

J A E R I - M

86-026

核的臨界安全性評価のために使用する
無限体系における臨界濃縮度及び臨界濃度

1986年3月

内藤 傑孝・小山 隆・小室 雄一

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1986

編集兼発行　　日本原子力研究所
印　　刷　　日青工業株式会社

核的臨界安全性評価のために使用する無限体系における
臨界濃縮度及び臨界濃度

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部

内藤 哲孝・小山 隆・小室 雄一

(1986年1月31日受理)

核燃料取り扱い施設の臨界安全性評価のために有用な無限体系における臨界濃度を、均質 $U - H_2O$ 、均質 $UO_2 - H_2O$ 、均質 $UO_2F_2 - H_2O$ 、均質 $UO_2(NO_3)_2$ 水溶液、均質 $Pu - H_2O$ 、均質 $PuO_2 - H_2O$ 、均質 $Pu(NO_3)_4$ 水溶液及び均質 $PuO_2 \cdot UO_2 - H_2O$ の体系について、臨界安全評価コードシステム J A C S を用いて算出した。算出結果を欧米の臨界ハンドブックに記載されている値と比較し、良好な一致を示すことを確認した。

Critical Enrichment and Critical Density of Infinite Systems
for Nuclear Criticality Safety Evaluation

Yoshitaka NAITO, Takashi KOYAMA and Yuich KOMURO

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

(Received January 31, 1986)

Critical enrichment and critical density of homogenous infinite systems, such as U-H₂O, UO₂-H₂O, UO₂F₂ aqueous solution, UO₂(NO₃)₂ aqueous solution, Pu-H₂O, PuO₂-H₂O, Pu(NO₃)₄ aqueous solution and PuO₂·UO₂-H₂O, were calculated with the criticality safety evaluation computer code system JACS for nuclear criticality safety evaluation on fuel facilities. The computed results were compared with the data described in European and American criticality handbooks and showed good agreement with each other.

Keywords: Critical Enrichment, Critical density,
Homogeneous Infinite System, Criticality Safety,
JACS, Criticality Handbook

目 次

1. 目 的	1
2. 臨界条件算出方法	1
3. 無限体系の臨界条件	3
4. 検 討	4
謝 辞	5
参考文献	5
付録 図表集	29

Contents

1. Purpose	1
2. Method for criticality condition calculation	1
3. Criticality condition of infinite systems	3
4. Discussion	4
Acknowledgement	5
References	5
Appendix Collection of figures and tables	29

1. 目 的

核燃料物質中の核分裂性物質の濃縮度又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。このある値を無限体系の臨界条件とよぶこととする。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極限値を臨界濃縮度といい、また、濃度以外の他の条件がいかなる場合でも臨界とならない濃度の極限値を臨界濃度という。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条件を知ることは、臨界管理を非常に容易にする場合が多い。このため、欧米の臨界ハンドブック^{1), 2), 3), 4)}には臨界濃縮度及び臨界濃度の値が記載されている。しかし、欧米の臨界ハンドブックでは、記載されている核燃料物質の種類は少なく、また臨界濃縮度及び臨界濃度のみが記載されており、減速材の変化に伴う臨界となる条件の変化については示されていない。

本報告書では、欧米の臨界ハンドブックに記載されていない核燃料物質についても臨界となる条件を求めて記すとともに、臨界条件の一つの極限値である臨界濃縮度及び臨界濃度について欧米の臨界ハンドブック記載値と比較する。

2. 臨界条件算出方法

無限体系の臨界条件を臨界安全性評価コードシステム J A C S に収納されている多群定数ライブラリ M G C L⁵⁾、巨視的断面積作成コード M A I L⁵⁾、及び簡易臨界計算コード S I M C R I⁶⁾を使い、次の手順で算出した。J A C S⁷⁾の計算の流れを図 1 に示す。

初めに化学形態、濃度等を与えて原子個数密度を算出する。U-H₂O 系についてウラン濃度と H/U の関係を図 2 に示す（他の化学形態については付録参照）。次に M A I L を用いて 137 群 300 K M G C L と原子個数密度から巨視的断面積セットを作成する。この断面積セットを S I M C R I に入力して無限増倍率を計算する。U-H₂O 系についての計算結果を図 3 に示す（他の化学形態については付録参照）。これより臨界増倍率、臨界制限増倍率に対応する濃縮度及び濃度を算出する。

臨界増倍率とは、計算された中性子増倍率がその値であれば系は臨界であると判断される値であり、臨界制限増倍率とは、計算された中性子増倍率がその値以下であれば系は未臨界であると判断される値である。これらの値は、臨界計算に使用する計算コードの精度を評価することにより定められる。

臨界増倍率としては、J A C S の計算誤差評価表（表 1 参照）の値を用いる。また参考のために臨界増倍率を $K_{\infty} = 1.0$ とした場合についても計算する。無限均質体系の計算においては、中性子の空間分布の計算に係る誤差を考慮しなくてもよいこと及び、現実には無限体系が存在しないことを勘案して表 1 に示す値より臨界制限増倍率として 1.0 に近い値 $K_{\infty} = 0.98$ を用いる。

1. 目 的

核燃料物質中の核分裂性物質の濃縮度又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。このある値を無限体系の臨界条件とよぶこととする。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極限値を臨界濃縮度といい、また、濃度以外の他の条件がいかなる場合でも臨界とならない濃度の極限値を臨界濃度という。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条件を知ることは、臨界管理を非常に容易にする場合が多い。このため、欧米の臨界ハンドブック^{1), 2), 3), 4)}には臨界濃縮度及び臨界濃度の値が記載されている。しかし、欧米の臨界ハンドブックでは、記載されている核燃料物質の種類は少なく、また臨界濃縮度及び臨界濃度のみが記載されており、減速材の変化に伴う臨界となる条件の変化については示されていない。

本報告書では、欧米の臨界ハンドブックに記載されていない核燃料物質についても臨界となる条件を求めて記すとともに、臨界条件の一つの極限値である臨界濃縮度及び臨界濃度について欧米の臨界ハンドブック記載値と比較する。

2. 臨界条件算出方法

無限体系の臨界条件を臨界安全性評価コードシステム J A C S に収納されている多群定数ライブラリ M G C L⁵⁾、巨視的断面積作成コード M A I L⁵⁾、及び簡易臨界計算コード S I M C R I⁶⁾を使い、次の手順で算出した。J A C S⁷⁾ の計算の流れを図 1 に示す。

初めに化学形態、濃度等を与えて原子個数密度を算出する。U-H₂O 系についてウラン濃度と H / U の関係を図 2 に示す（他の化学形態については付録参照）。次に M A I L を用いて 137 群 300 K M G C L と原子個数密度から巨視的断面積セットを作成する。この断面積セットを S I M C R I に入力して無限増倍率を計算する。U-H₂O 系についての計算結果を図 3 に示す（他の化学形態については付録参照）。これより臨界増倍率、臨界制限増倍率に対応する濃縮度及び濃度を算出する。

臨界増倍率とは、計算された中性子増倍率がその値であれば系は臨界であると判断される値であり、臨界制限増倍率とは、計算された中性子増倍率がその値以下であれば系は未臨界であると判断される値である。これらの値は、臨界計算に使用する計算コードの精度を評価することにより定められる。

臨界増倍率としては、J A C S の計算誤差評価表（表 1 参照）の値を用いる。また参考のために臨界増倍率を $K_{\infty} = 1.0$ とした場合についても計算する。無限均質体系の計算においては、中性子の空間分布の計算に係る誤差を考慮しなくてもよいこと及び、現実には無限体系が存在しないことを勘案して表 1 に示す値より臨界制限増倍率として 1.0 に近い値 $K_{\infty} = 0.98$ を用いる。

濃縮度以外の他の条件がいかなる場合でも臨界増倍率以上にならない濃縮度の極限値を臨界濃縮度といい、臨界制限増倍率以上にならない濃縮度の極限値を臨界制限濃縮度という。同様に臨界濃度及び臨界制限濃度を定義する。

3. 無限体系の臨界条件

臨界安全評価コードシステム J A C S を用いて算出した無限体系の臨界条件を以下に示す。計算した核燃料の形態は均質 U-H₂O, 均質 UO₂-H₂O, 均質 UO₂F₂ 水溶液, 均質 UO₂(NO₃)₂ 水溶液, 均質 Pu-H₂O, 均質 PuO₂-H₂O, 均質 Pu(NO₃)₄ 水溶液, 均質 PuO₂·UO₂-H₂O の 8 種類である。

図 4 は、均質 U-H₂O の無限体系について H/U 原子個数比に対する臨界及び未臨界となる濃縮度の領域を示す。

図 5 は、均質 UO₂-H₂O の無限体系について各 H/U 原子個数比に対する臨界及び未臨界となる濃縮度の領域を示す。

図 6 は、均質 UO₂F₂ 水溶液の無限体系について各 H/U 原子個数比に対する臨界及び未臨界となる濃縮度の領域を示す。

図 7 は、均質 UO₂(NO₃)₂ 水溶液の無限体系について各 H/U 原子個数比に対する臨界及び未臨界となる濃縮度の領域を示す。

図 8 は、均質 Pu-H₂O の無限体系について各 H/Pu 原子個数比に対する臨界及び未臨界となる²³⁹Pu/Pu の領域を示す。

図 9 は、均質 PuO₂-H₂O の無限体系について各 H/Pu 原子個数比に対する臨界及び未臨界となる²³⁹Pu/Pu の領域を示す。

図 10 は、均質 Pu(NO₃)₄ 水溶液の無限体系について各 H/Pu 原子個数比に対する臨界及び未臨界となる²³⁹Pu/Pu の領域を示す。

図 11 は、均質 PuO₂·UO₂-H₂O (²³⁹Pu/Pu = 100 Wt %, ウラン濃縮度 = 天然ウラン相当) の無限体系について各 H/(U+Pu) 原子個数比に対する臨界及び未臨界となるプルトニウム富化度 (PuO₂ / (PuO₂ + UO₂) 重量比) の領域を示す。

表 2 及び表 3 は、図 4 ~ 図 7 において濃縮度の最小値を示したものである。この表より下記のことがわかる。

- (1) 均質 U-H₂O の無限体系について、臨界濃縮度は 0.89 Wt % で、臨界制限濃縮度は 0.88 Wt % である。
- (2) 均質 UO₂-H₂O の無限体系について、臨界濃縮度は 0.93 Wt % で、臨界制限濃縮度は 0.91 Wt % である。
- (3) 均質 UO₂F₂ 水溶液の無限体系について、臨界濃縮度は 0.97 Wt % で、臨界制限濃縮度は 0.95 Wt % である。
- (4) 均質 UO₂(NO₃)₂ 水溶液の無限体系について、臨界濃縮度は 2.05 Wt % で、臨界制限濃縮度は 1.90 Wt % である。

濃縮度以外の他の条件がいかなる場合でも臨界増倍率以上にならない濃縮度の極限値を臨界濃縮度といい、臨界制限増倍率以上にならない濃縮度の極限値を臨界制限濃縮度という。同様に臨界濃度及び臨界制限濃度を定義する。

3. 無限体系の臨界条件

臨界安全評価コードシステム J A C S を用いて算出した無限体系の臨界条件を以下に示す。計算した核燃料の形態は均質 U-H₂O, 均質 UO₂-H₂O, 均質 UO₂F₂ 水溶液, 均質 UO₂(NO₃)₂ 水溶液, 均質 Pu-H₂O, 均質 PuO₂-H₂O, 均質 Pu(NO₃)₄ 水溶液, 均質 PuO₂·UO₂-H₂O の 8 種類である。

図 4 は、均質 U-H₂O の無限体系について H/U 原子個数比に対する臨界及び未臨界となる濃縮度の領域を示す。

図 5 は、均質 UO₂-H₂O の無限体系について各 H/U 原子個数比に対する臨界及び未臨界となる濃縮度の領域を示す。

図 6 は、均質 UO₂F₂ 水溶液の無限体系について各 H/U 原子個数比に対する臨界及び未臨界となる濃縮度の領域を示す。

図 7 は、均質 UO₂(NO₃)₂ 水溶液の無限体系について各 H/U 原子個数比に対する臨界及び未臨界となる濃縮度の領域を示す。

図 8 は、均質 Pu-H₂O の無限体系について各 H/Pu 原子個数比に対する臨界及び未臨界となる²³⁹Pu/Pu の領域を示す。

図 9 は、均質 PuO₂-H₂O の無限体系について各 H/Pu 原子個数比に対する臨界及び未臨界となる²³⁹Pu/Pu の領域を示す。

図 10 は、均質 Pu(NO₃)₄ 水溶液の無限体系について各 H/Pu 原子個数比に対する臨界及び未臨界となる²³⁹Pu/Pu の領域を示す。

図 11 は、均質 PuO₂·UO₂-H₂O (²³⁹Pu/Pu = 100 Wt %, ウラン濃縮度=天然ウラン相当) の無限体系について各 H/(U+Pu) 原子個数比に対する臨界及び未臨界となるプルトニウム富化度 (PuO₂ / (PuO₂ + UO₂) 重量比) の領域を示す。

表 2 及び表 3 は、図 4 ~ 図 7 において濃縮度の最小値を示したものである。この表より下記のことがわかる。

- (1) 均質 U-H₂O の無限体系について、臨界濃縮度は 0.89 Wt %で、臨界制限濃縮度は 0.88 Wt %である。
- (2) 均質 UO₂-H₂O の無限体系について、臨界濃縮度は 0.93 Wt %で、臨界制限濃縮度は 0.91 Wt %である。
- (3) 均質 UO₂F₂ 水溶液の無限体系について、臨界濃縮度は 0.97 Wt %で、臨界制限濃縮度は 0.95 Wt %である。
- (4) 均質 UO₂(NO₃)₂ 水溶液の無限体系について、臨界濃縮度は 2.05 Wt %で、臨界制限濃縮度は 1.90 Wt %である。

表4は、図11においてプルトニウム富化度の最小値を示したものである。この表より下記のことがわかる。

- (1) 均質 $\text{PuO}_2 \cdot \text{UO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ ($^{239}\text{Pu} / \text{Pu} = 100 \text{ Wt \%}$, ウラン濃縮度=天然ウラン相当) の無限体系に対して臨界プルトニウム富化度は 0.14 Wt %で、臨界制限プルトニウム富化度は 0.11 Wt %である。

図12は、図4をもとに各濃縮度に対して未臨界となるウラン濃度(g/l)を示したものである。この図より下記のことがわかる。

- (1) 均質 $\text{U} - \text{H}_2\text{O}$ の無限体系に対して、臨界濃度は $11.8 \text{ g}^{235}\text{U/l}$ で、臨界制限濃度は $11.6 \text{ g}^{235}\text{U/l}$ である。

図13は、図5をもとに各濃縮度に対して未臨界となるウラン濃度(g/l)を示したものである。この図より下記のことがわかる。

- (1) 均質 $\text{UO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ の無限体系に対して、臨界濃度は $11.7 \text{ g}^{235}\text{U/l}$ で、臨界制限濃度は $11.5 \text{ g}^{235}\text{U/l}$ である。

図14は、図6をもとに各濃縮度に対して未臨界となるウラン濃度(g/l)を示したものである。この図より下記のことがわかる。

- (1) 均質 UO_2F_2 水溶液の無限体系に対して、臨界濃度は $12.2 \text{ g}^{235}\text{U/l}$ で、臨界制限濃度は $12.0 \text{ g}^{235}\text{U/l}$ である。

図15は、図7をもとに各濃縮度に対して未臨界となるウラン濃度(g/l)を示したものである。この図より下記のことがわかる。

図16は、図8をもとに各 $^{239}\text{Pu} / \text{Pu}$ に対して未臨界となるプルトニウム濃度(g/l)を示したものである。この図より下記のことがわかる。

- (1) 均質 $\text{Pu} - \text{H}_2\text{O}$ の無限体系に対して、臨界濃度は $7.4 \text{ g}^{239}\text{Pu/l}$ で、臨界制限濃度は $7.0 \text{ g}^{239}\text{Pu/l}$ である。

図17は、図9をもとに各 $^{239}\text{Pu} / \text{Pu}$ に対して未臨界となるプルトニウム濃度(g/l)を示したものである。この図より下記のことがわかる。

- (1) 均質 $\text{PuO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ の無限体系に対して、臨界濃度は $7.5 \text{ g}^{239}\text{Pu/l}$ で、臨界制限濃度は $7.0 \text{ g}^{239}\text{Pu/l}$ である。

図18は、図10をもとに各 $^{239}\text{Pu} / \text{Pu}$ に対して未臨界となるプルトニウム濃度(g/l)を示したものである。この図より下記のことがわかる。

- (1) 均質 $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ 水溶液の無限体系に対して、臨界濃度は $7.5 \text{ g}^{239}\text{Pu/l}$ で、臨界制限濃度は $7.0 \text{ g}^{239}\text{Pu/l}$ である。

以上の結果をまとめて各化学形態の燃料に対する臨界濃度及び臨界制限濃度を表5に示す。

図19は、図11をもとに各プルトニウム富化度に対して未臨界となる(ウラン+プルトニウム)濃度(g/l)を示したものである。

図20は、図4、図5をもとに各濃縮度に対して未臨界となる H/U 原子個数比を示したものである。この図より下記のことがわかる。

- (1) 均質 $\text{U} - \text{H}_2\text{O}$ の無限体系に対して濃縮度 5 Wt %以下の範囲において、H/Uが 0.1 以下では臨界にならない。

- (2) 均質 $\text{UO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ の無限体系に対して濃縮度 6 Wt %以下の範囲において、 H/U が 0.1 以下では臨界にならない。

4. 検討

4.1 諸外国ハンドブックの値との比較

- (1) 均質 $\text{U} - \text{H}_2\text{O}$ 及び均質 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 水溶液の臨界濃縮度及び臨界制限濃縮度について、ARH - 600¹⁾ 及び TID - 7016 Rev 2³⁾ と比較した結果を表 6 及び表 7 に示す。この表より下記のことがわかる。
 $\text{U} - \text{H}_2\text{O}$ については、今回の計算結果は米国の値より小さい値を示した。 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 水溶液については、今回の計算結果は米国の値と良い一致を示している。
- (2) 均質 $\text{U} - \text{H}_2\text{O}$ 及び均質 $^{239}\text{Pu} - \text{H}_2\text{O}$ の臨界濃度について TID - 7016 Rev 1²⁾ 及び西欧ハンドブック⁴⁾の値と比較した結果を表 8 に示す。この表より、今回の計算結果は欧米のハンドブックの値と良い一致を示していることがわかる。

- (2) 均質 $\text{UO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ の無限体系に対して濃縮度 6 Wt %以下の範囲において、 H/U が 0.1 以下では臨界にならない。

4. 検討

4.1 諸外国ハンドブックの値との比較

- (1) 均質 $\text{U} - \text{H}_2\text{O}$ 及び均質 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 水溶液の臨界濃縮度及び臨界制限濃縮度について、ARH-600¹⁾ 及び TID-7016 Rev 2³⁾ と比較した結果を表 6 及び表 7 に示す。この表より下記のことがわかる。
 $\text{U} - \text{H}_2\text{O}$ については、今回の計算結果は米国の値より小さい値を示した。 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 水溶液については、今回の計算結果は米国の値と良い一致を示している。
- (2) 均質 $\text{U} - \text{H}_2\text{O}$ 及び均質 $^{239}\text{Pu} - \text{H}_2\text{O}$ の臨界濃度について TID-7016 Rev 1²⁾ 及び西欧ハンドブック⁴⁾の値と比較した結果を表 8 に示す。この表より、今回の計算結果は欧米のハンドブックの値と良い一致を示していることがわかる。

謝 辞

ここに報告した無限体系の臨界条件の値は、原研の核燃料施設安全研究委員会臨界ハンドブック専門部会の中の計算結果検討ワーキング・グループで検討していただいたもので、田仲昇一グループ・リーダーはじめグループ員に謝意を表します。また、原研燃料安全工学部三好慶典氏には原稿を詳読していただき適切な助言をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

1. R. D. Carter, G. R. Kiel, K. R. Ridgway : CRITICALITY HANDBOOK Vol II, ARH-600 (May 1969)
2. NUCLEAR SAFETY GUIPE. TID-7016, Rev 1 (1961)
3. J. T. Thomas, Editor : NUCLEAR SAFETY GUIDE, TID-7016, Rev 2 (May 1978)
4. Handbuch zur kritikalität
5. Y. Naito, et al.: MGCL - Processor, A Computer Code System for Processing Multigroup Constants Library MGCL, JAERI-M 9396 (1980)
6. S. Nakamaru, et al.: SIMCRI : A Simple Computer Code for Calculating Nuclear Criticality Parameters, JAERI-M 86-027 (1986)
7. J. Katakura, et al. : Development of the Computer Code System JACS for Criticality Safety, Tran. of the ANS Vol. 41 (1982)

