



JAEA-Data/Code

2026-001

DOI:10.11484/jaea-data-code-2026-001

高転換軽水炉を模擬したFCA XV炉心系における 臨界実験の特性試験と臨界性評価

Evaluation of Criticality of FCA XV Core Series
Simulating High Conversion Light Water Reactor

櫻井 健 福島 昌宏

Takeshi SAKURAI and Masahiro FUKUSHIMA

原子力科学研究所

原子力基礎工学研究センター

Nuclear Science and Engineering Center

Nuclear Science Research Institute

June 2026

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Data/Code

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
原子力科学研究所 プロモーション・オフィス 科学技術情報課
〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.
For inquiries regarding this report, please contact Library, Institutional Repository and INIS Section, Promotion Office, Nuclear Science Research Institute, Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

高転換軽水炉を模擬した FCA XV 炉心系における 臨界実験の特性試験と臨界性評価

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所
原子力基礎工学研究センター
櫻井 健、福島 昌宏

(2026 年 1 月 30 日受理)

高速炉臨界実験装置 FCA を用いて高転換軽水炉の核特性を模擬するために実施した臨界実験のうち、プルトニウム燃料を主として用いた第 2 フェーズ実験の XV 炉心系の臨界性の評価を行い、核データライブラリー JENDL-4.0 と JENDL-5 及び連続エネルギー法による中性子輸送計算モンテカルロコード MVP3 による解析を行った。臨界性の評価では、FCA のウランとプルトニウムの燃料板や減速材等の模擬物質板の重量や組成の不確かさの影響を取り入れた詳細な不確かさ評価を実施した。解析では、FCA の燃料や格子管の構造を詳細に模擬して計算を行った。JENDL-4.0 と JENDL-5 のいずれを用いても、実効増倍率の計算結果は実験結果を 0.4% から 0.8% 過大評価した。

**Evaluation of Criticality of FCA XV Core Series
Simulating High Conversion Light Water Reactor**

Takeshi SAKURAI and Masahiro FUKUSHIMA

Nuclear Science and Engineering Center
Nuclear Science Research Institute
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 30, 2026)

Experimental data obtained in the Fast Critical Assembly(FCA) simulating a High Conversion Light Water Reactor(HCLWR) were evaluated for the criticality of assemblies XV series in the second phase of FCA–HCLWR experiments, primarily using plutonium fuel. Analysis was performed using the nuclear data libraries JENDL–4.0 and JENDL–5 and the Monte Carlo code MVP3, which calculates neutron transport using the continuous energy method. In the evaluation of criticality, a detailed uncertainty assessment was performed, taking into account the effects of uncertainties in the weight and composition of the uranium and plutonium fuel plates and simulated material plates such as moderator in the FCA. The analysis involved detailed simulations of the fuel and lattice tube structures in the FCA. The calculation results for the effective multiplication factor overestimated the experimental results by 0.4% to 0.8% using both JENDL–4.0 and JENDL–5.

Keywords: FCA, HCLWR, Criticality, Assemblies XV Series, Uncertainty Assessment, JENDL–4.0, JENDL–5, MVP3

目 次

1. はじめに	1
2. 実験炉心	3
3. 特性試験	20
3.1 概要	20
3.2 制御棒校正曲線、反応度の温度係数と集合体密着面間隙係数の測定	21
3.3 基準反応度の測定	23
3.4 未臨界度の測定	23
3.5 炉心周辺部での燃料引出し反応度値測定	24
3.6 全挿入時の制御棒と安全棒引出しの先端の密着面からのへこみの深さ分の 反応度値測定	25
3.7 密着面でのステンレス鋼反応度値測定	26
4. 計算や核データによる実効増倍率の不確かさへの寄与分の評価	28
4.1 基準反応度測定の不確かさ	28
4.2 格子管の外寸法の不確かさによる反応度の不確かさ	29
4.3 実験炉心への装荷物の重量、燃料組成の不確かさによる反応度の不確かさ	30
5. 実効増倍率の実験結果と不確かさの評価	31
6. 実効増倍率の計算	38
7. まとめ	40
謝辞	40
参考文献	41
付録	
A XV 炉心系の特性試験の詳細	44
B XIV 炉心系の臨界性	148
C 炉周期法による基準反応度測定の不確かさ評価の詳細	232
D 実験炉心への装荷物の重量、燃料組成の不確かさによる反応度の不確かさ評価 の詳細	234

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Core Configuration	3
3. Evaluation of Experimental Data	20
3.1 Outline	20
3.2 Control Rod Curve and Reactivity Coefficients of Temperature and Gap between Two Half Assemblies	21
3.3 Standard Reactivity Worth	23
3.4 Subcriticality	23
3.5 Drawer Reactivity Worth	24
3.6 Reactivity Effect of Indent of Safety and Control Rods	25
3.7 Reactivity Effect of Stainless Steel between Two Half Assemblies	26
4. Evaluation of Uncertainties with Calculation and Nuclear data	28
4.1 Uncertainty of Standard Reactivity Worth	28
4.2 Effect of Matrix Dimension Uncertainty	29
4.3 Effect of Uncertainties in Weight and Composition of Fuel Plates and Simulated Material	30
5. Evaluation of Criticality with Uncertainty	31
6. Analysis of Criticality	38
7. Summary	40
Acknowledgements	40
References	41
Appendixes	
A Details of Evaluation of Assembles XV Series Experimental Data	44
B Criticality of Assemblies XIV Series	148
C Details of Uncertainty Assessment of Standard Reactivity Worth	232
D Details of Uncertainty Assessment due to Weight and Composition of Fuel Plates and Simulated Material	234

1. はじめに

軽水炉よりも燃料集合体の燃料棒の間隔を狭めて水対燃料の体積比を小さくすることにより転換比を高めてウラン資源の有効利用を図ろうとする高転換軽水炉 High Conversion Light Water Reactor(HCLWR) の概念が、1970 年代に M. C. Edlund により提唱された [1]。その後、1980 年代にかけて、この HCLWR の設計研究や実験研究が欧州各国を中心に盛んに行われて来た [2, 3, 4, 5, 6, 7]。HCLWR 炉心の設計研究では、水対燃料体積比を小さくすることによる臨界性の低下を補うために、プルトニウム富化度を高めた MOX 燃料の使用を想定していた。設計条件によっては、燃料に含まれるプルトニウム核種により減速材ボイド係数が正に近づく可能性があった。このため、実験研究では、減速材ボイド率の変化に伴う種々の核特性の予測精度評価に主眼が置かれていた。

旧日本原子力研究所においても、高転換軽水炉の設計研究を行う [8, 9, 10, 11] とともに、高速炉臨界実験装置 FCA を用いて、1986 年から 1989 年の 3 年半にわたり HCLWR 炉心の核特性を模擬した実験を実施した。FCA では、板状の核燃料と固体減速材を用いることにより燃料の種類、すなわちウランまたはプルトニウム、燃料濃縮度や減速材対燃料体積比といった燃料セルのパラメータを柔軟に変化させることができる。さらに、固体減速材として密度が異なるポリスチレン板や発泡ポリスチレン板を用いることにより、減速材ボイド率の詳細な模擬が可能である。

この一連の模擬実験は、主として 20% 濃縮ウラン燃料を用いた第 1 フェーズの XIV 炉心系と、主としてプルトニウム燃料を用いた第 2 フェーズの XV 炉心系の 2 つに分けて実施した。プルトニウム炉心である XV 炉心系の主な目的は、減速材ボイド率の変化に伴う臨界性をはじめとする諸特性の予測精度を把握することに加えて、中速系から高速系にまで至る幅広い中性子スペクトル場を実現し、核データの検証に有用な積分データを取得することにあった。

第 1 フェーズ実験では、まず、20% 濃縮ウラン燃料板とポリスチレン板を用いて燃料濃縮度 6.47%、減速材対燃料体積比 0.6 で減速材ボイド率 0% を模擬した XIV-1 炉心を構築して実験を実施した。次に、このポリスチレン板をボイド率 45% を模擬した発泡ポリスチレン板に置き換えた XIV-1(45V) 炉心を構築して実験を行った。最後に、燃料濃縮度 5.45%、減速材対燃料体積比 1.0 で減速材ボイド率 0% を模擬した XIV-2 炉心を構築して実験を行った。第 2 フェーズ実験では、プルトニウム燃料板を用いて、燃料のプルトニウム富化度が 8.11% で減速材対燃料体積比を 0.6 として、ポリスチレン板のボイド率を 0%、45%、65%、80%、95% と 5 段階に変化させた 5 つの炉心を構築して実験を実施した。これらを、それぞれ、XV-1、XV-2(45V)、XV-2(65V)、XV-2(80V)、XV-2(95V) 炉心と呼ぶ。

第 1 フェーズの主な実験データは既に公開されたが [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19]、第 2 フェーズの実験データは、一部のみ公開されている [20, 21]。その後、世界各国の臨界実験装置の相次ぐ廃止に伴い、2000 年代になると、世界的に貴重な資産と言える各国のこれまでの臨界実験データをその不確かさとともに詳細に再評価してデータベースとして保存する国際的なプロジェクト ICSBEP や IRPhEP が経済協力開発機構 / 原子力

機関 (OECD/NEA) で進行中である。これらのデータベースは各国で新たな核データのベンチマークテストに積極的に使われている。原子炉物理実験の分野におけるこのような世界的な潮流から、これまでの FCA の実験データについても詳細な不確かさを含めて再評価を進めている [22, 23]

このような近年の要請により、第 2 フェーズ実験の 5 つの炉心の特性試験と臨界性について再評価を行った。本報告書では、この再評価と連続エネルギー法による中性子輸送計算モンテカルロコード MVP3[24] と核データライブラリー JENDL-4.0[25] 及び JENDL-5[26] を用いた臨界性の解析についてまとめる。

本報告書では、2 章と 3 章で実験炉心と特性試験の概要について記述し、4 章では、実験炉心に装荷した燃料板や模擬物質版の重量や組成等に起因する臨界性の不確かさへの寄与分の算出結果について主に記述する。これは、詳細な不確かさ評価には必須となる事項である。5 章と 6 章では、臨界性の実験結果と計算結果の比較について記述する。今後、必要に応じて実験データを再度見直す際に、別途、電子化して保存したオリジナルの実験生データと照合が可能なように、実験データ処理の過程の詳細を付録 A に記載する。なお、第 1 フェーズ実験の 3 つの炉心の臨界性についても実験結果の再評価と解析を行ったが、本報告書の趣旨から、その結果は付録 B のみに記載する。

2. 実験炉心

FCA は固定側集合体と移動側集合体からなる水平 2 分割型の臨界実験装置である [22, 27]。その概要は以下のとおりである。固定側と移動側の各集合体の躯体は、縦と横の外寸がともに約 5.5 cm で長さが約 132 cm のステンレス製の中空の格子管を水平方向に寝かせて、これらを縦 51 行、横 51 列に積み上げたものである。この縦あるいは横方向が炉心の径方向で、格子管の長さ方向が炉心の軸方向となる。

炉心の構築や変更は集合体を分離して行う。板状の核燃料や減速材等の模擬物質を組み合わせて炉心組成を模擬したおおよそ 5 cm 四方の直方体の燃料セルを作り、これをステンレス製の引出しに最大で 13 セル分装填する。さらに、この引出しを格子管集合体の中に装荷していくことにより炉心を構築する。原則として、引出しは、固定側と移動側の集合体間で炉心が対称となるように装荷する。運転は、まず、移動側集合体を動かして固定側集合体に密着し、その後に、濃縮ウラン燃料を装填した制御棒引出しを、いくつかの格子管で挿入して原子炉出力を上昇することにより行う。このように固定側と移動側の両集合体の密着面が炉心の中心面となる。この中心面には、両集合体間の機械的なクリアランスとしての隙間と引出し前端面の部材の薄いステンレス板が存在する。これらの取り扱いについては後に議論する。

格子管の引出し装荷位置は、行(縦方向)と列(横方向)で指定する。固定側集合体では、列には、密着面側から見て左側から右側に向かう順に 1 から 51 の番号を付ける。行には、上から下に向かう順に、101 から 151 の番号を付ける。移動側集合体では、列には、密着面側から見て右側から左側に向かう順に 1 から 51 の番号を付ける。行は、固定側集合体と同様である。すなわち、固定側と移動側の両集合体で、向かい合う格子管は、同じ列番号と行番号になる。これに、固定側 (F) か移動側 (M) の区別を行う。例えば、固定側集合体の中心の格子管の位置は、F126/26 となる。

径方向の中心部分に HCLWR の MOX 燃料の組成と減速材を模擬した炉心の特性を測定するテスト領域を配置し、その周囲を濃縮ウラン燃料やプルトニウム燃料と希釈材からなるドライバー領域でとり囲み臨界を達成するゾーン型の実験炉心を構築した。このようなゾーン型炉心としたのは、FCA が保有する核燃料の在庫量の制約のため、HCLWR の燃料組成と減速材を模擬した単一領域の臨界炉心を構築することができないためである。炉心装荷図を図 2.1 ~ 図 2.6 に、引出しの燃料板や模擬物質板の装填図を図 2.7 ~ 図 2.15 に示す。固定側と移動側集合体は対称となるように燃料引出しを装荷するので、移動側集合体の装荷図は、基準となる XV-1 炉心のみ掲載する。

実験炉心に使用した燃料板の種類の一覧を表 2.1 に示す。プルトニウム燃料板のプルトニウム - アルミニウム合金はステンレス製の薄い被覆の中に密封され、ウランの燃料板やブロックは、表面保護や識別のために表面に塗料が塗布されたものである。プルトニウム燃料板は、サイズ(長さ)で異なるタイプに区別し、また、同じサイズであっても製造場所や製造時期等によって異なるタイプに区別した。ウランの燃料板やブロックも同様である。

テスト領域の炉心燃料セルのプルトニウム富化度 8.11% の MOX 燃料は、プルトニウム燃料板、天然ウラン

燃料板と劣化ウラン燃料板の組み合わせで模擬した。金属の燃料板を用いたため、酸素を可能な限り補うために酸化アルミニウム板も用いた。減速材の模擬にはポリスチレン板または発泡ポリスチレン板を用い、燃料セルの減速材対燃料体積比は 0.6 である。

引出しには、この炉心燃料セルを 9 パック装填して、その後ろには劣化ウラン燃料板を用いた軸方向ブランケットセルを 4 パック装填した。この基本的な燃料セルのパターンは共通であるが、用いた燃料板のタイプの違いで区別した Pu08A、Pu08B 及び Pu08C の 3 種類の引出しを作り、テスト領域に装荷した。これら 3 種類の引出しをまとめて Pu08 引出しと呼ぶ¹⁾。

減速材にボイドが無いポリスチレン板を用いた基準炉心を XV-1 炉心と呼び、ボイド模擬の発泡ポリスチレン板を用いた炉心は、ボイド率に応じて XV-2(45V) 炉心、XV-2(65V) 炉心、XV-2(80V) 炉心、XV-2(95V) 炉心と呼ぶ。すなわち () 内の数値がボイド率である。各炉心のテスト領域の Pu08A、Pu08B 及び Pu08C 引出しの燃料セルの内容は、このポリスチレン板または発泡ポリスチレン板のボイド率が変わるだけであり、セル内の他の燃料板と模擬物質板の配列は同じである。

計算コードによるテスト領域平均の中性子エネルギースペクトルを図 2.16 に示す。ボイドが無い XV-1 炉心と 45% ボイド率を模擬した XV-2(45V) 炉心では熱中性子エネルギーにピークができるが、ボイド率が 65% より大きな炉心ではこのピークは見えない。

ドライバー領域には、XV-1 炉心では 20% 濃縮ウラン燃料板を装填した EUDD 引出しを装荷し、他のボイド模擬の炉心では、これに加えてプルトニウム燃料板を装填した PuDA1 引出しも装荷した。これらの引出しの希釈材には黒鉛板を用いたため、その中性子エネルギースペクトルは熱エネルギーよりも硬めとなる。

いずれの炉心も、テスト領域の寸法は、縦と横がおおよそ 50 cm で、軸方向高さが固定側と移動側の両集合体を通しておおよそ 132 cm である。減速材模擬のポリスチレン板のボイド率が大きくなるに伴いテスト領域の臨界性が小さくなるにつれて、これを補い炉心を臨界とするためにドライバー領域の燃料引出し装荷本数を増やしていった。ボイド模擬の 4 つの炉心では、PuDA1 引出しの装荷本数は片側集合体当たり 40 本に固定して、その周りで EUDD 引出しの装荷本数を増やすことにより炉心を臨界とした。ドライバー領域を含めた炉心外周の寸法は、等価直径で 91 cm 程度から 102 cm 程度まで変化する。ドライバー領域の径方向外側には、主に炉心からの中性子を遮蔽するために劣化ウランブロックを装填した DUB 引出しを装荷した。

テスト領域とドライバー領域の境界には、ステンレス製の板やブロックを装填した SSB 引出しからなるバッファ領域を設けた。これは、ドライバー領域の中性子エネルギースペクトルが熱エネルギーよりも硬めであることから、ドライバー領域からテスト領域へのエネルギーが高い中性子の流れ込みの影響を緩和するためのも

¹⁾ Pu08 引出しに使用した天然ウラン燃料板の種類については詳しい記録が欠落しているので、以下のように推定した。Pu08 引出し 1 本に必要な (1/16×2×2) サイズの天然ウラン燃料板は 4×9=36 枚である。このサイズの天然ウラン燃料板には、'315' と '325' の 2 つのタイプがあり、在庫数は、タイプ 315 が 2788 枚、タイプ 325 が 4000 枚である。したがって、在庫数の多いタイプ 325 で、Pu08 引出しを作製しようとする、最多で 111 本 (36×111=3996 枚使用) となる。この数は、(1/16×2×2) サイズのプルトニウム燃料板のみを装填した Pu08A と Pu08B 引出しの総装荷本数 57×2=114 本に満たない。そこで、固定側と移動側の対称性を考えると、タイプ 325 の天然ウラン燃料板で 55×2=110 本の Pu08A 引出しを作製したと推定した。残りの 2×2=4 本分には、タイプ 315 の天然ウラン燃料板を用いたものと推定し、これを Pu08B とする。(1/16×2×2) サイズと (1/16×2×4) サイズのプルトニウム燃料板を装填した 20×2=40 本の引出しには、タイプ 315 の天然ウラン燃料板を用いたと考え、これを Pu08C とする。

のである。特に、ポリスチレン板のボイド率が小さくてテスト領域の中性子エネルギースペクトルが軟らかい炉心では、この流れ込みを低減する必要がある。これにより、テスト領域内のなるべく広い範囲で HCLWR の炉心組成の中性子エネルギースペクトルが成立するようにした。

片側集合体当たり合計で 8 本装荷した制御棒引出しと安全棒引出しには、いずれも 93% 濃縮ウラン燃料板とポリエチレン板等を用い、制御棒と安全棒で引出し装填図は共通である。すなわち、制御棒や安全棒を引き抜くことにより炉心の反応度を減じる。XV-1 炉心では SCRB 引出しをこれらに用い、他のボイド模擬の炉心では SCRA 引出しを用いた。両者の違いは、主に装填したポリエチレン板の枚数である。これらのうち、近接する 2 組の引出しを格子管集合体の密着面側と反対側の背面で連結して 1 つの駆動機構で同時に動かす。すなわち、片側集合体には 3 組 6 本の安全棒引出しと 1 組 2 本の制御棒引出しを配置した。安全棒引出しを全挿入し、2 組の制御棒引出しを典型的にはともに 10 cm 程度引き抜いたところで通常の運転をするとともに原子炉出力の調整の余力を残す。固定側と移動側の両集合体の 2 組 4 本の制御棒引出しの引き抜き量を反応度値に換算して合計すると、おおよそ、この原子炉の余剰反応度となる。この余剰反応度に対する種々の補正は特性試験にて測定する。計算コードによる臨界性の解析は、制御棒を全挿入した炉心モデルで行うので、この余剰反応度から実効増倍率の実験結果を求めて計算結果と比較する。

図 2.1 ~ 図 2.6 の炉心装荷図は、炉心の実効増倍率の実験値と解析での計算値を比較するための最終的なものである。特性試験においては、その目的に応じて、最外周のドライバー燃料引出しの装荷本数をこれらの図から若干変更した炉心で実験を実施したケースがある。このような場合は、ドライバー燃料引出しの変更箇所を、特性試験の結果とともにその都度記述する。

なお、いずれの炉心においても、テスト領域にはプルトニウム燃料板を用い、XV-1 炉心を除く 4 炉心ではドライバー領域にもプルトニウム燃料板を用いた。燃料に含まれる ^{241}Pu は半減期約 14 年で崩壊して半減期約 430 年の ^{241}Am が生成することから、炉心の臨界性は時間に依存する。このため、臨界性の実験結果にはその評価日を明記し、臨界性を解析する時には、実験データの評価日に合わせてプルトニウム燃料の組成を元の分析値から更新して計算に用いた。

表 2.1 実験炉心に装荷した燃料板とブロックの種類

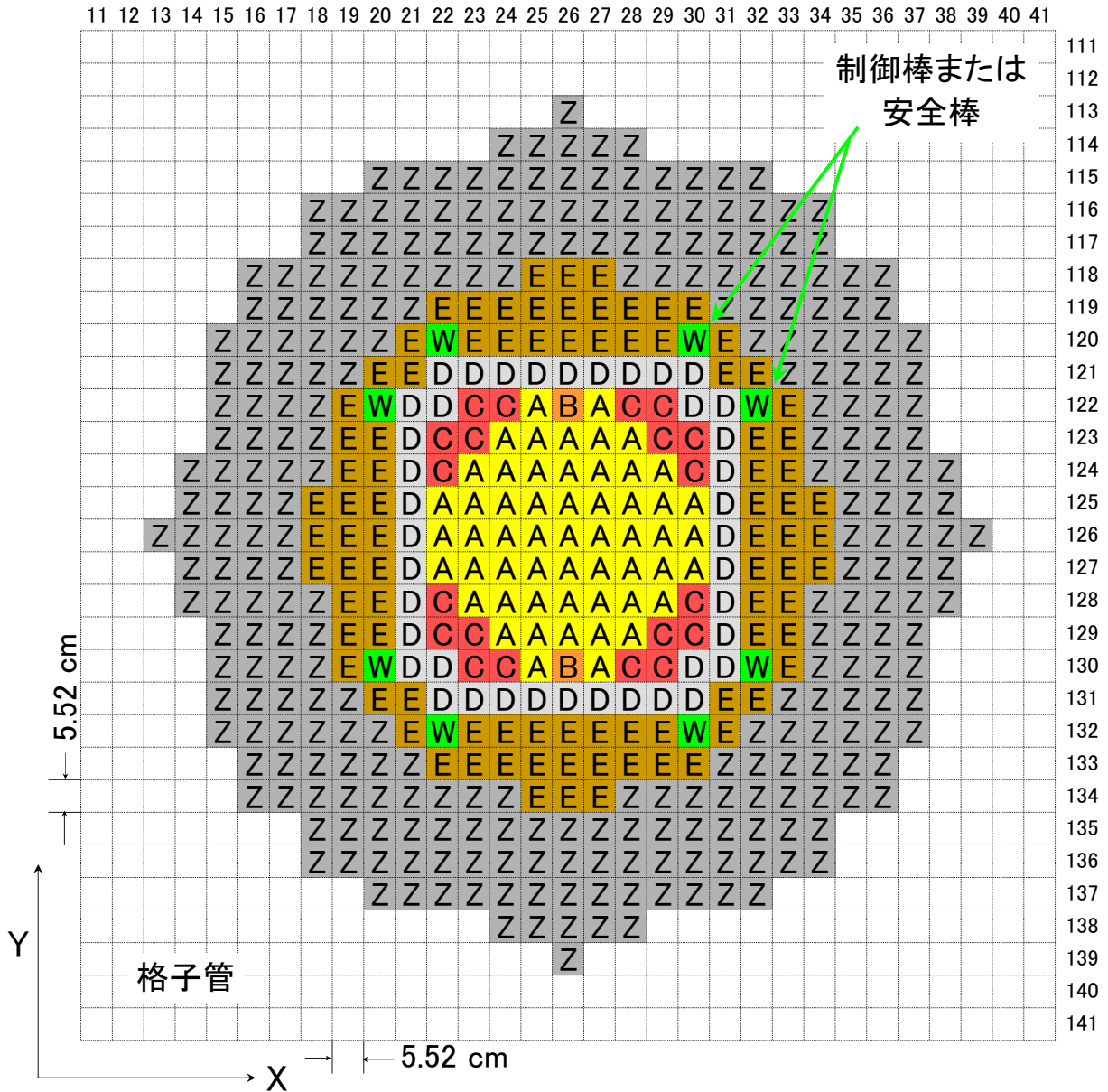
燃料板、ブロックの種類 (呼称)	タイプ	サイズ ¹⁾
92% 核分裂性プルトニウム – アルミニウム 1.3 wt% 合金 燃料板 ^{II)} (プルトニウム燃料板)	101	1/16×2×4
	102	1/16×2×4
	103	1/16×2×2
	104	1/16×2×2
	105	1/16×2×2
93% 濃縮ウラン金属燃料板 ^{III)} (93% 濃縮ウラン燃料板)	201	1/16×2×2
20% 濃縮ウラン金属燃料板 ^{III) IV)} (20% 濃縮ウラン燃料板)	204	1/8 ×2×2
	208	1/16×2×2
天然ウラン金属燃料板 ^{III)} (天然ウラン燃料板)	301	1/8 ×2×2
	315	1/16×2×2
	325	1/16×2×2
劣化ウラン酸化物燃料板 ^{III)} (劣化ウラン燃料板)	501	
	502	1/4 ×2×2
	503	
天然ウラン金属ブロック ^{III)} (天然ウランブロック)	402	2×2×4
	409	49 mm×50 mm×200 mm
劣化ウラン金属ブロック ^{III)} (劣化ウランブロック)	601	2×2×4
	602	2×2×4
	603	2×2×2

¹⁾ サイズは、例えば、1/16×2×4 では、板の厚さが 1/16 インチ、高さが 2 インチで長さが 4 インチ

^{II)} プルトニウム – アルミニウム合金はステンレス製の薄い被覆の中に密封

^{III)} ウラン燃料は、表面保護及び識別のために、表面に塗料が塗布されている

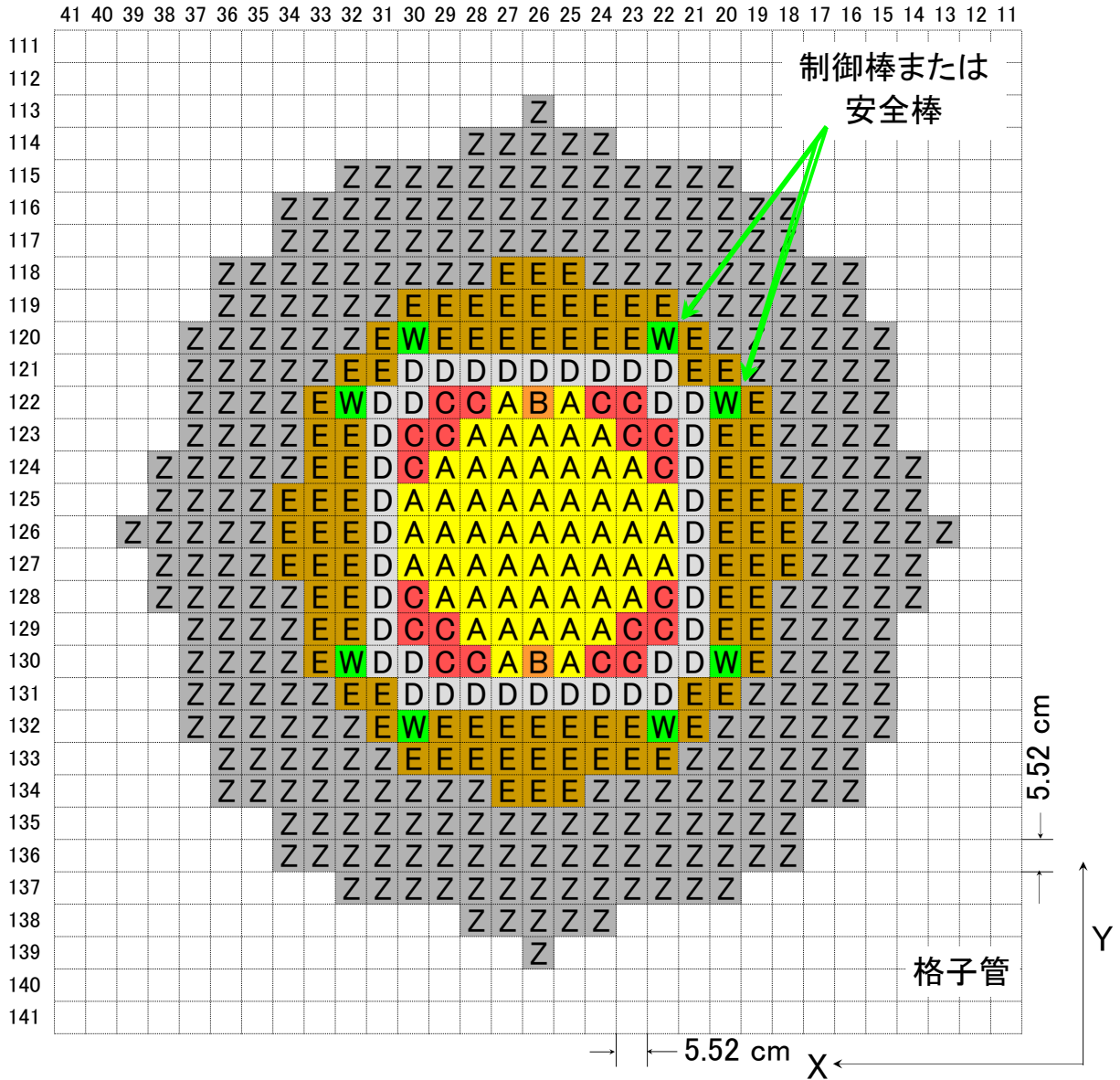
^{IV)} 濃縮度 19.9%



装荷引出しと本数

A Pu08A : 55	B Pu08B : 2
C Pu08C : 20	D SSB : 40
E EUDD : 88	P PuDA1 : 0
Z DUB : 288	W SCRIB : 8

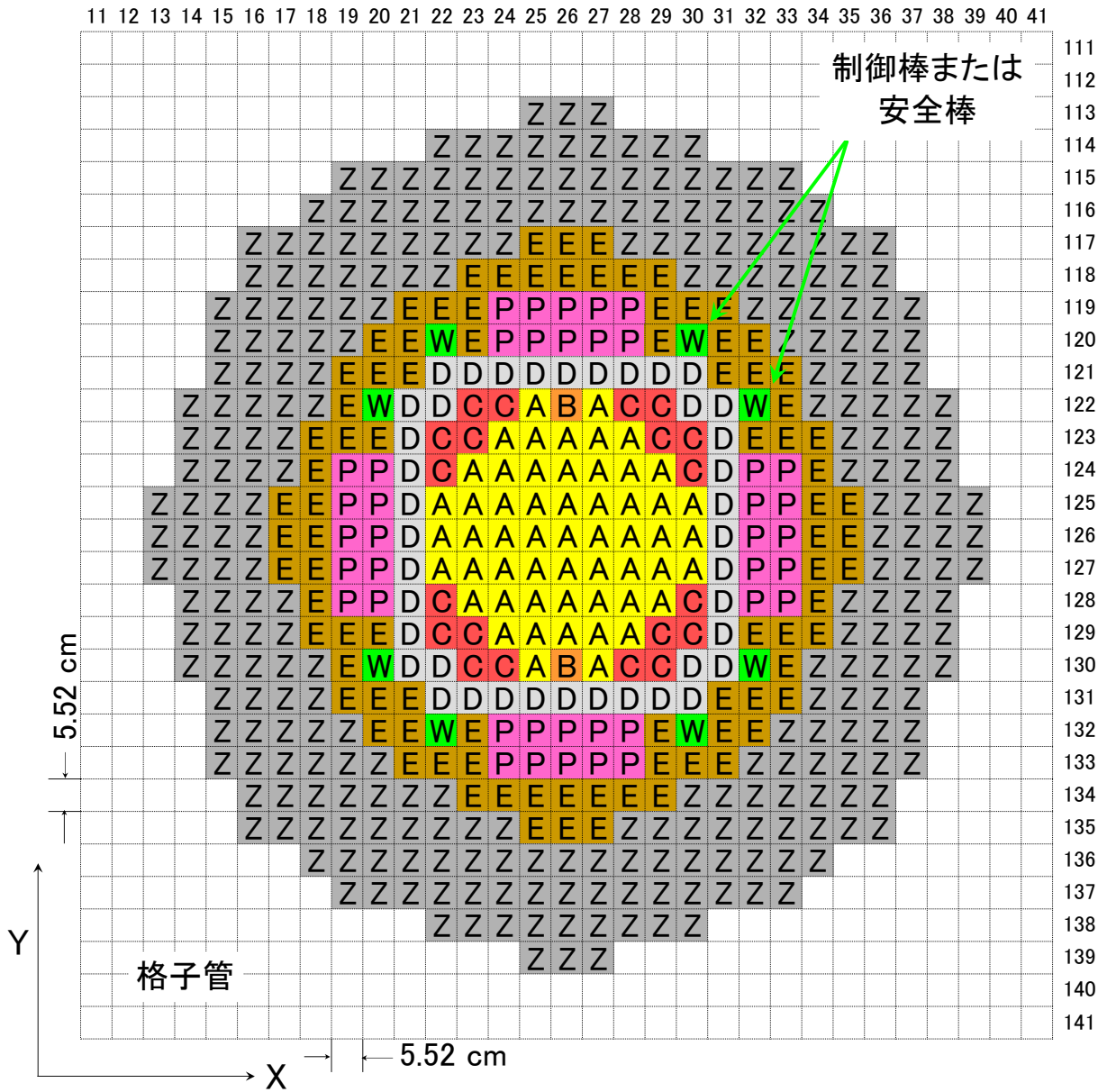
図 2.1 XV-1 炉心 固定側集合体燃料引出し装荷図



装荷引出しと本数

A Pu08A : 55	B Pu08B : 2
C Pu08C : 20	D SSB : 40
E EUDD : 88	P PuDA1 : 0
Z DUB : 288	W SCRIB : 8

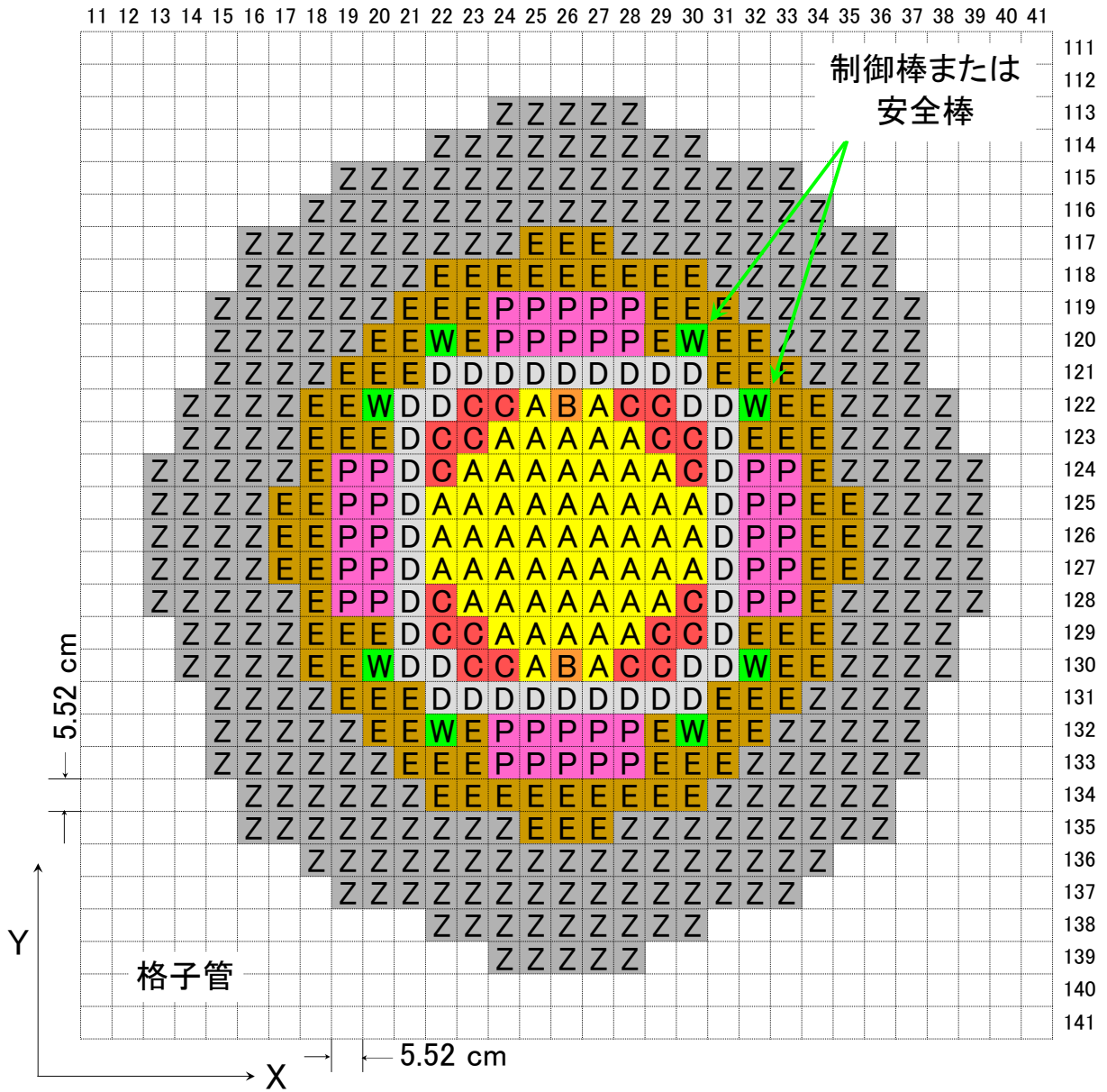
図 2.2 XV-1 炉心 移動側集合体燃料引出し装荷図



装荷引出しと本数

A Pu08A : 55	B Pu08B : 2
C Pu08C : 20	D SSB : 40
E EUDD : 88	P PuDA1 : 40
Z DUB : 288	W SCRA : 8

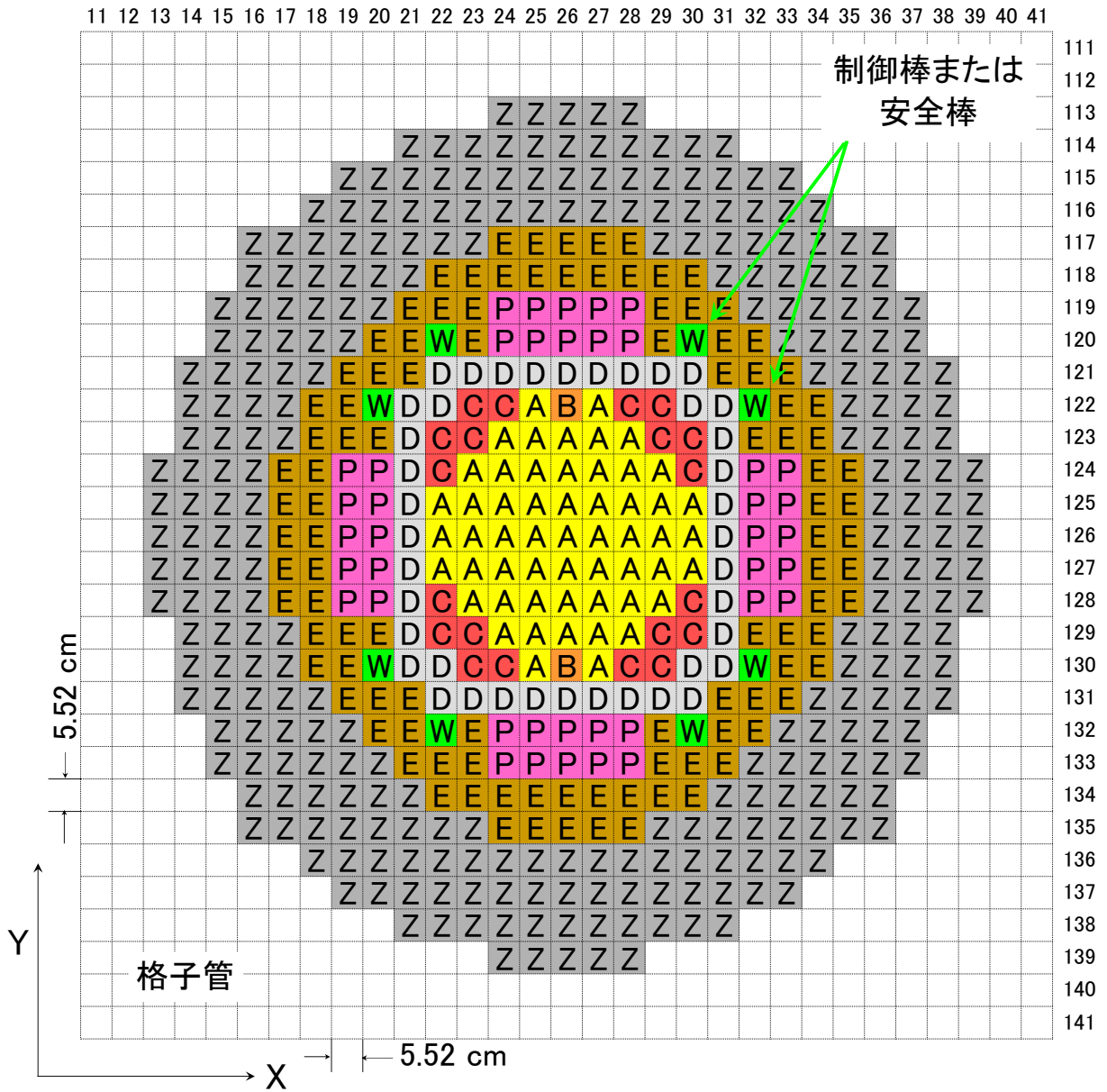
図 2.3 XV-2(45V) 炉心 固定側集合体燃料引出し装荷図



装荷引出しと本数

A Pu08A : 55	B Pu08B : 2
C Pu08C : 20	D SSB : 40
E EUDD : 96	P PuDA1 : 40
Z DUB : 288	W SCRA : 8

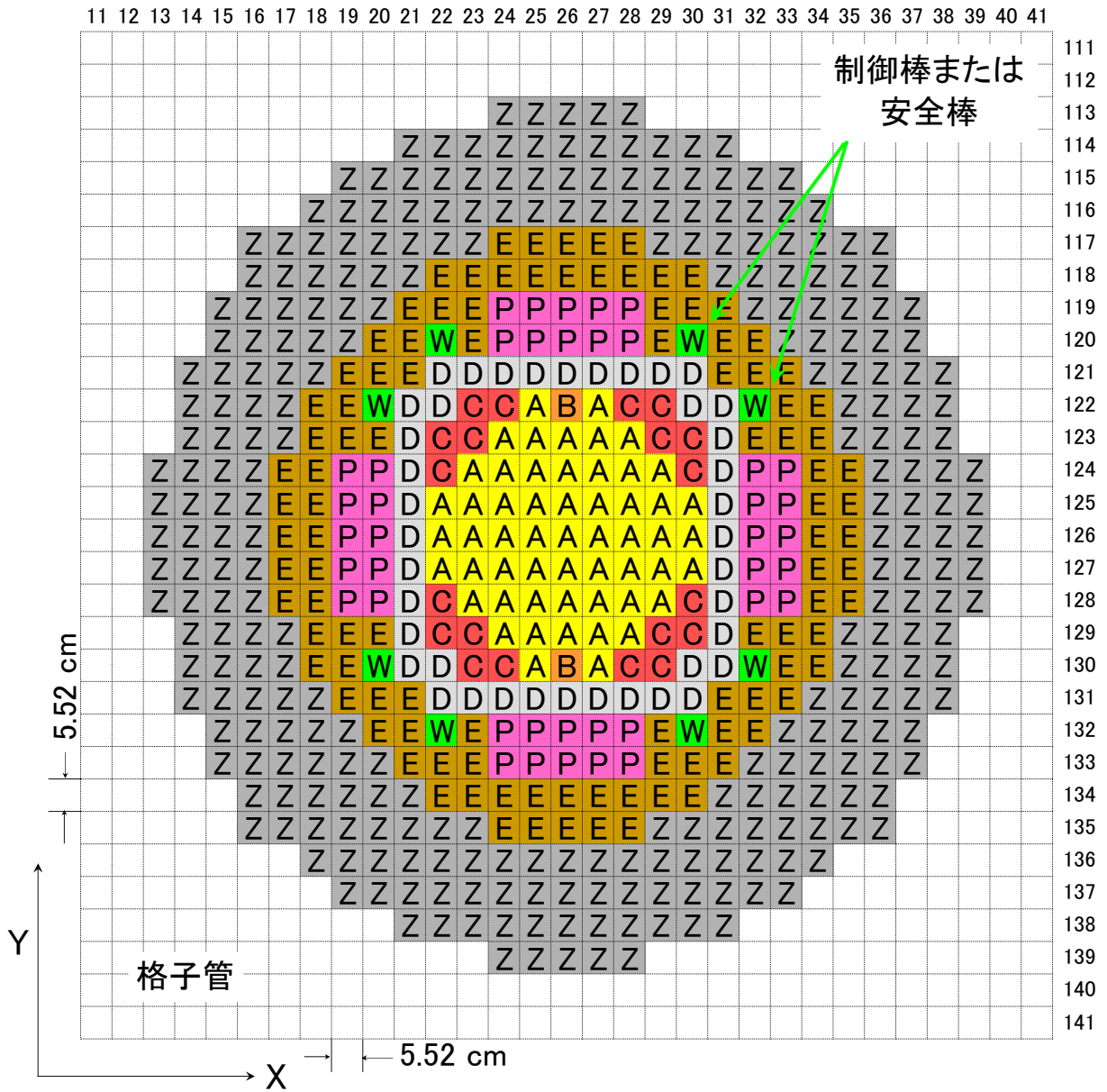
図 2.4 XV-2(65V) 炉心 固定側集合体燃料引出し装荷図



装荷引出しと本数

A Pu08A : 55	B Pu08B : 2
C Pu08C : 20	D SSB : 40
E EUDD : 104	P PuDA1 : 40
Z DUB : 288	W SCRA : 8

図 2.5 XV-2(80V) 炉心 固定側集合体燃料引出し装荷図



装荷引出しと本数

A Pu08A : 55	B Pu08B : 2
C Pu08C : 20	D SSB : 40
E EUDD : 104	P PuDA1 : 40
Z DUB : 288	W SCRA : 8

図 2.6 XV-2(95V) 炉心 固定側集合体燃料引出し装荷図

Pu08A

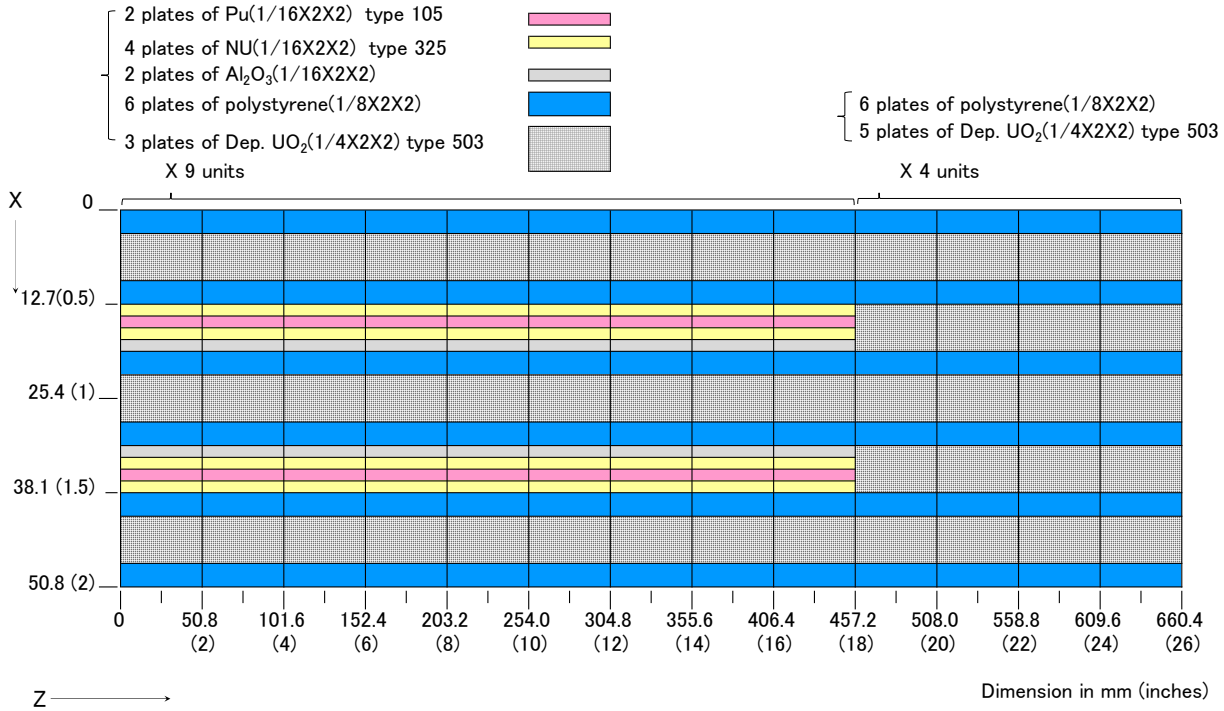


図 2.7 Pu08A 引出し装填図

Pu08B

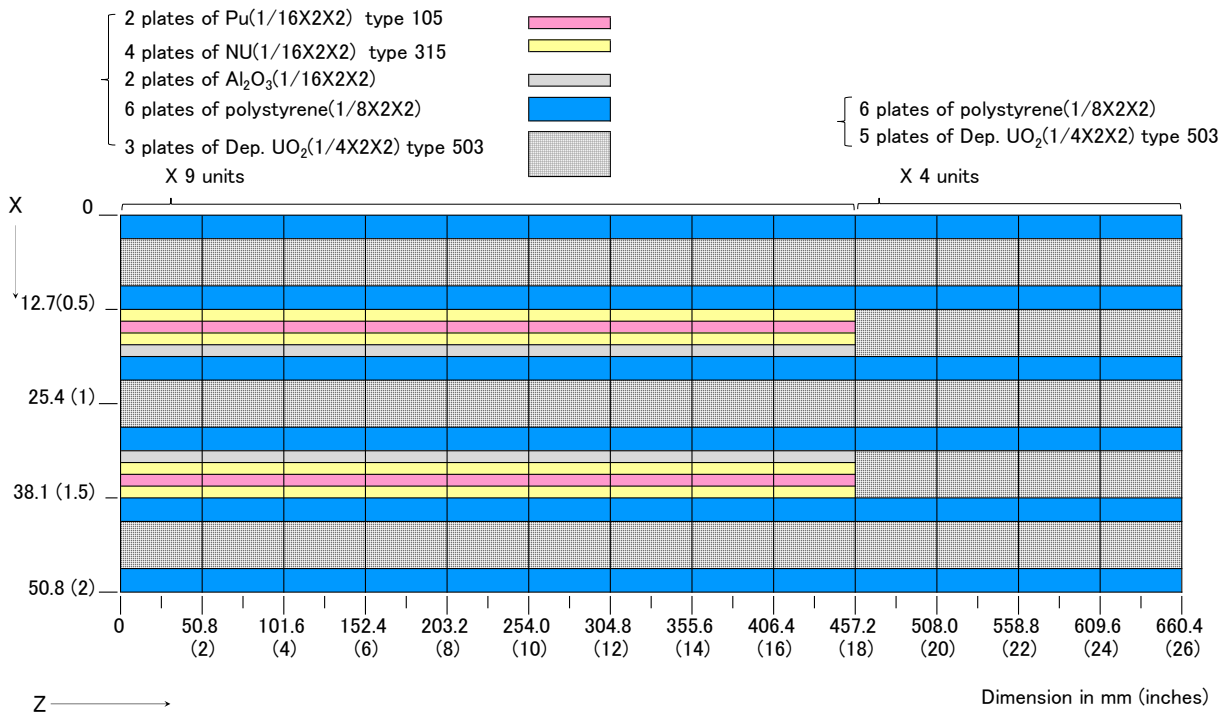


図 2.8 Pu08B 引出し装填図

Pu08C

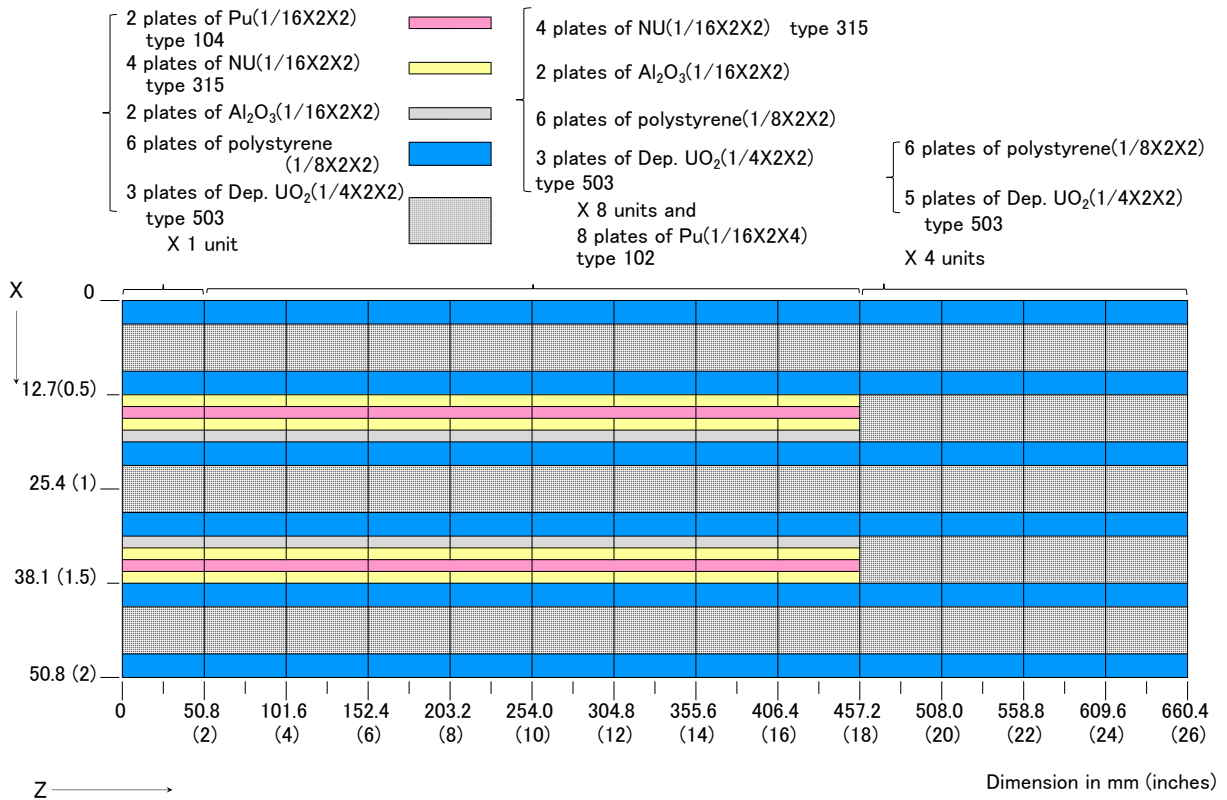


図 2.9 Pu08C 引出し装填図

EUDD

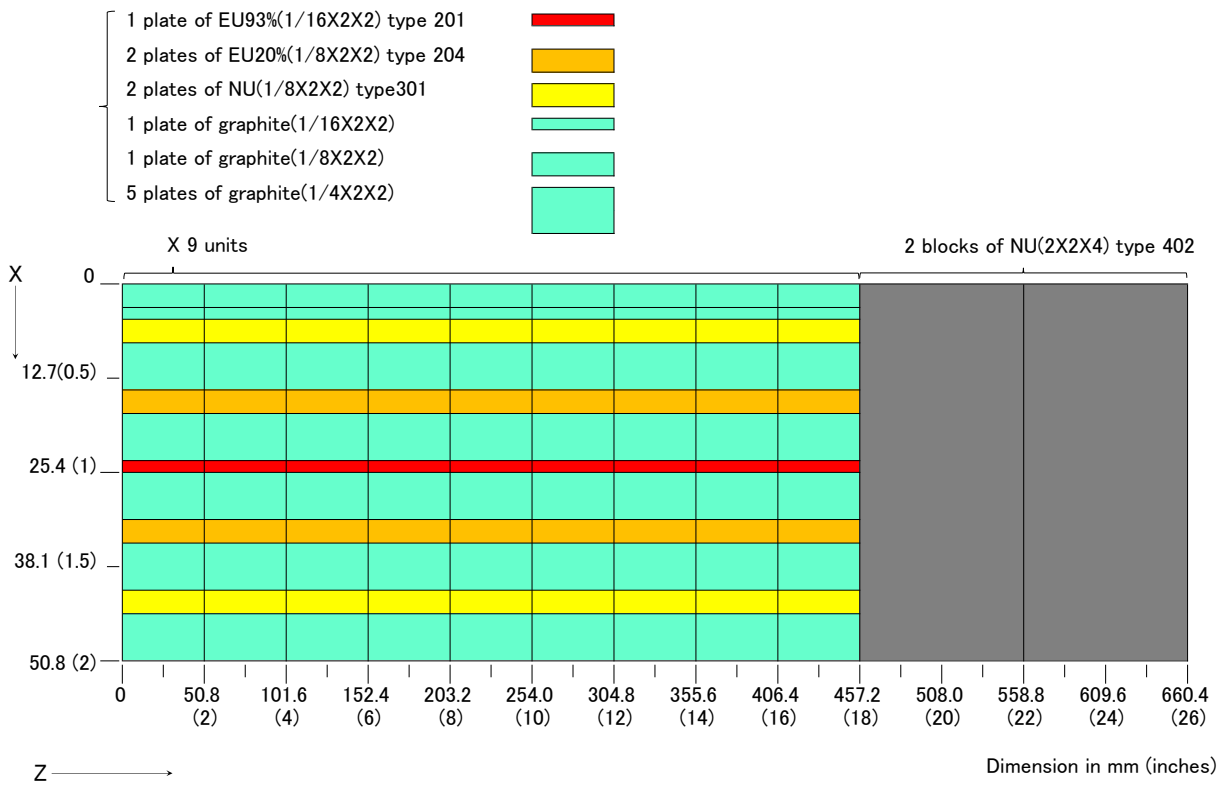


図 2.10 EUDD 引出し装填図

PuDA1

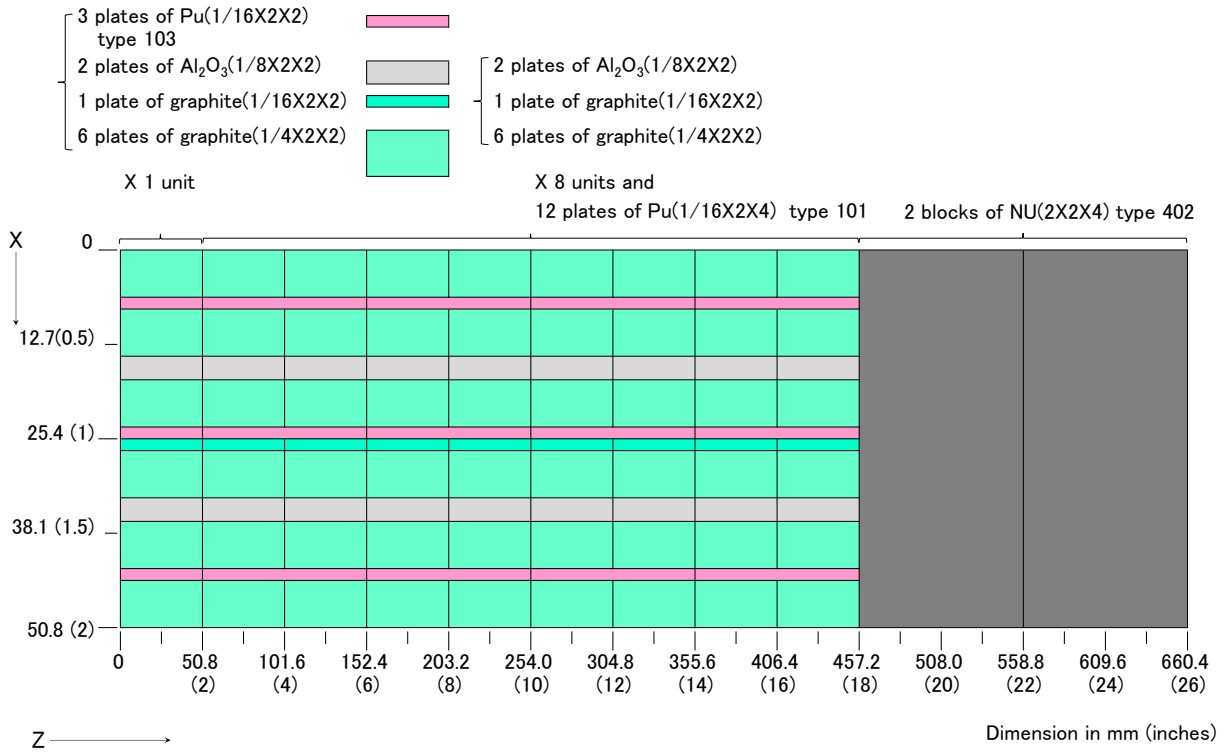


図 2.11 PuDA1 引出し装填図

SCRA

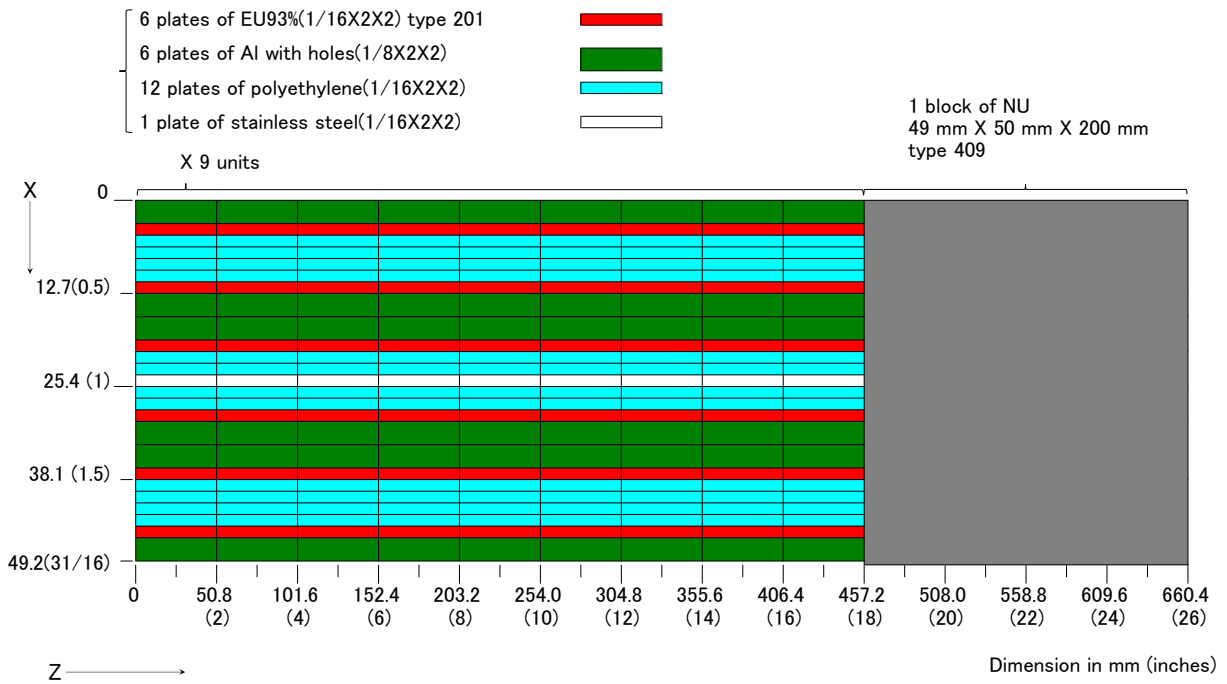


図 2.12 SCRA 引出し装填図

SCRB

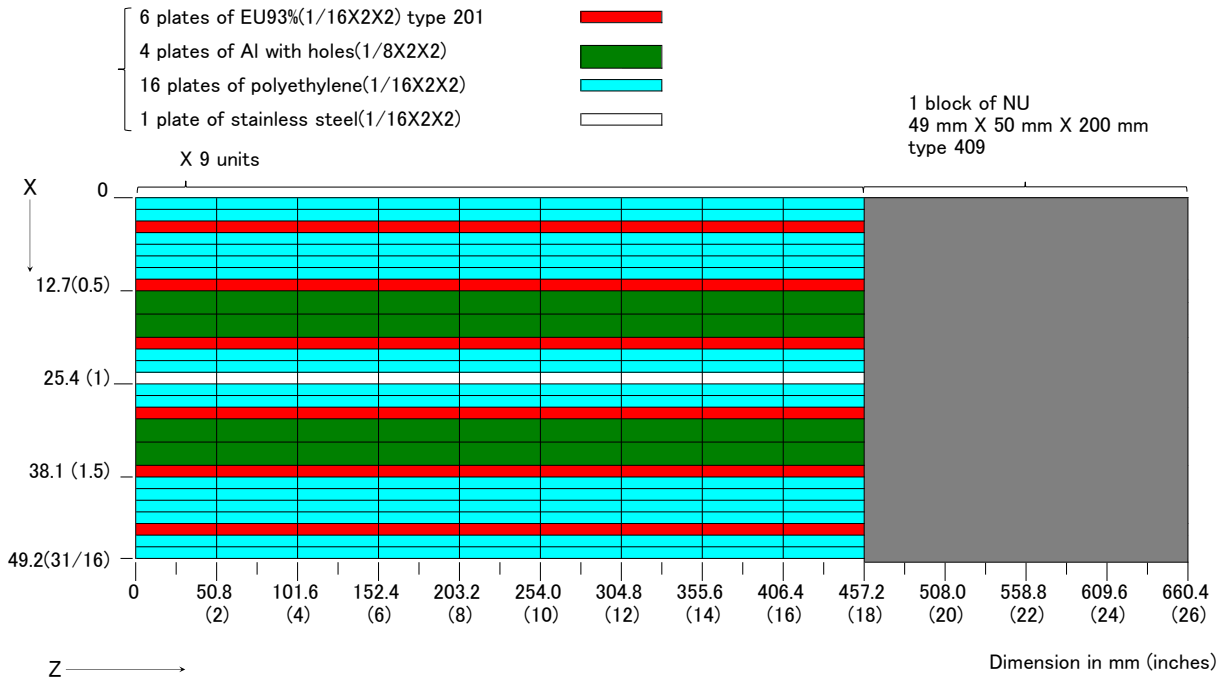


図 2.13 SCRB 引出し装填図

SSB

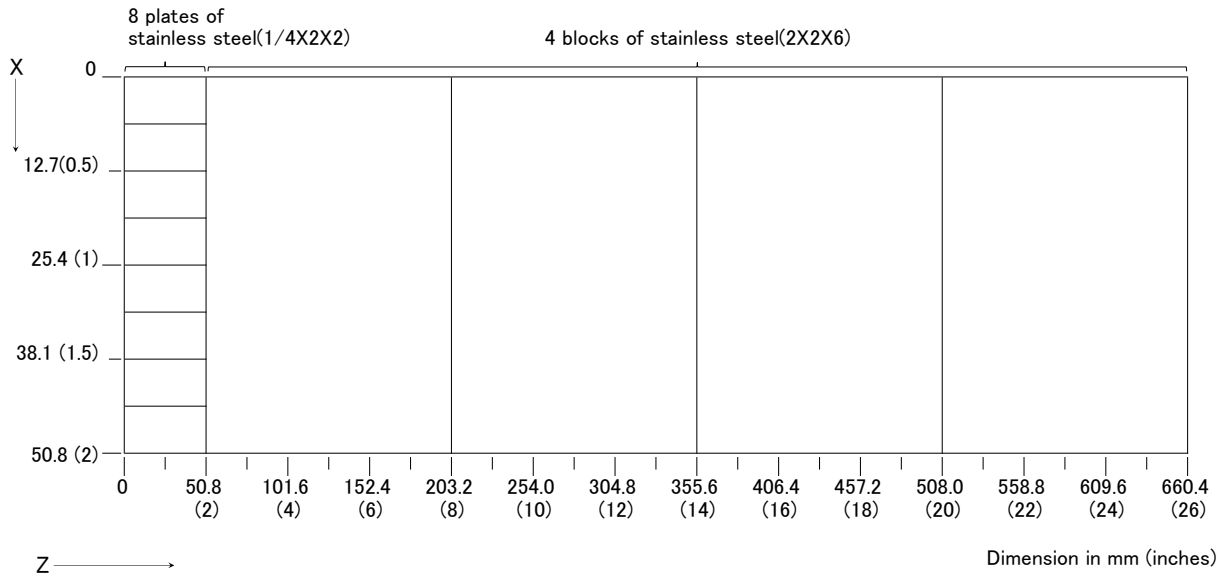


図 2.14 SSB 引出し装填図

DUB

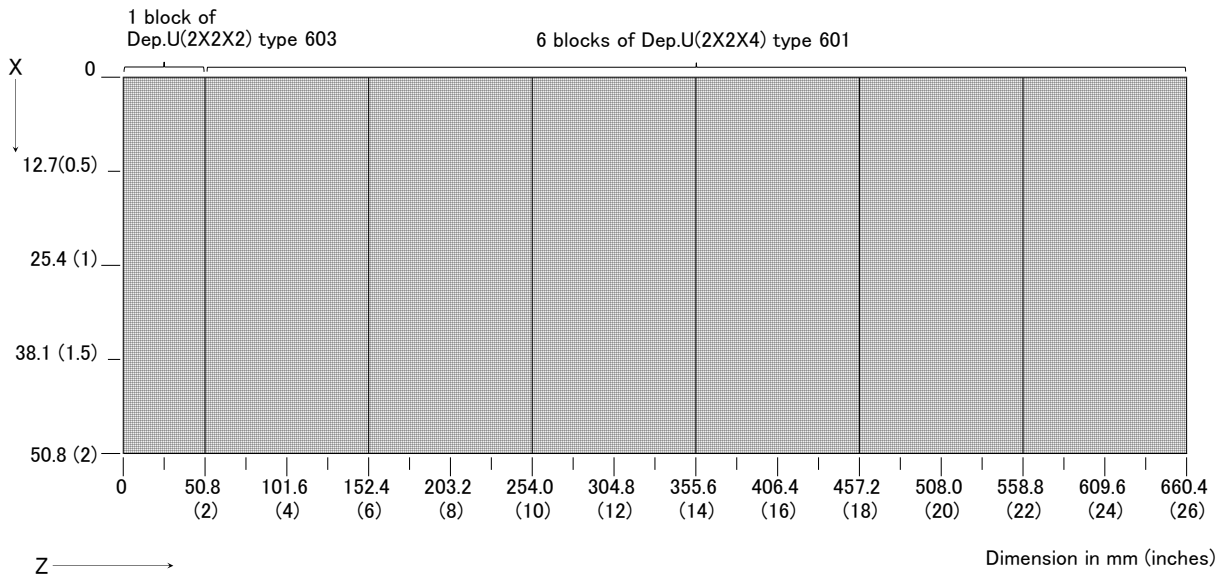


図 2.15 DUB 引出し装填図

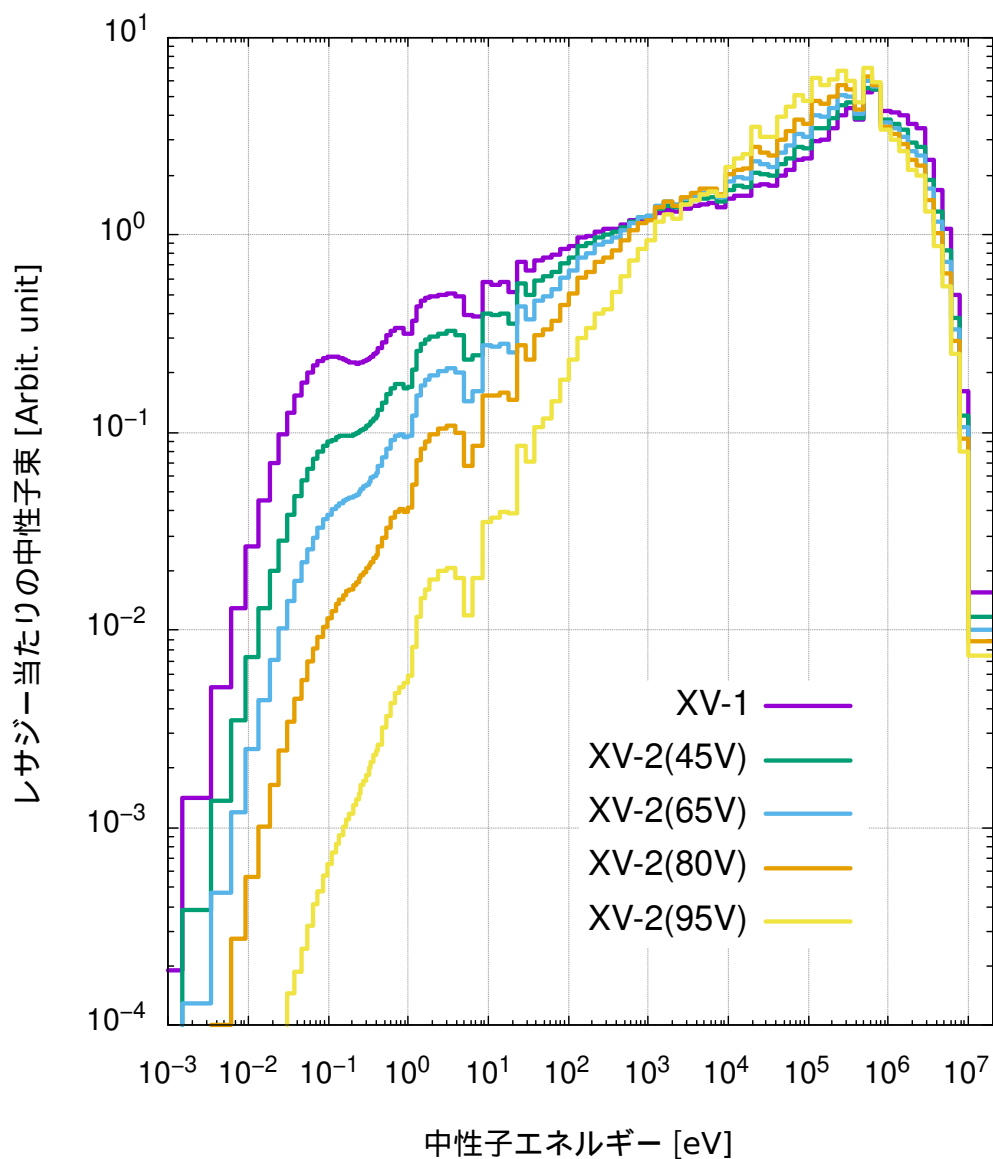


図 2.16 XV 炉心系のテスト領域の中性子エネルギースペクトル

3. 特性試験

3.1 概要

FCA で新たな炉心が臨界になると、最初に特性試験を実施して原子炉の保安規定に定められた運転上の制限値を満足することを確認するとともに、臨界性の評価やその他の炉物理パラメータの測定に用いる基礎的なデータを取得する。これらのうち、臨界性の評価に必要な実験項目は、(1) 基準反応度を基にした制御棒曲線の校正、(2) 反応度の温度係数の測定、(3) 反応度の密着面間隙係数の測定、(4) 正ペリオド法による基準反応度の測定、(5) 未臨界度の測定 (6) 炉心周辺部での燃料引出しの反応度値測定、(7) 全挿入時の制御棒と安全棒引出しの先端面の密着面からのへこみの深さ分の反応度値測定、及び (8) 密着面でのステンレス鋼反応度値の測定、である。いずれの実験データの処理も FCA の標準的な手法に基づくが、補正や不確かさの評価を詳細に行った。

プルトニウム燃料中の主として ^{240}Pu の自発核分裂で発生する中性子のために、一定の出力での運転時には、常に原子炉は未臨界となる。FCA では、通常、数 pcm ($10^{-3} \% \Delta k/k$) 程度のごく浅い未臨界で実験運転を行い、これは、数 W 程度の原子炉熱出力に相当する。このように、プルトニウム燃料を用いる臨界実験では、自発核分裂中性子源のため、厳密な臨界ではなくて浅い未臨界で原子炉の運転を行う。未臨界であるために、原子炉の定常出力のレベルが異なると制御棒の位置に相違が生じる。このため、例えば、制御棒との補償法で種々の置換反応度値を測定する時は、原子炉出力レベルをモニターして置換前後で出力レベルを同じにする必要がある。この出力レベルは、両集合体の四隅に設置した合計 8 チャンネルの原子炉核計装のうち、非補償型電離箱からなる線形出力系 CH#5 及び CH#6¹⁾ の出力電流値でモニターした。通常運転時にこの電流は小さくて、 10^{-6} A から 10^{-7} A のオーダーである。先に記述した余剰反応度は、浅い未臨界から制御棒の挿入により印加できる反応度変化であり、本来の臨界からの余剰反応度とするためには、この未臨界度分の補正を行う必要がある。

主にプルトニウム燃料の崩壊熱を除去して炉心の温度を炉室の室温と同程度に保つために、FCA では、常時、格子管に沿って冷却風を流す。固定側と移動側両集合体の分離時には、この冷却風の方法は、集合体の密着面側から集合体の背面側への方向である。原子炉の運転時に両集合体を密着すると、この方向を一部変えて、固定側集合体の背面側から密着面を通り移動側集合体の背面側への方向に冷却風を流す。このように冷却風の方法を変えることから、両集合体を密着した後のしばらくの間は、炉心の温度変化が大きくなる。例えば、1 時間で 0.5°C 程度変化する。しかし、両集合体密着後 2~3 時間経過するとこの温度変化はかなり小さくなり、これに伴う反応度変化も小さくなる。例えば、1 時間で 0.1°C 程度変化する。

この炉心温度は、集合体の格子管の間の隙間に配置した熱電対のうち代表位置のものを採用して測定した。通常、固定側集合体の 3 箇所と移動側集合体の 3 箇所、両集合体で合わせて 6 箇所の熱電対を採用して平均値

¹⁾ CH#5 は移動側集合体、CH#6 は固定側集合体に設置

をとり炉心温度変化をモニターした。例えば、置換反応度値を測定する時は、置換前後の温度変化を、あらかじめ測定しておいた反応度の温度係数を用いて反応度の変化分に換算して補正する必要がある。

両集合体の密着を保ったまま置換反応度値の測定を行う場合は、通常、密着後 2~3 時間経過した後に一連の測定を行うことから個々の測定間の温度変化は小さくて、温度測定には、これまでの経験から再現性として $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ の不確かさを見込んだ。両集合体の分離と密着を伴う測定では、通常、密着後 30 分以内に測定を行うので、個々の測定間の温度変化は大きくて、温度測定には、再現性として $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ の不確かさを見込んだ。これらの再現性としての不確かさとは別に、熱電対の温度校正には、これまでの経験から $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ の不確かさを見込んだ。

集合体密着面間隙は、両集合体の四隅に設置された光電式パルス検出器を基にした間隙測定器により測定した。移動側集合体は電動モーターで動かして、両集合体密着時にはリミットスイッチにて位置決めし静止する。しかしながら、間隙測定値には微小な変化が生じる。置換反応度値を測定する時は、置換前後の間隙変化を、あらかじめ測定しておいた反応度の密着面間隙係数を用いて反応度の変化分に換算して補正する必要がある。

両集合体の密着を保ったままでは、1 日を通してこの変化は 0.001 mm のオーダーに過ぎない。密着を保ったまま置換反応度値の測定を行う場合は、このように間隙の変化は小さく、これまでの経験から間隙測定には再現性として ± 0.001 mm の不確かさを見込んだ。集合体の分離密着を伴う測定では、間隙測定には、集合体の分離や再密着時の移動側集合体の位置再現性として ± 0.02 mm の不確かさを見込んだ。

制御棒と安全棒は、ボールネジを介して電気モーターで駆動し、その引き抜き位置には、再現性として ± 0.05 mm の不確かさを見込んだ。

3.2 制御棒校正曲線、反応度の温度係数と集合体密着面間隙係数の測定

まず、6 組 12 本ある安全棒のいずれか 1 組 2 本を選定して、その部分引き抜きから全挿入の反応度値を基準の ρ_0 と定義した。この基準を基にして、一般的な置換法により 2 組 4 本の制御棒校正曲線を同時に測定した。この基準となる安全棒の引き抜き長さは、XV-1 炉心では 50.00 mm、XV-2(45V) 炉心では 25.00 mm とし、その他の 3 炉心では 20.00 mm とした。この基準の反応度値は、別途、正炉周期法により $\% \Delta k/k$ 単位で求めた。炉心により基準の安全棒引き抜き長さを変えたのは、炉心ごとの安全棒の反応度値を考慮して、正炉周期法による反応度測定を適切に行うためである。校正実験時の余剰反応度、すなわち、運転時の 2 組の制御棒の引き抜き長さは炉心によって異なった。このため、置換法による測定の総ステップ数は炉心により異なり 11~17 ステップであった。

置換法による校正の各ステップ間で、炉心温度と両集合体間の密着面の間隙の変化が生じる。これに伴う反応度変化を、反応度の温度係数と間隙係数を用いて補正する必要がある。しかしながら、これらの係数を求めるには制御棒の校正曲線が必要となる。

そこで、まず最初に、温度変化と間隙変化に伴う補正を行わずに制御棒校正曲線の測定データ処理を行い、この結果を用いて温度係数と間隙係数を求めた。次に、これら係数を用いて校正曲線測定中の温度変化や間隙

変化による反応度変化の補正を行い、再度、制御棒校正曲線の測定データ処理を行う。さらに、この再度の処理で得た校正曲線を用いて温度係数と間隙係数を更新する、という繰り返しの処理を行った。

制御棒校正曲線は、 ρ_0 単位の制御棒の反応度値を全挿入からの引き抜き長さの関数としたものである。各ステップの制御棒の反応度値は、基準反応度 $1 \rho_0$ の積算により求めた。FCA での標準的な処理方法に従い、順次、隣り合う 4 ステップの測定点の制御棒反応度値と引き抜き長さの関係を 3 次式に当てはめることにより校正曲線を算出した。制御棒と補償することにより種々の反応度値を測定する時は、この校正曲線を用いてまず ρ_0 単位で反応度値を得る。反応度値の実験値を解析する際には、さらに、別途求める $1 \rho_0$ の測定結果を用いて実験値を $\% \Delta k/k$ 単位に変換して計算値と比較する。

反応度の温度係数は、炉心の温度を 5°C 程度変化させて、温度変化前後で同じ原子炉出力レベルで原子炉を運転することにより余剰反応度の差を測定し、この反応度差と温度の差から求めた。空調設備で炉室の温度を 5°C 程度変化させることにより炉心の温度を変化させた。変化後の炉心温度が十分安定するように、2 日以上の待ち時間後に温度変化後の測定を行った。反応度の密着面間隙係数は、固定側集合体を密着より 0.5 mm 程度の距離だけ分離し、分離による反応度変化を制御棒で補償することにより測定し、この反応度変化と距離の差から求めた。

制御棒校正曲線の測定は両集合体を密着したまま実施し、密着より 2~3 時間経過した後に測定を開始したので、データ処理において、炉心温度測定には $\pm 0.01^\circ\text{C}$ の不確かさを、間隙測定には $\pm 0.001 \text{ mm}$ の不確かさをを用いた。温度係数の測定では、両集合体を分離して炉心温度を変化させた後に、再度両集合体を密着して温度変化後の測定を行うので、炉心温度測定には $\pm 0.1^\circ\text{C}$ の不確かさを、間隙測定には $\pm 0.02 \text{ mm}$ の不確かさをを用いた。間隙係数の測定では、両集合体を分離するものの、その距離がわずかであるため冷却風の方向が変わらないので、この分離前後では両集合体を密着したままと同様に温度変化が小さい。したがって、炉心温度測定には $\pm 0.01^\circ\text{C}$ の不確かさを、間隙測定には $\pm 0.02 \text{ mm}$ の不確かさをを用いた。

5 つの炉心いずれにおいても、初回と 2 回目の温度係数と間隙係数の処理結果は、これら係数の不確かさ数 % をはるかに下回る 0.2% 以下の相違に過ぎず、このデータ処理は繰り返し 1 回で収束と判断した。このような繰り返しの処理が成功したのは、制御棒校正実験を両集合体の密着後に十分に時間が経過してから実施し、かつ、校正の各ステップ間に要した時間が 10 分程度と短いことから、温度変化による反応度変化の補正が小さいことによる。なお、密着面間隙の変化による反応度変化は、温度変化によるものよりも小さい。

5 つの炉心の温度係数と間隙係数をまとめて表 3.1 に示す。各炉心における測定データの処理の詳細は付録 A に記載する。

表 3.1 反応度の温度係数と集合体密着面間隙係数

炉心	XV-1	XV-2(45V)	XV-2(65V)	XV-2(80V)	XV-2(95V)
温度係数 [$\rho_0/^\circ\text{C}$]	$-0.0726 \pm 9.3\%$	$-0.0991 \pm 9.4\%$	$-0.101 \pm 10\%$	$-0.0925 \pm 9.6\%$	$-0.0783 \pm 9.6\%$
間隙係数 [ρ_0/mm]	$-0.406 \pm 6.8\%$	$-0.628 \pm 6.8\%$	$-0.764 \pm 7.5\%$	$-0.761 \pm 6.7\%$	$-0.742 \pm 6.6\%$

3.3 基準反応度の測定

先に記述した安全棒の部分引き抜きから全挿入の反応度価値として定義した基準反応度 $1 \rho_0$ を正炉周期法により $\% \Delta k/k$ 単位で測定した。この部分引き抜きで一定の原子炉出力で運転する時は浅い未臨界である。したがって、この状態から安全棒を全挿入しても、 $1 \rho_0$ から挿入前の未臨界度を差し引いた分の反応度の超臨界で倍加時間 (doubling time) の測定を行うことになる。そこで、挿入前の未臨界度をあらかじめ測定して基準反応度に対して補正し、倍加時間測定時の反応度を求めた。この未臨界度は中性子源増倍法を基にして測定した結果、いずれの炉心においても $0.015 \rho_0$ 以下であった。すなわち、 $1 \rho_0$ に対して大きくても 1.5% の補正に過ぎない。この未臨界度の測定法については後の 3.4 節に記述する。

安全棒を全挿入して超臨界とし、原子炉出力の上昇を核計装の線形出力系でモニターした。原子炉出力が安定炉周期で上昇するようになるまで待ち時間をとり、ストップウォッチを用いて複数名の測定者がそれぞれ複数回の倍加時間の測定を行い、全測定結果の平均値を採用した。この平均値の不確かさは、個々の測定値間のばらつきや FCA でのこれまでの経験を基にして ± 0.5 s の不確かさを見込んだ。この倍加時間の平均値を原子炉周期に換算して、後の 4.1 節に記載する逆時間方程式 (4.1) により反応度を求めた。 β_{eff} には JENDL-4.0 核データと MVP3 コードによる計算結果を用いた。これ以外の動特性パラメータには、4.1 節に記載するように JENDL-4.0 核データと決定論手法による計算結果を用いた。最後に、安全棒挿入前の未臨界度を補正して $1 \rho_0$ を求めた。倍加時間の不確かさによる基準反応度の不確かさは、遅発中性子データの不確かさによる基準反応度の不確かさとともに 4.1 節に記載する。

5 つの炉心の倍加時間の測定結果と基準反応度をまとめて表 3.2 に示す。各炉心における測定データの処理の詳細は付録 A に記載する。

表 3.2 基準反応度

炉心	XV-1	XV-2(45V)	XV-2(65V)	XV-2(80V)	XV-2(95V)
倍加時間測定時の 反応度 [ρ_0]	0.9952 ± 0.0014	0.9849 ± 0.0028	0.9959 ± 0.0035	0.9972 ± 0.0035	0.9869 ± 0.0037
倍加時間 [s] ^{D)}	28.0	46.4	54.3	52.5	48.3
基準反応度 $1 \rho_0$ [$\% \Delta k/k$] ^{E)}	0.0798	0.0603	0.0562	0.0599	0.0664

^{D)} 測定の不確かさは ± 0.5 s。

^{E)} 遅発中性子データの不確かさの影響も含めて、不確かさは、別途、4.1 節で論じる。

3.4 未臨界度の測定

一定出力で運転時の浅い未臨界度は中性子源増倍法を適用して測定した。既に記述したように数 pcm 程度の浅い未臨界での測定なので、補正を行わなくても中性子源増倍法を未臨界度の測定に適用することができる。原子炉出力レベルモニターとしての核計装線形出力系の出力電流値の読みが C_a 、 C_b である時の未臨界度を、

それぞれ ρ_a 、 ρ_b とすると、中性子源増倍法を基にして

$$\rho_b C_b = \rho_a C_a \quad (3.1)$$

である。両辺から $\rho_b C_a$ を差し引き変形すると ρ_b は

$$\rho_b (C_b - C_a) = (\rho_a - \rho_b) C_a \quad (3.2)$$

$$\rho_b = \frac{\rho_a - \rho_b}{\frac{C_b}{C_a} - 1} \quad (3.3)$$

となる。

例えば、出力レベルを 10 倍、すなわち $C_b/C_a = 10$ にして、出力を変える前後の余剰反応度の差が $\rho_a - \rho_b$ となる。先に記述したように、ここでの余剰反応度は、浅い未臨界から、制御棒の挿入により印加できる反応度変化であり、本来の臨界からの余剰反応度とするためには、この未臨界度分を差し引き補正する必要がある。したがって、ここでの余剰反応度の差がこのように未臨界度の差となる。これらを (3.3) 式で用いれば、未臨界度 ρ_b を求めることができる。この余剰反応度の差は、両集合体の密着を保ったまま制御棒の引き抜き位置を変えて出力レベルを調整し、制御棒位置の差から測定した。データ処理においては、炉心温度測定には $\pm 0.01^\circ\text{C}$ の不確かさを、間隙測定には $\pm 0.001 \text{ mm}$ の不確かさをを用いた。さらに、未臨界度と出力電流値の積である $\rho_a C_a$ を求めておけば、任意の原子炉出力での未臨界度は、その原子炉出力での電流値から求めることができる。ただし、これは浅い未臨界においてのみ適用可能である。

5 つの炉心の未臨界度と出力電流値の積をまとめて表 3.3 に示す。各炉心における未臨界度測定の詳細は付録 A に記載する。

表 3.3 未臨界度と核計装線形出力系¹⁾電流値の積

炉心	XV-1	XV-2(45V)	XV-2(65V)	XV-2(80V)	XV-2(95V)
未臨界度と電流値 の積 [$\rho_0 A$]	2.52×10^{-9} $\pm 3.1\%$	7.68×10^{-9} $\pm 1.9\%$	1.89×10^{-8} $\pm 15\%$	1.40×10^{-8} $\pm 16\%$	1.05×10^{-8} $\pm 10\%$

¹⁾ CH#6

3.5 炉心周辺部での燃料引出し反応度値測定

種々の実験目的に合わせて、臨界時の制御棒を適切な位置とするために、炉心周辺部、すなわち、径方向のドライバー領域と劣化ウランブロックからなる DUB 引出しを装荷した領域との境界で、ドライバー燃料引出し EUDD と劣化ウランブロック引出し DUB を交換して余剰反応度を調整することがある。また、実効増倍率の実験値と解析での計算値を比較するには、炉心はなるべく径方向に対称な形状とするのが望ましい。ここで、「径方向に対称」とは、図 2.1 ~ 図 2.6 の炉心装荷図の X や Y の各方向に対称であることに加えて、仮に、格子管に平行な炉心中心軸の周りで炉心を 90° 回転させても、炉心周辺部のドライバー燃料引出しの装荷パターンが同じとなることである。このような径方向に対称な炉心とするために、周辺部のドライバー燃料引出しを

付け加えたり差し引いたりする整形が必要となる場合がある。このような場合には、非対称な炉心で測定した余剰反応度に、こういったドライバー燃料引出しの反応度値分の補正を行い対称な炉心相当の余剰反応度を求めた。このために、あらかじめ炉心周辺部で EUDD 引出しと DUB 引出しの置換反応度値を測定した。

