

JAERI-M
9108

KENO - IVコードベンチマーク計算 (5)
(硝酸ウラニル水溶液のシリンダ群又はタンク)

1980年10月

野村 靖・倉重 哲雄*・片倉 純一

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、お申しこしてください。

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-Nコードベンチマーク計算(5)
(硝酸ウラニル水溶液のシリンダ群又はタンク)

日本原子力研究所東海研究所安全解析部

野村 靖・倉重 哲雄*・片倉 純一

(1980年9月2日受理)

モンテカルロ法コード KENO-N と原研で新たに開発整備中の多群定数ライブラリ-MGCL との組合せにより、硝酸ウラニル水溶液のシリンダ群又はタンクに関する臨界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。

プレクシガラスあるいはコンクリート製反射体のついた最大 4×4 配列シリンダ群の実験 31 ケース、および反射体つきあるいは裸の単一タンクの実験 45 ケースについての計算結果は、全 76 ケースの実効増倍率 k_{eff} の平均値が 0.959、標準偏差が 1.0% の分布をなす。

*) 石川島播磨重工業株式会社

KENO-IV Code Benchmark Calculation (5)
(Cylinders or a Tank Containing Uranyl Nitrate Solution)

Yasushi NOMURA, Tetsuo KURASHIGE*
and Jun'ich KATAKURA

Division of Reactor Safety Evaluation,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received September 2, 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 cylinders or a tank containing uranyl nitrate solution.

31 cases of experiments have been calculated for maximum 4 x 4 array of cylinders with plexiglass or concrete reflector, and 45 cases of experiments for a single tank with or without reflector.

For all the 76 cases, the effective multiplication factor can be predicted as 0.959 in average with 1.0% standard deviation by the JAERI's system.

Keywords: Criticality Safety, Benchmark Calculation, Cylinders Array, Single Tank, Uranyl Nitrate Solution, KENO-IV Monte Carlo Code, MGCL Multigroup Constants Library

* Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

目 次

1. まえがき	1
2. 実験体系と実験データ	1
2.1 単一タンクの実験データ	2
2.2 シリンダ群の実験データ	2
3. 計算手法と計算モデル	15
3.1 計算手法	15
3.2 計算モデル	19
3.2.1 単一タンクの計算モデル	19
3.2.2 シリンダ配列の計算モデル	19
4. 計算結果及び考察	34
4.1 k_{eff} 計算値のヒストグラム	34
4.2 単一タンク最小反射条件の検討	35
4.3 k_{eff} 計算値の傾向	35
4.4 中性子エネルギー群構造の影響	37
5. 結 論	52
参考文献	52

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Experimental System and Data	1
2.1 Experimental Data for a Single Tank	2
2.2 Experimental Data for an Array of Cylinders	2
3. Calculational Method and the Model	15
3.1 Calculational Method	15
3.2 Calculational Model	19
3.2.1 Calculational Model for a Single Tank	19
3.2.2 Calculational Model for an Array of Cylinders	19
4. Calculated Results and the Consideration	34
4.1 Histogram of k_{eff} Calculated	34
4.2 Examination of Minimum Reflecting Condition for a Single Tank	35
4.3 Tendency of k_{eff} Calculated	35
4.4 Effect of Neutron Energy Group Structure	37
5. Conclusion	52
References	52

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-N³⁾ 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。本報告書では硝酸ウラニル水溶液を含んだシリンダ群あるいはタンク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²³⁵U濃縮度93.17%の硝酸ウラニル水溶液を単一タンク、あるいは最大4×4の配列に並べたシリンダ群に注入し、臨界となる溶液レベルを測定したものである。シリンダ群あるいは単一タンクの実験では反射体としてメタクリレートプラスチックあるいはコンクリート製のキュービクルが用いられた。単一タンクの場合、この反射体のない実験も行われた。データの組合せは、タンクあるいはシリンダ群の配置形状、用いられた反射体の種類、および溶液のウラニウム濃度をパラメータとして、単一タンクの場合、45ケース、シリンダ群の場合、31ケースとなる。

以下、第2章で実験体系と実験データについて説明し、第3章で用いられた計算手法および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、実験体系と実験データの説明のために用いられた図、表および写真は全て実験レポート¹⁾から転載したものである。

2. 実験体系と実験データ

核分裂物質溶液は硝酸を過剰に含んだ硝酸ウラニル〔UO₂(NO₃)₂〕溶液であり、水を加えて低濃度(約60 gU/l)、中濃度(約140 gU/l)、高濃度(約350 gU/l)と3種類の濃度の範囲に分類される溶液を作った。Table. 1及びTable. 2に実験に用いた溶液濃度一覧を示す。ウラニウムは²³⁵Uが約93%に濃縮されたものを用いた。実験開始から終了まで5回にわたってサンプリングした試料についてマススペクトル分析によってウラニウム同位体元素成分比を測定した結果をTable. 3に示す。

実験は、東西11.28 m、南北10.67 m、高さ9.75 mの内部広さのコンクリート壁を有する実験室内で行われ、東西121.8 cm、南北122.2 cm、高さ123.7 cmの内面寸法を有し、高さ25.7 cmのコンクリート製キュービクル反射体の内部、あるいは一辺が122.9 cmの立方体の内面寸法を有し、厚さ20.6 cmのメタクリレートプラスチック製のキュービクル反射体の内部に、単一タンクを宙吊り、あるいは床置きとし、シリンダ群の場合は最大4×4の配列として床に垂直に立て、ウラニウム溶液を下から外径約2 cmの細管を通してタンク、またはシリンダ容器内に注入し、臨界となるまでレベルを上昇させて行れた。単一タンクの実験の場合は、キュービクル反射体を取り除いて実験室内に宙吊りとした最小反射条件のもとでの実験も行われた。実験室

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-N³⁾ 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。本報告書では硝酸ウラニル水溶液を含んだシリンダ群あるいはタンク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 ²³⁵U 濃縮度 93.17% の硝酸ウラニル水溶液を単一タンク、あるいは最大 4×4 の配列に並べたシリンダ群に注入し、臨界となる溶液レベルを測定したものである。シリンダ群あるいは単一タンクの実験では反射体としてメタクリレートプラスチックあるいはコンクリート製のキュービクルが用いられた。単一タンクの場合、この反射体のない実験も行われた。データの組合せは、タンクあるいはシリンダ群の配置形状、用いられた反射体の種類、および溶液のウラニウム濃度をパラメータとして、単一タンクの場合、45 ケース、シリンダ群の場合、31 ケースとなる。

以下、第2章で実験体系と実験データについて説明し、第3章で用いられた計算手法および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、実験体系と実験データの説明のために用いられた図、表および写真は全て実験レポート¹⁾ から転載したものである。

2. 実験体系と実験データ

核分裂物質溶液は硝酸を過剰に含んだ硝酸ウラニル [UO₂(NO₃)₂] 溶液であり、水を加えて低濃度 (約 60 gU/l)、中濃度 (約 140 gU/l)、高濃度 (約 350 gU/l) と 3 種類の濃度の範囲に分類される溶液を作った。Table. 1 及び Table. 2 に実験に用いた溶液濃度一覧を示す。ウラニウムは ²³⁵U が約 93% に濃縮されたものを用いた。実験開始から終了まで 5 回にわたってサンプリングした試料についてマススペクトル分析によってウラニウム同位体元素成分比を測定した結果を Table. 3 に示す。

実験は、東西 11.28 m、南北 10.67 m、高さ 9.75 m の内部広さのコンクリート壁を有する実験室内で行われ、東西 121.8 cm、南北 122.2 cm、高さ 123.7 cm の内面寸法を有し、厚さ 25.7 cm のコンクリート製キュービクル反射体の内部、あるいは一辺が 122.9 cm の立方体の内面寸法を有し、厚さ 20.6 cm のメタクリレートプラスチック製のキュービクル反射体の内部に、単一タンクを宙吊り、あるいは床置きとし、シリンダ群の場合は最大 4×4 の配列として床に垂直に立て、ウラニウム溶液を下から外径約 2 cm の細管を通してタンク、またはシリンダ容器内に注入し、臨界となるまでレベルを上昇させて行れた。単一タンクの実験の場合は、キュービクル反射体を取り除いて実験室内に宙吊りとした最小反射条件のもとでの実験も行われた。実験室

内、あるいは反射体内部におけるタンクの配置寸法については Table. 4 に示す。

反射体材質として用いられたコンクリート、およびプラスチックの成分組成を Table. 5、および Table. 6 に示す。容器材質として用いられたアルミニウム、およびステンレス・スチールの成分組成を Table. 7 に示す。容器がアルミニウム製の場合は、内面に硝酸により腐食されるのを防ぐため耐酸性のエポキシ樹脂コーティング（厚さ約 0.18 cm）が施されている。

次に単一タンクとシリンダ群の実験データについて各場合に分けて説明する。

2.1 単一タンクの実験データ

Table. 8 に単一タンクの実験データを示す。大別すると最小反射条件、コンクリート反射条件、プラスチック反射条件の臨界実験データとなり、ウラニウム濃度およびタンクのキュービクル内位置をパラメータとして全部で 45 ケースのデータがある。

単一タンク配置例として Fig. 1 にタンクがコンクリート反射体キュービクル内中央に吊された場合と、Fig. 2 にタンクがプラスチック反射体キュービクルの北西の隅に床置きされた場合を図式的に示す。コンクリートまたはプラスチック反射体キュービクルは、Fig. 3 及び Fig. 4 に示すように平板を東西南北 4 側面と上下 2 面に置いて組立てて作り、これを鋼製テーブルの上に等間隔に置いて並べた 9 本のスクリージャッキにより持ち上げて支持した。Photo. 1 及び Photo. 2 はキュービクルの上板をとり外して上から撮影した写真である。Photo. 3 は支持テーブル及びスクリージャッキ附近を撮影した写真であり、臨界近接測定用の中性子検出器がコンクリート側面に設置された様子も見える。Photo. 4 は最小反射条件実験の場合にタンクを天井クレーンからのワイヤにより吊り下げた状態を示した写真である。

2.2 シリンダ群の実験データ

Table. 10 にシリンダ群の実験データを示す。大別するとコンクリート反射体条件と、プラスチック反射体条件の臨界実験データとなり、ウラニウム濃度、配列形状、ステンレススチール製スリーブの有無などをパラメータとして全部で 31 ケースのデータがある。4 × 4 配列以外の配列形状で、a, b, c, などの英小文字で表現したシリンダ ID は Photo. 5 に示したとおりである。

シリンダ配列の例として Fig. 5 に 4 × 4 配列のスリーブつきシリンダ群がコンクリート反射体キュービクル内に置かれた場合を図式的に示す。ここで各シリンダ中心間距離は、外周に配置したシリンダの中心と反射体内壁との間の距離の 2 倍となっている。反射体床板には溶液注入用配管を通すための穴が、この配列の間隔で開けられており、シリンダ群の頭部には Photo. 5 に見られるようなアルミニウム製フレームが設けられている。

Table 1

Properties of Uranyl Nitrate Solutions Used in Single-Tank Experiments of Table 8

Uranium Concentration (g U/l)	Solution Density (g/cm ³)	Excess Nitric Acid (molar)	Total Impurities (ppm)	H:U
54.89 ± 0.25	1.0758 ± 0.0006	0.105 ± 0.001	2340	465.6
59.65 ± 0.42	1.0825 ± 0.0006	0.114 ± 0.004	2150 ± 680	427.7
60.32 ± 0.55	1.0837 ± 0.0007	0.113 ± 0.002	2860 ± 990	423.0
63.95 ± 0.34	1.0883 ± 0.0002	0.111 ± 0.003	780 ± 320	398.5
66.33 ± 1.52	1.0920 ± 0.0025	0.120 ± 0.003	2130 ± 250	383.9
137.40 ± 0.63	1.1923 ± 0.0007	0.287 ± 0.002	2210	180.2
142.92 ± 0.52	1.2007 ± 0.0024	0.283 ± 0.003	1960 ± 580	173.1
144.38 ± 0.47	1.2023 ± 0.0006	0.272 ± 0.003	1850 ± 130	171.3
145.68 ± 1.04	1.2038 ± 0.0001	0.294 ± 0.002	1240 ± 110	169.5
147.66 ± 0.75	1.2069 ± 0.0009	0.271 ± 0.010	1690 ± 440	167.4
334.77 ± 1.27	1.4636 ± 0.0011	0.521 ± 0.004	1390 ± 30	68.5
345.33 ± 1.18	1.4779 ± 0.0011	0.534 ± 0.023	1420 ± 540	66.1
346.73 ± 0.95	1.4800 ± 0.0003	0.542 ± 0.005	1360 ± 190	65.8
357.71 ± 1.99	1.4951 ± 0.0006	0.549 ± 0.015	1430 ± 360	63.5

*All uncertainties represent one standard deviation about the mean for multiple samples. All solution properties were measured at 23.0°C.

Table 2

Properties of Uranyl Nitrate Solutions Used in Array Experiments of Table 10

Uranium Concentration (g U/l)	Solution Density (g/cm ³)	Excess Nitric Acid (molar)	Total Impurities (ppm)	H:U
60.32 ± 0.55	1.0837 ± 0.0007	0.113 ± 0.002	2860 ± 990	423.0
63.95 ± 0.34	1.0883 ± 0.0002	0.111 ± 0.003	780 ± 320	398.5
67.28 ± 0.27	1.0934 ± 0.0003	0.128 ± 0.004	2300 ± 240	378.2
76.09 ± 0.21	1.1057 ± 0.0001	0.137 ± 0.002	2190 ± 210	333.5
80.72 ± 0.16	1.1122 ± 0.0000	0.143 ± 0.001	2060 ± 30	313.8
83.49 ± 0.47	1.1164 ± 0.0006	0.151 ± 0.002	2610 ± 250	303.2
355.94 ± 2.68	1.4925 ± 0.0029	0.494 ± 0.019	1160 ± 310	64.1
359.55 ± 1.38	1.4984 ± 0.0008	0.578 ± 0.019	1610 ± 120	63.1
360.37 ± 2.60	1.4995 ± 0.0037	0.585 ± 0.021	1530 ± 320	62.9
364.11 ± 1.78	1.5054 ± 0.0009	0.584 ± 0.016	1420 ± 20	62.3
369.96 ± 1.45	1.5120 ± 0.0017	0.598 ± 0.025	1340 ± 100	61.0

*All uncertainties represent one standard deviation about the mean for multiple samples. All solution properties were measured at 23.0°C.

Table 3

Uranium Isotopic Enrichment of Solution Used in Both Single-Tank and Array Experiments

Date Reported	Isotope (%)			
	²³⁴ U	²³⁵ U	²³⁶ U	²³⁸ U
July 7, 1976	1.01	93.16	0.44	5.40
Oct. 5, 1976	1.10	93.08	0.44	5.38
Dec. 21, 1976	0.99	93.17	0.43	5.41
Mar. 29, 1977	1.01	93.23	0.43	5.33
June 21, 1977	1.01	93.22	0.43	5.34
Average	1.022 ± 0.043	93.172 ± 0.060	0.434 ± 0.005	5.372 ± 0.036

TABLE 4
Interior Dimensions of Reflectors and Location* of Tanks Within Them for Various Categories of Experiments

Description of Experiment Category	Table ^a	North	South	Range	Total	East	West	Range	Total	Up	Down	Range	Total
Minimally reflected ^b													
Most cases	8	556	511	10	1067	451	677	5	1128	480	495	9	975
50.69-cm-diam tank only	8	535	532	0	1067	445	683	0	1128	469	506	0	975
Concrete reflected													
Single tank, centered	8	57.4	64.8	1.4	122.2	64.6	57.2	2.4	121.8	82.0	41.7	0.2	123.7
Single Tank, in corner	8	16.6	105.6	0.3	122.2	104.1	17.7	0.8	121.8	123.7	0	0	123.7
Arrays, all cases	10		(See Fig. 5)		122.2		(See Fig. 5)		121.8	124.4	0	0	124.4
Plastic reflected													
Single tank, centered	8	60.4	62.5	0.5	122.9	61.2	61.7	1.7	122.9	81.4	41.5	0.2	122.9
Single tank, in corner	8	17.3	105.6	0.9	122.9	105.0	17.9	0.6	122.9	122.9	0	0	122.9
Single tank, centered on floor	8	61.1	61.8	0.5	122.9	61.3	61.6	0.2	122.9	122.9	0	0	122.9
Arrays, no sleeves	10		(See Fig. 5)		122.9		(See Fig. 5)		122.9	122.9	0	0	122.9
Arrays, with sleeves	10		(See Fig. 5)		122.9		(See Fig. 5)		122.9	122.9	0	0	123.9

*Distance in centimetres from center of the underside of the bottom of a tank to each of the six reflecting surfaces. The range measures the extremes between cases within each category, and the totals give the interior dimensions of the reflectors in centimetres.

^aTable containing the corresponding critical height data.

^bApproximately centered in a large room having thick concrete walls.

TABLE 5
Composition of Concrete in Weight Percent

Element	Analysis of Ingredients	Analysis of Cured Concrete	Average	Method ^a	Number Density ^b (atom/b·cm)
Hydrogen	0.75	0.75	0.75	CH	0.0104 008
Carbon	5.57	5.52	5.55	CH	0.0064 590
Nitrogen	0.00	0.02	0.01	K	0.0000 100
Oxygen	50.09	48.49	49.29	Difference	0.0430 634
Sodium	0.21	0.63	0.42	AA	0.0002 554
Magnesium	1.71	1.25	1.48	AA	0.0008 509
Aluminum	1.94	2.17	2.06	AA,C	0.0010 672
Silicon	15.91	15.50	15.70	AA,C	0.0078 138
Sulfur	0.15	0.19	0.17	Eschka	0.0000 741
Potassium	0.13	1.37	0.75	AA	0.0002 681
Calcium	22.91	23.00	22.95	AA	0.0080 040
Titanium	0.00	0.10	0.05	AA	0.0000 146
Iron	0.63	1.01	0.82	AA	0.0002 052
Total	100.0	100.0	100.0		

^aAA = atomic absorption

CH = carbon/hydrogen analyzer

K = kjeldahl

C = calorimetric

^bBased on a density of 2.321 g/cm³.

TABLE 6
Properties of the Plastic Reflector and Composition of Materials

Density (g/cm ³) Weight (kg) Volume (10 ⁶ cm ³)	Total, All Six Panels		Top and Bottom Panels (Fire-Retardant Plastic)	All Four Side Panels (Nonfire-Retardant Plastic)
		2920.1	2.3938	1.286 1040.8 0.8096
Composition (wt%)				
Hydrogen			7.18 ± 0.16	8.03 ± 0.07
Carbon			52.68 ± 0.10	59.72 ± 0.05
Nitrogen			0.10	a
Oxygen			29.40 ± 0.32	32.14 ± 0.14
Phosphorus			1.54	a
Chlorine			1.63	a
Bromine			6.50	a
Ashb			0.71	a
Totals			99.74	99.89 ± 0.16

^aNot measured.

^bProducts of combustion at high temperature for a long time.

