

JAERI-M
9085

KENO-IVコードベンチマーク計算(8)
(弗化ウラニル水溶液の配管交差配位)

1980年9月

野村 靖・城 克彦*

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

KENO-IVコードベンチマーク計算(8)
(弗化ウラニル水溶液の配管交差配位)

日本原子力研究所東海研究所安全解析部
野村 靖・城 克彦*

(1980年8月21日受理)

モンテカルロ法コードKENO-IVと原研で新たに開発整備中の多群定数ライブラリーMGCLとの組合せにより、弗化ウラニル水溶液の配管交差配位に関する実験データを用いて、ベンチマーク計算を実施したので報告する。これは、原研で整備中の臨界安全性評価コードシステムの臨界計算精度評価を目的として計画された原子炉外臨界体系の解析作業の一環として実施されたものである。

30° 枝管つき垂直管あるいは十字管が軽水タンク内に配位した体系で、KENO-IVの一般形状入力により計算した結果、全45ケースの実効増倍率は、平均値が0.973で標準偏差が0.6%の範囲に分布した。

*) 日立エンジニアリング株式会社

KENO-IV Code Benchmark Calculation (8)

(Intersecting Cylinders of Aqueous Uranyl Fluoride Solutions)

Yasushi NOMURA and Katsuhiko JO*

Division of Reactor Safety Evaluation,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received August 21, 1980)

A series of benchmark tests has been undertaken in JAERI in order to examine the capability of JAERI's criticality safety evaluation system consisting of the Monte Carlo calculation code KENO-IV and the newly developed multi-group constants library MGCL. The present report describes the results of a benchmark test using criticality experiments about intersecting cylinders of aqueous uranyl fluoride solution.

In all, 45 cases of experiments have been calculated for a 30° lateral or a cross formed by cylinders respectively utilizing generalized geometry input of KENO-IV.

The effective multiplication factor for the 45 cases can be predicted as 0.973 in average with 0.6% standard deviation by the calculational method reported.

Keywords: Criticality Safety, Benchmark Calculation, KENO-IV Monte Carlo Code, MGCL Multi-group Constants Library, Intersecting Cylinders, Uranyl Fluoride Aqueous Solution

* Hitachi Engineering Co., Ltd.

目 次

1. まえがき	1
2. 実験体系と実験データ	2
2.1 30° 枝管つき垂直管	2
2.2 十字管	2
3. 計算手法と計算モデル	13
3.1 計算手法	13
3.2 計算モデル	14
4. 計算結果及び考察	20
4.1 計算値のヒストグラムと傾向	20
4.2 エネルギー群構造の影響	21
5. 結 論	31
参考文献	31

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Experimental System and Data	2
2.1 30 Degree Lateral Tubes	2
2.2 Cross Tubes	2
3. Calculational Method and the Model	13
3.1 Calculational Method	13
3.2 Calculational Model	14
4. Calculated Results and the Consideration	20
4.1 Histogram of the Calculated Values and the Tendency.....	20
4.2 Effect of Energy Group Structure	21
5. Conclusion	31
References	31

1. ま え が き

原研で整備中の臨界安全評価コードシステムのうち、多群定数ライブラリMGCL²⁾とモンテカルロ計算コードKENO-IV³⁾の組合せによる臨界計算精度を検証するため、昭和54年度末以来、多くの実験体系を用いてベンチマーク計算を実施している。本報告書では弗化ウラニル水溶液の配管交差配位に関する実験データ¹⁾により、ベンチマーク計算を実施した結果を報告する。

実験は、再処理あるいは濃縮工場内プラントにおいて核分裂物質溶液配管が互に交差していたり、枝分れしたりしている場合を模擬して行われた。実験用の幾何形状は2種類あって、ひとつは垂直管の途中から30度の角度で他の同径の配管が枝分れしており、他のひとつは2個の同径の配管がほぼ中央で直角に交差している。これらの配管内に下から弗化ウラニル水溶液を注入し、その溶液レベルを上昇させることにより臨界に到達させた。実験データの数は、配管径寸法、および溶液中のウラニウム濃度をパラメータとして全部で51ケースとなる。計算はこのうち45ケースの実験データについて、KENO-IVの一般形状オプションを用いて実施した。

以下、第2章で実験体系と実験データの説明を行い、第3章で採用した計算モデルについてふれ、第4章で計算結果の説明および考察を行い、第5章で結論を述べる。なお、第2章において実験の説明のために用いられた図、表および写真は実験レポート¹⁾から転載したものである。

2. 実験体系と実験データ

核分裂物質は弗化ウラニル (UO_2F_2) 水溶液の形態で用いられ、 ^{235}U の濃縮度は約 5 % である。この溶液を垂直管の途中から 30° の角度で上方へ枝分れした配管、あるいはほぼ直角に交差した 2 本の配管内部へ注入し、臨界となるまでレベルを上昇させる。管の外側が水反射体となるように、配管系は約 270 cm 内径の軽水を満たしたタンク内の中央下部に据え付けられている。

2.1 30° 枝管つき垂直管

Photo. 1 は内径 27.9 cm, 肉厚 0.16 cm のアルミニウム製円筒管を垂直に立て、ほぼ中央から同材質、同寸法の管を 30° 上向きの角度で枝分れさせた配管系を示したものであり、垂直管底板の中心にあけた穴を通して、内径 5.1 cm の細管により貯蔵タンクから弗化ウラニル水溶液を注入する。枝分れ管の上部は 0.64 cm 厚のアルミニウム板で盲蓋をしてあり、ここから水平に内径 2.2 cm の細管により垂直管内部と連通しており、枝分れ管内に溶液が上昇してきたときに空気が抜けられるようになっている。この配管系を軽水タンク内の中央下部に据えつけた様子を Fig. 1 に図式的に示す。この図からわかるように垂直管の底板はタンクの底面から 22.9 cm 上方に位置している。配管系の形状寸法は Fig. 2 に示す。臨界実験データは Table 1 に示すように溶液中のウラニウム濃度あるいは密度、軽水タンク内の水レベルをパラメータとして全部で、22 ケースが得られている。

2.2 十字管

Photo 2 はプレクシグラス (メタクリレート, $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$) 製円筒 2 個を中央でほぼ直角に交差するように組立てた配管系を示したものである。配管寸法は、最初の実験では内径 26.67 cm, 肉厚 3.18 cm であり、順次、内径を 27.30 cm, 27.94 cm, 28.57 cm となるように削りとっていく。水平管は中央の交差点へ向けて両端から 2 度の角度で傾斜下降させ、溶液が中央の垂直管の方へドレンするようにする。水平管の両端面には 3.17 cm 厚のプレクシグラス製円板で盲蓋をし、蓋内部に孔を通して空気抜きができるようにしてある。垂直管上蓋の構造にも同様にベントラインが設けてある。これらの盲蓋は、ひとつの実験終了後、とり外して円筒管内径を切削加工後次の実験にとりかかれるようにフランジ構造となっている。垂直管底板の中心にあけた穴を通して、内径 5.25 cm の細管により溶液貯蔵タンクから弗化ウラニル水溶液を注入する。この配管系を軽水タンク内の中央下部に据えつけた様子を Fig. 3 に図式的に示す。この図からわかるように垂直管の底板はタンクの底面から約 24 cm 上方に位置している。配管系の形状寸法を Fig. 4 に示す。これからわかるように水平および垂直に伸びたプレクシグラス製配管相互間は同じくプレクシグラス製板によりしっかり固着されて

いる。臨界実験データは Table 2 に示すように、溶液中のウラン濃度あるいは密度、軽水タンク内の水レベル、それに配管内径をパラメータとして全部で、29 ケースが得られている。