ここで、この置換反応度値の測定では、引出しの入れ替えのために両集合体を分離するので、炉心温度測定には $\pm 0.1^\circ\text{C}$ の不確かさを、間隙測定には $\pm 0.02\text{ mm}$ の不確かさをを用いた。

径方向に対称な炉心形状での臨界性評価のために、このような炉心整形の補正を行ったのは、XV-1、XV-2(65V)と XV-2(80V)の3炉心であった。これら3炉心で補正に用いた EUDD 引出しの反応度値を表 3.4 に示す。他の2つの炉心では、径方向に対称な形状の炉心で余剰反応度の測定を行ったので、この補正は不要であった。5つの炉心におけるその他の EUDD 引出しの反応度値は、測定データの処理の詳細とともに付録 A に記載する。

表 3.4 臨界性の評価に必要な炉心周辺燃料引出し反応度値

炉心	XV-1	XV-2(65V)	XV-2(80V)
反応度値 [ρ_0]	-1.349 ± 0.016 ¹⁾	3.159 ± 0.028 ²⁾	3.150 ± 0.027 ³⁾

¹⁾ 図 2.1、図 2.2 の径方向に対称な形状の臨界性評価炉心から、あらかじめ、F127/18、F125/34、M127/34、M125/18 の4箇所合計4本の EUDD 引出しを DUB 引出しに置き換えた炉心を基準として、この基準から、F118/25、M118/25、F134/27、M134/27 の4箇所合計4本の EUDD 引出しを DUB 引出しに置換することによる反応度値

²⁾ 図 2.4 の径方向に対称な形状の臨界性評価炉心から F128/17、F124/35、M128/17、M124/35 の4箇所合計4本の DUB 引出しを EUDD 引出しに置換することによる反応度値

³⁾ 図 2.5 の径方向に対称な形状の臨界性評価炉心から、あらかじめ、F124/17、F124/35、F128/17、F128/35、M124/17、M124/35、M128/17、M128/35 の8箇所合計8本の EUDD 引出しを DUB 引出しに置き換えた炉心を基準として、この基準から、F124/17、F128/35、M124/17、M128/35 の4箇所合計4本の DUB 引出しを EUDD 引出しに置換することによる反応度値

3.6 全挿入時の制御棒と安全棒引出しの先端の密着面からのへこみの深さ分の反応度値測定

既に記述したように、制御棒と安全棒の引出しは集合体の背面にて駆動機構に連結する。全挿入時に、これら引出しの前端面が、既に装荷されている他の通常の燃料引出しの前端面、すなわち密着面、となるべく揃うように調整して連結するが、連結部分の構造から完全に揃えることはできない。このため、制御棒と安全棒の引出しの前端面が、密着面より若干へこむ側にクリアランスを持たせて連結する。このへこみの深さは 1 mm 程度に過ぎないが、この深さの反応度値分を余剰反応度に対して補正する必要がある。

固定側と移動側両集合体で合計 16 本装荷されている制御棒と安全棒の各引出しについて、この深さをノギス等の計測器を用いて測定した。この測定には、1 箇所につき $\pm 0.1\text{ mm}$ の不確かさを見込んだ。制御棒と安全棒の引出しの装填内容を変更する時にのみ、これら引出しの駆動機構からの取り外しと変更後の取り付けを

行うので、この測定は装填内容を変更して引出し取り付け後のみ行った。16本の引出しのへこみ深さの平均値は、XV-1炉心では0.99 mmで、その他の4炉心は共通で0.70 mmであった。

へこみが密着面近傍であることから、深さの反応度値への換算は、密着面近傍での制御棒や安全棒の微分反応度値、すなわち $1 \rho_0$ を $1 \rho_0$ 分の安全棒移動距離で除したもの（例えば XV-2(45V) 炉心では $1 \rho_0 / 25 \text{ mm}$ ）を深さに乗じることにより行った。固定側と移動側両集合体で合わせて8組の制御棒と安全棒があるので、この換算で得た反応度値を8倍して補正量とした。この補正量は、XV-1炉心では $0.160 \pm 0.006 \rho_0$ 、XV-2(45V) 炉心では $0.224 \pm 0.011 \rho_0$ で、その他の3炉心では $0.280 \pm 0.014 \rho_0$ であった。これらの不確かさは、深さ測定の不確かさ $\pm 0.1 \text{ mm}$ を反応度値に換算して $\sqrt{8}$ 倍したものであり、ノミナル値の $\pm 3\% \sim \pm 5\%$ である。換算に用いる微分反応度値の不確かさはこれに比べて1桁小さいので無視した¹⁾。

3.7 密着面でのステンレス鋼反応度値測定

炉心の中心面に相当する2分割集合体の密着面には、主に引出し前端面の部材としてのステンレス鋼があり、決定論手法で実効増倍率を計算する場合はそのモデル化が困難となる場合がある。そこで、このステンレス鋼の負の反応度効果を実験的に求めて補正として用い、密着面のステンレス鋼を取り除いた炉心の余剰反応度あるいは実効増倍率を求める。この補正のために密着面近傍においてステンレス鋼の反応度値を測定した。

特性試験実施時の炉心はいずれも径方向にほぼ対称であることと、炉心周辺部ではステンレス鋼の反応度値が小さくなり補正量への寄与が小さくなることから、炉心周辺部分の形状が若干異なっても補正量への影響は無視し得る程度である。したがって、密着面である炉心中心面のいずれかの1/4象限を選び、さらに、これを径方向に半分にした扇型部分の密着面にてステンレス鋼反応度値の測定を行えば、この測定結果の定数倍より補正量を算出することができる。しかし、このような詳細な測定は、XV炉心系に先立ち実施した第1フェーズ実験のXIV-1炉心の特性試験においてのみ実施した。この炉心では補正量への領域別の寄与割合も求め、実際に、ドライバー領域の補正量への寄与割合が2%程度と小さなことを確認した。

XV炉心系の5つの炉心では、固定側集合体の中心引出しの前端面にステンレス板を装填するための小さな空間を設けて、中心格子管の密着面近傍でのみステンレス鋼の反応度値を測定した。この反応度値は両集合体の密着を保ったまま一連の測定を行ったので、データ処理において、炉心温度測定には $\pm 0.01^\circ\text{C}$ の不確かさを、間隙測定には $\pm 0.001 \text{ mm}$ の不確かさをを用いた。用いたステンレス板の重量からこの測定結果を単位重量当たりのステンレス鋼の反応度値に換算して、引出しを装荷した格子管当たりの補正すべきステンレス鋼の重量に乗じた。これにより、中心格子管部分のみの補正量への寄与分を求めた。次に、既に記述したXIV-1炉心における詳細なステンレス鋼反応度値の測定結果で、中心格子管部分の補正量への寄与割合を求めておく。最後に、この寄与割合をXV炉心系の5つの炉心に適用して、各炉心での補正量を求めた。5つの炉心の補正量をまとめて表3.5に示す。各炉心における補正量の算出の詳細は付録Aに記載する。

このようにして補正量を求めたのは、補正量への寄与が大きなテスト領域の形状と引出し装荷本数が第1

¹⁾ 制御棒や安全棒の位置再現性による不確かさが $\pm 0.05 \text{ mm}$ なので、この微分反応度値の不確かさは、例えば、XV-1炉心では $\pm \sqrt{0.05^2} \times 2/50 = \pm 0.14\%$ 、XV-2(95V)炉心では $\pm \sqrt{0.05^2} \times 2/20 = \pm 0.35\%$ に過ぎない。

フェーズの XIV 炉心系と第 2 フェーズの XV 炉心系の全ての炉心で共通であることによる。ドライバー領域の補正量への寄与割合は 2% 程度に過ぎず、ドライバー燃料引出しの装荷本数が炉心により異なってもその影響は小さく、その寄与分には本数の違いを基にして補正を行った。

表 3.5 密着面ステンレス鋼反応度値

炉心	XV-1	XV-2(45V)	XV-2(65V)	XV-2(80V)	XV-2(95V)
反応度値 [ρ_0]	$-0.768 \pm 21\%$	$-0.481 \pm 24\%$	$-0.390 \pm 31\%$	$-0.342 \pm 33\%$	$-0.250 \pm 42\%$

4. 計算や核データによる実効増倍率の不確かさへの寄与分の評価

4.1 基準反応度測定の不確かさ

原子炉周期 T から反応度 ρ を得る逆時間方程式は、実効遅発中性子割合を β_{eff} 、核種 j の遅発中性子グループ i について、その遅発中性子放出数の相対割合を $a_i^j = \beta_{eff i}^j / \beta_{eff}$ ($\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^6 a_i^j = 1$)、崩壊定数を λ_i^j 、即発中性子生成時間を Λ とすると

$$\rho = \frac{\Lambda}{T} + \beta_{eff} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^6 \frac{a_i^j}{1 + \lambda_i^j T} \approx \beta_{eff} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^6 \frac{a_i^j}{1 + \lambda_i^j T} \quad (4.1)$$

である。 T の測定値が 10 s ~ 100 s であるのに対して、FCA の HCLWR 模擬炉心の Λ は 1×10^{-5} s よりも短い¹⁾のでこの近似は良く成り立つ。

a_i^j は、決定論手法によるコードで計算した核種別、遅発中性子グループ別の β_{eff} への寄与 $\beta_{eff i}^j$ から $a_i^j = \beta_{eff i}^j / \beta_{eff}$ として求めた。ここで、炉心セルの計算には、衝突確率法に基づく詳細群セル計算コード SLAROM-UF[28] を用い、エネルギー 70 群のセル平均の実効断面積を作成した。炉心計算には、板状の燃料や模擬物質の配列と並行な方向への中性子ストリーミング効果を取り入れるために、3次元多群中性子拡散計算コード CITATION[29] に異方性拡散係数 [30] を適用して [31] 用いた。 β_{eff} と $\beta_{eff i}^j$ は、多群拡散理論に基づく摂動計算コード PERKY[32] で計算した。 λ_i^j は、核データファイルに格納されている。これら計算は、JENDL-4.0 核データに基づき行った。今回の炉心の β_{eff} に対して大部分の寄与を占める ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{239}Pu の主要 3 核種に関しては、JENDL-4.0 あるいは最新の JENDL-5 の遅発中性子データは JENDL-3.3 と同じである。なお、この決定論手法による β_{eff} の計算結果は MVP3 コードを用いた結果と 1% 以内で良く一致した¹⁾。

(4.1) 式より、反応度 ρ の不確かさには、 T 、 β_{eff} 、 a_i^j 、 λ_i^j の各パラメータの不確かさからの寄与がある。さらに、倍加時間測定時の ρ_0 単位の反応度にも不確かさがある。これらのうち、原子炉周期 T あるいは倍加時間と倍加時間測定時の反応度は測定値であり、他のパラメータは核データに基づくものであるが、評価の結果、核データの不確かさの寄与が大きいので、測定値の不確かさによる基準反応度の不確かさへの寄与分も本節に記述する。

まず、(4.1) 式を基にして、各パラメータの不確かさを伝搬させることにより、各パラメータの不確かさに起因する基準反応度の不確かさへの寄与分を個別に求めた。ここで、 β_{eff} の不確かさは寄与が大きな遅発中性子収率の不確かさからあらかじめ求めておき、基準反応度の不確かさの算出に用いた。

遅発中性子の収率の不確かさは JENDL-4.0 の共分散を用いた。 a_i^j と λ_i^j の共分散は JENDL には無いこと

¹⁾ MVP3 コードを用いた計算結果

¹⁾ さらに、JENDL-4.0 と JENDL-5 の間での MVP3 コードを用いた β_{eff} の計算結果の相違は、モンテカルロ計算の統計誤差と同程度の 0.3% に過ぎなかった。

と、主要3核種に関して JENDL の λ_i^j の評価値は Keepin の測定 [33] に基づくので、Keepin の ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{239}Pu と ^{240}Pu の4核種の λ_i^j の測定結果の不確かさを用いた。 a_i^j についても、Keepin の測定結果の不確かさを用いた。寄与が小さな ^{241}Pu については、 a_i^j と λ_i^j の不確かさは Keepin の測定結果にも無いので、その不確かさの寄与分は含めなかった。

5つの炉心の基準反応度の不確かさとその内訳をまとめて表4.1に示す。基準反応度の不確かさは、各パラメータの不確かさに起因する寄与分を合わせたものである。この基準反応度の不確かさ評価の詳細は付録Cに記載する。

表4.1 基準反応度測定の不確かさ

炉心	XV-1	XV-2(45V)	XV-2(65V)	XV-2(80V)	XV-2(95V)
不確かさ内訳					
ρ_0 単位の反応度	0.14%	0.28%	0.36%	0.35%	0.37%
原子炉周期 T	1.2%	0.8%	0.7%	0.7%	0.8%
実効遅発中性子割合 β_{eff} ¹⁾	2.5%	2.4%	2.4%	2.4%	2.4%
相対割合 a_i^j	3.2%	2.9%	2.7%	2.6%	2.6%
崩壊定数 λ_i^j	1.1%	1.2%	1.2%	1.1%	1.1%
基準反応度の不確かさ	4.3%	4.0%	3.8%	3.8%	3.7%

¹⁾ 遅発中性子収率の不確かさによる β_{eff} の不確かさ

4.2 格子管の外寸法の不確かさによる反応度の不確かさ

FCA 建設時の試験記録から、格子管の外寸法 55.2 mm には 0.04 mm の不確かさがある [22]。格子管が積み重なるので、縦と横方向の炉心の大きさに 0.04 mm の積算分の不確かさが生じる。これによる反応度の不確かさは計算により評価した。格子管の外寸法を 55.20 mm としたケースと、55.24 mm と大きくしたケースの2とおりの計算を行い、実効増倍率から反応度差を求めた。この計算は、MVP3 コードと JENDL-4.0 核データを用いて行った。反応度の不確かさの評価結果を表4.2に示す。反応度差とモンテカルロ計算の統計誤差を加算して±両側の不確かさとした。

表4.2 格子管の外寸法の不確かさによる反応度の不確かさ

炉心	XV-1	XV-2(45V)	XV-2(65V)	XV-2(80V)	XV-2(95V)
反応度差 [% $\Delta k/kk'$]	0.028 ± 0.002 ¹⁾	0.028 ± 0.002	0.034 ± 0.002	0.039 ± 0.002	0.041 ± 0.002
不確かさ [% $\Delta k/k$]	0.031	0.031	0.036	0.041	0.043

¹⁾ モンテカルロ計算の統計誤差

4.3 実験炉心への装荷物の重量、燃料組成の不確かさによる反応度の不確かさ

実験炉心に装荷した種々の燃料板に含まれるウランやプルトニウムの重量には不確かさがある。これらの同位体組成にも不確かさがある。ウラン燃料には、表面保護や燃料種類の識別のために塗料が塗られており、その塗布量や組成に不確かさがある。さらに、装荷したポリスチレン板やグラファイト板等の重量にも不確かさがある。

このような重量や組成の不確かさに起因する反応度の不確かさは計算により評価した。この評価方法は、これまでに行われてきた FCA 実験データの再評価 [22] と同様であり、FCA に整備されている燃料板や模擬物質板の重量や組成の不確かさのデータベースを基にした。

まず、装荷物の種類ごとに、この不確かさの分だけ重量や組成を変化させた時の実効増倍率の変化から反応度変化を計算した。この計算は、決定論手法により行った。炉心セルの計算には、JENDL-4.0 と SLAROM-UF コードを用いて、エネルギー 70 群のセル平均の実効断面積を作成した。炉心計算には 3 次元多群中性子輸送計算コード DANTSYS[34] を用いた。次に、燃料板や模擬物質板については、種類ごとに、今回の実験炉心に使用した枚数と FCA の在庫量を考慮して、種類ごとに反応度の不確かさへの寄与分を算出した。最後に、このように装荷物の種類といった項目別に評価した不確かさを合わせて、最終的な反応度の不確かさを算出した。

その結果を表 4.3 に記載する。装荷物の種類といった項目別に評価した不確かさの詳細は付録 D に記載する。

表 4.3 実験炉心への装荷物の重量、燃料組成の不確かさによる反応度の不確かさ

炉心	XV-1	XV-2(45V)	XV-2(65V)	XV-2(80V)	XV-2(95V)
不確かさ内訳					
装荷物の重量 [$\% \Delta k/k$]	0.019	0.039	0.046	0.051	0.056
ウランやプルトニウムの同位体比 [$\% \Delta k/k$]	0.13	0.080	0.060	0.047	0.039
塗料の組成と塗布量 [$\% \Delta k/k$]	0.022	0.027	0.032	0.034	0.038
不確かさ [$\% \Delta k/k$]	0.13	0.093	0.083	0.078	0.078

5. 実効増倍率の実験結果と不確かさの評価

5つの炉心の実効増倍率の評価日を表 5.1 に示す。評価結果を表 5.2～表 5.6 に示す。

既に記述したように、一定の原子炉出力で運転時に途中まで引き抜いた 2 組 4 本の制御棒を全挿入する時に増加する反応度、すなわち、おおよその余剰反応度を基に種々の補正を行い実効増倍率を求める。この余剰反応度は、炉心温度測定と温度の反応度係数により既に基準の温度である 20°C で値に補正したものである。この温度に関する補正が、各炉心における余剰反応度へ既に行った主な補正であり、この余剰反応度の不確かさとともに付録 A に記述する。この不確かさには、余剰反応度の再現性に伴う寄与に加えて、2 組 4 本の制御棒の引き抜き分の反応度値の不確かさの寄与も含めた。

解析において実効増倍率の計算結果と比較するために、この余剰反応度に対してさらなる補正を行った。これらは既に記述したように、まず、(1) 未臨界度の補正、(2) 径方向に対称な炉心形状相当とするための炉心周辺部でのドライバ燃料引出し置換反応度値の補正と (3) 全挿入時の制御棒と安全棒引出しの先端の密着面からのへこみの深さ分の反応度値補正である。(1) の補正は、表 3.3 に記載の未臨界度と核計装の線形出力系の電流値の積を、余剰反応度測定時の電流値で除して求めた。(2) の補正は、XV-1、XV-2(65V) と XV-2(80V) の 3 炉心について、表 3.4 に記載のデータを用いて行った。XV-2(45V) と XV-2(95V) の 2 炉心では、既に対称の炉心で余剰反応度を求めたため、この補正は不要であった。(3) の補正には、3.6 節に記載の補正量を用いた。

このように補正した余剰反応度の不確かさには、さらに、以下の実験による 2 つの不確かさ寄与分と 4 章にて記述した計算や核データを用いて評価した 3 つの不確かさ寄与分を合わせる。

格子管中に配置した熱電対による炉心の温度測定値と反応度の温度係数により、余剰反応度は 20°C で値となるように補正したが、既に記述したように、温度測定の再現性とは別に、用いた熱電対の温度校正には $\pm 0.5^\circ\text{C}$ の不確かさがある。この不確かさに表 3.1 の温度係数を乗じて、温度測定系の校正の不確かさによる反応度の不確かさへの寄与分として算出した。両集合体間の距離の不確かさは、移動側集合体の位置再現性による不確かさ $\pm 0.02 \text{ mm}$ であり、これによる反応度の不確かさへの寄与分は、この距離の不確かさに表 3.1 の集合体密着面間隙係数を乗じて算出した。

余剰反応度を ρ_0 単位から $\% \Delta k/k$ 単位に変換する時に表 3.2 の基準反応度を用いる。この基準反応度の不確かさは、相対値として求めて表 4.1 に記載した。これに補正後の余剰反応度を乗じて $\% \Delta k/k$ 単位の不確かさ寄与分として表 5.2～表 5.6 に示す。格子管の外寸法の不確かさによる反応度の不確かさ寄与分には、表 4.2 の値を用いた。燃料組成の不確かさによる反応度の不確かさ寄与分には表 4.3 の値を用いた。

これら 5 つの不確かさの寄与分も合わせた補正後の余剰反応度の不確かさは、いずれの炉心もおおよそ $0.1\% \Delta k/k$ となった。燃料組成の不確かさによる反応度の不確かさ寄与分が大きな寄与を占める。

実効増倍率 k_{eff} は余剰反応度 ρ から $k_{eff} = 1/(1 - \rho)$ と求め、不確かさ $\pm \delta k_{eff}$ は、余剰反応度の不確かさ $\delta \rho$ から $\delta k_{eff} = \delta \rho / (1 - \rho)^2$ と求めた。ここまでの補正を行った余剰反応度による実効増倍率を、後の 6 章において、実験炉心を詳細に模擬できる連続エネルギー法による中性子輸送計算モンテカルロコードの結果と

比較する。

余剰反応度に以下の2つの補正を追加することにより、密着面のステンレス鋼を取り除き、かつ、移動側と固定側の両集合体間の間隙を除いた余剰反応度と実効増倍率を求める。これらは、(4) 両集合体間の密着面のステンレス鋼の反応度価値の補正と(5) 両集合体間の密着面の間隙補正である。これら補正により、炉心のモデル化が簡便になり決定論手法による解析を容易に行うことができる。(4)の補正には、表3.5に記載の値を用いた。このように、引出し前端面の薄いステンレス板を取り除くと、両集合体の燃料板が装荷されている領域間には2.1 mmの間隙が残る。(5)の補正は、移動側集合体をこの間隙分だけ動かして固定側集合体に密着させようとした時に増加する反応度分の補正であり、この間隙に表3.1の集合体密着面間隙係数を乗じて反応度に換算して求めた。この間隙補正の不確かさには間隙係数の不確かさのみを考慮した。既に記述したように、固定側集合体の位置の再現性による不確かさ ± 0.02 mmによる反応度の不確かさは別に扱った。

これら2つの補正を追加した余剰反応度にも、追加前と同様に、熱電対の温度校正と移動側集合体の位置再現性による反応度の不確かさ寄与分と計算や核データを用いて評価した3つの不確かさ寄与分を合わせる。これら5つの不確かさ寄与分も合わせた補正後の余剰反応度の不確かさは、いずれの炉心も補正追加前とほぼ同じでおおよそ $0.1\% \Delta k/k$ となった。これは、燃料組成の不確かさによる反応度の不確かさが大きな寄与を占めていることによる。

このように、炉心によっては実効増倍率の不確かさが $0.1\% \Delta k/k$ を超えることもあるが、実効増倍率のノミナル値は $0.001\% \Delta k/k$ の桁まで掲載する。これは、燃料組成に起因する不確かさが実効増倍率の不確かさに対して大きな寄与を占めているので、今後、新たな知見が得られればこの寄与を低減し、実効増倍率の不確かさを再評価することができる。このような場合にも、本報告書の評価値をそのまま使うことができるようにするためである。

表 5.1 実効増倍率の評価日

炉心	XV-1	XV-2(45V)	XV-2(65V)	XV-2(80V)	XV-2(95V)
評価日	1987年6月1日	1988年3月28日	1989年5月31日	1989年3月10日	1988年7月27日

表 5.2 XV-1 炉心の実効増倍率^{D)}

一定の原子炉出力で運転時の余剰反応度 $[\rho_0]$ ^{II) III)}	4.243 ± 0.012
実験による補正と不確かさの項目	
補正項目 (1~5)	
1 未臨界度補正 $[\rho_0]$ ^{III)}	-0.050 ± 0.002
2 径方向に対称な炉心相当とするためのドライバー引出し置換反応度値補正 $[\rho_0]$ ^{IV)}	1.349 ± 0.016
3 全挿入時の制御棒と安全棒の先端の密着面からのへこみ分の反応度値補正 $[\rho_0]$	0.160 ± 0.006
4 集合体密着面のステンレス鋼の反応度値補正 $[\rho_0]$	0.77 ± 0.16
5 集合体密着面間隙 2.1 mm 分の反応度値補正 $[\rho_0]$	0.85 ± 0.06
不確かさ項目 (a, b)	
a 温度測定系の校正の不確かさによる反応度の不確かさ $[\rho_0]$	± 0.036
b 両集合体間の距離の不確かさによる反応度の不確かさ $[\rho_0]$	± 0.008
1~3 の補正を行った余剰反応度と a, b も合わせた不確かさ $[\rho_0]$	5.702 ± 0.043
同上 $[\% \Delta k/k]$ ^{V)}	0.4549 ± 0.0034
1~5 の補正を行った余剰反応度と a, b も合わせた不確かさ $[\rho_0]$	7.33 ± 0.18
同上 $[\% \Delta k/k]$ ^{V)}	0.584 ± 0.014
計算や核データを用いた評価による不確かさ項目 (c~e)	
c 正炉周期法による反応度測定の不確かさ $[\%]$	(± 4.3)
c-i 1~3 の補正を行った余剰反応度に対する不確かさ $[\% \Delta k/k]$ ^{VI)}	± 0.020
c-ii 1~5 の補正を行った余剰反応度に対する不確かさ $[\% \Delta k/k]$ ^{VI)}	± 0.025
d 格子管外寸法の不確かさによる反応度の不確かさ $[\% \Delta k/k]$	± 0.031
e 燃料組成の不確かさによる反応度の不確かさ $[\% \Delta k/k]$	± 0.13
1~3 の補正を行った余剰反応度と a, b, c-i, d, e も合わせた不確かさ $[\% \Delta k/k]$	0.455 ± 0.135
1~5 の補正を行った余剰反応度と a, b, c-ii, d, e も合わせた不確かさ $[\% \Delta k/k]$	0.584 ± 0.136
実効増倍率	
1~3 の補正を行った余剰反応度と a, b, c-i, d, e も合わせた不確かさによる値	1.00457 ± 0.00136
1~5 の補正を行った余剰反応度と a, b, c-ii, d, e も合わせた不確かさによる値	1.00588 ± 0.00138

^{D)} 1987 年 6 月 1 日時点における片側集合体当たりによりドライバー燃料引出し EUDD を 88 本装荷した径方向に対称な炉心での実効増倍率

^{II)} この径方向に対称な炉心から、F127/18、F125/34、M127/18、M125/34 の位置で合計 4 本の EUDD 引出しを DUB 引出しに置換した片側集合体当たりにより EUDD を 86 本装荷した炉心での余剰反応度

^{III)} 核計装 CH#6 電流値 0.5007×10^{-7} A の原子炉出力での値

^{IV)} EUDD86 本の炉心から EUDD88 本の対称炉心への反応度差を補正するために、F127/18、F125/34、M127/18、M125/34 の位置で合計 4 本の DUB 引出しを EUDD 引出しに置換する反応度値の合計、これらの位置と等価であると考えて表 3.4 の F118/25、F134/27、M118/25、M134/27 での置換反応度値を使用

^{V)} いずれも、基準反応度 $1 \rho_0 = 0.0798\% \Delta k/k$ を、補正後の ρ_0 単位の余剰反応度とその不確かさに乗じたもの

^{VI)} いずれも、() 内に示す反応度測定の不確かさの相対値を、補正後の $\% \Delta k/k$ 単位の余剰反応度に乗じたもの

表 5.3 XV-2(45V) 炉心の実効増倍率^{D)}

一定の原子炉出力で運転時の余剰反応度 [ρ_0] ^{II) III)}	7.483 ± 0.019
実験による補正と不確かさの項目	
補正項目 (1~5)	
1 未臨界度補正 [ρ_0] ^{III)}	-0.1538 ± 0.0029
2 径方向に対称な炉心相当とするためのドライバー引出し置換反応度価値補正 [ρ_0] ^{IV)}	—
3 全挿入時の制御棒と安全棒の先端の密着面からのへこみ分の反応度価値補正 [ρ_0]	0.224 ± 0.011
4 集合体密着面のステンレス鋼の反応度価値補正 [ρ_0]	0.48 ± 0.12
5 集合体密着面間隙 2.1 mm 分の反応度価値補正 [ρ_0]	1.319 ± 0.090
不確かさ項目 (a, b)	
a 温度測定系の校正の不確かさによる反応度の不確かさ [ρ_0]	± 0.050
b 両集合体間の距離の不確かさによる反応度の不確かさ [ρ_0]	± 0.013
1~3 の補正を行った余剰反応度と a, b も合わせた不確かさ [ρ_0]	7.553 ± 0.056
同上 [% $\Delta k/k$] ^{V)}	0.4555 ± 0.0034
1~5 の補正を行った余剰反応度と a, b も合わせた不確かさ [ρ_0]	9.35 ± 0.16
同上 [% $\Delta k/k$] ^{V)}	0.564 ± 0.010
計算や核データを用いた評価による不確かさ項目 (c~e)	
c 正炉周期法による反応度測定の不確かさ [%]	(± 4.0)
c-i 1~3 の補正を行った余剰反応度に対する不確かさ [% $\Delta k/k$] ^{VI)}	± 0.018
c-ii 1~5 の補正を行った余剰反応度に対する不確かさ [% $\Delta k/k$] ^{VI)}	± 0.023
d 格子管外寸法の不確かさによる反応度の不確かさ [% $\Delta k/k$]	± 0.031
e 燃料組成の不確かさによる反応度の不確かさ [% $\Delta k/k$]	± 0.093
1~3 の補正を行った余剰反応度と a, b, c-i, d, e も合わせた不確かさ [% $\Delta k/k$]	0.456 ± 0.099
1~5 の補正を行った余剰反応度と a, b, c-ii, d, e も合わせた不確かさ [% $\Delta k/k$]	0.564 ± 0.101
実効増倍率	
1~3 の補正を行った余剰反応度と a, b, c-i, d, e も合わせた不確かさによる値	1.00458 ± 0.00100
1~5 の補正を行った余剰反応度と a, b, c-ii, d, e も合わせた不確かさによる値	1.00567 ± 0.00102

^{D)} 1988 年 3 月 28 日時点における片側集合体当たりにドライバー燃料引出し EUDD を 88 本装荷した径方向に対称な炉心での値

^{II)} 片側集合体当たりに EUDD を 88 本装荷した径方向に対称な炉心での値

^{III)} 核計装 CH#6 電流値 0.4995×10^{-7} A の原子炉出力時の値

^{IV)} 既に対称炉心であるためこの補正は不要

^{V)} いずれも、基準反応度 $1 \rho_0 = 0.0603\% \Delta k/k$ を、補正後の ρ_0 単位の余剰反応度とその不確かさに乗じたもの

^{VI)} いずれも、() 内に示す反応度測定の不確かさの相対値を、補正後の $\% \Delta k/k$ 単位の余剰反応度に乗じたもの

表 5.4 XV-2(65V) 炉心の実効増倍率^{D)}

一定の原子炉出力で運転時の余剰反応度 [ρ_0] ^{II) III)}	5.810 ± 0.022
実験による補正と不確かさの項目	
補正項目 (1~5)	
1 未臨界度補正 [ρ_0] ^{III)}	-0.0382 ± 0.0057
2 径方向に対称な炉心相当とするためのドライバー引出し置換反応度価値補正 [ρ_0] ^{IV)}	-3.159 ± 0.028
3 全挿入時の制御棒と安全棒の先端の密着面からのへこみ分の反応度価値補正 [ρ_0]	0.280 ± 0.014
4 集合体密着面のステンレス鋼の反応度価値補正 [ρ_0]	0.39 ± 0.12
5 集合体密着面間隙 2.1 mm 分の反応度価値補正 [ρ_0]	1.60 ± 0.12
不確かさ項目 (a, b)	
a 温度測定系の校正の不確かさによる反応度の不確かさ [ρ_0]	± 0.051
b 両集合体間の距離の不確かさによる反応度の不確かさ [ρ_0]	± 0.015
1~3 の補正を行った余剰反応度と a, b も合わせた不確かさ [ρ_0]	2.893 ± 0.065
同上 [% $\Delta k/k$] ^{V)}	0.1627 ± 0.0037
1~5 の補正を行った余剰反応度と a, b も合わせた不確かさ [ρ_0]	4.88 ± 0.18
同上 [% $\Delta k/k$] ^{V)}	0.275 ± 0.010
計算や核データを用いた評価による不確かさ項目 (c~e)	
c 正炉周期法による反応度測定の不確かさ [%]	(± 3.8)
c-i 1~3 の補正を行った余剰反応度に対する不確かさ [% $\Delta k/k$] ^{VI)}	± 0.0062
c-ii 1~5 の補正を行った余剰反応度に対する不確かさ [% $\Delta k/k$] ^{VI)}	± 0.010
d 格子管外寸法の不確かさによる反応度の不確かさ [% $\Delta k/k$]	± 0.036
e 燃料組成の不確かさによる反応度の不確かさ [% $\Delta k/k$]	± 0.083
1~3 の補正を行った余剰反応度と a, b, c-i, d, e も合わせた不確かさ [% $\Delta k/k$]	0.163 ± 0.090
1~5 の補正を行った余剰反応度と a, b, c-ii, d, e も合わせた不確かさ [% $\Delta k/k$]	0.275 ± 0.091
実効増倍率	
1~3 の補正を行った余剰反応度と a, b, c-i, d, e も合わせた不確かさによる値	1.00163 ± 0.00091
1~5 の補正を行った余剰反応度と a, b, c-ii, d, e も合わせた不確かさによる値	1.00275 ± 0.00092

^{D)} 1989 年 5 月 31 日時点における片側集合体当たりドライバー燃料引出し EUDD を 96 本装荷した径方向に対称な炉心での値

^{II)} 径方向に対称な炉心から、F128/17、F124/35、M128/17、M124/35 の 4 箇所で合計 4 本の DUB 引出しを EUDD 引出しに置換した片側集合体当たり EUDD を 98 本装荷した炉心での値

^{III)} 核計装 CH#6 電流値 0.4946×10^{-6} A の原子炉出力時の値

^{IV)} EUDD98 本の炉心から EUDD96 本の対称炉心への反応度差を補正するために、表 3.4 に示す F128/17、F124/35、M128/17、M124/35 の 4 箇所で合計 4 本の EUDD 引出しを DUB 引出しに置換する反応度価値の合計

^{V)} いずれも、基準反応度 $1 \rho_0 = 0.0562\% \Delta k/k$ を、補正後の ρ_0 単位の余剰反応度とその不確かさに乗じたもの

^{VI)} いずれも、() 内に示す反応度測定の不確かさの相対値を、補正後の $\% \Delta k/k$ 単位の余剰反応度に乗じたもの

表 5.5 XV-2(80V) 炉心の実効増倍率¹⁾

一定の原子炉出力で運転時の余剰反応度 [ρ_0] ^{II) III)}	5.416 ± 0.022
実験による補正と不確かさの項目	
補正項目 (1~5)	
1 未臨界度補正 [ρ_0] ^{III)}	-0.0283 ± 0.0045
2 径方向に対称な炉心相当とするためのドライバー引出し置換反応度値補正 [ρ_0] ^{IV)}	3.150 ± 0.027
3 全挿入時の制御棒と安全棒の先端の密着面からのへこみ分の反応度値補正 [ρ_0]	0.280 ± 0.014
4 集合体密着面のステンレス鋼の反応度値補正 [ρ_0]	0.34 ± 0.11
5 集合体密着面間隙 2.1 mm 分の反応度値補正 [ρ_0]	1.60 ± 0.11
不確かさ項目 (a, b)	
a 温度測定系の校正の不確かさによる反応度の不確かさ [ρ_0]	± 0.046
b 両集合体間の距離の不確かさによる反応度の不確かさ [ρ_0]	± 0.015
1~3 の補正を行った余剰反応度と a, b も合わせた不確かさ [ρ_0]	8.818 ± 0.062
同上 [% $\Delta k/k$] ^{V)}	0.5279 ± 0.0037
1~5 の補正を行った余剰反応度と a, b も合わせた不確かさ [ρ_0]	10.76 ± 0.17
同上 [% $\Delta k/k$] ^{V)}	0.644 ± 0.010
計算や核データを用いた評価による不確かさ項目 (c~e)	
c 正炉周期法による反応度測定の不確かさ [%]	(± 3.8)
c-i 1~3 の補正を行った余剰反応度に対する不確かさ [% $\Delta k/k$] ^{VI)}	± 0.020
c-ii 1~5 の補正を行った余剰反応度に対する不確かさ [% $\Delta k/k$] ^{VI)}	± 0.025
d 格子管外寸法の不確かさによる反応度の不確かさ [% $\Delta k/k$]	± 0.041
e 燃料組成の不確かさによる反応度の不確かさ [% $\Delta k/k$]	± 0.078
1~3 の補正を行った余剰反応度と a, b, c-i, d, e も合わせた不確かさ [% $\Delta k/k$]	0.528 ± 0.090
1~5 の補正を行った余剰反応度と a, b, c-ii, d, e も合わせた不確かさ [% $\Delta k/k$]	0.644 ± 0.092
実効増倍率	
1~3 の補正を行った余剰反応度と a, b, c-i, d, e も合わせた不確かさによる値	1.00531 ± 0.00091
1~5 の補正を行った余剰反応度と a, b, c-ii, d, e も合わせた不確かさによる値	1.00648 ± 0.00093

¹⁾ 1989年3月10日時点における片側集合体当たりにはドライバー燃料引出し EUDD を 104 本装荷した径方向に対称な炉心での値

^{II)} 径方向に対称な炉心から、F128/17、F124/35、M128/17、M124/35 の位置で合計 4 本の EUDD 引出しを DUB 引出しに置換した片側集合体当たりには EUDD を 102 本装荷した炉心での値

^{III)} 核計装 CH#6 電流値 0.4949×10^{-6} A の原子炉出力時の値

^{IV)} EUDD102 本の炉心から EUDD104 本の対称炉心への反応度差を補正するために、F128/17、F124/35、M128/17、M124/35 の位置で合計 4 本の DUB 引出しを EUDD 引出しに置換する反応度値で、表 3.4 に示すこれらの位置と等価な F124/17、F128/35、M124/17、M128/35 の位置で合計 4 本の DUB 引出しを EUDD 引出しに置換する反応度値を使用

^{V)} いずれも、基準反応度 $1 \rho_0 = 0.0599\% \Delta k/k$ を、補正後の ρ_0 単位の余剰反応度とその不確かさに乗じたもの

^{VI)} いずれも、() 内に示す反応度測定の不確かさの相対値を、補正後の $\% \Delta k/k$ 単位の余剰反応度に乗じたもの

表 5.6 XV-2(95V) 炉心の実効増倍率¹⁾

一定の原子炉出力で運転時の余剰反応度 [ρ_0] ^{II) III)}	7.987 ± 0.066
実験による補正と不確かさの項目	
補正項目 (1~5)	
1 未臨界度補正 [ρ_0] ^{III)}	-0.0518 ± 0.0052
2 径方向に対称な炉心相当とするためのドライバー引出し置換反応度値補正 [ρ_0] ^{IV)}	—
3 全挿入時の制御棒と安全棒の先端の密着面からのへこみ分の反応度値補正 [ρ_0]	0.280 ± 0.014
4 集合体密着面のステンレス鋼の反応度値補正 [ρ_0]	0.25 ± 0.11
5 集合体密着面間隙 2.1 mm 分の反応度値補正 [ρ_0]	1.56 ± 0.10
不確かさ項目 (a, b)	
a 温度測定系の校正の不確かさによる反応度の不確かさ [ρ_0]	± 0.039
b 両集合体間の距離の不確かさによる反応度の不確かさ [ρ_0]	± 0.015
1~3 の補正を行った余剰反応度と a, b も合わせた不確かさ [ρ_0]	8.215 ± 0.080
同上 [% $\Delta k/k$] ^{V)}	0.5452 ± 0.0053
1~5 の補正を行った余剰反応度と a, b も合わせた不確かさ [ρ_0]	10.03 ± 0.17
同上 [% $\Delta k/k$] ^{V)}	0.665 ± 0.011
計算や核データを用いた評価による不確かさ項目 (c~e)	
c 正炉周期法による反応度測定の不確かさ [%]	(± 3.7)
c-i 1~3 の補正を行った余剰反応度に対する不確かさ [% $\Delta k/k$] ^{VI)}	± 0.020
c-ii 1~5 の補正を行った余剰反応度に対する不確かさ [% $\Delta k/k$] ^{VI)}	± 0.025
d 格子管外寸法の不確かさによる反応度の不確かさ [% $\Delta k/k$]	± 0.043
e 燃料組成の不確かさによる反応度の不確かさ [% $\Delta k/k$]	± 0.078
1~3 の補正を行った余剰反応度と a, b, c-i, d, e も合わせた不確かさ [% $\Delta k/k$]	0.545 ± 0.092
1~5 の補正を行った余剰反応度と a, b, c-ii, d, e も合わせた不確かさ [% $\Delta k/k$]	0.665 ± 0.094
実効増倍率	
1~3 の補正を行った余剰反応度と a, b, c-i, d, e も合わせた不確かさによる値	1.00548 ± 0.00093
1~5 の補正を行った余剰反応度と a, b, c-ii, d, e も合わせた不確かさによる値	1.00670 ± 0.00095

¹⁾ 1988 年 7 月 27 日時点における片側集合体当たりにはドライバー燃料引出し EUDD を 104 本装荷した径方向に対称な炉心での値

^{II)} EUDD を 104 本装荷した径方向に対称な炉心での値

^{III)} 核計装 CH#6 電流値 0.2028×10^{-6} A の原子炉出力時の値

^{IV)} 既に対称炉心であるためこの補正は不要

^{V)} いずれも、基準反応度 $1 \rho_0 = 0.0664\% \Delta k/k$ を、補正後の ρ_0 単位の余剰反応度とその不確かさに乗じたもの

^{VI)} いずれも、() 内に示す反応度測定の不確かさの相対値を、補正後の $\% \Delta k/k$ 単位の余剰反応度に乗じたもの

6. 実効増倍率の計算

実効増倍率の計算は、MVP3 コードと核データ JENDL-4.0 または JENDL-5 を用いて行った。制御棒と安全棒は、臨界性の実験評価と対応するように全挿入とした。セル内の燃料板や模擬物質板は、これらの大きさをそのままモデル化し、例えば、引出し内に装填した燃料板と上側の格子管の間にできる隙間もモデルに取り入れた。固定側と移動側の両集合体間の間隙や引出し前端面のステンレス鋼はその形状も含めてモデル化した。プルトニウム燃料板はステンレス鋼の被覆とその中のプルトニウム - アルミニウム合金に分けてモデル化した。ステンレス被覆の厚さはどの方向も同じとして、その内側に均一にプルトニウム - アルミニウム合金を配置した。プルトニウム燃料の組成のうち ^{241}Pu と ^{241}Am の原子個数密度は、臨界性の実験評価日での値となるように分析値から更新して使用した。ウランの燃料板やブロックに塗布されている塗料は極めて薄い層なので、ウランに含めてモデル化した。なお、JENDL-4.0 と JENDL-5 とともに本実験で用いたポリスチレンの熱中性子散乱則のデータが無いので、ポリエチレンのデータを代用として用いた¹⁾。

このように詳細なモデル化の結果得た実効増倍率の計算値を実験値と比較して表 6.1 に示す。実験値は、表 5.2～表 5.6 の 1～3 の補正を行った値である。実験値 (E) と計算値 (C) の比較を $C/E - 1$ として図 6.1 に示す。

JENDL-4.0 を用いると計算は実験値を 0.5% 程度過大評価した。特に、ポリスチレンのボイドが無いかわりボイド率が小さくて中性子エネルギー Spektrum が熱エネルギーに近い炉心ほどこの過大評価が大きい。今回の XV 炉心系と同じく発泡ポリスチレン板で減速材を模擬して、燃料のプルトニウム富化度がより高い炉心を模擬した FCA XXII 炉心系の実験において JENDL-4.0 を用いた解析結果が既に公開されている [23]。

表 6.1 実効増倍率の計算結果

炉心	XV-1	XV-2(45V)	XV-2(65V)	XV-2(80V)	XV-2(95V)
実験値 (E)	1.0046 ± 0.0014	1.0046 ± 0.0010	1.0016 ± 0.0009	1.0053 ± 0.0009	1.0055 ± 0.0009
計算値 (C) JENDL-4.0 ¹⁾	1.01001	1.01013	1.00760	1.01067	1.00926
計算値 (C) JENDL-5 ¹⁾	1.01263	1.01220	1.00894	1.01135	1.00954
C / E JENDL-4.0	1.0054	1.0055	1.0060	1.0053	1.0037
C / E JENDL-5	1.0080	1.0076	1.0073	1.0060	1.0040

¹⁾ モンテカルロ計算の統計誤差はいずれの炉心も ±0.00002

¹⁾ また、ドライバー燃料引出しの模擬物質板として黒鉛板を用いた。この黒鉛板の密度は、理論密度であるおおよそ 2.26 g/cm^3 の 75% 程度である。すなわち、実験に用いた黒鉛板は空孔率 25% 程度である。JENDL-5 に基づく MVP ライブラリーには、この空孔率を 0%、10%、30% と 3 段階に変えた黒鉛の熱中性子散乱則が用意されているので、空孔率の影響を調べるために空孔率 0% と 30% の 2 つのライブラリーで計算を行った。その結果、2 つの空孔率の間で、実効増倍率にはモンテカルロ計算の統計誤差程度の差しか生じず、空孔率の熱中性子散乱への影響は、本炉心では無視できることがわかった。

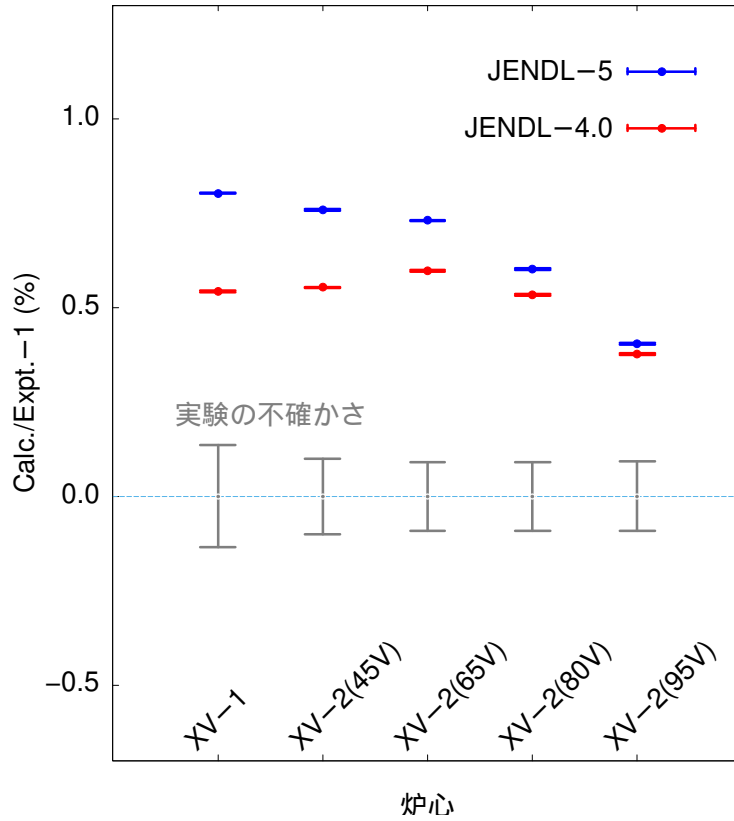


図 6.1 XV 炉心系の実効増倍率の実験値と計算値の比較

JENDL-4.0 を用いた XV 炉心系の計算結果の過大評価は、XXII 炉心系と同じ傾向となった。

JENDL-5 を用いると、JENDL-4.0 よりも過大評価が大きくなった。特に、中性子エネルギースペクトルが熱エネルギーに近い炉心ほどこの過大評価が顕著となった。

7. まとめ

1986年から1989年にかけてFCAで実施した高転換軽水炉の核特性を模擬した臨界実験のデータを不確かさを含めて詳細な見直しを行い、臨界性を再評価した。これは、旧日本原子力研究所でこれまでに実施された臨界実験データの再評価の一環として実施したものである。

FCAの高転換軽水炉模擬炉心では、減速材としてポリスチレン板や発泡ポリスチレン板を用いることにより、中速系から高速系に至る幅広い中性子エネルギースペクトル場を形成し、核データの検証に有効な積分データを取得した。さらに、核データJENDL-4.0及びJENDL-5を用いてMVP3コードにより実験炉心を詳細に模擬した解析を実施した。実効増倍率の計算結果と実験結果の間で生じた相違については、今後、用いた核データの面から詳細な分析を行う必要がある。

今回再評価した臨界実験データが新たな核データのベンチマークテストに利用されていくことを期待する。

謝辞

本報告書で再評価を行ったFCAの実験データは、当時、実験を行った旧日本原子力研究所原子炉工学部高速炉物理研究室の室員とFCAの運転管理を担った多くの方々のご尽力の結果として得たものであり、これらの皆様に深甚なる感謝の意を表します。また、本報告書をまとめるに当たって、多くの議論と助力をいただいた原子力基礎工学研究センター炉物理・熱流動研究グループのグループ員及びバックエンド技術部廃止措置第1課の課員の皆様に厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- [1] Edlund, M. C. , High Conversion Ratio Plutonium Recycle in Pressurized Water Reactors, *Annals of Nuclear Energy*, vol. 2, , 1975, pp. 801–807.
- [2] Oldekop, W. , Berger, H.-D. , Zeggel, W. , General Features of Advanced Pressurized Water Reactors with Improved Fuel Utilization, *Nuclear Technology*, vol. 59, no. 2, 1982, pp. 212–227.
- [3] Broeders, C. H. M. , Donne, M. D. , Conceptual Design of a (Pu,U)O₂ Core with a Tight Fuel Rod Lattice for an Advanced Pressurized Light Water Reactor, *Nuclear Technology*, vol. 71, no. 1, 1985, pp. 82–95.
- [4] Markl, H. , Goetzmann, C. A. , Moldaschl, H. , KWU's High Conversion Reactor Concept - an Economical Evolution of Modern Pressurized Water Reactor Technology Toward Improved Uranium Ore Utilization, *Nuclear Technology*, vol. 80, no. 1, 1988, pp. 65–72.
- [5] Zeggel, W. , et al., Analytical Methods in the High Conversion Reactor Core Design, *Nuclear Technology*, vol. 80, no. 2, 1988, pp. 292–310.
- [6] Chawla, R. , et al., Reactivity and Reaction Rate Ratio Changes with Moderator Voidage in a Light Water High Converter Reactor Lattice, *Nuclear Technology*, vol. 67, no. 3, 1984, pp. 360–380.
- [7] Seiler, R. , et al., Investigation of the Void Coefficient and Other Integral Parameters in the PROTEUS-LWHCR Phase II Program, *Nuclear Technology*, vol. 80, no. 2, 1988, pp. 311–323.
- [8] Ishiguro, Y. , Development of High Conversion Light Water Reactor, *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 26, no. 1, 1989, pp. 33–36.
- [9] 奥村啓介他, 高転換軽水炉格子の炉心概念設計, JAERI-M 90-096, 1990, 169p.
- [10] 伝熱流動研究室, 高転換軽水炉の熱水力工学の研究, JAERI-M 91-055, 1991, 198p.
- [11] 秋江拓志他, 軸方向非均質炉心型高転換軽水炉の炉心最適化の検討, JAERI-M 92-030, 1992, 68p.
- [12] Osugi, T. , et al., Reactor Physics Experiments and Analyses on High Conversion Light Water Reactor, *Proceedings of ANS International Reactor Physics Conference*, vol. 2, pp. 361–370, Jackson Hole, Wyoming, USA, September 1988.
- [13] Osugi, T. , et al., Investigation on Criticality and Infinite Multiplication Factor of High Conversion Light Water Reactor Using Zone-Type FCA-HCLWR Core Fueled with Enriched Uranium, *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 26, no. 5, 1989, pp. 477–491.
- [14] Ohbu, M. , et al., Measurements of Reaction Rates in Zone-Type Cores of Fast Critical Assembly Simulating High Conversion Light Water Reactor, *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 26, no. 11, 1989, pp. 993–1001.

- [15] Okajima, S. , et al., Experimental Study on Reactivity Worth for Absorber Material in High Conversion Light Water Reactor Using FCA-HCLWR Core Fueled with Enriched Uranium, *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 27, no. 10, 1990, pp. 950–959.
- [16] 大部誠他, 高転換軽水炉を模擬した FCA XIV 炉心における反応率の測定, JAERI-M 90-052, 1990, 52p.
- [17] 岡嶋成晃他, FCA 高転換軽水炉模擬実験における反応度値実験, JAERI-M 90-042, 1990, 53p.
- [18] 大野秋男, 大杉俊隆, 佐藤邦雄, FCA に於ける高転換軽水炉 (HCLWR) 模擬炉心 (Phase-1) の出力分布の測定, JAERI-M 91-186, 1991, 63p.
- [19] 桜井健, 岡嶋成晃, 大杉俊隆, 高転換軽水炉を模擬した FCA XIV-1 炉心における中心セル反応度値を用いた無限増倍率 k_{∞} の測定, JAERI-M 91-014, 1991, 25p.
- [20] Osugi, T. , et al., Experimental Study on Criticality and Reactivity Worth in High Conversion Light Water Reactor using FCA-HCLWR Core, *Proceedings of International Conference on the Physics of Reactors : Operation, Design and Computation*, vol. 3, pp. PI-93 – PI-102, Marseille France, 1990.
- [21] 大井川宏之他, FCA XV 炉心における B_4C 模擬制御棒半挿入体系の出力分布測定と解析, JAERI-M 91-096, 1991, 39p.
- [22] Fukushima, M. , FCA IX-7 Assembly Experiments: 20 % Enriched Uranium Metal Core Surrounded by Depleted Uranium Metal Blanket, *International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments*, Organization for Economic Co-operation and Development / Nuclear Energy Agency, 2018.
- [23] Fukushima, M. , Andoh, M. , Nagaya, Y. , Experiments on Criticality and Reactivity Worths in the FCA-XXII-1 Assembly Simulating Highly Enriched MOX Fueled Tight Lattice LWR Cores, *Nuclear Science and Engineering*, vol. 199, no. 1, 2025, pp. 18–41.
- [24] 長家康展他, MVP / GMVP 第 3 版 : 連続エネルギー法及び多群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード (翻訳資料), JAEA-DATA / CODE 2016-019, 2017, 450p.
- [25] Shibata, K. , et al., JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering, *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 48, no. 1, 2011, pp. 1–30.
- [26] Iwamoto, O. , et al., Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 5: JENDL-5, *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 60, no. 1, 2023, pp. 1–60.
- [27] 弘田実弥, FCA における高速炉実験とその解析, JAERI 1289, 1984, 132p.
- [28] Hazama, T. , Chiba, G. , Sugino, K. , Development of a Fine and Ultra-Fine Group Cell Calculation Code SLAROM-UF for Fast Reactor Analyses, *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 43, no. 8, 2006, pp. 908–918.
- [29] Fowler, T. B. , Nuclear Reactor Analysis Code CITATION, ORNL-TM 2496 Rev2, 1981.
- [30] Benoist, P. , Streaming Effects and Collision Probabilities in Lattices, *Nuclear Science and Engineering*, vol. 34, no. 3, 1968, pp. 285–307.

- [31] 飯島進他, 高速炉核特性計算コードシステム EXPARAM, JAERI-DATA / CODE 2004-016, 2004, 91p.
- [32] 飯島進, 岡嶋成晃, 多群拡散摂動計算コード PERKY; 2002 年版, JAERI-DATA / CODE 2002-023, 2002, 44p.
- [33] Keepin, G. R. , Wimett, T. F. , Zeigler, R. K. , Delayed Neutrons from Fissionable Isotopes of Uranium, Plutonium, and Thorium, Physical Review, vol. 107, , Aug 1957, pp. 1044–1049.
- [34] Alcouffe, R. E. , et al., DANTSYS : A Diffusion Accelerated Neural Particle Transport Code System, LA 12969-M, 1995.

付録

A. XV 炉心系の特性試験の詳細

A.1 XV-1 炉心の特性試験

A.1.1 実験炉心

XV-1 炉心は、1987 年 5 月 21 日から臨界近接を開始して、片側集合体当たりの引出し装荷本数が、Pu08A 55 本、Pu08B 2 本、Pu08C 20 本、SSB 40 本、EUDD 84 本、DUB 288 本、SCR B 4 組 8 本の炉心として、5 月 27 日に臨界に到達し 1988 年 3 月 18 日まで実験を行った。この炉心で片側集合体当たり DUB 引出し 4 本を EUDD 引出しに置換し、2 章に記載した EUDD 引出し装荷本数を 88 本とした径方向に対称な炉心に整形して実効増倍率を評価した。

A.1.2 制御棒校正曲線、温度係数と集合体密着面間隙係数の測定

片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数を 86 本として 2 組の制御棒、CR#1 と CR#2 の校正を行った。安全棒 SR#3 の 50 mm から全挿入による反応度を基準反応度 $1 \rho_0$ と定義して、これを基にして置換法で制御棒校正を行った。後に、正炉周期法によりこの $1 \rho_0$ を $\% \Delta k/k$ 単位で求める。置換法の各ステップで等しくする原子炉の出力レベルは、核計装 CH#6 の電流値でモニターし、その電流値は $0.5 \times 10^{-7} \text{A}$ レベルであった。制御棒校正時の各ステップの SR#3 や CR#1、CR#2 の配置等のデータを表 A.1 に示す。

各ステップ間に要した時間は 10 分程度と短く温度変化による反応度変化は小さい。集合体密着面間隙の変化による反応度変化は温度変化によるものよりも小さい。しかしながら、これらの反応度変化を補正する必要がある。この補正のためには反応度の温度係数と間隙係数が必要となるものの、これらの係数を求めるには制御棒の校正結果を用いる。

そこで、最初に、これらの補正を行わずに制御棒校正実験のデータ処理を行い制御棒校正曲線を算出し、これを基にして温度係数と間隙係数を求める。次に、これらを用いて温度変化や間隙変化による反応度変化の補正を行い、再度、制御棒校正実験のデータ処理を行う。さらに、この再度の処理の結果得た制御棒校正曲線を基にして温度係数と間隙係数を求めるという繰り返しの処理を行った。

まず、ステップ 1 から 9 のデータを用いて CR#1 の校正曲線を算出した。CR#1 の反応度値は、全挿入である 0.67 mm (ステップ 1、2) を $0 \rho_0$ とし、SR#3 との置換により、48.26 mm (ステップ 3、4) が $1 \rho_0$ 、103.82 mm (ステップ 5、6) が $2 \rho_0$ 、171.52 mm (ステップ 7、8) が $3 \rho_0$ 、265.25 mm (ステップ 9) が $4 \rho_0$ 、となる。これらは CR#1 の先端の位置である。

FCA のこれまでの多くの炉心の経験から、これらの 5 点のデータを同時にある関数にフィットするのでは

表 A.1 XV-1 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正前の制御棒校正曲線測定データ

ステップ	時刻 ^{Ⅰ)}	SR#3 位置 ^{Ⅱ)} [mm]	CR#1 位置 ^{Ⅱ)} [mm]	CR#2 位置 ^{Ⅱ)} [mm]	炉心温度 [°C]	密着面間隙 [mm]
1	14:28	0.29	0.67	302.72	18.66	-0.059
2	14:38	50.01 ^{Ⅲ)}	0.67	195.63	18.63	-0.059
3	14:46	0.29	48.26	195.63	18.62	-0.059
4	14:55	50.01	48.26	124.13	18.60	-0.059
5	15:03	0.29	103.82	124.13	18.58	-0.059
6	15:16	50.00	103.82	66.14	18.56	-0.059
7	15:24	0.29	171.52	66.14	18.54	-0.059
8	15:33	50.01	171.52	16.64	18.54	-0.059
9	15:44	0.29	265.25	16.64	18.52	-0.059
10	15:58	49.99	202.51	0.07	18.50	-0.058
11 ^{Ⅳ)}	16:08	0.29	202.51	46.62	18.48	-0.058

Ⅰ) 実験日 1987/5/29

Ⅱ) 先端の位置の表示

Ⅲ) SR#3 位置の表示の微小なずれのため 50.01 mm や 49.99 mm の場合もあった。

Ⅳ) ステップ 11 は制御棒校正には用いない。校正結果の不確かさを確認するために用いる。

図 2.1、図 2.2 の径方向に対称な炉心から、F127/18、F125/34、M127/34、M125/18 の合計 4 本の EUDD 引出しを DUB 引出しに置き換え、片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数を 86 本とした炉心で校正実験実施、核計装 CH#6 は 0.5×10^{-7} A レベル

なくて、0.67 mm から順番に 4 点ずつのデータを 3 次式に当てはめた。これにより、これら 4 点の範囲をカバーする制御棒校正曲線を、制御棒位置を x mm、その位置の制御棒値を y ρ_0 とする以下の 3 次式として求めた。

$$y = a \left(\frac{x}{100} \right)^3 + b \left(\frac{x}{100} \right)^2 + c \left(\frac{x}{100} \right) + d \quad (\text{A.1})$$

3 次式の係数、a、b、c、d を表 A.2 に示す。任意の位置の制御棒反応度値は、この 3 次式で内挿して求める。3 次式の係数の各セットの適用範囲もこの表に示す。これは、最小二乗法によるフィッティングではなくて 3 次式への当てはめなので、これに伴う不確かさは生じない。

同様に、CR#2 については、ステップ 1 から 10 のデータを用いて校正曲線を算出した。まず、全挿入である 0.07 mm (ステップ 10) を基準 0 ρ_0 とした。遡って、ステップ 9 と 8 で、CR#2 を 0.07 mm から 16.64 mm まで引き抜いた分の反応度値と補償するのは、SR#3 の 1 ρ_0 挿入分から CR#1 の 202.51 mm から 265.25 mm までの引き抜き分の反応度値を差し引いたものとなる。後者は、上記の CR#1 の校正曲線の式より

表 A.2 XV-1 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正前の制御棒 CR#1 校正曲線

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]
				a	b	c	d	
0.67	48.26	103.82	171.52	0.017779	-0.31938	2.2534	-0.015083	0.67 ~ 103.82
48.26	103.82	171.52	265.25	0.0035648	-0.27338	2.2092	-0.0028680	103.82 ~ 265.25

表 A.3 XV-1 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正前の制御棒 CR#2 校正曲線

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]
				a	b	c	d	
0.07	16.64	66.14	124.13	0.10697	-0.49649	2.3697	-0.0016585	0.07 ~ 66.14
16.64	66.14	124.13	195.63	0.013145	-0.30236	2.2629	0.011160	66.14 ~ 124.13
66.14	124.13	195.63	302.72	-0.0036506	-0.23754	2.1866	0.038136	124.13 ~ 302.72

算出した結果、 $4.0\rho_0 - 3.3794\rho_0 = 0.6206\rho_0$ であった。したがって、CR#2 の 16.64 mm の反応度値は、 $1.0\rho_0 - 0.6206\rho_0 = 0.3794\rho_0$ となる。66.14 mm(ステップ 7 と 6) が $1.3794 \rho_0$ 、124.13 mm(ステップ 5 と 4) が $2.3794 \rho_0$ 、195.63 mm(ステップ 3 と 2) が $3.3794 \rho_0$ 、302.72 mm(ステップ 1) が $4.3794 \rho_0$ となる。CR#1 と同様に、0.07 mm から遡って順番に 4 点ずつのデータを 3 次式に当てはめ、その係数、a、b、c、d を表 A.3 に示す。

ここで、46.62 mm(ステップ 11) は以下の理由により制御棒校正には用いない。後の表 A.7 に示すように、ステップ 11 以外では補正すべきステップ間の温度変化が全て上昇方向であるが、ステップ 11 ではこの温度変化が逆に低下方向であり、このステップ 11 のみ隣のステップとの間の温度変化補正が他のステップ間の温度変化補正よりも著しく大きくなる。温度係数を求める前には、まず、温度変化の補正無しで制御棒校正を行うので、この補正が大きくなると適切な校正を行うことができないので、ステップ 11 は校正に用いるデータより除外する。

このように 3 次式で当てはめたが、データ点間(ステップ間)で制御棒校正曲線は 1 次式で近似でき、この傾きが $c/100$ である。すなわち、制御棒の 1 mm 当たりの反応度値は、おおよそ $2/100 = 1/50\rho_0$ であり、これは、大部分の位置で制御棒の 50 mm から 70 mm の移動距離が $1 \rho_0$ に相当することからも導くことができる。CR#1、CR#2 や SR#3 の移動の片端での位置の不確かさは ± 0.05 mm である。50 mm の移動距離が $1 \rho_0$ に相当するとして、これを反応度の不確かさに換算すると $\pm 0.05\text{mm} \times 1/50\rho_0/\text{mm} = \pm 0.001\rho_0$ となる。70 mm の移動距離が $1 \rho_0$ に相当とすれば、これより 30% ほど小さな不確かさとなるが、反応度に関する不確かさ評価には $\pm 0.001\rho_0$ を採用する。

制御棒校正の不確かさは、基準となる SR#3 の移動距離 50 mm の不確かさによる $1 \rho_0$ の不確かさを基にして、上記の傾き $c/100$ の不確かさとして評価する。正炉周期法による $1 \rho_0$ の $\% \Delta k/k$ 単位での測定の不確か

さは、これとは別に 4.1 節に記述する。SR#3 の移動の片端での位置再現性による反応度の不確かさは $\pm 0.001 \rho_0$ なので、 $1 \rho_0$ の不確かさは移動距離 50 mm の両端を合わせて $\pm\sqrt{0.001^2 \times 2} = \pm 0.0014 \rho_0$ ($\pm 0.14\%$) となる。これと置換する CR#1 や CR#2 の移動距離もおおよそ 50 mm なので、 ρ_0/mm 単位の傾き $c/100$ の不確かさは、 $1 \rho_0$ と CR#1 や CR#2 の 50 mm の移動の不確かさを合わせて $\pm\sqrt{0.14^2 \times 2} = \pm 0.20\%$ となる。制御棒の移動距離が 50 mm より小さな反応度差を制御棒との置換法で測定する時、この傾きの不確かさを基に反応度差の不確かさを求める。

制御棒の移動距離が 50 mm より大きな時には、個々の場合で反応度差の不確かさを評価する。例えば、CR#1 を 0.67 mm の全挿入から 120.00 mm まで引き抜く時の制御棒反応度値の不確かさは以下のように評価する。

まず、CR#1 の校正時の第 5、6 ステップ 103.82 mm が 120.00 mm の直近の手前となるが、0.67 mm からこの 103.82 mm まで引き抜く時の反応度値の不確かさを考える。各ステップで SR#3 の 50 mm 移動による $1 \rho_0$ の不確かさはこれまでと同じく $\pm 0.0014 \rho_0$ であり、校正時にステップ 5、6 の $2 \rho_0$ に至るまでにこれが 2 回積み重なる。さらに、校正時の CR#1 の位置 0.67 mm と 103.82 mm の両端にはいずれも ± 0.05 mm の不確かさが伴い、これらは、それぞれ $\pm 0.001 \rho_0$ に相当する。ここで、 $2 \rho_0$ に至る途中のステップの CR#1 の位置 48.26 mm は、SR#3 の $2 \rho_0$ の積み重なりには直接関らないので、この位置の不確かさは $2 \rho_0$ の不確かさには寄与しない。これらから、校正時の 103.82 mm の $2 \rho_0$ の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.0014^2 \times 2 + 0.001^2 \times 2} = \pm 0.0024 \rho_0$$

となる。

次に、CR#1 の位置 103.82 mm から 120.00 mm の差 16.18 mm の反応度値は制御棒校正から $0.2631 \rho_0$ となる。校正の不確かさ $\pm 0.20\%$ によるこの反応度値の不確かさは

$$\pm 0.2631 \times 0.0020 = \pm 0.00053 \rho_0$$

となる。これら 2 つの寄与が制御棒校正に伴う不確かさである。

さらに、引き抜き時に動かす CR#1 の両端の 0.67 mm と 120.00 mm には、いずれも ± 0.05 mm の不確かさがありこれは $\pm 0.001 \rho_0$ に相当する。したがって、CR#1 を 0.67 mm から 120.00 mm まで全挿入する時の反応度値の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.0024^2 + 0.00053^2 + 0.001^2 \times 2} = \pm 0.0028 \rho_0$$

となる。

ここで、仮に、ステップ 7、8 の CR#1 位置 171.52 mm の $3 \rho_0$ の不確かさと 171.52 mm から 120.00 mm に戻る CR#1 反応度値の校正の不確かさを用いると、この戻る区間の不確かさを二重に含むことになり過大評価になる。

温度係数と集合体密着面間隙係数は、表 A.4 のように、温度と間隙をそれぞれ大きく変化させた 2 つの臨界データから測定した。しかし、間隙を全く変化させずに温度を変えたり、その逆を行うことはできなかった。そこで、反応度は温度変化と間隙変化について互いに独立に変化するとして、温度係数を $f_T \rho_0/^\circ\text{C}$ と間隙係

表 A.4 XV-1 炉心における温度係数と間隙係数の測定データ (温度変化と間隙変化による反応度変化補正前の制御棒校正曲線を使用)

測定項目	実験日 ¹⁾	CR#1		CR#2		CR 2 本	温度	間隙
	Run No.	位置 [mm]	反応度価値 [ρ_0]	位置 [mm]	反応度価値 [ρ_0]	反応度価値 合計 [ρ_0]	[°C]	[mm]
温度係数	5/29 No.13	100.01	1.9368	128.97	2.4553	4.3921	18.42	-0.058
	6/2 No.2	100.01	1.9368	86.90	1.7579	3.6947	27.83	-0.026
	差				0.6974	0.6974	-9.41	-0.032
間隙係数	6/4 No.8	100.00	1.9367	105.79	2.0823	4.0190	20.91	0.402
	6/4 No.10	100.00	1.9367	117.70	2.2772	4.2139	20.72	-0.043
	差				-0.1949	-0.1949	0.19	0.445

¹⁾ いずれも 1987 年

図 2.1、図 2.2 の径方向に対称な炉心から、F127/18、F125/34、M127/34、M125/18 の合計 4 本の EUDD 引出しを DUB 引出しに置き換え、片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数を 86 本とした炉心で実験実施、核計装 CH#6 は 0.5×10^{-7} A レベル

数を $f_G \rho_0 / \text{mm}$ とすると、各係数の測定のための各セットの臨界データ間の差から、連立方程式

$$0.6974(\pm 0.0042) = -9.41(\pm 0.14) \times f_T + -0.032(\pm 0.028) \times f_G \quad (\text{A.2})$$

$$-0.1949(\pm 0.0020) = 0.19(\pm 0.014) \times f_T + 0.445(\pm 0.028) \times f_G \quad (\text{A.3})$$

を立てることができる。ともに、左辺は各セットの臨界データ間の 2 本の CR の反応度価値の合計の差、右辺第 1 項は温度係数に温度差を乗じたもので、同第 2 項は間隙係数に間隙の差を乗じたものである。反応度の差、温度や間隙の差の不確かさは () 内に示す。これら不確かさの評価については以下に記述する。

温度係数を測定する 2 つの Run では集合体を分離、密着させて全ての制御棒 CR と安全棒 SR を動かした。このため、2 つの Run の間の反応度の差の不確かさは、CR と SR の位置再現性と CR の校正の不確かさから求めた。まず、同じ位置に戻したものの、2 つの Run の間で動かした合計 7 組の CR と SR の移動前後の位置再現性による反応度の不確かさは $\pm \sqrt{0.001^2 \times 2 \times 7} = \pm 0.0037 \rho_0$ である。2 つの Run での CR#2 の移動前後の位置は校正時のステップ 4、5 を跨ぐ。したがって、2 つの Run の反応度差の不確かさは、この CR#2 の移動前後の位置再現性による不確かさと校正の不確かさも合わせて

$$\pm \sqrt{0.0037^2 + 0.001^2 \times 2 + ((2.4553 - 2.3794) \times 0.002)^2 + ((2.3794 - 1.7579) \times 0.002)^2} = \pm 0.0042 \rho_0$$

となる。

間隙係数の測定では、6 組の安全棒 SR は 2 つの Run の間で動かさず、CR#1 と CR#2 を動かし、CR#2 の移動前後の位置は校正時のステップは跨がない。したがって、2 つの Run の反応度差の不確かさは、CR#1 と CR#2 の移動前後の位置再現性による不確かさと校正の不確かさから

$$\pm \sqrt{0.001^2 \times 2 \times 2 + ((2.2772 - 2.0823) \times 0.002)^2} = \pm 0.0020 \rho_0$$

となる。

温度差の不確かさは、温度係数の測定では集合体の分離と密着を行ったため $\pm\sqrt{0.1^2 \times 2} = \pm 0.14^\circ\text{C}$ である。間隙係数の測定では集合体を分離したものの分離の距離は数 mm と僅かで、集合体冷却風の方向は変わらず温度の時間変化は密着を保ったまま測定を行う場合と同じであったことから $\pm\sqrt{0.01^2 \times 2} = \pm 0.014^\circ\text{C}$ である。間隙差の不確かさは、いずれの測定も集合体の分離と密着を行ったため、 $\pm\sqrt{0.02^2 \times 2} = \pm 0.028 \text{ mm}$ である。

これらを f_T と f_G について解くと、温度係数と間隙係数は

$$\begin{aligned} f_T &= \frac{0.6974(\pm 0.0042) \times 0.445(\pm 0.028) - (-0.1949)(\pm 0.0020) \times (-0.032)(\pm 0.028)}{(-9.41)(\pm 0.14) \times 0.445(\pm 0.028) - (-0.032)(\pm 0.028) \times 0.19(\pm 0.014)} \\ &= -0.0727 \rho_0 / ^\circ\text{C} \pm 9.3\% \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

$$\begin{aligned} f_G &= \frac{-0.1949(\pm 0.0020) \times (-9.41)(\pm 0.14) - 0.6974(\pm 0.0042) \times 0.19(\pm 0.014)}{-9.41(\pm 0.14) \times 0.445(\pm 0.028) - (-0.032)(\pm 0.028) \times 0.19(\pm 0.014)} \\ &= -0.407 \rho_0 / \text{mm} \pm 6.8\% \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

となる。

CR#1 に関して、校正の実験結果に温度変化や間隙変化に伴う反応度変化の補正を行った結果を表 A.5 に示す。この補正後の反応度値を用いた CR#1 の校正曲線の係数 a、b、c、d を表 A.6 に示す。

CR#2 に関して、校正の実験結果に温度変化や間隙変化に伴う反応度変化分の補正を行った結果を表 A.7 に示す。全挿入である 0.07 mm (ステップ 10) を基準 $0 \rho_0$ とし、遡って、ステップ 9 と 8 で、CR#2 を 0.07 mm から 16.64 mm まで引き抜いた分の反応度値と補償するのは、温度変化と間隙変化の補正を考えなければ、SR#3 の $1 \rho_0$ 挿入分から CR#1 の 202.51 mm から 265.25 mm までの引き抜き分の反応度値を差し引いたものとなる。後者は、補正済みの CR#1 の校正曲線の式より算出した結果、 $4.0049\rho_0 - 3.3834\rho_0 = 0.6215\rho_0$ であった。したがって、表 A.7 に示す CR#2 の 16.64 mm の温度変化分補正前の反応度値は、 $1.0\rho_0 - 0.6215\rho_0 = 0.3785\rho_0$ となる。この補正後の反応度値を用いた CR#2 の校正曲線の係数 a、b、c、d を表 A.8 に示す。

ステップ間で最大で 0.03°C の温度変化がある。密着のまま一連の測定を行ったため、この温度変化の不確かさは $\pm\sqrt{0.01^2 \times 2} = \pm 0.014^\circ\text{C}$ である。温度係数を用いて温度変化による反応度値への補正量の不確かさを算出すると、温度変化が 0.03°C の時でも

$$\pm\sqrt{(-0.0727 \times 0.014)^2 + (0.03 \times (-0.0727) \times 0.093)^2} = \pm 0.0010 \rho_0$$

である。ここで、温度変化が小さなため平方根内第 2 項の温度係数の不確かさ $\pm 9.3\%$ の寄与は無視し得る。集合体の密着を保つ場合、仮に温度変化が無くても温度測定に $\pm 0.01^\circ\text{C}$ の不確かさが有ることから $\pm\sqrt{0.01^2 \times 2} \times (-0.0727) = \pm 0.0010 \rho_0$ の不確かさが生じる。

次に、ほとんどのステップ間で間隙の変化は 0.001 mm かこれより小さい。密着のまま一連の測定を行ったため、ステップ間でこの間隙変化の不確かさは $\pm\sqrt{0.001^2 \times 2} = \pm 0.0014 \text{ mm}$ である。間隙係数を用いて、この不確かさによる反応度値への補正量の不確かさを算出すると、間隙変化が 0.001 mm の時に

表 A.5 XV-1 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正後の制御棒 CR#1 校正曲線測定データ

ステップ	制御棒位置 [mm]	補正前反応度価値 [ρ_0]	補正量		補正後反応度価値 ¹⁾ [ρ_0]
			温度変化分 [ρ_0]	間隙変化分 [ρ_0]	
1,2	0.67	0.0	-	-	0.0
3,4	48.26	1.0	0.0007 ²⁾	-	1.0007
5,6	103.82	2.0	0.0014 ³⁾	-	2.0021
7,8	171.52	3.0	0.0014	-	3.0035
9	265.25	4.0	0.0014	-	4.0049

¹⁾ 現ステップの補正量とともに、前ステップまでの補正量をすべて加える。

²⁾ 温度 -0.01°C の変化による反応度変化

³⁾ 温度 -0.02°C の変化による反応度変化

表 A.6 XV-1 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正済みの制御棒 CR#1 校正曲線

使用データ位置 [mm]	3 次式係数				適用範囲 [mm]
	a	b	c	d	
0.67 48.26 103.82 171.52	0.016969	-0.31712	2.2539	-0.015087	0.67 ~ 171.52
48.26 103.82 171.52 265.25	0.0035698	-0.27376	2.2123	-0.0035720	48.26 ~ 265.25

$$\pm\sqrt{(-0.407 \times 0.0014)^2 + (0.001 \times (-0.407) \times 0.068)^2} = \pm 0.0006\rho_0$$

となる。ここで、間隙変化が僅かであるため平方根内第 2 項の間隙係数の不確かさ $\pm 6.8\%$ の寄与は小さく無視し得る。集合体の密着を保ったままで、仮に間隙変化が無くても間隙測定に ± 0.001 mm の不確かさが有ることから、 $\pm\sqrt{0.001^2 \times 2} \times (-0.407) = \pm 0.0006\rho_0$ の不確かさが生じる。

すなわち、ステップ間で温度や間隙の変化が無い場合であっても、温度や間隙の測定の不確かさにより $1 \rho_0$ に補正を行った後の反応度価値の不確かさは、これまでの SR#3 の 50 mm 移動時の両端での位置再現性に伴う不確かさの他に、温度や間隙の測定による不確かさも合わせて $\pm\sqrt{0.001^2 \times 2 + 0.0010^2 + 0.0006^2} = \pm 0.0018\rho_0$ ($\pm 0.18\%$) となる。したがって、CR#1 や CR#2 のステップ間の移動時の位置再現性による不確かさ $\pm 0.14\%$ も合わせて、補正後の制御棒校正の不確かさは $\pm\sqrt{0.18^2 + 0.14^2} = \pm 0.23\%$ となる。

温度係数と間隙係数の測定時の反応度の差をこれらの補正後の制御棒校正曲線を用いて求めた結果を表 A.9 に示す。温度と間隙のデータは表 A.4 と同じである。制御棒校正曲線を変更しても反応度の差は $0.0011 \rho_0$ だけ変化するに過ぎず、この変化は $1 \rho_0$ のオーダーの反応度の差と比べて僅かであった。

さらに、補正後の制御棒校正の不確かさが補正前に比べて少し大きくなり $\pm 0.23\%$ となったが、温度係数と間隙係数の測定いずれにおいても反応度の差の不確かさは変わらなかった。温度係数と間隙係数の新たな値と

表 A.7 XV-1 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正後の制御棒 CR#2 校正曲線測定データ

ステップ	制御棒位置 [mm]	補正前反応度値 [ρ_0]	補正量		補正後反応度値 ^{D)} [ρ_0]
			温度変化分 [ρ_0]	間隙変化分 [ρ_0]	
10	0.07	0.0	-	-	0.0
9,8	16.64	0.3785	-0.0014 ^{II)}	+0.0004 ^{III)}	0.3775
11 ^{IV)}	46.62	1.0000	+0.0014		1.0014
7,6	66.14	1.3785			1.3775
5,4	124.13	2.3785	-0.0014		2.3761
3,2	195.63	3.3785	-0.0014		3.3747
1	302.72	4.3785	-0.0022 ^{V)}		4.3725

^{D)} 現ステップの補正量とともに、ステップ 11 を除く前ステップまでの補正量をすべて加える。
ステップ 11 については、このステップの補正のみ行う。

^{II)} 温度 +0.02°C の変化による反応度変化

^{III)} 間隙 -0.001 mm の変化による反応度変化

^{IV)} ステップ 11 は制御棒校正には用いない。

^{V)} 温度 +0.03°C の変化による反応度変化

表 A.8 XV-1 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正済みの制御棒 CR#2 校正曲線

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]
				a	b	c	d	
0.07	16.64	66.14	124.13	0.091173	-0.46605	2.3536	-0.0016473	0.07 ~ 66.14
16.64	66.14	124.13	195.63	0.014597	-0.30761	2.2664	0.0088141	66.14 ~ 124.13
66.14	124.13	195.63	302.72	-0.0038223	-0.23653	2.1828	0.038398	124.13 ~ 302.72

不確かさは

$$f_T = \frac{0.6963(\pm 0.0042) \times 0.445(\pm 0.028) - (-0.1946)(\pm 0.0020) \times (-0.032)(\pm 0.028)}{-9.41(\pm 0.14) \times 0.445(\pm 0.028) - (-0.032)(\pm 0.028) \times 0.19(\pm 0.014)}$$

$$= -0.0726 \rho_0 / ^\circ\text{C} \pm 9.3\% \quad (\text{A.6})$$

$$f_G = \frac{-0.1946(\pm 0.0020) \times (-9.41)(\pm 0.14) - 0.6963(\pm 0.0042) \times 0.19(\pm 0.014)}{-9.41(\pm 0.14) \times 0.445(\pm 0.028) - (-0.032)(\pm 0.028) \times 0.19(\pm 0.014)}$$

$$= -0.406 \rho_0 / \text{mm} \pm 6.8\% \quad (\text{A.7})$$

となる。新たな温度係数と間隙係数は、補正前の制御棒校正曲線を用いた値から 0.2% 程度の相違に過ぎず、これら係数の不確かさは変わらない。

表 A.9 XV-1 炉心における温度係数と間隙係数の測定データ (温度変化と間隙変化による反応度変化補正後の制御棒校正曲線を使用)

測定項目	実験日 ^{D)}	CR#1		CR#2		CR 2 本	温度 [°C]	間隙 [mm]
	Run No.	位置 [mm]	反応度値 [ρ_0]	位置 [mm]	反応度値 [ρ_0]	反応度値 合計 [ρ_0]		
温度係数	5/29 No.13	100.01	1.9388	128.97	2.4519	4.3907	18.42	-0.058
	6/2 No.2	100.01	1.9388	86.90	1.7556	3.6944	27.83	-0.026
	差				0.6963	0.6963	-9.41	-0.032
間隙係数	6/4 No.8	100.00	1.9387	105.79	2.0795	4.0182	20.91	0.402
	6/4 No.10	100.00	1.9387	117.70	2.2741	4.2128	20.72	-0.043
	差				-0.1946	-0.1946	0.19	0.445

^{D)} いずれも 1987 年

図 2.1、図 2.2 の径方向に対称な炉心から、F127/18、F125/34、M127/34、M125/18 の合計 4 本の EUDD 引出しを DUB 引出しに置き換え、片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数を 86 本とした炉心で実験実施、核計装 CH#6 は 0.5×10^{-7} A レベル

制御棒校正実験において、温度変化と間隙変化による反応度値への補正量は、表 A.5 や表 A.7 から積算しても $0.005 \rho_0$ 未満と小さなため、温度係数をこれらの新たな値に変更しても、温度変化による補正量への影響は無視し得るほど小さい。すなわち、 $0.005 \rho_0$ 未満の補正量が 0.2% 変化するに過ぎず無視し得る。したがって、最終的に、温度変化と間隙変化による反応度変化補正済みの制御棒曲線校正の結果である表 A.6、表 A.8 と上記の新たな温度係数と間隙係数を採用する。

ステップ 11 の CR#2 位置 46.62 mm の反応度値は、補正を行った CR#2 の校正曲線より $1.0035 \rho_0$ となる。ステップ 10 から 11 へ温度が 0.02°C 低下したので、SR#3 の挿入による $1 \rho_0$ の印加反応度に温度変化補正を行うと $1.0014 \rho_0$ となり、校正曲線による反応度値と $0.0021 \rho_0$ の相違に過ない。この相違は、これまでに論じてきた不確かさと比べて有意ではない。

A.1.3 基準反応度の測定

SR#3 の 50 mm から全挿入位置である 0.29 mm への挿入による基準反応度 $1 \rho_0$ を正炉周期法により測定した。一定の原子炉出力で運転時は浅い未臨界なので、この状態から反応度 $1 \rho_0$ を印加しても、この印加反応度から印加前の未臨界度を差し引いた反応度だけ超臨界となる。そこで、補正のためにこの未臨界度を前もって測定した。

3.4 節のとおり、線形出力系の読みが C_a 、 C_b である時の未臨界度を、それぞれ ρ_a 、 ρ_b とすると、中性子源増倍法を基にして

表 A.10 XV-1 炉心における基準反応度測定のための安全棒と制御棒の配置

実験日 ^{D)} Run No.	ステップ	SR#3 ^{II)}		CR#2 ^{III)}		炉心温度 [°C]	間隙 [mm]	CH#6 電流値 [A]	反応度 [ρ ₀]
		位置 [mm]	反応度 ^{IV)} [ρ ₀]	位置 [mm]	反応度 ^{IV)} [ρ ₀]				
5/28 No.3	1	50.00	1.0000	191.33	3.3220	19.33	-0.061	0.503×10 ⁻⁷	-0.0476
5/28 No.4	2	50.00	1.0000	188.41	3.2857	19.24	-0.061	0.501×10 ⁻⁶	-0.0048
5/28 No.8	3	50.00	1.0000	190.12	3.3071 ^{V)}	18.93	-0.060	0.501×10 ⁻⁶	-0.0048
	4	0.29	0.0000	190.12	3.3071				

D) いずれも 1987 年

II) 他の安全棒は全挿入で固定

III) CR#1 は、ステップ 1 から 3 では全挿入位置に固定し、ステップ 3 の後に原子炉出力を下げるために 150 mm 程度まで引き抜き、ステップ 4 で元の位置に戻した。

IV) この SR または CR を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

V) ステップ 2 より CR#2 が 1.71 mm 引き抜け、これは -0.0214 ρ₀ に相当するが、温度が 0.69°C 低下し間隙が 0.001 mm 増加したので、これら変化分は -0.31°C × (-0.0726)ρ₀/°C + 0.001mm × (-0.406)ρ₀/mm = 0.0221ρ₀ となり、CR#2 の位置変化分と不確かさの範囲で相殺する。

図 2.1、図 2.2 の径方向に対称な炉心から、F127/18、F125/34、M127/34、M125/18 の合計 4 本の EUDD 引出しを DUB 引出しに置き換え、片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数を 86 本とした炉心で実験実施

$$\rho_b = \frac{\rho_a - \rho_b}{\frac{C_b}{C_a} - 1} \quad (\text{A.8})$$

である。

基準反応度測定のための安全棒と制御棒の配置を表 A.10 に示す。まず、SR#3 を 50.00 mm、CR#1 を 0.68 mm、CR#2 を 191.33 mm として核計装 CH#6 で 0.503 × 10⁻⁷ A (C_a) で定常とした。次に、CH#6 をこれより一桁高い 0.501 × 10⁻⁶ A (C_b) で定常とするために、CR#2 のみ調整したところ 188.41 mm となった。CR#2 の反応度値は、制御棒校正曲線から全挿入 0.07 mm を基準として、191.33 mm が 3.3220 ρ₀、188.41 mm が 3.2857 ρ₀ である。さらに、この間に炉心温度が 0.09°C 低下したものの、間隙は変化しなかった。温度係数からこの温度低下を反応度変化にすると +0.0065 ρ₀ ± 0.0012 ρ₀ となる。これまでと同じく、この反応度変化の不確かさは、集合体の密着を保ったまま 2 つの原子炉出力レベルでの温度測定の不確かさと温度係数の不確かさから求め、前者の寄与が大きい。集合体密着面間隙の変化は無いが、集合体の密着を保ったままの間隙測定の不確かさによる ± 0.0006 ρ₀ の不確かさが発生する。

2 つの原子炉出力レベルの未臨界度の差は、CR#2 の反応度値の差に温度変化による反応度変化を補正して、ρ_a - ρ_b は (3.3220 - 3.2857) + 0.0065 = 0.0428ρ₀ ± 0.0020 ρ₀ (± 4.7%) となる。こ

の不確かさは CR#2 の移動の両端での位置再現性による不確かさ、CR#2 の校正の不確かさ、温度変化による反応度変化の補正の不確かさ $\pm 0.0012 \rho_0$ と間隙測定の不確かさによる $\pm 0.0006 \rho_0$ から $\pm \sqrt{0.001^2 \times 2 + ((3.3220 - 3.2857) \times 0.0023)^2 + 0.0012^2 + 0.0006^2} = \pm 0.0020 \rho_0$ と算出した。

したがって、(A.8) 式を用いて CH#6 が 0.501×10^{-6} A で運転時の未臨界度は $0.0048 \rho_0 \pm 0.00022 \rho_0$ ($\pm 4.7\%$) となる。ここで、2つの原子炉出力レベルでの CH#6 の電流値の比の不確かさは、この $\pm 4.7\%$ に比べて十分小さいので無視した。SR#3 の挿入による $1 \rho_0$ の反応度に対してこの未臨界度分の補正を行う。

このようにして、反応度 $-0.0048 \rho_0 \pm 0.00022 \rho_0$ ($\pm 4.2\%$) の未臨界状態 (ステップ 3) から、SR#3 を 50.00 mm から全挿入して $1.000 \rho_0 \pm 0.0014 \rho_0$ の反応度を印加し、ステップ 4 の $0.9952 \rho_0 \pm 0.0014 \rho_0$ の超臨界にした。原子炉出力の増加は核計装 CH#6 でモニターし、これが 0.2×10^{-6} A から 0.4×10^{-6} A、 0.3×10^{-6} A から 0.6×10^{-6} A、 0.4×10^{-6} A から 0.8×10^{-6} A の間で、2名の測定者がそれぞれのストップウォッチで測定した倍加時間は、27.6 秒、27.6 秒、27.9 秒、28.5 秒、28.6 秒であり、これらの平均 28.0 秒を採用した。その不確かさは、これまでの経験から ± 0.5 秒を見込んだ。これより、原子炉周期は $T = 28.0 / \ln(2) = 40.4 \pm 0.7$ 秒となる。この原子炉周期より、逆時間方程式 (4.1) と JENDL-4.0 の遅発中性子データ評価値に基づく動特性パラメータにより反応度を求めた結果、 $0.9952 \rho_0 \pm 0.0014 \rho_0$ ($\pm 0.14\%$) = $0.0794\% \Delta k/k$ である。すなわち、 $1 \rho_0 = 0.0798\% \Delta k/k$ となる。この基準反応度の不確かさは、用いた遅発中性子データによる不確かさの寄与を合わせて 4.1 節に記述する。

A.1.4 炉心周辺部での燃料引出し反応度値の測定

ドライバー燃料引出し EUDD の反応度値の測定結果を表 A.11 にまとめる。図 2.1 と図 2.2 の対称な炉心から F125/34、F127/18、M125/34、M127/18 の 4 本の EUDD 引出しを DUB 引出しに置換して片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数を 86 本とした炉心を基準として、周辺の複数本の EUDD 引出しと DUB 引出しをこの表に示すように順次置換した。この置換反応度値は、制御棒で補償することにより測定した。すなわち、集合体を分離して引出しを入れ替えた後に集合体を再密着することによる引出しの置換前後の 2 つの Run の間での制御棒の位置の差を求めた。これを制御棒校正曲線より反応度値に換算して、さらに、2 つの Run の間での炉心温度差と集合体密着面間隙の差による反応度変化を補正した。

表 A.11 では、この補正した置換反応度値を簡便に算出するため、制御棒に関しては、各 Run の制御棒の位置と基準とする全挿入位置の差を反応度値に換算して示す。この全挿入位置は、表 A.1 より CR#1 は 0.67 mm で CR#2 は 0.07 mm である。炉心温度に関しては、各 Run の温度と基準とする 20°C との差を反応度差に換算して示す。集合体密着面間隙に関しては、各 Run の間隙と基準とする 0.000 mm との差を反応度差に換算して示す。これら制御棒の反応度値、温度差と間隙の差による反応度差を全て足し合わすと、温度 20.00°C 、

