

JAERI-M
91-107

二酸化ウラン燃料粒径の反応度に及ぼす効果
—衝突確率法計算コードを用いた超多群計算による検討—
(受託研究)

1991年8月

奥野 浩・奥田 泰久*

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, 1991

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

二酸化ウラン燃料粒径の反応度に及ぼす効果
— 衝突確率法計算コードを用いた超多群計算による検討 —

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部

奥野 浩・奥田 泰久*

(1991年7月24日受理)

粉末状またはスラリー状燃料の非均質効果を調べるために小さな1つの燃料塊とその周囲の水からなる微小な燃料セルの反応度を計算する。燃料の種類は低濃縮の二酸化ウラン燃料で、冠水状態を想定する。水と燃料の体積比を一定のまま燃料塊の大きさに応じてセルを小さくしていく。燃料塊の大きさ0の極限を均質と見なす。超多群エネルギーの中性子輸送方程式を衝突確率法で解く方法を用いて反応率を計算する。衝突確率の計算はRABBLEコード(高速群側)及びTHERMOSコード(熱群側)を球状セルに拡張して実施する。無限増倍率及び四因子と、その均質系からの変化割合を求める。低濃縮度(3~10wt%)の二酸化ウラン球状燃料と水からなる配列系では、平均濃度が同一としてそれを均質とみなすと、燃料粒径が2mmでも反応度を2%程度低く見積ること及びその主因子は共鳴を逃れる確率にあることが計算の結果明らかになった。

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

*住友原子力工業株

Effects of UO₂-fuel Grain Size on Reactivity
- Study by Ultra-fine Energy Group Calculations
Using the Computer Codes Based on the Collision Probability Method -

Hiroshi OKUNO and Yasuhisa OKUDA*

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

(Received July 24, 1991)

Heterogeneity effects of powdered or slurry fuel is studied through reactivity calculations of tiny cells consisting of a small fuel lump surrounded by water. The kind of fuel is slightly-enriched uranium dioxide which is immersed in water. The cells are made smaller keeping constant the volume ratio of water to fuel; the homogeneous system is regarded as the limit of grain size 0. Reaction rates are calculated by solving the ultra-fine energy group transport equations by the collision probability method. The collision probabilities are calculated using the extended version of the RABBLE code for the fast energy groups and that of the THERMOS code for the thermal energy groups as applicable to spherical cells. The infinite-medium multiplication factor and its four-factors, and their fractional changes from the homogeneous system are obtained. The results of calculations show that substitution of homogeneous system for heterogeneous ones underestimates the reactivity some 2% for as small as 2-mm-diam. fuel elements, and this underestimation mainly comes from the change of the resonance escape probability.

Keywords: Heterogeneity Effect, Grain Size, Uranium Dioxide, Cell Calculation, Resonance Escape Probability, Ultra-fine Energy Group, Collision Probability Method, RABBLE, THERMOS, Criticality Safety

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

* Sumitomo Atomic Energy Industries, Ltd.

目 次

| | |
|--|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. 棒状燃料の2次元配列 | 1 |
| 2.1 計算対象 | 1 |
| 2.2 計算方法 | 2 |
| 2.3 計算結果と検討 | 3 |
| 3. 球状燃料の3次元配列 | 19 |
| 3.1 計算対象 | 19 |
| 3.2 計算方法 | 19 |
| 3.3 計算結果と検討 | 19 |
| 4. 結論と今後の課題 | 36 |
| 謝 辞 | 36 |
| 参考文献 | 37 |
| 付録A 衝突確率法計算における幾何形状及び領域の区分数・メッシュ数の効果 | 38 |
| 付録B ANISNコードを用いた無限増倍率の計算(球状燃料の3次元配列) | 48 |

Contents

| | |
|--|----|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Two-dimensional Array of Fuel Rods | 1 |
| 2.1 Calculational Objects | 1 |
| 2.2 Method of Calculation | 2 |
| 2.3 Results and Discussions | 3 |
| 3. Three-dimensional Array of Spherical Fuel Pellets | 19 |
| 3.1 Calculational Objects | 19 |
| 3.2 Method of Calculation | 19 |
| 3.3 Results and Discussions | 19 |
| 4. Conclusions and Future Problems | 36 |
| Acknowledgements | 36 |
| References | 37 |
| Appendix A Differences of Geometry and Region/Mesh Numbers | 38 |
| Appendix B Calculations Using the ANISN Code for the Three- dimensional Array | 48 |

1. はじめに

燃料加工施設ではしばしば粉末状あるいはスラリー状の燃料を取扱う。臨界安全性評価の際に、この粉末（またはスラリー）を均質とした方が一般的には取扱いが簡単である。中性子にとって燃料粒の姿が見えない位に粒径が小さければ、この体系を均質とみなせるであろう。実際、フランスのハンドブック¹⁾には、非均質なウラン燃料及びプルトニウム燃料を均質とみなしてよい燃料寸法の値が表形式で記載されている（たとえば5 wt%濃縮の二酸化ウラン燃料では1.7 mmとなる）。これらの値は熱中性子の平均自由行程の1/5の大きさをとったものである。しかしながら、その根拠は明記されていない。

臨界安全上の観点からは、非均質体系を均質とみなしてよい燃料寸法は、非均質体系を均質とみなしたときに反応度的に高く（または、低くてもその大きさが十分小さく）なればよい。このような観点に立って、燃料の非均質効果についての知見を得るため、燃料寸法の変化に伴う反応度の変化を調べる。評価する際に冠水状態を設定することが多いため、燃料配列の間は水で埋まっているとする。また、簡単のため、燃料片は規則的な無限配列をなしているとする。

以上のような理由から、二酸化ウラン燃料の規則配列-水の体系を対象に、減速材と燃料の体積比を一定として燃料寸法を変えると無限増倍率がどう変化するか、均質（すなわち燃料寸法が0）の場合と比較してどうかを数値的に調べる。共鳴効果をできるだけ正確に取扱うため、反応率の計算は、超多群の中性子輸送方程式を衝突確率法で解いて得られる中性子束を重みにする。以下、第2章には予備的検討として、まず棒状燃料の2次元配列体系の計算について記す。第3章には球状燃料の3次元配列体系の計算について記す。最後の第4章に結論と今後の課題をまとめる。また、衝突確率法に基づいた計算で、幾何形状の相異、領域区分数及びメッシュ数についての検討結果を付録Aに記す。付録Bには微小な球状燃料の3次元配列に対してANISN-JRコード²⁾を用いた計算の結果について記しておく。

2. 棒状燃料の2次元配列

2.1 計算対象

計算対象は、二酸化ウラン燃料棒が水中で三角格子状に配列した体系とする（但し、計算コード上の制限から面積等価の円環形状セルに置換えて計算するため、正方格子状配列との区別はない）。表2.1に対象系のウラン濃縮度、均質化ウラン濃度、減速材と燃料の体積比及び燃料棒直径を記す。

濃縮度5 wt%，均質化ウラン濃度が2.0 gU/cm³の場合を基準例とする。さらに、濃縮度変化、均質化ウラン濃度（または減速材対燃料体積比）の影響を調べられるように計算対象を設定している。均質系での最適減速濃度は、西ドイツの原子炉安全協会（GRS）でまとめられた「臨界ハンドブック」³⁾を参考にして数値を設定した。燃料棒直径は0から2 mmの間で変化させる。ただ

1. はじめに

燃料加工施設ではしばしば粉末状あるいはスラリー状の燃料を取扱う。臨界安全性評価の際に、この粉末（またはスラリー）を均質とした方が一般的には取扱いが簡単である。中性子にとって燃料粒の姿が見えない位に粒径が小さければ、この体系を均質とみなせるであろう。実際、フランスのハンドブック¹⁾には、非均質なウラン燃料及びプルトニウム燃料を均質とみなしてよい燃料寸法の値が表形式で記載されている（たとえば5 wt%濃縮の二酸化ウラン燃料では1.7 mmとなる）。これらの値は熱中性子の平均自由行程の1/5の大きさをとったものである。しかしながら、その根拠は明記されていない。

臨界安全上の観点からは、非均質体系を均質とみなしてよい燃料寸法は、非均質体系を均質とみなしたときに反応度的に高く（または、低くてもその大きさが十分小さく）なればよい。このような観点に立って、燃料の非均質効果についての知見を得るため、燃料寸法の変化に伴う反応度の変化を調べる。評価する際に冠水状態を設定することが多いため、燃料配列の間は水で埋まっているとする。また、簡単のため、燃料片は規則的な無限配列をなしているとする。

以上のような理由から、二酸化ウラン燃料の規則配列-水の体系を対象に、減速材と燃料の体積比を一定として燃料寸法を変えると無限増倍率がどう変化するか、均質（すなわち燃料寸法が0）の場合と比較してどうかを数値的に調べる。共鳴効果をできるだけ正確に取扱うため、反応率の計算は、超多群の中性子輸送方程式を衝突確率法で解いて得られる中性子束を重みにする。以下、第2章には予備的検討として、まず棒状燃料の2次元配列体系の計算について記す。第3章には球状燃料の3次元配列体系の計算について記す。最後の第4章に結論と今後の課題をまとめる。また、衝突確率法に基づいた計算で、幾何形状の相異、領域区分数及びメッシュ数についての検討結果を付録Aに記す。付録Bには微小な球状燃料の3次元配列に対してANISN-JRコード²⁾を用いた計算の結果について記しておく。

2. 棒状燃料の2次元配列

2.1 計算対象

計算対象は、二酸化ウラン燃料棒が水中で三角格子状に配列した体系とする（但し、計算コード上の制限から面積等価の円環形状セルに置換えて計算するため、正方格子状配列との区別はない）。表2.1に対象系のウラン濃縮度、均質化ウラン濃度、減速材と燃料の体積比及び燃料棒直径を記す。

濃縮度5 wt%、均質化ウラン濃度が2.0gU/cm³の場合を基準例とする。さらに、濃縮度変化、均質化ウラン濃度（または減速材対燃料体積比）の影響を調べられるように計算対象を設定している。均質系での最適減速濃度は、西ドイツの原子炉安全協会（GRS）でまとめられた「臨界ハンドブック」³⁾を参考にして数値を設定した。燃料棒直径は0から2 mmの間で変化させる。ただ

し、均質系を燃料棒直径0の極限とみなす。体系の温度は20℃とする（但し、核計算においては現行の多群定数ライブラリーMGCL⁴⁾と合わせるために300 Kとする）。

二酸化ウラン燃料、水及び両者の均質化燃料の原子個数密度は原子個数密度算出コードAND⁵⁾を用いて算出した（この計算コードで採用されている原子個数密度の算出方法は日本の「臨界安全ハンドブック」⁶⁾にも記載されている）。各物質の原子個数密度の値を表2.2に示す。

2.2 計算方法

まず、評価済み核データファイルから超多群の群定数を作成し、衝突確率法により超多群の中性子束を算出する。この中性子束を重みにして、微視的断面積を原子個数密度、エネルギー及び領域の体積について積分することにより、各種の反応率を計算する。それらを組合わせて、無限増倍率 k_{∞} 及び四因子分解したときの各因子を算出する。

超多群中性子束算出の流れを図2.1に示す。評価済み核データファイルとしてはENDF/B-IV⁷⁾を用いる。ただし、水素についてはJENDL-3T⁸⁾を使用する。まず、温度依存の点状断面積PTFをRESENDDコード⁹⁾により作成する。RESENDDコードの計算条件を表2.3に示す。次に、SUPER-POINTコードを用いて、与えられたエネルギー点でPTFを内挿し、反応別、核種毎に高速群定数FPF（64,000群、 $E \geq 1.85539$ eV）を算出するとともに、熱群定数TPF作成用断面積データを作成する。PIXSEコード¹⁰⁾では、この断面積を読み込んで、熱群定数TPF（194群、 $E \geq 1.85539$ eV）を算出する。

超多群中性子束の算出には、衝突確率法を用いた計算コードを使用する。即ち、高速群についてはRABBLEコード¹¹⁾を、熱群についてはTHERMOSコード¹²⁾を使用する。非均質系の計算では、燃料領域・減速材領域をそれぞれ10区域に分割する。また、均質系では全体を1区域とする。なお、THERMOSコードで非均質系の計算を行う場合に1区域を2メッシュ、均質系では1メッシュとする。各領域の区分数及びメッシュ数についての検討を付録Aに示す。

高速群側と熱群側の中性子束は、 $E = 1.85539$ eVでセル平均したものが一致するように規格化する。即ち、熱群側の中性子束に以下の規格化因子 N_F を乗じる。

$$N_F = \frac{\phi_{fast}^{64000}(u)}{\phi_{th}^1(E) \times (E_1 - E_2) / \ln(E_1/E_2)}$$

ここで、

$\phi_{fast}^{64000}(u)$: 高速群側の第64,000群（1.85586 eV～1.85539 eV）のセル平均中性子束、

$\phi_{th}^1(E)$: 熱群側の第1群（1.85539 eV～1.82663 eV）のセル平均中性子束、

E_1 : 熱群側第1群の上限エネルギー（=1.85539 eV）

E_2 : 熱群側第2群の上限エネルギー（=1.82663 eV）

である。

次に、セル全体の反応率を計算する。計算する反応率を以下に示す。

$R f_{fast}^F$: 燃料での高速群の生成反応率、

$R f_{th}^F$: 燃料での熱群の生成反応率、

- $R a^F_{fast}$: 燃料での高速群の吸収反応率,
 $R a^F_{th}$: 燃料での熱群の吸収反応率,
 $R a^M_{fast}$: 減速材での高速群の吸収反応率,
 $R a^M_{th}$: 減速材での熱群の吸収反応率。

なお、燃料及び減速材は核種で区別する。すなわち、 ^{235}U 及び ^{239}U は燃料、H及び ^{16}O は減速材として取扱う。従って、燃料領域に存在する UO_2 のOも減速材とする。

これらの反応率を用いて、無限増倍率 k_∞ とその四因子を求める。すなわち、無限増倍率 k_∞ は、

$$k_\infty = \varepsilon p f \eta$$

で、高速核分裂効果 ε 、共鳴を逃れる確率 p 、熱中性子利用率 f 及び再生率 η は、

$$\varepsilon = \frac{R f^F_{th} + R f^F_{fast}}{R f^F_{th}}$$

$$p = \frac{R a^F_{th} + R a^M_{th}}{R a^F_{th} + R a^M_{th} + R a^F_{fast} + R a^M_{fast}}$$

$$f = \frac{R a^F_{th}}{R a^F_{th} + R a^M_{th}}$$

$$\eta = \frac{R f^F_{th}}{R a^F_{th}}$$

と表される。

2.3 計算結果と検討

無限増倍率 k_∞ 及びその四因子についての計算結果を表2.4に示す。この表で、燃料棒直径が0としたのは均質系についてのものである。また、均質系からの変化割合を表2.5に百分率で示す。

計算結果のうち、無限増倍率 k_∞ を縦軸に、燃料棒直径を横軸に示したのが図2.2である。当然ながら、濃縮度が高くなるに従い k_∞ が大きくなり、同じ濃縮度（濃縮度5wt%）では体積平均濃度が $2.0\text{gU}/\text{cm}^3$ （最適減速に対応）のときに k_∞ が一番大きくなっている。また、ここで検討した範囲では燃料棒が太くなるに従い無限増倍率が大きくなっている。燃料棒直径の増加に従い、無限増倍率が均質系に比べどれだけ増加するか、その割合を示したのが図2.3である。燃料棒直径の変化に伴う無限増倍率の増加割合は、ウラン濃縮度及び体積平均濃度（あるいは水対燃料体積比）に関わらず、ほぼ変らない。その結果、たとえば水中に置かれた直径1.0mmの燃料棒を体積平均して均質系として取扱うと、反応度を2%程度低く見積ることをこの図は示している。なお、図2.2及び図2.3で見られるように、非均質系で燃料棒を細くしていったときに無限増倍率の値が連続的に均質系の値につながらない。この点については後で検討する。

高速核分裂効果 ϵ 、共鳴を逃れる確率 p 、熱中性子利用率 f 及び再生率 η のそれぞれの値が燃料棒直径にどのように依存しているかを図 2.4 から図 2.7 に示す。高速核分裂効果 ϵ 及び再生率 η は燃料棒直径が変化しても殆ど変わらないことが分る (図 2.4 及び図 2.7)。また、燃料棒が大きくなるに従い、共鳴を逃れる確率 p は増大する (図 2.5) が、逆に、熱中性子利用率 f は減少する (図 2.6)。この変化の様子をより明瞭にするため、共鳴を逃れる確率 p 及び熱中性子利用率 f が均質系の値からどれだけ変化するか、その割合を示したのが図 2.8 及び図 2.9 である。この両方の図を比較すると、燃料棒直径の増加に伴う p の増加割合の方が f の減少割合よりも大きい。この結果図 2.3 に示したように、直径 2 mm 以内では燃料棒直径が増加するに従い、無限増倍率 k_{∞} も大きくなっている。

図 2.2 で観察された、非均質燃料系と均質燃料系での無限増倍率 k_{∞} の不連続性が何に由来しているかを検討する。図 2.4 から図 2.7 を眺めたときに、燃料棒直径を 2.0 mm から 0.2 mm まで変化させていったときと 0 のとき (即ち均質のとき) との不連続性が顕著に見られるのは熱中性子利用率 f である。これは、この不連続性が主に熱群の計算に由来することを意味する。標準燃料 (ウラン濃縮度 5 wt%, 平均濃度 2.0 gU/cm³) の場合について、前節に記した反応率の値を表 2.6 に記す。この表では、異なる燃料棒直径の反応率を比較するため、4 種類の吸収反応率の合計を 1.0 に規格化している。また、() 内は均質系 (燃料棒直径 0 で表示) からの変化割合を百分率で示している。この表によると、燃料棒直径が 0.1 mm の場合にこの変化割合の絶対値が最も大きいのは $R a_{t,h}^M$ (減速材での熱群の吸収反応率) で、その値は約 9% である。 $R a_{t,h}^M$ は $R a_{t,h}^F$ の約 1/10 なので、熱中性子利用率 f としてみると均質系との変化割合は約 0.9% となる。これが図 2.9 でギャップとなって現れている。

図 2.9 に見られる熱中性子利用率比のギャップ ($f(\text{直径} \rightarrow 0) / f(\text{均質}) - 1$) [%] を水対燃料体積比の平方根 $(V_{H_2O} / V_{UO_2})^{1/2}$ との関係で示したのが図 2.10 である。この図から、 f のギャップは $(V_{H_2O} / V_{UO_2})^{1/2}$ に比例することが分る。この比例関係は、領域の形状寸法に関連した補正が必要であることを示唆する。

また、全エネルギー群に対して熱群の中性子束が占める割合を表 2.7 に示す。均質体系に比べると、非均質体系の熱中性子束は 4% 程度不連続的に大きくなることが分る。これは、高速中性子束と熱中性子束の整合性のとり方を変更すべきことを示している。

表2.1 計算対象とする棒状燃料の2次元配列系

| 濃縮度 [wt%] | ウラン濃度 [gU/cm ³] | 減速材体積 /燃料体積 | 燃料棒直径*1 [mm] |
|--------------|--------------------------------|----------------|-----------------------------|
| 3 | 2.4 *2 | 3.0239 | 0, 0.2, 0.5, 1, 2 |
| 5 | 1.0 | 8.6549 | 同 上 |
| 〃 | 2.0 *2 | 3.8274 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1, 2 |
| 〃 | 3.0 | 2.2183 | 0, 0.2, 0.5, 1, 2 |
| 10 | 1.3 *2 | 6.4221 | 同 上 |

*1 燃料棒直径0は体積平均した均質系を意味する

*2 均質系で最適減速になっている

表2.2 原子個数密度

| 物質 | 濃縮度 [wt%] | U濃度 [gU/cm ³] | 原子個数密度 [atoms/b·cm] | | | |
|--------------------|--------------|------------------------------|---------------------|-----------------|------------------|------------------|
| | | | H | ¹⁶ O | ²³⁵ U | ²³⁸ U |
| 均質燃料 | 3 | 2.4 | 5.0149-2 * | 3.7222-2 | 1.8447-4 | 5.8892-3 |
| | 5 | 1.0 | 5.9822-2 | 3.4974-2 | 1.2810-4 | 2.4032-3 |
| | 5 | 2.0 | 5.2910-2 | 3.6580-2 | 2.5621-4 | 4.8065-3 |
| | 5 | 3.0 | 4.5998-2 | 3.8187-2 | 3.8431-4 | 7.2097-3 |
| | 10 | 1.3 | 5.7742-2 | 3.5457-2 | 3.3307-4 | 2.9598-3 |
| UO ₂ 燃料 | 3 | — | 0.0 | 4.8880-2 | 7.4229-4 | 2.3698-2 |
| | 5 | — | 0.0 | 4.8880-2 | 1.2368-3 | 2.3203-2 |
| | 10 | — | 0.0 | 4.8880-2 | 2.4721-3 | 2.1968-2 |
| 減速材 (水, 20°C) | | | 6.6734-2 | 3.3367-2 | 0.0 | 0.0 |