表1 反射体付き単純形状体系の計算誤差評価 (JACS)

グループ名	実効増倍係数		ベンチマーク計算結果(参考)		
	推定臨界値に 対応	推定臨界下限 値に対応	標本数	標準偏差	推定臨界下限値 を下回る標本数
均質-U低濃縮	0.986	0.965	40	0.008	0
-U高濃縮	0.985	0.954	68	0.013	0
-Pu	1.008	0.980	71	0.011	0
-MOX	1.013	0.980 *1	45	0.008	0
-MIX*2	1.010	0.980	10	0.008	0
非均質-U低濃縮	0.995	0.978	88	0.007	0
-Pu	1.004	0.964	9	0.010	0
-MOX	0.997	0.980	58	0.007	0

*1 統計計算によると 0.992

*2 MIXとは、 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 - \text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ 系をいう。表2 均質 $\text{U}-\text{H}_2\text{O}$, $\text{UO}_2-\text{H}_2\text{O}$, UO_2F_2 水溶液の臨界濃縮度と臨界制限濃縮度(%)

	無限増倍率		
	0.980*	0.986**	1.0***
$\text{U}-\text{H}_2\text{O}$	0.88	0.89	0.93
$\text{UO}_2-\text{H}_2\text{O}$	0.91	0.93	0.97
UO_2F_2 水溶液	0.95	0.97	1.01

* 臨界制限増倍率

** 臨界増倍率

*** 参考

表 3 均質 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 水溶液の臨界濃縮度と臨界制限濃縮度(%)

	無限増倍率		
	0.980*	1.010**	1.0***
$\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 水溶液	1.90	2.05	2.00

* 臨界制限増倍率
** 臨界増倍率
*** 参考

表 4 均質 $\text{PuO}_2 \cdot \text{UO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ ($^{239}\text{Pu} / \text{Pu} = 100$ Wt %,
ウラン濃縮度=天然ウラン相当) の臨界プルトニウム富化度と臨界制限プルトニウム富化度(%)

	無限増倍率		
	0.980*	1.013**	1.0***
$\text{PuO}_2 \cdot \text{UO}_2 - \text{H}_2\text{O}$	0.11	0.14	0.16

* 臨界制限増倍率
** 臨界増倍率
*** 参考

表 5 各化学形態の燃料の臨界濃度及び臨界制限濃度

化 学 形 態	臨 界 濃 度 (g $^{235}\text{U} / \ell$)	臨 界 制 限 濃 度 (g $^{235}\text{U} / \ell$)
$\text{U} - \text{H}_2\text{O}$	11.8	11.6
$\text{UO}_2 - \text{H}_2\text{O}$	11.7	11.5
UO_2F_2	12.2	12.0
$\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$	12.5	11.8
	(g $^{239}\text{Pu} / \ell$)	(g $^{239}\text{Pu} / \ell$)
$\text{Pu} - \text{H}_2\text{O}$	7.4	7.0
$\text{PuO}_2 - \text{H}_2\text{O}$	7.5	7.0
$\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$	7.5	7.0

表 6 臨界濃縮度に対する諸外国ハンドブックの値と今回
の計算結果の比較

	臨 界 濃 縮 度 (^{235}U w/o)	
	$\text{U} - \text{H}_2\text{O}$	$\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$
ARH - 600	1.034	2.104
今回の計算結果	0.89	2.05

表 7 臨界制限濃縮度に対する諸外国ハンドブックの値と
今回の計算結果の比較

	臨界制限濃縮度 (^{235}U w/o)	
	$\text{UO}_2 - \text{H}_2\text{O}$	$\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$
TID - 7016 Rev, 2	0.94	1.94
今回の計算結果	0.88	1.90

表 8 臨界濃度に対する諸外国ハンドブックの値と今回の
計算結果の比較

	臨 界 濃 度	
	$^{235}\text{U}-\text{H}_2\text{O}$	$^{239}\text{Pu}-\text{H}_2\text{O}$
(g $^{235}\text{U}/\ell$)		
TID - 7016 Rev, 1	12.1	7.8
西独ハンドブック	12.1	7.6
今回の計算結果	11.8	7.4

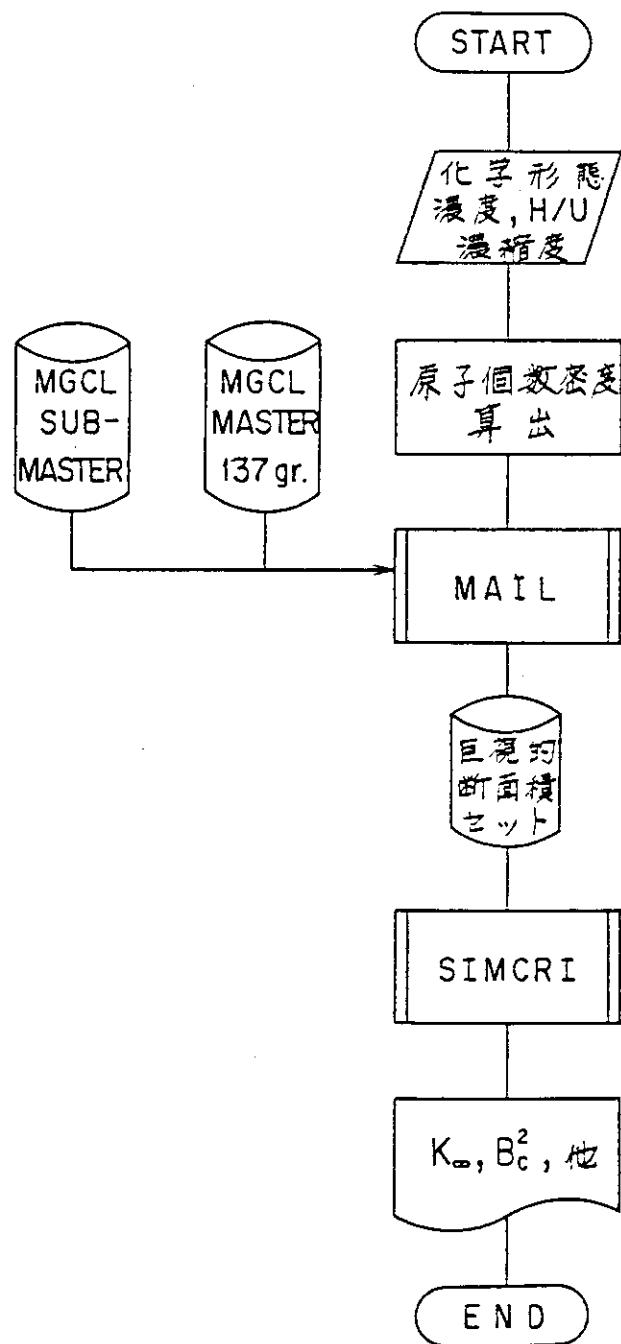


図1 JACSコードの中の簡易計算の流れ図

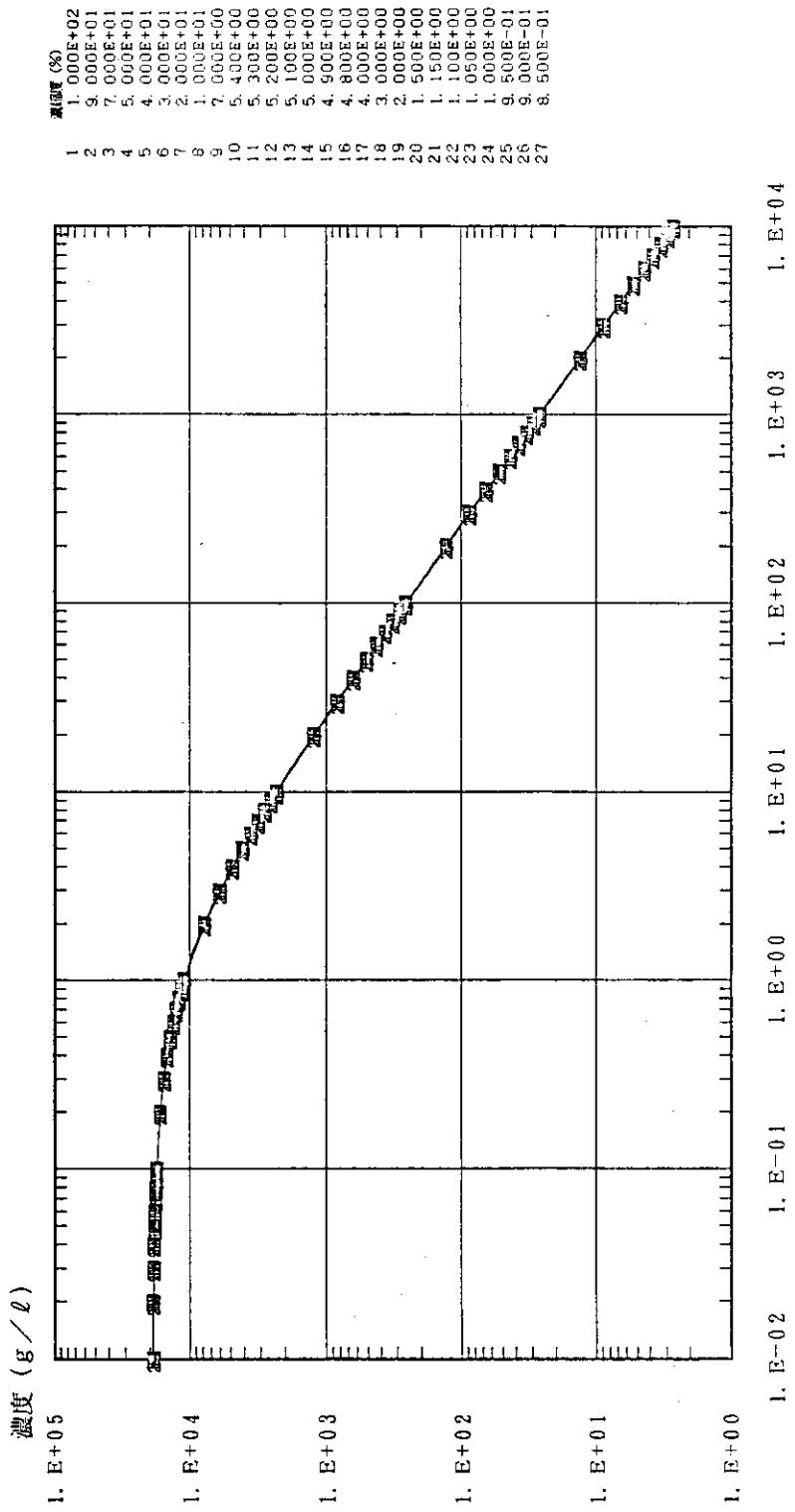
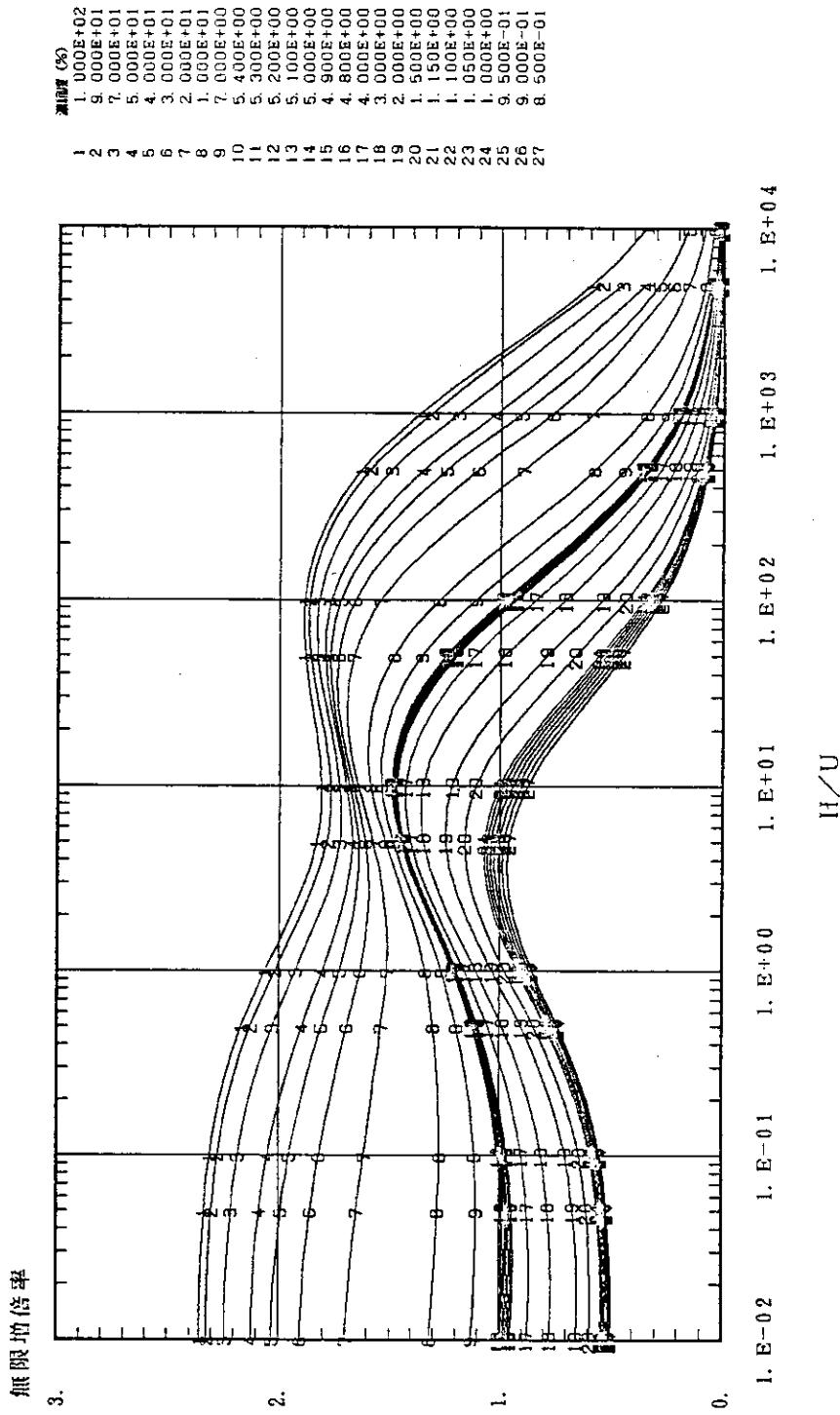
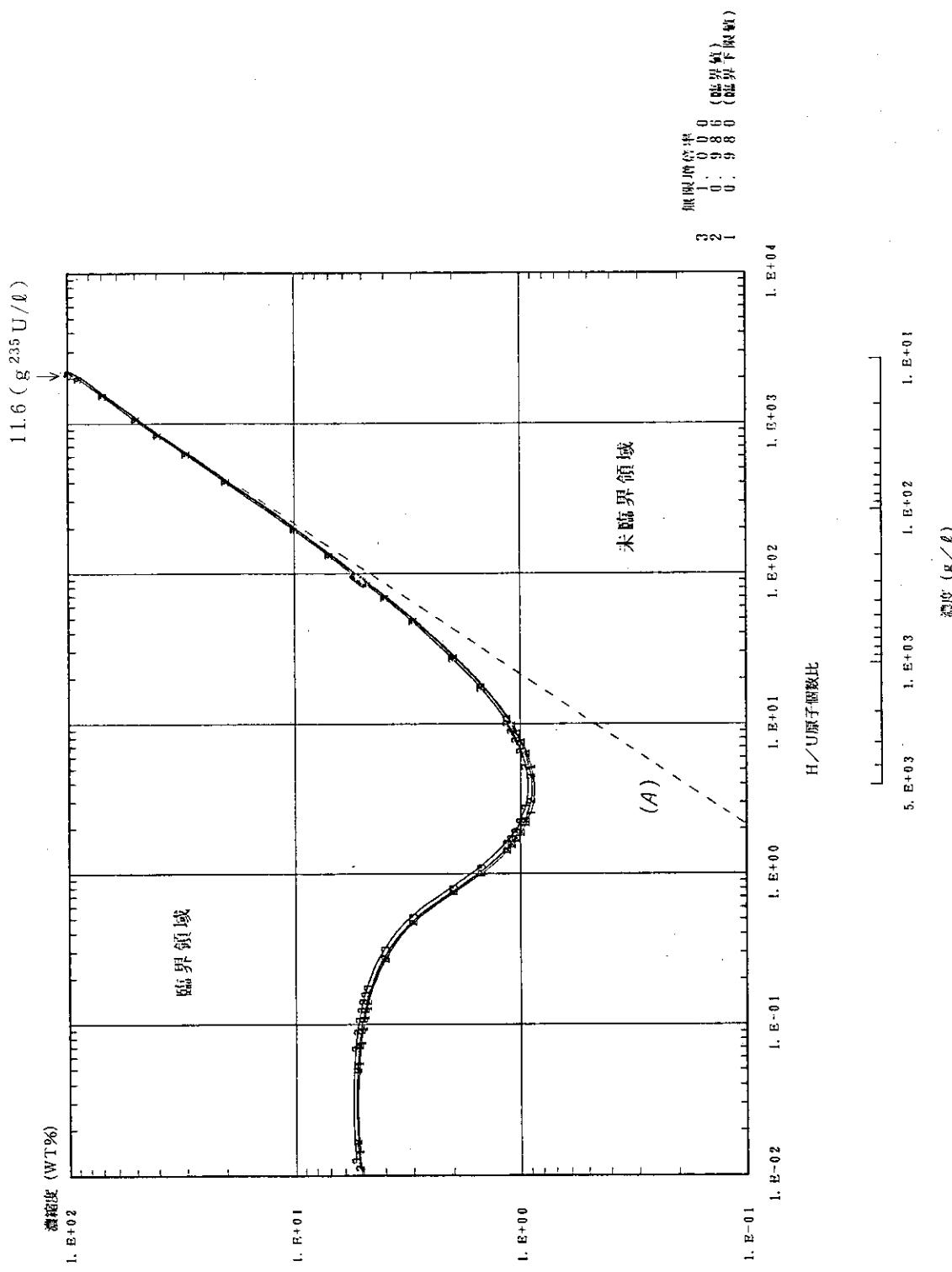
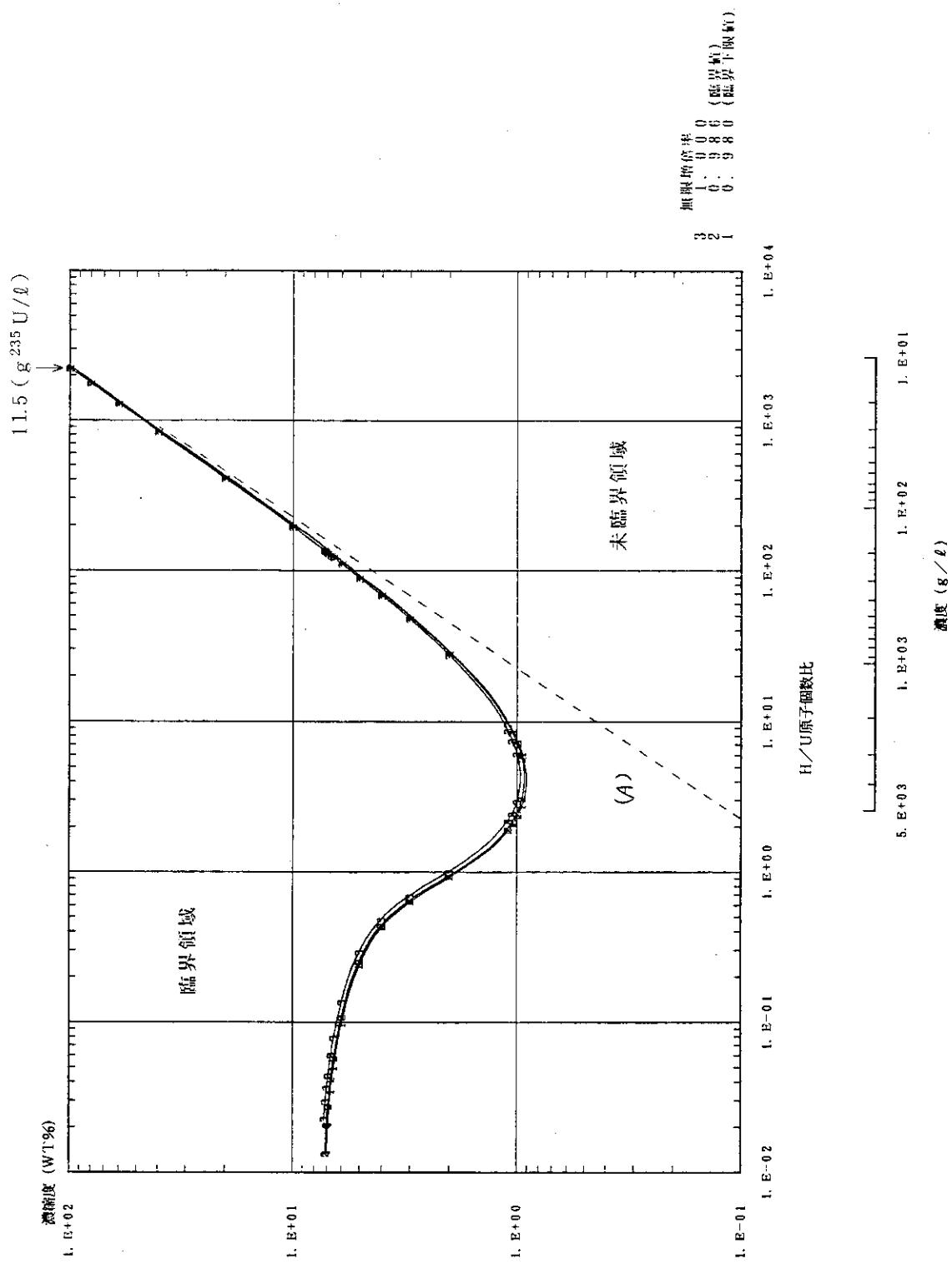


