

JAERI-Tech
98-037



MOX溶解用電解酸化方式型Pu溶解槽の臨界安全解析

1998年8月

梅田 幹・杉川 進・中村和仁・江頭哲郎*

29-51

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1998

編集兼発行 日本原子力研究所

MOX溶解用電解酸化方式型Pu溶解槽の臨界安全解析

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センターNUCEF試験部

梅田 幹・杉川 進・中村 和仁・江頭 哲郎*

(1998年7月29日受理)

燃料サイクル安全工学研究施設 (NUCEF) では、電解酸化方式型Pu溶解槽の設計、製作を進めている。本報は、Pu溶解槽の設計のうち臨界安全解析についてまとめたものである。Pu溶解槽は、MOX粉末を供給する供給部、供給されたMOX粉末を溶液に分散・循環させる循環部、MOX粉末の溶解に利用する銀を2価に酸化する電解部の3槽と各槽を接続する配管から構成される。Pu溶解槽の臨界管理には、質量制限値を設定した全濃度の形状寸法管理を適用した。臨界安全性の評価には、モンテカルロコードKENO-IV及び核データファイルENDF/B-IVに基づき作成されたMGCL-137群ライブラリを用いた。製作及び臨界安全上必要な寸法の確保を考慮して、1槽の円筒直径と3槽間の中心間距離を求めた。この条件において、3槽を接続する配管を考慮したPu溶解槽の中性子実効増倍率を評価した結果、中性子実効増倍率 k_{eff} は0.91となり未臨界の判定基準0.95を十分下回った。これより、Pu溶解槽の臨界安全性は十分確保できる設計であることを確認した。

Criticality Safety Analysis for Plutonium Dissolver
using Silver Mediated Electrolytic Oxidation Method

Miki UMEDA, Susumu SUGIKAWA, Kazuhito NAKAMURA
and Tetsurou EGASHIRA*

Department of NUCEF Project
Nuclear Safety Research Center
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 29, 1998)

Design and construction of a plutonium dissolver using silver mediated electrolytic oxidation method are promoted in NUCEF. Criticality safety analysis for the plutonium dissolver is described in this report.

The electrolytic plutonium dissolver consists of connection pipes and three pots for MOX powder supply, circulation and electrolysis. The criticality control for the dissolver is made by geometrically safe shape with mass limitation. Monte Carlo code KENO-IV using MGCL-137 library based on ENDF/B-IV was used for the criticality safety analysis for the plutonium dissolver. Considering the required size for construction and criticality safety, diameter of pot and distance between two pots were determined. On this condition, the criticality safety analysis for the plutonium dissolver with connection pipes was carried out. As the result of the criticality safety analysis, an effective neutron multiplication factor k_{eff} of 0.91 was obtained and the criticality safety of the plutonium dissolver was confirmed on the basis of criteria of ≤ 0.95 .

Keywords : Plutonium, Dissolver, MOX Powder, Silver, Electrolytic Oxidation,
Criticality Safety, Geometrically Safe, Mass Limitation

* Mitsubishi Materials Corporation

目 次

1. はじめに	1
2. Pu系調整附属設備の概要	2
2.1 Pu溶解槽	2
2.2 運転手順	2
3. Pu溶解槽の単一ユニットの臨界安全解析	3
3.1 単一ユニットの臨界安全解析の概要	3
3.2 1槽の直径	3
3.3 3槽間の各中心間距離	4
3.4 配管を考慮したPu溶解槽の解析	5
4. Pu系調整附属設備の複数ユニットの臨界安全解析	6
4.1 複数ユニットの臨界安全解析の概要	6
4.2 複数ユニットの解析結果	6
5. おわりに	7
謝 辞	7
参考文献	7

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of Plutonium Dissolution Process	2
2.1 Pu Dissolver	2
2.2 Operation Procedure	2
3. Criticality Safety Analysis for Single-unit	3
3.1 Summary of Analysis	3
3.2 Diameter of Pot	3
3.3 Distance between two Pots	4
3.4 Analysis Considering Pipes	5
4. Criticality Safety Analysis for Multiple-unit	6
4.1 Summary of Analysis	6
4.2 Results	6
5. Conclusion	7
Acknowledgement	7
Reference	7

1. はじめに

燃料サイクル安全工学研究施設 (NUCEF) の STACY 施設では、プルトニウム硝酸水溶液及びプルトニウム硝酸水溶液とウラン硝酸水溶液の混合溶液を用いた臨界実験の実施を計画している。臨界実験で使用する溶液燃料は、ウラン・プルトニウム混合酸化物 (MOX) の粉末として入手し、核燃料取扱設備の調整附属設備に設置する Pu 溶解槽を用いて MOX 粉末を溶解することにより調製する。Pu 溶解槽の溶解方式には、近年フランスにおいて開発された電解酸化方式⁽¹⁾を採用した。電解酸化方式による溶解は、電気加熱による沸騰硝酸溶液での溶解方式に比べて、NO_x 等のオフガス発生量が少なく、MOX の性状に依存せず短時間に完全に溶解するなど溶解性能が優れている。現在、Pu 溶解槽の製作に向けた実施設計がほぼ終了している。

Pu 溶解槽の臨界管理には、質量制限値を設定した全濃度の形状寸法管理を適用している。これは、電解酸化方式の溶解槽の場合、製作上の理由から溶解槽を構成する 3 本の各槽の円筒直径に全濃度の形状寸法管理を適用できなかったためである。質量制限値 1kgPu に対して、臨界安全解析においては、単一誤操作等を考慮して、最大 2.3kgPu が Pu 溶解槽に装荷された場合も未臨界を維持できることとした。臨界安全解析には、モンテカルロコード KENO-IV 及び核データファイル ENDF/B-IV に基づき作成された MGCL-137 群ライブラリを用いた。臨界安全解析は、Pu 溶解槽単一のユニットに加えて Pu 溶解槽の周辺機器を含めた複数ユニットについても行った。

2. Pu系調整附属設備の概要

調整附属設備は、NUCEF 実験棟 A の燃取室 (Ⅱ) に設置される。

調整附属設備は、Fig.2.1 に示すように MOX を溶解する設備であり、Pu 溶解槽、還元槽等からなり、これらの機器は、調整附属設備グローブボックス (Ⅱ) に収納される。Fig.2.2 に、NUCEF 実験棟 A 燃取室 (Ⅱ) の平面配置を示す。

2.1 Pu 溶解槽

(1) 使用目的

STACY (定常臨界実験装置) で用いるプルトニウム及び劣化ウランの溶液燃料を調整するために、電解酸化方式により MOX 粉末を溶解するための機器である。

(2) 機器仕様

Fig.2.3 に示すように 3 本の円筒槽から構成され、MOX 粉末を受け入れるための供給部、MOX 粉末を溶液中に分散させて循環させるための循環部、銀イオンを酸化させるための電解部からなる。これらの 3 槽は正三角形に配置された構造で、各槽は、連通配管により接続される。材質はチタンである。

(3) 溶解原理

本 Pu 溶解槽は、槽内部で電解により 1 価の銀イオンを 2 価に酸化させ、2 価の銀イオンの高い酸化力 (標準酸化還元電位 1.98V) により MOX を溶解する。

2.2 運転手順

Pu 系調整附属設備における MOX の主な溶解手順は次のとおりである。

- ① 粉末燃料貯蔵設備から MOX 粉末貯蔵容器を取り出し、粉末燃料取扱設備において、開梱して MOX 粉末入り Pu 缶を取り出し、秤量器で秤量後、蓋開閉装置で Pu 缶の蓋を取り、吸引装置にセットする。
- ② Pu ブロワにより Pu 缶から MOX 粉末を吸引し、一旦ホップに入れ、ロータリーフィーダにより Pu 溶解槽に MOX 粉末を定量供給し、約 6 時間かけて MOX 粉末を溶解する。1 バッチで溶解する MOX 粉末は約 2.5kg (Pu : 約 0.5 kg) である。
- ③ 溶解終了後は、溶解液を還元槽へ移送する。また、Pu 溶解槽をクリーンアウトするため、硝酸で洗浄して、その洗浄液も還元槽へ移送する。次に NO₂ ガスを還元槽へ通気して、銀イオン及びプルトニウムイオンを還元する。

3. Pu 溶解槽の単一ユニットの臨界安全解析

3.1 単一ユニットの臨界安全解析の概要

臨界安全性の評価には、臨界解析計算コード（モンテカルロコード KENO-IV⁽²⁾及び核データファイル ENDF/B-IVに基づき作成された MGCL-137 群ライブラリ⁽³⁾）を使用した。これらは、多数のベンチマーク実験の解析よりその信頼性が十分検証され、臨界安全性の評価に一般的に用いられているものである。Table 3.1 に KENO-IV の計算条件を示す。解析結果の判定基準としては、解析によって得られた中性子実効増倍率が 0.95 以下の場合、臨界安全性は確保されているものとした⁽⁴⁾。

今回の臨界安全解析条件を Table 3.2 に示す。また、使用した原子個数密度を Table 3.3 に示す。臨界安全解析における燃料形態としては、MOX 粉末の溶解中における燃料の化学形態において、臨界上最も厳しい結果を与える PuO_2 とした。プルトニウム同位体は ^{239}Pu を 100wt% とした。燃料の質量は、設備の処理量の制限値である 1kgPu/day より、プルトニウム 1kg とし、今回の解析ではこれに単一誤操作等を考慮した値を用いた。この燃料の質量 (1kgPu) は、実際に 1 バッチあたり Pu 溶解槽に投入される MOX 粉末 (約 2.5kg) 中の ^{235}U をプルトニウムに換算した値を含めても十分安全側な値である。燃料密度は、 PuO_2 の理論密度 ($11.46 \text{ gPuO}_2/\text{cm}^3$) を最大とした。解析における燃料領域については、実際の Pu 溶解槽の燃料領域を包含しつつ単純化し、各槽を円筒形状とするなどした。

溶解における初期遊離硝酸濃度は $4 \text{ mol}/\ell$ であるが、溶解の進行にともない溶液中の遊離硝酸濃度は低下する。硝酸根に含まれる窒素原子核は中性子吸収断面積が比較的大きく、負の反応度を与えるため、今回の臨界安全解析での遊離硝酸濃度は $0 \text{ mol}/\ell$ とした。

3.2 1 槽の直径

Pu 溶解槽は、2.1 で述べたとおり円筒形状の 3 槽から構成される。1 槽の直径を決めるにあたっては、製作上必要な寸法を確保できるよう考慮した。電解部は陰極、隔膜、陽極から構成されるため、13cm 程度の直径が必要となる。ここでは、この寸法を確保しつつ臨界安全性が確保できる直径を求める。

まず、プルトニウムの質量を単一誤操作等を考慮した値である 2.3kg に固定し、燃料密度と円筒直径をパラメータとして臨界安全解析を行った。計算モデルを Fig.3.1 に示す。プルトニウムの質量を固定したため、同一円筒直径のモデルでは、燃料密度の変化にしたがって円筒高さが変化することとなる。臨界安全解析では、燃料密度と円筒直径をパラメータとし、円筒直径は 12, 13, 14cm とした。解析結果を Table 3.4、Fig.3.2 に示す。

