

JAERI-M
87-212

コンクリート反射体と円柱燃料の面間距離
に対する中性子反応度の変化

1988年1月

長田 和男・内藤 倣孝

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

コンクリート反射体と円柱燃料の面間距離
に対する中性子反応度の変化

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部

長田 和男・内藤 倣孝

(1987年12月21日受理)

単一ユニットの核燃料物質の臨界安全性は多くの場合、その核燃料物質が水没した条件を仮定して評価される。しかし核燃料がコンクリート壁に囲まれると水没した場合よりも中性子増倍率が大きくなる場合がある。壁からの反射中性子が燃料と衝突する確率は燃料と壁との間隔によって変化する。この衝突確率の変化を中性子の実効アルベドの変化として表現する方法を導出した。

円柱燃料がコンクリート壁に囲まれている場合の中性子増倍率は、円柱燃料表面の境界条件として実効アルベドを用いて算出できる。この方法で求めた中性子増倍率はモンテカルロ法で計算した値とよい一致を示した。

コンクリート壁と水反射体の反射効果を実効アルベド値を用いて比較した。この結果、円柱燃料とコンクリート壁との面間距離が円柱燃料の半径より近よっていれば、完全水没条件の場合よりも中性子増倍率が大きくなることがわかった。

The Effective Neutron Multiplication Factor depending on
the Distance between the Concrete Reflector and
the Cylindrical Fuel Unit Surface

Kazuo OSADA and Yoshitaka NAITO
Department of Fuel Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 21, 1987)

For criticality safety evaluation on a single unit of nuclear fuel, it is often assumed to immerse the nuclear fuel in water. There exists, however, the fact that the neutron multiplication factor for the nuclear fuel enclosed by the concrete walls is larger than that for fully reflected water. The collision probability of a reflected neutron by the walls with the nuclear fuel changes depending on the distance between the fuel unit and the walls. The method to express the change of the collision probability as the change of the effective neutron albedo has been developed.

The neutron multiplication factor can be calculated with the effective albedo which is used as a boundary condition on the surface of a cylindrical fuel unit. The neutron multiplication factor calculated by this method showed good agreement with that calculated by the Monte Carlo code.

Neutron reflection effect has been compared between the concrete walls and fully reflected water by using the effective neutron albedo. It is concluded that the neutron multiplication factor for the concrete walls is larger than that for fully reflected water, where the distance between the cylindrical fuel unit surface and the concrete walls is smaller than the radius of the cylindrical fuel unit.

Keywords: Neutron Multiplication Factor,
Concrete Reflector, Criticality Safety,
Cylindrical Fuel Unit, Monte Carlo Code

目 次

1. 序	1
2. 方 法	2
2.1 実効アルベドの算出	2
2.2 中性子増倍率の算出	7
2.3 実効アルベドによる反射効果の比較	8
3. 検 討	9
4. 結 論	10
謝 辞	10
参考文献	10
付 録	22

Contents

1. Introduction	1
2. Methods	2
2.1 Calculation of the effective albedo	2
2.2 Calculation of the neutron multiplication factor	7
2.3 Comparison of neutron reflection effect by the effective neutron albedo	8
3. Considerations	9
4. Conclusion	10
Acknowledgement	10
References	10
Appendix	22

1. 序

完全水没条件での中性子増倍率が他の外周条件の場合よりも高い値を示す場合が多いので、核燃料施設の臨界安全評価においては、単一ユニットの核物質の周囲に十分な厚さの水反射体を巻いたモデルを設定し、臨界安全評価を行えば十分であるとする事が多い。しかしながら、核物質がコンクリート壁で取り囲まれている場合の方が十分な厚さの水で取り囲まれている場合よりも反応度的に厳しい結果を与えることがあるので、臨界安全性を評価するにあたっては注意を要する。

円柱燃料がコンクリート壁で囲まされると、壁による中性子の反射により系の中性子増倍率は増大する。円柱燃料と壁との間隔が増大すると、壁からの反射中性子が円柱燃料と衝突する確率が減少し、系の中性子増倍率が減少する。この衝突確率の減少は、中性子の実効アルベドの減少として表現できる。実効アルベドとは、燃料体の表面でこのアルベドを仮定して計算すると、実体系を解析した場合と同じ実効増倍率が得られる値である。

実効アルベドが求めれば、円柱燃料体表面での中性子輸送計算の境界条件が以下の式で定まる。¹⁾

$$\beta_e = \frac{1 + \left(\frac{2D}{\phi} \frac{d\phi}{dx} \right)_{x=0}}{1 - \left(\frac{2D}{\phi} \frac{d\phi}{dx} \right)_{x=0}} \quad (1-1)$$

ただし、 β_e は実効アルベド、 D は拡散係数、 ϕ は中性子束である。

また、簡易法による中性子増倍率の計算に必要な外挿距離 d 、及び十分な厚さの反射体が燃料領域を取り巻いている場合の反射体節約 δ は以下の式で定まる。

$$\begin{aligned} d &= 0.71 \lambda_{tr} \\ &= 0.71 \times 3D \\ &\doteq 2D \end{aligned} \quad (1-2)$$

$$\delta = 2D \cdot \left(\frac{1 + \beta_e}{1 - \beta_e} \right) \quad (1-3)$$

ただし、 λ_{tr} は平均自由行程、 D は拡散係数、 β_e は実効アルベドである。

また、燃料体外周の種々の条件を実効アルベドで比較することにより、反応度が等価となる外周条件が定まる。例えば、十分な水反射体によるアルベド値(0.56)とアルベド値が等しくなる外周条件の系の増倍率は、その系が十分な水反射体で囲まれている場合の増倍率とほぼ等しくなる。

本報告書では、コンクリートの実効アルベドの算出方法について示すとともに、実効アルベドを用いて修正一群モデルで計算した中性子増倍率とコンクリート壁の形状を考慮してモンテカルロ法多群中性子輸送コードKENO-IVを用いた計算結果と比較検討を行なった。

2. 方 法

2.1 実効アルベドの算出

実効アルベドを算出するにあたって、用いた仮定を以下に述べる。

無限長円柱燃料が正方形のコンクリート壁に囲まれているとし、中性子はコンクリート壁で鏡面反射すると仮定する。ここでいう鏡面反射とは、中性子の入射角と反射角が等しいことを意味する。コンクリート壁で反射された中性子の一部は、燃料に戻らず再びコンクリート壁に反射する。ここでは、コンクリート壁に反射する回数は1～7回までと仮定し、燃料に再びもどるまでの確率を反射の回数ごとに以下に示す。なお、Dは円柱燃料の直径、Lはコンクリート壁の内面寸法とする。

(1) 1回の反射で燃料に入射する確率 P_1

Fig.1に示すように、円柱燃料から中性子が放出され、境界で反射されると考える。まわりに描いてある円柱は、円柱燃料の鏡像である。1回の反射で再び燃料に入射する場合の放出角は、Fig.1に示すように、各面に対して $2\omega_1$ の角度で中性子が放出された場合に相当する。 ω_1 は Fig.2から分るように $\sin^{-1}(D/2L)$ であるから、1回の反射で再び燃料に入射する確率 P_1 は以下のとおりである。

$$\begin{aligned}
 P_1 &= 4 \times \frac{2\omega_1}{2\pi} \\
 &= \frac{4\omega_1}{\pi} \\
 &= \frac{4}{\pi} \{ \sin^{-1}(D/2L) \} \quad (2-1)
 \end{aligned}$$

(2) 2回の反射で燃料に入射する確率 P_2

2回の反射で再び燃料に入射する場合の放出角は、Fig.3に示すように $2\omega_2$ の角度で中性子が放出された場合に相当する。求める角度 ω_2 は、Fig.3の詳細図であるFig.4、Fig.5に示すように L/D によって2通りに分類される。2回の反射で燃料に入射する確率 P_2 は以下のとおりである。

(i) $L/D > 1.12$ の場合 (Fig. 4 参照)

$$\begin{aligned}
 P_2 &= 4 \times \frac{2\omega_2}{2\pi} \\
 &= \frac{4\omega_2}{\pi} \\
 &= \frac{4}{\pi} \{ \sin^{-1} (D/2\sqrt{2L}) \} \quad (2-2)
 \end{aligned}$$

