

JAERI-Research

94-047



鋼及びステンレス鋼の反射体節約に関する計算

1994年12月

小宮山和真\*・奥野 浩

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

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

This report is issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1994

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 株式会社原子力資料サービス

## 鋼及びステンレス鋼の反射体節約に関する計算

日本原子力研究所東海研究所燃料サイクル安全工学部

小宮山和真\*・奥野 浩

(1994年12月2日受理)

はじめに、米国 ORNL で実施された 4.98 wt%濃縮フッ化ウラニル水溶液（ウラン濃度 909 gU/l）の臨界実験を解析した。溶液は、0.079 cm厚の SUS304 製円筒容器に入り、その外側を厚さ 0～5 cm の間で7通りに厚さを変えた鋼で巻いている。解析には JACS コードシステムを用いた。この実験体系に対する中性子増倍率の計算誤差は約-2.1%  $\Delta k$  で、鋼反射体の厚さに依存しないことが分った。次に鋼反射体を取り除き、その代わりに燃料領域の直径を増やして臨界計算を行い、鋼の反射体節約  $\delta_{ST}$  を求めた。その結果、 $\delta_{ST}=0.87 T-0.064 T^2$  (T: 鋼の厚さ) の関係を得た。そのほか、「臨界安全ハンドブック」の記載データからステンレス鋼 SUS304 の反射体節約  $\delta_{SS}$  を求めた。4 wt%濃縮  $UO_2-H_2O$  の均質混合燃料で、ウラン濃度が 600～4000 gU/l の間で増加すると反射体節約も増加する傾向が得られた。

Calculations for Reflector Savings of Steel and Stainless Steel

Kazumasa KOMIYAMA\* and Hiroshi OKUNO

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

(Received December 2, 1994)

Firstly, the criticality experiments of aqueous solution of 4.98 %  $^{235}\text{U}$ -enriched uranyl fluoride of uranium concentration  $909 \text{ gU}/\ell$  performed at ORNL in USA have been analyzed. The solution was contained in 0.079 cm-thick cylindrical vessel made of SUS304 surrounded laterally by steel whose thickness was varied between 0 and 5 cm in 7 ways. The analyses have been made with the JACS code system. The calculational errors in the neutron multiplication factor have been found to be about  $-2.1\% \Delta k/k$  for these experiments, independent of the steel reflector thickness. Secondly, criticality calculations have been made for reflector savings of steel,  $\delta_{\text{ST}}$ , by removing the steel reflectors from the ORNL experimental systems and increasing the diameters of fuel region instead. As a result the relation  $\delta_{\text{ST}} = 0.87T - 0.064 T^2$  has been obtained, where T is the steel thickness. The reflector savings of stainless steel SUS304,  $\delta_{\text{SS}}$ , have been also obtained by using data found in "Nuclear Criticality Safety Handbook". In this case the reflector savings tend to increase as the uranium concentration of 4 wt%  $^{235}\text{U}$ -enriched  $\text{UO}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$  homogeneous mixture increases between 600 and 4000  $\text{gU}/\ell$ .

Keywords: Reflector, Savings, Steel, Stainless Steel, Uranium, Dioxide, Fluoride, Solution, Benchmark, JACS, Criticality Safety

---

\* Tokai University

## 目 次

1. 序 論 .....	1
2. 臨界実験体系の解析 .....	2
3. 鋼の反射体節約の計算 .....	16
4. ステンレス鋼の反射体節約の計算 .....	21
5. 結論と今後の課題 .....	31
謝 辞 .....	31
参考文献 .....	32
付録A 臨界実験解析に用いたジョブ制御文と入力データ .....	34
付録B 鋼の反射体節約を求める計算に用いた入力データ .....	37
付録C MCNP を用いた臨界計算に用いた入力データ .....	38

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Analysis of Criticality Experiments .....	2
3. Calculations for Reflector Savings of Steel .....	16
4. Calculations for Reflector Savings of Stainless Steel .....	21
5. Conclusions and Future Tasks .....	31
Acknowledgements .....	31
References .....	32
Appendix A Job Controlling Cards and Input Data for Analysis of Criticality Experiments .....	34
Appendix B Input Data for Calculation of Reflector Savings of Steel .....	37
Appendix C Input Data for Analysis of a Criticality Experiment with MCNP Code .....	38

## 1. 序 論

商業用大型再処理施設の設計・建設を契機に、低濃縮ウラン溶液系の臨界安全性研究が日本でも進められるようになってきた<sup>1)</sup>。溶液燃料は、ステンレス鋼などの容器に入っている。しかし、これまでの臨界安全性の簡易評価では、米国の配管交差に関する基準 (ANSI/ANS-8.9-1987)<sup>2)</sup> に見られるように、容器壁の効果を露には議論せずに済ませてきた。一方、旧ソ連で実施された硝酸ウラニル水溶液系の臨界実験の報告書<sup>3)</sup> には、ステンレス鋼 (SUS) 反射体の反射体節約  $\delta_{ss}$  が、SUS の厚さを  $T$  (但し、 $T \leq 1 \text{ cm}$ ) とする時、

$$\delta_{ss} = 0.9T \quad (1)$$

と表せると書かれている。この式は実験で調べたすべての燃料濃度で成り立つと書かれているが、その詳細は何も記されていない。容器壁の反射効果が反射体節約の形で定式化できると、容器壁を実質的に考慮せずにモデル化できるので簡易評価上便利である。このため、この報告書では、鋼及びステンレス鋼の容器壁の反射体節約の表式を計算により調べた。

計算を実施するに当たっては、まず臨界実験を解析することにより計算法の検証を行った。対象とした実験は、SUS304製の円筒容器に入った低濃縮のフッ化ウラニル水溶液の外側に薄い鋼反射体を巻き、その厚さを変化させた臨界実験である<sup>4)</sup>。計算には、日本原子力研究所で開発された臨界安全性評価コードシステム JACS<sup>5)</sup> のうち、137群定数ライブラリ MGCL-J3<sup>6)</sup> と多群エネルギーモンテカルロ臨界計算コード KENO-IV<sup>7)</sup> を用いた。

次に、同じ実験体系で鋼反射体を取り除き、その代わりに燃料領域の直径を増やして臨界計算を行い、鋼の反射体節約を求めた。また「臨界安全ハンドブック」<sup>8)</sup> には、均質  $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$  燃料の無限円柱体系において、ウラン濃度及び SUS304 の容器壁厚さをパラメタとして外側真空の反射条件のもとに中性子増倍率を計算した結果が掲載されている。この結果からステンレス鋼の反射体節約を求めた。

本報告書の構成は、以下のようになっている。第2章では、臨界実験体系の解析について述べる。次に第3章では、同じ実験体系を用いて行った鋼の反射体節約の計算について述べる。第4章では、ステンレス鋼の反射体節約の計算を行う。そして第5章で、結論と今後の課題をまとめる。

## 2. 臨界実験体系の解析

### (1) 実験体系の概要

容器壁の効果を評価するために、低濃縮フッ化ウラニル水溶液を入れた薄いステンレス鋼製の円筒容器の外側に巻いた鋼反射体の厚さを变化させた臨界実験が、E. B. JohnsonとC. E. Newlonによって1968年に行われた<sup>4)</sup>。円筒容器の内径は、39.09 cmと33.02 cmの2種類、肉厚はいずれも0.079 cmで、ステンレス鋼の種類はSUS304であった。鋼反射体の厚さは0~5 cmの間で变化させた。そのほか、カドミウム吸収材、水反射体を鋼反射体の内外に設置した体系についての臨界実験も実施した。容器の上部と下部には反射体はない。燃料としては、どの実験にも共通して<sup>235</sup>U濃縮度4.98 wt%、ウラン濃度909.1 gU/lのフッ化ウラニル水溶液を用いた。

実験では、容器の直径及び反射体の組合せにより大別して4つの問題が取り扱われ、それぞれの問題で鋼反射体厚さを変えた一連の実験が行われた。図2.1は、直径39.09 cm、高さ106.2 cmのステンレス容器の外側を鋼反射体（この図及び以下の図2.2-図2.4では厚さ1.27 cmの体系を図示する）で巻いた体系である。図2.2は、直径33.02 cm、高さ243.9 cmのステンレス容器の外側を鋼反射体で巻き、更にその外側を無限の厚さの水で取り巻いた体系である。図2.3は、図2.1の体系の鋼反射体の外側を無限の厚さの水で取り巻いた体系である。そして、図2.4は、図2.3の体系のステンレス容器の内側に厚さ0.081 cmのカドミウム板を取り付けた体系である。表2.1に各実験体系の詳細を示す。また、図2.5には各体系の臨界高さを図示する。

### (2) 計算方法

今回用いた臨界安全評価コードシステムJACS<sup>5)</sup>の計算流れ図を図2.6に示す。先ず、臨界安全評価で扱う様々な核種に対して評価済み核データ（ここではJENDL-3.1<sup>6)</sup>）からMGCL-ACEコードにより作成された137個の群で平均

化した断面積（群定数）MGCL-J3ライブラリ<sup>6)</sup>を用いる。現在170余の核種が用意されている。そしてJACSコードシステムの利用者は、基本的には燃料等の組成とその幾何形状を入力するだけでよい。即ち、MAIL3.0コード<sup>9)</sup>により典型的な燃料や反射材、構造材に関しての原子個数密度が算出され、対応する実効断面積が上記のMGCL-J3ライブラリを内挿して算出される。

この後の臨界計算では、対象の幾何形状の複雑さ等により、図2.6に示したように3つの選択肢がある。このうち、JACSコードシステムでは、モンテカルロ法中性子輸送計算コードKENO-IV<sup>7)</sup>を用いる流れを主流にしており、今回もこの流れを利用して、対象系の中性子増倍率 $k_{eff}$ を算出した。

計算条件として、1世代あたりの中性子数を3000、計算世代数を250とし、このうち初期の50世代を棄却した。初期中性子発生分布は燃料領域内で平坦とした。

### (3) 計算結果

臨界計算を実施する上で必要なフッ化ウラニル水溶液、SUS304、炭素鋼の原子個数密度を表2.2に、水の原子個数密度を表2.3に、カドミウムの原子個数密度を表2.4に示す。これらは体系の温度を20℃としてMAIL3.0コード<sup>9)</sup>で算出したものである。そして、表2.1の臨界計算問題をKENO-IVを用いて解いた。これらの臨界計算を実施するためのジョブ制御文及び入力データを付録Aに示す。また、中性子増倍率の計算結果を表2.5に示し、それをグラフに表したものを図2.7に示す。このうち問題1の体系に対する中性子増倍率の計算結果を図2.8に示す。この図によると、中性子増倍率の計算値は鋼反射体の厚さにほぼ依存せず、平均で0.979となった。また、図2.7より問題2及び3の体系の中性子増倍率の計算値も同様に鋼反射体の厚さにほぼ依存せず、平均で各々0.985、0.979となった。問題4の体系では、鋼反射体の厚さが約5cmでは、やや大き目の中性子増倍率の計算値が得られた。



#### (4) 他の計算結果との比較

問題1の実験体系の中性子増倍率は、JACSコードシステムによる臨界計算の結果、中性子増倍率の計算値は鋼反射体の厚さにほぼ依存せず、平均で0.979という値を得た。実験の報告書4)に記載されていたHansen-Roach断面積とANISNの組み合わせによる中性子増倍率の算出値は鋼反射体厚さ0では1.000であったが、鋼反射体厚さの増加に伴い値が大きくなり、鋼反射体が5.08cm付いた体系では中性子増倍率の算出値は1.016と記されている。反射体が付かない体系(表2.5のケース番号1-1)の臨界計算をMCNP-4A<sup>10)</sup>を用いて実施した(付録C)。用いた評価済み核データは、今回のKENO-IVの計算と同じJENDL-3.1である。その結果、中性子増倍率の計算値として $0.993 \pm 0.001$ という値が得られた。

また、文献11)には今回の実験体系をJACSコードシステムで解析した結果が記されている。但し、多群定数ライブラリとして今回使用したMGCL-J3ライブラリではなく、MGCL-B-IVライブラリ<sup>12)</sup>を使用している。表2.5には文献11)に記載された結果も併せて記した。この文献11)に記述されている問題1の結果を見ると、標準偏差は大きいので個々の比較は難しいが、平均的には今回得られた中性子増倍率よりも $0.4\% \Delta k$ ほど高く算出されていることがわかる。

表2.1 実 験 体 系

		鋼反射体の厚さ (cm)							
		0	0.64	1.27	1.90	2.54	3.81	5.08	
直径 39.09 cm の円筒									
問題 1	鋼反射体 (水無し) 臨界高さ (cm)	98.80	74.65	64.75	59.30	55.70	50.90	48.20	
直径 33.02 cm の円筒									
問題 2	鋼-水反射体 臨界高さ (cm)	84.60	158.85	201.60	172.80	143.00	109.10	91.95	
直径 39.09 cm の円筒									
問題 3	鋼-水反射体 臨界高さ (cm) 厚さ 0.081cm の Cd	44.70	48.70	49.40	48.95	48.20	46.50	45.10	
問題 4	鋼-水反射体 臨界高さ (cm)	64.90				54.45		50.80	