Table 3.4、Fig.3.2 より、円筒直径が 12, 13, 14cm における中性子実効増倍率の最大値はそれぞれ 0.85, 0.88, 0.92 となり、円筒直径が大きくなるにしたがって中性子実効増倍率の最大値も大きくなっている。解析の結果より、いずれの直径においても中性子実効増倍率の値は判定基準 0.95 を下回っており、Pu 溶解槽の 1 槽の直径としては製作上必要な寸法であ

る 13cm に設定した。

槽内で燃料領域が球形状を形成できるほど燃料密度が高い場合には、扁平な円盤形状よりも球形状の方が中性子実効増倍率が大きくなる可能性がある。そこで、プルトニウム質量 (2.3kg) と円筒直径 (13cm) を固定した場合について、燃料領域を円盤形状と球形状として解析を行った。解析結果を Table 3.5、Fig.3.3 に示す。この時、球形状の燃料領域については、球直径が円筒直径である 13cm を超えない燃料密度範囲で解析を行った。

Table 3.5、Fig.3.3 より、燃料密度が高い領域において球形状時の中性子実効増倍率の方が円盤形状よりも大きくなっていることがわかる。しかし、中性子実効増倍率が最大となるのは、燃料密度がこの領域よりも低い場合である。これより、燃料密度が高い場合に燃料体系が球形状となったとしても、臨界安全解析には影響が無いことがわかり、Table 3.4、Fig.3.2 の解析結果の妥当性が確認された。また、これ以降の臨界安全解析で燃料密度をパラメータとする場合に、燃料領域は円筒形状とする。

3.3 3 槽間の各中心間距離

2.1 で述べたとおり、Pu 溶解槽は円筒形状の 3 槽が正三角形に配置された構造となっている。ここでは、各槽間の中性子の相互干渉を評価することにより、3 槽間の各中心間距離を求める。

今回の臨界安全解析にあたっては、単一誤操作等を考慮した装荷量 2.3kg のプルトニウムの Pu 溶解槽内での分布の検討を省略するために、現実よりも大きな安全裕度を考慮したモデルを選定した。つまり、Pu 溶解槽の 3 槽間に起こり得る燃料の分布を包絡した評価を行うため、各々の槽に 2.3kg のプルトニウム (3 槽の合計は 6.9kgPu) が装荷されているものとした。また、それぞれ槽の直径は 13cm (固定) とした。計算モデルを Fig.3.4 に示す。

まず空間水密度を $0\text{g}/\text{cm}^3$ (固定) とし、燃料密度と各槽の中心間距離をパラメータとして臨界安全解析を行った。ここで、中心間距離は 33, 43, 53cm とした。計算結果を Table 3.6、Fig.3.5 に示す。

Table 3.6、Fig.3.5 より、いずれの中心間距離においても、燃料密度が $0.23\text{gPuO}_2/\text{cm}^3$ 付近の時に中性子実効増倍率は最大となることがわかった。

次に、この燃料密度 ($0.23\text{gPuO}_2/\text{cm}^3$) を用いて空間水密度と中心間距離をパラメータとして臨界安全解析を行った。ここで、空間水密度は水没条件である $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ を最大とした。計算結果を Table 3.7、Fig.3.6 に示す。

Table 3.7、Fig.3.6 より、中心間距離が 33, 43, 53cm における中性子実効増倍率の最大値は、それぞれ 0.95, 0.90, 0.89 となった。各槽の面間距離が 30cm 以上となる中心間距離 43cm 以上では、ほとんど各槽間の相互干渉の影響がないことがわかる。各中性子実効増倍率の値とも判定基準 0.95 以下であるが、Pu 溶解槽の各槽の中心間距離としては、3.4 で述べる配管分を含めた安全裕度を考慮して 53cm とした。また、中心間距離が 53cm の場合、空間水密度が $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ の時に中性子実効増倍率は最大となる。この値は、3.2 で述べた Pu 溶解

槽 1 槽に 2.3kgPu を装荷した場合の中性子実効増倍率と比較してもほぼ等しい値となった。

3.4 配管を考慮した Pu 溶解槽の解析

Pu 溶解槽の円筒形状の 3 槽は、それぞれが配管により接続されている。ここでは、各槽間を通る配管が中性子実効増倍率に与える影響を評価する。

計算モデルを Fig.3.7 に示す。Pu 溶解槽の 1 槽の直径は 13cm、各槽の中心距離は 53cm とした。また、Pu 溶解槽に装荷されるプルトニウムの質量は、配管内も含めて 3.3 での臨界安全解析と同様に 6.9kgPu とした。

配管の影響を評価するために、配管を考慮しない場合と配管を考慮した場合について臨界安全解析を行った。この時、空間水密度は 1.0g/cm^3 (固定) とし、燃料密度をパラメータとした。燃料密度は、Table 3.6、Fig.3.5 の結果より中性子実効増倍率が最大となる付近である $0.1\sim 0.4\text{ gPuO}_2/\text{cm}^3$ とした。それぞれの結果を Table 3.8、Table 3.9、Fig.3.8、Fig.3.9 に示す。

Table 3.8、Table 3.9、Fig.3.8、Fig.3.9 より、配管を考慮することにより中性子実効増倍率は約 2% 上昇することがわかった。ただし、配管を考慮した場合においても中性子実効増倍率の最大値は 0.91 以下であり、判定基準 0.95 を十分下回っている。

次に、燃料密度を中性子実効増倍率が最大をとる時の値である約 $0.26\text{gPuO}_2/\text{cm}^3$ に固定し、空間水密度をパラメータとして臨界安全解析を行った。解析結果を Table 3.10、Fig.3.10 に示す。Table 3.10、Fig.3.10 より空間水密度が 1.0g/cm^3 の時に中性子実効増倍率が最大となっていることがわかる。これより、空間水密度を変化させても、配管を考慮した場合の中性子実効増倍率の最大値は上述の 0.91 以下であることが確認された。

4. Pu系調整附属設備の複数ユニットの臨界安全解析

4.1 複数ユニットの臨界安全解析の概要

Pu系調整附属設備が設置されるのは、NUCEF 実験棟 A の燃取室 (Ⅱ) である。Pu系調整附属設備の複数ユニットの臨界安全解析は、燃取室 (Ⅱ) に既に設置されている調整附属設備グローブボックス (Ⅰ) と、Pu溶解槽及び還元槽等を収納する調整附属設備グローブボックス (Ⅱ) について行った。

燃取室 (Ⅱ) には、他に移送トンネル、粉末燃料取扱設備グローブボックス (Ⅱ) がある。MOXは、移送トンネル及び粉末燃料取扱設備グローブボックスを経由して、調整附属設備グローブボックス内のフィルタボックスに移送され、フィルタボックスからPu溶解槽に投入される。Pu溶解槽は、質量管理を行うため、Pu溶解槽内のプルトニウムが払出されるまで、次の溶解処理のためのMOXは、これらのグローブボックス及び機器に受入れないように管理される。複数ユニットの臨界安全解析では保守的に、調整附属設備グローブボックス (Ⅱ) 内フィルタボックスに、PuO₂-水系の質量制限値である4.5kgのプルトニウムが存在するものとした。これは、フィルタボックスが単一ユニットでの中性子実効増倍率が高いPu溶解槽、還元槽に最も近いためである。

解析コードは、単一ユニットの臨界安全解析と同様モンテカルロコードKENO-IV及び核データファイルENDF/B-IVに基づき作成されたMGCL-137群ライブラリを使用した。KENO-IVの計算条件はTable 3.1と同じである。

複数ユニットの臨界安全解析における各機器の燃料密度は、各機器の単一ユニットの臨界安全解析における最適減速燃料密度とした。Table 4.1に各機器の燃料条件を示す。また、複数ユニットの臨界安全解析に使用した原子個数密度はTable 3.3に示してある。

Pu溶解槽の燃料領域は、単一ユニットの解析時 (Fig.3.7) と同様とし、その他の機器の燃料領域は、機器に付随する配管の燃料の影響を考慮して、割増した体積を持つように設定した。

複数の機器が配置された体系では、各機器間の距離が小さい程、体系の中性子実効増倍率は高くなるので、解析モデルにおいては、各機器間の距離は実際の寸法よりも小さくなるような値に設定した。周囲は、室のコンクリートによる反射を考慮するため、周囲に60cm厚のコンクリートを設け、空間水密度をパラメータとした。Fig.4.1に複数ユニットの解析モデルを示す。

4.2 複数ユニットの解析結果

Table 4.2、Fig.4.2に複数ユニットの解析結果を示す。中性子実効増倍率が最大となるのは空間水密度が1.0g/cm³の場合で、0.92である。これより、複数ユニットの中性子実効増倍率は判定基準0.95を下回ることがわかり、Pu系調整附属設備の複数ユニットの臨界安全解析においても臨界安全性が確保できることが確認できた。

5. おわりに

燃料サイクル安全工学研究施設 (NUCEF) の STACY 施設では、プルトニウム硝酸水溶液及びプルトニウム硝酸水溶液とウラン硝酸水溶液の混合溶液を用いた臨界実験に向けて、電解酸化方式の Pu 溶解槽等の設計・製作を進めている。Pu 溶解槽の臨界安全解析において、単一ユニットでの解析の結果、Pu 溶解槽は、プルトニウム質量 1kg の質量制限値に単一誤操作等を考慮した 2.3kgPu に対して、1 槽の円筒直径を 13cm、3 槽間の中心間距離を 53cm と寸法を制限することにより中性子実効増倍率が 0.91 となり、臨界安全性の判定基準である 0.95 を十分下回った。また、Pu 系の調整附属設備に関する複数ユニットの臨界安全解析を行い、臨界安全性を確認した。以上の臨界安全解析により、今回設計した Pu 溶解設備の臨界安全性は十分確保できることを確認した。

謝辞

NUCEF 試験部長 竹下功氏には、本プロジェクトの推進及び本書の作成において貴重なコメントを頂きました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- (1) F.J.Pncelet, M.H.Mouliney, V.Decobert, M.Lecomte : “Industrial Use of Electrogenerated Ag II for PuO₂ Dissolution”, Proc. of RECOD'94, volume 1 (1994)
- (2) L.M.Petrie and N.F.Cross : “KENO-IV An Improved Monte Carlo Criticality Program”, ORLN-4983 (1975)
- (3) Y.Naito, et al. : “MGCL-PROCESSOR : A Computer Code System for Processing Multigroup Constants Library MGCL”, JAERI-M 9396 (1981)
- (4) 科学技術庁原子力安全局核燃料規制課編 : “臨界安全ハンドブック”, につかん書房 (1988)

Table 3.1 Calculation Condition of KENO-IV

エネルギー群数	137
計算世代数	303
1世代あたりの中性子発生数	2000
スキップ世代数	202
初期中性子発生分布	一様分布 (平坦)

Table 3.2 Condition of Criticality Safety Analysis

燃料形態	PuO ₂ -水均質系
同位体組成	Pu-239 : 100%
反射条件	完全水反射 (計算上は 30cm の水)
判定基準	$k_{eff} + 3\sigma \leq 0.95$

Table 3.3 Atomic Number Density used in Criticality Safety Analysis (1/2)

