

JAERI-M  
9859

臨界安全評価コードシステムJACSの  
ベンチマーク計算

1982年1月

|    |                  |   |    |                  |   |    |                  |    |                  |
|----|------------------|---|----|------------------|---|----|------------------|----|------------------|
| 片倉 | 純一               | ・ | 小室 | 雄一               | ・ | 横田 | 匡彦 <sup>*1</sup> | 内藤 | 俣孝               |
| 平林 | 文夫 <sup>*2</sup> | ・ | 浅野 | 則雄 <sup>*3</sup> | ・ | 大村 | 博志 <sup>*4</sup> | 北野 | 照明 <sup>*5</sup> |
| 城  | 克彦 <sup>*6</sup> | ・ | 谷本 | 亮二 <sup>*7</sup> | ・ | 山川 | 康泰 <sup>*8</sup> | 梶原 | 茂樹 <sup>*8</sup> |

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

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

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

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1982

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 日立高速印刷株式会社

臨界安全評価コードシステムJACSのベンチマーク計算

日本原子力研究所東海研究所安全解析部

片倉 純一・小室 雄一・横田 匡彦<sup>\*1</sup>・内藤 俣孝

平林 文夫<sup>\*2</sup>・浅野 則雄<sup>\*3</sup>・大村 博志<sup>\*4</sup>

北野 照明<sup>\*5</sup>・城 克彦<sup>\*6</sup>・谷本 亮二<sup>\*7</sup>

山川 康泰<sup>\*8</sup>・梶原 茂樹<sup>\*8</sup>

(1981年11月30日受理)

臨界安全評価コードシステムJACSのうち、多群定数ライブラリーMGCLとモンテカルロ計算コードKENO-IVの組み合わせによる臨界計算の精度評価を行なうために、ベンチマーク計算を昨年度に引き続き実施した。ベンチマーク計算の対象に選んだ体系は、主に低・中濃縮ウラン燃料およびプルトニウム含有率の高い燃料を使用した10種類の実験体系である。

臨界計算の結果は、硝酸水溶液を用いた体系と燃料棒を軽水中に配列した体系では大きく異なり、前者は3～4%も実験値より低目に算出されるのに対し、後者は、実験値の約1%以内に入り、ほぼ妥当な結果を与える。低目に算出される硝酸水溶液体系でも、モンテカルロ計算における中性子散乱の方向余弦を乱数を用いて決定するように改良することにより2～3%以上、計算値が上昇し、実験値の2%以内には入るよう改善される。

- 
- \* 1 ) 東洋情報システム(株)
  - \* 2 ) 動力炉・核燃料開発事業団
  - \* 3 ) 住友原子力工業(株)
  - \* 4 ) 石川島播磨重工業(株)
  - \* 5 ) 三井造船(株)
  - \* 6 ) 日立エンジニアリング(株)
  - \* 7 ) 三菱金属(株)
  - \* 8 ) 日揮(株)

Benchmark Calculation with the Nuclear Criticality  
Safety Evaluation Code System JACS

Jun'ichi KATAKURA, Yuichi MOMURO, Masahiko YAKOTA<sup>\*1</sup>, Yoshitaka NAITO  
Fumio HIRABAYASHI<sup>\*2</sup>, Norio ASANO<sup>\*3</sup>, Hiroshi OHMURA<sup>\*4</sup>, Teruaki KITANO<sup>\*5</sup>  
Katsuhiko JO<sup>\*6</sup>, Ryoji TANIMOTO<sup>\*7</sup>, Yasuhiro YAMAKAWA<sup>\*8</sup> and Shigeki KAJIWARA<sup>\*8</sup>

Division of Reactor Safety Evaluation,  
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received November 30, 1981)

A series of benchmark tests has been performed since 1980 in order to examine the capability of JAERI's criticality safety evaluation code system (JACS) which includes a Monte Carlo calculation code KENO-IV with the multi-group constants library MGCL.

This report describes the results of benchmark calculations on selected criticality experiments using fuels of low/medium enriched uranium or those with high plutonium contents.

The results showed that the calculated  $K_{eff}$ 's were 3~4% lower than experimental values for nitrate solution systems, while for lattice assemblies a fairly good agreement in  $K_{eff}$ 's was obtained. Then the Monte Carlo code was modified in determination of direction cosine of neutron scattering by using random numbers instead of a mean value, which gave 2~3% higher  $K_{eff}$ 's for nitrate solution systems, coming much closer to the experimental ones.

Keywords: Criticality Safety, Benchmark Calculation, Outside Reactor,  
KENO-IV Monte Carlo Code, Multi-Group Constants Library

---

\*1) Toyo Information System Co., Ltd.

\*2) Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

\*3) Sumitomo Atomic Energy Industries Co., Ltd.

\*4) Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

\*5) Mitsui Engineering and Shipbuilding Co., Ltd.

\*6) Hitachi Engineering Co., Ltd.

\*7) Mitsubishi Metal Corporation

\*8) JGC Corporation

## 目 次

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 1. はじめに                             | 1  |
| 2. 実験体系と実験データ                       | 2  |
| 2.1 ボロン入り軽水内に於ける $UO_2-PuO_2$ 燃料棒配列 | 2  |
| 2.2 $UO_2$ 燃料棒の軽水内に於ける最近接貯蔵         | 2  |
| 2.3 低濃縮 $U_3O_8$ パッケージの配列           | 3  |
| 2.4 硝酸ウラニル水溶液内の酸化ベリリウム入り燃料棒体系       | 3  |
| 2.5 Gd中性子毒を含む硝酸プルトニウム水溶液体系          | 3  |
| 2.6 軽水内に於ける $UO_2-PuO_2$ 燃料棒の臨界集合体  | 3  |
| 2.7 $UO_2$ ・アルコールスラリーの配列体系          | 4  |
| 2.8 金属ウラニウム・スラッグの配列                 | 4  |
| 2.9 Gdを含むU+Pu硝酸水溶液体系                | 4  |
| 2.10 鉛壁のある軽水プール内の $UO_2$ 燃料棒の配列体系   | 5  |
| 3. 計算手法                             | 34 |
| 4. 計算結果                             | 39 |
| 4.1 ボロン入り軽水内に於ける $UO_2-PuO_2$ 燃料棒配列 | 39 |
| 4.2 $UO_2$ 燃料棒の軽水内に於ける最近接貯蔵         | 39 |
| 4.3 低濃縮 $U_3O_8$ パッケージの配列           | 40 |
| 4.4 硝酸ウラニル水溶液内の酸化ベリリウム入り燃料棒体系       | 40 |
| 4.5 Gd中性子毒を含む硝酸プルトニウム水溶液体系          | 41 |
| 4.6 軽水内に於ける $UO_2-PuO_2$ 燃料棒の臨界集合体  | 41 |
| 4.7 $UO_2$ ・アルコールスラリーの配列体系          | 41 |
| 4.8 金属ウラニウム・スラッグの配列                 | 42 |
| 4.9 Gdを含むU+Pu硝酸水溶液体系                | 42 |
| 4.10 鉛壁のある軽水プール内の $UO_2$ 燃料棒の配列体系   | 43 |
| 5. 考 察                              | 73 |
| 6. 結 論                              | 76 |
| 謝 辞                                 | 76 |
| 参 考 文 献                             | 76 |

## Contents

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.   | Introduction .....  | 1  |
| 2.   | Experimental System and Data .....  | 2  |
| 2.1  | A Critical Mixed Oxide ( $\text{UO}_2 - \text{PuO}_2$ ) Fuel Lattice Moderated<br>by Borated Water .....  | 2  |
| 2.2  | Water Storage of Power Reactor Fuel in Close Proximity .....  | 2  |
| 2.3  | An Array of Compacted, Low-Enriched, Uranium Oxide ( $\text{U}_3\text{O}_8$ ) Packages... ..  | 3  |
| 2.4  | An Array of beryllium Oxide Fuel Pins in Uranyl Nitrate Solution .....  | 3  |
| 2.5  | Plutonium Nitrate Solution of High Fissile Content Poisoned<br>with Gadolinium .....  | 3  |
| 2.6  | A Critical Assembly of Mixed Oxide Fuel Pins Immersed in Water.....   | 3  |
| 2.7  | An Array of Tin Cans Containing $\text{UO}_2$ - Alcohol Slurry .....  | 4  |
| 2.8  | A Subcritical Assembly of Slightly Enriched Tubular Uranium Slugs... ..   | 4  |
| 2.9  | A Homogeneous System of U + Pu Nitrate Solution Countaining<br>Gadlinium .....  | 4  |
| 2.10 | Subcritical Clusters of 2.35 wt% and 4.25 wt% $^{235}\text{U}$ Enriched<br>$\text{UO}_2$ Rods in Water with Uranium or Lead Reflecting Wall ..... | 5  |
| 3.   | Calculational Method .....  | 34 |
| 4.   | Calculated Results .....  | 39 |
| 4.1  | A Critical Mixed Oxide ( $\text{UO}_2 - \text{PuO}_2$ ) Fuel Lattice Moderated<br>by Borated Water .....  | 39 |
| 4.2  | Water Storage of Power Reactor Fuel in Close Proximity .....  | 39 |
| 4.3  | An Array of Compacted, Low-Enriched, Uranium Oxide ( $\text{U}_3\text{O}_8$ ) Packages. ..  | 40 |
| 4.4  | An Array of Beryllium Oxide Fuel Pins in Uranium Nitrate Solution... ..   | 40 |
| 4.5  | Plutonium Nitrate Solution of High Fissile Content Poisoned<br>with Gadolinium .....  | 41 |
| 4.6  | A Critical Assembly of Mixed Oxide Fuel Pins Immersed in Water .....  | 41 |
| 4.7  | An Array of Tin Cans Containing $\text{UO}_2$ -Alcohol Slurry .....   | 41 |
| 4.8  | A Subcritical Assembly of Slightly Enriched Tubular Uranium Slugs... ..   | 42 |
| 4.9  | A Homogeneous System of U + Pu Nitrate Solution Containing<br>Gadolinium .....  | 42 |
| 4.10 | Subcritical Clusters of 2.35 wt% and 4.25 wt% $^{235}\text{U}$ Enriched<br>$\text{UO}_2$ Rods in Water with Uranium or Lead Reflecting Wall ..... | 43 |
| 5.   | Consideration .....   | 73 |
| 6.   | Conclusion .....  | 76 |
|      | Acknowledgements .....  | 76 |
|      | References .....  | 76 |

## 1. はじめに

臨界安全性評価を行なううえで対象となる各種の核燃料取扱施設では、化学形態が多種多様な核燃料を扱うために、熱中性子体系から高速中性子体系まで幅広い体系について考慮する必要がある。このため、臨界計算を行なう場合にも、ある種の体系では実験値を良く再現するが、他の異った体系では実験値と大きく異った結果を算出することもあり得る。

従って、多くの異った体系に対しベンチマーク計算を実施し、コードシステムの精度を評価しておく必要がある。また、コードシステムの精度を評価しておくことは安全性を保證するうえで必要な計算について、その計算結果の信頼度等を明白にすることにもなろう。

このために、55年度から各種の原子炉外の臨界体系を取り上げてベンチマーク計算を実施して来た。<sup>1)~9)</sup>

本報告では、55年度と同様、原研で開発した臨界安全評価コードシステムJACSのうち、多群定数ライブラリーMGCL<sup>10)</sup>とモンテカルロ計算コードKENO-IV<sup>11)</sup>を組み合わせた臨界計算の計算精度を検証するために実施した56年度のベンチマーク計算について報告する。

第2章では、今回取り上げて計算を実施した実験体系について述べ、第3章では計算手法について簡単に記述する。第4章、第5章で各体系に於ける計算結果を示し、考察を行なう。

## 2 実験体系と実験データ

今回のベンチマーク計算で取り上げた体系は、表 2.1 に示すような 10 体系であり、全部で約 200 ケースに及ぶものである。これらの実験データは 1970 年以降の比較的新らしいデータである。ただし、Nuclear Science and Engineering や Nuclear Technology など一般に普及している雑誌に掲載された実験データは含まれていない。また、核燃料としては、低・中濃縮ウラン及びプルトニウム含有率の高いものを選択してある。ただし、表 2.1 の 7 番目の体系に対応する  $UO_2$ -アルコール・スラリーの体系では、ウランの濃縮度が 93.15% の高濃縮であり、プルトニウムが含まれていなく、上記の範疇に属さない。

以下に、表 2.1 の各ケースについて実験体系を簡単に記す。

### 2.1 ボロン入り軽水内に於ける $UO_2$ - $PuO_2$ 燃料棒配列

本体系は、EPRI NP-196 Project 348 Vol. 1 Final Report 4. 1976<sup>12)</sup> に報告されている臨界体系であり、装荷燃料棒本数、減速材中のホウ素濃度、配列ピッチあるいは、燃料組成が異っている。

実験に使用されている燃料棒は 2 種類あり、一方は 2.35% 濃縮ウランの燃料棒であり、他方は 2%  $PuO_2$ - $UO_2$  混合燃料棒である。図 2.1 および図 2.2 にそれらの燃料棒を示す。表 2.2 には格子ピッチ、燃料棒本数、ボロン濃度等臨界条件を示す。また、図 2.3 には燃料棒の装荷パターン例を示す。

### 2.2 $UO_2$ 燃料棒の軽水内に於ける最近接貯蔵

本実験体系は Babcock & Wilcox Company (B&W) で行った一連の実験であり、BAW-1484-7<sup>13)</sup> に報告されているものである。

この体系は、2.46% 濃縮度の  $UO_2$  燃料棒を軽水中に配列した体系で、貯蔵プール内に来るだけ多くの燃料棒を貯蔵するために中性子吸収板を利用する。

臨界集合体は図 2.4 に示す様に直径 152.4 cm (5 ft)、高さ 198 cm (6.5 ft)、壁厚 1.27 cm (0.5 in) の A 製タンク内に組立てられている。このタンクはより大きな直径 274 cm (9 ft) のスチール・タンク内に置かれており、その底面から約 75 cm の所にスチール製のスカートで支持されている。また、燃料棒は格子間ピッチが  $1.636 \pm 0.005$  cm ( $0.644 \pm 0.002$  in) となるよう格子状に配列されている。

中性子吸収材としては  $B_4C$  ピン、ステンレスおよび含ホウ素アルミニウム隔離板等が用意されている。

臨界には水位を変えることにより到達している。

各体系の臨界パラメータを表 2.3 に、燃料棒の装荷パターン例を図 2.5 に示す。

### 2.3 低濃縮 $U_3O_8$ パッケージの配列

濃縮度 4.46% の $U_3O_8$  をアルミニウム製カンにつめて、2つに分離した可動テーブル上に配列し、分離したテーブルを接近することにより臨界に近づけている体系で、NUREG/CR-0674<sup>14)</sup> に報告された実験である。図 2.6 に示すように $U_3O_8$  をつめたアルミニウム製カンは水平なテーブル上で向い合う面を除き、コンクリートやプラスチックの反射体で囲まれているが、反射体で囲まれていない体系での実験も比較のために行なわれている。

なお、臨界反応度を保持するために金属ウランあるいは硝酸ウラン水溶液のドライバーを分離したテーブルの間に置いている。表 2.4 に実験条件を示す。

### 2.4 硝酸ウラニル水溶液内の酸化ベリリウム入り燃料棒体系

この実験では $UO_2$  と $BeO$  を均質化したセラミックペレットをハステロイ-280 のチューブに入れた燃料棒を用いており、ORNL/ENG-2<sup>15)</sup> に報告された実験である。燃料棒は直径 0.952 cm、長さ 196.8 cm、燃料ペレット部分は 193 cm の円柱状であり表 2.5 に示す組成をしている。

臨界体系は燃料棒を水タンク中に配列した体系と、水タンク中に更にボロンや硝酸ウラニル水溶液の入った小型タンクを設置し、その中に燃料棒を配置した体系とに大きく2種類に分けられる。それぞれの体系で配列パターンやピッチ等を変化させて臨界条件を研究している。表 2.6 および図 2.7 に臨界条件と配列パターンを示す。また、表 2.7 には水溶液での臨界条件を示す。

なお、燃料のウラン濃縮度は 6.24% である。

### 2.5 Gd 中性子毒を含む硝酸プルトニウム水溶液体系

本実験体系はガドリニウムを含んだ硝酸プルトニウム水溶液の円筒タンク臨界寸法に関するもので、BNWL-1522-3<sup>16)</sup> に報告された体系である。

本実験で用いられた燃料の化学形態は全て硝酸プルトニウム水溶液であるが 1.85 モルの硝酸濃度を持った 116 gPu/l の溶液と 4.1 モルの硝酸濃度を持った 363 gPu/l の溶液の2種類の水溶液が用いられている。それらの水溶液には各濃度のガドリニウムを入れて、濃度をパラメータとした臨界水位を求めている。

硝酸プルトニウム水溶液を入れる容器は内径 61.03 cm、壁厚 0.079 cm の上部密閉型のステンレス・スチール製円筒容器で、外側は水反射体で囲まれている。

図 2.8 および表 2.8 に実験体系の概略図と臨界条件を示す。

### 2.6 軽水内に於ける $UO_2$ - $PuO_2$ 燃料棒の臨界集合体

$UO_2$ - $PuO_2$  混合燃料棒を軽水プール内に配置し、燃料棒本数、燃料ピッチを変え、水位

によって臨界にしている体系で PNL-SA-7064<sup>17)</sup> に報告された実験である。燃料棒を配置する水タンクは幅 1.8 m, 長さ 3 m, 深さ 2.1 m である。燃料棒の組成形状は図 2.9 に示す。また, 臨界条件および燃料棒の配列例を表 2.9 と図 2.10 に示す。図 2.10 から分かるように外側の燃料棒は数ピッチ分の間隔をあけて配列してある。

## 2.7 $UO_2$ - アルコールスラリーの配列体系

濃縮度 93.15% の  $UO_2$  燃料をアルコールと混ぜ合わせたスラリー状の燃料をスズ製のコンテナに入れて配列し, 臨界体系を組立てた実験で Y-DR-120<sup>18)</sup> に報告されたものである。

実験に用いられたスズ製のコンテナは 4 種類あり, 表 2.10 に示すようにそれぞれ燃料の重量, 密度, アルコールの量およびコンテナの大きさ等が異っている。臨界体系はこれらのコンテナを積み重ねて, コンテナの数, 配列の大きさ, 減速材の有無等により形成している。

図 2.11 にコンテナの配列例を示し, 表 2.11 に各体系の実験条件を示す。

## 2.8 金属ウラニウム・スラッグの配列

本実験は二重円管状の金属ウラニウム・スラッグを, 水を満たした円筒状タンク内に格子状に配列して行ったものであり, DP-MS-73-41<sup>19)</sup> に報告されている。本実験では, 従来, 燃料としてよく用いられているウラニウムのロッドや小口径の円管に代って, 大口径でかつ同心円上に配置された円管を用いている。

実験体系は, 図 2.12 に示されるような金属ウラニウム・スラッグ, 支持棒としてのアルミニウム・ロッドおよびプレキングラス・ロッドからなる集合体を, 軽水タンク内で格子状に配列したものである。軽水タンクは直径 5 ft, 高さ 7 ft で, タンクの側面と底面はカドミウムシートで覆われている。

配列例および実験条件を図 2.13 と表 2.12 に示す。全て, 未臨界体系である。

## 2.9 Gd を含む U+Pu 硝酸水溶液体系

本実験は, 種々の濃度の U+Pu 硝酸水溶液にガドリニウムおよびボロンの中性子毒を加え, プルトニウム同位体組成, プルトニウム濃度, ウラン濃度, 中性子毒の形態および濃度等をパラメータとして行った一連の実験であり, BNWL-B-482<sup>20)</sup> に報告されている。U+Pu 硝酸水溶液は, 均質体系では内径 61.03 cm, 高さ 106.7 cm の円筒容器に満たされている。一方, 非均質体系では, 内径 55.5 cm, 高さ 106.7 cm の円筒容器に満たされ,  $UO_2 + PuO_2$  ロッドが配置されている。いずれの場合も円筒容器の外側は水射体で囲まれている。

均質および非均質の体系列を図 2.14 と図 2.15 に示す。また, 臨界条件を表 2.13 ~ 表 2.17 に示す。

## 2.10 鉛壁のある軽水プール内の $UO_2$ 燃料棒の配列体系

濃縮度 2.35% および 4.29% の $UO_2$ 燃料棒を軽水内で格子状に配列した集合体を三連クラスター状に並べ、クラスター間の距離、生体遮蔽の厚さおよび燃料クラスターと生体遮蔽との距離等をパラメータとした実験で、NUREG/CR-0796<sup>21)</sup> に報告されたものである。生体遮蔽としては鉛および劣化ウランが用いられた。図 2.16 に体系図を示す。また、表 2.18 には各種の臨界条件を示す。なお、燃料棒組成は図 2.17 に示す。

Table 2.1 Brief Description of Calculated Cases

| Case No. | Brief Description  | Number of Calculation |
|----------|--|-----------------------|
| 1        | A Critical Mixed Oxide ( $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$ ) Fuel Lattice Moderated by Borated Water                      | 12                    |
| 2        | Water Storage of Power Reactor Fuel in Close Proximity   | 21                    |
| 3        | An Array of Compacted, Low-Enriched, Uranium Oxide ( $\text{U}_3\text{O}_8$ ) Packages                             | 10                    |
| 4        | An Array of Beryllium Oxide Fuel Pins in Uranyl Nitrate Solution   | 18                    |
| 5        | Plutonium Nitrate Solution of High Fissile Content Poisoned with Gadolinium  | 15                    |
| 6        | A Critical Assembly of Mixed Oxide Fuel Pins Immersed in Water   | 5                     |
| 7        | An Array of Tin Cans Containing $\text{UO}_2$ -Alcohol Slurry  | 35                    |
| 8        | A Subcritical Assembly of Slightly Enriched Tubular Uranium Slugs  | 21                    |
| 9        | A Homogeneous System of $\text{U+Pu}$ Nitrate Solution Containing Gadolinium                                       | 40                    |
| 10       | Subcritical Clusters of 2.35wt % and 4.25wt % $^{235}\text{U}$ Rods in Water with Uranium or Lead Reflecting Walls | 20                    |

Table 2.2 Principal Results from PRCF Uniform Lattice Measurement Program

| Fuel Type   | Pitch<br>(in.) | Water/Fuel<br>Volume Ratio | Critical<br>No. of Rods | Boron<br>Concentration<br>(wppm B) | Excess Reactivity<br>Fully Reflected<br>(cents) | Boron Sensitivity<br>(cents/wppm B) |
|---|----------------|----------------------------|-------------------------|------------------------------------|---|-------------------------------------|
| UO <sub>2</sub> -2.35% <sup>235</sup> U                           | 0.615          | 1.196                      | 708<br>1201             | 0.9 ± 0.2<br>463.8 ± 1             | +6.9<br>+4.6                                    | 2.1                                 |
|   | 0.750          | 2.408                      | 383<br>1201             | 0.5 ± 0.2<br>568 ± 1               | +7.4<br>+4.6                                    | 3.1                                 |
|   | 0.870          | 3.687                      | 342<br>885              | 0.9 ± 0.2<br>285.8 ± 1             | +3.4<br>+5.6                                    | 5.2                                 |
| UO <sub>2</sub> -2 wt% PuO <sub>2</sub><br>(8% <sup>240</sup> Pu) | 0.700          | 1.195                      | 469<br>761              | 1.7 ± 0.1<br>680.9 ± 2             | +5.1<br>+1.8                                    | 2.8                                 |
|   | 0.870          | 2.527                      | 195<br>761              | 0.9 ± 0.2<br>1090.4 ± 2            | +6.8<br>+6.5                                    | 2.1                                 |
|   | 0.990          | 3.641                      | 160<br>689              | 1.6 ± 0.1<br>767.2 ± 2             | +22.3<br>+3.8                                   | 5.1                                 |

Table 2.3 Benchmark Core Loadings Adjusted to 145-cm and 150-cm Moderator Height

| Core | Ldg. diagr. Fig. No. | Spacing between arrays, pin pitches | No. of B <sub>4</sub> C pins | Moder boron conc, ppm | Reactivity (ρ) at 145-cm moder ht, ρ | Moder temp, C | Contribution to uncertainty on k <sub>eff</sub> , Δk/k |  |                              | k <sub>eff</sub> at 145-cm moder height | Combined std dev'n |
|------|----------------------|-------------------------------------|------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|---------------|--|--|------------------------------|---|--------------------|
|      |                      |                                     |                              |                       |                                      |               | From adj to 145 cm moder ht                            | From uncertainty in moderator boron conc | From uncert. in moder B conc |   |                    |
| I    | 12                   | --                                  | 0                            | 0                     | 2.5                                  | 21            | 0.0000   | 0.0005                                   | 0.0009                       | 1.0002                                  | ±0.0005            |
| II   | 13                   | 0                                   | 0                            | 1037                  | 1.6                                  | 18.5          | 0.0000   | 0.0005                                   | 0.0006                       | 1.0001                                  | ±0.0005            |
| III  | 14                   | 1                                   | 0                            | 764                   | 0.3                                  | 18            | 0.0000   | 0.0006                                   | 0.0007                       | 1.0000                                  | ±0.0006            |
| IV   | 15                   | 1                                   | 84                           | 0                     | -1.4                                 | 17            | 0.0000   | 0.0006                                   | 0.0007                       | 0.9999                                  | ±0.0006            |
| V    | 16                   | 2                                   | 64                           | 0                     | 0.5                                  | 17.5          | 0.0000   | 0.0007                                   | 0.0007                       | 1.0000                                  | ±0.0007            |
| VI   | 17                   | 2                                   | 64                           | 0                     | 128.6                                | 17.5          | 0.0010   | 0.0007                                   | 0.0007                       | 1.0097                                  | ±0.0012            |
| VII  | 18                   | 3                                   | 34                           | 0                     | -2.4                                 | 17.5          | 0.0000   | 0.0009                                   | 0.0007                       | 0.9998                                  | ±0.0009            |
| VIII | 19                   | 3                                   | 34                           | 0                     | 109.7                                | 17.5          | 0.0009   | 0.0009                                   | 0.0007                       | 1.0083                                  | ±0.0012            |
| IX   | 20                   | 4                                   | 0                            | 0                     | 40.3                                 | 17.5          | 0.0003   | 0.0009                                   | 0.0007                       | 1.0030                                  | ±0.0009            |

| Core  | Ldg. diagr. Fig. No. | Spacing between arrays, pin pitches | Type of isolation sheets | Moder B conc, ppm | Reactivity (ρ) at 150-cm moder ht, ρ | Moder temp, C | Contribution to uncertainty on k <sub>eff</sub> , Δk/k |   |                              | k <sub>eff</sub> at 150-cm moder height | Combined std dev'n |
|-------|----------------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------|--------------------------------------|---------------|--|---|------------------------------|---|--------------------|
|       |                      |                                     |                          |                   |                                      |               | From adj to 150 cm moder ht                            | From uncert. in avg bldg of isol sheets | From uncert. in moder B conc |   |                    |
| X     | 21                   | 1                                   | None                     | 143               | 1.9                                  | 24.5          | 0.0000   | --                                      | 0.0009                       | 1.0001                                  | ±0.0009            |
| XI    | 22                   | 1                                   | SS                       | 514               | 0.2                                  | 26            | 0.0000   | --                                      | 0.0006                       | 1.0000                                  | ±0.0006            |
| XII   | 23                   | 2                                   | SS                       | 247               | -0.4                                 | 26            | 0.0000   | --                                      | 0.0007                       | 1.0000                                  | ±0.0007            |
| XIII  | 22                   | 1                                   | 1.614X B/Al              | 15                | -0.6                                 | 20            | 0.0000   | 0.0008                                  | 0.0006                       | 1.0000                                  | ±0.0010            |
| XIV   | 22                   | 1                                   | 1.257X B/Al              | 92                | 1.9                                  | 18            | 0.0000   | 0.0008                                  | 0.0006                       | 1.0001                                  | ±0.0010            |
| XV    | 22                   | 1                                   | 0.401X B/Al              | 395               | -3.0                                 | 18            | 0.0000   | 0.0015                                  | 0.0006                       | 0.9998                                  | ±0.0016            |
| XVI   | 23                   | 2                                   | 0.401X B/Al              | 121               | 1.8                                  | 17.5          | 0.0000   | 0.0018                                  | 0.0007                       | 1.0001                                  | ±0.0019            |
| XVII  | 22                   | 1                                   | 0.242X B/Al              | 487               | 0.2                                  | 17.5          | 0.0000   | 0.0008                                  | 0.0006                       | 1.0000                                  | ±0.0010            |
| XVIII | 23                   | 2                                   | 0.242X B/Al              | 197               | 2.1                                  | 18            | 0.0000   | 0.0009                                  | 0.0007                       | 1.0002                                  | ±0.0011            |
| XIX   | 22                   | 1                                   | 0.100X B/Al              | 634               | 2.2                                  | 17.5          | 0.0000   | 0.0008                                  | 0.0006                       | 1.0002                                  | ±0.0010            |
| XX    | 23                   | 2                                   | 0.100X B/Al              | 320               | 4.1                                  | 17.5          | 0.0000   | 0.0009                                  | 0.0007                       | 1.0003                                  | ±0.0011            |
| XXI   | 24                   | 3                                   | 0.100X B/Al              | 72                | -3.5                                 | 16.5          | 0.0000   | 0.0012                                  | 0.0009                       | 0.9997                                  | ±0.0015            |

Table 2.4 Principal Critical Parameters of Ten 5x5x5 Arrays of Damp ,  
Compacted , Low-Enriched Uranium Oxide

| TYPE OF DRIVER   | TOTAL DRIVER MASS (kg) | METAL DIAMETER OR SOLUTION HEIGHT <sup>a</sup> (mm) | CRITICAL CORE SEPARATION (mm) | PERIOD DATA           |                              |                       | REFLECTOR    | OXIDE WEIGHT (kg) | NUMBER OF CANS <sup>b</sup> |
|--|------------------------|---|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|--------------|-------------------|-----------------------------|
|  |                        |   |                               | Negative Period (sec) | Separation <sup>c</sup> (mm) | Positive Period (sec) |              |                   |                             |
| 93.12% Enriched Uranium Metal                            | 29.870                 | 0.0 (ID), 146.68(OD)                                | 12.60 ± 1.19                  | 1080                  | 12.69 ± 1.19                 | 468                   | 12.39 ± 1.19 | 1864.6            | 120 and 4(S)                |
|  | 29.870                 | 0.0 (ID), 146.68(OD)                                | 8.01 ± 1.67                   | 1716                  | 8.08 ± 1.67                  | 492                   | 7.74 ± 1.67  | 1864.6            |                             |
|  | 33.543                 | 40.02(ID), 153.32(OD)                               | 14.64 ± 2.26                  | 1134                  | 14.73 ± 2.26                 | 624                   | 14.50 ± 2.26 | 1864.6            |                             |
| High Concentration Solution (351.2 kg U/m <sup>3</sup> ) | 14.066                 | 105.47 (S), 106.22 (N)                              | 6.68 ± 1.79                   | 1218                  | 6.71 ± 1.79                  | 462                   | 6.60 ± 1.79  | 1824.9            | 119 and 2(S)                |
|  | 14.844                 | 111.30 (S), 112.10 (N)                              | 9.42 ± 3.01                   | 882                   | 9.50 ± 3.01                  | 510                   | 9.27 ± 3.01  | 1824.9            |                             |
|  | 16.143                 | 121.04 (S), 121.91 (N)                              | 9.04 ± 1.44                   | 486                   | 9.20 ± 1.44                  | 408                   | 8.85 ± 1.44  | 1824.9            |                             |
| Low Concentration Solution (86.4 kg U/m <sup>3</sup> )   | 12.446                 | 124.08 (S), 124.42 (N)                              | 8.64 ± 1.31                   | 930                   | 8.76 ± 1.31                  | 516                   | 8.41 ± 1.31  | 1824.9            | 119 and 2(S)                |
|  | 12.875                 | 128.28 (S), 128.74 (N)                              | 9.12 ± 1.42                   | 474                   | 9.33 ± 1.42                  | 744                   | 8.98 ± 1.42  | 1824.9            |                             |
|  | 13.001                 | 129.54 (S), 129.99 (N)                              | 11.17 ± 1.42                  | 492                   | 11.28 ± 1.42                 | 462                   | 11.05 ± 1.42 | 1824.9            |                             |
|  | 13.999                 | 139.46 (S), 139.99 (N)                              | 6.30 ± 1.66                   | 522                   | 6.41 ± 1.66                  | 498                   | 6.18 ± 1.66  | 1824.9            |                             |

<sup>a</sup>ID = inner diameter; OD = outer diameter; S = south; N = north.

<sup>b</sup>S = special oxide can.

<sup>c</sup>The ± is on the absolute value. The relative accuracy between the two period data points is ± 0.08 mm.