表 2.2 問題 1 から問題 4 に現れる濃縮フッ化ウラニル水溶液, SUS304, 炭素鋼の原子個数密度

U (4.98) O<sub>2</sub> F<sub>2</sub> 水溶液

H	$5.6497 \times 10^{-2}$
O	$3.3076 \times 10^{-2}$
F-nat	$4.6025 \times 10^{-2}$
<sup>235</sup> U	$1.1599 \times 10^{-2}$
<sup>238</sup> U	$2.1852 \times 10^{-2}$

SUS304

C	$3.1729 \times 10^{-4}$
Si	$1.6962 \times 10^{-3}$
S	$4.4572 \times 10^{-5}$
Cr	$1.7408 \times 10^{-2}$
Mn	$1.7343 \times 10^{-3}$
Fe	$5.7872 \times 10^{-2}$
Ni	$8.1116 \times 10^{-2}$

炭素鋼

Fe	$8.3319 \times 10^{-2}$
C	$1.2514 \times 10^{-3}$
Mn	$2.5650 \times 10^{-4}$
Si	$3.3449 \times 10^{-4}$
P	$6.0660 \times 10^{-5}$
S	$5.8599 \times 10^{-2}$

単位: (atoms/barn·cm)

表 2.3 問題 2 から問題 4 に現れる水の原子個数密度

水

H	$6.6734 \times 10^{-2}$
O	$3.3367 \times 10^{-2}$

単位: (atoms/barn·cm)

表 2.4 問題 4 に現れるカドミウムの原子個数密度

カドミウム

Cd	$4.6367 \times 10^{-2}$
----	-------------------------

表 2.5 SUS 円筒容器入り 4.98 %  $^{235}\text{U}$  濃縮弗化ウラニル水溶液 (燃料濃度 909.1 gU/l) 体系に対する JACS コードシステムに基づく中性子増倍率の計算結果\*1

ケース 番号	SUS容器*2 内径[cm]	Cd板*3 の有無	鋼反射体 厚さ[cm]	水反射体 の有無	使用ライブラリ	
					MGCL-J3	MGCL-B-IV
1-1			0		0.981	0.992
1-2			0.64		0.978	0.987
1-3			1.27		0.977	0.988
1-4	39.09	無し	1.90	無し	0.980	0.978
1-5			2.54		0.979	0.973
1-6			3.81		0.979	0.979
1-7			5.08		0.979	0.985
2-1			0		0.987	0.979
2-2			0.64		0.985	0.986
2-3			1.27		0.985	0.981
2-4	33.02	無し	1.90	有り	0.985	0.985
2-5			2.54		0.984	0.989
2-6			3.81		0.984	0.978
2-7			5.08		0.984	0.985
3-1			0		0.980	0.979
3-2			0.64		0.979	0.982
3-3			1.27		0.979	0.973
3-4	39.09	無し	1.90	有り	0.978	0.992
3-5			2.54		0.979	0.975
3-6			3.81		0.977	0.977
3-7			5.08		0.979	0.983
4-1			0		0.978	0.989
4-5	39.09	有り	2.54	有り	0.980	0.999
4-7			5.08		0.985	0.985

\*1 MGCL-J3ライブラリを用いた計算の標準偏差約0.001、ENDF-B-IVライブラリを用いた計算の標準偏差は0.004から0.005。

\*2 SUS304反射体厚さ0.079cm。

\*3 Cd板厚さ0.081cm。

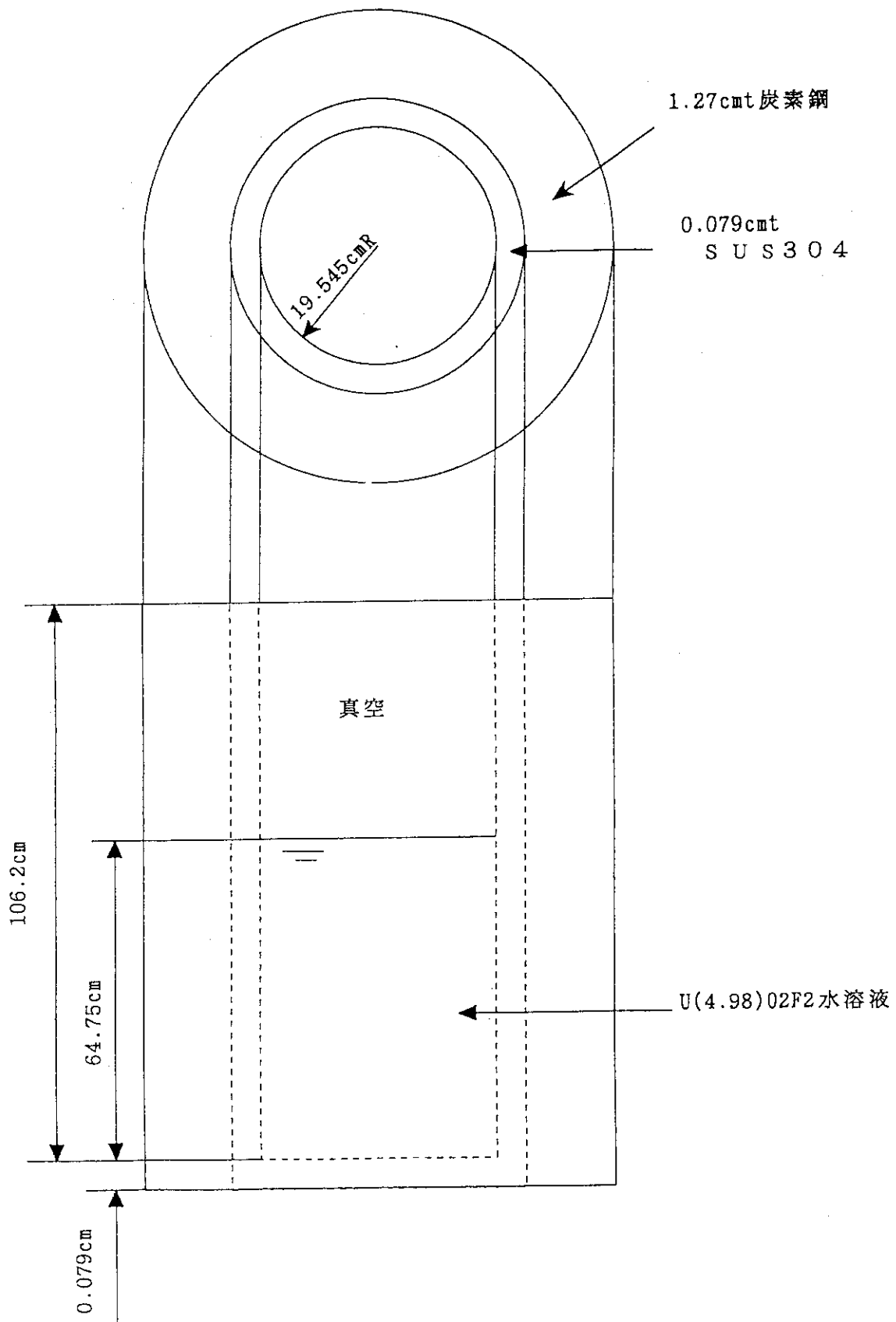


図 2.1 問題 1 の幾何形状例 (ケース 1-3)

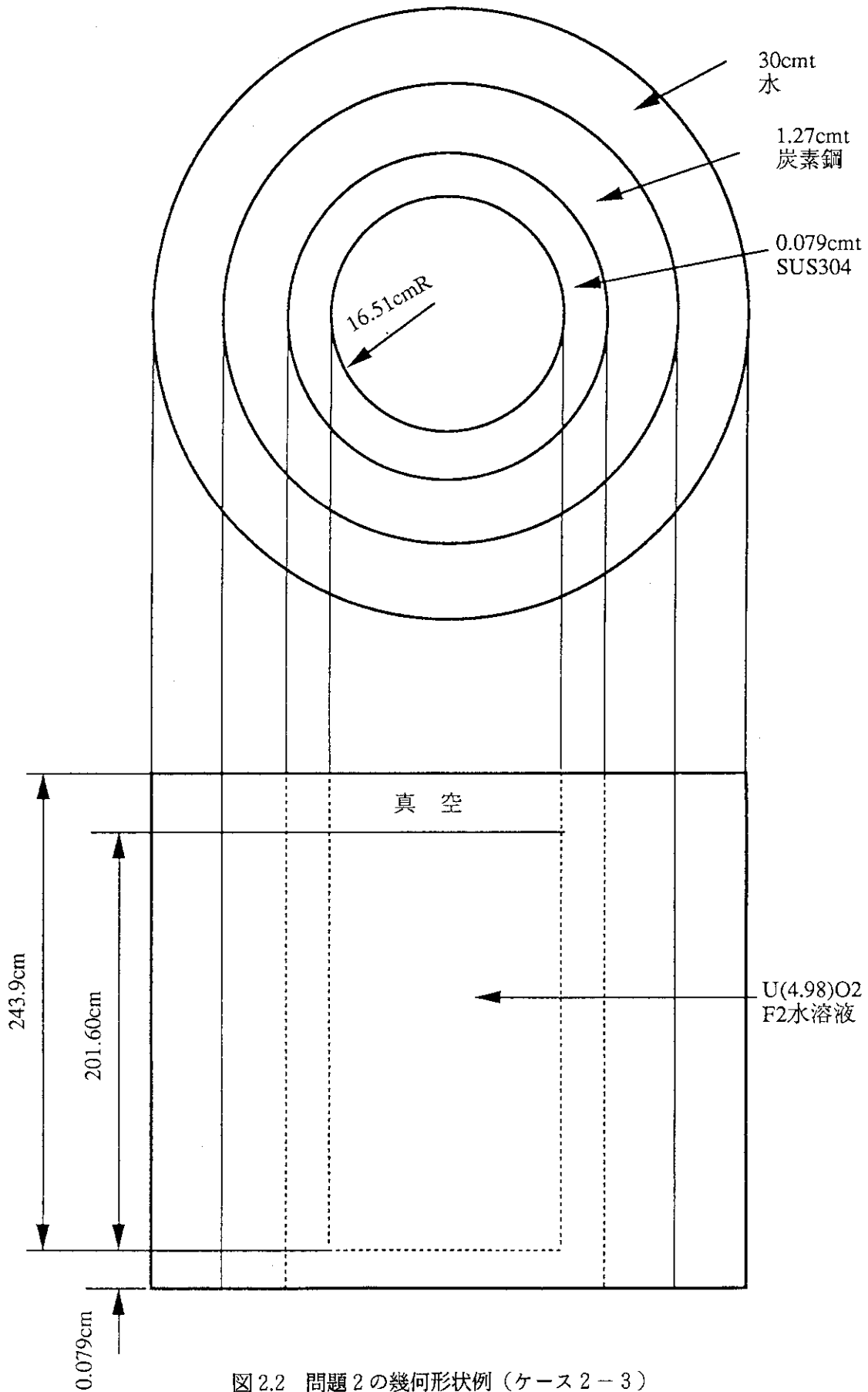


図 2.2 問題 2 の幾何形状例 (ケース 2-3)

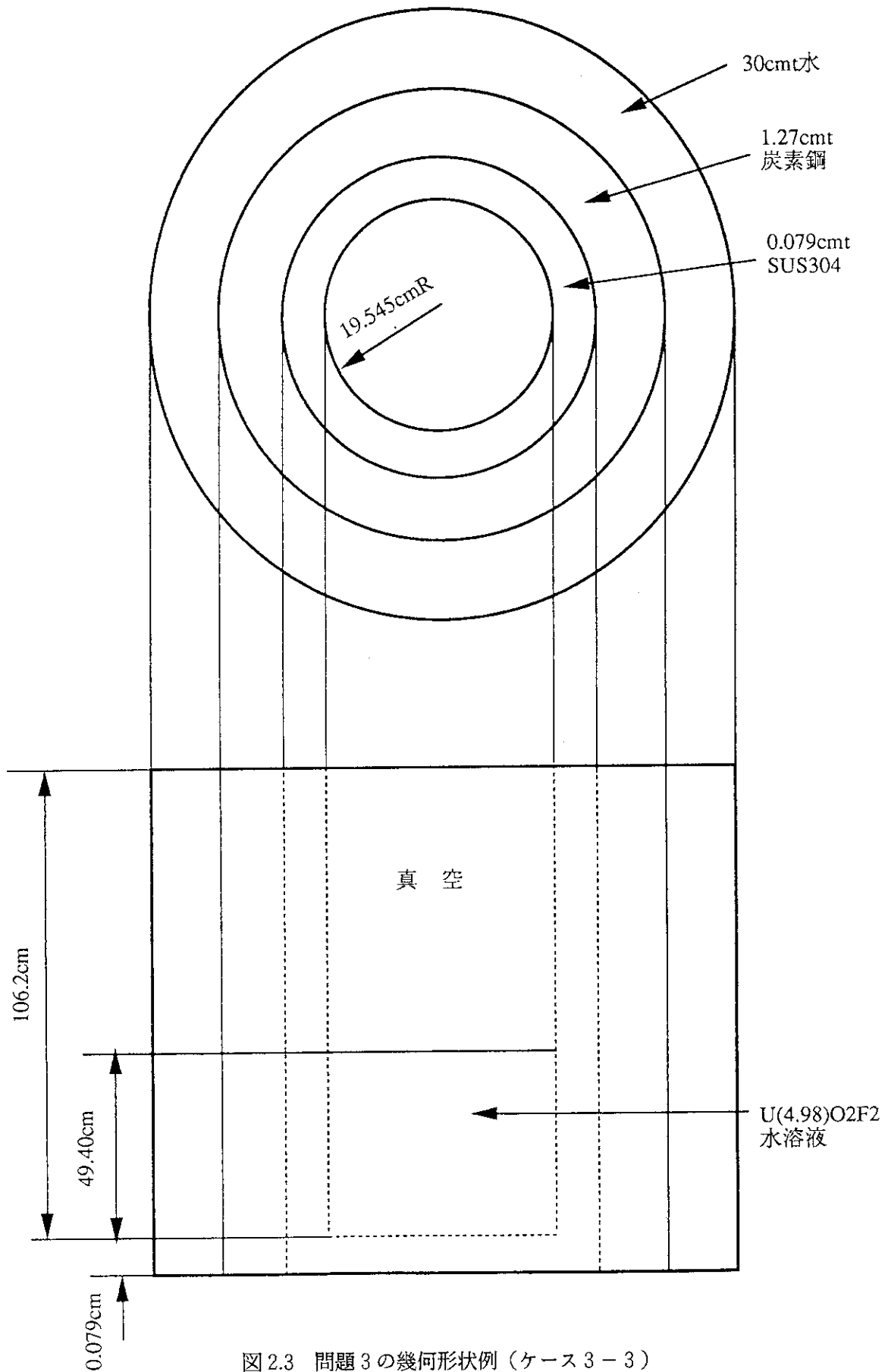


図 2.3 問題 3 の幾何形状例 (ケース 3-3)

