

JAERI-Tech
95-025



枝管の反応度効果についての計算による検討
(受託研究)

1995年3月

奥野 浩・内藤倅孝・金子俊幸*

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

This report is issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute.1994

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 (株)高野高速印刷

枝管の反応度効果についての計算による検討

日本原子力研究所東海研究所燃料サイクル安全工学部

奥野 浩・内藤 俣孝・金子 俊幸*

(1995年2月17日受理)

燃料溶液の入った容器に細い配管（枝管）が付いたときの反応度上昇割合を評価する簡易評価式を提案し、数値計算により妥当性を検討した。評価式は中性子収支を表す方程式に基づいたもので、既に複数ユニット燃料体系の臨界安全解析コードMUTUALに適用されているものに、さらに枝管側の中性子発生代表点を中心からずれることを取入れた。2次元及び3次元燃料体系モデルを対象として、多群モンテカルロ法計算コードKENO-IVを用いた詳細計算と比較することにより、今回提案した簡易評価式の妥当性を確認した。円筒状の容器の側面に枝管が垂直に接続している体系において、中性子増倍率の非常に小さな増加（たとえば $0.3\% \Delta k/k$ ）に対応する無視できる配管の太さ及び本数と容器の直径との関係を示した。

この報告書は、電源開発促進対策特別会計法に基づく科学技術庁からの受託として行った研究結果である。
東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方字白根2-4

* (株)日本総合研究所

Calculational Study on Reactivity Effect of Pipe Intersections

Hiroshi OKUNO, Yoshitaka NAITO and Toshiyuki KANEKO*

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

(Received February 17, 1995)

A simple formulation was proposed for evaluating the increment of reactivity due to the attachment of pipes to a vessel filled with fuel solution, and its validity was checked by numerical calculations. The formulation was based on the neutron balance equation which had been applied to the criticality safety analysis code MUTUAL for multi-unit systems, and the current formulation considered further the deviation of the representative neutron source point from the center of each pipe. The formulation was validated for models of 2- and 3-dimensional fuel systems by comparison with the precise calculations using the Monte Carlo code KENO-IV. For systems of pipes attached perpendicularly to the side of a cylindrical vessel, the size and number of negligible pipes were shown that corresponded to a very small increment (e.g. 0.3% $\Delta k/k$) of the neutron multiplication factor.

Keywords : Fuel Solution, Pipe Intersection, Reactivity, Nuclear Criticality,
Neutron Balance, Numerical Calculation, MUTUAL, KENO-IV

This work was carried out by the Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) under entrustment by the Science and Technology Agency (STA) of Japan.

* The Japan Research Institute, Ltd.

目 次

| | |
|-------------------------|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. 基本的考え方 | 2 |
| 3. 2次元体系での比較計算 | 5 |
| 4. 3次元体系での比較計算 | 8 |
| 5. 無視できる枝管についての検討 | 15 |
| 6. おわりに | 19 |
| 謝 辞 | 20 |
| 参考文献 | 21 |

Contents

| | |
|---|----|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Basic Idea | 2 |
| 3. Comparative Calculations for 2-dimensional Systems | 5 |
| 4. Comparative Calculations for 3-dimensional Systems | 8 |
| 5. Discussion on Negligible Pipes | 15 |
| 6. Concluding Remarks | 19 |
| Acknowledgments | 20 |
| References | 21 |

1. はじめに

大きな燃料ユニットに小さな燃料要素が近接している体系が核燃料施設では少なからず存在する。典型的な例としては、燃料溶液槽（以下、主容器）に同じ組成の燃料溶液が入った細い配管（以下、枝管）が接続している場合が挙げられる。このような体系の中性子増倍率を正確に計算することは一般的に困難である。即ち、複雑な形状を取扱うためモンテカルロ法の計算コードに頼ることになるが、入力データの作成が面倒な上、枝管の影響について調べるためには統計計算に伴う標準偏差を小さくする必要があり、このため計算時間も通常の場合より相当余計に必要なからである。

米国では、臨界安全手引き¹⁾あるいは原子力学会において制定された規準²⁾において、主容器の寸法ごとに許容される接続配管の寸法・本数等が定められている。これは詳細計算に基づいて導かれた半経験式³⁾をその根拠としている。

本報告書では、主容器に枝管が接続している体系を対象として、枝管の反応度寄与が非常に小さい場合には枝管を無視し、無視できない場合には主容器の反応度をその分だけ上積みすればよいという考え方に立つ。この考え方に立って枝管の反応度効果を推定する簡便な表式を提案し、その簡易式の妥当性を詳細計算と比較する。以下、第2章では中性子収支を表す方程式に基づき、枝管の反応度効果を推定する簡易式を導く。次に、2次元燃料体系に対して、モンテカルロ法計算コードKENO-IV⁴⁾を用いて詳細計算を実施し、その結果を簡易法による計算と比較して第3章に記す。さらに3次元燃料体系に対して同様の計算を行い、その結果を第4章に記す。第5章では無視できる配管を求める方法を検討・定式化し、詳細計算によりその妥当性を確認する。最後の第6章には、まとめと今後の課題について記す。

2. 基本的考え方

複数の燃料ユニットからなる系を考える。各燃料ユニット間の中性子相互作用の取扱いをMUTUALコード^{5), 6)}と同様にすれば、その固有値方程式は下記の式で表現できる。

$$K^{-1}(I - TD^{-1})(D\phi) = \frac{1}{\lambda}(D\phi) \quad (1)$$

即ち、全体系の中性子増倍率 λ (又は k_{eff})の逆数は

$$A \equiv K^{-1}(I - TD^{-1}) \quad (2)$$

の固有値である。行列Aの要素は、修正一群理論に基づくMUTUALコードの表現を用いれば、

$$\begin{aligned} a_{ii} &= \frac{1}{k_i} \\ a_{ij} &= -\frac{1}{k_i} \cdot \frac{(M^2 B^2)_j \omega_{ji}}{1 + (M^2 B^2)_j} \end{aligned} \quad (3)$$