Table 2.5 Fuel pins from the EBOR elements

## Isotopic composition of uranium (wt %):

|                  |      |
|------------------|------|
| $^{234}\text{U}$ | 0.42 |
| $^{235}\text{U}$ | 62.4 |
| $^{236}\text{U}$ | 0.29 |
| $^{238}\text{U}$ | 36.9 |

## Fuel pellet:

|          |                      |
|----------|----------------------|
| Diameter | 0.327 in. (0.831 cm) |
| Height   | 0.427 in. (1.085 cm) |

Fuel length in tube: 76 in. (193 cm)

## Hastelloy X-280 cladding:

|                  |                      |
|------------------|----------------------|
| Outside diameter | 0.375 in. (0.952 cm) |
| Inside diameter  | 0.020 in. (0.051 cm) |

## Helix (on outer surface of clad):

|           |                      |
|-----------|----------------------|
| Width     | 0.662 in. (0.157 cm) |
| Thickness | 0.020 in. (0.051 cm) |
| Pitch     | 7.5 in. (19.05 cm)   |

## Fuel composition:

$\text{U}(62.4)\text{O}_2\text{-BeO}$  homogeneous ceramic

50.2 wt % uranium

43 wt % beryllium oxide

Minimum density: 94% of theoretical

$^{235}\text{U}$  (average per pin determined from transfer data for those elements used in experiments): 156.27 g

Be:  $^{235}\text{U}$  atomic ratio: 13

Table 2.6 Lattices of EBOR fuel pins in water

| Surface Separation <sup>a</sup><br>(cm) | Center Separation <sup>a</sup><br>(in.) | Center Separation <sup>a</sup><br>(cm) | Critical Number<br>of Pins | Critical Height Above Fuel<br>(cm) | Critical Mass<br>(kg of <sup>235</sup> U) | Lattice <sup>b</sup><br>Number |
|---|---|--|----------------------------|------------------------------------|---|--------------------------------|
| 0.102                                   | 0.040                                   | 1.054                                  | (380) <sup>c</sup>         | Subcritical                        | (59.37) <sup>c</sup>                      | 1                              |
| 0.290                                   | 0.114                                   | 1.242                                  | 222 <sup>d,e</sup>         | (15.2) <sup>d,e</sup>              | 34.68                                     | 2                              |
| 0.536                                   | 0.211                                   | 1.488                                  | 138                        | 30.8                               | 21.56                                     | 3                              |
| 0.790                                   | 0.311                                   | 1.742                                  | 102 <sup>f</sup>           | -21.3 <sup>f</sup>                 | 15.94                                     | 4                              |
| 1.046                                   | 0.412                                   | 1.999                                  | 85 <sup>d,g</sup>          | (15.2) <sup>d,g</sup>              | 13.28                                     | 5                              |
| 1.323                                   | 0.521                                   | 2.276                                  | 78 <sup>d,h</sup>          | (15.2) <sup>d,h</sup>              | 12.19                                     | 6                              |
| 1.300                                   | 0.512                                   | 2.253                                  | 77 <sup>f</sup>            | -3.9 <sup>f</sup>                  | 12.03                                     | 7                              |
| 1.554                                   | 0.612                                   | 2.507                                  | 75 <sup>d,i</sup>          | (15.2) <sup>d,i</sup>              | 11.72                                     | 8                              |
| 1.826                                   | 0.719                                   | 2.779                                  | 77 <sup>f</sup>            | -43.2 <sup>f</sup>                 | 12.03                                     | 7                              |
| 2.042                                   | 0.804                                   | 2.995                                  | 83 <sup>j</sup>            | -34.1 <sup>j</sup>                 | 12.97                                     | 9                              |
| 1.544 <sup>k</sup>                      | 0.608 <sup>k</sup>                      | 2.497 <sup>k</sup>                     | 96 <sup>f</sup>            | -10.4 <sup>f</sup>                 | 15.00                                     | 10                             |
| 0.297                                   | 0.117                                   | 1.250                                  | 75                         | -12.2 <sup>m</sup>                 | 11.72                                     | 11                             |

- a. The reported separation is derived from the average of about 10 measurements of the outside dimensions of each lattice; the random orientation of the helix with relation to the spacers resulted in an effective average separation within a lattice, which could differ from the actual spacing of a pin by as much as twice the helix thickness.
- b. See Table 3b for the actual lattice arrangement.
- c. This lattice was sufficiently subcritical to preclude extrapolation to critical; the number and mass of fuel pins are those actually assembled.
- d. The criticality of this lattice was postulated by bracketing the critical number of pins; one pin less than the number tabulated for the critical lattice resulted in subcriticality and one pin more produced criticality when the water height was below the top of the fuel.
- e. A lattice of 223 pins was critical when the water was -50.3 cm.
- f. This lattice was critical with the water level below the top of the fuel; removal of one pin resulted in subcriticality.
- g. A lattice of 86 pins was critical when the water was -60.8 cm.
- h. A lattice of 79 pins was critical when the water was -39 cm.
- i. A lattice of 76 pins was critical when the water was -61.3 cm.
- j. At this lattice spacing, 82 pins were slightly subcritical.
- k. The average surface separation was 0.608 in. (1.544 cm) between pins in the 16-pin direction and 0.624 in. (1.585 cm) in the 6-pin direction.
- m. The reactivity of this lattice with an effectively infinite top water reflector was 11 cents.

Table 2.7 Slab lattices of EBOR fuel pins in aqueous solutions

| Aqueous Moderator/Reflector Composition   | Concentration <sup>a</sup> of Solute (g/liter) | Number of Fuel Pins | Mass of <sup>235</sup> U in Pins (kg) | Excess Reactivity of Submerged Lattice (cents) | Lattice Arrangement <sup>c</sup> |
|---|--|---------------------|---------------------------------------|--|----------------------------------|
| Water   | --   | 99                  | 15.47                                 | 1  | 1                                |
| H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>  | 0.039  | 114<br>113          | 17.81<br>17.66                        | 12<br>0  | 2 <sup>d</sup><br>3              |
| H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>  | 0.190  | 133                 | 20.78                                 | 0  | 4                                |
| U(92.6)O <sub>2</sub> (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                                     | 3.68   | 83                  | 12.97                                 | 1  | 5                                |
| U(92.6)O <sub>2</sub> (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub><br>+ H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> | 3.68<br>0.315                                  | 133                 | 20.78                                 | 9  | 4                                |

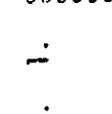
- a. The values of concentration refer to either boron or <sup>235</sup>U, as appropriate, in aqueous solution.
- b. The grid plates spacing the slab lattices were mounted in a 50.8-cm-diam (20-in.-diam) stainless steel cylinder to which the solutions were added. This cylinder was reflected by an effectively infinite thickness of water on the bottom and sides to its full height. The bottom of the fuel pins was 21 cm (6 in.) above the bottom of the cylinder. The center spacing of the holes in the grid plates into which the fuel pins were inserted was 2.48 cm (0.975 in.).
- c. 1.  2.  3.  4.  5. 
- d. Lattice Number 3 was produced by removing a corner pin from Lattice Number 2.

Table 2.8 Criticality of Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Poisoned Plutonium Solutions<sup>(a)</sup>

| Concentration                       |                       | Critical Values |              |                | GAMTEC-KENO<br>Computed<br>$k_{eff}$ |
|-------------------------------------|-----------------------|-----------------|--------------|----------------|--------------------------------------|
| Plutonium, <sup>(b)</sup><br>g Pu/l | Gadolinium,<br>g Gd/l | Height,<br>cm   | Volume,<br>l | Mass,<br>kg Pu |                                      |
| 116                                 | 0.00                  | 15.44           | 45.17        | 5.240          | 0.993                                |
| 116                                 | 0.48                  | 20.16           | 58.98        | 6.842          | 0.980                                |
| 116                                 | 0.96                  | 25.98           | 75.99        | 8.815          | 0.980                                |
| 116                                 | 1.42                  | 34.48           | 100.85       | 11.698         | 0.978                                |
| 116                                 | 1.92                  | 48.28           | 141.24       | 16.383         | 0.976                                |
| 116                                 | 2.38                  | 80.37           | 235.10       | 27.272         | 0.983                                |
| 363                                 | 4.40                  | 26.52           | 77.56        | 28.192         | 0.977                                |
| 363                                 | 5.28                  | 28.07           | 82.08        | 29.838         | 0.986                                |
| 363                                 | 6.28                  | 29.62           | 86.65        | 31.497         | 0.997                                |
| 363                                 | 8.21                  | 32.84           | 96.10        | 34.932         | 0.984                                |
| 363                                 | 9.88                  | 36.04           | 105.40       | 38.311         | 0.992                                |
| 363                                 | 12.85                 | 41.02           | 120.00       | 43.608         | 0.986                                |
| 363                                 | 15.55                 | 46.76           | 136.76       | 49.714         | 0.985                                |
| 363                                 | 18.4                  | 53.70           | 157.05       | 57.089         | 0.977                                |
| 363                                 | 20.25                 | 59.36           | 173.63       | 63.113         | 0.985                                |

a. 24-in. diameter, water reflected, cylindrical vessel

b. Chemical analysis - 116 g Pu/l, 1.85M acid, 238.9 g NO<sub>3</sub>/l total, 1.2552 sp. gr.

- 363 g Pu/l, 4.1M acid, 634.1 g NO<sub>3</sub>/l total, 1.7010 sp. gr.

Isotopic analysis, wt% - <sup>238</sup>Pu = 0.044, <sup>239</sup>Pu = 90.677, <sup>240</sup>Pu = 8.379  
<sup>241</sup>Pu = 0.851, <sup>242</sup>Pu = 0.049

Table 2.9 Experimental Criticality Data Water  
Flooded Type 3.2 FTR Fuel Pins

| EXPERIMENT<br>REFERENCE<br>NUMBER | SQUARE<br>LATTICE<br>PITCH<br>(mm) | WATER-TO-FUEL<br>(VOL RATIO) | LATTICE<br>WIDTH<br>(FUEL PINS) | CRITICAL<br>NUMBER OF<br>FUEL PINS <sup>(a)</sup> |
|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|---|
| 003R                              | 7.696                              | 1.69                         | 36                              | 1037 ± 1  |
| 005                               | 9.677                              | 3.49                         | 28                              | 605 ± 1   |
| 001                               | 12.446                             | 6.68                         | 18                              | 279 ± 0.6   |
| 004                               | 15.392                             | 10.96                        | 18                              | 205 ± 0.5   |
| 006                               | 19.355                             | 18.14                        | 14                              | 162 ± 0.5   |

(a) INCLUDES 65 TYPE 3.1 FTR FUEL PINS ON A 15.392 mm LATTICE PITCH POSITIONED ON EITHER SIDE (36 ON ONE SIDE AND 29 ON THE OTHER) OF A 27 x 36 FUEL PIN ARRAY OF TYPE 3.2 FTR FUEL PINS AT A 7.696 mm SQUARE LATTICE PITCH.

Table 2.10 Description of Fissile Units of U(9315)O<sub>2</sub>

|   | Container Type     |                    |                    |                    |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|   | I                  | II                 | III                | IV                 |
| <b>Container</b>  |                    |                    |                    |                    |
| Number of containers  | 196                | 18                 | 9                  | 9                  |
| Inside radius, cm   | 3.735              | 7.65               | 6.76               | 6.76               |
| Inside height, cm   | 11.59              | 21.76              | 25.18              | 25.18 <sup>a</sup> |
| Wall thickness, cm  | 0.055              | 0.03               | 0.03 <sup>a</sup>  | 0.03 <sup>a</sup>  |
| Average weight, g   | 128                | 360                | 341                | 341                |
| <b>UO<sub>2</sub></b>   |                    |                    |                    |                    |
| Height, cm  | 4.48 <sup>b</sup>  | 19.76 <sup>c</sup> | 17.87 <sup>d</sup> | 17.87 <sup>d</sup> |
| Density, g/cm <sup>3</sup>  | 2.144 <sup>b</sup> | 5.505 <sup>e</sup> | 6.628              | 6.628              |
| Mass, g   | 421                | 20,000             | 17,000             | 17,000             |
| Uranium Analysis,<br>g of U/g of UO <sub>2</sub>                                | 0.8754             | 0.8780             | 0.8780             | 0.8780             |
| <b>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O - 5% H<sub>2</sub>O in UO<sub>2</sub> Region</b> |                    |                    |                    |                    |
| Density, g/cm <sup>3</sup>  |                    |                    | 0.3458             | 0.3458             |
| Mass, g   |                    |                    | 711.5              | 711.5              |
| H/ <sup>235</sup> U Atom Ratio  |                    |                    | 1.556              | 1.556              |
| <b>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O 5% H<sub>2</sub>O Layer Above Oxide</b>          |                    |                    |                    |                    |
| Height, cm  |                    |                    | 3.14 <sup>d</sup>  | 0.53 <sup>d</sup>  |
| Density, g/cm <sup>3</sup>  |                    |                    | 0.8020             | 0.8020             |
| Mass, g   |                    |                    | 361.5              | 61.5               |
| Total Alcohol Mass, g   |                    |                    | 1,073              | 773                |

- The thickness of the top was increased to 0.05 cm to allow for extra steel in the friction closure lid.
- Height variations of  $\pm 20\%$  were measured, in 9 cans. The density is also uncertain by  $\pm 20\%$ . The dimensions and density result in the mass of 421 g of oxide.
- The container was vibrated until 20,000 g filled it within 2 cm of the top prior to sealing the rolled edge lid closure. The height was not measured accurately.
- The height of the liquid layer and the UO<sub>2</sub> was carefully measured at the conclusion of the experimental program 15 days after filling. The final two experiments with Type IV containers were done following removal of 300 g of alcohol.
- The density of oxide becomes 4.999 g/cm<sup>3</sup> if the oxide completely fills the container. The calculations of  $k_{eff}$  described in Table 2 for arrays of this container use this density value. See discussion in text.

Table 2.1.1 Description of Cells and Experimental and Calculated Multiplication Factors for U(93)O<sub>2</sub> Moderated and Unmoderated Critical Experiments.

| Experiment Number | Array Size             | Cell Description <sup>a</sup>  |          |         |   |         | k(exp)        | Multiplication Factor k(calc) | Δk     |
|-------------------|------------------------|--|----------|---------|---|---------|---------------|-------------------------------|--------|
|                   |                        | Material   | Geometry | R ± X   | Dimensions, cm ± Y                          | - Z     |               |                               |        |
| 1                 | 7 x 7 x 4              | UO <sub>2</sub>  | 3.735    | --      | 421 g Units of U(93)O <sub>2</sub> , Type 1 |         | 1.0167        | 1.014 ± 0.005                 | 0.003  |
|                   |                        | Void   | 3.735    | --      | + 4.535                                     | + 0.055 |               |                               |        |
|                   |                        | Steel  | 3.790    | --      | + 11.645                                    | + 0.055 |               |                               |        |
|                   |                        | Void   | --       | --      | + 11.70                                     | 0.0     |               |                               |        |
| 2                 | 7 x 7 x 4              | C <sub>5</sub> O <sub>2</sub> H <sub>8</sub>   | --       | + 4.025 | + 11.71                                     | 0.0     | 1.0012        | 0.992 ± 0.005                 | 0.009  |
|                   |                        | Cuboid   | --       | + 5.195 | + 14.05                                     | 0.0     |               |                               |        |
|                   |                        | Exp. 1 with 18 units removed from top layer  | --       | --      | --  | --      |               |                               |        |
| 3                 | 7 x 7 x 4              | UO <sub>2</sub> <sup>b</sup>   | --       | + 3.639 | + 0.055                                     | --      | 0.988 ± 0.005 |                               |        |
| 4                 | 7 x 7 x 4              | UO <sub>2</sub> <sup>b</sup>   | --       | + 5.431 | + 0.055                                     | --      | 1.056 ± 0.005 |                               |        |
| 5                 | 4 x 4 x 1              | UO <sub>2</sub>  | 7.65     | --      | 20 kg Units of U(93)O <sub>2</sub> , Type 2 |         | 1.0094        | 1.015 ± 0.005                 | -0.006 |
|                   |                        | Steel  | 7.68     | --      | + 10.88                                     | - 10.88 |               |                               |        |
|                   |                        | Void   | --       | + 7.85  | + 7.85                                      | - 11.15 |               |                               |        |
| 6                 | 3 x 2 x 2              | See No. 5 for Cell Description   | --       | + 9.08  | + 11.15                                     | - 11.15 | 0.9968        | 1.003 ± 0.005                 | -0.006 |
| 7                 | 3 x 3 x 2              | Void   | --       | + 9.08  | + 11.15                                     | - 11.15 | 1.0014        | 1.002 ± 0.005                 | 0.0    |
| 8                 | 3 x 3 x 2              | Void   | --       | + 10.22 | + 11.15                                     | - 11.15 | 1.0001        | 1.005 ± 0.006                 | -0.005 |
|                   |                        | C <sub>5</sub> O <sub>2</sub> H <sub>8</sub> <sup>c</sup>                                    | --       | + 10.22 | + 1.18                                      | - 1.18  |               |                               |        |
|                   |                        | Cuboid   | --       | + 10.22 | + 1.18                                      | - 1.18  |               |                               |        |
| 9                 | 3 x 3 x 2              | C <sub>5</sub> O <sub>2</sub> H <sub>8</sub> <sup>c</sup>                                    | --       | + 10.22 | + 1.81                                      | - 1.81  | 1.0137        | 1.003 ± 0.005                 | 0.011  |
|                   |                        | Cuboid   | --       | + 10.22 | + 1.81                                      | - 1.81  |               |                               |        |
| 10                | 3 x 3 x 2              | One corner unit removed from No. 9   | --       | --      | --  | --      | 0.9996        | 0.986 ± 0.005                 | 0.008  |
| 11                | 3 x 3 x 2              | C <sub>5</sub> O <sub>2</sub> H <sub>8</sub> <sup>c</sup>                                    | --       | + 10.22 | + 2.41                                      | - 2.41  | 1.0129        | 1.011 ± 0.005                 | 0.002  |
|                   |                        | Cuboid   | --       | + 10.22 | + 2.41                                      | - 2.41  |               |                               |        |
| 12                | 3 x 3 x 2              | One corner unit removed from No. 11  | --       | --      | --  | --      | 0.9989        | 0.989 ± 0.005                 | 0.001  |
| 13                | 3 x 3 x 2              | C <sub>5</sub> O <sub>2</sub> H <sub>8</sub> <sup>c</sup>                                    | --       | + 10.22 | + 3.04                                      | - 3.04  | 1.0049        | 1.004 ± 0.005                 | 0.001  |
|                   |                        | Cuboid   | --       | + 10.22 | + 3.04                                      | - 3.04  |               |                               |        |
| 14                | 3 x 3 x 2 <sup>d</sup> | Void   | --       | + 10.27 | + 11.15                                     | - 11.15 | 1.010         | 1.018 ± 0.005                 | -0.008 |
|                   |                        | Cuboid   | --       | + 10.27 | + 11.15                                     | - 11.15 |               |                               |        |
|                   |                        | Three units removed from Top Edge  | --       | --      | --  | --      |               |                               |        |
| 15                | 3 x 3 x 2 <sup>d</sup> | Three units removed from Top Edge  | --       | --      | --  | --      | 1.0018        | 1.017 ± 0.005                 | -0.015 |
|                   |                        | Three units removed from Top Edge, 2 from Opposite Corners, and 1 from the middle of an Edge | --       | --      | --  | --      |               |                               |        |
| 17                | 3 x 3 x 2 <sup>f</sup> | Void   | --       | + 10.27 | + 11.15                                     | - 11.15 | 1.0012        | 1.002 ± 0.005 <sup>g</sup>    | -0.001 |
|                   |                        | C <sub>5</sub> O <sub>2</sub> H <sub>8</sub>   | --       | + 12.70 | + 11.15                                     | - 15.97 |               |                               |        |
|                   |                        | Void   | --       | + 12.70 | + 12.70                                     | - 15.97 |               |                               |        |

Table 2.11 (cont'd)

| Experiment Number | Array Size | Cell Description <sup>a</sup>                    |          |      |                |         | k(exp) | Multiplication Factor k(calc) | Δk            |       |
|-------------------|------------|--|----------|------|----------------|---------|--------|-------------------------------|---------------|-------|
|                   |            | Material   | Geometry | R    | Dimensions, cm |         |        |                               |               |       |
|                   |            |  |          | ± X  | ± Y            | ± Z     |        |                               |               |       |
| 18                | 3 x 3 x 2  | Void   | Cuboid   | --   | ±10.27         | ±11.15  | 1.009  | 1.007 ± 0.005                 | 0.002         |       |
|                   |            | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>                    | Cuboid   | --   | ±12.70         | ±11.15  |        |                               |               |       |
|                   |            | Void   | Cuboid   | --   | ±12.70         | ±18.77  |        |                               |               |       |
| 19                | 3 x 3 x 2  | Void <sup>h</sup>                                | Cuboid   | --   | ±15.30         | ±11.15  | 1.0054 | 1.006 ± 0.004                 | -0.001        |       |
|                   |            |  |          |      |                |         |        |                               |               |       |
| 20                | 2 x 2 x 1  | UO <sub>2</sub> -C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O | Cylinder | 6.76 | --             | + 5.27  | 1.0065 | 0.999 ± 0.004                 | 0.007         |       |
|                   |            | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O                  | Cylinder | 6.76 | --             | + 8.41  |        |                               |               |       |
|                   |            | Void   | Cylinder | 6.76 | --             | +12.98  |        |                               |               |       |
|                   |            | Steel  | Cylinder | 6.79 | --             | +12.63  |        |                               |               |       |
|                   |            | Void   | Cuboid   | --   | ± 6.985        | ± 6.985 | ±12.78 |                               |               |       |
|                   |            | Void   | Cuboid   | --   | ± 7.025        | ± 7.025 | ±12.78 | 1.0031                        | 1.000 ± 0.004 | 0.003 |
|                   |            | Void   | Cuboid   | --   | ± 7.064        | ± 7.064 | ±12.78 | 1.0018                        | 0.996 ± 0.004 | 0.006 |
| 21                | 2 x 2 x 1  | Void   | Cuboid   | --   | ± 7.620        | ± 7.620 | 1.0146 | 1.019 ± 0.004                 | -0.004        |       |
|                   |            | Void   | Cuboid   | --   | ± 7.938        | ± 7.938 | 1.0025 | 0.997 ± 0.004                 | 0.006         |       |
| 22                | 2 x 3 x 1  | Void   | Cuboid   | --   | ± 8.017        | ± 8.017 | 0.9988 | 0.992 ± 0.004                 | 0.007         |       |
|                   |            | Void   | Cuboid   | --   | ± 8.493        | ± 8.493 | 1.0003 | 0.997 ± 0.004                 | 0.003         |       |
| 23                | 2 x 3 x 1  | Void   | Cuboid   | --   | ± 9.049        | ± 9.049 | 0.9996 | 0.999 ± 0.004                 | 0.001         |       |
|                   |            | Void   | Cuboid   | --   | ± 9.049        | ± 9.049 |        |                               |               |       |
| 24                | 2 x 3 x 1  | Void   | Cuboid   | --   | ± 8.573        | ± 8.573 | 1.0042 | 1.000 ± 0.004                 | 0.004         |       |
|                   |            | Void   | Cuboid   | --   | ± 8.652        | ± 8.652 | 0.9997 | 1.005 ± 0.004                 | -0.005        |       |
| 25                | 2 x 4 x 1  | Void   | Cuboid   | --   | ± 8.573        | ± 8.573 |        |                               |               |       |
|                   |            | Void   | Cuboid   | --   | ± 8.652        | ± 8.652 |        |                               |               |       |
| 26                | 3 x 3 x 1  | Void   | Cuboid   | --   | ± 8.573        | ± 8.573 |        |                               |               |       |
|                   |            | Void   | Cuboid   | --   | ± 8.652        | ± 8.652 |        |                               |               |       |
| 27                | 3 x 3 x 1  | Void   | Cuboid   | --   | ± 8.573        | ± 8.573 |        |                               |               |       |
|                   |            | Void   | Cuboid   | --   | ± 8.652        | ± 8.652 |        |                               |               |       |

a. The dimensions describe the surfaces of the material. Each successive region surrounds the previous region but the regions may have common boundaries. Unit descriptions in subsequent experiments are omitted and the cell size depends on the dimensions of the void region.

b. The mass of U<sub>2</sub> was constant; the density was changed. The cell size was unchanged.

c. Dimensions of plastic cell between top and bottom units.

d. Plastic thickness between top and bottom units was 4.82 cm and between adjacent units was 4.86 cm. The descriptions for Experiments 14 through 16 do not include this plastic.

e. When methyl methacrylate is substituted for polyethylene in 1-in.-thick layer of the reflector adjacent to the units, k(calc) = 1.078 ± 0.005.

f. PVC units were removed from opposite corners of the top layer.

g. In the experiment the plastic in the cells adjacent to the reflector was polyethylene instead of methyl methacrylate. For the 2 in. plastic substitution on the bottom, a correction of -0.012 and for the 1 in. on the sides -0.008 or a total of -0.020 has been applied to the calculated k.

h. Plastic thickness between top and bottom units was 2.41 cm and between adjacent units was 2.43 cm and this plastic is not included in the description of the cells in No. 19.

i. The alcohol content for Experiments 28 and 29 was decreased from 1073 to 773 g; the 3.14 cm layer above the oxide was reduced to 0.53 cm. In the cell description the +Z dimension for the alcohol region is changed from +8.41 to +5.80 cm.

Table 2.12 Experimental Results

| $V_{H_2O}/V_U$ | $\lambda, \text{ cm}$ | $B_M^2, \mu\text{B}$ | Array       | $k_2, \mu\text{B}$ | $K_{eff}$ |
|----------------|-----------------------|----------------------|-------------|--------------------|-----------|
| 2.777S         | 6.3                   | $2407 \pm 16$        | 4x5         | $3013 \pm 14$      | 0.913     |
|                |                       |                      | 5x5         | $2055 \pm 8$       | 0.935     |
|                |                       |                      | 6x5         | $1476 \pm 7$       | 0.950     |
|                |                       |                      | 6x6         | $801 \pm 4$        | 0.964     |
| 2.335S         | 6.5                   | $3146 \pm 46$        | 4x5         | $2734 \pm 30$      | 0.921     |
|                |                       |                      | 5x5         | $1702 \pm 17$      | 0.945     |
|                |                       |                      | 6x5         | $1087 \pm 7$       | 0.960     |
|                |                       |                      | 6x6         | $473 \pm 5$        | 0.976     |
| 2.001S         | 7.1                   | $3325 \pm 110$       | 4x5         | $2761 \pm 5$       | 0.921     |
|                |                       |                      | 5x5         | $1723 \pm 11$      | 0.945     |
|                |                       |                      | 6x5         | $1127 \pm 4$       | 0.960     |
|                |                       |                      | 6x6         | $467 \pm 3$        | 0.978     |
| 1.746S         | 7.7                   | $3499 \pm 63$        | 4x5         | $3015 \pm 29$      | 0.914     |
|                |                       |                      | 5x5         | $1990 \pm 27$      | 0.938     |
|                |                       |                      | 6x5         | $1374 \pm 24$      | 0.953     |
|                |                       |                      | 6x6         | $736 \pm 3$        | 0.969     |
| 1.881T         | 7.1                   | $3598 \pm 109$       | 5x5         | $1630 \pm 5$       | 0.947     |
|                |                       |                      | 6x5         | $1078 \pm 14$      | 0.961     |
|                |                       |                      | 19 assy hex | $2660 \pm 31$      | 0.923     |
|                |                       |                      | 31 " "      | $635 \pm 9$        | 0.971     |
|                |                       |                      | 37 " "      | $52 \pm 3$         | 0.986     |

Table 2.13 Criticality of Pins in Gadolinium-Poisoned Solution

| Experiment Number | Critical Height (cm) | Gadolinium (g/l) | $k_{eff}$ (KENO-ENDF/B-III) |
|-------------------|----------------------|------------------|-----------------------------|
| 115               | 19.205               | 0.02             | $1.021 \pm .008$            |
| 116               | 23.066               | 0.258            | $1.019 \pm .008$            |
| 117               | 28.227               | 0.515            | $1.010 \pm .007$            |
| 119               | 45.753               | 1.040            | $1.004 \pm .007$            |
| 120               | 64.506               | 1.280            | $1.000 \pm .006$            |
| 122               | 68.862               | 1.338            | $0.998 \pm .005$            |

Chemical Composition of Solution

|                  |                         |
|------------------|-------------------------|
| Pu               | 77.63 g/l               |
| U                | 180.0 g/l               |
| H <sup>+</sup>   | 3.4 g/l                 |
| NO <sub>3</sub>  | 38.4 g/l                |
| Fe               | 0.8 g/l                 |
| H <sub>2</sub> O | 81.7 g/l                |
| Sp. gr.          | 1.463 g/cm <sup>3</sup> |

Isotopic Composition of Pu and U in Solution (wt %)

| Plutonium |        | Uranium |        |
|-----------|--------|---------|--------|
| 239       | 93.846 | 234     | 0.006  |
| 240       | 5.715  | 235     | 0.665  |
| 241       | 0.367  | 236     | 0.012  |
| 242       | 0.057  | 238     | 99.317 |
| 238       | 0.015  |         |        |

Table 2.14 Gd-poisoned Homogeneous U+Pu Solution

| EXP. NO. | CRITICAL HEIGHT (cm) | Pu CONC. (g/L) | U CONC. (g/L) | ACID MOLARITY | TOTAL NO <sub>3</sub> (g/L) | SPECIFIC GRAVITY | Gd (g/L) | k <sub>eff</sub> (EGGKIT-KENO) |
|----------|----------------------|----------------|---------------|---------------|-----------------------------|------------------|----------|--------------------------------|
| 127      | 19.10                | 75.6           | 171.9         | 3.27          | 371.4                       | 1.446            | 0.042    | 1.001 ± 0.009                  |
| 128      | 21.93                | 76.3           | 173.4         | 3.26          | 377.0                       | 1.452            | 0.180    | 1.003 ± 0.008                  |
| 129      | 24.61                | 76.3           | 174.6         | 3.42          | 383.8                       | 1.450            | 0.288    | 1.011 ± 0.008                  |
| 130      | 29.47                | 76.6           | 174.7         | 3.07          | 375.8                       | 1.456            | 0.459    | 1.003 ± 0.008                  |
| 131      | 33.42                | 76.6           | 175.3         | 3.05          | 365.2                       | 1.454            | 0.581    | 1.002 ± 0.007                  |
| 132      | 37.15                | 77.0           | 175.9         | 3.14          | 370.8                       | 1.456            | 0.679    | 0.993 ± 0.007                  |
| 133      | 43.71                | 77.1           | 175.1         | 3.13          | 380.7                       | 1.456            | 0.800    | 1.002 ± 0.005                  |
| 134      | 53.12                | 77.3           | 177.7         | 3.24          | 376.4                       | 1.461            | 0.923    | 0.997 ± 0.005                  |
| 135      | 62.12                | 77.2           | 176.3         | 3.27          | 381.3                       | 1.455            | 1.01     | 0.987 ± 0.005                  |
| 136      | 75.32                | 77.3           | 176.8         | 3.25          | 383.8                       | 1.462            | 1.06     | 0.997 ± 0.005                  |

ISOTOPIC ANALYSIS - WT%

|                            |                           |
|----------------------------|---------------------------|
| <sup>238</sup> Pu - 0.012  | <sup>238</sup> U - 99.317 |
| <sup>239</sup> Pu - 93.789 | <sup>236</sup> U - 0.012  |
| <sup>240</sup> Pu - 5.766  | <sup>235</sup> U - 0.665  |
| <sup>241</sup> Pu - 0.371  | <sup>234</sup> U - 0.006  |
| <sup>242</sup> Pu - 0.062  |                           |

Table 2.15 Criticality of U-Pu Solutions in Raschig<sup>(1)</sup>-filled Tank

| Experiment No. | Wt% Pu in U+Pu | Pu Conc. g/l | (2)(3) U Conc. g/l | (4) Acid Molarity | Total NO <sub>3</sub> (g/l) | Specific Gravity | Critical Height cm. | k <sub>eff</sub> (KENO-EGGNIT-THERMOS) |
|----------------|----------------|--------------|--------------------|-------------------|-----------------------------|------------------|---------------------|--|
|                |                |              |                    |                   |                             |                  |                     |  |
| 106            | 38.6           | 92.3         | 147                | 4.2               | 433                         | 1.4691           | 57.56               | 1.016 ± .006                           |
| 107            | 36.4           | 89.9         | 157                | 4.1               | 425                         | 1.4778           | 63.98               | 1.018 ± .006                           |
| 108            | 33.2           | 86.1         | 173                | 3.9               | 418                         | 1.4820           | 70.46               | 1.013 ± .007                           |
| 109            | 31.6           | 83.7         | 181                | 3.8               | 414                         | 1.4850           | 76.07               | 1.008 ± .007                           |
| 110            | 30.1           | 82.4         | 191                | 3.6               | 409                         | 1.4995           | 79.78               | 1.005 ± .006                           |
| 111            | 30.5           | 81.7         | 186                | 3.5               | 394                         | 1.4856           | 79.93               | 1.006 ± .006                           |
| 112            | 30.4           | 80.8         | 185                | 3.5               | 391                         | 1.4812           | 81.51               | 1.006 ± .006                           |
| 113            | 30.4           | 79.4         | 182                | 3.4               | 384                         | 1.4731           | 85.70               | 1.006 ± .006                           |

(1) Description of Glass Raschig Rings

| Boron Nominal Wt% | Dimensions, in. I.D. O.D. Length | Density g/cm <sup>3</sup> | Chemical Composition, Wt% SiO <sub>2</sub> B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | Ring Displacement |
|-------------------|----------------------------------|---------------------------|---|-------------------|
| 0.5               | 1.25 1.50 1.70                   | 2.51                      | 91.55 1.5 2.25 0.05 3.50 1.15   | 19.3%             |

(2)  $\frac{G_d}{P_u} = 2.4 \times 10^{-4}$  by wt.  $\frac{Fe}{Pu} = 1.66 \times 10^{-2}$  by wt.