物質	PuO ₂ 密度 (gPuO ₂ /cm ³)	原子個数密度 (個/barn・cm)	
PuO ₂ -水系	11.46 (理論密度)	O	5.091×10^{-2}
		²³⁹ Pu	2.545×10^{-2}
		H	3.330×10^{-2}
	5.73 (理論密度の 50%)	O	4.210×10^{-2}
		²³⁹ Pu	1.273×10^{-2}
		H	5.328×10^{-2}
	2.29 (理論密度の 20%)	O	3.682×10^{-2}
		²³⁹ Pu	5.091×10^{-3}
		H	5.994×10^{-2}
	1.15 (理論密度の 10%)	O	3.506×10^{-2}
		²³⁹ Pu	2.545×10^{-3}
		H	6.327×10^{-2}
	0.573 (理論密度の 5%)	O	3.418×10^{-2}
		²³⁹ Pu	1.273×10^{-3}
		H	6.360×10^{-2}
	0.516 (理論密度の 4.5%)	O	3.409×10^{-2}
		²³⁹ Pu	1.145×10^{-3}
		H	6.394×10^{-2}
	0.458 (理論密度の 4%)	O	3.400×10^{-2}
		²³⁹ Pu	1.018×10^{-3}
H		6.427×10^{-2}	
0.401 (理論密度の 3.5%)	O	3.392×10^{-2}	
	²³⁹ Pu	8.908×10^{-4}	
	H	6.460×10^{-2}	
0.344 (理論密度の 3%)	O	3.383×10^{-2}	
	²³⁹ Pu	7.636×10^{-4}	
	H	6.493×10^{-2}	
0.287 (理論密度の 2.5%)	O	3.374×10^{-2}	
	²³⁹ Pu	6.363×10^{-4}	
	H	6.510×10^{-2}	
0.258 (理論密度の 2.25%)	O	3.370×10^{-2}	
	²³⁹ Pu	5.727×10^{-4}	
	H	6.527×10^{-2}	
0.229 (理論密度の 2%)	O	3.365×10^{-2}	
	²³⁹ Pu	5.091×10^{-4}	
	H	6.593×10^{-2}	
0.115 (理論密度の 1%)	O	3.348×10^{-2}	
	²³⁹ Pu	2.545×10^{-4}	

Table 3.3 Atomic Number Density used in Criticality Safety Analysis (2/2)

物質	密度 (g/cm ³)	原子個数密度 (個/barn · cm)	
Pu 硝酸水溶液 (400gPu/l)	1.654	H	5.608×10^{-2}
		N	4.029×10^{-3}
		O	4.013×10^{-2}
		²³⁹ Pu	1.007×10^{-3}
コンクリート	2.3	H	1.374×10^{-2}
		C	1.153×10^{-4}
		O	4.592×10^{-2}
		Na	9.640×10^{-4}
		Mg	1.239×10^{-4}
		Al	1.741×10^{-3}
		Si	1.662×10^{-2}
		K	4.605×10^{-4}
		Ca	1.503×10^{-3}
Fe	3.449×10^{-4}		

Table 3.4 Criticality Safety Analysis Result (Parameters : Fuel Density and Cylinder Diameter)

燃料密度 (gPu/cm ³)	円筒直径 : 12cm		円筒直径 : 13cm		円筒直径 : 14cm	
	keff	3 σ	keff	3 σ	keff	3 σ
0.10	0.795	0.00858	0.847	0.00852	0.880	0.00849
0.20	0.835	0.00882	0.871	0.00858	0.910	0.00900
0.51	0.832	0.00981	0.857	0.00792	0.881	0.00888
1.01	0.777	0.00792	0.783	0.00849	0.791	0.00861
2.02	0.690	0.00768	0.695	0.00729	0.689	0.00825
5.05	0.590	0.00693	0.588	0.00708	0.581	0.00657
10.11	0.579	0.00600	0.576	0.00720	0.567	0.00744

Table 3.5 Criticality Safety Analysis Result (Comparison of Cylinder and Sphere Geometry)

燃料密度 (gPu/cm ³)	円盤形状		球形状	
	keff	3 σ	keff	3 σ
0.10	0.847	0.00852	—————	—————
0.20	0.871	0.00858	—————	—————
0.51	0.857	0.00792	—————	—————
1.01	0.783	0.00849	—————	—————
2.02	0.695	0.00729	0.685	0.00798
5.05	0.588	0.00708	0.601	0.00648
10.11	0.576	0.00720	0.623	0.00648

Table 3.6 Criticality Safety Analysis Result (Parameters : Fuel Density and Distance between Pot Centers)

燃料密度 (gPuO ₂ /cm ³)	中心間距離 : 33cm		中心間距離 : 43cm		中心間距離 : 53cm	
	keff	3 σ	keff	3 σ	keff	3 σ
0.11	0.924	0.00762	0.873	0.00792	0.845	0.00780
0.23	0.936	0.01011	0.891	0.00900	0.861	0.00900
0.57	0.891	0.00912	0.848	0.00885	0.819	0.00894
1.15	0.798	0.00837	0.760	0.00834	0.741	0.00873
2.29	0.703	0.00747	0.673	0.00792	0.659	0.00663
5.73	0.593	0.00705	0.578	0.00624	0.572	0.00732
11.46	0.573	0.00699	0.564	0.00717	0.565	0.00708

Table 3.7 Criticality Safety Analysis Result

(Parameters : Water Density in Void Space and Distance between Pot Centers)

空間水密度 (g/cm ³)	中心間距離 : 33cm		中心間距離 : 43cm		中心間距離 : 53cm	
	keff	3 σ	keff	3 σ	keff	3 σ
0.0	0.936	0.01011	0.891	0.00900	0.861	0.00900
0.1	————	————	————	————	0.853	0.00915
0.2	0.937	0.00855	0.872	0.00909	————	————
0.3	————	————	————	————	0.846	0.00789
0.4	0.908	0.00813	0.866	0.00882	————	————
0.5	————	————	————	————	0.854	0.01023
0.6	0.900	0.00930	0.869	0.00960	————	————
0.7	————	————	————	————	0.869	0.00900
0.8	0.891	0.00942	0.879	0.00840	————	————
0.9	————	————	————	————	0.880	0.00921
1.0	0.890	0.00873	0.885	0.00810	0.881	0.00972

Table 3.8 Criticality Safety Analysis Result (Without Pipes)

燃料密度(gPuO ₂ /cm ³)	keff	3 σ
0.11	0.840	0.00810
0.23	0.872	0.00768
0.29	0.874	0.00870
0.34	0.879	0.00837
0.46	0.858	0.00930

Table 3.9 Criticality Safety Analysis Result (With Pipes)

燃料密度(gPuO ₂ /cm ³)	keff	3 σ
0.11	0.857	0.00930
0.17	0.878	0.00984
0.23	0.892	0.00870
0.26	0.895	0.00639
0.29	0.889	0.00873

Table 3.10 Criticality Safety Analysis Result

(With Pipes, Parameter : Water Density in Void Space)

空間水密度(g/cm ³)	keff	3 σ
0.0	0.865	0.00819
0.2	0.864	0.00936
0.4	0.866	0.00879
0.6	0.873	0.00876
0.8	0.888	0.00831
1.0	0.895	0.00639

Table 4.1 Fuel Density of each Equipment at Criticality Safety Analysis of Multiple-units

機器	燃料形態	燃料密度	形状
Pu 溶解槽	PuO ₂ -水系	0.26gPuO ₂ /cm ³	Fig.3.7 の燃料部と同じ
還元槽	Pu 硝酸水溶液	400gPu/ℓ	円筒 (直径 13.7cm×高さ 130cm)
フィルタボックス	PuO ₂ -水系	11.46gPuO ₂ /cm ³	直径 9.5cm の球
ろ過器 (Ⅲ)	PuO ₂ -水系	11.46gPuO ₂ /cm ³	円筒(直径 6.2cm×高さ 51cm)
溶解液計量槽	Pu 硝酸水溶液	400gPu/ℓ	円筒(直径 13.7cm×高さ 264cm)
送液ポット	Pu 硝酸水溶液	400gPu/ℓ	円筒(直径 13.7cm×高さ 48cm)
ろ過器 (Ⅰ) A, B	PuO ₂ -水系	11.46gPuO ₂ /cm ³	円筒(直径 5.6cm×高さ 46cm)
ろ過器 (Ⅱ)	PuO ₂ -水系	11.46gPuO ₂ /cm ³	円筒(直径 5.6cm×高さ 46cm)

Table 4.2 Criticality Safety Analysis Result of Multiple-units

(Parameter : Water Density in Void Space)

空間水密度(g/cm ³)	K _{eff}	3σ
0	0.557	0.00498
0.2	0.748	0.00591
0.4	0.806	0.00690
0.6	0.856	0.00582
0.8	0.884	0.00663
1.0	0.909	0.00618

