

JAERI-Research

96-067



TCAでのFP核種中性子断面積積分評価用臨界実験の
MCNP 4Aによる解析
— ベンチマーク問題の作成 —

1996年12月

桜井 淳・荒川拓也・山本俊弘・小室雄一
須崎武則・大友正一・新田一雄・堀木欧一郎

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。
入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 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（〒319-11 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 Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1996

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 いばらき印刷(株)

TCAでのFP核種中性子断面積積分評価用臨界実験のMCNP 4Aによる解析
—ベンチマーク問題の作成—

日本原子力研究所東海研究所燃料サイクル安全工学部
桜井 淳・荒川 拓也・山本 俊弘・小室 雄一⁺¹
須崎 武則・大友 正一⁺²・新田 一雄・堀木欧一郎⁺³

(1996年11月21日受理)

核分裂生成物核種 (Rh : 6 濃度、Cs : 5 濃度、Nd : 6 濃度、Sm : 7 濃度、Eu : 7 濃度、Gd : 7 濃度) の中性子断面積の積分評価用臨界実験をTCAで実施した。炉心を構成する18×18燃料棒配列のうち中央の2×2配列燃料棒を核分裂生成物核種の水溶液を満たした容器で置き換えた。実験及び計算の有効性をチェックするために中性子断面積のよくわかったB (4 濃度)、バーナブルポイズンとして重要なEr (7 濃度) についても同様の実験を実施した。

それらの体系の個数密度を算出した。さらにその値を使用して中性子増倍率をMCNP 4AとJENDL-3.2の組合せで計算した。ただし天然Erについては評価済み断面積が世界のどのライブラリーにも存在しないため除外してある。

計算で求めた中性子増倍率は、臨界固有値 (=1.0) に一致している。このことからJENDL-3.2に収納されているこれらの核種の中性子断面積は評価精度がよいと判断される。今回の実験及び解析結果から、ここで取り上げた体系は、FP核種の中性子断面積積分評価用ベンチマーク問題としてすぐれていることがわかった。

東海研究所 : 〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

+1 研究炉部

+2 原子炉安全工学部

+3 国際原子力総合技術センター

Analysis using MCNP 4A of Critical Experiments at TCA for Integral Evaluation
of Fission Product Nucleus Neutron Cross Sections

- Preparation of Benchmark Problems -

Kiyoshi SAKURAI, Takuya ARAKAWA, Toshihiro YAMAMOTO, Yuichi KOMURO⁺¹
Takenori SUZAKI, Shoichi OHTOMO⁺², Kazuo NITTA and Oichiro HORIKI⁺³

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

(Received November 21, 1996)

Critical experiments were performed at TCA for integral evaluation for fission product nuclides (Rh: six concentrations, Cs: five concentrations, Nd: six concentrations, Sm: seven concentrations, Eu: seven concentration, Gd: seven concentrations) neutron cross sections. The central 2×2 arrays among 18×18 arrays of fuel rods which constitute the core were replaced by a vessel containing aqueous solution of a fission product nuclide. Similar experiments were also performed for B (four concentrations) with well known neutron cross sections in order to check validity of experiments and calculations, and for Er (seven concentrations) as a future important burnable poison.

Number densities were calculated for each experimental system. Neutron multiplication factors were further calculated assuming the calculated number densities using MCNP 4A and JENDL-3.2. The only exception was for the Er experiments because there exist no evaluated neutron cross sections in form of natural Er element in any neutron cross section library in the world.

+1 Department of Research Reactor

+2 Department of Reactor Safety Research

+3 Nuclear Technology and Education Center

The neutron multiplication factors are consistent with the critical eigenvalue ($=1.0$). Therefore, we have good reason to judge that fission product nucleus neutron cross sections filed in JENDL-3.2 are accurate. It is concluded from the critical experiments and the analytic results that those systems serve satisfactorily as benchmark problems for integral evaluation of fission product nucleus neutron cross sections.

Keywords: TCA, Fission Product Nuclide, Neutron Cross Sections, Integral Evaluation, Critical Experiment, MCNP 4A, JENDL-3.2, Neutron Multiplication Factor, Benchmark Problem

目 次

1. 序 論	1
2. 実験法	1
3. 解析法	2
3.1 計算モデル	2
3.2 中性子増倍率の計算	3
4. 計算結果及び討論	4
5. 結 論	6
謝 辞	7
参考文献	8

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Method	1
3. Analytic Method	2
3.1 Computational Model	2
3.2 Calculation of Neutron Multiplication Factor	3
4. Calculation Results and Discussions	4
5. Conclusions	6
Acknowledgements	7
References	8

1. 序論

これまで熱中性子炉体系や高速中性子炉体系、遮蔽体系、核融合体系などのベンチマーク実験は数多くなされているが、核分裂生成物核種 (Fission Product: FP) の中性子断面積評価が可能なベンチマーク実験は、フランスで実施された一例しか報告されていない¹⁾。そこでは、 ^{149}Sm のベンチマーク臨界実験が行われ、解析は多群モンテカルロコードMORET IIIでなされた。

そこで原研の臨界実験装置 (Tank-type Critical Assembly: TCA)²⁾ を用いて炉心の中心領域に核分裂生成物核種 (各々天然のRh、Cs、Nd、Sm、Eu、Gd) を含む体系を構成して臨界実験を実施した³⁾。実験及び計算の有効性をチェックするために中性子断面積のよくわかったB、バーナブルポイズンとして重要なErについても同様の実験を実施した³⁾。

この報告書には、各々の体系 (Rh: 6濃度、Cs: 5濃度、Nd: 6濃度、Sm: 7濃度、Eu: 7濃度、Gd: 7濃度、B: 4濃度、Er: 8濃度) の個数密度及びその値を使用して連続エネルギーモンテカルロコードMCNP 4A⁴⁾ とJENDL-3.2から編集したポイントワイズ中性子断面積⁵⁾ の組合せで計算した中性子増倍率 (Neutron Multiplication Factor) について記述してある。ただし天然Erについては、実験は行ったものの、世界のどの評価済み中性子断面積ライブラリーにもデータが含まれていないため、解析は省略した。厳密な意味でのベンチマーク問題の成立性についても言及してある。そのため、将来、世界に向けて核分裂生成物核種積分評価ベンチマーク問題を提案する場合、非常に役立つ情報が含まれている。

2. 実験法

TCAの概念図を図-1に示す。この実験は図-2に示す体系で実施された。炉心は、 $n=18$ の正方配列 (燃料棒ピッチ: 1.956 cm、水/ウラン体積比: 1.83) から中心部分の4本の燃料棒を引き抜き、代わりにアルミニウム製の水溶液容器を挿入した体系である。水溶液容器を挿入した試験領域の水平断面及び下部の構造を各々図-3及び図-4に示す。

水溶液容器には、試料を溶かした約2リットルの水溶液が注ぎ込まれている。水溶液の濃度は、実験時間中 (一時間弱)、均質と仮定した。この実験は、炉水の温度が変化しやすい冬に三ヶ月かけて実施されたため、正確を期すため炉水及び水溶液の温度は、熱電対を利用して個々に連続的にモニターした (表-1参照)。測定点は、個々に一点であるが、それらの個々の領域は等温であると仮定した。これらの仮定は、事前の予備実験及びこれまでの経験から妥当

1. 序論

これまで熱中性子炉体系や高速中性子炉体系、遮蔽体系、核融合体系などのベンチマーク実験は数多くなされているが、核分裂生成物核種 (Fission Product: FP) の中性子断面積評価が可能なベンチマーク実験は、フランスで実施された一例しか報告されていない¹⁾。そこでは、¹⁴⁹Smのベンチマーク臨界実験が行われ、解析は多群モンテカルロコードMORET IIIでなされた。

そこで原研の臨界実験装置 (Tank-type Critical Assembly: TCA)²⁾ を用いて炉心の中心領域に核分裂生成物核種 (各々天然のRh、Cs、Nd、Sm、Eu、Gd) を含む体系を構成して臨界実験を実施した³⁾。実験及び計算の有効性をチェックするために中性子断面積のよくわかったB、バーナブルポイズンとして重要なErについても同様の実験を実施した³⁾。

この報告書には、各々の体系 (Rh: 6濃度、Cs: 5濃度、Nd: 6濃度、Sm: 7濃度、Eu: 7濃度、Gd: 7濃度、B: 4濃度、Er: 8濃度) の個数密度及びその値を使用して連続エネルギーモンテカルロコードMCNP 4A⁴⁾ とJENDL-3.2から編集したポイントワイズ中性子断面積⁵⁾ の組合せで計算した中性子増倍率 (Neutron Multiplication Factor) について記述してある。ただし天然Erについては、実験は行ったものの、世界のどの評価済み中性子断面積ライブラリーにもデータが含まれていないため、解析は省略した。厳密な意味でのベンチマーク問題の成立性についても言及してある。そのため、将来、世界に向けて核分裂生成物核種積分評価ベンチマーク問題を提案する場合、非常に役立つ情報が含まれている。

2. 実験法

TCAの概念図を図-1に示す。この実験は図-2に示す体系で実施された。炉心は、 $n=1.8$ の正方配列 (燃料棒ピッチ: 1.956 cm、水/ウラン体積比: 1.83) から中心部分の4本の燃料棒を引き抜き、代わりにアルミニウム製の水溶液容器を挿入した体系である。水溶液容器を挿入した試験領域の水平断面及び下部の構造を各々図-3及び図-4に示す。

水溶液容器には、試料を溶かした約2リットルの水溶液が注ぎ込まれている。水溶液の濃度は、実験時間中 (一時間弱)、均質と仮定した。この実験は、炉水の温度が変化しやすい冬に三ヶ月かけて実施されたため、正確を期するため炉水及び水溶液の温度は、熱電対を利用して個々に連続的にモニターした (表-1参照)。測定点は、個々に一点であるが、それらの個々の領域は等温であると仮定した。これらの仮定は、事前の予備実験及びこれまでの経験から妥当

と判断する。水溶液の濃度及び密度は、実験後、原研燃料研究部分析センターで測定した（表-1参照）。

この実験においては、これまでのTCAの臨界実験の方法と同様、水位を徐々に変化させて臨界条件を設定した。臨界水位設定の精度は ± 0.3 mmである。

3. 解析法

体系の中性子増倍率は、連続エネルギーモンテカルロコードMCNP 4A¹⁾で計算した。利用したポイントワイズ中性子断面積は、原研の核融合中性子工学研究室においてJENDL-3.2を基に編集したものである⁵⁾。ただし、熱中性子散乱テーブルS(α , β)は、MCNP-4Aの付属ライブラリー¹⁾に含まれていたものである。中性子増倍率の計算には、インポートランス・サンプリング法(Importance Sampling Method)を採用した。