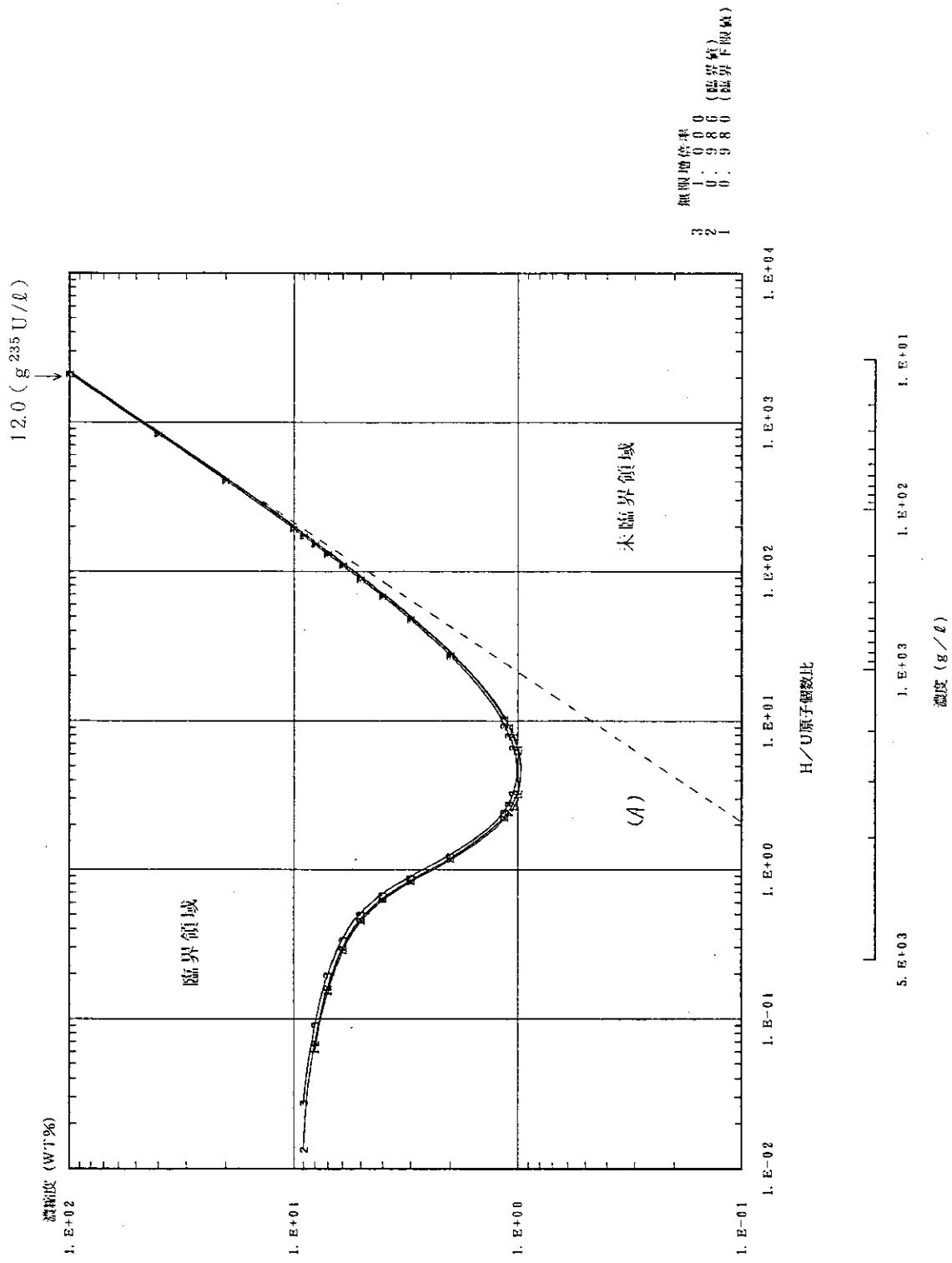
図 2 均質 $\text{U}-\text{H}_2\text{O}$ の H/U と濃度の関係

H/U

図 3 均質 U-H₂O の H/U と無限増倍率の関係







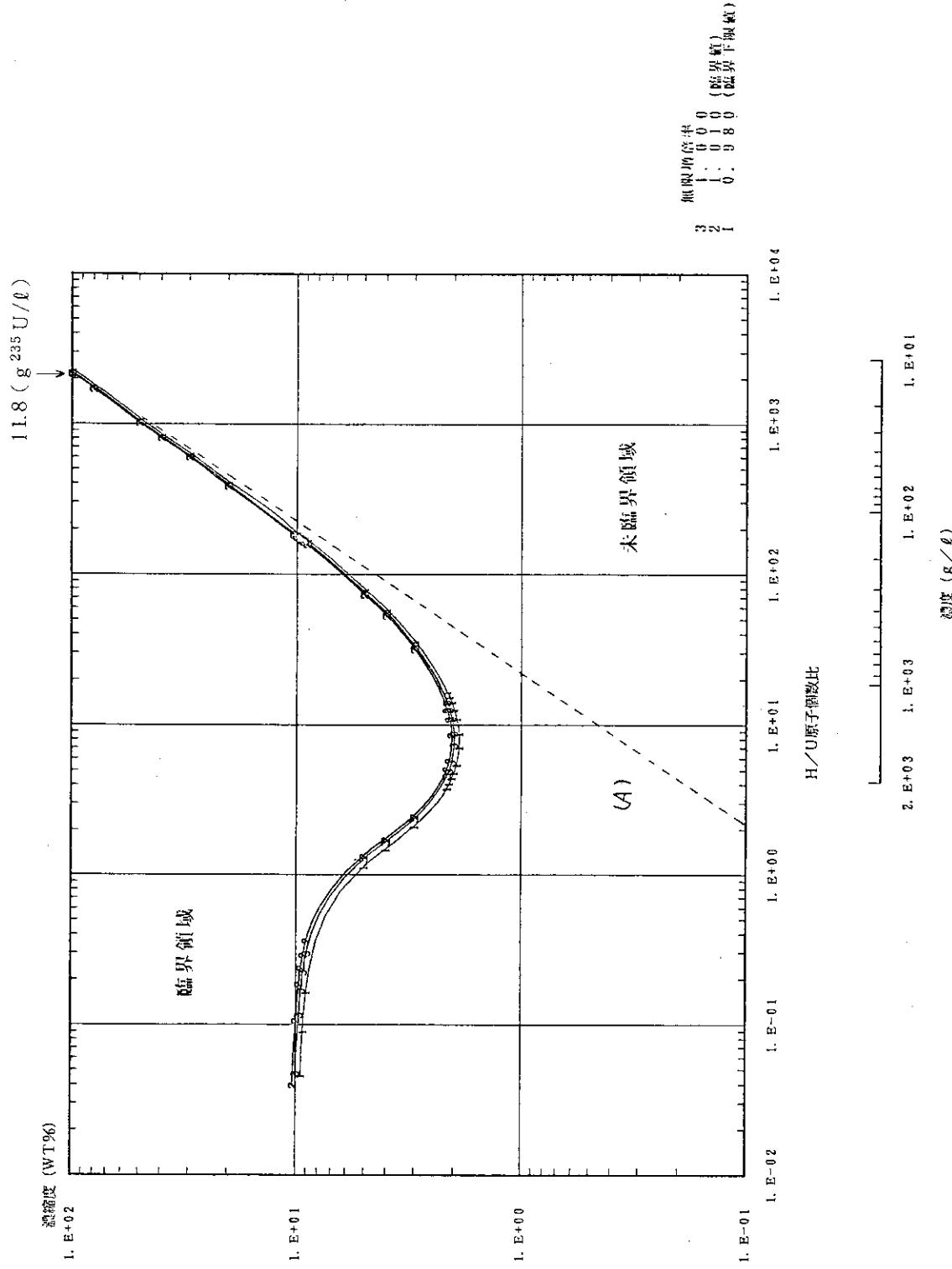


図 7 均質 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 水溶液の無限体系における未臨界領域判定図
破線(A)は ^{235}U 濃度を $11.8 \text{ g}^{235}\text{U/l}$ と一定とした場合の濃縮度に対する
 H/U 原子個数比の変化を示したものである。

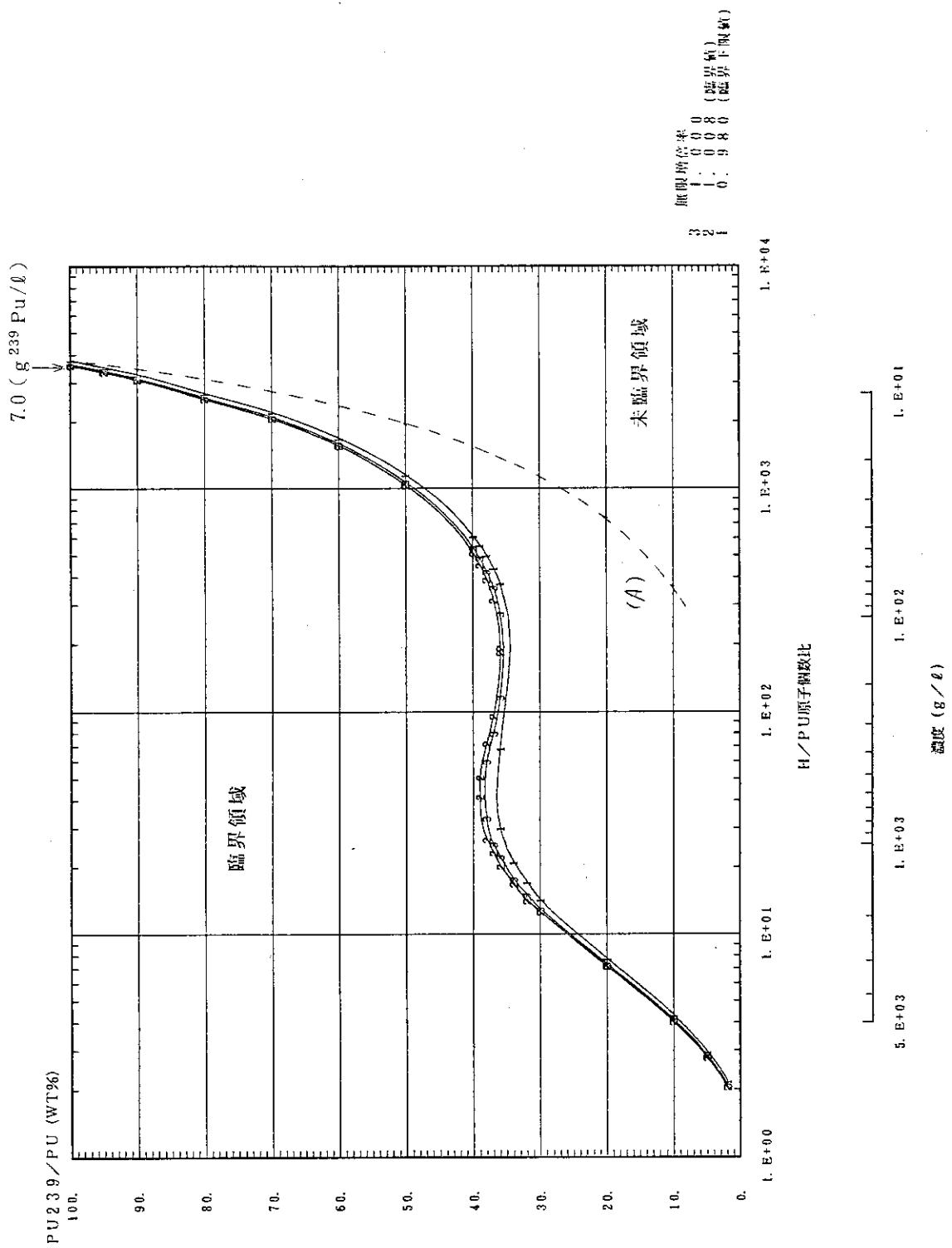


図 8 均質 Pu - H₂O の無限体系における未臨界領域判定図
破綻(A)は²³⁹Pu濃度を7.0 g²³⁹Pu/lと一定とした場合の²³⁹Pu/Pu比
に対するH/Pu原子個数比の変化を示したものである。

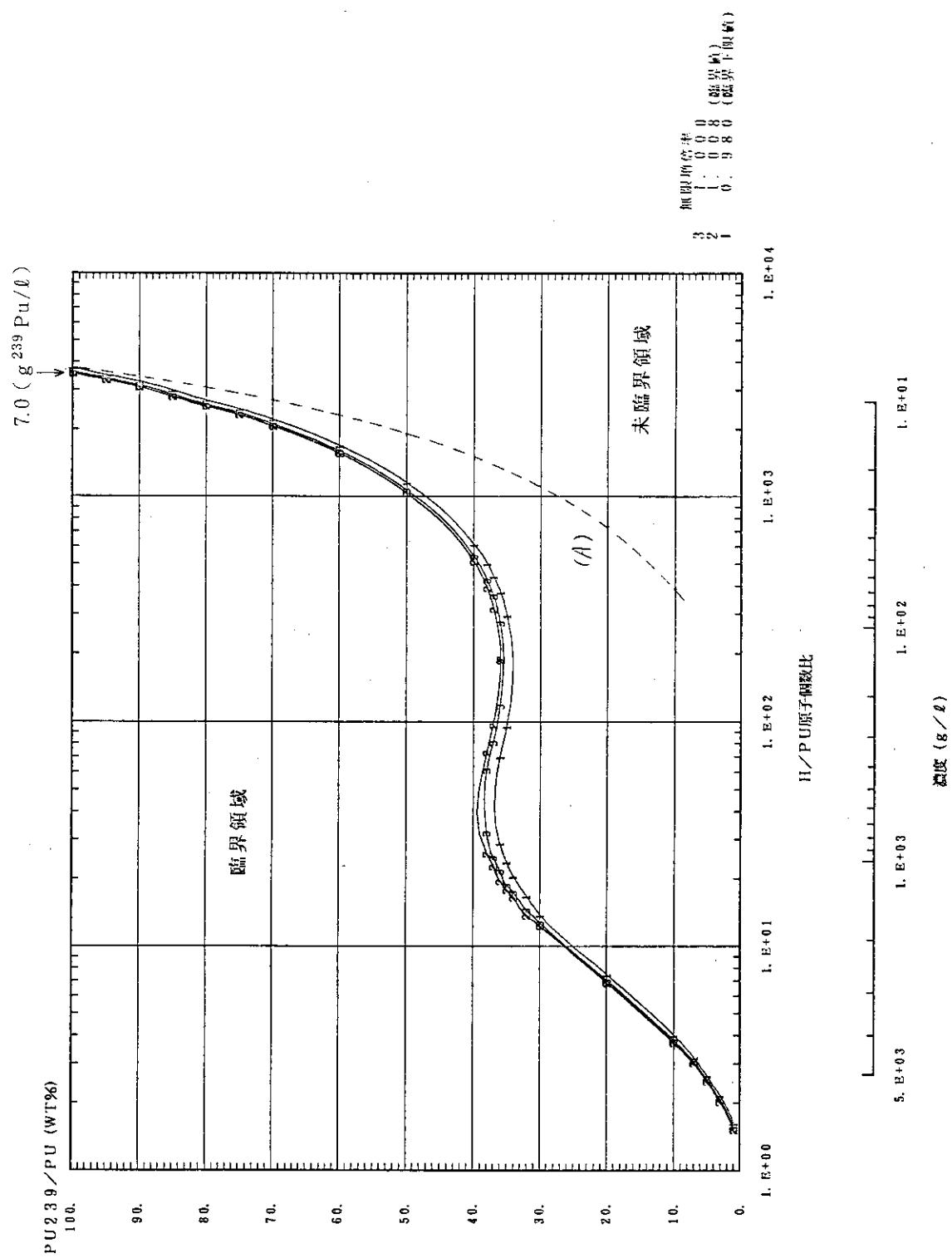


図 9 均質 $\text{PuO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ の無限体系における未臨界領域判定図
破線 (A) は $\text{Pu}^{239}/\text{Pu} / l$ と一定とした場合の $7.0 \text{ g}^{239}\text{Pu}/l$ に
対する H/Pu 原子個数比の変化を示したものである。

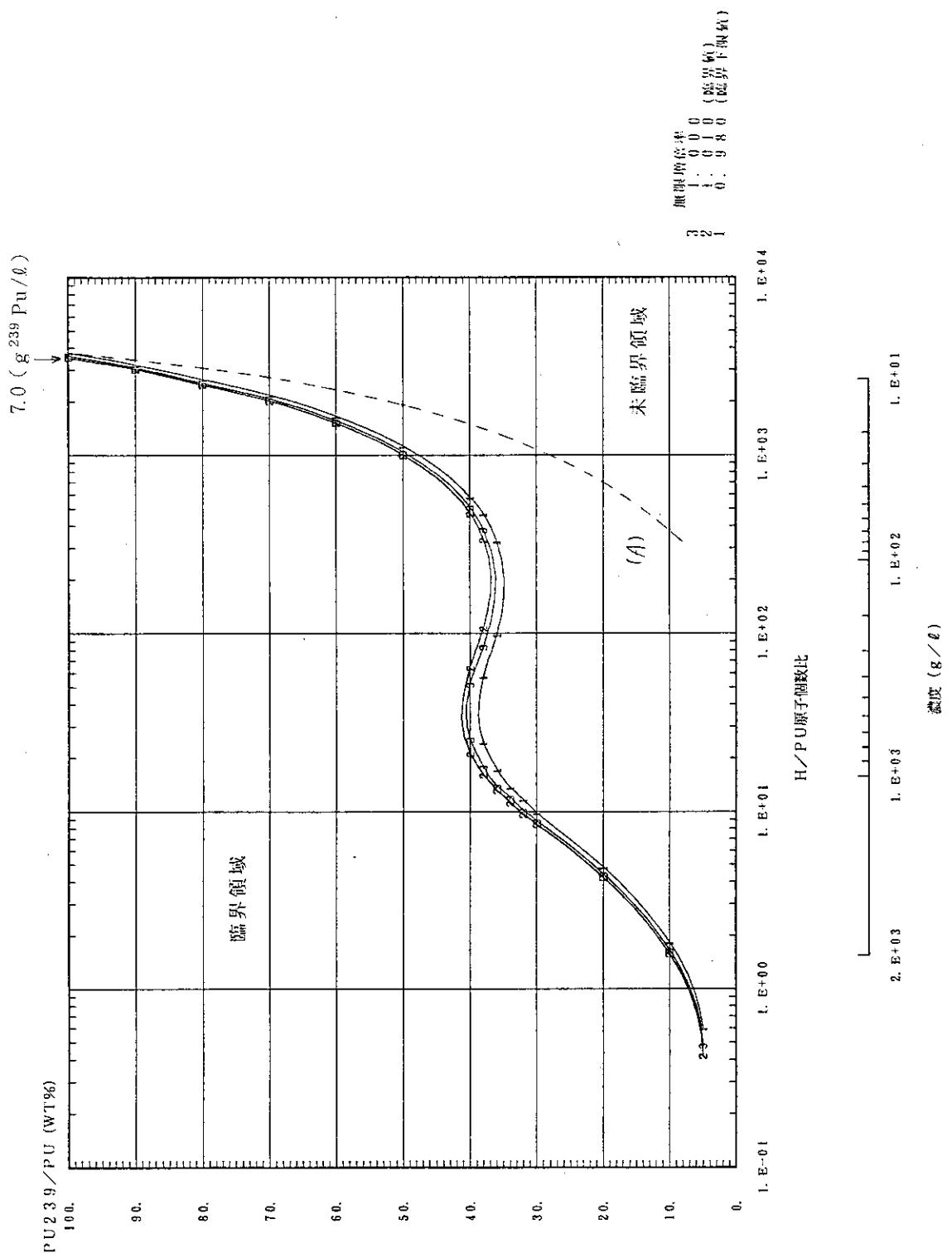


図10 均質Pu(NO₃)₄ - H₂Oの無限体系における未臨界領域判定図
破線(A)は²³⁹Pu濃度を7.0 g²³⁹Pu / ℓと一定とした場合の²³⁹Pu / Puに対するH / Pu原子個数比の変化を示したものである。

