



臨界安全ハンドブック・データ集第2版
(受託研究)

Second Version of Data Collection Part of Nuclear Criticality Safety Handbook
(Contract Research)

奥野 浩 須山 賢也 外池 幸太郎 山根 祐一
山本 俊弘 三好 慶典 内山 軍藏

Hiroshi OKUNO, Kenya SUYAMA, Kotaro TONOIKE, Yuichi YAMANE
Toshihiro YAMAMOTO, Yoshinori MIYOSHI and Gunzo UCHIYAMA

安全研究センター
原子力エネルギー関連施設安全評価研究ユニット

Nuclear Facility Safety Research Unit
Nuclear Safety Research Center

August 2009

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

臨界安全ハンドブック・データ集第2版
(受託研究)

日本原子力研究開発機構安全研究センター
原子力エネルギー関連施設安全評価研究ユニット

奥野 浩、須山 賢也[※]、外池 幸太郎、山根 祐一、山本 俊弘⁺¹、三好 慶典⁺²、内山 軍藏

(2009年6月17日受理)

本書は、1988年に発刊された「臨界安全ハンドブック・データ集」の改訂版として編まれたものである。本改訂版では、従来の版にはなかった均質 U-H₂O 及び UF₆-HF の臨界データを追加し、中濃縮度ウランの臨界データを充実させた。計算には旧日本原子力研究所で開発した連続エネルギーモンテカルロ法臨界計算コード MVP と日本の評価済み核データライブラリ JENDL-3 第2改訂版 (JENDL-3.2) を主に用いた。アクチノイド金属及び酸化物の原子個数密度に関するデータを追加し、燃焼燃料の核種組成に関する情報を改訂した。臨界実験ベンチマーク計算及び単一ユニットの臨界データ (臨界となる質量、体積、寸法など) の計算では、ヒストリ数を 100 万に採ることにより、第1版よりも計算精度が概ね 1 桁向上した。

本報告書は、電源特会促進対策特別法に基づく文部科学省からの受託として行った研究成果である。

原子力科学研究所 (駐在) : 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

+1 原子力研修センター

+2 東海研究開発センター 原子力科学研究所 安全試験施設管理部

※ 文部科学省へ出向中

Second Version of Data Collection Part of Nuclear Criticality Safety Handbook
(Contract Research)

Hiroshi OKUNO, Kenya SUYAMA[※], Kotaro TONOIKE, Yuichi YAMANE, Toshihiro YAMAMOTO⁺¹,
Yoshinori MIYOSHI⁺² and Gunzo UCHIYAMA

Nuclear Facility Safety Research Unit
Nuclear Safety Research Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 17, 2009)

The report revised the *Data Collection* part of *Nuclear Criticality Safety Handbook*, which was published in 1988. This second version provided criticality data on homogeneous U-H₂O and UF₆-HF, which were not cited in the previous version, and increased those data on the medium-enriched uranium fuels. Calculations were performed mainly with the Continuous-Energy Monte Carlo Criticality Calculation Code, MVP, and the Japanese Evaluated Nuclear Data Library, JENDL-3 Revision 2, JENDL-3.2, both of which were developed at the late Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI). Data on atomic number densities of actinide metal and oxide were additionally supplied, and nuclide compositions of irradiated fuels were improved from the first version. One million histories of neutrons were followed in benchmark calculations of critical experiments and in calculations of single-unit criticality data, i.e., critical mass, volume, dimensions, etc., to attain almost ten times higher precision than the first version.

Keywords: Data Collection, Criticality Safety, Handbook, Revision, MVP, JENDL-3.2,
Medium-Enriched Uranium, Actinide, Single-Unit Criticality Data, Benchmark Calculation

This work was carried out by the former Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) under entrustment by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) of Japan.

+1 Nuclear Technology and Education Center

+2 Department of Criticality and Fuel Cycle Research Facilities, Nuclear Science Research Institute, Tokai
Research and Development Center

※ On loan to MEXT

目 次

1. 序.....	1
2. 原子個数密度.....	5
2.1 核燃料物質の原子個数密度の計算.....	5
2.2 コンクリート及びステンレス鋼の組成.....	11
2.3 軽水炉使用済燃料中の核種組成.....	11
3. 種々の核燃料に対する核特性パラメータ.....	37
4. 無限増倍率による未臨界判定.....	73
5. 単一ユニットの臨界データ.....	83
5.1 臨界データ.....	83
5.2 計算方法.....	85
5.3 計算条件.....	85
6. 臨界実験ベンチマーク計算.....	159
6.1 均質低濃縮ウラン系.....	159
6.2 均質高濃縮ウラン系.....	160
6.3 均質プルトニウム系.....	160
6.4 均質ウラン・プルトニウム系.....	160
6.5 非均質ウラン系.....	161
6.6 非均質ウラン・プルトニウム系.....	161
謝辞.....	175

Contents

1. Introduction	1
2. Atomic Number Densities	5
2.1 Calculation of Atomic Number Densities in Nuclear Fuel Materials.....	5
2.2 Compositions of Concrete and Stainless Steel	11
2.3 Compositions of Nuclides in Light-Water Reactor Spent Fuel.....	11
3. Nuclear Characteristic Parameters for Various Fuel Compositions	37
4. Subcriticality Judgment Graphs for Infinite Fuel Systems.....	73
5. Criticality Data for Single Units.....	83
5.1 Criticality Data	83
5.2 Calculational Method	85
5.3 Calculational Conditions	85
6. Benchmark Calculations of Critical Experiments	159
6.1 Homogeneous Low-Enriched Uranium Systems	159
6.2 Homogeneous Highly Enriched Uranium Systems	160
6.3 Homogeneous Plutonium Systems	160
6.4 Homogeneous Uranium-Plutonium Systems	160
6.5 Heterogeneous Uranium Systems	161
6.6 Heterogeneous Uranium-Plutonium Systems.....	161
Acknowledgments	175

1. 序

1988年に科学技術庁原子力安全局核燃料規制課(当時)編としてにつかん書房(当時)から発刊された「臨界安全ハンドブック」には、「臨界安全ハンドブック・データ集」が参考につけられていた。しかし、1999年に日本原子力研究所(当時;以下「原研」)から刊行された「臨界安全ハンドブック第2版」には、データ集に相当するものは付いていなかった。本報告書は、「臨界安全ハンドブック・データ集」の改訂版として、「臨界安全ハンドブック第2版」の参考として編まれたものである。

臨界データは、軽水炉燃料再処理施設、軽水炉燃料加工施設、軽水炉使用済燃料貯蔵施設、核燃料輸送のほか、核燃料使用施設の臨界安全評価を念頭に置いて準備された。1999年に起きた核燃料加工施設の臨界事故の際に、ウラン濃縮度 20wt%の硝酸ウラニルの臨界データが臨界安全ハンドブックに記載されておらず、不便であったことの反省から、本改訂版では、従来のデータ集よりも幅広い範囲の燃料を対象とした。計算は主に原研で開発した連続エネルギーモンテカルロ法臨界計算コード MVP と評価済み核データ JENDL-3.2 を主に用いて算出した。なお、「臨界安全ハンドブック・データ集」にあった「第6章 複数ユニットの臨界安全評価に使用するデータ」及び「第7章 その他のデータ」及び付録は本改訂版では割愛している。

以下第2章では、種々の核燃料物質や構造材の原子個数密度の算出に関連するデータを示す。アクチニド金属及び酸化物の密度、並びに燃焼燃料の核種組成に関する情報を第1版に比べて充実させた。第3章では、種々の燃料の核特性パラメータとして、中性子無限増倍率 k_{∞} 、移動面積 M^2 、及び拡散係数 D を示す。これらのデータは、単一ユニットの臨界データを簡便に求める際だけでなく、複数ユニットの安全評価にも使用可能である。第4章では、無限体系の未臨界領域判定図を示す。無限体系で未臨界となる核燃料は、反射体なしの体系あるいは水反射体付き体系における臨界安全評価は不要である。

第5章では、単一ユニットの臨界データを示す。均質ウラン、非均質ウラン、均質プルトニウム、均質ウラン・プルトニウム混合溶液、均質ウラン・プルトニウム混合酸化物、及び非均質ウラン・プルトニウム混合酸化物の臨界データ(臨界となる質量、体積、寸法など)が示してある。第6章では、臨界実験ベンチマーク計算についての結果をまとめた。

本書に記載したデータ及び計算コードと臨界安全解析の関連を図 1.1 に示す。臨界安全ハンドブックでは、臨界安全解析は単一ユニットの解析と複数ユニットの解析からなり、各々、臨界データを用いる方法、簡易計算コードを用いる方法、詳細

計算コードを用いる方法の3つがある。これらの組み合わせである9通りの流れの計算ができるように本書は配慮されている。使用者の目的に応じて、最も有効な計算の流れを選ぶことができる。但し、各計算の流れごとに臨界の判定基準が異なるので、得られた結果の評価にあたっては「臨界安全ハンドブック第2版」の第4章を参照のこと。

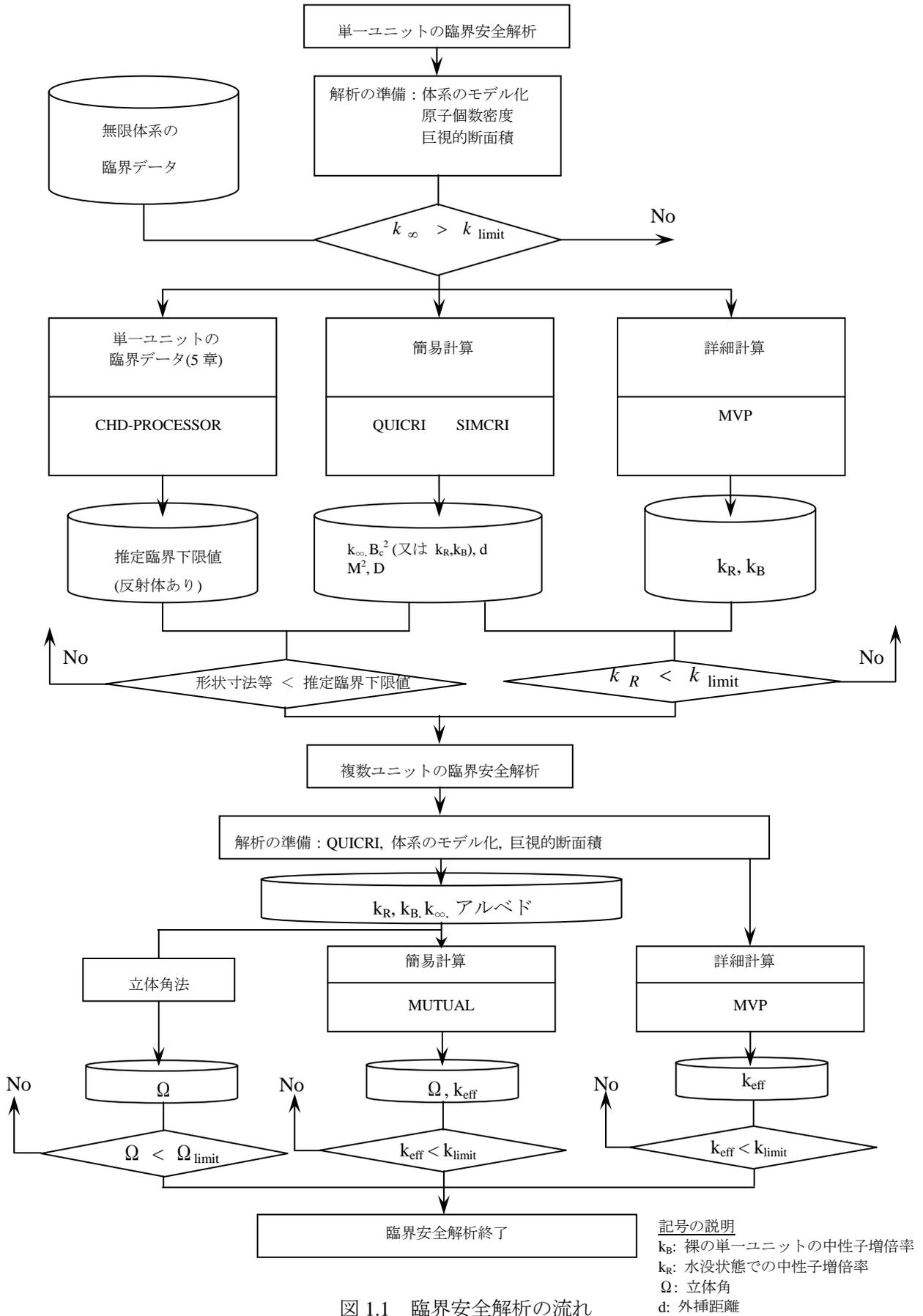


図 1.1 臨界安全解析の流れ

This is a blank page.

2. 原子個数密度

機器あるいは装置の臨界安全解析を行うためには、各領域の核分裂性物質、構造材等の原子個数密度をあらかじめ求める必要がある。解析の精度を上げるためには原子個数密度をできる限り正確に求めなければならないが、データの不足等自ら限界があるため、理論あるいは計算による補足が必要になってくる。

本章では、アクチニド金属を含む核燃料物質の原子個数密度計算に使用されるデータ、構造材として代表的なコンクリート及びステンレス鋼の組成を示す。また軽水炉で使用された燃料中には多くの核種が存在しているが、そのうち臨界安全解析上重要なウランとプルトニウムなどの同位体組成の燃焼に伴う変化を示す。さらに、中性子吸収材の原子個数密度を示す。

2.1 核燃料物質の原子個数密度の計算

本節では、原子個数密度の計算に必要なアボガドロ数や原子量等の物理定数、理論密度、水溶液体系の密度式及び体系中の水素と核分裂性元素との原子個数比を表す式を示す。

2.1.1 物理定数

本データ集を作成する際に使用した物理定数を表 2.1 に示す¹⁾。各元素、核種の原子量、中性子吸収断面積及び実効共鳴積分を表 2.2 に示す²⁾⁻⁵⁾。

2.1.2 アクチニド金属及び酸化物の密度

アクチニド金属及び酸化物の密度を表 2.3 に示す⁶⁾。

2.1.3 理論密度及び水溶液系の密度式

核燃料取扱施設の臨界安全評価に多用されるウラン及びプルトニウムの単体あるいは化合物の理論密度を表 2.4 に示す⁷⁾⁻¹⁰⁾。表中の UO_2 の値は ^{238}U の含有量の多い劣化ウランから天然ウランを含み 3wt%程度の濃縮ウランに対して適用される。高濃縮度の UO_2 の理論密度を表 2.5 に示す。一方、表 2.4 の PuO_2 の値は ^{239}Pu の含有率の高い組成（約 90wt%以上）に対して適用される。 ^{239}Pu 含有率の低い PuO_2 の理論密度を表 2.6 に示す¹¹⁾¹²⁾。

UO₂-PuO₂混合酸化物の理論密度の算出式を次に示す。

$$\rho = \frac{4M}{(a_0)^3 \cdot N_A} \quad (2.1)$$

ここで、 ρ : 理論密度[g/cm³]

M : 分子量

N_A : アボガドロ数

格子定数 a₀ には次の値を用いる。

$$\text{UO}_2 : a_0 = 5.4700 \text{ [\AA]}$$

$$\text{PuO}_2 : a_0 = 5.3960 \text{ [\AA]} \quad (2.2)$$

$$\text{UO}_2\text{-PuO}_2 : a_0 = 5.4700 - 7.40 \times 10^{-4} \cdot \varepsilon_{\text{PuO}_2} \text{ [\AA]}$$

(但し、 $\varepsilon_{\text{PuO}_2}$ は PuO₂ の個数百分率 [%] すなわち PuO₂ / (UO₂ + PuO₂) × 100 を表す。)

次に溶液体系の密度算出式を示す。

(1) 硝酸ウラニル水溶液、硝酸プルトニウム水溶液及びこれらの混合溶液

次の SST 式¹³⁾を用いる。

$$\begin{aligned} \rho = & 0.99928 + 1.7132 \times 10^{-3} \times C_{\text{Pu}25} \\ & + 1.4225 \times 10^{-3} \times C_{\text{U}25} \\ & + 3.9039 \times 10^{-2} \times C_{\text{HN}25} \\ & - 9.744 \times 10^{-8} \times C_{\text{Pu}25}^2 \\ & - 1.076 \times 10^{-7} \times C_{\text{U}25}^2 \\ & - 7.361 \times 10^{-4} \times C_{\text{HN}25}^2 \\ & - 5.548 \times 10^{-6} \times T^2 \\ & - 7.280 \times 10^{-8} \times C_{\text{Pu}25} \times C_{\text{U}25} \\ & - 4.876 \times 10^{-5} \times C_{\text{Pu}25} \times C_{\text{HN}25} \\ & - 1.427 \times 10^{-6} \times C_{\text{Pu}25} \times T \\ & - 1.520 \times 10^{-5} \times C_{\text{U}25} \times C_{\text{HN}25} \\ & - 8.865 \times 10^{-7} \times C_{\text{U}25} \times T \\ & - 8.494 \times 10^{-5} \times C_{\text{HN}25} \times T \end{aligned} \quad (2.3)^*$$

* 「臨界安全ハンドブック第2版」(JAERI 1340) 44 頁の (3.17)式は、この (2.3)式に置換えられるべきである。

ここで、

ρ : 温度 T における溶液密度 [g/cm³]

C_{Pu25} : 25 °C におけるプルトニウム濃度 [g/L]

C_{U25} : 25 °C におけるウラン濃度 [g/L]

C_{HN25} : 25 °C における遊離硝酸濃度 [mol/L]

T : 温度 [°C]

この SST 式は、以下の条件で適用可能であり、精度は 0.0032 g/cm³ である。

$C_{U25} < 530$ g/L

$C_{Pu25} < 480$ g/L

$C_{Pu25} + C_{U25} < 350$ g/L (混合溶液の場合)

$C_{HN25} < 7$ mol/L

$10 < T < 60$ °C.

これらの条件のうち、溶液中のウラン又はプルトニウムの濃度が適用範囲を超える場合には、最大濃度の水溶液と結晶（硝酸プルトニウム 5 水和物結晶及び硝酸ウラニル 6 水和物結晶）の混合物として扱う。

具体的には、温度 T の溶液中でのウラン濃度を C_U 、プルトニウム濃度を C_{Pu} 、硝酸プルトニウム 5 水和物結晶 ($Pu(NO_3)_4 \cdot 5H_2O$) 及び硝酸ウラニル 6 水和物結晶 ($UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) の体積分率をそれぞれ ξ_1 、 ξ_2 とするとき、これらの間には以下の関係がある。

$$C_{Pu}^{cry} \cdot \xi_1 + C_{Pu}^{sol} \cdot (1 - \xi_1 - \xi_2) = C_{Pu} \quad (2.4)$$

$$C_U^{cry} \cdot \xi_2 + C_U^{sol} \cdot (1 - \xi_1 - \xi_2) = C_U \quad (2.5)$$

ここで、

C_{Pu}^{cry} : 硝酸プルトニウム 5 水和物結晶中のプルトニウム濃度 [g/L]

C_{Pu}^{sol} : 温度 T での SST 式適用範囲における硝酸プルトニウム水溶液中の最大プルトニウム濃度 [g/L]

C_U^{cry} : 硝酸ウラニル 6 水和物結晶中のウラン濃度 [g/L]

C_U^{sol} : 温度 T での SST 式適用範囲における硝酸ウラニル水溶液中の最大ウラン濃度 [g/L]

(2.4)及び(2.5)を解くと、以下の式により ξ_1 、 ξ_2 が求められる。

$$\xi_1 = \frac{(C_U^{cry} - C_U^{sol})C_{Pu} - (C_U^{cry} - C_U)C_{Pu}^{sol}}{(C_{Pu}^{cry} - C_{Pu}^{sol})(C_U^{cry} - C_U^{sol}) - C_{Pu}^{sol}C_U^{sol}} \quad (2.6)$$

$$\xi_2 = \frac{(C_{Pu}^{cry} - C_{Pu}^{sol})C_U - (C_{Pu}^{cry} - C_{Pu})C_U^{sol}}{(C_{Pu}^{cry} - C_{Pu}^{sol})(C_U^{cry} - C_U^{sol}) - C_{Pu}^{sol}C_U^{sol}} \quad (2.7)$$

混合モデルによる温度 T での溶液密度は、

$$\rho = \rho_{Pu}^{cry} \cdot \xi_1 + \rho_U^{cry} \cdot \xi_2 + \rho^{sol} \cdot (1 - \xi_1 - \xi_2) \quad (2.8)$$

ここで、

ρ_{Pu}^{cry} : 硝酸プルトニウム 5 水和物結晶の密度 (=2.90 g/cm^{3 14})

ρ_U^{cry} : 硝酸ウラニル 6 水和物結晶の密度 (=2.772 g/cm^{3 15})

ρ^{sol} : SST 式適用限界での温度 T における溶液密度

となる。

(2) UO₂F₂ 水溶液

密度算出は次式¹⁶⁾による。

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_{H_2O}} - 0.9120 \cdot F + 0.0567F^2 \quad (2.9)$$

ここで、

ρ : 溶液密度 [g/cm³]

ρ_{H_2O} : 水密度 [g/cm³]

F : 溶液の UO₂F₂ 重量比

溶液温度 : 25°C

2.1.4 水素とウラン（またはプルトニウム）の原子個数比

臨界計算では対象とする体系中の水素(H)の量を正確に知ることは重要であり、H/U 比の僅かな違いが実効増倍率あるいは臨界寸法の計算値に大きな差異となって現われることがある。U あるいは Pu の単体または化合物の水との均質混合物の H/U あるいは H/Pu 個数比の算出式は次のように導くことができる。

均質 U-H₂O :

$$\frac{H}{U} = 2 \cdot \rho_{H_2O} \cdot \frac{A_U}{A_{H_2O}} \left(\frac{1}{C_U} - \frac{1}{\rho_U} \right) \quad (2.10)$$

均質 UO₂-H₂O :

$$\frac{H}{U} = 2 \cdot \rho_{H_2O} \cdot \frac{1}{A_{H_2O}} \cdot \left(\frac{A_U}{C_U} - \frac{A_{UO_2}}{\rho_{UO_2}} \right) \quad (2.11)$$

均質 U₃O₈-H₂O :

$$\frac{H}{U} = 2 \cdot \rho_{H_2O} \cdot \frac{1}{A_{H_2O}} \cdot \left(\frac{A_U}{C_U} - \frac{A_{U_3O_8}}{3 \cdot \rho_{U_3O_8}} \right) \quad (2.12)$$

均質 Pu-H₂O :

$$\frac{H}{Pu} = 2 \cdot \rho_{H_2O} \cdot \frac{A_{Pu}}{A_{H_2O}} \cdot \left(\frac{1}{C_{Pu}} - \frac{1}{\rho_{Pu}} \right) \quad (2.13)$$

均質 PuO₂-H₂O :

$$\frac{H}{Pu} = 2 \cdot \rho_{H_2O} \cdot \frac{1}{A_{H_2O}} \cdot \left(\frac{A_{Pu}}{C_{Pu}} - \frac{A_{PuO_2}}{\rho_{PuO_2}} \right) \quad (2.14)$$

均質 ADU(II)-H₂O(ADU(II):3UO₃·NH₃·5H₂O、Ammonium Diuranate、重ウラン酸アンモニウム) :

$$\frac{H}{U} = 2 \cdot \rho_{H_2O} \cdot \frac{1}{A_{H_2O}} \cdot \left(\frac{A_U}{C_U} - \frac{A_{ADU}}{3\rho_{ADU}} \right) + \frac{13}{3} \quad (2.15)$$

均質 PuO₂-UO₂-H₂O :

$$\begin{aligned} \frac{H}{(U + Pu)} &= 2 \cdot \rho_{H_2O} \cdot \frac{1}{A_{H_2O}} \cdot \left(\frac{A_{PuO_2} \cdot A_U + \alpha \cdot A_{UO_2} \cdot A_{Pu}}{A_U + \alpha \cdot A_{Pu}} \right) \\ &\cdot \left(\frac{1}{C_{PuO_2-UO_2}} - \frac{1}{\rho_{PuO_2-UO_2}} \right) \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\text{ただし、 } \alpha = \frac{C_U}{C_{Pu}} = \frac{100/\varepsilon - 1}{\left(\frac{A_{UO_2}}{A_{PuO_2}}\right) \cdot \left(\frac{A_{Pu}}{A_U}\right)}$$

ε [wt%] は PuO_2 富化度である。

式(2.10)から式(2.16)までに用いた記号の意味は次のとおりである。

- ρ : 理論密度[g/cm³]
- A : 原子量または分子量
- C : 濃度[g/cm³]

これらの記号は、 H_2O 、U、 U_3O_8 、Pu、 PuO_2 、ADU、 PuO_2-UO_2 などの関係する化合物の化学式に添字をつけて用いる。

以上に示した算出式を用いて、ウランあるいはプルトニウムの濃度と H/U 比の関係を、均質 $U-H_2O$ 、均質 UO_2-H_2O 、均質 $Pu-H_2O$ 、均質 PuO_2-H_2O 、均質 $ADU(II)-H_2O$ 、均質 $UO_2-PuO_2-H_2O$ の各核燃料物質について、それぞれ図 2.1 から図 2.6 に示す。

また、SST 式に基づいて、 $UO_2(NO_3)_2$ 水溶液、 $Pu(NO_3)_4$ 水溶液、及び $UO_2(NO_3)_2-Pu(NO_3)_4$ 水溶液のウランあるいはプルトニウムの濃度と H/U 比の関係を求めたものを、それぞれ図 2.7 から図 2.9 に示す。

均質 UO_2F_2 水溶液（溶液温度 25°C）の場合、H/U 比はウラン濃度の関数として次式のように表せる。

$$\frac{H}{U} = 26.444 \cdot \frac{\rho_{UO_2F_2}}{C_U} - 34.222 \quad (2.17)$$

$$\rho_{UO_2F_2} = \frac{1}{1.00294 - 0.9120F + 0.0567F^2} \quad (2.18)^{11)}$$

$$F = \frac{1}{1 + 0.02922 \cdot \frac{H}{U}} \quad (2.19)$$

但し、 C_U は溶液中の U 濃度[gU/cm³]である。上記三式による繰り返し計算により、 C_U に対する H/U を得る。その結果を図 2.10 に示すとともに、CEA-N-2051¹⁷⁾（上記三式による結果）と西独ハンドブック及び ARH-600 記載の U 濃度-H/U 曲線の比較を図 2.11 に示す。

2.2 コンクリート及びステンレス鋼の組成

コンクリート（普通コンクリート、重コンクリート）及びステンレス鋼（SUS304、SUS304L）の密度、組成をそれぞれ表 2.7、表 2.8 に示す。

(1) コンクリート

原子力建家の構造物として用いられるコンクリートの組成は、今日まで数多く公表されている^{9), 16)-18)}。コンクリートの密度、組成の標準値を設定するにあたり、数多くの文献値から次のような方針のもとに選択した。

- a) 普通コンクリート、重コンクリートのそれぞれについて標準値を設定する。
- b) 普通コンクリートの密度は既存の原子力施設の設計値程度（約 2.2～2.4）⁹⁾ の値を採用する。
- c) 各種文献に共通のデータをできるだけ採用する。
- d) 減速効果に影響する水素の含有率が平均的なデータを採用する。

以上の方針のもとに、普通コンクリートには文献 9)、18)、19) に示されているデータを、重コンクリートには文献 9) 及び 18) に示されているデータをそれぞれ標準値として設定した。なお、実際の臨界安全設計にあたっては、コンクリート密度はそれが主として反射体として働く場合には設計上で考えられるその上限値を、また主として遮蔽材として働く場合にはその下限値を用いることが必要となる。

(2) ステンレス鋼

ステンレス鋼は原子力施設の機器類の材料としてよく用いられる。その種類は主として SUS304 及びこれより炭素含有量が少ない SUS304L である。

ステンレス鋼の密度、組成はわが国の国内規格に合致したものが適当と考えられるため、JIS 規格¹⁹⁾ のデータを採用した。JIS 規格では化学成分の値が上限値もしくは範囲で示されているが、上限値の場合はその値を、範囲の場合にはその中央値をそれぞれ採用した。また、ステンレス鋼板とステンレス鋼管とでは化学成分が若干異なるが、ここではステンレス鋼板の値を採用した。

2.3 軽水炉使用済燃料中の核種組成

新燃料は、ガドリニウム等の吸収材核種の存在を無視した場合に、燃焼燃料より核分裂性物質を多く含み、反応度価値が高くなる。従って臨界安全評価モデル上、燃焼燃料を新燃料で置きかえれば、反応度的により厳しい結果が得られる。但し、燃焼度の評価が臨界安全上妥当であれば、燃焼に伴う核種組成の変化を考慮して臨界安全評価を行ってもよい。

燃焼燃料の核種組成は炉心の出力履歴や照射中の中性子スペクトルの変化に影響をうけるため、正確にそれを求めるには、それらの条件を考慮した評価が必要である。核種組成評価で必要とされる精度は、その後行われる臨界安全評価手法とそれに含まれる安全裕度を考慮して決定されなければならない。

核種組成の与え方の一例として、それを燃焼計算コードで求めた場合に、計算された組成と実測値との比を予め評価して補正係数を求めておき、その係数で除することによって反応度的に保守的な組成を与える手法がある。PWR に対して評価検討されている補正因子の一例を以下の表 2.9 に示す²³⁾。この表に示されている補正因子によって ORIGEN 2.1 コードで得られた核種組成を除する事で、反応度的に保守的な核種組成を与える事が提案されている。

燃焼計算コードの精度評価は、計算値と照射後試験で得られた燃料核種組成の測定データとの比較によって行われるが、その実測データの取得は各国で行われている。表 2.10 に、照射後試験によって燃焼燃料核種組成データが取得され、公開文献によってそれらを手に入る原子炉の名前とその形式を示す。それらのデータを広く利用可能な形式のデータベースとした SFCOMPO が日本原子力研究所で開発され、OECD/NEA を通じてそのデータベースが公開されている²⁴⁾。図 2.12 から図 2.17 に SFCOMPO に登録されている使用済 UO_2 燃料の核種組成データのうち、ウラン及びプルトニウム同位体の減損及び生成量を照射直後の値としてまとめたものを示す。図中の実線は回帰曲線を示し、点線はそれぞれのデータの回帰曲線からのばらつきを示す偏差 σ の3倍の範囲を示す。測定データは、燃焼燃料の核種組成が、初期濃縮度や燃料ピッチ等の燃料設計の差や、照射された場所が燃料の上部であるか下部であるかに依存した照射条件によってばらつくが、多くの測定データが、偏差 3σ の範囲に入っている事が示されている。これらのデータは、計算コードの結果や、新たに測定されたデータの妥当性を検討する際に利用できる。

第2章の参考文献

- 1) E. R. Cohen and B. N. Taylor, "The 1986 adjustment of the fundamental physical constants," *Rev. Mod Phys.*, **59**, p.1121 (1987).
- 2) G. Audi and A. H. Wapstra, "The 1995 update to the atomic mass evaluation," *Nuclear Physics* **A595**, 409 (1995).
- 3) IUPAC Commission on Atomic Weights and Isotopic Abundances, "Atomic Weights of the Elements, 1995," *Pure Appl. Chem.*, **68**, p.2339 (1996).
- 4) P. De Bièvre and P. D. P. Taylor, "Table of the isotopic compositions of the elements," *Int. J. Mass Spectrum. Ion Processes*, **123**, p.149 (1993).
- 5) K. Shibata, T. Nakagawa, H. Sugano and H. Kawasaki (Eds.), "Curves and Tables of Neutron Cross Sections in JENDL-3.2," JAERI-Data/Code 97-003 (1997).
- 6) Crystallographic data was compiled by R. G. Haire and calculated by J. E. Bigelow (1997).
- 7) R. D. Carter, G. R. Kiel and K. R. Ridgway "Criticality Handbook – Volume I, II, III," ARH-600 Vol. I, II, III, Atlantic Richfield Hanford Co. (1968, 1969, 1971);
W. Thomas, W. Weber, "Handbook of Criticality," Technical University of Munich (1972).
- 8) 日本化学会編、「化学便覧（改定2版）」（1975）.
- 9) 長谷川正義・三島良績監修、「原子炉材料ハンドブック」、日刊工業新聞社（1977）.
- 10) P. C. Debets and B. O. Loopstra, "On the uranates of ammonium-II X-ray investigation of the compounds in the system $\text{NH}_3\text{-UO}_3\text{-H}_2\text{O}$," *J. Inorg. Nucl. Chem.*, **25**, p.945 (1963)
- 11) Nuclear Materials and Equipment Corporation. Apollo. Pennsylvania 15613 U.S.A.
- 12) 湯本鎌三・五十嵐孝行・増田純男・三島毅、「プルトニウムの取扱いに関する放射線外部被ばく線量の計算法の指針」、PNC TN852-73-01 (1973).
- 13) S. Sakurai and S. Tachimori, "Density equation of aqueous solution containing plutonium (IV), uranium (VI) and nitric acid," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **33**, p.187 (1996).
- 14) E. Staritzky, "Plutonium tetranitrate pentahydrate, $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$," *Anal. Chem.*, **28**, pp.2021-2022 (1956).
- 15) J. J. Katz, G. T. Seaborg and L. R. Moss, "The Chemistry of the Actinide Elements, 2nd edition," p.342, Chapman and Hall, London, New York, vol.1 (1986).
- 16) J. S. Johnson and K.A. Kraus, "Density and refractive index of uranyl fluoride solutions," *J. Am. Chem. Soc.*, **75**, p.4594 (1953).
- 17) L. Maubert, "Standard de Criticite-Valeurs Minimales Critiques," CEA-N-2051, CEA (1983).

- 18) R. G. Jaeger et al. ed., "Engineering Compendium on Radiation Shielding, Volume II Shielding Materials," Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York (1975).
- 19) Argonne National Laboratory, "Reactor Physics Constants," USAEC Report ANL-5800 2nd Edition (1963).
- 20) E. P. Blizard and Lorraine S. Abbott (Ed.), "Reactor Handbook, Volume III Part B Shielding," Inter-Science Publishers (1962).
- 21) 日本規格協会「JIS ハンドブック鉄鋼」、(財) 日本規格協会 (1982).
- 22) J. F. Hogerton and R. C. Grass, "The Reactor Handbook, Vol.I, Physics," p.674, pp.725-727, McGraw-Hill Book Co., New York (1955).
- 23) 燃料サイクル安全研究委員会、「燃焼度クレジット導入ガイド原案」、JAERI-Tech 2001-055 (2001).
- 24) 望月弘樹・須山賢也・野村靖・奥野浩、「WWW を利用した核種組成データベースシステム SFCOMPO on WWW ver. 2.0」、JAERI-Data/Code 2001-020 (2001);
(URL <http://www.nea.fr/sfcompo/>)

表 2.1 物理定数¹⁾

アボガドロ数	6.0221367×10^{23}	[mol ⁻¹]
気体定数	8.314510	[J mol ⁻¹ K ⁻¹]
中性子の質量	1.008664904	[u]
陽子の質量	1.007276470	[u]
原子質量単位	$1.6605402 \times 10^{-24}$	[g]

表 2.2 元素及び核種の原子量^{2),3)}、存在比⁴⁾、中性子吸収断面積⁵⁾及び実効共鳴積分⁵⁾

元素	核種	原子量	存在比[a/o]	σ_a [barn]*	RI_a [barn]
H		1.00794			
	¹ H	1.007825	99.985	3.320×10^{-1}	1.491×10^{-1}
	² H	2.014102	0.015	5.500×10^{-4}	2.863×10^{-4}
B		10.811			
	¹⁰ B	10.012937	19.9	3.837×10^3	1.719×10^3
	¹¹ B	11.009305	80.1	5.075×10^{-3}	2.542×10^{-3}
C		12.0107			
	¹² C	12	98.9	3.530×10^{-3}	1.823×10^{-3}
	¹³ C	13.003355	1.1		
N		14.00674			
	¹⁴ N	14.003074	99.634	1.844	9.456×10^{-1}
	¹⁵ N	15.000109	0.366	2.426×10^{-5}	1.663×10^{-5}
O		15.9994			
	¹⁶ O	15.994915	99.762	1.900×10^{-4}	6.327×10^{-4}
	¹⁷ O	16.999132	0.038		
	¹⁸ O	17.99916	0.200		
F	¹⁹ F	18.998403	100	9.570×10^{-3}	1.949×10^{-2}
Mg		24.305		6.298×10^{-2}	2.333×10^{-1}
	²⁴ Mg	23.985042	78.99	5.029×10^{-2}	3.117×10^{-2}
	²⁵ Mg	24.985837	10.00	1.904×10^{-1}	3.389×10^{-1}
	²⁶ Mg	25.982593	11.01	3.831×10^{-2}	1.890×10^{-2}
Al	²⁷ Al	26.981538	100	2.311×10^{-1}	1.231×10^{-1}
Si		28.0855		1.711×10^{-1}	1.033×10^{-1}
	²⁸ Si	27.976927	92.23	1.767×10^{-1}	8.476×10^{-2}

* 2200 m/s 値

表 2.2 元素及び核種の原子量^{2),3)}、存在比⁴⁾、中性子吸収断面積⁵⁾及び実効共鳴積分⁵⁾
(続き)

元素	核種	原子量	存在比[a/o]	σ_a [barn]*	RI_a [barn]
	²⁹ Si	28.976495	4.67	1.014×10^{-1}	6.636×10^{-2}
	³⁰ Si	29.97377	3.10	1.075×10^{-1}	7.080×10^{-1}
S		32.066		5.218×10^{-1}	1.31
	³² S	31.97207	95.02	5.352×10^{-1}	7.863×10^{-1}
	³³ S	32.971458	0.75	5.202×10^{-1}	3.523
	³⁴ S	33.967867	4.21	2.236×10^{-1}	1.006×10^{-1}
	³⁶ S	35.967081	0.02	1.500×10^{-1}	1.209×10^{-1}
Cl		35.4527		3.314×10	1.355×10
	³⁵ Cl	34.968853	75.77	4.360×10	1.781×10
	³⁷ Cl	36.965903	24.23	4.329×10^{-1}	2.035×10^{-1}
K		39.0983		2.062	2.261
	³⁹ K	38.963707	93.2581	2.102	2.303
	⁴⁰ K	39.963999	0.0117	3.479×10	1.624×10^1
	⁴¹ K	40.961826	6.7302	1.459	1.58
Ca		40.078		4.358×10^{-1}	5.504×10^{-1}
	⁴⁰ Ca	39.962591	96.941	4.075×10^{-1}	5.460×10^{-1}
	⁴² Ca	41.958618	0.647	6.830×10^{-1}	4.367×10^{-1}
	⁴³ Ca	42.958767	0.135	1.166×10^1	5.839×10^{-1}
	⁴⁴ Ca	43.955481	2.086	8.884×10^{-1}	4.241×10^{-1}
	⁴⁶ Ca	45.953693	0.004	7.400×10^{-1}	3.391×10^{-1}
	⁴⁸ Ca	47.952534	0.187	1.093	4.843×10^{-1}
Cr		51.9961		3.071	1.555
	⁵⁰ Cr	49.94605	4.345	1.592×10^1	7.452
	⁵² Cr	51.940512	83.789	7.640×10^{-1}	4.622×10^{-1}
	⁵³ Cr	52.940654	9.501	1.821×10^1	8.621
	⁵⁴ Cr	53.938885	2.365	3.644×10^{-1}	1.842×10^{-1}

* 2200 m/s 値

表 2.2 元素及び核種の原子量^{2),3)}、存在比⁴⁾、中性子吸収断面積⁵⁾及び実効共鳴積分⁵⁾
(続き)

元素	核種	原子量	存在比[a/o]	σ_a [barn]*	RI_a [barn]
Mn	⁵⁵ Mn	54.93805	100	1.341×10	1.176×10
Fe		55.845		2.562	1.49
	⁵⁴ Fe	53.939615	5.8	2.156	2.145
	⁵⁶ Fe	55.934942	91.72	2.813	1.476
	⁵⁷ Fe	56.935399	2.2	2.462	1.434
	⁵⁸ Fe	57.93328	0.28	1.3	1.357
Co	⁵⁹ Co	58.9332	100	3.718×10^1	7.553×10^1
Ni		58.6934		4.383	2.851
	⁵⁸ Ni	57.935348	68.27	4.503	3.134
	⁶⁰ Ni	59.930791	26.10	2.9	1.505
	⁶¹ Ni	60.93106	1.13	2.509	2.476
	⁶² Ni	61.928349	3.59	1.420×10^1	6.889
	⁶⁴ Ni	63.92797	0.91	1.48	8.171×10^{-1}
Cu		63.546		3.785	4.284
	⁶³ Cu	62.929601	69.17	4.506	5.19
	⁶⁵ Cu	64.927794	30.83	2.168	2.22
Zr		91.224		1.943×10^{-1}	1.216
	⁹⁰ Zr	89.904704	51.45	1.112×10^{-2}	1.806×10^{-1}
	⁹¹ Zr	90.905645	11.22	1.247	6.949
	⁹² Zr	91.90504	17.15	2.292×10^{-1}	7.201×10^{-1}
	⁹⁴ Zr	93.906316	17.38	4.981×10^{-2}	3.236×10^{-1}
	⁹⁶ Zr	95.908276	2.80	2.280×10^{-2}	5.865
Mo		95.94		2.582	2.572×10
	⁹² Mo	91.90681	14.84	2.075×10^{-2}	1.164
	⁹⁴ Mo	93.905088	9.25	1.311×10^{-2}	1.418
	⁹⁵ Mo	94.905841	15.92	1.399×10^{-2}	1.186×10^2

* 2200 m/s 値

表 2.2 元素及び核種の原子量^{2),3)}、存在比⁴⁾、中性子吸収断面積⁵⁾及び実効共鳴積分⁵⁾
(続き)

元素	核種	原子量	存在比[a/o]	$\sigma_a(22)$ [barn]*	RI_a [barn]
	⁹⁶ Mo	95.904679	16.68	5.954×10^{-1}	1.754×10
	⁹⁷ Mo	96.906021	9.55	2.1	1.712×10
	⁹⁸ Mo	97.905408	24.13	1.300×10^{-1}	6.556
	¹⁰⁰ Mo	99.907477	9.63	1.990×10^{-1}	3.908
Tc	⁹⁹ Tc	98.906255		1.964×10	3.116×10^2
Rh	¹⁰³ Rh	102.905504	100	1.466×10^2	1.043×10^3
Ag		107.8682		6.362×10	7.626×10^2
	¹⁰⁷ Ag	106.905093	51.839	3.862×10	1.039×10^2
	¹⁰⁹ Ag	108.904756	48.161	9.054×10	1.472×10^3
Cd		112.411		2.528×10^3	6.781×10
	¹⁰⁶ Cd	105.906458	1.25	9.695×10^{-1}	1.071×10
	¹⁰⁸ Cd	107.904183	0.89	1.087	2.716×10
	¹¹⁰ Cd	109.903006	12.49	1.105×10	3.925×10
	¹¹¹ Cd	110.904182	12.80	2.394×10	4.979×10
	¹¹² Cd	111.902757	24.13	2.192	1.336×10
	¹¹³ Cd	112.904401	12.22	2.065×10^4	3.936×10^2
	¹¹⁴ Cd	113.903358	28.73	3.404×10^{-1}	1.695×10
	¹¹⁶ Cd	115.904755	7.49	7.484×10^{-2}	1.743
In		114.818			
	¹¹³ In	112.904061	4.3	1.207×10	3.251×10^2
	¹¹⁵ In	114.903878	95.7	2.010×10^2	3.208×10^3
Cs	¹³³ Cs	132.905447	100	2.900×10	3.962×10^2
Nd		144.24			
	¹⁴² Nd	141.907719	27.13	1.870×10	8.661
	¹⁴³ Nd	142.90981	12.18	3.250×10^2	1.288×10^2

* 2200 m/s 値

表 2.2 元素及び核種の原子量^{2),3)}、存在比⁴⁾、中性子吸収断面積⁵⁾ 及び実効共鳴積分⁵⁾
(続き)

元素	核種	原子量	存在比[a/o]	σ_a [barn]*	RI_a [barn]
	¹⁴⁴ Nd	143.910083	23.80	3.603	4.3
	¹⁴⁵ Nd	144.912569	8.30	4.384×10	2.040×10^2
	¹⁴⁶ Nd	145.913112	17.19	1.399	2.908
	¹⁴⁸ Nd	147.916889	5.76	2.493	1.472×10
	¹⁵⁰ Nd	149.920887	5.64	1.202	1.590×10
Eu		151.964		4.560×10^3	2.201×10^3
	¹⁵¹ Eu	150.919846	47.8	9.198×10^3	3.065×10^3
	¹⁵³ Eu	152.921226	52.2	3.127×10^2	1.410×10^3
Gd		157.252			
	¹⁵² Gd	151.919788	0.20	1.056×10^3	9.892×10^2
	¹⁵⁴ Gd	153.920862	2.18	8.499×10	2.149×10^2
	¹⁵⁵ Gd	154.922619	14.80	6.089×10^4	1.534×10^3
	¹⁵⁶ Gd	155.92212	20.47	2.188	1.205×10^2
	¹⁵⁷ Gd	156.923957	15.65	2.541×10^5	7.613×10^2
	¹⁵⁸ Gd	157.924101	24.84	2.496	6.394×10
	¹⁶⁰ Gd	159.927051	21.86	7.961×10^{-1}	1.202×10
Pb		207.2		1.742×10^{-1}	1.464×10^{-1}
	²⁰⁴ Pb	203.973029	1.4	6.606×10^{-1}	1.86
	²⁰⁶ Pb	205.974449	24.1	3.060×10^{-2}	1.114×10^{-1}
	²⁰⁷ Pb	206.975881	22.1	7.120×10^{-1}	3.917×10^{-1}
	²⁰⁸ Pb	207.976636	52.4	5.007×10^{-4}	1.003×10^{-2}
U		238.0289			
	²³³ U	233.039628		5.765×10^2	9.126×10^2
	²³⁴ U	234.040946	0.0055	9.975×10	6.380×10^2
	²³⁵ U	235.043923	0.7200	6.832×10^2	4.111×10^2
	²³⁶ U	236.045562		5.356	3.534×10^2
	²³⁷ U	237.048724		4.541×10^2	1.133×10^3
	²³⁸ U	238.050783	99.2745	2.717	2.801×10^2

* 2200 m/s 値

表 2.2 元素及び核種の原子量^{2),3)}、存在比⁴⁾、中性子吸収断面積⁵⁾ 及び実効共鳴積分⁵⁾
(続き)

元素	核種	原子量	存在比[a/o]	σ_a [barn]*	RI_a [barn]
Np	²³⁷ Np	237.048167		1.646×10^2	6.683×10^2
Pu	²³⁸ Pu	238.049553		5.582×10^2	1.863×10^2
	²³⁹ Pu	239.052157		1.018×10^3	4.840×10^2
	²⁴⁰ Pu	240.053807		2.894×10^2	8.111×10^3
	²⁴¹ Pu	241.056845		1.374×10^3	7.525×10^2
	²⁴² Pu	242.058737		1.879×10	1.136×10^3
Am	²⁴¹ Am	241.056823		6.034×10^2	1.319×10^3
	²⁴² Am	242.059543		7.600×10^3	1.649×10^3
	²⁴³ Am	243.061373		7.850×10	1.831×10^3
Cm	²⁴³ Cm	243.061382		7.476×10^2	1.763×10^3
	²⁴⁴ Cm	244.062746		1.614×10	6.734×10^2
	²⁴⁵ Cm	245.065486		2.347×10^3	9.103×10^2
	²⁴⁷ Cm	247.070347		1.390×10^2	1.146×10^3
Cf	²⁴⁹ Cf	249.074847		2.171×10^3	2.914×10^3
	²⁵¹ Cf	251.07958		7.813×10^3	4.378×10^3

* 2200 m/s 値

表 2.3 アクチニド金属及び酸化物の密度⁶⁾

アクチニド 核種	金属	酸化物	
	密度 [g/cm ³]	分子式	密度 [g/cm ³]
U-238	19.165	UO ₂	表 2.4 及び 2.5 参照
Pu-239	19.851	PuO ₂	表 2.4 及び 2.6 参照
Am-241	13.660	AmO ₂	11.686
Cm-244	13.518	CmO ₂	11.921
Cf-249	15.110	CfO ₂	12.469

表 2.4 ウラン、プルトニウム系化合物の理論密度

化 合 物	理論密度 [g/cm ³]
UO ₂	10.96 ⁷⁾
UO ₃	7.29 ⁸⁾
U	19.05 ⁸⁾
UF ₆	5.09 ⁸⁾
U ₃ O ₈	8.43 ⁹⁾
ADU(II)*	4.83 ¹⁰⁾
Pu	19.816 ⁸⁾
PuO ₂	11.46 ⁸⁾

*3UO₃・NH₃・5H₂O、Ammonium Diuranate、重ウラン酸アンモニウム

表 2.5 ²³⁵U 濃縮度の変化に伴う UO₂ 理論密度の変化

²³⁵ U 濃縮度 (wt%)	UO ₂ 密度 (g/cm ³)
0 (天然)	10.96
5	10.95
20	10.93
40	10.91
60	10.89
80	10.86
100	10.84

表 2.6 典型的な Pu 同位体組成を持つ PuO₂ の理論密度

Pu fissile 率[wt%]	93	90	80	75	50
PuO ₂ 密度[g/cm ³]	11.46	11.46	11.47	11.48	11.49
Pu 組成[wt%]	11)	12)	12)	12)	12)
²³⁸ Pu	0.0	0.02	0.09	0.494	0.101
²³⁹ Pu	93.0	90.484	77.68	68.18	38.408
²⁴⁰ Pu	7.0	8.573	18.50	22.07	45.624
²⁴¹ Pu	0.0	0.853	3.22	7.268	10.702
²⁴² Pu	0.0	0.07	0.51	2.037	5.165

表 2.7 典型的なコンクリートの密度及び組成 [g/cm³]

種 類	普通コンクリート	重コンクリート
元素 \ 密度	2.30	3.55
H	0.023	0.0219
O	1.220	1.187
C	0.0023	—
Na	0.0368	—
Mg	0.005	0.023
Al	0.078	0.097
Si	0.775	0.123
P	—	0.001
S	—	0.004
K	0.0299	—
Ca	0.100	0.240
Ti	—	0.096
V	—	0.006
Cr	—	0.003
Mn	—	0.002
Fe	0.032 ^{a)}	1.745
Ni	— ^{a)}	—

注a) Fe と Ni の値は文献 19) 及び 22) から引用した。

表 2.8 典型的なステンレス鋼の密度 [g/cm³] 及び組成 [wt%]²¹⁾

種 類	SUS304	SUS304L
密度[g/cm ³]	7.93	7.93
元素		
C	0.08	0.03
Si	1	1
Mn	2	2
P	0.045	0.045
S	0.03	0.03
Ni	9.25	11
Cr	19	19
Fe	68.595	66.895

表 2.9 ORIGEN 2.1 で算出された組成に対して適用が検討される補正因子の例²³⁾

核種	補正因子							
	Obrigheim		美浜 3 号炉		玄海 1 号炉		高浜 3 号炉	
	PWR-U	PWR-US	PWR-U	PWR-US	PWR-U	PWR-US	PWR-UE	PWR 41J32
U-234	-	-	1.15	1.15	1.00	1.00	1.30	1.29
U-235	0.73	0.69	0.91	0.87	0.88	0.82	0.89	0.99
U-236	1.09	1.10	1.06	1.07	1.00	1.00	1.00	1.00
U-238	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
Pu-238	1.49	1.59	1.00	1.01	1.00	1.00	1.10	1.00
Pu-239	0.94	0.95	0.85	0.83	0.86	0.94	0.91	0.97
Pu-240	1.36	1.23	1.08	1.01	1.00	1.00	1.16	1.07
Pu-241	0.94	0.99	0.78	0.84	0.86	0.81	0.86	0.92
Pu-242	1.85	1.96	1.00	1.08	1.00	1.00	1.00	1.00
Am-241	2.41	2.62	1.06	1.18	1.00	1.00	1.51	1.62

表 2.10 SFCOMPO²⁴⁾ にデータが内蔵されている照射後試験一覧

原子炉	国名	炉型	燃料集合体	燃料	サンプル数*
Obrigheim	独	PWR	14 × 14	UO ₂	23
Gundremmingen	独	BWR	6 × 6	UO ₂	12
Trino Vercellese	イタリア	PWR	15 × 15	UO ₂	39
JPDR	日本	BWR	6 × 6	UO ₂	30
敦賀 1 号	日本	BWR	7 × 7	UO ₂	10
福島第一 3 号炉	日本	BWR	8 × 8	UO ₂ , UO ₂ -Gd ₂ O ₃	36(10)
福島第二 2 号炉	日本	BWR	8 × 8	UO ₂ , UO ₂ -Gd ₂ O ₃	18(10)
美浜 3 号炉	日本	PWR	15 × 15	UO ₂	9
玄海 1 号炉	日本	PWR	14 × 14	UO ₂	2
高浜 3 号炉	日本	PWR	17×17	UO ₂ , UO ₂ -Gd ₂ O ₃	16(5)
Cooper	米国	BWR	7 × 7	UO ₂	6
Monticello	米国	BWR	8×8	UO ₂ , UO ₂ -Gd ₂ O ₃	30(5)
Calvert Cliffs-1	米国	PWR	14 × 14	UO ₂	9
H.B.Robinson-2	米国	PWR	15 × 15	UO ₂	6

* ()内は UO₂-Gd₂O₃ サンプルの数

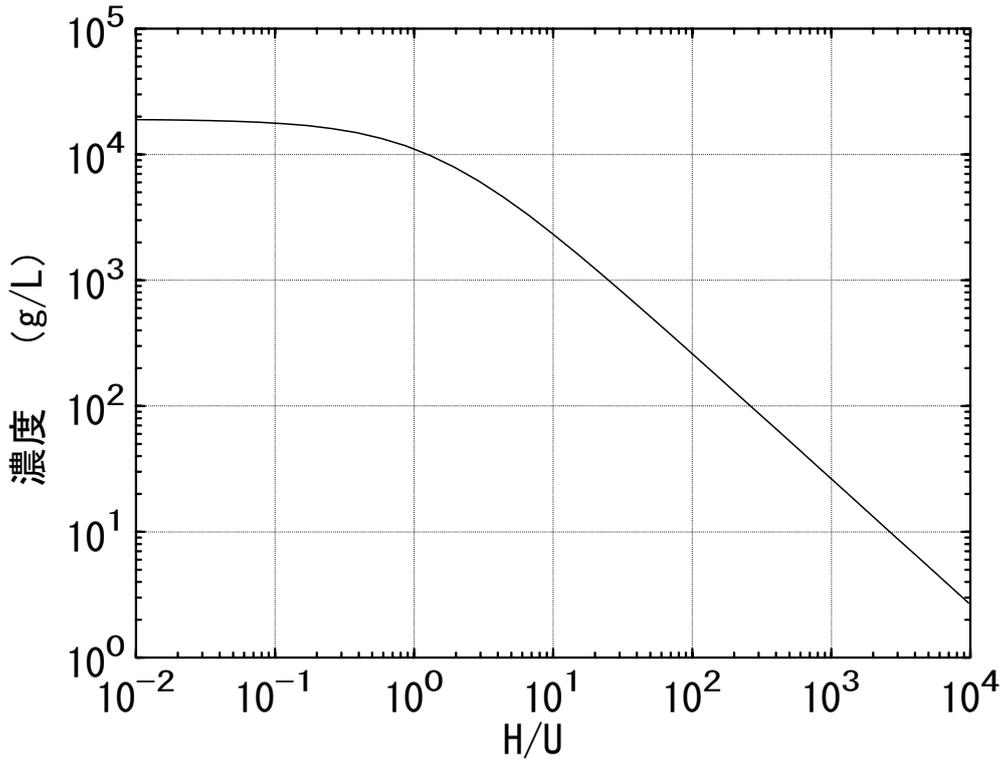


図 2.1 U濃度-H/U曲線 (均質U-H₂O) (²³⁵U濃縮度 0.711wt%)

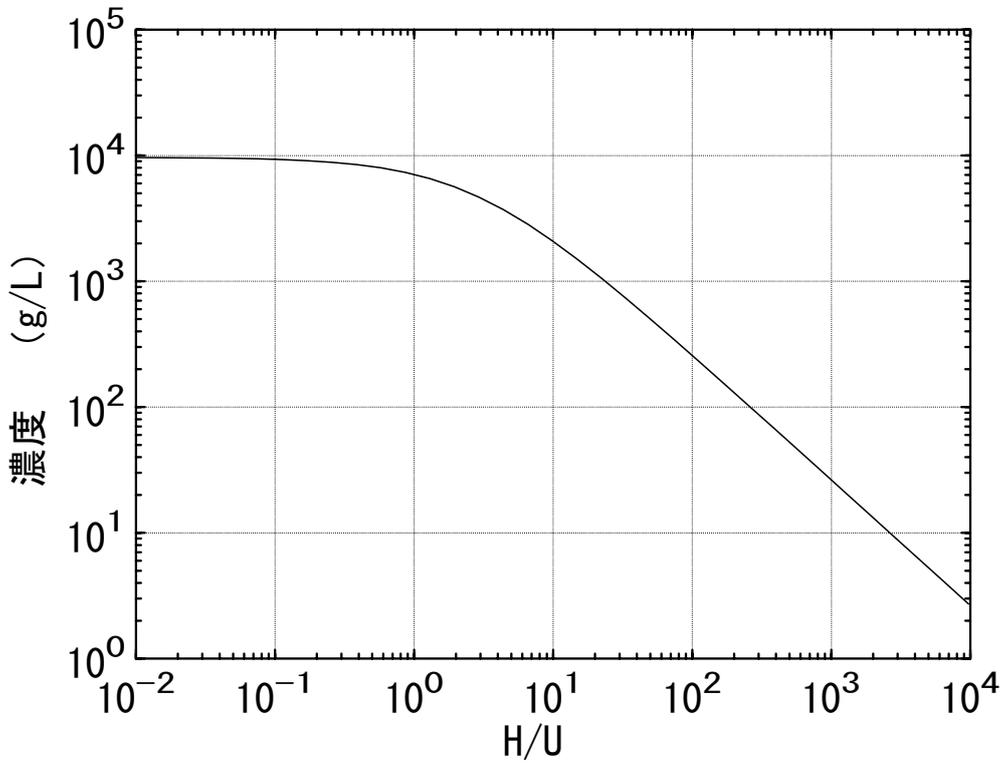


図 2.2 U濃度-H/U曲線 (均質UO₂-H₂O) (²³⁵U濃縮度 0.711wt%)

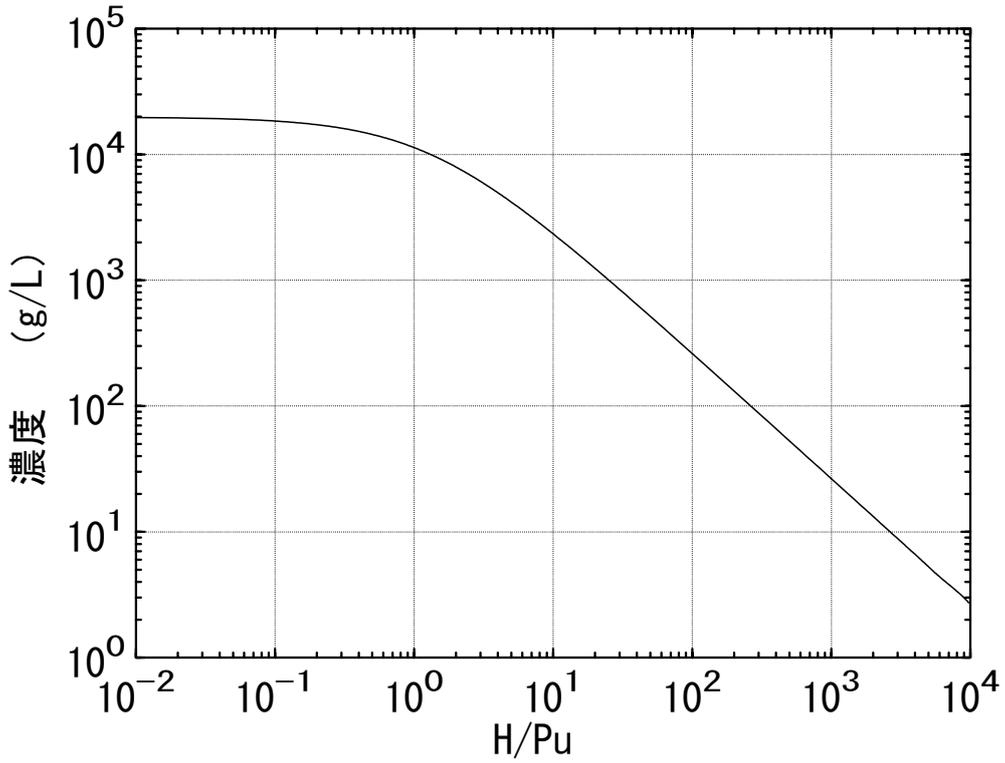


図 2.3 Pu濃度-H/Pu曲線 (均質Pu-H₂O) (²³⁹Pu 100%)

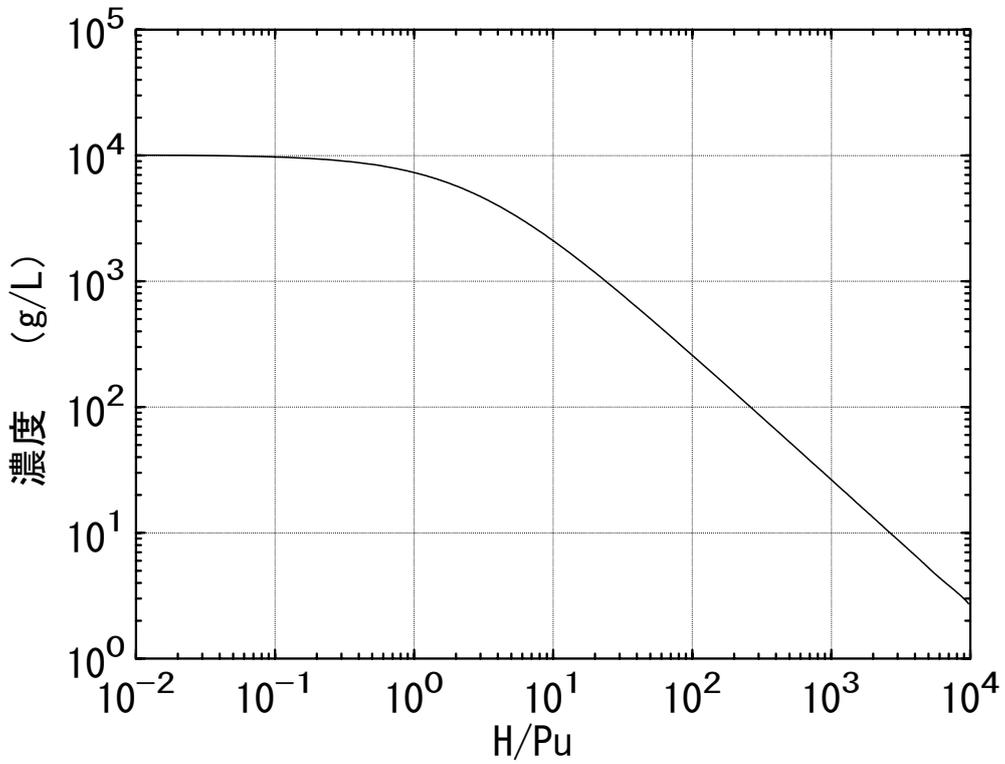


図 2.4 Pu濃度-H/Pu曲線 (均質PuO₂-H₂O) (²³⁹Pu 100%)

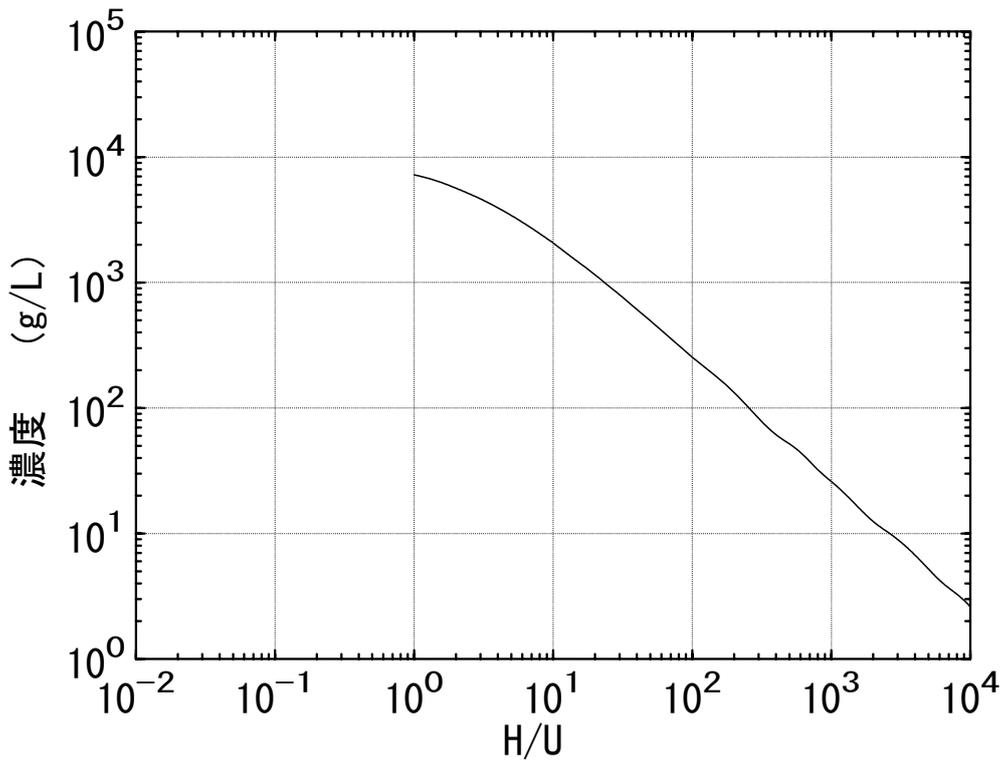


図 2.5 U濃度-H/U曲線 (均質ADU(II)-H₂O) (²³⁵U濃縮度 0.711wt%)

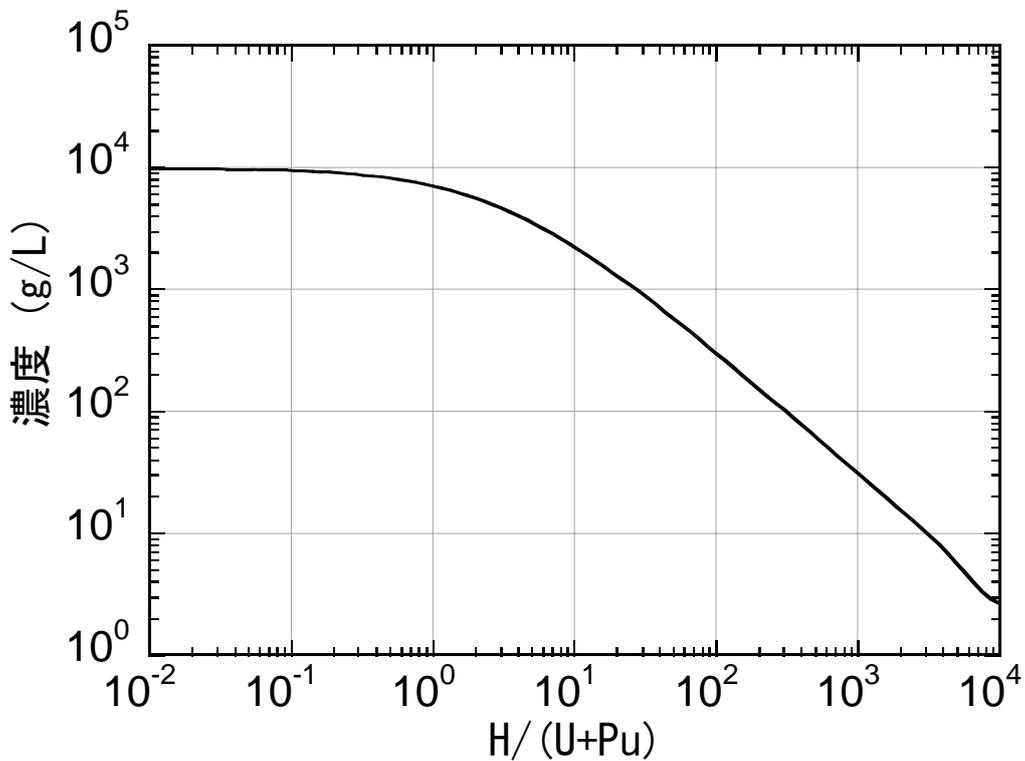


図 2.6 (Pu+U)濃度-H/(Pu+U)曲線 (均質PuO₂-UO₂-H₂O)
(PuO₂ 富化度 30%、²³⁵U濃縮度 0.711wt%、同位体比: ²³⁹Pu 100%)

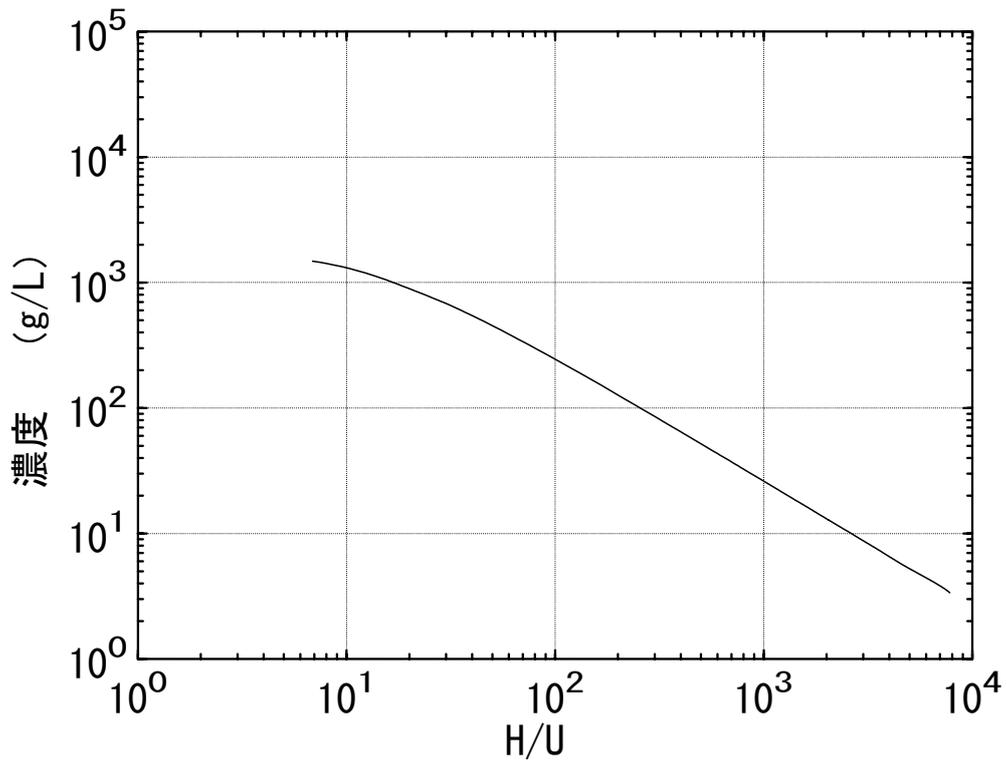


図 2.7 U濃度-H/U曲線 ($\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 水溶液) (^{235}U 濃縮度 0.711wt%)

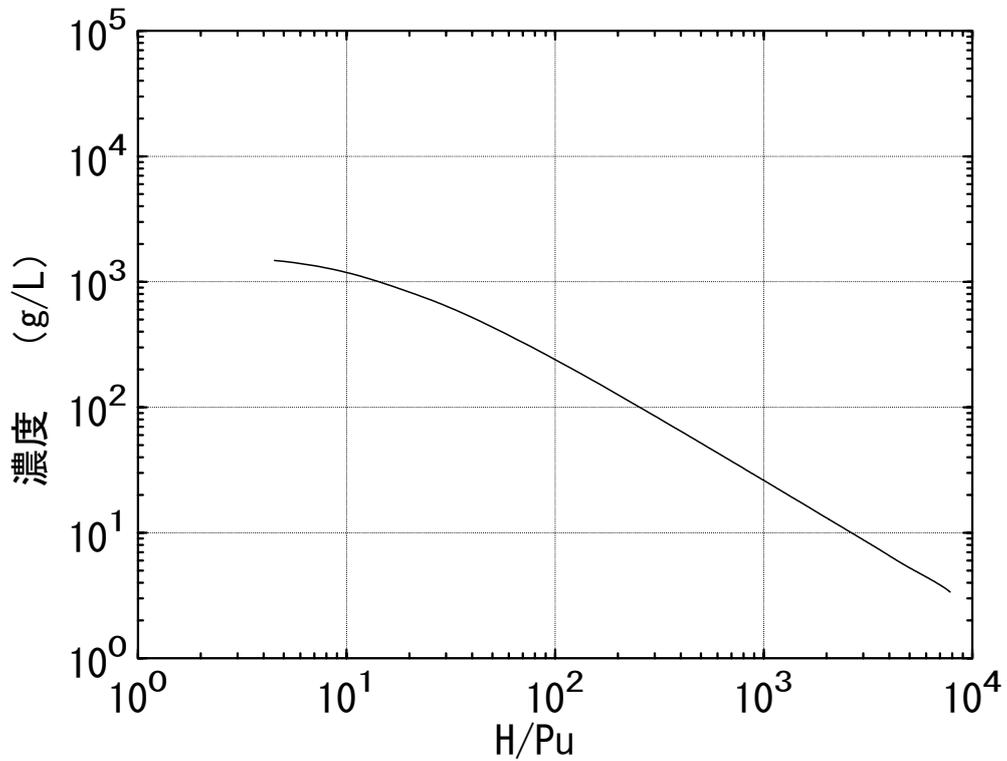


図 2.8 Pu濃度-H/Pu曲線 ($\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ 水溶液) (同位体比: ^{239}Pu 100%)

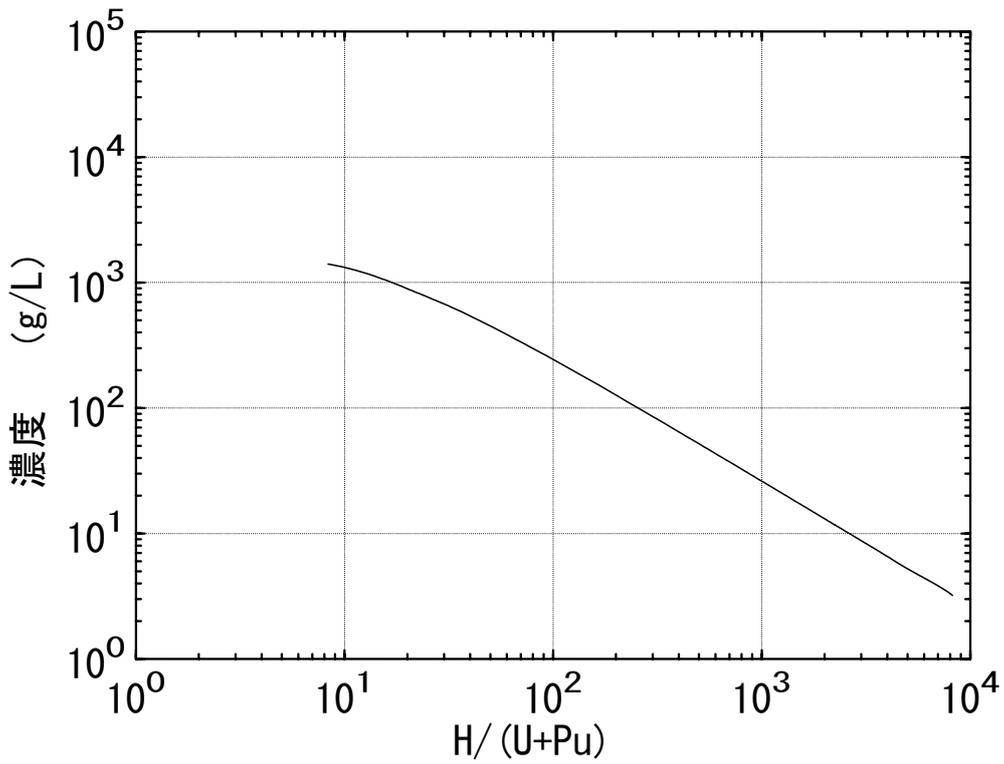


図 2.9 (Pu+U)濃度-H/(Pu+U)曲線 ($\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2\text{-Pu}(\text{NO}_3)_4$ 水溶液)
(Pu富化度 30%、 ^{235}U 濃縮度 0.711wt%、同位体比： ^{239}Pu 100%)

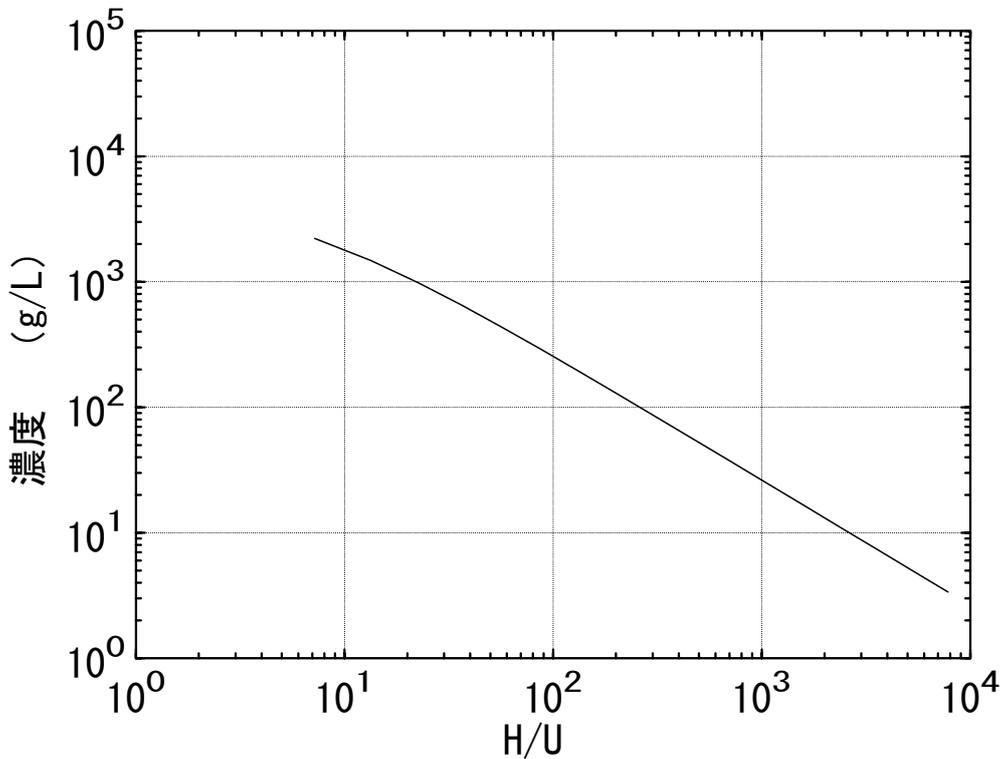


図 2.10 U濃度-H/U曲線 (UO_2F_2 水溶液) (^{235}U 濃縮度 0.711wt%)

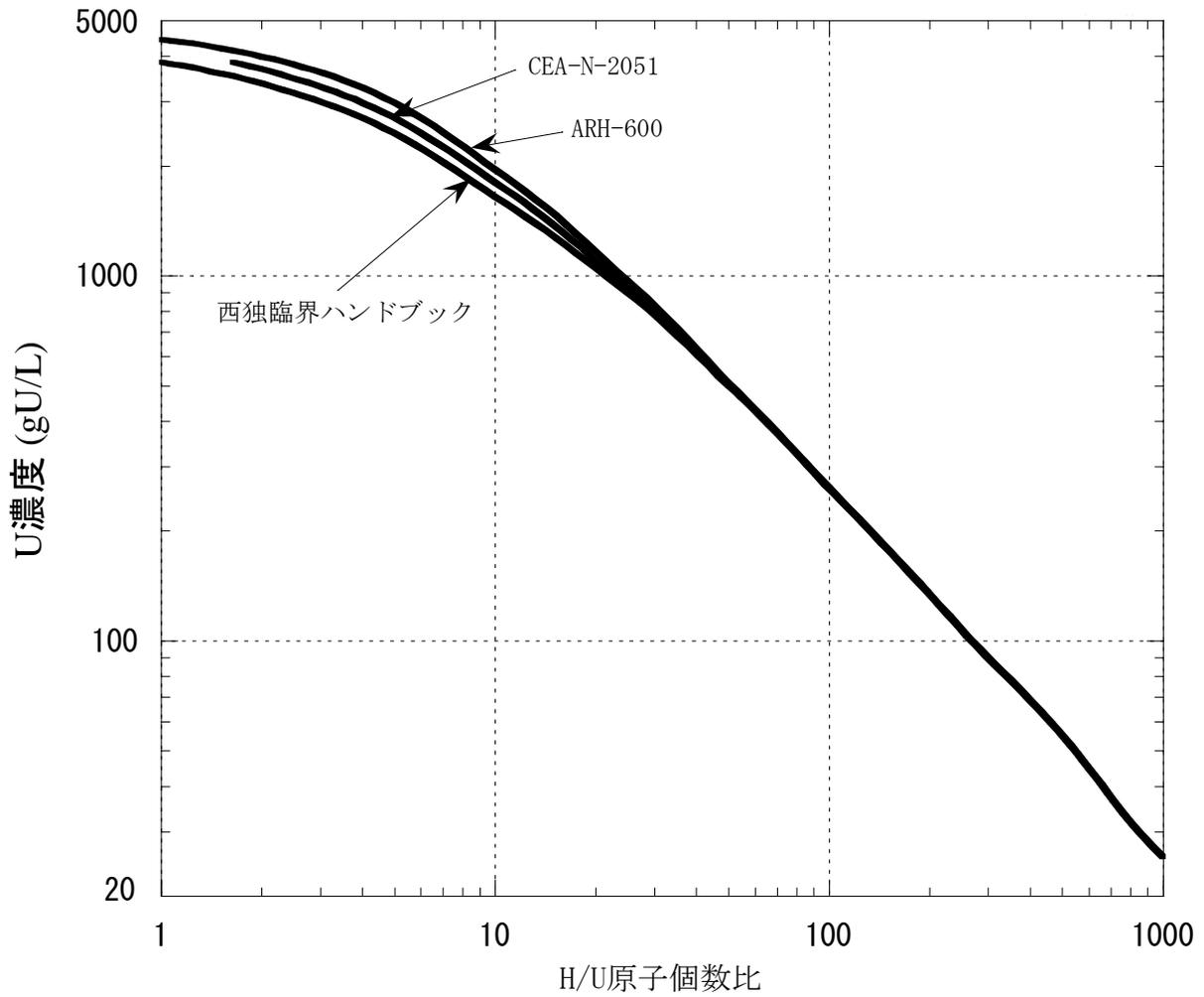


図 2.11 UO_2F_2 水溶液のU濃度-H/U曲線の比較

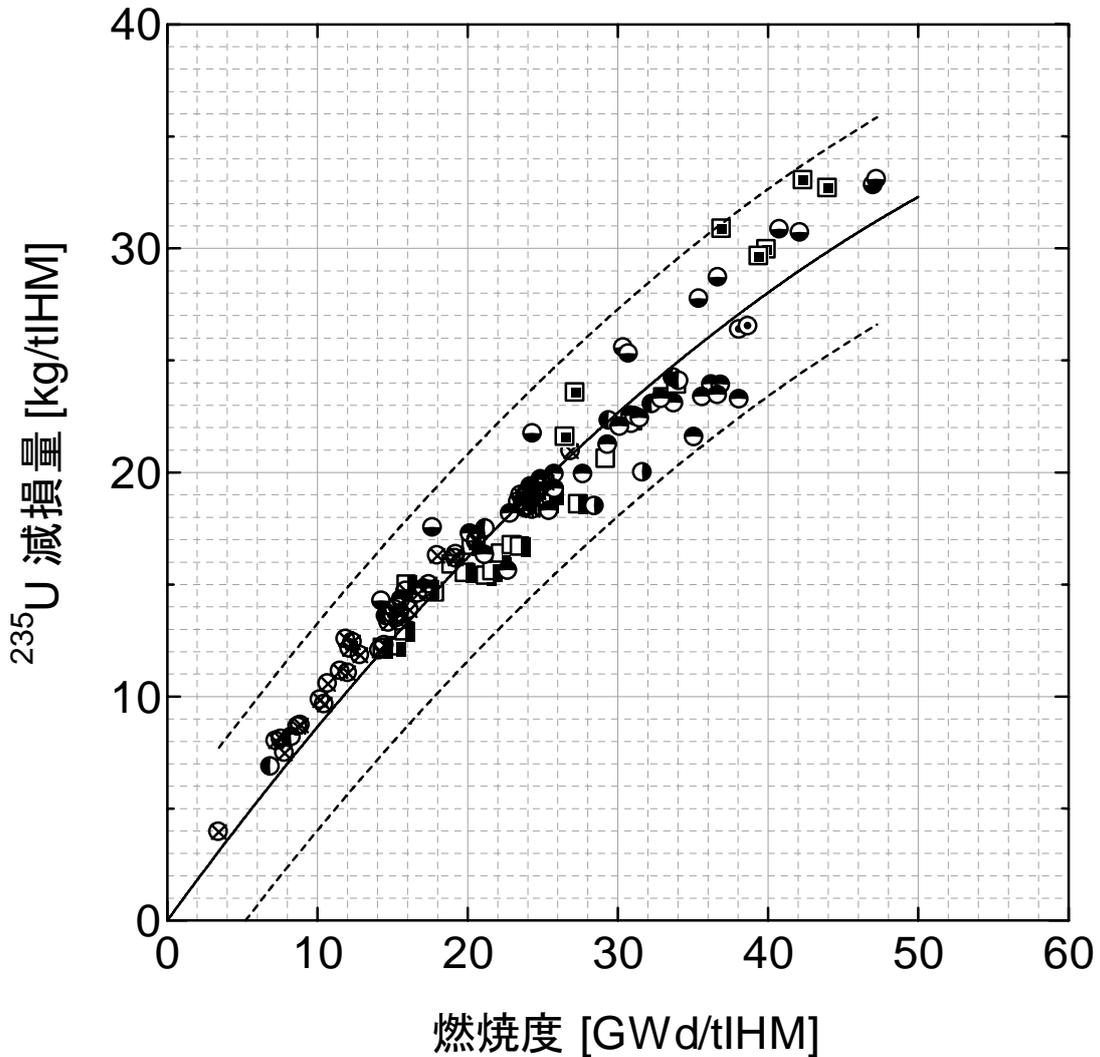


図 2.12 燃焼度に対する ^{235}U の減損量 (可燃性中性子吸収材を使用していない UO_2 燃料ペレット、tHMは燃焼前のウラン量 [トン] を表す)

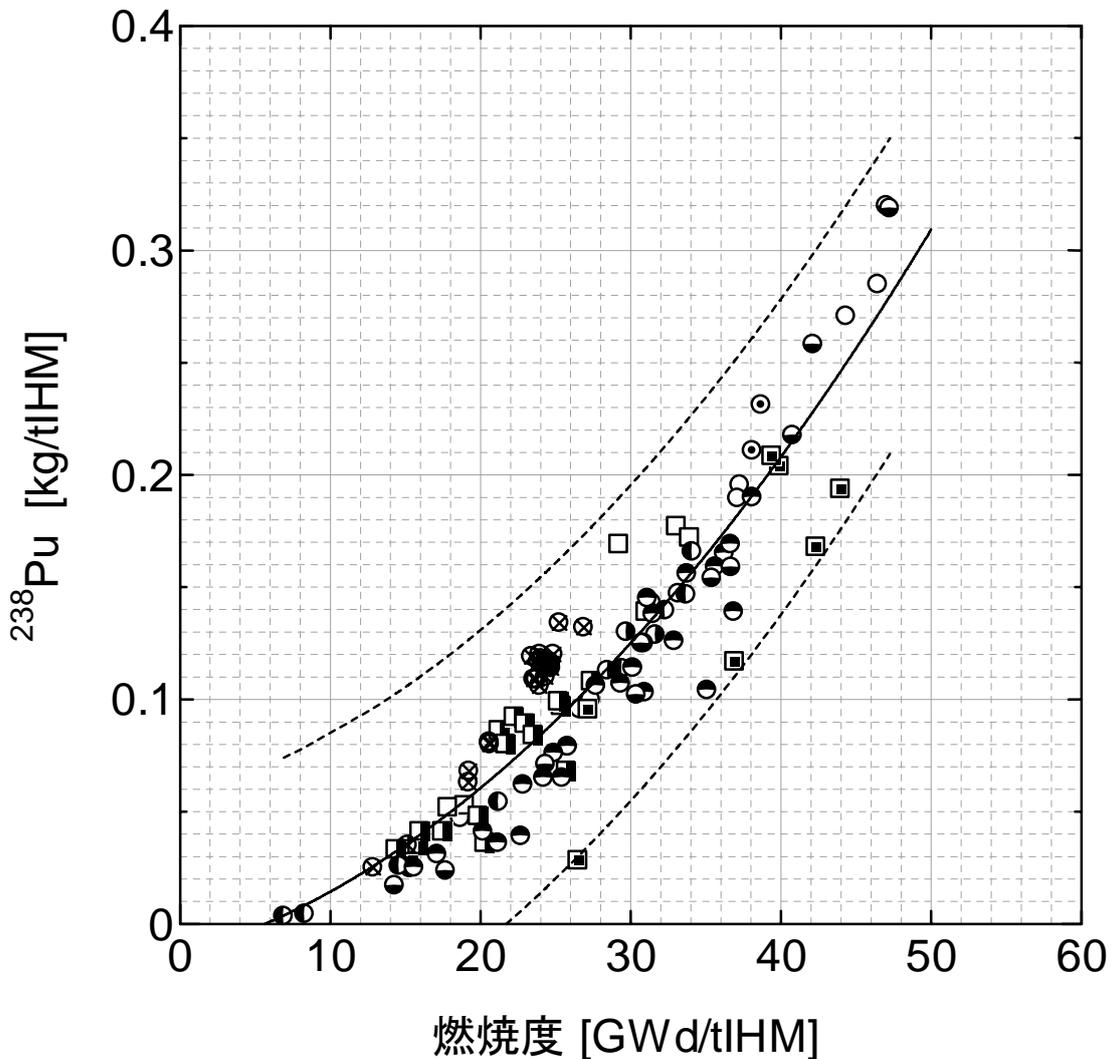
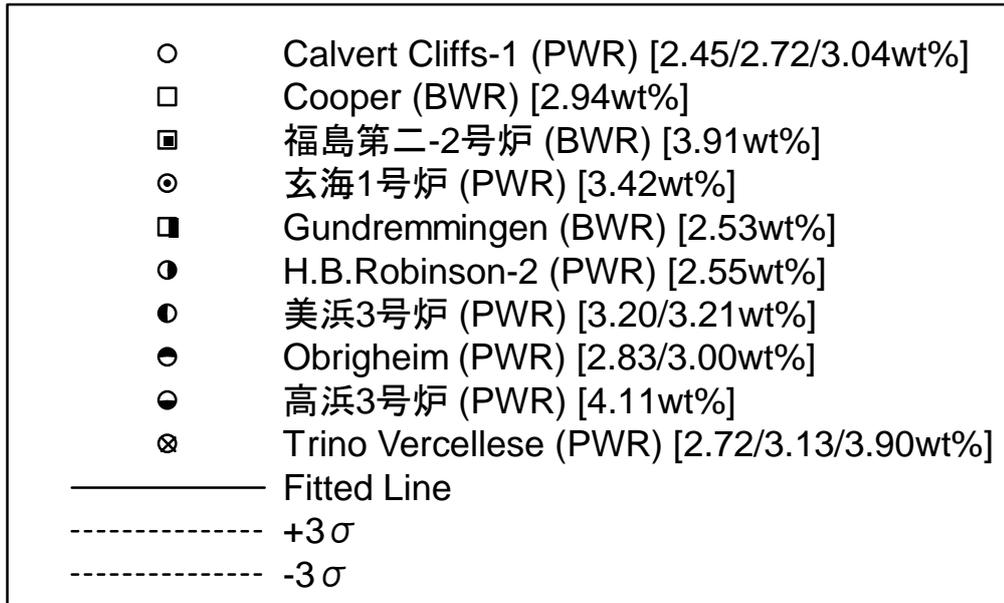


図 2.13 燃烧度に対する ^{238}Pu 生成量 (可燃性中性子吸収材を使用していない UO_2 燃料ペレット、tIHMは燃烧前のウラン量 [トン] を表す)

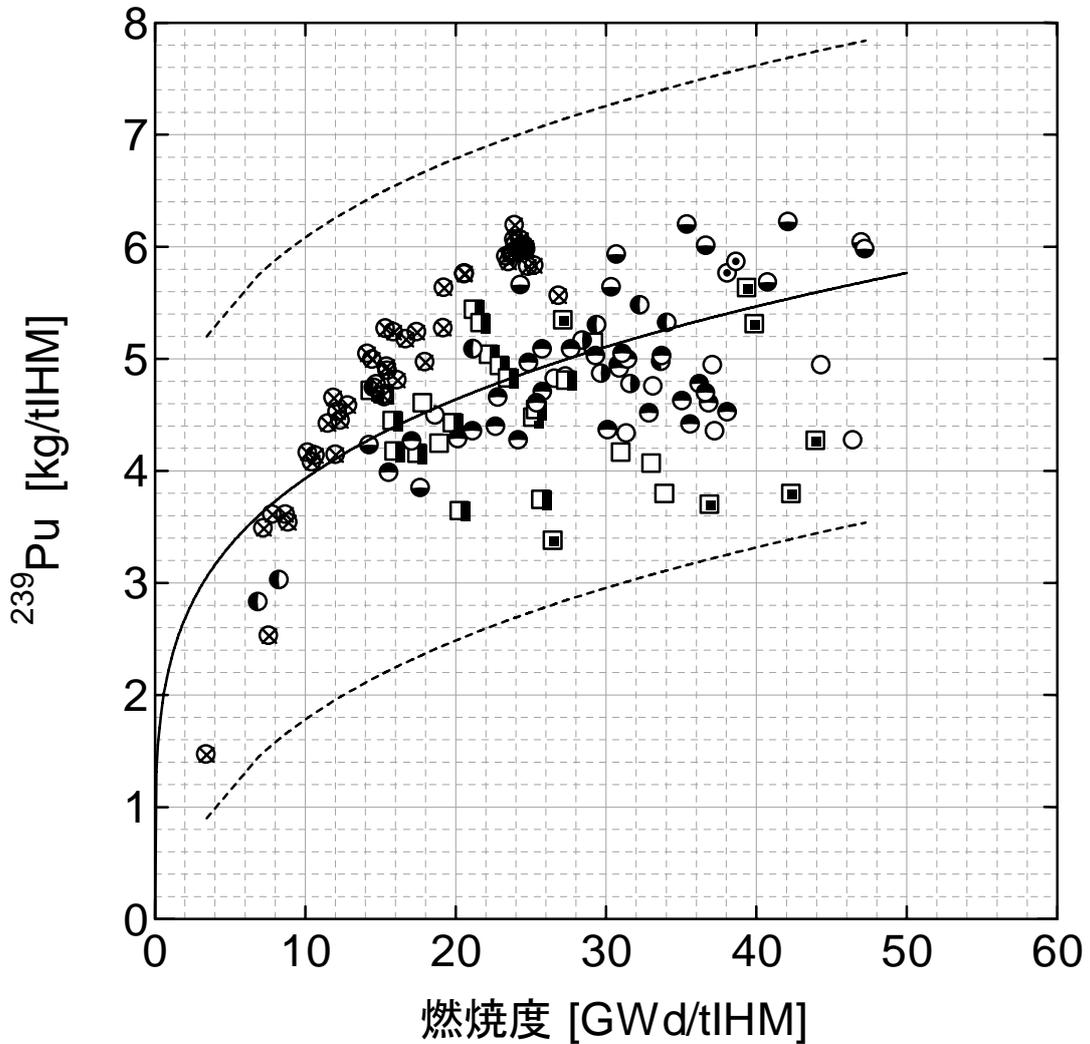
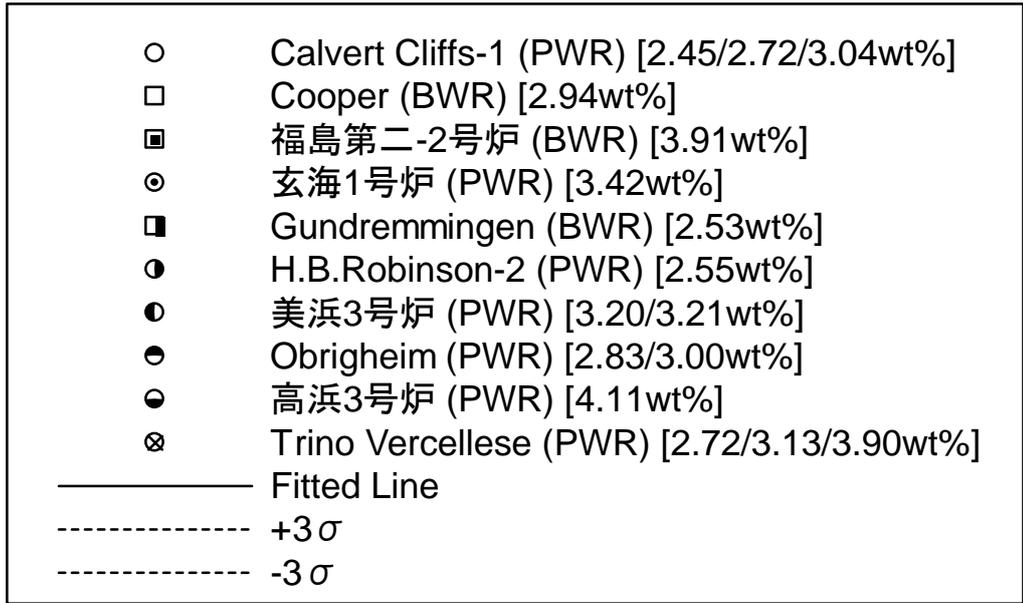