(ii) $L/D < 1.12$ の場合 (Fig. 5 参照)

$$\begin{aligned}
 P_2 &= 4 \times \frac{2\omega_2}{2\pi} \\
 &= \frac{4\omega_2}{\pi}
 \end{aligned}$$

ここで,

$$\begin{aligned}
 \omega_2 &= \theta_1 - \theta_2 \\
 &= \pi/4 - \sin^{-1} (D/2L)
 \end{aligned}$$

ゆえに,

$$\begin{aligned}
 P_2 &= \frac{4\omega_2}{\pi} \\
 &= 1 - \frac{4}{\pi} \{ \sin^{-1} (D/2L) \} \quad (2-3)
 \end{aligned}$$

(3) 3回の反射で燃料に入射する確率 P_3

3回の反射で再び燃料に入射する場合の放出角は, Fig. 6 に示すように, $2\omega_3$ の角度で中性子が放出された場合に相当する。ただし求める角度は, Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9 で示すように L/D によって3通りに分類される。3回の反射で燃料に入射する確率 P_3 は以下のとおりである。

(i) $L/D > 1.8$ の場合 (Fig.7 参照)

$$\begin{aligned}
 P_3 &= 8 \times \frac{2\omega_3}{2\pi} \\
 &= \frac{8\omega_3}{\pi} \\
 &= \frac{8}{\pi} \{ \sin^{-1} (D/2\sqrt{5}L) \} \quad (2-4)
 \end{aligned}$$

(ii) $1.8 > L/D > 1.58$ の場合 (Fig.8 参照)

$$\begin{aligned}
 P_3 &= 8 \times \frac{2\omega_3}{2\pi} \\
 &= \frac{8\omega_3}{\pi}
 \end{aligned}$$

ここで,

$$\begin{aligned}
 2\omega_3 &= \theta_1 - \theta_2 \\
 &= \left\{ \pi/4 - \sin^{-1} \left(\frac{D/2}{\sqrt{2}L} \right) \right\} - \left\{ \tan^{-1} (1/2) - \sin^{-1} \left(\frac{D/2}{\sqrt{5}L} \right) \right\} \\
 &= \pi/4 - \sin^{-1} (D/2\sqrt{2}L) - \tan^{-1} (1/2) + \sin^{-1} (D/2\sqrt{5}L)
 \end{aligned}$$

ゆえに,

$$\begin{aligned}
 P_3 &= \frac{8\omega_3}{\pi} \\
 &= 1 - \frac{4}{\pi} \{ \sin^{-1} (D/2\sqrt{2}L) + \tan^{-1} (1/2) - \sin^{-1} (D/2\sqrt{5}L) \} \\
 &\quad (2-5)
 \end{aligned}$$

(iii) $1.58 > L/D > 1.12$ の場合 (Fig.9 参照)

$$\begin{aligned}
 P_3 &= 8 \times \frac{2\omega_3}{2\pi} \\
 &= \frac{8\omega_3}{\pi}
 \end{aligned}$$

ここで,

$$\begin{aligned}
2\omega_3 &= \theta_1 - \theta_2 \\
&= \left\{ \pi/4 - \sin^{-1} \left(\frac{D/2}{\sqrt{2}L} \right) \right\} - \left\{ \sin^{-1} \left(\frac{D/2}{L} \right) \right\} \\
&= \pi/4 - \sin^{-1} (D/2\sqrt{2}L) - \sin^{-1} (D/2L)
\end{aligned}$$

ゆえに,

$$\begin{aligned}
P_3 &= \frac{8\omega_3}{\pi} \\
&= 1 - \frac{4}{\pi} \{ \sin^{-1} (D/2\sqrt{2}L) + \sin^{-1} (D/2L) \} \\
&\hspace{15em} (2-6)
\end{aligned}$$

(4) 4回以降の反射で燃料に入射する確率

4回以降の反射で再び燃料に入射する場合の放出角は、自己遮蔽によって生じる影について考慮に入れずに計算を行い、入射する確率の総和が1を越えないように調整を行なった。4～7回の反射で再び燃料に戻ってくる確率 $P_4 \sim P_7$ は以下のとおりである。

$$P_4 = \frac{8}{\pi} \{ \sin^{-1} (D/2\sqrt{10}L) \} \quad (2-7)$$

$$P_5 = \frac{8}{\pi} \{ \sin^{-1} (D/2\sqrt{17}L) + \sin^{-1} (D/2\sqrt{13}L) \}$$

$$P_6 = \frac{8}{\pi} \{ \sin^{-1} (D/2\sqrt{26}L) + \sin^{-1} (D/2\sqrt{20}L) \}$$

$$P_7 = \frac{8}{\pi} \{ \sin^{-1} (D/2\sqrt{37}L) + \sin^{-1} (D/2\sqrt{29}L) + \sin^{-1} (D/10L) \}$$

ここで求めようとするコンクリートの実効アルベド β_e を以下の式で定義する。

$$\begin{aligned}
\beta_e &= \beta_c P_1 + \beta_c^2 P_2 + \beta_c^3 P_3 + \beta_c^4 P_4 + \beta_c^5 P_5 + \beta_c^6 P_6 + \beta_c^7 P_7 \\
&\hspace{15em} (2-8)
\end{aligned}$$

ただし、 β_c は十分な厚さのコンクリートのアルベド値

この式は、中性子がコンクリート壁に1回反射する度に、中性子強度が β_c 倍になることによる。これは反射することにより、中性子が壁に $(1-\beta_c)$ の割合で吸収されることを意味する。

以下にこれまでの計算結果をまとめる。

$$\beta_e = \beta_c P_1 + \beta_c^2 P_2 + \beta_c^3 P_3 + \beta_c^4 P_4 + \beta_c^5 P_5 + \beta_c^6 P_6 + \beta_c^7 P_7$$

(i) $L/D > 1.8$ の場合

$$P_1 = \frac{4}{\pi} \{ \sin^{-1} (D/2L) \} \quad (2-9)$$

$$P_2 = \frac{4}{\pi} \{ \sin^{-1} (D/2\sqrt{2}L) \}$$

$$P_3 = \frac{8}{\pi} \{ \sin^{-1} (D/2\sqrt{5}L) \}$$

$$P_4 = \frac{8}{\pi} \{ \sin^{-1} (D/2\sqrt{10}L) \}$$

$$P_5 = \frac{8}{\pi} \{ \sin^{-1} (D/2\sqrt{17}L) + \sin^{-1} (D/2\sqrt{13}L) \}$$

$$P_6 = \frac{8}{\pi} \{ \sin^{-1} (D/2\sqrt{26}L) + \sin^{-1} (D/2\sqrt{20}L) \}$$

$$P_7 = \frac{8}{\pi} \{ \sin^{-1} (D/2\sqrt{37}L) + \sin^{-1} (D/2\sqrt{29}L) + \sin^{-1} (D/10L) \}$$

(ii) $1.8 > L/D > 1.58$ の場合

$$P_1 = \frac{4}{\pi} \{ \sin^{-1} (D/2L) \} \quad (2-10)$$

$$P_2 = \frac{4}{\pi} \{ \sin^{-1} (D/2\sqrt{2}L) \}$$

$$P_3 = 1 - \frac{4}{\pi} \{ \sin^{-1} (D/2\sqrt{2}L) + \tan^{-1} (1/2) - \sin^{-1} (D/2\sqrt{5}L) \}$$

$$P_4 = 1 - P_1 - P_2 - P_3$$

$$P_5 \sim P_7 = 0$$

(iii) $1.58 > L/D > 1.12$ の場合

$$P_1 = \frac{4}{\pi} \{ \sin^{-1} (D/2L) \} \quad (2-11)$$

$$P_2 = \frac{4}{\pi} \{ \sin^{-1} (D/2\sqrt{2}L) \}$$

$$P_3 = 1 - P_1 - P_2$$

$$P_4 \sim P_7 = 0$$

(iv) $1.12 > L/D$ の場合

$$P_1 = \frac{4}{\pi} \{ \sin^{-1} (D/2L) \} \quad (2-12)$$

$$P_2 = 1 - P_1$$

$$P_3 \sim P_7 = 0$$

Fig. 10 は、 L/D に対して放出された中性子が再び燃料に入射する確率をコンクリート壁との反射の回数ごとに示し、Fig. 11 は L/D に対する反射の回数ごとのアルベド値と実効アルベド値 β_e を示している。ただし、ここでは β_c として 0.73 を用いている。コンクリート反射体が燃料表面から離れ、 L/D が増大すると実効アルベドは小さくなることがわかる。