(3) Isotopic Analysis of Plutonium in the Fissile Solution (4) Isotopic Analysis of Uranium in the Fissile Solution

| Isotope           | Sample 692 (Exp. 106-109) |          | Sample 694 (Exp. 110) |          | Sample 697 (Exp. 111-114) |          |
|-------------------|---------------------------|----------|-----------------------|----------|---------------------------|----------|
|                   | Wt%                       | Wt% of U | Wt%                   | Wt% of U | Wt%                       | Wt% of U |
| <sup>239</sup> Pu | 93.951                    | 93.901   | 93.840                | 93.840   | 93.840                    | 93.840   |
| <sup>240</sup> Pu | 5.621                     | 5.663    | 5.710                 | 5.710    | 5.710                     | 5.710    |
| <sup>241</sup> Pu | 0.348                     | 0.362    | 0.376                 | 0.376    | 0.376                     | 0.376    |
| <sup>242</sup> Pu | 0.061                     | 0.059    | 0.058                 | 0.058    | 0.058                     | 0.058    |
| <sup>238</sup> Pu | 0.019                     | 0.015    | 0.016                 | 0.016    | 0.016                     | 0.016    |

Table 2.16 Effect of Boron and Gadolinium on Criticality of Heterogeneous Lattice Assembly

| Date    | Exp. No. | Critical Height (cm) | Pu Conc. (g/l) | U Conc. (g/l) | Acid Molarity | Total <sup>10</sup> B (g/l) | Specific Gravity | Gd (g/l) | B (g/l) | k <sub>eff</sub> |                     |
|---------|----------|----------------------|----------------|---------------|---------------|-----------------------------|------------------|----------|---------|------------------|---------------------|
|         |          |                      |                |               |               |                             |                  |          |         | TEMPEST          | EGGNIT-KENO THERMOS |
| 5-7-76  | 141R     | 21.20                | 84.5           | 182.1         | 1.75          | 296                         | 1.438            | 0.13     | 0.27    | 0.999 ± .010     | 1.020 ± .012        |
| 5-9-75  | 142      | 25.37                | 84.0           | 183.2         | 1.88          | 302                         | 1.442            | 0.235    | 0.6     | 0.994 ± .010     | 1.018 ± .008        |
| 5-13-75 | 143      | 30.49                | 82.7           | 180.6         | 2.01          | 308                         | 1.444            | 0.309    | 0.9     | 0.998 ± .007     | 1.003 ± .007        |
| 5-30-75 | 148      | 43.86                | 81.2           | 180.0         | 2.18          | 321                         | 1.447            | 0.424    | 1.35    | 0.992 ± .010     | 1.004 ± .006        |
| 6-3-75  | 149      | 51.97                | 81.0           | 180.4         | 2.09          | 316                         | 1.451            | 0.519    | 1.5     | 0.993 ± .007     | 1.000 ± .006        |
| 7-17-75 | 152      | 55.18                | 81.0           | 180.3         | 2.21          | 318                         | 1.452            | 0.537    | 1.548   | 0.982 ± .005     | 1.000 ± .007        |
| 7-18-75 | 153      | 65.42                | 80.5           | 180.5         | 2.24          | 321                         | 1.454            | 0.541    | 1.662   | 0.995 ± .006     | 1.008 ± .007        |

Table 2.17 Effect of Boron and Gadolinium on Criticality of Homogeneous Systems (U+Pu Solutions in 61 cm Diameter Water—Reflected Cylinder)

| Date    | Exp. No. | Critical Height (cm) | Pu Conc. (g/l) | U Conc. (g/l) | Acid Solubility | Total NO <sub>3</sub> (g/l) | Specific Gravity | Gd (g/l) | B (g/l) | k <sub>eff</sub> EGGHIT(TEMPEST)KENO |
|---------|----------|----------------------|----------------|---------------|-----------------|-----------------------------|------------------|----------|---------|--------------------------------------|
| 4-7-75  | 137R     | 18.13                | 85.0           | 182.5         | 1.55            | 320                         | 1.433            | 0.04     | 0.0     | 0.990 · .008                         |
| 4-9-75  | 138      | 18.65                | 84.9           | 182.2         | 1.61            | 311                         | 1.434            | 0.04     | 0.1     | 1.003 · .007                         |
| 4-11-75 | 139R     | 19.68                | 84.8           | 182.6         | 1.67            | 290                         | 1.433            | 0.04     | 0.3     | 0.992 · .006                         |
| 4-17-75 | 140      | 21.13                | 84.5           | 182.1         | 1.75            | 296                         | 1.438            | 0.128    | 0.27    | 1.008 · .006                         |
| 5-20-75 | 145      | 32.16                | 82.8           | 180.6         | 1.95            | 309                         | 1.443            | 0.293    | 0.9     | 1.007 · .005                         |
| 5-22-75 | 146      | 43.03                | 82.2           | 179.5         | 2.12            | 319                         | 1.446            | 0.388    | 1.2     | 1.003 · .005                         |
| 5-26-75 | 147      | 52.12                | 81.2           | 180.0         | 2.18            | 321                         | 1.447            | 0.424    | 1.35    | 0.988 · .004                         |
| 5-16-75 | 150      | 67.83                | 81.0           | 180.4         | 2.09            | 316                         | 1.451            | 0.519    | 1.5     | 0.994 · .004                         |
| 7-11-75 | 151      | 75.44                | 81.0           | 180.3         | 2.21            | 318                         | 1.452            | 0.537    | 1.54    | 0.992 · .004                         |

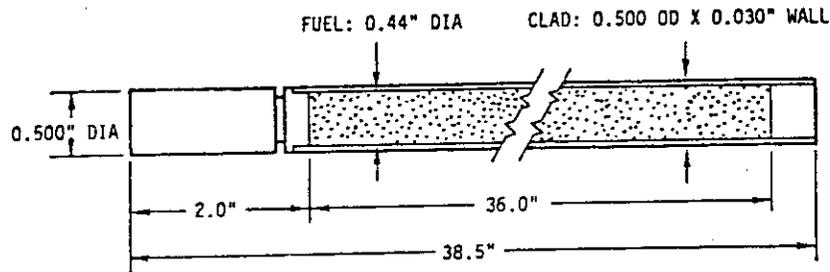
Table 2.18 Experimental Data on Clusters of 2.35 wt% and 4.29 wt% <sup>235</sup>U Enriched UO<sub>2</sub> Rods in Water With Depleted Uranium or Lead Reflecting Walls (a)

| DISTANCE BETWEEN REFLECTING WALLS AND FUEL CLUSTERS (b) (mm) | 2.35 wt% ENRICHED FUEL               |   |                     |                                      | 4.29 wt% ENRICHED FUEL                        |                     |  |  |
|--|--------------------------------------|---|---------------------|--------------------------------------|---|---------------------|--|--|
|  | FUEL CLUSTERS 20.32 mm SQ. PITCH (c) | CRITICAL SEPARATION BETWEEN FUEL CLUSTERS (d) |                     | FUEL CLUSTERS 25.40 mm SQ. PITCH (c) | CRITICAL SEPARATION BETWEEN FUEL CLUSTERS (d) |                     |  |  |
|  |                                      | URANIUM WALLS (e) (mm)                        | LEAD WALLS (f) (mm) |                                      | URANIUM WALLS (e) (mm)                        | LEAD WALLS (f) (mm) |  |  |
| 0  | 3-19x16                              | 118.3 ± 0.2                                   | 138.4 ± 0.1         | 3-13x8                               | 153.8 ± 0.1                                   | 206.2 ± 0.1         |  |  |
| 6.60 ± 1.02  | 3-19x16                              | -   | 137.2 ± 0.1         | -                                    | -   | 207.8 ± 0.2         |  |  |
| 13.21 ± 0.76   | 3-19x16                              | 139.3 ± 0.1                                   | -                   | -                                    | -   | 190.4 ± 0.2         |  |  |
| 19.56 ± 1.02   | 3-19x16                              | 141.1 ± 0.1                                   | -                   | 3-12x8                               | 153.2 ± 0.1 (h)                               | -                   |  |  |
| 26.16 ± 0.76   | 3-19x16                              | 137.0 ± 0.2                                   | 112.5 ± 0.8         | -                                    | -   | -                   |  |  |
| 39.12 ± 0.76   | -                                    | -   | -                   | 3-13x8                               | 180.5 ± 0.5                                   | -                   |  |  |
| 54.05 ± 1.02   | 3-19x16                              | 106.9 ± 0.2                                   | -                   | 3-13x8                               | 134.9 ± 0.2                                   | 103.0 ± 0.2         |  |  |
| 106.76 ± 1.52  | 3-19x16                              | 85.6 ± 0.2                                    | -                   | -                                    | -   | -                   |  |  |
| ∞  | 3-19x16                              | 83.1 ± 0.4                                    | 83.1 ± 0.4          | 3-13x8                               | 82.4 ± 0.3                                    | 82.4 ± 0.3          |  |  |
| ∞  | 3-20x16 (g)                          | 91.3 ± 0.2                                    | 91.3 ± 0.2          | -                                    | -   | -                   |  |  |

- (a) ERROR LIMITS SHOWN ARE ONE STANDARD DEVIATION
- (b) PERPENDICULAR DISTANCE BETWEEN THE CELL BOUNDARY OF THE FUEL CLUSTERS AND THE REFLECTING WALLS
- (c) NUMBER OF FUEL CLUSTERS, RODS LONG x RODS WIDE, ALIGNED IN A ROW
- (d) PERPENDICULAR DISTANCE BETWEEN THE CELL BOUNDARIES OF THE FUEL CLUSTERS
- (e) WALLS 76.5 ± 0.4 mm THICK
- (f) WALLS 102.0 ± 0.3 mm THICK
- (g) CRITICAL SEPARATIONS OF 91.3, 91.6, 91.5, AND 91.8 mm OBTAINED IN PREVIOUS EXPERIMENTS AT THIS LATTICE PITCH, NO PREVIOUS MEASUREMENTS WITH THREE 19x16 ROD CLUSTERS
- (h) A SINGLE FUEL CLUSTER, 3 RODS WIDE, WAS DETERMINED FROM EXPERIMENTS TO REQUIRE 101.5 ± 0.5 RODS FOR CRITICALITY

FUEL SPECIFICATIONS: 2.35% ENRICHED  $UO_2$   
 FUEL RODS

1. ROD DIMENSIONS



2. CLADDING: 6061 ALUMINUM TUBING SEAL WELDED WITH A LOWER END PLUG OF 5052-H32 ALUMINUM AND A TOP PLUG OF 1100 ALUMINUM.
3. TOTAL WEIGHT OF LOADED FUEL RODS: 917 gm (AVERAGE)

FUEL LOADING

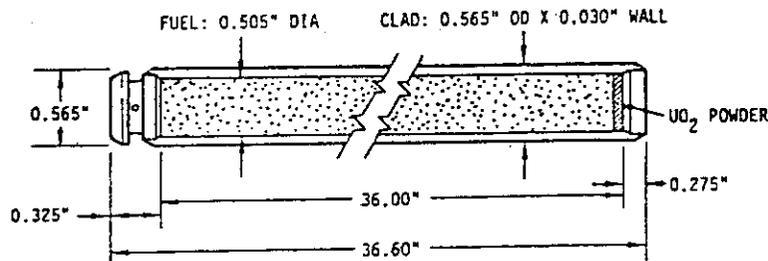
1. FUEL MIXTURE VIBRATIONALLY COMPACTED.
2. 825 gm OF  $UO_2$  POWDER/ROD, 726 gm OF U/ROD, 17.08 gm OF U-235/ROD.
3. ENRICHMENT -  $2.35 \pm 0.05$  w/o U-235.
4. FUEL DENSITY -  $9.20 \text{ gm/cm}^3$  (84% THEORETICAL DENSITY).

Fig.2.1  $UO_2$ -2.35%  $^{235}U$  Fuel Description

FUEL SPECIFICATIONS:  $UO_2$  - 2 WT%  $PuO_2$

FUEL RODS

1. ROD DIMENSIONS



2. CLADDING: ZIRCALOY-2 TUBING WITH PLUGS SEAL WELDED AT BOTH ENDS.
3. TOTAL WEIGHT OF LOADED FUEL RODS: 1340 gms (AVERAGE)

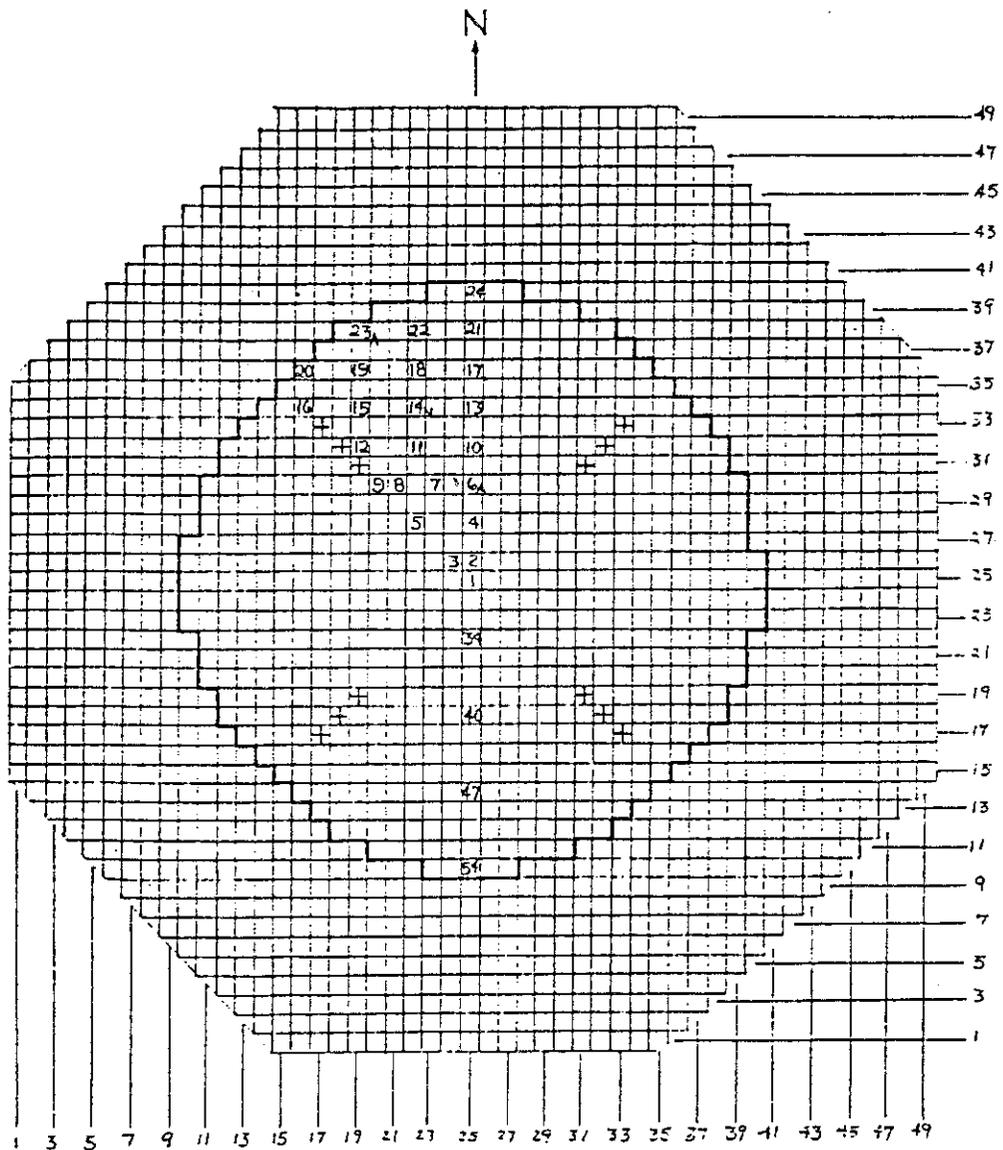
FUEL LOADINGS

1.  $PuO_2$  MIXED IN NATURAL  $UO_2$  AND VIBRATIONALLY COMPACTED.
2. 1128 gms OF  $UO_2$ - $PuO_2$  MIX/ROD.
3. CHEMICAL COMPOSITION WT%:  $Pu/PuO_2 = 88.1$   $U/UO_2 = 88.0$   $Pu/MIX = 1.760$ .
4.  $PuO_2$  IS 2.00 WT% OF TOTAL MIXTURE.
5. FUEL DENSITY -  $9.54 \text{ gm/cc}$  (~87% THEORETICAL DENSITY).
6.  $UO_2$  POWDER AT THE END OF FUEL COLUMN.
7. THE ISOTOPIC DISTRIBUTION OF PLUTONIUM

| 8% (NOMINAL) $^{240}Pu$ |            |
|-------------------------|------------|
| ATOM PERCENT            |            |
| 91.615                  | $^{239}Pu$ |
| 7.654                   | $^{240}Pu$ |
| 0.701                   | $^{241}Pu$ |
| 0.031                   | $^{242}Pu$ |

8. ANALYSIS DATE: JANUARY 1965
9. SEPARATIONS DATE: APRIL 1962
10.  $^{241}Am$  CONTENT: NOT KNOWN

Fig.2.2  $UO_2$  - 2wt%  $PuO_2$  (8%  $^{240}Pu$ ) Fuel Description



0.615-INCH  $UO_2$  CORE, UNBORATED, GAMMA SCAN IRRADIATION  
 Top Reflector thickness 6.0 inches. Moderator Temp. 21.90 °C  
 Excess Reactivity 6.88 cents. Boron concentration, < 1 wppm.  
 Number and Type of Fuel Rods in Core: Top Reflector thickness during  
 $UO_2$ -2.35%  $^{235}U$  708 Irradiation 6.0 inches.  
 A=Axial Scan D=Decay Rod  
 N=Normalization Rod  
 $\beta_{eff} = \underline{6.99} \times 10^{-3}$

Fig.2.3 Example of Fuel Pins Loading Pattern

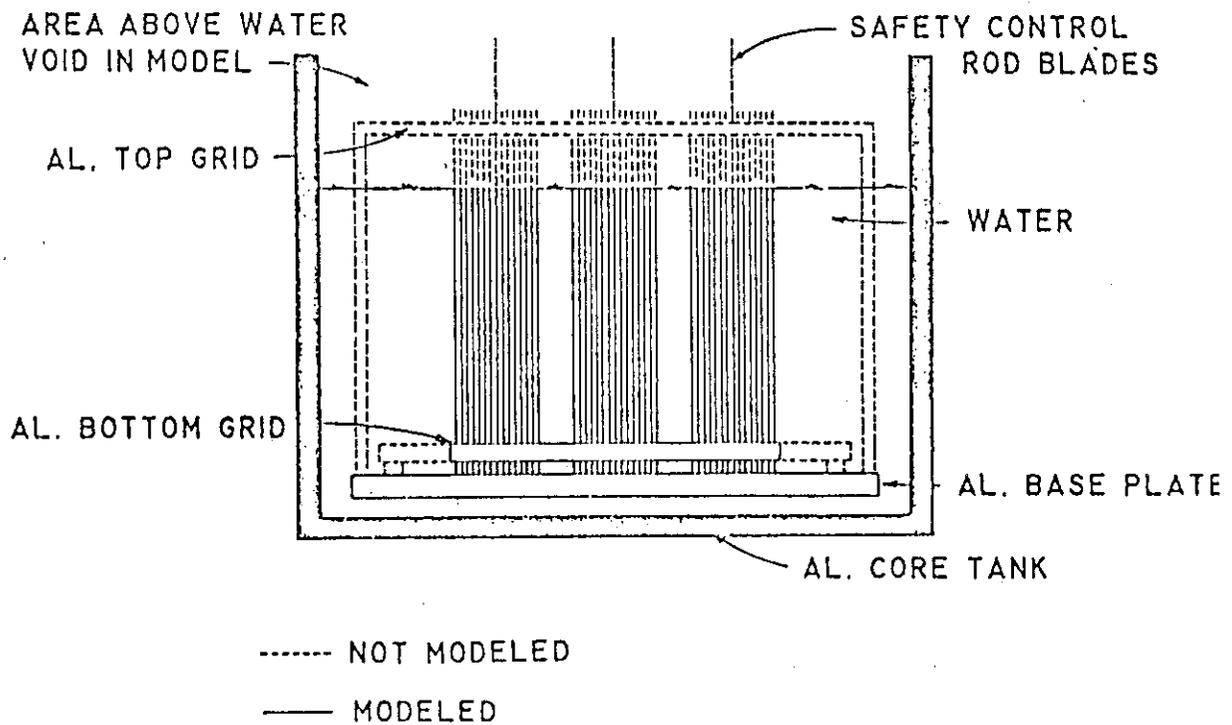


Fig.2.4 KENO Model of Critical Experiments

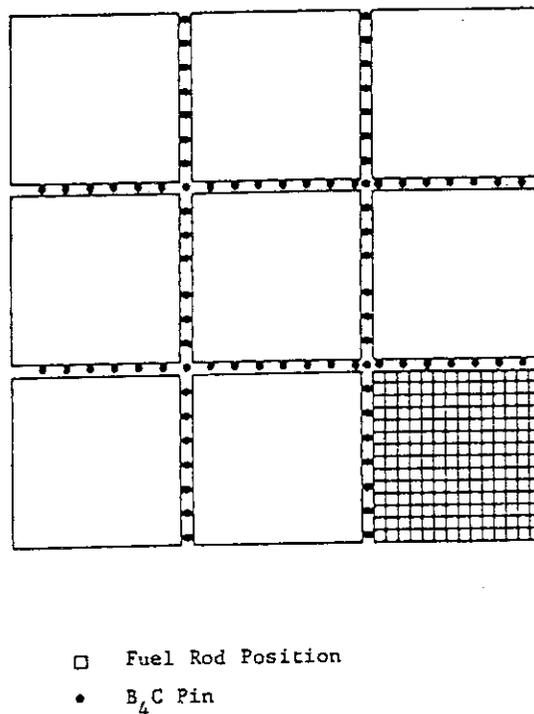


Fig.2.5 Example of Core Loading Diagram — Nine Arrays Separated by One Pin Pitch and 84  $B_4C$  Pins

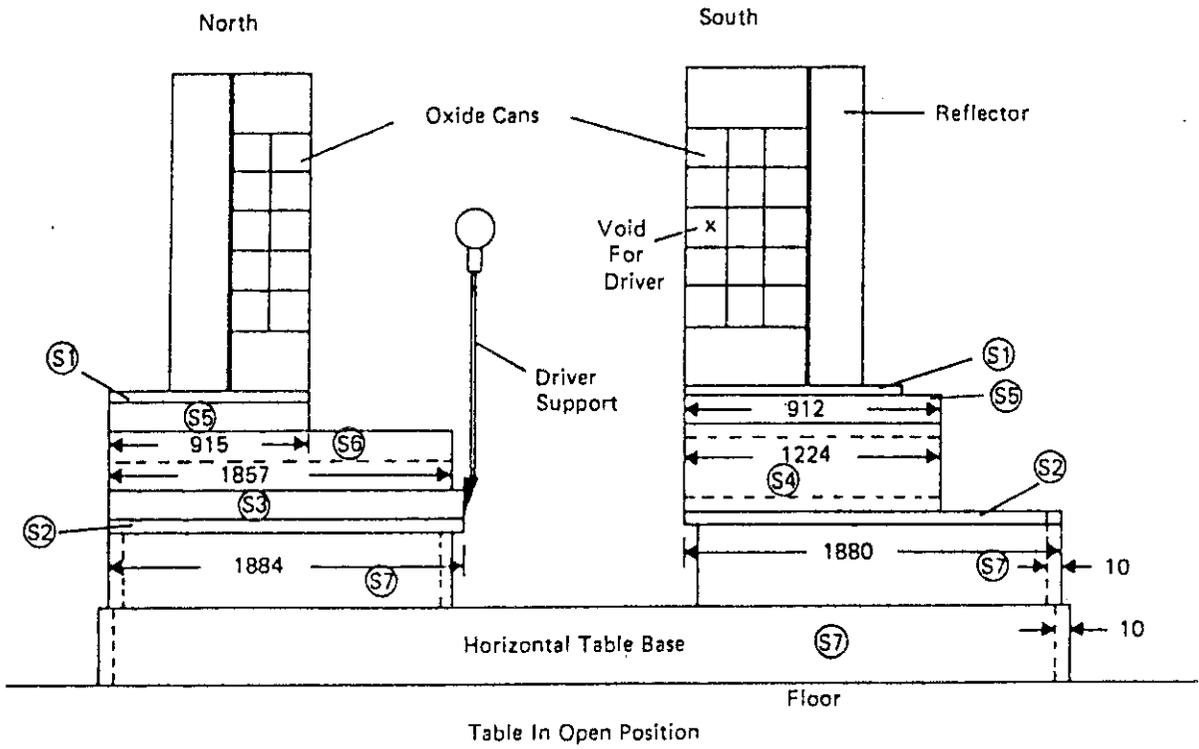


Fig.2.6 Critical Experimental Facility of  $U_3O_8$  Array

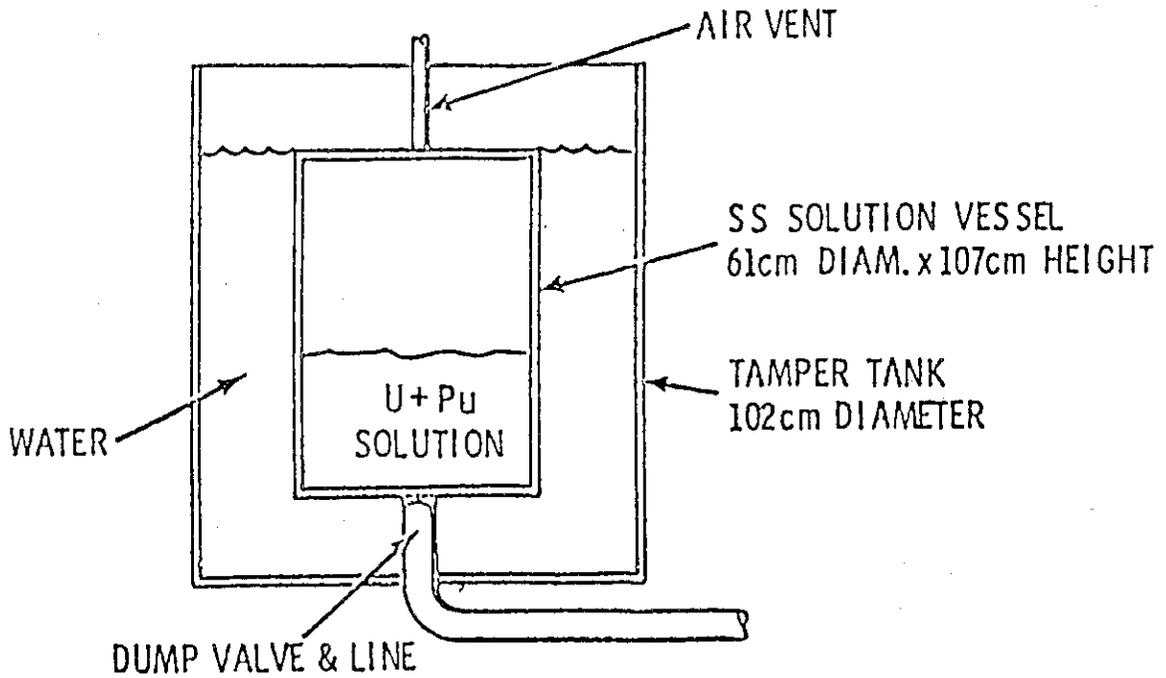
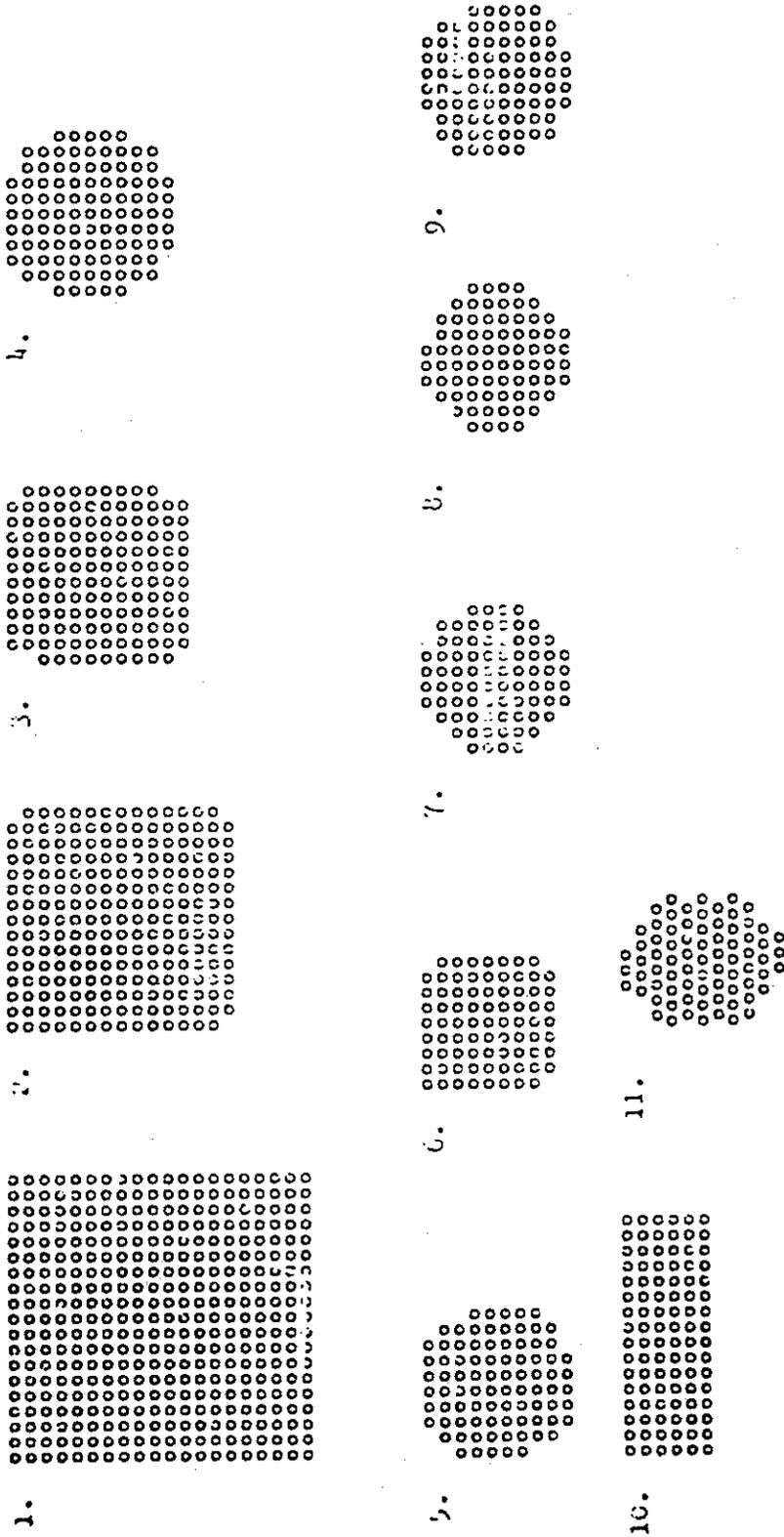
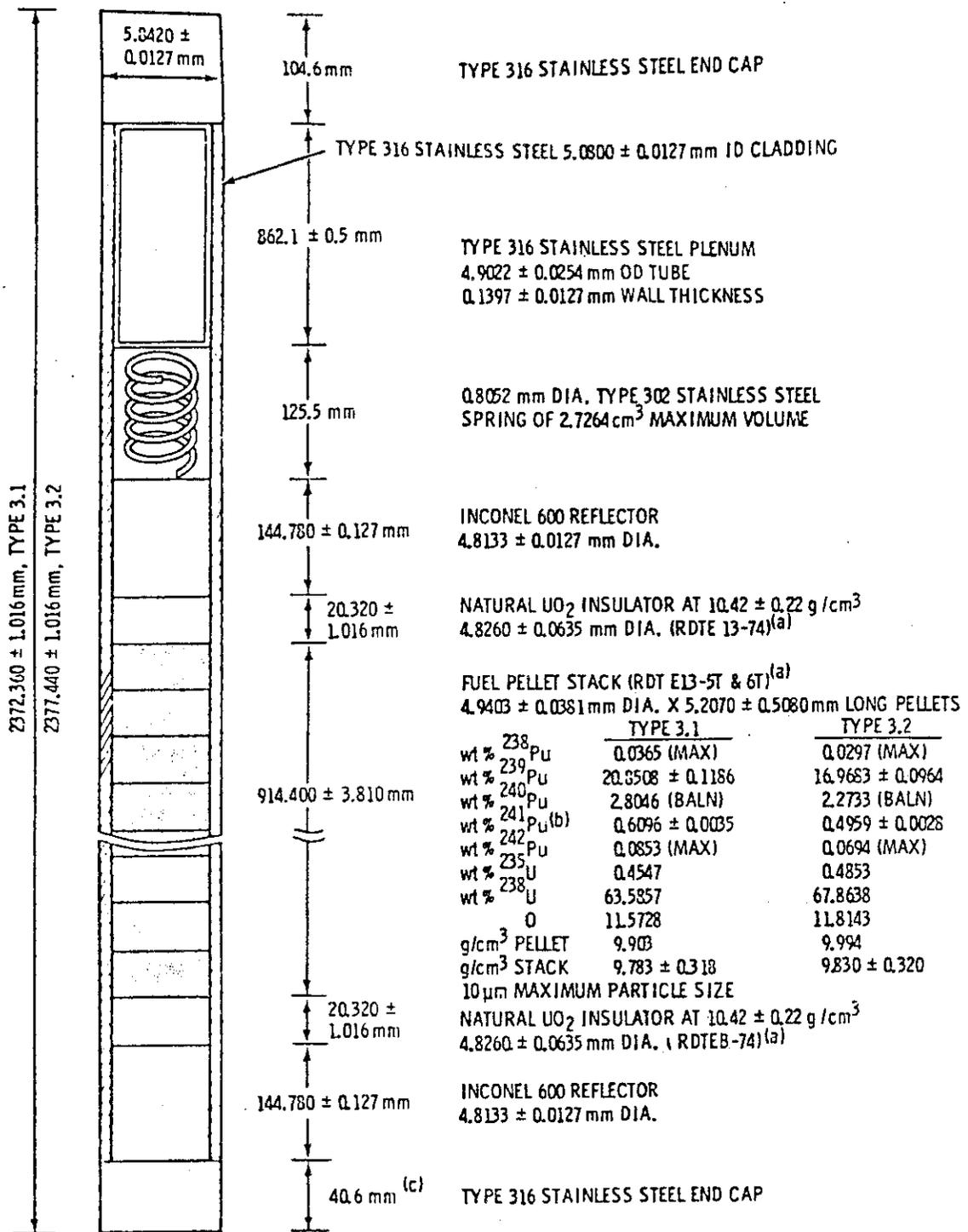


Fig. 2.8 Schematic Figure of Experimental Set up



There is no significance to the spacing between symbols designating fuel pins in these diagrams.