3.1 計算モデル

濃縮度2.596%UO₂ペレットの直径は1.250 cmであり、密度は10.40 g/cm³ (理論密度の94.9%)である。アルミニウム被覆管の内径は、1.265 cmであり、肉厚は0.076 cmである。(以上は文献2より引用した。)

中性子増倍率の計算に影響する不確定要因には、ウラン濃縮度(± 0.01 wt. %)、ウランペレット密度(± 0.05 g/cm³)、ウランペレット直径(± 0.05 mm)、燃料被覆管の直径(± 0.005 mm)及び肉厚(± 0.005 mm)、燃料棒格子ピッチ(± 0.02 mm)、水反射体の厚さ、炉水の温度、水位の設定(± 0.3 mm)、中性子断面積の編集温度(300 K)が考えられる⁶⁾。

実験に利用した燃料棒の全長は、187.56 cmであるが、今回モデル化した部分は、これまでの計算例に従い、燃料有効長144.15 cmの部分のみである。これまでの経験から燃料棒の上下端部のアルミニウムプラグ(下端部プラグの長さ16.8 cm)を無視しても、計算結果には影響しないことがわかっている⁶⁾。燃料棒配列の正方断面の周囲および下部には、中性子増倍率の収束状況から判断して厚さ30 cmの水反射体を想定している⁶⁾。

水溶液容器の材質は、普通のアルミニウムである。モデル化した時の外表面は1.956 × 2 = 3.912 cm 正方、肉厚0.5 mm、高さ144.15 cmとした。ペレット下端位置をZ = 0 cmとすると、水溶液容器の内面下端位置はZ = -1.83 cmとなるように設定されている。水溶液容器の下端には、厚さ2 cmのアルミニウム、その下にアルミニウム製の支持構造物があるが、それらは無視した。すべての燃料棒の下端部のアルミニウムプラグを無視しても計算結果に影響しないことがわかっており⁶⁾、それとのバランスから水溶液容器のそれら無視してもやはり結果には何の影響もないと判断する。

と判断する。水溶液の濃度及び密度は、実験後、原研燃料研究部分析センターで測定した（表-1参照）。

この実験においては、これまでのTCAの臨界実験の方法と同様、水位を徐々に変化させて臨界条件を設定した。臨界水位設定の精度は ± 0.3 mmである。

3. 解析法

体系の中性子増倍率は、連続エネルギーモンテカルロコードMCNP 4A⁴⁾で計算した。利用したポイントワイズ中性子断面積は、原研の核融合中性子工学研究室においてJENDL-3.2を基に編集したものである⁵⁾。ただし、熱中性子散乱テーブルS(α , β)は、MCNP-4Aの付属ライブラリー¹⁾に含まれていたものである。中性子増倍率の計算には、インポートランス・サンプリング法(Importance Sampling Method)を採用した。

3.1 計算モデル

濃縮度2.596%UO₂ペレットの直径は1.250 cmであり、密度は10.40 g/cm³ (理論密度の94.9%)である。アルミニウム被覆管の内径は、1.265 cmであり、肉厚は0.076 cmである。(以上は文献2より引用した。)

中性子増倍率の計算に影響する不確定要因には、ウラン濃縮度(± 0.01 wt. %)、ウランペレット密度(± 0.05 g/cm³)、ウランペレット直径(± 0.05 mm)、燃料被覆管の直径(± 0.005 mm)及び肉厚(± 0.005 mm)、燃料棒格子ピッチ(± 0.02 mm)、水反射体の厚さ、炉水の温度、水位の設定(± 0.3 mm)、中性子断面積の編集温度(300 K)が考えられる⁶⁾。

実験に利用した燃料棒の全長は、187.56 cmであるが、今回モデル化した部分は、これまでの計算例に従い、燃料有効長144.15 cmの部分のみである。これまでの経験から燃料棒の上下端部のアルミニウムプラグ(下端部プラグの長さ16.8 cm)を無視しても、計算結果には影響しないことがわかっている⁶⁾。燃料棒配列の正方断面の周囲および下部には、中性子増倍率の収束状況から判断して厚さ30 cmの水反射体を想定している⁶⁾。

水溶液容器の材質は、普通のアルミニウムである。モデル化した時の外表面は1.956 × 2 = 3.912 cm正方、肉厚0.5 mm、高さ144.15 cmとした。ペレット下端位置をZ = 0 cmとすると、水溶液容器の内面下端位置はZ = -1.83 cmとなるように設定されている。水溶液容器の下端には、厚さ2 cmのアルミニウム、その下にアルミニウム製の支持構造物があるが、それらは無視した。すべての燃料棒の下端部のアルミニウムプラグを無視しても計算結果に影響しないことがわかっており⁶⁾、それとのバランスから水溶液容器のそれら無視してもやはり結果には何の影響もないと判断する。

今回設定した計算条件では、不確定要因は取り除いてある。いちばん影響すると考えられる炉水の温度についても、すべての体系に対して正確に測定し、その情報を基に水の個数密度を算出している。そのため厳密に評価できている。空気の部分は真空とした。ポイントワイズ中性子断面積は、すべて温度300Kのものを利用した⁵⁾。

表-1には、実測した各実験体系の水溶液の温度及び濃度、密度、炉水の温度及び臨界水位が示してある。表-2には、個数密度計算に利用した原子量及び重量存在割合⁷⁾、化学形が示してある。表-3には、水密度の温度依存性が示してある⁸⁾。表-4には、2.6w%濃縮度のUO₂燃料棒の20℃の個数密度が示してある²⁾。表-5には、各核種各濃度の個数密度が示してある。

3. 2 中性子増倍率の計算

中性子増倍率 (k_{eff}) の計算においては、標準偏差 (1σ) を0.1%以下に抑えるため、ヒストリー数は100万とした。粒子数は、バッチ当たり10000とし、110バッチの計算をし、そのうち最初の10バッチの結果はスキップした。MCNP-4Aでは、最終的な中性子増倍率は、衝突エスティメータ (k^{c}_{eff}) 及び吸収エスティメータ (k^{a}_{eff})、トラックレンクス・エスティメータ (k^{TL}_{eff}) を組合わせた「共分散加重組合せエスティメータ」⁴⁾ で評価している。

$$k^{c}_{eff} = (1/N) \sum_i W_i \left[\sum_k f_k \cdot \nu_k \cdot \sigma_{FK} / \sum_k f_k \cdot \sigma_{TK} \right] \quad (1)$$

$$k^{a}_{eff} = (1/N) \sum_i W_i \cdot \nu_k \left[\sigma_{FK} / (\sigma_{AK} + \sigma_{FK}) \right] \quad (2)$$

$$k^{TL}_{eff} = (1/N) \sum_i W_i \cdot \rho \cdot d \cdot \sum_k f_k \cdot \nu_k \cdot \sigma_{FK} \quad (3)$$

ここで、

- i : サイクル当たりの全衝突に対する和 (衝突)
- i : k^{th} アイソトープにおける捕獲イベントに対する和 (吸収)
- i : 全中性子経路に対する和 (トラックレンクス)
- k : i^{th} の衝突に含まれる全アイソトープに対する和
- σ_{TK} : ミクロ全断面積
- σ_{FK} : ミクロ核分裂断面積
- σ_{AK} : 核分裂を除くミクロ吸収断面積
- ν_k : 核分裂当たり発生する即発あるいは全中性子の平均数
- f_k : 核種 k の割合
- N : 公称線源サイズ
- W_i : 粒子ウエイト
- ρ : セルの原子密度

d : 最終イベントからの経路トラックレングス

この計算に要した時間は、Sunワークステーション (Sparc-20) を利用した場合、体系にもよるが、1ケース当たり100万ヒストリーで約24時間であった。

4. 計算結果及び討論

表-6は、すべての実験体系に対して各々100万ヒストリーで計算した時の中性子増倍率をまとめたものである。計算結果についてつぎの点を注意深く検討した。

- ①炉心には、燃料棒のわずかな歪曲を矯正するために厚さ1cmのルサイト製中間格子板が設けられているが、計算ではそれを無視している。燃料の周りにルサイトか水を組み入れた簡単な球モデルを想定して中性子増倍率を計算して中間格子板を無視したことによる(ルサイトを水に置き換えた)影響を定量的に評価してみたところ、誤差は0.04%以下であると推定された。実際にはその影響は無視できる。
- ②アルミニウム製水溶液容器は、正確に製造されているが、仮に形状がわずかに歪んでいたとしても、そのマクロ全断面積 ($\Sigma_t = 0.099 \text{ cm}^{-1}$) 及びそれが炉心に占める割合、熱中性子束分布から判断して、まったく影響しないと推定される。
- ③水溶液の濃度及び密度は、原研燃料研究部分析センターにおいて実測し、濃度には約4%、密度には約1%の誤差がある。Euの9575 $\mu\text{g/ml}$ の濃度の時、個数密度を±4%変化させて中性子増倍率を求めたが、有意な系統的变化は認められなかった。
- ④表-6の中性子増倍率の値を注意深く検討してみると、図-5のように濃度の増加とともに単調に大きくなる核種 (Sm, Eu, Gd, B,) と図-6のように逆の傾向を示す核種 (Rh, Cs, Nd) に分けられ、中性子断面積の精度を評価する上での有用な情報を与えている。それは、濃度の増加とともに中性子断面積の誤差が徐々に増幅されていくためであると解釈できる。各核種の臨界水位とMCNP 4Aによる中性子増倍率の計算値の相関を図-7に示す。Rhについては、水位の増加とともに臨界固有値から減少傾向を示し、その他の核種については、逆に増加傾向を示している。
- ⑤計算結果の妥当性をチェックするために、まずMCNP 4Aの幾何形状プロットルーチン⁴⁾を利用して形状入力が正しくなされていることをチェックした。つぎにMCNP 4Aの出力リストから体系の核種毎及びセル毎(さらにセル内の核種毎)の衝突数を確認した。ひとつの例としてRhの12200 $\mu\text{g/ml}$ の濃度の時、核種毎の衝突数はつぎの