図 2.14 燃焼度に対する ^{239}Pu 生成量 (可燃性中性子吸収材を使用していない UO_2 燃料ペレット、tHMは燃焼前のウラン量 [トン] を表す)

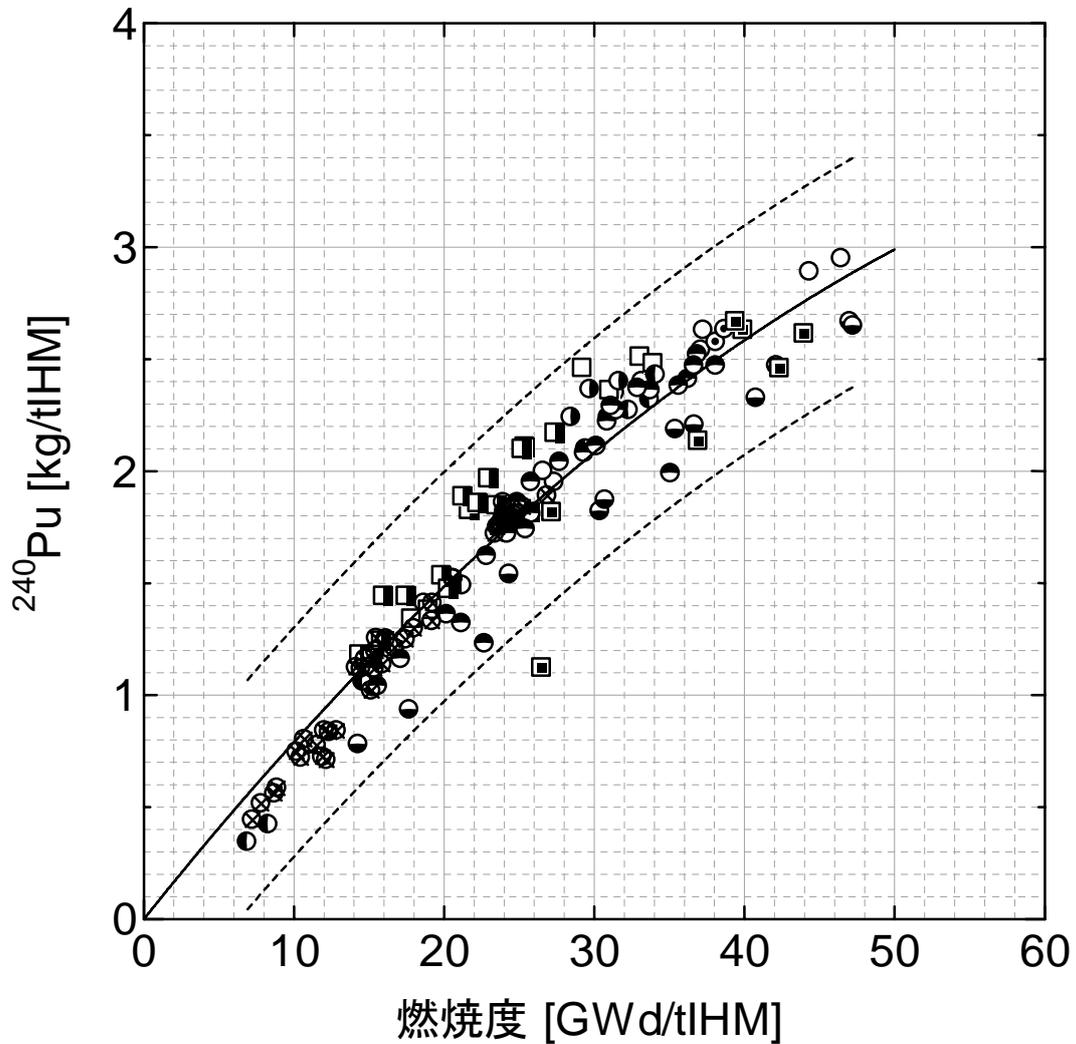
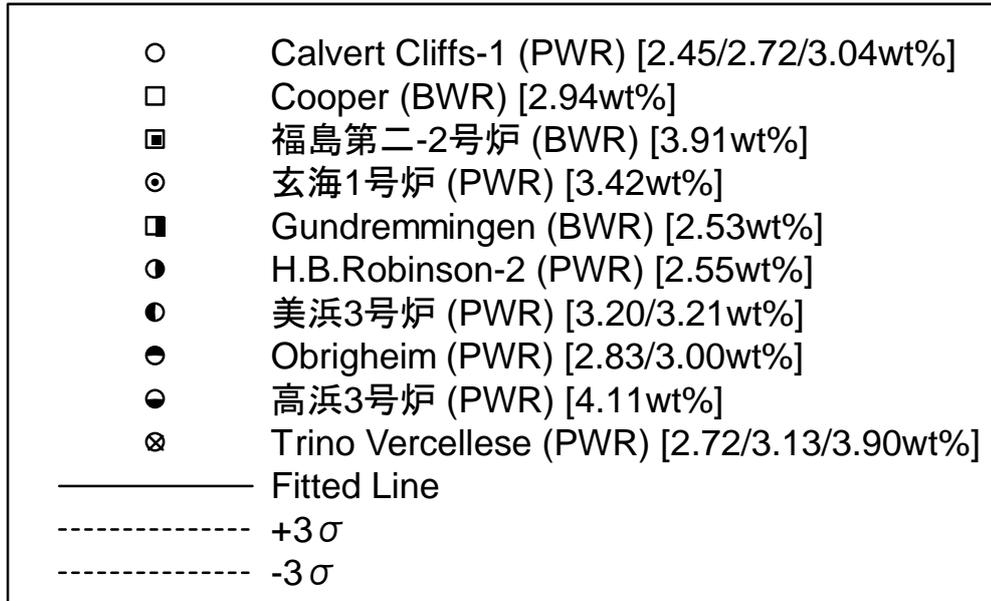


図 2.15 燃焼度に対する ^{240}Pu 生成量 (可燃性中性子吸収材を使用していない UO_2 燃料ペレット、tIHMは燃焼前のウラン量 [トン] を表す)

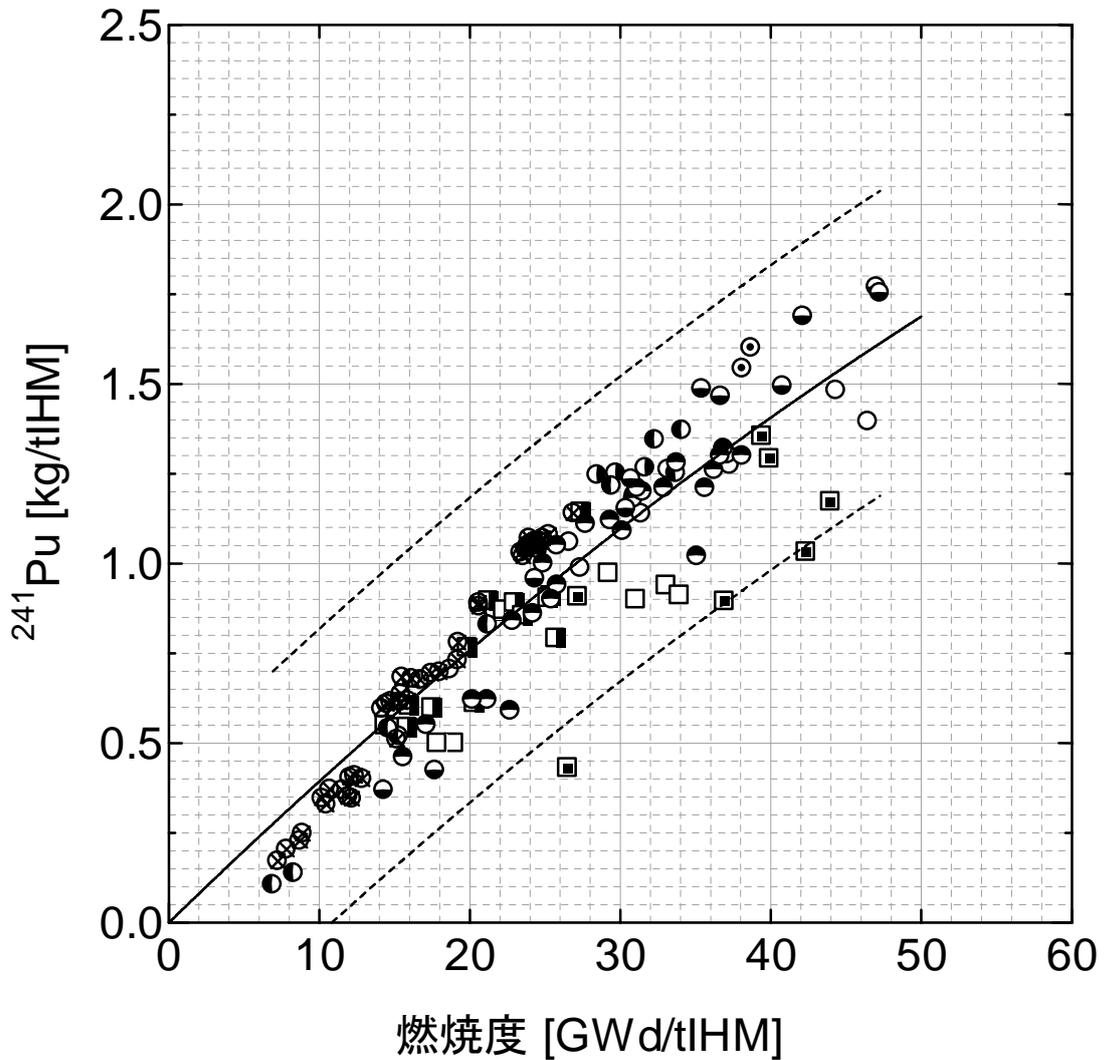
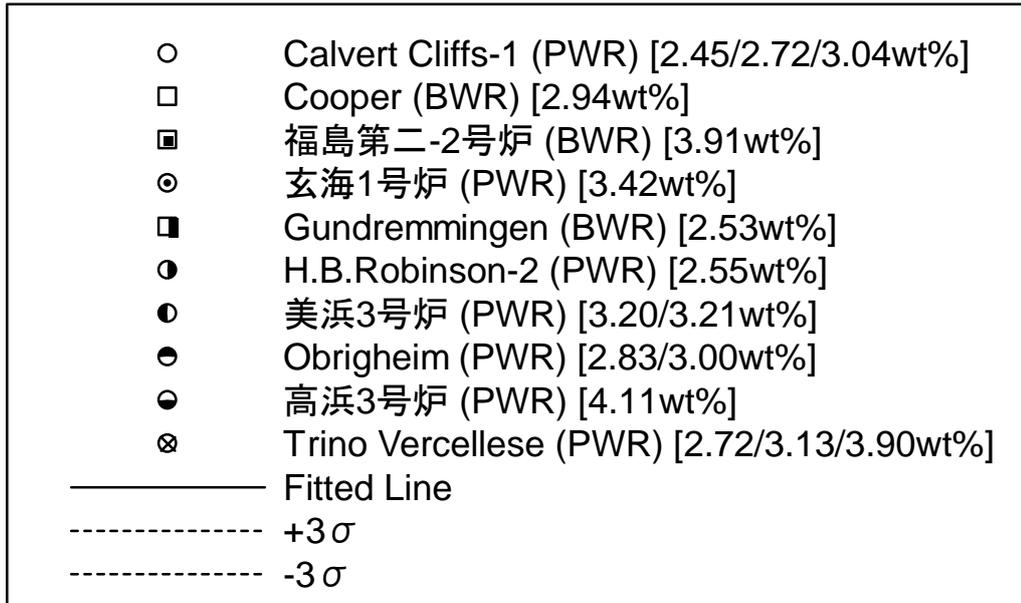


図 2.16 燃烧度に対する ^{241}Pu 生成量 (可燃性中性子吸収材を使用していない UO_2 燃料ペレット、tIHMは燃烧前のウラン量 [トン] を表す)

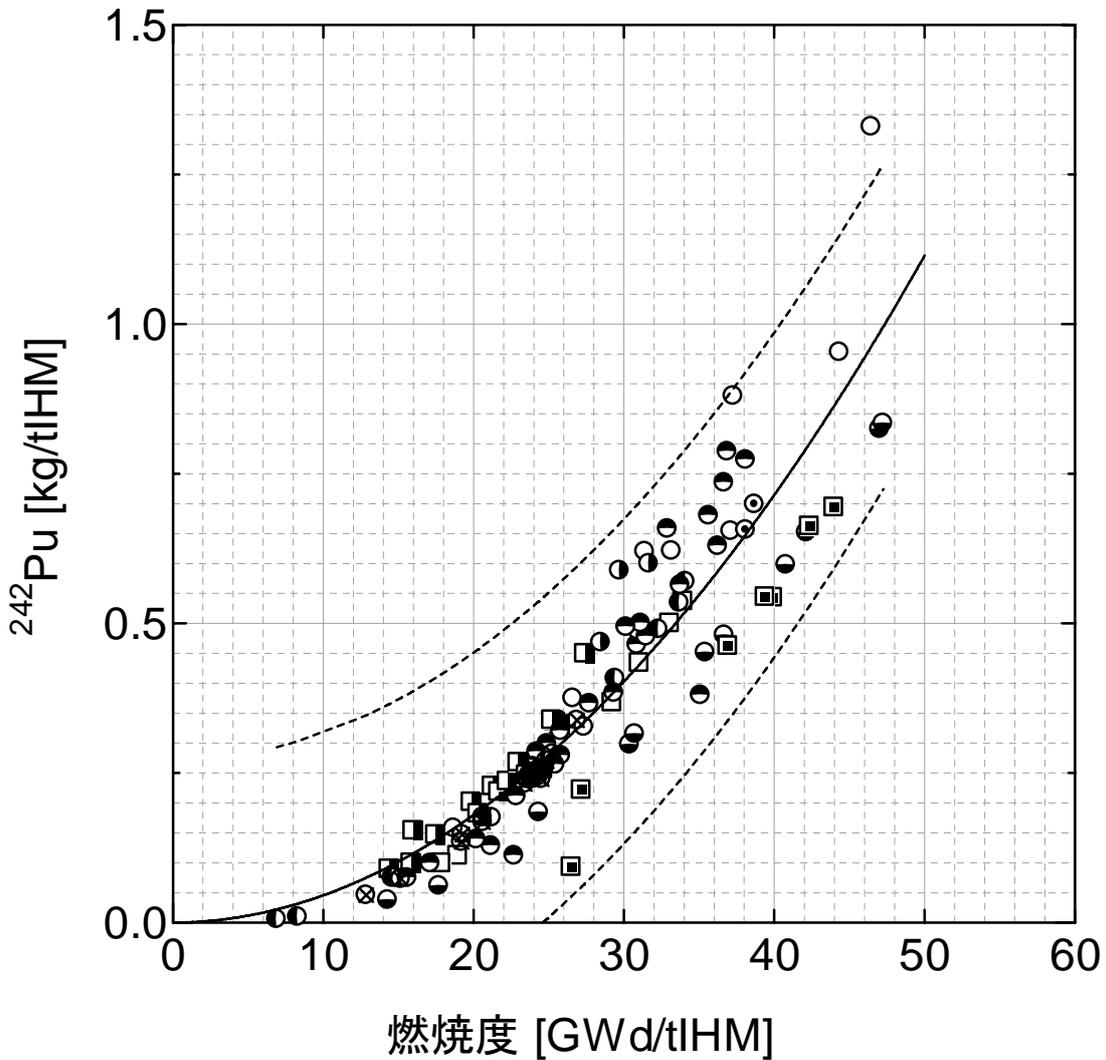
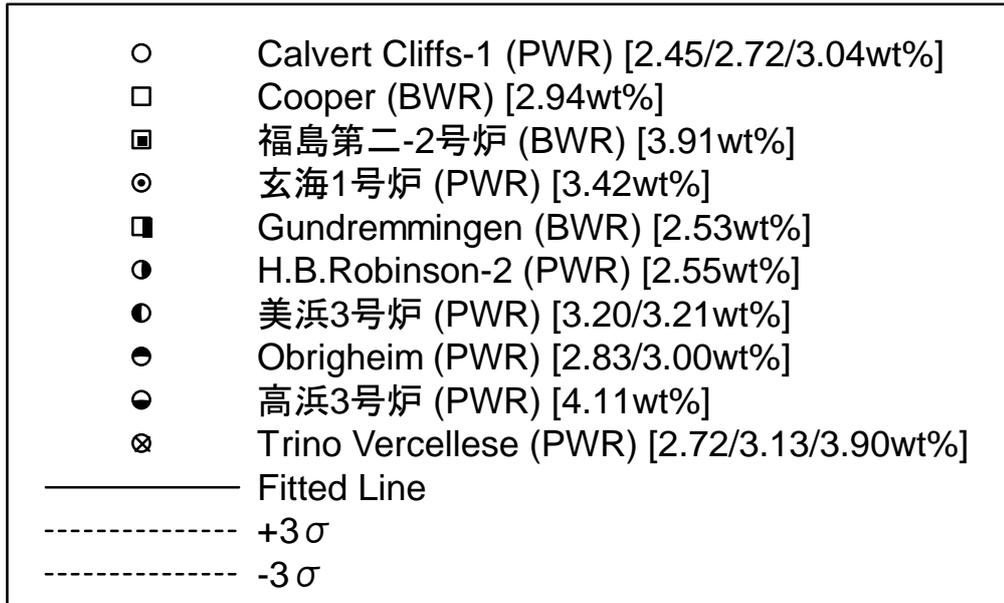


図 2.17 燃焼度に対する ^{242}Pu 生成量 (可燃性中性子吸収材を使用していない UO_2 燃料ペレット、tIHMは燃焼前のウラン量 [トン] を表す)

3. 種々の核燃料に対する核特性パラメータ

核特性パラメータとは、ここでは、無限増倍率 k_{∞} 、中性子移動面積 M^2 及び拡散係数 D を指す。これらの量を用いると、下記の方法により簡便に臨界データが求まる。目標とする中性子増倍率を k_{eff} とすると、それに対応するバックリング B^2 は下記の式で求まる。

$$B^2 = \left(\frac{k_{\infty}}{k_{\text{eff}}} - 1 \right) / M^2 \quad (3.1)$$

B^2 に相当する球の半径 r 、無限平板の厚さ T 、無限長円柱の半径 r は下記の式から求まる。

$$\text{球} \quad : B^2 = \left(\frac{\pi}{r+d} \right)^2 \quad (3.2)$$

$$\text{無限平板} \quad : B^2 = \left(\frac{\pi}{T+2d} \right)^2 \quad (3.3)$$

$$\text{無限円柱} \quad : B^2 = \left(\frac{2.405}{r+d} \right)^2 \quad (3.4)$$

ここで、 d は外挿距離であり下記式で求まる。

$$d = 2D \left(\frac{1+\beta}{1-\beta} \right) \quad (3.5)$$

β はアルベド値で下記の式で求まる。

$$\text{球} \quad : \beta = \frac{1 - 2D_R \left(\kappa_R + \frac{1}{r} \right)}{1 + 2D_R \left(\kappa_R - \frac{1}{r} \right)} \quad (3.6)$$

$$\text{無限平板} \quad : \beta = \frac{1 - 2\kappa_R D_R}{1 + 2\kappa_R D_R} \quad (3.7)$$

$$\text{無限円柱} \quad : \beta = \frac{1 - 2D_R \kappa_R \frac{K_1(\kappa_R \cdot r)}{K_0(\kappa_R \cdot r)}}{1 + 2D_R \kappa_R \frac{K_1(\kappa_R \cdot r)}{K_0(\kappa_R \cdot r)}} \quad (3.8)$$

ここで、 K_0 及び K_1 は変形第2種のベッセル関数である。 D_R は反射体の拡散係数、 κ_R は反射体の拡散距離の逆数である。反射体が水の場合には下記の値を用いる。

$$D_{\text{H}_2\text{O}} = 0.47 \text{cm}, \quad \kappa_{\text{H}_2\text{O}} = 0.3 \text{cm}^{-1}$$

以上のように k_{∞} 、 M^2 及び D を用いて、 k_{eff} に対応するバックリングまたは形状寸法を求めることが

できる。本章では、均質 $\text{U-H}_2\text{O}$ 、均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 、 UO_2F_2 水溶液、 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 水溶液、均質 $\text{Pu-H}_2\text{O}$ 、均質 $\text{PuO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 、 $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ 水溶液、均質 $\text{PuO}_2\text{-UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 、均質 $\text{ADU(II)-H}_2\text{O}$ 、 $\text{UF}_6\text{-HF}$ 、 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2\text{-Pu}(\text{NO}_3)_4$ 混合水溶液、の 11 種類の核燃料物質について、 H/X (X は U または U+Pu) あるいは濃度を変数とした k_∞ 、 M^2 及び D を図 3.1.1 から図 3.11.3 に示す¹⁾。これらのデータは、**SRAC95** コード²⁾と **JENDL-3.2** に基づく 107 群ライブラリで計算した実効断面積を改良 **POST** コード³⁾で **KENO** 形式断面積セットに変換したものをを用いて、**SIMCRI** コード⁴⁾を用いて計算したものである。原子個数密度は **MAIL3.1** コード⁵⁾で採用している算出方式に基本的に従うものとした。但し、 UO_2F_2 水溶液、 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 水溶液、 $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ 水溶液、 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2\text{-Pu}(\text{NO}_3)_4$ 混合水溶液に関しては、結晶と測定で密度が確認されている最大濃度の水溶液の混合モデルを採用した。

なお、温度、同位体組成等の諸条件は以下のように設定した。

- ① 溶液温度は 20°C 。
- ② 硝酸溶液における遊離硝酸は 0 モル。
- ③ プルトニウム燃料については、プルトニウム同位体は ^{239}Pu と ^{240}Pu の 2 種類のみ。
- ④ プルトニウムとウランが混じった体系では、ウランの同位体組成は天然のもの（この章では、 $^{235}\text{U} : ^{238}\text{U} = 0.711 : 99.289$ 重量比）。プルトニウムは $^{239}\text{Pu}100\%$ とする。
- ⑤ $\text{UF}_6\text{-HF}$ では、減速度管理が行われているとし、**HF** の割合は $0.5\text{wt}\%$ とする⁶⁾。

第 3 章の参考文献

- 1) H. Okuno and T. Takada, "Calculation of nuclear characteristic parameters and drawing subcriticality judgment graphs of infinite fuel systems for typical nuclear fuels," J. Nucl. Sci. Technol., **41**, p.481 (2004).
- 2) 奥村啓介・金子邦男・土橋敬一郎、「**SRAC95**; 汎用核計算コードシステム」、**JAERI-Data/Code 96-015** (1996).
- 3) 須山賢也・高田友幸、「**POST-SRAC95** を使用した臨界計算のための断面積処理プログラム」、**JAERI-Data/Code 98-035** (1998).
- 4) S. Nakamaru, N. Sugawara, Y. Naito, J. Katakura and H. Okuno, "SIMCRI: A Simple Computer Code for Calculating Nuclear Criticality Parameter," **JEARI-M 86-027** (1986).
- 5) 須山賢也・小室雄一・高田友幸・川崎弘光・大内圭介、「断面積セット作成プログラム **MAIL3.1**」、**JAERI-Data/Code 98-004** (1998).
- 6) R. H. Dyer, F. M. Kovac and W. A. Pryor, "Moderation control in low enriched ^{235}U uranium hexafluoride packaging operations and transportation," The 34th Annual Meeting of the Institute of Nuclear Materials Management, Scottsdale, AZ, USA, July 18-22, 1993.

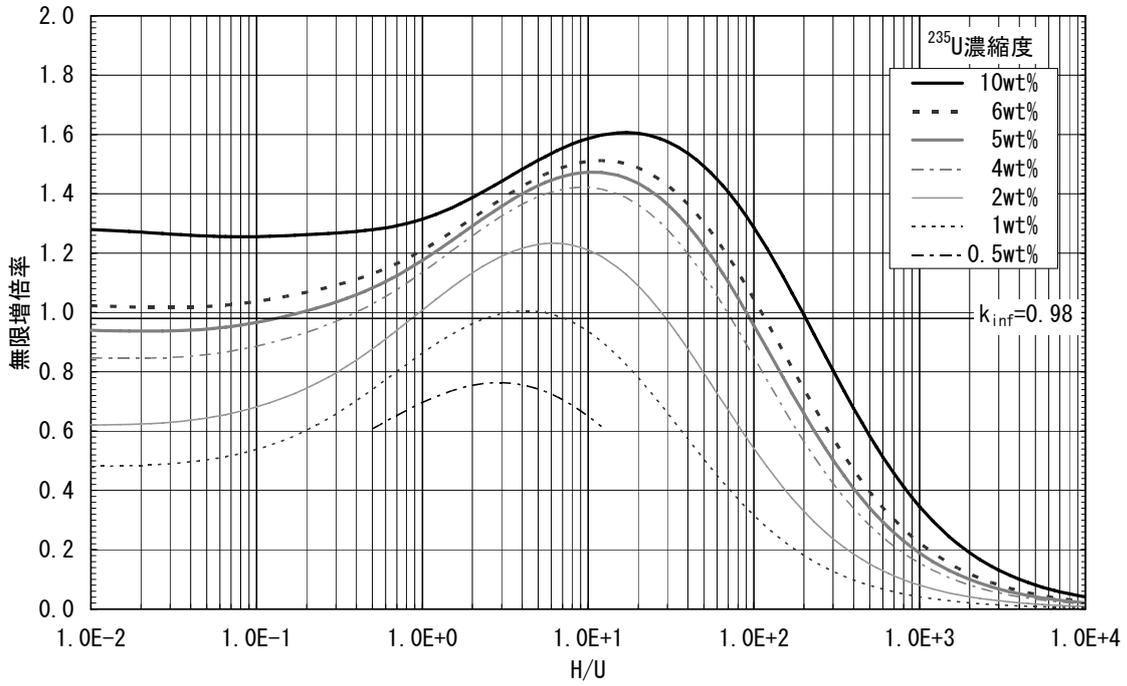


図3.1.1(a) 均質U-H₂O系の無限増倍率

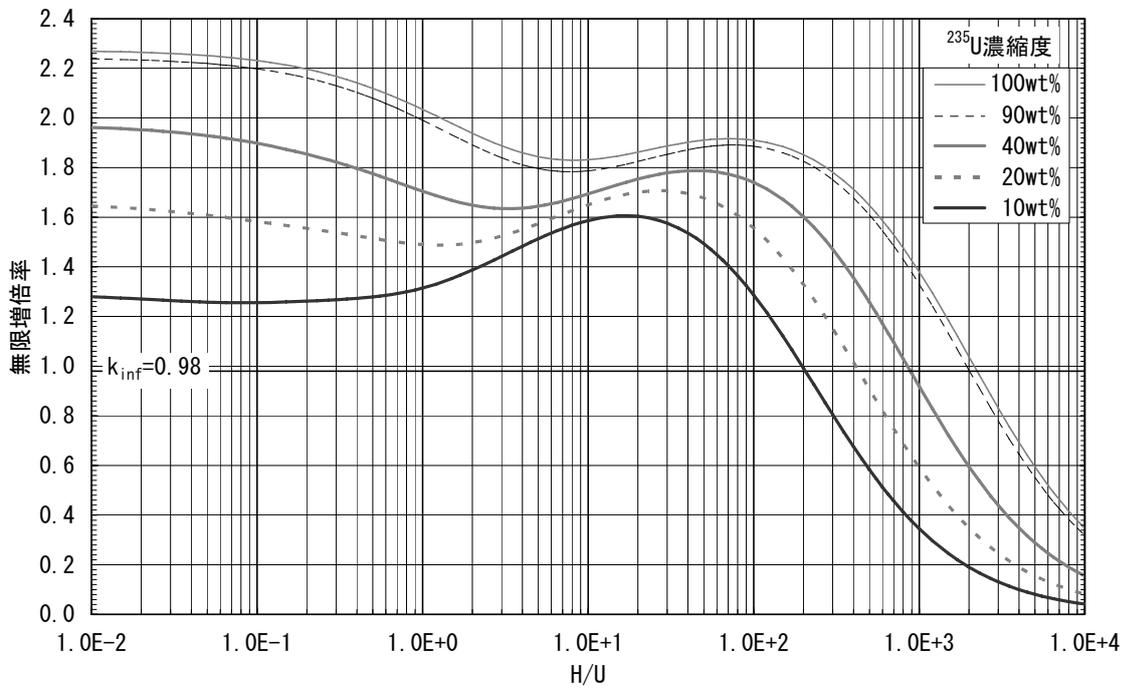


図3.1.1(b) 均質U-H₂O系の無限増倍率

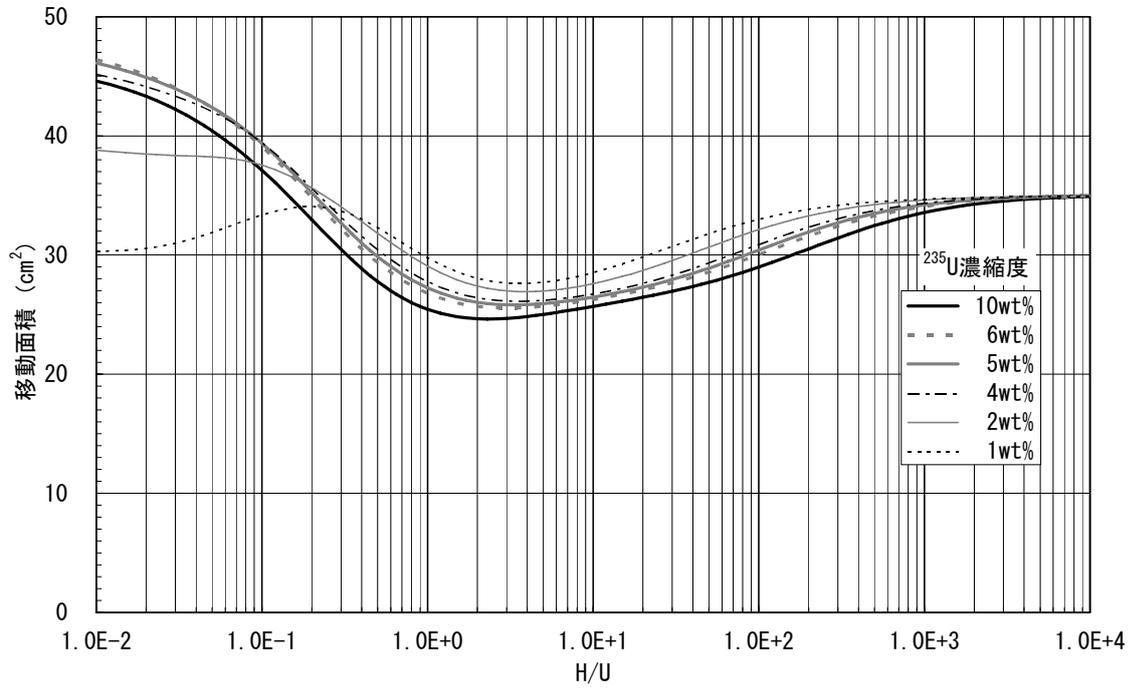


図3. 1. 2 (a) 均質U-H₂O系の移動面積

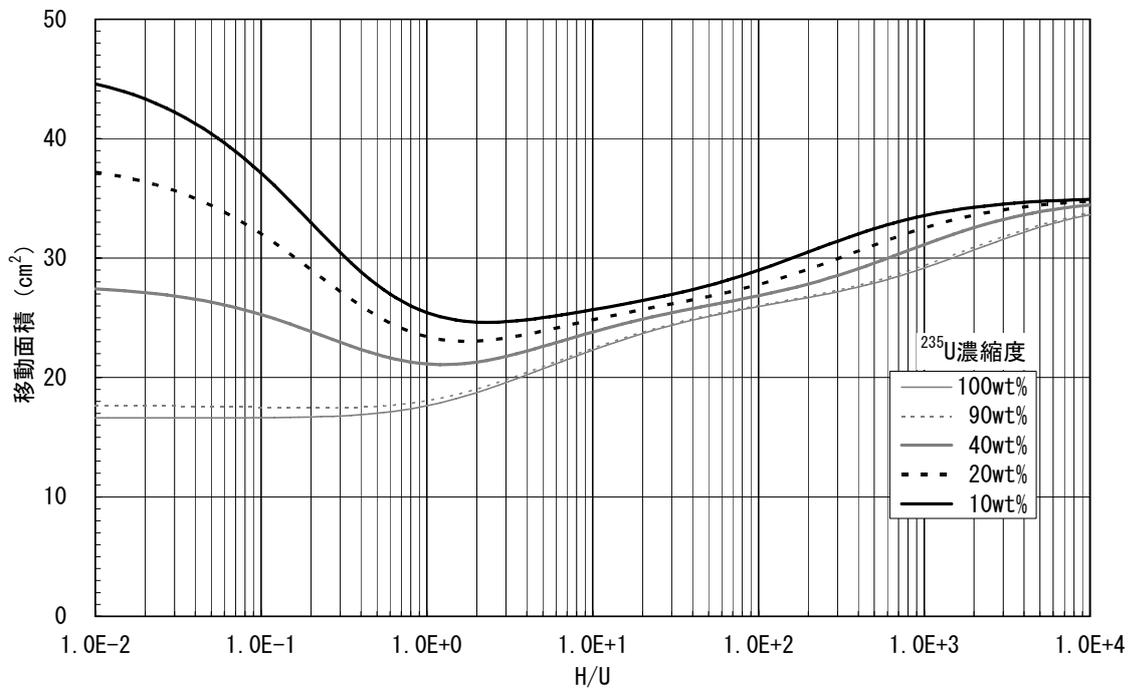


図3. 1. 2 (b) 均質U-H₂O系の移動面積

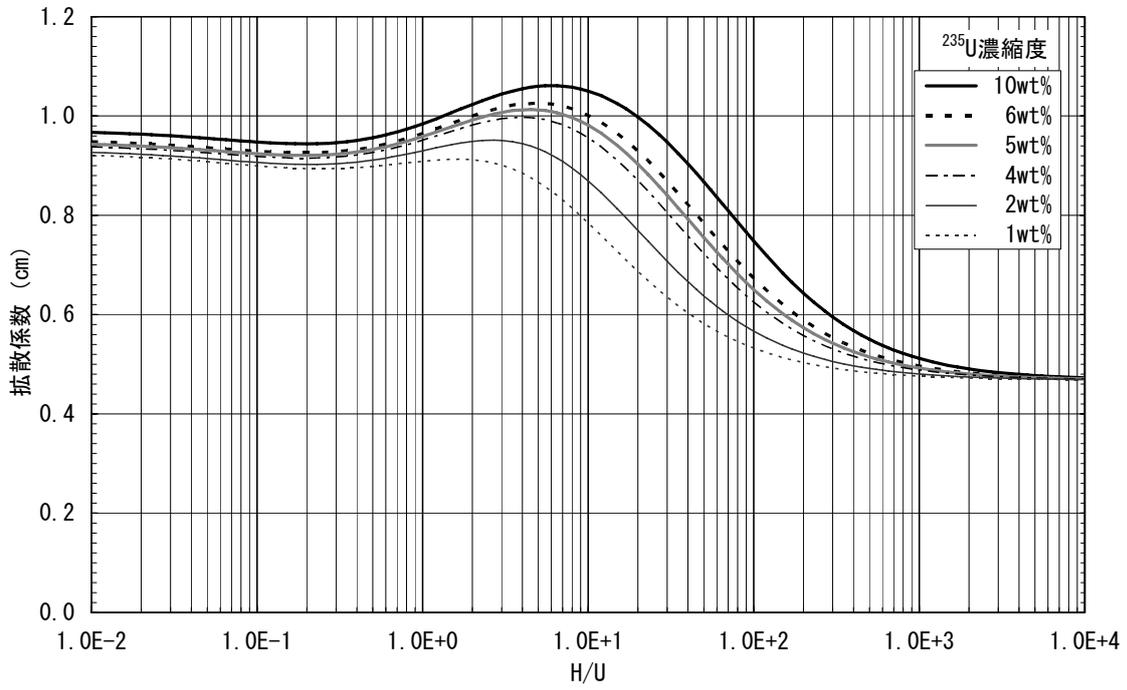


図3. 1. 3 (a) 均質U-H₂O系の拡散係数

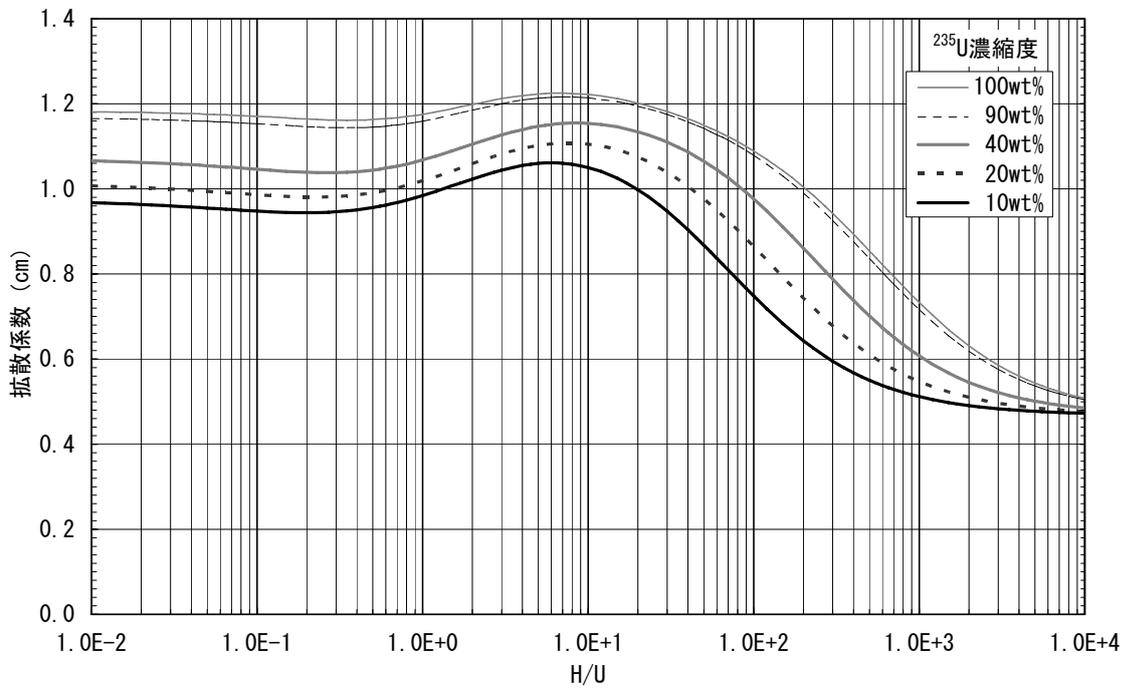


図3. 1. 3 (b) 均質U-H₂O系の拡散係数

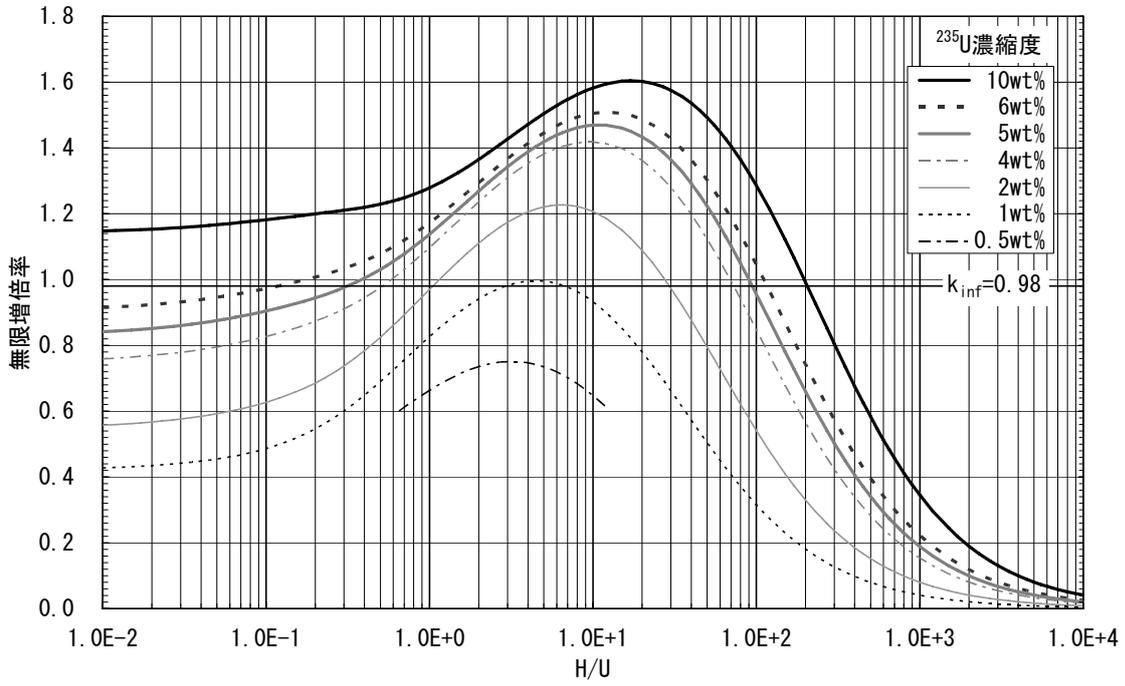


図3.2.1(a) 均質 UO_2-H_2O 系の無限増倍率

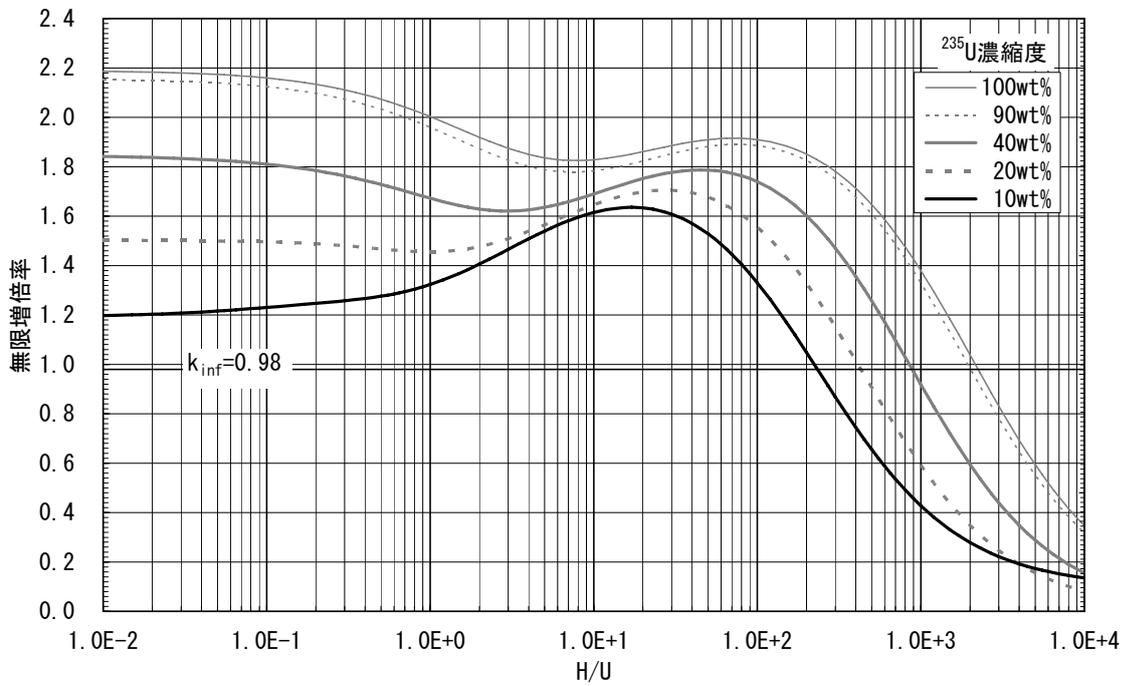


図3.2.1(b) 均質 UO_2-H_2O 系の無限増倍率

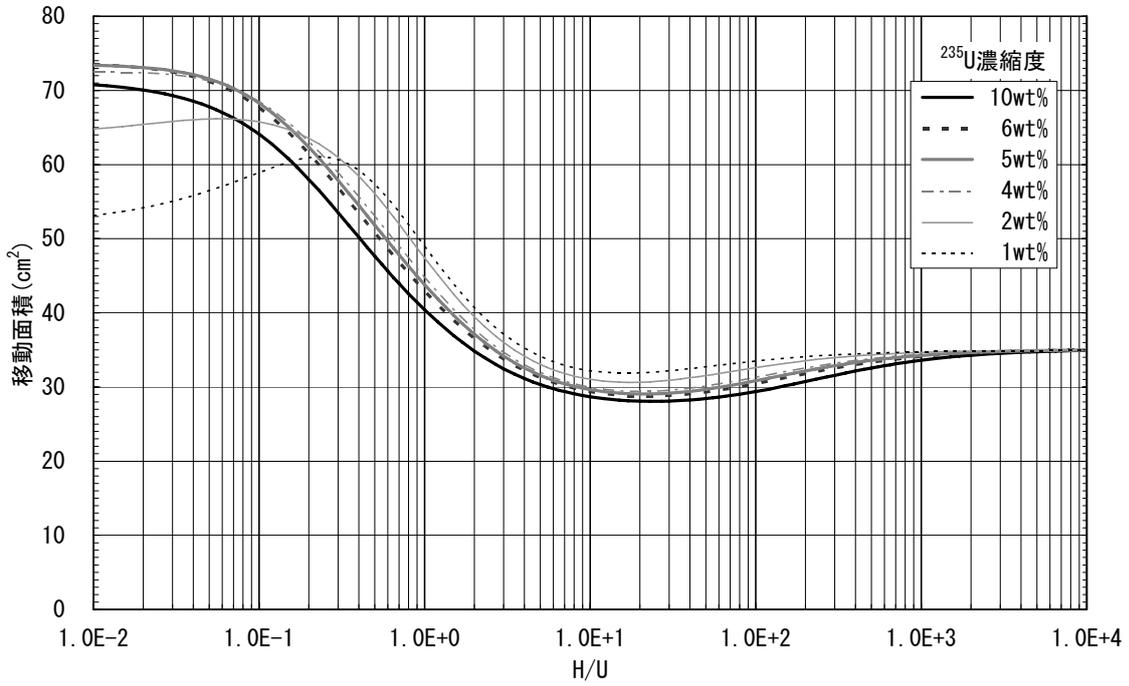


図3. 2. 2(a) 均質UO₂-H₂O系の移動面積

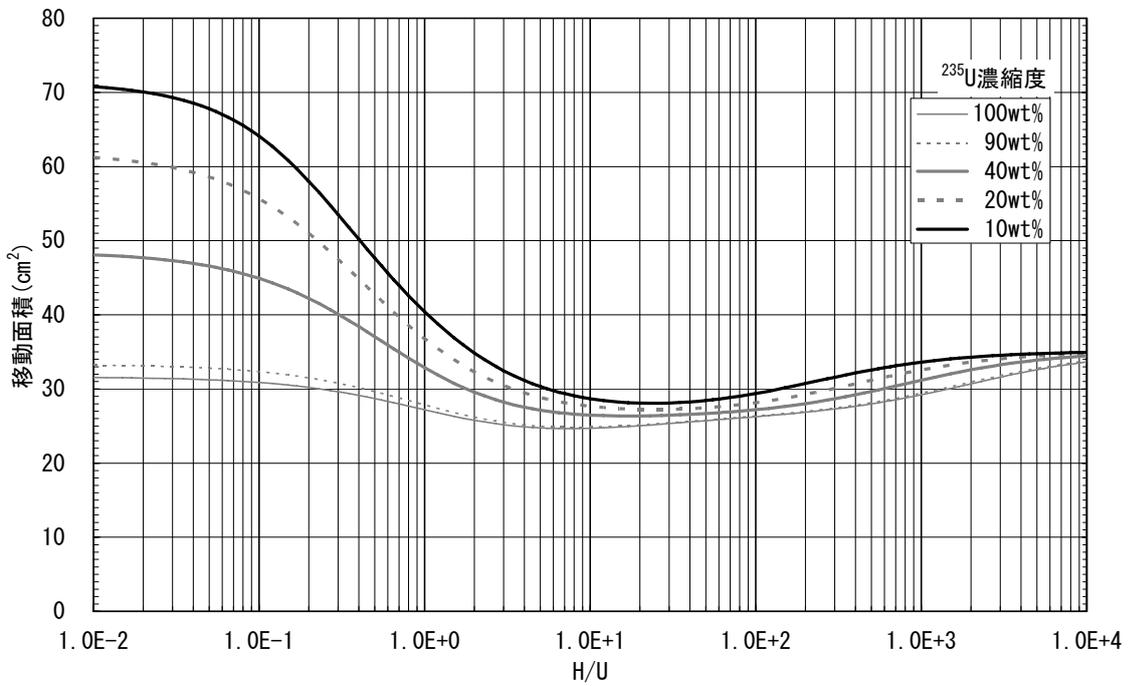


図3. 2. 2(b) 均質UO₂-H₂O系の移動面積

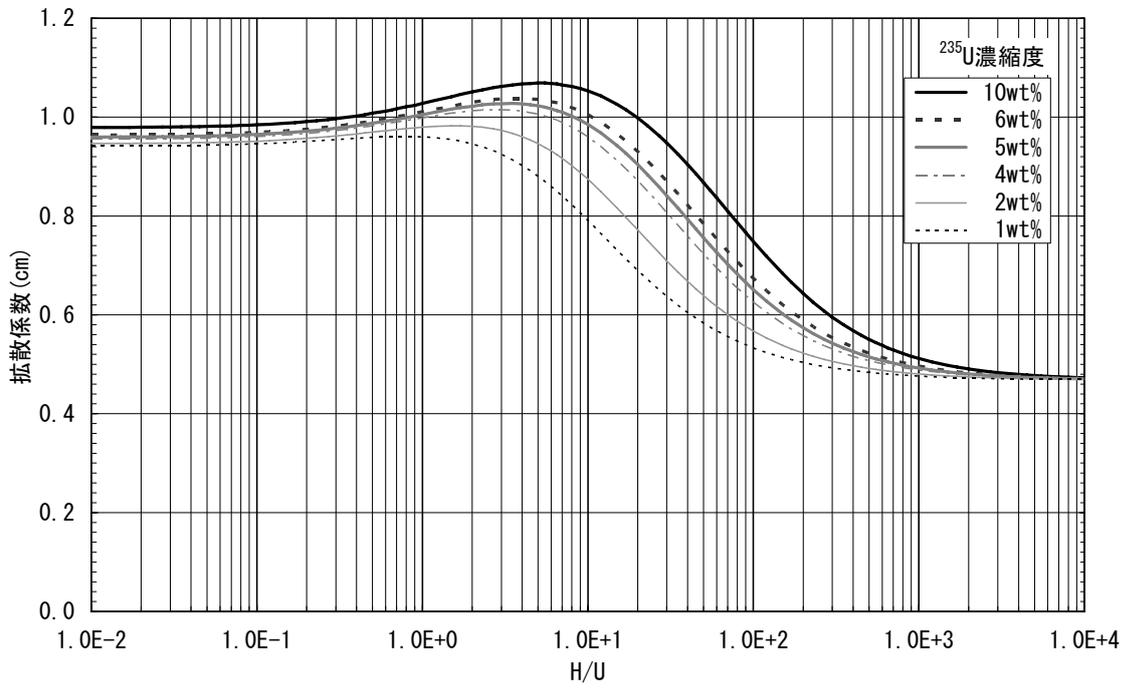


図3. 2. 3(a) 均質 UO_2-H_2O 系の拡散係数

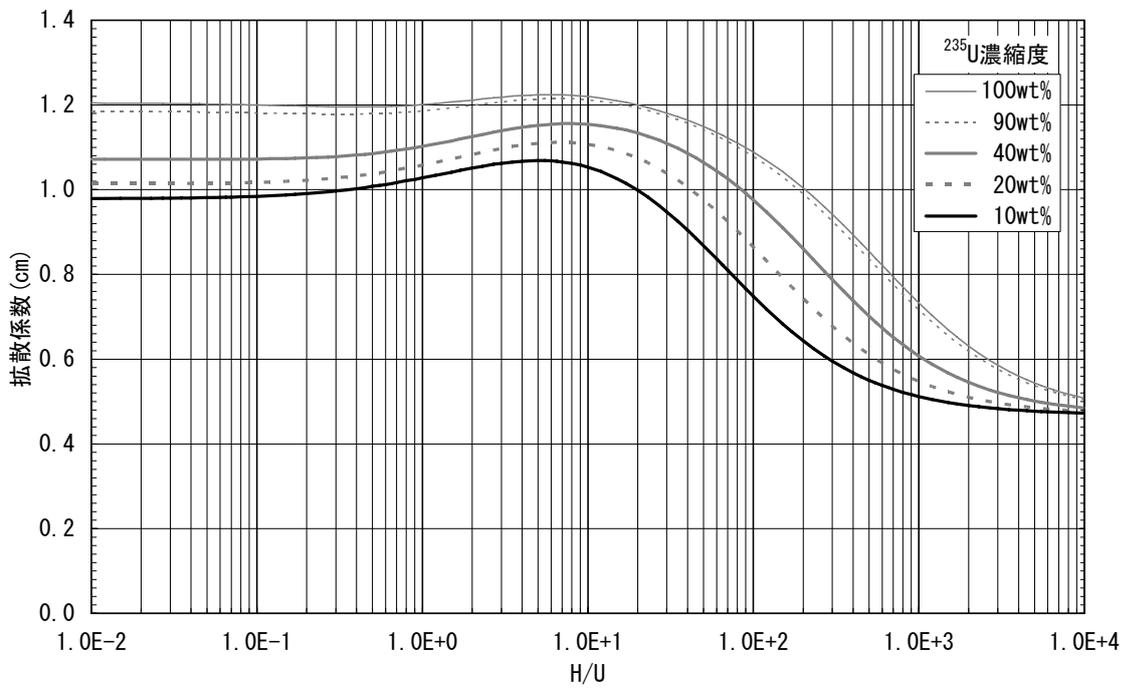


図3. 2. 3(b) 均質 UO_2-H_2O 系の拡散係数

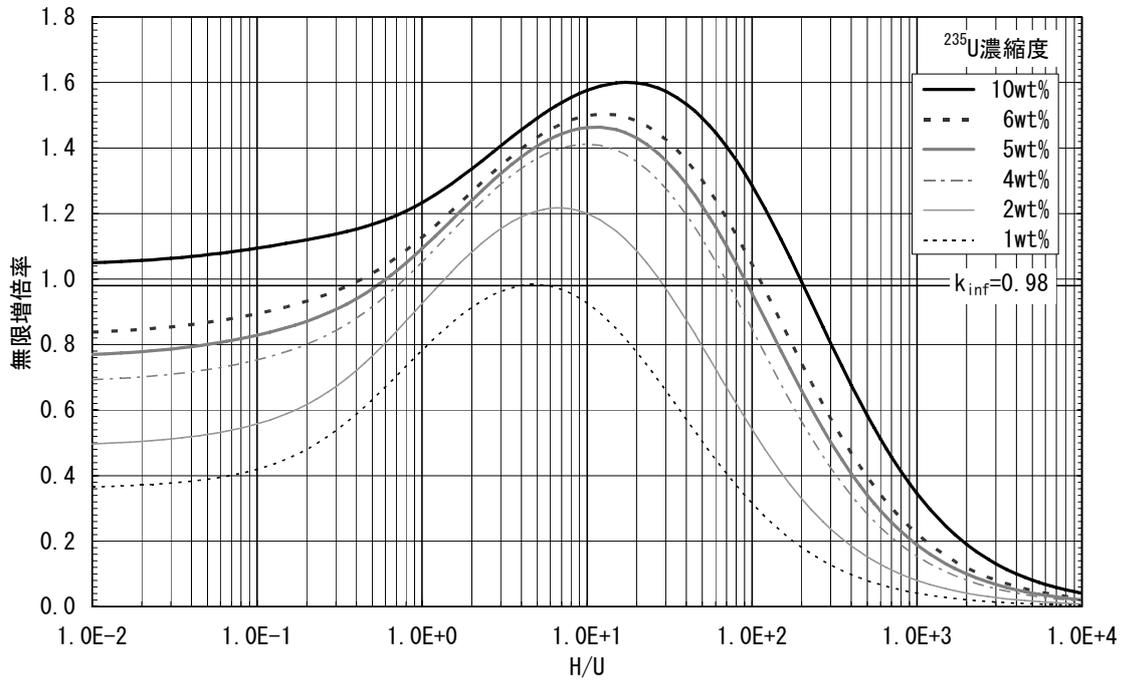


図3.3.1(a) UO_2F_2 水溶液系の無限増倍率

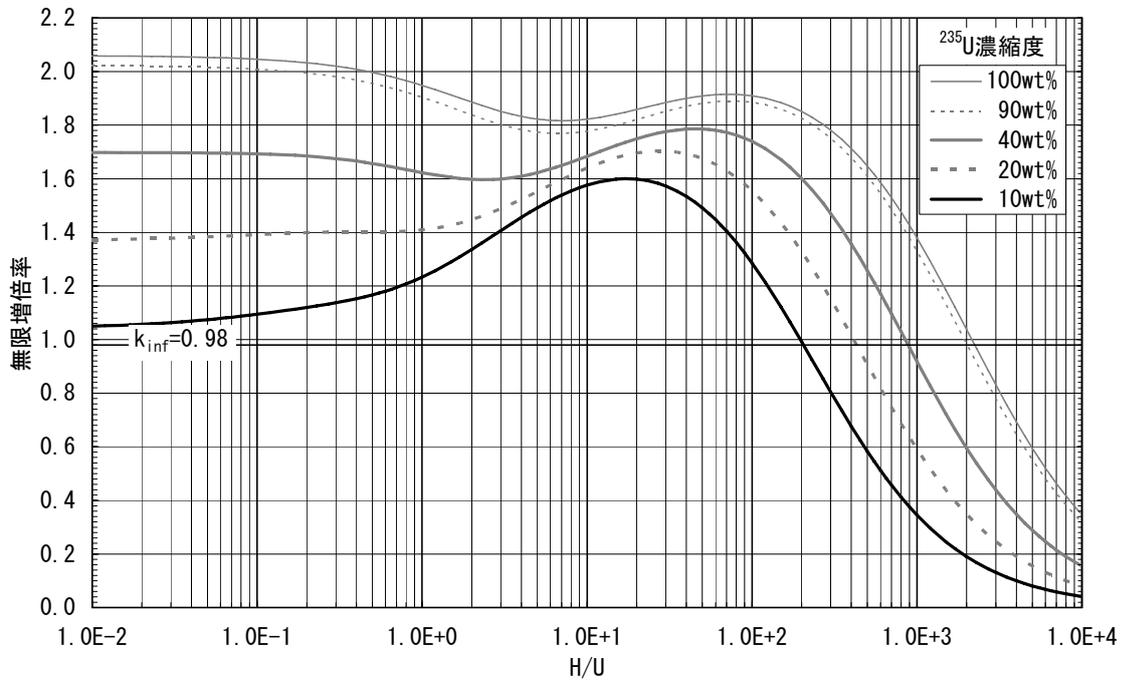


図3.3.1(b) UO_2F_2 水溶液系の無限増倍率

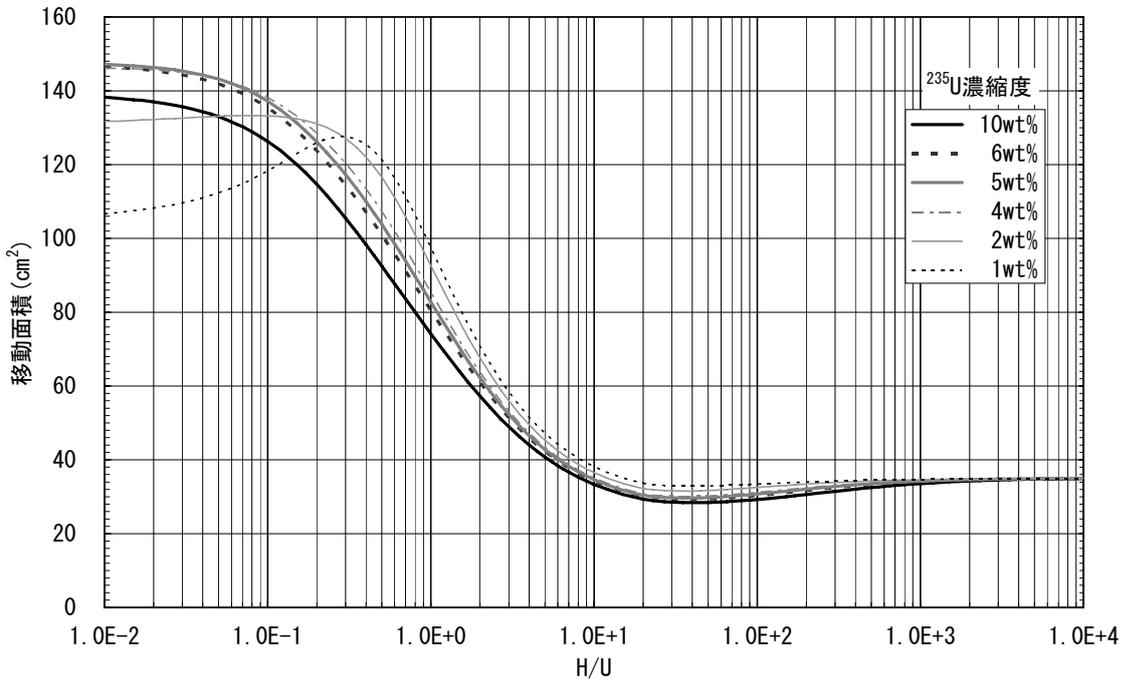


図3. 3. 2 (a) UO₂F₂水溶液系の移動面積

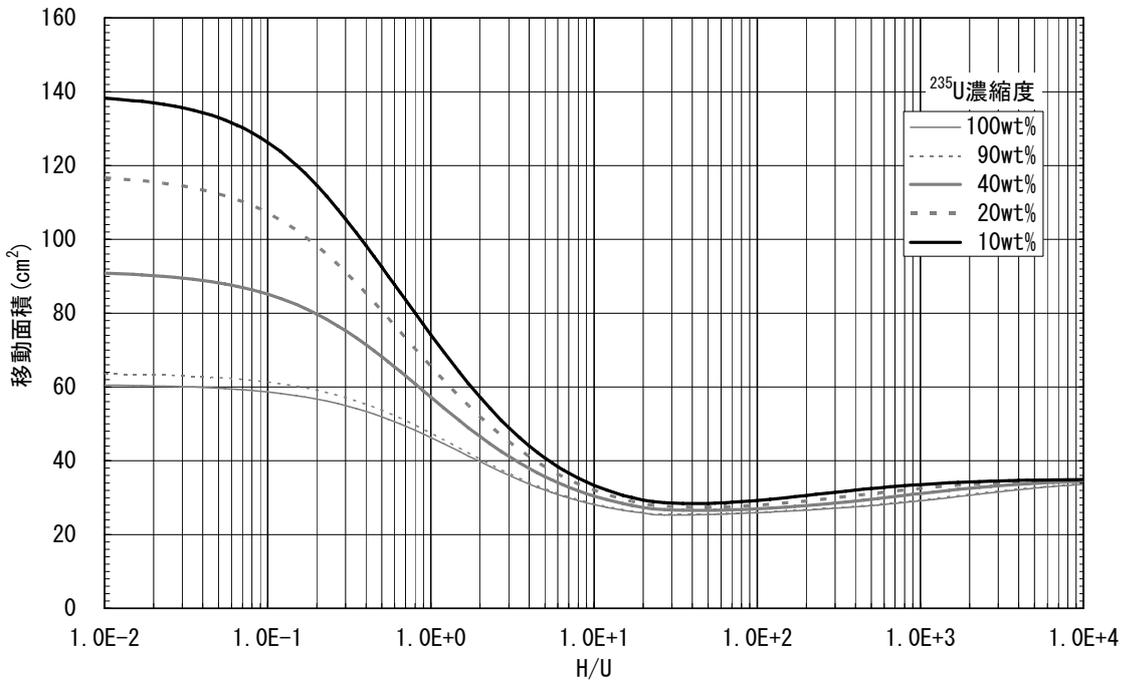


図3. 3. 2 (b) UO₂F₂水溶液系の移動面積

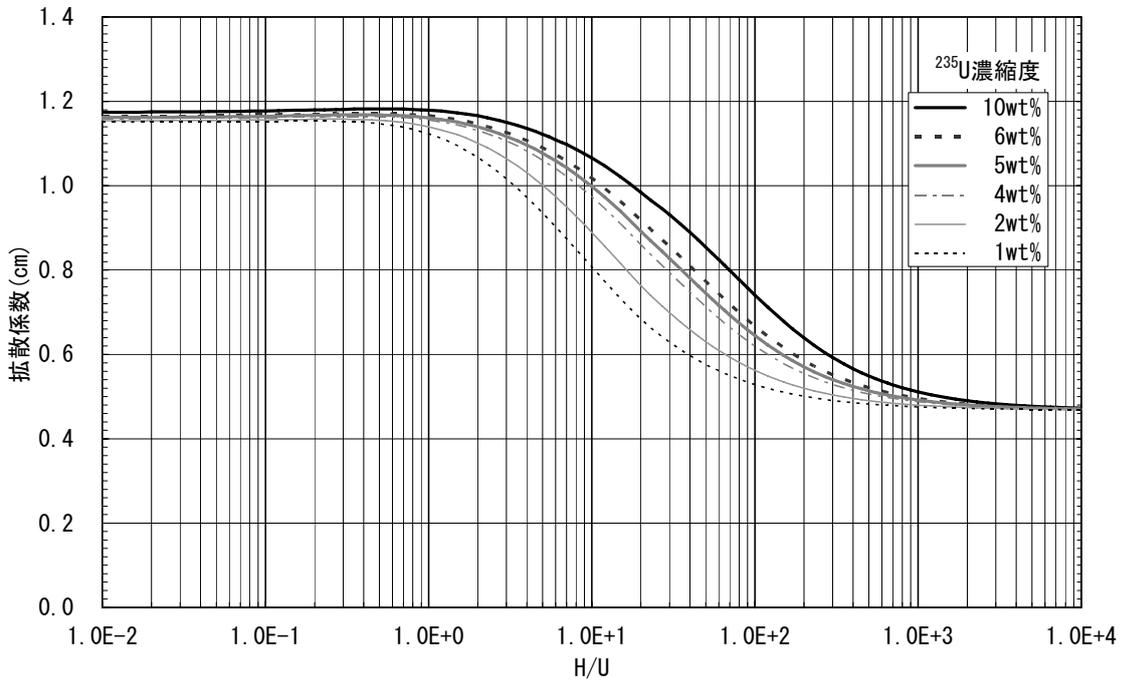


図3.3.3(a) UO_2F_2 水溶液系の拡散係数

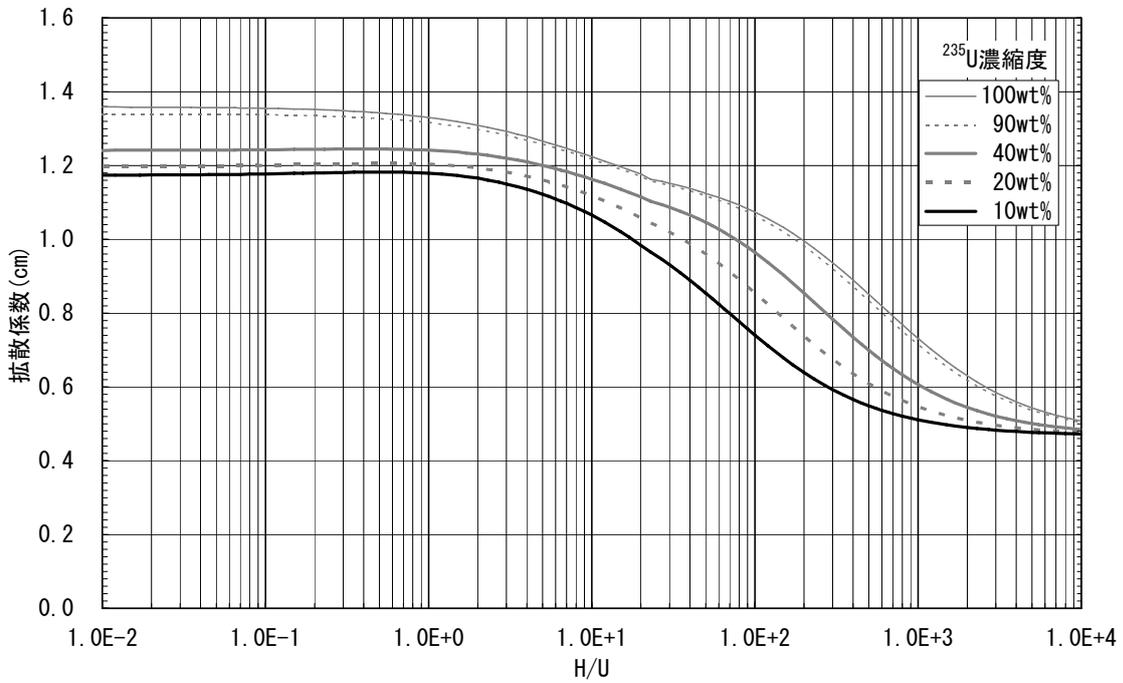


図3.3.3(b) UO_2F_2 水溶液系の拡散係数

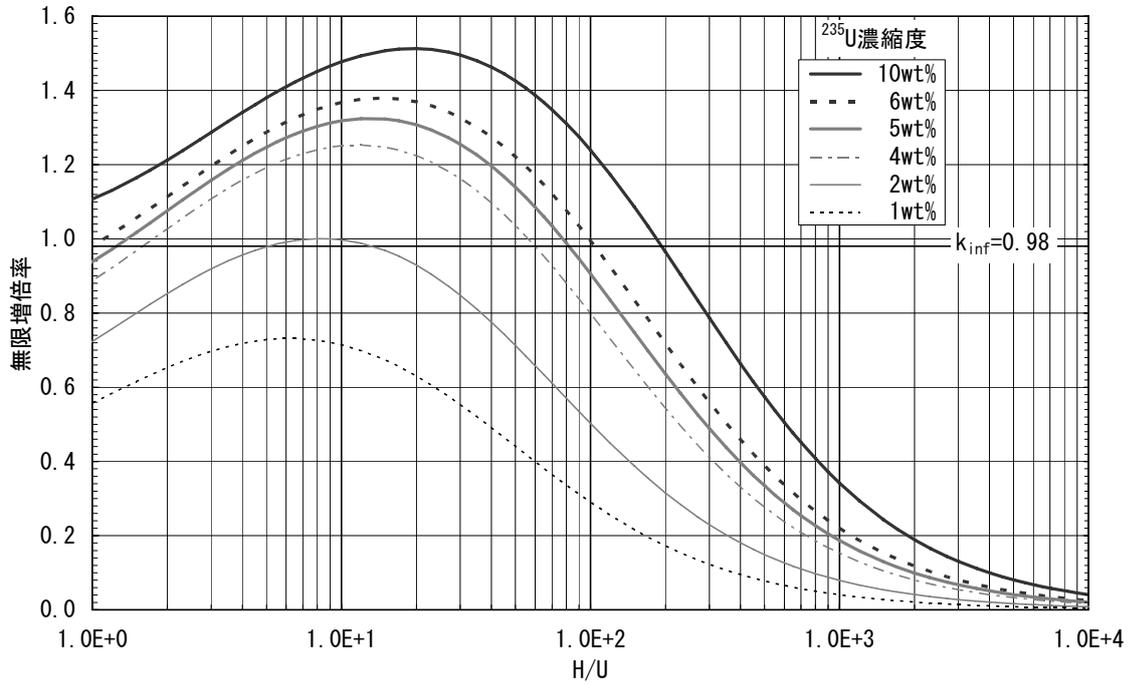


図3. 4. 1(a) $UO_2(NO_3)_2$ 水溶液系の無限増倍率

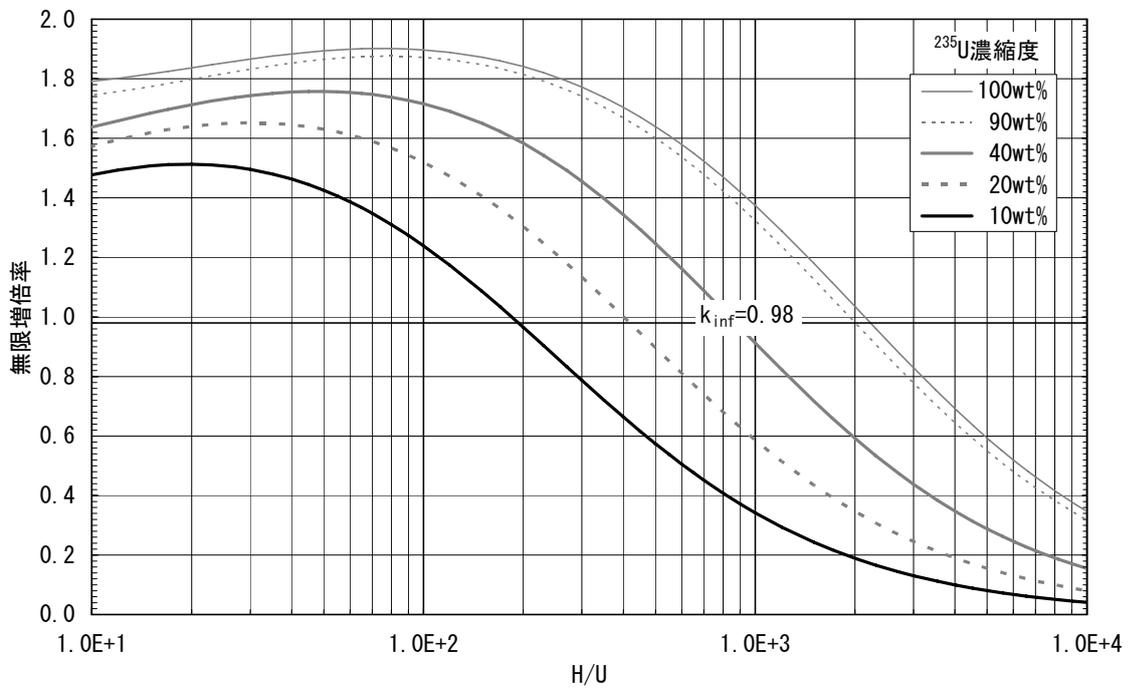


図3. 4. 1(b) $UO_2(NO_3)_2$ 水溶液系の無限増倍率

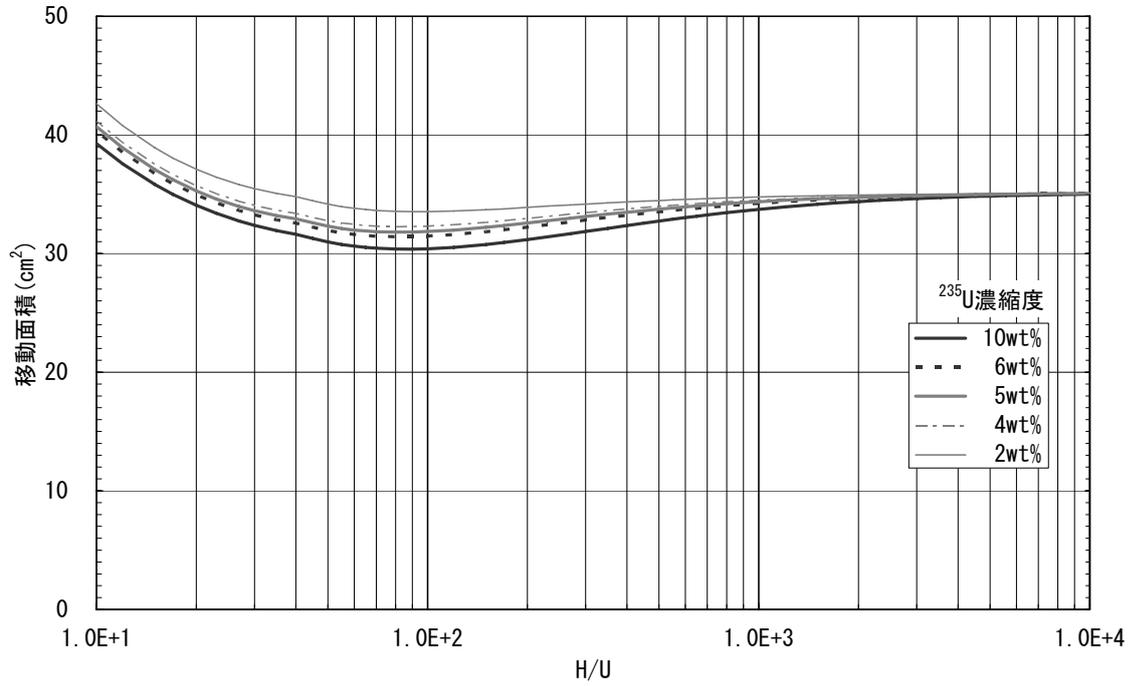


図3. 4. 2 (a) $UO_2(NO_3)_2$ 水溶液系の移動面積

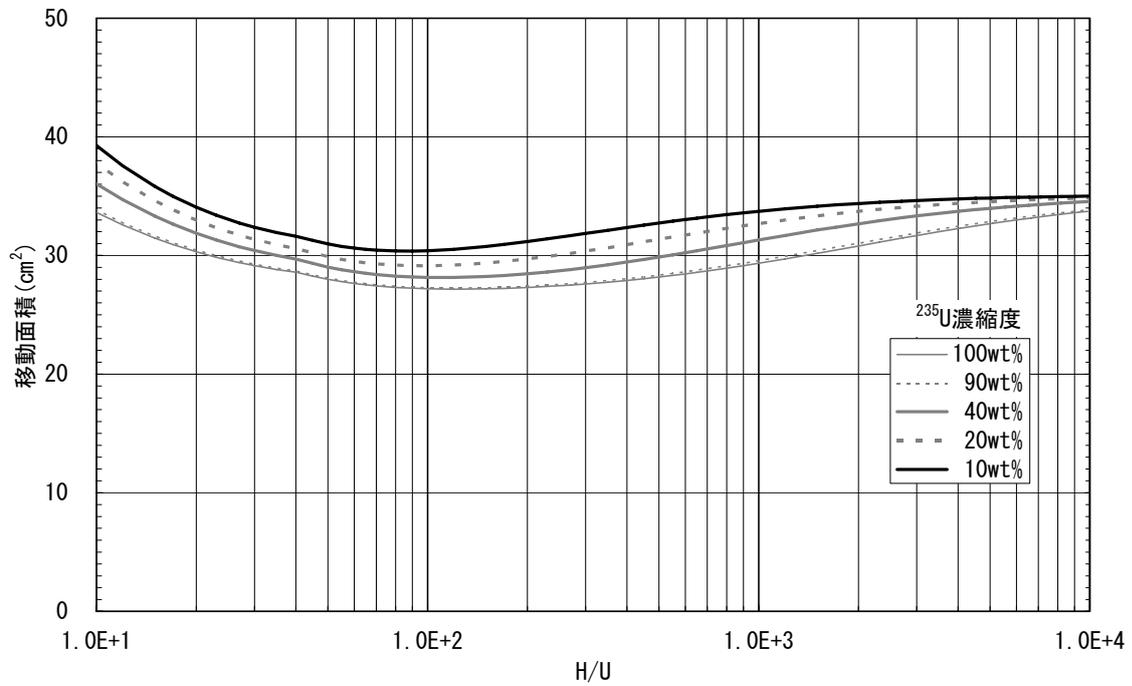


図3. 4. 2 (b) $UO_2(NO_3)_2$ 水溶液系の移動面積

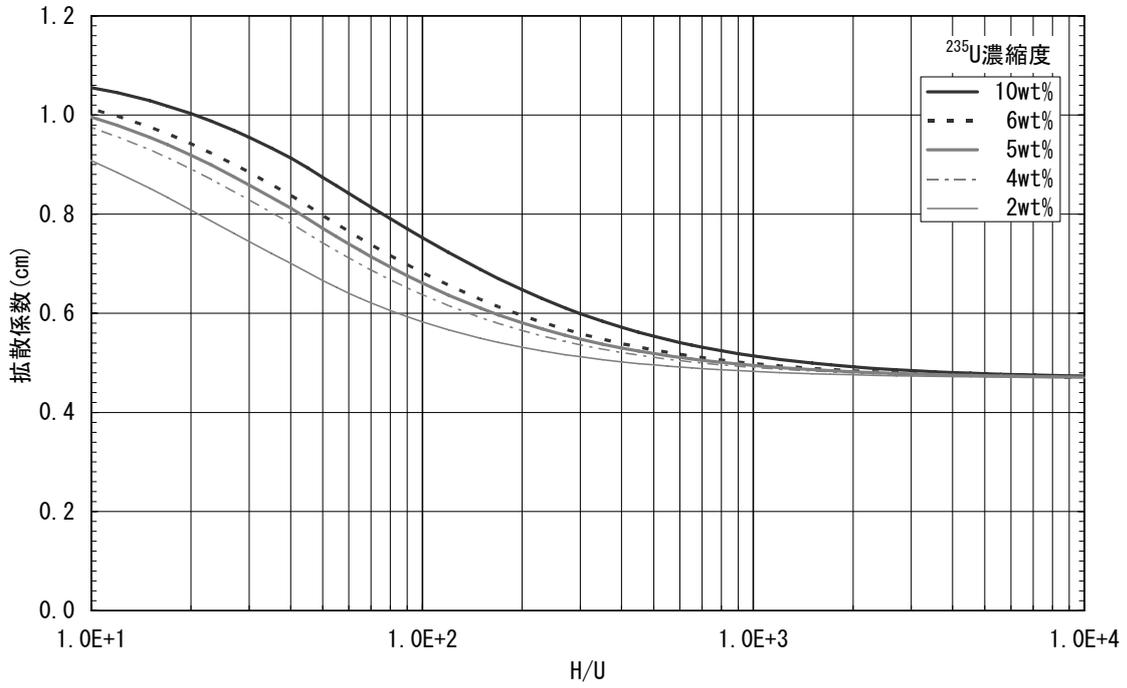


図3.4.3(a) $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 水溶液系の拡散係数

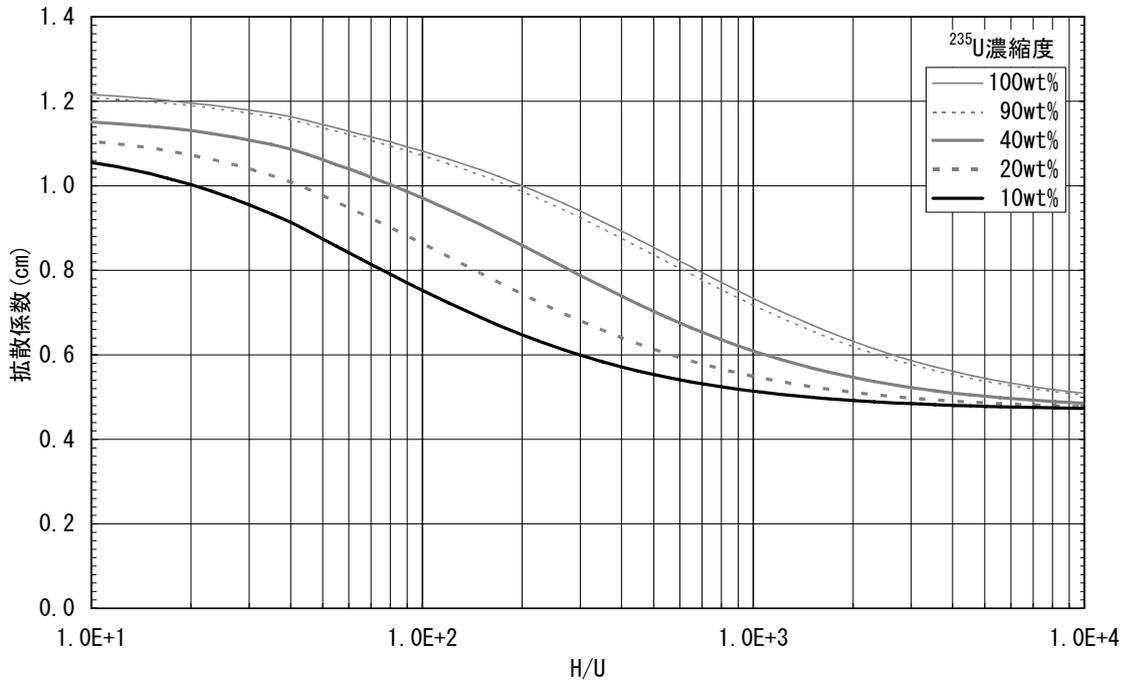


図3.4.3(b) $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 水溶液系の拡散係数

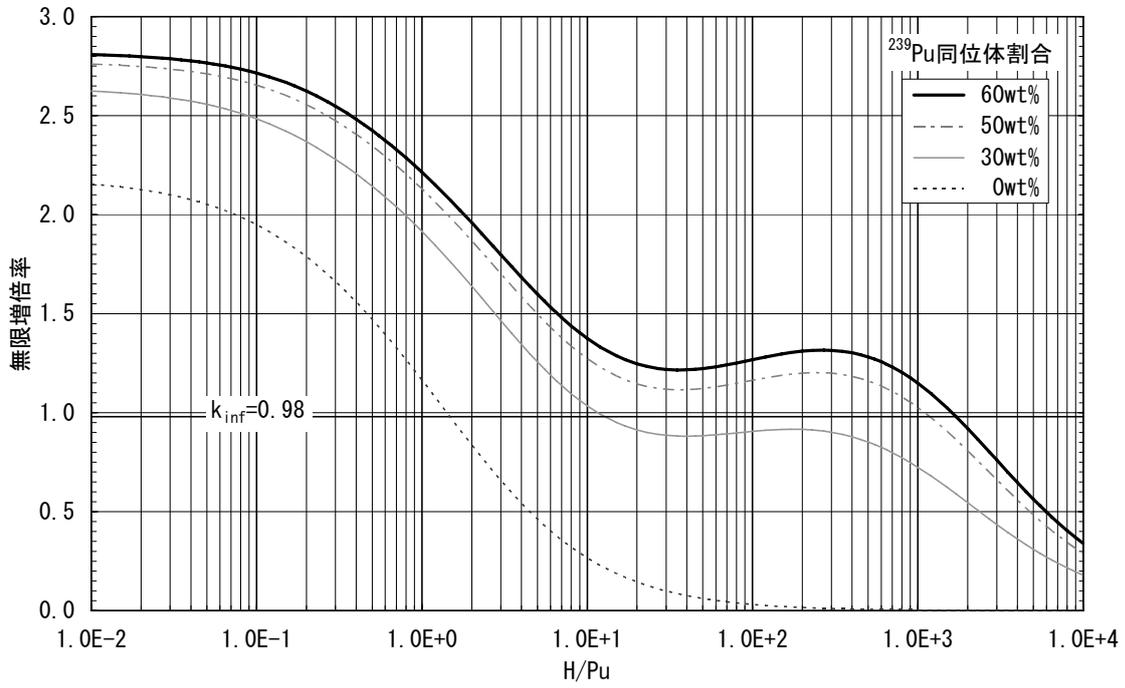


図3.5.1(a) 均質Pu-H₂O系の無限増倍率

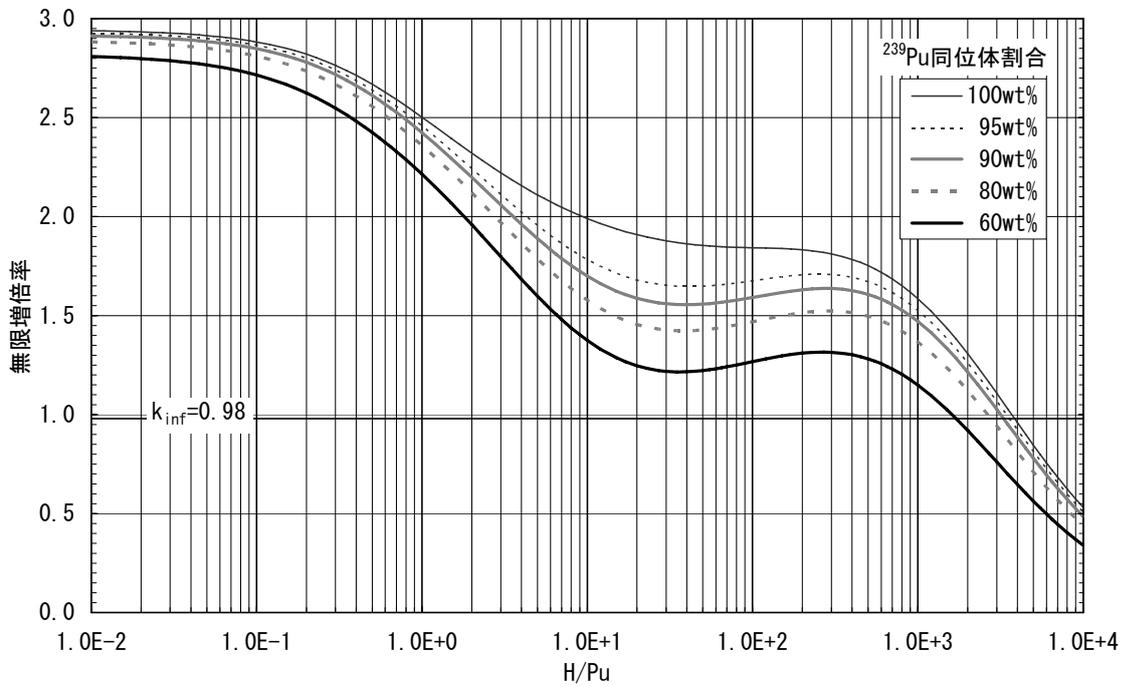


図3.5.1(b) 均質Pu-H₂O系の無限増倍率

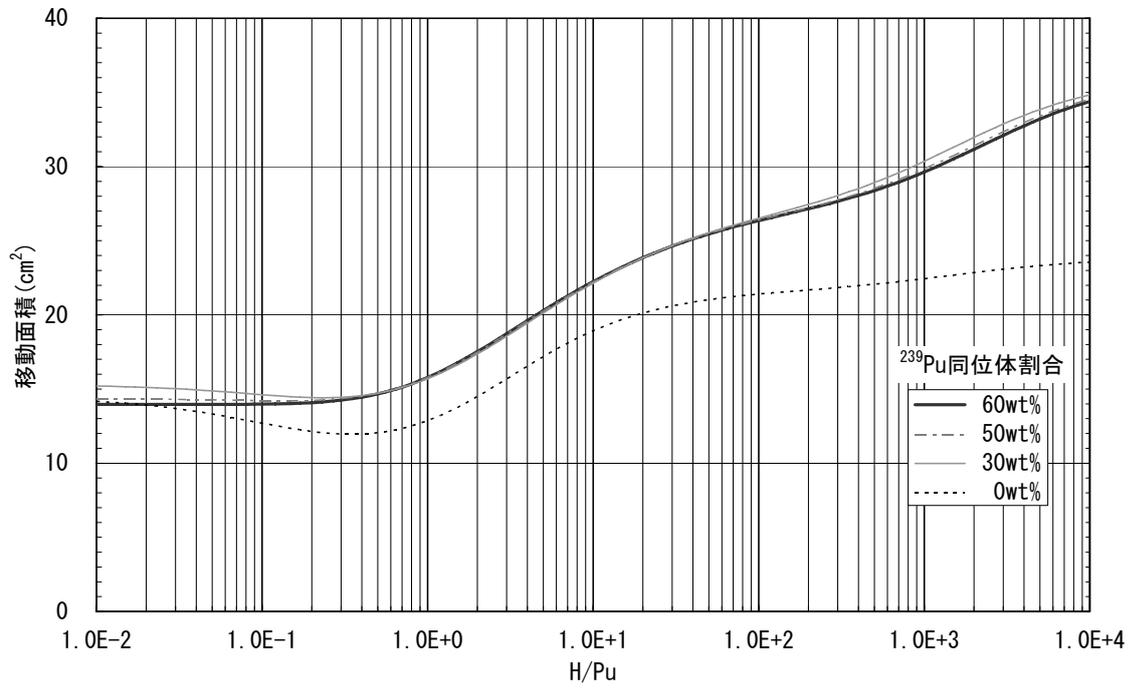


図3.5.2(a) 均質 $\text{Pu}-\text{H}_2\text{O}$ 系の移動面積

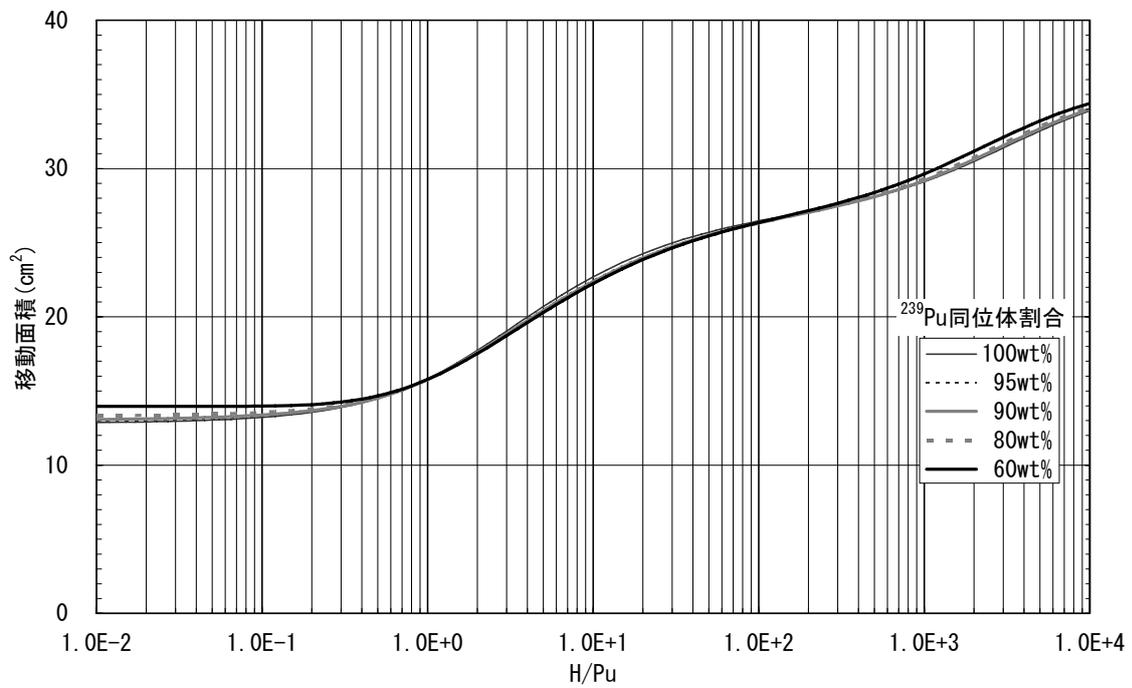


図3.5.2(b) 均質 $\text{Pu}-\text{H}_2\text{O}$ 系の移動面積

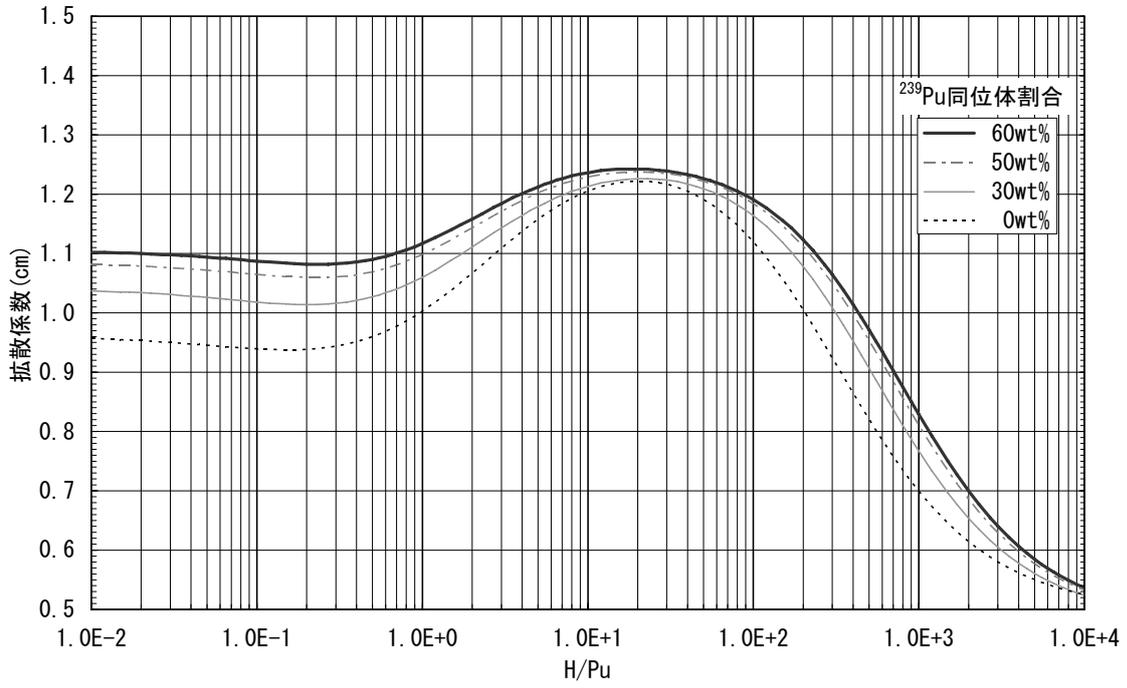


図3.5.3(a) 均質Pu-H₂O系の拡散係数

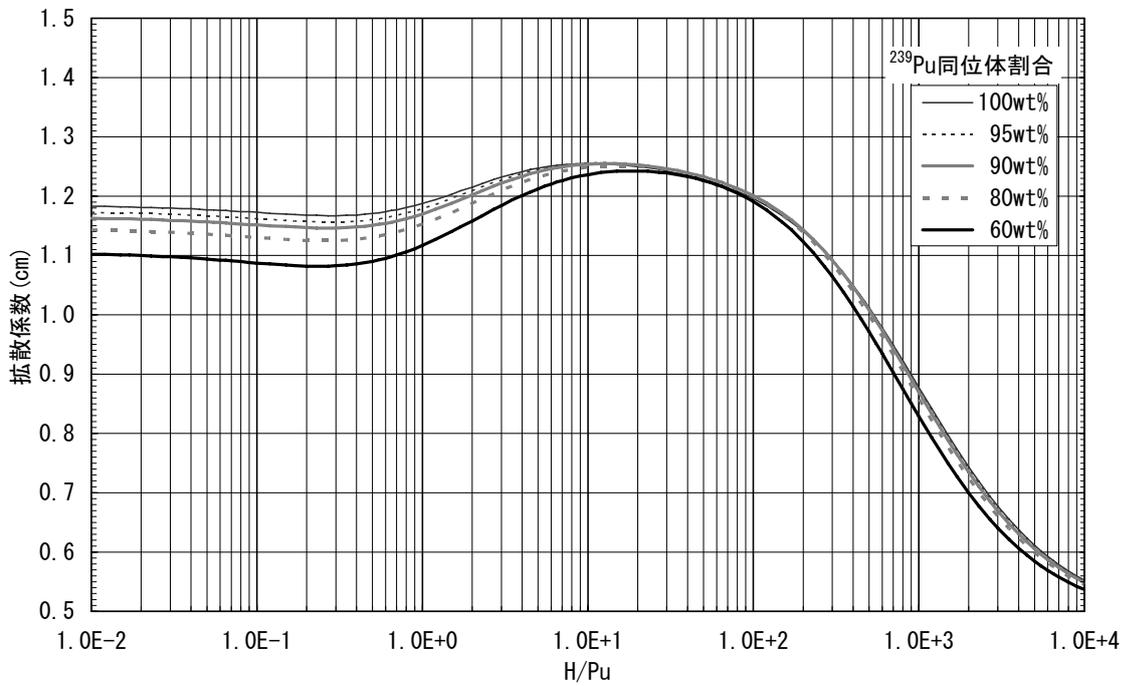


図3.5.3(b) 均質Pu-H₂O系の拡散係数

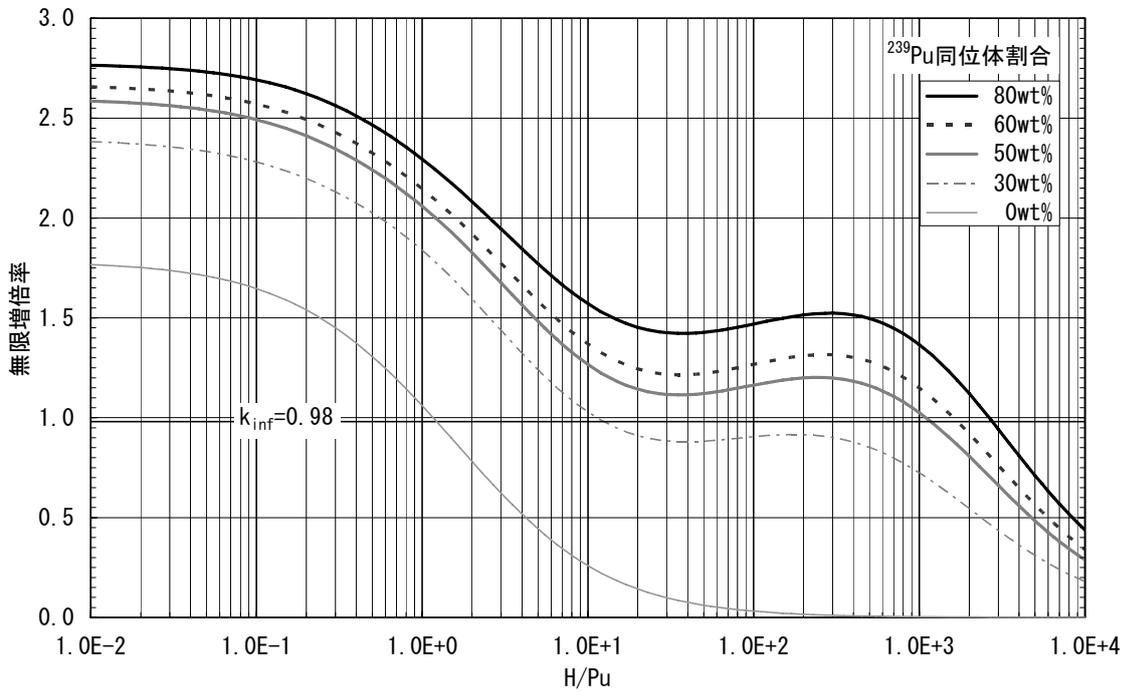


図3.6.1(a) 均質PuO₂-H₂O系の無限増倍率

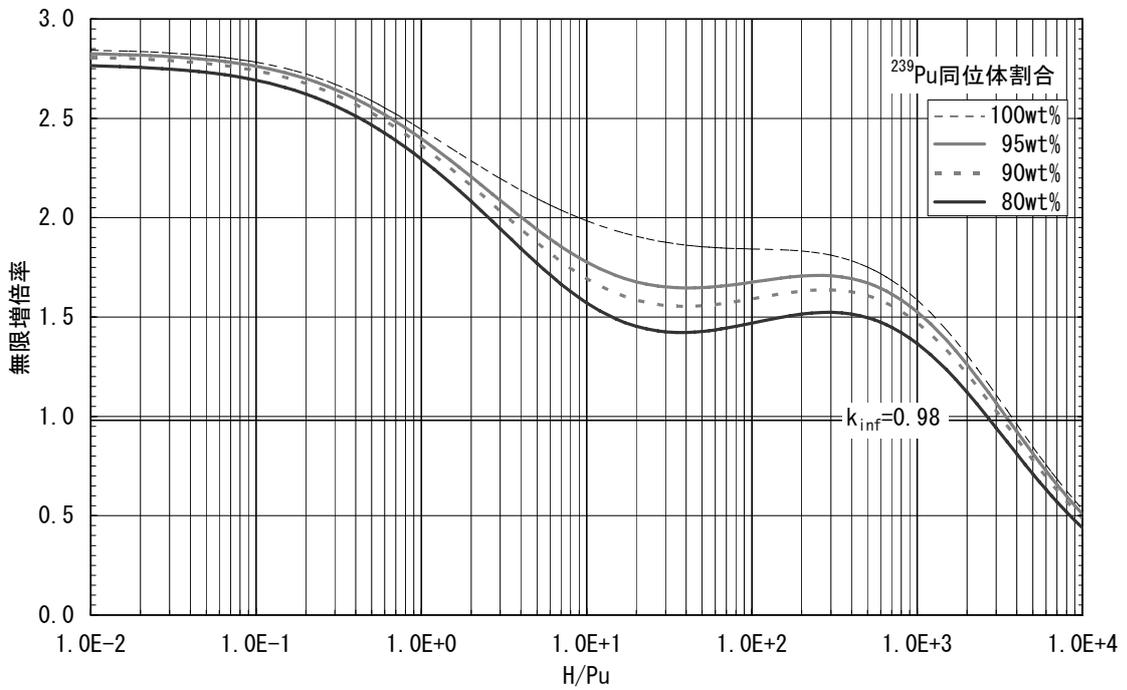


図3.6.1(b) 均質PuO₂-H₂O系の無限増倍率

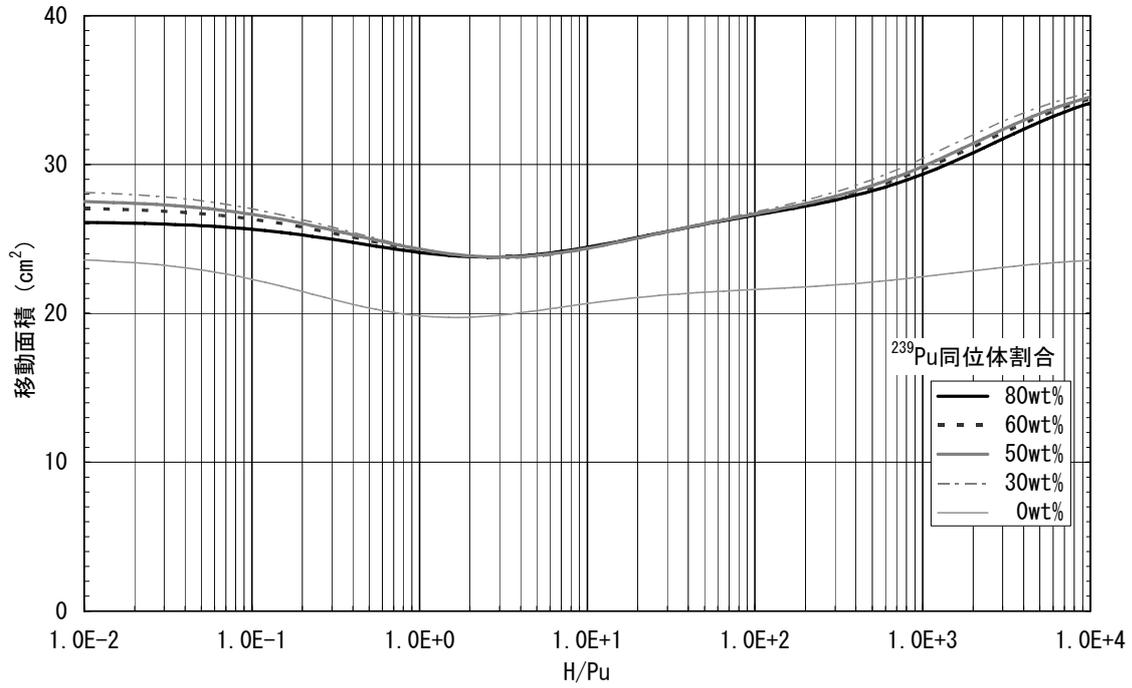


図3.6.2(a) 均質PuO₂-H₂O系の移動面積

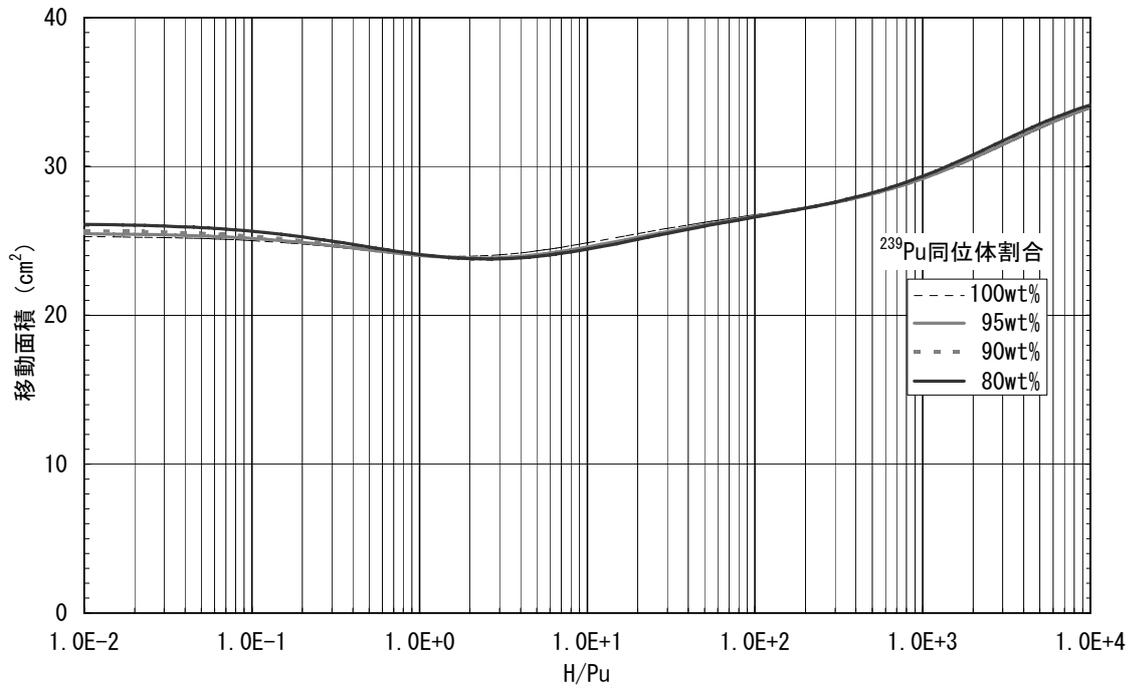


図3.6.2(b) 均質PuO₂-H₂O系の移動面積

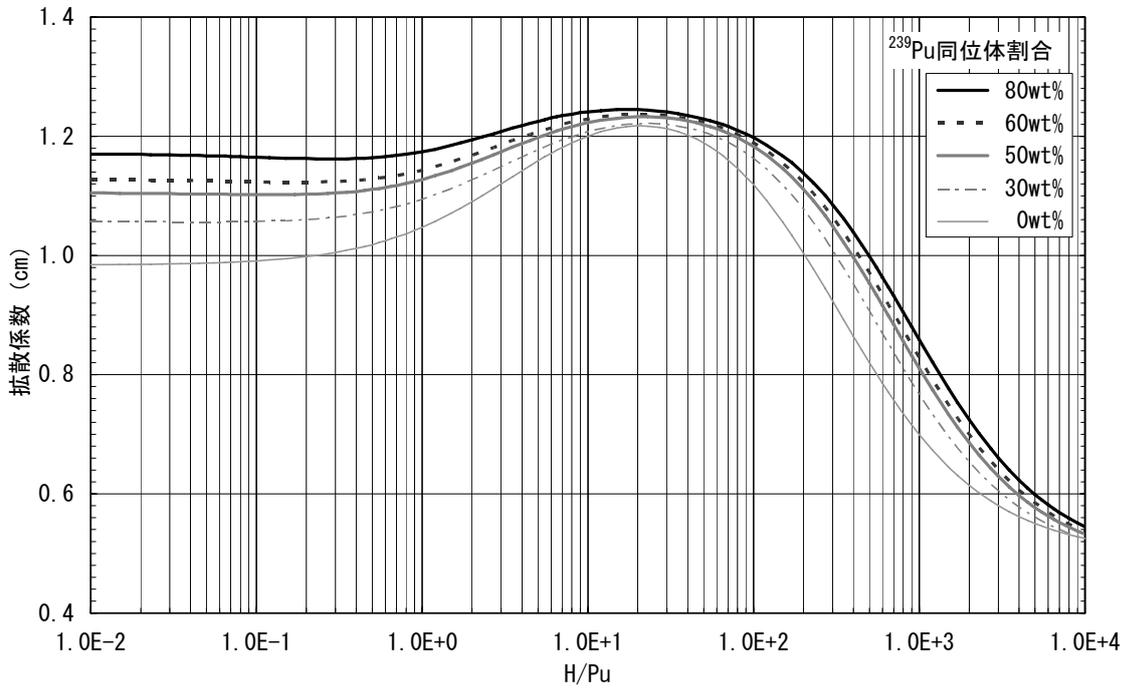


図3.6.3(a) 均質 $\text{PuO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 系の拡散係数