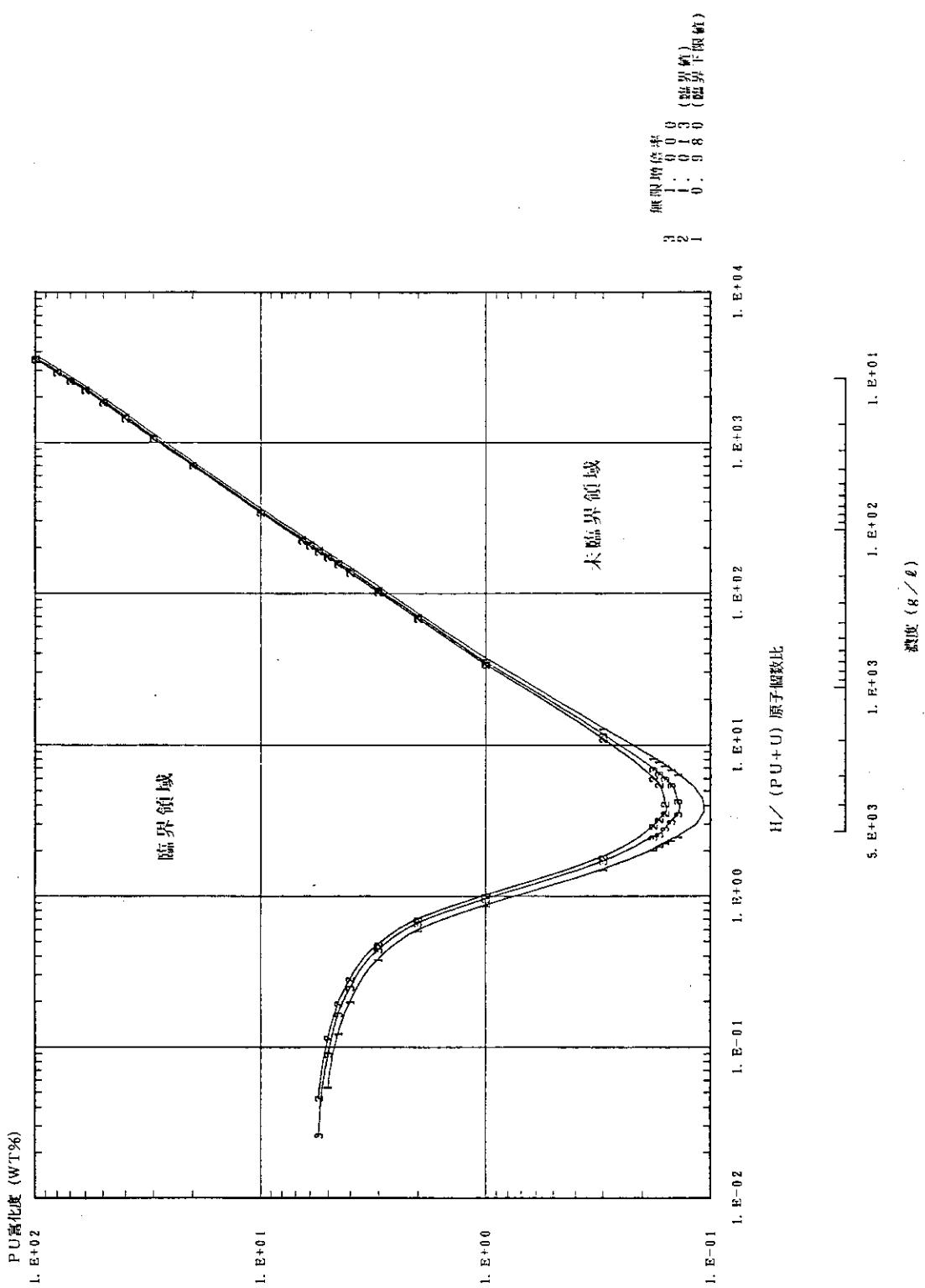


図11 均質 $PuO_2 \cdot UO_2 - H_2O$ ($^{239}Pu / Pu = 100$ WT%, ヴラン濃縮度=天然ウラン相当) の無限体系における未臨界領域判定図

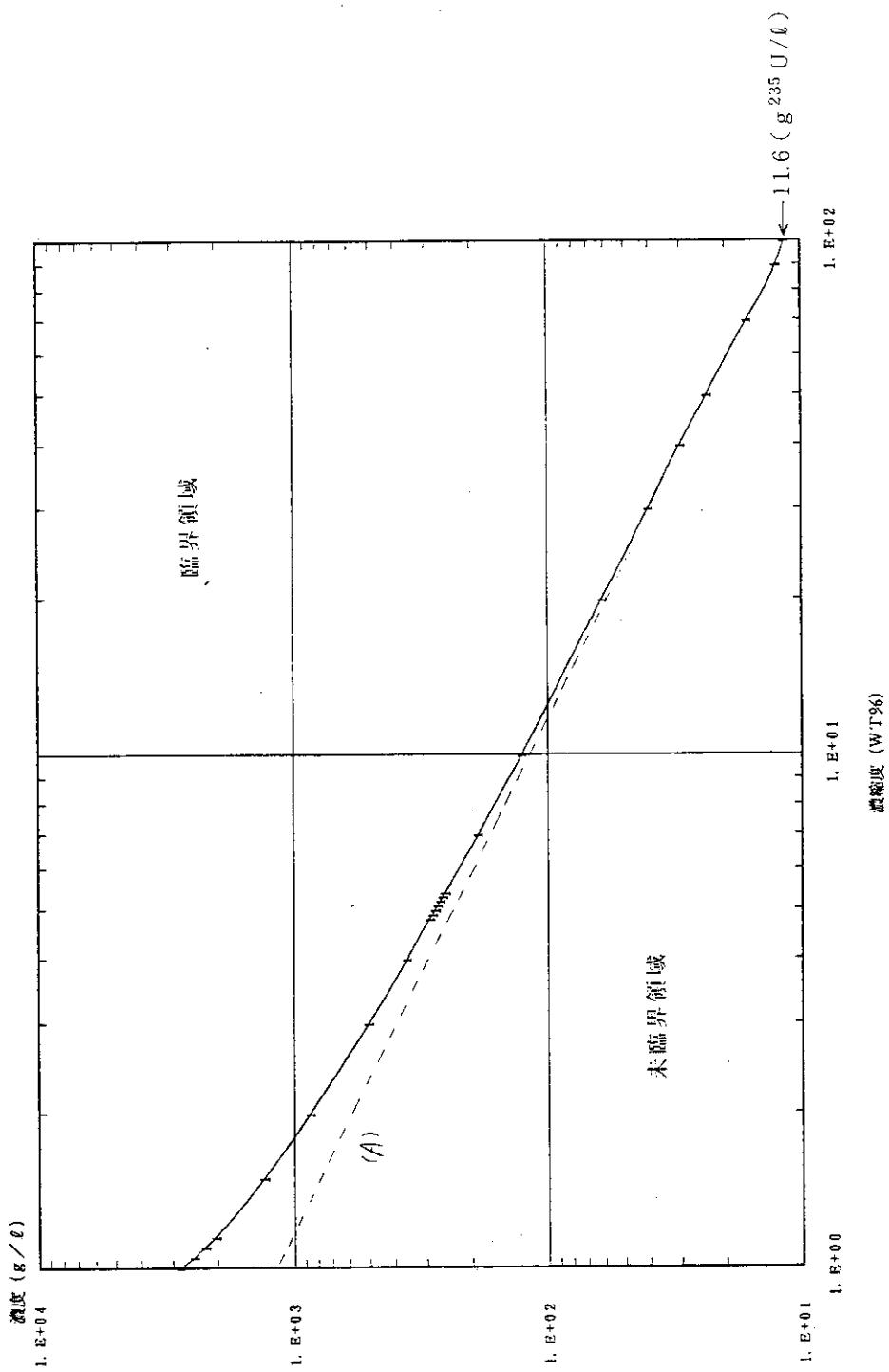


図12 均質U-H₂Oの無限体系における未臨界領域判定図
破線(A)は²³⁵U濃度を11.6 g²³⁵U/lと一定とした場合の濃縮度に対する
ウラン濃度(g/l)の変化を示したものである。

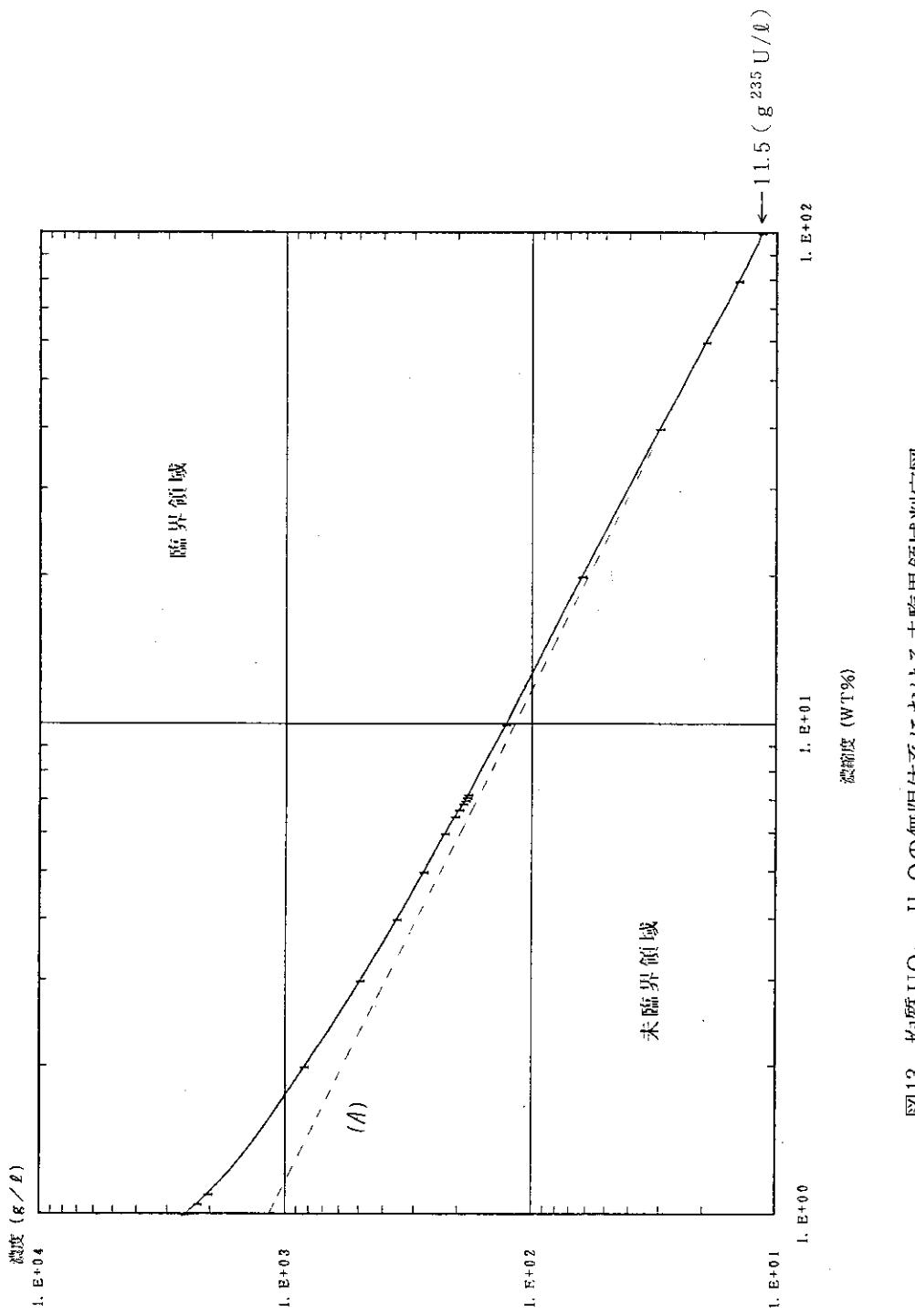


図13 均質 $\text{UO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ の無限体系における未臨界領域判定図
破線(A)は ^{235}U 濃度を $11.5 \text{ g}^{235}\text{U} / \ell$ と一定とした場合の濃縮度に対する
ウラン濃度 (g / ℓ) の変化を示したものである。

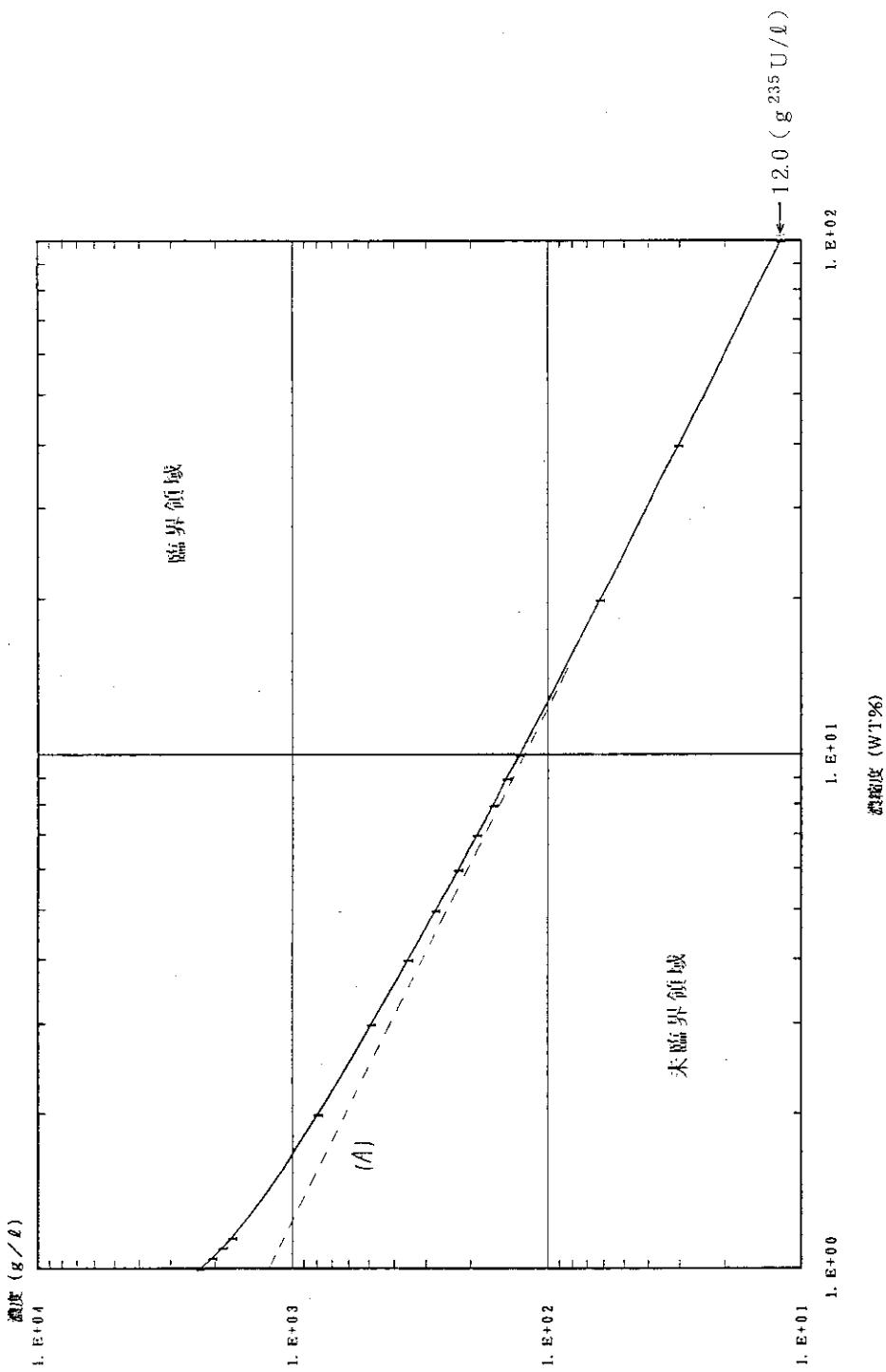
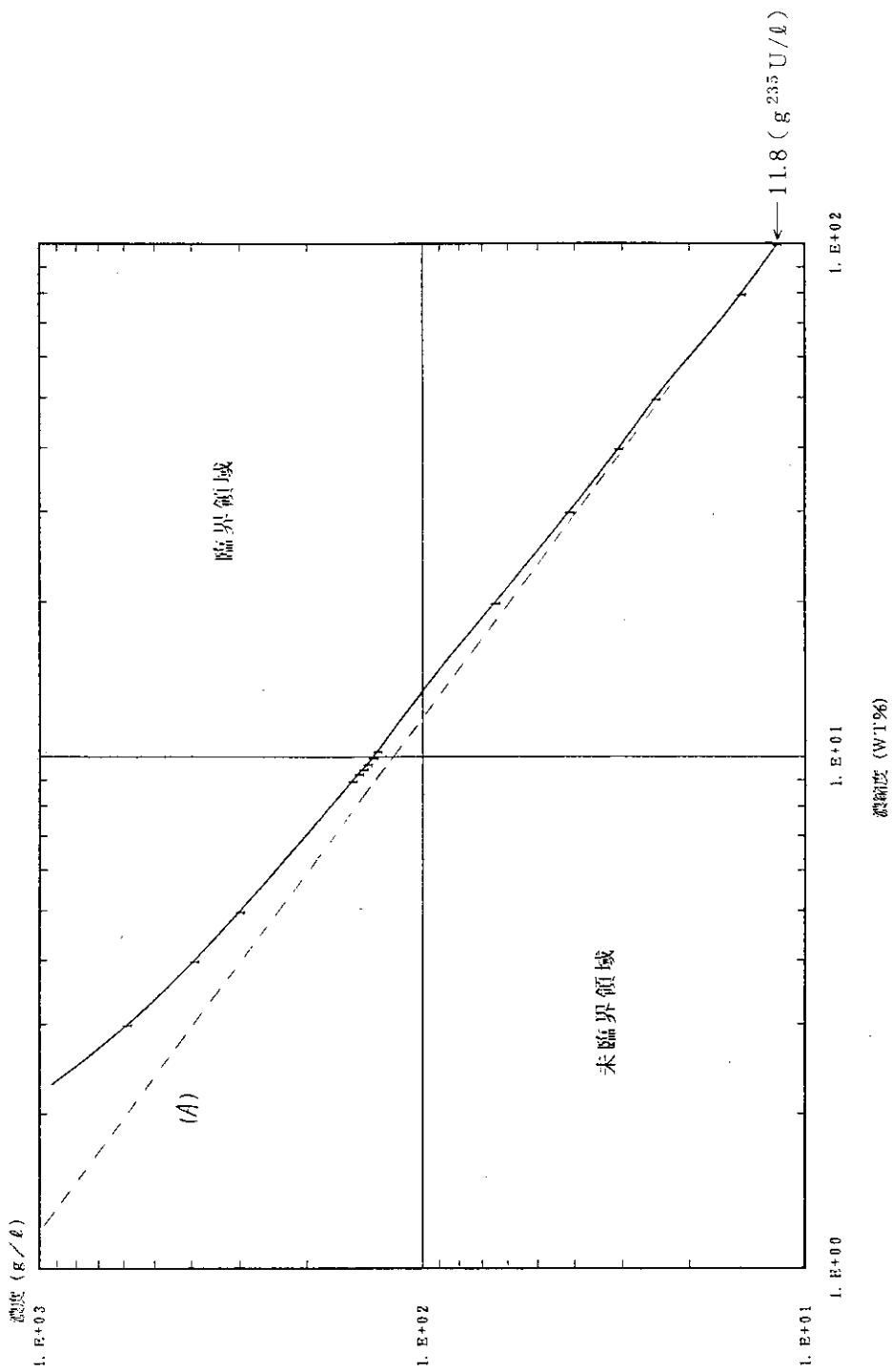


