0.337 に対して平均で約30%のひらきがある。この要因は、図8の RF は外挿距離を含まない反射体厚さを用いて求めたことにあると考えられる。

以上、水反射体付き体系の RF の傾きの妥当性を文献値との対比から考察してきた。普通コンクリートの場合の対比は、今回とりあげた組成をもつコンクリートの中性子移動距離を見出せなかったので、行わなかった。ただし、水と同様に、 RF の傾きはユニットの大きさや燃料の組成には依存しないことが明らかになった。

さて、式(25)及び式(28)の導出の最後の過程で、「 R が十分に大きい」との仮説を立てたが、両式における R の適用下限の目安をここで考えてみたい。「 R が十分に大きい」とは、この場合、「 $e^{-2K_r R}$ が1.0よりも十分に小さい」ことである。ここでは次式を満足すれば、 $e^{-2K_r R}$ は1.0よりも十分に小さい、すなわち、 R が十分に大きいと判断することにする。

$$e^{-2K_r R} \leq e^{-2} \doteq 0.135$$

この条件式を満足するためには、

$$-2K_r R \leq -2$$

$$K_r R \geq 1$$

$$K_r R = \sqrt{\frac{1}{M_r^2} + B_1^2} \cdot R \geq \frac{R}{M_r} \geq 1$$

の成立が求められる。つまり、

$$R \geq M_r$$

である。よって、反射体厚さ R がその中性子移動距離 M_r よりも厚くなると、反射体の RF は式(25)に従って指数関数的に減少する。隔離体厚さ $2R$ の場合には、その中性子移動距離の二

倍値 $2M_r$ よりも厚くなると、隔離体のRFは式(28)に従って変化する。図14(1)及び図14(2)には、3章に述べた詳細な計算から得られた隔離体のRFと、式(28)に基づく近似的なRFが併記してある。詳細計算による結果から、隔離体厚さ $2R$ が $2M_r$ を超えるとRFは片対数紙上に直線を描いていることが確認できる。近似によるRFは、最も大きいRFを与える燃料(この場合 ^{235}U 金属)の $R=0$ におけるRFを起点に中性子移動距離に等しい長さの線を横軸と平行に引き、その終点から式(28)に従う線を描いたものである。この近似的な折れ線は詳細な線よりも厚い(安全な)隔離厚さを与えるが、過大な裕度はない。中性子移動距離と燃料の形状バックリンから得られる折線であるにもかかわらず、簡便におよそのRFを知ることができるので、有効である。

4.2 有限長体系と無限長体系の反射体効果係数の比較

式(25)及び式(28)から、RFは反射体(隔離体)の厚さの増加に対して指数関数的に減少し、その傾きは中性子の拡散と上下方向の漏れによって決定づけられることがわかった。本節では有限長体系と無限長体系の十分な反射体厚さの比較を行う。前節で示した K_r の定義及び式(25)から、反射体の組成が同じならば、反射体厚さRF曲線の傾きの大きさは燃料の上下方向からの中性子の漏れ B_1^2 の大小によって決まり、無限長体系よりも有限長体系の傾きの方が大きいことは自明である。したがって、有限長体系の十分な反射体厚さは無限長体系のそれよりも薄くなる。

表5のケース⑬からケース⑯は、有限長体系及び無限長体系の反射体厚さ-RF曲線の傾きの違いを確認するために設定した。表24のケース⑬からケース⑯の $-A_2/2$ の項から、水及びコンクリート反射体のいずれの場合も、反射体厚さ-RF曲線の傾きは無限長体系よりも有限長体系の方が大きいことが読みとれる(傾きは $-2/A_2$ であるが、表には $A_2/2$ の値が記載されていることに注意されたい。)

4.3 無限円柱、球、配列体系の反射体効果係数

無限円柱あるいは球状燃料のRFは、式(12.1)及び式(12.2)にそれぞれラプラス演算子を代入して臨界方程式を導出することで得られる。この場合、反射体厚さ-RF曲線の傾きは円柱または球の半径の関数になるが、半径が十分大きければ無限平板の傾きに一致する。半径が十分大きくないときには、無限平板の傾きよりも大きくなるので、無限平板の反射体厚さ-RF曲線から十分な水反射体厚さを求めることは安全側の行為である。

図4に示すような配列系の場合には、解析的には解けない。しかし、図13に示す計算結果から、配列系であってもRFは隔離体厚さの増加に対して指数関数的に減少することが確認できる。この図からはさらに、曲線の傾きはユニット数に依存し、ユニット数の増加にともなって傾きは小さくなるが、無限個のユニットを持つ配列系であっても無限平板の曲線の傾きより小さくはないことがわかる。したがって、無限平板の隔離体厚さ-RF曲線から得られた隔離厚さを配列系に適用することは安全である。

5. 一般体系の十分な反射体厚さ、隔離厚さ 及び許容隔離厚さ（水、普通コンクリート）

5.1 十分な反射体厚さ

3章で導出した次式は無限平板体系のRFと反射体厚さRの関係を表す近似式であった。

$$RF \approx C \cdot e^{-2K_r R} \quad (25)$$

本節では式(25)中の定数Cの値を求めて、水及び普通コンクリートの十分な反射体厚さを求める。2章では次のようにRFを定義した(ただし、 $k(\infty) > k(R)$ の場合)。

$$RF = \left| \frac{k(R) - k(\infty)}{k(\infty)} \right| = \frac{k(\infty) - k(R)}{k(\infty)} \quad (1)$$

式(25)及び式(1)に $R=0$ を代入してRFを消去し、Cについて解くと、

$$C = \frac{k(\infty) - k(0)}{k(\infty)} = 1 - \frac{k(0)}{k(\infty)}$$

になる。このCを式(25)に代入すると次式を得る(ただし、 $k(0) < k(\infty)$ の場合)。

$$RF = \left\{ 1 - \frac{k(0)}{k(\infty)} \right\} e^{-2K_r R} \leq e^{-2K_r R} \quad (29)$$

ここでは、RFが判定値 $\epsilon = 1.0 \times 10^{-3}$ に等しい時のRを十分な反射体厚さとする。すなわち、

$$RF = 1.0 \times 10^{-3} \leq e^{-2K_r R}$$

$$R \geq - \frac{\ln(1.0 \times 10^{-3})}{2K_r} = - \frac{\ln(1.0 \times 10^{-3})}{2\sqrt{1/M_r^2}} = 3.454 M_r \quad (30)$$

である。3章で用いた水の中性子移動距離5.93 cmを式(30)の M_r に代入すると、

$$R \geq 3.454 \times 5.93 \doteq 20$$

普通コンクリートの中性子移動距離11.42 cm^{註2)}を代入すると、

$$R \geq 3.454 \times 11.4 \doteq 39$$

を得る。よって、水の十分な反射体厚さは20 cm、普通コンクリートの十分な反射体厚さは39 cmになる。その他の物質の十分な反射体も、中性子移動距離 M_r さえわかれば、式(30)から容易に求まる。

註2) 今回取上げたコンクリートと同じ組成のコンクリートの中性子移動距離は見出せなかったので、かわりに次のようにして求めた。4.1節で得られた知見によれば、反射体厚さとRFの関係は片対数紙上では $-2K_r$ の傾きの直線になる。図12に示すケース④の直線の傾きは $-1/5.71$ なので、

$$-2K_r = -2 \sqrt{\frac{1}{M_r^2} + B_{\perp}^2} = - \frac{2}{M_r} = - \frac{1}{5.71}$$

よって、 M_r は11.42 cmになる。

5.2 隔離厚さ

5.1節と同様にして次式を得る。ただし、 $2R$ は隔離厚さに相当すること及び R が十分厚い場合に適用できることに注意されたい。

$$RF = \left\{ \frac{k(0)}{k(\infty)} - 1 \right\} e^{-K_r(2R)} \quad (\text{ただし, } k(0) > k(\infty)) \quad (31)$$

隔離体厚さ $2R$ の増加にともなって、 RF が指数関数的に減少する性質を利用して導出した次の式から隔離厚さを求めてもよい。

$$RF = \left\{ \frac{k(0)}{k(\infty)} - 1 \right\} \exp \left\{ -\frac{2}{M_r} \left(R - \frac{M_r}{2} \right) \right\} \quad (32.1)$$

式(31)は R が薄い場合に適用できないのに対して、式(32.1)では R は薄くてもよい。この式は、式(31)を基礎に、4.1節の後半でも述べた次の考えのもとに導出した。

$$\textcircled{1} \quad RF = \frac{k(0)}{k(\infty)} - 1 = \text{const.} \quad (0 \leq 2R \leq M_r)$$

$$\textcircled{2} \quad K_r = \sqrt{\frac{1}{M_r^2} + B_1^2} = \frac{1}{M_r} \quad (\text{無限平板の場合})$$

隔離体厚さ $2R$ を使って式(32.1)を書き直すと次のようになる。

$$RF = \left\{ \frac{k(0)}{k(\infty)} - 1 \right\} \exp \left\{ -\left(\frac{2R}{M_r} - 1 \right) \right\} = \varepsilon \quad (32.2)$$

RF がある判定値 ε に等しくなる時の $2R$ を隔離厚さ l とする。式(32.2)を $2R$ について解くと、

$$l = 2R = M_r \left\{ \ln \left(\frac{k(0)/k(\infty) - 1}{\varepsilon} \right) + 1 \right\} \quad (33)$$