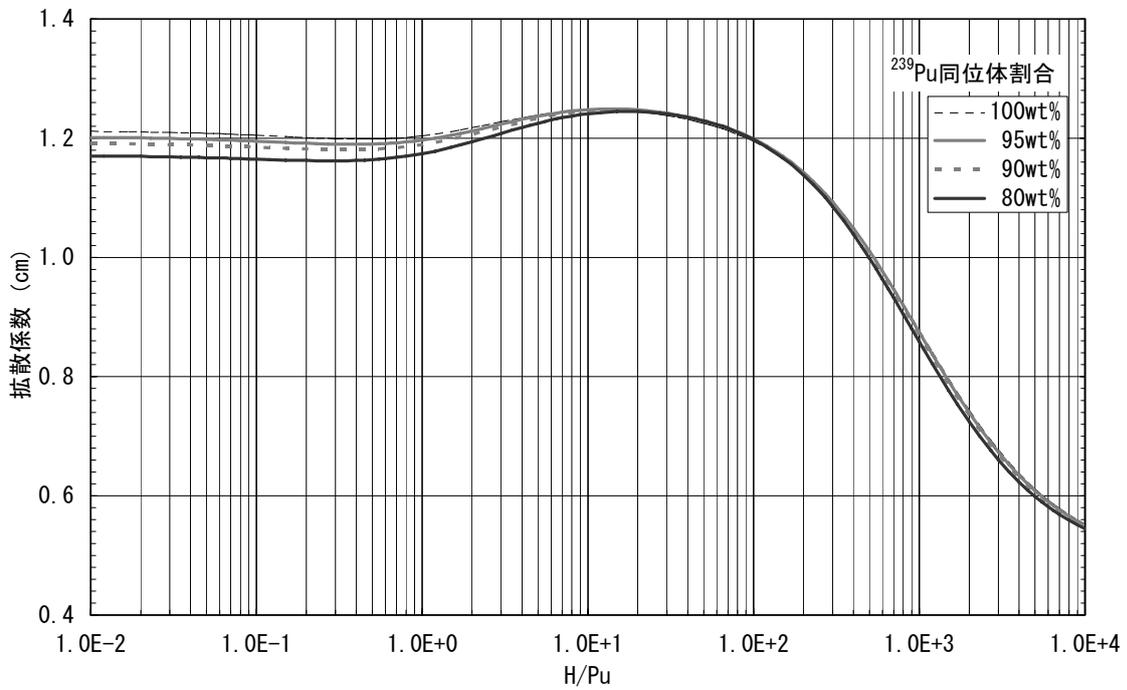


図3.6.3(b) 均質 $\text{PuO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 系の拡散係数

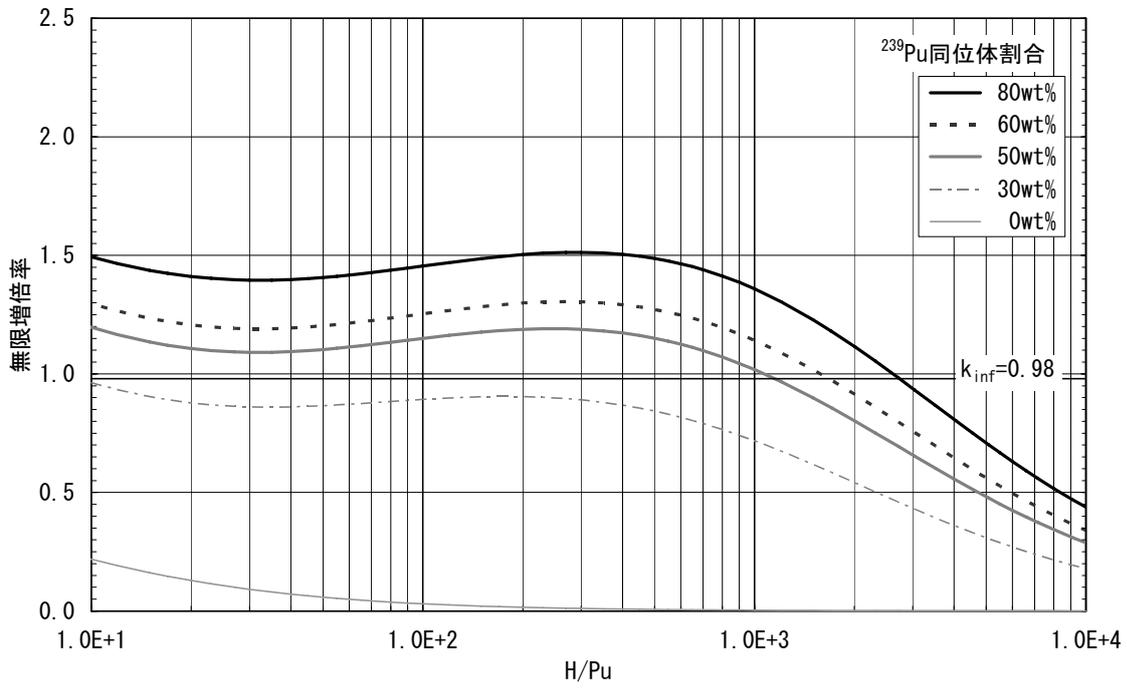


図3.7.1(a) Pu(NO₃)₄水溶液系の無限増倍率

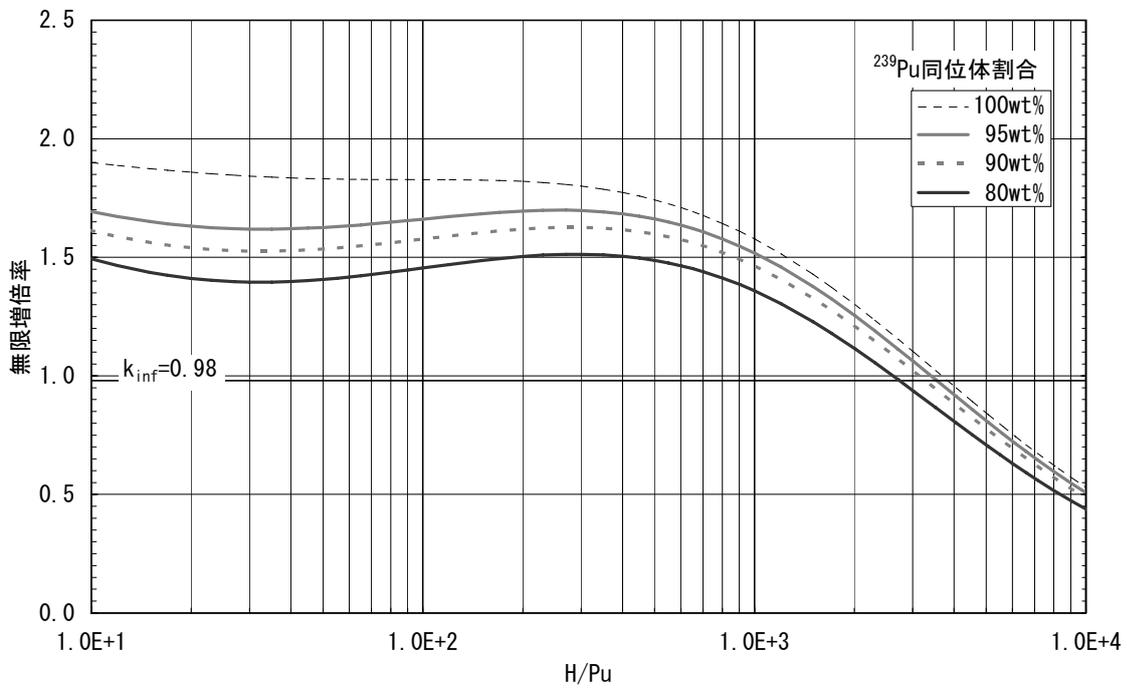


図3.7.1(b) Pu(NO₃)₄水溶液系の無限増倍率

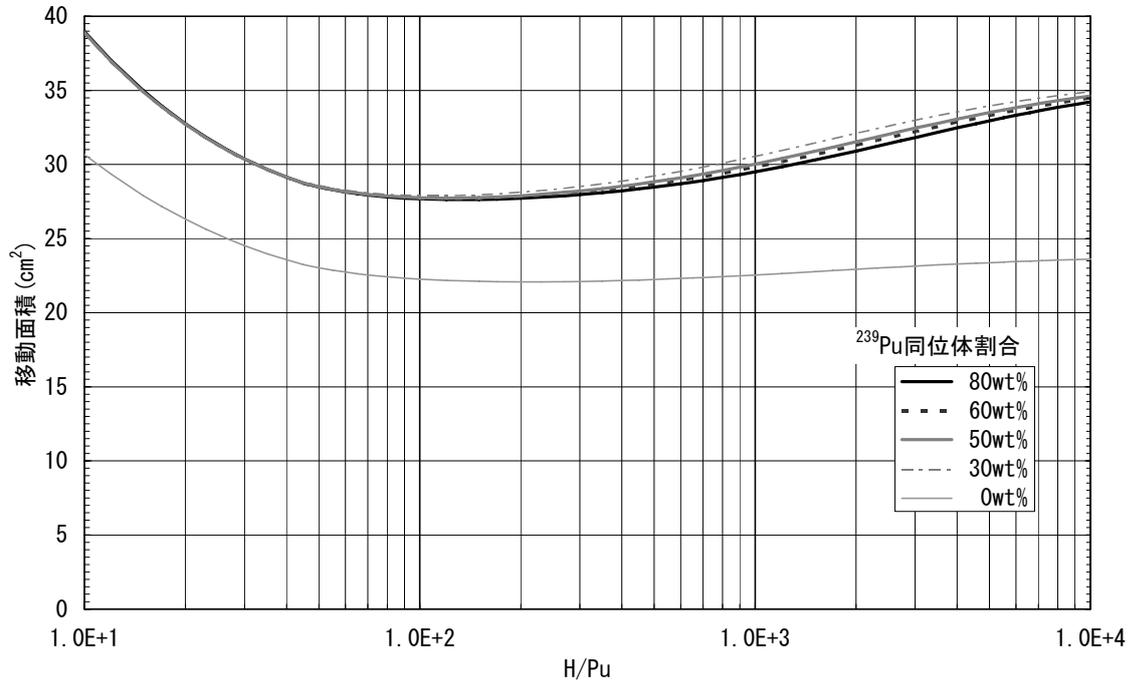


図3.7.2(a) Pu(NO₃)₄水溶液系の移動面積

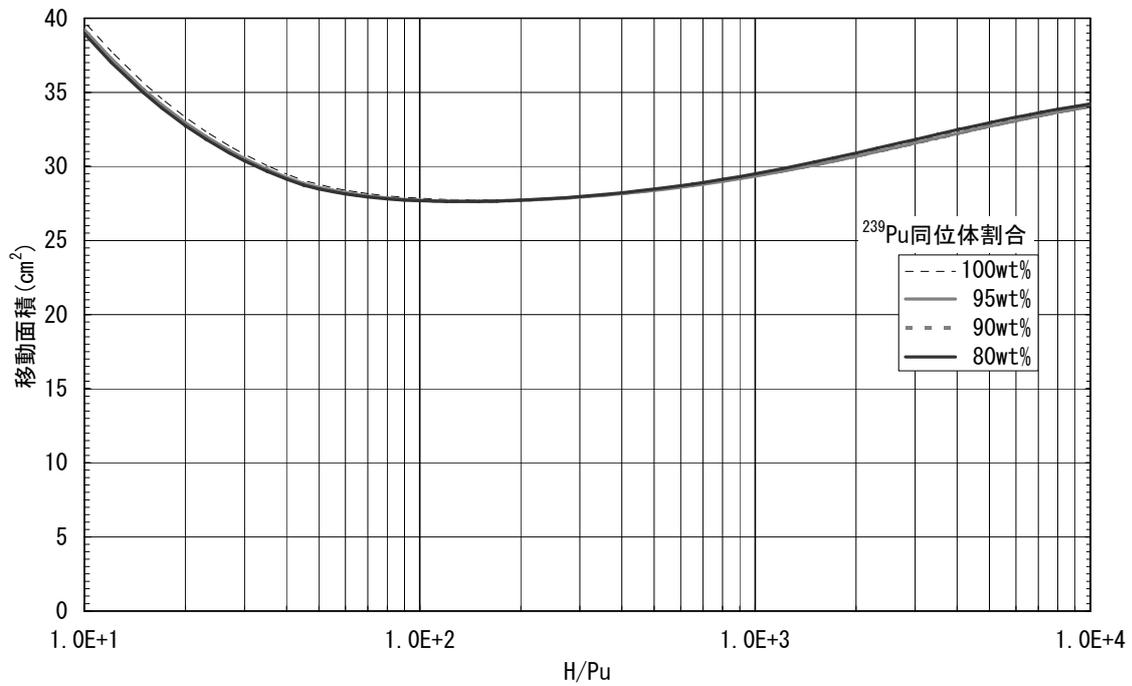


図3.7.2(b) Pu(NO₃)₄水溶液系の移動面積

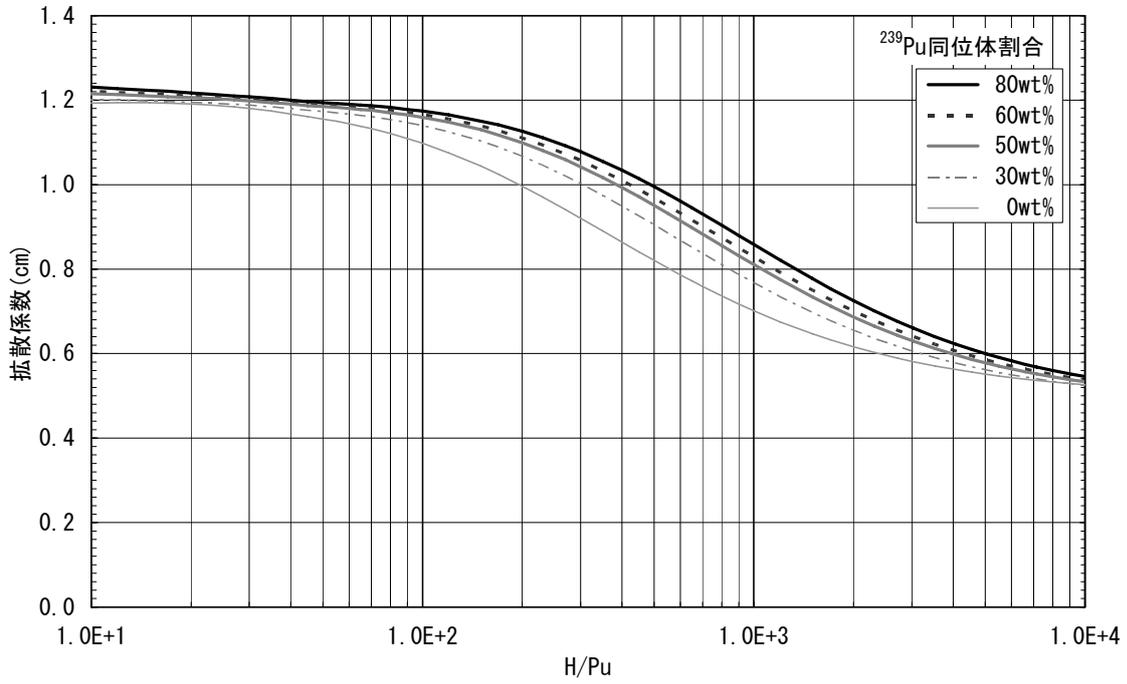


図3.7.3(a) $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ 水溶液系の拡散係数

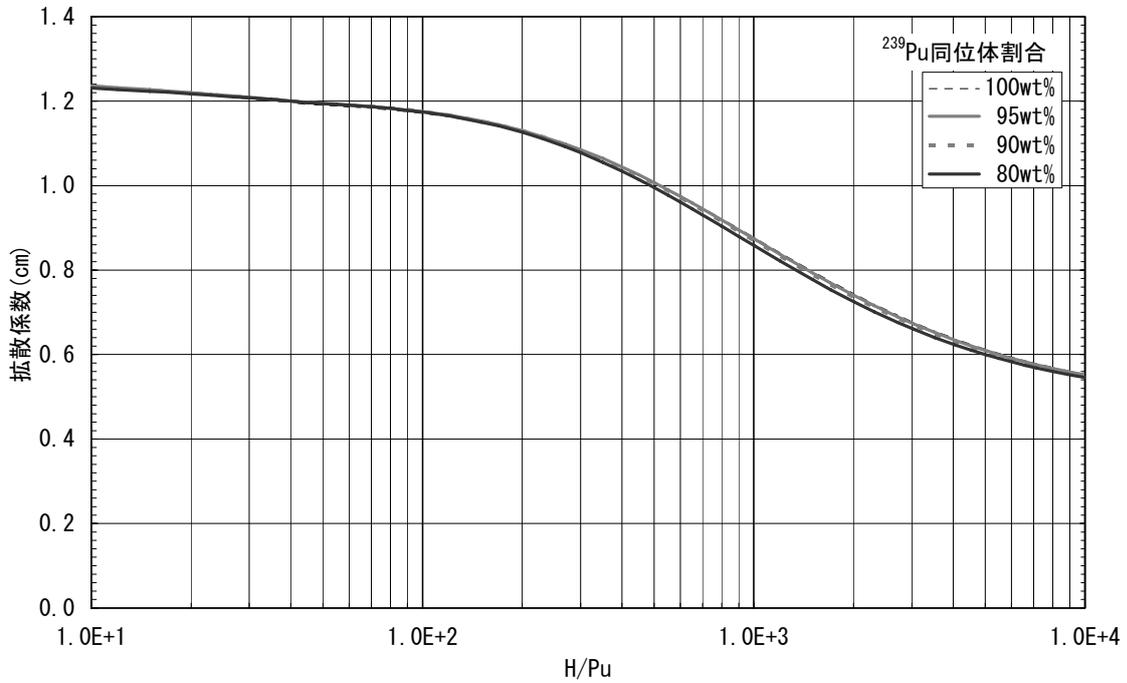


図3.7.3(b) $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ 水溶液系の拡散係数

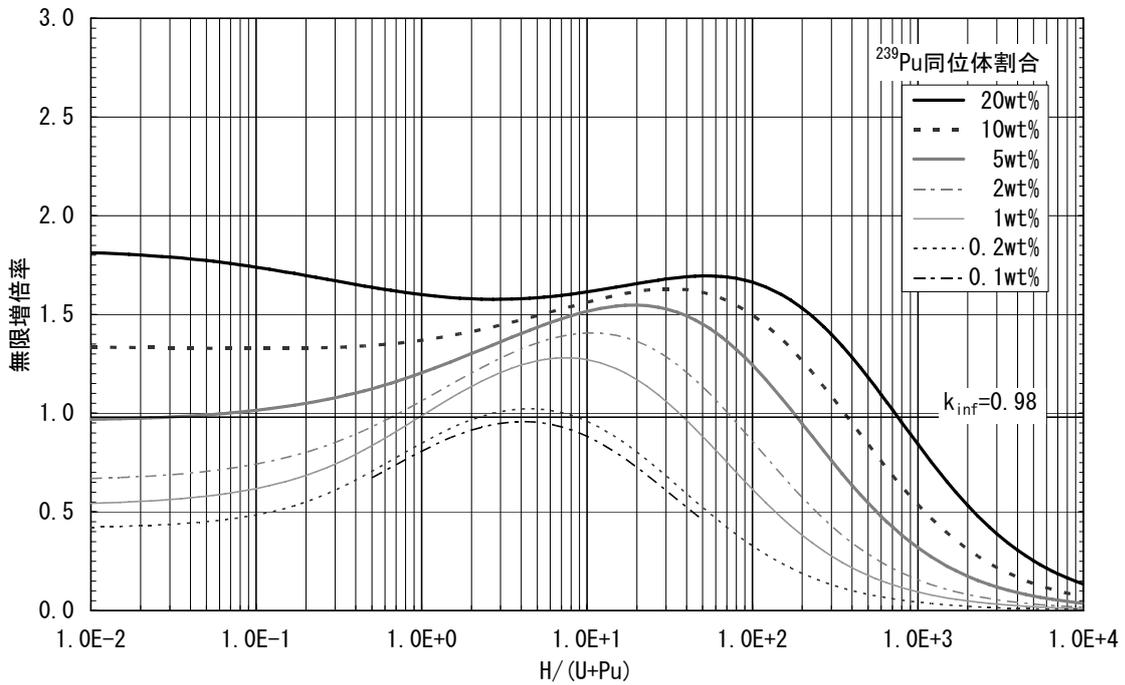


図3.8.1(a) 均質 $\text{PuO}_2\text{-UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 系の無限増倍率 (^{239}Pu 100%、 ^{235}U 濃縮度0.711wt%)

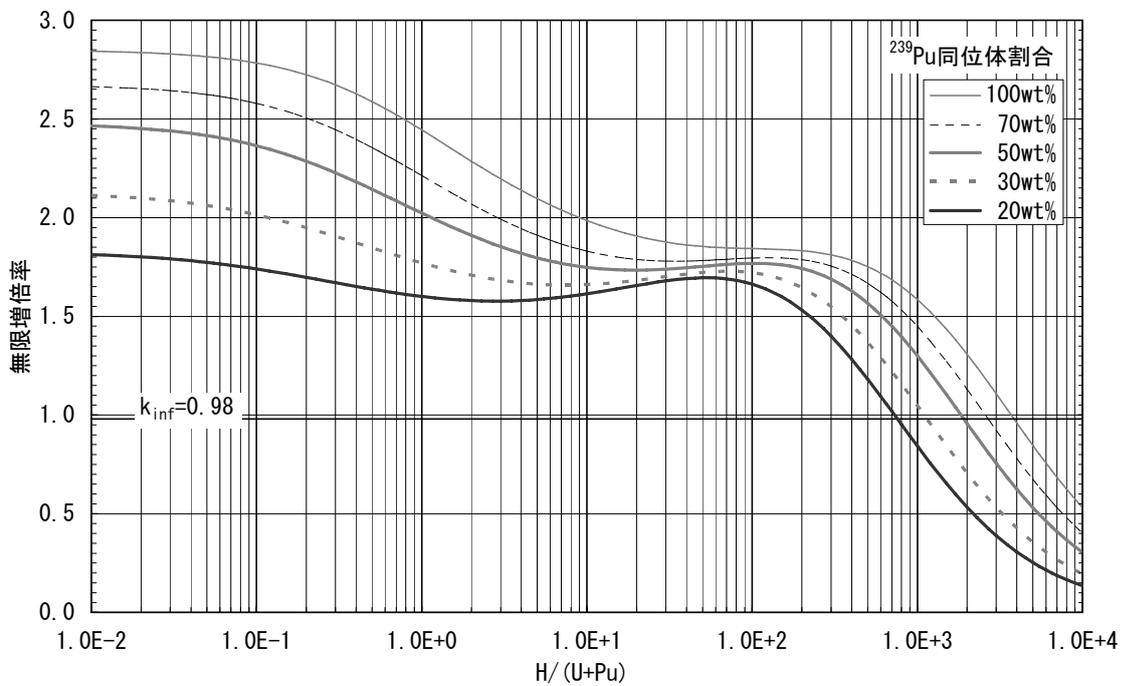


図3.8.1(b) 均質 $\text{PuO}_2\text{-UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 系の無限増倍率 (^{239}Pu 100%、 ^{235}U 濃縮度0.711wt%)

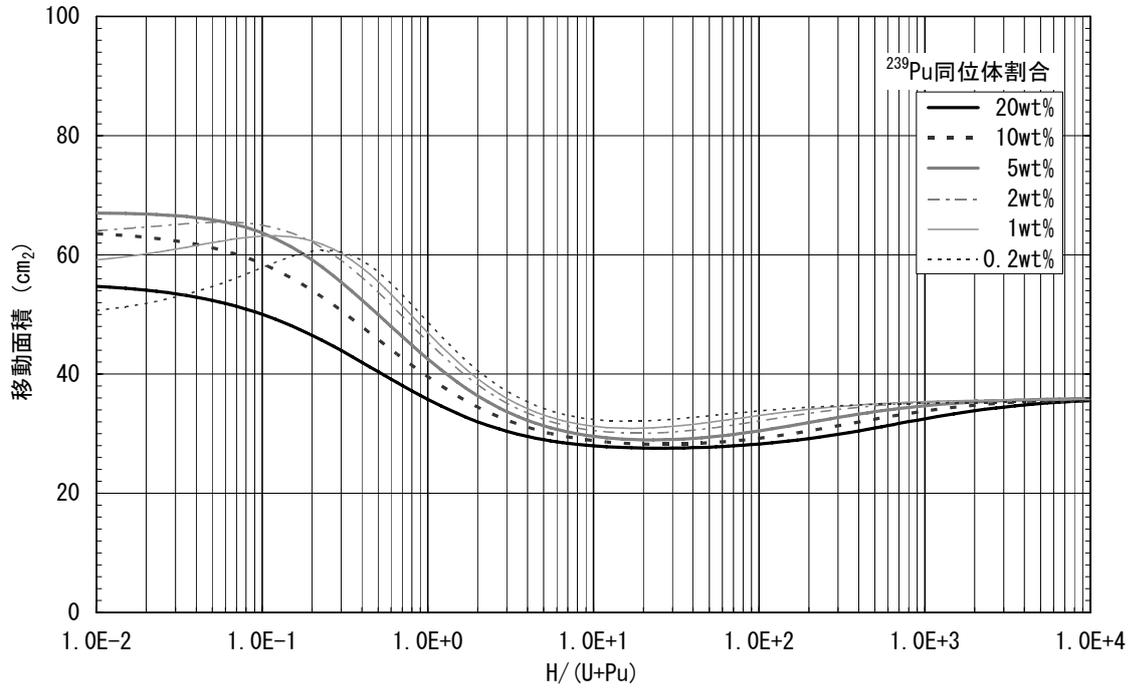


図3.8.2(a) 均質PuO₂-UO₂-H₂O系の移動面積 (²³⁹Pu100%、²³⁵U濃縮度0.711wt%)

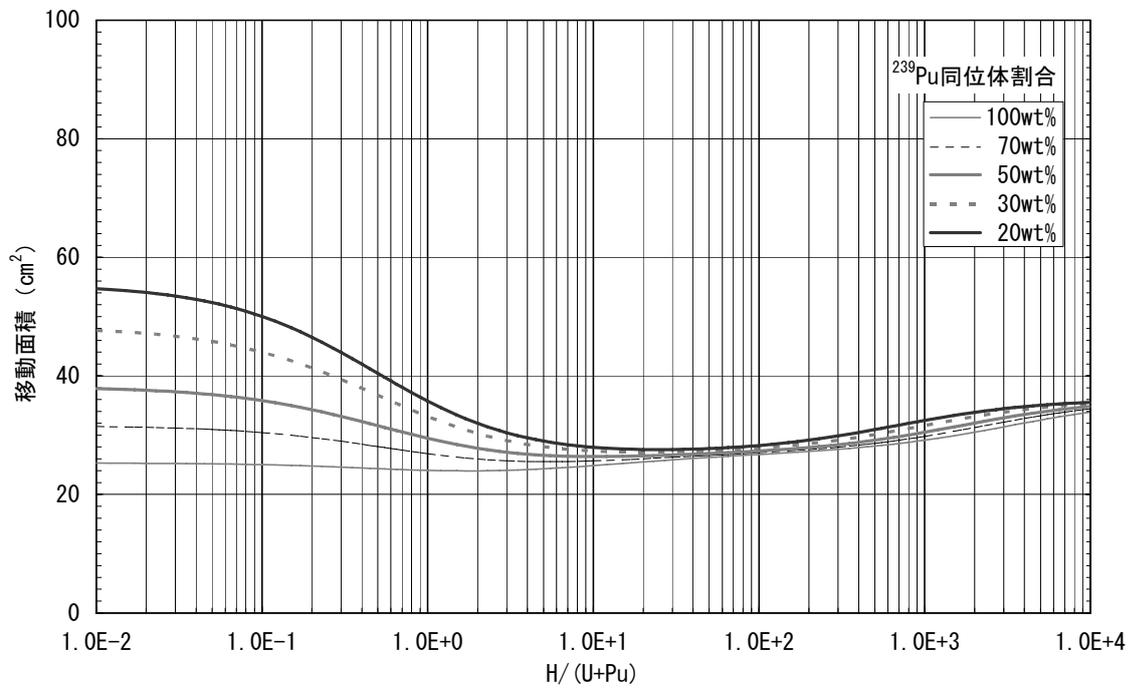


図3.8.2(b) 均質PuO₂-UO₂-H₂O系の移動面積 (²³⁹Pu100%、²³⁵U濃縮度0.711wt%)

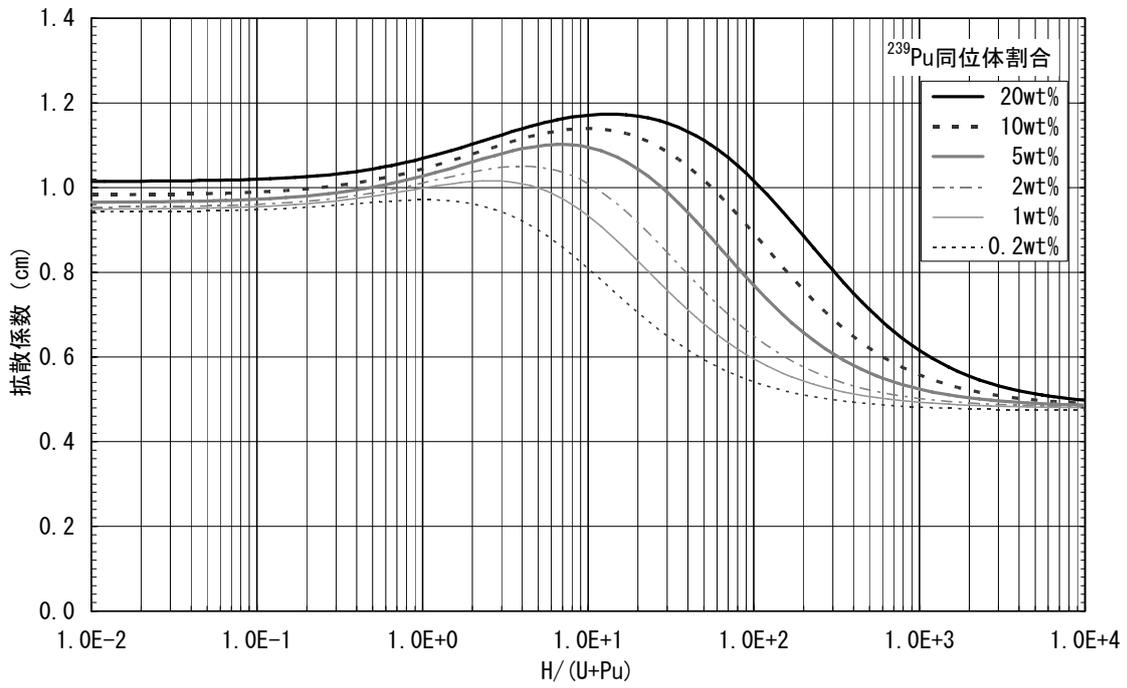


図3.8.3(a) 均質PuO₂-UO₂-H₂O系の拡散係数 (²³⁹Pu100%、²³⁵U濃縮度0.711wt%)

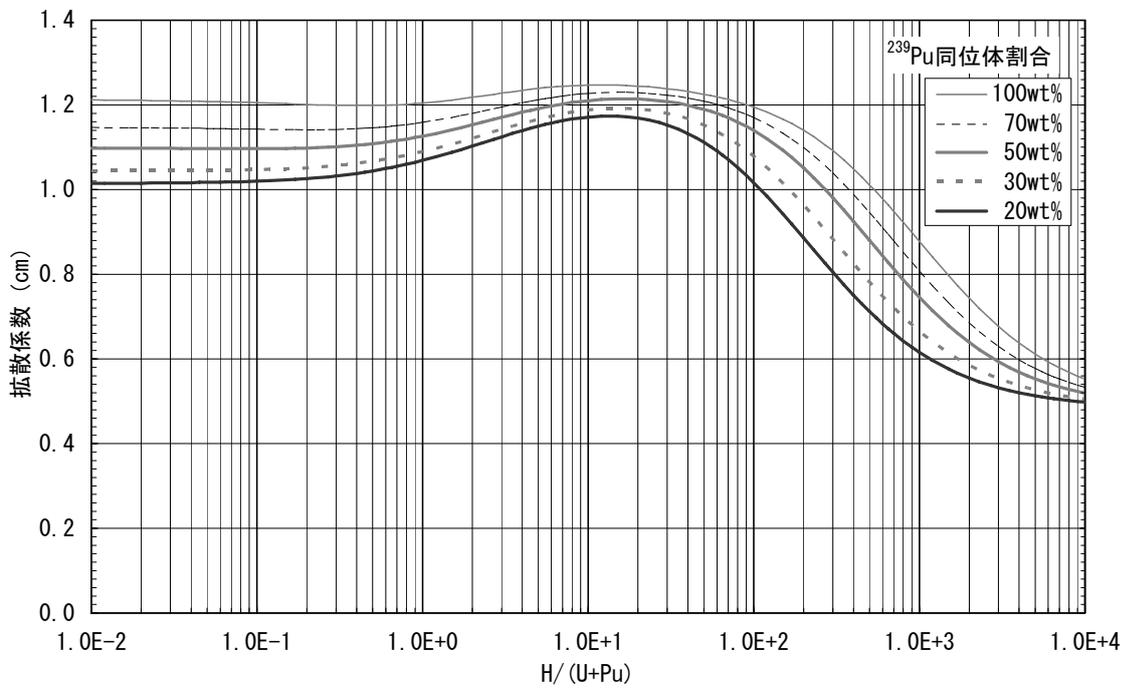


図3.8.3(b) 均質PuO₂-UO₂-H₂O系の拡散係数 (²³⁹Pu100%、²³⁵U濃縮度0.711wt%)

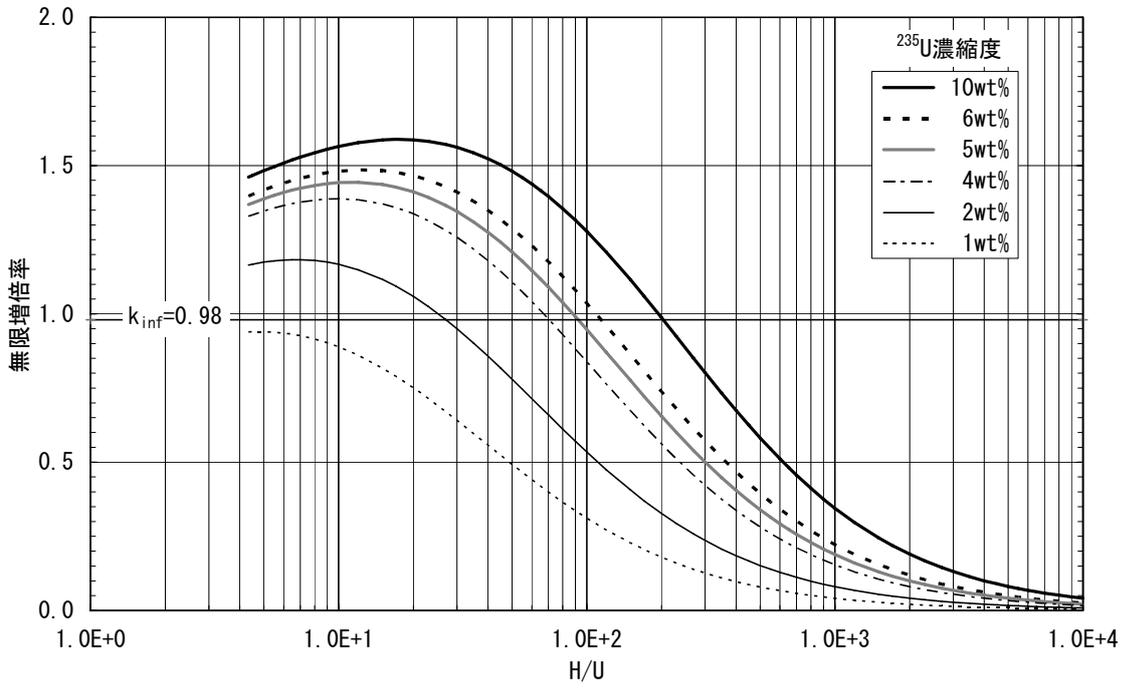


図3.9.1(a) 均質ADU(II)-H₂O系の無限増倍率

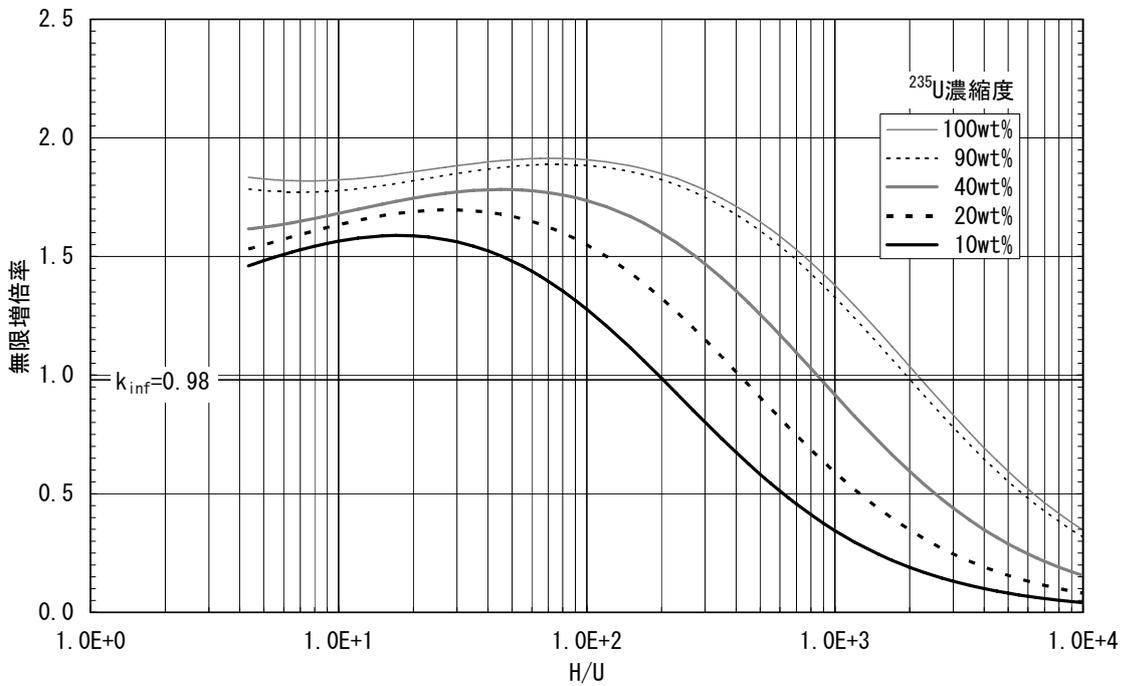


図3.9.1(b) 均質ADU(II)-H₂O系の無限増倍率

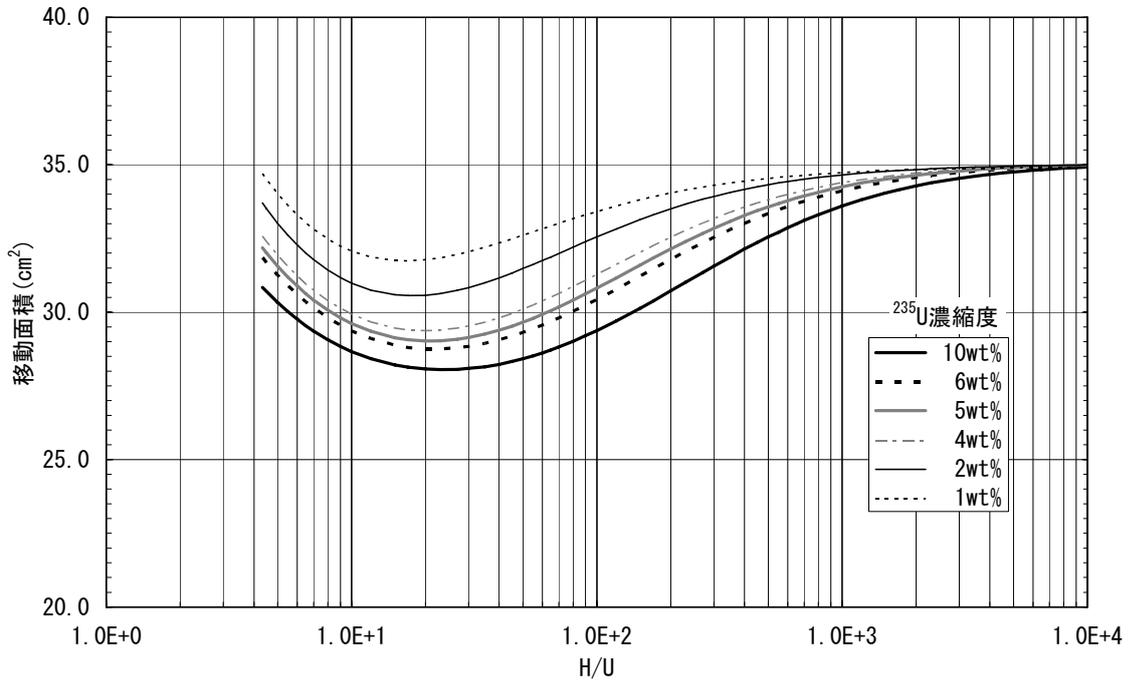


図3.9.2(a) 均質ADU(II)-H₂O系の移動面積

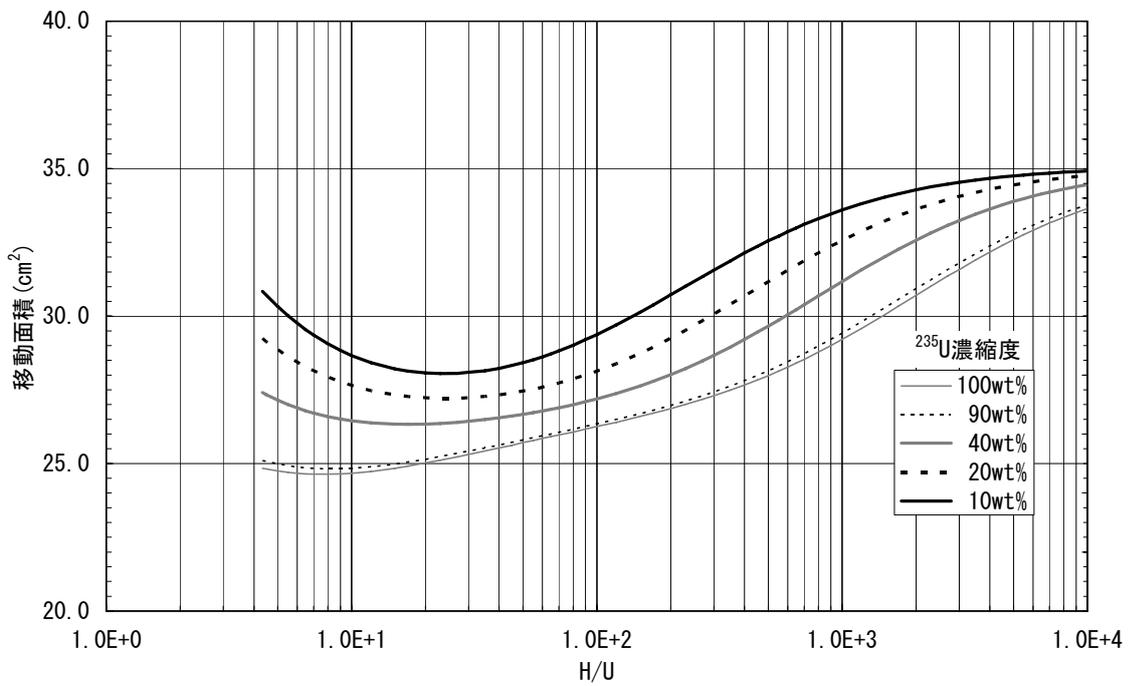


図3.9.2(b) 均質ADU(II)-H₂O系の移動面積

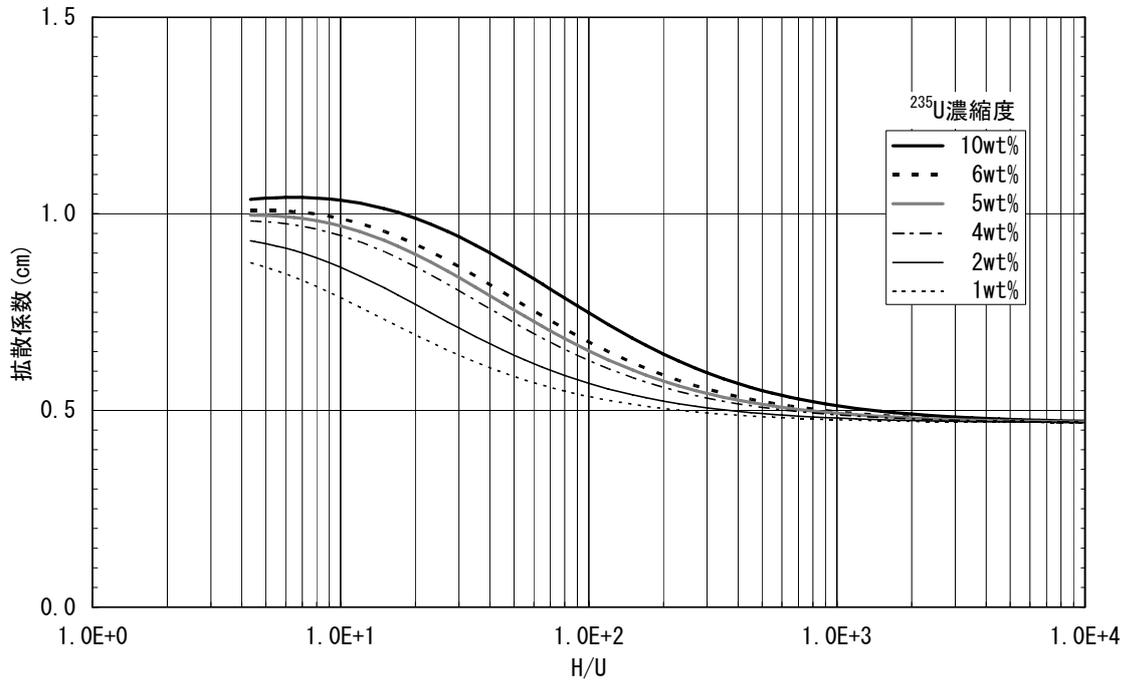


図3.9.3(a) 均質ADU(II)- H_2O 系の拡散係数

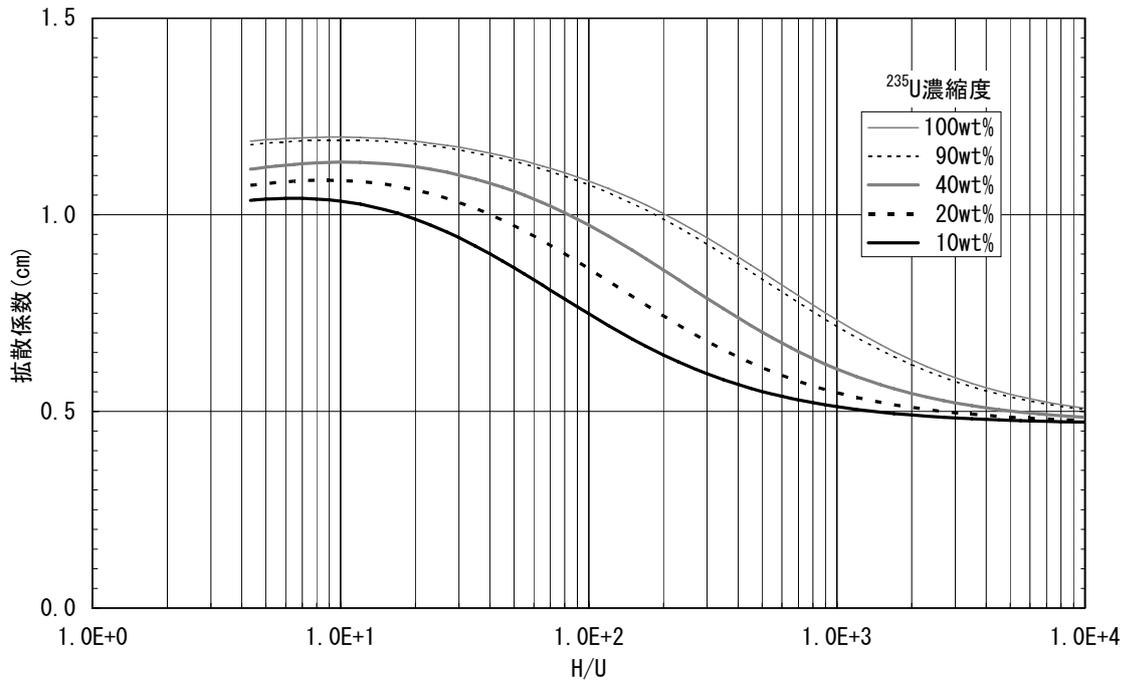


図3.9.3(b) 均質ADU(II)- H_2O 系の拡散係数

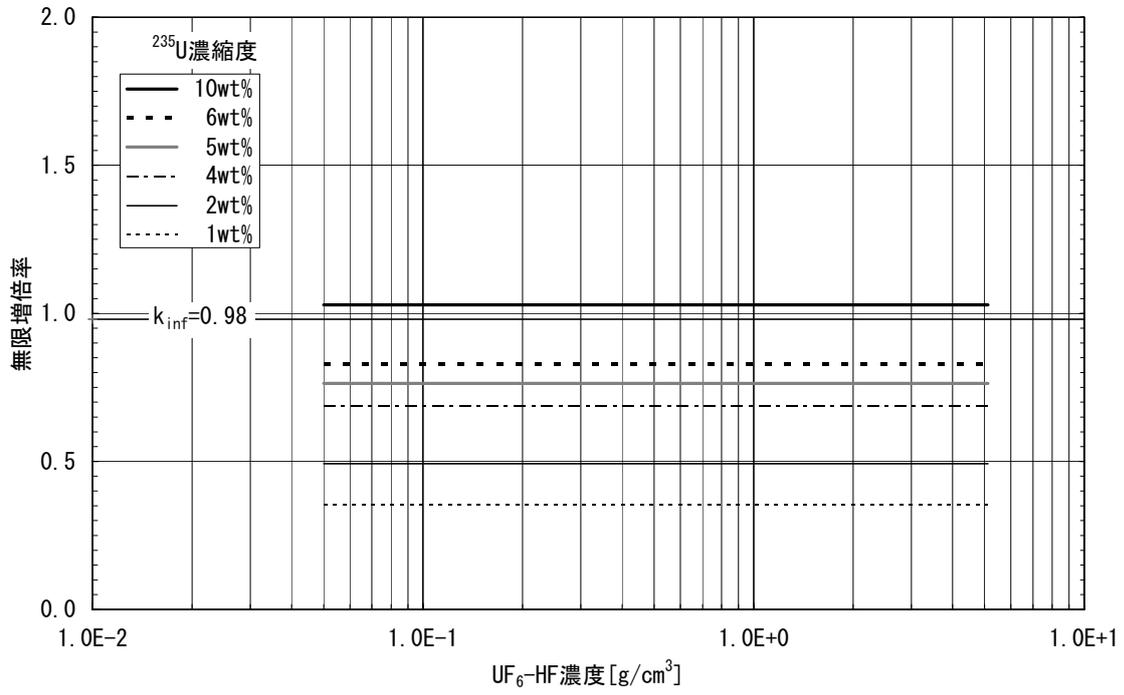


図3.10.1 (a) UF₆-HF系の無限増倍率 (HF 0.5wt%)

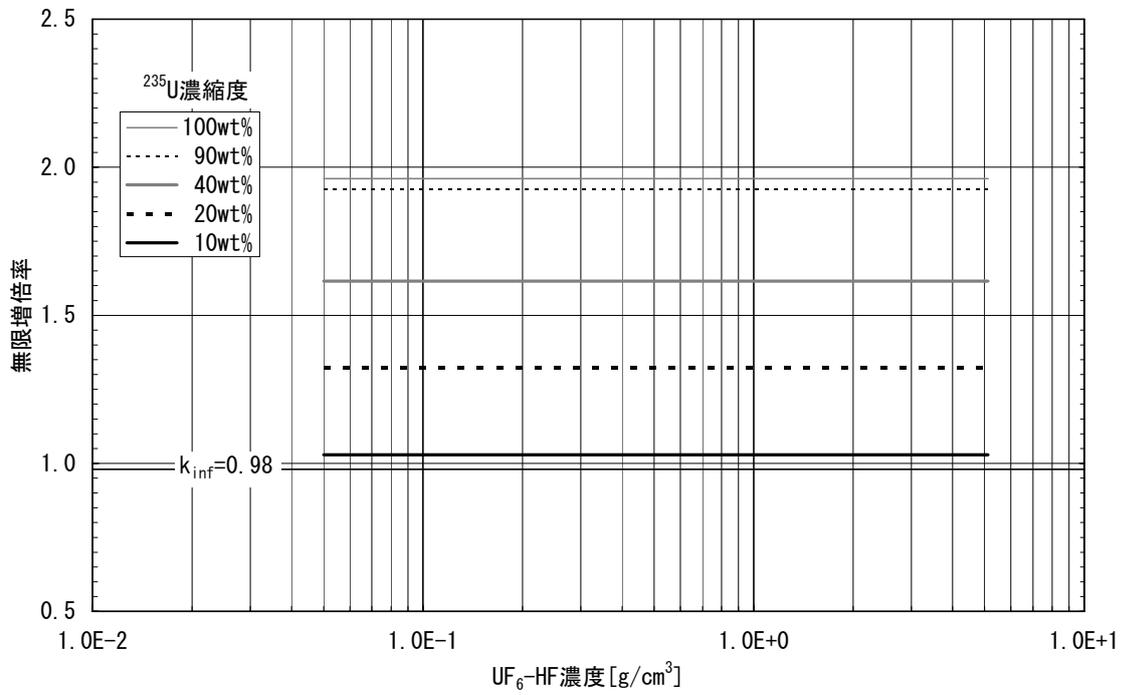


図3.10.1 (b) UF₆-HF系の無限増倍率 (HF 0.5wt%)

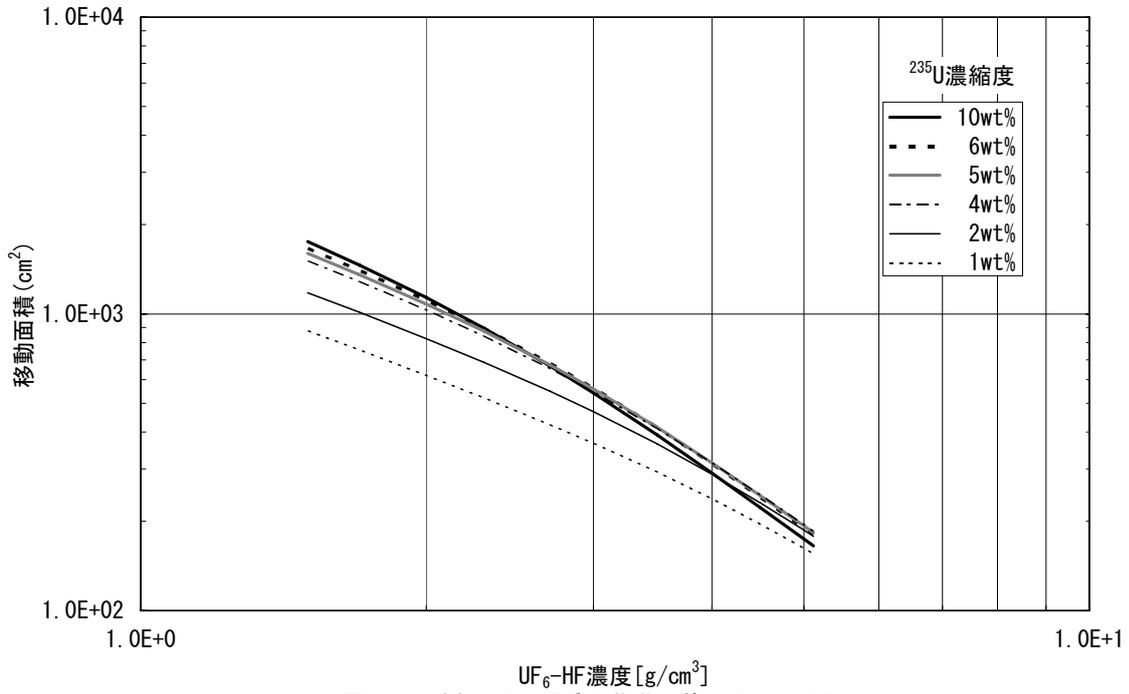


図3.10.2(a) UF₆-HF系の移動面積 (HF 0.5wt%)

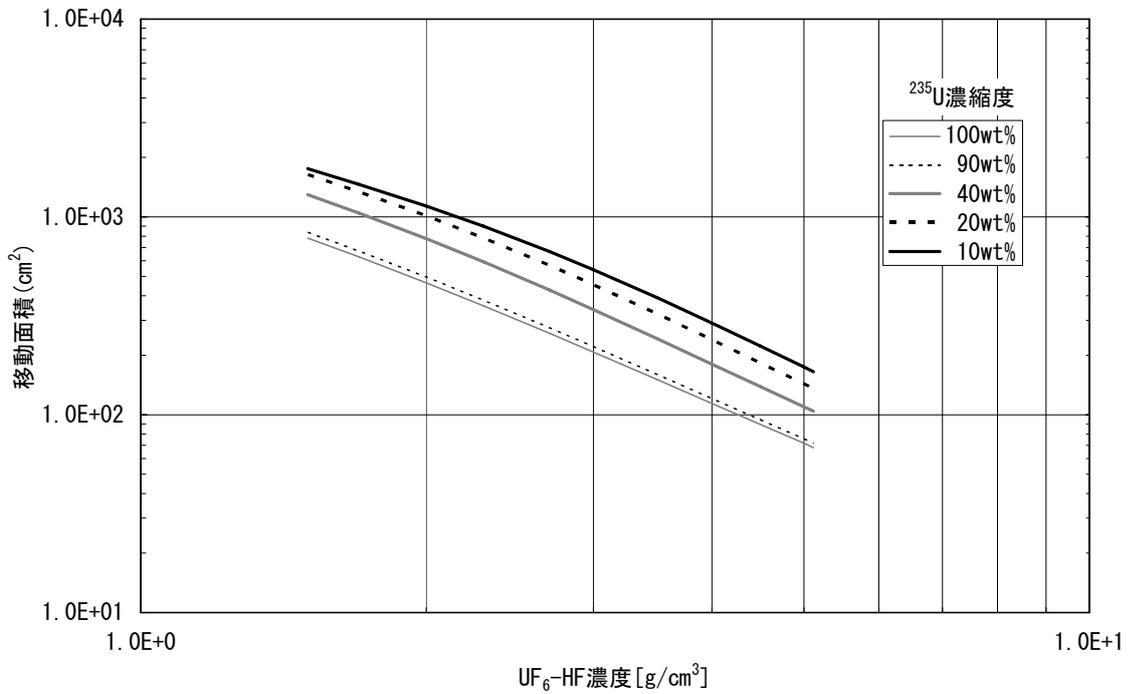


図3.10.2(b) UF₆-HF系の移動面積 (HF 0.5wt%)

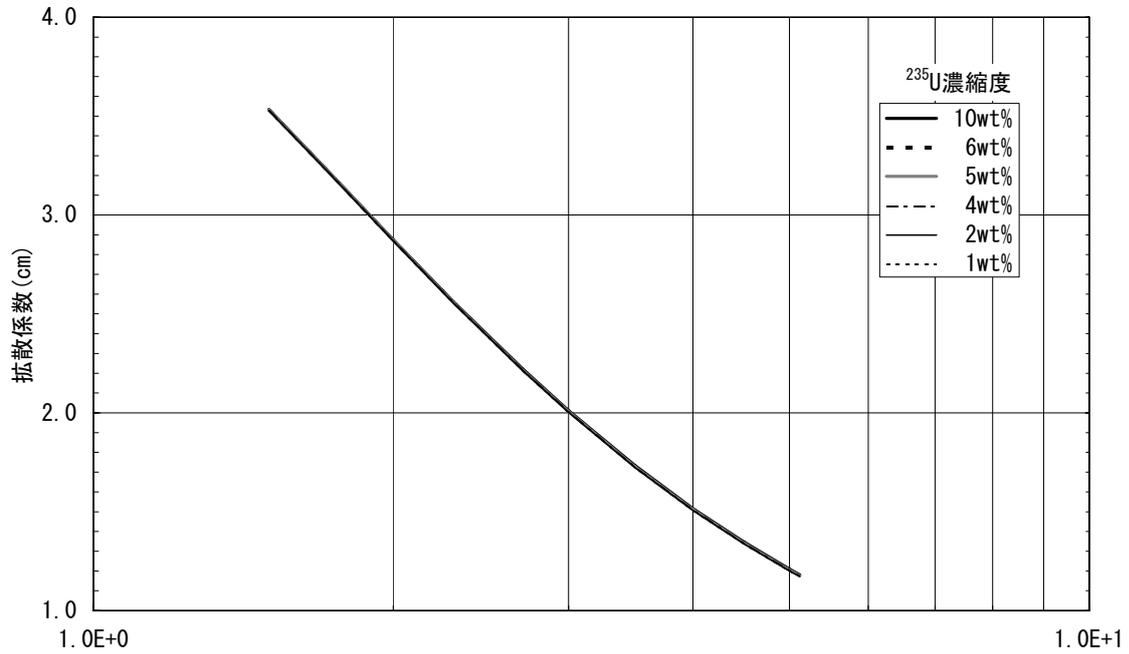


図3.10.3(a) UF_6 -HF系の拡散係数 (HF 0.5wt%)

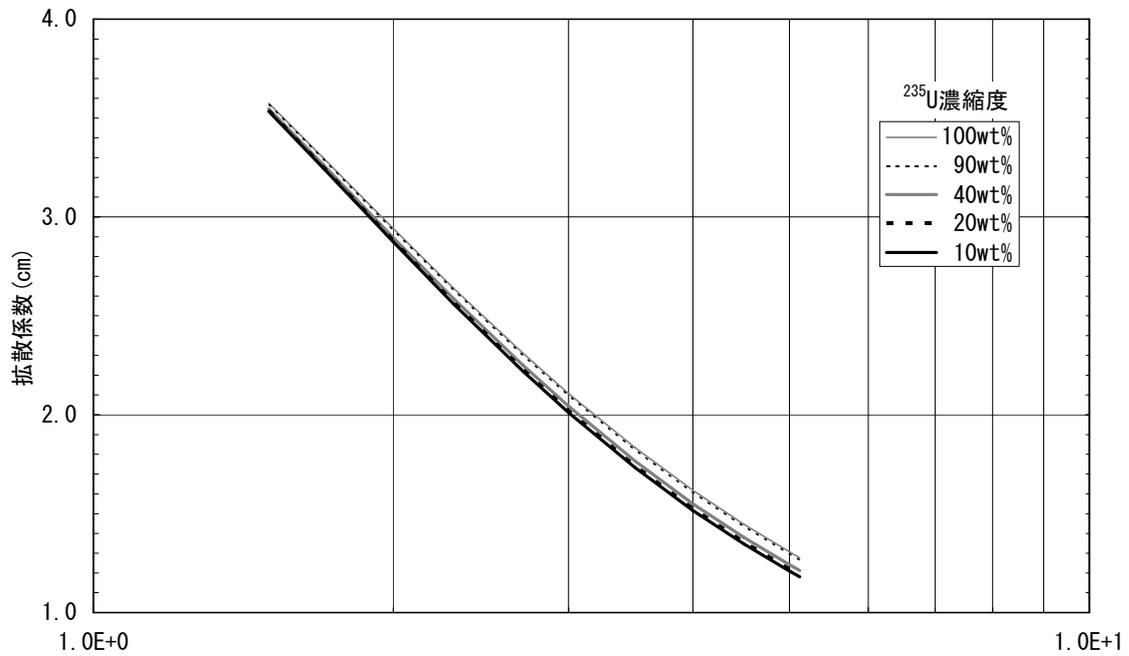


図3.10.3(b) UF_6 -HF系の拡散係数 (HF 0.5wt%)

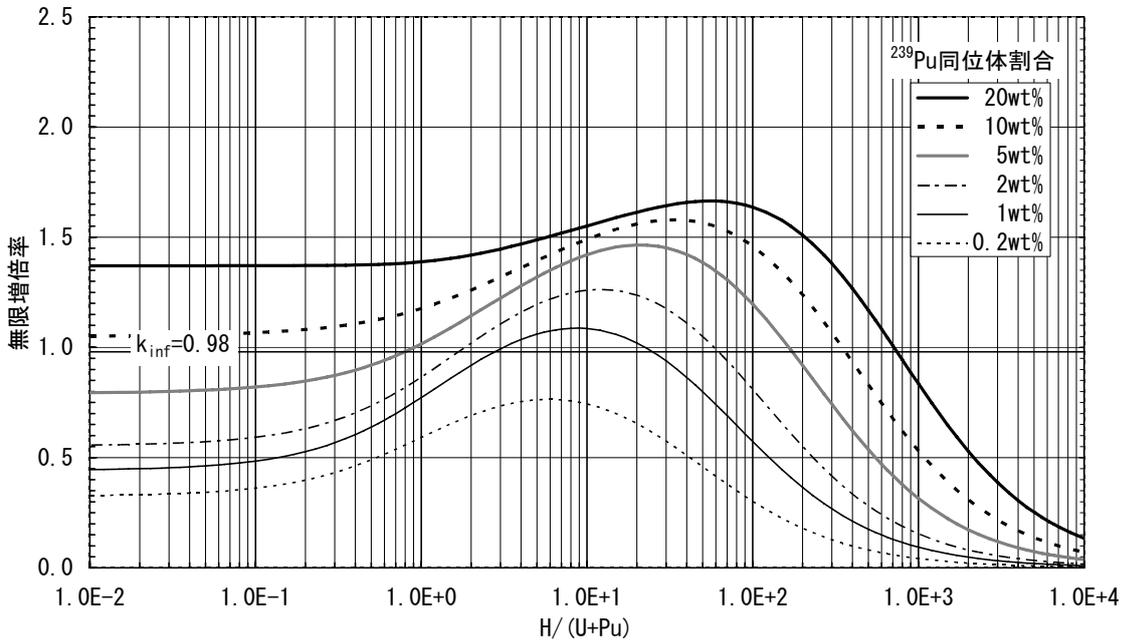


図3.11.1(a) $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2\text{-Pu}(\text{NO}_3)_4$ 混合水溶液系の無限増倍率 (^{239}Pu 100%、 ^{235}U 濃縮度 0.711wt%)

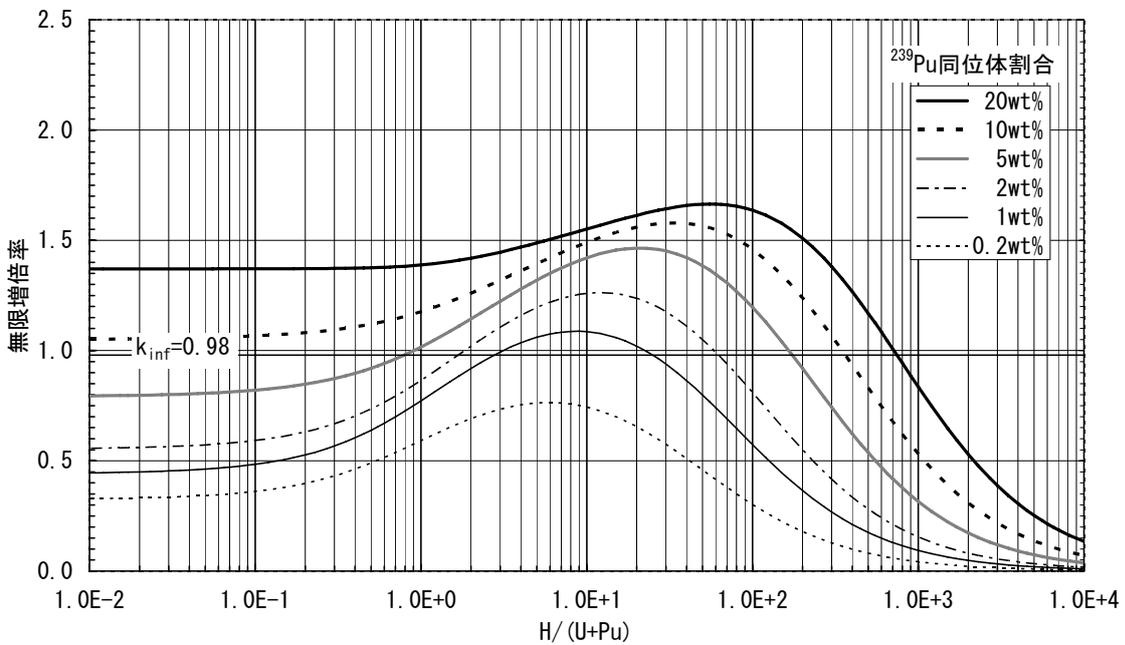


図3.11.1(a) $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2\text{-Pu}(\text{NO}_3)_4$ 混合水溶液系の無限増倍率 (^{239}Pu 100%、 ^{235}U 濃縮度 0.711wt%)

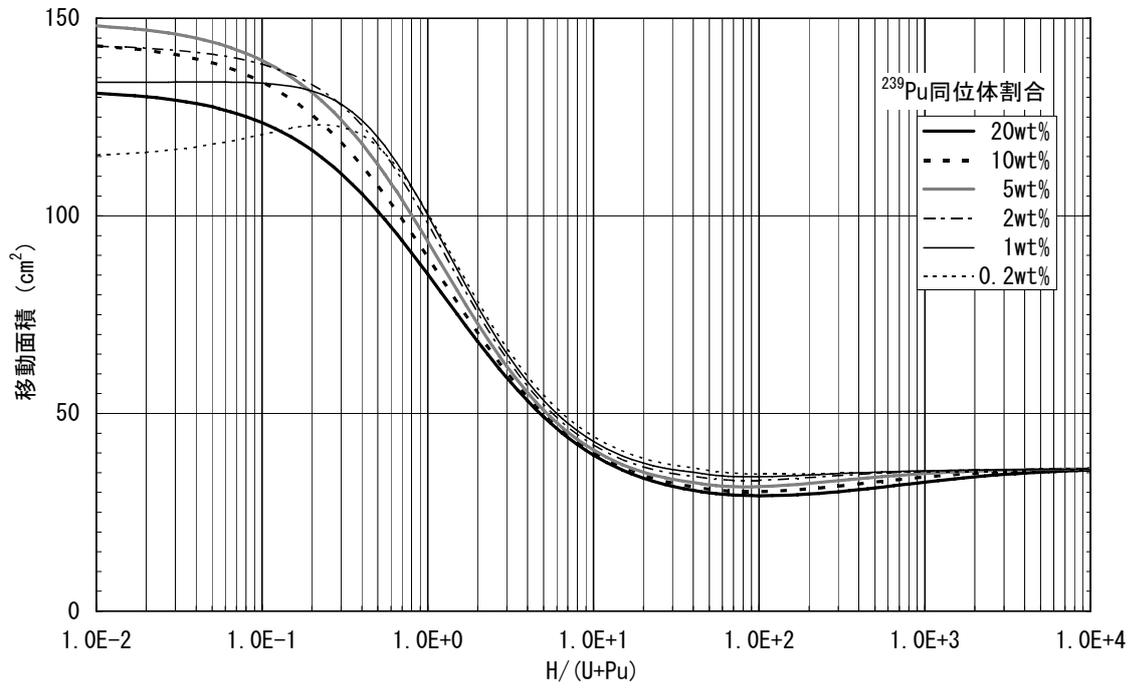


図3.11.2(a) $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2\text{-Pu}(\text{NO}_3)_4$ 混合水溶液系の移動面積 ($^{239}\text{Pu}100\%$ 、 ^{235}U 濃縮度 0.711wt%)

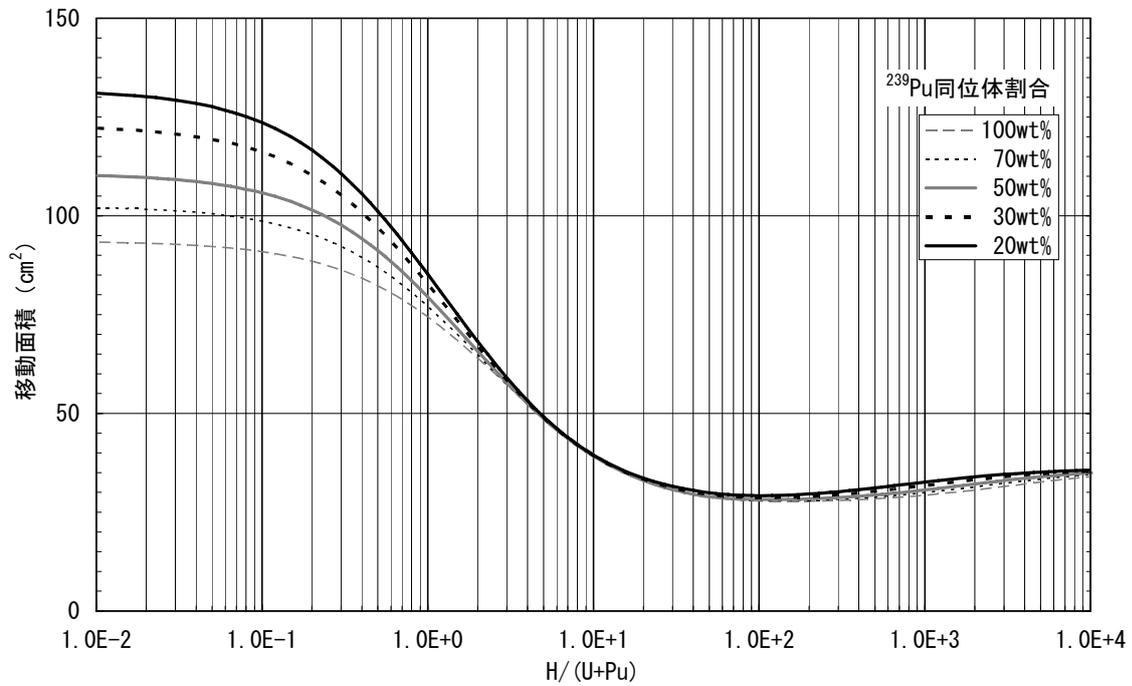


図3.11.2(b) $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2\text{-Pu}(\text{NO}_3)_4$ 混合水溶液系の移動面積 ($^{239}\text{Pu}100\%$ 、 ^{235}U 濃縮度 0.711wt%)

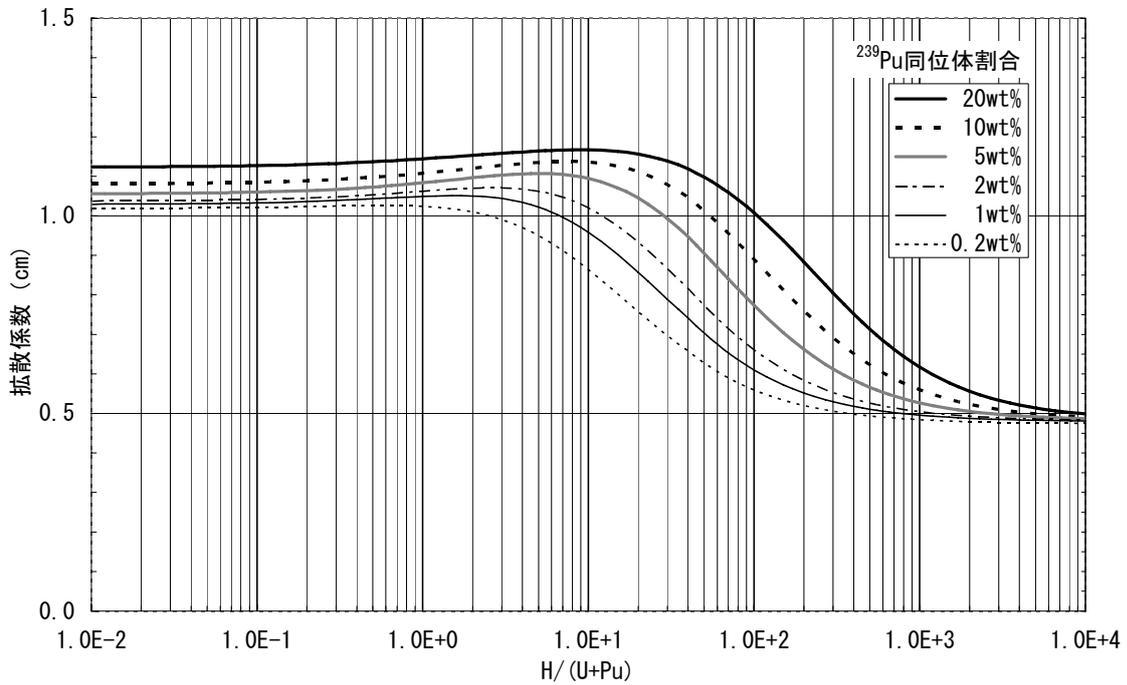


図3.11.3(a) $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2\text{-Pu}(\text{NO}_3)_4$ 混合水溶液系の拡散係数 (^{239}Pu 100%、 ^{235}U 濃縮度 0.711wt%)

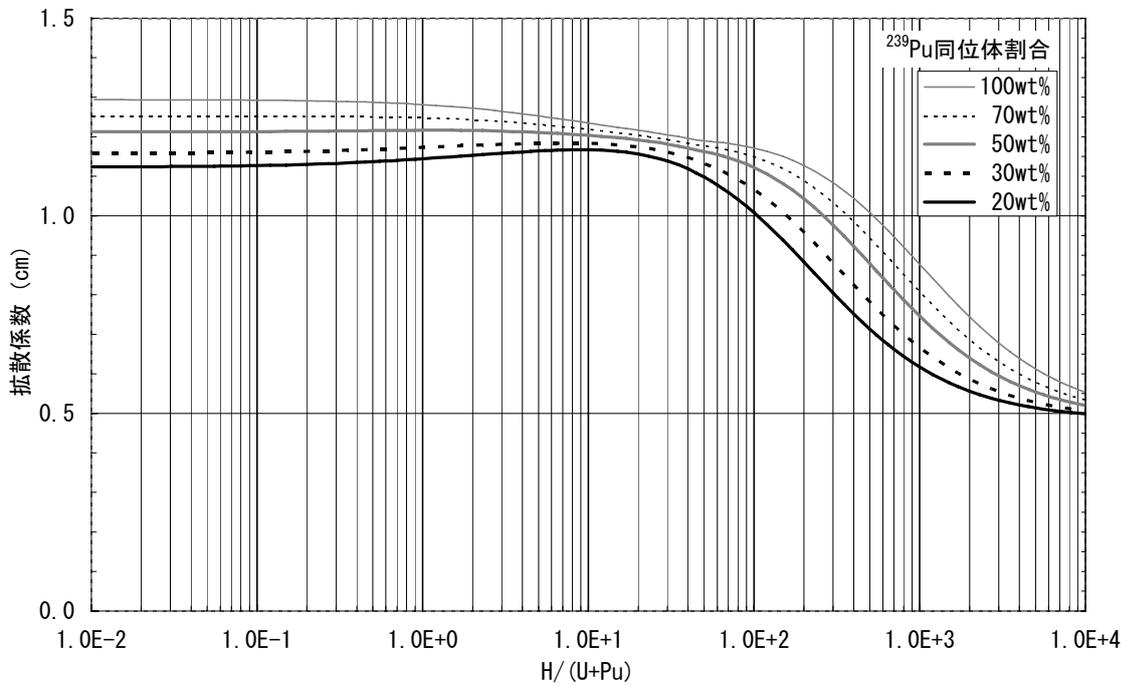


図3.11.3(b) $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2\text{-Pu}(\text{NO}_3)_4$ 混合水溶液系の拡散係数 (^{239}Pu 100%、 ^{235}U 濃縮度 0.711wt%)

This is a blank page.

4. 無限増倍率による未臨界判定

核燃料物質中の核分裂性物質の濃縮度または濃度がある値以下であれば、その核燃料物質を無限に集積しても臨界にならない。この値を無限体系の臨界データと呼ぶこととする。特に、濃縮度以外の他の条件がいかなる場合でも臨界にならない濃縮度の上限値を臨界濃縮度といい、濃度以外の条件がいかなる場合でも臨界とならない濃度の極限值を臨界濃度という。これらの値は核燃料物質の化学形態や中性子減速材の種類及び量により異なる。種々の核燃料物質に対して無限体系の臨界データを知ることは、臨界管理を非常に容易にする場合が多い。

3章で核特性パラメータを求めた対象に対して、核データとして JENDL-3.2¹⁾ を使用し、SRAC95²⁾、改良 POST コード³⁾、そして SIMCRI コード⁴⁾ によって無限体系の中性子増倍率を算出した。均質無限体系に対する臨界計算では中性子束の空間分布計算に関わる誤差が生じないこと、及び無限体系は実在しないことから、中性子増倍率の計算誤差は 2%未満であることを見込んで、推定臨界下限増倍率を 0.98 として推定臨界下限値を算出した。なお、計算の条件は以下である。

1. 溶液温度は 20°C。
2. 硝酸溶液における遊離硝酸は 0 モル。
3. プルトニウム燃料については、プルトニウム同位体は ^{239}Pu と ^{240}Pu の 2 種類のみ。
4. プルトニウムとウランが混じった体系では、ウランの同位体組成は天然のもの（この章では、 $^{235}\text{U} : ^{238}\text{U} = 0.711 : 99.289$ 重量比）。プルトニウムは ^{239}Pu 100%とする。
5. $\text{UF}_6\text{-HF}$ では、減速度管理が行われているとし、HF の割合は 0.5wt%とする。⁵⁾

表 4.1 から表 4.3 に、得られた推定臨界下限濃縮度及び推定臨界下限濃度を与える。図 4.1 から図 4.11 にそれぞれの系に対する未臨界判定図を示す⁶⁾。与えられた図から、濃縮度に対応する H/X (X は U または U+Pu) 比を求め、2 章に示した H/X 比と溶液濃度の関係の図を使用して対応する濃度を定めることが出来る。

第 4 章の参考文献

- 1) T. Nakagawa, K. Shibata, S. Chiba, T. Fukahori, Y. Nakajima, Y. Kikuchi, T. Kawano, Y. Kanda, T. Ohsawa, H. Matsunobu, M. Kawai, A. Zukeran, T. Watanabe, S. Igarasi, K. Kosako and T. Asami., “Japanese Evaluated Nuclear Data Library, version 3, revision 2: JENDL 3.2,” J. Nucl. Sci. Technol., **32**, p.1259 (1995).

- 2) 奥村啓介・金子邦男・土橋敬一郎、「SRAC95 ; 汎用核計算コードシステム」、JAERI-Data/Code 96-015 (1996).
- 3) 須山賢也・高田友幸、「POST-SRAC95 を使用した臨界計算のための断面積処理プログラム」、JAERI-Data/Code 98-035 (1998)
- 4) S. Nakamaru, N. Sugawara, Y. Naito, J. Katakura and H.Okuno, “SIMCRI: A Simple Computer Code for Calculating Nuclear Criticality Parameter,” JEARI-M 86-027 (1986).
- 5) R. H. Dyer, F. M. Kovac and W. A. Pryor, “Moderation control in low enriched ^{235}U uranium hexafluoride packaging operations and transportation,” The 34th Annual Meeting of the Institute of Nuclear Materials Management, Scottsdale, AZ, USA, July 18-22, 1993.
- 6) H. Okuno and T. Takada, “Calculation of nuclear characteristic parameters and drawing subcriticality judgment graphs of infinite fuel systems for typical nuclear fuels,” J. Nucl. Sci. Technol., **41**, p.481 (2004).