2.2 中性子増倍率の算出

コンクリート壁に囲まれた均質 U-H₂O 燃料の無限円柱体系で、円柱直径、²³⁵U 濃縮度、ウラン濃度をパラメータとし、コンクリート壁内面寸法を変化させて中性子増倍率を算出した。算出するにあたって実効アルベドを用いて以下の式により修正一群モデルで計算した。

$$k_{eff} = \frac{k_{\infty}}{1 + M^2 B^2} \quad (2-13)$$

ただし、 k_{eff} は実効増倍率、 k_{∞} は無限増倍率、 M^2 は移動面積、 B^2 はバックリングである。

$$B^2 = \left(\frac{2.405}{r + \delta} \right)^2 \quad (2-14)$$

この式は無限円柱のバックリングを求める式であり、 r は円柱燃料半径、 δ は反射体節約である。

$$\delta = 2D \cdot \left(\frac{1 + \beta_e}{1 - \beta_e} \right) \quad (2-15)$$

ただし D は拡散係数、 β_e は実効アルベドである。

上記の式を用いて計算された中性子増倍率は Fig. 13 にコンクリート壁内面寸法と円柱燃料直径との比 L/D を横軸にとり実線で示す。なお計算で使用した諸元値及び計算結果は Table 1 に示し、CASE 1 ~ 3 の燃料組成は Fig. 13 の下の Table に示す。ここで CASE 1 は高濃縮、高密度ウランであり、CASE 2 は高濃縮、低密度ウランであり、CASE 3 は低濃縮ウランである。

また比較のために中性子増倍率をモンテカルロ法で計算した。計算には多群定数ライブラリー

MGCL²⁾とモンテカルロ法多群中性子輸送コードKENO-IV³⁾を使用した。なお使用したMGCLの体系温度は300 Kで、KENO-IVの一代あたりの中性子数は300、計算世代数は103、スキップ世代数は3である。計算の結果はFig.13にCASE 1, 2, 3について○, △, □で示す。なおコンクリートの組成はTable 2に示し、計算モデルをFig. 12に示す。

2.3 実効アルベドによる反射効果の比較

コンクリート反射体への入射中性子エネルギー・スペクトルがCASE 1~3のそれぞれについて異なる効果を考慮して十分な厚さのコンクリートのアルベド値を計算すると、CASE 1~3についてそれぞれ0.729, 0.746, 0.741である。これらの値を用いて実効アルベドを算出した。結果をFig. 14にコンクリート壁内面寸法と円柱燃料直径との比L/Dを横軸にとり、CASE 1~3について示す。縦軸に記述されている値0.550, 0.649, 0.618はそれぞれCASE 1~3についての十分な水反射体によるアルベド値である。それゆえ横軸に記述されている値1.71, 1.21, 1.34はそれぞれコンクリートの実効アルベド値が十分な水反射体によるアルベド値と等しくなるL/Dである。

3. 検 討

モンテカルロ法で計算した場合と実効アルベドを用いて計算した場合の実効増倍率を比較する。Fig. 13において、CASE 3はよく一致しているが、CASE 1は大きくずれている。この理由として考えられることは、 $L/D=1$ から $L/D=100$ まで変化する時に、燃料中の中性子エネルギー・スペクトルが大きく変わり、それに伴って無限増倍率、移動面積、拡散係数が変わってくると思われる。したがってCASE 1のような減速材を含まない燃料体系においては、反射体による中性子エネルギー・スペクトルの変化を考慮し無限増倍率、移動面積及び拡散係数を実効アルベドの関数としなければならない。

またFig. 13において、十分な水反射体を仮定した場合の中性子増倍率は1.0であるので、CASE 1～3についてそれぞれ L/D の値が1.9, 1.2, 1.1より小さくなるとコンクリート壁に囲まれた方が反応度的に厳しい結果を与えることになる。これはFig. 14において実効アルベドを用いて求めた L/D の値1.71, 1.21, 1.34とおおむね一致している。CASE 1が水反射体のアルベド値と等価な実効アルベドを与える L/D の値が最も大きいことがわかる。これはCASE 1が高濃縮度、高密度ウランであり、中性子の漏洩量が非常に大きな体系であり、またコンクリート壁での中性子減速による反応度効果がこれ以上になる場合はほとんどないと考えられる。

次に、Fig. 15, Fig. 16のように円柱燃料が二面あるいは、一面がコンクリート壁に囲まれている場合、最も条件の厳しいCASE 1において、円柱燃料とコンクリート壁が最も接している場合について実効アルベドを算出すると、それぞれFig. 15の場合は0.287, Fig. 16の場合は0.122である。これは十分な水反射体によるアルベド値0.550を大きく下まわっている。

4. 結 論

円柱燃料が四面コンクリート壁に囲まれている場合、Fig.14において、水反射体のアルベド値と等価な実効アルベドを与える L/D の値がCASE 1の場合1.71であるため少し安全裕度を見込んで L/D が2以上であれば、いかなる燃料組成でもコンクリート壁のかわりに十分な水反射体を仮定して臨界となる条件を求めておけば安全である。

検討の結果、円柱燃料が二面あるいは、一面がコンクリート壁に囲まれている場合、いかなる燃料組成でもコンクリート壁のかわりに十分な水反射体を仮定して臨界となる条件を求めておけば安全である。

謝 辞

本研究の実施に際し御指導をいただいた、日本情報サービス㈱の酒井友宏氏、ならびに原研燃料安全工学部プラント安全解析研究室の方々に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 石森富太郎編, 原子炉工学講座 3, 原子炉物理, 培風館
- 2) Y. NAITO et al., "MGCL PROCESSOR: A computer code system for processing multigroup constants library MGCL" (JAERI-M, 9396, 1981)
- 3) L. M. Petries, N. F. Cross, "KENO-IV, An Improved Monte Carlo Criticality Program", ORNL-4938, Oak Ridge National Laboratory (Nov. 1975)

4. 結 論

円柱燃料が四面コンクリート壁に囲まれている場合、Fig. 14において、水反射体のアルベド値と等価な実効アルベドを与える L/D の値が CASE 1 の場合 1.71 であるため少し安全裕度を見込んで L/D が 2 以上であれば、いかなる燃料組成でもコンクリート壁のかわりに十分な水反射体を仮定して臨界となる条件を求めておけば安全である。

検討の結果、円柱燃料が二面あるいは、一面がコンクリート壁に囲まれている場合、いかなる燃料組成でもコンクリート壁のかわりに十分な水反射体を仮定して臨界となる条件を求めておけば安全である。

謝 辞

本研究の実施に際し御指導をいただいた、日本情報サービス㈱の酒井友宏氏、ならびに原研燃料安全工学部プラント安全解析研究室の方々に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 石森富太郎編, 原子炉工学講座 3, 原子炉物理, 培風館
- 2) Y. NAITO et al., "MGCL PROCESSOR: A computer code system for processing multigroup constants library MGCL" (JAERI-M, 9396, 1981)
- 3) L. M. Petries, N. F. Cross, "KENO-IV, An Improved Monte Carlo Criticality Program", ORNL-4938, Oak Ridge National Laboratory (Nov. 1975)

4. 結 論

円柱燃料が四面コンクリート壁に囲まれている場合、Fig.14において、水反射体のアルベド値と等価な実効アルベドを与える L/D の値がCASE 1の場合1.71であるため少し安全裕度を見込んで L/D が2以上であれば、いかなる燃料組成でもコンクリート壁のかわりに十分な水反射体を仮定して臨界となる条件を求めておけば安全である。

検討の結果、円柱燃料が二面あるいは、一面がコンクリート壁に囲まれている場合、いかなる燃料組成でもコンクリート壁のかわりに十分な水反射体を仮定して臨界となる条件を求めておけば安全である。