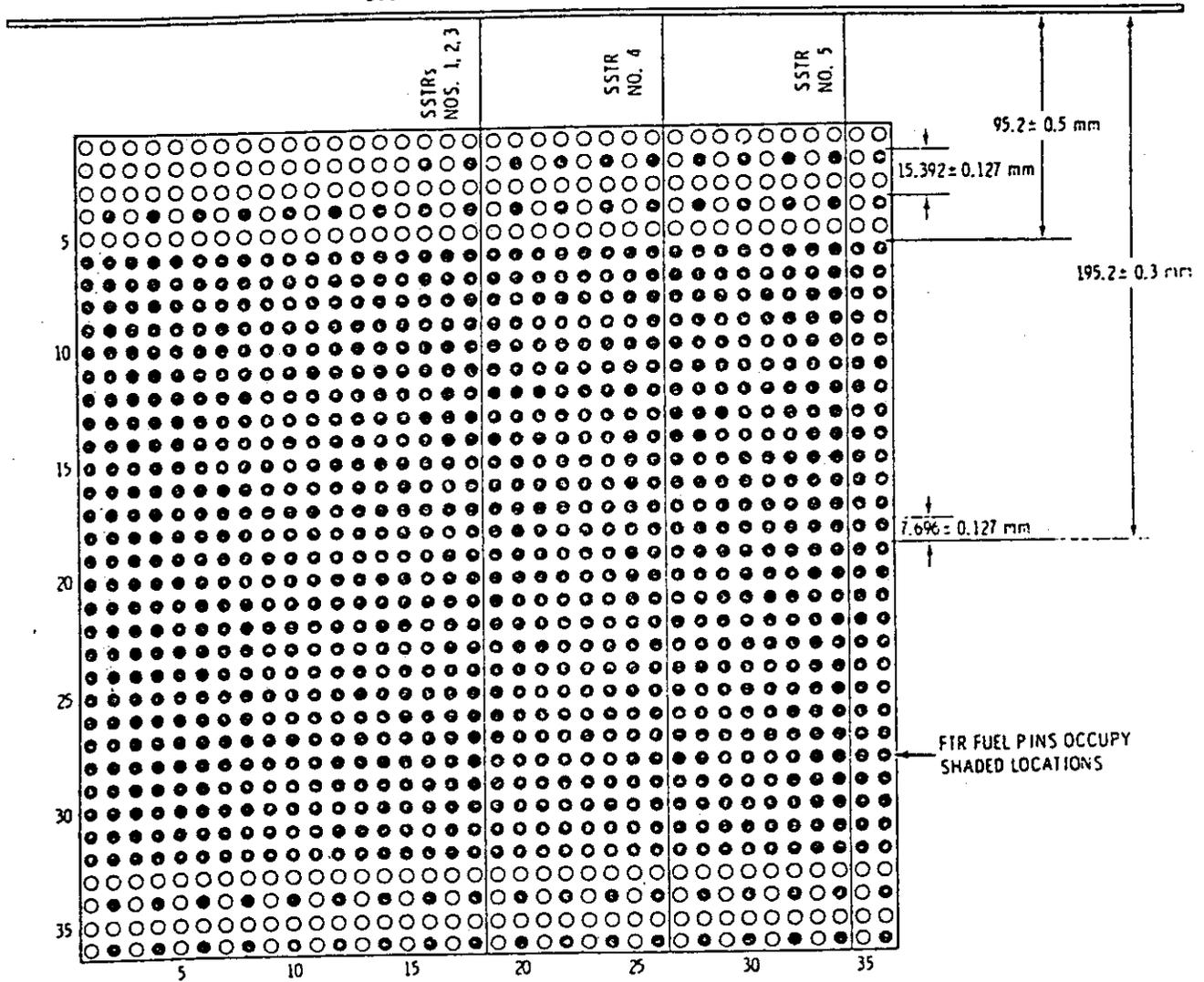
Fig.2.7 Lattices of EBOR (Experimental Beryllium Oxide Reactor) Fuel Pins in Water



- (a) REFERENCED DIVISION OF REACTOR DEVELOPMENT AND TECHNOLOGY STANDARD
- (b) <sup>241</sup>Am CONTENT OF TOTAL PLUTONIUM WAS MEASURED TO BE 0.13 wt% DURING APRIL AND MAY OF 1972
- (c) 35.6 mm FOR TYPE 3.1 FUEL PINS

Fig.2.9 Simplified Description of Fast Test Reactor Fuel Pin

SOLID STATE TRACK RECORDER REFERENCE BAR <sup>(a)</sup>



<sup>(a)</sup> ELEVATIONS OF THE SOLID STATE TRACK RECORDER (SSTR) REFERENCE BARS ARE  $1065.61 \pm 1.52$  mm AND  $862.41 \pm 1.59$  mm ABOVE THE BOTTOM OF THE FUEL PINS FOR SSTRs NO. 1 AND 2 RESPECTIVELY. THE REFERENCE BAR FOR SSTRs NOS. 3, 4 AND 5 IS AT AN ELEVATION OF  $659.21 \pm 2.0$  mm ABOVE THE BOTTOM OF THE FUEL PINS. SSTRs NOT IN ASSEMBLY DURING APPROACH TO CRITICAL

Fig.2.10 Layout of Critical Experiment(Experiment No. 003R)

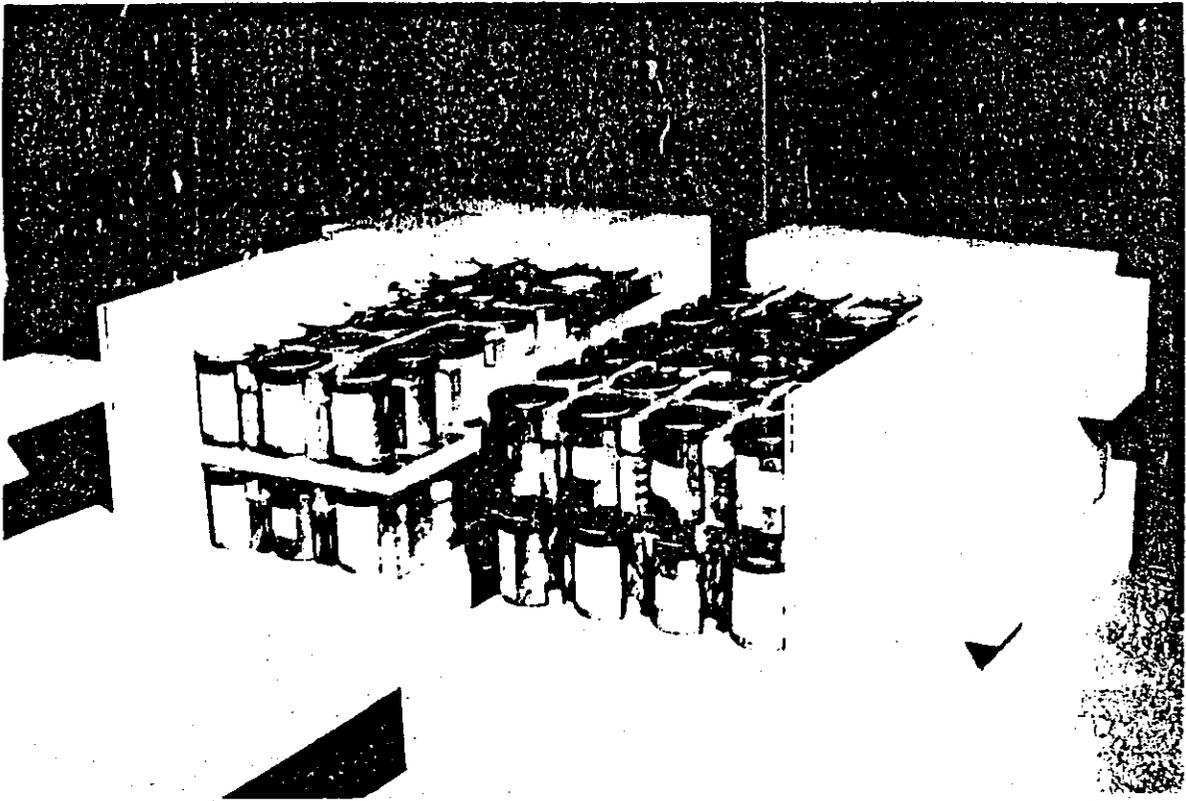
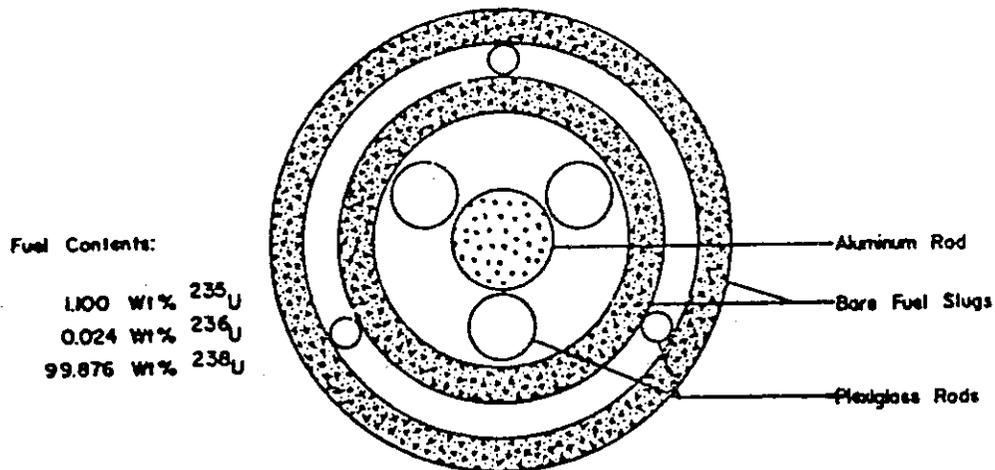


Fig.2.11 Photograph of a 7x7x2 Array of 42 1g Fissile Units of UO<sub>2</sub>



ASSEMBLY GEOMETRY

Fig.2.12 Assembly Geometry

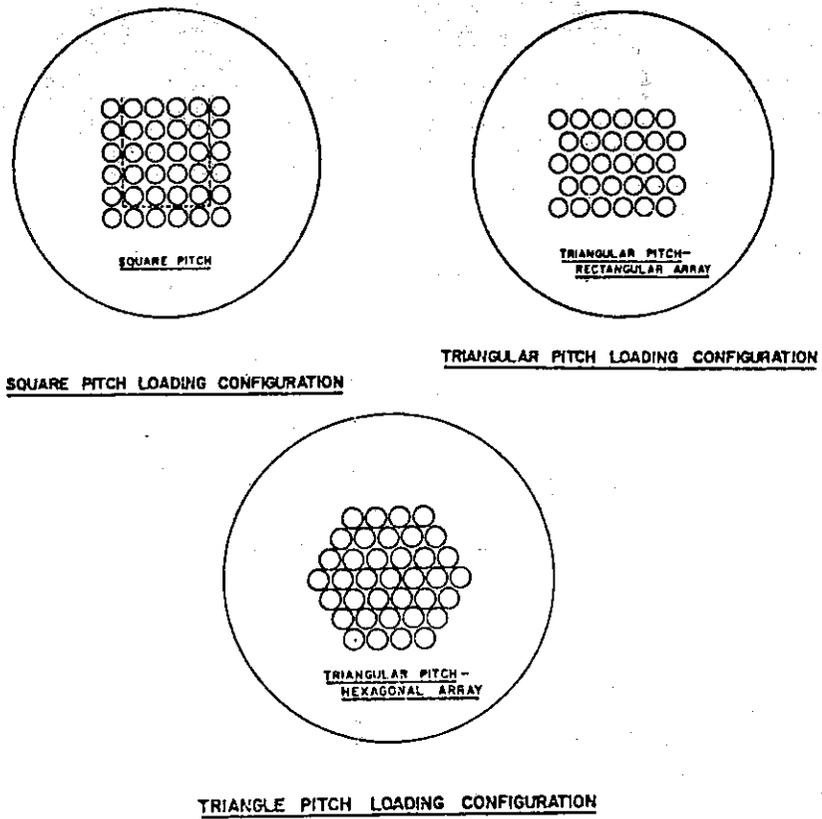


Fig.2.13 Loading Configuration

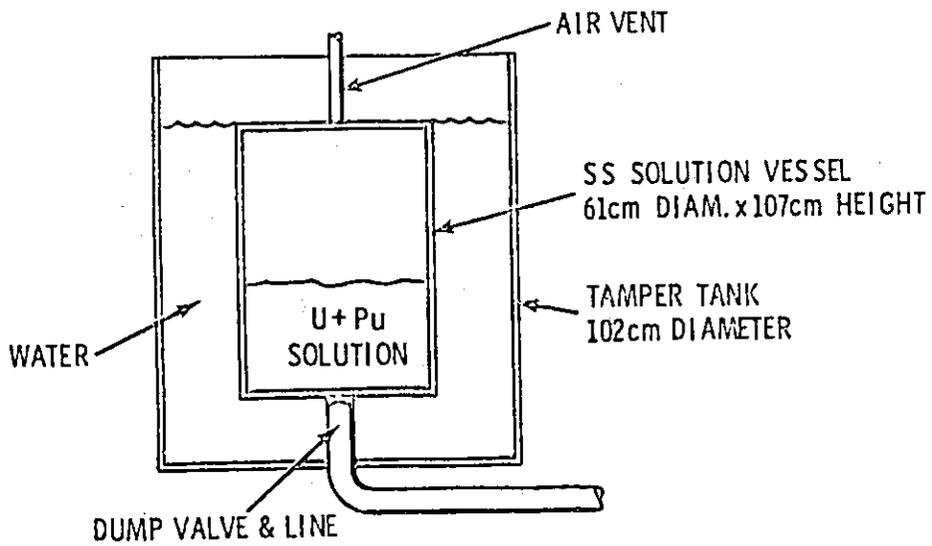


Fig. 2.14 Schematic Figure of Experimental Set Up

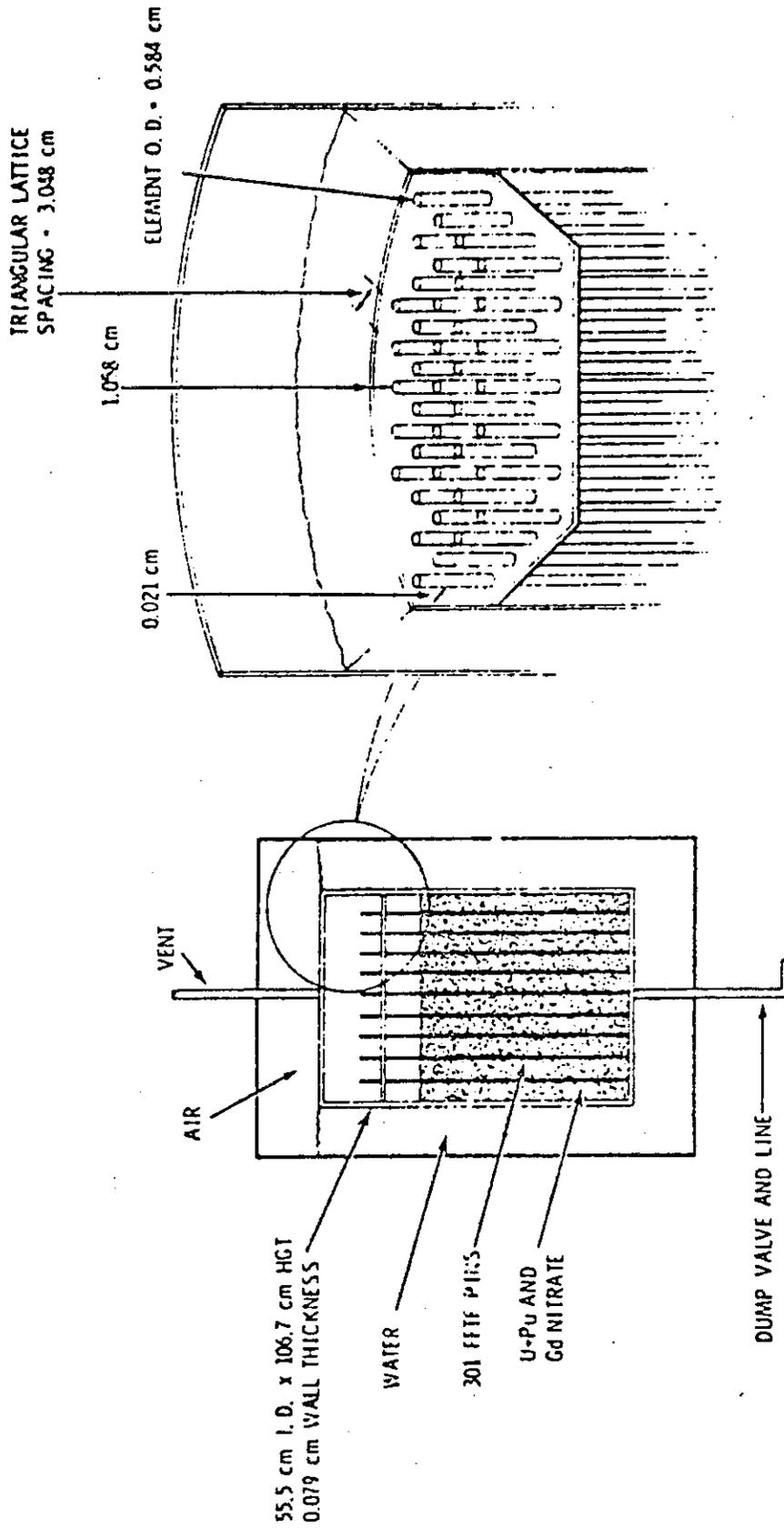


Fig. 2.15  $UO_2$ -PuO<sub>2</sub> Fuel Pins in Fissile Solution Containing Gadolinium

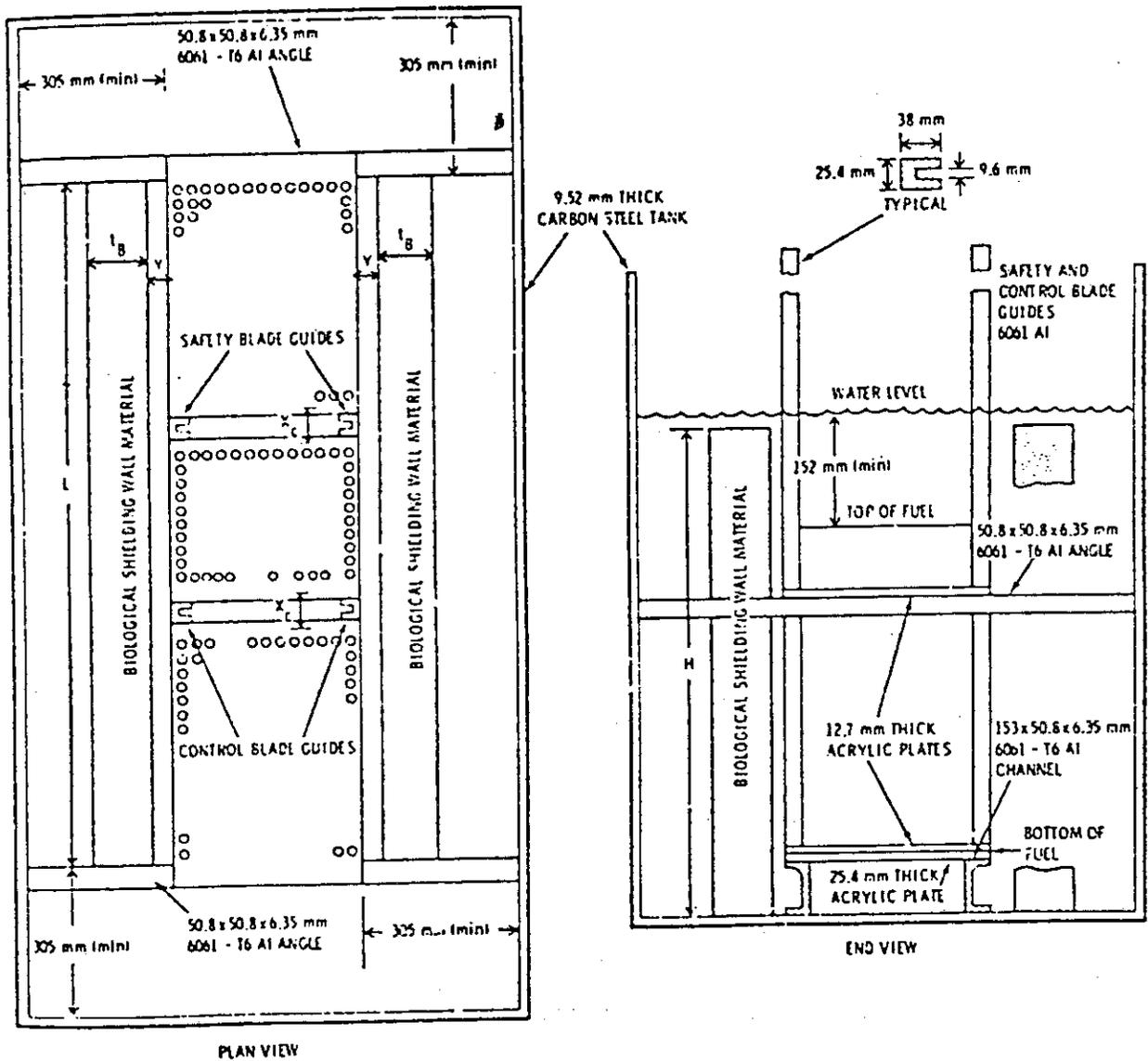
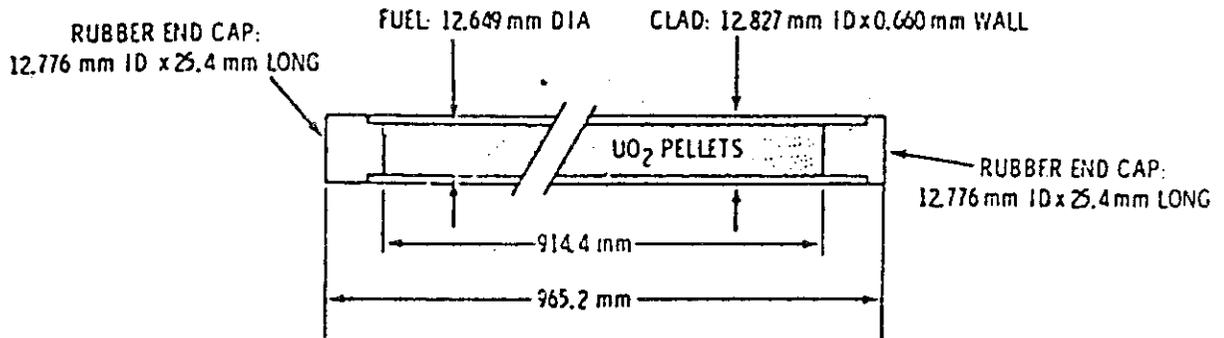


Fig.2.16. Graphical Arrangement of Simulated Shipping Container Critical Experiments

### 4.29 wt% <sup>235</sup>U ENRICHED UO<sub>2</sub> RODS



CLADDING: 6061 ALUMINUM TUBING

LOADING:

ENRICHMENT - 4.289 ± 0.006 wt% <sup>235</sup>U

FUEL DENSITY - 94.9 ± 0.55% OF THEORETICAL DENSITY

URANIUM ASSAY - 88.055 ± 0.261 wt% OF TOTAL FUEL COMPOSITION

UO<sub>2</sub> - 1203.38 ± 4.12 g/ROD

END CAP:

C - 58 ± 1 wt%

S - 1.7 ± 0.2 wt%

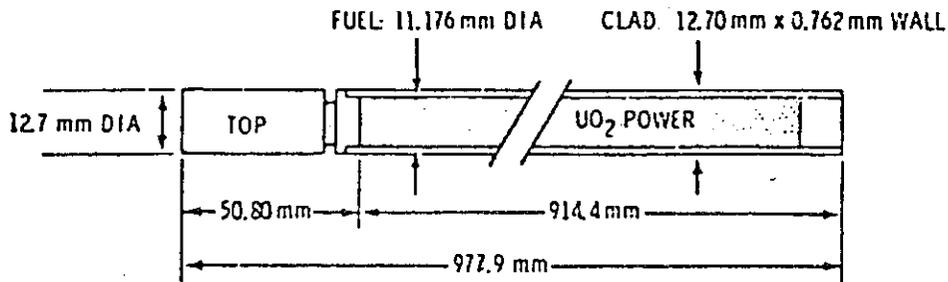
H - 6.5 ± 0.3 wt%

O - 22.1 wt% (BALANCE)

Ca - 11.4 ± 1.8 wt%

Si - 0.3 ± 0.1 wt%

### 2.35 wt% <sup>235</sup>U ENRICHED UO<sub>2</sub> RODS



CLADDING: 6061 ALUMINUM TUBING SEAL WELDED WITH A LOWER END PLUG OF 5052-H32 ALUMINUM AND A TOP PLUG OF 1100 ALUMINUM

LOADING:

ENRICHMENT - 2.35 ± 0.05 wt% <sup>235</sup>U

FUEL DENSITY - 9.20 mg/mm<sup>3</sup> (84% THEORETICAL DENSITY)

URANIUM ASSAY - 88.0 wt%

UO<sub>2</sub> - 825 g/ROD (AVERAGE)

Fig.2.17 Description of Fuel Rods

### 3. 計算手法

臨界計算は、原研で開発中の安全性評価コードシステム J A C S に組込まれている多群定数ライブラリ MGCL<sup>10)</sup> とモンテカルロコード KENO-IV<sup>11)</sup> の組合せで行なった。J A C S の流れを図 3.1 に示す。

モンテカルロコード KENO-IV は階差近似法や  $S_n$  法と異なり、複雑な形状の体系を三次元的に正確に取扱える利点を持っている。核燃料取扱施設等に於ては体系の組成や形状がほとんど定型化されている原子炉等とは異なり、核分裂性物質の種類は溶液、粉末そして固体等様々な形態があり、一方、形状についても交差配管、円筒容器そして燃料棒の格子状配列等多様である。このような多様な体系の臨界評価計算には KENO-IV コードは有効な手段となる。また、このコードは多群近似の中性子輸送方程式を解く計算コードで、多群定数として Hansen-Roach 16 群の断面積データセット<sup>22)</sup> が用意されている。しかし、今回の計算では初めにも述べたように J A C S に納められている多群定数ライブラリ MGCL を用いた。このライブラリは ENDF/B-IV<sup>23)</sup> の中性子核データを MGCL-ACE<sup>10)</sup> で処理して作成した Bondarenko<sup>24)</sup> 型の多群定数である。このマスタライブラリのエネルギー群数は 137 群である。マスタライブラリは COLLAP コードにより、核分裂スペクトル、 $1/E$  及びマックスウェル分布からなる標準スペクトルを用いて任意の群数の群定数に縮約することが可能である。今回は、マスタライブラリの 137 群 MGCL と、これを上記手法で縮約した 26 群 MGCL を使った。これらのエネルギー群構造を表 3.1 に示す。

この MGCL の処理コード MAIL<sup>10)</sup> から 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原子個数密度と幾何形状（非均質効果を考慮する必要がある場合）を入力データとして次の式から巨視的実効断面積  $\Sigma_{\text{eff}}$  を求めている。

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

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

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

ここで、

$\ell$  : 燃料ブロックの平均弦長

$G$  : タンコフ補正因子

$a$  : ベル補正因子

$T$  : 核種温度

$f(\sigma_0^j, T)$  : 中性子自己遮蔽因子

$\sigma_\infty^j$  : 無限希釈断面積

$\sigma_0^j$  : バックグラウンド断面積

$i, j$  : 核種を示す添字

MGCL内の散乱マトリックスは、高速群(1~92群)についてはSUPERTOG<sup>25)</sup>で、熱群(93~137群)についてはPIXSE<sup>26)</sup>で求められており、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 $P_3$ 成分まで考慮されている。MAILでは上記の巨視的実行断面積の一次元データと散乱マトリックスデータをKENO-IV用ライブラリに編集している。

以上の手法によりMAILで作成したKENO-IV用ライブラリと、注目している体系の三次元形状をKENO-IVコードに入力して体系の実効増倍率 $k_{eff}$ が得られる。

Table 3.1 Energy Structure of MGCL 137 and MGCL 26.

| Group № |        | Upper Energy Boundary | Lethergy width $\Delta U$ | Group № |           | Upper Energy Boundary | Lethergy width $\Delta U$ |
|---------|--------|-----------------------|---------------------------|---------|-----------|-----------------------|---------------------------|
| 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                 |                           |
|         | 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                      |
|         |        |                       | 5 9                       |         | 9.1188    | 0.25                  |                           |
| 3       | 2 3    | 1.0540                | 0.125                     | 6 0     | 7.1017    | 0.25                  |                           |
|         | 2 4    | 930.14 KeV            | 0.125                     | 7       | 6 1       | 5.5308                | 0.25                      |
|         | 2 5    | 820.85                | 0.125                     |         | 6 2       | 4.3075                | 0.25                      |
|         | 2 6    | 724.40                | 0.125                     |         | 6 3       | 3.3546                | 0.25                      |
|         | 2 7    | 639.28                | 0.125                     |         | 6 4       | 2.6126                | 0.25                      |
|         | 2 8    | 564.16                | 0.125                     |         | 6 5       | 2.0347                | 0.25                      |
|         | 2 9    | 497.87                | 0.125                     |         | 6 6       | 1.5846                | 0.25                      |
|         | 3 0    | 439.37                | 0.125                     | 6 7     | 1.2341    | 0.25                  |                           |
|         | 3 1    | 387.74                | 0.125                     | 6 8     | 961.12 eV | 0.25                  |                           |
|         | 3 2    | 342.18                | 0.125                     | 6 9     | 748.52    | 0.25                  |                           |
| 3 3     | 301.97 | 0.125                 | 8                         | 7 0     | 582.95    | 0.25                  |                           |
| 3 4     | 266.49 | 0.125                 |                           | 7 1     | 454.00    | 0.25                  |                           |
| 3 5     | 235.18 | 0.125                 |                           | 7 2     | 353.58    | 0.25                  |                           |
| 3 6     | 207.54 | 0.125                 |                           | 7 3     | 275.36    | 0.25                  |                           |
| 4       | 3 7    | 183.16                | 0.125                     | 7 4     | 214.45    | 0.25                  |                           |

Table 3.1 Energy Structure of MGCL 137 and MGCL 26 (continued).

| Group No. |        | Upper Energy Boundary | Lethergy width $\Delta U$ |
|-----------|--------|-----------------------|---------------------------|
| 26 Gr     | 137 Gr |                       |                           |
| 8         | 75     | 167.02 eV             | 0.25                      |
| 9         | 76     | 130.07                | 0.25                      |
|           | 77     | 101.30                | 0.25                      |
|           | 78     | 78.893                | 0.25                      |
|           | 79     | 61.442                | 0.25                      |
|           | 80     | 47.851                | 0.25                      |
|           | 81     | 37.267                | 0.25                      |
| 10        | 82     | 29.023                | 0.25                      |
|           | 83     | 22.603                | 0.25                      |
|           | 84     | 17.603                | 0.25                      |
|           | 85     | 13.710                | 0.25                      |
|           | 86     | 10.677                | 0.25                      |
|           | 87     | 8.3153                | 0.25                      |
| 11        | 88     | 6.4760                | 0.25                      |
|           | 89     | 5.0435                | 0.25                      |
|           | 90     | 3.9279                | 0.25                      |
|           | 91     | 3.0590                | 0.25                      |
|           | 92     | 2.3824                | 0.25                      |
| 12        | 93     | 1.8554                | 0.125                     |
|           | 94     | 1.6374                | 0.125                     |
|           | 95     | 1.4450                | 0.125                     |
| 13        | 96     | 1.2752                | 0.125                     |
|           | 97     | 1.1254                | 0.125                     |
|           | 98     | 0.99312               | 0.125                     |
| 14        | 99     | 0.87642               | 0.125                     |
|           | 100    | 0.77344               | 0.125                     |
| 15        | 101    | 0.68256               | 0.125                     |
|           | 102    | 0.60236               | 0.125                     |
|           | 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                       |

| Group No. |        | Upper Energy Boundary | Lethergy width $\Delta U$ |
|-----------|--------|-----------------------|---------------------------|
| 26 Gr     | 137 Gr |                       |                           |
| 17        | 110    | 0.29792 eV            | 270 m/sec                 |
| 18        | 111    | 0.27699               | 270                       |
|           | 112    | 0.25683               | 270                       |
|           | 113    | 0.23742               | 270                       |
| 19        | 114    | 0.21871               | 270                       |
|           | 115    | 0.20090               | 270                       |
|           | 116    | 0.18378               | 270                       |
| 20        | 117    | 0.16743               | 270                       |
|           | 118    | 0.15183               | 270                       |
|           | 119    | 0.13700               | 270                       |
| 21        | 120    | 0.12293               | 270                       |
|           | 121    | 0.10962               | 270                       |
|           | 122    | 0.09708               | 270                       |
| 22        | 123    | 0.085295              | 270                       |
|           | 124    | 0.074274              | 270                       |
|           | 125    | 0.064015              | 270                       |
| 23        | 126    | 0.054518              | 270                       |
|           | 127    | 0.045783              | 270                       |
|           | 128    | 0.037811              | 270                       |
| 24        | 129    | 0.030600              | 270                       |
|           | 130    | 0.024152              | 270                       |
|           | 131    | 0.018465              | 270                       |
| 25        | 132    | 0.013541              | 270                       |
|           | 133    | 0.009379              | 270                       |
|           | 134    | 0.005979              | 270                       |
| 26        | 135    | 0.003341              | 270                       |
|           | 136    | 0.001466              | 270                       |
|           | 137    | 0.000352              | 270                       |

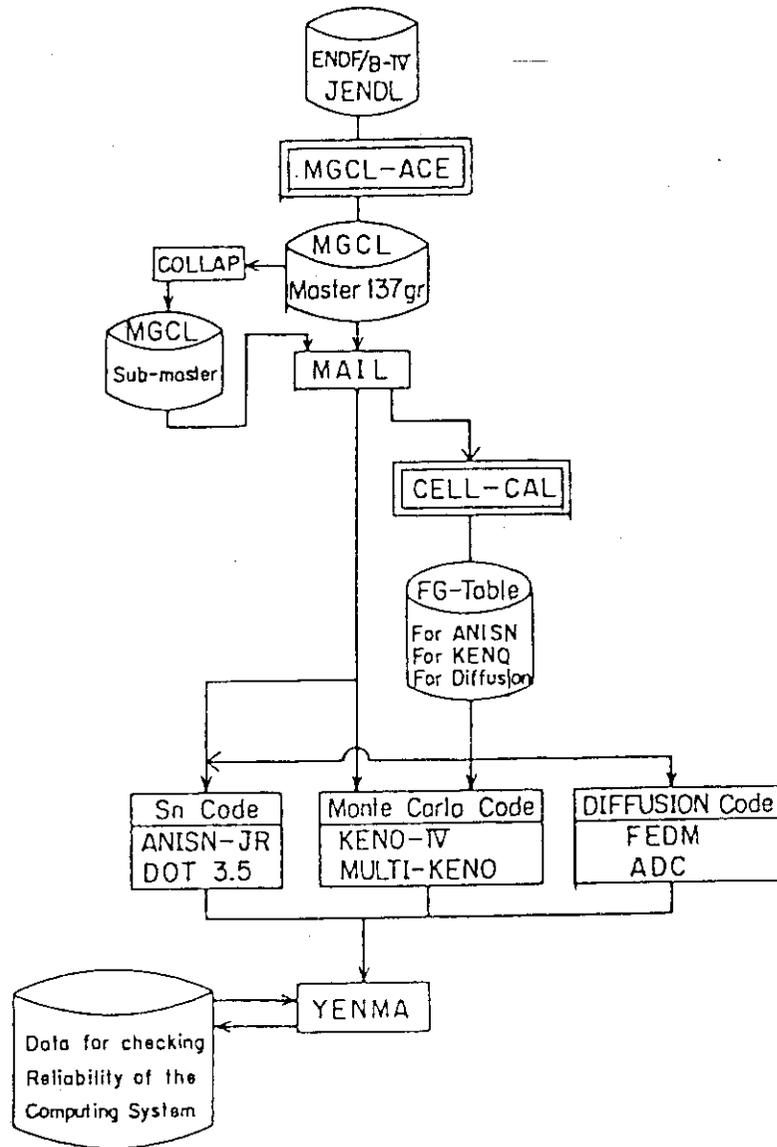


Fig. 3.1 General calculation flow of JACS

## 4 計算結果

モンテカルロ計算コードKENO-IVと、26群および137群のエネルギー群構造を持つ多群定数ライブラリーMGCLを用いた計算結果を各体系ごとに以下に示す。

### 4.1 ボロン入り軽水内に於ける $UO_2-PuO_2$ 燃料棒配列

表4.1に計算条件および計算結果を示す。図4.1および図4.2に26群および137群MGCLを用いた計算結果をヒストグラムにして示す。

26群MGCLを用いた計算では0.978~1.026まで分布し、それらの平均値は0.9988である。一方、137群MGCLを用いた計算では0.983~1.022まで分布しており、平均値は1.0001である。いずれも、平均値は妥当な値を与えるが、各々の計算ケースのバラツキは大きい。

図4.3および図4.4は燃料棒本数およびボロン濃度により分類した図である。図中、丸印は $UO_2-2.35\%^{235}U$ 燃料棒についての計算結果であり、角印は $UO_2-2w/oPuO_2$ 燃料棒についての計算結果である。なお、白抜きは26群MGCLの計算であり、黒印は137群MGCLによる計算である。 $UO_2-PuO_2$ 燃料に関しては燃料棒本数およびボロン濃度の増加に伴い実効増倍率の計算値は増加する傾向にある。 $UO_2-2.35\%^{235}U$ 燃料についても、計算例4(表4.1参照)の0.98前後に算出される1ケースを除いて、 $UO_2-PuO_2$ 燃料の傾向と同様な傾向がある。なお、26群MGCLと137群MGCLの結果を比較すると137群MGCLの方が、臨界値に近く算出される。