表 4.1 無限体系の推定臨界下限濃縮度 [wt%]

核燃料物質	推定臨界下限濃縮度**
均質 U-H ₂ O	0.90
均質 UO ₂ -H ₂ O	0.94
UO ₂ F ₂ 水溶液	0.99
UO ₂ (NO ₃) ₂ 水溶液	1.86
ADU(II)-H ₂ O	1.17
PuO ₂ -UO ₂ -H ₂ O	0.12*
Pu(NO ₃) ₄ -UO ₂ (NO ₃) ₂ 水溶液	0.74*

* Pu 富化度

** 推定臨界下限増倍率 = 0.98

表 4.2 無限体系の推定臨界下限濃度 [²³⁵U g/L]

U 系 (²³⁵U 100%)

核燃料物質	推定臨界下限濃度*
均質 U-H ₂ O	11.7
均質 UO ₂ -H ₂ O	11.7
UO ₂ F ₂ 水溶液	11.7
UO ₂ (NO ₃) ₂ 水溶液	11.9

* 推定臨界下限増倍率 = 0.98

表 4.3 無限体系の推定臨界下限濃度 [²³⁹Pu g/L]

Pu 系 (²³⁹Pu 100%)

核燃料物質	推定臨界下限濃度*
均質 Pu-H ₂ O	6.9
均質 PuO ₂ -H ₂ O	6.9
Pu(NO ₃) ₄ 水溶液	6.9

* 推定臨界下限増倍率 = 0.98

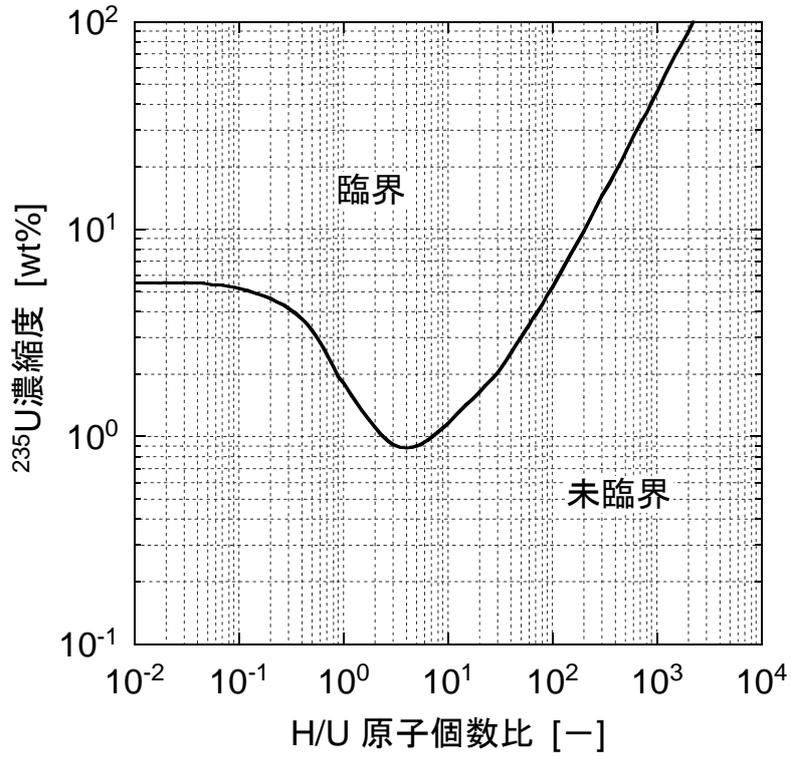


図 4.1 均質 U-H₂O 系の未臨界領域判定図

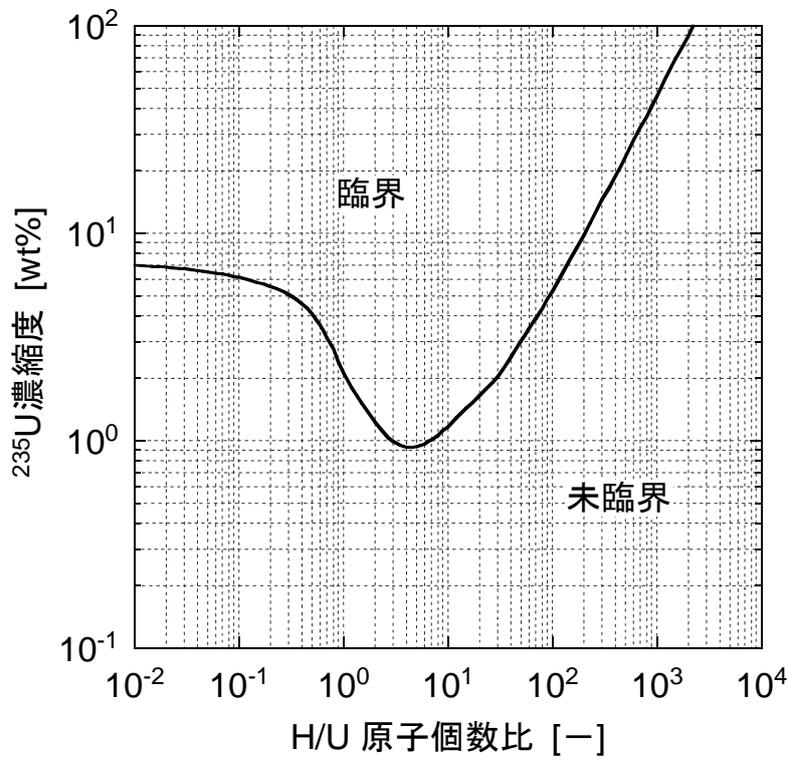


図 4.2 均質 UO₂-H₂O 系の未臨界領域判定図

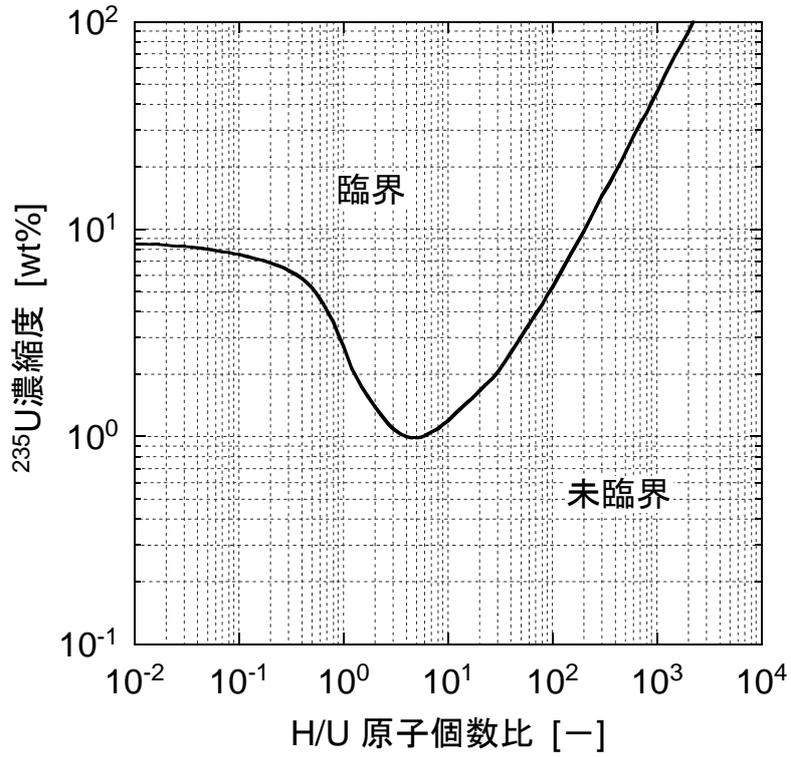


図 4.3 UO_2F_2 水溶液系の未臨界領域判定図

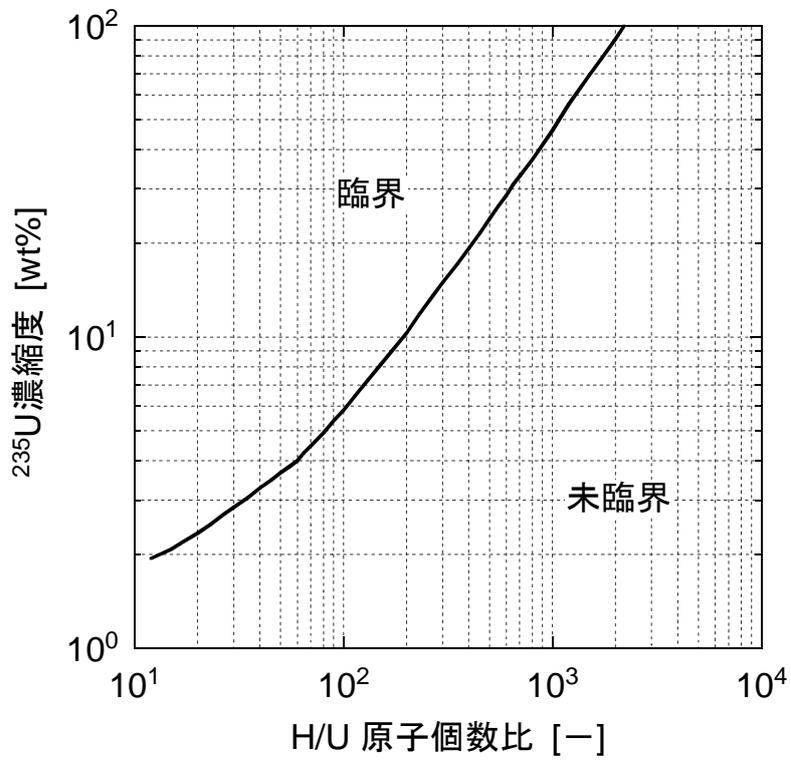


図 4.4 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 水溶液系の未臨界領域判定図

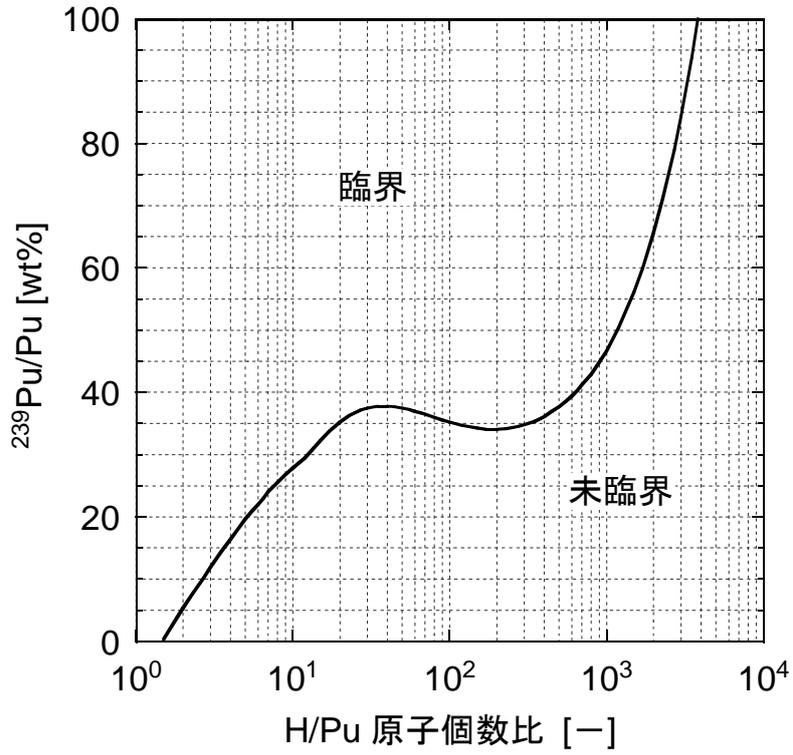


図 4.5 均質 Pu-H₂O 系の未臨界領域判定図

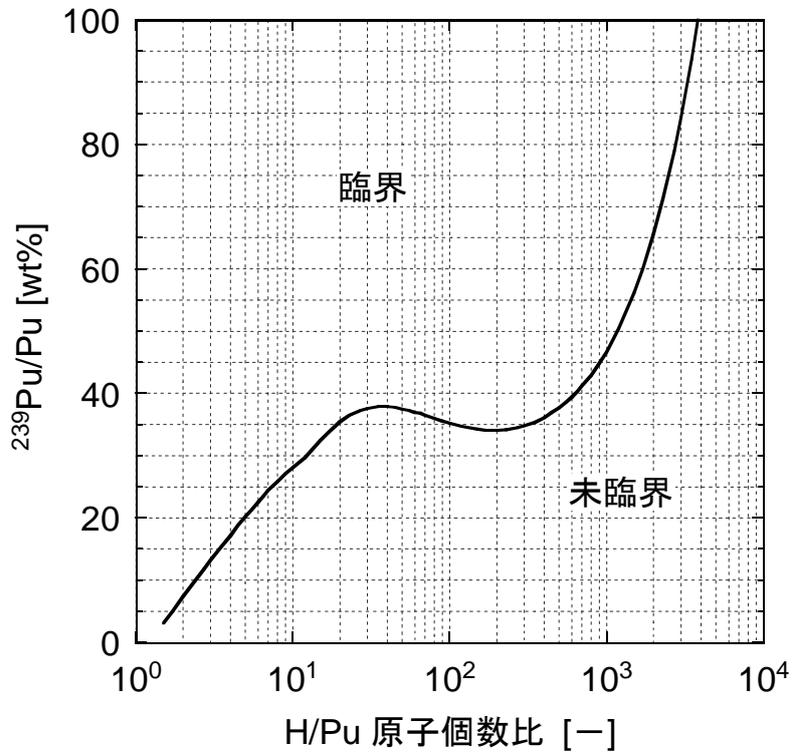


図 4.6 均質 PuO₂-H₂O 系の未臨界領域判定図

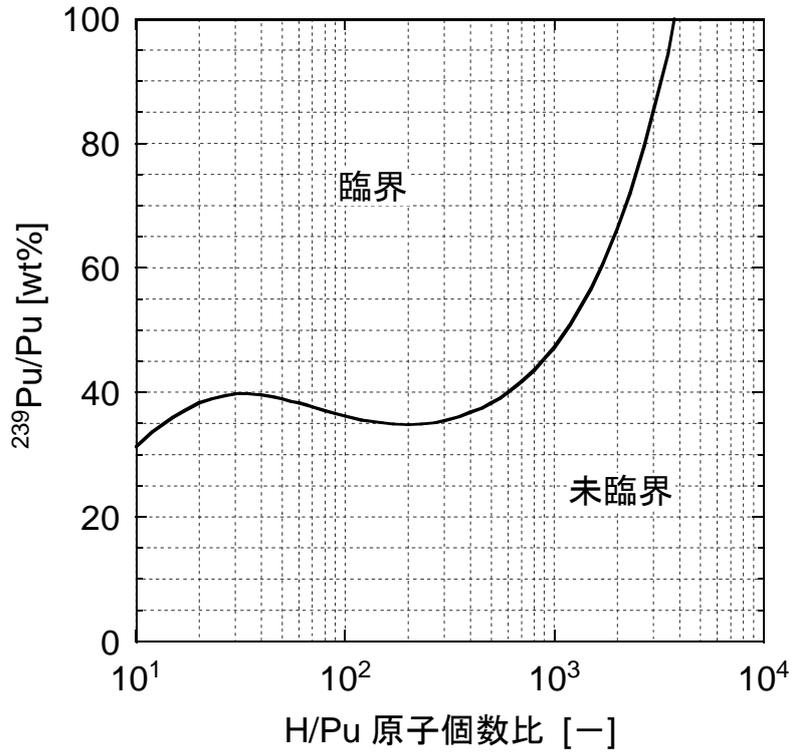


図 4.7 $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ 水溶液系の未臨界領域判定図

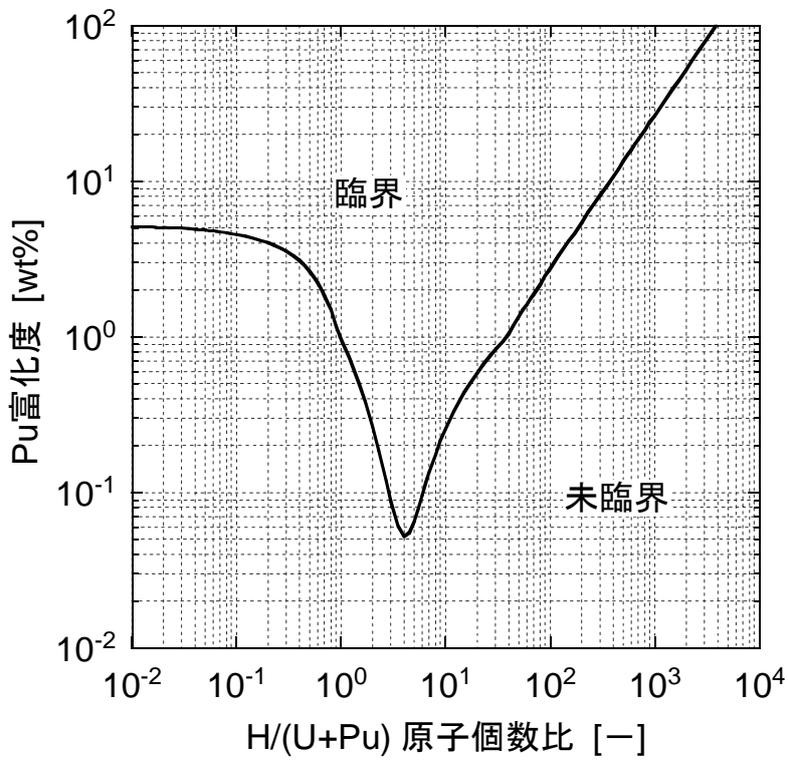


図 4.8 均質 $\text{PuO}_2\text{-UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 系の未臨界領域判定図

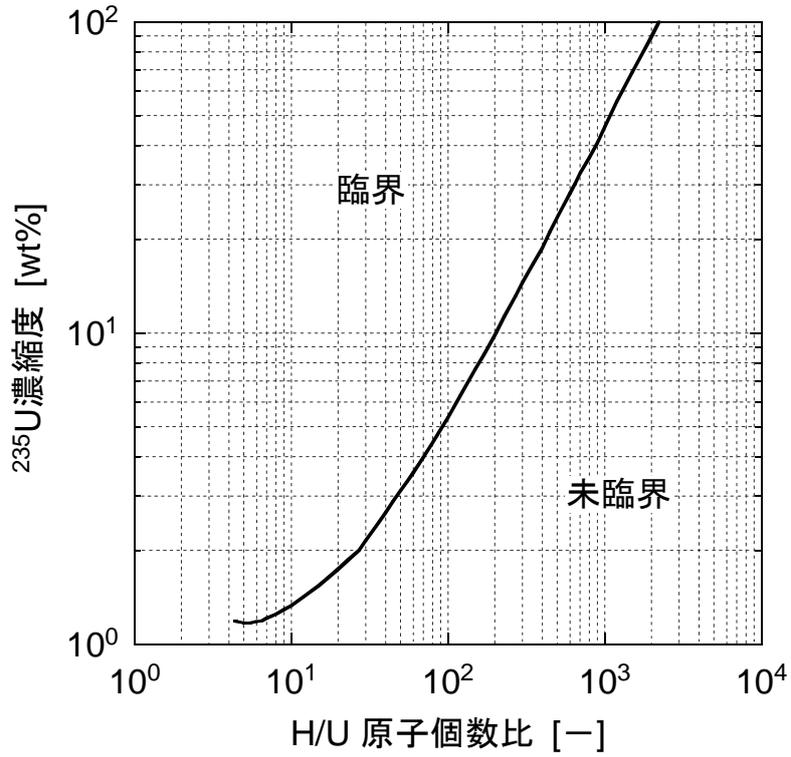


図 4.9 均質 ADU(II)-H₂O 系の未臨界領域判定図

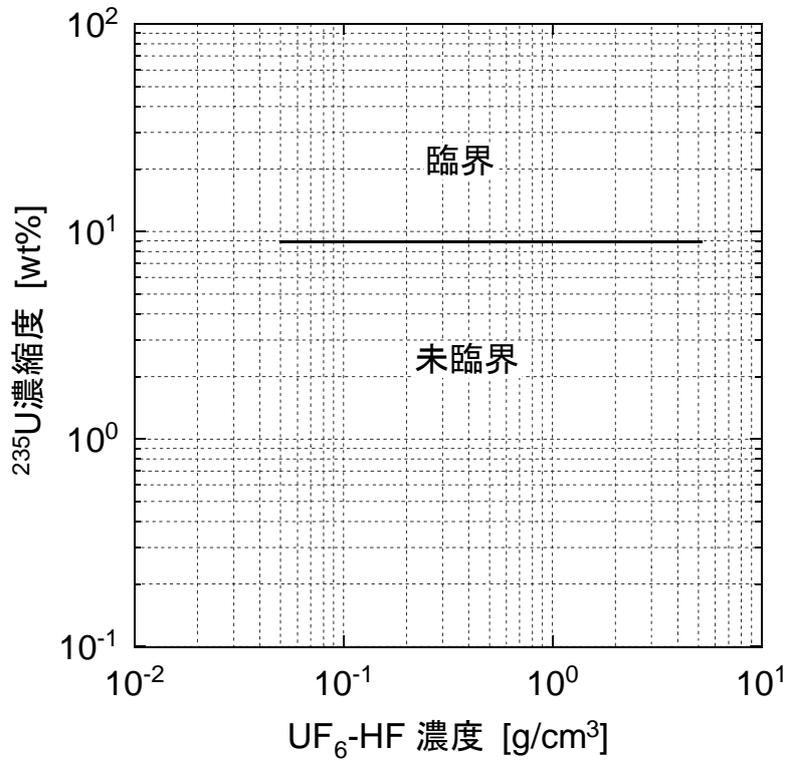


図 4.10 UF₆-HF 系の未臨界領域判定図 (HF 0.5wt%)

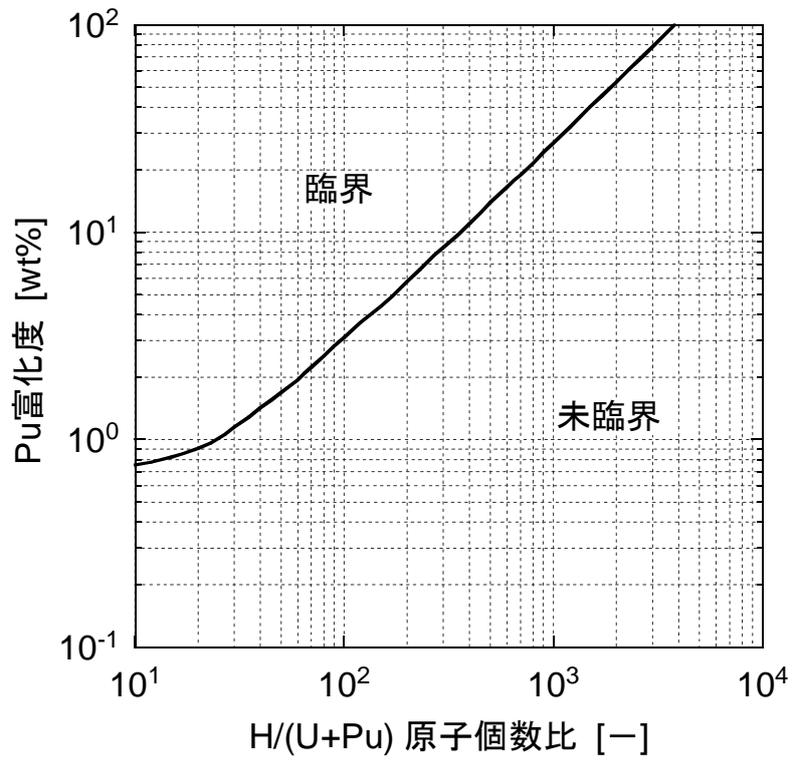


図 4.11 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2\text{-Pu}(\text{NO}_3)_4$ 混合水溶液系の未臨界領域判定図 (^{239}Pu 100%, ^{235}U 濃縮度.0.711wt%)

This is a blank page.

5. 単一ユニットの臨界データ

様々な核燃料物質の推定臨界値及び推定臨界下限値を計算によって求めた。対象とした核燃料は、主に LWR 燃料再処理施設、LWR 燃料加工施設を念頭において選定した。核燃料物質の形状は、球、無限円柱、無限平板の 3 種類に限った。核燃料物質の周囲には十分な厚さ (30cm) の水反射体を設けた。

5.1 臨界データ

各核燃料物質の推定臨界値及び推定臨界下限値を図 5.1 から図 5.38 に示す。均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 、均質 $\text{PuO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 及び均質 $\text{PuO}_2\text{-UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ において、含水率は、水質量 / (燃料質量+水質量) $\times 100$ wt% で定義される。均質 $\text{PuO}_2\text{-UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ を除く 11 種類の燃料及び主要核分裂性核種に関して各図の最小値 (最小推定臨界値、最小推定臨界下限値) を表 5.1 から表 5.11 に示す。

また、その他の核分裂性核種の臨界質量 ($k_{\text{eff}} = 1$ に対応) 及び未臨界質量 ($k_{\text{eff}} = 0.9, 0.8$ に対応) を燃料濃度の関数として図 5.39 から図 5.43 に示す。さらに、各図の臨界質量の最小値を表 5.12 に示す。

臨界データを計算するための方法、モデル、計算条件を 5.2 節から 5.4 節に示す。各図番の対応は以下の表の通り。

核燃料物質	燃料濃度 vs (a)質量、(b)球体積、(c)円柱直径、(d)平板厚さ										
	^{235}U 濃縮度[wt%]										
	3	4	5	6	7	10	20	50	93.5	100	
(1) 均質 $\text{U-H}_2\text{O}$	図 5.1	同左	同左	図 5.2	同左	同左	同左	同左	図 5.3	同左	同左
(2) 均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$	図 5.4	図 5.5	図 5.6	図 5.7	図 5.8	図 5.9	図 5.10	---	---	---	
(3) UO_2F_2 水溶液	図 5.11	同左	同左	図 5.12	同左	同左	同左	---	---	---	
(4) $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 水溶液	図 5.13	同左	同左	図 5.14	同左	同左	同左	---	---	---	
(5) 均質 $\text{ADU(II)-H}_2\text{O}$	図 5.15	同左	同左	図 5.16	同左	同左	同左	---	---	---	
(6) $\text{UF}_6\text{-HF}$	図 5.17	同左	同左	図 5.18	同左	同左	同左	---	---	---	

核燃料物質	燃料濃度 vs (a)質量、(b)球体積、(c)円柱直径、(d)平板厚さ			
	Pu 組成[wt%] ^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu			
	100:0:0	95:5:0	80:10:10	71:17:12
(7) 均質 $\text{PuO}_2\text{-H}_2\text{O}$	---	図 5.19	図 5.20	図 5.21
(8) $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ 水溶液	図 5.22	---	図 5.22	同左

核燃料物質	燃料濃度 vs (a)質量、(b)球体積 ²³⁵ U 濃縮度 0.711 wt% (プロットは含水率 1, 3, 5 wt% 及び空隙なし)		
(9) 均質 PuO ₂ -UO ₂ -H ₂ O	PuO ₂ 富化度 55[wt%]	PuO ₂ 富化度 35[wt%]	PuO ₂ 富化度 15[wt%]
²³⁹ Pu: ²⁴⁰ Pu: ²⁴¹ Pu=100:0:0	図 5.23	図 5.24	図 5.25
80:10:10	図 5.26	図 5.27	図 5.28
71:17:12	図 5.29	図 5.30	図 5.31

核燃料物質	(U+Pu)濃度 vs (a)質量、(b)球体積、(c)円柱直径、(d)平板厚さ	
(10) U,Pu 混合硝酸水溶液	Pu 富化度 0.744wt%, ²³⁵ U 濃縮度 2, 3.5wt% (Pu 組成 ²³⁹ Pu: ²⁴⁰ Pu: ²⁴¹ Pu=71:17:12)	図 5.32
	(U+Pu)濃度 vs (a)円柱直径、(b)平板厚さ	
	Pu 富化度 10,30,50wt%, ²³⁵ U 濃縮度 0.711wt% (Pu 組成 ²³⁹ Pu: ²⁴⁰ Pu: ²⁴¹ Pu=71:17:12)	図 5.33
Pu 富化度 10,30,50wt%, ²³⁵ U 濃縮度 0.711wt% (Pu 組成 ²³⁹ Pu: ²⁴⁰ Pu: ²⁴¹ Pu=80:10:10)	図 5.34	

核燃料物質	質量 vs 燃料棒直径	質量 vs 燃料濃度
(11) 非均質 UO ₂ 及び 非均質 PuO ₂ -UO ₂	非均質 UO ₂ -H ₂ O (²³⁵ U 濃縮度 5wt%)	図 5.35 (全 ²³⁵ U 濃縮度)
	非均質 PuO ₂ -UO ₂ -H ₂ O (²³⁵ U 濃縮度 0.711 wt%)	図 5.36 (PuO ₂ 富化度 10wt%, Pu 組成 ²³⁹ Pu: ²⁴⁰ Pu: ²⁴¹ Pu = 71:17:12)

核燃料物質	燃料濃度 vs 質量				
(12) その他の核分 裂性核種の臨界及 び未臨界質量	(k _{eff} =1.0, 0.9, 0.8)				
	²⁴¹ Pu 図 5.39	^{242m} Am 図 5.40	²⁴³ Cm 図 5.41	²⁴⁹ Cf 図 5.42	²⁵¹ Cf 図 5.43

5.2 計算方法

連続エネルギーモンテカルロ臨界計算コード MVP¹⁾と日本の評価済み核データライブラリ JENDL-3.2²⁾の組合せを用いて均質燃料体系及び非均質燃料体系の臨界データを計算した。推定臨界増倍率及び推定臨界下限増倍率は第6章に記したベンチマーク計算結果を用いて表5.13に記した値を用いた。なお、標準偏差の計算には、燃料体系グループごとに、ベンチマーク計算の系統的誤差のばらつきの他、個々のベンチマークモデルの誤差とベンチマーク計算の誤差を考慮して示している。また、推定臨界下限増倍率は、統計計算により得られた値と0.98とのうち、小さい方の値を採用している³⁾。

計算の模式的な流れを図5.44に示す。対象の物理的なパラメータは、空隙を含む物質情報と幾何形状、即ち物質の大きさと配置からなる。物質情報は、核種の物質中での原子個数密度であり、中性子輸送コードに伝えられる。中性子輸送計算コード MVP の入力データは、幾何形状情報と計算を管理するパラメータ情報からなる。実際には、原子個数密度は入力データを通して与えられるが、図5.44では簡略化して原子個数密度が直接 MVP コードに与えられるように描いている。MVP コードは中性子断面積も必要とし、評価済み核データライブラリ JENDL-3.2 の場合には JENDL-3.2 ARTLIB ライブラリとして与えられる。なお、マイナー・アクチニドの臨界データの計算に当っては、諸外国の同様なデータとの比較を容易にするため連続エネルギー計算コードとして MCNP コード⁴⁾と JENDL-3.2 の組合せを用いた。

MVP あるいは MCNP では、任意に与えられた燃料寸法に対して中性子増倍率 k_{eff} が計算される。特定の k_{eff} に対して対応する燃料寸法を決めるために、燃料寸法と k_{eff} の計算値を2次曲線に当てはめた。なお、マイナー・アクチニドの臨界質量 ($k_{\text{eff}}=1$ に対応するもの) 及び未臨界質量 ($k_{\text{eff}}=0.9$ 及び 0.8 に対応するもの) の計算において各燃料濃度での $k_{\text{eff}}=1, 0.9, 0.8$ に対応する燃料球寸法の計算には、参考文献5) に記された方法を用いた。即ち、(1) k_{∞} の計算値、及び(2) $k_{\text{eff}}=1, 0.9, 0.8$ の値を挟むように4つの球半径を決め対応する k_{eff} の計算値を $k_{\text{eff}} = k_{\infty} (1 - e^{-\alpha x})^{\beta x^{\gamma}}$ の曲線に当てはめた。ここで、 α 、 β 、 γ はパラメータであり、 x は球半径である。

5.3 計算条件

5.3.1 体系温度

体系温度は20°Cとした(但し、 UO_2F_2 水溶液については、溶液温度は25°Cとして密度を算出した)。したがって、燃料の原子個数密度を計算する際に用いる水の密度は、20°Cにおける値 0.99820 g/cm^3 を採用した⁶⁾。水反射体及び水減速材も同様である。

5.3.2 MVP

連続エネルギーモンテカルロ臨界計算コード MVP を用いた計算では、標準偏差が 0.06%以下になることを目安にヒストリー数は 100 万程度とした。具体的には、5,000 個/世代× (250-50) 世代程度とした。

5.3.3 MCNP

連続エネルギーモンテカルロ臨界計算コード MCNP を用いた計算では、標準偏差が 0.06%以下になることを目安にヒストリー数は 100 万程度とした。具体的には、5,000 個/世代× (250-50) 世代程度とした。

第 5 章の参考文献

- 1) 森貴正・中川正幸、「MVP/GMVP: 連続エネルギー法及び多群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード」、JAERI-Data/Code 94-007 (1994).
- 2) T. Nakagawa, K. Shibata, S. Chiba, T. Fukahori, Y. Nakajima, Y. Kikuchi, T. Kawano, Y. Kanda, T. Ohsawa, H. Matsunobu, M. Kawai, A. Zukeran, T. Watanabe, S. Igarasi, K. Kosako and T. Asami., “Japanese Evaluated Nuclear Data Library, version 3, revision 2: JENDL 3.2,” J. Nucl. Sci. Technol., **32**, p.1259 (1995).
- 3) 奥野浩・内藤叔孝、「臨界安全解析コードシステム JACS の計算誤差評価」、JAERI-M 87-057 (1987).
- 4) J.F. Briesmeister (ed.), “MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B,” LA-12625-M (1997).
- 5) C.T. Rombough, S.H. Martonak and N.L. Pruvost, “Search technique for calculating critical and subcritical configurations with MCNP,” ANS Trans. **76**, p.197 (1996).
- 6) 「理科年表」、昭和 60 年版、東京天文台編纂.

表 5.1 均質 U-H₂O の最小推定臨界値及び最小推定臨界下限値

²³⁵ U 濃縮度 [wt%]	最小推定臨界値				最小推定臨界下限値			
	ウラン 質量 [kgU]	球体積 [L]	無限円柱 直径 [cm]	無限平板 厚さ [cm]	ウラン 質量 [kgU]	球体積 [L]	無限円柱 直径 [cm]	無限平板 厚さ [cm]
3	94.3	41.3	29.7	14.8	76.3	34.2	27.7	13.4
4	52.9	28.5	26.0	12.3	44.5	24.3	24.3	11.3
5	35.8	22.6	23.8	10.9	30.2	19.3	22.3	10.1
6	25.0	19.2	22.3	10.1	21.5	16.5	21.1	9.22
7	20.3	16.9	21.3	9.40	17.3	14.6	20.2	8.65
10	12.6	13.5	19.5	8.20	10.9	11.8	18.5	7.54
20	5.14	9.66	17.1	6.64	4.48	8.49	16.2	6.09
50	1.72	3.54	11.5	3.23	1.52	3.13	11.0	2.89
93.5	0.87	1.25	7.91	1.73	0.77	1.12	7.57	1.55
100	0.79	1.12	7.57	1.59	0.69	1.01	7.24	1.43

表 5.2 均質 UO₂-H₂O の最小推定臨界値及び最小推定臨界下限値

²³⁵ U 濃縮度 [wt%]	最小推定臨界値				最小推定臨界下限値			
	ウラン 質量 [kgU]	球体積 [L]	無限円柱 直径 [cm]	無限平板 厚さ [cm]	ウラン 質量 [kgU]	球体積 [L]	無限円柱 直径 [cm]	無限平板 厚さ [cm]
3	98.2	55.4	32.7	16.6	81.6	45.2	30.6	15.3
4	55.5	36.1	28.2	13.5	45.9	30.4	26.5	12.7
5	37.0	28.0	25.7	12.2	31.1	23.7	24.2	11.2
6	27.7	23.4	24.1	11.1	23.5	20.2	22.8	10.3
7	21.6	20.4	22.9	10.4	18.5	17.6	21.7	9.56
10	12.9	15.7	20.7	9.00	11.1	13.6	19.7	8.34
20	5.25	10.8	17.8	7.21	4.62	9.5	17.0	6.65

表 5.3 UO₂F₂ 水溶液の最小推定臨界値及び最小推定臨界下限値

²³⁵ U 濃縮度 [wt%]	最小推定臨界値				最小推定臨界下限値			
	ウラン 質量 [kgU]	球体積 [L]	無限円柱 直径 [cm]	無限平板 厚さ [cm]	ウラン 質量 [kgU]	球体積 [L]	無限円柱 直径 [cm]	無限平板 厚さ [cm]
3	108	73.4	36.5	19.1	87.4	61.5	34.2	17.6
4	58.2	46.5	31.1	15.6	48.0	39.4	29.2	14.4
5	38.3	34.9	28.0	13.6	32.4	29.9	26.3	12.6
6	28.1	28.4	25.8	12.3	23.8	24.2	24.4	11.4
7	22.1	24.2	24.4	11.4	18.7	21.0	23.1	10.6
10	12.9	17.8	21.8	9.75	11.1	15.5	20.8	9.07
20	5.28	11.6	18.5	7.64	4.60	10.2	17.6	7.06

表 5.4 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 水溶液の最小推定臨界値及び最小推定臨界下限値

^{235}U 濃縮度 [wt%]	最小推定臨界値				最小推定臨界下限値			
	ウラン 質量 [kgU]	球体積 [L]	無限円柱 直径 [cm]	無限平板 厚さ [cm]	ウラン 質量 [kgU]	球体積 [L]	無限円柱 直径 [cm]	無限平板 厚さ [cm]
3	424	343	62.7	36.2	305	243	55.7	31.8
4	143	136	45.3	25.0	111	110	41.8	22.6
5	77.0	84.0	38.3	20.2	61.5	69.1	35.6	18.5
6	49.1	60.2	34.0	17.4	40.2	50.1	31.9	16.1
7	35.5	47.2	31.1	15.6	29.3	40.0	29.2	14.5
10	17.6	30.0	26.3	12.6	15.0	25.7	25.0	11.7
20	6.00	16.3	21.0	9.21	5.19	14.3	20.0	8.58

表 5.5 $\text{ADU(II)-H}_2\text{O}$ の最小推定臨界値及び最小推定臨界下限値

^{235}U 濃縮度 [wt%]	最小推定臨界値				最小推定臨界下限値			
	ウラン 質量 [kgU]	球体積 [L]	無限円柱 直径 [cm]	無限平板 厚さ [cm]	ウラン 質量 [kgU]	球体積 [L]	無限円柱 直径 [cm]	無限平板 厚さ [cm]
3	119	67.4	35.3	18.5	95.9	54.5	32.9	16.8
4	61.6	42.1	30.0	14.9	51.7	35.3	27.9	13.7
5	40.6	31.0	26.9	12.9	33.8	26.4	25.4	12.0
6	29.7	26.0	25.0	11.7	25.0	22.1	23.6	10.8
7	23.1	22.2	23.6	10.9	19.8	19.1	22.3	10.1
10	13.4	16.8	21.2	9.37	11.5	14.6	20.1	8.68
20	5.40	11.1	18.2	7.40	4.71	9.86	17.3	6.84

表 5.6 $\text{UF}_6\text{-HF}$ の最小推定臨界値及び最小推定臨界下限値

^{235}U 濃縮度 [wt%]	最小推定臨界値				最小推定臨界下限値			
	ウラン 質量 [kgU]	球体積 [L]	無限円柱 直径 [cm]	無限平板 厚さ [cm]	ウラン 質量 [kgU]	球体積 [L]	無限円柱 直径 [cm]	無限平板 厚さ [cm]
3	4169	1226	96.4	56.5	2456	722	80.2	45.9
4	1830	538	72.5	40.4	1240	364	63.3	34.7
5	1142	336	61.8	33.9	828	243	55.1	29.2
6	888	261	55.7	29.6	648	190	50.0	26.0
7	685	201	50.9	26.7	525	154	46.6	23.5
10	422	124	43.0	21.4	339	99.7	39.4	18.9
20	185	54.5	31.9	14.6	154	45.4	29.8	13.0

表 5.7 均質 PuO₂-H₂O の最小推定臨界値及び最小推定臨界下限値

プルトニウム組成 ²³⁹ Pu : ²⁴⁰ Pu : ²⁴¹ Pu [wt%]	最小推定臨界値				最小推定臨界下限値			
	プルトニウム質量 [kgU]	球体積 [L]	無限円柱直径 [cm]	無限平板厚さ [cm]	プルトニウム質量 [kgU]	球体積 [L]	無限円柱直径 [cm]	無限平板厚さ [cm]
95:5:0	0.61	1.27	7.98	1.95	0.54	1.15	7.69	1.80
80:10:10	0.68	1.32	8.09	1.94	0.60	1.21	7.80	1.77
71:17:12	0.89	1.41	8.34	2.09	0.76	1.29	8.04	1.92

表 5.8 Pu(NO₃)₄ 水溶液の最小推定臨界値及び最小推定臨界下限値

プルトニウム組成 ²³⁹ Pu : ²⁴⁰ Pu : ²⁴¹ Pu [wt%]	最小推定臨界値				最小推定臨界下限値			
	プルトニウム質量 [kgU]	球体積 [L]	無限円柱直径 [cm]	無限平板厚さ [cm]	プルトニウム質量 [kgU]	球体積 [L]	無限円柱直径 [cm]	無限平板厚さ [cm]
100:0:0	0.51	7.81	15.8	5.87	0.46	7.03	15.1	5.48
80:10:10	0.69	12.4	18.9	7.82	0.61	11.1	18.1	7.25
71:17:12	0.89	15.8	20.7	8.95	0.78	14.0	19.7	8.28

表 5.9 UO₂(NO₃)₂-Pu(NO₃)₄ 混合硝酸水溶液の最小推定臨界値及び最小推定臨界下限値

プルトニウム組成 ²³⁹ Pu : ²⁴⁰ Pu : ²⁴¹ Pu [wt%]	Pu 富化度 [wt%]	²³⁵ U 濃縮度 [wt%]	最小推定臨界値				最小推定臨界下限値			
			(U+Pu) 質量 [kg(U+Pu)]	球体積 [L]	無限円柱直径 [cm]	無限平板厚さ [cm]	(U+Pu) 質量 [kg(U+Pu)]	球体積 [L]	無限円柱直径 [cm]	無限平板厚さ [cm]
71:17:12	0.744	2	592	504	72.3	42.1	432	377	65.1	37.5
71:17:12	0.744	3.5	116	123	44.2	24.0	96.4	104	41.5	22.3
71:17:12	10	0.711	---	---	29.5	14.6	---	---	28.1	13.8
	30	0.711	---	---	23.7	10.8	---	---	22.7	10.2
	50	0.711	---	---	22.3	9.90	---	---	21.3	9.35
80:10:10	10	0.711	---	---	26.6	12.8	---	---	25.5	12.1
	30	0.711	---	---	21.6	9.55	---	---	20.8	9.01
	50	0.711	---	---	20.3	8.71	---	---	19.5	8.16

表 5.10 最適燃料寸法での非均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の最小推定臨界下限値

^{235}U 濃縮度 [wt%]	最小推定臨界下限値
	U 質量 [kgU]
3	67.1
5	27.7
7	16.9
10	10.4
15	6.44
20	4.56
30	2.82
50	1.56

表 5.11 最適燃料寸法での非均質 $\text{PuO}_2\text{-UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の最小推定臨界下限値 (^{239}Pu 100%、 ^{235}U 0.711 wt%)

PuO_2 富化度 [wt%]	最小推定臨界下限値
	(U+Pu)質量 [kg(U+Pu)]
5	21.2
10	10.0
15	6.31
20	4.55
30	2.91
50	1.70

表 5.12 その他の核分裂性核種の最小臨界下限値

核種	最小推定臨界下限値		
	反射体なし 質量[kg]	SUS 反射体付き 質量[kg]	水反射体付き 質量[kg]
^{241}Pu	0.52	0.21	0.28
$^{242\text{m}}\text{Am}$	0.044	0.018	0.021
^{243}Cm	0.39	0.15	0.18
^{249}Cf	0.12	0.052	0.059
^{251}Cf	0.064	0.027	0.032

表 5.13 MVP と JENDL-3.2 の組合せに対する臨界計算の誤差評価

体系	平均 m	標準偏差 s	標本数	パラメータ μ^*	m - μs	推定臨界 増倍率	推定臨界 下限増倍率
均質低濃縮ウラン系	1.0073	0.0050	75	2.411	0.9951	1.0073	0.98
均質高濃縮ウラン系	1.0052	0.0070	55	2.503	0.9878	1.0052	0.98
均質プルトニウム系	1.0044	0.0077	46	2.566	0.9846	1.0044	0.98
均質ウラン・プルトニウム系	0.9999	0.0057	29	2.775	0.9839	0.9999	0.98
非均質ウラン系	1.0026	0.0064	121	2.303	0.9878	1.0026	0.98
非均質ウラン・プルトニウム系	0.9991	0.0053	47	2.558	0.9855	0.9991	0.98

* パラメータ μ : 非心 t 分布のパラメータ。標本数の関数。未臨界確率 97.5%、信頼度 97.5%としている。

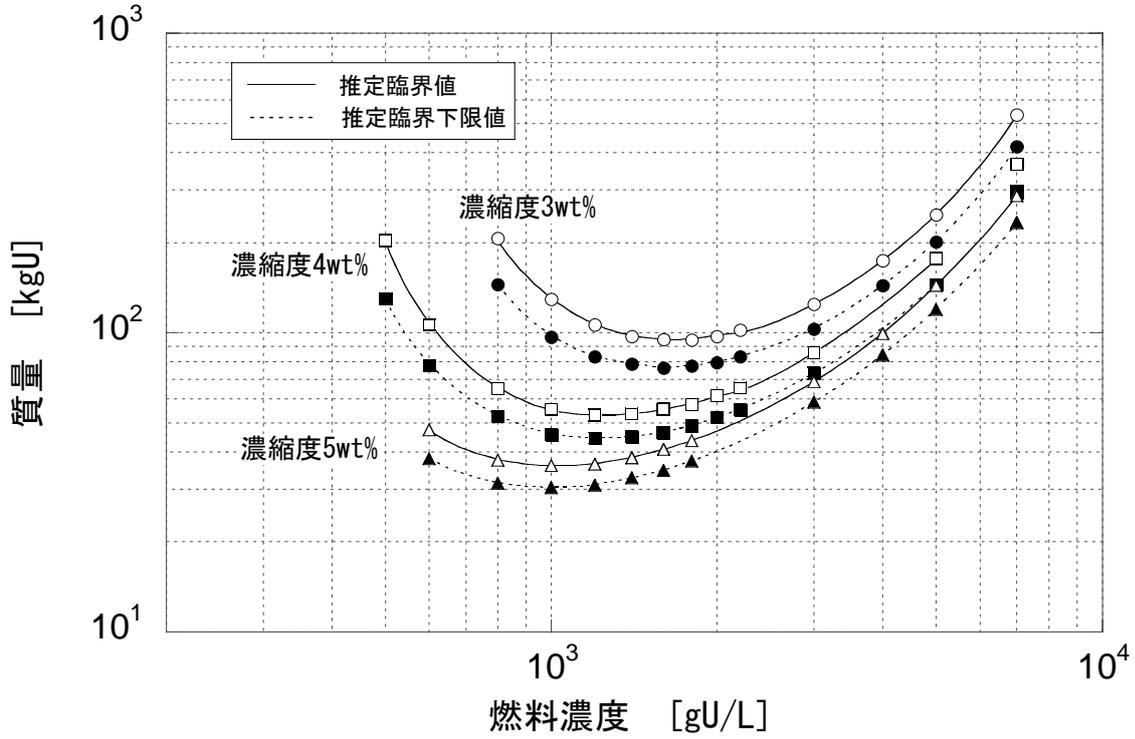


図 5.1(a) 均質 U-H₂O の臨界質量 (²³⁵U 濃縮度 3,4,5wt%、水反射体付き)

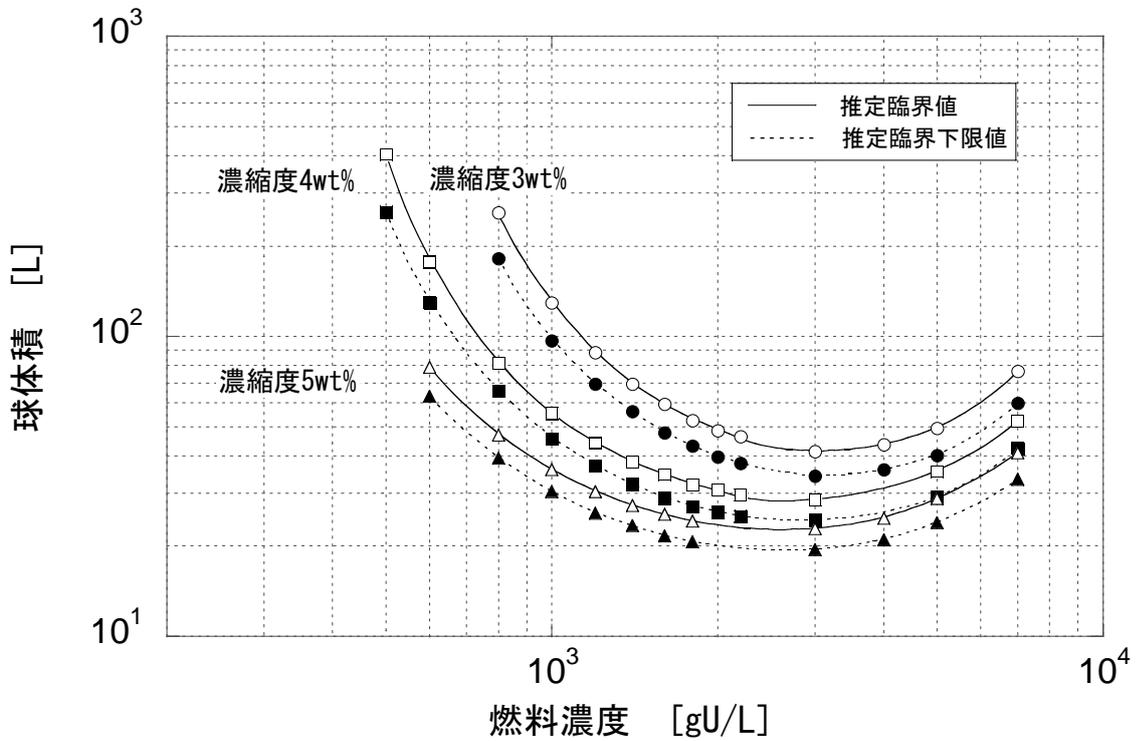


図 5.1(b) 均質 U-H₂O の臨界球体積 (²³⁵U 濃縮度 3,4,5wt%、水反射体付き)

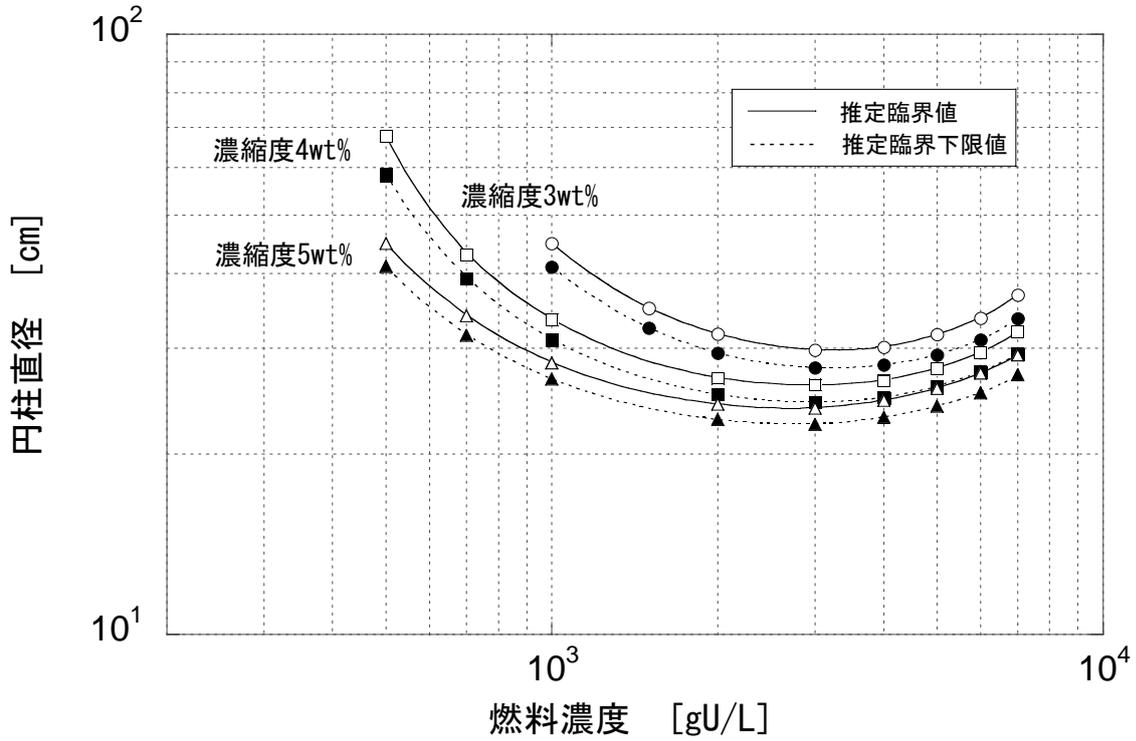


図 5.1(c) 均質 U-H₂O の臨界無限円柱直径 (²³⁵U 濃縮度 3,4,5wt%、水反射体付き)

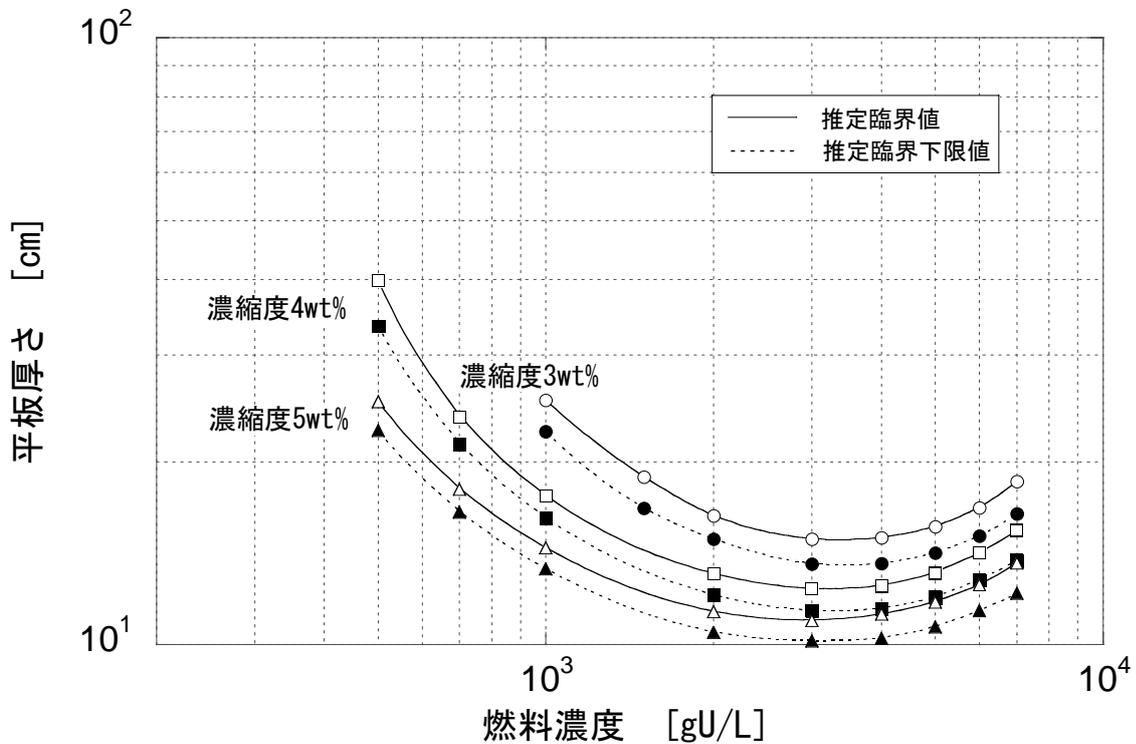


図 5.1(d) 均質 U-H₂O の臨界無限平板厚さ (²³⁵U 濃縮度 3,4,5wt%、水反射体付き)

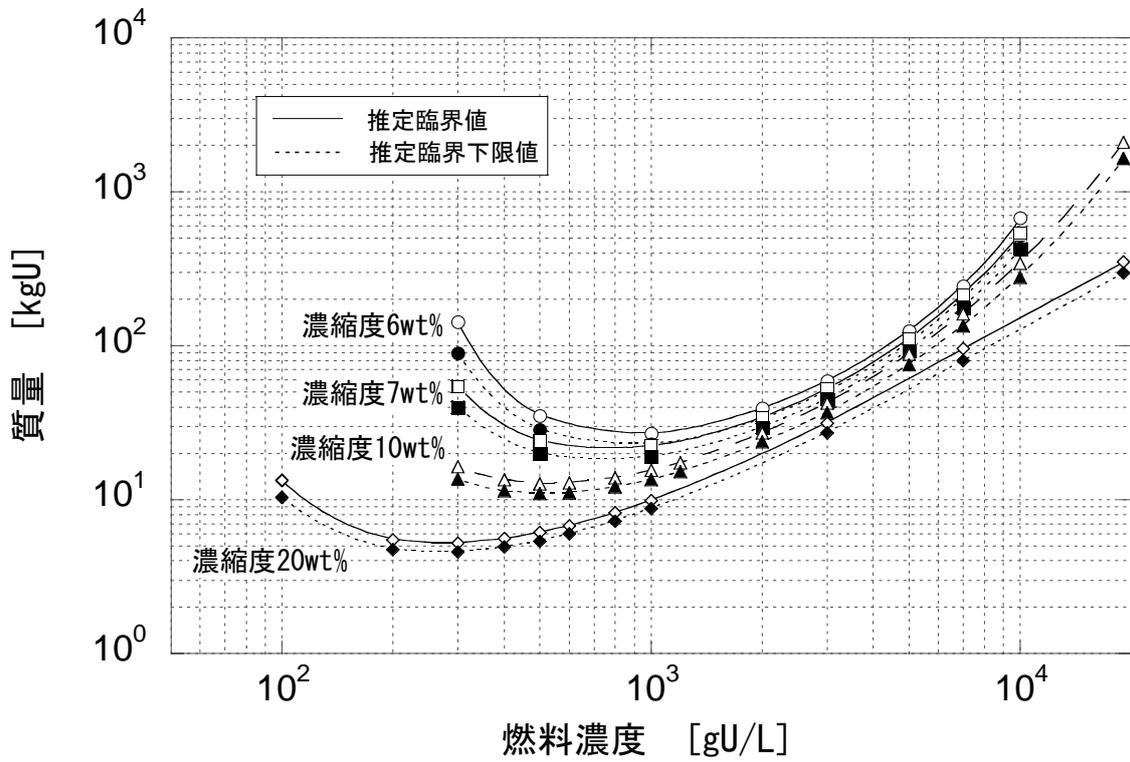


図 5.2(a) 均質 U-H₂O の臨界質量 (^{235}U 濃縮度 6,7,10,20wt%、水反射体付き)

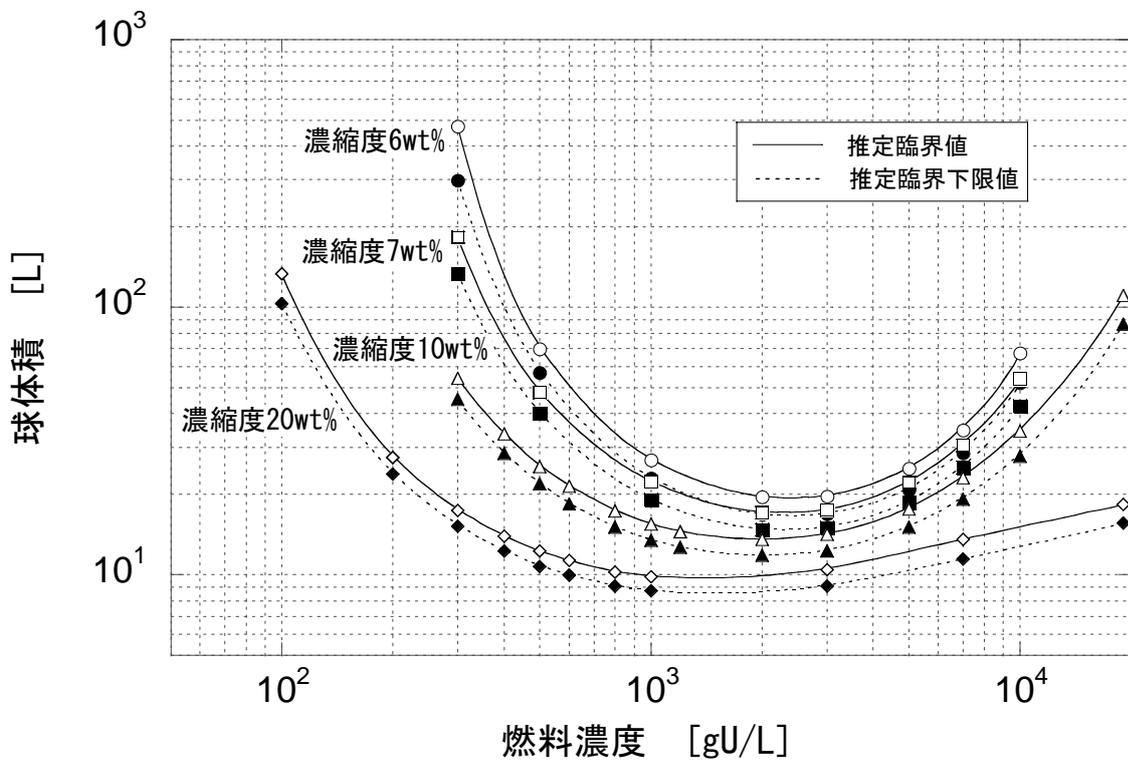


図 5.2(b) 均質 U-H₂O の臨界球体積 (^{235}U 濃縮度 6,7,10,20wt%、水反射体付き)

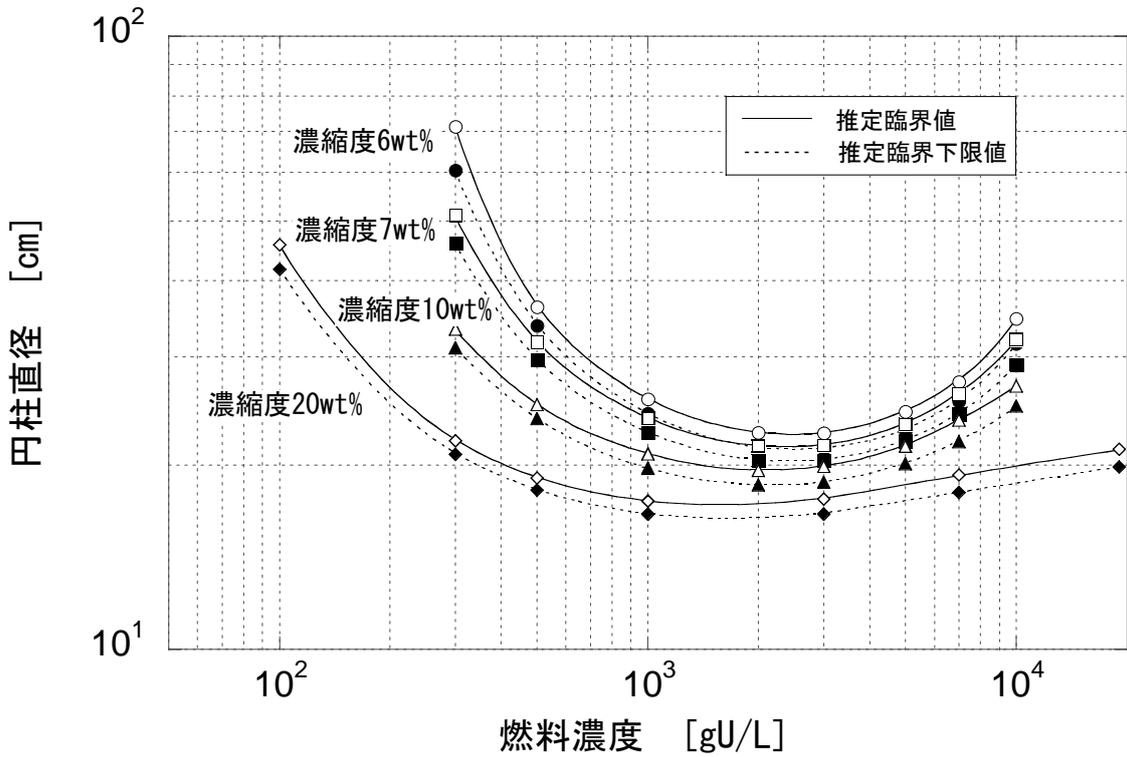


図 5.2(c) 均質 U-H₂O の臨界無限円柱直径 (²³⁵U 濃縮度 6,7,10,20wt%、水反射体付き)

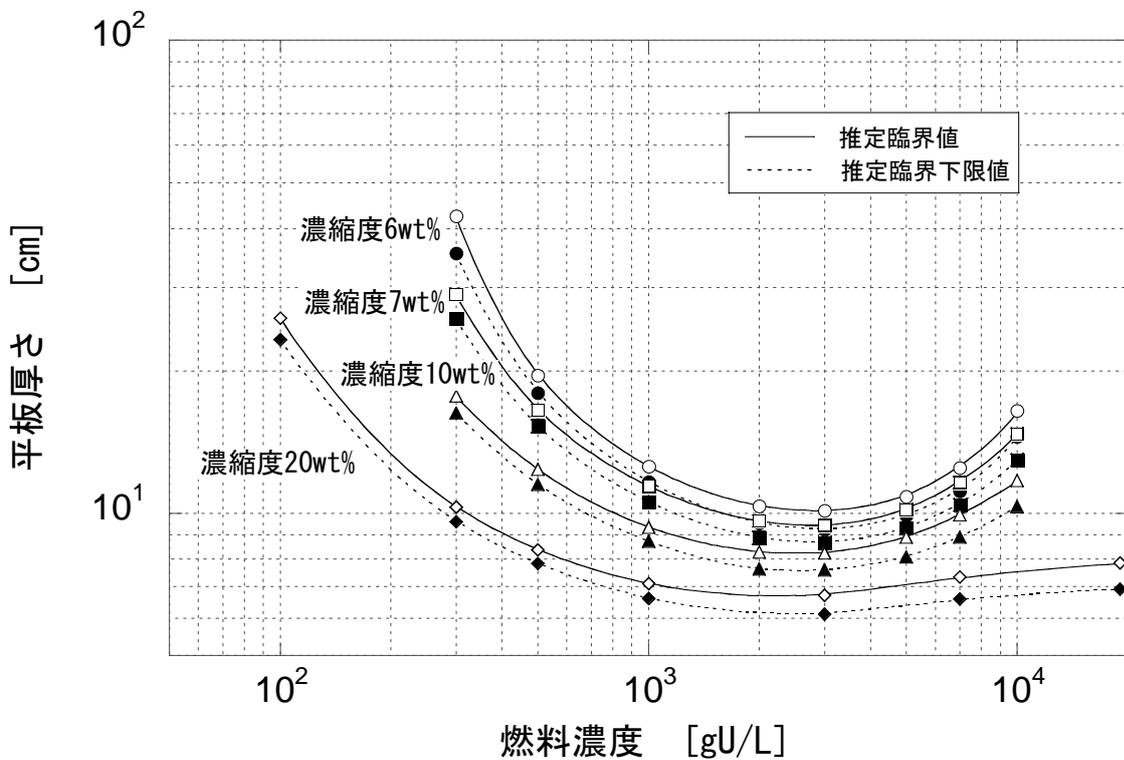


図 5.2(d) 均質 U-H₂O の臨界無限平板厚さ (²³⁵U 濃縮度 6,7,10,20wt%、水反射体付き)

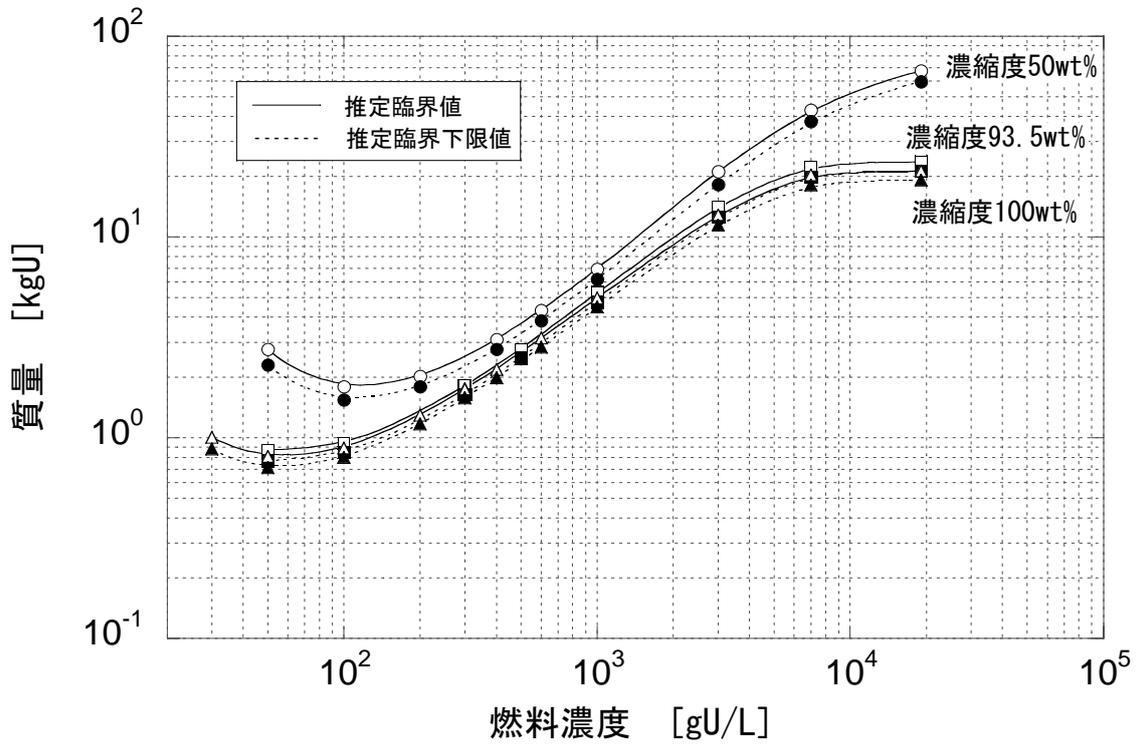


図 5.3(a) 均質 U-H₂O の臨界質量 (²³⁵U 濃縮度 50,93.5,100wt%、水反射体付き)

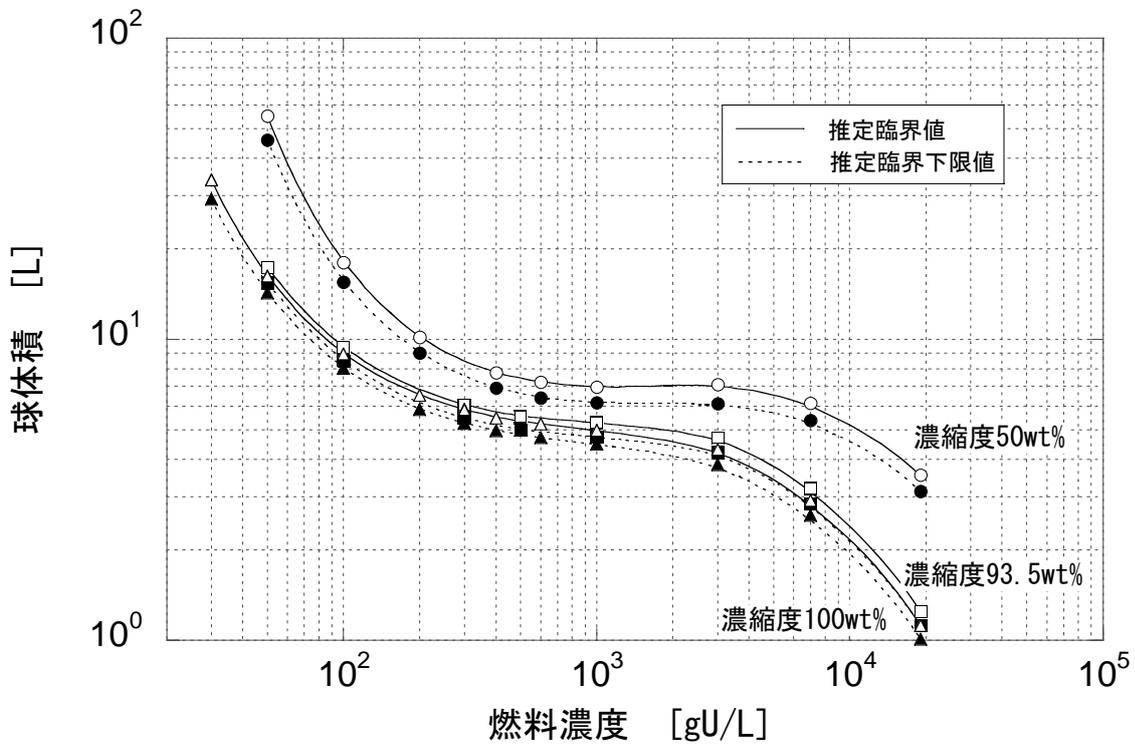


図 5.3(b) 均質 U-H₂O の臨界球体積 (²³⁵U 濃縮度 50,93.5,100wt%、水反射体付き)

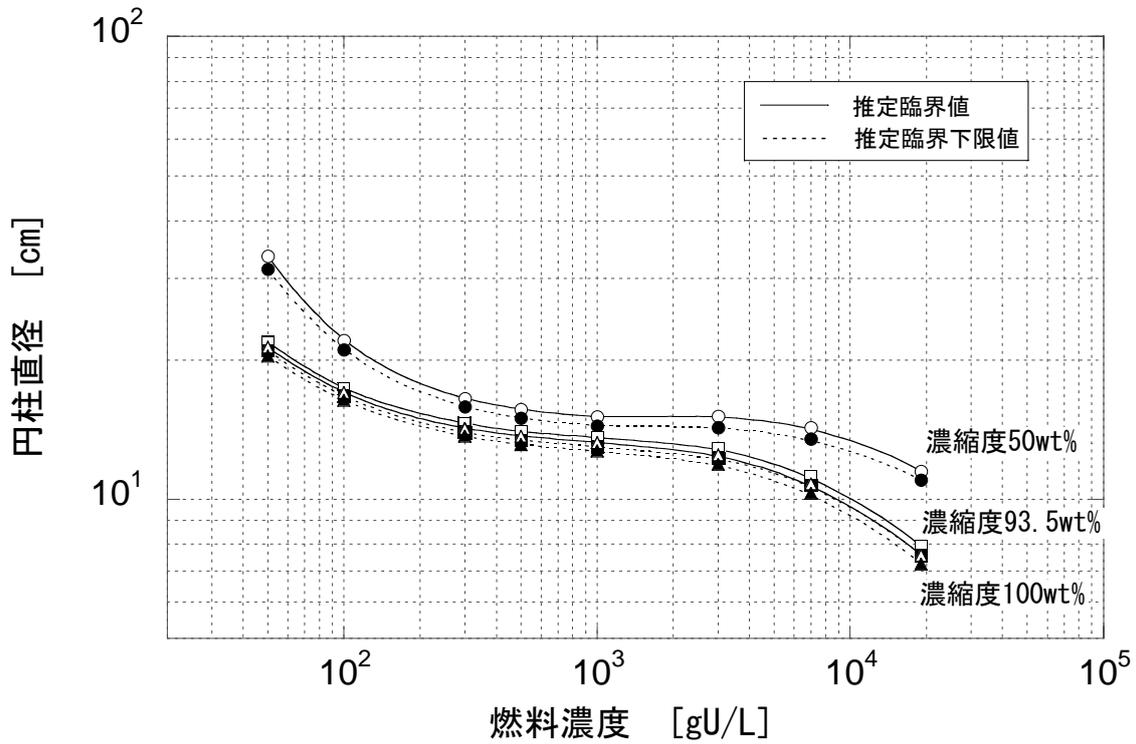


図 5.3(c) 均質 U-H₂O の臨界無限円柱直径 (²³⁵U 濃縮度 50,93.5,100wt%、水反射体付き)

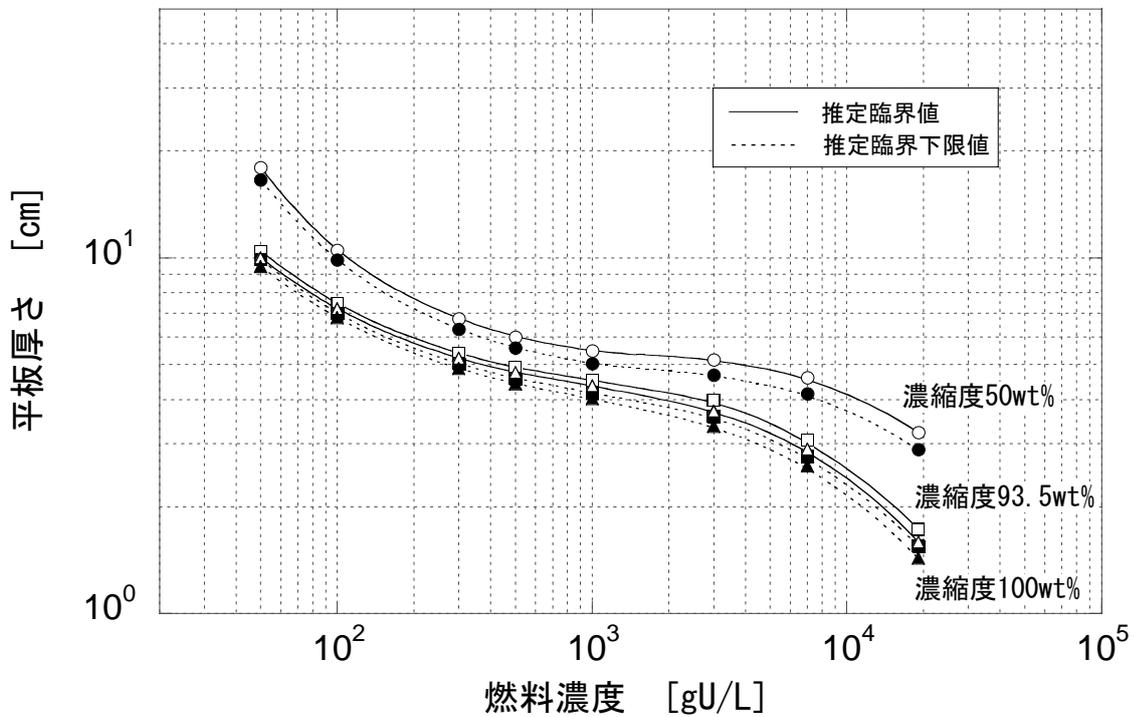


図 5.3(d) 均質 U-H₂O の臨界無限平板厚さ (²³⁵U 濃縮度 50,93.5,100wt%、水反射体付き)

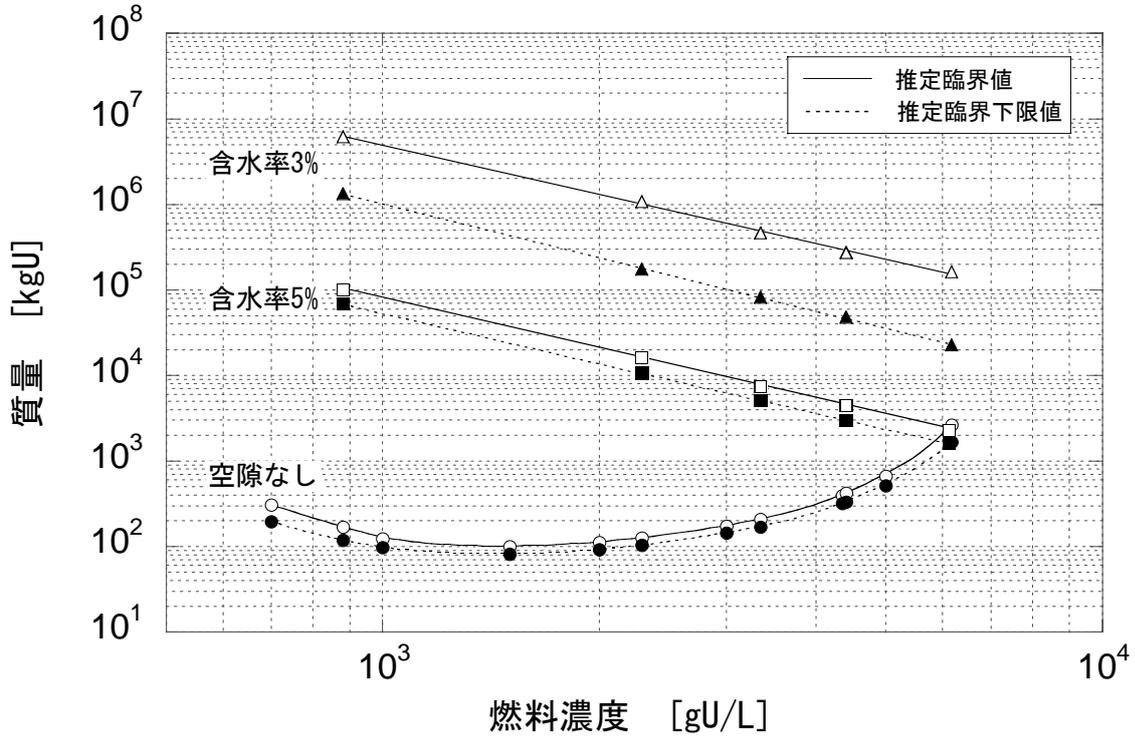


図 5.4(a) 均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界質量 (^{235}U 濃縮度 3wt%、水反射体付き)

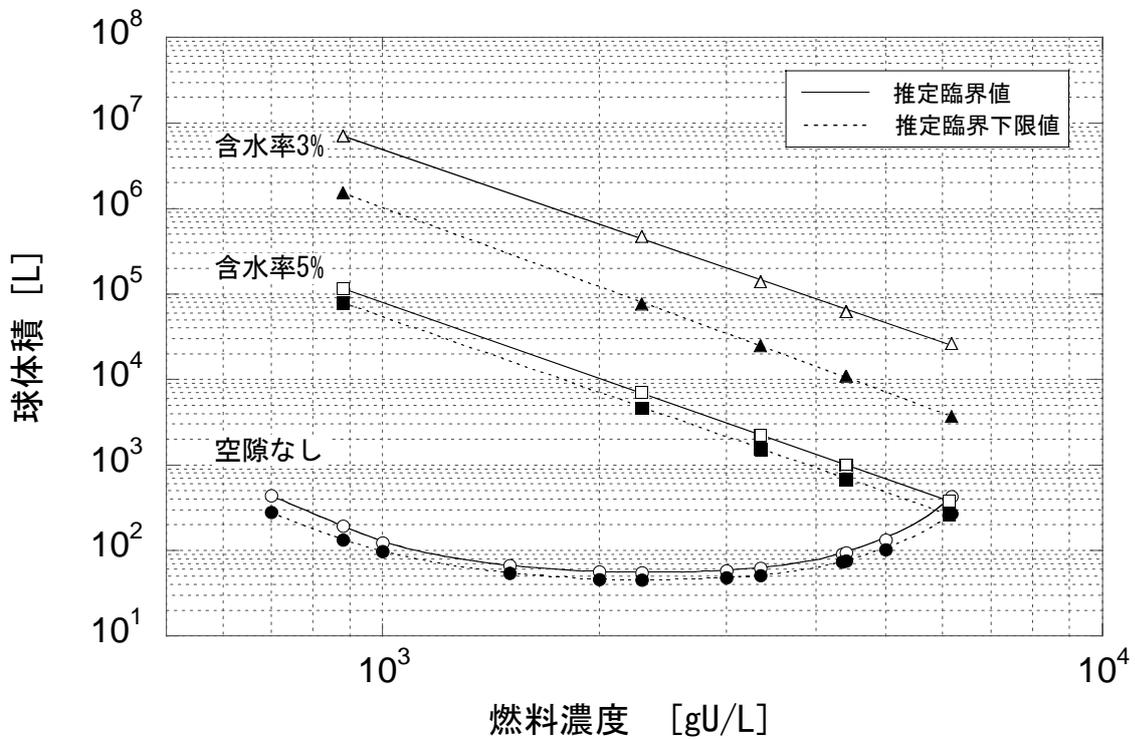


図 5.4(b) 均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界球体積 (^{235}U 濃縮度 3wt%、水反射体付き)

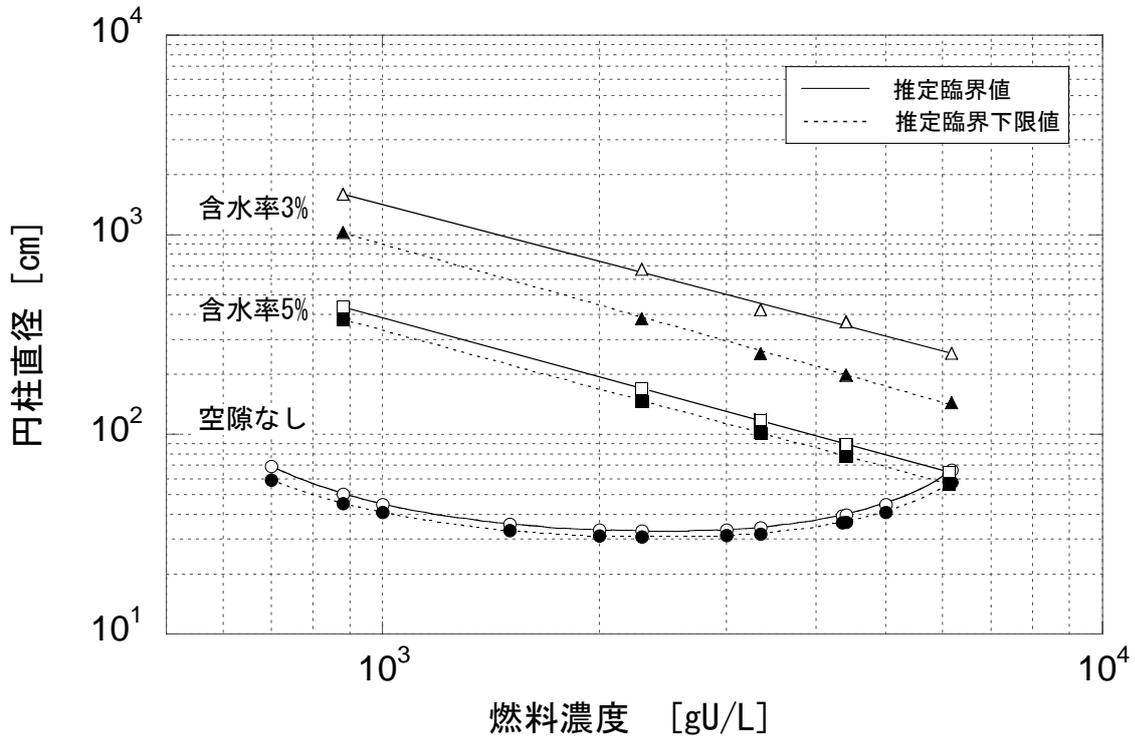


図 5.4(c) 均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界無限円柱直径 (^{235}U 濃縮度 3wt%、水反射体付き)

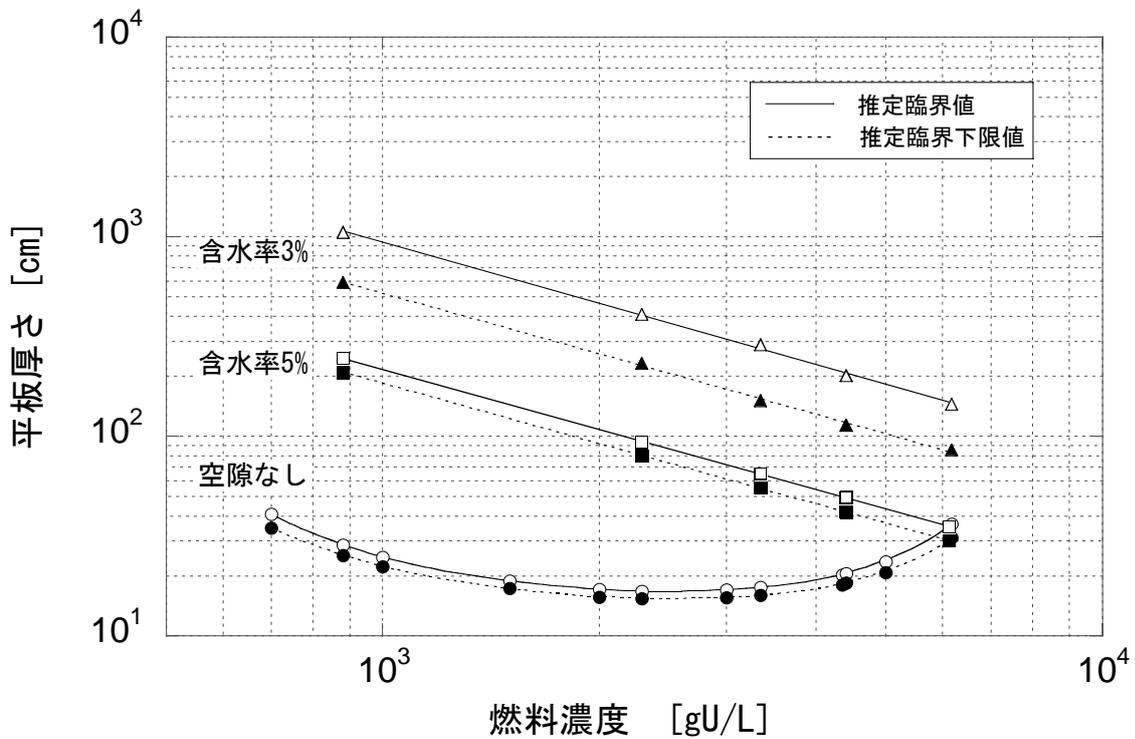


図 5.4(d) 均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界無限平板厚さ (^{235}U 濃縮度 3wt%、水反射体付き)

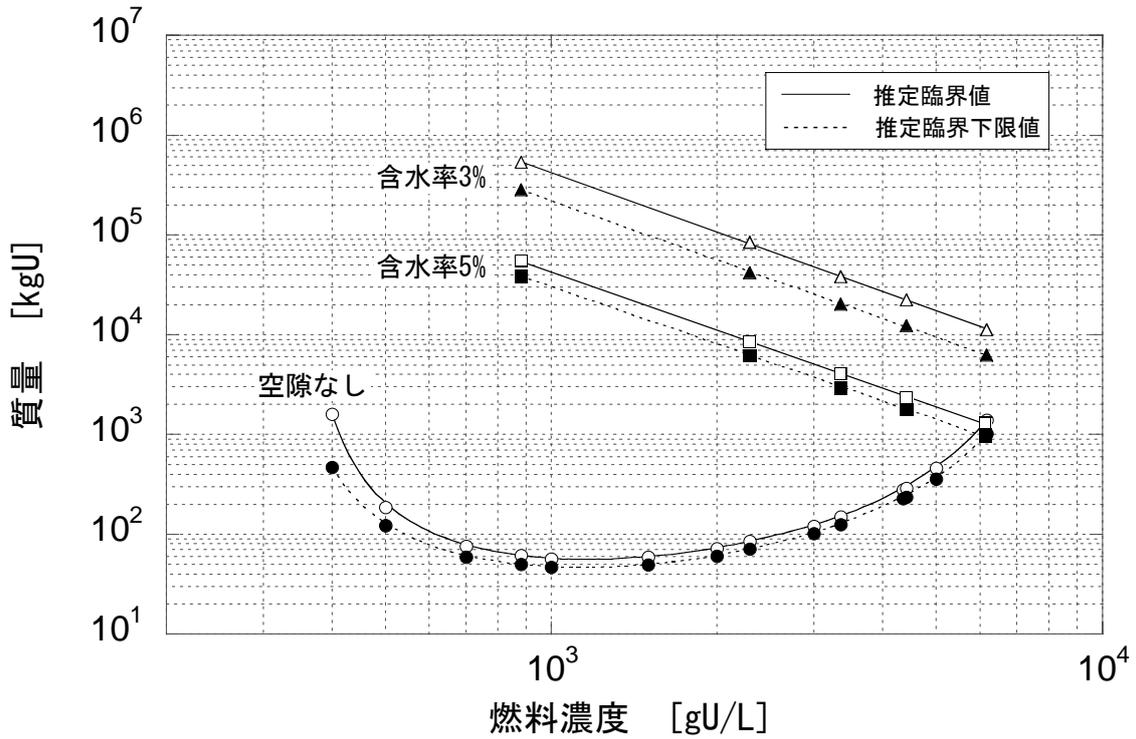


図 5.5(a) 均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界質量 (^{235}U 濃縮度 4wt%、水反射体付き)

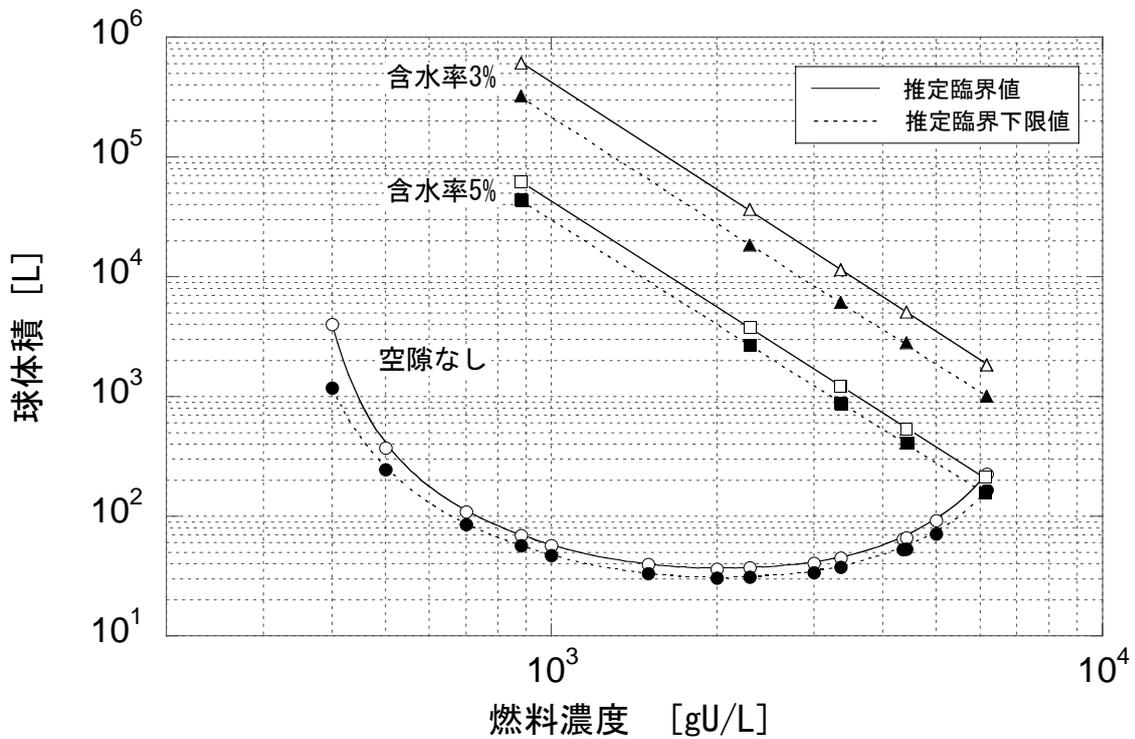


図 5.5(b) 均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界球体積 (^{235}U 濃縮度 4wt%、水反射体付き)

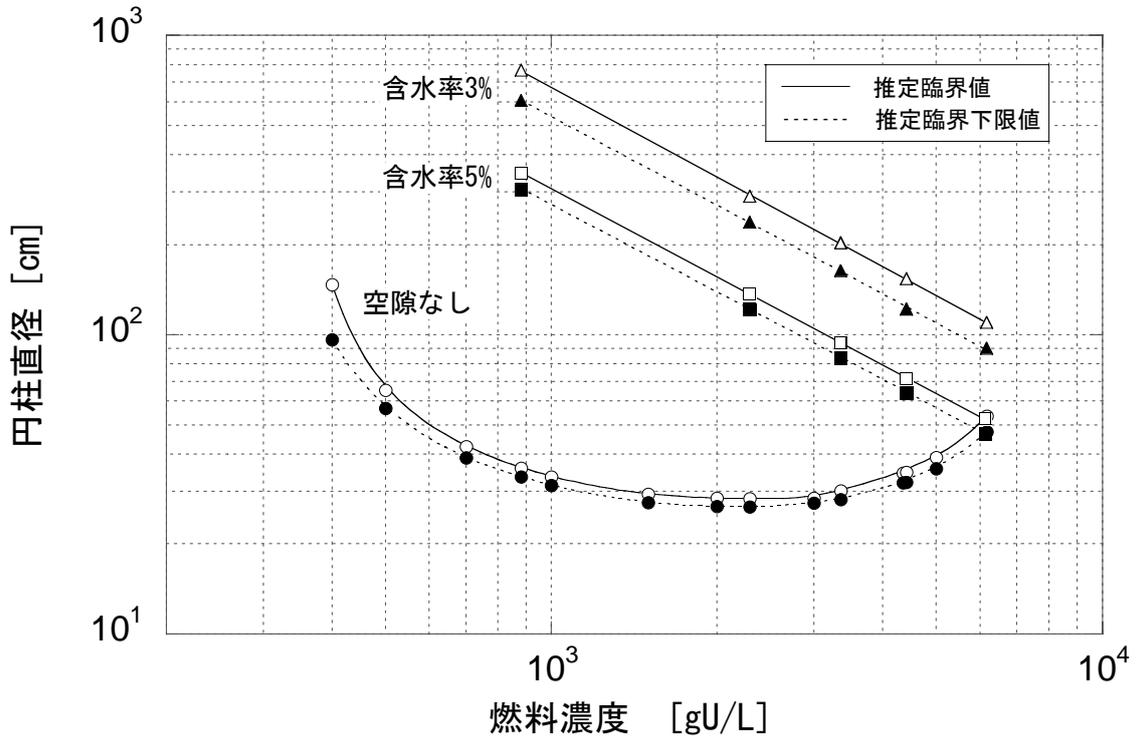


図 5.5(c) 均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界無限円柱直径 (^{235}U 濃縮度 4wt%、水反射体付き)