表 A.11 XV-1 炉心におけるドライバー領域の燃料引出しの置換反応度値

実験日 ¹⁾ Run No.	片側集合体 EUDD 引出し 本数	CR#1		CR#2		炉心温度		密着面間隙		余剰 反応度 ^{V)} [ρ_0]	反応度 値 ^{VI)} [ρ_0]
		位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_0]	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_0]	温度 [°C]	反応度 ^{III)} [ρ_0]	間隙 [mm]	反応度 ^{IV)} [ρ_0]		
6/3 No.1	86 ^{VII)}	100.00	1.9387	107.44	2.1069	22.71	0.1967	-0.034	-0.0138	4.2285	(6/3 の基準)
6/3 No.2	84 ^{VIII)}	100.00	1.9387	34.75	0.7638	22.63	0.1909	-0.034	-0.0138	2.8796	-1.349
6/3 No.3	85 ^{IX)}	100.01	1.9388	73.53	1.5148	22.44	0.1771	-0.035	-0.0142	3.6165	-0.612
6/3 No.4	F:87 M:86 ^{X)}	100.00	1.9387	128.12	2.4387	22.35	0.1706	-0.035	-0.0142	4.5338	0.305
6/3 No.5	87 ^{XI)}	100.00	1.9387	153.57	2.8188	22.22	0.1612	-0.035	-0.0142	4.9045	0.676
6/3 No.6	87 ^{XII)}	100.00	1.9387	157.89	2.8801	22.14	0.1554	-0.036	-0.0146	4.9596	0.731
6/4 No.1	87 ^{XIII)}	100.00	1.9387	133.41	2.5204	21.69	0.1227	-0.048	-0.0195	4.5623	0.317
6/4 No.2	87 ^{XIV)}	100.01	1.9388	148.75	2.7493	21.63	0.1183	-0.047	-0.0191	4.7873	0.542
6/4 No.3	86 ^{VII)}	100.00	1.9387	114.03	2.2149	21.53	0.1111	-0.047	-0.0191	4.2456	(6/4 の基準)

^{I)} いずれも 1987 年

^{II)} この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

^{III)} 炉心温度を左記の読みから基準とする 20.00°C に変化させる時に加わる反応度

^{IV)} 集合体密着面間隙を左記の読みから基準とする 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

^{V)} 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00°C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度

^{VI)} 各日の基準との余剰反応度の差で不確かさはいずれも $\pm 0.016 \rho_0$

^{VII)} 図 2.1、図 2.2 の径方向に対称な炉心から、F127/18、F125/34、M127/34、M125/18 の合計 4 本の EUDD 引出しを DUB 引出しに置き換えた炉心を基準とする。

^{VIII)} 基準から F118/25、F134/27、M118/25、M134/27 にて合計 4 本の EUDD 引出しを 4 本の DUB 引出しに置換

^{IX)} 基準から F126/18、M126/18 にて EUDD 引出し 2 本を DUB 引出し 2 本に置換

^{X)} 基準から F124/18 にて DUB 引出し 1 本を EUDD 引出し 1 本に置換し、EUDD 引出しの装荷本数は固定側集合体が 87 本で移動側集合体が 86 本

^{XI)} 基準から F131/19、M131/19 にて DUB 引出し 2 本を EUDD 引出し 2 本に置換

^{XII)} 基準から F132/20、M132/20 にて DUB 引出し 2 本を EUDD 引出し 2 本に置換

^{XIII)} 基準から F135/26、M135/26 にて DUB 引出し 2 本を EUDD 引出し 2 本に置換

^{XIV)} 基準から F134/23、M134/23 にて DUB 引出し 2 本を EUDD 引出し 2 本に置換
核計装 CH#6 は 0.5×10^{-7} A レベル

間隙読み 0.000 mm の基準状態に補正した炉心の余剰反応度となる^{I)}。2 つの Run の間でこれら補正した余剰反応度の差をとることにより、簡便に、2 つの Run の間の補正した反応度の差、すなわち引出しの置換反応度値を算出することができる。

^{I)} ただし、この余剰反応度は浅い未臨界から制御棒の挿入により印加できる反応度変化であり、本来の臨界からの余剰反応度とするためには、未臨界度分の補正を行う必要がある。

このように、補正した余剰反応度の差として引出しの置換反応度値を算出するものの、その内訳は、2つの Run の間で制御棒の位置の差を反応度値に換算し、これに温度や間隙の差を反応度差に換算して補正したものである。したがって、この置換反応度値の不確かさは、制御棒、安全棒の位置の再現性による不確かさと校正の不確かさ、温度測定と温度係数の不確かさや間隙測定と間隙係数の不確かさから算出した。

CR#1 に関しては、同じ位置に戻したものの移動前後の位置再現性に伴う不確かさ $\pm\sqrt{0.001^2 \times 2} = \pm 0.0014\rho_0$ が生じる。CR#2 の不確かさは、2つの Run の間での移動前後の位置再現性による不確かさと校正の不確かさ $\pm 0.23\%$ によるものを合わせる。例えば、6/3 の Run No.1 と No.6 では、移動前後の位置は制御棒校正ステップ 5、4 の 124.13 mm を跨ぐため、反応度差の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.001^2 \times 2 + ((2.8801 - 2.3761) \times 0.0023)^2 + ((2.3761 - 2.1069) \times 0.0023)^2} = \pm 0.0019\rho_0$$

となる。平方根内の第 1 項は CR#2 の移動前後の位置再現性による不確かさで、第 2 項は Run No.6 の 157.89 mm からステップ 5、4 の 124.13 mm の反応度差に対する校正の不確かさで、第 3 項は同ステップから Run No.1 の 107.44 mm の反応度差に対する校正の不確かさである。

安全棒に関しては、同一日であれば集合体の分離と再密着を行っても全挿入位置から動かすことはなく不確かさは生じない。

炉心温度に関しては、集合体の分離と密着を行う時の温度測定の不確かさ $\pm 0.1^\circ\text{C}$ と温度係数の不確かさ $\pm 9.3\%$ を合わせて、温度変化による反応度変化の補正の不確かさは

$$\pm\sqrt{(\sqrt{0.1^2 \times 2} \times (-0.0726))^2 + (-0.0726 \times 0.093 \times (22.14 - 22.71))^2} = \pm 0.011 \rho_0$$

となる。温度差が小さいため、前者の寄与がこの不確かさの大部分を占める。

集合体密着面間隙に関しては、集合体の分離と密着を行う時の間隙測定の不確かさ $\pm 0.02 \text{ mm}$ と間隙係数の不確かさ $\pm 6.8\%$ を合わせて、間隙の差による反応度差の補正の不確かさは

$$\pm\sqrt{(\sqrt{0.02^2 \times 2} \times (-0.406))^2 + (-0.406 \times 0.068 \times (-0.036 - (-0.034)))^2} = \pm 0.011 \rho_0$$

となる。間隙の差が小さいため、前者の寄与がこの不確かさの大部分を占める。

これら 4 つの不確かさを合わせて、引出し置換反応度値の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.0014^2 + 0.0019^2 + 0.011^2 + 0.011^2} = \pm 0.016 \rho_0$$

となる。温度差と間隙の差による反応度差の補正の不確かさの寄与が大きい。他の Run の間の反応度差に関しても同様に算出した結果、いずれも不確かさは $\pm 0.016 \rho_0$ となった。

集合体の分離と再密着を伴う場合は、仮に、2つの Run の間で温度や間隙の差が無い場合でも、温度測定に伴う反応度の不確かさ

$$\pm\sqrt{0.1^2 \times 2} \text{ }^\circ\text{C} \times (-0.0726) \rho_0/^\circ\text{C} = \pm 0.010 \rho_0$$

と間隙測定に伴う反応度の不確かさ

$$\pm\sqrt{0.02^2 \times 2} \text{ mm} \times (-0.406) \rho_0/\text{mm} = \pm 0.011 \rho_0$$

が生じる。

A.1.5 未臨界度の測定

実効増倍率は主に2本の制御棒 CR の余剰反応度から算定するが、これに種々の補正を行う。そのうちのひとつが未臨界度である。基準反応度の測定時と同様に、浅い未臨界で核計装 CH#6 の読みが C_a 、 C_b である時の未臨界度をそれぞれ ρ_a 、 ρ_b とすると、中性子源増倍法を基にしてこれらには (A.8) 式の関係がある。表 A.12 に示すように、原子炉出力レベルを2段階に変えた Run を4組実施して、それぞれ未臨界度を求めた。

各日の2つの Run で余剰反応度の差が $\rho_a - \rho_b$ である。これら2つの Run の間で、CR#1 と全ての安全棒 SR は動かさず、集合体は密着したままであり間隙の変化も無いか僅かなので、この余剰反応度の差の不確かさは、CR#2 の移動による反応度差の不確かさと温度変化や間隙変化による反応度変化の補正の不確かさから以下のように算定した。

例えば、6/17 の2つの Run では、前者は、CR#2 の移動時の位置の再現性と制御棒校正の不確かさより

$$\pm\sqrt{0.001^2 \times 2 + (1.0071 - 0.9612) \times 0.0023^2} = \pm 0.0014 \rho_0$$

の不確かさが生じる。余剰反応度の差が小さいので、位置再現性による不確かさが大部分の寄与を占める。集合体の密着を保持した時の温度測定の不確かさと温度係数の不確かさより

$$\pm\sqrt{(\sqrt{0.01^2 \times 2} \times (-0.0726))^2 + (-0.0726 \times 0.093 \times (19.21 - 19.20))^2} = \pm 0.0010 \rho_0$$

の不確かさが生じる。温度差が小さいので、温度測定の不確かさが大部分の寄与を占める。集合体の密着を保持した時の間隙測定の不確かさより

$$\pm\sqrt{0.001^2 \times 2} \times (-0.406) = \pm 0.0006 \rho_0$$

の不確かさが生じる。余剰反応度の差の不確かさは、これらを合わせて

$$\pm\sqrt{0.0014^2 + 0.0010^2 + 0.0006^2} = \pm 0.0018 \rho_0$$

となる。したがって、(A.8) 式を用いて核計装 CH#6 が $0.4999 \times 10^{-7} \text{ A}$ で運転時の未臨界度は $0.0518 \rho_0 \pm 0.0021 \rho_0$ ($\pm 3.8\%$) となる。ここで、2つの原子炉出力レベルでの CH#6 の電流値の比の不確かさは、この $\pm 3.8\%$ に比べて十分小さいので無視した。

中性子源増倍法より、未臨界度と、その時の原子炉出力レベルとしての CH#6 の電流値の積は一定となる。この積は、5/27 が $2.51 \times 10^{-9} \rho_0 \text{ A} \pm 4.3\%$ 、5/28 が $2.40 \times 10^{-9} \rho_0 \text{ A} \pm 4.5\%$ 、6/17 が $2.59 \times 10^{-9} \rho_0 \text{ A} \pm 4.0\%$ 、1/6 が $2.59 \times 10^{-9} \rho_0 \text{ A} \pm 3.9\%$ となった。5/28 の値と 1/6 の値には 8% の相違があるが、各日の値の不確かさが $\pm 4\%$ 程度あるので、これは有意な差ではない。4つの値の平均である $2.52 \times 10^{-9} \rho_0 \text{ A}$ を採用し、その不確かさには4つの値の間の標準偏差 $\pm 0.078 \times 10^{-9} \rho_0 \text{ A}$ ($\pm 3.1\%$) を採用する。これを基に余剰反応度に補正を行い実効増倍率を求める。

表 A.12 XV-1 炉心における未臨界度

実験日 ^{D)}	CR#1	CR#2	炉心温度		密着面間隙		余剰	CH#6	未臨界度		
Run No.	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_0]	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_0]	温度 [°C]	反応度 ^{III)} [ρ_0]	間隙 [mm]	反応度 ^{IV)} [ρ_0]	反応度 ^{V)} [ρ_0]	電流 [$\times 10^{-7}$ A]	[ρ_0]
5/27 No.8	100.00	1.9387	52.28	1.1144	19.62	-0.0276	-0.070	-0.0284	2.9971	0.5005	0.0501 $\pm 0.0022(4.3\%)$
5/27 No.9	100.00	1.9387	50.33	1.0765	19.52	-0.0348	-0.070	-0.0284	2.9520	5.016	0.0050 $\pm 0.00022(4.3\%)$
5/28 No.3	0.68	0.0000	191.33	3.3220	19.33	-0.0486	-0.061	-0.0248	4.2486 ^{VI)}	0.5034	0.0477 $\pm 0.0021(4.5\%)$
5/28 No.4	0.68	0.0000	188.41	3.2857	19.24	-0.0552	-0.061	-0.0248	4.2057 ^{VI)}	5.014	0.0048 $\pm 0.00022(4.5\%)$
6/17 No.2	0.68	0.0000	46.80	1.0071	19.21	-0.0574	-0.061	-0.0248	0.9249	0.4999	0.0518 $\pm 0.0021(4.0\%)$
6/17 No.3	0.68	0.0000	44.49	0.9612	19.20	-0.0581	-0.061	-0.0248	0.8783	5.014	0.0052 $\pm 0.00021(4.0\%)$
1/6 No.1	70.00	1.4131	65.76	1.3704	20.37	-0.0269	-0.071	-0.0288	2.7278	4.992	0.0052 $\pm 0.00020(3.9\%)$
1/6 No.2	70.00	1.4131	68.21	1.4163	20.36	-0.0261	-0.071	-0.0288	2.7745	0.4995	0.0519 $\pm 0.0020(3.9\%)$

^{D)} 1987年5月から1988年1月

^{II)} この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

^{III)} 炉心温度の読みを左記の値から基準の20.00°Cに変化させる時に加わる反応度

^{IV)} 集合体密着面間隙の読みを左記の値から基準の0.000mmに変化させる時に加わる反応度

^{V)} 制御棒2本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み20.00°C、間隙読み0.000mmの基準状態とする時の余剰反応度

^{VI)} 5/28はSR#3が50mm位置まで引き抜かれ固定されていたのでこの反応度値1 ρ_0 を加算、他のSRは全挿入、5/27、6/17と1/6は6組のSRは全挿入

5/27と1/6は、図2.1、図2.2の径方向に対称な炉心から、F125/18、F127/18、F125/34、F127/34、M125/18、M127/18、M125/34、M127/34の合計8本のEUDD引出しをDUB引出しに置き換え、片側集合体当たりのEUDD引出し装荷本数を84本とした炉心で実験実施

5/28は、図2.1、図2.2の径方向に対称な炉心から、F127/18、F125/34、M127/34、M125/18の合計4本のEUDD引出しをDUB引出しに置き換え、片側集合体当たりのEUDD引出し装荷本数を86本とした炉心で実験実施

6/17は、図2.1、図2.2の径方向に対称な炉心から、F118/25、F118/27、F125/18、F127/18、F125/34、F134/25、F134/27、M118/25、M118/27、M125/18、M127/18、M125/34、M134/25、M134/27の合計14本のEUDD引出しをDUB引出しに置き換え、片側集合体当たりのEUDD引出し装荷本数を81本とした炉心で実験実施

A.1.6 密着面でのステンレス鋼反応度値の測定

炉心の中心面に相当する 2 分割集合体の密着面には、主に引出し前端面の部材としてのステンレス鋼があり、決定論手法で実効増倍率を計算する場合はそのモデル化が困難となる場合がある。そこで、このステンレス鋼の負の反応度効果を実験的に求めて実効増倍率の実験値導出において補正として用い、密着面のステンレス鋼を取り除いた炉心の実効増倍率を決定論手法による計算結果と比較する。この補正のために、炉心中心引出しの密着面近傍においてステンレス鋼の反応度値測定を行った。炉心中心引出し以外の領域の密着面では、付録 B.2.6 項の XIV-1 炉心において求めた表 B.20 の炉心中心引出しと各領域間の反応度値の比を基に、そのステンレス鋼の反応度値を求めた。

実験に用いたステンレス板等の重量を表 A.13 に示す。重量の測定誤差は 0.1% 未満であり、後に記述するように反応度値の測定誤差と比べて無視し得るほど小さい。

まず、F126/26 の中心引出しにおいて、引出し内の燃料板と模擬物質板を全て軸方向に炉心外側に向けておらずることにより、この引出し内の前端面の内側に、通常とは垂直の方向に模擬物質板を装填できる 1/8 インチ幅の空間を設けて、この空間で 1 枚のステンレス SUS(1/8×2×2) 板とアルミニウム Al(1/8×2×2) 板の置換反応度値を 6/5 の Run No.5 と No.6 で測定した。測定結果を表 A.14 に示す。

これらの反応度値は、制御棒 CR#2 で補償することにより測定した。集合体は分離せずに密着を保ったまま、ステンレス板とアルミニウム板の入れ替え前後の 2 つの Run の間での CR#2 の位置の差を求めた。これを制御棒の校正結果より反応度値に換算して、さらに、2 つの Run の間での炉心温度と集合体密着面間隙の変化による反応度変化を補正した。

表 A.13 より SUS(1/8×2×2) 板の重さは 62.23 g で Al(1/8×2×2) 板の重さは 21.68 g であり、この置換反応度値の測定結果は表 A.14 に示すように $-0.0306 \rho_0 \pm 0.0034 \rho_0$ である。この不確かさは以下のように算出した。

制御棒 CR と安全棒 SR に関しては、まず、同じ位置に戻したものの 2 つの Run の間で動かした CR#1 と固定側集合体の 3 組の安全棒 SR の移動前後の位置再現性により生じる反応度の不確かさは

表 A.13 XV-1 炉心中心におけるステンレス鋼反応度値測定に用いたステンレス板とアルミニウム板の重量

板種類とサイズ	使用枚数	重量 [g] ^{D)}	板種類とサイズ	使用枚数	合計重量 [g] ^{D)}
SUS(1/8×2×2)	1	62.23 ^{II)}	Al(1/16×2×2)	8	81.69 ^{III)}
Al(1/8×2×2)	1	21.68 ^{III)}	Al frame(1/4×2×2) ^{IV)}	2	10.22 ^{III)}

^{D)} 重量の測定誤差は 0.1% 未満

^{II)} 実験時の記録及び FCA プレートデータより

^{III)} 実験時の記録より

^{IV)} Al(1/4×2×2) 板の内側をくり抜いて製作

表 A.14 XV-1 炉心中心におけるステンレス鋼反応度値とアルミニウム反応度値

実験日 ¹⁾ Run No.	装荷物 (目的)	CR#1		CR#2		炉心温度		密着面間隙		余剰 反応度 ^{V)} [ρ_0]	反応度 値 ^{VI)} [ρ_0]
		位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_0]	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_0]	温度 [°C]	反応度 ^{III)} [ρ_0]	間隙 [mm]	反応度 ^{IV)} [ρ_0]		
6/5 No.5	Al(1/8×2×2) 1 枚 (6/5 の基準)	100.01	1.9388	119.33	2.3001	20.15	0.0109	-0.049	-0.0199	4.2299	
6/5 No.6	SUS(1/8×2×2) 1 枚	99.99	1.9385	117.75	2.2749	20.08	0.0058	-0.049	-0.0199	4.1993	-0.0306
8/20 No.3	Al(1/16×2×2) 8 枚	45.00	0.9365	61.45	1.2898	20.68	0.0494	-0.036	-0.0147	2.2610	-0.0131
8/20 No.4	Al frame(1/4×2×2) 2 枚 (8/20 の基準)	45.00	0.9365	62.26	1.3050	20.65	0.0473	-0.036	-0.0147	2.2741	

¹⁾ いずれも 1987 年

^{II)} この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

^{III)} 炉心温度の読みを左記の値から基準の 20.00°C に変化させる時に加わる反応度

^{IV)} 集合体密着面間隙の読みを左記の値から基準の 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

^{V)} 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00°C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度

^{VI)} それぞれの日の基準の余剰反応度からの差

6/5 は、図 2.1、図 2.2 の径方向に対称な炉心から、F127/18、F125/34、M127/34、M125/18 の合計 4 本の EUDD 引出しを DUB 引出しに置き換え、片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数を 86 本とした炉心で実験実施、8/20 は、片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数を 83 本とした炉心で実験実施、核計装 CH#6 は 0.5×10^{-7} A レベル

$$\pm\sqrt{0.001^2 \times 2 \times 4} = \pm 0.0028 \rho_0$$

である。これら 2 つの Run の間では、移動側集合体の 3 組の SR は全挿入のまま動かさなかったため、これら SR に関して不確かさは生じない。次に、2 つの Run の間の反応度差を補償する CR#2 の移動の両端での位置再現性と CR#2 の校正の不確かさ $\pm 0.23\%$ を合わせると

$$\pm\sqrt{0.001^2 \times 2 + ((2.2749 - 2.3001) \times 0.0023)^2} = \pm 0.0014 \rho_0$$

となる。CR#2 の位置の差が小さなため、前者の寄与がこの不確かさの大部分を占める。

炉心温度に関しては、集合体の密着を保ったまま測定を行う時の温度測定の不確かさ $\pm 0.01^\circ\text{C}$ と温度係数の不確かさ $\pm 9.3\%$ による寄与を合わせて、温度変化による反応度変化の補正の不確かさは

$$\pm\sqrt{(\sqrt{0.01^2 \times 2} \times (-0.0726))^2 + (-0.0726 \times 0.093 \times (20.08 - 20.15))^2} = \pm 0.0011 \rho_0$$

となる。温度差が小さなため、前者の寄与がこの不確かさの大部分を占める。集合体密着面間隙の変化は無いが、間隙測定に伴う不確かさ $\pm 0.0006 \rho_0$ が生じる。

これら 4 つの不確かさを合わせて、置換反応度値の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.0028^2 + 0.0014^2 + 0.0011^2 + 0.0006^2} = \pm 0.0034 \rho_0$$

となる。

ステンレス板正味の反応度価値を得るためには、アルミニウムの反応度価値分を補正する必要がある。このために、F126/26のPu08A引出しの密着面から1セル目において、3枚装填されている劣化ウラン燃料板のうち両脇の2枚を取り除いてセル内に1/4インチ幅の2箇所の空間を設けて、これら空間で8枚のAl(1/16×2×2)板と2枚のAl frame(1/4×2×2)の置換反応度価値を8/20のRun No.3とNo.4で測定した。表A.13より8枚のAl(1/16×2×2)板の重さの合計は81.69gで2枚のAl frame(1/4×2×2)の重さの合計は10.22gである。この置換反応度価値の測定結果は表A.14に示すように $-0.0131 \rho_0 \pm 0.0034 \rho_0$ である。この不確かさは、6/5に実施したアルミニウム板とステンレス板の置換反応度価値と同様に算出し、その内訳は以下のとおりである。

制御棒と安全棒に関しては、まず、同じ位置に戻したものの2つのRunの間で動かしたCR#1と固定側集合体の3組のSRの移動前後の位置再現性により生じる反応度の不確かさは $\pm 0.0028 \rho_0$ である。これら2つのRunの間では、移動側集合体の3組のSRは全挿入のまま動かさなかったため、これらSRに関して不確かさは生じない。次に、2つのRunの間の反応度差を補償するCR#2の移動の両端での位置再現性と校正の不確かさを合わせると

$$\pm \sqrt{0.001^2 \times 2 + ((1.2898 - 1.3050) \times 0.0023)^2} = \pm 0.0014 \rho_0$$

となる。

炉心温度に関しては、集合体の密着を保ったまま測定を行う時の温度測定の不確かさと温度係数の不確かさを合わせて、温度変化による反応度変化の補正の不確かさは

$$\pm \sqrt{(\sqrt{0.01^2 \times 2} \times (-0.0726))^2 + (-0.0726 \times 0.093 \times (20.68 - 20.65))^2} = \pm 0.0010 \rho_0$$

となる。集合体密着面間隙の変化は無いが、間隙測定に伴う不確かさ $\pm 0.0006 \rho_0$ が生じる。

これら4つの不確かさを合わせて、置換反応度価値の不確かさは

$$\pm \sqrt{0.0028^2 + 0.0014^2 + 0.0010^2 + 0.0006^2} = \pm 0.0033 \rho_0$$

となる。

炉心中心における単位重量当たりのアルミニウムの反応度価値は

$$\frac{-0.0131 \rho_0 (\pm 0.0034 \rho_0)}{81.69g - 10.22g} = -1.83 \times 10^{-4} \rho_0/g \pm 25\% \quad (\text{A.9})$$

となる。ここで、アルミニウムの重量の不確かさは0.1%のオーダーであり、25%の反応度価値の不確かさに比べてはるかに小さいので無視した。

これより、SUS(1/8×2×2)との置換反応度価値を求めたAl(1/8×2×2)板の反応度価値は

$$-1.83 \times 10^{-4} \rho_0/g (\pm 25\%) \times 21.68g = -0.0040 \rho_0 \pm 0.0010 \rho_0 \quad (\text{A.10})$$

となる。ここでも、アルミニウムの重量の不確かさは小さく無視した。なお、ステンレス鋼の反応度価値を測定した引出し前端面とアルミニウムの反応度価値を測定した劣化ウラン燃料板の位置では、アルミニウムの反応度価値に若干の相違が生じることが予想される。しかしながら、アルミニウムの反応度価値の不確かさが $\pm 25\%$ と大きなことから、測定位置の相違によるアルミニウム反応度価値の相違は、この大きな不確かさと比べて無視できるものと考えられる。

表 A.15 XV-1 炉心における密着面ステンレス鋼反応度価値

領域	引出し本数 (格子管数) (固定側と移動側の合計)	ステンレス鋼 重量 [g] ¹⁾	反応度価値 の比 ²⁾	反応度価値 ³⁾ [ρ_0]
中心引出し	1 × 2	19.98	1.0	-0.0111 ± 10%
中心引出しを除くテスト領域	76 × 2	1518.48	52.2 ± 13%	-0.579 ± 16%
バッファー領域	40 × 2	799.2	11.9 ± 52%	-0.132 ± 53%
制御・安全棒引出し	8 × 2	863.392	2.8 ± 264%	-0.031 ± 264%
ドライバー領域	88 × 2 ⁴⁾	1758.24	1.3 ± 202% ⁵⁾	-0.014 ± 202%
合計			69.2 ± 19%	-0.768 ± 21%

¹⁾ 各領域で、引出し装荷本数に 1 格子管当たりの余分に存在するステンレス鋼の重量を乗じたもの

²⁾ 付録 B.2.6 項の表 B.20 より引用、中心引出しの反応度価値で規格化

³⁾ 中心引出しの反応度価値 $-0.0111\rho_0 \pm 10\%$ に中心引出しと各領域間の反応度価値の比を乗じたもの

⁴⁾ 図 2.1、図 2.2 の片側集合体当たりに EUDD 引出しを 88 本装荷した径方向に対称な炉心のドライバー燃料引出し本数

⁵⁾ 表 B.20 のドライバー領域の反応度価値の比に、炉心間のドライバー燃料引出し本数の比を乗じて補正したもの

これを用いて、炉心中心での引出し前端面における SUS(1/8×2×2) 板の正味の反応度価値は

$$-0.0306 \rho_0 (\pm 0.0034 \rho_0) - 0.0040 \rho_0 (\pm 0.0010 \rho_0) = -0.0346 \rho_0 \pm 0.0035 \rho_0 (\pm 10\%) \quad (\text{A.11})$$

となる。したがって、単位重量当たりのステンレス鋼の反応度価値は

$$\frac{-0.0346 \rho_0 (\pm 0.0035 \rho_0)}{62.23g} = -5.56 \times 10^{-4} \rho_0/g \pm 10\% \quad (\text{A.12})$$

となる。ここでも、ステンレス鋼の重量の不確かさは小さく無視した。

アルミニウムとステンレス鋼の単位重量当たりの反応度価値の比は

$$\frac{-1.83 \times 10^{-4} \rho_0/g (\pm 25\%)}{-5.56 \times 10^{-4} \rho_0/g (\pm 10\%)} = 0.329 \pm 27\% \quad (\text{A.13})$$

である。付録 B.2.6 項に記述する XIV-1 炉心での同比 $0.292 \pm 34\%$ とは 13% の相違に過ぎず、これは不確かさの範囲内である。

付録 B.2.6 項の表 B.20 より、中心引出しの 1 格子管当たりに余分に存在するステンレス鋼の重量は、固定側と移動側集合体合わせて 19.98 g であり、これに単位重量当たりのステンレス鋼の反応度価値を乗じると

$$-5.56 \times 10^{-4} \rho_0/g (\pm 10\%) \times 19.98g = -0.0111 \rho_0 \pm 10\% \quad (\text{A.14})$$

である。

テスト領域、バッファー領域と制御安全棒引出しに関しては、XIV-1 炉心と XV-1 炉心間で引出し内の燃料セルの組成が異なることはあっても引出しの装荷本数と装荷位置が同じである。したがって、表 B.20 の炉心

中心引出しとこれらの各領域間の反応度価値の比は、両炉心間で不確かさの範囲で変わらないとする。ドライバー領域に関しては、固定側と移動側集合体を合わせた装荷本数が、XIV-1 炉心では $116 \times 2 = 232$ 本であるのに対して XV-1 炉心が $88 \times 2 = 176$ 本と異なる。この引出し本数の比 $176/232 = 0.7586$ をドライバー領域の反応度価値寄与分に乘ずることにより引出し本数の違いを補正した。表 B.20 より、ドライバー領域の寄与分が 2~3% と小さく、その不確かさが大きいので、このような評価で十分である。表 A.15 に XV-1 炉心での密着面のステンレス鋼反応度価値を示す。

A.1.7 余剰反応度の再現性と不確かさの評価

実効増倍率は余剰反応度を基に算出する。原子炉運転時は、6 組の安全棒 SR は全挿入で 2 組の制御棒 CR を途中まで引き抜くので、これら 2 組の CR を全挿入する時に増加する反応度の和が余剰反応度となる。ただし、この余剰反応度は、本来の臨界からの余剰反応度に一定の原子炉出力で運転時の未臨界度を加えた反応度である。これまでと同様に、この余剰反応度に炉心温度や集合体密着面間隙に関する補正を行う。

炉心に特別な実験用装荷物等が無く標準である Run のデータを抽出して、集合体の分離、密着に伴う余剰反応度の再現性として変化 (ばらつき) を見た。いずれの Run も浅い未臨界なので、余剰反応度は原子炉出力レベルに依存する。したがって、この出力レベルやその他の炉心の状態が同じである Run ごとに、データを表 A.16 と表 A.17 にまとめる¹⁾。これら表の各 Run の余剰反応度は、基準の 20°C、間隙読み 0.000 mm での値となるように、既に反応度の温度補正と間隙補正を行った値である。

各表内で Run の間の余剰反応度の変化 (ばらつき) は $0.02 \rho_0$ 以内である。一方で、余剰反応度の再現性は、CR と SR の位置再現性、温度測定の不確かさ、間隙測定の不確かさからも以下のように評価できる。

8 組の CR と SR の位置再現性により生じる反応度の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.001^2 \times 8} = \pm 0.0028 \rho_0$$

である。集合体の分離と密着を行う場合の温度測定の不確かさ $\pm 0.1^\circ\text{C}$ より

$$\pm 0.1^\circ\text{C} \times (-0.0726) \rho_0 / ^\circ\text{C} = \pm 0.0073 \rho_0$$

が、これに伴う反応度の不確かさとなる。間隙測定の不確かさ $\pm 0.02 \text{ mm}$ より

$$\pm 0.02 \text{ mm} \times (-0.406) \rho_0 / \text{mm} = \pm 0.0081 \rho_0$$

が、これに伴う反応度の不確かさとなる。これら 3 つの不確かさを合わせて余剰反応度の再現性は

$$\pm\sqrt{0.0028^2 + 0.0073^2 + 0.0081^2} = \pm 0.011 \rho_0$$

となる。このように算出した余剰反応度の再現性と比べて、各表内での余剰反応度の変化 (ばらつき) $0.02 \rho_0$ は有意ではない。

これらの不確かさの他に、表 A.16 の 4 つの Run の間では、温度差が 1°C から 4°C に及び、これは反応度差では $0.07 \rho_0$ から $0.3 \rho_0$ である。温度係数の不確かさ $\pm 9.3\%$ によるこの反応度差の不確かさは、 $\pm 0.006 \rho_0$

¹⁾ これらの他に、6/9 から 6/19 の間に、片側集合体当たりの EUDD 引出しの装荷本数を 81 本に減らした炉心で数 Run のデータがあるが、これらは、燃料板の γ スキャンニング法により出力分布の測定を行った際のデータであり、ここでは採用しない。

表 A.16 XV-1 炉心における集合体分離密着時の余剰反応度の再現性 (1)

実験日 ¹⁾ Run No.	CR#1		CR#2		炉心温度		密着面間隙		余剰 反応度 ^{V)} [ρ_0]	CH#6 電流 [$\times 10^{-7}$ A]	備考
	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_0]	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_0]	温度 [$^{\circ}$ C]	反応度 ^{III)} [ρ_0]	間隙 [mm]	反応度 ^{IV)} [ρ_0]			
5/29 No.1	100.01	1.9388	127.45	2.4282	18.70	-0.0944	-0.059	-0.0240	4.249	0.5022	
6/3 No.1	100.00	1.9387	107.44	2.1069	22.71	0.1967	-0.034	-0.0138	4.229	0.5006	
6/4 No.3	100.00	1.9387	114.03	2.2149	21.53	0.1111	-0.047	-0.0191	4.246	0.5005	
6/5 No.3	100.00	1.9387	120.12	2.3127	20.23	0.0167	-0.048	-0.0195	4.249	0.4995	

¹⁾ いずれも 1987 年

^{II)} この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

^{III)} 炉心温度の読みを左記の値から基準の 20.00 $^{\circ}$ C に変化させる時に加わる反応度

^{IV)} 集合体密着面間隙の読みを左記の値から基準の 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

^{V)} 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00 $^{\circ}$ C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度に相当

いずれの Run も、図 2.1、図 2.2 の径方向に対称な炉心から、F127/18、F125/34、M127/34、M125/18 の合計 4 本の EUDD 引出しを DUB 引出しに置き換え、片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数を 86 本とした炉心で実験実施

から $\pm 0.028 \rho_0$ となり、余剰反応度の再現性の算出結果 $\pm 0.011 \rho_0$ よりも大きくなる。しかし、Run の間の余剰反応度の差を見ると、6/3 の Run No.1 は他の 3 つの Run から $0.02 \rho_0$ も異なるが、6/3 の Run No.1 を除く 3 つの Run の間では $0.003 \rho_0$ に過ぎない。したがって、この $0.02 \rho_0$ の余剰反応度の変化(ばらつき)は、温度係数の不確かさによるものではない。なお、各表で、いずれの Run も CR の位置は近く、この CR 位置の差から Run の間の余剰反応度の差を計算するための制御棒校正の不確かさは余剰反応度の再現性には影響しない。さらに、各表の Run の間で集合体密着面間隙の差も最大で 0.01 mm 程度であるため、間隙係数の不確かさによる反応度差の不確かさも余剰反応度の再現性への影響は小さい。

片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数が 86 本である炉心の余剰反応度は、表 A.16 の 4 つの Run の余剰反応度の平均として $4.243 \rho_0$ である。一方で、EUDD 引出し装荷本数が 83 本である炉心の余剰反応度は、表 A.17 の 6 つの Run の余剰反応度の平均として $2.129 \rho_0$ である。なお、核計装 CH#6 の電流値の Run の間の平均値は、EUDD 引出しが 86 本の炉心では 0.5007×10^{-7} A、EUDD 引出しが 83 本の炉心では 0.5001×10^{-7} A であり、両者の差は 0.1% に過ぎず、余剰反応度には影響しない。

表 A.11 の 6/3 の No.1 と No.2 より、片側集合体当たり 2 本の EUDD 引出しを DUB 引出しに置換する反応度値は、両集合体合わせて $-1.3489 \rho_0 \pm 0.016 \rho_0$ である。図 2.1 より、これら 2 本の位置は等価であるので 1 本当たりの置換反応度値はその半分の $-0.6745 \rho_0 \pm 0.008 \rho_0$ である。余剰反応度の平均を求めた片側集合体当たり EUDD 引出し装荷本数が 83 本の炉心は 86 本の炉心から 3 本の EUDD 引出しを DUB 引出しに置換したものである。これら 3 本の EUDD 引出しは全て置換反応度値の測定を行った EUDD 引出しと等価な位置にあるので、1 本当たりの置換反応度値を 3 倍にした $-2.0233 \rho_0 \pm 0.024 \rho_0$ が 3 本の置換反応度値

表 A.17 XV-1 炉心における集合体分離密着時の余剰反応度の再現性 (2)

実験日 ^{D)} Run No.	CR#1		CR#2		炉心温度		密着面間隙		余剰 反応度 ^{V)} [ρ_0]	CH#6 電流 [$\times 10^{-7}$ A]	備考
	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_0]	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_0]	温度 [$^{\circ}$ C]	反応度 ^{III)} [ρ_0]	間隙 [mm]	反応度 ^{IV)} [ρ_0]			
8/4 No.1	44.99	0.9363	53.98	1.1473	20.83	0.0603	-0.039	-0.0158	2.128	0.5002	
8/5 No.5	45.00	0.9365	55.14	1.1697	20.57	0.0414	-0.040	-0.0162	2.131	0.5006	
8/6 No.1	45.00	0.9365	55.61	1.1787	20.39	0.0283	-0.031	-0.0126	2.131	0.5001	
8/18 No.7	45.00	0.9365	54.98	1.1666	20.46	0.0334	-0.032	-0.0130	2.124	0.4997	
8/20 No.6	45.00	0.9365	54.59	1.1591	20.56	0.0407	-0.036	-0.0146	2.122	0.5012	
8/21 No.5	54.69	1.1225	45.01	0.9716	20.79	0.0574	-0.036	-0.0146	2.137	0.4988	

^{D)} いずれも 1987 年

^{II)} この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

^{III)} 炉心温度の読みを左記の値から基準の 20.00 $^{\circ}$ C に変化させる時に加わる反応度

^{IV)} 集合体密着面間隙の読みを左記の値から基準の 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

^{V)} 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00 $^{\circ}$ C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度に相当

いずれの Run も、図 2.1、図 2.2 の径方向に対称な炉心から合計 10 本の EUDD 引出しを DUB 引出しに置き換え、片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数を 83 本とした炉心で実験実施

値となる。したがって、EUDD 引出しが 83 本の炉心の余剰反応度に $2.0233 \rho_0 \pm 0.024 \rho_0$ を加えた $4.1523 \rho_0 \pm 0.026 \rho_0$ が、EUDD 引出しが 86 本相当の炉心の余剰反応度となる。

このように片側集合体当たり EUDD 引出し装荷本数が 83 本の炉心に 3 本の EUDD 引出しの置換反応度価値の補正を行い EUDD 引出し装荷本数を 86 本相当とした余剰反応度は、EUDD 引出しが 86 本の炉心で測定した余剰反応度よりも $0.09 \rho_0$ も小さく、この相違は再現性の算出結果 $\pm 0.011 \rho_0$ の範囲を大きく超える。しかし、両者の余剰反応度の測定は 2 カ月の期間を経て行ったので、この間に、炉心のプルトニウム燃料に含まれる ^{241}Pu が 1% 程度崩壊して減少し中性子吸収物質である ^{241}Am が生成することにより、この余剰反応度の相違が生じたものと考えられる。

実効増倍率を評価するための基となる余剰反応度は、径方向に対称な炉心に近い形状の表 A.16 に記載の片側集合体当たりに EUDD 引出しを 86 本装荷した炉心での 4 回の Run の平均値を採用する。表 A.17 の EUDD 引出しが 83 本の炉心の余剰反応度は、これより 2 カ月後に測定したものであり、プルトニウム燃料中の ^{241}Pu の崩壊と ^{241}Am の生成といった燃料組成の変化の影響が余剰反応度に現れるため不採用とする。先に記述したように、これらの平均値は $4.243 \rho_0$ であり、CH#6 の電流値は 0.5007×10^{-7} A である。

この平均値の不確かさには余剰反応度の再現性の算出結果 $\pm 0.011 \rho_0$ を用い、これに 2 組の CR の反応度価値の校正に起因する不確かさを合わせる。4 回の Run いずれも、CR#1 は 100 mm、CR#2 は最大で 127 mm 程度引き抜き、CR#1 では制御棒校正ステップ 3、4 の 48.26 mm、CR#2 ではステップ 5、4 の 124.13 mm が直近の制御棒校正ステップ位置である。全挿入位置からこれらステップの位置に至るまでに基準反応度に温度

変化と間隙変化による反応度変化の補正を加えた結果 $\pm 0.0018 \rho_0$ の不確かさを持つ反応度値をそれぞれ 1 回と 4 回積み重ねることになる。100 mm や 127 mm からこれら直近の校正ステップ位置までの間の反応度値の不確かさと、両 CR の全挿入とこれら直近の校正ステップの両端での校正時の位置の再現性による不確かさも合わせると、制御棒校正の不確かさによる 2 組の CR の反応度値の不確かさは

$$\pm \sqrt{0.0018^2 \times (1 + 4) + ((1.9388 - 1.0007) \times 0.0023)^2 + ((2.4282 - 2.3761) \times 0.0023)^2 + 0.001^2 \times 2 \times 2}$$

$$= \pm 0.0050 \rho_0$$

となり、先の平均値の不確かさ $\pm 0.011 \rho_0$ と合わせると $\pm 0.012 \rho_0$ となる。なお、先に記述したように、表 A.16 の余剰反応度測定時の SR や CR の位置再現性に伴う不確かさは、既に平均値の不確かさ $\pm 0.011 \rho_0$ に含まれる。

これら 4 回の Run は、5 月 29 日から 6 月 5 日の 8 日間の間に行われ、余剰反応度の平均値 $4.243 \rho_0 \pm 0.012 \rho_0$ は、この期間の中央となる 1987 年 6 月 1 日時点の値である。

A.2 XV-2(45V) 炉心の特性試験

A.2.1 実験炉心

XV-2(45V) 炉心は、1988年3月22日から臨界近接を開始して、片側集合体当たりの引出し装荷本数が、Pu08A 55本、Pu08B 2本、Pu08C 20本、SSB 40本、PuDA1 40本、EUDD 88本、DUB 288本、SCRA 4組8本で径方向に対称な炉心として、3月25日に臨界に到達し同年7月15日まで実験を行った。炉心装荷図は2章に掲載する。

A.2.2 制御棒校正曲線、温度係数と集合体密着面間隙係数の測定

片側集合体当たりのEUDD引出し装荷本数が88本の対称な炉心で2組の制御棒、CR#1とCR#2の校正を行った。安全棒SR#4の25mmから全挿入による反応度を基準反応度 $1 \rho_0$ と定義して、これを基にして置換法で制御棒校正を行った。後に、正炉周期法によりこの $1 \rho_0$ を $\% \Delta k/k$ 単位で求める。置換法の各ステップで等しくする原子炉の出力レベルは、核計装CH#6の電流値でモニターし、その電流値は $0.5 \times 10^{-7} \text{A}$ レベルであった。制御棒校正時の各ステップのSR#4やCR#1、CR#2の配置等のデータを表A.18に示す。

各ステップ間に要した時間は10分程度と短く、温度変化による反応度変化は小さい。集合体密着面間隙の変化による反応度変化は無い。しかしながら、これらの反応度変化を補正する必要がある。この補正のためには、反応度の温度係数と間隙係数が必要となるものの、これらの係数を求めるには制御棒の校正結果を用いる。

そこで、最初に、これらの補正を行わずに制御棒校正実験のデータ処理を行い制御棒校正曲線を算出し、これを基にして温度係数と間隙係数を求める。次に、これらを用いて温度変化や間隙変化による反応度変化の補正を行い、再度、制御棒校正実験のデータ処理を行う。さらに、この再度の処理の結果得た制御棒校正曲線を基にして温度係数と間隙係数を求めるという繰り返しの処理を行った。

まず、ステップ2から16のデータを用いて、CR#1の校正曲線を算出した。この制御棒の反応度値は、全挿入である0.46mm(ステップ2、3)を $0 \rho_0$ として、SR#4との置換により、24.37mm(ステップ4、5)が $1 \rho_0$ 、50.03mm(ステップ6、7)が $2 \rho_0$ 、77.50mm(ステップ8、9)が $3 \rho_0$ 、107.00mm(ステップ10、11)が $4 \rho_0$ 、139.42mm(ステップ12、13)が $5 \rho_0$ 、175.65mm(ステップ14、15)が $6 \rho_0$ 、217.87mm(ステップ16)が $7 \rho_0$ となる。これらはCR#1の先端の位置である。

0.46mmから順番に4点ずつのデータを3次式に当てはめ、これら4点の範囲をカバーする制御棒校正曲線を、制御棒位置を x mm、その位置の制御棒値を $y \rho_0$ とする以下の3次式として求めた。

$$y = a \left(\frac{x}{100} \right)^3 + b \left(\frac{x}{100} \right)^2 + c \left(\frac{x}{100} \right) + d \quad (\text{A.15})$$

3次式の係数、a、b、c、dを表A.19に示す。任意の位置の制御棒反応度値は、この3次式で内挿して求める。3次式の係数の各セットの適用範囲もこの表に示す。これは、最小二乗法によるフィッティングではなくて3次式への当てはめなので、これに伴う不確かさは生じない。

同様に、CR#2については、ステップ2から17のデータを用いて校正曲線を算出した。まず、全挿入で

表 A.18 XV-2(45V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正前の制御棒校正曲線測定データ

ステップ	時刻 ^{I)}	SR#4 位置 ^{II)} [mm]	CR#1 位置 ^{II)} [mm]	CR#2 位置 ^{II)} [mm]	炉心温度 [°C]	密着面間隙 [mm]
1 ^{III)}	13:33	0.00	92.46	89.99	24.53	-0.001
2	13:45	0.00	0.46	213.91	24.52	-0.001
3	13:56	25.00 ^{IV)}	0.46	172.86	24.52	-0.001
4	14:03	0.00	24.37	172.86	24.51	-0.001
5	14:17	24.99	24.37	137.44	24.50	-0.001
6	14:29	0.00	50.03	137.44	24.50	-0.001
7	14:38	25.00	50.03	105.62	24.50	-0.001
8	14:48	0.00	77.50	105.62	24.50	-0.001
9	15:01	25.01	77.50	76.57	24.49	-0.001
10	15:13	0.00	107.00	76.57	24.48	-0.001
11	15:22	24.99	107.00	49.48	24.48	-0.001
12	15:33	0.00	139.42	49.48	24.47	-0.001
13	15:36	25.00	139.42	24.31	24.45	-0.001
14	15:58	0.00	175.65	24.31	24.44	-0.001
15	16:17	25.01	175.65	0.78	24.43	-0.001
16	16:27	0.00	217.87	0.78	24.42	-0.001
17	16:38	25.00	177.08	0.02	24.41	-0.001

I) 実験日 1988/4/1

II) 先端の位置の表示

III) ステップ 1 は制御棒校正には用いない。

IV) 安全棒位置の表示の微小なずれのため 25.01 mm や 24.99 mm の場合もあった。

図 2.3 の径方向に対称な炉心で校正実験実施、核計装 CH#6 は 0.5×10^{-7} A レベル

ある 0.02 mm (ステップ 17) を基準 $0 \rho_0$ とした。遡って、ステップ 16 と 15 で、CR#2 を 0.02 mm から 0.78 mm まで引き抜いた分の反応度値と補償するのは、SR#4 の $1 \rho_0$ 挿入分から CR#1 の 177.08mm から 217.87 mm までの引き抜き分の反応度値を差し引いたものとなる。後者は、上記の CR#1 の校正曲線の式より算出した結果、 $7.0 \rho_0 - 6.0368 \rho_0 = 0.9632 \rho_0$ であった。したがって、CR#2 の 0.78 mm の反応度値は、 $1.0 \rho_0 - 0.9632 \rho_0 = 0.0368 \rho_0$ となる。24.31 mm(ステップ 14 と 13) が $1.0368 \rho_0$ 、49.48 mm(ステップ 12 と 11) が $2.0368 \rho_0$ 、76.57 mm(ステップ 10 と 9) が $3.0368 \rho_0$ 、105.62 mm(ステップ 8 と 7) が $4.0368 \rho_0$ 、137.44 mm(ステップ 6 と 5) が $5.0368 \rho_0$ 、172.86 mm(ステップ 4 と 3) が $6.0368 \rho_0$ 、213.91 mm(ステップ 2) が $7.0368 \rho_0$ となる。CR#1 と同様に、0.02 mm から遡って順番に 4 点ずつのデータを 3 次式に当てはめ、その係数、a、b、c、d を表 A.20 に示す。

これら制御棒校正の不確かさの考え方は、XV-1 炉心と同様である。しかし、本炉心では $1 \rho_0$ を SR#4 の 25

表 A.19 XV-2(45V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正前の制御棒 CR#1 校正曲線

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]
				a	b	c	d	
0.46	24.37	50.03	77.50	0.11956	-0.66492	4.3402	-0.019951	0.46 ~ 50.03
24.37	50.03	77.50	107.00	0.052759	-0.56345	4.2936	-0.013639	50.03 ~ 77.50
50.03	77.50	107.00	139.42	-0.059701	-0.29970	4.0965	0.033018	77.50 ~ 107.00
77.50	107.00	139.42	175.65	0.020966	-0.56099	4.3709	-0.060244	107.00 ~ 139.42
107.00	139.42	175.65	217.87	-0.024053	-0.37098	4.1089	0.057720	139.42 ~ 217.87

表 A.20 XV-2(45V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正前の制御棒 CR#2 校正曲線

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]
				a	b	c	d	
0.02	0.78	24.31	49.48	3.7798	-3.3872	4.8690	-0.00097366	0.02 ~ 24.31
0.78	24.31	49.48	76.57	0.039305	-0.59791	4.3975	0.0025358	24.31 ~ 49.48
24.31	49.48	76.57	105.62	0.11706	-0.71482	4.4508	-0.0046252	49.48 ~ 76.57
49.48	76.57	105.62	137.44	-0.055324	-0.31547	4.1560	0.064354	76.57 ~ 105.62
76.57	105.62	137.44	172.86	0.017930	-0.54961	4.3987	-0.017069	105.62 ~ 137.44
105.62	137.44	172.86	213.91	-0.028922	-0.35474	4.1338	0.10050	137.44 ~ 213.91

mm 移動としたので、データ点間 (ステップ間) の制御棒校正曲線を 1 次式で近似した時の傾き $c/100$ 、すなわち、制御棒の 1 mm 当たりの反応度値は、おおよそ $4/100 = 1/25\rho_0$ であり、これは、大部分の位置で制御棒の 25 mm から 30 mm の移動距離が $1 \rho_0$ に相当することからも導くことができる。制御棒や安全棒の移動の片端での位置の不確かさは $\pm 0.05 \text{ mm}$ である。25 mm の移動距離が $1 \rho_0$ に相当するとして、これを反応度の不確かさに換算すると $\pm 0.05 \text{ mm} \times 1/25\rho_0/\text{mm} = \pm 0.0020\rho_0$ となる。30 mm の移動距離が $1 \rho_0$ に相当すれば、これより 30% ほど小さな不確かさとなるが、反応度に関する不確かさ評価には $\pm 0.0020\rho_0$ を採用する。

制御棒校正の不確かさは、基準となる SR#4 の移動距離 25 mm の不確かさによる $1 \rho_0$ の不確かさを基にして、上記の傾き $c/100$ の不確かさとして評価する。正炉周期法による $1 \rho_0$ の $\% \Delta k/k$ 単位での測定の不確かさは、これとは別に 4.1 節に記述する。SR#4 の移動の片端での位置再現性による反応度の不確かさは $\pm 0.0020 \rho_0$ なので、 $1 \rho_0$ の不確かさは移動距離 25 mm の両端を合わせて $\pm \sqrt{0.0020^2 \times 2} = \pm 0.0028\rho_0$ ($\pm 0.28\%$) となる。これと置換する制御棒の移動距離もおおよそ 25 mm なので、 ρ_0/mm 単位の傾き $c/100$ の不確かさは、 $1 \rho_0$ と制御棒の 25 mm の移動の不確かさを合わせて $\pm \sqrt{0.28^2 \times 2} = \pm 0.40\%$ となる。制御棒の移動距離が 25 mm より小さな反応度差を制御棒との置換法で測定する時、この傾きの不確かさを基に反応度差の不確かさを求める。制御棒の移動距離が 25 mm より大きな時には、個々の場合で反応度差の不確かさを評価するが、その考え方は XV-1 炉心と同様である。

表 A.21 XV-2(45V) 炉心における温度係数と間隙係数の測定データ (温度変化と間隙変化による反応度変化補正前の制御棒校正曲線を使用)

測定項目	実験日 ¹⁾	CR#1		CR#2		CR 2 本 反応度価値 合計 [ρ_0]	温度 [°C]	間隙 [mm]
	Run No.	位置 [mm]	反応度価値 [ρ_0]	位置 [mm]	反応度価値 [ρ_0]			
温度係数	4/1 No.10	107.00	4.0000	76.57	3.0368	7.0368	24.48	-0.001
	4/8 No.1	71.07	2.7721	90.00	3.5089	6.2810	31.83	0.045
	差		-1.2279		0.4721	-0.7558	7.35	0.046
間隙係数	3/31 No.5	83.28	3.2022	89.99	3.5085	6.7107	25.02	0.448
	3/31 No.6	91.95	3.4999	89.99	3.5085	7.0084	24.92	-0.011
	差		0.2977		0.0000	0.2977	-0.10	-0.459

¹⁾ いずれも 1988 年

図 2.3 の径方向に対称な炉心で実験実施、核計装 CH#6 は 0.5×10^{-7} A レベル

温度係数と集合体密着面間隙係数は、表 A.21 のように、それぞれ温度と間隙を大きく変化させた 2 つの臨界データから測定した。温度係数のための 4/1 の Run No.10 は、先の制御棒校正ステップ 10 を兼ねる。しかし、間隙を全く変化させずに温度を変えたり、その逆を行うことはできなかった。そこで、反応度は温度変化と間隙変化について互いに独立に変化するとして、温度係数を $f_T \rho_0/^\circ\text{C}$ と間隙係数を $f_G \rho_0/\text{mm}$ とすると、各係数の測定のための各セットの臨界データ間の差から、連立方程式

$$-0.7558(\pm 0.0089) = 7.35(\pm 0.14) \times f_T + 0.046(\pm 0.028) \times f_G \quad (\text{A.16})$$

$$0.2977(\pm 0.0031) = -0.10(\pm 0.014) \times f_T + -0.459(\pm 0.028) \times f_G \quad (\text{A.17})$$

を立てることができる。ともに、左辺は各セットの臨界データ間の 2 本の CR の反応度価値の合計の差、右辺第 1 項は温度係数に温度差を乗じたもので、同第 2 項は間隙係数に間隙の差を乗じたものである。反応度の差、温度や間隙の差の不確かさは () 内に示す。これら不確かさの評価については以下に記述する。

温度係数を測定する 2 つの Run では集合体を分離、密着させて全ての制御棒 CR と安全棒 SR を動かした。このため、2 つの Run の間の反応度の差の不確かさは、CR と SR の位置再現性と CR の校正の不確かさから求めた。まず、同じ位置に戻したものの、2 つの Run の間で動かした合計 6 組の安全棒 SR の移動前後の位置再現性による反応度の不確かさは、 $\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 \times 6} = \pm 0.0069 \rho_0$ である。

CR#1 の移動前後の片端は校正時のステップ 10、11 の位置 107.00 mm であり、移動の両端は校正時のステップ 8、9 の位置 77.50 mm を跨ぐので、2 つの Run の間の CR#1 の反応度差の不確かさは $\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 + 0.0028^2 + 0.002^2 + ((3.000 - 2.772) \times 0.004)^2} = \pm 0.0045 \rho_0$ となる。平方根内の第 1 項は、CR#1 の 2 つの Run の移動前後の両端での位置再現性による不確かさを加算したものである。第 2 項は、校正時のステップ 8、9 とステップ 10、11 間の SR#4 の移動の両端での位置再現性による $1 \rho_0$ の不確かさ、すなわち $\pm\sqrt{0.002^2 \times 2} = \pm 0.0028 \rho_0$ である。第 3 項は、校正時のステップ 8、9

での CR#1 の位置再現性による不確かさである。ここで、4/1 の Run No.10 は、制御棒校正のステップ 10 を兼ねるため、同ステップ 10、11 での CR#1 の位置再現性による不確かさは含めない。第 4 項は、制御棒校正の不確かさ $\pm 0.4\%$ による同ステップ 8、9 の 77.50 mm と 71.07 mm 間の反応度差の不確かさである。

一方、CR#2 の移動前後の両端は校正時のステップ 7、8 とステップ 9、10 の間にあるので、2 つの Run の間の CR#2 の反応度差の不確かさは、2 つの Run の移動前後の両端での位置再現性による不確かさと制御棒校正の不確かさ $\pm 0.4\%$ による 2 つの Run の間の反応度差の不確かさを合わせて

$$\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 + ((3.5089 - 3.0368) \times 0.004)^2} = \pm 0.0034 \rho_0 \text{ となる。}$$

これらを合わせて、2 つの Run の間の反応度差の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.0069^2 + 0.0045^2 + 0.0034^2} = \pm 0.0089 \rho_0 \text{ となる。}$$

間隙係数の測定では、CR#2 と 6 組の SR は 2 つの Run の間で動かさず、CR#1 のみを動かし、その移動前後の位置は校正時のステップ 8、9 とステップ 10、11 の間であった。したがって、2 つの Run の間の反応度差の不確かさは、CR#1 の移動前後の位置再現性による不確かさと校正の不確かさから

$$\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 + (0.2977 \times 0.004)^2} = \pm 0.0031 \rho_0 \text{ となる。}$$

温度差の不確かさは、温度係数の測定では集合体の分離と密着を行ったため $\pm\sqrt{0.1^2 \times 2} = \pm 0.14^\circ\text{C}$ である。間隙係数の測定では集合体を分離したものの分離の距離は数 mm と僅かで、集合体冷却風の方向は変わらず温度の時間変化は密着を保ったまま測定を行う場合と同じであったことから $\pm\sqrt{0.01^2 \times 2} = \pm 0.014^\circ\text{C}$ である。

間隙差の不確かさは、いずれの測定も集合体の分離と密着を行ったため、 $\pm\sqrt{0.02^2 \times 2} = \pm 0.028 \text{ mm}$ である。

これらを f_T と f_G について解くと、温度係数と間隙係数は

$$\begin{aligned} f_T &= \frac{-0.7558(\pm 0.0089) \times (-0.459)(\pm 0.028) - 0.2977(\pm 0.0031) \times 0.046(\pm 0.028)}{7.35(\pm 0.14) \times (-0.459)(\pm 0.028) - 0.046(\pm 0.028) \times (-0.10)(\pm 0.014)} \\ &= -0.0989 \rho_0 / ^\circ\text{C} \pm 9.4\% \end{aligned} \quad (\text{A.18})$$

$$\begin{aligned} f_G &= \frac{0.2977(\pm 0.0031) \times 7.35(\pm 0.14) - (-0.7558)(\pm 0.0089) \times (-0.10)(\pm 0.014)}{7.35(\pm 0.14) \times (-0.459)(\pm 0.028) - 0.046(\pm 0.028) \times (-0.10)(\pm 0.014)} \\ &= -0.627 \rho_0 / \text{mm} \pm 6.8\% \end{aligned} \quad (\text{A.19})$$

となる。

CR#1 に関して、校正の実験結果に温度変化や間隙変化に伴う反応度変化の補正を行った結果を表 A.22 に示す。この補正後の反応度値を用いた CR#1 の校正曲線の係数 a、b、c、d を表 A.23 に示す。

CR#2 に関しては、校正の実験結果にこれらの反応度変化の補正を行った結果を表 A.24 に示す。全挿入である 0.02 mm (ステップ 17) を基準 $0 \rho_0$ とし、遡って、ステップ 16 と 15 で、CR#2 を 0.02 mm から 0.78 mm まで引き抜いた分の反応度値と補償するのは、温度変化と間隙変化の補正を考えなければ、SR#4 の $1 \rho_0$ 挿入分から CR#1 の 177.08 mm から 217.87 mm までの引き抜き分の反応度値を差し引いたものとなる。後者は、補正済みの CR#1 の校正曲線の式より算出した結果、 $7.0050\rho_0 - 6.0409\rho_0 = 0.9641\rho_0$ であった。した

表 A.22 XV-2(45V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正後の制御棒 CR#1 校正曲線測定データ

ステップ	制御棒位置 [mm]	補正前反応度価値 [ρ_0]	補正量		補正後反応度価値 ¹⁾ [ρ_0]
			温度変化分 [ρ_0]	間隙変化分 [ρ_0]	
2,3	0.46	0.0	-	-	0.0
4,5	24.37	1.0	0.0010 ²⁾		1.0010
6,7	50.03	2.0			2.0010
8,9	77.50	3.0			3.0010
10,11	107.00	4.0	0.0010		4.0020
12,13	139.42	5.0	0.0010		5.0030
14,15	175.65	6.0	0.0010		6.0040
16	217.87	7.0	0.0010		7.0050

¹⁾ 現ステップの補正量とともに、前ステップまでの補正量をすべて加える。

²⁾ 温度 -0.01°C の変化による反応度変化

表 A.23 XV-2(45V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正済みの制御棒 CR#1 校正曲線

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]
				a	b	c	d	
0.46	24.37	50.03	77.50	0.130513	-0.68156	4.3479	-0.019986	0.46 ~ 50.03
24.37	50.03	77.50	107.00	0.059960	-0.57439	4.2986	-0.013319	50.03 ~ 77.50
50.03	77.50	107.00	139.42	-0.066909	-0.27684	4.0763	0.039315	77.50 ~ 107.00
77.50	107.00	139.42	175.65	0.020987	-0.56155	4.3753	-0.062305	107.00 ~ 139.42
107.00	139.42	175.65	217.87	-0.024077	-0.37135	4.1130	0.055777	139.42 ~ 217.87

がって、表 A.24 に示す CR#2 の 0.78 mm の温度変化分補正前の反応度価値は、 $1.0\rho_0 - 0.9641\rho_0 = 0.0359\rho_0$ となる。この補正後の反応度価値を用いた CR#2 の校正曲線の係数 a、b、c、d を表 A.25 に示す。

ステップ間で最大で 0.02°C の温度変化がある。密着のまま一連の測定を行ったため、この温度変化の不確かさは $\pm\sqrt{0.01^2 \times 2} = \pm 0.014^\circ\text{C}$ である。温度係数を用いて温度変化による反応度価値への補正量の不確かさを算出すると、温度変化が 0.02°C の時でも

$$\pm\sqrt{(-0.0989 \times 0.014)^2 + (0.02 \times (-0.0989) \times 0.094)^2} = \pm 0.0014\rho_0$$

となる。ここで、温度変化が小さいため平方根内第 2 項の間隙係数の不確かさ $\pm 9.4\%$ の寄与は小さく無視し得る。集合体の密着を保つ場合、仮に温度変化が無くても温度測定に $\pm 0.01^\circ\text{C}$ の不確かさが有ることから $\pm\sqrt{0.01^2 \times 2} \times (-0.0989) = \pm 0.0014\rho_0$ の不確かさが生じる。

次に、全てのステップ間で間隙の変化は無いが、集合体の密着を保ったままで間隙測定に ± 0.001 mm の不

表 A.24 XV-2(45V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正後の制御棒 CR#2 校正曲線測定データ

ステップ	制御棒位置 [mm]	補正前反応度値 [ρ_0]	補正量		補正後反応度値 ¹⁾ [ρ_0]
			温度変化分 [ρ_0]	間隙変化分 [ρ_0]	
17	0.02	0.0	-	-	0.0
16,15	0.78	0.0359	-0.0010 ¹⁾		0.0349
14,13	24.31	1.0359	-0.0010		1.0339
12,11	49.48	2.0359	-0.0020 ¹⁾		2.0319
10,9	76.57	3.0359			3.0319
8,7	105.62	4.0359	-0.0010		4.0309
6,5	137.44	5.0359			5.0309
4,3	172.86	6.0359	-0.0010		6.0299
1	213.91	7.0359			7.0299

¹⁾ 現ステップの補正量とともに、前ステップまでの補正量をすべて加える。

¹⁾ 温度 +0.01°C の変化による反応度変化

¹⁾ 温度 +0.02°C の変化による反応度変化

表 A.25 XV-2(45V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正済みの制御棒 CR#2 校正曲線

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]
				a	b	c	d	
0.02	0.78	24.31	49.48	1.7189	-1.8580	4.6069	-0.00092130	0.02 ~ 24.31
0.78	24.31	49.48	76.57	0.069380	-0.6279	4.3990	0.00062632	24.31 ~ 49.48
24.31	49.48	76.57	105.62	0.090814	-0.66016	4.4136	-0.0013478	49.48 ~ 76.57
49.48	76.57	105.62	137.44	-0.041923	-0.35265	4.1866	0.051768	76.57 ~ 105.62
76.57	105.62	137.44	172.86	0.0076964	-0.51125	4.3510	-0.0033849	105.62 ~ 137.44
105.62	137.44	172.86	213.91	-0.021636	-0.38925	4.1852	0.070218	137.44 ~ 213.91

確かさが有ることから $\pm\sqrt{0.001^2 \times 2} \times (-0.627) = \pm 0.0009\rho_0$ の不確かさが生じる。

すなわち、ステップ間で温度や間隙の変化が無い場合であっても、温度や間隙の測定の不確かさにより $1 \rho_0$ に補正を行った後の反応度値の不確かさは、これまでの SR#4 の 25 mm 移動時の両端での位置再現性に伴う不確かさの他に、温度や間隙の測定による不確かさも合わせて $\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 + 0.0014^2 + 0.0009^2} = \pm 0.0033\rho_0$ ($\pm 0.33\%$) となる。したがって、CR#1 や CR#2 のステップ間の移動時の位置再現性による不確かさ $\pm 0.28\%$ も合わせて、補正後の制御棒校正の不確かさは $\pm\sqrt{0.33^2 + 0.28^2} = \pm 0.43\%$ となる。

温度係数と間隙係数の測定時の反応度の差をこれらの補正後の制御棒校正曲線を用いて求めた結果を表 A.26 に示す。温度と間隙のデータは表 A.21 と同じである。制御棒校正曲線を変更しても反応度の差は $0.0015 \rho_0$

表 A.26 XV-2(45V) 炉心における温度係数と間隙係数の測定データ (温度変化と間隙変化による反応度変化補正後の制御棒校正曲線を使用)

測定項目	実験日 ^{D)}	CR#1		CR#2		CR 2 本 反応度価値 合計 [ρ_0]	温度 [°C]	間隙 [mm]
	Run No.	位置 [mm]	反応度価値 [ρ_0]	位置 [mm]	反応度価値 [ρ_0]			
温度係数	4/1 No.10	107.00	4.0020	76.57	3.0319	7.0339	24.48	-0.001
	4/8 No.1	71.07	2.7731	90.00	3.5035	6.2766	31.83	0.045
	差		-1.2289		0.4716	-0.7573	7.35	0.046
間隙係数	3/31 No.5	83.28	3.2034	89.99	3.5032	6.7066	25.02	0.448
	3/31 No.6	91.95	3.5014	89.99	3.5032	7.0046	24.92	-0.011
	差		0.2980		0.0000	0.2980	-0.10	-0.459

^{D)} いずれも 1988 年

図 2.3 の径方向に対称な炉心で実験実施、核計装 CH#6 は 0.5×10^{-7} A レベル

だけ変化するに過ぎず、この変化は $1 \rho_0$ のオーダーの反応度の差と比べて僅かであった。制御棒校正中の温度測定と間隙測定の不確かさにより、 $1 \rho_0$ の不確かさが $\pm 0.0033 \rho_0$ と大きくなり、温度変化補正後の制御棒校正の不確かさが少し大きくなり $\pm 0.43\%$ となったため、温度係数の測定において反応度の差の不確かさが少し大きくなり、 $\pm 0.0092 \rho_0$ となった。温度係数と間隙係数の新たな値と不確かさは

$$f_T = \frac{-0.7573(\pm 0.0092) \times (-0.459)(\pm 0.028) - 0.2980(\pm 0.0031) \times 0.046(\pm 0.028)}{7.35(\pm 0.14) \times (-0.459)(\pm 0.028) - 0.046(\pm 0.028) \times (-0.10)(\pm 0.014)}$$

$$= -0.0991 \rho_0 / ^\circ\text{C} \pm 9.4\% \quad (\text{A.20})$$

$$f_G = \frac{0.2980(\pm 0.0031) \times 7.35(\pm 0.14) - (-0.7573)(\pm 0.0092) \times (-0.10)(\pm 0.014)}{7.35(\pm 0.14) \times (-0.459)(\pm 0.028) - 0.046(\pm 0.028) \times (-0.10)(\pm 0.014)}$$

$$= -0.628 \rho_0 / \text{mm} \pm 6.8\% \quad (\text{A.21})$$

となる。新たな温度係数と間隙係数は、補正前の制御棒校正曲線を用いた値からそれぞれ 0.2% と 0.16% の相違に過ぎず、これら係数の不確かさもほとんど変わらない。

制御棒校正実験において、温度変化による反応度価値への補正は、表 A.22 や表 A.24 から積算しても $0.006 \rho_0$ 以下と小さいため、温度係数をこれらの新たな値に変更しても、温度変化による補正量への影響は無視し得るほど小さい。すなわち、 $0.006 \rho_0$ 以下の補正量が 0.2% 変化するに過ぎず無視し得る。したがって、最終的に、温度変化と間隙変化による反応度変化補正済みの制御棒曲線校正の結果である表 A.23、表 A.25 と上記の新たな温度係数と間隙係数を採用する。

A.2.3 基準反応度の測定

SR#4 の 25 mm から全挿入位置である 0.00 mm への挿入による基準反応度 ρ_0 を正炉周期法により測定した。一定の原子炉出力で運転時は浅い未臨界なので、この状態から反応度 ρ_0 を印加しても、この印加反応度から印加前の未臨界度を差し引いた反応度だけ超臨界となる。そこで、補正のためにこの未臨界度を前もって測定した。

3.4 節のとおり、線形出力系の読みが C_a 、 C_b である時の未臨界度を、それぞれ ρ_a 、 ρ_b とすると、中性子源増倍法を基にして

$$\rho_b = \frac{\rho_a - \rho_0}{\frac{C_b}{C_a} - 1} \tag{A.22}$$

である。

基準反応度測定のための安全棒と制御棒の配置を表 A.27 に示す。まず、SR#4 を 25.01 mm、CR#1 を 77.50 mm、CR#2 を 76.91 mm として核計装 CH#6 で 0.4973×10^{-7} A (C_a) で定常とした。次に、CH#6 をこれより一桁高い 0.5006×10^{-6} A (C_b) で定常とするために、CR#2 のみ調整したところ 73.09 mm となった。CR#2 の反応度値は、制御棒校正曲線から全挿入 0.02 mm を基準として、76.91 mm が $3.0440 \rho_0$ 、73.09 mm が $2.9074 \rho_0$ である。この間に温度と間隙には変化が無いので、2つの原子炉出力レベルの未臨界度の差は CR#2 の反応度差より $\rho_a - \rho_b$ は $3.0440 - 2.9074 = 0.1366\rho_0 \pm 0.0033 \rho_0$ ($\pm 2.4\%$) となる。この不確かさは CR#2 の移動の両端での位置再現性による不確かさ、CR#2 の校正の不確かさに加えて、温度と間隙は変化しないがこれらの測定の不確かさから

$$\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 + ((3.0440 - 2.9074) \times 0.0043)^2 + 0.0014^2 + 0.0009^2} = \pm 0.0033\rho_0$$

表 A.27 XV-2(45V) 炉心における基準反応度測定のための安全棒と制御棒の配置

実験日 ^{D)} Run No.	ステップ	SR#4 ^{II)}		CR#2 ^{III)}		炉心温度 [°C]	間隙 [mm]	CH#6 電流値 [A]	反応度 [ρ_0]
		位置 [mm]	反応度 ^{IV)} [ρ_0]	位置 [mm]	反応度 ^{IV)} [ρ_0]				
4/1 No.22	1	25.01	1.0000	76.91	3.0440	24.37	-0.001	0.4973×10^{-7}	-0.1517
4/1 No.23	2	25.01	1.0000	73.09	2.9074	24.37	-0.001	0.5006×10^{-6}	-0.0151
	3	0.02	0.0000	73.09	2.9074			(炉周期測定)	0.9849

D) いずれも 1988 年

II) 他の安全棒は全挿入で固定

III) CR#1 は、ステップ 1、2 では 77.50 mm に固定し、ステップ 2 の後に原子炉出力を下げるために大きく引き抜き、ステップ 3 で元の位置に戻した。

IV) この SR または CR を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

図 2.3 の径方向に対称な炉心で実験実施

と算出した。制御棒校正のステップ 10、9 の CR#2 位置 76.57 mm が、CR#2 の 76.91 mm から 73.09 mm への移動の間にあるが、移動距離が小さいため 76.57 mm の前後で分けずに不確かさを評価した。このように算出すると制御棒校正の不確かさの寄与を若干過大評価することになるが、この寄与は小さくて位置の再現性による不確かさの寄与が大部分を占めるため、CR#2 の移動による反応度差の不確かさへの影響は無視し得る。

したがって、(A.22) 式を用いて CH#6 が 0.5006×10^{-6} A 時の未臨界度は $0.0151 \rho_0 \pm 0.00037 \rho_0$ ($\pm 2.4\%$) となる。ここで、2 つの原子炉出力レベルでの CH#6 の電流値の比の不確かさは、この $\pm 2.4\%$ に比べて十分小さいので無視した。SR#4 の挿入による $1 \rho_0$ の反応度に対してこの未臨界度分の補正を行う。

このようにして、反応度 $-0.0151 \rho_0 \pm 0.00037 \rho_0$ ($\pm 2.4\%$) の未臨界状態 (ステップ 2) から、SR#4 を 25.00 mm から全挿入して $1.000 \rho_0 \pm 0.0028 \rho_0$ の反応度を印加し、ステップ 3 の $0.9849 \rho_0 \pm 0.0028 \rho_0$ の超臨界にした。この不確かさは、ステップ 2 の反応度の不確かさ $\pm 0.00037 \rho_0$ と SR#4 の移動前後の位置の再現性による不確かさ $\pm 0.0028 \rho_0$ を合わせたものである。

原子炉出力の増加は核計装 CH#6 でモニターし、これが 0.4×10^{-6} A から 0.8×10^{-6} A の間で、2 名の測定者がそれぞれのストップウォッチで測定した倍加時間は、ともに 46.4 秒であった。その不確かさは、これまでの経験から ± 0.5 秒を見込んだ。これより、原子炉周期は $T = 46.4 / \ln(2) = 66.9 \pm 0.7$ 秒となる。この原子炉周期より、逆時間方程式 (4.1) と JENDL-4.0 の遅発中性子データ評価値に基づく動特性パラメータにより反応度を求めた結果、 $0.9849 \rho_0 \pm 0.0028 \rho_0$ ($\pm 0.28\%$) = $0.0594\% \Delta k/k$ であった。すなわち、 $1 \rho_0 = 0.0603\% \Delta k/k$ である。この基準反応度の不確かさは、用いた遅発中性子データによる不確かさの寄与を合わせて 4.1 節に記述する。

A.2.4 炉心周辺部での燃料引出し反応度値の測定

ドライバー燃料引出し EUDD の反応度値は、炉心周辺の複数本の EUDD 引出しと DUB 引出しを表 A.28 に示すように順次置換して測定を行った。EUDD 引出しを片側集合体当たり 88 本装荷した対称な炉心から、F117/25、F117/27、F135/25、F135/27、M117/25、M117/27、M135/25、M135/27 の位置で EUDD 引出しを DUB 引出しに置換した片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数が 84 本の炉心を基準として測定を行った。

この置換反応度値は、制御棒で補償することにより測定した。すなわち、集合体を分離して引出しを入れ替えた後に集合体を再密着して臨界とすることによる引出しの置換前後の 2 つの Run の間での制御棒 CR の位置の差を求めた。これを制御棒校正曲線より反応度値に換算して、さらに、2 つの Run の間での炉心温度差と集合体密着面間隙の差による反応度差を補正した。

表 A.28 では、この補正した置換反応度値を簡便に算出するため、制御棒に関しては、各 Run の制御棒の位置と基準とする全挿入位置の差を反応度値に換算して示す。この全挿入位置は、表 A.18 より CR#1 は 0.46 mm で CR#2 は 0.02 mm である。炉心温度に関しては、各 Run の温度と基準とする 20°C との差を反応度差に換算して示す。集合体密着面間隙に関しては、各 Run の間隙と基準とする 0.000 mm との差を反応度差に換算して示す。これら制御棒の反応度値、温度差と間隙の差による反応度差を全て足し合わすと、温度

表 A.28 XV-2(45V) 炉心におけるドライバー領域の燃料引出しの置換反応度値

実験日 ^{Ⅰ)} Run No.	片側集合体 EUDD 引出し 本数	CR#1		CR#2		炉心温度		密着面間隙		余剰 反応度 ^{Ⅴ)} [ρ_0]	反応度 値 ^{Ⅵ)} [ρ_0]
		位置 [mm]	反応度 ^{Ⅱ)} [ρ_0]	位置 [mm]	反応度 ^{Ⅱ)} [ρ_0]	温度 [°C]	反応度 ^{Ⅲ)} [ρ_0]	間隙 [mm]	反応度 ^{Ⅳ)} [ρ_0]		
3/25 No.4	88 ^{Ⅶ)}	82.69	3.1829	99.99	3.8435	24.75	0.4707	-0.005	-0.0031	7.4940	4.903
3/25 No.6	84 ^{Ⅷ)}	25.55	1.0486	24.99	1.0618	24.88	0.4836	-0.004	-0.0025	2.5915	(3/25 の基準)
3/25 No.7	86 ^{Ⅸ)}	40.01	1.6188	42.41	1.7586	24.85	0.4806	-0.004	-0.0025	3.8555	1.264
3/30 No.1	86 ^{Ⅹ)}	59.83	2.3658	55.01	2.2419	25.16	0.5114	0.001	0.0006	5.1197	2.540
3/30 No.2	86 ^{Ⅺ)}	68.48	2.6802	60.00	2.4288	25.10	0.5054	-0.006	-0.0038	5.6106	3.031
3/30 No.3	86 ^{Ⅻ)}	51.26	2.0473	60.00	2.4288	25.19	0.5143	-0.005	-0.0031	4.9873	2.408
3/30 No.4	84 ^{Ⅷ)}	24.51	1.0067	25.00	1.0622	25.18	0.5133	-0.004	-0.0025	2.5794	(3/30 の基準)

Ⅰ) いずれも 1988 年

Ⅱ) この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

Ⅲ) 炉心温度を左記の読みから基準とする 20.00°C に変化させる時に加わる反応度

Ⅳ) 集合体密着面間隙を左記の読みから基準とする 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

Ⅴ) 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00°C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度

Ⅵ) 各日の基準との余剰反応度の差で、不確かさは 3/25 の Run No.4 が $\pm 0.025 \rho_0$ で、これ以外の Run は $\pm 0.024 \rho_0$

Ⅶ) 基準から F117/25、F117/27、F135/25、F135/27、M117/25、M117/27、M135/25、M135/27 にて合計 8 本の DUB 引出しを 8 本の EUDD 引出しに置換

Ⅷ) 図 2.3 の径方向に対称な炉心から F117/25、F117/27、F135/25、F135/27、M117/25、M117/27、M135/25、M135/27 にて合計 8 本の EUDD 引出しを 8 本の DUB 引出しに置き換えた炉心を基準とする。

Ⅸ) 基準から F126/16、F126/36、M126/16、M126/36 にて DUB 引出し 4 本を EUDD 引出し 4 本に置換

Ⅹ) 基準から F128/17、F124/35、M128/17、M124/35 にて DUB 引出し 4 本を EUDD 引出し 4 本に置換

Ⅺ) 基準から F130/18、F122/34、M130/18、M122/34 にて DUB 引出し 4 本を EUDD 引出し 4 本に置換

Ⅻ) 基準から F132/19、F120/33、M132/19、M120/33 にて DUB 引出し 4 本を EUDD 引出し 4 本に置換
核計装 CH#6 は 0.5×10^{-7} A レベル

20.00°C、間隙読み 0.000 mm の基準状態に補正した炉心の余剰反応度となる^{Ⅲ)}。2つの Run の間でこれら補正した余剰反応度の差をとることにより、簡便に、2つの Run の間の補正した反応度の差、すなわち引出しの置換反応度値を算出することができる。

このように、補正した余剰反応度の差として引出しの置換反応度値を算出するものの、その内訳は、2つの Run の間で制御棒の位置の差を反応度差に換算し、これに温度や間隙の差を反応度差に換算して補正したものである。したがって、この置換反応度値の不確かさは、制御棒、安全棒の位置の再現性による不確かさと

^{Ⅲ)} ただし、この余剰反応度は浅い未臨界から制御棒の挿入により印加できる反応度変化であり、本来の臨界からの余剰反応度とするためには、この未臨界度分の補正を行う必要がある。

校正の不確かさ、温度測定と温度係数の不確かさや間隙測定と間隙係数の不確かさから算出した。

制御棒の反応度差の不確かさは、2つの Run の間での移動前後の位置再現性による不確かさと校正の不確かさによるものを合わせる。例えば、3/25 の Run No.4 と No.6 の置換反応度値では、CR#1 の移動前後の位置は制御棒校正のステップ 6、7 の 50.03 mm とステップ 8、9 の 77.50 mm を跨ぐため、反応度差の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 + ((3.1829 - 3.0010) \times 0.0043)^2 + 0.0033^2 + 0.002^2 \times 2 + ((2.0010 - 1.0486) \times 0.0043)^2}$$

$$= \pm 0.0067 \rho_0$$

となる。平方根内の第 1 項は CR#1 の Run No.4 と No.6 の両端での位置再現性による不確かさで、第 2 項は校正の不確かさによる Run No.4 の 82.69 mm からステップ 8、9 の 77.50 mm の反応度差の不確かさ、第 3 項はステップ 8、9 とステップ 6、7 間の SR#4 による $1 \rho_0$ の不確かさで SR#4 の移動の両端での位置再現性と校正時の温度と間隙の測定の不確かさを合わせたもの、第 4 項はステップ 8、9 とステップ 6、7 の両端での校正時の CR#1 の位置再現性による不確かさで、第 5 項は校正の不確かさによるステップ 6、7 の 50.03 mm から Run No.4 の 25.55 mm の反応度差の不確かさである。CR#2 の移動前後の位置も制御棒校正のステップ 11、12 の 49.48 mm とステップ 9、10 の 76.57 mm を跨ぐため、反応度差の不確かさは CR#1 と同様に

$$\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 + ((3.8435 - 3.0319) \times 0.0043)^2 + 0.0033^2 + 0.002^2 \times 2 + ((2.0319 - 1.0618) \times 0.0043)^2}$$

$$= \pm 0.0075 \rho_0$$

となる。

安全棒に関しては、同一日であれば集合体の分離と再密着を行っても全挿入位置から動かすことはなく不確かさは生じない。

炉心温度に関しては、集合体の分離と密着を行う時の温度測定の不確かさ $\pm 0.1^\circ\text{C}$ と温度係数の不確かさ $\pm 9.4\%$ を合わせて、温度変化による反応度変化の補正の不確かさは

$$\pm\sqrt{(\sqrt{0.1^2 \times 2} \times (-0.0991))^2 + (-0.0991 \times 0.094 \times (24.75 - 24.88))^2} = \pm 0.014 \rho_0$$

となる。温度差が小さなため、前者の寄与がこの不確かさの大部分を占める。

集合体密着面間隙に関しては、集合体の分離と密着を行う時の間隙測定の不確かさ $\pm 0.02 \text{ mm}$ と間隙係数の不確かさ $\pm 6.8\%$ を合わせて、間隙の差による反応度差の補正の不確かさは

$$\pm\sqrt{(\sqrt{0.02^2 \times 2} \times (-0.628))^2 + (-0.628 \times 0.068 \times (-0.0054 - (-0.0044)))^2} = \pm 0.018 \rho_0$$

となる。間隙の差が小さなため、前者の寄与がこの不確かさの大部分を占める。

これら 4 つの不確かさを合わせて、引出し置換反応度値の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.0067^2 + 0.0075^2 + 0.014^2 + 0.018^2} = \pm 0.025 \rho_0$$

となる。温度差と間隙の差による反応度差の補正の不確かさの寄与が大きい。他の置換反応度値に関しても同様に算出した結果、いずれも不確かさは $\pm 0.024 \rho_0$ となった。

集合体の分離と再密着を伴う場合は、仮に、2つの Run の間で温度や間隙の差が無い場合でも、温度測定に伴う反応度の不確かさ

$$\pm\sqrt{0.1^2 \times 2} \text{ } ^\circ\text{C} \times (-0.0991) \rho_0 / ^\circ\text{C} = \pm 0.014 \rho_0$$

と間隙測定に伴う反応度の不確かさ

$$\pm\sqrt{0.02^2 \times 2} \text{ mm} \times (-0.628) \rho_0/\text{mm} = \pm 0.018 \rho_0$$

が生じる。

A.2.5 未臨界度の測定

実効増倍率は主に2本の制御棒CRの余剰反応度から算定するが、これに種々の補正を行う。そのうちのひとつが未臨界度である。基準反応度の測定時と同様に、浅い未臨界で核計装CH#6の読みが C_a 、 C_b である時の未臨界度をそれぞれ ρ_a 、 ρ_b とすると、中性子源増倍法を基にしてこれらには(A.22)式の関係がある。表A.29に示すように、原子炉出力レベルを2段階に変えたRunを3組実施して、それぞれ未臨界度を求めた。

各日の2つのRunで余剰反応度の差が $\rho_a - \rho_b$ である。これら2つのRunの間で、CR#1またはCR#2のいずれか片方を動かして原子炉出力を変更し、他方のCRと全ての安全棒SRは動かさなかった。さらに、集合体は密着したままであり間隙の変化も無いかごく僅かなので、この余剰反応度の差の不確かさは、CR#1またはCR#2の移動による反応度差の不確かさ、温度変化と間隙変化による反応度変化の補正の不確かさから以下のように算定した。

例えば、3/30の2つのRunではCR#1のみ動かしたので、CR#1の移動時の位置の再現性と制御棒校正の不確かさより $\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 + (1.0067 - 0.8740) \times 0.0043^2} = \pm 0.0029 \rho_0$

の不確かさが生じる。CR#1の移動前後の位置は、制御棒校正のステップ4、5の24.37 mmを跨ぐが、移動距離が3 mm程度と小さなため、この24.37 mmの前後で分けずに不確かさを算出した。このように算出すると制御棒校正の不確かさの寄与を若干過大評価することになるが、この寄与は小さくて位置の再現性による不確かさの寄与が大部分を占めるため、CR#1の移動による反応度差の不確かさへの影響は無視し得る。

集合体の密着を保持した時の温度測定の不確かさと温度係数の不確かさより

$$\pm\sqrt{(\sqrt{0.01^2 \times 2} \times (-0.0991))^2 + (-0.0991 \times 0.094 \times (25.18 - 25.09))^2} = \pm 0.0016 \rho_0$$

の不確かさが生じる。集合体の密着を保持した時の間隙測定の不確かさと間隙係数の不確かさより

$$\pm\sqrt{(\sqrt{0.001^2 \times 2} \times (-0.628))^2 + (-0.628 \times 0.068 \times (-0.004 - (-0.005)))^2} = \pm 0.0009 \rho_0$$

の不確かさが生じる。

余剰反応度の差の不確かさは、これらを合わせて

$$\pm\sqrt{0.0029^2 + 0.0016^2 + 0.0009^2} = \pm 0.0034 \rho_0$$

となる。したがって、(A.22)式を用いて3/30の核計装CH#6が $0.4988 \times 10^{-7} \text{ A}$ で運転時の未臨界度は $0.1580 \rho_0 \pm 0.0038 \rho_0$ ($\pm 2.4\%$)となる。ここで、2つの原子炉出力レベルでのCH#6の電流値の比の不確かさは、この $\pm 2.4\%$ に比べて十分小さいので無視した。

中性子源増倍法より、未臨界度と、その時の原子炉出力レベルとしての核計装CH#6の電流値の積は一定となる。この積は、3/25が $7.62 \times 10^{-9} \rho_0 \text{ A} \pm 2.5\%$ 、3/30が $7.88 \times 10^{-9} \rho_0 \text{ A} \pm 2.4\%$ 、4/1が $7.54 \times 10^{-9} \rho_0 \text{ A} \pm 2.4\%$ となった。3/30と4/1の値の間には4.2%の差があるが、各日の不確かさより有意な差ではない。

表 A.29 XV-2(45V) 炉心における未臨界度

実験日 ^{Ⅰ)} Run No.	CR#1		CR#2		炉心温度		密着面間隙		余剰 反応度 ^{Ⅴ)} [ρ_0]	CH#6 電流 [$\times 10^{-7}$ A]	未臨界度 [ρ_0]
	位置 [mm]	反応度 ^{Ⅱ)} [ρ_0]	位置 [mm]	反応度 ^{Ⅱ)} [ρ_0]	温度 [$^{\circ}$ C]	反応度 ^{Ⅲ)} [ρ_0]	間隙 [mm]	反応度 ^{Ⅳ)} [ρ_0]			
3/25 No.4	82.69	3.1829	99.99 ^{Ⅵ)}	3.8435	24.75	0.4707	-0.005	-0.0031	7.4940	0.5001	0.1525 $\pm 0.0038(2.5\%)$
3/25 No.5	79.07	3.0563	99.99 ^{Ⅵ)}	3.8435	24.65	0.4608	-0.006	-0.0038	7.3568	4.994	0.0153 $\pm 0.00038(2.5\%)$
3/30 No.4	24.51	1.0067	25.00 ^{Ⅵ)}	1.0622	25.18	0.5133	-0.004	-0.0025	2.5797	0.4988	0.1580 $\pm 0.0038(2.4\%)$
3/30 No.5	21.24	0.8740	25.00 ^{Ⅵ)}	1.0622	25.09	0.5044	-0.005	-0.0031	2.4375	5.003	0.0158 $\pm 0.00038(2.4\%)$
4/1 No.22	77.50 ^{Ⅵ)}	3.0010	76.91	3.0440	24.37	0.4331	-0.001	-0.0006	7.4775 ^{Ⅶ)}	0.4973	0.1517 $\pm 0.0036(2.4\%)$
4/1 No.23	77.50 ^{Ⅵ)}	3.0010	73.09	2.9074	24.37	0.4331	-0.001	-0.0006	7.3409 ^{Ⅶ)}	5.006	0.0151 $\pm 0.00036(2.4\%)$

Ⅰ) いずれも 1988 年

Ⅱ) この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

Ⅲ) 炉心温度の読みを左記の値から基準の 20.00 $^{\circ}$ C に変化させる時に加わる反応度

Ⅳ) 集合体密着面間隙の読みを左記の値から基準の 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

Ⅴ) 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00 $^{\circ}$ C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度に相当

Ⅵ) 3/25 と 3/30 は CR#2 は動かさず CR#1 で原子炉出力を変更し、逆に、4/1 は CR#1 は動かさず CR#2 で原子炉出力を変更した。

Ⅶ) SR#4 を 25.01 mm まで引き抜き固定したのでその反応度値 1 ρ_0 を加えた。他の 5 組の SR は全挿入
3/25 と 4/1 は図 2.3 の径方向に対称な炉心で実験実施、3/30 は、図 2.3 の径方向に対称な炉心から F117/25、F117/27、F135/25、F135/27、M117/25、M117/27、M135/25、M135/27 にて合計 8 本の EUDD 引出しを 8 本の DUB 引出しに置き換え、片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数を 84 本とした炉心で実験実施、4/1 を除き 6 組の SR は全挿入

3 つの値の平均である $7.68 \times 10^{-9} \rho_0 A$ を採用し、その不確かさには 3 つの値の間の標準偏差 $\pm 0.14 \times 10^{-9} \rho_0 A$ ($\pm 1.9\%$) を採用する。これを基に余剰反応度に補正を行い実効増倍率を求める。

A.2.6 密着面でのステンレス鋼反応度値の測定

炉心の中心面に相当する 2 分割集合体の密着面には、主に引出し前端面の部材としてのステンレス鋼があり、決定論手法で実効増倍率を計算する場合はそのモデル化が困難となる場合がある。そこで、このステンレス鋼の負の反応度効果を実験的に求めて実効増倍率の実験値導出において補正として用い、密着面のステンレス鋼を取り除いた炉心の実効増倍率を決定論手法による計算結果と比較する。この補正のために、炉心中心引