### 4.2 $UO_2$ 燃料棒の軽水内に於ける最近接貯蔵

表4.2に標準水位に規格化した測定値と26群MGCLおよび137群MGCLの計算結果を示す。また、燃料集合体間の間隔別に表4.3に示す。参考に、Balawin等が123群XSDRNライブラリーを使用して行った計算結果も併せて示す。図4.5、図4.6には計算結果をヒストグラムにして示す。

計算結果は26群MGCL、137群MGCLいずれの多群定数を用いても、概ね測定値と良く一致しているが、26群MGCLを用いた計算の方が137群MGCLを用いた計算よりも、平均して約1%程高目に算出されている。燃料集合体間の間隔による $k_{eff}$ への依存性は26群MGCL、137群MGCLとも表4.3を見る限り現われていない。123群XSDRNによる計算では、燃料集合体間の間隔が大きくなるにつれ $k_{eff}$ は小さく算出される傾向がある。

図4.7、図4.8にボロン濃度の変化に伴う $k_{eff}$ 計算値の変化を示した。ボロン濃度がゼロ、すなわちボロンを含まない体系では、26群MGCL、137群MGCLともかなりのバラツキが見られる。それ以外の体系では、ボロン濃度が上昇するにつれ、 $k_{eff}$ 計算値が上昇する傾

向がわずかながら見られる。MGCLに含まれているボロンは天然の元素ではなく $^{10}\text{B}$ と $^{11}\text{B}$ の同位体元素別になっているため、ボロンの個数密度は天然の元素の存在比から $^{10}\text{B}$ 、 $^{11}\text{B}$ の個数密度を算出した。ただし、存在比は1979年の理科年表より引用し、 $^{10}\text{B}$ で18.7%である。しかし、一般に天然のボロンの存在比は産地により異なることが言われており、20%前後の値が採用されている。従って、実験に用いられたボロン中の $^{10}\text{B}$ 存在比が20%以上あったとすれば計算結果が高目に算出され、ボロン濃度が上昇するにつれ計算値が上昇していくことが考えられる。

#### 4.3 低濃縮 $\text{U}_3\text{O}_8$ パッケージの配列

表4.4に主な計算条件と26群MGCLおよび137群MGCLの計算結果を示す。また、図4.9と図4.10にはそれぞれの計算結果をヒストグラムにして示した。全体的にやや低目の結果が得られた。26群MGCLの計算結果は平均値が0.993であり、137群の結果は平均値が0.990である。ただし、反射体が無い体系は、26群の計算で1.012となったケースを除くと、約2%程度低目に算出された。また、反射体付きのケースを比較すると、コンクリート反射体の計算は26群、137群とも平均すると1.00であり、分散も0.007と0.004と両者ともほぼ満足すべき結果が得られる。プラスチック反射体の場合は、26群で0.991、137群で0.989と約1%程度低い。従って、コンクリート反射体、プラスチック反射体、反射体無しの場合になるにつれ約1%程度づつ $k_{\text{eff}}$ の計算値は低く算出される傾向にある。

#### 4.4 硝酸ウラニル水溶液内の酸化ベリリウム入り燃料棒体系

表4.5、表4.6に計算された実効増倍率と主な計算条件を示す。また、図4.11、図4.12には26群MGCLと137群MGCLによる計算結果を分けたヒストグラムを示す。表4.5、表4.6で、NUSWのケースとNUS Sのケースは、前者が、燃料棒を水中に配列した体系であるのに対し、後者は、燃料棒をボロンや硝酸ウラニルの水溶液中に配列した体系である。

なお、ヒストグラムの図においてNUSW001およびNUSW012の2ケースは除外した。NUSW001のケースは原論文に未臨界との記されているためであり、NUSW012については計算値が0.6とあまりにも低すぎることで、およびほぼ同じピッチで四角格子配列されたNUSW002の臨界本数222本と比べ、三角格子配列とはいえ臨界本数が75本と極端に少ないなどデータに問題があると考えられるためである。

今回の計算結果は26群MGCLで最低0.93から最高0.98、137群MGCLで最低0.95から最高0.99といずれの場合も臨界値1.0と比較してかなり低い値が算出された。ただし、26群と137群の結果を比較すると137群の方が1~2%程度臨界値に近づく。また、燃料棒を水中に配列した体系と、ボロンや硝酸ウラニル水溶液中に配列した体系では、水中に配列した体系の方がバラツキが大きく、図4.13に示すように、ピッチが小さくなるにつれ実効増倍率が低く算出される傾向がある。この傾向は、26群MGCLを用いた計算の方が特に顕著である。

#### 4.5 Gd中性子毒を含む硝酸プルトニウム水溶液体系

主な計算条件と計算結果を表4.7に示す。比較のために、原論文中に掲載されているGAMTEC-KENOによる計算値も示した。また、図4.14と図4.15に26群MGCLと137群MGCLにより計算結果をヒストグラムにして示した。

26群MGCLによる結果は0.966 から0.986 まで分布しており、平均して約3%程実験値より小さい。一方、137群MGCLを用いると1~2%実験値に近づくが、平均して約1.2%程度低目に算出される。GAMTEC-KENOの計算値も我々の計算と同様1~2%低目に算出されている。

表4.7にはガドリニウム濃度、溶液の高さも示してあるが、これらのパラメータの変化による計算値への影響は、ほとんど見られない。

#### 4.6 軽水内に於ける $UO_2$ - $PuO_2$ 燃料棒の臨界集合体

原論文に記載されている実験データは5ケースであるが、1ケースを除いて臨界体系の記述(特に配列パターン)が充分でないため、計算可能な体系は1ケースのみであった。従って、計算はこの1ケースについてだけ行った。表4.8に計算結果を示す。比較のために、原論文中に報告されている計算値(EGGNIT-THERMOSによる定数を用いたKENO-IVの計算)も示した。いずれの計算値も臨界値よりは約1%程高く算出されている。

#### 4.7 $UO_2$ - アルコールスラリーの配列体系

計算結果と主な体系情報を表4.9に示す。図4.16と図4.17に26群MGCL、137群MGCLによる計算結果をヒストグラムにして示す。この実験体系には実効増倍係数の実験値(1.0と僅かながら異っている。)が与えられているためヒストグラムにする際には実験値との差を取って図示した。横軸は実験値から計算値を引いた値である。(実験値の与えられていないデータはヒストグラムには含まない。)

26群MGCLおよび137群MGCLによる結果も1ケース飛び離れたデータがあるが、このケースを除けば、約2%以内に実験値と計算値の差は納まる。

比較のために、原論文に記載されている16群Hansen-Roach断面積セット(16群H-R)を用いての計算結果を実験値との差をとって図4.18にヒストグラムとして掲げた。16群H-Rでは、計算値は実験値の1.5%以内に入り、この体系ではMGCLより一致は良さそうである。

なお、本実験体系で燃料をつめている罐はスズ製であるが、ライブラリーにスズが含まれていないため、スチールに置き換えて計算を行った。論文に記載されている16群H-R断面積セットを用いた計算でも、同様にスズをスチールで置き換えて計算を行っている。

#### 4.8 金属ウラニウム・スラッグの配列

この体系は、2章の図2.1.2にも示したように同心円筒状の金属ウラニウム・スラッグと支持用のプレキングラス、アルミニウム棒から成っており、形状を正確に入れるには一般形状オブションを用いる必要がある。ただし、三角格子配列の体系は一般形状オブションを用いても複雑でかつ計算時間もかかり、実際的でないため、プレキングラス棒を水で置き換えて一般形状オブションを用いずに計算を行った。(137群MGCLでの計算のみ)

表4.1.0に計算結果を示す。この体系は全て未臨界体系であり、 $k_{eff}$  は1.0より小さい。実験値と計算値の差をとってヒストグラムで表わしたものを図4.1.9と図4.2.0に示す。

26群MGCLによる結果は4%~6%実験値より高く算出される。一方、137群MGCLによる結果は2%~4%程実験値より高くなり、26群MGCLよりは実験値に近づく。ただし、原論文からはウランの個数密度を求めることは不可能なため理論密度を仮定し、個数密度を求めたが、この個数密度の違いが計算値に現われたのであろう。

#### 4.9 Gdを含むU + Pu 硝酸水溶液体系

表4.1.1~表4.1.5に主な体系情報と計算結果を示す。表4.1.1は(U+Pu)硝酸溶液にGdを添加した水溶液に $UO_2 + PuO_2$  燃料棒を三角格子状に配列した体系の計算結果であり、表4.1.2は燃料棒を含まないGd入り(U+Pu)硝酸水溶液体系の計算結果である。表4.1.3は、中性子毒物としてGdの代りにB入りラヒシリングを入れた体系の計算結果である。表4.1.4と表4.1.5は(U+Pu)硝酸溶液に中性子毒物としてGdとBを入れた体系についての結果であるが表4.1.4の体系には $UO_2 + PuO_2$  燃料棒が溶液中に配列してある。なお、これらの表には原論文中に載せられてあるKENOによる計算結果も比較のために示してある。 $UO_2 + PuO_2$  燃料棒を含むケースでは表4.1.1と表4.1.4に示す如く、26群MGCLによる結果の方が137群MGCLによる結果より大きく算出される。特に差が大きいものに到っては実験値115や116のように約8%も異っている。

図4.2.1と図4.2.2には26群MGCLと137群MGCLによる計算結果をヒストグラムにして示した。26群MGCLによる計算は0.97以下の結果と0.99以上の結果に分かれる。前者のケースは硝酸溶液にGdやBを入れた均質な体系であり、後者は $UO_2 + PuO_2$  燃料棒を含む非均質な体系である。137群MGCLでは26群の場合の様に分離されることはないが、全体的に低目に算出されている。

非均質な体系と均質な体系に分けてヒストグラムに示したのが図4.2.3と図4.2.4である。図4.2.3が非均質な体系で図4.2.4が均質な体系である。これらの図で斜線を引いてあるのが137群MGCLを用いた計算であり、白抜きが26群MGCLである。非均質な体系では26群MGCLによる計算の方が137群MGCLより高く算出されるのに対し、均質な体系では逆に26群MGCLによる計算の方が137群による計算より低くなる。

4.10 鉛壁のある軽水プール内の $UO_2$ 燃料棒の配列体系

表 4.16 に 26 群 MGCL および 137 群 MGCL による計算結果を示した。図 4.25 と図 4.26 には計算結果をヒストグラムにして示した。どちらの場合にも臨界値 1.0 よりも低目に算出されるが、ほぼ 2% 以内には入っている。モンテカルロ計算による計算結果のバラツキ（統計誤差）を考慮すれば、ほぼ妥当な結果であろうと思われる。

Table 4.1 Principal Critical Parameters and Calculated Results for Case 1

| No. | Fuel Type   | Pitch<br>(mm) | Critical<br>Number of<br>Rods | Boron<br>Concentration<br>(wppm) | Calculated $k_{eff}$ |                 |
|-----|---|---------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------|-----------------|
|     |   |               |                               |                                  | 26-Group             | 137-Group       |
| 1   | UO <sub>2</sub> - 2.35% <sup>235</sup> U                          | 1.5621        | 708                           | 0.9                              | 0.9856 ± 0.0042      | 0.9910 ± 0.0043 |
| 2   | "   | 1.5621        | 1201                          | 463.8                            | 1.0111 ± 0.0044      | 1.0039 ± 0.0037 |
| 3   | "   | 1.905         | 383                           | 0.5                              | 0.9836 ± 0.0042      | 0.9911 ± 0.0043 |
| 4   | "   | 1.905         | 1201                          | 568.0                            | 0.9784 ± 0.0035      | 0.9831 ± 0.0035 |
| 5   | "   | 2.2098        | 342                           | 0.9                              | 0.9857 ± 0.0038      | 0.9921 ± 0.0041 |
| 6   | "   | 2.2098        | 885                           | 285.8                            | 1.0031 ± 0.0032      | 0.9963 ± 0.0033 |
| 7   | UO <sub>2</sub> - 2w/o PuO <sub>2</sub><br>(8% <sup>240</sup> Pu) | 1.778         | 469                           | 1.7                              | 1.0007 ± 0.0044      | 1.0051 ± 0.0047 |
| 8   | "   | 1.778         | 761                           | 680.9                            | 1.0127 ± 0.0038      | 1.0066 ± 0.0042 |
| 9   | "   | 2.2098        | 195                           | 0.9                              | 0.9932 ± 0.0040      | 0.9947 ± 0.0048 |
| 10  | "   | 2.2098        | 761                           | 1090.4                           | 1.0260 ± 0.0039      | 1.0222 ± 0.0033 |
| 11  | "   | 2.5146        | 160                           | 1.6                              | 0.9941 ± 0.0042      | 0.9999 ± 0.0039 |
| 12  | "   | 2.5146        | 689                           | 767.2                            | 1.0109 ± 0.0032      | 1.0147 ± 0.0034 |

Table 4.2 Measured and Calculated  $\kappa_{eff}$  Values for Case 2

| Core No. | Measured Values | Calculated Values |                  |                   |
|----------|-----------------|-------------------|------------------|-------------------|
|          |                 | MGCL (26-Group)   | MGCL (137-Group) | XSDRN (123-Group) |
| 1        | 1.0002±0.0005   | 0.9953±0.0043     | 0.9898±0.0039    | 0.998±0.006       |
| 2        | 1.0001±0.0005   | 1.0184±0.0036     | 1.0148±0.0036    | 1.007±0.004       |
| 3        | 1.0000±0.0006   | 1.0304±0.0035     | 1.0158±0.0035    | 0.999±0.004       |
| 4        | 0.9999±0.0006   | 1.0067±0.0039     | 0.9979±0.0040    | 1.004±0.007       |
| 5        | 1.0000±0.0007   | 1.0057±0.0043     | 0.9958±0.0041    | 1.005±0.005       |
| 6        | 1.0097±0.0012   | 1.0021±0.0041     | 1.0056±0.0038    | 0.998±0.004       |
| 7        | 0.9998±0.0009   | 1.0081±0.0039     | 0.9935±0.0040    | 0.994±0.005       |
| 8        | 1.0083±0.0012   | 1.0047±0.0034     | 1.0046±0.0038    | 1.003±0.005       |
| 9        | 1.0030±0.0009   | 1.0176±0.0041     | 1.0024±0.0043    | 0.987±0.005       |
| 10       | 1.0001±0.0009   | 1.0143±0.0039     | 1.0100±0.0039    | 0.988±0.004       |
| 11       | 1.0000±0.0006   | 1.0147±0.0033     | 1.0120±0.0037    | 1.015±0.004       |
| 12       | 1.0000±0.0007   | 1.0086±0.0037     | 0.9935±0.0042    | 0.991±0.005       |
| 13       | 1.0000±0.0010   | 1.0039±0.0036     | 0.9962±0.0045    | 1.008±0.005       |
| 14       | 1.0001±0.0010   | 1.0018±0.0035     | 0.9984±0.0038    | 1.003±0.004       |
| 15       | 0.9998±0.0016   | 1.0092±0.0043     | 1.0056±0.0042    | 0.995±0.005       |
| 16       | 1.0001±0.0019   | 1.0040±0.0039     | 0.9951±0.0037    | 0.990±0.005       |
| 17       | 1.0000±0.0010   | 1.0164±0.0039     | 1.0034±0.0035    | 0.993±0.005       |
| 18       | 1.0002±0.0011   | 1.0039±0.0039     | 1.0064±0.0035    | 1.005±0.005       |
| 19       | 1.0002±0.0010   | 1.0117±0.0036     | 1.0075±0.0037    | 0.991±0.004       |
| 20       | 1.0003±0.0011   | 1.0102±0.0037     | 1.0089±0.0034    | 0.997±0.005       |
| 21       | 0.9997±0.0015   | 1.0066±0.0038     | 1.0065±0.0034    | 0.981±0.004       |

Table 4.3 Calculated  $k_{eff}$  at Various Inter-Assembly Spacing for Case 2

| Spacing between arrays (cm) | Core No. | Moderator boron Concentration (ppm) | Calculated $k_{eff}$ Values |                 |                  |
|-----------------------------|----------|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------|------------------|
|                             |          |                                     | MGCL(26-Group)              | MGCL(137-Group) | XSDRN(123-Group) |
| None                        | 1        | 0                                   | 0.9953±0.0043               | 0.9898±0.0039   | 0.998±0.006      |
|                             | 2        | 1037                                | 1.0184±0.0036               | 1.0148±0.0036   | 1.007±0.004      |
| 1.636<br>(1 pitch)          | 3        | 764                                 | 1.0304±0.0035               | 1.0158±0.0035   | 0.999±0.004      |
|                             | 4        | 0                                   | 1.0067±0.0039               | 0.9979±0.0040   | 1.004±0.007      |
|                             | 11       | 514                                 | 1.0147±0.0033               | 1.0120±0.0037   | 1.015±0.004      |
|                             | 13       | 15                                  | 1.0039±0.0036               | 0.9962±0.0045   | 1.008±0.005      |
|                             | 14       | 92                                  | 1.0018±0.0035               | 0.9984±0.0038   | 1.003±0.004      |
|                             | 15       | 395                                 | 1.0092±0.0043               | 1.0056±0.0042   | 0.995±0.005      |
|                             | 17       | 487                                 | 1.0164±0.0039               | 1.0034±0.0035   | 0.993±0.005      |
| 3.272<br>(2 pitches)        | 19       | 634                                 | 1.0117±0.0036               | 1.0075±0.0037   | 0.991±0.004      |
|                             | 5        | 0                                   | 1.0057±0.0043               | 0.9958±0.0041   | 1.005±0.005      |
|                             | 6        | 0                                   | 1.0021±0.0041               | 1.0056±0.0038   | 0.998±0.004      |
|                             | 12       | 217                                 | 1.0086±0.0037               | 0.9935±0.0042   | 0.991±0.005      |
| 4.908<br>(3 pitches)        | 16       | 121                                 | 1.0040±0.0039               | 0.9951±0.0037   | 0.990±0.005      |
|                             | 18       | 197                                 | 1.0039±0.0039               | 1.0064±0.0035   | 1.005±0.005      |
|                             | 20       | 320                                 | 1.0102±0.0037               | 1.0089±0.0034   | 0.997±0.005      |
|                             | 7        | 0                                   | 1.0081±0.0039               | 0.9935±0.0040   | 0.994±0.005      |
| 6.544<br>(4 pitches)        | 8        | 0                                   | 1.0047±0.0034               | 1.0046±0.0038   | 1.003±0.005      |
|                             | 10       | 143                                 | 1.0143±0.0039               | 1.0100±0.0039   | 0.988±0.004      |
|                             | 21       | 72                                  | 1.0066±0.0038               | 1.0065±0.0034   | 0.981±0.004      |
|                             | 9        | 0                                   | 1.0176±0.0041               | 1.0024±0.0043   | 0.987±0.005      |

Table 4.4 Principal Critical Parameters and Calculated  $k_{eff}$  for Case 3

| Type of Driver   | Total Driver Mass (kg) | Metal Diameter or Solution Height *) (mm) | Critical Core Separation (mm) | Calculated $k_{eff}$ |                 |
|--|------------------------|---|-------------------------------|----------------------|-----------------|
|  |                        |   |                               | MGCL(26-Group)       | MGCL(137-Group) |
| 93.12% Enriched Uranium Metal  | 29.870                 | 0.0 (ID), 146.68(OD)                      | 1.260±1.19 <sup>1)</sup>      | 1.0076±0.0046        | 0.9997±0.0063   |
|  | 29.870                 | 0.0 (ID), 146.68(OD)                      | 8.01±1.67 <sup>2)</sup>       | 0.9956±0.0062        | 0.9855±0.0047   |
|  | 33.543                 | 4.002(ID), 153.32(OD)                     | 14.64±2.26 <sup>3)</sup>      | 1.0123±0.0053        | 0.9858±0.0057   |
| High Concentration Solution (351.2kg <sup>3</sup> U/m <sup>3</sup> ) | 14.066                 | 10.547(S), 106.22(N)                      | 6.68±1.79 <sup>1)</sup>       | 0.9945±0.0043        | 1.0059±0.0045   |
|  | 14.844                 | 11.130(S), 112.10(N)                      | 9.42±3.01 <sup>2)</sup>       | 0.9837±0.0055        | 0.9874±0.0049   |
|  | 16.143                 | 12.104(S), 121.91(N)                      | 9.04±1.44 <sup>3)</sup>       | 0.9737±0.0050        | 0.9727±0.0052   |
| Low Concentration Solution (86.4kg <sup>3</sup> U/m <sup>3</sup> )   | 12.446                 | 124.08(S), 124.42(N)                      | 8.64±1.31 <sup>1)</sup>       | 0.9982±0.0042        | 0.9998±0.0041   |
|  | 12.875                 | 128.28(S), 128.74(N)                      | 9.12±1.42 <sup>2)</sup>       | 0.9956±0.0050        | 0.9870±0.0045   |
|  | 13.001                 | 129.54(S), 129.99(N)                      | 11.17±1.42 <sup>2)</sup>      | 0.9907±0.0047        | 0.9942±0.0044   |
| 13.999   | 139.46(S), 139.99(N)   | 6.30±1.66 <sup>3)</sup>                   | 0.9740±0.0049                 | 0.9868±0.0050        |                 |

\*) ID=Inner diameter ; OD=Outer diameter ; S=South ; N=North

1) Concrete reflector

2) Plastic reflector

3) Minimal reflector

Table 4.5 Principal Critical Parameters and Calculated  $k_{eff}$  for Case 4 (I)

| No.     | Number of Pins | Center Separation (cm) | Critical Water Height above Fuel (cm) | Calculated $k_{eff}$ |                  |
|---------|----------------|------------------------|---------------------------------------|----------------------|------------------|
|         |                |                        |                                       | MGCL (26-Group)      | MGCL (137-Group) |
| NUSW001 | 380            | 1.054                  | 15.2                                  | 0.9150±0.00047       | 0.9342±0.00053   |
| NUSW002 | 222            | 1.242                  | 15.2                                  | 0.9309±0.00049       | 0.9556±0.00045   |
| NUSW003 | 138            | 1.488                  | 30.8                                  | 0.9339±0.00043       | 0.9514±0.00047   |
| NUSW004 | 102            | 1.742                  | -21.3                                 | 0.9488±0.00056       | 0.9526±0.00054   |
| NUSW005 | 85             | 1.999                  | 15.2                                  | 0.9479±0.00040       | 0.9593±0.00053   |
| NUSW006 | 78             | 2.276                  | 15.2                                  | 0.9478±0.00048       | 0.9637±0.00050   |
| NUSW007 | 77             | 2.253                  | 3.9                                   | 0.9613±0.00046       | 0.9718±0.00045   |
| NUSW008 | 75             | 2.507                  | 15.2                                  | 0.9641±0.00043       | 0.9682±0.00050   |
| NUSW009 | 77             | 2.779                  | -43.2                                 | 0.9655±0.00045       | 0.9799±0.00044   |
| NUSW010 | 83             | 2.995                  | -34.1                                 | 0.9788±0.00048       | 0.9859±0.00040   |
| NUSW011 | 96             | 2.497                  | -10.4                                 | 0.9668±0.00051       | 0.9615±0.00047   |
| NUSW012 | 75             | 1.250                  | -12.2                                 | 0.6279±0.00042       | 0.6362±0.00051   |

Table 4.6 Principal Critical Parameters and Calculated  $k_{eff}$  for Case 4 (II)

| No.     | Number of Pins | Solution Characteristic |                      | Calculated $k_{eff}$ |                  |
|---------|----------------|-------------------------|----------------------|----------------------|------------------|
|         |                | B (%)                   | $^{235}\text{U}$ (%) | MGCL (26-Group)      | MGCL (137-Group) |
| NUSS001 | 99             | -                       | -                    | 0.9690 ± 0.0049      | 0.9760 ± 0.0046  |
| NUSS002 | 114            | 0.039                   | -                    | 0.9638 ± 0.0053      | 0.9674 ± 0.0050  |
| NUSS003 | 113            | 0.039                   | -                    | 0.9622 ± 0.0046      | 0.9807 ± 0.0049  |
| NUSS004 | 133            | 0.190                   | -                    | 0.9800 ± 0.0047      | 0.9774 ± 0.0048  |
| NUSS005 | 83             | -                       | 3.68                 | 0.9647 ± 0.0042      | 0.9776 ± 0.0039  |
| NUSS006 | 133            | 0.315                   | 3.68                 | 0.9736 ± 0.0040      | 0.9794 ± 0.0042  |

Table 4.8 Calculated  $k_{eff}$  for Case 6

| Experiment No. | Square Pitch (mm) | Water to Fuel Ratio | Critical No. of Fuel Pins | Calculated $k_{eff}$ |                  |
|----------------|-------------------|---------------------|---------------------------|----------------------|------------------|
|                |                   |                     |                           | EGGNIT-THERMOS       | MGCL (26-Group)  |
| 003R           | 7.696             | 1.69                | 1037 ± 1                  | 1.012 ± 0.005        | 1.0110 ± 0.0038  |
|                |                   |                     |                           |                      | MGCL (137-Group) |
|                |                   |                     |                           |                      | 1.0100 ± 0.0041  |

Table 4.7 Principal Critical Parameters and Calculated  $k_{eff}$  for Case 5

| No. | Concentration        |                      | Critical Values |                      |                 | GAMTEC-<br>KENO | Calculated $k_{eff}$ |                     |
|-----|----------------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|-----------------|----------------------|---------------------|
|     | Pu<br>(gPu/ $\ell$ ) | Gd<br>(gGd/ $\ell$ ) | Height<br>(cm)  | Volume<br>( $\ell$ ) | Mass<br>(kg Pu) |                 | MGCL (26-Group)      | MGCL (137-Group)    |
| 1   | 116                  | 0.00                 | 15.44           | 45.17                | 5.240           | 0.993           | 0.9859 $\pm$ 0.0054  | 1.0009 $\pm$ 0.0047 |
| 2   | 116                  | 0.48                 | 20.16           | 58.98                | 6.842           | 0.980           | 0.9682 $\pm$ 0.0047  | 1.0008 $\pm$ 0.0044 |
| 3   | 116                  | 0.96                 | 25.98           | 75.99                | 8.815           | 0.980           | 0.9708 $\pm$ 0.0038  | 0.9838 $\pm$ 0.0035 |
| 4   | 116                  | 1.42                 | 34.48           | 100.85               | 11.698          | 0.978           | 0.9735 $\pm$ 0.0034  | 0.9833 $\pm$ 0.0037 |
| 5   | 116                  | 1.92                 | 48.28           | 141.24               | 16.383          | 0.976           | 0.9679 $\pm$ 0.0036  | 0.9879 $\pm$ 0.0030 |
| 6   | 116                  | 2.38                 | 80.37           | 235.10               | 27.272          | 0.983           | 0.9723 $\pm$ 0.0031  | 0.9853 $\pm$ 0.0030 |
| 7   | 363                  | 4.40                 | 26.52           | 77.56                | 28.192          | 0.977           | 0.9800 $\pm$ 0.0039  | 0.9938 $\pm$ 0.0038 |
| 8   | 363                  | 5.28                 | 28.07           | 82.08                | 29.838          | 0.986           | 0.9703 $\pm$ 0.0041  | 0.9842 $\pm$ 0.0041 |
| 9   | 363                  | 6.28                 | 29.62           | 86.65                | 31.497          | 0.997           | 0.9696 $\pm$ 0.0040  | 0.9858 $\pm$ 0.0036 |
| 10  | 363                  | 8.21                 | 32.84           | 96.10                | 34.932          | 0.984           | 0.9738 $\pm$ 0.0036  | 0.9860 $\pm$ 0.0038 |
| 11  | 363                  | 9.88                 | 36.04           | 105.40               | 38.311          | 0.992           | 0.9719 $\pm$ 0.0036  | 0.9875 $\pm$ 0.0039 |
| 12  | 363                  | 12.85                | 41.02           | 120.00               | 43.608          | 0.986           | 0.9658 $\pm$ 0.0035  | 0.9883 $\pm$ 0.0039 |
| 13  | 363                  | 15.55                | 46.76           | 136.76               | 49.714          | 0.985           | 0.9686 $\pm$ 0.0034  | 0.9840 $\pm$ 0.0039 |
| 14  | 363                  | 18.4                 | 53.70           | 157.05               | 57.089          | 0.977           | 0.9666 $\pm$ 0.0036  | 0.9818 $\pm$ 0.0037 |
| 15  | 363                  | 20.25                | 59.36           | 173.63               | 63.113          | 0.985           | 0.9712 $\pm$ 0.0030  | 0.9881 $\pm$ 0.0027 |

Table 4.9 Principal Critical Parameters and Calculated  $k_{eff}$  for Case 7

| No. | Fuel   |                         |       |                     |                 |                      | $k_{eff}$<br>(Measured<br>Value) | Calculated $k_{eff}$ |               |
|-----|--|-------------------------|-------|---------------------|-----------------|----------------------|----------------------------------|----------------------|---------------|
|     | Type of<br>Fuel                              | Density<br>( $g/cm^3$ ) | Array | Pitch(cm)<br>X, Y Z | Unit<br>Numbers | MGCL(26-Group)       |                                  | MGCL(137-Group)      |               |
| 1   | I.D.<br>=3.735cm<br>UO <sub>2</sub><br>=421g | 2.144                   | 7×7×4 | 10.39               | 14.05           | 196                  | 1.0288±0.0050                    | 1.0323±0.0049        |               |
| 2   |  |                         |       |                     |                 |                      | 1.0012                           | 0.9988±0.0044        |               |
| 3   |  | 2.573                   |       | -                   | -               | 1.0009±0.0048        | 1.0006±0.0045                    |                      |               |
| 4   |  | 1.715                   |       | -                   | -               | 1.0389±0.0041        | 1.0515±0.0052                    |                      |               |
| 5   | I.D.<br>=7.65cm<br>UO <sub>2</sub><br>=20kg  | 4.999                   | 4×4×1 | 15.7                | -               | 16                   | 1.0094                           | 1.0122±0.0044        |               |
| 6   |  |                         | 3×2×2 | 18.16               | 2.23            | 12                   | 0.9968                           | 0.9928±0.0039        |               |
| 7   |  | 3×3×2                   | 4.999 | 20.44               | 27.12           | 18                   | 1.0014                           | 1.0103±0.0046        |               |
| 8   |  |                         |       |                     |                 |                      | 2.466                            | 2.466                | 1.0001        |
| 9   | 3×3×2  | 4.999                   | 20.44 | 27.12               | 17              | 1.0137               | 1.0052±0.0050                    |                      |               |
| 10  |  |                         |       |                     |                 | 2.592                | 2.592                            | 0.9996               | 0.9809±0.0047 |
| 11  | I.D.<br>=7.65cm<br>UO <sub>2</sub><br>=20kg  | 4.999                   | 3×3×2 | 20.44               | 27.12           | 18                   | 1.0129                           | 1.0168±0.0042        |               |
| 12  |  |                         |       |                     |                 |                      | 0.9989                           | 1.0043±0.0050        |               |
| 13  |  |                         |       | 28.38               | 28.38           | 18                   | 1.0049                           | 1.0118±0.0045        |               |
| 14  |  |                         |       |                     |                 |                      | -                                | 1.0855±0.0041        | 1.0743±0.0051 |
| 15  | 3×3×2  | 4.999                   | 25.4  | 27.12               | 15              | 1.010                | 1.0292±0.0044                    |                      |               |
| 16  |  |                         |       |                     |                 | 1.0018               | 0.9627±0.0038                    | 0.9555±0.0042        |               |
| 17  | 3×3×2  | 4.999                   | 25.4  | 31.25               | 16              | 1.0012               | 1.0219±0.0041                    |                      |               |
| 18  |  |                         |       |                     |                 | 1.009                | 1.0343±0.0044                    | 1.0221±0.0048        |               |
| 19  | 3×3×2  | 4.999                   | 25.4  | 34.74               | 18              | 1.0054               | 0.9949±0.0042                    |                      |               |
|     |  |                         |       |                     |                 | 33.03(X)<br>22.87(Y) | 24.71                            | 0.9926±0.0047        |               |

Table 4.9 (Continued)

| #  | Fuel   |                                 |       |            |   |                 |                | k <sub>eff</sub><br>(Measured<br>Value) | Calculated k <sub>eff</sub> |  |
|----|--|---------------------------------|-------|------------|---|-----------------|----------------|---|-----------------------------|--|
|    | Type of<br>Fuel  | Density<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Array | Pitch (cm) |   | Unit<br>Numbers | MGCL(26-Group) |   | MGCL(137-Group)             |  |
|    |  |                                 |       | X, Y       | Z |                 |                |   |                             |  |
| 20 |  |                                 |       | 1 3.97     |   |                 | 1.0065         | 1.0040±0.0045                           | 0.9953±0.0049               |  |
| 21 |  |                                 | 2×2×1 | 1 4.05     |   | 4               | 1.0031         | 0.9988±0.0045                           | 0.9966±0.0041               |  |
| 22 |  |                                 |       | 1 4.128    |   |                 | 1.0018         | 0.9995±0.0043                           | 0.9974±0.0052               |  |
| 23 | I.D.<br>=6.76cm  |                                 |       | 1 5.24     |   |                 | 1.0146         | 1.0263±0.0051                           | 1.0175±0.0051               |  |
| 24 |  |                                 | 2×3×1 | 1 5.876    |   | 6               | 1.0025         | 1.0060±0.0050                           | 1.0108±0.0043               |  |
| 25 | UO <sub>2</sub><br>=17kg                               | 6.626                           |       | 1 6.034    |   |                 | 0.9988         | 1.0068±0.0049                           | 0.9884±0.0050               |  |
| 26 |  |                                 | 2×4×1 | 1 6.986    |   | 8               | 1.0003         | 1.0071±0.0047                           | 0.9981±0.0049               |  |
| 27 | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O<br>-5%H <sub>2</sub> O |                                 |       | 1 8.098    |   |                 | 0.9996         | 1.0033±0.0049                           | 0.9929±0.0056               |  |
| 28 |  |                                 | 3×3×1 | 1 7.146    |   | 9               | 1.0042         | 1.0083±0.0047                           | 0.9982±0.0042               |  |
| 29 | =71.5g   |                                 |       | 1 7.304    |   |                 | 0.9997         | 1.0108±0.0047                           | 0.9944±0.0050               |  |

