

JAERI - M  
88-159

UO<sub>2</sub>燃料棒の臨界性における非均質効果及び  
最適ペレット直径

1988年8月

酒井 友宏\*・内藤 俣孝・小室 雄一

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 いばらき印刷(株)

UO<sub>2</sub>燃料棒の臨界性における非均質効果及び最適ペレット直径

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部

酒井友宏<sup>\*</sup>・内藤倣孝・小室雄一

(1988年7月28日受理)

一般に臨界質量、臨界寸法等の臨界量は、核燃料物質が減速材と均質に混合している状態と非均質な状態では異なる。無限に長いUO<sub>2</sub>ペレットを水中に正方格子状に配列した体系を対象にウラン濃縮度、ペレット直径及び格子間隔を変えて臨界量を計算し、最小の臨界量を与えるペレット直径(最適ペレット直径)をウラン濃縮度ごとに求めた。

この結果から、臨界寸法の場合にはウラン濃縮度が20 wt%以上、臨界ウラン質量の場合には10 wt%以上になると、均質系の最小臨界量は非均質系を下回ることがわかった。したがって、これらの濃縮度範囲のUO<sub>2</sub>を取扱う機器等の設計には、均質ばかりでなく非均質であっても、均質UO<sub>2</sub>の臨界データを適用できる。

---

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

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方字白根2-4

\* 日本情報サービス(株)

Heterogeneity Effect and Optimum Rod Diameter of UO<sub>2</sub>  
Fuel Rod on the Criticality

Tomohiro SAKAI\*, Yoshitaka NAITO and Yuichi KOMURO

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

(Received July 28, 1988)

Critical mass and critical dimension of homogeneous mixture of nuclear material and moderator will not be commonly equal to those of heterogeneous identical material. Critical sizes of square lattices of infinitely long UO<sub>2</sub> rods with various <sup>235</sup>U enrichment, rod diameter and lattice pitch were calculated so as to obtain the rod diameter which gives a minimum critical size.

The criticality calculations resulted that minimum critical uranium mass of homogeneous UO<sub>2</sub> whose <sup>235</sup>U enrichment is more than 10 wt% and minimum critical dimension of homogeneous UO<sub>2</sub> whose <sup>235</sup>U enrichment is more than 20 wt% became less than those of heterogeneous identical materials, respectively. It is safely concluded that if <sup>235</sup>U enrichment is more than 10 or 20 wt%, criticality data for homogeneous UO<sub>2</sub> can be applicable to not only homogeneous, also heterogeneous system.

Keywords: Criticality Safety, Heterogeneous and Homogeneous UO<sub>2</sub>,  
Low Enrichment, Heterogeneity Effect, Optimum Pellet  
Diameter.

---

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

\* Japan Information Service, Ltd.

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. 計 算 .....	1
2.1 対 象 .....	1
2.2 手 順 .....	2
2.3 手 法 .....	2
2.3.1 非均質系 .....	2
2.3.2 均 質 系 .....	4
2.4 モデル (ANISN用) .....	5
2.5 条 件 (ANISN用) .....	5
3. 計算結果 .....	5
3.1 UO <sub>2</sub> ペレット直径に対する臨界量の変化 .....	5
3.2 最小球体積及び最小ウラン質量の均質系と非均質系における比較 .....	5
4. 考 察 .....	6
4.1 非均質効果 .....	6
4.2 正方格子と三角格子 .....	6
4.3 最適ペレット直径 .....	6
4.4 外国のデータとの比較 .....	6
5. 結 論 .....	7
参考文献 .....	7

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Calculations .....	1
2.1 Object .....	1
2.2 Procedure .....	2
2.3 Method .....	2
2.3.1 Heterogeneous System .....	2
2.3.2 Homogeneous System .....	4
2.4 Model for ANISN .....	5
2.5 Conditions for ANISN .....	5
3. Results of Calculations .....	5
3.1 Variation of Critical Value vs. UO <sub>2</sub> Pellet Diameter .....	5
3.2 Comparison of Minimum Critical Volum and Minimum Critical Uranium Mass between Homogeneous and Heterogeneous Systems ..	5
4. Consideration .....	6
4.1 Heterogeneity Effect .....	6
4.2 Square Lattice and Triangular Lattice .....	6
4.3 Optinum Rod Diameter .....	6
4.4 Comparison with Foreign Criticality Data .....	6
5. Conclusions .....	7
Reference .....	7

# 1. 緒 言

臨界条件（ちょうど臨界となる核燃料物質の質量または形状寸法）を決定する要因には、燃料の濃度（または水素対核分裂性核種個数比）・核分裂性同位体比（たとえばウラン濃縮度）・形状・非均質性、及び反射体の有無などがある。本書では無限に長い $\text{UO}_2$ ペレットを対象に、燃料の非均質性と臨界条件の関係について検討するとともに臨界上最適なペレット直径を計算によって求めた。

$\text{UO}_2$ の最適ペレット直径及び最小臨界条件（最適直径の $\text{UO}_2$ ペレットを最適な間隔で配列した場合の臨界形状寸法・質量）を少数の外国の文献（4.4節参照）から見出すことができるが、いずれも計算方法が明らかでない。このような事情から、我が国でよく使われている臨界コードシステムを利用してこれらの値を計算するとともに計算の方法を記録しておく。

燃料の非均質効果に関わる概説は多くの文献から見出すことができるが、たとえば文献1)には次のような一文がある。「非均質格子では、同量の物質で作った均質の混合体に比べて熱中性子利用率 $f$ は小さく、一方共鳴を逃れる確率 $p$ と、高速核分裂因子 $\epsilon$ は、大きい。そこで、もしも $p$ と $\epsilon$ の増加が $f$ の減少を補って余りあるとすれば、非均質格子の $k_{\infty}$ は等価な均質体系のものよりも大きくなる。事実、(軽水減速材中の)天然ウランと、微濃縮ウランの場合にはその通りである。つまり、 $^{235}\text{U}$ にして約5%の濃縮度までは、燃料を塊状にすれば $k_{\infty}$ は増加するが、濃縮度がこれより高ければ逆に $k_{\infty}$ は減少する。」(カッコ内筆者追加)

これを裏返せば、低濃縮ウラン非均質格子系の臨界条件は、均質系よりも厳しい（臨界量が小さい）ことになる。つまり、低濃縮ウランの臨界性を検討するときには、均質・非均質の双方をみなしなければならないことがある。しかし、非均質効果（ $k_{\infty, \text{homo}} < k_{\infty, \text{hetero}}$ となることをこう呼ぶことにする。）のしきい値となるウラン濃縮度がわかれば、非均質効果のないウラン濃縮度の場合、非均質系への配慮は不用になり、均質系の臨界データを採用しても安全である。

本書では、また、非均質効果の表れるウラン濃縮度の範囲を計算によって明らかにすることを試みた。無限に長い $\text{UO}_2$ ペレットを水中に正方格子状に配列した体系を対象とした。

# 2. 計 算

## 2.1 対 象

非均質系として、無限に長い $\text{UO}_2$ ペレットを水中に正方格子状に配列した体系をとりあげた。 $\text{UO}_2$ ペレットの組成及び直径は次の通りである。

ウラン濃縮度：3, 5, 10, 20, 40 wt%

直 径：0 (均質), 0.2, 0.5, 0.7, 1.0, 1.4 cm

密 度：理論密度の95%

## 1. 緒 言

臨界条件（ちょうど臨界となる核燃料物質の質量または形状寸法）を決定する要因には、燃料の濃度（または水素対核分裂性核種個数比）・核分裂性同位体比（たとえばウラン濃縮度）・形状・非均質性、及び反射体の有無などがある。本書では無限に長い $UO_2$ ペレットを対象に、燃料の非均質性と臨界条件の関係について検討するとともに臨界上最適なペレット直径を計算によって求めた。

$UO_2$ の最適ペレット直径及び最小臨界条件（最適直径の $UO_2$ ペレットを最適な間隔で配列した場合の臨界形状寸法・質量）を少数の外国の文献（4.4節参照）から見出すことができるが、いずれも計算方法が明らかでない。このような事情から、我が国でよく使われている臨界コードシステムを利用してこれらの値を計算するとともに計算の方法を記録しておく。