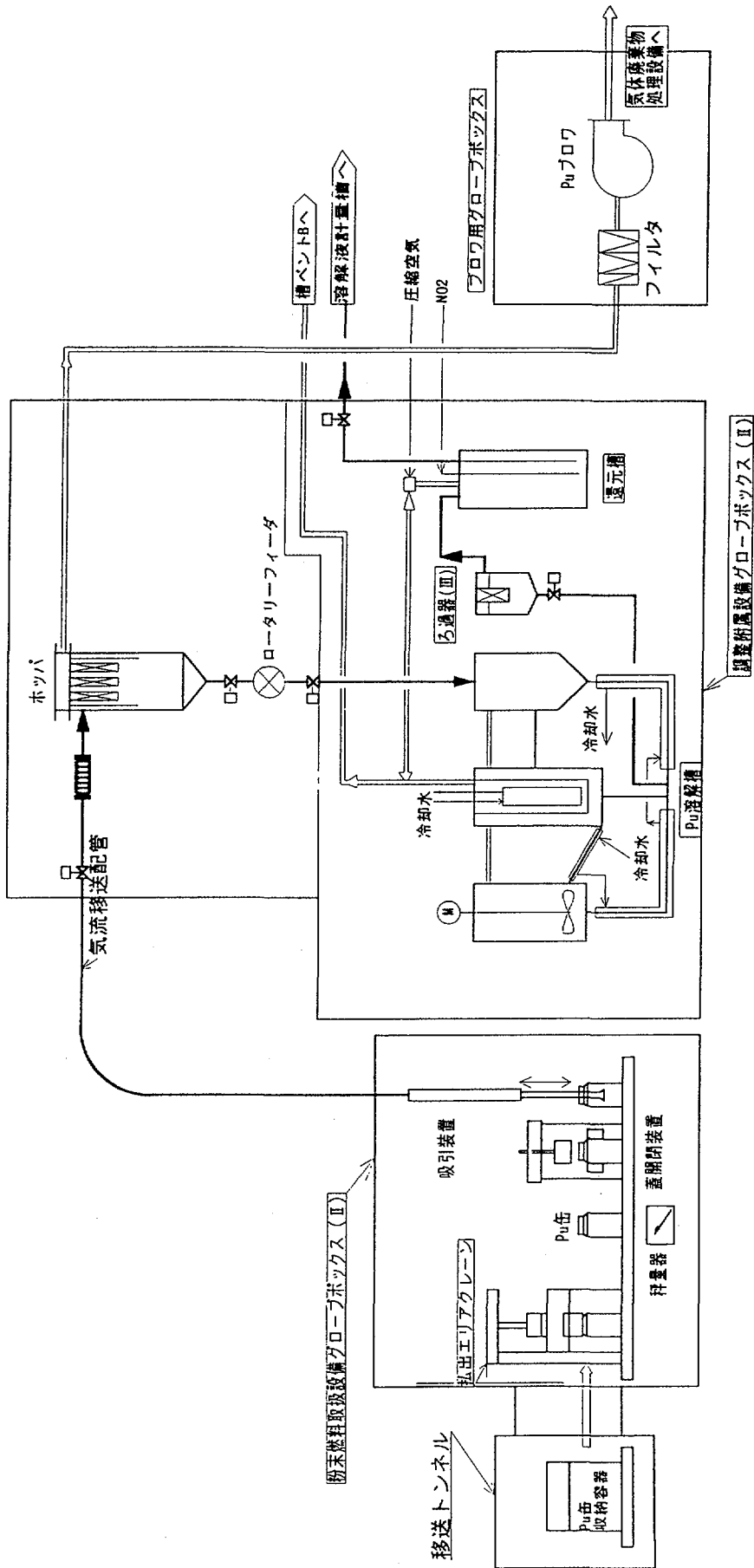


Fig.2.1 Outline of Plutonium Dissolution Process

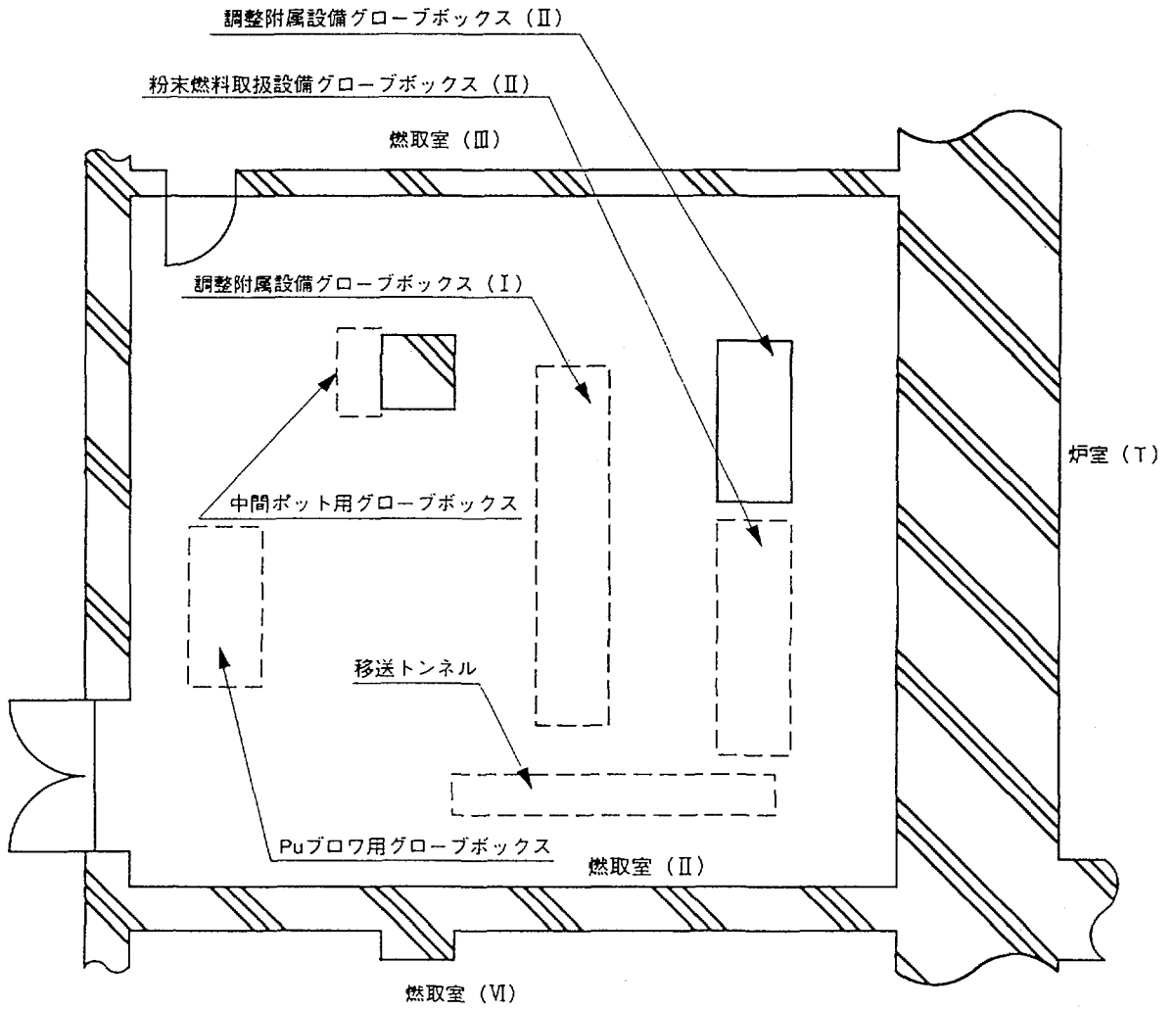


Fig.2.2 Layout of Fuel Treatment Room (II)

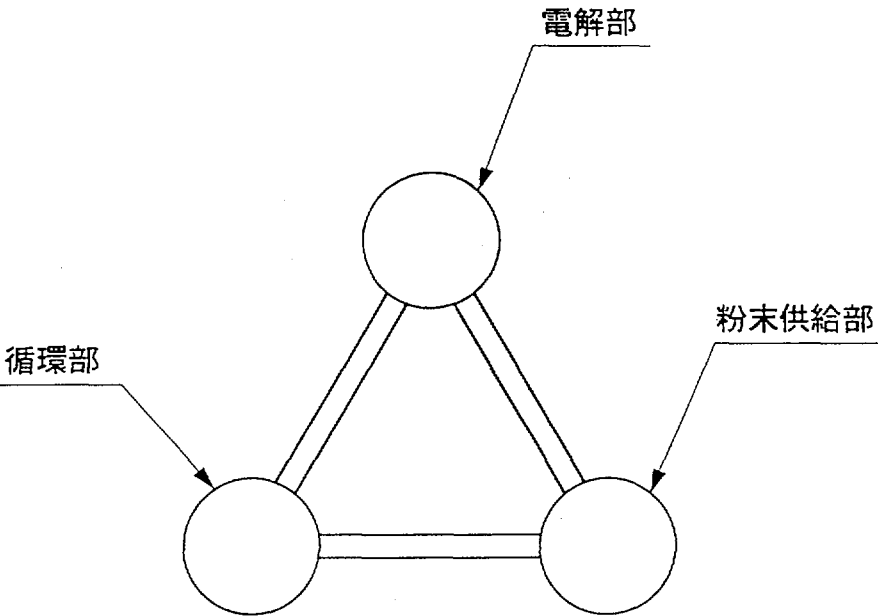
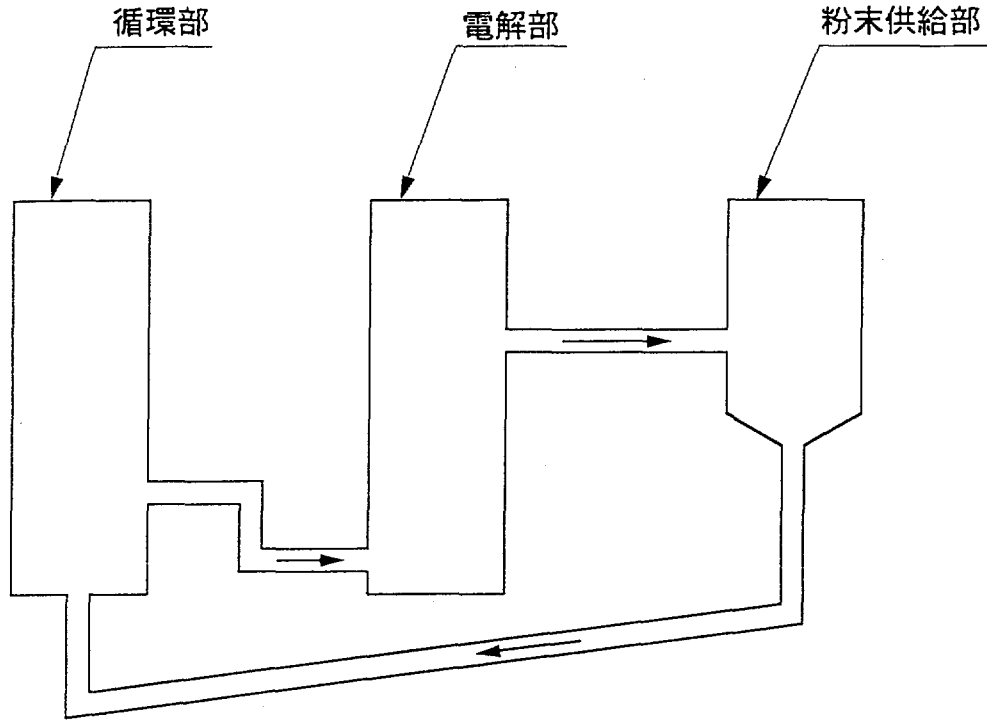