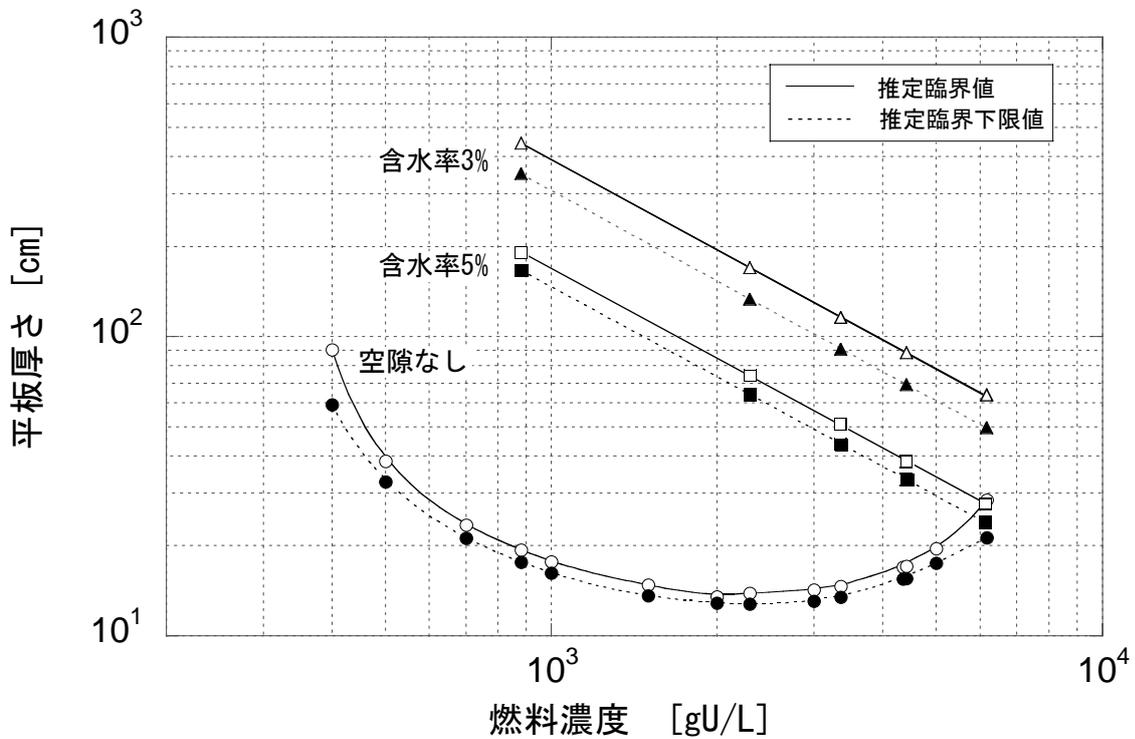


図 5.5(d) 均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界無限平板厚さ (^{235}U 濃縮度 4wt%、水反射体付き)

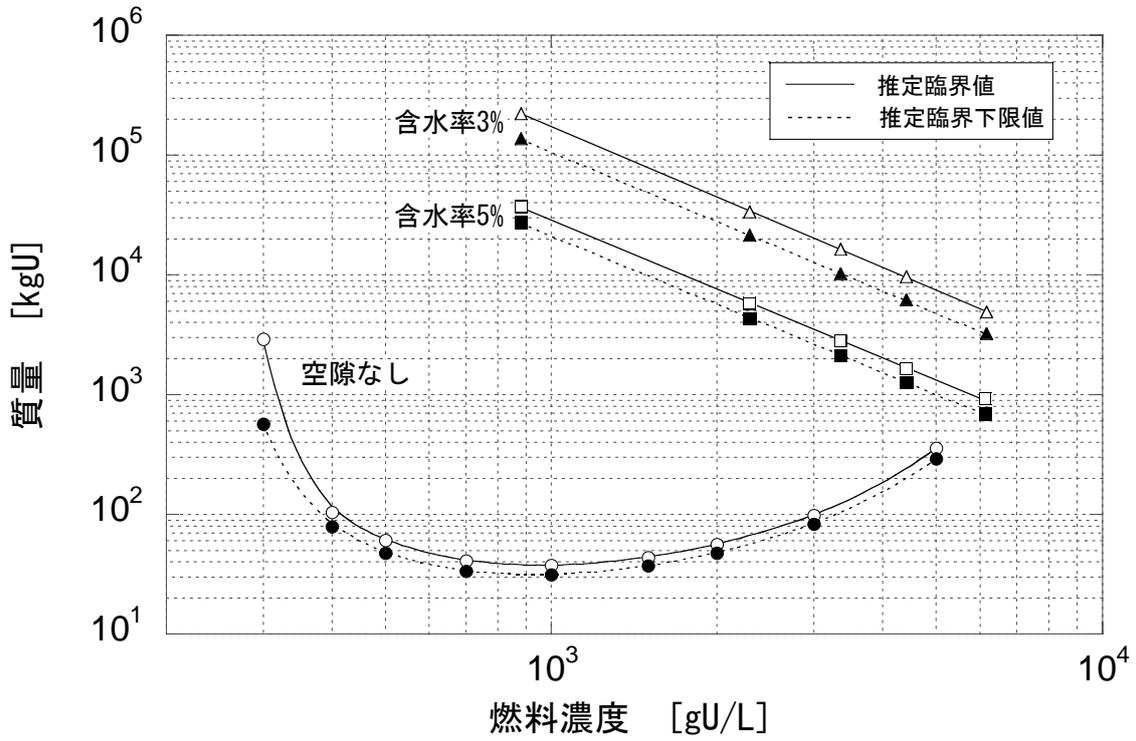


図 5.6(a) 均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界質量 (^{235}U 濃縮度 5wt%、水反射体付き)

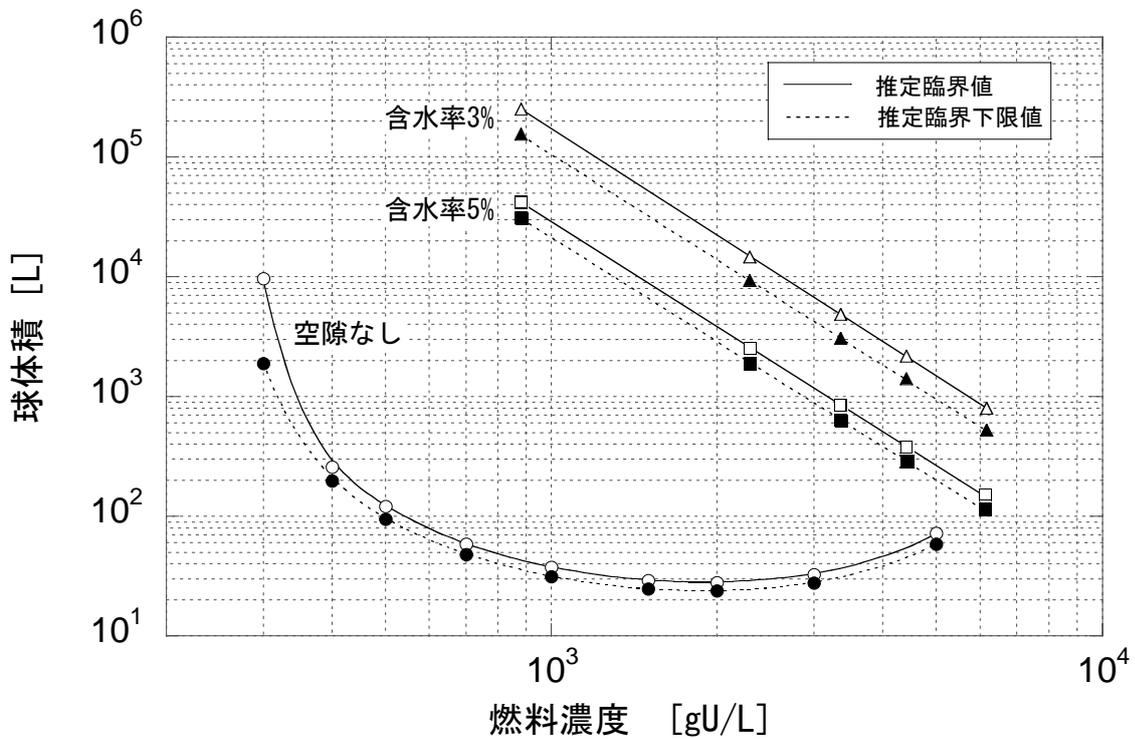


図 5.6(b) 均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界球体積 (^{235}U 濃縮度 5wt%、水反射体付き)

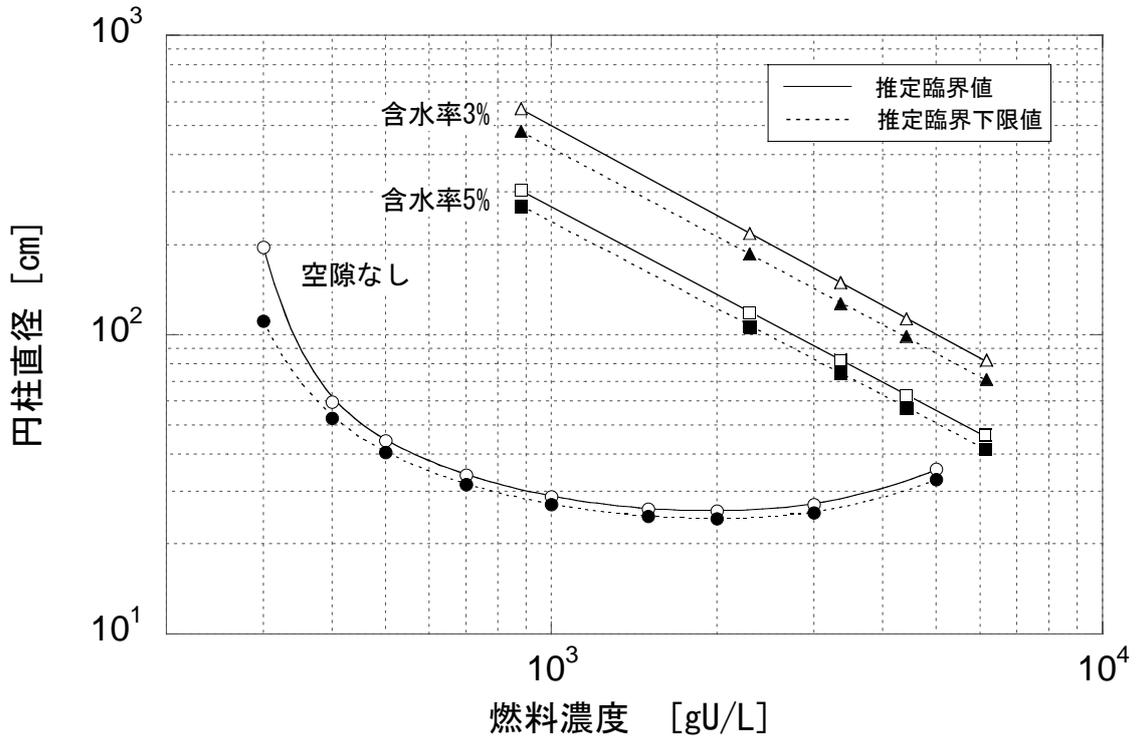


図 5.6(c) 均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界無限円柱直径 (^{235}U 濃縮度 5wt%、水反射体付き)

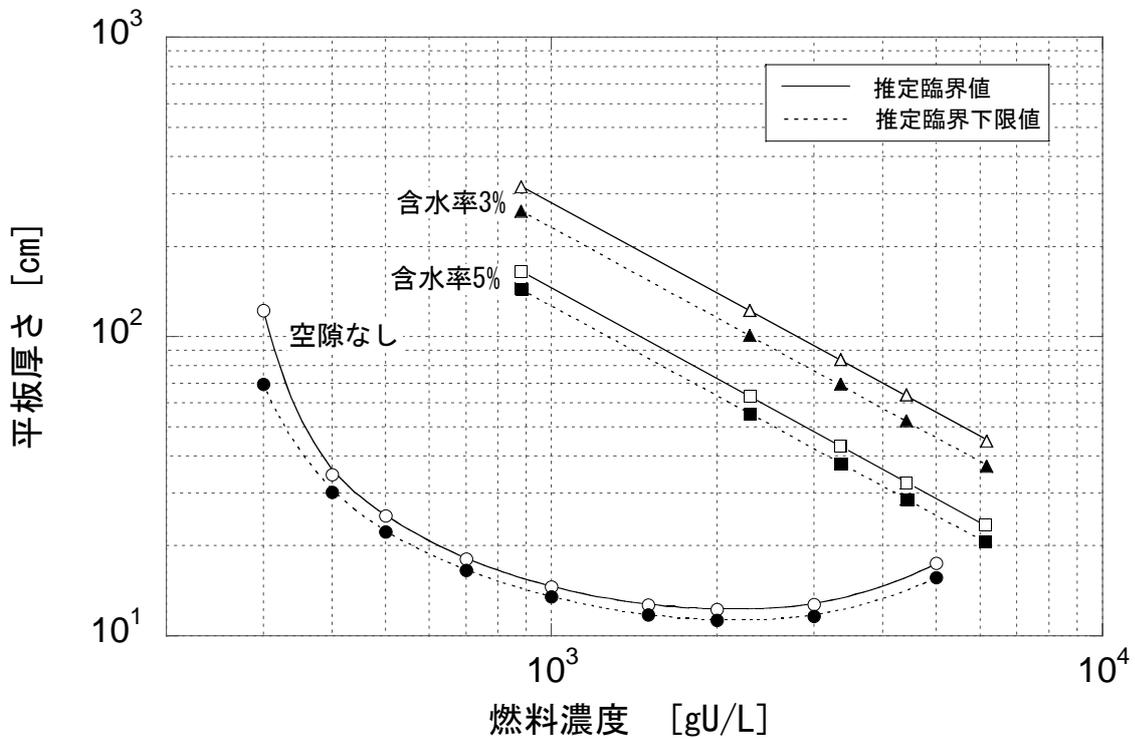


図 5.6(d) 均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界無限平板厚さ (^{235}U 濃縮度 5wt%、水反射体付き)

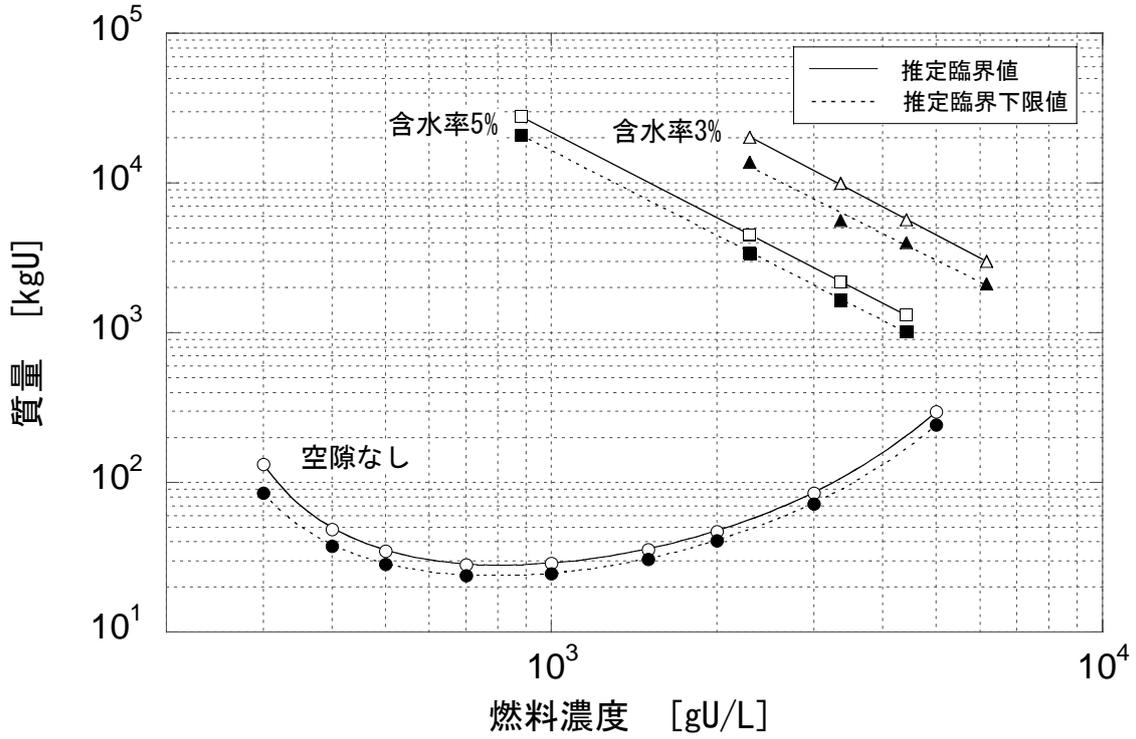


図 5.7(a) 均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界質量 (^{235}U 濃縮度 6wt%、水反射体付き)

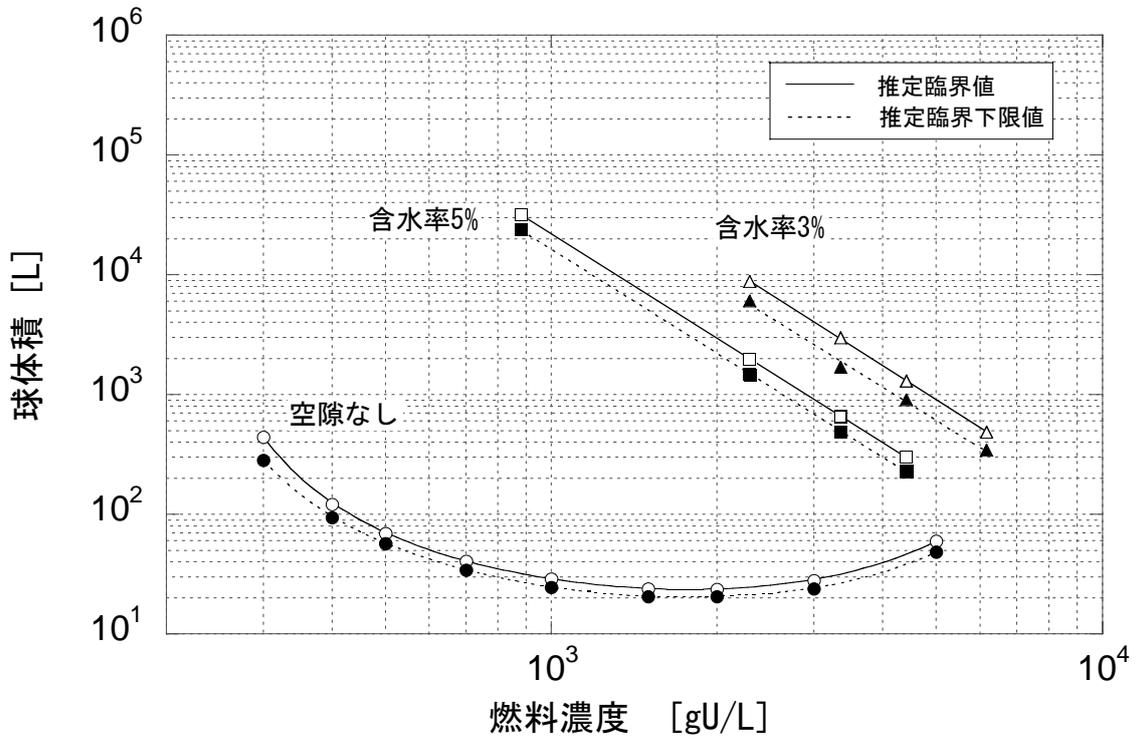


図 5.7(b) 均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界球体積 (^{235}U 濃縮度 6wt%、水反射体付き)

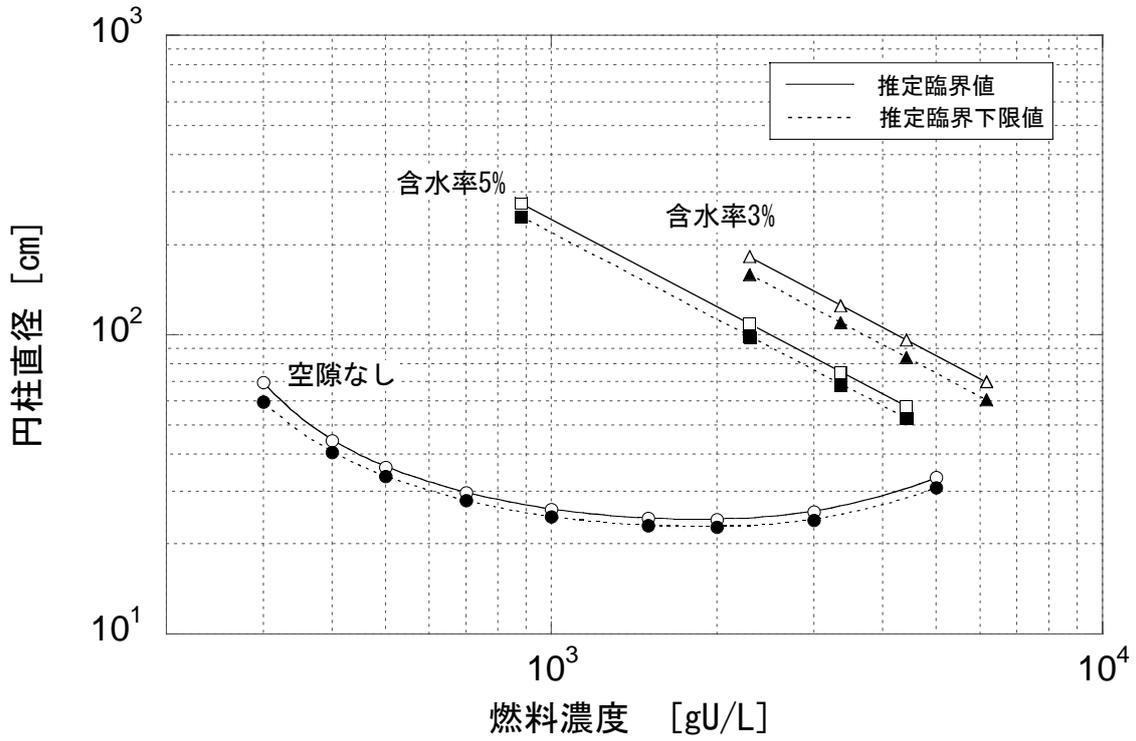


図 5.7(c) 均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界無限円柱直径 (^{235}U 濃縮度 6wt%、水反射体付き)

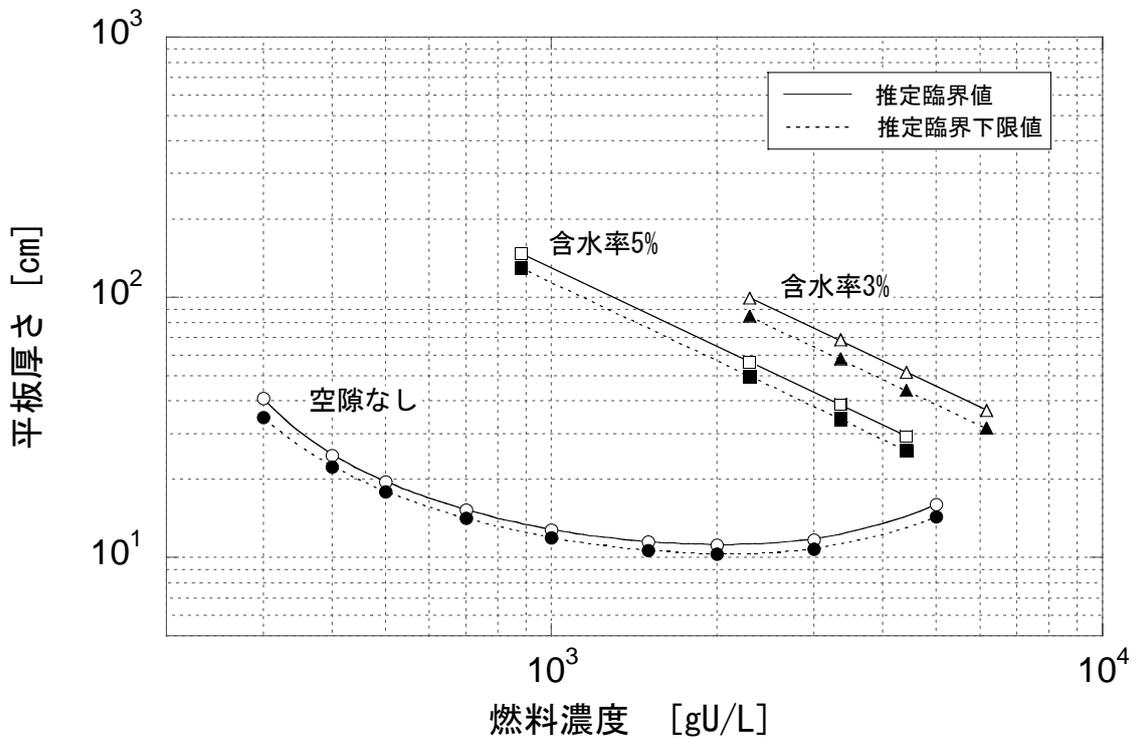


図 5.7(d) 均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界無限平板厚さ (^{235}U 濃縮度 6wt%、水反射体付き)

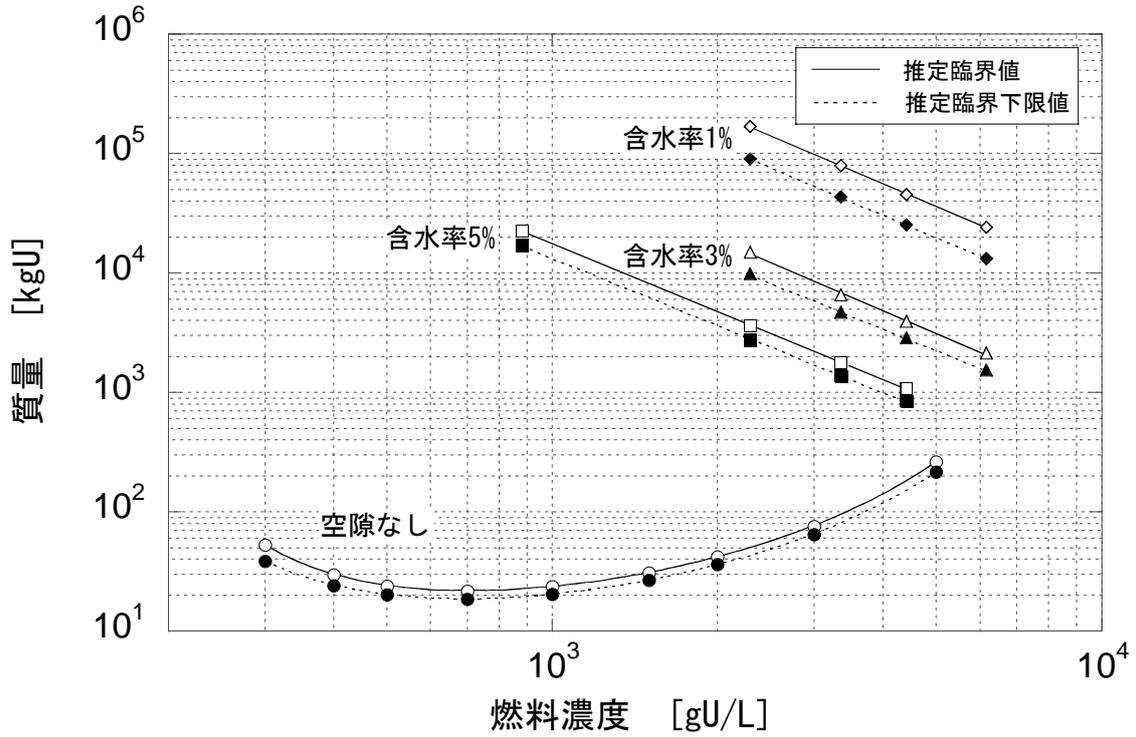


図 5.8(a) 均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界質量 (^{235}U 濃縮度 7wt%、水反射体付き)

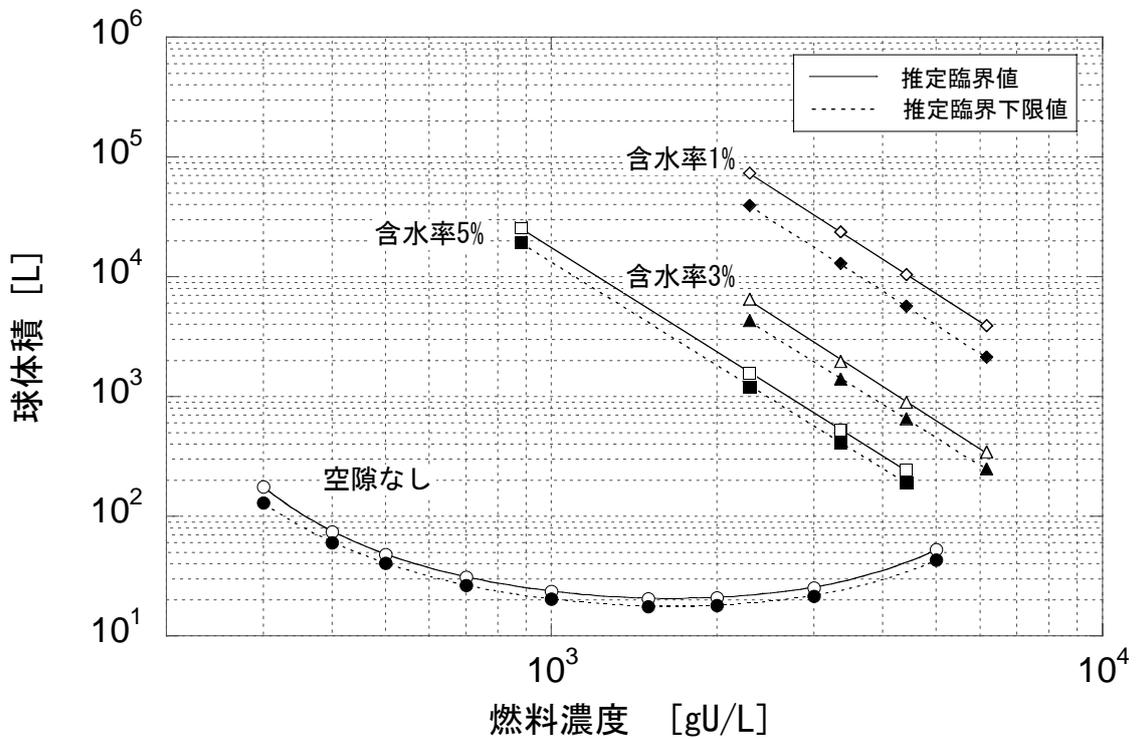


図 5.8(b) 均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界球体積 (^{235}U 濃縮度 7wt%、水反射体付き)

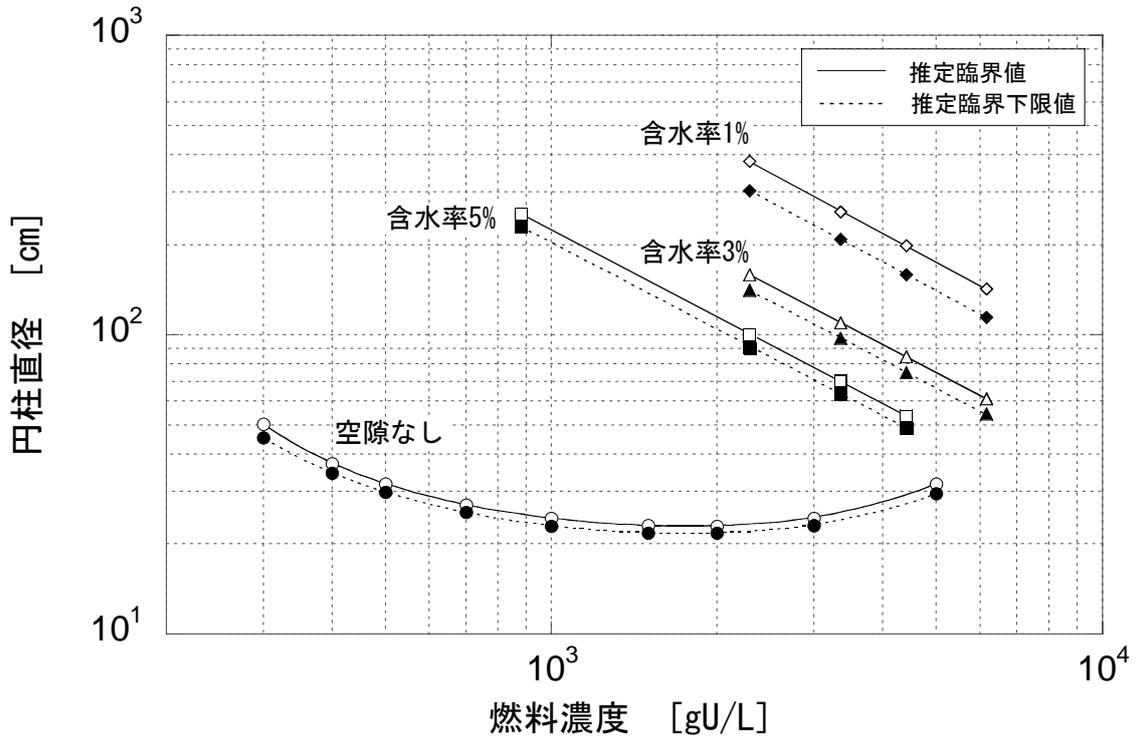


図 5.8(c) 均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界無限円柱直径 (^{235}U 濃縮度 7wt%、水反射体付き)

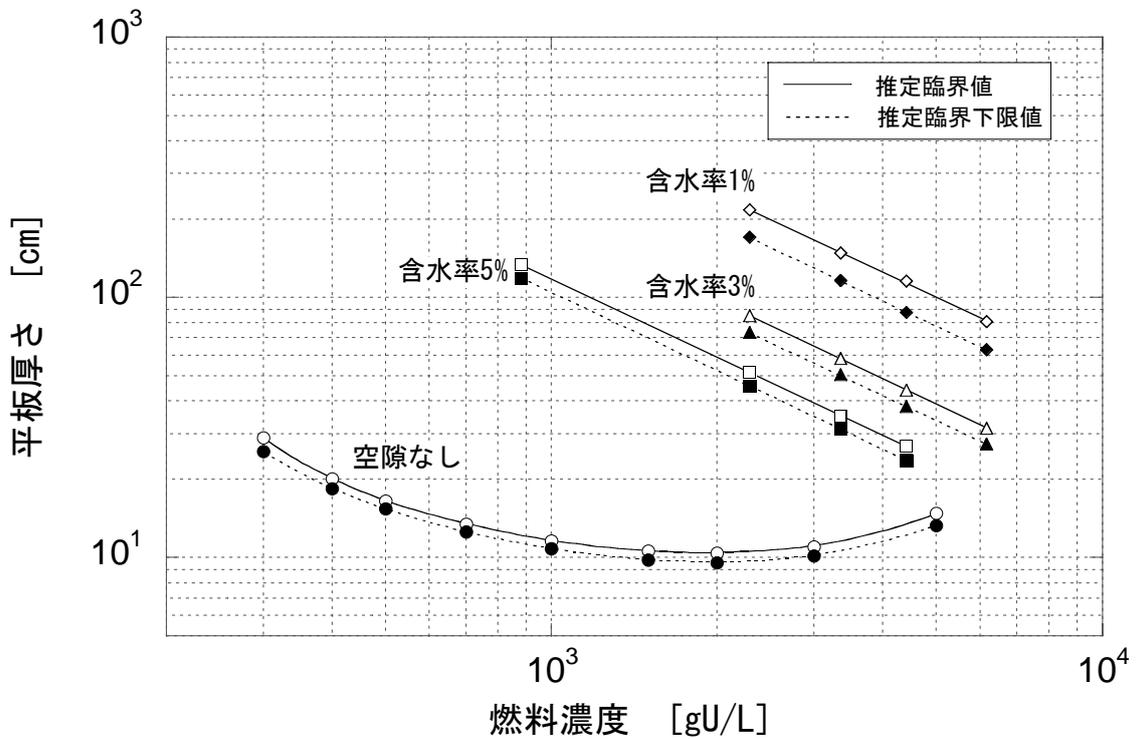


図 5.8(d) 均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界無限平板厚さ (^{235}U 濃縮度 7wt%、水反射体付き)

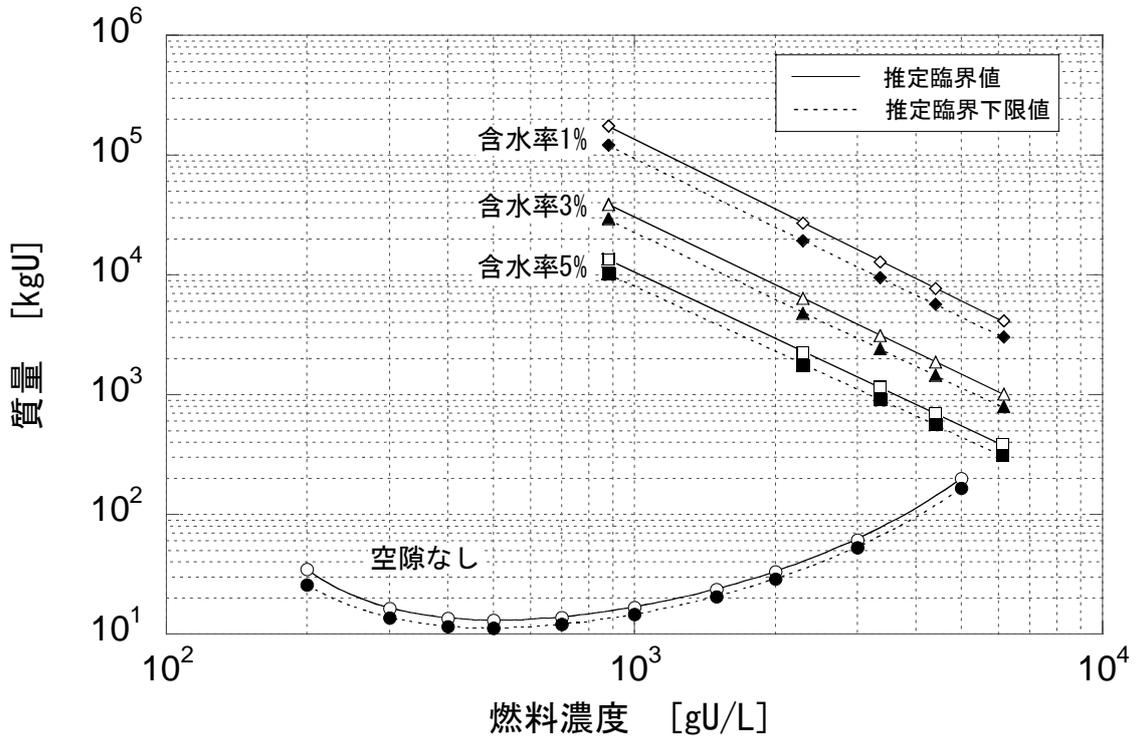


図 5.9(a) 均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界質量 (^{235}U 濃縮度 10wt%、水反射体付き)

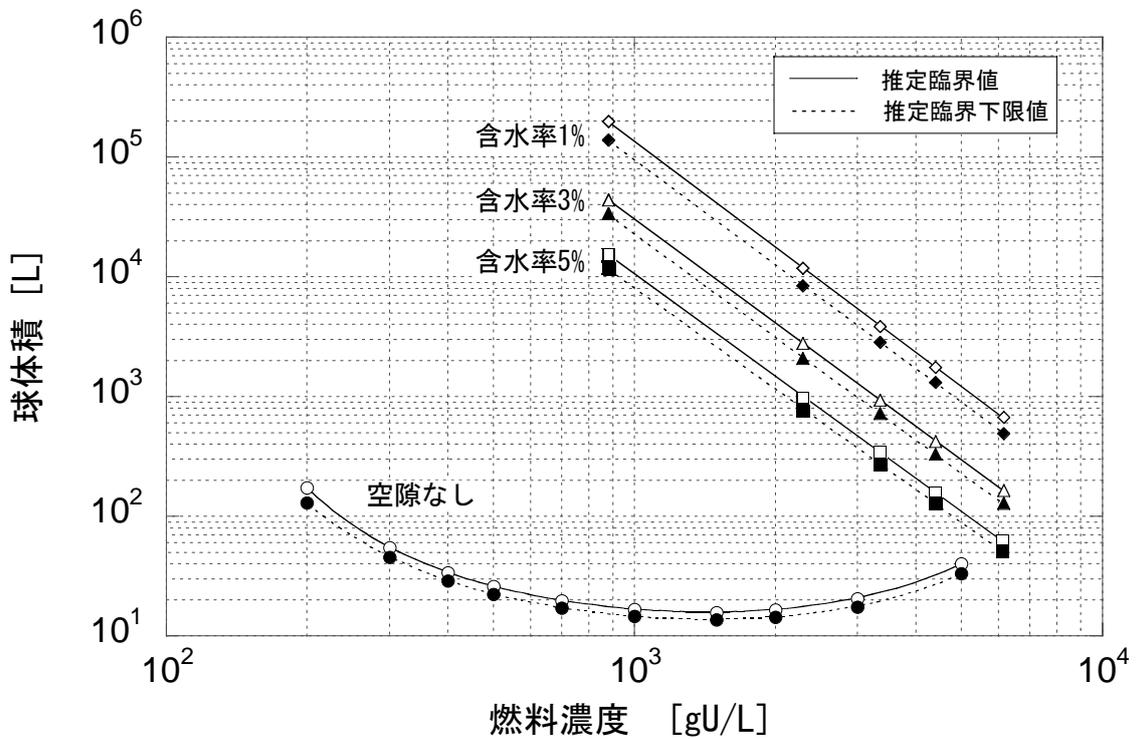


図 5.9(b) 均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界球体積 (^{235}U 濃縮度 10wt%、水反射体付き)

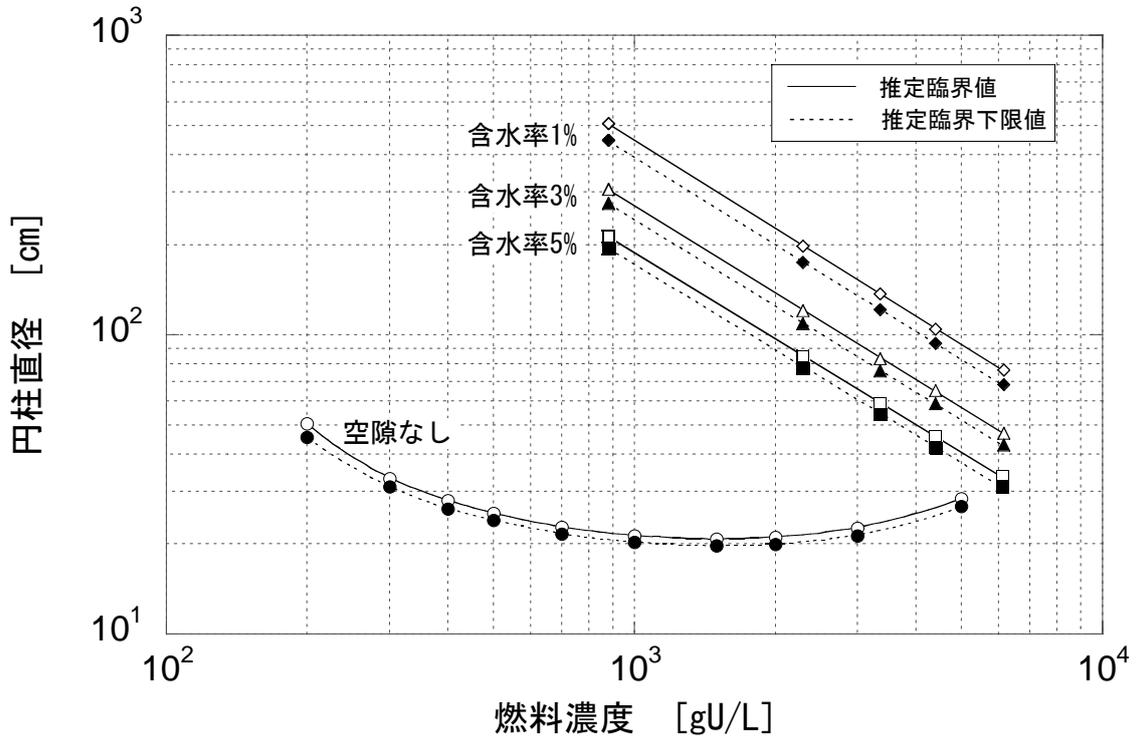


図 5.9(c) 均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界無限円柱直径 (^{235}U 濃縮度 10wt%、水反射体付き)

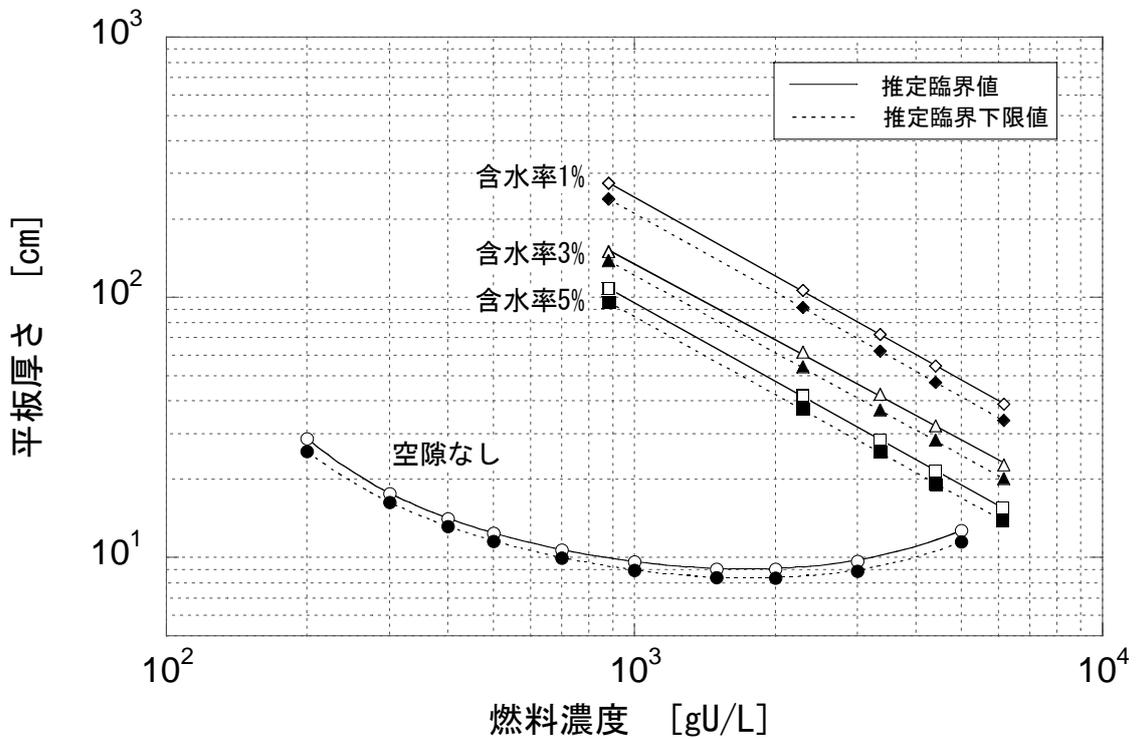


図 5.9(d) 均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界無限平板厚さ (^{235}U 濃縮度 10wt%、水反射体付き)

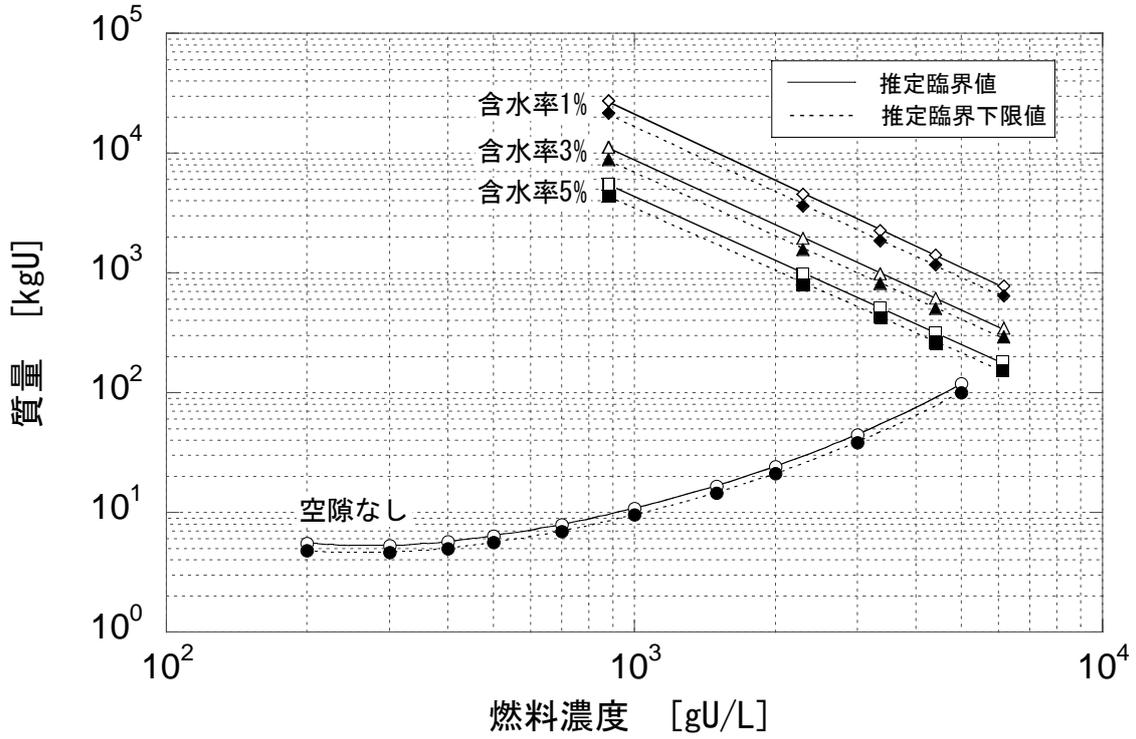


図 5.10(a) 均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界質量 (^{235}U 濃縮度 20wt%、水反射体付き)

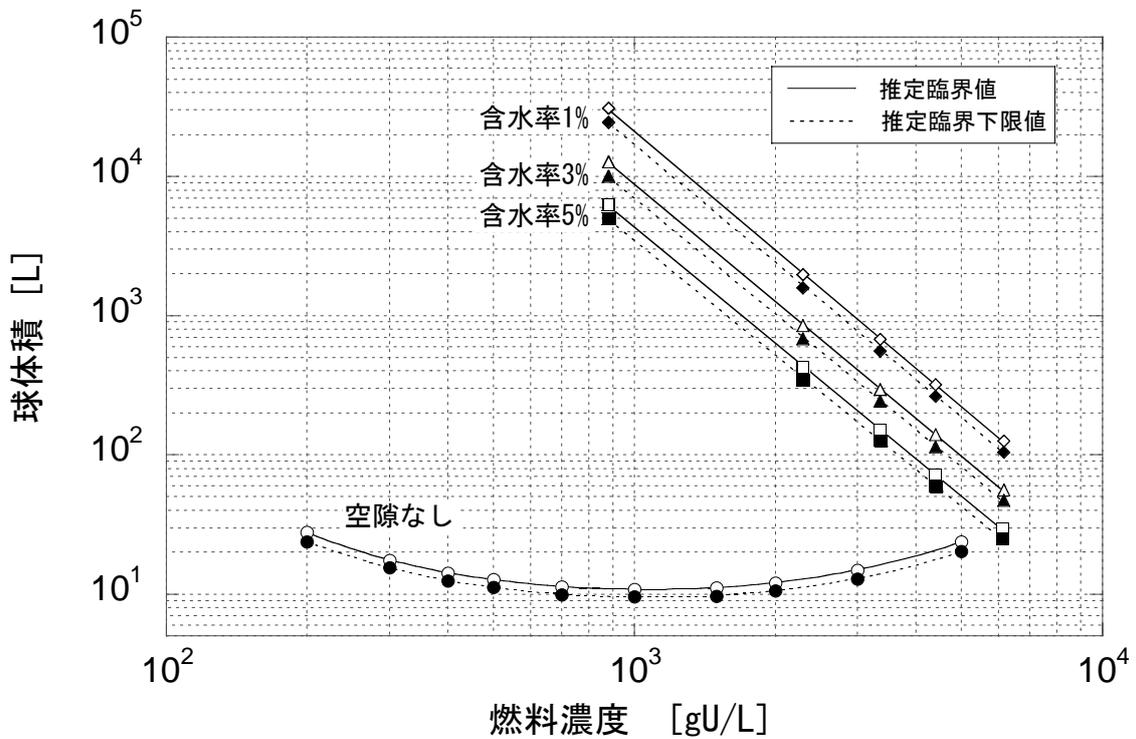


図 5.10(b) 均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界球体積 (^{235}U 濃縮度 20wt%、水反射体付き)

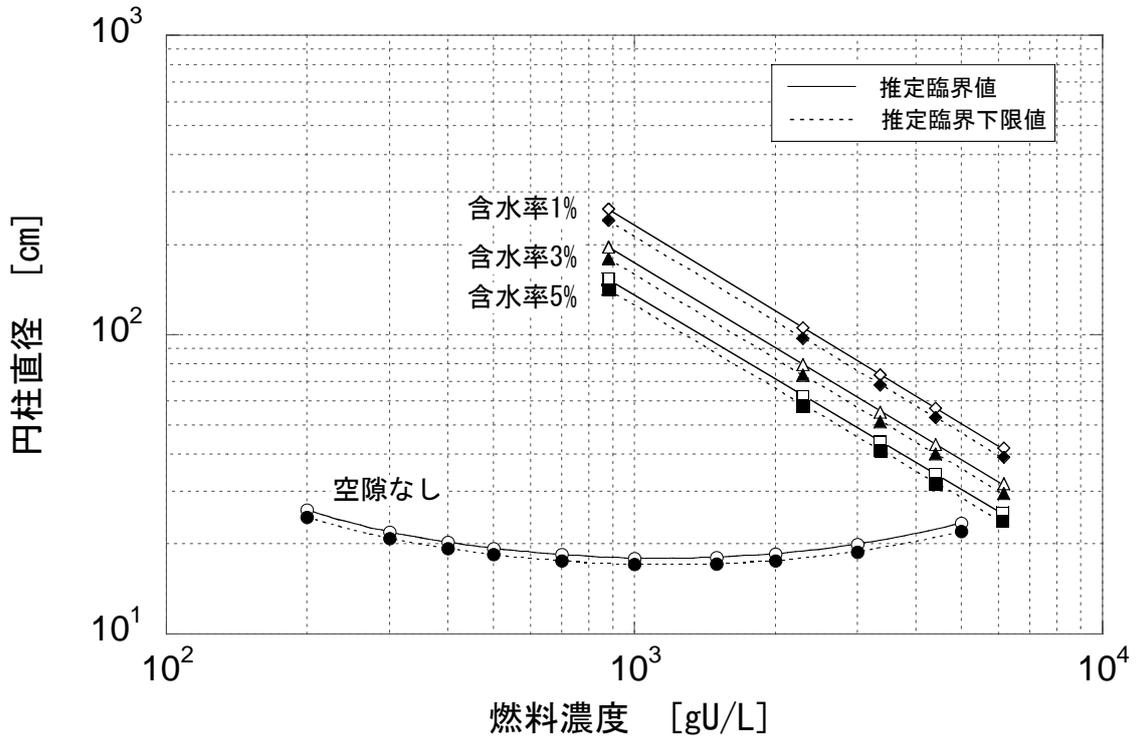


図 5.10(c) 均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界無限円柱直径 (^{235}U 濃縮度 20wt%、水反射体付き)

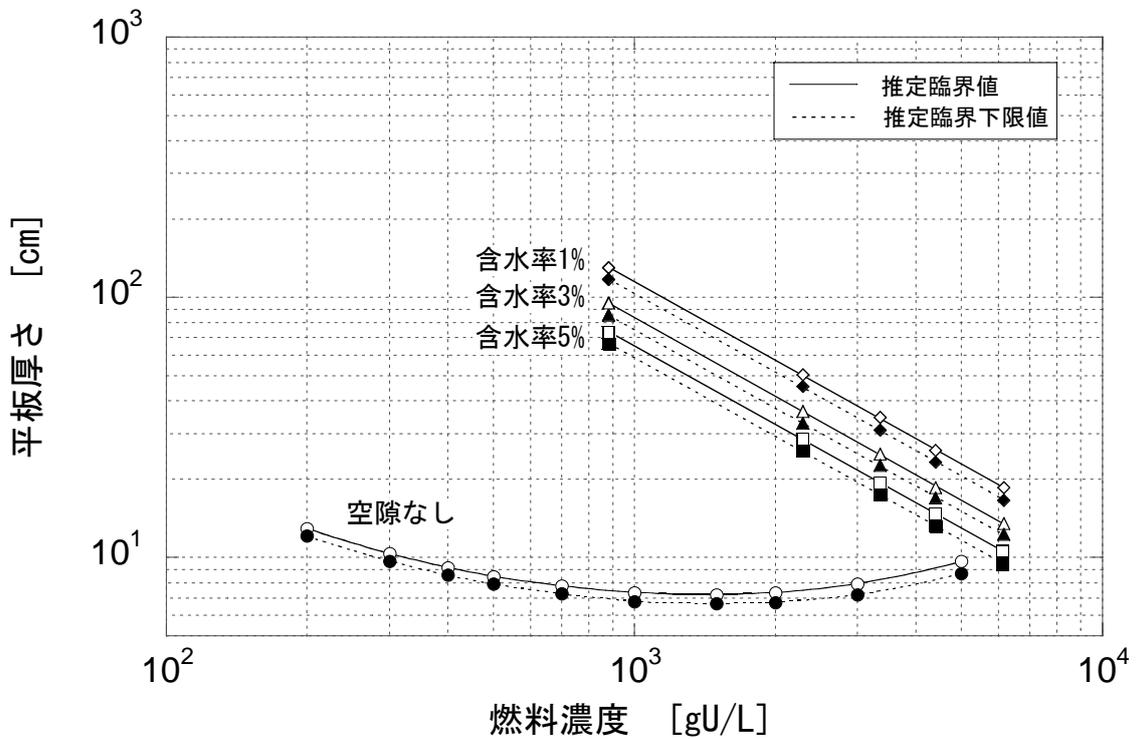


図 5.10(d) 均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界無限平板厚さ (^{235}U 濃縮度 20wt%、水反射体付き)

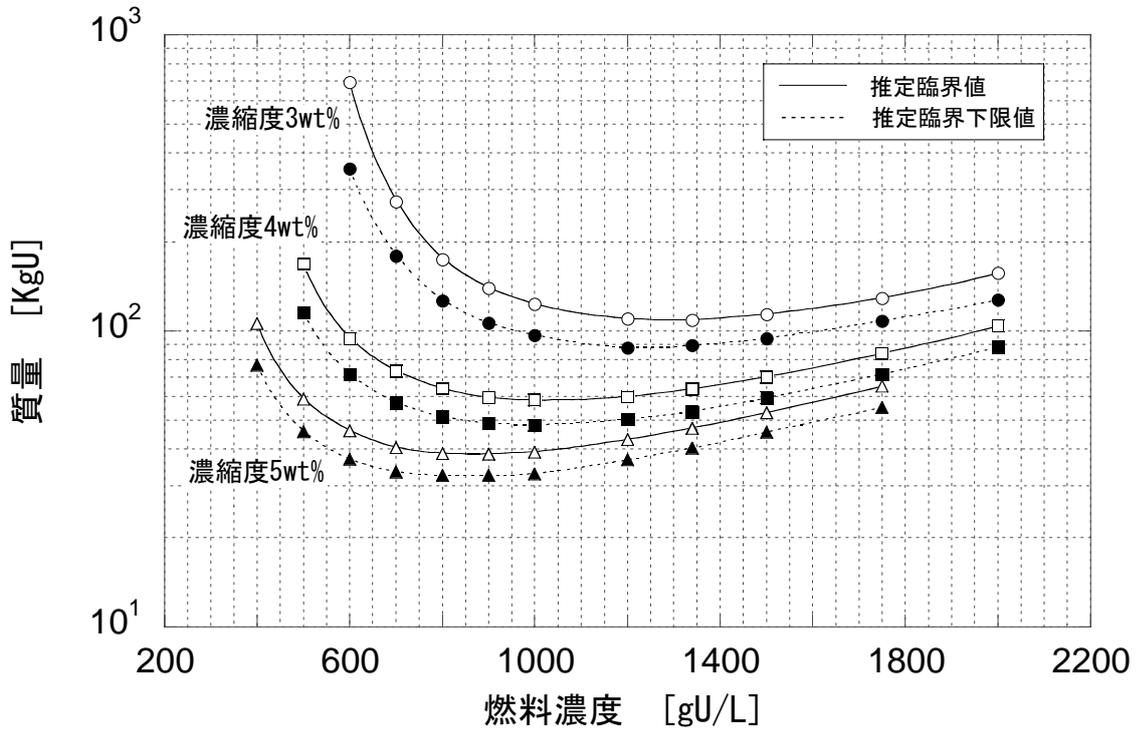


図 5.11(a) UO_2F_2 水溶液の臨界質量 (^{235}U 濃縮度 3,4,5wt%、水反射体付き)

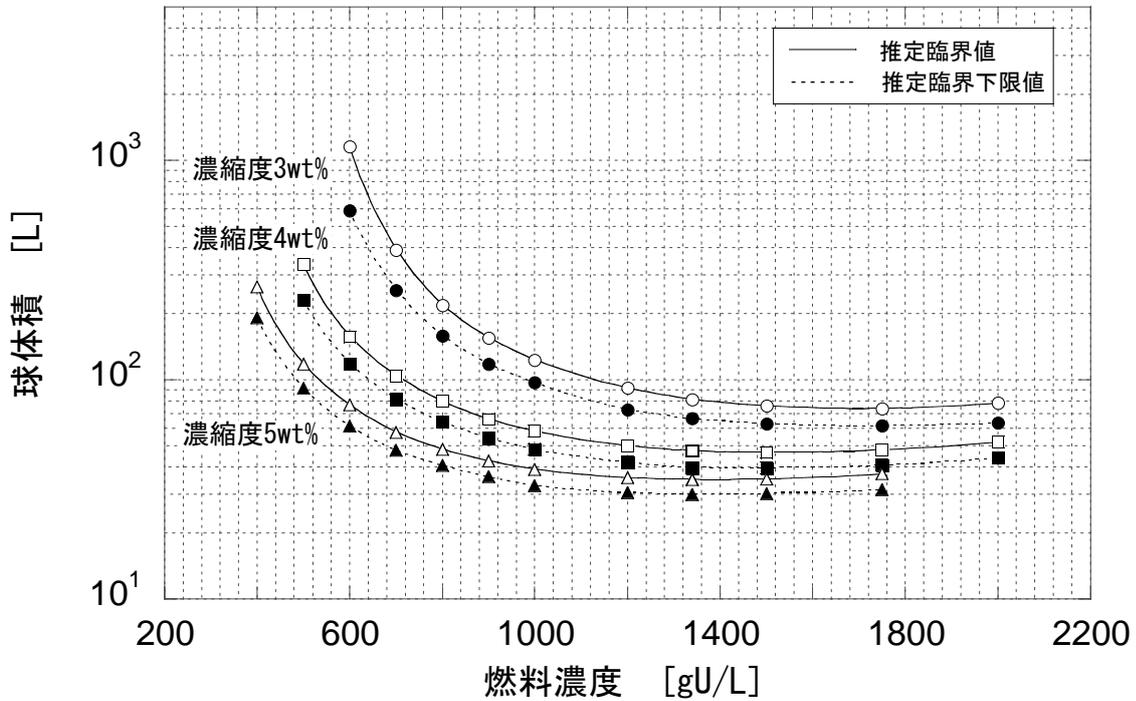


図 5.11(b) UO_2F_2 水溶液の臨界球体積 (^{235}U 濃縮度 3,4,5wt%、水反射体付き)

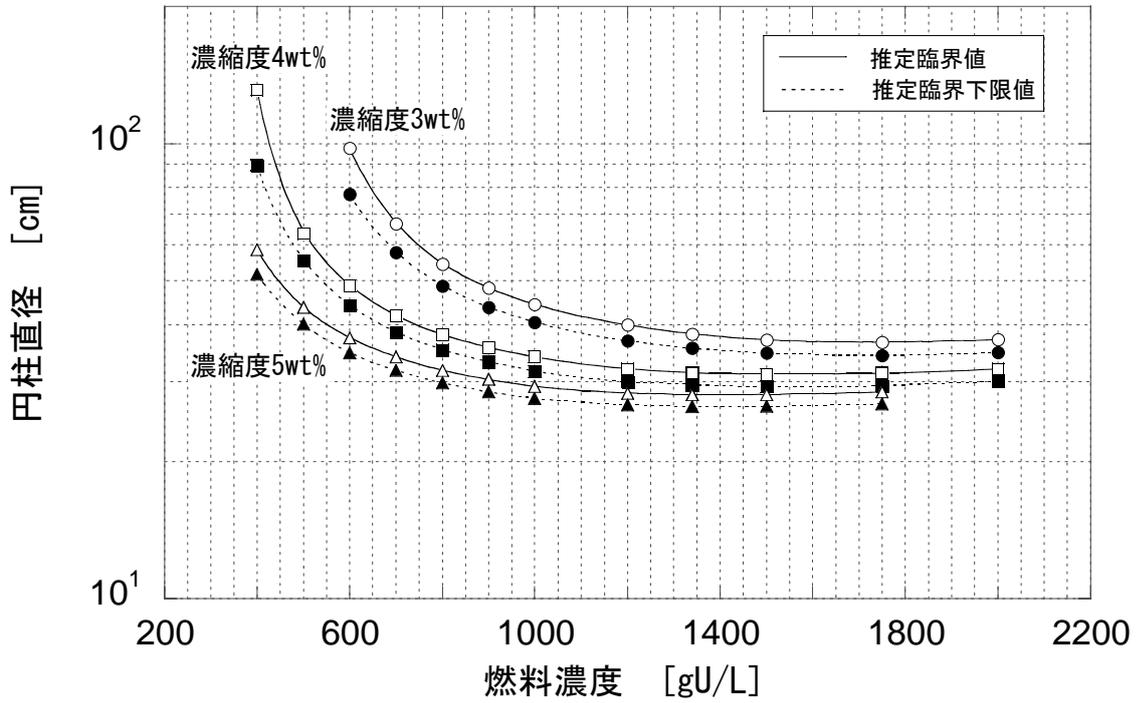


図 5.11(c) UO_2F_2 水溶液の臨界無限円柱直径 (^{235}U 濃縮度 3,4,5wt%、水反射体付き)

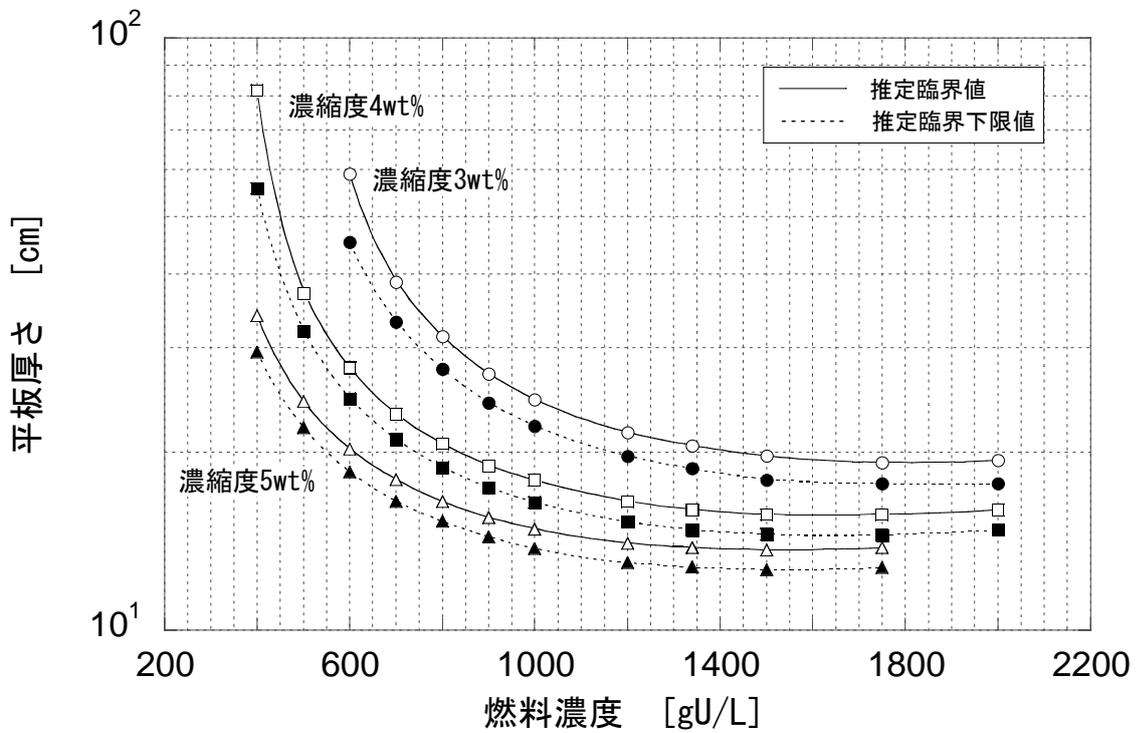


図 5.11(d) UO_2F_2 水溶液の臨界無限平板厚さ (^{235}U 濃縮度 3,4,5wt%、水反射体付き)

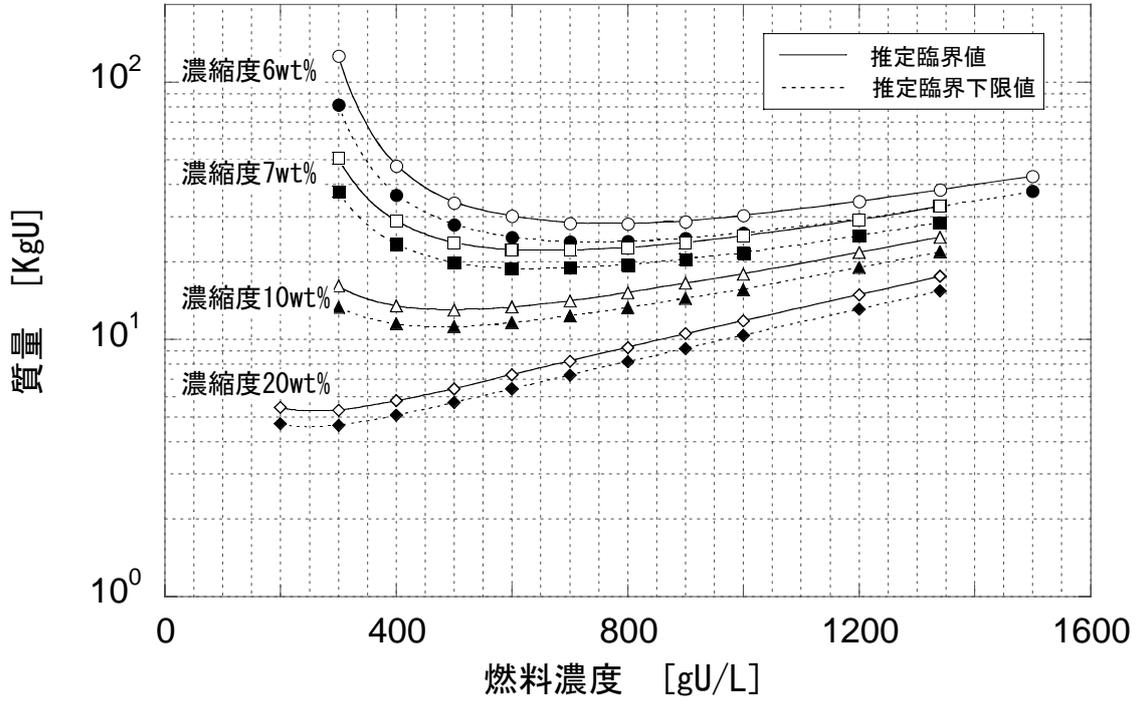


図 5.12(a) UO_2F_2 水溶液の臨界質量 (^{235}U 濃縮度 6,7,10,20wt%、水反射体付き)

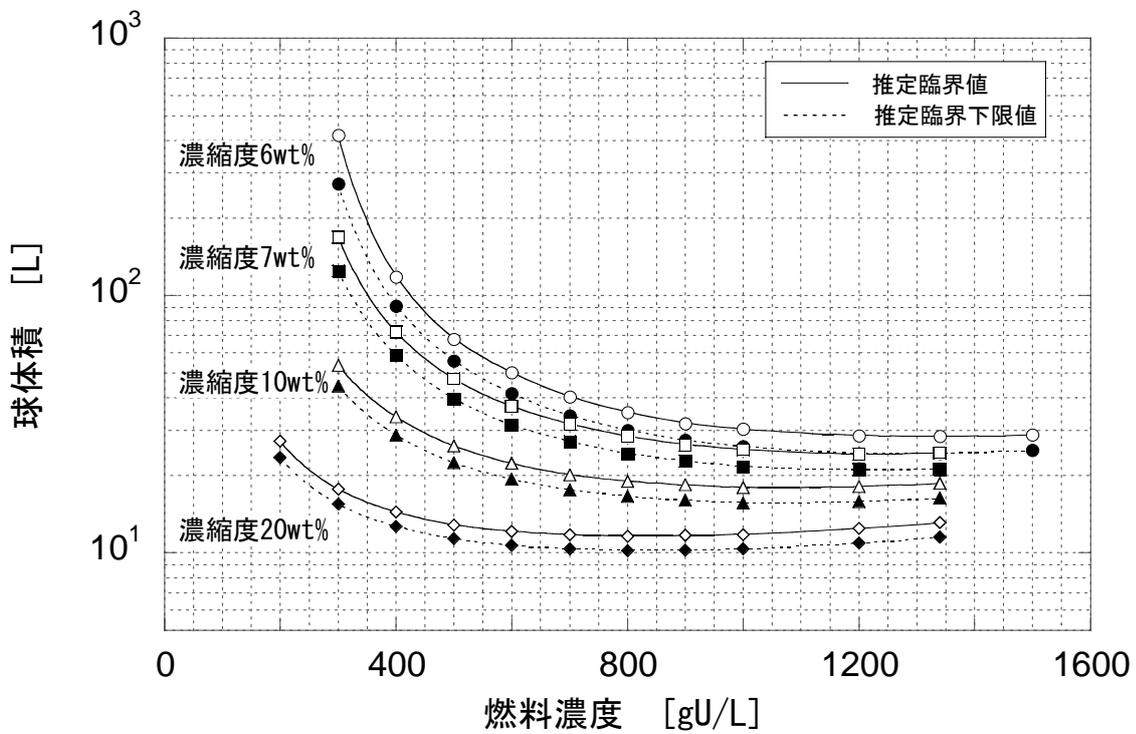


図 5.12(b) UO_2F_2 水溶液の臨界球体積 (^{235}U 濃縮度 6,7,10,20wt%、水反射体付き)

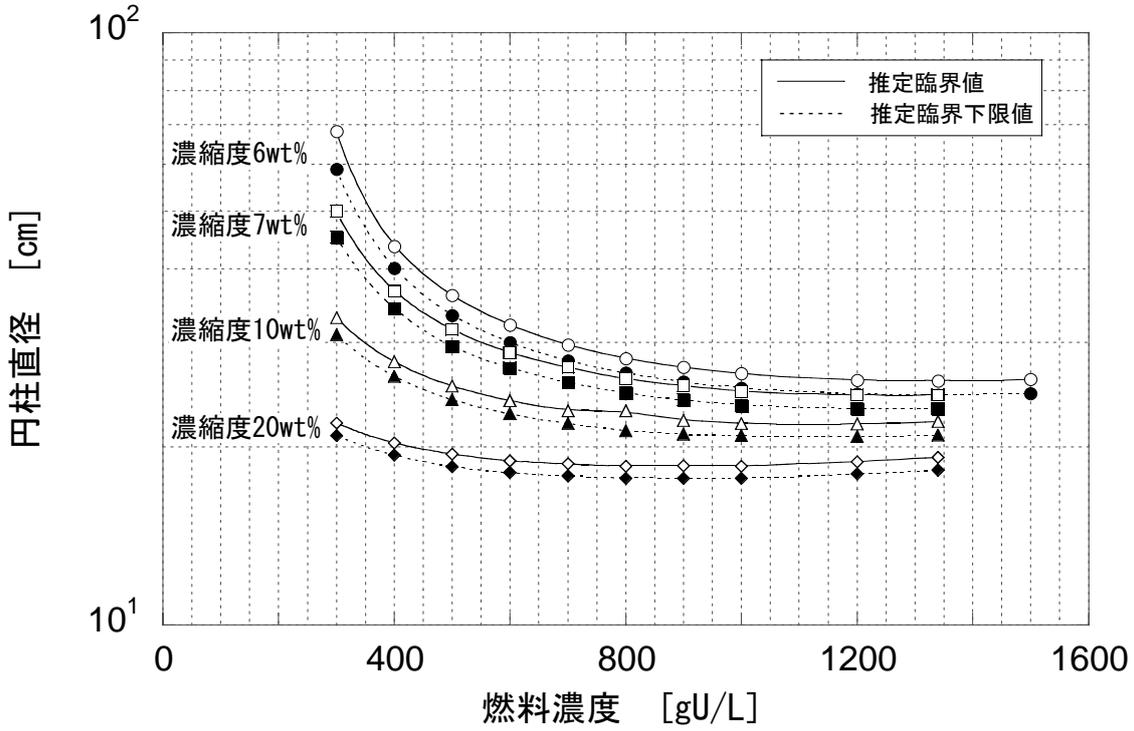


図 5.12(c) UO_2F_2 水溶液の臨界無限円柱直径 (^{235}U 濃縮度 6,7,10,20wt%、水反射体付き)

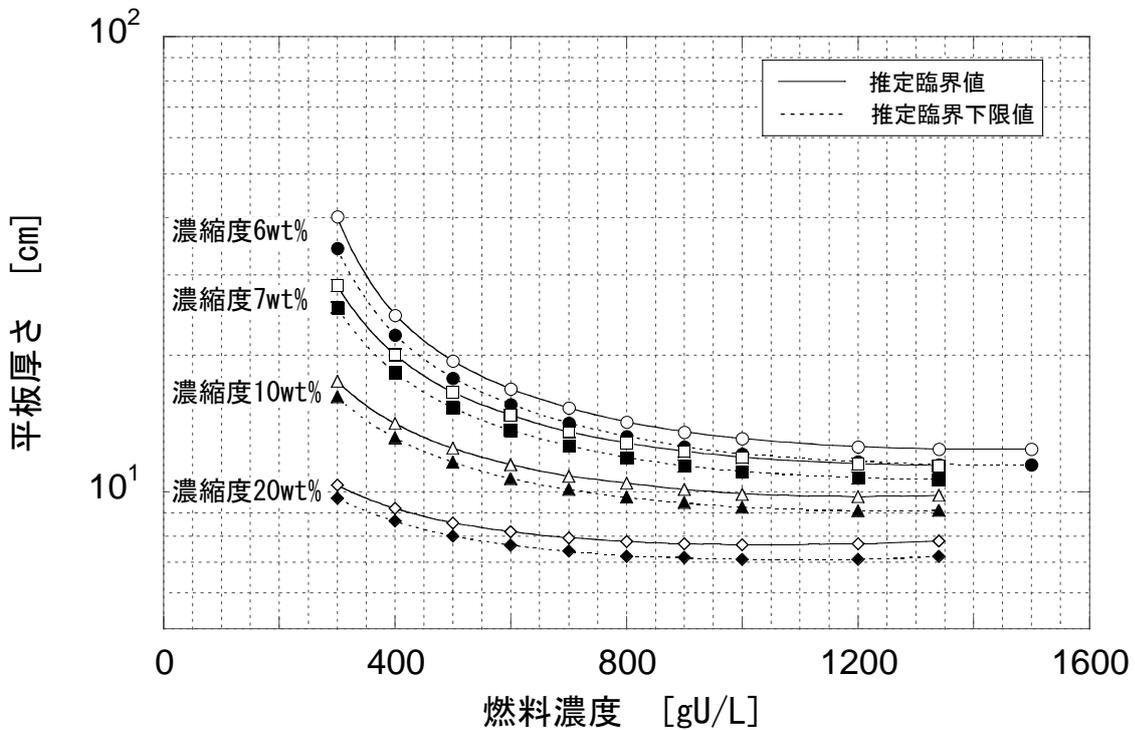


図 5.12(d) UO_2F_2 水溶液の臨界無限平板厚さ (^{235}U 濃縮度 6,7,10,20wt%、水反射体付き)

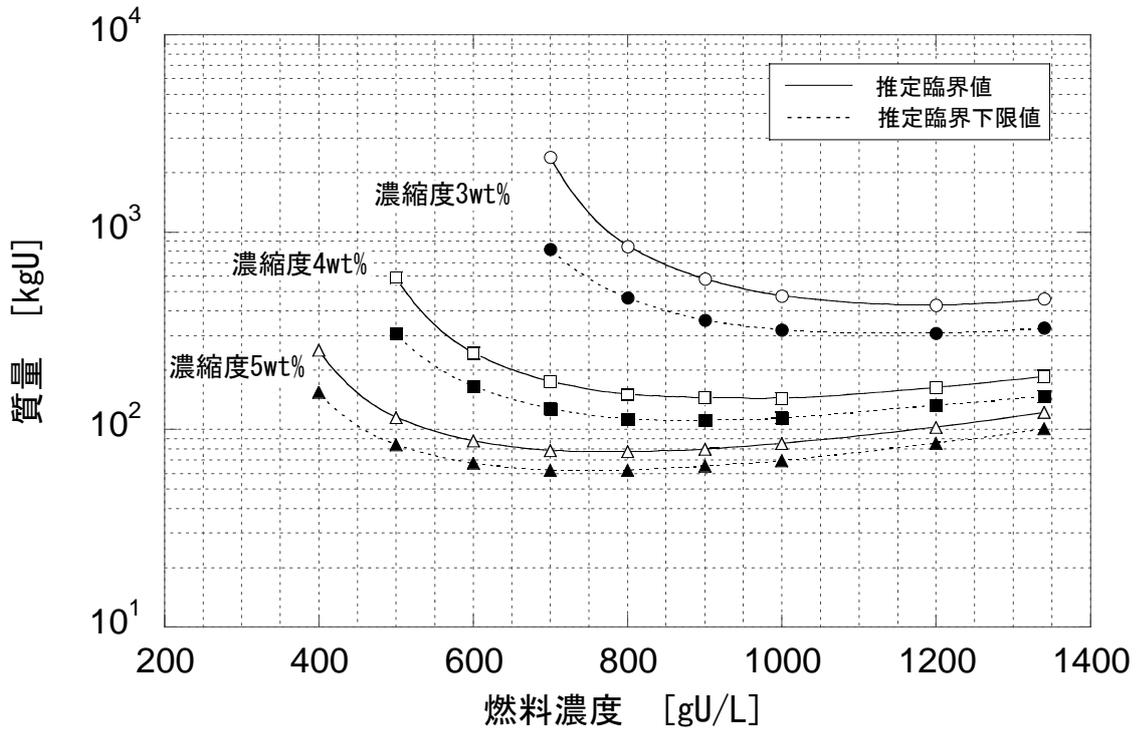


図 5.13(a) $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 水溶液の臨界質量 (^{235}U 濃縮度 3,4,5wt%、水反射体付き)

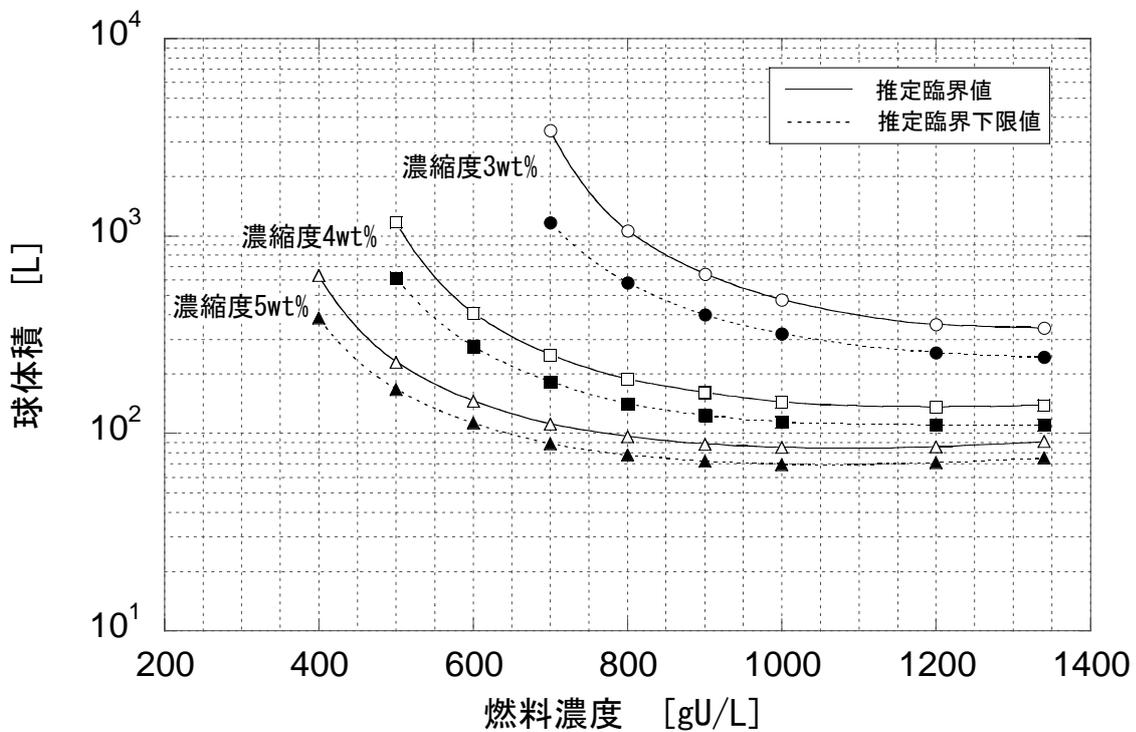


図 5.13(b) $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 水溶液の臨界球体積 (^{235}U 濃縮度 3,4,5wt%、水反射体付き)

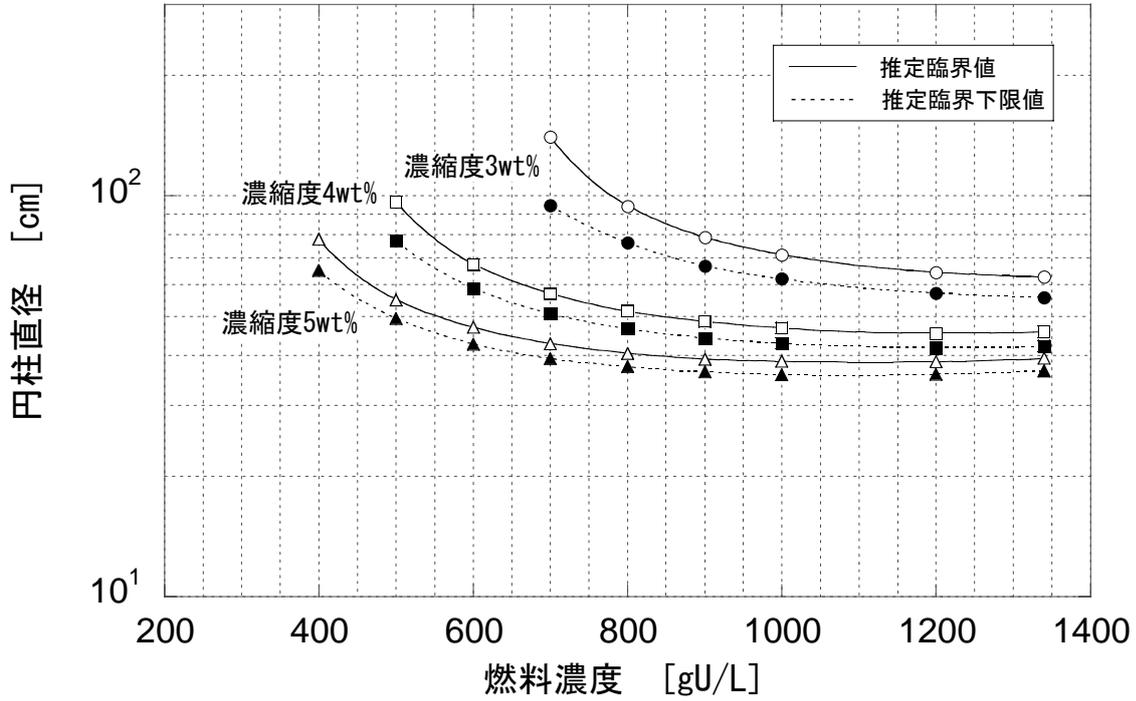


図 5.13(c) $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 水溶液の臨界無限円柱直径 (^{235}U 濃縮度 3,4,5wt%、水反射体付き)

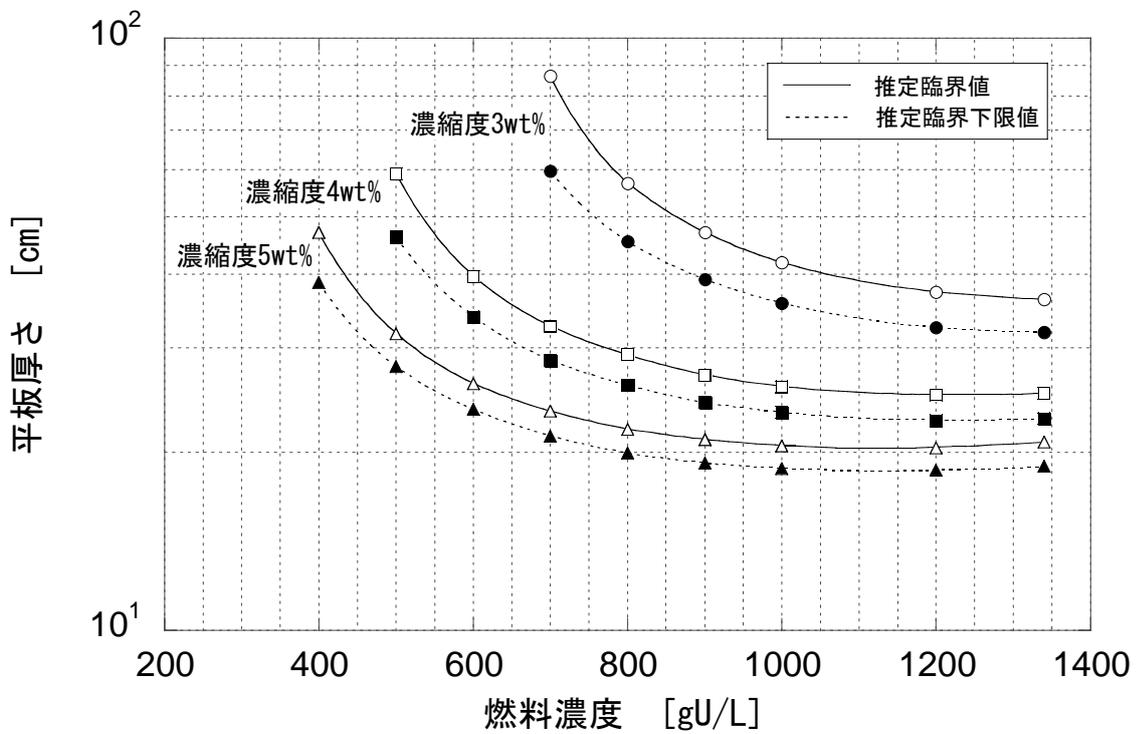


図 5.13(d) $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 水溶液の臨界無限平板厚さ (^{235}U 濃縮度 3,4,5wt%、水反射体付き)

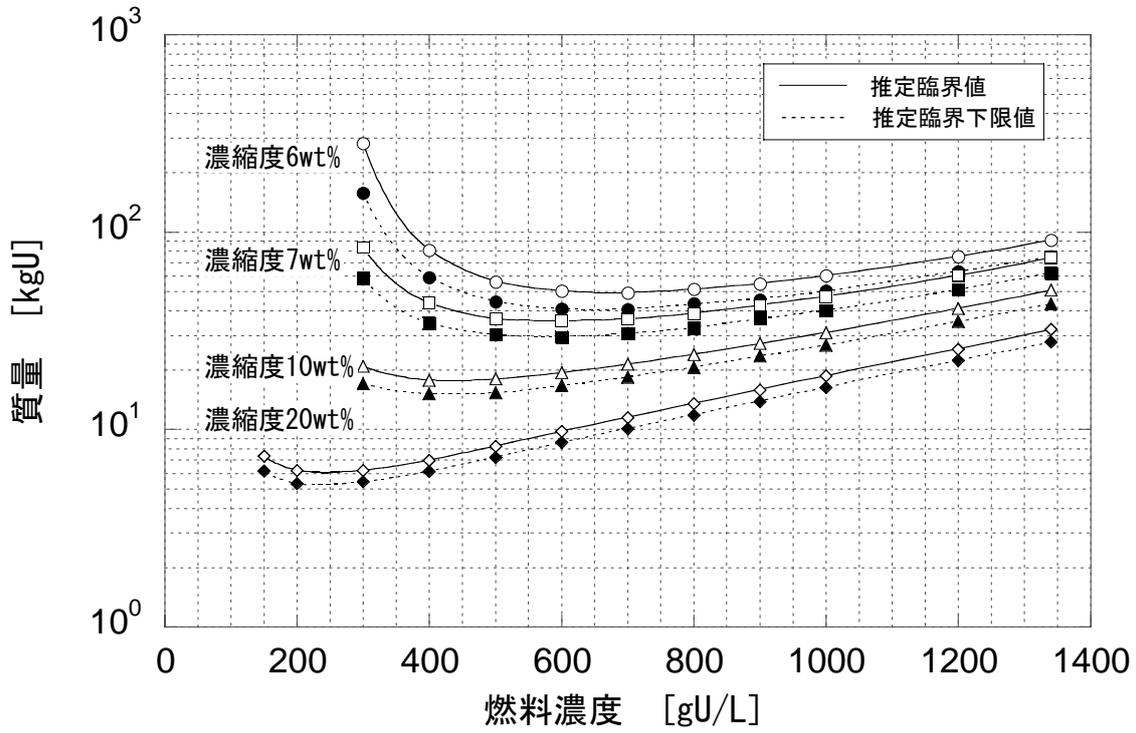


図 5.14(a) $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 水溶液の臨界質量 (^{235}U 濃縮度 6,7,10,20wt%、水反射体付き)

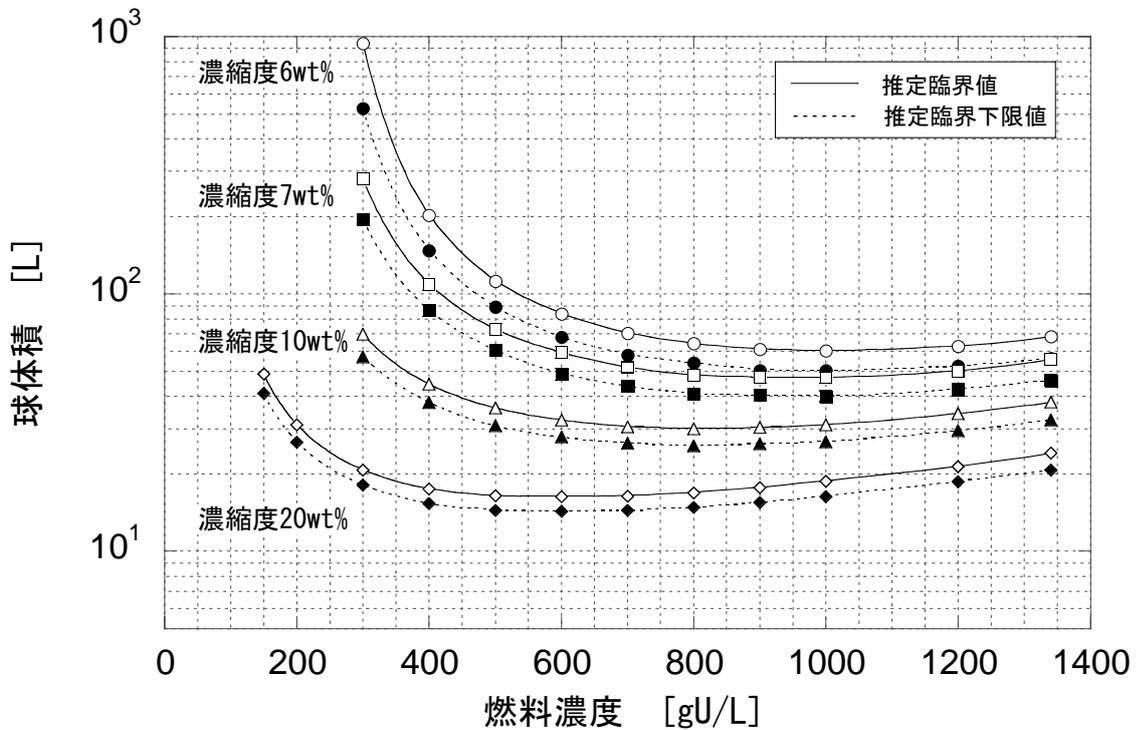


図 5.14(b) $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 水溶液の臨界球体積 (^{235}U 濃縮度 6,7,10,20wt%、水反射体付き)

