

J A E R I - M  
92-192

核燃料濃度の不均一性による反応度効果の計算  
(受託研究)

1992年12月

奥野 浩・酒井 友宏\*・塩田 雅之\*\*

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。

入手の問合わせは、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、お申し込みください。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, 1992

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 ニッセイエプロ株式会社

核燃料濃度の不均一性による反応度効果の計算

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部

奥野 浩・酒井 友宏\*・塩田 雅之\*\*

(1992年11月11日受理)

核燃料濃度分布の不均一性が反応度に及ぼす効果について数値計算に基づき検討した。初めに、球形状及び円柱状の濃縮度100wt%ウラン-水及び濃縮度5wt%硝酸ウラニル水溶液を対象に、中心からの距離の2乗の1次式で表される燃料濃度分布を持つときの臨界量を求めた。次に、硝酸ウラニル水溶液及び硝酸プルトニウム水溶液を対象に、燃料インポートンス分布を平坦に近付ける方法で最適燃料濃度分布を求めた。さらに、濃縮度5wt%二酸化ウラン-水の均質混合燃料を対象に、最適燃料濃度分布及び中性子増倍率の計算結果に対する燃料の大きさ、形状、反射体の有無による影響を調べた。最適燃料濃度分布は、燃料の減速度が最適減速以上では中央部、以下では周辺部の燃料濃度を高める分布となった。反射体が付いた体系では、減速度が最適あるいはそれ以上で、中央部と反射体近傍両方の燃料濃度を高める分布も得られた。最適燃料濃度分布をとることにより、中性子増倍率は均一分布に比べ、相対的に0から4%増加した。一次元多群拡散近似を用いた最適燃料濃度分布計算コードOPT-Dの概要及び使用手引きを付録に記した。

---

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技術庁からの受託として行った研究成果である。

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方字白根2-4

\* (株)日本総合研究所

\*\* (株)CRC総合研究所

Calculations of Reactivity Effects  
Caused by Non-uniform Concentration of Nuclear Fuel

Hiroshi OKUNO, Tomohiro SAKAI\* and Masayuki SHIODA\*\*

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

(Received November 11, 1992)

Reactivity effects caused by non-uniformly distributed nuclear fuel concentration were studied through numerical calculations. At first, the criticality quantities of spherical and cylindrical  $^{235}\text{U}$ - $\text{H}_2\text{O}$  and aqueous solution of 5 wt% enriched  $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$  were obtained, whose fuel concentration distribution is linearly dependent on the square distance from the center of the fuel region. The optimum distributions of aqueous solutions of  $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$  and  $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$  were obtained by flattening the fuel importance distribution. The effects of dimension and shape of fuel region and with/without reflector on the results of the optimum fuel distribution and neutron multiplication factor were also examined for 5wt%  $^{235}\text{U}$ -enriched uranium  $\text{UO}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$  fuel. The calculations revealed that the optimum fuel distribution had higher concentration in the center for overmoderated fuel, whereas higher on the periphery for undermoderated

---

Notice: This work was carried out by the Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) under entrustment by the Science and Technology Agency (STA) of Japan.

\* The Japan Research Institute, Ltd.

\*\* CRC Research Institute, Inc.

fuel. Reflector attached systems produced both centrally and peripherally high fuel distribution for optimum and more moderated fuel. The neutron multiplication factor of the optimum fuel distribution increased by 0 to 4% relative to that of the uniform distribution. The outline of a computer code OPT-D to obtain the optimum fuel distribution by using the one-dimensional diffusion approximation, inclusive of its manual, was given in an appendix.

Keywords: Non-uniform Distribution, Optimum Distribution, Fuel Importance, OPT-D, Manual, Fuel Solution, Slurry, Reactivity, Nuclear Criticality

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 濃度勾配が臨界量に及ぼす影響 .....	3
3. 球形状溶液燃料における最適燃料濃度分布 .....	20
4. 平板状溶液燃料における最適燃料濃度分布 .....	38
5. 二酸化ウラン-水均質混合燃料における燃料濃度の不均一効果 .....	54
6. おわりに .....	79
謝 辞 .....	80
参考文献 .....	81
付録A KENO-IVの寸法サーチ計算結果 .....	83
付録B 最適燃料濃度分布臨界計算コードOPT-Dの概要及び使用手引き .....	88

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Effects of Concentration Gradient of Criticality Quantities ....	3
3. Optimum Fuel Distribution for Fuel Solution in Sphere .....	20
4. Optimum Fuel Distribution for Fuel Solution in Slab .....	38
5. Non-uniformity Effect of Homogeneous Mixture of Uranium Dioxide and Water .....	54
6. Concluding Remarks .....	79
Acknowledgements .....	80
References .....	81
Appendix A Dimensional Search Calculations Using KENO-IV .....	83
Appendix B Outline and a Manual of the Criticality Calculation Code OPT-D in Optimum Distribution .....	88

## 1. はじめに

核燃料取扱い施設の臨界安全性は、技術的に想定される最も厳しい条件を設定し、評価することになっている<sup>1)</sup>。溶液状燃料の濃度分布は沈澱などの現象が起きなければ、通常は空間的に均一であると考えられる。実際、臨界安全ハンドブック等に記載されている臨界条件データも均一のときのものである。これに対して、何らかの異常によって燃料濃度分布の均一性が保たれない状態になれば、実際に現れる不均一な濃度分布の下で臨界安全評価を行うか、より厳しい（すなわち、反応度を高める）濃度分布を仮定して臨界安全評価を行うことになる。燃料濃度が空間的に平坦である均一な濃度分布に比べて、不均一になる自由度を許すと一般的に臨界量が小さくなりうる。

臨界質量を最小にする燃料分布、即ち最適燃料分布に関する研究は古くから行われていた。Goertzelは、熱中性子炉体系において熱中性子束が炉心内で一定となる燃料分布（いわゆるGoertzel分布；以下G分布）が最小の臨界質量を与えることを示した<sup>2)</sup>。そこでは高速中性子の減速及び熱中性子の輸送特性が、炉心及び反射体を通じて空間的に一様であることを仮定した。高濃縮ウラン燃料体系では、熱中性子束一定の条件は、中心部が高く周辺部が低い燃料濃度分布のときに得られる<sup>2)</sup>・<sup>3)</sup>。これに対して、低濃縮ウラン燃料体系については、熱中性子の振舞いだけで最小臨界質量を与える燃料濃度分布は決められない。その代り、より一般的に、燃料インポートランス一定の条件により実現されることが変分法<sup>4)</sup>あるいは摂動論<sup>5)</sup>・<sup>6)</sup>によって導かれた。

このように、1960年代に行われた研究は理論的なものが主流であった。これに対して、現実体系を念頭に置いた数値計算及び実験による研究が最近国内で進められた。片倉らは、低濃縮ウラン燃料において平均燃料濃度が高い場合には、G分布に従うと平坦分布よりも臨界量が大きくなることを数値計算の結果として示した<sup>7)</sup>。平野らは、最適燃料濃度分布が燃料インポートランス一定のときに得られることを用いて、最適燃料濃度分布を数値的に求める手法を開発した<sup>8)</sup>。さらに、実際のプルトニウム取扱い施設における硝酸プルトニウム水溶液の燃料濃度不均一の効果を評価するに到った<sup>9)</sup>。

均質燃料の不均一効果を棒状燃料で模擬した実験が、T C Aの燃料集合体を用いて行われた。水対燃料体積比のとりうる範囲が狭かったためか、不均一分布の方が均一分布よりも臨界質量が大きいという結果が得られた（柳澤らによる<sup>10)</sup>）。山根らはポリエチレンに挟まれた高濃縮ウラン燃料を使った実験をK U C Aで行い、中央部の燃料密度を適度に高めると、燃料密度分布が平坦な場合より反応度が高くなることを確認した<sup>11)</sup>。

この報告書では、臨界安全ハンドブック改訂の参考とするため、均質燃料の不均一濃度分布が反応度に及ぼす影響についての全般的な傾向を数値計算により調べた。まず第2章では、燃料領域の中心からの距離の2乗の1次式で表される単純な燃料濃度分布を仮定して、燃料濃度勾配を変えて臨界量を求めた。臨界安全ハンドブックでは燃料濃度分布が均一として臨界量を求めているので、燃料濃度が勾配を持つときの臨界量の変化が分る。この計算は、後で最適濃度分布を調べるための予備解析としての意味を持つほか、現実体系との対応を考える上で参考になる。次に第3章では、最適濃度分布が燃料インポートランスを平坦化することによって実現されることを用いて、球形状をした溶液燃料体系の最適濃度分布を求めた。この計算方法は、文献8)のものと基本的に同じである。第4章では平板状溶液燃料体系の場合を調べた。

第3章及び第4章では、文献7)～9)で調べられたのと同様に、溶液燃料が主として扱われた。しかしながら、溶液燃料では拡散現象のために燃料濃度の不均一性は起きにくいと考えられるため、第5章ではスラリー燃料を対象に最適燃料濃度分布を求めた。特に、燃料の寸法、形状の違い及び反射体の有無による結果への影響を調べた。最後の第6章には、まとめと今後の課題を記した。

なお、第2章の臨界計算はK E N O - IVコードの寸法サーチ機能を用いた。その計算結果を付録Aにまとめた。また、原研が隣日本総合研究所に発注して作成した最適濃度臨界計算コードOPT-Dについてはまだ公開文献がないため、付録Bにその概要及び使用手引きを記した。



## 2. 濃度勾配が臨界量に及ぼす影響

臨界安全ハンドブックには臨界質量、臨界体積あるいは無限円柱形状燃料の臨界直径、平板状燃料の臨界厚さなどのデータが記載されている。これらの量は、いずれも燃料領域中で燃料濃度が空間的に均一に分布するとして得られたものである。これに対して、空間的に燃料濃度が増減するとき臨界量が変わるかどうかが、また変わるとすれば、それがどのような傾向を持つかを調べた。

燃料領域の形状は、球及び無限長の円柱の場合を対象とする。燃料の周囲は30cm以上の厚さを持つ水反射体で囲まれているものとする。

燃料中心からの距離を  $r$  とし、燃料濃度分布  $C(r)$  が  $r$  のべき乗の多項式で表されるものとする。このうち、定数項のみで表されるのが均一分布である。 $r$  の1次項の係数は、燃料濃度分布  $C(r)$  が球あるいは円柱の中心で滑らかにつながっていること、即ち、

$$\left(\frac{\partial C}{\partial r}\right)_{r=0} = 0 \quad (1)$$

であることより0になる。このため、燃料濃度分布は  $r$  の2次式までで表されるとし、燃料中心で0にならないとすると、燃料濃度分布  $C(r)$  は、

$$C(r) = C_0 [1 + a(r/R)^2], \quad (2)$$

という形で表される。ここで、

- $C_0$  : 規格化定数、
- $R$  : 燃料領域の半径、
- $a$  : 燃料濃度勾配のパラメタ

である。なお、また、燃料濃度勾配を表すパラメタ  $a$  の値は、0、 $\pm 0.5$ 、 $\pm 1$  という5通りの値をとるものとする。ここで、 $a = 0$  は燃料濃度が均一であることを示す。また、 $a = 1$  のときは、中心濃度が  $C_0$  で、外側へ向かうに従い燃料濃度が高くなる。逆に、 $a = -1$  では内側の燃料濃度が高く、燃料領域の最外周辺で燃料濃度

は0になる。規格化定数 $C_0$ は、濃度勾配 $a$ と平均燃料濃度とで一意的に決まる。

計算対象としたのは均質燃料で、濃縮度100%のウラン-水及び濃縮度5 wt%の硝酸ウラニル水溶液の2種類である。前者は理想的な高濃縮燃料として、また後者は、再処理施設で取扱われる典型的な燃料として選んだ。計算で対象とする燃料の平均濃度を表2.1に示す。

### (1) 計算方法

計算には臨界安全性評価コードシステムJACS<sup>12)</sup>を使用する。計算の流れを図2.1に示す。まず、原子個数密度を算出する。硝酸ウラニル水溶液の個数密度式は「臨界安全ハンドブック」<sup>1)</sup>に記載されているMoekenの式<sup>13)</sup>を用いる(なお、均質体系でのウラン-水の最大ウラン濃度は18,900gU/l、硝酸ウラニル水溶液の最大ウラン濃度は1,330gU/lとする<sup>14)</sup>)。次に、原子個数密度に対応する137群の巨視的断面積をMAILコード<sup>15,16)</sup>を使用してMGCLライブラリ<sup>15)</sup>から算出する。MGCLは、中性子核反応の断面積が背景断面積(background cross section)をパラメタとして整理されている。

臨界寸法の算出には、モンテカルロ法中性子輸送計算コードKENO-IV<sup>17)</sup>の寸法サーチと呼ばれる機能を使用する。臨界状態を与えると期待される中性子増倍率の値(多群定数として137群MGCLを使用する場合、高濃縮ウラン燃料では0.985、低濃縮ウラン燃料では0.991)<sup>18),19)</sup>を入力することにより、対応する寸法を得る機能である。球状燃料の場合、臨界半径を基に臨界体積及び臨界質量を算出する。ここで臨界質量は、臨界体積に平均濃度を乗じて得られる。

KENO-IVでは連続的な濃度変化は取扱えない。このため、燃料領域を等体積分割し、各領域の燃料濃度は、(2)式で表される $C(r)$ のこの領域での平均値で近似する<sup>7)</sup>。このとき、領域 $i$ での燃料濃度 $C_i$ 及び規格化定数 $C_0$ は、以下の式で表される。

$$C_i = C_0 \left\{ 1 + \frac{a N n}{N+2} \left[ \left( \frac{i}{n} \right)^{\frac{N+2}{N}} - \left( \frac{i-1}{n} \right)^{\frac{N+2}{N}} \right] \right\} \quad (4)$$

$$C_0 = \bar{C} / \left( 1 + \frac{N}{N+2} a \right) \quad (5)$$

ここで、

- $N$  : 次元数 (球のとき 3、無限円柱のとき 2)、  
 $n$  : 燃料領域の分割数 (= 10)、  
 $\bar{C}$  : 平均燃料濃度

である。領域ごとの燃料濃度と平均燃料濃度との比  $C_i / \bar{C}$  ( $i=1, 2, 3, \dots, 10$ ) の値を球状燃料及び無限円柱状燃料の場合に、それぞれ表 2.2 及び表 2.3 に示す。これらを燃料濃度分布として図示したのが、それぞれ図 2.2 及び図 2.3 である。なお、これらの図には濃度勾配パラメタが  $a = \pm 1, 0$  のときのみを示した。

KENO-IV の計算条件を表 2.4 に示す。一世代当りの追跡中性子数を「臨界安全ハンドブック」では 300 として臨界量を算出していた。今回の計算では計算精度を上げるため、これを 600 とした。KENO-IV で使用する計算モデルを、燃料領域が球形状及び無限円柱形状の燃料体系についてそれぞれ図 2.4 及び図 2.5 に示す。

## (2) 計算結果

均質ウラン-水の球状燃料体系における計算結果を表 2.5 及び表 2.6 に示す。表 2.6 は臨界体積についてまとめたものであり、表 2.5 はこれに平均ウラン濃度を乗じて臨界ウラン質量を求めたものである。表 2.5 によると、均一分布のときには最小臨界質量が、平均ウラン濃度  $50 \text{gU/l}$  で  $841 \text{gU}$  となるのに対して、濃度勾配を持つことを許したときには、平均ウラン濃度  $30 \text{gU/l}$  のとき約 6% 減少し、 $793 \text{gU}$  となっている。濃度勾配 0 (均一) に対して、臨界体積 (臨界質量も同じ) の増加割合を示したのが図 2.6 である。平均ウラン濃度が  $50 \text{gU/l}$  以下の計算の範囲では、 $a$  が負のときに臨界体積が減少している。これは、内側に燃料を集めた方が均一のときよりも臨界体積が (したがって、臨界質量も) 小さくなることを示している。しかも、この割合は平均ウラン濃度が小さくなるほど著しくなる。これに対して、平均ウラン濃度が  $200 \text{gU/l}$  から  $3,000 \text{gU/l}$  計算の範囲では、 $a$  が正のときに臨界体積が減少する。しかし、その減少割合は高々 2~3% にすぎない。濃度勾配パラメタの値を 5 通り採ったうちで臨界質量が最小になるものと、濃度勾配が 0 (均一) の臨界質量を比較したのが図 2.7 である。特に平均ウラン濃度  $50 \text{gU/l}$  以下では、濃度勾配を考えた場合と考えない場合の隔たりは大きい。

無限円柱状燃料体系についての結果を示したのが表 2.7 である。さらに、濃度勾

配を持つことに伴う臨界直径増加割合を示したのが図2.8である。濃度勾配を考えた場合でも均一のときに比べて臨界直径の減少は殆どなかった。aが正のときに1%前後の減少が見られるだけであった。これは計算対象とした燃料濃度が100gU/l以上であったことに起因するものと思われる。

均質硝酸ウラニル水溶液の球状燃料体系における計算結果を表2.8及び表2.9に示す。表2.8によると、均一分布では最小臨界質量が80.0kgUであるのに対して、濃度勾配を持つことを許したときには、約3%減少し、77.3kgUとなった。均質ウラン-水のとおり同様に、濃度勾配をもつことに伴う臨界球体積増加割合を求め、図2.9に示した。平均ウラン濃度が500gU/lから800gU/lの間で、aが負、すなわち中心側に燃料を集めた方が臨界体積及び臨界質量が小さくなる傾向にあることが分る。図2.9に示された平均ウラン濃度が500gU/lから1,000gU/lの計算結果と、図2.6の平均ウラン濃度20gU/lから100gU/lの計算結果とは傾向がよく似ている。濃縮度の違いを考慮すると、減速体系では $^{235}\text{U}$ の濃度が不均一効果における重要因子であることをこの類似性は示唆する。なお最大濃度を越えているが、参考のために平均ウラン濃度が1,400gU/lの燃料を対象とした計算の結果も表2.8及び表2.9には示した。臨界質量あるいは臨界体積は、 $a > 0$ の方が $a = 0$ のときよりも約10%小さくなっている。平均燃料濃度が高くなると外側に燃料を集めた方が臨界量が小さくなるという傾向は、ウラン-水の燃料を例にした高濃縮燃料体系でも見られたことである。

無限円柱状燃料体系についての計算結果を表2.10に示す。さらに、濃度勾配をもつことに伴う臨界円柱直径の増加割合を図2.10に示す。平均濃度500gU/lでは、 $a < 0$ となる燃料濃度分布の方が均一燃料分布よりも臨界直径が5~8%小さい。濃度勾配を考えたときの臨界円柱直径を、均一分布のときのものと比較して図2.11に示す。平均ウラン濃度が700gU/l以下の範囲においてのみ、不均一濃度分布を考慮することによる有意な差が認められる。

### (3) 結論

1) 均質ウラン（濃縮度100%）-水の球状及び無限円柱状燃料体系（十分な水反射体付き）についての臨界計算から次のことが明らかになった。

① 球状燃料体系について、均一濃度分布ではウラン濃度が50gU/lのときに最小臨

界質量を得た。これに対して、中心からの距離の2乗の1次式で表される濃度分布について検討した。内側の濃度を高くとることにより、同じ平均濃度で6%小さな臨界質量が得られた。平均ウラン濃度が50gU/gより小さい場合には、臨界質量の減少はより顕著になった。

- ② 平均ウラン濃度が200gU/g以上になると、外側の燃料濃度を高くした方が臨界質量が小さくなった。均一分布に対する減少割合は、球形状で2~3%、円柱形状で1~2%程度であった。周辺部の燃料濃度を中心部より高くした方が臨界寸法が小さくなることは、フランスの臨界安全ハンドブック<sup>19)</sup>に定性的に記載されている。また、硝酸プルトニウム水溶液では三橋ら<sup>20)</sup>により確認されている。
- 2) 均質硝酸ウラニル(濃縮度5wt%)水溶液の球状及び無限円柱状燃料体系(十分な水反射体付き)についての臨界計算から次のことが明らかになった。
- ① 均一濃度分布では、ウラン濃度が700gU/gのときに最小臨界質量を得た。内側の濃度分布を高くとることにより、同じ平均濃度で約3%小さな臨界質量が得られた。平均ウラン濃度が700gU/gより小さいウラン濃度の領域、いわば減速過剰領域では臨界質量の減少は著しい。この傾向は、片倉らによるGoertzel分布に基づく計算結果<sup>7)</sup>及び平野らによる最適濃度分布に基づく計算結果<sup>8)</sup>と一致している。
- ② 平均ウラン濃度が900gU/gから1,100gU/gの範囲では均一分布のときに臨界質量が最も小さくなった。最大濃度を越えた平均濃度1,400gU/gでは、外側に燃料を集めた方が臨界質量が小さくなった。しかし、溶解度に制限があるため、実際にはこの効果は現れない。
- 3) なお、最小臨界質量あるいは最小臨界寸法についての数値的な検討をさらに進めるためには、平均濃度及び濃度勾配パラメタ $a$ の最適値を最小自乗法等により求め、そのときの最小臨界値を算出するとよいと考えられる。

表 2.1 計算対象とする燃料の平均濃度

燃料組成	濃縮度 [wt%]	形状	平均燃料濃度 [gU/g]
U-H <sub>2</sub> O	100	球	20,30,50,100,200,300,1000,3000,10000
		円柱	100,300,1000,3000,10000
UO <sub>2</sub> (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 水溶液	5	球	500,700,800,900,1100,1400
		円柱	500,700,1000,1200,1500

表 2.2 球状燃料体系における各燃料領域での濃度と平均濃度との比

領域番号 i	領域の外半径 (i/10) <sup>1/3</sup>	各領域での濃度/平均濃度			
		a=-1	-0.5	+0.5	+1
1	0.4642	2.1768	1.3362	0.8189	0.7058
2	0.5848	1.7972	1.2278	0.8774	0.8007
3	0.6694	1.5094	1.1455	0.9216	0.8727
4	0.7368	1.2593	1.0741	0.9601	0.9352
5	0.7937	1.0326	1.0093	0.9950	0.9919
6	0.8434	0.8223	0.9492	1.0273	1.0444
7	0.8879	0.6245	0.8927	1.0578	1.0939
8	0.9283	0.4366	0.8390	1.0867	1.1408
9	0.9655	0.2570	0.7877	1.1143	1.1858
10	1.0000	0.0843	0.7384	1.1409	1.2289

註) a は濃度勾配のパラメタ。また、領域の外半径は最外半径が 1 になるように規格化している。

表 2.3 無限円柱状燃料体系における各燃料領域での濃度と平均濃度との比

領域番号 i	領域の外半径 (i/10) <sup>1/2</sup>	各領域での濃度/平均濃度			
		a=-1	-0.5	+0.5	+1
1	0.3162	1.9000	1.3000	0.8200	0.7000
2	0.4472	1.7000	1.2333	0.8600	0.7667
3	0.5477	1.5000	1.1667	0.9000	0.8333
4	0.6325	1.3000	1.1000	0.9400	0.9000
5	0.7071	1.1000	1.0333	0.9800	0.9667
6	0.7746	0.9000	0.9667	1.0200	1.0333
7	0.8367	0.7000	0.9000	1.0600	1.1000
8	0.8944	0.5000	0.8333	1.1000	1.1667
9	0.9487	0.3000	0.7667	1.1400	1.2333
10	1.0000	0.1000	0.7000	1.1800	1.3000

註) a は濃度勾配のパラメタ。また、領域の外半径は最外半径が 1 になるように規格化している。

表 2.4 KENO-IV の計算条件

エネルギー群数	137
一世代当りの追跡中性子数	600
計算世代数	110
除外する初期世代数	10
初期中性子発生分布	平坦
サーチ計算収束判定値	$\sigma$ (標準偏差)
境界条件	図2.4 及び図2.5 参照

表 2.5 均質ウラン（濃縮度 100 %）—水体系における臨界球質量の濃度勾配パラメータ  $a$  による変化

平均ウラン濃度 [gU/ℓ]	臨界ウラン質量 [gU]				
	$a=-1$	-0.5	0	+0.5	+1
20	919	$1.36 \times 10^3$	$1.99 \times 10^3$	$2.60 \times 10^3$	$3.44 \times 10^3$
30	793	891	$1.10 \times 10^3$	$1.25 \times 10^3$	$1.38 \times 10^3$
50	830	801	841	883	950
100	$1.07 \times 10^3$	958	939	990	974
200	$1.66 \times 10^3$	$1.42 \times 10^3$	$1.42 \times 10^3$	$1.40 \times 10^3$	$1.38 \times 10^3$
300	$2.26 \times 10^3$	$1.90 \times 10^3$	$1.83 \times 10^3$	$1.83 \times 10^3$	$1.78 \times 10^3$
1000	$6.17 \times 10^3$	$5.59 \times 10^3$	$5.38 \times 10^3$	$5.23 \times 10^3$	$5.31 \times 10^3$
3000	$1.39 \times 10^4$	$1.31 \times 10^4$	$1.40 \times 10^4$	$1.37 \times 10^4$	$1.35 \times 10^4$
10000	( $1.78 \times 10^4$ )	$2.15 \times 10^4$	$2.31 \times 10^4$	$2.30 \times 10^4$	$2.35 \times 10^4$

註) ( ) 内は最大濃度  $18,900 \text{gU}/\ell$  を越える燃料領域があるもの。

表 2.6 均質ウラン（濃縮度 100 %）—水体系における臨界球体積の濃度勾配パラメータ  $a$  による変化

平均ウラン濃度 [gU/ℓ]	臨界球体積 [ℓ]				
	$a=-1$	-0.5	0	+0.5	+1
20	46.0	68.2	99.7	130	172
30	26.4	29.7	36.7	41.8	46.0
50	16.6	16.0	16.8	17.7	19.2
100	10.7	9.58	9.39	9.90	9.74
200	8.32	7.12	7.08	7.02	6.91
300	7.55	6.35	6.09	6.08	5.92
1000	6.17	5.59	5.38	5.23	5.31
3000	4.62	4.37	4.67	4.58	4.51
10000	(2.31)	2.15	2.31	2.30	2.35

註) ( ) 内は最大濃度  $18,900 \text{gU}/\ell$  を越える燃料領域があるもの。



表 2.7 均質ウラン（濃縮度 100 %）一水体系における臨界円柱直径の濃度勾配パラメータ  $a$  による変化

平均ウラン濃度 [gU/l]	臨界円柱直径 [cm]				
	$a=-1$	-0.5	0	+0.5	+1
100	18.7	17.4	17.5	17.3	17.4
300	15.8	14.9	14.5	14.3	14.4
1000	14.5	13.7	13.6	13.5	13.6
3000	13.0	12.9	12.8	12.7	12.7
10000	(9.67)	9.62	9.77	9.81	9.80

註) ( ) 内は最大濃度 18,900gU/l を越える燃料領域があるもの。

表 2.8 均質硝酸ウラニル（濃縮度 5wt %）水溶液体系における臨界球質量の濃度勾配パラメータ  $a$  による変化

平均ウラン濃度 [gU/l]	臨界ウラン質量 [kgU]				
	$a=-1$	-0.5	0	+0.5	+1
300	95.5	393	---	$2.53 \times 10^5$	$6.70 \times 10^5$
500	78.2	81.3	108	154	214
700	(107)	77.3	80.0	92.0	102
800	(128)	80.1	80.6	85.5	95.4
900	(170)	87.7	85.1	90.3	90.9
1100	(305)	(122)	101	101	(103)
1400	(794)	(219)	(159)	(144)	(143)

註) ( ) 内は最大濃度 1,330gU/l を越える燃料領域があるもの。

表 2.9 均質硝酸ウラニル（濃縮度 5wt%）水溶液体系における臨界球体積の濃度勾配パラメタ a による変化

平均ウラン濃度 [gU/ℓ]	臨界体積 [ℓ]				
	a=-1	-0.5	0	+0.5	+1
300	318	1.31x10 <sup>3</sup>	---	8.43x10 <sup>5</sup>	2.23x10 <sup>5</sup>
500	156	163	216	308	427
700	(152)	110	114	131	145
800	(161)	101	101	107	119
900	(188)	97.4	94.5	100	101
1100	(277)	(111)	92.0	92.2	(93.2)
1400	(567)	(156)	(113)	(103)	(102)

註) ( ) 内は最大濃度1,330gU/ℓ を越える燃料領域があるもの。

表 2.10 均質硝酸ウラニル（濃縮度 5wt%）水溶液体系における臨界円柱直径の濃度勾配パラメタ a による変化

平均ウラン濃度 [gU/ℓ]	臨界直径 [cm]				
	a=-1	-0.5	0	+0.5	+1
300	72.2	117	---	---	---
500	49.7	51.6	54.1	59.7	66.4
700	47.3	42.7	43.1	44.1	46.3
1000	(50.6)	41.0	39.8	40.0	40.0
1100	(54.0)	(41.6)	39.4	40.0	(39.4)
1200	(57.2)	(42.8)	39.8	(40.0)	(40.0)
1500	(74.9)	(48.5)	(44.2)	(42.0)	(41.0)

註) ( ) 内は最大濃度1,330gU/ℓ を越える燃料領域があるもの。

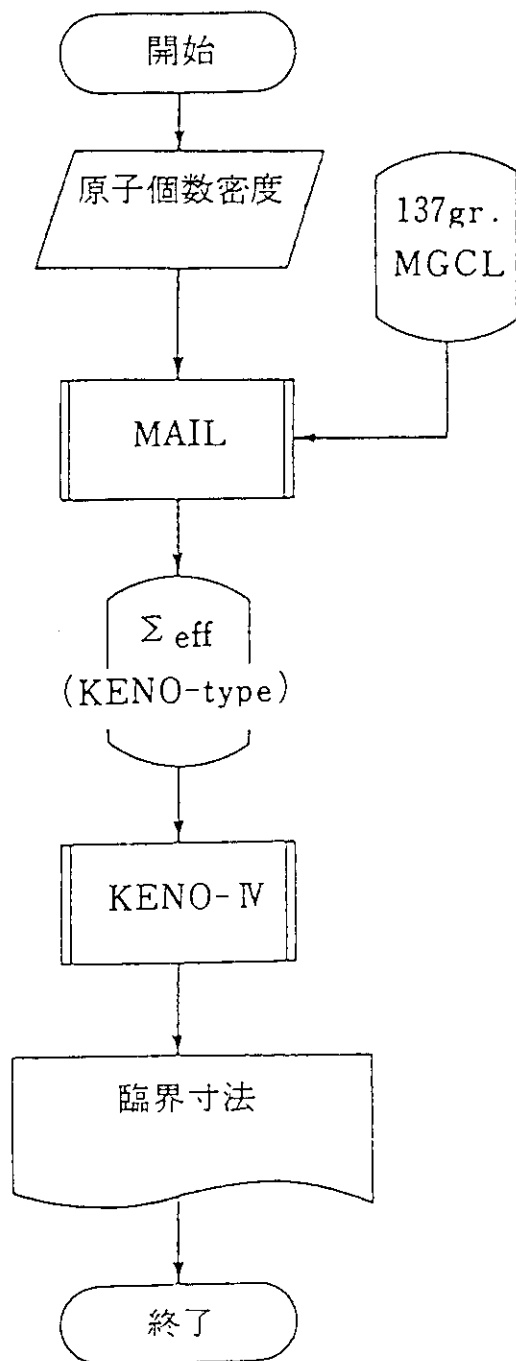


図 2.1 臨界寸法算出の流れ

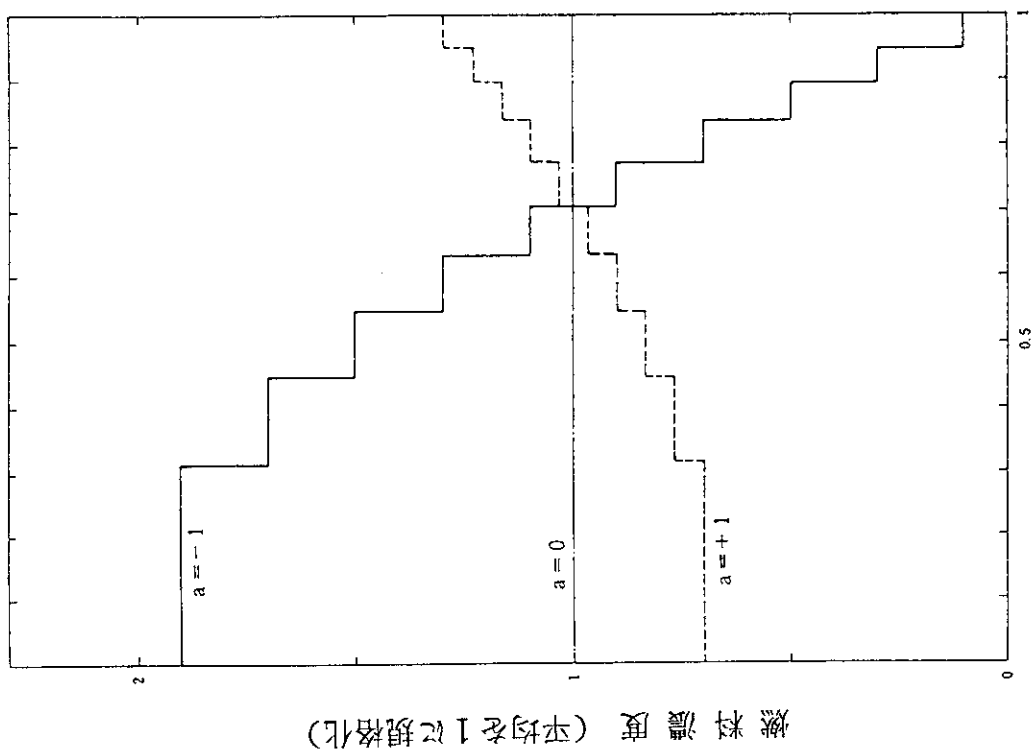


図 2.2 無限円柱燃料体系における燃料濃度分布  
( $a$  は濃度勾配パラメタ)

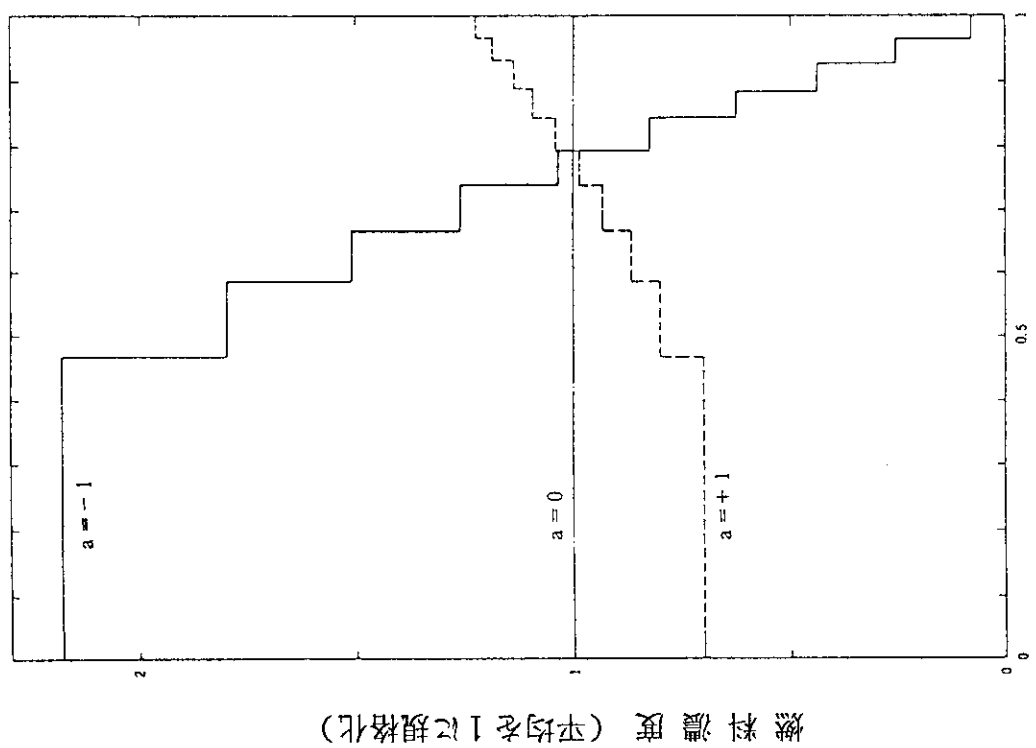
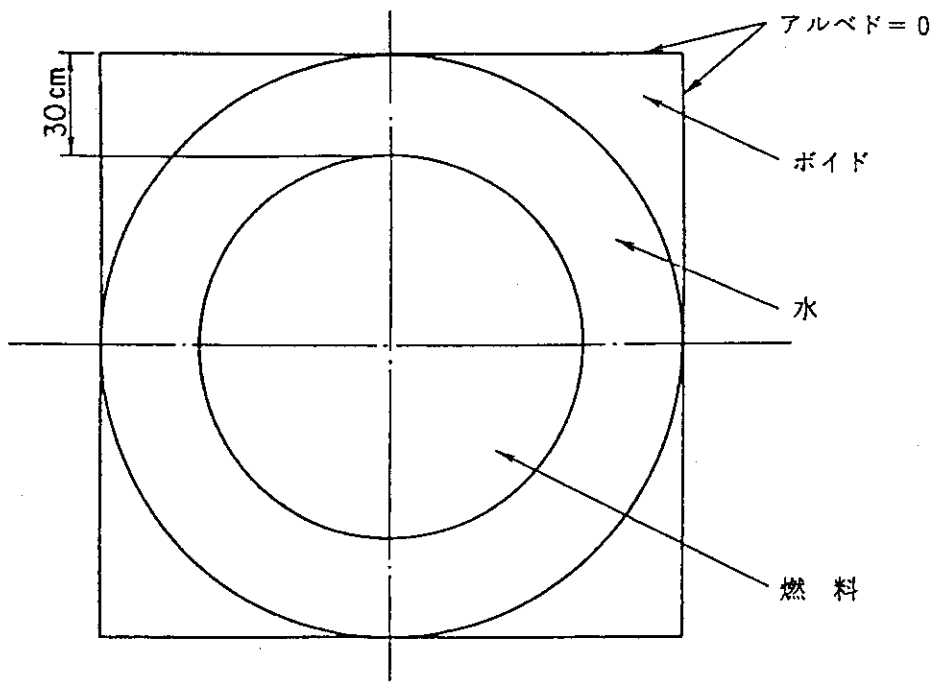
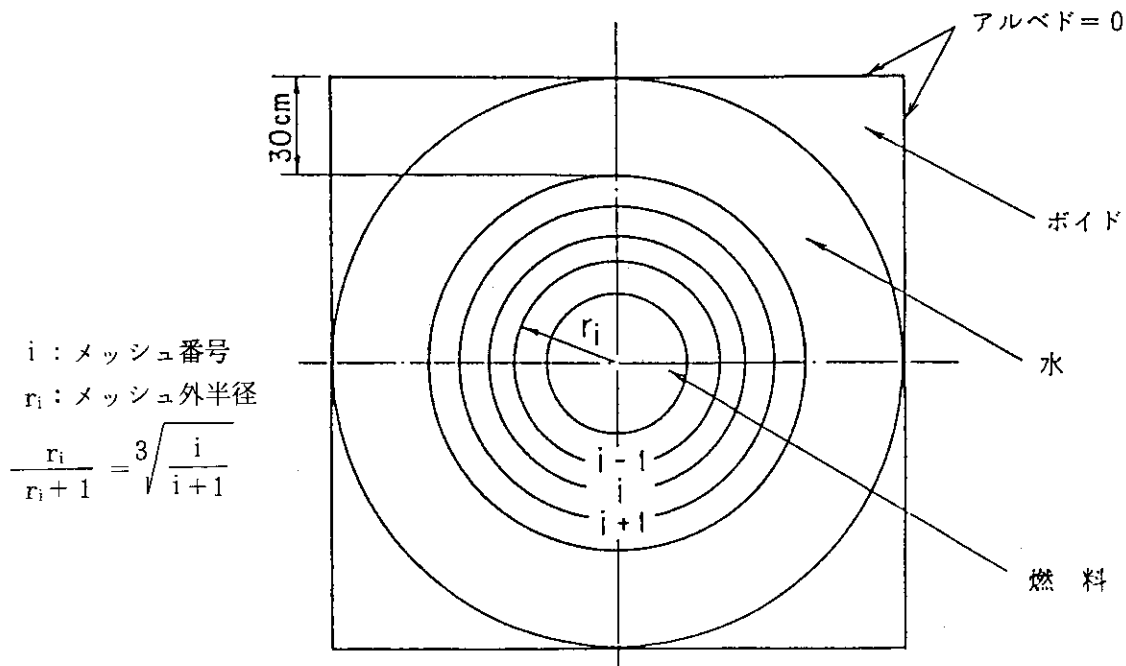