TABLE 8
Critical Height (in centimetres) of a Single Enriched Uranium Solution Tank

Tank	Minima-ly Reflected ^a				25.7-cm-thick Concrete Shell (~122-cm inside dimension)				20.6-cm-thick Plastic Shell (~122-cm inside dimension)										
	Material	Inside Diameter ^d (cm)	Concentration ^e (g U/l)	Critical Height (cm)	At Center ^b		In Corner ^c		At Center ^b		In Corner ^c		Centered on Floor ^b						
					Concentration ^e (g U/l)	Critical Height (cm)	Serial NO.	Concentration ^e (g U/l)	Critical Height (cm)	Serial NO.	Concentration ^e (g U/l)	Critical Height (cm)	Serial NO.	Concentration ^e (g U/l)	Critical Height (cm)	Serial NO.			
Stainless steel	27.92	145.68	1	31.20±0.04	144.38	29.79±0.03	11	144.38	24.19±0.01	18	147.66	29.71±0.05	25	147.66	50.52±0.09 ^d	33	60.32	67.48±0.20 ^d	43
			2	28.93±0.09	334.77	27.23±0.03	12	334.77	21.79±0.01	19	345.33	27.60±0.01	26	345.33	22.75±0.01	34	60.32	67.48±0.20 ^d	43
			3	33.55±0.03	144.38	31.37±0.01	13	144.38	31.37±0.01	20	147.66	31.26±0.01	27	147.66	51.67±0.05 ^d	36	60.32	67.48±0.20 ^d	43
			4	30.91±0.04 ⁴	334.77	28.60±0.03	14	334.77	28.60±0.03	21	345.33	28.84±0.02	28	345.33	22.87±0.01	37	60.32	67.48±0.20 ^d	43
Aluminum	33.01	5	39.48±0.13	59.65	34.10±0.02	15	59.65	27.27 ¹	22	60.32	34.33±0.02	30	60.32	27.70±0.27 ³	39	60.32	31.75±0.03	45	
		6	36.67±0.17 ³	144.38	22.85±0.03	16	144.38	18.24±0.01	23	147.66	22.78±0.01	31	147.66	18.49±0.04	40	60.32	31.75±0.03	45	
		7	23.96±0.13	334.77	21.50±0.01	17	334.77	16.78±0.02	24	345.33	21.67±0.00	32	345.33	17.20±0.03 ³	41	60.32	31.75±0.03	45	
		8	145.68	144.38	31.37±0.01	13	144.38	31.37±0.01	20	147.66	31.26±0.01	27	147.66	51.67±0.05 ^d	36	60.32	67.48±0.20 ^d	43	
		9	357.71	334.77	28.60±0.03	14	334.77	28.60±0.03	21	345.33	28.84±0.02	28	345.33	22.87±0.01	37	60.32	67.48±0.20 ^d	43	
		10	22.53±0.05	63.95	20.48±0.05	10	63.95	20.48±0.05	10	63.95	20.48±0.05	10	63.95	20.48±0.05	10	63.95	20.48±0.05	10	

^aApproximately centered in an ~10-cm cubical room having thick concrete walls; see Table 4.

^bRefer to Table 4 for distances to reflector.

^cRefer to Table 4 for distances to reflector.

^dThese four tanks are completely specified in Table 9. Five entries in this table (at 60.32g U/l) used three taller tanks-also described in Table 9. The 76.9-cm-tall aluminum tank was used for those critical heights reported at 78.1, 51.67, and 77.1 cm. The 91.5- and 76.6-cm-tall stainless-steel tanks were used for those critical heights reported at 50.52 and 67.48 cm, respectively.

^eRefer to Table 1 for complete specification of uranium solution.

^fObtained by an extrapolation of reciprocal multiplication curves.

TABLE 7
Composition of Containers in Weight Percent

Element	Aluminum (Type 6061-T6)	Stainless Steel	
		(Type 304)	(Type 316)
Carbon		0.066	0.042
Magnesium	1.00		
Aluminum	97.35 ^a		
Silicon	0.60	0.81	0.45
Phosphorus		0.025	0.031
Sulfur		0.019	0.014
Titanium	0.03		
Chromium	0.17	18.5	16.6
Manganese	0.07	1.29	1.25
Iron	0.47	70.02 ^a	70.31 ^{3a}
Nickel		9.27	11.3
Copper	0.25		
Zinc	0.06	0.018	2.1
Molybdenum			
Density (g/cm ³)	2.737	7.927	7.92 ^b

^adetermined by difference.

^bHandbook value.

TABLE 9
Properties of Tanks Used in Single-Tank Experiments of Table 8

Material ^a	Inside Diameter (cm)	Inside Height (cm)	Uncoated Mass (g)	Mass of Coating (g)	Thickness of Coating (cm)	Tailpipe Length (cm)
Type 6061 aluminum	50.69 ± 1.25	30.9	7834	323	0.030	29.9
	33.01 ± 0.25	49.5	6049	170	0.018	30.4
	28.01 ± 0.14	41.9	4473	118	0.017	30.3
Type 304 or 316 ^c stainless steel	27.88 ± 0.09	76.9	7165	189	0.017	29.7
	27.92 ± 0.38	41.6	12,326	No coating on stainless-steel tanks		30.7 ^e
	27.93 ^d ± 0.16	9.15	23,739			29.6
	27.93 ^d ± 0.16	76.6	21,439			29.6

^aNominal wall and bottom thicknesses in all cases were 0.32 and 0.64 cm, respectively.

^bNominal 2.54-cm-o.d. tubing with 0.12-cm-thick wall except for footnote e.

^cSee text.

^dThese two are actually the same tank. Only the height was changed for different experiments.

^eNominal 2.22-cm-o.d. tubing with 0.12-cm-thick wall.

TABLE 10
Critical Height (in centimetres) of an Array of Enriched Uranium Solution Cylinders

Diameter (cm)	Configuration		25.7-cm-thick Concrete Steel (122-cm inside dimension)				20.6-cm-thick Plastic Shell (122-cm inside dimension)					
	Size	Array	Stainless-Steel Sleeve	Low Concentration		High Concentration		60.32 g U/g		355.94 g U/g		
21.12	4 x 4		Yes	67.28	28.63 ± 0.03	46	369.96	17.24 ^h ± 0.10	53	34.82 ± 0.02	63	19.27 ± 0.01
	4 x 4		No	67.28	27.15 ± 0.01	47	364.11	17.13 ± 0.02	54	31.76 ± 0.00	64	18.82 ± 0.00
	2 x 2	f, g, j, k	Yes	76.09	60.70 ± 0.06	48	360.37	29.49 ± 0.01	55	110.20 ^l	65	31.93 ± 0.01
	2 x 2	f, g, j, k	No	76.09	62.34 ^h ± 0.16	49	364.11	31.11 ± 0.03	56	102.29 ± 0.09	66	33.20 ± 0.02
	2 x 2	f, g, j, k	No	80.72	57.88 ^l	50						
16.12	4 x 4		Yes	83.49	57.34 ± 0.05	51	360.37	32.32 ^h ± 0.09	57	105.85 ± 0.03	67	38.10 ± 0.03
	4 x 4		No	83.49	51.21 ± 0.02	52	359.55	31.82 ± 0.01	58	78.40 ± 0.05	68	35.56 ± 0.02
	2 x 4		No				359.55	51.45 ^l	59			
	2 x 3	a, b, e, f, i, j, m, n	No				359.55	65.49 ^l	60			
	2 x 3	e, f, g, i, j	Yes									
	2 x 3	e, f, g, i, j, k	No									
	2 x 2	a, b, e, f	Yes				359.55	101.45 ± 0.03	61	95.20 ± 0.04	75	
2 x 2	a, b, e, f	No				359.55	104.04 ± 0.03	62	89.78 ± 0.02	76		

Refer to Photo 5 for identification of cylinders. Do not confuse lettered cylinder locations in this column with footnotes given elsewhere in the Table. For arrays smaller than 4x4, unused cylinder locations were vacant.

Refer to Table 2 for complete specification of uranium solution.

TABLE 11

Properties of Cylinders and Sleeves Used in the Array Experiments of Table 10

Dimension (cm)	16-cm-diam Cylinders	21-cm-diam Cylinders
<u>Cylinder^d</u>		
inside diameter	16.12 ± 0.07	21.12 ± 0.01
wall thickness	0.32 ± 0.01	0.40 ± 0.01
outside diameter ^b	16.77	21.92
inside length	119.1 ± 0.1	119.1 ± 0.1
bottom thickness ^c	0.32	0.32
<u>Coating (thickness)</u>		
inside wall, concrete reflector	0.017 ± 0.003	0.014 ± 0.002
bottom and tailpipe, concrete reflector	0.157 ± 0.030	0.014 ± 0.002
inside wall, plastic reflector	0.017 ± 0.003	0.015 ± 0.002
bottom and tailpipe, plastic reflector	0.157 ± 0.030	0.077 ± 0.030
<u>Tailpipe</u>		
outside diameter, except cylinders f and j	1.27	1.27
outside diameter, cylinders f and j only	2.54	2.54
wall thickness	0.13	0.13
length	30.4	30.4
<u>Sleeved</u>		
wall thickness	0.31 ± 0.01	0.32 ± 0.01
length	(2x)61.0 ± 0.01	122.0 ± 0.1

^aConstructed from schedule 10S commercial aluminum (Type 6061-T6) pipe.

^bNot measured, o.d. = i.d. + 2 x wall.

^cNot measured, nominal value.

^dRolled from Type 304 stainless steel.

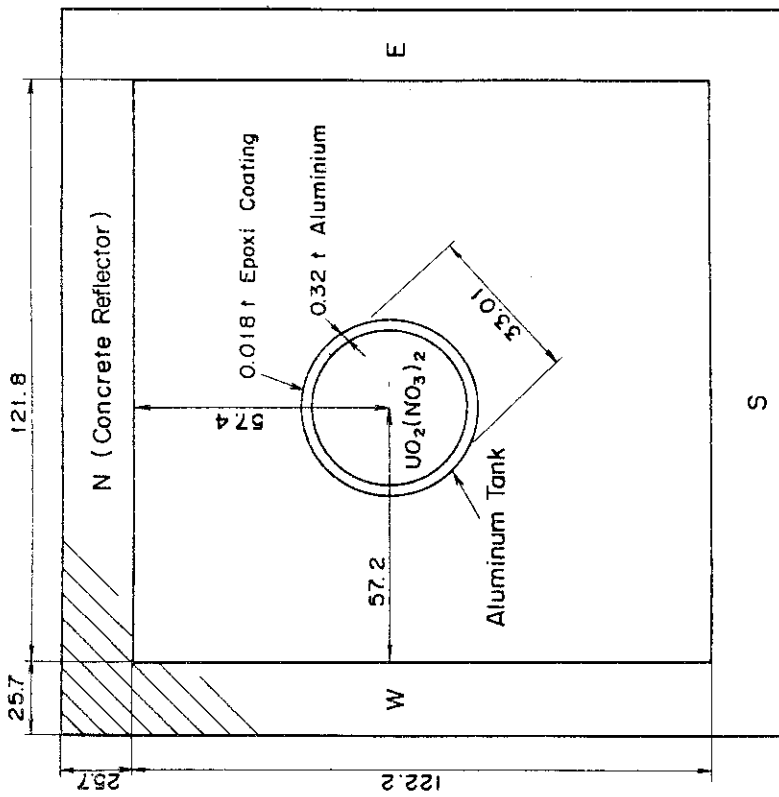
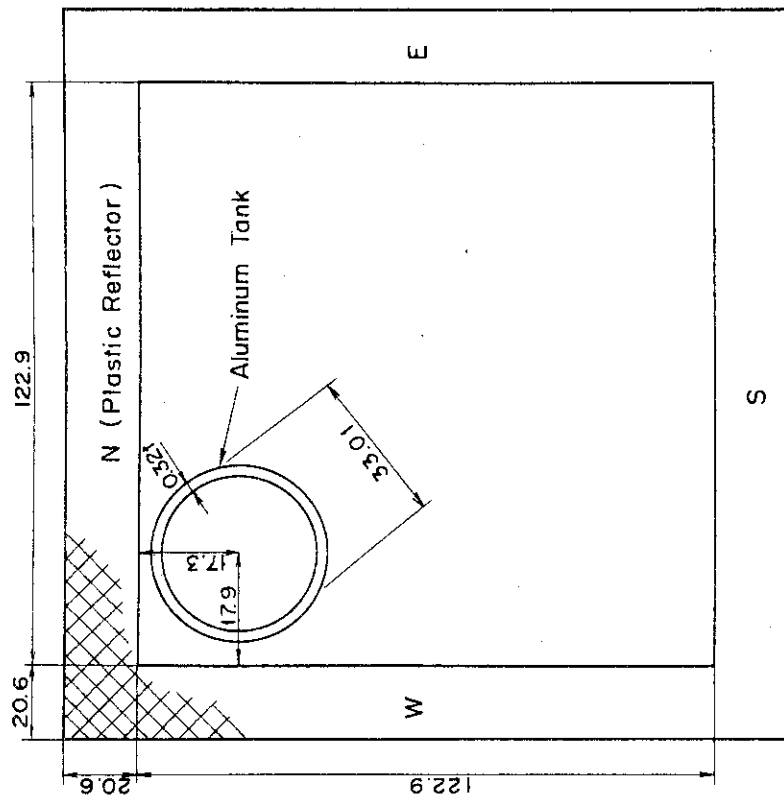


Fig. 1 A single tank in the center of the cubicle

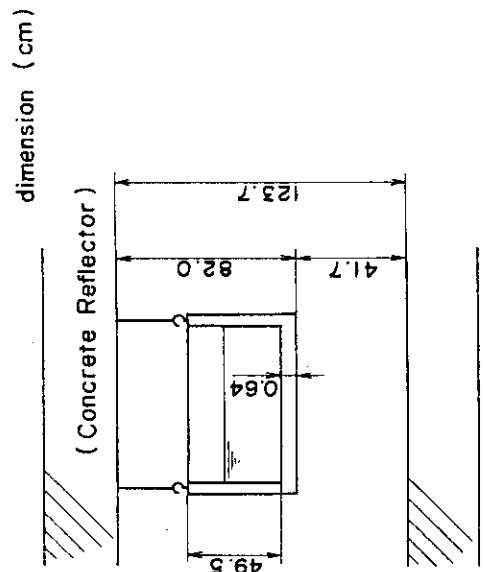
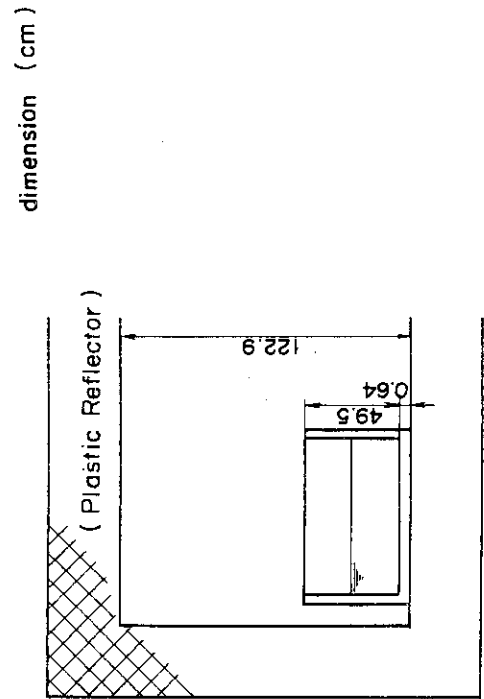


Fig. 2 A single tank in the corner of the cubicle

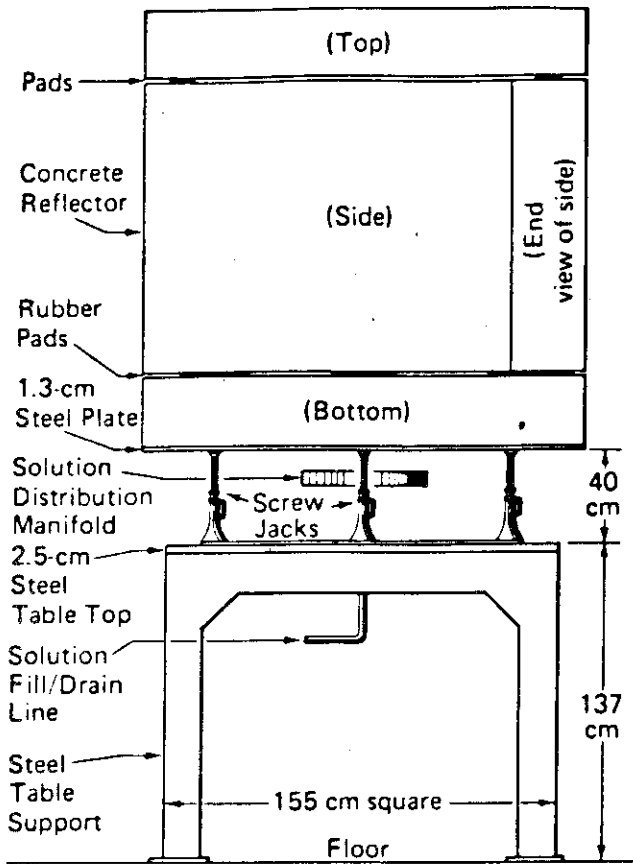
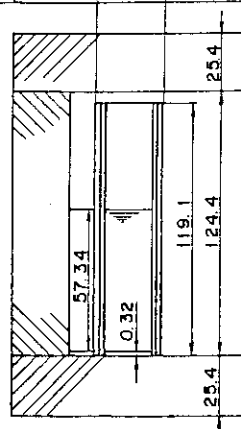
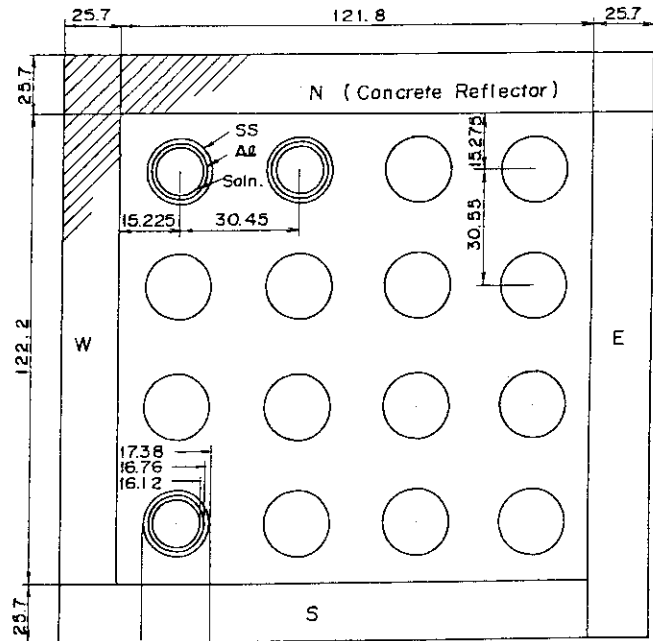


Fig. 3 Drawing of the concrete reflector in elevation.



dimension (cm)

Fig. 5 Cylinder arrays with sleeves in the cubicle

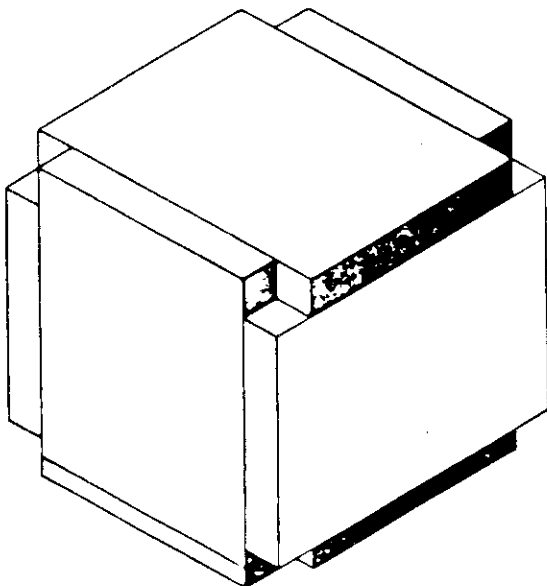


Fig. 4 Assembly drawing of the plastic reflector, showing perturbations from a complete cube.