図14 均質 UO_2F_2 水溶液の無限体系における未臨界領域判定図
破線(A)は ^{235}U 濃度を $12.0 \text{ g } ^{235}\text{U} / \ell$ と一定とした場合の濃縮度に対する
ウラン濃度(g / ℓ)の変化を示したものである。



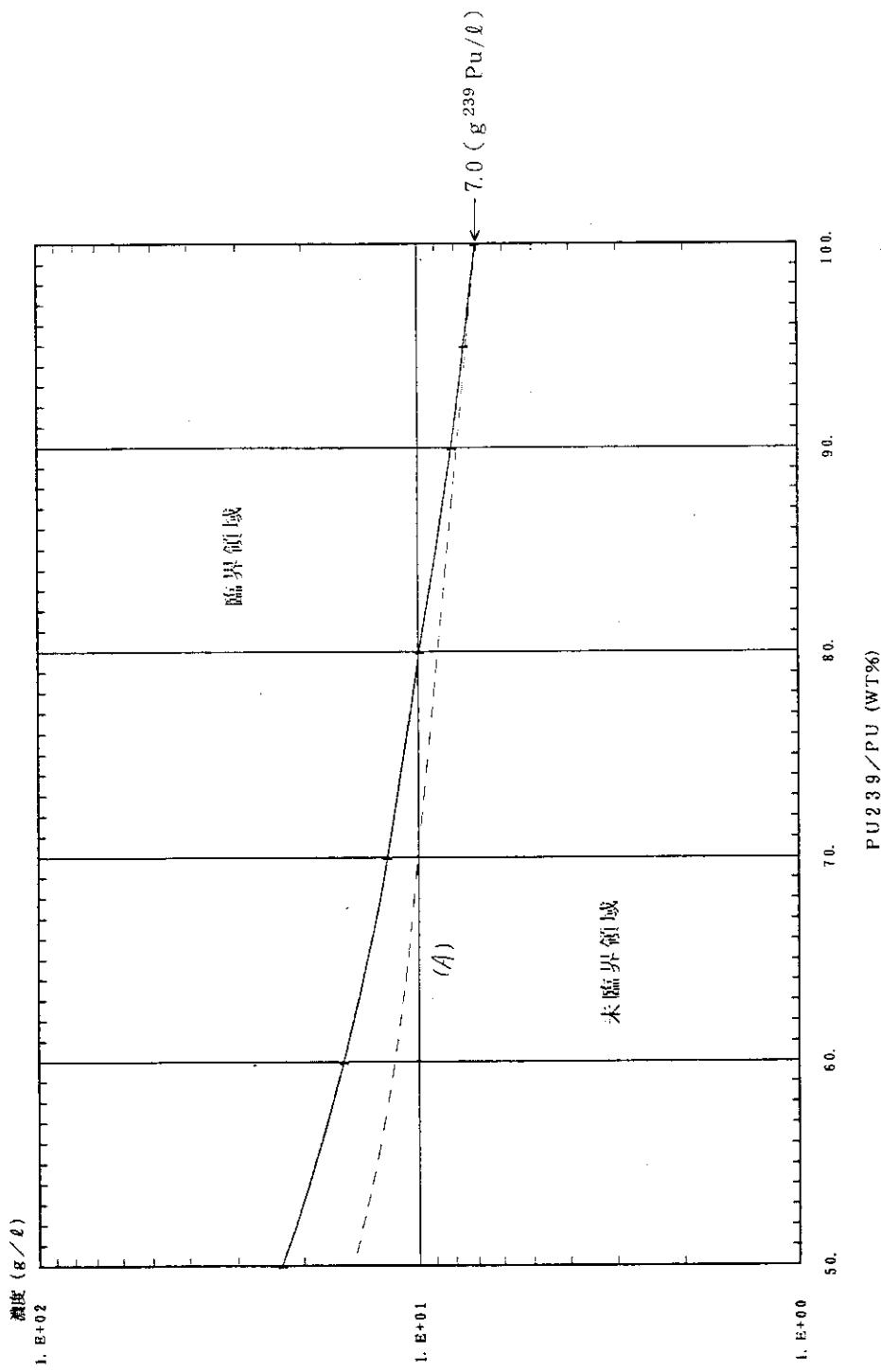
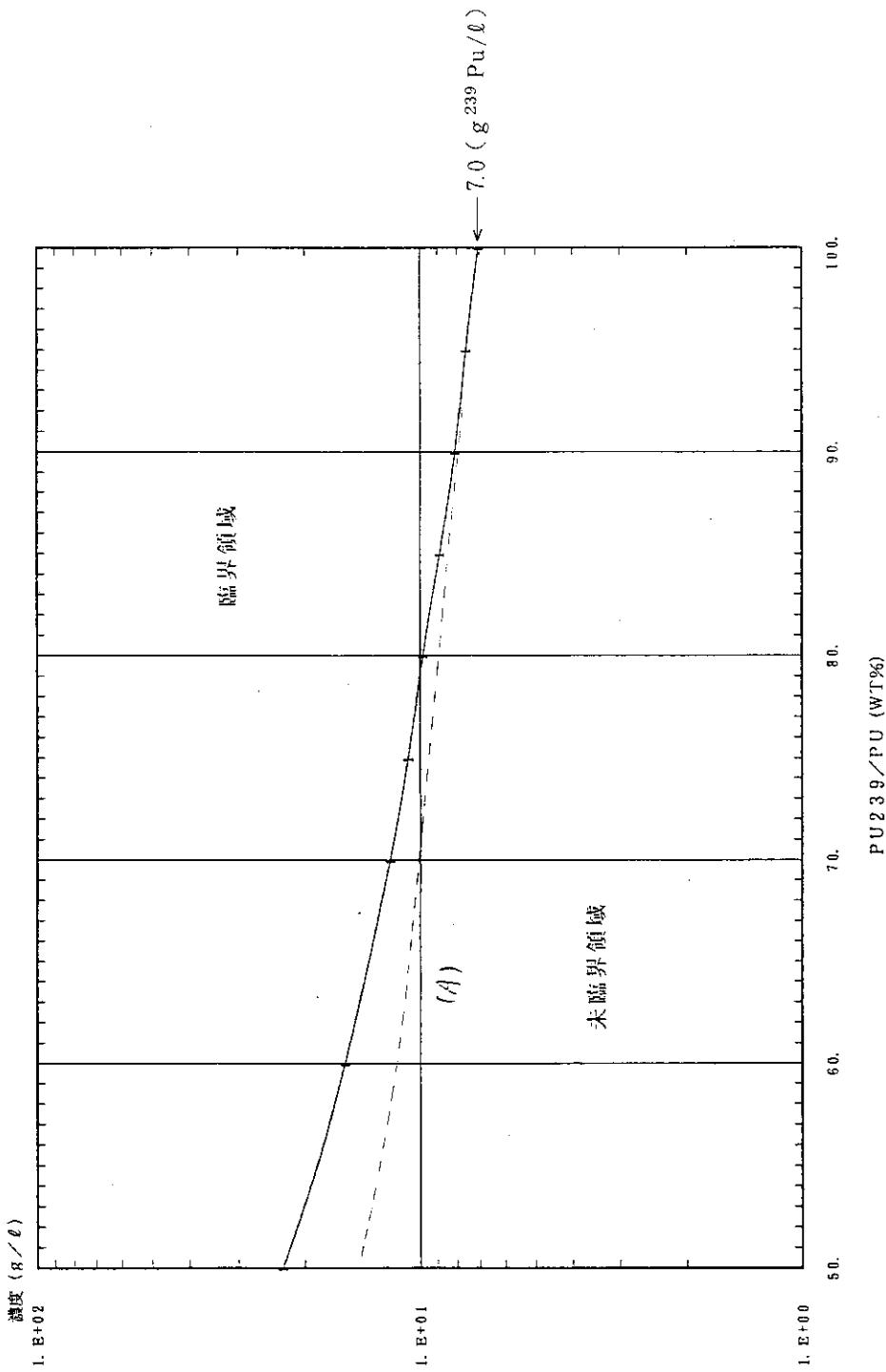


図16 均質Pu-H₂Oの無限体系における未臨界領域判定図
破線(A)は²³⁹Pu濃度を7.0 g²³⁹Pu / lと一定とした場合の²³⁹Pu / Puに対するプルトニウム濃度の変化を示したものである。



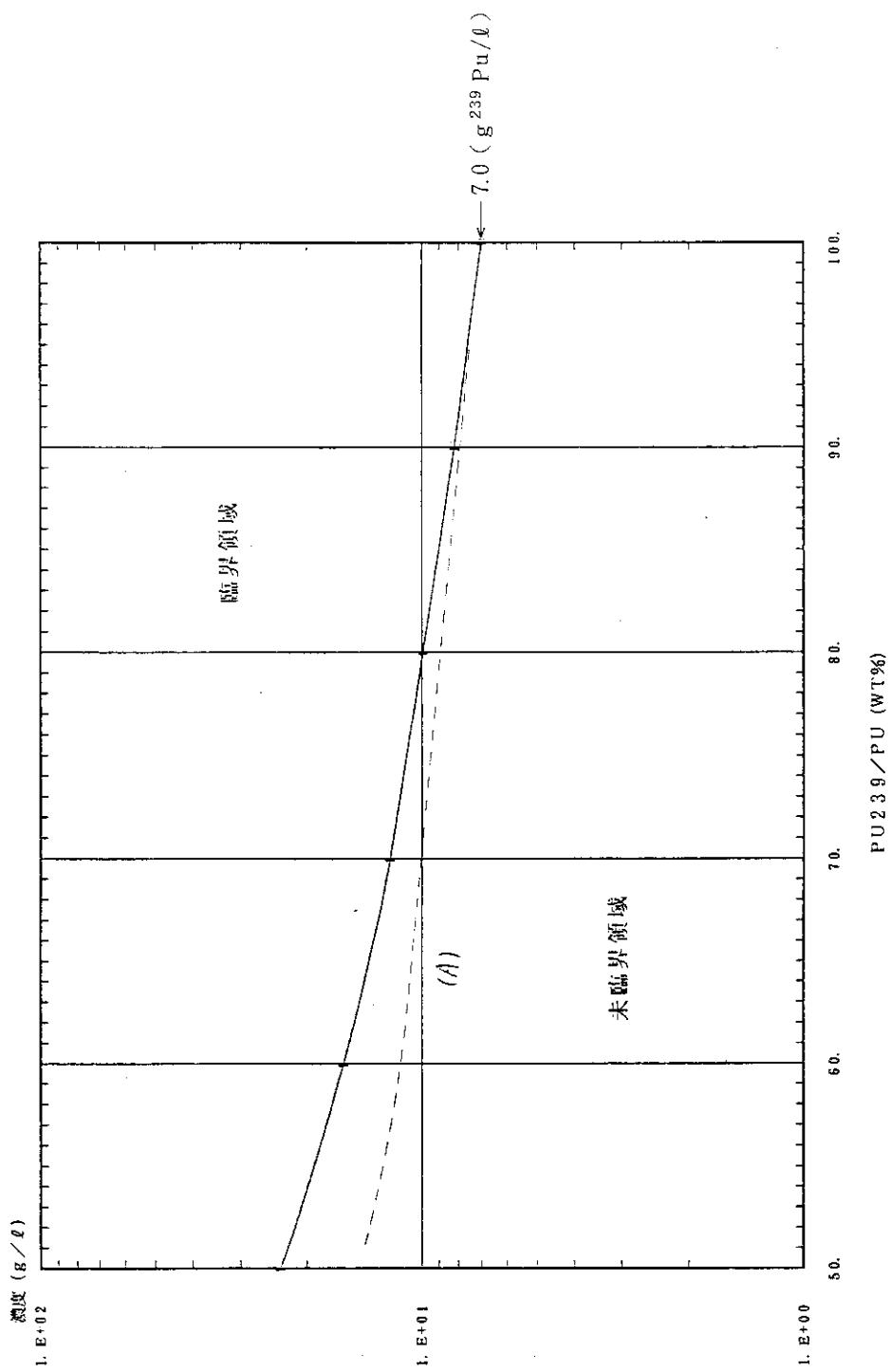


図18 均質Pu(No₃)₄水溶液の無限体系における未臨界領域判定図
破線(A)は²³⁹Pu濃度を7.0 g²³⁹Pu/lと一定とした場合の²³⁹Pu/Puに対するプルトニウム濃度の変化を示したものである。

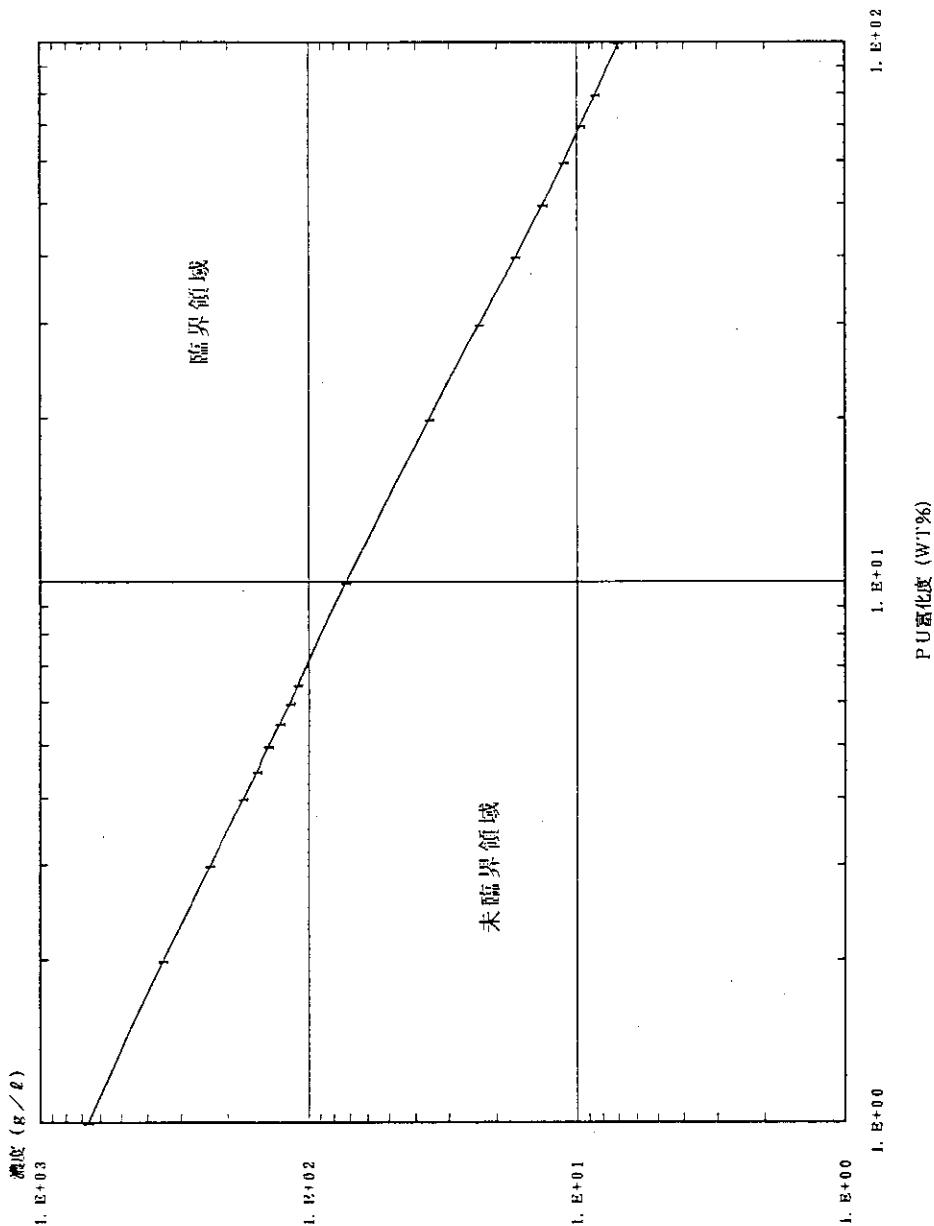
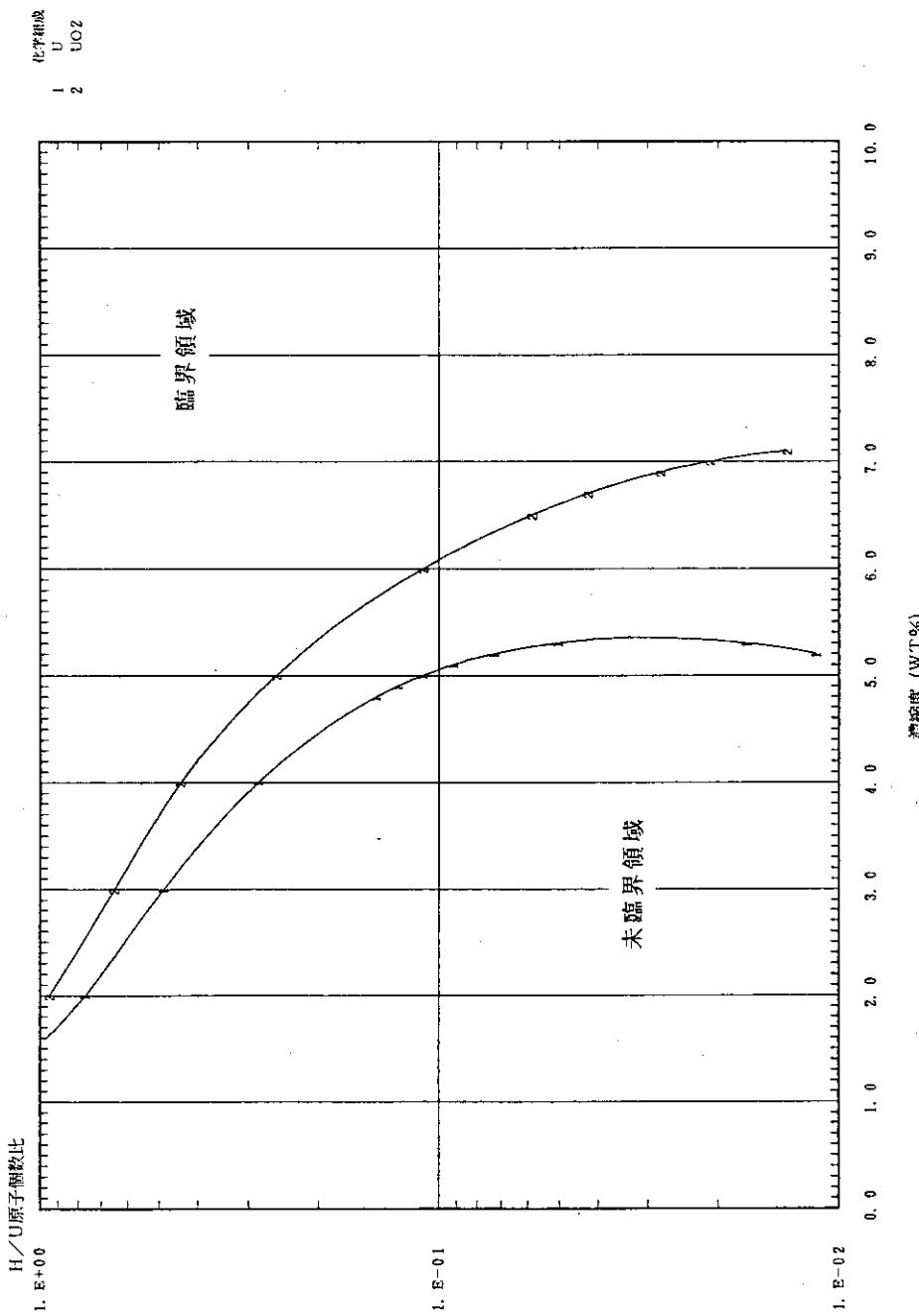


図19 均質 $\text{PuO}_2 \cdot \text{UO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ ($^{239}\text{Pu} / \text{Pu} = 100 \text{ Wt\%}$, ヴラン濃縮度=天然ウラン相当) の無限体系における未臨界領域判定図