* 5.0149×10⁻²を表す表2.3 RESENDコード⁹⁾の計算条件

| 変数名 | 意味 | 値 |
|------|----------------------------------|---|
| ERR | 計算精度 | 0.01 |
| TEMP | 体系温度 [K] | 300 |
| E | ドップラー効果を 考慮するエネルギー 範囲 [eV] | 1×10 ⁻⁵ , 1×10 ⁶ |
| OPT | 出力情報の選択肢 | 2 |

表2.4 無限増倍率及び四因子

| 濃縮度 [wt%] | 水対燃料 体積比 (U濃度) | 燃料棒 直径 [mm] | ϵ | p | f | η | k_{∞} |
|--------------|------------------------------------|-------------------|------------|---------|---------|---------|--------------|
| 3 | 3.0239 (2.4gU/cm ³) | 0.0 | 1.11696 | 0.72841 | 0.89053 | 1.81871 | 1.31773 |
| | | 0.2 | 1.11821 | 0.73223 | 0.88358 | 1.81885 | 1.31588 |
| | | 0.5 | 1.11814 | 0.73614 | 0.88342 | 1.81885 | 1.32257 |
| | | 1.0 | 1.11752 | 0.74288 | 0.88290 | 1.81882 | 1.33314 |
| | | 2.0 | 1.11620 | 0.75546 | 0.88131 | 1.81874 | 1.35161 |
| 5 | 8.6549 (1.0gU/cm ³) | 0.0 | 1.05639 | 0.83593 | 0.81976 | 1.91603 | 1.38701 |
| | | 0.2 | 1.05771 | 0.84213 | 0.80907 | 1.91604 | 1.38083 |
| | | 0.5 | 1.05774 | 0.85039 | 0.80831 | 1.91602 | 1.39309 |
| | | 1.0 | 1.05749 | 0.86148 | 0.80623 | 1.91597 | 1.40725 |
| | | 2.0 | 1.05731 | 0.87581 | 0.80006 | 1.91582 | 1.41935 |
| 5 | 3.8274 (2.0gU/cm ³) | 0.0 | 1.11930 | 0.74015 | 0.91017 | 1.91036 | 1.44047 |
| | | 0.1 | 1.11997 | 0.74316 | 0.90213 | 1.91066 | 1.43465 |
| | | 0.2 | 1.12047 | 0.74436 | 0.90212 | 1.91066 | 1.43757 |
| | | 0.3 | 1.12047 | 0.74586 | 0.90206 | 1.91066 | 1.44038 |
| | | 0.5 | 1.12023 | 0.74907 | 0.90186 | 1.91065 | 1.44595 |
| | | 1.0 | 1.11943 | 0.75690 | 0.90112 | 1.91063 | 1.45880 |
| | | 2.0 | 1.11788 | 0.77054 | 0.89887 | 1.91057 | 1.47927 |
| 5 | 2.2183 (3.0gU/cm ³) | 0.0 | 1.20601 | 0.64914 | 0.94503 | 1.90401 | 1.40866 |
| | | 0.2 | 1.20656 | 0.65289 | 0.93885 | 1.90470 | 1.40870 |
| | | 0.5 | 1.20626 | 0.65564 | 0.93875 | 1.90469 | 1.41410 |
| | | 1.0 | 1.20512 | 0.66067 | 0.93842 | 1.90468 | 1.42310 |
| | | 2.0 | 1.20253 | 0.67081 | 0.93739 | 1.90467 | 1.44026 |
| 10 | 6.4221 (1.3gU/cm ³) | 0.0 | 1.11317 | 0.77349 | 0.92035 | 1.98668 | 1.57434 |
| | | 0.2 | 1.11431 | 0.77885 | 0.90963 | 1.98715 | 1.56875 |
| | | 0.5 | 1.11381 | 0.78554 | 0.90908 | 1.98715 | 1.58056 |
| | | 1.0 | 1.11268 | 0.79554 | 0.90752 | 1.98714 | 1.59632 |
| | | 2.0 | 1.11083 | 0.81037 | 0.90286 | 1.98711 | 1.61501 |

表 2.5 無限増倍率及び四因子（均質体系に対する変化割合）

| 濃縮度 [wt%] | 水対燃料 体積比 (U濃度) | 燃料棒 直径 [mm] | 均質体系に対する変化割合 [%] | | | | |
|--------------|------------------------------------|-------------------|------------------|--------|---------|---------|--------------|
| | | | ϵ | ρ | f | η | k_{∞} |
| 3 | 3.0239 (2.4gU/cm ³) | 0.2 | 0.1119 | 0.5244 | -0.7804 | 0.0077 | -0.1404 |
| | | 0.5 | 0.1056 | 1.0612 | -0.7984 | 0.0077 | 0.3673 |
| | | 1.0 | 0.0501 | 1.9865 | -0.8568 | 0.0061 | 1.1694 |
| | | 2.0 | -0.0681 | 3.7136 | -1.0353 | 0.0017 | 2.5711 |
| 5 | 8.6549 (1.0gU/cm ³) | 0.2 | 0.1250 | 0.7417 | -1.3040 | 0.0005 | -0.4456 |
| | | 0.5 | 0.1278 | 1.7298 | -1.3968 | -0.0005 | 0.4384 |
| | | 1.0 | 0.1041 | 3.0565 | -1.6505 | -0.0031 | 1.4593 |
| | | 2.0 | 0.0871 | 4.7707 | -2.4031 | -0.0110 | 2.3316 |
| 5 | 3.8274 (2.0gU/cm ³) | 0.1 | 0.0599 | 0.4067 | -0.8834 | 0.0157 | -0.4040 |
| | | 0.2 | 0.1045 | 0.5688 | -0.8845 | 0.0157 | -0.2013 |
| | | 0.3 | 0.1045 | 0.7715 | -0.8910 | 0.0157 | -0.0062 |
| | | 0.5 | 0.0831 | 1.2052 | -0.9130 | 0.0152 | 0.3804 |
| | | 1.0 | 0.0116 | 2.2631 | -0.9943 | 0.0141 | 1.2725 |
| | | 2.0 | -0.1269 | 4.1059 | -1.2415 | 0.0110 | 2.6936 |
| 5 | 2.2183 (3.0gU/cm ³) | 0.2 | 0.0456 | 0.5777 | -0.6539 | 0.0362 | 0.0028 |
| | | 0.5 | 0.0207 | 1.0013 | -0.6645 | 0.0357 | 0.3862 |
| | | 1.0 | -0.0738 | 1.7762 | -0.6994 | 0.0352 | 1.0251 |
| | | 2.0 | -0.2886 | 3.3383 | -0.8084 | 0.0347 | 2.2433 |
| 10 | 6.4221 (1.3gU/cm ³) | 0.2 | 0.1024 | 0.6930 | -1.1648 | 0.0237 | -0.3551 |
| | | 0.5 | 0.0575 | 1.5579 | -1.2245 | 0.0237 | 0.3951 |
| | | 1.0 | -0.0440 | 2.8507 | -1.3940 | 0.0231 | 1.3961 |
| | | 2.0 | -0.2102 | 4.7680 | -1.9004 | 0.0217 | 2.5833 |

表 2.6 標準燃料の反応率

燃料条件

濃縮度 5 wt%

ウラン濃度 2.0gU/cm³

区域数/メッシュ数

燃料 10/20

減速材 10/20

| 燃料棒 直径 [mm] | 反 応 率 (均質に対する変化割合 [%]) | | | | | |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|
| | 吸 収 反 応 率 | | | | 生 成 反 応 率 | |
| | 高速群・燃料 $R a^F_{fast}$ | 高速・減速材 $R a^M_{fast}$ | 熱群・燃料 $R a^F_{th}$ | 熱群・減速材 $R a^M_{th}$ | 高速群・燃料 $R f^F_{fast}$ | 熱群・燃料 $R f^F_{th}$ |
| 0.0 | 2.53108-1 | 6.74647-3 | 6.73657-1 | 6.64882-2 | 1.53537-1 | 1.28693 |
| 0.1 | 2.50081-1 (-1.1959) | 6.75525-3 (0.1301) | 6.70431-1 (-0.4789) | 7.27322-2 (9.3991) | 1.53684-1 (0.0957) | 1.28097 (-0.4631) |
| 0.2 | 2.48869-1 (-1.6748) | 6.77032-3 (0.3535) | 6.71502-1 (-0.3199) | 7.28583-2 (9.5808) | 1.54559-1 (0.6656) | 1.28301 (-0.3046) |
| 0.3 | 2.47358-1 (-2.2718) | 6.77903-3 (0.4826) | 6.72810-1 (-0.1257) | 7.30527-2 (9.8732) | 1.54870-1 (0.8682) | 1.28551 (-0.1103) |
| 0.5 | 2.44132-1 (-3.5463) | 6.79297-3 (0.6892) | 6.75561-1 (0.2826) | 7.35137-2 (10.5665) | 1.55194-1 (1.0792) | 1.29076 (0.2976) |
| 1.0 | 2.36271-1 (-6.6521) | 6.82550-3 (1.1714) | 6.82062-1 (1.2477) | 7.48411-2 (12.5630) | 1.55634-1 (1.3658) | 1.30317 (1.2619) |
| 2.0 | 2.22587-1 (-12.0585) | 6.87734-3 (1.9398) | 6.92609-1 (2.8133) | 7.79264-2 (17.2034) | 1.55989-1 (1.5970) | 1.32328 (2.8246) |

表 2.7 標準燃料の熱中性子束割合

| 燃料棒直径 [mm] | 熱中性子束の 割合 | 均質に対する 変化割合 [%] |
|---------------|--------------|--------------------|
| 0.0 | 2.08707-1 | 0.0 |
| 0.1 | 2.17214-1 | 4.0760 |
| 0.2 | 2.17346-1 | 4.1393 |
| 0.3 | 2.17665-1 | 4.2921 |
| 0.5 | 2.18466-1 | 4.6759 |
| 1.0 | 2.20666-1 | 5.7300 |
| 2.0 | 2.25505-1 | 8.0486 |

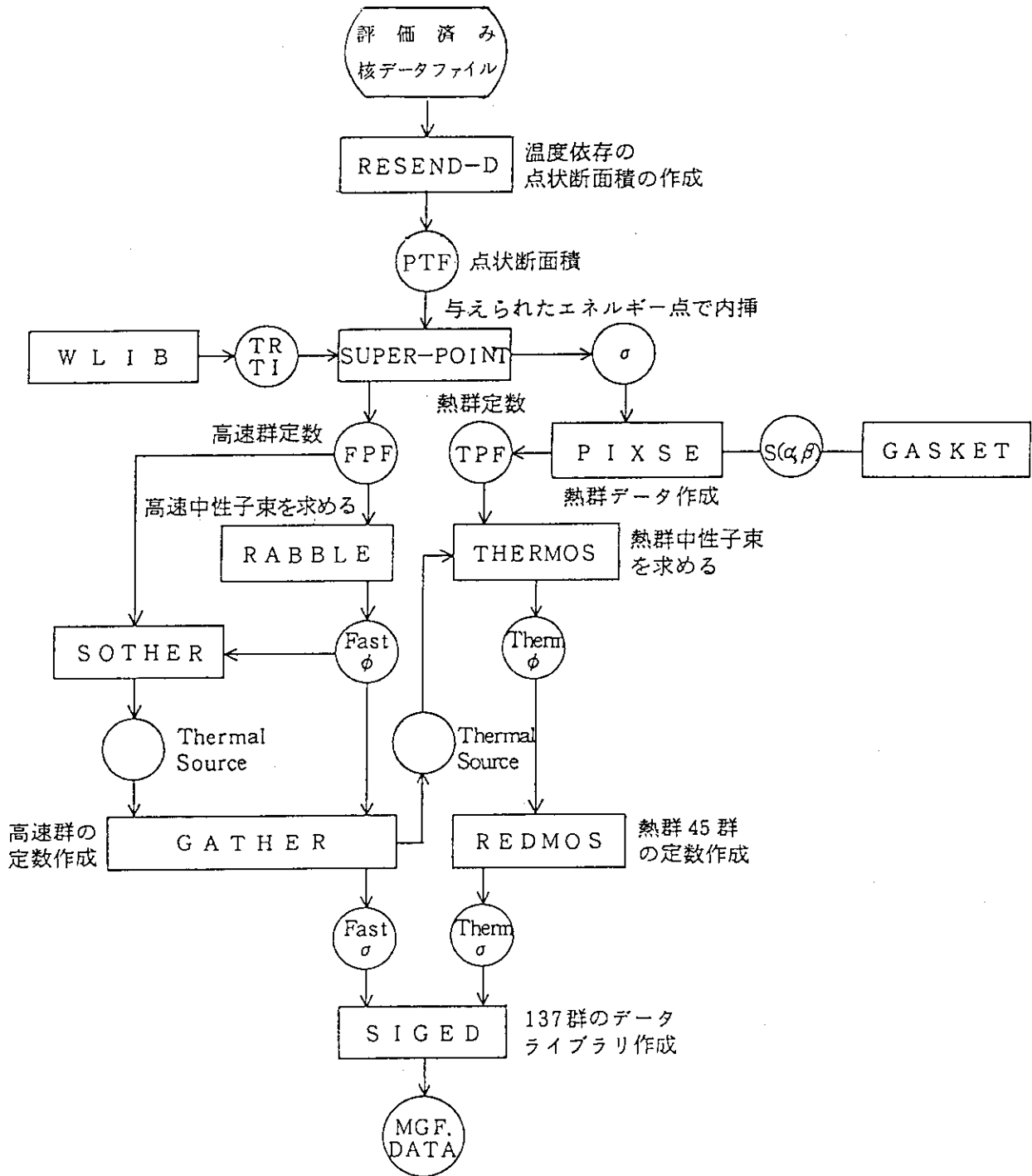


図2.1 超多群中性子束算出の流れ図

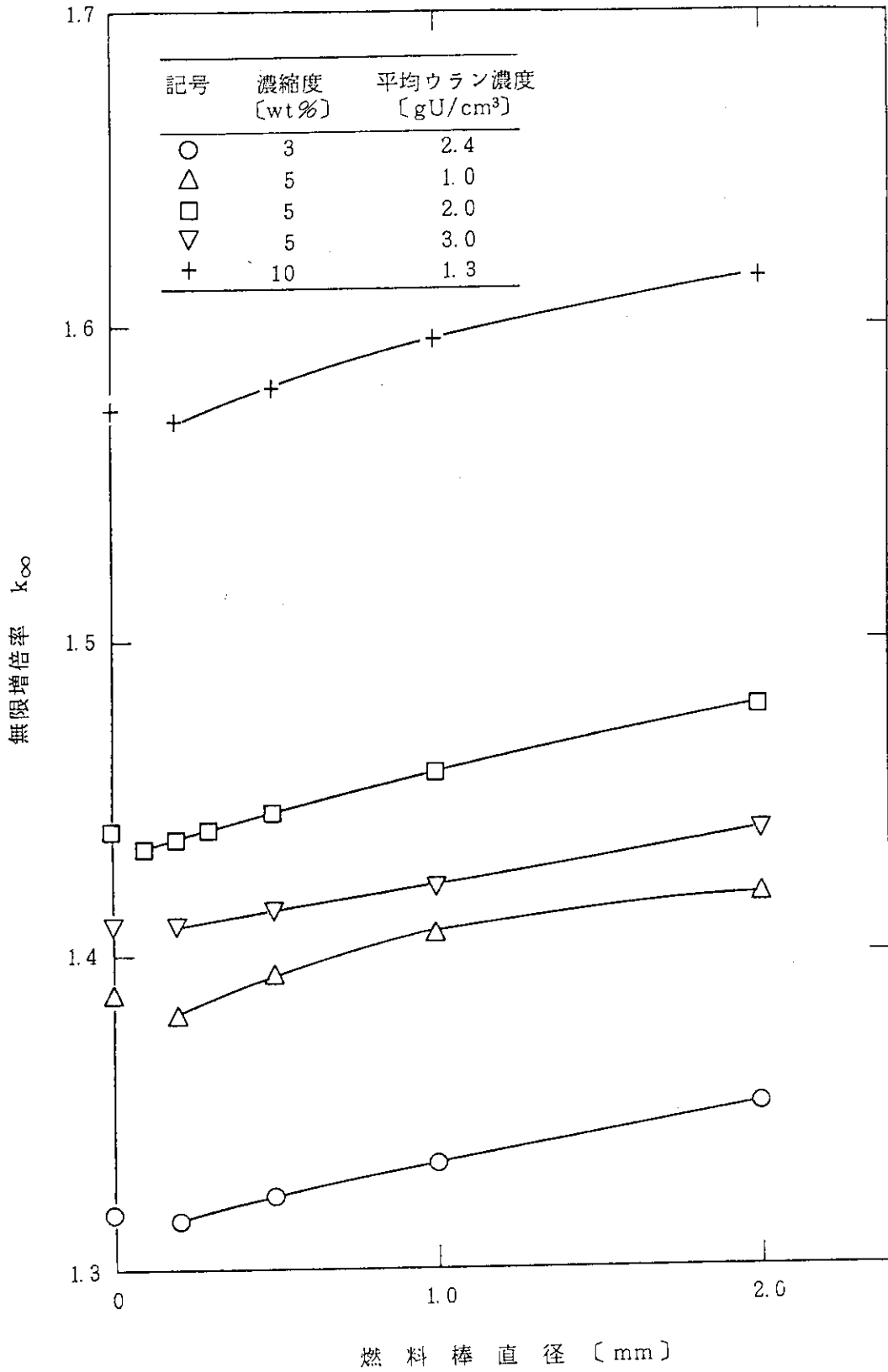


図2.2 無限増倍率 (円柱形状)

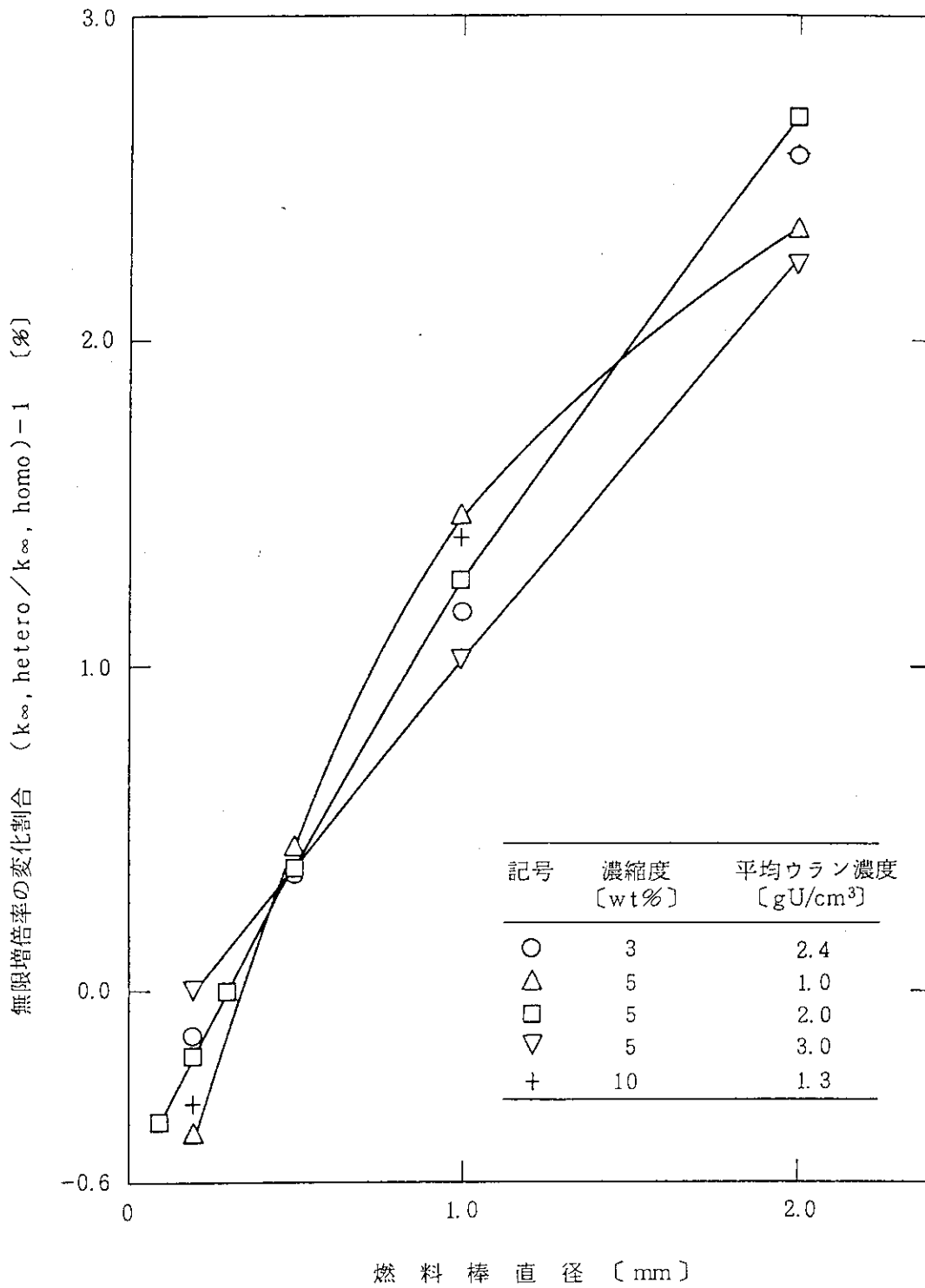


図2.3 無限増倍率 (均質に対する変化割合, 円柱形状)