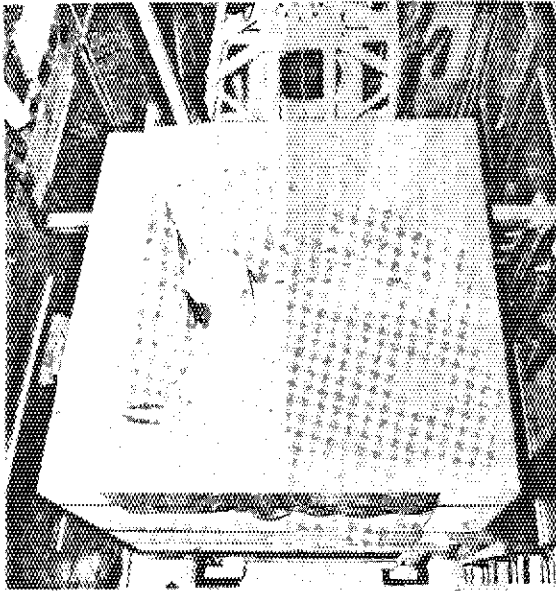


Photo.1 A single tank in one corner of the concrete reflector.

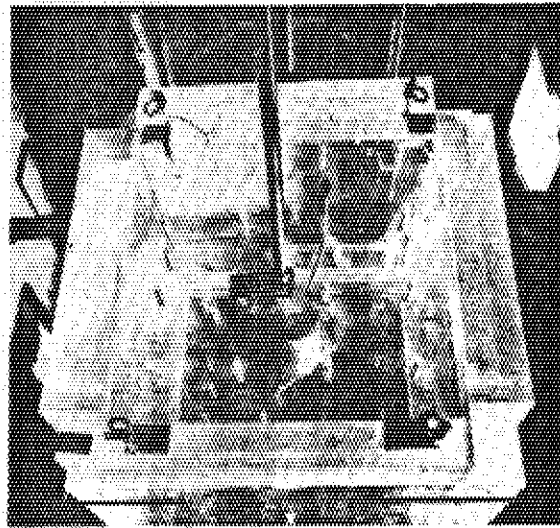


Photo.2 A single tank centered in the plastic reflector.

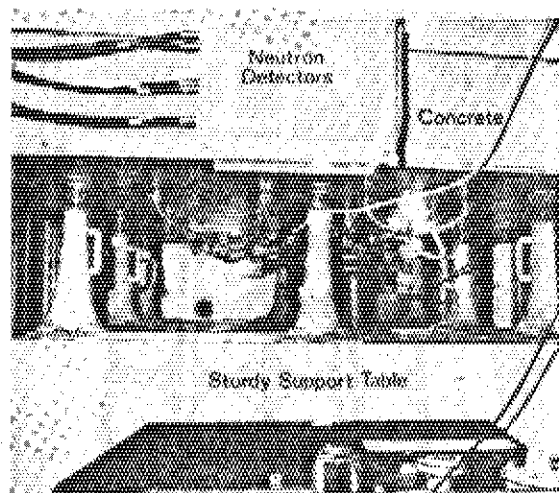


Photo.3 Reflector support showing all nearby environmental reflectors.

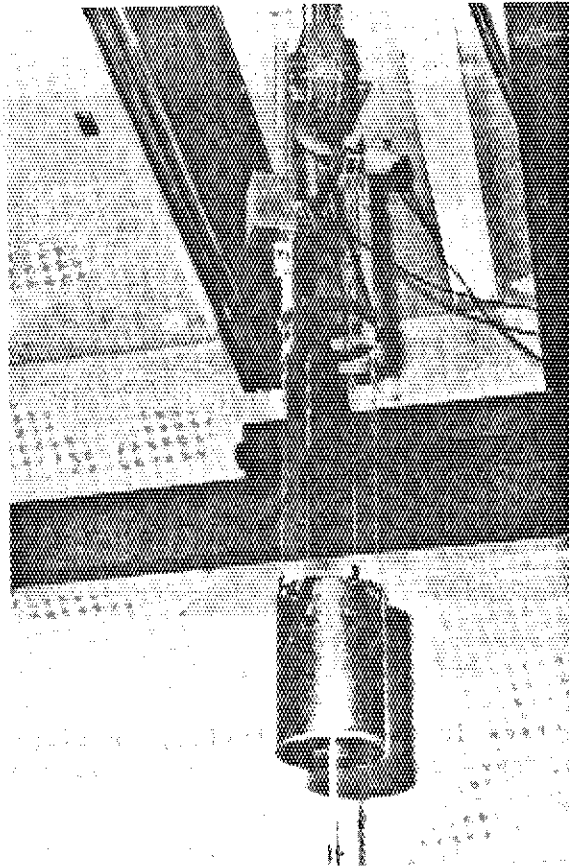


Photo.4 A single tank under minimally reflected conditions.

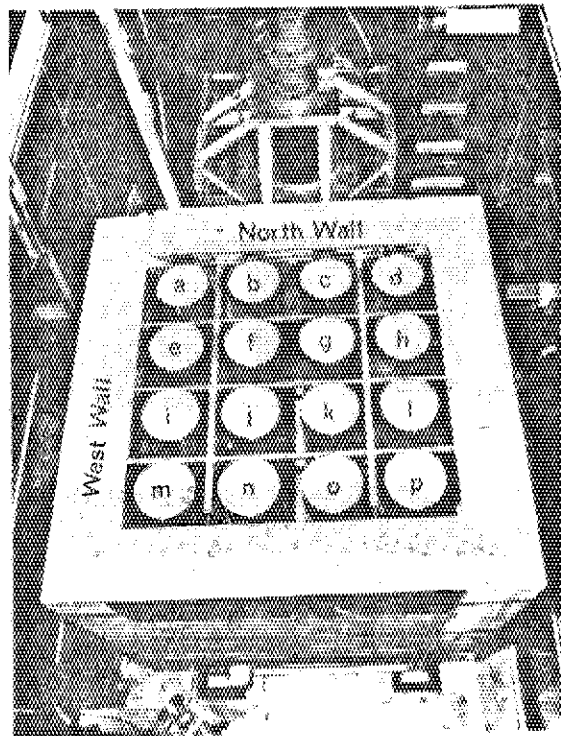


Photo.5 An array of cylinders in the concrete reflector.

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-N 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-N³⁾ 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⁾ を使用しての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-N⁵⁾ の中性子核データを RESEND-D⁶⁾、SUPERTOG⁷⁾、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、 $1/E$ 、およびマクスウエ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. 12 に示す。この MGCL を用いて、処理コード MAIL により KENO-N 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. 6 に示す。

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

$$\sigma_0^j = \frac{1}{N_j} \left(\text{Sum}_{i \neq j} N^i \sigma_{t,i}^j + \frac{aG}{\ell} \right)$$

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

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 中の散乱マトリックスは高速群については SUPERTOG 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_3 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・セットは各計算ケース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 の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 についてはコード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。

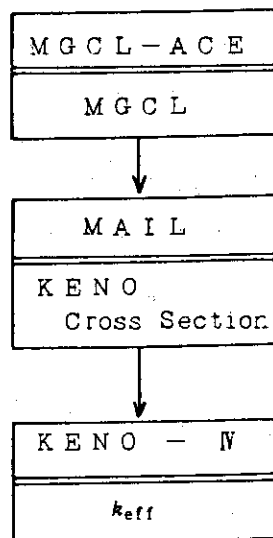


Fig. 6 Flow diagram for KENO calculation

Table 12 Energy Structure of MGCL 137 and MGCL 26

Group NO.		Upper Energy Boundary	Lethergy width ΔU	Group NO.		Upper Energy Boundary	Lethergy width ΔU	
26Gn	137Gn			26Gn	137Gn			
1	1	16.487 Mev	0.125	4	38	16163 Kev	0.125	
	2	14550	0.125		39	14264	0.125	
	3	12840	0.125		40	12588	0.125	
	4	11331	0.125		41	11109	0.125	
	5	10000	0.125		42	98037	0.125	
	6	8825	0.125		43	86517	0.125	
	7	7788	0.125		44	76351	0.125	
	8	68729	0.125		45	67379	0.125	
	9	60653	0.125		46	59462	0.125	
	10	53526	0.125		47	52475	0.125	
2	11	47237	0.125	5	48	46309	0.125	
	12	41686	0.125		49	40868	0.125	
	13	36788	0.125		50	36066	0.125	
	14	32465	0.125		51	31828	0.125	
	15	28650	0.125		52	28088	0.125	
	16	25284	0.125		53	24788	0.125	
	17	22313	0.125		54	21875	0.125	
	18	19691	0.125		55	19305	0.125	
	19	17377	0.125		56	17036	0.125	
	20	15335	0.125		6	57	15034	0.25
	21	13533	0.125			58	11709	0.25
	22	11943	0.125			59	91188	0.25
23	10540	0.125	60	71017		0.25		
3	24	930.14 Kev	0.125	7	61	55308	0.25	
	25	82085	0.125		62	43075	0.25	
	26	72440	0.125		63	33546	0.25	
	27	63928	0.125		64	26126	0.25	
	28	56416	0.125		65	20347	0.25	
	29	49787	0.125		66	15846	0.25	
	30	43937	0.125		67	12341	0.25	
	31	38774	0.125		68	961.12 ev	0.25	
	32	34218	0.125		69	74852	0.25	
	33	30197	0.125		8	70	58295	0.25
	34	26649	0.125			71	45400	0.25
	35	23518	0.125			72	35358	0.25
	36	20754	0.125			73	27536	0.25
	4	37	18316			0.125	74	21445

Table 12 Energy Structure of MGCL 137 and MGCL 26 (continued)

Group NO.	Upper Energy Boundary	Lethergy width ΔU
26G 8	137G 75	167.02 ev
9	76	130.07
	77	101.30
	78	78.893
	79	61.442
	80	47.851
	81	37.267
10	82	29.023
	83	22.603
	84	17.603
	85	13.710
	86	10.677
	87	8.3153
11	88	6.4760
	89	5.0435
	90	3.9279
	91	3.0590
	92	2.3824
12	93	1.8554
	94	1.6374
	95	1.4450
13	96	1.2752
	97	1.1254
	98	0.99312
14	99	0.87642
	100	0.77344
15	101	0.68256
	102	0.60236
	103	0.53158
	104	0.46912
16	105	0.41399
	106	0.38925
	107	0.36528
17	108	0.34206
	109	0.31961

Group NO.	Upper Energy Boundary	Lethergy width ΔU
26G, 137G 17	110	0.29792 ev
18	111	0.27699
	112	0.25683
	113	0.23742
19	114	0.21871
	115	0.20090
	116	0.18378
20	117	0.16743
	118	0.15183
	119	0.13700
21	120	0.12293
	121	0.10962
	122	0.09708
22	123	0.085295
	124	0.074274
	125	0.064015
23	126	0.054518
	127	0.045783
	128	0.037811
24	129	0.030600
	130	0.024152
	131	0.018465
25	132	0.013541
	133	0.009379
	134	0.005979
26	135	0.003341
	136	0.001466
	137	0.000352
		0.000033

3.2 計算モデル

3.2.1 単一タンクの計算モデル

単一タンク系の実験データは、タンクの材質・寸法、水溶液中のウラン濃度、反射条件およびタンクの位置をパラメータとして、45 ケースある。

実験には3種類の寸法をもつステンレス・スチール製のタンクと、4種類の寸法をもつアルミニウム製のタンクが使用された。これらのタンクの材質および寸法にNo.1～No.7までのIDをつけてTable. 13 に示す如くとする。各IDに対応するタンクの計算モデルをFig. 7からFig. 10までに示す。

実験に用いたウラン濃度はTable. 1 に示したように54.89 gU/lから357.71 gU/lまで14種類ある。

反射条件としては、最小反射の場合、厚さ約25 cmのコンクリート壁に囲まれた場合、および厚さ約20 cmのプラスチック壁に囲まれた場合の3種類がある。

タンクの位置としては、中央に吊り下げた場合、中央の床上に置かれた場合、および隅の床上に置かれた場合の3種類がある。これらの反射条件とタンク位置の組合せのうち、実際に実験が行われた6個の組合せについてタンクから反射体までの距離をTable. 14 に、計算モデルをFig. 11からFig. 16までに示す。ただしタンクが隅に置かれた場合(Table. 14のID No.3及びID No.5)については各実験データの連続番号ごとにタンクから反射体までの距離をTable. 15 に示す。

以上の組合せによる実験データ45 ケースをTable. 16、およびTable. 17 に実験パラメータ及び対応するID番号と共に示す。

3.2.2 シリンダ配列の計算モデル

シリンダ配列系の実験データはシリンダの寸法、ステンレス・スチール製スリーブの有無、水溶液中のウラン濃度、反射条件およびシリンダ配列法をパラメータとして、31 ケースある。

実験には内径16.12 cmと内径21.12 cmの2種類のアルミニウム製シリンダが用いられた。さらに各シリンダに対して厚さ0.31 cmのステンレス・スチール製スリーブを取付けた場合と、これのない場合とがあり、各々の場合についての計算モデルをFig. 17からFig. 20までに示す。これらに順にIDをNo.1からNo.4までつける。

実験に用いたウラン濃度はTable. 2 に示したように60.32 g/lから369.96 g/lまで11種類ある。

反射体としては、コンクリート製およびプラスチック製の2種類の反射体を使用した。各反射体の計算モデルをFig. 21およびFig. 22 に示す。これらのIDをそれぞれNo.1及びNo.2とする。

シリンダ配列法は、反射体で囲まれた空間を4×4のユニットに分割し全部あるいは一部のユニットに同一のシリンダを配置して行われた。実際に実験が行われた6種類のシリンダ配列及びIDをFig. 23 に示す。

以上の組合せによる実験データ31 ケースをTable. 18 に実験パラメータ及び対応するID

番号と共に示す。

Table 13 Tank ID and Dimensions

Tank ID NO.	Material		Inner Dia. (cm)	Height (cm)
	Sides	Bottom		
1	SUS 304	SUS 316	27.92	41.6
2	SUS 304	SUS 316	27.93	91.5
3	SUS 304	SUS 316	27.93	76.6
4	Al	Al	50.69	30.9
5	Al	Al	33.01	49.5
6	Al	Al	28.01	41.9
7	Al	Al	27.88	76.9

Table 14 Tank Locations and Distances to Reflectors

Location ID NO.	Reflector	Tank Location	Distance (cm) *					
			North	South	East	West	Up	Down
1	Min. Refl.	Center Hang	556	511	451	677	480	495
2	Concrete	Center Hang	57.4	64.8	64.6	57.2	82.0	41.7
3	Concrete	Corner Floor		see Table 15			123.7	0.0
4	Plastic	Center Hang	60.4	62.5	64.6	57.2	81.4	41.5
5	Plastic	Corner Floor		see Table 15			122.9	0.0
6	Plastic	Center Floor	61.1	61.8	61.3	61.6	122.9	0.0

*(note) Distance in centimeters from center of the underside of the bottom of a tank to each of the six reflecting surfaces.

Table 15 Distances to Reflectors from a Cornor Tank

Serial NO.	Reflector	Inner Dia. of Tank (cm)	Distance (cm) *			
			North	South	East	West
18	concrete	27.92	16.76	105.44	104.49	17.31
19	concrete	27.92	16.76	105.44	104.49	17.31
20	concrete	28.01	16.50	105.70	104.00	17.80
21	concrete	28.01	16.65	105.55	103.75	18.05
22	concrete	33.01	16.50	105.70	103.88	17.92
23	concrete	33.01	16.50	105.70	103.88	17.92
24	concrete	33.01	16.50	105.70	104.55	17.25
33	plastic	27.92	17.71	105.19	104.64	18.26
34	plastic	27.92	17.06	105.84	104.99	17.91
35	plastic	27.92	16.81	106.09	104.84	18.06
36	plastic	28.01	17.51	105.39	105.15	17.75
37	plastic	28.01	17.52	105.38	104.95	17.95
38	plastic	28.01	17.50	105.40	105.10	17.80
39	plastic	33.01	17.10	105.80	105.18	17.72
40	plastic	33.01	17.10	105.80	105.18	17.72
41	plastic	33.01	17.10	105.86	105.18	17.72
42	plastic	33.01	17.30	105.60	105.20	17.70

*(note) Distance in centimeters from center of the underside of the bottom of a tank to the four reflecting surfaces.

Table 16 Criticality Data for a Single Tank

Serial NO.	Tank		Reflector	Location of Tank	Uranium Concen- tration (g/l)	Critical Sol. level (cm)	Tank IDNO	Loca- tion IDNO
	Material	Inner Dia. (cm)						
1	S.S.	27.92	Min.Ref.	Center Hang	145.68	31.20	1	1
2	S.S.	27.92	Min.Ref.	Center Hang	346.73	28.93	1	1
3	Al	28.01	Min.Ref.	Center Hang	142.92	33.55	6	1
4	Al	28.01	Min.Ref.	Center Hang	357.71	30.91	6	1
5	Al	33.01	Min.Ref.	Center Hang	54.89	39.48	5	1
6	Al	33.01	Min.Ref.	Center Hang	59.65	36.67	5	1
7	Al	33.01	Min.Ref.	Center Hang	137.40	23.96	5	1
8	Al	33.01	Min.Ref.	Center Hang	145.68	23.67	5	1
9	Al	33.01	Min.Ref.	Center Hang	357.71	22.57	5	1
10	Al	50.69	Min.Ref.	Center Hang	63.95	20.48	4	1
11	S.S.	27.92	Concrete	Center Hang	144.38	29.79	1	2
12	S.S.	27.92	Concrete	Center Hang	334.77	27.23	1	2
13	Al	28.01	Concrete	Center Hang	144.38	31.37	6	2
14	Al	28.01	Concrete	Center Hang	334.77	28.60	6	2
15	Al	33.01	Concrete	Center Hang	59.65	34.10	5	2
16	Al	33.01	Concrete	Center Hang	144.38	22.85	5	2
17	Al	33.01	Concrete	Corner Floor	334.77	21.50	5	2
18	S.S.	27.92	Concrete	Corner Floor	144.38	24.19	1	2
19	S.S.	27.92	Concrete	Corner Floor	334.77	21.79	1	2
20	Al	28.01	Concrete	Corner Floor	144.38	24.70	6	2
21	Al	28.01	Concrete	Corner Floor	334.77	22.33	6	2
22	Al	33.01	Concrete	Corner Floor	59.65	27.27	5	2
23	Al	33.01	Concrete	Corner Floor	144.38	18.24	5	2

Table 17 Criticality Data for a Single Tank (continued)

Serial NO.	Tank		Reflector	Location of Tank	Uranium Concentration (g/l)	Critical Sol. level (cm)	Tank IDNO	Loca- tion IDNO
	Material	Inner Dia. (cm)						
24	Al	33.01	Concrete	Corner Floor	334.77	16.78	5	3
25	S.S.	27.92	Plastic	Center Hang	147.66	29.71	1	4
26	S.S.	27.92	Plastic	Center Hang	345.33	27.60	1	4
27	Al	27.88	Plastic	Center Hang	60.32	[78.1] ^{a)}	7	4
28	Al	28.01	Plastic	Center Hang	147.66	31.26	6	4
29	Al	28.01	Plastic	Center Hang	345.33	28.84	6	4
30	Al	33.01	Plastic	Center Hang	60.32	34.33	5	4
31	Al	33.01	Plastic	Center Hang	147.66	22.78	5	4
32	Al	33.01	Plastic	Center Hang	345.33	21.67	5	4
33	S.S.	27.93	Plastic	Corner Floor	60.32	50.52	2	5
34	S.S.	27.92	Plastic	Corner Floor	147.66	25.03	1	5
35	S.S.	27.92	Plastic	Corner Floor	345.33	22.75	1	5
36	Al	27.88	Plastic	Corner Floor	60.32	51.67	7	5
37	Al	28.01	Plastic	Corner Floor	147.66	25.26	6	5
38	Al	28.01	Plastic	Corner Floor	345.33	22.87	6	5
39	Al	33.01	Plastic	Corner Floor	60.32	27.70	5	5
40	Al	33.01	Plastic	Corner Floor	66.33	25.10	5	5
41	Al	33.01	Plastic	Corner Floor	147.66	18.49	5	5
42	Al	33.01	Plastic	Corner Floor	345.33	17.20	5	5
43	S.S.	27.93	Plastic	Center Floor	60.32	67.48	3	5
44	Al	27.88	Plastic	Center Floor	60.32	[77.1]*	7	5
45	Al	33.01	Plastic	Center Floor	60.32	31.75	5	5

a) (note) Due to the lack of the tank height, the critical level was obtained by extrapolation in the 1/M curve.