謝 辞

本研究の実施に際し御指導をいただいた、日本情報サービス㈱の酒井友宏氏、ならびに原研燃料安全工学部プラント安全解析研究室の方々に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 石森富太郎編, 原子炉工学講座3, 原子炉物理, 培風館
- 2) Y. NAITO et al., "MGCL PROCESSOR: A computer code system for processing multigroup constants library MGCL" (JAERI-M, 9396, 1981)
- 3) L. M. Petries, N. F. Cross, "KENO-IV, An Improved Monte Carlo Criticality Program", ORNL-4938, Oak Ridge National Laboratory (Nov. 1975)

Table 1 Calculated keff by using the effective neutron albedo

	L/D	k_{∞}	D[cm]	M ² [cm ²]	βe	keff
CASE 1	1	2.181	0.11	4.7	0.663	1.074
	1.2	2.184			0.629	1.050
	2	2.197			0.512	0.992
	5	2.248			0.266	0.942
	10	2.293			0.133	0.938
	20	2.341			0.067	0.948
	100	2.405			0.013	0.967
CASE 2	1	1.793	0.40	21.6	0.683	1.034
	1.2	1.793			0.650	1.001
	2	1.792			0.536	0.918
	5	1.790			0.285	0.817
	10	1.789			0.142	0.783
	20	1.787			0.071	0.770
	100	1.784			0.014	0.759
CASE 3	1	1.453	0.54	23.4	0.677	1.012
	1.2	1.451			0.644	0.988
	2	1.445			0.529	0.925
	5	1.435			0.279	0.845
	10	1.428			0.139	0.816
	20	1.420			0.070	0.801
	100	1.402			0.014	0.784

Table 2 Density of concrete

Material	Concrete
	2.30 [g/cm ³]
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

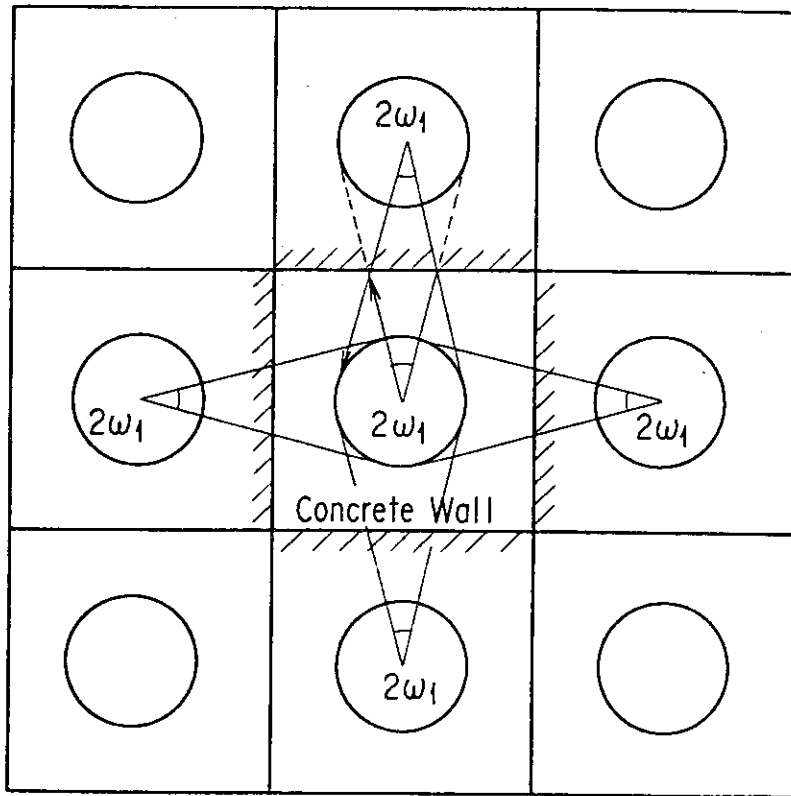


Fig. 1 The calculation model for $2\omega_1$

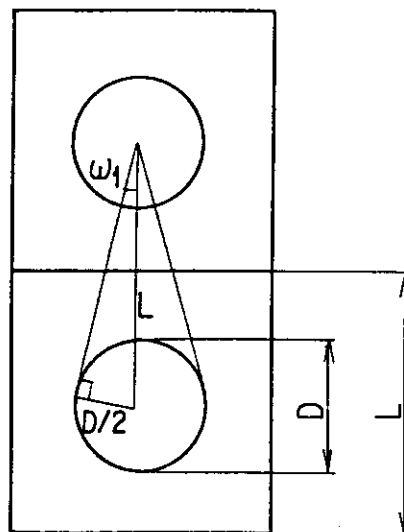


Fig. 2 Detail of Fig. 1

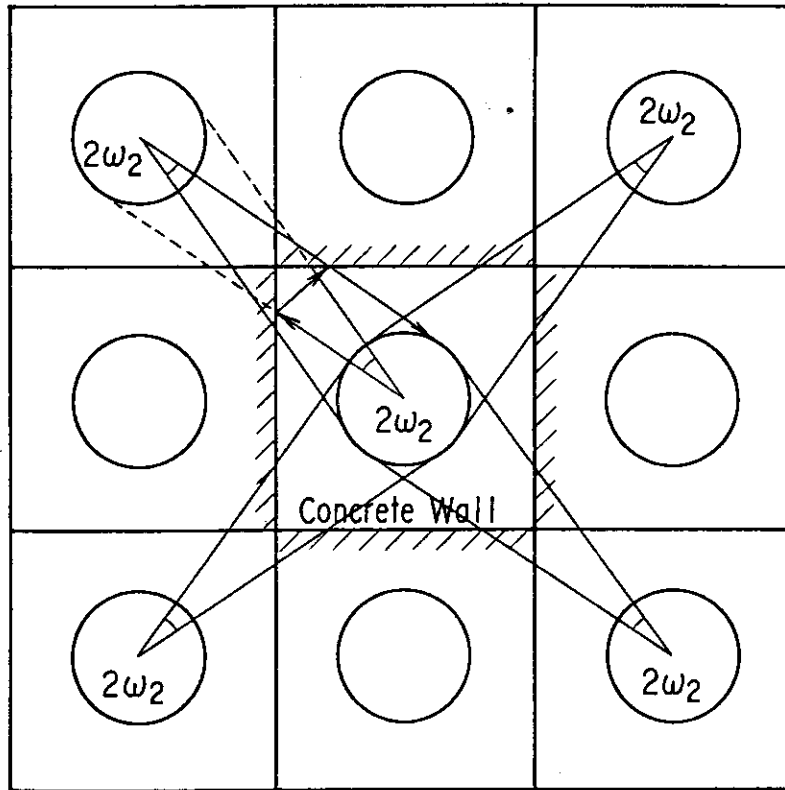


Fig. 3 The calculation model for $2w_2$

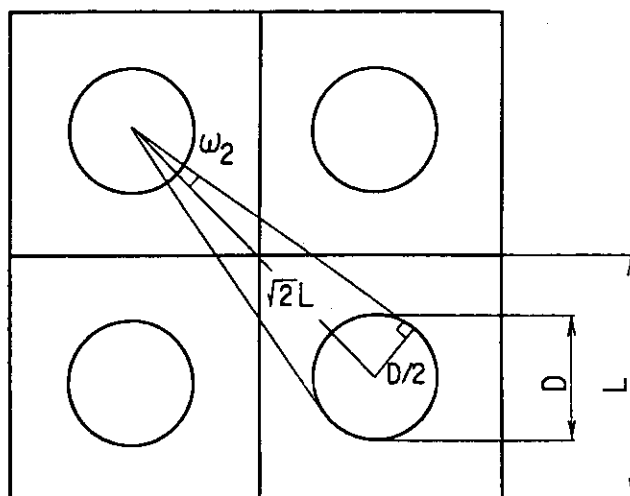


Fig. 4 Detail of Fig. 3 ($L/D > 1.12$)