図 2.2 球状燃料体系における燃料濃度分布  
( $a$  は濃度勾配パラメタ)



均一燃料の計算モデル

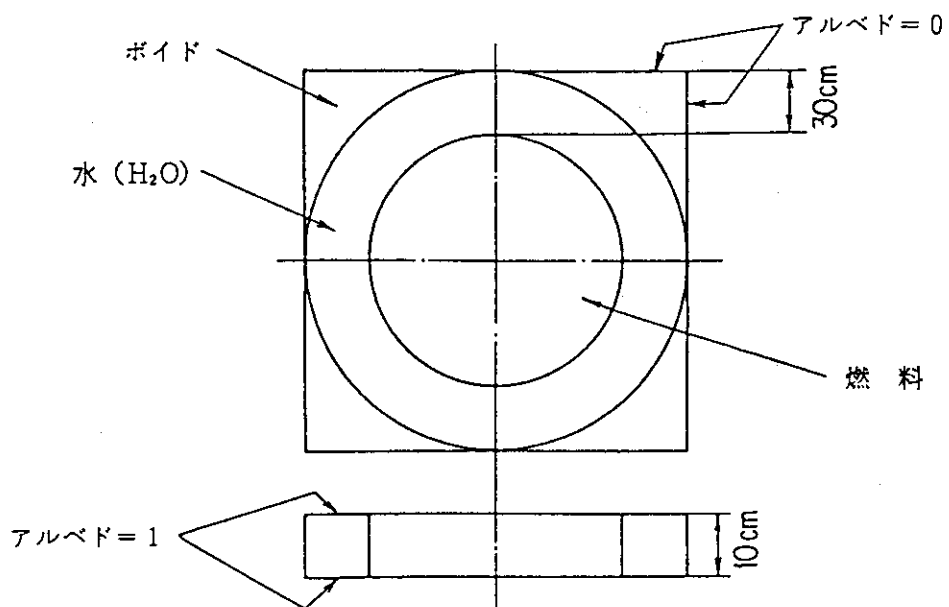


$i$  : メッシュ番号  
 $r_i$  : メッシュ外半径  

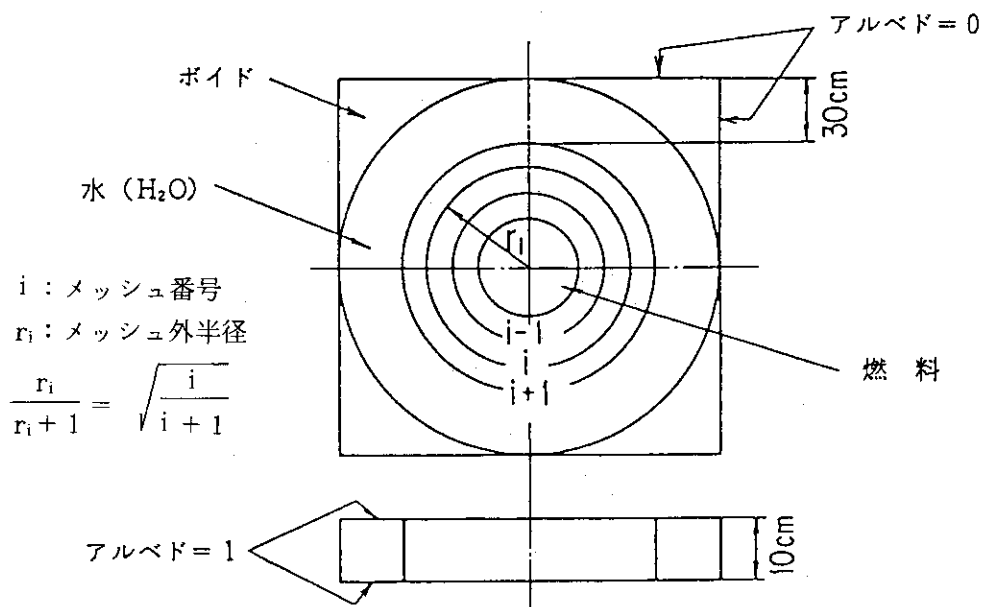
$$\frac{r_i}{r_{i+1}} = 3 \sqrt{\frac{i}{i+1}}$$

不均一燃料の計算モデル

図 2.4 球体系の KENO-IV コードによる計算モデル



均一燃料計算モデル



不均一燃料計算モデル

図 2.5 円柱体系のKENO-IVコードによる計算モデル

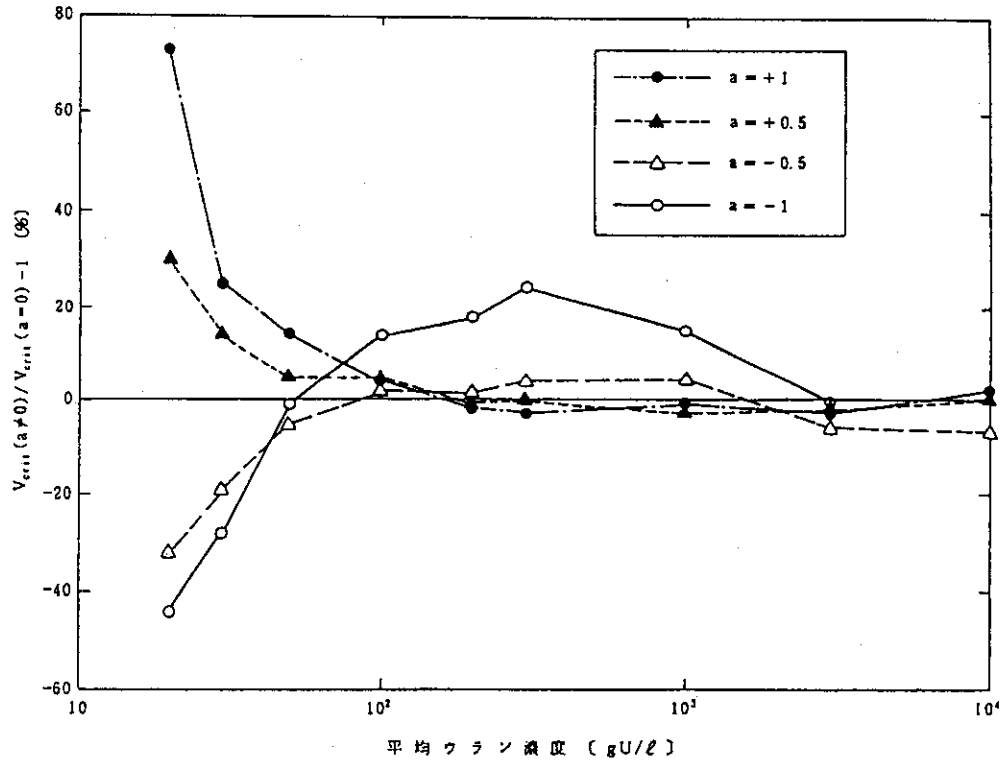


図 2.6 濃度勾配をもつことに伴う<sup>235</sup>U-H<sub>2</sub>O燃料の臨界球体積増加割合

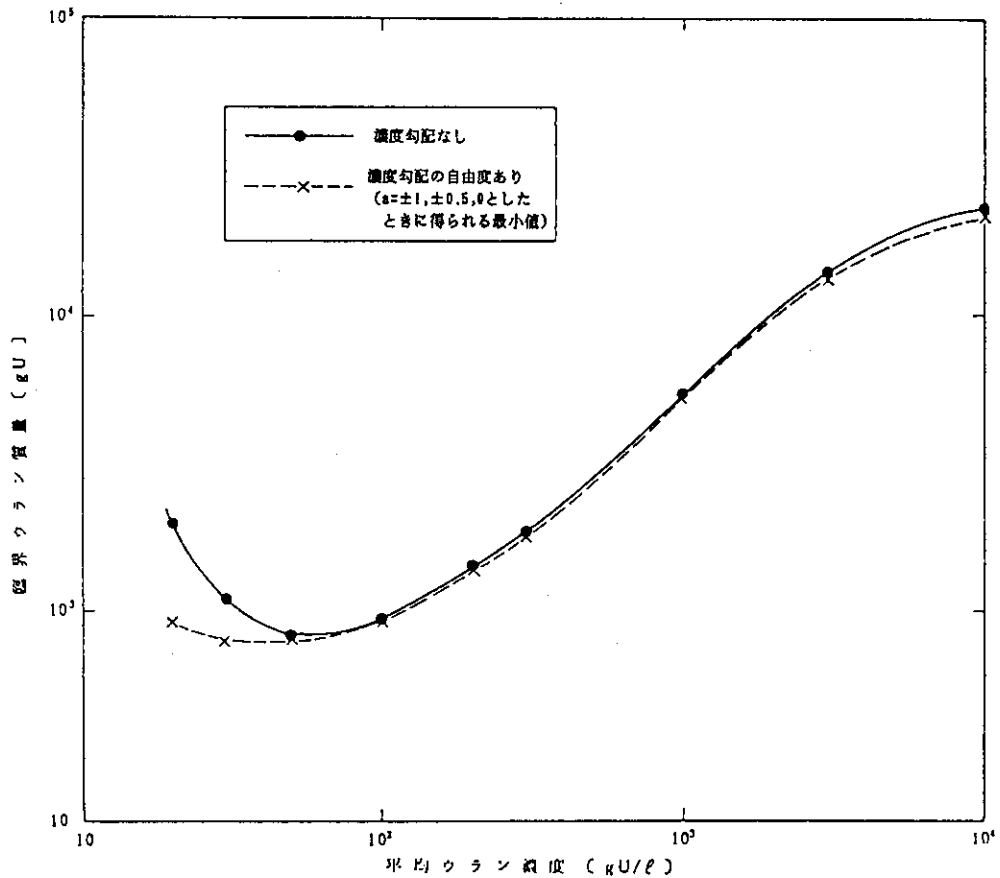


図 2.7 均質ウラン (濃縮度 100%) - 水体系における濃度勾配のない場合 (均一燃料分布:  $a = 0$ ) と濃度勾配の自由度がある場合 (不均一燃料分布:  $a = \pm 1, \pm 0.5, 0$ ) の臨界ウラン質量の比較

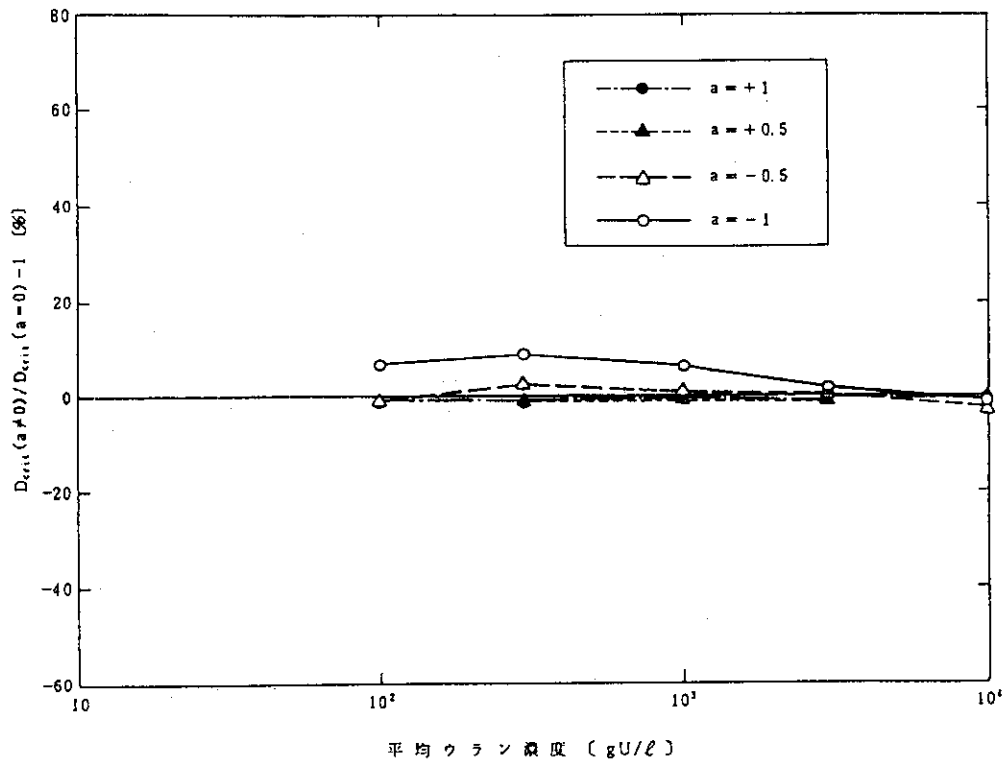


図 2.8 濃度勾配をもつことに伴う <sup>235</sup>U-H<sub>2</sub>O 燃料の臨界円柱直径増加割合

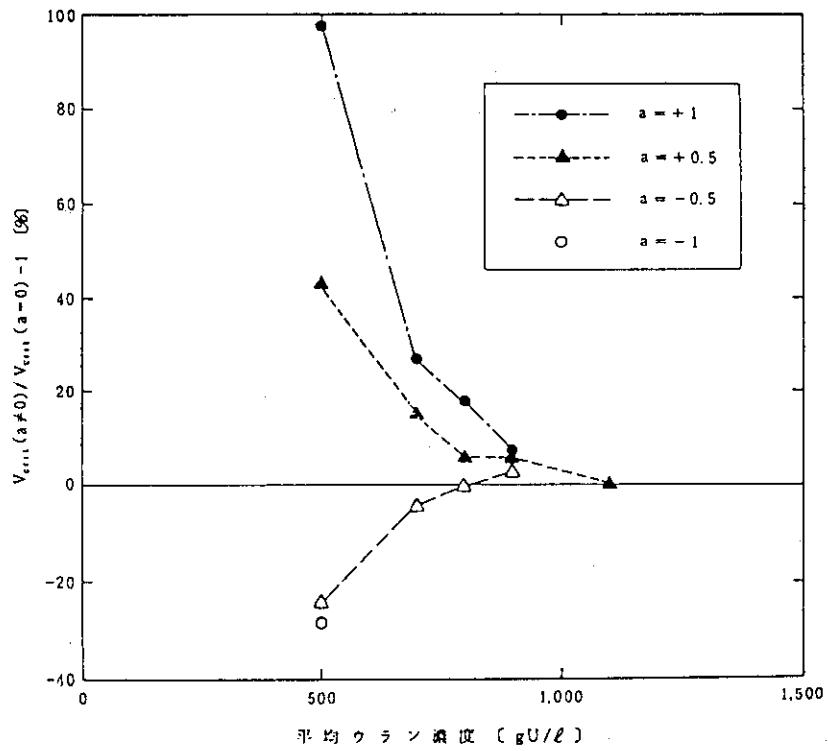


図 2.9 濃度勾配をもつことに伴う硝酸ウラニル水溶液 (濃縮度 5wt %) の臨界球体積増加割合



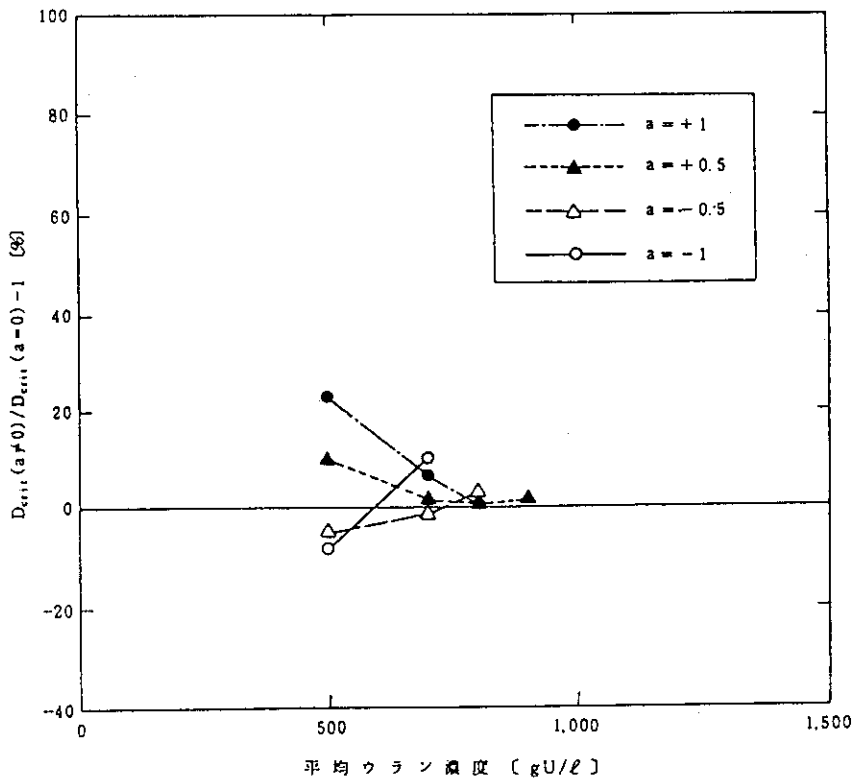


図 2.10 濃度勾配をもつことに伴う硝酸ウラニル水溶液（濃縮度 5wt %）の臨界円柱直径増加割合

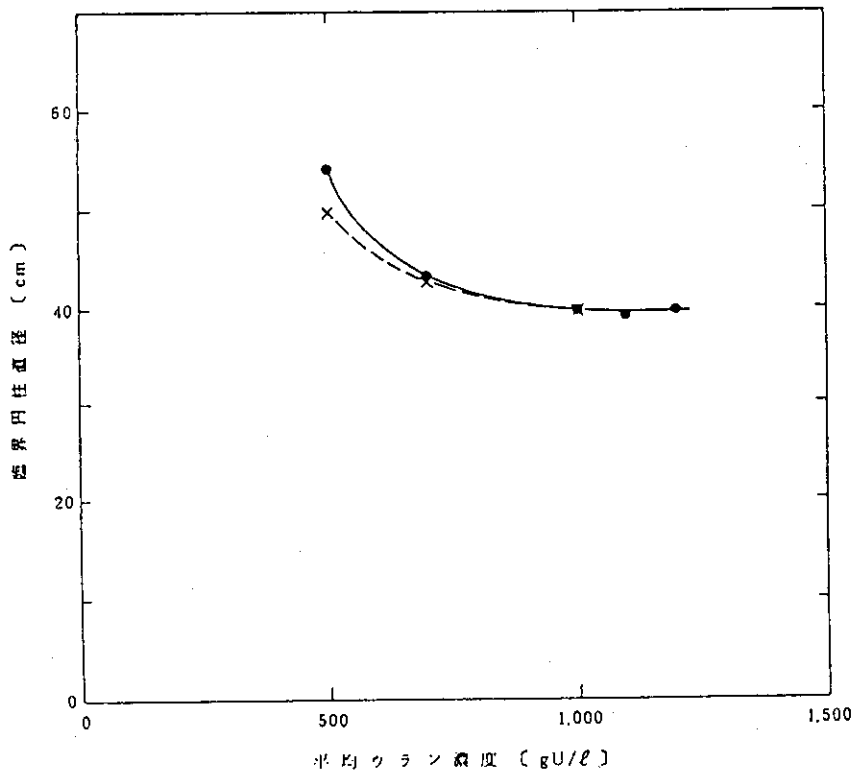


図 2.11 均質硝酸ウラニル（濃縮度 5wt %）水溶液体系における濃度勾配のない場合（均一燃料分布：a = 0）と濃度勾配の自由度がある場合（不均一燃料分布：a = ±1, ±0.5, 0）の臨界円柱直径の比較

### 3. 球形状溶液燃料における最適燃料濃度分布

前章では燃料の濃度勾配を5通りに変えて、臨界になると推定される臨界質量等の計算等について記した。この章では、十分な厚さの水反射体に囲まれた球状燃料体系において、燃料濃度が不均一になる自由度を許したときの最大中性子増倍率及び対応する燃料濃度分布（最適燃料濃度分布）について記す。計算対象としたのは、濃縮度100%のウラン-水、濃縮度5 wt%の硝酸ウラニル水溶液及びプルトニウム同位体個数比  $^{239}\text{Pu} : ^{240}\text{Pu} = 5 : 1$  の硝酸プルトニウム水溶液の3種類の均質燃料である。温度はいずれも20°Cとした。それぞれの燃料領域の球半径及び計算対象とした平均燃料濃度を表3.1に示す。

#### (1) 計算方法

最適燃料濃度分布は、計算コードOPT-Dを用いて求めた。OPT-Dは、燃料インポートランスを平坦に近付けるように燃料分布を変化させて、中性子輸送方程式を拡散近似で解く計算コードである。コードの概要及び入力データ等の手引きを付録Bに示す。核定数は26群のMGCLライブラリー<sup>15)</sup>を用いた。

計算では第2章に記したのと同様に、燃料領域を等体積になるよう10に分割した。さらに、燃料インポートランスが平坦化されなくても、各領域の燃料濃度が最大燃料濃度に達するか、0以下になった場合には燃料濃度分布に関する反復計算を打切った。

#### (2) 計算結果

ウラン-水系で得られた最適燃料濃度分布を表3.2に示す。この表にある領域番号は表2.2に記したものと同様である。さらに、硝酸ウラニル水溶液系についての計算結果を表3.3に、硝酸プルトニウム水溶液系についての計算結果を表3.4に示す。これらを図示したのが、上記の燃料の順に、図3.1～図3.5、図3.6～図3.10、図3.11～図3.15である。図では、縦軸に燃料濃度を示し、横軸には燃料中心からの距離と燃料領域の半径との比を示している。

ウラン-水系についての計算結果では、平均燃料濃度30gU/lのときに内側の燃料濃度を高く、外側の燃料濃度を低くする分布になっている。最も内側は平均燃料濃

度の3倍強、最も外側の2領域では燃料濃度0になっている。これは、図2.2を参考にすると、前章(1)式の燃料濃度勾配パラメタ  $a = -1$  よりも、さらに勾配を急にしたような分布になっている。平均燃料濃度  $100\text{gU}/\ell$  及び  $300\text{gU}/\ell$  では、中心領域及び反射体近傍の最も外側の燃料領域の2ヶ所で燃料濃度が高い分布が最適燃料濃度分布になっている。平均燃料濃度  $1,000\text{gU}/\ell$  では、図3.4で示されるように、大部分の燃料を周辺部に集めた分布になった。しかし、図3.5に示されるように、平均燃料濃度が  $3,000\text{gU}/\ell$  では、再び内側の燃料濃度を高める方が中性子増倍率が高くなっている。このようなウラン-水系における最適燃料濃度分布の振舞いは、燃料濃度と無限増倍率  $k_{\infty}$  との関係によって説明される。図3.16にはウラン-水系における  $k_{\infty}$  と  $H/U$  との関係（図中、番号1が本計算の濃縮度100%に対応）を、図3.17には燃料濃度と  $H/U$  との関係を示している<sup>1)</sup>。  $k_{\infty}$  は、  $H/U = 0$  すなわち金属状態で最大になる。図3.5（平均燃料濃度  $3,000\text{gU}/\ell$ ）において、一番内側の領域はこの状態になっている。次に  $k_{\infty}$  が大きくなるのは、  $H/U = 80$ 、すなわち  $300\text{gU}/\ell$  近傍である。平均燃料濃度が  $300\text{gU}/\ell$  以下では、内側の燃料濃度を高めることにより最適燃料濃度分布が得られる傾向が説明される。平均燃料濃度が  $300$  及び  $1000\text{gU}/\ell$  において、周辺部の燃料濃度が中央部より高くなって最適燃料濃度分布が達成される理由は、反射体による中性子の減速効果が中央より周辺の方がより利くためであろうと考えられる。

硝酸ウラニル水溶液系においても、平均燃料濃度が高くなるに従い、中央高の燃料分布から、次第に周辺部の燃料濃度が高くなる傾向になっている。すなわち、平均ウラン濃度が  $500\text{gU}/\ell$  では中心の燃料濃度を高く（図3.6）、  $700\text{gU}/\ell$  では中心部に加え、周辺部の燃料濃度も高くなっている（図3.7）。しかし図3.8～図3.10に見るように、平均燃料濃度が  $900\text{gU}/\ell$  以上になると中心部より周辺部の燃料濃度が高い分布を得ている。これも、反射体領域にある水の減速効果が有効に働くためと考えられる。参考のため、この体系での  $k_{\infty}$  と  $H/U$  の関係を図3.18（図中、番号14が本計算の濃縮度5wt%に対応）に、燃料濃度と  $H/U$  との関係を図3.19に示す。

硝酸プルトニウム水溶液体系については、これまで調べてきた傾向に非均質化による反応度上昇の効果が重なって現れている。図3.11に示されているように、平均燃料濃度  $70\text{gU}/\ell$  では反射体近傍、次いで中心部に燃料を集める分布になっている。細かく凹凸しており、すでに非均質化の傾向が現れている。図3.12～図3.15では、

非均質化の傾向及び外側の燃料濃度を内側より高くするという傾向がより顕著に現れている。図3.20には均質Pu(NO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>水溶液体系における $k_{\infty}$ とH/Puとの関係を示す。本計算で対象としているプルトニウム同位体比は番号3に近い。図3.21には、プルトニウム濃度とH/Puとの関係を示す。この図によると、プルトニウム濃度70~500g Pu/ℓの範囲は、H/Puにして $4 \times 10^2 \sim 4 \times 10^1$ の範囲に対応している。これは図3.20によると、 $k_{\infty}$ に関するピークのやや左側（減速不足側）に位置している。この減速度範囲において外側（反射体側）に燃料を集める方が反応度を高める傾向があることは、ウラン燃料体系でも見られたことである。

上記の3種類の燃料に対する中性子増倍率の算出結果を表3.5に示す。プルトニウム燃料では、最適燃料濃度分布を採ることによる均一分布からの中性子増倍率の増加割合は、平均燃料濃度が高くなるほど大きくなっている。しかし、非均質化の傾向が加わっており、燃料濃度の不均一効果のみについては議論しにくい。ウラン-水燃料を対象にした計算では、平均燃料濃度30gU/ℓ及び3,000gU/ℓのときに不均一効果が大きく、均一分布を仮定したときからの中性子増倍率の増加割合として、それぞれ8.5%及び14%となる。これらはいずれも中央に燃料を集めた分布であった（図3.1及び図3.5）。しかし、平均燃料濃度300gU/ℓでは最適分布をとっても均一分布に比べて中性子増倍率は0.3%しか増加しない。ウラン濃度300gU/ℓはH/U=80に対応し（図3.17）、 $k_{\infty}$ はこのとき極大値をとるので（図3.16）、均一分布のままではほぼ最適減速になっていることによる。硝酸ウラニル水溶液の計算では、平均燃料濃度が700gU/ℓ以上では不均一効果は1%未満である。これは、変動しうるH/U比の幅が小さいためであると考えられる。

今回の計算ではOPT-Dコードを用いて最適燃料濃度分布及び対応する中性子増倍率を求めた。同コードでは中性子輸送を拡散法を用いて計算している。OPT-Dコードで得られた燃料濃度分布を仮定し、S<sub>N</sub>法に基づいて中性子輸送を解くANISN-JRコード<sup>21)</sup>を用いて中性子増倍率を計算した。その結果をOPT-Dコードの計算結果と比較して表3.6に示す。ANISN-JRコードの方が、OPT-Dコードより中性子増倍率を3~5%も高く計算する。しかし、不均一効果としての中性子増倍率の増加割合を見ると、コード間の違いはほとんどないか、あっても小さいものであった。

### (3) 結論

十分な水反射体に囲まれた球状燃料の最適燃料濃度分布を求めた。対象とした燃料は濃縮度100%のウラン-水、濃縮度5wt%の硝酸ウラニル水溶液及びプルトニウム同位体個数比  $^{239}\text{Pu}:^{240}\text{Pu} = 5:1$  の硝酸プルトニウム水溶液の3種類の均質燃料である。計算の結果、次のことが明らかになった。

- 1) 燃料濃度が低く、減速度が最適減速より十分に大きな（過減速）燃料では、中央部の燃料濃度を高くすることにより最適燃料濃度分布が得られる。
- 2) 逆に平均燃料濃度が高い（減速不足）体系では、周辺部の燃料濃度を高めることにより最適燃料濃度分布が得られる。ただし、さらに平均燃料濃度が高いと、中央部に金属状態を作り出すことにより最適燃料濃度分布が得られることがある。
- 3) 減速度が最適減速の近くでは、不均一効果は小さい。最適燃料濃度分布は、周辺部の反射体近傍及び中央の燃料濃度を高める分布になる。なお、硝酸プルトニウム水溶液では、このほかに非均質効果が重なって現れるが、このような非均質効果を分離する手法については今後工夫する必要がある。

表 3.1 燃料濃度分布の不均一効果を検討するための計算対象（球状燃料、十分な水反射体付き）

燃料の種類	燃料球直径 [cm]	平均燃料濃度 [gu/ℓ]または[gPu/ℓ]
ウラン-水*1)	5.0	30, 100, 300, 1000, 3000
硝酸ウラニル水溶液*2)	5.4	500, 700, 900, 1100, 1300
硝酸プルトニウム水溶液*3)	2.4	70, 100, 200, 300, 500

\*1)  $^{235}\text{U}$ 濃縮度100%\*2)  $^{235}\text{U}$ 濃縮度5wt%\*3)  $^{239}\text{Pu}:\text{}^{240}\text{Pu} = 5:1$  [原子個数比]

表 3.2 濃縮度100%ウラン-水系の最適燃料濃度分布（球直径50cm）

単位 : gU/ℓ

ケース番号	平均濃度	領域1	領域2	領域3	領域4	領域5	領域6	領域7	領域8	領域9	領域10
A 1	30	98.7	60.3	48.2	34.8	25.6	17.7	13.6	1.2	0.0	0.0
A 2	100	172	137	121	104	92.0	79.1	68.3	62.7	32.7	131
A 3	300	333	307	292	275	258	243	215	245	56.6	777
A 4	1000	394	386	383	379	378	356	346	399	0.0	6980
A 5	3000	19050	8542	219	282	261	254	222	264	48.3	858

注 燃料領域の分割は体積等価となるように10分割されている。

表 3.3 濃縮度 5 wt % 硝酸ウラニル水溶液の最適燃料濃度分布 (球直径54cm)

単位 : gU/g

ケース番号	平均濃度	領域1	領域2	領域3	領域4	領域5	領域6	領域7	領域8	領域9	領域10
B 1	500	810	714	687	590	540	461	386	308	246	268
B 2	700	870	806	781	726	689	627	544	719	0.0	1238
B 3	900	936	901	884	865	838	810	768	688	968	1330
B 4	1100	987	994	993	1000	985	990	1074	1316	1330	1330
B 5	1300	1104	1255	1330	1330	1330	1330	1330	1330	1330	1330

注 燃料領域の分割は体積等価となるように10分割されている。

表 3.4  $^{239}\text{Pu} : ^{240}\text{Pu} = 5 : 1$  (原子個数比) 硝酸プルトウム水溶液の最適燃料濃度分布 (球直径24cm)

単位 : gPu/g

ケース番号	平均濃度	領域1	領域2	領域3	領域4	領域5	領域6	領域7	領域8	領域9	領域10
C 1	70	65.7	57.9	53.2	60.6	36.7	62.9	36.8	36.8	0.0	290
C 2	100	74.3	87.7	36.4	126	0.0	126	36.1	36.1	0.0	477
C 3	200	154	0.0	326	0.0	0.0	521	0.0	0.0	0.0	1000
C 4	300	92.4	154	0.0	405	0.0	0.0	0.0	348	1000	1000
C 5	500	161	0.0	308	0.0	0.0	530	1000	1000	1000	1000

注 燃料領域の分割は体積等価となるように10分割されている。

表 3.5 均一濃度分布及び最適濃度分布下での中性子増倍率の比較 (OPT-Dコードを用いた算出結果)

燃料種類	平均燃料濃度 [gu/ℓ]又は [gPu/ℓ]	中性子増倍率		均一分布からの 増加割合 [%]
		均一分布	最適分布	
ウラン-水 ( <sup>235</sup> U濃縮度100%、 球直径50cm)	30	1.0268	1.1138	8.5
	100	1.3226	1.3361	1.0
	300	1.4217	1.4264	0.3
	1,000	1.4232	1.4490	1.8
	3,000	1.4355	1.6371	14.0
硝酸ウラニル水溶液 ( <sup>235</sup> U濃縮度5wt%、 球直径54cm)	500	0.84969	0.87174	2.6
	700	0.91174	0.91810	0.7
	900	0.93700	0.94015	0.3
	1,100	0.94015	0.94578	0.6
	1,300	0.92785	0.93200	0.4
硝酸プルトニウム 水溶液 ( <sup>239</sup> Pu: <sup>240</sup> Pu=5:1、 球直径24cm)	70	0.73570	0.75109	2.1
	100	0.75411	0.77623	2.9
	200	0.76090	0.79666	4.7
	300	0.75332	0.79173	5.1
	500	0.73861	0.78115	5.8

表 3.6 ANISN-JRコードを用いて計算した中性子増倍率とOPT-Dコードの計算結果の比較

燃料体系	計算コード	均一分布	最適分布	増加割合[%]
ウラン-水 ( <sup>235</sup> U100%、300gU/ℓ)	OPT-D	1.0268	1.1138	8.5
	ANISN-JR	1.0663	1.1694	9.7
硝酸ウラニル水溶液 ( <sup>235</sup> U5wt%、900gU/ℓ)	OPT-D	0.93700	0.94118	0.3
	ANISN-JR	0.96535	0.96805	0.3