Table 18 Criticality Data for an Array of Cylinders

Serial NO.	Cylinder Inner Dia. (cm)	Stainless Steel Sleeve	Array Size	Reflector	Uranium Concentration (g/l)	Critical Solution level (cm)	Cylinder ID NO.	Array ID NO.	Reflector ID NO.
46	21.12	Yes	4x4	Concrete	67.28	28.63	1	0	1
47	21.12	No	4x4	Concrete	67.28	27.15	2	0	1
48	21.12	Yes	2x2	Concrete	76.09	60.70	1	1	1
49	21.12	No	2x2	Concrete	76.09	62.34	2	1	1
50	21.12	No	2x2	Concrete	80.72	57.88	2	1	1
51	16.12	Yes	4x4	Concrete	83.49	57.34	3	0	1
52	16.12	No	4x4	Concrete	83.49	51.21	4	0	1
53	21.12	Yes	4x4	Concrete	369.96	17.24	1	0	1
54	21.12	No	4x4	Concrete	364.11	17.13	2	0	1
55	21.12	Yes	2x2	Concrete	360.37	29.49	1	1	1
56	21.12	No	2x2	Concrete	364.11	31.11	2	1	1
57	16.12	Yes	4x4	Concrete	360.37	32.32	3	0	1
58	16.12	No	4x4	Concrete	359.55	31.82	4	0	1
59	16.12	No	2x4	Concrete	359.55	51.45	4	2	1
60	16.12	No	2x3	Concrete	359.55	65.49	4	3	1
61	16.12	Yes	2x2	Concrete	359.55	101.45	3	4	1
62	16.12	No	2x2	Concrete	359.55	104.04	4	4	1
63	21.12	Yes	4x4	Plastic	60.32	34.82	1	0	2
64	21.12	No	4x4	Plastic	60.32	31.76	2	0	2
65	21.12	Yes	2x2	Plastic	60.32	110.20	1	1	2
66	21.12	No	2x2	Plastic	60.32	102.29	2	1	2
67	16.12	Yes	4x4	Plastic	60.32	105.85	3	0	2
68	16.12	No	4x4	Plastic	60.32	78.40	4	0	2
69	21.12	Yes	4x4	Plastic	355.94	19.27	1	0	2
70	21.12	No	4x4	Plastic	355.94	18.82	2	0	2
71	21.12	Yes	2x2	Plastic	355.94	31.93	1	1	2
72	21.12	No	2x2	Plastic	355.94	33.20	2	1	2
73	16.12	Yes	4x4	Plastic	355.94	38.10	3	0	2
74	16.12	No	4x4	Plastic	355.94	35.56	4	0	2
75	16.12	Yes	2x3	Plastic	355.94	95.20	3	5	2
76	16.12	No	2x3	Plastic	355.94	89.78	4	5	2

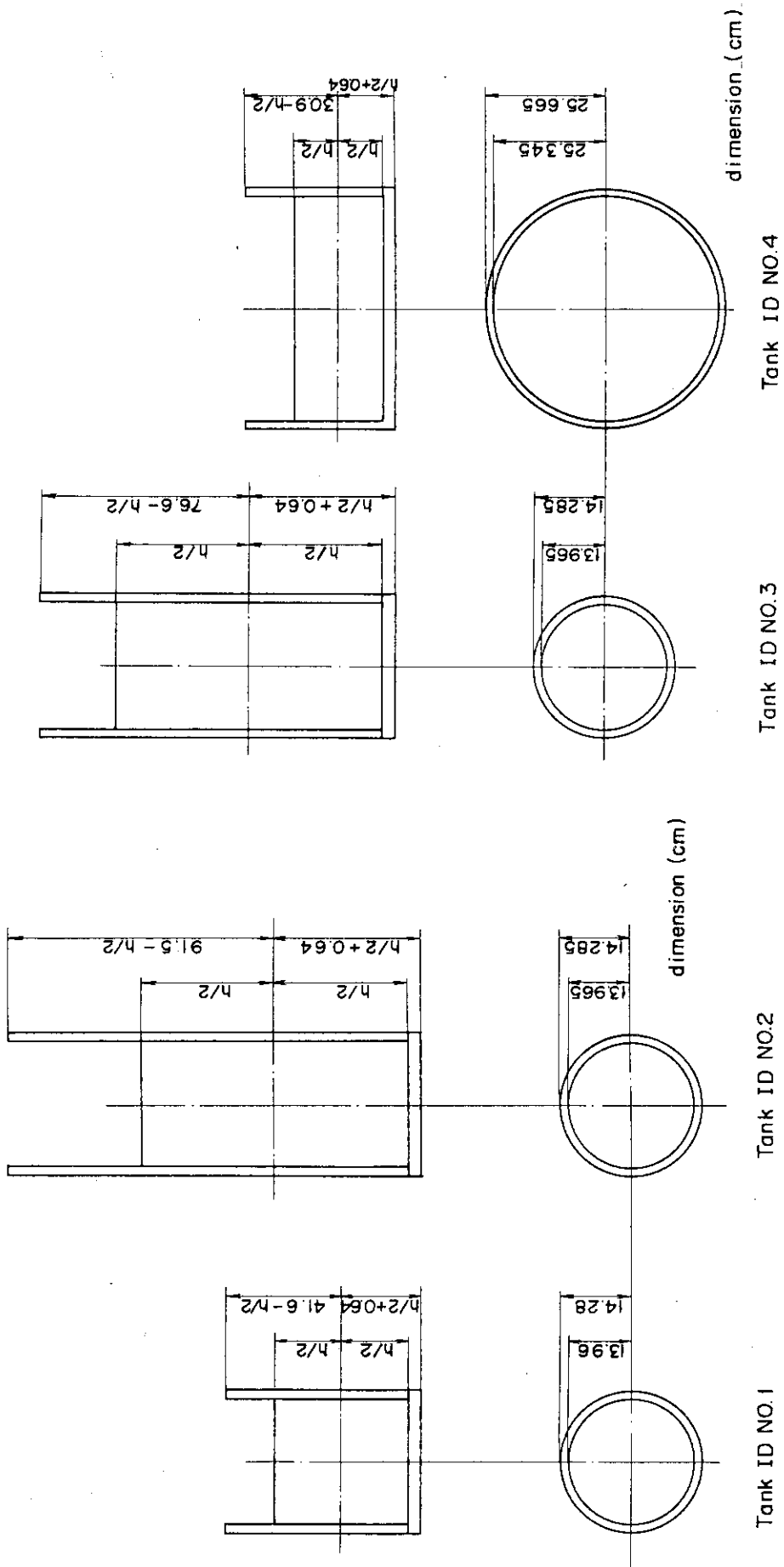
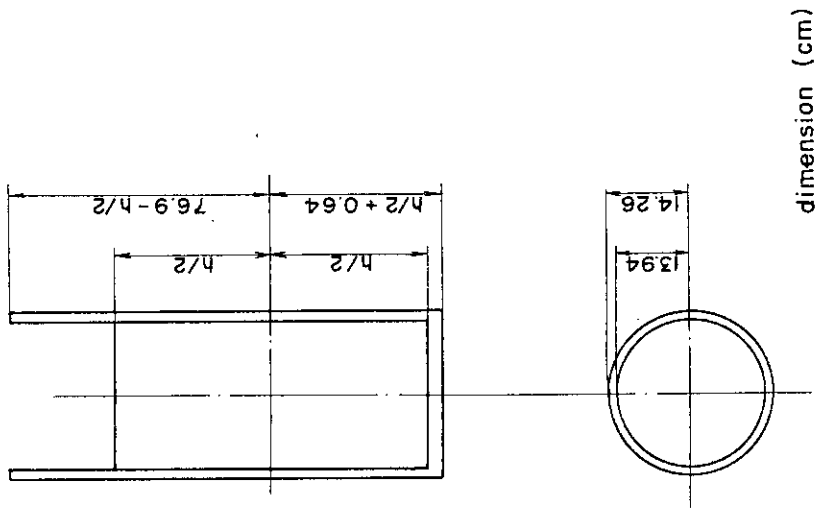


Fig. 7 Calculational models of tank ID NO.1 and ID NO.2

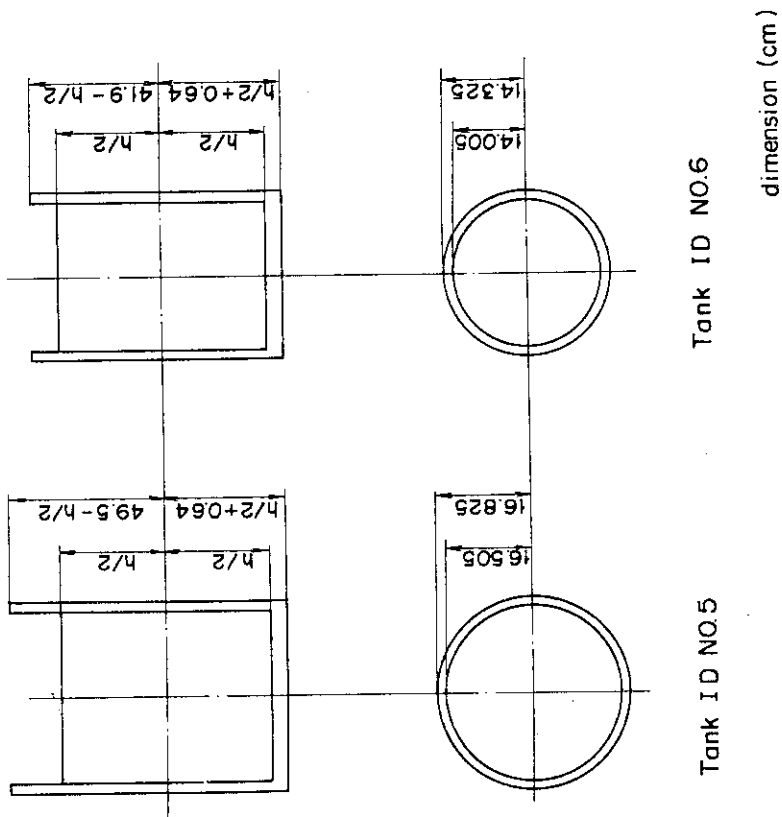
Fig. 8 Calculational models of tank ID NO.3 and ID NO.4



Tank ID NO.7

dimension (cm)

Fig. 10 Calculational model of tank ID NO.7



Tank ID NO.5

Tank ID NO.6

dimension (cm)