となり、無限平板燃料の隔離厚さを求める簡便な式が導出できた。

多数の同一組成ユニットで構成される体系に式(33)を適用するにあたって、 $k(0)$ としてそのユニットの無限増倍係数 k_∞ を用いることは安全である。少数の同一組成ユニットの体系の場合には、隔離体厚さがゼロ、すなわち、全ユニットが接しても系の大きさは有限でゼロより大きいバックリングを有するので、 $k(0)$ にはそのユニットの k_∞ よりも小さい中性子増倍係数が使える。これらのことは、図13からもうかがえる。またこの図において、無限平板の線の傾きが他の二つの配列系の傾きより小さいのは、無限平板ユニットのバックリングは平板の厚さ方向を除いてゼロだからである。このような事情から、無限平板の隔離厚さを与える式(33)を有限配列系に適用することは安全である。

5.3 許容隔離厚さ

2章で述べた詳細な計算あるいは式(33)のような簡便式から得られる隔離厚さは、実際に求めてみると、厚くなりすぎて経済的及び空間的にみて実用的でない。たとえば図7によれば水の隔離厚さは約35cm(ケース①)、図9によればコンクリートの隔離厚さは約70cm(ケース③)

である ($\epsilon = 3 \times 10^{-3}$ の場合)。ところで、各ユニットの k_{eff} が制限値 k_{limit} を十分余裕をもって下まわっているならば、隔離体の厚さを隔離厚さよりいくぶん薄くしても系を臨界上安全に保つことができるであろう。本節では、隔離厚さよりも薄い隔離体を設置するときの、臨界安全上許される隔離体の厚さ（許容隔離厚さ）について検討する。

次のようにして許容隔離厚さを求める。仮に、中性子相互干渉のために ϵ だけ反応度が上昇したとすると、各ユニットの中性子増倍係数は $(1 + \epsilon) k_s$ になる。 k_s は相互干渉がない時のユニットの中性子増倍係数である。このとき、

$$k_{\text{limit}} \geq (1 + \epsilon) k_s \quad (34)$$

を満たす範囲に ϵ があれば、体系は臨界上安全である。 k_s 及び k_{limit} が既知であれば、式 (34) より ϵ を知ることができる。 ϵ を判定値として式 (34) に代入すれば、許容隔離厚さを得る。

許容隔離厚さの算出例を二つ紹介する。第一例として、無限平板燃料間の水について考える。燃料が十分に厚い水で囲まれた時の燃料の中性子増倍係数 k_s を 0.8 (式 (33) における $k(\infty)$ に相当する)、燃料の無限増倍係数 (式 (33) における $k(0)$ に相当する) を 1.2 とすると、式 (33) より、水の隔離厚さ 36 cm を得る。ただし、 $\epsilon = 3 \times 10^{-3}$ 、 $M_r = 5.93$ とした。ここで、 k_{limit} を仮に 0.94 とすると、式 (34) より、(中性子相互作用が大きくなって) ϵ が最大で $17.5 \% \Delta k / k$ まで大きくなって燃料の中性子増倍係数は k_{limit} を超えないことがわかる。すなわち、 ϵ が $17.5 \% \Delta k / k$ になるまで隔離体を隔離厚さ以下に薄くしても臨界上安全といえる。この時の隔離体の厚さすなわち許容隔離厚さを、式 (33) に $k(\infty) = 0.8$ 、 $k(0) = 1.2$ 、 $M_r = 5.93$ 及び $\epsilon = 0.175$ を代入して計算すると、約 12 cm になる。以上をまとめると、燃料間の中性子相互干渉をさえぎるためには、この例の場合 36 cm の水を燃料間に設ける必要があるが、燃料の中性子増倍係数の上昇を k_{limit} まで許してもよいのであれば、隔離体の厚さを 12 cm にまで薄くできる。

第二例では、コンクリートで仕切られた燃料貯蔵室間の中性子相互干渉を考えてみる。 $k_s (= k(\infty))$ は一つの貯蔵室の十分な反射体厚さに相当する厚さのコンクリートで外周を囲まれた貯蔵室の中性子増倍係数である。 $k(0)$ は貯蔵室の無限増倍係数である。第一例と同様に、 $k_s = 0.8$ 、 $k(0) = 1.2$ 、 $k_{\text{limit}} = 0.94$ 、 $M_r = 11.4$ として隔離厚さと許容隔離厚さを求めるとそれぞれ 70 cm、23 cm になる。

6. 結 論

137群MGCLライブラリーと一次元SnプログラムANISN-JRあるいはモンテカルロ臨界計算プログラムKENO-Nの組合せによる臨界計算結果をもとに、水及び普通コンクリートの十分な反射体厚さ、隔離厚さを求めた。この二種類の値を求めてゆくなかで、また、求めた値を解析して得られた知見を、以下に述べる。

- ① 反射体（隔離体）厚さの変化に対する体系の中性子増倍係数の変化を反射体効果係数 Reflector Factor ; RF) で表すことを試みた。反射体（隔離体）が薄い場合を除いて、RFは、反射体（隔離体）厚さの増加に対して指数関数的に減少し、片対数紙上では負の傾きをもつ直線を描く。
- ② 反射体（隔離体）厚さの変化に対するRFの変化を表す式を理論的に導出した。この式から、先に述べた傾きは反射体（隔離体）厚さ方向の燃料寸法及び燃料の組成には依存せず、反射体（隔離体）厚さ方向と直交する方向の燃料寸法と反射体（隔離体）の組成だけで決まることがわかった。傾きの大きさは反射体（隔離体）の中性子移動距離の逆数の二倍値に等しく、無限平板燃料が最も小さい。
- ③ 水反射体の厚さに対するRFの変化の片対数グラフ上での傾きは、無限平板の場合、中性子移動距離の逆数になる。今回の計算結果から求めたRFの傾きと、中性子移動距離の実測値の逆数とは非常に良い一致を示した。このことは、本報告に示す手法及びデータの妥当性を裏づけるものである。
- ④ 最も小さい傾きをもつ体系が最も厚い十分な反射体厚さ及び隔離厚さを与えるので、無限平板燃料体系のこれらの値を他の体系に適用することは安全である。

以上の検討の結果、本報告で新たに提案した反射体効果係数RFを用いることにより反射体の厚さと反応度との関係が簡明に表現できることが分った。また、この関係は理論的に導出した式とも一致し、反射体の材質に関係なし成立することが確認できた。この関係を用いて、十分な反射体厚さ及び隔離厚さを簡便に求める一般式を導出した。この式は反射体の材質の中性子移動距離と中性子バックリングのみの関数となっており、反射体が水またはコンクリートでなくても一般的に成立するものである。

この研究により、従来、経験的に決めていた十分な反射体厚さ及び隔離厚さを論理的に求めることができるようになった。

謝 辞

本書の内容は、日本原子力研究所が科学技術庁から受託した「臨界安全解析データ・プログラム整備事業」（昭和57年度～60年度）を行うために設置した核燃料施設安全性研究委員会臨界ハンドブック専門部分の中の相互干渉効果検討ワーキンググループにおいて検討された。ここに、グループリーダー野村靖氏はじめワーキンググループ各位に謝意を表します。また、図2～図6、図12、図13、表3、表4、表8～表20、表23の掲載を認可してくれた科学技術庁に感謝します。

6. 結 論

137群MGCLライブラリーと一次元SnプログラムANISN-JRあるいはモンテカルロ臨界計算プログラムKENO-IVの組合せによる臨界計算結果をもとに、水及び普通コンクリートの十分な反射体厚さ、隔離厚さを求めた。この二種類の値を求めてゆくなかで、また、求めた値を解析して得られた知見を、以下に述べる。

- ① 反射体（隔離体）厚さの変化に対する体系の中性子増倍係数の変化を反射体効果係数 Reflector Factor ; RF) で表すことを試みた。反射体（隔離体）が薄い場合を除いて、RFは、反射体（隔離体）厚さの増加に対して指数関数的に減少し、片対数紙上では負の傾きをもつ直線を描く。
- ② 反射体（隔離体）厚さの変化に対するRFの変化を表す式を理論的に導出した。この式から、先に述べた傾きは反射体（隔離体）厚さ方向の燃料寸法及び燃料の組成には依存せず、反射体（隔離体）厚さ方向と直交する方向の燃料寸法と反射体（隔離体）の組成だけで決まることがわかった。傾きの大きさは反射体（隔離体）の中性子移動距離の逆数の二倍値に等しく、無限平板燃料が最も小さい。
- ③ 水反射体の厚さに対するRFの変化の片対数グラフ上での傾きは、無限平板の場合、中性子移動距離の逆数になる。今回の計算結果から求めたRFの傾きと、中性子移動距離の実測値の逆数とは非常に良い一致を示した。このことは、本報告に示す手法及びデータの妥当性を裏づけるものである。
- ④ 最も小さい傾きをもつ体系が最も厚い十分な反射体厚さ及び隔離厚さを与えるので、無限平板燃料体系のこれらの値を他の体系に適用することは安全である。

以上の検討の結果、本報告で新たに提案した反射体効果係数RFを用いることにより反射体の厚さと反応度との関係が簡明に表現できることが分った。また、この関係は理論的に導出した式とも一致し、反射体の材質に関係なし成立することが確認できた。この関係を用いて、十分な反射体厚さ及び隔離厚さを簡便に求める一般式を導出した。この式は反射体の材質の中性子移動距離と中性子バックリングのみの関数となっており、反射体が水またはコンクリートでなくとも一般的に成立するものである。

この研究により、従来、経験的に決めていた十分な反射体厚さ及び隔離厚さを論理的に求めることができるようになった。

謝 辞

本書の内容は、日本原子力研究所が科学技術庁から受託した「臨界安全解析データ・プログラム整備事業」（昭和57年度～60年度）を行うために設置した核燃料施設安全性研究委員会臨界ハンドブック専門部分の中の相互干渉効果検討ワーキンググループにおいて検討された。ここに、グループリーダー野村靖氏はじめワーキンググループ各位に謝意を表します。また、図2～図6、図12、図13、表3、表4、表8～表20、表23の掲載を認可してくれた科学技術庁に感謝します。