Table 4.10 Comparison of Measured and Calculated  $k_{eff}$  for Case 8

| No | $V_{H_2O}/V_U$ | Array             | Measured $k_{eff}$ | Calculated $k_{eff}$ |                             |
|----|----------------|-------------------|--------------------|----------------------|-----------------------------|
|    |                |                   |                    | MGCL (26-Group)      | MGCL (137-Group)            |
| 1  | 2.777          | 4×5               | 0.913              | 0.9502±0.0037        | 0.9380±0.0032               |
| 2  |                | 5×5               | 0.935              | 0.9729±0.0034        | 0.9581±0.0035               |
| 3  |                | 6×5               | 0.950              | 0.9893±0.0032        | 0.9697±0.0032               |
| 4  |                | 6×6               | 0.964              | 1.0183±0.0033        | 0.9889±0.0032               |
| 5  | 2.335          | 4×5               | 0.921              | 0.9618±0.0033        | 0.9426±0.0032               |
| 6  |                | 5×5               | 0.945              | 0.9995±0.0029        | 0.9691±0.0037               |
| 7  |                | 6×5               | 0.960              | 1.0043±0.0033        | 0.9861±0.0037               |
| 8  |                | 6×6               | 0.976              | 1.0327±0.0031        | 1.0051±0.0035               |
| 9  | 2.001          | 4×5               | 0.921              | 0.9678±0.0036        | 0.9435±0.0034               |
| 10 |                | 5×5               | 0.945              | 0.9943±0.0035        | 0.9730±0.0031               |
| 11 |                | 6×5               | 0.960              | 1.0116±0.0037        | 0.9835±0.0032               |
| 12 |                | 6×6               | 0.978              | 1.0407±0.0034        | 1.0011±0.0036               |
| 13 | 1.746          | 4×5               | 0.914              | 0.9555±0.0032        | 0.9305±0.0031               |
| 14 |                | 5×5               | 0.938              | 0.9947±0.0032        | 0.9595±0.0035               |
| 15 |                | 6×5               | 0.953              | 1.0100±0.0034        | 0.9874±0.0030               |
| 16 |                | 6×6               | 0.969              | 1.0261±0.0034        | 1.0078±0.0033               |
| 17 | 1.881          | 5×5 <sup>a)</sup> | 0.947              | —                    | 0.9822±0.0033 <sup>c)</sup> |
| 18 |                | 6×5 <sup>a)</sup> | 0.961              | —                    | 0.9875±0.0033 <sup>c)</sup> |
| 19 |                | 19 <sup>b)</sup>  | 0.923              | —                    | 0.9535±0.0031 <sup>c)</sup> |
| 20 |                | 31 <sup>b)</sup>  | 0.971              | —                    | 0.9992±0.0036 <sup>c)</sup> |
| 21 |                | 37 <sup>b)</sup>  | 0.986              | —                    | 1.0154±0.0031 <sup>c)</sup> |

a) ; Triangular Pitch- Rectangular Array

b) ; Triangular Pitch- Hexagonal Array

c) ; Calculated with a model in which plexiglass is replaced by water

Table 4.11 Calculated  $k_{eff}$  of ( $UO_2+PuO_2$ ) Fuel Pins in Gadolinium-Poisoned Solution for Case 9

| Experiment Number | Critical Height (cm) | Gadolinium Conc. (g/ℓ) | Calculated $k_{eff}$ |                |                 |
|-------------------|----------------------|------------------------|----------------------|----------------|-----------------|
|                   |                      |                        | KENO-ENDF/B-III      | MGCL(26-Group) | MGCL(137-Group) |
| 115               | 19.205               | 0.02                   | 1.021±0.008          | 1.0134±0.0055  | 0.9363±0.0046   |
| 116               | 23.066               | 0.258                  | 1.019±0.008          | 1.0224±0.0044  | 0.9474±0.0050   |
| 117               | 28.227               | 0.515                  | 1.010±0.007          | 1.0143±0.0041  | 0.9680±0.0044   |
| 119               | 45.753               | 1.040                  | 1.004±0.007          | 1.0002±0.0033  | 0.9751±0.0032   |
| 120               | 64.506               | 1.280                  | 1.000±0.006          | 0.9923±0.0030  | 0.9771±0.0032   |
| 122               | 68.862               | 1.338                  | 0.998±0.005          | 0.9952±0.0028  | 0.9719±0.0030   |

Table 4.12 Calculated  $k_{eff}$  of Gd-Poisoned Homogeneous U+Pu for Case 9

| Experiment Number | Critical Height (cm) | Pu Conc. (g/ℓ) | U Conc. (g/ℓ) | Gd Conc. (g/ℓ) | Calculated $k_{eff}$ |                |                 |
|-------------------|----------------------|----------------|---------------|----------------|----------------------|----------------|-----------------|
|                   |                      |                |               |                | EGGNI T-KENO         | MGCL(26-Group) | MGCL(137-Group) |
| 127               | 19.10                | 75.6           | 171.9         | 0.042          | 1.001±0.009          | 0.9340±0.0051  | 0.9570±0.0055   |
| 128               | 21.93                | 76.3           | 173.4         | 0.180          | 1.003±0.008          | 0.9518±0.0042  | 0.9773±0.0045   |
| 129               | 24.61                | 76.3           | 174.6         | 0.288          | 1.011±0.008          | 0.9557±0.0042  | 0.9756±0.0036   |
| 130               | 29.47                | 76.6           | 174.7         | 0.459          | 1.003±0.008          | 0.9631±0.0040  | 0.9773±0.0035   |
| 131               | 33.42                | 76.6           | 175.3         | 0.581          | 1.002±0.007          | 0.9560±0.0040  | 0.9767±0.0038   |
| 132               | 37.15                | 77.0           | 175.9         | 0.679          | 0.993±0.007          | 0.9618±0.0032  | 0.9761±0.0042   |
| 133               | 43.71                | 77.1           | 175.1         | 0.800          | 1.002±0.005          | 0.9553±0.0033  | 0.9765±0.0033   |
| 134               | 53.12                | 77.3           | 177.1         | 0.923          | 0.997±0.005          | 0.9621±0.0030  | 0.9782±0.0034   |
| 135               | 62.12                | 77.2           | 176.3         | 1.01           | 0.987±0.005          | 0.9607±0.0035  | 0.9752±0.0032   |
| 136               | 75.32                | 77.3           | 176.8         | 1.06           | 0.997±0.005          | 0.9637±0.0032  | 0.9791±0.0035   |

Table 4.13 Calculated  $k_{eff}$  of U+Pu Solutions in Raschig Ring-Filled Tank for Case 9

| Exp. № | Critical Height (cm) | Pu Conc. (g/L) | U Conc. (g/L) | Calculated $k_{eff}$ |                |                 |
|--------|----------------------|----------------|---------------|----------------------|----------------|-----------------|
|        |                      |                |               | KENO-EGGNIT-THERMOS  | MGCL(26-Group) | MGCL(137-Group) |
| 106    | 57.56                | 92.3           | 147           | 1.016±0.006          | 0.9598±0.0035  | 0.9795±0.0041   |
| 107    | 63.98                | 89.9           | 157           | 1.018±0.006          | 0.9516±0.0041  | 0.9891±0.0042   |
| 108    | 70.46                | 86.1           | 173           | 1.013±0.007          | 0.9591±0.0042  | 0.9852±0.0042   |
| 109    | 76.07                | 83.7           | 181           | 1.008±0.007          | 0.9520±0.0036  | 0.9765±0.0037   |
| 110    | 79.78                | 82.4           | 191           | 1.005±0.006          | 0.9553±0.0038  | 0.9880±0.0035   |
| 111    | 79.93                | 81.7           | 186           | 1.006±0.006          | 0.9601±0.0039  | 0.9800±0.0038   |
| 112    | 81.51                | 80.8           | 185           | 1.006±0.006          | 0.9560±0.0041  | 0.9789±0.0034   |
| 113    | 85.70                | 79.4           | 182           | 1.006±0.006          | 0.9582±0.0033  | 0.9893±0.0040   |

Table 4.14 Calculated  $k_{eff}$  of Heterogeneous Lattice Assembly in U+Pu Solution with B and Gd Poison for Case 9

| Exp. № | Critical Height (cm) | Pu Conc. (g/L) | U Conc. (g/L) | Gd Conc. (g/L) | B Conc. (g/L) | Calculated $k_{eff}$ |             |                |                 |
|--------|----------------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------------|-------------|----------------|-----------------|
|        |                      |                |               |                |               | EGGNIT-KENO          |             | MGCL(26-Group) | MGCL(137-Group) |
|        |                      |                |               |                |               | TEMPEST              | THERMOS     |                |                 |
| 141R   | 21.20                | 84.5           | 182.1         | 0.13           | 0.27          | 0.999±0.010          | 1.020±0.012 | 1.0182±0.0046  | 0.9446±0.0052   |
| 142    | 25.37                | 84.0           | 183.2         | 0.235          | 0.6           | 0.994±0.010          | 1.018±0.008 | 1.0341±0.0037  | 0.9756±0.0043   |
| 143    | 30.49                | 82.7           | 180.6         | 0.309          | 0.9           | 0.998±0.007          | 1.003±0.007 | 1.0269±0.0041  | 0.9872±0.0037   |
| 148    | 43.86                | 81.2           | 180.0         | 0.424          | 1.35          | 0.992±0.010          | 1.004±0.006 | 1.0274±0.0034  | 0.9964±0.0034   |
| 149    | 51.97                | 81.0           | 180.4         | 0.519          | 1.5           | 0.993±0.007          | 1.000±0.006 | 1.0267±0.0032  | 0.9906±0.0037   |
| 152    | 55.18                | 81.0           | 180.3         | 0.537          | 1.548         | 0.982±0.005          | 1.000±0.007 | 1.0283±0.0032  | 1.0032±0.0032   |
| 153    | 65.42                | 80.5           | 180.5         | 0.541          | 1.662         | 0.995±0.006          | 1.008±0.007 | 1.0297±0.0033  | 1.0186±0.0029   |

Table 4.15 Calculated  $k_{eff}$  of U+Pu Solution with Boron and Gadolinium for Case 9

| Exp. No | Critical Height (cm) | Pu Conc. (g/L) | U Conc. (g/L) | Gd Conc. (g/L) | B Conc. (g/L) | Calculated $k_{eff}$   |                 |                 |
|---------|----------------------|----------------|---------------|----------------|---------------|------------------------|-----------------|-----------------|
|         |                      |                |               |                |               | EGGNIT(TEMPEST) - KENO | MGCL(26-Group)  | MGCL(13-Group)  |
| 137R    | 18.13                | 85.0           | 182.5         | 0.04           | 0.0           | 0.990 ± 0.008          | 0.9564 ± 0.0049 | 0.9950 ± 0.0048 |
| 138     | 18.65                | 84.9           | 182.2         | 0.04           | 0.1           | 1.003 ± 0.008          | 0.9518 ± 0.0044 | 1.0051 ± 0.0046 |
| 139R    | 19.68                | 84.8           | 182.6         | 0.04           | 0.3           | 0.992 ± 0.006          | 0.9609 ± 0.0050 | 1.0006 ± 0.0044 |
| 140     | 21.13                | 84.5           | 182.1         | 0.128          | 0.27          | 1.008 ± 0.006          | 0.9547 ± 0.0049 | 1.0058 ± 0.0045 |
| 145     | 32.16                | 82.8           | 180.6         | 0.293          | 0.9           | 1.000 ± 0.005          | 0.9625 ± 0.0037 | 0.9947 ± 0.0038 |
| 146     | 43.03                | 82.2           | 179.5         | 0.388          | 1.2           | 1.003 ± 0.005          | 0.9509 ± 0.0036 | 0.9901 ± 0.0035 |
| 147     | 52.12                | 81.2           | 180.0         | 0.424          | 1.35          | 0.988 ± 0.004          | 0.9594 ± 0.0033 | 0.9927 ± 0.0030 |
| 150     | 67.83                | 81.0           | 180.4         | 0.519          | 1.5           | 0.998 ± 0.004          | 0.9529 ± 0.0025 | 0.9840 ± 0.0031 |
| 151     | 75.44                | 81.0           | 180.3         | 0.537          | 1.54          | 0.992 ± 0.004          | 0.9596 ± 0.0032 | 0.9830 ± 0.0034 |

Table 4.16 Principal Critical Parameters and Calculated  $k_{eff}$  for Case 10

| #  | $^{235}\text{U}$<br>enrichment<br>of fuel rod | Fuel<br>Cluster | Pitch<br>(mm) | Biological<br>Shielding<br>Wall <sup>a)</sup> | A*<br>(mm) | B**<br>(mm) | 26 gr. MGCL |          | 137 gr. MGCL |          |
|----|---|-----------------|---------------|---|------------|-------------|-------------|----------|--------------|----------|
|    |   |                 |               |   |            |             | $k_{eff}$   | $\delta$ | $k_{eff}$    | $\delta$ |
| 1  | 2.35  | 3-19x16         | 20.32         | U   | 0          | 118.3       | 0.99016     | 0.00392  | 0.99093      | 0.00392  |
| 2  | 2.35  | 3-19x16         | 20.32         | U   | 13.21      | 139.3       | 0.98585     | 0.00423  | 0.98618      | 0.00369  |
| 3  | 2.35  | 3-19x16         | 20.32         | U   | 19.56      | 141.1       | 0.99325     | 0.00362  | 0.99396      | 0.00357  |
| 4  | 2.35  | 3-19x16         | 20.32         | U   | 26.16      | 137.0       | 0.99034     | 0.00399  | 0.98005      | 0.00335  |
| 5  | 2.35  | 3-19x16         | 20.32         | U   | 54.05      | 106.9       | 0.99140     | 0.00385  | 0.98338      | 0.00374  |
| 6  | 2.35  | 3-19x16         | 20.32         | U   | 106.76     | 85.6        | 0.98290     | 0.00414  | 0.97950      | 0.00377  |
| 7  | 2.35  | 3-19x16         | 20.32         | U   | $\infty$   | 83.1        | 0.97848     | 0.00368  | 0.99009      | 0.00329  |
| 8  | 2.35  | 3-20x16         | 20.32         | U   | $\infty$   | 91.3        | 0.98020     | 0.00413  | 0.98433      | 0.00390  |
| 9  | 2.35  | 3-19x16         | 20.32         | Pb  | 0          | 138.4       | 0.99320     | 0.00378  | 0.98814      | 0.00377  |
| 10 | 2.35  | 3-19x16         | 20.32         | Pb  | 6.60       | 137.2       | 0.99270     | 0.00373  | 0.99105      | 0.00435  |
| 11 | 2.35  | 3-19x16         | 20.32         | Pb  | 26.16      | 112.5       | 1.00069     | 0.00389  | 0.99699      | 0.00391  |
| 12 | 4.29  | 3-13x8          | 25.40         | U   | 0          | 153.8       | 1.00598     | 0.00425  | 0.99532      | 0.00370  |
| 13 | 4.29  | 3-12x8          | 25.40         | U   | 19.56      | 153.2       | 0.99395     | 0.00422  | 1.00155      | 0.00441  |
| 14 | 4.29  | 3-13x8          | 25.40         | U   | 39.12      | 180.5       | 1.00693     | 0.00370  | 0.99855      | 0.00384  |
| 15 | 4.29  | 3-13x8          | 25.40         | U   | 54.05      | 134.9       | 0.99990     | 0.00424  | 0.99433      | 0.00413  |
| 16 | 4.29  | 3-13x8          | 25.40         | U   | $\infty$   | 82.4        | 0.98653     | 0.00412  | 0.99071      | 0.00420  |
| 17 | 4.29  | 3-13x8          | 25.40         | Pb  | 0          | 206.2       | 1.00984     | 0.00417  | 1.00340      | 0.00410  |
| 18 | 4.29  | 3-13x8          | 25.40         | Pb  | 6.60       | 207.8       | 1.00001     | 0.00455  | 1.00305      | 0.00435  |
| 19 | 4.29  | 3-13x8          | 25.40         | Pb  | 13.21      | 190.4       | 0.99380     | 0.00451  | 0.99665      | 0.00446  |
| 20 | 4.29  | 3-13x8          | 25.40         | Pb  | 54.05      | 103.0       | 0.98591     | 0.00423  | 0.98338      | 0.00385  |

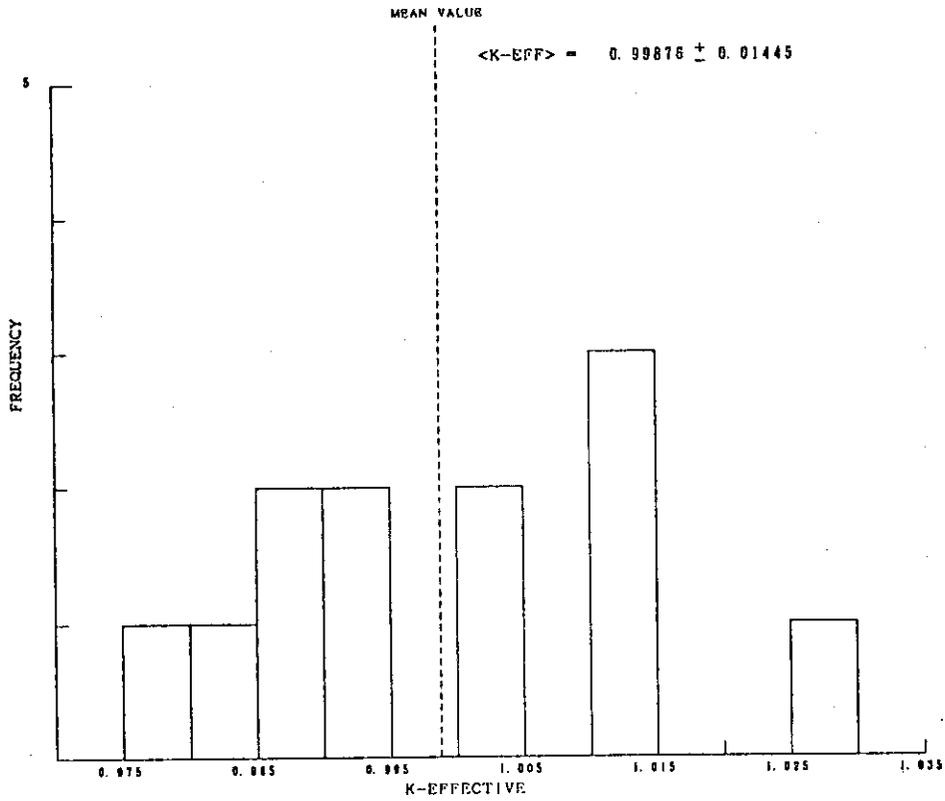
a) U is depleted Uranium and Pb is lead

\* Distance between reflecting walls and fuel clusters

\*\* Critical separation between fuel clusters

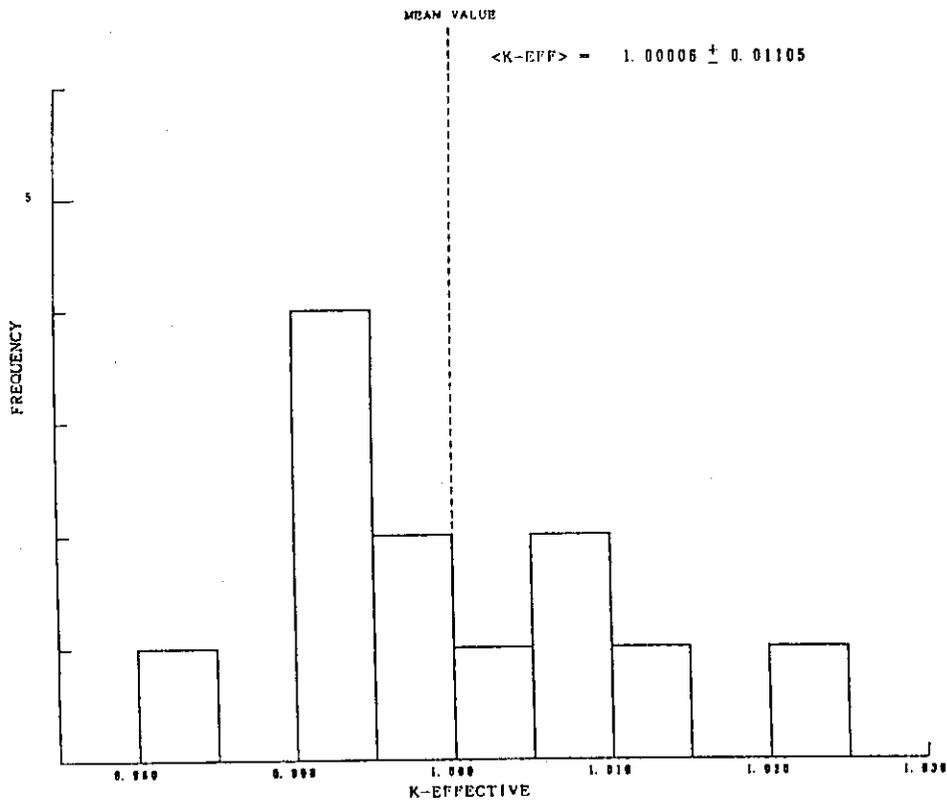
$\bar{k}_{eff} = 0.99310$        $\bar{k}_{eff} = 0.99158$

$\delta_{26} = 0.00871$        $\delta_{137} = 0.00730$



( HISTOGRAM OF THE EFFECTIVE MULTIPLICATION FACTORS )

Fig.4.1 Histogram of Calculated Effective Multiplication Factors for Case 1 (26 Group MGCL)



( HISTOGRAM OF THE EFFECTIVE MULTIPLICATION FACTORS )

Fig.4.2 Histogram of Calculated Effective Multiplication Factors for Case 1 (137 Group MGCL)

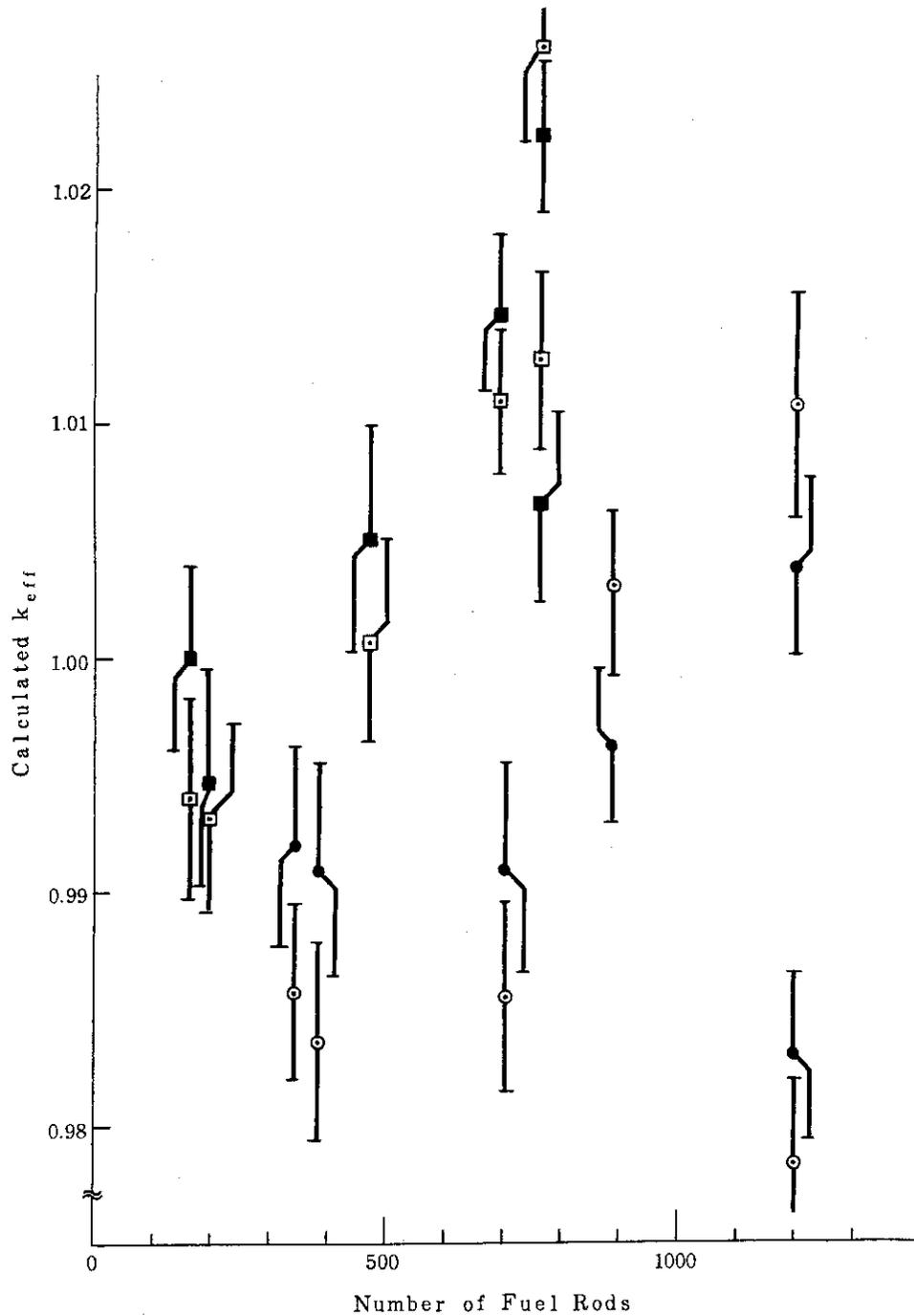


Fig. 4.3 Variation of Calculated  $k_{eff}$  with Number of Fuel Rods

- :  $UO_2(2.35\%^{235}U)$  Fuel Rod (26 Group MGCL)
- :  $UO_2(2.35\%^{235}U)$  Fuel Rod (137 Group MGCL)
- :  $UO_2-2w/o PuO_2$  Fuel Rod (26 Group MGCL)
- :  $UO_2-2w/o PuO_2$  Fuel Rod (137 Group MGCL)
- ⊥: One Standard Deviation

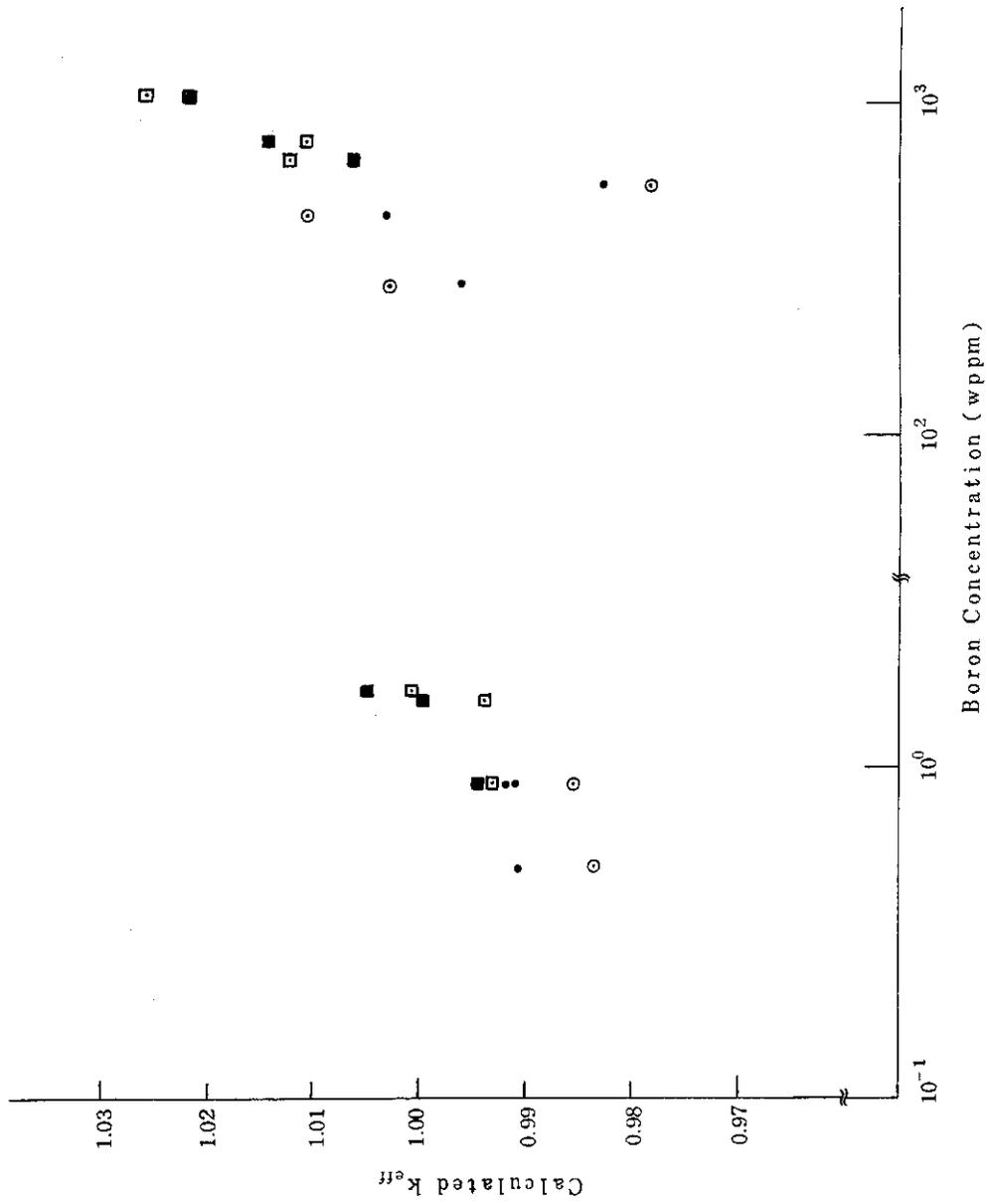
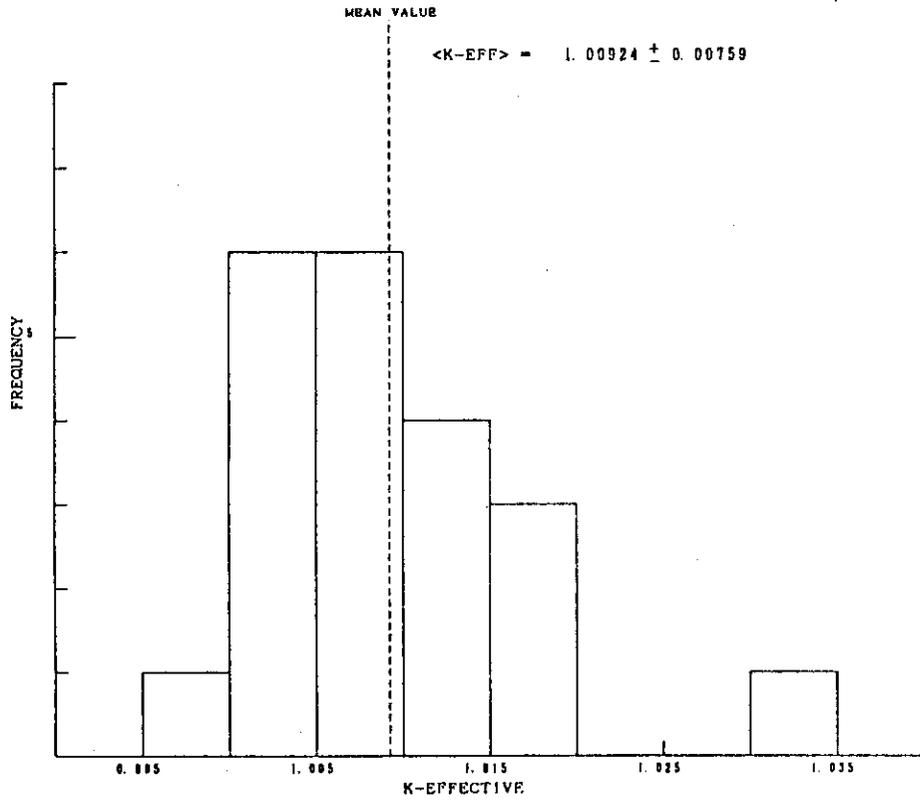
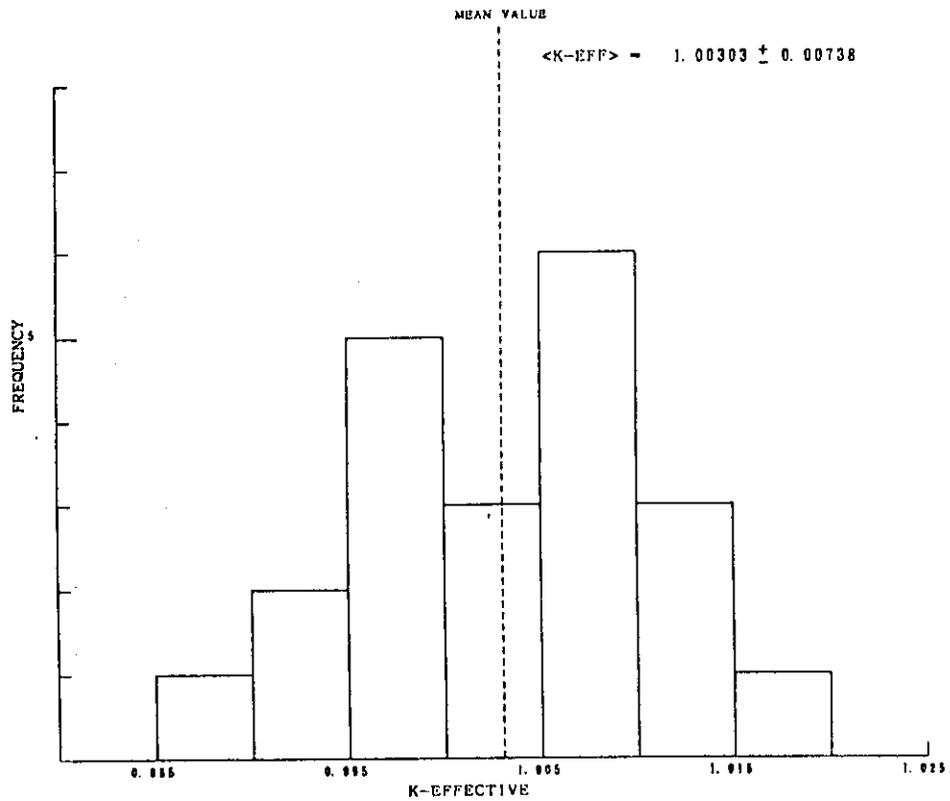


Fig. 4.4 Variation of Calculated  $k_{eff}$  with Boron Concentration  
 Notations are the same ones in Fig. 4.3



( HISTOGRAM OF THE EFFECTIVE MULTIPLICATION FACTORS )

Fig.4.5 Histogram of Calculated Effective Multiplication Factors for Case 2 (26 Group MGCL)



( HISTOGRAM OF THE EFFECTIVE MULTIPLICATION FACTORS )

Fig.4.6 Histogram of Calculated Effective Multiplication Factors for Case 2 (137 Group MGCL)