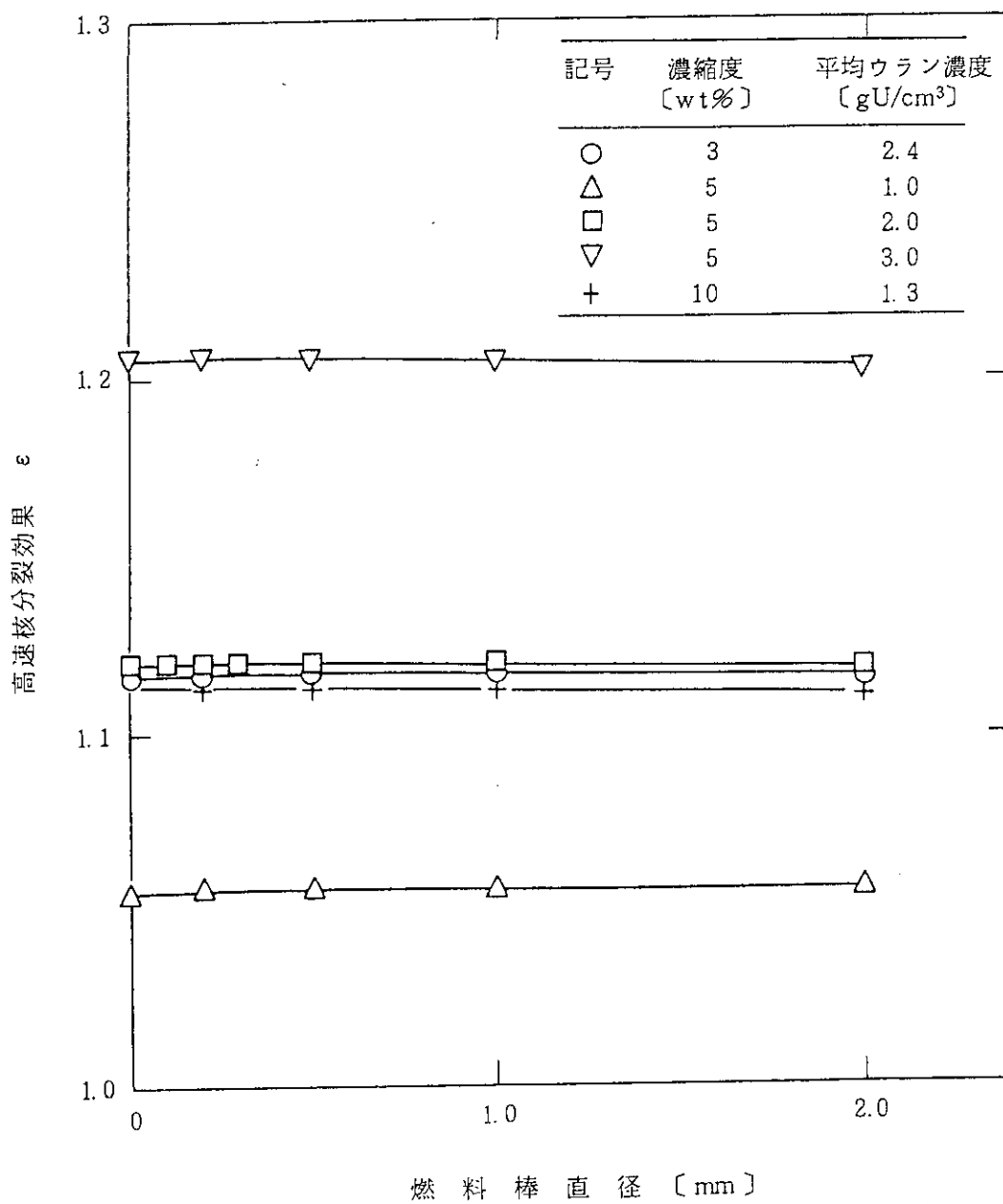


図2.4 高速核分裂効果 (円柱形状)

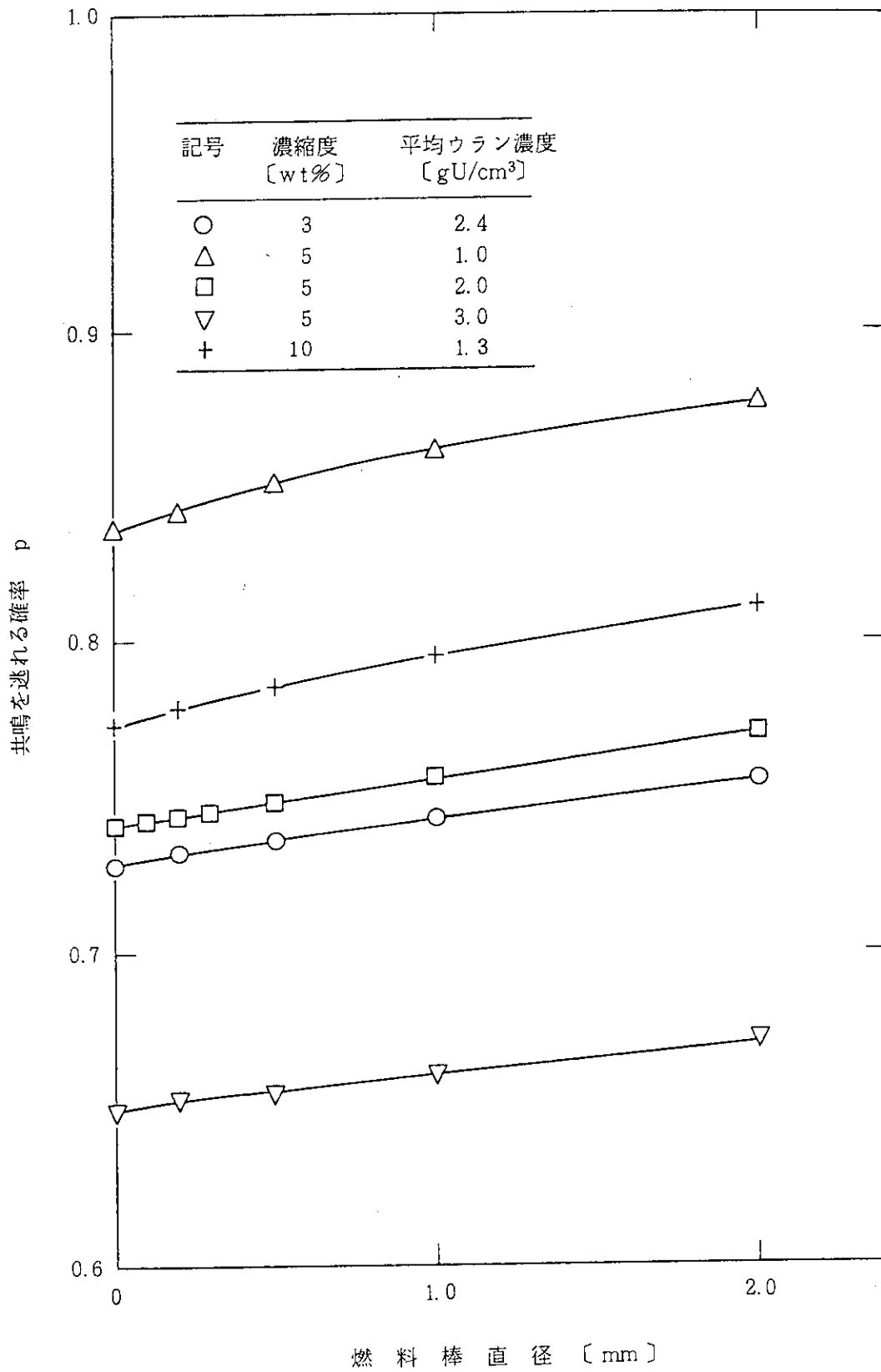


図 2.5 共鳴を逃れる確率 (円柱形状)

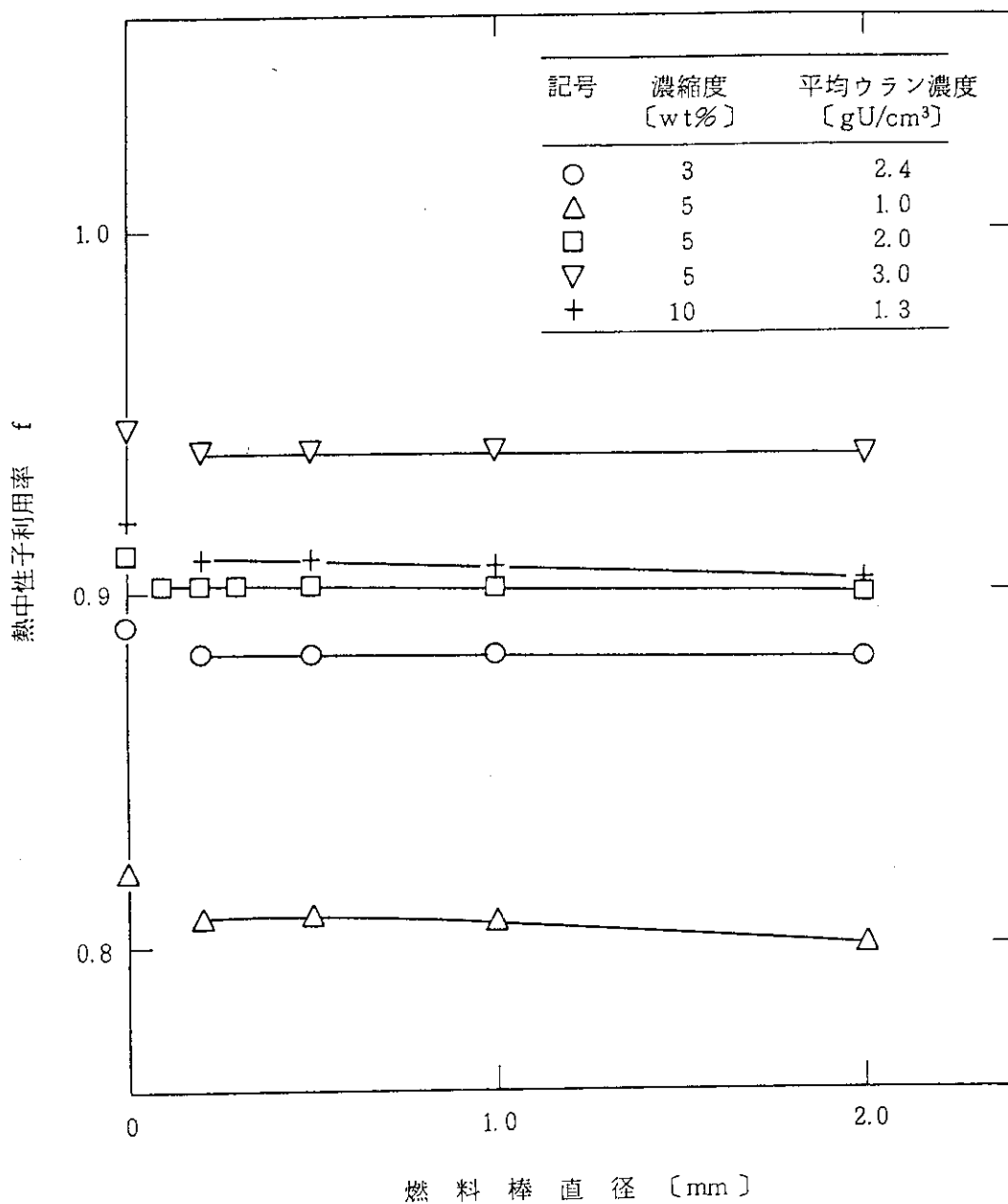


図2.6 熱中性子利用率 (円柱形状)

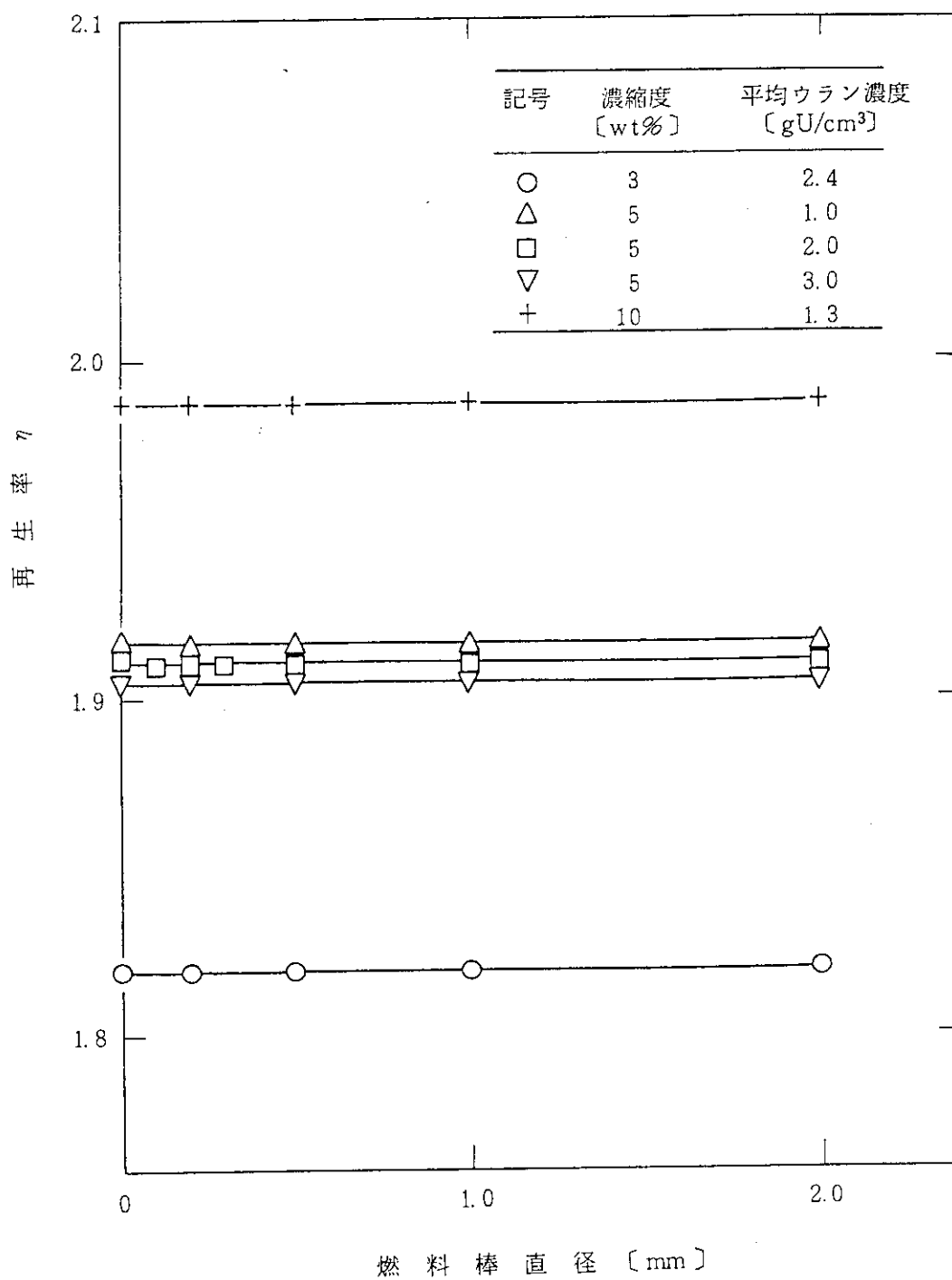


図2.7 再生率(円柱形状)

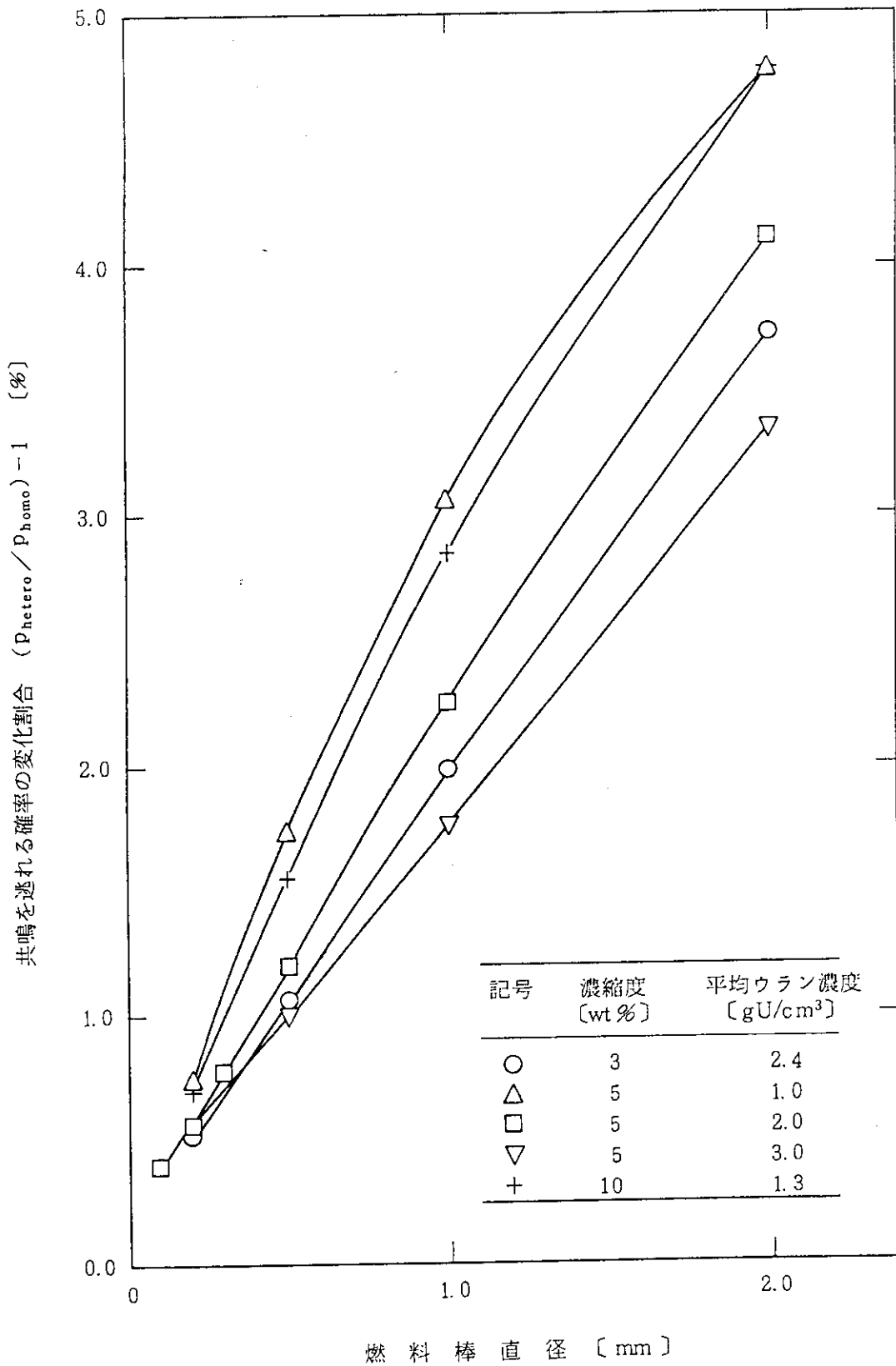


図2.8 共鳴を逃れる確率 (均質に対する変化割合, 円柱形状)