参 考 文 献

- 1) J. Katakura, Y. Naito and Y. Komuro, "Development of the Computer Code System JACS for Criticality Safety," Trans. of Am. Nucl. Soc., Vol.41, P329 (1982)
- 2) Y. Naito, Shin-ichiro Tsuruta, Tetsuo Matsumura and Tamotsu Ohuchi, "MGCL-PROCESSOR : A Computer Code System for Processing Multigroup Constants Library MGCL," JAERI-M 9396 (1981)
- 3) K. Koyama, et al., "RADHEAT-V3, A Code System for Generating Coupled Neutron and Gamma-Ray Group Constants and Analyzing Radiation Transport," JAERI-M 7155 (1977)
- 4) L.M. Petrie, N.F. Cross, "KENO-IV An Improved Monte Carlo Criticality Program," ORNL-4938 (1975)
- 5) Argonne National Laboratory, "Reactor Physics Constants," USAEC Report ANL-5800 2nd edition (1963)

表1 ハンドブック等に記載されている隔離厚さの例

	TID-7016 Rev.1	CEA-R-3114	西独ハンドブック	Exxon 再処理工場
水	12 in.	30 cm 程度	—	12 in.
コンクリート	12 in.	20 cm	—	24 in.
鉄	—	20 cm	—	—
パラフィン	—	30 cm 程度	—	—
ポリエチレン	—	30 cm 程度	—	—
水とほとんど同じ水素密度を有するプラスチック等	—	30 cm 程度	—	—
Cd シート付パラフィン	—	—	18 cm	—
Cd シート付ポリエチレン	—	—	12 cm	—
B 入ポリエチレン	—	—	10 cm	—
B 入コンクリート	—	—	20 cm	—

表2 臨界実験から得られた隔離厚さの例

隔離物質	実効隔離厚 (cm)	備考
ポリエチレン	17.5 ± 0.5	$\rho = 0.917 \text{ g/cm}^3$
＃ (片側Cdシート付)	10.8 ± 0.2	Cd シート厚 = 0.02 in.
＃ (両側Cdシート付)	9.4 ± 0.2	＃
B入ポリエチレン	8.8 ± 0.2	10 wt% B, $\rho = 0.964 \text{ g/cm}^3$
圧縮木材	19.0 ± 0.5	$\rho = 1.341 \text{ g/cm}^3$
コンクリート	25.0 ± 2.0	$\rho = 2.33 \text{ g/cm}^3$
B入コンクリート	17.5 ± 0.5	2.2 wt% B, $\rho = 2.33 \text{ g/cm}^3$
鉛	26.0 ± 2.0	$\rho = 11.34 \text{ g/cm}^3$

表3 普通コンクリートの組成

単位 [g/cm³]

元 素	密 度
	2.30
H	0.023
O	1.220
C	0.0023
Na	0.0368
Mg	0.005
Al	0.078
Si	0.775
K	0.0299
Ca	0.100
Ni	0.032

表4 燃料及び反射体（隔離体）の原子個数密度

単位 [atoms/barn·cm]

核 種	燃 料 の 組 成			反 射 体 (隔 離 体)	
	A	B	C	水	普通コンクリート
H	—	6.6500-2	5.97275-2	6.6738-2	1.3742-2
O	—	3.3250-2	2.98638-2	3.3370-2	4.5919-2
C	—	—	—	—	1.1532-4
Na	—	—	—	—	9.6395-4
Mg	—	—	—	—	1.2388-4
Al	—	—	—	—	1.7409-3
Si	—	—	—	—	1.6617-2
K	—	—	—	—	4.6052-4
Ca	—	—	—	—	1.5025-3
Ni	—	—	—	—	3.2826-4
²³⁵ U	4.8424-2	2.5621-4	2.56209-4	—	—
²³⁸ U	—	—	4.80649-3	—	—

表5 各計算ケースの詳細

計算 ケース	燃 料			反射体(隔離体) の材質	反射体(隔離体) 外側の境界条件
	組 成	形 状	寸 法 [cm]		
①	A	無限平板	2	水	反 射
②	"	"	"	"	真 空
③	"	"	"	普通コンクリート	反 射
④	"	"	"	"	真 空
⑤	B	"	"	水	反 射
⑥	"	"	"	"	真 空
⑦	"	"	"	普通コンクリート	反 射
⑧	"	"	"	"	真 空
⑨	"	"	7.5	水	反 射
⑩	"	"	"	"	真 空
⑪	"	"	"	普通コンクリート	反 射
⑫	"	"	"	"	真 空
⑬	C	"	20	水	—
⑭	"	"	"	普通コンクリート	—
⑮	"	有限平板	20×30×30	水	—
⑯	"	"	"	普通コンクリート	—
⑰	"	円柱, 2×1 配列	高さ100, 直径30	水	—
⑱	"	円柱, 3×3 配列	"	"	—
⑲	"	円柱, 無限配列	"	"	—

表6 計算条件 (ANISN)

エネルギー群数	137群
収束判定値	1.0×10 ⁻⁵ (固有値) 2.0×10 ⁻⁵ (中性子束)
メッシュ幅	最大 2 cm (反射体領域) 最小 0.5 cm (燃料領域)
P _ℓ 次数	P ₁
S _n 次数	S ₁₆

表7 計算条件 (KENO-N)

エネルギー群数	137群
1世代当りの中性子数	1000
計算世代数	203
スキップ世代数	3
初期中性子発生分布	平 担

表8 実効増倍係数 (ケース①, ②)

ケース①		ケース②	
隔離体厚さ 2R [cm]	実効増倍係数	反射体厚さ R [cm]	実効増倍係数
0	2.3567991	0	0.41063207
4	1.9290514	2	—
10	1.4452057	5	0.92130268
14	1.2415991	7	0.99769932
20	1.1158352	10	1.03942058
24	1.0853739	12	1.0492983
30	1.0673409	15	1.0537663
34	1.0617790	17	1.0545654
40	1.0578499	20	1.0549755
50	1.0557959	25	1.0550480
60	1.0553694	30	1.0549126
70	1.0551241	35	1.0550079
80	1.0544224	40	1.0545464

表9 実効増倍係数 (ケース③, ④)

ケース③		ケース④	
隔離体厚さ 2R [cm]	実効増倍係数	反射体厚さ R [cm]	実効増倍係数
0	2.3567991	0	0.41063207
4	2.0747375	2	0.57067585
10	1.9327421	5	0.76479125
20	1.6783609	10	1.0215406
24	1.5774145	12	1.0925627
30	1.4586535	15	1.1674175
34	1.4023437	17	1.2004166
40	1.3455629	20	1.232148
50	1.2984543	25	1.2569437
60	1.2804642	30	1.2657948
70	1.2739134	35	1.2687044
80	1.271493	40	1.2696877
100	1.2703209	50	1.2701025

表 10 実効増倍係数 (ケース⑤, ⑥)

ケ ー ス ⑤		ケ ー ス ⑥	
隔離体厚さ 2 R [cm]	実効増倍係数	反射体厚さ R [cm]	実効増倍係数
0	1.7908640	0	0.011901587
4	1.3174639	2	0.19610167
10	0.81514688	5	0.43905857
14	—	7	0.50049448
20	0.58930665	10	—
24	0.57026029	12	0.54821849
30	0.55886281	15	0.55142605
34	0.55577594	17	0.55200779
40	0.55369610	20	0.55224037
50	0.55252177	25	0.55222529
60	0.55220228	30	0.55212057
70	0.55192417	35	0.55211800
80	0.55176699	40	0.55206305

表 11 実効増倍係数 (ケース⑦, ⑧)

ケ ー ス ⑦		ケ ー ス ⑧	
隔離体厚さ 2 R [cm]	実効増倍係数	反射体厚さ R [cm]	実効増倍係数
0	1.7908640	0	0.011901587
4	1.5674429	2	0.069120586
10	1.2788239	5	0.21421242
20	0.93546188	10	0.43387121
24	0.84614313	12	0.49157214
30	0.75353324	15	0.5497008
34	0.71288896	17	0.57440692
40	0.67363983	20	0.59745932
50	0.64225143	25	0.61496001
60	0.63057733	30	0.62099034
70	0.62633765	35	0.62298667
80	0.62481833	40	0.62365365
100	0.62407643	50	0.62393826

表 12 実効増倍係数 (ケース⑨, ⑩)

ケ - ス ⑨	
隔離体厚さ 2 R [cm]	実効増倍係数
0	1.7908640
4	1.5681896
10	1.2122583
14	1.1011152
20	1.0353308
24	1.0167809
30	1.0059233
34	1.0027695
40	1.0011520
44	0.99745727
50	0.99588427
60	0.99704188

ケ - ス ⑩	
反射体厚さ R [cm]	実効増倍係数
0	0.44110656
2	0.72995210
5	0.92741567
7	0.97244972
10	0.99343348
12	0.99723339
15	0.99883878
17	0.99894440
20	0.99915290
22	0.99708831
25	0.99701250
30	0.99662584

表 13 実効増倍係数 (ケース⑪, ⑫)

ケ - ス ⑪	
隔離体厚さ 2 R [cm]	実効増倍係数
0	1.7908640
10	1.5783463
20	1.3632088
30	1.2370224
40	1.1816864
50	1.1595955
60	1.1502924
70	1.1468039
80	1.1456327

ケ - ス ⑫	
反射体厚さ R [cm]	実効増倍係数
0	0.44110656
5	0.83249265
10	1.0169411
15	1.0969830
20	1.1286039
25	1.1399698
30	1.1436052
35	1.1446600
40	1.1449099