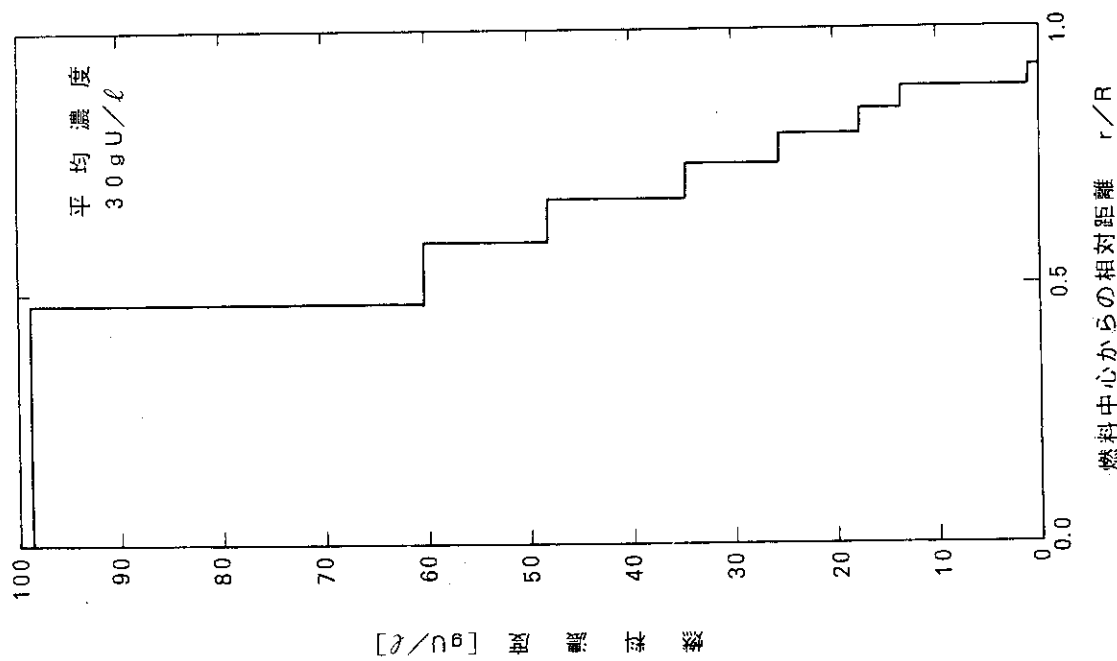


図 3.1

OPT-Dコードで算出した金属ウラン-水（ウラン濃縮度100%、平均ウラン濃度30gU/l、球形状、直径50cm、水反射体付き）の最適濃度分布

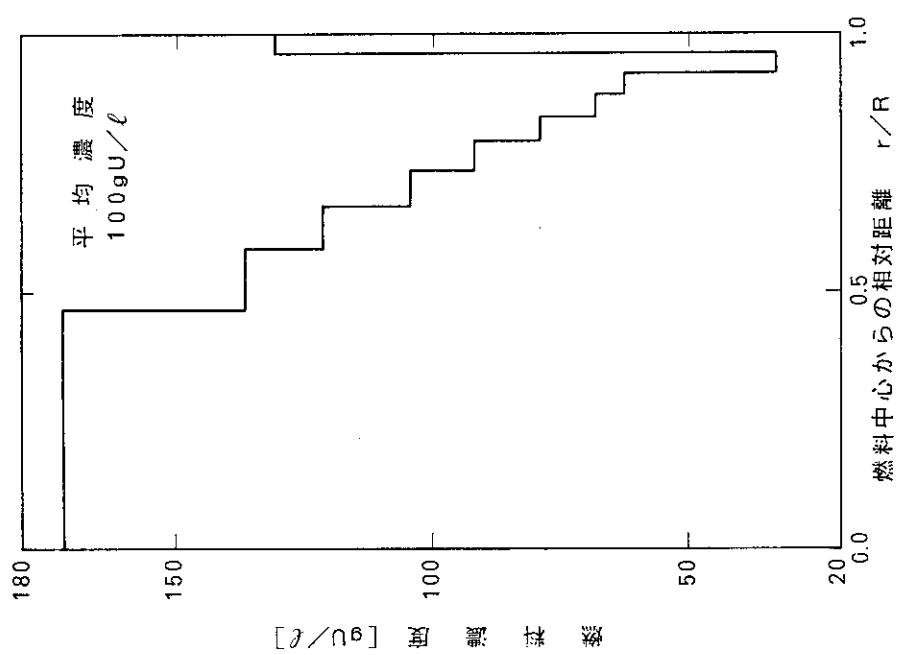


図 3.2

OPT-Dコードで算出した金属ウラン-水（ウラン濃縮度100%、平均ウラン濃度100gU/l、球形状、直径50cm、水反射体付き）の最適濃度分布

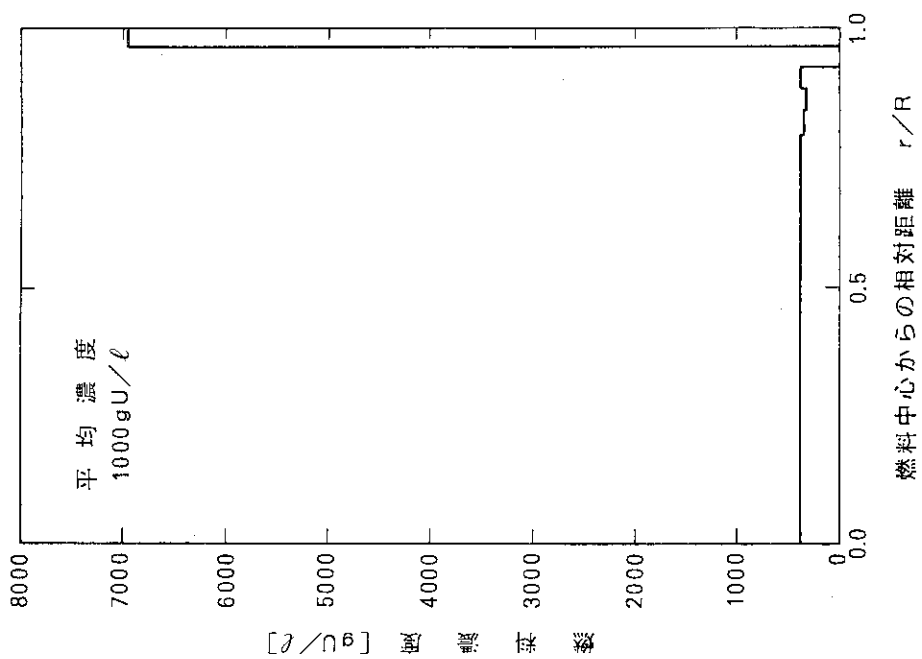


図 3.3

OPT-Dコードで算出した金属ウラン-水（ウラン濃縮度100%、平均ウラン濃度300gU/l、球形状、直径50cm、水反射体付き）の最適濃度分布

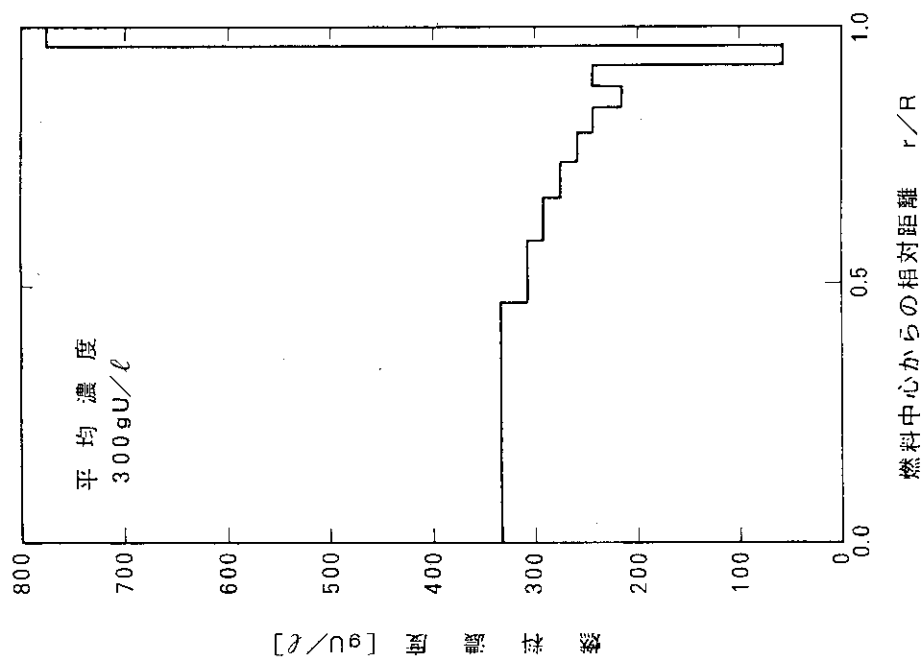


図 3.4

OPT-Dコードで算出した金属ウラン-水（ウラン濃縮度100%、平均ウラン濃度10000gU/l、球形状、直径50cm、水反射体付き）の最適濃度分布

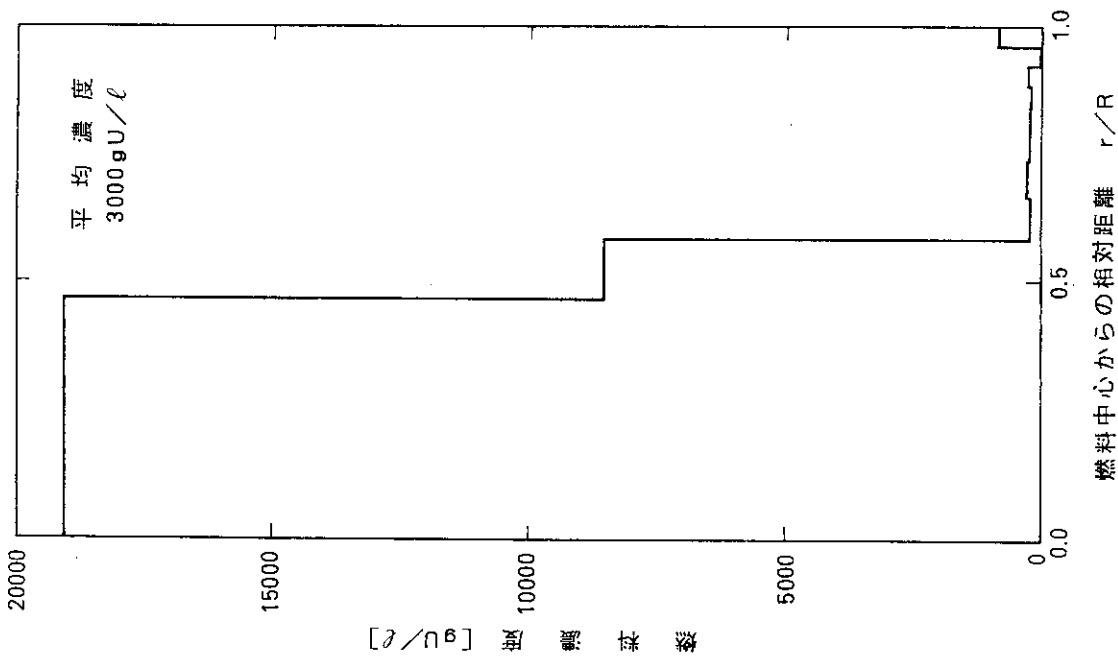


図 3.5

OPT-Dコードで算出した金属ウラン-水（ウラン濃縮度100%、平均ウラン濃度3000gU/l、球形状、直径50cm、水反射体付き）の最適濃度分布

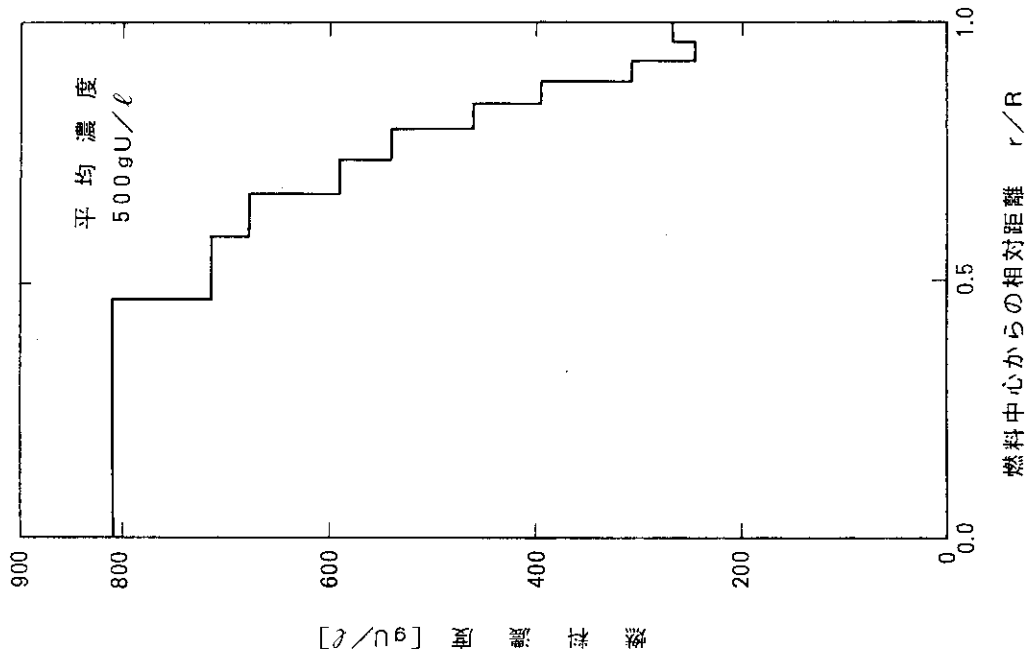


図 3.6

OPT-Dコードで算出した硝酸ウラニル水溶液（ウラン濃縮度5wt%、平均ウラン濃度500gU/l、球形状、直径54cm、水反射体付き）の最適濃度分布

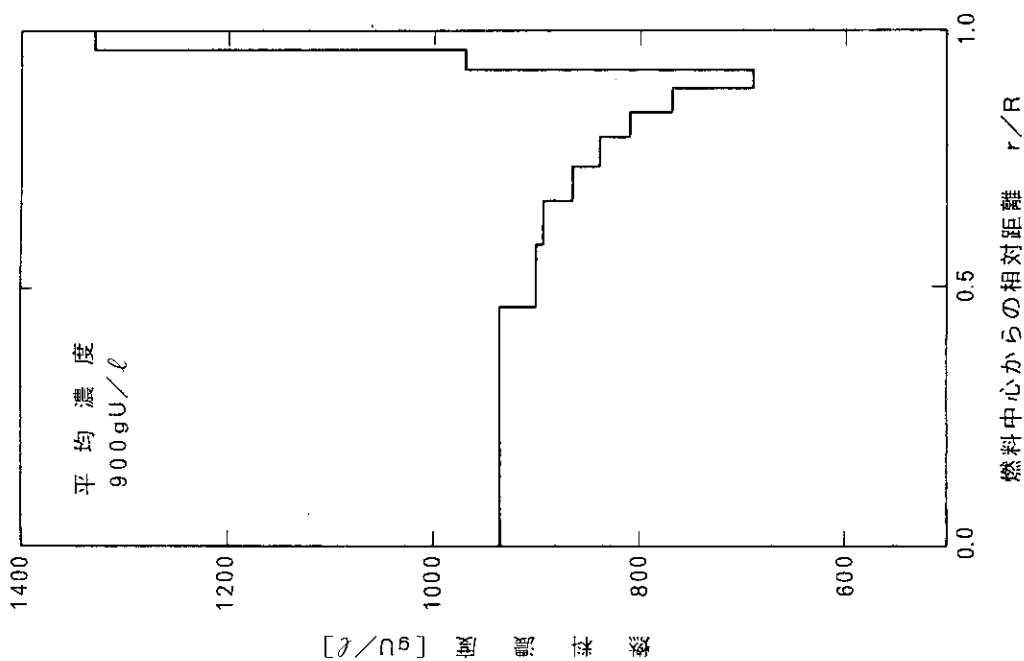


図 3.7

OPT-Dコードで算出した硝酸ウラニル水溶液（ウラン濃縮度 5 wt %、平均ウラン濃度 700 gU/l、球形状、直径54cm、水反射体付き）の最適濃度分布

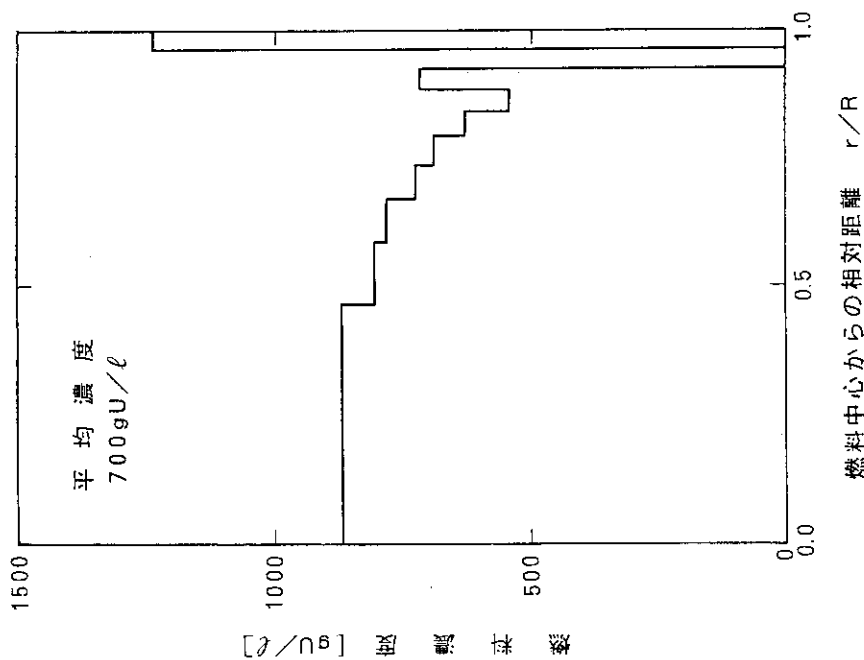


図 3.8

OPT-Dコードで算出した硝酸ウラニル水溶液（ウラン濃縮度 5 wt %、平均ウラン濃度 900 gU/l、球形状、直径54cm、水反射体付き）の最適濃度分布

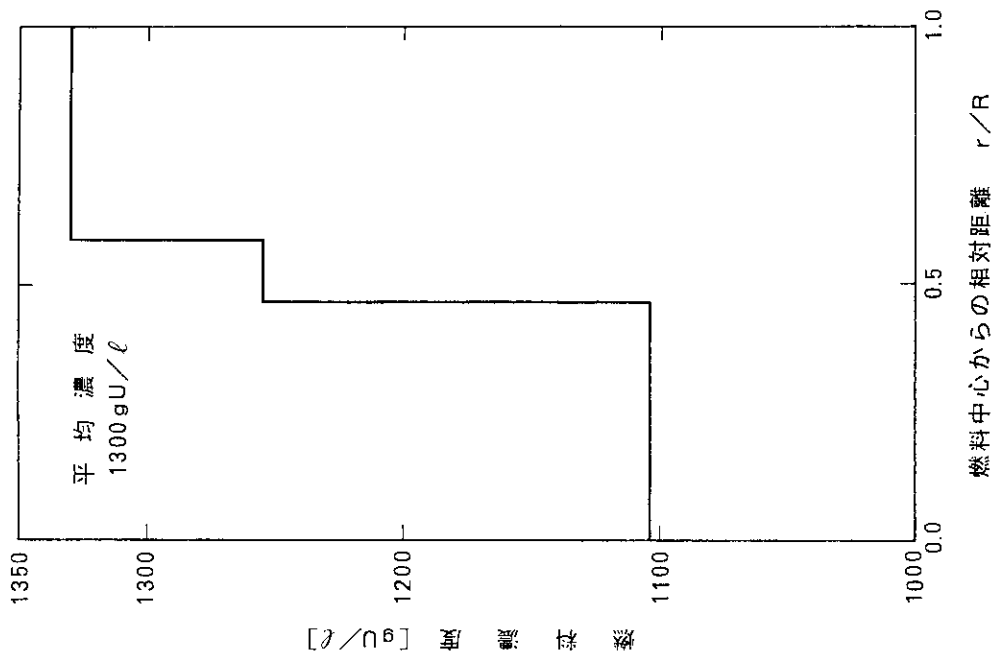


図 3.9

OPT-Dコードで算出した硝酸ウラニル水溶液（ウラン濃縮度 5 wt %、平均ウラン濃度 1100 gU/l、球形状、直径 54 cm、水反射体付き）の最適濃度分布

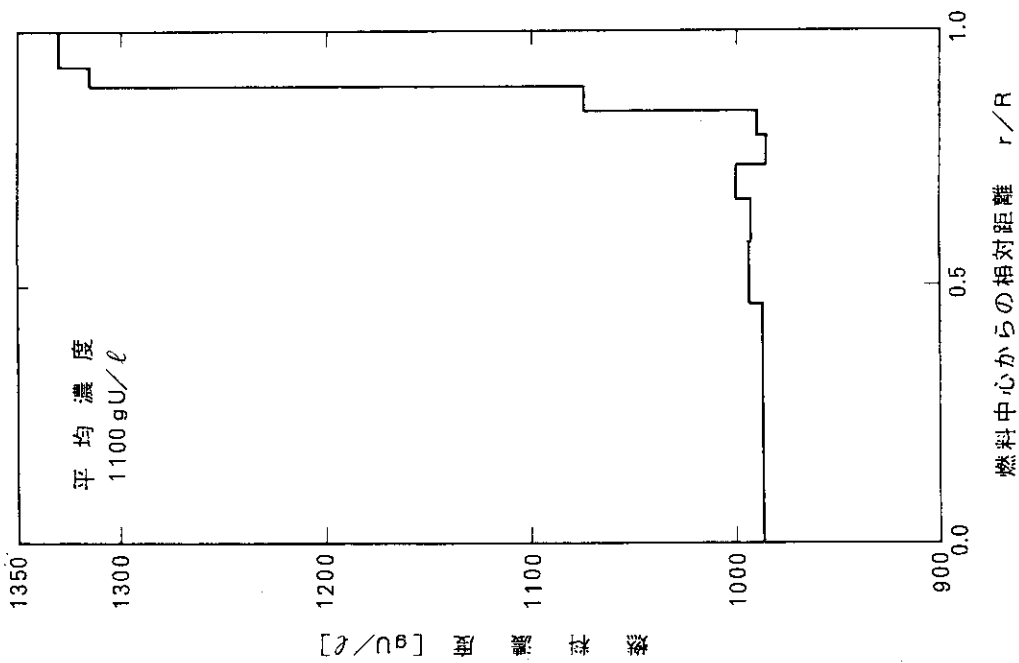


図 3.10

OPT-Dコードで算出した硝酸ウラニル水溶液（ウラン濃縮度 5 wt %、平均ウラン濃度 1300 gU/l、球形状、直径 54 cm、水反射体付き）の最適濃度分布

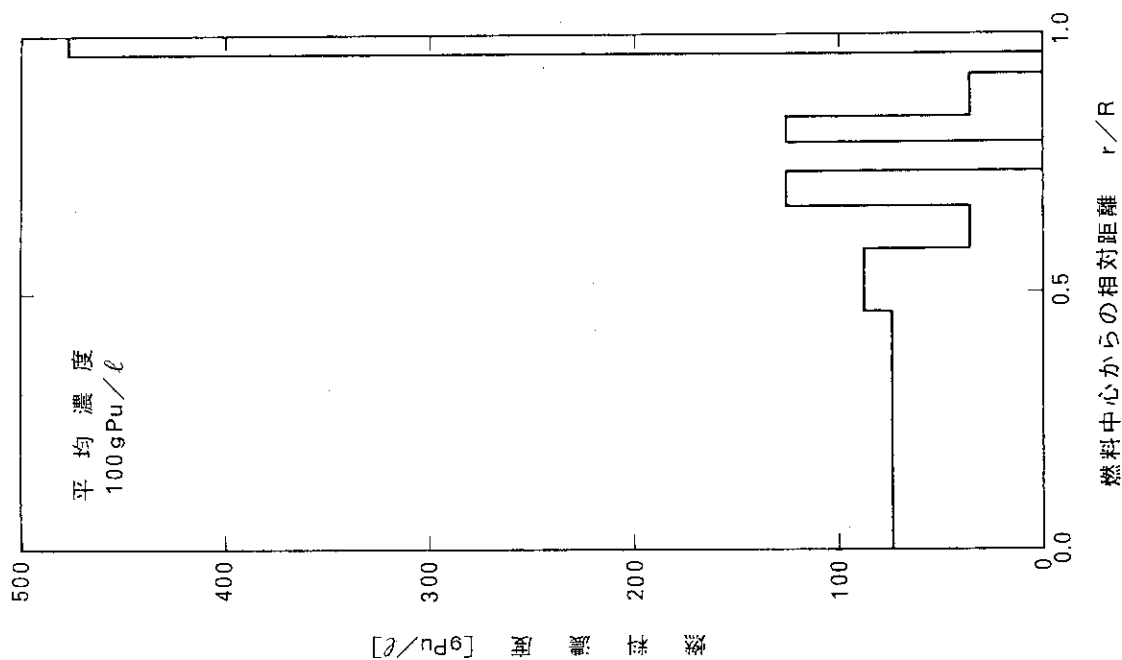


図 3.12

OPT-Dコードで算出した硝酸プルトニウム水溶液 ( $^{239}\text{Pu}$ :  $^{240}\text{Pu}$  = 5 : 1、平均プルトニウム濃度  $100\text{gPu/l}$ 、球形状、直径  $24\text{cm}$ 、水反射体付き) の最適濃度分布

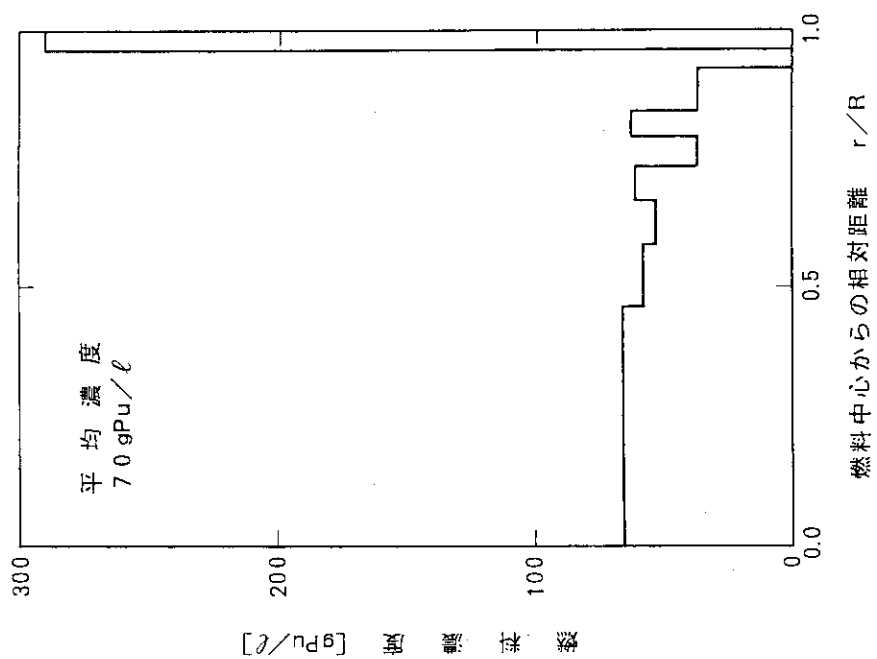


図 3.11

OPT-Dコードで算出した硝酸プルトニウム水溶液 ( $^{239}\text{Pu}$ :  $^{240}\text{Pu}$  = 5 : 1、平均プルトニウム濃度  $70\text{gPu/l}$ 、球形状、直径  $24\text{cm}$ 、水反射体付き) の最適濃度分布

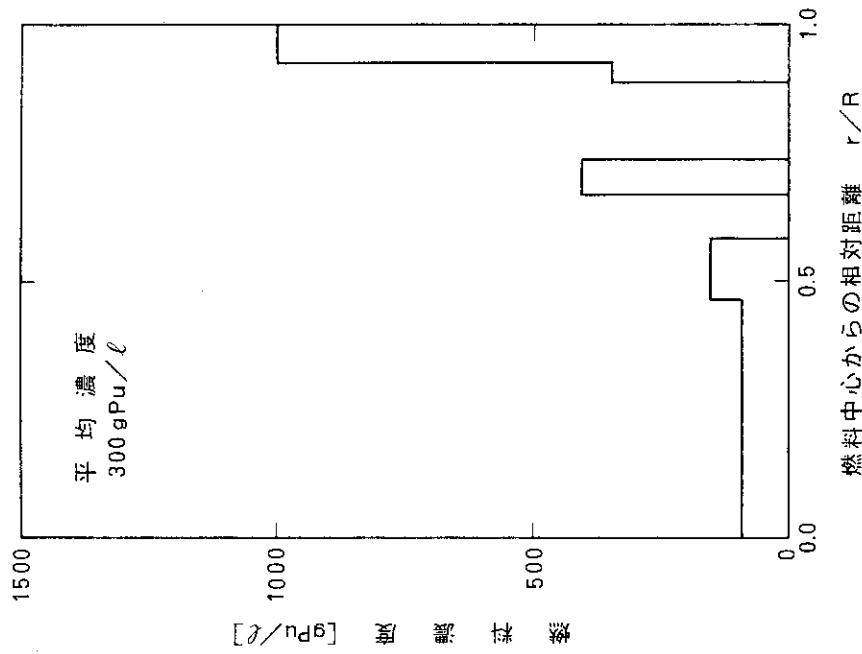


図 3.13

OPT-Dコードで算出した硝酸プルトニウム水溶液 ( $^{239}\text{Pu} : ^{240}\text{Pu}$  = 5 : 1、平均プルトニウム濃度 200gPu/ℓ、球形状、直径24cm、水放射体付き) の最適濃度分布

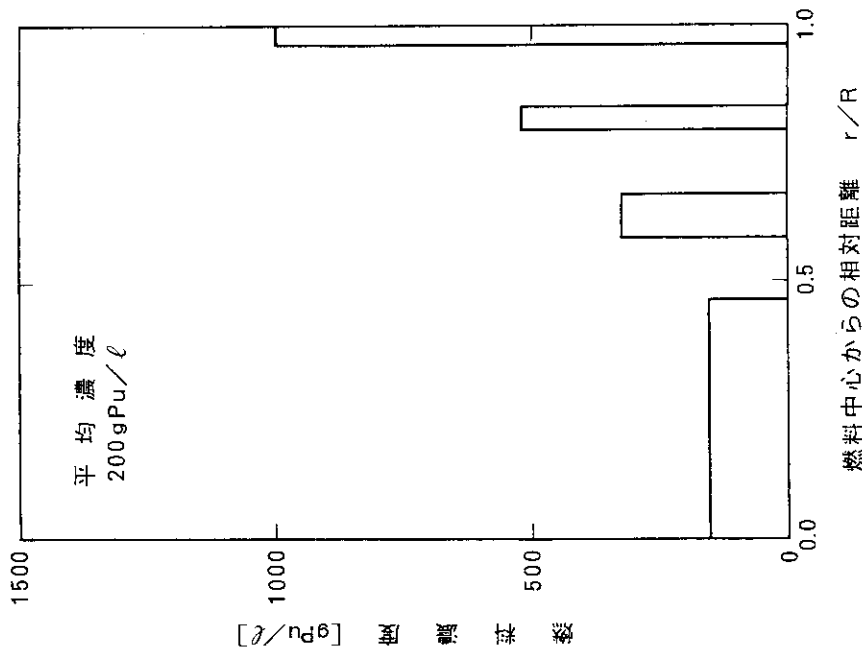


図 3.14

OPT-Dコードで算出した硝酸プルトニウム水溶液 ( $^{239}\text{Pu} : ^{240}\text{Pu}$  = 5 : 1、平均プルトニウム濃度 300gPu/ℓ、球形状、直径24cm、水放射体付き) の最適濃度分布

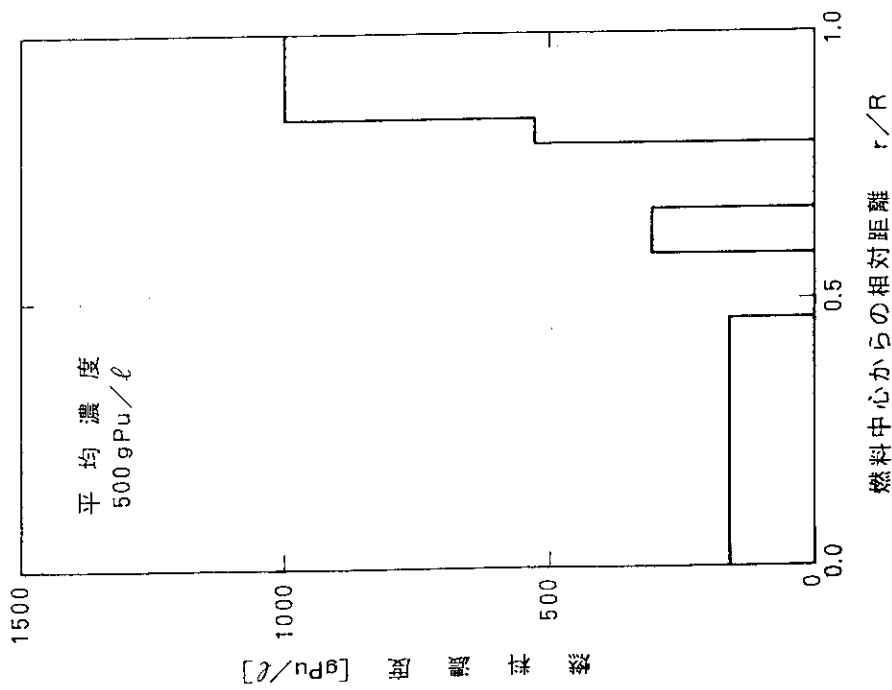


図 3.15

OPT-Dコードで算出した硝酸プルトニウム水溶液 ( $^{239}\text{Pu} : ^{240}\text{Pu} = 5 : 1$ 、平均プル  
トニウム濃度 500 gPu/l、球形状、直径24cm、水反射体付き) の最適濃度分布



無限増倍率

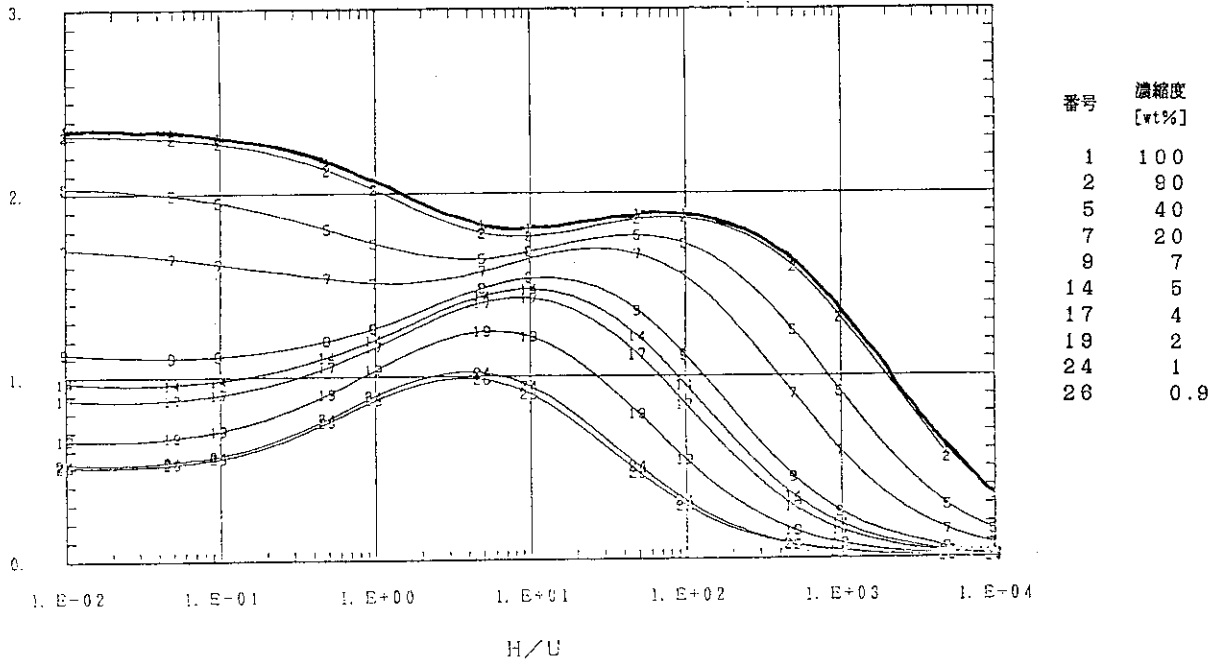


図 3.16 均質U-H<sub>2</sub>Oの無限増倍率

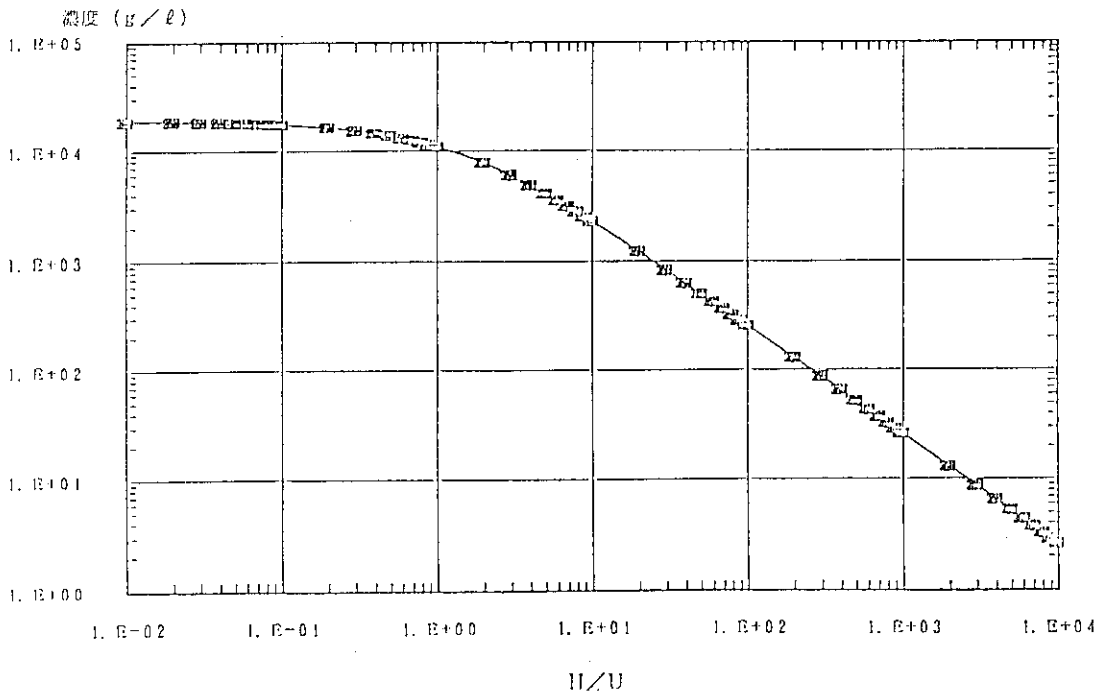


図 3.17 U濃度-H/U曲線 (均質U-H<sub>2</sub>O)

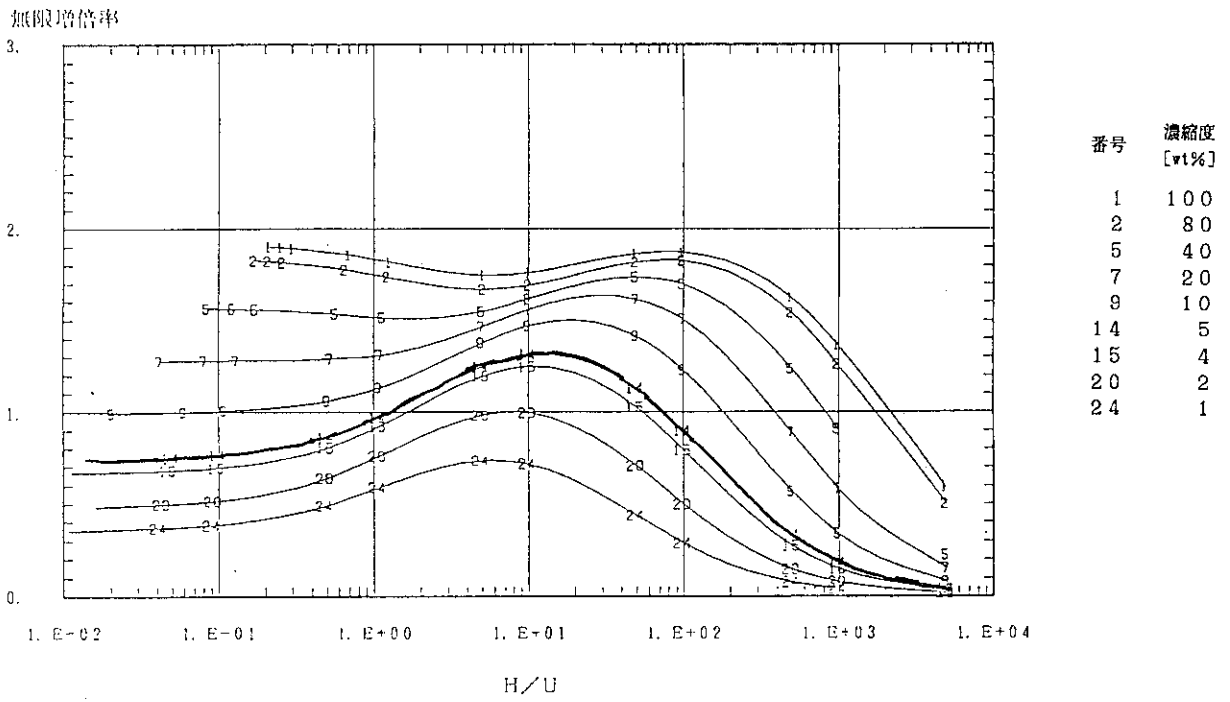


図 3.18 均質  $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$  水溶液の無限増倍率

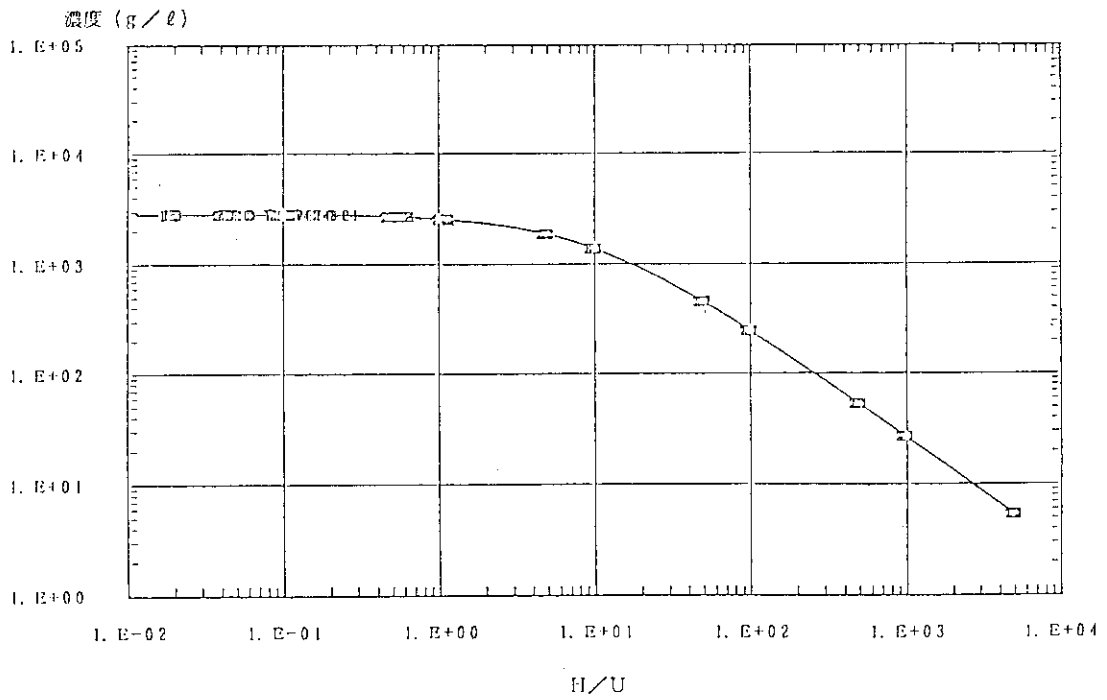


図 3.19 U 濃度 - H/U 曲線 (均質  $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$  水溶液)