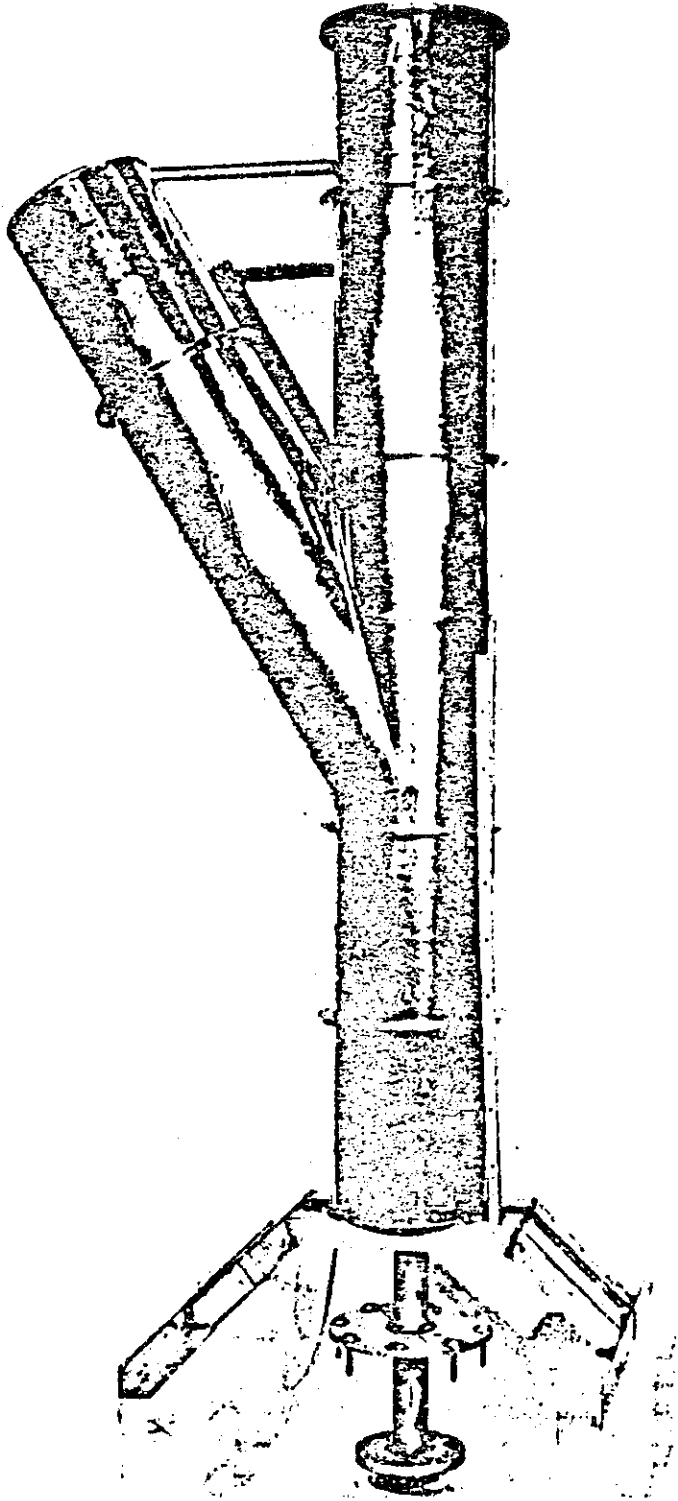
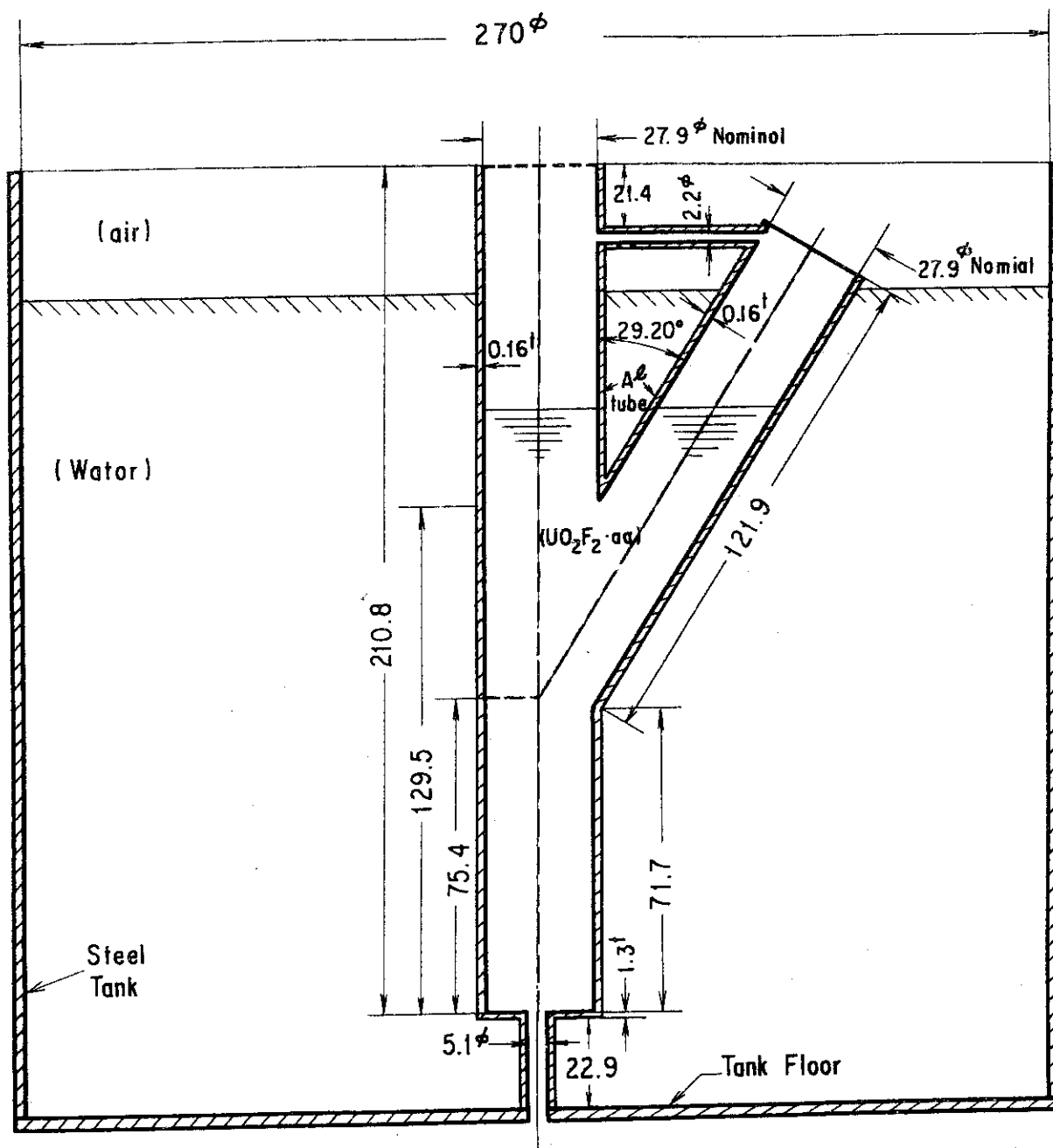


Photo. 1 The 30° Lateral Prior to Installation in the Reflector Tank.



All linear dimensions are in cm.

Fig. 1 Cutout view of the experimental arrangement.

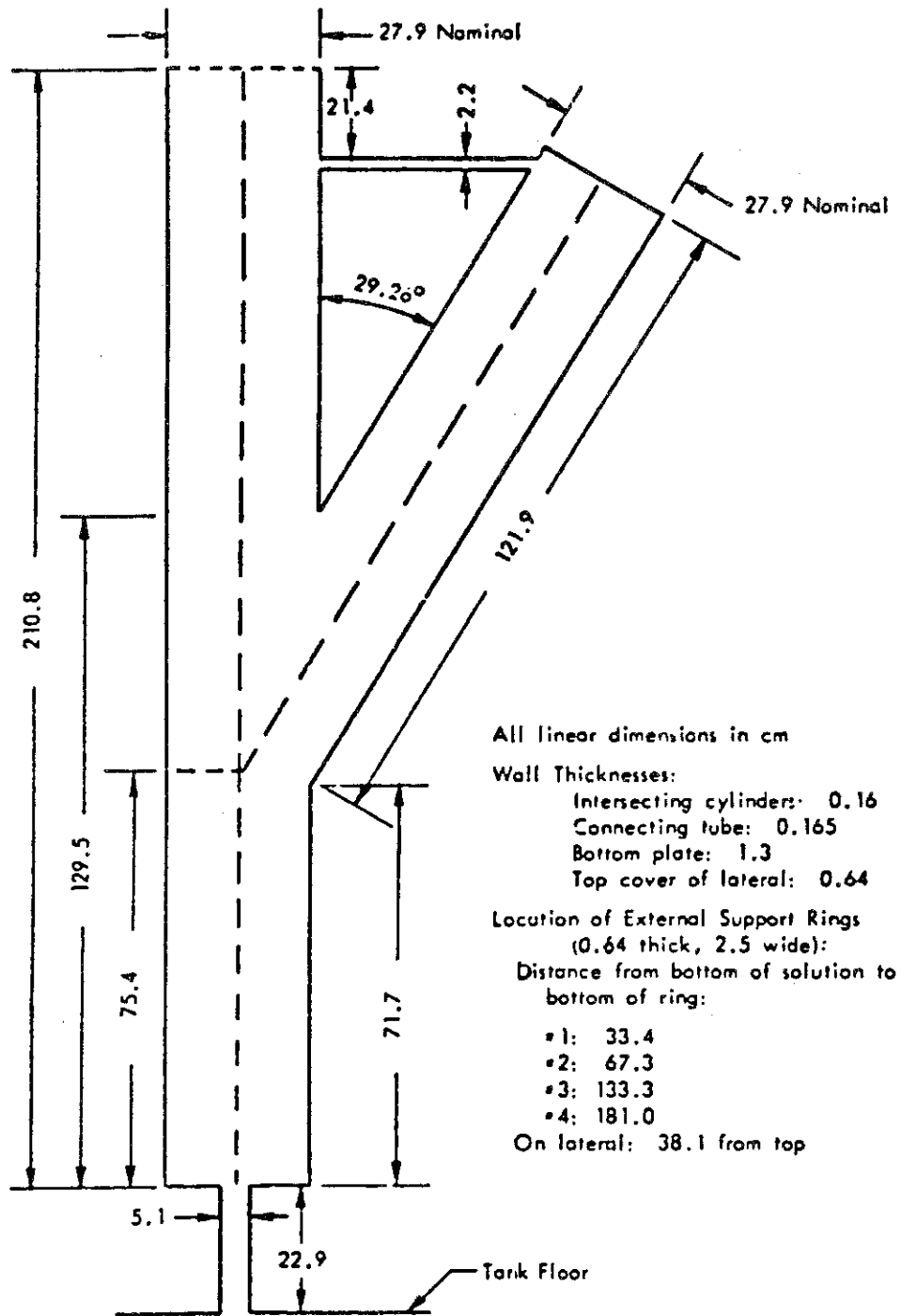


Fig. 2 Inside dimensions of the 30° lateral.

Table 1 Summary of Critical Conditions of the 30° Lateral of U(5)O₂F₂^d Aqueous Solution.

Serial No.	Height of Reflector Water ^a (cm)	Solution				Temperature (°C)	
		Critical Height (cm)	Δ Height for Positive Period (cm)	Reactivity (cents)	Sensitivity (Δρ/Δh, cents/cm)	Solution ^b	Water
Solution Concentration: 907.0 g of U/liter; Density: 2.0289 g/cm ³							
1	210.1	128.2	0.40	9.3	23.2	26.1	26.0
2	209.8	128.4 ^c	0.40	11.4	28.5	26.0	26.2
3	209.8	128.3 ^c	0.60	15.1	25.2	26.0	26.2
4	144.9	128.55	0.50	12.4	24.8	26.1	26.0
5	144.9	128.45	0.35	9.0	25.7	25.5	25.9
6	129.2	129.1	0.55	10.6	19.3	25.5	25.9
Solution Concentration: 885.8 g of U/liter; Density: 2.0048 g/cm ³							
7	210.2	131.35	0.50	10.6	21.2	26.4	--
8	147.2	131.6	--	--	--	--	--
9	132.0	132.2	--	--	--	--	--
Solution Concentration: 876.5 g of U/liter; Density: 1.9952 g/cm ³							
10	210.2	132.1	0.65	12.2	18.8	25.6	26.0
11	147.5	132.4	0.60	10.1	16.8	26.0	26.0
12	132.8	132.2	1.50	8.3	5.5	26.0	26.0
Solution Concentration: 824.8 g of U/liter; Density: 1.9367 g/cm ³							
13	209.0	141.65	1.95	14.7	7.5	25.6	26.0
14	157.5	141.9	1.60	12.4	7.7	26.0	26.0
15	143.2	142.75	2.30	13.6	5.9	26.0	26.0

Table 1 (Cont'd) Summary of Critical Conditions of the 30° Lateral of U(5)^dO₂F₂ Aqueous Solution.