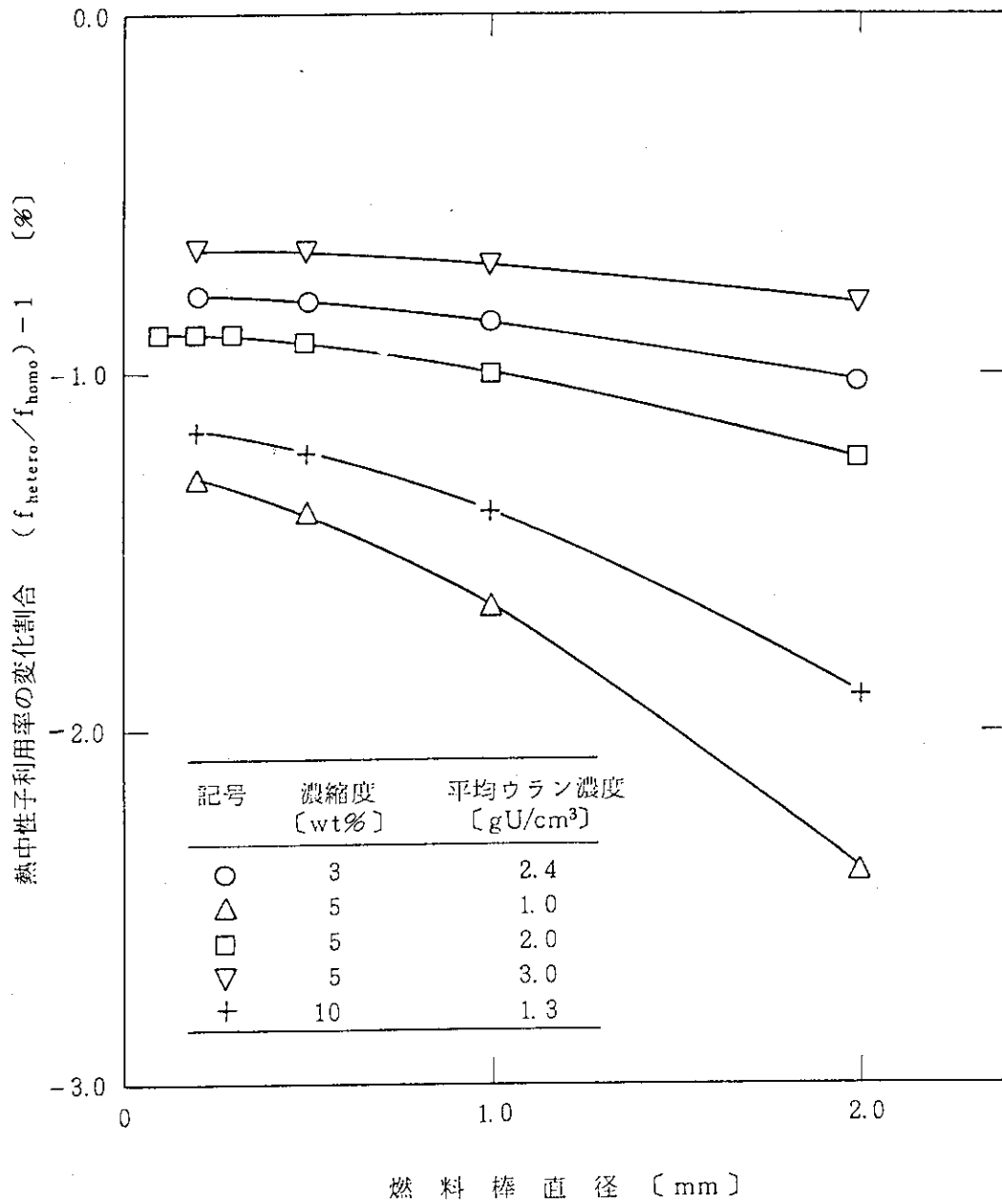


図2.9 熱中性子利用率 (均質に対する変化割合, 円柱形状)

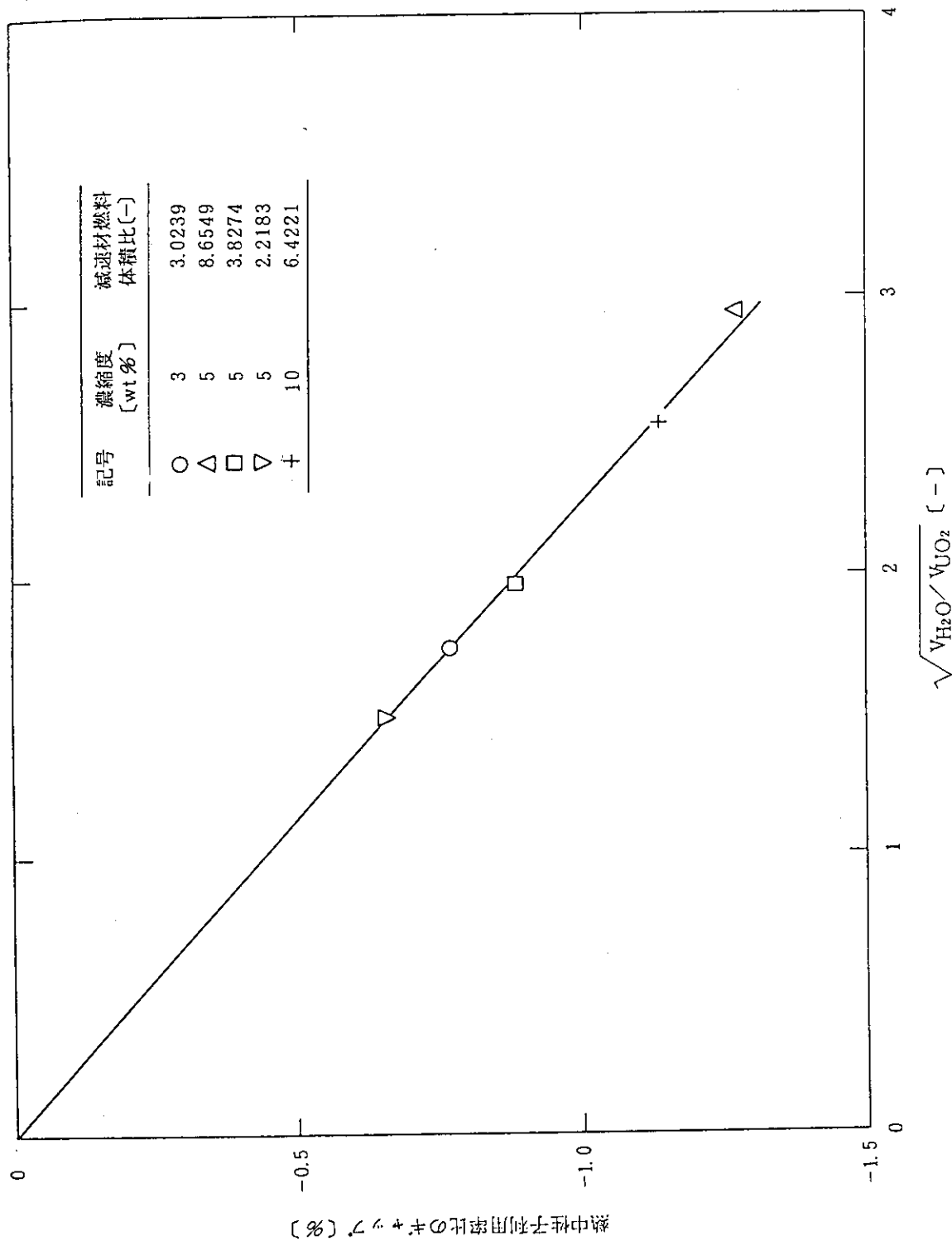


図 2.10 熱中性子利用率比のギャップと水対燃料体積比との関係 (円柱形状)

3. 球状燃料の3次元配列

3.1 計算対象

ここでは2で調べた棒状燃料の2次元配列よりは現実体系に近い、二酸化ウランの球状燃料が水中で立方格子状に配列した体系を計算対象とする（ここでも体積等価の円殻形状セルに置換えて計算するため、六方格子状配列との区別はない）。表3.1に対象系のウラン濃縮度、均質化ウラン濃度、減速材と燃料の体積比及び燃料球直径を記す。濃縮度を上げたときに非均質効果がなくなることを確認するため、ここでは濃縮度が20及び40wt%の燃料も対象とする。基準としたのは2次元配列体系の場合と同様に濃縮度5wt%で、均質化ウラン濃度が $2.0\text{gU}/\text{cm}^3$ の体系である。燃料球直径は0（均質）から6mmの間で変化させる。体系の温度は 20°C とする（これは核計算においても同様で、 293.15K である）。

二酸化ウラン燃料、水及び両者の均質化燃料の原子個数密度の値を表3.2に示す。

3.2 計算方法

計算方法の概略は2.2で述べた棒状燃料の2次元配列の場合と同じである。子細には異なる部分があるので、その部分を中心に以下に記す。

評価済み核データファイルとしてはJENDL-3¹³⁾を用いる。高速群定数FPF及び熱群定数TPFの作成手順は2.2に述べたのと同様である。超多群中性子束の算出には、衝突確率法を用いた計算コード（高速群についてはRABBLEコード¹¹⁾を、熱群についてはTHERMOSコード¹²⁾）を使用する。但しこれらの計算コードはそのままでは3次元体系に適用できないので、2次元体系の場合を参考にして3次元体系の輸送核が計算できるように拡張した計算コードを使用する。非均質系の計算では、燃料領域・減速材領域をそれぞれ1区域とし、均質系では全体を1区域として取扱う。また、THERMOSコードで計算を行う場合に1区域を4メッシュとする（均質系・非均質系とも）。各領域の区分数及びメッシュ数の検討については付録Aに示す。

高速群側と熱群側の中性子束は、セル当りに発生する中性子が減速の途中で必ず吸収されることを用いて規格化する。即ち、高速群側ではセル当りの核分裂中性子数が1 [個/秒]になる条件より中性子束を規格化し、熱群側ではセル内の全吸収反応率が1 [個/秒]として中性子束を規格化する（このとき2.2で用いた記号では $R a^F_{f,h} + R a^M_{f,h} + R a^F_{f,s,s} + R a^M_{f,s,s} = 1$ となる）。反応率、無限増倍率及びその四因子の計算方法は2.2と同様である。

3.3 計算結果と検討

無限増倍率 k_∞ 及びその四因子についての計算結果を表3.3に示す。この表で、燃料球直径が0としたのは均質系についてのものである。また、均質系からの変化割合を表3.4に百分率で示

す。

計算結果のうち、無限増倍率 k_{∞} を縦軸に、燃料球直径を横軸に示したのが図3.1である。濃縮度が高くなるに従い k_{∞} が大きくなり、同じ濃縮度（濃縮度5wt%）では体積平均濃度が2.0g U/cm³（最適減速に対応）のときに k_{∞} が一番大きくなっている。また、濃縮度が3wt%から10wt%までは燃料球が大きくなるに従い無限増倍率が大きくなっており、棒状燃料の配列と同様の傾向を示している。濃縮度が40wt%では逆に、燃料球直径が大きくなると無限増倍率が小さくなり、濃縮度が20wt%ではこれらの中間の傾向になっている。

燃料球直径の増加に伴う無限増倍率の均質系からの変化割合を示したのが図3.2である。この変化割合は、ウラン濃縮度が3wt%から5wt%では濃縮度及び体積平均濃度（あるいは水対燃料体積比）に関わらず、ほぼ変らない。10wt%及び20wt%と濃縮度が増すと、増加割合は減少し、濃縮度40wt%では燃料球直径の増加とともに無限増倍率の変化割合は負に転じる。この結果、冠水状態にある粒径2.0mmの低濃縮（5wt%以下）の二酸化ウラン燃料を体積平均して均質系として取扱うと、反応度を2%程度低く見積ることをこの図は示している。なお、図3.1及び図3.2で見られるように、非均質系で燃料球を小さくしていったときに無限増倍率の値が連続的に均質系の値につながらないという傾向が見られる。この傾向は燃料棒の2次元配列の場合と同じである。

高速核分裂効果 ϵ 、再生率 η 、熱中性子利用率 f 及び共鳴を逃れる確率 p のそれぞれの値が燃料球直径にどのように依存しているかを図3.3から図3.6に示す。高速核分裂効果 ϵ 及び再生率 η は燃料球直径が変化しても殆ど変らないことが分る（図3.3及び図3.4）。また、燃料球が大きくなるに従い、熱中性子利用率 f は減少する（図3.5）が、共鳴を逃れる確率 p は逆に増大する（図3.6）。この変化の様子をより明瞭にするため、熱中性子利用率 f 及び共鳴を逃れる確率 p が均質系の値からどれだけ変化するか、その割合を示したのが図3.7及び図3.8である。この両方の図を比較すると、濃縮度20wt%以下では燃料球直径の増加に伴う p の増加割合の方が f の減少割合よりも大きい。この結果図3.2に示したように、直径2mm以内では燃料球直径が増加するに従い、無限増倍率 k_{∞} も大きくなっている。さらに、濃縮度を上げると濃縮度20wt%前後で非均質効果が消失するが、これは均質から非均質に移ることによる熱中性子利用率 f の減少の方が、共鳴を逃れる確率 p の増加を凌ぐことによることが分る（なお、図3.9に高速核分裂効果 ϵ の均質系に対する変化割合を示すが、濃縮度が上がると ϵ の減少傾向も加わる）。

次に、標準燃料（濃縮度5wt%、ウラン濃度2 gU/cm³）と濃縮度20wt%燃料の熱中性子束不利係数（減速材領域と燃料領域の熱群中性子束の比）を算出し、均質系と非均質系が連続的につながっているかどうかの確認を行った。その結果を表3.5及び図3.10に示す。これらの表及び図より、熱中性子束不利係数は均質と不均質との間でギャップがあることが分る。さらに、標準燃料について、燃料領域、減速材領域及びセル平均の中性子束を高速群（縮約1群）と熱群（縮約1群）で求めた。その結果を図3.11に示す。この図より、高速中性子束は均質体系と非均質体系で連続的につながるが、熱群中性子束は不連続となることが分る。THERMOSコードを使用した熱群の計算方法を今後検討する必要がある。

表3.1 計算対象とする球状燃料の3次元配列系

| 濃縮度 [wt%] | ウラン濃度 [gU/cm ³] | 減速材体積 /燃料体積 | 燃料球直径*1 [mm] |
|--------------|--------------------------------|----------------|--------------------|
| 3 | 2.4*2 | 3.0239 | 0, 2, 4, 6 |
| 5 | 1.0 | 8.6549 | 同上 |
| // | 2.0*2 | 3.8274 | 0, 0.2, 1, 2, 4, 6 |
| // | 3.0 | 2.2183 | 0, 2, 4, 6 |
| 10 | 1.3*2 | 6.4221 | 同上 |
| 20 | 0.8*2 | 11.0455 | // |
| 40 | 0.48*2 | 19.0247 | // |

*1 燃料球直径0は体積平均した均質系を意味する

*2 均質系で最適減速になっている

表3.2 原子個数密度

| 物質 | 濃縮度 [wt%] | U濃度 [gU/cm ³] | 原子個数密度 [atoms/b·cm] | | | |
|--------------------|--------------|------------------------------|---------------------|-----------------|------------------|------------------|
| | | | H | ¹⁶ O | ²³⁵ U | ²³⁸ U |
| 均質燃料 | 3 | 2.4 | 5.0149-2* | 3.7222-2 | 1.8447-4 | 5.8892-3 |
| | 5 | 1.0 | 5.9822-2 | 3.4974-2 | 1.2810-4 | 2.4032-3 |
| | 5 | 2.0 | 5.2910-2 | 3.6580-2 | 2.5621-4 | 4.8065-3 |
| | 5 | 3.0 | 4.5998-2 | 3.8187-2 | 3.8431-4 | 7.2097-3 |
| | 10 | 1.3 | 5.7742-2 | 3.5457-2 | 3.3307-4 | 2.9598-3 |
| | 20 | 0.8 | 6.1194-2 | 3.4655-2 | 4.0993-4 | 1.6190-3 |
| | 40 | 0.48 | 6.3401-2 | 3.4142-2 | 4.9192-4 | 7.2856-4 |
| UO ₂ 燃料 | 3 | — | 0.0 | 4.8880-2 | 7.4229-4 | 2.3698-2 |
| | 5 | — | 0.0 | 4.8880-2 | 1.2368-3 | 2.3203-2 |
| | 10 | — | 0.0 | 4.8880-2 | 2.4721-3 | 2.1968-2 |
| | 20 | — | 0.0 | 4.8880-2 | 4.9379-3 | 1.9502-2 |
| | 40 | — | 0.0 | 4.8880-2 | 9.8506-3 | 1.4589-2 |
| 減速材 (水, 20°C) | | | 6.6734-2 | 3.3367-2 | 0.0 | 0.0 |

* 5.0149x10⁻²を表す

表3.3 無限増倍率及び四因子

| 濃縮度 [wt%] | V_{H_2O}/V_{UO_2} (U濃度) | 燃料球 直径[mm] | ϵ | η | f | p | k_{∞} |
|--------------|--------------------------------------|---------------|------------|--------|--------|--------|--------------|
| 3 | 3.02389 (2.4gU/cm ³) | 0.0 | 1.1149 | 1.8318 | 0.8901 | 0.7302 | 1.3274 |
| | | 2.0 | 1.1140 | 1.8318 | 0.8782 | 0.7517 | 1.3470 |
| | | 4.0 | 1.1126 | 1.8316 | 0.8766 | 0.7672 | 1.3704 |
| | | 6.0 | 1.1119 | 1.8313 | 0.8741 | 0.7784 | 1.3855 |
| 5 | 8.65486 (1.0gU/cm ³) | 0.0 | 1.0532 | 1.9301 | 0.8191 | 0.8419 | 1.4018 |
| | | 2.0 | 1.0533 | 1.9297 | 0.7991 | 0.8740 | 1.4195 |
| | | 4.0 | 1.0535 | 1.9292 | 0.7929 | 0.8876 | 1.4304 |
| | | 6.0 | 1.0542 | 1.9286 | 0.7840 | 0.8953 | 1.4273 |
| 5 | 3.82743 (2.0gU/cm ³) | 0.0 | 1.1154 | 1.9239 | 0.9098 | 0.7435 | 1.4516 |
| | | 0.2 | 1.1169 | 1.9242 | 0.8963 | 0.7459 | 1.4366 |
| | | 1.0 | 1.1155 | 1.9242 | 0.8960 | 0.7564 | 1.4549 |
| | | 2.0 | 1.1142 | 1.9241 | 0.8954 | 0.7675 | 1.4733 |
| | | 4.0 | 1.1126 | 1.9239 | 0.8931 | 0.7833 | 1.4974 |
| | | 6.0 | 1.1117 | 1.9235 | 0.8895 | 0.7943 | 1.5109 |
| 5 | 2.21829 (3.0gU/cm ³) | 0.0 | 1.2069 | 1.9171 | 0.9448 | 0.6445 | 1.4089 |
| | | 2.0 | 1.2043 | 1.9181 | 0.9340 | 0.6618 | 1.4278 |
| | | 4.0 | 1.2005 | 1.9180 | 0.9329 | 0.6760 | 1.4521 |
| | | 6.0 | 1.1977 | 1.9178 | 0.9312 | 0.6873 | 1.4701 |
| 10 | 6.42207 (1.3gU/cm ³) | 0.0 | 1.1072 | 2.0006 | 0.9200 | 0.7788 | 1.5870 |
| | | 2.0 | 1.1055 | 2.0009 | 0.8999 | 0.8080 | 1.6085 |
| | | 4.0 | 1.1037 | 2.0005 | 0.8948 | 0.8235 | 1.6270 |
| | | 6.0 | 1.1029 | 2.0000 | 0.8874 | 0.8334 | 1.6311 |
| 20 | 11.04548 (0.8gU/cm ³) | 0.0 | 1.1071 | 2.0411 | 0.9288 | 0.8043 | 1.6880 |
| | | 2.0 | 1.1044 | 2.0417 | 0.8994 | 0.8370 | 1.6975 |
| | | 4.0 | 1.1021 | 2.0410 | 0.8883 | 0.8512 | 1.7007 |
| | | 6.0 | 1.1013 | 2.0404 | 0.8728 | 0.8598 | 1.6865 |
| 40 | 19.02469 (.48gU/cm ³) | 0.0 | 1.1133 | 2.0616 | 0.9370 | 0.8220 | 1.7679 |
| | | 2.0 | 1.1088 | 2.0625 | 0.8927 | 0.8550 | 1.7454 |
| | | 4.0 | 1.1059 | 2.0616 | 0.8693 | 0.8681 | 1.7207 |
| | | 6.0 | 1.1058 | 2.0612 | 0.8392 | 0.8761 | 1.6758 |