燃料の非均質効果に関わる概説は多くの文献から見出すことができるが、たとえば文献1)には次のような一文がある。「非均質格子では、同量の物質で作った均質の混合体に比べて熱中性子利用率 $f$ は小さく、一方共鳴を逃れる確率 $p$ と、高速核分裂因子 $\epsilon$ は、大きい。そこで、もしも $p$ と $\epsilon$ の増加が $f$ の減少を補って余りあるとすれば、非均質格子の $k_{\infty}$ は等価な均質体系のものよりも大きくなる。事実、(軽水減速材中の)天然ウランと、微濃縮ウランの場合にはその通りである。つまり、 $^{235}U$ にして約5%の濃縮度までは、燃料を塊状にすれば $k_{\infty}$ は増加するが、濃縮度がこれより高ければ逆に $k_{\infty}$ は減少する。」(カッコ内筆者追加)

これを裏返せば、低濃縮ウラン非均質格子系の臨界条件は、均質系よりも厳しい（臨界量が小さい）ことになる。つまり、低濃縮ウランの臨界性を検討するときには、均質・非均質の双方をみななければならないことがある。しかし、非均質効果（ $k_{\infty, \text{homo}} < k_{\infty, \text{hetero}}$ となることをこう呼ぶことにする。）のしきい値となるウラン濃縮度がわかれば、非均質効果のないウラン濃縮度の場合、非均質系への配慮は不用になり、均質系の臨界データを採用しても安全である。

本書では、また、非均質効果の表れるウラン濃縮度の範囲を計算によって明らかにすることを試みた。無限に長い $UO_2$ ペレットを水中に正方格子状に配列した体系を対象とした。

## 2. 計 算

### 2.1 対 象

非均質系として、無限に長い $UO_2$ ペレットを水中に正方格子状に配列した体系をとりあげた。 $UO_2$ ペレットの組成及び直径は次の通りである。

ウラン濃縮度：3, 5, 10, 20, 40 wt%

直 径：0 (均質), 0.2, 0.5, 0.7, 1.0, 1.4 cm

密 度：理論密度の95%



ペレット間隔（格子間隔）は最適間隔（最大の $k_{\infty}$ を与えるペレット間隔）を把握できる範囲で変化させた。

ペレット直径0cmとは均質系のことである。均質系には、 $\text{UO}_2$ と水が均質に混合した仮想的な燃料（均質 $\text{UO}_2-\text{H}_2\text{O}$ ）に水反射体が付いた体系を考えた。ウラン濃縮度は非均質系に合わせた。

## 2.2 手順

図2.1にウラン質量の場合の計算のおよその手順を示す。あるウラン濃縮度をもつ $\text{UO}_2$ 燃料の最適減速条件下の臨界ウラン質量 $M$ を、非均質系と均質系の双方について求め、比較する。その結果が $M_{\text{hetero}} < M_{\text{homo}}$ であれば、初めに指定したウラン濃縮度の場合には非均質効果が認められたと判断する。

$M_{\text{hetero}}$ は次のようにして求める。最大の $k_{\infty}$ を与えるペレット直径と格子間隔の組合せを見つけだし、この単位セルと等価な均質化断面積をもつ球体の臨界直径を求め、これをウラン質量 $M_{\text{hetero}}$ に換算する。 $M_{\text{homo}}$ の場合には、最大の $k_{\infty}$ を与えるウラン濃度を見つけだし、この濃度の $\text{UO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 球体の臨界直径を求め、これをウラン質量 $M_{\text{homo}}$ に換算する。以上の計算を前節に述べた5種類のウラン濃縮度について実施する。

## 2.3 手法

図2.1に示した流れに沿って、主要な部分を図中の番号に従って説明する。

### 2.3.1 非均質系

#### 手続き①-a $k_{\infty}$ 及び中性子移動面積 $M^2$ の計算

図2.2に詳細な流れ図を示す。指定されたウラン濃縮度の $\text{UO}_2$ ペレット及び水の原子個数密度、及びペレット直径と格子間隔を処理プログラムMAIL<sup>2)</sup>に入力して、ペレット及び水の実効巨視的断面積セット $\Sigma_{\text{eff}}$ （ANISN型）を作成する。この計算には、多群定数として137群300K MGCL<sup>2)</sup>を用いる。次に、 $\Sigma_{\text{eff}}$ （ANISN型）とペレット直径及び格子間隔を一次元 $S_n$ プログラムANISN<sup>3)</sup>に入力して、ペレット及び水で構成される非均質単位格子を均質化した $\Sigma_{\text{eff}}$ （ANISN型）を計算する。これをREMAIL<sup>2)</sup>を介して $\Sigma_{\text{eff}}$ （KENO型）に変換してSIMCRI<sup>4)</sup>に送り、 $k_{\infty}$ の計算及びこの $k_{\infty}$ と指定した実効増倍係数 $k_{\text{eff}}$ に対応する中性子移動面積 $M^2$ の計算を行う。

#### 手続き②-a 臨界量の計算

- ・ 形状寸法（球体積，無限円柱半径，無限平板厚さ）の場合  
一群理論より，

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

ここで，

$M^2$  : 中性子移動面積,

$B^2$  : 形状バックリング,

$k_\infty$  : 無限増倍係数,

$k_{eff}$  : 実効増倍係数 (臨界値)。

$B^2$  は形状ごとに次の各式で与えられる。

$$\text{球} : B^2 = \left( \frac{\pi}{R + \delta} \right)^2 \quad (2-1)$$

$$\text{無限円柱} : B^2 = \left( \frac{2.405}{R + \delta} \right)^2 \quad (2-2)$$

$$\text{無限平板} : B^2 = \left( \frac{\pi}{T + 2\delta} \right)^2 \quad (2-3)$$

ここで,

R : 球半径, 円柱半径,

T : 平板厚さ,

$\delta$  : 反射体節約。

次に, 上記四式より臨界球体積, 臨界円柱半径R, 臨界平板厚さTを表す式を導出する。

$$\text{球体積} : V = \frac{4}{3} \pi \left( \pi \sqrt{\frac{M^2}{k_\infty / k_{eff} - 1}} - \delta \right)^3 \quad (3-1)$$

$$\text{円柱直径} : D = 2 \left( 2.405 \sqrt{\frac{M^2}{k_\infty / k_{eff} - 1}} - \delta \right) \quad (3-2)$$

$$\text{平板厚さ} : T = \pi \sqrt{\frac{M^2}{k_\infty / k_{eff} - 1}} - 2\delta \quad (3-3)$$

手続き①-a から得られる  $k_\infty$  及び  $M^2$  を式(3-1), 式(3-2), 式(3-3)に代入して臨界球体積, 臨界円柱直径, 臨界平板厚さを得る。ただし,  $k_{eff} = 0.990$ ,  $\delta = 7 \text{ cm}$  とする。<sup>註1)</sup>

・ ウラン質量の場合

ペレット直径  $d$ , 格子間隔  $p$  の単位正方格子を考える。この格子中の水対燃料体積比  $V_{H_2O} / V_{UO_2}$  は次式で表せる。

$$\frac{V_{H_2O}}{V_{UO_2}} = \frac{p^2 - \pi d^2 / 4}{\pi d^2 / 4} = \frac{4}{\pi} \left( \frac{p}{d} \right)^2 - 1 = \alpha \quad (4)$$

式(3-1)に示す体積  $V$  の球に含まれる  $UO_2$  の質量  $M_{UO_2}$  は,

$$\begin{aligned} \text{UO}_2 \text{ 質量} : M_{UO_2} &= V_{UO_2} \cdot \rho_{UO_2} = V \cdot \frac{V_{UO_2}}{V} \cdot \rho_{UO_2} \\ &= V \cdot \left( \frac{V_{UO_2}}{V_{H_2O} + V_{UO_2}} \right) \cdot \rho_{UO_2} \end{aligned}$$

註1 暫定値である。本計算結果は  $k_{eff}$  の値に依存しないので, この値自身にはあまり大きな意味はない。

$$\begin{aligned}
 &= V \cdot \left( \frac{1}{\alpha + 1} \right) \cdot \rho_{\text{UO}_2} \\
 &= \frac{4}{3} \pi \left( \pi \sqrt{\frac{M^2}{k_{\infty} / k_{\text{eff}} - 1}} - \delta \right)^3 \cdot \left( \frac{1}{\alpha + 1} \right) \cdot \rho_{\text{UO}_2} \quad (3-4)
 \end{aligned}$$

である。ここで、 $\rho_{\text{UO}_2}$  は  $\text{UO}_2$  ペレットの密度である。球は水と  $\text{UO}_2$  ペレットからできていて、球体積  $V$  は  $V_{\text{H}_2\text{O}}$  と  $V_{\text{UO}_2}$  の和に等しいものとした。 $\text{UO}_2$  質量  $M_{\text{UO}_2}$  からウラン質量  $M_{\text{U}}$  への変換は次のようにすればよい。

$$M_{\text{U}} = M_{\text{UO}_2} \cdot \frac{A_{\text{U}}}{A_{\text{U}} + 2A_{\text{O}}} \quad (5)$$