Fig.2.3 Plutonium Dissolver

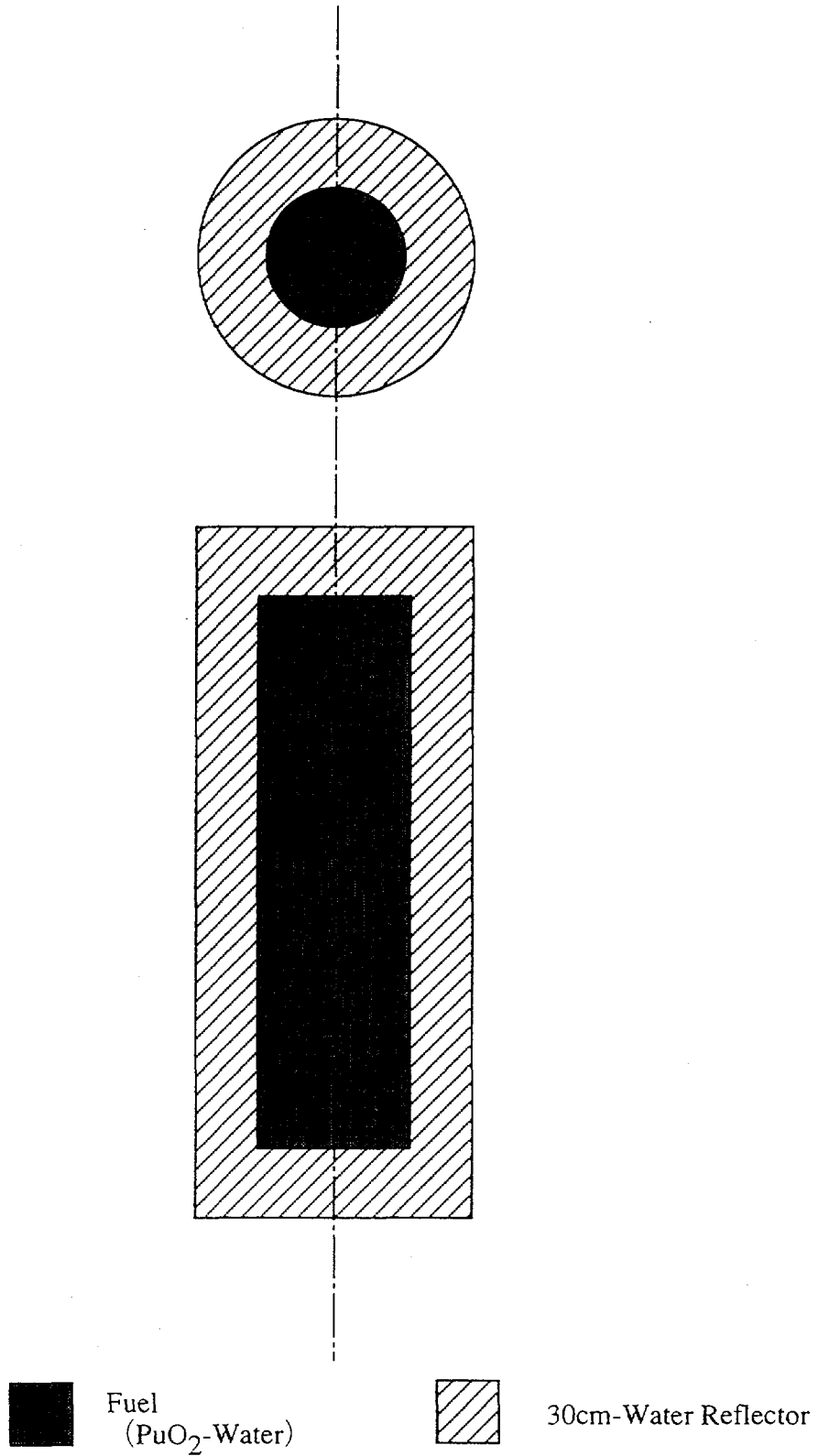


Fig.3.1 Analysis Model of One Pot

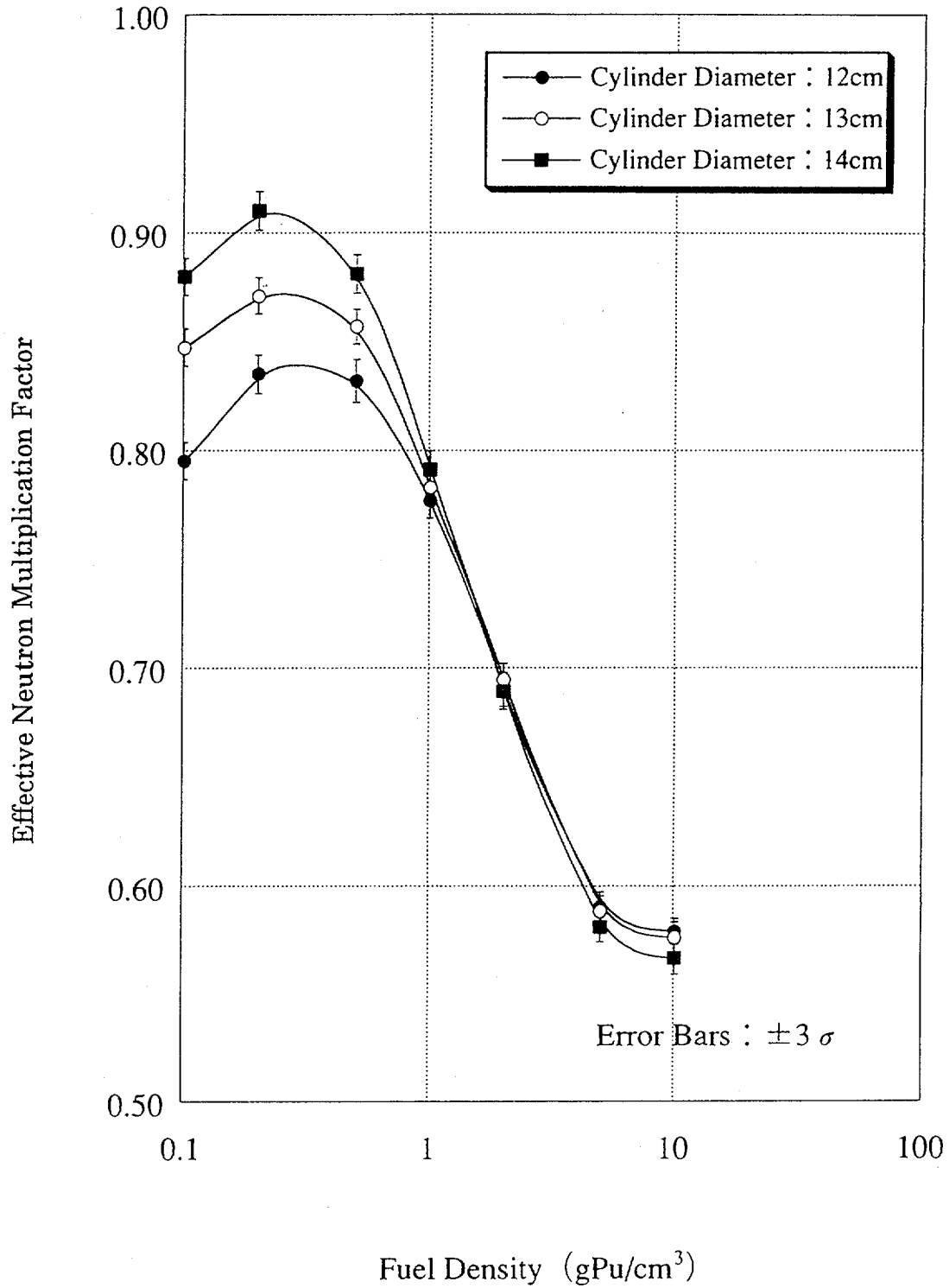


Fig.3.2 Criticality Safety Analysis Result
 (Parameters : Fuel Density and Cylinder Diameter)

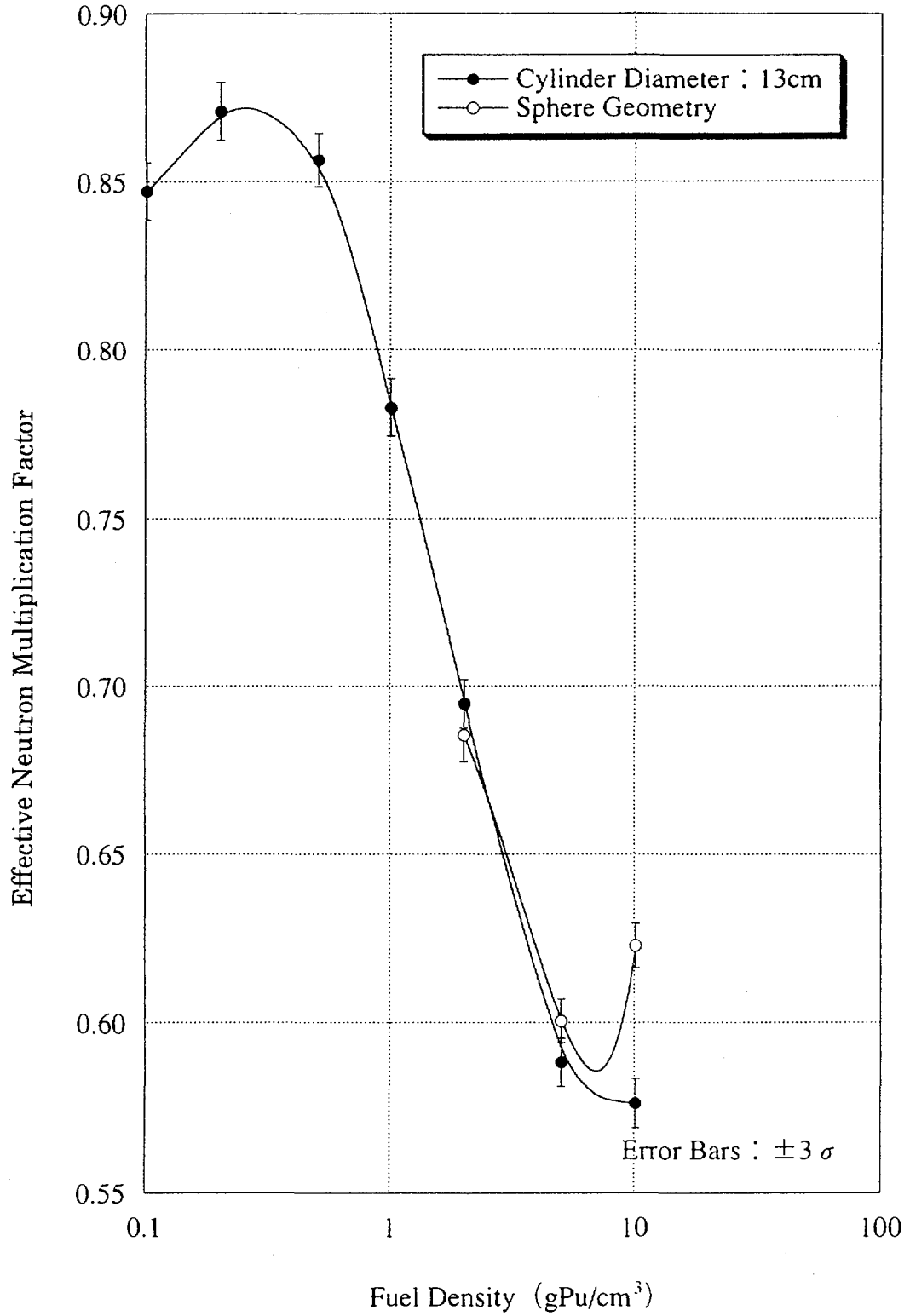


Fig.3.3 Criticality Safety Analysis Result
(Comparison of Cylinder and Sphere Geometry)

■ : Fuel ▨ : 30cm-Water Reflector □ : Void Space
(Water Density is variable)

Diameter of One Pot : 13cm
Pu Mass : 2.3kg Each Pot
(Total : 6.9kgPu)