d : 最終イベントからの経路トラックレングス

この計算に要した時間は、Sunワークステーション (Sparc-20) を利用した場合、体系にもよるが、1ケース当たり100万ヒストリーで約24時間であった。

4. 計算結果及び討論

表-6は、すべての実験体系に対して各々100万ヒストリーで計算した時の中性子増倍率をまとめたものである。計算結果についてつぎの点を注意深く検討した。

- ①炉心には、燃料棒のわずかな歪曲を矯正するために厚さ1cmのルサイト製中間格子板が設けられているが、計算ではそれを無視している。燃料の周りにルサイトか水を組み入れた簡単な球モデルを想定して中性子増倍率を計算して中間格子板を無視したことによる(ルサイトを水に置き換えた)影響を定量的に評価してみたところ、誤差は0.04%以下であると推定された。実際にはその影響は無視できる。
- ②アルミニウム製水溶液容器は、正確に製造されているが、仮に形状がわずかに歪んでいたとしても、そのマクロ全断面積 ($\Sigma_t = 0.099 \text{ cm}^{-1}$) 及びそれが炉心に占める割合、熱中性子束分布から判断して、まったく影響しないと推定される。
- ③水溶液の濃度及び密度は、原研燃料研究部分析センターにおいて実測し、濃度には約4%、密度には約1%の誤差がある。Euの9575 $\mu\text{g}/\text{ml}$ の濃度の時、個数密度を $\pm 4\%$ 変化させて中性子増倍率を求めたが、有意な系統的变化は認められなかった。
- ④表-6の中性子増倍率の値を注意深く検討してみると、図-5のように濃度の増加とともに単調に大きくなる核種 (Sm, Eu, Gd, B,) と図-6のように逆の傾向を示す核種 (Rh, Cs, Nd) に分けられ、中性子断面積の精度を評価する上での有用な情報を与えている。それは、濃度の増加とともに中性子断面積の誤差が徐々に増幅されていくためであると解釈できる。各核種の臨界水位とMCNP 4Aによる中性子増倍率の計算値の相関を図-7に示す。Rhについては、水位の増加とともに臨界固有値から減少傾向を示し、その他の核種については、逆に増加傾向を示している。
- ⑤計算結果の妥当性をチェックするために、まずMCNP 4Aの幾何形状プロットルーチン¹⁾を利用して形状入力が正しくなされていることをチェックした。つぎにMCNP 4Aの出力リストから体系の核種毎及びセル毎(さらにセル内の核種毎)の衝突数を確認した。ひとつの例としてRhの12200 $\mu\text{g}/\text{ml}$ の濃度の時、核種毎の衝突数はつぎの

とおりである。

H	:	1 2 4 4 3 8 3 6 回
N	:	1 4 3 9 回
O	:	8 3 6 4 2 8 2 回
A 1	:	4 4 2 8 8 5 回
R h	:	5 0 0 9 回
^{235}U	:	8 3 6 0 6 2 回
^{238}U	:	2 6 2 4 8 5 9 回

総衝突数 2 4 7 1 8 3 7 2 に占める R h の衝突数の割合は 0. 0 2 % である。その体系に対する核種毎の Σ_t 及び体積比、熱中性子束分布を総合的に考慮して R h の衝突数を大雑把に計算してみると、約 0. 0 3 % になる。MCNP 4 A の計算は、正しく行なわれていることがわかる。各々の核種の最高濃度での Σ_t はつぎのようになる。

B	:	$\Sigma_t = 0. 0 8 7 3 \text{ cm}^{-1}$
R h	:	$\Sigma_t = 0. 0 7 2 5 \text{ cm}^{-1}$
C s	:	$\Sigma_t = 0. 0 2 1 0 \text{ cm}^{-1}$
N d	:	$\Sigma_t = 0. 0 1 9 2 \text{ cm}^{-1}$
S m	:	$\Sigma_t = 0. 1 0 1 0 \text{ cm}^{-1}$
E u	:	$\Sigma_t = 0. 1 6 4 0 \text{ cm}^{-1}$
G d	:	$\Sigma_t = 0. 1 7 9 0 \text{ cm}^{-1}$

平均的には $\Sigma_t = 0. 1 \text{ cm}^{-1}$ 程度であり、R h の検討結果は他の核種に対するひとつのめやすになる。中性子増倍率に占める各々の核種の影響の程度が推定されよう。いまのコンピュータの性能から判断して、モンテカルロ計算ではかなりきびしい条件ではあるが、表-6の計算誤差 (1σ) からして中性子断面積の誤差の有意な情報を浮上させているものと判断できる。

⑥ここではMCNP 4 Aの解析結果についてまとめたが、二次元中性子輸送計算コード TWOTRANを用いて摂動計算も実施している³⁾。MCNP 4 A及びTWOTRANの結果から総合的に判断すると、全核種に対して実測の反応度をよく再現している。

⑦表-1のデータと水位変化に対する反応度変化の式²⁾ $[d\rho/dH = C(1/(H+\lambda))]$ ³⁾、ここで今回の燃料棒ピッチでは $C = 7. 59 \pm 0. 07 (\phi \cdot \text{cm})$ 、 $\lambda = 12. 2 \text{ cm}$ から、今回の実験では、C s及びN dに対して約70~80 ϕ 、他の核種に対して

約 $350\phi = 3.5\%$ の反応度が印加されている。そのためこの実験は核分裂生成物の中性子断面積積分評価用ベンチマーク実験として十分な信頼性を有すると判断される。

⑧FP核種の中性子断面積積分評価用臨界実験については、熱中性子エネルギー領域に対しては実測と計算が比較的良好だが、むしろ興味深い問題は熱外中性子エネルギー領域に存在するように思える。そこでつぎの実験では、水溶液容器（図-2及び3参照）の周囲及び下面に厚さ0.5mmのカドミニウム板を張り付け、熱中性子をカットして熱外中性子エネルギー領域の積分情報を得る臨界実験を予定している。

⑨今回の計算は、JENDL-3.2のFP核種を対象にした。天然のErについては、世界のどの中性子断面積ライブラリーにも収録されていないため、厳密な計算はできない。しかしながらENDF/B-IV及び-Vには、天然Erの熱中性子吸収断面積の99%をカバーする ^{166}Er 及び ^{167}Er のみ収録されている。Erの個数密度から判断すると、散乱断面積の影響は問題になるほど表れないと推定されるため、熱中性子吸収断面積が99%カバーされていれば、計算結果の信頼性は失われないと判断できる。Erについては、PWR燃料のバーナブルポイズンとしての利用が検討されており、近い将来、今回のベンチマーク実験をENDF/B-Vの中性子断面積を利用して解析する予定である。

⑩天然試料に含まれる不純物の影響については、メーカーから提供された資料を参考に、試料のマクロ熱中性子断面積に対する各不純物のその総和の割合 ($< 10^{-3}$) から判断した。このオーダーであれば、③の結果から推定して影響は無視できる。つぎに予定されている熱外中性子エネルギー領域の実験では、原研分析センターに依頼して各核種の溶液について濃度及び密度のみならず、代表的な数種の不純物核種の定量についても実施する予定である。

5. 結論

TCA炉心の中心領域に核分裂生成物核種 (Rh: 6濃度、Cs: 5濃度、Nd: 6濃度、Sm: 7濃度、Eu: 7濃度、Gd: 7濃度) を含む体系を構成して中性子断面積積分評価用臨界実験を実施した。実験及び計算の有効性をチェックするために中性子断面積のよくわかったB (4濃度)、バーナブルポイズンとして重要なEr (7濃度) についても同様の実験を実施した。

それらの体系の個数密度を算出した。その値を使用して中性子増倍率をMCNP 4AとJENDL-3.2の組合せで計算した (ただしErについては評価済み断面積が世界のどのライブラリーにも存在しないため除外してある)。

計算で求めた中性子増倍率は、全体的に臨界固有値を非常によく再現している。このことが

約 $350 \phi = 3.5$ の反応度が印加されている。そのためこの実験は核分裂生成物の中性子断面積積分評価用ベンチマーク実験として十分な信頼性を有すると判断される。

⑨FP核種の中性子断面積積分評価用臨界実験については、熱中性子エネルギー領域に対しては実測と計算が比較的良好だが、むしろ興味深い問題は熱外中性子エネルギー領域に存在するように思える。そこでつぎの実験では、水溶液容器（図-2及び3参照）の周囲及び下面に厚さ0.5mmのカドミニウム板を張り付け、熱中性子をカットして熱外中性子エネルギー領域の積分情報を得る臨界実験を予定している。

⑩今回の計算は、JENDL-3.2のFP核種を対象にした。天然のErについては、世界のどの中性子断面積ライブラリーにも収納されていないため、厳密な計算はできない。しかしながらENDF/B-IV及び-Vには、天然Erの熱中性子吸収断面積の99%をカバーする ^{166}Er 及び ^{167}Er のみ収納されている。Erの個数密度から判断すると、散乱断面積の影響は問題になるほど表れないと推定されるため、熱中性子吸収断面積が99%カバーされていれば、計算結果の信頼性は失われないと判断できる。Erについては、PWR燃料のバーナブルポイズンとしての利用が検討されており、近い将来、今回のベンチマーク実験をENDF/B-Vの中性子断面積を利用して解析する予定である。

⑪天然試料に含まれる不純物の影響については、メーカーから提供された資料を参考に、試料のマクロ熱中性子断面積に対する各不純物のその総和の割合 ($< 10^{-3}$) から判断した。このオーダーであれば、③の結果から推定して影響は無視できる。つぎに予定されている熱外中性子エネルギー領域の実験では、原研分析センターに依頼して各核種の溶液について濃度及び密度のみならず、代表的な数種の不純物核種の定量についても実施する予定である。

5. 結論

TCA炉心の中心領域に核分裂生成物核種 (Rh: 6濃度、Cs: 5濃度、Nd: 6濃度、Sm: 7濃度、Eu: 7濃度、Gd: 7濃度) を含む体系を構成して中性子断面積積分評価用臨界実験を実施した。実験及び計算の有効性をチェックするために中性子断面積のよくわかったB (4濃度)、バーナブルポイズンとして重要なEr (7濃度) についても同様の実験を実施した。

それらの体系の個数密度を算出した。その値を使用して中性子増倍率をMCNP 4AとJENDL-3.2の組合せで計算した (ただしErについては評価済み断面積が世界のどのライブラリーにも存在しないため除外してある)。

計算で求めた中性子増倍率は、全体的に臨界固有値を非常によく再現している。このことか

ら JENDL-3.2 に収納されているこれらの核種の中性子断面積は評価精度がよいと判断される。今回の実験及び解析結果から、ここで取り上げた体系は、FP核種の中性子断面積積分評価用ベンチマーク問題としてすぐれていることがわかった。