Fig. 9 Calculational models of tank ID NO.5 and ID NO.6

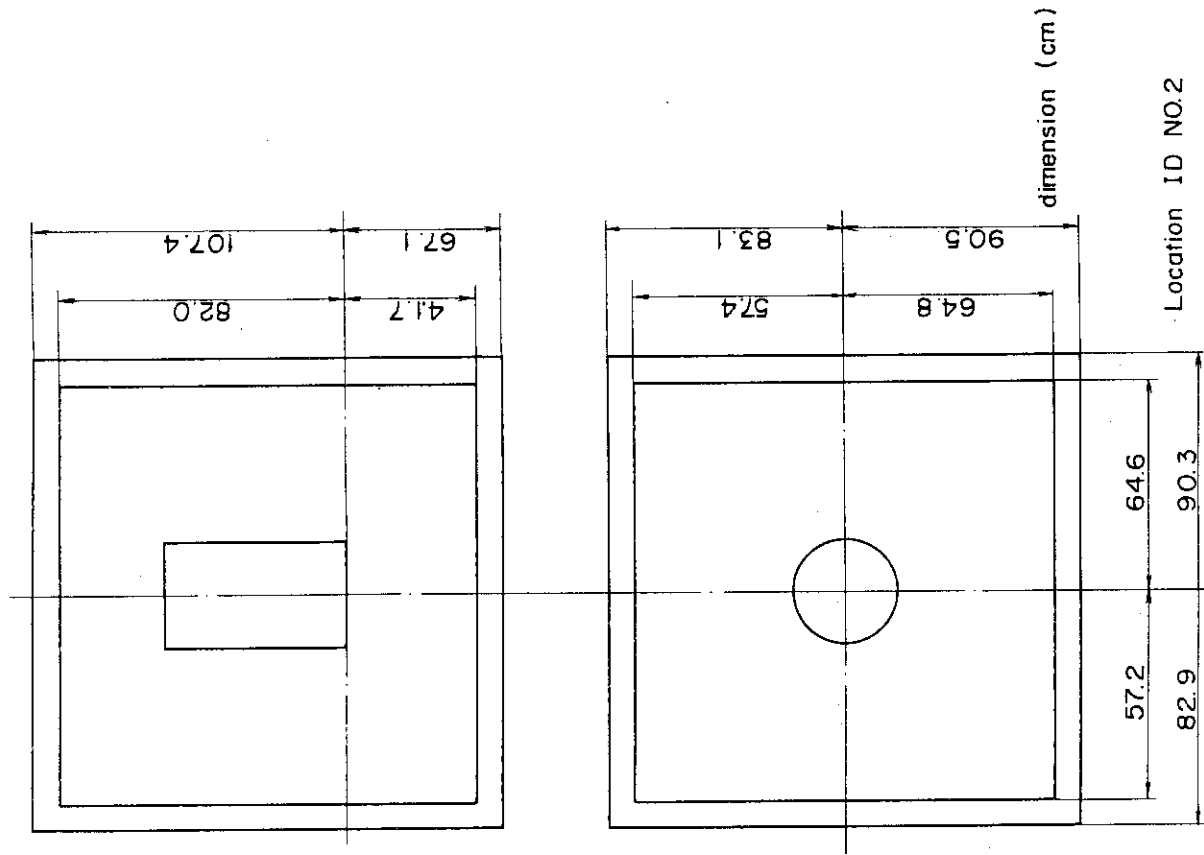


Fig. 12 Calculational model of a single tank in the reflector

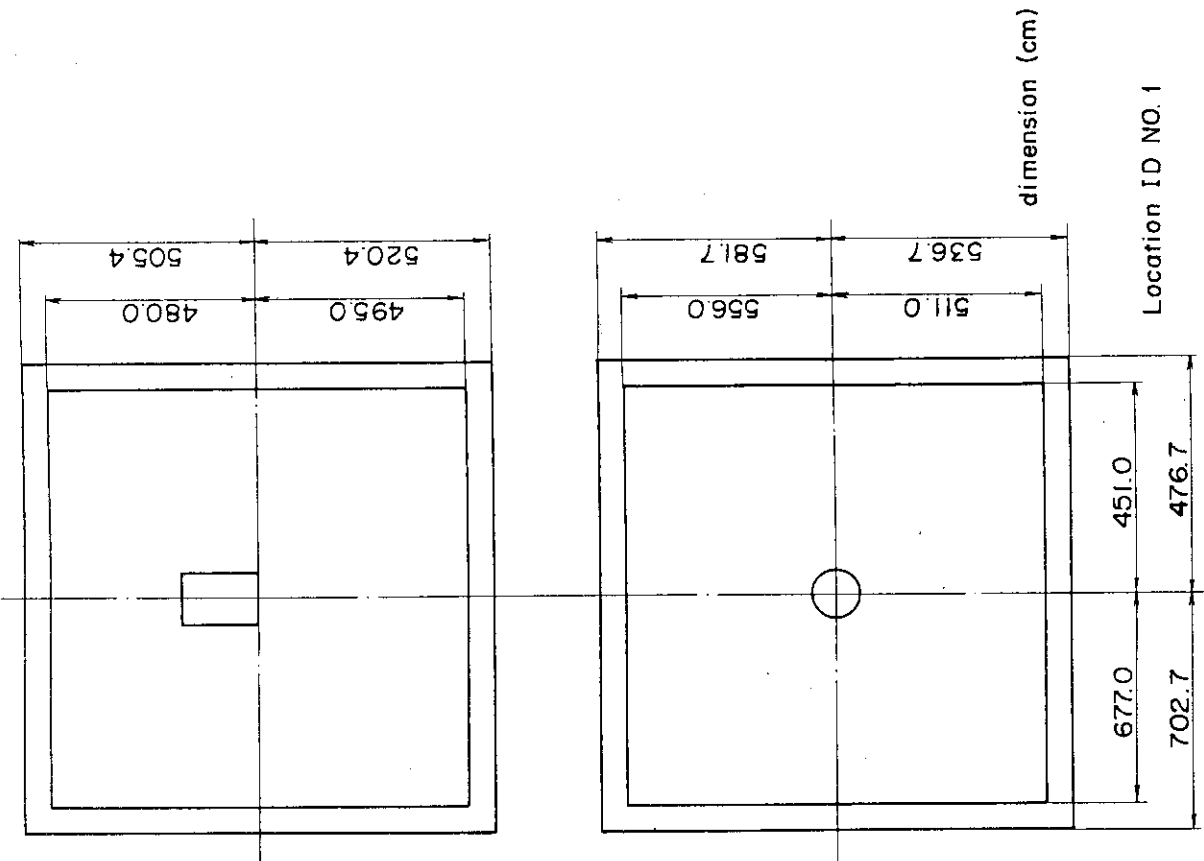


Fig. 11 Calculational model of a single tank in the reflector

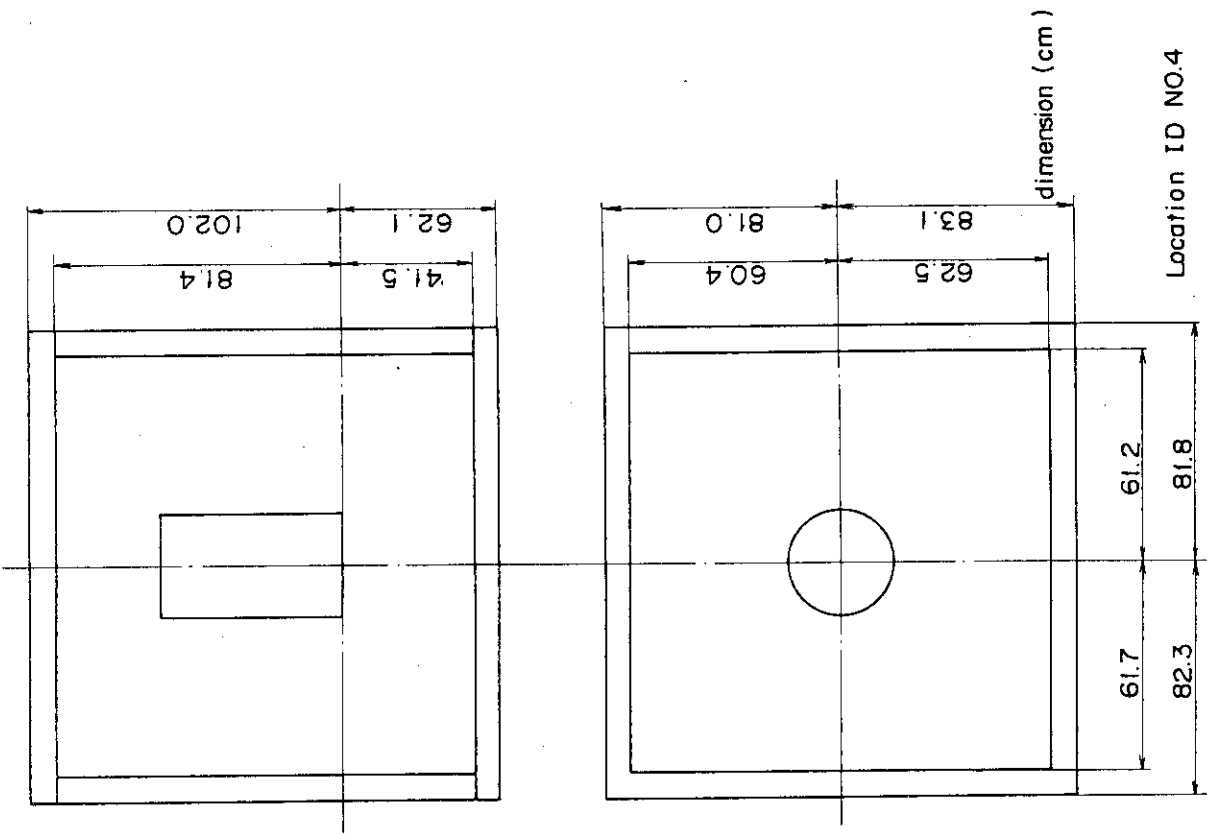


Fig. 14 Calculational model of a single tank in the reflector

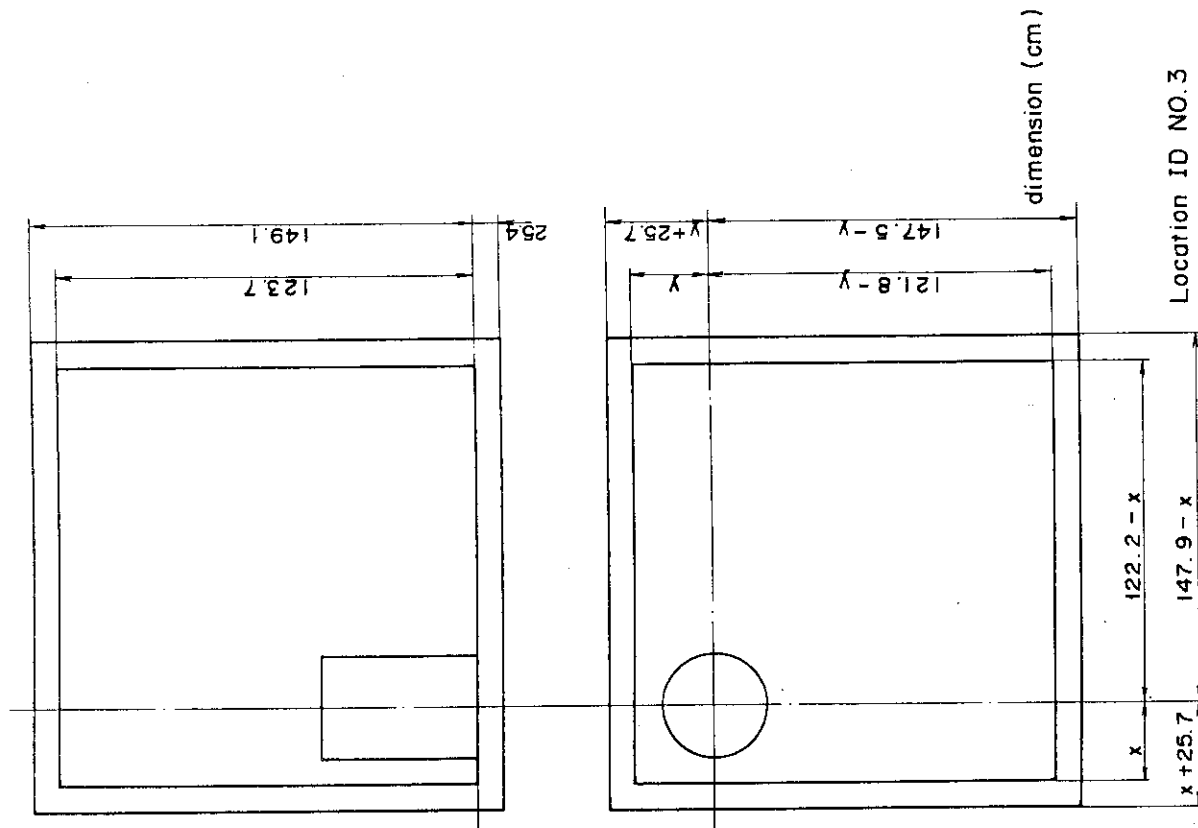


Fig. 13 Calculational model of a single tank in the reflector

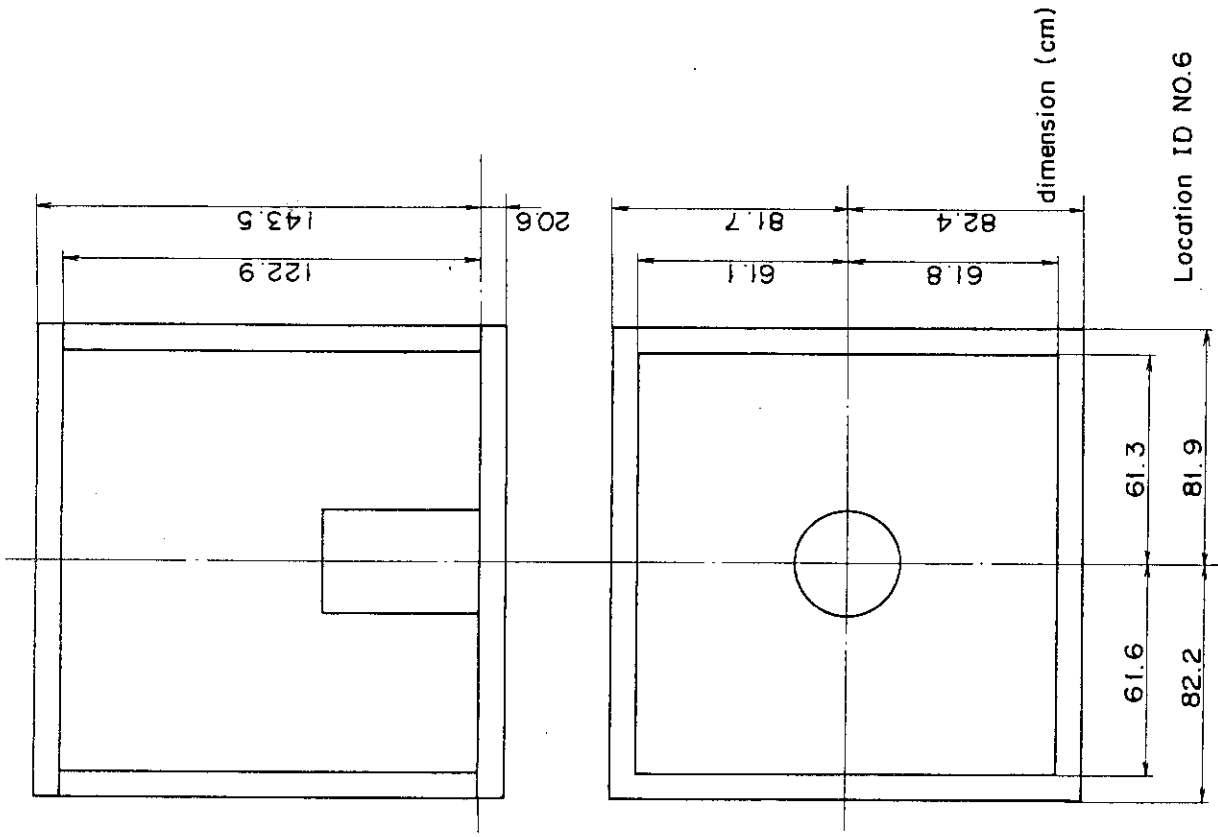


Fig. 16 Calculational model of a single tank in the reflector

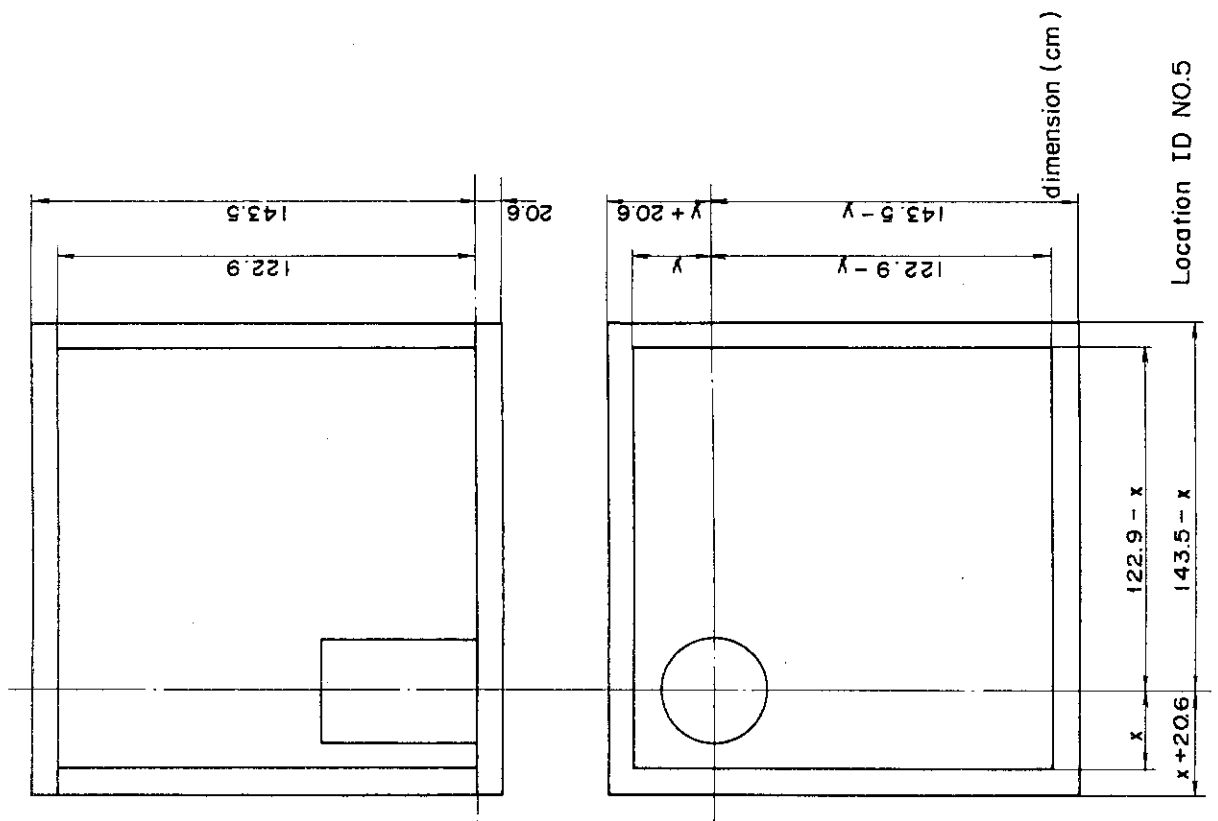


Fig. 15 Calculational model of a single tank in the reflector

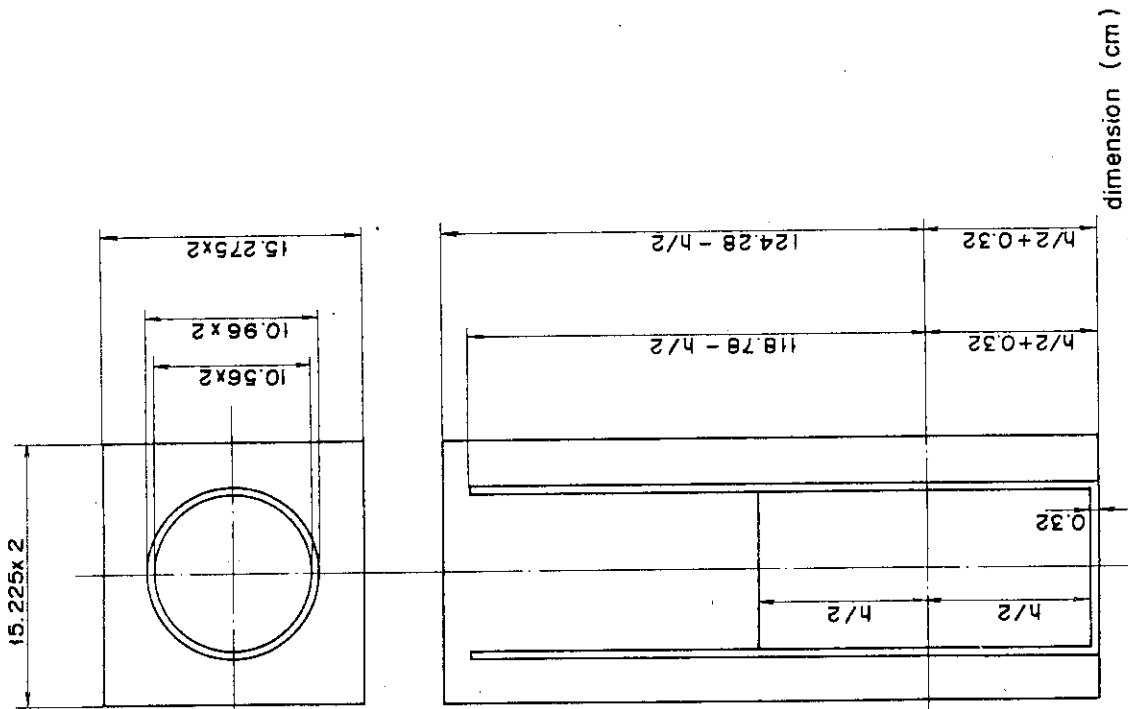


Fig. 18 Calculational model of the 21.12 cm inner dia. cylinder (ID NO.2)

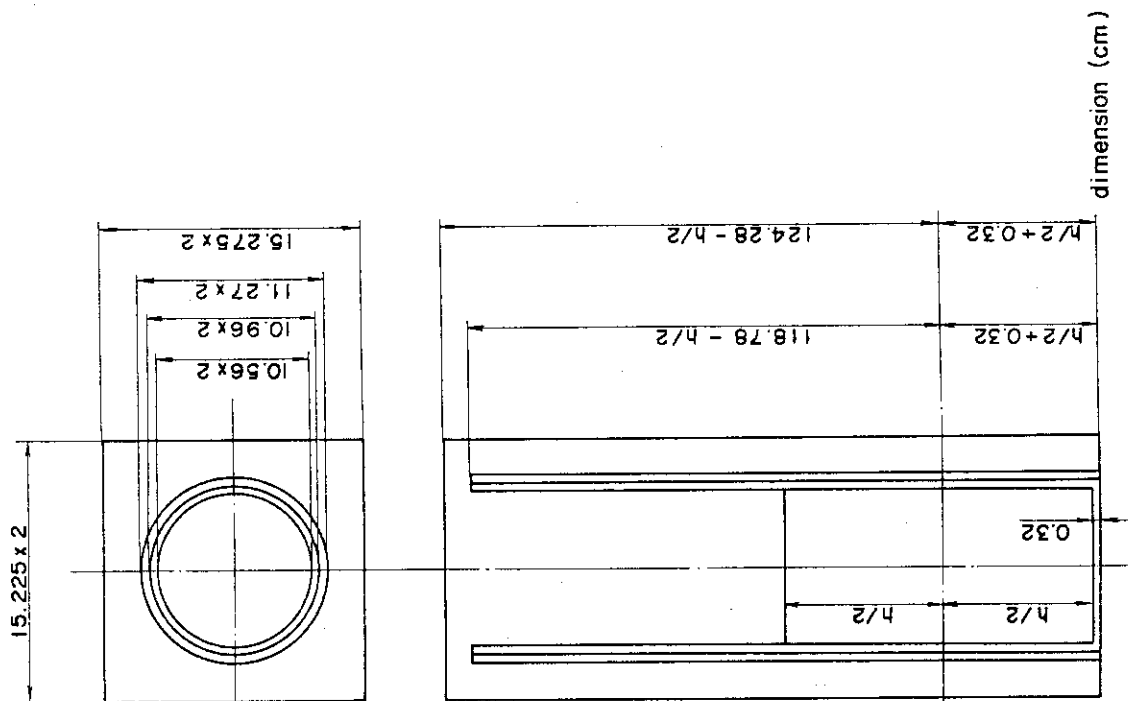


Fig. 17 Calculational model of the 21.12 cm inner dia. cylinder with a sleeve. (ID NO.1)

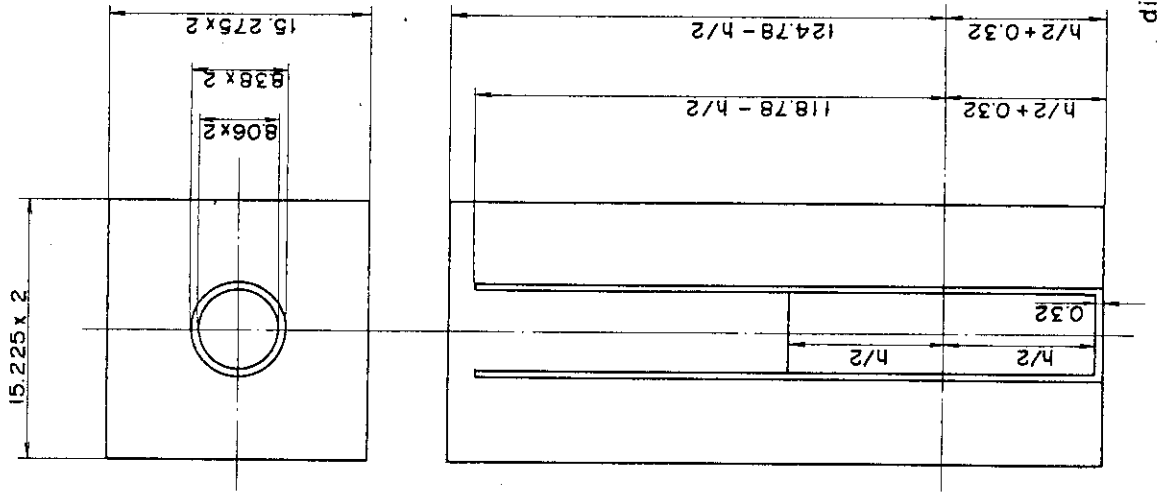


Fig. 20 Calculational model of the 16.12 cm inner dia. cylinder (ID NO.4)