ここで、 $A_{\text{U}}$ 、 $A_{\text{O}}$  はそれぞれウランと酸素の原子量である。

手続き①-a から得られる  $k_{\infty}$  及び  $M^2$  を式 (3-4) に代入して、格子間隔ごとの臨界ウラン質量を得る。

#### 手続き②-a' 格子間隔に対する最小臨界量の決定

手続き②-a を格子間隔の数だけ繰返して得られる格子間隔と臨界量の関係を二次式でフィッティングして、最小の臨界ウラン質量、臨界球体積、臨界円柱直径、臨界平板厚さを求める (図 2.1 参照)。

#### 手続き③-a ペレット直径に対する最小臨界量の決定

手続き②-a' をペレット直径の種類だけ繰返して得られるペレット直径と臨界量の関係を二次式でフィッティングして、最小の臨界ウラン質量、臨界球体積、臨界円柱直径、臨界平板厚さを求める (図 2.1 参照)。

### 2.3.2 均質系

#### 手続き①-b $k_{\infty}$ 及び中性子移動面積 $M^2$ の計算

図 2.3 に詳細な流れ図を示す。指定されたウラン濃縮度及びウラン濃度の原子個数密度を MAIL に入力して均質  $\text{UO}_2 - \text{H}_2\text{O}$  の実効巨視的断面積  $\Sigma_{\text{eff}}$  (KENO型) を作成する。これを SIMCRI に送り、 $k_{\infty}$  の計算及びこの  $k_{\infty}$  と指定した実効増倍係数  $k_{\text{eff}}$  に対応する中性子移動面積  $M^2$  の計算を行う。

#### 手続き②-b 臨界量の計算

手続き①-b から得られる  $k_{\infty}$  及び  $M^2$  を式 (3-1)、式 (3-2)、式 (3-3) に代入して、臨界球体積、臨界円柱直径、臨界平板厚さを得る。ただし、 $k_{\text{eff}} = 0.990$ 、 $\delta = 7 \text{ cm}$  とする。

臨界ウラン質量は次式から求める。

$$M_{\text{U}} = \frac{4}{3} \pi \left( \pi \sqrt{\frac{M^2}{k_{\infty} / k_{\text{eff}} - 1}} - \delta \right)^3 \cdot c \quad (3-4')$$

ここで、 $c$  はウラン濃度 ( $\text{gU}/\text{cm}^3$ ) である。

#### 手続き③-b ウラン濃度に対する最少臨界量の決定

手続き②-b をウラン濃度の種類だけ繰返して得られるウラン濃度と臨界量の関係を二次式でフィッティングして、最小の臨界ウラン質量、臨界球体積、臨界円柱直径、臨界平板厚さを求める (図 2.1 参照)。

## 2.4 モデル (ANISN用)

無限長 $UO_2$ ペレットと水で構成される非均質の単位正方格子の均質化断面積を求めるための計算をANISNで行うが(図2.2参照),この際無限円柱モデルを用いた。正方格子をこのモデルに合わせるために,ペレットの周囲の正方断面の水領域を面積が等しい円に変換する近似を行う。これ以外の計算では,計算のためのモデルはとくに必要としない。

## 2.5 条件 (ANISN用)

以下のとおりである。

エネルギー群数	: 137
散乱断面積の次数	: $P_1$
角度分点数	: $S_8$
空間メッシュ幅	: 0.7 cm 以下
境界条件	: 鏡面反射
固有値の収束条件	: $1.0 \times 10^{-5}$
中性子束の収束条件	: $1.0 \times 10^{-5}$

# 3. 計算結果

## 3.1 $UO_2$ ペレット直径に対する臨界量の変化

手続き②-a'及び手続き③-bの結果を表1.1及び表1.2に示す。(ペレット直径)=0 cmの項が手続き③-b(均質系)の結果で,その他のペレット直径の項はすべて手続き②-a'(非均質系)の結果である。表中のデータをグラフ化して図3.1から図3.4に示す。

## 3.2 最小球体積及び最小ウラン質量の均質系と非均質系における比較

手続き④の結果のうち,球体積及びウラン質量について図3.5及び図3.6に示す。これらの図は,図3.1及び図3.4のデータを抽出して描いたものである。球体積について示してある図3.5について説明すると,均質系の曲線は図3.1の(ペレット直径)=0 cmの球体積をウラン濃縮度ごとに抽出・プロットしたものであり,非均質系とは,図3.1の(ペレット直径) $\neq 0$ の球体積曲線の最小値を濃縮度ごとに抽出・プロットしたものである。なお,円柱直径及び平板厚さに関する手続き④の結果の紹介は省略した。これらの量が最小となるペレット直径は,球体積の場合と同じだからである。

## 2.4 モデル (ANISN用)

無限長 $\text{UO}_2$ ペレットと水で構成される非均質の単位正方格子の均質化断面積を求めるための計算をANISNで行うが(図2.2参照),この際無限円柱モデルを用いた。正方格子をこのモデルに合わせるために,ペレットの周囲の正方断面の水領域を面積が等しい円に変換する近似を行う。これ以外の計算では,計算のためのモデルはとくに必要としない。

## 2.5 条件 (ANISN用)

以下のとおりである。

エネルギー群数	: 137
散乱断面積の次数	: $P_1$
角度分点数	: $S_8$
空間メッシュ幅	: 0.7 cm 以下
境界条件	: 鏡面反射
固有値の収束条件	: $1.0 \times 10^{-5}$
中性子束の収束条件	: $1.0 \times 10^{-5}$

# 3. 計算結果

## 3.1 $\text{UO}_2$ ペレット直径に対する臨界量の変化

手続き②-a'及び手続き③-bの結果を表1.1及び表1.2に示す。(ペレット直径)=0 cmの項が手続き③-b(均質系)の結果で,その他のペレット直径の項はすべて手続き②-a'(非均質系)の結果である。表中のデータをグラフ化して図3.1から図3.4に示す。

## 3.2 最小球体積及び最小ウラン質量の均質系と非均質系における比較

手続き④の結果のうち,球体積及びウラン質量について図3.5及び図3.6に示す。これらの図は,図3.1及び図3.4のデータを抽出して描いたものである。球体積について示してある図3.5について説明すると,均質系の曲線は図3.1の(ペレット直径)=0 cmの球体積をウラン濃縮度ごとに抽出・プロットしたものであり,非均質系とは,図3.1の(ペレット直径) $\neq 0$ の球体積曲線の最小値を濃縮度ごとに抽出・プロットしたものである。なお,円柱直径及び平板厚さに関する手続き④の結果の紹介は省略した。これらの量が最小となるペレット直径は,球体積の場合と同じだからである。

## 4. 考 察

### 4.1 非均質効果

3章に示した図 3.5 及び図 3.6 より、形状寸法の場合にはウラン濃縮度 20 wt%以下、ウラン質量の場合には 10 wt%以下の領域で、非均質系の臨界量が均質系の臨界量を下まわることがわかる。すなわち、この領域でのみ非均質効果が認められた。この結果に従えば、これらの値以上の濃縮度をもつ  $\text{UO}_2$  の臨界性の検討にあたっては、非均質効果への配慮は不用になり、均質系の臨界データをそのまま適用できる。

### 4.2 正方格子と三角格子

本計算では、無限に長い  $\text{UO}_2$  ペレットが正方格子状に並んだ体系を対象としている。4.1 節に述べたこのような特定の配列型から得られた結果が、他の配列型にも適用できるのか、本節で検討する。ウラン濃縮度が 3, 5 wt% の  $\text{UO}_2$  ペレットの三角格子配列を対象に、球体積について同様の計算を行った。その結果と正方格子配列の値（図 3.1 の濃縮度 3, 5 wt% の曲線上の白点）とをあわせて図 4.1 に示す。いずれの濃縮度でも、配列型の違いに関係なくペレット直径に対する最小臨界球体積の変化の様子はほぼ同じであることがわかる。したがって、4.1 節に述べたことは三角格子配列に対してもいえる。