である。ここで、

k_i : ユニットiの孤立系での実効増倍率、

$(M^2 B^2)_j$: ユニットjからの漏洩割合、

ω_{ji} : ユニットjからユニットiを見たときの立体角分率

である。

従って、下記の行列式から固有値 $1/\lambda$ が求められる。

$$\begin{vmatrix} a_{11} - \frac{1}{\lambda}, & a_{12}, & a_{13} & \dots \\ a_{21}, & a_{22} - \frac{1}{\lambda}, & a_{23} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{vmatrix} = 0 \quad (4)$$

この行列式において、非対角項からの寄与が中性子相互作用の効果を表している。

各単一ユニットの実効増倍率のうち最大値が k_1 であるとすると、非対角項に関して2次までとる近似の下で、式(4)の固有値は下記の式で表現できる⁷⁾。

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{k_1} - \sum_{p \neq 1} \frac{a_{1p} \cdot a_{p1}}{\frac{1}{k_p} - \frac{1}{k_1}} \quad (5a)$$

$$= \frac{1}{k_1} - \frac{1}{k_1} \cdot \sum_{p \neq 1} \frac{1}{1 - k_p/k_1} \cdot \frac{(M^2 B^2)_p \omega_{p1}}{1 + (M^2 B^2)_p} \cdot \frac{(M^2 B^2)_1 \omega_{1p}}{1 + (M^2 B^2)_1} \quad (5b)$$

$$= \frac{1}{k_1} - \frac{1}{k_1} \cdot \sum_{p \neq 1} \delta_p \quad (5c)$$

ここで、

$$\delta_p \equiv \frac{1}{1 - k_p/k_1} \cdot \frac{(M^2 B^2)_p}{1 + (M^2 B^2)_p} \cdot \frac{(M^2 B^2)_1}{1 + (M^2 B^2)_1} \cdot \omega_{p1} \omega_{1p} \quad (6)$$

である。

(5)式は実効増倍率の最大値が k_1 であるユニットと他のユニットとの中性子相互作用は考慮しているが、他のユニット間同士での相互作用は考慮されていない。 $\omega_p^2 \equiv \omega_{1p} \omega_{p1}$ と置くと、(6)式から明かなように δ_p は ω_p^2 に比例する。その比例定数は、各単一ユニットの実効増倍率及び無限増倍率のみから求められる。それゆえ、相互に見込む立体角だけをさらに求めれば実効増倍率 k_1 に対する増加割合 δ_p を算出できる。

$\sum_{p \neq 1} \delta_p$ を δ と記すと、

$$\lambda = \frac{k_1}{1 - \delta} \doteq k_1 (1 + \delta) \quad (7)$$

と表される。以上の結果から δ が十分に小さい場合には、最大ユニットの実効増倍率 k_1 を δ だけ見かけ上大きくして臨界安全評価を行えばよいと考えられる。

上に示した方法で小さい要素の反応度効果を検討する場合に、残された問題は立体角分率 ω の求め方である。特に、枝管のように連続している場合の立体角分率を、中性子漏洩割合(M^2B^2)の空間分布を含めて安全側になるように算出する必要がある。

単純な体系の例として、実効増倍率が k_1 である主容器に実効増倍率が k_2 である枝管が接触しているという2つのユニットからなる系では、(5)式は

$$\lambda = k_1 / (1 - \delta) \quad (8a)$$

$$\delta = \frac{1}{1 - k_2/k_1} \left(\frac{L}{L+A} \right)_1 \left(\frac{L}{L+A} \right)_2 \omega_{12} \omega_{21} \quad (8b)$$

という関係式で表される。ここで、1及び2はそれぞれ主容器及び枝管に関する添字で、

- k_i : ユニット*i*の実効増倍率 ($i=1,2$)、
- $\left(\frac{L}{L+A} \right)_i$: ユニット*i*からの漏洩割合 ($i=1,2$)
- ω_{ij} : ユニット*i*からユニット*j*を見たときの立体角分率
($i, j=1,2$)

である。

3. 2次元体系での比較計算

前章では、主容器と枝管がある体系での中性子増倍率の簡易評価式を導いた。その妥当性を数値的に検討するため、この章では図3.1のAからFに示す2次元の（すなわち軸方向無限長の）凹面体形状（再入射可能形状）モデルについて、KENO-IVを用いた計算と第2章の(5)式に基づく簡易計算との比較を行う。ここで燃料は、 ^{235}U 濃縮度4 wt%の二酸化ウラン-水体系で、燃料密度は $5\text{ gUO}_2/\text{cm}^3$ とした。また、詳細計算において中性子実効断面積は、137群の多群定数ライブラリMGCL-B-IV⁸⁾とMAILコード⁹⁾を用いて算出した。KENO-IVの計算条件を表3.1に示す。なお、MGCL-B-IVライブラリとKENO-IVコードの組合せを枝管のある体系へ検証した計算結果は既に報告されている⁹⁾。

図3.1のGに示した「枝管」がない場合の実効増倍率は1.096である。「枝管」がある場合とない場合の実効増倍率の比を表3.2に示す。この表で、簡易計算1と記したのは、MUTUALと同様にそれぞれのユニットの中心を代表点として中性子が発生すると仮定して立体角を計算したものである。これに対して、簡易計算2と記したのは、枝管の端を代表点としてそこから中性子が発生するという仮定に基づき $\omega_{21}=0.5$ と置いたものである。

表3.2に示した結果によると、枝管から主容器を見込む立体角が最大になる位置に枝管の中性子源を仮定して系の実効増倍率を簡易法で計算することにより、安全側の実効増倍率が得られることが分った。このようにして、主容器及びその近傍の枝管の実効増倍率、漏洩割合及び主容器と枝管との相互の立体角を用いて式(5)により枝管を含む単一ユニットの実効増倍率を求めることができることが分った。

表 3.1 KENO-IVの計算条件

| 項 目 | 値 |
|------------|-------|
| エネルギー群数 | 137 |
| 1世代当りの中性子数 | 2,000 |
| 計算世代数 | 110 |
| 除外する初期世代数 | 10 |
| 初期中性子発生分布 | 平坦 |