謝辞

水溶液の濃度及び密度の分析は、原研燃料研究部分析センターの樋田行雄氏が担当した。ここに記し感謝の言葉としたい。

この実験は小室主担当の下にTCA管理グループ全員で担当した。個数密度の算出は、小室及び須崎の確認の下に桜井が担当した。MCNP 4Aの入力の作成及び計算は、荒川の協力の下に桜井が担当した。

燃料サイクル安全工学部部長の内藤倅孝氏には計算途中で有益な助言をいただいた。この報告書の原稿は、同部臨界安全研究室室長の三好慶典氏及び同部燃料サイクル安全評価研究室の奥野浩氏に査読していただいた。特に奥野氏からは図-5～7の分析の視点を提示していただいた。ここに記し感謝の言葉としたい。

ら JENDL-3.2 に収納されているこれらの核種の中性子断面積は評価精度がよいと判断される。今回の実験及び解析結果から、ここで取り上げた体系は、FP核種の中性子断面積積分評価用ベンチマーク問題としてすぐれていることがわかった。

謝辞

水溶液の濃度及び密度の分析は、原研燃料研究部分析センターの樋田行雄氏が担当した。ここに記し感謝の言葉としたい。

この実験は小室主担当の下にTCA管理グループ全員で担当した。個数密度の算出は、小室及び須崎の確認の下に桜井が担当した。MCNP 4Aの入力の作成及び計算は、荒川の協力の下に桜井が担当した。

燃料サイクル安全工学部部長の内藤倅孝氏には計算途中で有益な助言をいただいた。この報告書の原稿は、同部臨界安全研究室室長の三好慶典氏及び同部燃料サイクル安全評価研究室の奥野浩氏に査読していただいた。特に奥野氏からは図-5~7の分析の視点を提示していただいた。ここに記し感謝の言葉としたい。

参考文献

- 1) J. Anno, P. Fouillaud, P. Grivot and G. Poullo t: Description and Exploitation of Benchm arks Involving ^{149}Sm , A Fission Product Ta king Part in the Burn up Credit in Spent Fuels, Proc. of The Fifth Int. Conf. on Nu clear Criticality Safety, 5.10-5.17 (1995).
- 2) H. Tsuruta, et al. : Critical Sizes of Light Water Moderated UO_2 and $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ Lattices, JAERI 1254 (1978).
- 3) Y. Komuro, S. Ohtomo, K. Sakurai, T. Yamamoto, T. Suzuki, O. Horiki, K. Nitta: Measurement of R eactivity Worth of Natural Sm, Cs, Gd, Nd, Rh, Eu, B and Er, Proc. of Int. Conf. on Physi cs of Reactor (PHYSOR96), L120-L129 (1996).
- 4) J. F. Briesmeister, Ed. : MCNP-A General Mon te Carlo N-Particle Transport Code, Versi on 4A, LA-12625 (1993).
- 5) 小迫和明、大山幸夫、前川 洋: FSXLIB-J3R2; JENDL-3. 2に基づ くMCNP用連続エネルギー断面積ライブラリー、JAERI-Data/Code 94-020 (1994).
- 6) Y. Miyoshi, T. Arakawa and T. Yamamoto: Criti cal Arrays of Low Enriched UO_2 Fuel Rods with Volume Ratio Ranging from 1.5 to 3. 0, (to be published).
- 7) W. Seelmann-Eggebert, G. Pfennig, H. Münzel: NUKLIDKARTE, KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSR UHE, (1974).
- 8) 理科年表 (平成7年版)、国立天文台編、丸善、1994年。

表-1 実測した各実験体系のFP水溶液の温度(*)及び濃度(*)、密度(*)、炉心の水温及び臨界水位
 [(*)は原研分析センターにて実測した]

実験炉心	FP水溶液			炉心	
	温度(°C)	濃度(μg/ml)	密度(g/cm ³)**	水温(°C)	臨界水位(cm)
18×18				19.0	75.02
18×18 -2×2				19.0	77.95
ボックス内水				18.9	78.02
ボックス内B	(推定18°C)	504	1.0038	18.8	85.99
	-	1004	1.0040	18.6	93.30
	-	1535	1.0050	18.6	100.47
	-	2070	1.0070	18.5	107.35
ボックス内Rh	8.4	3130	1.0070	9.2	80.25
	9.3	12200	1.0260	9.2	84.68
	9.9	25100	1.0540	9.2	90.68
	8.8	40500	1.0840	9.1	97.13
	9.3	56400	1.1190	9.2	103.82
	9.7	73400	1.1520	9.3	110.90
ボックス内Cs	13.6	11200	1.0100	13.7	79.65
	13.7	21600	1.0210	13.8	80.70
	13.7	45900	1.0460	13.9	82.76
	13.4	68900	1.0700	13.2	84.71
	13.5	95800	1.0980	13.5	86.67
ボックス内Nd	15.9	10100	1.0190	15.9	79.61
	16.0	20900	1.0380	16.0	80.58
	16.2	32100	1.0610	16.0	81.55
	14.5	44000	1.0830	14.6	82.45
	14.7	56100	1.1040	14.6	83.51
	14.9	73900	1.1390	14.6	85.17

表-1 実測した各実験体系のFP水溶液の温度(*)及び濃度(*)、密度(*)、炉心の水温及び臨界水位(続)
 [(*)は原研分析センターにて実測した]

実験炉心	FP水溶液			炉心	
	温度(℃)	濃度(μg/ml)	密度(g/cm ³)*	水温(℃)	臨界水位(cm)
ボックス内Sm	16.0	440	1.0020	17.6	85.25
	17.3	870	1.0030	17.5	91.69
	17.5	1305	1.0030	17.5	97.86
	17.5	1735	1.0040	17.5	103.96
	17.0	2595	1.0050	17.3	115.77
	17.0	3430	1.0060	17.3	127.01
	17.0	4385	1.0090	17.3	138.65
ボックス内Eu	17.0	515	1.0000	17.2	81.57
	17.0	1005	1.0010	17.2	84.73
	17.0	1510	1.0010	17.2	87.94
	17.0	2535	1.0040	17.0	94.15
	17.0	4090	1.0050	17.0	103.10
	17.0	6210	1.0120	17.0	114.84
	17.0	9575	1.0170	17.0	132.77
ボックス内Gd	12.9	51	0.9990	12.9	81.45
	13.1	101	0.9990	12.9	84.11
	13.1	207	0.9990	12.9	89.47
	12.4	418	1.0000	12.6	98.90
	12.7	622	0.9990	12.6	107.30
	12.9	826	0.9990	12.6	114.94
	12.8	1040	1.0000	12.6	121.99
ボックス内Er	11.2	3200	1.0040	11.1	79.92
	11.3	11300	1.0180	11.1	82.90
	11.1	48400	1.0790	11.1	97.05
	10.8	62800	1.0890	10.8	101.60
	11.0	79000	1.1260	10.8	106.79
	11.0	108900	1.1750	10.8	118.36
	11.0	145200	1.2380	10.9	131.73

**密度測定時の温度:すべて18~20℃

表-2 実験対象元素の原子量及び重量存在割合、化学形

実験対象元素	原子量 (*)	重量存在割合 (%) (*)	化学形
B ¹⁰ B ¹¹ B	10.81	20 80	H ₃ BO ₃
Rh ¹⁰³ Rh	102.9055	100	Rh(NO ₃) ₃ ·XH ₂ O
Cs ¹³³ Cs	132.9094	100	Cs(NO ₃)
Nd ¹⁴² Nd ¹⁴³ Nd ¹⁴⁴ Nd ¹⁴⁵ Nd ¹⁴⁶ Nd ¹⁴⁸ Nd ¹⁵⁰ Nd	144.24	27.1 12.2 23.9 8.3 17.2 5.7 5.6	Nd(NO ₃) ₃ ·XH ₂ O
Sm ¹⁴⁴ Sm ¹⁴⁷ Sm ¹⁴⁸ Sm ¹⁴⁹ Sm ¹⁵⁰ Sm ¹⁵² Sm ¹⁵⁴ Sm	150.4	3.1 15.0 11.2 13.8 7.4 29.7 22.8	Sm(NO ₃) ₃ ·XH ₂ O

表-2 実験対象元素の原子量及び重量存在割合、化学形 (続)

実験対象元素	原子量	重量存在割合 (%)	化学形
Eu	151.96		Eu(NO ₃) ₃ ·XH ₂ O
¹⁵¹ Eu		47.8	
¹⁵³ Eu		52.2	
Gd	157.25		Gd(NO ₃) ₃ ·XH ₂ O
¹⁵² Gd		0.20	
¹⁵⁴ Gd		2.2	
¹⁵⁵ Gd		14.9	
¹⁵⁶ Gd		20.6	
¹⁵⁷ Gd		15.7	
¹⁵⁸ Gd		24.7	
¹⁶⁰ Gd		21.7	
Er	167.26		Er(NO ₃) ₃ ·XH ₂ O
¹⁶² Er		0.14	
¹⁶⁴ Er		1.6	
¹⁶⁶ Er		33.4	
¹⁶⁷ Er		22.9	
¹⁶⁸ Er		27.0	
¹⁷⁰ Er		15.0	

(*) W. Seelmann-Eggebert, G. Pfennig, H. Münzel: NUKLIDKARTE,
KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE (1974) より引用

表-3 水密度の温度依存性 (実験温度範囲のみ)

温度 (°C)	密度 (g/cm ³) *
8	0.99985
9	0.99978
10	0.99970
11	0.99961
12	0.99949
13	0.99938
14	0.99924
15	0.99910
16	0.99894
17	0.99877
18	0.99860
19	0.99841
20	0.99820

*理科年表 (平成7年版)、国立天文台編、丸善、1994年

表-4 2.6w%濃縮度のUO₂燃料棒 (*) の個数密度 (20°C)

核種	個数密度 (×10 ²⁴) (個/cm ³)
燃料	
²³⁵ U	6.086-4
²³⁸ U	2.255-2
O	4.725-2
被覆管	
A1	5.587-2 (エアギャップ込み)
炉水	
H	6.676-2
O	3.338-2

(*) 被覆管: 内径12.65mm、肉厚0.76mm、ペレット都有効長1441.5mm、H. Tsuruta et al.: JAERI 1254 (1978) より引用。