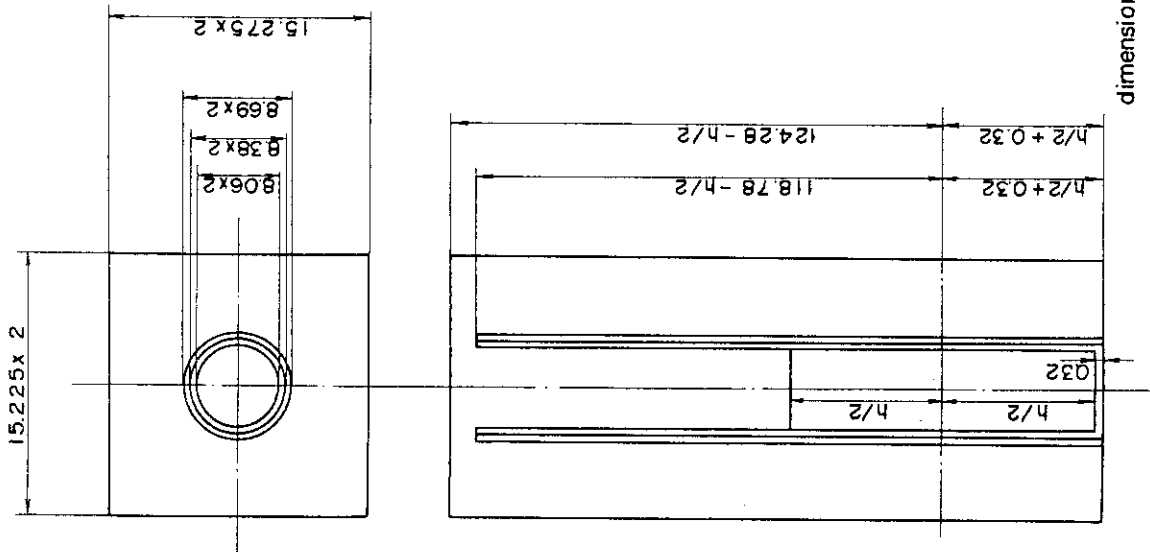


Fig. 19 Calculational model of the 16.12 cm inner dia. cylinder with a sleeve. (ID NO.3)

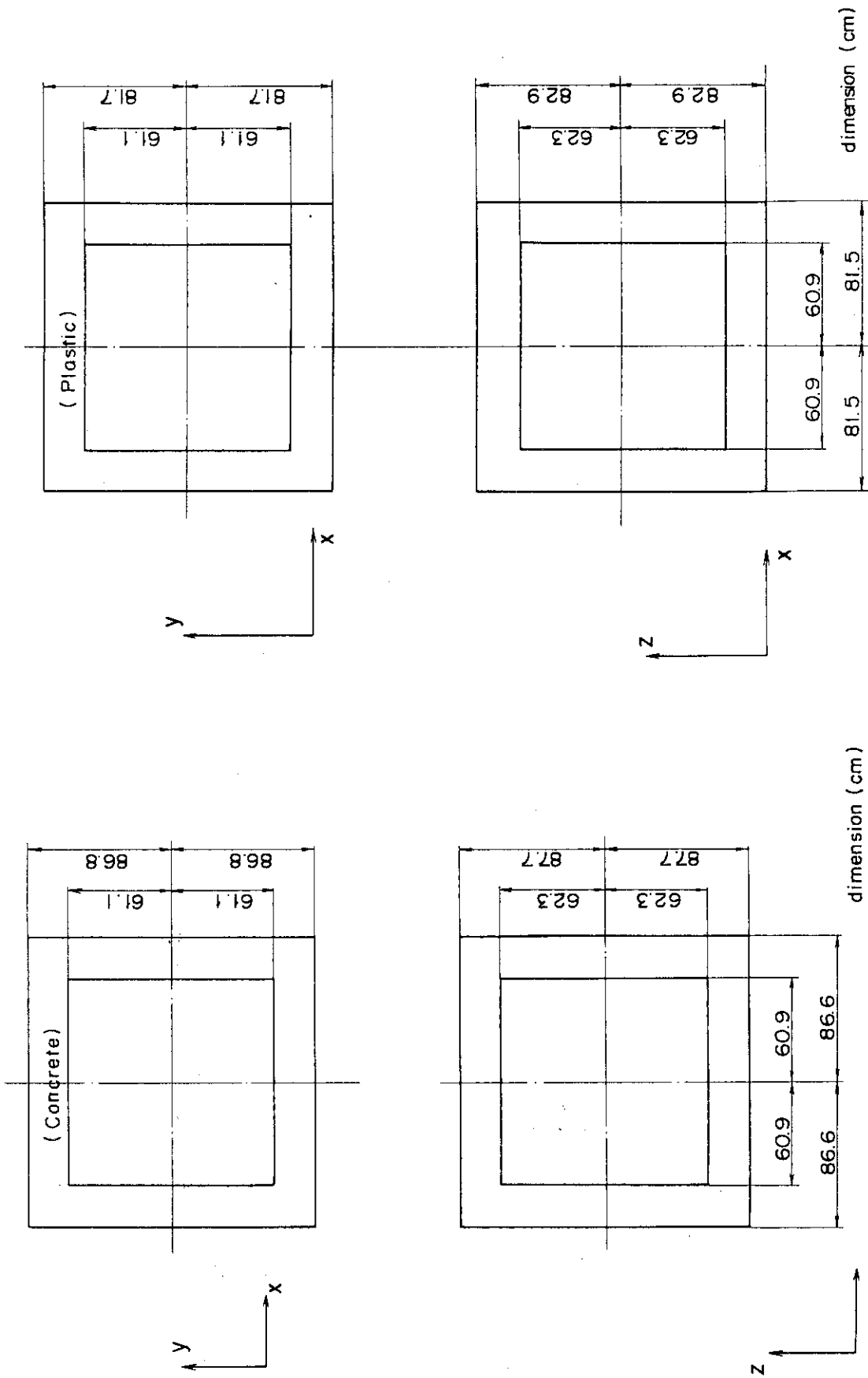
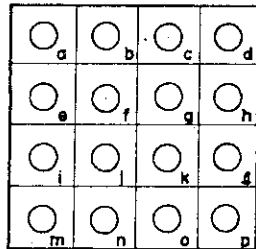
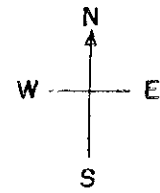
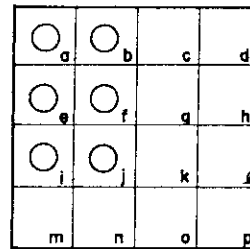


Fig. 21 Calculational model of the concrete reflector for cylinders (ID NO.1)

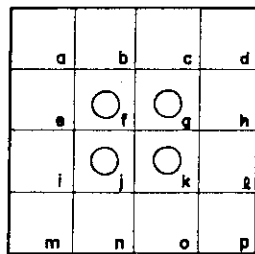
Fig. 22 Calculational model of the plastic reflector for cylinders (ID NO.2)



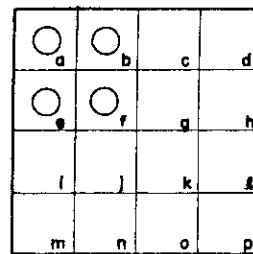
ID NO. 0



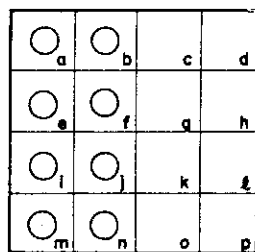
ID NO. 3



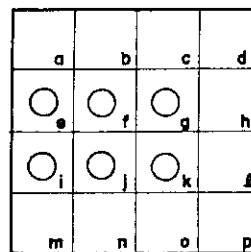
ID NO. 1



ID NO. 4



ID NO. 2



ID NO. 5

Fig. 23 Array patterns used in the experiment

4. 計算結果及び考察

MGCL 26群核断面積セットとKENO-N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

計算結果は実験データNo. 1からNo. 76までに対応して全部で76ケースあり、これらをTable. 19からTable. 22までに示す。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 MeV)

F_3 が15~26群 (0.683 MeV ~ 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。

4.1 k_{eff} 計算値のヒストグラム

全76ケースの k_{eff} 計算値のヒストグラム (頻度分布) をFig. 24に示す。これを見ると k_{eff} は, 0.930から0.995までの範囲に分布しており, 平均値0.959となり, 平均して1.0より約4%低く算出されることがわかる。単一タンク45ケースとシリンダ配列31ケースに分けてヒストグラムを示すとFig. 25およびFig. 26のようになり, 単一タンクの k_{eff} 平均値は0.953であり, シリンダ配列の k_{eff} 平均値は0.967であった。このことから単一タンクの k_{eff} 計算値は平均としてシリンダ配列の k_{eff} 計算値より約1.5%低いことがわかる。

4.2 単一タンク最小反射条件の検討

ケースNo.1～No.10は単一タンクの最小反射条件の実験に関するもので、Table.19に示した計算結果は、タンクから約5mの位置にある厚さ約25cmのコンクリート製実験室壁を考慮して得られた。そこでこの反射壁を完全にとり除いたモデルにより計算してみると、その結果はTable.23に示す如くとなり、反射壁を考慮に入れても入れなくてもその影響は無視しうる程度である。

Table.23にはまた、体系からの中性子の漏れる割合も示してあり、これを見るとタンクから漏れる中性子は全体の漏れと吸収のうちの約45%程度にも達していることがわかる。

4.3 k_{eff} 計算値の傾向

Fig.27およびFig.28は単一タンクおよびシリンダ配列の各場合について、各計算ケースの $k_{eff} \pm \sigma$ を、平均値 k_{eff} と標準偏差の平均値 $\bar{\sigma}$ を用いて引いた $\pm 1\bar{\sigma}$ 、 $\pm 2\bar{\sigma}$ 、 $\pm 3\bar{\sigma}$ の境界線と共に示したものであり、これから各場合について1ケースを除く全てのケースの k_{eff} は $k_{eff} \pm 3\bar{\sigma}$ の範囲に入っていることがわかる。

単一タンクの体系においてウラン濃度、タンク径、あるいはタンク位置のパラメータに着目して、同一のパラメータ値を持つケース毎に平均値を計算するとTable.25に示すごとくとなり、パラメータ値の違いによる k_{eff} 平均値の差は高々0.34%であり、Table.24に示す標準偏差の平均値0.55%となり有意でない。

シリンダ配列の体系においてウラン濃度、シリンダ内径、あるいは配列の大きさのパラメータに着目して、同一のパラメータ値を持つケース毎に平均値を計算するとTable.26に示すごとくとなる。Table.24に示す標準偏差の平均値0.52%の2倍($2\bar{\sigma}$)を考えると、ウラン濃度、あるいはシリンダ内径のパラメータ値の違いによる k_{eff} 平均値の差は $2\bar{\sigma}$ 以内であり有意とはいえないが、配列の大きさが 4×4 の場合と、これが 2×2 の場合の k_{eff} 平均値の差は約1.1%となり、 $2\bar{\sigma}$ 以上の有意さを持つ。

そこで同一のウラン濃度を有する溶液の体系のケースから、 2×2 配列シリンダ群のケースと 4×4 配列シリンダ群のケースをとり出して、4因子解析を行ってみた。すなわち、KENO-IVのアウトプットの核分裂数(Fg)、吸収数(Ag)、漏洩数(Lg)($g=1 \sim 26$)を用いて実効増倍率を4因子で表せば、

$$\begin{aligned} k_{eff}^{(4)} &= \frac{F}{L+A} = \frac{F}{A} \cdot \frac{A}{L+A} \\ &= \frac{F}{F_T} \cdot \frac{F_T}{A_T} \cdot \frac{A_T}{A} \cdot \frac{A}{L+A} \\ &= \epsilon \cdot \eta f \cdot p \cdot P_L \end{aligned}$$

ここで F_T : 熱領域中性子の核分裂数 $\sum_{g=15}^{26} Fg$

$$F : \text{全核分裂数} \sum_{g=1}^{26} Fg$$

$$A_T : \text{熱領域中性子の吸収数} \sum_{g=15}^{26} Ag$$

$$A : \text{全領域中性子の吸収数} \sum_{g=1}^{26} Ag$$

$$L : \text{全領域中性子の漏洩数} \sum_{g=1}^{26} Lg$$

となり、同一のウラン濃度として 60.32 gU/l をとり、ケース No. 66 と No. 68 について数値代入して計算してみると Table. 27 に示すごとくとなる。これから同一ウラン濃度溶液を含むシリンダの (2×2) 配列と (4×4) 配列の k_{eff} 計算値の違いは、主として熱中性子再生率 η と熱中性子利用率 f の積の値によることがわかる。両体系の燃料溶液内の熱中性子スペクトルは Fig. 29 に示すように同一のマクスウェル分布となり、燃料組成も同一であることから η は変化しない。従って f の値が変化していることとなる。

f は次式で表せるごとく、

$$f = \frac{\text{燃料に吸収される熱中性子数}}{\text{体系内の全領域で吸収される熱中性子数}}$$

$$= \frac{\bar{\Sigma}_{aMsol.} \cdot \Phi_{sol.} \cdot V_{sol}}{(\bar{\Sigma}_{aFsol.} + \bar{\Sigma}_{aMsol.}) \cdot \Phi_{sol.} \cdot V_{sol} + \bar{\Sigma}_{aMref.} \cdot \Phi_{ref.} \cdot V_{ref}}$$

$$= \frac{\bar{\Sigma}_{aFsol.}}{\bar{\Sigma}_{aFsol.} + \bar{\Sigma}_{aMsol.} + \bar{\Sigma}_{aMref.} \cdot \Omega}$$

$$\Omega = \frac{\Phi_{ref} \cdot V_{ref}}{\Phi_{sol} \cdot V_{sol}}$$

ここで、sol は燃料溶液領域、ref は反射体領域を表し、 $\bar{\Sigma}_{aF}$ or $\bar{\Sigma}_{aM}$ は各領域内の熱中性子スペクトルで平均した燃料あるいは減速材の吸収断面積である。両体系において燃料溶液組成、反射体組成は等しく、各領域内の熱中性子スペクトルは同一なので、 $\bar{\Sigma}_{aMref.}$ 、 $\bar{\Sigma}_{aFsol.}$ 、 $\bar{\Sigma}_{aMsol.}$ などは変化しない。結局、 Ω が両体系の計算で変りうる唯一のファクターとなることがわかる。実際に KENO-IV のアウトプットに含まれる中性子束とシリンダ半径からケース No. 66 の Ω とケース No. 68 の Ω を計算すると、前者は後者の 1.071 倍ほど大きくなっており、これがケース No. 66 の k_{eff} をケース No. 68 の k_{eff} より小さな値としているものと思われる。

ケース No. 66 では、シリンダの 2×2 配列を扱っており、全てのシリンダについて半円周面が反射体内面と向き合っている。一方、ケース No. 68 では、シリンダの 4×4 配列を扱っており、配列の内側のシリンダについては全面が他のシリンダにより囲まれている。仮りに KENO-IV の計算ではシリンダ内の燃料溶液から漏れ出る中性子数が過大に評価されるものとすれば、ケース No. 66 の場合は反射体領域の中性子束が過大に計算される結果、 Ω が大きく f が小さく、従って k_{eff} がケース No. 68 の場合よりも小さく計算されることとなり、Table. 27 の結果と一致

する。

以上は、 (2×2) 配列と (4×4) 配列の相互比較の際に見られる k_{eff} 計算値の有意な差について考察した結果、燃料領域から漏れ出る中性子数の評価に原因があるのではないかと推定したものである。さらに一步考察を進めて、今回の体系の計算全体を通じて、 k_{eff} 計算値が総じて 1.0 より 3~4% 低くなっている原因についても、KENO - IV 計算で燃料領域からの漏れ出る中性子数が過大に評価されていることをその一因として挙げ得よう。

4.4 エネルギー群構造の影響

Table. 28 および Table. 29 に、単一タンクおよびシリンダ群の各体系について MGCL - 137 と MGCL - 26 の各々を用いて計算したときの k_{eff} 値を比較して示す。これを見ると中性子エネルギーを 137 群としたことにより、 k_{eff} 計算値は平均として単一タンクの場合約 2.0%、シリンダ群の場合約 1.5% 上昇して 1.0 に近づいている。

例としてコンクリート反射体キュービクル内のシリンダ群のケース No. 47 をとり、KENO - IV のアウトプットから核分裂発生中性子数について 26 群の各群における値と、これを 137 群に分けたときの対応する群における値の和をとって比較すると、Table. 30 に示すごとくとなる。これを見ると熱エネルギー領域のマクスウエル分布のピーク値より低エネルギー部分（26 群中第 22 群以下の領域）におけるプラスの増加分が大部分を占めている。体系内の中性子スペクトルは、Fig. 29 に示したように熱エネルギー領域でマクスウエル分布の発達した形となり、このような体系に対しては MGCL - 26 の第 22 群以下の群以下の群定数の精度が不足するものと思われる。

Table 19 Calculated Results

Serial NO.	k_{eff}	σ	L/L + A	CPU (sec)	F ₁	F ₂	F ₃	comment
1	0.95241	0.00581	0.14929	1391.0	.01	.09	.90	TANK WITH MINIMALLY REFLECTED
2	0.93210	0.00559	0.15795	1337.0	.03	.19	.78	TANK WITH MINIMALLY REFLECTED
3	0.96499	0.00554	0.14485	1417.0	.01	.09	.90	TANK WITH MINIMALLY REFLECTED
4	0.96219	0.00592	0.15459	1337.0	.03	.20	.77	TANK WITH MINIMALLY REFLECTED
5	0.96458	0.00577	0.12207	1621.0	.00	.04	.96	TANK WITH MINIMALLY REFLECTED
6	0.94504	0.00453	0.12747	1620.0	.00	.04	.96	TANK WITH MINIMALLY REFLECTED
7	0.95032	0.00575	0.14714	1469.0	.01	.09	.90	TANK WITH MINIMALLY REFLECTED
8	0.94420	0.00612	0.14962	1427.0	.01	.09	.90	TANK WITH MINIMALLY REFLECTED
9	0.95214	0.00528	0.15543	1444.0	.03	.20	.77	TANK WITH MINIMALLY REFLECTED
10	0.94240	0.00529	0.12948	1600.0	.01	.04	.95	TANK WITH MINIMALLY REFLECTED
11	0.95381	0.00604	0.15916	1336.0	.01	.09	.90	TANK AT CENTER WITH CONCRETE R
12	0.95411	0.00595	0.17091	1234.0	.02	.19	.79	TANK AT CENTER WITH CONCRETE R
13	0.96022	0.00588	0.15859	1398.0	.01	.09	.90	TANK AT CENTER WITH CONCRETE R
14	0.95301	0.00604	0.16947	1259.0	.02	.10	.79	TANK AT CENTER WITH CONCRETE R
15	0.95960	0.00533	0.13641	1631.0	.00	.04	.96	TANK AT CENTER WITH CONCRETE R
16	0.94968	0.00522	0.16180	1369.0	.01	.09	.90	TANK AT CENTER WITH CONCRETE R
17	0.94267	0.00598	0.16959	1284.0	.03	.18	.79	TANK AT CENTER WITH CONCRETE R
18	0.95529	0.00560	0.16300	1300.0	.01	.09	.90	TANK IN CORNER WITH CONCRETE R
19	0.95454	0.00542	0.17331	1212.0	.03	.18	.79	TANK IN CORNER WITH CONCRETE R
20	0.95329	0.00579	0.16500	1455.0	.01	.09	.90	TANK IN CORNER WITH CONCRETE R