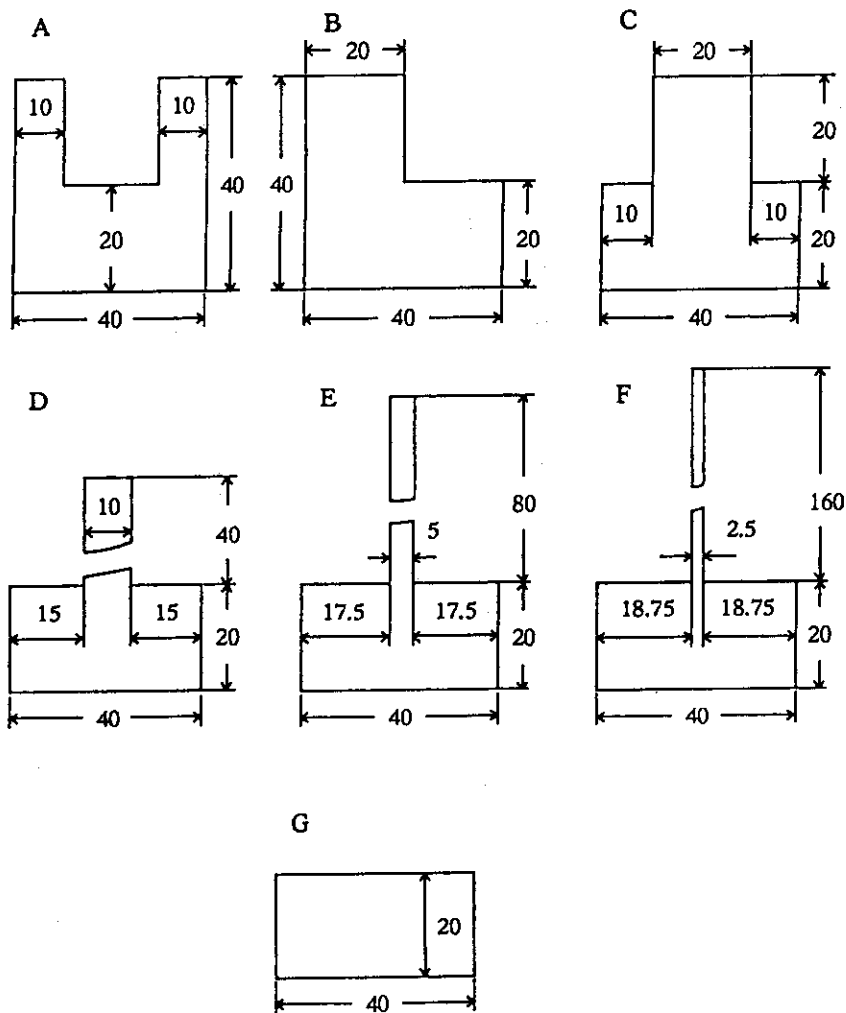
表 3.2 「枝管」の有無による実効増倍率の比

| 計算モデル 記号 | 実効増倍率*1 | モデルGに対する実効増倍率の比 | | |
|-------------|---------------|-----------------|---------|---------|
| | | KENO-IV | 簡易計算1*2 | 簡易計算2*3 |
| A | 1.1217±0.0017 | 1.023 | 1.021 | 1.038 |
| B | 1.1616±0.0016 | 1.060 | 1.034 | 1.054 |
| C | 1.1777±0.0015 | 1.075 | 1.054 | 1.078 |
| D | 1.1224±0.0019 | 1.024 | 1.012 | 1.024 |
| E | 1.1083±0.0019 | 1.011 | 1.003 | 1.009 |
| F | 1.0995±0.0015 | 1.003 | 1.0007 | 1.004 |
| G | 1.0960±0.0017 | --- | --- | --- |

註 *1 KENO-IVを用いた計算結果。

*2 枝管の中心から主容器を仰ぐ立体角を用いた（中心源）。

*3 枝管の端から主容器を仰ぐ立体角を用いた（端源）。



長さの単位はcmとする

図3.1 凹面体無限長形状の計算モデル

4. 3次元体系での比較計算

前章で設定した端源モデル（枝管から主容器を見込む立体角が最大になる位置に枝管の中性子源を仮定するモデル）に基づく中性子増倍率の簡易評価法を、この章では3次元体系に適用し、詳細計算と比較してその妥当性を検討する。計算対象として、濃縮度5 wt%の硝酸ウラニル水溶液（濃度1000gU/l）からなる一辺32 cm、高さ1 mの四角柱の各側面に同じ燃料組成で四角柱の枝管が1本ずつ付いているものとした。計算体系のモデルを図4.1に示す。但し、枝管の太さ（一辺）、長さ、位置及び反射体条件を表4.1に示す。基準ケースは、表4.1で下線で示したように、一辺5 cm、長さ50 cmの枝管を主容器の4側面中央に付け、上下方向及び側面方向ともに裸とした。なお、ここで主容器・枝管の形状として、実用上よく現れる円柱状ではなく角柱状としたのは、詳細計算における入力データ作成の容易さのためである。詳細計算には、前章と同様にKENO-IVを使用した。KENO-IVの計算条件を表4.2に示す。

四角柱状ユニット及びこれに枝管が付いた体系の実効増倍率について、KENO-IVを用いた詳細計算と簡易計算とを比較し、その結果をまとめて表4.3に示す。これらの結果のうち、図4.2には枝管太さと実効増倍率の関係を示す。この図は、枝管が太くなると実効増倍率は単調に増加する傾向を示している。また、図4.3には枝管長さを実効増倍率の関係を示す。この図は、枝管が長くなっても実効増倍率の増大には殆ど寄与しないことを示している。これらの傾向はKENO-IVによる詳細計算の結果ばかりではなく、簡易計算の結果も同様である。この結果、簡易評価法は、枝管太さ・長さに関する変化の傾向を正しく予測していると言える。