### 4.3 最適ペレット直径

表 1.1 及び表 1.2 には、各ペレット直径ごとの最小臨界量が形状寸法とウラン質量に分けて表示してある。この表のデータから各最小臨界量の最小値を与えるペレット直径（最適ペレット直径）を求めて、表 2.1 及び表 2.2 に示す。表 2.1 には表 1.1 のペレット直径と最小球体積との関係を二次式でフィッティングして求めた最適ペレット直径が示してあるが、円柱直径または平板厚さから求めても結果は同じである。ウラン濃縮度が高くなるにしたがって最適ペレット直径が小さくなる様子がよくわかる。表 2.1 にはウラン濃縮度 40 wt% の最適ペレット直径が、表 2.2 には 10, 20, 40 wt% における最適ペレット直径が欠落しているが、このことは、最適ペレット直径が存在しない、すなわち、非均質効果が表れず、均質時の臨界量の方が小さいことを意味する。

### 4.4 外国のデータとの比較

図 3.1 から図 3.4 の妥当性を、外国の文献に記載されている値との比較により検討する。西独臨界ハンドブック<sup>5)</sup> 及び DP-1014<sup>6)</sup> に比較のためのデータを求めたところ、ウラン濃縮度が 3 及

び5 wt%の最小球体積及び最小ウラン質量が載っていたので、これらと対応する図3.1及び図3.4中のデータとを一括して、表3.1及び表3.2に示す。なお、これ以外の濃縮度及び形状に関するデータは見出せなかった。

表中の最小球体積及び最小ウラン質量とは、それぞれ図3.1及び図3.4に描いてある曲線の最小値である。その時のペレット直径が、最適ペレット直径である。表に戻って、最小球体積及び最小ウラン質量を出典ごとに比較してみると、DP-1014、西独ハンドブックは本書の値に較べてせいぜい5%どまりの差異をもつ程度である。一方、最適ペレット直径は30%以上の違いが認められるものもある。この様子は図3.1及び図3.4中の曲線を見れば理解できる。濃縮度3及び5 wt%のいずれも最小値付近の曲線変化は非常にゆるやかで、ペレット直径の変化に対する球体積、ウラン質量の変化は小さい。このような事情から、出典の違い（換言すれば、計算プログラムの違い、計算結果の内挿法の違い）によって、最適ペレット直径は少なくない違いを有することになる。

## 5. 結 論

ウラン濃縮度40 wt%以下の均質 $\text{UO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 及び非均質 $\text{UO}_2$ ペレット- $\text{H}_2\text{O}$ 正方格子配列を対象に、非均質効果の有無及び最適ペレット直径をウラン濃縮度ごとに計算によって求めた。

形状寸法の場合にはウラン濃縮度20 wt%以下、ウラン質量の場合には濃縮度10 wt%以下で非均質効果が表れることを確認した。さらに、このことは三角格子配列に対してもいえることを明らかにした。非均質効果の表れる範囲内で最適ペレット直径を示し、これを外国の文献値と比較したが、良い一致はみられなかった。ただし、最適ペレット直径における臨界量は5%以内の差異をもつ程度である。

### 参考文献

- 1) 武田充司, 仁科浩二郎共訳, "ラマーシュ 原子炉の初等理論(上), (下)" 吉岡書店 (1976)
- 2) Y. Naito, et al., "MGCL-Processor : A Computer Code System for Processing Multigroup Constants Library MGCL", JAERI-M9396 (1981)
- 3) K. Koyama, et al., "RADHEAT-V3, A Code System for Generating Coupled Neutron and Gamma-Ray Group Constants and Analyzing Radiation Transport", JAERI-M7155 (1977)
- 4) Shou-ichi NAKAMURA, et al., "SIMCRI : A Simple Computer Code for Calculating Nuclear Criticality Parameters," JAERI-M 86-027 (1986)
- 5) W. Thomas, W. Weber, "Handbook of Criticality," Thechnical University of Munich (1972)
- 6) Hugh K. Clark, "Critical and Safe Masses and Dimensions of Lattices of U and  $\text{UO}_2$  Rods in Water," DP-1014 (1966)

び5 wt%の最小球体積及び最小ウラン質量が載っていたので、これらと対応する図3.1及び図3.4中のデータとを一括して、表3.1及び表3.2に示す。なお、これ以外の濃縮度及び形状に関するデータは見出せなかった。

表中の最小球体積及び最小ウラン質量とは、それぞれ図3.1及び図3.4に描いてある曲線の最小値である。その時のペレット直径が、最適ペレット直径である。表に戻って、最小球体積及び最小ウラン質量を出典ごとに比較してみると、DP-1014、西独ハンドブックは本書の値に較べてせいぜい5%どまりの差異をもつ程度である。一方、最適ペレット直径は30%以上の違いが認められるものもある。この様子は図3.1及び図3.4中の曲線を見れば理解できる。濃縮度3及び5 wt%のいずれも最小値付近の曲線変化は非常にゆるやかで、ペレット直径の変化に対する球体積、ウラン質量の変化は小さい。このような事情から、出典の違い（換言すれば、計算プログラムの違い、計算結果の内挿法の違い）によって、最適ペレット直径は少くない違いを有することになる。

## 5. 結 論

ウラン濃縮度40 wt%以下の均質 $\text{UO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 及び非均質 $\text{UO}_2$ ペレット- $\text{H}_2\text{O}$ 正方格子配列を対象に、非均質効果の有無及び最適ペレット直径をウラン濃縮度ごとに計算によって求めた。

形状寸法の場合にはウラン濃縮度20 wt%以下、ウラン質量の場合には濃縮度10 wt%以下で非均質効果が表れることを確認した。さらに、このことは三角格子配列に対してもいえることを明らかにした。非均質効果の表れる範囲内で最適ペレット直径を示し、これを外国の文献値と比較したが、良い一致はみられなかった。ただし、最適ペレット直径における臨界量は5%以内の差異をもつ程度である。

### 参考文献

- 1) 武田充司, 仁科浩二郎共訳, "ラマーシュ 原子炉の初等理論(上), (下)" 吉岡書店 (1976)
- 2) Y. Naito, et al., "MGCL-Processor : A Computer Code System for Processing Multigroup Constants Library MGCL", JAERI-M9396 (1981)
- 3) K. Koyama, et al., "RADHEAT-V3, A Code System for Generating Coupled Neutron and Gamma-Ray Group Constants and Analyzing Radiation Transport", JAERI-M7155 (1977)
- 4) Shou-ichi NAKAMURA, et al., "SIMCRI : A Simple Computer Code for Calculating Nuclear Criticality Parameters," JAERI-M 86-027 (1986)
- 5) W. Thomas, W. Weber, "Handbook of Criticality," Thechnical University of Munich (1972)
- 6) Hugh K. Clark, "Critical and Safe Masses and Dimensions of Lattices of U and  $\text{UO}_2$  Rods in Water," DP-1014 (1966)



び5 wt%の最小球体積及び最小ウラン質量が載っていたので、これらと対応する図3.1及び図3.4中のデータとを一括して、表3.1及び表3.2に示す。なお、これ以外の濃縮度及び形状に関するデータは見出せなかった。

表中の最小球体積及び最小ウラン質量とは、それぞれ図3.1及び図3.4に描いてある曲線の最小値である。その時のペレット直径が、最適ペレット直径である。表に戻って、最小球体積及び最小ウラン質量を出典ごとに比較してみると、DP-1014、西独ハンドブックは本書の値に較べてせいぜい5%どまりの差異をもつ程度である。一方、最適ペレット直径は30%以上の違いが認められるものもある。この様子は図3.1及び図3.4中の曲線を見れば理解できる。濃縮度3及び5 wt%のいずれも最小値付近の曲線変化は非常にゆるやかで、ペレット直径の変化に対する球体積、ウラン質量の変化は小さい。このような事情から、出典の違い（換言すれば、計算プログラムの違い、計算結果の内挿法の違い）によって、最適ペレット直径は少なくない違いを有することになる。

## 5. 結 論

ウラン濃縮度40 wt%以下の均質 $\text{UO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 及び非均質 $\text{UO}_2$ ペレット- $\text{H}_2\text{O}$ 正方格子配列を対象に、非均質効果の有無及び最適ペレット直径をウラン濃縮度ごとに計算によって求めた。

形状寸法の場合にはウラン濃縮度20 wt%以下、ウラン質量の場合には濃縮度10 wt%以下で非均質効果が表れることを確認した。さらに、このことは三角格子配列に対してもいえることを明らかにした。非均質効果の表れる範囲内で最適ペレット直径を示し、これを外国の文献値と比較したが、良い一致はみられなかった。ただし、最適ペレット直径における臨界量は5%以内の差異をもつ程度である。