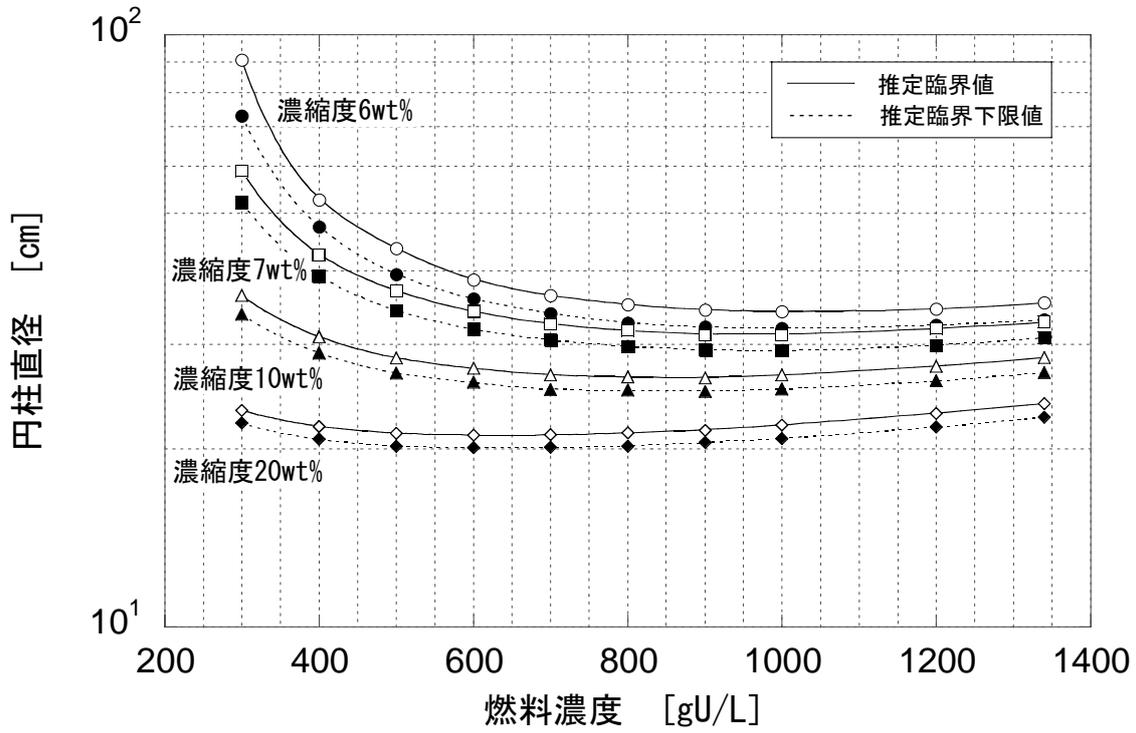


図 5.14(c) $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 水溶液の臨界無限円柱直径 (^{235}U 濃縮度 6,7,10,20wt%、水反射体付き)

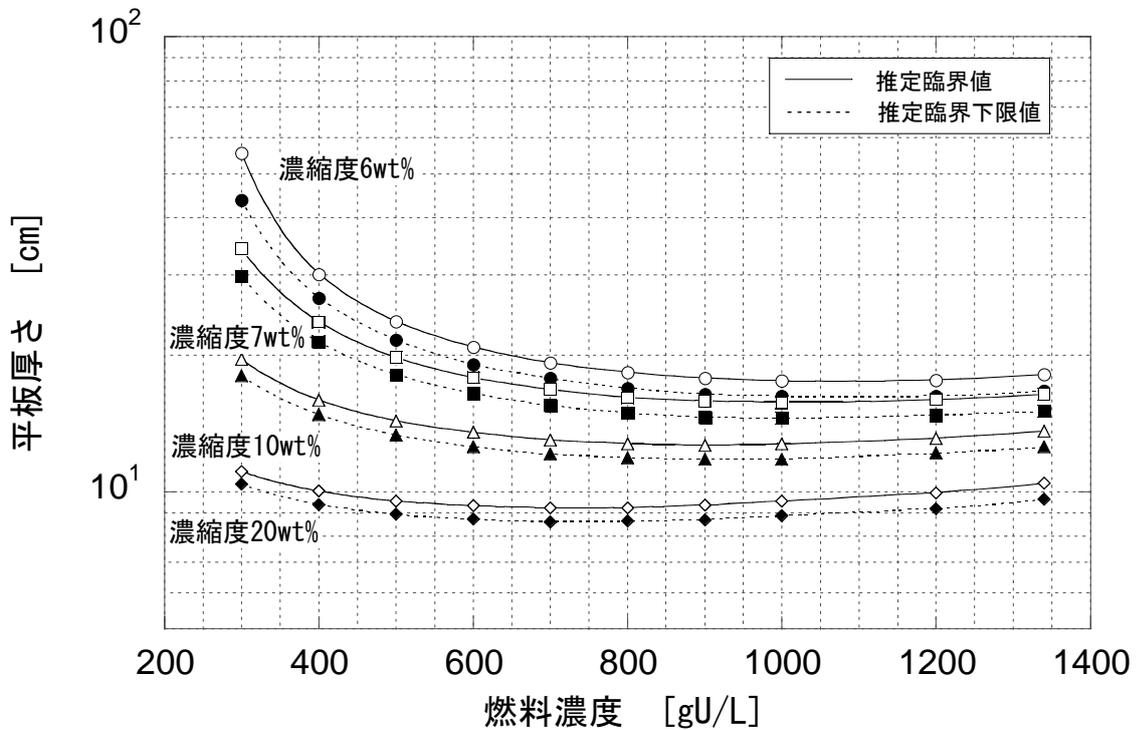


図 5.14(d) $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 水溶液の臨界無限平板厚さ (^{235}U 濃縮度 6,7,10,20wt%、水反射体付き)

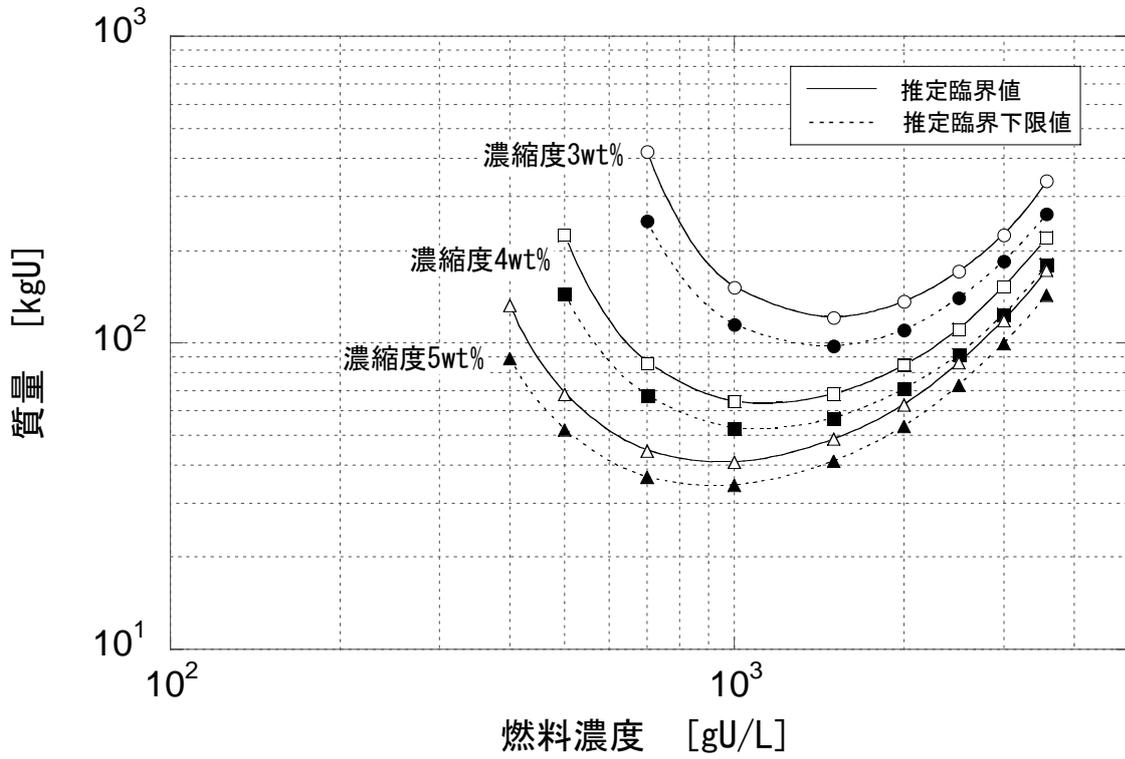


図 5.15(a) 均質 ADU(II)-H₂O の臨界質量 (²³⁵U 濃縮度 3,4,5wt%、水反射体付き)

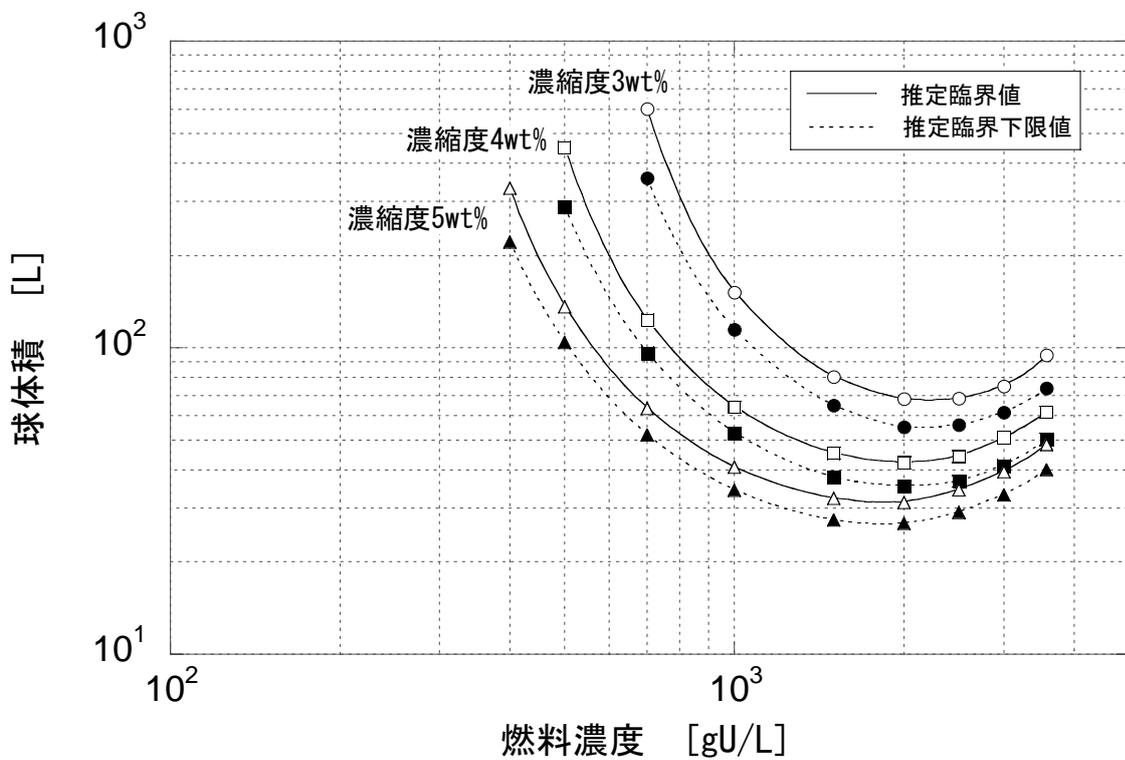


図 5.15(b) 均質 ADU(II)-H₂O の臨界球体積 (²³⁵U 濃縮度 3,4,5wt%、水反射体付き)

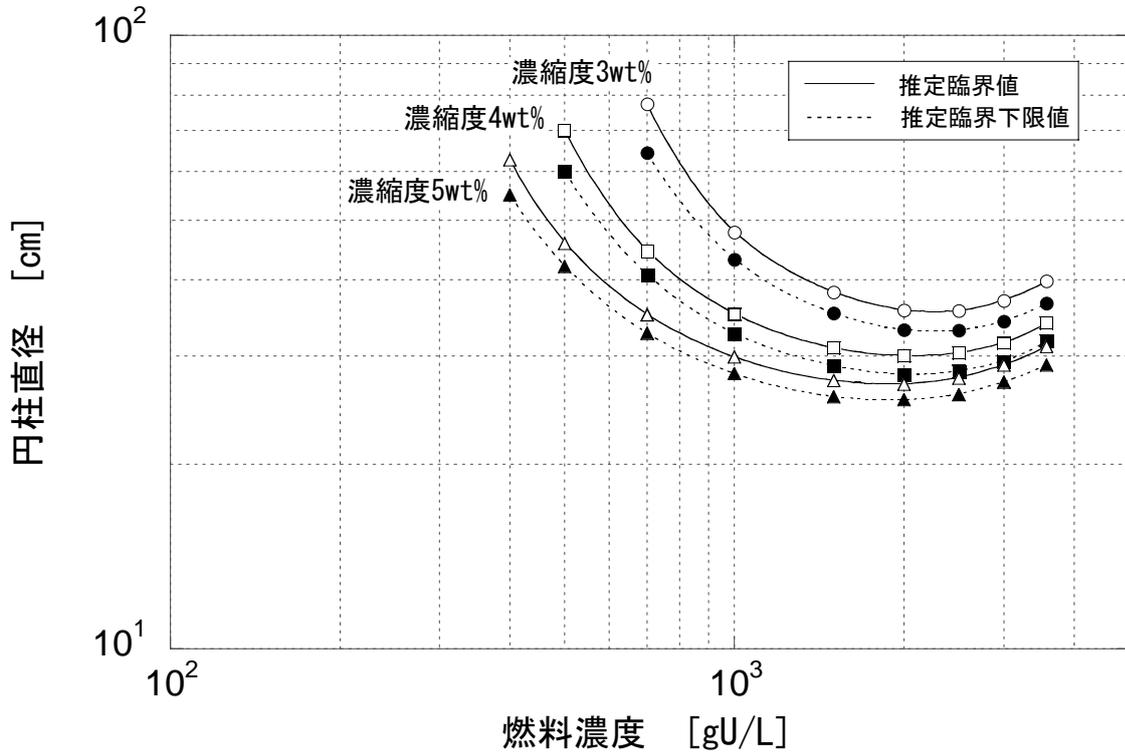


図 5.15(c) 均質 ADU(II)-H₂O の臨界無限円柱直径 (²³⁵U 濃縮度 3,4,5wt%、水反射体付き)

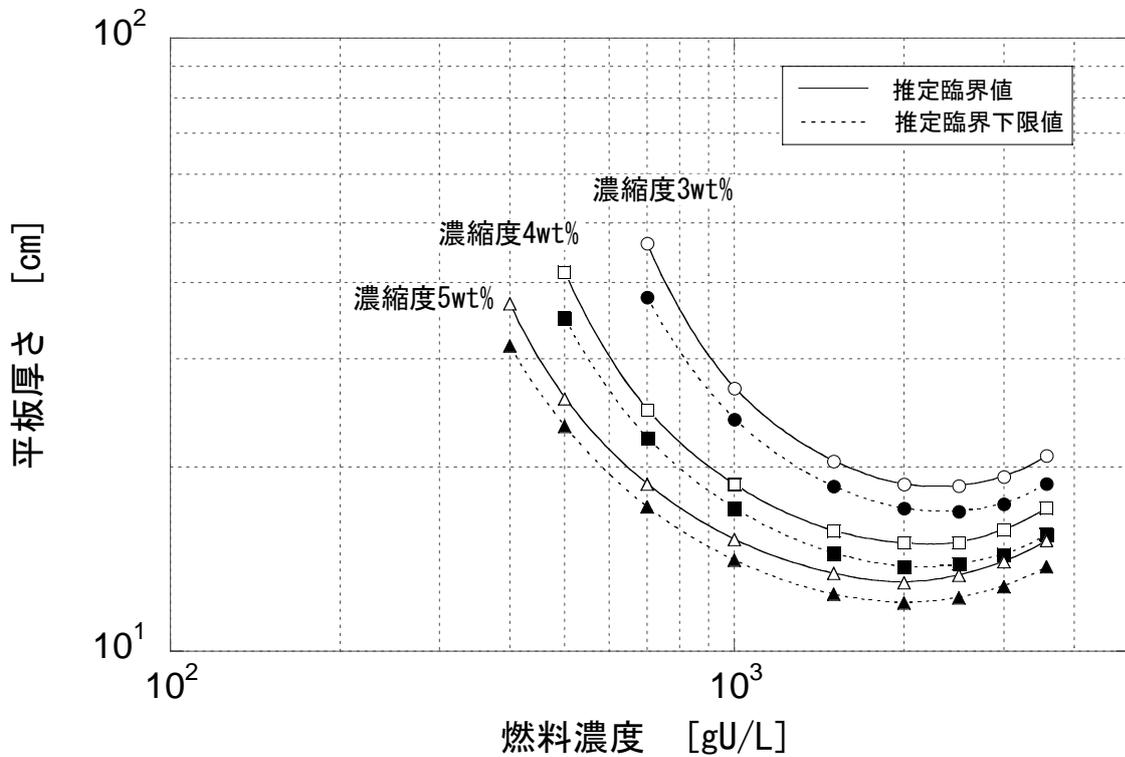


図 5.15(d) 均質 ADU(II)-H₂O の臨界無限平板厚さ (²³⁵U 濃縮度 3,4,5wt%、水反射体付き)

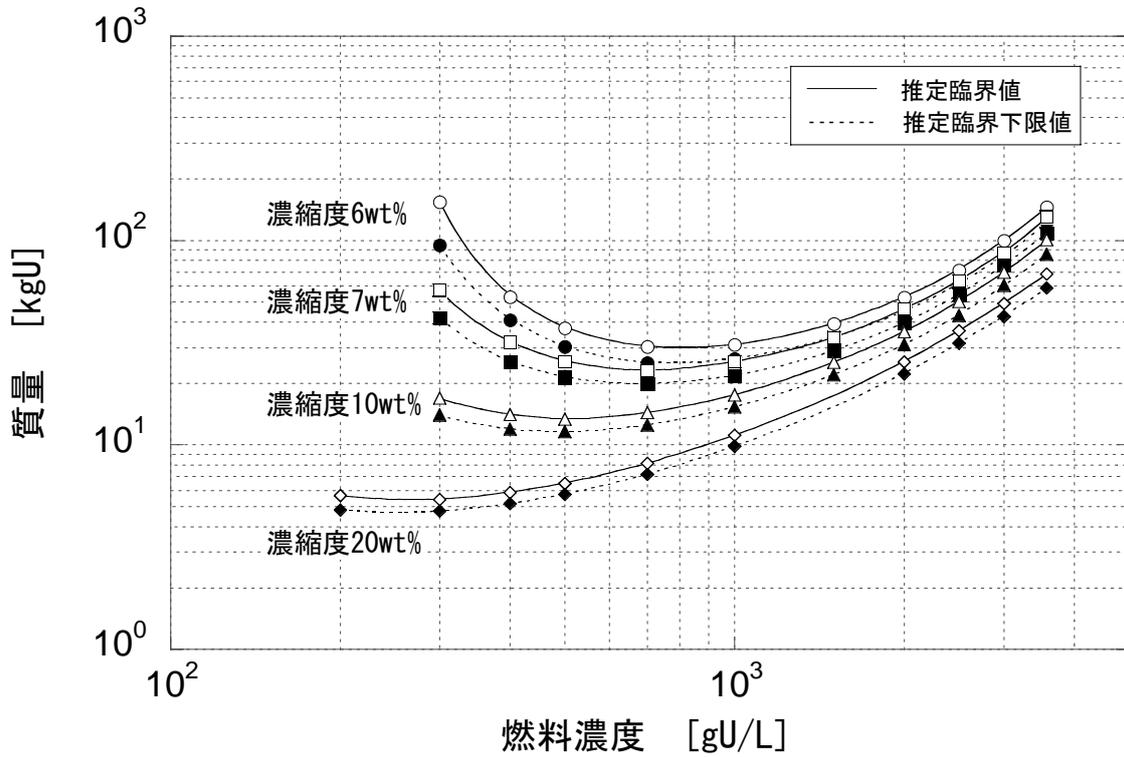


図 5.16(a) 均質 ADU(II)-H₂O の臨界質量 (²³⁵U 濃縮度 6,7,10,20wt%、水反射体付き)

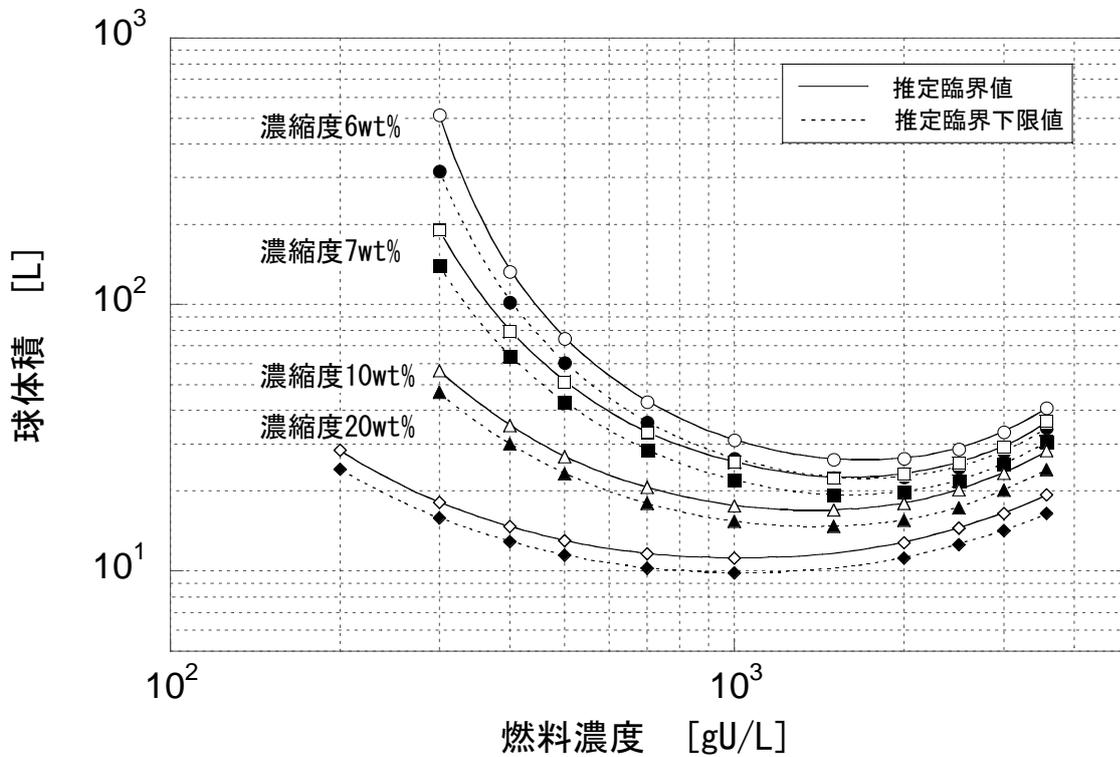


図 5.16(b) 均質 ADU(II)-H₂O の臨界球体積 (²³⁵U 濃縮度 6,7,10,20wt%、水反射体付き)

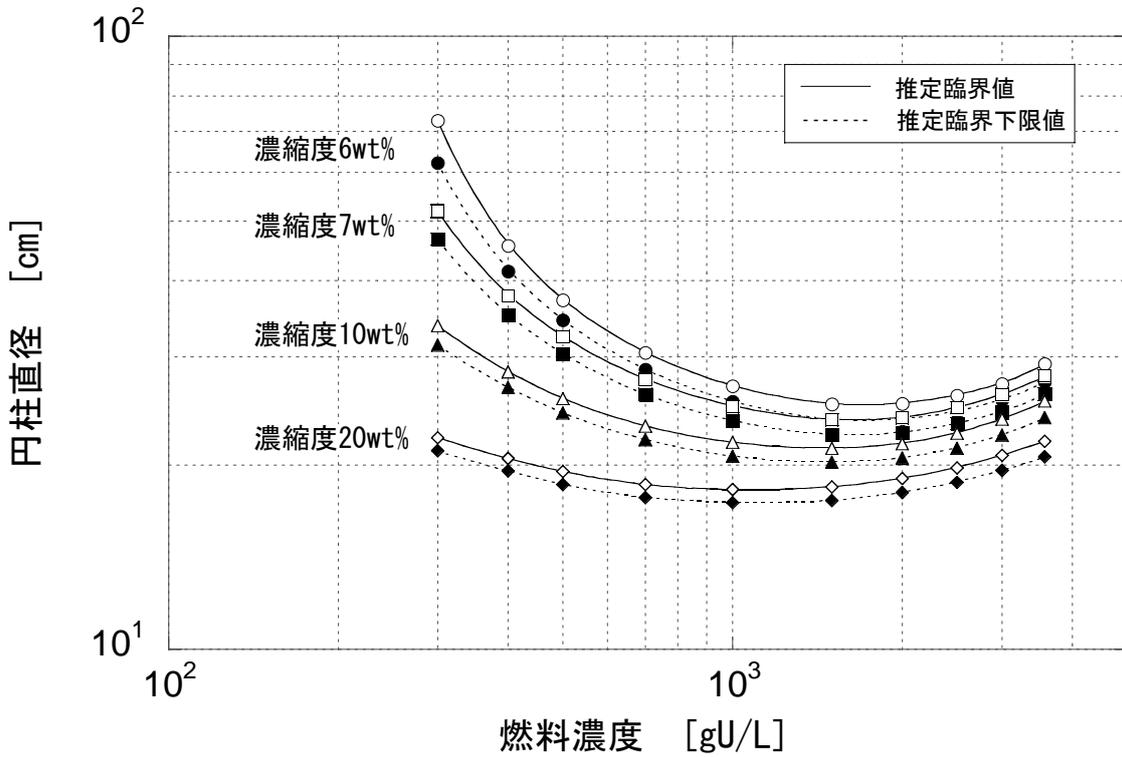


図 5.16(c) 均質 ADU(II)-H₂O の臨界無限円柱直径 (²³⁵U 濃縮度 6,7,10,20wt%、水反射体付き)

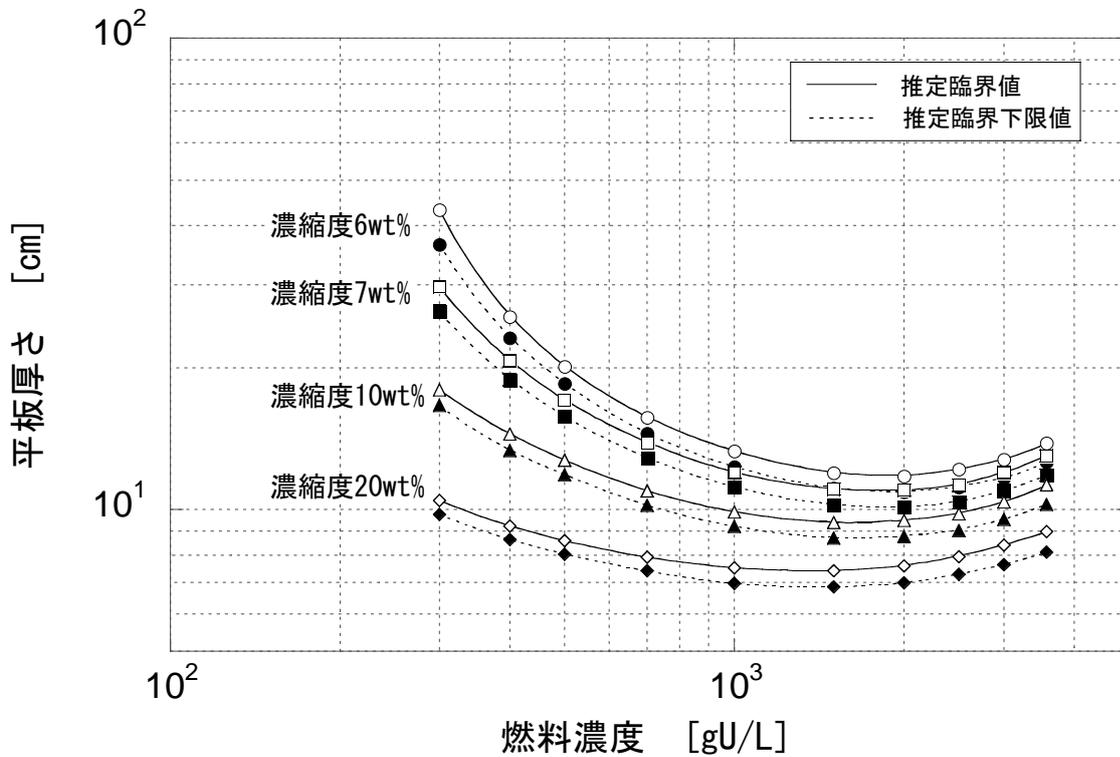


図 5.16(d) 均質 ADU(II)-H₂O の臨界無限平板厚さ (²³⁵U 濃縮度 6,7,10,20wt%、水反射体付き)

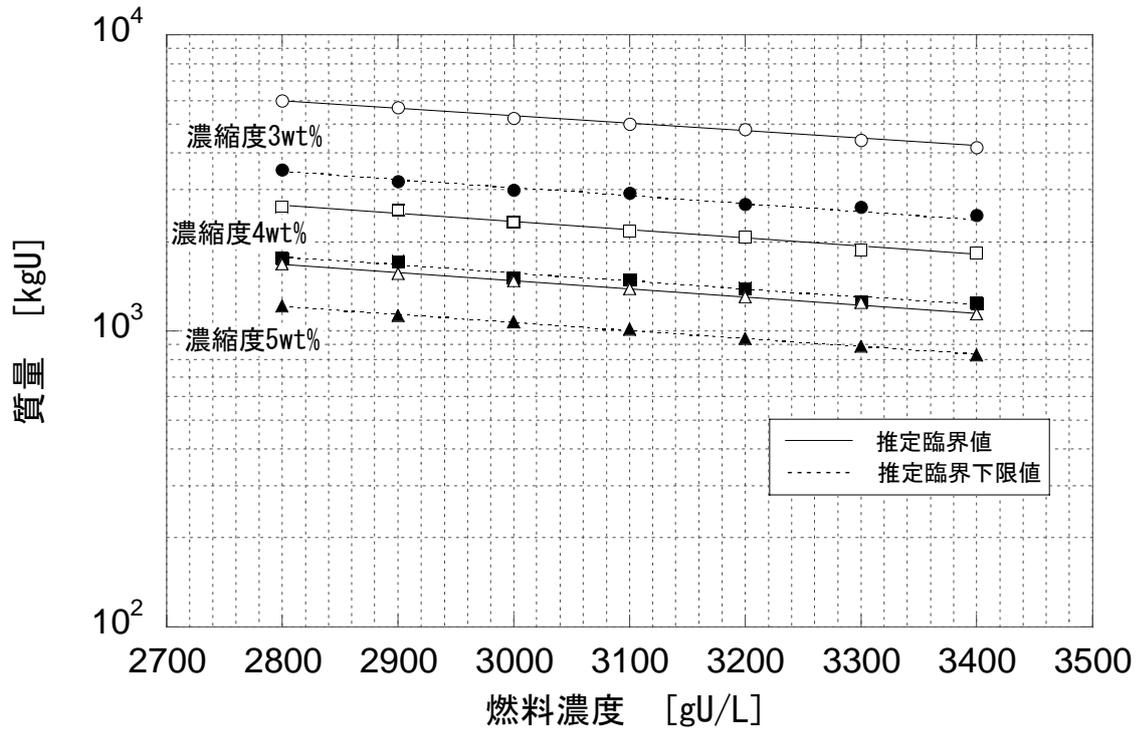


図 5.17(a) UF₆-HF の臨界質量 (HF 0.5wt%、²³⁵U 濃縮度 3,4,5wt%、水反射体付き)

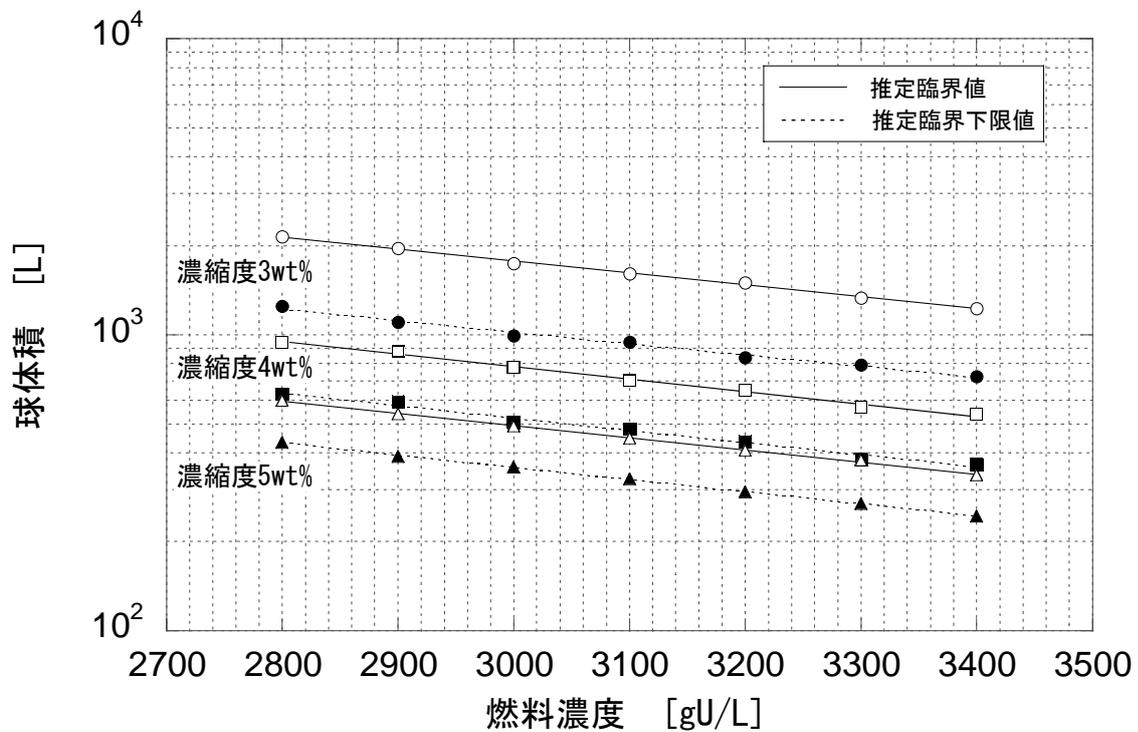


図 5.17(b) UF₆-HF の臨界球体積 (HF 0.5wt%、²³⁵U 濃縮度 3,4,5wt%、水反射体付き)

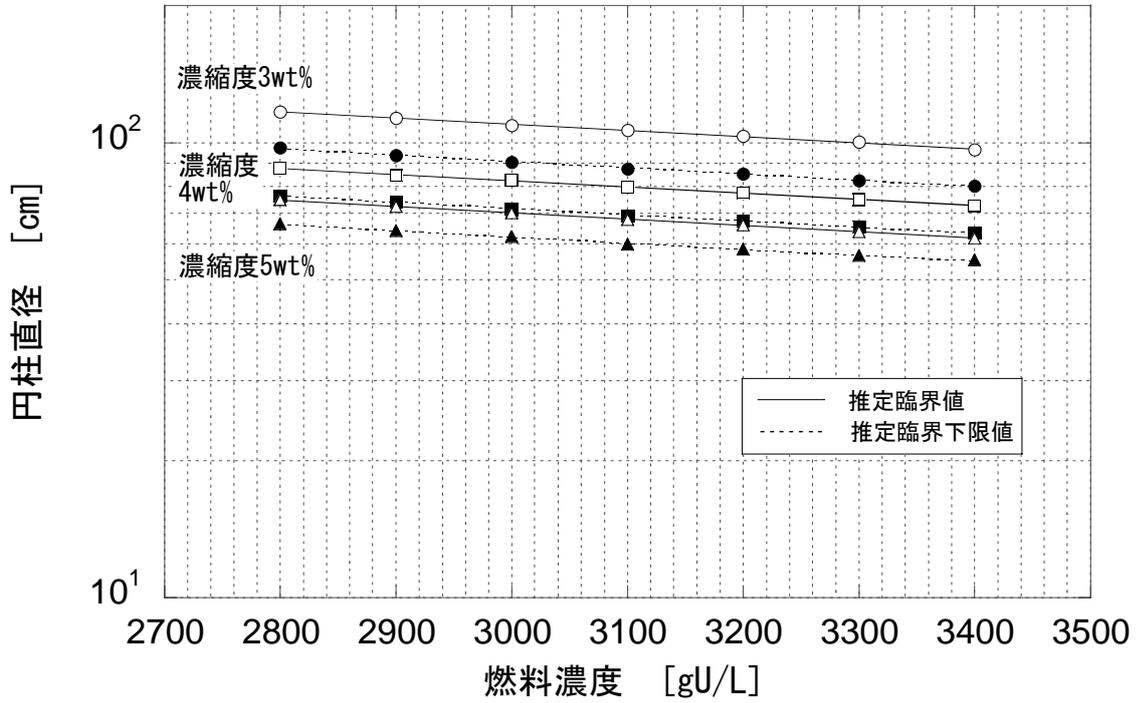


図 5.17(c) $\text{UF}_6\text{-HF}$ の臨界無限円柱直径 (HF 0.5wt%、 ^{235}U 濃縮度 3,4,5wt%、水反射体付き)

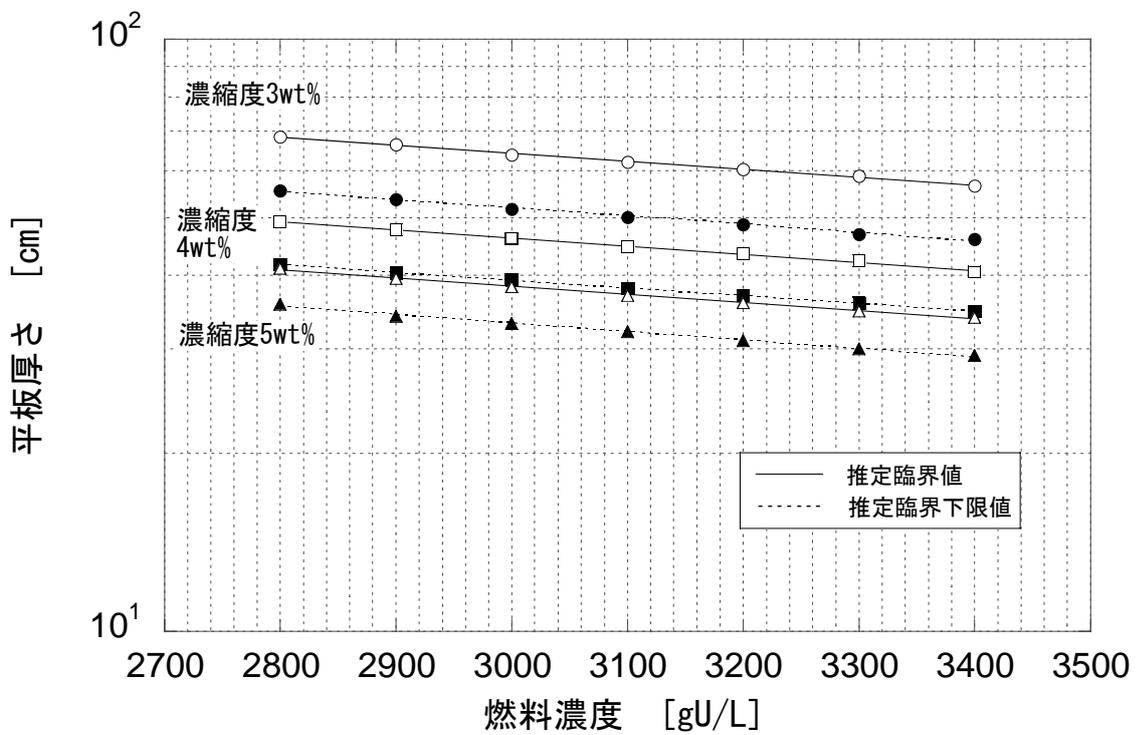


図 5.17(d) $\text{UF}_6\text{-HF}$ の臨界無限平板厚さ (HF 0.5wt%、 ^{235}U 濃縮度 3,4,5wt%、水反射体付き)

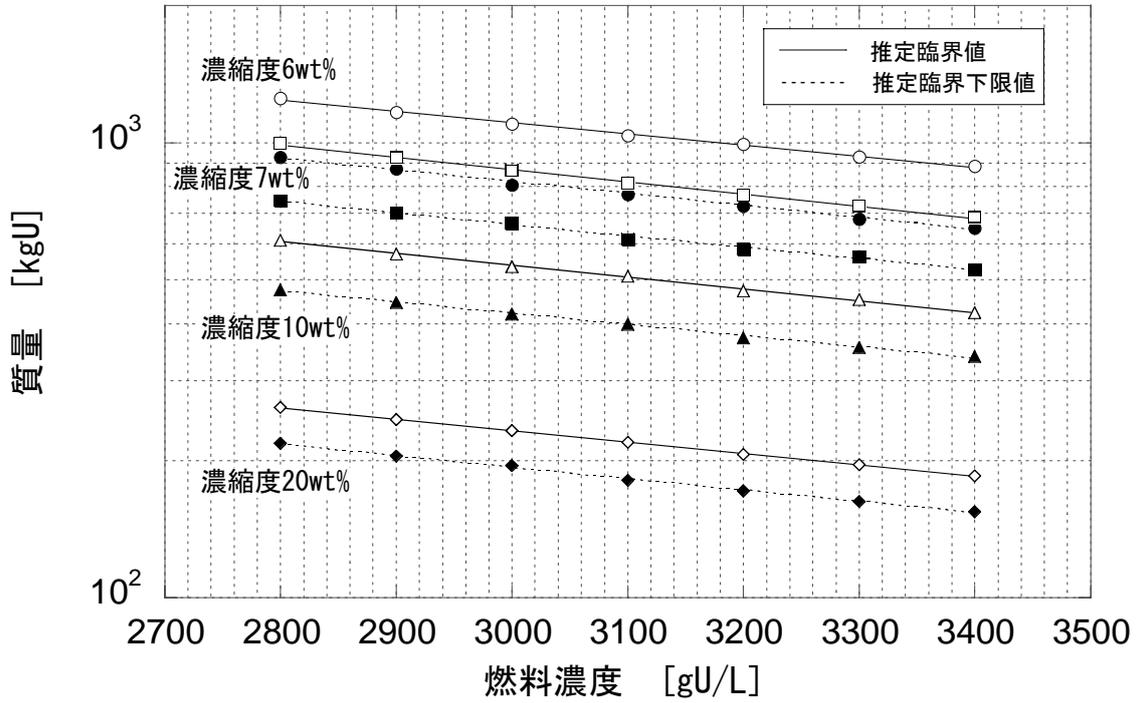


図 5.18(a) UF_6-HF の臨界質量 (HF 0.5wt%、 ^{235}U 濃縮度 6,7,10,20wt%、水反射体付き)

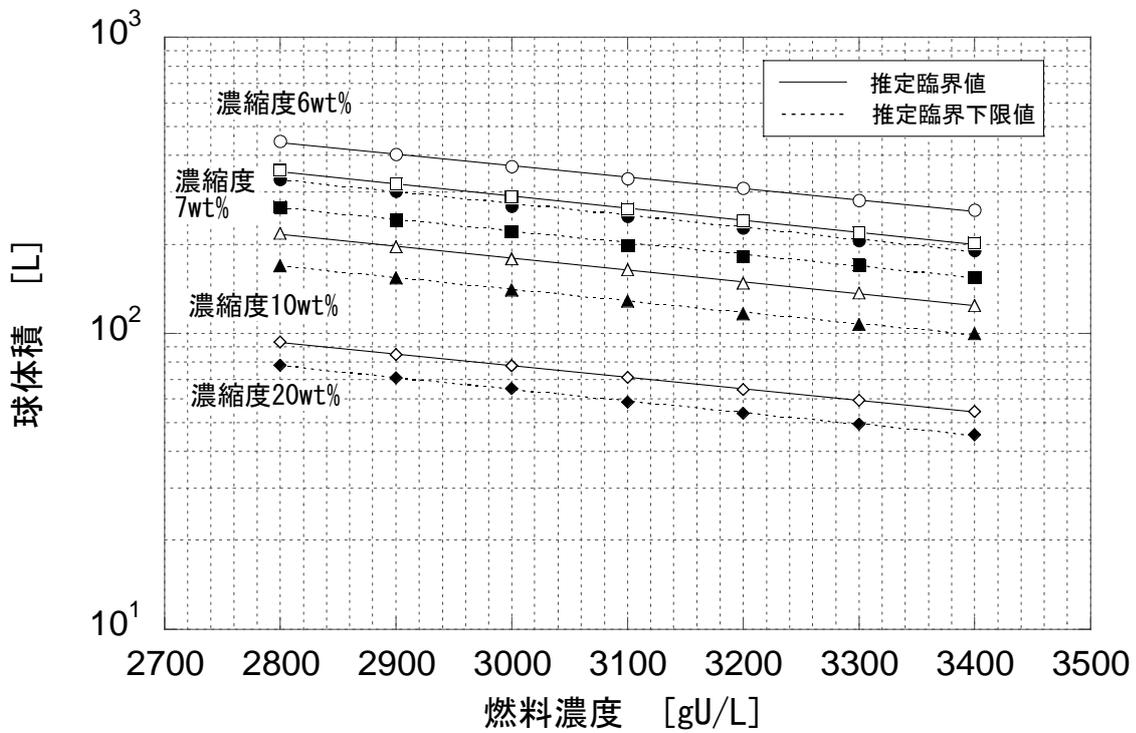


図 5.18(b) UF_6-HF の臨界球体積 (HF 0.5wt%、 ^{235}U 濃縮度 6,7,10,20wt%、水反射体付き)

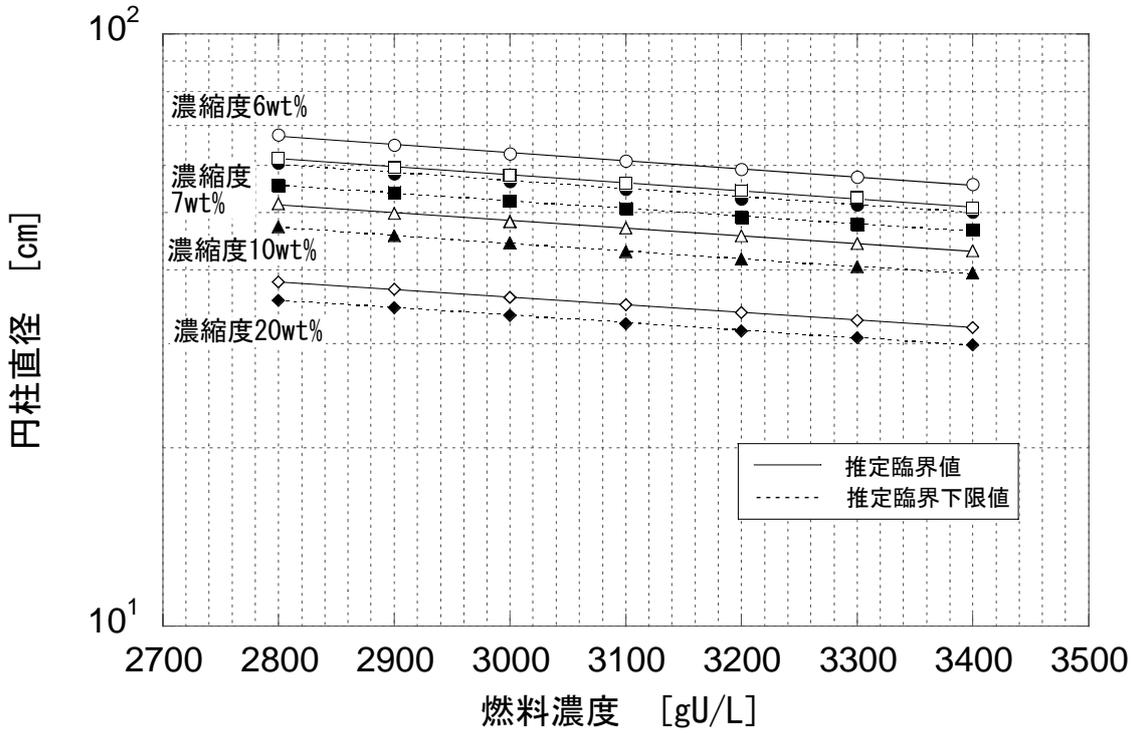


図 5.18(c) UF₆-HF の臨界無限円柱直径 (HF 0.5wt%、²³⁵U 濃縮度 6,7,10,20wt%、水反射体付き)

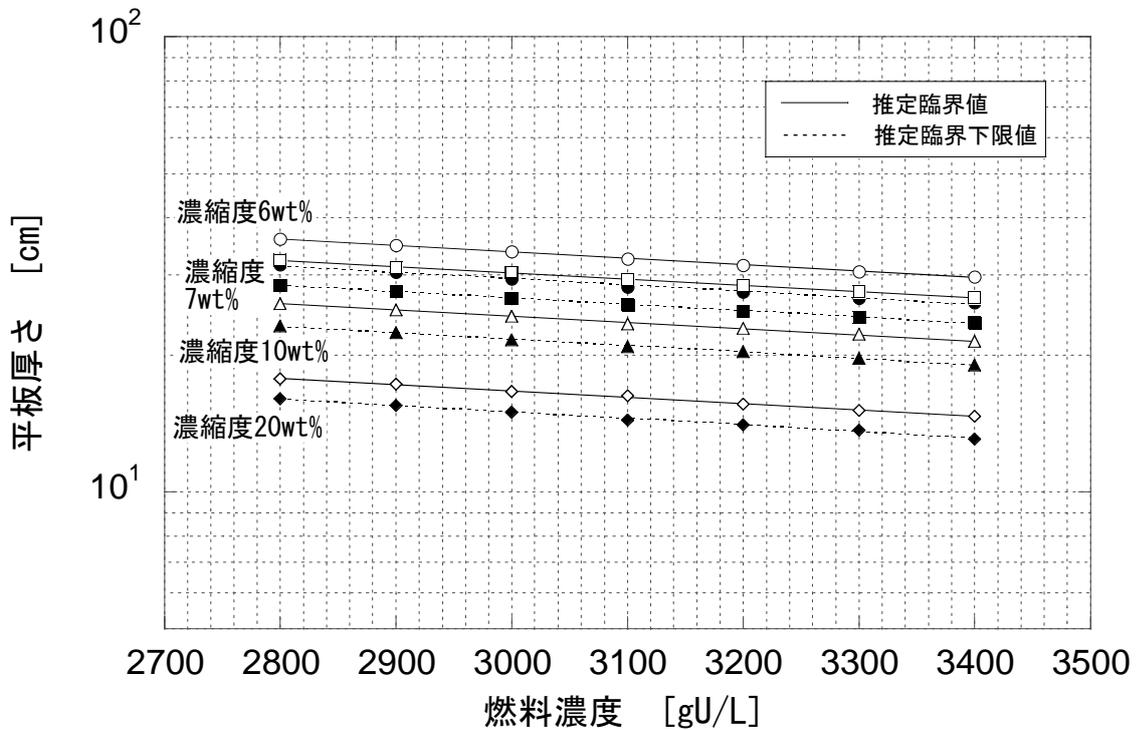


図 5.18(d) UF₆-HF の臨界無限平板厚さ (HF 0.5wt%、²³⁵U 濃縮度 6,7,10,20wt%、水反射体付き)

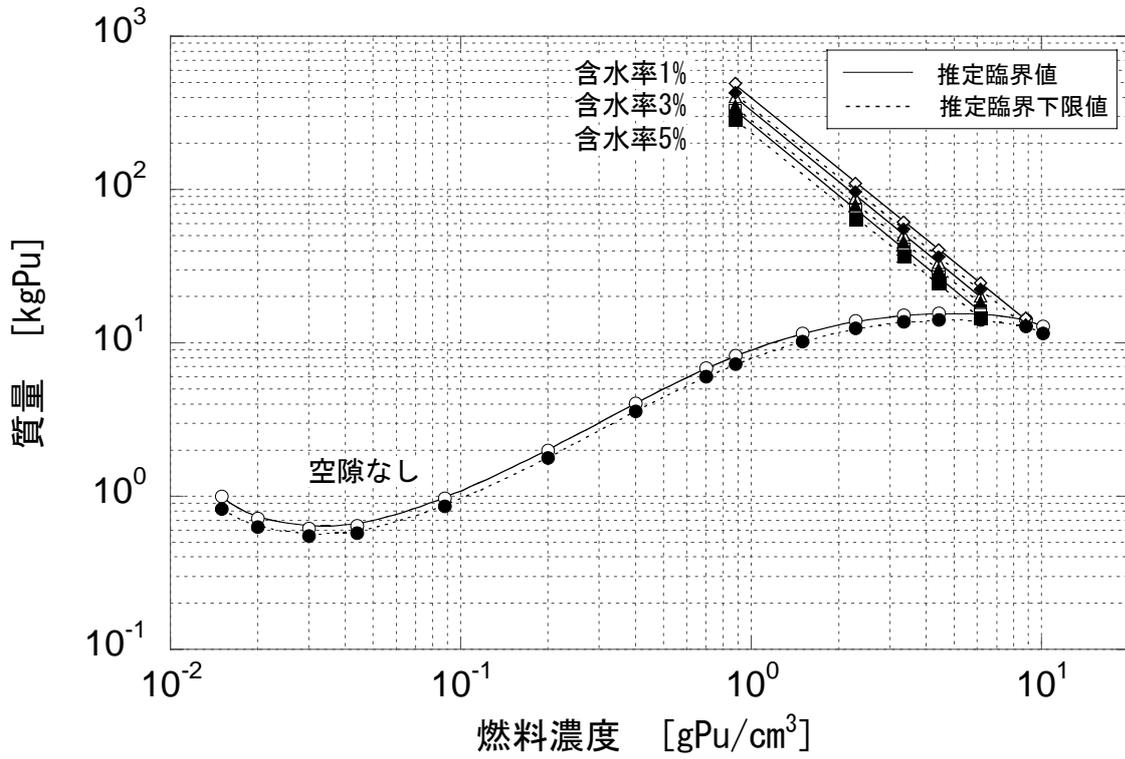


図 5.19(a) 均質 $\text{PuO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界質量
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu =95:5:0、水反射体付き)

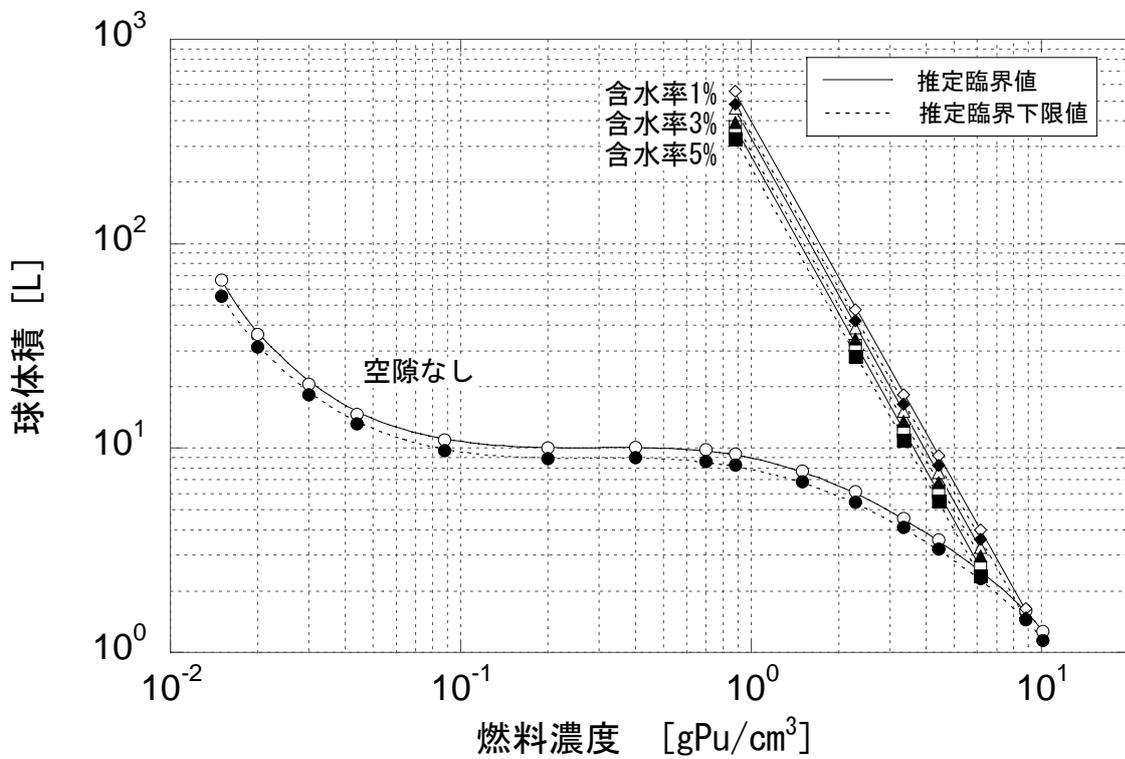


図 5.19(b) 均質 $\text{PuO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界球体積
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu =95:5:0、水反射体付き)

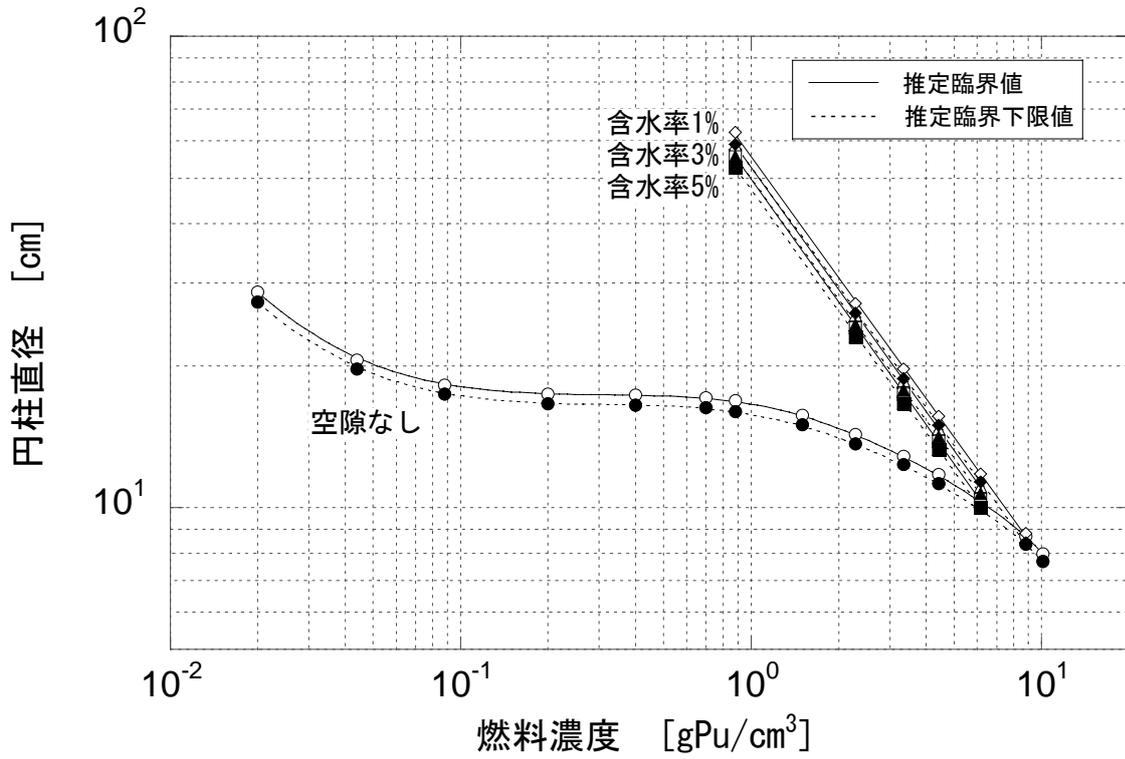


図 5.19(c) 均質 PuO₂-H₂O の臨界無限円柱直径
(²³⁹Pu: ²⁴⁰Pu: ²⁴¹Pu=95:5:0、水反射体付き)

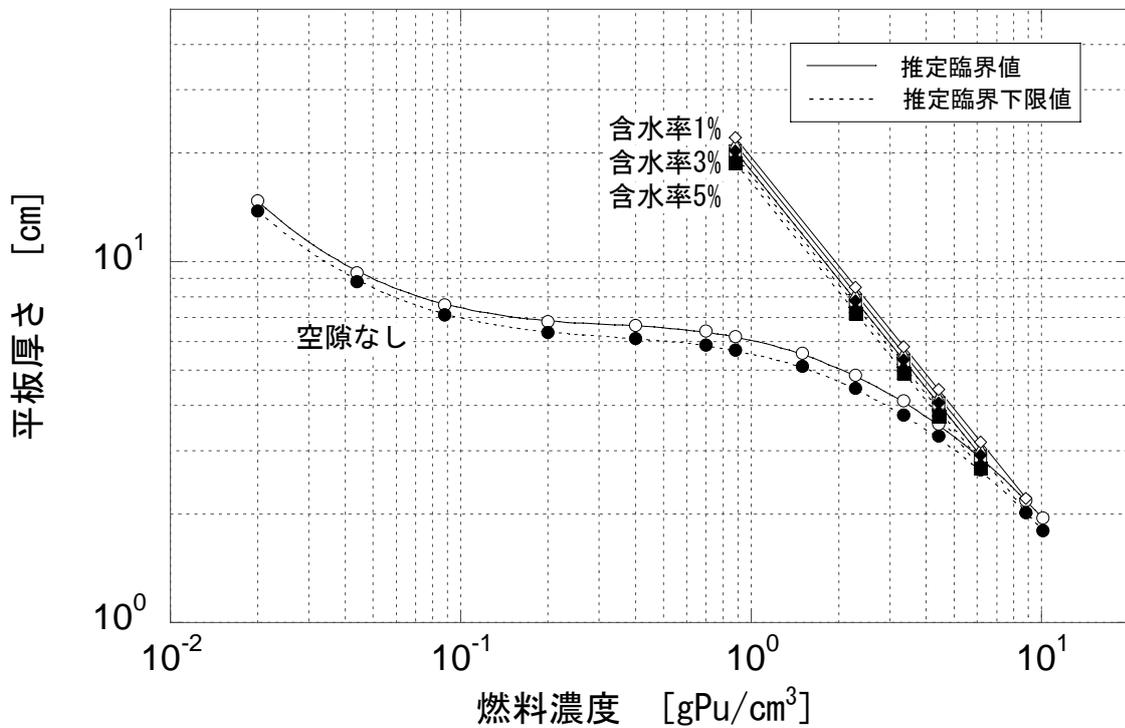


図 5.19(d) 均質 PuO₂-H₂O の臨界無限平板厚さ
(²³⁹Pu: ²⁴⁰Pu: ²⁴¹Pu=95:5:0、水反射体付き)

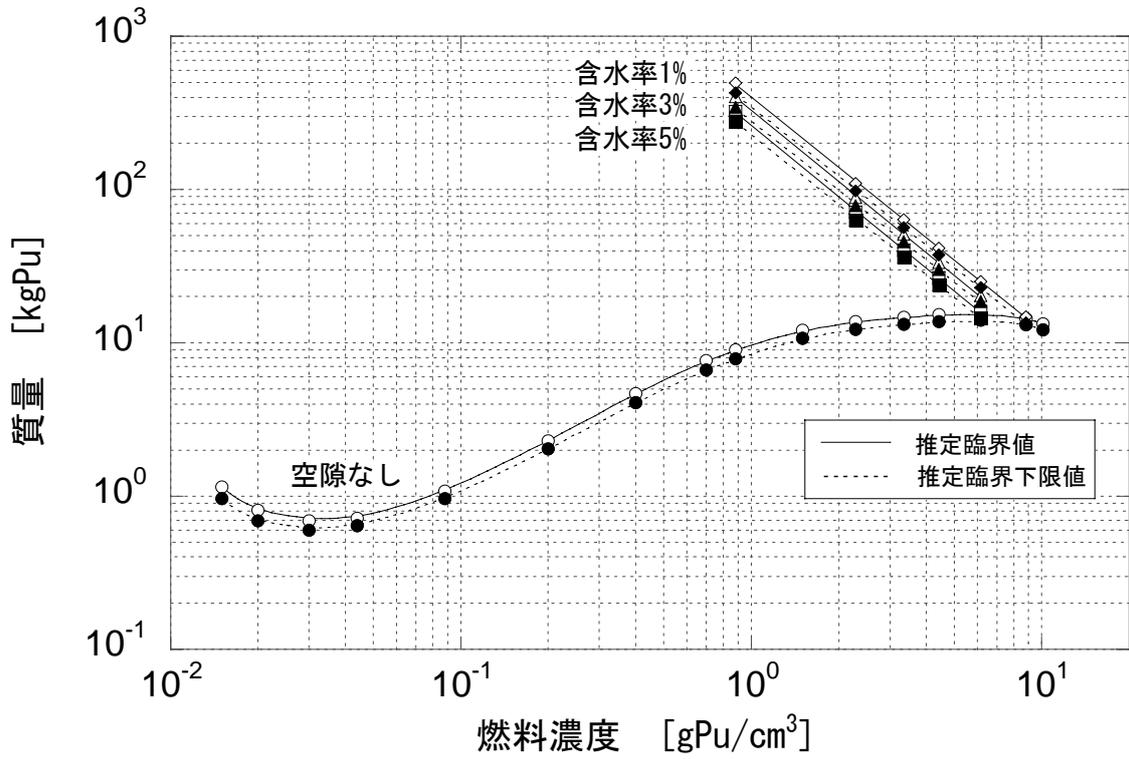


図 5.20(a) 均質 $\text{PuO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界質量
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu = 80:10:10、水反射体付き)

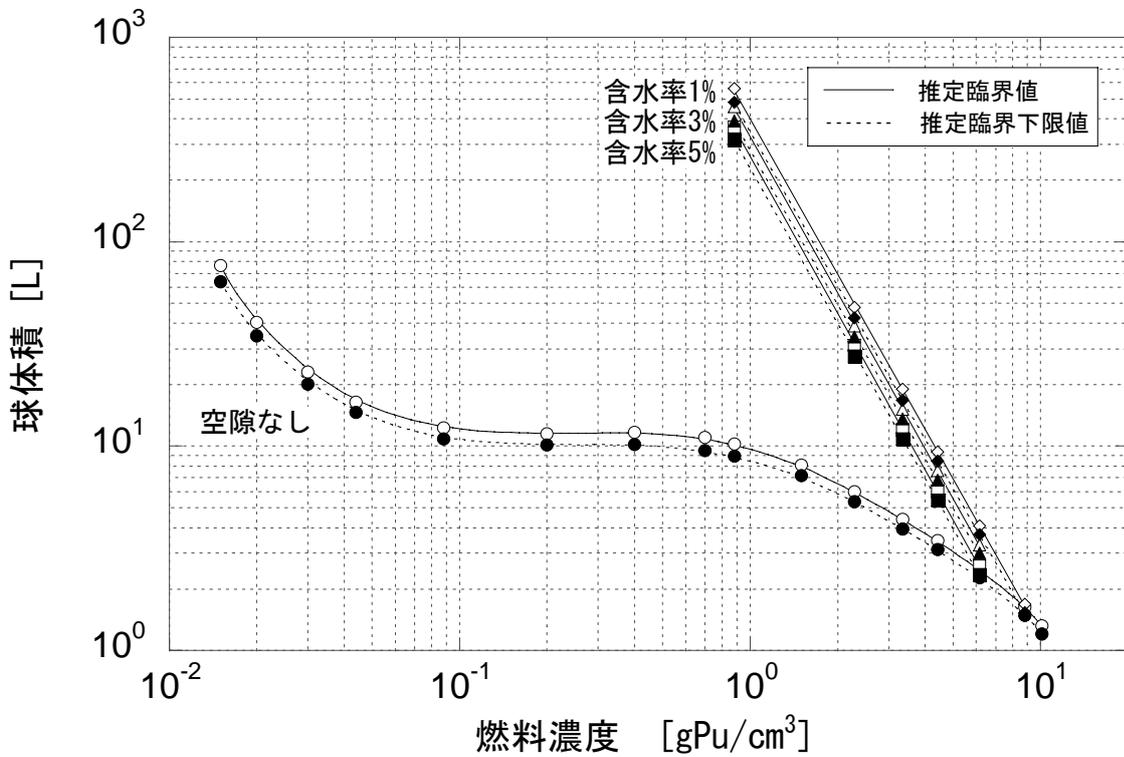


図 5.20(b) 均質 $\text{PuO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界球体積
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu = 80:10:10、水反射体付き)

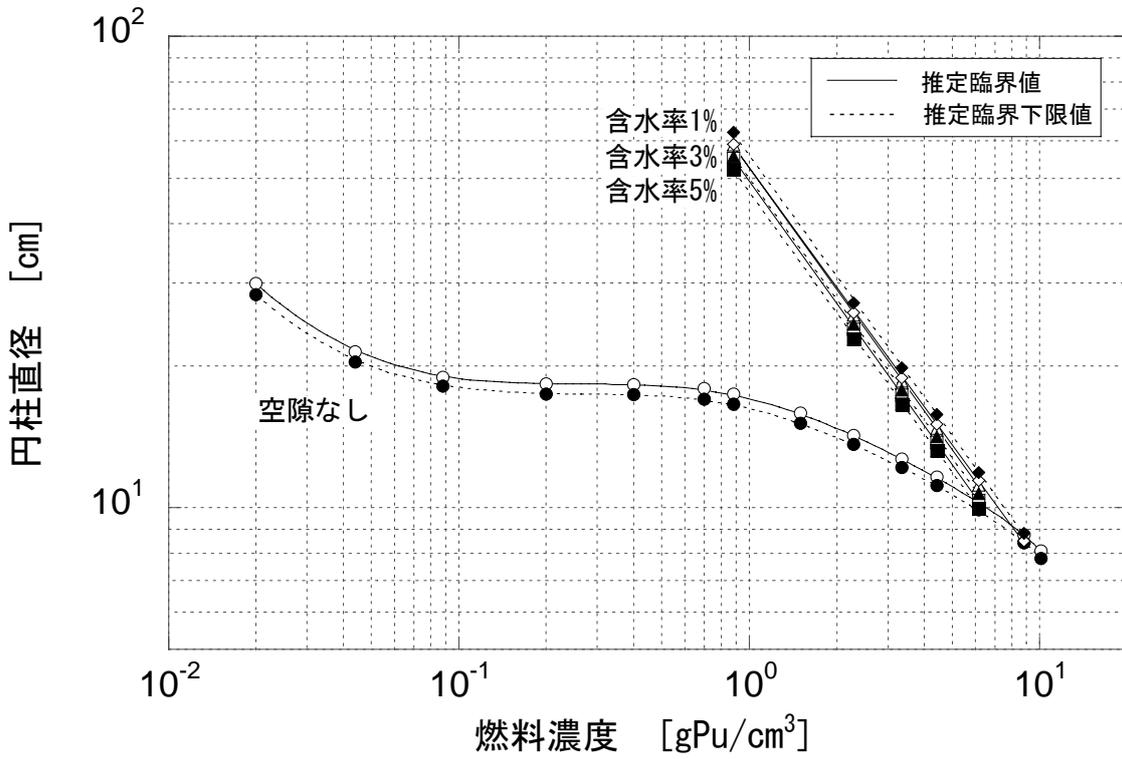


図 5.20(c) 均質 PuO₂-H₂O の臨界無限円柱直径
(²³⁹Pu: ²⁴⁰Pu: ²⁴¹Pu=80:10:10、水反射体付き)

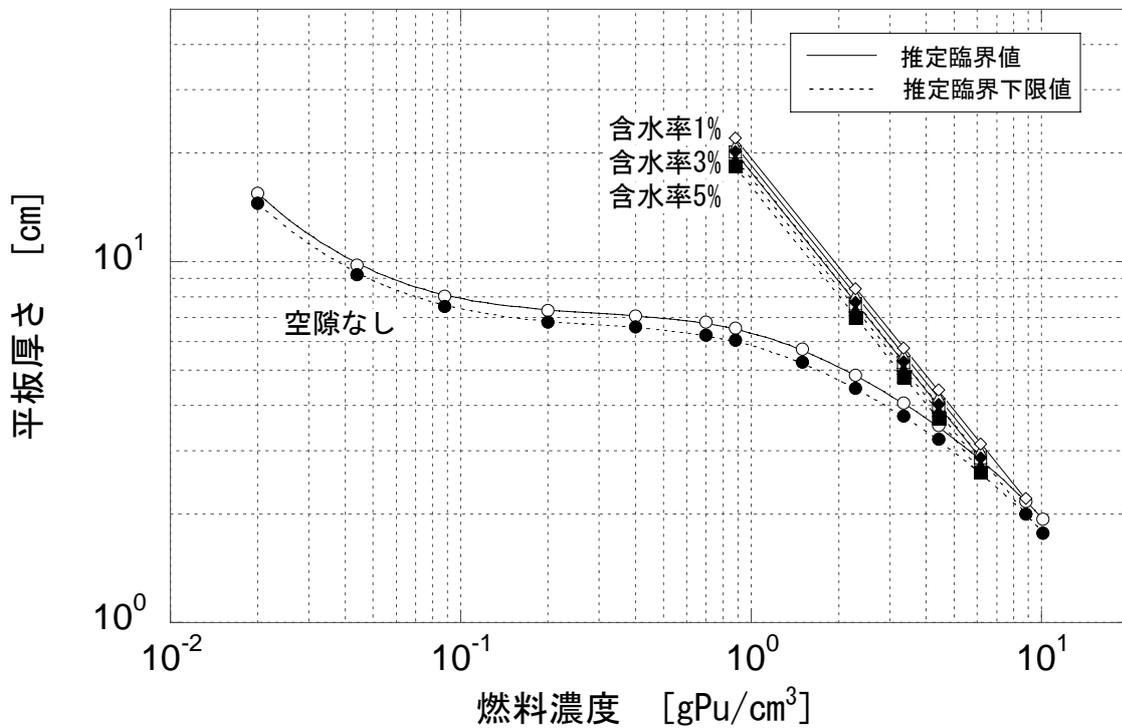


図 5.20(d) 均質 PuO₂-H₂O の臨界無限平板厚さ
(²³⁹Pu: ²⁴⁰Pu: ²⁴¹Pu=80:10:10、水反射体付き)

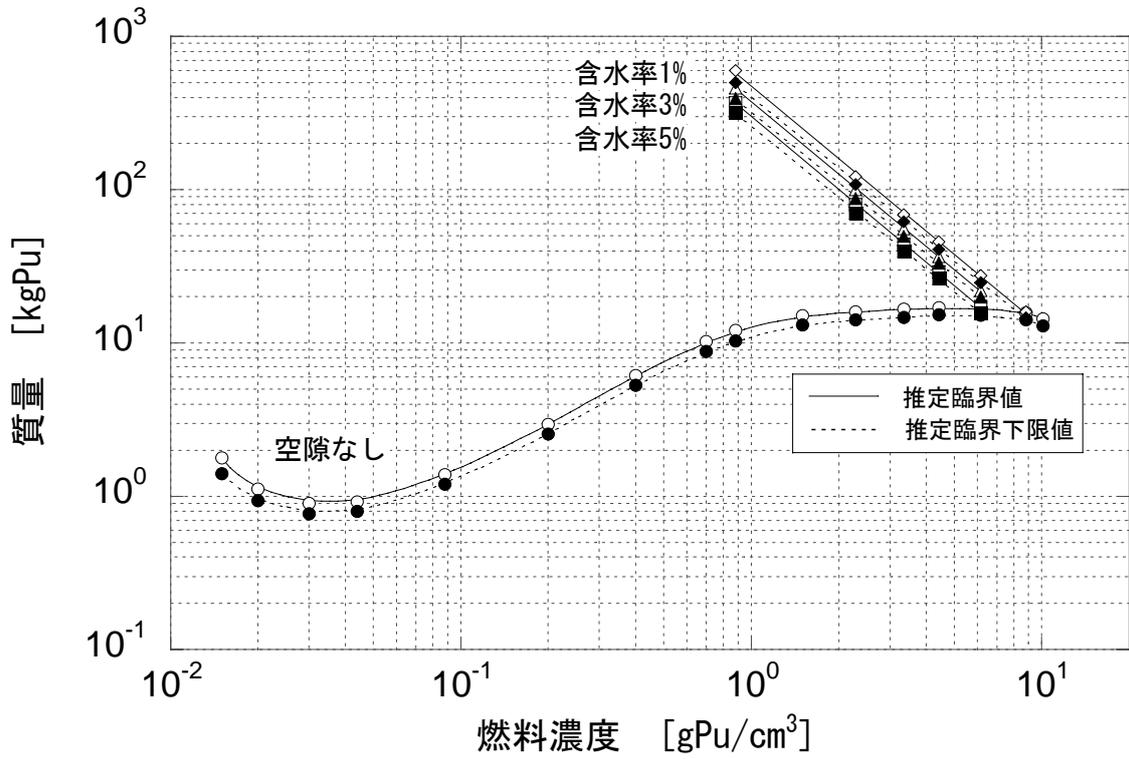


図 5.21(a) 均質 $\text{PuO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界質量
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu =71:17:12、水反射体付き)

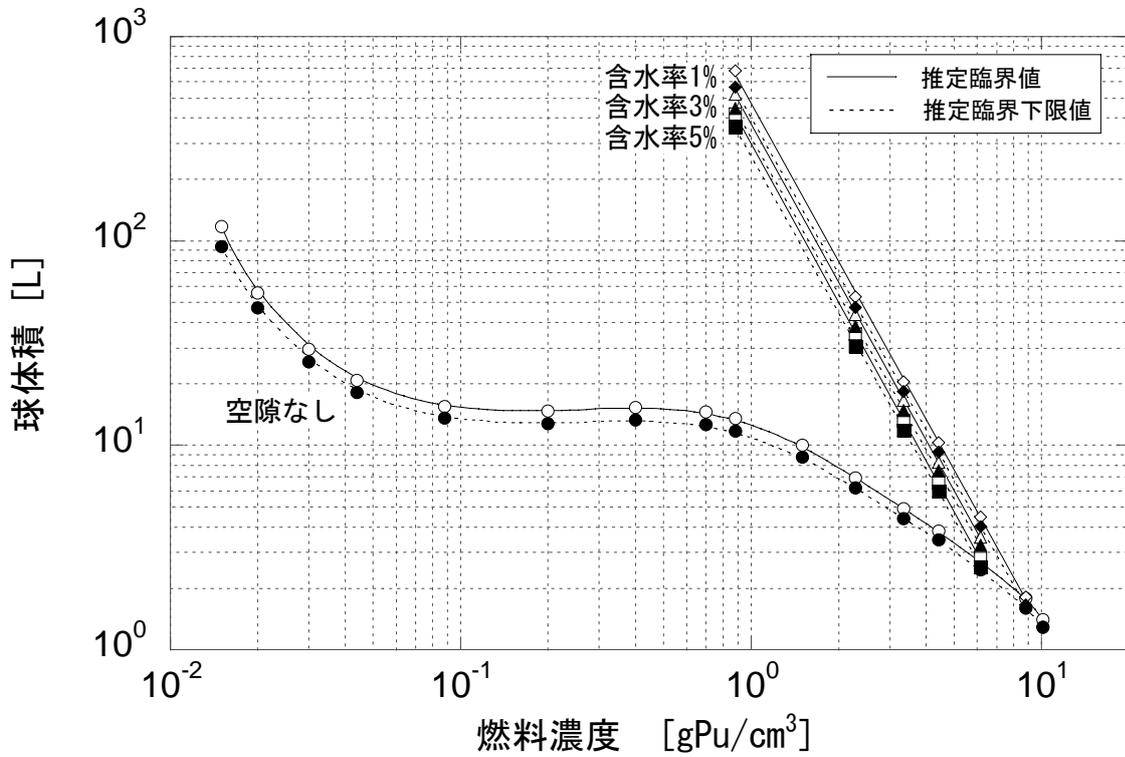


図 5.21(b) 均質 $\text{PuO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界球体積
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu =71:17:12、水反射体付き)

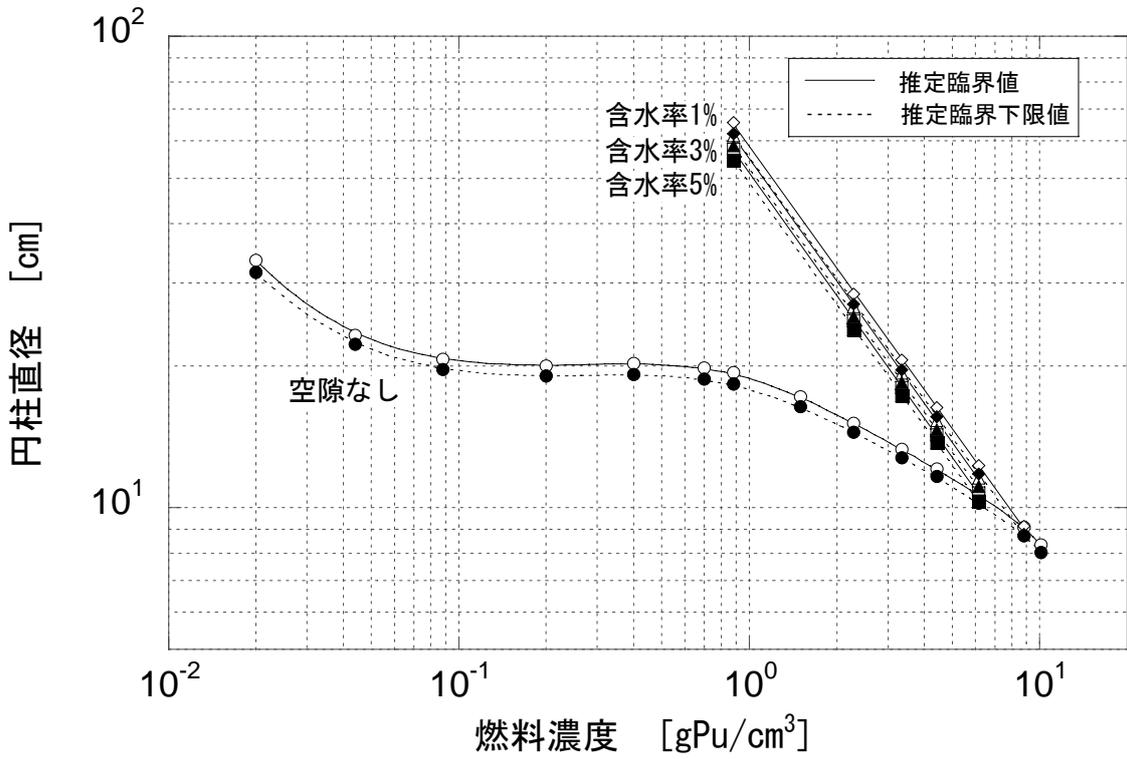


図 5.21(c) 均質 $\text{PuO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界無限円柱直径
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu =71:17:12、水反射体付き)

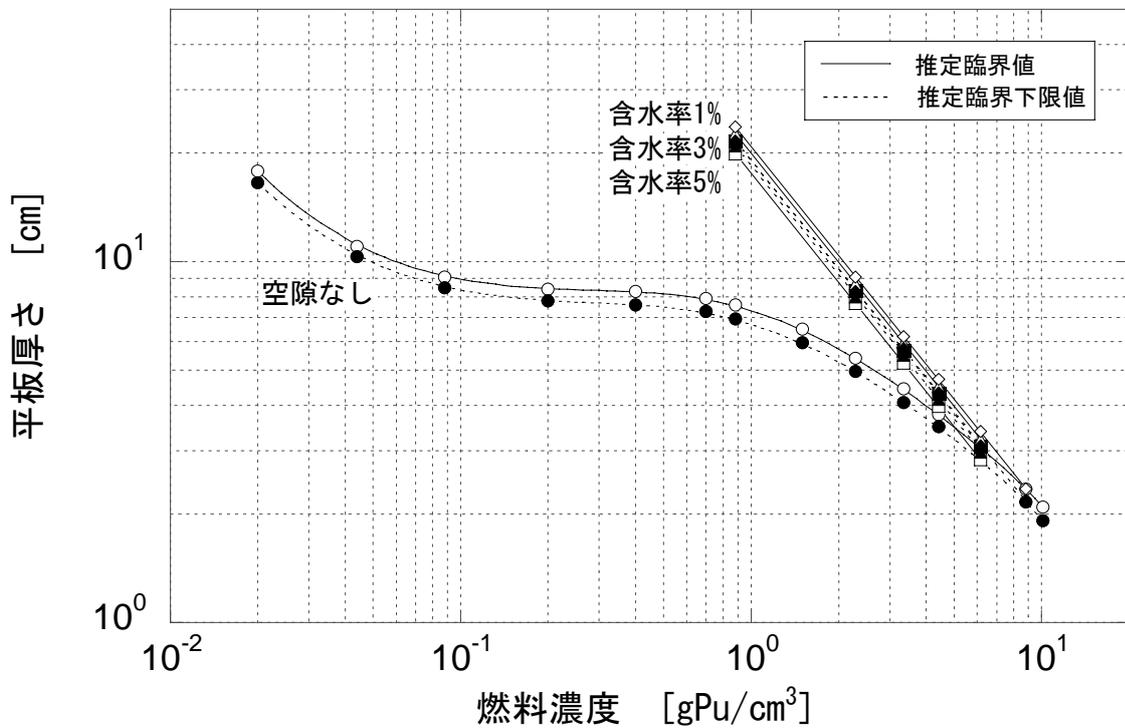


図 5.21(d) 均質 $\text{PuO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界無限平板厚さ
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu =71:17:12、水反射体付き)

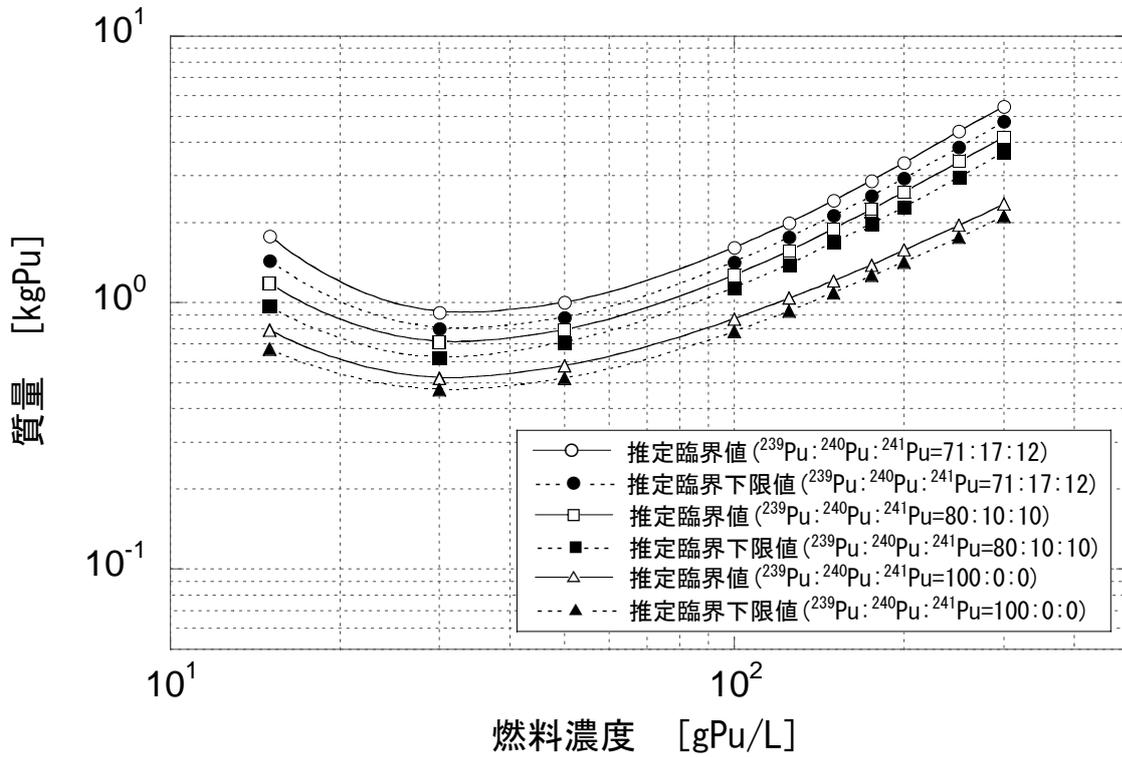


図 5.22(a) $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ 水溶液の臨界質量 (水反射体付き)

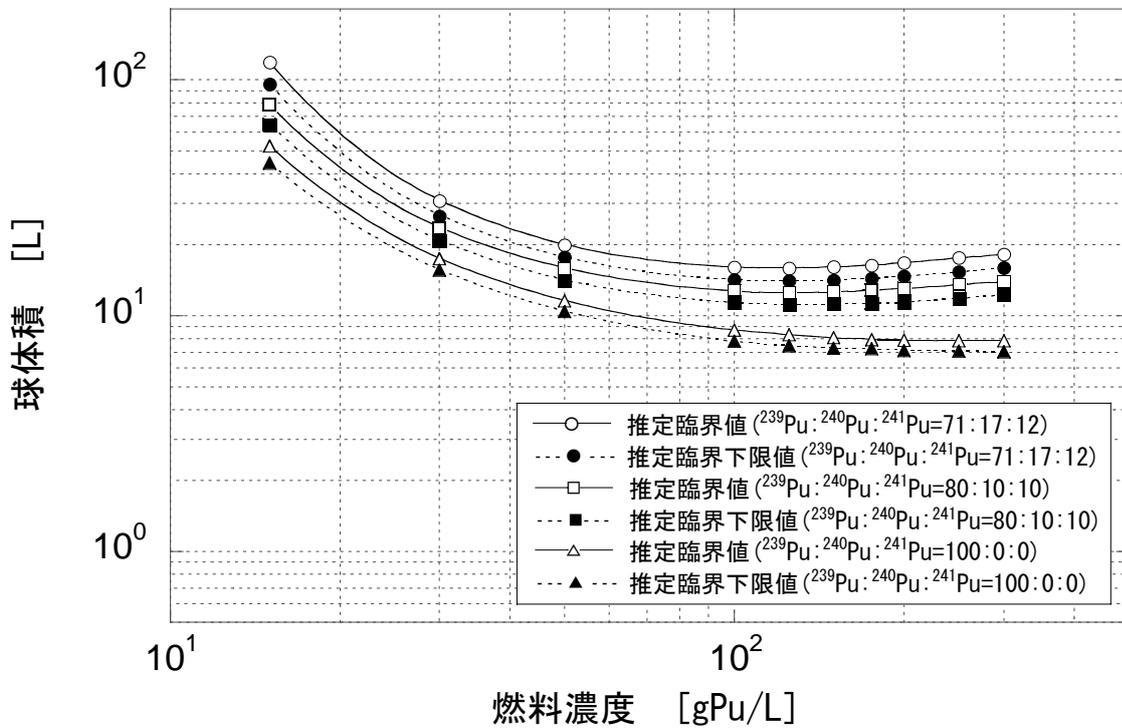


図 5.22(b) $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ 水溶液の臨界球体積 (水反射体付き)

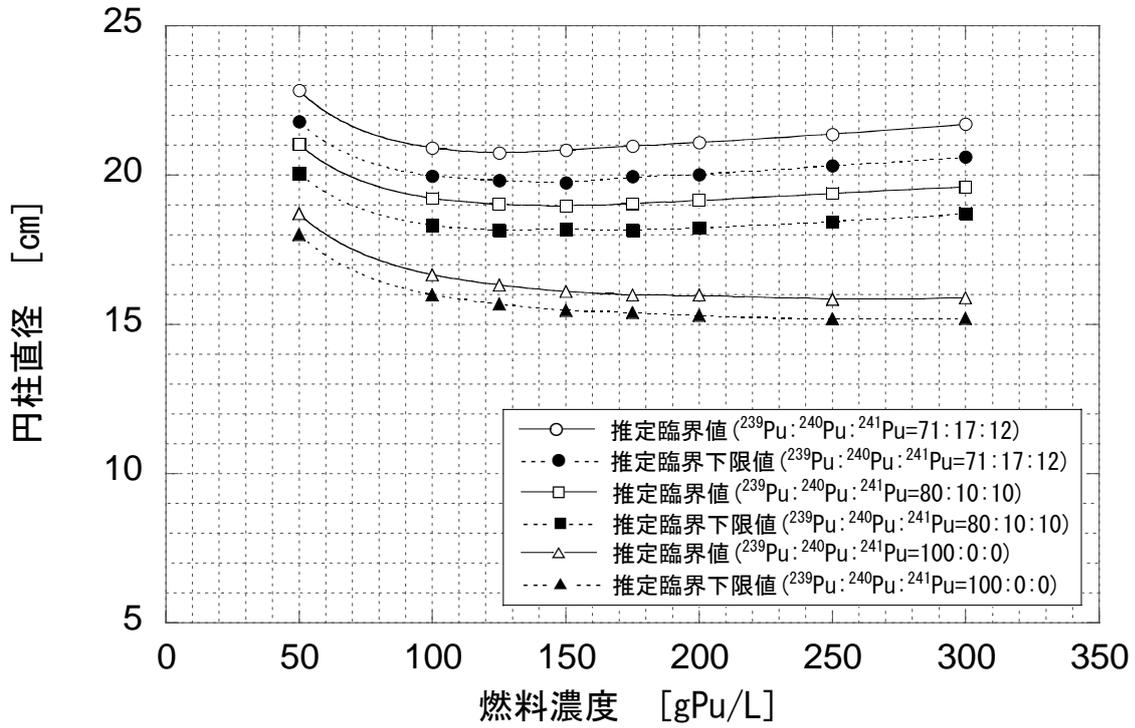


図 5.22(c) $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ 水溶液の臨界無限円柱直径 (水反射体付き)

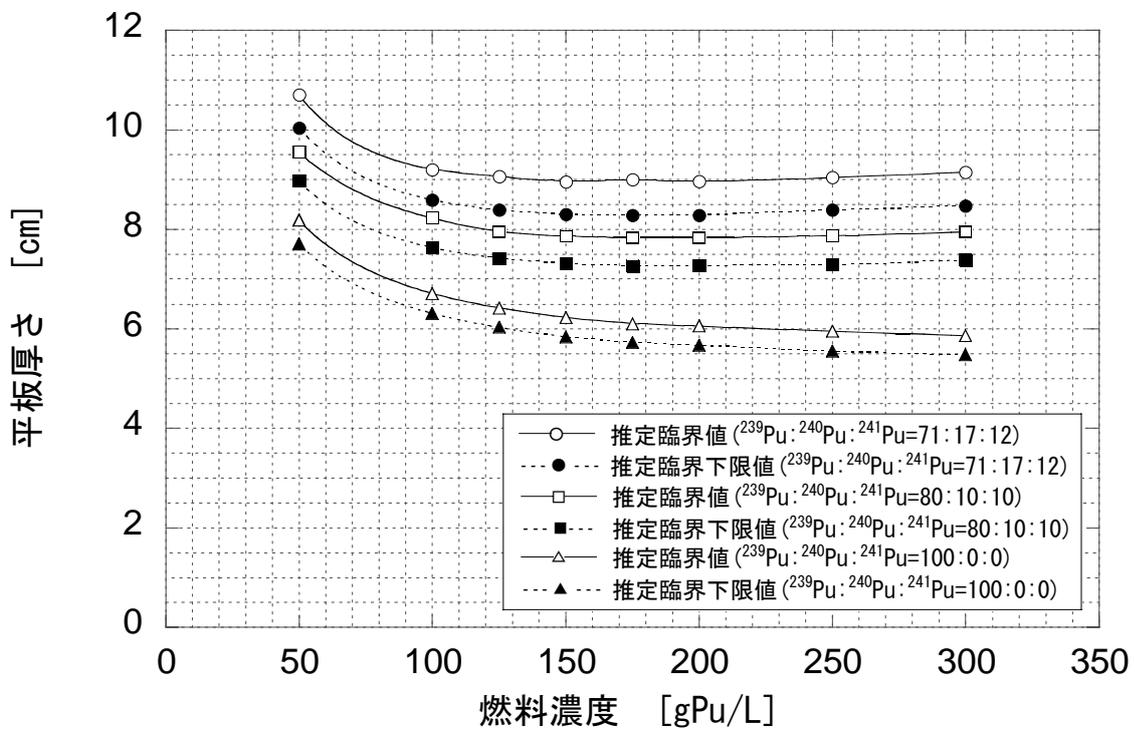


図 5.22(d) $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ 水溶液の臨界無限平板厚さ (水反射体付き)

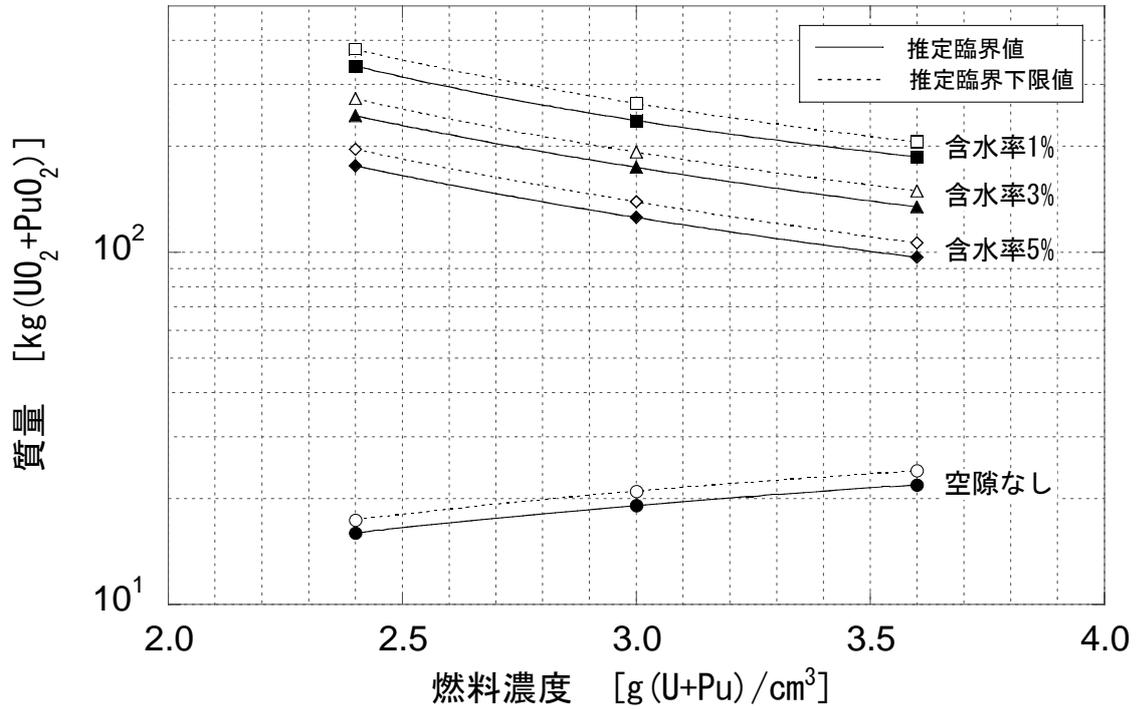


図 5.23(a) 均質 $\text{PuO}_2\text{-UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界質量
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu =100:0:0、 PuO_2 富化度 55wt%、 ^{235}U 濃縮度 0.711wt%、水反射体付き)