図20 均質U-H₂O, UO₂-H₂Oの無限体系における未臨界領域判定図

付録 図 表 集

H/X と濃度の関係を図A・1～図A・7に示す。

H/X と無限増倍率の関係を図A・8～図A・14に示す。

各濃縮度に対して臨界となる濃度及びH/Xの値を表A・1～表A・8に示す。

表 A. 1 均質 U - H₂O の各濃縮度に対して臨界となる濃度及び H/U の値

濃縮度 (WT%)	臨 界 値		臨 界 制 限 値	
	濃度 (g U / ℓ)	H/U	濃度 (g U / ℓ)	H/U
2	877	2.8×10	860	2.9×10
3	511	5.0×10	502	5.0×10
4	361	7.1×10	356	7.2×10
5	280	9.2×10	276	9.3×10
7	190	1.4×10^2	188	1.4×10^2
10	128	2.0×10^2	126	2.0×10^2
20	61.9	4.2×10^2	61.1	4.3×10^2
30	40.5	6.4×10^2	40.0	6.5×10^2
40	30.3	8.6×10^2	30.0	8.7×10^2
50	23.9	1.1×10^3	23.5	1.1×10^3
70	16.5	1.6×10^3	16.3	1.6×10^3
90	12.7	2.1×10^3	12.5	2.1×10^3
100	11.8	2.2×10^3	11.6	2.2×10^3

表 A. 2 均質 UO₂ - H₂O の各濃縮度に対して臨界となる濃度及び H/U の値

濃縮度 (WT%)	臨 界 値		臨 界 制 限 値	
	濃度 (g U / ℓ)	H/U	濃度 (g U / ℓ)	H/U
2	842	2.9×10	830	2.9×10
3	499	5.0×10	491	5.0×10
4	356	7.1×10	351	7.2×10
5	277	9.2×10	273	9.3×10
7	189	1.4×10^2	185	1.4×10^2
10	129	2.0×10^2	128	2.0×10^2
20	63.2	4.2×10^2	62.4	4.3×10^2
40	30.3	8.6×10^2	29.9	8.7×10^2
60	19.8	1.3×10^3	19.5	1.3×10^3
80	14.5	1.8×10^3	14.3	1.8×10^3
100	11.7	2.3×10^3	11.5	2.3×10^3

表 A.3 均質 UO_2F_2 水溶液の各濃縮度に対して臨界となる濃度及び H/U の値

濃縮度 (W T %)	臨 界 値		臨 界 制 限 値	
	濃度 (g U / ℓ)	H / U	濃度 (g U / ℓ)	H / U
2	805	2.9×10	792	2.9×10
3	495	4.9×10	488	5.0×10
4	356	7.0×10	351	7.1×10
5	277	9.2×10	273	9.3×10
7	191	1.4×10^2	189	1.4×10^2
10	130	2.0×10^2	129	2.0×10^2
20	62.7	4.2×10^2	61.9	4.2×10^2
40	30.7	8.6×10^2	30.3	8.7×10^2
100	12.2	2.2×10^3	12.0	2.2×10^3

表 A.4 均質 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 水溶液の各濃縮度に対して臨界となる濃度及び H/U の値

濃縮度 (W T %)	臨 界 値		臨 界 制 限 値	
	濃度 (g U / ℓ)	H / U	濃度 (g U / ℓ)	H / U
3	658	3.2×10	588	3.6×10
4	428	5.3×10	394	5.9×10
5	323	7.3×10	300	8.0×10
10	144	1.8×10^2	134	1.9×10^2
20	68.8	3.8×10^2	64.6	4.1×10^2
30	43.9	6.0×10^2	41.2	6.4×10^2
40	32.7	8.1×10^2	30.7	8.6×10^2
50	26.0	1.0×10^3	24.5	1.1×10^3
80	15.7	1.7×10^3	14.6	1.8×10^3
100	12.5	2.2×10^3	11.8	2.3×10^3

表 A. 5 均質 Pu-H₂O の各 ²³⁹Pu / Pu に対して臨界となる濃度及び H / Pu の値

²³⁹ Pu / Pu *	臨 界 値		臨界制限値	
	(WT%)	濃度(gPu/l)	H/Pu	濃度(gPu/l)
40	51.2	5.2×10^2	43.0	6.2×10^2
50	25.7	1.0×10^3	22.9	1.2×10^3
60	17.0	1.6×10^3	15.7	1.7×10^3
70	12.9	2.1×10^3	12.0	2.2×10^3
80	10.5	2.5×10^3	9.9	2.7×10^3
90	8.6	3.1×10^3	8.2	3.3×10^3
100	7.4	3.6×10^3	7.0	3.8×10^3

* Pu = ²³⁹Pu + ²⁴⁰Pu

表 A. 6 均質 PuO₂-H₂O の各 ²³⁹Pu / Pu に対して臨界となる濃度及び H / Pu の値

²³⁹ Pu / Pu *	臨 界 値		臨界制限値	
	(WT%)	濃度(gPu/l)	H/Pu	濃度(gPu/l)
40	51.1	5.2×10^2	42.9	6.1×10^2
50	25.6	1.0×10^3	22.9	1.2×10^3
60	17.0	1.6×10^3	15.7	1.7×10^3
70	12.8	2.1×10^3	11.9	2.2×10^3
80	10.5	2.5×10^3	9.8	2.7×10^3
90	8.6	3.1×10^3	8.1	3.3×10^3
100	7.5	3.6×10^3	7.0	3.8×10^3

* Pu = ²³⁹Pu + ²⁴⁰Pu

表A.7 均質 $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ 水溶液の各 ^{239}Pu / Pu に対して臨界となる濃度及び H / Pu の値

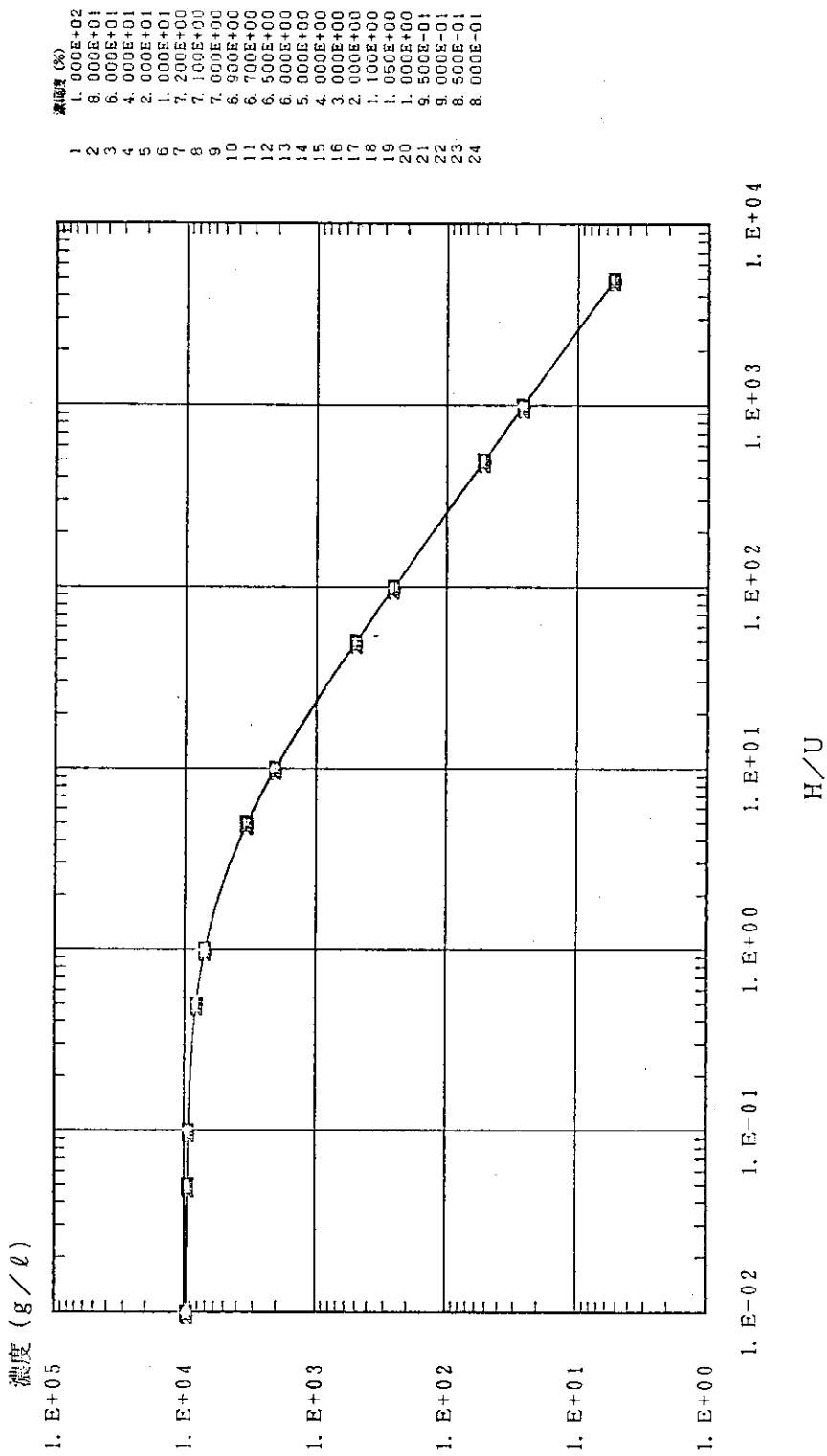
$^{239}\text{Pu} / \text{Pu}^*$ (WT%)	臨 界 値		臨 界 制 限 値	
	濃度 (g Pu/l)	H / Pu	濃度 (g Pu/l)	H / Pu
40	55.1	4.7×10^{-2}	45.0	5.8×10^{-2}
50	26.4	1.0×10^{-3}	23.6	1.1×10^{-3}
60	17.4	1.5×10^{-3}	16.0	1.7×10^{-3}
70	13.2	2.0×10^{-3}	12.1	2.2×10^{-3}
80	10.8	2.5×10^{-3}	9.9	2.7×10^{-3}
90	8.7	3.0×10^{-3}	8.2	3.2×10^{-3}
100	7.5	3.5×10^{-3}	7.0	3.8×10^{-3}

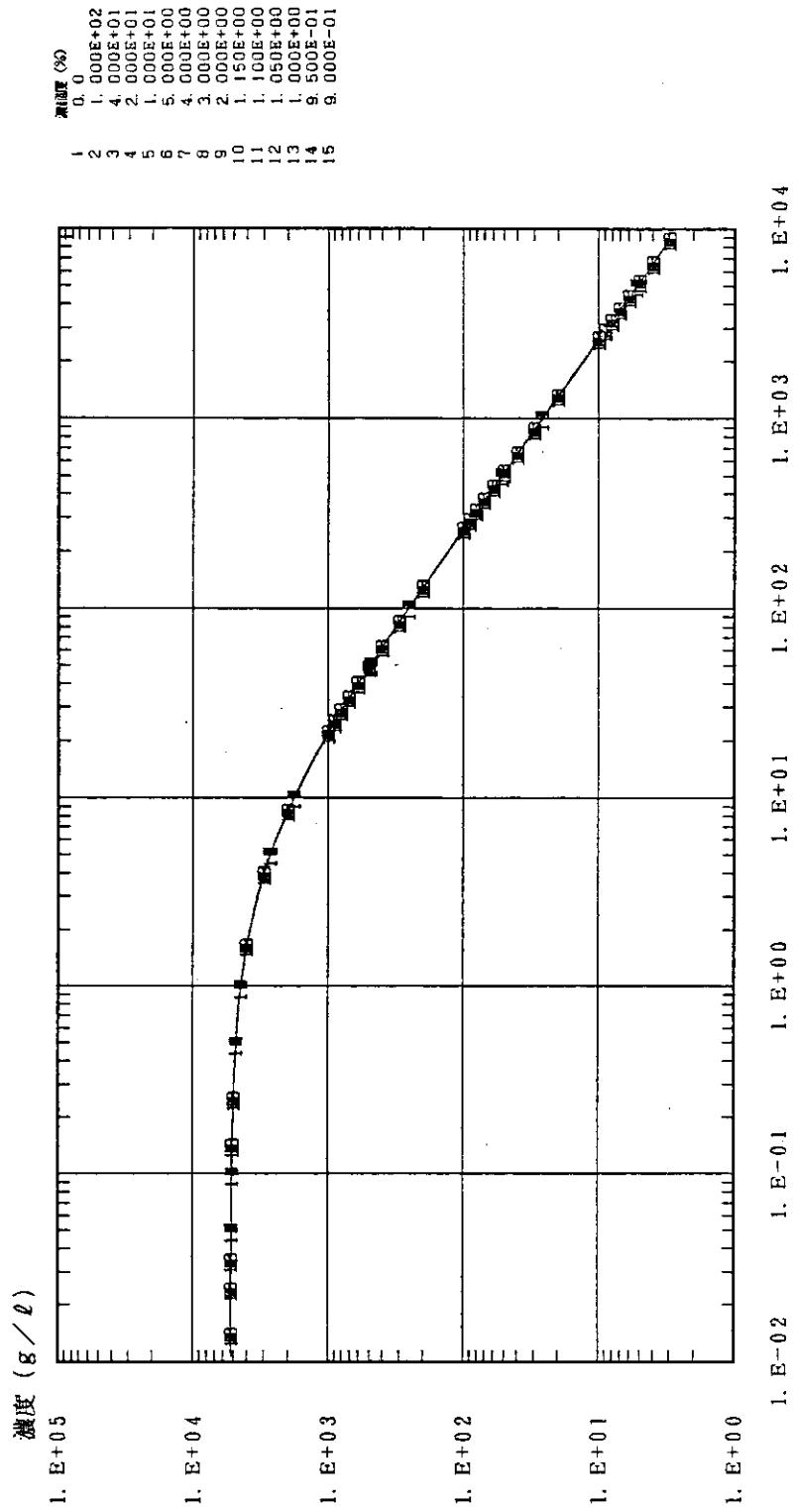
* $\text{Pu} = ^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu}$

表A.8 均質 $\text{PuO}_2 \cdot \text{UO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ の各プルトニウム富化度に対して臨界となる濃度及び $\text{H} / (\text{U} + \text{Pu})$ の値

Pu 富化度 * (WT%)	臨 界 値		臨 界 制 限 値	
	濃度 (g(U+Pu)/l)	$\text{H} / (\text{U} + \text{Pu})$	濃度 (g(U+Pu)/l)	$\text{H} / (\text{U} + \text{Pu})$
2	375	6.8×10^{-1}	348	7.4×10^{-1}
4	190	1.4×10^{-2}	175	1.5×10^{-2}
6	127	2.1×10^{-2}	118	2.2×10^{-2}
10	76.9	3.4×10^{-2}	72.2	3.6×10^{-2}
20	37.8	7.0×10^{-2}	35.4	7.5×10^{-2}
40	18.3	1.4×10^{-3}	16.9	1.6×10^{-3}
60	11.9	2.2×10^{-3}	11.2	2.4×10^{-3}
80	9.1	2.9×10^{-3}	8.5	3.1×10^{-3}
100	7.5	3.5×10^{-3}	7.0	3.8×10^{-3}

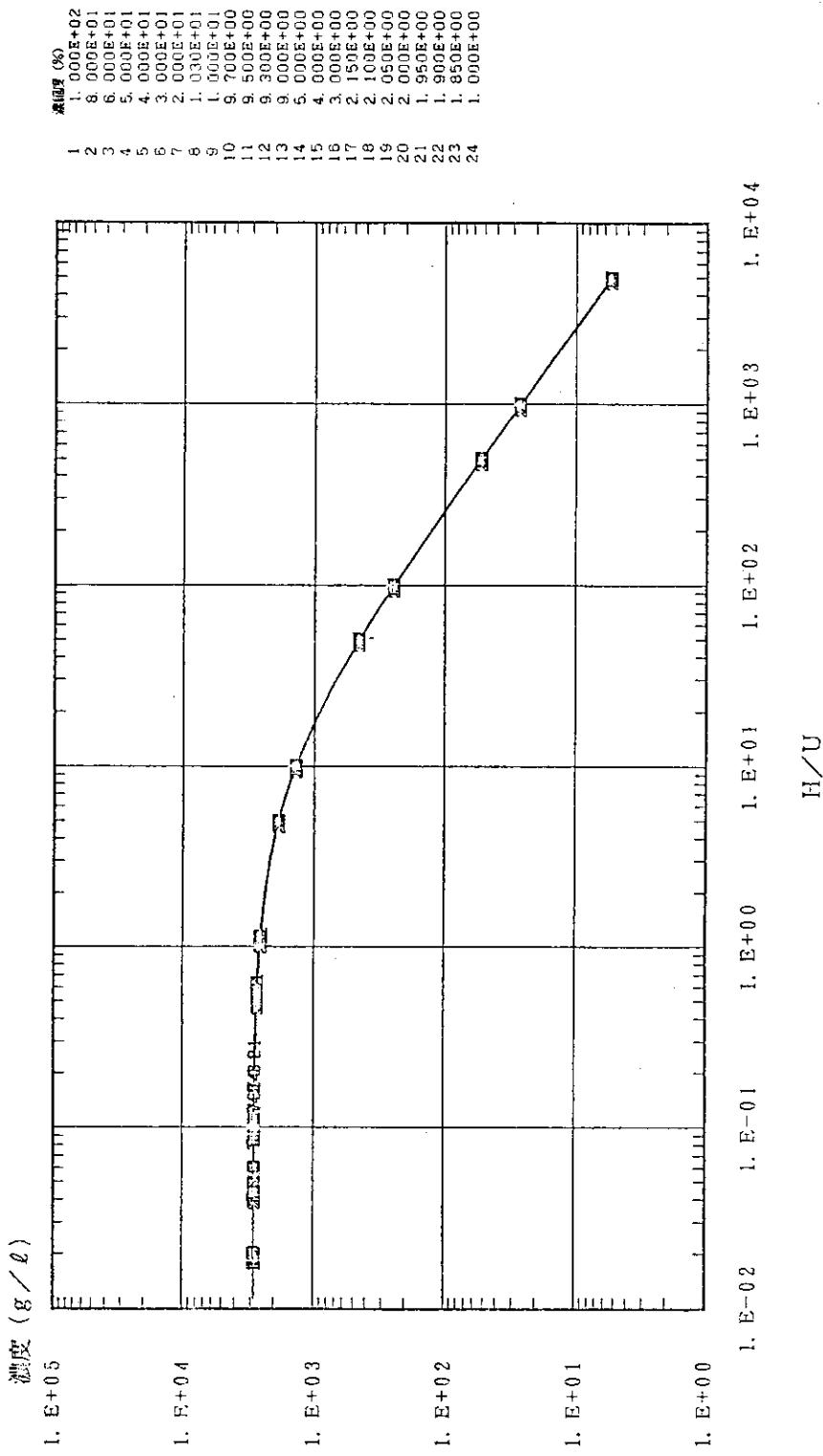
* Pu 富化度 = $\frac{\text{Pu}}{\text{U} + \text{Pu}}$