表 14 実効増倍係数 (ケース⑬, ⑮)

隔離体厚さ 2 R [cm]	ケース ⑬	ケース ⑮
	$k_{eff} \pm \sigma$	$k_{eff} \pm \sigma$
0	1.29709 ± 0.00157	0.90789 ± 0.00201
5	1.25518 ± 0.00155	0.86805 ± 0.00189
10	1.17042 ± 0.00167	0.81923 ± 0.00173
15	1.13391 ± 0.00167	0.79344 ± 0.00186
17	—	0.79088 ± 0.00181
20	1.12160 ± 0.00161	0.78810 ± 0.00192
25	—	0.78426 ± 0.00173
30	1.10994 ± 0.00163	0.78891 ± 0.00182
40	1.10722 ± 0.00167	0.78982 ± 0.00173
60	1.10757 ± 0.00166	0.78445 ± 0.00169

表 15 実効増倍係数 (ケース⑭, ⑯)

隔離体厚さ 2 R [cm]	ケース ⑭	ケース ⑯
	$k_{eff} \pm \sigma$	$k_{eff} \pm \sigma$
0	1.29709 ± 0.00157	0.90789 ± 0.00201
5	1.29324 ± 0.00165	0.84972 ± 0.00185
10	1.26875 ± 0.00140	0.81415 ± 0.00193
15	1.24062 ± 0.00162	0.80162 ± 0.00189
20	1.21030 ± 0.00155	0.79215 ± 0.00171
25	—	0.78426 ± 0.00179
30	1.17429 ± 0.00158	0.78005 ± 0.00170
40	1.15698 ± 0.00157	0.78155 ± 0.00171
60	1.14988 ± 0.00168	0.77806 ± 0.00191
80	1.14962 ± 0.00162	—

表 16 実効増倍係数 (ケース⑰, ⑱, ⑲)

隔離体厚さ 2 R [cm]	ケ ー ス ⑰	ケ ー ス ⑱	ケ ー ス ⑲
	$k_{\text{eff}} \pm \sigma$	$k_{\text{eff}} \pm \sigma$	$k_{\text{eff}} \pm \sigma$
0	1.12286 ± 0.00498	1.26821 ± 0.00384	1.32702 ± 0.00385
4	1.07751 ± 0.00391	1.16493 ± 0.00382	1.22109 ± 0.00378
10	1.04959 ± 0.00440	1.07700 ± 0.00431	1.09697 ± 0.00409
14	1.03456 ± 0.00436	1.05609 ± 0.00436	1.06531 ± 0.00425
20	1.03992 ± 0.00241	1.04269 ± 0.00259	1.04609 ± 0.00237
24	1.03955 ± 0.00234	1.03834 ± 0.00242	1.04108 ± 0.00238
30	1.03594 ± 0.00244	1.04317 ± 0.00247	1.04132 ± 0.00234
40	1.04396 ± 0.00261	1.04063 ± 0.00265	1.03808 ± 0.00208

表 17 Reflector Factor (ケース①, ⑤, ⑨)

隔離体厚さ 2 R [cm]	ケ ー ス ①	ケ ー ス ⑤	ケ ー ス ⑨
0	1.233	2.239	7.906×10^{-1}
4	8.278×10^{-1}	1.383	5.680×10^{-1}
10	3.693×10^{-1}	4.741×10^{-1}	2.121×10^{-1}
14	1.764×10^{-1}	—	1.009×10^{-1}
20	5.724×10^{-2}	6.572×10^{-2}	3.517×10^{-2}
24	2.838×10^{-2}	3.127×10^{-2}	1.663×10^{-2}
30	1.129×10^{-2}	1.066×10^{-2}	5.770×10^{-3}
34	6.023×10^{-3}	5.708×10^{-2}	2.671×10^{-3}
40	2.300×10^{-3}	1.316×10^{-3}	9.994×10^{-4}

表18 Reflector Factor (ケース②, ⑥, ⑩)

反射体厚さ R [cm]	ケース②	ケース⑥	ケース⑩
0	6.109×10^{-1}	9.785×10^{-1}	5.590×10^{-1}
2	—	6.454×10^{-1}	2.702×10^{-1}
5	1.271×10^{-1}	2.060×10^{-1}	7.273×10^{-2}
7	5.469×10^{-2}	9.489×10^{-2}	2.770×10^{-2}
10	1.516×10^{-2}	—	6.718×10^{-3}
12	5.802×10^{-3}	8.590×10^{-3}	2.919×10^{-3}
15	1.569×10^{-3}	2.789×10^{-3}	1.313×10^{-3}
17	8.116×10^{-4}	1.737×10^{-3}	1.208×10^{-3}
20	4.230×10^{-4}	1.316×10^{-3}	9.994×10^{-4}

表19 Reflector Factor (ケース③, ⑦, ⑪)

隔離体厚さ 2R [cm]	ケース③	ケース⑦	ケース⑪
0	8.554×10^{-1}	1.870	5.637×10^{-1}
10	5.216×10^{-1}	1.049	3.781×10^{-1}
20	3.213×10^{-1}	4.991×10^{-1}	1.903×10^{-1}
30	1.484×10^{-1}	2.076×10^{-1}	8.011×10^{-2}
40	5.932×10^{-2}	7.954×10^{-2}	3.180×10^{-2}
50	2.223×10^{-2}	2.924×10^{-2}	1.251×10^{-2}
60	8.071×10^{-3}	1.053×10^{-2}	4.384×10^{-3}
70	2.914×10^{-3}	3.734×10^{-3}	1.338×10^{-3}
80	1.009×10^{-3}	1.300×10^{-3}	3.156×10^{-4}

表20 Reflector Factor (ケース④, ⑧, ⑫)

反射体厚さ R [cm]	ケース④	ケース⑧	ケース⑫
0	6.767×10^{-1}	9.809×10^{-1}	6.148×10^{-1}
5	3.979×10^{-1}	6.567×10^{-1}	2.731×10^{-1}
10	1.958×10^{-1}	3.047×10^{-1}	1.121×10^{-1}
15	8.093×10^{-2}	1.191×10^{-1}	4.216×10^{-2}
20	2.997×10^{-2}	4.254×10^{-2}	1.455×10^{-2}
25	1.045×10^{-2}	1.450×10^{-2}	4.629×10^{-3}
30	3.477×10^{-3}	4.835×10^{-3}	1.455×10^{-3}
35	1.187×10^{-3}	1.636×10^{-3}	5.338×10^{-4}
40	4.125×10^{-4}	5.668×10^{-4}	3.156×10^{-4}

表21 Reflector Factor (ケース⑬, ⑮)

隔離体厚さ 2R [cm]	ケース⑬	ケース⑮
0	1.711×10^{-1}	1.574×10^{-1}
5	1.333×10^{-1}	1.066×10^{-1}
10	5.675×10^{-2}	4.434×10^{-2}
15	2.378×10^{-2}	1.146×10^{-2}
17	—	8.197×10^{-3}
20	1.267×10^{-2}	4.653×10^{-3}
25	—	2.422×10^{-4}
30	2.140×10^{-3}	5.686×10^{-3}
40	—	6.846×10^{-3}

表 22 Reflector Factor (ケース⑭, ⑯)

隔離体厚さ 2 R [cm]	ケ ー ス ⑭	ケ ー ス ⑯
0	1.283×10^{-1}	1.669×10^{-1}
5	1.249×10^{-1}	9.210×10^{-2}
10	1.036×10^{-1}	4.638×10^{-2}
15	7.916×10^{-2}	3.028×10^{-2}
20	5.278×10^{-2}	1.811×10^{-2}
25	—	7.969×10^{-3}
30	2.146×10^{-2}	2.558×10^{-3}
40	6.402×10^{-3}	4.486×10^{-3}
60	2.264×10^{-4}	—

表 23 Reflector Factor (ケース⑰, ⑱, ⑲)

隔離体厚さ 2 R [cm]	ケ ー ス ⑰	ケ ー ス ⑱	ケ ー ス ⑲
0	7.59×10^{-2}	2.16×10^{-1}	2.78×10^{-1}
4	3.21×10^{-2}	1.17×10^{-1}	1.76×10^{-1}
10	5.65×10^{-3}	3.24×10^{-2}	5.67×10^{-2}
14	—	1.24×10^{-2}	2.62×10^{-2}
20	—	—	7.72×10^{-3}
24	—	—	2.89×10^{-3}
30	—	—	4.13×10^{-3}

表 24 Reflector Factor のフィッティング係数

ケース番号	A_1	$-A_2/2$	境界条件	反射体, 隔離体* の材質
①	2.02	-0.175	完全反射	水*
②	1.18	-0.441	真 空	水
③	3.16	-0.1	完全反射	普通コンクリート*
④	2.02	-0.212	真 空	普通コンクリート
⑤	2.82	-0.185	完全反射	水*
⑥	1.91	-0.441	真 空	水
⑦	4.56	-0.102	完全反射	普通コンクリート*
⑧	3.07	-0.215	真 空	普通コンクリート
⑨	1.31	-0.182	完全反射	水*
⑩	0.712	-0.461	真 空	水
⑪	1.83	-0.102	完全反射	普通コンクリート*
⑫	1.66	-0.218	真 空	普通コンクリート
⑬	0.315	-0.172	-	水*
⑭	0.298	-0.088	-	普通コンクリート*
⑮	0.331	-0.216	-	水*
⑯	0.165	-0.117	-	普通コンクリート*
⑰	0.102	-0.289	-	水*
⑱	0.291	-0.223	-	水*
⑲	0.393	-0.195	-	水*