Serial No.	Height of Reflector Water ^a (cm)	Solution			Temperature (°C)		
		Critical Height (cm)	Δ Height for Positive Period (cm)	Reactivity (cents)	Sensitivity (Δρ/Δh, cents/cm)	Solution ^b	Water
Solution Concentration: 801.1 g of U/liter; Density: 1.9108 g/cm ³							
16	210.1	155.25	6.10	10.2	1.7	25.9	26.0
17	171.9	155.35	3.65	6.9	1.9		--
18	155.9	155.85	7.35	7.9	1.1		--
Solution Concentration: 796.2 g of U/liter; Density: 1.9059 g/cm ³							
19	210.1	169.10	33.6	4.9	0.15	25.9	--
20	185.5	168.00	9.2	4.3	0.45		--
21	168.1	168.20	32.8	3.8	0.12		--
Solution Concentration: 774.6 g of U/liter; Density: 1.8823 g/cm ³							
22		(204.60)	Subcritical			26.3	26.2

- a. The water height measured from the same reference as was the solution height; i.e., from the top of the inside surface of the bottom plate of the lateral.
- b. The solution temperatures were determined either before or after establishing the solution critical height or at the beginning and end of a short series. A single entry in this column is the average solution temperature for that concentration. The reported critical heights were determined with no thermocouples in the solution.
- c. These two runs were made to establish the worth of three additional aluminum rings, each 0.25-in.-thick, placed on the lower vertical section of the lateral.
- d. Analyses of Uranium, 234U : 0.03 wt% 235U : 5.00 wt% 236U : 0.05 wt% 238U : 94.92 wt%

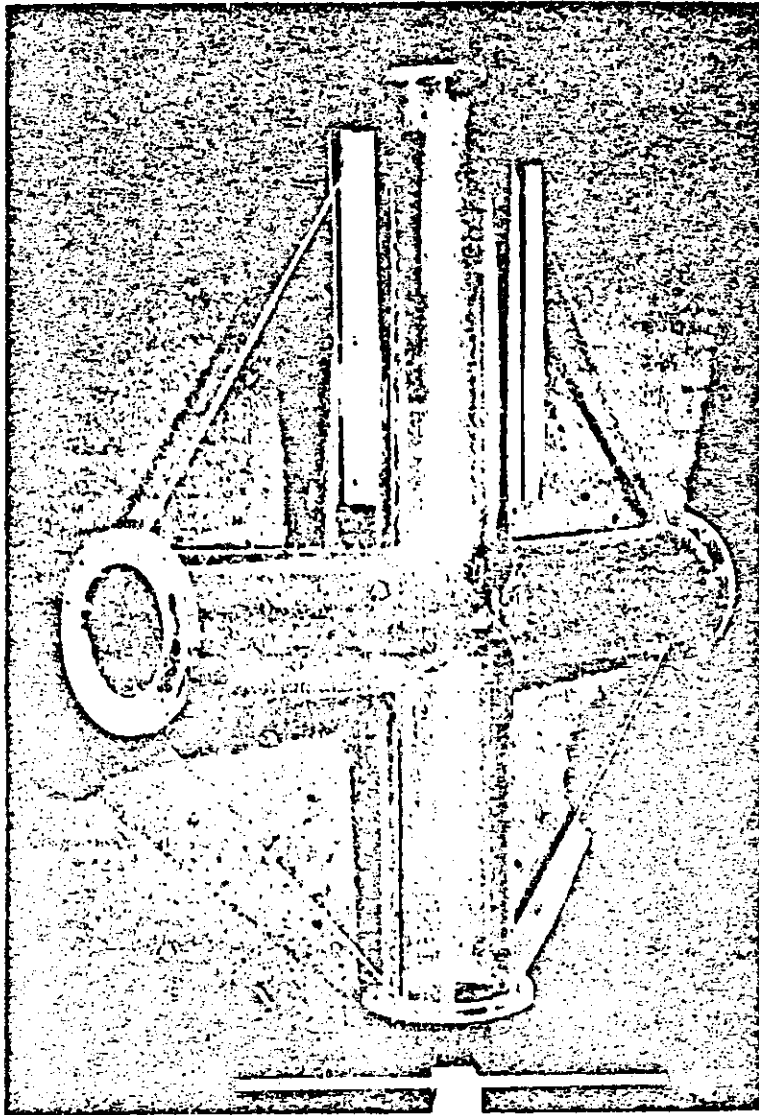
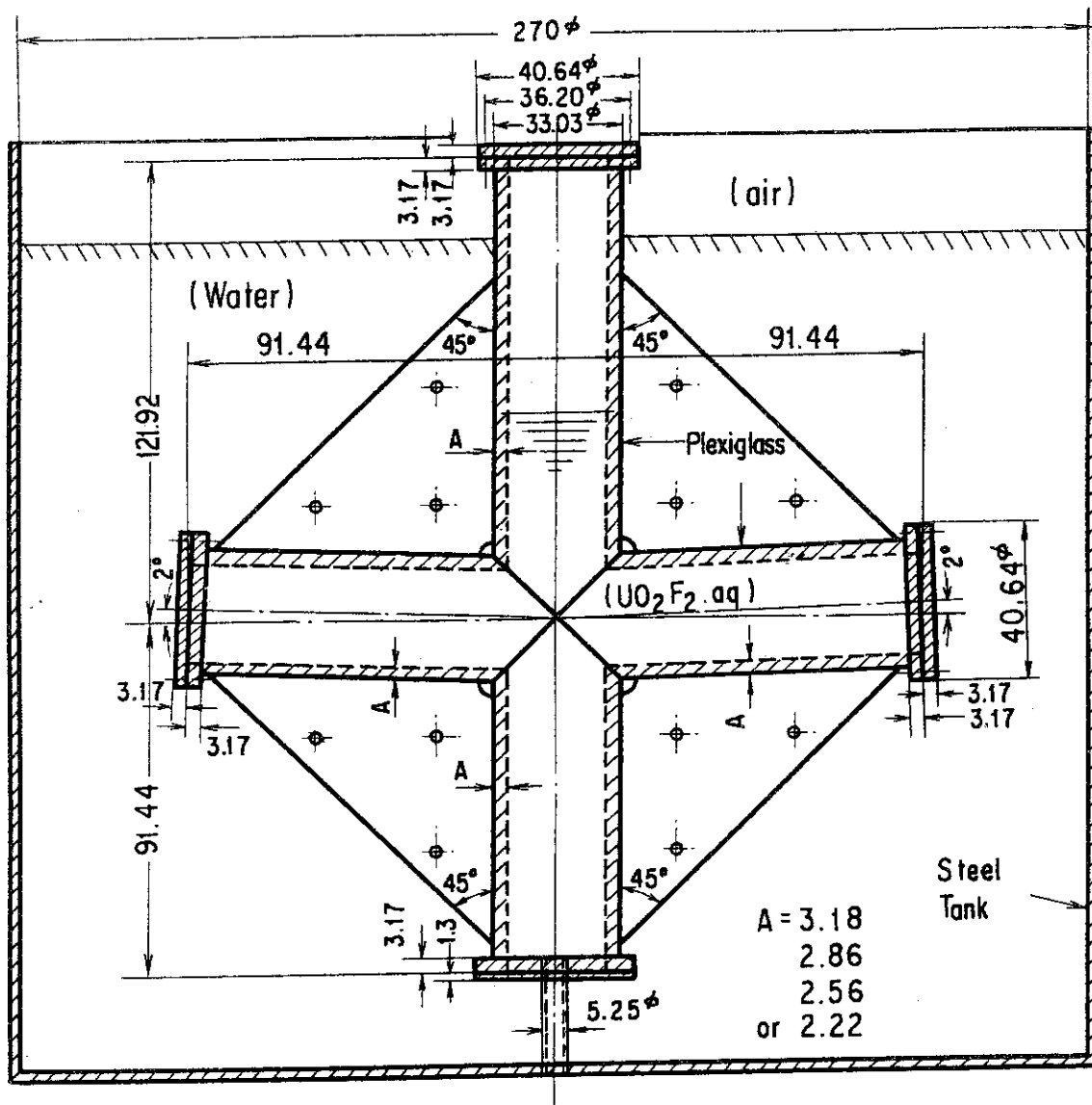


Photo. 2 The Plexiglas Cross Prior to Installation in the Reflector Tank.



All linear dimensions are in cm.

Fig. 3 Cutout view of the experimental arrangement.

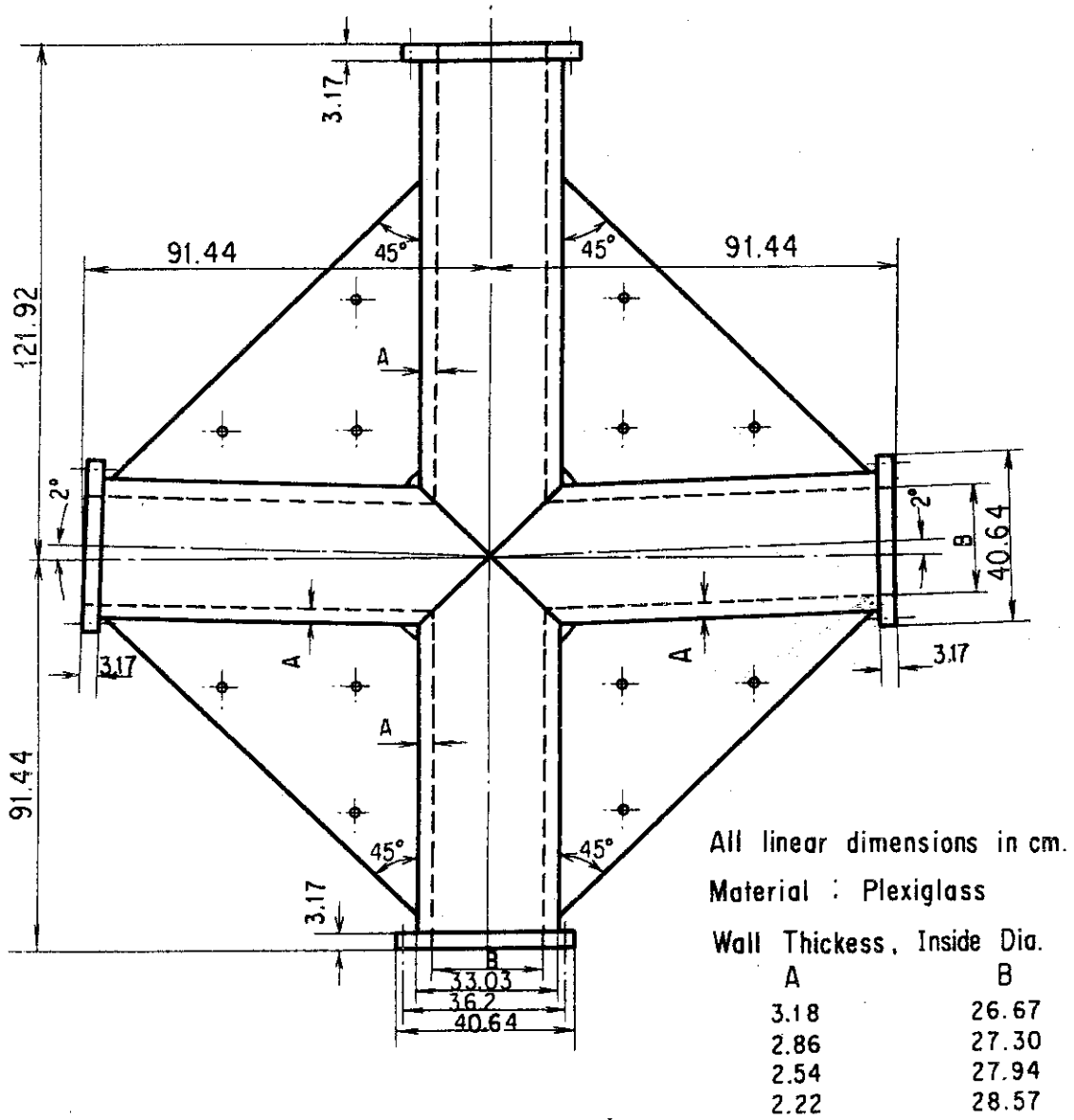


Fig. 4 Diagram of the plexiglas cross.