表 A.30 XV-2(45V) 炉心中心におけるステンレス鋼反応度値測定に用いたステンレス板とアルミニウム板の重量

板種類とサイズ	枚数	合計重量 [g] ¹⁾	板種類とサイズ	枚数	合計重量 [g]
SUS(1/4×2×2)	1	124.6 ¹⁾	Al frame(1/8×2×2) ^{III)}	2	8.633 ^{II)}
Al(1/16×2×2)	8	81.70 ^{II)}	Al frame(1/4×2×2) ^{III)}	2	10.22 ^{II)}

¹⁾ 重量の測定誤差は 0.1% 未満

^{II)} 実験時の記録より

^{III)} Al(1/8×2×2) 板または Al(1/4×2×2) 板の内側をくり抜いて製作

出しの密着面近傍においてステンレス鋼の反応度値測定を行った。炉心中心引出し以外の領域の密着面では、付録 B.2.6 項の XIV-1 炉心において求めた表 B.20 の炉心中心引出しと各領域間の反応度値の比を基に、そのステンレス鋼の反応度値を求めた。

実験に用いたステンレス板などの重量を表 A.30 に示す。重量の測定誤差は 0.1% 未満であり、後に記述するように反応度値の測定誤差と比べて無視し得るほど小さい。

まず、F126/26 の中心引出しにおいて、引出し内の燃料板と模擬物質板を全て軸方向に炉心外側に向けておらずることにより、この引出し内の前端面の内側に、通常とは垂直の方向に模擬物質板を装填できる 1/4 インチ幅の空間を設けて、この空間で 1 枚のステンレス SUS(1/4×2×2) 板とアルミニウム Al frame(1/8×2×2) 板 2 枚の置換反応度値を 3/31 の Run No.7 と No.9 で測定した。測定結果を表 A.31 に示す。

これらの反応度値は、制御棒 CR#1 で補償することにより測定した。集合体は分離せずに密着を保ったまま、ステンレス板とアルミニウム板の入れ替え前後の 2 つの Run の間での CR#1 の位置の差を求めた。これを制御棒の校正結果より反応度値に換算して、さらに、2 つの Run の間での炉心温度と集合体密着面間隙の変化による反応度変化を補正した。

表 A.30 より SUS(1/4×2×2) 板の重さは 124.6 g で Al frame(1/8×2×2) 板 2 枚の重さは 8.633 g であり、この置換反応度値の測定結果は表 A.31 に示すように $-0.0414 \rho_0 \pm 0.0066 \rho_0$ である。この不確かさは以下のように算出した。

制御棒 CR と安全棒 SR に関しては、まず、同じ位置に戻したものの 2 つの Run の間で動かした CR#2 と固定側集合体の 3 組の安全棒 SR の移動前後の位置再現性により生じる反応度の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 \times 4} = \pm 0.0057 \rho_0$$

である。これら 2 つの Run の間では、移動側集合体の 3 組の SR は全挿入のまま動かさなかったため、これら SR に関して不確かさは生じない。次に、2 つの Run の間の反応度差を補償する CR#1 の移動の両端での位置再現性と CR#1 の校正の不確かさ $\pm 0.43\%$ を合わせると

$$\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 + ((3.4694 - 3.5197) \times 0.0043)^2} = \pm 0.0028 \rho_0$$

となる。CR#1 の位置の差が小さなため、前者の寄与がこの不確かさの大部分を占める。

炉心温度に関しては、集合体の密着を保ったまま測定を行う時の温度測定の不確かさ $\pm 0.01^\circ\text{C}$ と温度係数

表 A.31 XV-2(45V) 炉心中心におけるステンレス鋼反応度値とアルミニウム反応度値

実験日 ^{Ⅰ)} Run No.	装荷物 (目的)	CR#1		CR#2		炉心温度		密着面間隙		余剰 反応度 ^{Ⅴ)} [ρ_0]	反応度 値 ^{Ⅵ)} [ρ_0]
		位置 [mm]	反応度 ^{Ⅱ)} [ρ_0]	位置 [mm]	反応度 ^{Ⅱ)} [ρ_0]	温度 [°C]	反応度 ^{Ⅲ)} [ρ_0]	間隙 [mm]	反応度 ^{Ⅳ)} [ρ_0]		
3/31 No.7	SUS(1/4×2×2) 1枚	91.01	3.4694 ^{Ⅶ)}	90.00	3.5035	24.64	0.4598	-0.012	-0.0075	7.4252	-0.0414
3/31 No.9	Al frame(1/8×2×2) 2枚(3/31の基準)	92.49	3.5197 ^{Ⅶ)}	89.99	3.5032	24.56	0.4519	-0.013	-0.0082	7.4666	
6/9 No.4	Al(1/16×2×2) 8枚	62.95	2.4800	60.00	2.4288	18.62	-0.1368	-0.040	-0.0251	4.7469	-0.0130
6/9 No.5	Al frame(1/4×2×2) 2枚(6/9の基準)	63.36	2.4949	60.00	2.4288	18.60	-0.1387	-0.040	-0.0251	4.7599	

Ⅰ) いずれも 1988 年

Ⅱ) この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

Ⅲ) 炉心温度の読みを左記の値から基準の 20.00°C に変化させる時に加わる反応度

Ⅳ) 集合体密着面間隙の読みを左記の値から基準の 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

Ⅴ) 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00°C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度

Ⅵ) それぞれの日の基準の余剰反応度からの差

Ⅶ) 実験時のデータ処理に誤りがあったので、正しい値にここで訂正する

3/31 は図 2.3 の径方向に対称な炉心で実験実施、6/9 は、図 2.3 の径方向に対称な炉心から F127/17、F125/35、M127/17、M125/35 にて合計 4 本の EUDD 引出しを 4 本の DUB 引出しに置き換え、片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数を 86 本とした炉心で実験実施、核計装 CH#6 は、3/31 が 0.5×10^{-7} A レベル、6/9 が 0.2×10^{-6} A レベル

の不確かさ $\pm 9.4\%$ による寄与を合わせて、温度変化による反応度変化の補正の不確かさは

$$\pm \sqrt{(\sqrt{0.01^2 \times 2} \times (-0.0991))^2 + (-0.0991 \times 0.094 \times (24.64 - 24.56))^2} = \pm 0.0016 \rho_0$$

となる。温度差が小さいため、前者の寄与がこの不確かさの大部分を占める。

集合体密着面間隙に関しては、集合体の密着を保ったまま測定を行う時の間隙測定の不確かさ ± 0.001 mm

と間隙係数の不確かさ $\pm 6.8\%$ による寄与を合わせて、間隙変化による反応度変化の補正の不確かさは

$$\pm \sqrt{(\sqrt{0.001^2 \times 2} \times (-0.628))^2 + (-0.628 \times 0.068 \times (-0.012 - (-0.013)))^2} = \pm 0.0009 \rho_0$$

となる。間隙差が小さいため、後者の寄与は無視し得る。

これら 4 つの不確かさを合わせて、置換反応度値の不確かさは

$$\pm \sqrt{0.0057^2 + 0.0028^2 + 0.0016^2 + 0.0009^2} = \pm 0.0066 \rho_0$$

となる。

ステンレス板正味の反応度値を得るためには、アルミニウムの反応度値分を補正する必要がある。このために、F126/26 の Pu08A 引出しの密着面から 1 セル目において、3 枚装填されている劣化ウラン燃料板のう

ち両脇の2枚を取り除いてセル内に1/4インチ幅の2箇所の空間を設けて、これら空間で8枚のAl(1/16×2×2)板と2枚のAl frame(1/4×2×2)板の置換反応度値を6/9のRun No.4とNo.5で測定した。表A.30より8枚のAl(1/16×2×2)板の重さの合計は81.70gで2枚のAl frame(1/4×2×2)板の重さの合計は10.22gである。この置換反応度値の測定結果は表A.31に示すように $-0.0130 \rho_0 \pm 0.0066 \rho_0$ である。この不確かさは、3/31に実施したステンレス板とアルミニウム板の置換反応度値と同様に算出し、その内訳は以下のとおりである。

制御棒と安全棒に関しては、まず、同じ位置に戻したものの2つのRunの間で動かしたCR#2と固定側集合体の3組のSRの移動前後の位置再現性により生じる反応度の不確かさは $\pm 0.0057 \rho_0$ である。これら2つのRunの間では、移動側集合体の3組のSRは全挿入のまま動かさなかったため、これらSRに関して不確かさは生じない。次に、2つのRunの間の反応度差を補償するCR#1の移動の両端での位置再現性と校正の不確かさを合わせると

$$\pm \sqrt{0.002^2 \times 2 + ((2.4800 - 2.4949) \times 0.0043)^2} = \pm 0.0028 \rho_0$$

となる。CR#1の位置の差が小さなため、後者の寄与は無視し得る。

炉心温度に関しては、集合体の密着を保ったまま測定を行う時の温度測定の不確かさ $\pm 0.01^\circ\text{C}$ と温度係数の不確かさ $\pm 9.4\%$ による寄与を合わせて、温度変化による反応度変化の補正の不確かさは

$$\pm \sqrt{(\sqrt{0.01^2 \times 2} \times (-0.0991))^2 + (-0.0991 \times 0.094 \times (18.62 - 18.60))^2} = \pm 0.0014 \rho_0$$

となる。温度差が小さなため、後者の寄与は無視し得る。

集合体密着面間隙に関しては、間隙変化は無いが間隙測定の不確かさによる $\pm 0.0009 \rho_0$ の不確かさが生じる。

これら4つの不確かさを合わせて、置換反応度値の不確かさは

$$\pm \sqrt{0.0057^2 + 0.0028^2 + 0.0014^2 + 0.0009^2} = \pm 0.0066 \rho_0$$

となる。

炉心中心における単位重量当たりのアルミニウムの反応度値は

$$\frac{-0.0130 \rho_0 (\pm 0.0066 \rho_0)}{81.70\text{g} - 10.22\text{g}} = -1.82 \times 10^{-4} \rho_0/\text{g} \pm 51\% \quad (\text{A.23})$$

となる。ここで、アルミニウムの重量の不確かさは0.1%のオーダーであり、51%の反応度値の不確かさに比べてはるかに小さいので無視した。

これより、SUS(1/4×2×2)板との置換反応度値を求めたAl frame(1/8×2×2)板2枚の反応度値は

$$-1.82 \times 10^{-4} \rho_0/\text{g} (\pm 51\%) \times 8.633\text{g} = -0.0016 \rho_0 \pm 0.0008 \rho_0 \quad (\text{A.24})$$

となる。ここでも、アルミニウムの重量の不確かさは小さく無視した。なお、ステンレス鋼の反応度値を測定した引出し前端面とアルミニウムの反応度値を測定した劣化ウラン燃料板の位置では、アルミニウムの反応度値に若干の相違が生じることが予想される。しかしながら、アルミニウムの反応度値の不確かさが $\pm 51\%$ と大きなことから、測定位置の相違によるアルミニウム反応度値の相違は、この大きな不確かさと比べて無視できるものと考えられる。

これを用いて、炉心中心での引出し前端面における SUS(1/8×2×2) 板の正味の反応度値は

$$-0.0414 \rho_0 (\pm 0.0066 \rho_0) - 0.0016 \rho_0 (\pm 0.0008 \rho_0) = -0.0430 \rho_0 \pm 0.0066 \rho_0 (\pm 15\%) \quad (\text{A.25})$$

となる。したがって、単位重量当たりのステンレス鋼の反応度値は

$$\frac{-0.0430 \rho_0 (\pm 0.0066 \rho_0)}{124.61g} = -3.45 \times 10^{-4} \rho_0/g \pm 15\% \quad (\text{A.26})$$

となる。ここでも、ステンレス鋼の重量の不確かさは小さく無視した。

アルミニウムとステンレス鋼の単位重量当たりの反応度値の比は

$$\frac{-1.82 \times 10^{-4} \rho_0/g (\pm 51\%)}{-3.45 \times 10^{-4} \rho_0/g (\pm 15\%)} = 0.528 \pm 53\% \quad (\text{A.27})$$

である。付録 B.2.6 項の XIV-1 炉心での同比 $0.292 \pm 34\%$ とは 80% 程度の相違があるが、これは両者の不確かさの範囲と同程度である。

付録 B.2.6 項の表 B.20 より、中心引出しの 1 格子管当たり余分に存在するステンレス鋼の重量は、固定側と移動側集合体合わせて $19.98g$ であり、これに単位重量当たりのステンレス鋼の反応度値を乗じると

$$-3.45 \times 10^{-4} \rho_0/g (\pm 15\%) \times 19.98g = -0.00689 \rho_0 \pm 15\% \quad (\text{A.28})$$

である。

テスト領域、バッファ領域と制御安全棒引出しに関しては、XIV-1 炉心と XV-2(45V) 炉心間で引出し内の燃料セルの組成が異なることはあっても引出しの装荷本数と装荷位置が同じである。したがって、表 B.20 の炉心中心引出しとこれらの各領域間の反応度値の比は、両炉心間で不確かさの範囲で変わらないとする。ドライバー領域に関しては、固定側と移動側集合体を合わせた装荷本数が、XIV-1 炉心では $116 \times 2 = 232$ 本であるのに対して XV-2(45V) 炉心が $128 \times 2 = 256$ 本と異なる。この引出し本数の比 $256/232 = 1.103$ をドライバー領域の反応度値寄与分に乗ずることにより引出し本数の違いを補正した。表 B.20 より、ドライバー領域の寄与分が $2\sim 3\%$ と小さく、その不確かさが大きいので、このような評価で十分である。表 A.32 に XV-2(45V) 炉心での密着面のステンレス鋼反応度値を示す。

表 A.32 XV-2(45V) 炉心における密着面ステンレス鋼反応度値

領域	引出し本数 (格子管数) (固定側と移動側の合計)	ステンレス鋼 重量 [g] ¹⁾	反応度値 の比 ¹⁾	反応度値 ^{III)} [ρ_0]
中心引出し	1 × 2	19.98	1.0	-0.00689 ± 15%
中心引出しを除くテスト領域	76 × 2	1518.48	52.2 ± 13%	-0.360 ± 20%
バッファー領域	40 × 2	799.2	11.9 ± 52%	-0.0820 ± 54%
制御・安全棒引出し	8 × 2	863.392	2.8 ± 264%	-0.019 ± 264%
ドライバー領域	128 × 2 ^{IV)}	2557.44	1.9 ± 202% ^{V)}	-0.013 ± 203%
合計			69.8 ± 19%	-0.481 ± 24%

¹⁾ 各領域で、引出し装荷本数に 1 格子管当たりの余分に存在するステンレス鋼の重量を乗じたもの

^{II)} 付録 B.2.6 項の表 B.20 より引用、中心引出しの反応度値で規格化

^{III)} 中心引出しの反応度値 $-0.00689\rho_0 \pm 15\%$ に中心引出しと各領域間の反応度値の比を乗じたもの

^{IV)} 図 2.3 の片側集合体当たりに EUDD 引出しを 88 本装荷した径方向に対称な炉心のドライバー燃料引出し本数

^{V)} 付録 B.2.6 項の表 B.20 のドライバー領域の反応度値の比に、炉心間のドライバー燃料引出し本数の比を乗じて補正したもの

A.2.7 余剰反応度の再現性と不確かさの評価

実効増倍率は余剰反応度を基に算出する。原子炉運転時は、6 組の安全棒 SR は全挿入で 2 組の制御棒 CR を途中まで引き抜くので、これら 2 組の CR を全挿入する時に増加する反応度の和が余剰反応度となる。ただし、この余剰反応度は、本来の臨界からの余剰反応度に一定の原子炉出力で運転時の未臨界度を加えた反応度である。これまでと同様に、この余剰反応度に炉心温度や集合体密着面間隙に関する補正を行う。

炉心に特別な実験用装荷物等が無い標準の構成である Run のデータを抽出して、集合体の分離、密着に伴う余剰反応度の再現性として変化 (ばらつき) を見た。いずれの Run も浅い未臨界なので、この余剰反応度は原子炉出力レベルに依存する。この出力レベルやその他の炉心の状態が同じである Run を抽出した結果、EUDD 引出しを片側集合体当たりに 88 本装荷した炉心と 84 本装荷した炉心のそれぞれで余剰反応度の変化 (ばらつき) を見る事ができた。これらのデータを表 A.33 と表 A.34 にまとめる^{IV)}。これら表の各 Run の余剰反応度は、基準の 20°C、間隙読み 0.000 mm での値となるように、既に反応度の温度補正と間隙補正を行った値である。

表 A.33 の 5/17 の Run No.1 を除くと、各表で Run の間の余剰反応度の変化 (ばらつき) は $0.024 \rho_0$ 以内である。一方で、余剰反応度の再現性は、CR と SR の位置再現性、温度測定の不確かさ、間隙測定の不確かさからも以下のように評価できる。8 組の CR と SR の位置再現性により生じる反応度の不確かさは

^{IV)} 片側集合体当たりに EUDD 引出しを 88 本装荷した炉心では 4/8 にも標準の炉心構成で測定を行ったが、この日は温度係数の測定を行ったために再現性を見ることに使うのは不適切であり、このデータは表には掲載しない。

表 A.33 XV-2(45V) 炉心における集合体分離密着時の余剰反応度の再現性 (1)

実験日 ^{D)} Run No.	CR#1		CR#2		炉心温度		密着面間隙		余剰 反応度 ^{V)} [ρ_0]	CH#6 電流 [$\times 10^{-7}$ A]	備考
	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_0]	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_0]	温度 [$^{\circ}$ C]	反応度 ^{III)} [ρ_0]	間隙 [mm]	反応度 ^{IV)} [ρ_0]			
3/25 No.4	82.69	3.1829	99.99	3.8435	24.75	0.4707	-0.005	-0.0031	7.494	0.5001	
3/31 No.6	91.95	3.5014	89.99	3.5032	24.92	0.4876	-0.011	-0.0069	7.485	0.4987	
4/1 No.1	92.46	3.5187	89.99	3.5032	24.53	0.4489	-0.001	-0.0006	7.470	0.4996	
5/17 No.1	104.80	3.9302	90.01	3.5039	19.10	-0.0892	-0.064	-0.0402	7.305	0.4996	

^{D)} いずれも 1988 年

^{II)} この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

^{III)} 炉心温度の読みを左記の値から基準の 20.00 $^{\circ}$ C に変化させる時に加わる反応度

^{IV)} 集合体密着面間隙の読みを左記の値から基準の 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

^{V)} 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00 $^{\circ}$ C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度に相当

いずれも図 2.3 の径方向に対称な炉心で実験実施

表 A.34 XV-2(45V) 炉心における集合体分離密着時の余剰反応度の再現性 (2)

実験日 ^{D)} Run No.	CR#1		CR#2		炉心温度		密着面間隙		余剰 反応度 ^{V)} [ρ_0]	CH#6 電流 [$\times 10^{-7}$ A]	備考
	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_0]	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_0]	温度 [$^{\circ}$ C]	反応度 ^{III)} [ρ_0]	間隙 [mm]	反応度 ^{IV)} [ρ_0]			
3/25 No.6	25.55	1.0486	24.99	1.0618	24.88	0.4836	-0.004	-0.0025	2.592	0.4993	
3/30 No.4	24.51	1.0067	25.00	1.0622	25.18	0.5133	-0.004	-0.0025	2.579	0.4988	

^{D)} いずれも 1988 年

^{II)} この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

^{III)} 炉心温度の読みを左記の値から基準の 20.00 $^{\circ}$ C に変化させる時に加わる反応度

^{IV)} 集合体密着面間隙の読みを左記の値から基準の 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

^{V)} 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00 $^{\circ}$ C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度に相当

いずれも図 2.3 の径方向に対称な炉心から F117/25、F117/27、F135/25、F135/27、M117/25、M117/27、M135/25、M135/27 にて合計 8 本の EUDD 引出しを 8 本の DUB 引出しに置き換え、片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数を 84 本とした炉心で実験実施

$$\pm\sqrt{0.002^2 \times 8} = \pm 0.0057 \rho_0$$

である。集合体の分離と密着を行う時の温度測定の不確かさ $\pm 0.1^{\circ}$ C より

$$\pm 0.1^{\circ}\text{C} \times (-0.0991) \rho_0 / ^{\circ}\text{C} = \pm 0.0099 \rho_0$$

が、これに伴う反応度の不確かさとなる。集合体の分離と密着を行う時の間隙測定の不確かさ ± 0.02 mm より

$$\pm 0.02 \text{ mm} \times (-0.628) \rho_0 / \text{mm} = \pm 0.013 \rho_0$$

が、これに伴う反応度の不確かさとなる。これら3つの不確かさを合わせて、余剰反応度の再現性は
 $\pm\sqrt{0.0057^2 + 0.0099^2 + 0.013^2} = \pm 0.017 \rho_0$
 となる。

このように算出した余剰反応度の再現性と比べて、5/17Run No.1を除いた各表内での余剰反応度の変化(ばらつき) $0.024 \rho_0$ は有意ではない。表 A.33 で、5/17 の Run No.1 は他の Run から測定日が 1.5 カ月以上遅いため、この期間にプルトニウム燃料に含まれる ^{241}Pu が崩壊して ^{241}Am が生成することにより余剰反応度が再現性の算出結果を大きく超えて $0.2 \rho_0$ 程度も低下したものと考えられる。

なお、5/17 の Run No.1 を除くと、いずれの Run も CR の位置は近い。3/25 の Run No.4 と 4/1 の Run No.1 では 10 mm 程度の差があり、これは約 $0.3 \rho_0$ の反応度差に相当する。制御棒校正の不確かさによるこの反応度差の不確かさは $\pm 0.0027 \rho_0$ 程度であるため、余剰反応度の再現性への影響は小さい。

さらに、5/17 の Run No.1 を除くと、Run の間で炉心温度の差は 0.4°C 以内であるため、温度係数の不確かさによる反応度差の不確かさは、 $0.4^\circ\text{C} \times (-0.0991) \rho_0 / ^\circ\text{C} \times \pm 0.094 = \pm 0.0037 \rho_0$ であり、集合体密着面間隙の差も 0.01 mm 以内であるため、間隙係数の不確かさによる反応度差の不確かさは $0.01 \text{ mm} \times (-0.628) \rho_0 / \text{mm} \times \pm 0.068 = \pm 0.0004 \rho_0$ であり、いずれも余剰反応度の再現性への影響は小さい。

実効増倍率を評価するための基となる炉心の余剰反応度は、表 A.33 に記載の片側集合体当たりに EUDD 引出しを 88 本装荷した径方向に対称な炉心での 5/17 Run No.1 を除く 3 回の Run の平均値を採用する。これらの平均値は $7.483 \rho_0$ であり、核計装 CH#6 の電流値は $0.4995 \times 10^{-7} \text{ A}$ である。

この平均値の不確かさには余剰反応度の再現性の算出結果 $\pm 0.017 \rho_0$ を用い、これに 2 組の CR の反応度値の校正に起因する不確かさを合わせる。3 回の Run いずれも、最大で、CR#1 は 92 mm、CR#2 は 100 mm 程度引き抜き、CR#1 では制御棒校正ステップ 8、9 の 77.50 mm、CR#2 ではステップ 9、10 の 76.57 mm が直近の制御棒校正ステップ位置である。全挿入位置からこれらステップの位置に至るまでに、基準反応度に温度と間隙の測定の不確かさによる分を加えた $\pm 0.0033 \rho_0$ の不確かさを持つ反応度値をそれぞれ 3 回と 4 回積み重ねることになる。92 mm や 100 mm からこれら直近の校正ステップ位置までの間の反応度値の不確かさと、両 CR の全挿入とこれら直近の校正ステップの両端での校正時の位置の再現性による不確かさも合わせると、制御棒校正の不確かさによる 2 組の CR の反応度値の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.0033^2 \times (3 + 4) + ((3.5187 - 3.0010) \times 0.0043)^2 + ((3.8435 - 3.0319) \times 0.0043)^2 + 0.002^2 \times 2 \times 2} \\ = \pm 0.010 \rho_0$$

となり、先の平均値の不確かさ $\pm 0.017 \rho_0$ と合わせると $\pm 0.019 \rho_0$ となる。なお、先に記述したように、表 A.33 の余剰反応度測定時の SR や CR の位置再現性に伴う不確かさは、既に平均値の不確かさ $\pm 0.017 \rho_0$ に含まれる。

これら 3 回の Run は、3 月 25 日から 4 月 1 日の 8 日間の間に行われ、余剰反応度の平均値 $7.483 \rho_0 \pm 0.019 \rho_0$ は、この期間の中央となる 1988 年 3 月 28 日時点の値である。

A.3 XV-2(65V) 炉心の特性試験

A.3.1 実験炉心

XV-2(65V) 炉心は、1989年5月10日から臨界近接を開始して、片側集合体当たりの引出し装荷本数が、Pu08A 55本、Pu08B 2本、Pu08C 20本、SSB 40本、PuDA1 40本、EUDD 96本、DUB 288本、SCRA 4組8本の径方向に対称な炉心として、5月11日に臨界に到達し同年7月14日まで実験を行った。炉心装荷図は2章に掲載する。

A.3.2 制御棒校正曲線、温度係数と集合体密着面間隙係数の測定

片側集合体当たりのEUDD引出し装荷本数を98本とした炉心で制御棒CR#1、CR#2の校正を行った。安全棒SR#4の20mmから全挿入による反応度を基準反応度 $1\rho_0$ と定義して、これを基にして置換法で制御棒校正を行った。後に、正炉周期法によりこの $1\rho_0$ を $\% \Delta k/k$ 単位で求める。置換法の各ステップで等しくする原子炉の出力レベルは、核計装CH#6の電流値でモニターし、その電流値は 0.5×10^{-6} Aレベルであった。制御棒校正時の各ステップのSR#4やCR#1、CR#2の配置等のデータを表A.35に示す。

各ステップ間に要した時間は10分程度と短く、温度変化や集合体密着面間隙の変化による反応度変化は小さい。しかしながら、これらの反応度変化を補正する必要がある。この補正のためには、反応度の温度係数と間隙係数が必要となるものの、これらの係数を求めるには制御棒の校正結果を用いる。

そこで、最初に、これらの補正を行わずに制御棒校正実験のデータ処理を行い制御棒校正曲線を算出し、これを基にして温度係数と間隙係数を求める。次に、これらを用いて温度変化や間隙変化による反応度変化の補正を行い、再度、制御棒校正実験のデータ処理を行う。さらに、この再度の処理の結果得た制御棒校正曲線を基にして温度係数と間隙係数を求めるという繰り返しの処理を行った。

まず、ステップ1から11のデータを用いて、CR#1の校正曲線を算出した。CR#1の反応度値は、全挿入である0.47mm(ステップ1、2)を $0\rho_0$ として、SR#4との置換により、20.35mm(ステップ3、4)が $1\rho_0$ 、41.56mm(ステップ5、6)が $2\rho_0$ 、63.92mm(ステップ7、8)が $3\rho_0$ 、87.68mm(ステップ9、10)が $4\rho_0$ 、112.83mm(ステップ11)が $5\rho_0$ となる。これらはCR#1の先端の位置である。

0.47mmから順番に4点ずつのデータを3次式に当てはめた、これら4点の範囲をカバーする制御棒の校正曲線を、制御棒位置を x mm、その位置の制御棒値を $y\rho_0$ とする以下の3次式として求めた。

$$y = a \left(\frac{x}{100} \right)^3 + b \left(\frac{x}{100} \right)^2 + c \left(\frac{x}{100} \right) + d \quad (\text{A.29})$$

3次式の係数、a、b、c、dを表A.36に示す。任意の位置の制御棒反応度値は、この3次式で内挿して求める。3次式の係数の各セットの適用範囲もこの表に示す。これは、最小二乗法によるフィッティングではなくて3次式への当てはめなので、これに伴う不確かさは生じない。

同様に、CR#2については、ステップ1から12のデータを用いて校正曲線を算出した。まず、全挿入である0.02mm(ステップ12)を基準 $0\rho_0$ とした。遡って、ステップ11と10で、CR#2を0.02mmから

表 A.35 XV-2(65V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正前の制御棒校正曲線測定データ

ステップ	時刻 ^{Ⅰ)}	SR#4 位置 ^{Ⅱ)} [mm]	CR#1 位置 ^{Ⅱ)} [mm]	CR#2 位置 ^{Ⅱ)} [mm]	炉心温度 [°C]	密着面間隙 [mm]
1	13:06	0.00	0.47	116.67	25.89	-0.018
2	13:21	20.01 ^{Ⅲ)}	0.47	91.30	25.87	-0.021
3	13:33	0.00	20.35	91.30	25.87	-0.022
4	13:44	20.01	20.35	67.76	25.85	-0.023
5	13:59	0.00	41.56	67.76	25.86	-0.022
6	14:16	20.01	41.56	45.49	25.84	-0.021
7	14:24	0.00	63.92	45.49	25.85	-0.022
8	14:32	20.01	63.92	24.28	25.83	-0.021
9	14:47	0.00	87.68	24.28	25.84	-0.021
10	14:57	20.01	87.68	4.54	25.83	-0.021
11	15:07	0.00	112.83	4.54	25.83	-0.022
12	15:17	20.01	93.51	0.02	25.83	-0.022

^{Ⅰ)} 実験日 1989/5/12

^{Ⅱ)} 先端の位置の表示

^{Ⅲ)} 安全棒位置の表示の微小なずれのため 20.01 mm の場合もあった。

図 2.4 の径方向に対称な炉心から F128/17、F124/35、M128/17、M124/35 にて合計 4 本の DUB 引出しを 4 本の EUDD 引出しに置き換え、片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数を 98 本とした炉心で校正実験を実施、核計装 CH#6 は 0.5×10^{-6} A レベル

4.54 mm まで引き抜いた分の反応度価値と補償するのは、SR#4 の $1 \rho_0$ 挿入分から CR#1 の 93.51 mm から 112.83 mm までの引き抜き分の反応度価値を差し引いたものとなる。後者は、上記の CR#1 の校正曲線の式より算出した結果、 $5.0 \rho_0 - 4.2367 \rho_0 = 0.7633 \rho_0$ であった。したがって、CR#2 の 4.54 mm の反応度価値は、 $1.0 \rho_0 - 0.7633 \rho_0 = 0.2367 \rho_0$ となる。24.28 mm(ステップ 9 と 8) が $1.2367 \rho_0$ 、45.49 mm(ステップ 7 と 6) が $2.2367 \rho_0$ 、67.76 mm(ステップ 5 と 4) が $3.2367 \rho_0$ 、91.30 mm(ステップ 3 と 2) が $4.2367 \rho_0$ 、116.67 mm(ステップ 1) が $5.2367 \rho_0$ となる。CR#1 と同様に、0.02 mm から遡って順番に 4 点ずつのデータを 3 次式に当てはめ、その係数、a、b、c、d を表 A.37 に示す。

これら制御棒校正の不確かさの考え方は XV-1 炉心と同様である。しかし、本炉心では $1 \rho_0$ を SR#4 の 20 mm 移動としたので、データ点間(ステップ間)の制御棒校正曲線を 1 次式で近似した時の傾き $c/100$ 、すなわち、制御棒の 1 mm 当たりの反応度価値は、おおよそ $5/100 = 1/20 \rho_0$ であり、これは、大部分の位置で制御棒の 20 mm から 25 mm の移動距離が $1 \rho_0$ に相当することからも導くことができる。制御棒や安全棒の移動の片端での位置再現性は ± 0.05 mm である。20 mm の移動距離が $1 \rho_0$ に相当するとして、これを反応度の不確かさに換算すると $\pm 0.05 \text{ mm} \times 1/20 \rho_0 / \text{mm} = \pm 0.0025 \rho_0$ となる。25 mm の移動距離が $1 \rho_0$ に相当とすれ

表 A.36 XV-2(65V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正前の制御棒 CR#1 校正曲線

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]
				a	b	c	d	
0.47	20.35	41.56	63.92	0.33270	-0.97518	5.2191	-0.024508	0.47 ~ 41.56
20.35	41.56	63.92	87.68	-0.022029	-0.52882	5.0487	-0.0053315	41.56 ~ 63.92
41.56	63.92	87.68	112.83	0.13440	-0.83097	5.2350	-0.041767	63.92 ~ 112.83

表 A.37 XV-2(65V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正前の制御棒 CR#2 校正曲線

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]
				a	b	c	d	
0.02	4.54	24.28	45.49	-0.33661	-0.60725	5.2651	-0.001053	0.02 ~ 24.28
4.54	24.28	45.49	67.76	0.53980	-1.2585	5.3897	-0.0054477	24.28 ~ 45.49
24.28	45.49	67.76	91.30	-0.018957	-0.49005	5.064	0.036370	45.49 ~ 67.76
45.49	67.76	91.30	116.67	-0.13723	-0.24814	4.9051	0.069653	67.76 ~ 116.67

ば、これより 30% ほど小さな不確かさとなるが、反応度に関する不確かさ評価には $\pm 0.0025\rho_0$ を採用する。

制御棒校正の不確かさは、基準となる SR#4 の移動距離 25 mm の不確かさによる $1 \rho_0$ の不確かさを基にして、上記の傾き $c/100$ の不確かさとして評価する。正炉周期法による $1 \rho_0$ の $\% \Delta k/k$ 単位での測定の不確かさは、これとは別に 4.1 節に記述する。SR#4 の移動の片端での位置再現性による反応度の不確かさは $\pm 0.0025 \rho_0$ なので、 $1 \rho_0$ の不確かさは移動距離 20 mm の両端を合わせて $\pm \sqrt{0.0025^2 \times 2} = \pm 0.0035\rho_0$ ($\pm 0.35\%$) となる。これと置換する制御棒の移動距離もおおよそ 20 mm なので、 ρ_0/mm 単位の傾き $c/100$ の不確かさは、 $1 \rho_0$ と制御棒の 20 mm の移動の不確かさを合わせて $\pm \sqrt{0.35^2 \times 2} = \pm 0.50\%$ となる。制御棒の移動距離が 20 mm より小さな反応度差を制御棒との置換法で測定する時、この傾きの不確かさを基に反応度差の不確かさを求める。制御棒の移動距離が 20 mm より大きな時には、個々の場合で反応度差の不確かさを評価するが、その考え方は XV-1 炉心と同様である。

温度係数と集合体密着面間隙係数は、表 A.38 のように、温度と間隙をそれぞれ大きく変化させた 2 つの臨界データから測定した。温度係数のための 5/12 の Run No.9 は、先の制御棒校正ステップ 5 を兼ねる。しかし、間隙を全く変化させずに温度を変えたり、その逆を行うことはできなかった。そこで、反応度は温度変化と間隙変化について互いに独立に変化するとして、温度係数を $f_T \rho_0/^\circ\text{C}$ と間隙係数を $f_G \rho_0/\text{mm}$ とすると、各係数の測定のための各セットの臨界データ間の差から、連立方程式

$$0.7590(\pm 0.011) = -7.28(\pm 0.14) \times f_T + -0.036(\pm 0.028) \times f_G \quad (\text{A.30})$$

$$0.3201(\pm 0.0055) = -0.03(\pm 0.014) \times f_T + -0.415(\pm 0.028) \times f_G \quad (\text{A.31})$$

表 A.38 XV-2(65V) 炉心における温度係数と間隙係数の測定データ (温度変化と間隙変化による反応度変化補正前の制御棒校正曲線を使用)

測定項目	実験日 ¹⁾	CR#1		CR#2		CR 2 本 反応度価値 合計 [ρ_0]	温度 [°C]	間隙 [mm]
	Run No.	位置 [mm]	反応度価値 [ρ_0]	位置 [mm]	反応度価値 [ρ_0]			
温度係数	5/12 No.9	41.56	2.0000	67.76	3.2367	5.2367	25.86	-0.022
	5/16 No.8	66.27	3.1016	60.00	2.8941	5.9957	18.58	-0.058
	差		1.1016		-0.3426	0.7590	-7.28	-0.036
間隙係数	5/16 No.11	69.46	3.2386	50.01	2.4438	5.6824	18.56	0.362
	5/16 No.12	66.43	3.1085	60.00	2.8941	6.0025	18.53	-0.053
	差		-0.1301		0.4503	0.3201	-0.03	-0.415

¹⁾ いずれも 1988 年

図 2.4 の径方向に対称な炉心から F128/17、F124/35、M128/17、M124/35 にて合計 4 本の DUB 引出しを 4 本の EUDD 引出しに置き換え、片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数を 98 本とした炉心で実験実施、核計装 CH#6 は 0.5×10^{-6} A レベル

を立てることができる。ともに、左辺は各セットの臨界データ間の 2 本の CR の反応度価値の合計の差、右辺第 1 項は温度係数に温度差を乗じたもので、同第 2 項は間隙係数に間隙の差を乗じたものである。反応度の差、温度差や間隙の差の不確かさは () 内に示す。これら不確かさの評価については以下に記述する。

温度係数を測定する 2 つの Run では集合体を分離、密着させて全ての制御棒 CR と安全棒 SR を動かした。このため、2 つの Run の間の反応度の差の不確かさは、CR と SR の位置再現性と CR の校正の不確かさから求めた。まず、同じ位置に戻したものの、2 つの Run の間で動かした合計 6 組の安全棒 SR の移動前後の位置再現性による反応度の不確かさは、 $\pm\sqrt{0.0025^2 \times 2 \times 6} = \pm 0.0087 \rho_0$ である。

CR#1 の移動前後の片端は校正時のステップ 5、6 の位置 41.56 mm であり、移動の両端は校正時のステップ 7、8 の 63.92 mm を跨ぐので、2 つの Run の間の CR#1 の反応度差の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.0025^2 \times 2 + 0.0035^2 + 0.0025^2 + ((3.1016 - 3.000) \times 0.005)^2} = \pm 0.0056 \rho_0$$
となる。平方根内の第 1 項は、CR#1 の 2 つの Run の移動前後の両端での位置再現性による不確かさを加算したものである。第 2 項は、ステップ 5、6 とステップ 7、8 間の $1 \rho_0$ の不確かさである。第 3 項は、校正時のステップ 7、8 での CR#1 の位置再現性による不確かさである。ここで、5/12 の Run No.9 は、制御棒校正のステップ 5 を兼ねるため、校正時の同ステップ 5、6 での CR#1 の位置再現性による不確かさは含めない。第 4 項は、制御棒校正の不確かさ $\pm 0.50\%$ による同ステップ 7、8 の 63.92 mm と 66.27 mm 間の反応度差の不確かさである。

一方、CR#2 の移動前後の両端は校正時のステップ 4、5 とステップ 6、7 の間にあるので、2 つの Run の間の CR#2 の反応度差の不確かさは、2 つの Run の移動前後の両端での位置再現性による不確かさと制御棒校正の不確かさ $\pm 0.50\%$ による 2 つの Run の間の反応度差の不確かさを合わせて

$\pm\sqrt{0.0025^2 \times 2 + ((3.2367 - 2.8941) \times 0.0050)^2} = \pm 0.0039 \rho_0$ となる。

これらを合わせて、2つの Run の間の反応度差の不確かさは

$\pm\sqrt{0.0087^2 + 0.0056^2 + 0.0039^2} = \pm 0.011 \rho_0$ となる。

間隙係数の測定では、6組の SR は2つの Run の間で動かさず、2組の制御棒 CR のみを動かし、その移動前後の位置は、いずれも校正時の隣り合うステップの間であった。したがって、2つの Run の間の反応度差の不確かさは、2組の CR の移動前後の位置再現性による不確かさと校正の不確かさから

$\pm\sqrt{0.0025^2 \times 2 \times 2 + ((3.2386 - 3.1085) \times 0.0050)^2 + ((2.8941 - 2.4438) \times 0.0050)^2} = \pm 0.0055 \rho_0$ となる。

温度差の不確かさは、温度係数の測定では集合体の分離と密着を行ったため $\pm\sqrt{0.1^2 \times 2} = \pm 0.14^\circ\text{C}$ である。間隙係数の測定では集合体を分離したものの分離の距離は数 mm と僅かで、温度の時間変化は密着を保ったまま測定を行う場合と同じであったことから $\pm\sqrt{0.01^2 \times 2} = \pm 0.014^\circ\text{C}$ である。

間隙差の不確かさは、いずれの測定も集合体の分離と密着を行ったため、 $\pm\sqrt{0.02^2 \times 2} = \pm 0.028 \text{ mm}$ である。

これらを f_T と f_G について解くと、温度係数と間隙係数は

$$\begin{aligned} f_T &= \frac{0.7590(\pm 0.011) \times (-0.415)(\pm 0.028) - 0.3201(\pm 0.0055) \times (-0.036)(\pm 0.028)}{-7.28(\pm 0.14) \times (-0.415)(\pm 0.028) - (-0.036)(\pm 0.028) \times (-0.03)(\pm 0.014)} \\ &= -0.101 \rho_0 / ^\circ\text{C} \pm 10\% \end{aligned} \quad (\text{A.32})$$

$$\begin{aligned} f_G &= \frac{0.3201(\pm 0.0055) \times (-7.28)(\pm 0.14) - 0.7590(\pm 0.011) \times (-0.03)(\pm 0.014)}{-7.28(\pm 0.14) \times (-0.415)(\pm 0.028) - (-0.036)(\pm 0.028) \times (-0.03)(\pm 0.014)} \\ &= -0.764 \rho_0 / \text{mm} \pm 7.5\% \end{aligned} \quad (\text{A.33})$$

となる。

CR#1 に関して、校正の実験結果に温度変化や間隙変化に伴う反応度変化の補正を行った結果を表 A.39 に示す。この補正後の反応度値を用いた CR#1 の校正曲線の係数 a、b、c、d を表 A.40 に示す。

CR#2 に関して、校正の実験結果に温度変化や間隙変化に伴う反応度変化分の補正を行った結果を表 A.41 に示す。全挿入である 0.02 mm (ステップ 17) を基準 $0 \rho_0$ とし、遡って、ステップ 11 と 10 で、CR#2 を 0.02 mm から 4.54 mm まで引き抜いた分の反応度値と補償するのは、温度変化と間隙変化の補正を考えなければ、SR#4 の $1 \rho_0$ 挿入分から CR#1 の 93.51 mm から 112.83 mm までの引き抜き分の反応度値を差し引いたものとなる。後者は、補正済みの CR#1 の校正曲線の式より算出した結果、 $4.9986\rho_0 - 4.2344\rho_0 = 0.7642\rho_0$ であった。したがって、表 A.41 に示す CR#2 の 4.54 mm の温度変化分補正前の反応度値は、 $1.0\rho_0 - 0.7642\rho_0 = 0.2358\rho_0$ となる。この補正後の反応度値を用いた CR#2 の校正曲線の係数 a、b、c、d を表 A.42 に示す。

ステップ間で最大で 0.02°C の温度変化がある。密着のまま一連の測定を行ったため、この温度変化の不確かさは $\pm\sqrt{0.01^2 \times 2} = \pm 0.014^\circ\text{C}$ である。温度係数を用いて温度変化による反応度値への補正量の不確か

表 A.39 XV-2(65V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正後の制御棒 CR#1 校正曲線測定データ

ステップ	制御棒位置 [mm]	補正前反応度価値 [ρ_0]	補正量		補正後反応度価値 ¹⁾ [ρ_0]
			温度変化分 [ρ_0]	間隙変化分 [ρ_0]	
1,2	0.47	0.0	-	-	0.0
3,4	20.35	1.0		0.0008 ^{II)}	1.0008
5,6	41.56	2.0	-0.0010 ^{III)}	-0.0008 ^{IV)}	1.9990
7,8	63.92	3.0	-0.0010	0.0008	2.9988
9,10	87.68	4.0	-0.0010		3.9978
11,12	112.83	5.0		0.0008	4.9986

¹⁾ 現ステップの補正量とともに、前ステップまでの補正量をすべて加える。

^{II)} 間隙 -0.001 mm の変化による反応度変化

^{III)} 温度 +0.01°C の変化による反応度変化

^{IV)} 間隙 +0.001 mm の変化による反応度変化

表 A.40 XV-2(65V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正済みの制御棒 CR#1 校正曲線

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]
				a	b	c	d	
0.47	20.35	41.56	63.92	0.40815	-1.0527	5.2361	-0.024586	0.47 ~ 41.56
20.35	41.56	63.92	87.68	-0.058582	-0.46540	5.0119	0.00064531	41.56 ~ 63.92
41.56	63.92	87.68	112.83	0.16568	-0.89859	5.2789	-0.051590	63.92 ~ 112.83

さを算出すると、温度変化が 0.02°C の時でも

$$\pm\sqrt{(-0.101 \times 0.014)^2 + (0.02 \times (-0.101) \times 0.10)^2} = \pm 0.0014\rho_0$$

となる。ここで、温度変化が小さいため平方根内第 2 項の温度係数の不確かさ $\pm 10\%$ の寄与は小さく無視し得る。集合体の密着を保つ場合、仮に温度変化が無くても温度測定に $\pm 0.01^\circ\text{C}$ の不確かさが有ることから $\pm\sqrt{0.01^2 \times 2} \times (-0.101) = \pm 0.0014\rho_0$ の不確かさが生じる。

次に、ほとんどのステップ間で間隙の変化は 0.003 mm かこれより小さい。密着のまま一連の測定を行ったため、ステップ間でこの間隙変化の不確かさは $\pm\sqrt{0.001^2 \times 2} = \pm 0.0014$ mm である。間隙係数を用いて、この不確かさによる反応度価値への補正量の不確かさを算出すると、間隙変化が 0.003 mm の時に

$$\pm\sqrt{(-0.764 \times 0.0014)^2 + (0.003 \times (-0.764) \times 0.075)^2} = \pm 0.0011\rho_0$$

となる。ここで、間隙変化が小さいため平方根内第 2 項の間隙係数の不確かさ $\pm 7.5\%$ の寄与は小さく無視し得る。集合体の密着を保ったままで、仮に間隙変化が無くても間隙測定に ± 0.001 mm の不確かさが有ることから、 $\pm\sqrt{0.001^2 \times 2} \times (-0.764) = \pm 0.0011\rho_0$ の不確かさが生じる。

表 A.41 XV-2(65V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正後の制御棒 CR#2 校正曲線測定データ

ステップ	制御棒位置 [mm]	補正前反応度値 [ρ_0]	補正量		補正後反応度値 ^{D)} [ρ_0]
			温度変化分 [ρ_0]	間隙変化分 [ρ_0]	
12	0.02	0.0	-	-	0.0
11,10	4.54	0.2358			0.2358
9,8	24.28	1.2358	-0.0010 ^{II)}		1.2348
7,6	45.49	2.2358	-0.0020 ^{III)}	+0.0008 ^{IV)}	2.2336
5,4	67.76	3.2358	-0.0020	+0.0008	3.2324
3,2	91.30	4.2358	-0.0020	-0.0008 ^{V)}	4.2296
1	116.67	5.2358	-0.0020	-0.0023 ^{VI)}	5.2253

D) 現ステップの補正量とともに、前ステップまでの補正量をすべて加える。

II) 温度 +0.01°C の変化による反応度変化

III) 温度 +0.02°C の変化による反応度変化

IV) 間隙 -0.001 mm の変化による反応度変化

V) 間隙 +0.001 mm の変化による反応度変化

VI) 間隙 +0.003 mm の変化による反応度変化

表 A.42 XV-2(65V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正済みの制御棒 CR#2 校正曲線

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]
				a	b	c	d	
0.02	4.54	24.28	45.49	-0.47437	-0.50632	5.2409	-0.0010482	0.02 ~ 24.28
4.54	24.28	45.49	67.76	0.54306	-1.2624	5.3855	-0.00615	24.28 ~ 45.49
24.28	45.49	67.76	91.30	-0.041073	-0.45902	5.0448	0.037567	45.49 ~ 67.76
45.49	67.76	91.30	116.67	-0.13179	-0.27346	4.9231	0.063097	67.76 ~ 116.67

すなわち、ステップ間で温度や間隙の変化が無い小さくても、温度や間隙の測定の不確かさにより $1 \rho_0$ に補正を行った後の反応度値の不確かさは、これまでの SR#4 の 20 mm 移動時の両端での位置再現性に伴う不確かさの他に、温度や間隙の測定による不確かさも合わせて $\pm\sqrt{0.0025^2 \times 2 + 0.0014^2 + 0.0011^2} = \pm 0.0040 \rho_0$ ($\pm 0.40\%$) となる。したがって、CR#1 や CR#2 のステップ間の移動時の位置再現性による不確かさ $\pm 0.35\%$ も合わせて、補正後の制御棒校正の不確かさは $\pm\sqrt{0.40^2 + 0.35^2} = \pm 0.53\%$ となる。

温度係数と間隙係数の測定時の反応度の差をこれらの補正後の制御棒校正曲線を用いて求めた結果を表 A.43 に示す。温度と間隙のデータは表 A.38 と同じである。制御棒校正曲線を変更しても反応度の差は $0.0002 \rho_0$ だけ変化するに過ぎず、この変化は $1 \rho_0$ のオーダーの反応度の差と比べて僅かであった。制御棒校正中の温度と間隙の測定の不確かさにより、 $1 \rho_0$ の不確かさが $\pm 0.0040 \rho_0$ と大きくなり、温度変化補正後の制御棒

表 A.43 XV-2(65V) 炉心における温度係数と間隙係数の測定データ (温度変化と間隙変化による反応度変化補正後の制御棒校正曲線を使用)

測定項目	実験日 ¹⁾	CR#1		CR#2		CR 2 本 反応度価値 合計 [ρ_0]	温度 [°C]	間隙 [mm]
	Run No.	位置 [mm]	反応度価値 [ρ_0]	位置 [mm]	反応度価値 [ρ_0]			
温度係数	5/12 No.9	41.56	1.9990	67.76	3.2324	5.2314	25.86	-0.022
	5/16 No.8	66.27	3.1003	60.00	2.8903	5.9906	18.58	-0.058
	差		1.1013		-0.3421	0.7592	-7.28	-0.036
間隙係数	5/16 No.11	69.46	3.2371	50.01	2.4405	5.6776	18.56	0.362
	5/16 No.12	66.43	3.1072	60.00	2.8903	5.9975	18.53	-0.053
	差		-0.1299		0.4498	0.3199	-0.03	-0.415

¹⁾ いずれも 1989 年

図 2.4 の径方向に対称な炉心から F128/17、F124/35、M128/17、M124/35 にて合計 4 本の DUB 引出しを 4 本の EUDD 引出しに置き換え、片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数を 98 本とした炉心で実験実施、核計装 CH#6 は 0.5×10^{-6} A レベル

校正の不確かさが少し大きくなり $\pm 0.53\%$ となったため、間隙係数の測定において反応度の差の不確かさが少し大きくなり、 $\pm 0.0056 \rho_0$ となった。温度係数と間隙係数の新たな値と不確かさは

$$f_T = \frac{0.7592(\pm 0.011) \times (-0.415)(\pm 0.028) - 0.3199(\pm 0.0056) \times (-0.036)(\pm 0.028)}{-7.28(\pm 0.14) \times (-0.415)(\pm 0.028) - (-0.036)(\pm 0.028) \times (-0.03)(\pm 0.014)}$$

$$= -0.101 \rho_0 / ^\circ\text{C} \pm 10\% \quad (\text{A.34})$$

$$f_G = \frac{0.3199(\pm 0.0056) \times (-7.28)(\pm 0.14) - 0.7592(\pm 0.011) \times (-0.03)(\pm 0.014)}{-7.28(\pm 0.14) \times (-0.415)(\pm 0.028) - (-0.036)(\pm 0.028) \times (-0.03)(\pm 0.014)}$$

$$= -0.764 \rho_0 / \text{mm} \pm 7.5\% \quad (\text{A.35})$$

となる。新たな温度係数と間隙係数は補正前の制御棒校正曲線を用いた値から変わらない。したがって、最終的に、制御棒校正曲線の結果は、温度変化と間隙変化による反応度変化補正済みである表 A.40、表 A.42 を採用する。

A.3.3 基準反応度の測定

SR#4 の 20 mm から全挿入位置である 0.00 mm への挿入による基準反応度 $1 \rho_0$ を正炉周期法により測定した。一定の原子炉出力で運転時は浅い未臨界なので、この状態から反応度 $1 \rho_0$ を印加しても、この印加反応度から印加前の未臨界度を差し引いた反応度だけ超臨界となる。そこで、補正のためにこの未臨界度を前もって測定した。

3.4 節のとおり、線形出力系の読みが C_a 、 C_b である時の未臨界度を、それぞれ ρ_a 、 ρ_b とすると、中性子源増倍法を基にして

表 A.44 XV-2(65V) 炉心における基準反応度測定のための安全棒と制御棒の配置

実験日 ^{Ⅰ)} Run No.	ステップ	SR#4 ^{Ⅱ)}		CR#1 ^{Ⅲ)}		炉心温度 [°C]	間隙 [mm]	CH#6 電流値 [A]	反応度 [ρ ₀]
		位置 [mm]	反応度 ^{Ⅳ)} [ρ ₀]	位置 [mm]	反応度 ^{Ⅳ)} [ρ ₀]				
5/12 No.17	1	20.01	1.0000	42.31	2.0334	25.82	-0.022	0.4949×10 ⁻⁶	-0.0409
5/12 No.18	2	20.01	1.0000	41.20	1.9825	25.96	-0.022	0.4926×10 ⁻⁵	-0.0041
	3	0.00	0.0000	41.20	1.9825			(炉周期測定)	0.9959

Ⅰ) いずれも 1989 年

Ⅱ) 他の安全棒は全挿入で固定

Ⅲ) CR#2 は、ステップ 1、2 では 45.01 mm に固定し、ステップ 2 の後に原子炉出力を下げるために大きく引き抜き、ステップ 3 で元の位置に戻した。

Ⅳ) この SR または CR を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

図 2.4 の径方向に対称な炉心から F128/17、F124/35、M128/17、M124/35 にて合計 4 本の DUB 引出しを 4 本の EUDD 引出しに置き換え、片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数を 98 本とした炉心で実験実施

$$\rho_b = \frac{\rho_a - \rho_b}{\frac{C_b}{C_a} - 1} \quad (\text{A.36})$$

である。

基準反応度測定のための安全棒と制御棒の配置を表 A.44 に示す。まず、SR#4 を 20.01 mm、CR#1 を 42.31 mm、CR#2 を 45.01 mm とし核計装 CH#6 で 0.4949×10^{-6} A (C_a) で定常とした。次に、CH#6 をこれより一桁高い 0.4926×10^{-5} A (C_b) で定常とするために、CR#1 のみ調整したところ 41.20 mm となった。CR#1 の反応度値は、制御棒の校正曲線から全挿入 0.47 mm を基準として、42.31 mm が $2.0334 \rho_0$ 、41.20 mm が $1.9825 \rho_0$ である。さらに、この間に炉心温度が 0.14°C 上昇したが間隙に変化は無かった。温度係数からこの温度上昇を反応度変化にすると $-0.0141 \rho_0 \pm 0.0020 \rho_0$ となる。この反応度変化の不確かさは、2 つの原子炉出力レベルでの温度測定の不確かさを合わせた $\pm\sqrt{0.01^2 \times 2}$ と温度係数の不確かさ $\pm 10\%$ から求め、温度変化が大きいため両者は同程度の寄与を持つ。2 つの原子炉出力レベルの未臨界度の差は、この温度変化による反応度変化を補正して $\rho_a - \rho_b$ は $(2.0334 - 1.9825) - 0.0141 = 0.0368\rho_0 \pm 0.0042 \rho_0$ ($\pm 12\%$) となる。この不確かさは CR#1 の移動の両端での位置再現性による不確かさ、CR#1 の校正の不確かさ $\pm 0.53\%$ に加えて、温度変化による反応度変化の補正の不確かさ $\pm 0.0020 \rho_0$ と間隙測定の不確かさによるものから $\pm\sqrt{0.0025^2 \times 2 + ((2.0334 - 1.9825) \times 0.0053)^2 + 0.0020^2 + 0.0011^2} = \pm 0.0042\rho_0$ と算出した。制御棒校正のステップ 5、6 の CR#1 位置 41.56 mm が、CR#1 の 42.31 mm から 41.20 mm への移動の間にあるが、移動距離が小さいため 41.56 mm の前後で分けずに不確かさをこのように評価した。このように算出すると制御棒校正の不確かさの寄与を若干過大評価することになるが、この寄与は小さくて位置の

再現性による不確かさの寄与が大部分を占めるため、CR#1の移動による反応度差の不確かさへの影響は無視し得る。

したがって、(A.36)式を用いてCH#6が 0.4926×10^{-5} Aで運転時の未臨界度は $0.0041 \rho_0 \pm 0.0005 \rho_0$ ($\pm 12\%$)となる。ここで、2つの原子炉出力レベルでのCH#6の電流値の比の不確かさは、この $\pm 12\%$ に比べて十分小さいので無視した。SR#4の挿入による $1 \rho_0$ の反応度に対してこの未臨界度分の補正を行う。

このようにして、ステップ2の反応度 $-0.0041 \rho_0 \pm 0.0005 \rho_0$ ($\pm 12\%$)の未臨界状態から、SR#4を20.00 mmから全挿入して $1.000 \rho_0 \pm 0.0035 \rho_0$ の反応度を印加し、ステップ3の $0.9959 \rho_0 \pm 0.0035 \rho_0$ の超臨界にした。この不確かさは、ステップ2の反応度の不確かさ $\pm 0.0004 \rho_0$ とSR#4の移動の両端での位置の再現性による不確かさ $\pm 0.0035 \rho_0$ を合わせたものである。

原子炉出力の増加は核計装CH#6でモニターし、これが 0.2×10^{-5} Aから 0.4×10^{-5} A、 0.3×10^{-5} Aから 0.6×10^{-5} A、 0.4×10^{-5} Aから 0.8×10^{-5} Aの間で、2名の測定者がそれぞれのストップウォッチで測定した倍加時間は、53.7秒、53.8秒、54.2秒、55.0秒、55.0秒であり、これらの平均54.3秒を採用した。その不確かさは、これまでの経験から ± 0.5 秒を見込んだ。これより、原子炉周期は $T = 54.3 / \ln(2) = 78.3 \pm 0.7$ 秒となる。この原子炉周期より、逆時間方程式(4.1)とJENDL-4.0の遅発中性子データ評価値に基づく動特性パラメータにより反応度を求めた結果、 $0.9959 \rho_0 \pm 0.0035 \rho_0$ ($\pm 0.36\%$) = $0.0560\% \Delta k/k$ であった。すなわち、 $1 \rho_0 = 0.0562\% \Delta k/k$ である。この基準反応度の不確かさは、用いた遅発中性子データによる不確かさの寄与を合わせて4.1節に記述する。

A.3.4 炉心周辺部での燃料引出し反応度値の測定

ドライバー燃料引出しEUDDの反応度値は、炉心周辺の複数本のEUDD引出しとDUB引出しを表A.45に示すように順次置換して測定を行った。この置換反応度値は、制御棒で補償することにより測定した。すなわち、集合体を分離して引出しを入れ替えた後に集合体を再密着して臨界とすることによる引出しの置換前後の2つのRunの間での制御棒CRの位置の差を求めた。基準は、図2.4の径方向に対称な炉心での測定結果とした。これを制御棒校正曲線より反応度値に換算して、さらに、2つのRunの間での炉心温度差と集合体密着面間隙の差による反応度差を補正した。

表A.45では、この補正した置換反応度値を簡便に算出するため、制御棒に関しては、各Runの制御棒の位置と基準とする全挿入位置の差を反応度値に換算して示す。この全挿入位置は、表A.35よりCR#1は0.47 mmでCR#2は0.02 mmである。炉心温度に関しては、各Runの温度と基準とする 20°C との差を反応度差に換算して示す。集合体密着面間隙に関しては、各Runの間隙と基準とする0.000 mmとの差を反応度差に換算して示す。これら制御棒の反応度値、温度差と間隙の差による反応度差を全て足し合わすと、温度 20.00°C 、間隙読み0.000 mmの基準状態に補正した炉心の余剰反応度となる^{V)}。2つのRunの間でこれら補

^{V)} ただし、この余剰反応度は浅い未臨界から制御棒の挿入により印加できる反応度変化であり、本来の臨界からの余剰反応度とするためには、この未臨界度分の補正を行う必要がある。

表 A.45 XV-2(65V) 炉心におけるドライバー領域の燃料引出しの置換反応度値

実験日 ^{Ⅰ)} Run No.	片側集合体 EUDD 引出し 本数	CR#1		CR#2		炉心温度		密着面間隙		余剰 反応度 ^{Ⅴ)} [ρ_0]	反応度 値 ^{Ⅵ)} [ρ_0]
		位置 [mm]	反応度 ^{Ⅱ)} [ρ_0]	位置 [mm]	反応度 ^{Ⅱ)} [ρ_0]	温度 [°C]	反応度 ^{Ⅲ)} [ρ_0]	間隙 [mm]	反応度 ^{Ⅳ)} [ρ_0]		
5/11 No.6	96 ^{Ⅶ)}	0.48	0.0005	40.84	2.0197	26.28	0.6343	0.015	0.0113	2.6658	(基準)
5/11 No.7	98 ^{Ⅶ)}	58.58	2.7651	50.00	2.4401	26.31	0.6373	-0.024	-0.0180	5.8245	3.159

Ⅰ) いずれも 1989 年

Ⅱ) この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

Ⅲ) 炉心温度を左記の読みから基準とする 20.00°C に変化させる時に加わる反応度

Ⅳ) 集合体密着面間隙を左記の読みから基準とする 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

Ⅴ) 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00°C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度

Ⅵ) 基準との余剰反応度の差で不確かさは $\pm 0.028 \rho_0$

Ⅶ) 図 2.4 の径方向に対称な炉心を基準とする。

Ⅷ) 基準から F128/17、F124/35、M128/17、M124/35 にて DUB 引出し 4 本を EUDD 引出し 4 本に置換核計装 CH#6 は 0.5×10^{-6} A レベル

正した余剰反応度の差をとることにより、簡便に、2つの Run の間の補正した反応度の差、すなわち引出しの置換反応度値を算出することができる。

このように、補正した余剰反応度の差として引出しの置換反応度値を算出するものの、その内訳は、2つの Run の間で制御棒の位置の差を反応度差に換算し、これに温度や間隙の差を反応度差に換算して補正したものである。したがって、この置換反応度値の不確かさは、制御棒、安全棒の位置の再現性による不確かさと校正の不確かさ、温度測定と温度係数の不確かさや間隙測定と間隙係数の不確かさから算出した。

制御棒の反応度差の不確かさは、2つの Run の間での移動前後の位置再現性による不確かさと校正の不確かさによるものを合わせる。CR#1 の移動前後の位置は制御棒校正のステップ 3、4 の 20.35 mm とステップ 5、6 の 41.56 mm を跨ぐため、反応度差の不確かさは

$$\pm \sqrt{0.0025^2 \times 2 + ((2.7651 - 1.9990) \times 0.0053)^2 + 0.0040^2 \times 2 + 0.0025^2 \times 2} = \pm 0.0086 \rho_0$$

となる。平方根内の第 1 項は CR#1 の Run No.6 と No.7 の両端での位置再現性による不確かさで、第 2 項は校正の不確かさによる Run No.7 の 58.58 mm からステップ 5、6 の 41.56 mm の反応度差の不確かさ、第 3 項はステップ 1、2 とステップ 3、4 間及びステップ 3、4 とステップ 5、6 間の SR#4 による $1 \rho_0$ の不確かさで既に記述した SR#4 の移動の両端での位置再現性による不確かさと校正時の温度補正と間隙測定による不確かさを合わせたもの、第 4 項はステップ 1、2 とステップ 5、6 の両端での校正時の CR#1 の位置再現性による不確かさである。

CR#2 の移動前後の位置も制御棒校正のステップ 7、6 の 45.49 mm を跨ぐため、反応度差の不確かさは

$$\pm \sqrt{0.0025^2 \times 2 + ((2.4401 - 2.2336) \times 0.0053)^2 + ((2.2336 - 2.0197) \times 0.0053)^2} = \pm 0.0039 \rho_0$$

となる。

安全棒に関しては、同一日なので集合体の分離と再密着を行っても全挿入位置から動かすことはなく不確かさは生じない。

炉心温度に関しては、集合体の分離と密着を行う時の温度測定の不確かさと温度係数の不確かさを合わせて、温度変化による反応度変化の補正の不確かさは

$$\pm\sqrt{(\sqrt{0.1^2 \times 2} \times (-0.101))^2 + (-0.101 \times 0.10 \times (26.31 - 26.28))^2} = \pm 0.014 \rho_0$$

となる。温度差が小さなため、前者の寄与がこの不確かさの大部分を占める。

集合体密着面間隙に関しては、集合体の分離と密着を行う時の間隙測定の不確かさと間隙係数の不確かさを合わせて、間隙の差による反応度差の補正の不確かさは

$$\pm\sqrt{(\sqrt{0.02^2 \times 2} \times (-0.764))^2 + (-0.764 \times 0.075 \times (-0.024 - 0.015))^2} = \pm 0.022 \rho_0$$

となる。間隙の差が小さなため、前者の寄与がこの不確かさの大部分を占める。

これら4つの不確かさを合わせて、引出し置換反応度値の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.0086^2 + 0.0039^2 + 0.014^2 + 0.022^2} = \pm 0.028 \rho_0$$

となる。温度差と間隙の差による反応度差の補正の不確かさの寄与が大きい。

集合体の分離と再密着を伴う場合は、仮に、2つのRunの間で温度や間隙の差が無い場合でも、温度測定に伴う反応度の不確かさ

$$\pm\sqrt{0.1^2 \times 2} \text{ } ^\circ\text{C} \times (-0.101) \rho_0 / ^\circ\text{C} = \pm 0.014 \rho_0$$

と間隙測定に伴う反応度の不確かさ

$$\pm\sqrt{0.02^2 \times 2} \text{ mm} \times (-0.764) \rho_0 / \text{mm} = \pm 0.022 \rho_0$$

が生じる。

A.3.5 未臨界度の測定

実効増倍率は主に2本の制御棒CRの余剰反応度から算定するが、これに種々の補正を行う。そのうちのひとつが未臨界度である。基準反応度の測定時と同様に、浅い未臨界度で核計装CH#6の読みが C_a 、 C_b である時の未臨界度をそれぞれ ρ_a 、 ρ_b とすると、中性子源増倍法を基にしてこれらには(A.36)式の関係がある。表A.46に示すように、原子炉出力レベルを2段階に変えたRunを3組実施して、それぞれ未臨界度を求めた。各日の2つのRunで余剰反応度の差が $\rho_a - \rho_b$ である。これら2つのRunの間で、CR#1のみを動かして原子炉出力を変更し、他方のCRと全ての安全棒SRは動かさなかった。さらに、集合体は密着したままであり間隙の変化は無いので、この余剰反応度の差の不確かさは、CR#1の移動による反応度差の不確かさ、温度変化による反応度変化の補正の不確かさと間隙測定の不確かさから以下のように算出した。

例えば、5/12の2つのRunでは、CR#1の移動時の位置の再現性と制御棒校正の不確かさより

$$\pm\sqrt{0.0025^2 \times 2 + ((2.0334 - 1.9825) \times 0.0053)^2} = \pm 0.0035 \rho_0$$

の不確かさが生じる。制御棒校正のステップ5、6のCR#1位置41.56 mmが、CR#1の42.31 mmから41.20

表 A.46 XV-2(65V) 炉心における未臨界度

実験日 ¹⁾	CR#1	CR#2	炉心温度		密着面間隙		余剰	CH#6	未臨界度		
Run No.	位置 [mm]	反応度 ¹⁾ [ρ_0]	位置 [mm]	反応度 ¹⁾ [ρ_0]	温度 [°C]	反応度 ³⁾ [ρ_0]	間隙 [mm]	反応度 ⁴⁾ [ρ_0]	反応度 ⁵⁾ [ρ_0]	電流 [$\times 10^{-6}$ A]	[ρ_0]
5/11 No.7	58.58	2.7651	50.00	2.4401	26.31	0.6373	-0.024	-0.0183	5.8242	0.4954	0.0432 $\pm 0.0043(10 \%)$
5/11 No.8	57.72	2.7272	50.00	2.4401	26.30	0.6363	-0.024	-0.0183	5.7853	4.933	0.0043 $\pm 0.0004(10 \%)$
5/12 No.17	42.31	2.0334	45.01	2.2116	25.82	0.5878	-0.022	-0.0168	5.8160 ⁶⁾	0.4949	0.0408 $\pm 0.0045(11 \%)$
5/12 No.18	41.20	1.9825	45.01	2.2116	25.96	0.6020	-0.022	-0.0168	5.7793 ⁶⁾	4.926	0.0041 $\pm 0.0005(11 \%)$
6/2 No.23	69.78	3.2508	60.00	2.8903	17.24	-0.2788	-0.070	-0.0535	5.8088	0.4939	0.0303 $\pm 0.0045(15 \%)$
6/2 No.27	69.00	3.2174	60.00	2.8903	17.30	-0.2727	-0.070	-0.0535	5.7815	4.9393	0.0030 $\pm 0.0005(15 \%)$

¹⁾ いずれも 1989 年

¹⁾ この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

³⁾ 炉心温度の読みを左記の値から基準の 20.00°C に変化させる時に加わる反応度

⁴⁾ 集合体密着面間隙の読みを左記の値から基準の 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

⁵⁾ 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00°C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度

⁶⁾ SR#4 を 20.01 mm まで引き抜き固定したのでその反応度値 1 ρ_0 を加えた。他の 5 組の SR は全挿入

いずれも、図 2.4 の径方向に対称な炉心から F128/17、F124/35、M128/17、M124/35 にて合計 4 本の DUB 引出しを 4 本の EUDD 引出しに置き換え、片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数を 98 本とした炉心で実験実施、5/12 を除き 6 組の SR は全挿入

mm への移動の間にあるが、移動距離が小さなため 41.56 mm の前後で分けずに不確かさを算出した。このように算出すると制御棒校正の不確かさの寄与を若干過大評価することになるが、この寄与は小さくて位置の再現性による不確かさの寄与が大部分を占めるため、CR#1 の移動による反応度差の不確かさへの影響は無視し得る。

集合体の密着を保持した時の温度測定の不確かさと温度係数の不確かさより

$$\pm \sqrt{(\sqrt{0.01^2 \times 2} \times (-0.101))^2 + (-0.101 \times 0.10 \times (25.96 - 25.82))^2} = \pm 0.0020 \rho_0$$

の不確かさが生じる。温度変化が大きいため両者は同程度の寄与を持つ。間隙の変化は無く、集合体の密着を保持した時の間隙測定の不確かさより $\pm 0.0011 \rho_0$ の不確かさが生じる。

余剰反応度の差の不確かさは、これらを合わせて

$$\pm \sqrt{0.0035^2 + 0.0020^2 + 0.0011^2} = \pm 0.0042 \rho_0$$

となる。したがって、(A.36) 式を用いて 5/12 の核計装 CH#6 が 0.4949×10^{-6} A で運転時の未臨界度は 0.0408

$\rho_0 \pm 0.0045 \rho_0$ ($\pm 11\%$)となる。ここで、2つの原子炉出力レベルでのCH#6の電流値の比の不確かさは、この $\pm 11\%$ に比べて十分小さいので無視した。

中性子源増倍法より、未臨界度と、その時の原子炉出力レベルとしての核計装CH#6の電流値の積は一定となる。この積は、5/11が $2.14 \times 10^{-8} \rho_0 A \pm 10\%$ 、5/12が $2.02 \times 10^{-8} \rho_0 A \pm 11\%$ 、6/2が $1.50 \times 10^{-8} \rho_0 A \pm 15\%$ となった。5/11と6/2の値の間には43%の差があり、これは各日の不確かさの範囲を超える。3つの値の平均である $1.89 \times 10^{-8} \rho_0 A$ を採用し、その不確かさには3つの値の間の標準偏差 $\pm 0.28 \times 10^{-8} \rho_0 A$ ($\pm 15\%$)を採用する。これを基に余剰反応度に補正を行い実効増倍率を求める。

A.3.6 密着面でのステンレス鋼反応度値の測定

炉心の中心面に相当する2分割集合体の密着面には、主に引出し前端面の部材としてのステンレス鋼があり、決定論手法で実効増倍率を計算する場合はそのモデル化が困難となる場合がある。そこで、このステンレス鋼の負の反応度効果を実験的に求めて実効増倍率の実験値導出において補正として用い、密着面のステンレス鋼を取り除いた炉心の実効増倍率を決定論手法による計算結果と比較する。この補正のために、炉心中心引出しの密着面近傍においてステンレス鋼の反応度値測定を行った。炉心中心引出し以外の領域の密着面では、XIV-1炉心において求めた表B.20の炉心中心引出しと各領域間の反応度値の比を基に、そのステンレス鋼の反応度値を求めた。

実験に用いたステンレス板とアルミニウム板の重量を表A.47に示す。重量の測定誤差は0.1%未満であり、後に記述するように反応度値の測定誤差と比べて無視し得るほど小さい。

まず、F126/26の中心引出しにおいて、引出し内の燃料板と模擬物質板を全て軸方向に炉心外側に向けてずらすことにより、この引出し内の前端面の内側に、通常とは垂直の方向に模擬物質板を装填できる1/4インチ幅の空間を設けて、この空間で1枚のステンレスSUS(1/4×2×2)板とアルミニウムAl frame(1/8×2×2)板2枚の置換反応度値を5/16のRun No.13とNo.14で測定した。測定結果を表A.48に示す。

これらの反応度値は、制御棒CR#1で補償することにより測定した。集合体は分離せずに密着を保ったまま、ステンレス板とアルミニウム板の入れ替え前後の2つのRunの間でのCR#1の位置の差を求めた。これを制御棒の校正結果より反応度値に換算して、さらに、2つのRunの間での炉心温度と集合体密着面間隙の

表 A.47 XV-2(65V) 炉心中心におけるステンレス鋼反応度値測定に用いたステンレス板とアルミニウム板の重量

板種類とサイズ	枚数	合計重量 [g] ¹⁾	板種類とサイズ	枚数	合計重量 [g]
SUS(1/4×2×2)	1	124.6 ¹⁾	Al frame(1/8×2×2) ^{III)}	2	8.633 ¹⁾
Al(1/16×2×2)	8	81.70 ¹⁾	Al frame(1/4×2×2) ^{III)}	2	9.269 ¹⁾

¹⁾ 重量の測定誤差は0.1%未満

^{II)} 実験時の記録より

^{III)} Al(1/8×2×2)板またはAl(1/4×2×2)板の内側をくり抜いて製作

変化による反応度変化を補正した。

表 A.47 より SUS(1/4×2×2) 板の重さは 124.6 g で Al frame(1/8×2×2) 板 2 枚の重さは 8.633 g であり、この置換反応度値の測定結果は表 A.48 に示すように $-0.0336 \rho_0 \pm 0.0082 \rho_0$ である。この不確かさは以下のように算出した。

制御棒 CR と安全棒 SR に関しては、まず、同じ位置に戻したものの 2 つの Run の間で動かした CR#2 と固定側集合体の 3 組の安全棒 SR の移動前後の位置再現性により生じる反応度の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.0025^2 \times 2 \times 4} = \pm 0.0071 \rho_0$$

である。これら 2 つの Run の間では、移動側集合体の 3 組の SR は全挿入のまま動かさなかったため、これら SR に関して不確かさは生じない。次に、2 つの Run の間の反応度差を補償する CR#1 の移動の両端での位置再現性と CR#1 の校正の不確かさ $\pm 0.53\%$ を合わせると

$$\pm\sqrt{0.0025^2 \times 2 + ((3.0831 - 3.1102) \times 0.0053)^2} = \pm 0.0035 \rho_0$$

となる。CR#1 の位置の差が小さなため、前者の寄与がこの不確かさの大部分を占める。

炉心温度に関しては、集合体の密着を保ったまま測定を行う時の温度測定の不確かさ $\pm 0.01^\circ\text{C}$ と温度係数の不確かさ $\pm 10\%$ による寄与を合わせて、温度変化による反応度変化の補正の不確かさは

$$\pm\sqrt{(\sqrt{0.01^2 \times 2} \times (-0.101))^2 + (-0.101 \times 0.10 \times (18.35 - 18.42))^2} = \pm 0.0016 \rho_0$$

となる。温度差が小さなため、前者の寄与がこの不確かさの大部分を占める。

集合体密着面間隙に関しては、間隙変化は無いが間隙測定の不確かさによる $\pm 0.0011 \rho_0$ の不確かさが生じる。

これら 4 つの不確かさを合わせて、置換反応度値の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.0071^2 + 0.0035^2 + 0.0016^2 + 0.0011^2} = \pm 0.0082 \rho_0$$

となる。

ステンレス板正味の反応度値を得るためには、アルミニウムの反応度値分を補正する必要がある。このために、F126/26 の Pu08A 引出しの密着面から 1 セル目において、3 枚装填されている劣化ウラン燃料板のうち両脇の 2 枚を取り除いてセル内に 1/4 インチ幅の 2 箇所の空間を設けて、これら空間で 8 枚の Al(1/16×2×2) 板と 2 枚の Al frame(1/4×2×2) 板の置換反応度値を 6/9 の Run No.3 と No.4 で測定した。表 A.47 より 8 枚の Al(1/16×2×2) 板の重さの合計は 81.70 g で 2 枚の Al frame(1/4×2×2) 板の重さの合計は 9.269 g である。この置換反応度値の測定結果は表 A.48 に示すように $-0.0102 \rho_0 \pm 0.0082 \rho_0$ である。この不確かさは、5/16 に実施したステンレス板とアルミニウム板の置換反応度値と同様に算出し、その内訳は以下のとおりである。

制御棒と安全棒に関しては、まず、同じ位置に戻したものの 2 つの Run の間で動かした CR#2 と固定側集合体の 3 組の SR の移動前後の位置再現性により生じる反応度の不確かさは $\pm 0.0071 \rho_0$ である。これら 2 つの Run の間では、移動側集合体の 3 組の SR は全挿入のまま動かさなかったため、これら SR に関して不確かさは生じない。次に、2 つの Run の間の反応度差を補償する CR#1 の移動の両端での位置再現性と校正の不確

表 A.48 XV-2(65V) 炉心中心におけるステンレス鋼反応度値とアルミニウム反応度値

実験日 ^{Ⅰ)} Run No.	装荷物 (目的)	CR#1		CR#2		炉心温度		密着面間隙		余剰 反応度 ^{Ⅴ)} [ρ ₀]	反応度 値 ^{Ⅵ)} [ρ ₀]
		位置 [mm]	反応度 ^{Ⅱ)} [ρ ₀]	位置 [mm]	反応度 ^{Ⅱ)} [ρ ₀]	温度 [°C]	反応度 ^{Ⅲ)} [ρ ₀]	間隙 [mm]	反応度 ^{Ⅳ)} [ρ ₀]		
5/16 No.13	Al frame(1/8×2×2) 2枚(5/16の基準)	66.50	3.1102	60.00	2.8903	18.42	-0.1596 ^{Ⅶ)}	-0.054	-0.0413	5.7996	
5/16 No.14	SUS(1/4×2×2) 1枚	65.87	3.0831	60.01	2.8908	18.35	-0.1666	-0.054	-0.0413	5.7660	-0.0336
6/9 No.3	Al(1/16×2×2) 8枚	71.28	3.3146	60.00	2.8903	17.48	-0.2545	-0.073	-0.0558	5.8946	-0.0102
6/9 No.4	Al frame(1/4×2×2) 2枚(6/9の基準)	71.65	3.3304	60.01	2.8908	17.42	-0.2606	-0.073	-0.0558	5.9048	

Ⅰ) いずれも 1989 年

Ⅱ) この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

Ⅲ) 炉心温度の読みを左記の値から基準の 20.00°C に変化させる時に加わる反応度

Ⅳ) 集合体密着面間隙の読みを左記の値から基準の 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

Ⅴ) 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00°C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度

Ⅵ) それぞれの日の基準の余剰反応度からの差

Ⅶ) 実験時のデータ処理に誤りがあったので、正しい値にここで訂正する

いずれも、図 2.4 の径方向に対称な炉心から F128/17、F124/35、M128/17、M124/35 にて合計 4 本の DUB 引出しを 4 本の EUDD 引出しに置き換え、片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数を 98 本とした炉心で実験実施、核計装 CH#6 は 0.5×10^{-6} A

かさを合わせると

$$\pm \sqrt{0.0025^2 \times 2 + ((3.3146 - 3.3304) \times 0.0053)^2} = \pm 0.0035 \rho_0$$

となる。CR#1 の位置の差が小さなため、後者の寄与は無視し得る。

炉心温度に関しては、集合体の密着を保ったまま測定を行う時の温度測定の不確かさ $\pm 0.01^\circ\text{C}$ と温度係数の不確かさ $\pm 10\%$ による寄与を合わせて、温度変化による反応度変化の補正の不確かさは

$$\pm \sqrt{(\sqrt{0.01^2 \times 2} \times (-0.101))^2 + (-0.101 \times 0.10 \times (17.42 - 17.48))^2} = \pm 0.0016 \rho_0$$

となる。温度差が小さなため、後者の寄与は無視し得る。

集合体密着面間隙に関しては、間隙変化は無いが間隙測定の不確かさによる $\pm 0.0011 \rho_0$ の不確かさが生じる。

これら 4 つの不確かさを合わせて、置換反応度値の不確かさは

$$\pm \sqrt{0.0071^2 + 0.0035^2 + 0.0016^2 + 0.0011^2} = \pm 0.0082 \rho_0$$

となる。

炉心中心における単位重量当たりのアルミニウムの反応度値は

$$\frac{-0.0102 \rho_0 (\pm 0.0082 \rho_0)}{81.70g - 9.269g} = -1.41 \times 10^{-4} \rho_0 / g \pm 80\% \quad (\text{A.37})$$

となる。ここで、アルミニウムの重量の不確かさは0.1%のオーダーであり、80%の反応度値の不確かさに比べてはるかに小さいので無視した。

これより、SUS(1/4×2×2)板との置換反応度値を求めたAl frame(1/8×2×2)板2枚の反応度値は

$$-1.41 \times 10^{-4} \rho_0 / g (\pm 80\%) \times 8.633g = -0.0012 \rho_0 \pm 0.0010 \rho_0 \quad (\text{A.38})$$

となる。ここでも、アルミニウムの重量の不確かさは小さく無視した。なお、ステンレス鋼の反応度値を測定した引出し前端面とアルミニウムの反応度値を測定した劣化ウラン燃料板の位置では、アルミニウムの反応度値に若干の相違が生じることが予想される。しかしながら、アルミニウムの反応度値の不確かさが±80%と大きなことから、測定位置の相違によるアルミニウム反応度値の相違は、この大きな不確かさと比べて無視できるものとする。

これを用いて、炉心中心での引出し前端面におけるSUS(1/8×2×2)板の正味の反応度値は

$$-0.0336 \rho_0 (\pm 0.0082 \rho_0) - 0.0012 \rho_0 (\pm 0.0010 \rho_0) = -0.0348 \rho_0 \pm 0.0083 \rho_0 (\pm 24\%) \quad (\text{A.39})$$

となる。したがって、単位重量当たりのステンレス鋼の反応度値は

$$\frac{-0.0348 \rho_0 (\pm 0.0083 \rho_0)}{124.61g} = -2.79 \times 10^{-4} \rho_0 / g \pm 24\% \quad (\text{A.40})$$

となる。ここでも、ステンレス鋼の重量の不確かさは小さく無視した。

アルミニウムとステンレス鋼の単位重量当たりの反応度値の比は

$$\frac{-1.41 \times 10^{-4} \rho_0 / g (\pm 80\%)}{-2.79 \times 10^{-4} \rho_0 / g (\pm 24\%)} = 0.505 \pm 84\% \quad (\text{A.41})$$

である。付録B.2.6項のXIV-1炉心での同比 $0.292 \pm 34\%$ とは70%程度の相違があるが、これは両者の不確かさの範囲内である。

付録B.2.6項の表B.20より、中心引出しの1格子管当たり余分に存在するステンレス鋼の重量は、固定側と移動側集合体合わせて19.98gであり、これに単位重量当たりのステンレス鋼の反応度値を乗じると

$$-2.79 \times 10^{-4} \rho_0 / g (\pm 24\%) \times 19.98g = -0.00558 \rho_0 \pm 24\% \quad (\text{A.42})$$

である。

テスト領域、バッファ領域と制御安全棒引出しに関しては、XIV-1炉心とXV-2(65V)炉心間で引出し内の燃料セルの組成が異なることはあっても引出しの装荷本数と装荷位置が同じである。したがって、表B.20の炉心中心引出しとこれらの各領域間の反応度値の比は、両炉心間で不確かさの範囲で変わらないとする。ドライバー領域に関しては、固定側と移動側集合体を合わせた装荷本数が、XIV-1炉心では $116 \times 2 = 232$ 本であるのに対してXV-2(65V)炉心が $136 \times 2 = 272$ 本と異なる。この引出し本数の比 $272/232 = 1.172$ をドライバー領域の反応度値寄与分に乗ずることにより引出し本数の違いを補正した。表B.20より、ドライバー領域の寄与分が2~3%と小さく、その不確かさが大きいので、このような評価で十分である。表A.49にXV-2(65V)炉心での密着面のステンレス鋼反応度値を示す。

表 A.49 XV-2(65V) 炉心における密着面ステンレス鋼反応度価値

領域	引出し本数 (格子管数) (固定側と移動側の合計)	ステンレス鋼 重量 [g] ^{I)}	反応度価値 の比 ^{II)}	反応度価値 ^{III)} [ρ_0]
中心引出し	1 × 2	19.98	1.0	-0.00558 ± 24%
テスト領域 ^{IV)}	76 × 2	1518.48	52.2 ± 13%	-0.291 ± 27%
バッファ領域	40 × 2	799.2	11.9 ± 52%	-0.0664 ± 57%
制御・安全棒引出し	8 × 2	863.392	2.8 ± 264%	-0.016 ± 265%
ドライバー領域	136 × 2 ^{V)}	2717.28	2.0 ± 202% ^{VI)}	-0.011 ± 203%
合計			69.9 ± 19%	-0.390 ± 31%

I) 各領域で、引出し装荷本数に 1 格子管当たりの余分に存在するステンレス鋼の重量を乗じたもの

II) 付録 B.2.6 項の表 B.20 より引用、中心引出しの反応度価値で規格化

III) 中心引出しの反応度価値 $-0.00558 \rho_0 \pm 24\%$ に中心引出しと各領域間の反応度価値の比を乗じたもの

IV) 中心引出しを除く

V) 図 2.4 の片側集合体当たりに EUDD 引出しを 96 本装荷した径方向に対称な炉心のドライバー燃料引出し本数

VI) 付録 B.2.6 項の表 B.20 のドライバー領域の反応度価値の比に、炉心間のドライバー燃料引出し本数の比を乗じて補正したもの

A.3.7 余剰反応度の再現性と不確かさの評価

実効増倍率は余剰反応度を基に算出する。原子炉運転時は、6 組の安全棒 SR は全挿入で 2 組の制御棒 CR を途中まで引き抜くので、これら 2 組の CR を全挿入する時に増加する反応度の和が余剰反応度となる。ただし、この余剰反応度は、本来の臨界からの余剰反応度に一定の原子炉出力で運転時の未臨界度を加えた反応度である。これまでと同様に、この余剰反応度に炉心温度や集合体密着面間隙に関する補正を行う。

炉心に特別な実験用装荷物等が無く標準である Run のデータを抽出して、集合体の分離、密着に伴う余剰反応度の再現性として変化(ばらつき)を見た。いずれの Run も浅い未臨界なので、この余剰反応度は原子炉出力レベルに依存する。したがって、この出力レベルやその他の炉心の状態が同じである Run を抽出した結果、EUDD 引出しを片側集合体当たり 98 本装荷した炉心で余剰反応度の変化(ばらつき)を見ることができた。これらのデータを表 A.50 にまとめる。この表の各 Run の余剰反応度は、基準の 20°C、間隙読み 0.000 mm での値となるように、既に反応度の温度補正と間隙補正を行った値である。

Run の間の余剰反応度の変化(ばらつき)は $0.015 \rho_0$ 以内である。一方で、余剰反応度の再現性は、CR と SR の位置再現性、温度測定の不確かさ、間隙測定の不確かさからも以下のように評価できる。8 組の CR と SR の位置再現性により生じる反応度の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.0025^2 \times 8} = \pm 0.0071 \rho_0$$

表 A.50 XV-2(65V) 炉心における集合体分離密着時の余剰反応度の再現性

実験日 ¹⁾	CR#1	CR#2	炉心温度		密着面間隙		余剰	CH#6	備考	
Run No.	位置 [mm]	反応度 ²⁾ [ρ_0]	位置 [mm]	反応度 ²⁾ [ρ_0]	温度 [°C]	反応度 ³⁾ [ρ_0]	間隙 [mm]	反応度 ⁴⁾ [ρ_0]	反応度 ⁵⁾ [ρ_0]	電流 [$\times 10^{-6}$ A]
5/16 No.8	66.27	3.1003	60.00	2.8903	18.58	-0.1434	-0.058	-0.0443	5.803	0.4944
5/19 No.8	68.02	3.1755	59.99	2.8899	17.90	-0.2121	-0.062	-0.0474	5.806	0.4943
5/31 No.9	69.54	3.2405	60.00	2.8903	17.34	-0.2687	-0.067	-0.0512	5.811	0.4945
6/1 No.8	70.23	3.2700	60.01	2.8908	17.12	-0.2909	-0.068	-0.0520	5.818	0.4949
6/2 No.23	69.78	3.2508	60.00	2.8903	17.24	-0.2788	-0.070	-0.0535	5.809	0.4939
6/9 No.6	69.58	3.2422	60.01	2.8908	17.42	-0.2606	-0.073	-0.0558	5.817	0.4951
6/13 No.6	69.85	3.2537	60.00	2.8903	17.22	-0.2808	-0.071	-0.0542	5.809	0.4940
6/14 No.9	70.16	3.2670	60.00	2.8903	17.12	-0.2909	-0.073	-0.0558	5.811	0.4959

¹⁾ いずれも 1989 年

²⁾ この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

³⁾ 炉心温度の読みを左記の値から基準の 20.00°C に変化させる時に加わる反応度

⁴⁾ 集合体密着面間隙の読みを左記の値から基準の 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

⁵⁾ 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00°C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度に相当

いずれも、図 2.4 の径方向に対称な炉心から F128/17、F124/35、M128/17、M124/35 にて合計 4 本の DUB 引出しを 4 本の EUDD 引出しに置き換え、片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数を 98 本とした炉心で実験実施

である。集合体の分離と密着を行う時の温度測定の不確かさ $\pm 0.1^\circ\text{C}$ より

$$\pm 0.1^\circ\text{C} \times (-0.101) \rho_0 / ^\circ\text{C} = \pm 0.010 \rho_0$$

が、これに伴う反応度の不確かさとなる。集合体の分離と密着を行う時の間隙測定の不確かさ $\pm 0.02 \text{ mm}$ より

$$\pm 0.02 \text{ mm} \times (-0.764) \rho_0 / \text{mm} = \pm 0.015 \rho_0$$

が、これに伴う反応度の不確かさとなる。これら 3 つの不確かさを合わせて、余剰反応度の再現性は

$$\pm \sqrt{0.0071^2 + 0.010^2 + 0.015^2} = \pm 0.019 \rho_0$$

となる。

なお、いずれの Run も CR の位置は近く、この CR 位置の差から余剰反応度の差を計算するための制御棒校正の不確かさは余剰反応度の再現性には影響しない。さらに、5/16 の Run No.8 を除くと、Run の間で炉心温度の差は 0.8°C 以内であるため、温度係数の不確かさによる反応度差の不確かさは、 $0.8^\circ\text{C} \times (-0.101) \rho_0 / ^\circ\text{C} \times \pm 0.10 = \pm 0.008 \rho_0$ であり、集合体密着面間隙の差も 0.02 mm に満たないため、間隙係数の不確かさによる反応度差の不確かさは $0.02 \text{ mm} \times (-0.764) \rho_0 / \text{mm} \times \pm 0.075 = \pm 0.001 \rho_0$ より小さく、いずれも余剰反応度の再現性への影響は小さい。

このように算出した余剰反応度の再現性 $\pm 0.019 \rho_0$ と比べて、余剰反応度の変化 (ばらつき) $0.015 \rho_0$ は有

意ではない。5/16のRun No.8と6/14のRun No.9は1カ月離れているが、この期間にプルトニウム燃料に含まれる ^{241}Pu が崩壊して ^{241}Am が生成することによる余剰反応度の低下は有意には現れなかった。

実効増倍率を評価するための基となる炉心の余剰反応度は、表A.50に記載の片側集合体当たりEUDD引出しを98本装荷した炉心での8回のRunの平均値を採用する。これらの平均値は $5.810 \rho_0$ であり、核計装CH#6の電流値は $0.4946 \times 10^{-6} \text{ A}$ である。