なお表4.3には、枝管の接続高さ及び全体系の反射条件をさまざまに変えたKENO-IVを用いた詳細計算の結果も記してある。すなわち、一辺5 cm角の枝管を主容器の底ないしは底から1/4の高さだけ上に付けたもの（ケース7及び8）は、枝管を全く付けなかった場合（ケース0）の実効増倍率と変わらなかった。一方、主容器の中央の高さに枝管を付けた体系（ケース1）では実効増倍率が0.001 Δk だけ大きくなった。これは、中央部の方が燃料インポートンスが大きく、そこに枝管を配置した方が実効増倍率が高くなるためと考えられる。これに対して現状の簡易法

では、枝管の断面（切口）よりも側面を見る方が立体角が大きくなるため、枝管を主容器の底ないしは底から1/4の高さだけ上に付けた体系の実効増倍率を大き目に見積る。

また、基準ケースの計算モデル（ケース1）に対してコンクリートの反射体を側面方向にそれぞれ1 m、50 cm離して置いた場合（ケース9及び10）に、KENO-IVの計算結果が基準ケースに比べてそれぞれ0.001 Δk 及び0.002 Δk だけ増加している。簡易評価では反射体を無視しているが、もともと実効増倍率を大き目に見積れるような仮定を置いているため、この例では基準ケースの計算モデルの側面に50 cm離してコンクリートに囲まれた場合と、基準ケースを簡易法で評価した場合とで同じ実効増倍率を与えている。

表4.3において側面を十分な水反射とした場合（ケース11）及び側面が裸で上下方向を完全反射とした場合（ケース12）に対するKENO-IVの計算はあくまで参考のために行ったもので、簡易法の適用範囲外である。

表 4.1 四角柱状枝管の寸法・接続位置及び計算体系の反射条件を規定するパラメタ

| 項 目 | パラメタ値 |
|-------------------|---|
| 枝管の太さ（一辺） [cm] | 2, <u>5</u> , 10 |
| 〃 長さ [cm] | 30, <u>50</u> , 100 |
| 枝管を接続する主容器の位置（高さ） | <u>中央</u> 、底、底から 1/4 |
| 反射条件（側面） | <u>裸</u> 、40cm厚コンクリートを 1m 離す、同50cm離す、十分な水反射 |
| 反射条件（上下方向） | <u>裸</u> 、完全反射 |

表 4.2 KENO-IVの計算条件

| 項 目 | 値 |
|------------|--------|
| エネルギー群数 | 137 |
| 1世代当りの中性子数 | 20,000 |
| 計算世代数 | 110 |
| 除外する初期世代数 | 10 |
| 初期中性子発生分布 | 平坦 |

表 4.3 四角柱形状の枝管が接続した体系の実効増倍率計算結果*1
 (濃縮度 5 wt% 硝酸ウラニル水溶液 (濃度 1000gU/l) で満たされた 1 辺 32cm, 高さ 1 m 正四角柱の各側面に正四角形状の枝管を接続)

| ケース 番号 | 枝管太さ 一辺[cm] | 枝管長さ [cm] | 枝管接続 高さ | 反 射 条 件 | | KENO-IV $k_{eff}^{(1)}$ | 簡易評価 $k_{eff}^{(2)}$ | Δk_{eff}^{*2} | 備 考 |
|-----------|----------------|--------------|------------|--------------------|----|----------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------|
| | | | | 側面 | 上下 | | | | |
| 0 | ----- | ----- | ----- | 裸 | 裸 | 0.795 | ----- | ----- | 主以外のみ(枝管なし) |
| 1 | 5 | 50 | 中央 | 〃 | 〃 | 0.796 | 0.799 | 0.003 | 基準ケース |
| 2 | 2 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 0.794 | 0.795 | 0.001 | |
| 3 | 10 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 0.806 | 0.813 | 0.007 | |
| 4 | 15 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 0.821 | 0.837 | 0.016 | |
| 5 | 5 | 30 | 〃 | 〃 | 〃 | 0.796 | 0.799 | 0.003 | |
| 6 | 〃 | 100 | 〃 | 〃 | 〃 | 0.798 | 0.799 | 0.001 | |
| 7 | 〃 | 50 | 底 | 〃 | 〃 | 0.795 | 0.801 | 0.006 | |
| 8 | 〃 | 〃 | 底から 1/4 | 〃 | 〃 | 0.795 | 0.803 | 0.008 | |
| 9 | 〃 | 〃 | 中央 | コンクリートを 1m 離す | 〃 | 0.798 | 0.799 | 0.001 | 簡易法では反射体無視 |
| 10 | 〃 | 〃 | 〃 | コンクリートを 50cm 離す | 〃 | 0.799 | 0.799 | 0.000 | 簡易法では反射体無視 |
| 11 | 〃 | 〃 | 〃 | 水 反 射 | 〃 | 0.932 | | | |
| 12 | 〃 | 〃 | 〃 | 裸 完全反射 | 〃 | 0.816 | | | |