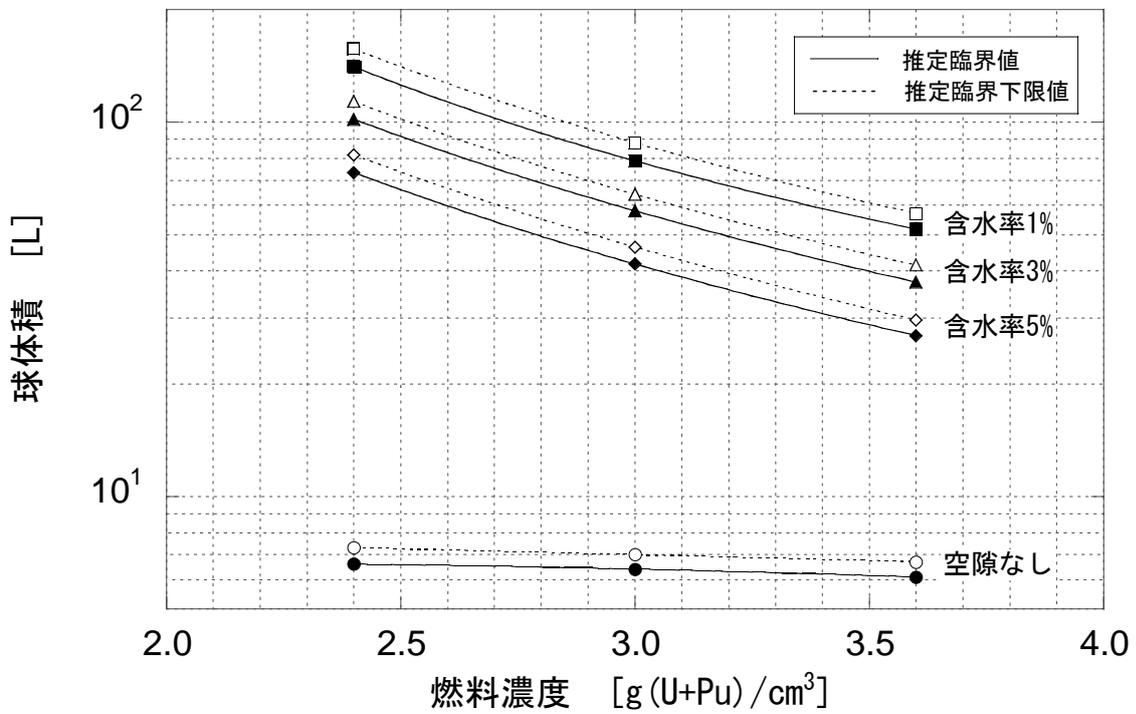


図 5.23(b) 均質 $\text{PuO}_2\text{-UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界球体積
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu =100:0:0、 PuO_2 富化度 55wt%、 ^{235}U 濃縮度 0.711wt%、水反射体付き)

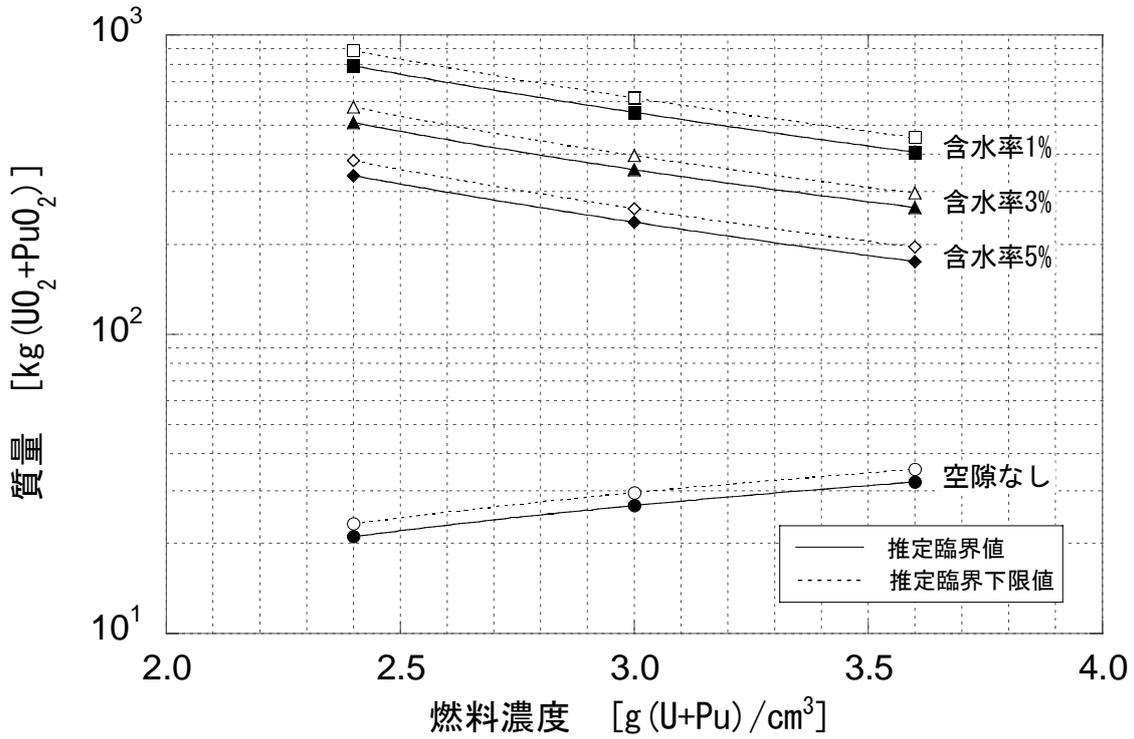


図 5.24(a) 均質 $\text{PuO}_2\text{-UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界質量
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu =100:0:0、 PuO_2 富化度 35wt%、 ^{235}U 濃縮度 0.711wt%、水反射体付き)

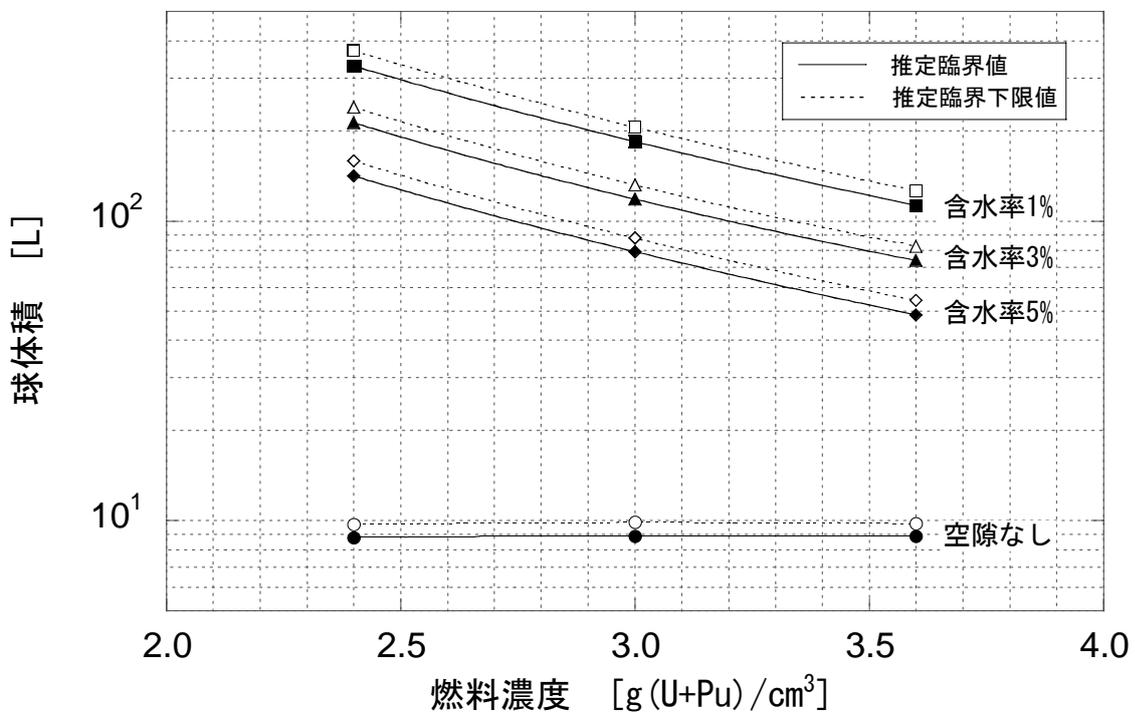


図 5.24(b) 均質 $\text{PuO}_2\text{-UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界球体積
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu =100:0:0、 PuO_2 富化度 35wt%、 ^{235}U 濃縮度 0.711wt%、水反射体付き)

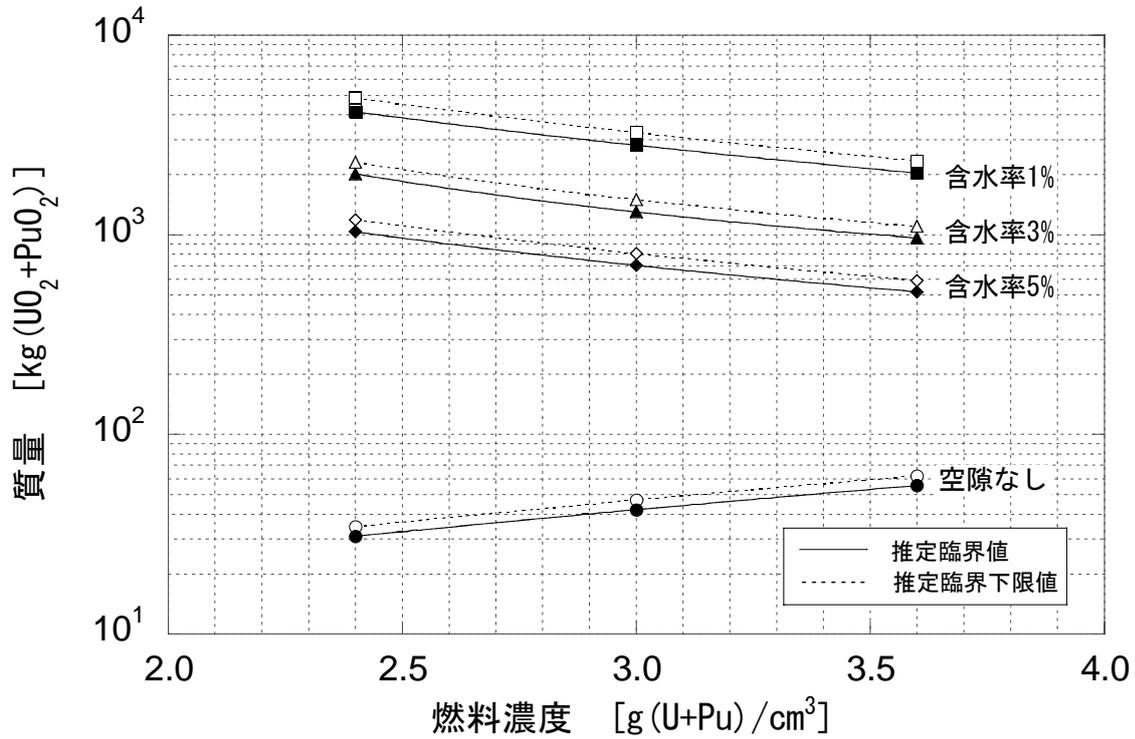


図 5.25(a) 均質 $\text{PuO}_2\text{-UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界質量
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu =100:0:0、 PuO_2 富化度 15wt%、 ^{235}U 濃縮度 0.711wt%、水反射体付き)

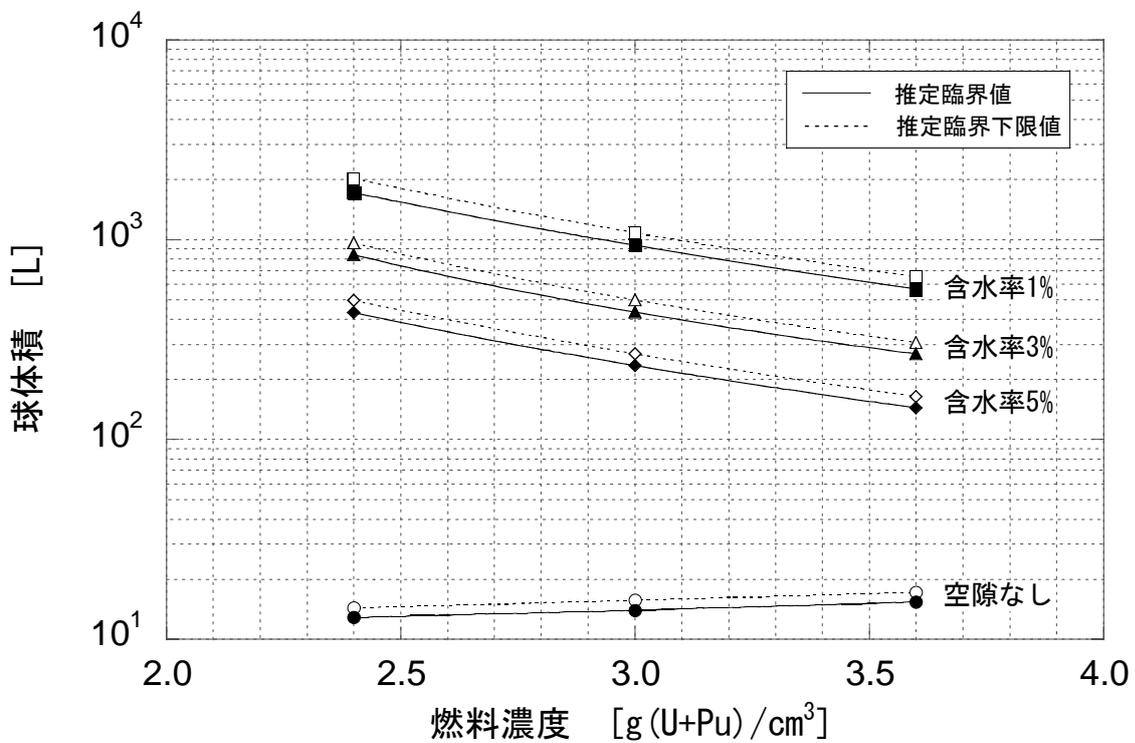


図 5.25(b) 均質 $\text{PuO}_2\text{-UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界球体積
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu =100:0:0、 PuO_2 富化度 15wt%、 ^{235}U 濃縮度 0.711wt%、水反射体付き)

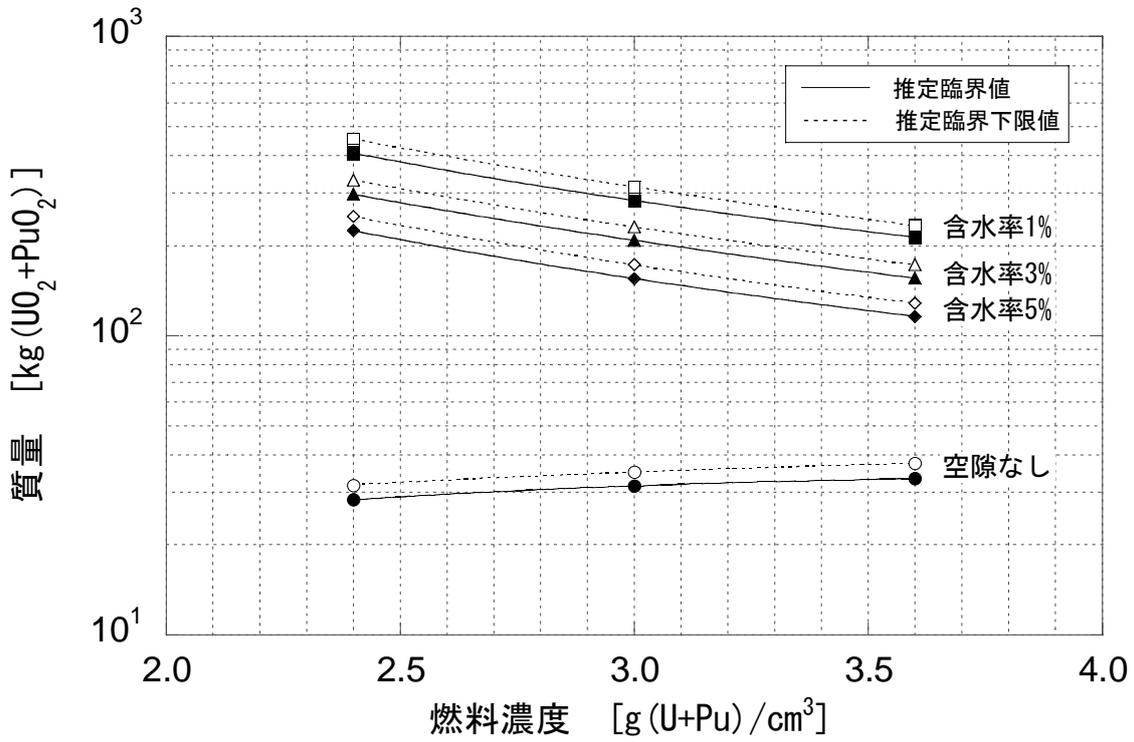


図 5.26(a) 均質 $\text{PuO}_2\text{-UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界質量
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu =80:10:10、 PuO_2 富化度 55wt%、 ^{235}U 濃縮度 0.711wt%、水反射体付き)

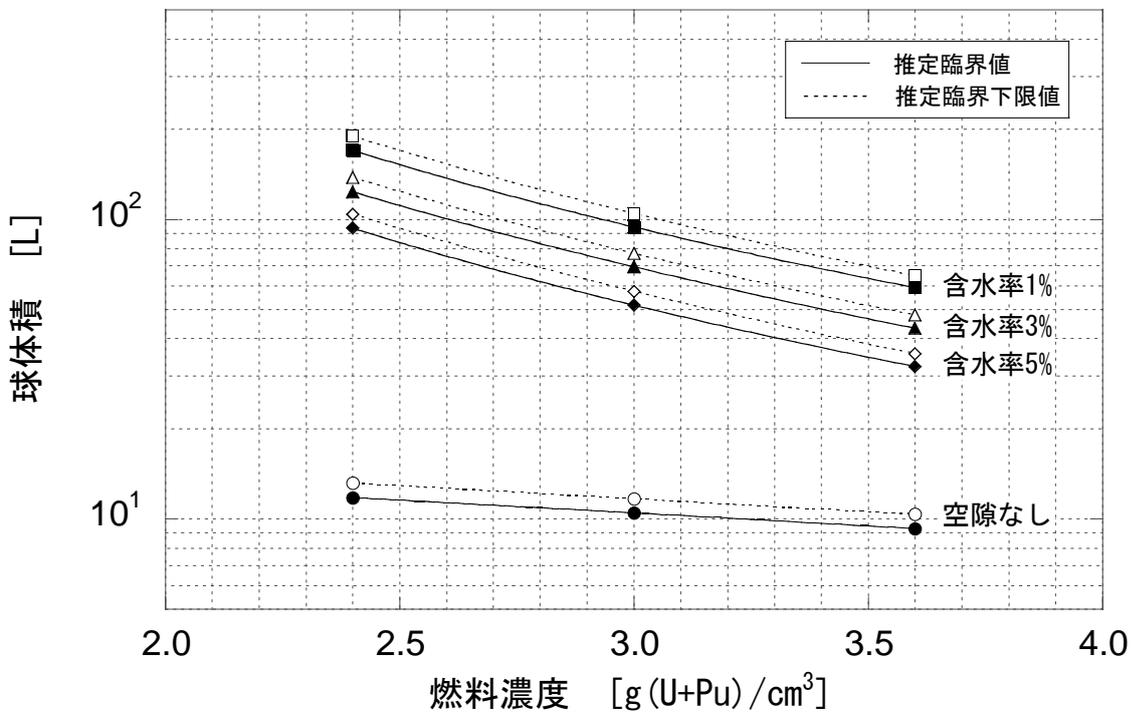


図 5.26(b) 均質 $\text{PuO}_2\text{-UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界球体積
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu =80:10:10、 PuO_2 富化度 55wt%、 ^{235}U 濃縮度 0.711wt%、水反射体付き)

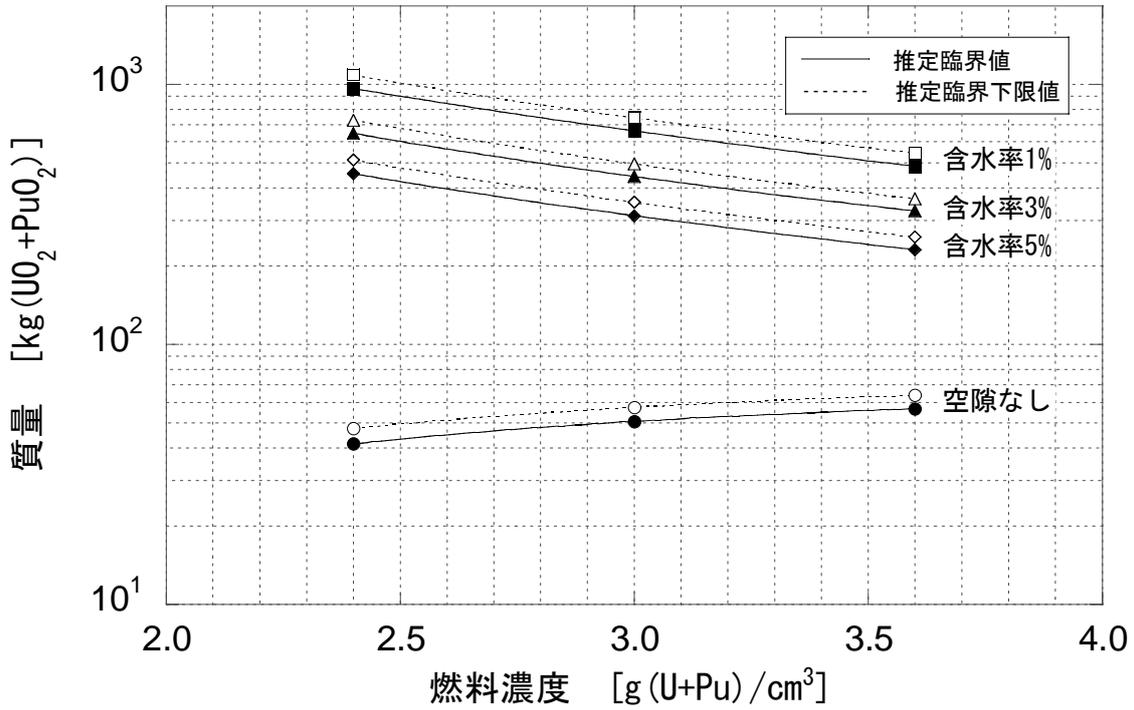


図 5.27(a) 均質 $\text{PuO}_2\text{-UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界質量
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu =80:10:10、 PuO_2 富化度 35wt%、 ^{235}U 濃縮度 0.711wt%、水反射体付き)

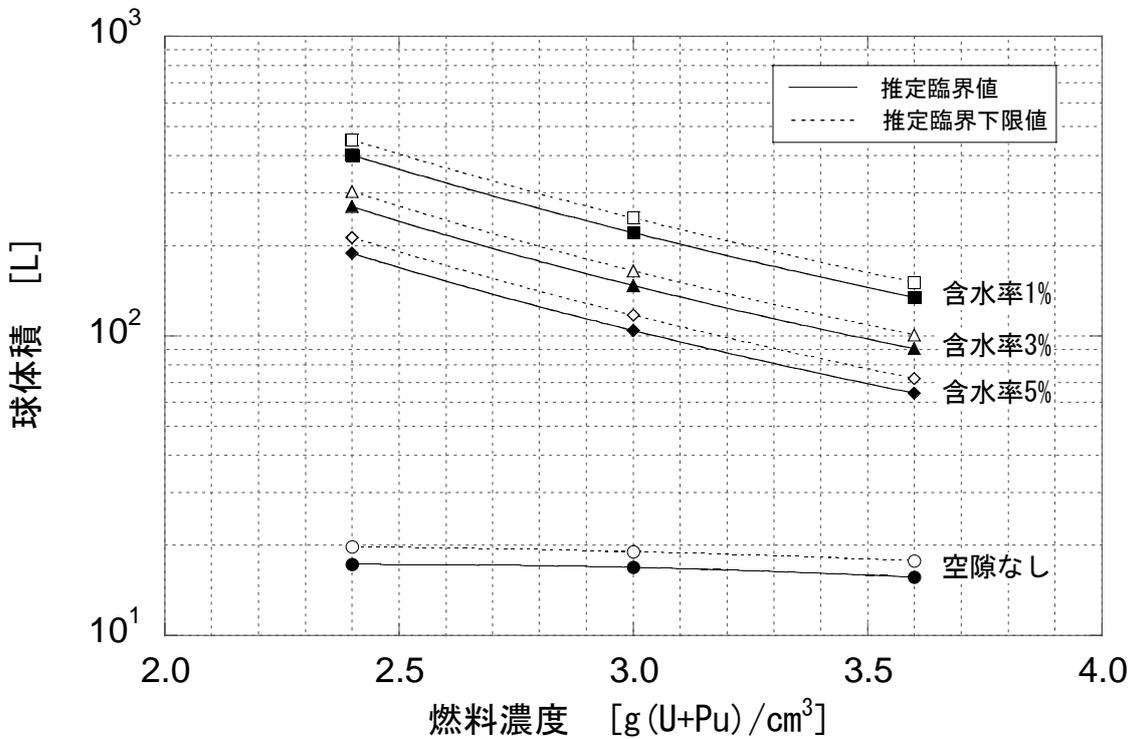


図 5.27(b) 均質 $\text{PuO}_2\text{-UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界球体積
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu =80:10:10、 PuO_2 富化度 35wt%、 ^{235}U 濃縮度 0.711wt%、水反射体付き)

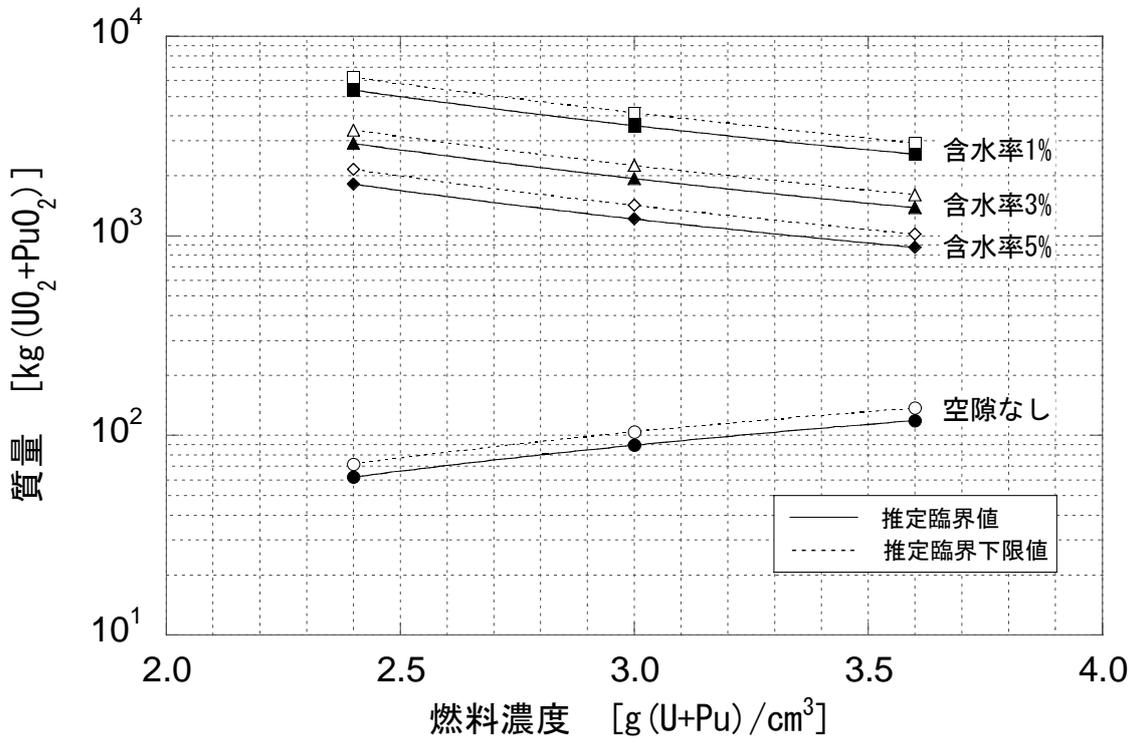


図 5.28(a) 均質 $\text{PuO}_2\text{-UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界質量
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu =80:10:10、 PuO_2 富化度 15wt%、 ^{235}U 濃縮度 0.711wt%、水反射体付き)

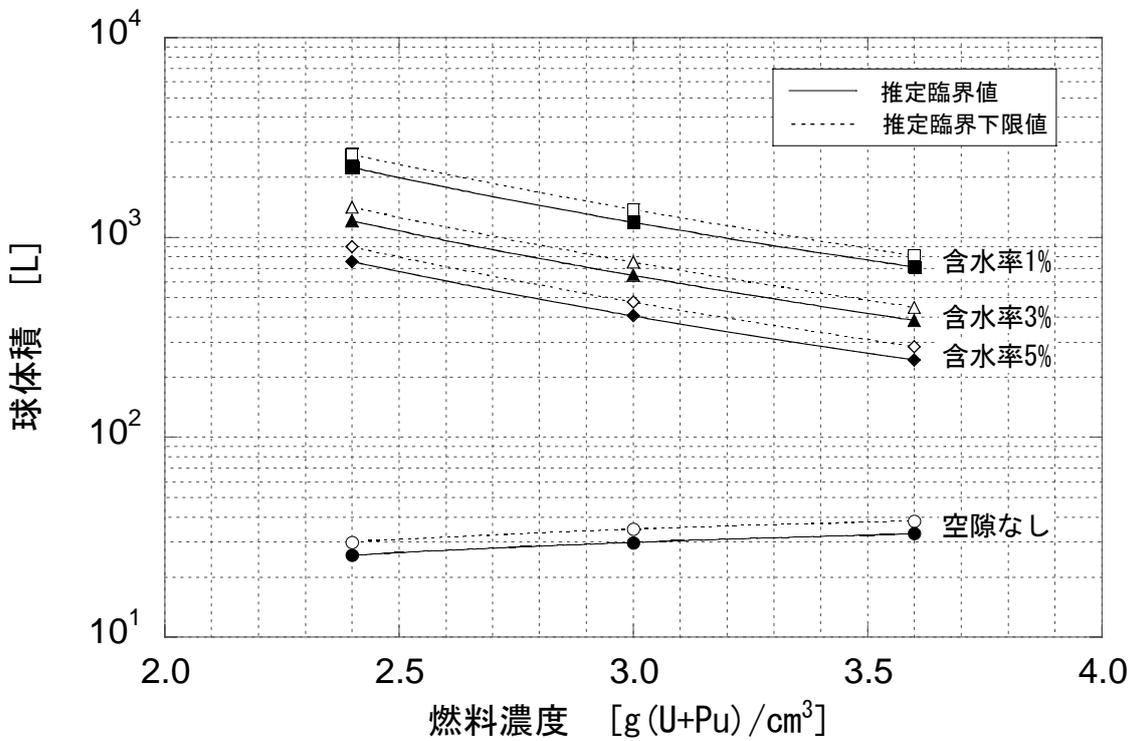


図 5.28(b) 均質 $\text{PuO}_2\text{-UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界球体積
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu =80:10:10、 PuO_2 富化度 15wt%、 ^{235}U 濃縮度 0.711wt%、水反射体付き)

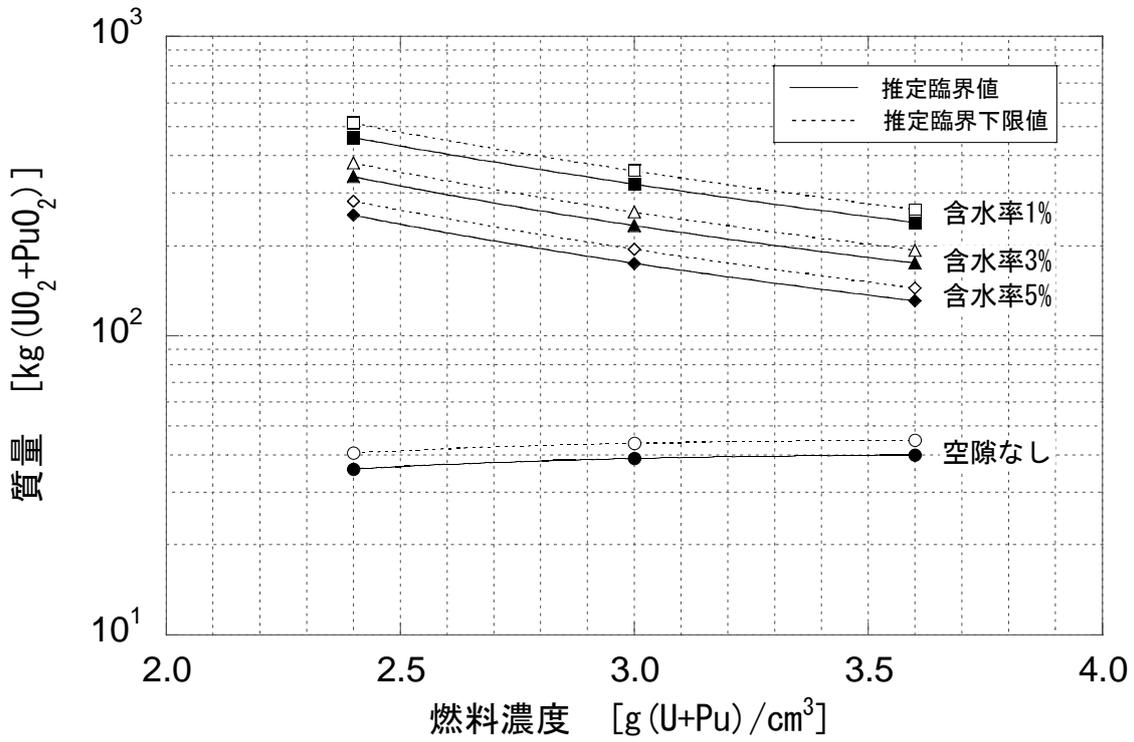


図 5.29(a) 均質 $\text{PuO}_2\text{-UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界質量
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu =71:17:12、 PuO_2 富化度 55wt%、 ^{235}U 濃縮度 0.711wt%、水反射体付き)

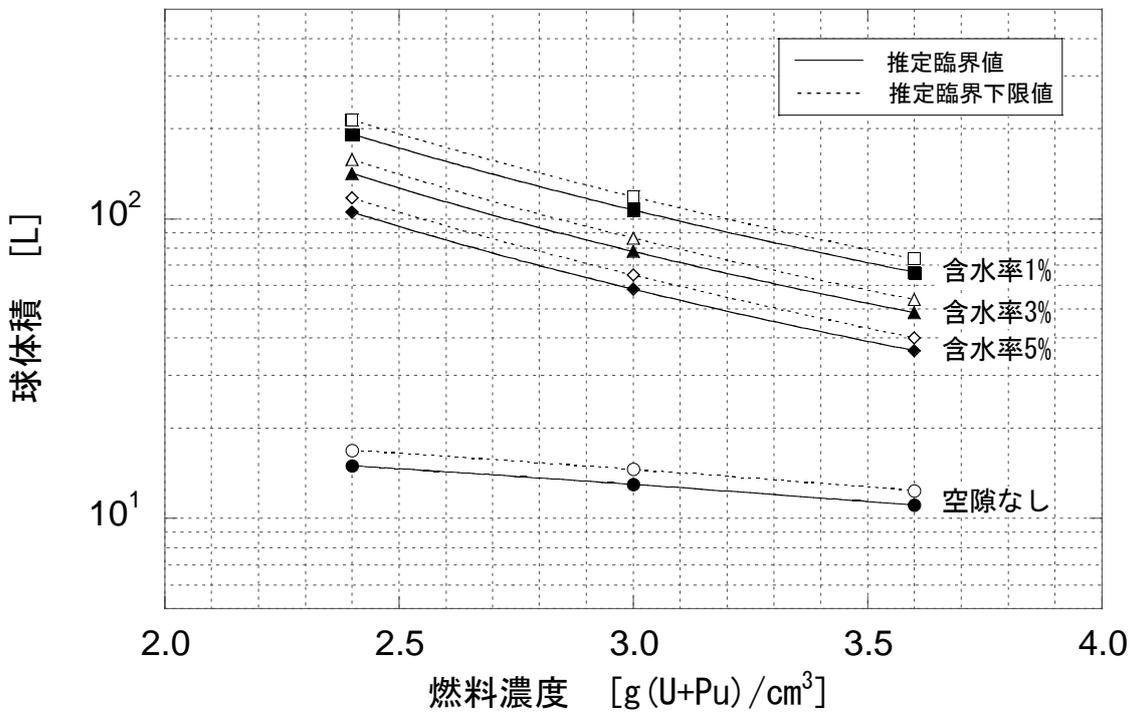


図 5.29(b) 均質 $\text{PuO}_2\text{-UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界球体積
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu =71:17:12、 PuO_2 富化度 55wt%、 ^{235}U 濃縮度 0.711wt%、水反射体付き)

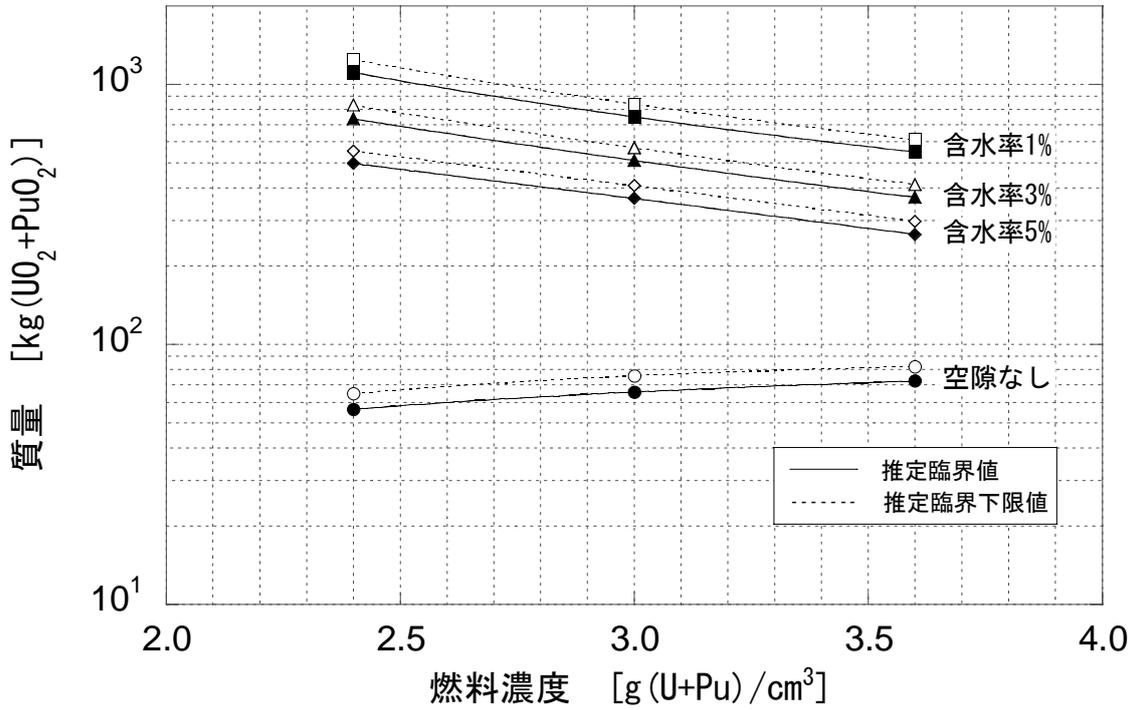


図 5.30(a) 均質 $\text{PuO}_2\text{-UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界質量
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu =71:17:12、 PuO_2 富化度 35wt%、 ^{235}U 濃縮度 0.711wt%、水反射体付き)

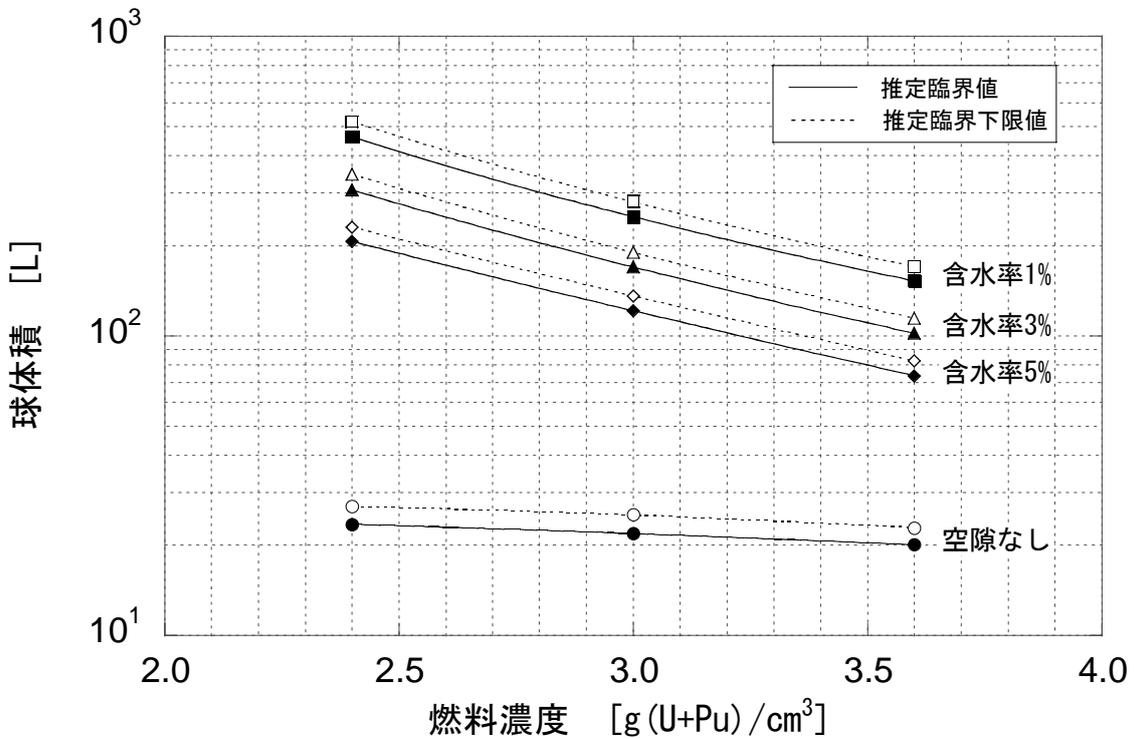


図 5.30(b) 均質 $\text{PuO}_2\text{-UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界球体積
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu =71:17:12、 PuO_2 富化度 35wt%、 ^{235}U 濃縮度 0.711wt%、水反射体付き)

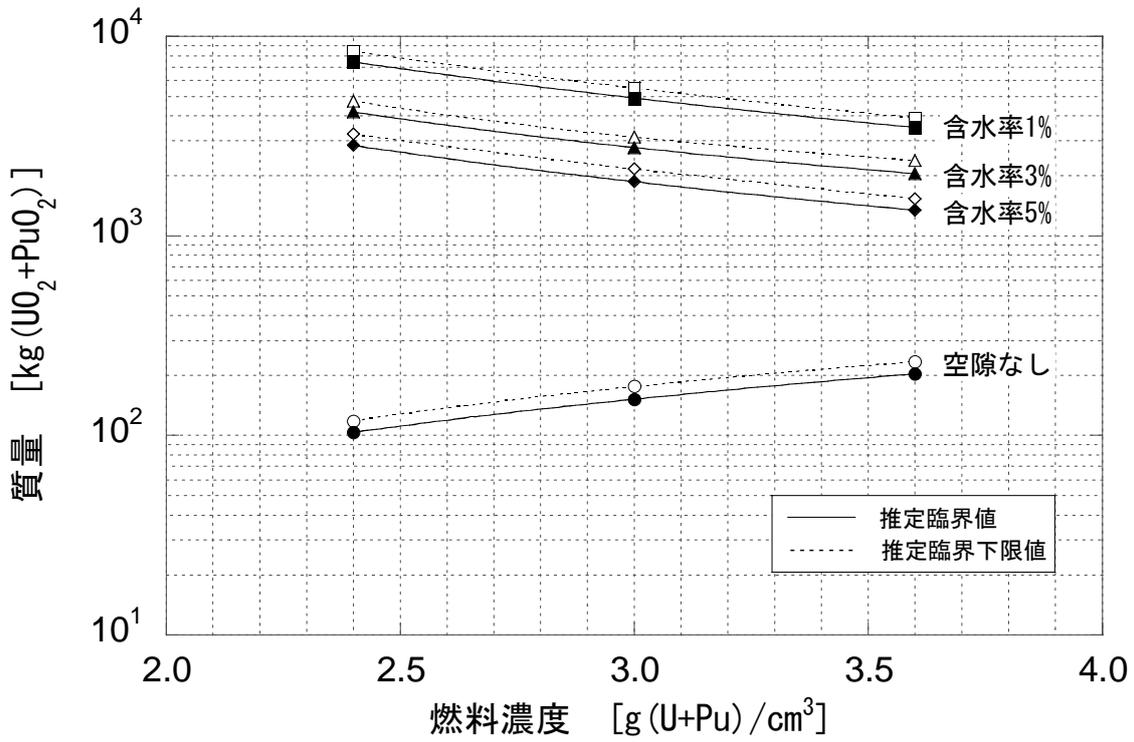


図 5.31(a) 均質 $\text{PuO}_2\text{-UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界質量
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu =71:17:12、 PuO_2 富化度 15wt%、 ^{235}U 濃縮度 0.711wt%、水反射体付き)

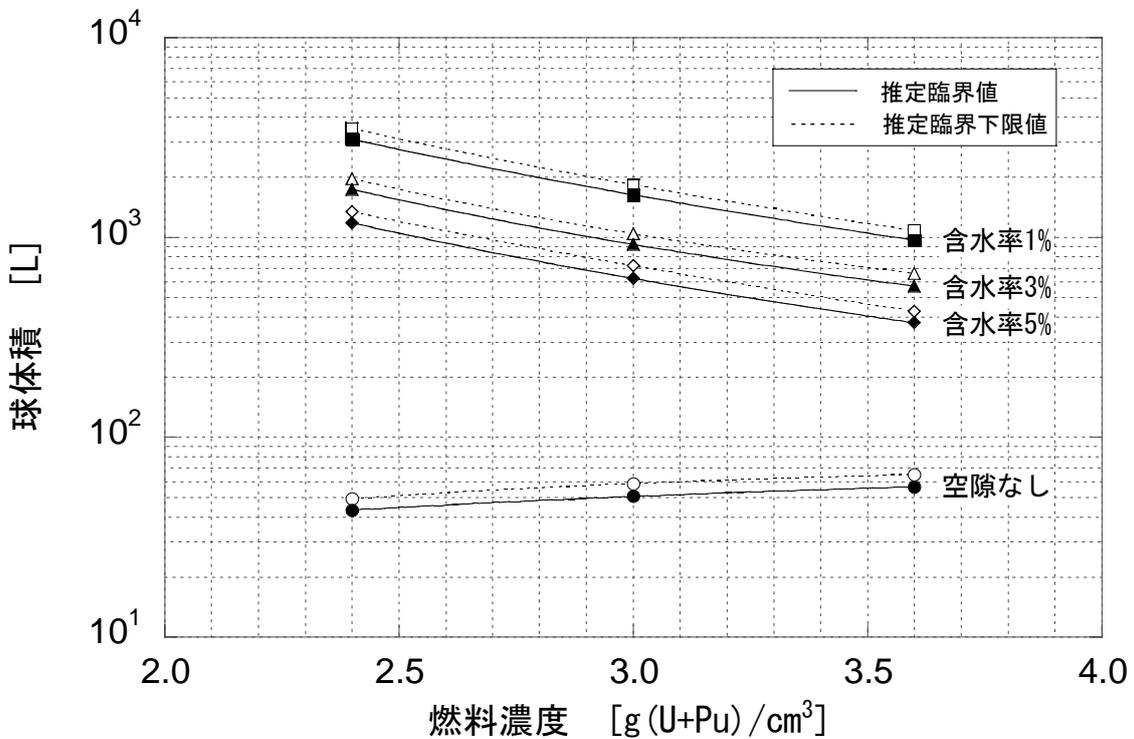


図 5.31(b) 均質 $\text{PuO}_2\text{-UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界球体積
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu =71:17:12、 PuO_2 富化度 15wt%、 ^{235}U 濃縮度 0.711wt%、水反射体付き)

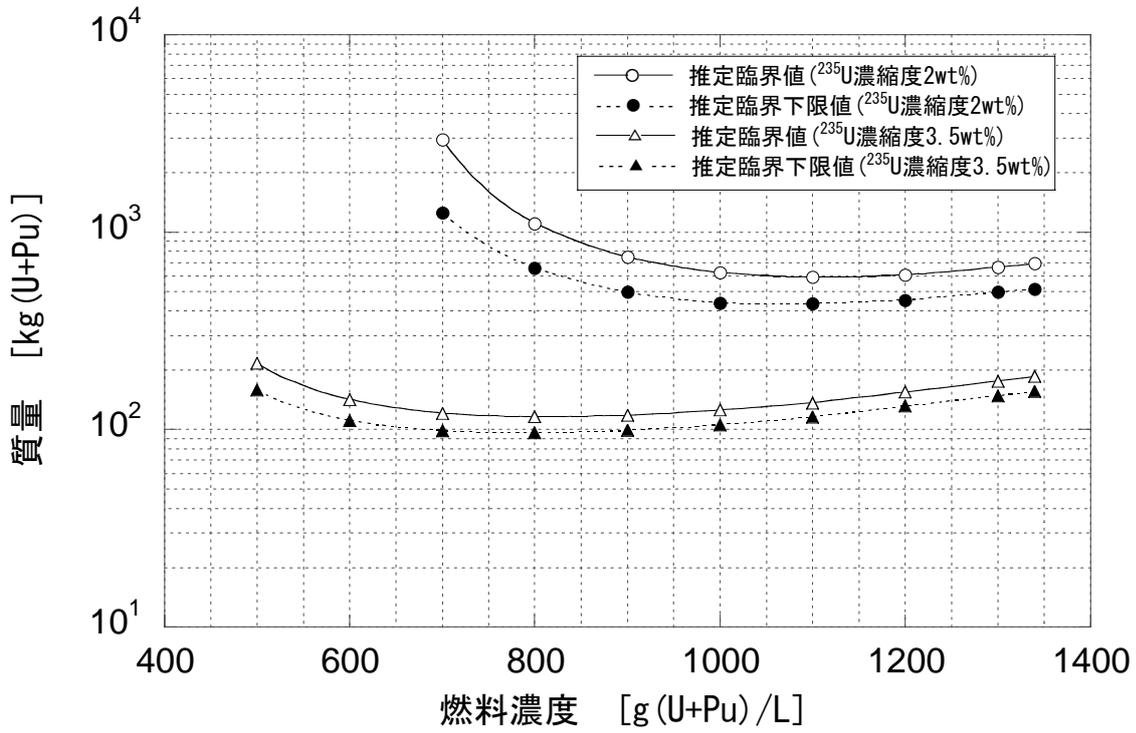


図 5.32(a) $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2\text{-Pu}(\text{NO}_3)_4$ 水溶液の臨界質量
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu =71:17:12、Pu 富化度 0.744wt%、水反射体付き)

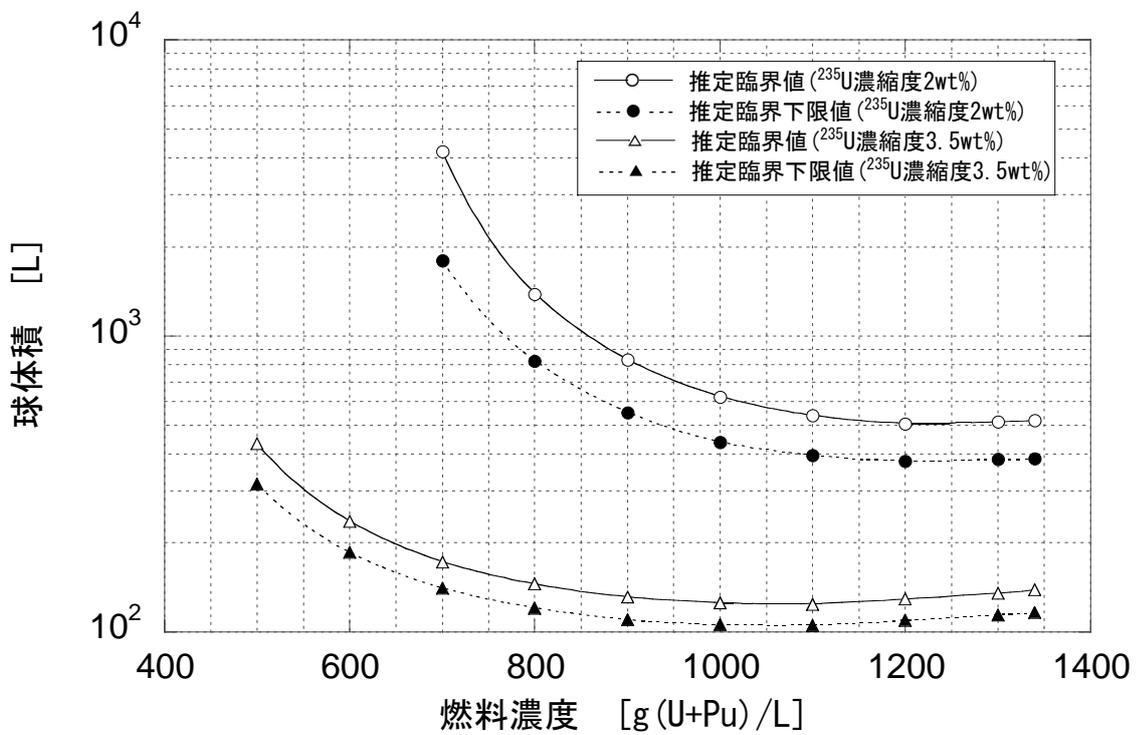


図 5.32(b) $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2\text{-Pu}(\text{NO}_3)_4$ 水溶液の臨界球体積
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu =71:17:12、Pu 富化度 0.744wt%、水反射体付き)

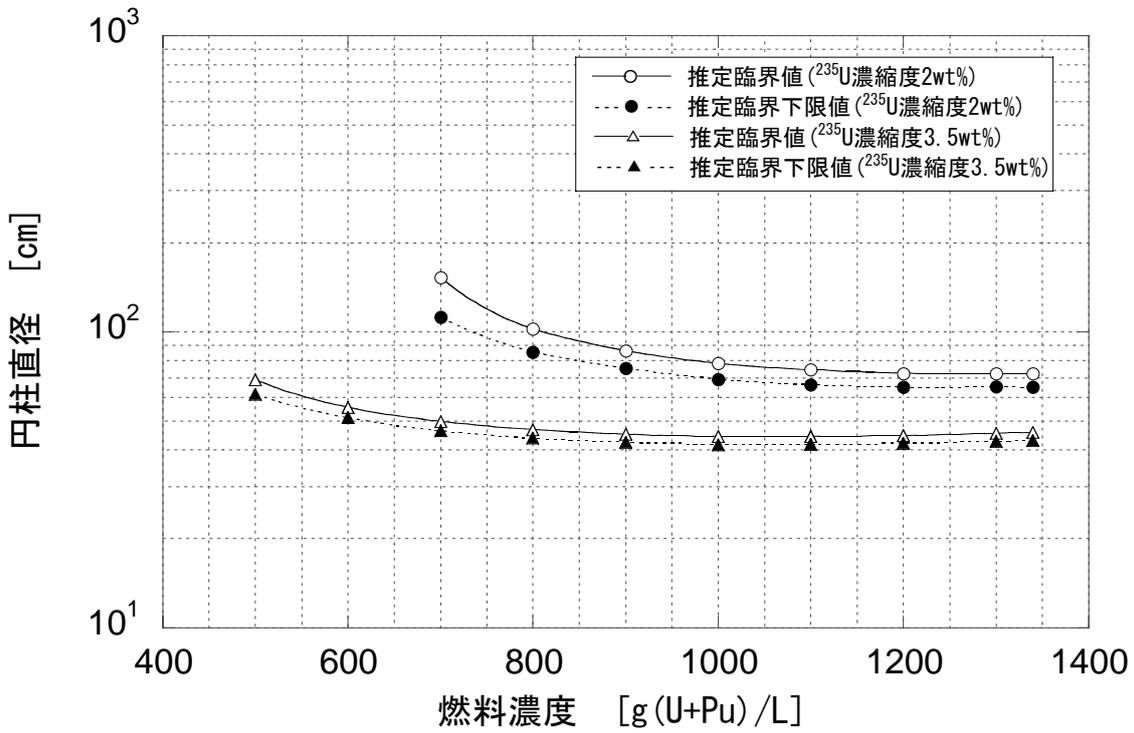


図 5.32(c) $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2\text{-Pu}(\text{NO}_3)_4$ 水溶液の臨界無限円柱直径
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu =71:17:12、Pu 富化度 0.744wt%、水反射体付き)

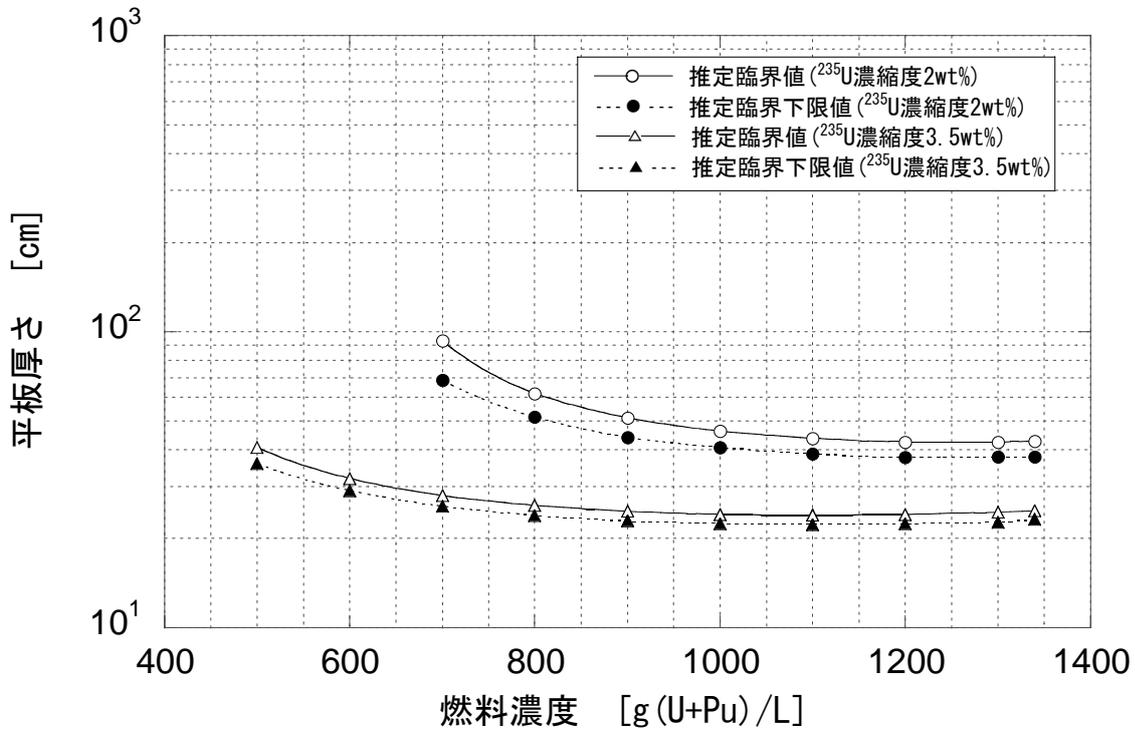


図 5.32(d) $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2\text{-Pu}(\text{NO}_3)_4$ 水溶液の臨界無限平板厚さ
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu =71:17:12、Pu 富化度 0.744wt%、水反射体付き)

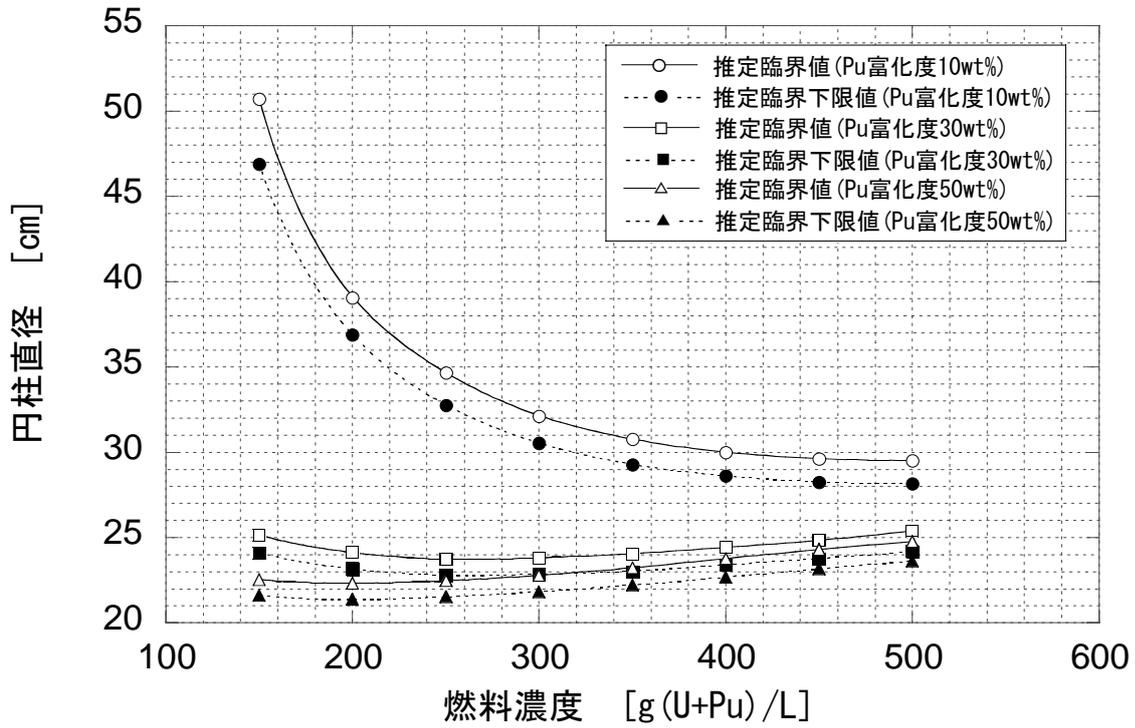


図 5.33(a) $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 - \text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ 水溶液の臨界無限円柱直径
 $(^{239}\text{Pu}: ^{240}\text{Pu}: ^{241}\text{Pu} = 71:17:12, ^{235}\text{U}$ 濃縮度 0.711wt%、水反射体付き)

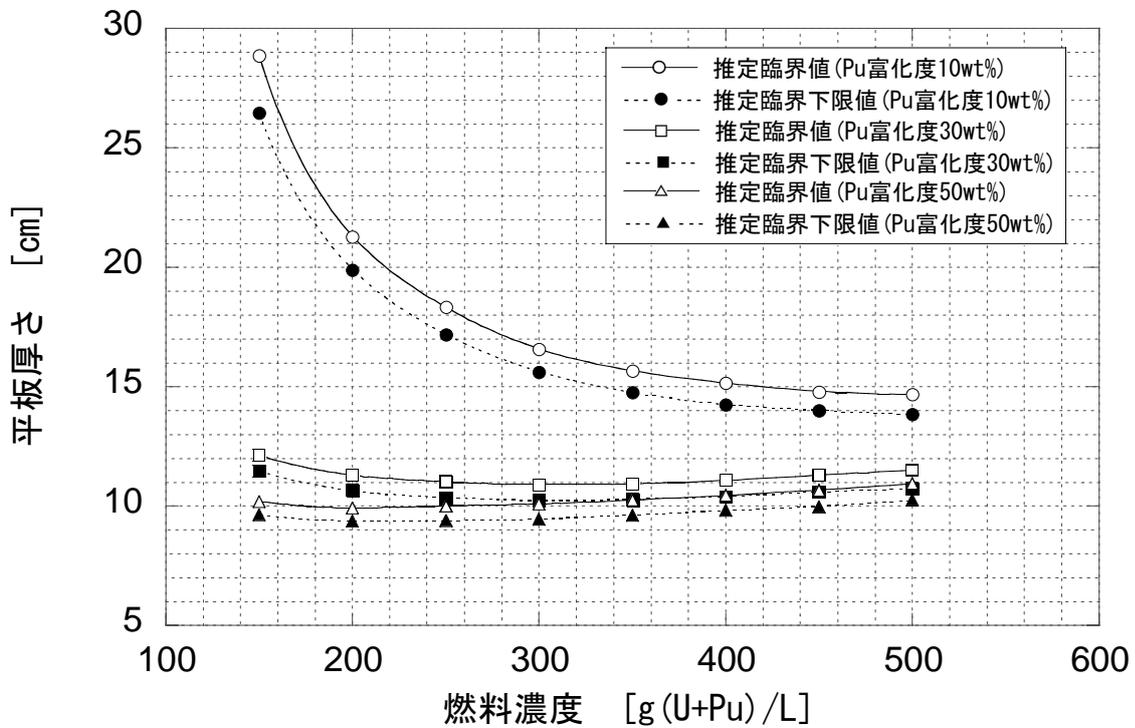


図 5.33(b) $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 - \text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ 水溶液の臨界無限平板厚さ
 $(^{239}\text{Pu}: ^{240}\text{Pu}: ^{241}\text{Pu} = 71:17:12, ^{235}\text{U}$ 濃縮度 0.711wt%、水反射体付き)

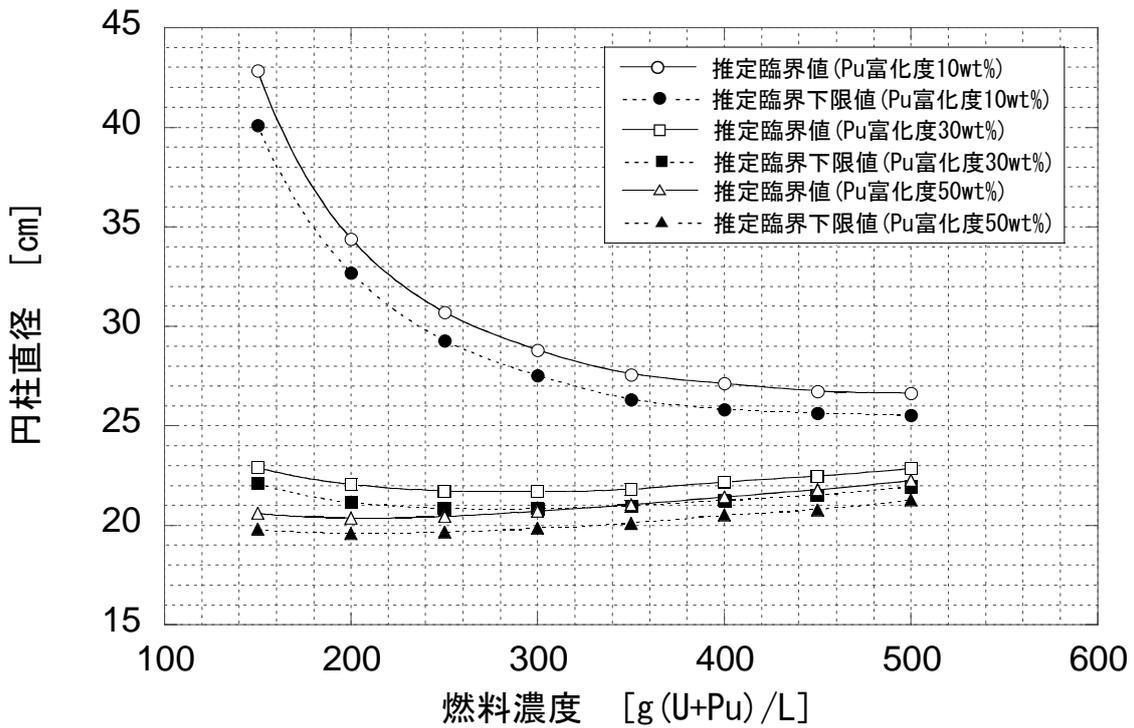


図 5.34(a) $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2\text{-Pu}(\text{NO}_3)_4$ 水溶液の臨界無限円柱直径
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu =80:10:10、 ^{235}U 濃縮度 0.711wt%、水反射体付き)

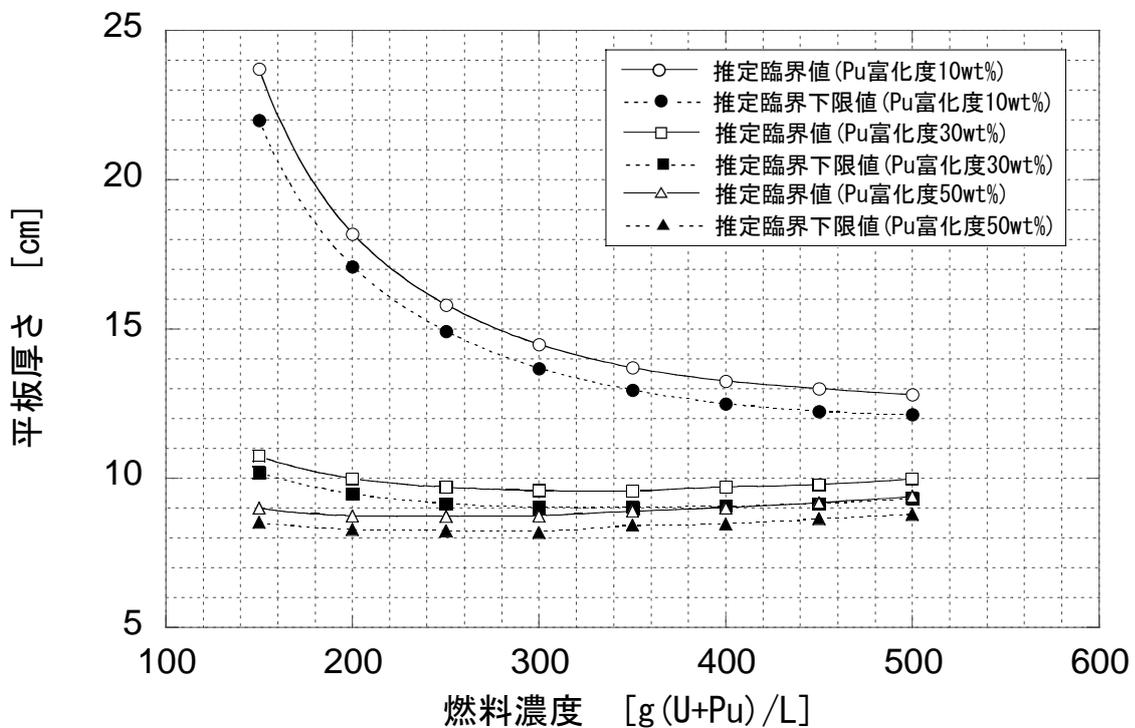


図 5.34(b) $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2\text{-Pu}(\text{NO}_3)_4$ 水溶液の臨界無限平板厚さ
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu =80:10:10、 ^{235}U 濃縮度 0.711wt%、水反射体付き)

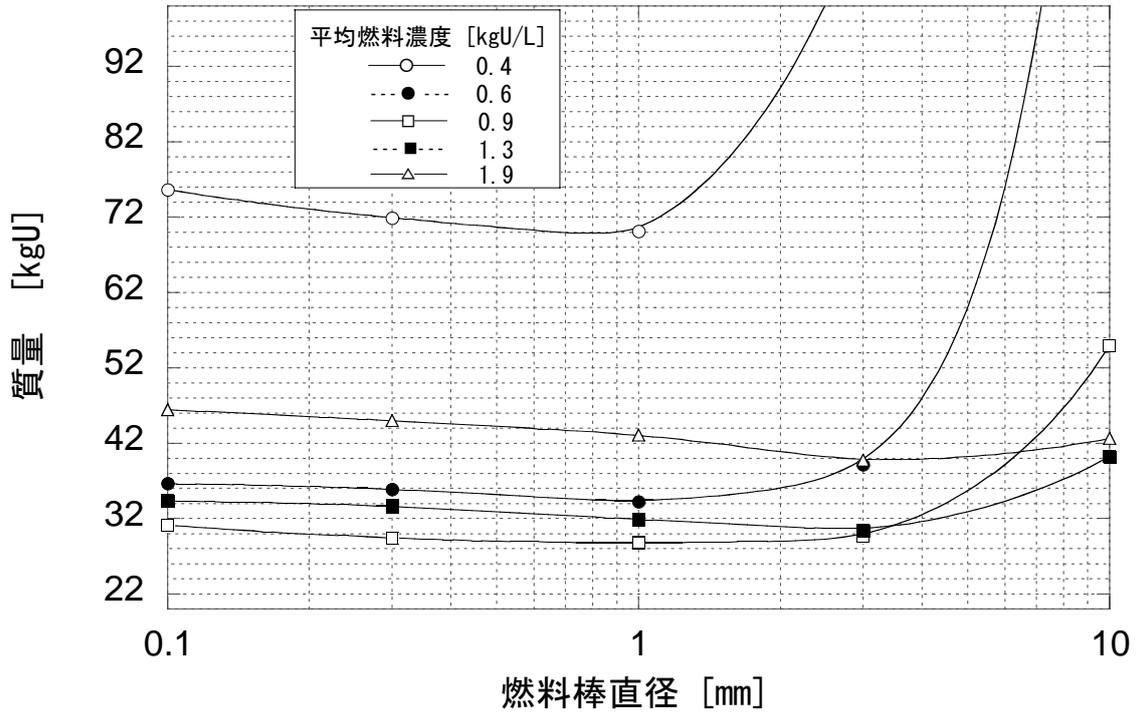


図 5.35 非均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の推定臨界下限値 (質量)
 (^{235}U 濃縮度 5wt%、水反射体付き)

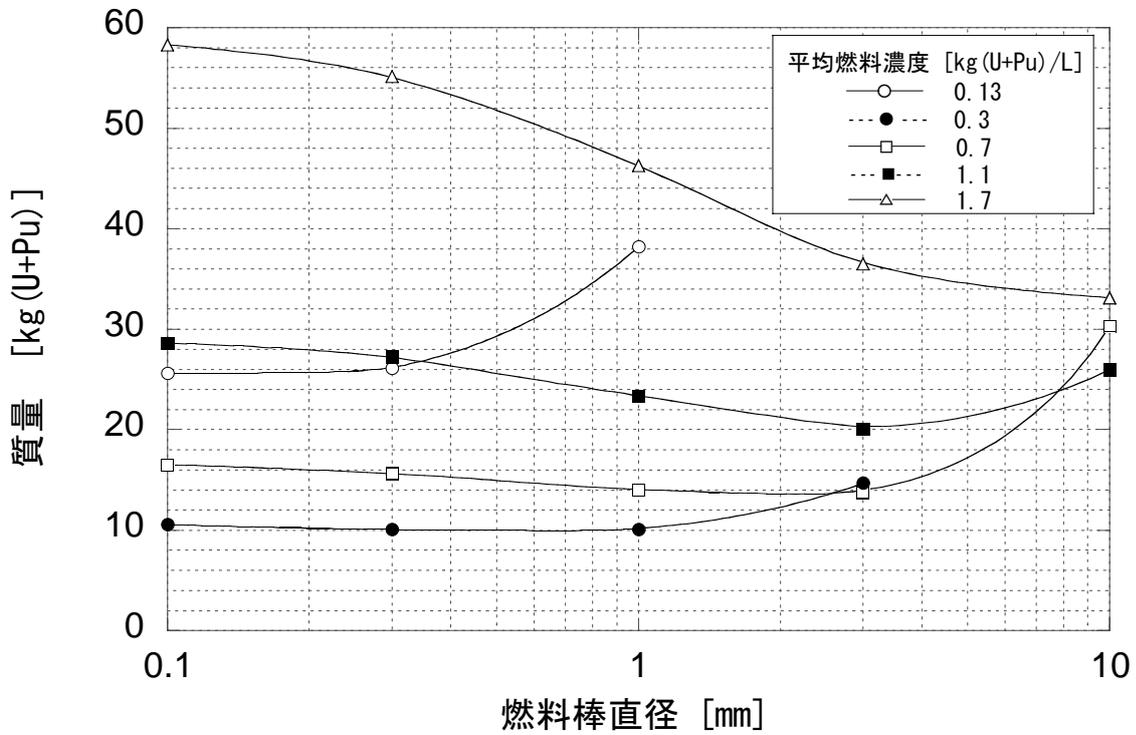


図 5.36 非均質 $\text{PuO}_2\text{-UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の推定臨界下限値 (質量)
 (^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu =71:17:12、 PuO_2 富化度 10wt%、 ^{235}U 濃縮度 0.711wt%、水反射体付き)

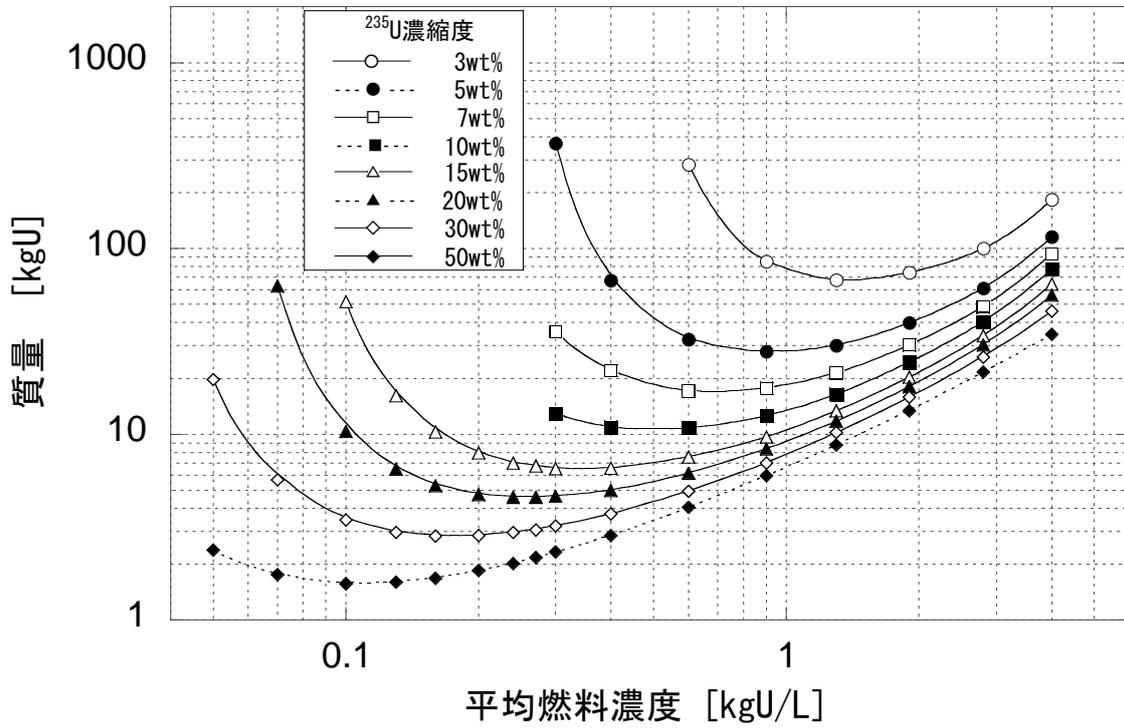


図 5.37 最適燃料寸法での非均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の推定臨界下限値 (質量)
(水反射体付き)

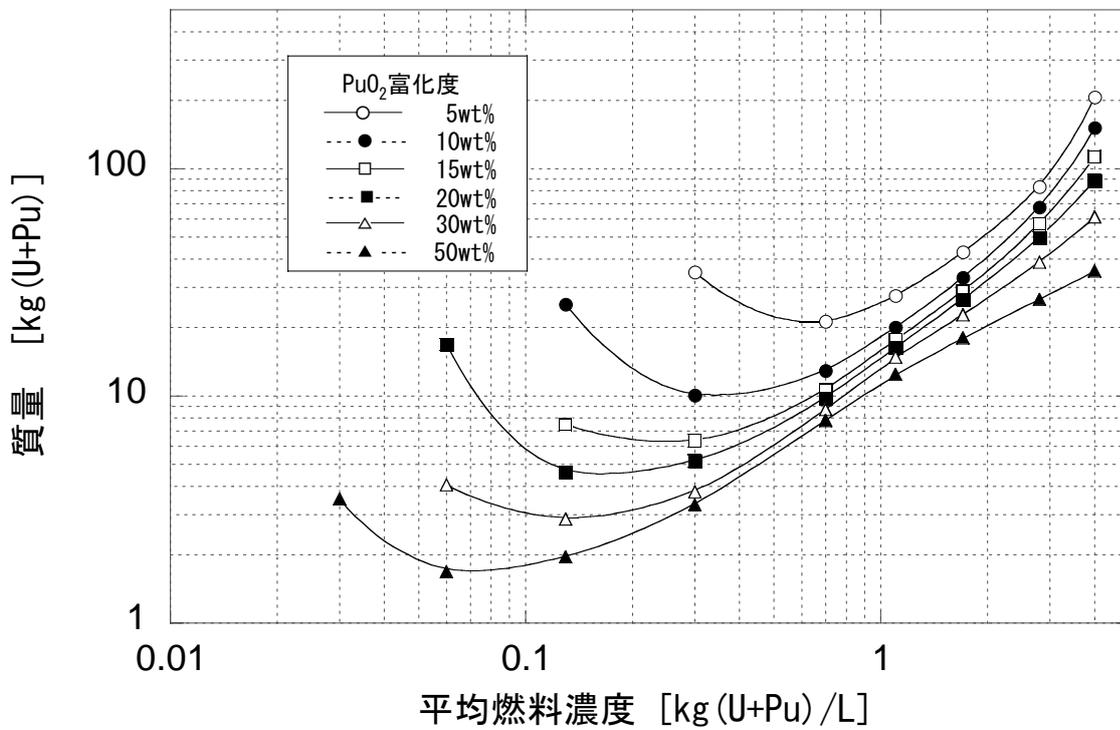


図 5.38 最適燃料寸法での非均質 $\text{PuO}_2\text{-UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の推定臨界下限値 (質量)
(^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu =71:17:12、 ^{235}U 濃縮度 0.711wt%、水反射体付き)

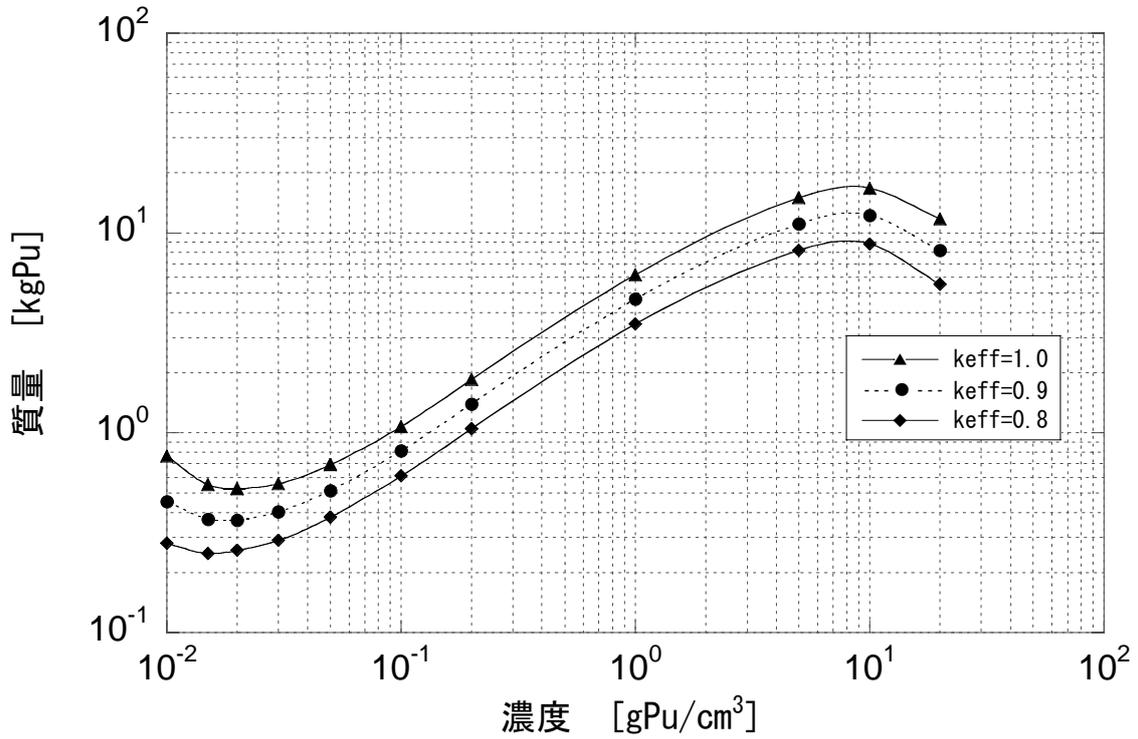


図 5.39(a) 均質 $^{241}\text{Pu}-\text{H}_2\text{O}$ の未臨界質量 (反射体なし)

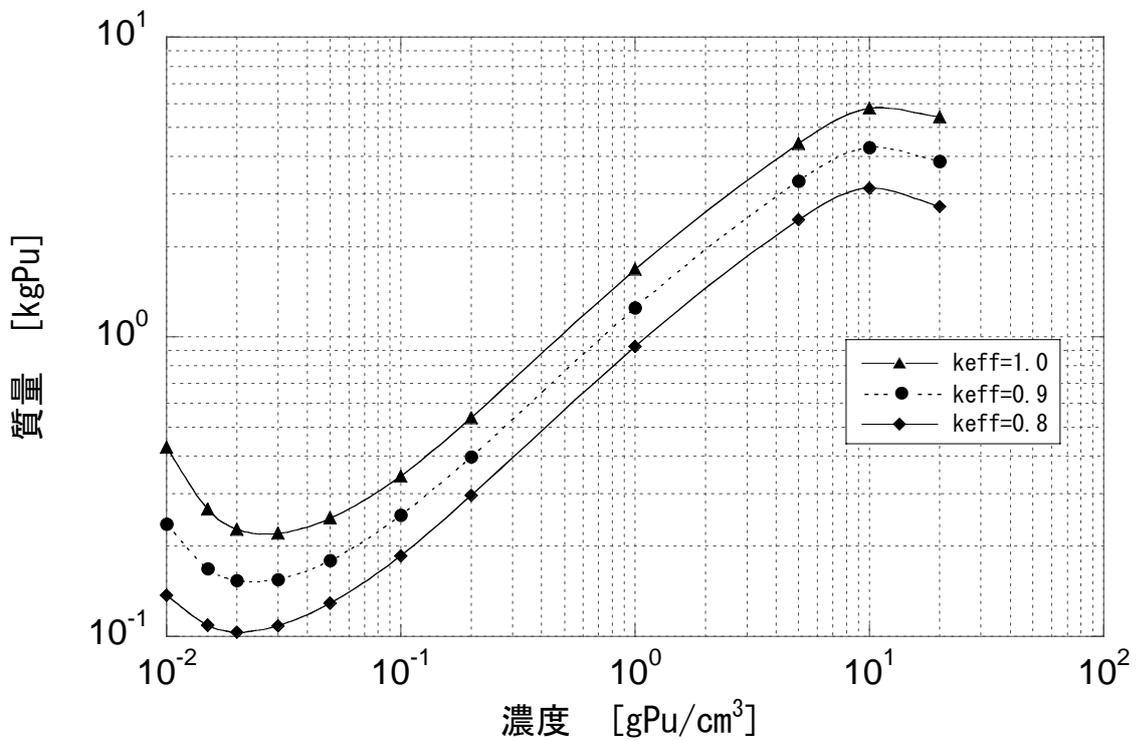


図 5.39(b) 均質 $^{241}\text{Pu}-\text{H}_2\text{O}$ の未臨界質量 (SUS 反射体付き)

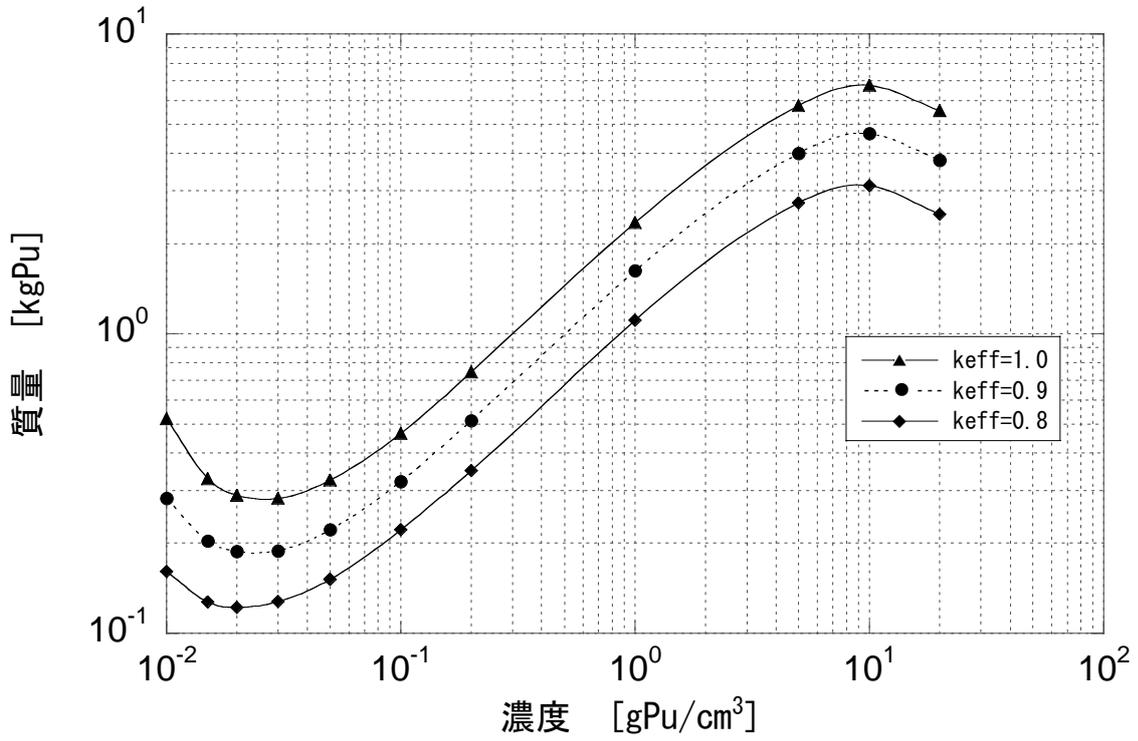


図 5.39(c) 均質 ²⁴¹Pu-H₂O の未臨界質量 (水反射体付き)

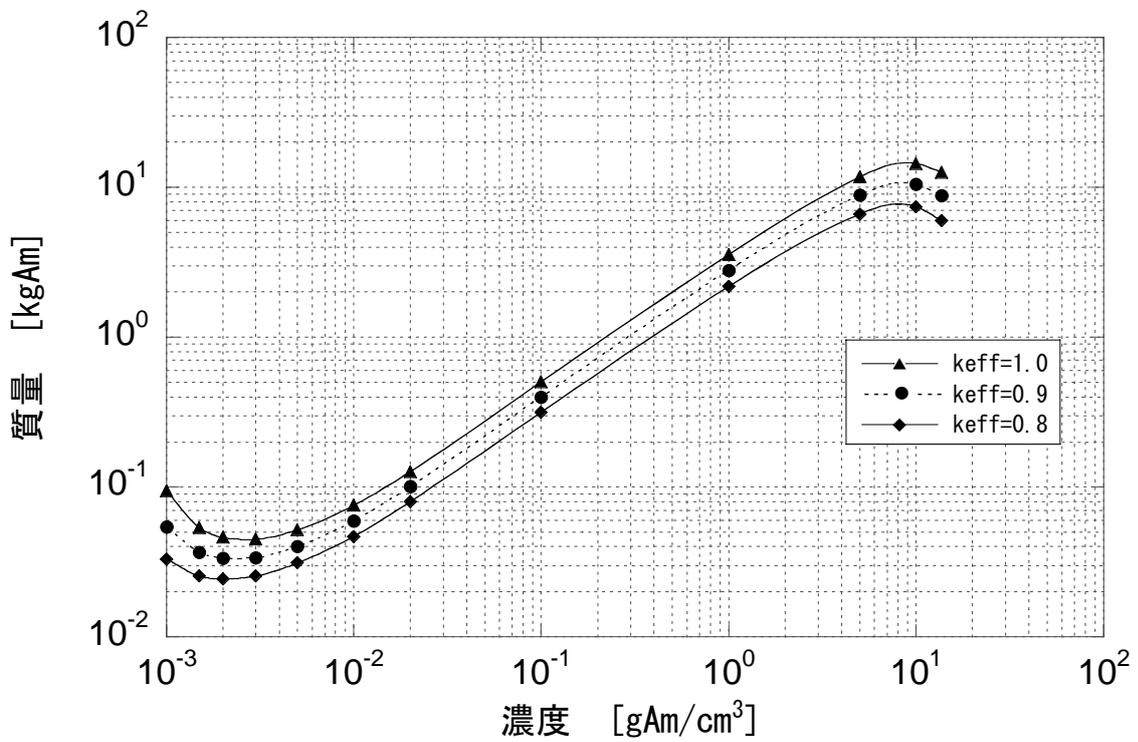


図 5.40(a) 均質 ^{242m}Am-H₂O の未臨界質量 (反射体なし)

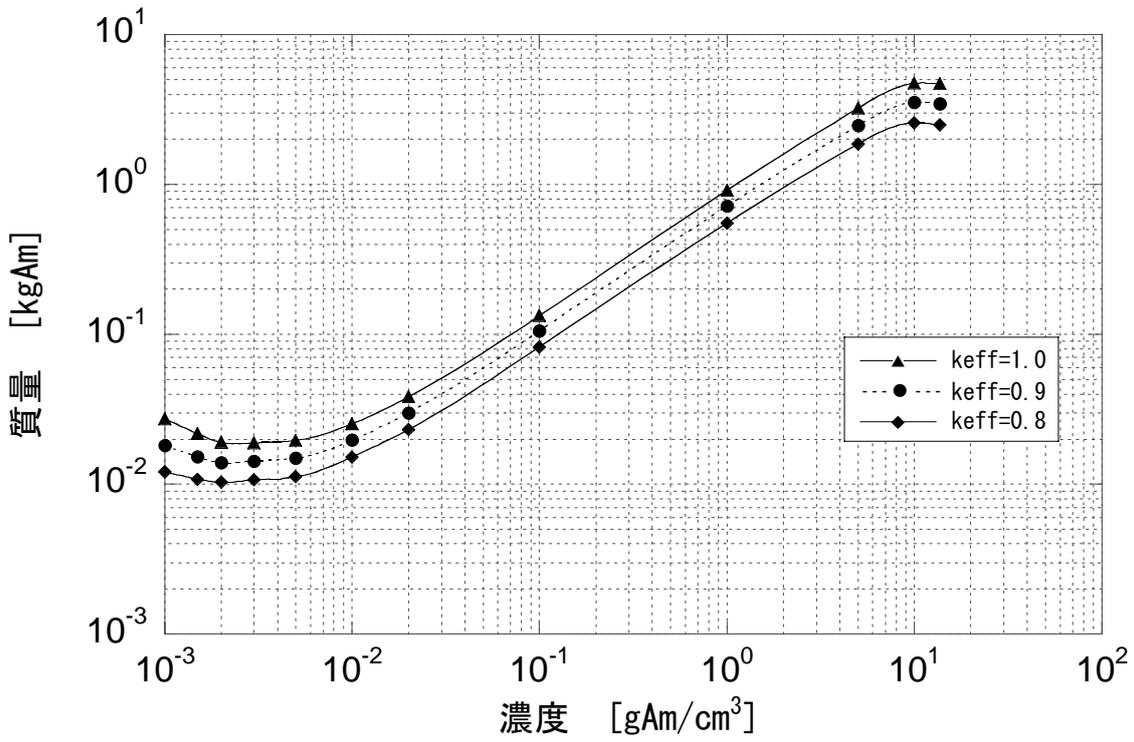


図 5.40(b) 均質 ^{242m}Am-H₂O の未臨界質量 (SUS 反射体付き)