表 25 十分な反射体厚さと隔離厚さ

ケース番号	隔離厚さ [cm]	ケース番号	十分な反射体厚さ [cm]
①	37.1	②	16.1
③	69.6	④	35.9
⑤	37.0	⑥	17.1
⑦	72.1	⑧	37.3
⑨	33.4	⑩	14.3
⑪	63.1	⑫	34.0
⑬	27.0		
⑭	52.5		
⑮	21.8		
⑯	34.3		
⑰	12.2		
⑱	20.5		
⑲	25.0		

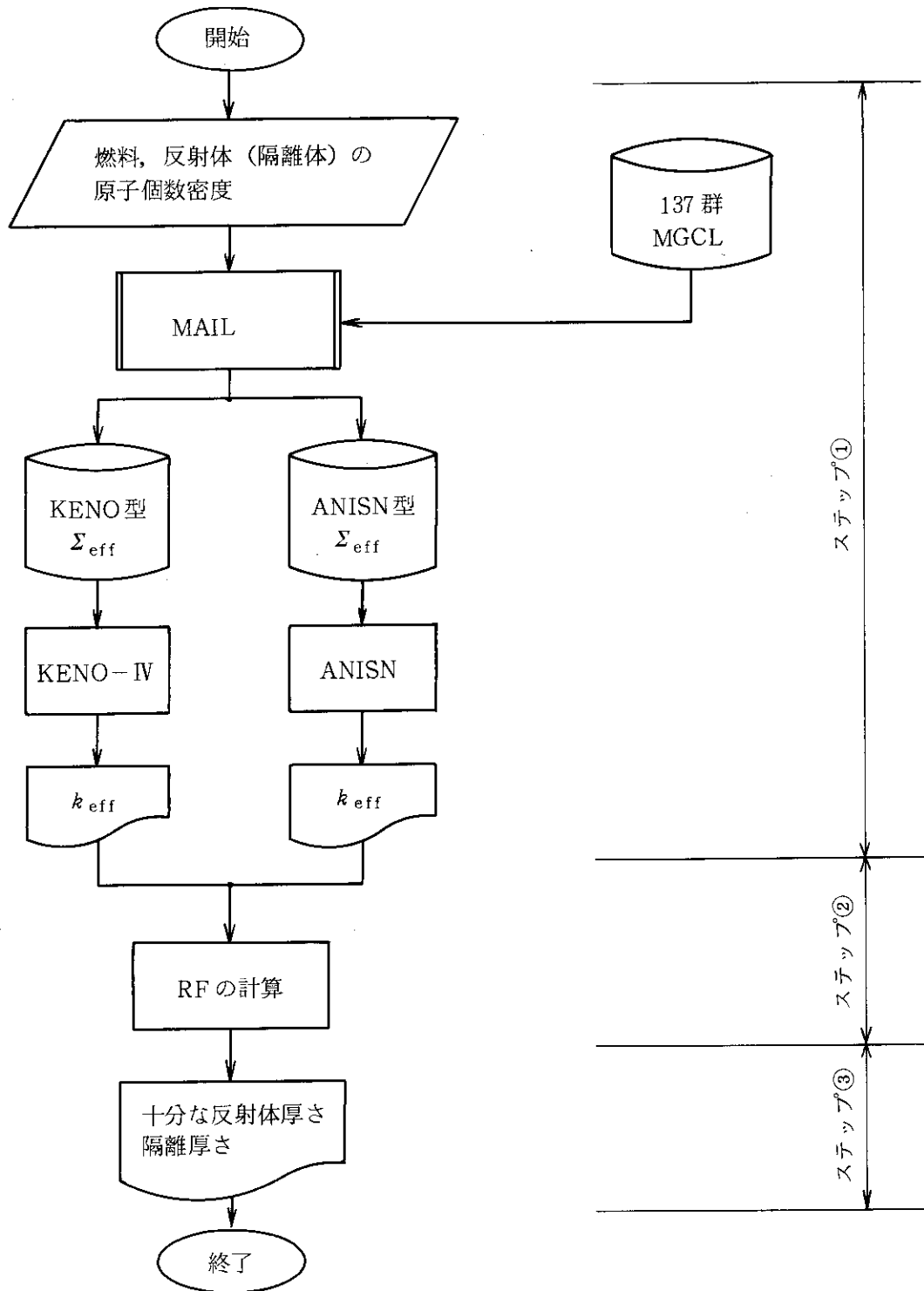


図1 十分な反射体厚さ及び隔離厚さの計算の流れ

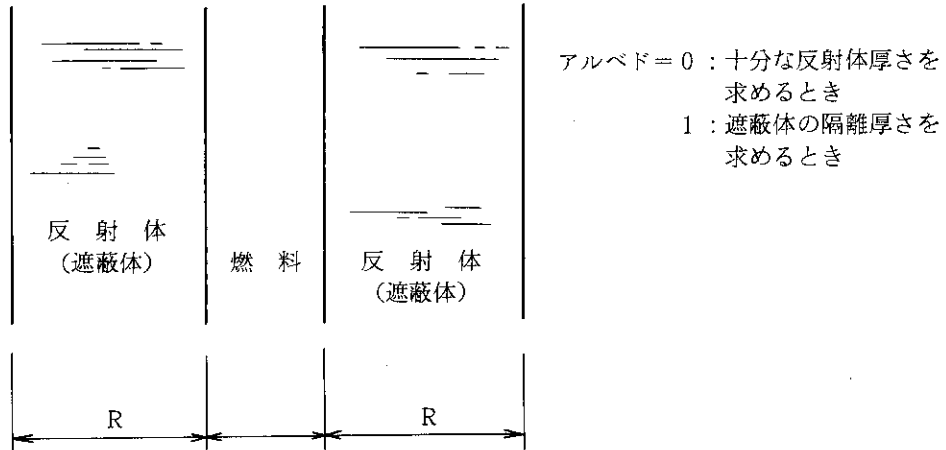


図2 臨界計算モデル (ANISN用, ケース①からケース⑫,
 R : 反射体厚さ, 2R : 隔離体厚さ)

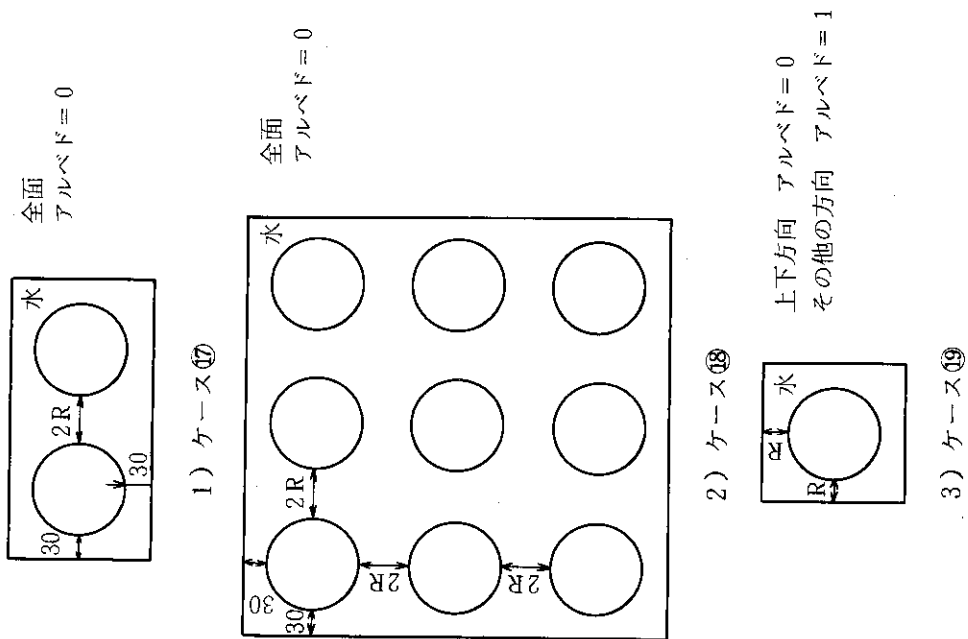


図4 臨界計算モデル (KENO用, ケース⑰~⑲, 単位[cm], 平面図)

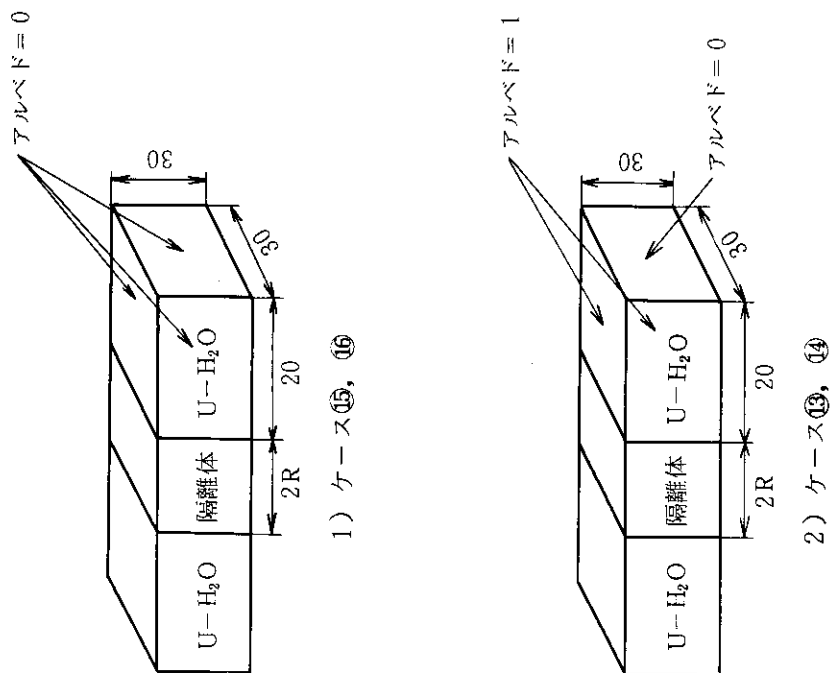


図3 臨界計算モデル (KENO用, ケース⑬~⑯, 単位[cm])