この平均値の不確かさには余剰反応度の再現性の算出結果 $\pm 0.019 \rho_0$ を用い、これに2組のCRの反応度値の校正に起因する不確かさを合わせる。8回のRunいずれも、最大で、CR#1は70 mm、CR#2は60 mm程度引き抜き、CR#1では制御棒校正ステップ7、8の63.92 mm、CR#2ではステップ7、6の45.49 mmが直近の制御棒校正ステップ位置である。全挿入位置からこれらステップの位置に至るまでに、基準反応度に温度と間隙の測定の不確かさによる分を加えた $\pm 0.0040 \rho_0$ の不確かさを持つ反応度値をいずれも3回積み重ねることになる。70 mmや60 mmからこれら直近の校正ステップ位置までの間の反応度値の不確かさと、両CRの全挿入とこれら直近の校正ステップの両端での校正時の位置の再現性による不確かさも合わせると、制御棒校正の不確かさによる2組のCRの反応度値の不確かさは

$$\begin{aligned} & \pm \sqrt{0.0040^2 \times (3 + 3) + ((3.2700 - 2.9988) \times 0.0053)^2 + ((2.8903 - 2.2336) \times 0.0053)^2 + 0.0025^2 \times 2 \times 2} \\ & = \pm 0.012 \rho_0 \end{aligned}$$

となり、先の平均値の不確かさ $\pm 0.019 \rho_0$ と合わせると $\pm 0.022 \rho_0$ となる。なお、先に記述したように、表A.50の余剰反応度測定時のSRやCRの位置再現性に伴う不確かさは、既に平均値の不確かさ $\pm 0.019 \rho_0$ に含まれる。

これら8回のRunは、5月16日から6月14日の30日間の間に行われ、余剰反応度の平均値 $5.810 \rho_0 \pm 0.022 \rho_0$ は、この期間の中央となる1989年5月31日時点の値である。

A.4 XV-2(80V) 炉心の特性試験

A.4.1 実験炉心

XV-2(80V) 炉心は、1989年3月7日から臨界近接を開始して、片側集合体当たりの引出しが、Pu08A 55本、Pu08B 2本、Pu08C 20本、SSB 40本、PuDA1 40本、EUDD 100本、DUB 288本、SCRA 4組 8本の炉心として、3月8日に臨界に到達し同年4月28日まで実験を行った。この炉心で片側集合体当たり DUB 引出し 4本を EUDD 引出しに置換し、2章に記載した EUDD 引出し装荷本数を 104本とした径方向に対称な炉心に整形して実効増倍率を評価した。

A.4.2 制御棒校正曲線、温度係数と集合体密着面間隙係数の測定

片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数を 102本とした炉心で制御棒 CR#1、CR#2 の校正を行った。安全棒 SR#4 の 20 mm から全挿入による反応度を基準反応度 $1 \rho_0$ と定義して、これを基にして置換法で制御棒校正を行った。後に、正炉周期法によりこの $1 \rho_0$ を $\% \Delta k/k$ 単位で求める。置換法の各ステップで等しくする原子炉の出力レベルは、核計装 CH#6 の電流値でモニターしその電流値は $0.5 \times 10^{-6} \text{A}$ レベルであった。制御棒校正時の各ステップの SR#4 や CR#1、CR#2 の配置等のデータを表 A.51 に示す。

各ステップ間に要した時間は 10 分程度と短く、温度変化や集合体密着面間隙の変化による反応度変化は小さい。しかしながら、これらの反応度変化を補正する必要がある。この補正のためには、反応度の温度係数と間隙係数が必要となるものの、これらの係数を求めるには制御棒の校正結果を用いる。

そこで、最初に、これらの補正を行わずに制御棒校正実験のデータ処理を行い制御棒校正曲線を算出し、これを基にして温度係数と間隙係数を求める。次に、これらを用いて温度変化や間隙変化による反応度変化の補正を行い、再度、制御棒校正実験のデータ処理を行う。さらに、この再度の処理の結果得た制御棒校正曲線を基にして温度係数と間隙係数を求めるという繰り返しの処理を行った。

まず、ステップ 1 から 11 のデータを用いて、CR#1 の校正曲線を算出した。この制御棒の反応度値は、全挿入である 0.47 mm (ステップ 1、2) を $0 \rho_0$ とし、SR#4 との置換により、19.77 mm (ステップ 3、4) が $1 \rho_0$ 、40.04 mm (ステップ 5、6) が $2 \rho_0$ 、61.67 mm (ステップ 7、8) が $3 \rho_0$ 、84.58 mm (ステップ 9、10) が $4 \rho_0$ 、108.86 mm (ステップ 11) が $5 \rho_0$ 、となる。これらは CR#1 の先端の位置である。

0.47 mm から順番に 4 点ずつのデータを 3 次式に当てはめた、これら 4 点の範囲をカバーする制御棒の校正曲線を、制御棒位置を x mm、その位置の制御棒値を $y \rho_0$ とする以下の 3 次式として求めた。

$$y = a \left(\frac{x}{100} \right)^3 + b \left(\frac{x}{100} \right)^2 + c \left(\frac{x}{100} \right) + d \quad (\text{A.43})$$

3 次式の係数、a、b、c、d を表 A.52 に示す。任意の位置の制御棒反応度値は、この 3 次式で内挿して求める。3 次式の係数の各セットの適用範囲もこの表に示す。これは、最小二乗法によるフィッティングではなくて 3 次式への当てはめなので、これに伴う不確かさは生じない。

同様に、CR#2 については、ステップ 1 から 12 のデータを用いて校正曲線を算出した。まず、全挿入で

表 A.51 XV-2(80V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正前の制御棒校正曲線測定データ

ステップ	時刻 ^{Ⅰ)}	SR#4 位置 ^{Ⅱ)} [mm]	CR#1 位置 ^{Ⅱ)} [mm]	CR#2 位置 ^{Ⅱ)} [mm]	炉心温度 [°C]	密着面間隙 [mm]
1	13:23	0.00	0.47	109.60	23.35	-0.018
2	13:36	20.01 ^{Ⅲ)}	0.47	85.63	23.36	-0.019
3	13:54	0.00	19.77	85.63	23.35	-0.019
4	14:02	19.99	19.77	63.18	23.34	-0.019
5	14:10	0.00	40.04	63.18	23.33	-0.019
6	14:20	20.01	40.04	41.74	23.34	-0.019
7	14:32	0.00	61.67	41.74	23.32	-0.018
8	14:42	20.00	61.67	21.38	23.32 ^{Ⅳ)}	-0.019
9	14:56	0.00	84.58	21.38	23.31	-0.019
10	15:07	20.01	84.58	2.18	23.31	-0.019
11	15:23	0.00	108.86	2.18	23.31	-0.019
12	15:38	19.99	87.48	0.05	23.28	-0.019

^{Ⅰ)} 実験日 1989/3/10

^{Ⅱ)} 先端の位置の表示

^{Ⅲ)} 安全棒位置の表示の微小なずれのため 20.01 mm や 19.99 mm の場合もあった。

^{Ⅳ)} ステップ 8 で固定側#2 チャンネルの温度読みが不安定な動きを示したため、このチャンネルに関しては前後ステップの読みの平均値とし、これを他の 5 チャンネルの温度読みと合わせて平均した結果を採用した。

図 2.5 の径方向に対称な炉心から F128/17、F124/35、M128/17、M124/35 にて合計 4 本の EUDD 引出しを 4 本の DUB 引出しに置き換え、片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数を 102 本とした炉心で校正実験を実施、核計装 CH#6 は 0.5×10^{-6} A レベル

ある 0.05 mm (ステップ 12) を基準 $0 \rho_0$ とした。遡って、ステップ 11 と 10 で、CR#2 を 0.05 mm から 2.18 mm まで引き抜いた分の反応度値と補償するのは、SR#4 の $1 \rho_0$ 挿入分から CR#1 の 87.48 mm から 108.86 mm までの引き抜き分の反応度値を差し引いたものとなる。後者は、上記の CR#1 の校正曲線の式より算出した結果、 $5.0 \rho_0 - 4.1225 \rho_0 = 0.8775 \rho_0$ であった。したがって、CR#2 の 2.18 mm の反応度値は、 $1.0 \rho_0 - 0.8775 \rho_0 = 0.1225 \rho_0$ となる。21.38 mm(ステップ 9 と 8) が $1.1225 \rho_0$ 、41.74 mm(ステップ 7 と 6) が $2.1225 \rho_0$ 、63.18 mm(ステップ 5 と 4) が $3.1225 \rho_0$ 、85.63 mm(ステップ 3 と 2) が $4.1225 \rho_0$ 、109.60 mm(ステップ 1) が $5.1225 \rho_0$ となる。CR#1 と同様に、0.05 mm から遡って順番に 4 点ずつのデータを 3 次式に当てはめ、その係数、a、b、c、d を表 A.53 に示す。

基準反応度の安全棒の挿入距離が同じであることから、これら制御棒校正の不確かさの考え方は XV-2(65V) 炉心と同様である。

表 A.52 XV-2(80V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正前の制御棒 CR#1 校正曲線

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]
				a	b	c	d	
0.47	19.77	40.04	61.67	-0.18579	-0.51461	5.2929	-0.024865	0.47 ~ 40.04
19.77	40.04	61.67	84.58	0.24746	-1.0409	5.4870	-0.046016	40.04 ~ 61.67
40.04	61.67	84.58	108.86	0.084310	-0.73699	5.3064	-0.011942	61.67 ~ 108.86

表 A.53 XV-2(80V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正前の制御棒 CR#2 校正曲線

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]
				a	b	c	d	
0.05	2.18	21.38	41.74	4.3052	-3.5614	5.8285	-0.0029134	0.05 ~ 21.38
2.18	21.38	41.74	63.18	0.25936	-0.919479	5.4118	0.0049576	21.38 ~ 41.74
21.38	41.74	63.18	85.63	0.17712	-0.81560	5.3716	0.0095946	41.74 ~ 63.18
41.74	63.18	85.63	109.60	-0.19215	-0.11195	4.9425	0.092983	63.18 ~ 109.60

温度係数と集合体密着面間隙係数は、表 A.54 のように、温度と間隙をそれぞれ大きく変化させた 2 つの臨界データから測定した。しかし、間隙を全く変化させずに温度を変えたり、その逆を行うことはできなかった。そこで、反応度は温度変化と間隙変化について互いに独立に変化するとして、温度係数を $f_T \rho_0/^\circ\text{C}$ と間隙係数を $f_G \rho_0/\text{mm}$ とすると、各係数の測定のための各セットの臨界データ間の差から、連立方程式

$$0.6324(\pm 0.011) = -6.58(\pm 0.14) \times f_T + -0.033(\pm 0.028) \times f_G \quad (\text{A.44})$$

$$0.3728(\pm 0.0053) = -0.06(\pm 0.014) \times f_T + -0.483(\pm 0.028) \times f_G \quad (\text{A.45})$$

を立てることができる。ともに、左辺は各セットの臨界データ間の 2 本の CR の反応度値の合計の差、右辺第 1 項は温度係数に温度差を乗じたもので、同第 2 項は間隙係数に間隙の差を乗じたものである。反応度の差、温度差や間隙の差の不確かさは () 内に示す。これら不確かさの評価については以下に記述する。

温度係数を測定する 2 つの Run では集合体を分離、密着させて全ての制御棒 CR と安全棒 SR を動かした。SR#4 は、3/10 Run No.37 では 19.99 mm まで引き抜き、3/15 Run No.5 では全挿入した。他の 5 組の SR はこれら 2 つの Run のいずれにおいても全挿入した。このため、2 つの Run の間の反応度の差の不確かさは、CR と SR の移動前後の位置再現性と CR の校正の不確かさから求めた。まず、2 つの Run の間で動かした合計 6 組の安全棒 SR の位置再現性による反応度の不確かさは、 $\pm\sqrt{0.0025^2 \times 2 \times 6} = \pm 0.0087 \rho_0$ である。なお、SR#4 の 19.99 mm の反応度値 $1 \rho_0$ は「定義」によるものであり、これに伴う不確かさは無い。この SR の移動前後の位置再現性による不確かさのみ考えればよい。

CR#1 の移動前後の両端は校正時のステップ 5、6 とステップ 7、8 の間にあるので、2 つの Run の間の CR#1

表 A.54 XV-2(80V) 炉心における温度係数と間隙係数の測定データ (温度変化と間隙変化による反応度変化補正前の制御棒校正曲線を使用)

測定項目	実験日 ¹⁾	CR#1		CR#2		CR 2 本 反応度価値 合計 [ρ_0]	温度 [°C]	間隙 [mm]
	Run No.	位置 [mm]	反応度価値 [ρ_0]	位置 [mm]	反応度価値 [ρ_0]			
温度係数	3/10 No.37	42.28	2.1065	40.01	2.0396	5.1461 ¹⁾	23.16	-0.019
	3/14 No.5	52.27	2.5730	65.00	3.2055	5.7785	16.58	-0.052
	差		0.4665		1.1659	0.6324	-6.58	-0.033
間隙係数	3/9 No.7	44.81	2.2260	50.00	2.5137	4.7397	23.35	0.481
	3/9 No.8	52.83	2.5988	50.00	2.5137	5.1125	23.29	-0.002
	差		0.3728		0.0000	0.3728	-0.06	-0.483

¹⁾ いずれも 1989 年

¹⁾ SR#4 を 19.99 mm まで引き抜いていたので、この反応度価値 1 ρ_0 を加えた。

図 2.5 の径方向に対称な炉心から F128/17、F124/35、M128/17、M124/35 にて合計 4 本の EUDD 引出しを 4 本の DUB 引出しに置き換え、片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数を 102 本とした炉心で実験実施、核計装 CH#6 は 0.5×10^{-6} A レベル

の反応度差の不確かさは、2 つの Run の移動前後の両端での位置再現性による不確かさと制御棒校正の不確かさ $\pm 0.50\%$ による 2 つの Run の間の反応度差の不確かさを合わせて

$$\pm \sqrt{0.0025^2 \times 2 + ((2.5730 - 2.1065) \times 0.0050)^2} = \pm 0.0042 \rho_0$$

となる。

一方、CR#2 の移動前後の両端は校正時のステップ 4、5 の 63.18 mm とステップ 6、7 の 41.74 mm を跨ぐので、2 つの Run の間の CR#2 の反応度差の不確かさは

$$\pm \sqrt{0.0025^2 \times 2 + 0.0035^2 + 0.0025^2 \times 2 + ((3.2055 - 3.1225) \times 0.0050)^2 + ((2.1225 - 2.0396) \times 0.0050)^2} = \pm 0.0061 \rho_0$$

となる。平方根内の第 1 項は、CR#2 の 2 つの Run の移動前後の両端での位置再現性による不確かさである。第 2 項は、ステップ 4、5 とステップ 6、7 間の 1 ρ_0 の不確かさである。第 3 項は、校正時のステップ 4、5 とステップ 6、7 での CR#2 の位置再現性による不確かさである。第 4 項は、制御棒校正の不確かさ $\pm 0.50\%$ による Run No.5 の 65.00 mm と同ステップ 4、5 の 63.18 mm の間の反応度差の不確かさである。第 5 項は、制御棒校正の不確かさによる同ステップ 6、7 の 41.74 mm と Run No.37 の 40.01 mm の間の反応度差の不確かさである。

これらを合わせて、2 つの Run の間の反応度差の不確かさは

$$\pm \sqrt{0.0087^2 + 0.0042^2 + 0.0061^2} = \pm 0.011 \rho_0$$

となる。

間隙係数の測定では、6 組の SR は 2 つの Run の間で動かさず、2 組の制御棒 CR のみを動かし、CR#2 は

移動後に元の位置に戻し、CR#1 の移動前後の位置は校正時の隣り合うステップの間であった。したがって、2 つの Run の間の反応度差の不確かさは、2 組の CR の移動前後の位置再現性による不確かさと校正の不確かさから

$$\pm\sqrt{0.0025^2 \times 2 \times 2 + ((2.5988 - 2.2260) \times 0.0050)^2} = \pm 0.0053 \rho_0 \text{ となる。}$$

温度差の不確かさは、温度係数の測定では集合体の分離と密着を行ったため $\pm\sqrt{0.1^2 \times 2} = \pm 0.14^\circ\text{C}$ である。間隙係数の測定では集合体を分離したものの分離の距離は数 mm と僅かで、温度の時間変化は密着を保ったまま測定を行う場合と同じであったことから $\pm\sqrt{0.01^2 \times 2} = \pm 0.014^\circ\text{C}$ である。

間隙差の不確かさは、いずれの測定も集合体の分離と密着を行ったため、 $\pm\sqrt{0.02^2 \times 2} = \pm 0.028 \text{ mm}$ である。

これらを f_T と f_G について解くと、温度係数と間隙係数は

$$\begin{aligned} f_T &= \frac{0.6324(\pm 0.011) \times (-0.483)(\pm 0.028) - 0.3728(\pm 0.0053) \times (-0.033)(\pm 0.028)}{-6.58(\pm 0.14) \times (-0.483)(\pm 0.028) - (-0.033)(\pm 0.028) \times (-0.06)(\pm 0.014)} \\ &= -0.0923 \rho_0 / ^\circ\text{C} \pm 9.5\% \end{aligned} \quad (\text{A.46})$$

$$\begin{aligned} f_G &= \frac{0.3728(\pm 0.0053) \times (-6.58)(\pm 0.14) - 0.6324(\pm 0.011) \times (-0.06)(\pm 0.014)}{-6.58(\pm 0.14) \times (-0.483)(\pm 0.028) - (-0.033)(\pm 0.028) \times (-0.06)(\pm 0.014)} \\ &= -0.760 \rho_0 / \text{mm} \pm 6.7\% \end{aligned} \quad (\text{A.47})$$

となる。

CR#1 に関して、校正の実験結果に温度変化や間隙変化に伴う反応度変化の補正を行った結果を表 A.55 に示す。この補正後の反応度値を用いた CR#1 の校正曲線の係数 a、b、c、d を表 A.56 に示す。

CR#2 に関して、校正の実験結果に温度変化や間隙変化に伴う反応度変化分の補正を行った結果を表 A.57 に示す。全挿入である 0.05 mm (ステップ 12) を基準 $0 \rho_0$ とし、遡って、ステップ 11 と 10 で、CR#2 を 0.05 mm から 2.18 mm まで引き抜いた分の反応度値と補償するのは、温度変化と間隙変化の補正を考えなければ、SR#4 の $1 \rho_0$ 挿入分から CR#1 の 87.48 mm から 108.86 mm までの引き抜き分の反応度値を差し引いたものとなる。後者は、補正済みの CR#1 の校正曲線の式より算出した結果、 $5.0019\rho_0 - 4.1244\rho_0 = 0.8775\rho_0$ であった。したがって、表 A.57 に示す CR#2 の 2.18 mm の温度変化分補正前の反応度値は、 $1.0\rho_0 - 0.8775\rho_0 = 0.1225\rho_0$ となる。この補正後の反応度値を用いた CR#2 の校正曲線の係数 a、b、c、d を表 A.58 に示す。

ステップ間で最大で 0.03°C の温度変化がある。密着のまま一連の測定を行ったため、この温度変化の不確かさは $\pm\sqrt{0.01^2 \times 2} = \pm 0.014^\circ\text{C}$ である。温度係数を用いて温度変化による反応度値への補正量の不確かさを算出すると、温度変化が 0.03°C の時でも

$$\pm\sqrt{(-0.0923 \times 0.014)^2 + (0.03 \times (-0.0923) \times 0.095)^2} = \pm 0.0013\rho_0$$

となる。ここで、温度変化が小さいため平方根内第 2 項の温度係数の不確かさ $\pm 9.5\%$ の寄与は小さく無視し得る。集合体の密着を保つ場合、仮に温度変化が無くても温度測定に $\pm 0.01^\circ\text{C}$ の不確かさが有ることから $\pm\sqrt{0.01^2 \times 2} \times (-0.0923) = \pm 0.0013 \rho_0$ の不確かさが生じる。

表 A.55 XV-2(80V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正後の制御棒 CR#1 校正曲線測定データ

ステップ	制御棒位置 [mm]	補正前反応度値 $[\rho_0]$	補正量		補正後反応度値 $[\rho_0]$ ¹⁾
			温度変化分 $[\rho_0]$	間隙変化分 $[\rho_0]$	
1,2	0.47	0.0	-	-	0.0
3,4	19.77	1.0			1.0000
5,6	40.04	2.0	0.0009 ²⁾		2.0009
7,8	61.67	3.0	0.0018 ³⁾	-0.0008 ⁴⁾	3.0019
9,10	84.58	4.0			4.0019
11,12	108.86	5.0			5.0019

¹⁾ 現ステップの補正量とともに、前ステップまでの補正量をすべて加える。

²⁾ 温度 -0.01°C の変化による反応度変化

³⁾ 温度 -0.02°C の変化による反応度変化

⁴⁾ 間隙 $+0.001\text{ mm}$ の変化による反応度変化

表 A.56 XV-2(80V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正済みの制御棒 CR#1 校正曲線

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]
				a	b	c	d	
0.47	19.77	40.04	61.67	-0.20341	-0.49277	5.2892	-0.024849	0.47 ~ 40.04
19.77	40.04	61.67	84.58	0.23077	-1.0202	5.4837	-0.046044	40.04 ~ 61.67
40.04	61.67	84.58	108.86	0.099393	-0.77547	5.3383	-0.018606	61.67 ~ 108.86

次に、ほとんどのステップ間で間隙の変化は 0.001 mm かこれより小さい。密着のまま一連の測定を行ったため、2つのステップで、この間隙変化の不確かさは $\pm\sqrt{0.001^2 \times 2} = \pm 0.0014\text{ mm}$ である。間隙係数を用いて、この不確かさによる反応度値への補正量の不確かさを算出すると、間隙変化が 0.001 mm の時に

$$\pm\sqrt{(-0.760 \times 0.0014)^2 + (0.001 \times (-0.760) \times 0.067)^2} = \pm 0.0011\rho_0$$

となる。ここで、間隙変化が小さいため平方根内第2項の間隙係数の不確かさ $\pm 6.7\%$ の寄与は小さく無視し得る。集合体の密着を保ったままで、仮に間隙変化が無くても間隙測定に $\pm 0.001\text{ mm}$ の不確かさが有ることから、 $\pm\sqrt{0.001^2 \times 2} \times (-0.760) = \pm 0.0011\rho_0$ の不確かさが生じる。

すなわち、ステップ間で温度や間隙の変化が無いか小さくても、温度や間隙の測定の不確かさにより $1\rho_0$ に補正を行った後の反応度値の不確かさは、これまでの SR#4 の 20 mm 移動時の両端での位置再現性に伴う不確かさの他に、温度や間隙の測定による不確かさも合わせて $\pm\sqrt{0.0025^2 \times 2 + 0.0013^2 + 0.0011^2} = \pm 0.0039\rho_0$ ($\pm 0.39\%$) となる。したがって、CR#1 や CR#2 のステップ間の移動時の位置再現性による不確かさ $\pm 0.35\%$ も合わせて、補正後の制御棒校正の不確かさは $\pm\sqrt{0.39^2 + 0.35^2} = \pm 0.53\%$ となる。

表 A.57 XV-2(80V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正後の制御棒 CR#2 校正曲線測定データ

ステップ	制御棒位置 [mm]	補正前反応度価値 [ρ_0]	補正量		補正後反応度価値 ¹⁾ [ρ_0]
			温度変化分 [ρ_0]	間隙変化分 [ρ_0]	
12	0.05	0.0	-	-	0.0
11,10	2.18	0.1225	-0.0028 ^{II)}		0.1197
9,8	21.38	1.1225			1.1197
7,6	41.74	2.1225		-0.0008 ^{III)}	2.1189
5,4	63.18	3.1225	+0.0009 ^{IV)}		3.1198
3,2	85.63	4.1225	-0.0009 ^{V)}		4.1189
1	109.60	5.1225	+0.0009	-0.0008	5.1190

1) 現ステップの補正量とともに、前ステップまでの補正量をすべて加える。

II) 温度 +0.03°C の変化による反応度変化

III) 間隙 +0.001 mm の変化による反応度変化

IV) 温度 -0.01°C の変化による反応度変化

V) 温度 -0.01°C の変化による反応度変化

表 A.58 XV-2(80V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正済みの制御棒 CR#2 校正曲線

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]	
				a	b	c	d		
0.05	2.18	21.38	41.74	2.8031	-2.5905	5.6761	-0.0028374	0.05 ~ 21.38	
2.18	21.38	41.74	63.18	0.30752	-0.96085	5.4191	0.0020177	21.38 ~ 41.74	
21.38	41.74	63.18	85.63	0.11776	-0.72118	5.3265	0.012717	41.74 ~ 63.18	
41.74	63.18	85.63	109.60	-0.15055	-0.20992	5.0147	0.073305	63.18 ~ 109.60	

温度係数と間隙係数の測定時の反応度の差をこれらの補正後の制御棒校正曲線を用いて求めた結果を表 A.59 に示す。温度と間隙のデータは表 A.54 と同じである。制御棒校正曲線を変更しても反応度の差は 0.0012 ρ_0 だけ変化するに過ぎず、この変化は 1 ρ_0 のオーダーの反応度の差と比べて僅かであった。制御棒校正中の温度測定の不確かさにより、1 ρ_0 の不確かさが $\pm 0.0039 \rho_0$ と大きくなり、温度変化補正後の制御棒校正の不確かさが少し大きくなり $\pm 0.53\%$ となったため、温度と間隙係数の測定いずれにおいても反応度の差の不確かさが少し大きくなり、それぞれ $\pm 0.012 \rho_0$ 、 $\pm 0.0054 \rho_0$ となった。温度係数と間隙係数の新たな値と不確かさは

表 A.59 XV-2(80V) 炉心における温度係数と間隙係数の測定データ (温度変化と間隙変化による反応度変化補正後の制御棒校正曲線を使用)

測定項目	実験日 ¹⁾	CR#1		CR#2		CR 2 本 反応度価値 合計 [ρ_0]	温度 [°C]	間隙 [mm]
	Run No.	位置 [mm]	反応度価値 [ρ_0]	位置 [mm]	反応度価値 [ρ_0]			
温度係数	3/10 No.37	42.28	2.1076	40.01	2.0361	5.1437 ²⁾	23.16	-0.019
	3/14 No.5	52.27	2.5745	65.00	3.2028	5.7773	16.58	-0.052
	差		0.4669		1.1667	0.6336	-6.58	-0.033
間隙係数	3/9 No.7	44.81	2.2271	50.00	2.5104	4.7375	23.35	0.481
	3/9 No.8	52.83	2.6003	50.00	2.5104	5.1107	23.29	-0.002
	差		0.3732		0.0000	0.3732	-0.06	-0.483

¹⁾ いずれも 1989 年

²⁾ SR#4 を 19.99 mm まで引き抜いていたので、この反応度価値 1 ρ_0 を加えた。

図 2.5 の径方向に対称な炉心から F128/17、F124/35、M128/17、M124/35 にて合計 4 本の EUDD 引出しを 4 本の DUB 引出しに置き換え、片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数を 102 本とした炉心で実験実施、核計装 CH#6 は 0.5×10^{-6} A レベル

$$f_T = \frac{0.6336(\pm 0.011) \times (-0.483)(\pm 0.028) - 0.3732(\pm 0.0054) \times (-0.033)(\pm 0.028)}{-6.58(\pm 0.14) \times (-0.483)(\pm 0.028) - (-0.033)(\pm 0.028) \times (-0.06)(\pm 0.014)}$$

$$= -0.0925 \rho_0 / ^\circ\text{C} \pm 9.6\% \quad (\text{A.48})$$

$$f_G = \frac{0.3732(\pm 0.0054) \times (-6.58)(\pm 0.14) - 0.6336(\pm 0.011) \times (-0.06)(\pm 0.014)}{-6.58(\pm 0.14) \times (-0.483)(\pm 0.028) - (-0.033)(\pm 0.028) \times (-0.06)(\pm 0.014)}$$

$$= -0.761 \rho_0 / \text{mm} \pm 6.7\% \quad (\text{A.49})$$

となる。

新たな温度係数と間隙係数は補正前の制御棒校正曲線を用いた値からそれぞれ 0.2 % と 0.1 % の相違に過ぎず、これら係数の不確かさは変わらない。制御棒校正実験において、温度変化による反応度価値への補正は、表 A.55 や表 A.57 から $0.003 \rho_0$ 以下と小さいため、温度係数をこれらの新たな値に変更しても、温度変化による補正量への影響は無視し得るほど小さい。すなわち、 $0.003 \rho_0$ 以下の補正量が 0.2% 変化するに過ぎず無視し得る。したがって、最終的に、温度変化と間隙変化による反応度変化補正済みの制御棒校正曲線の結果である表 A.56、表 A.58 と上記の新たな温度係数と間隙係数を採用する。

A.4.3 基準反応度の測定

SR#4 の 20 mm から全挿入位置である 0.00 mm への挿入による基準反応度 1 ρ_0 を正炉周期法により測定した。一定の原子炉出力で運転時は浅い未臨界なので、この状態から反応度 1 ρ_0 を印加しても、この印加反応度から印加前の未臨界度を差し引いた反応度だけ超臨界となる。そこで、補正のためにこの未臨界度を前もつ

表 A.60 XV-2(80V) 炉心における基準反応度測定のための安全棒と制御棒の配置

実験日 ^{Ⅰ)} Run No.	ステップ	SR#4 ^{Ⅱ)}		CR#1 ^{Ⅲ)}		炉心温度 [°C]	間隙 [mm]	CH#6 電流値 [A]	反応度 [ρ ₀]
		位置 [mm]	反応度 ^{Ⅳ)} [ρ ₀]	位置 [mm]	反応度 ^{Ⅳ)} [ρ ₀]				
3/10 No.37	1	19.99	1.0000	42.28	2.1076	23.16	-0.019	0.4944×10 ⁻⁶	-0.0283
3/10 No.39	2	19.99	1.0000	41.59	2.0748	23.23	-0.018	0.4946×10 ⁻⁵	-0.0028
	3	0.00	0.0000	41.59	2.0748			(炉周期測定)	0.9972

Ⅰ) いずれも 1989 年

Ⅱ) 他の安全棒は全挿入で固定

Ⅲ) CR#2 は、ステップ 1、2 では 40.01 mm に固定し、ステップ 2 から 3 の間で原子炉出力を下げるために、一度引き抜き、ステップ 3 で元の位置 40.01 mm に戻した。

Ⅳ) この SR または CR を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

図 2.5 の径方向に対称な炉心から F128/17、F124/35、M128/17、M124/35 にて合計 4 本の EUDD 引出しを 4 本の DUB 引出しに置き換え、片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数を 102 本とした炉心で実験実施

て測定した。

3.4 節のとおり、線形出力系の読みが C_a 、 C_b である時の未臨界度を、それぞれ ρ_a 、 ρ_b とすると、中性子源増倍法を基にして

$$\rho_b = \frac{\rho_a - \rho_b}{\frac{C_b}{C_a} - 1} \quad (\text{A.50})$$

である。

基準反応度測定のための安全棒と制御棒の配置を表 A.60 に示す。まず、SR#4 を 19.99 mm、CR#1 を 42.28 mm、CR#2 を 40.01 mm として核計装 CH#6 で 0.4944×10^{-6} A (C_a) で定常とした。次に、CH#6 をこれより一桁高い 0.4946×10^{-5} A (C_b) で定常とするために、CR#1 のみ調整したところ 41.59 mm となった。CR#1 の反応度値は、制御棒の校正曲線から全挿入 0.47 mm を基準として、42.28 mm が $2.1076 \rho_0$ 、41.59 mm が $2.0748 \rho_0$ である。さらに、この間に炉心温度が 0.07°C 上昇し、間隙が 0.001 mm 増加した。温度係数からこの温度上昇を反応度変化にすると $-0.0065 \rho_0 \pm 0.0014 \rho_0$ となる。この反応度変化の不確かさは、2 つの原子炉出力レベルでの温度測定の不確かさを合わせた $\pm\sqrt{0.01^2 \times 2}$ と、温度係数の不確かさ $\pm 9.6\%$ から求め、温度変化が小さなため前者の寄与が大きい。間隙係数からこの間隙変化を反応度変化にすると $-0.0008 \rho_0 \pm 0.0011 \rho_0$ となる。この反応度変化の不確かさは、2 つの原子炉出力レベルでの間隙測定の不確かさを合わせた $\pm\sqrt{0.001^2 \times 2}$ と、間隙係数の不確かさ $\pm 6.7\%$ から求め、間隙変化が小さなため前者の寄与が大きい。

2 つの原子炉出力レベルの未臨界度の差は、この温度変化と間隙変化による反応度変化を補正して $\rho_a - \rho_b$ は $(2.1076 - 2.0748) - 0.0065 - 0.0008 = 0.0255 \rho_0 \pm 0.0040 \rho_0 (\pm 16\%)$ となる。この不確かさは CR#1 の移

動前後の両端の位置再現性 ± 0.05 mm による不確かさ、CR#1 の校正の不確かさ $\pm 0.53\%$ に加えて、温度変化による反応度変化の補正の不確かさ $\pm 0.0014 \rho_0$ と間隙変化による反応度変化の補正の不確かさ $\pm 0.0011 \rho_0$ から

$$\pm \sqrt{0.0025^2 \times 2 + ((2.1076 - 2.0748) \times 0.0053)^2 + 0.0014^2 + 0.0011^2} = \pm 0.0040 \rho_0$$

と算出した。

したがって、(A.50) 式を用いて CH#6 が 0.4946×10^{-5} A で運転時の未臨界度は $0.0028 \rho_0 \pm 0.0004 \rho_0$ ($\pm 16\%$) となる。ここで、2つの原子炉出力レベルでの CH#6 の電流値の比の不確かさは、この $\pm 16\%$ に比べて十分小さいので無視した。SR#4 の挿入による $1 \rho_0$ の反応度に対してこの未臨界度分の補正を行う。

このようにして、反応度 $-0.0028 \rho_0 \pm 0.0004 \rho_0$ ($\pm 16\%$) の未臨界状態 (ステップ 2) から、SR#4 を 19.99 mm から全挿入して $1.000 \rho_0 \pm 0.0035 \rho_0$ の反応度を印加し、ステップ 3 の $0.9972 \rho_0 \pm 0.0035 \rho_0$ の超臨界にした。この不確かさは、ステップ 2 の反応度の不確かさ $\pm 0.0004 \rho_0$ と SR#4 の移動前後の位置の再現性による不確かさ $\pm 0.0035 \rho_0$ を合わせたものである。

原子炉出力の増加は核計装 CH#6 でモニターし、これが 0.2×10^{-5} A から 0.4×10^{-5} A、 0.3×10^{-5} A から 0.6×10^{-5} A、 0.4×10^{-5} A から 0.8×10^{-5} A の間で、3名の測定者がそれぞれのストップウォッチで測定した倍加時間は、52.0 秒、52.2 秒、52.6 秒、53.0 秒、52.8 秒であり、これらの平均 52.5 秒を採用した。その不確かさは、これまでの経験から ± 0.5 秒を見込んだ。これより、原子炉周期は $T = 52.5 / \ln(2) = 75.7 \pm 0.7$ 秒となる。この原子炉周期より、逆時間方程式 (4.1) と JENDL-4.0 の遅発中性子データ評価値に基づく動特性パラメータにより反応度を求めた結果、 $0.9972 \rho_0 \pm 0.0035 \rho_0$ ($\pm 0.35\%$) = $0.0597\% \Delta k/k$ であった。すなわち、 $1 \rho_0 = 0.0599\% \Delta k/k$ である。この基準反応度の不確かさは、用いた遅発中性子データによる不確かさの寄与を合わせて 4.1 節に記述する。

A.4.4 炉心周辺部での燃料引出し反応度値の測定

ドライバー燃料引出し EUDD の反応度値は、炉心周辺の複数本の DUB 引出しと EUDD 引出しを表 A.61 に示すように順次置換して測定を行った。この置換反応度値は、制御棒で補償することにより測定した。すなわち、集合体を分離して引出しを入れ替えた後に集合体を再密着して臨界とすることによる引出しの置換前後の 2つの Run の間での CR の位置の差を求めた。これを制御棒校正曲線より反応度値に換算して、さらに、2つの Run の間での炉心温度差と集合体密着面間隙の差による反応度差を補正した。

表 A.61 では、この補正した置換反応度値を簡便に算出するため、制御棒に関しては、各 Run の制御棒の位置と基準とする全挿入位置の差を反応度値に換算して示す。この全挿入位置は、表 A.51 より CR#1 は 0.47 mm で CR#2 は 0.05 mm である。炉心温度に関しては、各 Run の温度と基準とする 20°C との差を反応度差に換算して示す。集合体密着面間隙に関しては、各 Run の間隙と基準とする 0.000 mm との差を反応度差に換算して示す。これら制御棒の反応度値、温度差と間隙の差による反応度差を全て足し合わすと、温度

表 A.61 XV-2(80V) 炉心におけるドライバー領域の燃料引出しの置換反応度値

実験日 ¹⁾ Run No.	片側集合体 EUDD 引出し 本数	CR#1		CR#2		炉心温度		密着面間隙		余剰 反応度 ^{V)} [ρ_0]	反応度 値 ^{VI)} [ρ_0]
		位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_0]	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_0]	温度 [°C]	反応度 ^{III)} [ρ_0]	間隙 [mm]	反応度 ^{IV)} [ρ_0]		
3/8 No.3	100 ^{VII)}	0.47	0.0000	36.97	1.8897	24.02	0.3718	0.060	0.0457	2.3072	(基準)
3/8 No.4	102 ^{VIII)}	51.63	2.5450	50.01	2.5108	23.85	0.3561	0.059	0.0449	5.4568	3.150

¹⁾ いずれも 1989 年

^{II)} この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

^{III)} 炉心温度を左記の読みから基準とする 20.00°C に変化させる時に加わる反応度

^{IV)} 集合体密着面間隙を左記の読みから基準とする 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

^{V)} 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00°C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度

^{VI)} 基準との余剰反応度の差で不確かさは $\pm 0.027 \rho_0$

^{VII)} 図 2.5 の径方向に対称な炉心から、F124/17、F128/17、F124/35、F128/35、M124/17、M128/17、M124/35、M128/35 の合計 8 本の EUDD 引出しを DUB 引出しに置換した炉心を基準とする。

^{VIII)} 基準から F124/17、F128/35、M124/17、M128/35 にて DUB 引出し 4 本を EUDD 引出し 4 本に置換核計装 CH#6 は 0.2×10^{-6} A レベル

20.00°C、間隙読み 0.000 mm の基準状態に補正した炉心の余剰反応度となる^{VI)}。2 つの Run の間でこれら補正した余剰反応度の差をとることにより、簡便に、2 つの Run の間の補正した反応度の差、すなわち引出しの置換反応度値を算出することができる。

このように、補正した余剰反応度の差として引出しの置換反応度値を算出するものの、その内訳は、2 つの Run の間で制御棒の位置の差を反応度差に換算し、これに温度や間隙の差を反応度差に換算して補正したものである。したがって、この置換反応度値の不確かさは、制御棒、安全棒の位置の再現性による不確かさと校正の不確かさ、温度測定と温度係数の不確かさや間隙測定と間隙係数の不確かさから算出した。

制御棒の反応度差の不確かさは、2 つの Run の間での移動前後の位置再現性による不確かさと校正の不確かさによるものを合わせる。CR#1 の移動前後の位置は制御棒校正のステップ 3、4 の 19.77 mm とステップ 5、6 の 40.04 mm を跨ぐため、反応度差の不確かさは

$$\pm \sqrt{0.0025^2 \times 2 + ((2.5450 - 2.0009) \times 0.0053)^2 + 0.0039^2 \times 2 + 0.0025^2 \times 2} = \pm 0.0080 \rho_0$$

となる。平方根内の第 1 項は CR#1 の Run No.3 と No.4 の両端での位置再現性による不確かさで、第 2 項は校正の不確かさによる Run No.4 の 51.63 mm からステップ 5、6 の 40.04 mm の反応度差の不確かさ、第 3 項はステップ 1、2 とステップ 3、4 間及びステップ 3、4 とステップ 5、6 間の SR#4 による $1 \rho_0$ の不確かさで SR#4 の移動の両端での位置再現性 ± 0.05 mm による $\pm \sqrt{0.0025^2 \times 2} \rho_0$ 、校正時の温度補正の不確かさ $\pm 0.0013 \rho_0$ と間隙測定の不確かさ $\pm 0.0011 \rho_0$ を合わせたもの、第 4 項はステップ 1、2 とステップ 5、6 の両

^{VI)} ただし、この余剰反応度は浅い未臨界から制御棒の挿入により印加できる反応度変化であり、本来の臨界からの余剰反応度とするためには、この未臨界度分の補正を行う必要がある。

端での校正時の CR#1 の位置再現性による不確かさである。

CR#2 の移動前後の位置も制御棒校正のステップ 7、6 の 41.74 mm を跨ぐため、反応度差の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.0025^2 \times 2 + ((2.5108 - 2.1189) \times 0.0053)^2 + ((2.1189 - 1.8897) \times 0.0053)^2} = \pm 0.0043 \rho_0$$

となる。

安全棒に関しては、同一日なので集合体の分離と再密着を行っても全挿入位置から動かすことはなく不確かさは生じない。

炉心温度に関しては、集合体の分離と密着を行う時の温度測定の不確かさ $\pm 0.1^\circ\text{C}$ と温度係数の不確かさ $\pm 9.6\%$ を合わせて、温度変化による反応度変化の補正の不確かさは

$$\pm\sqrt{(\sqrt{0.1^2 \times 2} \times (-0.0925))^2 + (-0.0925 \times 0.096 \times (23.85 - 24.02))^2} = \pm 0.013 \rho_0$$

となる。温度差が小さなため、前者の寄与がこの不確かさの大部分を占める。

集合体密着面間隙に関しては、集合体の分離と密着を行う時の間隙測定の不確かさ $\pm 0.02 \text{ mm}$ と間隙係数の不確かさ $\pm 7.5\%$ を合わせて、間隙の差による反応度差の補正の不確かさは

$$\pm\sqrt{(\sqrt{0.02^2 \times 2} \times (-0.761))^2 + (-0.761 \times 0.067 \times (0.059 - 0.060))^2} = \pm 0.022 \rho_0$$

となる。間隙の差が小さなため、前者の寄与がこの不確かさの大部分を占める。

これら 4 つの不確かさを合わせて、引出し置換反応度値の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.0080^2 + 0.0043^2 + 0.013^2 + 0.022^2} = \pm 0.027 \rho_0$$

となる。温度差と間隙の差による反応度差の補正の不確かさの寄与が大きい。

集合体の分離と再密着を伴う場合は、仮に 2 つの Run の間で温度差や間隙の差が無い場合でも、温度測定に伴う反応度の不確かさ

$$\pm\sqrt{0.1^2 \times 2} \text{ } ^\circ\text{C} \times (-0.0925) \rho_0 / ^\circ\text{C} = \pm 0.013 \rho_0$$

と間隙測定に伴う反応度の不確かさ

$$\pm\sqrt{0.02^2 \times 2} \text{ mm} \times (-0.761) \rho_0 / \text{mm} = \pm 0.022 \rho_0$$

が生じる。

A.4.5 未臨界度の測定

本炉心での未臨界度の測定は、先の基準反応度の測定時に実施したものだけである。中性子源増倍法より、未臨界度と、その時の原子炉出力レベルとしての核計装 CH#6 の電流値の積は一定となる。この積は、表 A.60 のデータを用いて、 $1.40 \times 10^{-8} \rho_0 A \pm 0.22 \times 10^{-8} \rho_0 A (\pm 16\%)$ となった。これを基に余剰反応度に補正を行い実効増倍率を求める。

A.4.6 密着面でのステンレス鋼反応度値の測定

炉心の中心面に相当する 2 分割集合体の密着面には、主に引出し前端面の部材としてのステンレス鋼があり、決定論手法で実効増倍率を計算する場合はそのモデル化が困難となる場合がある。そこで、このステンレ

表 A.62 XV-2(80V) 炉心中心におけるステンレス鋼反応度値測定に用いたステンレス板とアルミニウム板の重量

板種類とサイズ	枚数	合計重量 [g] ¹⁾	板種類とサイズ	枚数	合計重量 [g]
SUS(1/4×2×2)	1	124.6 ¹⁾	Al frame(1/8×2×2) ^{III)}	2	8.633 ^{II)}
Al(1/16×2×2)	8	81.70 ^{II)}	Al frame(1/4×2×2) ^{III)}	2	9.913 ^{II)}

¹⁾ 重量の測定誤差は 0.1% 未満

^{II)} 実験時の記録より

^{III)} Al(1/8×2×2) 板または Al(1/4×2×2) 板の内側をくり抜いて製作

ス鋼の負の反応度効果を実験的に求めて実効増倍率の実験値導出において補正として用い、密着面のステンレス鋼を取り除いた炉心の実効増倍率を決定論手法による計算結果と比較する。この補正のために、炉心中心引出しの密着面近傍においてステンレス鋼の反応度値測定を行った。炉心中心引出し以外の領域の密着面では、XIV-1 炉心において求めた表 B.20 の炉心中心引出しと各領域間の反応度値の比を基に、そのステンレス鋼の反応度値を求めた。

実験に用いたステンレス板などの重量を表 A.62 に示す。重量の測定誤差は 0.1% 未満であり、後に記述するように反応度値の測定誤差と比べて無視し得るほど小さい。

まず、F126/26 の中心引出しにおいて、引出し内の燃料板と模擬物質板を全て軸方向に炉心外側に向けてずらすことにより、この引出し内の前端面の内側に、通常とは垂直の方向に模擬物質板を装填できる 1/4 インチ幅の空間を設けて、この空間で 1 枚のステンレス SUS(1/4×2×2) 板とアルミニウム Al frame(1/8×2×2) 板 2 枚の置換反応度値を 3/9 の Run No.1 と No.2 で測定した。測定結果を表 A.63 に示す。

これらの反応度値は、制御棒 CR#1 で補償することにより測定した。集合体は分離せずに密着を保ったまま、ステンレス板とアルミニウム板の入れ替え前後の 2 つの Run の間での CR#1 の位置の差を求めた。これを制御棒の校正結果より反応度値に換算して、さらに、2 つの Run の間での炉心温度と集合体密着面間隙の変化による反応度変化を補正した。

表 A.62 より SUS(1/4×2×2) 板の重さは 124.6 g で Al frame(1/8×2×2) 板 2 枚の重さは 8.633 g であり、この置換反応度値の測定結果は表 A.63 に示すように $-0.0294 \rho_0 \pm 0.0081 \rho_0$ である。この不確かさは以下のように算出した。

制御棒 CR と安全棒 SR に関しては、まず、同じ位置に戻したものの 2 つの Run の間で動かした CR#2 と固定側集合体の 3 組の安全棒 SR の移動前後の位置再現性により生じる反応度の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.0025^2 \times 2 \times 4} = \pm 0.0071 \rho_0$$

である。これら 2 つの Run の間では、移動側集合体の 3 組の SR は全挿入のまま動かさなかったため、これら SR に関して不確かさは生じない。次に、2 つの Run の間の反応度差を補償する CR#1 の移動の両端での位置再現性と CR#1 の校正の不確かさ $\pm 0.53\%$ を合わせると

$$\pm\sqrt{0.0025^2 \times 2 + ((2.5136 - 2.5464) \times 0.0053)^2} = \pm 0.0035 \rho_0$$

表 A.63 XV-2(80V) 炉心中心におけるステンレス鋼反応度値とアルミニウム反応度値

実験日 ^{D)} Run No.	装荷物 (目的)	CR#1		CR#2		炉心温度		密着面間隙		余剰 反応度 ^{V)} [ρ_0]	反応度 値 ^{VI)} [ρ_0]
		位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_0]	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_0]	温度 [°C]	反応度 ^{III)} [ρ_0]	間隙 [mm]	反応度 ^{IV)} [ρ_0]		
3/9 No.1	SUS(1/4×2×2) 1枚	50.95	2.5136	49.99	2.5099	23.42	0.3164	0.058	0.0441	5.3840	-0.0294
3/9 No.2	Al frame(1/8×2×2) 2枚(3/9の基準)	51.66	2.5464	50.00	2.5104	23.37	0.3117 ^{VII)}	0.059	0.0449	5.4134	
4/20 No.2	Al frame(1/4×2×2) 2枚(4/20の基準)	55.25	2.7112	50.00	2.5104	22.02	0.1868	0.007	0.0053	5.4137	
4/20 No.3	Al(1/16×2×2) 8枚	55.14	2.7062	50.01	2.5108	21.97	0.1822	0.008	0.0061	5.4053	-0.0084

D) いずれも 1989 年

II) この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

III) 炉心温度の読みを左記の値から基準の 20.00°C に変化させる時に加わる反応度

IV) 集合体密着面間隙の読みを左記の値から基準の 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

V) 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00°C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度

VI) それぞれの日の基準の余剰反応度からの差

VII) 実験時のデータ処理に誤りがあったので、正しい値にここで訂正する

図 2.5 の径方向に対称な炉心から F128/17、F124/35、M128/17、M124/35 にて合計 4 本の EUDD 引出しを 4 本の DUB 引出しに置き換え、片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数を 102 本とした炉心で実験実施、核計装 CH#6 は 0.5×10^{-6} A

となる。CR#1 の位置の差が小さいため、前者の寄与がこの不確かさの大部分を占める。

炉心温度に関しては、集合体の密着を保ったまま測定を行う時の温度測定の不確かさ $\pm 0.01^\circ\text{C}$ と温度係数の不確かさ $\pm 9.6\%$ による寄与を合わせて、温度変化による反応度変化の補正の不確かさは

$$\pm \sqrt{(\sqrt{0.01^2 \times 2 \times (-0.0925)})^2 + (-0.0925 \times 0.096 \times (23.42 - 23.37))^2} = \pm 0.0014 \rho_0$$

となる。温度差が小さいため、前者の寄与がこの不確かさの大部分を占める。

集合体密着面間隙に関しては、集合体の密着を保ったまま測定を行う時の間隙測定の不確かさ ± 0.001 mm と間隙係数の不確かさ $\pm 6.7\%$ による寄与を合わせて、間隙変化による反応度変化の補正の不確かさは

$$\pm \sqrt{(\sqrt{0.001^2 \times 2 \times (-0.761)})^2 + (-0.761 \times 0.067 \times (0.058 - 0.059))^2} = \pm 0.0011 \rho_0$$

となる。間隙差が小さいため、後者の寄与は無視し得る。

これら 4 つの不確かさを合わせて、置換反応度値の不確かさは

$$\pm \sqrt{0.0071^2 + 0.0035^2 + 0.0014^2 + 0.0011^2} = \pm 0.0081 \rho_0$$

となる。

ステンレス板正味の反応度値を得るためには、アルミニウムの反応度値分を補正する必要がある。この

ために、F126/26 の Pu08A 引出しの密着面から 1 セル目において、3 枚装填されている劣化ウラン燃料板のうち両脇の 2 枚を取り除いてセル内に 1/4 インチ幅の 2 箇所を設けて、これら空間で 8 枚の Al(1/16×2×2) 板と 2 枚の Al frame(1/4×2×2) 板の置換反応度値を 4/20 の Run No.2 と No.3 で測定した。表 A.62 より 8 枚の Al(1/16×2×2) 板の重さの合計は 81.70 g で 2 枚の Al frame(1/4×2×2) 板の重さの合計は 9.913 g である。この置換反応度値の測定結果は表 A.63 に示すように $-0.0084 \rho_0 \pm 0.0081 \rho_0$ である。この不確かさは、3/9 に実施したステンレス板とアルミニウム板の置換反応度値と同様に算出し、その内訳は以下のとおりである。

制御棒と安全棒に関しては、まず、同じ位置に戻したものの 2 つの Run の間で動かした CR#2 と固定側集合体の 3 組の SR の移動前後の位置再現性により生じる反応度の不確かさは $\pm 0.0071 \rho_0$ である。これら 2 つの Run の間では、移動側集合体の 3 組の SR は全挿入のまま動かさなかったため、これら SR に関して不確かさは生じない。次に、2 つの Run の間の反応度差を補償する CR#1 の移動の両端での位置再現性と校正の不確かさを合わせると

$$\pm \sqrt{0.0025^2 \times 2 + ((2.7062 - 2.7112) \times 0.0053)^2} = \pm 0.0035 \rho_0$$

となる。CR#1 の位置の差が小さなため、後者の寄与は無視し得る。

炉心温度に関しては、集合体の密着を保ったまま測定を行う時の温度測定の不確かさ $\pm 0.01^\circ\text{C}$ と温度係数の不確かさ $\pm 9.6\%$ による寄与を合わせて、温度変化による反応度変化の補正の不確かさは

$$\pm \sqrt{(\sqrt{0.01^2 \times 2} \times (-0.0925))^2 + (-0.0925 \times 0.096 \times (21.97 - 22.02))^2} = \pm 0.0014 \rho_0$$

となる。温度差が小さなため、後者の寄与は小さい。

集合体密着面間隙に関しては、集合体の密着を保ったまま測定を行う時の間隙測定の不確かさ $\pm 0.001 \text{ mm}$ と間隙係数の不確かさ $\pm 6.7\%$ による寄与を合わせて、間隙変化による反応度変化の補正の不確かさは

$$\pm \sqrt{(\sqrt{0.001^2 \times 2} \times (-0.761))^2 + (-0.761 \times 0.067 \times (0.008 - 0.007))^2} = \pm 0.0011 \rho_0$$

となる。間隙差が小さなため、後者の寄与は無視し得る。

これら 4 つの不確かさを合わせて、置換反応度値の不確かさは

$$\pm \sqrt{0.0071^2 + 0.0035^2 + 0.0014^2 + 0.0011^2} = \pm 0.0081 \rho_0$$

となる。

炉心中心における単位重量当たりのアルミニウムの反応度値は

$$\frac{-0.0084 \rho_0 (\pm 0.0081 \rho_0)}{81.70 \text{ g} - 9.913 \text{ g}} = -1.17 \times 10^{-4} \rho_0 / \text{g} \pm 96\% \quad (\text{A.51})$$

となる。ここで、アルミニウムの重量の不確かさは 0.1% のオーダーであり、96% の反応度値の不確かさに比べてはるかに小さいので無視した。

これより、SUS(1/4×2×2) 板との置換反応度値を求めた Al frame(1/8×2×2) 板 2 枚の反応度値は

$$-1.17 \times 10^{-4} \rho_0 / \text{g} (\pm 96\%) \times 8.633 \text{ g} = -0.0010 \rho_0 \pm 0.0010 \rho_0 \quad (\text{A.52})$$

となる。ここでも、アルミニウムの重量の不確かさは小さく無視した。なお、ステンレス鋼の反応度値を測定した引出し前端面とアルミニウムの反応度値を測定した劣化ウラン燃料板の位置では、アルミニウムの反

応度値に若干の相違が生じることが予想される。しかしながら、アルミニウムの反応度値の不確かさが±96%と大きなことから、測定位置の相違によるアルミニウム反応度値の相違は、この大きな不確かさと比べて無視できる。

これを用いて、炉心中心での引出し前端面における SUS(1/8×2×2) 板の正味の反応度値は

$$-0.0294 \rho_0 (\pm 0.0081 \rho_0) - 0.0010 \rho_0 (\pm 0.0010 \rho_0) = -0.0304 \rho_0 \pm 0.0082 \rho_0 (\pm 27\%) \quad (\text{A.53})$$

となる。したがって、単位重量当たりのステンレス鋼の反応度値は

$$\frac{-0.0304 \rho_0 (\pm 0.0082 \rho_0)}{124.61 \text{g}} = -2.44 \times 10^{-4} \rho_0 / \text{g} \pm 27\% \quad (\text{A.54})$$

となる。ここでも、ステンレス鋼の重量の不確かさは小さく無視した。

アルミニウムとステンレス鋼の単位重量当たりの反応度値の比は

$$\frac{-1.17 \times 10^{-4} \rho_0 / \text{g} (\pm 96\%)}{-2.44 \times 10^{-4} \rho_0 / \text{g} (\pm 27\%)} = 0.480 \pm 100\% \quad (\text{A.55})$$

である。付録 B.2.6 項の XIV-1 炉心での同比 $0.292 \pm 34\%$ とは 65% 程度の相違があるが、これは両者の不確かさの範囲内である。

付録 B.2.6 項の表 B.20 より、中心引出しの 1 格子管当たり余分に存在するステンレス鋼の重量は、固定側と移動側集合体合わせて 19.98g であり、これに単位重量当たりのステンレス鋼の反応度値を乗じると

$$-2.44 \times 10^{-4} \rho_0 / \text{g} (\pm 27\%) \times 19.98 \text{g} = -0.00488 \rho_0 \pm 27\% \quad (\text{A.56})$$

である。

テスト領域、バッファー領域と制御安全棒引出しに関しては、XIV-1 炉心と XV-2(80V) 炉心間で引出し内の燃料セルの組成が異なることはあっても引出しの装荷本数と装荷位置が同じである。したがって、表 B.20 の炉心中心引出しとこれらの各領域間の反応度値の比は、両炉心間で不確かさの範囲で変わらないとする。ドライバー領域に関しては、固定側と移動側集合体を合わせた装荷本数が、XIV-1 炉心では $116 \times 2 = 232$ 本であるのに対して XV-2(80V) 炉心が $144 \times 2 = 288$ 本と異なる。この引出し本数の比 $280/232 = 1.241$ をドライバー領域の反応度値寄与分に乗ずることにより引出し本数の違いを補正した。表 B.20 より、ドライバー領域の寄与分が 2~3% と小さく、その不確かさが大きいので、このような評価で十分である。表 A.64 に XV-2(80V) 炉心での密着面のステンレス鋼反応度値を示す。

表 A.64 XV-2(80V) 炉心における密着面ステンレス鋼反応度値

領域	引出し本数 (格子管数) (固定側と移動側の合計)	ステンレス鋼 重量 [g] ^{I)}	反応度値 の比 ^{II)}	反応度値 ^{III)} [ρ_0]
中心引出し	1 × 2	19.98	1.0	-0.00488 ± 27%
テスト領域 ^{IV)}	76 × 2	1518.48	52.2 ± 13%	-0.255 ± 30%
バッファ領域	40 × 2	799.2	11.9 ± 52%	-0.0580 ± 59%
制御・安全棒引出し	8 × 2	863.392	2.8 ± 264%	-0.014 ± 265%
ドライバー領域	144 × 2 ^{V)}	2877.12	2.1 ± 202% ^{VI)}	-0.010 ± 203%
合計			70.0 ± 19%	-0.342 ± 33%

I) 各領域で、引出し装荷本数に 1 格子管当たりの余分に存在するステンレス鋼の重量を乗じたもの

II) 付録 B.2.6 項の表 B.20 より引用、中心引出しの反応度値で規格化

III) 中心引出しの反応度値 $-0.00488\rho_0 \pm 27\%$ に中心引出しと各領域間の反応度値の比を乗じたもの

IV) 中心引出しを除く

V) 図 2.5 の片側集合体当たりに EUDD 引出しを 104 本装荷した径方向に対称な炉心のドライバー燃料引出し本数

VI) 付録 B.2.6 項の表 B.20 のドライバー領域の反応度値の比に、炉心間のドライバー燃料引出し本数の比を乗じて補正したもの

A.4.7 余剰反応度の再現性と不確かさの評価

実効増倍率は余剰反応度を基に算出する。原子炉運転時は、6 組の安全棒 SR は全挿入で 2 組の制御棒 CR を途中まで引き抜くので、これら 2 組の CR を全挿入する時に増加する反応度の和が余剰反応度となる。ただし、この余剰反応度は、本来の臨界からの余剰反応度に一定の原子炉出力で運転時の未臨界度を加えた反応度である。これまでと同様に、この余剰反応度に炉心温度や集合体密着面間隙に関する補正を行う。

炉心に特別な実験用装荷物等が無く標準である Run のデータを抽出して、集合体の分離、密着に伴う余剰反応度の再現性として変化 (ばらつき) を見た。いずれの Run も浅い未臨界なので、この余剰反応度は原子炉出力レベルに依存する。したがって、この出力レベルやその他の炉心の状態が同じである Run を抽出した結果、EUDD 引出しを片側集合体当たり 102 本装荷した炉心で余剰反応度の変化 (ばらつき) を見る事ができた。これらのデータを表 A.65 にまとめる。この表の各 Run の余剰反応度は、基準の 20°C、間隙読み 0.000 mm での値となるように、既に反応度の温度補正と間隙補正を行った値である。

3/9 と 3/10 の 2 つの Run と 4/20 から 4/27 の 5 つの Run の 2 つのグループに分けると、各グループ内で Run の間の余剰反応度の変化 (ばらつき) は 0.022 ρ_0 以内である。一方で、余剰反応度の再現性は、CR と SR の位置再現性、温度測定の不確かさ、間隙測定の不確かさからも以下のように評価できる。8 組の CR と SR の位置再現性により生じる反応度の不確かさは

表 A.65 XV-2(80V) 炉心における集合体分離密着時の余剰反応度の再現性

実験日 ^{D)} Run No.	CR#1		CR#2		炉心温度		密着面間隙		余剰 反応度 ^{V)} [ρ_0]	CH#6 電流 [$\times 10^{-6}$ A]	備考
	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_0]	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_0]	温度 [$^{\circ}$ C]	反応度 ^{III)} [ρ_0]	間隙 [mm]	反応度 ^{IV)} [ρ_0]			
3/9 No.4	51.91	2.5579	50.00	2.5104	23.31	0.3062	0.058	0.0441	5.419	0.4948	
3/10 No.15	61.67	3.0019	41.74	2.1189	23.32	0.3071	-0.018	-0.0137	5.414	0.4950	
4/20 No.5	53.89	2.6490	50.00	2.5104	21.98	0.1832	0.006	0.0046	5.347	0.4956	
4/21 No.4	53.17	2.6159	50.00	2.5104	22.25	0.2081	0.001	0.0008	5.335	0.4966	
4/25 No.4	54.25	2.6655	50.01	2.5108	21.83	0.1693	-0.026	-0.0198	5.326	0.4957	
4/26 No.5	54.28	2.6668	50.00	2.5104	21.99	0.1841	-0.029	-0.0221	5.339	0.4951	
4/27 No.3	53.55	2.6334	49.99	2.5099	22.03	0.1878	0.006	0.0046	5.336	0.4949	

D) いずれも 1989 年

II) この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

III) 炉心温度の読みを左記の値から基準の 20.00 $^{\circ}$ C に変化させる時に加わる反応度

IV) 集合体密着面間隙の読みを左記の値から基準の 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

V) 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00 $^{\circ}$ C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度に相当

いずれも、図 2.5 の径方向に対称な炉心から F128/17、F124/35、M128/17、M124/35 にて合計 4 本の EUDD 引出しを 4 本の DUB 引出しに置き換え、片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数を 102 本とした炉心で実験実施

$$\pm\sqrt{0.0025^2 \times 8} = \pm 0.0071 \rho_0$$

である。集合体の分離と密着を行う時の温度測定の不確かさ $\pm 0.1^{\circ}$ C より

$$\pm 0.1^{\circ}\text{C} \times (-0.0925) \rho_0 / ^{\circ}\text{C} = \pm 0.009 \rho_0$$

が、これに伴う反応度の不確かさとなる。集合体の分離と密着を行う時の間隙測定の不確かさ ± 0.02 mm より

$$\pm 0.02 \text{ mm} \times (-0.761) \rho_0 / \text{mm} = \pm 0.015 \rho_0$$

が、これに伴う反応度の不確かさとなる。これら 3 つの不確かさを合わせて、余剰反応度の再現性は

$$\pm\sqrt{0.0071^2 + 0.009^2 + 0.015^2} = \pm 0.019 \rho_0$$

となる。

なお、いずれの Run も CR の位置は近く、この CR 位置の差から余剰反応度の差を計算するための制御棒校正の不確かさは余剰反応度の再現性には影響しない。さらに、Run の間で炉心温度の差は 1.5 $^{\circ}$ C 以内であるため、温度係数の不確かさによる反応度差の不確かさは、 $1.5^{\circ}\text{C} \times (-0.0925) \rho_0 / ^{\circ}\text{C} \times \pm 0.096 = \pm 0.013 \rho_0$ であり、集合体密着面間隙の差も 0.09 mm に満たないため、間隙係数の不確かさによる反応度差の不確かさは $0.09 \text{ mm} \times (-0.761) \rho_0 / \text{mm} \times \pm 0.067 = \pm 0.005 \rho_0$ であり、いずれも余剰反応度の再現性への影響は小さい。このように算出した余剰反応度の再現性 $\pm 0.019 \rho_0$ と比べて、各グループ内での余剰反応度の変化 (ばらつき) $0.022 \rho_0$ は有意ではない。

4/20以降のグループの余剰反応度は、3/9と3/10のグループの余剰反応度と比べて $0.08 \rho_0$ 小さい。2つのグループは1.5カ月離れており、この期間にプルトニウム燃料に含まれる ^{241}Pu が崩壊して ^{241}Am が生成することにより余剰反応度が低下したものと考えられる。

実効増倍率を評価するための基となる炉心の余剰反応度は、表A.65に記載の片側集合体当たりEUDD引出しを102本装荷した炉心での3/9と3/10の2回のRunの平均値を採用する。これらの平均値は $5.416 \rho_0$ であり、核計装CH#6の電流値は $0.4949 \times 10^{-6} \text{ A}$ である。

この平均値の不確かさには余剰反応度の再現性の算出結果 $\pm 0.019 \rho_0$ を用い、これに2組のCRの反応度値の校正に起因する不確かさを合わせる。2回のRunいずれも、最大で、CR#1は62 mm、CR#2は50 mm程度引き抜き、CR#1では制御棒校正ステップ7、8の61.67 mm、CR#2ではステップ7、6の41.74 mmが直近の制御棒校正ステップ位置である。全挿入位置からこれらステップの位置に至るまでに基準反応度に温度変化による反応度変化の補正を加えた結果 $\pm 0.0039 \rho_0$ の不確かさを持つ反応度値をいずれも3回積み重ねることになる。なお、62 mmや50 mmからこれら直近の校正ステップ位置までの間の反応度値の不確かさの寄与は小さく無視できる。両CRの全挿入とこれら直近の校正ステップの両端での校正時の位置の再現性による不確かさも合わせると、制御棒校正の不確かさによる2組のCRの反応度値の不確かさは

$$\pm \sqrt{0.0039^2 \times (3 + 3) + 0.0025^2 \times 2 \times 2}$$

$$= \pm 0.011 \rho_0$$

となり、先の平均値の不確かさ $\pm 0.019 \rho_0$ と合わせると $\pm 0.022 \rho_0$ となる。なお、先に記述したように、表A.65の余剰反応度測定時のSRやCRの位置再現性に伴う不確かさは、既に平均値の不確かさ $\pm 0.019 \rho_0$ に含まれる。

この余剰反応度の平均値 $5.416 \rho_0 \pm 0.022 \rho_0$ は、1989年3月10日時点の値である。

A.5 XV-2(95V) 炉心の特性試験

A.5.1 実験炉心

XV-2(95V) 炉心は、1988年7月21日から臨界近接を開始して、片側集合体当たりの引出しが、Pu08A 55本、Pu08B 2本、Pu08C 20本、SSB 40本、PuDA1 40本、EUDD 104本、DUB 288本、SCRA 4組 8本の径方向に対称な炉心として、7月22日に臨界に到達し同年10月21日まで実験を行った。炉心装荷図は2章に記載する。

A.5.2 制御棒校正曲線、温度係数と集合体密着面間隙係数の測定

片側集合体当たりに EUDD 引出しを 104 本装荷した径方向に対称な炉心で制御棒 CR#1、CR#2 の校正を行った。安全棒 SR#4 の 20 mm から全挿入による反応度を基準反応度 $1 \rho_0$ と定義して、これを基にして置換法で制御棒校正を行った。後に、正炉周期法によりこの $1 \rho_0$ を $\% \Delta k/k$ 単位で求める。置換法の各ステップで等しくする原子炉の出力レベルは、核計装 CH#6 の電流値でモニターしその電流値は $0.2 \times 10^{-6} \text{A}$ レベルであった。制御棒校正時の各ステップの SR#4 や CR#1、CR#2 の配置等のデータを表 A.66 に示す。

各ステップ間に要した時間は 10 分程度と短く、温度変化や集合体密着面間隙の変化による反応度変化は小さい。しかしながら、これらの反応度変化を補正する必要がある。この補正のためには、反応度の温度係数と間隙係数が必要となるものの、これらの係数を求めるには制御棒の校正結果を用いる。

そこで、最初に、これらの補正を行わずに制御棒校正実験のデータ処理を行い制御棒校正曲線を算出し、これを基にして温度係数と間隙係数を求める。次に、これらを用いて温度変化や間隙変化による反応度変化の補正を行い、再度、制御棒校正実験のデータ処理を行う。さらに、この再度の処理の結果得た制御棒校正曲線を基にして温度係数と間隙係数を求めるという繰り返しの処理を行った。

まず、ステップ 1 から 15 のデータを用いて、CR#1 の校正曲線を算出した。この制御棒の反応度値は、全挿入である 0.46 mm (ステップ 1、2) を $0 \rho_0$ とし、SR#4 との置換により、19.67 mm (ステップ 3、4) が $1 \rho_0$ 、40.02 mm (ステップ 5、6) が $2 \rho_0$ 、61.51 mm (ステップ 7、8) が $3 \rho_0$ 、84.16 mm (ステップ 9、10) が $4 \rho_0$ 、108.03 mm (ステップ 11、12) が $5 \rho_0$ 、133.51 mm (ステップ 13、14) が $6 \rho_0$ 、161.23 mm (ステップ 15) が $7 \rho_0$ 、となる。これらは CR#1 の先端の位置である。

FCA のこれまでの多くの炉心の経験から、これらの 8 点のデータを同時にある関数にフィットするのではなく、0.46 mm から順番に 4 点ずつのデータを 3 次式に当てはめた。これにより、これら 4 点の範囲をカバーする制御棒の校正曲線を、制御棒位置を x mm、その位置の制御棒値を $y \rho_0$ とする以下の 3 次式として求めた。

$$y = a \left(\frac{x}{100} \right)^3 + b \left(\frac{x}{100} \right)^2 + c \left(\frac{x}{100} \right) + d \quad (\text{A.57})$$

3 次式の係数、a、b、c、d を表 A.67 に示す。任意の位置の制御棒反応度値は、この 3 次式で内挿して求める。3 次式の係数の各セットの適用範囲もこの表に示す。これは、最小二乗法によるフィッティングではなく

表 A.66 XV-2(95V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正前の制御棒校正曲線測定データ

ステップ	時刻 ^{Ⅰ)}	SR#4 位置 ^{Ⅱ)} [mm]	CR#1 位置 ^{Ⅱ)} [mm]	CR#2 位置 ^{Ⅱ)} [mm]	炉心温度 [°C]	密着面間隙 [mm]
1	13:36	0.00	0.46	181.17	21.69	-0.025
2	13:54	20.00	0.46	151.88	21.61	-0.025
3	14:11	0.00	19.67	151.88	21.54	-0.024
4	14:22	20.00	19.67	125.32	21.50	-0.024
5	14:33	0.00	40.02	125.32	21.47	-0.024
6	14:48	20.00	40.02	100.72	21.41	-0.024
7	14:59	0.00	61.51	100.72	21.40	-0.024
8	15:10	20.00	61.51	77.60	21.36	-0.024
9	15:18	0.00	84.16	77.60	21.35	-0.024
10	15:25	20.00	84.16	55.74	21.33	-0.023
11	15:32	0.00	108.03	55.74	21.31	-0.023
12	15:46	20.00	108.03	35.12	21.30	-0.023
13	15:54	0.00	133.51	35.12	21.28	-0.023
14	16:05	20.00	133.51	15.46	21.27	-0.023
15	16:15	0.00	161.23	15.46	21.25	-0.023
16	16:26	20.00	156.16	0.05	21.24	-0.023
17 ^{Ⅲ)}	16:34	0.00	186.18	0.05	21.23	-0.023

^{Ⅰ)} 実験日 1988/7/28

^{Ⅱ)} 先端の位置の表示

^{Ⅲ)} このステップは校正には用いずに結果の確認のために用いる。

図 2.6 の径方向に対称な炉心で実験実施、核計装 CH#6 は 0.2×10^{-6} A レベル

て 3 次式への当てはめなので、これに伴う不確かさは生じない。

同様に、CR#2 については、ステップ 1 から 16 のデータを用いて校正曲線を算出した。まず、全挿入である 0.05 mm (ステップ 16) を基準 $0 \rho_0$ とした。遡って、ステップ 15 と 14 で、CR#2 を 0.05 mm から 15.46 mm まで引き抜いた分の反応度値と補償するのは、SR#4 の $1 \rho_0$ 挿入分から CR#1 の 156.16mm から 161.23 mm までの引き抜き分の反応度値を差し引いたものとなる。後者は、上記の CR#1 の校正曲線の式より算出した結果、 $7.0\rho_0 - 6.8244\rho_0 = 0.1756\rho_0$ であった。したがって、CR#2 の 15.46 mm の反応度値は、 $1.0\rho_0 - 0.1756\rho_0 = 0.8244\rho_0$ となる。35.12 mm(ステップ 13 と 12) が $1.8244 \rho_0$ 、55.74 mm(ステップ 11 と 10) が $2.8244 \rho_0$ 、77.60 mm(ステップ 9 と 8) が $3.8244 \rho_0$ 、100.72 mm(ステップ 7 と 6) が $4.8244 \rho_0$ 、125.32 mm(ステップ 5 と 4) が $5.8244 \rho_0$ 、151.88 mm(ステップ 3 と 2) が $6.8244 \rho_0$ 、181.17 mm(ステップ 1) が $7.8244 \rho_0$ となる。CR#1 と同様に、0.05 mm から遡って順番に 4 点ずつのデータを 3 次式に当てはめ、その係数、a、b、c、d を表 A.68 に示す。

表 A.67 XV-2(95V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正前の制御棒 CR#1 校正曲線

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]
				a	b	c	d	
0.46	19.67	40.02	61.51	0.18692	-0.84959	5.3692	-0.024681	0.46 ~ 40.02
19.67	40.02	61.51	84.16	0.12890	-0.77926	5.3434	-0.021871	40.02 ~ 61.51
40.02	61.51	84.16	108.03	0.080643	-0.68966	5.2903	-0.011874	61.51 ~ 84.16
61.51	84.16	108.03	133.51	-0.071296	-0.30419	4.9725	0.073096	84.16 ~ 108.03
84.16	108.03	133.51	161.23	-0.077509	-0.28395	4.9509	0.080637	108.03 ~ 161.23

表 A.68 XV-2(95V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正前の制御棒 CR#2 校正曲線

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]
				a	b	c	d	
0.05	15.46	35.12	55.74	0.29248	-0.89888	5.4822	-0.0027409	0.05 ~ 35.12
15.46	35.12	55.74	77.60	-0.096040	-0.48580	5.3515	0.0090175	35.12 ~ 55.74
35.12	55.74	77.60	100.72	0.14227	-0.88725	5.5662	-0.027184	55.74 ~ 77.60
55.74	77.60	100.72	125.32	0.012871	-0.58439	5.3365	0.029189	77.60 ~ 100.72
77.60	100.72	125.32	151.88	-0.055269	-0.37749	5.1309	0.095931	100.72 ~ 125.32
100.72	125.32	151.88	181.17	-0.05218	-0.38916	5.1454	0.090010	125.32 ~ 181.17

基準反応度の安全棒の挿入距離が同じであることから、これら制御棒校正の不確かさの考え方は XV-2(65V) 炉心と同様である。

温度係数と集集体密着面間隙係数は、表 A.69 のように、温度と間隙をそれぞれ大きく変化させた 2 つの臨界データから測定した。しかし、間隙を全く変化させずに温度を変えたり、その逆を行うことはできなかった。そこで、反応度は温度変化と間隙変化について互いに独立に変化するとして、温度係数を $f_T \rho_0/^\circ\text{C}$ と間隙係数を $f_G \rho_0/\text{mm}$ とすると、各係数の測定のための各セットの臨界データ間の差から、連立方程式

$$0.5778(\pm 0.010) = -6.96(\pm 0.14) \times f_T + -0.043(\pm 0.028) \times f_G \quad (\text{A.58})$$

$$-0.3657(\pm 0.0053) = 0.05(\pm 0.014) \times f_T + 0.487(\pm 0.028) \times f_G \quad (\text{A.59})$$

を立てることができる。ともに、左辺は各セットの臨界データ間の 2 本の CR の反応度価値の合計の差、右辺第 1 項は温度係数に温度差を乗じたもので、同第 2 項は間隙係数に間隙の差を乗じたものである。反応度の差、温度差や間隙の差の不確かさは () 内に示す。これら不確かさの評価については以下に記述する。

温度係数を測定する 2 つの Run では集集体を分離、密着させて全ての CR と SR を動かした。6 組の安全棒 SR はこれら 2 つの Run のいずれにおいても全挿入した。CR#1 は 2 つの Run とともに 79.99 mm とした。このため、2 つの Run の間の反応度差の不確かさは、CR と SR の移動の両端の位置再現性と CR#2 の校正の不確

表 A.69 XV-2(95V) 炉心における温度係数と間隙係数の測定データ (温度変化と間隙変化による反応度変化補正前の制御棒校正曲線を使用)

測定項目	実験日 ¹⁾	CR#1		CR#2		CR 2 本 反応度値 合計 [ρ_0]	温度 [°C]	間隙 [mm]
	Run No.	位置 [mm]	反応度値 [ρ_0]	位置 [mm]	反応度値 [ρ_0]			
温度係数	7/22 No.5	79.99	3.8198	86.50	4.2163	8.0361	19.93	-0.031
	7/26 No.8	79.99	3.8198	73.44	3.6385	7.4583	26.89	0.012
	差				0.5778	0.5778	-6.96	-0.043
間隙係数	7/26 No.6	79.99	3.8198	66.02	3.3019	7.1217	26.98	0.499
	7/26 No.7	79.99	3.8198	74.09	3.6676	7.4874	26.93	0.012
	差				-0.3657	-0.3657	0.05	0.487

¹⁾ いずれも 1988 年

図 2.6 の径方向に対称な炉心で実験実施、核計装 CH#6 は、温度係数の測定では 0.5×10^{-6} A レベル、間隙係数の測定では 0.2×10^{-6} A レベル

かさから求めた。まず、同じ位置に戻したものの 2 つの Run の間で動かした合計 6 組の SR と CR#1 の位置再現性による反応度の不確かさは、 $\pm\sqrt{0.0025^2 \times 2 \times 7} = \pm 0.0094 \rho_0$ である。CR#2 の移動の両端は校正時のステップ 8、9 の 77.60 mm を跨ぐので、2 つの Run の間の CR#2 の反応度差の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.0025^2 \times 2 + ((4.2163 - 3.8244) \times 0.0050)^2 + ((3.8244 - 3.6385) \times 0.0050)^2}$$

$$= \pm 0.0041 \rho_0$$

となる。これらを合わせて、2 つの Run の間の反応度差の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.0094^2 + 0.0041^2} = \pm 0.010 \rho_0$$

となる。

間隙係数の測定では、6 組の SR は 2 つの Run の間で動かさず 2 組の CR を動かし、CR#1 は移動後に元の位置に戻し、CR#2 の移動前後の位置は校正時の隣り合うステップの間であった。したがって、2 つの Run の間の反応度差の不確かさは、2 組の CR の移動前後の位置再現性による不確かさと CR#2 の校正の不確かさから $\pm\sqrt{0.0025^2 \times 2 \times 2 + ((3.6676 - 3.3019) \times 0.0050)^2} = \pm 0.0053 \rho_0$ となる。

温度差の不確かさは、温度係数の測定では集合体の分離と密着を行ったため $\pm\sqrt{0.1^2 \times 2} = \pm 0.14^\circ\text{C}$ である。間隙係数の測定では集合体を分離したものの分離の距離は数 mm と僅かで、温度の時間変化は密着を保ったまま測定を行う場合と同じであったことから $\pm\sqrt{0.01^2 \times 2} = \pm 0.014^\circ\text{C}$ である。

間隙差の不確かさは、いずれの測定も集合体の分離と密着を行ったため、 $\pm\sqrt{0.02^2 \times 2} = \pm 0.028$ mm である。

これらを f_T と f_G について解くと、温度係数と間隙係数は

表 A.70 XV-2(95V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正後の制御棒 CR#1 校正曲線測定データ

ステップ	制御棒位置 [mm]	補正前反応度値 [ρ_0]	補正量		補正後反応度値 ¹⁾ [ρ_0]
			温度変化分 [ρ_0]	間隙変化分 [ρ_0]	
1,2	0.46	0.0	-	-	0.0
3,4	19.67	1.0	0.0055 ^{II)}	-0.0007 ^{III)}	1.0048
5,6	40.02	2.0	0.0024 ^{IV)}		2.0072
7,8	61.51	3.0	0.0008 ^{V)}		3.0080
9,10	84.16	4.0	0.0008		4.0088
11,12	108.03	5.0	0.0016 ^{VI)}		5.0104
13,14	133.51	6.0	0.0016		6.0120
15	161.23	7.0	0.0016		7.0136

¹⁾ 現ステップの補正量とともに、前ステップまでの補正量をすべて加える。

^{II)} 温度 -0.07°C の変化による反応度変化

^{III)} 間隙 $+0.001\text{ mm}$ の変化による反応度変化

^{IV)} 温度 -0.03°C の変化による反応度変化

^{V)} 温度 -0.01°C の変化による反応度変化

^{VI)} 温度 -0.02°C の変化による反応度変化

$$f_T = \frac{0.5778(\pm 0.010) \times 0.487(\pm 0.028) - (-0.3657)(\pm 0.0053) \times (-0.043)(\pm 0.028)}{-6.96(\pm 0.14) \times 0.487(\pm 0.028) - (-0.043)(\pm 0.028) \times 0.05(\pm 0.014)}$$

$$= -0.0784 \rho_0 / ^\circ\text{C} \pm 9.6\% \quad (\text{A.60})$$

$$f_G = \frac{-0.3657(\pm 0.0053) \times (-6.96)(\pm 0.14) - 0.5778(\pm 0.010) \times 0.05(\pm 0.014)}{-6.96(\pm 0.14) \times 0.487(\pm 0.028) - (-0.043)(\pm 0.028) \times 0.05(\pm 0.014)}$$

$$= -0.743 \rho_0 / \text{mm} \pm 6.6\% \quad (\text{A.61})$$

となる。

CR#1 に関して、校正の実験結果に温度変化や間隙変化に伴う反応度変化の補正を行った結果を表 A.70 に示す。間隙はステップ 2、3 間でのみ変化し、間隙変化の補正はこれらステップ間でのみ必要であった。この補正後の反応度値を用いた CR#1 の校正曲線の係数 a、b、c、d を表 A.71 に示す。

CR#2 に関して、校正の実験結果に温度変化や間隙変化に伴う反応度変化分の補正を行った結果を表 A.72 に示す。ここで、全挿入である 0.05 mm (ステップ 16) を基準 $0 \rho_0$ とし、遡って、ステップ 15 と 14 で、CR#2 を 0.05 mm から 15.46 mm まで引き抜いた分の反応度値と補償するのは、温度変化分の補正を考えなければ、SR#4 の $1 \rho_0$ 挿入分から CR#1 の 156.16 mm から 161.23 mm までの引き抜き分の反応度値を差し引いたものとなる。後者は、上記の CR#1 の補正済みの校正曲線の式より算出した結果、 $7.0136\rho_0 - 6.8377\rho_0 = 0.1759\rho_0$ であった。したがって、表 A.72 に示す CR#2 の 15.46 mm の温度変化分補

表 A.71 XV-2(95V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正済みの制御棒 CR#1 校正曲線

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]
				a	b	c	d	
0.46	19.67	40.02	61.51	0.20995	-0.89679	5.4028	-0.024834	0.46 ~ 40.02
19.67	40.02	61.51	84.16	0.15814	-0.83399	5.3797	-0.022325	40.02 ~ 61.51
40.02	61.51	84.16	108.03	0.091300	-0.70988	5.3062	-0.0084782	61.51 ~ 84.16
61.51	84.16	108.03	133.51	-0.081955	-0.27033	4.9438	0.088413	84.16 ~ 108.03
84.16	108.03	133.51	161.23	-0.077633	-0.28441	4.9588	0.083166	108.03 ~ 161.23

正前の反応度値は、 $1.0\rho_0 - 0.1759\rho_0 = 0.8241\rho_0$ となる。この補正後の反応度値を用いた CR#2 の校正曲線の係数 a、b、c、d を表 A.73 に示す。

ステップ間で最大で 0.08°C の温度変化がある。密着のまま一連の測定を行ったため、この温度変化の不確かさは $\pm\sqrt{0.01^2 \times 2} = \pm 0.014^\circ\text{C}$ である。温度係数を用いて温度変化による反応度値への補正量の不確かさを算出すると、温度変化が 0.08°C の時でも

$$\pm\sqrt{(-0.0784 \times 0.014)^2 + (0.08 \times (-0.0784) \times 0.096)^2} = \pm 0.0013\rho_0$$

である。ここで、温度変化が小さなため平方根内第 2 項の温度係数の不確かさ $\pm 9.6\%$ の寄与は小さい。集合体の密着を保つ場合、仮に温度変化が無くても温度測定に $\pm 0.01^\circ\text{C}$ の不確かさが有ることから $\pm\sqrt{0.01^2 \times 2} \times (-0.0784) = \pm 0.0011\rho_0$ の不確かさが生じる。

次に、ステップ間で間隙の変化は 0.001 mm かこれより小さい。密着のまま一連の測定を行ったため、ステップ間で間隙測定の不確かさは $\pm\sqrt{0.001^2 \times 2} = \pm 0.0014\text{ mm}$ である。間隙係数を用いて、この不確かさによる反応度値への補正量の不確かさを算出すると、間隙変化が 0.001 mm のときに

$$\pm\sqrt{(-0.743 \times 0.0014)^2 + (0.001 \times (-0.743) \times 0.066)^2} = \pm 0.0010\rho_0$$

となる。ここで、間隙変化が僅かであるため平方根内第 2 項の間隙係数の不確かさ $\pm 6.6\%$ の寄与は小さく無視し得る。集合体の密着を保ったままで、仮に間隙変化が無くても間隙測定に $\pm 0.001\text{ mm}$ の不確かさが有ることから、 $\pm\sqrt{0.001^2 \times 2} \times (-0.743) = \pm 0.0010\rho_0$ の不確かさが生じる。

すなわち、ステップ間で温度や間隙の変化が無いか僅かであっても、温度や間隙の測定の不確かさにより $1\rho_0$ に補正を行った後の反応度値の不確かさは、これまでの SR#4 の 20 mm 移動の両端での位置再現性に伴う不確かさの他に、温度や間隙の測定による不確かさも合わせて $\pm\sqrt{0.0025^2 \times 2 + 0.0011^2 + 0.0010^2} = \pm 0.0038\rho_0$ ($\pm 0.38\%$) となる。したがって、CR#1 や CR#2 のステップ間の移動時の位置再現性による不確かさ $\pm 0.35\%$ も合わせて、補正後の制御棒校正の不確かさは $\pm\sqrt{0.38^2 + 0.35^2} = \pm 0.52\%$ となる。これらの不確かさでは、CR#1 と CR#2 の位置再現性による不確かさの寄与が大きいため、温度変化が 0.08°C であってもこれらの不確かさは変わらない。

温度係数と間隙係数の測定時の反応度の差をこれらの補正後の制御棒校正曲線を用いて求めた結果を表 A.74

表 A.72 XV-2(95V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正後の制御棒 CR#2 校正曲線測定データ

ステップ	制御棒位置 [mm]	補正前反応度値 [ρ_0]	補正量		補正後反応度値 ¹⁾ [ρ_0]
			温度変化分 [ρ_0]	間隙変化分 [ρ_0]	
16	0.05	0.0	-	-	0.0
15,14	15.46	0.8241	-0.0008 ^{II)}		0.8233
13,12	35.12	1.8241	-0.0008		1.8225
11,10	55.74	2.8241	-0.0008		2.8217
9.8	77.60	3.8241	-0.0016 ^{III)}	0.0007 ^{IV)}	3.8208
7,6	100.72	4.8241	-0.0031 ^{V)}		4.8177
5,4	125.32	5.8241	-0.0047 ^{VI)}		5.8130
3,2	151.88	6.8241	-0.0031		6.8099
1	181.17	7.8241	-0.0063 ^{VII)}		7.8036

1) 現ステップの補正量とともに、前ステップまでの補正量をすべて加える。

II) 温度 +0.01°C の変化による反応度変化

III) 温度 +0.02°C の変化による反応度変化

IV) 間隙 -0.001 mm の変化による反応度変化

V) 温度 +0.04°C の変化による反応度変化

VI) 温度 +0.06°C の変化による反応度変化

VII) 温度 +0.08°C の変化による反応度変化

表 A.73 XV-2(95V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正済みの制御棒 CR#2 校正曲線

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]
				a	b	c	d	
0.05	15.46	35.12	55.74	0.27761	-0.88260	5.4729	-0.0027362	0.05 ~ 35.12
15.46	35.12	55.74	77.60	-0.097696	-0.48357	5.3467	0.0086223	35.12 ~ 55.74
35.12	55.74	77.60	100.72	0.111632	-0.83620	5.5353	-0.0231764	55.74 ~ 77.60
55.74	77.60	100.72	125.32	0.025400	-0.63437	5.3821	0.014391	77.60 ~ 100.72
77.60	100.72	125.32	151.88	-0.019633	-0.49763	5.2463	0.058500	100.72 ~ 125.32
100.72	125.32	151.88	181.17	-0.092136	-0.22363	4.9059	0.19749	125.32 ~ 181.17

に示す。温度と間隙のデータは表 A.69 と同じである。制御棒校正曲線を変更しても反応度の差は 0.0012 ρ_0 だけ変化するに過ぎず、この変化は 1 ρ_0 のオーダーの反応度の差と比べて僅かである。制御棒校正中の温度と間隙の測定の不確かさにより、補正後の制御棒校正の不確かさが少し大きくなり $\pm 0.52\%$ となるが、温度と間隙係数の測定いずれにおいても反応度の差の不確かさは変わらない。温度係数と間隙係数の新たな値と不確かさは

表 A.74 XV-2(95V) 炉心における温度係数と間隙係数の測定データ (温度変化と間隙変化による反応度変化補正後の制御棒校正曲線を使用)

測定項目	実験日 ^{d)}	CR#1		CR#2		CR 2 本	温度 [°C]	間隙 [mm]
	Run No.	位置 [mm]	反応度値 [ρ_0]	位置 [mm]	反応度値 [ρ_0]	反応度値 合計 [ρ_0]		
温度係数	7/22 No.5	79.99	3.8284	86.50	4.2117	8.0401	19.93	-0.031
	7/26 No.8	79.99	3.8284	73.44	3.6351	7.4635	26.89	0.012
	差				0.5766	0.5766	-6.96	-0.043
間隙係数	7/26 No.6	79.99	3.8284	66.02	3.2988	7.1272	26.98	0.499
	7/26 No.7	79.99	3.8284	74.09	3.6643	7.4927	26.93	0.012
	差				-0.3655	-0.3655	0.05	0.487

^{d)} いずれも 1988 年

図 2.6 の径方向に対称な炉心で実験実施、核計装 CH#6 は、温度係数の測定では 0.5×10^{-6} A レベル、間隙係数の測定では 0.2×10^{-6} A レベル

$$f_T = \frac{0.5766(\pm 0.010) \times 0.487(\pm 0.028) - (-0.3655)(\pm 0.0053) \times (-0.043)(\pm 0.028)}{-6.96(\pm 0.14) \times 0.487(\pm 0.028) - (-0.043)(\pm 0.028) \times 0.05(\pm 0.014)}$$

$$= -0.0783 \rho_0 / ^\circ\text{C} \pm 9.6\% \quad (\text{A.62})$$

$$f_G = \frac{-0.3655(\pm 0.0053) \times (-6.96)(\pm 0.14) - 0.5766(\pm 0.010) \times 0.05(\pm 0.014)}{-6.96(\pm 0.14) \times 0.487(\pm 0.028) - (-0.043)(\pm 0.028) \times 0.05(\pm 0.014)}$$

$$= -0.742 \rho_0 / \text{mm} \pm 6.6\% \quad (\text{A.63})$$

となる。

新たな温度係数と間隙係数は補正前の制御棒校正曲線を用いた値からいずれも 0.13% の相違に過ぎず、これら係数の不確かさは変わらない。制御棒校正実験において、温度変化による反応度値への補正は、表 A.70 や表 A.72 から積算しても $0.021 \rho_0$ 以下と小さいため、温度係数をこれらの新たな値に変更しても、温度変化による補正量への影響は無視し得るほど小さい。すなわち、 $0.021 \rho_0$ 以下の補正量が 0.13% 変化するに過ぎず無視し得る。したがって、最終的に、温度変化と間隙変化による反応度変化補正済みの制御棒校正曲線である表 A.71、表 A.73 と上記の新たな温度係数と間隙係数を採用する。