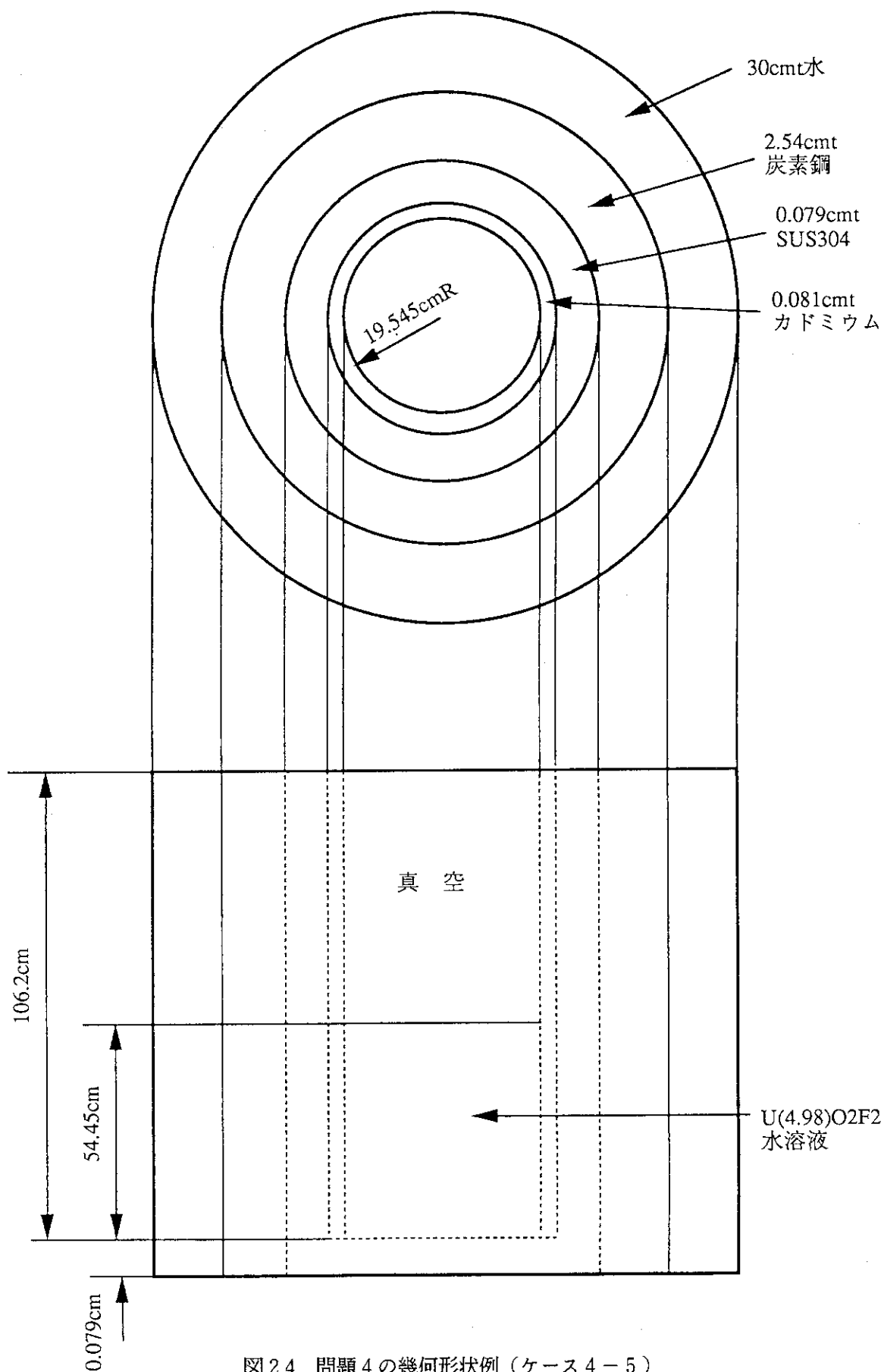


図 2.4 問題 4 の幾何形状例 (ケース 4-5)