表-5 個数密度の計算結果

体系・核種	濃度 ($\mu\text{g}/\text{ml}$)	個数密度 ($\times 10^{-24}$ 個/ cm^3)
水溶液容器		A1 6.030-2
18×18		H 6.677-2 O 3.339-2
18×18-2×2		H 6.677-2 O 3.339-2
18×18-2×2 (ボックス内水)		H 6.677-2 O 3.339-2
B水溶液 (注)	504	^{10}B 5.615-6 ^{11}B 2.246-5 H 6.703-2 O 3.355-2 炉水 H 6.676-2 O 3.338-2
B水溶液	1004	^{10}B 1.119-5 ^{11}B 4.474-5 H 6.693-2 O 3.355-2 炉水 H 6.676-2 O 3.338-2

(注) すべての水溶液の水の個数密度はつぎの式から計算した。水溶液の濃度 C ($\mu\text{g}/\text{ml}$) 及びある温度での密度 ρ (g/cm^3) の分析値からある温度における水の密度 $\rho_{\text{水}}$ は $\rho_{\text{水}} = \rho$ (g/cm^3) $\{1 - [C$ ($\mu\text{g}/\text{ml}$) $\times 10^{-6} M$ (試料化学式原子量) / ρ (g/cm^3) M (FP核などの原子量)] $\}$ となり、最後に実験時の水溶液の温度を基に密度補正を行う。

表-5 個数密度の計算結果(続)

体系・核種	濃度 ($\mu\text{g}/\text{ml}$)	個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/ cm^3)
B水溶液	1535	^{10}B 1.711-5
		^{11}B 6.840-5
		H 6.688-2
		O 3.357-2
		炉水 H 6.676-2
		O 3.338-2
B水溶液	2070	^{10}B 2.307-5
		^{11}B 9.224-5
		H 6.691-2
		O 3.363-2
		炉水 H 6.676-2
		O 3.338-2
Rh水溶液	3130	^{103}Rh 1.832-5
		H 6.688-2
		N 5.496-5
		O 3.360-2
		炉水 H 6.689-2
		O 3.345-2
Rh水溶液	12200	^{103}Rh 7.139-5
		H 6.648-2
		N 2.142-4
		O 3.388-2
		炉水 H 6.688-2
		O 3.344-2

表-5 個数密度の計算結果(続)

体系・核種	濃度 ($\mu\text{g/ml}$)	個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)
Rh水溶液	25100	¹⁰³ Rh 1.469-4
		H 6.593-2
		N 4.407-4
		O 3.429-2
		炉水 H 6.688-2
		O 3.344-2
Rh水溶液	40500	¹⁰³ Rh 2.370-4
		H 6.594-2
		N 7.110-4
		O 3.510-2
		炉水 H 6.688-2
		O 3.344-2
Rh水溶液	56400	¹⁰³ Rh 3.301-4
		H 6.439-2
		N 9.903-4
		O 3.517-2
		炉水 H 6.688-2
		O 3.344-2
Rh水溶液	73400	¹⁰³ Rh 4.295-4
		H 6.339-2
		N 1.289-3
		O 3.556-2
		炉水 H 6.688-2
		O 3.344-2

表-5 個数密度の計算結果(続)

体系・核種	濃度 ($\mu\text{g}/\text{ml}$)	個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/ cm^3)
Cs水溶液	11200	Cs 5.071-5
		H 6.584-2
		N 5.070-5
		O 3.307-2
		炉水 H 6.683-2
		O 3.341-2
Cs水溶液	21600	Cs 9.780-5
		H 6.490-2
		N 9.780-5
		O 3.274-2
		炉水 H 6.683-2
		O 3.341-2
Cs水溶液	45900	Cs 2.078-4
		H 6.269-2
		N 2.078-4
		O 3.196-2
		炉水 H 6.683-2
		O 3.341-2
Cs水溶液	68900	Cs 3.119-4
		H 6.062-2
		N 3.119-4
		O 3.125-2
		炉水 H 6.683-2
		O 3.341-2

表-5 個数密度の計算結果(続)

体系・核種	濃度 ($\mu\text{g}/\text{ml}$)	個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/ cm^3)
Cs水溶液	95800	Cs 4.337-4
		H 5.814-2
		N 4.337-4
		O 3.037-2
		炉水 H 6.683-2
		O 3.341-2
Nd水溶液	10100	^{142}Nd 1.143-5
		^{143}Nd 5.146-6
		^{144}Nd 1.008-5
		^{145}Nd 3.501-6
		^{146}Nd 7.254-6
		^{148}Nd 2.404-6
		^{150}Nd 2.362-6
		H 6.669-2
		N 1.265-4
		O 3.373-2
		炉水 H 6.683-2
		O 3.341-2

表-5 個数密度の計算結果(続)

体系・核種	濃度 ($\mu\text{g}/\text{ml}$)	個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/ cm^3)
Nd水溶液	20900	^{142}Nd 2.365-5
		^{143}Nd 1.065-5
		^{144}Nd 2.086-5
		^{145}Nd 7.245-6
		^{146}Nd 1.501-5
		^{148}Nd 4.975-6
		^{150}Nd 4.888-6
		H 6.629-2
		N 2.618-4
		O 3.392-2
		炉水 H 6.683-2
O 3.341-2		
Nd水溶液	32100	^{142}Nd 3.632-5
		^{143}Nd 1.636-5
		^{144}Nd 3.204-5
		^{145}Nd 1.113-5
		^{146}Nd 2.305-5
		^{148}Nd 7.641-6
		^{150}Nd 7.507-6
		H 6.609-2
		N 4.020-4
		O 3.425-2
		炉水 H 6.683-2
O 3.341-2		

表-5 個数密度の計算結果(続)

体系・核種	濃度 ($\mu\text{g/ml}$)	個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)
Nd水溶液	44000	¹⁴² Nd 4.978-5
		¹⁴³ Nd 2.242-5
		¹⁴⁴ Nd 4.392-5
		¹⁴⁵ Nd 1.526-5
		¹⁴⁶ Nd 3.160-5
		¹⁴⁸ Nd 1.047-5
		¹⁵⁰ Nd 1.029-5
		H 6.577-2
		N 5.511-4
		O 3.453-2
		炉水 H 6.683-2
		O 3.341-2
Nd水溶液	56100	¹⁴² Nd 6.347-5
		¹⁴³ Nd 2.859-5
		¹⁴⁴ Nd 5.600-5
		¹⁴⁵ Nd 1.946-5
		¹⁴⁶ Nd 4.029-5
		¹⁴⁸ Nd 1.335-5
		¹⁵⁰ Nd 1.312-5
		H 6.536-2
		N 7.026-4
		O 3.479-2
		炉水 H 6.683-2
		O 3.341-2

表-5 個数密度の計算結果(続)

体系・核種	濃度 ($\mu\text{g}/\text{ml}$)	個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/ cm^3)
Nd水溶液	73900	^{142}Nd 8.361-5
		^{143}Nd 3.766-5
		^{144}Nd 7.377-5
		^{145}Nd 2.563-5
		^{146}Nd 5.307-5
		^{148}Nd 1.759-5
		^{150}Nd 1.728-5
		H 6.495-2
		N 9.255-4
		O 3.526-2
炉水		H 6.683-2
		O 3.341-2
Sm水溶液	440	^{144}Sm 5.461-8
		^{147}Sm 2.643-7
		^{148}Sm 1.973-7
		^{149}Sm 2.431-7
		^{150}Sm 1.304-7
		^{152}Sm 5.232-7
		^{154}Sm 4.017-7
		H 6.702-2
		N 5.445-6
		O 3.353-2
炉水		H 6.676-2
		O 3.338-2

表-5 個数密度の計算結果(続)

体系・核種	濃度 ($\mu\text{g}/\text{ml}$)	個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/ cm^3)
Sm水溶液	870	^{144}Sm 1.080-7
		^{147}Sm 5.226-7
		^{148}Sm 3.901-7
		^{149}Sm 4.807-7
		^{150}Sm 2.578-7
		^{154}Sm 7.943-7
		H 6.701-2
		N 1.077-5
		O 3.354-2
		炉水 H 6.680-2 O 3.340-2
Sm水溶液	1305	^{144}Sm 1.620-7
		^{147}Sm 7.839-7
		^{148}Sm 5.852-7
		^{149}Sm 7.211-7
		^{150}Sm 3.867-7
		^{152}Sm 1.553-6
		^{154}Sm 1.191-6
		H 6.693-2
		N 1.615-5
		O 3.352-2
炉水 H 6.680-2 O 3.340-2		

表-5 個数密度の計算結果(続)

体系・核種	濃度 ($\mu\text{g}/\text{ml}$)	個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/ cm^3)
Sm水溶液	1735	^{144}Sm 2.154-7
		^{147}Sm 1.042-6
		^{148}Sm 7.780-7
		^{149}Sm 9.587-7
		^{150}Sm 5.141-7
		^{152}Sm 2.065-6
		^{154}Sm 1.583-6
		H 6.694-2
		N 2.147-5
		O 3.353-2
		炉水 H 6.680-2
O 3.340-2		
Sm水溶液	2595	^{144}Sm 3.222-7
		^{147}Sm 1.558-6
		^{148}Sm 1.164-6
		^{149}Sm 1.434-6
		^{150}Sm 7.689-7
		^{152}Sm 3.089-6
		^{154}Sm 2.368-6
		H 6.688-2
		N 3.211-5
		O 3.354-2
		炉水 H 6.680-2
O 3.340-2		

表-5 個数密度の計算結果(続)

体系・核種	濃度 ($\mu\text{g}/\text{ml}$)	個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/ cm^3)
Sm水溶液	3430	^{144}Sm 4.259-7
		^{147}Sm 2.059-6
		^{148}Sm 1.539-6
		^{149}Sm 1.895-6
		^{150}Sm 1.016-6
		^{152}Sm 4.083-6
		^{154}Sm 3.130-6
		H 6.683-2
		N 4.243-5
		O 3.354-2
炉水		H 6.680-2
		O 3.340-2
Sm水溶液	4385	^{144}Sm 5.445-7
		^{147}Sm 2.632-6
		^{148}Sm 1.967-6
		^{149}Sm 2.423-6
		^{150}Sm 1.300-6
		^{152}Sm 5.220-6
		^{154}Sm 4.001-6
		H 6.690-2
		N 5.423-5
		O 3.361-2
炉水		H 6.680-2
		O 3.340-2

表-5 個数密度の計算結果(続)