Table 2 Summary of U(5)O₂F₂ Aqueous Solution Data in Flexiglas Cross.

Serial No.	Nominal Inside Diameter (in.)	Nominal Diameter (cm)	Solution ^a					Height of Water (cm)	Temperature (°C) Solution Water
			Concentration (g of U/liter)	Density (g/cm ³)	Critical Height (cm)	Height Above Center of Intersection (cm)	Height of Water (cm)		
23	10.50 ^b	26.67 ^b	904.85	2.020	115.45	24.0	210.5 ^c	24.2	22.7
24					115.6	24.2	210.5 ^c	25.7	22.7
25					115.9	24.5	115.9 ^e	24.6	22.7
26					116.0	24.6	116.0 ^e	25.7	22.7
27			896.1	2.015	117.2	25.8	117.3	25.0	23.1
28			856.4	1.970	133.9	42.5	210.5 ^c	24.9	23.1
29					134.1	42.7	134.1 ^e	24.9	23.1
30	10.75 ^f	27.30 ^f	906.4	2.026	109.6	18.2	210.5 ^c	24.4	23.1
31					110.6	19.2	110.6 ^e	24.4	23.1
32			657.35	1.971	115.55	24.1	210.5 ^c	24.7	22.8
33					116.05	24.6	116.05 ^e	24.7	22.8
34	11.00 ^g	27.94 ^g	904.6	2.024	106.3	14.9	210.5 ^c	24.8	23.1
35					107.9	16.5	107.9 ^e	24.8	23.1
36			859.5	1.971	110.0	18.6	210.5 ^c	24.3	23.0
37					110.95	19.5	110.95 ^e	24.6	23.0
38			811.2	1.920	117.0	25.6	210.5 ^c	24.7	23.5
39					117.5	26.1	117.5 ^e	24.7	23.5

Table 2 (Cont'd) Summary of U(5)O₂F₂ Aqueous Solution Data in Plexiglas Cross.

Serial No.	Nominal Inside Diameter (in.) (cm)		Solution ^a					Height of Water (cm)	Temperature (°C) Solution Water	
			Concentration (g of U/liter)	Density (g/cm ³)	Critical Height (cm)	Height Above Center of Intersection (cm)	Height of Water (cm)			
40	11.25 ^h	28.57 ^h	905.3	2.023	104.45	13.0	210.5 ^c	25.1	25.0	
41					105.7	14.3	105.7 ^e	25.1	25.0	
42			854.9	1.967	107.8	16.4	210.5 ^c	25.7	26.3	
43					109.0	17.6	109.0 ^e	25.7	26.3	
44			812.8	1.921	111.0	19.6	210.5 ^c	26.5	27.9	
45					111.9	20.5	111.9 ^e	26.5	27.9	
46			786.4	1.892	115.4	24.0	210.5 ^c	27.3	27.6	
47					115.95	24.5	115.95 ^e	27.3	27.6	
48			764.2	1.866	122.65	31.2	210.5 ^c	25.7	27.0	
49					123.15	31.7	123.15 ^e	25.7	27.0	
50			744.9	1.844	150.05	58.6	210.5 ^c	25.6	26.2	
51					150.05	58.6	150.05 ^e	25.6	26.2	

a. The values quoted for both solution concentration and solution density are the average of two determinations by different laboratories.

b. On the basis of the calibration data, the average inside radius of the lower vertical cylinder is 13.327 cm and of the top vertical cylinder 13.341 cm, corresponding to an average diameter of 10.494 in. and 10.505 in., respectively.

c. The water height is measured from the same reference as the solution; i.e., at the bottom of the lower vertical member, 91.4 cm below the intersection centerline. At a height of 210.5 cm the water surface was at the bottom of the top flange.

d. The uncertainties are one standard deviation of the eigenvalue resulting from the statistical nature of Monte Carlo codes.

e. In these cases, criticality was established with the solution and water at the same height as determined by a carpenter's level across the indicated heights in the two manometers.

f. On the basis of the calibration data, the average inside radius of the lower vertical cylinder was 13.63 cm and of the top vertical cylinder 13.667 cm, corresponding to an average inside diameter of 10.735 in. and 10.761 in., respectively.

g. On the basis of the calibration data, the average inside radius of the lower vertical cylinder was 13.957 cm and of the top vertical cylinder 13.963 cm, corresponding to an average inside diameter of 10.990 in. and 10.994 in., respectively.

h. On the basis of the calibration data, the average inside radius of the lower vertical cylinder was 14.273 cm and of the top vertical cylinder 14.286 cm, corresponding to an average inside diameter of 11.239 in. and 11.249 in., respectively.

3. 計算手法と計算モデル

3.1 計算手法

臨界計算はモンテカルロ法による計算コードKENO-IV³⁾により行う。モンテカルロ法は、階差近似法やSn法とは異なり、複雑な3次元幾何形状を正確に扱える利点をもっている。KENO-IVは多群定数を用いるモンテカルロ計算コードであり、HANSEN-ROACH 16群核断面積データセット⁴⁾を使用している計算がこれまで多く報告されている。今回の計算には、原研で開発整備中の多群定数ライブラリMGCL²⁾を用いた。

MGCLは、ENDF/B-IV⁵⁾の中性子核データをRESEND-D⁶⁾、SUPERTO⁷⁾、PIXSE⁸⁾等で処理して作成した多群定数であり、マスターライブラリは137群である。MGCLの多群定数はABBNセット⁹⁾やJAERI-FAST-SET¹⁰⁾と同様な表現方式の中性子遮蔽因子 $f(\sigma_0^j, T)$ と無限希釈断面積 σ_∞^j で与えられている。また標準スペクトルも内蔵しており、このスペクトルを用いて他の任意の群数を持つ群定数へ縮約することも可能である。ただし、この標準スペクトルは核分裂スペクトル、 $1/E$ 、およびマクスウェル分布を用いて作成されたものである。

今回の計算では、基本的には上記マスターライブラリから標準スペクトルで縮約した26群の多群定数を用いた。137群と26群のエネルギー構造をTable 3に示す。このMGCLを用いて、処理コードMAILによりKENO-IV用の巨視的実効断面積セットが作成される。MAILでは、計算対象の各領域の核種個数密度と幾何形状を入力データとして、下記の式を用いて巨視的実効断面積 Σ_{eff} を求めている。計算の流れをFig. 5に示す。

$$\sigma_{\text{eff}}^j = \sigma_\infty^j \cdot f(\sigma_0^j, T)$$

$$\sigma_0^j = \frac{1}{N_j} \left(\sum_{i \neq j} N^i \sigma_t^i + \frac{aG}{\ell} \right)$$

$$\Sigma_{\text{eff}} = \sum_j N^j \sigma_{\text{eff}}^j$$

ここで

ℓ : 燃料ブロックの平均弦長

G : ダンコフ補正因子

a : ベル補正因子

i, j : 核種を示す添字

MGCLの中の散乱マトリックスは高速群についてはSUPERTO⁷⁾により、また熱群についてはFLANGE¹¹⁾、あるいはPIXSEにより求められており、中性子散乱の角度依存性は散乱断面積をLEGENDRE展開したときの P_0 成分までが考慮されている。MAILコードでは、前述した巨視的断面積の1次元データの他に今述べた散乱マトリックス・データをKENO-IV用データセットに編集している。KENO-IVの中では方向余弦を散乱断面積の P_0 成分と

P_1 成分から求めている。

以上述べたごとく、今回用いた手法ではKENO-IV用のデータ・セットは各計算ごとに作成する必要がある。元々、KENO-IV計算ではKENO-IV用のデータ・セット（例えばHANSEN-ROACH断面積セット）は各計算ケース共通に使い、各元素のID番号と個数密度を入力すると、計算コード内で巨視的断面積が作成されるようになっている。ただし、中性子の自己遮蔽効果はポテンシャル断面積で取り入れるため、使用者は前以ってポテンシャル断面積を計算し、このポテンシャル断面積に対応する微視的断面積を選択しそのID番号を入力することが必要となる。ただし、非均質効果の計算はKENO-IVコード内では行われないので、これを考慮する必要がある場合にはあらかじめ計算しポテンシャル断面積に取り入れるようにしなければならない。

今回の計算では、前に述べたように非均質効果はMAILコードによる処理の段階で考慮されており、またバックグラウンド断面積 σ_0 についてはMAILの中で繰り返し法により計算され、これに対応する実効断面積は内挿法で求められる。

3.2 計算モデル

モンテカルロコードKENO-IVでは、体系をボックスタイプに分割し各ボックスタイプ毎に、球、円筒、直方体などの標準的な幾何形状パッケージを多数用意し、通常臨界安全問題で遭遇するような幾何形状には充分対処できるようになっているほか、標準的な幾何形状からは合成できないような複雑な幾何形状に対しても3次元の直角座標を用いて2次曲面として表すことにより取り扱えるようになっている。ここで取り上げた実験体系は、後者の一般的な幾何形状オプションにより扱わなければならない。

30度枝管つき垂直管の計算モデルはFig. 6に示すごとく、縦100 cm×横100 cm×高さ235 cmの領域をとり、この領域の外側は真空とし、内部に水反射体、30度枝管つき垂直管、弗化ウラニル水溶液を配し、各実験ケース毎に水反射体高さ、溶液高さ、溶液中のウラニウム濃度を変えて計算した。枝管頂部の盲蓋はないものとし、連通管は省略し、垂直管底部の溶液注入管も省略し代りに軽水でおきかえたモデルとした。

十字管の計算モデルはFig. 7に示すごとく、縦270 cm×横270 cm×高さ237.1 cmの領域をとり、この領域の外側は真空とし、内部に水反射体、十字管、弗化ウラニル水溶液を配し、各実験ケース毎に水反射体高さ、溶液高さ、溶液中のウラニウム濃度を変えて計算した。垂直管と水平管を固定するプレクシグラスの板は水で置きかえた。