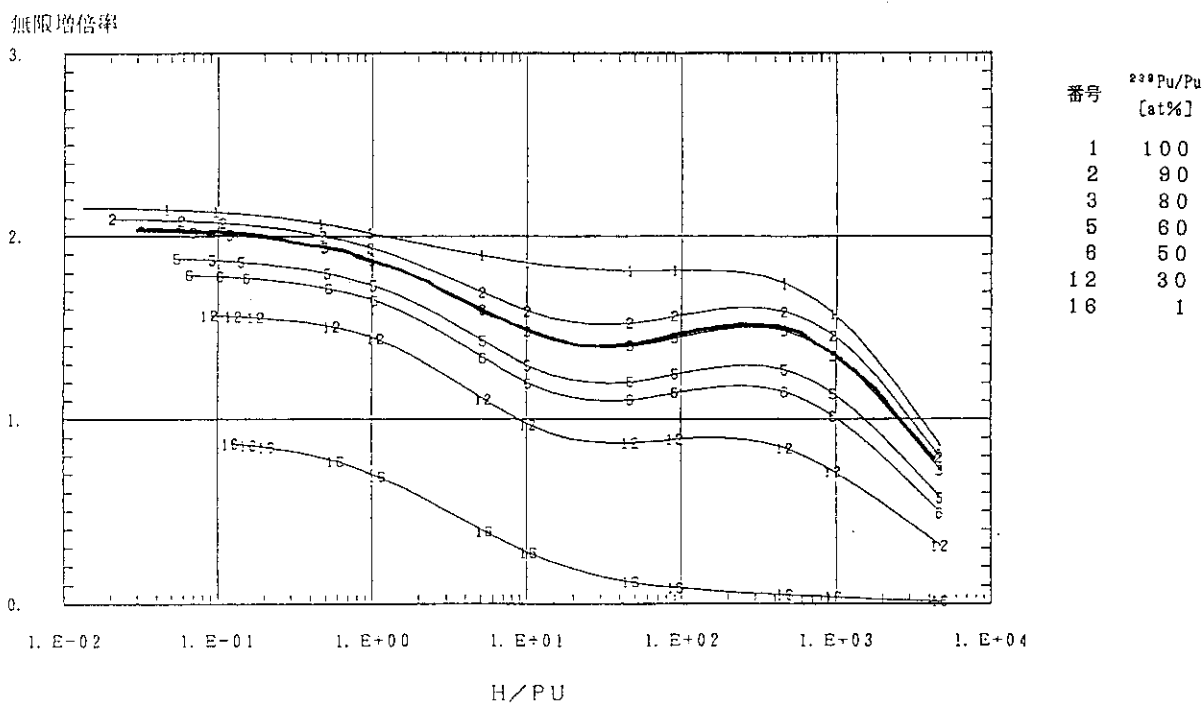


図 3.20 均質  $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$  水溶液の無限増倍率

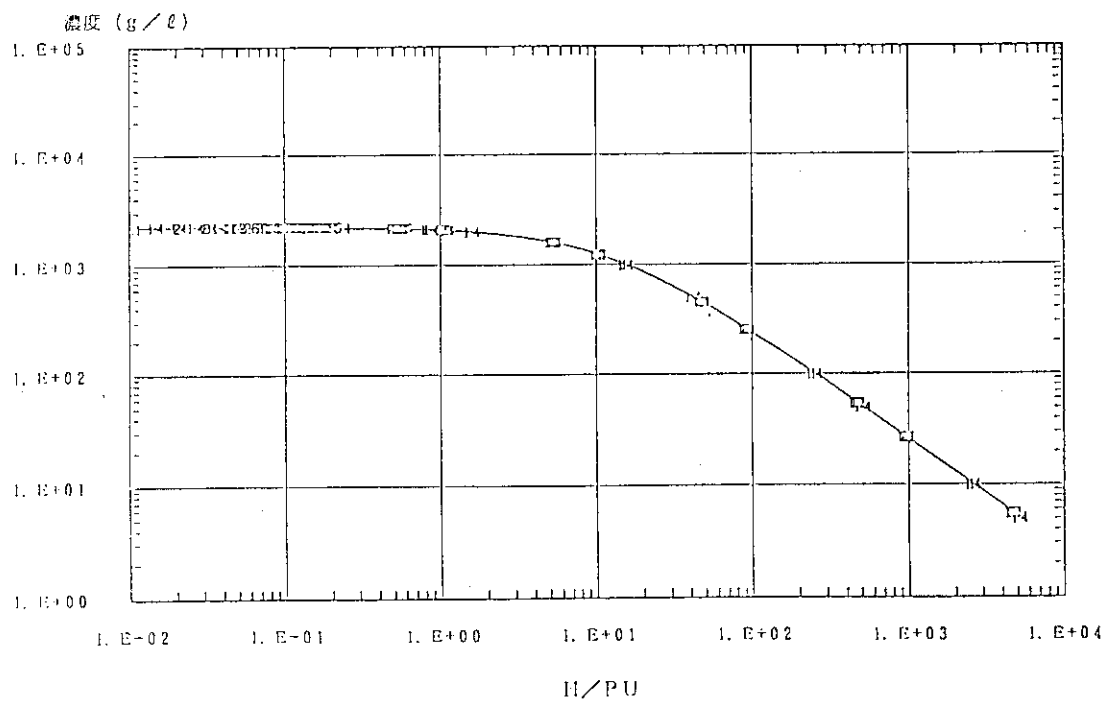


図 3.21  $\text{Pu}$  濃度 -  $\text{H}/\text{Pu}$  曲線 (均質  $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$  水溶液)

#### 4. 平板状溶液燃料における最適燃料濃度分布

この章では、十分な厚さの水反射体に囲まれた平板状燃料体系において、燃料濃度が不均一になる自由度を許したときの最大中性子増倍率及び対応する燃料濃度分布（最適燃料濃度分布）について記す。計算対象としたのは、濃縮度5wt%の硝酸ウラニル水溶液及びプルトニウム同位体個数比  $^{239}\text{Pu} : ^{240}\text{Pu} = 5 : 1$  の硝酸プルトニウム水溶液の2種類の均質燃料である。温度はいずれも20°Cとした。それぞれの燃料領域の平板厚さ及び計算対象とした平均燃料濃度を表4.1に示す。

##### (1) 計算方法

前章と同様に、1次元中性子拡散計算コードをもとに作成した計算コードOPT-Dを使用して、最適燃料濃度分布を求めた。さらに、均一分布及び最適分布の下での中性子増倍率を算出し、不均一効果に伴う中性子増倍率の増加割合を調べた。燃料の非均質化に伴う反応度上昇の影響を避けるため、燃料濃度が空間的に波型分布する場合には、その前で反復計算を終了させた。この判定は、対称面で折返した燃料濃度分布が極小値を2つ以上持たないという条件によって行った。

##### (2) 計算結果

硝酸ウラニル水溶液系で得られた最適燃料濃度分布を表4.2に示す。硝酸プルトニウム水溶液系についての計算結果を表4.3に示す。これらを図示したのが、それぞれ図4.1～図4.5、図4.6～図4.10である。図では、縦軸に燃料濃度を示し、横軸には燃料中心からの距離と燃料領域の半厚との比を示している。

濃縮度5wt%の硝酸ウラニル水溶液系においては、平均燃料濃度が高くなるに従い、燃料濃度分布は中央高から、次第に周辺部の燃料濃度が高くなる傾向がある。この傾向は、前章で見た球形状の場合と同様である。平均ウラン濃度が300gU/ℓでは、中心の燃料濃度を高くする分布となっている（図4.1）。平均燃料濃度500gU/ℓでは、中心部に加え、周辺部の燃料濃度も高くなっている（図4.2）。しかし図4.3～図4.5に見るように、平均燃料濃度が700gU/ℓ以上になると、中心部より周辺部の燃料濃度が高い分布が得られた。平板形状では、球形状よりも反射体による影響が大きく働く<sup>22)</sup>。このため、平板形状では球形状よりも、平均燃料濃度が低いときに

反射体近傍の燃料濃度を高めることにより、反射体領域にある水の減速効果を有効に利用するものと考えられる。

硝酸プルトニウム水溶液体系については、対称面で折り返した燃料濃度分布において極小値を2つ以上持たないという条件を課したために、前章で見たような燃料濃度の波型分布は現れなかった。この点を除くと、球形状について調べたのと同様の傾向となった。

次に、今回の計算で得られた燃料インポートンス分布を図示する。硝酸ウラニル水溶液については図4.11～図4.15に、硝酸プルトニウム水溶液については図4.16～図4.20に示す。これらの図で、縦軸は燃料インポートンスの大きさ（単位は任意）を、横軸は燃料中心からの距離と燃料領域の半厚との比を表している。また、実線は燃料濃度分布が均一のときの燃料インポートンスを、破線はこの計算で得られた最適燃料濃度分布での燃料インポートンスを示している。これらの図を見て気付くことは、まず燃料インポートンスが一定になるのは、硝酸ウラニル水溶液で平均燃料濃度が $300\text{gU/l}$ のときだけである。このことは、これ以外の場合には燃料インポートンスが一定になるのを待たずに、他の条件（燃料濃度が最大燃料濃度を超過した、0未満になった、あるいは燃料中心から折り返した燃料濃度分布が極小値を2つ以上持った）によって、燃料濃度変化についての反復計算が打ち切られたためであると考えられる。次に気付くことは、燃料分布が均一な系での燃料インポートンス分布と、最適燃料濃度分布とが類似の分布を持つことである（特に、硝酸ウラニル水溶液系において）。例として、硝酸ウラニル水溶液で平均燃料濃度が $300\text{gU/l}$ のときに、均一燃料濃度分布下での燃料インポートンス分布と最適燃料分布を、それぞれの平均値に対する相対値として図示したのが図4.21である。OPT-Dコードでは、燃料インポートンスの低い所から高い所へ燃料を移動するという方式を採用している。このため、平坦な燃料分布におけるインポートンスの分布と、最適燃料濃度分布との間で傾向がある程度一致するのは当然である。特に、燃料濃度変化による燃料インポートンスの変化割合が場所に依らず一定であれば2つの分布の相似性が得られる。

上記の2種類の燃料に対する中性子増倍率の算出結果を表4.4に示す。いずれの燃料においても、均一分布では中性子増倍率は0.9前後の値になっている。最適分布をとったときの中性子増倍率が、均一分布のときからどれだけ増加したかの割合を不

均一効果の指標とする。このとき、硝酸ウラニル水溶液における不均一効果は1%以下である。これに対して硝酸プルトニウム水溶液では、不均一効果は3~4%となっている。

### (3) 結論

十分な水反射体に囲まれた平板状燃料の最適燃料濃度分布を求めた。対象とした燃料は、濃縮度5wt%の硝酸ウラニル水溶液及びプルトニウム同位体個数比  $^{239}\text{Pu} : ^{240}\text{Pu} = 5 : 1$  の硝酸プルトニウム水溶液の2種類の均質燃料である。計算の結果、次のことが明らかになった。

- 1) 最適燃料濃度分布の形については、平板状燃料でも球形状と基本的に同様の傾向が得られた。
- 2) 不均一効果の大きさは、硝酸ウラニル水溶液では高々1%なのに対して、硝酸プルトニウム水溶液では3~4%になった。

表 4.1 燃料濃度分布の不均一効果を検討するための計算対象（平板状燃料、十分な水反射体付き）

燃料の種類	平板厚さ [cm]	平均燃料濃度 [gU/ℓ]または[gPu/ℓ]
硝酸ウラニル水溶液*1)	18	300, 500, 700, 900, 1100
硝酸プルトニウム水溶液*2)	8	70, 100, 200, 300, 500

\*1)  $^{235}\text{U}$ 濃縮度5wt%\*2)  $^{239}\text{Pu}:\text{}^{240}\text{Pu} = 5:1$  [原子個数比]

表 4.2 硝酸ウラニル水溶液の最適燃料濃度分布（平板厚さ 18cm）

単位：gU/ℓ

平均濃度	領域1	領域2	領域3	領域4	領域5	領域6	領域7	領域8	領域9	領域10
300	365.32	360.14	350.65	337.79	320.82	294.50	269.99	240.62	186.83	273.34
500	517.98	517.61	501.80	500.22	480.19	455.31	439.21	438.45	217.59	931.64
700	684.23	684.02	669.24	654.77	638.77	623.22	618.93	645.85	744.99	1036.00
900	833.18	833.10	820.05	817.54	812.43	782.74	764.69	830.84	1175.43	1330.0
1100	996.86	996.81	987.56	983.15	975.94	989.50	1080.19	1330.0	1330.0	1330.0

註 燃料領域の分割は体積が等しくなるように10分割している。  
 硝酸ウラニル水溶液の最大密度として1330 gU/lを仮定している。  
 束縛条件として、燃料分布中の極小値は1点しか許されていない。

表 4.3 硝酸プルトニウム水溶液の最適燃料濃度分布 (平板厚さ 8 cm)

単位 : gPu/l

平均濃度	領域1	領域2	領域3	領域4	領域5	領域6	領域7	領域8	領域9	領域10
70	49.94	49.91	49.46	49.03	45.88	40.78	36.39	38.84	76.57	263.20
100	68.50	68.41	66.08	63.76	58.84	53.72	53.26	69.59	127.85	370.00
200	109.94	109.49	105.55	92.53	68.51	53.18	82.11	157.49	313.21	907.99
300	163.64	163.60	83.61	0.0	0.0	137.00	270.34	457.27	724.53	1000.0
500	0.0	40.32	187.53	188.06	338.06	548.20	751.08	946.75	1000.0	1000.0

註 燃料領域の分割は体積が等しくなるように10分割している。  
 硝酸プルトニウム水溶液の最大密度として1000 gPu/lを仮定している。  
 束縛条件として、燃料分布中の極小値は1点しか許されていない。

表 4.4 均一濃度分布及び最適濃度分布下での中性子増倍率の比較 (OPT-Dコードを用いた算出結果)

燃料種類	平均燃料濃度 [gU/l]又は [gPu/l]	中性子増倍率		均一分布からの 増加割合 [%]
		均一分布	最適分布	
硝酸ウラニル水溶液 ( <sup>235</sup> U濃縮度5wt%、 平板厚さ18cm)	300	0.67895	0.68263	0.4
	500	0.81559	0.81902	0.4
	700	0.88027	0.88558	0.6
	900	0.90922	0.91861	1.0
	1,100	0.91689	0.92547	0.9
硝酸プルトニウム 水溶液 ( <sup>239</sup> Pu: <sup>240</sup> Pu=5:1、 平板厚さ8cm)	70	0.86617	0.89612	3.5
	100	0.89246	0.92419	3.6
	200	0.90890	0.94433	3.9
	300	0.90443	0.94083	4.0
	500	0.89227	0.92036	3.1



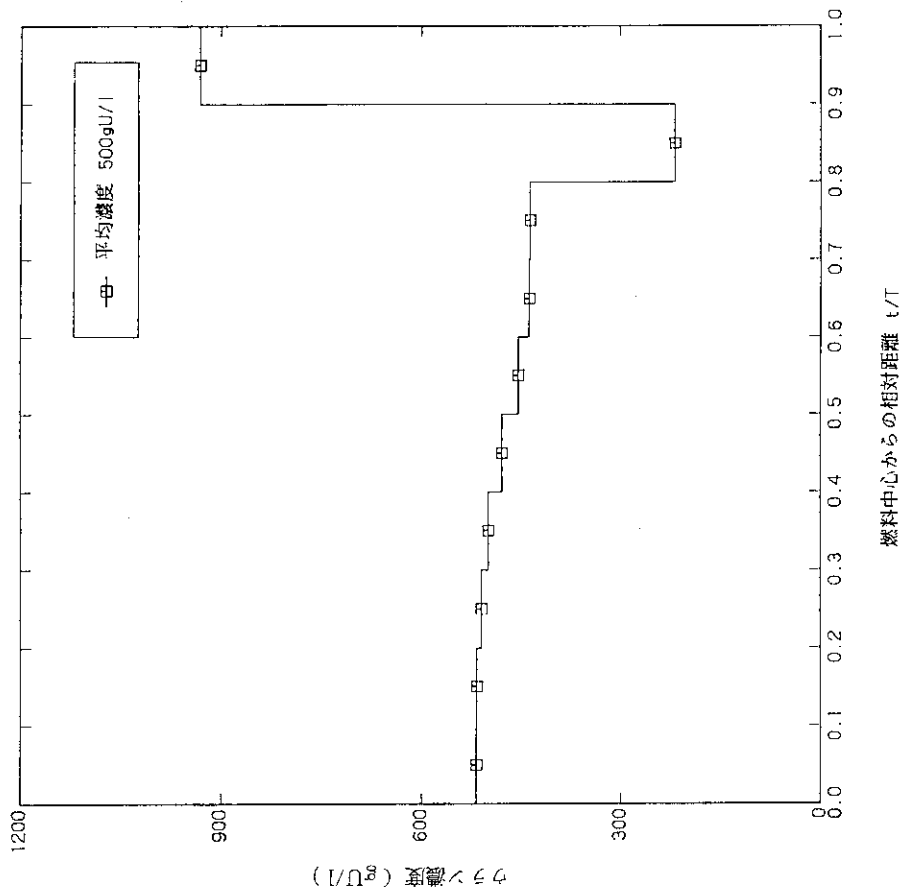


図 4.1

OPT-Dコードで算出した硝酸ウラニル水溶液（ウラン濃縮度 5 wt%、平均ウラン濃度 300 gU/l、平板状、厚さ18cm、水反射体付き）の最適濃度分布

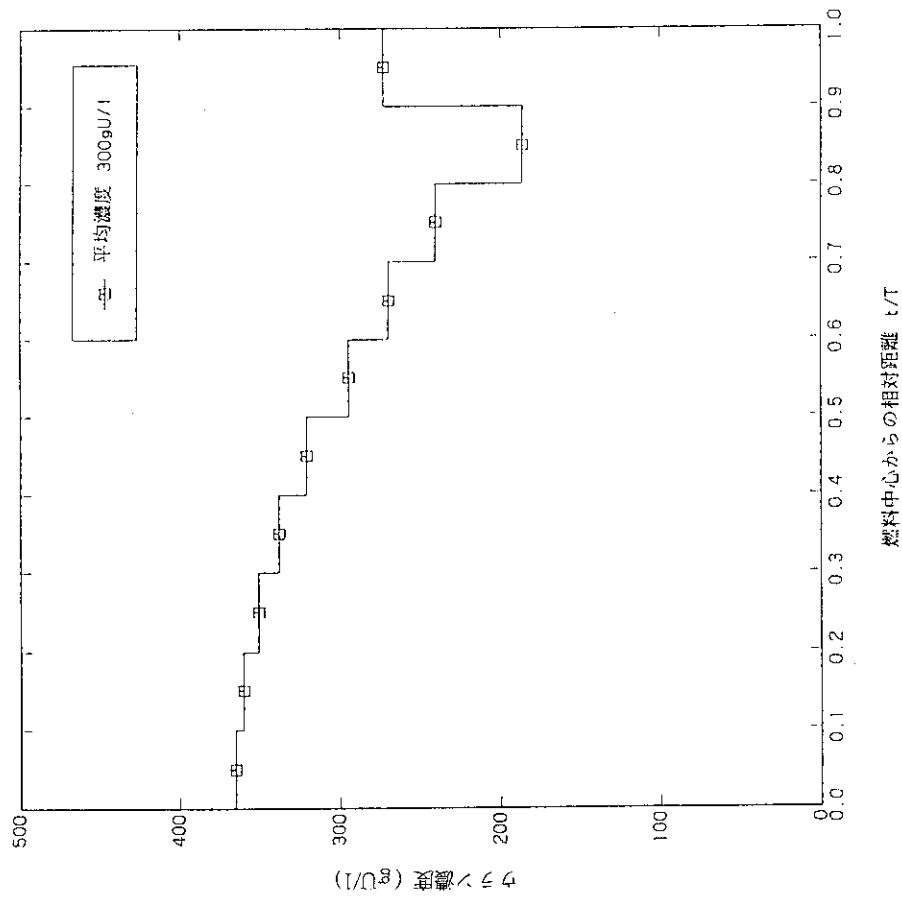


図 4.2

OPT-Dコードで算出した硝酸ウラニル水溶液（ウラン濃縮度 5 wt%、平均ウラン濃度 500 gU/l、平板状、厚さ18cm、水反射体付き）の最適濃度分布

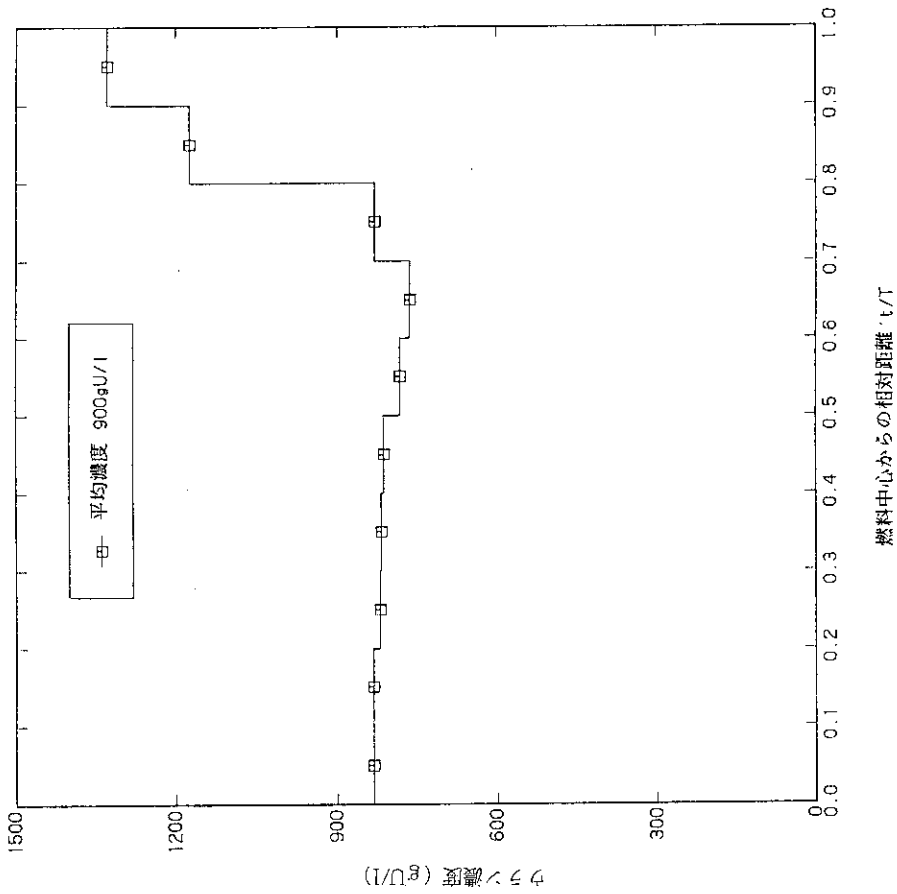


図 4.3

OPT-Dコードで算出した硝酸ウラニル水溶液（ウラン濃縮度 5 wt%、平均ウラン濃度 700 gU/l、平板状、厚さ18cm、水反射体付き）の最適濃度分布

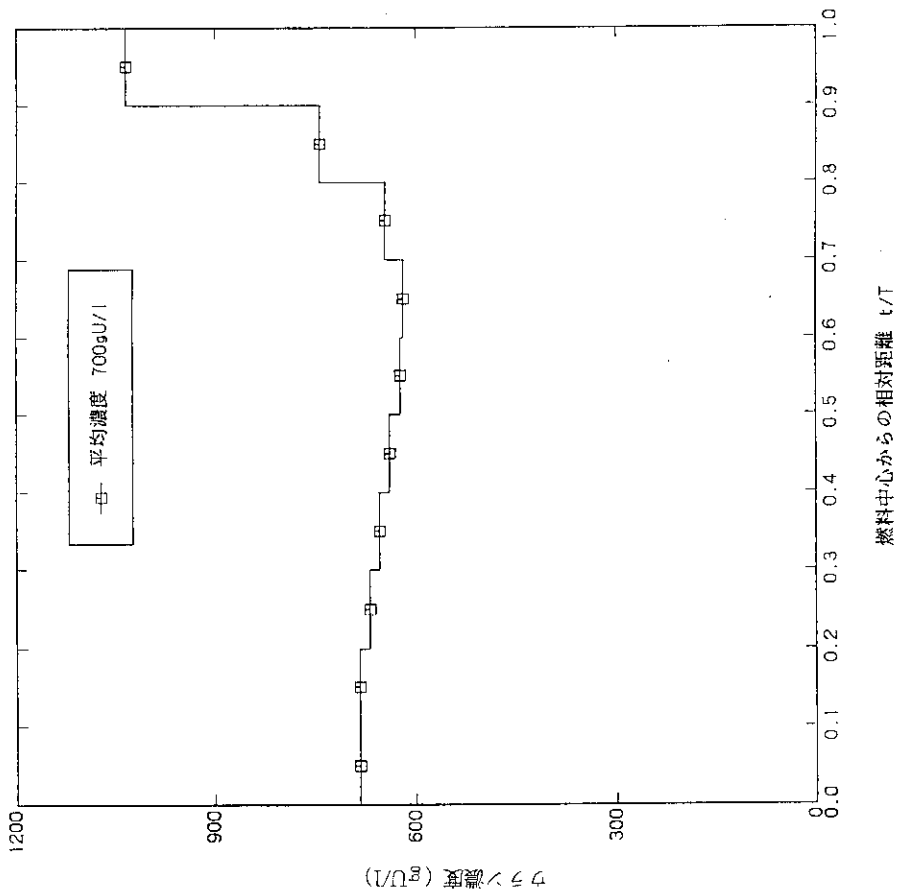


図 4.4

OPT-Dコードで算出した硝酸ウラニル水溶液（ウラン濃縮度 5 wt%、平均ウラン濃度 900 gU/l、平板状、厚さ18cm、水反射体付き）の最適濃度分布

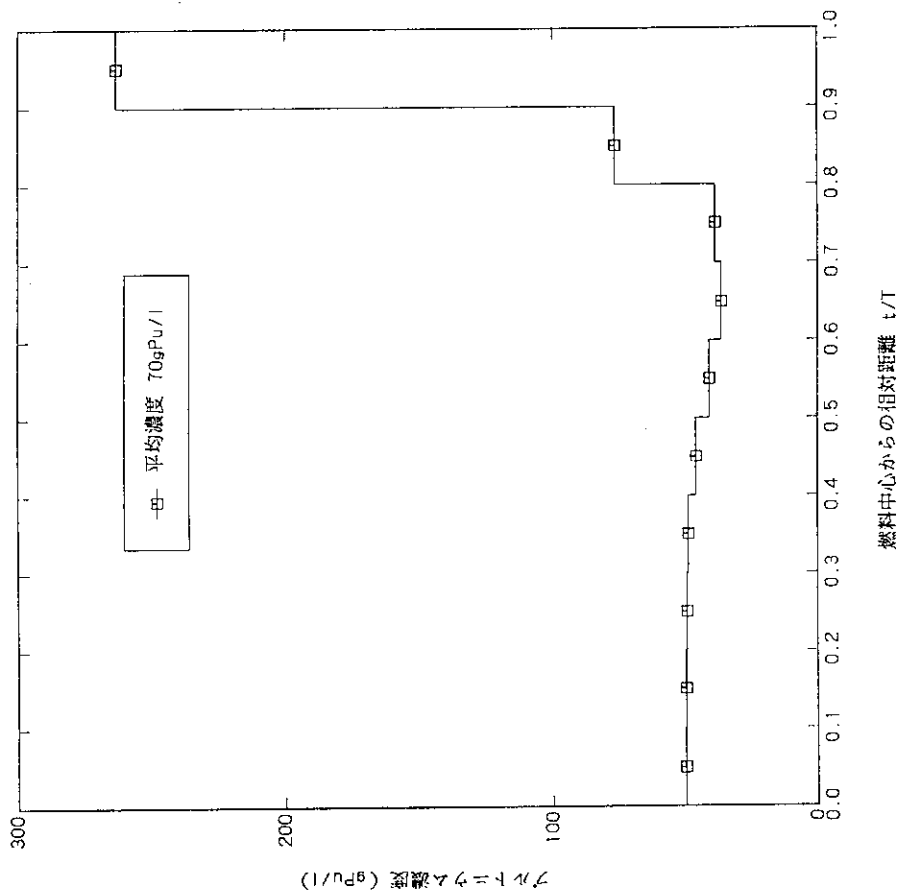


図 4.5 OPT-Dコードで算出した硝酸ウラニル水溶液（ウラン濃縮度 5 wt%、平均ウラン濃度 1100 gU/l、平板状、厚さ 18cm、水反射体付き）の最適濃度分布

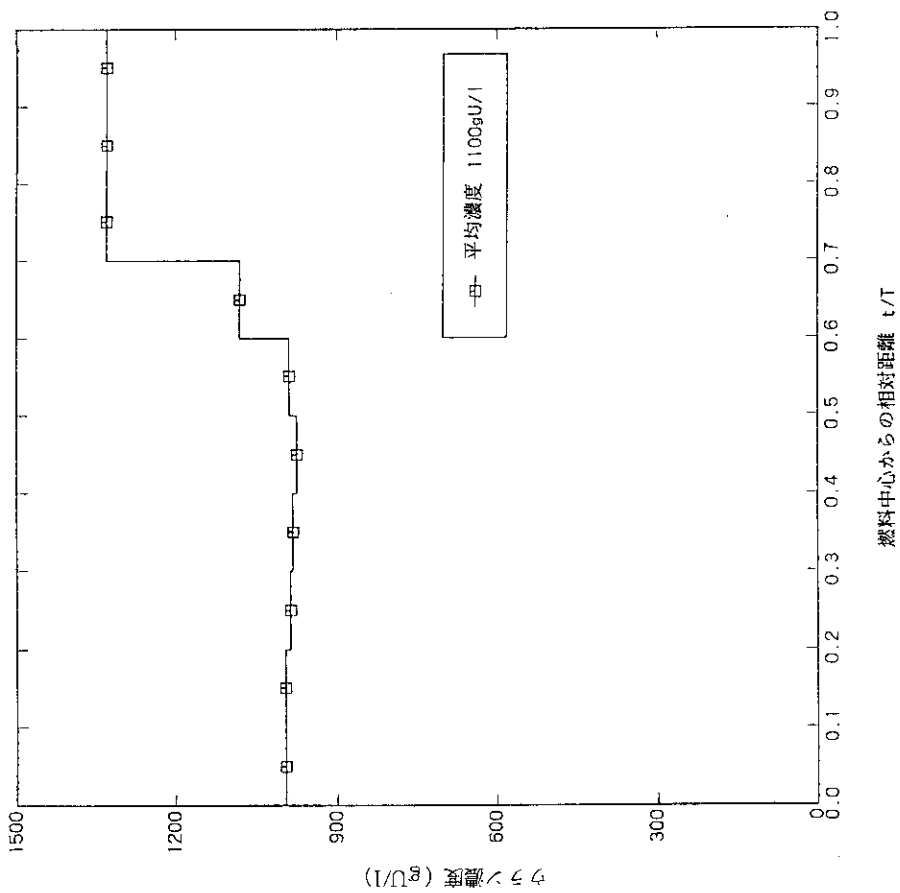


図 4.6 OPT-Dコードで算出した硝酸プルトニウム水溶液（ $^{239}\text{Pu} : ^{240}\text{Pu} = 5 : 1$ 、平均プルトニウム濃度 70 gPu/l、平板状、厚さ 8 cm、水反射体付き）の最適濃度分布

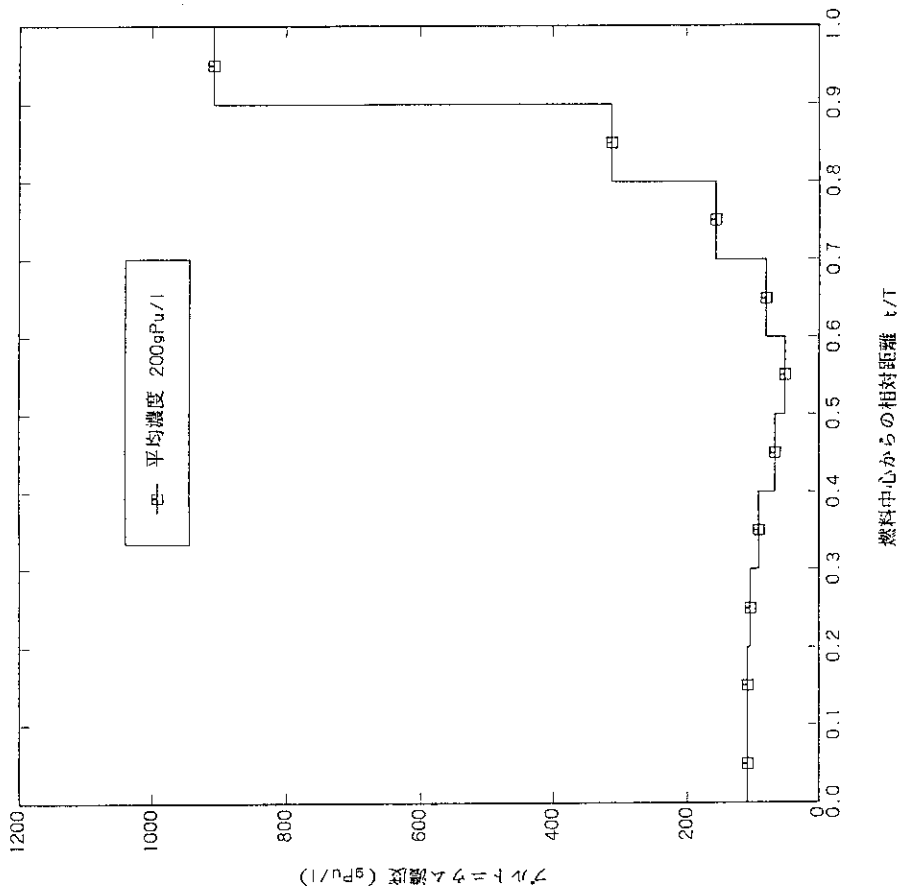


図 4.7

OPT-Dコードで算出した硝酸プルトニウム水溶液 ( $^{239}\text{Pu} : ^{240}\text{Pu}$  = 5 : 1、平均プルトニウム濃度  $100\text{gPu}/\ell$ 、平板状、厚さ  $8\text{ cm}$ 、水反射体付き) の最適濃度分布

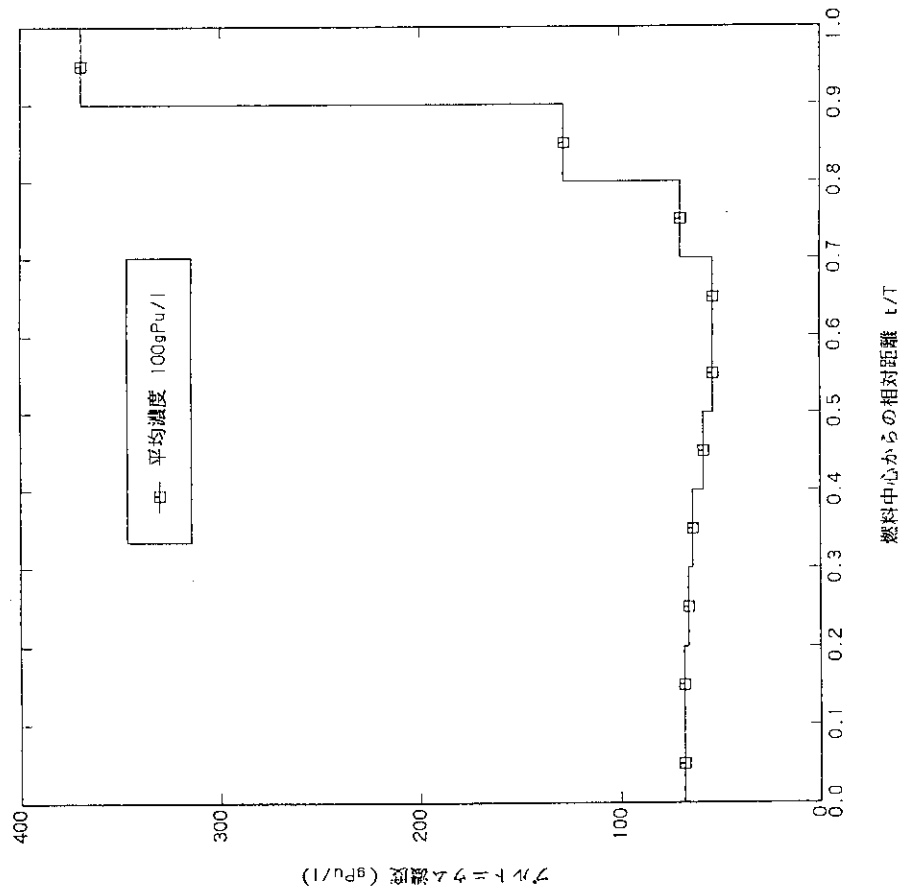


図 4.8

OPT-Dコードで算出した硝酸プルトニウム水溶液 ( $^{239}\text{Pu} : ^{240}\text{Pu}$  = 5 : 1、平均プルトニウム濃度  $200\text{gPu}/\ell$ 、平板状、厚さ  $8\text{ cm}$ 、水反射体付き) の最適濃度分布