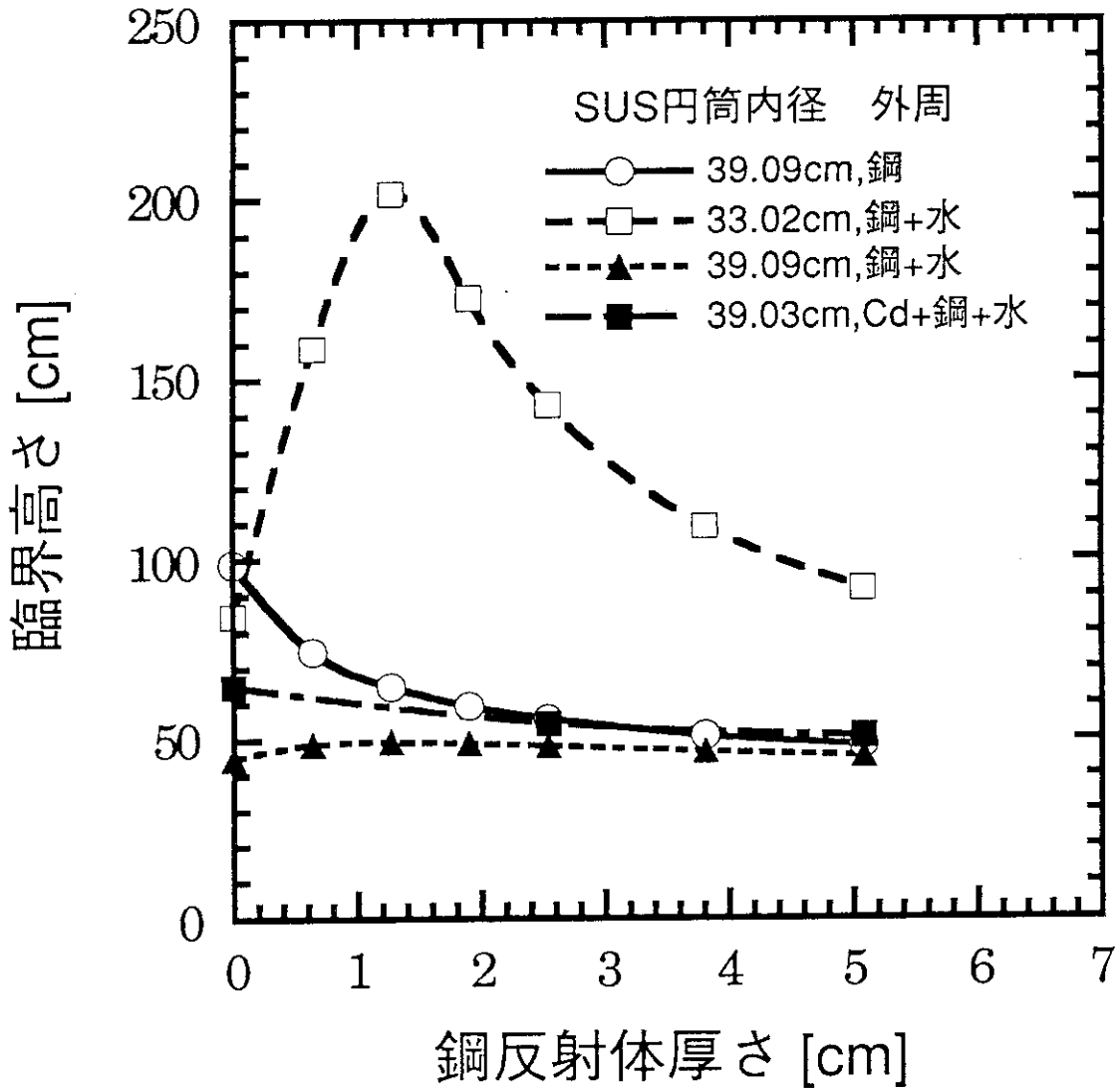


図 2.5 SUS 円筒容器入り 4.98 wt% <sup>235</sup>U 濃縮弗化ウラニル水溶液実験における臨界高さ

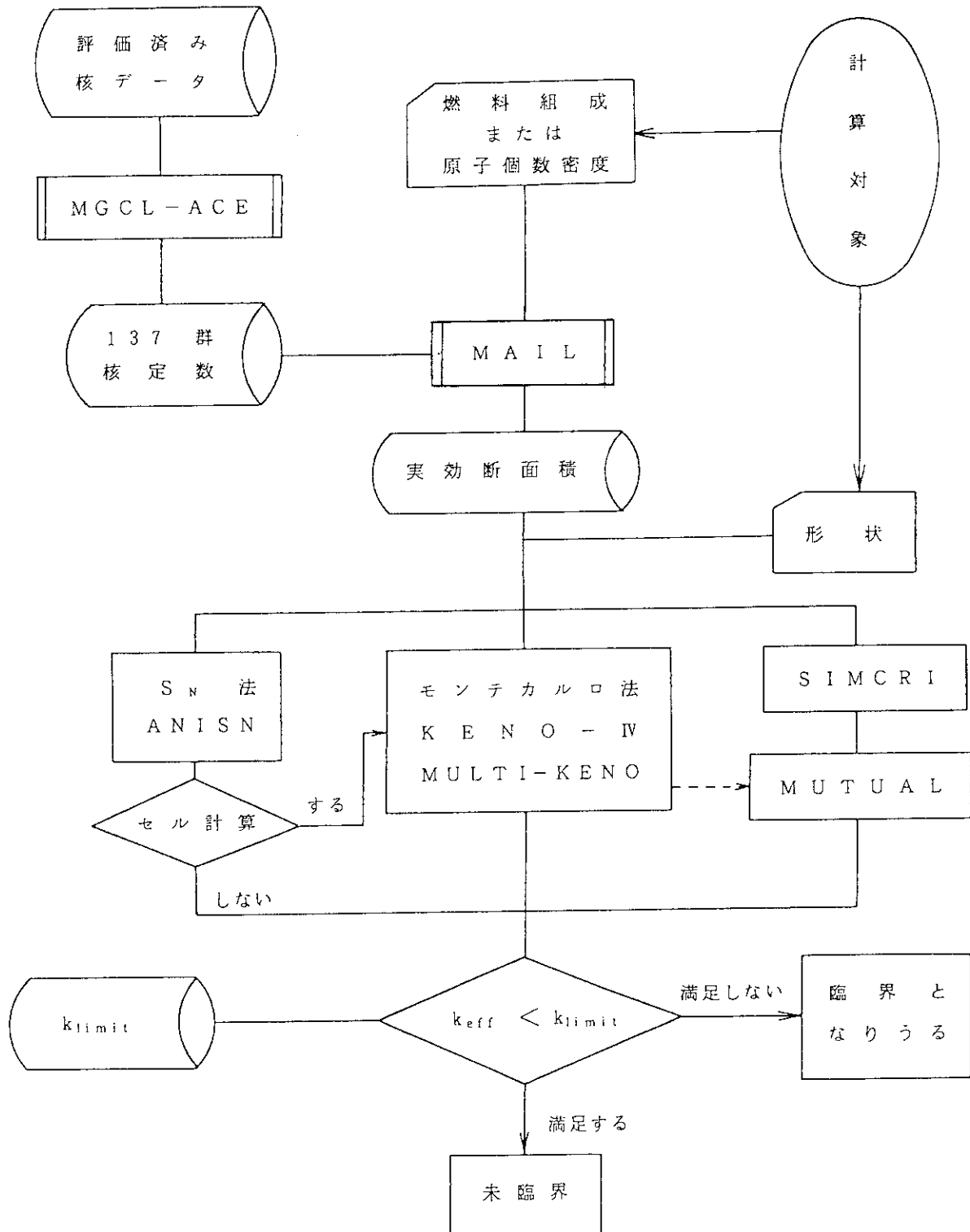


図 2.6 JACS コードシステムの流れ図

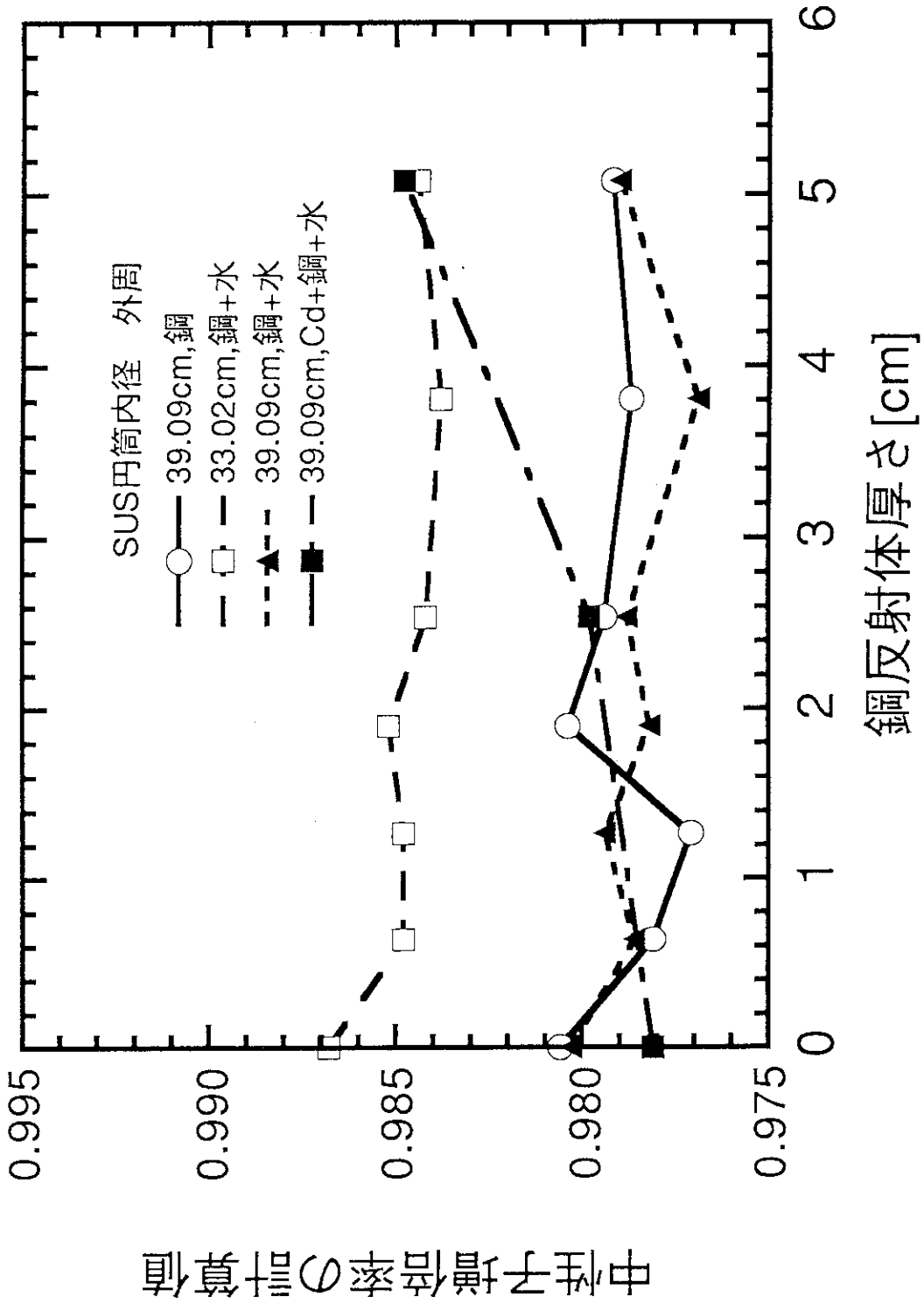


図2.7 SUS円筒容器入り4.98 wt% <sup>235</sup>U濃縮弗化ウラニル水溶液体系に対するJACSコードシステムでの解析結果

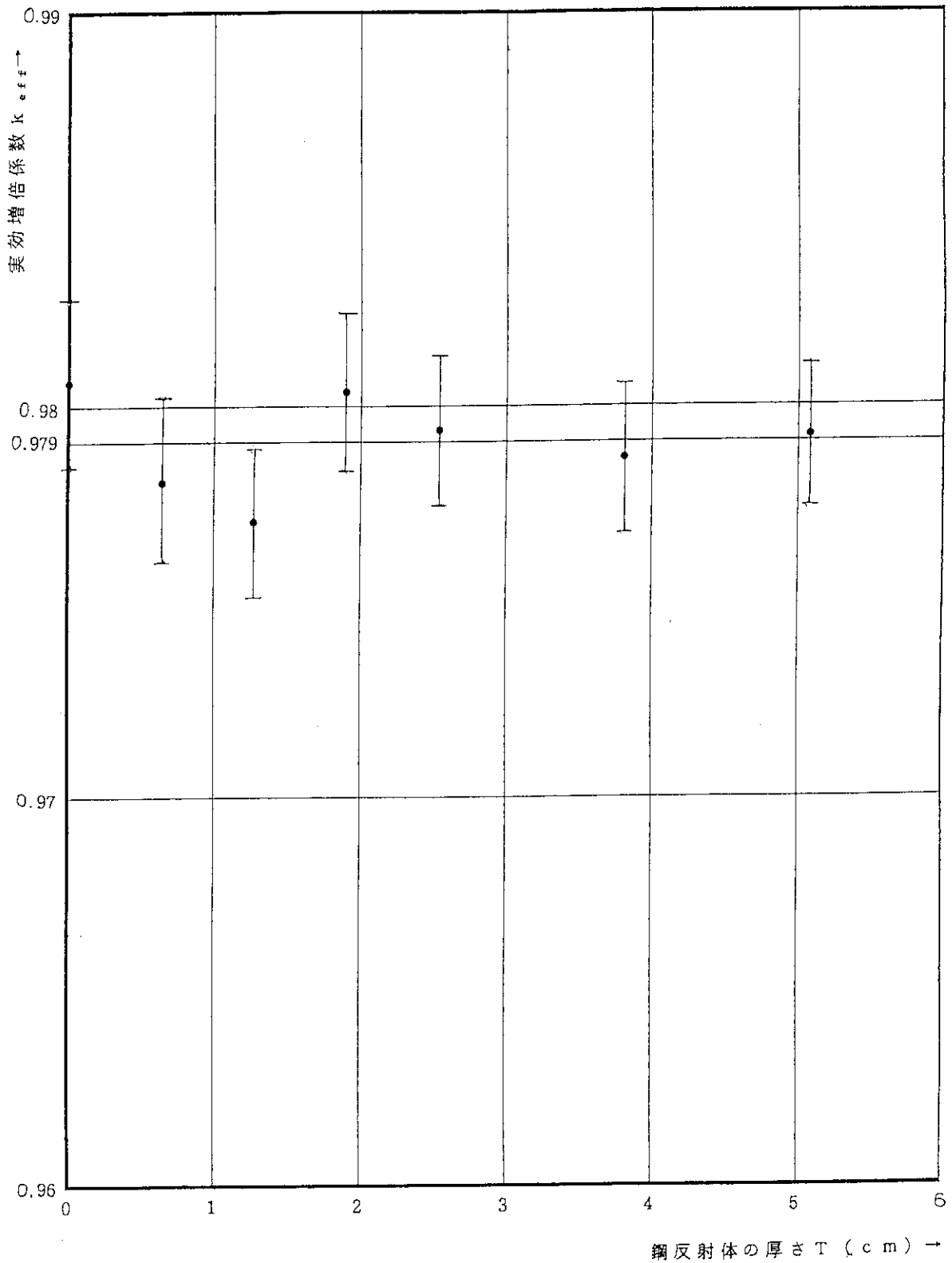


図 2.8 鋼反射体の厚さと実効増倍係数の関係 (問題 1)

### 3. 鋼の反射体節約の計算

第2章の問題1の体系を用いて鋼の反射体節約を求めた。即ち、鋼反射体を取り除き、燃料高さを変えずに燃料半径を増すことにより、臨界となる中性子増倍率の計算値0.979を得るための燃料半径を求めた。用いた幾何形状を図3.1に示す。ここでは計算精度を上げるために、KENO-IVの寸法サーチ機能を用いずに、燃料領域の半径を3~4通りに変えて中性子増倍率を求め、結果を1次式に当てはめることにより臨界となる中性子増倍率の値0.979に対応する燃料半径を求めた。第2章に記したのと同様に、臨界計算はJACSコードシステムのMGCL-J3ライブラリとKENO-IVコードの組合せを用いた。臨界計算を実施する為のジョブ制御文及び入力データを付録Bに示す。

臨界計算の結果、弗化ウラニル水溶液の半径増分と中性子増倍率との関係が表3.1のように得られ、これをグラフ化すると図3.2が得られる。さらに、第2章で得られた問題1の体系の中性子増倍率0.979を用いて、反射体節約を求めたものが表3.2である。これにより、鋼の厚さと反射体節約の関係が図3.3に示される。この図から鋼の反射体節約 $\delta_{ST}$ は、 $T$ を鋼反射体の厚さとすると、次のように表される ( $T \leq 5 \text{ cm}$ )。

$$\delta_{ST} = 0.87T - 0.064T^2 \quad (2)$$

表3.2 鋼反射体と同じ効果を与える燃料半径の増分  
SUS円筒容器(内径39.09 cm, 厚さ0.079 cm)  
入り4.98%  $^{235}\text{U}$ 濃縮弗化ウラニル水溶液(燃料濃度909.1 gU/l)臨界体系

鋼反射体厚さ [cm]	燃料半径増分 [cm]
0.64	0.48
1.27	1.03
1.90	1.43
2.54	1.80
3.81	2.37
5.08	2.77

表 3.1 SUS 円筒容器 (厚さ 0.079 cm) 入り 4.98 %  $^{235}\text{U}$  濃縮弗化ウラニル水溶液 (燃料濃度 909.1gU/l) 体系において燃料領域半径を 19.545 cm から増したときの JACS コードシステムに基づく中性子増倍率の計算結果\*1

溶液の高さ [cm]	溶液の直径 [cm]	半径の増分 [cm]	中性子増倍率の 計 算 値
74.65	39.49	0.20	0.973
	40.37	0.64	0.982
	41.57	1.24	0.998
	42.77	1.84	1.011
64.75	40.43	0.67	0.971
	41.63	1.27	0.985
	42.83	1.87	0.999
59.30	41.69	1.30	0.977
	42.89	1.90	0.989
	44.09	2.50	1.000
55.70	42.09	1.50	0.973
	42.97	1.94	0.981
	44.17	2.54	0.994
	45.37	3.14	1.008
50.90	43.49	2.20	0.976
	45.51	3.21	0.993
	46.71	3.81	1.005
	47.91	4.41	1.016
48.20	43.09	2.00	0.966
	48.05	4.48	1.008
	49.25	5.08	1.019