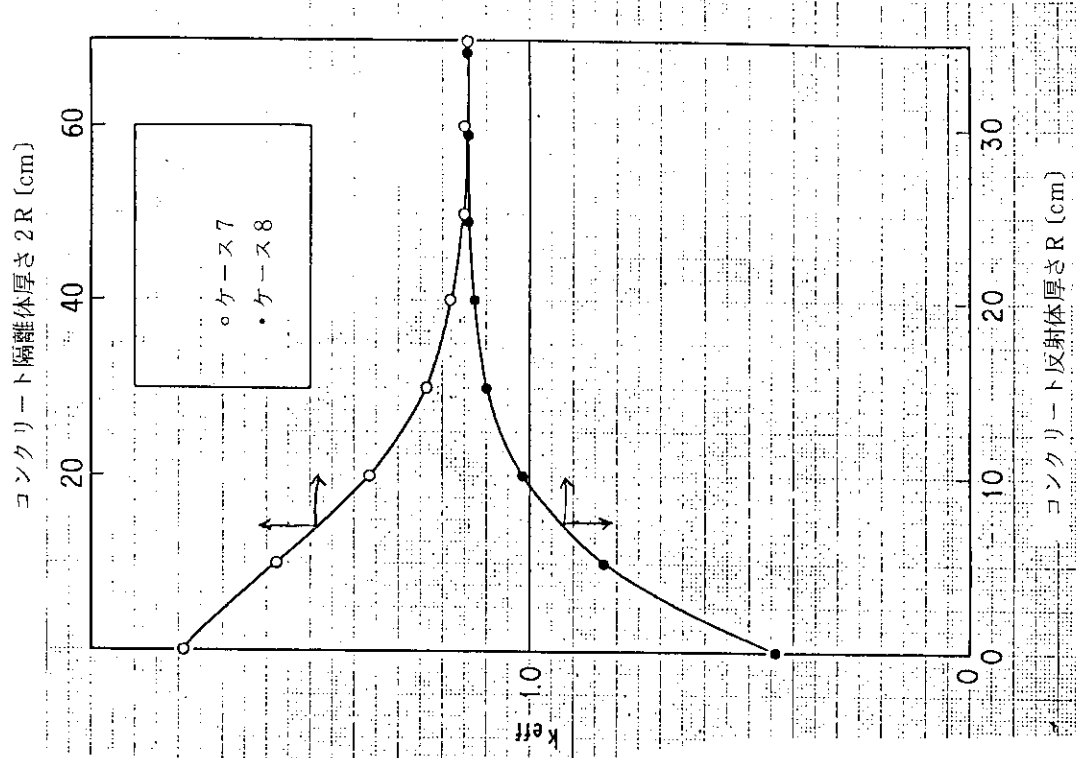


図6 実効増倍係数 (ケース⑦, ⑧)

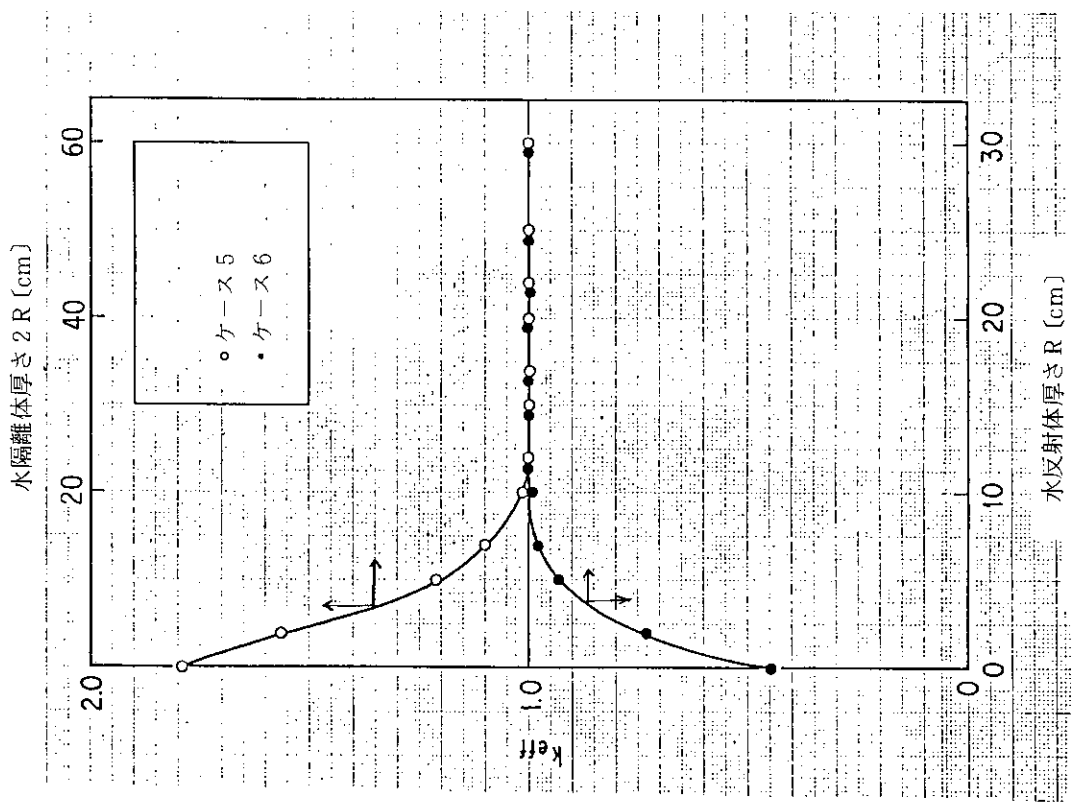


図5 実効増倍係数 (ケース⑤, ⑥)

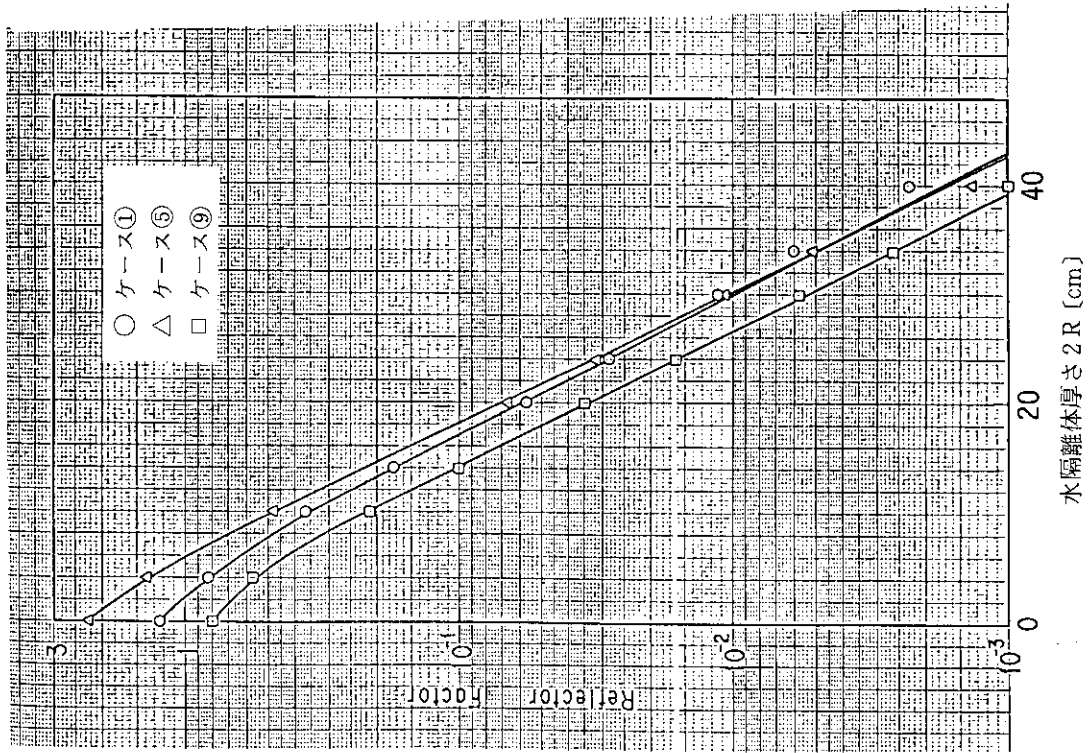


図7 水隔離体の Reflector Factor (ケース①, ⑤, ⑨)

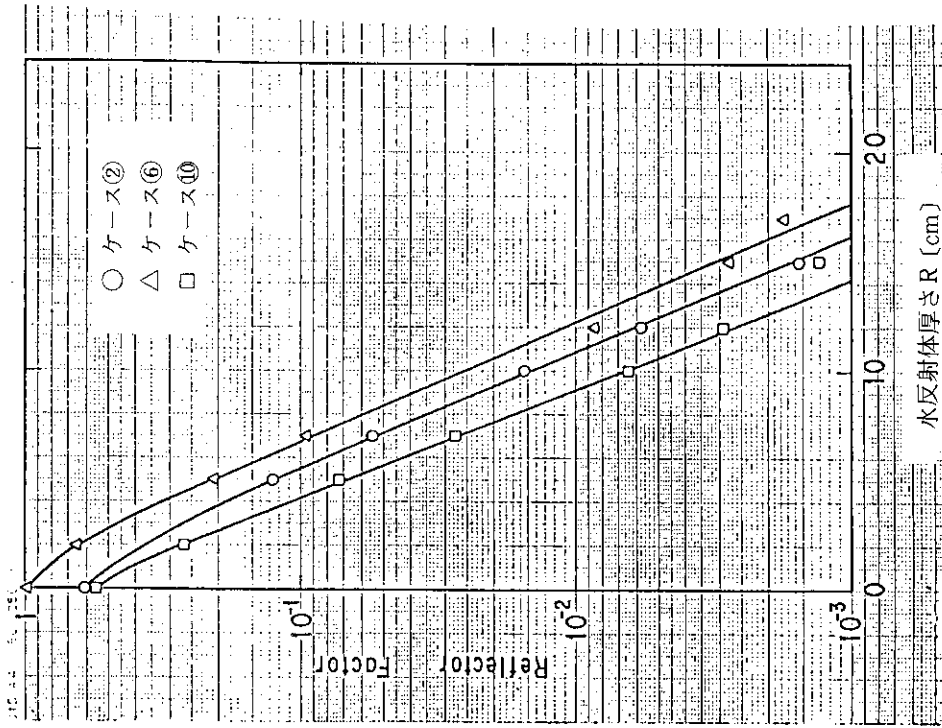


図8 水反射体の Reflector Factor (ケース②, ⑥, ⑩)