### 参考文献

- 1) 武田充司, 仁科浩二郎共訳, "ラマーシュ 原子炉の初等理論(上), (下)" 吉岡書店 (1976)
- 2) Y. Naito, et al., "MGCL-Processor : A Computer Code System for Processing Multigroup Constants Library MGCL", JAERI-M9396 (1981)
- 3) K. Koyama, et al., "RADHEAT-V3, A Code System for Generating Coupled Neutron and Gamma-Ray Group Constants and Analyzing Radiation Transport", JAERI-M7155 (1977)
- 4) Shou-ichi NAKAMURA, et al., "SIMCRI : A Simple Computer Code for Calculating Nuclear Criticality Parameters," JAERI-M 86-027 (1986)
- 5) W. Thomas, W. Weber, "Handbook of Criticality," Thechnical University of Munich (1972)
- 6) Hugh K. Clark, "Critical and Safe Masses and Dimensions of Lattices of U and  $\text{UO}_2$  Rods in Water," DP-1014 (1966)

表 1.1 均質  $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$  及び非均質  $\text{UO}_2$  ペレット- $\text{H}_2\text{O}$  正方格子の最小臨界条件  
(形状寸法, 水反射体付き体系)

ウラン濃縮度 [wt %]	ペレット直径 [cm]	水対 $\text{UO}_2$ 体積比	球体積 [ℓ]	円柱直径 [cm]	平板厚さ [cm]
3	0 (均質)	—	50.2	31.8	15.9
	0.2	3.362	47.1	31.0	15.4
	0.5	2.998	41.4	29.6	14.5
	0.7	2.783	40.5	29.3	14.3
	1.0	2.593	40.2	29.3	14.3
	1.4	2.325	41.3	29.6	14.4
5	0 (均質)	—	26.6	25.1	11.5
	0.2	5.064	24.8	24.4	11.1
	0.5	4.145	23.7	24.0	10.8
	0.7	3.607	23.2	23.8	10.7
	1.0	3.364	23.9	24.1	10.9
	1.4	2.857	24.7	24.4	11.1
10	0 (均質)	—	15.0	20.1	8.29
	0.2	6.931	13.6	19.4	7.82
	0.5	6.083	13.2	19.2	7.66
	0.7	5.247	13.8	19.5	7.89
	1.0	3.927	14.7	20.0	8.21
	1.4	3.342	15.8	20.6	8.57
20	0 (均質)	—	10.14	17.3	6.43
	0.2	9.900	9.95	17.1	6.34
	0.5	7.040	10.1	17.2	6.40
	0.7	5.826	10.2	17.3	6.45
	1.0	4.636	11.0	17.8	6.79
	1.4	3.650	11.9	18.4	7.15
40	0 (均質)	—	7.48	15.3	5.13
	0.2	10.19	7.55	15.4	5.17
	0.5	7.025	7.82	15.6	5.32
	0.7	4.975	8.15	15.8	5.49
	1.0	4.751	8.45	16.1	5.64
	1.4	3.574	8.88	16.4	5.85

表 1.2 均質  $\text{UO}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$  及び非均質  $\text{UO}_2$  ペレット- $\text{H}_2\text{O}$  正方格子の最小臨界条件  
(ウラン質量, 水反射体付き体系)

ウラン濃縮度 〔wt%〕	ペレット直径 〔cm〕	水対 $\text{UO}_2$ 体 積 比	ウ ラ ン 質 量 〔kg〕
3.0	0 (均質)	—	91.3
	0.2	5.828	79.9
	0.5	5.043	78.6
	0.7	4.206	86.7
	1.0	4.114	87.6
	1.4	3.573	99.1
5.0	0 (均質)	—	34.4
	0.2	9.014	32.3
	0.5	7.480	34.4
	0.7	6.958	41.0
	1.0	5.573	42.6
	1.4	4.388	51.1
10.0	0 (均質)	—	11.8
	0.2	15.68	12.6
	0.5	11.01	15.7
	0.7	9.523	18.2
	1.0	7.599	22.0
	1.4	5.394	28.4
20.0	0 (均質)	—	4.62
	0.2	25.96	6.02
	0.5	14.4	9.08
	0.7	10.31	11.3
	1.0	8.080	14.7
	1.4	6.13	19.6
40.0	0 (均質)	—	1.97
	0.2	34.11	3.60
	0.5	17.38	6.34
	0.7	12.37	8.21
	1.0	9.058	11.1
	1.4	6.306	14.6

表 2.1  $\text{UO}_2$  ペレット- $\text{H}_2\text{O}$  正方格子の最適ペレット直径  
(形状寸法, 水反射体付き条件)

ウラン濃縮度 [wt %]	最適ペレット直径 [cm]	最適水対 $\text{UO}_2$ 体積比
3	0.94	2.630
5	0.73	3.553
10	0.43	6.335
20	0.25	9.337

表 2.2  $\text{UO}_2$  ペレット- $\text{H}_2\text{O}$  正方格子の最適ペレット直径  
(ウラン質量, 水反射体付き条件)

ウラン濃縮度 [wt %]	最適ペレット直径 [cm]	最適水対 $\text{UO}_2$ 体積比
3	0.37	5.441
5	0.25	8.696

表 3.1 非均質  $UO_2$  の最小臨界球体積及び最適ペレット直径の比較

出典	ウラン濃縮度 〔wt%〕	最適ペレット 直径〔cm〕	最適水対 $UO_2$ 体積比	最小臨界球体積 〔ℓ〕
本書		0.94	2.63	40.2
DP-1014	3	1.2	4.0	38.8
西独ハンドブック		—	—	38.0
本書		0.73	3.55	23.2
DP-1014	5	0.9	6.0	22.1
西独ハンドブック		—	—	22.0

表 3.2 非均質  $UO_2$  の最小臨界ウラン質量及び最適ペレット直径の比較

出典	ウラン濃縮度 〔wt%〕	最適ペレット 直径〔cm〕	最適水対 $UO_2$ 体積比	最小臨界球体積 〔ℓ〕
本書		0.37	5.44	77.2
DP-1014	3	0.5	10	78.6
西独ハンドブック		—	—	81.5
本書		0.25	8.70	32.2
DP-1014	5	0.3	18	31.2
西独ハンドブック		—	—	31.2