\*1 計算の標準偏差約0.001である。

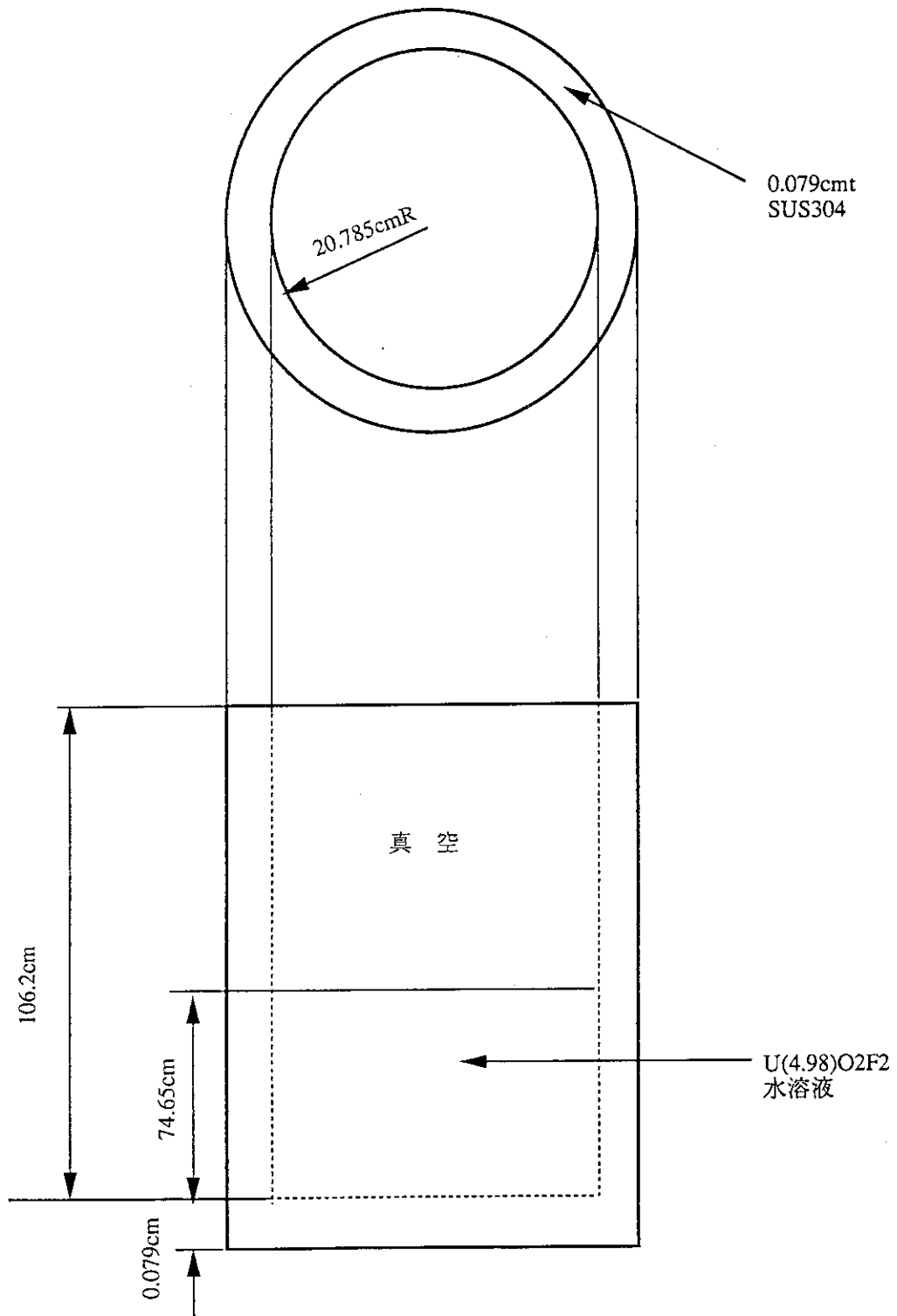


図 3.1 鋼の反射体節約を求めるときに用いた幾何形状例

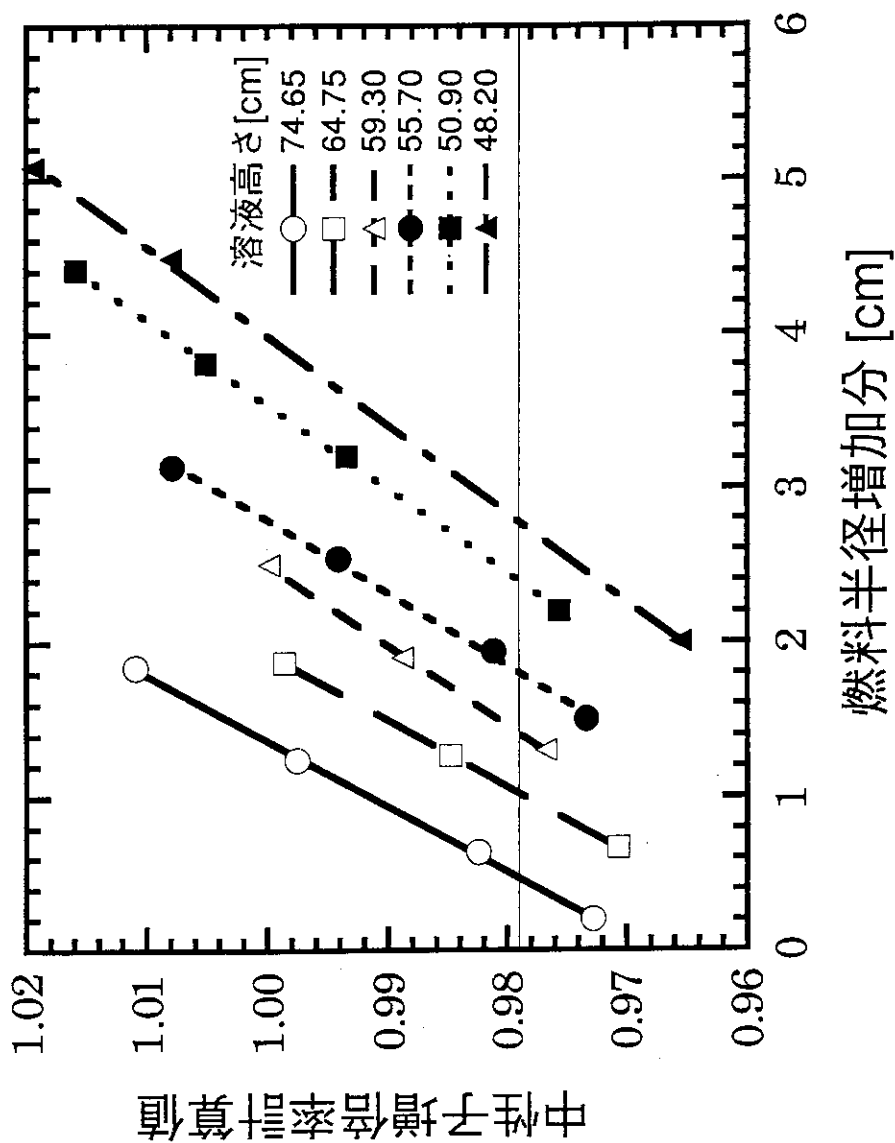


図 3.2 燃料領域半径の増加分と中性子増倍率計算値との関係 (厚さ 0.079 cm の SUS 製円筒容器入り 4.98 wt% 濃縮弗化ウラニル水溶液, ウラン濃度 909.1 gU/L)



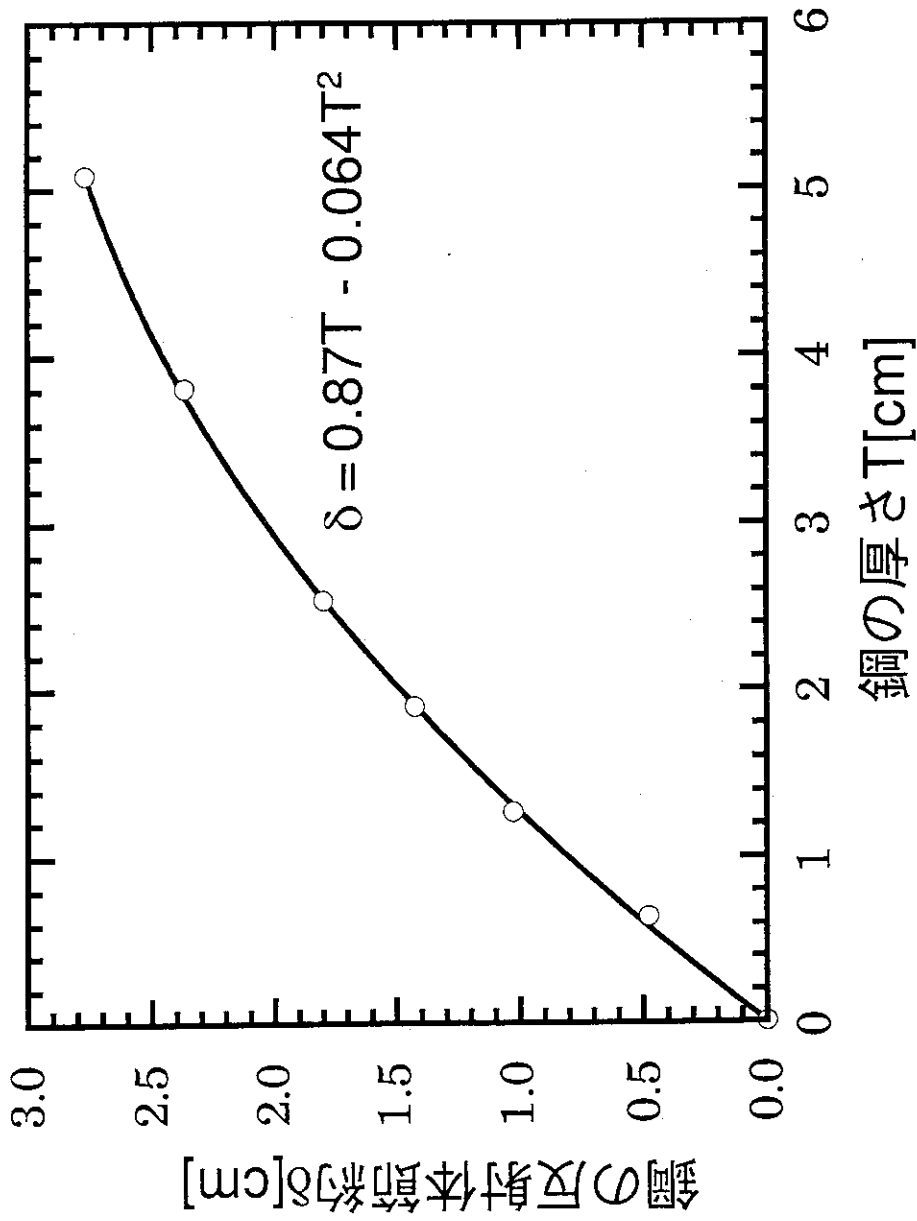


図 3.3 鋼の厚さと反射係数  $\delta_{ST}$  の関係

## 4. ステンレス鋼の反射体節約の計算

「臨界安全ハンドブック」<sup>13)</sup>の3.3.4節「外側真空の容器壁の反射効果」には、4wt%濃縮均質 $UO_2-H_2O$ 燃料の無限円柱体系（外側真空の反射条件下）において、ウラン濃度及びSUS304の容器壁厚さをパラメタとして中性子増倍率を計算した結果が掲載されている。これを図4.1に示す。これらの体系に対して、容器壁を取り除きその代わりに燃料領域の半径を増して同じ中性子増倍率を得ることができる。この燃料領域半径の増加分を元の容器壁による反射体節約と定義する。この関係を式で表すと、

$$\delta(T) = R_0(k_{eff}) - R(T; k_{eff}) \quad (3a)$$

$$= R(0; k_{eff}) - R(T; k_{eff}) \quad (3b)$$

となる。ここで、

$R_0(k_{eff})$  : 中性子増倍率が $k_{eff}$ となる裸の燃料領域の円柱半径、  
 $R(T; k_{eff})$  : 反射体を厚さ $T$ だけ巻き付けたときに中性子増倍率が $k_{eff}$ となる燃料領域の円柱半径、

である。図4.1に示された計算結果を用いて、核燃料サイクル施設で用いられる典型的なステンレス鋼SUS304における反射体節約を以下のようにして求めた。

修正一群理論によると、中性子増倍率 $k_{eff}$ は、

$$k_{eff} = \frac{k_{\infty}}{1 + M^2 B^2} \quad (4)$$

と表される。ここで、

$k_{\infty}$  : 無限増倍率、  
 $M^2$  : 中性子移動面積、  
 $B^2$  : 幾何学的バックリング

で、 $B^2$ は

$$B^2 = \left( \frac{2.405}{R + \lambda_{ex}} \right)^2 \quad (5)$$

と表される。ここで、

R : 無限円柱状燃料領域の半径、

$\lambda_{ex}$  : 外挿距離

である。

(3a)式に戻り、中性子増倍率が $k_{eff}$ となる裸の燃料領域の円柱半径 $R_0(k_{eff})$ は、(4)及び(5)式を用いると、

$$R_0(k_{eff}) = 2.405M \cdot \left[ \frac{k_{\infty}}{k_{eff}(T)} - 1 \right]^{-1/2} - \lambda_{ex} \quad (6)$$

となる。ここで $k_{eff}(T)$ と記したのは、厚さTの反射体が付いた体系での $k_{eff}$ と同じ値を持っているという意味である。

反射体を厚さTだけ巻き付けたときに中性子増倍率が $k_{eff}$ となる燃料領域の円柱半径 $R(T; k_{eff})$ は、各燃料濃度で一定値をとっている。「臨界安全ハンドブック」にはその値が記載されていないが、ここでは反射体厚さ0での計算結果に対して(4)及び(5)式を用いることにより

$$R(T; k_{eff}) = 2.405M \cdot \left[ \frac{k_{\infty}}{k_{eff}(0)} - 1 \right]^{-1/2} - \lambda_{ex} \quad (7)$$

と表される。こうして、反射体節約の表式

$$\delta(T) = 2.405M \left\{ \left[ \frac{k_{\infty}}{k_{eff}(T)} - 1 \right]^{-1/2} - \left[ \frac{k_{\infty}}{k_{eff}(0)} - 1 \right]^{-1/2} \right\} \quad (8)$$

の関係が得られる。

この(8)式を用いて、図4.1に示された燃料について $\delta(T)$ を求める。中性子増倍率 $k_{eff}(T)$ は図から読み取り、無限増倍率 $k_{\infty}$ 及び中性子移動面積Mは26群MGC

L-B-IVライブラリ<sup>12)</sup>とSIMCRIコード<sup>14)</sup>の組合せを用いて計算した。これら炉物理定数の計算結果を表4.1に示す。なお、反射体厚さは0として求めた。さらに、(8)式に従って求めた反射体節約 $\delta(T)$ の計算結果を表4.2及び図4.2に示す。

図4.2では、ウラン濃度が400gU/ℓの結果のばらつきが大きいのが、600~4000gU/ℓの結果は次に示すように、ステンレス鋼SUS304厚さTの3次関数として、その反射体節約 $\delta_{ss}$ が次のように求まった ( $T \leq 10 \text{ cm}$ )。

$$\delta_{ss} = 0.94T - 0.079T^2 + 0.0030T^3 \quad (9)$$

(U濃度：600gU/ℓ)

$$\delta_{ss} = 1.00T - 0.086T^2 + 0.0034T^3 \quad (10)$$

(U濃度：1000gU/ℓ)

$$\delta_{ss} = 1.09T - 0.094T^2 + 0.0037T^3 \quad (11)$$

(U濃度：2000gU/ℓ)

$$\delta_{ss} = 1.14T - 0.090T^2 + 0.0034T^3 \quad (12)$$

(U濃度：4000gU/ℓ)