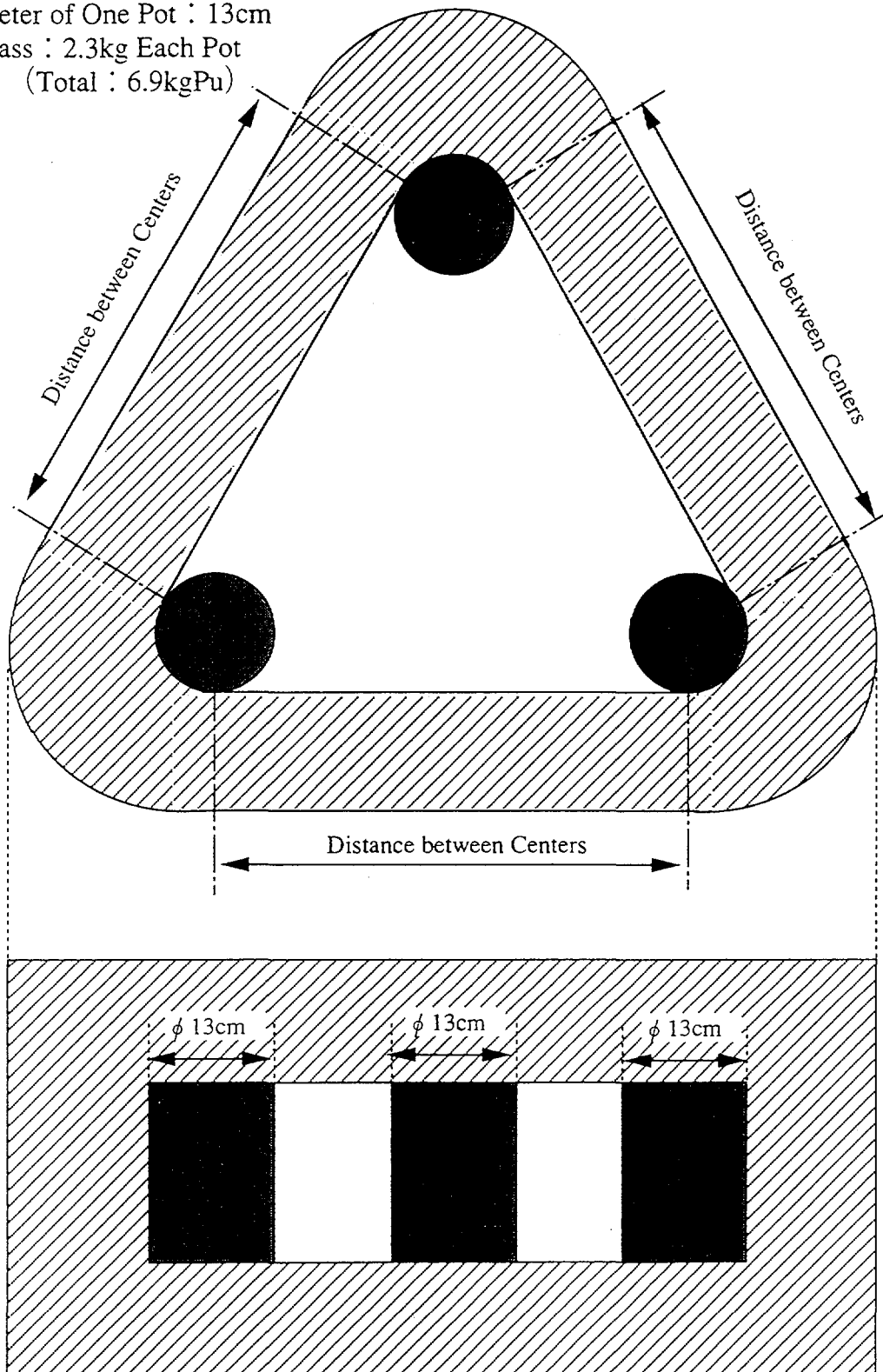


Fig.3.4 Analysis Model of Three Pots

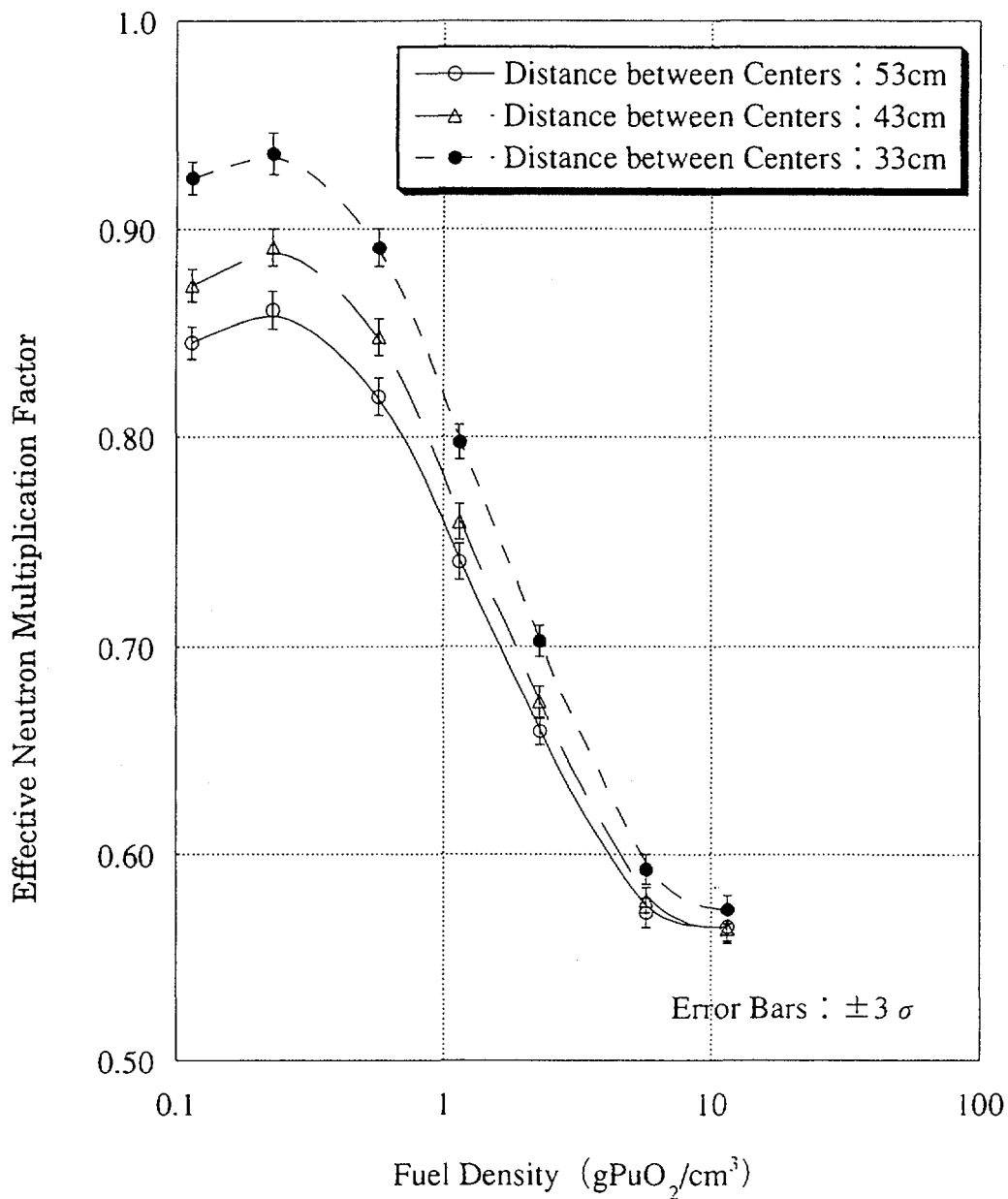


Fig.3.5 Criticality Safety Analysis Result
 (Parameters : Fuel Density and Distance between Pot Centers)

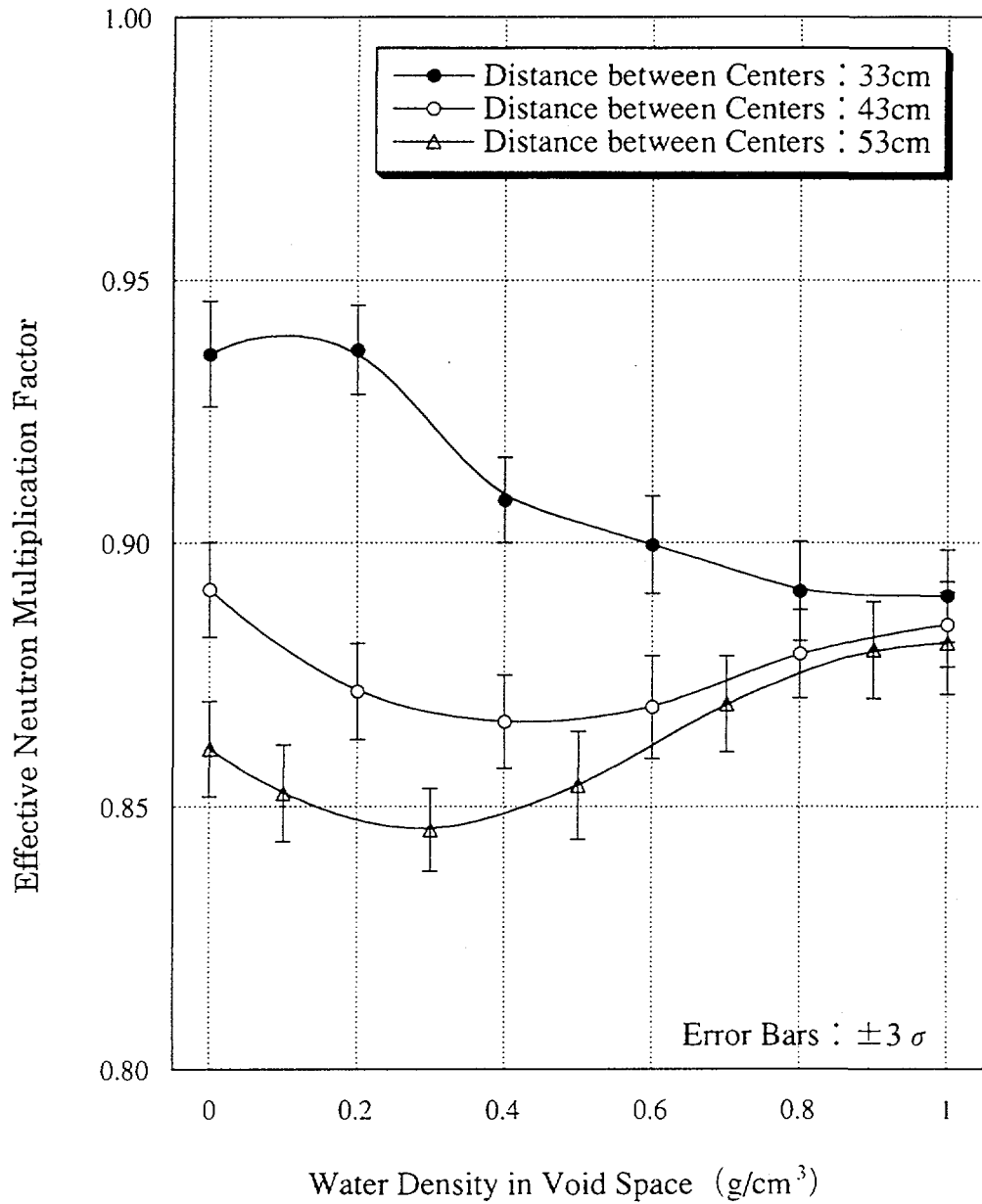


Fig.3.6 Criticality Safety Analysis Result
 (Parameters : Water Density in Void Space
 and Distance between Pot Centers)