体系・核種	濃度 ($\mu\text{g}/\text{ml}$)	個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/ cm^3)
Eu水溶液	515	Eu 2.041-6
		H 6.688-2
		N 6.123-4
		O 3.346-2
		炉水 H 6.683-2
		O 3.341-2
Eu水溶液	1005	Eu 3.983-6
		H 6.688-2
		N 1.195-5
		O 3.348-2
		炉水 H 6.683-2
		O 3.341-2
Eu水溶液	1510	Eu 5.984-6
		H 6.688-2
		N 1.795-5
		O 3.349-2
		炉水 H 6.683-2
		O 3.341-2
Eu水溶液	2535	Eu 1.005-5
		H 6.688-2
		N 3.014-5
		O 3.353-2
		炉水 H 6.683-2
		O 3.341-2

表-5 個数密度の計算結果(続)

体系・核種	濃度 ($\mu\text{g}/\text{ml}$)	個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)
Eu水溶液	4090	Eu 1.621-5
		H 6.669-2
		N 4.864-5
		O 3.350-2
		炉水 H 6.683-2
		O 3.341-2
Eu水溶液	6210	Eu 2.461-5
		H 6.683-2
		N 7.384-5
		O 3.363-2
		炉水 H 6.683-2
		O 3.341-2
Eu水溶液	9575	Eu 3.795-5
		H 6.669-2
		N 1.138-4
		O 3.369-2
		炉水 H 6.683-2
		O 3.341-2

表-5 個数密度の計算結果(続)

体系・核種	濃度 ($\mu\text{g}/\text{ml}$)	個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/ cm^3)
Gd水溶液	51	^{152}Gd 3.906-10
		^{154}Gd 4.297-9
		^{155}Gd 2.910-8
		^{156}Gd 4.023-8
		^{157}Gd 3.066-8
		^{158}Gd 4.824-8
		^{160}Gd 4.238-8
		H 6.692-2
		N 5.859-7
		O 3.346-2
		炉水 H 6.683-2
O 3.341-2		
Gd水溶液	101	^{152}Gd 7.735-10
		^{154}Gd 8.510-9
		^{155}Gd 5.763-8
		^{156}Gd 7.967-8
		^{157}Gd 6.072-8
		^{158}Gd 9.553-8
		^{160}Gd 8.393-8
		H 6.692-2
		N 1.160-6
		O 3.346-2
		炉水 H 6.683-2
O 3.341-2		

表-5 個数密度の計算結果(続)

体系・核種	濃度 ($\mu\text{g}/\text{ml}$)	個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/ cm^3)
Gd水溶液	207	^{152}Gd 1.585-9
		^{154}Gd 1.744-8
		^{155}Gd 1.181-7
		^{156}Gd 1.633-7
		^{157}Gd 1.244-7
		^{158}Gd 1.958-7
		^{160}Gd 1.720-7
		H 6.692-2
		N 2.378-6
		O 3.347-2
炉水		H 6.683-2
		O 3.341-2
Gd水溶液	418	^{152}Gd 3.200-9
		^{154}Gd 3.461-8
		^{155}Gd 2.344-7
		^{156}Gd 3.241-7
		^{157}Gd 2.469-7
		^{158}Gd 3.886-7
		^{160}Gd 3.414-7
		H 6.692-2
		N 4.720-6
		O 3.347-2
炉水		H 6.683-2
		O 3.341-2

表-5 個数密度の計算結果(続)

体系・核種	濃度 ($\mu\text{g}/\text{ml}$)	個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/ cm^3)
Gd水溶液	622	^{152}Gd 4.762-9
		^{154}Gd 5.150-8
		^{155}Gd 3.488-7
		^{156}Gd 4.823-7
		^{157}Gd 3.674-7
		^{158}Gd 5.783-7
		^{160}Gd 5.080-7
		H 6.683-2
		N 7.023-6
		O 3.343-2
炉水		H 6.683-2
		O 3.341-2
Gd水溶液	826	^{152}Gd 6.324-9
		^{154}Gd 6.839-8
		^{155}Gd 4.632-7
		^{156}Gd 6.405-7
		^{157}Gd 4.879-7
		^{158}Gd 7.680-7
		^{160}Gd 6.746-7
		H 6.690-2
		N 9.331-6
		O 3.348-2
炉水		H 6.683-2
		O 3.341-2

表-5 個数密度の計算結果(続)

体系・核種	濃度 ($\mu\text{g}/\text{ml}$)	個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/ cm^3)
Gd水溶液	1040	^{152}Gd 7.962-9
		^{154}Gd 8.611-8
		^{155}Gd 5.832-7
		^{156}Gd 8.064-7
		^{157}Gd 6.143-7
		^{158}Gd 9.670-7
		^{160}Gd 8.494-7
		H 6.683-2
		N 1.174-5
		O 3.346-2
		炉水 H 6.683-2
		O 3.341-2

表-5 個数密度の計算結果 (続)

体系・核種	濃度 ($\mu\text{g}/\text{ml}$)	個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/ cm^3)
Er水溶液	3200	^{162}Er 1.613-8
		^{164}Er 1.843-7
		^{166}Er 3.848-6
		^{167}Er 2.638-6
		^{168}Er 3.110-6
		^{170}Er 1.728-6
		N 3.456-5
		O 3.350-2
		H 6.680-2
		炉水 H 6.687-2
O 3.343-2		
Er水溶液	11300	^{164}Er 1.843-7
		^{166}Er 3.848-6
		^{167}Er 2.638-6
		^{168}Er 3.110-6
		^{170}Er 1.728-6
		N 3.456-5
		O 3.350-2
		H 6.680-2
		炉水 H 6.687-2
		O 3.343-2

表-5 個数密度の計算結果(続)

体系・核種	濃度 ($\mu\text{g}/\text{ml}$)	個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/ cm^3)
Er 水溶液	48400	^{162}Er 2.440-7
		^{164}Er 2.787-6
		^{166}Er 5.821-5
		^{167}Er 3.990-5
		^{168}Er 4.703-5
		^{170}Er 2.614-5
		N 5.225-4
		O 3.431-2
		炉水 H 6.687-2
		O 3.343-2
Er 水溶液	62800	^{162}Er 3.166-7
		^{164}Er 3.616-6
		^{166}Er 7.553-5
		^{167}Er 5.177-5
		^{168}Er 6.102-5
		^{170}Er 3.392-5
		N 6.780-4
		O 3.406-2
		H 6.405-2
		炉水 H 6.687-2 O 3.343-2

表-5 個数密度の計算結果(続)

体系・核種	濃度 ($\mu\text{g}/\text{ml}$)	個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/ cm^3)
Er水溶液	79000	^{162}Er 3.166-7
		^{164}Er 4.549-6
		^{166}Er 9.501-5
		^{167}Er 6.512-5
		^{168}Er 7.676-5
		^{170}Er 4.267-5
		N 8.529-4
		O 3.239-3
		H 6.425-2
		炉水 H 6.687-2 O 3.343-2
Er水溶液	108900	^{162}Er 4.364-7
		^{164}Er 6.271-6
		^{166}Er 1.310-4
		^{167}Er 8.977-5
		^{168}Er 1.058-4
		^{170}Er 5.882-5
		N 1.176-3
		O 3.519-2
		H 6.331-2
		炉水 H 6.687-2 O 3.343-2

表-5 個数密度の計算結果(続)

体系・核種	濃度 ($\mu\text{g}/\text{ml}$)	個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/ cm^3)
Er水溶液	145200	^{162}Er 5.819-7
		^{164}Er 8.361-6
		^{166}Er 1.747-4
		^{167}Er 1.197-4
		^{168}Er 1.411-4
		^{170}Er 7.843-5
		N 1.568-3
		O 3.591-2
		H 6.242-2
		炉水
		H 6.687-2
		O 3.343-2

表-6 MCNP 4Aの固有値問題で100万ヒストリーで算出した中性子増倍率 k_{eff}

実験炉心	濃度 ($\mu\text{g}/\text{ml}$)	中性子増倍率 k_{eff}
18×18		1.00239±0.00088
18×18 -2×2		1.00105±0.00071
ボックス内水		1.00261±0.00076
ボックス内B	504	1.00104±0.00077
	1004	1.00513±0.00082
	1535	1.00841±0.00071
	2070	1.01153±0.00079
ボックス内Rh	3130	1.00239±0.00069
	12200	1.00138±0.00078
	25100	0.99825±0.00073
	40500	0.99432±0.00073
	56400	0.99842±0.00073
	73400	0.99873±0.00071
ボックス内Cs	11200	0.99674±0.00068
	21600	1.00065±0.00071
	45900	0.99649±0.00076
	68900	1.00103±0.00073
	95800	1.00267±0.00073
ボックス内Nd	10100	0.99717±0.00078
	20900	0.99684±0.00067
	32100	0.99670±0.00069
	44000	0.99917±0.00072
	56100	0.99714±0.00070
	73900	0.99917±0.00084

表-6 MCNP 4Aの固有値問題で100万ヒストリーで算出した中性子増倍率 k_{eff} (続)

実験炉心	濃度 ($\mu\text{g/ml}$)	中性子増倍率 k_{eff}
ボックス内Sm	440	0.99954 \pm 0.00073
	870	1.00434 \pm 0.00073
	1305	1.00625 \pm 0.00070
	1735	1.00512 \pm 0.00071
	2595	1.00782 \pm 0.00062
	3430	1.00903 \pm 0.00070
	4385	1.01115 \pm 0.00073
ボックス内Eu	515	0.99648 \pm 0.00070
	1005	0.99860 \pm 0.00072
	1510	1.00063 \pm 0.00084
	2535	1.00439 \pm 0.00081
	4090	1.00710 \pm 0.00069
	6210	1.00885 \pm 0.00073
	9575	1.00996 \pm 0.00072
ボックス内Gd	51	0.99895 \pm 0.00067
	101	1.00047 \pm 0.00072
	207	1.00180 \pm 0.00075
	418	1.00464 \pm 0.00073
	622	1.00624 \pm 0.00063
	826	1.00867 \pm 0.00071
	1040	1.01617 \pm 0.00074
ボックス内Er*	3200	-
	11300	-
	48400	-
	62800	-
	79000	-
	108900	-
	145200	-

* 天然Erの評価済み中性子断面積は世界のどのライブラリーにも存在せず、ENDF/B-IV及び ^{166}Er 及び ^{167}Er のみ収録済み (中川庸雄: 私信, 1995年12月)。