反射体節約 $\delta_{ss}$ と容器壁厚さTが、特に $\delta_{ss} \leq T$ の関係であれば、容器壁を燃料に置き換えた方が中性子増倍率が大きくなる。すなわち、臨界安全評価上厳しい結果を与え、安全側の評価となる。(10)~(12)式から、 $\delta_{ss} = T$ となるウラン濃度とSUS容器壁厚さの関係を示したのが図4.3である。この曲線の上側の範囲では上記の置き換えが厳しい結果を与える範囲である。

なお、文献3)に記述されているSUSの反射体節約 $\delta_{ss}$ の表式

$$\delta_{ss} = 0.90T \quad (1)$$

(T：SUSの厚さ、但し、 $T \leq 1 \text{ cm}$ )

は、今回の計算結果を考えるとほぼ妥当なものであったと判断される。ただし、今回の計算結果は図3.2から分かるように燃料濃度依存性があり、ウラン濃度が高い方

が反射体節約が大きかった。反射体厚さ  $T$  が小さい範囲において、反射体節約とウラン濃度との関係について次のような一群拡散近似での関係がある。

$$\delta(T) \cong \frac{D_o}{D_r} T \quad (13)$$

ここで、

$D_o$  : 燃料領域での拡散係数、

$D_r$  : 反射体領域での拡散係数

である。均質  $UO_2-H_2O$  の拡散係数の図<sup>15)</sup>を図4.4として引用する。この図は  $H/U$  の関数で示しているので、参考までに  $U$  濃度- $H/U$  曲線<sup>13)</sup>も図4.5として引用する。濃縮度4%では、ウラン濃度が  $600\text{gU}/\ell$  から  $4,000\text{gU}/\ell$  に増大するのに従い  $H/U$  が40から4に減少し、拡散係数は0.82から1.05に増大しているのが分かる。この結果は今回の計算結果とよく整合性がとれている。

また、前章で調べた鋼の反射体節約の方が  $SUS$  の反射体節約より少ないのは、材料の組成の相違、特に  $Fe$  の含有量の相違からきているものと考えられる。

表 4.1 4 wt% 濃縮  $\text{UO}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$  ボイドなし均質混合系の  
無限増倍率  $k_\infty$  及び移動距離  $M$  の計算結果

ウラン濃度 [gU/ℓ]	実効増倍率 $k_{eff}$	無限増倍率 $k_\infty$	移動距離 $M$ [cm]
400	0.987	1.028	5.92
600	0.945	1.183	5.82
1,000	0.884	1.332	5.78
2,000	0.824	1.430	5.85
4,000	0.819	1.384	6.11

表 4.2 4 wt% 濃縮  $\text{UO}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$  ボイドなし均質混合系における  
ステンレス鋼 SUS304 の反射体節約の計算結果

反射体厚さ [cm]	ウラン濃度[gU/ℓ]				
	400	600	1000	2000	4000
1	1.18	0.91	0.97	1.05	1.10
2	1.97	1.61	1.71	1.86	1.97
3	2.42	2.18	2.31	2.52	2.69
4	3.91	2.65	2.81	3.07	3.30
5	2.79	3.07	3.24	3.54	3.84
6	2.86	3.44	3.62	3.94	4.30
7	3.91	3.75	3.94	4.30	4.72
8	3.57	4.03	4.23	4.62	5.09
9	4.30	4.28	4.49	4.90	5.42
10	4.17	4.50	4.72	5.15	5.72

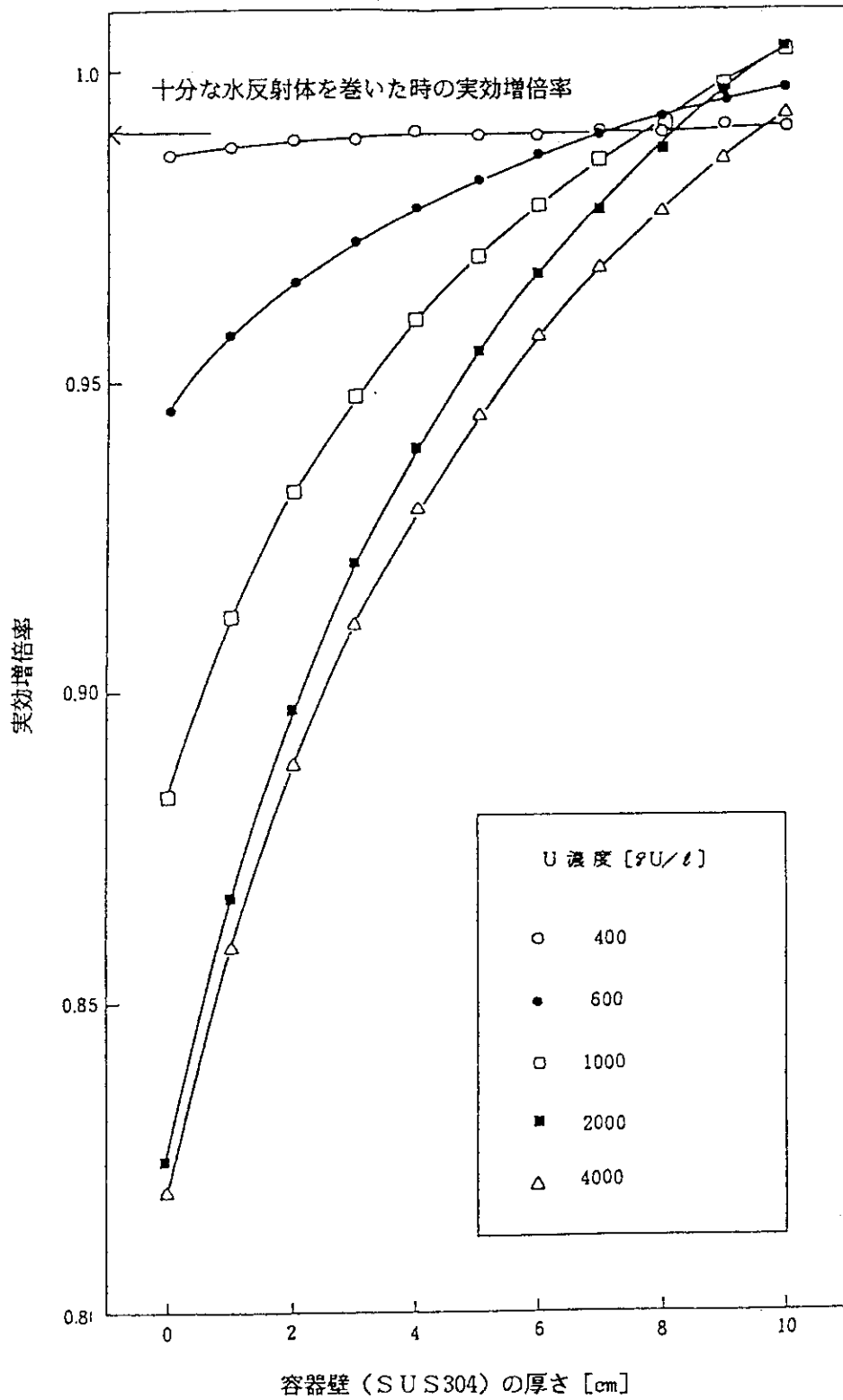


図 4.1 均質  $UO_2-H_2O$  燃料体系の容器壁 (SUS304) 厚さによる実効増倍率の変化 (無限円柱, 濃縮度 4 wt%, 容器外側真空)

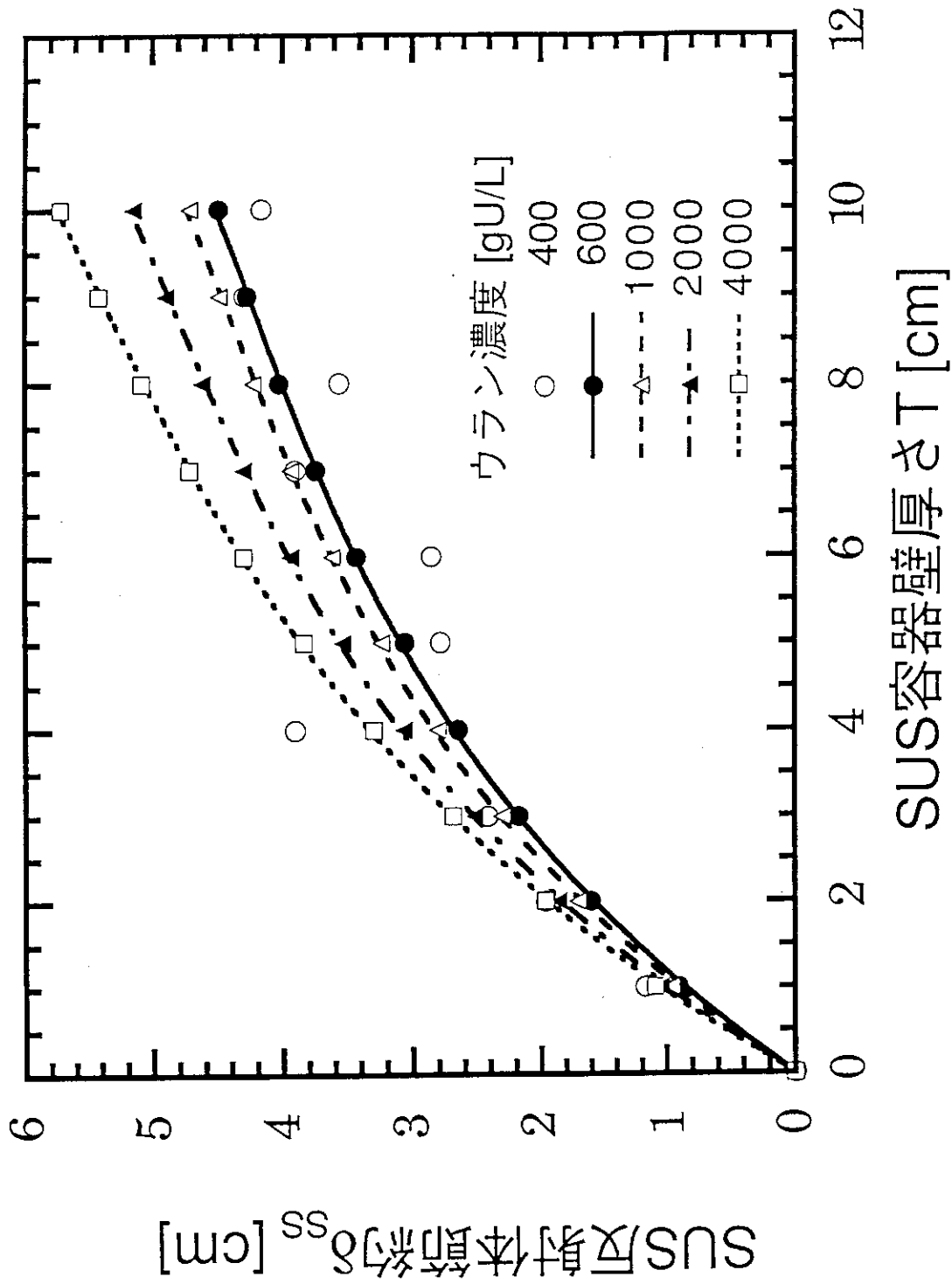


図 4.2 SUS304 容器壁の厚さと反射体節約  $\delta_{ss}$  との関係



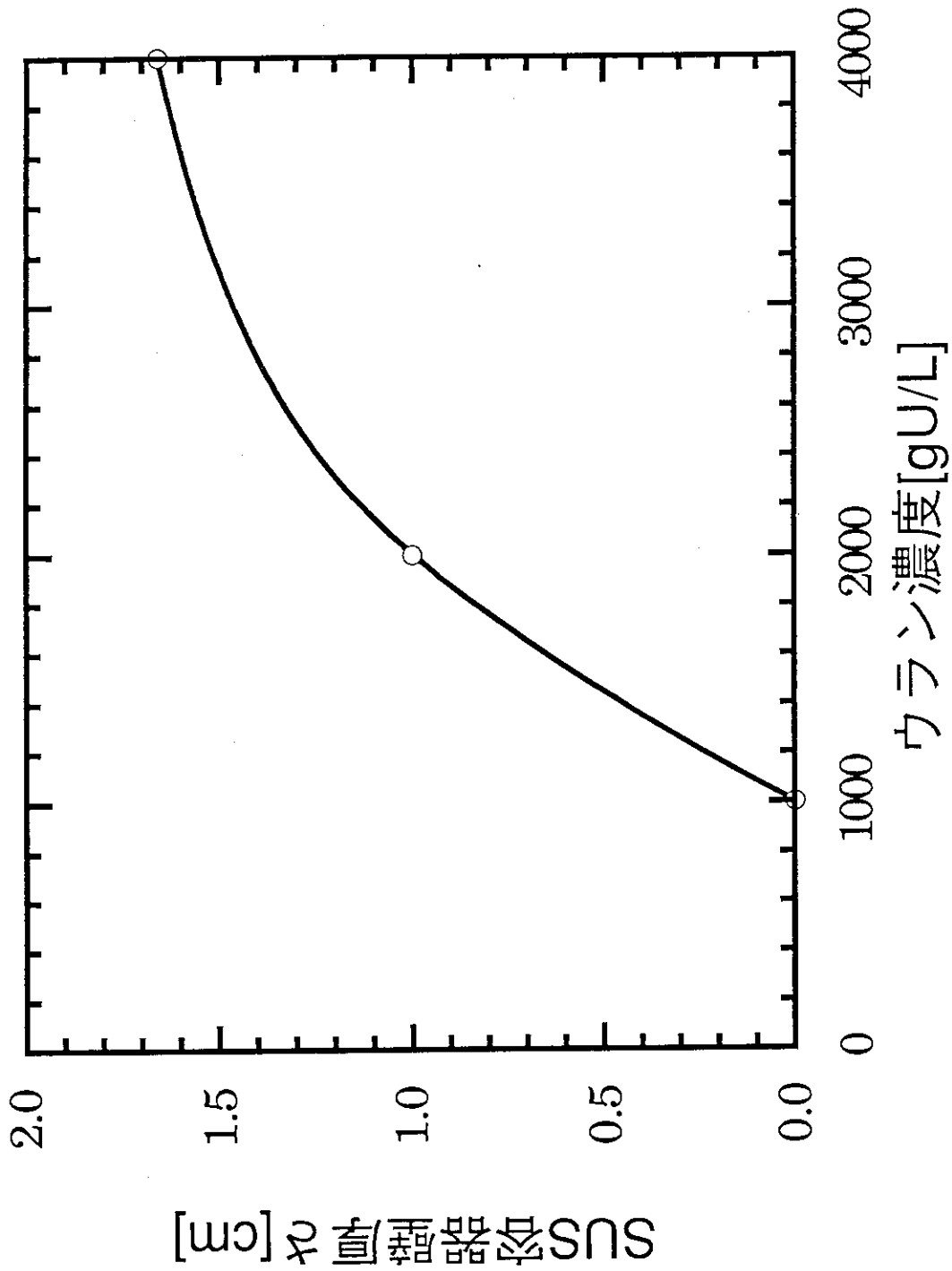


図 4.3 水反射体で囲まれていない SUS 容器を燃料に置き換えたときに中性子増倍率が等しくなる SUS 容器壁厚さ (4 wt.% 濃縮  $UO_2-H_2O$  燃料)