*1 KENO-IVを用いた計算結果の標準偏差は0.0006以下である。

*2 $\Delta k_{eff} = k_{eff}^{(2)} - k_{eff}^{(1)}$

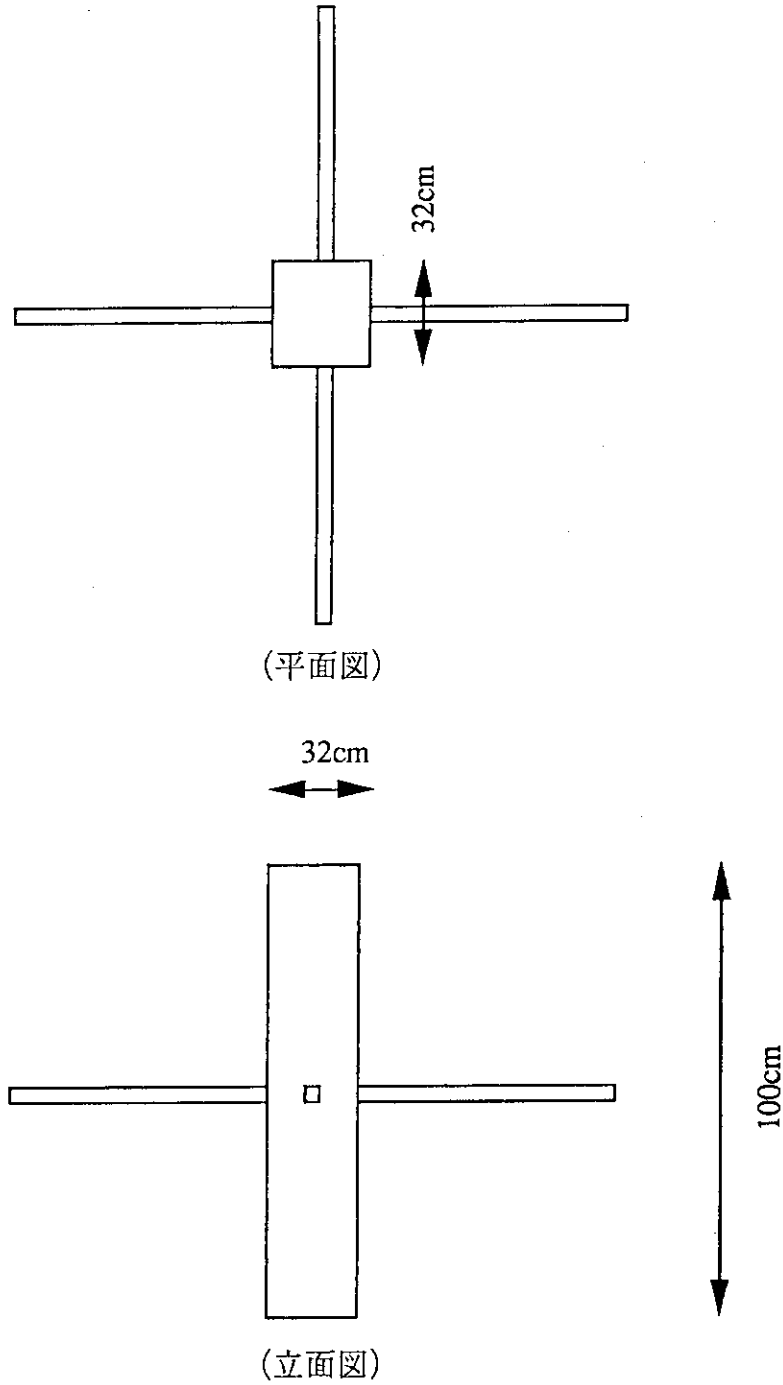


図 4. 1 計算モデル図
(四角柱状ユニットの各側面に四角柱の枝管が1本ずつ付いている体系)

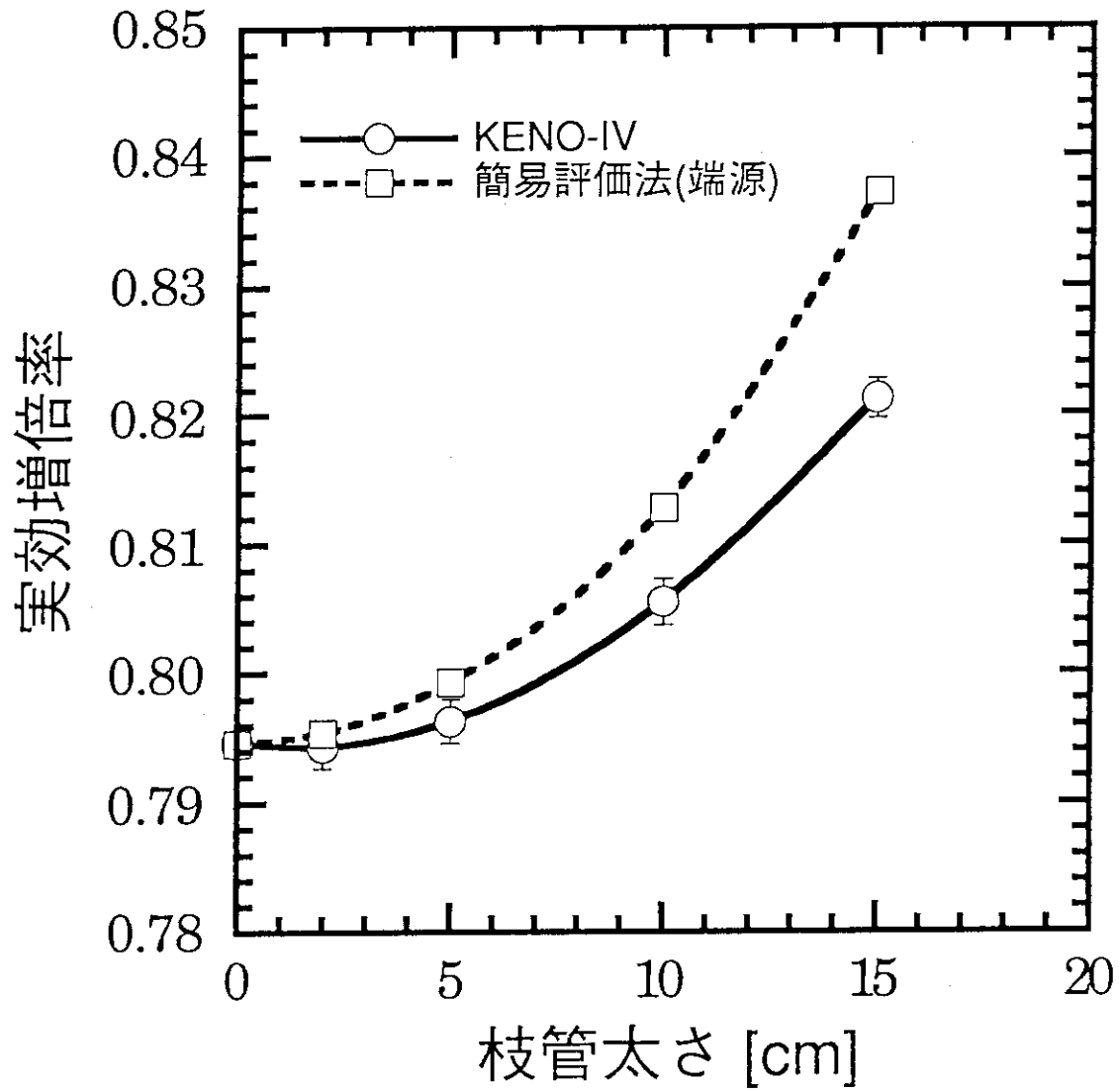


図4.2 枝管太さと実効増倍率の関係
 (枝管長さ50cm, 枝管位置中央, 反射条件裸; KENO-IVの誤差棒は $\pm 3\sigma$)