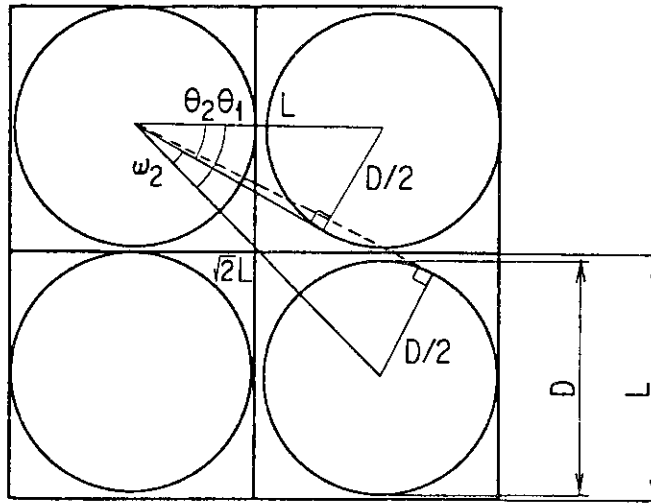


Fig. 5 Detail of Fig. 3 ($L/D < 1.12$)

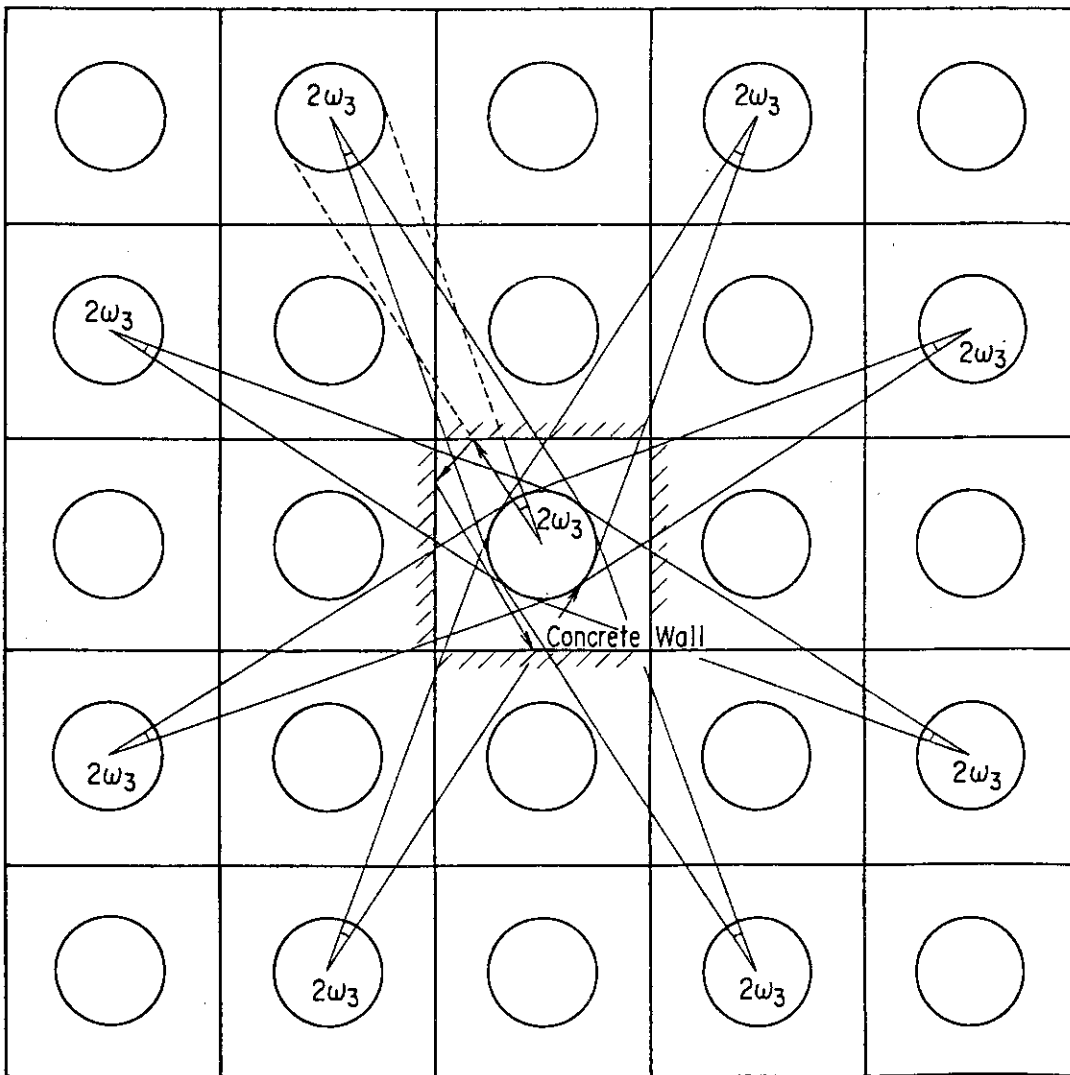


Fig. 6 The calculation model for $2w_3$

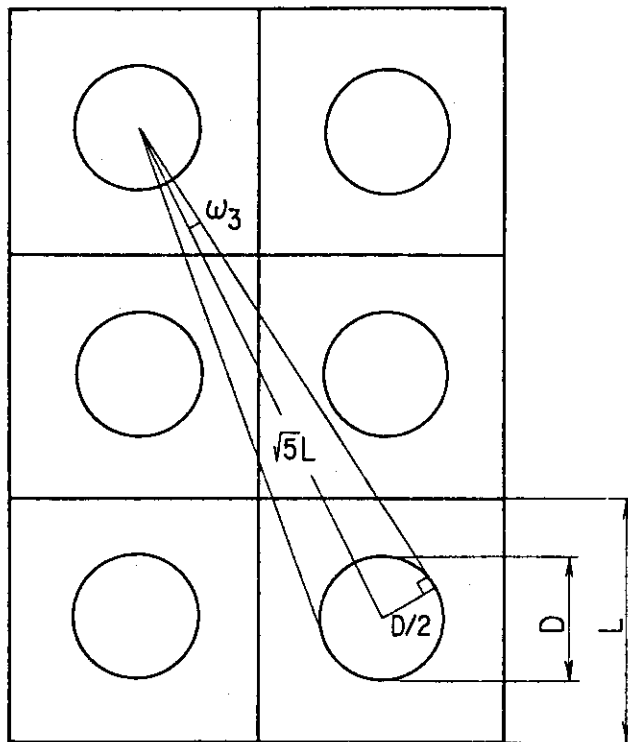


Fig. 7 Detail of Fig. 6 ($L/D > 1.8$)

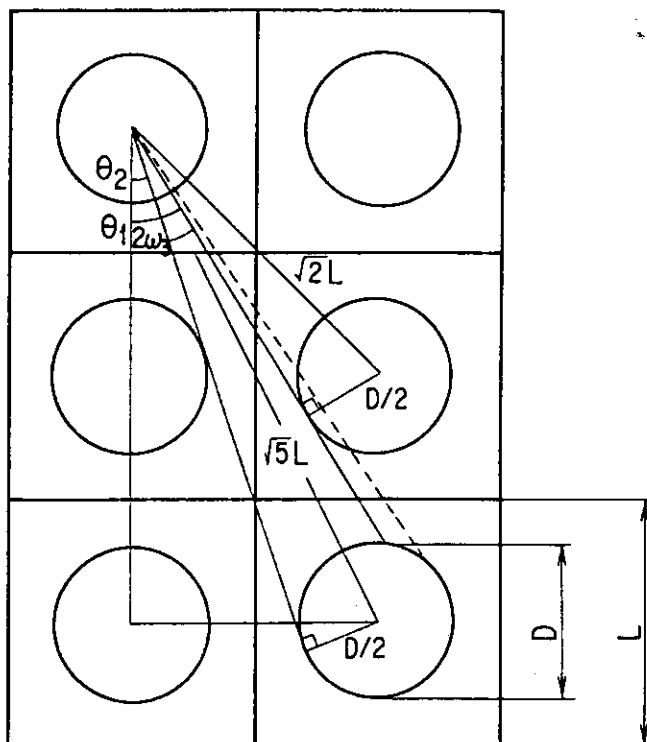


Fig. 8 Detail of Fig. 6 ($1.8 > L/D > 1.58$)