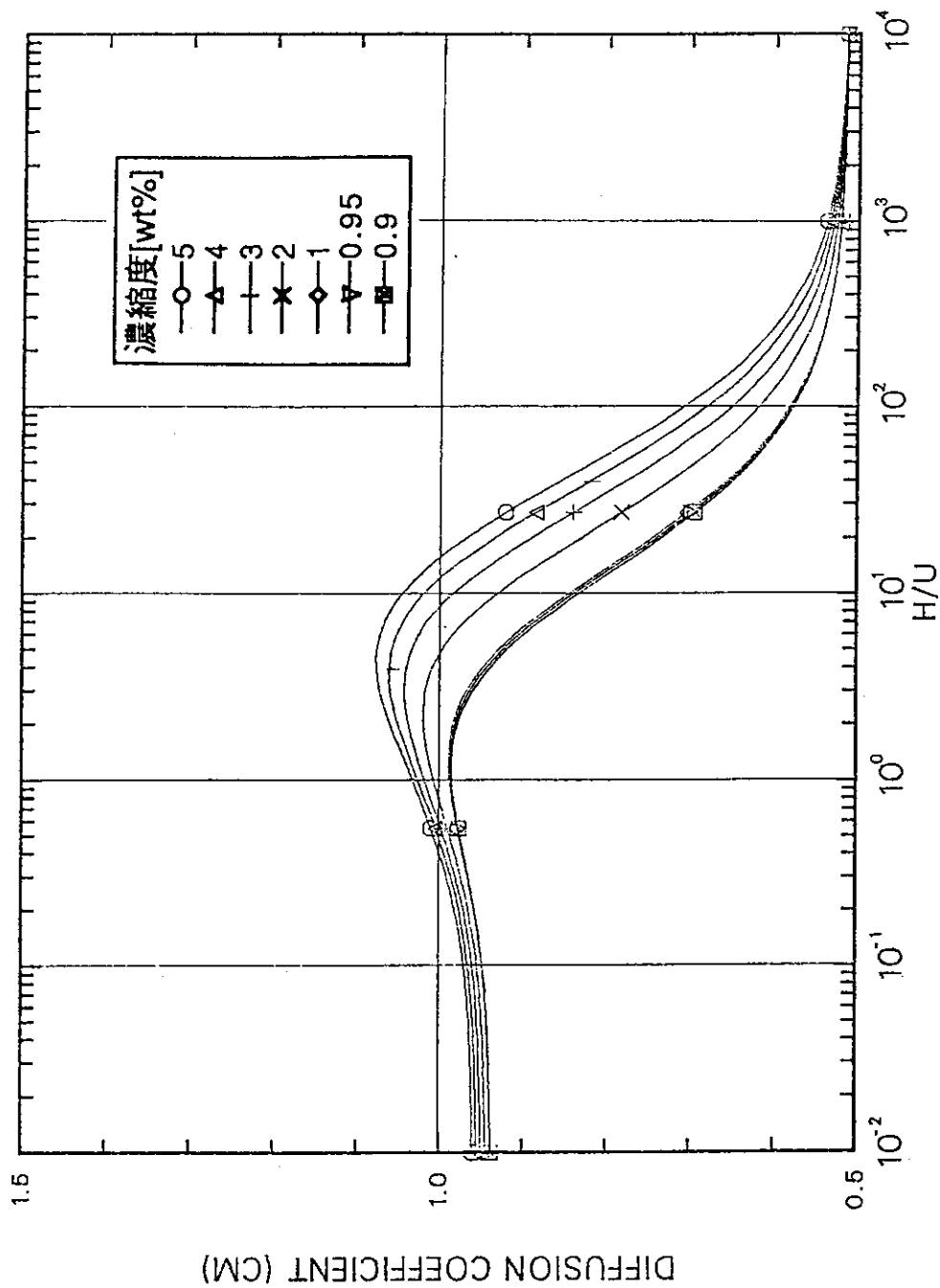


図 4.4 均質  $UO_2-H_2O$  の拡散係数 (MGCL-J3 ライブラリに準拠)

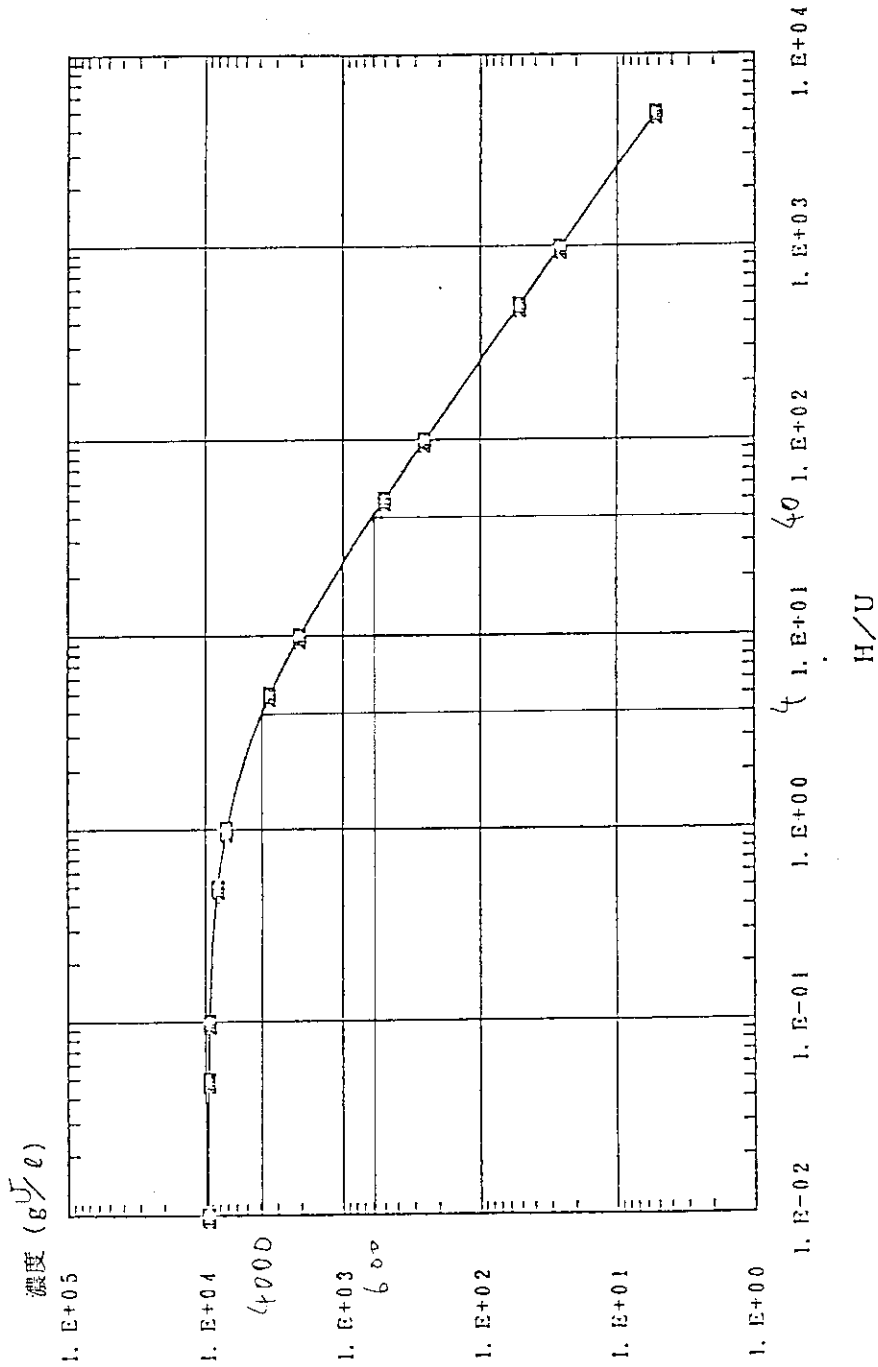


図 4.5 U 濃度-H/U 曲線 (均質  $UO_2-H_2O$ )

## 5. 結論と今後の課題

はじめに、米国ORNLで実施された4.98wt%濃縮フッ化ウラニル水溶液（ウラン濃度909gU/ℓ）の臨界実験を解析した。溶液は、0.079cm厚のSUS304製円筒容器に入り、その外側を厚さ0~5cmの間で7通りに厚さを変えた鋼で巻いている。解析にはJACSコードシステムのMGCL-J3ライブラリとKENO-IVコードの組合せを用いた。中性子増倍率の計算値は、鋼反射体の厚さにほぼ依存せず、平均で0.979となった。

次に、鋼反射体を取り除き、その代わりに燃料領域の直径を増やして臨界計算を行い、鋼の反射体節約 $\delta_{sT}$ を求めた。その結果、 $\delta_{sT}=0.87T-0.064T^2$ （T：鋼の厚さ）の関係を得た。

さらに、「臨界安全ハンドブック」の記載されている4wt%濃縮UO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>Oの均質混合燃料のウラン濃度とSUS304容器壁厚さをパラメタとした中性子増倍率の計算結果のデータからステンレス鋼SUS304の反射体節約 $\delta_{ss}$ と容器壁厚さTとの関係をTの3次式として求めた。ウラン濃度が600~4000gU/ℓの間で増加すると反射体節約も増加する傾向が得られた。

商業用の核燃料サイクル施設で現れる配管が臨界安全評価上無視しうるか否かの議論をする上で、配管材としてよく用いられるステンレス鋼をどのように取り扱ったらよいかは重要な問題である。今回の検討ではそれ自体の臨界性が問題となる直径が何十cmにもなる容器の壁としてのステンレス鋼であった。配管のようにその直径が数cmしかない配管材としてのステンレス鋼においても、その効果が反射体節約として取り扱えると簡易評価上において便利である。配管におけるステンレス鋼の反射効果を検討することが次の課題である。

## 謝 辞

本研究は、小宮山が平成6年度の夏期実習生として日本原子力研究所に滞在中に行った計算に主に基づくものです。JACSコードシステムについて御指導下さった小室雄一氏、参考のためMCNPによる臨界計算を実施して下さいました荒川拓也氏を始め、お世話になった燃料サイクル安全工学部燃料サイクル安全評価研究室の皆様へ感謝致します。最後になりましたが、本報告書について有益なご意見を頂いた同研究室の野村靖室長及び燃料サイクル安全工学部の内藤倅孝次長に感謝致します。

## 5. 結論と今後の課題

はじめに、米国ORNLで実施された4.98wt%濃縮フッ化ウラニル水溶液（ウラン濃度909gU/ℓ）の臨界実験を解析した。溶液は、0.079cm厚のSUS304製円筒容器に入り、その外側を厚さ0～5cmの間で7通りに厚さを変えた鋼で巻いている。解析にはJACSコードシステムのMGCL-J3ライブラリとKENO-IVコードの組合せを用いた。中性子増倍率の計算値は、鋼反射体の厚さにほぼ依存せず、平均で0.979となった。

次に、鋼反射体を取り除き、その代わりに燃料領域の直径を増やして臨界計算を行い、鋼の反射体節約 $\delta_{sT}$ を求めた。その結果、 $\delta_{sT}=0.87T-0.064T^2$ （T：鋼の厚さ）の関係を得た。

さらに、「臨界安全ハンドブック」の記載されている4wt%濃縮 $UO_2-H_2O$ の均質混合燃料のウラン濃度とSUS304容器壁厚さをパラメタとした中性子増倍率の計算結果のデータからステンレス鋼SUS304の反射体節約 $\delta_{ss}$ と容器壁厚さTとの関係をTの3次式として求めた。ウラン濃度が600～4000gU/ℓの間で増加すると反射体節約も増加する傾向が得られた。