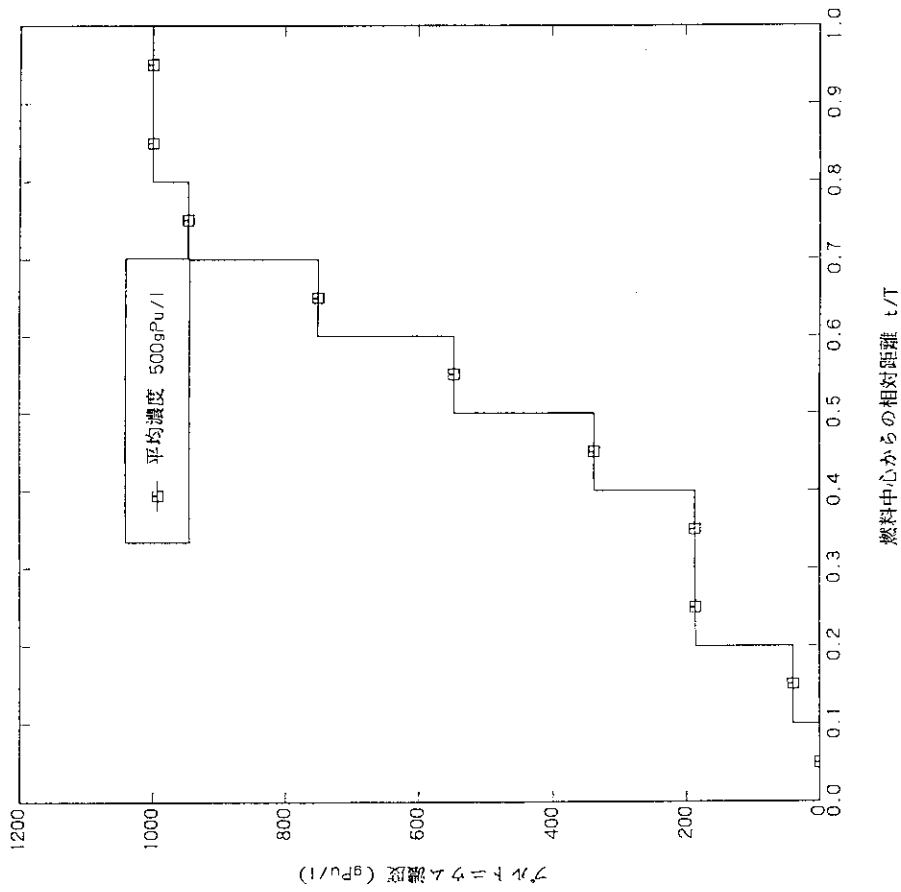


図 4.10

OPT-Dコードで算出した硝酸プルトニウム水溶液 ( $^{239}\text{Pu} : ^{240}\text{Pu} = 5 : 1$ 、平均プルトニウム濃度  $500\text{gPu}/\ell$ 、平板状、厚さ  $8\text{ cm}$ 、水反射体付き) の最適濃度分布

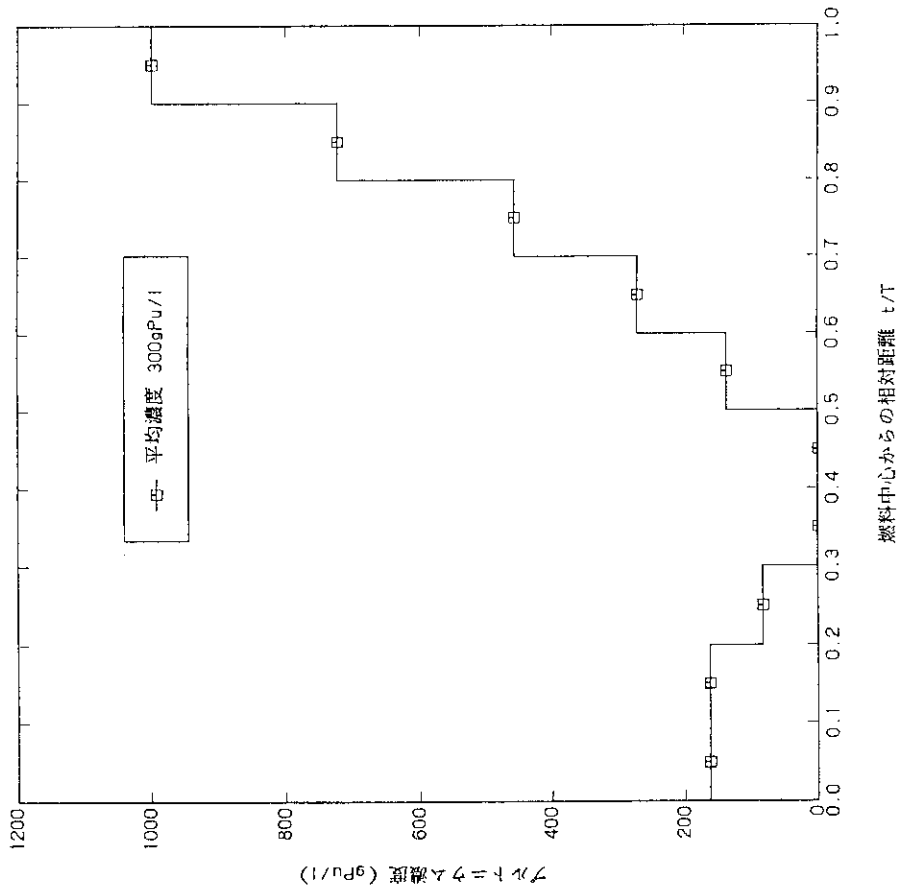


図 4.9

OPT-Dコードで算出した硝酸プルトニウム水溶液 ( $^{239}\text{Pu} : ^{240}\text{Pu} = 5 : 1$ 、平均プルトニウム濃度  $300\text{gPu}/\ell$ 、平板状、厚さ  $8\text{ cm}$ 、水反射体付き) の最適濃度分布

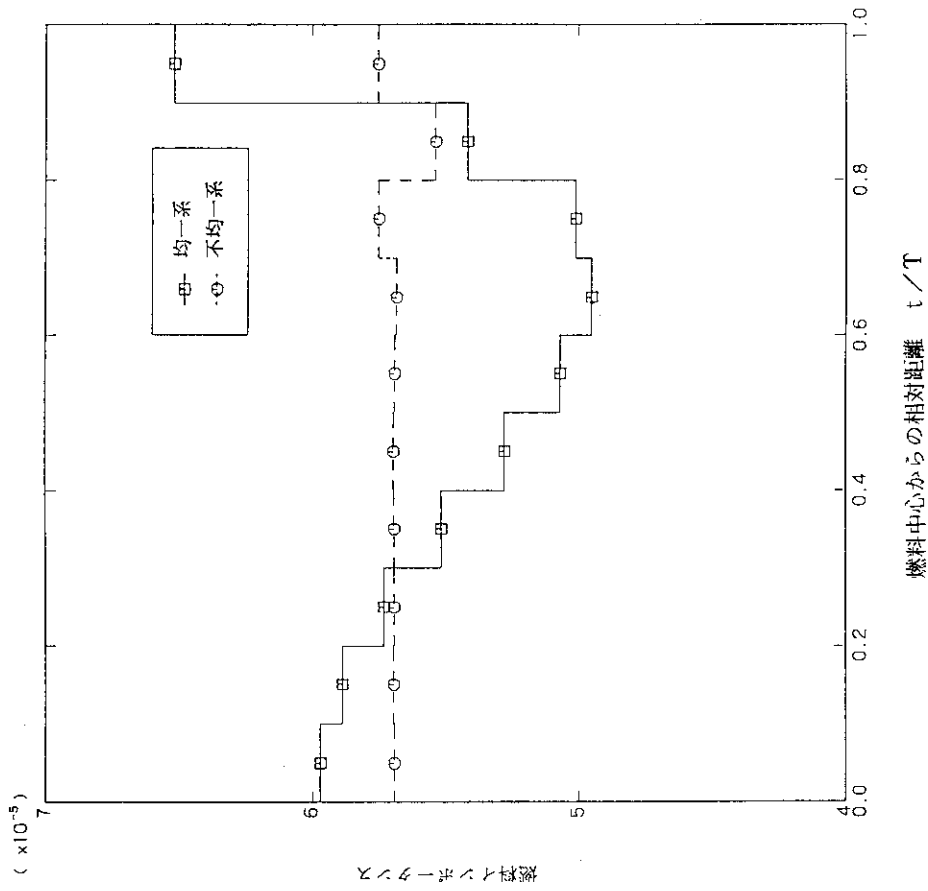


図 4.11 OPT-Dコードで算出した硝酸ウラニル水溶液 (ウラン濃縮度 5 wt%, 平均ウラン濃度 300 gU/l、厚さ 18cmの平板状、水反射体付き) の燃料イオン化率分布

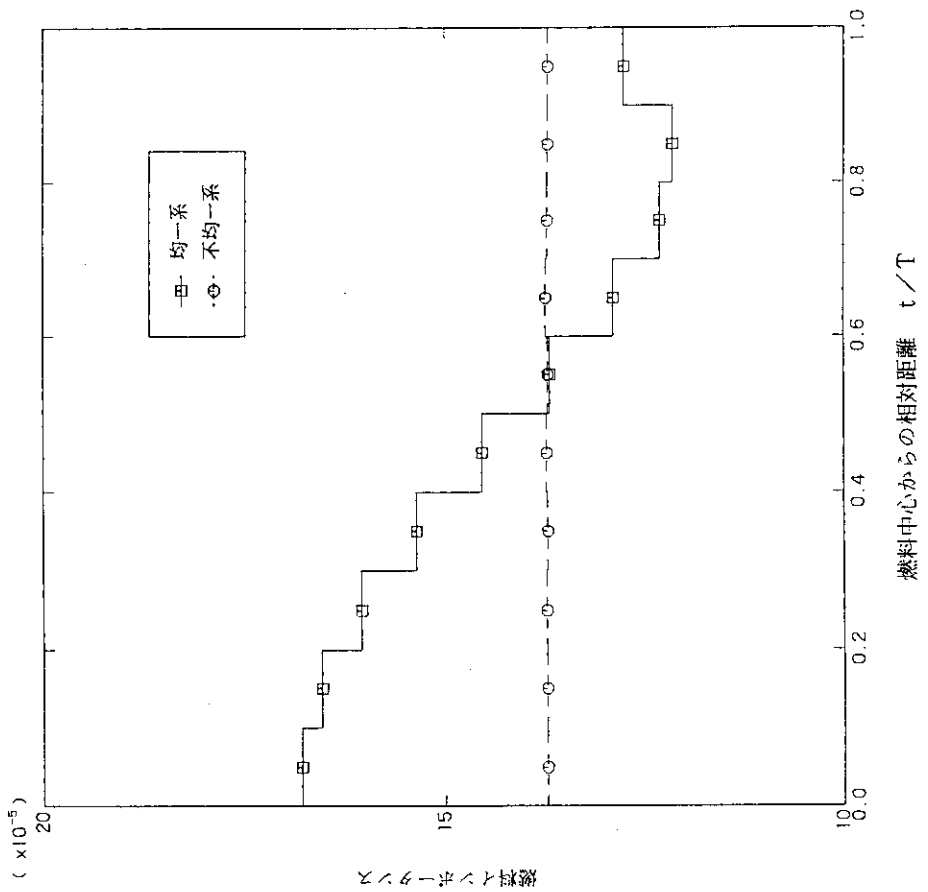


図 4.12 OPT-Dコードで算出した硝酸ウラニル水溶液 (ウラン濃縮度 5 wt%, 平均ウラン濃度 500 gU/l、厚さ 18cmの平板状、水反射体付き) の燃料イオン化率分布

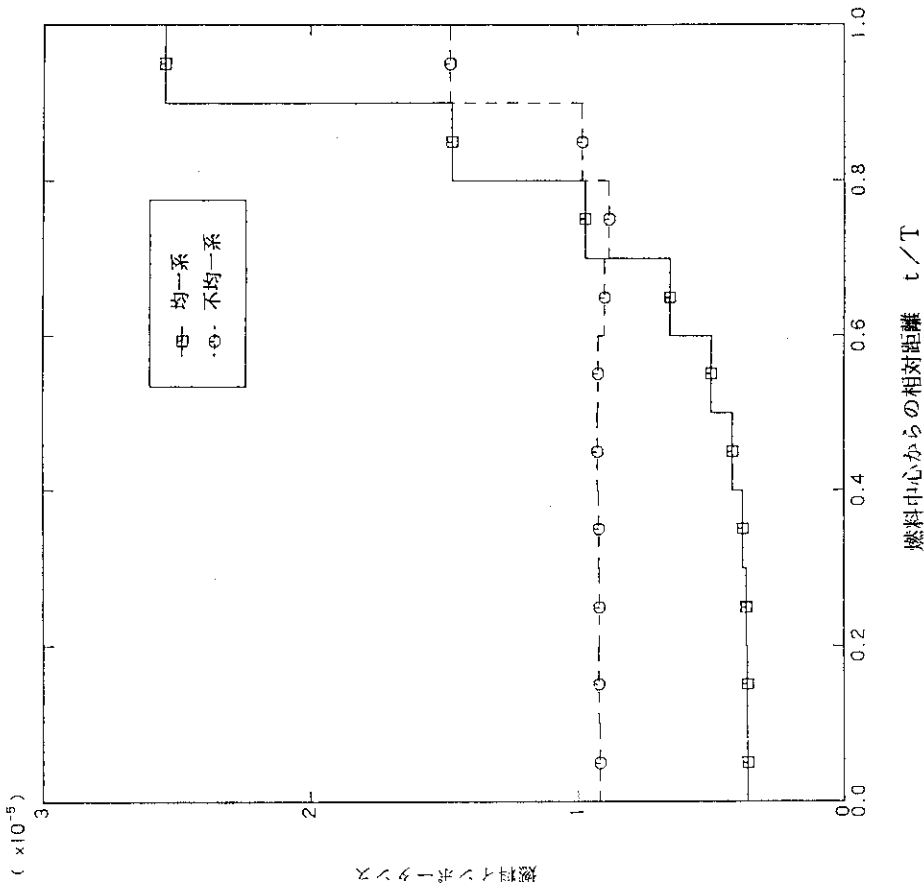


図 4.13

OPT-Dコードで算出した硝酸ウラニル水溶液 (ウラン濃縮度 5 wt%、平均ウラン濃度 700 gU/l、厚さ 18cmの平板状、水放射体付き) の燃料イオンボーンタンス分布

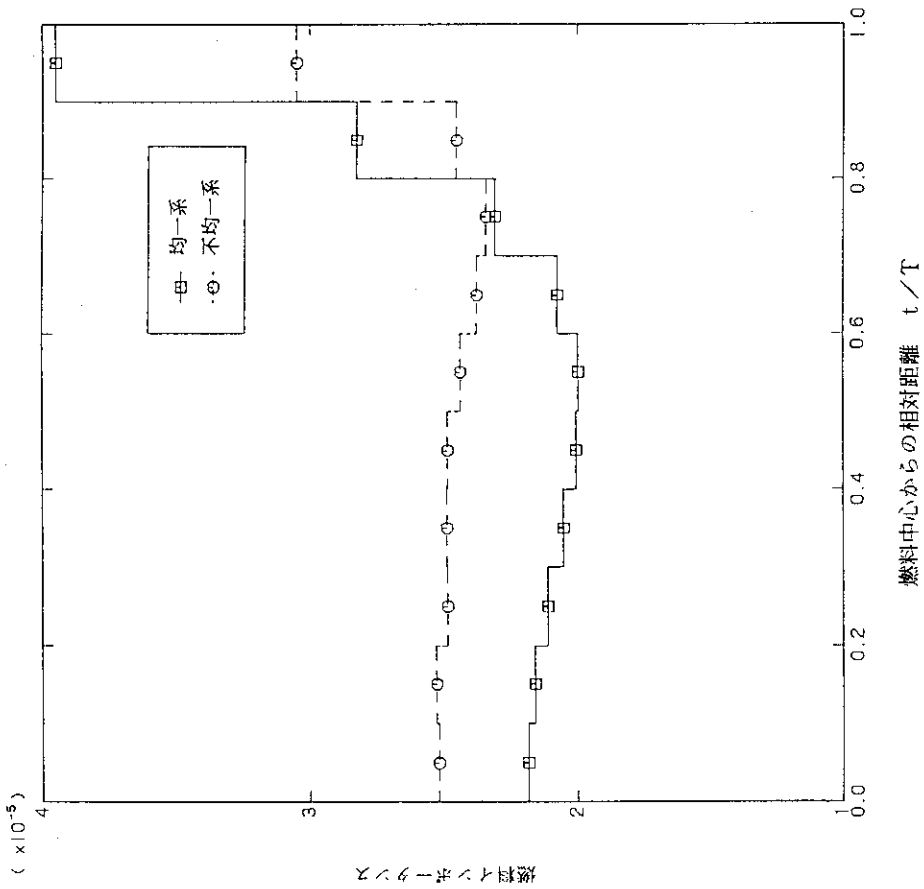


図 4.14

OPT-Dコードで算出した硝酸ウラニル水溶液 (ウラン濃縮度 5 wt%、平均ウラン濃度 900 gU/l、厚さ 18cmの平板状、水放射体付き) の燃料イオンボーンタンス分布

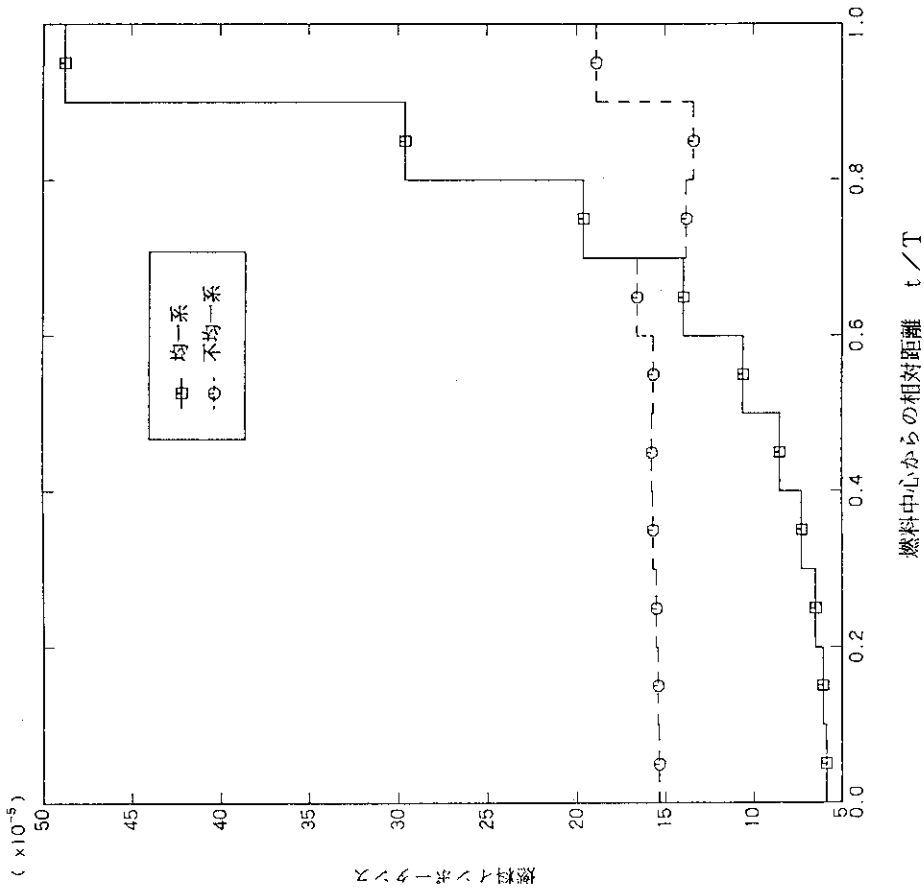


図 4.15

OPT-Dコードで算出した硝酸ウラニル水溶液（ウラン濃縮度 5 wt%、平均ウラン濃度 1100 gU/l、厚さ 18 cm の平板状、水反射体付き）の燃料イオンポータンス分布

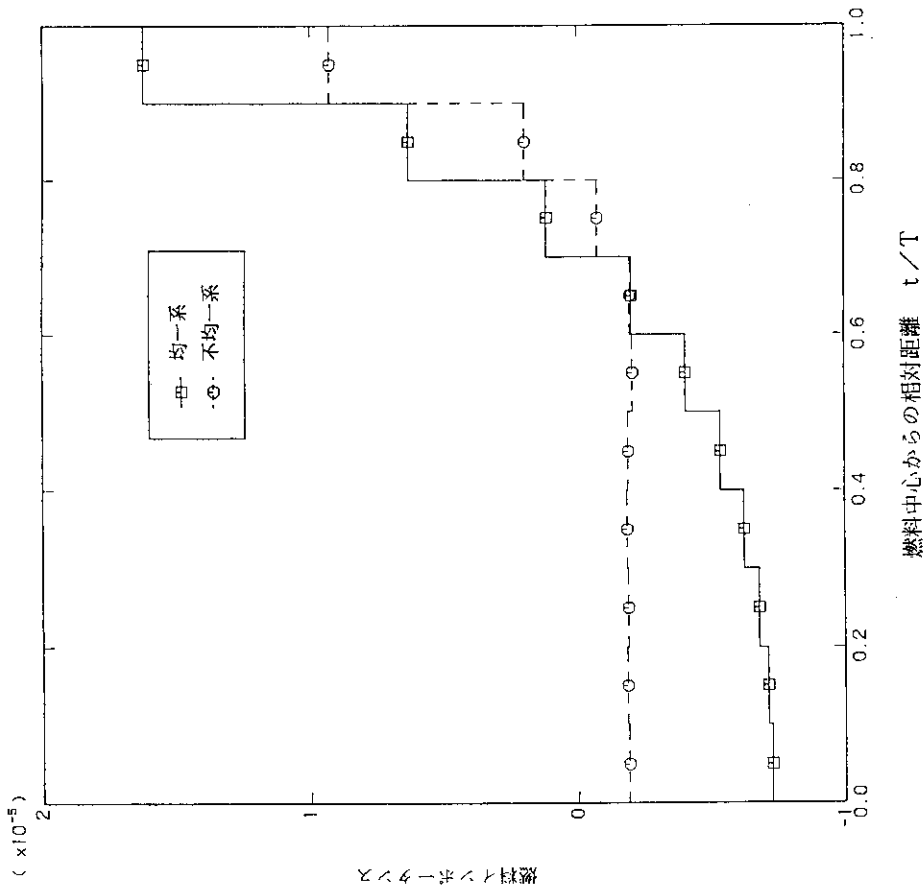


図 4.16

OPT-Dコードで算出した硝酸プルトニウム水溶液 ( $^{239}\text{Pu} : ^{240}\text{Pu} = 5 : 1$ 、平均プルトニウム濃度 70 gPu/l、厚さ 8 cm の平板状、水反射体付き) の燃料イオンポータンス分布



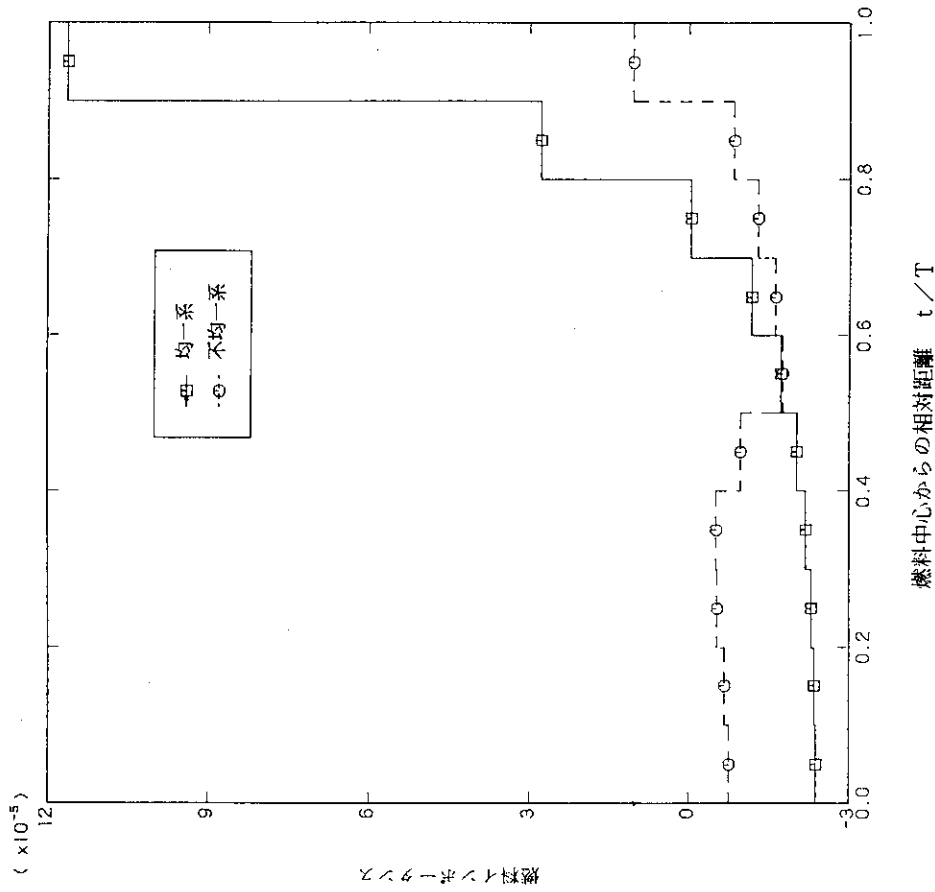


図 4.17

OPT-Dコードで算出した硝酸プルトニウム水溶液 ( $^{239}\text{Pu} : ^{240}\text{Pu} = 5 : 1$ 、平均プルトニウム濃度  $100\text{gPu}/\ell$ 、厚さ  $8\text{cm}$ の平板状、水反射体付き) の燃料イソトプ濃度分布

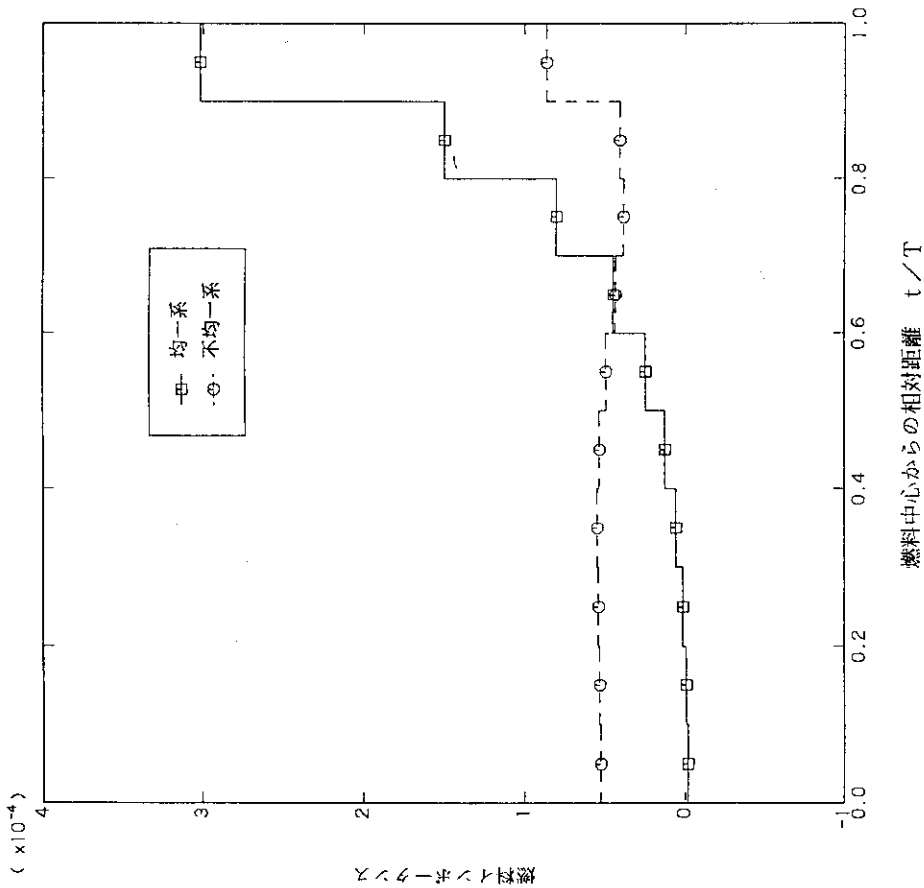


図 4.18

OPT-Dコードで算出した硝酸プルトニウム水溶液 ( $^{239}\text{Pu} : ^{240}\text{Pu} = 5 : 1$ 、平均プルトニウム濃度  $200\text{gPu}/\ell$ 、厚さ  $8\text{cm}$ の平板状、水反射体付き) の燃料イソトプ濃度分布

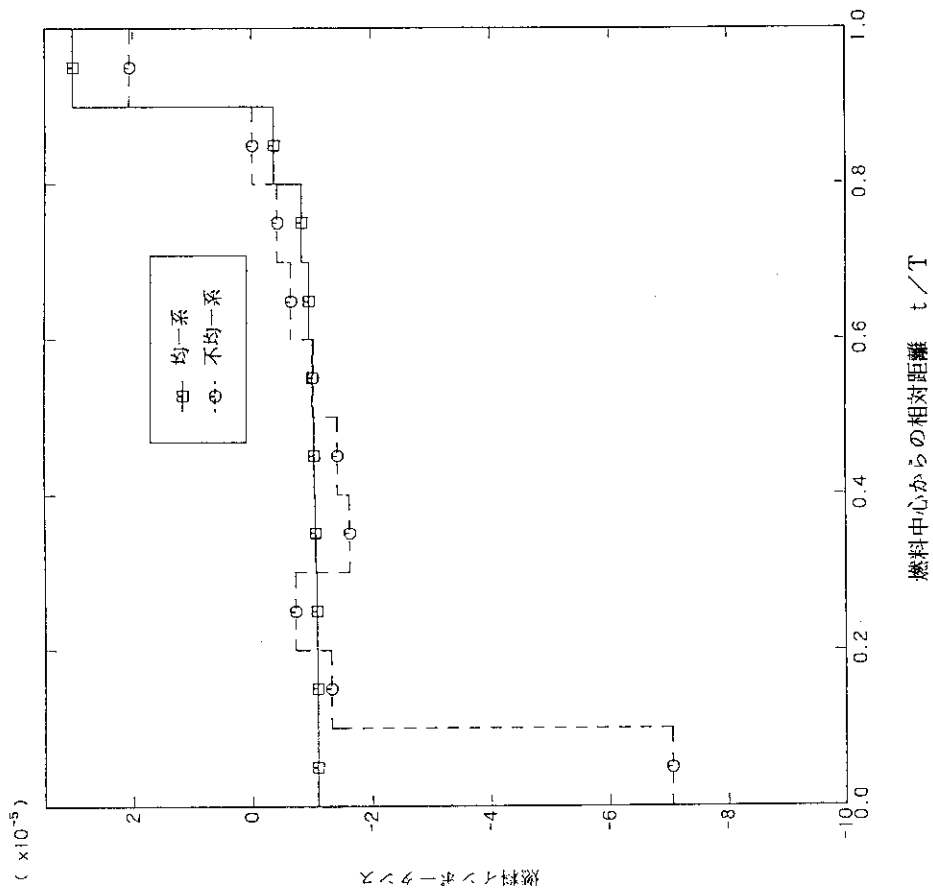


図 4.20

OPT-Dコードで算出した硝酸プルトニウム水溶液 ( $^{239}\text{Pu} : ^{240}\text{Pu} = 5 : 1$ 、平均プルトニウム濃度  $500\text{gPu}/\ell$ 、厚さ  $8\text{cm}$ の平板状、水放射体付き) の燃料イオンポータンス分布

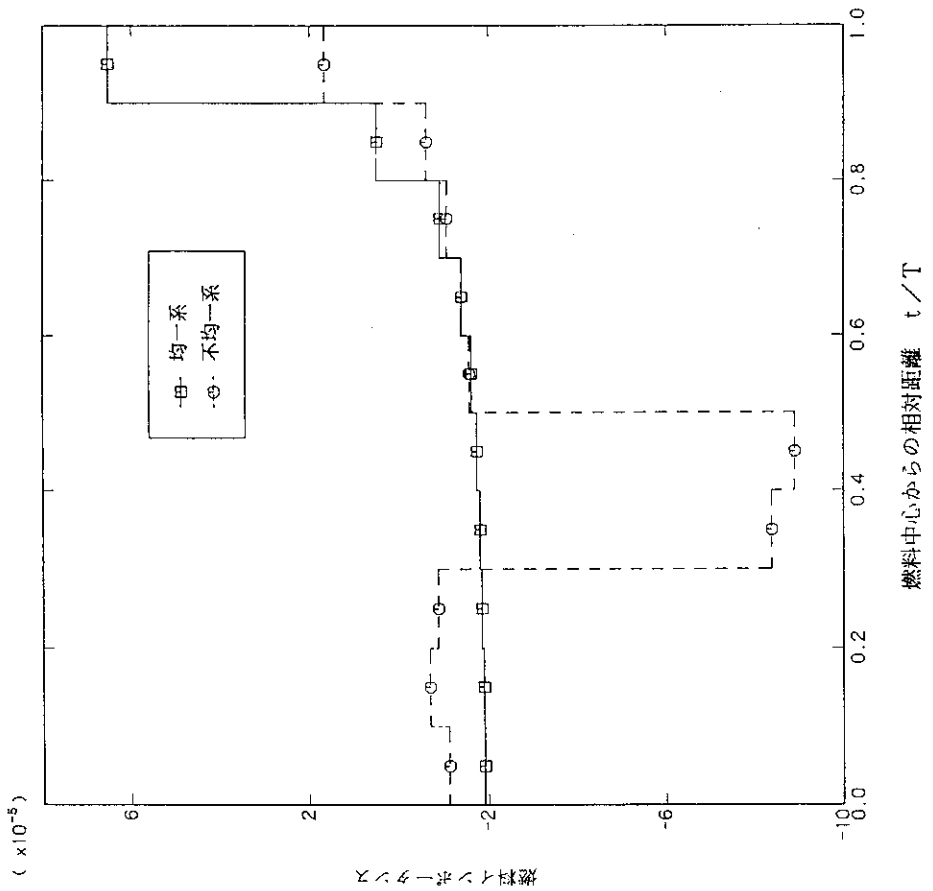


図 4.19

OPT-Dコードで算出した硝酸プルトニウム水溶液 ( $^{239}\text{Pu} : ^{240}\text{Pu} = 5 : 1$ 、平均プルトニウム濃度  $300\text{gPu}/\ell$ 、厚さ  $8\text{cm}$ の平板状、水放射体付き) の燃料イオンポータンス分布

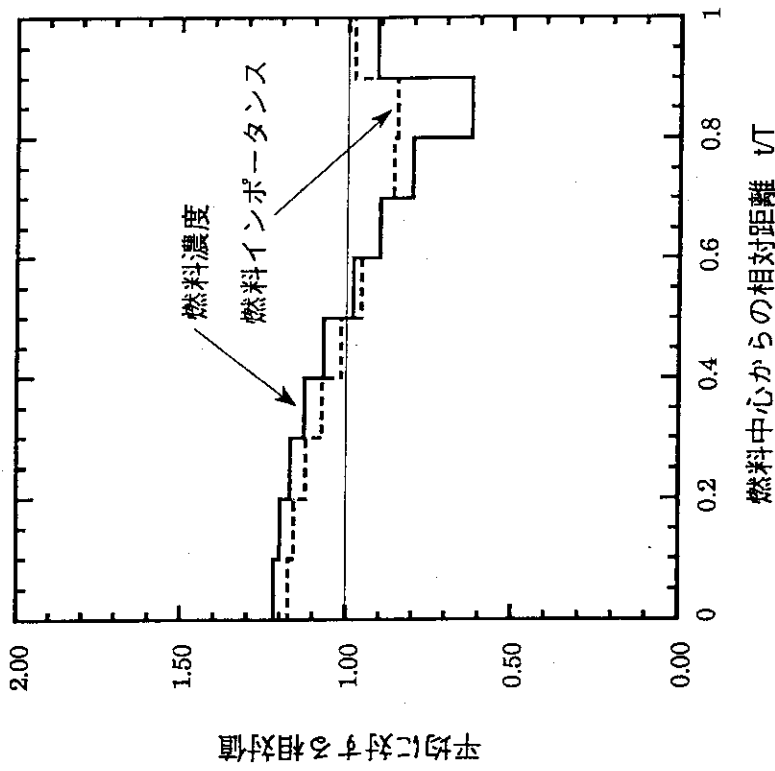


図 4.21 OPT-D コードで算出した均一燃料濃度分布下での燃料イオンポータンス分布と最適燃料濃度分布との比較  
 (ウラン濃度 5 wt% の硝酸ウラン水溶液、平均ウラン濃度 300gU/l、厚さ 18cm の平板状、水放射体付き)

## 5. 二酸化ウラン-水均質混合燃料における燃料濃度の不均一効果

十分な水反射体が付いた球状及び平板状燃料体系に対する燃料濃度不均一効果に関して前章までに記した計算結果をもとにすると、最適燃料濃度分布は、(1)中央が高くなるもの、(2)周辺が高くなるもの、(3)中央と周辺が両方高くなるものの3つの型に分類される。過減速の燃料では(1)の分布が、減速不足の燃料では(3)の分布が、その中間では(2)の分布で実効増倍率が大きくなる。この傾向が燃料の大きさ・形状・反射条件へ依存しないかどうか、さらには不均一効果の大きさを調べた。

前2章では溶液燃料を主な対象にしていた。しかし、拡散現象のため、溶液燃料では燃料濃度が不均一になる現象が起きるとは通常では考え難い。これに対して、二酸化ウラン-水のようなスラリー燃料では拡散が起きにくく、均一性の担保が難しいと考えられる。このため、本章では5wt%濃縮の均質二酸化ウラン-水(ボイドなし)燃料系を対象とした。燃料体系を表5.1に示す。なお、この表にある燃料体系のうち、直径36cmの球、直径24cmの円柱及び厚さ10cmの平板燃料は、最適減速状態(燃料濃度2,000gU/l)で、十分な厚さの水反射体で囲まれたときにほぼ同一の中性子増倍率を与える寸法になっている。

### (1) 計算方法

前章までと同様に、最適燃料濃度分布計算コードOPT-Dを用いて最適燃料濃度分布及び対応する中性子増倍率を求めた。なお、OPT-Dコードに課した収束条件を表5.2に示す。

### (2) 計算結果

5wt%ウラン濃縮の均質二酸化ウラン-水(ボイドなし)の最適燃料濃度分布についての計算結果を表5.3~表5.10に示す。このうち、表5.3は直径36cmの球状炉心で十分な厚さの水反射体で囲まれた体系のものである。この体系を今回標準とした。球直径を30cmと小さくしたもの、40cmと大きくしたものの結果がそれぞれ表5.4及び表5.5である。また、球直径36cmで反射体がないときの最適燃料濃度分布の計算結果

が表5.6である。燃料領域が直径24cmの円柱形状で、十分な厚さの水反射体で囲まれた体系の計算結果が表5.7である。また、厚さ10cmの平板形状で、十分な厚さの水反射体が両側に付いた体系、片側のみに付いた体系及び全くない体系の計算結果がそれぞれ表5.8から表5.10である。表5.3から表5.10に対応する最適燃料濃度分布を図5.1から図5.8に示す。これらの図を中央高( $\alpha$ )、周辺高( $\beta$ )、中央及び周辺高( $\gamma$ )の3つの型に分類して一覧にしたのが表5.11である。