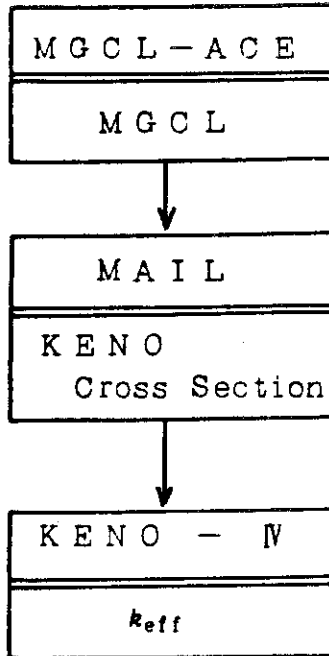
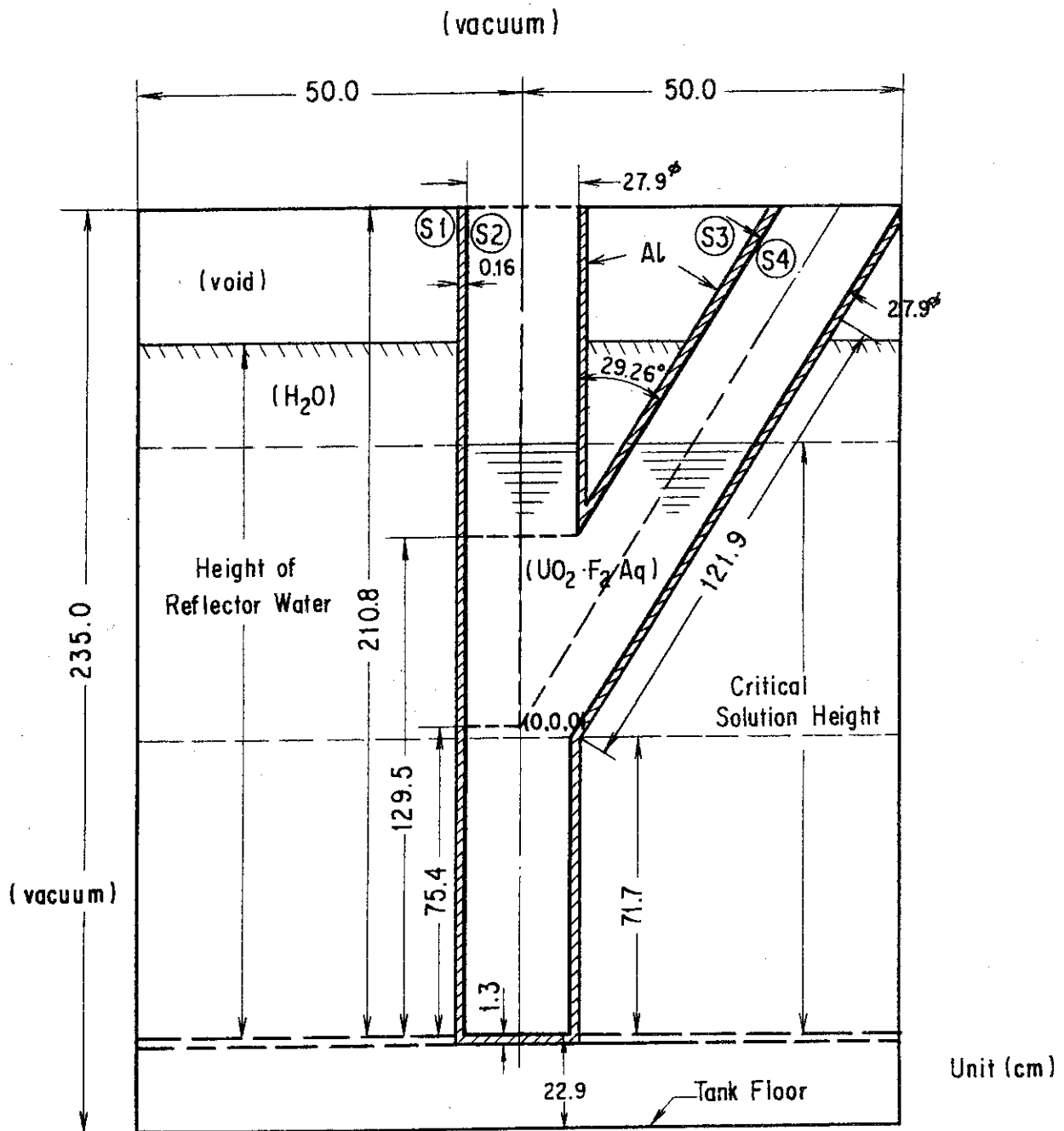


Fig. 5 Flow diagram for KENO calculation.



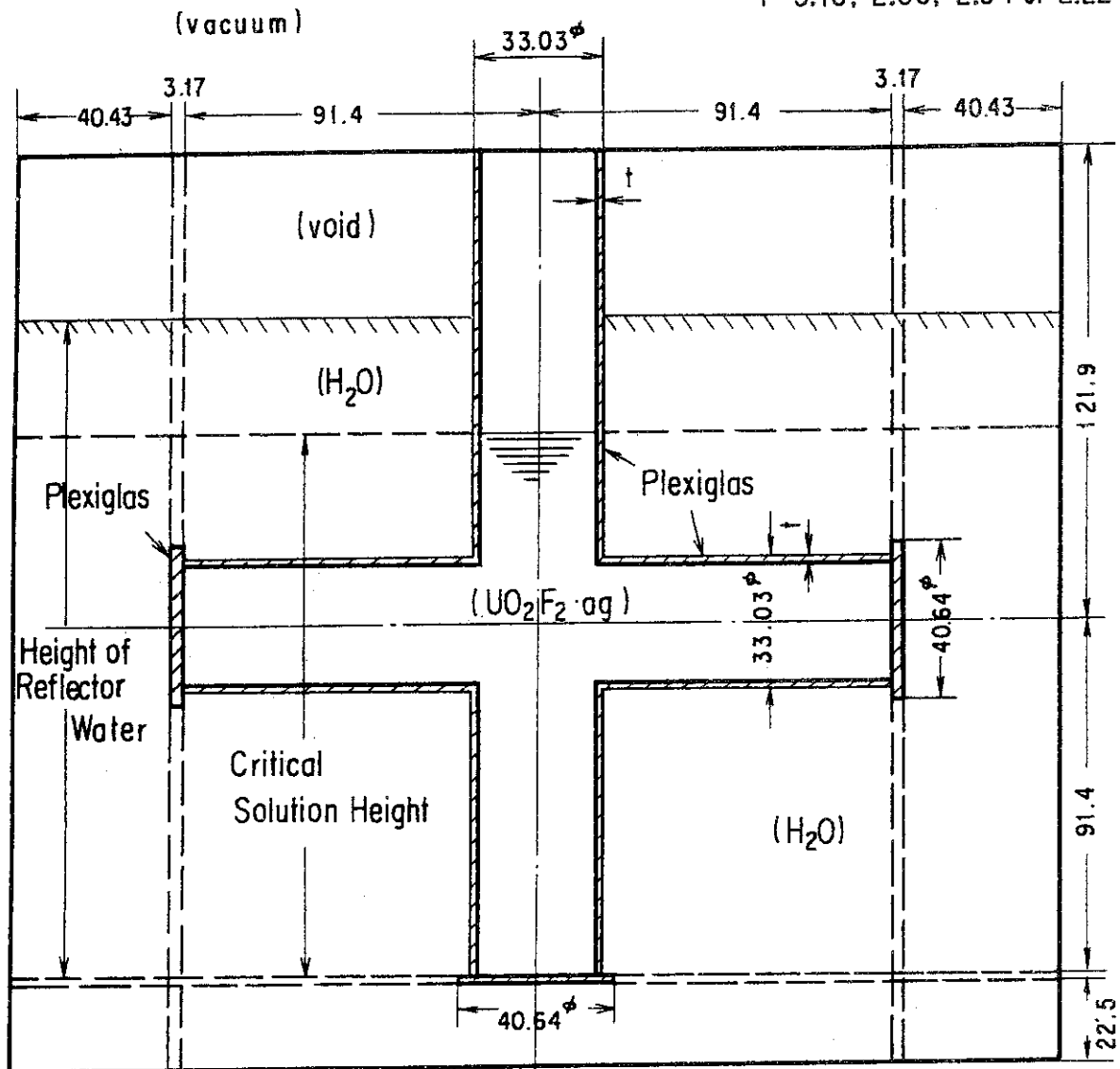
Unit (cm)

surface equations

- Ⓢ1 $X^2 + y^2 - 199.09 = 0$
- Ⓢ2 $X^2 + y^2 - 194.60 = 0$
- Ⓢ3 $1.3139 X^2 + y^2 + 0.3139 Z^2 - 1.1205 yZ - 258.63 = 0$
- Ⓢ4 $1.3139 X^2 + y^2 + 0.3139 Z^2 - 1.1205 yZ - 255.69 = 0$

Fig. 6 Calculational model for the 30° lateral tube.

$t = 3.18, 2.86, 2.54$ or 2.22



All linear dimensions in cm.

Fig. 7 Calculational model for the plexiglas cross.

Table 3 Energy Structure of MGCL 137 and MGCL 26.

Group No.		Upper Energy Boundary	Lethergy width ΔU	Group No.		Upper Energy Boundary	Lethergy width ΔU	
26 Gr	137 Gr			26 Gr	137 Gr			
1	1	16.487 MeV	0.125	4	3 8	161.63 KeV	0.125	
	2	14.550	0.125		3 9	142.64	0.125	
	3	12.840	0.125		4 0	125.88	0.125	
	4	11.331	0.125		4 1	111.09	0.125	
	5	10.000	0.125		4 2	98.037	0.125	
	6	8.825	0.125		4 3	86.517	0.125	
	7	7.788	0.125		4 4	76.351	0.125	
	8	6.8729	0.125		4 5	67.379	0.125	
	9	6.0653	0.125		4 6	59.462	0.125	
	1 0	5.3526	0.125					
2	1 1	4.7237	0.125	5	4 7	52.475	0.125	
	1 2	4.1686	0.125		4 8	46.309	0.125	
	1 3	3.6788	0.125		4 9	40.868	0.125	
	1 4	3.2465	0.125		5 0	36.066	0.125	
	1 5	2.8650	0.125		5 1	31.828	0.125	
	1 6	2.5284	0.125		5 2	28.088	0.125	
	1 7	2.2313	0.125		5 3	24.788	0.125	
	1 8	1.9691	0.125		5 4	21.875	0.125	
	1 9	1.7377	0.125		5 5	19.305	0.125	
	2 0	1.5335	0.125		5 6	17.036	0.125	
3	2 1	1.3533	0.125	6	5 7	15.034	0.25	
	2 2	1.1943	0.125		5 8	11.709	0.25	
	2 3	1.0540	0.125		5 9	9.1188	0.25	
	2 4	930.14 KeV	0.125		6 0	7.1017	0.25	
	2 5	820.85	0.125		6 1	5.5308	0.25	
	2 6	724.40	0.125		6 2	4.3075	0.25	
	2 7	639.28	0.125		6 3	3.3546	0.25	
	2 8	564.16	0.125		6 4	2.6126	0.25	
	2 9	497.87	0.125		7 6 5	2.0347	0.25	
	3 0	439.37	0.125		6 6	1.5846	0.25	
4	3 1	387.74	0.125	7	6 7	1.2341	0.25	
	3 2	342.18	0.125		6 8	961.12 eV	0.25	
	3 3	301.97	0.125		6 9	748.52	0.25	
	3 4	266.49	0.125		8	7 0	582.95	0.25
	3 5	235.18	0.125			7 1	454.00	0.25
	3 6	207.54	0.125			7 2	353.58	0.25
	3 7	183.16	0.125			7 3	275.36	0.25
						7 4	214.45	0.25

Table 3 Energy Structure of MGCL 137 and MGCL 26 (continued).