計算条件 2領域, 4メッシュ/領域

表3.4 無限増倍率及び四因子 (均質体系に対する変化割合)

| 濃縮度 [wt%] | VH ₂ O/VUO ₂ (U濃度) | 燃料球 直径[mm] | 均質体系に対する変化割合 [%] | | | | |
|--------------|---|---------------|------------------|--------|--------|------|----------------|
| | | | ϵ | η | f | p | k _∞ |
| 3 | 3.02389 (2.4gU/cm ³) | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| | | 2.0 | -0.08 | 0.0 | -1.34 | 2.94 | 1.48 |
| | | 4.0 | -0.21 | -0.01 | -1.52 | 5.07 | 3.24 |
| | | 6.0 | -0.27 | -0.03 | -1.80 | 6.60 | 4.38 |
| 5 | 8.65486 (1.0gU/cm ³) | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| | | 2.0 | 0.01 | -0.02 | -2.44 | 3.81 | 1.26 |
| | | 4.0 | 0.03 | -0.05 | -3.20 | 5.43 | 2.04 |
| | | 6.0 | 0.09 | -0.08 | -4.29 | 6.34 | 1.82 |
| 5 | 3.82743 (2.0gU/cm ³) | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| | | 0.2 | 0.13 | 0.02 | -1.48 | 0.32 | -1.03 |
| | | 1.0 | 0.01 | 0.02 | -1.52 | 1.74 | 0.23 |
| | | 2.0 | -0.11 | 0.01 | -1.58 | 3.23 | 1.49 |
| | | 4.0 | -0.25 | 0.0 | -1.84 | 5.35 | 3.16 |
| | | 6.0 | -0.33 | -0.02 | -2.23 | 6.83 | 4.09 |
| 5 | 2.21829 (3.0gU/cm ³) | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| | | 2.0 | -0.22 | 0.05 | -1.14 | 2.68 | 1.34 |
| | | 4.0 | -0.53 | 0.05 | -1.26 | 4.89 | 3.07 |
| | | 6.0 | -0.76 | 0.04 | -1.44 | 6.64 | 4.34 |
| 10 | 6.42207 (1.3gU/cm ³) | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| | | 2.0 | -0.15 | 0.01 | -2.18 | 3.75 | 1.35 |
| | | 4.0 | -0.32 | -0.01 | -2.74 | 5.74 | 2.52 |
| | | 6.0 | -0.39 | -0.03 | -3.54 | 7.01 | 2.78 |
| 20 | 11.04548 (0.8gU/cm ³) | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| | | 2.0 | -0.24 | 0.03 | -3.17 | 4.07 | 0.56 |
| | | 4.0 | -0.45 | 0.0 | -4.36 | 5.83 | 0.75 |
| | | 6.0 | -0.52 | -0.03 | -6.03 | 6.90 | -0.09 |
| 40 | 19.02469 (.48gU/cm ³) | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| | | 2.0 | -0.40 | 0.04 | -4.73 | 4.01 | -1.27 |
| | | 4.0 | -0.66 | 0.0 | -7.23 | 5.61 | -2.67 |
| | | 6.0 | -0.67 | -0.02 | -10.44 | 6.58 | -5.21 |

計算条件 2領域, 4メッシュ/領域

表 3.5 1 群熱中性子束と熱中性子束不利係数

| 濃縮度 [wt%] | VH ₂ O/VUO ₂ (U濃度) | 燃料球 直径[mm] | 1 群熱中性子束 $\phi(u)$ | | | 熱中性子束 不利係数 |
|--------------|---|---------------|--------------------|---------|---------|---------------|
| | | | セル平均 | 燃料領域 | 減速材領域 | |
| 5 | 3.827430 (2.0gU/cm ³) | 0.0 | 0.55325 | — | — | 1.0 |
| | | 0.2 | 0.59986 | 0.54244 | 0.61486 | 1.134 |
| | | 1.0 | 0.60911 | 0.55025 | 0.62448 | 1.135 |
| | | 2.0 | 0.62019 | 0.55859 | 0.63628 | 1.139 |
| | | 4.0 | 0.64120 | 0.57096 | 0.65955 | 1.155 |
| | | 6.0 | 0.66303 | 0.57984 | 0.68477 | 1.181 |
| 20 | 11.04548 (0.8gU/cm ³) | 0.0 | 0.43653 | — | — | 1.0 |
| | | 2.0 | 0.56763 | 0.43261 | 0.57986 | 1.340 |
| | | 4.0 | 0.61979 | 0.44052 | 0.63603 | 1.444 |
| | | 6.0 | 0.68660 | 0.44282 | 0.70867 | 1.600 |

計算条件 2 領域, 4 メッシュ/領域

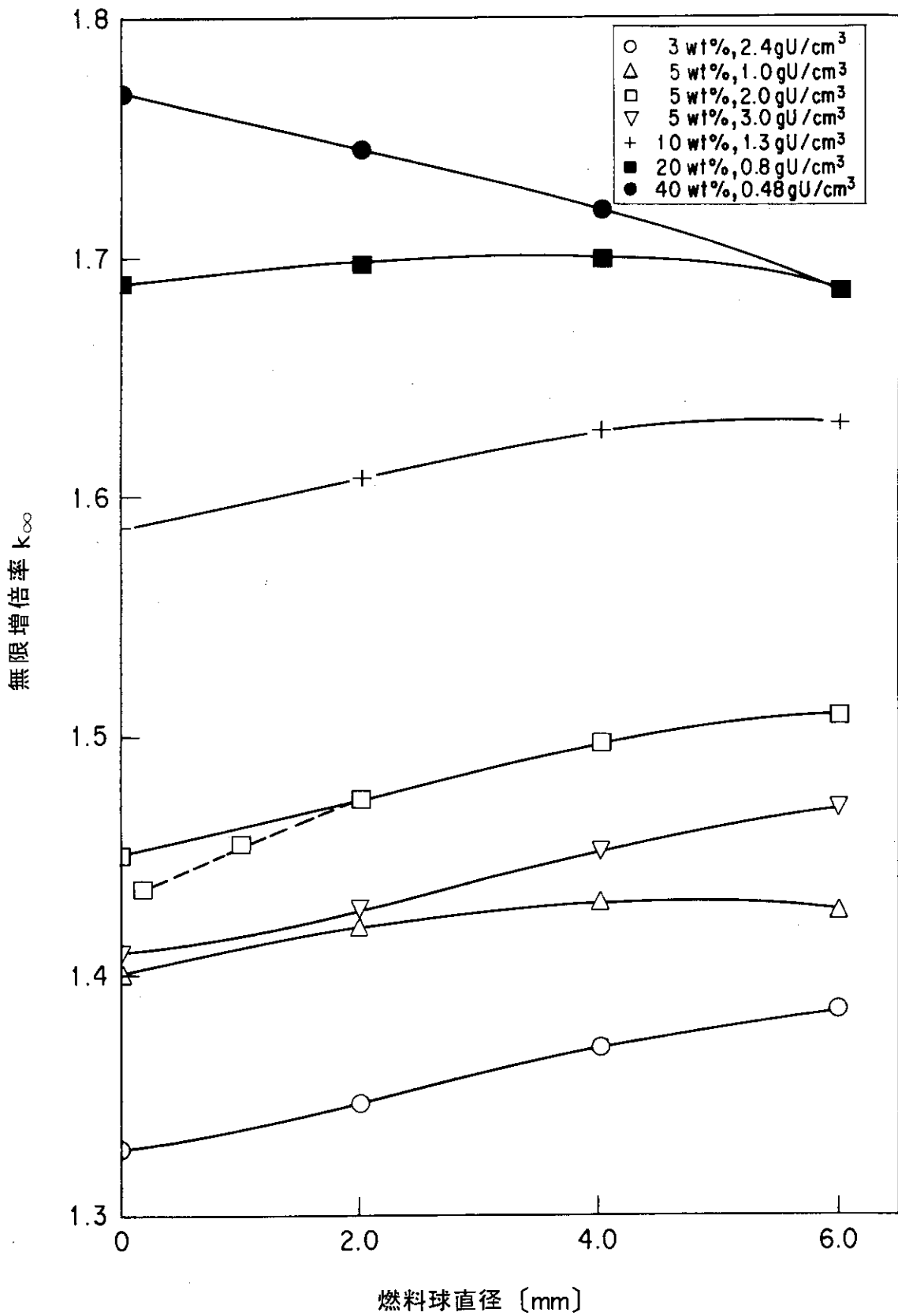


図 3.1 無限増倍率 (球形状)

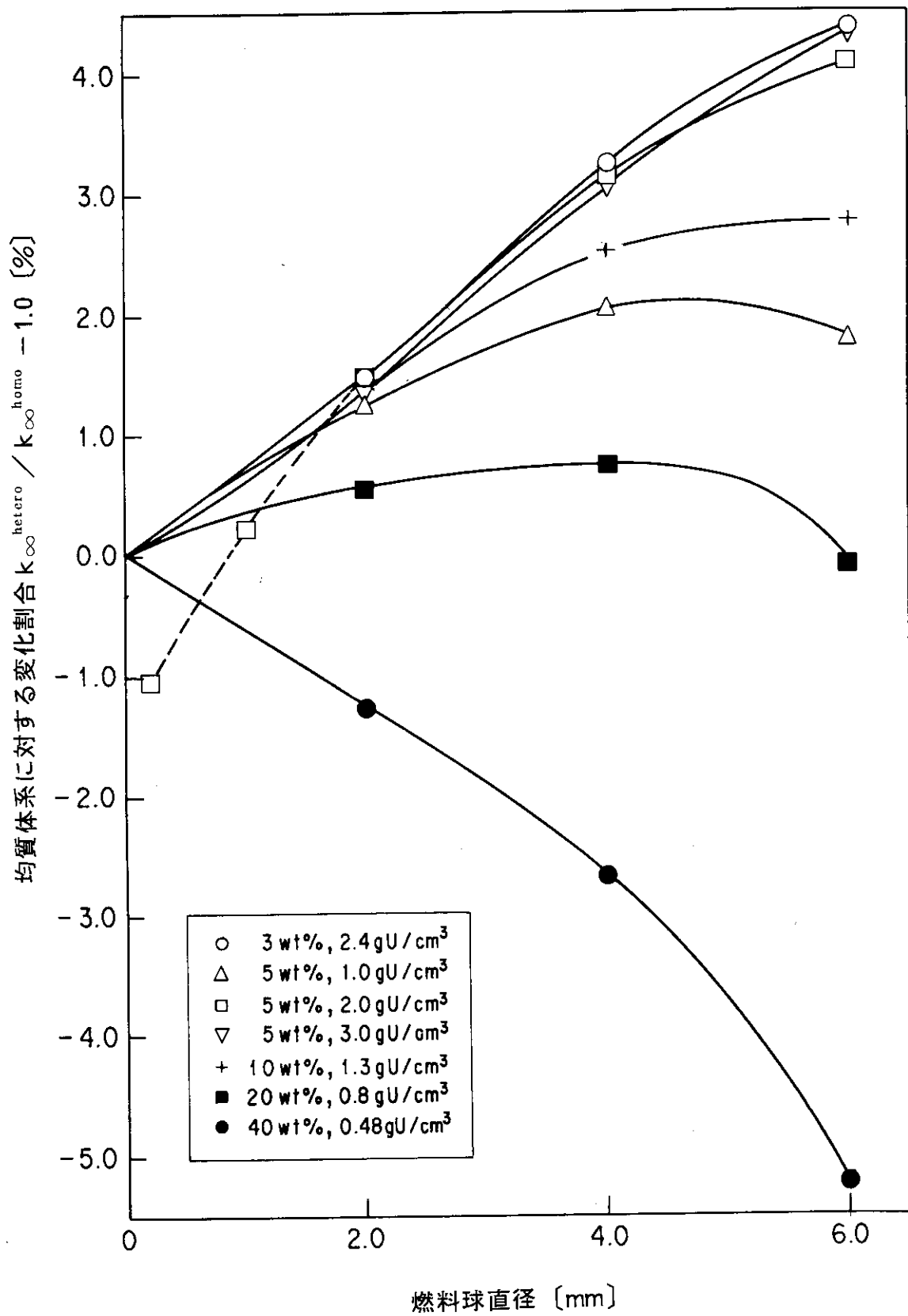
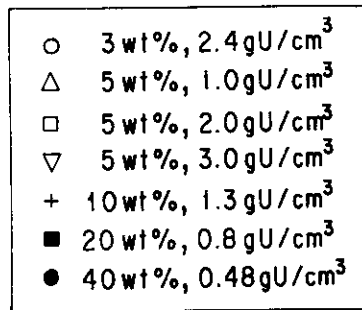


図 3.2 無限増倍率 (均質体系に対する変化割合、球形状)



3 wt%, 2.4 gU/cm³は 5 wt%, 2.0 gU/cm³ に重なる
 20 wt%, 0.8 gU/cm³は 10 wt%, 1.3 gU/cm³ に重なる

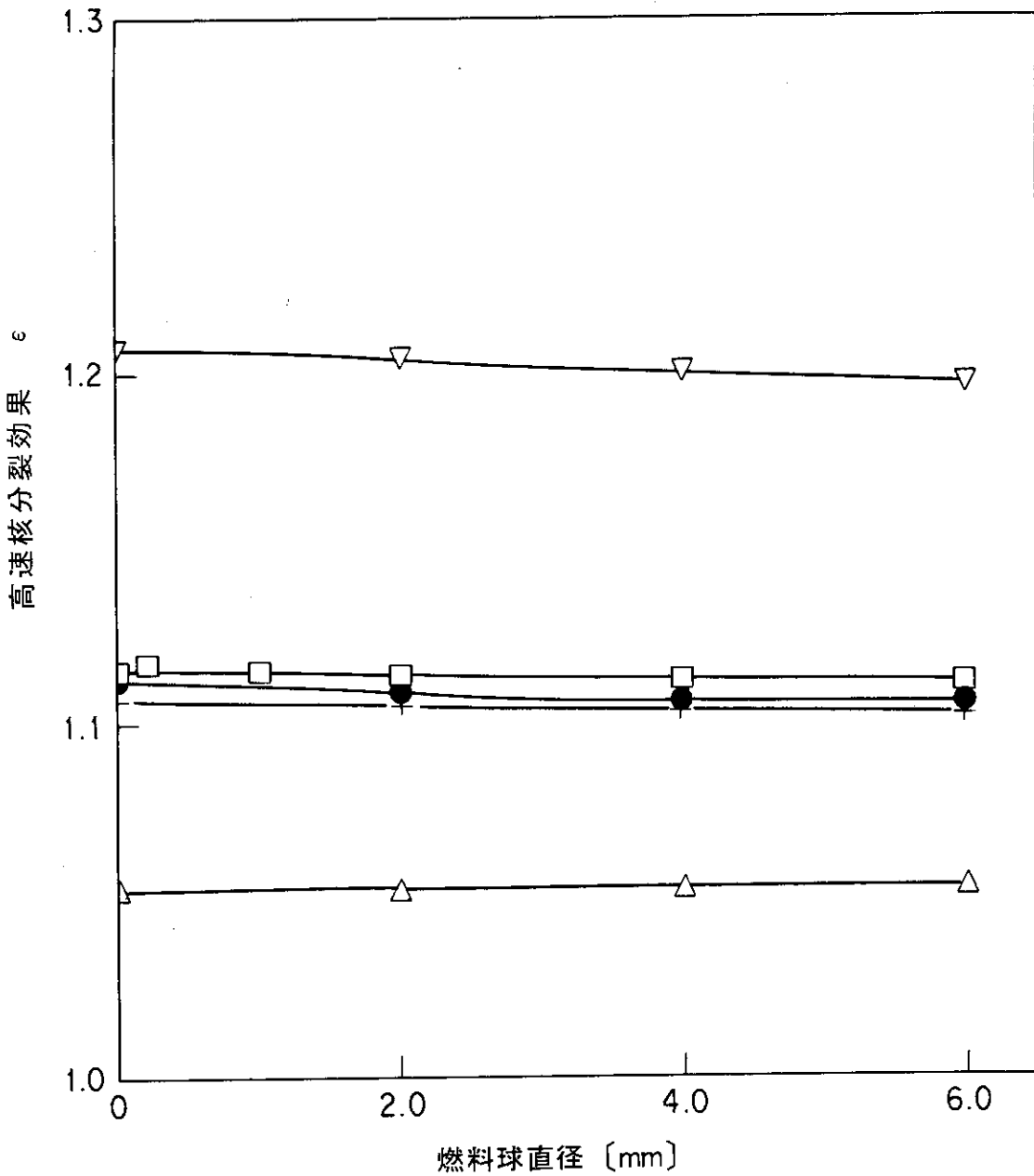


図 3.3 高速核分裂効果 (球形状)

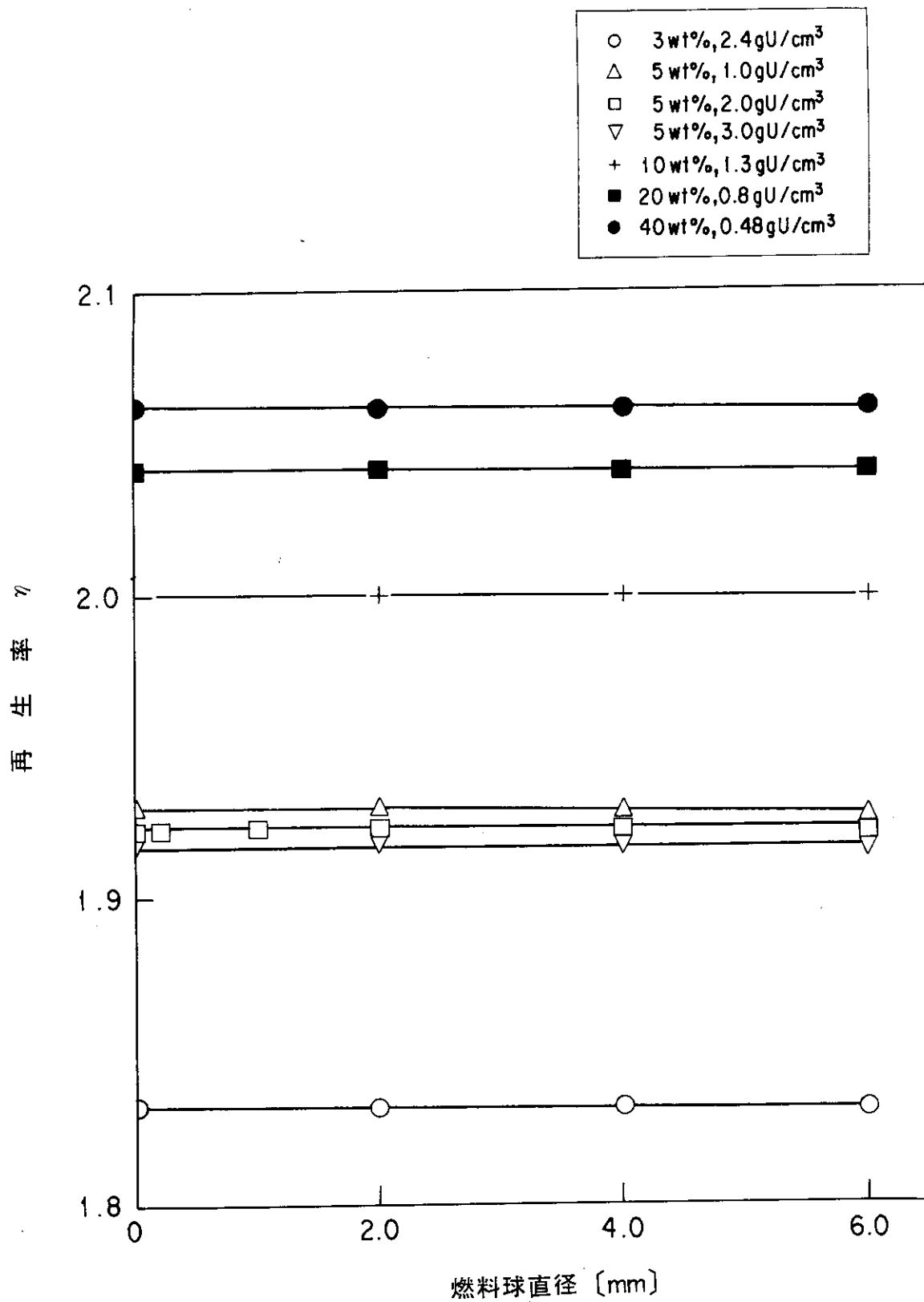


图 3.4 再生率 (球形状)