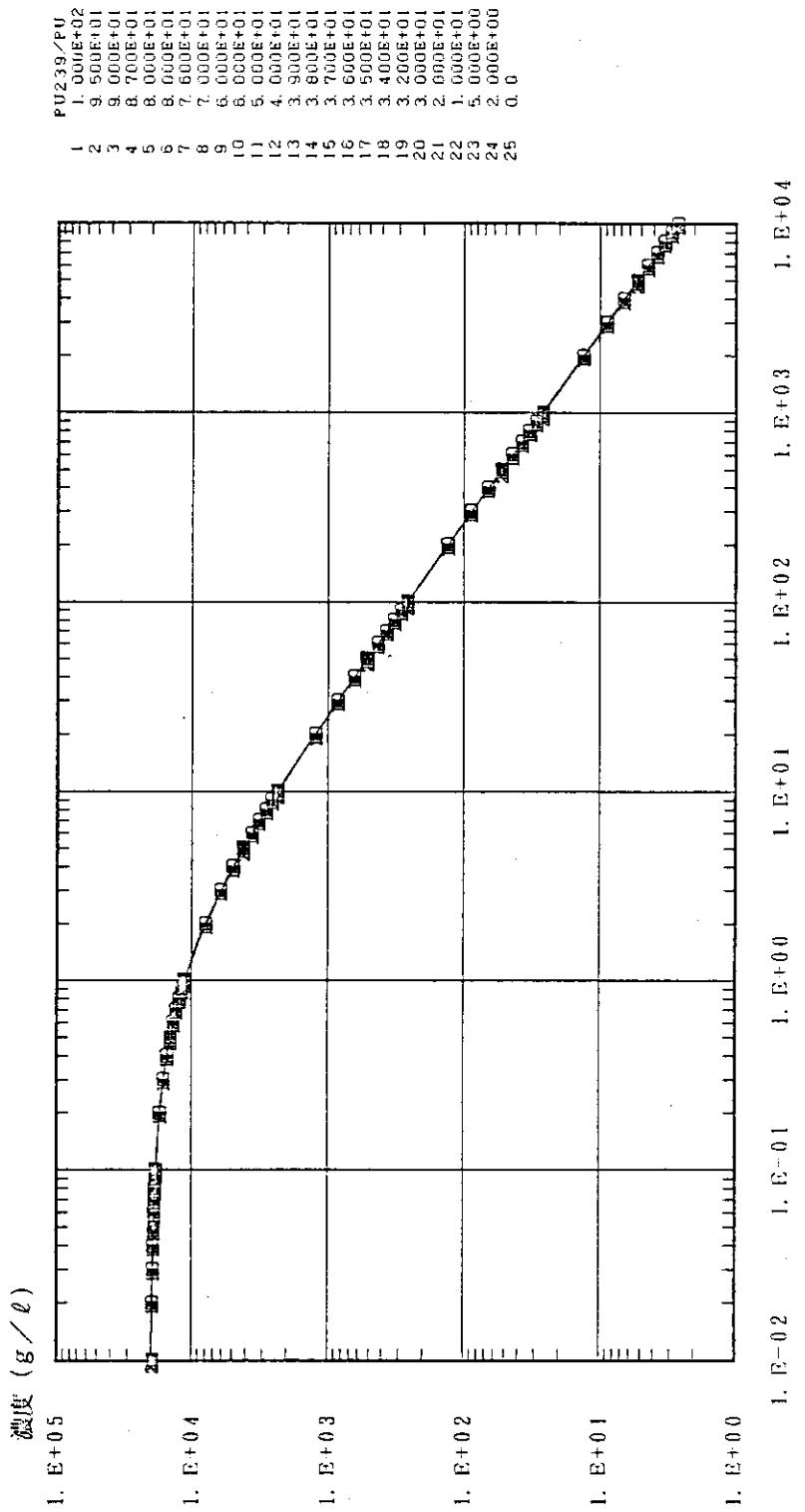
図 A.1 均質 $\text{UO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ の H / U と濃度の関係

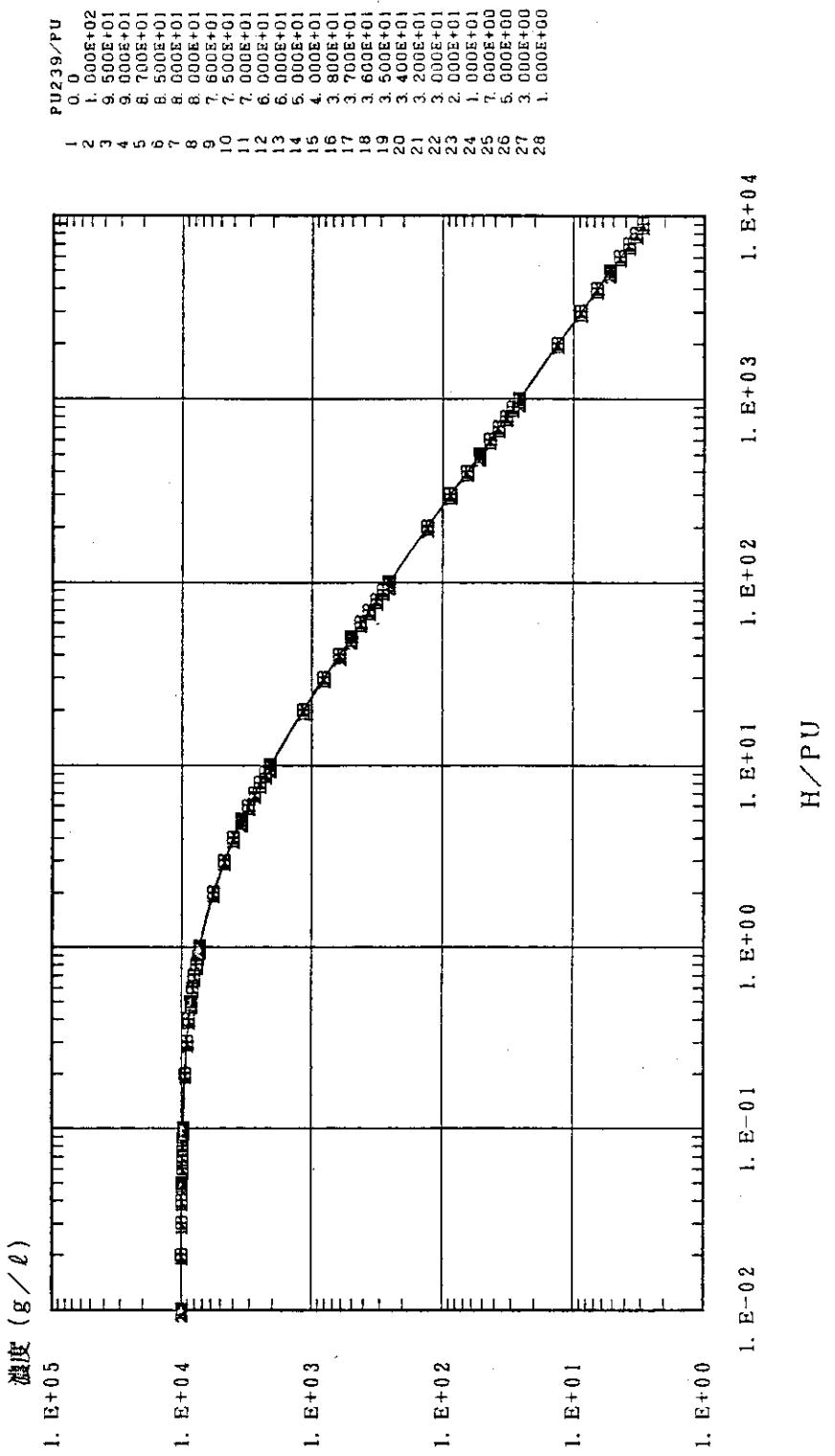


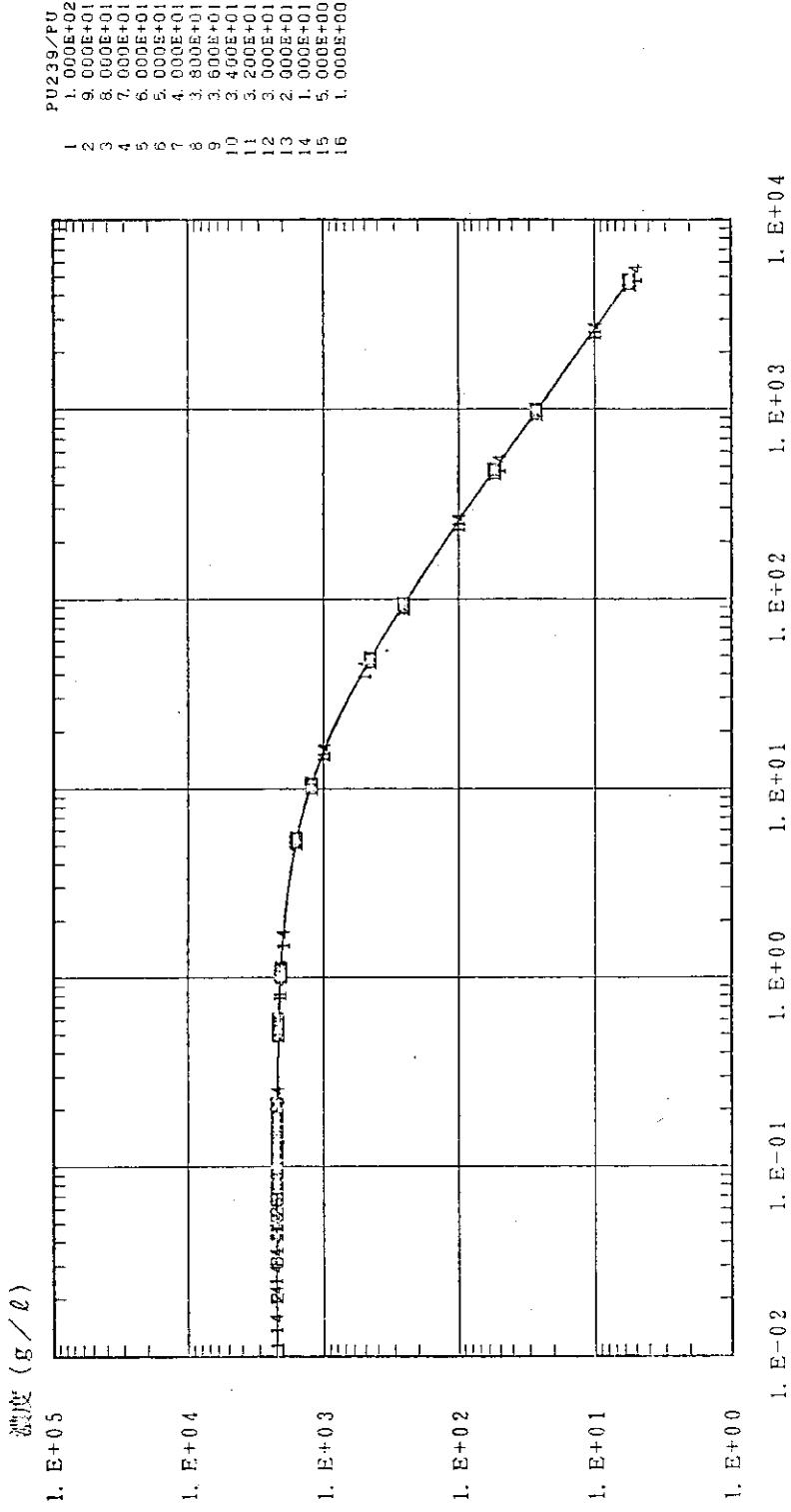
図A.2 均質 UO_2F_2 水溶液のH/Uと濃度の関係

H/U

図 A. 3 均質 $UO_2(NO_3)_2$ 水溶液の H/U と濃度の関係

図 A.4 均質 $Pu-H_2O$ の H_2O/Pu と濃度の関係

図A.5 均質PuO₂-H₂OのH/Puと濃度の関係

図 A. 6 均質 $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ 水溶液の H / Pu と濃度の関係

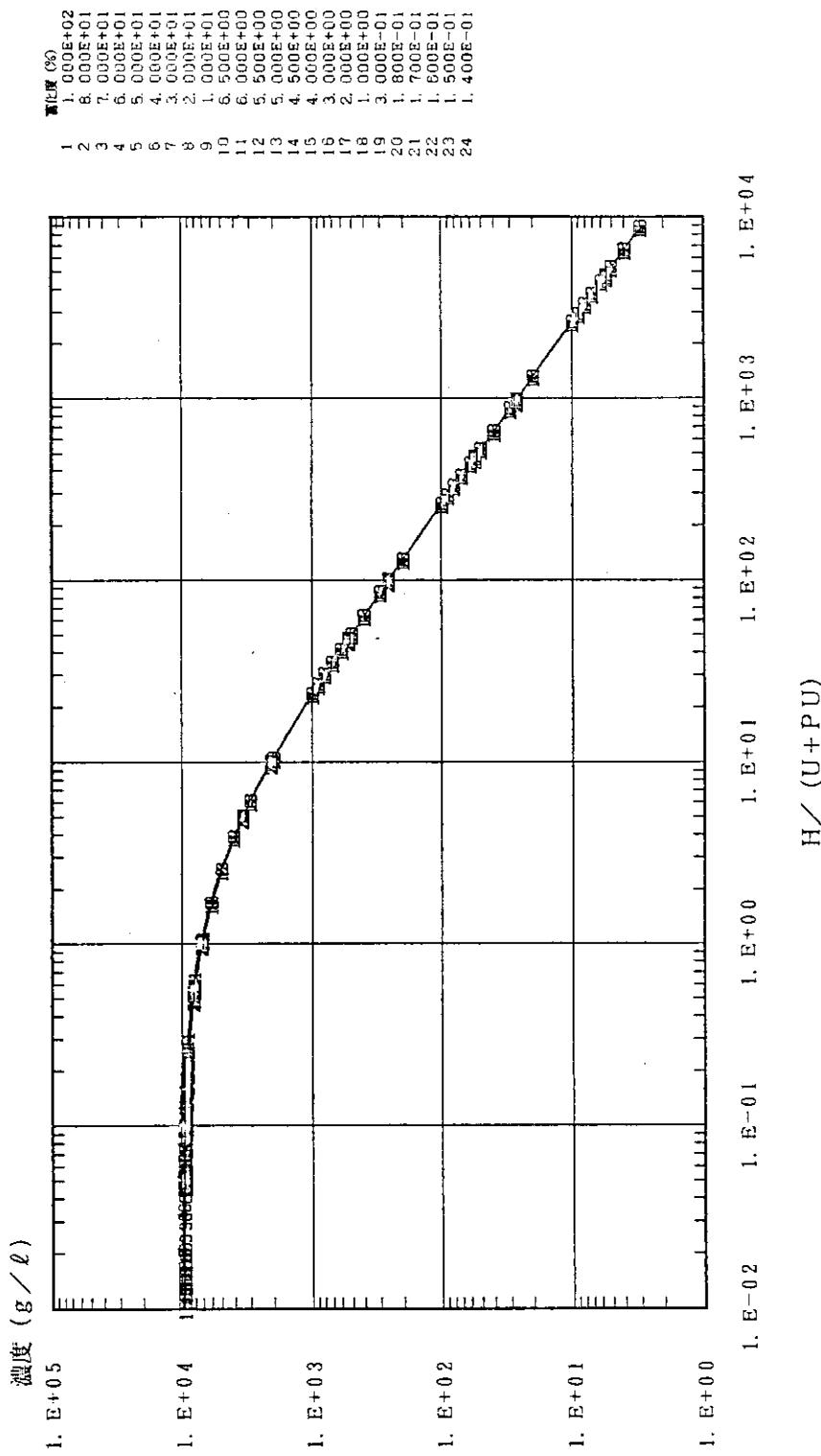
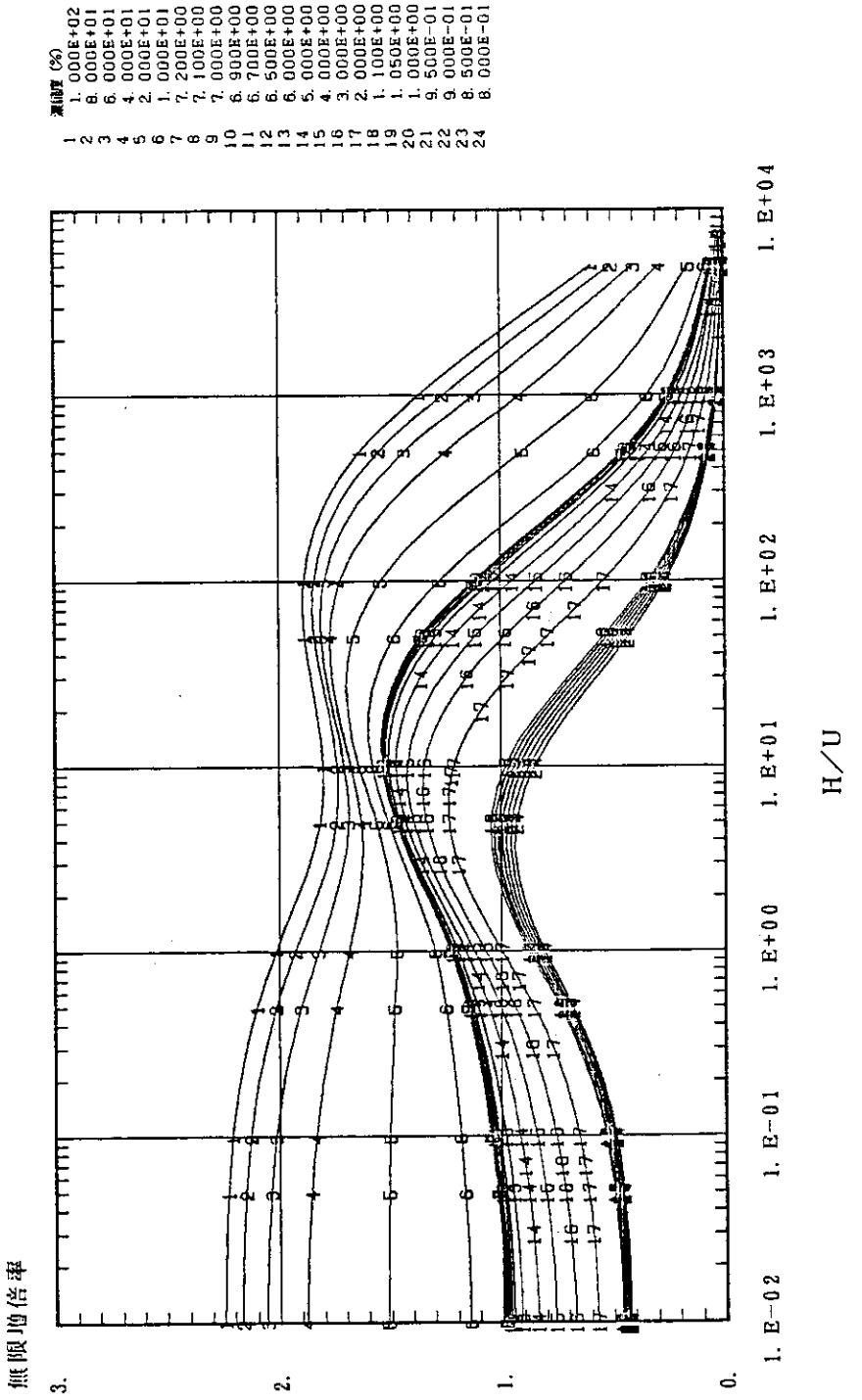
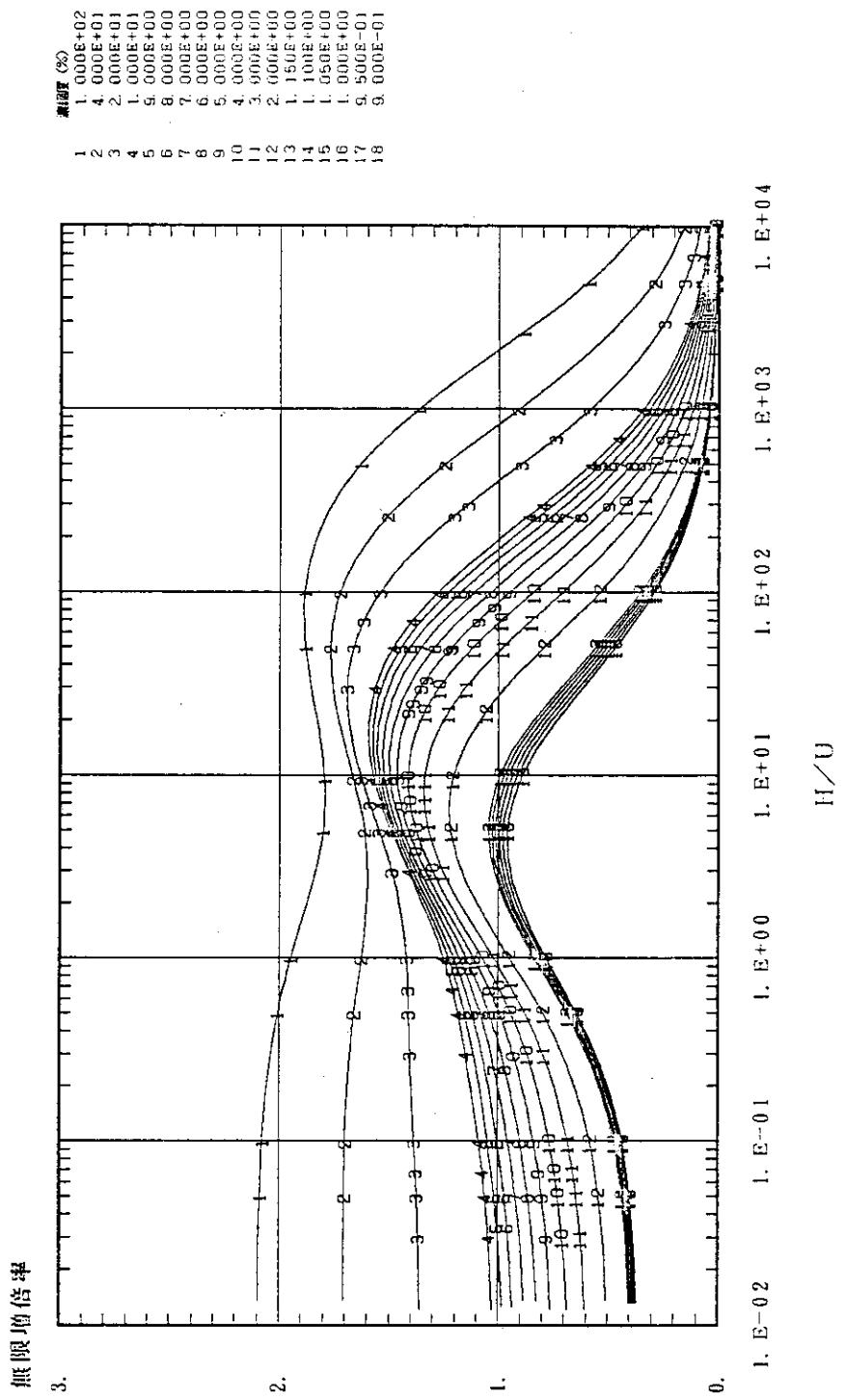
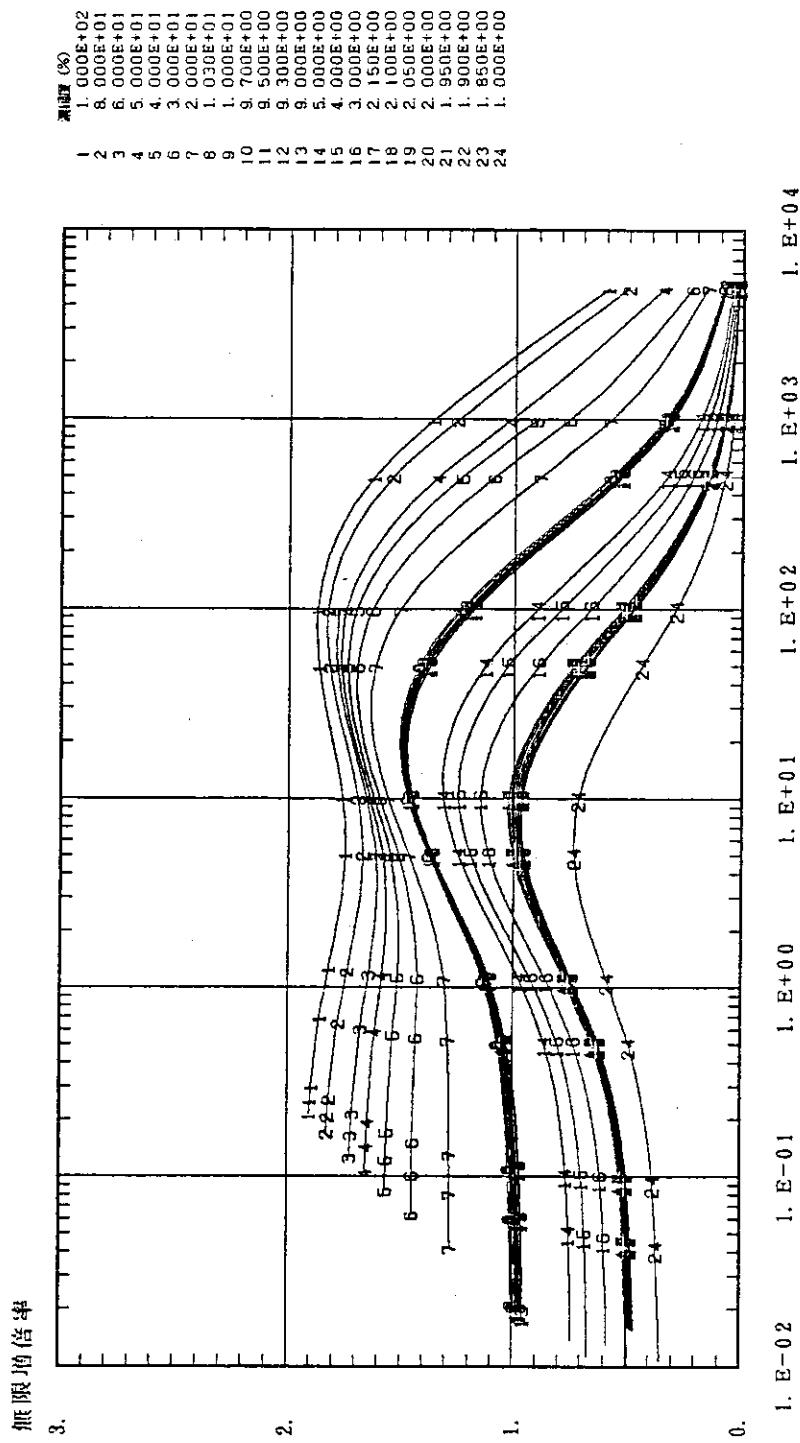
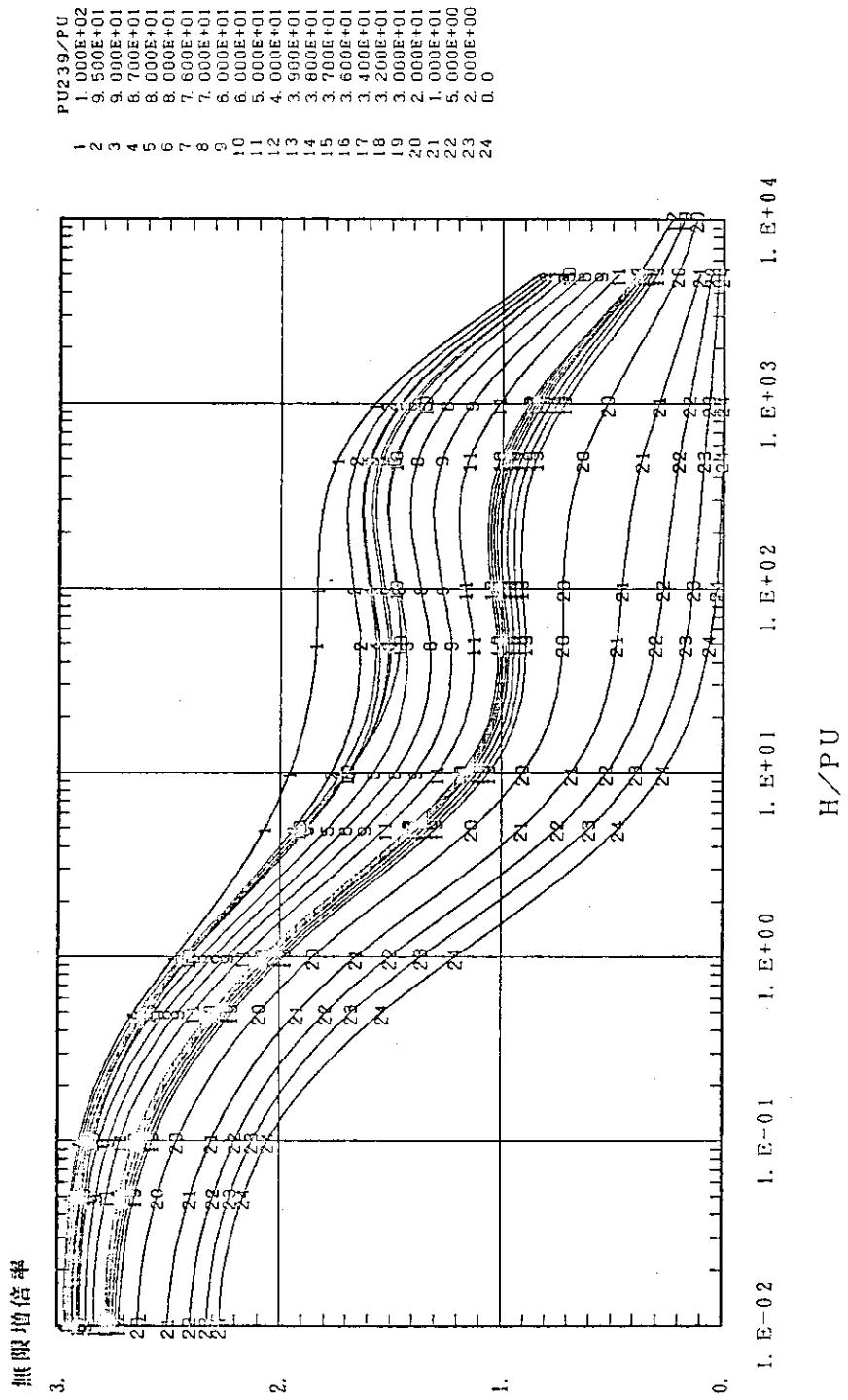