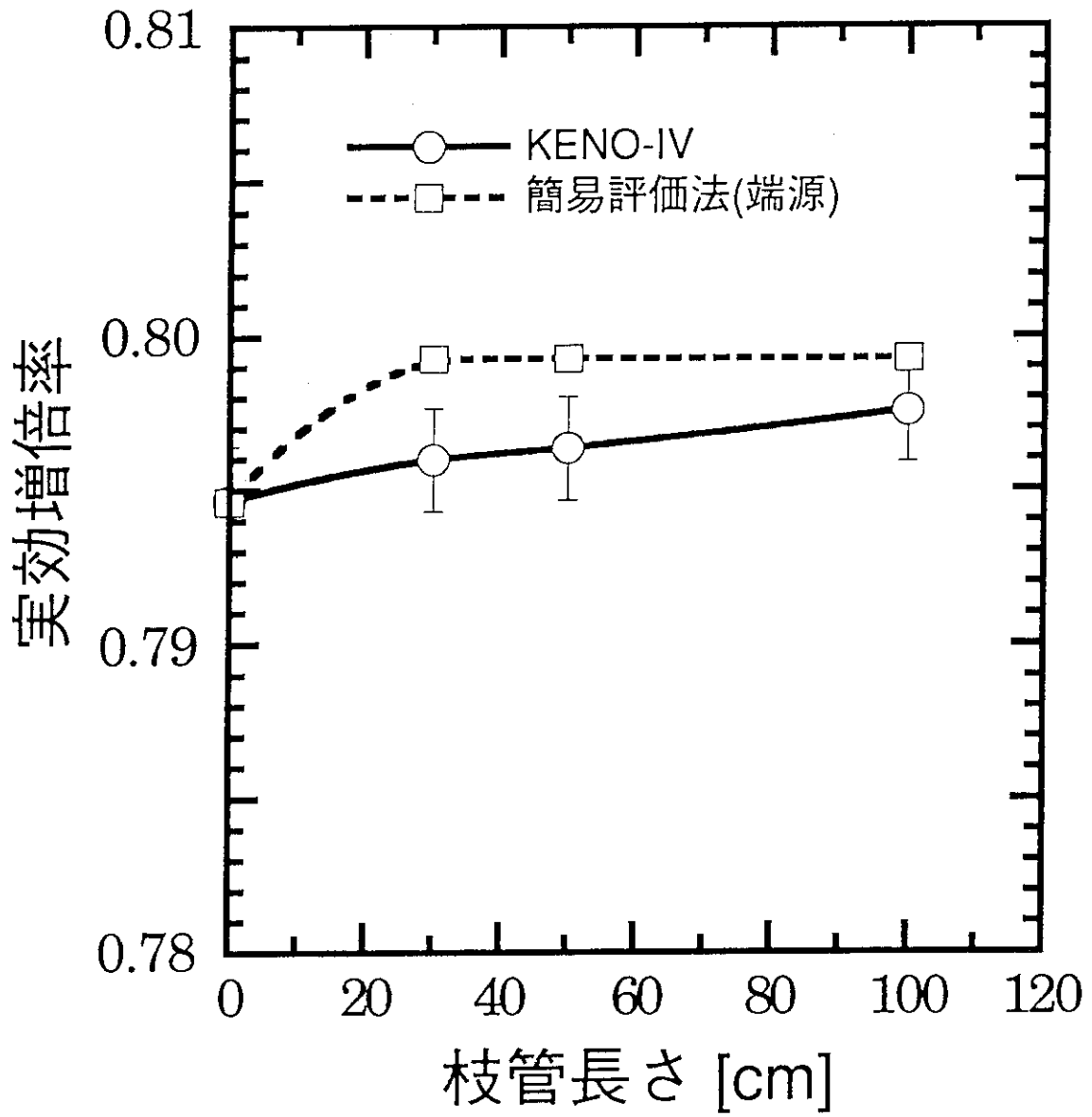


図4.3 枝管長さと実効増倍率の関係
 (枝管太さ5cm, 枝管位置中央, 反射条件裸; KENO-IVの誤差棒は $\pm 3\sigma$)

5. 無視できる枝管についての検討

第4章では、主容器と枝管からなる3次元の燃料体系に簡易法が適用できることを示した。ここでは第2章(5)～(7)式を参考にして、実効増倍率の増加割合がある微小割合 ε を越えないために主容器と枝管が満たすべき条件を検討する。「臨界安全ハンドブック」¹⁸⁾の隔離立体角の項ではこのような ε の値として0.3% $\Delta k/k$ の値が例示されている。ここでもこの値を念頭に置いて検討を進める。

(6)式を変形すると、

$$\delta_p = \frac{1}{1 - \frac{B_1^2}{B_p^2}} \frac{M^2 B_1^2}{1 + M^2 B_1^2} \omega_{1p} \omega_{p1} \quad (9)$$

と記すことができる。ここで、主容器と枝管とは同種類・同濃度の燃料溶液が入っているとし、

$$k_{\infty,1} = k_{\infty,p} \quad (10a)$$

$$M_1^2 = M_p^2 = M^2 \quad (10b)$$

とした。

(9)式で表されるように、 δ_p が M^2 の増加関数であることから、 M^2 を大き目に見積る(=40 cm²)と δ_p を大き目に見積れることが分る。また、主容器、枝管ともに円筒形であることを仮定すると、バックリング B^2 は

$$B^2 = \left(\frac{2.405}{0.5d + \lambda_{ox}} \right)^2 \quad (11)$$

と表される。ここで、

d : 円筒直径、

λ_{ox} : 外挿距離 (以下では大き目の評価として3 cmとする)