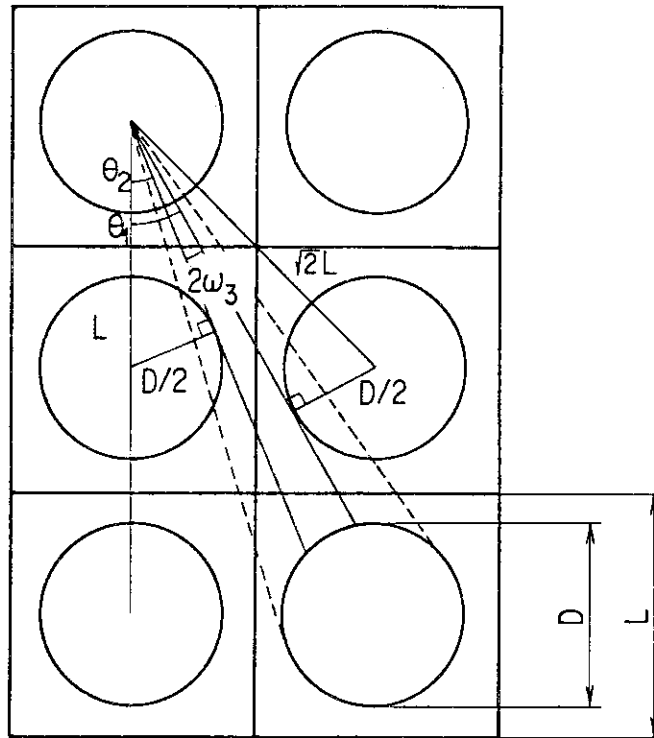


Fig. 9 Detail of Fig. 6 ($1.58 > L/D > 1.12$)