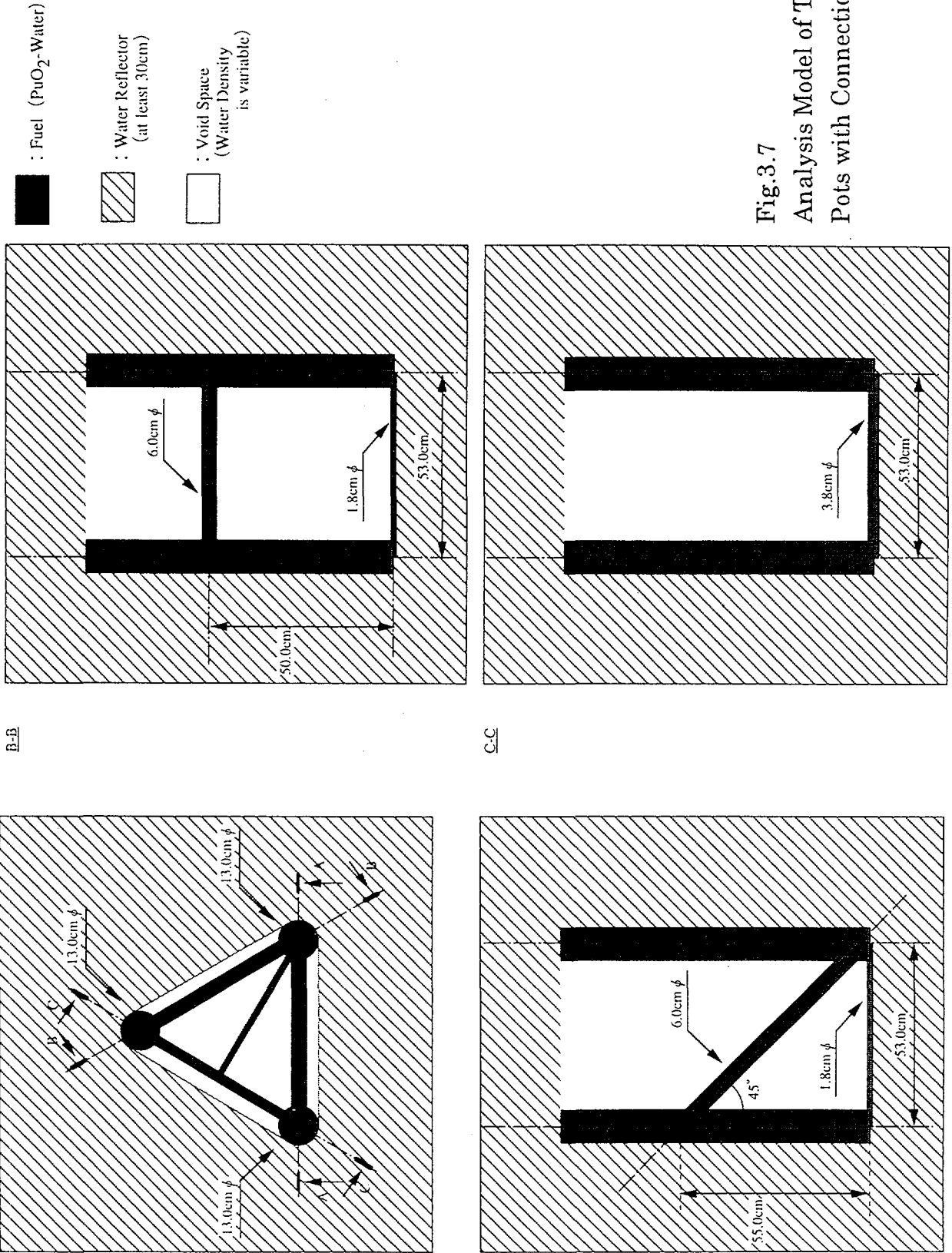


Fig.3.7
Analysis Model of Three
Pots with Connection Pipes

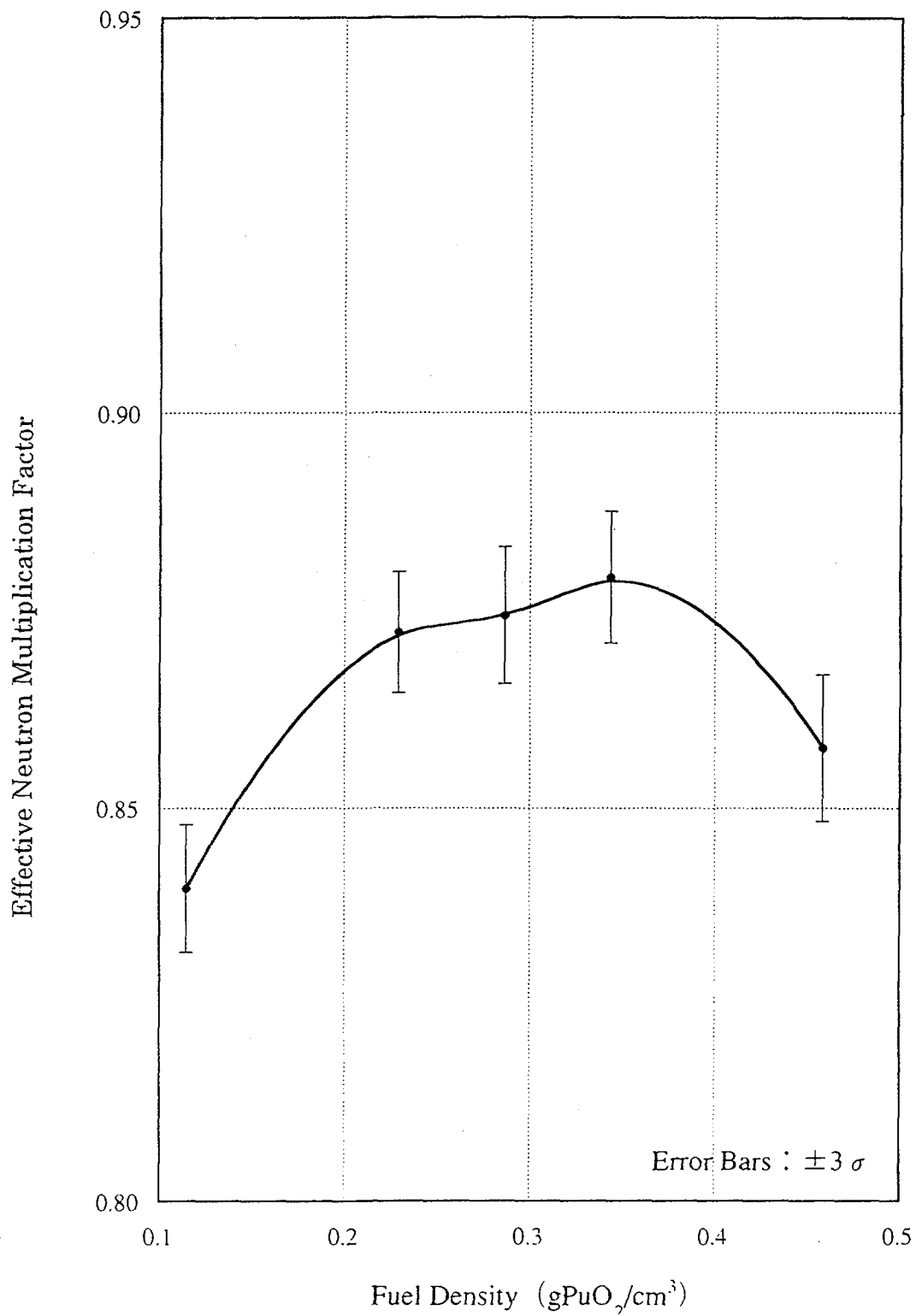


Fig.3.8 Criticality Safety Analysis Result
(without Connection Pipes)

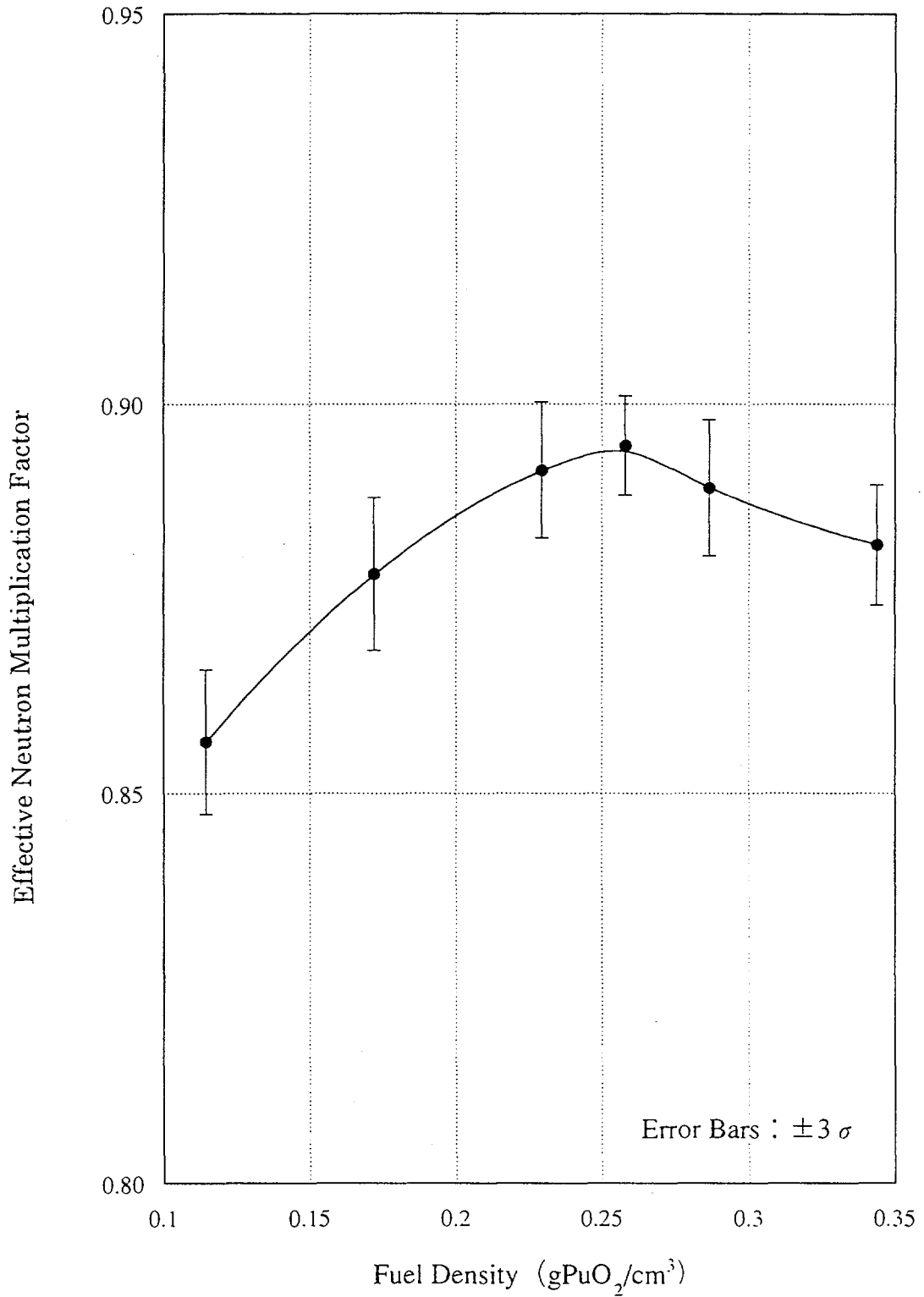


Fig.3.9 Criticality Safety Analysis Result
(with Connection Pipes)