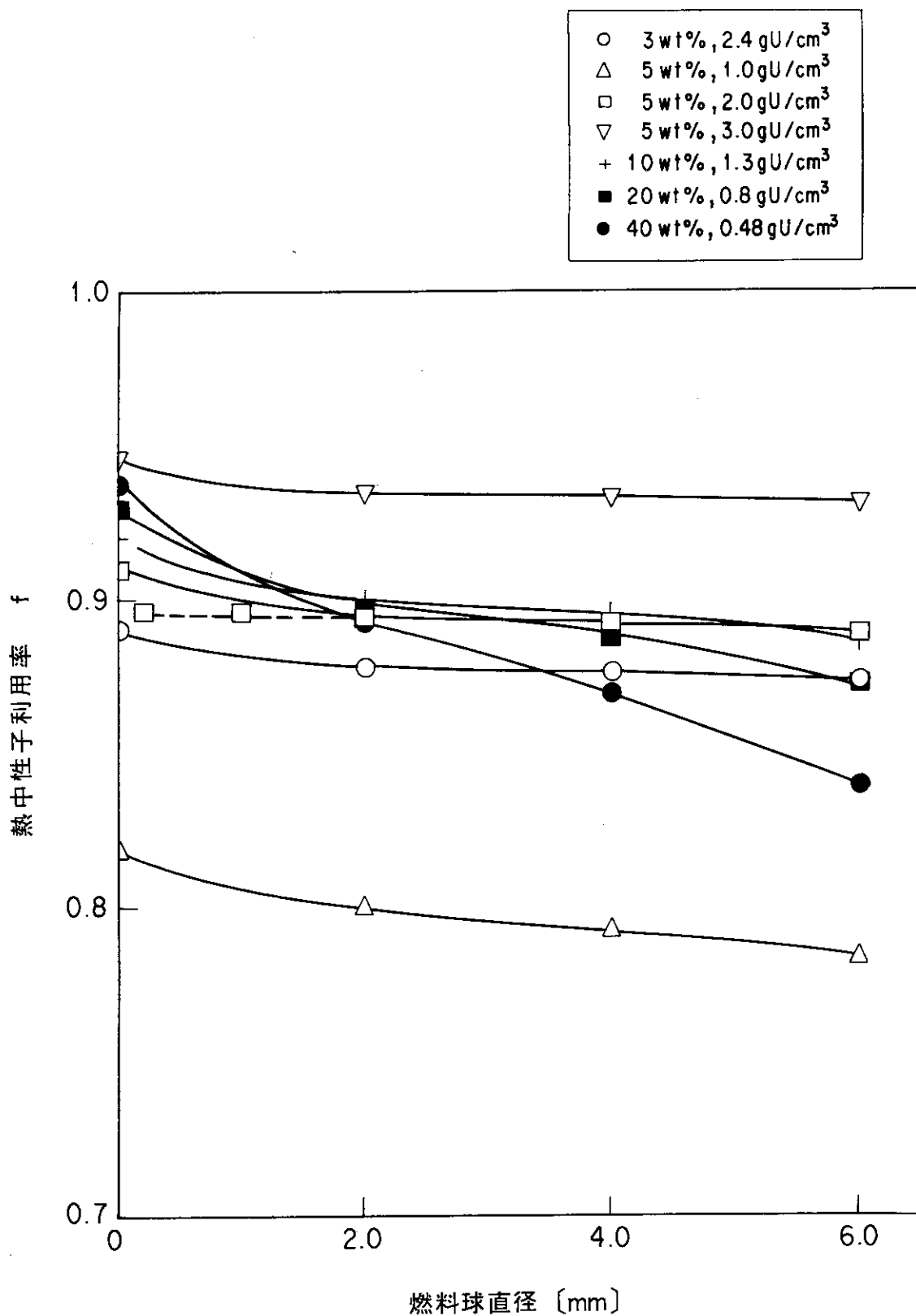


图 3.5 熱中性子利用率 (球形状)

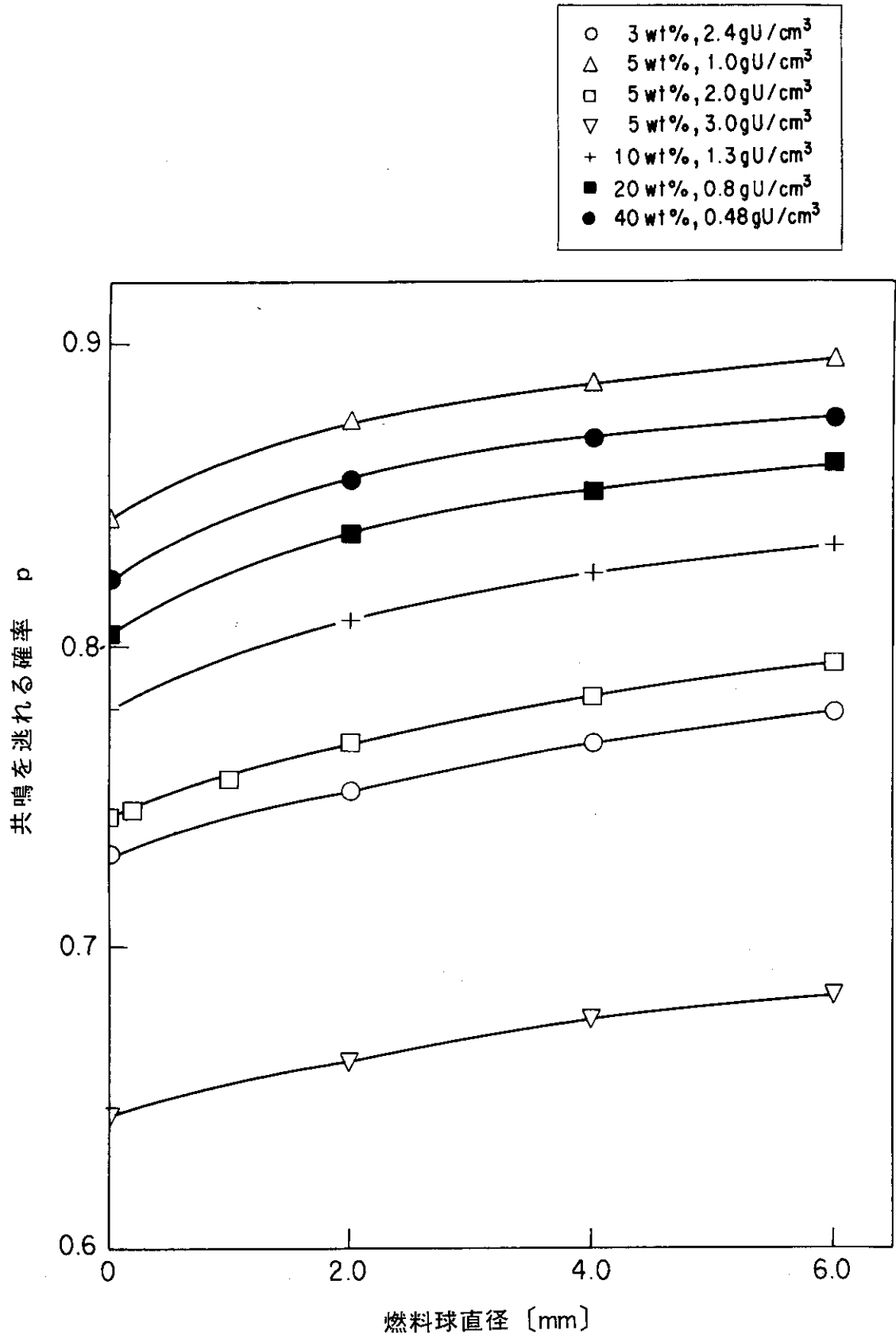


図 3.6 共鳴を逃れる確率 (球形状)

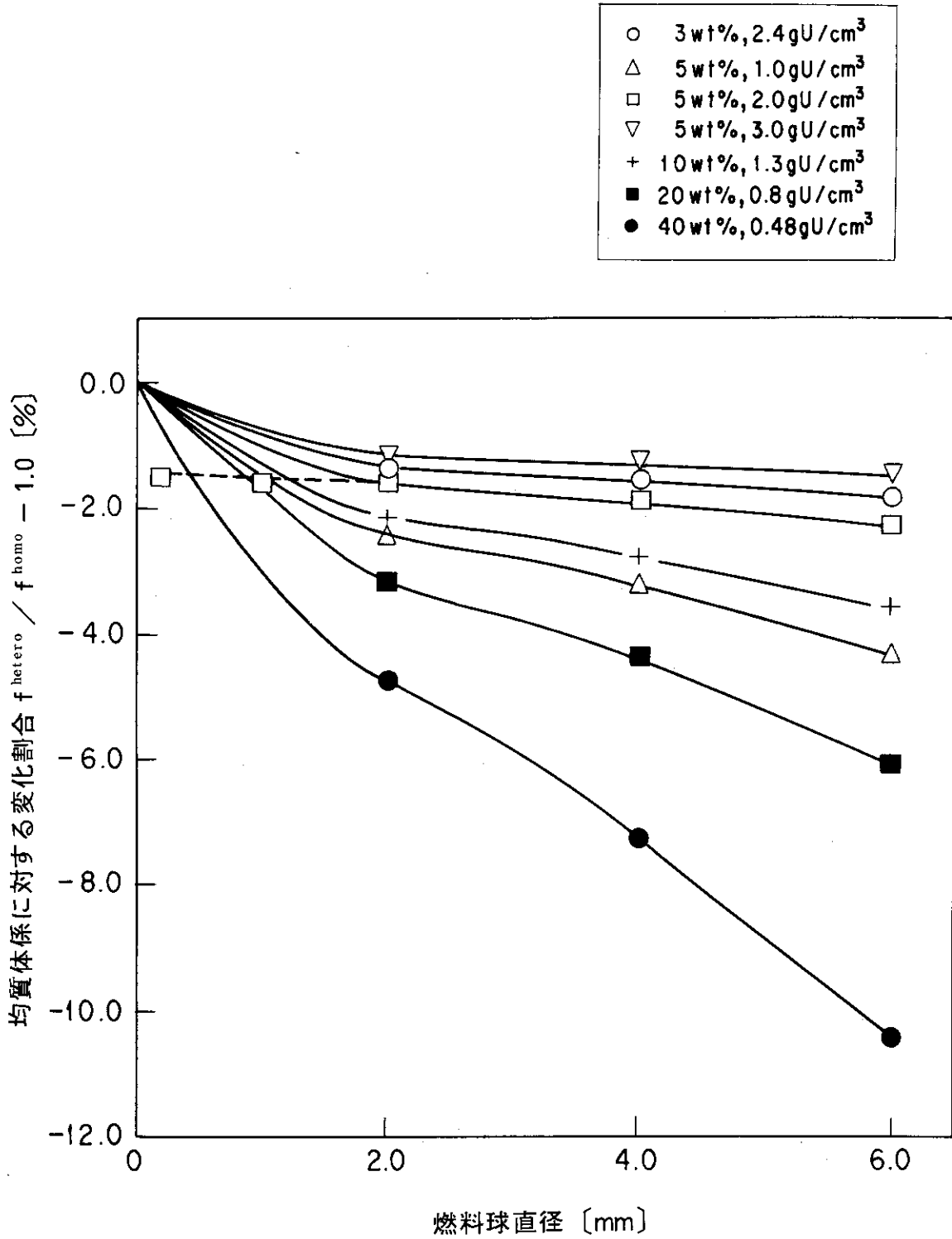


図 3.7 熱中性子利用率 (均質体系に対する変化割合、球形状)

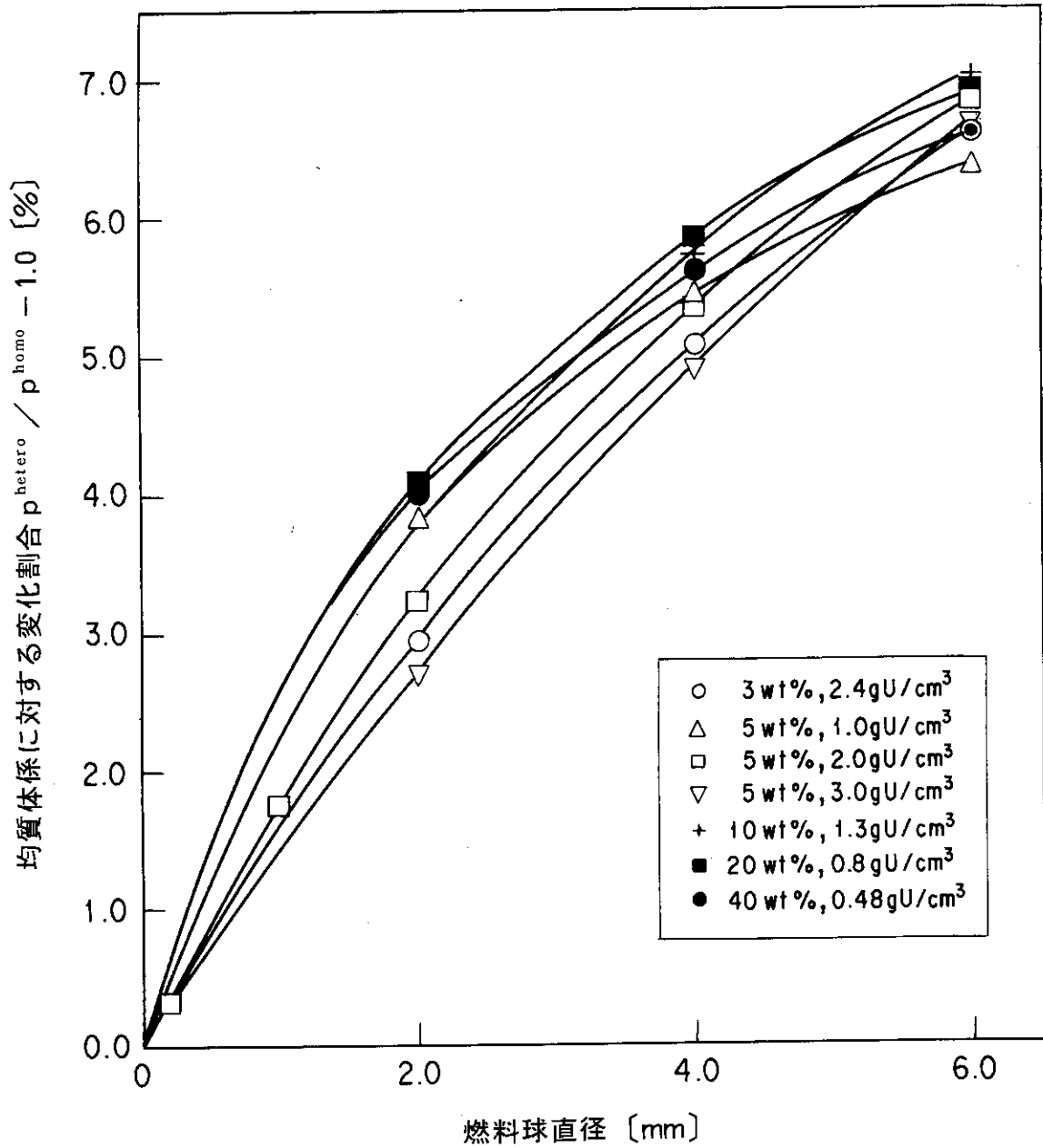


図 3.8 共鳴を逃れる確率 (均質体系に対する変化割合、球形状)

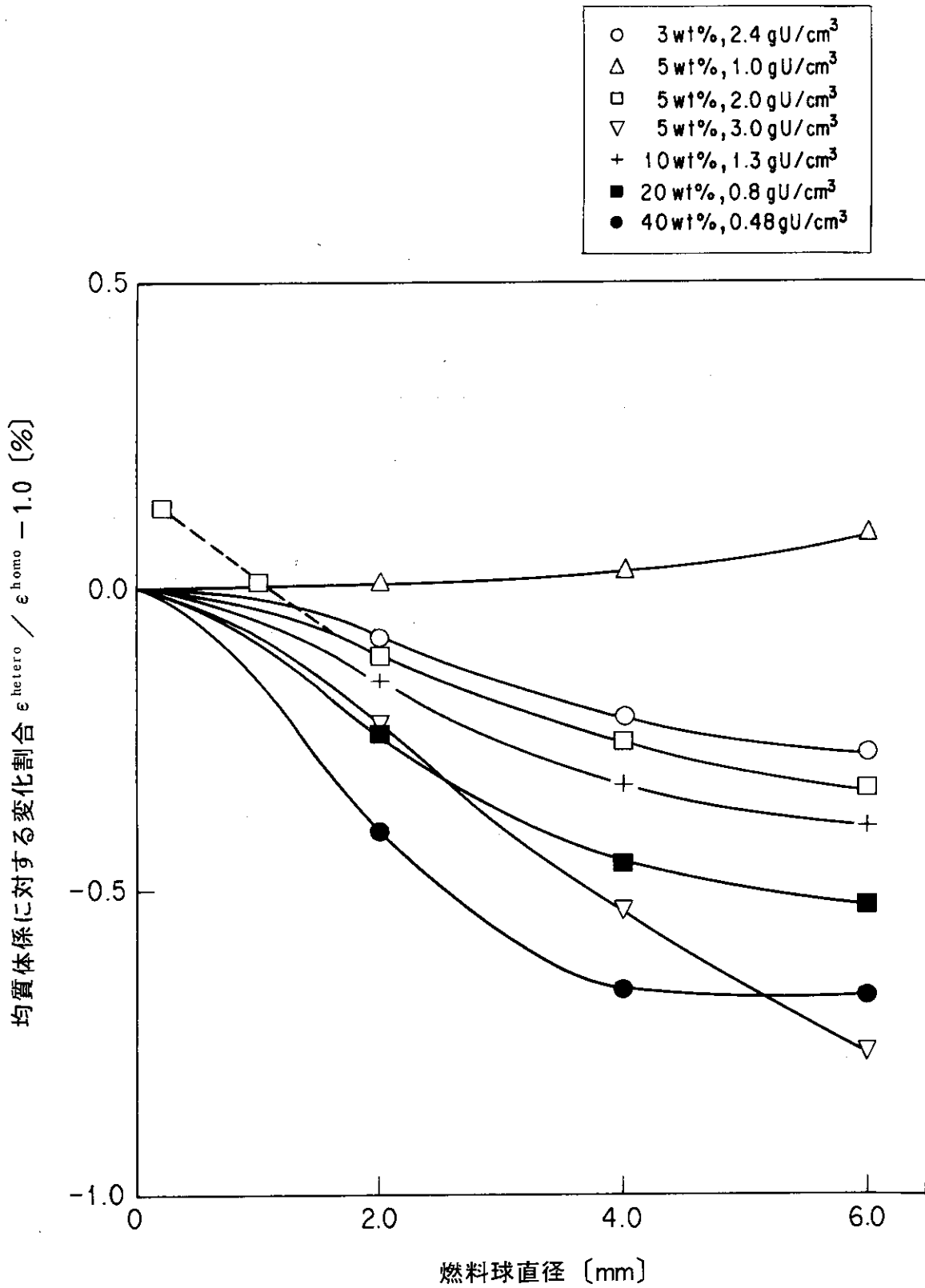


図 3.9 高速核分裂効果 (均質体系に対する変化割合、球形状)

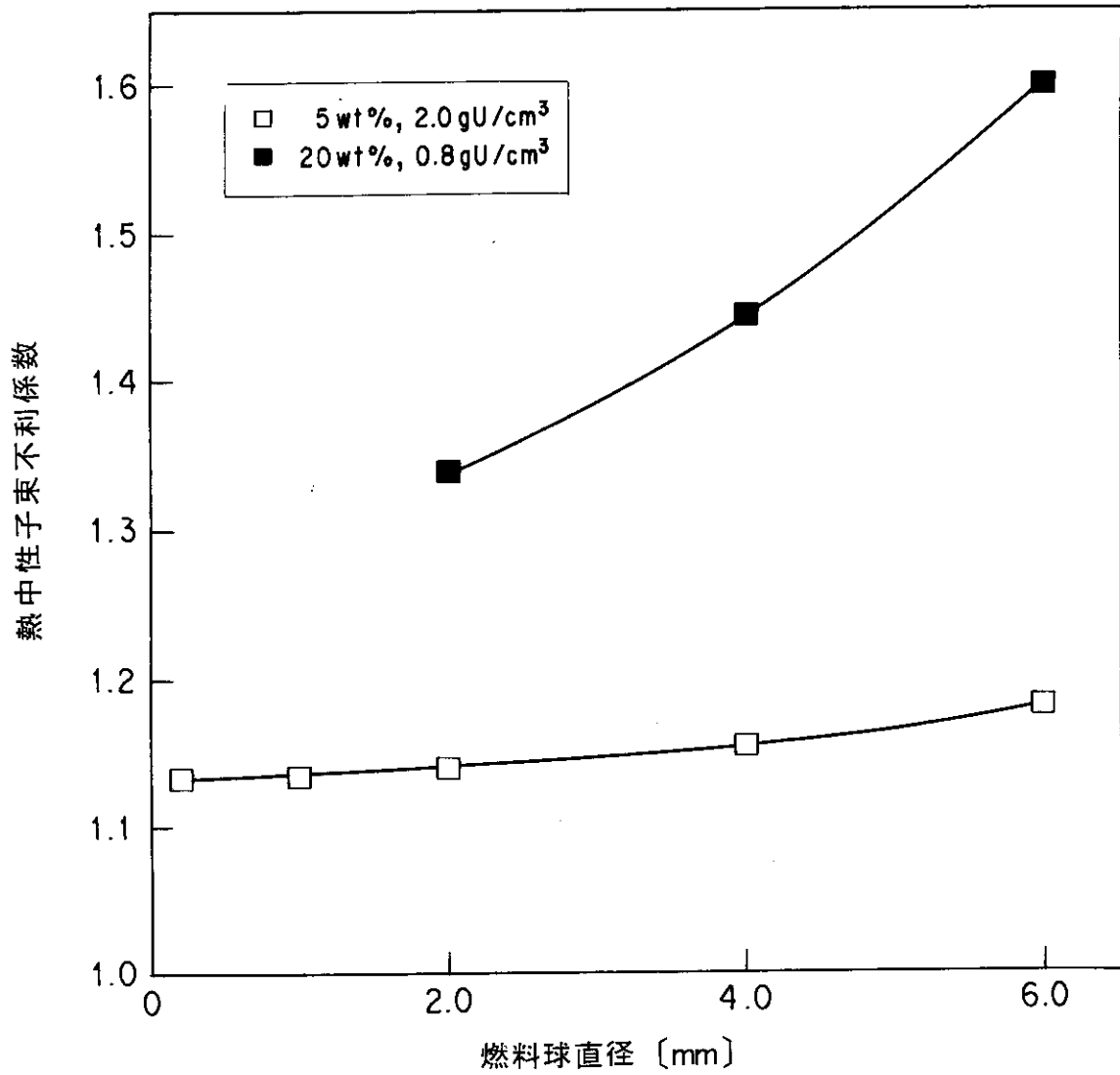


图 3.10 熱中性子束不利係数 (球形状)