図5.1から明かなように、直径36cmの球形状炉心で水反射体付きの体系では、平均燃料濃度が700gU/ℓから2000gU/ℓの間では、最適燃料濃度分布は中央及び周辺高の分布になるのに対して、3000gU/ℓでは周辺高の分布になる。均質二酸化ウラン-水燃料における無限増倍率とH/U原子個数比との関係を図5.9に示す。本計算で対象とした濃縮度5wt%は図の14番に対応する。最適減速となるのは、H/U=10のときである。ウラン濃度とH/U原子個数比の関係を図5.10に示す。この図によると、H/U=10は、燃料濃度にして2000gU/ℓに対応する。すなわち、均質二酸化ウラン-水は2000gU/ℓ程度で最適燃料濃度となる。このため、直径36cmの球形状炉心で水反射体付きの体系における最適燃料濃度分布は、この章の冒頭に挙げた型分類と一致する。ただし、どの程度過減速となったときに中央高の分布が現れるかは、今回の計算からは分らない。

炉心球直径を40cmと大きくしたときの最適燃料濃度分布は、直径36cmと同じ型となった。直径を30cmと小さくしたときには、平均燃料濃度が3000gU/ℓと高くても、周辺高とともに中央高の傾向が重なって現れた。この傾向は炉心が平板状(図5.6)の場合にも見られるし、円柱状(図5.5)でも兆しが見られる。

炉心の球直径36cmで反射体がない体系での最適燃料濃度分布(図5.4)では、平均燃料濃度が低い間は中央高となるが、平均燃料濃度が2gU/cm<sup>3</sup>以上になると、余った燃料を外側に追いやる分布になる。この傾向は平板形状(図5.8)でも変わらない。

平板炉心で片側のみに反射体が付いた体系(図5.7)では、反射体側に燃料を集める分布になっている。平均濃度2000gU/ℓ以下では、さらに反射体のない側に自ら反射体を形成している。

中性子増倍率についての計算結果を表5.12から表5.19に示す。これらの結果を図示したのが図5.11から図5.17である(ただし、平板状炉心で反射体のない場合は図示していない)。

球直径の違いが不均一効果に与える影響を図5.18に示す。平均燃料濃度が低いときには燃料直径が大きい方が不均一効果が大きい、高くなると逆に燃料直径が小さい方が不均一効果が大きくなる。これは、平均燃料濃度が低い（過減速）ときは大きい方が燃料の融通が利き、平均燃料濃度が高い（減速不足）と小さい方が表面近傍の割合が相対的に多いためと考えられる。

球（直径36cm）、円柱（直径24cm）、平板（厚さ10cm）の3つの形状では、この順で次第に反射体近傍の燃料濃度を上昇させ易い。2gU/cm<sup>3</sup>では不均一を考慮することによる中性子増倍率の増加割合、すなわち不均一効果も、この順で1.5%、2.2%、3.7%と大きくなっていく。

反射体が付いた体系での最適減速燃料での不均一効果の程度は上に記したように高々4%である。これに対して、厚さ10cmの平板燃料の片側に反射体が付いた体系の不均一効果は特に大きい。これは図5.17でも明かである。今回の計算では、いずれも極小値1つまでという条件を課した。片側にのみ反射体が付いた体系では、極小値を持たないとする条件設定も可能なので、この条件を課して計算した。得られた最適燃料濃度分布を表5.20及び図5.19に、また、中性子増倍率を表5.21及び図5.20に示す。最適燃料濃度分布は反射体近傍の燃料濃度を高くし、また反射体のない側の燃料濃度を下げて、実質的な水反射体を自ら作り出している。なお、平均燃料濃度が3000gU/lのときには、平坦な燃料分布を仮定して求めた燃料インポートンス分布が極小値を持つため、平坦な燃料分布が最適燃料濃度分布として求まった。これ以外の平均燃料濃度における中性子増倍率の値は、極小値を1つ認めた場合（表5.18及び図5.17）と大きな相異はなかった。

なお、表5.19に示したように、平板厚さ10cmで水反射体が付かない体系において得られた不均一分布は、燃料分布が均一の場合よりも中性子増倍率が低くなった。これは計算コードに原因するものと考えられるが、その詳細はいまのところ不明である。

### (3) 結論

5wt%ウラン濃縮の二酸化ウラン-水（ボイドなし）燃料を対象として、燃料の大きさ、形状、反射条件を変えて最適燃料濃度分布及び対応する中性子増倍率を計算した。その結果、次のことが明かとなった。

- 1) 反射体がない燃料体系では、減速度によって最適燃料濃度分布が2つの型に区分された。過減速燃料では、中央が高くなる燃料分布が最適燃料濃度分布となった。これに対して、減速度が最適減速より低い燃料体系では、周辺部の燃料濃度が高くなる分布が最適燃料濃度分布となった。反射体が付いた燃料では、過減速であっても、中央部とともに反射体の付いた周辺部の燃料濃度を高める第3の燃料分布が存在する。
- 2) 反射体が付いた球状燃料においては、平均燃料濃度が低い場合は燃料直径が大きい方が中性子増倍率が大きいが、平均燃料濃度が高くなると燃料直径が小さい方が中性子増倍率が大きくなる。また、球よりも円柱、さらには平板形状の方が不均一効果が大きい。平板状燃料で片側に水反射体が付いた体系では不均一効果が特に大きい。これは、燃料濃度を高めることが、反射体のない側に実質的な反射体を作り出すことになるためと考えられる。

表 5.1 均質二酸化ウラン-水 (5 wt%ウラン濃縮) の燃料濃度不均一効果についての計算対象

形 状	直径または厚さ [cm]	水反射体 の 有 無	燃 料 濃 度 [g U / ℓ]
球	36	有り	700, 1000, 1500, 2000, 3000
球	30	有り	700, 1000, 1500, 2000, 3000
球	40	有り	700, 1000, 1500, 2000, 3000
球	36	無し	700, 1000, 1500, 2000, 3000
円柱	24	有り	700, 1000, 1500, 2000, 3000
平板	10	両側有り	700, 1000, 1500, 2000, 3000
平板	10	片側有り	700, 1000, 1500, 2000, 3000
平板	10	無し	700, 1000, 1500, 2000, 3000

表 5.2 OPT-Dコードの収束条件

核定数ライブラリー:	26群MGCLライブラリー
燃料の最大濃度	: 9.66 gU/cm <sup>3</sup> (均質二酸化ウラン-水)
収束判定値	: 1.0E-5 (中性子束、固有値)
	: 1.0E-3 (中性子インポートンス、燃料濃度)
束縛条件	: 燃料分布中の極小値を2つ以上持たない



表 5.3 5wt%濃縮均質二酸化ウラン-水の最適濃度分布 (球直径36cm、水反射体あり)

単位 (gU/cm<sup>3</sup>)

平均濃度 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域1 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域2 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域3 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域4 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域5 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域6 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域7 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域8 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域9 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域10 (gU/cm <sup>3</sup> )
0.7	1.1233	0.8806	0.8657	0.7235	0.6349	0.5908	0.5385	0.5327	0.0	1.1101
1.0	1.2559	1.0757	1.0730	0.9588	0.9064	0.8144	0.8062	0.6614	0.3124	2.1338
1.5	1.5587	1.4176	1.4162	1.2823	1.2603	1.1899	1.1884	0.8385	0.8679	3.9802
2.0	1.7579	1.6804	1.6797	1.6421	1.5662	1.5086	1.5449	1.7820	2.4962	4.3600
3.0	1.9109	1.9526	1.9546	2.1159	2.3973	2.7750	3.2151	3.7234	4.3753	5.5800

註 燃料領域の分割は体積が等しくなるように10分割している。  
均質二酸化ウラン-水の最大密度として理論密度を仮定している。  
束縛条件として燃料分布中の極小値は1点しか許されていない。

表 5.4 5wt%濃縮均質二酸化ウラン-水の最適濃度分布 (球直径30cm、水反射体あり)

単位 (gU/cm<sup>3</sup>)

平均濃度 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域1 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域2 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域3 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域4 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域5 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域6 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域7 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域8 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域9 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域10 (gU/cm <sup>3</sup> )
0.7	1.0395	0.8242	0.8009	0.6876	0.6291	0.5831	0.4765	0.3975	0.4542	1.1084
1.0	1.2155	1.0276	1.0275	0.8868	0.8517	0.7797	0.7317	0.5831	0.5155	2.3849
1.5	1.4758	1.3316	1.3275	1.2307	1.1790	1.1760	1.0147	0.7943	1.2600	4.2103
2.0	1.6785	1.6049	1.6036	1.5238	1.4640	1.4132	1.4812	1.8039	2.6667	4.7601
3.0	1.9697	1.9395	1.7767	1.7544	1.9719	2.4027	3.0122	3.7693	4.8035	6.6000

註 燃料領域の分割は体積が等しくなるように10分割している。  
均質二酸化ウラン-水の最大密度として理論密度を仮定している。  
束縛条件として燃料分布中の極小値は1点しか許されていない。

表 5.5 5 wt%濃縮均質二酸化ウラン-水の最適濃度分布 (球直径40cm、水反射体あり)

単位 (gU/cm<sup>3</sup>)

平均濃度 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域1 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域2 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域3 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域4 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域5 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域6 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域7 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域8 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域9 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域10 (gU/cm <sup>3</sup> )
0.7	1.1856	0.9347	0.8889	0.7523	0.6629	0.5894	0.5250	0.5221	0.0	0.9393
1.0	1.3495	1.1508	1.1074	1.0229	0.9076	0.8330	0.8010	0.7977	0.0	2.0302
1.5	1.5508	1.4487	1.4454	1.3635	1.2827	1.2415	1.2246	0.9374	0.7613	3.7741
2.0	1.8109	1.7108	1.6798	1.6491	1.5947	1.5696	1.4706	1.2498	1.8789	5.3857
3.0	1.9472	1.9730	1.9894	2.1655	2.4521	2.8272	3.2461	3.7147	4.2929	5.3919

註 燃料領域の分割は体積が等しくなるように10分割している。  
均質二酸化ウラン-水の最大密度として理論密度を仮定している。  
束縛条件として燃料分布中の極小値は1点しか許されていない。

表 5.6 5 wt%濃縮均質二酸化ウラン-水の最適濃度分布 (球直径36cm、水反射体なし)

単位 (gU/cm<sup>3</sup>)

平均濃度 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域1 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域2 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域3 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域4 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域5 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域6 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域7 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域8 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域9 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域10 (gU/cm <sup>3</sup> )
0.7	1.5959	1.3876	1.3489	1.0896	1.0887	0.4893	0.0	0.0	0.0	0.0
1.0	1.6920	1.6025	1.5992	1.4735	1.2737	0.9972	0.6798	0.3922	0.1834	0.1065
1.5	1.7127	1.6671	1.6426	1.5687	1.4910	1.4264	1.3825	1.3627	1.3641	1.3821
2.0	1.7836	1.6776	1.6708	1.5832	1.6101	1.7706	2.0633	2.3721	2.6318	2.8310
3.0	1.7474	1.7228	1.5575	1.6099	2.2496	3.6990	3.8555	4.4040	4.7675	4.9868

註 燃料領域の分割は体積が等しくなるように10分割している。  
均質二酸化ウラン-水の最大密度として理論密度を仮定している。  
束縛条件として燃料分布中の極小値は1点しか許されていない。

表 5.7 5 wt%濃縮均質二酸化ウラン-水の最適濃度分布 (円柱直径24cm、水反射体あり)

単位 (gU/cm<sup>3</sup>)

平均濃度 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域1 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域2 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域3 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域4 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域5 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域6 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域7 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域8 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域9 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域10 (gU/cm <sup>3</sup> )
0.7	0.8706	0.7870	0.7503	0.6911	0.6149	0.5870	0.5816	0.5757	0.0	1.5418
1.0	1.0891	1.0157	1.0018	0.8998	0.8755	0.8073	0.8058	0.6095	0.4574	2.4381
1.5	1.4102	1.3437	1.3339	1.2434	1.2313	1.1943	1.1843	0.8053	0.9266	4.3271
2.0	1.6797	1.6452	1.6145	1.6086	1.5357	1.4721	1.3683	1.4917	2.3440	5.2400
3.0	1.9924	1.9915	1.9588	1.9495	2.0431	2.3273	2.8224	3.5524	4.6425	6.7200

註 燃料領域の分割は体積が等しくなるように10分割している。  
均質二酸化ウラン-水の最大密度として理論密度を仮定している。  
束縛条件として燃料分布中の極小値は1点しか許されていない。

表 5.8 5 wt%濃縮均質二酸化ウラン-水の最適濃度分布 (平板厚さ10cm、両側水反射体あり)

単位 (gU/cm<sup>3</sup>)

平均濃度 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域1 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域2 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域3 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域4 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域5 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域6 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域7 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域8 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域9 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域10 (gU/cm <sup>3</sup> )
0.7	0.5954	0.5932	0.5903	0.5891	0.5887	0.5422	0.4855	0.4464	0.6394	1.9298
1.0	0.8093	0.8078	0.8073	0.8042	0.7843	0.7824	0.6618	0.5706	0.8689	3.1034
1.5	1.1747	1.1744	1.1592	1.1158	1.0816	1.0496	1.0795	1.2929	1.9121	3.9600
2.0	1.4800	1.4791	1.4686	1.4452	1.3799	1.3086	1.2836	1.5379	2.6178	6.0001
3.0	1.9883	1.9077	1.9022	1.8326	1.6873	1.5343	1.8358	2.7227	4.9892	9.6000

註 燃料領域の分割は体積が等しくなるように10分割している。  
均質二酸化ウラン-水の最大密度として理論密度を仮定している。  
束縛条件として燃料分布中の極小値は1点しか許されていない。

表 5.9 5 wt%濃縮均質二酸化ウラン-水の最適濃度分布 (平板厚さ10cm、片側水反射体あり)

単位 (gU/cm<sup>3</sup>)

平均濃度 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域1 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域2 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域3 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域4 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域5 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域6 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域7 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域8 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域9 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域10 (gU/cm <sup>3</sup> )
0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4171	0.4179	0.5567	0.0	5.6083
1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2833	0.5863	0.5869	0.7791	0.0	7.7644
1.5	0.0	0.0	0.0	0.5571	0.9124	0.9687	0.9739	1.9280	0.0	9.6600
2.0	0.0	0.0	0.4025	1.3213	1.4855	1.4860	1.9532	1.0035	2.6879	9.6000
3.0	2.7368	2.3946	2.2118	2.0279	1.9284	1.8698	1.8630	1.3075	4.0003	9.6600

註 燃料領域の分割は体積が等しくなるように10分割している。  
均質二酸化ウラン-水の最大密度として理論密度を仮定している。  
束縛条件として燃料分布中の極小値は1点しか許されていない。

表 5.10 5 wt%濃縮均質二酸化ウラン-水の最適濃度分布 (平板厚さ10cm、水反射体なし)

単位 (gU/cm<sup>3</sup>)

平均濃度 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域1 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域2 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域3 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域4 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域5 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域6 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域7 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域8 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域9 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域10 (gU/cm <sup>3</sup> )
0.7	1.3152	1.3005	1.2751	1.2582	1.2582	0.5943	0.0	0.0	0.0	0.0
1.0	1.5840	1.5844	1.5860	1.5988	1.5988	1.4298	0.6332	0.0	0.0	0.0
1.5	1.7472	1.7475	1.7537	1.7771	1.8083	1.8040	1.6846	1.3340	0.8636	0.4800
2.0	1.7449	1.7217	1.6900	1.6880	1.6861	1.7262	1.9525	2.2971	2.6346	2.8589
3.0	1.7177	1.7141	1.5674	1.4515	1.6134	2.2795	3.3882	4.5785	5.5698	6.1200

註 燃料領域の分割は体積が等しくなるように10分割している。  
均質二酸化ウラン-水の最大密度として理論密度を仮定している。  
束縛条件として燃料分布中の極小値は1点しか許されていない。

表 5.11 OPT-Dコードで算出したウラン濃縮度 5 wt%の均質二酸化ウラン-水の最適燃料濃度分布

形状	直径または厚さ [cm]	水反射体 の有無	燃料濃度 [gU/l]				
			700	1000	1500	2000	3000
球	36	有り	$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$	$\beta$
球	30	有り	$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$
球	40	有り	$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$	$\beta$
球	36	無し	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	$\beta$	$\beta$
円柱	24	有り	$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$	$\beta$
平板	10	両側有り	$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$
平板	10	片側有り	$\beta$	$\beta$	$\beta$	$\beta$	$\gamma$
平板	10	無し	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	$\beta$	$\beta$

註 燃料分布型として、以下の記号を用いた。

$\alpha$  : 中央高、 $\beta$  : 周辺高、 $\gamma$  : 中央及び周辺高。

表 5.12 5 wt%濃縮均質二酸化ウラン-水の実効増倍率 (球直径36cm、水反射体あり)

平均濃度 (gU/l)	均一系	不均一系 (最適分布)	増加割合 (% $\Delta k/k$ )
700	0.79951	0.81044	1.37
1000	0.86158	0.86760	0.70
1500	0.90646	0.91538	0.98
2000	0.91970	0.93304	1.45
3000	0.90892	0.93590	2.97

表 5.13 5 wt%濃縮均質二酸化ウラン-水の実効増倍率 (球直径30cm、水反射体あり)

平均濃度 (gU/l)	均一系	不均一系 (最適分布)	増加割合 (% $\Delta k/k$ )
700	0.70146	0.70751	0.86
1000	0.75943	0.76538	0.78
1500	0.80241	0.81403	1.45
2000	0.81602	0.83309	2.09
3000	0.80838	0.84050	3.97

表 5.14 5 wt%濃縮均質二酸化ウラン-水の実効増倍率 (球直径40cm、水反射体あり)

平均濃度 (gU/l)	均一系	不均一系 (最適分布)	増加割合 (% $\Delta k/k$ )
700	0.85353	0.86795	1.69
1000	0.91792	0.92543	0.82
1500	0.96396	0.97141	0.77
2000	0.97714	0.99070	1.39
3000	0.96493	0.99040	2.64

表 5.15 5 wt %濃縮均質二酸化ウラン-水の実効増倍率 (球直径36cm、水反射体なし)

平均濃度 (gU/l)	均一系	不均一系 (最適分布)	増加割合 (% $\Delta k/k$ )
700	0.58923	0.64331	9.18
1000	0.62937	0.65169	3.55
1500	0.65762	0.65883	0.18
2000	0.66257	0.66434	0.27
3000	0.64254	0.67197	4.58

表 5.16 5 wt %濃縮均質二酸化ウラン-水の実効増倍率  
(円柱直径24cm、水反射体あり)

平均濃度 (gU/l)	均一系	不均一系 (最適分布)	増加割合 (% $\Delta k/k$ )
700	0.79055	0.79617	0.71
1000	0.85439	0.86159	0.84
1500	0.90174	0.91608	1.59
2000	0.91707	0.93726	2.20
3000	0.90991	0.94205	3.53

表 5.17 5 wt%濃縮均質二酸化ウラン-水の実効増倍率  
(平板厚さ10cm、両側水反射体あり)

平均濃度 (gU/l)	均一系	不均一系 (最適分布)	増加割合 (% $\Delta k/k$ )
700	0.75262	0.76545	1.70
1000	0.82123	0.84132	2.45
1500	0.87586	0.90098	2.87
2000	0.89751	0.93030	3.65
3000	0.90133	0.94511	4.86

表 5.18 5 wt%濃縮均質二酸化ウラン-水の実効増倍率  
(平板厚さ10cm、片側水反射体あり、極値1つのみ)

平均濃度 (gU/l)	均一系	不均一系 (最適分布)	増加割合 (% $\Delta k/k$ )
700	0.50383	0.74613	48.09
1000	0.57483	0.82629	43.75
1500	0.64922	0.89514	37.88
2000	0.69680	0.90692	30.15
3000	0.75632	0.91927	21.55



表 5.19 5 wt%濃縮均質二酸化ウラン-水の実効増倍率  
(平板厚さ10cm、水反射体なし)

平均濃度 (gU/l)	均一系	不均一系 (最適分布)	増加割合 (%Δk/k)
700	0.20203	0.21644	7.13
1000	0.22056	0.22530	2.15
1500	0.22206	0.22088	-0.53
2000	0.22250	0.22518	1.20
3000	0.21031	0.22951	9.13

表 5.20 5 wt%濃縮均質二酸化ウラン-水の最適濃度分布 (平板厚さ10cm、片側水反射体あり)

単位 (gU/cm<sup>3</sup>)

平均濃度 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域1 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域2 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域3 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域4 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域5 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域6 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域7 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域8 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域9 (gU/cm <sup>3</sup> )	領域10 (gU/cm <sup>3</sup> )
0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1782	0.4093	0.4644	0.4647	0.8016	4.6819
1.0	0.0	0.0	0.0	0.0030	0.4930	0.6339	0.6776	0.6776	1.1289	6.3862
1.5	0.0	0.0	0.0	0.5391	0.8181	0.9724	1.0122	1.0131	1.6284	9.0167
2.0	0.0270	0.3120	0.7265	1.0824	1.3257	1.4676	1.5065	1.5071	2.3851	9.6800
3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0

註 燃料領域の分割は体積が等しくなるように10分割している。  
均質二酸化ウラン-水の最大密度として理論密度を仮定している。  
束縛条件として燃料分布中の極値は許されていない。

表 5.21 5 wt%濃縮均質二酸化ウラン-水の実効増倍率  
 (平板厚さ10cm、片側水反射体あり、極値なし)

平均濃度 (gU/l)	均一系	不均一系 (最適分布)	増加割合 (% $\Delta k/k$ )
700	0.50383	0.73115	45.12
1000	0.57483	0.80743	40.46
1500	0.64922	0.88231	35.90
2000	0.69680	0.90730	30.21
3000	0.75632	0.75632	0.00