Group №		Upper Energy Boundary	Lethergy width ΔU	Group №		Upper Ener- gy Boundary	Lethergy width ΔU
26 Gr	137 Gr			26 Gr	137 Gr		
8	75	167.02 eV	0.25	17	110	0.29792 eV	270 m/sec
9	76	130.07	0.25	18	111	0.27699	270
	77	101.30	0.25		112	0.25683	270
	78	78.893	0.25		113	0.23742	270
	79	61.442	0.25	19	114	0.21871	270
	80	47.851	0.25		115	0.20090	270
	81	37.267	0.25		116	0.18378	270
10	82	29.023	0.25	20	117	0.16743	270
	83	22.603	0.25		118	0.15183	270
	84	17.603	0.25		119	0.13700	270
	85	13.710	0.25	21	120	0.12293	270
	86	10.677	0.25		121	0.10962	270
	87	8.3153	0.25		122	0.09708	270
11	88	6.4760	0.25	22	123	0.085295	270
	89	5.0435	0.25		124	0.074274	270
	90	3.9279	0.25		125	0.064015	270
	91	3.0590	0.25	23	126	0.054518	270
	92	2.3824	0.25		127	0.045783	270
12	93	1.8554	0.125	128	0.037811	270	
	94	1.6374	0.125	24	129	0.030600	270
	95	1.4450	0.125		130	0.024152	270
13	96	1.2752	0.125	131	0.018465	270	
	97	1.1254	0.125	25	132	0.013541	270
	98	0.99312	0.125		133	0.009379	270
99	0.87642	0.125	134		0.005979	270	
14	100	0.77344	0.125	26	135	0.003341	270
	101	0.68256	0.125		136	0.001466	270
15	102	0.60236	0.125	137	0.000352	270	
	103	0.53158	0.125				
	104	0.46912	0.125				
16	105	0.41399	270 m/sec				
	106	0.38925	270				
	107	0.36528	270				
17	108	0.34206	270				
	109	0.31961	270				

4. 計算結果及び考察

MGCL 26群核断面積セットとKENO-IVコードを組合せて計算を実施したときのモンテカルロ法計算条件は次に示すとおりである。

エネルギー群数	26
一世代当中性子数	300
計算世代数	103
スキップ世代数	3
初期中性子発生分布	平担
中性子平均重み	0.5

計算結果はNo. 1からNo. 51までのうち他と重複するケースNo. 1, 2, 5, 22, 24, 26を除いた45ケースについてTable 4~Table 5に示す。

ここで、

No. : 実験データ連続番号

$L/(A+L)$: Lは漏洩, Aは吸収を示す。従って $L/(A+L)$ は体系外への中性子の漏れの割合を示す。

F_1, F_2, F_3 : それぞれ高速, 熱外, 熱領域の中性子の核分裂に寄与する割合を示す。
なお, $F_1 + F_2 + F_3 = 1.0$ に規格化しており, 26群のうち対応する群数およびエネルギーは

F_1 が1~3群 (16.487 MeV ~ 0.183 MeV)

F_2 が4~14群 (0.183 MeV ~ 0.683 eV)

F_3 が15~26群 (0.683 eV ~ 0.0 eV)

である。

CPU (sec): 計算機 (FACOM 230-75) 使用時のCPUタイムを示す。ただし小数点以下四捨五入した。

COMMENT: 実験体系あるいは計算条件の特徴的内容を示す。すなわち

H. of Water: 水反射体高さ (cm)

Critical H.: 臨界溶液高さ (cm)

Solution Concentration: ウラン濃度 gU/l

4.1 計算値のヒストグラムと傾向

全45ケースについて k_{eff} 計算値の頻度グラフ(ヒストグラム)をFig. 8に示す。Fig. 8からわかるように k_{eff} 計算値は0.960から0.985までの範囲に分布しており, 平均値は0.973となり, 臨界値1.0より約2.7%低く算出されることがわかる。枝管つき垂直管18ケースと十字管27ケースについて別々に分けてヒストグラムを示すとFig. 9およびFig. 10

に示すごとくとなり、枝管つき垂直管の k_{eff} 平均値は0.971であり、十字管の k_{eff} 平均値は0.974である。どちらの幾何形状についても、似た様な結果となっている。

Table 6は、枝管つき垂直管について、同一のパラメータを有する体系のケース毎に k_{eff} 計算値の平均をとって示したものである。ここで同一のパラメータとしてウラニウム濃度および水反射体と溶液のレベル差を考えた。これから k_{eff} 計算値に対し有意な傾向は見出せない。

同様にTable 7は、十字管について同一のパラメータを有する体系のケース毎に k_{eff} 計算値の平均をとって示したものであるが、有意な傾向は見出せない。

4.2 エネルギー群構造の影響

Table 8およびTable 9にエネルギー群構造を137群として計算した結果を26群による計算結果と比較して示す。これから枝管つき垂直管については k_{eff} 平均値で約0.7%、十字管については平均値で約1.0%上昇して臨界値1.0に近づくことがわかる。

代表例としてケースNo. 3をとり、KENO-IVのアウトプットから核分裂により発生した中性子数を、26群の各群において、137群の対応する群における値の和と共に比較して示したのがTable 10である。これを見ると26群中第18群以下($E < 0.3 \text{ eV}$)の熱中性子マクスウェル分布領域における核分裂中性子数の変化が大きく、低エネルギー側テイル部分でのプラスの変化分が高エネルギー側テイル部分でのマイナスの変化分を上まわって全体として k_{eff} 計算値を約0.54%増加させていることがわかる。Fig. 11はケースNo. 3の体系の UO_2F_2 水溶液の中性子スペクトルを26群と137群のエネルギー群構造の場合に分けて示したものである。137群構造下の計算で、中性子スペクトルは高エネルギー側で低くなった代りに低エネルギー側では高くなっている様子が良く判る。このスペクトルの変化が、上述の核分裂中性子数の変化に対応していることは明らかである。

Table 4. Calculational Results for the 30° Lateral.

No.	$k_{eff} \pm \sigma$	L/(L+A)	CPU(sec)	F ₁	F ₂	F ₃	COMMENT		
							H. of Water	Critical H.	Solution Concentration
7-003	0.97604	0.00419	4227.0	0.023	0.038	0.939	210.1	128.30	907.0 GU/L
7-004	0.97614	0.00496	4147.0	0.024	0.037	0.939	144.9	128.55	907.0 GU/L
7-006	0.97477	0.00414	4121.0	0.024	0.037	0.939	129.2	129.1	907.0 GU/L
7-007	0.96831	0.00420	4308.0	0.023	0.037	0.940	210.2	131.35	885.8 GU/L
7-008	0.96785	0.00415	4456.0	0.023	0.037	0.940	147.2	131.6	885.8 GU/L
7-009	0.96829	0.00474	4282.0	0.023	0.037	0.940	132.0	132.2	885.8 GU/L
7-010	0.96690	0.00385	4222.0	0.023	0.036	0.941	210.2	132.1	876.5 GU/L
7-011	0.97032	0.00415	4677.0	0.023	0.036	0.941	147.5	132.4	876.5 GU/L
7-012	0.97272	0.00399	4512.0	0.023	0.036	0.941	132.8	132.2	876.5 GU/L
7-013	0.97076	0.00448	4293.0	0.021	0.034	0.945	209.9	141.65	824.8 GU/L
7-014	0.97421	0.00361	4246.0	0.022	0.034	0.944	157.5	141.9	824.8 GU/L
7-015	0.96676	0.00399	4271.0	0.022	0.034	0.944	143.2	142.75	824.8 GU/L
7-016	0.97036	0.00396	4345.0	0.021	0.034	0.945	210.0	155.25	801.1 GU/L
7-017	0.97210	0.00395	4596.0	0.021	0.034	0.945	171.9	155.85	801.1 GU/L
7-018	0.96589	0.00373	4575.0	0.021	0.034	0.945	155.9	155.85	801.1 GU/L
7-019	0.96952	0.00376	4683.0	0.021	0.034	0.945	210.1	169.10	796.2 GU/L
7-020	0.97744	0.00389	4315.0	0.021	0.034	0.945	185.5	168.00	796.2 GU/L
7-021	0.96443	0.00411	4345.0	0.021	0.034	0.945	168.1	168.2	796.2 GU/L

Table 5. Calculational Results for the Plexiglass Cross.

No.	$k_{eff} \pm \sigma$	L/(L+A)	CPU (sec)	F ₁	F ₂	F ₃	COMMENT		
							H. of Water	Critical H.	Solution Concentration
7-023	0.97498	0.002	46190	0.024	0.037	0.939	210.5	115.45	90485 GU/L
7-025	0.98033	0.026	43160	0.024	0.037	0.939	115.9	115.9	90485 GU/L
7-027	0.97056	0.024	44650	0.023	0.037	0.940	117.3	117.2	896.1 GU/L
7-028	0.97563	0.001	47090	0.022	0.035	0.943	210.5	133.9	856.4 GU/L
7-029	0.96466	0.008	46230	0.023	0.035	0.942	134.1	134.1	856.4 GU/L
7-030	0.97035	0.001	46140	0.023	0.038	0.939	210.5	109.6	906.4 GU/L
7-031	0.97053	0.045	42150	0.023	0.038	0.939	110.6	110.6	906.4 GU/L
7-032	0.96674	0.001	46620	0.022	0.036	0.942	210.5	115.55	857.35 GU/L
7-033	0.97972	0.028	43600	0.022	0.036	0.942	116.05	116.05	857.35 GU/L
7-034	0.97314	0.002	46420	0.024	0.037	0.939	210.5	106.3	904.6 GU/L
7-035	0.97439	0.046	42120	0.024	0.037	0.939	107.9	107.9	904.6 GU/L
7-036	0.96352	0.002	46370	0.022	0.036	0.942	210.5	110.0	859.5 GU/L
7-037	0.98015	0.040	41790	0.022	0.036	0.942	110.95	110.95	859.5 GU/L
7-038	0.97204	0.002	46710	0.021	0.034	0.945	210.5	117.0	811.2 GU/L
7-039	0.97770	0.023	43750	0.021	0.034	0.945	117.5	117.5	811.2 GU/L
7-040	0.98185	0.002	44890	0.024	0.037	0.939	210.5	104.45	905.3 GU/L
7-041	0.97094	0.060	49650	0.024	0.037	0.939	105.7	105.7	905.3 GU/L
7-042	0.97737	0.002	45650	0.022	0.036	0.942	210.5	107.8	854.9 GU/L
7-043	0.98106	0.050	40810	0.022	0.036	0.942	109.0	109.0	854.9 GU/L
7-044	0.97133	0.002	46030	0.022	0.034	0.944	210.5	111.0	812.8 GU/L
7-045	0.98211	0.039	41730	0.022	0.034	0.944	111.9	111.9	812.8 GU/L
7-046	0.96574	0.002	47350	0.021	0.033	0.946	210.5	115.4	786.4 GU/L
7-047	0.98304	0.025	43380	0.021	0.033	0.946	115.95	115.95	786.4 GU/L
7-048	0.97979	0.001	46640	0.020	0.032	0.948	210.5	122.65	764.2 GU/L
7-049	0.97262	0.016	44020	0.020	0.032	0.948	123.15	123.15	764.2 GU/L
7-050	0.97326	0.001	47460	0.019	0.032	0.949	210.5	150.05	744.9 GU/L
7-051	0.97030	0.004	46280	0.019	0.032	0.949	150.05	150.05	744.9 GU/L

Table 6. Parametric Mean k_{eff} for the 30 deg Lateral Tubes.