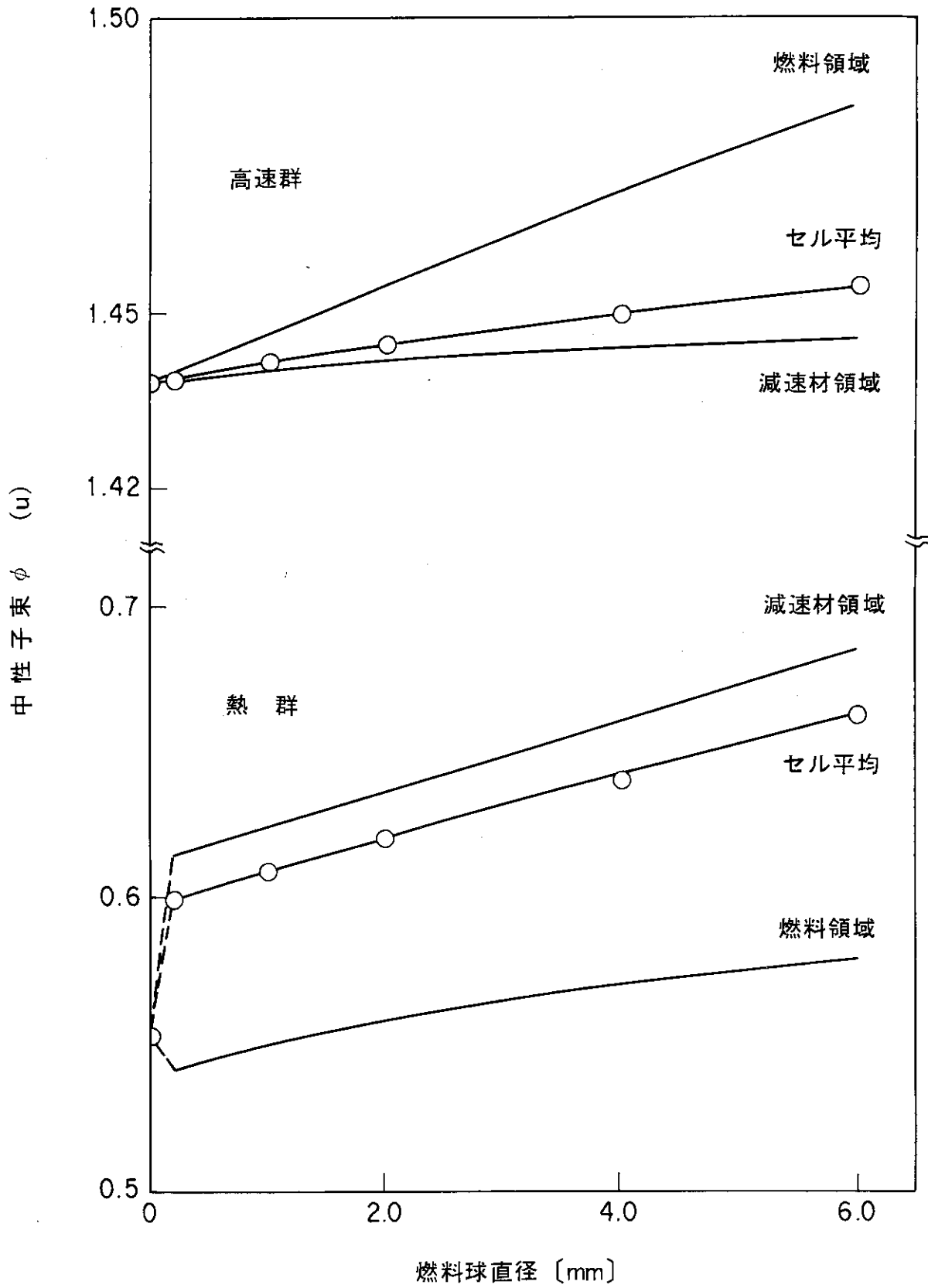


図 3.11 標準燃料の中性子束 (球形状)

4. 結論と今後の課題

二酸化ウラン燃料の粉末（またはスラリー）は、燃料粒径が小さくなると臨界安全性評価の際に均質とみなせるか否かを数値計算によって検討した。非常に細かい燃料であっても、濃縮度が10wt%以下では非均質系の方が均質系よりも無限増倍率 k_{∞} が大きくなるため、フランスのハンドブックに記されているようなしきい値（均質とみなしてよい燃料寸法の値）は存在しない。ちなみに、冠水状態にある直径2mmの球状燃料の配列を体積平均して均質系として取扱うと、反応度を2%程度低く見積るという計算結果が得られた。これは、非均質効果が主に熱中性子によって起こされるのではなく、共鳴領域の中中性子の振舞いに依存するためである。

今後、燃料を細かくしていても熱中性子利用率や熱中性束不利係数が均質系の値と連続的につながらない問題を解決することが課題として残っている。

謝 辞

本研究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年度及び平成元年度に実施され、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のもとで御検討いただきました。ここに記して謝辞といたします。

4. 結論と今後の課題

二酸化ウラン燃料の粉末（またはスラリー）は、燃料粒径が小さくなると臨界安全性評価の際に均質とみなせるか否かを数値計算によって検討した。非常に細かい燃料であっても、濃縮度が10wt%以下では非均質系の方が均質系よりも無限増倍率 k_{∞} が大きくなるため、フランスのハンドブックに記されているようなしきい値（均質とみなしてよい燃料寸法の値）は存在しない。ちなみに、冠水状態にある直径2mmの球状燃料の配列を体積平均して均質系として取扱うと、反応度を2%程度低く見積るという計算結果が得られた。これは、非均質効果が主に熱中性子によって起こされるのではなく、共鳴領域の中中性子の振舞いに依存するためである。

今後、燃料を細かくしていても熱中性子利用率や熱中性束不利係数が均質系の値と連続的につながらない問題を解決することが課題として残っている。

謝 辞

本研究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年度及び平成元年度に実施され、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のもとで御検討いただきました。ここに記して謝辞といたします。

参 考 文 献

- 1) "Guide de Criticité". CEA-R3114, Commissariat a L'Énergie Atomique (1967).
- 2) Koyama K., Taji Y. and Minami K.: "ANISN-JR, A One-Dimensional Discrete Ordinates Code for Neutron and Gamma-Ray Transport Calculations", JAERI-M 6954 (1977).
- 3) Heinicke W., Krug H., Thomas W., Weber W. and Gmal B.: "Handbuch zur Kritikalität". Gesellschaft für Reaktorsicherheit (1985).
- 4) Naito Y., Tsuruta S., Matsumura T. and Ohuchi T.: "MGCL-TROCESSOR: A Computer Code System for Processing Multigroup Constants Library MGCL", JAERI-M 9396 (1981).
- 5) 小室雄一・酒井友宏・中丸昇一: 「各種核燃料物質の原子個数密度算出方法」, JAERI-M 87-037 (1987).
- 6) 科学技術庁原子力安全局核燃料規制課編: 「臨界安全ハンドブック」, にかん書房 (1988).
- 7) "ENDF/B Summary Documentation", BNL-NCS-17541 (ENDF-201), 2nd Edition (ENDF/B-IV) (1975).
- 8) 「シグマ」特別研究委員会: "「シグマ委員会」における核データの収集評価の活動, 昭和62, 62年度の作業報告", 日本原子力学会誌, 32 (1990) 56-64.
- 9) Nakagawa T.: "Program RESEND (Version 84-07): A Program for Reconstruction of Resonance Cross Sections from Evaluated Nuclear Data in the ENDF/B Format (Modified Version of RESEND)", JAERI-M 84-192 (1984).
- 10) Macdougall J. D.: "PIXSE", AEEW-M 318 (1963).
- 11) Kier P. H. and Robba A. A.: "RABBLE. A Program for Computation of Resonance Absorption in Multiregion Reactor Cells", ANL-7326 (1967).
- 12) Honek H. C.: "THERMOS: A Thermalization Transport Theory Code for Reactor Lattice Calculations", BNL-5826 (1961).
- 13) Shibata K. et al.: "Japanese Evaluated Nuclear Data Library, Version-3 - JENDL-3 -", JAERI-1319 (1990).

付録A 衝突確率計算における幾何形状及び領域の区分数・メッシュ数の効果

超多群中性子束の算出には、高速群ではRABBLEコードを、熱群ではTHERMOSコードを使用した。RABBLEコードを使用する際に、領域をいくつかの区域に分割する。また、THERMOSコードを使用する際には、その各区域をさらにいくつかのメッシュに分ける。均質系の計算では、計算結果が領域の分割の仕方やメッシュ数に依存してはいけなければならないはずである。逆に、非均質系の計算結果には多少なりとも領域の区分数及びメッシュ数の影響が現れると考えられる。また、非均質燃料体系で、燃料の寸法を小さくしていったときに均質燃料と連続的につながらない問題でも、幾何形状の依存性が見られるかもしれない。このように考え、以下では標準燃料（濃縮度5wt%，ウラン濃度2.0gU/cm³，水対燃料体積比3.8274）を対象に、幾何形状及び区域数・メッシュ数の影響を均質燃料と非均質燃料に分けて検討する。

(1) 均質燃料体系

まず均質燃料について、幾何形状、セルの大きさ、領域数及びメッシュ数等を変化させて無限増倍率を及び四因子を計算し、比較した。計算条件を表A. 1に示す。いずれの場合も小数点以下4桁まで同じになり、均質体系では、それを1領域として計算しても、2領域でそれぞれの領域に同じ物質があるとしても、セルの大きさ及びメッシュ数により計算結果には影響が現れないことが分る。

次に表A. 1のケースから11から14について、高速群及び熱群中性子を領域毎に1群に縮約して比較した。計算結果を表A. 2に示す。この表より、高速群中性子束については領域1（内側）と領域2（外側）は一致している（但し、標準燃料の燃料球直径2mmに対応するケース14では領域2の方が領域1よりも1%小さい）。これに対して熱群中性子束の比較では領域2の方が領域1よりも0.5%前後大きくなっている。このように、無限増倍率及び四因子には現れないが、中性子束の計算では領域の区分の仕方等に依存する微妙な差があることが分った。

(2) 非均質燃料体系

a) 棒状燃料の2次元配列

棒状燃料の2次元配列について、セル半径、区域数及びメッシュ数を変化させて、無限増倍率及び四因子を比較した。燃料棒直径0.2mm（セル半径0.21971mm）の場合の計算結果を表A. 3に、燃料棒直径2.0mm（セル半径2.1971mm）の場合の計算結果を表A. 4に示す。これらの表より、燃料領域の区域数またはメッシュ数を変化させたとき結果に与える影響は、燃料棒直径に殆ど依存しないことが分かる。以下、燃料棒直径が2.0mmの場合について検討する。

ここで調べた範囲において、区域数を一定としてメッシュ数を変化させた場合よりも、メッシュ数を一定として区域数を変化させた方が結果に与える影響が大きい。燃料領域の区分数を増加させると、高速核分裂効果 ϵ 及び共鳴を逃れる確率 p は増加し、その結果、無限増倍率 k_{∞} は減少する。いずれの場合も、再生率 η 及び熱中性子利用率 f は変化しない。

b) 球状燃料の3次元配列

標準燃料の非均質体系（燃料球直径2mm）を対象に、RABBLEコードの領域区分数及びTHERMOSコードのメッシュ数を変化させて無限増倍率 k_{∞} 、四因子、熱群中性子束及び熱中性子不利係数を算出した。その結果を表A. 5に示す。この表より、この程度の領域数・メッシュ数の変化では計算結果は大きく変化しないことが分る（本文及び以下の検討計算で、RABBLEコードを用いた計算では燃料領域及び減速材領域をそれぞれ1区域とし、THERMOSコー

ドを用いた計算では各領域を4メッシュに区分している)。

c) 幾何形状の効果

標準燃料の非均質体系で水対燃料体積比を一定のまま、幾何形状を球、円柱、平板と変えた。計算モデルを図A. 1に示す。無限増倍率、四因子及び熱中性子不利係数の算出結果を表A. 6に示す。本文でも見たように、高速核分裂効果 ϵ 及び再生率 η はどの形状の燃料でも燃料寸法に対する依存性が小さい。また、共鳴を逃れる確率 p は燃料の寸法(球直径、円柱直径、平板厚さ)を同じにとると、平板、円柱、球の順で大きくなる。

次に、熱中性子利用率 f の均質系からの変化割合を図A. 2に、熱中性子不利係数を図A. 3に示す。これらの図より、平板燃料で均質と非均質とで f 及び熱中性子不利係数が連続的につながる傾向なのに対して、円柱形状、球状の燃料では燃料寸法を小さくしていても、寸法0の極限值が均質系の値と等しくはならない。この原因としては、THERMOSコードの輸送核が円柱形状及び球状燃料で正確でないことが考えられる。

表A.1 幾何形状の効果 (標準燃料, 均質体系)

| ケース | 幾何形状 | セルの大きさ | 備 考 |
|-----|------|-----------|--|
| 1 | 均質 | ———— | RABBLEは均質、THERMOSは半径1 cmの円柱 |
| 2 | 球 | 直径 0.2mm | 2領域、1メッシュ/領域 |
| 3 | | 5.0 | 領域1と領域2の体積比 0.5 : 0.5 |
| 4 | | 50.0 | |
| 5 | 円柱 | 直径 0.2mm | 2領域、1メッシュ/領域 |
| 6 | | 5.0 | 領域1と領域2の体積比 0.63 : 0.37 |
| 7 | | 50.0 | |
| 8 | 平板 | 厚さ 0.2mm | RABBLEはcosine current |
| 9 | | 5.0 | 2領域、1メッシュ/領域 |
| 10 | | 50.0 | 領域1と領域2の体積比 0.5 : 0.5 |
| 11 | 球 | 直径 0.2mm | 2領域、4メッシュ/領域 |
| 12 | | 5.0 | 領域1と領域2の体積比 0.5 : 0.5 |
| 13 | | 50.0 | |
| 14 | 球 | 直径 3.3802 | 2領域、4メッシュ/領域 領域1と領域2の体積比は標準燃料の 燃料と減速材の体積比と同じ |

表A.2 球形状均質体系の領域毎の中性子束

| ケース | 高速群中性子束 (縮約1群) | | | 熱群中性子束 (縮約1群) | | |
|-----|----------------|---------|--------|---------------|----------|--------|
| | 領域1 | 領域2 | 2 / 1 | 領域1 | 領域2 | 2 / 1 |
| 11 | 1.43786 | 1.43787 | 1.0000 | 0.552162 | 0.554376 | 1.0040 |
| 12 | 1.43794 | 1.43795 | 1.0000 | 0.551879 | 0.554594 | 1.0049 |
| 13 | 1.43795 | 1.43795 | 1.0000 | 0.546921 | 0.559585 | 1.0232 |
| 14 | 1.44857 | 1.43516 | 0.9907 | 0.551025 | 0.553835 | 1.0051 |

表A. 3 非均質燃料の区域数とメッシュ数(1)

燃料条件

| | |
|---------|------------------------|
| 濃縮度 | 5 wt% |
| ウラン濃度 | 2.0 gU/cm ³ |
| 領域半径 燃料 | 0.01 cm |
| 減速材 | 0.021971 cm |

| 区域数 | | THERMOSメッシュ | | ε | ρ | f | η | k_{∞} |
|-----|-----|-------------|-----|---------------|---------|---------|---------|--------------|
| 燃料 | 減速材 | 燃料 | 減速材 | | | | | |
| 1 | 1 | 10 | 6 | 1.12062 | 0.74396 | 0.90247 | 1.91063 | 1.43753 |
| 1 | 1 | 20 | 6 | 1.12062 | 0.74394 | 0.90252 | 1.91062 | 1.43757 |
| 1 | 1 | 30 | 6 | 1.12062 | 0.74395 | 0.90253 | 1.91062 | 1.43759 |
| 1 | 1 | 30 | 6 | 1.12062 | 0.74395 | 0.90253 | 1.91062 | 1.43759 |
| 2 | 1 | 30 | 6 | 1.12070 | 0.74390 | 0.90253 | 1.91062 | 1.43761 |
| 3 | 1 | 30 | 6 | 1.12068 | 0.74396 | 0.90253 | 1.91062 | 1.43769 |
| 5 | 1 | 30 | 6 | 1.12061 | 0.74407 | 0.90253 | 1.91062 | 1.43782 |
| 6 | 1 | 30 | 6 | 1.12057 | 0.74413 | 0.90253 | 1.91062 | 1.43788 |
| 10 | 1 | 30 | 6 | 1.12041 | 0.74431 | 0.90253 | 1.91062 | 1.43802 |
| 15 | 1 | 30 | 6 | 1.12021 | 0.74448 | 0.90253 | 1.91062 | 1.43809 |

表A. 4 非均質燃料の区域数とメッシュ数(2)

燃料条件

| | |
|---------|------------------------|
| 濃縮度 | 5 wt% |
| ウラン濃度 | 2.0 gU/cm ³ |
| 領域半径 燃料 | 0.1 cm |
| 減速材 | 0.21971 cm |

| 区域数 | | THERMOSメッシュ | | ϵ | p | f | η | k_{∞} |
|-----|-----|-------------|-----|------------|---------|---------|---------|--------------|
| 燃料 | 減速材 | 燃料 | 減速材 | | | | | |
| 10 | 1 | 10 | 6 | 1.11741 | 0.77328 | 0.89926 | 1.91054 | 1.48454 |
| 10 | 1 | 20 | 6 | 1.11741 | 0.77327 | 0.89932 | 1.91053 | 1.48462 |
| 10 | 1 | 30 | 6 | 1.11740 | 0.77328 | 0.89933 | 1.91053 | 1.48464 |
| 10 | 1 | 40 | 6 | 1.11740 | 0.77329 | 0.89934 | 1.91053 | 1.48465 |
| 1 | 1 | 30 | 6 | 1.11666 | 0.77295 | 0.89933 | 1.91053 | 1.48302 |
| 2 | 1 | 30 | 6 | 1.11682 | 0.77298 | 0.89933 | 1.91053 | 1.48329 |
| 3 | 1 | 30 | 6 | 1.11700 | 0.77300 | 0.89933 | 1.91053 | 1.48356 |
| 5 | 1 | 30 | 6 | 1.11722 | 0.77306 | 0.89933 | 1.91053 | 1.48399 |
| 6 | 1 | 30 | 6 | 1.11729 | 0.77310 | 0.89933 | 1.91053 | 1.48416 |
| 10 | 1 | 30 | 6 | 1.11740 | 0.77328 | 0.89933 | 1.91053 | 1.48464 |
| 15 | 1 | 30 | 6 | 1.11742 | 0.77347 | 0.89933 | 1.91053 | 1.48504 |
| 10 | 1 | 30 | 6 | 1.11740 | 0.77328 | 0.89933 | 1.91053 | 1.48464 |
| 10 | 1 | 30 | 12 | 1.11741 | 0.77333 | 0.89902 | 1.91055 | 1.48425 |
| 10 | 1 | 30 | 18 | 1.11741 | 0.77337 | 0.89880 | 1.91057 | 1.48397 |
| 10 | 1 | 30 | 24 | 1.11741 | 0.77334 | 0.89899 | 1.91056 | 1.48421 |
| 10 | 1 | 30 | 30 | 1.11741 | 0.77332 | 0.89909 | 1.91055 | 1.48433 |
| 10 | 1 | 30 | 18 | 1.11741 | 0.77337 | 0.89880 | 1.91057 | 1.48397 |
| 10 | 2 | 30 | 18 | 1.11751 | 0.77235 | 0.89880 | 1.91057 | 1.48215 |
| 10 | 3 | 30 | 18 | 1.11759 | 0.77182 | 0.89880 | 1.91057 | 1.48124 |
| 10 | 6 | 30 | 18 | 1.11777 | 0.77102 | 0.89880 | 1.91057 | 1.47994 |
| 10 | 9 | 30 | 18 | 1.11786 | 0.77064 | 0.89880 | 1.91057 | 1.47932 |