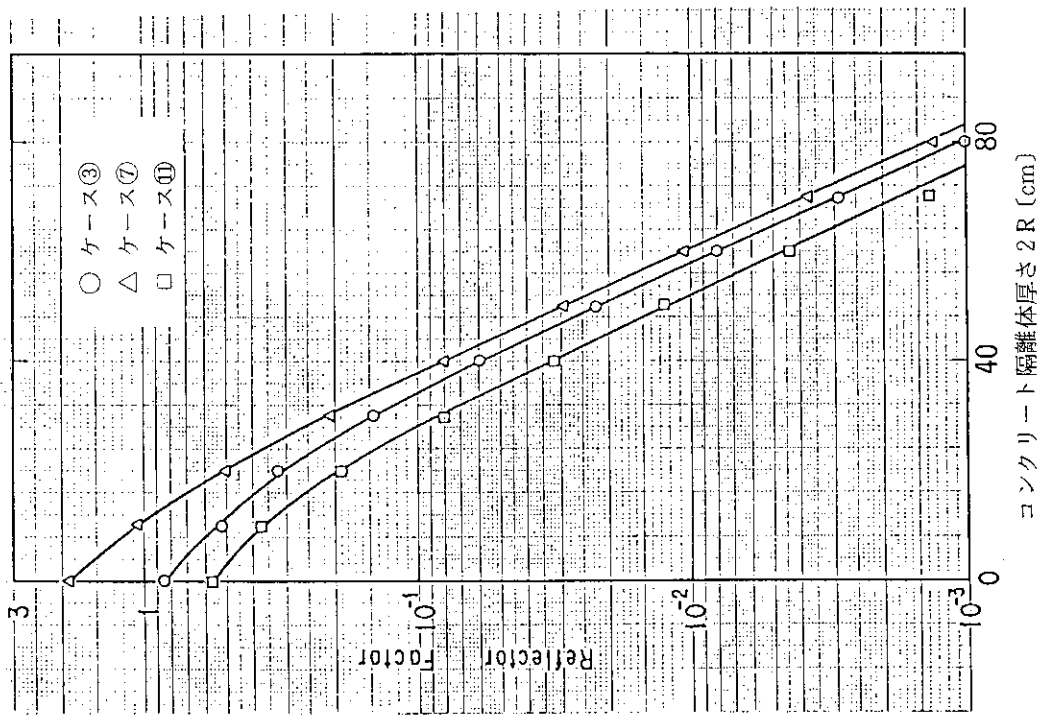


図9 コンクリート隔離体の Reflector Factor
(ケース③, ⑦, ⑪)

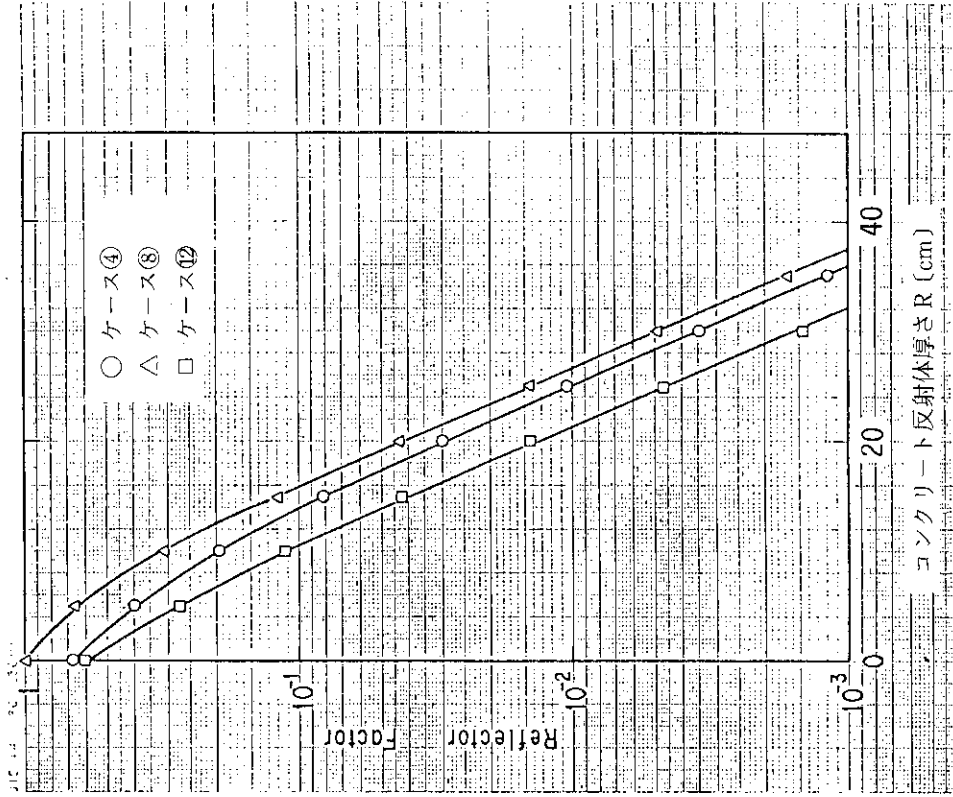


図10 コンクリート反射体の Reflector Factor
(ケース④, ⑧, ⑫)

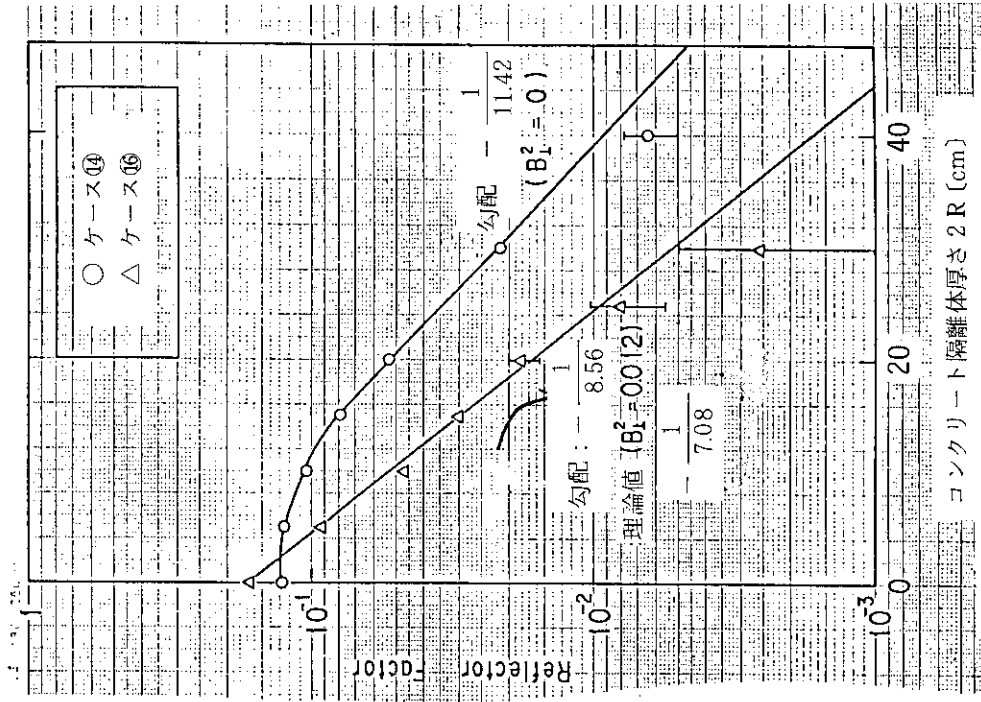


図12 コンクリート隔離体の Reflector Factor (ケース⑭, ⑯)