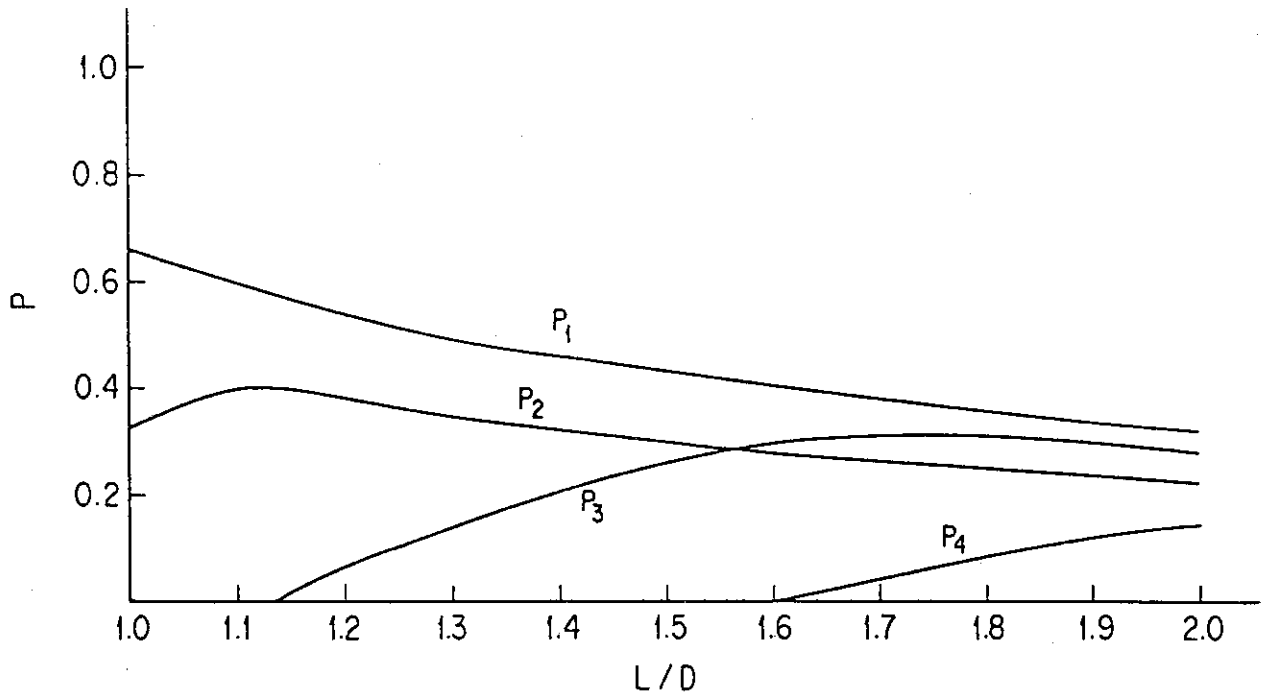


Fig. 10 Probability to collide with the fuel

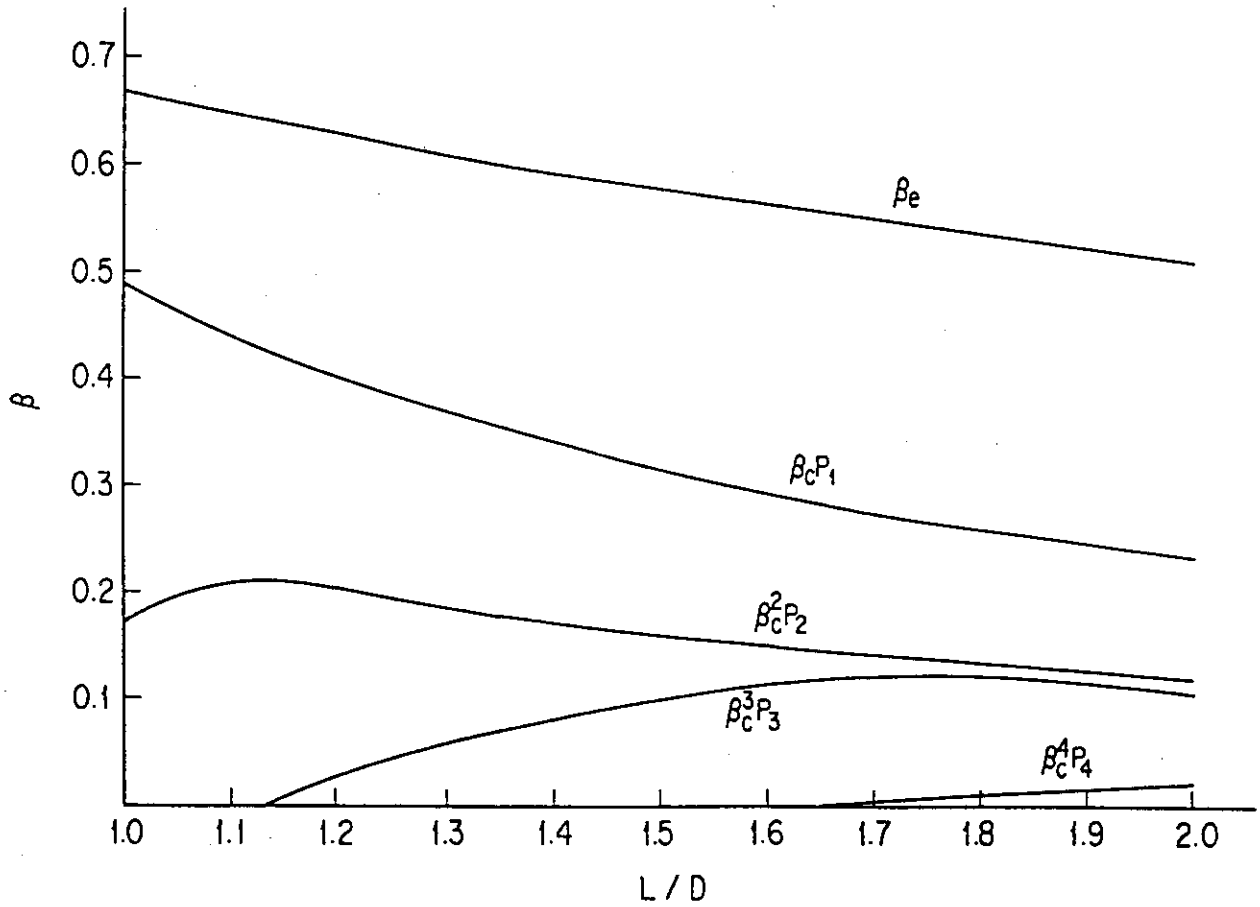


Fig. 11 Effective albedo for L/D

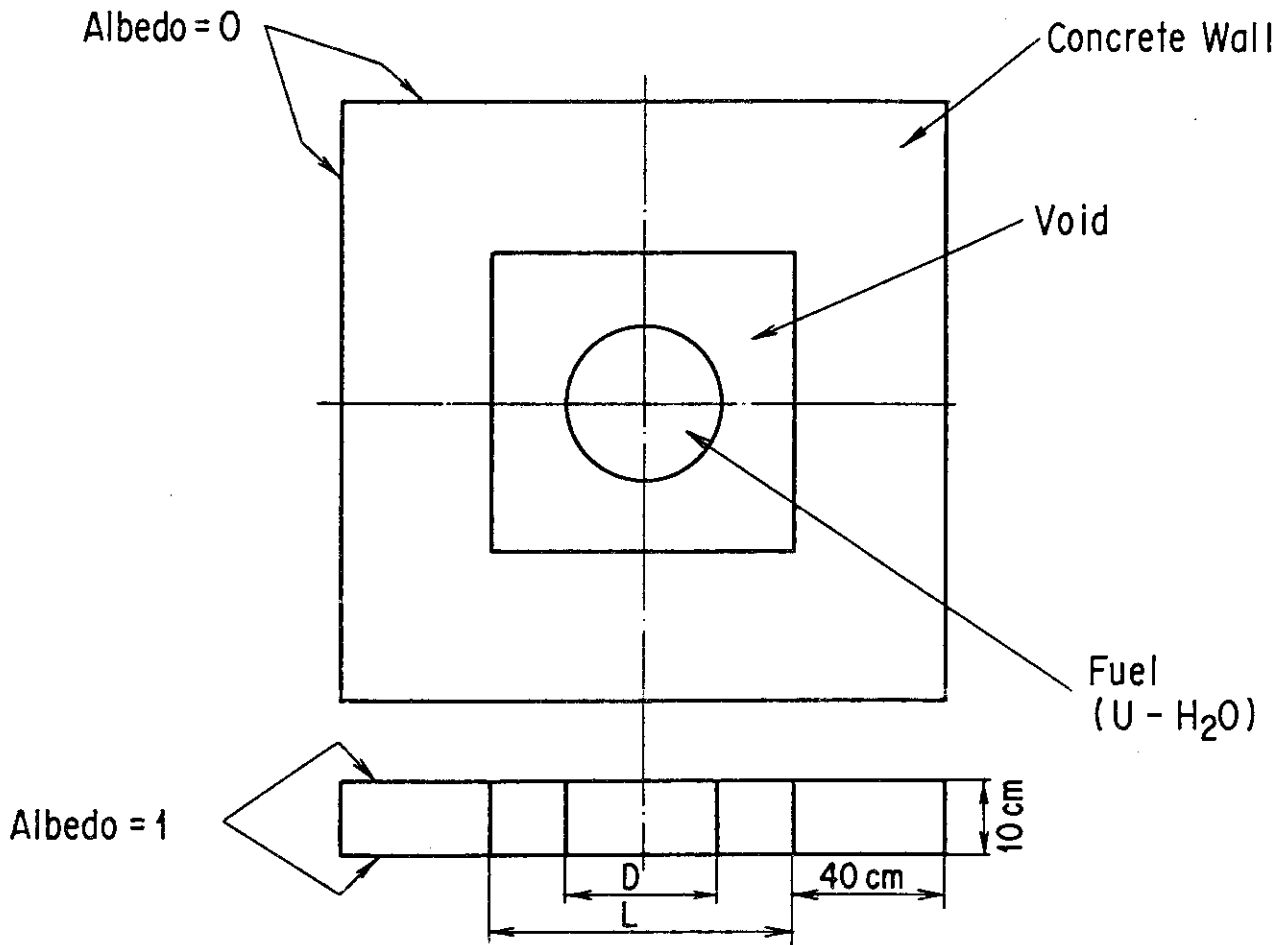
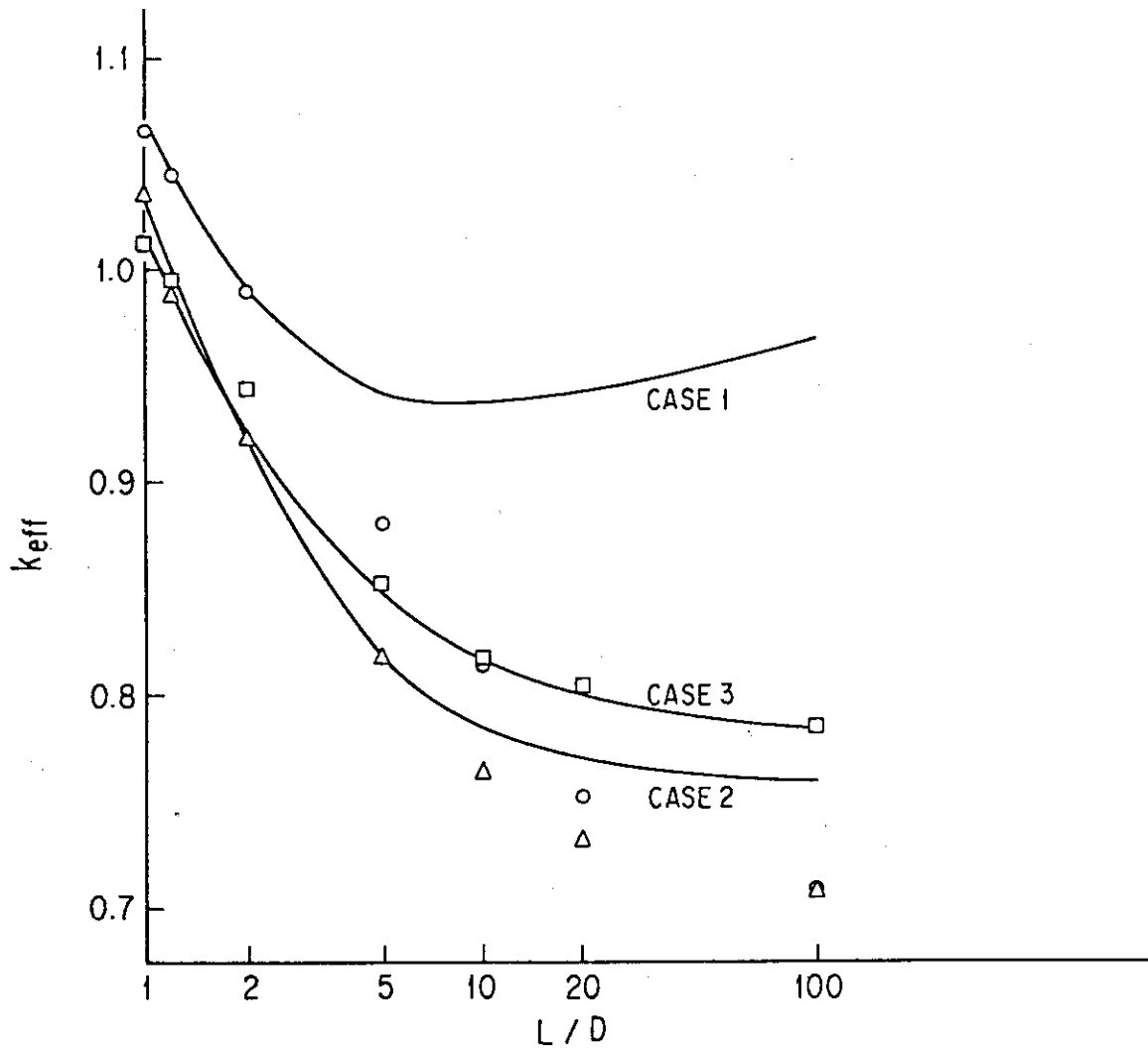


Fig. 12 Calculation model for KENO-IV



[○△□ Calculated by KENO-IV]
 [— Calculated by albedo]

		Diameter for cylinder [cm]	²³⁵ U Enrichment [w/o]	U Density [gU/cm ³]
○	CASE 1	8.1	93.5	18.0
△	CASE 2	17.6	100.0	0.1
□	CASE 3	24.0	5.0	4.5