Uranium Concentration (gU/ℓ)	Number of Samples	k_{eff} mean
907.0	3	0.97565
885.0	3	0.96815
876.5	3	0.96850
824.8	3	0.97058
801.1	3	0.96945
796.6	3	0.97046
Difference of Water and Solution Level		
Maximum*	6	0.97032
Middle	6	0.97301
Minimum**	6	0.96881

* "Maximum" indicates that reflector water is filled to top of the tank.

** "Minimum" indicates that reflector water level is the same as the solution level.

Table 7. Parametric mean k_{eff} for the Plexiglass Cross Tubes.

Uranium Concentration (gU/l)	No. of Samples	k_{eff} mean
905±1.5	8	0.97456
896.1	1	0.97056
857±2.5	8	0.97361
812±1	4	0.97580
786.4	2	0.97439
764.2	2	0.97621
744.9	2	0.97178
Difference of Water and Solution Level		
Maximum*	13	0.97275
Minimum**	14	0.97558
Inside Diameter (cm)		
26.67	5	0.97323
27.30	4	0.97184
27.94	6	0.97349
28.57	12	0.97578

* "Maximum" indicates that reflector is filled to top of the tank.

** "Minimum" indicates that reflector water level is the same as the solution level.

Table 8. Comparison of k_{eff} obtained with 26 & 137 Energy-Group Libraries for the 30 deg Lateral Tube System.

CASE No.	Height of Water (cm)	Critical Height (cm)	Solution Density (g/cm^2)	k_{eff} using MGCL 26	k_{eff} using MGCL 137
1	210.1	128.2			
2	209.3	128.4			
3	209.8	128.3	2.0289	0.97604	0.98139
4	144.9	128.55		0.97614	0.96834
5	144.9	128.45			
6	129.2	129.1		0.97477	0.98312
7	210.2	131.35		0.96831	0.98599
8	147.2	131.6	2.0048	0.96785	0.97865
9	132.8	132.2		0.96829	0.97813
10	210.2	132.1		0.96690	0.97602
11	147.5	132.4	1.9952	0.97032	0.97638
12	132.8	132.2		0.97272	0.98000
13	209.9	141.65		0.97076	0.98797
14	157.5	141.9	1.9367	0.97421	0.96956
15	143.2	142.75		0.96676	0.97619
16	210.1	155.25		0.97036	0.97631
17	171.9	155.35	1.9108	0.97210	0.97379
18	155.9	155.85		0.96589	0.97331
19	210.1	169.10		0.96952	0.98567
20	185.5	168.00	1.9059	0.97744	0.98114
21	168.1	168.20		0.96443	0.97363
22*	(209.5)	(204.60)	(1.8823)		
mean				0.97071	0.97809

* subcritical condition.

Table 9 Comparison of k_{eff} obtained with 26 & 137 Energy-Group Libraries for the Cross Tube System.

CASE No.	Height of Water (cm)	Critical Height (cm)	Solution Density (g/cm^3)	Inside Diameter (cm)	k_{eff} using MGCL26	k_{eff} using MGCL137
23	210.5	115.45	2.020	26.67	0.97498	0.98977
24	210.5	115.6			0.98033	0.98115
25	115.9	115.9				
26	116.0	116.0				
27	117.3	117.2	2.015		0.97056	0.98257
28	210.5	133.9	1.970		0.97563	0.99443
29	134.1	134.1			0.96466	0.97957
30	210.5	109.6	2.026	27.30	0.97035	0.98584
31	110.6	110.6				0.97053
32	210.5	115.55	1.971		0.96674	0.98354
33	116.05	116.05			0.97972	0.98689
34	210.5	106.3	2.024	27.94	0.97314	0.97813
35	107.9	107.9				0.97439
36	210.5	110.0	1.971		0.96352	0.98507
37	110.95	110.95			0.98015	0.97759
38	210.5	117.0	1.920		0.97204	0.99099
39	117.5	117.5			0.97770	0.97452
40	210.5	104.45	2.023	28.57	0.98185	0.98737
41	105.7	105.7				0.97094
42	210.5	107.8	1.967		0.97737	0.99153
43	109.0	109.0			0.98106	0.97508
44	210.5	111.0	1.921		0.97133	0.98290
45	111.9	111.9			0.98211	0.98921
46	210.5	115.4	1.892		0.96574	0.98412
47	115.95	115.95			0.98304	0.98207
48	210.5	122.65	1.866		0.97979	0.98589
49	123.15	123.15			0.97262	0.99047
50	210.5	150.05	1.844		0.97326	0.98371
51	150.05	150.05			0.97030	0.98657
mean					0.97420	0.98475

Table 10. Leakage, Absorption and Fissions using MGCL 26 and 137 for the case No. 3.

26 Gr No.	137 Gr No.	Fissions		$\frac{\Delta F_i}{\Delta F_{total}}$ (%)
		with 26 Gr	with 137 Gr	
1	1~10	8.091×10^{-3}	5.258×10^{-3}	-5.25
2	11~22	1.350×10^{-2}	1.326×10^{-2}	-4.4
3	23~36	1.269×10^{-3}	1.291×10^{-3}	0.4
4	37~46	5.347×10^{-4}	5.551×10^{-4}	0.4
5	47~56	5.102×10^{-4}	5.094×10^{-4}	0.
6	57~60	5.228×10^{-4}	5.321×10^{-4}	0.2
7	61~69	2.500×10^{-3}	2.560×10^{-3}	11.1
8	70~75	4.085×10^{-3}	4.138×10^{-3}	1.0
9	76~81	7.850×10^{-3}	8.171×10^{-3}	5.9
10	82~87	1.044×10^{-2}	1.090×10^{-2}	8.5
11	88~92	3.144×10^{-3}	3.130×10^{-3}	-0.3
12	93~95	9.021×10^{-4}	8.987×10^{-4}	0
13	96~98	4.021×10^{-3}	3.947×10^{-3}	-1.4
14	99~100	2.084×10^{-3}	2.085×10^{-3}	0
15	101~104	6.040×10^{-3}	6.056×10^{-3}	0.3
16	105~107	3.856×10^{-3}	3.861×10^{-3}	0.1
17	108~110	5.934×10^{-3}	6.026×10^{-3}	1.7
18	111~113	7.899×10^{-3}	7.586×10^{-3}	-5.8
19	114~116	1.191×10^{-2}	1.144×10^{-2}	-8.7
20	117~119	2.662×10^{-2}	2.538×10^{-2}	-23.0
21	120~122	6.548×10^{-2}	6.370×10^{-2}	-33.0
22	123~125	1.430×10^{-1}	1.408×10^{-1}	-40.7
23	126~128	2.329×10^{-1}	2.321×10^{-1}	-14.8
24	129~131	2.443×10^{-1}	2.504×10^{-1}	113.0
25	132~134	1.425×10^{-1}	1.499×10^{-1}	137.0
26	135~137	2.614×10^{-2}	2.694×10^{-2}	14.8
total		9.760×10^{-1}	9.814×10^{-1}	

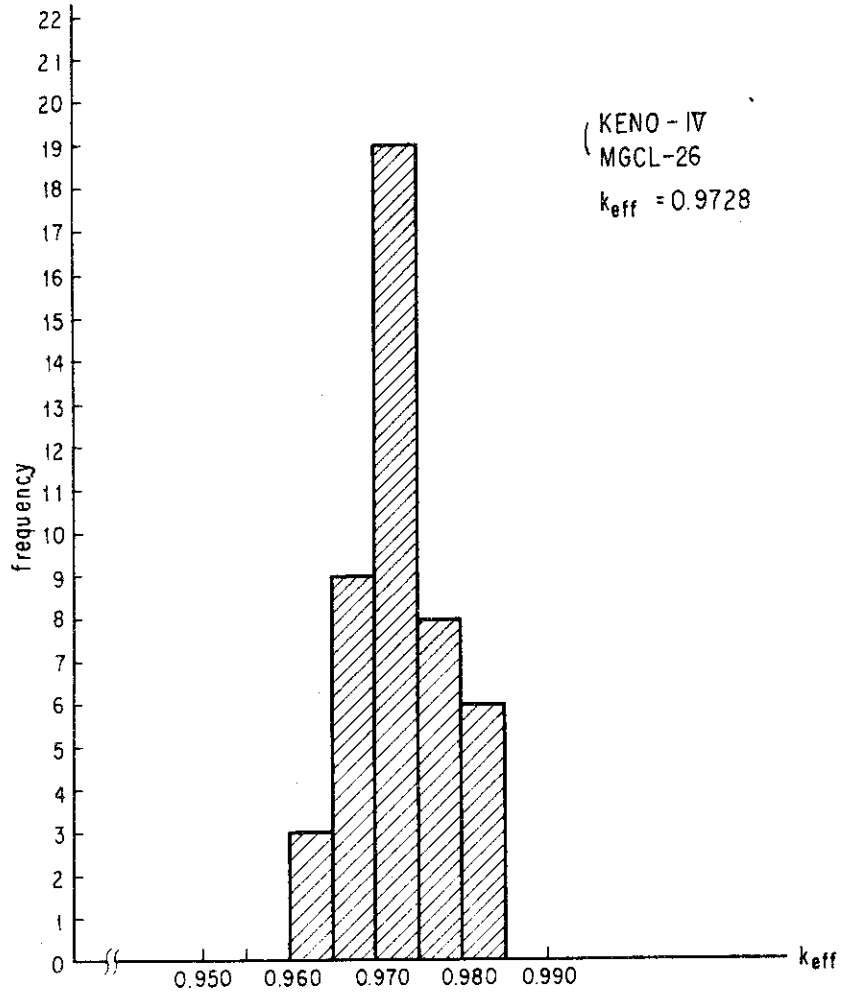


Fig. 8 Histogram of 45 Intersecting Tube Cases.