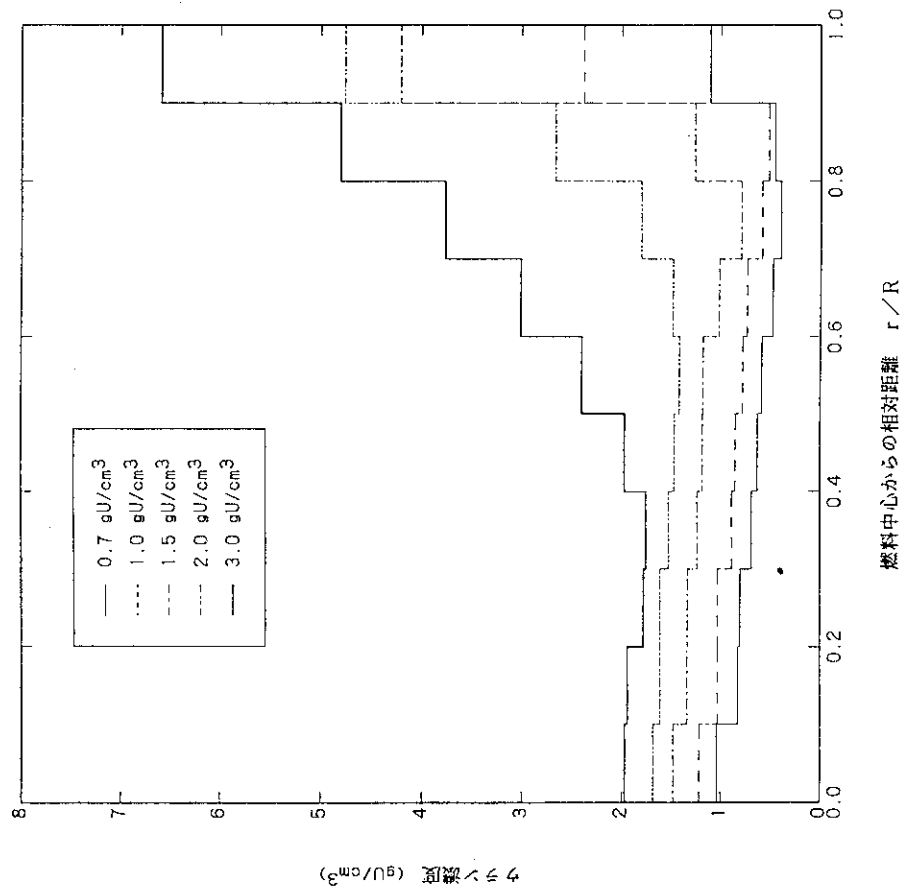


図 5.1

OPT-Dコードで算出した均質二酸化ウラン-水 (ウラン濃縮度 5 wt %、直径36cmの球形状、水反射体付き) の最適燃料濃度分布

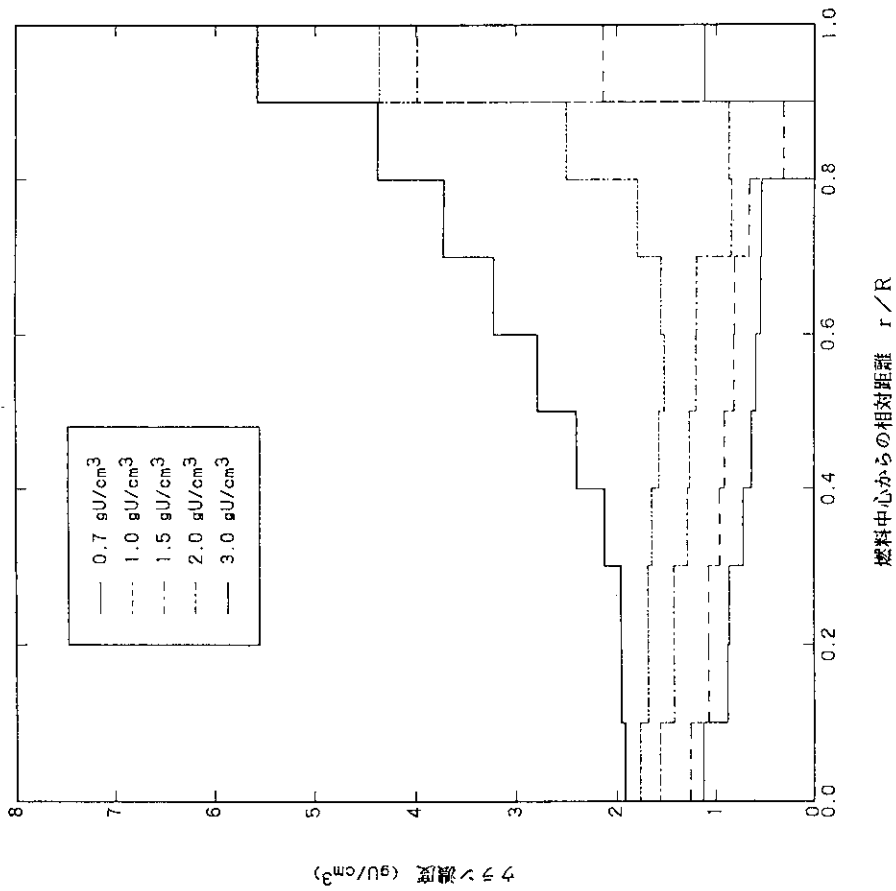


図 5.2

OPT-Dコードで算出した均質二酸化ウラン-水 (ウラン濃縮度 5 wt %、直径30cmの球形状、水反射体付き) の最適燃料濃度分布

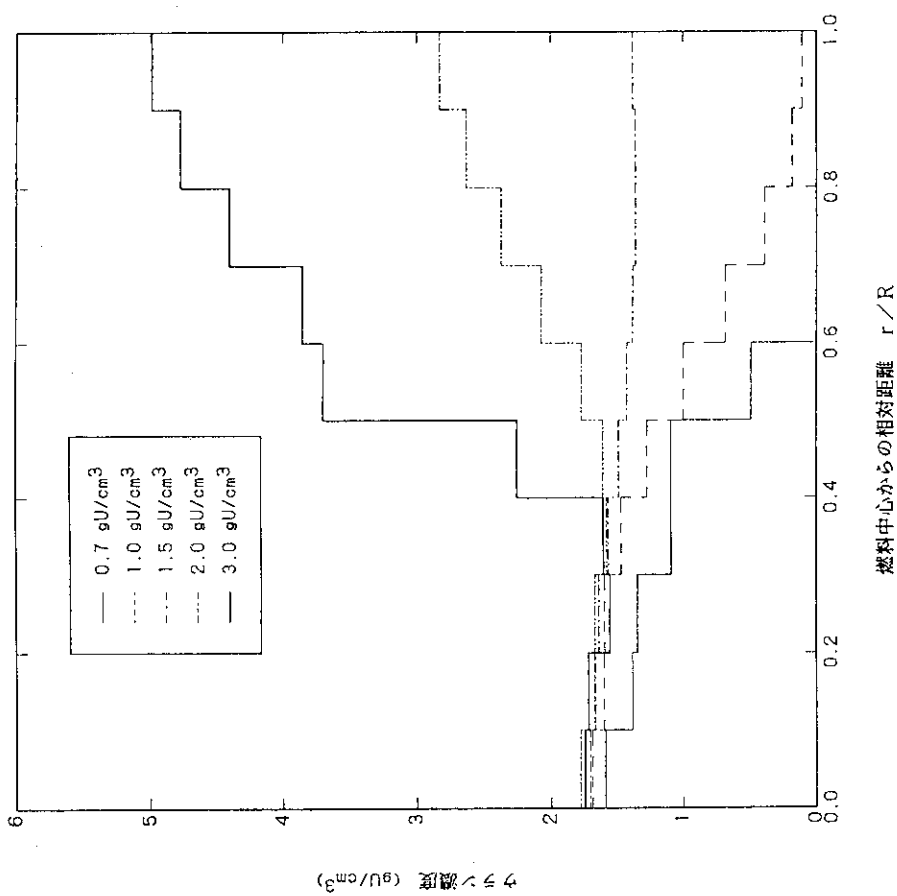


図 5.3

OPT-Dコードで算出した均質二酸化ウラン-水（ウラン濃縮度5wt%、直径40cmの球形、水反射体付き）の最適燃料濃度分布

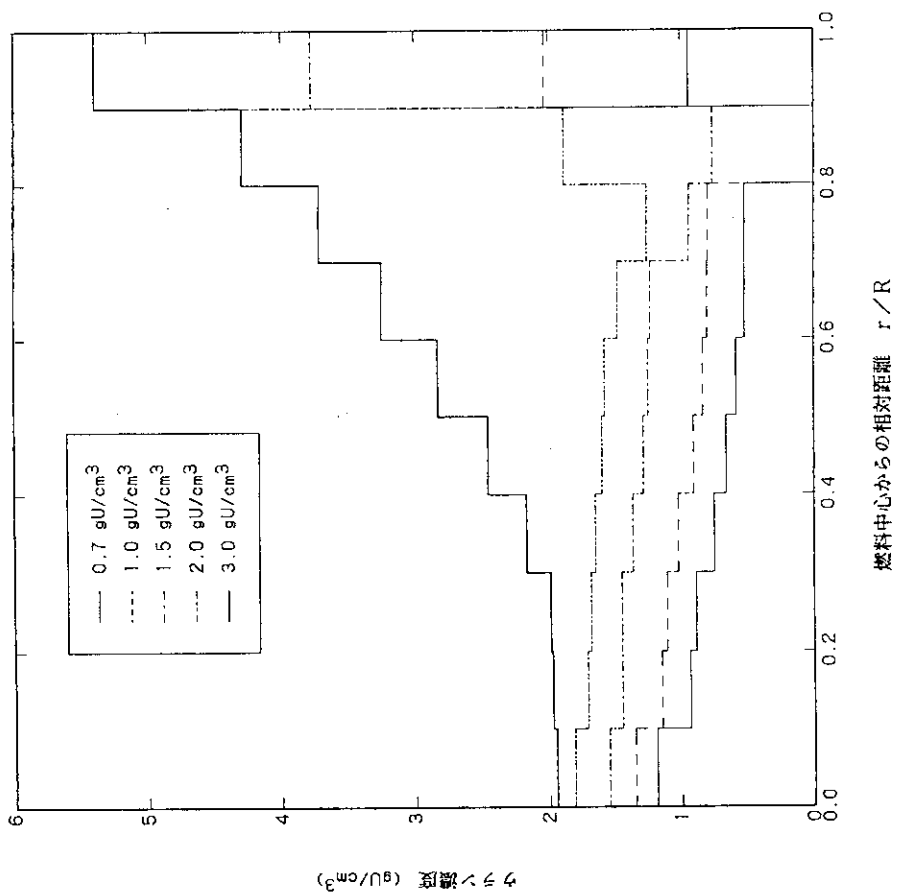


図 5.4

OPT-Dコードで算出した均質二酸化ウラン-水（ウラン濃縮度5wt%、直径36cmの球形、反射体なし）の最適燃料濃度分布

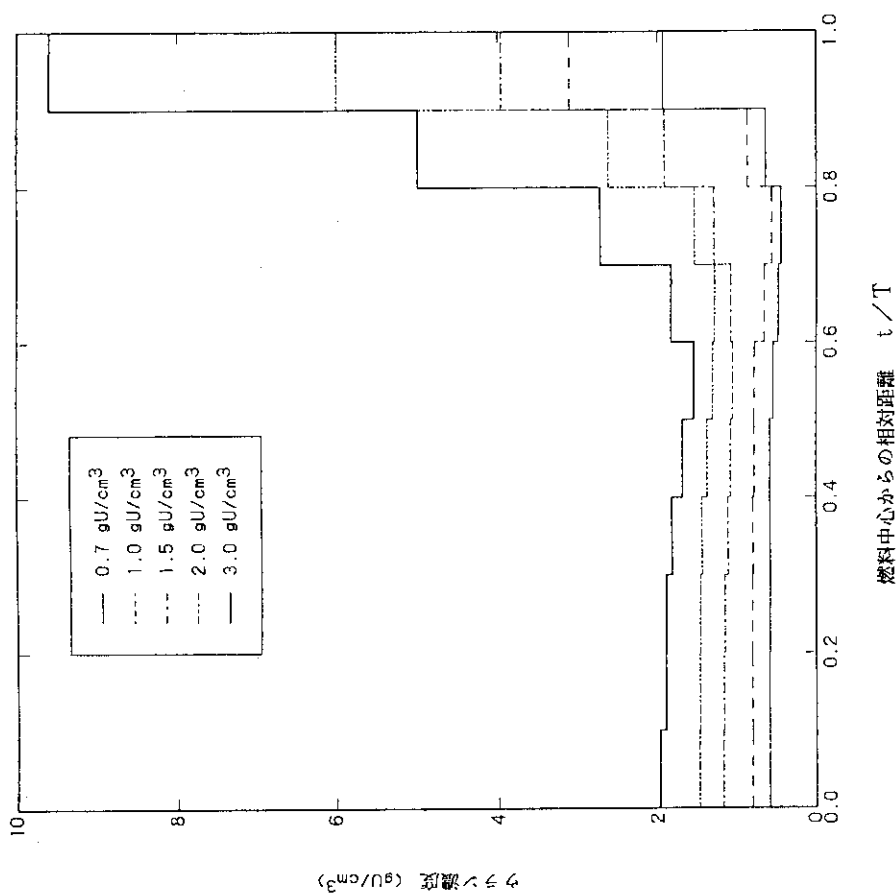


図 5.5

OPT-Dコードで算出した均質二酸化ウラン-水（ウラン濃縮度5wt%、直径24cmの円柱形状、水反射体付き）の最適燃料濃度分布

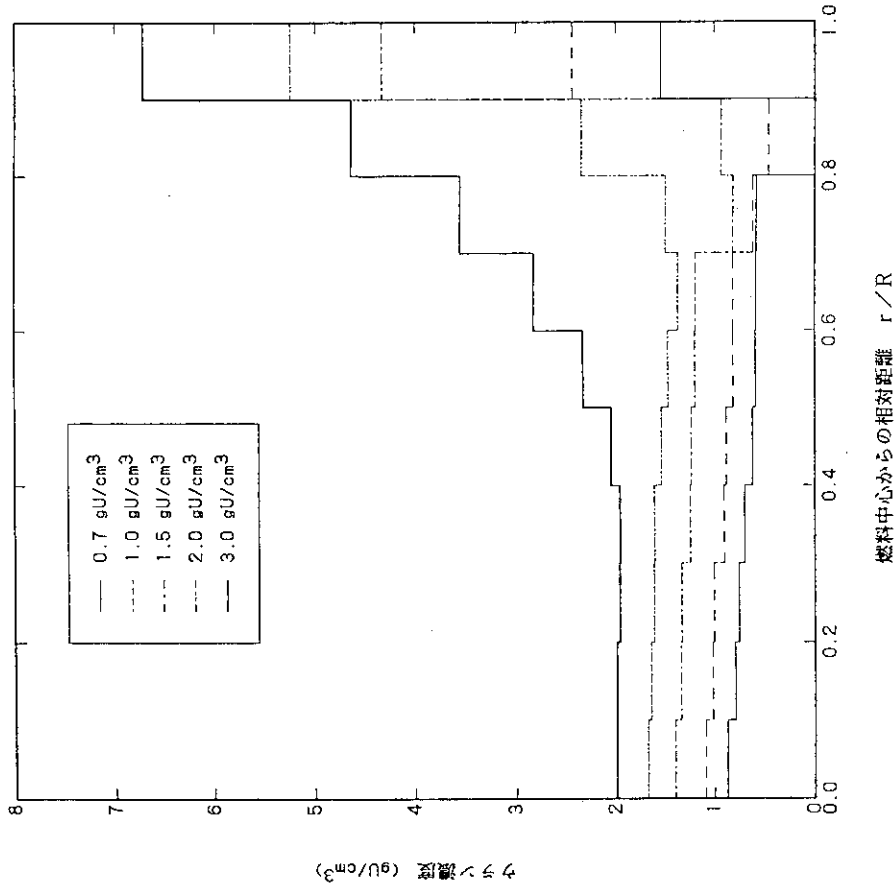


図 5.6

OPT-Dコードで算出した均質二酸化ウラン-水（ウラン濃縮度5wt%、厚さ10cmの平板形状、両側水反射体付き）の最適燃料濃度分布

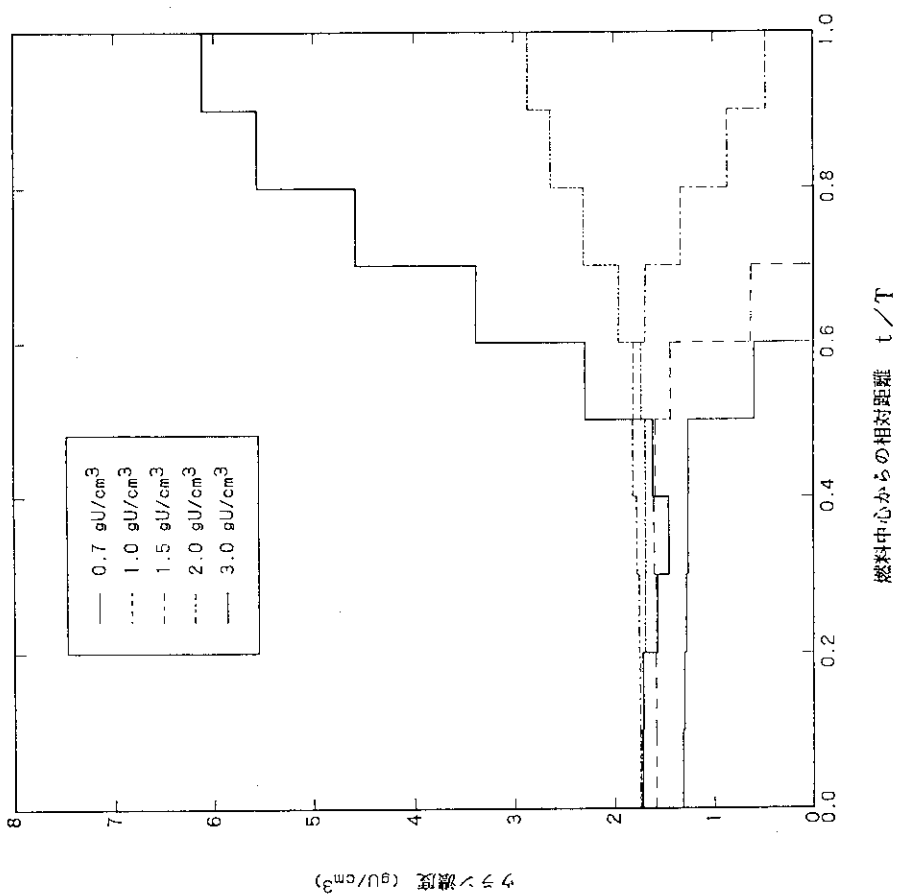


図 5.7

OPT-Dコードで算出した均質二酸化ウラン-水（ウラン濃縮度5wt%、厚さ10cmの平板形状、片側水反射体付き）の最適燃料濃度分布

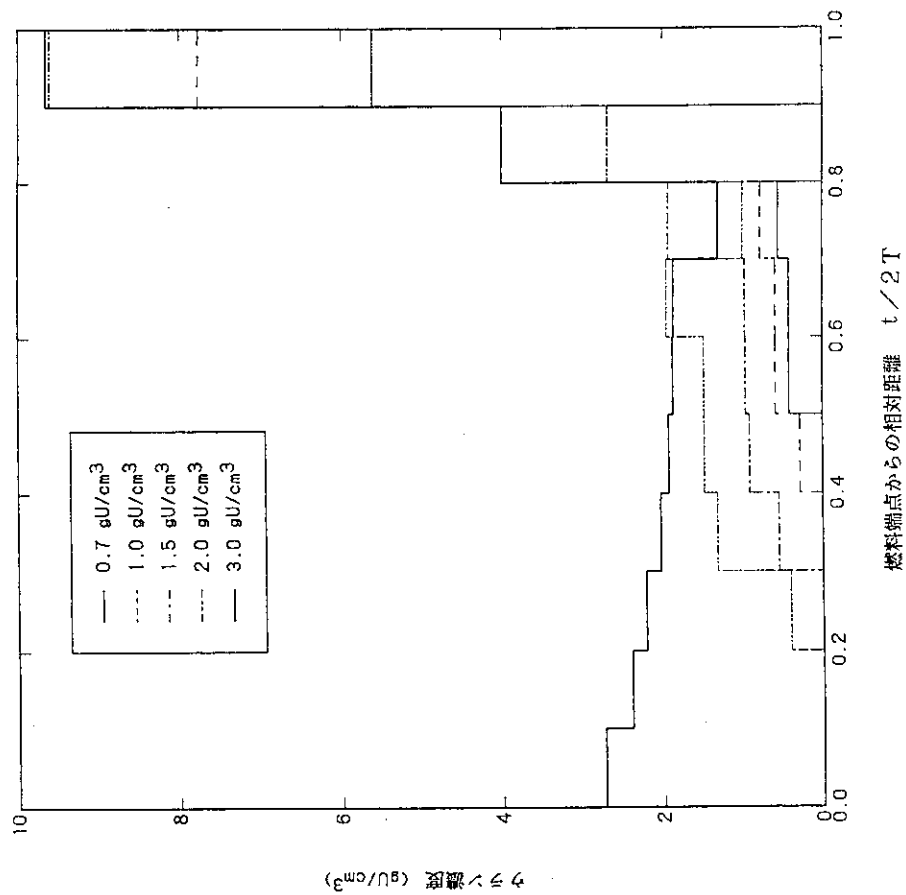


図 5.8

OPT-Dコードで算出した均質二酸化ウラン-水（ウラン濃縮度5wt%、厚さ10cmの平板形状、反射体なし）の最適燃料濃度分布

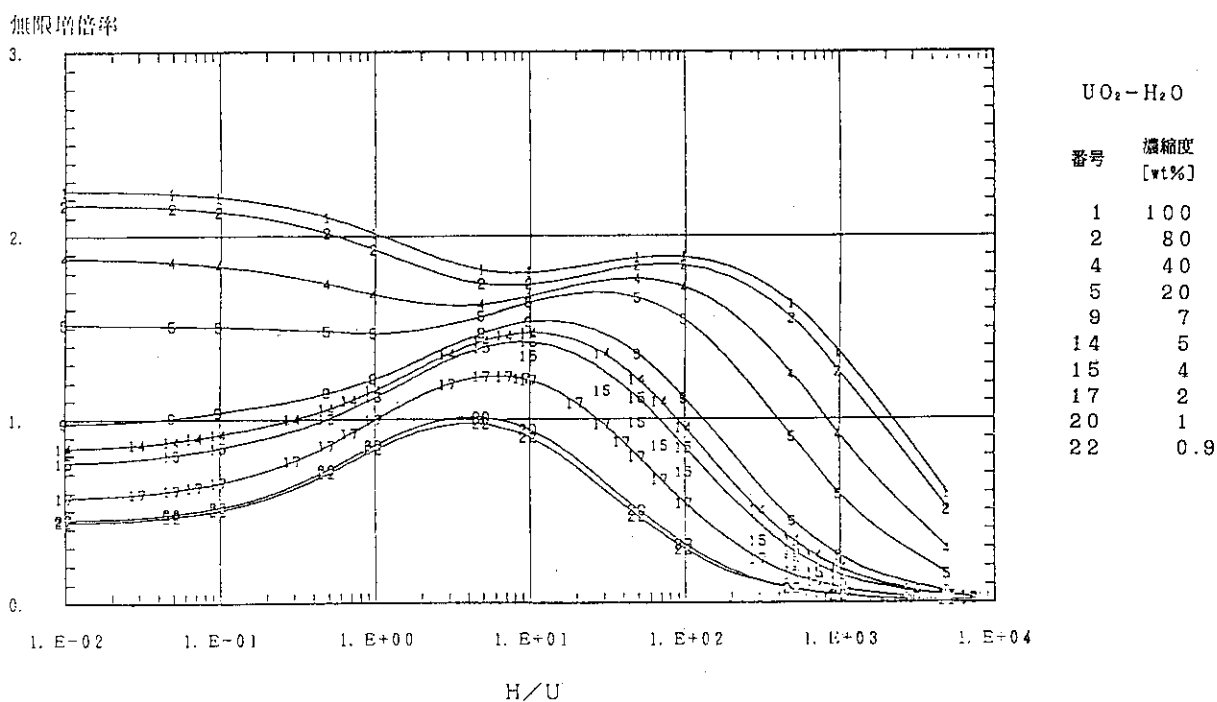


図 5.9 均質UO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>Oの無限増倍率

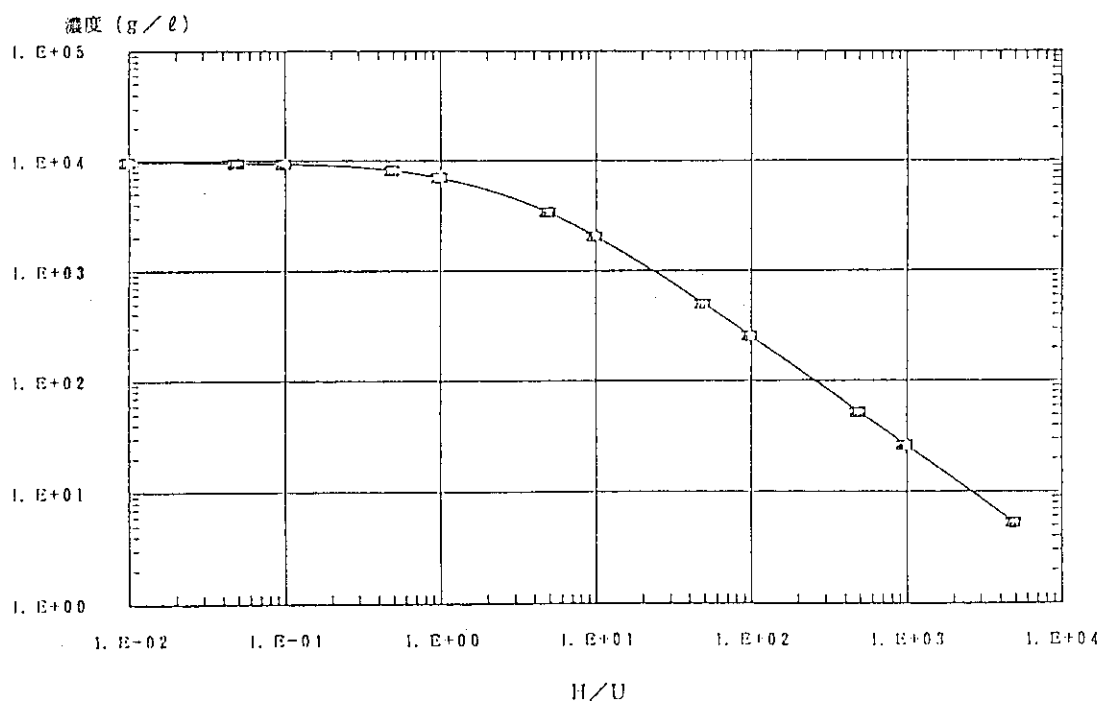


図 5.10 U濃度-H/U曲線 (均質UO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O)

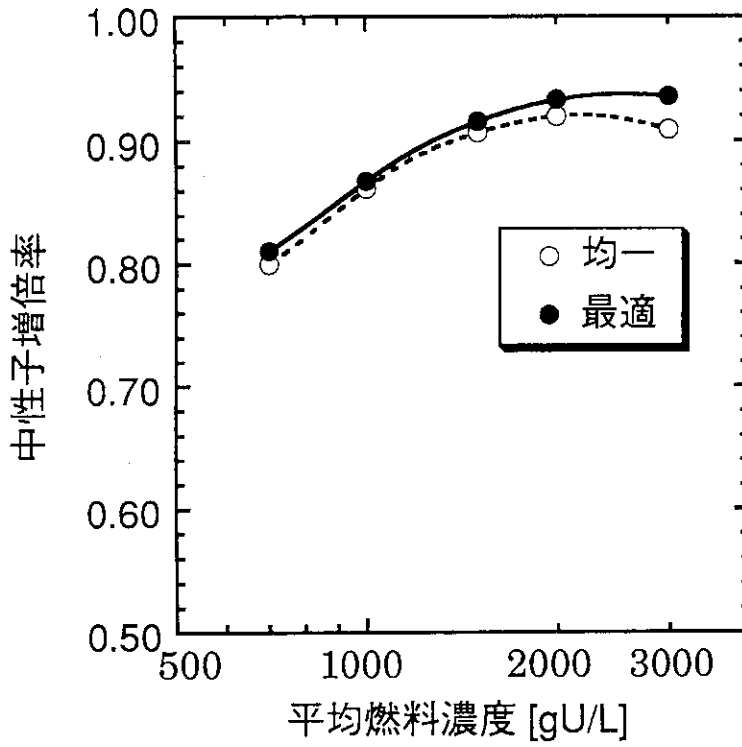


図 5.11 均一及び最適燃料分布での中性子増倍率の比較  
(直径36cmの球形状UO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O、水反射体付き)

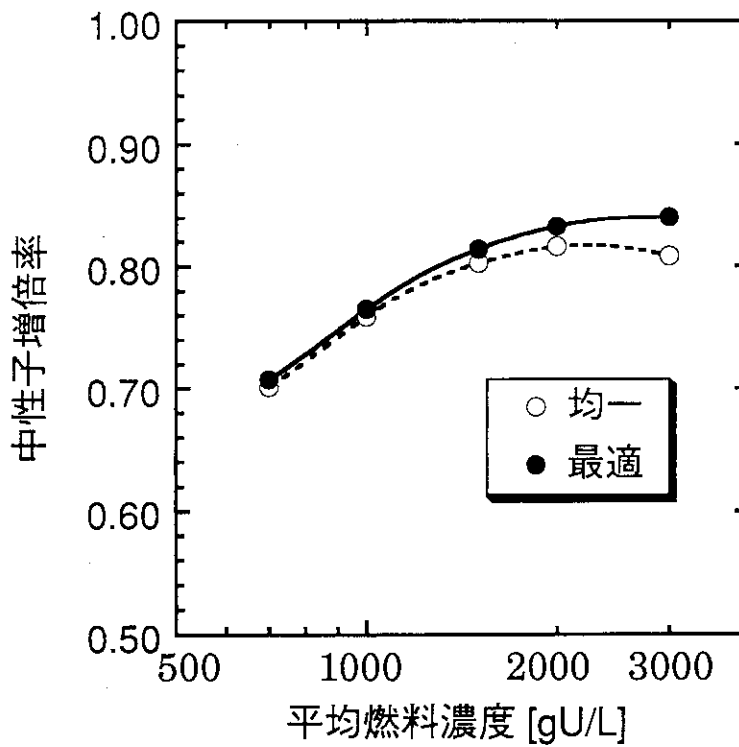


図 5.12 均一及び最適燃料分布での中性子増倍率の比較  
(直径30cmの球形状UO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O、水反射体付き)



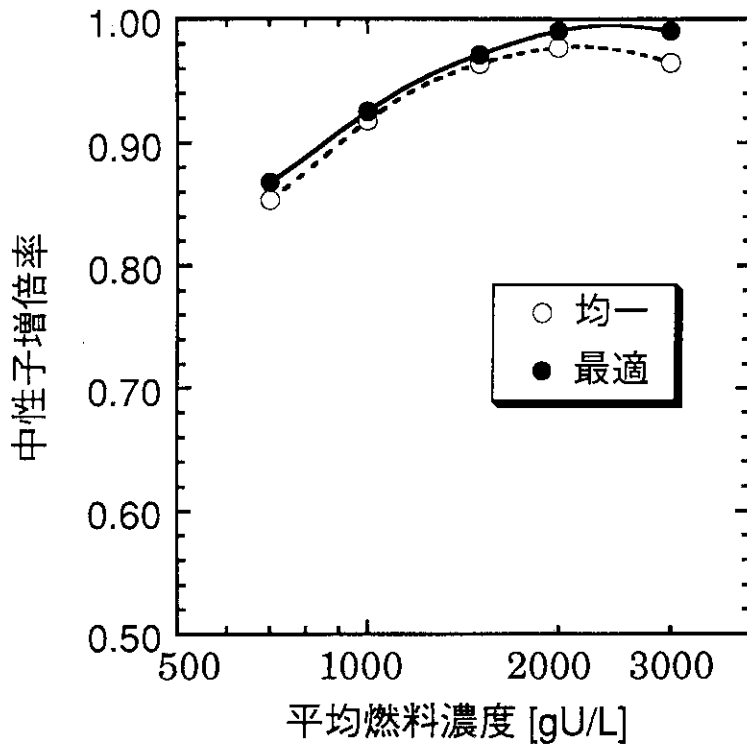


図 5.13 均一及び最適燃料分布での中性子増倍率の比較  
(直径40cmの球形状UO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O、水反射体付き)

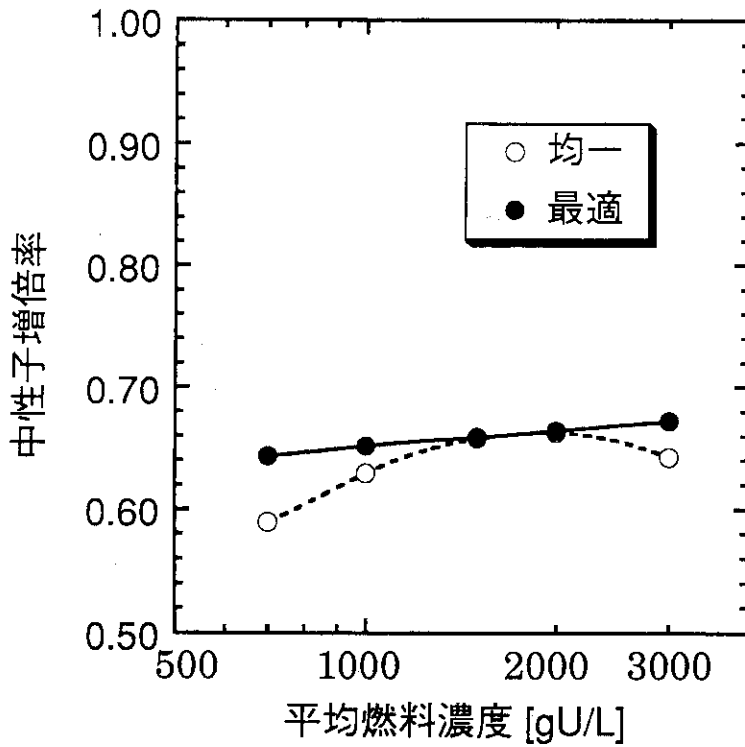


図 5.14 均一及び最適燃料分布での中性子増倍率の比較  
(直径36cmの球形状UO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O、水反射体なし)

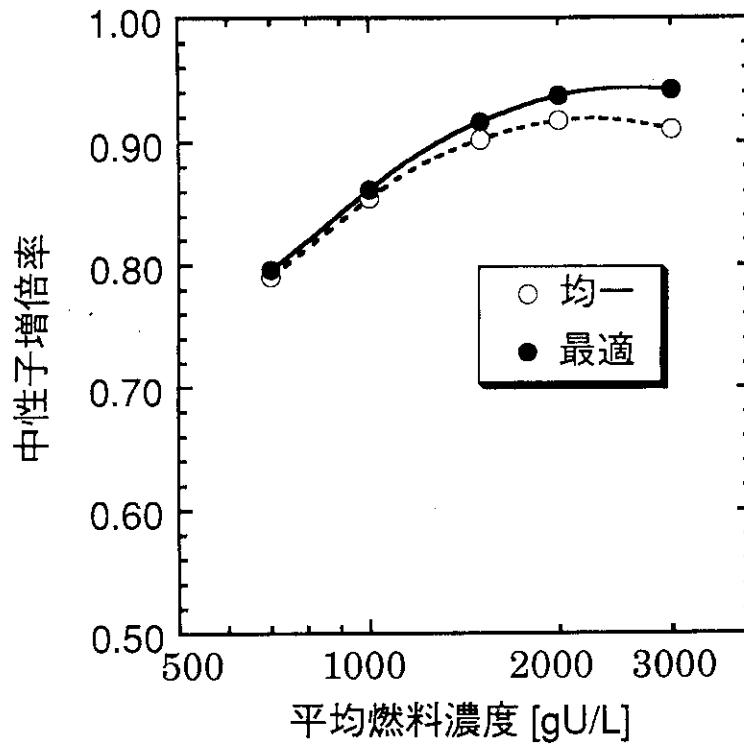


図 5.15 均一及び最適燃料分布での中性子増倍率の比較  
(直径24cmの円柱形状 $UO_2-H_2O$ 、水反射体付き)

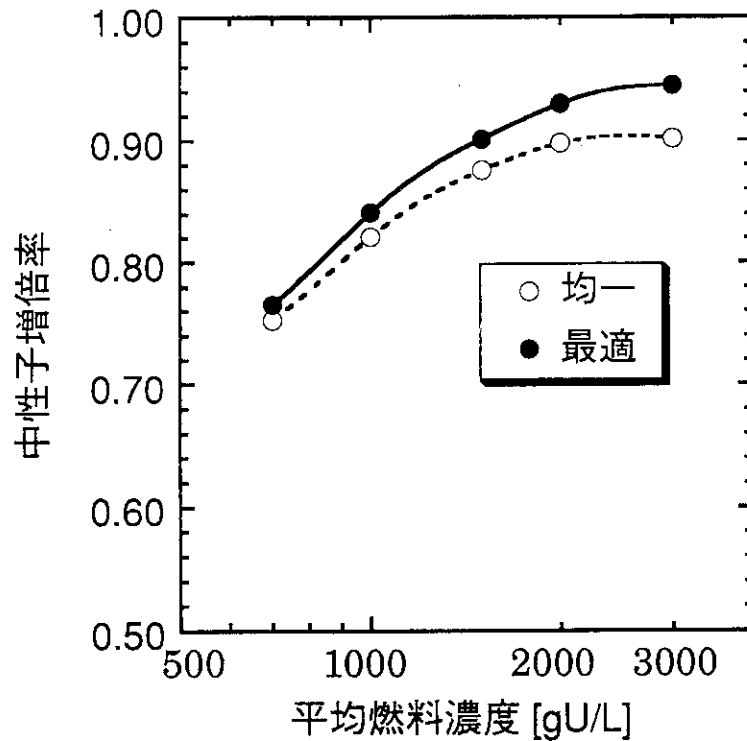


図 5.16 均一及び最適燃料分布での中性子増倍率の比較  
(厚さ10cmの平板形状 $UO_2-H_2O$ 、両側水反射体付き)

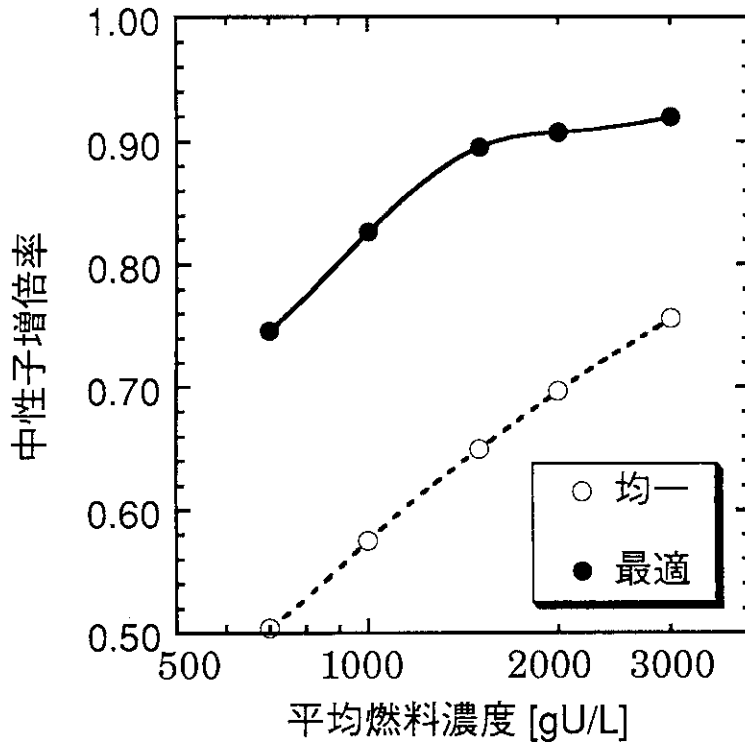


図 5.17 均一及び最適燃料分布での中性子増倍率の比較  
(厚さ10cmの平板形状 $UO_2-H_2O$ 、片側水反射体付き)

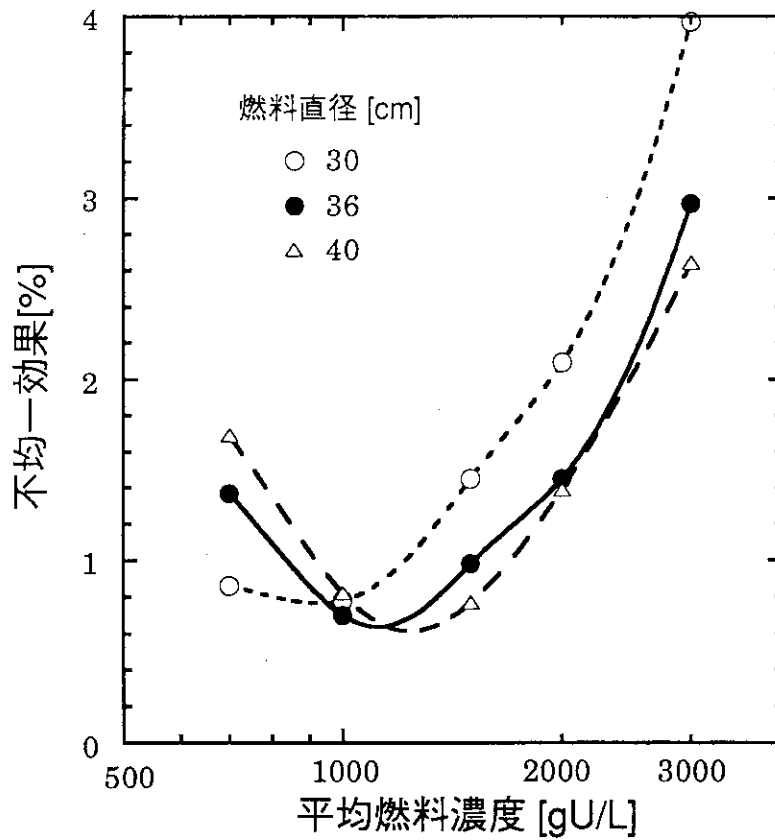


図 5.18 大きさの異なる均質燃料の不均一効果  
(球形状 $UO_2-H_2O$ 、水反射体付き)

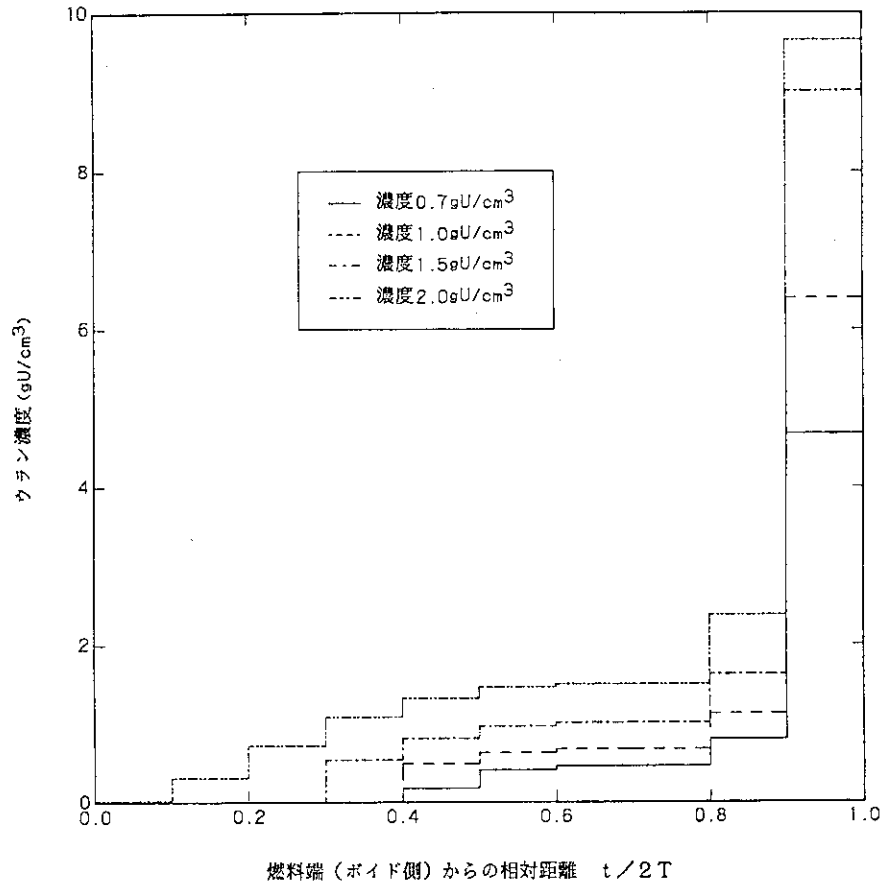


図 5.19 OPT-Dコードで算出した均質二酸化ウラン-水（ウラン濃縮度 5 wt%、厚さ 10cmの平板形状、片側水反射体付き）の最適燃料濃度分布（極小値なし）

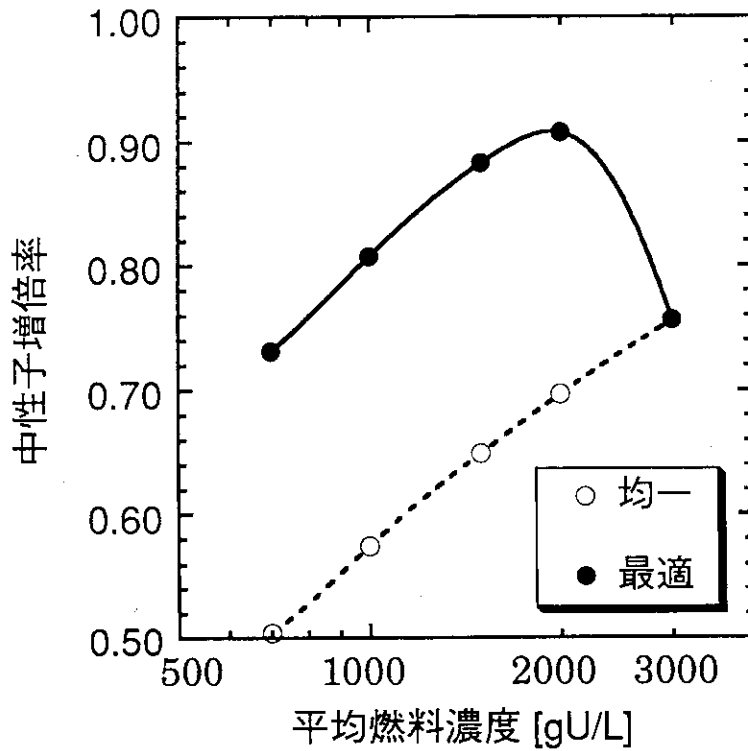


図 5.20 均一及び最適燃料分布での中性子増倍率の比較  
 （厚さ10cmの平板形状  $\text{UO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ 、片側水反射体付き、極値なし）

## 6. おわりに

球及び円柱形状燃料領域の中心からの距離の2乗の1次式で表される単純な燃料濃度分布を仮定して、燃料濃度勾配を変えて臨界量を計算した。この計算により、以下のことが明らかになった。濃縮度100%のウラン-水系の高濃縮ウラン燃料では、臨界質量・臨界寸法ともに、平均ウラン濃度が低いときには内側の燃料濃度が高い方が小さいが、平均ウラン濃度が高くなると逆に外側の燃料濃度が高い方がこれらの量が小さくなる。濃縮度5wt%の硝酸ウラニル水溶液を例にとった低濃縮ウラン燃料の場合にも、高濃縮ウラン燃料と同様の傾向が見られた（たとえば、平坦のときよりも約3%最小臨界質量が小さくなる燃料濃度勾配が存在する）が、この傾向は顕著ではない。

燃料領域が球形状の場合に限定して、硝酸ウラニル水溶液及び硝酸プルトニウム水溶液体系を対象として最適燃料分布を求めた。この計算から、燃料濃度の調査範囲では、反射体付近、次いで中心に燃料を集めた方が反応度的に有利になるという傾向が得られた。但し、硝酸プルトニウム水溶液体系で平均プルトニウム濃度が70 gPu/g以上 のときに、燃料濃度が空間的に振動分布したときに反応度が高くなるという結果が得られた。これは、非均質にした方が反応度が高くなることに対応していると考えられる。

平板状燃料を対象とした計算では、非均質の効果を取り除くため、極小値を2つ以上持たないという条件を設けた。この条件下での最適濃度分布は、反射体近傍に燃料を集めるとともに、残った燃料で中央の濃度が高めになる分布となった。硝酸ウラニル水溶液体系では、不均一効果による中性子増倍率の増加は高々1%なのに比べ、硝酸プルトニウム水溶液体系では3%～4%になるとの結果が得られた。

均質二酸化ウラン-水燃料に対する計算の結果、球（直径36cm）、円柱（直径24cm）、平板（厚さ10cm）の3つの形状では、この順で次第に反射体近傍に燃料を集め易くなる。最適減速（ $2\text{gU}/\text{cm}^3$ ）での不均一効果（不均一を考慮することによる中性子増倍率の増加割合）も、この順で1.5%、2.2%、3.7%と大きくなっていく。燃料寸法を変化させたときには、平均濃度が低い間は燃料寸法が大きい方が不均一効果が大きい、高くなると逆に燃料寸法が小さい方が不均一効果が大きくなる。反射

体がない体系での最適濃度分布は、平均濃度が低い間は中央高（余弦分布）であるが、平均濃度が $2\text{gU}/\text{cm}^3$ 以上になると余った燃料を外側に追いやる分布になる。なお、平板（厚さ $10\text{cm}$ ）燃料の片側に反射体が付いた体系の不均一効果は特別大きい。

本報告と関連して以下の課題が残っている。

- (1) 非均質効果を排除するために、今回は極小値を2つ以上持たないという条件を設定した。しかしながらこの条件設定は、得られる最適濃度分布が燃料の移動の仕方に依存しうる便宜的・人為的なものであった。それゆえ、燃料の移動の仕方に依存しない条件を設定する。
- (2) 今回の計算では中性子輸送を拡散法により取扱った。これをより正確に取扱える方法（ $S_N$ 法やモンテカルロ法）によって計算できるようにする。特に、第5章で調べた均質二酸化ウラン-水燃料からなる $10\text{cm}$ 厚の無限平板燃料体系の計算については、①反射体のない体系で平均燃料濃度が $1500\text{gU}/\ell$ では、最適燃料濃度分布下での中性子増倍率が均一分布下でのものより小さくなった。また、②片側に反射体が付いた体系では、均一分布のときに比べて最適燃料濃度分布下での中性子増倍率が30%以上大きくなった。これらの計算事例の再検討・再確認をする。
- (3) 最大濃度の値は計算結果に大きな影響を与える。しかし、燃料の化学形態及び温度などの物理条件により最大濃度の値は変化する。これらの依存性について把握する。
- (4) 化学プロセス上で、実際に不均一になりうるか、否かについても検討を進める（例えば、文献23)及び24)）。

## 謝 辞

本計算は、科学技術庁から日本原子力研究所が受託した「再処理施設臨界安全性実証試験」の一部として昭和63年度から平成3年度に実施され、臨界安全性実験データ検討ワーキンググループの下に設置された第二サブワーキンググループ（リーダー：日本ニユクリア・フュエル㈱の西堀俊雄氏）のもとで御検討いただきました。特に、㈱東芝の三橋偉司氏には、最適燃料濃度分布の型と減速度との関連について御指摘いただきました。また、日本原子力研究所燃料安全工学部の野村靖氏には、原稿全体を閲読し、不備を御指摘いただきました。ここに記して謝辞といたします。

体がない体系での最適濃度分布は、平均濃度が低い間は中央高（余弦分布）であるが、平均濃度が $2\text{gU}/\text{cm}^3$ 以上になると余った燃料を外側に追いやる分布になる。なお、平板（厚さ $10\text{cm}$ ）燃料の片側に反射体が付いた体系の不均一効果は特別大きい。

本報告と関連して以下の課題が残っている。

- (1) 非均質効果を排除するために、今回は極小値を2つ以上持たないという条件を設定した。しかしながらこの条件設定は、得られる最適濃度分布が燃料の移動の仕方に依存しうる便宜的・人為的なものであった。それゆえ、燃料の移動の仕方に依存しない条件を設定する。
- (2) 今回の計算では中性子輸送を拡散法により取扱った。これをより正確に取扱える方法（ $S_N$ 法やモンテカルロ法）によって計算できるようにする。特に、第5章で調べた均質二酸化ウラン-水燃料からなる $10\text{cm}$ 厚の無限平板燃料体系の計算については、①反射体のない体系で平均燃料濃度が $1500\text{gU}/\ell$ では、最適燃料濃度分布下での中性子増倍率が均一分布下でのものより小さくなった。また、②片側に反射体が付いた体系では、均一分布のときに比べて最適燃料濃度分布下での中性子増倍率が30%以上大きくなった。これらの計算事例の再検討・再確認をする。
- (3) 最大濃度の値は計算結果に大きな影響を与える。しかし、燃料の化学形態及び温度などの物理条件により最大濃度の値は変化する。これらの依存性について把握する。
- (4) 化学プロセス上で、実際に不均一になりうるか、否かについても検討を進める（例えば、文献23)及び24)）。

## 謝 辞

本計算は、科学技術庁から日本原子力研究所が受託した「再処理施設臨界安全性実証試験」の一部として昭和63年度から平成3年度に実施され、臨界安全性実験データ検討ワーキンググループの下に設置された第二サブワーキンググループ（リーダー：日本ニユクリア・フュエル㈱の西堀俊雄氏）のもとで御検討いただきました。特に、㈱東芝の三橋偉司氏には、最適燃料濃度分布の型と減速度との関連について御指摘いただきました。また、日本原子力研究所燃料安全工学部の野村靖氏には、原稿全体を閲読し、不備を御指摘いただきました。ここに記して謝辞といたします。

## 参 考 文 献

- 1) 科学技術庁原子力局核燃料規制課編、「臨界安全ハンドブック」、にっかん書房 (1988).
- 2) G. Geortzel, "Minimum Critical Mass and Flat Flux," J. Nucl. Energy, 2, 193 (1956).
- 3) H.K. Clark, "Effect of Distribution of Fissile Material on Critical Mass", Nucl. Sci. Eng. 24, 133 (1966).
- 4) M.M. Sapiro, "Minimum Critical Mass in Variable Density and Epithermal Reactors", Nucl. Sci. Eng. 10, 159 (1961).
- 5) C.I.G. Andersson, "Semianalytical and Seminumerical Calculations of Optimum Material Distributions", Nucleonik 5, 185 (1963).
- 6) M. Otsuka, "Fuel-Importance Function and Minimum Critical Mass", Nucl. Sci. Eng. 18, 514 (1964).
- 7) 片倉純一・酒井友宏、「 $^{235}\text{U}$ 燃料の濃度分布による臨界質量への効果に関する予備的検討」、JAERI-M88-148 (1988).
- 8) Y. Hirano, Y. Yamane, K. Nishina and I. Mitsuhashi, "Reactivity Effect of Non-Uniformly Distributed Fuel in Fuel Solution System," J. Nucl. Sci. Tech., 28, 595 (1991).
- 9) 銚東芝、「核燃料物質溶液における濃度の不均一効果について」、TLR-R005 (1991).
- 10) H. Yanagisawa, T. Suzaki and K. Nitta, "Measurements of Masses of Non-Uniform Fuel Rod Lattice Configurations," Proc. Int. Seminar on Nuclear Criticality Safety, 84, Tokyo (1987).
- 11) Y. Yamane, Y. Hirano, K. Nishina and S. Shiroya, "Measurements of Reactivity Effect Caused by Nonuniform Fuel Distribution," Proc. Int. Conference on Nuclear Criticality Safety, Vol. 1, 1-51, Oxford (1991).
- 12) J. Katakura, Y. Naito and Y. Komuro: "Development of the Computer Code System JACS for Criticality Safety", Trans. Am. Nucl. Soc. 41, 329 (1982).