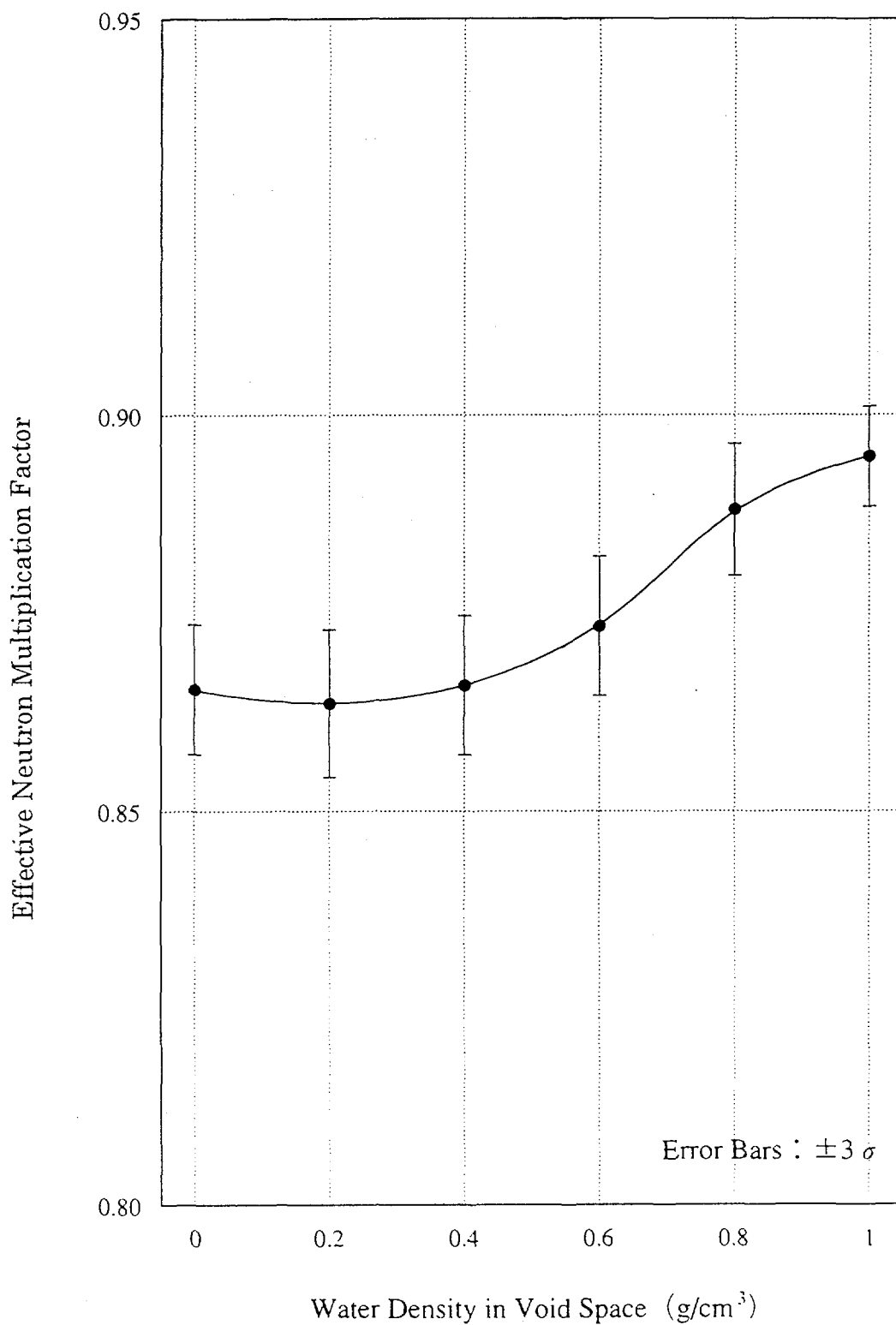


Fig.3.10 Criticality Safety Analysis Result
 (with Connection Pipes, Parameter : Water Density in Void Space)

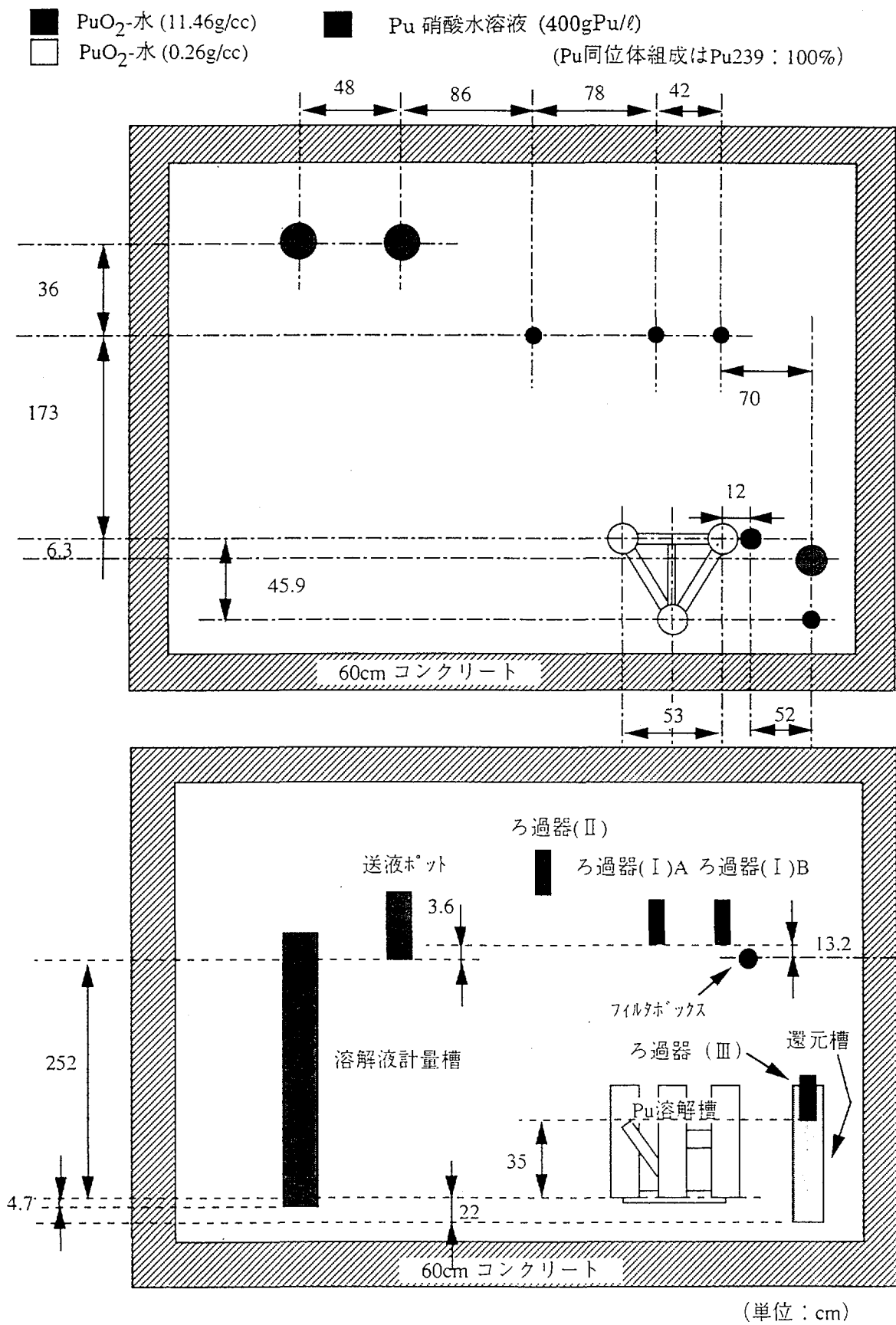


Fig.4.1 Analysis Model of Multiple Units

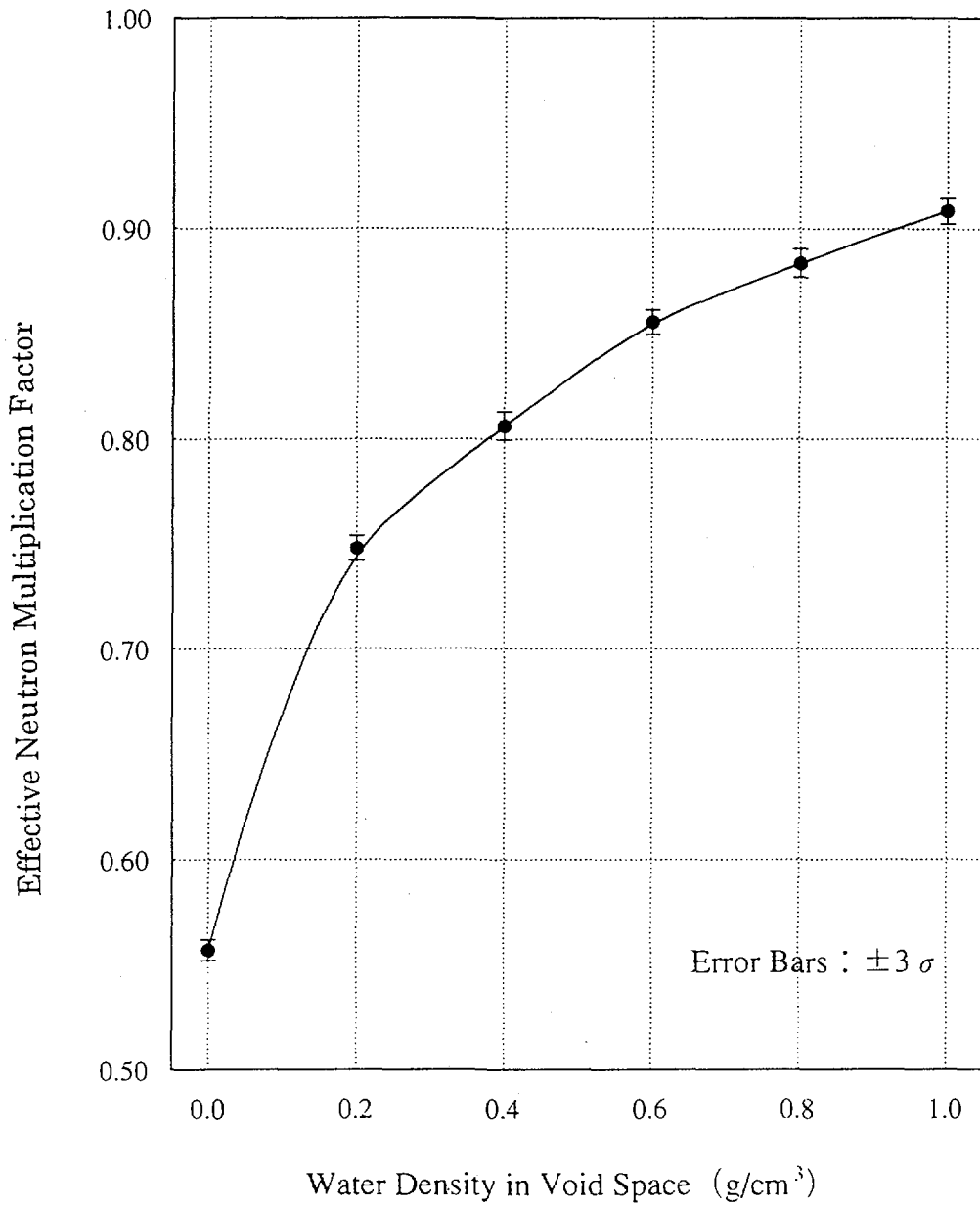


Fig.4.2 Criticality Safety Analysis Result of Multiple Units
(Parameter : Water Density in Void Space)

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値は CODATA の1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- bar は, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal = 4.18605 J (計量法) = 4.184 J (熱化学) = 4.1855 J (15 °C) = 4.1868 J (国際蒸気表)
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵	
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS (馬力) = 75 kgf·m/s
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	= 735.499 W
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

MOX溶解用電解酸化方式型Pu溶解槽の臨界安全解析