商業用の核燃料サイクル施設で現れる配管が臨界安全評価上無視しうるか否かの議論をする上で、配管材としてよく用いられるステンレス鋼をどのように取り扱ったらよいかは重要な問題である。今回の検討ではそれ自体の臨界性が問題となる直径が何十cmにもなる容器の壁としてのステンレス鋼であった。配管のようにその直径が数cmしかない配管材としてのステンレス鋼においても、その効果が反射体節約として取り扱えると簡易評価上において便利である。配管におけるステンレス鋼の反射効果を検討することが次の課題である。

## 謝 辞

本研究は、小宮山が平成6年度の夏期実習生として日本原子力研究所に滞在中に行った計算に主に基づくものです。JACSコードシステムについて御指導下さった小室雄一氏、参考のためMCNPによる臨界計算を実施して下さいました荒川拓也氏を始め、お世話になった燃料サイクル安全工学部燃料サイクル安全評価研究室の皆様へ感謝致します。最後になりましたが、本報告書について有益なご意見を頂いた同研究室の野村靖室長及び燃料サイクル安全工学部の内藤倣孝次長に感謝致します。

## 参 考 文 献

- 1) NUCEF実験計画検討グループ、「燃料サイクル安全工学研究施設(NUCEF)における研究計画」、JAERI-M94-066 (1994).
- 2) "American National Standard Nuclear Criticality Safety Criteria for Steel-Pipe Intersections Containing Aqueous Solutions of Fissile Materials," ANSI/ANS-8.9-1987, American National Society (1987).
- 3) B.G. Dubovsky et al., "The Critical Parameters of Aqueous Solutions of  $UO_2(NO_3)_2$  and Nuclear Safety," Proc. of the Third Int. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, 1964, 13, 254-263 (United Nations, NY, 1965)
- 4) E.B. Johnson and C.E. Newlon, "The effect of Steel-Water Reflectors on the Criticality of Low-Enriched Uranyl Fluoride Solution," ANS Trans. 11, 383-384 (1968)
- 5) J. Katakura, Y. Naito and Y. Komuro, "Development of the Computer Code System JACS for Criticality Safety", Trans. Am. Nucl. Soc., 41, 329 (1982).
- 6) 小室雄一・奥野浩・内藤淑孝・小田久子・永井正克・奥田泰久・酒井友宏・塩田雅之、「臨界計算用多群定数ライブラリーMGCL-J3の作成と検証」、JAERI-M93-190 (1993).
- 7) L.M. Petrie and N.F. Cross, "KENO-IV, An Improved Monte Carlo Criticality Program," ORNL-4398, Oak Ridge National Library (1975).
- 8) K. Shibata et al., "JENDL-3: Japanese Evaluated Nuclear Cross Section Library, Version-3," JAERI-1319 (1990).
- 9) 小室雄一・奥野浩・内藤淑孝・酒井友宏・塩田雅之・奥田泰久、「断面積セット作成プログラムMAI L3.0使用手引書」、JAERI-M90-126 (1990).
- 10) J. Briersmeister (ed.), "MCNP--A General Monte Carlo Code N-Particle Transport Code Version 4A," LA-12625 (1993).
- 11) Y. Nomura, J. Katakura, Y. Naito, Y. Komuro and H. Okuno, "Benchmark

- Calculations by the Nuclear Criticality Safety Analysis Code System JACS (MGCL, KENO-IV)," JAERI 1303 (1986).
- 12) Y. Naito, S. Tsuruta, T. Matsumura and T. Ohuchi, "MGCL-PROCESSOR: A Computer Code System for Processing Multigroup Constants Library MGCL", JAERI-M9396 (1981).
- 13) 科学技術庁原子力局核燃料規制課編、「臨界安全ハンドブック」、にっかん書房 (1988).
- 14) S. Nakamaru, N. Sugawara, Y. Naito, J. Katakura and H. Okuno, "SIMCRI: A Simple Computer Code for Calculating Nuclear Criticality Parameters," JAERI-M86-027 (1986).
- 15) 奥野浩・梅田健太郎・小室雄一・内藤俣孝、「種々の核燃料物質における無限体系の核特性パラメタ及び臨界データ—MGCL-J3とSIMCRIの組合せによる計算—」、JAERI-M93-135 (1993).

付録A 臨界実験解析に用いたジョブ制御文と入力データ  
 [J9068. JCL. CNTLに収納]

```

//F9068049 JOB ('636790680931.00001',, 'SRP',, 'JOB 628.
//          'T.07W.06C.03I.07E.02',, 'SRP',, '
//          'KA.KOMIYAMA ',CLASS=F,PRTY=00,TIME=(0020,00),
//          MSGCLASS=S,MSGLEVEL=(2,0,1),
//          NOTIFY=J9068,
//          USER=J9068,GROUP=G0931,PASSWORD=
***JOBPARM
// EXEC      FORTEX,SO='J3069.MAIL31.FORTEX',Q=' ',A='ELM(*)'      0000080
// EXEC      LKEDEX,SSLB='NO'                                       0000090
// EXEC      GOEX                                                    0000100
//FT21F001   DD DSN=J1446.RAB89B.HTABLE.DATA,LABEL=(,,,IN),DISP=SHR  0000150
//FT11F001   DD DSN=J3069.MGCL94A.DATA,LABEL=(,,,IN),DISP=SHR      0000151
//FT31F001   DD DSN=J3069.SMF94A.DATA,LABEL=(,,,IN),DISP=SHR      0000152
// EXPAND    TPDISK,DDN=FT02F001,RECFM=VBS,RSIZE=19064,BSIZE=19068 0000160
// EXPAND    DISKPSN,DDN=FT03F001,DSN=B                             0000170
//SYSIN      DD DSN=J9068.U2F2MAIL.DATA(P870#4),DISP=SHR          0000181
***
// EXEC      FORTEX                                                    0000200
//SYSIN      DD *              GENERATED STATEMENT
// EXEC      LKEDITEX,LM='J3069.KEND0',Q=' .LOADEX',                0000210
//          A='SECTION=24,SIZE=(4M,1M)',REGION=2048K              0000211
// EXEC      GOEX,QBSIZE=137                                         0000220
// EXPAND    DISK,DDN=FT18F001,SPC='50,20'                          0000260
// EXPAND    DISKPSO,DDN=FT41F001,DSN=B,DISP=SHR                   0000270
//SYSIN      DD DSN=J9068.U2F2KEND.DATA(P05#5),DISP=SHR           0000290

```



(1) 問題1の入力データ

```

    3 137    2    0    1    0    1    3
*UO2F2*
    4.98    0.9091        0
*SUS-304*
*C-STEEL*

```

```

CRITICAL EXPERIMENT UO2F2 SOLUTIONS WITH 4.98% ENRICHMENT U PATTERN 5
100.0 250 3000 50 2R137 3*3 5 1 3*1 3 0 0 2000 10*0
1 -1 1.0 2 2 1.0 3 3 1.0
BOX TYPE 1
CYLINDER 1 19.545 74.65 0.000 137R0.5
CYLINDER 0 19.545 106.200 0.000 137R0.5
CYLINDER 2 19.624 106.200 -0.0790 137R0.5
CYLINDER 3 20.264 106.200 -0.0790 137R0.5
CUBOID 0 20.264 -20.264 20.264 -20.264 106.20 -0.0790 137R0.5

```

(2) 問題2の入力データ

```

    4 137    2    0    1    0    1    3
*UO2F2*
    4.98    0.9091        0
*SUS-304*
*C-STEEL*
*H2O*
    20

```

```

CRITICAL EXPERIMENT UO2F2 SOLUTIONS WITH 4.98% ENRICHMENT U PATTERN 5
100.0 250 3000 50 2R137 3*4 6 1 3*1 4 0 0 2000 10*0
1 -1 1.0 2 2 1.0 3 3 1.0 4 4 1.0
BOX TYPE 1
CYLINDER 1 16.510 158.85 0.000 137R0.5
CYLINDER 0 16.510 243.900 0.000 137R0.5
CYLINDER 2 16.589 243.900 -0.0790 137R0.5
CYLINDER 3 17.229 243.900 -0.0790 137R0.5
CYLINDER 4 47.229 243.900 -0.0790 137R0.5
CUBOID 0 47.229 -47.229 47.229 -47.229 243.90 -0.0790 137R0.5

```

(3) 問題3の入力データ

```

    4 137    2    0    1    0    1    3
*UO2F2*
    4.98    0.9091    0
*SUS-304*
*C-STEEL*
*H2O*
    20
    
```

```

CRITICAL EXPERIMENT UO2F2 SOLUTIONS WITH 4.98% ENRICHMENT U PATTERN 5
100.0 250 3000 50 2R137 3*4 6 1 .3*1 4 0 0 2000 10*0
1 -1 1.0 2 2 1.0 3 3 1.0 4 4 1.0
BOX TYPE 1
CYLINDER 1 19.545 48.70 0.000 137R0.5
CYLINDER 0 19.545 106.200 0.000 137R0.5
CYLINDER 2 19.624 106.200 -0.0790 137R0.5
CYLINDER 3 20.264 106.200 -0.0790 137R0.5
CYLINDER 4 50.264 106.200 -0.0790 137R0.5
CUBOID 0 50.264 -50.264 50.264 -50.264 106.20 -0.0790 137R0.5
    
```

(4) 問題4の入力データ

```

    5 137    2    0    1    0    1    3
*UO2F2*
    4.98    0.9091    0
*CADMIUM*
*SUS-304*
*C-STEEL*
*H2O*
    20
    
```

```

CRITICAL EXPERIMENT UO2F2 SOLUTIONS WITH 4.98% ENRICHMENT U PATTERN 5
100.0 250 3000 50 2R137 3*5 7 1 .3*1 5 0 0 2000 10*0
1 -1 1.0 2 2 1.0 3 3 1.0 4 4 1.0 5 5 1.0
BOX TYPE 1
CYLINDER 1 19.464 54.45 0.000 137R0.5
CYLINDER 0 19.464 106.200 0.000 137R0.5
CYLINDER 2 19.545 106.200 -0.0790 137R0.5
CYLINDER 3 19.624 106.200 -0.0790 137R0.5
CYLINDER 4 22.164 106.200 -0.0790 137R0.5
CYLINDER 5 52.164 106.200 -0.0790 137R0.5
CUBOID 0 52.164 -52.164 52.164 -52.164 106.20 -0.0790 137R0.5
    
```

付録B 鋼の反射体節約を求める計算に用いた入力データ

```

      2 137      2 0      1 0      1 3
*UO2F2*
      4.98      0.9091      0
*SUS-304*
    
```

```

CRITICAL EXPERIMENT UO2F2 SOLUTIONS WITH 4.98% ENRICHMENT U PATTERN 5
100.0 250 3000 50 2R137 3*2 4 1 3*1 2 0 0 2000 10*0
1 -1 1.0 2 2 1.0
BOX TYPE 1
CYLINDER 1 20.185 98.800 0.000 137R0.5
CYLINDER 0 20.185 106.200 0.000 137R0.5
CYLINDER 2 20.264 106.200 -0.0790 137R0.5
CUBOID 0 20.264 -20.264 20.264 -20.264 106.20 -0.0790 137R0.5
    
```

## 付録C MCNP を用いた臨界計算に用いた入力データ

```

komi01 ;cylinder input
c
c   cellcard
c
1   1   9.69266900E-02           1  -2  -10           imp:n=1
2   0                                     2  -3  -10           imp:n=1
3   2   8.71839620E-02   #1 #2(-3  4  -20)           imp:n=1
4   0                                     3: -4: 20           imp:n=0

c
c   surface cards (origin x=0.0 y=0.0 z=0.0)
c   cylinder
1   pz      0.00000
2   pz      98.80000
3   pz     106.20000
4   pz     -0.07900
10  cz      19.54500
20  cz      19.62400

c
c   data cards
c
mode n                $ transfort neutrons only
c
c   material cards
c
c   UO2F2
c   atomic density  9.69266900E-02
m1  1001.34c  5.69470000E-02
    8016.34c  3.30760000E-02
    9019.34c  4.60250000E-03
    92235.34c 1.15990000E-04
    92238.34c 2.18520000E-03
m1  lwtr.01t  $ 300k
c
c   *SUS-304* MAIL3.1 Data
c   atomic density  8.71839620E-02
m2  6012.34c  3.17290000E-04
    14000.34c 1.69620000E-03
    16000.34c 4.45720000E-05
    24000.34c 1.74080000E-02
    25055.34c 1.73430000E-03
    26000.34c 5.78720000E-02
    28000.34c 8.11160000E-03

c
c   default energy bins; hansen-roach structure
e0  1.0e-7 4.0e-7 1.0e-6 3.0e-6 1.0e-5 3.0e-5 1.0e-4 5.5e-4 3.0e-3
    1.7e-2 0.1 0.4 0.9 1.4 3.0 20.0

c
c   tallies
f4:n 1                $ ave flux in cell 1
c
c   criticality cards

```

```
c
kcode 3000 1.0 50 250
sdef cel=1 pos=0 0 0 axs=0 0 1 rad=d1 ext=d2 erg=d3
c
si1 h 0.0 19.545
sp1 -21 1
c
si2 h -49.400 49.400
sp2 -21 0
c
sp3 -3
c
prcmp j -100 1 3
c
print -175
```