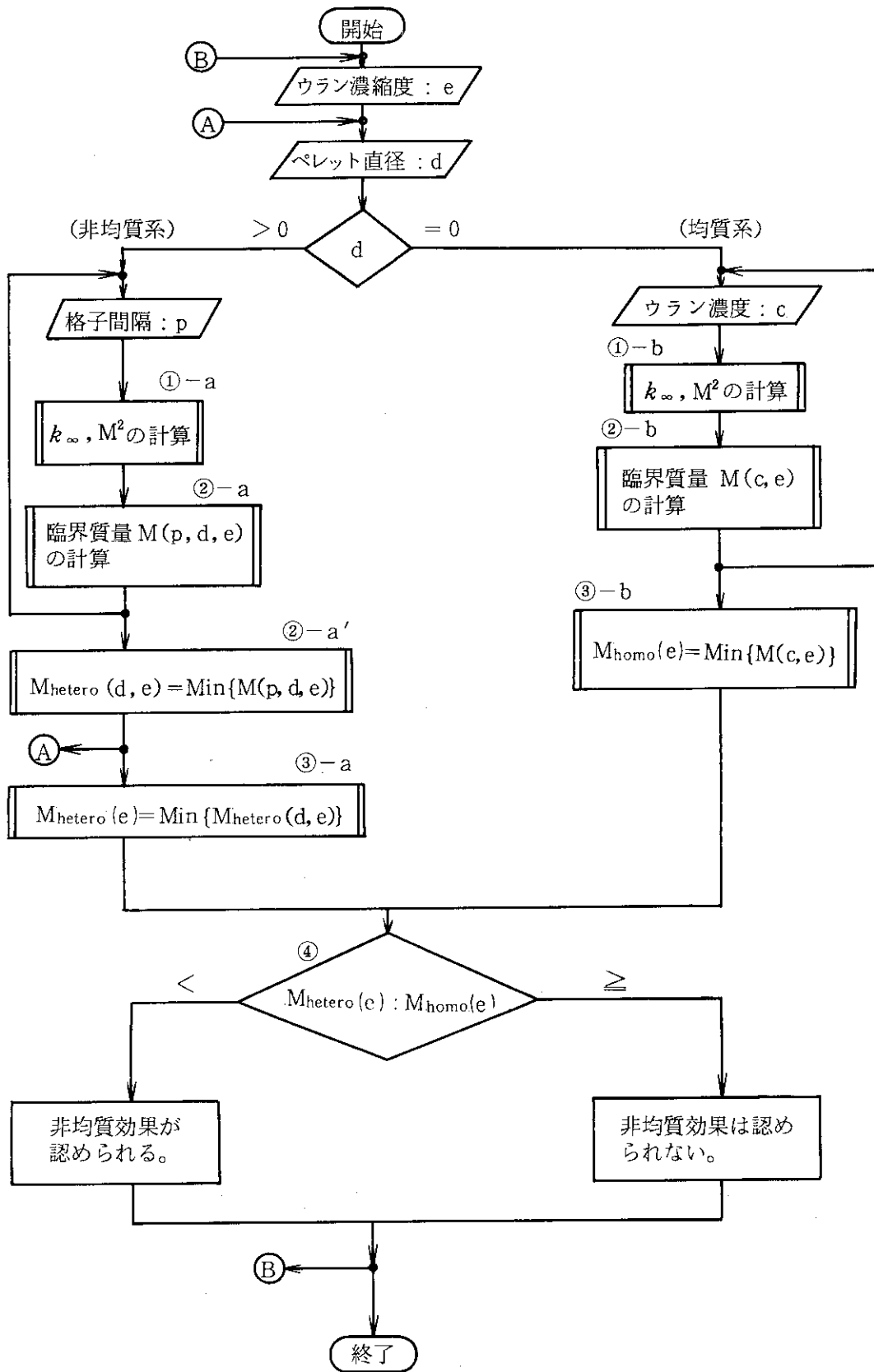


図 2.1 非均質効果検討のための計算の流れ図

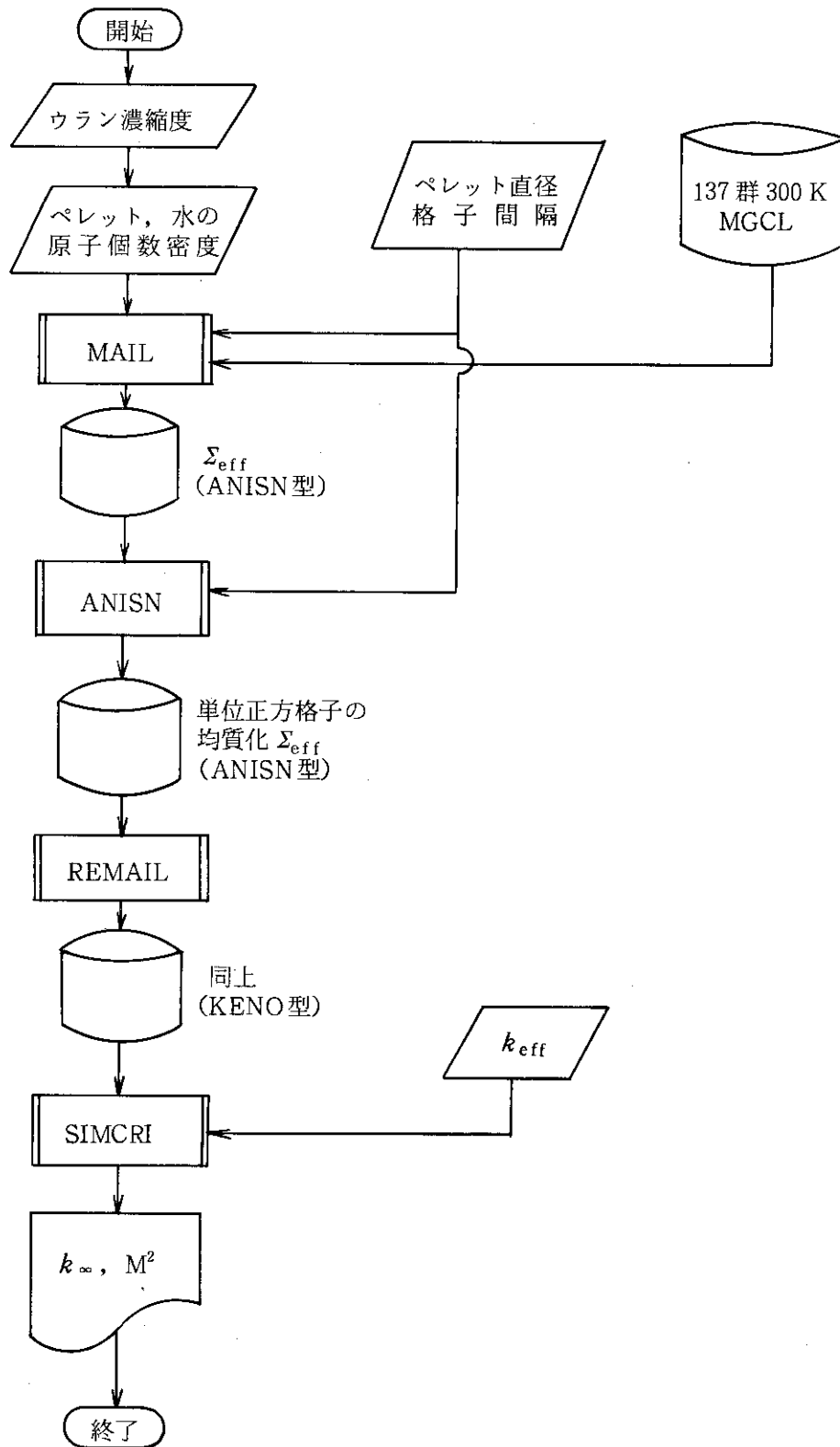


図 2.2 非均質系の計算手法 (図 1 の手続き①-a)

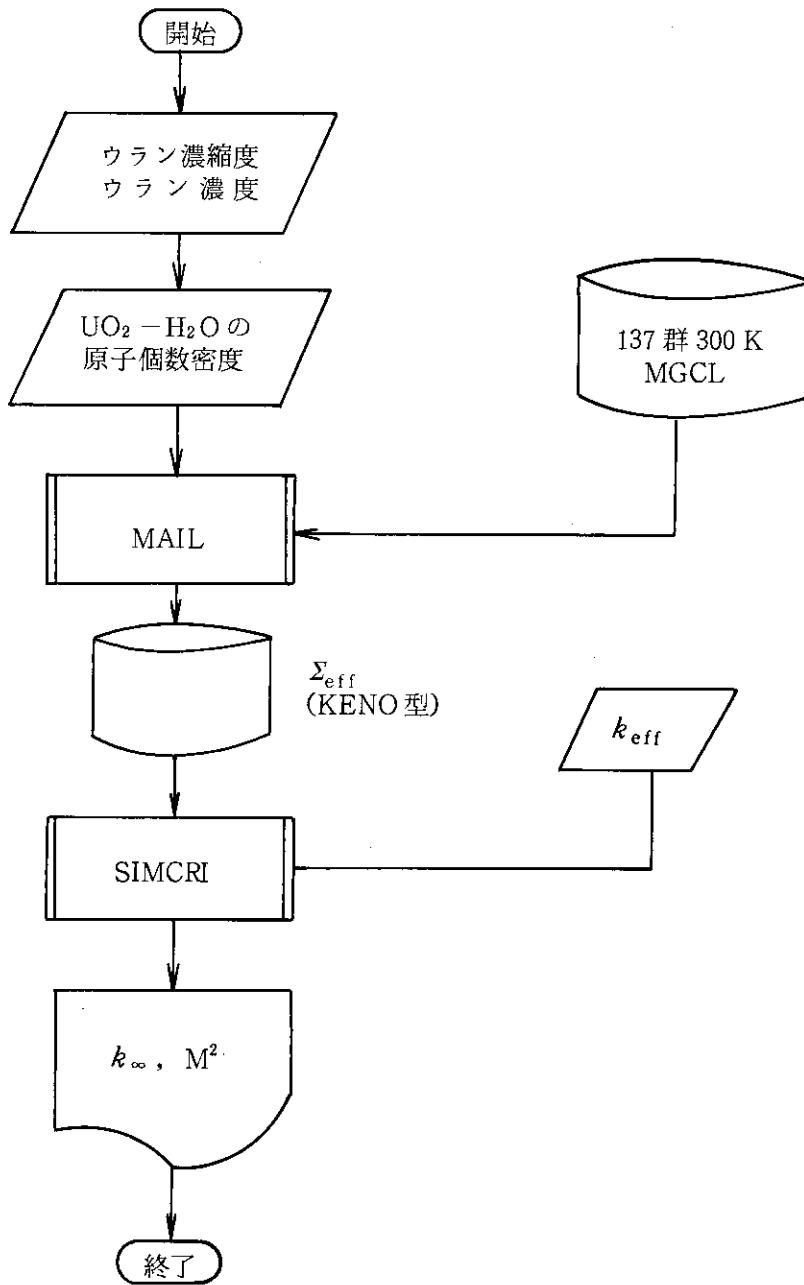


図 2.3 均質系の計算手法 (図 2.1 の手続き①-b)