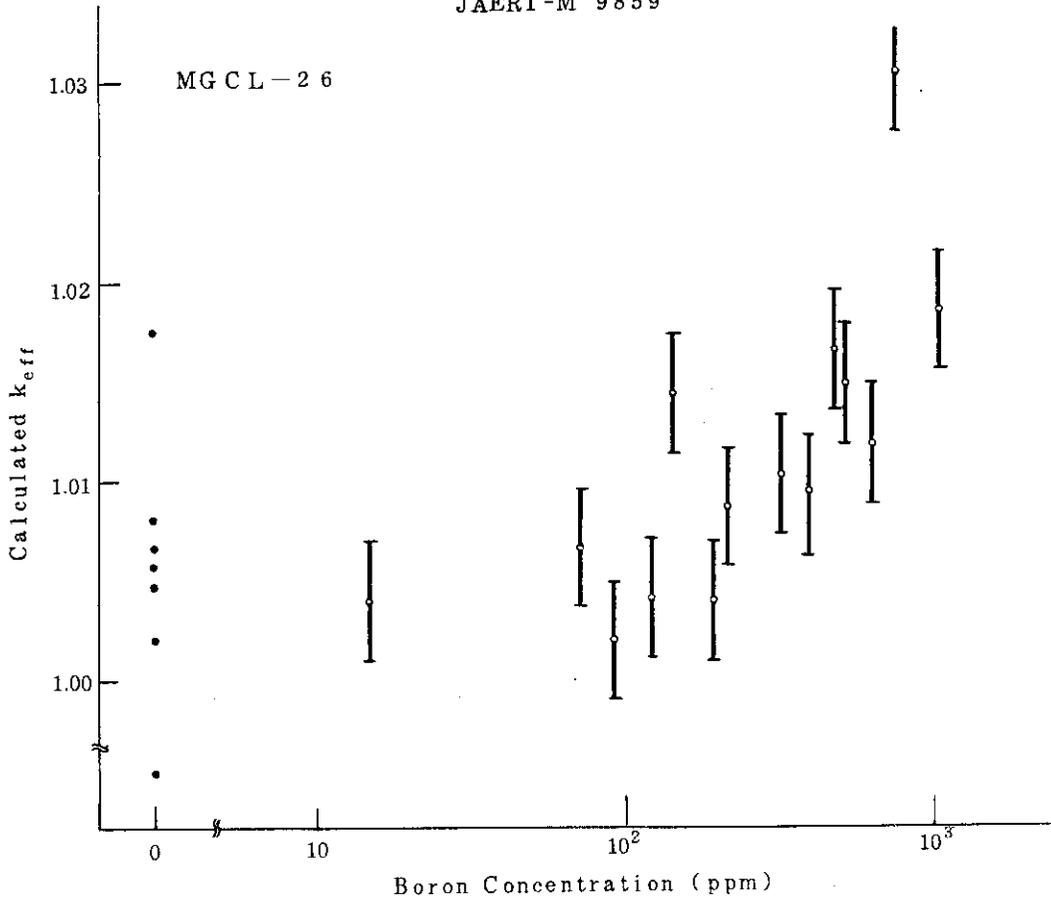


Fig. 4.7 Variation of Calculated  $k_{eff}$  with Boron Concentration (26 Group MGCL)

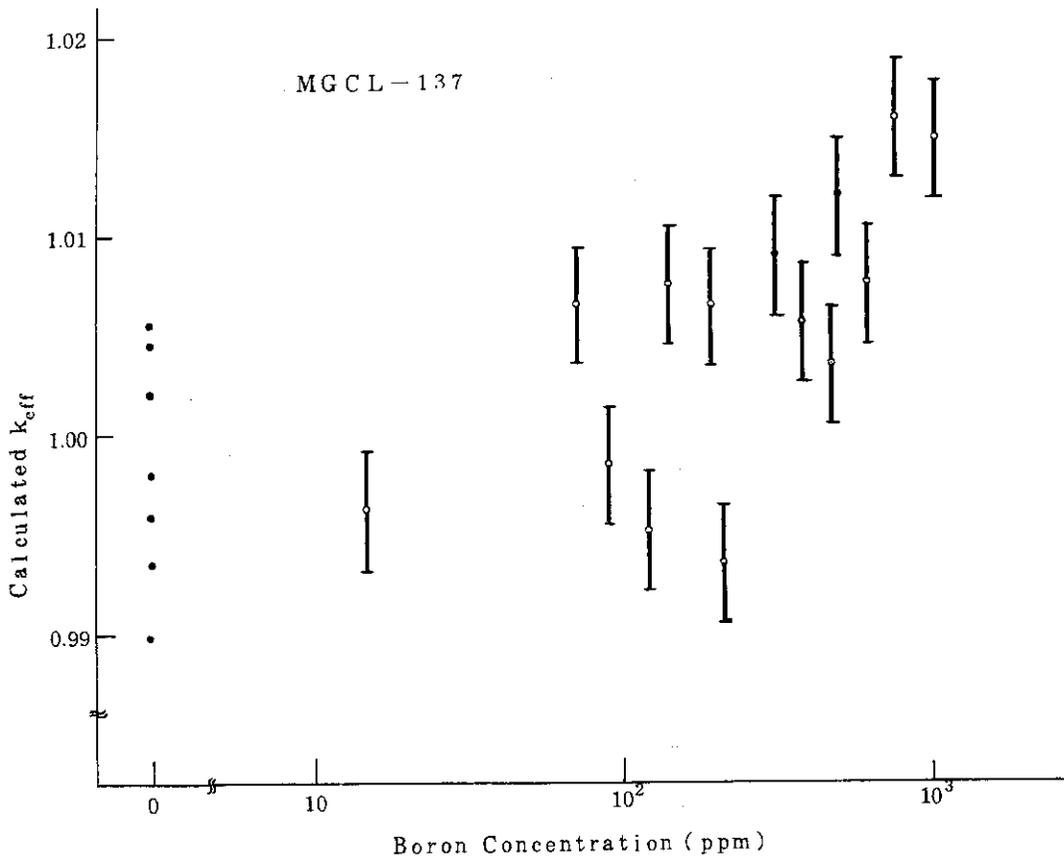
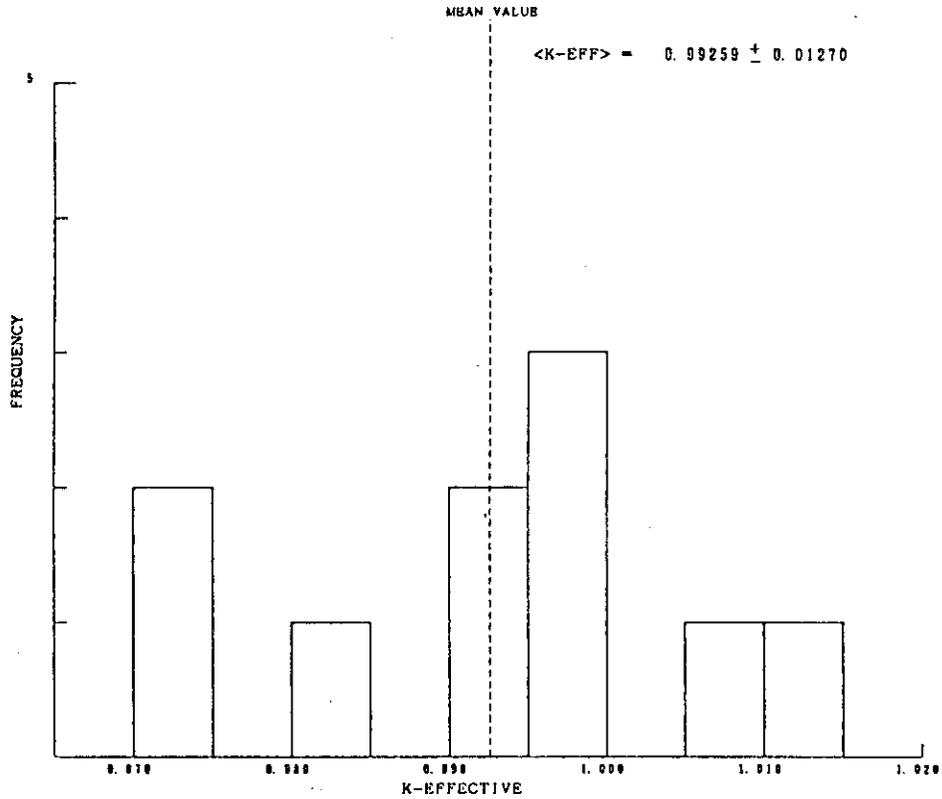
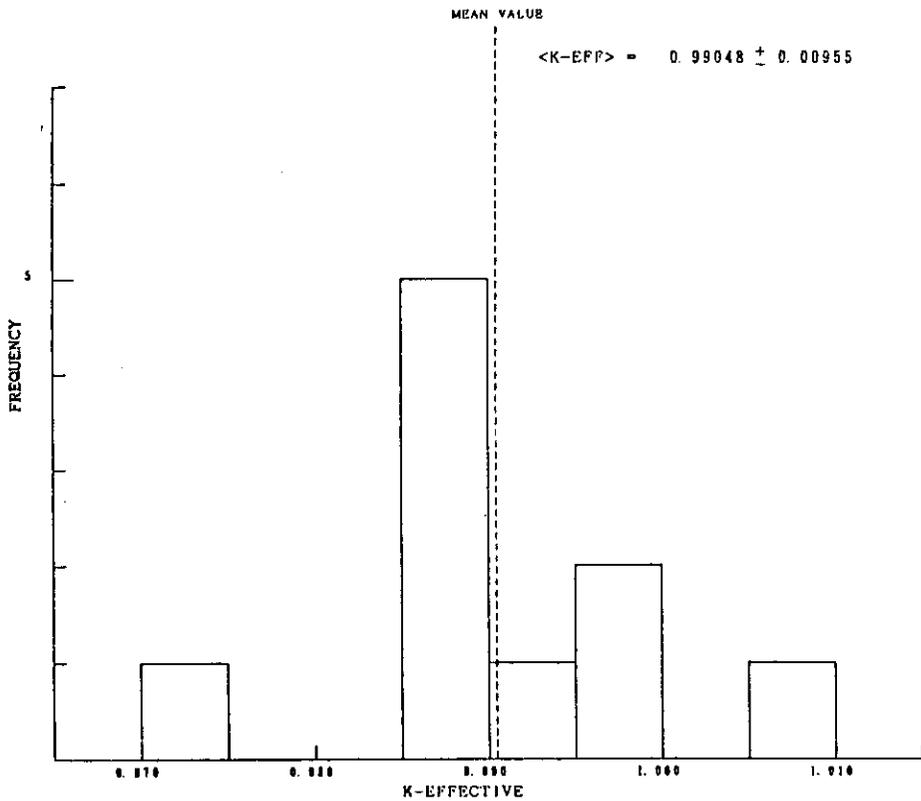


Fig. 4.8 Variation of Calculated  $k_{eff}$  with Boron Concentration (137 Group MGCL)



( HISTOGRAM OF THE EFFECTIVE MULTIPLICATION FACTORS )

Fig.4.9 Histogram of Calculated Effective Multiplication Factors for Case 3 (26 Group MGCL)



( HISTOGRAM OF THE EFFECTIVE MULTIPLICATION FACTORS )

Fig.4.10 Histogram of Calculated Effective Multiplication Factors for Case 3 (137 Group MGCL)

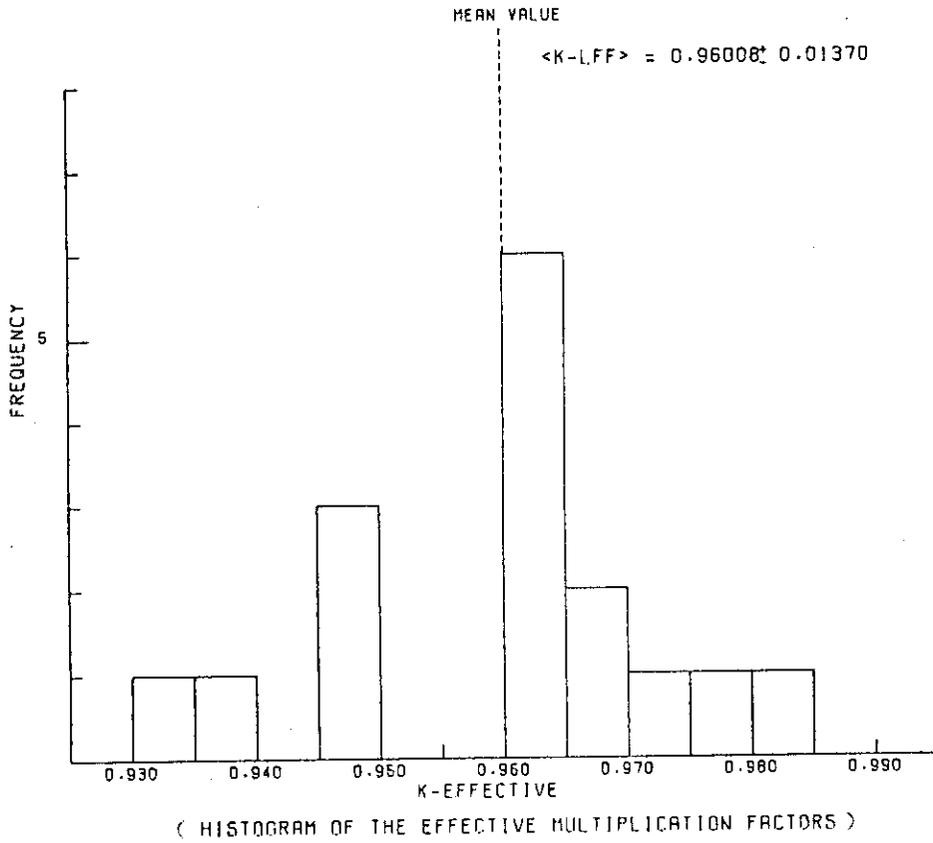


Fig.4.11 Histogram of Calculated Effective Multiplication Factors for Case 4 (26 Group MGCL)

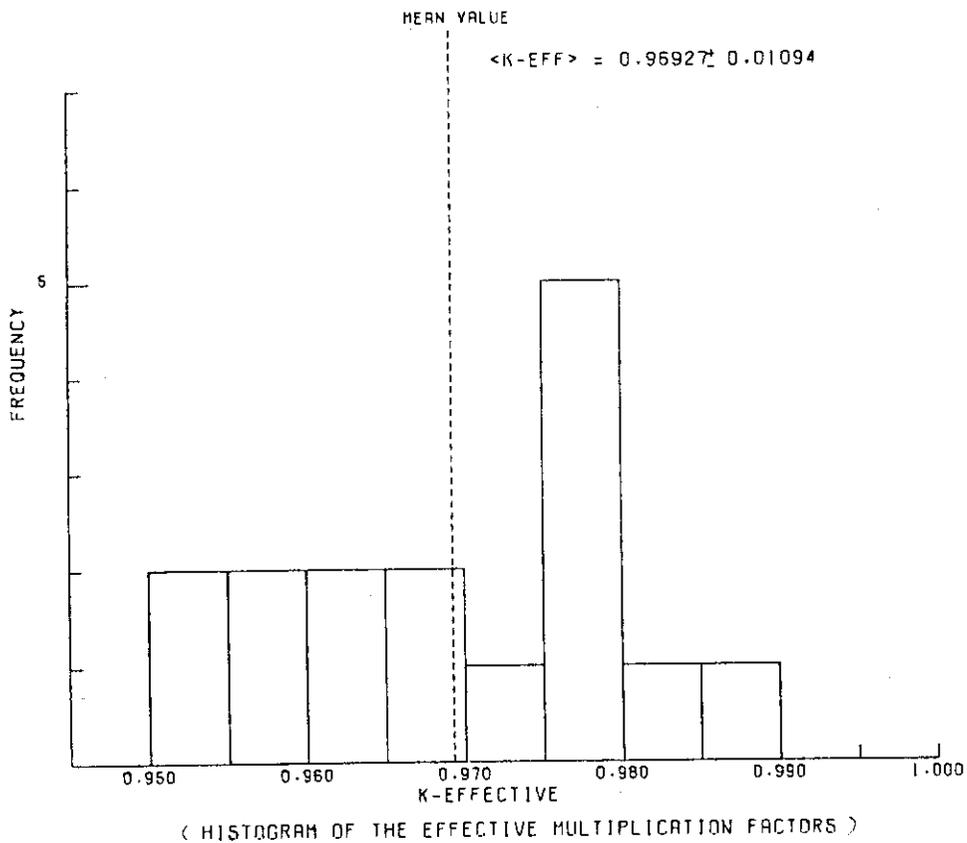


Fig.4.12 Histogram of Calculated Effective Multiplication Factors for Case 4 (137 Group MGCL)

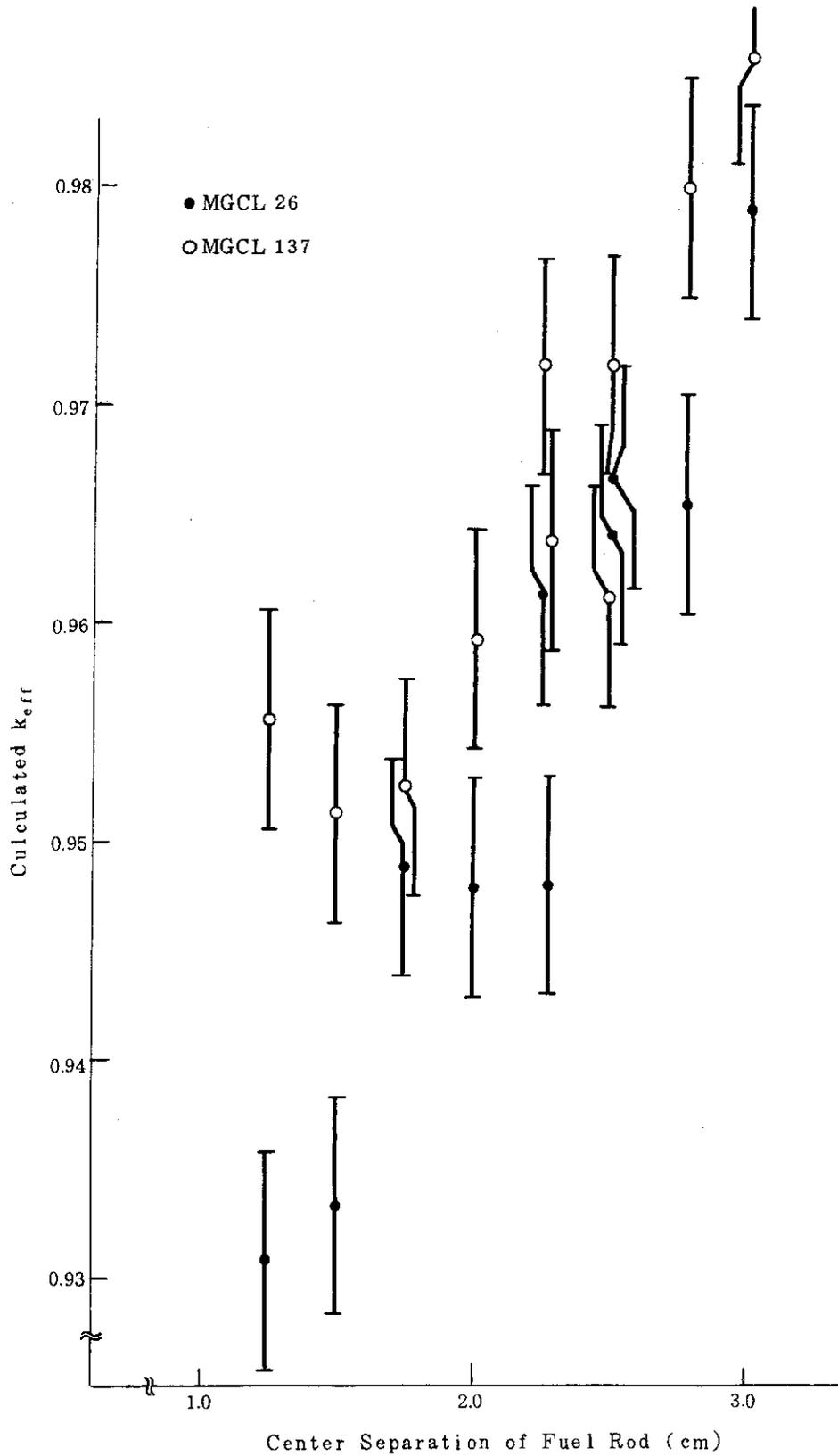


Fig. 4.13 Variation of  $k_{eff}$  with Center Separation of Fuel Rod

⊙ : One Standard Deviation

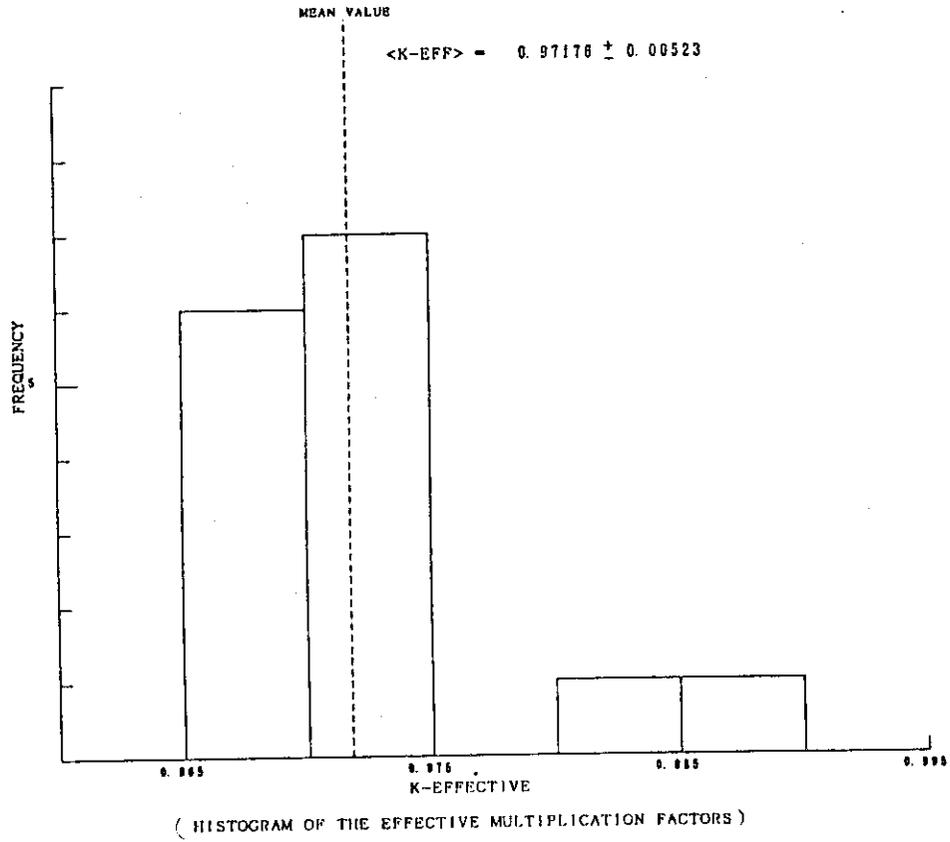


Fig.4.14 Histogram of Calculated Effective Multiplication Factors for Case 5 (26 Group MGCL)

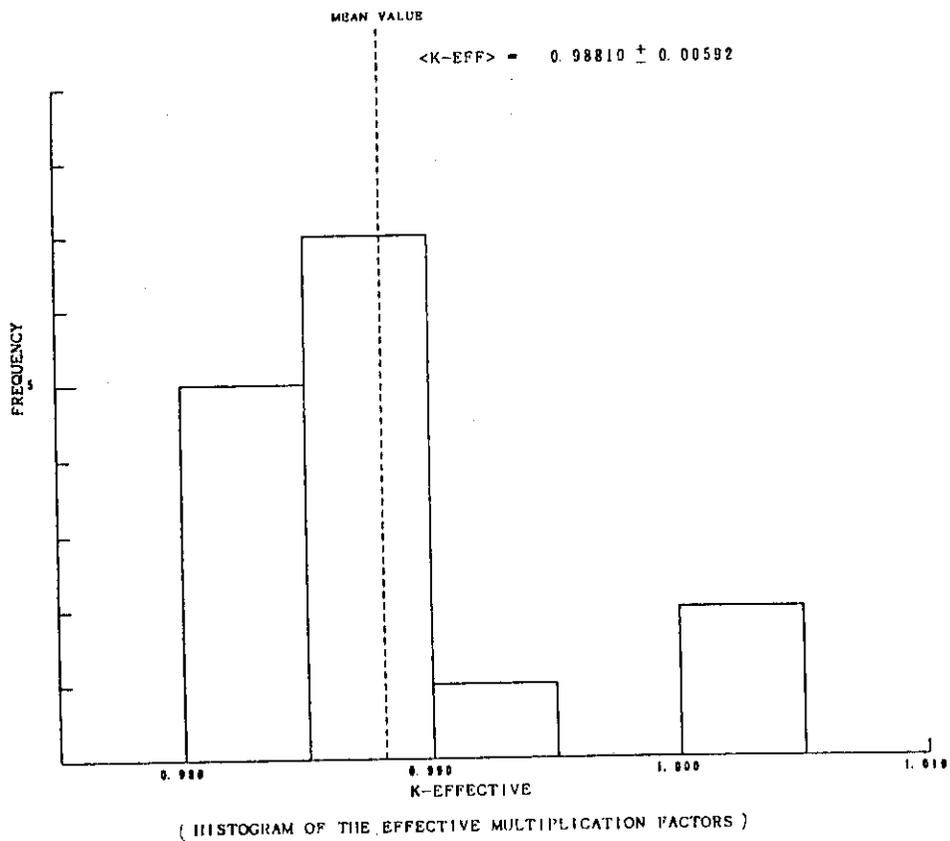


Fig.4.15 Histogram of Calculated Effective Multiplication Factors for Case 5 (137 Group MGCL)

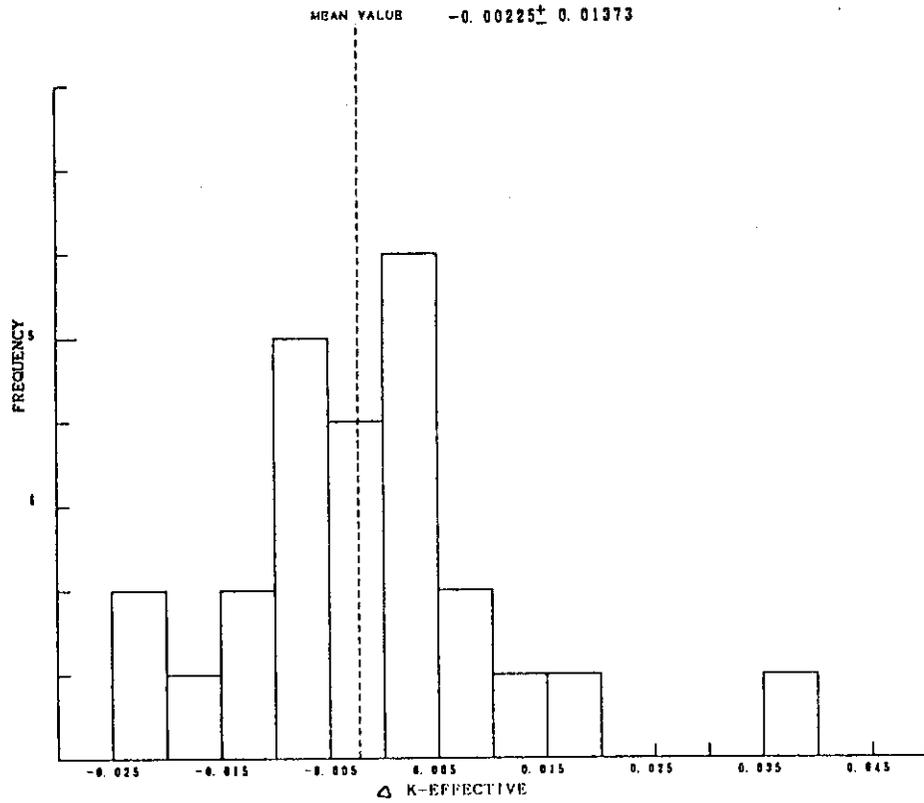


Fig.4.16 Histogram of Difference between Measured and Calculated  $k_{eff}$  for Case 7 (26 Group MGCL)  
 $\Delta k_{eff} = [\text{Calculated Value}] - [\text{Measured Value}]$

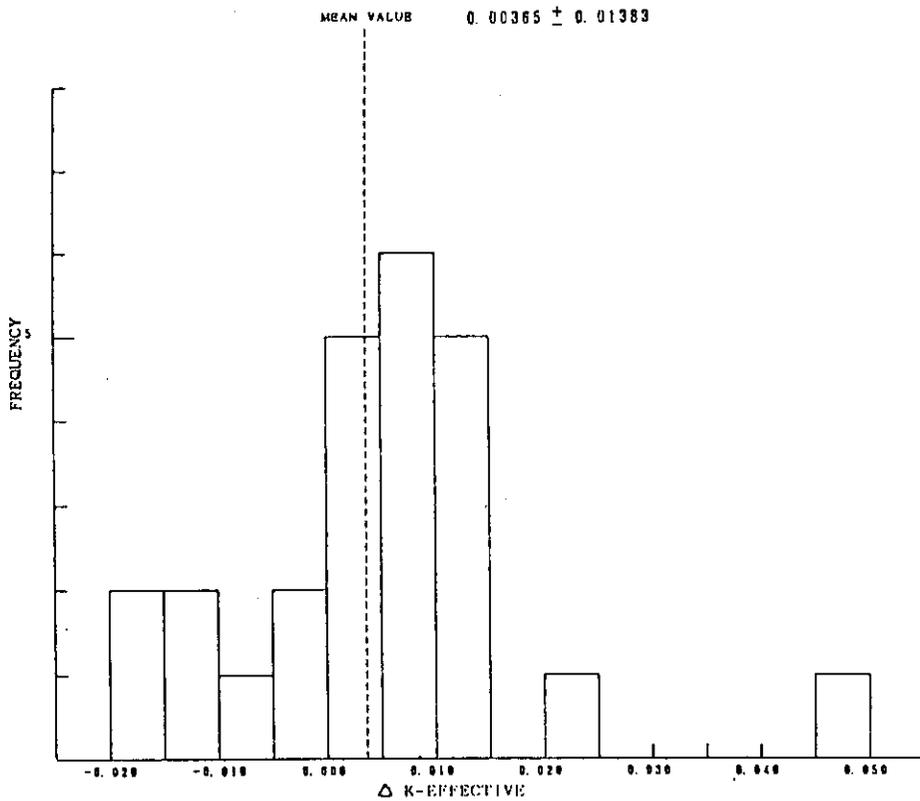


Fig.4.17 Histogram of Difference between Measured and Calculated  $k_{eff}$  for Case 7 (137 Group MGCL)  
 $\Delta k_{eff}$  is same in Fig.4.16

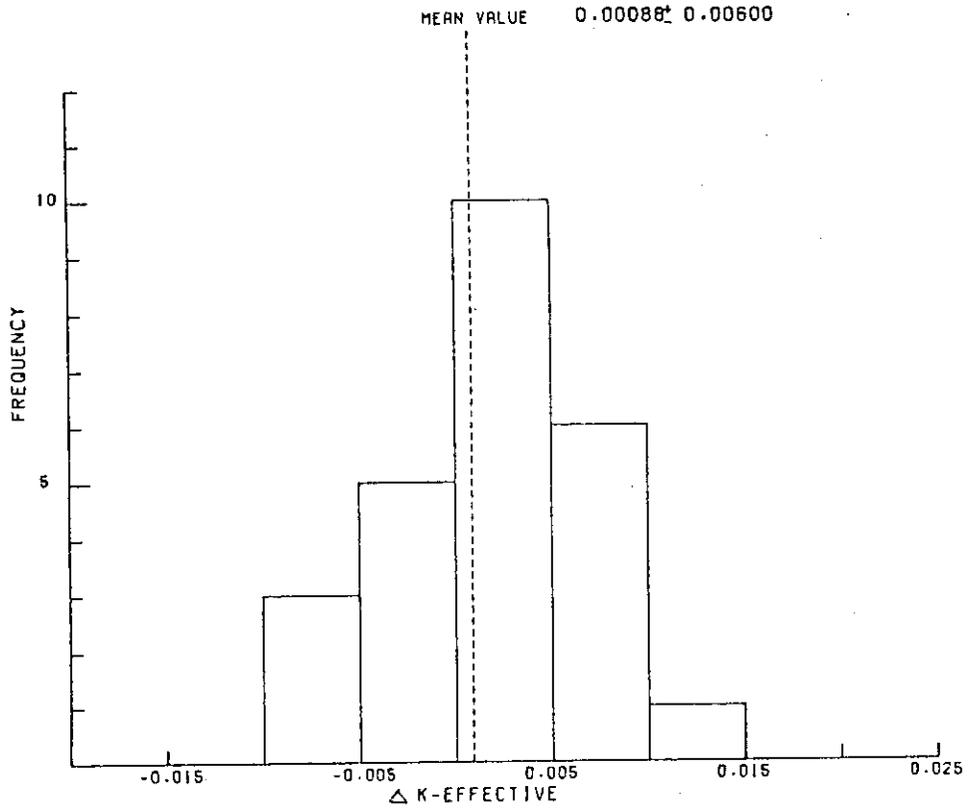


Fig.4.18 Histogram of Difference between Measured and Calculated  $k_{eff}$  for Case 7 (Hansen - Roach Library)  $\Delta k_{eff}$  is same in Fig.4.16

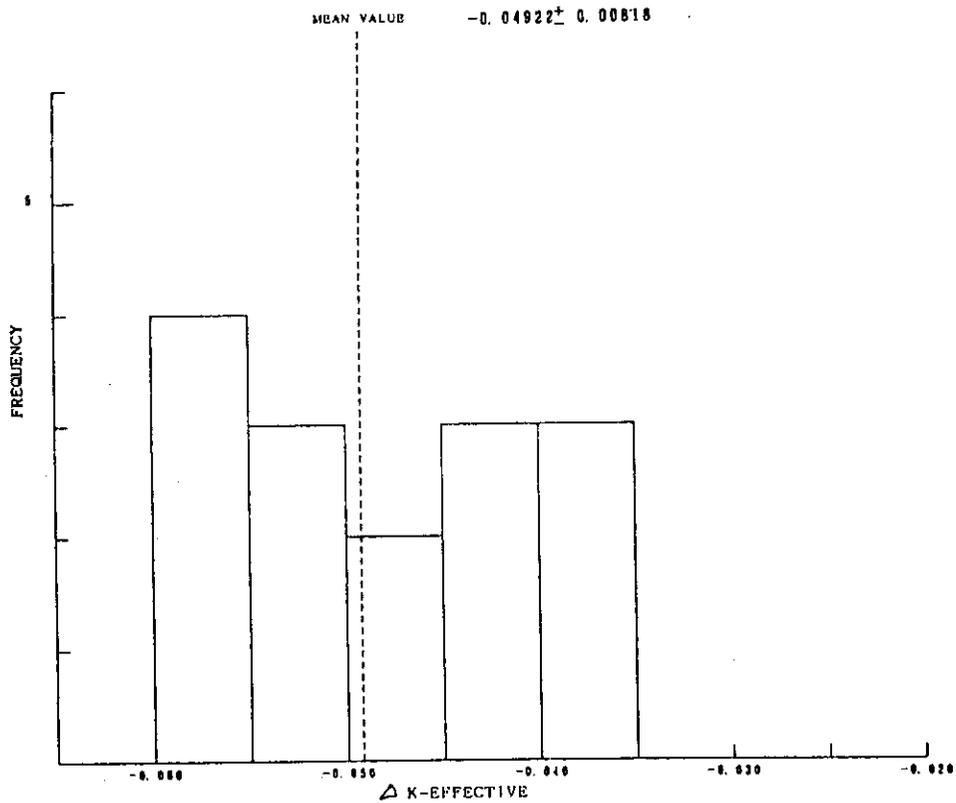


Fig.4.19 Histogram of Difference between Measured and Calculated  $k_{eff}$  for Case 8 (26 Group MGCL)  $\Delta k_{eff}$  is same in Fig.4.16