である。

また、枝管が主容器の中心に接続されていると仮定すると、

$$\omega_{p1} = 0.5 \quad (12)$$

$$\omega_{1p} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d_p/2}{\sqrt{(d_p/2)^2 + (d_1/2)^2}} \right) \quad (13a)$$

$$\approx \frac{1}{4} \left(\frac{d_p}{d_1} \right)^2 \quad (13b)$$

枝管の本数を n とするとき n の満たすべき関係は、

$$n \leq \varepsilon \left(1 - \frac{B_1^2}{B_p^2} \right) \left(1 + \frac{1}{M^2 B_1^2} \right) \frac{1}{\omega_{1p} \omega_{p1}} \quad (14)$$

であるから、上記の数値を代入して、

$$n \leq 2 \times 10^{-3} \left[1 - \left(\frac{0.5d_p + 3}{0.5d_1 + 3} \right)^2 \right] \cdot \left[1 + \frac{(0.5d_1 + 3)^2}{(2.405)^2 \cdot (40)^2} \right] \\ \times 2 \times 4 \left(\frac{d_1}{d_p} \right)^2 \quad (15)$$

この評価式を用いて、円筒状の主容器の側面に円筒状の枝管が垂直に接続している体系において、無視できる枝管の直径と本数を求めて図示したのが図5.1である。

(15)式で表された無視できる枝管本数に関する簡易評価式が成立つことの確認のため、KENO-IVを用いた詳細計算を実施した。計算対象は、濃縮度5wt%の硝酸ウラニル水溶液で満たされた高さ1mの円柱状の主容器の側面に1本ないしは4本の枝管を垂直に接した体系である。枝管となる円柱の直径は、図5.1の曲線上の値を採った。KENO-IVの計算条件は表4.2と同じにした。計算結果を表5.1に示す。この表によると、枝管を付けても中性子増倍率の増加割合は0.3% $\Delta k/k$ 以内に収まることが分かり、図5.1の妥当性が詳細計算によっても確かめられた。

表 5.1 枝管による反応度効果

(濃縮度 5 wt%硝酸ウラニル水溶液で満たされた高さ 1 mの円柱状主容器の側面に長さ 1 mの円柱状枝管が付いた体系での中性子増倍率の計算結果)

| ケース 番号 | ウラン 濃度 [gU/ℓ] | 主容器 の直径 [cm] | 枝管 | | 中性子増倍率 の計算値 | | 枝管による k_{eff} 増加割合 [% $\Delta k/k$] |
|-----------|---------------------|--------------------|------------|-----------|----------------|----------|---|
| | | | 直径 [cm] | 本数 [本] | k_{eff} | σ | |
| 1 | 300 | 100 | ---- | 0 | 0.8898 | 0.0003 | --- |
| 2 | // | // | 26.7 | 4 | 0.8910 | 0.0003 | 0.1 |
| 3 | 500 | 50 | ---- | 0 | 0.8947 | 0.0005 | --- |
| 4 | // | // | 15.0 | 1 | 0.8965 | 0.0004 | 0.2 |
| 5 | // | // | 7.8 | 4 | 0.8946 | 0.0005 | 0.0 |
| 6 | 1000 | 25 | ---- | 0 | 0.5801 | 0.0005 | --- |
| 7 | // | // | 5.1 | 1 | 0.5809 | 0.0005 | 0.1 |
| 8 | // | // | 2.6 | 4 | 0.5804 | 0.0005 | 0.1 |