Table 20 Calculated Results (continued)

Serial NO.	k_{eff}	σ	L/L + A	CPU (sec)	F ₁	F ₂	F ₃	comment
21	0.94357	0.00486	0.17955	1267.0	.02	.18	.80	TANK IN CORNER WITH CONCRETE R
22	0.95770	0.00493	0.14226	1550.0	.01	.04	.95	TANK IN CORNER WITH CONCRETE R
23	0.96658	0.00560	0.16560	1365.0	.01	.09	.90	TANK IN CORNER WITH CONCRETE R
24	0.95164	0.00535	0.17784	1252.0	.02	.18	.80	TANK IN CORNER WITH CONCRETE R
25	0.95856	0.00514	0.02896	2578.0	.01	.09	.90	TANK AT CENTER WITH PLASTIC RE
26	0.95992	0.00586	0.02934	2558.0	.02	.19	.79	TANK AT CENTER WITH PLASTIC RE
27	0.94760	0.00458	0.02478	2526.0	.01	.04	.95	TANK AT CENTER WITH PLASTIC RE
28	0.96026	0.00547	0.02775	2439.0	.01	.09	.90	TANK AT CENTER WITH PLASTIC RE
29	0.95749	0.00635	0.02880	2558.0	.02	.19	.79	TANK AT CENTER WITH PLASTIC RE
30	0.94786	0.00527	0.02598	2516.0	.01	.04	.95	TANK AT CENTER WITH PLASTIC RE
31	0.95152	0.00515	0.02860	2430.0	.01	.09	.90	TANK AT CENTER WITH PLASTIC RE
32	0.96013	0.00593	0.02908	2351.0	.02	.19	.79	TANK AT CENTER WITH PLASTIC RE
33	0.95425	0.00490	0.02339	2443.0	.01	.04	.95	TANK IN CORNER WITH PLASTIC RE
34	0.94929	0.00579	0.02693	2519.0	.01	.09	.90	TANK IN CORNER WITH PLASTIC RE
35	0.94673	0.00588	0.02895	2325.0	.02	.18	.80	TANK IN CORNER WITH PLASTIC RE
36	0.95711	0.00585	0.02406	2696.0	.01	.04	.95	TANK IN CORNER WITH PLASTIC RE
37	0.96594	0.00605	0.02754	2392.0	.01	.08	.91	TANK IN CORNER WITH PLASTIC RE
38	0.95615	0.00529	0.02894	2343.0	.02	.18	.80	TANK IN CORNER WITH PLASTIC RE
39	0.94612	0.00442	0.02620	2479.0	.01	.04	.95	TANK IN CORNER WITH PLASTIC RE
40	0.94788	0.00529	0.02660	2439.0	.01	.04	.95	TANK IN CORNER WITH PLASTIC RE

Table 21 Calculated Results (continued)

Serial NO.	k_{eff}	σ	L/L + A	CPU (sec)	F ₁	F ₂	F ₃	comment
41	0.95896	0.00585	0.02802	2357.0	.01	.08	.91	TANK IN CORNER WITH PLASTIC RE
42	0.94935	0.00600	0.03008	2287.0	.02	.17	.81	TANK IN CORNER WITH PLASTIC RE
43	0.95544	0.00465	0.02439	2477.0	.01	.04	.95	TANK CENTERED ON FLOOR WITH PL
44	0.95234	0.00501	0.02460	2526.0	.01	.04	.95	TANK CENTERED ON FLOOR WITH PL
45	0.95221	0.00522	0.02396	2547.0	.01	.04	.95	TANK CENTERED ON FLOOR WITH PL
46	0.97527	0.00500	0.12276	1324.0	.00	.05	.95	4*4 ARRAY WITH CONCRETE REFLEC
47	0.96440	0.00487	0.14126	1510.0	.00	.05	.95	4*4 ARRAY WITH CONCRETE REFLEC
48	0.96597	0.00517	0.13582	1413.0	.01	.05	.94	2*2 ARRAY WITH CONCRETE REFLEC
49	0.97103	0.00495	0.14119	1501.0	.01	.05	.94	2*2 ARRAY WITH CONCRETE REFLEC
50	0.96957	0.00472	0.14523	1518.0	.01	.05	.94	2*2 ARRAY WITH CONCRETE REFLEC
51	0.96714	0.00472	0.13330	1285.0	.00	.06	.94	4*4 ARRAY WITH CONCRETE REFLEC
52	0.99029	0.00455	0.14399	1439.0	.01	.05	.94	4*4 ARRAY WITH CONCRETE REFLEC
53	0.97261	0.00512	0.16230	1085.0	.03	.19	.78	4*4 ARRAY WITH CONCRETE REFLEC
54	0.96985	0.00513	0.18178	1191.0	.02	.18	.80	4*4 ARRAY WITH CONCRETE REFLEC
55	0.95346	0.00521	0.16367	1206.0	.03	.19	.78	2*2 ARRAY WITH CONCRETE REFLEC
56	0.95340	0.00567	0.17321	1287.0	.03	.19	.78	2*2 ARRAY WITH CONCRETE REFLEC
57	0.97959	0.00583	0.16329	1098.0	.02	.19	.79	4*4 ARRAY WITH CONCRETE REFLEC
58	0.97471	0.00580	0.17929	1210.0	.02	.18	.80	4*4 ARRAY WITH CONCRETE REFLEC
59	0.96006	0.00584	0.18179	1231.0	.02	.18	.80	2*4 ARRAY WITH CONCRETE REFLEC
60	0.97293	0.00570	0.17793	1247.0	.02	.18	.80	2*3 ARRAY WITH CONCRETE REFLEC

Table 22 Calculated Results (continued)

Serial NO.	k_{eff}	σ	L/L + A	CPU (sec)	F ₁	F ₂	F ₃	comment
61	0.96862	0.00565	0.16889	1181.0	.03	.18	.79	2*2 ARRAY WITH CONCRETE REFLEC
62	0.97260	0.00519	0.18006	1223.0	.02	.18	.80	2*2 ARRAY WITH CONCRETE REFLEC
63	0.95779	0.00460	0.01428	2076.0	.01	.04	.95	4*4 ARRAY WITH PLASTIC REFLECT
64	0.95650	0.00472	0.01587	2498.0	.00	.04	.96	4*4 ARRAY WITH PLASTIC REFLECT
65	0.95292	0.00514	0.01402	2441.0	.01	.04	.95	2*2 ARRAY WITH PLASTIC REFLECT
66	0.95774	0.00483	0.01570	2591.0	.00	.04	.96	2*2 ARRAY WITH PLASTIC REFLECT
67	0.96248	0.00403	0.01399	2195.0	.01	.04	.95	4*4 ARRAY WITH PLASTIC REFLECT
68	0.96623	0.00471	0.01588	2523.0	.00	.04	.96	4*4 ARRAY WITH PLASTIC REFLECT
69	0.97456	0.00543	0.01867	2014.0	.02	.18	.80	4*4 ARRAY WITH PLASTIC REFLECT
70	0.97499	0.00557	0.01993	2289.0	.02	.17	.81	4*4 ARRAY WITH PLASTIC REFLECT
71	0.95259	0.00603	0.01842	2311.0	.02	.19	.79	2*2 ARRAY WITH PLASTIC REFLECT
72	0.95814	0.00540	0.01846	2396.0	.03	.18	.79	2*2 ARRAY WITH PLASTIC REFLECT
73	0.96983	0.00519	0.01823	2377.0	.02	.18	.80	4*4 ARRAY WITH PLASTIC REFLECT
74	0.97060	0.00520	0.02052	2094.0	.02	.16	.82	4*4 ARRAY WITH PLASTIC REFLECT
75	0.96756	0.00518	0.01758	2365.0	.02	.18	.80	2*3 ARRAY WITH PLASTIC REFLECT
76	0.98084	0.00559	0.01881	2388.0	.02	.16	.82	2*3 ARRAY WITH PLASTIC REFLECT

Table 23 The Effect of the Room Wall on k_{eff} in Minimally Reflected Systems

Case NO	k_{eff}		σ	L/(L+A)		CPU time (sec)	
	with wall	without wall		with wall	without wall	with wall	without wall
1	0.95241 ± 0.00581	0.95976 ± 0.00583	0.95976 ± 0.00583	0.149	0.465	1391	353
2	0.93210 ± 0.00559	0.95988 ± 0.00553	0.95988 ± 0.00553	0.158	0.475	1337	238
3	0.96499 ± 0.00554	0.94732 ± 0.00583	0.94732 ± 0.00583	0.145	0.474	1417	348
4	0.96219 ± 0.00592	0.94733 ± 0.00550	0.94733 ± 0.00550	0.155	0.481	1337	230
5	0.96458 ± 0.00577	0.95599 ± 0.00456	0.95599 ± 0.00456	0.122	0.406	1621	669
6	0.94508 ± 0.00453	0.96669 ± 0.00541	0.96669 ± 0.00541	0.127	0.408	1620	634
7	0.95032 ± 0.00575	0.94461 ± 0.00544	0.94461 ± 0.00544	0.147	0.475	1469	351
8	0.94420 ± 0.00612	0.95356 ± 0.00620	0.95356 ± 0.00620	0.149	0.472	1427	342
9	0.95214 ± 0.00528	0.94759 ± 0.00605	0.94759 ± 0.00605	0.155	0.483	1444	227
10	0.94249 ± 0.00529	0.94402 ± 0.00544	0.94402 ± 0.00544	0.129	0.429	1600	589
mean	0.95104	0.95268	0.95268	0.144	0.457	1466	398

note, The walls are located about 5 m apart from the single tank surface and have the thickness of about 25 cm.