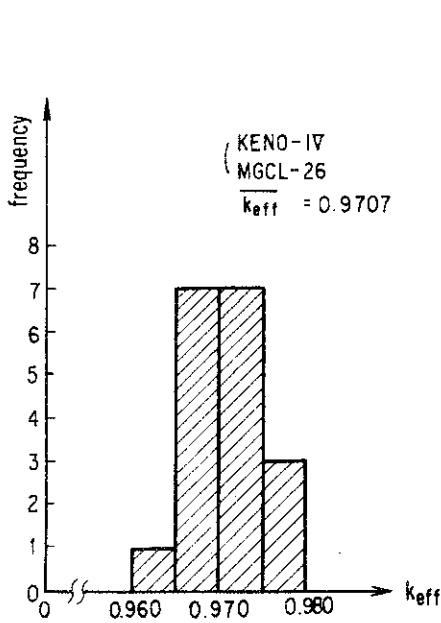


Fig. 9 Histogram of k_{eff} for 18 Lateral Tube Cases.

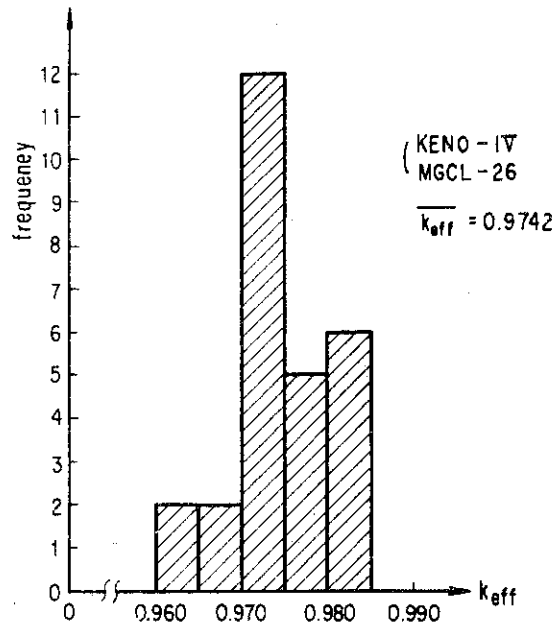


Fig.10 Histogram of k_{eff} for 27 Cross Tube Cases.

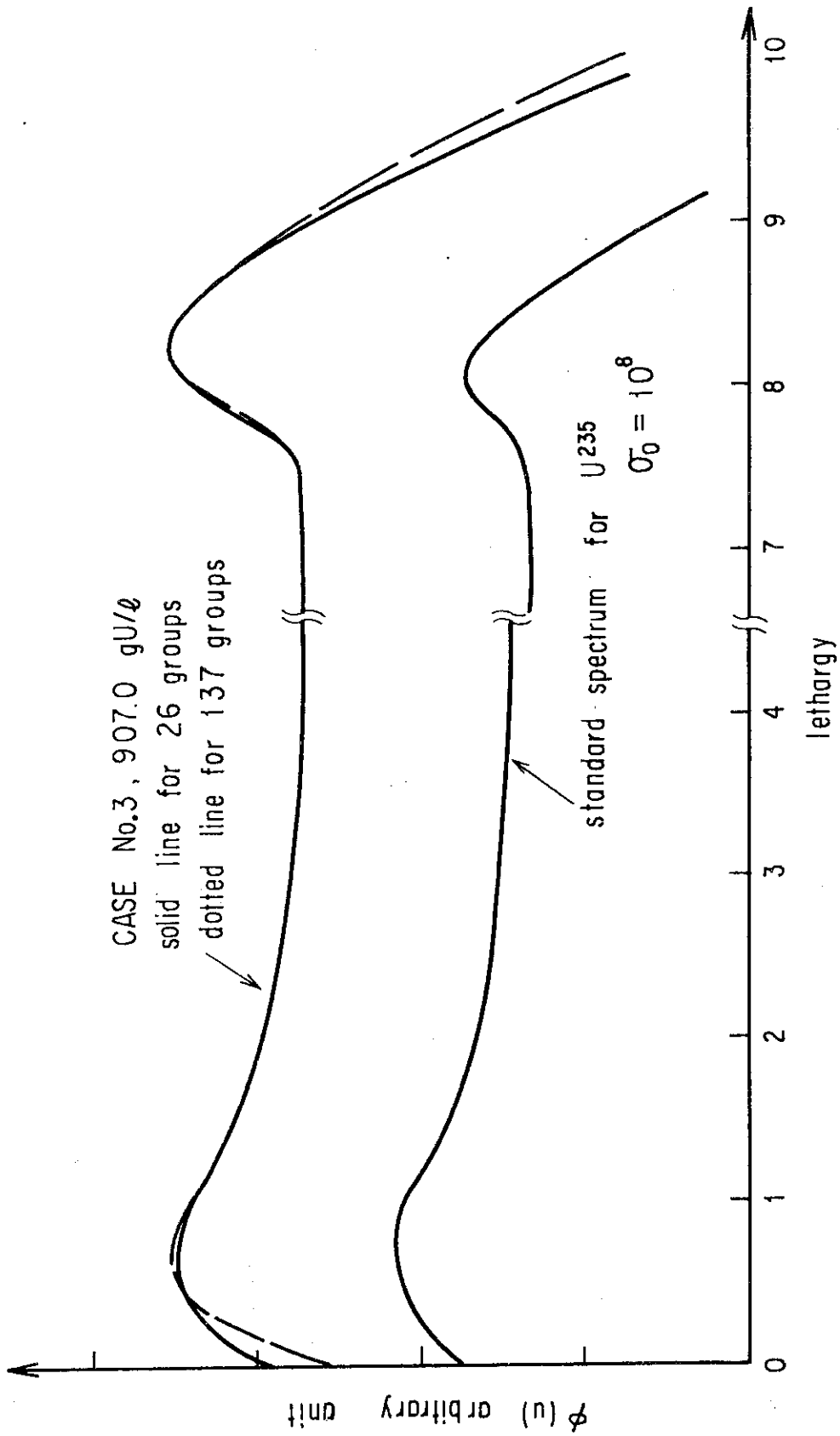


Fig. 11 Neutron spectrum in UO_2F_2 solution comparing 26 groups and 137 groups.

5. 結 論

以上、弗化ウラニル水溶液を含んだ枝管つき垂直管および十字管を軽水タンク内に設置した体系についての臨界実験データに基づき、KENO-IVとMGCL 26群データセットとの組合せによる臨界計算結果を述べた。これから結論として次のようにまとめられた。

- (i) 全45ケースについての k_{eff} 計算値は、0.960から0.985までの範囲に入り、平均値は0.973となる。このうち枝管つき垂直管18ケースの平均値は0.971であり、十字管の27ケースの平均値は、0.974となる。
- (ii) 実験上のパラメータとなったウラニウム濃度、水反射体レベルと溶液レベルの差、あるいは十字管内径などの変化に対しては、 k_{eff} 計算値に有意な傾向は見出せない。
- (iii) エネルギー群構造を26群から137群とすると、平均として約1%程度 k_{eff} 計算値の上昇がみられる。この原因は熱中性子領域での中性子束の計算精度が高まったことにあると思われる。
- (iv) KENO-IVとMGCL-26群データセットとの組合せにより、一連の実験体系についてのベンチマーク計算を実施したが、本報告書で扱った配管交差配位体系については他と異なり、KENO-IVの標準幾何形状オプションで処理できなく、いわゆる一般形状オプションにより処理したものである。得られた計算精度については、他のベンチマーク計算結果の計算精度と比較しつつ検討する必要がある。

謝 辞

今回のベンチマーク計算には、契約に基づき、日本原子力事業(株)、日立製作所(株)、住友原子力(株)、石川島播磨(株)、日揮(株)の各社の御協力を得ております。また、動燃事業団も参加していただきました。ここに記して謝意を表します。さらに、日本原子力研究所安全解析部長 桂木 学氏にも終始貴重な御助言と御協力を得たので感謝します。

参 考 文 献

- 1) E.B. JOHNSON, "The Nuclear Criticality of Intersecting Cylinders of Aqueous Uranyl Fluoride Solutions," Y-DR-129, Union Carbide Corporation (1974).
- 2) Y. NAITO et al., to be published.
- 3) L.M. PETRIE and N.F. CROSS, "KENO-IV-An Improved Monte Carlo Criticality Program," ORNL-4938, Oak Ridge National Laboratory (1975).
- 4) G.E. HANSEN and W.H. ROACH, "Six and Sixteen Group Cross Sections for Fast and Intermediate Critical Assemblies," LAMS-2543, Los Alamos Scientific Laboratory (1961).

5. 結 論

以上、弗化ウラニル水溶液を含んだ枝管つき垂直管および十字管を軽水タンク内に設置した体系についての臨界実験データに基づき、KENO-IVとMGCL 26群データセットとの組合せによる臨界計算結果を述べた。これから結論として次のようにまとめられた。

- (i) 全45ケースについての k_{eff} 計算値は、0.960から0.985までの範囲に入り、平均値は0.973となる。このうち枝管つき垂直管18ケースの平均値は0.971であり、十字管の27ケースの平均値は、0.974となる。
- (ii) 実験上のパラメータとなったウラニウム濃度、水反射体レベルと溶液レベルの差、あるいは十字管内径などの変化に対しては、 k_{eff} 計算値に有意な傾向は見出せない。
- (iii) エネルギー群構造を26群から137群とすると、平均として約1%程度 k_{eff} 計算値の上昇がみられる。この原因は熱中性子領域での中性子束の計算精度が高まったことにあると思われる。
- (iv) KENO-IVとMGCL-26群データセットとの組合せにより、一連の実験体系についてのベンチマーク計算を実施したが、本報告書で扱った配管交差配位体系については他と異なり、KENO-IVの標準幾何形状オプションで処理できなく、いわゆる一般形状オプションにより処理したものである。得られた計算精度については、他のベンチマーク計算結果の計算精度と比較しつつ検討する必要がある。

謝 辞

今回のベンチマーク計算には、契約に基づき、日本原子力事業(株)、日立製作所(株)、住友原子力(株)、石川島播磨(株)、日揮(株)の各社の御協力を得ております。また、動燃事業団も参加していただきました。ここに記して謝意を表します。さらに、日本原子力研究所安全解析部長 桂木 学氏にも終始貴重な御助言と御協力を得たので感謝します。

参 考 文 献

- 1) E.B. JOHNSON, "The Nuclear Criticality of Intersecting Cylinders of Aqueous Uranyl Fluoride Solutions," Y-DR-129, Union Carbide Corporation (1974).
- 2) Y. NAITO et al., to be published.
- 3) L.M. PETRIE and N.F. CROSS, "KENO-IV-An Improved Monte Carlo Criticality Program," ORNL-4938, Oak Ridge National Laboratory (1975).
- 4) G.E. HANSEN and W.H. ROACH, "Six and Sixteen Group Cross Sections for Fast and Intermediate Critical Assemblies," LAMS-2543, Los Alamos Scientific Laboratory (1961).