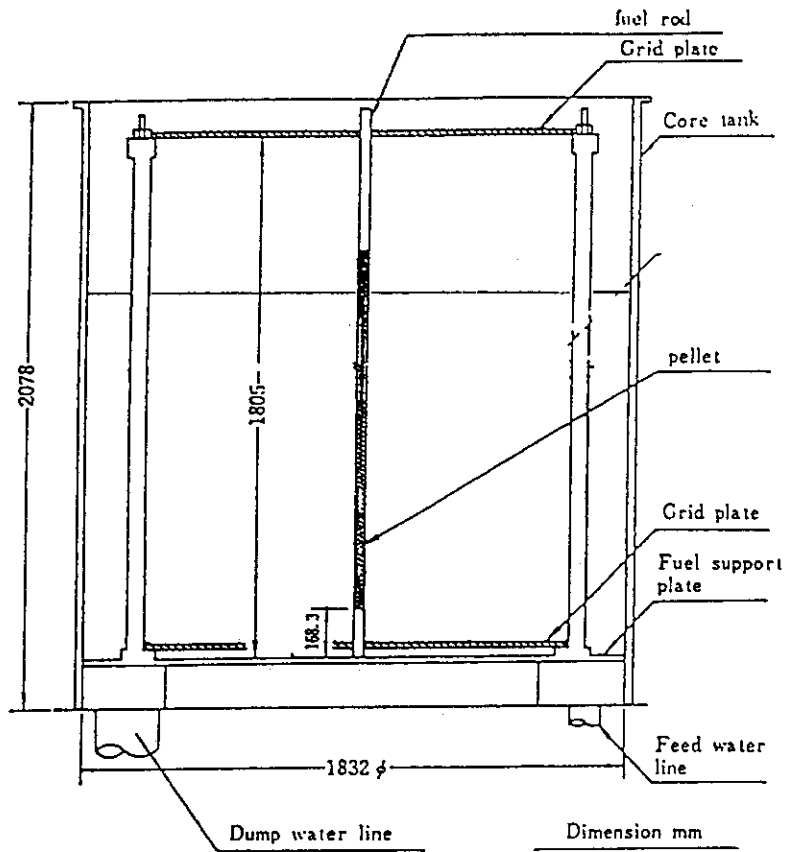


図-1 TCAの概念図

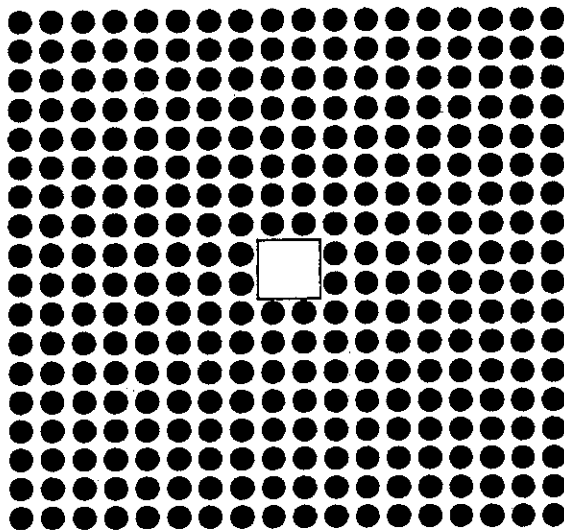


図-2 実験炉心 (18×18-2×2体系、水溶液容器設置)

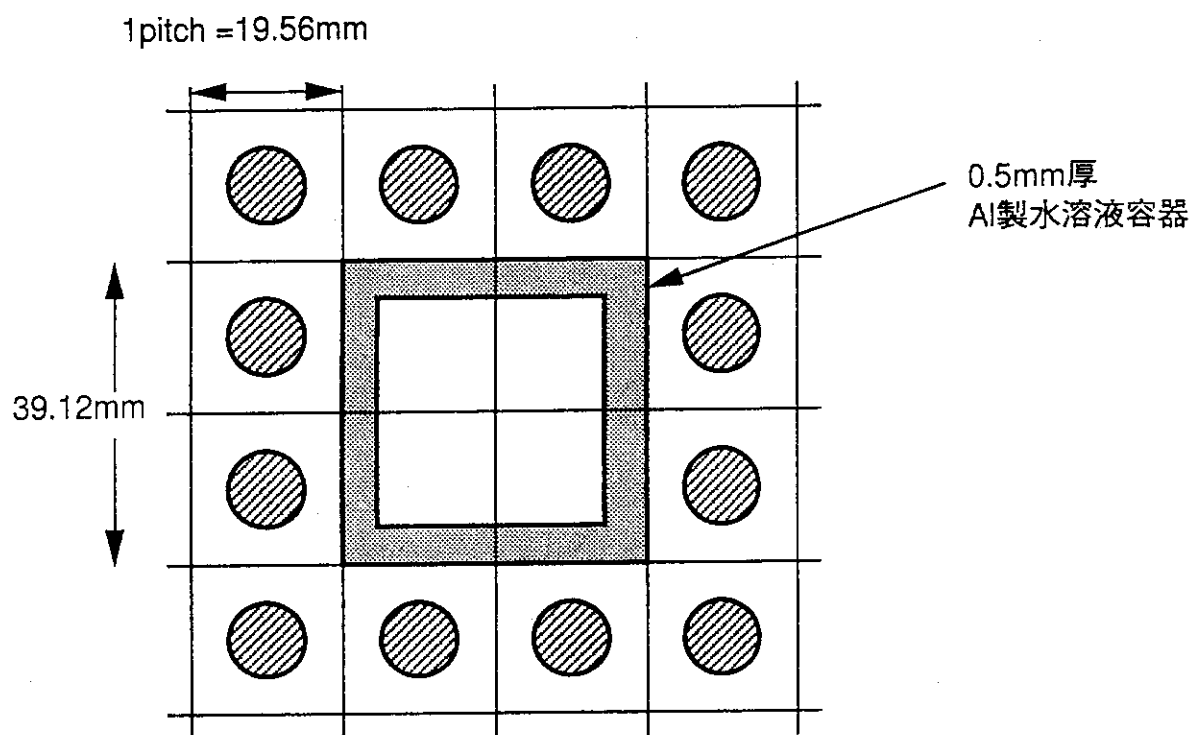


図-3 試験領域の水平断面図

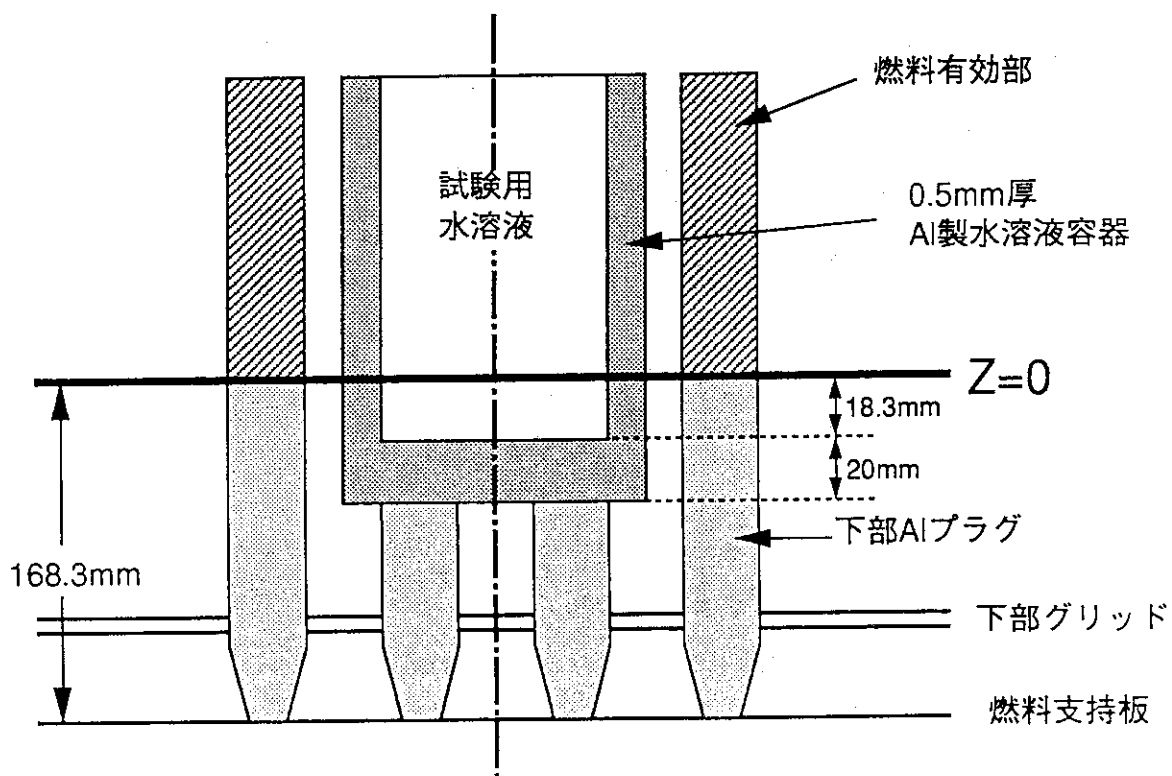
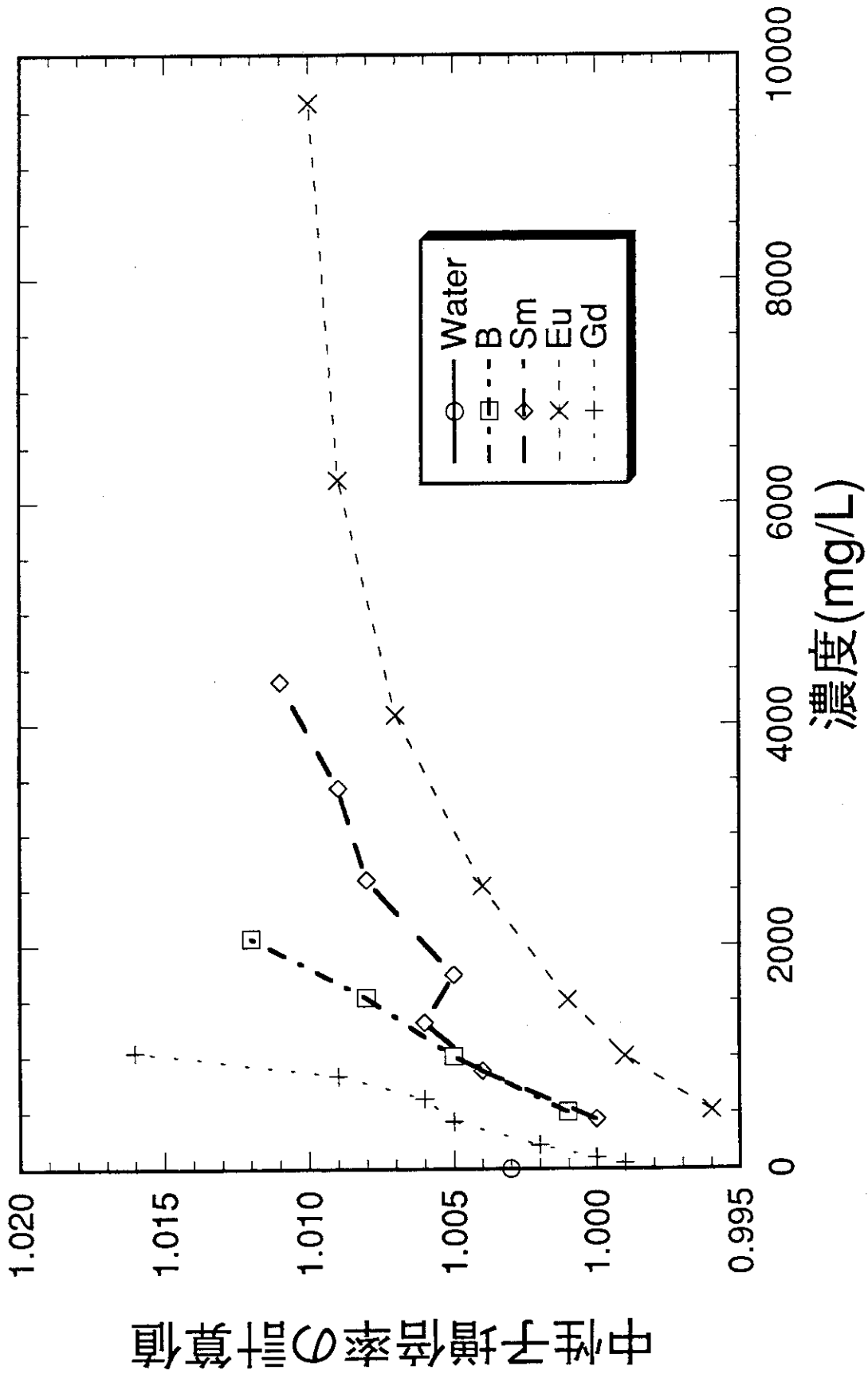