Fig. 13 Calculated keff by KENO-IV and albedo

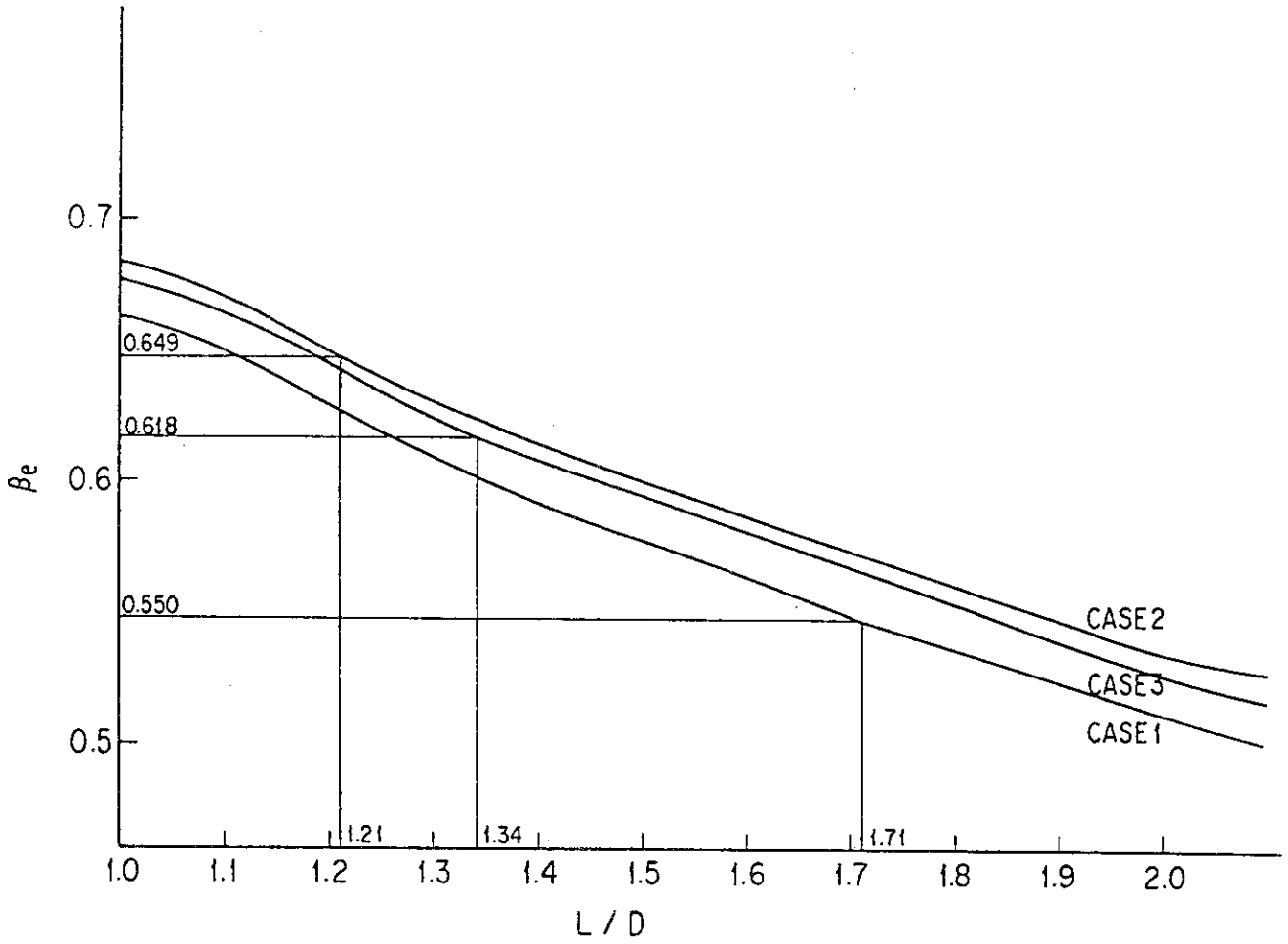


Fig. 14 Effective albedo for Case 1, Case 2 and Case 3

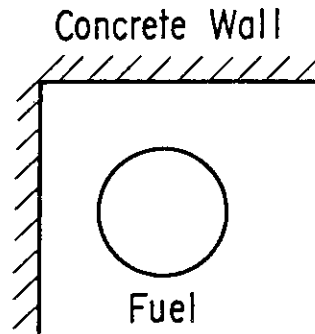


Fig. 15 A cylindrical fuel and concrete walls of two sides

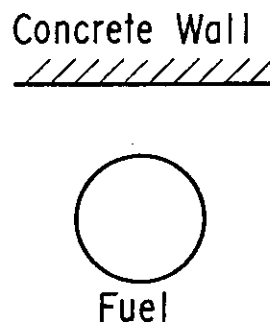


Fig. 16 A cylindrical fuel and concrete wall of one side

付 録

十分な水反射体(20 cm)及び、十分なコンクリート反射体(40 cm)に対するアルベド値は入射中性子スペクトルによって大きく異なる。本文でのCASE 1~3のアルベド値は中性子スペクトルを考慮して算出したものである。ここではその時に使用したアルベド値をエネルギー群ごとにTable A・1, Table A・2に示す。

Table A-1 Albedo and transfer of water of which thickness is 20cm

Energy Group	Upper Boundary [eV]	Albedo	Transfer
1	1.6487x10 ⁷	0.321	0.214
2	4.7237x10 ⁶	0.479	0.044
3	1.0540x10 ⁶	0.610	0.006
4	1.8316x10 ⁵	0.668	0.002
5	5.2475x10 ⁴	0.689	0.002
6	1.5034x10 ⁴	0.693	0.002
7	5.5308x10 ³	0.691	0.001
8	5.8295x10 ²	0.685	0.001
9	1.3007x10 ²	0.683	0.001
10	2.9023x10	0.684	0.001
11	6.4760	0.695	0.001
12	1.8554	0.714	0.001
13	1.2752	0.724	0.001
14	8.7642x10 ⁻¹	0.734	0.001
15	6.0236x10 ⁻¹	0.746	0.001
16	4.1399x10 ⁻¹	0.760	0.001
17	3.4206x10 ⁻¹	0.768	0.001
18	2.7699x10 ⁻¹	0.776	0.000
19	2.1878x10 ⁻¹	0.785	0.000
20	1.6743x10 ⁻¹	0.795	0.000
21	1.2293x10 ⁻¹	0.806	0.000
22	8.5295x10 ⁻²	0.815	0.000
23	5.4518x10 ⁻²	0.830	0.000
24	3.0600x10 ⁻²	0.855	0.000
25	1.3541x10 ⁻²	0.850	0.000
26	3.3414x10 ⁻³	0.845	0.000

END 3.3066x10⁻⁵

Table A-2 Albedo and transfer of concrete walls of which thickness is 40cm

Energy Group	Upper Boundary [eV]	Albedo	Transfer
1	1.6487×10^7	0.476	0.077
2	4.7237×10^6	0.690	0.049
3	1.0540×10^6	0.791	0.014
4	1.8316×10^5	0.776	0.010
5	5.2475×10^4	0.776	0.008
6	1.5034×10^4	0.777	0.007
7	5.5308×10^3	0.778	0.006
8	5.8295×10^2	0.759	0.006
9	1.3007×10^2	0.750	0.005
10	2.9023×10	0.741	0.005
11	6.4760	0.735	0.004
12	1.8554	0.738	0.004
13	1.2752	0.740	0.004
14	8.7642×10^{-1}	0.743	0.003
15	6.0236×10^{-1}	0.747	0.003
16	4.1399×10^{-1}	0.752	0.003
17	3.4206×10^{-1}	0.755	0.003
18	2.7699×10^{-1}	0.759	0.003
19	2.1878×10^{-1}	0.763	0.003
20	1.6743×10^{-1}	0.768	0.002
21	1.2293×10^{-1}	0.774	0.002
22	8.5295×10^{-2}	0.779	0.002
23	5.4518×10^{-2}	0.789	0.002
24	3.0600×10^{-2}	0.809	0.002
25	1.3541×10^{-2}	0.824	0.001
26	3.3414×10^{-3}	0.789	0.002

END 3.3066×10^{-5}