A.5.3 基準反応度の測定

SR#4 の 20 mm から全挿入位置である 0.00 mm への挿入による基準反応度 $1 \rho_0$ を正炉周期法により測定した。一定の原子炉出力で運転時は浅い未臨界なので、この状態から反応度 $1 \rho_0$ を印加しても、この印加反応度から印加前の未臨界度を差し引いた反応度だけ超臨界となる。そこで、補正のためにこの未臨界度を前もって測定した。

表 A.75 XV-2(95V) 炉心における基準反応度測定のための安全棒と制御棒の配置

実験日 ^{Ⅰ)} Run No.	ステップ	SR#4 ^{Ⅱ)}		CR#1 ^{Ⅲ)}		炉心温度 [°C]	間隙 [mm]	CH#6 電流値 [A]	反応度 [ρ ₀]
		位置 [mm]	反応度 ^{Ⅳ)} [ρ ₀]	位置 [mm]	反応度 ^{Ⅳ)} [ρ ₀]				
7/29 No.6	1	20.00	1.0000	25.42	1.2941	20.86	-0.033	0.2027×10 ⁻⁶	-0.0529
7/29 No.7	2	20.00	1.0000	24.67	1.2566	20.83	-0.033	0.8164×10 ⁻⁶	-0.0131
	3	0.00	0.0000	24.67	1.2566			(炉周期測定)	0.9869

Ⅰ) いずれも 1988 年

Ⅱ) 他の安全棒は全挿入で固定

Ⅲ) CR#2 は、ステップ 1、2 では 45.00 mm に固定し、ステップ 2 から 3 の間で原子炉出力を下げるために、一度引き抜き、ステップ 3 で元の位置 45.00 mm に戻した。

Ⅳ) この SR または CR を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

図 2.6 の径方向に対称な炉心から F128/17、F124/35、M128/17、M124/35 にて合計 4 本の EUDD 引出しを 4 本の DUB 引出しに置き換え、片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数を 102 本とした炉心で実験実施

3.4 節のとおり、線形出力系の読みが C_a 、 C_b である時の未臨界度を、それぞれ ρ_a 、 ρ_b とすると、中性子源増倍法を基にして

$$\rho_b = \frac{\rho_a - \rho_b}{\frac{C_b}{C_a} - 1} \quad (\text{A.64})$$

である。

基準反応度測定のための安全棒と制御棒の配置を表 A.75 に示す。まず、SR#4 を 20.00 mm、CR#1 を 25.42 mm、CR#2 を 45.00 mm として核計装 CH#6 で 0.2027×10^{-6} A (C_a) で定常とした。次に、CH#6 をこの 4 倍の 0.8164×10^{-6} A (C_b) で定常とするために、CR#1 のみ調整したところ 24.67 mm となった。CR#1 の反応度値は、制御棒の校正結果から全挿入 0.46 mm を基準として、25.42 mm が $1.2941 \rho_0$ 、24.67 mm が $1.2566 \rho_0$ である。さらに、この間に炉心温度が 0.03°C 低下したが、間隙の変化は無かった。温度係数からこの温度低下を反応度変化にすると $0.0023 \rho_0 \pm 0.0011 \rho_0$ となる。この反応度変化の不確かさは、2つの原子炉出力レベルでの温度測定の不確かさを合わせた $\pm\sqrt{0.01^2 \times 2}$ と温度係数の不確かさ $\pm 9.6\%$ から求め、温度変化が小さなため後者の寄与は無視し得る。間隙変化は無いが、2つの原子炉出力レベルでの間隙測定の不確かさを合わせた $\pm\sqrt{0.001^2 \times 2}$ により $\pm 0.0010 \rho_0$ の不確かさが生じる。

2つの原子炉出力レベルの未臨界度の差は、この温度変化による反応度変化を補正して $\rho_a - \rho_b$ は $(1.2941 - 1.2566) + 0.0023 = 0.0398 \rho_0 \pm 0.0038 \rho_0$ ($\pm 9.5\%$) となる。この不確かさは CR#1 の移動の両端での位置再現性による不確かさ、CR#1 の校正の不確かさ、温度変化による反応度変化の補正の不確かさ $\pm 0.0011 \rho_0$ と間隙測定による不確かさ $\pm 0.0010 \rho_0$ から

$\pm\sqrt{0.0025^2 \times 2 + ((1.2941 - 1.2566) \times 0.0052)^2 + 0.0011^2 + 0.0010^2} = \pm 0.0038\rho_0$
と算出した。

したがって、(A.64) 式を用いて CH#6 が 0.8164×10^{-6} A で運転時の未臨界度は $0.0131 \rho_0 \pm 0.0013 \rho_0$ ($\pm 9.5\%$) となる。ここで、2つの原子炉出力レベルでの CH#6 の電流値の比の不確かさは、この $\pm 9.5\%$ に比べて十分小さいので無視した。SR#4 の挿入による $1 \rho_0$ の反応度に対してこの未臨界度分の補正を行う。

このようにして、ステップ 2 の反応度 $-0.0131 \rho_0 \pm 0.0013 \rho_0$ ($\pm 9.5\%$) の未臨界状態から、SR#4 を 20.00 mm から全挿入して $1.000 \rho_0 \pm 0.0035 \rho_0$ の反応度を印加し、ステップ 3 の $0.9869 \rho_0 \pm 0.0037 \rho_0$ の超臨界にした。この不確かさは、ステップ 2 の反応度の不確かさ $\pm 0.0013 \rho_0$ と SR#4 の移動前後の位置の再現性による不確かさ $\pm 0.0035 \rho_0$ を合わせたものである。

原子炉出力の増加は核計装 CH#6 でモニターし、これが 0.3×10^{-6} A から 0.6×10^{-6} A、 0.4×10^{-6} A から 0.8×10^{-6} A の間で、3名の測定者がそれぞれのストップウォッチで測定した倍加時間は、48.5 秒、48.2 秒、48.0 秒、48.6 秒、48.4 秒であり、これらの平均 48.3 秒を採用した。その不確かさは、これまでの経験から ± 0.5 秒を見込んだ。これより、原子炉周期は $T = 48.3 / \ln(2) = 69.7 \pm 0.7$ 秒となる。この原子炉周期より、逆時間方程式 (4.1) と JENDL-4.0 の遅発中性子データ評価値に基づく動特性パラメータにより反応度を求めた結果、 $0.9869 \rho_0 \pm 0.0037 \rho_0$ ($\pm 0.37\%$) = $0.0655\% \Delta k/k$ であった。すなわち、 $1 \rho_0 = 0.0664\% \Delta k/k$ である。この基準反応度の不確かさは、用いた遅発中性子データによる不確かさの寄与を合わせて 4.1 節に記述する。

A.5.4 炉心周辺部での燃料引出し反応度値の測定

ドライバー燃料引出し EUDD の反応度値は、炉心周辺の複数本の DUB 引出しと EUDD 引出しを表 A.76 に示すように順次置換して測定を行った。この置換反応度値は、制御棒で補償することにより測定した。すなわち、集合体を分離して引出しを入れ替えた後に集合体を再密着して臨界とすることによる引出しの置換前後の 2つの Run の間での制御棒 CR の位置の差を求めた。基準は、EUDD 引出しを片側集合体当たり 104 本装荷した径方向に対称な炉心での測定結果とした。これを制御棒校正曲線より反応度値に換算して、さらに、2つの Run の間での炉心温度差と集合体密着面間隙の差による反応度差を補正した。

表 A.76 では、この補正した置換反応度値を簡便に算出するため、制御棒に関しては、各 Run の制御棒の位置と基準とする全挿入位置の差を反応度値に換算して示す。この全挿入位置は、表 A.66 より CR#1 は 0.46 mm で CR#2 は 0.05 mm である。炉心温度に関しては、各 Run の温度と基準とする 20°C との差を反応度差に換算して示す。集合体密着面間隙に関しては、各 Run の間隙と基準とする 0.000 mm との差を反応度差に換算して示す。これら制御棒の反応度値、温度差と間隙の差による反応度差を全て足し合わすと、温度 20.00°C 、間隙読み 0.000 mm の基準状態に補正した炉心の余剰反応度となる^{VI)}。2つの Run の間でこれら補

^{VI)} ただし、この余剰反応度は浅い未臨界から制御棒の挿入により印加できる反応度変化であり、本来の臨界からの余剰反応度とするためには、未臨界度分の補正を行う必要がある。

表 A.76 XV-2(95V) 炉心におけるドライバー領域の燃料引出しの置換反応度値

実験日 ^{Ⅰ)} Run No.	片側集合体 EUDD 引出し 本数	CR#1		CR#2		炉心温度		密着面間隙		余剰 反応度 ^{Ⅴ)} [ρ ₀]	反応度 値 ^{Ⅵ)} [ρ ₀]
		位置 [mm]	反応度 ^{Ⅱ)} [ρ ₀]	位置 [mm]	反応度 ^{Ⅱ)} [ρ ₀]	温度 [°C]	反応度 ^{Ⅲ)} [ρ ₀]	間隙 [mm]	反応度 ^{Ⅳ)} [ρ ₀]		
7/27 No.1	104 ^{Ⅶ)}	79.90	3.8245	80.01	3.9276	23.46	0.2709	0.012	0.0089	8.0319	(基準)
7/27 No.2	102 ^{Ⅷ)}	42.53	2.1270	35.01	1.8170	23.27	0.2560	0.004	0.0030	4.203	-3.829
7/27 No.3	102 ^{Ⅸ)}	49.83	2.4709	40.00	2.0637	23.23	0.2529	-0.017	-0.0126	4.7749	-3.257
7/27 No.4	101 ^{Ⅹ)}	24.75	1.2606	30.01	1.5677	23.07	0.2404	-0.015	-0.0111	3.0576	-1.717
7/27 No.5	106 ^{Ⅺ)}	102.63	4.7889	100.01	4.7880	23.05	0.2388	-0.015	-0.0111	9.8046	1.773

Ⅰ) いずれも 1988 年

Ⅱ) この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

Ⅲ) 炉心温度を左記の読みから基準とする 20.00°C に変化させる時に加わる反応度

Ⅳ) 集合体密着面間隙を左記の読みから基準とする 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

Ⅴ) 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00°C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度

Ⅵ) 基準との余剰反応度の差で、不確かさは Run No.2 と No.3 で ±0.026 ρ₀、Run No.4 と No.5 で ±0.025 ρ₀

Ⅶ) 図 2.6 の径方向に対称な炉心を基準とする。

Ⅷ) 基準から F122/34、F130/18、M122/34、M130/18 にて EUDD 引出し 4 本を DUB 引出し 4 本に置換

Ⅸ) 基準から F124/35、F128/17、M124/35、M128/17 にて EUDD 引出し 4 本を DUB 引出し 4 本に置換

Ⅹ) 基準から F124/35、F128/17、F125/35、M124/35、M128/17、M125/35 にて EUDD 引出し 6 本を DUB 引出し 6 本に置換、この Run のみ基準を Run No.3 とする。

Ⅺ) 基準から F126/16、F126/36、M126/16、M126/36 にて DUB 引出し 2 本を EUDD 引出し 2 本に置換
核計装 CH#6 は 0.2×10⁻⁶ A レベル

正した余剰反応度の差をとることにより、簡便に、2 つの Run の間の補正した反応度の差、すなわち引出しの置換反応度値を算出することができる。

このように、補正した余剰反応度の差として引出しの置換反応度値を算出するものの、その内訳は、2 つの Run の間で制御棒の位置の差を反応度差に換算し、これに温度や間隙の差を反応度差に換算して補正したものである。したがって、この置換反応度値の不確かさは、制御棒、安全棒の位置の再現性による不確かさと校正の不確かさ、温度測定と温度係数の不確かさや間隙測定と間隙係数の不確かさから算出した。

制御棒の反応度差の不確かさは、2 つの Run の間での移動前後の位置再現性による不確かさと校正の不確かさによるものを合わせる。例えば、Run No.1 と No.2 の置換反応度値では、CR#1 の移動前後の位置は制御棒校正のステップ 7、8 の 61.51 mm を跨ぐため、反応度差の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.0025^2 \times 2 + ((3.8245 - 3.0080) \times 0.0052)^2 + ((3.0080 - 2.1270) \times 0.0052)^2} = \pm 0.0072\rho_0$$

となる。

CR#2 の移動前後の位置も制御棒校正のステップ 8、9 の 77.60 mm、ステップ 10、11 の 55.74 mm とステッ

プ 12、13 の 35.12 mm を跨ぐため、反応度差の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.0025^2 \times 2 + ((3.9276 - 3.8208) \times 0.0052)^2 + 0.0038^2 \times 2 + 0.0025^2 \times 2 + ((1.8225 - 1.8170) \times 0.0052)^2}$$

$$= \pm 0.0074 \rho_0$$

となる。

安全棒に関しては、同一日なので集合体の分離と再密着を行っても全挿入位置から動かすことはなく不確かさは生じない。

炉心温度に関しては、集合体の分離と密着を行う時の温度測定の不確かさ $\pm 0.1^\circ\text{C}$ と温度係数の不確かさ $\pm 9.6\%$ を合わせて、温度変化による反応度変化の補正の不確かさは

$$\pm\sqrt{(\sqrt{0.1^2 \times 2} \times (-0.0783))^2 + (-0.0783 \times 0.096 \times (23.27 - 23.46))^2} = \pm 0.011 \rho_0$$

となる。温度差が小さなため、前者の寄与がこの不確かさの大部分を占める。

集合体密着面間隙に関しては、集合体の分離と密着を行う時の間隙測定の不確かさ $\pm 0.02 \text{ mm}$ と間隙係数の不確かさ $\pm 6.6\%$ を合わせて、間隙の差による反応度差の補正の不確かさは

$$\pm\sqrt{(\sqrt{0.02^2 \times 2} \times (-0.742))^2 + (-0.742 \times 0.066 \times (0.004 - 0.012))^2} = \pm 0.021 \rho_0$$

となる。間隙の差が小さなため、前者の寄与がこの不確かさの大部分を占める。

これら 4 つの不確かさを合わせて、引出し置換反応度値の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.0072^2 + 0.0074^2 + 0.011^2 + 0.021^2} = \pm 0.026 \rho_0$$

となる。温度差と間隙の差による反応度差の補正の不確かさの寄与が大きい。他の置換反応度値に関しても同様に算出した結果、不確かさは Run No.3 で $\pm 0.026 \rho_0$ 、Run No.4 と No.5 で $\pm 0.025 \rho_0$ であった。

集合体の分離と再密着を伴う場合は、仮に 2 つの Run の間で温度や間隙の差が無い場合でも、温度測定に伴う反応度の不確かさ

$$\pm\sqrt{0.1^2 \times 2} \text{ }^\circ\text{C} \times (-0.0783) \rho_0 / \text{ }^\circ\text{C} = \pm 0.011 \rho_0$$

と間隙測定に伴う反応度の不確かさ

$$\pm\sqrt{0.02^2 \times 2} \text{ mm} \times (-0.742) \rho_0 / \text{mm} = \pm 0.021 \rho_0$$

が生じる。

A.5.5 未臨界度の測定

実効増倍率は主に 2 本の制御棒 CR の余剰反応度から算定するが、これに種々の補正を行う。そのうちの 하나가未臨界度である。基準反応度の測定時と同様に、浅い未臨界で核計装 CH#6 の読みが C_a 、 C_b である時の未臨界度をそれぞれ ρ_a 、 ρ_b とすると、中性子源増倍法を基にしてこれらには (A.64) 式の関係がある。表 A.77 に示すように、原子炉出力レベルを 2 段階に変えた Run を 2 組実施して、それぞれ未臨界度を求めた。各日の 2 つの Run で余剰反応度の差が $\rho_a - \rho_b$ である。これら 2 つの Run の間で、片方の CR のみを動かして原子炉出力を変更し、他方の CR と全ての安全棒 SR は動かさなかった。さらに、集合体は密着したままであり間隙の変化は無いので、この余剰反応度の差の不確かさは、CR の移動による反応度差の不確かさ、温度変化によ

表 A.77 XV-2(95V) 炉心における未臨界度

実験日 ^㉑	CR#1		CR#2		炉心温度		密着面間隙		余剰	CH#6	未臨界度
Run No.	位置 [mm]	反応度 ^㉒ [ρ_0]	位置 [mm]	反応度 ^㉒ [ρ_0]	温度 [°C]	反応度 ^㉓ [ρ_0]	間隙 [mm]	反応度 ^㉔ [ρ_0]	反応度 ^㉕ [ρ_0]	電流 [$\times 10^{-6}$ A]	[ρ_0]
7/28 No.20	61.50	3.0075	78.11	3.8434	21.14	0.0893	-0.023	-0.0171	7.9231 ^㉖	0.2021	0.0505 $\pm 0.0051(10\%)$
7/28 No.21	61.50	3.0075	77.29	3.8070	21.12	0.0877	-0.023	-0.0171	7.8851 ^㉖	0.8159	0.0125 $\pm 0.0013(10\%)$
7/29 No.6	25.42	1.2941	45.00	2.3078	20.86	0.0673	-0.033	-0.0245	4.6447 ^㉖	0.2027	0.0530 $\pm 0.0051(9.7\%)$
7/29 No.7	24.67	1.2566	45.00	2.3078	20.83	0.0650	-0.033	-0.0245	4.6049 ^㉖	0.8164	0.0132 $\pm 0.0013(9.7\%)$

㉑ いずれも 1988 年

㉒ この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

㉓ 炉心温度の読みを左記の値から基準の 20.00°C に変化させる時に加わる反応度

㉔ 集合体密着面間隙の読みを左記の値から基準の 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

㉕ 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00°C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度

㉖ SR#4 を 20.00 mm まで引き抜き固定したのでその反応度値 1 ρ_0 を加えた。他の 5 組の SR は全挿入 7/28 は図 2.6 の径方向に対称な炉心で実験実施、7/29 は、図 2.6 の径方向に対称な炉心から F128/17、F124/35、M128/17、M124/35 にて合計 4 本の EUDD 引出しを 4 本の DUB 引出しに置き換え、片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数を 102 本とした炉心で実験実施

る反応度変化の補正の不確かさと間隙測定の不確かさから以下のように算出した。

例えば、7/29 の 2 つの Run では、CR#1 の移動時の位置の再現性と制御棒校正の不確かさより

$$\pm\sqrt{0.0025^2 \times 2 + ((1.2941 - 1.2566) \times 0.0052)^2} = \pm 0.0035 \rho_0$$

の不確かさが生じる。

集合体の密着を保持した時の温度測定の不確かさと温度係数の不確かさより

$$\pm\sqrt{(\sqrt{0.01^2 \times 2} \times (-0.0783))^2 + (-0.0783 \times 0.096 \times (20.83 - 20.86))^2} = \pm 0.0011 \rho_0$$

の不確かさが生じる。温度変化が小さなため温度係数の不確かさの寄与は無視し得る。間隙の変化は無く、集合体の密着を保持した時の間隙測定の不確かさより $\pm 0.0010 \rho_0$ の不確かさが生じる。

余剰反応度の差の不確かさは、これらを合わせて

$$\pm\sqrt{0.0035^2 + 0.0011^2 + 0.0010^2} = \pm 0.0038 \rho_0$$

となる。したがって、(A.64) 式を用いて 7/29 の核計装 CH#6 が 0.2027×10^{-6} A で運転時の未臨界度は $0.0530 \rho_0 \pm 0.0051 \rho_0$ ($\pm 9.7\%$) となる。ここで、2 つの原子炉出力レベルでの CH#6 の電流値の比の不確かさは、この $\pm 9.7\%$ に比べて十分小さいので無視した。

中性子源増倍法より、未臨界度と、その時の原子炉出力レベルとしての核計装 CH#6 の電流値の積は一定と

なる。この積は、7/28 が $1.02 \times 10^{-8} \rho_0 A \pm 10\%$ 、7/29 が $1.07 \times 10^{-8} \rho_0 A \pm 9.7\%$ となった。両日の値の間には 5% の差があるが、これは各日の不確かさから有意ではない。2 つの値の平均である $1.05 \times 10^{-8} \rho_0 A$ を採用し、平均のサンプル数が少ないためその不確かさには各日の値の不確かさである $\pm 0.11 \times 10^{-8} \rho_0 A$ ($\pm 10\%$) を採用する。これを基に余剰反応度に補正を行い実効増倍率を求める。

A.5.6 密着面でのステンレス鋼反応度価値の測定

炉心の中心面に相当する 2 分割集合体の密着面には、主に引出し前端面の部材としてのステンレス鋼があり、決定論手法で実効増倍率を計算する場合はそのモデル化が困難となる場合がある。そこで、このステンレス鋼の負の反応度効果を実験的に求めて実効増倍率の実験値導出において補正として用い、密着面のステンレス鋼を取り除いた炉心の実効増倍率を決定論手法による計算結果と比較する。この補正のために、炉心中心引出しの密着面近傍においてステンレス鋼の反応度価値測定を行った。炉心中心引出し以外の領域の密着面では、XIV-1 炉心において求めた表 B.20 の炉心中心引出しと各領域間の反応度価値の比を基に、そのステンレス鋼の反応度価値を求めた。

実験に用いたステンレス板とアルミニウム板の重量を表 A.78 に示す。重量の測定誤差は 0.1% 未満であり、後に記述するように反応度価値の測定誤差と比べて無視し得るほど小さい。

まず、F126/26 の中心引出しにおいて、引出し内の燃料板と模擬物質板を全て軸方向に炉心外側に向けてずらすことにより、この引出し内の前端面の内側に、通常とは垂直の方向に模擬物質板を装填できる 1/4 インチ幅の空間を設けて、この空間で 1 枚のステンレス SUS(1/4×2×2) 板とアルミニウム Al frame(1/8×2×2) 板 2 枚の置換反応度価値を 7/29 の Run No.4 と No.5 で測定した。測定結果を表 A.79 に示す。

これらの反応度価値は、制御棒 CR#1 で補償することにより測定した。集合体は分離せずに密着を保ったまま、ステンレス板とアルミニウム板の入れ替え前後の 2 つの Run の間での CR#1 の位置の差を求めた。これを制御棒の校正結果より反応度価値に換算して、さらに、2 つの Run の間での炉心温度と集合体密着面間隙の変化による反応度変化を補正した。

表 A.78 より SUS(1/4×2×2) 板の重さは 124.6 g で Al frame(1/8×2×2) 板 2 枚の重さは 8.633 g であり、この置換反応度価値の測定結果は表 A.79 に示すように $-0.0205 \rho_0 \pm 0.0081 \rho_0$ である。この不確かさは以下

表 A.78 XV-2(95V) 炉心中心におけるステンレス鋼反応度価値測定に用いたステンレス板とアルミニウム板の重量

板種類とサイズ	枚数	合計重量 [g] ¹⁾	板種類とサイズ	枚数	合計重量 [g]
SUS(1/4×2×2)	1	124.6 ¹⁾	Al frame(1/8×2×2) ^{III)}	2	8.633 ^{II)}
Al(1/16×2×2)	8	81.70 ^{II)}	Al frame(1/4×2×2) ^{III)}	2	10.06 ^{II)}

¹⁾ 重量の測定誤差は 0.1% 未満

^{II)} 実験時の記録より

^{III)} Al(1/8×2×2) 板または Al(1/4×2×2) 板の内側をくり抜いて製作

表 A.79 XV-2(95V) 炉心中心におけるステンレス鋼反応度値とアルミニウム反応度値

実験日 ^{Ⅰ)} Run No.	装荷物 (目的)	CR#1		CR#2		炉心温度		密着面間隙		余剰 反応度 ^{Ⅴ)} [ρ ₀]	反応度 値 ^{Ⅵ)} [ρ ₀]
		位置 [mm]	反応度 ^{Ⅱ)} [ρ ₀]	位置 [mm]	反応度 ^{Ⅱ)} [ρ ₀]	温度 [°C]	反応度 ^{Ⅲ)} [ρ ₀]	間隙 [mm]	反応度 ^{Ⅳ)} [ρ ₀]		
7/29 No.4	SUS(1/4×2×2) 1枚	45.81	2.2823	45.00	2.3078	20.93	0.0728	-0.034	-0.0252	4.6377	-0.0205
7/29 No.5	Al frame(1/8×2×2) 2枚(7/29の基準)	46.33	2.3068	45.00	2.3078	20.87	0.0681	-0.033	-0.0245	4.6582	
9/7 No.4	Al frame(1/4×2×2) 2枚(9/7の基準)	53.50	2.6413	40.00	2.0637	21.43	0.1120	-0.037	-0.0275	4.7895	
9/7 No.5	Al(1/16×2×2) 8枚	53.23	2.6288	40.00	2.0637	21.40	0.1096	-0.037	-0.0275	4.7746	-0.0149

Ⅰ) いずれも 1988 年

Ⅱ) この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

Ⅲ) 炉心温度の読みを左記の値から基準の 20.00°C に変化させる時に加わる反応度

Ⅳ) 集合体密着面間隙の読みを左記の値から基準の 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

Ⅴ) 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00°C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度

Ⅵ) それぞれの日の基準の余剰反応度からの差

いずれも、図 2.6 の径方向に対称な炉心から F128/17、F124/35、M128/17、M124/35 にて合計 4 本の EUDD 引出しを 4 本の DUB 引出しに置き換え、片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数を 102 本とした炉心で実験実施、核計装 CH#6 は 0.2×10^{-6} A

のように算出した。

制御棒と安全棒に関しては、まず、同じ位置に戻したものの 2 つの Run の間で動かした CR#2 と固定側集合体の 3 組の安全棒 SR の移動前後の位置再現性により生じる反応度の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.0025^2 \times 2 \times 4} = \pm 0.0071 \rho_0$$

である。これら 2 つの Run の間では、移動側集合体の 3 組の SR は全挿入のまま動かさなかったため、これら SR に関して不確かさは生じない。次に、2 つの Run の間の反応度差を補償する CR#1 の移動の両端での位置再現性と CR#1 の校正の不確かさ $\pm 0.52\%$ を合わせると

$$\pm\sqrt{0.0025^2 \times 2 + ((2.2823 - 2.3068) \times 0.0052)^2} = \pm 0.0035 \rho_0$$

となる。CR#1 の位置の差が小さなため、前者の寄与がこの不確かさの大部分を占める。

炉心温度に関しては、集合体の密着を保ったまま測定を行う時の温度測定の不確かさ $\pm 0.01^\circ\text{C}$ と温度係数の不確かさ $\pm 9.6\%$ による寄与を合わせて、温度変化による反応度変化の補正の不確かさは

$$\pm\sqrt{(\sqrt{0.01^2 \times 2 \times (-0.0783)})^2 + (-0.0783 \times 0.096 \times (20.93 - 20.87))^2} = \pm 0.0012 \rho_0$$

となる。温度差が小さなため、前者の寄与がこの不確かさの大部分を占める。

集合体密着面間隙に関しては、集合体の密着を保ったまま測定を行う時の間隙測定の不確かさ ± 0.001 mm

と間隙係数の不確かさ $\pm 6.6\%$ による寄与を合わせて、間隙変化による反応度変化の補正の不確かさは

$$\pm\sqrt{(\sqrt{0.001^2 \times 2} \times (-0.742))^2 + (-0.742 \times 0.066 \times (-0.034 - -0.033))^2} = \pm 0.0010 \rho_0 \text{ となる。}$$

間隙差が小さいため、後者の寄与は無視し得る。

これら 4 つの不確かさを合わせて、置換反応度値の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.0071^2 + 0.0035^2 + 0.0012^2 + 0.0010^2} = \pm 0.0081 \rho_0$$

となる。

ステンレス板正味の反応度値を得るためには、アルミニウムの反応度値分を補正する必要がある。このために、F126/26 の Pu08A 引出しの密着面から 1 セル目において、3 枚装填されている劣化ウラン燃料板のうち両脇の 2 枚を取り除いてセル内に 1/4 インチ幅の 2 箇所の空間を設けて、これら空間で 8 枚の Al(1/16×2×2) 板と 2 枚の Al frame(1/4×2×2) 板の置換反応度値を 9/7 の Run No.4 と No.5 で測定した。表 A.78 より 8 枚の Al(1/16×2×2) 板の重さの合計は 81.70 g で 2 枚の Al frame(1/4×2×2) 板の重さの合計は 10.06 g である。この置換反応度値の測定結果は表 A.79 に示すように $-0.0149 \rho_0 \pm 0.0081 \rho_0$ である。この不確かさは、7/29 に実施したステンレス板とアルミニウム板の置換反応度値と同様に算出し、その内訳は以下のとおりである。

制御棒 CR と安全棒 SR に関しては、まず、同じ位置に戻したものの 2 つの Run の間で動かした CR#2 と固定側集合体の 3 組の SR の移動前後の位置再現性により生じる反応度の不確かさは $\pm 0.0071 \rho_0$ である。これら 2 つの Run の間では、移動側集合体の 3 組の SR は全挿入のまま動かさなかったため、これら SR に関して不確かさは生じない。次に、2 つの Run の間の反応度差を補償する CR#1 の移動の両端での位置再現性と校正の不確かさを合わせると

$$\pm\sqrt{0.0025^2 \times 2 + ((2.6288 - 2.6413) \times 0.0052)^2} = \pm 0.0035 \rho_0$$

となる。CR#1 の位置の差が小さいため、後者の寄与は無視し得る。

炉心温度に関しては、集合体の密着を保ったまま測定を行う時の温度測定の不確かさ $\pm 0.01^\circ\text{C}$ と温度係数の不確かさ $\pm 9.6\%$ による寄与を合わせて、温度変化による反応度変化の補正の不確かさは

$$\pm\sqrt{(\sqrt{0.01^2 \times 2} \times (-0.0783))^2 + (-0.0783 \times 0.096 \times (21.40 - 21.43))^2} = \pm 0.0011 \rho_0$$

となる。温度差が小さいため、後者の寄与は無視し得る。

集合体密着面間隙に関しては、間隙変化は無いが間隙測定の不確かさによる $\pm 0.0010 \rho_0$ の不確かさが生じる。

これら 4 つの不確かさを合わせて、置換反応度値の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.0071^2 + 0.0035^2 + 0.0011^2 + 0.0010^2} = \pm 0.0081 \rho_0$$

となる。

炉心中心における単位重量当たりのアルミニウムの反応度値は

$$\frac{-0.0149 \rho_0 (\pm 0.0081 \rho_0)}{81.70\text{g} - 10.06\text{g}} = -2.08 \times 10^{-4} \rho_0/\text{g} \pm 54\% \quad (\text{A.65})$$

となる。ここで、アルミニウムの重量の不確かさは 0.1% のオーダーであり、54% の反応度値の不確かさに

比べてはるかに小さいので無視した。

これより、SUS(1/4×2×2) 板との置換反応度値を求めた Al frame(1/8×2×2) 板 2 枚の反応度値は

$$-2.08 \times 10^{-4} \rho_0/g(\pm 54\%) \times 8.633g = -0.00180\rho_0 \pm 0.00097\rho_0 \quad (\text{A.66})$$

となる。ここでも、アルミニウムの重量の不確かさは小さく無視した。なお、ステンレス鋼の反応度値を測定した引出し前端面とアルミニウムの反応度値を測定した劣化ウラン燃料板の位置では、アルミニウムの反応度値に若干の相違が生じることが予想される。しかしながら、アルミニウムの反応度値の不確かさが ±54% と大きなことから、測定位置の相違によるアルミニウム反応度値の相違は、この大きな不確かさと比べて無視できるものとする。

これを用いて、炉心中心での引出し前端面における SUS(1/8×2×2) 板の正味の反応度値は

$$-0.0205 \rho_0(\pm 0.0081 \rho_0) - 0.00180\rho_0(\pm 0.00097\rho_0) = -0.0223 \rho_0 \pm 0.0082 \rho_0 (\pm 37\%) \quad (\text{A.67})$$

となる。したがって、単位重量当たりのステンレス鋼の反応度値は

$$\frac{-0.0223 \rho_0(\pm 0.0082 \rho_0)}{124.6g} = -1.79 \times 10^{-4} \rho_0/g \pm 37\% \quad (\text{A.68})$$

となる。ここでも、ステンレス鋼の重量の不確かさは小さく無視した。

アルミニウムとステンレス鋼の単位重量当たりの反応度値の比は

$$\frac{-2.08 \times 10^{-4} \rho_0/g(\pm 54\%)}{-1.79 \times 10^{-4} \rho_0/g(\pm 37\%)} = 1.16 \pm 65\% \quad (\text{A.69})$$

である。

付録 B.2.6 項の表 B.20 より、中心引出しの 1 格子管当たりに余分に存在するステンレス鋼の重量は、固定側と移動側集合体合わせて 19.98 g であり、これに単位重量当たりのステンレス鋼の反応度値を乗じると

$$-1.79 \times 10^{-4} \rho_0/g(\pm 37\%) \times 19.98g = -0.00357\rho_0 \pm 37\% \quad (\text{A.70})$$

である。

テスト領域、バッファ領域と制御安全棒引出しに関しては、XIV-1 炉心と XV-2(95V) 炉心間で引出し内の燃料セルの組成が異なることはあっても引出しの装荷本数と装荷位置が同じである。したがって、表 B.20 の炉心中心引出しとこれらの各領域間の反応度値の比は、両炉心間で不確かさの範囲で変わらないとする。ドライバー領域に関しては、固定側と移動側集合体を合わせた装荷本数が、XIV-1 炉心では $116 \times 2 = 232$ 本であるのに対して XV-2(95V) 炉心が $144 \times 2 = 288$ 本と異なる。この引出し本数の比 $288/232 = 1.241$ をドライバー領域の反応度値寄与分に乗ずることにより引出し本数の違いを補正した。表 B.20 より、ドライバー領域の寄与分が 2~3% と小さく、その不確かさが大きいので、このような評価で十分である。表 A.80 に XV-2(95V) 炉心での密着面のステンレス鋼反応度値を示す。

表 A.80 XV-2(95V) 炉心における密着面ステンレス鋼反応度価値

領域	引出し本数 (格子管数) (固定側と移動側の合計)	ステンレス鋼 重量 [g] ¹⁾	反応度価値 の比 ^{II)}	反応度価値 ^{III)} [ρ_0]
中心引出し	1 × 2	19.98	1.0	-0.00357 ± 37%
テスト領域 ^{IV)}	76 × 2	1518.48	52.2 ± 13%	-0.186 ± 39%
バッファ領域	40 × 2	799.2	11.9 ± 52%	-0.0425 ± 64%
制御・安全棒引出し	8 × 2	863.392	2.8 ± 264%	-0.010 ± 267%
ドライバー領域	144 × 2 ^{V)}	2877.12	2.1 ± 202% ^{VI)}	-0.0075 ± 205%
合計			70.0 ± 19%	-0.250 ± 42%

¹⁾ 各領域で、引出し装荷本数に 1 格子管当たりの余分に存在するステンレス鋼の重量を乗じたもの

^{II)} 付録 B.2.6 項の表 B.20 より引用、中心引出しの反応度価値で規格化

^{III)} 中心引出しの反応度価値 $-0.00357\rho_0 \pm 37\%$ に中心引出しと各領域間の反応度価値の比を乗じたもの

^{IV)} 中心引出しを除く

^{V)} 図 2.6 の片側集合体当たりに EUDD 引出しを 104 本装荷した径方向に対称な炉心のドライバー燃料引出し本数

^{VI)} 付録 B.2.6 項の表 B.20 のドライバー領域の反応度価値の比に、炉心間のドライバー燃料引出し本数の比を乗じて補正したもの

A.5.7 余剰反応度の再現性と不確かさの評価

実効増倍率は余剰反応度を基に算出する。原子炉運転時は、6 組の安全棒 SR は全挿入で 2 組の制御棒 CR を途中まで引き抜くので、これら 2 組の CR を全挿入する時に加わる反応度の和が余剰反応度となる。ただし、この余剰反応度は、本来の臨界からの余剰反応度に一定の原子炉出力で運転時の未臨界度を加えた反応度である。これまでと同様に、この余剰反応度に炉心温度や集合体密着面間隙に関する補正を行う。

炉心に特別な実験用装荷物等が無い標準の構成である Run のデータを抽出して、集合体の分離、密着に伴う余剰反応度の再現性として変化(ばらつき)を見た。いずれの Run も浅い未臨界なので、この余剰反応度は原子炉出力レベルに依存する。したがって、この出力レベルやその他の炉心の状態が同じである Run を抽出した結果、EUDD 引出しを片側集合体当たり 104 本装荷した炉心と 102 本装荷した炉心で余剰反応度の変化(ばらつき)を見ることができた。これらのデータを表 A.81 と表 A.82 にまとめる。これら表の各 Run の余剰反応度は、基準の 20°C、間隙読み 0.000 mm での値となるように、既に反応度の温度補正と間隙補正を行った値である。

各表内で Run の間の余剰反応度の変化(ばらつき)は $0.13 \rho_0$ に達する。一方で、余剰反応度の再現性は、CR と SR の位置再現性、温度測定の不確かさ、間隙測定の不確かさからも以下のように評価できる。8 組の CR と SR の位置再現性により生じる反応度の不確かさは

表 A.81 XV-2(95V) 炉心における集合体分離密着時の余剰反応度の再現性 (1)

実験日 ^{D)} Run No.	CR#1		CR#2		炉心温度		密着面間隙		余剰 反応度 ^{V)} [ρ_0]	CH#6 電流 [$\times 10^{-6}$ A]	備考
	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_0]	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_0]	温度 [$^{\circ}$ C]	反応度 ^{III)} [ρ_0]	間隙 [mm]	反応度 ^{IV)} [ρ_0]			
7/26 No.7	79.99	3.8284	74.09	3.6643	26.93	0.5426	0.012	0.0089	8.044	0.2023	
7/27 No.1	79.90	3.8245	80.01	3.9276	23.46	0.2709	0.012	0.0089	8.032	0.2027	
7/28 No.9	84.16	4.0088	77.60	3.8208	21.35	0.1057	-0.024	-0.0178	7.918	0.2029	
8/26 No.3	81.22	3.8818	80.00	3.9271	21.69	0.1323	0.017	0.0126	7.954	0.2032	

^{D)} いずれも 1988 年

^{II)} この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

^{III)} 炉心温度の読みを左記の値から基準の 20.00 $^{\circ}$ C に変化させる時に加わる反応度

^{IV)} 集合体密着面間隙の読みを左記の値から基準の 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

^{V)} 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00 $^{\circ}$ C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度に相当

いずれも、図 2.6 の径方向に対称な炉心で実験実施

表 A.82 XV-2(95V) 炉心における集合体分離密着時の余剰反応度の再現性 (2)

実験日 ^{D)} Run No.	CR#1		CR#2		炉心温度		密着面間隙		余剰 反応度 ^{V)} [ρ_0]	CH#6 電流 [$\times 10^{-6}$ A]	備考
	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_0]	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_0]	温度 [$^{\circ}$ C]	反応度 ^{III)} [ρ_0]	間隙 [mm]	反応度 ^{IV)} [ρ_0]			
7/27 No.3	49.83	2.4709	40.00	2.0637	23.23	0.2529	-0.017	-0.0126	4.775	0.2027	
7/29 No.1	45.86	2.2847	45.01	2.3083	21.12	0.0877	-0.034	-0.0252	4.656	0.2027	
8/24 No.4	40.92	2.0502	49.99	2.5484	21.57	0.1229	-0.031	-0.0230	4.699	0.2029	
8/25 No.3	40.62	2.0359	50.02	2.5498	21.71	0.1339	-0.035	-0.0259	4.694	0.2031	
9/6 No.3	51.56	2.5514	40.00	2.0637	21.57	0.1229	-0.018	-0.0134	4.725	0.2030	
9/7 No.3	52.06	2.5746	40.00	2.0637	21.47	0.1151	-0.037	-0.0275	4.726	0.2036	
9/8 No.4	51.40	2.5440	40.00	2.0637	21.37	0.1073	0.021	0.0156	4.731	0.2029	

^{D)} いずれも 1988 年

^{II)} この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

^{III)} 炉心温度の読みを左記の値から基準の 20.00 $^{\circ}$ C に変化させる時に加わる反応度

^{IV)} 集合体密着面間隙の読みを左記の値から基準の 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

^{V)} 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00 $^{\circ}$ C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度に相当

いずれも、図 2.6 の径方向に対称な炉心から F128/17、F124/35、M128/17、M124/35 にて合計 4 本の EUDD 引出しを 4 本の DUB 引出しに置き換え、片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数を 102 本とした炉心で実験実施

$$\pm\sqrt{0.0025^2 \times 8} = \pm 0.0071 \rho_0$$

である。集合体の分離と密着を行う時の温度測定の不確かさ $\pm 0.1^\circ\text{C}$ より

$$\pm 0.1^\circ\text{C} \times (-0.0783) \rho_0 / ^\circ\text{C} = \pm 0.008 \rho_0$$

が、これに伴う反応度の不確かさとなる。集合体の分離と密着を行う時の間隙測定の不確かさ $\pm 0.02 \text{ mm}$ より

$$\pm 0.02 \text{ mm} \times (-0.742) \rho_0 / \text{mm} = \pm 0.015 \rho_0$$

が、これに伴う反応度の不確かさとなる。これら3つの不確かさを合わせて、余剰反応度の再現性は

$$\pm\sqrt{0.0071^2 + 0.008^2 + 0.015^2} = \pm 0.018 \rho_0$$

となる。

なお、各表内では、いずれの Run も CR の位置は近く、この CR 位置の差から余剰反応度の差を計算するための制御棒校正の不確かさは余剰反応度の再現性には影響しない。集合体密着面間隙の差は 0.06 mm であるため、間隙係数の不確かさによる反応度差の不確かさは $0.06 \text{ mm} \times (-0.742) \rho_0 / \text{mm} \times \pm 0.066 = \pm 0.003 \rho_0$ であり、余剰反応度の再現性への影響は小さい。しかし、Run の間で炉心温度の差は 3.5°C に達することがあり、この場合、温度係数の不確かさによる反応度差の不確かさは、 $3.5^\circ\text{C} \times (-0.0783) \rho_0 / ^\circ\text{C} \times \pm 0.096 = \pm 0.026 \rho_0$ となる。

このように算出した余剰反応度の再現性 $\pm 0.018 \rho_0$ や温度係数の不確かさによる $\pm 0.026 \rho_0$ と比べて Run の間の余剰反応度の変化(ばらつき) $0.13 \rho_0$ は大きい。なお、各表内で1カ月以上離れた測定結果があるが、この期間にプルトニウム燃料に含まれる ^{241}Pu が崩壊して ^{241}Am が生成することによる余剰反応度の低下は、このばらつき $0.13 \rho_0$ と比較して有意に観測されない。

なお、余剰反応度の平均をとると、片側集合体当たりの EUDD 引出し装荷本数が 104 本の表 A.81 では $7.987 \rho_0$ で、EUDD 引出し装荷本数が 102 本の表 A.82 では $4.705 \rho_0$ である。後者に、先の周辺燃料引出し反応度価値 $3.257 \rho_0 \pm 0.026 \rho_0$ を加えると $7.962 \rho_0$ となり前者との差は $0.025 \rho_0$ となる。余剰反応度の再現性 $\pm 0.018 \rho_0$ と比較してこの差は有意ではない。

実効増倍率を評価するための基となる炉心の余剰反応度は、表 A.81 に記載の片側集合体当たりに EUDD 引出しを 104 本装荷した径方向に対称な炉心での 7/26 から 8/26 の4回の Run の平均を採用する。これらの平均値は、先に記述したように $7.987 \rho_0$ であり、核計装 CH#6 の電流値は $0.2028 \times 10^{-6} \text{ A}$ である。

この平均値の不確かさは既に記述した Run の間での余剰反応度の変化 $0.13 \rho_0$ の $1/2$ である $\pm 0.065 \rho_0$ に、2組の CR の反応度価値の校正に起因する不確かさを合わせる。4回の Run いずれも、最大で、CR#1 は 84.16 mm 、CR#2 は 80 mm 引き抜き、この CR#1 の位置は制御棒校正ステップ 9、10 の 84.16 mm であり、CR#2 ではステップ 8、9 の 77.60 mm が直近の制御棒校正ステップ位置である。全挿入位置からこれらステップの位置に至るまでに $\pm 0.0038 \rho_0$ の不確かさを持つ基準反応度をいずれも4回積み重ねることになる。なお、 80 mm からこの直近の校正ステップ位置までの間の反応度価値の不確かさの寄与は小さく無視できる。両 CR の全挿入とこれら直近の校正ステップの両端での校正時の位置の再現性による不確かさも合わせると、制御棒校正の不確かさによる2組の CR の反応度価値の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.0038^2 \times (4 + 4) + 0.0025^2 \times 2 \times 2} = \pm 0.012 \rho_0$$

となり、先の平均値の不確かさ $\pm 0.065 \rho_0$ と合わせると $\pm 0.066 \rho_0$ となる。なお、先に記述したように、表 A.82 の余剰反応度測定時の SR や CR の位置再現性に伴う不確かさは、既に平均値の不確かさ $\pm 0.065 \rho_0$ に含まれる。

これら 4 回の Run は 7/26、7/27、7/28、8/26 に行ったが、既に記述したように、この 1 カ月の期間でプルトニウム燃料に含まれる ^{241}Pu の崩壊と ^{241}Am の生成による反応度の低下は有意に観測されないため、この平均値 $7.987 \rho_0 \pm 0.066 \rho_0$ は 1988 年 7 月 27 日時点の値とする。

B. XIV 炉心系の臨界性

B.1 実験炉心

テスト領域とこれを取り囲むドライバー領域からなるゾーン型炉心の構成は、XIV 炉心系と XV 炉心系で同じである。XIV-1、XIV-1(45V)、XIV-2 の 3 炉心の装荷図を図 B.1 ～ 図 B.3 に、引出しの燃料板や模擬物質板の装填図を図 B.4 ～ 図 B.12 に示す。固定側と移動側集合体は対称となるように燃料引出しを装荷するので、固定側集合体の装荷図のみ掲載する。なお、SCRA 引出し、SCRB 引出し、SSB 引出し及び DUB 引出し及びドライバー領域の燃料引出しのうち PuDA1 引出しの装填図は、XV 炉心系と共通であるためここには掲載しない。

XIV-1 炉心のテスト領域の燃料セルの濃縮ウラン燃料は、20% 濃縮ウラン燃料板、天然ウラン燃料板と劣化ウラン燃料板と酸素を補うためのアルミニウム酸化物板で模擬した。減速材はポリスチレン板で模擬した。引出しには、この燃料セルを 9 パック装填し、その後ろには、劣化ウラン燃料板を用いた軸方向ブランケットセルを 4 パック装填した。燃料セルに用いた 20% 濃縮ウラン燃料板、天然ウラン燃料板やアルミニウム酸化物板の厚さや枚数が異なる EU06A、EU06B、EU06C の 3 種類の引出しを作り、テスト領域に装荷した。テスト領域平均のウラン濃縮度は 6.47%、減速材対燃料体積比は 0.6 である。

XIV-1(45V) 炉心のテスト領域の EU06A、EU06B、EU06C 引出しは、減速材模擬のポリスチレン板を 45% ボイドの発泡ポリスチレン板に置き換えたものである。燃料セル内の他の燃料板と模擬物質板の配列は XIV-1 炉心と同じである。

XIV-2 炉心のテスト領域の燃料セルは、EU06A 引出しの燃料セルの 20% 濃縮ウラン燃料板と天然ウラン燃料板の枚数を減らして、ポリスチレン板の枚数を増やしたものである。この燃料セル 7 パックと軸方向ブランケットセルを 6 パック装填した EU05 引出しのみをテスト領域に装荷し、XIV-1 炉心のテスト領域と比べてウラン濃縮度を 5.45% に減らして、減速材対燃料体積比を 1.1 に増やした。

XIV-1 炉心のドライバー領域には、まず、20% 濃縮ウラン燃料板、天然ウラン燃料板と黒鉛板を用いた EUDA 引出しを内側に装荷して、外側にはプルトニウム燃料板と黒鉛板等からなる PuDA1、PuDA2、PuDA3 引出しを装荷した。これら、3 種の引出しは基本的な燃料セルの装填パターンは同じで、用いたプルトニウム燃料板のタイプが異なるものである。

XIV-1(45V) 炉心のドライバー領域には、EUDA 引出しの代わりに、これよりも 20% 濃縮ウラン燃料板の枚数を増やした EUDC 引出しを内側に装荷し、外側には PuDA1、PuDA2、PuDA3 引出しに加えて PuDA4 引出しを装荷してテスト領域の臨界性の低下を補った。この PuDA4 引出しも燃料セルの基本的な装填パターンは他の PuDA1、PuDA2、PuDA3 引出しと同じで、異なるタイプのプルトニウム燃料板を用いたものである。これら PuDA1、PuDA2、PuDA3 及び PuDA4 引出しをまとめて PuDA 引出しと呼ぶ。

XIV-2 炉心のドライバー領域には、EUDA 引出しと PuDA1、PuDA2、PuDA3 引出しを装荷した。

XIV-1 炉心と XIV-1(45V) 炉心では、テスト領域とバッファー領域の配置や寸法は XV 炉心系と共通であるが、XIV-2 炉心ではテスト領域の軸方向高さのみが変わり、固定側と移動側の両集合体を通して高さはおおよそ 71 cm である。

これら 3 炉心の計算コードによるテスト領域平均の中性子エネルギースペクトルを比較して図 B.13 に示す。減速材対燃料体積比が大きくてポイド率 0% の XIV-2 炉心が最も軟らかいスペクトルを持ち、熱中性子エネルギーに顕著なピークができる。

図 B.1 ～ 図 B.3 の炉心装荷図は、炉心の実効増倍率の実験値と解析での計算値を比較するための最終的なものである。特性試験においては、その目的に応じて、最外周のドライバー燃料引出しの装荷本数をこれらの図から若干変更した炉心で実験を実施したケースがある。このような場合は、ドライバー燃料引出しの変更箇所を、特性試験の結果とともにその都度記述する。

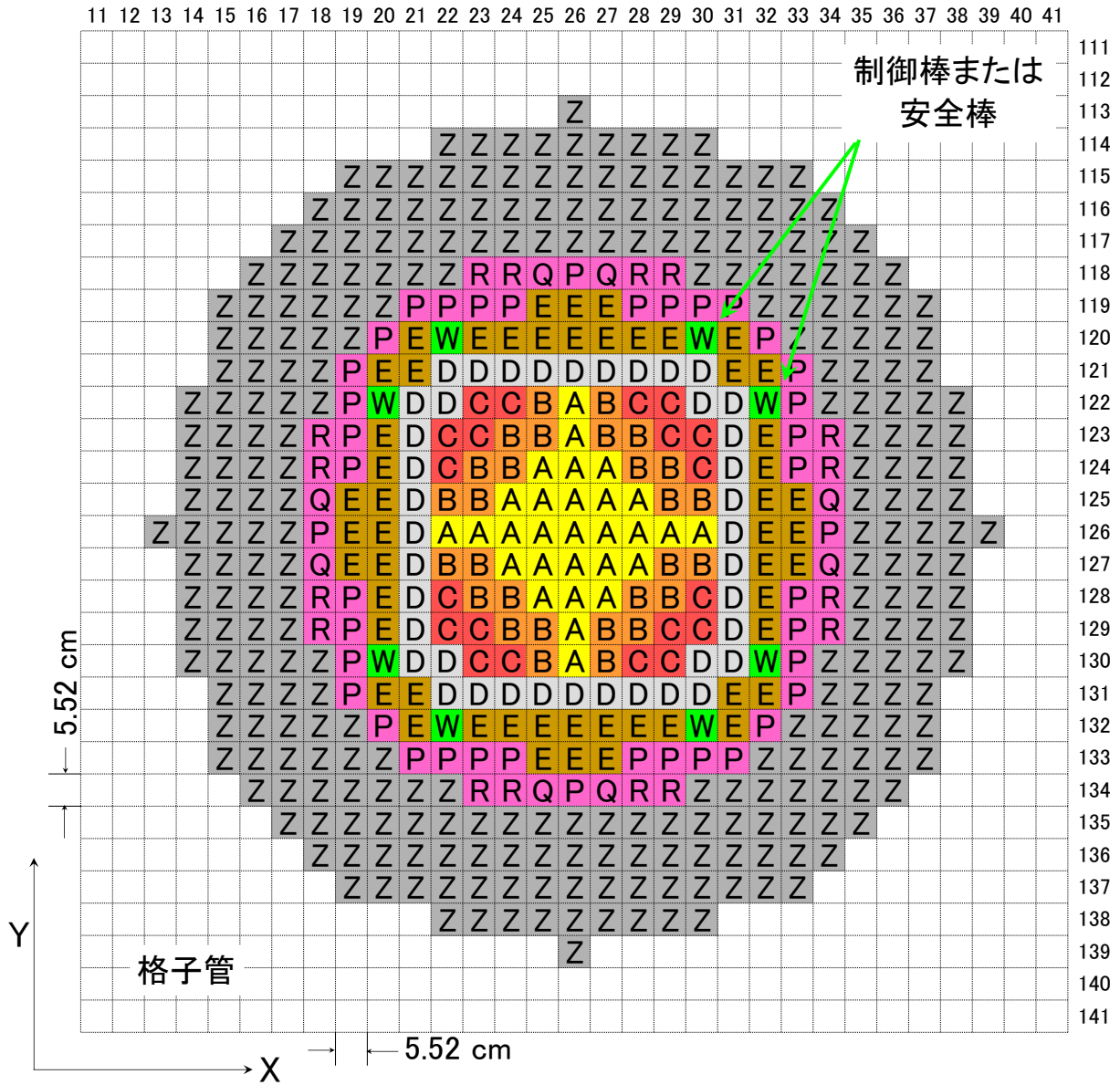
なお、いずれの炉心においてもドライバー領域にプルトニウム燃料板を用いた。燃料に含まれる ^{241}Pu の崩壊と ^{241}Am の生成のため、XV 炉心系と同様に、臨界性の実験値にはその評価日を明記し、臨界性を解析する時には、実験データの評価日に合わせてプルトニウム燃料の組成を元の分析値から更新して計算に用いた。

XIV-1 炉心は、1986 年 5 月 20 日から臨界近接を開始して、片側集合体当たりの引出し装荷本数が、EU06A 29 本、EU06B 28 本、EU06C 20 本、SSB 40 本、EUDA 52 本、PuDA1 40 本、PuDA2 8 本、PuDA3 19 本、DUB 288 本、SCRB 4 組 8 本で、5 月 29 日に臨界に到達し同年 10 月 14 日まで実験を行った。この臨界を達成した炉心で、F119/20、F133/20、F133/32、M119/20、M133/20、M133/32 にて合計 6 本の PuDA3 引出しを 6 本の DUB 引出しに置換して整形すると、図 B.1 に示す片側集合体当たりの PuDA 引出し装荷本数が 64 本の径方向に対称な形状の炉心となる。この対称な炉心の実効増倍率を求めた。

XIV-1(45V) 炉心は、1986 年 11 月 27 日から臨界近接を開始して、片側集合体当たりの装荷本数が、EU06A 29 本、EU06B 28 本、EU06C 20 本、SSB 40 本、EUDC 52 本、PuDA1 40 本、PuDA2 8 本、PuDA3 24 本、PuDA4 30 本、DUB 288 本、SCRA 4 組 8 本で、11 月 28 日に臨界に到達し翌年 2 月 13 日まで実験を行った。この臨界を達成した炉心で、F128/17、F124/35、M128/17、M124/35 の合計 4 本の PuDA4 引出しを DUB 引出しに置換して整形すると、図 B.2 に示す片側集合体当たりの PuDA 引出し装荷本数が 100 本の径方向に対称な形状の炉心となる。この対称な炉心の実効増倍率を求めた。

XIV-2 炉心は、1987 年 2 月 19 日から臨界近接を開始して、片側集合体当たりの装荷本数が、EU05 77 本、SSB 40 本、EUDA 44 本、PuDA1 40 本、PuDA2 8 本、PuDA3 8 本、DUB 288 本、SCRB 4 組 8 本の径方向に対称な炉心として、3 月 2 日に臨界に到達し 5 月 13 日まで実験を行った。この臨界を達成した図 B.3 に示す炉心の実効増倍率を求めた¹⁾。

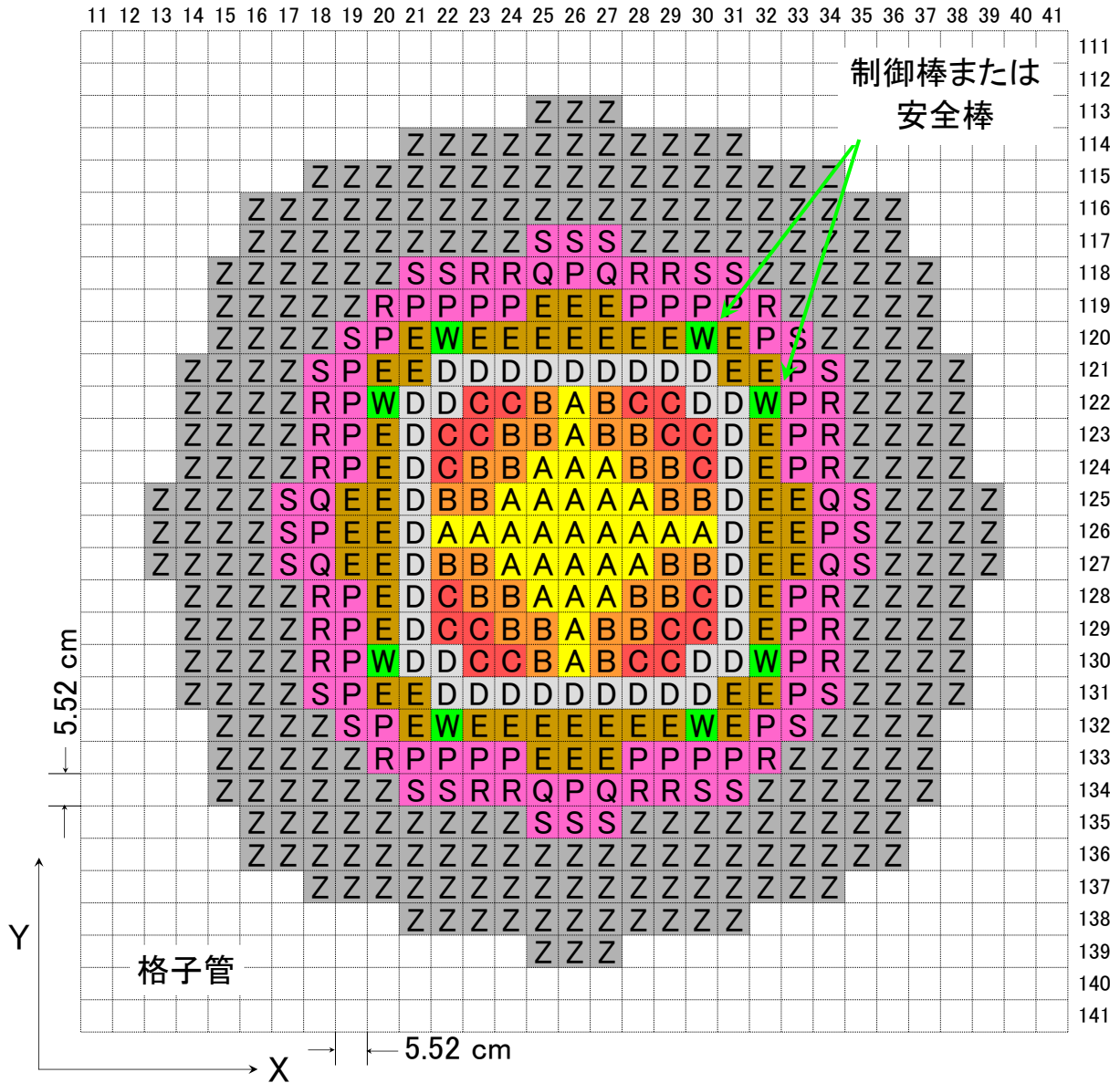
¹⁾ 参考文献 [13] に掲載されているのは、別途、片側集合体当たり 12 本の EUDA 引出しを DUB 引出しに置換し、片側集合体当たりの EUDA 引出し装荷本数を 32 本とした径方向に対称な炉心での実効増倍率である。



装荷引出しと本数

A EU06A : 29	B EU06B : 28
C EU06C : 20	D SSB : 40
E EUDA : 52	P PuDA1 : 40
Q PuDA2 : 8	R PuDA3 : 16
S PuDA4 : 0	Z DUB : 288
W SCRB : 8	PuDA合計 64

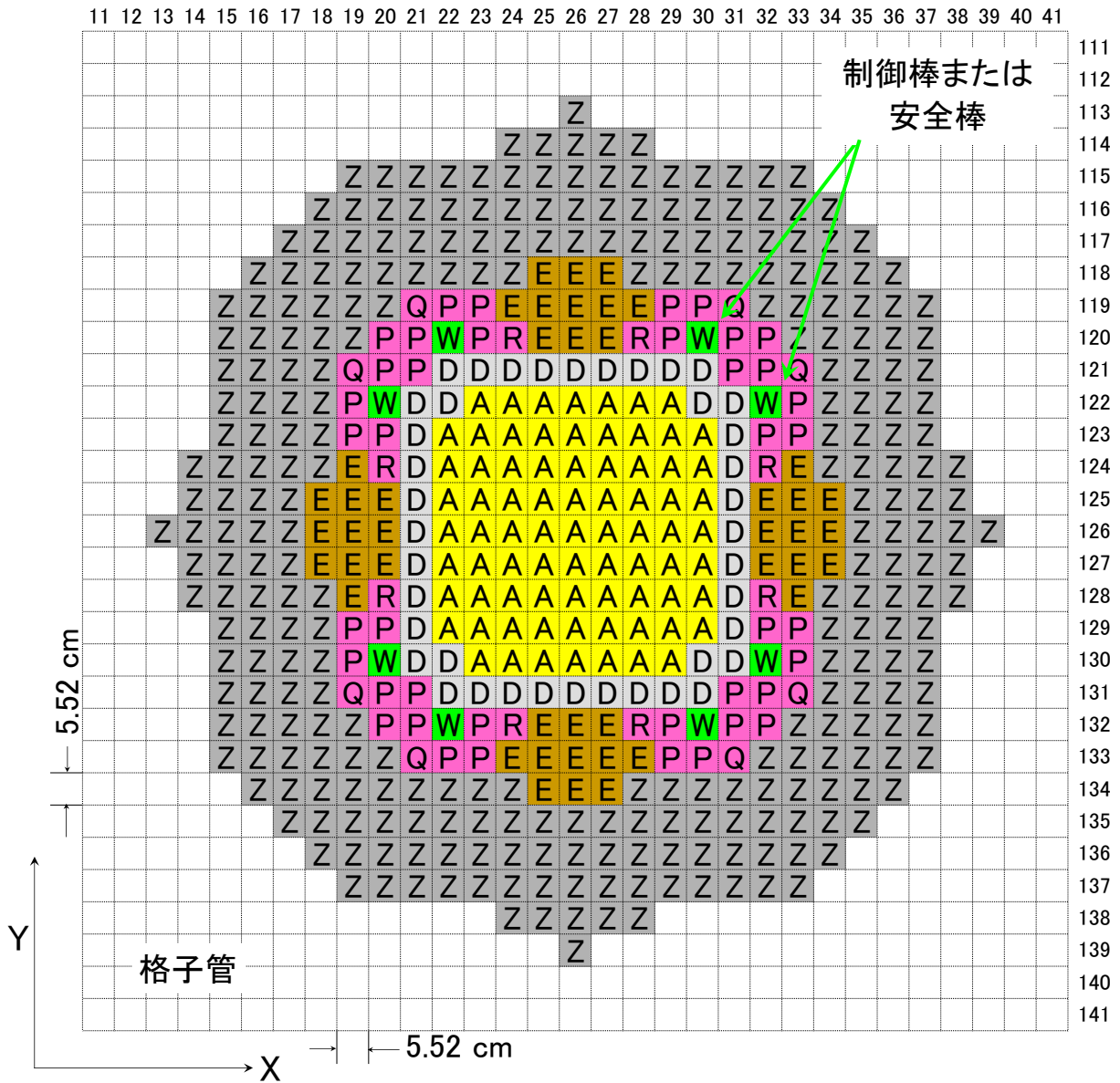
図 B.1 XIV-1 炉心 固定側集合体燃料引出し装荷図



装荷引出しと本数

A EU06A : 29	B EU06B : 28
C EU06C : 20	D SSB : 40
E EU06D : 52	P PuDA1 : 40
Q PuDA2 : 8	R PuDA3 : 24
S PuDA4 : 28	Z DUB : 288
W SCRA : 8	PuDA合計 100

図 B.2 XIV-1(45V) 炉心 固定側集合体燃料引出し装荷図



装荷引出しと本数

A EU05 :	77	Z SSB :	40
E EUDA :	44	P PuDA1 :	40
Q PuDA2 :	8	R PuDA3 :	8
Z DUB :	288	W SCRB :	8
		PuDA合計	56

図 B.3 XIV-2 炉心 固定側集合体燃料引出し装荷図

EU06A

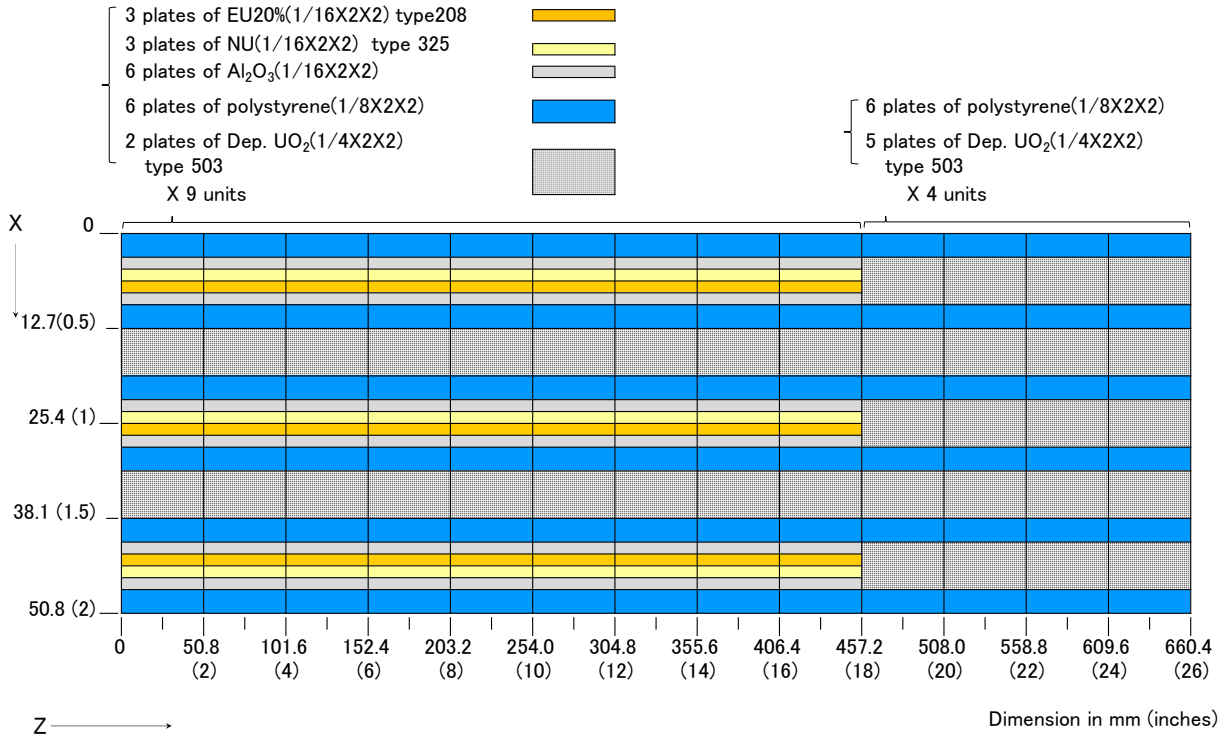


図 B.4 EU06A 引出し装填図

EU06B

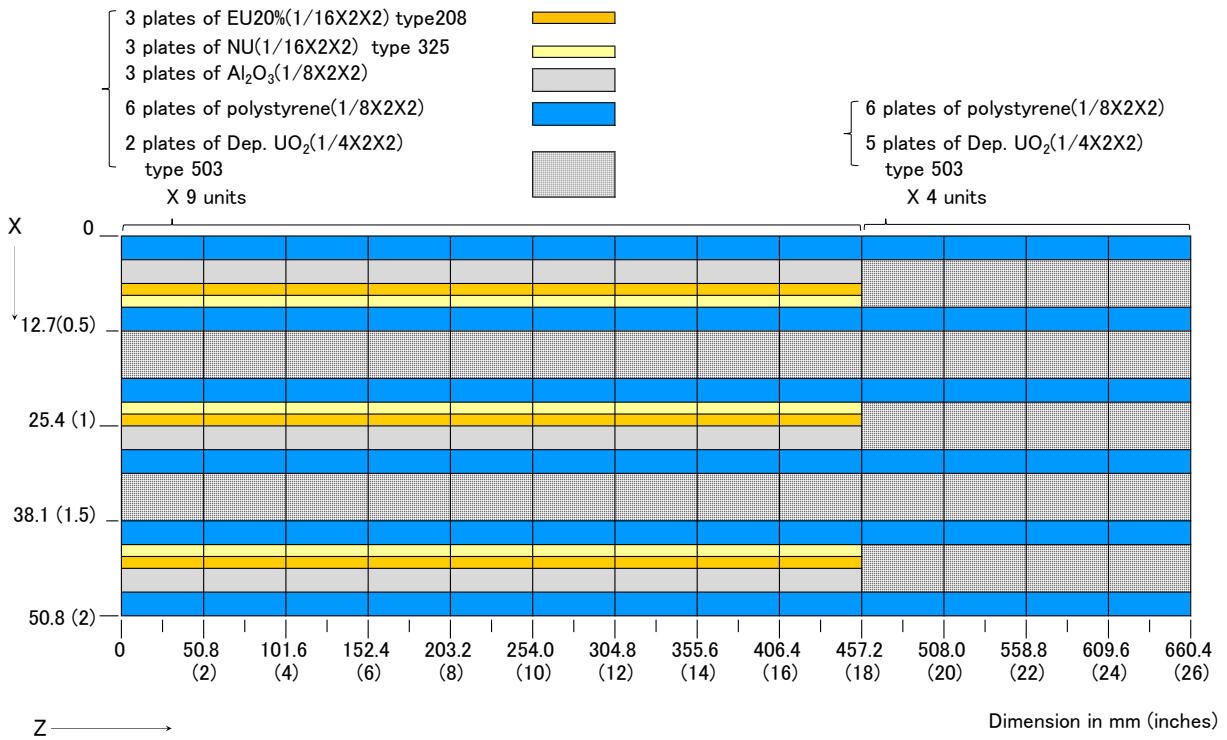


図 B.5 EU06B 引出し装填図

EU06C

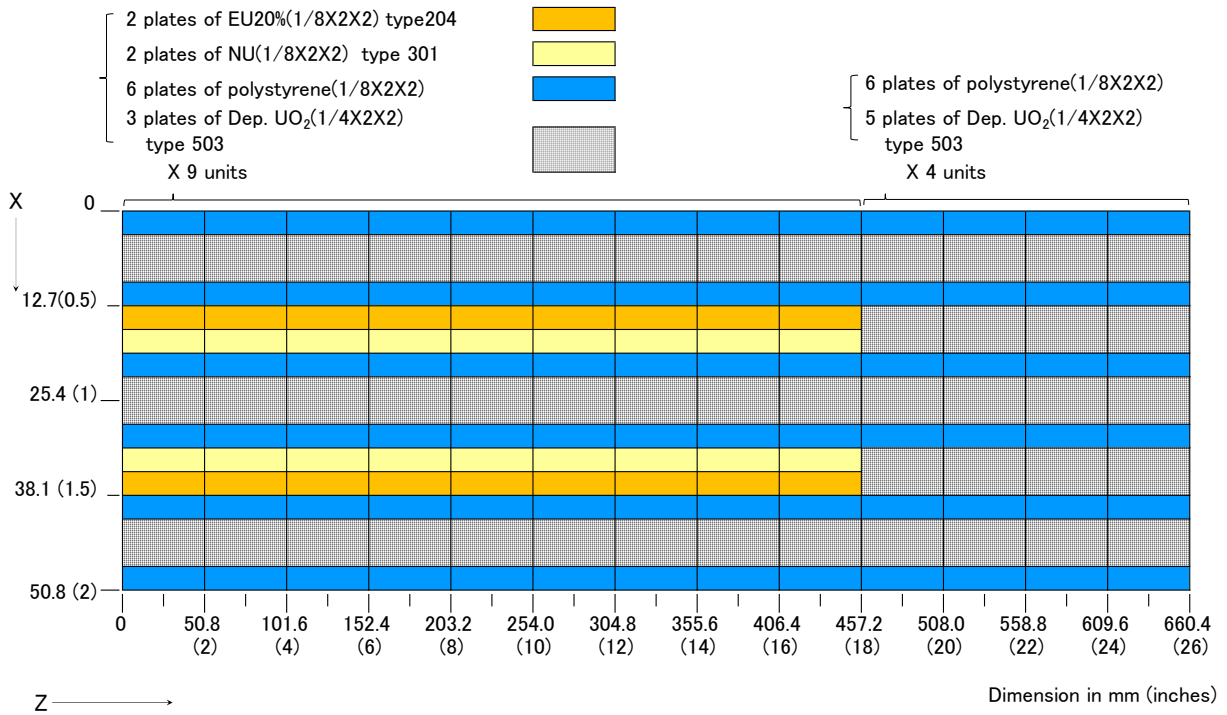


図 B.6 EU06C 引出し装填図

EU05

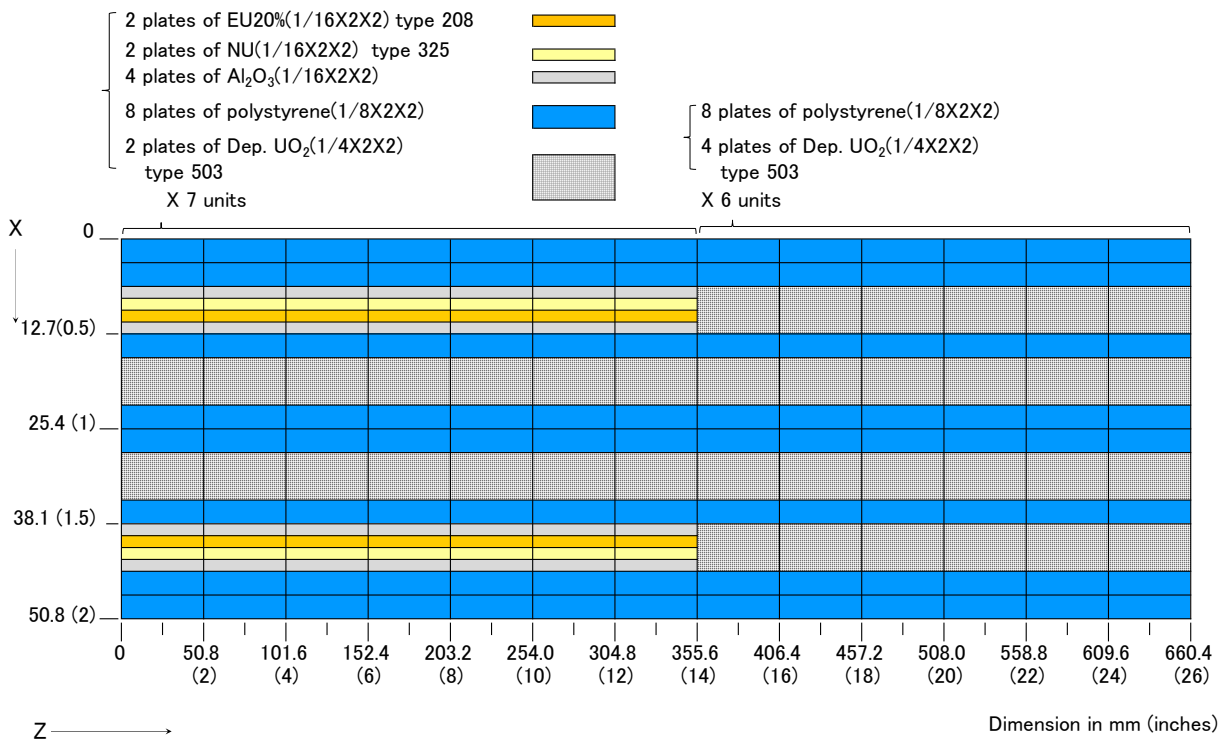


図 B.7 EU05 引出し装填図

EUDA

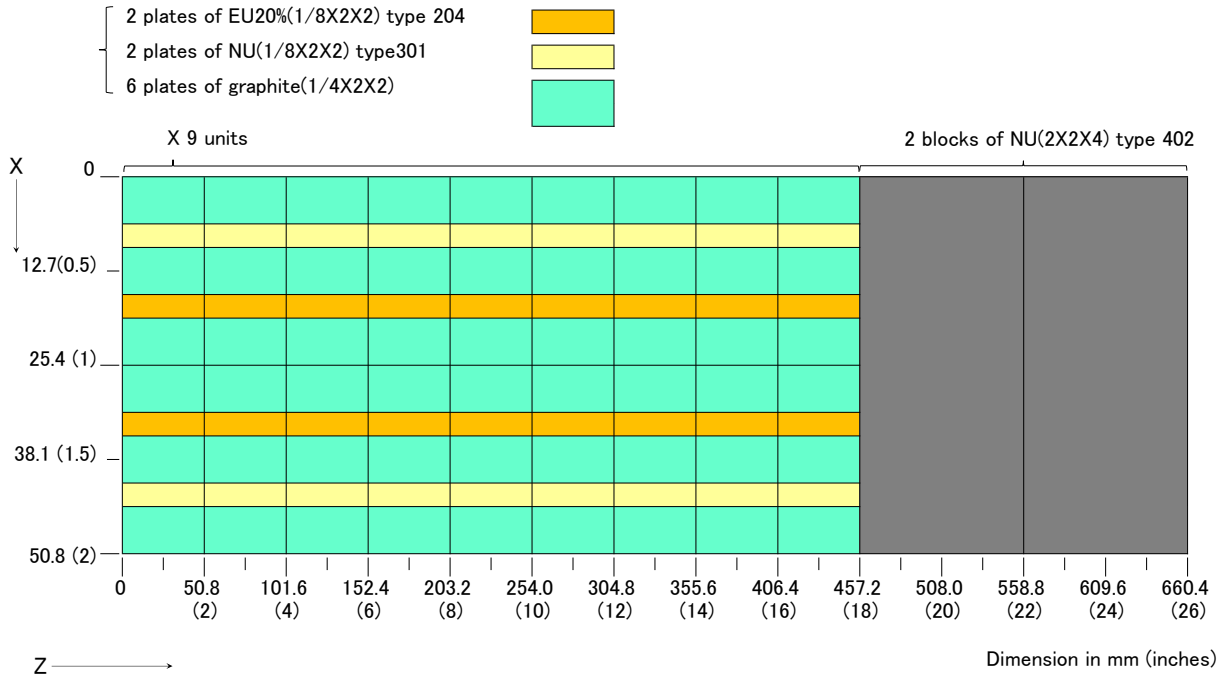


図 B.8 EUDA 引出し装填図

EUDC

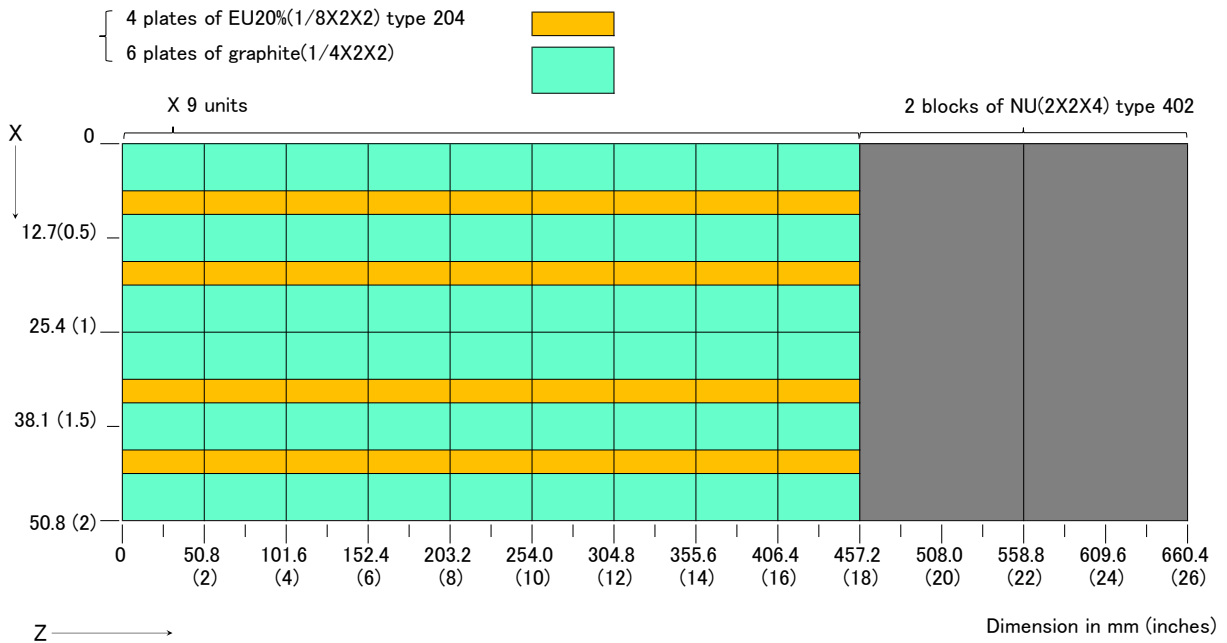


図 B.9 EUDC 引出し装填図

PuDA2

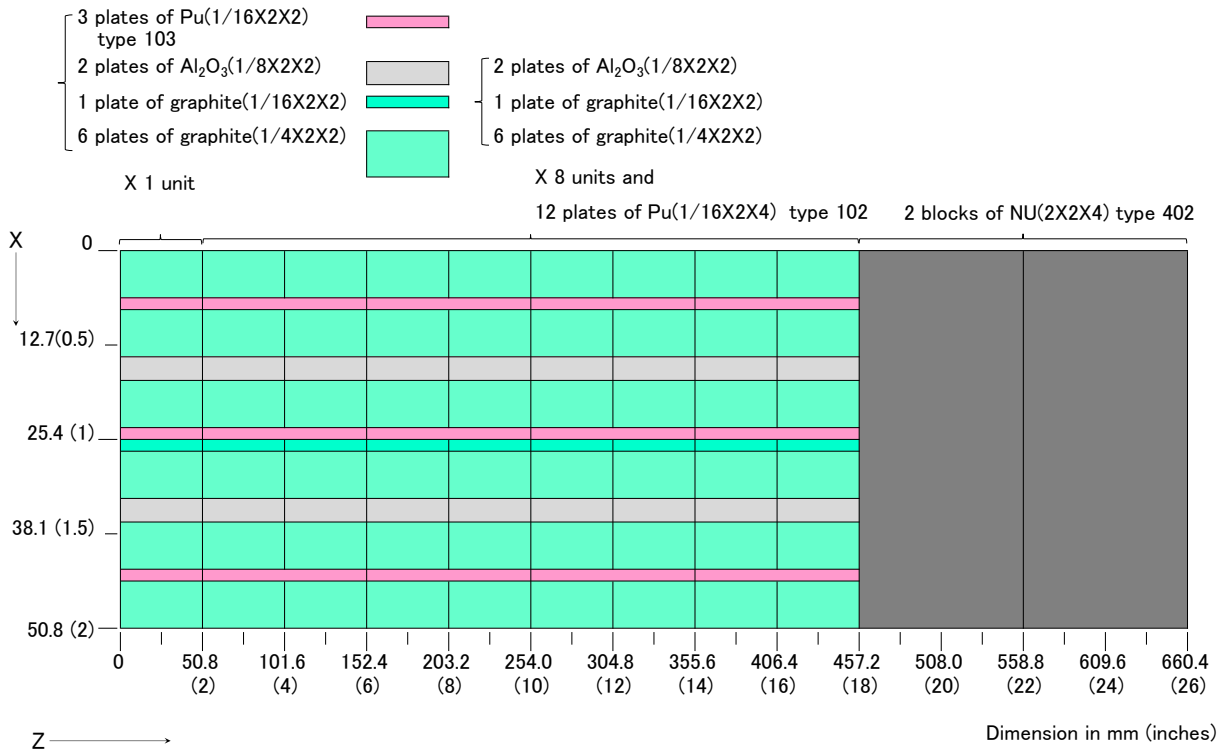


図 B.10 PuDA2 引出し装填図

PuDA3

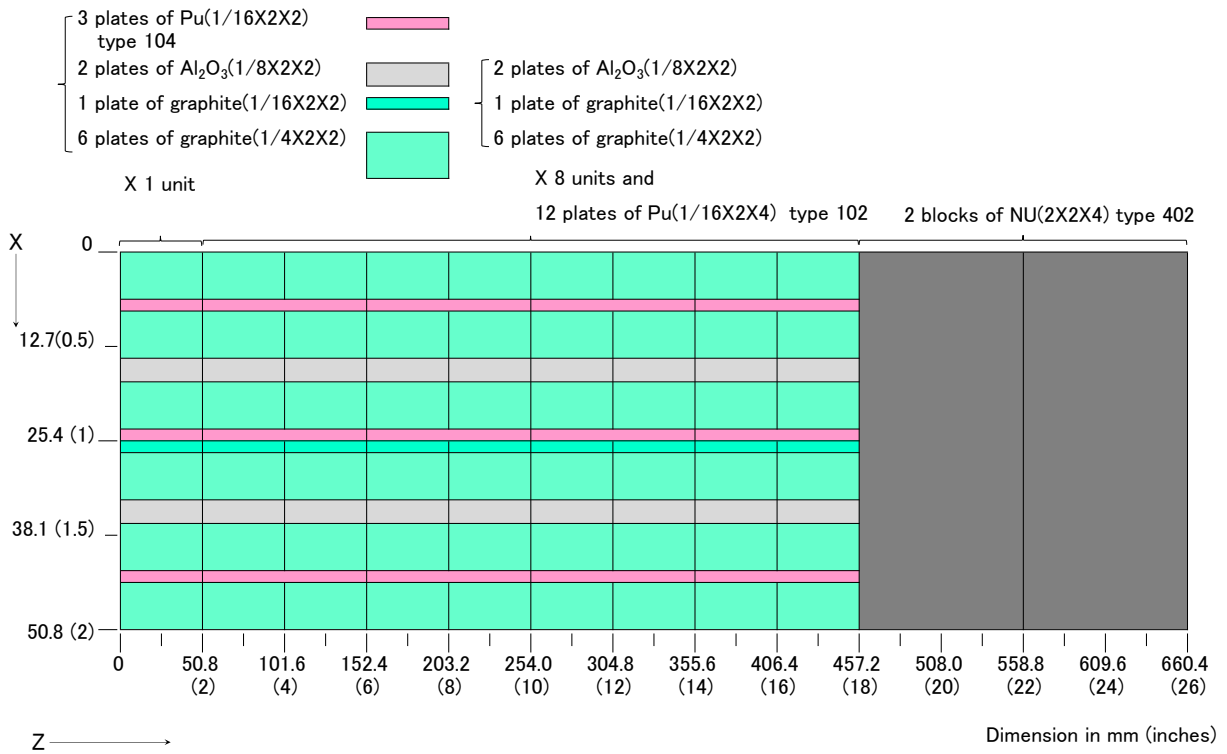


図 B.11 PuDA3 引出し装填図

PuDA4

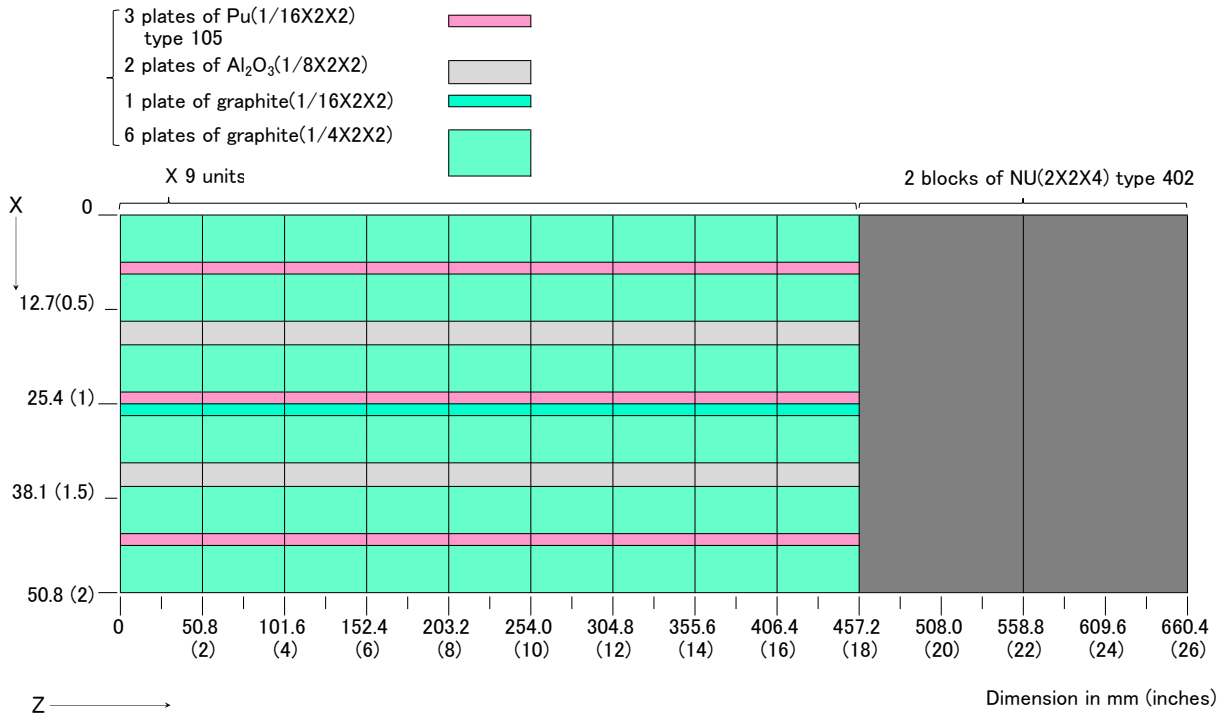


図 B.12 PuDA4 引出し装填図

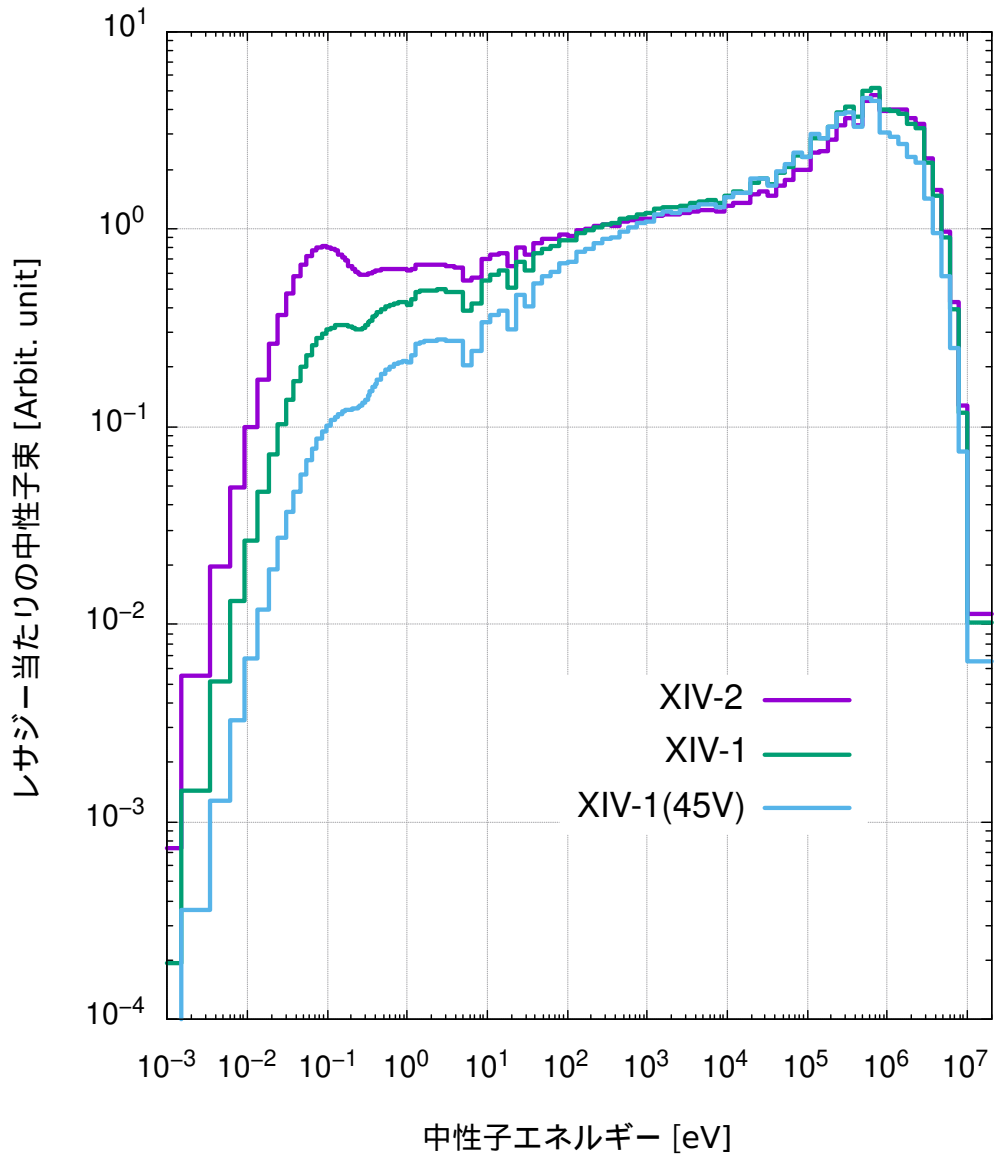


図 B.13 XIV 炉心系のテスト領域の中性子エネルギースペクトル

B.2 XIV-1 炉心の特性試験

B.2.1 制御棒校正曲線、温度係数と集合体密着面間隙係数の測定

制御棒校正は、臨界達成後間もない6月3日に、B.1節に記載した臨界到達時の片側集合体当たりのPuDA引出し装荷本数が67本の炉心で、安全棒SR#7の50mmから0mmへの挿入による反応度を基準反応度 $1\rho_0$ と定義して行った。しかし、校正実験中の炉心の温度変化が大きく適切な実験条件で行うことができなかった。