図-4 水溶液容器の下部拡大図（垂直断面）



図一5 Sm及びEu、Gd、B溶液を含むTCA臨界実験の解析結果

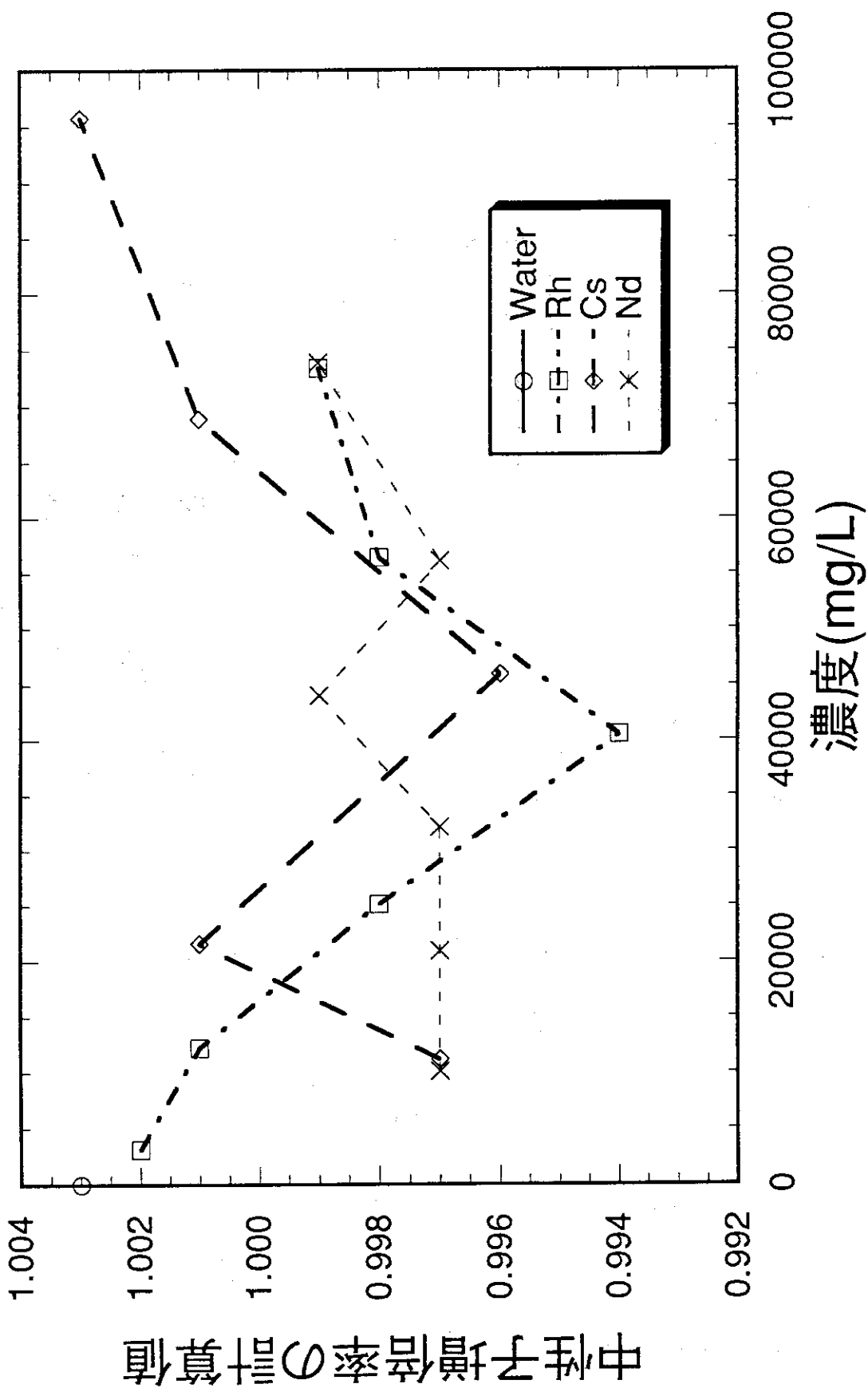


図-6 Rh及びCs、Nd溶液を含むTCA臨界実験の解析結果

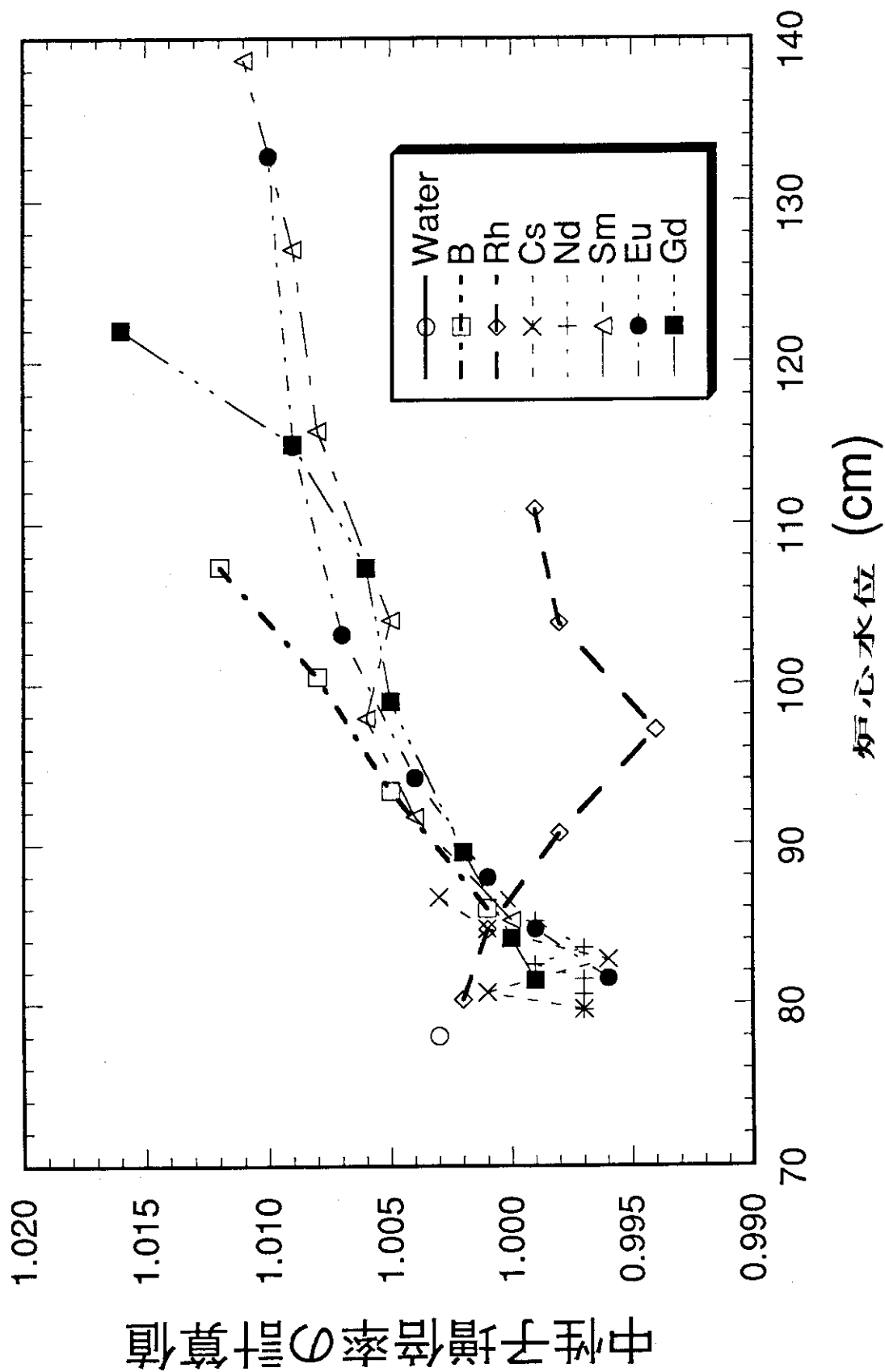


図-7 臨界水位とMCNP 4Aによる中性子増倍率の計算値の相関