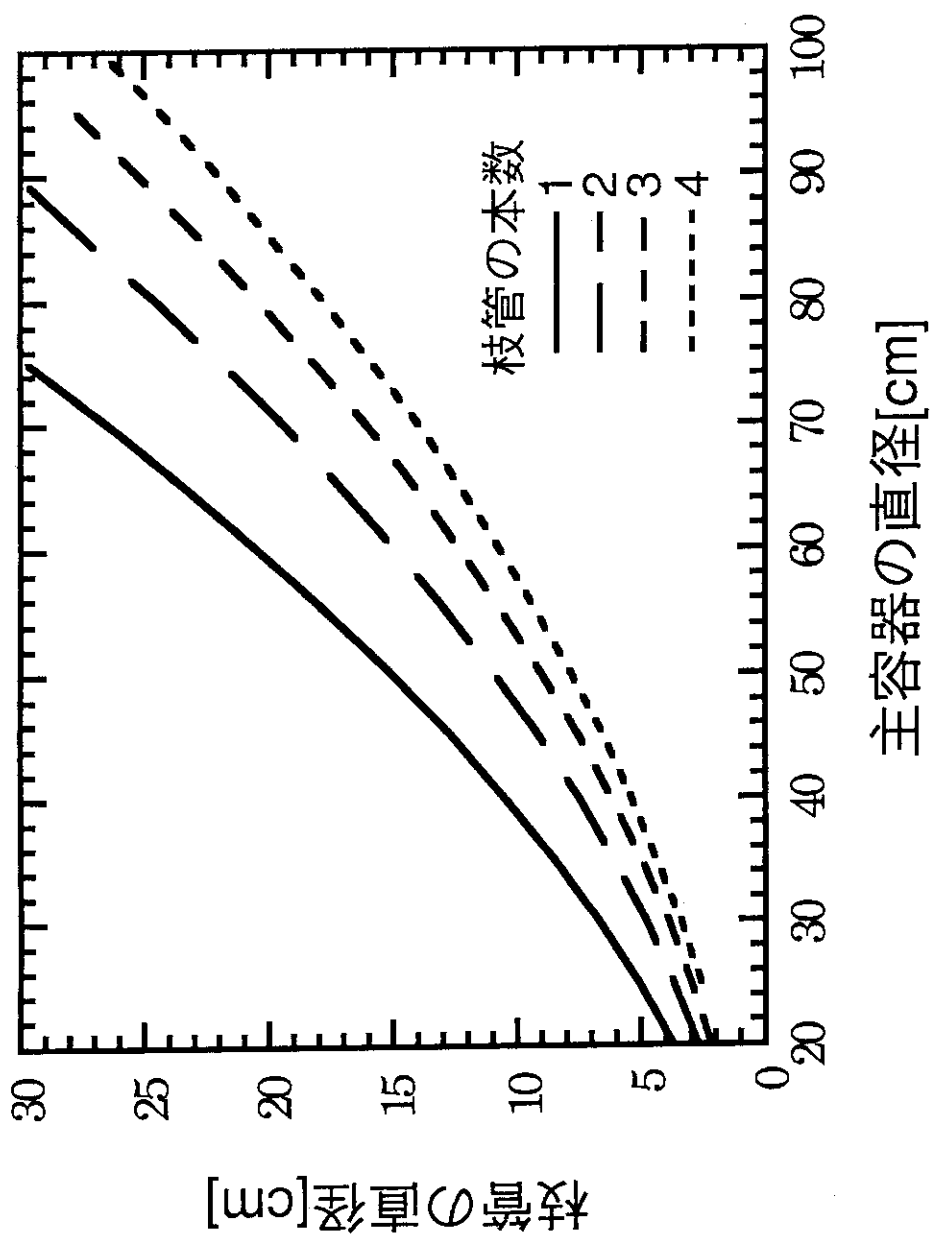


図5.1 無視できる枝管の直径と本数
 (円筒状の枝管が円筒状の主容器の側面に垂直に接続しているとして)

6. おわりに

燃料溶液の入った容器に細い配管（枝管）が付いたときの反応度上昇割合を評価する簡易式を提案し、数値計算によりその妥当性を検討した。評価式は中性子収支に基づいて得られたものである。既に複数ユニット燃料体系の臨界安全解析コード MUTUAL に応用されたものと基本的には同じであるが、ユニットが近接しているため、今回の簡易式は枝管側の中性子発生点が中心からずれることを取入れている。4 wt%²³⁵U濃縮の UO₂-H₂O 燃料からなる2次元燃料体系及び5 wt%²³⁵U濃縮の硝酸ウラニル水溶液（濃度1,000 gU/l）からなる3次元燃料体系に対してモンテカルロ法計算コード KENO-IV を用いた詳細計算と比較した。2次元体系ではモンテカルロ計算コードの計算結果とよい一致が得られた。3次元体系では簡易式はやや大きめの値を与える傾向にあるが、安全側の評価式としては十分使用しうることが分った。さらに、反応度的に無視できる（ここでは 0.3% $\Delta k/k$ 以下の）枝管の太さと本数を、主容器の大きさとの関係で示した。

なお、この報告書で行った検討は、いずれも燃料容器及び配管の肉厚を無視したものであった。しかし、実際の体系では容器及び配管の肉厚がある。容器材としてよく用いられるステンレス鋼 SUS304 の影響を反射体節約として取扱う試みが最近なされた¹⁾。さらに、直径が数 cm しかない配管材においても同様の取扱いが可能であれば、この報告書で提案した枝管の反応度効果に関する簡易評価式の実体系への適用が容易になる。このため、配管材による反射効果の検討が今後の課題として残っている。

また、米国の規準²⁾では、容器直径と無視できる枝管の直径・本数の関係を反射条件を区分して表の形にして与えている。そこでは、この報告書の第5章で仮定した容器壁に垂直に出ている枝管のみではなく、斜めに出ている枝管も対象としている。本報告書で得られた結果と、米国の規準の記載事項との関係を調べておくことも今後の課題である。

謝 辞

本研究の初期において計算作業に参加された荻野晃久氏（当時所属：プラント安全解析研究室）及び㈱CSKの中丸昇一氏の御協力に感謝いたします。また、計算結果は臨界安全性実験データ検討第二ワーキンググループ（リーダー：西堀俊雄氏、日本ニュークリア・フュエル㈱）において検討して頂きました。グループ員の皆様、特に無視できる配管の提示を勧められました三菱マテリアル㈱の田仲昇一氏に感謝いたします。さらに、報告書全体を閲読の上、有益なご指摘をいただきました臨界安全研究室の三好慶典氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) "Nuclear Safety Guide, TID-7016, Revision 2", NUREG/CR-0095, ORNL/NUREG/CSD-6, Oak Ridge National Laboratory (1978).
- 2) "Nuclear Criticality Safety Criteria for Steel-Pipe Intersections Containing Aqueous Solutions of Fissile Material," ANSI/ANS-8.9-1987 (1987).
- 3) J.T.Thomas, "Reflectors, Infinite Cylinders, Intersecting Cylinders, and Nuclear Criticality," Nucl. Sci. Eng. 67, 279-295 (1978).
- 4) L.M.Petrie and N.F.Cross, "KENO-IV--An Improved Monte Carlo Criticality Program," ORNL-4938, Oak Ridge National Laboratory (1975).
- 5) Y.Naito, T.Kaneko and H.Okuno, "MUTUAL: A Computer Code for Analysing Nuclear Criticality Safety on Array System," JAERI-M86-140(1986).
- 6) H.Okuno, Y.Naito, T.Kaneko and K.Kuribayashi, "A Revision of MUTUAL, A Computer Code for Analysing Nuclear Criticality Safety on Array System," JAERI-M89-140 (1989).
- 7) P.M.Morse and H.Feshbach, "Methods of Theoretical Physics," McGraw-Hill (1953).
- 8) Y.Naito, S.Tsuruta, T.Matsumura and T.Ohuchi, "MGCL-PROCESSOR: A Computer Code System for Processing Multigroup Constants Library MGCL," JAERI-M9396(1981).
- 9) 野村靖・城克彦、「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)」、JAERI-M9085 (1980).
- 10) 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」、にっかん書房(1988).
- 11) 小宮山和真・奥野浩、「鋼及びステンレス鋼の反射体節約に関する計算」、JAERI-Research 94-047(1994).