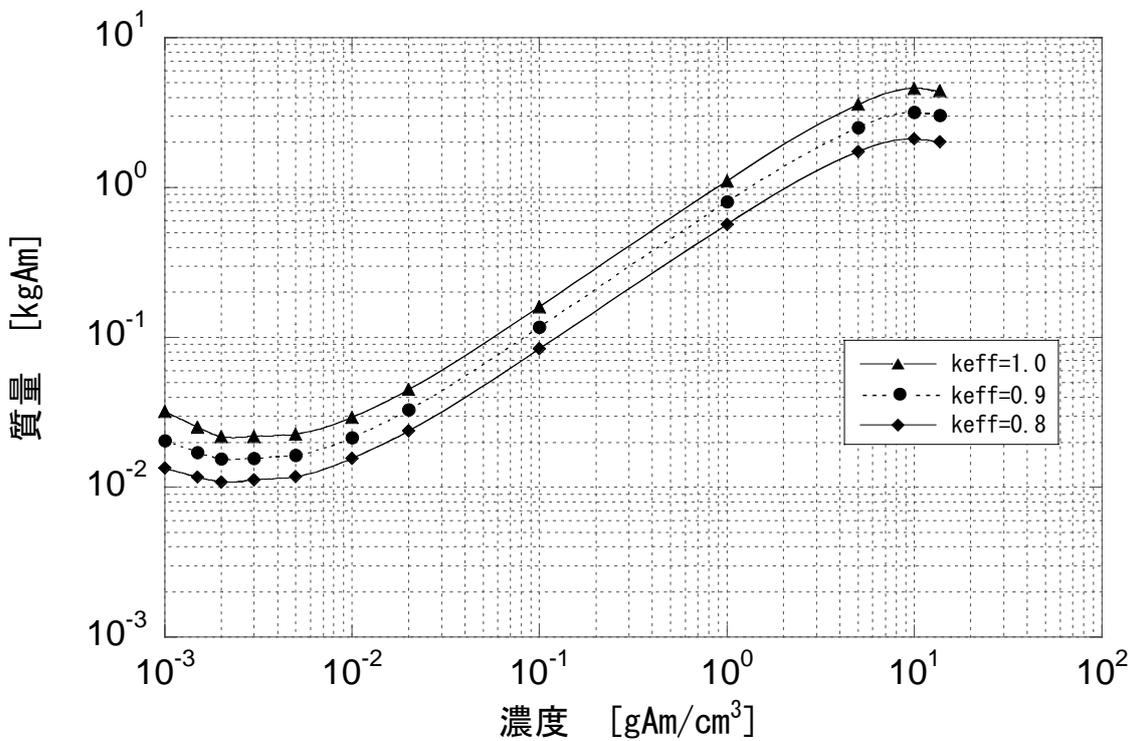


図 5.40(c) 均質 ^{242m}Am-H₂O の未臨界質量 (水反射体付き)

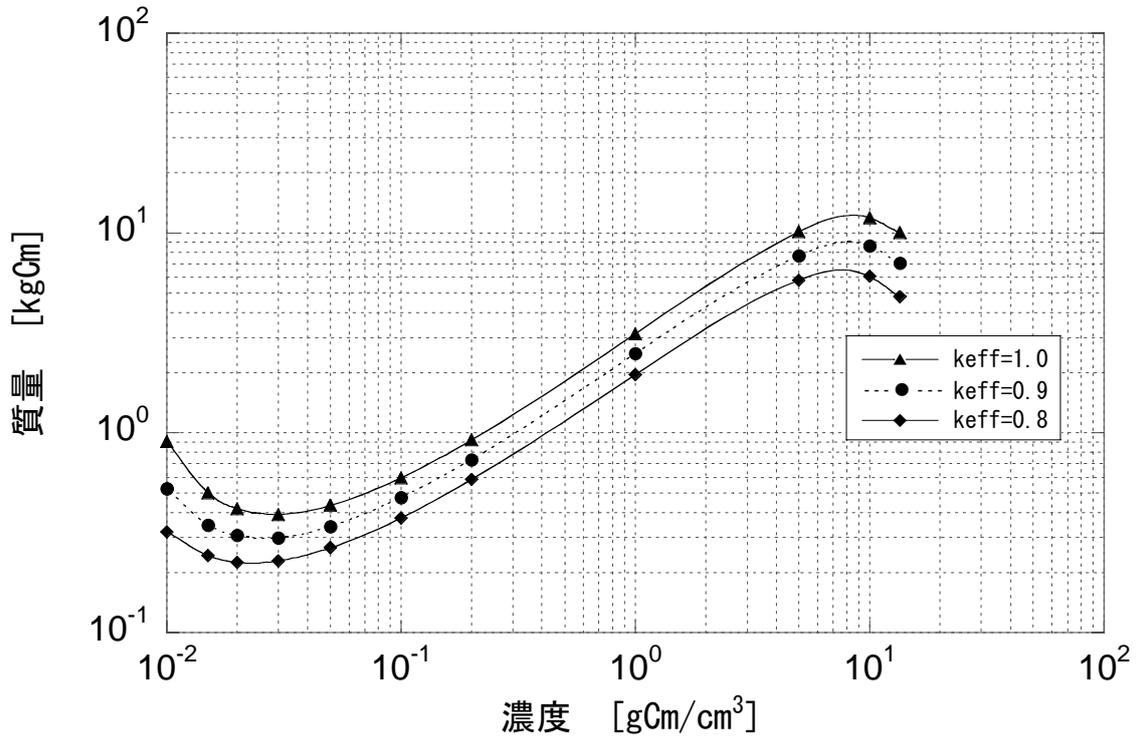


図 5.41(a) 均質 ²⁴³Cm-H₂O の未臨界質量 (反射体なし)

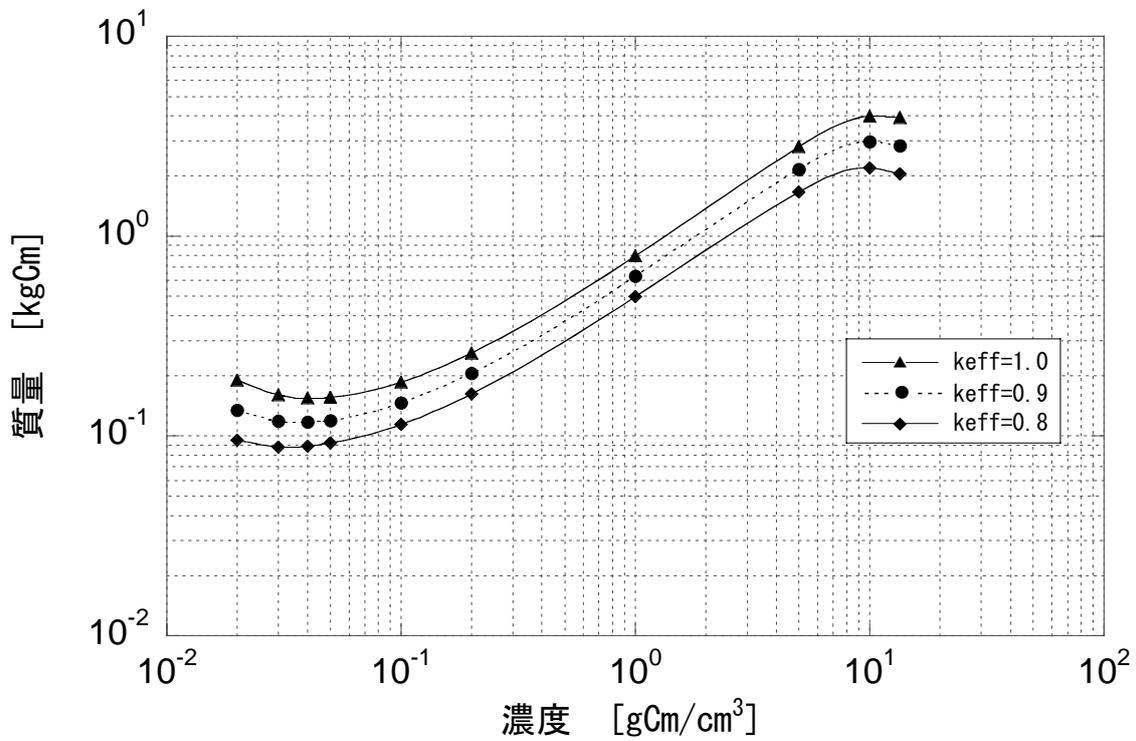


図 5.41(b) 均質 ²⁴³Cm-H₂O の未臨界質量 (SUS 反射体付き)

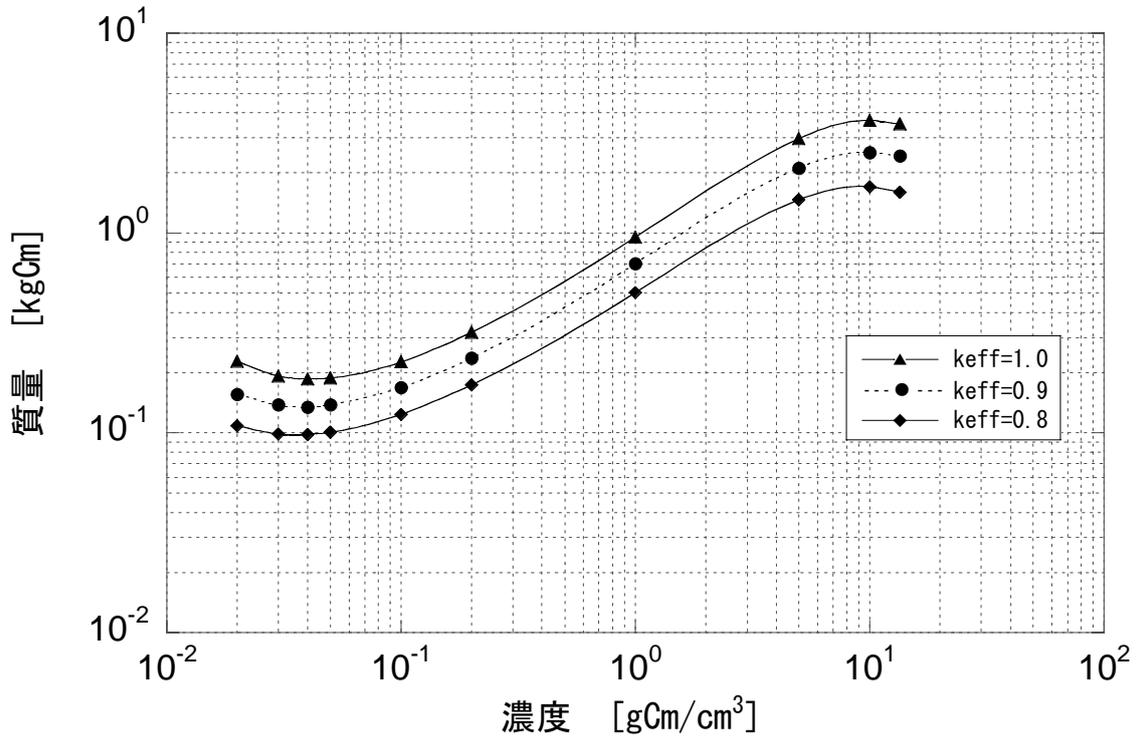


図 5.41(c) 均質 ²⁴³Cm-H₂O の未臨界質量 (水反射体付き)

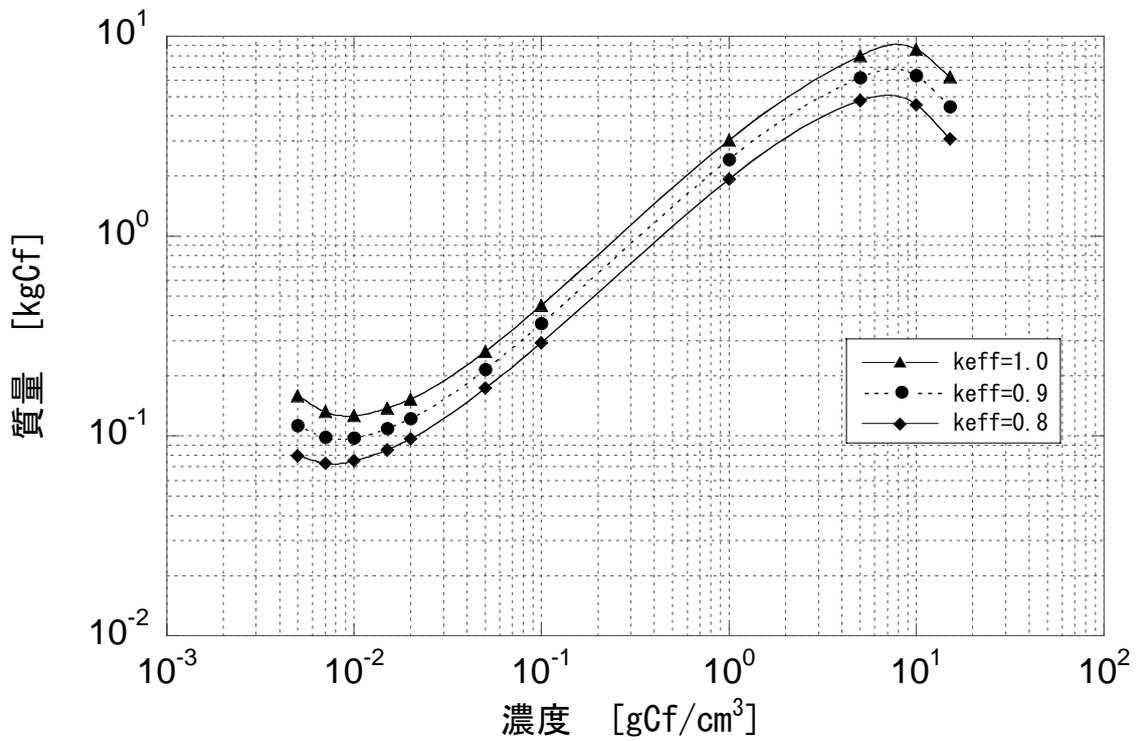


図 5.42(a) 均質 ²⁴⁹Cf-H₂O の未臨界質量 (反射体なし)

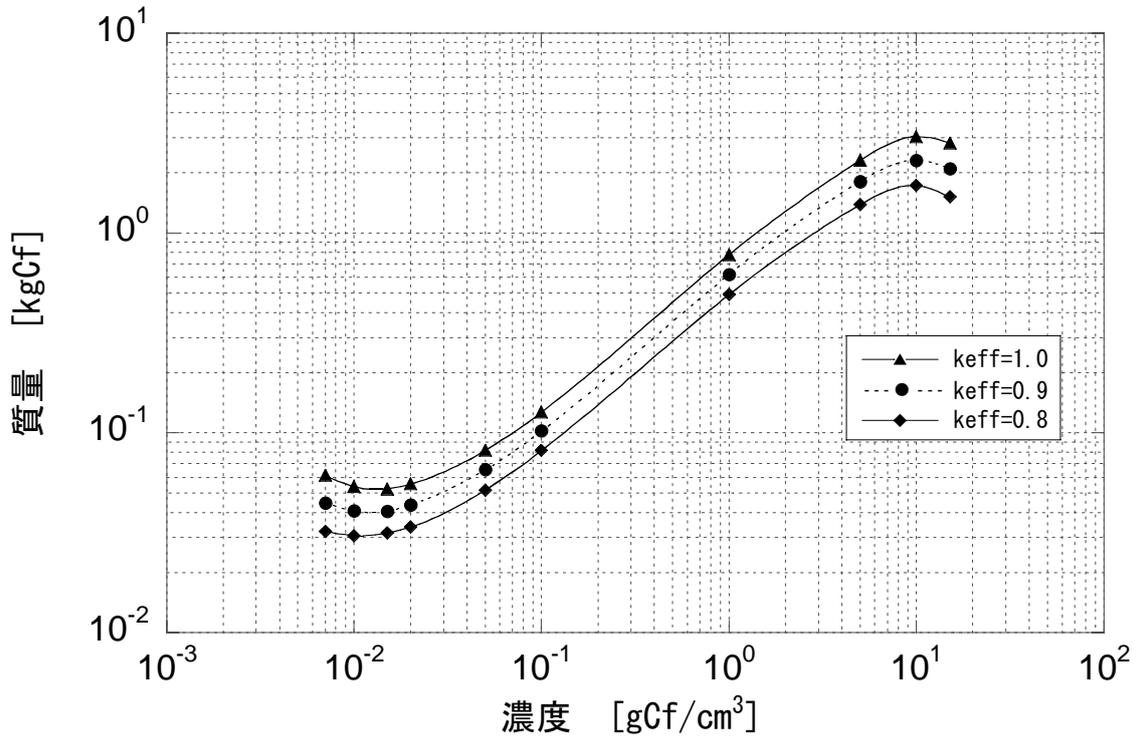


図 5.42(b) 均質 ²⁴⁹Cf-H₂O の未臨界質量 (SUS 反射体付き)

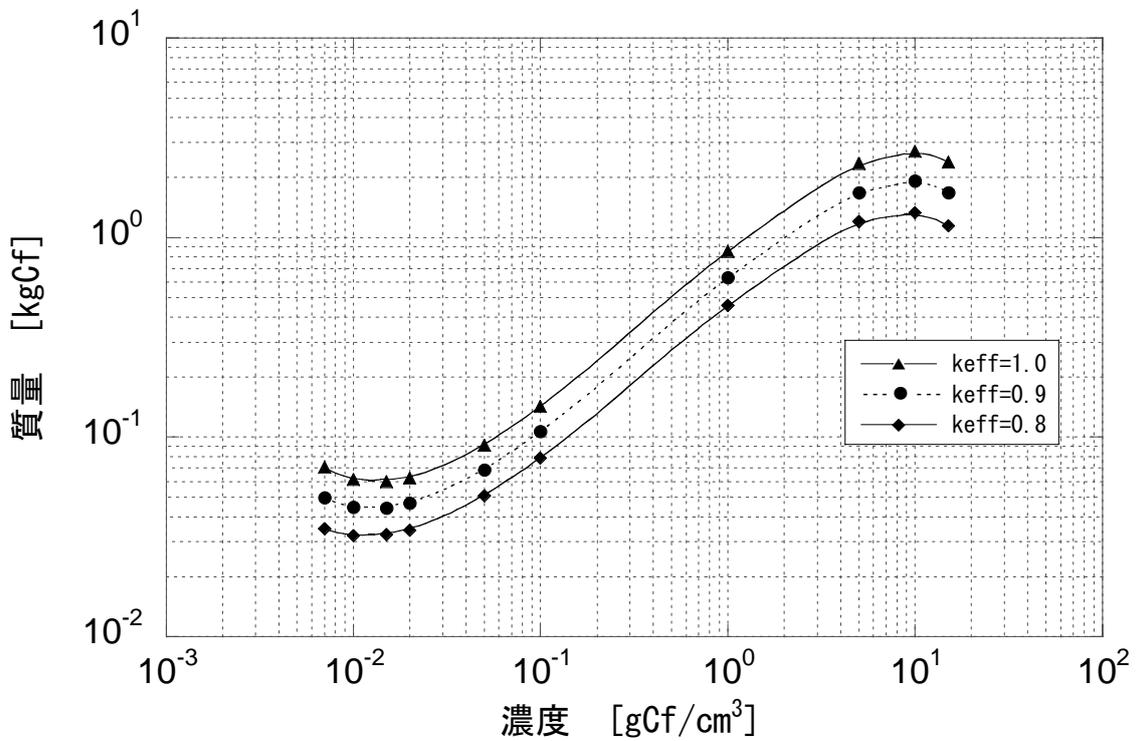


図 5.42(c) 均質 ²⁴⁹Cf-H₂O の未臨界質量 (水反射体付き)

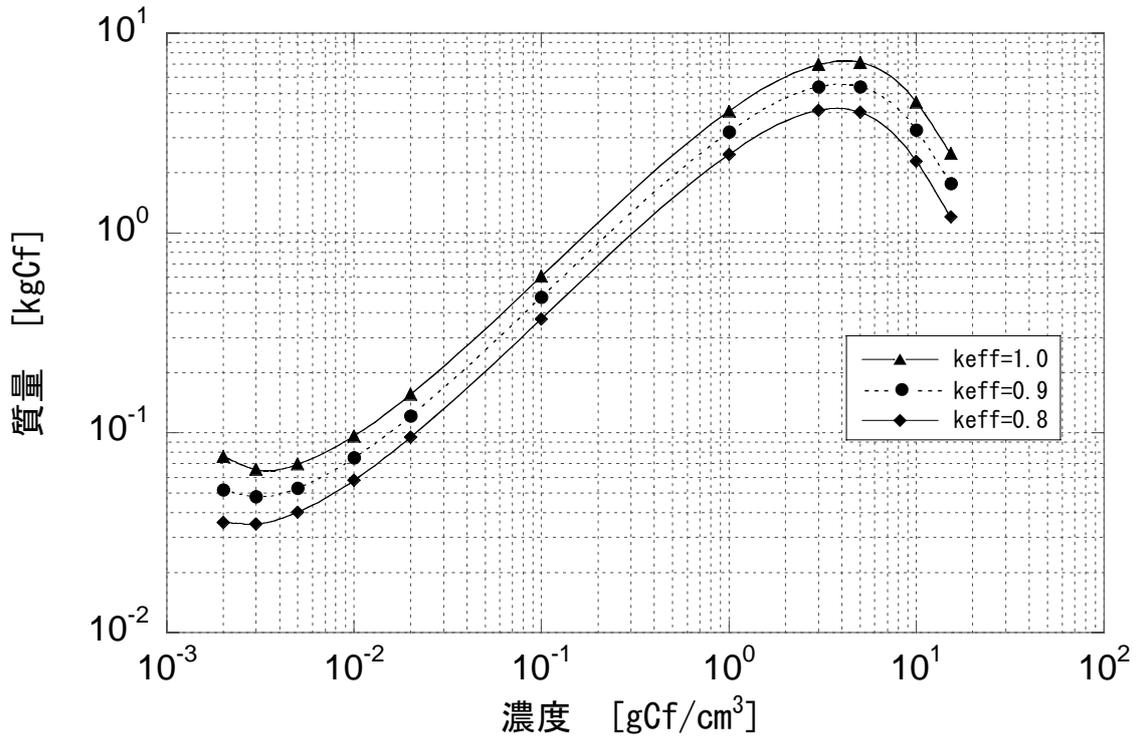


図 5.43(a) 均質 ²⁵¹Cf-H₂O の未臨界質量 (反射体なし)

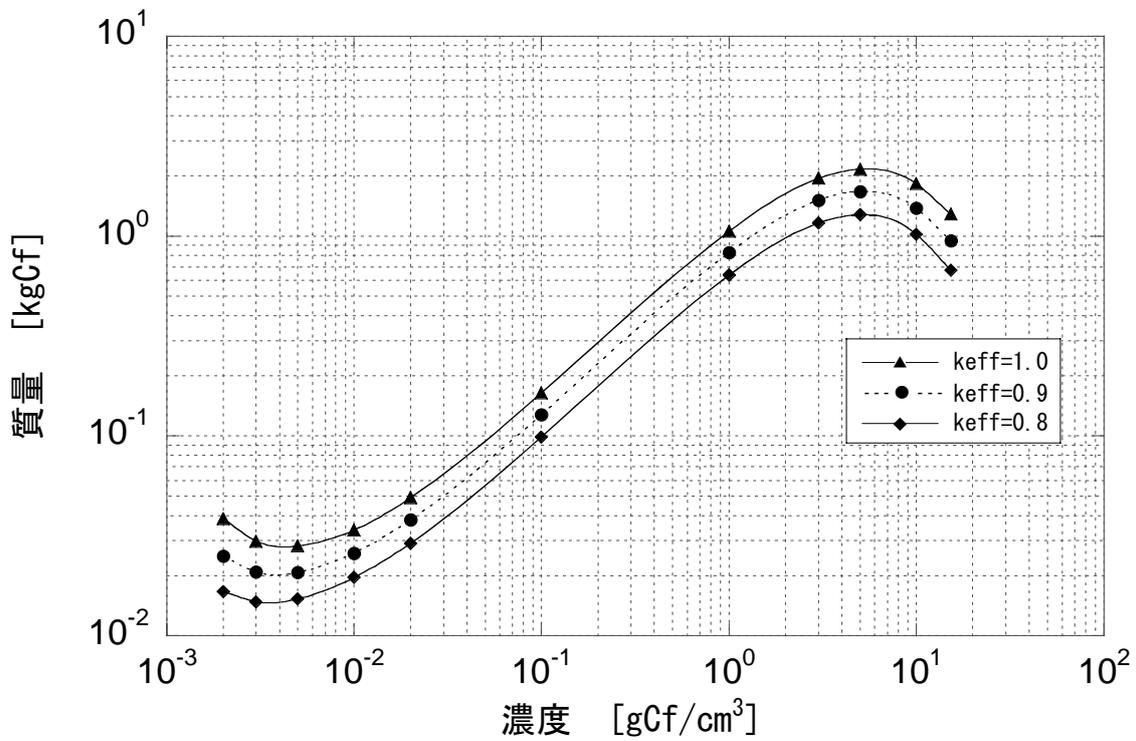


図 5.43(b) 均質 ²⁵¹Cf-H₂O の未臨界質量 (SUS 反射体付き)

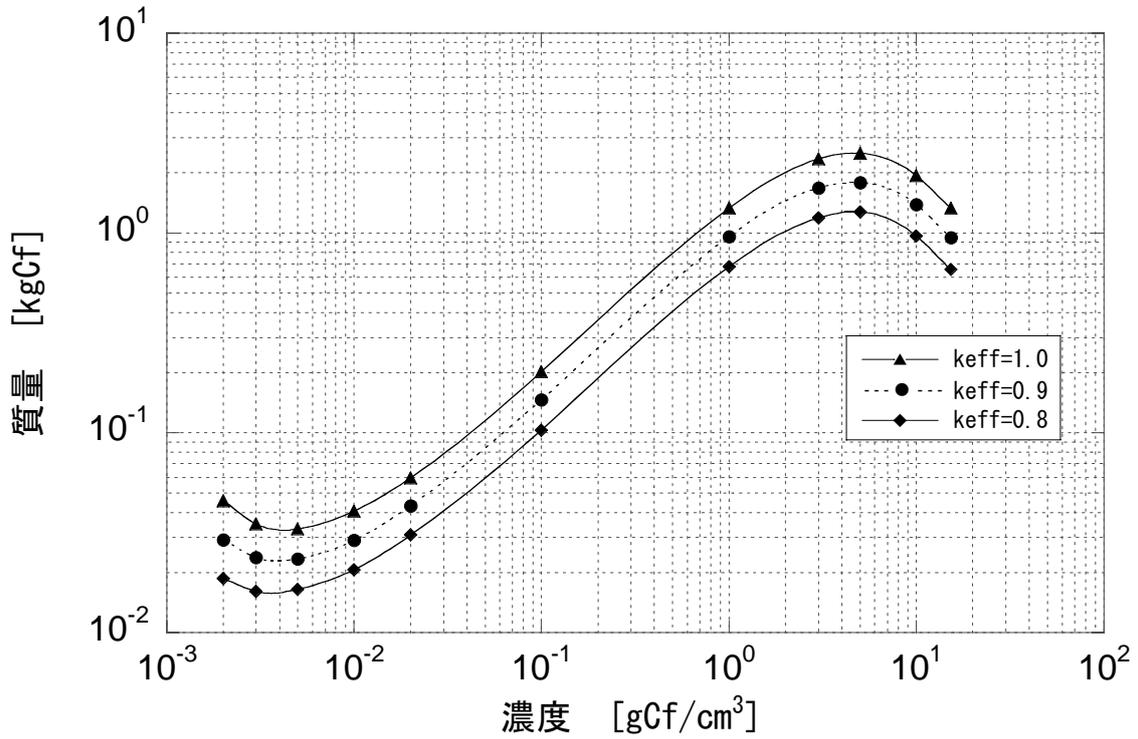


図 5.43(c) 均質 $^{251}\text{Cf}-\text{H}_2\text{O}$ の未臨界質量 (水反射体付き)

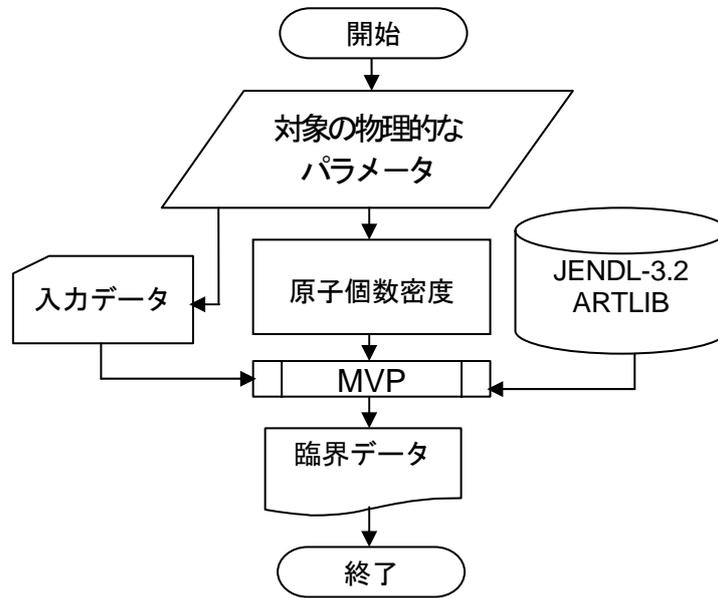


図 5.44 MVP と JENDL-3.2 の組合せによる臨界データ計算の模式図

6. 臨界実験ベンチマーク計算

「臨界安全ハンドブック・データ集」は、「臨界安全ハンドブック」(第1版)¹⁾の参考資料として添付されている。しかし、「臨界安全ハンドブック第2版」を1999年に原研の報告書(JAERI 1340)として刊行した際に、データ集部分は含まなかった。

「データ集」の改訂に当り、臨界データを算出する臨界計算手法に関しては、これまでの核データライブラリとして ENDF/B-IV を用いた多群モンテカルロ計算に基づくものから、核データライブラリ JENDL-3.2²⁾を用いた連続エネルギーモンテカルロ計算に基づくものに改めた。また、計算ヒストリ数を2桁近く増加することにより、計算精度も1桁近く向上した。

一方、臨界計算の検証に用いる臨界実験に関しても、OECD/NEAによる評価活動が進み、その結果得られた評価済み臨界実験データは、ICSBEPハンドブック³⁾にまとめられている。ICSBEPハンドブック記載のものを検証計算に用いることにより、計算の信頼度の向上を図ることができる。

ここでは5章の臨界データの算出に用いた連続エネルギーモンテカルロコード MVP⁴⁾によるベンチマーク計算結果を示す。これらのベンチマーク計算結果は、5章の臨界データの算出に用いた推定臨界増倍率及び推定臨界下限増倍率の導出の根拠となるものである。なお、推定臨界増倍率は類似の臨界実験体系のベンチマーク計算結果に基づき、臨界状態であると推定される確率が最も高い中性子増倍率の値であり、標本の平均値に等しい。推定臨界増倍率の算出にあたっては、ICSBEPハンドブックに与えられている各体系のベンチマークモデル実効増倍率(ベンチマークモデルと実験体系のバイアスを考慮したベンチマークモデル自身の持つ実効増倍率)とその不確かさ、モンテカルロ法による臨界計算の標準偏差を考慮している。また、推定臨界下限増倍率は、臨界超過確率2.5%、信頼度97.5%として、これ以下ならば臨界にならないと判断される中性子増倍率の値である。この値が0.98より高い場合には、安全側の判断に基づき、0.98を推定臨界下限増倍率として扱うこととする⁵⁾。

6.1 均質低濃縮ウラン系

ICSBEPハンドブックから均質低濃縮ウランの臨界実験体系を75件選択し、連続エネルギーモンテカルロ計算コード MVP と JENDL-3.2 の組合せでベンチマーク計算を実施した。計算結果を表6.1に示す。均質低濃縮ウランの実験データのほとんどは原研の STACY で行われた10%濃縮の硝酸ウラン水溶液のものである(LEU-SOL-THERM-004, 007-011)。またフランスで行われた UO₂粉末を用いた低減速体系の臨界実験(LEU-COMP-THERM-049)も含まれている。ロシアで行われた実験(LEU-SOL-THEM-005,-006)は B₄C 吸収棒を含むものである。計算は100万ヒストリーとし、実効増倍率の標準偏差は0.1%以下である。誤差評価の結果は5章の表5.10に示すとおり、標本数75で推定臨界増倍率1.0073に対して、推定臨界下限増倍率は0.98である。参考のため、ベンチマークモデルの k_{eff} が1から異なっていることを考慮した k_{eff} 計算値の頻度分布を図6.1に示す。

6.2 均質高濃縮ウラン系

ICSBEP ハンドブックから均質高濃縮ウランの臨界実験体系を 55 件選択し、連続エネルギーモンテカルロ計算コード MVP と JENDL-3.2 の組合せでベンチマーク計算を実施した。なお、HEU-SOL-THERM-010 には溶液を昇温させた実験も含まれるが、これらは計算対象からは除外した。また、HEU-SOL-THERM-028, 029, 030 には B_4C 吸収棒を用いた実験も含まれる。MVP と JENDL-3.2 による計算結果を表 6.2 に示す。計算は 100 万ヒストリーとし、実効増倍率の標準偏差は 0.1% 以下である。誤差評価の結果は 5 章の表 5.10 に示すとおり、標本数 55 で推定臨界増倍率 1.0052 に対して、推定臨界下限増倍率は 0.98 である。参考のため、ベンチマークモデルの k_{eff} が 1 から異なっていることを考慮した k_{eff} 計算値の頻度分布を図 6.2 に示す。

6.3 均質プルトニウム系

ICSBEP ハンドブックから均質プルトニウム燃料の臨界実験体系を選択し、連続エネルギーモンテカルロ計算コード MVP と JENDL-3.2 の組合せでベンチマーク計算を実施した。選択した実験体系は、プルトニウム金属の高速系、プルトニウム溶液の熱系の計 46 ケースである。PU-COMP-MIXED-002 は PuO_2 粉末とポリスチレンからなる均質体系であるが、実効増倍率の計算値が極端に高いために計算対象からは除外している。MVP と JENDL-3.2 による計算結果を表 6.3 に示す。誤差評価の結果は 5 章の表 5.10 に示すとおり、標本数 46 で推定臨界増倍率 1.0044 に対して、推定臨界下限増倍率は 0.98 である。参考のため、 k_{eff} 計算値の頻度分布を図 6.3 に示す。

6.4 均質ウラン・プルトニウム系

ICSBEP ハンドブックから均質ウラン・プルトニウム燃料の臨界実験体系を 29 件選択し、連続エネルギーモンテカルロ計算コード MVP と JENDL-3.2 の組合せでベンチマーク計算を実施した。計算はすべてウラン・プルトニウム混合溶液を用いた実験を対象としている。そのうち MIX-SOL-THERM-001 には中性子吸収材を用いた実験も含まれる。MOX 粉末とポリスチレンからなる均質体系の実験が従来、均質ウラン・プルトニウム系のベンチマークに用いられていたが、実効増倍率の計算値が極端に高いために計算対象からは除外している。MVP と JENDL-3.2 による計算結果を表 6.4 に示す。誤差評価の結果は 5 章の表 5.10 に示すとおり、標本数 29 で推定臨界増倍率 0.9999 に対して、推定臨界下限増倍率は 0.98 である。参考のため、 k_{eff} 計算値の頻度分布を図 6.4 に示す。

6.5 非均質ウラン系

ICSBEP ハンドブックから非均質ウランの臨界実験体系を 121 件選択し、連続エネルギーモンテカルロ計算コード MVP と JENDL-3.2 の組合せでベンチマーク計算を実施した。MVP と JENDL-3.2 による計算結果を表 6.5 に示す。LEU-COMP-THERM-032 には高温、高圧で行った実験も含まれるが、これらは除外し、室温で行った実験のみを対象としている。また、LEU-COMP-THERM-007, 016, 021 には中性子吸収材を用いた実験が含まれる。計算は 100 万ヒストリーとし、実効増倍率の標準偏差は 0.1% 以下である。誤差評価の結果は 5 章の表 5.10 に示すとおり、標本数 121 で推定臨界増倍率 1.0026 に対して、推定臨界下限増倍率は 0.98 である。参考のため、ベンチマークモデルの k_{eff} が 1 から異なっていることを考慮した k_{eff} 計算値の頻度分布を図 6.5 に示す。

6.6 非均質ウラン・プルトニウム系

ICSBEP ハンドブックから非均質ウラン・プルトニウム系の臨界実験体系を 47 件選択し、連続エネルギーモンテカルロ計算コード MVP と JENDL-3.2 の組合せでベンチマーク計算を実施した。MVP と JENDL-3.2 による計算結果を表 6.6 に示す。MIX-COMP-THERM-002, 003 には中性子吸収材を用いた実験も含まれる。計算は 100 万ヒストリーとし、実効増倍率の標準偏差は 0.1% 以下である。誤差評価の結果は 5 章の表 5.10 に示すとおり、標本数 47 で推定臨界増倍率 0.9991 に対して、推定臨界下限増倍率は 0.98 である。参考のため、ベンチマークモデルの k_{eff} が 1 から異なっていることを考慮した k_{eff} 計算値の頻度分布を図 6.6 に示す。

第6章の参考文献

- 1) 「臨界安全ハンドブック」 科学技術庁原子力安全局核燃料規制課 編、にっかん書房 (1988).
- 2) T. Nakagawa, K. Shibata, S. Chiba, T. Fukahori, Y. Nakajima, Y. Kikuchi, T. Kawano, Y. Kanda, T. Ohsawa, H. Matsunobu, M. Kawai, A. Zukeran, T. Watanabe, S. Igarasi, K. Kosako and T. Asami., “Japanese Evaluated Nuclear Data Library, version 3, revision 2: JENDL 3.2,” J. Nucl. Sci. Technol., **32**, p.1259 (1995).
- 3) “International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments,” NEA/NSC/DOC(95)03, September 2003 Edition (2003).
- 4) 森貴正、中川正幸、「MVP/GMVP:連続エネルギー法及び多群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード」、JAERI-Data/Code 94-007 (1994).
- 5) 奥野浩・内藤叔孝、「臨界安全解析コードシステム JACS の計算誤差評価」、JAERI-M87-057 (1987).

表 6.1(1) 均質低濃縮ウラン系臨界ベンチマーク解析結果

ICSBEP ID number	ケース番号	燃料化学式	H/U-235	濃縮度 (wt%)	反射体	ベンチマークモデル keff		計算結果		備考
						keff	1 σ	keff	1 σ	
LEU-SOL-THERM-001 SHEBA	-	UO ₂ F ₂	453.9	4.94		0.9991	0.0029	1.01766	0.00074	
LEU-SOL-THERM-002 SHEBA	1	UO ₂ F ₂	1098.3	4.89		1.0038	0.0040	1.00232	0.00059	
	2	UO ₂ F ₂	1001.3	4.89		1.0024	0.0037	0.99842	0.00060	
	3	UO ₂ F ₂	1001.3	4.89		1.0024	0.0044	1.00296	0.00066	
LEU-SOL-THERM-003 IPPE	1	UO ₂ (NO ₃) ₂	770.3	10.07		0.9997	0.0039	0.99775	0.00096	
	2	UO ₂ (NO ₃) ₂	877.6	10.07		0.9993	0.0042	1.00524	0.00073	
	3	UO ₂ (NO ₃) ₂	897.0	10.07		0.9995	0.0042	1.00622	0.00099	
	4	UO ₂ (NO ₃) ₂	913.2	10.07		0.9995	0.0042	1.00575	0.00071	
	5	UO ₂ (NO ₃) ₂	1173.4	10.07		0.9997	0.0048	1.00548	0.00073	
	6	UO ₂ (NO ₃) ₂	1213.1	10.07		0.9999	0.0049	1.00709	0.00074	
	7	UO ₂ (NO ₃) ₂	1239.8	10.07		0.9994	0.0049	1.01174	0.00100	
	8	UO ₂ (NO ₃) ₂	1411.6	10.07		0.9993	0.0052	1.01503	0.00086	
	9	UO ₂ (NO ₃) ₂	1437.5	10.07		0.9996	0.0052	1.01621	0.00090	
LEU-SOL-THERM-004 STACY 円柱体系 (60cm 径)	1	UO ₂ (NO ₃) ₂	719.0	9.97	水	0.9994	0.0008	1.00563	0.00071	
	29	UO ₂ (NO ₃) ₂	771.3	9.97	水	0.9999	0.0009	1.00835	0.00070	
	33	UO ₂ (NO ₃) ₂	842.2	9.97	水	0.9999	0.0009	1.00594	0.00069	
	34	UO ₂ (NO ₃) ₂	895.8	9.97	水	0.9999	0.0010	1.00782	0.00058	
	46	UO ₂ (NO ₃) ₂	941.7	9.97	水	0.9999	0.0010	1.00792	0.00065	
	51	UO ₂ (NO ₃) ₂	983.6	9.97	水	0.9994	0.0011	1.00647	0.00057	
	54	UO ₂ (NO ₃) ₂	1017.6	9.97	水	0.9996	0.0011	1.00593	0.00058	
LEU-SOL-THERM-005 IPPE	1	UO ₂ (NO ₃) ₂	972.2	5.64	水	1.0000	0.0042	1.01257	0.00097	B ₄ C 吸収棒
	2	UO ₂ (NO ₃) ₂	972.2	5.64	水	1.0000	0.0051	1.00801	0.00093	B ₄ C 吸収棒
	3	UO ₂ (NO ₃) ₂	972.2	5.64	水	1.0000	0.0064	1.00960	0.00086	B ₄ C 吸収棒
LEU-SOL-THERM-006 IPPE	1	UO ₂ (NO ₃) ₂	531.5	10.07	水	1.0000	0.0037	1.00672	0.00082	B ₄ C 吸収棒
	2	UO ₂ (NO ₃) ₂	531.5	10.07	水	1.0000	0.0038	1.00054	0.00095	B ₄ C 吸収棒
	3	UO ₂ (NO ₃) ₂	531.5	10.07	水	1.0000	0.0041	1.00284	0.00090	B ₄ C 吸収棒
	4	UO ₂ (NO ₃) ₂	531.5	10.07	水	1.0000	0.0041	1.00435	0.00086	B ₄ C 吸収棒
	5	UO ₂ (NO ₃) ₂	531.5	10.07	水	1.0000	0.0047	1.00523	0.00093	B ₄ C 吸収棒
LEU-SOL-THERM-007 STACY 円柱体系 (60cm 径)	14	UO ₂ (NO ₃) ₂	709.2	9.97		0.9961	0.0009	0.99699	0.00059	
	30	UO ₂ (NO ₃) ₂	770.0	9.97		0.9973	0.0009	1.00634	0.00061	
	32	UO ₂ (NO ₃) ₂	842.2	9.97		0.9985	0.0010	1.00161	0.00056	
	36	UO ₂ (NO ₃) ₂	896.0	9.97		0.9988	0.0011	1.00477	0.00058	
	49	UO ₂ (NO ₃) ₂	942.2	9.97		0.9983	0.0011	1.00426	0.00055	
LEU-SOL-THERM-008 STACY 円柱体系 (60cm 径)	74(C50)	UO ₂ (NO ₃) ₂	954.8	9.97	コンクリート	1.0002	0.0015	1.00781	0.00052	
	76(C100)	UO ₂ (NO ₃) ₂	954.8	9.97	コンクリート	0.9999	0.0014	1.00842	0.00060	
	78(C200)	UO ₂ (NO ₃) ₂	950.7	9.97	コンクリート	0.9999	0.0014	1.00852	0.00052	
	72(C300)	UO ₂ (NO ₃) ₂	956.4	9.97	コンクリート	0.9999	0.0014	1.00837	0.00059	
LEU-SOL-THERM-009 STACY 円柱体系 (60cm 径)	92(B010)	UO ₂ (NO ₃) ₂	935.8	9.97	ボロンコンクリート	0.9998	0.0014	1.00576	0.00057	
	93(B050)	UO ₂ (NO ₃) ₂	934.1	9.97	ボロンコンクリート	0.9999	0.0014	1.00736	0.00062	
	94(B155)	UO ₂ (NO ₃) ₂	933.5	9.97	ボロンコンクリート	0.9999	0.0014	1.00663	0.00055	
LEU-SOL-THERM-010 STACY 円柱体系 (60cm 径)	83(P30)	UO ₂ (NO ₃) ₂	946.2	9.97	ポリエチレン	0.9999	0.0015	1.00651	0.00059	
	85(P60)	UO ₂ (NO ₃) ₂	944.8	9.97	ポリエチレン	0.9999	0.0014	1.00851	0.00055	
	86(P100)	UO ₂ (NO ₃) ₂	943.6	9.97	ポリエチレン	1.0000	0.0014	1.00735	0.00056	
	88(P200)	UO ₂ (NO ₃) ₂	941.7	9.97	ポリエチレン	1.0001	0.0014	1.00687	0.00058	
LEU-SOL-THERM-016 STACY 平板体系	105	UO ₂ (NO ₃) ₂	468.7	9.97	水	0.9996	0.0013	1.01352	0.00079	
	113	UO ₂ (NO ₃) ₂	514.2	9.97	水	0.9999	0.0013	1.01332	0.00085	
	125	UO ₂ (NO ₃) ₂	608.4	9.97	水	0.9994	0.0014	1.01261	0.00078	
	129	UO ₂ (NO ₃) ₂	650.2	9.97	水	0.9996	0.0014	1.01065	0.00086	
	131	UO ₂ (NO ₃) ₂	699.1	9.97	水	0.9995	0.0014	1.01027	0.00074	
	140	UO ₂ (NO ₃) ₂	738.9	9.97	水	0.9992	0.0015	1.00886	0.00072	
	196	UO ₂ (NO ₃) ₂	771.8	9.97	水	0.9994	0.0015	1.00976	0.00077	
LEU-SOL-THERM-017 STACY 平板体系	104	UO ₂ (NO ₃) ₂	468.7	9.97		0.9981	0.0013	1.01135	0.00070	
	122	UO ₂ (NO ₃) ₂	510.8	9.97		0.9986	0.0013	1.00983	0.00072	
	123	UO ₂ (NO ₃) ₂	610.9	9.97		0.9989	0.0014	1.00799	0.00066	
	126	UO ₂ (NO ₃) ₂	650.1	9.97		0.9992	0.0014	1.00872	0.00077	
	130	UO ₂ (NO ₃) ₂	699.2	9.97		0.9987	0.0015	1.00886	0.00064	
	147	UO ₂ (NO ₃) ₂	729.0	9.97		0.9996	0.0015	1.00909	0.00063	

表 6.1(2) 均質低濃縮ウラン系臨界ベンチマーク解析結果

ICSBEP ID number	ケース 番号	燃料 化学式	H/U-235	濃縮度 (wt%)	反射体	ベンチマークモデル keff		計算結果		備考
						keff	1 σ	keff	1 σ	
LEU-COMP-THERM-049 MARACAS	1	UO ₂ (粉末)	39.94	4.98	ポリエチレン	1.0000	0.0034	1.00504	0.00077	
	2	UO ₂ (粉末)	39.94	4.98	ポリエチレン	1.0000	0.0034	1.00606	0.00077	
	3	UO ₂ (粉末)	39.94	4.98	ポリエチレン	1.0000	0.0034	1.00405	0.00075	
	4	UO ₂ (粉末)	39.94	4.98	ポリエチレン	1.0000	0.0034	1.00603	0.00076	
	5	UO ₂ (粉末)	49.95	4.98	ポリエチレン	1.0000	0.0042	1.00636	0.00078	
	6	UO ₂ (粉末)	49.95	4.98	ポリエチレン	1.0000	0.0042	1.00803	0.00074	
	7	UO ₂ (粉末)	49.95	4.98	ポリエチレン	1.0000	0.0042	1.00626	0.00074	
	8	UO ₂ (粉末)	49.95	4.98	ポリエチレン	1.0000	0.0042	1.00531	0.00080	
	9	UO ₂ (粉末)	59.68	4.98	ポリエチレン	1.0000	0.0037	1.00383	0.00080	
	10	UO ₂ (粉末)	59.68	4.98	ポリエチレン	1.0000	0.0037	1.00695	0.00073	
	11	UO ₂ (粉末)	59.68	4.98	ポリエチレン	1.0000	0.0037	1.00540	0.00073	
	12	UO ₂ (粉末)	59.68	4.98	ポリエチレン	1.0000	0.0037	1.00641	0.00076	
	13	UO ₂ (粉末)	59.68	4.98	ポリエチレン	1.0000	0.0036	1.00491	0.00077	
	14	UO ₂ (粉末)	59.68	4.98	ポリエチレン	1.0000	0.0036	1.00495	0.00075	
	15	UO ₂ (粉末)	59.68	4.98	ポリエチレン	1.0000	0.0036	1.00672	0.00076	
	16	UO ₂ (粉末)	59.68	4.98	ポリエチレン	1.0000	0.0036	1.00520	0.00080	
	17	UO ₂ (粉末)	59.68	4.98	ポリエチレン	1.0000	0.0036	1.00666	0.00084	
	18	UO ₂ (粉末)	59.68	4.98	ポリエチレン	1.0000	0.0030	1.00697	0.00079	

表 6.2 均質高濃縮ウラン系臨界ベンチマーク解析結果

ICSBEP ID number	ケース番号	燃料化学式	H/U-235	濃縮度 (wt%)	反射体	ベンチマークモデル keff		計算結果		備考
						keff	1 σ	keff	1 σ	
HEU-SOL-THERM-009 ORNL	1	UO ₂ F ₂	35.84	93.18	水	1.0000	0.0057	1.01582	0.00104	
	2	UO ₂ F ₂	47.23	93.18	水	1.0000	0.0057	1.01359	0.00099	
	3	UO ₂ F ₂	76.08	93.18	水	1.0000	0.0057	1.01175	0.00103	
	4	UO ₂ F ₂	126.47	93.18	水	1.0000	0.0057	1.00601	0.00106	
HEU-SOL-THERM-010 ORNL	1	UO ₂ F ₂	269.97	93.13	水	1.0000	0.0018	1.00953	0.00100	
HEU-SOL-THERM-011 ORNL	1	UO ₂ F ₂	523.41	93.18	水	1.0000	0.0020	1.01024	0.00089	
	2	UO ₂ F ₂	533.12	93.18	水	1.0000	0.0020	1.00788	0.00092	
HEU-SOL-THERM-012 ORNL	1	UO ₂ F ₂	1272.25	93.18	水	0.9999	0.0058	1.00472	0.00064	
HEU-SOL-THERM-014 IPPE	1	UO ₂ (NO ₃) ₂	405.00	89.04	水	1.0000	0.0028	0.99843	0.00089	
HEU-SOL-THERM-015 IPPE	1	UO ₂ (NO ₃) ₂	278.39	89.04	水	1.0000	0.0032	1.00703	0.00100	
	2	UO ₂ (NO ₃) ₂	278.39	89.04	水	1.0000	0.0034	0.99709	0.00092	
HEU-SOL-THERM-016 IPPE	1	UO ₂ (NO ₃) ₂	175.20	89.04	水	1.0000	0.0036	0.99863	0.00103	
HEU-SOL-THERM-017 IPPE	1	UO ₂ (NO ₃) ₂	132.79	89.04	水	1.0000	0.0028	0.99987	0.00103	
	2	UO ₂ (NO ₃) ₂	132.79	89.04	水	1.0000	0.004	0.99188	0.00106	
	3	UO ₂ (NO ₃) ₂	132.79	89.04	水	1.0000	0.0036	0.98842	0.00099	
HEU-SOL-THERM-018 IPPE	1	UO ₂ (NO ₃) ₂	86.03	89.04	水	1.0000	0.0034	1.00157	0.00106	
	2	UO ₂ (NO ₃) ₂	86.03	89.04	水	1.0000	0.0046	0.99604	0.00098	
	3	UO ₂ (NO ₃) ₂	86.03	89.04	水	1.0000	0.0042	1.00142	0.00103	
HEU-SOL-THERM-019 IPPE	1	UO ₂ (NO ₃) ₂	54.72	89.04	水	1.0000	0.0041	1.00903	0.00107	
HEU-SOL-THERM-025 IPPE	1	UO ₂ (NO ₃) ₂	555.76	89.04	水	1.0002	0.0025	1.00712	0.00083	
	2	UO ₂ (NO ₃) ₂	555.76	89.04	水	1.0007	0.0025	1.00736	0.00090	
	4	UO ₂ (NO ₃) ₂	534.62	89.04	水	1.0003	0.0027	1.00943	0.00084	
	5	UO ₂ (NO ₃) ₂	367.79	89.04	水	1.0013	0.003	1.00996	0.00091	
HEU-SOL-THERM-028 IPPE	1	UO ₂ (NO ₃) ₂	374.56	89.08	水	1.0000	0.0023	1.00477	0.00098	
	2	UO ₂ (NO ₃) ₂	374.56	89.08	水	1.0000	0.0034	1.00437	0.00094	
	3	UO ₂ (NO ₃) ₂	374.56	89.08	水	1.0000	0.0026	1.00609	0.00105	
	4	UO ₂ (NO ₃) ₂	374.56	89.08	水	1.0000	0.0028	1.00594	0.00093	B4C
	5	UO ₂ (NO ₃) ₂	374.56	89.08	水	1.0000	0.0031	1.00127	0.00099	
	6	UO ₂ (NO ₃) ₂	374.56	89.08	水	1.0000	0.0023	1.00570	0.00092	B4C
	7	UO ₂ (NO ₃) ₂	374.56	89.08	水	1.0000	0.0038	1.00589	0.00094	
	8	UO ₂ (NO ₃) ₂	374.56	89.08	水	1.0000	0.0027	1.00555	0.00088	B4C
	9	UO ₂ (NO ₃) ₂	91.48	89.08	水	1.0000	0.0049	1.00534	0.00096	
	10	UO ₂ (NO ₃) ₂	91.48	89.08	水	1.0000	0.0053	1.00112	0.00106	B4C
	11	UO ₂ (NO ₃) ₂	91.48	89.08	水	1.0000	0.0051	1.00860	0.00098	
	12	UO ₂ (NO ₃) ₂	91.48	89.08	水	1.0000	0.0046	1.00199	0.00090	B4C
	13	UO ₂ (NO ₃) ₂	91.48	89.08	水	1.0000	0.0058	1.00562	0.00098	
	14	UO ₂ (NO ₃) ₂	91.48	89.08	水	1.0000	0.0046	1.00439	0.00101	B4C
	15	UO ₂ (NO ₃) ₂	91.48	89.08	水	1.0000	0.0064	1.01442	0.00098	
	16	UO ₂ (NO ₃) ₂	91.48	89.08	水	1.0000	0.0052	1.00869	0.00105	B4C
	17	UO ₂ (NO ₃) ₂	91.48	89.08	水	1.0000	0.0066	1.00425	0.00104	
	18	UO ₂ (NO ₃) ₂	91.48	89.08	水	1.0000	0.0060	1.00575	0.00094	B4C
HEU-SOL-THERM-029 IPPE	1	UO ₂ (NO ₃) ₂	91.48	89.08	水	1.0000	0.0066	1.00805	0.00096	
	2	UO ₂ (NO ₃) ₂	91.48	89.08	水	1.0000	0.0058	1.01057	0.00090	B4C
	3	UO ₂ (NO ₃) ₂	91.48	89.08	水	1.0000	0.0068	1.00201	0.00102	B4C
	4	UO ₂ (NO ₃) ₂	91.48	89.08	水	1.0000	0.0074	0.99989	0.00103	B4C
	5	UO ₂ (NO ₃) ₂	91.48	89.08	水	1.0000	0.0067	1.00732	0.00098	B4C
	6	UO ₂ (NO ₃) ₂	91.48	89.08	水	1.0000	0.0065	1.00726	0.00099	B4C
	7	UO ₂ (NO ₃) ₂	91.48	89.08	水	1.0000	0.0063	1.00813	0.00099	B4C
HEU-SOL-THERM-030 IPPE	1	UO ₂ (NO ₃) ₂	374.56	89.08	水	1.0000	0.0039	1.00514	0.00099	
	2	UO ₂ (NO ₃) ₂	374.56	89.08	水	1.0000	0.0032	1.00392	0.00093	B4C
	3	UO ₂ (NO ₃) ₂	374.56	89.08	水	1.0000	0.0031	1.00346	0.00093	B4C
	4	UO ₂ (NO ₃) ₂	91.14	89.08	水	1.0000	0.0064	1.01140	0.00099	
	5	UO ₂ (NO ₃) ₂	91.14	89.08	水	1.0000	0.0058	1.00617	0.00100	
	6	UO ₂ (NO ₃) ₂	91.14	89.08	水	1.0000	0.0059	1.00622	0.00100	B4C
	7	UO ₂ (NO ₃) ₂	91.14	89.08	水	1.0000	0.0064	1.00642	0.00103	B4C

表 6.3 均質プルトニウム系臨界ベンチマーク計算結果

ICSBEP ID number	ケース番号	H/Pu-239	Pu-239/Pu (wt%)	反射体	ベンチマークモデル keff		計算結果		備考
					keff	1σ	keff	1σ	
PU-MET-FAST-009 LANL			94.80	アルミニウム	1.0000	0.0027	0.99986	0.00060	
PU-MET-FAST-011 LANL			94.46	水	1.000	0.001	0.99900	0.00120	
PU-MET-FAST-021 VNIIEF	Be-Reflected		95.21	Be	1.0000	0.0026	1.00400	0.00070	
	BeO-Reflected		95.21	BeO	1.0000	0.0026	0.99300	0.00070	
PU-MET-FAST-023 VNIIEF			98.20	グラファイト	1.0000	0.0020	0.99500	0.00060	
PU-MET-FAST-024 VNIIEF			98.20	ポリエチレン	1.0000	0.0020	0.99800	0.00060	
PU-MET-FAST-025 VNIIEF			98.20	steel	1.0000	0.0020	0.99648	0.00060	
PU-MET-FAST-027 VNIIEF			89.66	ポリエチレン	1.0000	0.0022	1.00000	0.00070	
PU-MET-FAST-028 VNIIEF			89.66	steel	1.0000	0.0022	1.00100	0.00060	
PU-MET-FAST-030 VNIIEF			88.87	グラファイト	1.0000	0.0021	0.99900	0.00060	
PU-MET-FAST-032 VNIIEF			88.87	steel	1.0000	0.0020	0.99800	0.00070	
PU-MET-FAST-041 VNIIEF			88.24	depleted-U	1.0000	0.0016	0.99800	0.00070	
PU-SOL-THERM-003 Hanford	1	788.0	98.24	水	1.0000	0.0047	1.00700	0.00090	
	2	756.0	98.24	水	1.0000	0.0047	1.00600	0.00090	
PU-SOL-THERM-004 Hanford	1	987.0	99.46	水	1.0000	0.0047	1.00800	0.00090	
	2	976.9	99.46	水	1.0000	0.0047	1.00400	0.00090	
	3	934.6	99.46	水	1.0000	0.0047	1.00400	0.00090	
	4	888.9	99.46	水	1.0000	0.0047	1.00300	0.00090	
	5	942.0	98.24	水	1.0000	0.0047	1.00300	0.00090	
PU-SOL-THERM-005 Hanford	1	902.8	95.95	水	1.0000	0.0047	1.00219	0.00085	
	2	867.7	95.95	水	1.0000	0.0047	1.00440	0.00094	
	3	834.4	95.95	水	1.0000	0.0047	1.00811	0.00081	
	4	765.2	95.95	水	1.0000	0.0047	1.00973	0.00085	
	5	694.1	95.95	水	1.0000	0.0047	1.01023	0.00083	
	6	633.4	95.95	水	1.0000	0.0047	1.01026	0.00087	
	7	580.6	95.95	水	1.0000	0.0047	1.00795	0.00085	
	8	868.7	95.60	水	1.0000	0.0047	1.00356	0.00089	
	9	825.1	95.60	水	1.0000	0.0047	1.00589	0.00082	
PU-SOL-THERM-006 Hanford	1	1061.1	96.88	水	1.0000	0.0035	1.00400	0.00090	
	2	1017.8	96.88	水	1.0000	0.0035	1.00600	0.00090	
	3	940.1	96.88	水	1.0000	0.0035	1.00700	0.00090	
PU-SOL-THERM-007 PNL	2	109.2	95.01	水	1.0000	0.0047	1.00426	0.00092	
	3	113.6	95.01	水	1.0000	0.0047	1.00016	0.00092	
	5	266.7	95.01	水	1.0000	0.0047	1.00594	0.00092	
	6	261.2	95.01	水	1.0000	0.0047	0.99907	0.00090	
	7	264.9	95.01	水	1.0000	0.0047	1.00159	0.00091	
	8	257.6	95.01	水	1.0000	0.0047	0.99690	0.00092	
	9	258.9	95.01	水	1.0000	0.0047	0.99437	0.00092	
	10	284.1	95.01	水	1.0000	0.0047	0.99914	0.00091	
PU-SOL-THERM-010 Hanford	9-1	266.9	97.15	水	1.0000	0.0048	1.02006	0.00096	
	9-2	356.9	97.15	水	1.0000	0.0048	1.01648	0.00085	
	9-3	484.2	97.15	水	1.0000	0.0048	1.01131	0.00082	
	12-1	543.4	97.10	水	1.0000	0.0048	1.01155	0.00093	
	12-2	618.3	97.10	水	1.0000	0.0048	1.01463	0.00090	
	12-3	728.1	97.10	水	1.0000	0.0048	1.02005	0.00084	
	12-4	849.7	97.10	水	1.0000	0.0048	1.01450	0.00083	

注) 燃料の化学式は以下のとおり。

PU-MET-FAST : 金属 Pu

PU-SOL-THERM : Pu(NO₃)₄

表 6.4 均質ウラン・プルトニウム系臨界ベンチマーク解析結果

ICSBEP ID number	ケース番号	H(U+Pu)	Pu 富化度 (wt%)	反射体	ベンチマークモデル keff		計算結果		備考
					keff	1σ	keff	1σ	
MIX-SOL-THERM-004 PNL(PNC-DOE, 円筒)	065	654.4	39.68	裸	1.0000	0.0033	1.00211	0.00096	
	066	650.7	39.69	水	1.0000	0.0033	0.99897	0.00081	
	067	651.7	39.69	コンクリート	1.0000	0.0068	1.00211	0.00079	
	068	211.3	40.56	コンクリート	1.0000	0.0078	1.00387	0.00087	
	069	210.1	40.53	水	1.0000	0.0029	0.99653	0.00084	
	070	210.7	40.52	裸	1.0000	0.0029	0.99821	0.00096	
	077	134.7	39.64	裸	1.0000	0.0026	0.99912	0.00077	
	078	134.5	39.69	水	1.0000	0.0026	0.99684	0.00076	
MIX-SOL-THERM-005 PNL(PNC-DOE, 平板)	083	134.0	39.72	コンクリート	1.0000	0.0077	1.00353	0.00078	
	063	664.2	39.50	裸	1.0000	0.0037	0.99792	0.00081	
	064	651.1	39.81	水	1.0000	0.0037	1.00282	0.00084	
	071	210.9	40.66	水	1.0000	0.0037	1.00271	0.00087	
	072	210.9	40.66	水	1.0000	0.0037	0.99964	0.00085	
	074	210.3	40.62	裸	1.0000	0.0037	0.99171	0.00088	
	075	134.3	39.66	裸	1.0000	0.0037	0.99051	0.00091	
MIX-SOL-THERM-001 PNL(PNC-DOE, 円環)	076	134.3	39.64	水	1.0000	0.0037	0.99781	0.00078	
	087	226.6	21.86	水	1.0000	0.0016	0.99649	0.00086	2wt%B4C-Conc.
	087s	224.8	21.96	水	1.0000	0.0016	0.99734	0.00084	
	100	335.9	22.78	水	1.0000	0.0052	1.00994	0.00088	Cd-Poly(中実)
	091	46.29	22.13	水	1.0000	0.0016	0.99212	0.00079	0wt%B4C-Conc.
	092	45.21	22.16	水	1.0000	0.0016	0.99769	0.00087	1wt%B4C-Conc.
	093	44.16	22.14	水	1.0000	0.0016	1.00044	0.00082	6wt%B4C-Conc.
	094	44.08	22.16	水	1.0000	0.0016	1.00143	0.00076	
	098	73.00	22.73	水	1.0000	0.0016	1.00085	0.00088	2wt%B4C-Conc.
	099	72.01	22.73	水	1.0000	0.0052	1.00775	0.00086	Cd-Poly
	108	116.35	22.55	水	1.0000	0.0016	1.00034	0.00081	2wt%B4C-Conc.
095	110.44	96.78	水	1.0000	0.0016	1.00241	0.00084	2wt%B4C-Conc.	
096	213.22	96.66	水	1.0000	0.0016	1.00078	0.00091	2wt%B4C-Conc.	
097	418.64	96.20	水	1.0000	0.0016	1.00437	0.00087	2wt%B4C-Conc.	

注) 燃料の化学式はすべて $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2\text{-Pu}(\text{NO}_3)_4$ である。

表 6.5(1) 非均質ウラン系臨界ベンチマーク解析結果

ICSBEP ID number	ケース 番号	燃料棒 直径 (cm)	水対燃料 体積比	濃縮度 (wt%)	燃料棒 本数	ベンチマークモデル keff		計算結果		備考
						keff	1σ	keff	1σ	
LEU-COMP-THERM-002 PNL	1	1.265	3.882	4.31	10x11+5	0.9997	0.0020	1.00150	0.00081	
	2	1.265	3.882	4.31	9x13+3	0.9997	0.0020	1.00202	0.00083	
	3	1.265	3.882	4.31	8x16+3	0.9997	0.0020	1.00248	0.00079	
	4	1.265	3.882	4.31	15x8x3	0.9997	0.0018	1.00047	0.00084	
	5	1.265	3.882	4.31	13x8x3	0.9997	0.0019	0.99899	0.00082	
LEU-COMP-THERM-006 TCA	1	1.25	1.447	2.596	19x19	1.000	0.002	1.00127	0.00077	
	2	1.25	1.447	2.596	20x20	1.000	0.002	1.00140	0.00077	
	3	1.25	1.447	2.596	21x21	1.000	0.002	1.00026	0.00078	
	4	1.25	1.766	2.596	17x17	1.000	0.002	1.00177	0.00082	
	5	1.25	1.766	2.596	18x18	1.000	0.002	0.99949	0.00078	
	6	1.25	1.766	2.596	19x19	1.000	0.002	1.00097	0.00079	
	7	1.25	1.766	2.596	20x20	1.000	0.002	1.00313	0.00080	
	8	1.25	1.766	2.596	21x21	1.000	0.002	1.00278	0.00081	
	9	1.25	2.392	2.596	16x16	1.000	0.002	1.00260	0.00080	
	10	1.25	2.392	2.596	17x17	1.000	0.002	1.00210	0.00075	
	11	1.25	2.392	2.596	18x18	1.000	0.002	1.00138	0.00078	
	12	1.25	2.392	2.596	19x19	1.000	0.002	1.00199	0.00071	
	13	1.25	2.392	2.596	20x20	1.000	0.002	1.00076	0.00082	
	14	1.25	2.891	2.596	15x15	1.000	0.002	1.00094	0.00077	
	15	1.25	2.891	2.596	16x16	1.000	0.002	1.00164	0.00076	
	16	1.25	2.891	2.596	17x17	1.000	0.002	1.00069	0.00073	
	17	1.25	2.891	2.596	18x18	1.000	0.002	1.00130	0.00079	
	18	1.25	4.13	2.596	19x19	1.000	0.002	0.99998	0.00077	
LEU-COMP-THERM-007 I.P.S.N. at SRSC Valduc, C.E.A.	1	0.79	1.82	4.738	22 x 22	1.0000	0.0016	1.00189	0.00078	boron (5.0e-5 wt%)
	2	0.79	3.81	4.738	16 x 17	1.0000	0.0016	1.00363	0.00089	
	3	0.79	7.58	4.738	15 x 15	1.0000	0.0016	1.00141	0.00083	
	4	0.79	11.54	4.738	18 x 17	1.0000	0.0016	1.00081	0.00073	
LEU-COMP-THERM-016 PNL	1	1.12	2.918	2.35	20 x 16 x 3 (68.8mm)*	1.0000	0.0031	0.99964	0.00069	
	2	1.12	2.918	2.35	20 x 16 x 3 (76.4mm)*	1.0000	0.0031	0.99931	0.00070	
	3	1.12	2.918	2.35	20 x 16 x 3 (75.1mm)*	1.0000	0.0031	0.99813	0.00071	
	4	1.12	2.918	2.35	20 x 16 x 3 (74.2mm)*	1.0000	0.0031	0.99796	0.00071	
	5	1.12	2.918	2.35	20 x 16 x 3 (77.6mm)*	1.0000	0.0031	0.99968	0.00074	
	6	1.12	2.918	2.35	20 x 17 x 3 (104.4mm)*	1.0000	0.0031	0.99770	0.00078	
	7	1.12	2.918	2.35	20 x 17 x 3 (114.7mm)*	1.0000	0.0031	0.99996	0.00073	
	8	1.12	2.918	2.35	20 x 17 x 3 (75.6mm)*	1.0000	0.0031	0.99984	0.00076	304L steel (1.1% B)
	9	1.12	2.918	2.35	20 x 17 x 3 (96.2mm)*	1.0000	0.0031	1.00129	0.00077	
	10	1.12	2.918	2.35	20 x 17 x 3 (73.6mm)*	1.0000	0.0031	0.99872	0.00073	304L steel (1.6% B)
	11	1.12	2.918	2.35	20 x 17 x 3 (95.2mm)*	1.0000	0.0031	1.00076	0.00075	
	12	1.12	2.918	2.35	20 x 17 x 3 (63.3mm)*	1.0000	0.0031	0.99879	0.00074	Boral
	13	1.12	2.918	2.35	20 x 17 x 3 (90.3mm)*	1.0000	0.0031	0.99984	0.00072	Boral
	14	1.12	2.918	2.35	20 x 16, 22 x 16 x 2 (50.5mm)*	1.0000	0.0031	1.00051	0.00074	Boral
	15	1.12	2.918	2.35	20 x 16 x 3 (66.2mm)*	1.0000	0.0031	0.99868	0.00072	
	16	1.12	2.918	2.35	20 x 16 x 3 (77.2mm)*	1.0000	0.0031	0.99615	0.00069	

注) 燃料の化学式はすべて UO₂ である。

* クラスタ間の距離を示す。

表 6.5(2) 非均質ウラン系臨界ベンチマーク解析結果

ICSBEP ID number	ケース番号	燃料棒直径 (cm)	水対燃料体積比	濃縮度 (wt%)	燃料棒本数	ベンチマークモデル keff		計算結果		備考
						keff	1σ	keff	1σ	
LEU-COMP-THERM-016 PNL	17	1.12	2.918	2.35	20 x 16 x 3 (75.1mm)*	1.0000	0.0031	0.99681	0.00073	
	18	1.12	2.918	2.35	20 x 15, 24 x 15 x 2 (68.8mm)*	1.0000	0.0031	1.00017	0.00071	
	19	1.12	2.918	2.35	20 x 15, 24 x 15 x 2 (70.0mm)*	1.0000	0.0031	1.00071	0.00070	
	20	1.12	2.918	2.35	20 x 15, 24 x 15 x 2 (51.5mm)*	1.0000	0.0031	1.00144	0.00077	Cu (Cd)
	21	1.12	2.918	2.35	20 x 17 x 3 (67.4mm)*	1.0000	0.0031	0.99968	0.00074	Cd
	22	1.12	2.918	2.35	20 x 17 x 3 (76.0mm)*	1.0000	0.0031	1.00036	0.00075	Cd
	23	1.12	2.918	2.35	20 x 17 x 3 (93.7mm)*	1.0000	0.0031	0.99902	0.00078	Cd
	24	1.12	2.918	2.35	20 x 17 x 3 (77.8mm)*	1.0000	0.0031	0.99958	0.00072	Cd
	25	1.12	2.918	2.35	20 x 17 x 3 (94.0mm)*	1.0000	0.0031	0.99899	0.00071	Cd
	26	1.12	2.918	2.35	20 x 17 x 3 (75.4mm)*	1.0000	0.0031	1.00006	0.00073	Cd
	27	1.12	2.918	2.35	20 x 17 x 3 (93.9mm)*	1.0000	0.0031	1.00000	0.00070	Cd
	28	1.12	2.918	2.35	20 x 16 x 3 (86.7mm)*	1.0000	0.0031	0.99895	0.00071	
	29	1.12	2.918	2.35	20 x 16 x 3 (87.8mm)*	1.0000	0.0031	0.99897	0.00076	
	30	1.12	2.918	2.35	20 x 16 x 3 (88.3mm)*	1.0000	0.0031	1.00095	0.00075	
31	1.12	2.918	2.35	20 x 16 x 3 (87.9mm)*	1.0000	0.0031	1.00126	0.00073		
32	1.12	2.918	2.35	20 x 16 x 3 (87.8mm)*	1.0000	0.0031	0.99970	0.00072		
LEU-COMP-THERM-018 AEA Technology	1	0.743	2.764	7	376	1.0000	0.0020	1.00426	0.00095	
LEU-COMP-THERM-019 Kurchatov Institute	1	0.436	1.527	5	3937	1.0000	0.0063	1.01850	0.00092	
	2	0.436	2.397	5	2124	1.0000	0.0058	1.01418	0.00101	
	3	0.436	10.054	5	1319	1.0000	0.0061	1.01064	0.00085	
LEU-COMP-THERM-020 Kurchatov Institute	1	0.46	7.048	5	3267	1.0000	0.0061	0.99775	0.00096	
	2	0.46	7.048	5	1305	1.0000	0.0061	1.00524	0.00073	
	3	0.46	7.048	5	1051	1.0000	0.0061	1.00622	0.00099	
	4	0.46	7.048	5	952	1.0000	0.0061	1.00575	0.00071	
	5	0.46	7.048	5	842	1.0000	0.0061	1.00548	0.00073	
	6	0.46	7.048	5	785	1.0000	0.0061	1.00709	0.00074	
	7	0.46	7.048	5	654	1.0000	0.0061	1.01174	0.00100	
LEU-COMP-THERM-021 Kurchatov Institute	1	0.46	3.453	5	2612	1.0000	0.0072	1.01503	0.00086	Boric Acid
	2	0.46	3.453	5	2300	1.0000	0.0072	1.01621	0.0009	Boric Acid
	3	0.46	3.453	5	2128	1.0000	0.0072	1.01587	0.00089	Boric Acid
	4	0.46	7.048	5	3267	1.0000	0.0050	1.01326	0.00076	Boric Acid
	5	0.46	7.048	5	2865	1.0000	0.0050	1.01528	0.00075	Boric Acid
	6	0.46	7.048	5	2307	1.0000	0.0050	1.01535	0.00075	Boric Acid
LEU-COMP-THERM-022 Kurchatov Institute	1	0.416	1.619	10	1969	1.0000	0.0046	1.00739	0.00095	
	2	0.416	2.575	10	1151	1.0000	0.0046	1.01140	0.00096	
	3	0.416	4.869	10	629	1.0000	0.0036	1.01261	0.00095	
	4	0.416	7.981	10	462	1.0000	0.0037	1.01257	0.00097	
	5	0.416	10.986	10	410	1.0000	0.0038	1.00801	0.00093	
	6	0.416	19.835	10	483	1.0000	0.0046	1.00960	0.00086	
	7	0.416	20.352	10	504	1.0000	0.0046	1.00672	0.00082	

注) 燃料の化学式はすべて UO₂ である。

* クラスタ間の距離を示す。

表 6.5(3) 非均質ウラン系臨界ベンチマーク解析結果

ICSBEP ID number	ケース 番号	燃料棒 直径 (cm)	水対燃料 体積比	濃縮度 (wt%)	燃料棒 本数	ベンチマークモデル keff		計算結果		備考
						keff	1 σ	keff	1 σ	
LEU-COMP-THERM-023 Kurchatov Institute	1	0.416	10.986	10	1503	1.0000	0.0044	1.00054	0.00095	
	2	0.416	10.986	10	901	1.0000	0.0044	1.00284	0.00090	
	3	0.416	10.986	10	745	1.0000	0.0044	1.00435	0.00086	
	4	0.416	10.986	10	619	1.0000	0.0044	1.00523	0.00093	
	5	0.416	10.986	10	523	1.0000	0.0044	1.00754	0.00092	
	6	0.416	10.986	10	445	1.0000	0.0044	1.00816	0.00087	
LEU-COMP-THERM-024 Kurchatov Institute	1	0.416	1.325	10	2625	1.0000	0.0054	1.00674	0.00090	
	2	0.416	4.153	10	1297	1.0000	0.004	1.01384	0.00094	
LEU-COMP-THERM-025 Kurchatov Institute	1	0.416	1.619	7.5	2410	1.0000	0.0041	0.99264	0.00090	
	2	0.416	2.575	7.5	1433	1.0000	0.0044	1.00077	0.00091	
	3	0.416	4.869	7.5	831	1.0000	0.0047	1.00513	0.00093	
	4	0.416	7.981	7.5	661	1.0000	0.0052	1.00523	0.00086	
LEU-COMP-THERM-031 Kurchatov Institute	1	0.46	1.577	5	3717	1.0000	0.0045	0.99235	0.00085	
	2	0.46	1.577	5	3710	1.0000	0.0045	0.99728	0.00089	
	3	0.46	1.577	5	3011	1.0000	0.0045	0.99685	0.00087	
	4	0.46	1.577	5	2903	1.0000	0.0045	0.99237	0.00087	
	5	0.46	1.577	5	2877	1.0000	0.0045	0.99422	0.00083	
	6	0.46	1.577	5	2649	1.0000	0.0045	0.99502	0.00083	
LEU-COMP-THERM-032 Kurchatov Institute	1	0.416	1.619	10	2002	1.0000	0.0045	1.00704	0.00096	
	4	0.416	1.619	10	421	1.0000	0.0037	1.00762	0.00093	
	7	0.416	1.619	10	523	1.0000	0.0045	1.00663	0.00086	
LEU-COMP-THERM-039 I.P.S.N. at SRSC Valduc, C.E.A.	1	0.79	1.8231	4.738	459	1.0000	0.0014	0.99998	0.00087	
	2	0.79	1.8231	4.738	448	1.0000	0.0014	1.00032	0.00089	
	3	0.79	1.8231	4.738	420	1.0000	0.0014	1.00295	0.00085	
	4	0.79	1.8231	4.738	392	1.0000	0.0014	0.99922	0.00089	
	5	0.79	1.8231	4.738	320	1.0000	0.0014	1.00072	0.00082	
	6	0.79	1.8231	4.738	363	1.0000	0.0014	1.00145	0.00092	
	7	0.79	1.8231	4.738	459	1.0000	0.0014	0.99910	0.00082	
	8	0.79	1.8231	4.738	448	1.0000	0.0014	1.00177	0.00088	
	9	0.79	1.8231	4.738	448	1.0000	0.0014	0.99896	0.00083	
	10	0.79	1.8231	4.738	420	1.0000	0.0014	1.00129	0.00092	
	11	0.79	1.8231	4.738	459	1.0000	0.0014	0.99857	0.00088	
	12	0.79	1.8231	4.738	459	1.0000	0.0014	0.99990	0.00083	
	13	0.79	1.8231	4.738	459	1.0000	0.0014	0.99978	0.00084	
	14	0.79	1.8231	4.738	459	1.0000	0.0014	0.99910	0.00093	
	15	0.79	1.8231	4.738	459	1.0000	0.0014	0.99936	0.00083	
	16	0.79	1.8231	4.738	459	1.0000	0.0014	1.00009	0.00086	
	17	0.79	1.8231	4.738	459	1.0000	0.0014	1.00147	0.00085	

注) 燃料の化学式はすべて UO₂ である。

* クラスタ間の距離を示す。

表 6.6 非均質ウラン・プルトニウム系臨界ベンチマーク解析結果

ICSBE ID number	ケース 番号	燃料棒 直径 (cm)	水対燃 料体積 比	PuO ₂ 富化度 (wt%)	燃料棒 本数	ベンチマークモデル keff		計算結果		備考
						keff	1σ	keff	1σ	
MIX-COMP-THERM-001 PNL	Case1	0.494	3.335	22.37	605	1.0000	0.0025	0.99905	0.00084	
	Case2	0.494	6.858	22.37	279	1.0000	0.0026	0.99835	0.00093	
	Case3	0.494	10.881	22.37	205	1.0000	0.0032	0.99846	0.00091	
	Case4	0.494	17.534	22.37	162	1.0000	0.0039	0.99985	0.00088	
MIX-COMP-THERM-002 PNL	PNL-30	1.283	1.195	2.04	469	1.0024	0.0060	0.99906	0.00079	
	PNL-31	1.283	1.195	2.04	761	1.0009	0.0047	1.00088	0.00076	boron
	PNL-32	1.283	2.525	2.04	195	1.0042	0.0031	1.00174	0.00081	
	PNL-33	1.283	2.525	2.04	761	1.0024	0.0024	1.00790	0.00072	boron
	PNL-34	1.283	3.641	2.04	161	1.0038	0.0025	1.00217	0.00078	
	PNL-35	1.283	3.641	2.04	689	1.0029	0.0027	1.00706	0.00067	boron
MIX-COMP-THERM-003 CRX (Westinghouse)	1	0.857	1.681	6.59	506	1.0000	0.0071	0.99912	0.00082	
	2	0.857	2.165	6.59	361	1.0000	0.0057	1.00079	0.00086	
	3	0.857	2.165	6.59	441	1.0000	0.0052	1.00156	0.00083	boron
	4	0.857	4.706	6.59	169	1.0000	0.0028	0.99943	0.00088	
	5	0.857	5.672	6.59	144	1.0000	0.0024	0.99966	0.00089	
	6	0.857	10.754	6.59	121	1.0000	0.0020	1.00037	0.00090	
MIX-COMP-THERM-004 TCA	1	1.065	2.420	3.0	529	1.0000	0.0046	0.99583	0.00080	
	2	1.065	2.420	3.0	529	1.0000	0.0046	0.99672	0.00082	
	3	1.065	2.420	2.8	529	1.0000	0.0046	0.99744	0.00073	
	4	1.065	2.976	3.0	441	1.0000	0.0039	0.99650	0.00075	
	5	1.065	2.976	3.0	441	1.0000	0.0039	0.99773	0.00078	
	6	1.065	2.976	3.0	441	1.0000	0.0039	0.99797	0.00079	
	7	1.065	4.239	3.0	400	1.0000	0.004	0.99688	0.00076	
	8	1.065	4.239	3.0	400	1.0000	0.004	0.99957	0.00073	
	9	1.065	4.239	3.0	400	1.0000	0.004	1.00002	0.00074	
	10	1.065	5.552	3.0	441	1.0000	0.0051	0.99853	0.00074	
	11	1.065	5.552	3.0	441	1.0000	0.0051	0.99861	0.00068	
MIX-COMP-THERM-005 Hanford	1	1.264	2.219	3.99	253	1.0008	0.0022	1.00165	0.00076	
	2	1.264	2.853	3.99	179	1.0011	0.0026	0.99922	0.00076	
	3	1.264	3.912	3.99	139	1.0016	0.0029	1.00617	0.00067	
	4	1.264	4.820	3.99	122	1.0021	0.0028	1.00398	0.00071	
	5	1.264	7.558	3.99	124	1.0026	0.0036	1.00533	0.00071	
	6	1.264	10.405	3.99	181	1.0033	0.0042	1.00487	0.00065	
	7	1.264	11.875	3.99	272	1.0035	0.0042	1.00758	0.00061	
MIX-COMP-THERM-006 Hanford	1	1.283	1.767	2.04	320	1.0016	0.0051	0.99831	0.00068	
	2	1.283	2.740	2.04	192	1.0017	0.0036	1.00160	0.00073	
	3	1.283	3.767	2.04	152	1.0026	0.0036	0.99763	0.00073	
	4	1.283	4.649	2.04	148	1.0051	0.0044	1.00518	0.00074	
	5	1.283	6.534	2.04	163	1.0040	0.0054	1.00549	0.00067	
	6	1.283	7.306	2.04	180	1.0055	0.0051	1.00114	0.00066	
	7	1.283	3.767	2.04	151	1.0024	0.0045	0.99489	0.00066	
MIX-COMP-THERM-009 PNL	1	0.945	1.410	1.5	1487	1.0003	0.0054	1.00086	0.00070	
	2	0.945	1.869	1.5	829	1.0020	0.0049	0.99641	0.00068	
	3	0.945	3.017	1.5	484	1.0035	0.0050	0.99800	0.00078	
	4	0.945	4.100	1.5	420	1.0046	0.0062	0.99916	0.00072	
	5	0.945	5.454	1.5	452	1.0059	0.0074	1.00119	0.00064	
	6	0.945	5.892	1.5	488	1.0067	0.0080	1.00129	0.00065	

注) 燃料の化学式はすべて UO₂・PuO₂ である。

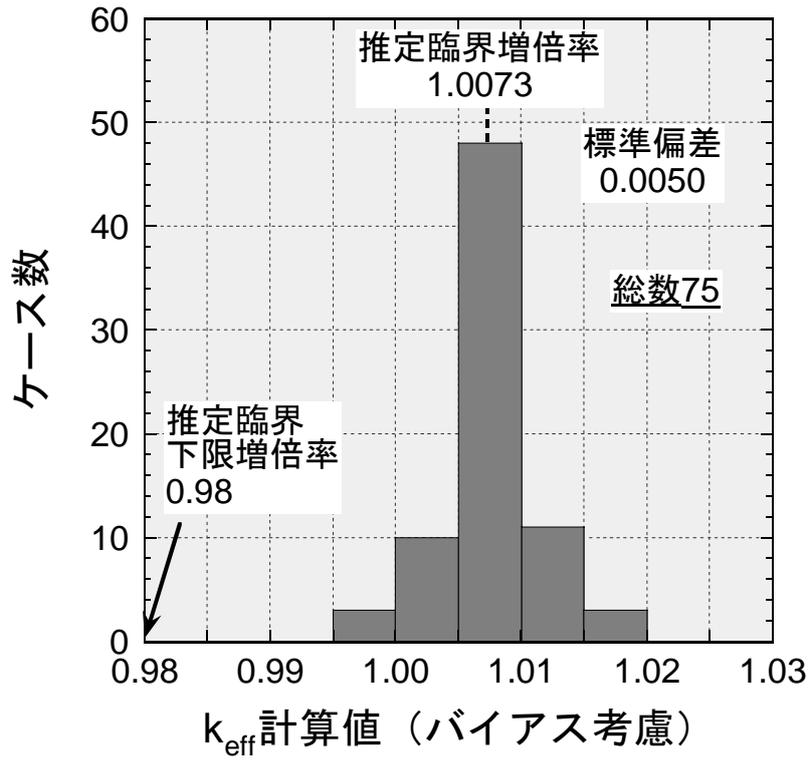


図 6.1 MVP と JENDL-3.2 の組合せによる臨界ベンチマーク解析結果の頻度分布 (均質低濃縮ウラン系)

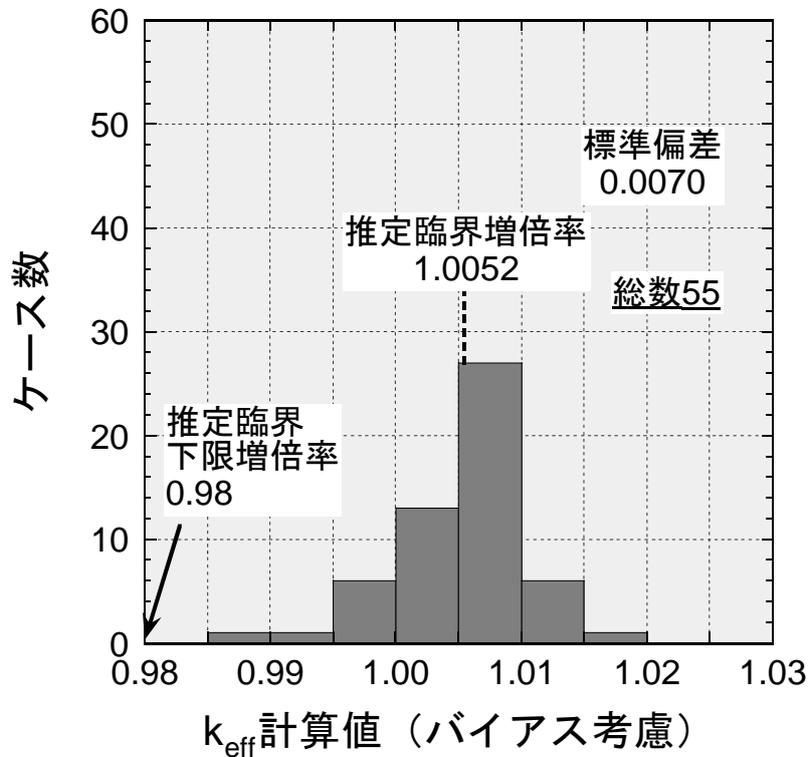


図 6.2 MVP と JENDL-3.2 の組合せによる臨界ベンチマーク解析結果の頻度分布 (均質高濃縮ウラン系)

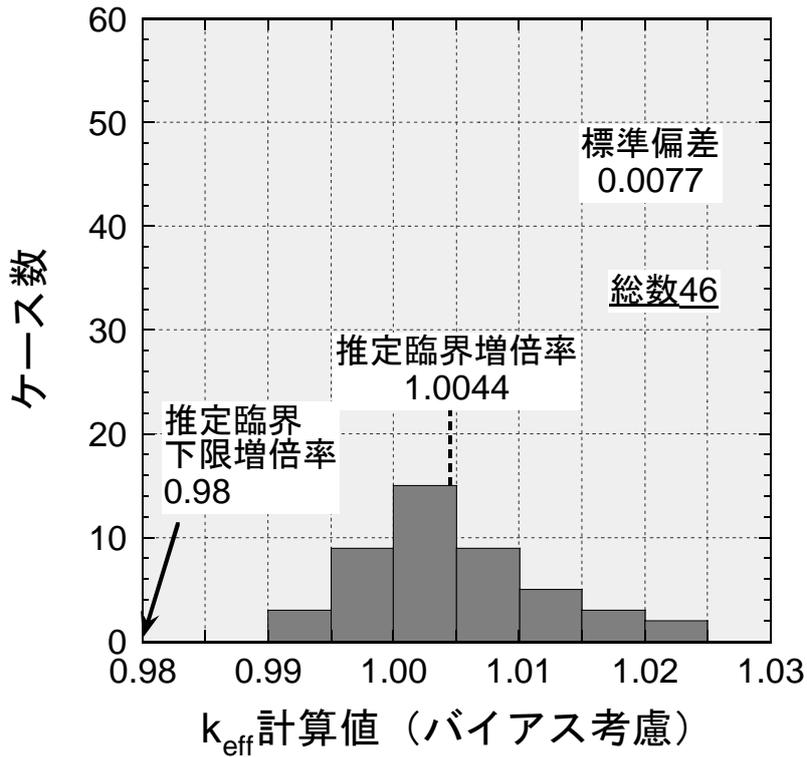


図 6.3 MVP と JENDL-3.2 の組合せによる臨界ベンチマーク解析結果の頻度分布 (均質プルトニウム系)

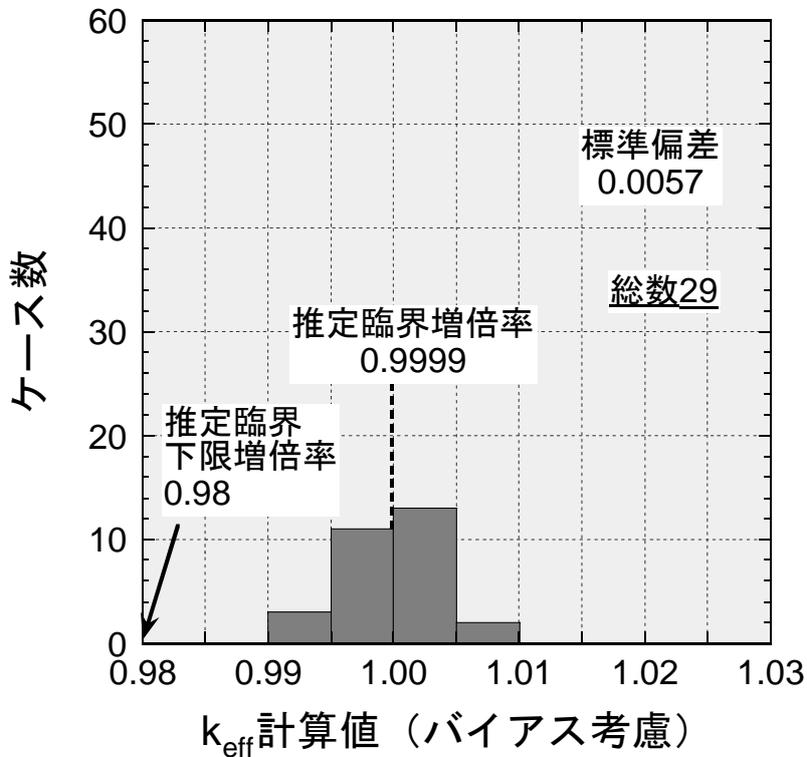


図 6.4 MVP と JENDL-3.2 の組合せによる臨界ベンチマーク解析結果の頻度分布 (均質ウラン・プルトニウム系)

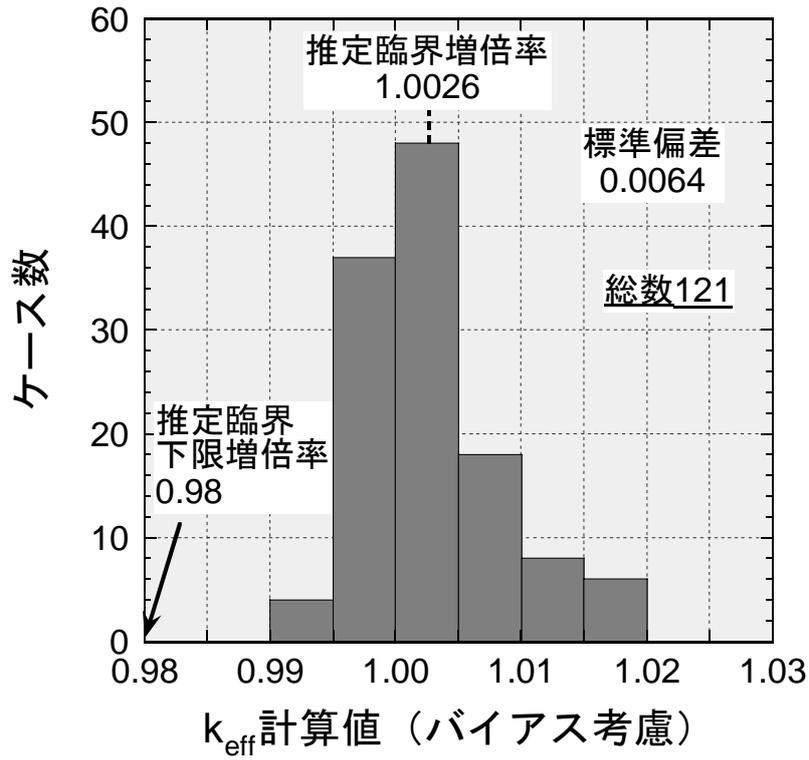


図 6.5 MVP と JENDL-3.2 の組合せによる臨界ベンチマーク解析結果の頻度分布 (非均質ウラン系)

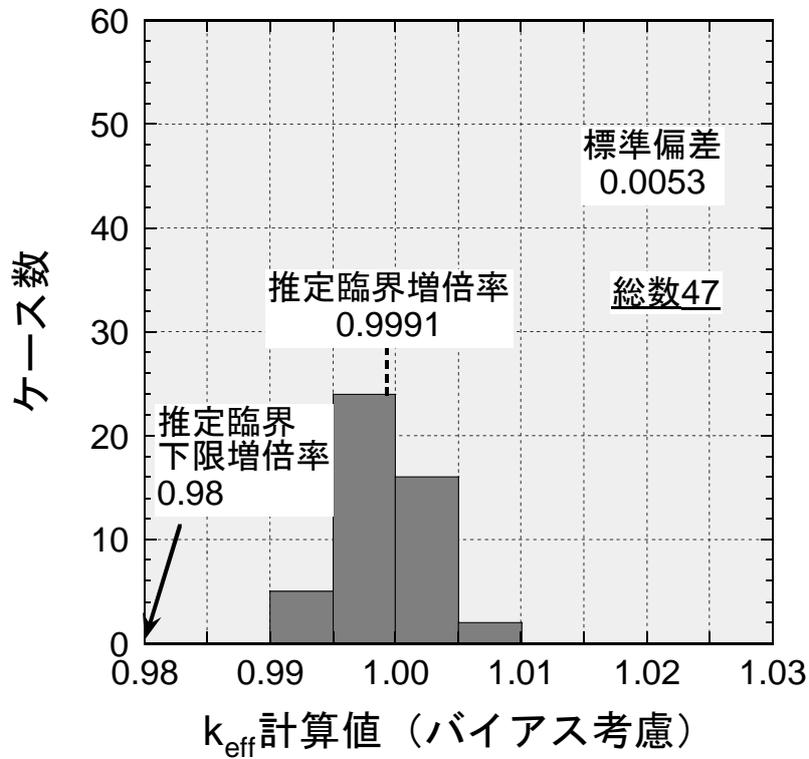


図 6.6 MVP と JENDL-3.2 の組合せによる臨界ベンチマーク解析結果の頻度分布 (非均質ウラン・プルトニウム系)

謝辞

本報告書は、電源開発促進対策特別法に基づく文部科学省からの受託として旧原子力研究所が行った研究成果「平成 15 年度文部科学省受託事業 再処理施設臨界安全技術開発等 ①再処理施設臨界安全技術開発 成果報告書」に基づいています。同成果報告書は、臨界安全性専門部会（下記の表に当時の専門部会の名簿を示す）の検討を受けてまとめたものです。ここに重ねて謝意を表し、同専門部会メンバーへの謝辞といたします。また、須藤俊幸氏（核燃料サイクル技術開発部門 技術主幹）には、原稿全体を閲読の上、いろいろと有益なコメントを戴きました。篤く感謝いたします。

臨界安全性専門部会名簿（平成 15 年度当時）

氏名	職名	所属（当時）
山根 義宏	専門部会長	名古屋大学
三澤 毅	専門委員	京都大学
岩崎 智彦	同上	東北大学
松本 忠邦	同上	核燃料サイクル開発機構
須藤 俊幸	同上	核燃料サイクル開発機構
板原 國幸	同上	日本原燃(株)
中田 哲夫	同上	(財)原子力安全基盤機構
牧口 浩文	同上	(財)グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン
夏目 智弘	同上	三菱重工業(株)
黒石 武	同上	原子燃料工業(株)
三橋 偉司	同上	(財)東芝
寺山 弘通	同上	三菱マテリアル
石井 一弥	同上	(財)日立製作所
松村 哲夫	同上	(財)電力中央研究所
金子 俊幸	同上	(財)日本総合研究所
藤根 幸雄	同上	日本原子力研究所
野村 靖	同上	日本原子力研究所
三好 慶典	同上	日本原子力研究所
櫻庭 耕一	同上	日本原子力研究所

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質モル	mol	
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
	立法メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
	アンペア毎メートル	A/m
濃度 ^(a)	モル毎立方メートル	mol/m ³
	キログラム毎立法メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
	屈折率 ^(b)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) とよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照射	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, ビエエネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報を付たえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で「radioactivity」と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘	パスカル秒	Pa s	m ¹ kg s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ¹ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オンGSTローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオトル	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe=(10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「=」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 f=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