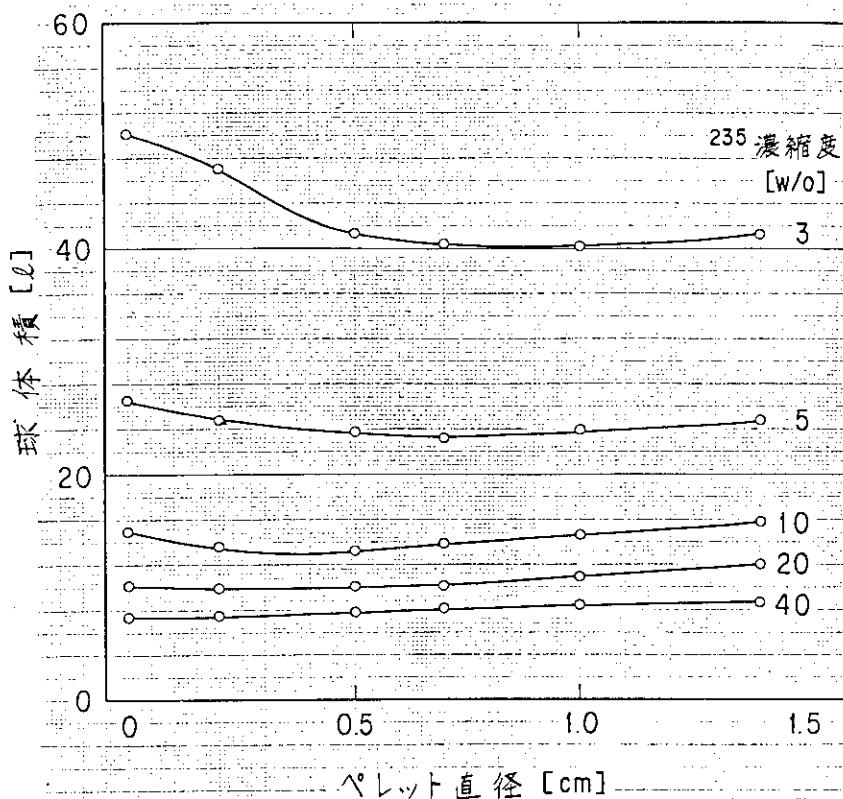


図 3.1 ペレット直径に対する臨界球体積の変化  
 (非均質  $UO_2-H_2O$  体系, 正方格子, 水減速材, 最適減速, 水反射体付き)

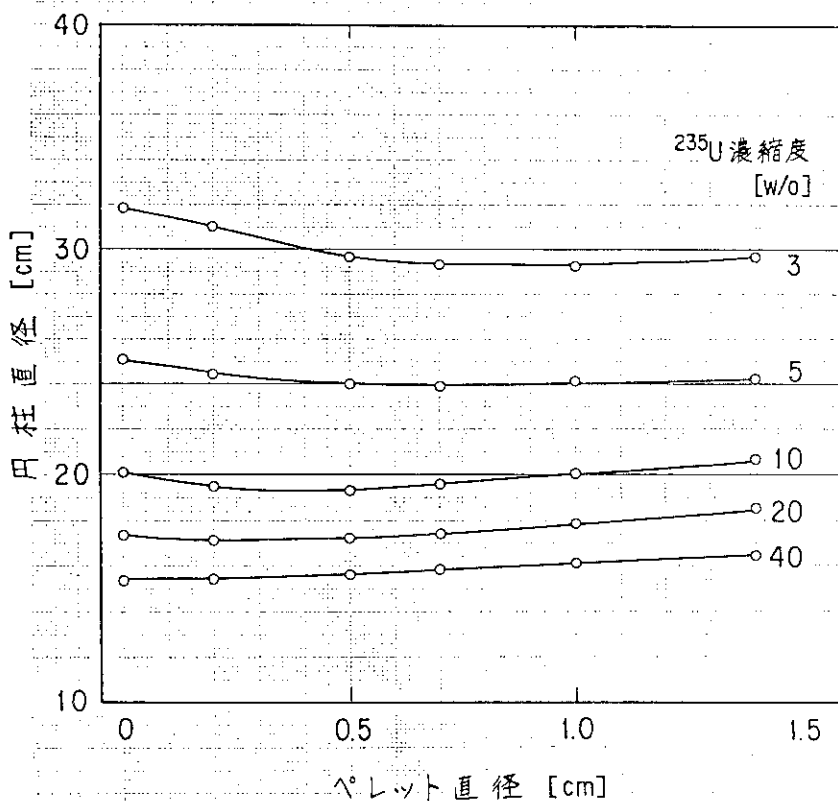


図 3.2 ペレット直径に対する臨界無限円柱直径の変化  
 (非均質  $UO_2-H_2O$  体系, 正方格子, 水減速材, 最適減速, 水反射体付き)

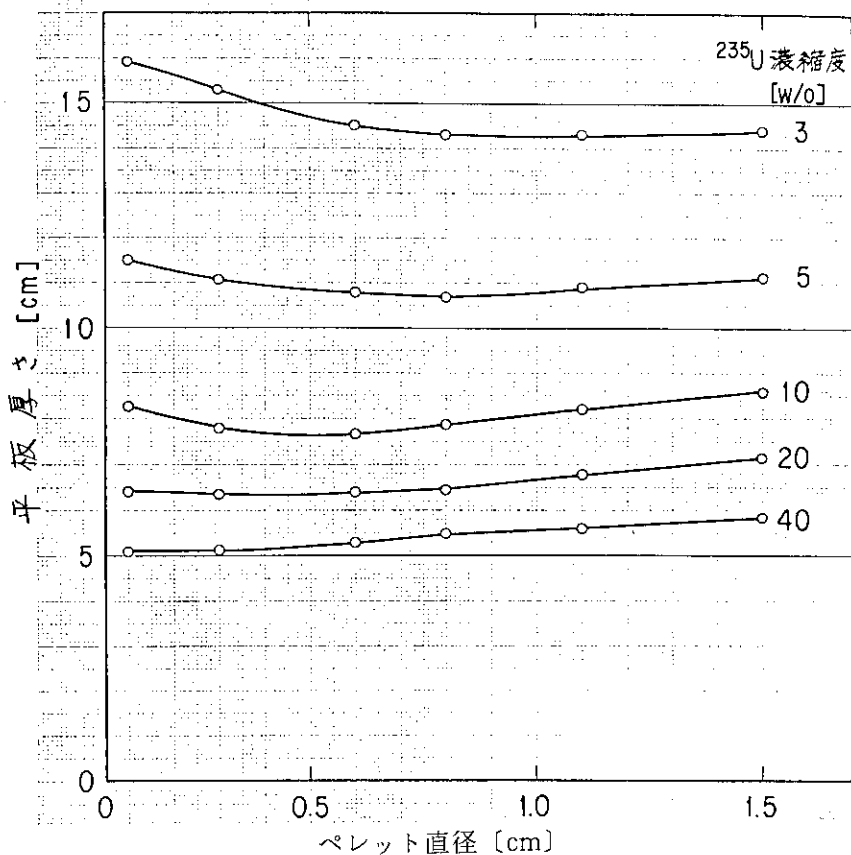


図 3.3 ペレット直径に対する臨界無限平板厚さの変化  
 (非均質  $UO_2-H_2O$  体系, 正方格子, 水減速材, 最適減速, 水反射体付き)