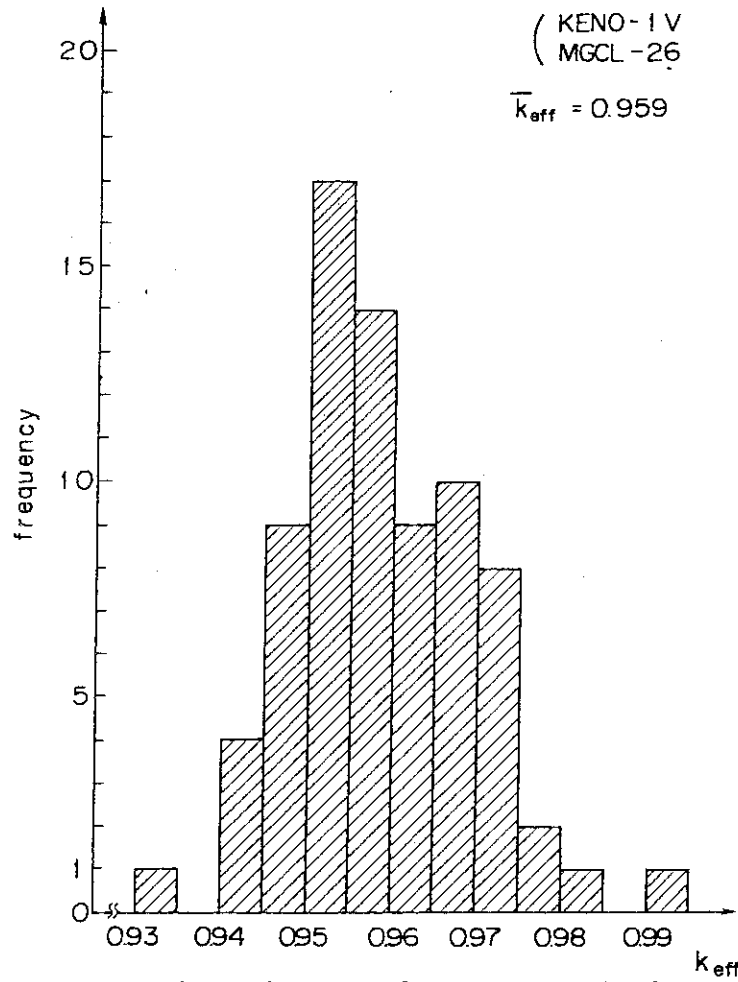


Fig. 24 Frequency distribution of K_{eff} in all 76 cases

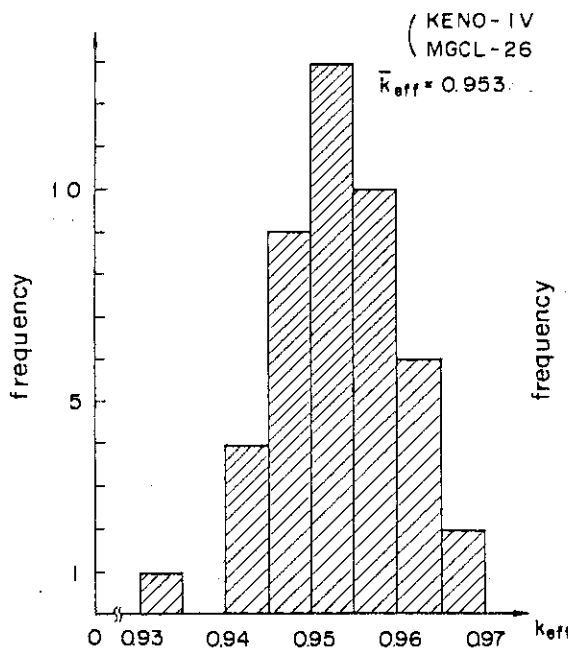


Fig. 25 Frequency distribution of K_{eff} in 45 single tank cases

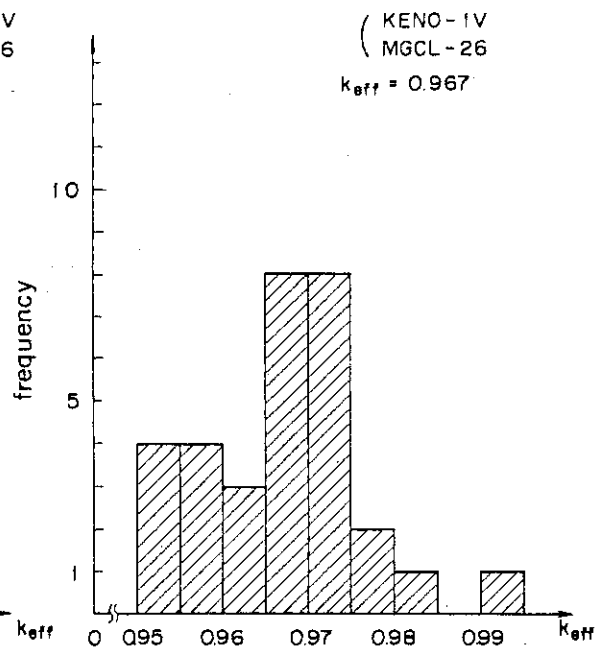


Fig. 26 Frequency distribution of K_{eff} in 31 cylinder cases

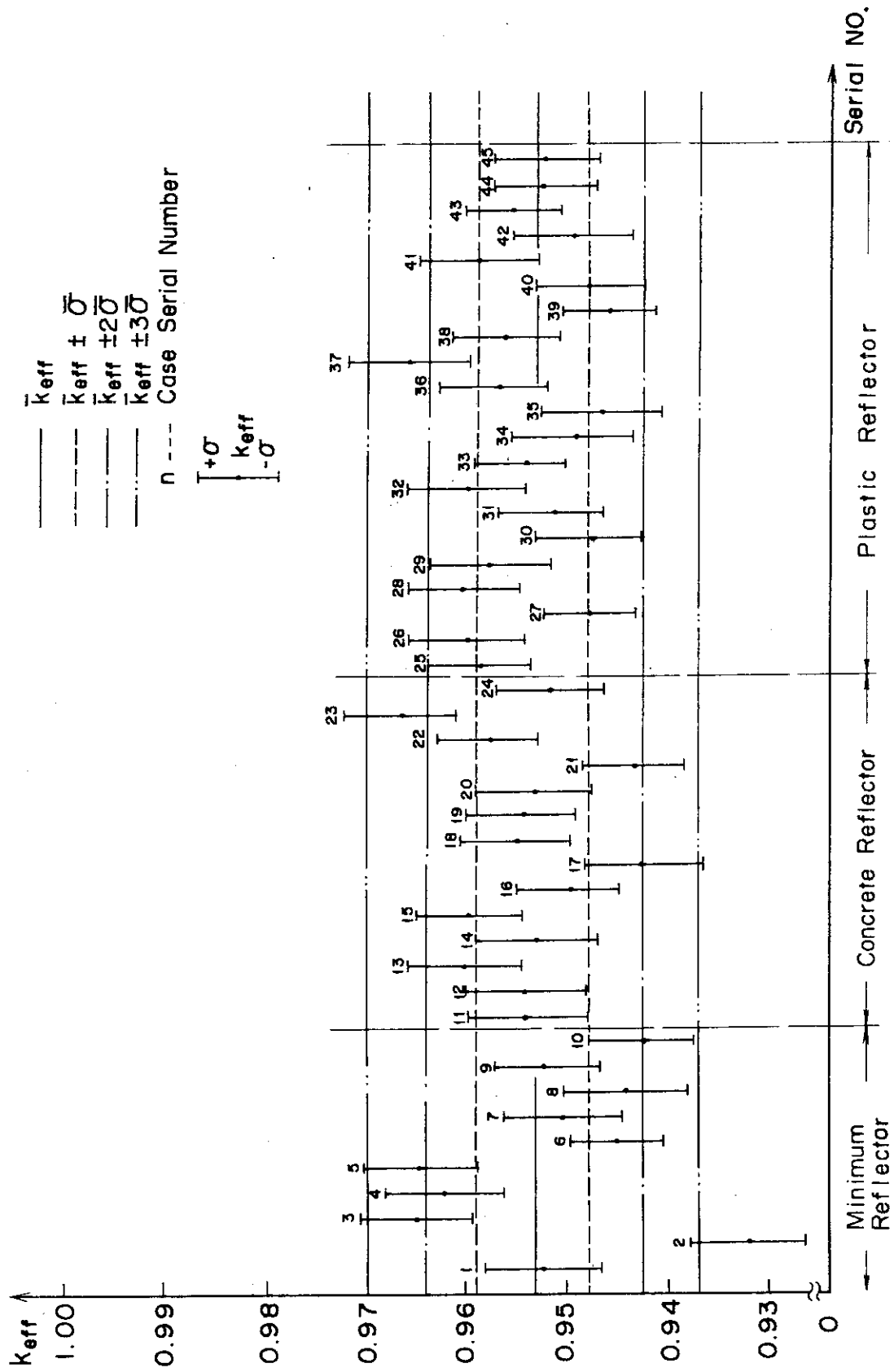


Fig. 27 K_{eff} of each serial case of a single tank

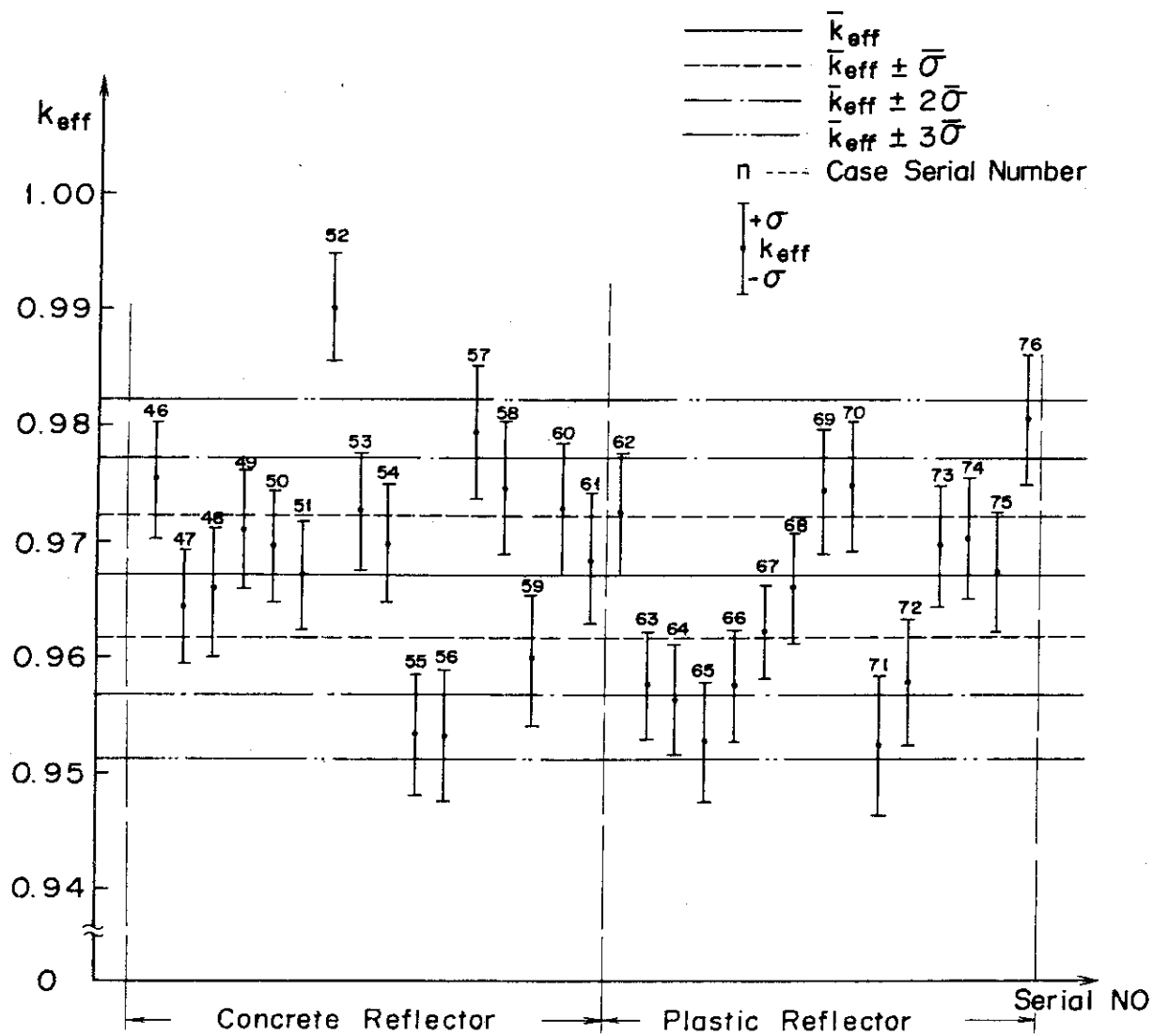


Fig. 28 K_{eff} of each serial case of cylinders

Table 24 Averaged k_{eff} and Standard Deviation

Item Experiment	Averaged k_{eff}	Standard Dev. of k_{eff} Distribution	Averaged Standard Dev.
Single Tank	0.95336	0.00753	0.00550
Cylinders	0.96723	0.01611	0.00519
Over all	0.95902	0.01030	0.00537

Table 25 Averaged k_{eff} by Parameters (Single Tank)

Concentration		Tank Inner Dia.		Location of Tank	
Class	Av. k_{eff}	Class	Av. k_{eff}	Class	Av. k_{eff}
about 60g ^U /ℓ	0.95252	about 28cm	0.95481	Min.Ref1.	0.95104
about 145g ^U /ℓ	0.95596	about 33cm	0.95254	Center Hang	0.95443
about 350g ^U /ℓ	0.95172			Corner Floor	0.95379

Table 26 Averaged k_{eff} by Parameters (Cylinders)

Concentration		Cylinder Inner Dia.		Array Size	
Class	Av. k_{eff}	Class	Av. k_{eff}	Class	Av. k_{eff}
60 ~ 80 g/ℓ	0.96596	16.12 cm	0.97168	4×4 (IDNO.0)	0.97043
about 360g/ℓ	0.96816	21.12 cm	0.96358	2×2 (IDNO.1)	0.95942

Table 27 Comparison of k_{eff} by means of the Four Factor Formula.

CASE	NO.66 (2×2), 60.32g ^U /ℓ	NO.68 (4×4), 60.32g ^U /ℓ
F_T	0.9143	0.9247
F	0.9577	0.9663
A_T	0.9417	0.9393
A	0.9844	0.9810
L	0.01570	0.01583
$\eta f = \frac{F_T}{A_T}$	0.9709	0.9845
$\epsilon = \frac{F}{F_T}$	1.047	1.045
$p = \frac{A_T}{A}$	0.9566	0.9575
$P_L = \frac{A}{A+L}$	0.9843	0.9841
$k_{eff}^{(4)} = \eta f p \epsilon P_L$	0.9576	0.9694

note, F_T : fissions in thermal group, $\sum_{g=15}^{26} F_g$
 F : total fissions, $\sum_{g=1}^{26} F_g$
 A_T : absorptions in thermal group, $\sum_{g=15}^{26} A_g$
 A : total absorptions, $\sum_{g=1}^{26} A_g$
 L : total leakage, $\sum_{g=1}^{26} L_g$

F_g , A_g and L_g ($g=1\sim 26$) are given in KENO-IV output list.

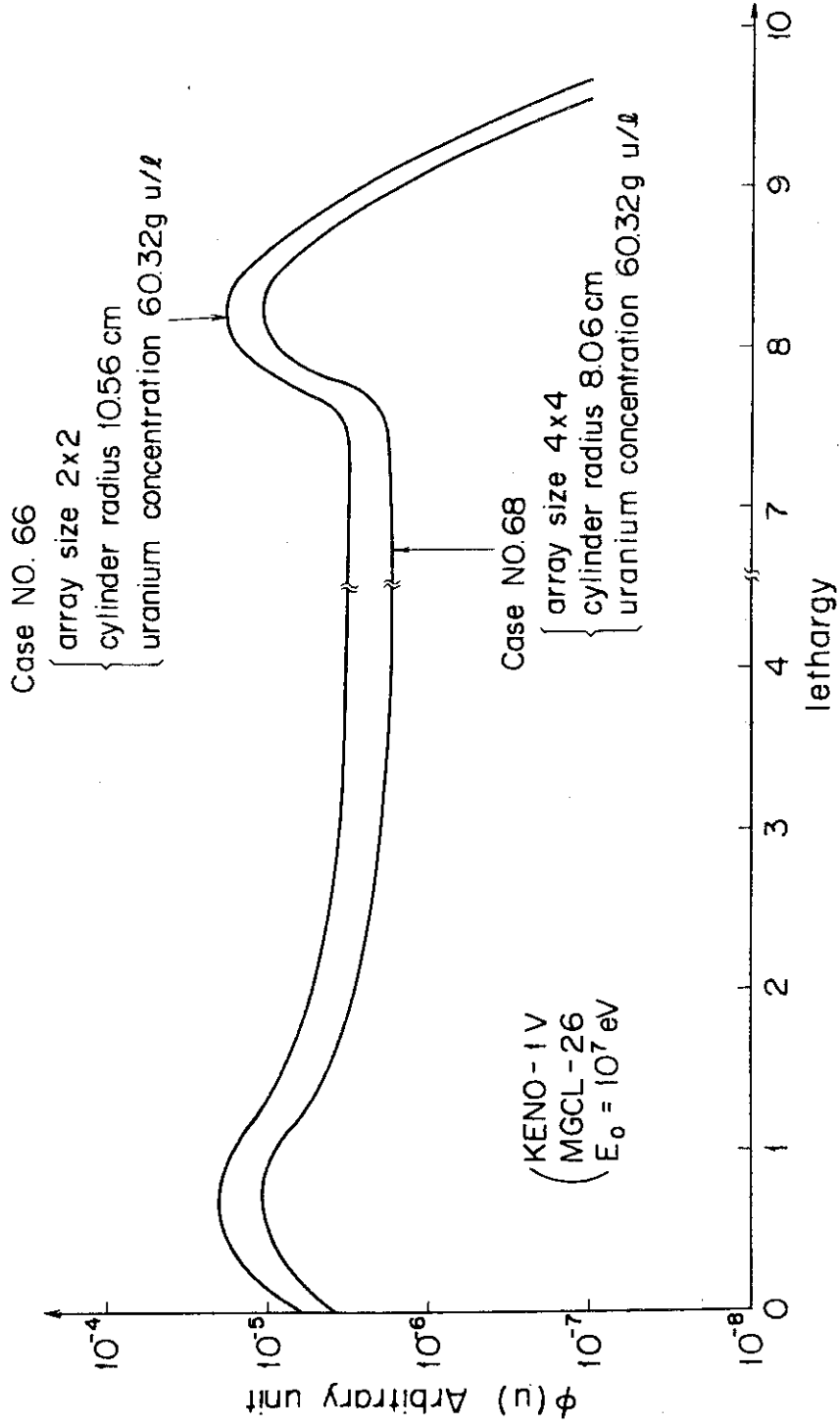


Fig. 29 Neutron spectrum for fuel region in the Case NO.66 and Case NO.68.

Table 28 Comparison between k_{eff} obtained with MGCL-26 Group and with MGCL-137 Group in a single Tank Cases.

CASE NO.	k_{eff}		CASE NO.	k_{eff}	
	With 26 Gr.	With 137 Gr.		With 26 Gr.	With 137 Gr.
01	0.95241	0.96023	24	0.95164	0.97787
02	0.93210	0.96540	25	0.95856	0.96744
03	0.96499	0.97211	26	0.95992	0.96148
04	0.96219	0.97021	27	0.94760	0.97455
05	0.96458	0.96087	28	0.96026	0.97556
06	0.94504	0.98311	29	0.95749	0.96908
07	0.95032	0.96870	30	0.94786	0.97753
08	0.94420	0.97342	31	0.95152	0.97731
09	0.95214	0.97121	32	0.96013	0.97846
10	0.94240	0.97211	33	0.95425	0.97336
11	0.95381	0.96911	34	0.94929	0.96497
12	0.95411	0.96419	35	0.94673	0.96973
13	0.96022	0.97680	36	0.95711	0.98427
14	0.95301	0.97901	37	0.96594	0.96833
15	0.95960	0.96573	38	0.95615	0.97105
16	0.94968	0.98328	39	0.94612	0.96830
17	0.94267	0.97333	40	0.94788	0.96393
18	0.95529	0.97528	41	0.95896	0.98508
19	0.95454	0.97658	42	0.94939	0.97353
20	0.95329	0.99463	43	0.95544	0.97074
21	0.94357	0.97639	44	0.95234	0.97874
22	0.95770	0.98655	45	0.95221	0.96906
23	0.96658	0.98222	Average	0.95336	0.97335

Table 29 Comparison between k_{eff} obtained with MGCL-26 Group and with MGCL-137 Group in Cylinder Cases.

CASE NO.	k_{eff}		CASE NO.	k_{eff}	
	With 26 Gr.	With 137 Gr.		With 26 Gr.	With 137 Gr.
46	0.97527	0.99136	62	0.97260	0.98430
47	0.96440	0.98959	63	0.95779	0.98230
48	0.96597	0.99402	64	0.95650	0.97910
49	0.97103	0.97565	65	0.95292	0.98439
50	0.96957	0.98493	66	0.95774	0.97712
51	0.96714	0.98728	67	0.96248	0.98202
52	0.99029	0.99544	68	0.96623	0.97391
53	0.97261	0.98281	69	0.97456	0.97242
54	0.96985	0.98957	70	0.97499	0.97346
55	0.95346	0.98170	71	0.95259	0.96810
56	0.95340	0.97910	72	0.95814	0.97569
57	0.97959	0.98414	73	0.96983	0.97762
58	0.97471	0.98909	74	0.97060	0.98139
59	0.96006	0.98719	75	0.96756	0.97408
60	0.97293	0.98223	76	0.98084	0.98575
61	0.96862	0.97678	Average	0.96723	0.98202

Table 30 Calculated Fission Neutrons using MGCL-26 and MGCL-137 in the Case No.47

26 Gr. NO.	137 Gr. NO.	fission neutrons F_i		δF_i (%)
		with 26 Gr.	with 137 Gr.	ΔF total
1	1 ~ 10	9.20×10^{-4}	5.96×10^{-4}	- 1.3
2	11 ~ 22	2.34×10^{-3}	2.25×10^{-3}	- 0.4
3	23 ~ 36	1.38×10^{-3}	1.48×10^{-3}	+ 0.4
4	37 ~ 46	6.22×10^{-4}	6.57×10^{-4}	+ 0.1
5	47 ~ 56	5.77×10^{-4}	6.19×10^{-4}	+ 0.2
6	57 ~ 60	6.08×10^{-4}	6.27×10^{-4}	+ 0.1
7	61 ~ 69	2.90×10^{-3}	3.01×10^{-3}	+ 0.4
8	70 ~ 75	4.75×10^{-3}	4.89×10^{-3}	+ 0.6
9	76 ~ 81	9.39×10^{-3}	9.63×10^{-3}	+ 1.0
10	82 ~ 87	1.28×10^{-2}	1.32×10^{-2}	+ 1.6
11	88 ~ 92	3.95×10^{-3}	3.98×10^{-3}	+ 0.1
12	93 ~ 95	1.10×10^{-3}	1.14×10^{-3}	+ 0.1
13	96 ~ 98	4.70×10^{-3}	4.80×10^{-3}	+ 0.4
14	99 ~ 100	2.57×10^{-3}	2.62×10^{-3}	+ 0.2
15	101 ~ 104	7.45×10^{-3}	7.74×10^{-3}	+ 1.2
16	105 ~ 107	4.62×10^{-3}	4.70×10^{-3}	+ 0.3
17	108 ~ 110	7.05×10^{-3}	7.22×10^{-3}	+ 0.7
18	111 ~ 113	9.14×10^{-3}	9.30×10^{-3}	+ 0.6
19	114 ~ 116	1.31×10^{-2}	1.35×10^{-2}	+ 1.5
20	117 ~ 119	2.82×10^{-2}	2.72×10^{-2}	- 3.8
21	120 ~ 122	0.72×10^{-2}	6.66×10^{-2}	- 2.4
22	123 ~ 125	1.43×10^{-1}	1.44×10^{-1}	+ 4.0
23	126 ~ 128	2.30×10^{-1}	2.34×10^{-1}	+15.2
24	129 ~ 131	2.40×10^{-1}	2.51×10^{-1}	+43.6
25	132 ~ 134	1.40×10^{-1}	1.48×10^{-1}	+32.9
26	135 ~ 137	2.53×10^{-2}	2.68×10^{-2}	+ 6.0
total		0.9644	0.9896	

5. 結 論

以上高濃縮 ($\epsilon = 93.17\%$) の硝数ウラニル水溶液を単一タンク、あるいは最大 4×4 の配列に並べたシリンダ群に注入し、コンクリート、あるいはメタクリレートプラスチックの反射体で囲んだときに臨界となる溶液レベルを測定した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る。

- (i) 全 76 ケースについて k_{eff} 計算値は 0.930 から 0.995 までの範囲に分布し、平均値は 0.959 となる。単一タンク 45 ケースの平均値は 0.953、シリンダ群 31 ケースの平均値は 0.967 となり、後者の方が約 1.5% 高く算出される。
- (ii) 単一タンクの最小反射条件の計算で、実験室のコンクリート壁からの反射は、考慮に入れてもまたは入れなくても結果に有意な差は生じない。
- (iii) シリンダ群の体系で、配列の大きさが (2×2) から (4×4) と大きくなるにつれ、 k_{eff} 計算値は約 1.1% 程度高く算出される。これについては、KENO-IV では、燃料領域からもれ出す中性子数を過大評価していることが考えられる。
- (iv) エネルギー群構造を 26 群から 137 群に変更すると、 k_{eff} 計算値は 1.5~2.0% 程度上昇して 1.0 に近くなる。燃料溶液中の中性子スペクトルは、熱エネルギー領域でマクスウエル分布のよく発達した形となり、このような体系の解析に対しては MGCL-26 の熱群の群定数の精度改善が必要となる。

今後は、他のベンチマーク計算結果と照し合せながら、KENO-IV 計算法を検討改良し、MGCL 核断面積セットの信頼性を評価してゆく必要がある。

謝 辞

今回のベンチマーク計算には、契約に基づき、日本原子力事業所(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。

5. 結 論

以上高濃縮 ($\epsilon = 93.17\%$) の硝数ウラニル水溶液を単一タンク、あるいは最大 4×4 の配列に並べたシリンダ群に注入し、コンクリート、あるいはメタクリレートプラスチックの反射体で囲んだときに臨界となる溶液レベルを測定した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る。

- (i) 全 76 ケースについて k_{eff} 計算値は 0.930 から 0.995 までの範囲に分布し、平均値は 0.959 となる。単一タンク 45 ケースの平均値は 0.953、シリンダ群 31 ケースの平均値は 0.967 となり、後者の方が約 1.5% 高く算出される。
- (ii) 単一タンクの最小反射条件の計算で、実験室のコンクリート壁からの反射は、考慮に入れてもまたは入れなくても結果に有意な差は生じない。
- (iii) シリンダ群の体系で、配列の大きさが (2×2) から (4×4) と大きくなるにつれ、 k_{eff} 計算値は約 1.1% 程度高く算出される。これについては、KENO-IV では、燃料領域からもれ出す中性子数を過大評価していることが考えられる。
- (iv) エネルギー群構造を 26 群から 137 群に変更すると、 k_{eff} 計算値は 1.5~2.0% 程度上昇して 1.0 に近くなる。燃料溶液中の中性子スペクトルは、熱エネルギー領域でマクスウエル分布のよく発達した形となり、このような体系の解析に対しては MGCL-26 の熱群の群定数の精度改善が必要となる。

今後は、他のベンチマーク計算結果と照し合せながら、KENO-IV 計算法を検討改良し、MGCL 核断面積セットの信頼性を評価してゆく必要がある。

謝 辞

今回のベンチマーク計算には、契約に基づき、日本原子力事業所(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) R.E. ROTHE and I. OH, "Benchmark Critical Experiments on High-Enriched Uranyl Nitrate Solution Systems", Nucl. Technol., 41, 207 (1978).
- 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) M.K. DRAKE, "Data Formats and Procedures for the ENDF Neutron Cross Section Library", BNL-50274, Brookhaven National Laboratory (1970).
- 6) O. OZER, "Program RESEND", BNL-17134, Brookhaven National Laboratory (1972).
- 7) R.Q. WRIGHT et al., "SUPERTOG; A Program to Generate Group Constants and Pu Scattering Matrices from ENDF/B", ORNL-TM-2679, Oak Ridge National Laboratory (1969).
- 8) J.D. MACDOUGALL, "PIXSE", AEEW-M318, Atomic Energy Establishment, Winfrith (1963).
- 9) I.I. BONDARENKO et al., "Group Constants for Nuclear Reactor Calculations", Consultants Bureau, New York (1964).
- 10) S. KATSURAGI et al., "JAERI Fast Reactor Group Constant System, Pt. 1 & 2", JAERI-1195, Japan Atomic Energy Research Institute (1970).
- 11) H.C. HONECK and D.R. FINCH, "FLANGE II; A Code to Process Thermal Neutron Data from an ENDF/B Tape, DP-2179, E.I. Du Pont De Nemours & Company (1971).