- 13) H.H.Ph. Moeken, "The Density of Nitric Acid Solutions of Uranium and Uranium-Aluminium Alloys", *Am.Chim.Acta.* 44, 225 (1969).
- 14) W. Heinicke, H. Krug, W. Thomas, W. Weber and B. Gmal, "Handbuch zur Kritikalität", Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH (1985).
- 15) Y. Naito, S. Tsuruta, T. Matsumura and T. Ohuchi, "MGCL-PROCESSOR: A Computer Code System for Processing Multigroup Constants Library MGCL", JAERI-M9396 (1981).
- 16) 小室雄一・奥野浩・内藤俣孝・酒井友宏・塩田雅之・奥田泰久、「断面積セット作成プログラムMAIL3.0使用手引書」、JAERI-M90-126 (1990).
- 17) L.M. Petrie and N.F. Cross: "KENO IV—An Improved Monte Carlo Criticality Program", ORNL-4938 (1975).
- 18) 奥野浩・内藤俣孝: 「臨界安全解析コード J A C S の計算誤差評価」、JAERI-M87-057 (1987).
- 19) "Guide de Criticité", CEA-R-3114 (1967).
- 20) 三橋偉司・菊池茂人・平野靖・清野起: 「硝酸プルトニウム水溶液の濃度不均一に関する検討」日本原子力学会1989年年会、C 6 (1989).
- 21) K. Koyama et al., "ANISN-JR, A One-Dimensional Discrete Ordinates Code for Neutron and Gamma Ray Transport Calculations," JAERI-M6954 (1977).
- 22) 荻野晃久・内藤俣孝、「無限増倍率が1.0未満である核燃料体系の臨界性」、JAERI-M89-039 (1989).
- 23) 館盛勝一・阿見則男・三好慶典、「再処理共除染工程におけるプルトニウム蓄積と臨界安全性の評価」、日本原子力学会誌、28、543 (1986).
- 24) 阿見則男・三好慶典・館盛勝一、「ミキサセトラ工程のプルトニウム不均一濃度分布の臨界性への影響」、JAERI-M91-184 (1991).

## 付録A KENO-IVの寸法サーチ計算結果

KENO-IVの寸法サーチ計算機能を用いて、臨界になると推定される寸法（球半径あるいは無限円柱半径）を算出した。希望する中性子増倍率（desired  $k_{eff}$ ）の値として、本文2.(1)に記したように、濃縮度100%のウラン-水の燃料に対しては0.985、濃縮度5wt%の硝酸ウラニル水溶液に対しては0.991を用いた。寸法サーチ計算は、中性子増倍率が希望値から $\pm\sigma$ （標準偏差）以内に収まったときに終了させた。計算結果を表A.1から表A.4に示す。

表A.1 ウラン(濃縮度100%) - 水の臨界球半径 (KENO-IV計算結果)

平均ウラン濃度 [gU/l]	濃度勾配 パラメータ a	球半径 [cm]	中性子増倍率収束値 $k_{eff} \pm \sigma$	備考
20	-1	22.223	0.98471 ± 0.00318	
	-0.5	25.347	0.98631 ± 0.00261	
	0	28.761	0.98285 ± 0.00237	
	0.5	31.414	0.98331 ± 0.00219	
	1	34.498	0.98616 ± 0.00220	
30	-1	18.479	0.98722 ± 0.00367	
	-0.5	19.214	0.98305 ± 0.00302	
	0	20.607	0.98735 ± 0.00308	
	0.5	21.527	0.98358 ± 0.00309	
	1	22.226	0.98684 ± 0.00284	
50	-1	15.824	0.98215 ± 0.00363	
	-0.5	15.640	0.98594 ± 0.00335	
	0	15.893	0.98574 ± 0.00321	
	0.5	16.157	0.98260 ± 0.00318	
	1	16.506	0.98558 ± 0.00339	
100	-1	13.657	0.98142 ± 0.00430	
	-0.5	13.174	0.98707 ± 0.00393	
	0	13.089	0.98418 ± 0.00342	
	0.5	13.320	0.98844 ± 0.00403	
	1	13.246	0.98529 ± 0.00373	
200	-1	12.572	0.98356 ± 0.00392	
	-0.5	11.932	0.98269 ± 0.00404	
	0	11.913	0.98942 ± 0.00374	
	0.5	11.878	0.98383 ± 0.00381	
	1	11.815	0.98729 ± 0.00411	
300	-1	12.167	0.98454 ± 0.00440	
	-0.5	11.485	0.98609 ± 0.00353	
	0	11.329	0.98580 ± 0.00432	
	0.5	11.325	0.98168 ± 0.00448	
	1	11.221	0.98246 ± 0.00396	
1,000	-1	11.375	0.98784 ± 0.00370	
	-0.5	11.007	0.98648 ± 0.00407	
	0	10.871	0.98489 ± 0.00434	
	0.5	10.767	0.98343 ± 0.00356	
	1	10.820	0.98776 ± 0.00398	
3,000	-1	10.335	0.98426 ± 0.00339	
	-0.5	10.138	0.98359 ± 0.00385	
	0	10.370	0.98588 ± 0.00395	
	0.5	10.303	0.98483 ± 0.00335	
	1	10.247	0.98262 ± 0.00347	
10,000	-1	7.5152	0.98378 ± 0.00305	註) 参照
	-0.5	8.0092	0.98814 ± 0.00329	
	0	8.1974	0.98600 ± 0.00318	
	0.5	8.1836	0.98432 ± 0.00340	
	1	8.2488	0.98507 ± 0.00336	

註) 最大濃度18,900gU/l を越える燃料領域がある。

表A.2 ウラン（濃縮度 100%）-水の臨界円柱半径（KENO-IV計算結果）

平均ウラン濃度 [gU/ℓ]	濃度勾配 パラメータ a	円柱半径 [cm]	中性子増倍率収束値 $k_{eff} \pm \sigma$	備考
100	-1	9.3496	0.98551 ± 0.00328	
	-0.5	8.6831	0.98290 ± 0.00421	
	0	8.7300	0.98736 ± 0.00388	
	0.5	8.6378	0.98224 ± 0.00334	
	1	8.7145	0.98326 ± 0.00384	
300	-1	7.9244	0.98766 ± 0.00368	
	-0.5	7.4272	0.98718 ± 0.00381	
	0	7.2581	0.98441 ± 0.00361	
	0.5	7.1460	0.98519 ± 0.00380	
	1	7.2070	0.98383 ± 0.00351	
1,000	-1	7.2389	0.98355 ± 0.00362	
	-0.5	6.8470	0.98490 ± 0.00315	
	0	6.8198	0.98904 ± 0.00357	
	0.5	6.7609	0.98428 ± 0.00373	
	1	6.7750	0.98711 ± 0.00387	
3,000	-1	6.4986	0.98156 ± 0.00345	
	-0.5	6.4435	0.98738 ± 0.00359	
	0	6.4036	0.98660 ± 0.00316	
	0.5	6.3676	0.98618 ± 0.00337	
	1	6.3419	0.98503 ± 0.00375	
10,000	-1	4.8326	0.98826 ± 0.00349	註) 参照
	-0.5	4.8121	0.98280 ± 0.00336	
	0	4.8861	0.98572 ± 0.00332	
	0.5	4.9050	0.98787 ± 0.00323	
	1	4.9019	0.98187 ± 0.00363	

註) 最大濃度18,900gU/ℓ を越える燃料領域がある。

表A.3 硝酸ウラニル（濃縮度5wt%）水溶液の臨界球半径（KENO-IV計算結果）

平均ウラン濃度 [gU/l]	濃度勾配 パラメータ a	球半径 [cm]	中性子増倍率収束値 $k_{eff} \pm \sigma$	備考
300	-1	42.353	0.98996±0.00189	
	-0.5	67.866	0.99207±0.00185	
	0.5	585.95	0.99061±0.00131	
	1	376.40	0.99173±0.00173	
500	-1	33.426	0.98932±0.00225	
	-0.5	33.853	0.99236±0.00214	
	0	37.246	0.99171±0.00255	
	0.5	41.873	0.99075±0.00207	
	1	46.723	0.99018±0.00196	
700	-1	33.127	0.99156±0.00235	註) 参照
	-0.5	29.766	0.98980±0.00272	
	0	30.107	0.98928±0.00253	
	0.5	31.535	0.98847±0.00265	
	1	32.599	0.99050±0.00229	
800	-1	33.719	0.98979±0.00234	註) 参照
	-0.5	28.806	0.98907±0.00294	
	0	28.868	0.99341±0.00264	
	0.5	29.437	0.98843±0.00251	
	1	30.538	0.99126±0.00258	
900	-1	35.560	0.99356±0.00302	註) 参照
	-0.5	28.545	0.98858±0.00280	
	0	28.258	0.98962±0.00236	
	0.5	28.821	0.99300±0.00240	
	1	28.889	0.99043±0.00267	
1,100	-1	40.459	0.98982±0.00255	註) 参照
	-0.5	29.797	0.99188±0.00281	註) 参照
	0	28.009	0.99288±0.00284	
	0.5	28.029	0.99335±0.00253	
	1	28.125	0.98797±0.00241	註) 参照
1,400	-1	51.345	0.98977±0.00265	註) 参照
	-0.5	33.412	0.99242±0.00302	註) 参照
	0	30.011	0.99070±0.00300	註) 参照
	0.5	29.072	0.99115±0.00275	註) 参照
	1	28.970	0.99330±0.00320	註) 参照

註) 最大濃度1,330gU/l を越える燃料領域がある。

表A. 4 硝酸ウラニル（濃縮度5wt%）水溶液の臨界円柱半径（KENO-IV計算結果）

平均ウラン濃度 [gU/l]	濃度勾配 パラメータ a	球半径 [cm]	中性子増倍率収束値 $k_{eff} \pm \sigma$	備考
300	-1	36.085	0.99220±0.00188	
	-0.5	58.360	0.98979±0.00169	
500	-1	24.872	0.99271±0.00258	
	-0.5	25.787	0.99220±0.00238	
	0	27.044	0.98910±0.00245	
	0.5	29.859	0.99079±0.00198	
	1	33.189	0.99139±0.00213	
700	-1	23.664	0.99003±0.00233	
	-0.5	21.365	0.98891±0.00253	
	0	21.558	0.98871±0.00258	
	0.5	22.043	0.99095±0.00233	
	1	23.138	0.99116±0.00253	
1,000	-1	25.322	0.99084±0.00273	註) 参照
	-0.5	20.488	0.99318±0.00291	
	0	19.889	0.98982±0.00277	
	0.5	20.000	0.99233±0.00252	
	1	19.975	0.99169±0.00291	
1,100	-1	27.001	0.99182±0.00277	註) 参照
	-0.5	20.780	0.99026±0.00261	註) 参照
	0	19.694	0.98822±0.00297	
	0.5	20.000	0.99273±0.00298	
	1	19.707	0.99279±0.00267	註) 参照
1,200	-1	28.611	0.99172±0.00257	註) 参照
	-0.5	21.393	0.99117±0.00256	註) 参照
	0	19.890	0.98891±0.00285	
	0.5	20.000	0.99015±0.00295	註) 参照
	1	20.000	0.99321±0.00279	註) 参照
1,500	-1	37.470	0.99016±0.00241	註) 参照
	-0.5	24.232	0.98964±0.00264	註) 参照
	0	22.109	0.99152±0.00309	註) 参照
	0.5	21.015	0.99109±0.00272	註) 参照
	1	20.475	0.98841±0.00302	註) 参照

註) 最大濃度1,330gU/l を越える燃料領域がある。

## 付録B 最適燃料濃度分布臨界計算コードOPT-Dの概要及び使用手引き

## B.1 基本方程式

定常状態における中性子の収支は、

$$\left( M - \frac{1}{k} F \right) \Phi = 0 \quad (\text{B.1})$$

という方程式で表される。ここで、

M：中性子の消滅を表す演算子、

F：中性子の生成を表す演算子、

k：中性子増倍率、

$\Phi$ ：中性子束、

である。燃料分布に対する1次の摂動をとると、反応度 $\rho$ の変化 $\delta\rho$ に対する表式として、

$$\delta\rho = \frac{\langle \Phi^+, \left( \frac{1}{k} \delta F - \delta M \right) \Phi \rangle}{\langle \Phi^+, F \Phi \rangle} \quad (\text{B.2})$$

が得られる。ここで、 $\Phi^+$ は随伴中性子束であり、 $\langle \quad \rangle$ はエネルギー及び空間についての積分を意味する。

反応度変化 $\delta\rho$ が燃料濃度分布の微小変化 $\delta u(\mathbf{r})$ に伴うものであると仮定する。すなわち、

$$\frac{1}{k} \delta F - \delta M = \frac{\partial \left( \frac{1}{k} F - M \right)}{\partial u} \cdot \delta u \quad (\text{B.3})$$

さらに $\delta u(\mathbf{r})$ は任意なので、

$$\delta u(\mathbf{r}) = \Delta u \left[ -\delta^3(\mathbf{r} - \mathbf{r}_1) + \delta^3(\mathbf{r} - \mathbf{r}_2) \right] \quad (\text{B.4})$$

ととる。但し、ここで $\Delta u$ は微小燃料濃度量、 $r_1$ 及び $r_2$ は任意の位置ベクトルである。(B.3)式及び(B.4)式を(B.2)式に代入して、

$$\delta \rho = \frac{\Delta u}{\langle \Phi^+, F \Phi \rangle} [I_f(r_2) - I_f(r_1)] \quad (B.5)$$

が得られる。ただし、ここで燃料インポートランス関数 $I_f(r)$ を

$$I_f(r) \equiv \int dE \Phi^+ \left[ \frac{\partial \left( \frac{1}{k} F - M \right)}{\partial u} \right] \Phi \quad (B.6)$$

によって定義した。

$r_1$ 及び $r_2$ が任意だったので、 $\delta \rho = 0$ が成立つためには

$$I_f(r) = \text{一定} \quad (B.7)$$

でなければならない。すなわち、(B.7)式を満足する燃料分布が最適燃料濃度分布となる。

エネルギーをG群に分割した拡散法では、中性子の消滅を表す行列M及び生成を表す行列Fは、次のように表される。

$$M = \begin{pmatrix} -\nabla \cdot D_1 \nabla + \Sigma_{R1} & -\Sigma_{s21} & \cdots & -\Sigma_{sG1} \\ -\Sigma_{s12} & -\nabla \cdot D_2 \nabla + \Sigma_{R2} & \cdots & -\Sigma_{sG2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -\Sigma_{s1G} & -\Sigma_{s2G} & \cdots & -\nabla \cdot D_G \nabla + \Sigma_{RG} \end{pmatrix} \quad (B.8)$$

$$F = \begin{pmatrix} \chi_1 \nu_1 \Sigma_{f1} & \chi_1 \nu_2 \Sigma_{f2} & \cdots & \chi_1 \nu_G \Sigma_{fG} \\ \chi_2 \nu_1 \Sigma_{f1} & \chi_2 \nu_2 \Sigma_{f2} & \cdots & \chi_2 \nu_G \Sigma_{fG} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \chi_G \nu_1 \Sigma_{f1} & \chi_G \nu_2 \Sigma_{f2} & \cdots & \chi_G \nu_G \Sigma_{fG} \end{pmatrix} \quad (B.9)$$



なお、(B.8)式で $\Sigma_{Rg}$ は除去断面積で、次の式で定義される。

$$\Sigma_{Rg} \equiv \Sigma_{tg} - \Sigma_{sgg} \quad (B.10)$$

(B.8)式及び(B.9)式を(B.6)式に代入して、燃料インポートランスについての表式を書下すと次のようになる。

$$I_f(r) = \sum_g [\Phi^+_g \{ \frac{1}{k} \cdot \sum_{g'} \chi_{g'} \frac{\partial (\nu_{g'} \Sigma_{fg'})}{\partial u} \Phi_{g'} - \frac{\partial \Sigma_{Rg}}{\partial u} \Phi_g + \sum_{g' \neq g} \frac{\partial \Sigma_{sg'g}}{\partial u} \Phi_{g'} \} - \nabla \Phi^+_g \frac{\partial D_g}{\partial u} \nabla \Phi_g ] \quad (B.11)$$

## B.2 計算手順

最適燃料濃度分布計算コードOPT-Dの計算手順を次に示す。また、計算の流れを図B.1に示す。

- (1) 入出力回数を減らすため、まず26群300KのMGCLライブラリから計算対象核種のみを取出したデータファイルを作成する。次に、巨視的断面積セット作成コードMAIL3.0<sup>1)</sup>に含まれる主要サブルーチンを用いて、平均濃度から0までを50点、最大濃度までを50点、計100点の濃度に対応する実効巨視的断面積セットを作成し、作業用ファイルに保存する。

なお、拡散係数については、 $D = 1 / (3\Sigma_{tr}) = 1 / [3(\Sigma_t - \Sigma_{s1})]$ とした。

- (2) 各領域の濃度に対応する巨視的断面積 $\Sigma$ 及び拡散係数 $D$ 、並びに燃料濃度についての1次微分係数 $\partial \Sigma / \partial u$ 及び $\partial D / \partial u$ を求める。このため、各領域の燃料濃度値を挟む3濃度点での巨視的断面積セットを(1)で作成した作業用ファイルから読み込み、2次曲線による内挿を行う。
- (3) (2)で算出した巨視的断面積 $\Sigma$ 及び拡散係数 $D$ を用いて1次元拡散計算を行い、固有値 $k$ 、固有中性子束 $\Phi$ 及び固有随伴中性子束 $\Phi^+$ を算出する。
- (4) (2)で算出した巨視的断面積、拡散係数及びこれらの燃料濃度での1次微分係数、(3)で算出した固有値、固有中性子束、随伴固有中性子束を用いて、(B.11)式によ

り燃料インポートンス分布  $I_f(\mathbf{r})$  を算出する。さらに、次回の反復計算で仮定する燃料濃度変化量  $\delta u(\mathbf{r})$  を次式によって決める。

$$\delta u(\mathbf{r}) = \Delta u \cdot \frac{I_f(\mathbf{r}) - I_a}{I_a} \quad (\text{B.12})$$

ここで、 $\Delta u$  は微小燃料濃度変化量であり、 $I_a$  は燃料インポートンスの平均値である。

- (5) (4) で求めた各領域での燃料濃度変化量  $\delta u(\mathbf{r})$  が収束判定値以内に収まっているか否かを判定し、収束していれば計算を終了する。収束していなければ(2)に戻り、収束するまで(2)から(4)の計算を繰り返す。

なお、(B.12)式に示した燃料の移動が、最大燃料濃度を越える燃料濃度あるいは負の燃料濃度を要求することがある。このような場合には、対応する領域の燃料濃度を最大燃料濃度あるいは0に設定し、それ以降の燃料濃度についての繰り返し計算では、この領域を除外した領域についてのみ燃料インポートンスが空間的に一定になるようにした。

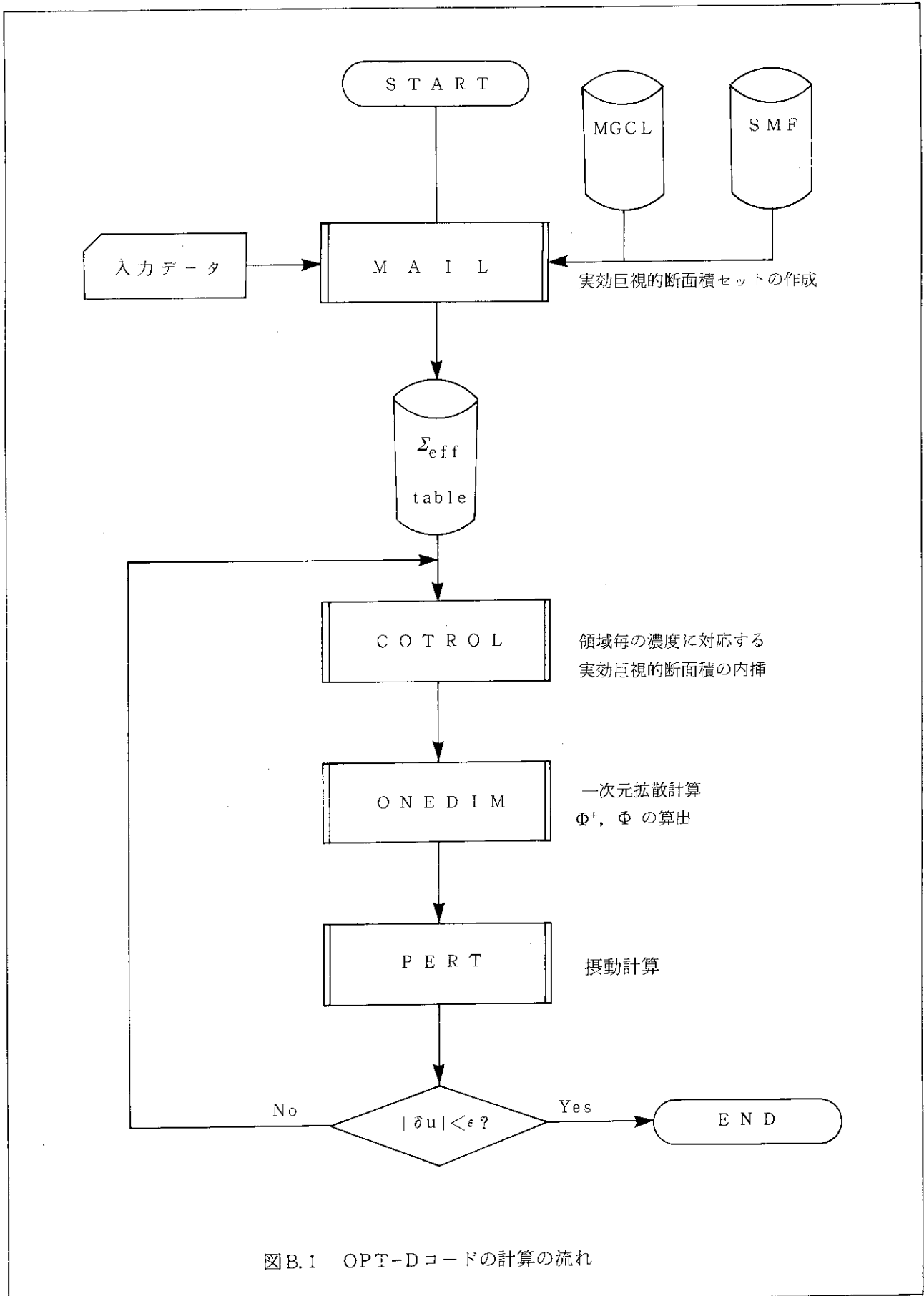
### B.3 使用手引き

OPT-Dコードで計算できる体系は、球、円柱、平板の1次元形状である。また、反射体として用いることができる物質は、20°Cの水のみである。

以下に、OPT-Dコードの入力データの手引き、OPT-Dコードで使用する論理機番の一覧、ジョブ制御文、入力データ及び出力リストの例を示す。

### 参考文献

- B1) 小室雄一・奥野浩・内藤俣孝・酒井友宏・塩田雅之・奥田泰久、「断面積セット作成プログラムMAIL3.0使用手引書」、JAERI-M90-126(1990)。



図B.1 OPT-Dコードの計算の流れ

## (1) 入力データの手引き

カード 1           FORMAT(A72)

1 - 72   TITL:   タイトルカード

カード 2           FORMAT(5I5)

1 - 5    IGM :   エネルギー群数 (現バージョンでは26群計算のみが可能)

6 -10   ITEMP:  f-tableの温度内挿オプション

=0  温度内挿しない

=1  温度内挿する

11 -15  IHFIT:  減速材質量効果補正オプション

=0  補正しない

=1  補正する

16 -20  JENDL:  MGCLライブラリー選択オプション       (省略値 4)

=3  MGCL-J3を参照する。

=4  MGCL-B-IVを参照する。

カード 2-A         FORMAT(3F10.0)

1 -10   TEMP1:  論理機番FT11に割り当てるMGCLライブラリーの温度   [K]

11 -20  TEMP2:  論理機番FT12に割り当てるMGCLライブラリーの温度   [K]

21 -30  TEMP :  内挿温度   [K]

注   カード2-Aはカード1のITEMPが0でない場合のみ必要となる。

## カード 3           FORMAT(7I5)

- 1 - 5     IP :   1 / 2 / 3   =  平板 / 円柱 / 球  
 6 -10    IRL :   左側境界条件 (= 1  完全反射, = - 1  真空)  
 11 -15   IBL :   右側境界条件 (= 1  完全反射, = - 1  真空)  
 16 -20   KMAX :   燃料領域分割数  
 21 -25   IMAX :   反射体領域分割数  
 26 -30   ITMAX :   最適分布計算最大反復回数  
 31 -35   IPRINT :   0 / 1   =  簡易出力 / 詳細出力  
 36 -40   ILP    :   燃料分布中で現れる極値の最大値

注  現バージョンでは、燃料領域の分割は体積等価分割のみが可能である。

注   $3 * KMAX + IMAX + 1$  が 200 を越えないこと。

## カード 4           FORMAT(7F10.0)

- 1 - 10    RF : 燃料半径           (c m)  
 11 - 20   WF : 反射体半径       (c m)  
 21 - 30   EPS1 : 拡散係数による中性子束収束判定値  
 31 - 40   EPS2 : 拡散係数による中性子源収束判定値  
 41 - 50   EPS3 : 燃料インポートランスの収束判定値  
 51 - 60   FACT : 燃料濃度繰り返し計算における加速、減速因子  
 61 - 70   CMAX : 燃料濃度として許される最大濃度

注  FACTの値が小さい場合濃度分布は収束したのにもかかわらず、燃料インポートランスが収束しない場合がある。また、FACTの値が大きすぎると振動して収束しない場合がある。

注  最大濃度として、理論密度を越えるような濃度を入力してはならない。

## カード 5      FORMAT(A80)

## 1 - 80 ITITLE: 燃料領域の表題

注 本プログラムでは、核燃料物質の指定をこのカードの先頭の数文字を用いて指定する。本プログラムでは、以下に示す核燃料物質の原子個数密度の計算が可能である。ITITLEの先頭で核燃料物質の識別子を指定すれば、その物質の原子個数密度が計算され断面積セットが計算される。燃料の原子個数密度の計算には燃料識別子の他に、次頁以降に示す組成の入力が要求される。

物質名	燃料識別子
U - H <sub>2</sub> O	*U*
UO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O	*UO2*
UO <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O	*UO3*
UO <sub>3</sub> O <sub>8</sub> -H <sub>2</sub> O	*U3O8*
UF <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	*UF4*
UF <sub>6</sub> -HF	*UF6*
UO <sub>2</sub> F <sub>2</sub> 水溶液	*UO2F2*
UO <sub>2</sub> (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 水溶液	*(U+PU)NO3*
Pu(NO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> 水溶液	*(U+PU)NO3*
Pu - H <sub>2</sub> O	*PU*
PuO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O	*PUO2*

*U*、*UO2*、*UO3*、*U3O8*、*UF4* のいずれかを指定したとき
---

カード 6 a	FORMAT( 3F10.0, 2I5 )
---------	-----------------------

カラム	1-10	ENR	:	ウラン濃縮度 [wt%]
	11-20	CONC	:	ウラン濃度(単位はIOXIDEで指定する)
	21-30	HBU	:	H/U原子個数比 [-]
	31-35	IOXIDE	:	CONCの単位識別子 = 0 [gU/cm <sup>3</sup> ] 単位 = 100 [gUO <sub>2</sub> /cm <sup>3</sup> ] 単位
	36-40	IT	:	水の温度 [°C]

[注意] 物質中に空隙がなければウラン濃度とH/U原子個数比のあいだには一定の関係が成立する。したがって CONC あるいは HBU のいずれかを指定すればよい。CONC < 0.0 かつ HBU ≥ 0.0 の場合には、HBU に基づき CONC が計算される。一方 CONC ≥ 0.0 かつ HBU < 0.0 の場合には、CONC に基づき HBU が計算される。

物質中に空隙がある場合(例えば、UO<sub>2</sub>粉末)には、CONC 及び HBU の両方を指定する。但し CONC ≥ 0.0 かつ HBU ≥ 0.0 である。また、実際には在り得ない CONC と HBU の組合せ(H/U原子個数密度対ウラン濃度曲線の外側にあたる領域)は避ける。

IOXIDE=100 を指定できるのは \*UO2\* の場合に限られる。その他の燃料では常に IOXIDE=0 とする。

H/Uの分母は全ウランを指す。IT は 1 から 100°C まで 1°C間隔で指定できる。IT=0 は20°Cを指定したことに等しい。

*UF6* を指定したとき
---------------

カード 6 b	FORMAT( 4F10.0 )
---------	------------------

カラム	1-10	DUF6HF	:	UF <sub>6</sub> -HF理論密度 [g/cm <sup>3</sup> ] (HFは不純物)
	11-20	ENR	:	ウラン濃縮度 [wt%]
	21-30	CONC	:	ウラン濃度 [gU/cm <sup>3</sup> ] (CONC < DUF6HF)
	31-40	P	:	UF <sub>6</sub> の純度 [wt%] ( UF <sub>6</sub> /(UF <sub>6</sub> +HF) 重量比 )

[注意] UF<sub>6</sub>-HFの理論密度は温度依存性が強いので、温度に応じた密度を入力する必要がある。その一例として、5.09g/cm<sup>3</sup> (温度 20℃、UF<sub>6</sub>純度 99.5wt%の場合) を挙げておく。

CONC=0.0 とすれば、理論密度状態における個数密度が得られる (この状態では、理論密度とウラン濃度のあいだには一定の関係があるので、ウラン濃度の入力は不用になる)。

UF<sub>6</sub>密度は温度依存性が強い。UF<sub>6</sub>密度対温度 曲線の一例を下記文献から転載して図1に示す。

"Uranium Hexafluoride : Handling and Container Criteria,"  
ORO-651 Revision 4(1977)



* (U+PU)NO3* を指定したとき
----------------------

カード 6c-1	FORMAT( 3F10.0, 15 )
----------	----------------------

カラム	1-10	CU	:	ウラン濃度 [gU/l]
	11-20	CPU	:	プルトニウム濃度 [gU/l]
	21-30	HBU	:	硝酸の酸性度 [mol/l]
	31-35	IT	:	溶液の温度 [°C]

カード 6c-2	FORMAT( 7F10.0 )
----------	------------------

① CU > 0.0 かつ CPU = 0.0 の場合

カラム	1-10	ABD(1)	:	<sup>235</sup> Uの同位体比 [wt%]
	11-20	ABD(2)	:	<sup>238</sup> Uの同位体比 [wt%]

② CU = 0.0 かつ CPU > 0.0 の場合

カラム	1-10	ABD(3)	:	<sup>238</sup> Puの同位体比 [wt%]
	11-20	ABD(4)	:	<sup>239</sup> Puの同位体比 [wt%]
	21-30	ABD(5)	:	<sup>240</sup> Puの同位体比 [wt%]
	31-40	ABD(6)	:	<sup>241</sup> Puの同位体比 [wt%]
	41-50	ABD(7)	:	<sup>242</sup> Puの同位体比 [wt%]

(次ページに続く)

* (U+PU)N03* を指定したとき
----------------------

カード 6c-2 (続き)
---------------

③  $CU > 0.0$  かつ  $CPU > 0.0$  の場合

カラム	1-10	ABD(1)	:	$^{235}\text{U}$ の同位体比 [wt%]
	11-20	ABD(2)	:	$^{238}\text{U}$ の同位体比 [wt%]
	21-30	ABD(3)	:	$^{238}\text{Pu}$ の同位体比 [wt%]
	31-40	ABD(4)	:	$^{239}\text{Pu}$ の同位体比 [wt%]
	41-50	ABD(5)	:	$^{240}\text{Pu}$ の同位体比 [wt%]
	51-60	ABD(6)	:	$^{241}\text{Pu}$ の同位体比 [wt%]
	61-70	ABD(7)	:	$^{242}\text{Pu}$ の同位体比 [wt%]

[注意] ウラン及びプルトニウム濃度は[gU/l]で入力する。ウラン及びプルトニウムのいずれも同位体比の合計は100.0でなければならない。

*PU*、*PUO2* のいずれかを指定したとき
--------------------------

カード 6 d	FORMAT( 7F10.0, 2I5 )
---------	-----------------------

カラム	1-10	CONC	:	プルトニウム濃度(単位はIOXIDEで指定する)
	11-20	HBPU	:	H/Pu原子個数比 [-]
	21-30	WP238	:	$^{238}\text{Pu}$ の同位体比 [wt%]
	31-40	WP239	:	$^{239}\text{Pu}$ の同位体比 [wt%]
	41-50	WP240	:	$^{240}\text{Pu}$ の同位体比 [wt%]
	51-60	WP241	:	$^{241}\text{Pu}$ の同位体比 [wt%]
	61-70	WP242	:	$^{242}\text{Pu}$ の同位体比 [wt%]
	71-75	IOXIDE	:	CONCの単位識別子
			=	0 [gPU/cm <sup>3</sup> ] 単位
			=	100 [gPUO <sub>2</sub> /cm <sup>3</sup> ] 単位
	76-80	IT	:	水の温度 [°C]

【注意】 CONC、HBPU 及び IT の取扱いはカード 6 a と同様である。IOXIDE=100 を指定できるのは \*PUO2\* の場合に限られる。\*PU\* の場合には常に IOXIDE=0 とする。H/PU の分母は全プルトニウムを指す。同位体比の合計は 100.0 でなければならない。

## \*UO2F2\* を指定したとき

カード 6 e    FORMAT( 3F10.0 )

カラム    1-10        ENR        :    ウラン濃縮度 [wt%]  
           11-20        CONC      :    ウラン濃度 [gU/cm<sup>3</sup>]  
           21-30        HBU        :    H/U原子個数比

[注意]    この燃料の場合、CONC>0.0 かつ HBU≦0.0 あるいは CONC<0.0 かつ HBU  
           ≧ 0.0 でなければならない。CONC≧0.0 かつ HBU≧0.0の組合せ、すなわち、  
           空隙の存在は許されない。

          溶液温度は指定できない。25℃ 一定である。

## (2) 入出力論理機番の一覧

ユニット番号	使用内容
2	ワークファイル
3	ワークファイル
5	入力データ読み込み用
6	出力
11	26群 MGCL ライブラリ
31	26群 SMF ライブラリ
41	ワークファイル

## (3) ジョブ制御文及び入力データの例

```

T(3) W(0) I(4) C(3)
// EXEC FORT77,SO='J3755.OPTD',A='ELM(*)'
// EXEC LKED
// EXEC GO
//FT05F001 DD DDNAME=SYSIN
//FT06F001 DD SYSOUT=*
//FT11F001 DD DSN=J1446.CL26300.DATA,DISP=SHR,LABEL=(,,,IN)
//FT31F001 DD DSN=J1446.SMF26302.DATA,DISP=SHR,LABEL=(,,,IN)
//FT02F001 DD SPACE=(TRK,(10,10)),UNIT=WK10,DISP=(,DELETE),
// DCB=(RECFM=VBS,LRECL=19064,BLKSIZE=19068,DSORG=PS)
//FT41F001 DD SPACE=(TRK,(10,10)),UNIT=WK10,DISP=(,DELETE),
// DCB=(RECFM=VBS,LRECL=19064,BLKSIZE=19068,DSORG=PS)
//FT03F001 DD SPACE=(TRK,(10,10)),UNIT=WK10,DISP=(,DELETE),
// DCB=(RECFM=VBS,LRECL=19064,BLKSIZE=19068,DSORG=PS)
//SYSIN DD *
  UO2(NO3)2    FUEL CONCENTRATION 300 GU/L
  26
    0      1    -1    10    20  500    0      1
  9.0      30.0      1330.0    1.0E-5    1.0E-5    1.0E-3    1.0
*(U+PU)NO3*
  300.0    0.0      0.0      20
  5.0      95.0
/*
//

```

(4) 出力リストの例

```

*****
*                               *
*   INPUT DATA LIST   *
*                               *
*****

.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....
1   UD2(NO3)2   FUEL CONCENTRATION 300 GU/L
2       26
3       0       1       -1       10       20       500       0       1
4       9.0     30.0           1330.0     1.0E-5     1.0E-5     1.0E-3     1.0
5   *(U+PU)NO3*
6       300.0     0.0           0.0           20
7       5.0     95.0
.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....

*** INPUT DATA END ***

** OPTIMIZE CONCENTRATION SEARCH CODE ** VER 1.0

```

UO2(NO3)2 FUEL CONCENTRATION 300 GU/L

FUEL IMPORTANCE

1.4303280E-03			
1.6792567E-04	1.6536708E-04	1.6045496E-04	1.5359178E-04
1.4541228E-04	1.3677859E-04	1.2882877E-04	1.2303256E-04
1.2139620E-04	1.2754220E-04	0.0	

ITERATION NO.	K-EFFECTIVE	MAX ERROR
1	0.67985	2.000E-01
2	0.68252	6.284E-02
3	0.68260	3.237E-02
4	0.68261	2.070E-02
5	0.68261	1.884E-02
6	0.68261	2.915E-02
7	0.68260	1.300E-02
8	0.68263	1.320E-02
9	0.68264	8.093E-03
10	0.68265	3.959E-03
11	0.68264	4.014E-03
12	0.68263	3.662E-03
13	0.68262	3.468E-03
14	0.68262	3.465E-03
15	0.68262	3.157E-03
16	0.68262	7.303E-03
17	0.68262	3.238E-03
18	0.68263	4.136E-03
19	0.68262	6.046E-03
20	0.68262	3.443E-03
21	0.68262	3.391E-03
22	0.68262	6.905E-03
23	0.68263	3.209E-03
24	0.68263	3.215E-03
25	0.68263	6.462E-03
26	0.68263	3.116E-03
27	0.68263	3.148E-03
28	0.68264	6.477E-03
29	0.68262	3.001E-03
30	0.68263	3.015E-03
31	0.68263	2.850E-03
32	0.68263	8.588E-03
33	0.68263	3.010E-03
34	0.68263	3.019E-03
35	0.68263	2.717E-03
36	0.68263	8.690E-03
37	0.68263	2.729E-03
38	0.68263	2.622E-03
39	0.68263	2.002E-03
40	0.68263	8.386E-03
41	0.68263	2.640E-03
42	0.68263	2.387E-03
43	0.68263	2.065E-03
44	0.68263	1.862E-03
45	0.68262	1.889E-03
46	0.68262	2.086E-03
47	0.68263	2.568E-03
48	0.68262	2.477E-03
49	0.68262	9.164E-03
50	0.68262	3.046E-03

UO2(NO3)2 FUEL CONCENTRATION 300 GU/L

ITERATION NO.	K-EFFECTIVE	MAX ERROR
51	0.68262	1.204E-03
52	0.68262	1.206E-03
53	0.68262	1.202E-03
54	0.68262	1.147E-03
55	0.68263	1.109E-03
56	0.68263	1.063E-03
57	0.68263	1.057E-03
58	0.68263	1.067E-03
59	0.68263	8.799E-03
60	0.68262	1.619E-03
61	0.68262	1.676E-03
62	0.68263	1.565E-03
63	0.68263	1.382E-03
64	0.68263	1.176E-03
65	0.68263	1.084E-03
66	0.68263	8.567E-03
67	0.68262	1.515E-03
68	0.68262	1.613E-03
69	0.68262	1.530E-03
70	0.68263	1.386E-03
71	0.68262	1.210E-03
72	0.68263	9.794E-04

UO2(NO3)2 FUEL CONCENTRATION 300 GU/L

FUEL IMPORTANCE

1.3715336E-03			
1.3715649E-04	1.3715413E-04	1.3715040E-04	1.3714291E-04
1.3724188E-04	1.3710621E-04	1.3725861E-04	1.3709436E-04
1.3709159E-04	1.3713836E-04	0.0	

FUEL CONCENTRATION

365.3208	360.1392	350.6548	337.7886	320.8193
294.5032	269.9890	240.6151	186.8274	273.3403