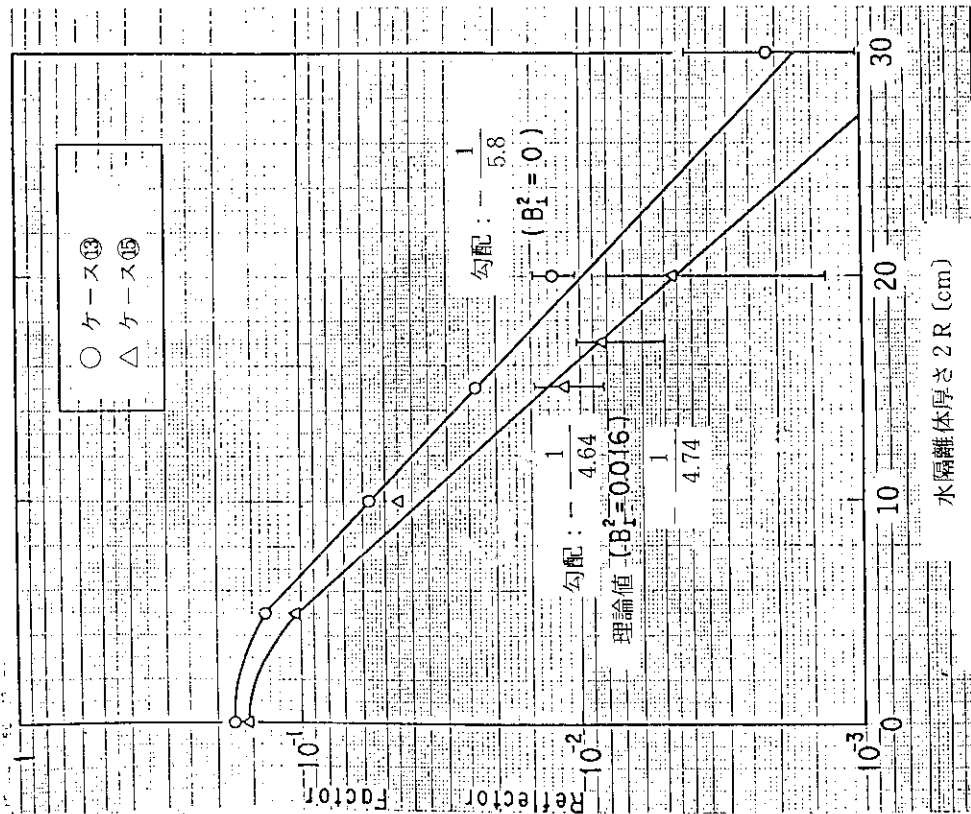


図11 水隔離体の Reflector Factor (ケース⑬, ⑮)

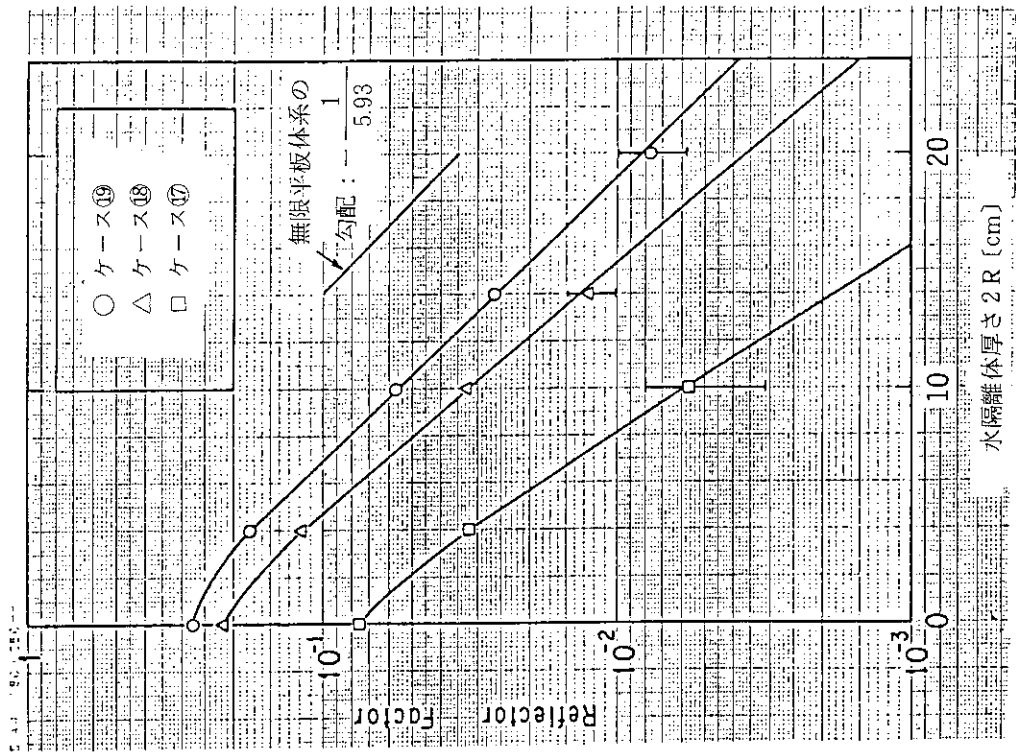


図 13 水隔離体の Reflector Factor (ケース⑰, ⑱, ⑲)

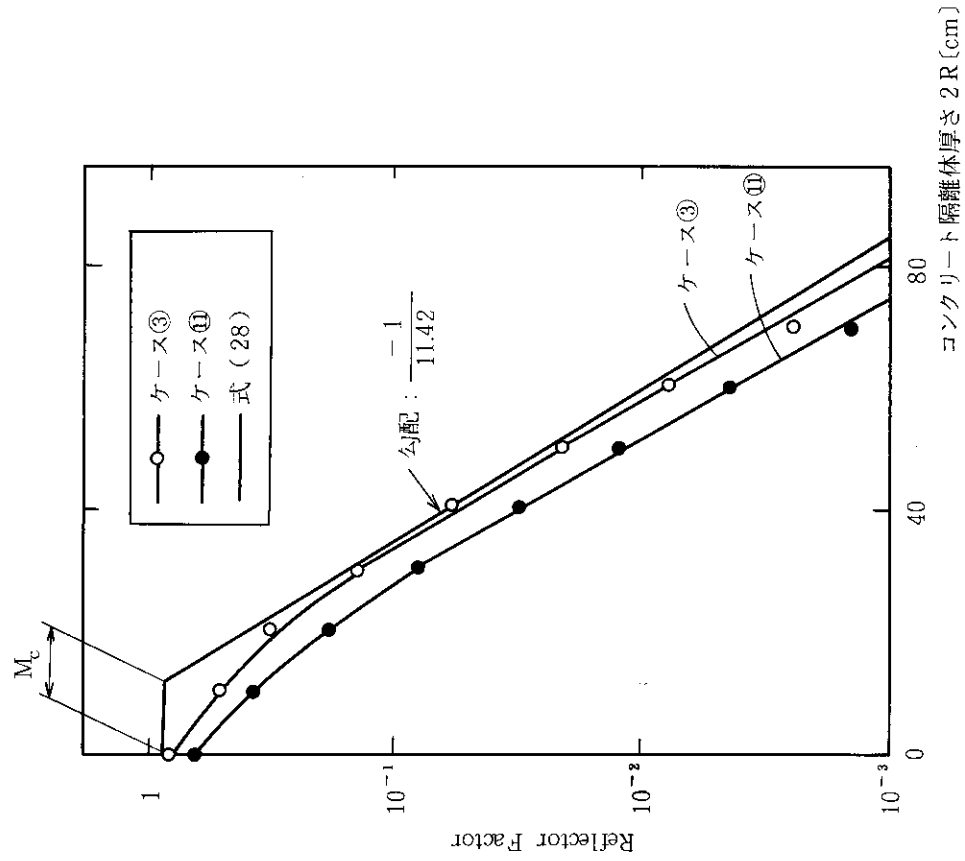


図 14 (1) 水隔離体の Reflector Factor
(詳細計算と近似式の比較, M_w : 水の中性子
移動距離)

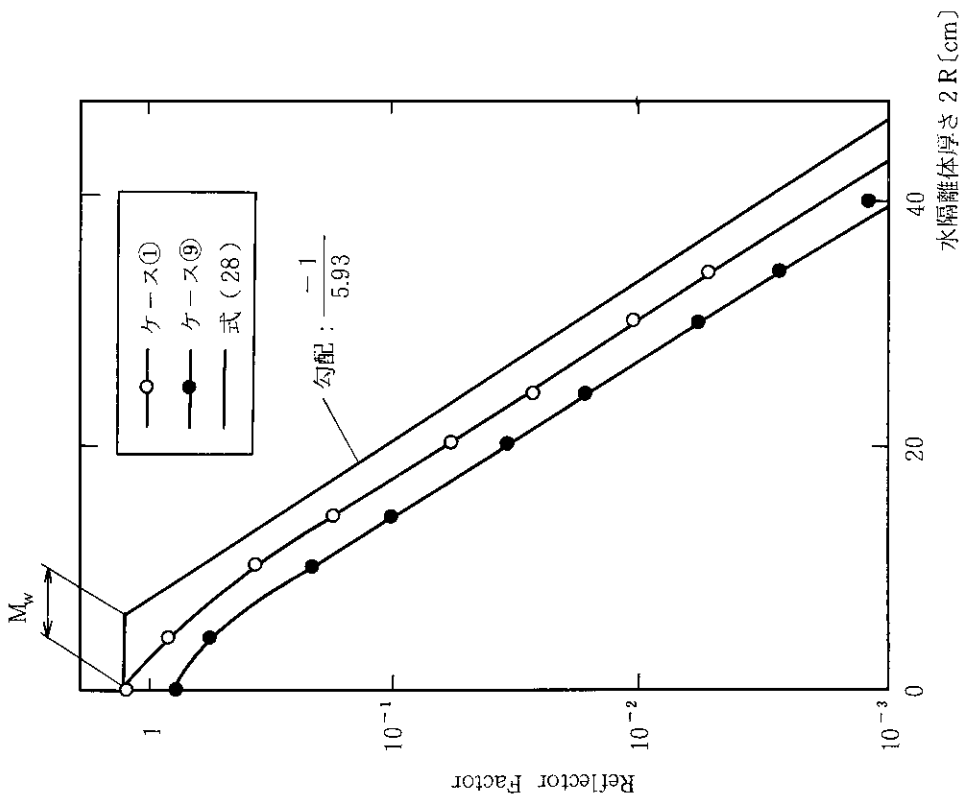


図 14 (2) コンクリート隔離体の Reflector Factor
(詳細計算と近似式の比較, M_c : コンクリートの中性子
移動距離)