図 A.7 均質 $PuO_2 \cdot UO_2 \cdot H_2O$ ($^{239}Pu / Pu = 100$ WT%, ウラン濃縮度=天然ウラン相当) の $H_2O / (U + Pu)$ と濃度の関係

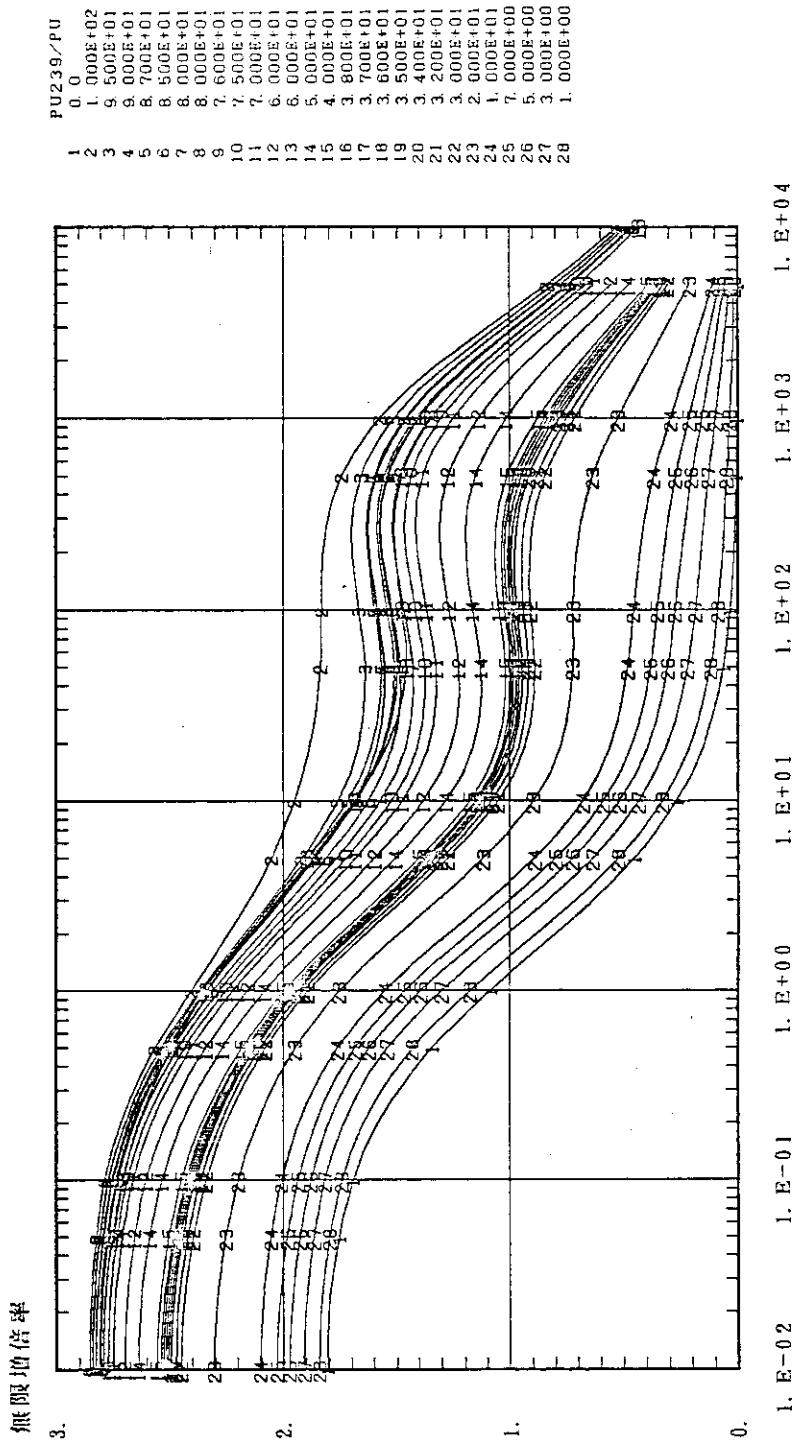
図 A.8 均質 $\text{UO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ の H/U と無限増倍率の関係

図 A. 9 均質 UO_2F_2 水溶液の H/U と無限増倍率の関係

図 A.10 均質 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 水溶液の H/U と無限増倍率の関係

図 A.11 均質 Pu-H₂O の H/Pu と無限増倍率の関係

H/Pu

図A.12 種質PuO₂-H₂OのH/Puと無限増倍率の関係

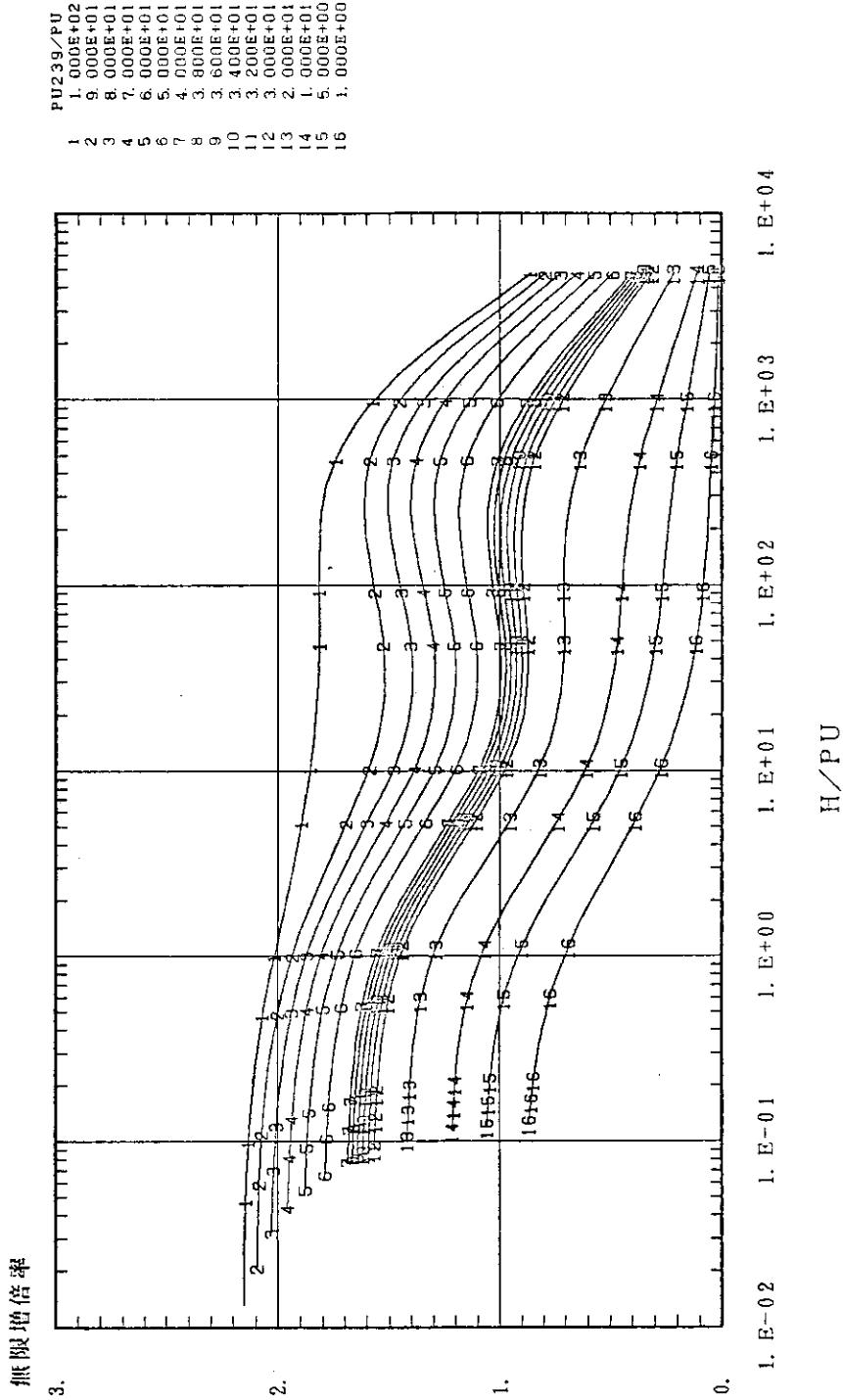


図 A.13 均質 $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ 水溶液の H/Pu と無限増倍率の関係

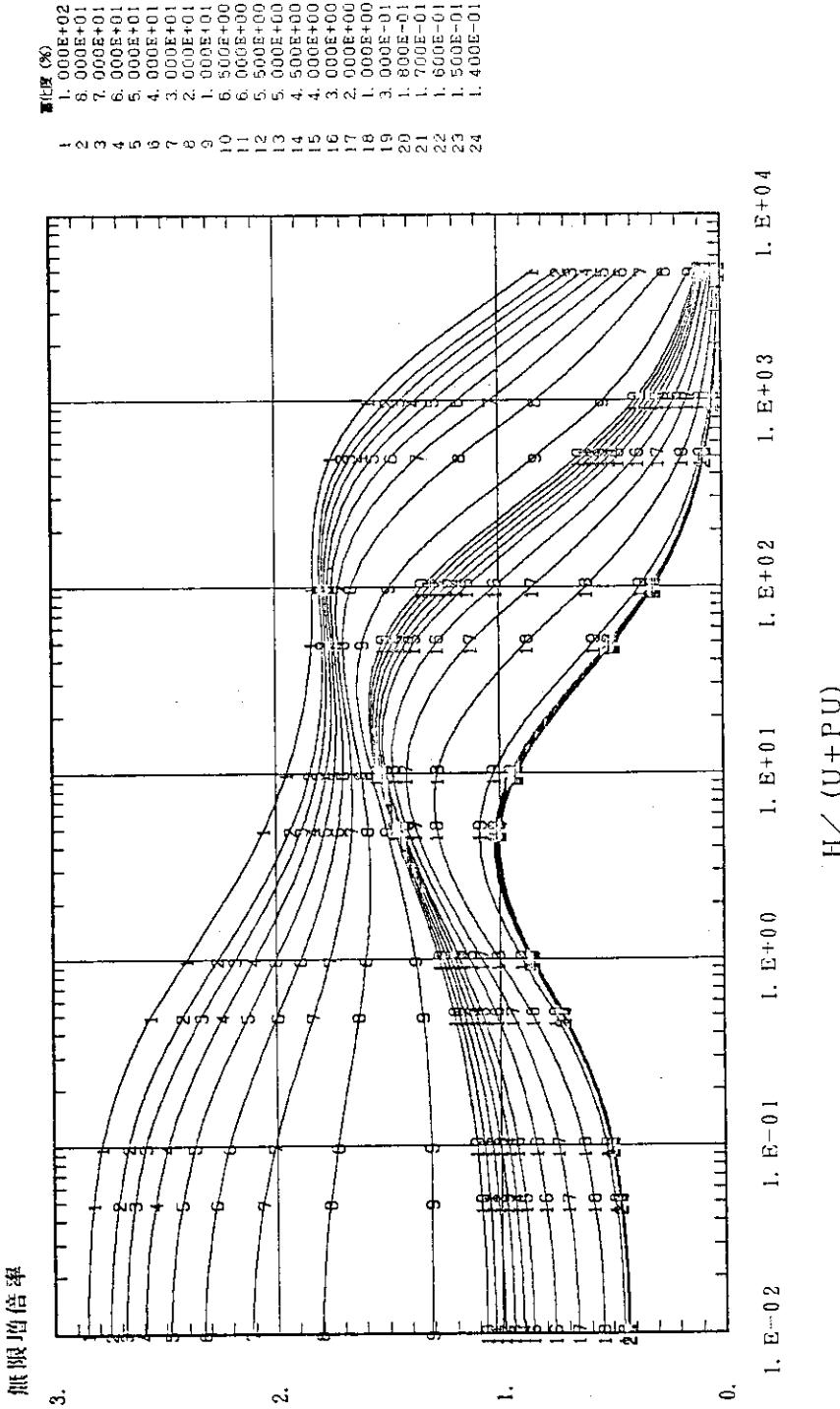


図 A.14 均質 $\text{PuO}_2 \cdot \text{UO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ ($^{239}\text{Pu} / \text{Pu} = 100\text{WT\%}$, ウラン濃縮度 = 天然ウラン相当) の $H / (U + Pu)$ と無限増倍率の関係