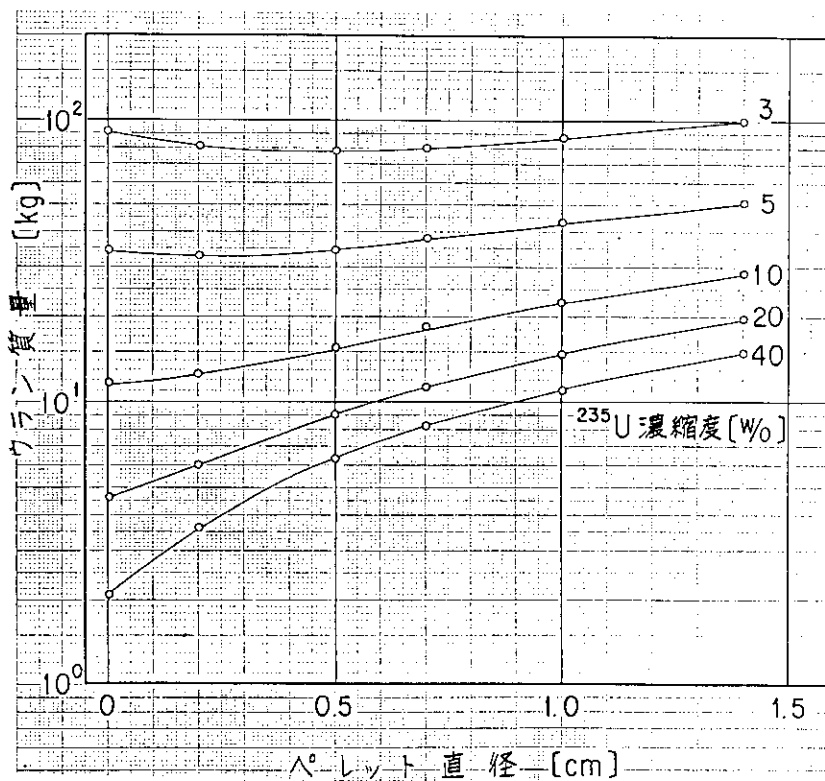


図 3.4 ペレット直径に対する臨界ウラン質量の変化  
 (非均質  $UO_2-H_2O$  体系, 正方格子, 水減速材, 最適減速, 水反射体付き)

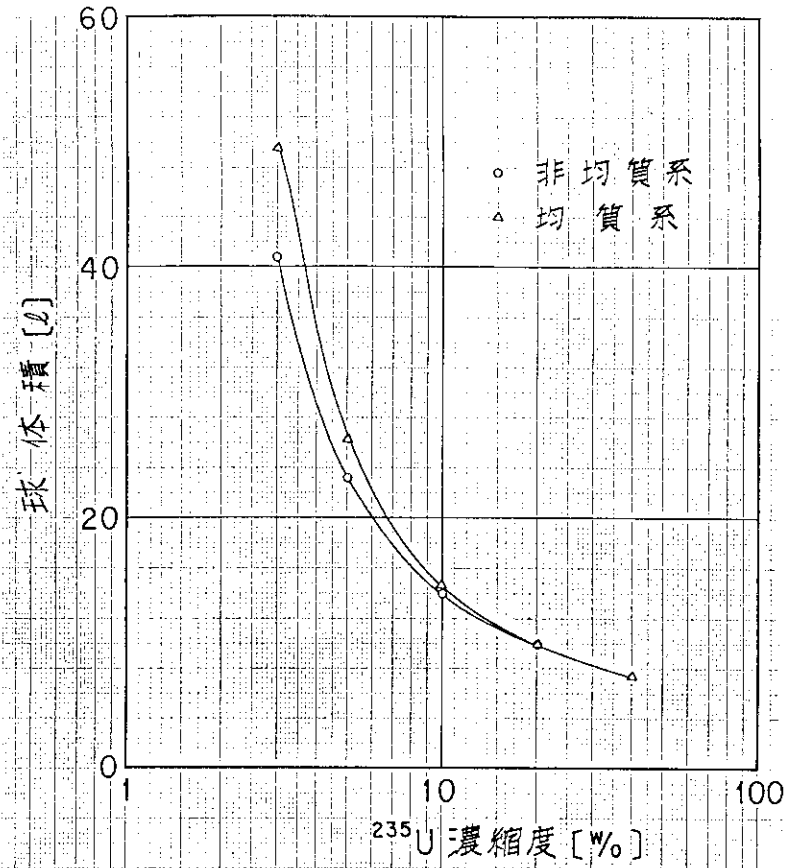


図 3.5 均質  $\text{UO}_2 - \text{H}_2\text{O}$  と非均質  $\text{UO}_2 - \text{H}_2\text{O}$  体系における最小臨界球体積の比較 (水反射体付き)

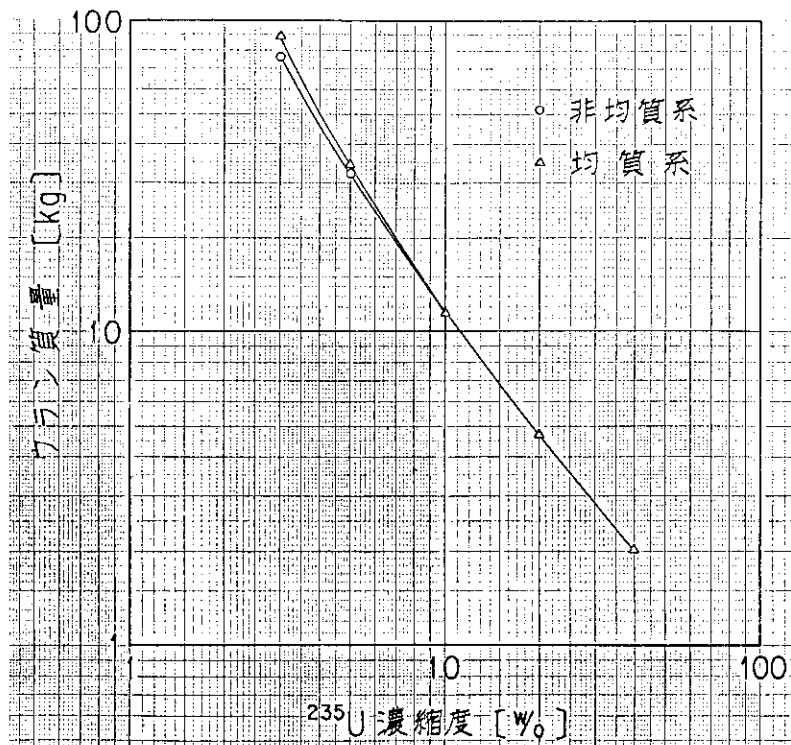


図 3.6 均質  $\text{UO}_2 - \text{H}_2\text{O}$  と非均質  $\text{UO}_2 - \text{H}_2\text{O}$  体系における最小ウラン質量の比較 (水反射体付き)

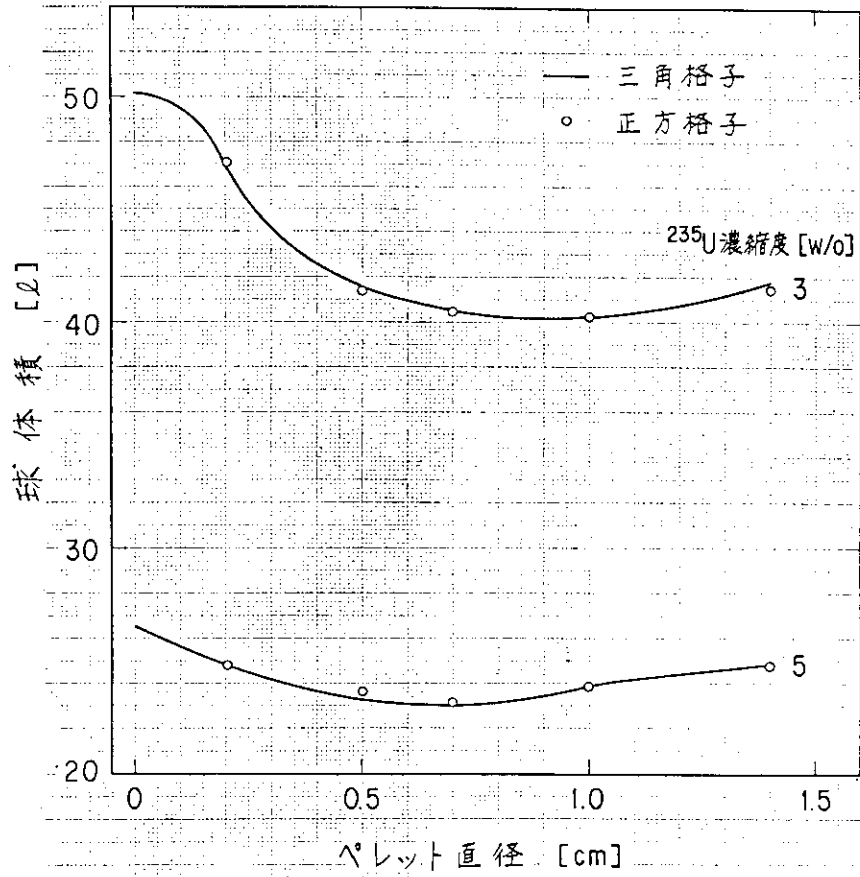


図4.1 正方格子と三角格子における最小球体積の比較  
 (非均質  $\text{UO}_2 - \text{H}_2\text{O}$  体系, 水減速材, 水反射体付き)