このため、再度、片側集合体当たりのPuDA引出し装荷本数が67本の炉心で、SR#7の25mmから0mmへの挿入による反応度を基準反応度 $1\rho_1$ と定義して、これを基に制御棒CR#1、CR#2の校正を行った。後に、正炉周期法によりこの $1\rho_1$ を $\% \Delta k/k$ 単位で求める。既に、 $1\rho_0$ の単位を使って公開されている実験データがあるため、後に、 $1\rho_0$ と $1\rho_1$ の換算係数を求め記載する。

原子炉出力レベルは核計装CH#6の電流値でモニターした。出力レベルの変動を拡大して観察できるように、CH#6には75%のバックングカレントをかけて $0.5 \times 10^{-8} \text{A}$ で一定とした。バックングカレントを用いなければ、CH#6の電流値は $0.2 \times 10^{-7} \text{A}$ レベルとなる。制御棒校正時の各ステップのSR#7やCR#1、CR#2の配置等のデータを表B.1に示す。

各ステップ間に要した時間は10分程度と短く、温度変化による反応度変化は小さい。集合体密着面間隙の変化による反応度変化は、温度変化によるものよりも小さい。しかしながら、これらの反応度変化を補正する必要がある。この補正のためには、反応度の温度係数と間隙係数が必要となるものの、これらの係数を求めるには制御棒の校正結果を用いる。

そこで、最初に、これらの補正を行わずに制御棒校正実験のデータ処理を行い制御棒校正曲線を算出し、これを基にして温度係数と間隙係数を求める。次に、これらを用いて温度変化や間隙変化による反応度変化の補正を行い、再度、制御棒校正実験のデータ処理を行う。さらに、この再度の処理の結果得た制御棒校正曲線を基にして温度係数と間隙係数を求めるという繰り返しの処理を行った。

まず、ステップ1から15のデータを用いて、CR#1の校正曲線を算出した。この制御棒の反応度値は、全挿入である0.72mm(ステップ1、2)を $0\rho_1$ として、SR#7との置換により、24.68mm(ステップ3、4)が $1\rho_1$ 、50.97mm(ステップ5、6)が $2\rho_1$ 、79.21mm(ステップ7、8)が $3\rho_1$ 、109.99mm(ステップ9、10)が $4\rho_1$ 、144.04mm(ステップ11、12)が $5\rho_1$ 、183.14mm(ステップ13、14)が $6\rho_1$ 、229.99mm(ステップ15)が $7\rho_1$ 、となる。これらはCR#1の先端の位置である。

0.72mmから順番に4点ずつのデータを3次式に当てはめ、これら4点の範囲をカバーする制御棒の校正曲線を、制御棒位置を x mm、その位置の制御棒値を $y\rho_1$ とする以下の3次式として求めた。

$$y = a \left(\frac{x}{100} \right)^3 + b \left(\frac{x}{100} \right)^2 + c \left(\frac{x}{100} \right) + d \quad (\text{B.1})$$

3次式の係数、a、b、c、dを表B.2に示す。任意の位置の制御棒反応度値は、この3次式で内挿して求める。3次式の係数の各セットの適用範囲もこの表に示す。これは、最小二乗法によるフィッティングではなくて3次式への当てはめなので、これに伴う不確かさは生じない。

表 B.1 XIV-1 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正前の制御棒校正曲線測定データ

ステップ	時刻 ^{Ⅰ)}	SR#7 位置 ^{Ⅱ)} [mm]	CR#1 位置 ^{Ⅱ)} [mm]	CR#2 位置 ^{Ⅱ)} [mm]	炉心温度 [°C]	密着面間隙 [mm]
1	13:48	0.00	0.72	262.74	17.88	-0.055
2	14:05	25.00 ^{Ⅲ)}	0.72	209.63	17.85	-0.055
3	14:15	0.00	24.68	209.63	17.83	-0.054
4	14:27	25.01	24.68	166.86	17.81	-0.054
5	14:33	0.00	50.97	166.86	17.79	-0.054
6	14:44	25.00	50.97	130.56	17.77	-0.054
7	14:52	0.00	79.21	130.56	17.75	-0.054
8	15:10	25.01	79.21	98.31	17.73	-0.054
9	15:29	0.00	109.99	98.31	17.70	-0.054
10	15:40	25.00	109.99	69.00	17.69	-0.054
11	15:47	0.00	144.04	69.00	17.68	-0.054
12	15:59	25.00	144.04	41.76	17.67	-0.054
13	16:09	0.00	183.14	41.76	17.66	-0.054
14	16:31	25.00	183.14	16.76	17.64	-0.054
15	16:42	0.00	229.99	16.76	17.62	-0.054
16	16:59	25.00	215.18	0.12	17.60	-0.054
17	17:06	0.00	271.70	0.12	17.60	-0.054
18 ^{Ⅳ)}	17:18	0.00	79.21	131.09	17.60	-0.054
19 ^{Ⅳ)}	17:38	49.99	79.21	71.19	17.59	-0.054

Ⅰ) 実験日 1986/10/7

Ⅱ) 先端の位置の表示

Ⅲ) 安全棒位置の表示の微小なずれのため 25.01 mm の場合もあった。

Ⅳ) $1 \rho_1$ と $1 \rho_0$ 換算のためのステップ

図 B.1 の径方向に対称な炉心から F119/20、F133/20、F133/32、M119/20、M133/20、M133/32 にて合計 6 本の DUB 引出しを 6 本の PuDA 引出しに置き換え、片側集合体当たりの PuDA 引出し装荷本数を 67 本とした炉心で校正実験を実施、核計装 CH#5 は 0.210×10^{-7} A、CH#6 は 75% バッキングカレントを掛けて 0.5×10^{-8} A レベル

同様に、CR#2 については、ステップ 1 から 17 のデータを用いて校正曲線を算出した。まず、全挿入である 0.12 mm (ステップ 17、16) を基準 $0 \rho_1$ とした。遡って、ステップ 15 と 14 で、CR#2 を 0.12 mm から 16.76 mm まで引き抜いた分の反応度値と補償するのは、SR#7 の $1 \rho_1$ 挿入分から CR#1 の 215.18mm から 229.99 mm までの引き抜き分の反応度値を差し引いたものとなる。後者は、上記の CR#1 の校正曲線の式より算出した結果、 $7.0\rho_1 - 6.70650\rho_1 = 0.2935\rho_1$ であった。したがって、CR#2 の 16.76 mm の反応度値は、 $1.0\rho_1 - 0.2935\rho_1 = 0.7065\rho_1$ となる。41.76 mm(ステップ 13 と 12) が $1.7065 \rho_1$ 、69.00 mm(ステップ

表 B.2 XIV-1 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正前の制御棒 CR#1 校正曲線

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]
				a	b	c	d	
0.72	24.68	50.97	79.21	0.32418	-0.98368	4.4031	-0.031652	0.72 ~ 50.97
24.68	50.97	79.21	109.99	-0.015761	-0.45726	4.1567	0.002220	50.97 ~ 79.21
50.97	79.21	109.99	144.04	0.014873	-0.53083	4.2129	-0.011384	79.21 ~ 109.99
79.21	109.99	144.04	183.14	-0.035865	-0.36175	4.0304	0.052289	109.99 ~ 144.04
109.99	144.04	183.14	229.99	0.021925	-0.61439	4.3908	-0.11539	144.04 ~ 229.99

表 B.3 XIV-1 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正前の制御棒 CR#2 校正曲線

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]
				a	b	c	d	
0.12	16.76	41.76	69.00	-0.057152	-0.55677	4.3414	-0.0052089	0.12 ~ 41.76
16.76	41.76	69.00	98.31	0.2099	-0.89731	4.4679	-0.018106	41.76 ~ 69.00
41.76	69.00	98.31	130.56	-0.052671	-0.34835	4.1064	0.056274	69.00 ~ 98.31
69.00	98.31	130.56	166.86	0.0005845	-0.50699	4.2588	0.0091087	98.31 ~ 130.56
98.31	130.56	166.86	209.63	-0.020095	-0.42515	4.1533	0.053398	130.56 ~ 166.86
130.56	166.86	209.63	262.74	0.039553	-0.72760	4.6551	-0.21900	166.86 ~ 262.74

11 と 10) が 2.7065 ρ_1 、98.31 mm(ステップ 9 と 8) が 3.7065 ρ_1 、130.56 mm(ステップ 7 と 6) が 4.7065 ρ_1 、166.86 mm(ステップ 5 と 4) が 5.7065 ρ_1 、209.63 mm(ステップ 3 と 2) が 6.7065 ρ_1 、262.74 mm(ステップ 1) が 7.7065 ρ_1 となる。CR#1 と同様に、0.12 mm から遡って順番に 4 点ずつのデータを 3 次式に当てはめ、その係数、a、b、c、d を表 B.3 に示す。

基準反応度の安全棒の挿入距離が同じであることから、これら制御棒校正の不確かさの考え方は XV-2(45V) 炉心と同様である。

温度係数と集合体密着面間隙係数は、表 B.4 のように、温度と間隙をそれぞれ大きく変化させた 2 つの臨界データから測定した。しかし、間隙を全く変化させずに温度を変えたり、その逆を行うことはできなかった。そこで、反応度は温度変化と間隙変化について互いに独立に変化するとして、温度係数を $f_T \rho_0 / ^\circ\text{C}$ と間隙係数を $f_G \rho_0 / \text{mm}$ とすると、各係数の測定のための各セットの臨界データ間の差から、連立方程式

$$-0.9085(\pm 0.0084) = 6.89(\pm 0.14) \times f_T + 0.038(\pm 0.028) \times f_G \quad (\text{B.2})$$

$$-0.4972(\pm 0.0033) = 0.20(\pm 0.014) \times f_T + 0.700(\pm 0.028) \times f_G \quad (\text{B.3})$$

を立てることができる。ともに、左辺は各セットの臨界データ間の 2 本の制御棒 CR の反応度値の合計の差、右辺第 1 項は温度係数に温度差を乗じたもので、同第 2 項は間隙係数に間隙の差を乗じたものである。反応度

の差、温度差や間隙の差の不確かさは () 内に示す。これら不確かさの評価については以下に記述する。

表 B.4 XIV-1 炉心における温度係数と間隙係数の測定データ (温度変化と間隙変化による反応度変化補正前の制御棒校正曲線を使用)

測定項目	実験日 ¹⁾	CR#1		CR#2		CR 2 本	温度	間隙
	Run No.	位置 [mm]	反応度値 [ρ_1]	位置 [mm]	反応度値 [ρ_1]	反応度値 合計 [ρ_1]	[°C]	[mm]
温度係数	5/30 No.6	100.05	3.6872	84.25	3.2371	6.9243	26.65	0.003
	6/3 No.19	100.04	3.6868	112.07	4.1460	7.8328	19.76	-0.035
	差		0.0004		-0.9089	-0.9085	6.89	0.038
間隙係数	6/4 No.7	100.01	3.6859	95.41	3.6113	7.2972	20.24	0.664
	6/4 No.10	100.01	3.6859	110.87	4.1085	7.7944	20.04	-0.036
	差				-0.4972	-0.4972	0.20	0.700

¹⁾ いずれも 1986 年

いずれも、図 B.1 の径方向に対称な炉心から F119/20、F133/20、F133/32、M119/20、M133/20、M133/32 にて合計 6 本の DUB 引出しを 6 本の PuDA 引出しに置き換え、片側集合体当たりの PuDA 引出し装荷本数を 67 本とした炉心で実験実施、核計装 CH#6 は 0.5×10^{-7} A レベル

温度係数を測定する 2 つの Run では集合体を分離、密着させて全ての CR と安全棒 SR を動かした。このため、2 つの Run の間の反応度の差の不確かさは、CR と SR の位置再現性と CR の校正の不確かさから求めた。まず、同じ位置に戻したものの、2 つの Run の間で動かした合計 7 組の CR と SR の移動前後の位置再現性による反応度の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 \times 7} = \pm 0.0075 \rho_1$$

である。次に、2 つの Run の間の反応度の差を補償する CR#2 の移動前後の位置 84.25 mm と 112.07 mm の間には、制御棒校正ステップ 8、9 の 98.31 mm がある。したがって、84.25 mm から 112.07 mm の反応度値の不確かさは、84.25 mm から 98.31 mm と 98.31 mm から 112.07 mm の 2 つの区間の反応度値に分けて考える必要がある。両区間の反応度値は、校正結果よりそれぞれ $0.4694 \rho_1$ と $0.4395 \rho_1$ であり、これらはいずれも、その区間が属する校正ステップ間の校正の不確かさ $\pm 0.4\%$ を伴う。すなわち、84.25 mm から 112.07 mm の反応度値は、両区間の反応度値の合計である $0.9089 \rho_1$ であり、校正の不確かさによるこの合計の不確かさは、両区間の反応度値の不確かさを合わせて

$$\pm\sqrt{(0.4694 \times 0.004)^2 + (0.4395 \times 0.004)^2} = \pm 0.0026 \rho_1$$

となる。さらに、CR#2 の移動前後の両端、84.25 mm と 112.07 mm での位置再現性の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.002^2 \times 2} = \pm 0.0028 \rho_1$$

である。したがって、2 つの Run の間で 2 本の CR の反応度の差の合計である $0.9085 \rho_1$ の不確かさは、これらを合わせて

$$\pm\sqrt{0.0075^2 + 0.0026^2 + 0.0028^2} = \pm 0.0084\rho_1$$

となる。

間隙係数の測定では、CR#2のみ動かして、CR#1と6組のSRは2つのRunの間で動かさなかった。したがって、2つのRunの間の反応度の差の不確かさは、CR#2の95.41 mmから110.87 mmへの移動前後の位置再現性と校正の不確かさのみから求めた。これら移動前後の位置の間にも、制御棒校正ステップ8、9の98.31 mmがあり、95.41 mmから98.31 mmと98.31 mmから110.87 mmの2つの区間の反応度値はそれぞれ0.0952 ρ_1 と0.4020 ρ_1 なので、2つのRunの間の反応度差の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 + (0.0952 \times 0.004)^2 + (0.4020 \times 0.004)^2} = \pm 0.0033\rho_1$$

となる。

温度差の不確かさは、温度係数の測定では集合体の分離と密着を行ったため $\pm\sqrt{0.1^2 \times 2} = \pm 0.14^\circ\text{C}$ である。間隙係数の測定では集合体を分離したものの分離の距離は数 mmと僅かで、温度の時間変化は密着を保ったまま測定を行う場合と同じであったことから $\pm\sqrt{0.01^2 \times 2} = \pm 0.014^\circ\text{C}$ である。

間隙の差の不確かさは、いずれの測定も集合体の分離と密着を行ったため、 $\pm\sqrt{0.02^2 \times 2} = \pm 0.028$ mmである。

これらを f_T と f_G について解くと、温度係数と間隙係数は

$$\begin{aligned} f_T &= \frac{-0.9085(\pm 0.0084) \times 0.700(\pm 0.028) + 0.4972(\pm 0.0033) \times 0.038(\pm 0.028)}{6.89(\pm 0.14) \times 0.700(\pm 0.028) - 0.20(\pm 0.014) \times 0.038(\pm 0.028)} \\ &= -0.1281 \rho_1 / ^\circ\text{C} \pm 6.6\% \end{aligned} \quad (\text{B.4})$$

$$\begin{aligned} f_G &= \frac{6.89(\pm 0.14) \times 0.4972(\pm 0.0033) - 0.20(\pm 0.014) \times 0.9085(\pm 0.0084)}{-6.89(\pm 0.14) \times 0.700(\pm 0.028) + 0.20(\pm 0.014) \times 0.038(\pm 0.028)} \\ &= -0.674 \rho_1 / \text{mm} \pm 5.0\% \end{aligned} \quad (\text{B.5})$$

となる。

CR#1に関して、校正の実験結果に温度変化や間隙変化に伴う反応度変化の補正を行った結果を表B.5に示す。間隙はステップ2、3間でのみ変化し、間隙変化の補正はこれらステップ間でのみ必要であった。この補正後の反応度値を用いたCR#1の校正曲線の係数a、b、c、dを表B.6に示す。

CR#2に関して、校正の実験結果に温度変化や間隙変化に伴う反応度変化分の補正を行った結果を表B.7に示す。間隙は該当のステップ間では変化せず、その変化による補正は不要であった。ここで、全挿入である0.12 mm（ステップ17、16）を基準0 ρ_1 とし、遡って、ステップ15、14で、CR#2を0.12 mmから16.76 mmまで引き抜いた分の反応度値と補償するのは、温度変化分の補正を考えなければ、SR#7の1 ρ_1 挿入分からCR#1の215.18 mmから229.99 mmまでの引き抜き分の反応度値を差し引いたものとなる。後者は、上記のCR#1の補正済みの校正曲線の式より算出した結果、 $7.0161\rho_1 - 6.7216\rho_1 = 0.2945\rho_1$ であった。したがって、表B.7に示すCR#2の16.76 mmの温度変化分補正前の反応度値は、 $1.0\rho_1 - 0.2945\rho_1 = 0.7055\rho_1$ となる。この補正後の反応度値を用いたCR#2の校正曲線の係数a、b、c、dを表B.8に示す。

表 B.5 XIV-1 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正後の制御棒 CR#1 校正曲線測定データ

ステップ	制御棒位置 [mm]	補正前反応度値 [ρ_1]	補正量		補正後反応度値 ¹⁾ [ρ_1]
			温度変化分 [ρ_1]	間隙変化分 [ρ_1]	
1,2	0.72	0.0	-	-	0.0
3,4	24.68	1.0	0.0026 ²⁾	-0.0007 ³⁾	1.0019
5,6	50.97	2.0	0.0026		2.0045
7,8	79.21	3.0	0.0026		3.0071
9,10	109.99	4.0	0.0038 ⁴⁾		4.0109
11,12	144.04	5.0	0.0013 ⁵⁾		5.0122
13,14	183.14	6.0	0.0013		6.0135
15	229.99	7.0	0.0026		7.0161

1) 現ステップの補正量とともに、前ステップまでの補正量をすべて加える。

2) 温度 -0.02°C の変化による反応度変化

3) 間隙 $+0.001\text{ mm}$ の変化による反応度変化

4) 温度 -0.03°C の変化による反応度変化

5) 温度 -0.01°C の変化による反応度変化

表 B.6 XIV-1 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正済みの制御棒 CR#1 校正曲線

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]
				a	b	c	d	
0.72	24.68	50.97	79.21	0.31761	-0.97477	4.4092	-0.031696	0.72 ~ 50.97
24.68	50.97	79.21	109.99	-0.0080590	-0.47044	4.1731	0.00075435	50.97 ~ 79.21
50.97	79.21	109.99	144.04	-0.0049746	-0.47784	4.1788	-0.00061536	79.21 ~ 109.99
79.21	109.99	144.04	183.14	-0.023857	-0.41492	4.1109	0.023080	109.99 ~ 144.04
109.99	144.04	183.14	229.99	0.024643	-0.62695	4.4133	-0.11764	144.04 ~ 229.99

ステップ間で最大で 0.03°C の温度変化がある。密着のまま一連の測定を行ったため、この温度変化の不確かさは $\pm\sqrt{0.01^2 \times 2} = \pm 0.014^{\circ}\text{C}$ である。温度係数を用いて温度変化による反応度値への補正量の不確かさを算出すると、温度変化が 0.03°C の時でも

$$\pm\sqrt{(-0.1281 \times 0.014)^2 + (0.03 \times (-0.1281) \times 0.066)^2} = \pm 0.0018\rho_1$$

である。ここで、温度変化が小さいため平方根内第 2 項の温度係数の不確かさ $\pm 6.6\%$ の寄与は小さく無視し得る。集合体の密着を保つ場合、仮に温度変化が無くても温度測定に $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ の不確かさが有ることから

$$\pm\sqrt{0.01^2 \times 2} \times (-0.1281) = \pm 0.0018\rho_1 \text{ の不確かさが生じる。}$$

表 B.7 XIV-1 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正後の制御棒 CR#2 校正曲線測定データ

ステップ	制御棒位置 [mm]	補正前反応度価値 [ρ_1]	補正量		補正後反応度価値 ¹⁾ [ρ_1]
			温度変化分 [ρ_1]	間隙変化分 [ρ_1]	
17,16	0.12	0.0	-	-	0.0
15,14	16.76	0.7055	-0.0026 ²⁾		0.7029
13,12	41.76	1.7055	-0.0026		1.7003
11,10	69.00	2.7055	-0.0013 ³⁾		2.6990
9.8	98.31	3.7055	-0.0013		3.6977
7,6	130.56	4.7055	-0.0026		4.6951
5,4	166.86	5.7055	-0.0026		5.6925
3,2	209.63	6.7055	-0.0026		6.6899
1	262.74	7.7055	-0.0038 ⁴⁾		7.6861

1) 現ステップの補正量とともに、前ステップまでの補正量をすべて加える。

2) 温度 +0.02°C の変化による反応度変化

3) 温度 +0.01°C の変化による反応度変化

4) 温度 +0.03°C の変化による反応度変化

表 B.8 XIV-1 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正済みの制御棒 CR#2 校正曲線

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]
				a	b	c	d	
0.12	16.76	41.76	69.00	-0.080682	-0.51599	4.3135	-0.0051755	0.12 ~ 41.76
16.76	41.76	69.00	98.31	0.19742	-0.87063	4.4453	-0.018606	41.76 ~ 69.00
41.76	69.00	98.31	130.56	-0.059977	-0.33248	4.0909	0.054308	69.00 ~ 98.31
69.00	98.31	130.56	166.86	0.0079455	-0.53481	4.2853	-0.0058464	98.31 ~ 130.56
98.31	130.56	166.86	209.63	-0.020042	-0.42405	4.1425	0.054096	130.56 ~ 166.86
130.56	166.86	209.63	262.74	0.037667	-0.71666	4.6280	-0.20945	166.86 ~ 262.74

次に、ほとんどのステップ間で間隙の変化は 0.001 mm かこれより小さい。密着のまま一連の測定を行ったため、ステップ間で間隙測定の不確かさは $\pm\sqrt{0.001^2 \times 2} = \pm 0.0014$ mm である。間隙係数を用いて、この不確かさによる反応度価値への補正量の不確かさを算出すると、間隙変化が 0.001 mm のときに

$$\pm\sqrt{(-0.674 \times 0.0014)^2 + (0.001 \times (-0.674) \times 0.050)^2} = \pm 0.0009\rho_1$$

となる。ここで、間隙変化が僅かであるため平方根内第 2 項の間隙係数の不確かさ $\pm 5.0\%$ の寄与は小さく無視し得る。集合体の密着を保ったままで、仮に間隙変化が無くても間隙測定に ± 0.001 mm の不確かさが有ることから、 $\pm\sqrt{0.001^2 \times 2} \times (-0.674) = \pm 0.0009\rho_1$ の不確かさが生じる。

表 B.9 XIV-1 炉心における温度係数と間隙係数の測定データ (温度変化と間隙変化による反応度変化補正後の制御棒校正曲線を使用)

測定項目	実験日 ¹⁾	CR#1		CR#2		CR 2 本	温度 [°C]	間隙 [mm]
	Run No.	位置 [mm]	反応度価値 [ρ_1]	位置 [mm]	反応度価値 [ρ_1]	反応度価値 合計 [ρ_1]		
温度係数	5/30 No.6	100.05	3.6969	84.25	3.2290	6.9259	26.65	0.003
	6/3 No.19	100.04	3.6966	112.07	4.1362	7.8328	19.76	-0.035
	差				-0.9072	-0.9069	6.89	0.038
間隙係数	6/4 No.7	100.01	3.6956	95.41	3.6026	7.2982	20.24	0.664
	6/4 No.10	100.01	3.6956	110.87	4.0987	7.7943	20.04	-0.036
	差				-0.4961	-0.4961	0.20	0.700

¹⁾ いずれも 1986 年

いずれも、図 B.1 の径方向に対称な炉心から F119/20、F133/20、F133/32、M119/20、M133/20、M133/32 にて合計 6 本の DUB 引出しを 6 本の PuDA 引出しに置き換え、片側集合体当たりの PuDA 引出し装荷本数を 67 本とした炉心で実験実施、核計装 CH#6 は 0.5×10^{-7} A レベル

すなわち、ステップ間で温度や間隙の変化が無いか僅かであっても、温度や間隙の測定の不確かさにより $1 \rho_1$ に補正を行った後の反応度価値の不確かさは、これまでの SR#7 の 25 mm 移動時の両端での位置再現性に伴う不確かさの他に、温度や間隙の測定による不確かさも合わせて $\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 + 0.0018^2 + 0.0009^2} = \pm 0.0035 \rho_1$ ($\pm 0.35\%$) となる。したがって、CR#1 や CR#2 のステップ間の移動時の位置再現性による不確かさ $\pm 0.28\%$ も合わせて、補正後の制御棒校正の不確かさは $\pm\sqrt{0.35^2 + 0.28^2} = \pm 0.45\%$ となる。

温度係数と間隙係数の測定時の反応度の差をこれらの補正後の制御棒校正曲線を用いて求めた結果を表 B.9 に示す。温度と間隙のデータは表 B.4 と同じである。制御棒校正曲線を変更しても反応度の差は $0.001 \rho_1$ だけ変化するに過ぎず、この変化は $1 \rho_1$ のオーダーの反応度の差と比べて僅かであった。補正後の制御棒校正の不確かさが補正前に比べて少し大きくなり $\pm 0.45\%$ となったため、温度係数と間隙係数の測定いずれにおいても、反応度の差の不確かさは $0.0001 \rho_1$ 大きくなり、これも反映して温度係数と間隙係数の新たな値と不確かさは

$$f_T = \frac{-0.9069(\pm 0.0085) \times 0.700(\pm 0.028) + 0.4961(\pm 0.0034) \times 0.038(\pm 0.028)}{6.89(\pm 0.14) \times 0.700(\pm 0.028) - 0.20(\pm 0.014) \times 0.038(\pm 0.028)}$$

$$= -0.1279 \rho_1 / ^\circ\text{C} \pm 6.6\% \quad (\text{B.6})$$

$$f_G = \frac{6.89(\pm 0.14) \times 0.4961(\pm 0.0034) - 0.20(\pm 0.014) \times 0.9069(\pm 0.0085)}{-6.89(\pm 0.14) \times 0.700(\pm 0.028) + 0.20(\pm 0.014) \times 0.038(\pm 0.028)}$$

$$= -0.672 \rho_1 / \text{mm} \pm 5.0\% \quad (\text{B.7})$$

となる。

これらの新たな温度係数と間隙係数は、補正前の制御棒校正曲線を用いた値から、それぞれ、0.15%と0.3%の相違に過ぎず、係数の不確かさは変わらない。

制御棒校正実験において、主として温度変化による反応度価値への補正は、表 B.5 や表 B.7 から積算しても $0.017 \rho_1$ 未満と小さなため、温度係数と間隙係数をこれらの新たな値に変更しても、温度変化や間隙変化による補正量への影響は無視し得るほど小さい。すなわち、 $0.017 \rho_1$ 未満の補正量が 0.15% 変化するに過ぎず無視し得る。したがって、最終的に、温度変化と間隙変化による反応度変化補正済みの制御棒校正曲線である表 B.6、表 B.8 と上記の新たな温度係数と間隙係数を採用する。

FCA では、通常、安全棒 SR#7 の 50 mm から 0 mm への挿入による反応度を基準 $1 \rho_0$ とする。表 B.1 の制御棒校正実験のステップ 18、19 において、 $1 \rho_1$ から $1 \rho_0$ への換算を行った。SR#7 をステップ 18 の 0.00 mm からステップ 19 の 49.99 mm まで引き抜くことにより、炉心に $-1\rho_0$ の反応度を加えて、これと補償するのは、CR#2 をステップ 18 の 131.09 mm からステップ 19 の 71.19 mm まで挿入することによる 59.90 mm 分の反応度価値である $4.7106\rho_1 - 2.7764\rho_1 = 1.9342\rho_1$ とステップ 18 から 19 への炉心温度変化 -0.01°C による反応度変化 $+0.0013\rho_1$ の和 $+1.9355\rho_1$ である。このように温度変化の補正は 0.1% に満たない小さなものであった。

すなわち、 $1\rho_0$ は $1.9355\rho_1$ と等価で、逆に、 $1\rho_1$ は $0.5167\rho_0$ と等価となる。したがって、 ρ_0 単位では、 ρ_1 単位の制御棒校正曲線の 3 次式の係数 a、b、c、d、温度係数 f_T と間隙係数 f_G を全て $0.5167 \pm 0.38\%$ 倍すれば良い。この不確かさ $\pm 0.38\%$ は、CR#2 の 131.09 mm から 71.19 mm の移動による ρ_1 単位の反応度価値の不確かさと、SR#7 の 0.00 mm から 49.99 mm の移動による $1 \rho_0$ の不確かさから以下のように評価した

前者では、CR#2 の 131.09 mm から 71.19 mm の間にステップ 7、6 と同 9、8 の 130.56 mm と 98.31 mm が位置する。校正時に、温度変化による反応度変化 $-0.0026 \rho_1$ を補正した後のこれらステップ間の反応度価値 $0.9974 \rho_1$ の不確かさは、既に記述したように $\pm 0.0035 \rho_1$ である。次に、校正時の CR#2 のステップ間の移動の両端での位置再現性による不確かさは $\pm\sqrt{0.002^2 \times 2} \rho_1$ である。さらに、CR#2 の 71.19 mm から 98.31 mm と 130.56 mm から 131.09 mm の反応度価値は、それぞれ、 $0.9213 \rho_1$ と $0.0155 \rho_1$ であり、校正の不確かさ $\pm 0.45\%$ によるこれらの反応度価値の不確かさは合わせて $\pm\sqrt{(0.9213 \times 0.0045)^2 + (0.0155 \times 0.0045)^2} \rho_1$ である。これら 3 つの要素が制御棒校正に伴う不確かさである。

これらに、CR#2 の 131.09 mm から 71.19 mm への移動の両端での位置再現性による不確かさ $\pm\sqrt{0.002^2 \times 2} \rho_1$ 、温度測定と間隙測定に伴う不確かさ $\pm 0.0018 \rho_1$ と $\pm 0.0009 \rho_1$ を合わせて、CR#2 の移動による反応度価値 $1.9342 \rho_1$ の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.0035^2 + 0.002^2 \times 2 + (0.9213 \times 0.0045)^2 + (0.0155 \times 0.0045)^2 + 0.002^2 \times 2 + 0.0018^2 + 0.0009^2}$$

$$= \pm 0.0070 \rho_1 (\pm 0.36\%) \text{ となる。}$$

後者は、SR#7 の 0.00 mm から 49.99 mm への移動の両端の位置再現性による不確かさより $\pm\sqrt{0.05^2 \times 2}/49.99 = \pm 0.14\%$ である。

両者を合わせて $\pm\sqrt{0.36^2 + 0.14^2} = \pm 0.39\%$ が ρ_1 から ρ_0 単位への変換ファクターの不確かさとなる。

表 B.10 XIV-1 炉心における ρ_0 単位の制御棒 CR#1 校正曲線 (温度変化と間隙変化による反応度変化補正済み)

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]
				a	b	c	d	
0.72	24.68	50.97	79.21	0.16411	-0.50366	2.2782	-0.016377	0.72 ~ 50.97
24.68	50.97	79.21	109.99	-0.0041641	-0.24307	2.1562	0.0003898	50.97 ~ 79.21
50.97	79.21	109.99	144.04	-0.0025704	-0.24690	2.1592	-0.00031796	79.21 ~ 109.99
79.21	109.99	144.04	183.14	-0.012327	-0.21439	2.1241	0.011926	109.99 ~ 144.04
109.99	144.04	183.14	229.99	0.012733	-0.32394	2.2804	-0.060786	144.04 ~ 229.99

表 B.11 XIV-1 炉心における ρ_0 単位の制御棒 CR#2 校正曲線 (温度変化と間隙変化による反応度変化補正済み)

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]
				a	b	c	d	
0.12	16.76	41.76	69.00	-0.041689	-0.26661	2.2288	-0.0026742	0.12 ~ 41.76
16.76	41.76	69.00	98.31	0.10201	-0.44985	2.2969	-0.0096137	41.76 ~ 69.00
41.76	69.00	98.31	130.56	-0.030990	-0.17180	2.1138	0.0280612	69.00 ~ 98.31
69.00	98.31	130.56	166.86	0.0041054	-0.27633	2.2142	-0.0030208	98.31 ~ 130.56
98.31	130.56	166.86	209.63	-0.010356	-0.21911	2.1404	0.027951	130.56 ~ 166.86
130.56	166.86	209.63	262.74	0.019463	-0.3703	2.3913	-0.10823	166.86 ~ 262.74

参考のため、 ρ_0 単位の制御棒の校正曲線の 3 次式の係数を表 B.10 と表 B.11 に示す。この ρ_0 単位の制御棒校正の不確かさは、元の ρ_1 単位の同校正の不確かさ $\pm 0.45\%$ と、 ρ_1 単位から ρ_0 単位への変換ファクターの不確かさ $\pm 0.39\%$ を合わせて $\pm 0.60\%$ となる。

さらに、 ρ_0 単位の温度係数と間隙係数は、それぞれ

$$f_T = -0.06609 \rho_0 / ^\circ\text{C} \pm 6.6\% \quad (\text{B.8})$$

$$f_G = -0.3472 \rho_0 / \text{mm} \pm 5.0\% \quad (\text{B.9})$$

となる。ここで、 ρ_1 単位の f_T と f_G の不確かさが、このように ± 5 から $\pm 7\%$ と大きいため、これと比べて単位変換ファクターの不確かさ $\pm 0.39\%$ は無視できる。

B.2.2 基準反応度の測定

SR#7 の 25 mm から 0 mm への挿入による反応度 $1 \rho_1$ を正炉周期法により校正した。一定の原子炉出力で運転時は浅い未臨界なので、この状態から反応度 $1 \rho_1$ を印加しても、この印加反応度から印加前の未臨界度を差し引いた反応度だけ超臨界となる。そこで、この未臨界度を別に測定して、これに相当する CR#2 挿入量を求めておき、原子炉周期測定時に SR#7 の 25 mm に加えてこの未臨界度分も CR#2 を同時に挿入すること

表 B.12 XIV-1 炉心における基準反応度測定のための安全棒と制御棒の配置

実験日 ^{Ⅰ)} Run No.	ステップ	SR#7 ^{Ⅱ)}		CR#2 ^{Ⅲ)}		炉心温度 [°C]	CH#5 電流値 [A]	反応度 [ρ ₁]
		位置 [mm]	反応度 ^{Ⅳ)} [ρ ₁]	位置 [mm]	反応度 ^{Ⅳ)} [ρ ₁]			
10/7 No.22	1	25.00	1.0000	98.81	3.7140	17.57	0.210×10 ⁻⁷	-0.1354
10/7 No.23	2	25.00	1.0000	95.13	3.5934	17.56	0.210×10 ⁻⁶	-0.0135
	3 ^{Ⅴ)}	25.00	1.0000	94.72	3.5799		(臨界)	0.000
	4	00.00	0.0000	94.72	3.5799		(超臨界、炉周期測定)	1.000

Ⅰ) いずれも 1986 年

Ⅱ) 他の SR は動かさず全挿入位置に保持

Ⅲ) CR#1 の位置は、ステップ 1、2 では 79.21 mm に保持し、ステップ 2 の後に原子炉出力を下げるために大きく引き抜き、ステップ 4 で元の位置に戻した。

Ⅳ) この SR または CR を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

Ⅴ) このステップは、測定手順の説明のために記載したものであり、実際は、この CR と SR の配置はとらない。

集合体密着面間隙は変化なし。

いずれも、図 B.1 の径方向に対称な炉心から F119/20、F133/20、F133/32、M119/20、M133/20、M133/32 にて合計 6 本の DUB 引出しを 6 本の PuDA 引出しに置き換え、片側集合体当たりの PuDA 引出し装荷本数を 67 本とした炉心で実験実施

により、1 ρ₁ の超臨界として原子炉周期を測定した。

3.4 節のとおり、線形出力系の読みが C_a、C_b である時の未臨界度を、それぞれ ρ_a、ρ_b とすると、中性子源増倍法を基にして

$$\rho_b = \frac{\rho_a - \rho_b}{\frac{C_b}{C_a} - 1} \quad (\text{B.10})$$

である。

基準反応度測定のための安全棒と制御棒の配置を表 B.12 に示す。まず、SR#7 を 25.00 mm、CR#1 を 79.21 mm、CR#2 を 98.81 mm として核計装 CH#5 で 0.210 × 10⁻⁷ A (C_a) で定常とした。次に、CH#5 を、これより一桁高い 0.210 × 10⁻⁶ A (C_b) で定常とするために、CR#2 のみ調整したところ 95.13 mm となった。CR#2 の反応度値は、制御棒の校正結果から全挿入 0.12 mm を基準として、98.81 mm が 3.7140 ρ₁、95.13 mm が 3.5934 ρ₁ である。さらに、この間に炉心温度が 0.01°C 低下した。温度係数からこの温度低下を反応度変化にすると 0.0013 ρ₁ ± 0.0018 ρ₁ となる。これまでと同じく、この反応度変化の不確かさは、2 つの出力レベルでの温度測定の不確かさを合わせた ±√(0.01² × 2) °C と温度係数の不確かさ ± 6.6% から求め、前者の寄与が大きい。集合体密着面間隙の変化は無いが、間隙測定の不確かさ ±√(0.001² × 2) mm による ± 0.0009 ρ₁ の不確かさが発生する。2 つの原子炉出力レベルの未臨界度の差は、この温度変化による反応度変化を補正して

$\rho_a - \rho_b$ は $0.1206\rho_1 + 0.0013\rho_1 = 0.1219\rho_1 \pm 0.0035 \rho_1$ ($\pm 2.9\%$) となる。この不確かさは CR#2 の移動前後の位置再現性 ± 0.05 mm による不確かさ、CR#2 の校正の不確かさ $\pm 0.45\%$ 、温度変化による反応度変化の補正の不確かさ $\pm 0.0018 \rho_1$ と間隙測定の不確かさによる $\pm 0.0009 \rho_1$ から

$$\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 + (0.1206 \times 0.0045)^2 + 0.0018^2 + 0.0009^2} = \pm 0.0035\rho_1$$

と算出した。ここで、制御棒校正のステップ 8、9 の CR#2 位置 98.31 mm が、CR#2 の 98.81 mm から 95.13 mm への移動の間にあるが、98.81 mm が 98.31 mm に近いため、98.31 mm の前後で 2 つに分けずに不確かさをこのように評価した。このように算出すると制御棒校正の不確かさの寄与を若干過大評価することになるが、この寄与は小さくて位置の再現性による不確かさの寄与が大部分を占めるため、CR#2 の移動による反応度差の不確かさへの影響は無視し得る。

したがって、(B.10) 式を用いて核計装 CH#5 が 0.210×10^{-6} A で運転時の未臨界面は $0.0135 \rho_1 \pm 0.0004 \rho_1$ ($\pm 2.9\%$) となる。ここで、2 つの出力レベルでの CH#5 の電流値の比の不確かさは、この $\pm 2.9\%$ に比べて十分小さいので無視した。この未臨界面分だけ CR#2 を挿入すれば、SR#7 を 25.00 mm 引き抜いた状態で臨界となる。

このようにして、反応度 $-0.0135 \rho_1 \pm 0.0004 \rho_1$ の定常出力状態 (ステップ 2) から、SR#7 を 25.00 mm から 0.00 mm に挿入して $1.000 \rho_1 \pm 0.0028 \rho_1$ を加え、同時に CR#2 を 95.13 mm から 94.72 mm まで 0.41 mm 挿入して $0.0135 \rho_1 \pm 0.0028 \rho_1$ を加えることにより $1.000 \rho_1 \pm 0.0040 \rho_1$ の超臨界 (ステップ 4) にした。

ここで、SR#7 の挿入による $1 \rho_1$ の不確かさはその移動の両端での位置の再現性から求め、CR#2 挿入による $0.0135 \rho_1$ の不確かさはその移動の両端での位置の再現性と CR#2 の校正の不確かさから

$$\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 + (0.0135 \times 0.0045)^2} = \pm 0.0028\rho_1$$

と求めた。ステップ 4 の反応度 $1.000 \rho_1$ の不確かさは、これらとステップ 2 の反応度 $-0.0135 \rho_1$ の不確かさ $\pm 0.0004 \rho_1$ を合わせて

$$\pm\sqrt{0.0028^2 + 0.0028^2 + 0.0004^2} = \pm 0.0040\rho_1$$

と求めた。

原子炉出力の増加は核計装 CH#5 でモニターし、これが 0.4×10^{-6} A から 0.8×10^{-6} A の間で、3 名の測定者がそれぞれのストップウォッチで測定した倍加時間は、94.9 秒、94.65 秒、94.70 秒であり、これらの平均 94.8 秒を採用した。その不確かさは、これまでの経験から ± 0.5 秒を見込んだ。これより、原子炉周期は $T = 94.8 / \ln(2) = 136.8 \pm 0.7$ 秒となる。この原子炉周期より、逆時間方程式 (4.1) と JENDL-4.0 の遅発中性子データ評価値に基づく動特性パラメータにより反応度を求めた結果、 $1.000 \rho_1 \pm 0.0040\rho_1$ ($\pm 0.40\%$) = $0.0492\% \Delta k/k$ であった。この基準反応度の不確かさは、用いた遅発中性子データによる不確かさの寄与を合わせて B.5 節に記述する。なお、 $1 \rho_0$ は $1\rho_0 = 0.0492\% \Delta k/k \times 1.9355 = 0.0952\% \Delta k/k$ である。

B.2.3 炉心周辺部での燃料引出し反応度値の測定

表 B.13 にまとめる測定結果のうち、炉心周辺の PuDA 引出しは DUB 引出しとの置換反応度値として測定したものである。これらに加えて、ドライバ領域内部において PuDA 引出しと EUDA 引出しの置換反応度値を測定した。これらの反応度値は、CR#2 で補償することにより測定した。すなわち、集合体を分離して引出しを入れ替えた後に集合体を再密着することによる引出しの置換前後の 2 つの Run の間での CR#2 の位置の差を求めた。これを ρ_1 単位の制御棒校正曲線より反応度値に換算して、さらに、2 つの Run の間での炉心温度差と集合体密着面間隙の差による反応度差を補正した。

表 B.13 では、この補正した置換反応度値を簡便に算出するため、制御棒に関しては、各 Run の制御棒の位置と基準とする全挿入位置の差を反応度値に換算して示す。この全挿入位置は、表 B.1 より CR#1 は 0.72 mm で CR#2 は 0.12 mm である。炉心温度に関しては、各 Run の温度と基準とする 20°C との差を反応度差に換算して示す。集合体密着面間隙に関しては、各 Run の間隙と基準とする 0.000 mm との差を反応度差に換算して示す。これら制御棒の反応度値、温度と間隙の差の反応度差を全て足し合わすと、温度 20.00°C、間隙読み 0.000 mm の基準状態に補正した炉心の余剰反応度となる¹⁾。2 つの Run の間でこれら補正した余剰反応度の差をとることにより、簡便に、2 つの Run の間の補正した反応度の差、すなわち引出しの置換反応度値を算出することができる。

このように、補正した余剰反応度の差として引出しの置換反応度値を算出するものの、その内訳は、2 つの Run の間で制御棒の位置の差を反応度値に換算し、これに温度や間隙の差を反応度差に換算して補正したものである。したがって、この置換反応度値の不確かさは、制御棒、安全棒の位置の再現性による不確かさと校正の不確かさ、温度測定と温度係数の不確かさや間隙測定と間隙係数の不確かさから算出した。例えば、6/5 の No.1 と No.3 の 2 つの Run で測定した F130/19 の PuDA 引出しの反応度値の不確かさは、以下のよう

に求めた。制御棒に関しては、まず、同じ位置に戻したものの 2 つの Run の間で動かした CR#1 の移動前後の位置再現性 ± 0.05 mm により生じる反応度の不確かさがこれまでと同じく

$$\pm\sqrt{0.002^2 \times 2} = 0.0028 \rho_1$$

である。次に、2 つの Run の間の反応度差を補償する CR#2 に関しては、109.16 mm から 65.88 mm への移動前後の位置再現性による不確かさと校正の不確かさによるものを合わせる。前者は CR#1 と同じである。後者は、まず、位置 109.16 mm と 65.88 mm の間に制御棒校正ステップ 8、9 の 98.31 mm と同ステップ 10、11 の 69.00 mm がある。温度変化による反応度変化補正後のこれらステップ間の反応度差は、表 B.7 より 0.9987 ρ_1 であり、この反応度差の不確かさは既に記述したように $\pm 0.0035 \rho_1$ である。さらに、校正時の CR#2 のステップ間の移動前後の位置再現性による不確かさ $\pm\sqrt{0.002^2 \times 2} \rho_1$ も合わせる必要がある。次に、109.16 mm から 98.31 mm と 69.00 mm から 65.88 mm への移動の反応度値が、それぞれ、0.3474 ρ_1 と 0.1105 ρ_1 であり、校

¹⁾ ただし、この余剰反応度は浅い未臨界から制御棒の挿入により印加できる反応度変化であり、本来の臨界からの余剰反応度とするためには、未臨界度分の補正を行う必要がある。

表 B.13 XIV-1 炉心におけるドライバー領域の燃料引出しの置換反応度値

実験日 ^{D)} Run No.	引出し 位置 種類	CR#1		CR#2		炉心温度		密着面間隙		余剰 反応度 ^{V)} [ρ_1]	反応度 値 ^{VI)} [ρ_1]
		位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_1]	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_1]	温度 [°C]	反応度 ^{III)} [ρ_1]	間隙 [mm]	反応度 ^{IV)} [ρ_1]		
6/4 No.10	(6/4 の 基準)	100.01	3.6956	110.87	4.0987	20.04	0.0051	-0.036	-0.0242	7.7752	
6/4 No.11	F133/20 PuDA ^{VII)}	100.01	3.6956	91.44	3.4711	20.29	0.0371	-0.036	-0.0242	7.1796	-0.596
6/4 No.12	F131/19 PuDA ^{VII)}	100.01	3.6956	81.40	3.1316	20.34	0.0435	-0.037	-0.0249	6.8458	-0.929
6/5 No.1	F130/19 PuDA ^{VII)}	99.99	3.6950	65.88	2.5885	20.54	0.0691	-0.030	-0.0202	6.3324	-1.449
6/5 No.2	F129/18 PuDA ^{VII)}	100.00	3.6953	84.53	3.2385	20.45	0.0576	-0.032	-0.0215	6.9699	-0.811
6/5 No.3	(6/5 の 基準)	100.01	3.6956	109.16	4.0451	20.49	0.0627	-0.033	-0.0222	7.7812	
6/5 No.4	F128/18 PuDA ^{VII)}	100.01	3.6956	80.54	3.1021	20.48	0.0614	-0.032	-0.0215	6.8376	-0.944
6/5 No.5	F127/18 PuDA ^{VII)}	99.99	3.6950	80.04	3.0849	20.45	0.0576	-0.033	-0.0222	6.8153	-0.966
6/5 No.6	F126/18 PuDA ^{VII)}	100.00	3.6953	80.36	3.0959	20.38	0.0486	-0.033	-0.0222	6.8176	-0.964
6/6 No.1	(6/6 の 基準)	100.00	3.6953	108.96	4.0388	20.48	0.0614	-0.030	-0.0202	7.7753	
6/6 No.2	F126/17 PuDA ^{VIII)}	99.99	3.6950	123.92	4.4984	20.44	0.0563	-0.032	-0.0215	8.2282	0.453
6/6 No.3	F132/19 PuDA ^{VIII)}	100.01	3.6956	132.23	4.7439	20.41	0.0524	-0.032	-0.0215	8.4704	0.695
6/6 No.4	F132/20 PuDA ^{VII)}	100.00	3.6953	76.63	2.9669	20.41	0.0524	-0.033	-0.0222	6.6924	-1.083
6/6 No.5	F127/19 EUDA ^{IX)}	100.00	3.6953	132.94	4.7646	20.41	0.0524	-0.033	-0.0222	8.4901	0.715
6/6 No.6	F126/19 EUDA ^{IX)}	100.01	3.6956	132.03	4.7381	20.40	0.0512	-0.028	-0.0188	8.4661	0.691

^{D)} いずれも 1986 年

^{II)} この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

^{III)} 炉心温度を左記の読みから基準とする 20.00°C に変化させる時に加わる反応度

^{IV)} 集合体密着面間隙を左記の読みから基準とする 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

^{V)} 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00°C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度

^{VI)} それぞれの日の基準の余剰反応度からの差で不確かさはいずれも $\pm 0.027 \rho_1$

^{VII)} PuDA 引出し 1 本から DUB 引出し 1 本への置換による反応度値

^{VIII)} DUB 引出し 1 本から PuDA 引出し 1 本への置換による反応度値

^{IX)} EUDA 引出し 1 本から PuDA 引出し 1 本への置換による反応度値

各日の基準は、図 B.1 の径方向に対称な炉心から F119/20、F133/20、F133/32、M119/20、M133/20、M133/32 にて合計 6 本の DUB 引出しを 6 本の PuDA 引出しに置き換え、片側集合体当たりの PuDA 引出し装荷本数を 67 本とした炉心、核計装 CH#6 は 0.5×10^{-7} A レベル

正の不確かさ $\pm 0.45\%$ によるこれら反応度値の不確かさは $\pm\sqrt{(0.3474 \times 0.0045)^2 + (0.1105 \times 0.0045)^2} \rho_1$ である。これらを合わせて CR#2 に関する不確かさは

$$\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 + 0.0035^2 + 0.002^2 \times 2 + (0.3474 \times 0.0045)^2 + (0.1105 \times 0.0045)^2} = \pm 0.0056 \rho_1$$

となる。安全棒に関しては、同日内では、通常、集合体の分離と再密着を行っても全挿入位置から動かすことはなく、同日内の 2 つの Run の間で安全棒位置による不確かさは生じない。

炉心温度に関しては、集合体の分離と密着を行う時の温度測定の不確かさ $\pm 0.1^\circ\text{C}$ と温度係数の不確かさ $\pm 6.6\%$ を合わせて、温度変化による反応度変化の補正の不確かさは

$$\pm\sqrt{(\sqrt{0.1^2 \times 2} \times (-0.1279))^2 + (-0.1279 \times 0.066 \times (20.54 - 20.49))^2} = \pm 0.018 \rho_1$$

となる。温度差が小さいため、前者の寄与がこの不確かさの大部分を占める。

集合体密着面間隙に関しては、集合体の分離と密着を行う時の間隙測定の不確かさ $\pm 0.02 \text{ mm}$ と間隙係数の不確かさ $\pm 5.0\%$ を合わせて、間隙の差による反応度差の補正の不確かさは

$$\pm\sqrt{(\sqrt{0.02^2 \times 2} \times (-0.672))^2 + (-0.672 \times 0.050 \times (-0.030 - -0.033))^2} = \pm 0.019 \rho_1$$

となる。間隙の差が小さいため、前者の寄与がこの不確かさの大部分を占める。

これら 4 つの不確かさを合わせて、引出し置換反応度値の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.0028^2 + 0.0056^2 + 0.018^2 + 0.019^2} = \pm 0.027 \rho_1$$

となる。温度と間隙の差による反応度差の補正の不確かさの寄与が大きい。他の Run の間の反応度差として測定した反応度値に関しても同様に算出した結果、いずれも不確かさは $\pm 0.027 \rho_1$ となった。

集合体の分離と再密着を伴う場合は、仮に、2 つの Run の間で温度や間隙の差が無い場合でも、温度測定に伴う反応度の不確かさ

$$\pm\sqrt{0.1^2 \times 2} \text{ }^\circ\text{C} \times (-0.1279) \rho_1 / \text{ }^\circ\text{C} = \pm 0.018 \rho_1$$

と間隙測定に伴う反応度の不確かさ

$$\pm\sqrt{0.02^2 \times 2} \text{ mm} \times (-0.672) \rho_1 / \text{mm} = \pm 0.019 \rho_1$$

が生じる。

B.2.4 未臨界度の測定

実効増倍率は主に 2 本の制御棒 CR の余剰反応度から算定するが、これに種々の補正を行う。そのうちのひとつが未臨界度である。基準反応度の測定時と同様に、浅い未臨界度で核計装 CH#5 の読みが C_a 、 C_b である時の未臨界度をそれぞれ ρ_a 、 ρ_b とすると、中性子源増倍法を基にしてこれらには (B.10) 式の関係がある。表 B.14 に示すように、原子炉出力レベルを 2 段階に変えた Run を数組実施して未臨界度を求めた。各日の 2 つの Run で余剰反応度の差が $\rho_a - \rho_b$ である。

これら 2 つの Run の間で、CR#1 と全ての安全棒 SR は動かさなかったため、この余剰反応度の差の不確かさは、CR#2 の移動による反応度差の不確かさ、温度変化と集合体密着面間隙変化による反応度変化の補正の不確かさから以下のように算定した。

表 B.14 XIV-1 炉心における未臨界度

実験日 ^{D)} Run No.	CR#1		CR#2		炉心温度		密着面間隙		余剰 反応度 ^{V)} [ρ_1]	CH#5 電流 [$\times 10^{-7}$ A]	未臨界度 [ρ_1]
	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_1]	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_1]	温度 [$^{\circ}$ C]	反応度 ^{III)} [ρ_1]	間隙 [mm]	反応度 ^{IV)} [ρ_1]			
6/3 No.19	100.04	3.6966	112.07	4.1362	19.76	-0.0307	-0.035	-0.0235	7.7786	0.509	0.0445 $\pm 0.0041(9.2\%)$
6/3 No.20	100.04	3.6966	110.22	4.0783	19.90	-0.0128	-0.035	-0.0235	7.7386	5.08	0.0045 $\pm 0.00041(9.2\%)$
6/17 No.1	99.99	3.6950	108.29	4.0176	20.57	0.0729	-0.033	-0.0222	7.7633	0.510	0.0508 $\pm 0.0053(11\%)$
6/17 No.2	99.99	3.6950	109.55	4.0573	20.52	0.0665	-0.033	-0.0222	7.7966	0.308	0.0841 $\pm 0.0089(11\%)$
7/16 No.1	100.00	3.6953	97.49	3.6709	20.62	0.0793	-0.035	-0.0235	7.422	0.214	0.1335 $\pm 0.0039(3.0\%)$
7/16 No.3	100.00	3.6953	93.96	3.5548	20.59	0.0755	-0.035	-0.0235	7.3021	2.10	0.0136 $\pm 0.00040(3.0\%)$
10/7 No.22 ^{VI)}	79.21	3.0071	98.81	3.7140	17.57	-0.3108	-0.054	-0.0363	7.374 ^{VII)}	0.210	0.1354 $\pm 0.0039(2.9\%)$
10/7 No.23 ^{VI)}	79.21	3.0071	95.13	3.5934	17.56	-0.3121	-0.054	-0.0363	7.2521 ^{VII)}	2.10	0.0135 $\pm 0.00039(2.9\%)$

^{D)} いずれも 1986 年

^{II)} この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

^{III)} 炉心温度の読みを左記の値から基準の 20.00 $^{\circ}$ C に変化させる時に加わる反応度

^{IV)} 集合体密着面間隙の読みを左記の値から基準の 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

^{V)} 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00 $^{\circ}$ C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度

^{VI)} 10/7 の Run No.22 と 23 のみ SR#7 を 25.00 mm 引き抜き他の SR は全挿入、他の Run は、全ての SR を全挿入

^{VII)} SR#7 の 25.00 mm 挿入による 1 ρ_1 も加えた余剰反応度

6/3 と 6/17 は、固定側、移動側ともに中心格子管には通常の 0.8 mm 厚さの引出しを装荷、7/16 と 10/7 は、1.2 mm 厚さの引出しを装荷

いずれも、図 B.1 の径方向に対称な炉心から F119/20、F133/20、F133/32、M119/20、M133/20、M133/32 にて合計 6 本の DUB 引出しを 6 本の PuDA 引出しに置き換え、片側集合体当たりの PuDA 引出し装荷本数を 67 本とした炉心で実験実施

ここに記載したデータの他に、5/30 の臨界近接ステップ 11 と 6/3 の Run11、12 でも同様の測定を行っているが、これらは、いずれも CR#1 を全挿入、CR#2 を 250 mm 以上引き抜き測定を行ったため不採用とした。

例えば、10/7 の 2 つの Run では、前者は、CR#2 の移動時の位置の再現性と制御棒校正の不確かさより

$$\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 + ((3.7140 - 3.5934) \times 0.0045)^2} = \pm 0.0029\rho_1$$

である。後者は、集合体の密着を保持した時の温度測定の不確かさ $\pm 0.01^{\circ}$ C と温度係数の不確かさ $\pm 6.6\%$

より

$$\pm\sqrt{(0.01 \times (-0.1279))^2 \times 2 + (-0.1279 \times 0.066 \times (17.57 - 17.56))^2} = \pm 0.0018 \rho_1$$

である。間隙の変化は無いが、間隙測定の不確かさに伴う $\pm 0.0009 \rho_1$ の不確かさが生じる。

余剰反応度の差の不確かさは、これらを合わせて

$$\pm\sqrt{0.0029^2 + 0.0018^2 + 0.0009^2} = \pm 0.0035 \rho_1$$

となる。したがって、(B.10) 式を用いて核計装 CH#5 が $2.10 \times 10^{-7} \text{ A}$ 時の未臨界度は $0.01354 \rho_1 \pm 0.00039 \rho_1$ ($\pm 2.9\%$) となる。ここで、2つの原子炉出力レベルでの CH#5 の電流値の比の不確かさは、この $\pm 2.9\%$ に比べて十分小さいので無視した。

中性子源増倍法より、未臨界度と、その時の原子炉出力レベルとしての核計装 CH#5 の電流値の積は一定となる。この積は、6/3 が $2.26 \times 10^{-9} \rho_1 \text{ A} \pm 9.2\%$ 、6/17 が $2.59 \times 10^{-9} \rho_1 \text{ A} \pm 11\%$ 、7/16 が $2.86 \times 10^{-9} \rho_1 \text{ A} \pm 2.9\%$ 、10/7 が $2.84 \times 10^{-9} \rho_1 \text{ A} \pm 2.9\%$ となった。6/17 以降の3日では、この積の値がほぼ不確かさの範囲で一致したが、6/3 の値は他の3日の値から、不確かさの範囲を著しく超えて異なる。炉心温度は、通常の小さな反応度差を測る集合体密着後30分経過後は時間経過とともに下がる傾向にあるが、6/3 の2つの Run では逆に時間の遅い Run の温度が上がりその差が大きい。このため、この日の温度測定に何らかの不良が考えられ、この不良により温度変化による反応度変化の補正がうまくいかず、他の日の値から著しく異なったものと推定する。したがって6/3の実験データは棄却する。他の3日では、6/17の不確かさが他の2日よりも3倍と大きい。これは、7/16と10/7では原子炉出力レベルを1桁変えた2つの Run で測定を行ったのに対して、6/17の2つの Run では原子炉出力レベルを1.7倍程度しか変えず、Run 間の余剰反応度の差が小さいため、相対的に不確かさが大きくなった。

これら3日の各データの不確かさ(絶対値)を重みとした平均をとり、データ数が少ないためこの平均の不確かさは伝搬則で求めた。ここで、各日の原子炉出力レベルを変えた Run 間の CR#2 位置の差は小さく、また、温度差も小さいので、データ間で共通となる制御棒校正や温度係数の不確かさの寄与は小さくデータ間の相関は無視した。すなわち、未臨界度とその時の核計装 CH#5 の電流値の積の平均値は $2.840 \times 10^{-9} \rho_1 \text{ A} \pm 2.0\%$ となり、これを基に余剰反応度に補正を行い実効増倍率を求める。

B.2.5 全挿入時の制御棒と安全棒引出しの先端面の密着面からのへこみの深さ分の反応度値測定

XV 炉心系と同様に全挿入時の制御棒と安全棒の引出しの前端面の密着面からのへこみの深さを測定して反応度値に換算した。16本の引出しのへこみ深さの平均値は、本炉心では -0.91 mm であった。この深さに、密着面近傍での制御棒や安全棒の微分反応度値である $1 \rho_1 / 25 \text{ mm}$ を乗じることにより、深さを反応度値に換算して8倍することにより $0.292 \rho_1 \pm 0.011 \rho_1$ の補正量を得た。この不確かさも、1箇所の深さ測定の不確かさ $\pm 0.1 \text{ mm}$ を換算して $\sqrt{8}$ 倍したものである。

B.2.6 密着面でのステンレス鋼反応度値の測定

炉心の中心面に相当する 2 分割集合体の密着面には、主に引出し前端面の部材としてのステンレス鋼があり、決定論手法で実効増倍率を計算する場合はこのモデル化が困難となる場合がある。そこで、このステンレス鋼の負の反応度効果を実験的に求めて実効増倍率の実験値導出において補正として用い、密着面のステンレス鋼を取り除いた炉心の実効増倍率を決定論手法による計算結果と比較する。この補正のために、固定側集合体の密着面近傍において一連のステンレス鋼の反応度値測定を行った。この測定は、径方向に対称な炉心から、F119/20、F133/20、F133/32、M119/20、M133/20、M133/32 で合計 6 本の DUB 引出しを PuDA 引出しに置換した片側集合体当たり PuDA 引出しを 67 本装荷した炉心で行った。実験に用いたステンレス板とアルミニウム板の重量を表 B.15 に示す。重量の測定誤差は 0.1% 未満であり、後に記述するように反応度値の測定誤差と比べて無視し得るほど小さい。

まず、固定側集合体中心の F126/26 の EU06A 引出しにおいてこの測定を行った。引出し内の燃料板と模擬物質板を全て軸方向に炉心外側に向けてずらすことにより、この引出しの前端面の内側に、通常とは垂直の方向に模擬物質板を装填できる 1/8 インチ幅での空間を設けた。この空間で 2 枚のステンレス SUS(1/16×2×2) 板と 1 枚のアルミニウム Al(1/8×2×2) 板の置換反応度値を 6/20 の Run No.3 と No.4 で測定した。測定結果を表 B.16 に示す。

これらの反応度値は、制御棒 CR#2 で補償することにより測定した。集合体は分離せずに密着を保ったまま、ステンレス板とアルミニウム板の入れ替え前後の 2 つの Run の間での CR#2 の位置の差を求めた。これを制御棒校正曲線より反応度値に換算して、さらに、2 つの Run の間での炉心温度と集合体密着面間隙の変化による反応度変化を補正した。

表 B.15 より SUS(1/16×2×2) 板の重さは 2 枚で 62.08 g で 1 枚の Al(1/8×2×2) 板の重さは 21.675 g であり、この置換反応度値の測定結果は表 B.16 に示すように $-0.0599 \rho_1 \pm 0.0066 \rho_1$ である。この不確かさは以下のように算出した。

表 B.15 XIV-1 炉心における密着面ステンレス鋼反応度値測定に用いたステンレス板とアルミニウム板の重量

板種類とサイズ	枚数	合計重量 [g] ^{D)}	板種類とサイズ	枚数	合計重量 [g]
SUS(1/16×2×2)	1	31.04 ^{D)}	Al(1/8×2×2)	1	21.675 ^{III)}
SUS(1/16×2×1)	1	15.45 ^{D)}	Al(1/8×2×1)	1	10.871 ^{III)}
			Al(1/16×2×2)	8	81.69 ^{III)}
			Al frame(1/4×2×2) ^{IV)}	2	15.30 ^{III)}

^{D)} 重量の測定誤差は 0.1% 未満

^{D)} FCA プレートデータより

^{III)} 実験時の記録より

^{IV)} Al(1/4×2×2) 板の内側をくり抜いて製作

表 B.16 XIV-1 炉心中心におけるステンレス鋼反応度値とアルミニウム反応度値

実験日 ¹⁾ Run No.	装荷物 (目的)	CR#1		CR#2		炉心温度		密着面間隙		余剰 反応度 ^{V)} [ρ ₁]	反応度 値 ^{VI)} [ρ ₁]
		位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ ₁]	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ ₁]	温度 [°C]	反応度 ^{III)} [ρ ₁]	間隙 [mm]	反応度 ^{IV)} [ρ ₁]		
6/20 No.3	Al(1/8×2×2) 1 枚 (6/20 の基準)	74.99	2.8622	126.67	4.5804	20.06	0.0077	-0.037	-0.0249	7.4255	
6/20 No.4	SUS(1/16×2×2) 2 枚	74.99	2.8622	124.96	4.5295	19.99	-0.0013	-0.037	-0.0249	7.3656	-0.0599
7/23 No.2	Al(1/16×2×2) 8 枚	100.00	3.6953	107.08	3.9794	21.00	0.1279	-0.036	-0.0242	7.7784	-0.0207
7/23 No.3	Al frame(1/4×2×2) 2 枚 (7/23 の基準)	100.00	3.6953	108.26	4.0167	20.87	0.1113	-0.036	-0.0242	7.7991	

¹⁾ いずれも 1986 年

^{II)} この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

^{III)} 炉心温度の読みを左記の値から基準の 20.00°C に変化させる時に加わる反応度

^{IV)} 集合体密着面間隙の読みを左記の値から基準の 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

^{V)} 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00°C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度

^{VI)} それぞれの日の基準の余剰反応度からの差

いずれも、図 B.1 の径方向に対称な炉心から F119/20、F133/20、F133/32、M119/20、M133/20、M133/32 にて合計 6 本の DUB 引出しを 6 本の PuDA 引出しに置き換え、片側集合体当たりの PuDA 引出し装荷本数を 67 本とした炉心で実験実施、核計装 CH#6 は 0.5×10^{-7} A レベル

制御棒 CR と安全棒 SR に関しては、まず、同じ位置に戻したものの 2 つの Run の間で動かした CR#1 と固定側集合体の 3 組の SR の移動前後の位置再現性 ± 0.05 mm により生じる反応度の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 \times 4} = \pm 0.0056 \rho_1$$

である。これら 2 つの Run の間では、移動側集合体の 3 組の SR は全挿入のまま動かさなかったため、これら SR に関して不確かさは生じない。次に、2 つの Run の間の反応度差を補償する CR#2 の移動の両端での位置再現性と CR#2 の校正の不確かさ $\pm 0.45\%$ を合わせると

$$\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 + ((4.5295 - 4.5804) \times 0.0045)^2} = \pm 0.0028 \rho_1$$

となる。CR#2 の位置の差が小さなため、前者の寄与がこの不確かさの大部分を占める。

炉心温度に関しては、集合体の密着を保ったまま測定を行う時の温度測定の不確かさ $\pm 0.01^\circ\text{C}$ と温度係数の不確かさ $\pm 6.6\%$ を合わせて、温度変化による反応度変化の補正の不確かさは

$$\pm\sqrt{(\sqrt{0.01^2 \times 2} \times (-0.1279))^2 + (-0.1279 \times 0.066 \times (19.99 - 20.06))^2} = \pm 0.0019 \rho_1$$

となる。温度差が小さなため、前者の寄与がこの不確かさの大部分を占める。

集合体密着面間隙の変化は無いが、間隙測定に伴う不確かさ $\pm 0.0009 \rho_1$ が生じる。

これら 4 つの不確かさを合わせて、置換反応度値の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.0056^2 + 0.0028^2 + 0.0019^2 + 0.0009^2} = \pm 0.0066 \rho_1$$

となる。

ステンレス板正味の反応度価値を得るためには、アルミニウムの反応度価値分を補正する必要がある。このために、F126/26のEU06A引出しの密着面から1セル目において、2枚の劣化ウラン燃料板を取り除いてセル内に2箇所の1/4インチ幅の空間を設けて、これら空間で8枚のAl(1/16×2×2)板と2枚のAl frame(1/4×2×2)の置換反応度価値を7/23のRun No.2とNo.3で測定した。表B.15より8枚のAl(1/16×2×2)板の重さの合計は81.69gで2枚のAl frame(1/4×2×2)の重さの合計は15.30gである。この置換反応度価値の測定結果は表B.16に示すように $-0.0207 \rho_1 \pm 0.0067 \rho_1$ である。この不確かさは、6/20に実施したアルミニウム板とステンレス板の置換反応度価値と同様に算出し、その内訳は以下のとおりである。

制御棒と安全棒に関しては、まず、同じ位置に戻したものの2つのRunの間で動かしたCR#1と固定側集合体の3組のSRの移動前後の位置再現性により生じる反応度の不確かさは $\pm 0.0056 \rho_1$ である。これら2つのRunの間では、移動側集合体の3組のSRは全挿入のまま動かさなかったため、これらSRに関して不確かさは生じない。次に、2つのRunの間の反応度差を補償するCR#2の移動の両端での位置再現性と校正の不確かさを合わせると

$$\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 + ((3.9794 - 4.0167) \times 0.0045)^2} = \pm 0.0028 \rho_1$$

となる。

炉心温度に関しては、集合体の密着を保ったまま測定を行う時の温度測定の不確かさと温度係数の不確かさを合わせて、温度変化による反応度変化の補正の不確かさは

$$\pm\sqrt{(\sqrt{0.01^2 \times 2} \times (-0.1279))^2 + (-0.1279 \times 0.066 \times (21.00 - 20.87))^2} = \pm 0.0021 \rho_1$$

となる。

集合体密着面間隙の変化は無いが、間隙測定に伴う不確かさ $\pm 0.0009 \rho_1$ が生じる。

これら4つの不確かさを合わせて、置換反応度価値の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.0056^2 + 0.0028^2 + 0.0021^2 + 0.0009^2} = \pm 0.0067 \rho_1$$

となる。

炉心中心における単位重量当たりのアルミニウムの反応度価値は

$$\frac{-0.0207 \rho_1 (\pm 0.0067 \rho_1)}{81.69g - 15.30g} = -3.12 \times 10^{-4} \rho_1/g \pm 32\% \quad (\text{B.11})$$

となる。ここで、アルミニウムの重量の不確かさは0.1%のオーダーであり、32%の反応度価値の不確かさに比べてはるかに小さいので無視した。

これより、2枚のSUS(1/16×2×2)との置換反応度価値を求めた1枚のAl(1/8×2×2)板の反応度価値は

$$-3.12 \times 10^{-4} \rho_1/g (\pm 32\%) \times 21.675g = -0.0068 \rho_1 \pm 0.0022 \rho_1 \quad (\text{B.12})$$

となる。ここでも、アルミニウムの重量の不確かさは小さく無視した。なお、ステンレス鋼の反応度価値を測定した引出し前端面とアルミニウムの反応度価値を測定した劣化ウラン燃料板の位置では、アルミニウムの反

応度値に若干の相違が生じることが予想される。しかしながら、アルミニウムの反応度値の不確かさが±32%と大きなことから、測定位置の相違によるアルミニウム反応度値の相違は、この大きな不確かさと比べて無視できるものとする。

これを用いて、炉心中心での引出し前端面における2枚のSUS(1/16×2×2)板の正味の反応度値は

$$-0.0599 \rho_1 (\pm 0.0066 \rho_1) - 0.0068 \rho_1 (\pm 0.0022 \rho_1) = -0.0667 \rho_1 \pm 0.0070 \rho_1 (\pm 10\%) \quad (\text{B.13})$$

となる。したがって、単位重量当たりのステンレス鋼の反応度値は

$$\frac{-0.0667 \rho_1 (\pm 0.0070 \rho_1)}{62.08 \text{g}} = -1.07 \times 10^{-3} \rho_1 / \text{g} \pm 10\% \quad (\text{B.14})$$

となる。ここでも、ステンレス鋼の重量の不確かさは小さく無視した。

アルミニウムとステンレス鋼の単位重量当たりの反応度値の比は

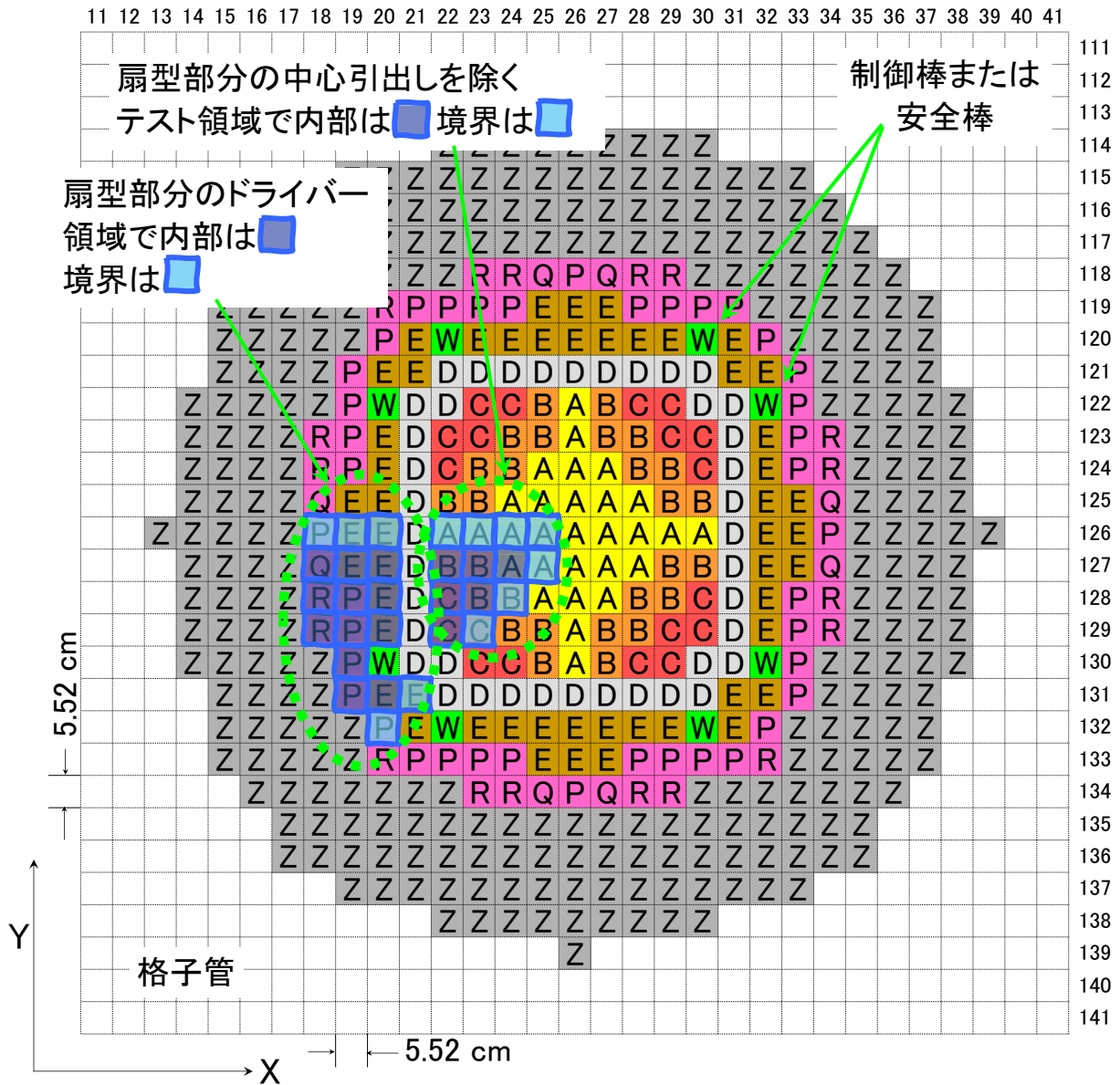
$$\frac{-3.12 \times 10^{-4} \rho_1 / \text{g} (\pm 32\%)}{-1.07 \times 10^{-3} \rho_1 / \text{g} (\pm 10\%)} = 0.292 \pm 34\% \quad (\text{B.15})$$

である。炉心内の他の場所では、ステンレス板とアルミニウム板の置換反応度値は測定したが、中心引出しのように、アルミニウム単独での反応度値の測定は行わなかった。そこで、この反応度値の比が、炉心内の他の場所でも不確かさの範囲で炉心中心と同じであるとして、アルミニウムの反応度値分の補正に用いて、中心以外の場所でのステンレス鋼の正味の反応度値を求めた。

まず、図 B.14 に示すように、固定側集合体の左下の 1/4 象限を径方向に半分にした扇型部分で、中心引出しを除くテスト領域内の引出し 13 本で、中心引出しと同様に引出し前端面の内側に 1/8 インチ幅のスペースを設けてアルミニウム板とステンレス板の置換反応度値を測定した。この扇型部分の径方向の境界に配置した7本の引出しでは、1枚の Al(1/8×2×2) 板を1枚の Al(1/8×2×1) 板と2枚の SUS(1/16×2×1) 板に置換した。これら境界以外の内側に配置した6本の引出しでは、中心引出しと同様に1枚の Al(1/8×2×2) 板を2枚の SUS(1/16×2×2) 板に置換した。この置換実験を表 B.17 に整理する。

このようにして、この扇型部分で 1/8 インチ厚さのアルミニウム板と 1/8 インチ厚さ相当のステンレス板の置換反応度値を測定した。したがって、13本の引出しで、合わせて13枚の Al(1/8×2×2) 板を、7枚の Al(1/8×2×1) 板、12枚の SUS(1/16×2×2) 板と14枚の SUS(1/16×2×1) 板に置換した。用いたアルミニウム板とステンレス板の重量は表 B.15 に示す。これより、13枚の Al(1/8×2×2) 板が 281.775 g、7枚の Al(1/8×2×1) が 76.097 g、12枚の SUS(1/16×2×2) 板が 372.48 g、14枚の SUS(1/16×2×1) が 216.30 g なので、この扇型部分の13本の引出しで、281.775 g - 76.097 g = 205.678 g のアルミニウムを 372.48 g + 216.30 g = 588.78 g のステンレス鋼に置換したことになる。

この置換反応度値が、表 B.18 に示すように $-0.3884 \rho_1 \pm 0.027 \rho_1$ である。先のドライバー燃料引出しの反応度値の測定と同様に、この反応度値は、制御棒 CR#2 で補償することにより測定した。すなわち、集合体を分離してステンレス板とアルミニウム板を入れ替えた後に集合体を再密着することによる入れ替え前後の2つの Run の間での CR#2 の位置の差を求めた。これを制御棒校正曲線より反応度値に換算して、さらに、2つの Run の間での炉心温度変化と集合体密着面間隙変化による反応度変化を補正した。この置換反応



装荷引出しと本数

■ EU06A : 29	■ EU06B : 28
■ EU06C : 20	■ SSB : 40
■ EUDA : 52	■ PuDA1 : 40
■ PuDA2 : 8	■ PuDA3 : 19
■ PuDA4 : 0	■ DUB : 288
■ SCRB : 8	PuDA合計 67

図 B.14 XIV-1 炉心における固定側集合体での密着面ステンレス鋼反応度値の測定位置

表 B.17 XIV-1 炉心における扇型部分の密着面ステンレス鋼反応度値の測定時のアルミニウム板とステンレス板の使用枚数

扇型部分 領域	内訳	引出し 本数	使用枚数、重量			
			基準時		置換後	
			Al(1/8×2×2)	Al(1/8×2×1)	SUS(1/16×2×2)	SUS(1/16×2×1)
中心引出しを除く テスト領域	境界	7本	7枚	7枚	0枚	14枚 ^{D)}
	内部	6本	6枚	0枚	12枚 ^{D)}	0枚
	合計	13本	13枚	7枚	12枚	14枚
	重量合計		281.775 g	76.097 g	372.48 g	216.30 g
ドライバー 領域	境界	5本	5枚	5枚	0枚	10枚 ^{D)}
	内部	12本	12枚	0枚	24枚 ^{D)}	0枚
	合計	17本	17枚	5枚	24枚	10枚
	重量合計		368.475 g	54.355 g	744.96 g	154.5 g

^{D)} 引出し 1 本当たり 2 枚

度値の不確かさは、ドライバー燃料引出しの置換反応度値の不確かさと同様に算出し、その内訳は以下のとおりである。

制御棒に関しては、同じ位置に戻したものの 2 つの Run の間で動かした CR#1 の移動前後の位置再現性により生じる反応度の不確かさは、 $\pm 0.0028 \rho_1$ である。2 つの Run の間の反応度差を補償する CR#2 の移動前後の位置再現性と校正の不確かさを合わせると

$$\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 + ((4.7366 - 5.1234) \times 0.0045)^2} = \pm 0.0033 \rho_1$$

となる。なお、安全棒に関しては、2 つの Run は同日内で集合体の分離と再密着を行っても全挿入位置から動かすことはないので、安全棒位置による不確かさは生じない。

2 つの Run の間で温度差は 0.01°C と小さく、間隙の差は無いが、集合体の分離と再密着を伴うので、周辺燃料引出し反応度値の測定において記述したように、温度変化に伴う反応度変化の不確かさ $\pm 0.018 \rho_1$ と間隙測定に伴う反応度の不確かさ $\pm 0.019 \rho_1$ が生じる。これら 4 つの不確かさを合わせて、置換反応度値の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.0028^2 + 0.0033^2 + 0.018^2 + 0.019^2} = \pm 0.027 \rho_1$$

となる。

このステンレス鋼 588.78 g の正味の反応度値を $\Delta\rho_{SUS}$ 、205.678 g のアルミニウムの反応度値を $\Delta\rho_{Al}$ とすると、ステンレス鋼正味の反応度値と、ステンレス鋼とアルミニウムの置換反応度値の比は

$$\frac{\Delta\rho_{SUS}}{\Delta\rho_{SUS} - \Delta\rho_{Al}} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta\rho_{Al}}{\Delta\rho_{SUS}}} \quad (\text{B.16})$$

となり、この比を補正ファクターとして測定したステンレス鋼とアルミニウムの置換反応度値に乘じれば、ステンレス鋼正味の反応度値を得ることができる。この式の右辺分母の $\Delta\rho_{Al}/\Delta\rho_{SUS}$ は、中心引出しで測

表 B.18 XIV-1 炉心における扇型部分での密着面ステンレス鋼反応度値の測定結果

実験日 ^{Ⅰ)} Run No.	装荷物 目的	CR#1		CR#2		炉心温度		密着面間隙		余剰 反応度 ^{Ⅴ)} [ρ ₁]	反応度 値 ^{Ⅵ)} [ρ ₁]
		位置 [mm]	反応度 ^{Ⅱ)} [ρ ₁]	位置 [mm]	反応度 ^{Ⅱ)} [ρ ₁]	温度 [°C]	反応度 ^{Ⅲ)} [ρ ₁]	間隙 [mm]	反応度 ^{Ⅳ)} [ρ ₁]		
6/25 No.1	テスト領域 Al (No.2 の基準)	50.00	1.9689	145.55	5.1234	20.63	0.0806	-0.036	-0.0242	7.1487	
6/25 No.2	テスト領域 SUS へ置換	49.99	1.9686	131.98	4.7366	20.62	0.0793	-0.036	-0.0242	6.7603	-0.3884
6/25 No.3	ドライバー領域 Al (No.4 の基準)	49.99	1.9686	151.70	5.2924	20.67	0.0857	-0.035	-0.0235	7.3232	
6/25 No.4	ドライバー領域 SUS へ置換	49.99	1.9686	151.25	5.2802	20.67	0.0857	-0.036	-0.0242	7.3103	-0.0129

Ⅰ) いずれも 1986 年

Ⅱ) この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

Ⅲ) 炉心温度の読みを左記の値から基準の 20.00°C に変化させる時に加わる反応度

Ⅳ) 集合体密着面間隙の読みを左記の値から基準の 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

Ⅴ) 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00°C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度

Ⅵ) 基準の余剰反応度からの差

いずれも、図 B.1 の径方向に対称な炉心から F119/20、F133/20、F133/32、M119/20、M133/20、M133/32 にて合計 6 本の DUB 引出しを 6 本の PuDA 引出しに置き換え、片側集合体当たりの PuDA 引出し装荷本数を 67 本とした炉心で実験実施、核計装 CH#6 は 0.5×10^{-7} A レベル

定したアルミニウムとステンレス鋼の単位重量当たりの反応度値の比 $0.292 \pm 34\%$ とアルミニウムとステンレス鋼の重量の比 205.678 g/588.78 g の積として求めると、 $0.102 \pm 34\%$ となる。ここでも、重量の不確かさは反応度値の比の不確かさと比べてかなり小さいため無視した。この値を上式で用いて、ステンレス鋼正味の反応度値と、ステンレス鋼とアルミニウムの置換反応度値の比を計算すると、 $1.114 \pm 3.9\%$ となる。これを補正係数として用いて、ステンレス鋼正味の反応度値は $-0.3884 \rho_1 (\pm 0.027 \rho_1) \times 1.114 (\pm 3.9\%) = -0.433 \rho_1 \pm 8.0\%$ である。これを、単位重量当たりの反応度値にすると $-0.433 \rho_1 / 588.78 \text{ g} = -7.35 \times 10^{-4} \rho_1 / \text{g} \pm 8.0\%$ である。

次に、図 B.14 の扇型部分のドライバー領域内の 17 本の引出しについて、テスト領域と同様にアルミニウム板とステンレス板の置換反応度値を測定した。表 B.17 に示すように、扇型部分の径方向の境界の 5 本の引出しでは、1 枚の Al(1/8×2×2) 板を 1 枚の Al(1/8×2×1) 板と 2 枚の SUS(1/16×2×1) 板に置換した。これら以外の内側の 12 本の引出しでは、1 枚の Al(1/8×2×2) 板を 2 枚の SUS(1/16×2×2) 板に置換した。扇型部分 17 本の引出しで、合わせて 17 枚の Al(1/8×2×2) 板を、24 枚の SUS(1/16×2×2) 板、10 枚の SUS(1/16×2×1) 板と 5 枚の Al(1/8×2×1) 板に置換した。重量にすると、 $368.475 \text{ g} - 54.355 \text{ g} = 314.12 \text{ g}$ のアルミニウムを $744.96 \text{ g} + 154.5 \text{ g} = 899.46 \text{ g}$ のステンレス鋼に置換したことになる。この置換反応度値が表 B.18 の

$-0.0129 \rho_1 \pm 0.026 \rho_1$ である。

この不確かさは、テスト領域での測定の不確かさと同様に算出した。CR#2 の移動前後の位置再現性と制御棒校正の不確かさを合わせると $\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 + ((5.2802 - 5.2924) \times 0.0045)^2} = \pm 0.0028 \rho_1$ となる。これ以外の不確かさを合わせて、置換反応度値の不確かさは $\pm\sqrt{0.0028^2 + 0.0028^2 + 0.018^2 + 0.019^2} = \pm 0.026 \rho_1$ となる。

テスト領域と同様に、 $\Delta\rho_{Al}/\Delta\rho_{SUS}$ は、 $0.292 (\pm 34\%) \times (314.12 \text{ g} / 899.46 \text{ g}) = 0.102 \pm 34\%$ となる。これより、ステンレス鋼正味の反応度値と、ステンレス鋼とアルミニウムの置換反応度値の比は、 $1.114 \pm 3.9\%$ であり、ステンレス鋼正味の反応度値は $-0.0129 \rho_1 (\pm 0.026 \rho_1) \times 1.114 (\pm 3.9\%) = -0.0144 \rho_1 \pm 202\%$ である。これを、単位重量当たりの反応度値にすると $-0.0144 \rho_1 (\pm 202\%) / 899.46 \text{ g} = -1.60 \times 10^{-5} \rho_1 / \text{g} \pm 202\%$ である。

バッファ領域の引出しと、制御・安全棒引出しの前端面では、このようなステンレス鋼の反応度値の測定は行わなかったため、これまでの測定結果を用いて密着面でのステンレス鋼の反応度値を求めた。このために、扇型部分の中心引出しを除くテスト領域で、ステンレス鋼の反応度値測定を行った 13 本の各引出しの炉心中心軸からの距離を求め、これらの平均をとると 18.50 cm となる。ここで、扇型部分の境界にある 7 本の引出しについては、重みを 0.5 としてこの平均をとった。同様に、扇型部分のドライバー領域で、ステンレス鋼の反応度値測定を行った 17 本の各引出しの炉心中心軸からの距離を求め、これらの平均をとると 41.38 cm となる。ここでも、扇型部分の境界にある 5 本の引出しについては重みを 0.5 とした。

中心引出しを 1 つの独立した領域として、これら 3 つの領域の炉心中心軸からの平均距離と各領域のステンレス鋼単位重量当たりの反応度値を表 B.19 に示す。さらに、図 B.15 に、この反応度値を距離に対してプロットした。これを最小二乗法を用いて 1 次関数にあてはめ、反応度値 $\delta\rho$ の距離 r 依存性は

$$\delta\rho(r) = 2.82 \times 10^{-5} (\pm 12\%) \times r - 1.19 \times 10^{-3} (\pm 10\%) \quad (\text{B.17})$$

で近似できる。

扇型部分のバッファ領域の引出し 6 本と、制御・安全棒引出し 1 本の炉心中心軸からの距離の領域平均は、それぞれ 30.96 cm と 39.81 cm である。ここでも、扇型部分の境界にあるバッファ領域の 2 本の引出しについては重みを 0.5 とした。バッファ領域と制御・安全棒でのステンレス鋼の単位重量当たりの反応度値は、1 次式 (B.17) と距離を用いて内挿で求め、その結果も表 B.19 に示す。

密着面に余分にある標準引出し 1 本当たりのステンレス鋼の重量は、参考文献 [22] の記載を基にして以下のように計算した。まず、引出し前端面に溶接により張り付けられているステンレスの板は、高さが 5.25 cm で、引出し横のタブの部分も合わせると幅が $5.27 \text{ cm} + 2 \times 0.5 \text{ cm}$ であり、その中に、直径 0.3 cm の穴が 4 箇所、直径 0.67 cm の穴が 12 箇所設けられており、板の厚さは 0.08 cm である。したがって、この板のステンレス鋼の体積は

$$\left\{ (5.27 + 2 \times 0.5) \times 5.25 - 4 \pi \left(\frac{0.3}{2} \right)^2 - 12 \pi \left(\frac{0.67}{2} \right)^2 \right\} \times 0.08 = 2.2723 \text{ cm}^3 \quad (\text{B.18})$$