表A. 5 非均質燃料の区域数とメッシュ数の効果 (標準燃料, 球形状)

標準燃料 (濃縮度 5 wt%、U 濃度 2 gU/cm³)

球形状 球直径 2 mm

領域半径 燃料 0.1 cm

減速材 0.16901cm

(1) 無限増倍率と四因子

| RABBLE領域数 | | THERMOSメッシュ数 | | ϵ | η | f | p | k_{∞} |
|-----------|-----|--------------|-------|------------|--------|--------|--------|--------------|
| 燃料 | 減速材 | 燃料 | 減速材 | | | | | |
| 1 | 1 | 1 *1 | 1 *1 | 1.1152 | 1.9242 | 0.8879 | 0.7675 | 1.4622 |
| 1 | 1 | 2 *2 | 2 *2 | 1.1143 | 1.9241 | 0.8946 | 0.7675 | 1.4721 |
| 1 | 1 | 3 *3 | 3 *3 | 1.1143 | 1.9241 | 0.8947 | 0.7675 | 1.4722 |
| 1 | 1 | 4 *4 | 4 *4 | 1.1142 | 1.9241 | 0.8954 | 0.7675 | 1.4733 |
| 1 | 1 | 10 *5 | 10 *5 | 1.1143 | 1.9242 | 0.8950 | 0.7675 | 1.4728 |
| 2 | 2 | 2 *1 | 2 *1 | 1.1145 | 1.9241 | 0.8946 | 0.7671 | 1.4716 |
| 2 | 2 | 4 *2 | 4 *2 | 1.1144 | 1.9241 | 0.8954 | 0.7671 | 1.4728 |
| 3 | 3 | 3 *1 | 3 *1 | 1.1146 | 1.9241 | 0.8947 | 0.7669 | 1.4714 |

(2) 熱群中性子束と熱中性子束不利係数

| RABBLE領域数 | | THERMOSメッシュ数 | | 1群熱中性子束 $\phi(u)$ | | | 熱中性子束 不利係数** |
|-----------|-----|--------------|-------|-------------------|---------|---------|-----------------|
| 燃料 | 減速材 | 燃料 | 減速材 | セル平均 | 燃料領域 | 減速材領域 | |
| 1 | 1 | 1 *1 | 1 *1 | 0.64599 | 0.55254 | 0.67041 | 1.213 |
| 1 | 1 | 2 *2 | 2 *2 | 0.62298 | 0.55841 | 0.63985 | 1.146 |
| 1 | 1 | 3 *3 | 3 *3 | 0.62272 | 0.55762 | 0.63973 | 1.147 |
| 1 | 1 | 4 *4 | 4 *4 | 0.62019 | 0.55859 | 0.63628 | 1.139 |
| 1 | 1 | 10 *5 | 10 *5 | 0.62149 | 0.55771 | 0.63815 | 1.144 |
| 2 | 2 | 2 *1 | 2 *1 | 0.62267 | 0.55812 | 0.63953 | 1.146 |
| 2 | 2 | 4 *2 | 4 *2 | 0.61987 | 0.55830 | 0.63596 | 1.139 |
| 3 | 3 | 3 *1 | 3 *1 | 0.62223 | 0.55717 | 0.63922 | 1.147 |

*1 1メッシュ/領域

*2 2メッシュ/領域

*3 3メッシュ/領域

*4 4メッシュ/領域

*5 10メッシュ/領域

** 減速材領域 $\phi(u)$ / 燃料領域 $\phi(u)$

表A.6 幾何形状の効果 (標準燃料, 非均質体系)

(1) 無限増倍率、四因子及び熱中性子不利係数

| 幾何形状 | 燃料の 大きさ [mm] | ϵ | η | f | ρ | k_{∞} | 熱中性子束 不利係数 |
|------|-----------------|------------|--------|--------|--------|--------------|---------------|
| 均質 | —— | 1.1154 | 1.9239 | 0.9098 | 0.7435 | 1.4516 | 1.0 |
| 球 | 直径 0.2 | 1.1169 | 1.9242 | 0.8963 | 0.7459 | 1.4366 | 1.134 |
| | 1.0 | 1.1155 | 1.9242 | 0.8960 | 0.7564 | 1.4549 | 1.135 |
| | 2.0 | 1.1142 | 1.9241 | 0.8954 | 0.7675 | 1.4733 | 1.139 |
| 円柱 | 直径 0.2 | 1.1171 | 1.9241 | 0.9019 | 0.7469 | 1.4479 | 1.078 |
| | 2.0 | 1.1131 | 1.9238 | 0.8986 | 0.7758 | 1.4928 | 1.101 |
| 平板 | 厚さ 0.2 | 1.1165 | 1.9239 | 0.9078 | 0.7517 | 1.4657 | 1.019 |
| | 2.0 | 1.1145 | 1.9229 | 0.8893 | 0.7911 | 1.5076 | 1.168 |

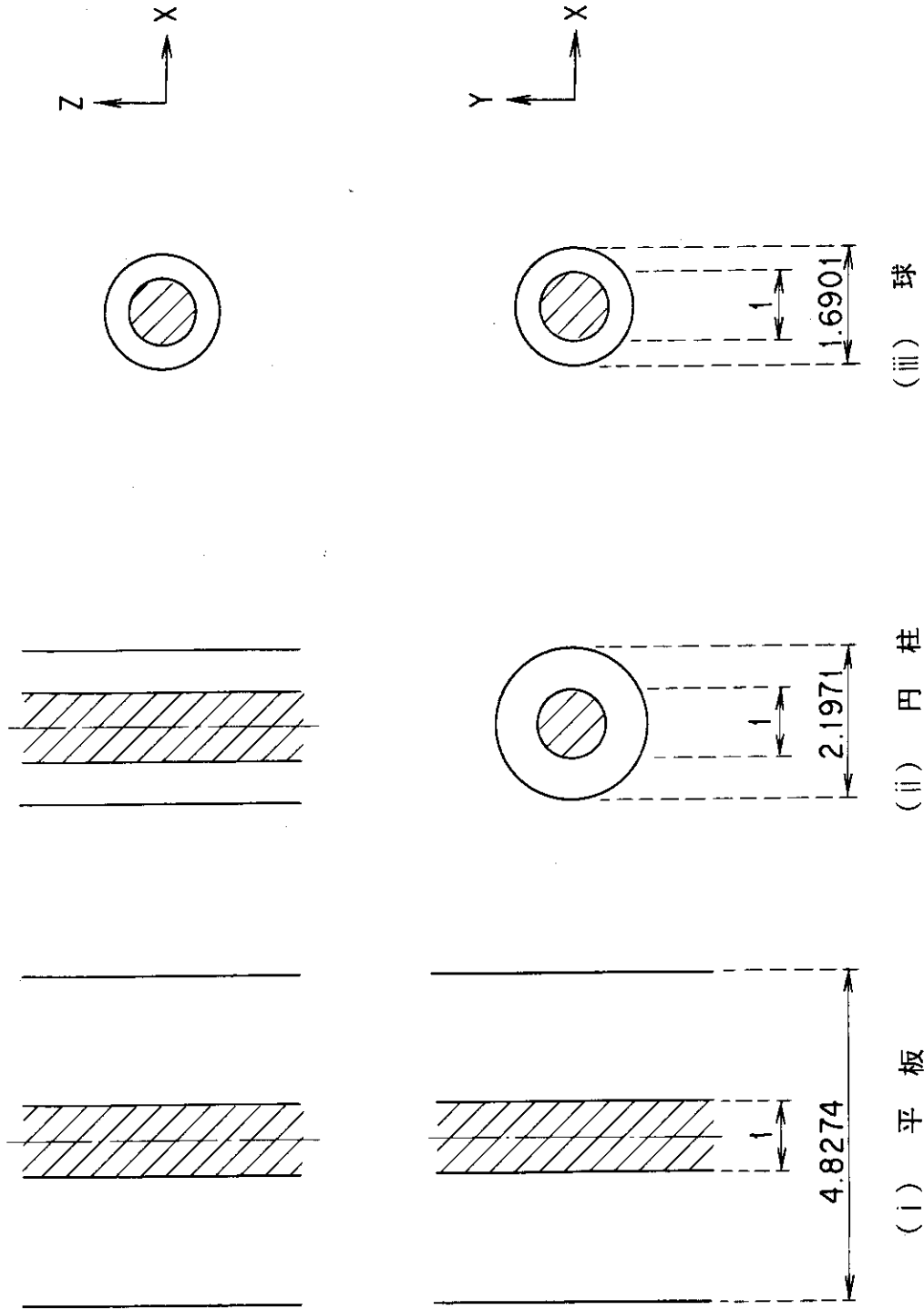
(2) 均質体系に対する変化割合

| 幾何形状 | 燃料の 大きさ [mm] | 均質体系に対する変化割合 [%] | | | | |
|------|-----------------|------------------|--------|-------|--------|--------------|
| | | ϵ | η | f | ρ | k_{∞} |
| 球 | 直径 0.2 | 0.13 | 0.02 | -1.48 | 0.32 | -1.03 |
| | 1.0 | 0.01 | 0.02 | -1.52 | 1.74 | 0.23 |
| | 2.0 | -0.11 | 0.01 | -1.58 | 3.23 | 1.49 |
| 円柱 | 直径 0.2 | 0.15 | 0.01 | -0.87 | 0.46 | -0.25 |
| | 2.0 | -0.21 | -0.01 | -1.23 | 4.34 | 2.84 |
| 平板 | 厚さ 0.2 | 0.10 | 0.0 | -0.22 | 1.10 | 0.97 |
| | 2.0 | -0.08 | -0.05 | -2.25 | 6.40 | 3.86 |

RABBLEは2領域、THERMOSは4メッシュ/領域とした。

平板はcosine currentとした。

減速材領域の大きさ (セルの大きさ) は $V_{H_2O}/V_{UO_2} = 3.82743$ となるように幾何形状毎に定めた。



図A.1 標準燃料の計算モデル図

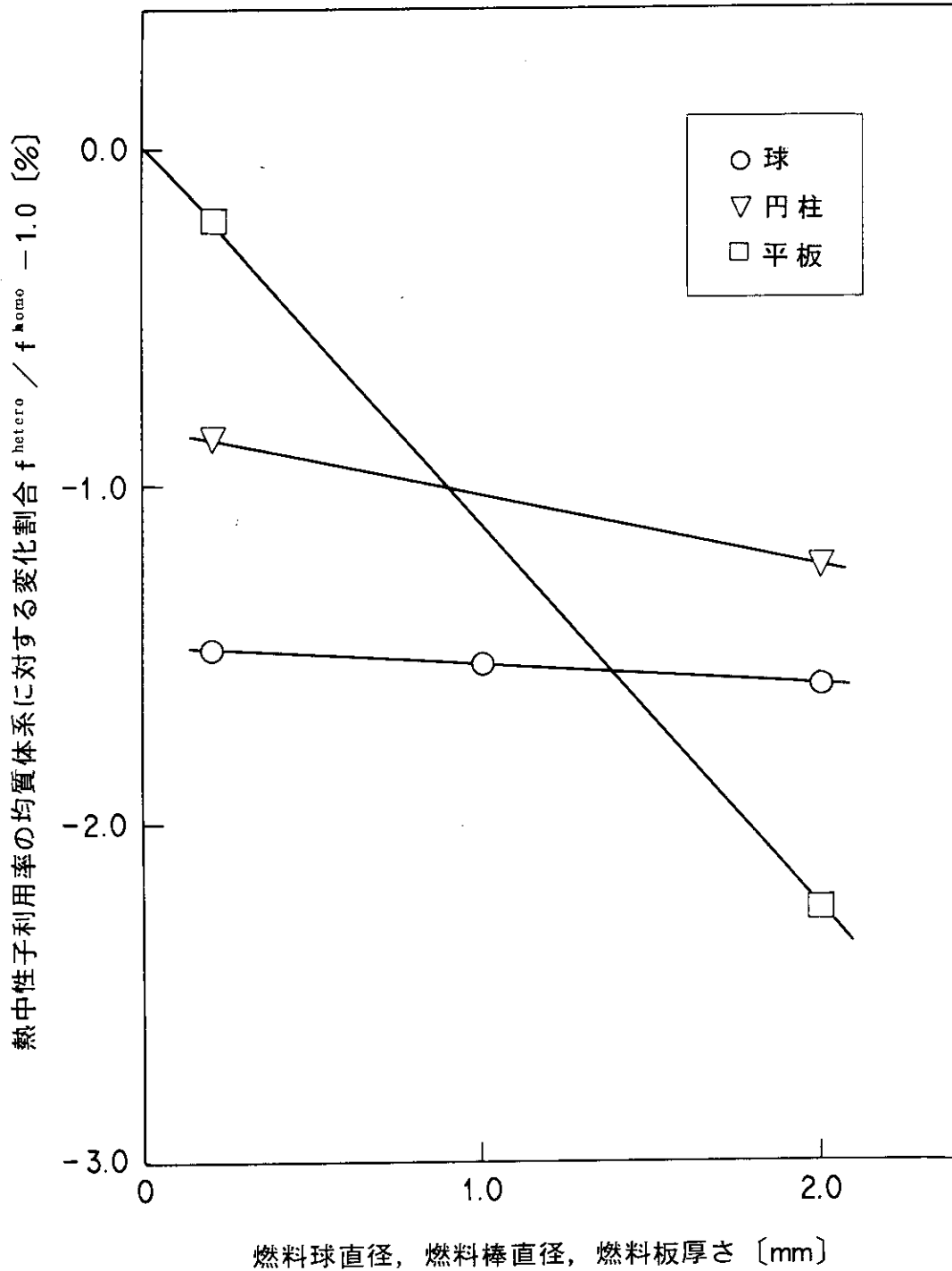
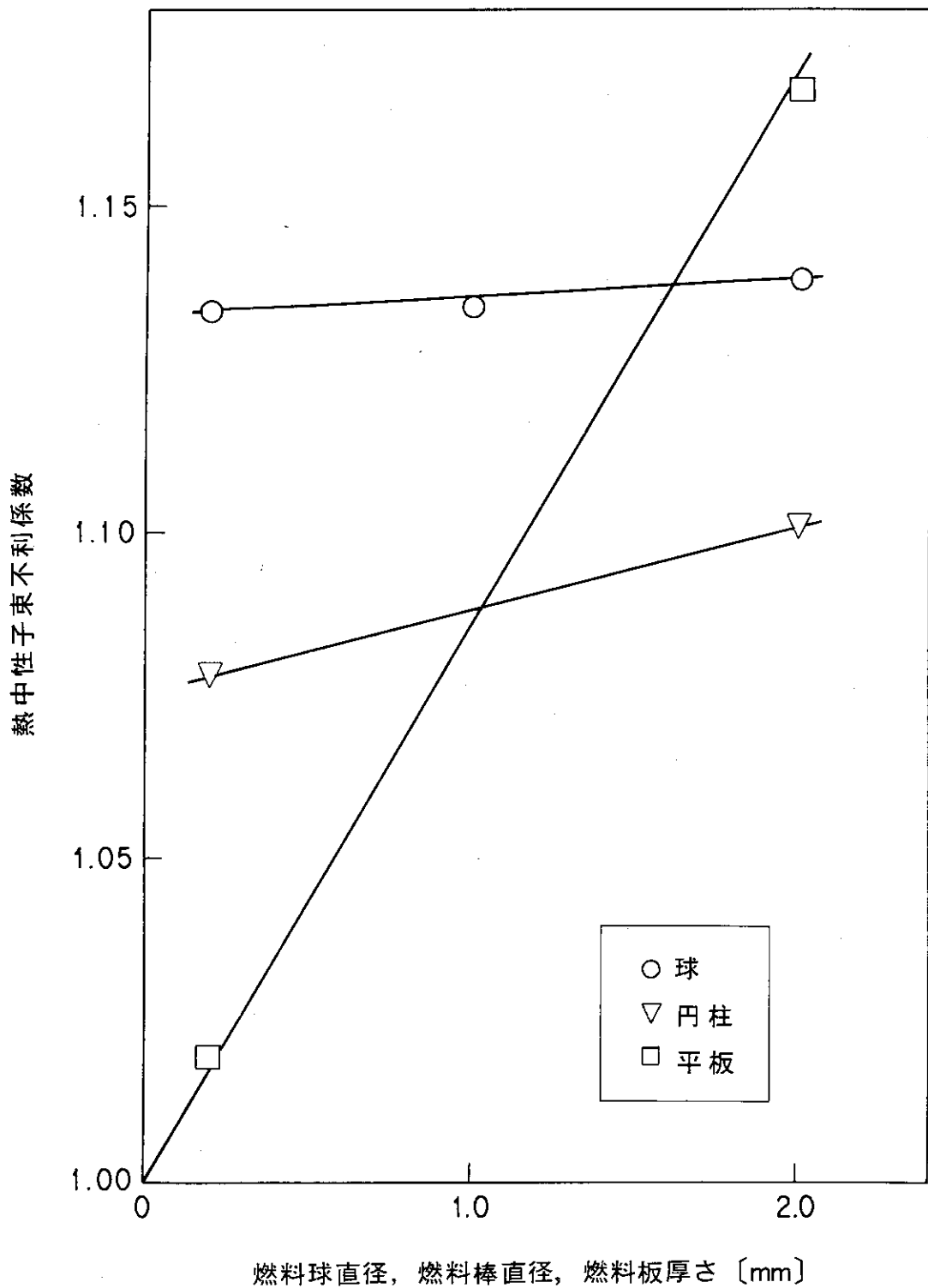


図 A. 2 非均質燃料の幾何形状による変化
(熱中性子利用率の均質体系に対する変化割合)



図A.3 非均質燃料の幾何形状による変化
(熱中性子束不利係数)

付録B ANISNコードを用いた無限増倍率の計算（球状燃料の3次元配列）

本文では超多群の衝突確率法により、非常に小さな燃料セルに対して無限増倍率及び四因子を算出した。しかし、燃料球直径が小さくなるに従い熱中性子利用率 f が急激に小さくなってしまい、均質系の値とは連続的に繋がらない傾向を示した。熱中性子不利係数が燃料を小さくしていく極限で1にならないことと併せ、中性子束が特に熱エネルギー領域で正しく求められていないという原因が考えられる。それゆえ、より正確な中性子束の空間分布を得るため、 S_N 法に基づくANISN-JRコードを用いて中性子の輸送方程式を解き、無限増倍率を求めることにした。

ここでは標準燃料（ウラン濃縮度5wt%，平均濃度 $2.0\text{gU}/\text{cm}^3$ ）を対象にする。巨視的実効断面積としては、a) 評価済み核データJENDL-3から作成した137群のMGCLライブラリをMAILコードで処理した断面積と、b) JENDL-3からFPF及びTPFを作成し、衝突確率法で求めた超多群の中性子束で137群に縮約した断面積（RABMAILコードにより得られる）という2種類を用いる。a) のMAILコードの計算ではダンコフ補正を行うが、このための形状を六方稠密格子とする（セル体積 $= a^3 / \sqrt{2}$ ， a ：格子間隔）。ANISN-JRコードの計算では、散乱角のルジャンドル展開次数を1 (P_1)， S_N 次数を4，メッシュ点数を8（燃料領域4，減速材領域4；但し、均質では5）とし、左側境界条件を完全反射，右側境界条件を等方反射，内側反復（inner iteration）の最大回数を30回，収束条件を 10^{-4} にとる。

計算結果を本文に記した超多群の衝突確率法で求めたものと比較して表B.1に示す。この表より、ANISNの計算結果は均質の場合及び、燃料球直径が4mmの場合には断面積の計算の仕方及びANISNの内側反復最大回数に依存しない。しかし、燃料球直径がさらに小さくなった場合、特に1mmの場合にはこれらの条件により計算結果が大きく異なっている。これはANISNコードをこのような非常に小さな燃料体系に適用するのが適当でないことを示していると考えられる。

以上の結果から、ANISNコードは燃料球直径が2mm以下という非常に小さい燃料に適用すると精度が悪く、超多群の衝突確率法で求めた計算結果の妥当性を判断する上での参考にはならないことが分った。

表B.1 計算コードによる無限増倍率の比較

| 燃料球直径 | 無限増倍率 (均質に対する変化割合 [%]) | | |
|-------|---------------------------|--------------------------|---------------|
| | MGCL/MAIL-ANISN | RABMAIL-ANISN | RABBLE |
| 均質 | 1.4641 1.4641* | 1.4653 | 1.4516 |
| 1 mm | 1.4608 (-0.23) 1.4009* | 1.5152 (3.41) 1.4535* | 1.4549 (0.23) |
| 2 mm | 1.4630 (-0.08) 1.4629* | 1.4833 (1.23) | 1.4733 (1.49) |
| 4 mm | 1.5072 (2.94) 1.5067* | 1.5116 (3.16) | 1.4974 (3.16) |

ANISNの計算はすべて収束した。

*印はinner iterationの最大回数を50回とした時の結果。