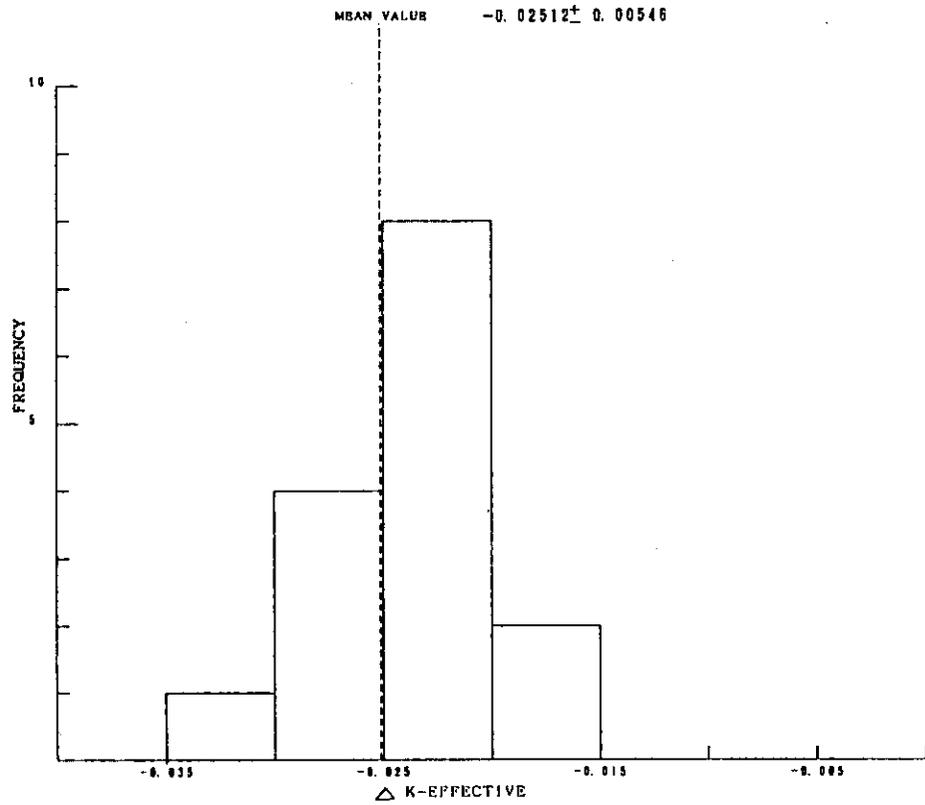


Fig.4.20 Histogram of Difference between Measured and Calculated  $k_{eff}$  for Case 8 (137 Group MGCL)  $\Delta k_{eff}$  is same in Fig.4.16

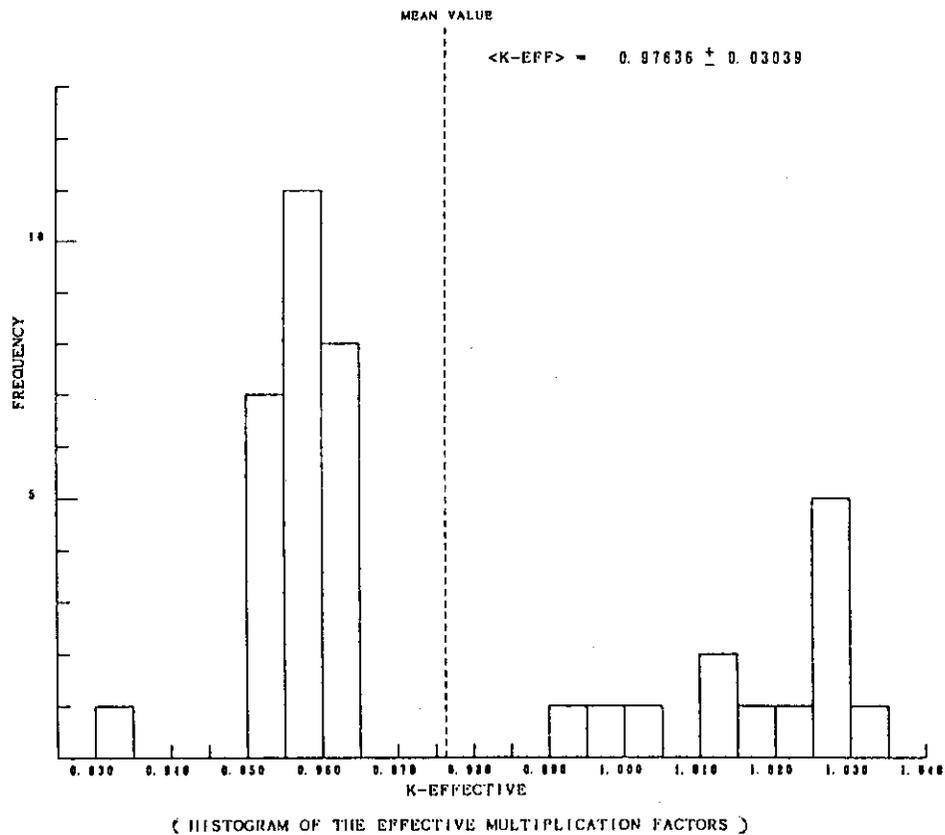


Fig.4.21 Histogram of Calculated Effective Multiplication Factors for Case 9 (26 Group MGCL)

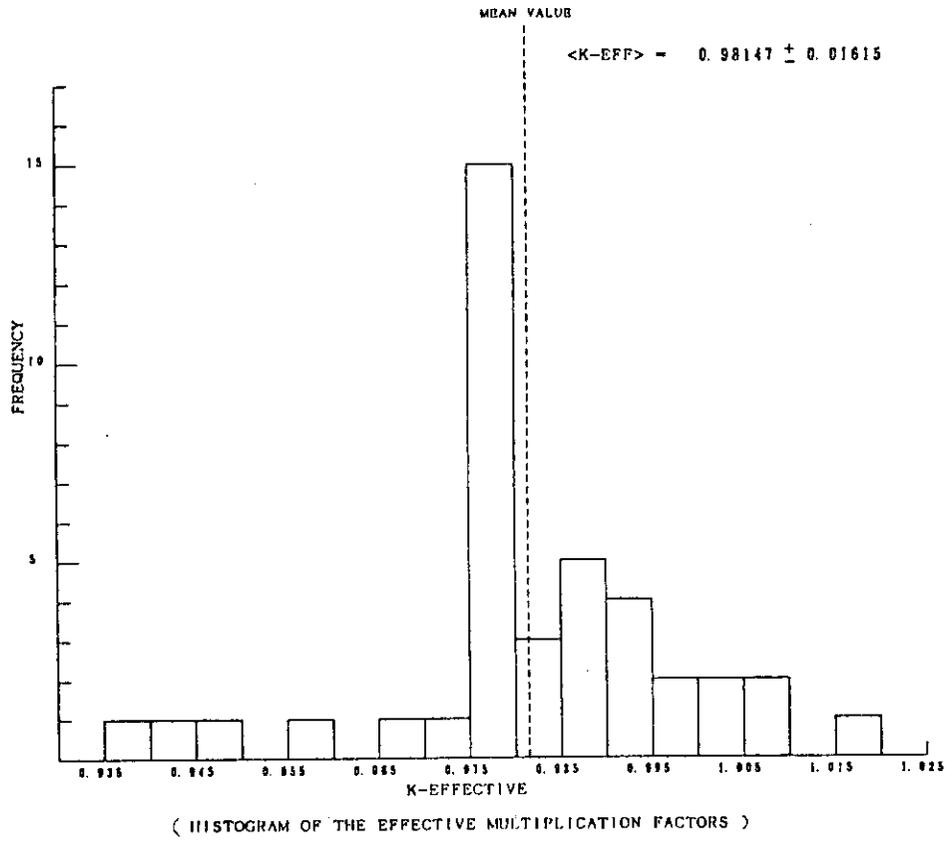


Fig.4.22 Histogram of Calculated Effective Multiplication Factors for Case 9 (137 Group MGCL)

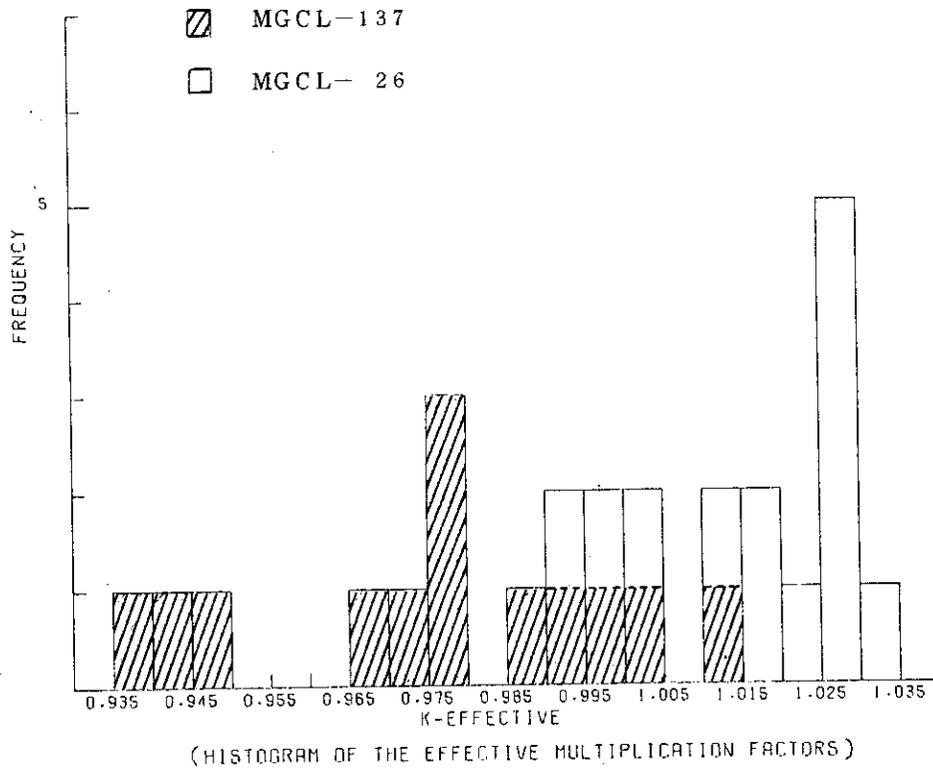
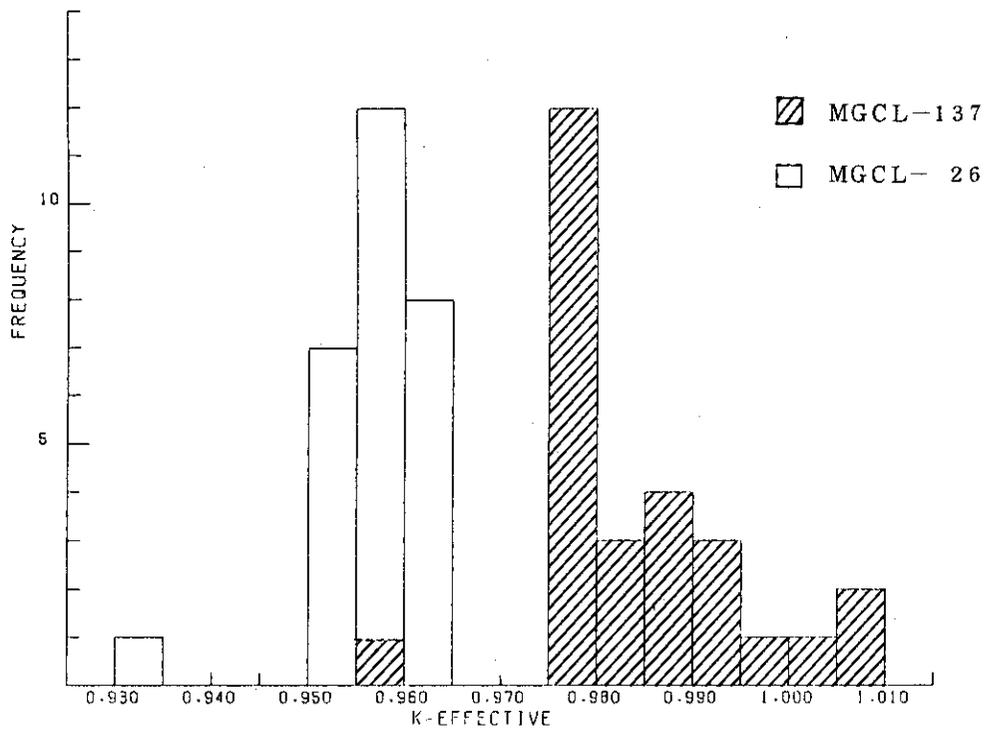
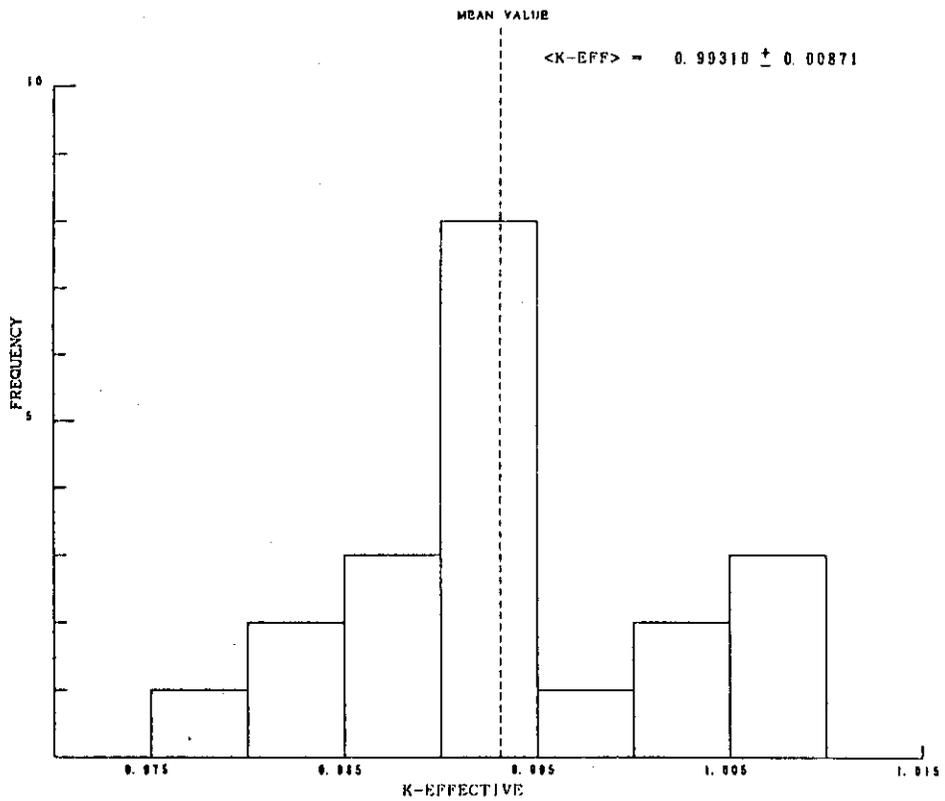


Fig.4.23 Histogram of Calculated  $k_{eff}$  for  $UO_2$ - $PuO_2$  Rods in Nitrate Solutions (Case 9)



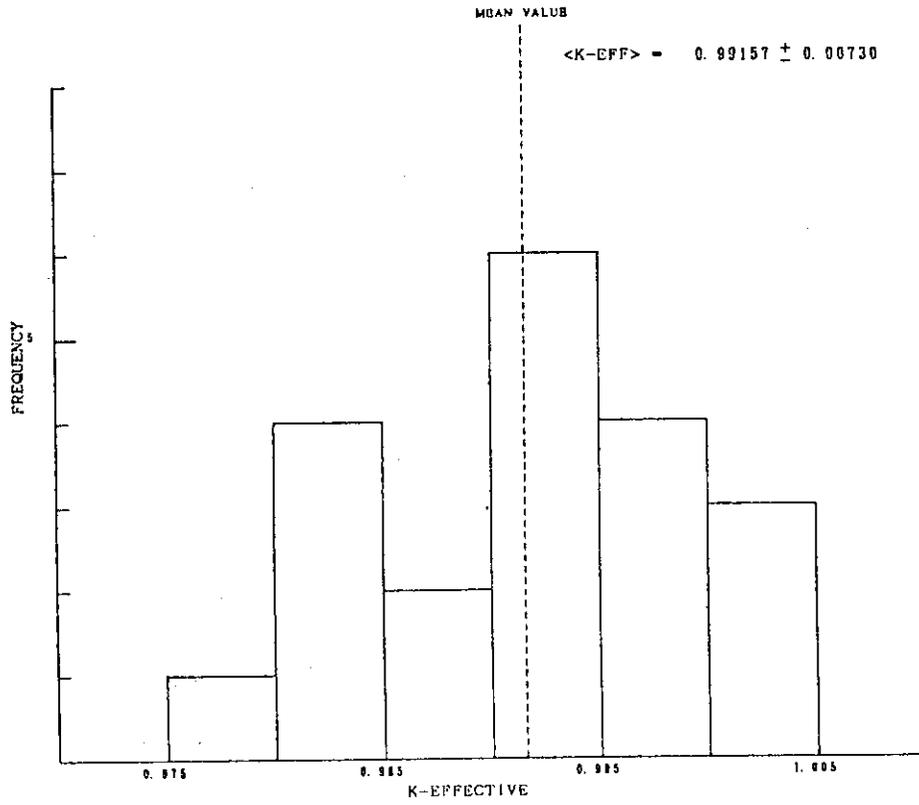
( HISTOGRAM OF THE EFFECTIVE MULTIPLICATION FACTORS )

Fig.4.24 Histogram of Calculated  $k_{eff}$  for Homogeneous System (Case 9)



( HISTOGRAM OF THE EFFECTIVE MULTIPLICATION FACTORS )

Fig.4.25 Histogram of Calculated  $k_{eff}$  for Case 10 (26 Group MGCL)



( HISTOGRAM OF THE EFFECTIVE MULTIPLICATION FACTORS )

Fig.4.26 Histogram of Calculated  $k_{eff}$  for Case 10 (137 Group MGCL)

## 5 考 察

今回計算を行った体系のうち、 $\text{UO}_2$  燃料棒等の燃料棒が水中に配列している体系（ケース 1，ケース 2 および ケース 10）については、計算結果に統計誤差を含むモンテカルロ計算であることを考慮するとほぼ妥当な結果が得られたと思われる。しかしながら、硝酸水溶液体系（ケース 4，ケース 5 および ケース 9）では、臨界値よりも 2～4% 低目に算出される傾向があり、このような硝酸水溶液体系の臨界計算を行なう場合には十分に注意する必要がある。また、同じ硝酸水溶液体系でも 26 群 MGCL と 137 群 MGCL による結果では 137 群 MGCL による結果の方がより実験値に近くなる。これは、26 群 MGCL を作成する際の中性子スペクトルは軽水炉に於ける標準スペクトルを採用し、このスペクトルを重みにして縮約しているが、硝酸水溶液体系では中性子スペクトルがかなり異っていると考えられるため、より詳細な群構造を持つ 137 群 MGCL の方が実験値に近づくのであろう。ただし、同じ硝酸水溶液体系でも  $\text{PuO}_2 + \text{UO}_2$  燃料棒を配列した体系（ケース 9 の 1 部）では、むしろ 137 群 MGCL による結果の方が低く算出されており（図 4.2.2 参照）、今後充分検討していく必要がある。

また、 $\text{U}_3\text{O}_8$  パッケージや  $\text{UO}_2$ -アルコール-スラリーの体系についても、我々のシステムによる計算では平均して 1% 程度低目に算出されている。

なお、計算に使用したモンテカルロ計算コード KENO-IV では、中性子の散乱を取り扱う際に中性子の方向余弦は全て平均値で代表されている。しかし、体系が小さく、散乱の角度依存性が大きい体系を処理するには散乱の方向余弦を平均値で代表するのは充分でないと思われる。そこで、今回のベンチマーク計算で実験値よりも低目に算出された硝酸水溶液体系を例にとって、中性子の方向余弦を乱数で発生させるように KENO-IV を改良して比較を行った。この時、定数ライブラリーには変更を加えず、もとのライブラリーをそのまま使用した。表 5.1 にその結果を示す。また、改良する前にもほぼ妥当な結果を与えていた体系についても比較を行ったので表 5.2 に結果を示す。なお、これらの比較は 137 群 MGCL を用いて行った。表中のケース No は表 2.1 のケース No に対応している。これらの表を見ると、硝酸水溶液体系でオリジナルな KENO-IV を使用すると 3～4% も低目に算出されたものが、改良した KENO-IV では臨界値の 2% 以内に入る。ただし、オリジナルな KENO-IV でほぼ妥当な値を与えていた体系については、計算値に 1～2% の上昇が見られ、臨界値を 2% 以上越えるものも見られる。しかしながら、全体的に見れば、計算値のバラツキの大きさは、改良後の方が小さくなっている。したがって、方向余弦を乱数で決定する方法は、実効増倍係数がかなり低く算出されるような体系については有効である。改良後に、臨界値を 1% 以上越える体系については、より検討する必要がある。

Table 5.1 Comparison of Original KENO-W and Revised KENO-W with the Same Library MGCL for Nitrate Solution

| Case No. | Original KENO-W | Revised KENO-W  | Case No.        | Original KENO-W | Revised KENO-W  |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 4        | 0.9556 ± 0.0045 | 0.9895 ± 0.0047 | 9               | 0.9680 ± 0.0044 | 0.9802 ± 0.0040 |
|          | 0.9526 ± 0.0054 | 0.9923 ± 0.0053 |                 | 0.9751 ± 0.0032 | 0.9926 ± 0.0038 |
|          | 0.9593 ± 0.0053 | 0.9938 ± 0.0046 |                 | 0.9771 ± 0.0032 | 0.9909 ± 0.0036 |
|          | 0.9637 ± 0.0050 | 1.0040 ± 0.0041 |                 | 0.9719 ± 0.0030 | 0.9861 ± 0.0028 |
|          | 0.9760 ± 0.0046 | 0.9967 ± 0.0050 |                 | 0.9570 ± 0.0055 | 0.9873 ± 0.0042 |
|          | 0.9674 ± 0.0050 | 0.9978 ± 0.0047 |                 | 0.9773 ± 0.0045 | 1.0104 ± 0.0059 |
| 8        | 1.0009 ± 0.0050 | 1.0265 ± 0.0045 |                 | 0.9756 ± 0.0036 | 0.9964 ± 0.0044 |
|          | 1.0008 ± 0.0044 | 1.0187 ± 0.0047 |                 | 0.9773 ± 0.0035 | 1.0041 ± 0.0041 |
|          | 0.9838 ± 0.0035 | 1.0055 ± 0.0039 |                 | 0.9446 ± 0.0052 | 0.9868 ± 0.0044 |
|          | 0.9833 ± 0.0037 | 1.0109 ± 0.0040 |                 | 0.9756 ± 0.0043 | 0.9979 ± 0.0049 |
|          | 0.9879 ± 0.0030 | 1.0010 ± 0.0035 |                 | 0.9872 ± 0.0037 | 1.0002 ± 0.0041 |
|          | 0.9853 ± 0.0030 | 0.9981 ± 0.0034 |                 | 0.9964 ± 0.0034 | 1.0153 ± 0.0034 |
|          | 0.9938 ± 0.0038 | 0.9970 ± 0.0048 | 0.9906 ± 0.0037 | 1.0128 ± 0.0031 |                 |
|          | 0.9842 ± 0.0041 | 1.0055 ± 0.0044 | 1.0032 ± 0.0032 | 1.0124 ± 0.0029 |                 |
|          | 0.9858 ± 0.0036 | 1.0043 ± 0.0037 | 1.0186 ± 0.0029 | 1.0113 ± 0.0031 |                 |

Table 5.2 Comparison of Original KENO-IV and Revised KENO-IV with the Same Library MGCL for Lattice Assembly in Water

| Case No. | Original KENO-IV | Revised KENO-IV |
|----------|------------------|-----------------|
| 2        | 0.9898±0.0039    | 1.0108±0.0040   |
|          | 1.0148±0.0036    | 1.0197±0.0038   |
|          | 1.0158±0.0035    | 1.0141±0.0035   |
|          | 0.9979±0.0040    | 1.0080±0.0036   |
|          | 0.9958±0.0041    | 1.0057±0.0041   |
|          | 1.0056±0.0038    | 1.0223±0.0042   |
| 10       | 0.9909±0.0039    | 1.0006±0.0036   |
|          | 0.9862±0.0037    | 1.0063±0.0034   |
|          | 0.9940±0.0036    | 1.0049±0.0049   |
|          | 0.9801±0.0034    | 1.0063±0.0038   |
|          | 0.9901±0.0033    | 1.0157±0.0038   |
|          | 0.9795±0.0038    | 1.0009±0.0040   |
|          | 1.0016±0.0044    | 1.0223±0.0039   |
|          | 1.0034±0.0041    | 1.0127±0.0039   |
|          | 1.0031±0.0044    | 1.0181±0.0039   |

## 6. 結 論

今回実施したベンチマーク計算の結果、次のようなことがまとめられる。

- (1) 燃料棒が軽水中に配列した、軽水炉様体系については、実効増倍係数はモンテカルロ法による計算であることを考えれば、ほぼ妥当な結果を与える。
- (2) 核燃料の硝酸水溶液体系では、計算値は低目に算出され、はなはだしいのでは4~5%も臨界値より低くなる。
- (3)  $U_3O_8$  パッケージや $UO_2$ -アルコール-スラリー体系も軽水中の燃料棒配列と同様ほぼ妥当な計算値を与える。

これらの結果のうち、実効増倍係数が低目になる体系については考察でも述べた如く、中性子の散乱を扱う際方向余弦を平均値ではなく乱数で発生させることによりかなりの改善が見られ、今後の改良に対する示唆を与えるものと思われる。

## 謝 辞

今回のベンチマーク計算には、契約に基づき、日立製作所、住友原子力工業、石川島播磨重工業、日揮、三井造船、三菱金属の各社の御協力を得た。また、動燃事業団にも参加していただいた。ここに謝意を表します。又、原子力工学試験センター安全解析所、野村 靖氏、日本原子力研究所安全解析部長、桂木 学氏にも貴重な御助言と御協力を得たことを感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) 小室他, "KENO-IV コードベンチマーク計算(2),  $PuO_2-UO_2$  ホリスチレンコンパクトのブロック積み", JAERI-M 9015 (1980)
- 2) 片倉他, "KENO-IV コードベンチマーク計算(3),  $UF_6$  充填シリンダーの平面配列" JAERI-M 9025 (1980)
- 3) 片倉他, "KENO-IV コードベンチマーク計算(4), 硝酸ウラニル水溶液のスラブ・シリンダー体系" JAERI-M 9026 (1980)
- 4) 野村他, "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" JAERI-M 9108 (1980)
- 5) 野村他, "KENO-IV コードベンチマーク計算(6), 各種形状下のプルトニウムの臨界,

## 6. 結 論

今回実施したベンチマーク計算の結果、次のようなことがまとめられる。

- (1) 燃料棒が軽水中に配列した、軽水炉様体系については、実効増倍係数はモンテカルロ法による計算であることを考えれば、ほぼ妥当な結果を与える。
- (2) 核燃料の硝酸水溶液体系では、計算値は低目に算出され、はなはだしいのでは4~5%も臨界値より低くなる。
- (3)  $U_3O_8$  パッケージや  $UO_2$ -アルコール-スラリー体系も軽水中の燃料棒配列と同様ほぼ妥当な計算値を与える。

これらの結果のうち、実効増倍係数が低目になる体系については考察でも述べた如く、中性子の散乱を扱う際方向余弦を平均値ではなく乱数で発生させることによりかなりの改善が見られ、今後の改良に対する示唆を与えるものと思われる。

## 謝 辞

今回のベンチマーク計算には、契約に基づき、日立製作所、住友原子力工業、石川島播磨重工業、日揮、三井造船、三菱金属の各社の御協力を得た。また、動燃事業団にも参加していただいた。ここに謝意を表します。又、原子力工学試験センター安全解析所、野村 靖氏、日本原子力研究所安全解析部長、桂木 学氏にも貴重な御助言と御協力を得たことを感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) 小室他, “KENO-IV コードベンチマーク計算(2),  $PuO_2-UO_2$  ポリスチレンコンパクトのブロック積み”, JAERI-M 9015 (1980)
- 2) 片倉他, “KENO-IV コードベンチマーク計算(3),  $UF_6$  充填シリンダーの平面配列” JAERI-M 9025 (1980)
- 3) 片倉他, “KENO-IV コードベンチマーク計算(4), 硝酸ウラニル水溶液のスラブ・シリンダー体系” JAERI-M 9026 (1980)
- 4) 野村他, “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” JAERI-M 9108 (1980)
- 5) 野村他, “KENO-IV コードベンチマーク計算(6), 各種形状下のプルトニウムの臨界,

## 6. 結 論

今回実施したベンチマーク計算の結果、次のようなことがまとめられる。

- (1) 燃料棒が軽水中に配列した、軽水炉様体系については、実効増倍係数はモンテカルロ法による計算であることを考えれば、ほぼ妥当な結果を与える。
- (2) 核燃料の硝酸水溶液体系では、計算値は低目に算出され、はなはだしいのでは4~5%も臨界値より低くなる。
- (3)  $U_3O_8$  パッケージや  $UO_2$ -アルコール-スラリー体系も軽水中の燃料棒配列と同様ほぼ妥当な計算値を与える。

これらの結果のうち、実効増倍係数が低目になる体系については考察でも述べた如く、中性子の散乱を扱う際方向余弦を平均値ではなく乱数で発生させることによりかなりの改善が見られ、今後の改良に対する示唆を与えるものと思われる。

## 謝 辞

今回のベンチマーク計算には、契約に基づき、日立製作所、住友原子力工業、石川島播磨重工業、日揮、三井造船、三菱金属の各社の御協力を得た。また、動燃事業団にも参加していただいた。ここに謝意を表します。又、原子力工学試験センター安全解析所、野村 靖氏、日本原子力研究所安全解析部長、桂木 学氏にも貴重な御助言と御協力を得たことを感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) 小室他, “KENO-IV コードベンチマーク計算(2),  $PuO_2-UO_2$  ホリスチレンコンパクトのブロック積み”, JAERI-M 9015 (1980)
- 2) 片倉他, “KENO-IV コードベンチマーク計算(3),  $UF_6$  充填シリンダーの平面配列” JAERI-M 9025 (1980)
- 3) 片倉他, “KENO-IV コードベンチマーク計算(4), 硝酸ウラニル水溶液のスラブ・シリンダー体系” JAERI-M 9026 (1980)
- 4) 野村他, “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” JAERI-M 9108 (1980)
- 5) 野村他, “KENO-IV コードベンチマーク計算(6), 各種形状下のプルトニウムの臨界,

JAERI-M 9201 (1980)

- 6) 野村他, "KENO-IV コードベンチマーク計算(7), プルトニウム富化燃料棒の三角格子配列" JAERI-M 9079 (1980)
- 7) 野村他, "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" JAERI-M 9085 (1980)
- 8) 野村他, "KENO-IV コードベンチマーク計算(9),  $UO_2$  燃料棒格子配列の3連クラスター" JAERI-M 9168 (1980)
- 9) 小室他, "KENO-IV コードベンチマーク計算(10), 軽水型原子炉臨界集合体による臨界実験" JAERI-M 9147 (1980)
- 10) Y. Naito et al., "MGCL-Processor ; A Computer Code System for Processing Multigroup Constants Library MGCL." JAERI-M 9396 (1980)
- 11) L. M. Petrie and N. F. Cross, "KENO-IV. An Improved Monte Carlo Criticality Program." ORNL-4938 (1975)
- 12) R. I. Smith and G. J. Konzek, "Clean Critical Experiment Benchmarks for Plutonium Recycle in LWRs." EPRI NP-196 (1976)
- 13) M. N. Baldwin et al., "Critical Experiments Supporting Close Proximity Water Storage of Power Reactor Fuel." BAW-1484-7 (1979)
- 14) G. Tuck and I. Oh, "Benchmark Critical Experiments on Low-Enriched Uranium Oxide Systems with H/U=0.77." NUREG/CR-0674 (1979)
- 15) E. B. Johnson, "The Criticality of Heterogeneous Lattices of Experimental Beryllium Oxide Reactor Fuel Pins in Water and in Aqueous Solutions Containing Boron and Uranyl Nitrate." ORNL/ENG-2 (1976)
- 16) L. C. Schmid, "Technical Activities Quarterly Report." BNWL-1522-3 (1971)
- 17) B. M. Durst et al., "Critical Experiments with Fast Test Reactor Fuel Pins in Water." PNL-SA-7064 (1978)
- 18) D. W. Magnuson, "Critical Experiments with Enriched Uranium Dioxide." Y-DR-120 (1973)
- 19) J. R. Smotrel, "Light-Water-Moderated Reactivity of Tubular Slug Pairs Containing 1.1wt%  $^{235}U$ ." DP-MS-73-41 (1973)
- 20) R. C. Lloyd and E. D. Clayton, "Summary of Criticality Data Obtained at Battelle Pacific Northwest Laboratories on Fixed and Soluble Poisons in U+Pu Nitrate Solutions." BNWL-B-482 (1976)

- 21) S. R. Bierman et al. , "Criticality Experiments with Subcritical Clusters of 2.35 wt% and 4.29 wt% U-235 Enriched UO<sub>2</sub> Rods in Water with Uranium or Lead Reflecting Walls, " NUREG/CR-0796 (1979)
- 22) G. E. Hansen and W. H. Roach, "Six and Sixteen Group Cross Sections for Fast Intermediate Critical Assemblies, " LAMS-2543 (1961)
- 23) M. K. Drake, "Data Formats and Procedures for the ENDF Neutron Cross Section Library, " BNL-50274 (1970)
- 24) I. I. Bondarenko et al. , "Group Constants for Nuclear Reactor Calculation, " Consultants Bureau, New York (1964)
- 25) R. Q. Wright et al. , "SUPERTOG; A Program to Generate Group Constants and Pn Scattering Matrices from ENDF/B, " ORNL-TM-2679 (1969)
- 26) J. D. Macdougall, "PIXSE, " AEEW-M 318 (1963)