表 B.19 XIV-1 炉心における扇型部分でのステンレス鋼単位重量当たりの反応度値の炉心中心軸からの径方向距離依存性

扇型部分領域	引出し本数	炉心中心軸からの平均距離 [cm]	反応度値 [ρ_1/g]	反応度値の比 ¹⁾
中心引出し	1	0.0	$-1.07 \times 10^{-3} \pm 10\%$	1.0
中心引出しを除くテスト領域	13	18.50	$-7.35 \times 10^{-4} \pm 8.0\%$	$0.687 \pm 13\%$
バッファー領域	6	30.96	$-3.18 \times 10^{-4} \pm 51\%$ ¹⁾	$0.297 \pm 52\%$
制御・安全棒引出し	1	39.81	$-6.9 \times 10^{-5} \pm 264\%$ ¹⁾	$0.065 \pm 264\%$
ドライバー領域	17	41.38	$-1.6 \times 10^{-5} \pm 202\%$	$0.015 \pm 202\%$

¹⁾ 中心引出しでの反応度値で規格化

¹⁾ 中心引出し、テスト領域とドライバー領域での測定結果を用いた内挿による評価結果

である。

さらに、引出し全体のステンレス鋼の体積を求めるために、この前端面の板以外の部分の体積を計算した。まず、引出し後端面に溶接で付けられた板は、幅が 5.27 cm、高さが 5.25 cm であり、1.0 cm × 2.1 cm の四角の切り欠きが施されており、直径が 0.35 cm の穴が 1 つ空けられている。したがって、この部分のステンレス鋼の体積は

$$\left\{ 5.27 \times 5.25 - 1 \times 2.1 - \pi \left(\frac{0.35}{2} \right)^2 \right\} \times 0.08 = 2.0377 \text{ cm}^3 \quad (\text{B.19})$$

である。

これらの前端面と後端面の板を除く引出し側面と底面を合わせると、長さが 66.54 cm で側面の高さで底面の幅の和は $5.25 \times 2 + 5.11$ であり、この側面と底面に合計 $13 \times 3 = 39$ 個の直径 2.1 cm の穴が開く。この部分のステンレス鋼の体積は

$$\left\{ (5.25 \times 2 + 5.11) \times 66.54 - 13 \times 3 \times \pi \left(\frac{2.1}{2} \right)^2 \right\} \times 0.08 = 72.289 \text{ cm}^3 \quad (\text{B.20})$$

である。

これら、前端面、後端面、側面と底面を合わせた標準引出しの体積は、 $2.2723 + 2.0377 + 72.289 = 76.599 \text{ cm}^3$ となる。参考文献 [22] より、この標準引出し 1 本の重量は 583.96 g と測定されているので、ステンレス鋼の密度は、 $583.96 / 76.599 = 7.624 \text{ g/cm}^3$ となる。これは、一般的なステンレス鋼の密度である 7.9 g/cm^3 と比較して 3.6% 小さ目であるが、引出しのステンレス板の厚さが 0.8 mm と薄くて、この厚さや穴の直径の不確かさにより小さ目になったものとする。この「実効的な」密度を用いて、引出し前端面のステンレス鋼の重量は、 $2.2723 \text{ cm}^3 \times 7.624 \text{ g/cm}^3 = 17.324 \text{ g}$ となる。これは、参考文献 [22] にある標準引出しの部品ごとの重量を足し合わせたものと一致する。

このタブの後端を格子管の前端面に押し付けて引出しの位置決めを行うため、この分だけ、格子管は、密着

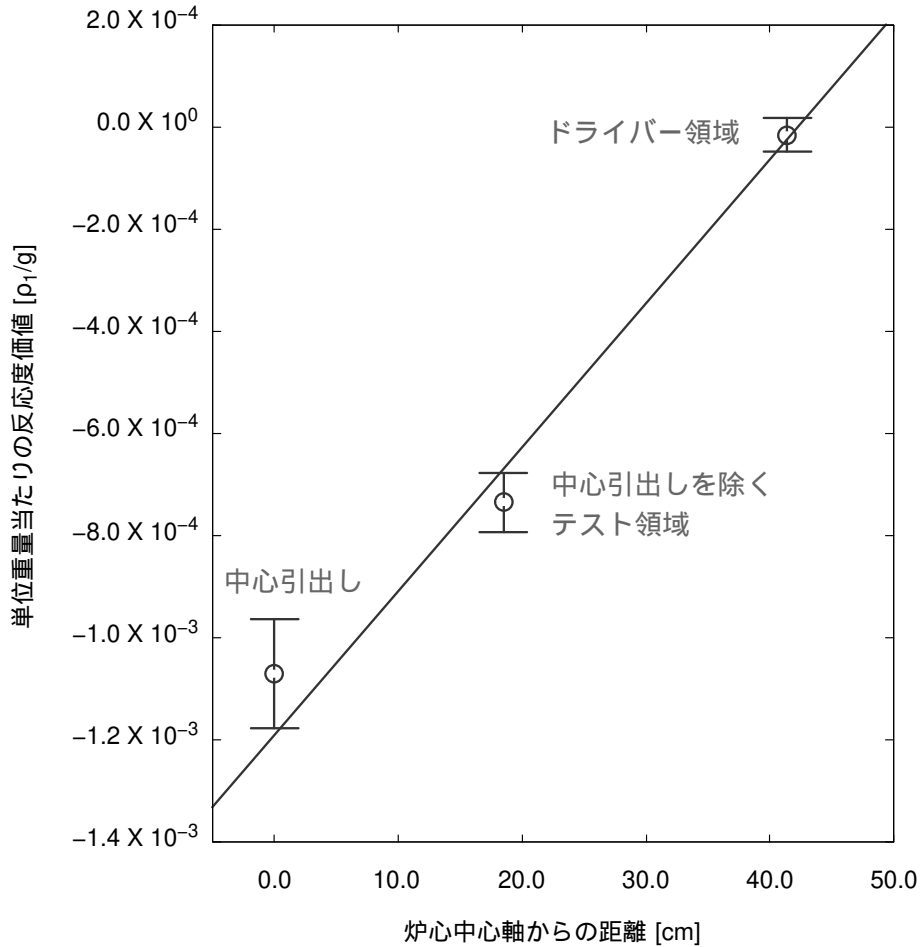


図 B.15 XIV-1 炉心における領域別の密着面ステンレス鋼反応度値の炉心中心軸からの距離依存性

面側の燃料板を装填した領域の前端面より炉心外側に向けて後退している。この後退している格子管の部分が、決定論手法での格子管のモデルから欠落することになる。この部分は、奥行きが、タブの長さから引出し前端面の厚さ分だけ短い 0.5 cm – 0.08 cm で、4 辺の幅と高さを合計すると、 $2 \times (5.316 + 2 \times 0.102 + 5.316)$ で、その厚さは 0.102 cm である。したがって、この部分のステンレス鋼の体積は

$$\{(0.5 - 0.08) \times 2 \times (5.316 + 2 \times 0.102 + 5.316)\} \times 0.102 = 0.9284 \text{ cm}^3 \quad (\text{B.21})$$

である。この格子管の密度には、参考文献 [22] から一般的な 7.9 g/cm^3 を用いると、この体積に相当する格子管の重量は、 $0.9284 \text{ cm}^3 \times 7.9 \text{ g/cm}^3 = 7.334 \text{ g}$ である。

以上から、標準引出しを装荷した部分では、決定論手法の計算モデルと比較して、実際の炉心で密着面に余分に存在するステンレス重量は、1 格子管当たり $17.324 - 7.334 = 9.990 \text{ g}$ となる。

次に、制御・安全棒引出しでは、前端面に幅が 4.94 cm、高さが 5.11 cm で厚さが 0.3 cm のステンレス板が底面と側面の内側に溶接されていると考えて、その部分のステンレス鋼の体積は

$$4.94 \times 5.11 \times 0.3 = 7.573 \text{ cm}^3 \quad (\text{B.22})$$

である。この前端面を周囲の標準引出しの前端面と揃えるので、厚さ 0.15 cm の引出しの底面と両側面は、標

表 B.20 XIV-1 炉心における密着面ステンレス鋼反応度値とその領域別の寄与

領域	引出し本数 (格子管数) (固定側と移動側の合計)	ステンレス鋼 重量 [g] ^{Ⅰ)}	反応度値 ^{Ⅱ)} [ρ_1]	寄与割合 [%]	反応度値 の比 ^{Ⅲ)}
中心引出し	1 × 2	19.98	-0.0214 ± 10%	1.4	1.0
中心引出しを除くテスト領域	76 × 2	1518.48	-1.116 ± 8.0%	75.0	52.20 ± 13%
バッファ領域	40 × 2	799.2	-0.254 ± 51%	17.1	11.88 ± 52%
制御・安全棒引出し	8 × 2	863.392	-0.060 ± 264%	4.0	2.8 ± 264%
ドライバー領域	116 × 2 ^{Ⅳ)}	2317.68	-0.037 ± 202%	2.5	1.7 ± 202%
合計			-1.49 ± 16%	100.0	69.6 ± 19%

Ⅰ) 各領域で、引出し装荷本数に本文記載の 1 格子管当たりの余分に存在するステンレス鋼の重量を乗じたもの

Ⅱ) 各領域で、ステンレス鋼の重量に表 B.19 の単位重量当たりのステンレス鋼の反応度値を乗じたもの

Ⅲ) 中心引出しの反応度値で規格化

Ⅳ) 図 B.1 の片側集合体当たりに PuDA 引出しを 64 本装荷した径方向に対称な炉心のドライバー燃料引出し本数

標準引出しの燃料板を装荷した領域よりも標準引出し前端面の厚さ 0.08 cm だけ密着面側に突き出ていることになる。この底面と両側面の突き出た部分のステンレス鋼の体積は、

$$\{(4.94 + 2 \times 0.15) \times 0.15 + 2 \times 5.11 \times 0.15\} \times 0.08 = 0.186 \text{ cm}^3 \quad (\text{B.23})$$

となり、両者の和は、 $7.573 + 0.186 = 7.759 \text{ cm}^3$ であり、参考文献 [22] より、この引出しのステンレス鋼の密度には 7.9 g/cm^3 を用いて、この部分のステンレス鋼の重量は $7.759 \text{ cm}^3 \times 7.9 \text{ g/cm}^3 = 61.296 \text{ g}$ となる。したがって、制御・安全棒引出しを装荷した部分では、余分に存在するステンレス重量は、1 格子管当たり $61.296 - 7.334 = 53.962 \text{ g}$ である。

各領域の引出し装荷本数（格子管数）に、ここまでに求めた引出し種類別の 1 格子管当たりの余分に存在するステンレス鋼の重量と、各領域の単位重量当たりのステンレス鋼の反応度値の平均値を乗じて、炉心の全領域でその合計をとることにより、決定論手法による計算結果と比較する際に補正量として必要な密着面のステンレス鋼反応度値を求めた。その結果は表 B.20 に示すように $-1.49 \rho_1 \pm 16\%$ すなわち $-0.769 \rho_0 \pm 16\%$ であった^{Ⅲ)}。同表より、ドライバー領域は引出し装荷本数が多いがその寄与割合が 2.5% と小さい。これは、この領域が炉心の外側にあるため、単位重量当たりのステンレス鋼の負の反応度値が小さくなることと、集合体密着面の間隙を通しての中性子漏洩をステンレス鋼が妨げることによる正の反応度効果が加わることによる。先に記述したように、一連の測定は、片側集合体当たり PuDA 引出しを 67 本装荷した炉心で行ったが、図 B.14 より、ドライバー領域での測定を行った部分の炉心周辺の形状は、片側集合体当たり PuDA 引

Ⅲ) これまでの密着面ステンレス鋼反応度値の評価は $-0.419 \rho_0$ であったが、今回の評価結果はこの 1.8 倍となる。この大きな相違は、これまでの評価では片側集合体分のステンレス鋼のみを考えていたが、今回は、正しく両側の集合体のステンレス鋼の反応度値を評価したことにある。

出しを 64 本装荷した径方向に対称な炉心と同じである。したがって、ドライバー領域の密着面ステンレス鋼の反応度値の測定結果は、対称な炉心相当でのものと考えて良い。

このように、この密着面ステンレス鋼の反応度値は、片側集合体当たりに PuDA 引出しを 64 本装荷した径方向に対称な炉心におけるものであるが、ドライバー領域の寄与が 2.5% と小さなため、仮に、炉心周囲に数本のドライバー燃料引出しを追加しても、密着面ステンレス鋼反応度値の相違は、16% の不確かさに比べて無視し得るほど小さなものである。

B.2.7 余剰反応度の再現性と不確かさの評価

実効増倍率は余剰反応度を基に算出する。原子炉運転時は、6 組の安全棒 SR は全挿入で 2 組の制御棒 CR を途中まで引き抜くので、これら 2 組の CR を全挿入する時に増加する反応度の和が余剰反応度となる。ただし、この余剰反応度は、本来の臨界からの余剰反応度に一定の原子炉出力で運転時の未臨界度を加えた反応度である。これまでと同様に、この余剰反応度に炉心温度や集合体密着面間隙に関する補正を行う。

炉心に特別な実験用装荷物等が無く標準である Run のデータを抽出して、集合体の分離、密着に伴う余剰反応度の再現性として変化(ばらつき)を見た。いずれの Run も浅い未臨界なので、この余剰反応度は原子炉出力レベルに依存する。したがって、この出力レベルやその他の炉心の状態が同じである Run ごとに、データを表 B.21~表 B.23 にまとめる。これら表の各 Run の余剰反応度は、基準の 20°C、間隙読み 0.000 mm での値となるように、既に反応度の温度補正と間隙補正を行った値である。

表 B.21 XIV-1 炉心における集合体分離密着時の余剰反応度の再現性 (1)

実験日 ^{Ⅰ)} Run No.	CR#1		CR#2		炉心温度		密着面間隙		余剰 反応度 ^{Ⅴ)} [ρ ₁]	CH#5 電流 [×10 ⁻⁷ A]	備考
	位置 [mm]	反応度 ^{Ⅱ)} [ρ ₁]	位置 [mm]	反応度 ^{Ⅱ)} [ρ ₁]	温度 [°C]	反応度 ^{Ⅲ)} [ρ ₁]	間隙 [mm]	反応度 ^{Ⅳ)} [ρ ₁]			
6/19 No.2	75.01	2.8629	125.22	4.5372	20.42	0.0537	-0.031	-0.0208	7.433	0.308	
6/19 No.4	75.00	2.8626	127.13	4.5940	20.12	0.0153	-0.037	-0.0249	7.447	0.308	
6/20 No.2	74.99	2.8622	126.06	4.5623	20.42	0.0537	-0.036	-0.0242	7.454	0.308	

Ⅰ) いずれも 1986 年

Ⅱ) この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

Ⅲ) 炉心温度の読みを左記の値から基準の 20.00°C に変化させる時に加わる反応度

Ⅳ) 集合体密着面間隙の読みを左記の値から基準の 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

Ⅴ) 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00°C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度

いずれも、図 B.1 の径方向に対称な炉心から F119/20、F133/20、F133/32、M119/20、M133/20、M133/32 にて合計 6 本の DUB 引出しを 6 本の PuDA 引出しに置き換え、片側集合体当たりの PuDA 引出し装荷本数を 67 本とした炉心で実験実施

表 B.22 XIV-1 炉心における集合体分離密着時の余剰反応度の再現性 (2)

実験日 ¹⁾ Run No.	CR#1		CR#2		炉心温度		密着面間隙		余剰 反応度 ^{V)} [ρ_1]	CH#5 電流 [$\times 10^{-7}$ A]	備考
	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_1]	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_1]	温度 [$^{\circ}$ C]	反応度 ^{III)} [ρ_1]	間隙 [mm]	反応度 ^{IV)} [ρ_1]			
7/16 No.1	100.00	3.6953	97.49	3.6709	20.62	0.0793	-0.035	-0.0235	7.422	0.214	
7/16 No.4	100.00	3.6953	97.69	3.6775	20.56	0.0716	-0.035	-0.0235	7.421	0.214	
7/18 No.3	100.00	3.6953	98.73	3.7114	20.91	0.1164	-0.038	-0.0255	7.498	0.210	
7/22 No.8	100.01	3.6956	100.87	3.7807	20.68	0.0870	-0.035	-0.0235	7.540	0.208	同日の Run1 で SR 調整
7/23 No.6	100.00	3.6953	101.26	3.7933	20.70	0.0895	-0.036	-0.0242	7.554	0.206	
7/29 No.3	100.00	3.6953	97.94	3.6856	21.56	0.1995	-0.032	-0.0215	7.559	0.208	
7/31 No.3	100.00	3.6953	96.27	3.6309	21.83	0.2341	-0.032	-0.0215	7.539	0.207	
8/5 No.6	100.00	3.6953	103.64	3.8698	19.76	-0.0307	-0.034	-0.0229	7.512	0.208	

¹⁾ いずれも 1986 年

^{II)} この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

^{III)} 炉心温度の読みを左記の値から基準の 20.00 $^{\circ}$ C に変化させる時に加わる反応度

^{IV)} 集合体密着面間隙の読みを左記の値から基準の 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

^{V)} 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00 $^{\circ}$ C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度

いずれも、図 B.1 の径方向に対称な炉心から F119/20、F133/20、F133/32、M119/20、M133/20、M133/32 にて合計 6 本の DUB 引出しを 6 本の PuDA 引出しに置き換え、片側集合体当たりの PuDA 引出し装荷本数を 67 本とした炉心で実験実施、核計装 CH#6 には 75% バッキングカレントを使用

各表内の余剰反応度の変化(ばらつき)は、ほとんどの Run の間で 0.04 ρ_1 の範囲内であるが、いくつかの Run の間では、最大で 0.14 ρ_1 変化する場合がある。この原因は、例えば SR の調整による引出し内の燃料の移動が考えられる。一方で、余剰反応度の再現性は、CR と SR の位置再現性、温度測定の不確かさ、間隙測定の不確かさからも、以下のように評価できる。8 組の CR と SR の位置再現性により生じる反応度の変化は

$$\pm\sqrt{0.002^2 \times 8} = 0.0057 \rho_1$$

である。集合体の分離と密着を行う場合の温度測定の不確かさ $\pm 0.1^{\circ}$ C より

$$\pm 0.1^{\circ}\text{C} \times (-0.1279) \rho_1 / ^{\circ}\text{C} = \pm 0.0128 \rho_1$$

が、これに伴う反応度の変化となる。間隙測定の不確かさ ± 0.02 mm より

$$\pm 0.02 \text{ mm} \times (-0.672) \rho_1 / \text{mm} = \pm 0.0134 \rho_1$$

が、これに伴う反応度の変化となる。これら 3 つの不確かさを合わせて、余剰反応度の再現性は

$$\pm\sqrt{0.0057^2 + 0.0128^2 + 0.0134^2} = \pm 0.019 \rho_1$$

となる。このように算出した余剰反応度の再現性と比べて、ほとんどの Run の間での余剰反応度の変化(ばらつき) 0.04 ρ_1 は有意ではない。

表 B.23 XIV-1 炉心における集合体分離密着時の余剰反応度の再現性 (3)

実験日 ¹⁾ Run No.	CR#1		CR#2		炉心温度		密着面間隙		余剰 反応度 ^{V)} [ρ_1]	CH#5 電流 [$\times 10^{-7}$ A]	備考
	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_1]	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_1]	温度 [$^{\circ}$ C]	反応度 ^{III)} [ρ_1]	間隙 [mm]	反応度 ^{IV)} [ρ_1]			
7/17 No.1	100.00	3.6953	96.18	3.6280	20.92	0.1177	-0.036	-0.0242	7.417	0.210	
7/17 No.5	100.00	3.6953	99.28	3.7292	20.69	0.0883	-0.040	-0.0269	7.486	0.209	同日の Run4 で SR 調整
7/23 No.2	100.00	3.6953	99.78	3.7455	21.10	0.1407	-0.035	-0.0235	7.558	0.208	
7/23 No.5	100.00	3.6953	101.00	3.7849	20.79	0.1010	-0.035	-0.0235	7.558	0.208	
7/25 No.4	100.00	3.6953	101.08	3.7875	20.69	0.0883	-0.036	-0.0242	7.547	0.207	
7/30 No.6	100.00	3.6953	96.93	3.6526	21.67	0.2136	-0.033	-0.0222	7.539	0.207	
8/20 No.1	99.99	3.6950	102.13	3.8214	20.17	0.0217	-0.044	-0.0295	7.509	0.208	
8/20 No.7	100.00	3.6953	105.86	3.9407	19.32	-0.0870	-0.043	-0.0289	7.520	0.207	
8/22 No.1	100.00	3.6953	103.63	3.8695	19.88	-0.0153	-0.047	-0.0316	7.518	0.210	
8/22 No.8	100.01	3.6956	108.05	4.0101	18.83	-0.1496	-0.046	-0.0309	7.525	0.210	
8/28 No.1	99.99	3.6950	104.53	3.8983	19.70	-0.0384	-0.048	-0.0323	7.523	0.209	
8/28 No.8	100.00	3.6953	107.95	4.0069	18.94	-0.1356	-0.049	-0.0329	7.534	0.210	

¹⁾ いずれも 1986 年

^{II)} この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

^{III)} 炉心温度の読みを左記の値から基準の 20.00 $^{\circ}$ C に変化させる時に加わる反応度

^{IV)} 集合体密着面間隙の読みを左記の値から基準の 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

^{V)} 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00 $^{\circ}$ C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度

いずれも、図 B.1 の径方向に対称な炉心から F119/20、F133/20、F133/32、M119/20、M133/20、M133/32 にて合計 6 本の DUB 引出しを 6 本の PuDA 引出しに置き換え、片側集合体当たりの PuDA 引出し装荷本数を 67 本とした炉心で実験実施、核計装 CH#6 には 75% バッキングカレントを使用

なお、いずれの Run も 2 組の CR は 100 mm 程度で同じであり、この CR 位置の差から Run の間の余剰反応度の差を計算するための制御棒校正の不確かさは、余剰反応度の再現性には影響しない。ほとんどの Run の間で炉心温度の差は 1 $^{\circ}$ C 以内であるため、温度係数の不確かさによる反応度差の不確かさは $\pm 0.008 \rho_1$ よりも小さく、余剰反応度の再現性への影響は小さい。さらに、集合体密着面間隙の差も 0.02 mm 以内であるため、間隙係数の不確かさによる反応度差の不確かさは $\pm 0.0007 \rho_1$ よりも小さく、余剰反応度の再現性への影響は小さい。

実効増倍率を評価するための基となる炉心の余剰反応度は、表 B.22 と表 B.23 に記載の 20 回の Run を採用する。これら 20 回の Run の余剰反応度は、いずれも原子炉出力レベルとしての核計装 CH#5 の電流値が 0.21×10^{-7} のものである。これら 20 回の Run の余剰反応度はいずれも同程度の不確かさを持ち、その単純平均は $7.514 \rho_1$ で、20 回のデータのばらつきから標準偏差を求めると $\pm 0.044 \rho_1$ である。しかし、この平均値

の不確かさには、Run 間の余剰反応度の最大の変化の 1/2 である $\pm 0.071 \rho_1$ を採用した。

これに、2 組の CR の反応度値の校正に起因する不確かさを合わせて実効増倍率の評価に用いた。ここで、2 組の CR はいずれも 100 mm 程度引き抜き、1 組当たりの反応度値はおおよそ $4 \rho_1$ である。CR#1 では制御棒校正ステップ 9、10 の 109.99 mm、CR#2 では同ステップ 9、8 の 98.31 mm が、この 100 mm の直近の制御棒校正ステップである。いずれの CR も、これらステップに至るまでに SR#7 の 25 mm の移動による $1 \rho_1$ に温度変化による反応度変化の補正を加えた結果 $\pm 0.0034 \rho_1$ の不確かさを持つ反応度値を 4 回積み重ねることになる。109.99 mm や 98.31 mm から 100 mm の間の反応度値の不確かさは、これらに比べれば小さく無視する。両 CR の全挿入とこれら直近の校正ステップの両端での校正時の位置の再現性による不確かさも合わせると、制御棒校正の不確かさによる 2 組の CR の反応度値の不確かさは $\pm \sqrt{0.0034^2 \times 4 \times 2 + 0.002^2 \times 2 \times 2} = \pm 0.010 \rho_1$ となり、これも合わせると余剰反応度の不確かさは $\pm 0.072 \rho_1$ となる。なお、先に記述したように、余剰反応度測定時の SR や CR の位置再現性に伴う不確かさは平均値の不確かさ $\pm 0.071 \rho_1$ に含まれる。

これら 20 回の Run は、7 月中旬から 8 月下旬のおおよそ 1 カ月の間に行われ、この間にプルトニウム燃料中の ^{241}Pu が崩壊し ^{241}Am が生成する。これにより反応度変化がもたらされ余剰反応度が減少する。 ^{241}Pu の半減期は 14 年であり、1 カ月程度の間では ^{241}Pu は 0.4% 崩壊して減少するに過ぎず、また、その崩壊の時間依存性の指数関数は、この短期間では 1 次関数で良く近似できる。この微量の ^{241}Pu の崩壊と ^{241}Am の生成による反応度化は小さくて 1 次摂動で考えて良く、これによる余剰反応度減少も、この短期間では経過時間の 1 次関数で近似できる。表 B.22 と表 B.23 より、この期間に余剰反応度の減少は測定結果に明確に表れていないが、余剰反応度の平均値 $7.514 \rho_1$ は、この平均をとった期間のおおよそ中央となる 1986 年 8 月 1 日時点の値とする。

B.3 XIV-1(45V) 炉心の特性試験

B.3.1 制御棒校正曲線、温度係数と集合体密着面間隙係数の測定

B.1 節に記載した臨界到達時の片側集合体当たりの PuDA 引出し装荷本数が 102 本の炉心で、安全棒 SR#7 の 25 mm から 0 mm への挿入による反応度を基準反応度 $1 \rho_0$ と定義して、これを基にして制御棒 CR#1、CR#2 の校正を行った。後に、正炉周期法によりこの $1 \rho_0$ を $\% \Delta k/k$ 単位で求める。原子炉出力レベルは、核計装 CH#6 の電流値でモニターしその電流値は $0.200 \times 10^{-7} \text{A}$ レベルであった。制御棒校正時の各ステップの SR#7 や CR#1、CR#2 の配置等のデータを表 B.24 に示す。

表 B.24 XIV-1(45V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正前の制御棒校正曲線測定データ

ステップ	時刻 ^{Ⅰ)}	SR#7 位置 ^{Ⅱ)} [mm]	CR#1 位置 ^{Ⅱ)} [mm]	CR#2 位置 ^{Ⅱ)} [mm]	炉心温度 [°C]	密着面間隙 [mm]
1	13:46	0.00	0.69	216.39	26.68	-0.007
2	14:01	24.99 ^{Ⅲ)}	0.69	172.63	26.67	-0.007
3	14:09	0.00	24.14	172.63	26.67	-0.007
4	14:20	25.00	24.14	136.04	26.68	-0.007
5	14:28	0.00	49.56	136.04	26.67	-0.007
6	14:37	25.00	49.56	103.89	26.67	-0.007
7	14:46	0.00	76.89	103.89	26.66	-0.006
8	14:55	24.99	76.89	75.05	26.66	-0.007
9	15:04	0.00	106.64	75.05	26.66	-0.007
10	15:13	25.00	106.64	48.32	26.66	-0.007
11	15:23	0.00	139.79	48.32	26.66	-0.006
12	15:35	25.00	139.79	23.58	26.64	-0.006
13	15:43	0.00	177.71	23.58	26.64	-0.006
14	15:52	25.00	177.71	0.85	26.64	-0.007
15	16:02	0.00	223.01	0.85	26.64	-0.006
16	16:18	25.01	179.40	0.08	26.62	-0.006
17	16:29	0.00	179.40	22.67	26.63	-0.006
18	16:42	0.00	0.69	216.41	26.61	-0.006

^{Ⅰ)} 実験日 1986/12/2

^{Ⅱ)} 先端の位置の表示

^{Ⅲ)} 安全棒位置の表示の微小なずれのため 24.99 mm や 25.01 mm の場合もあった。

図 B.2 の径方向に対称な炉心から F128/17、F124/35、M128/17、M124/35 にて合計 4 本の DUB 引出しを 4 本の PuDA 引出しに置き換え、片側集合体当たりの PuDA 引出し装荷本数を 102 本とした炉心で校正実験を実施、核計装 CH#6 は $0.2 \times 10^{-7} \text{A}$ レベル

表 B.25 XIV-1(45V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正前の制御棒 CR#1 校正曲線

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]
				a	b	c	d	
0.69	24.14	49.56	76.89	0.20349	-0.82762	4.4577	-0.030719	0.69 ~ 49.56
24.14	49.56	76.89	106.64	-0.000304	-0.52073	4.3178	-0.01197	49.56 ~ 76.89
49.56	76.89	106.64	139.79	-0.029543	-0.45258	4.2673	-0.00009	76.89 ~ 106.64
76.89	106.64	139.79	177.71	0.014057	-0.59355	4.4149	-0.050066	106.64 ~ 139.79
106.64	139.79	177.71	223.01	0.015187	-0.59834	4.4215	-0.053057	139.79 ~ 223.01

各ステップ間に要した時間は 10 分程度と短く、温度変化による反応度変化は小さい。集合体密着面間隙の変化による反応度変化は、温度変化によるものよりも小さい。しかしながら、これらの反応度変化を補正する必要がある。この補正のためには、反応度の温度係数と間隙係数が必要となるものの、これらの係数を求めるには制御棒の校正結果を用いる。

そこで、最初に、これらの補正を行わずに制御棒校正実験のデータ処理を行い制御棒校正曲線を算出し、これを基にして温度係数と間隙係数を求める。次に、これらを用いて温度変化や間隙変化による反応度変化の補正を行い、再度、制御棒校正実験のデータ処理を行う。さらに、この再度の処理の結果得た制御棒校正曲線を基にして温度係数と間隙係数を求めるという繰り返しの処理を行った。

まず、ステップ 1 から 15 のデータを用いて、CR#1 の校正曲線を算出した。この制御棒の反応度値は、全挿入である 0.69 mm (ステップ 1、2) を $0 \rho_0$ とし、SR#7 との置換により、24.14 mm (ステップ 3、4) が $1 \rho_0$ 、49.56 mm (ステップ 5、6) が $2 \rho_0$ 、76.89 mm (ステップ 7、8) が $3 \rho_0$ 、106.64 mm (ステップ 9、10) が $4 \rho_0$ 、139.79 mm (ステップ 11、12) が $5 \rho_0$ 、177.71 mm (ステップ 13、14) が $6 \rho_0$ 、223.01 mm (ステップ 15) が $7 \rho_0$ 、となる。これらは CR#1 の先端の位置である。

0.69 mm から順番に 4 点ずつのデータを 3 次式に当てはめた、これら 4 点の範囲をカバーする制御棒の校正曲線を、制御棒位置を x mm、その位置の制御棒値を $y \rho_0$ とする以下の 3 次式として求めた。

$$y = a \left(\frac{x}{100} \right)^3 + b \left(\frac{x}{100} \right)^2 + c \left(\frac{x}{100} \right) + d \quad (\text{B.24})$$

3 次式の係数、a、b、c、d を以下に示す。任意の位置の制御棒反応度値は、この 3 次式で内挿して求める。3 次式の係数の各セットの適用範囲も表 B.25 に示す。これは、最小二乗法によるフィッティングではなくて 3 次式への当てはめなので、これに伴う不確かさは生じない。

同様に、CR#2 については、ステップ 1 から 16 のデータを用いて校正曲線を算出した。まず、全挿入である 0.08 mm (ステップ 16) を基準 $0 \rho_0$ とした。遡って、ステップ 15 と 14 で、CR#2 を 0.08 mm から 0.85 mm まで引き抜いた分の反応度値と補償するのは、SR#7 の $1 \rho_0$ 挿入分から CR#1 の 179.40mm から 223.01 mm までの引き抜き分の反応度値を差し引いたものとなる。後者は、上記の CR#1 の校正曲線の式より算出した結果、 $7.0\rho_0 - 6.0411\rho_0 = 0.95890\rho_0$ であった。したがって、CR#2 の 0.85 mm の反応度値

表 B.26 XIV-1(45V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正前の制御棒 CR#2 校正曲線

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]
				a	b	c	d	
0.08	0.85	23.58	48.32	6.7150	-5.6382	5.3896	-0.0043080	0.08 ~ 23.58
0.85	23.58	48.32	75.05	0.22684	-0.91800	4.6107	0.0019756	23.58 ~ 48.32
23.58	48.32	75.05	103.89	0.11469	-0.75320	4.5374	0.011565	48.32 ~ 75.05
48.32	75.05	103.89	136.04	-0.10576	-0.25220	4.1749	0.09462	75.05 ~ 103.89
75.05	103.89	136.04	172.63	0.037146	-0.70232	4.6342	-0.056959	103.89 ~ 136.04
103.89	136.04	172.63	216.39	-0.0073181	-0.51888	4.3872	0.051524	166.86 ~ 262.74

は、 $1.0\rho_0 - 0.95890\rho_0 = 0.0411\rho_0$ となる。23.58 mm(ステップ 13 と 12) が $1.0411 \rho_0$ 、48.32 mm(ステップ 11 と 10) が $2.0411 \rho_0$ 、75.05 mm(ステップ 9 と 8) が $3.0411 \rho_0$ 、103.89 mm(ステップ 7 と 6) が $4.0411 \rho_0$ 、136.04 mm(ステップ 5 と 4) が $5.0411 \rho_0$ 、172.63 mm(ステップ 3 と 2) が $6.0411 \rho_0$ 、216.39 mm(ステップ 1) が $7.0411 \rho_0$ となる。CR#1 と同様に、0.08 mm から遡って順番に 4 点ずつのデータを 3 次式に当てはめ、その係数、a、b、c、d を表 B.26 に示す。これら制御棒校正の不確かさの考え方は、XIV-1 炉心と同様である。

温度係数と集合体密着面間隙係数は、表 B.27 のように、温度と間隙をそれぞれ大きく変化させた 2 つの臨界データから測定した。炉心温度には、通常、固定側集合体の F1、F2、F3 チャンネルと移動側集合体の M1、M2、M3 チャンネルの合計 6 チャンネルの平均を採用するが、M2 チャンネルに不具合が生じたため、これを除く 5 チャンネルの平均値を採用した。しかし、間隙を全く変化させずに温度を変えたり、その逆を行うことはできなかった。そこで、反応度は温度変化と間隙変化について互いに独立に変化するとして、温度係数を $f_T \rho_0/^\circ\text{C}$ と間隙係数を $f_G \rho_0/\text{mm}$ とすると、各係数の測定のための各セットの臨界データ間の差から、連立方程式

$$0.5043(\pm 0.0083) = -6.42(\pm 0.14) \times f_T + -0.031(\pm 0.028) \times f_G \quad (\text{B.25})$$

$$-0.2602(\pm 0.0030) = 0.04(\pm 0.014) \times f_T + 0.431(\pm 0.028) \times f_G \quad (\text{B.26})$$

を立てることができる。ともに、左辺は各セットの臨界データ間の 2 本の制御棒 CR の反応度価値の合計の差、右辺第 1 項は温度係数に温度差を乗じたもので、同第 2 項は間隙係数に間隙の差を乗じたものである。反応度の差、温度差や間隙の差の不確かさは () 内に示す。これら不確かさの評価については以下に記述する。

温度係数を測定する 2 つの Run では集合体を分離、密着させて全ての CR と安全棒 SR を動かした。このため、2 つの Run の間の反応度の差の不確かさは、CR と SR の位置再現性と CR の校正の不確かさから求めた。まず、同じ位置に戻したものの、2 つの Run の間で動かした合計 7 組の CR と SR の移動前後の位置再現性による反応度の不確かさは $\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 \times 7} = \pm 0.0075 \rho_0$ である。2 つの Run での CR#2 の移動前後の位置は校正時のステップ 6、7 とステップ 8、9 の間に入るため、CR#2 による 2 つの Run の反応度差の不確かさは、CR#2 の移動前後の位置の再現性による不確かさと校正の不確かさ $\pm 0.4\%$ によるものからなる。した

表 B.27 XIV-1(45V) 炉心における温度係数と間隙係数の測定データ (温度変化と間隙変化による反応度変化補正前の制御棒校正曲線を使用)

測定項目	実験日 ^{D)}	CR#1		CR#2		CR 2 本	温度 [°C]	間隙 [mm]
	Run No.	位置 [mm]	反応度価値 [ρ ₀]	位置 [mm]	反応度価値 [ρ ₀]	反応度価値 合計 [ρ ₀]		
温度係数	11/28 No.13	99.99	3.7847	95.45	3.7578	7.5425	20.26	-0.038
	12/2 No.2	99.99	3.7847	80.97	3.2535	7.0382	26.68	-0.007
	差				0.5043	0.5043	-6.42	-0.031
間隙係数	12/3 No.17	76.89	3.0000	92.98	3.6734	6.6734	26.88	0.423
	12/3 No.19	76.89	3.0000	100.66	3.9336	6.9336	26.84	-0.008
	差				-0.2602	-0.2602	0.04	0.431

^{D)} いずれも 1986 年

いずれも、図 B.2 の径方向に対称な炉心から F128/17、F124/35、M128/17、M124/35 にて合計 4 本の DUB 引出しを 4 本の PuDA 引出しに置き換え、片側集合体当たりの PuDA 引出し装荷本数を 102 本とした炉心で実験実施、核計装 CH#6 は、温度係数測定時が 0.2×10^{-7} A レベル、間隙係数測定時が 0.5×10^{-7} A レベル

がって、2 つの Run の反応度差の不確かさは、これら全てを合わせて

$$\pm \sqrt{0.0075^2 + 0.002^2 \times 2 + (0.5043 \times 0.004)^2} = \pm 0.0083 \rho_0 \text{ となる。}$$

間隙係数の測定では、CR#1 と 6 組の安全棒 SR は 2 つの Run の間で動かさず、CR#2 のみを動かし、その移動前後の位置は校正時のステップ 6、7 とステップ 8、9 の間であった。したがって、2 つの Run の反応度差の不確かさは、CR#2 の移動前後の位置再現性による不確かさと校正の不確かさから

$$\pm \sqrt{0.002^2 \times 2 + (-0.2602 \times 0.004)^2} = \pm 0.0030 \rho_0 \text{ となる。}$$

温度差の不確かさは、温度係数の測定では集合体の分離と密着を行ったため $\pm \sqrt{0.1^2 \times 2} = \pm 0.14^\circ\text{C}$ である。間隙係数の測定では集合体を分離したものの分離の距離は数 mm と僅かで、温度の時間変化は密着を保ったまま測定を行う場合と同じであったことから $\pm \sqrt{0.01^2 \times 2} = \pm 0.014^\circ\text{C}$ である。

間隙差の不確かさは、いずれの測定も集合体の分離と密着を行ったため、 $\pm \sqrt{0.02^2 \times 2} = \pm 0.028 \text{ mm}$ である。

これらを f_T と f_G について解くと、温度係数と間隙係数は

$$f_T = \frac{0.5043(\pm 0.0083) \times 0.431(\pm 0.028) - (-0.2602)(\pm 0.0030) \times (-0.031)(\pm 0.028)}{-6.42(\pm 0.14) \times 0.431(\pm 0.028) - 0.04(\pm 0.014) \times (-0.031)(\pm 0.028)} = -0.0757 \rho_0 / ^\circ\text{C} \pm 10\% \quad (\text{B.27})$$

$$f_G = \frac{0.5043(\pm 0.0083) \times 0.04(\pm 0.014) - (-0.2602)(\pm 0.0030) \times (-6.42)(\pm 0.14)}{-0.031(\pm 0.028) \times 0.04(\pm 0.014) - 0.431(\pm 0.028) \times (-6.42)(\pm 0.14)} = -0.597 \rho_0 / \text{mm} \pm 7.3\% \quad (\text{B.28})$$

表 B.28 XIV-1(45V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正後の制御棒 CR#1 校正曲線測定データ

ステップ	制御棒位置 [mm]	補正前反応度値 [ρ_0]	補正量		補正後反応度値 ¹⁾ [ρ_0]
			温度変化分 [ρ_0]	間隙変化分 [ρ_0]	
1,2	0.69	0.0	-	-	0.0
3,4	24.14	1.0			1.0000
5,6	49.56	2.0	0.0008 ²⁾		2.0008
7,8	76.89	3.0	0.0008	-0.0006 ³⁾	3.0010
9,10	106.64	4.0			4.0010
11,12	139.79	5.0		-0.0006	5.0004
13,14	177.71	6.0			6.0004
15	223.01	7.0		-0.0006	6.9998

¹⁾ 現ステップの補正量とともに、前ステップまでの補正量をすべて加える。

²⁾ 温度 -0.01°C の変化による反応度変化

³⁾ 間隙 $+0.001\text{ mm}$ の変化による反応度変化

表 B.29 XIV-1(45V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正済みの制御棒 CR#1 校正曲線

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]
				a	b	c	d	
0.69	24.14	49.56	76.89	0.18903	-0.81043	4.4543	-0.030696	0.69 ~ 49.56
24.14	49.56	76.89	106.64	0.0036919	-0.53133	4.3271	-0.013647	49.56 ~ 76.89
49.56	76.89	106.64	139.79	-0.031312	-0.44974	4.2665	0.00057723	76.89 ~ 106.64
76.89	106.64	139.79	177.71	0.019437	-0.61382	4.4384	-0.057592	106.64 ~ 139.79
106.64	139.79	177.71	223.01	0.011630	-0.58071	4.3925	-0.036910	139.79 ~ 223.01

となる。

CR#1 に関して、校正の実験結果に温度変化や間隙変化に伴う反応度変化の補正を行った結果を表 B.28 に示す。この補正後の反応度値を用いた CR#1 の校正曲線の係数 a、b、c、d を表 B.29 に示す。

CR#2 に関して、校正の実験結果に温度変化や間隙変化に伴う反応度変化分の補正を行った結果を表 B.30 に示す。全挿入である 0.08 mm (ステップ 16) を基準 $0\ \rho_0$ とし、遡って、ステップ 15 と 14 で、CR#2 を 0.08 mm から 0.85 mm まで引き抜いた分の反応度値と補償するのは、温度変化と間隙変化の補正を考えなければ、SR#7 の $1\ \rho_0$ 挿入分から CR#1 の 179.40mm から 223.01 mm までの引き抜き分の反応度値を差し引いたものとなる。後者は、補正済みの CR#1 の校正曲線の式より算出した結果、 $6.9998\rho_0 - 6.0415\rho_0 = 0.9583\rho_0$ であった。したがって、表 B.30 に示す CR#2 の 0.85 mm の温度変化分補正

表 B.30 XIV-1(45V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正後の制御棒 CR#2 校正曲線測定データ

ステップ	制御棒位置 [mm]	補正前反応度値 [ρ_0]	補正量		補正後反応度値 ¹⁾ [ρ_0]
			温度変化分 [ρ_0]	間隙変化分 [ρ_0]	
16	0.08	0.0	-	-	0.0
15,14	0.85	0.0417	-0.0015 ^{II)}		0.0402
13,12	23.58	1.0417		-0.0006 ^{III)}	1.0396
11,10	48.32	2.0417	-0.0015		2.0381
9.8	75.05	3.0417			3.0381
7,6	103.89	4.0417		-0.0006	4.0375
5,4	136.04	5.0417			5.0375
3,2	172.63	6.0417	0.0008 ^{IV)}		6.0383
1	216.39	7.0417	-0.0008 ^{V)}		7.0375

1) 現ステップの補正量とともに、前ステップまでの補正量をすべて加える。

II) 温度 +0.02°C の変化による反応度変化

III) 間隙 +0.001 mm の変化による反応度変化

IV) 温度 -0.01°C の変化による反応度変化

V) 温度 +0.01°C の変化による反応度変化

表 B.31 XIV-1(45V) 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正済みの制御棒 CR#2 校正曲線

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]
				a	b	c	d	
0.08	0.85	23.58	48.32	5.6923	-4.9013	5.2659	-0.0042096	0.08 ~ 23.58
0.85	23.58	48.32	75.05	0.25243	-0.94383	4.6129	0.0010588	23.58 ~ 48.32
23.58	48.32	75.05	103.89	0.095362	-0.71301	4.5102	0.014490	48.32 ~ 75.05
48.32	75.05	103.89	136.04	-0.097603	-0.27448	4.1929	0.087189	75.05 ~ 103.89
75.05	103.89	136.04	172.63	0.036910	-0.69817	4.6252	-0.055488	103.89 ~ 136.04
103.89	136.04	172.63	216.39	-0.014587	-0.48571	4.3392	0.070153	166.86 ~ 262.74

前の反応度値は、 $1.0\rho_0 - 0.9583\rho_0 = 0.0417\rho_0$ となる。この補正後の反応度値を用いた CR#2 の校正曲線の係数 a、b、c、d を表 B.31 に示す。

ステップ間で最大で 0.02°C の温度変化がある。密着のまま一連の測定を行ったため、この温度変化の不確かさは $\pm\sqrt{0.01^2 \times 2} = \pm 0.014^\circ\text{C}$ である。温度係数を用いて温度変化による反応度値への補正量の不確かさを算出すると、温度変化が 0.02°C の時でも

$$\pm\sqrt{(-0.0757 \times 0.014)^2 + (0.02 \times (-0.0757) \times 0.10)^2} = \pm 0.0011\rho_0 \text{ である。}$$

ここで、温度変化が小さいため平方根内第 2 項の温度係数の不確かさ $\pm 10\%$ の寄与は小さく無視し得る。集合体の密着を保つ場合、仮に温度変化が無くとも温度測定に $\pm 0.01^\circ\text{C}$ の不確かさが有ることから $\pm\sqrt{0.01^2 \times 2} \times (-0.0757) = \pm 0.0011 \rho_0$ の不確かさが生じる。

次に、ほとんどのステップ間で間隙の変化は 0.001 mm かこれより小さい。密着のまま一連の測定を行ったため、ステップ間でこの間隙変化の不確かさは $\pm\sqrt{0.001^2 \times 2} = \pm 0.0014 \text{ mm}$ である。間隙係数を用いて、この不確かさによる反応度価値への補正量の不確かさを算出すると、間隙変化が 0.001 mm の時に

$$\pm\sqrt{(-0.597 \times 0.0014)^2 + (0.001 \times (-0.597) \times 0.073)^2} = \pm 0.0008 \rho_0$$

となる。ここで、間隙変化が僅かであるため平方根内第 2 項の間隙係数の不確かさ $\pm 7.3\%$ の寄与は小さく無視し得る。集合体の密着を保ったままで、仮に間隙変化が無くとも間隙測定に $\pm 0.001 \text{ mm}$ の不確かさが有ることから、 $\pm\sqrt{0.001^2 \times 2} \times (-0.597) = \pm 0.0008 \rho_0$ の不確かさが生じる。

すなわち、ステップ間で温度や間隙の変化が無い場合であっても、温度や間隙の測定の不確かさにより $1 \rho_0$ に補正を行った後の反応度価値の不確かさは、これまでの SR#7 の 25 mm 移動時の両端での位置再現性に伴う不確かさの他に、温度や間隙の測定による不確かさも合わせて $\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 + 0.0011^2 + 0.0008^2} = \pm 0.0031 \rho_0$ ($\pm 0.31\%$) となる。したがって、CR#1 や CR#2 のステップ間の移動時の位置再現性による不確かさ $\pm 0.28\%$ も合わせて、補正後の制御棒校正の不確かさは $\pm\sqrt{0.31^2 + 0.28^2} = \pm 0.42\%$ となる。

温度係数と間隙係数の測定時の反応度の差をこれらの補正後の制御棒校正曲線を用いて求めた結果を表 B.32 に示す。温度と間隙のデータは表 B.27 と同じである。制御棒校正曲線を変更しても反応度の差は $0.0003 \rho_0$ だけ変化するに過ぎず、この変化は $1 \rho_0$ のオーダーの反応度の差と比べて僅かであった。補正後の制御棒校正の不確かさが補正前に比べて少し大きくなり $\pm 0.42\%$ となったが、温度係数と間隙係数の測定いずれにおいても、反応度の差の不確かさはほぼ変わらなかった。温度係数と間隙係数の新たな値と不確かさは

$$f_T = \frac{0.5040(\pm 0.0083) \times 0.431(\pm 0.028) - (-0.2601)(\pm 0.0030) \times (-0.031)(\pm 0.028)}{-6.42(\pm 0.14) \times 0.431(\pm 0.028) - 0.04(\pm 0.014) \times (-0.031)(\pm 0.028)}$$

$$= -0.0756 \rho_0 / ^\circ\text{C} \pm 10\% \quad (\text{B.29})$$

$$f_G = \frac{0.5040(\pm 0.0083) \times 0.04(\pm 0.014) - (-0.2601)(\pm 0.0030) \times (-6.42)(\pm 0.14)}{-0.031(\pm 0.028) \times 0.04(\pm 0.014) - 0.431(\pm 0.028) \times (-6.42)(\pm 0.14)}$$

$$= -0.596 \rho_0 / \text{mm} \pm 7.3\% \quad (\text{B.30})$$

となる。これらの新たな温度係数と間隙係数は、いずれも、補正前の制御棒校正曲線を用いた値から 0.2% 未満の相違に過ぎず、係数の不確かさは変わらない。

制御棒校正実験において、温度変化と間隙変化による反応度価値への補正は、表 B.28 や表 B.30 から積算しても $0.006 \rho_0$ 以下と小さいため、温度係数と間隙係数をこれらの新たな値に変更しても、温度変化や間隙変化による補正量への影響は無視し得るほど小さい。すなわち、 $0.006 \rho_0$ 以下の補正量が 0.2% 変化するに過ぎず無視し得る。したがって、最終的に、温度変化と間隙変化による反応度変化補正済みの制御棒校正曲線である表 B.29、表 B.31 と上記の新たな温度係数と間隙係数を採用する。

表 B.32 XIV-1(45V) 炉心における温度係数と間隙係数の測定データ (温度変化と間隙変化による反応度変化補正後の制御棒校正曲線を使用)

測定項目	実験日 ¹⁾	CR#1		CR#2		CR 2 本	温度 [°C]	間隙 [mm]
	Run No.	位置 [mm]	反応度係数 [ρ_0]	位置 [mm]	反応度係数 [ρ_0]	反応度係数 合計 [ρ_0]		
温度係数	11/28 No.13	99.99	3.7857	95.45	3.7544	7.5401	20.26	-0.038
	12/2 No.2	99.99	3.7857	80.97	3.2504	7.0361	26.68	-0.007
	差				0.5040	0.5040	-6.42	-0.031
間隙係数	12/3 No.17	76.89	3.0010	92.98	3.6700	6.6710	26.88	0.423
	12/3 No.19	76.89	3.0010	100.66	3.9301	6.9311	26.84	-0.008
	差				-0.2601	-0.2601	0.04	0.431

¹⁾ いずれも 1986 年

いずれも、図 B.2 の径方向に対称な炉心から F128/17、F124/35、M128/17、M124/35 にて合計 4 本の DUB 引出しを 4 本の PuDA 引出しに置き換え、片側集合体当たりの PuDA 引出し装荷本数を 102 本とした炉心で実験実施、核計装 CH#6 は、温度係数測定時が 0.2×10^{-7} A レベル、間隙係数測定時が 0.5×10^{-7} A レベル

B.3.2 基準反応度の測定

SR#7 の 25 mm から 0 mm への挿入による基準反応度 $1 \rho_0$ を正炉周期法により測定した。一定の原子炉出力で運転時は浅い未臨界なので、この状態から反応度 $1 \rho_0$ を印加しても、この印加反応度から印加前の未臨界度を差し引いた反応度だけ超臨界となる。そこで、この未臨界度を別に測定して、これに相当する CR#2 挿入量を求めておき、原子炉周期測定時に SR#7 の 25 mm に加えてこの未臨界度分も CR#2 を同時に挿入することにより、 $1 \rho_0$ の超臨界として原子炉周期を測定した。

3.4 節のとおり、線形出力系の読みが C_a 、 C_b である時の未臨界度を、それぞれ ρ_a 、 ρ_b とすると、中性子源増倍法を基にして

$$\rho_b = \frac{\rho_a - \rho_b}{\frac{C_b}{C_a} - 1} \quad (\text{B.31})$$

である。

基準反応度測定のための安全棒と制御棒の配置を表 B.33 に示す。まず、SR#7 を 0.00 mm、CR#1 を 100.00 mm、CR#2 を 81.18 mm として核計装 CH#5 で 0.206×10^{-7} A (C_a) で定常とした。次に、CH#5 をこれより一桁高い 0.206×10^{-6} A (C_b) で定常とするために、CR#2 のみ調整したところ 73.60 mm となった。CR#2 の反応度係数は、制御棒の校正曲線から全挿入 0.08 mm を基準として、81.18 mm が $3.2579 \rho_0$ 、73.60 mm が $2.9858 \rho_0$ である。さらに、この間に炉心温度が 0.01°C 低下した。温度係数からこの温度低下を反応度変化にすると $0.0008 \rho_0 \pm 0.0011 \rho_0$ となる。これまでと同じく、この反応度変化の不確かさは、2つの原子炉出力

表 B.33 XIV-1(45V) 炉心における基準反応度測定のための安全棒と制御棒の配置

実験日 ¹⁾ Run No.	ステップ	SR#7 ²⁾		CR#1		CR#2		炉心温度 [°C]	CH#5 電流値 [A]	反応度 [ρ ₀]
		位置 [mm]	反応度 ³⁾ [ρ ₀]	位置 [mm]	反応度 ³⁾ [ρ ₀]	位置 [mm]	反応度値 ³⁾ [ρ ₀]			
12/2 No.21	1	0.00	0.0000	100.00	3.7861	81.18	3.2579	26.60	0.206×10 ⁻⁷	-0.3032
12/2 No.22	2	0.00	0.0000	100.00	3.7861	73.60	2.9858	26.59	0.206×10 ⁻⁶	-0.0303
12/2 No.23	3	25.00	1.0000	70.91	2.7888	73.60	2.9858	26.58	0.203×10 ⁻⁶	-0.0307
	4 ⁴⁾	25.00	1.0000	70.91	2.7888	72.77	2.9557		(未臨界)	-0.0006
	5	00.00	0.0000	70.91	2.7888	72.77	2.9557		(炉周期測定)	0.9994

¹⁾ いずれも 1986 年

²⁾ 他の安全棒は全挿入で固定

³⁾ この SR または CR を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

⁴⁾ このステップは、測定手順の説明のために記載したものであり、実際は、この CR と SR の配置はとらない。
集合体密着面間隙は変化なし

図 B.2 の径方向に対称な炉心から F128/17、F124/35、M128/17、M124/35 にて合計 4 本の DUB 引出しを 4 本の PuDA 引出しに置き換え、片側集合体当たりの PuDA 引出し装荷本数を 102 本とした炉心で実験実施

レベルでの温度測定の不確かさを合わせた $\pm\sqrt{0.01^2 \times 2}$ と温度係数の不確かさ $\pm 10\%$ から求め、前者の寄与が大きい。集合体密着面間隙の変化は無いが、間隙測定の不確かさ $\pm\sqrt{0.001^2 \times 2}$ mm による $\pm 0.0008 \rho_0$ の不確かさが発生する。

2つの原子炉出力レベルの未臨界度の差は、この温度変化による反応度変化を補正して $\rho_a - \rho_b$ は $0.2721\rho_0 + 0.0008\rho_0 = 0.2729\rho_0 \pm 0.0033 \rho_0$ ($\pm 1.2\%$) となる。この不確かさは CR#2 の移動の両端での位置再現性による不確かさ、CR#2 の校正の不確かさ、温度変化による反応度変化の補正の不確かさ $\pm 0.0011 \rho_0$ と間隙測定の不確かさによる $\pm 0.0008 \rho_0$ から

$$\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 + ((3.2579 - 3.0381) \times 0.0042)^2 + ((3.0381 - 2.9858) \times 0.0042)^2 + 0.0011^2 + 0.0008^2}$$

$$= \pm 0.0033\rho_0$$

と算出した。制御棒校正のステップ 8、9 の CR#2 位置 75.05 mm が、CR#2 の 81.18 mm から 73.60 mm への移動の間にあるため不確かさをこのように評価した。

したがって、(B.31) 式を用いて核計装 CH#5 が 0.206×10^{-6} A で運転時の未臨界度は $0.0303 \rho_0 \pm 0.0004 \rho_0$ ($\pm 1.2\%$) となる。ここで、2つの出力レベルでの CH#5 の電流値の比の不確かさは、この $\pm 1.2\%$ に比べて十分小さいので無視した。この未臨界度分だけ CR#2 を挿入すれば、SR#7 を 25.00 mm 引き抜いた状態で臨界となる。

未臨界度の測定を SR#7 を全挿入として行ったため、ステップ 3 において原子炉周期測定の準備として SR#7 を 25 mm まで引き抜き、これにより低下する $1 \rho_0$ の反応度を補償しようとして CR#1 を 100.00 mm から

70.91 mm まで挿入したところ、核計装 CH#5 が 0.203×10^{-6} A で定常となった。ステップ 3 ではステップ 2 より CH#5 の電流値が 1.5% 低下し、これに伴い未臨界度が 1.5% すなわち $0.0004 \rho_0$ 大きくなった。

このようにして、反応度 $-0.0307 \rho_0 \pm 0.0004 \rho_0$ ($\pm 1.2\%$) のステップ 3 から、SR#7 を 25.00 mm 挿入して $1.000 \rho_0 \pm 0.0028 \rho_0$ を加え、同時に CR#2 を 73.60 mm から大きく引き抜き原子炉出力を低下させた後に 72.77 mm まで 0.83 mm 挿入して $0.0301 \rho_0 \pm 0.0028 \rho_0$ を加えることにより、ステップ 5 の $0.9994 \rho_0 \pm 0.0040 \rho_0$ の超臨界にした。ここで、SR#7 の挿入による $1 \rho_0$ と CR#2 挿入による $0.0301 \rho_0$ の不確かさは、これらの移動の両端での位置の再現性から求めた。CR#2 の移動量が小さいため、その校正の不確かさの寄与は無視し得る。ステップ 5 の反応度 $0.9994 \rho_0$ の不確かさは、これらとステップ 3 の反応度の不確かさ $\pm 0.0004 \rho_0$ を合わせて $\pm \sqrt{0.0028^2 + 0.0028^2 + 0.0004^2} = \pm 0.0040 \rho_0$ となる。

原子炉出力の増加は核計装 CH#5 でモニターし、これが 0.3×10^{-6} A から 0.6×10^{-6} A、 0.4×10^{-6} A から 0.8×10^{-6} A、 0.2×10^{-5} A から 0.4×10^{-5} A、 0.3×10^{-5} A から 0.6×10^{-5} A の間で、2 名の測定者がそれぞれのストップウォッチで測定した倍加時間は、48.3 秒、48.2 秒、48.3 秒、48.4 秒、48.4 秒、48.4 秒、48.9 秒、49.0 秒であり、これらの平均 48.5 秒を採用した。その不確かさは、これまでの経験から ± 0.5 秒を見込んだ。これより、原子炉周期は $T = 48.5 / \ln(2) = 70.0 \pm 0.7$ 秒となる。この原子炉周期より、逆時間方程式 (4.1) と JENDL-4.0 の遅発中性子データ評価値に基づく動特性パラメータにより反応度を求めた結果、 $0.9994 \rho_0 \pm 0.0040 \rho_0$ ($\pm 0.40\%$) = $0.0748\% \Delta k/k$ であった。すなわち、 $1 \rho_0 = 0.0748\% \Delta k/k$ である。この基準反応度の不確かさは、用いた遅発中性子データによる不確かさの寄与を合わせて B.5 節に記述する。

B.3.3 炉心周辺部での燃料引出し反応度値の測定

表 B.34 にまとめる測定結果で、PuDA 引出しは DUB 引出しとの置換反応度値として測定したものである。これらの反応度値は、制御棒 CR#2 で補償することにより測定した。すなわち、集合体を分離して引出しを入れ替えた後に集合体を再密着することによる引出しの置換前後の 2 つの Run の間での CR#2 の位置の差を求めた。これを制御棒校正曲線より反応度値に換算して、さらに、2 つの Run の間での炉心温度差と集合体密着面間隙の差による反応度差を補正した。

表 B.34 では、この補正した置換反応度値を簡便に算出するため、制御棒に関しては、各 Run の制御棒の位置と基準とする全挿入位置の差を反応度値に換算して示す。この全挿入位置は、表 B.24 より CR#1 は 0.69 mm で CR#2 は 0.08 mm である。炉心温度に関しては、各 Run の温度と基準とする 20°C との差を反応度差に換算して示す。集合体密着面間隙に関しては、各 Run の間隙と基準とする 0.000 mm との差を反応度差に換算して示す。これら制御棒の反応度値、温度差と間隙の差による反応度差を全て足し合わすと、温度 20.00°C 、間隙読み 0.000 mm の基準状態に補正した炉心の余剰反応度となる^{IV)}。2 つの Run の間でこれら補正した余剰反応度の差をとることにより、簡便に、2 つの Run の間の補正した反応度の差、すなわち引出しの

^{IV)} ただし、この余剰反応度は浅い未臨界から制御棒の挿入により印加できる反応度変化であり、本来の臨界からの余剰反応度とするためには、未臨界度分の補正を行う必要がある。

表 B.34 XIV-1(45V) 炉心におけるドライバー領域の燃料引出しの置換反応度値

実験日 ^{Ⅰ)} Run No.	引出し 位置 種類	CR#1		CR#2		炉心温度		密着面間隙		余剰 反応度 ^{Ⅴ)} [ρ_0]	反応度 値 ^{Ⅵ)} [ρ_0]
		位置 [mm]	反応度 ^{Ⅱ)} [ρ_0]	位置 [mm]	反応度 ^{Ⅱ)} [ρ_0]	温度 [°C]	反応度 ^{Ⅲ)} [ρ_0]	間隙 [mm]	反応度 ^{Ⅳ)} [ρ_0]		
12/4 No.1	F124/35 PuDA ^{Ⅶ)}	76.88	3.0006	99.35	3.8862	27.19	0.5436	0.005	0.0030	7.4334	0.876
12/4 No.2	(基準) ^{Ⅷ)}	76.88	3.0006	74.40	3.0147	27.15	0.5405	0.003	0.0018	6.5576	
12/4 No.3	F125/35 PuDA ^{Ⅸ)}	76.90	3.0013	51.34	2.1550	27.19	0.5436	0.003	0.0018	5.7017	-0.856
12/4 No.4	F126/35 PuDA ^{Ⅸ)}	76.88	3.0006	48.63	2.0501	27.19	0.5436	0.002	0.0012	5.5955	-0.962
12/4 No.5	F126/36 PuDA ^{Ⅶ)}	76.89	3.0010	85.67	3.4164	27.17	0.5421	0.002	0.0012	6.9607	0.403
12/4 No.6	F121/34 PuDA ^{Ⅸ)}	76.88	3.0006	51.23	2.1508	27.16	0.5413	0.001	0.0006	5.6933	-0.864

Ⅰ) いずれも 1986 年

Ⅱ) この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

Ⅲ) 炉心温度を左記の読みから基準とする 20.00°C に変化させる時に加わる反応度

Ⅳ) 集合体密着面間隙を左記の読みから基準とする 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

Ⅴ) 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00°C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度

Ⅵ) 基準の余剰反応度からの差で、不確かさはいずれも $\pm 0.022 \rho_0$

Ⅶ) DUB 引出し 1 本から PuDA 引出し 1 本への置換

Ⅷ) 図 B.2 の径方向に対称な炉心から F128/17、M128/17、M124/35 にて合計 3 本の DUB 引出しを 3 本の PuDA 引出しに置き換えた炉心を基準とする。

Ⅸ) PuDA 引出し 1 本から DUB 引出し 1 本への置換

核計装 CH#6 は 0.5×10^{-7} A レベル

置換反応度値を算出することができる。

このように、補正した余剰反応度の差として引出しの置換反応度値を算出するものの、その内訳は、2 つの Run の間で制御棒の位置の差を反応度値に換算し、これに温度や間隙の差を反応度差に換算して補正したものである。したがって、この置換反応度値の不確かさは、制御棒、安全棒の位置の再現性による不確かさと校正の不確かさ、温度測定と温度係数の不確かさや間隙測定と間隙係数の不確かさから算出した。例えば、No.1 と No.2 の 2 つの Run で測定した F124/35 の PuDA 引出しの反応度値の不確かさは、以下のように求めた。

制御棒に関しては、まず、同じ位置に戻したものの 2 つの Run の間で動かした CR#1 の位置再現性により生じる反応度の不確かさがこれまでと同じく

$$\pm\sqrt{0.002^2 \times 2} = 0.0028 \rho_0$$

である。次に、2つの Run の間の反応度差を補償する CR#2 に関しては、99.35 mm から 74.40 mm への移動前後の位置再現性による不確かさと校正の不確かさ $\pm 0.42\%$ によるものを合わせる。前者は CR#1 と同じである。後者は、位置 99.35 mm と 74.40 mm の間に制御棒校正ステップ 8、9 の 75.05 mm があるため、99.35 mm から 75.05 mm と 75.05 mm から 74.40 mm への移動の反応度値に分ける。それぞれが、 $0.8481 \rho_0$ と $0.0234 \rho_0$ なので CR#2 に関する不確かさは

$$\pm\sqrt{(0.8481 \times 0.0042)^2 + (0.0234 \times 0.0042)^2 + 0.002^2 \times 2} = 0.0045\rho_0$$

である。

安全棒に関しては、同日内では、通常、集合体の分離と再密着を行っても全挿入位置から動かすことはなく、同日内の 2つの Run の間で安全棒位置による不確かさは生じない。

炉心温度に関しては、集合体の分離と密着を行う時の温度測定の不確かさ $\pm 0.1^\circ\text{C}$ と温度係数の不確かさ $\pm 10\%$ を合わせて、温度変化による反応度変化の補正の不確かさは

$$\pm\sqrt{(\sqrt{0.1^2 \times 2} \times (-0.0756))^2 + (-0.0756 \times 0.10 \times (27.19 - 27.15))^2} = \pm 0.011 \rho_0$$

となる。温度差が小さなため、前者の寄与がこの不確かさの大部分を占める。

集合体密着面間隙に関しては、集合体の分離と密着を行う時の間隙測定の不確かさ $\pm 0.02 \text{ mm}$ と間隙係数の不確かさ $\pm 7.3\%$ を合わせて、間隙の差による反応度差の補正の不確かさは

$$\pm\sqrt{(\sqrt{0.02^2 \times 2} \times (-0.596))^2 + (-0.596 \times 0.073 \times (0.005 - 0.003))^2} = \pm 0.017 \rho_0$$

となる。間隙の差が小さなため、前者の寄与がこの不確かさの大部分を占める。

これら 4つの不確かさを合わせて、引出し置換反応度値の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.0028^2 + 0.0045^2 + 0.011^2 + 0.017^2} = \pm 0.021 \rho_0$$

となる。温度差と間隙の差による反応度差の補正の不確かさの寄与が大きい。他の Run の間の反応度差として測定した反応度値に関しても同様に算出した結果、いずれも不確かさは $\pm 0.021 \rho_0$ となった。

集合体の分離と再密着を伴う場合は、仮に、2つの Run の間で温度や間隙の差が無い場合でも、温度測定に伴う反応度の不確かさ

$$\pm\sqrt{0.1^2 \times 2} \text{ }^\circ\text{C} \times (-0.0756) \rho_0 / \text{ }^\circ\text{C} = \pm 0.011 \rho_0$$

と間隙測定に伴う反応度の不確かさ

$$\pm\sqrt{0.02^2 \times 2} \text{ mm} \times (-0.596) \rho_0 / \text{mm} = \pm 0.017 \rho_0$$

が生じる。

B.3.4 未臨界度の測定

実効増倍率は主に 2本の制御棒 CR の余剰反応度から算定するが、これに種々の補正を行う。そのうちのひとつが未臨界度である。基準反応度の測定時と同様に、浅い未臨界で核計装 CH#6 の読みが C_a 、 C_b である時の未臨界度をそれぞれ ρ_a 、 ρ_b とすると、中性子源増倍法を基にしてこれらには (B.31) 式の関係がある。表 B.35 に示すように、原子炉出力レベルを 2段階に変えた Run を 2組実施して、それぞれ未臨界度を求めた。各日の

表 B.35 XIV-1(45V) 炉心における未臨界度

実験日 ¹⁾	CR#1	CR#2	炉心温度		密着面間隙		余剰	CH#6	未臨界度		
Run No.	位置 [mm]	反応度 ¹⁾ [ρ_0]	位置 [mm]	反応度 ¹⁾ [ρ_0]	温度 [°C]	反応度 ¹⁾ [ρ_0]	間隙 [mm]	反応度 ¹⁾ [ρ_0]	電流 [$\times 10^{-7}$ A]	[ρ_0]	
12/2 No.21	100.00	3.7861	81.18	3.2579	26.60	0.4990	-0.006	-0.0036	7.5394	0.200	0.3032 $\pm 0.0036(1.2\%)$
12/2 No.22	100.00	3.7861	73.60	2.9858	26.59	0.4982	-0.006	-0.0036	7.2665	2.00	0.0303 $\pm 0.00036(1.2\%)$
12/3 No.1	24.14	1.0000	170.58	5.9862	27.14	0.5398	-0.008	-0.0048	7.5212	0.200	0.2960 $\pm 0.0038(1.3\%)$
12/3 No.2	24.14	1.0000	160.49	5.7227	27.11	0.5375	-0.009	-0.0054	7.2548	2.00	0.0296 $\pm 0.00038(1.3\%)$

¹⁾ いずれも 1986 年

¹⁾ この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

¹⁾ 炉心温度の読みを左記の値から基準の 20.00°C に変化させる時に加わる反応度

¹⁾ 集合体密着面間隙の読みを左記の値から基準の 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

¹⁾ 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00°C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度

いずれも、図 B.2 の径方向に対称な炉心から F128/17、F124/35、M128/17、M124/35 にて合計 4 本の DUB 引出しを 4 本の PuDA 引出しに置き換え、片側集合体当たりの PuDA 引出し装荷本数を 102 本とした炉心で実験実施、6 組の SR は全挿入

ここに記載したデータの他に、11/28 の臨界近接ステップ 5 でも同様の測定を行っているが、CR#1 を全挿入、CR#2 を 180 mm 以上引き抜き測定を行ったため不採用とした。

2 つの Run で余剰反応度の差が $\rho_a - \rho_b$ である。これら 2 つの Run の間で、CR#1 と全ての安全棒 SR は動かさず、集合体は密着したままであり間隙の変化も無いか僅かなので、この余剰反応度の差の不確かさは、CR#2 の移動による反応度差の不確かさと温度変化や間隙変化による反応度変化の補正の不確かさから以下のように算定した。

例えば、12/3 の 2 つの Run では、CR#2 の移動の両端での位置再現性と制御棒校正の不確かさより

$$\pm \sqrt{0.002^2 \times 2 + ((5.9862 - 5.7227) \times 0.0042)^2} = \pm 0.0030 \rho_0$$

の不確かさが生じる。集合体の密着を保持した時の温度測定の不確かさ $\pm 0.01^\circ\text{C}$ と温度係数の不確かさ $\pm 10\%$ より

$$\pm \sqrt{(\sqrt{0.01^2 \times 2} \times (-0.0756))^2 + (-0.0756 \times 0.10 \times (27.14 - 27.11))^2} = \pm 0.0011 \rho_0$$

の不確かさが生じる。間隙の変化は僅かであるが、間隙測定の不確かさより $\pm 0.0008 \rho_0$ の反応度の不確かさが生じる。

余剰反応度の差の不確かさは、これらを合わせて

$$\pm \sqrt{0.0030^2 + 0.0011^2 + 0.0008^2} = \pm 0.0033 \rho_0$$

となる。したがって、(B.31) 式を用いて核計装 CH#6 が 2.00×10^{-7} A で運転時の未臨界度は $0.0296 \rho_0 \pm$

0.00038 ρ_0 ($\pm 1.2\%$)となる。ここで、2つの出力レベルでのCH#6の電流値の比の不確かさは、この $\pm 1.2\%$ に比べて十分小さいので無視した。

中性子源増倍法より、未臨界度と、その時の原子炉出力レベルとしての核計装CH#6の電流値の積は一定となる。この積は、12/2が $6.06 \times 10^{-9} \rho_0 A \pm 1.2\%$ で12/3が $5.92 \times 10^{-9} \rho_0 A \pm 1.3\%$ となった。両者の相違2.5%はこれらの不確かさの程度であり、両者の平均をとり平均の不確かさは $\pm 1.3\%$ とする。すなわち、未臨界度とその時のCH#6の電流値の積の平均値は $5.99 \times 10^{-9} \rho_0 A \pm 1.3\%$ となり、これを基に余剰反応度に補正を行い実効増倍率を求める。

B.3.5 全挿入時の制御棒と安全棒引出しの先端面の密着面からのへこみの深さ分の反応度価値測定

XV炉心系と同様に全挿入時の制御棒と安全棒の引出しの前端面の密着面からのへこみの深さを測定して反応度価値に換算した。16本の引出しのへこみ深さの平均値は、本炉心では -0.99 mm であった。この深さに、密着面近傍での制御棒や安全棒の微分反応度価値である $1 \rho_0 / 25 \text{ mm}$ を乗じることにより、深さを反応度価値に換算して8倍することにより $0.318 \rho_0 \pm 0.011 \rho_0$ の補正量を得た。この不確かさも、1箇所の深さ測定の不確かさ $\pm 0.1 \text{ mm}$ を換算して $\sqrt{8}$ 倍したものである。

B.3.6 密着面でのステンレス鋼反応度価値の測定

本炉心では、密着面でのステンレス鋼反応度価値の測定は行わなかったため、他の炉心での測定結果を基にして本炉心でのこの反応度価値を評価する。

XV炉心系におけるこの反応度価値の測定については3.7節において記述したが、その基となったXIV-1炉心の測定値とともに、基準反応度を乗じて $\% \Delta k/k$ 単位に変換して表B.36に記載する。これより、不確かさを考えると、炉心のポリスチレンボイド率や炉心サイズが同程度の炉心では、密着面でのステンレス鋼反応度価値は同程度の値となることがわかる。そこで、XIV-1(45V)炉心では、XV-2(45V)炉心での測定値 $-0.029 \% \Delta k/k \pm 0.007 \% \Delta k/k$ を採用した。これは、 ρ_0 単位では $0.39 \rho_0 \pm 0.10 \rho_0$ である。

表 B.36 XIV-1 炉心及び XV 炉心系での密着面ステンレス鋼反応度価値の測定結果

炉心	XIV-1	XV-1	XV-2(45V)	XV-2(65V)	XV-2(80V)	XV-2(95V)
反応度価値	-0.073	-0.061	-0.029	-0.022	-0.020	-0.017
[$\% \Delta k/k$]	± 0.012	± 0.013	± 0.007	± 0.007	± 0.007	± 0.007

B.3.7 余剰反応度の再現性と不確かさの評価

実効増倍率は余剰反応度を基に算出する。原子炉運転時は、6組の安全棒SRは全挿入で2組の制御棒CRを途中まで引き抜くので、これら2組のCRを全挿入する時に加わる反応度の和が余剰反応度となる。ただし、

表 B.37 XIV-1(45V) 炉心における集合体分離密着時の余剰反応度の再現性 (1)

実験日 ¹⁾ Run No.	CR#1		CR#2		炉心温度		密着面間隙		余剰 反応度 ^{V)} [ρ_0]	CH#6 電流 [$\times 10^{-7}$ A]	備考
	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_0]	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_0]	温度 [$^{\circ}$ C]	反応度 ^{III)} [ρ_0]	間隙 [mm]	反応度 ^{IV)} [ρ_0]			
12/2 No.2	99.99	3.7857	80.97	3.2504	26.68	0.5050	-0.007	-0.0042	7.537	0.200	
12/2 No.21	100.00	3.7861	81.18	3.2579	26.60	0.4990	-0.006	-0.0036	7.539	0.200	
12/3 No.1	24.14	1.0000	170.58	5.9862	27.14	0.5398	-0.008	-0.0048	7.521	0.200	

¹⁾ いずれも 1986 年

^{II)} この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

^{III)} 炉心温度の読みを左記の値から基準の 20.00 $^{\circ}$ C に変化させる時に加わる反応度

^{IV)} 集合体密着面間隙の読みを左記の値から基準の 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

^{V)} 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00 $^{\circ}$ C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度

いずれも、図 B.2 の径方向に対称な炉心から F128/17、F124/35、M128/17、M124/35 にて合計 4 本の DUB 引出しを 4 本の PuDA 引出しに置き換え、片側集合体当たりの PuDA 引出し装荷本数を 102 本とした炉心で実験実施

この余剰反応度は、本来の臨界からの余剰反応度に一定の原子炉出力で運転時の未臨界度を加えた反応度である。これまでと同様に、この余剰反応度に炉心温度や集合体密着面間隙に関する補正を行う。

炉心に特別な実験用装荷物等が無く標準である Run のデータを抽出して、集合体の分離、密着に伴うこの余剰反応度の再現性として変化(ばらつき)を見た。いずれの Run も浅い未臨界なので、この余剰反応度は原子炉出力レベルに依存する。この出力レベルやその他の炉心の状態が同じである Run ごとに、データを表 B.37～表 B.39 にまとめる。これら表の各 Run の余剰反応度は、基準の 20 $^{\circ}$ C、間隙読み 0.000 mm での値となるように、既に反応度の温度補正と間隙補正を行った値である。

各表内で Run の間の余剰反応度の変化(ばらつき)は 0.022 ρ_0 の範囲内である。一方で、余剰反応度の再現性は、CR と SR の位置再現性、温度測定の不確かさ、間隙測定の不確かさからも、以下のように評価できる。

8 組の CR と SR の位置再現性により生じる反応度の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.002^2 \times 8} = \pm 0.0057 \rho_0$$

である。集合体の分離と密着を行う場合の温度測定の不確かさ $\pm 0.1^{\circ}$ C より

$$\pm 0.1^{\circ}\text{C}(-0.0756) \rho_0/^{\circ}\text{C} = \pm 0.0076 \rho_0$$

が、これに伴う反応度の不確かさとなる。間隙測定の不確かさ ± 0.02 mm より

$$\pm 0.02 \text{ mm}(-0.596) \rho_0/\text{mm} = \pm 0.012 \rho_0$$

が、これに伴う反応度の不確かさとなる。これら 3 つの不確かさを合わせて、余剰反応度の再現性は

$$\pm\sqrt{0.0057^2 + 0.0076^2 + 0.012^2} = \pm 0.015 \rho_0$$

となる。このように算出した余剰反応度の再現性と比べて、余剰反応度の変化(ばらつき) 0.022 ρ_0 は有意で

表 B.38 XIV-1(45V) 炉心における集合体分離密着時の余剰反応度の再現性 (2)

実験日 ¹⁾ Run No.	CR#1		CR#2		炉心温度		密着面間隙		余剰 反応度 ^{V)} [ρ_0]	CH#6 電流 [$\times 10^{-7}$ A]	備考
	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_0]	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_0]	温度 [$^{\circ}$ C]	反応度 ^{III)} [ρ_0]	間隙 [mm]	反応度 ^{IV)} [ρ_0]			
12/3 No.13	76.88	3.0006	100.41	3.9217	26.90	0.5216	-0.004	-0.0024	7.442	0.500	直前に SR 調整
12/3 No.19	76.89	3.0010	100.66	3.9301	26.84	0.5171	-0.008	-0.0048	7.443	0.500	
12/4 No.1	76.88	3.0006	99.35	3.8862	27.19	0.5436	0.005	0.0030	7.433	0.500	

¹⁾ いずれも 1986 年

^{II)} この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

^{III)} 炉心温度の読みを左記の値から基準の 20.00 $^{\circ}$ C に変化させる時に加わる反応度

^{IV)} 集合体密着面間隙の読みを左記の値から基準の 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

^{V)} 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00 $^{\circ}$ C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度

いずれも、図 B.2 の径方向に対称な炉心から F128/17、F124/35、M128/17、M124/35 にて合計 4 本の DUB 引出しを 4 本の PuDA 引出しに置き換え、片側集合体当たりの PuDA 引出し装荷本数を 102 本とした炉心で実験実施

はない。

なお、一部の例外を除き、各表で、いずれの Run も CR の位置は近く、この CR 位置の差から余剰反応度の差を計算するための制御棒校正の不確かさは、余剰反応度の再現性には影響しない。さらに、各表の Run の間で炉心温度の差は 1 $^{\circ}$ C 以内であるため、温度係数の不確かさによる反応度差の不確かさは $\pm 0.008 \rho_0$ よりも小さく、集合体密着面間隙の差も 0.01 mm 以内であるため、間隙係数の不確かさによる反応度差の不確かさは $\pm 0.0004 \rho_0$ よりも小さく、いずれも余剰反応度の再現性への影響は小さい。

各表内の Run の余剰反応度の平均をとり、この平均値に各表の原子炉出力時の未臨界度の補正を加えて異なる原子炉出力間で比較ができるようにし、さらに、PuDA 引出しの装荷本数が異なる場合は、表 B.34 に記載の反応度値を用いて片側集合体当たりの PuDA 引出し装荷本数が 100 本である径方向に対称な炉心相当の余剰反応度に補正したものを比較する。

表 B.37 では、余剰反応度の平均値が $7.533 \rho_0$ で、これから核計装 CH#6 の電流値が 0.200×10^{-7} A で運転時の未臨界度 $5.99 \times 10^{-9} \rho_0$ A / 0.200×10^{-7} A = $0.300 \rho_0$ を差し引き補正した。さらに、測定は片側集合体当たりの PuDA 引出し装荷本数が 102 本の炉心で行った。これを PuDA 引出し装荷本数が 100 本の径方向に対称な炉心とするためには、固定側集合体の F124/35、F128/17 と、これらとそれぞれ対面にある移動側集合体の M124/35、M128/17 の PuDA 引出しを DUB 引出しに変えれば良い。これら 4 つの位置はいずれも等価なので、F124/35 の DUB 引出しから PuDA 引出しへの置換反応度値 $0.876 \rho_0$ の 4 倍を差し引き補正した。これら 2 つの補正を行った余剰反応度は $7.533 \rho_0 - 5.99 \times 10^{-9} \rho_0$ A / 0.200×10^{-7} A - $0.876 \rho_0 \times 4 = 3.730 \rho_0$ となる。同様に、表 B.38 では、 $7.439 \rho_0 - 5.99 \times 10^{-9} \rho_0$ A / 0.500×10^{-7} A - $0.876 \rho_0 \times 4 = 3.815 \rho_0$ となる。

表 B.39 XIV-1(45V) 炉心における集合体分離密着時の余剰反応度の再現性 (3)

実験日 ^{D)} Run No.	CR#1		CR#2		炉心温度		密着面間隙		余剰 反応度 ^{V)} [ρ_0]	CH#6 電流 [$\times 10^{-6}$ A]	備考
	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_0]	位置 [mm]	反応度 ^{II)} [ρ_0]	温度 [$^{\circ}$ C]	反応度 ^{III)} [ρ_0]	間隙 [mm]	反応度 ^{IV)} [ρ_0]			
12/8 No.1	40.00	1.6334	47.88	2.0210	22.34	0.1769	-0.018	-0.0107	3.821	0.502	
12/9 No.1	40.00	1.6334	49.10	2.0684	21.87	0.1414	-0.023	-0.0137	3.830	0.502	
12/9 No.2	40.01	1.6338	49.18	2.0715	21.87	0.1414	-0.023	-0.0137	3.833	0.502	
12/10 No.1	40.01	1.6338	49.06	2.0668	21.86	0.1406	-0.024	-0.0143	3.827	0.502	
12/10 No.2	40.01	1.6338	49.18	2.0715	21.77	0.1338	-0.024	-0.0143	3.825	0.502	
12/11 No.1	40.01	1.6338	49.22	2.0730	21.70	0.1285	-0.024	-0.0143	3.821	0.503	
12/11 No.2	39.99	1.6331	49.38	2.0792	21.66	0.1255	-0.024	-0.0143	3.824	0.503	
12/15 No.1	40.01	1.6338	52.35	2.1939	20.05	0.0038	-0.034	-0.0203	3.811	0.504	

^{D)} いずれも 1986 年

^{II)} この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

^{III)} 炉心温度の読みを左記の値から基準の 20.00 $^{\circ}$ C に変化させる時に加わる反応度

^{IV)} 集合体密着面間隙の読みを左記の値から基準の 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

^{V)} 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00 $^{\circ}$ C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度

いずれも、図 B.2 の径方向に対称な炉心で実験実施

一方、表 B.39 では、片側集合体当たりの PuDA 引出し装荷本数が 100 本の径方向に対称な炉心での測定なので、 $3.824\rho_0 - 5.99 \times 10^{-9}\rho_0 A / 0.502 \times 10^{-6} A = 3.812\rho_0$ となる。表 B.38 と表 B.39 の補正後の余剰反応度の相違は 0.003 ρ_0 であり余剰反応度の再現性の算出結果 $\pm 0.015 \rho_0$ 内で良く一致するが、表 B.37 と表 B.38 の間には 0.085 ρ_0 の相違がある。この原因は、SR の調整による引出し内の燃料の移動が考えられる。

実効増倍率を評価するための基となる炉心の余剰反応度は、表 B.39 に記載の片側集合体当たりの PuDA 引出しを 100 本装荷した径方向に対称な炉心での 8 回の Run の平均値を採用する。片側集合体当たりの PuDA 引出し装荷本数が 102 本である表 B.37 と表 B.38 の測定結果を用いると、先に記述したように PuDA 引出しから DUB 引出しへの置換反応度価値 0.876 $\rho_0 \pm 0.021 \rho_0$ の 4 倍である 3.504 $\rho_0 \pm 0.084 \rho_0$ を大きな補正として差し引くことになり、 $\pm 0.084 \rho_0$ という大きな不確かさを補正後の余剰反応度を持ち込むことになる。したがって、これら PuDA 引出し装荷本数が 102 本の炉心の余剰反応度は不採用とした。

表 B.39 の 8 回の Run の余剰反応度の平均値は先に記述したように 3.824 ρ_0 であり、この平均値の不確かさは先に記述した余剰反応度の平均値の間の最大の相違である 0.085 ρ_0 の 1/2 である $\pm 0.043 \rho_0$ と、2 組の CR の反応度価値の校正に起因する不確かさを合わせたものとする。ここで、CR#1 は 40 mm、CR#2 は最大で 52.35 mm 引き抜き、CR#1 では制御棒校正ステップ 5、6 の 49.56 mm、CR#2 では同ステップ 11、10 の 48.32 mm が、直近の制御棒校正ステップである。2 組の CR は、これらステップに至るまでに SR#7 の 25 mm の移動による 1 ρ_0 に温度変化による反応度変化の補正を加えた結果 $\pm 0.0031 \rho_0$ の不確かさを持つ反応度価値を、

それぞれ2回積み重ねることになる。40 mm や 52.35 mm からこれら制御棒校正ステップ位置までの間の反応度値の不確かさは、これらに比べれば小さく無視する。両 CR の全挿入とこれら直近の校正ステップの両端での校正時の位置の再現性による不確かさも合わせると、制御棒校正の不確かさによる2組の CR の反応度値の不確かさは $\pm\sqrt{0.0031^2 \times 2 \times 2 + 0.002^2 \times 2 \times 2} = \pm 0.0074 \rho_0$ となり、この寄与も合わせると余剰反応度の不確かさは $\pm 0.044 \rho_0$ となる。なお、先に記述したように、表 B.39 の余剰反応度測定時の SR や CR の位置再現性に伴う不確かさは、既に平均値の不確かさ $\pm 0.043 \rho_0$ に含まれる。

これら8回の Run は、12月8日から12月15日の1週間の間に行われ、余剰反応度の平均値 $3.824 \rho_0 \pm 0.044 \rho_0$ は、この期間の中央となる1986年12月11日時点の値である。

B.4 XIV-2 炉心の特性試験

B.4.1 制御棒校正曲線、温度係数と集合体密着面間隙係数の測定

B.1 節に記載した片側集合体当たりの EUDA 引出し装荷本数が 44 本の径方向に対称な炉心で、安全棒 SR#3 の 25 mm から全挿入による反応度を基準反応度 $1 \rho_0$ と定義して、これを基にして置換法で制御棒校正を行った。後に、正炉周期法によりこの $1 \rho_0$ を $\% \Delta k/k$ 単位で求める。原子炉の出力レベルは、核計装 CH#6 の電流値でモニターしその電流値は 0.500×10^{-7} A レベルであった。制御棒校正時の各ステップの SR#3 や制御棒 CR#1、CR#2 の配置等のデータを表 B.40 に示す。

表 B.40 XIV-2 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正前の制御棒校正曲線測定データ

ステップ	時刻 ^{I)}	SR#3 位置 ^{II)} [mm]	CR#1 位置 ^{II)} [mm]	CR#2 位置 ^{II)} [mm]	炉心温度 [°C]	密着面間隙 [mm]
1	12:57	0.29	0.69	430.58	19.33	-0.037
2	13:32	25.00 ^{III)}	0.69	279.06	19.30	-0.038
3	13:52	0.29	23.90	279.05 ^{IV)}	19.29	-0.038
4	14:06	25.00	23.89 ^{IV)}	211.32	19.28	-0.038
5	14:17	0.29	49.53	211.32	19.28	-0.038
6	14:34	24.99	49.53	163.13	19.27	-0.038
7	14:41	0.28	77.91	163.13	19.27	-0.038
8	14:50	25.00	77.91	124.27	19.27	-0.038
9	14:56	0.29	109.53	124.27	19.26	-0.038
10	15:07	25.00	109.53	91.13	19.26	-0.038
11	15:15	0.28	145.78	91.13	19.27	-0.038
12	15:24	24.99	145.78	61.77	19.26	-0.038
13	15:35	0.29	189.63	61.77	19.25	-0.038
14	15:48	24.99	189.63	35.17	19.24	-0.038
15	15:58	0.29	247.54	35.16 ^{IV)}	19.24	-0.038
16	16:09	25.01	247.54	10.89	19.22	-0.038
17	16:16	0.28	344.48	10.89	19.22	-0.038
18	16:28	25.00	286.10	0.07	19.22	-0.038

I) 実験日 1987/3/3

II) 先端の位置の表示

III) 安全棒位置の表示の微小なずれのため 24.99 mm や 25.01 mm の場合もあった。

IV) 制御棒位置の表示の微小なずれのため前ステップの位置から僅かに異なる場合もあった。

いずれも、図 B.3 の径方向に対称な炉心で実験実施、核計装 CH#6 は 0.5×10^{-7} A レベル

表 B.41 XIV-2 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正前の制御棒 CR#1 校正曲線

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]
				a	b	c	d	
0.69	23.90	49.53	77.91	0.17216	-0.96055	4.5346	-0.031243	0.69 ~ 49.53
23.90	49.53	77.91	109.53	0.11473	-0.87363	4.4949	-0.025946	49.53 ~ 77.91
49.53	77.91	109.53	145.78	0.0068523	-0.61799	4.3027	0.019651	77.91 ~ 109.53
77.91	109.53	145.78	189.63	-0.0015604	-0.58996	4.2725	0.030116	109.53 ~ 145.78
109.53	145.78	189.63	247.54	0.038254	-0.76711	4.5289	-0.090438	145.78 ~ 189.63
145.78	189.63	247.54	344.48	0.047873	-0.82319	4.6353	-0.15626	189.63 ~ 344.48

各ステップ間に要した時間は 10 分程度と短く、温度変化による反応度変化は小さい。集合体密着面間隙の変化による反応度変化は、温度変化によるものよりも小さい。しかしながら、これらの反応度変化を補正する必要がある。この補正のためには、反応度の温度係数と間隙係数が必要となるものの、これらの係数を求めるには制御棒の校正結果を用いる。

そこで、最初に、これらの補正を行わずに制御棒校正実験のデータ処理を行い制御棒校正曲線を算出し、これを基にして温度係数と間隙係数を求める。次に、これらを用いて温度変化や間隙変化による反応度変化の補正を行い、再度、制御棒校正実験のデータ処理を行う。さらに、この再度の処理の結果得た制御棒校正曲線を基にして温度係数と間隙係数を求めるという繰り返しの処理を行った。

まず、ステップ 1 から 17 のデータを用いて、CR#1 の校正曲線を算出した。この制御棒の反応度値は、全挿入である 0.69 mm (ステップ 1、2) を 0 ρ_0 として、SR#3 との置換により、23.90 mm (ステップ 3、4) が 1 ρ_0 、49.53 mm (ステップ 5、6) が 2 ρ_0 、77.91 mm (ステップ 7、8) が 3 ρ_0 、109.53 mm (ステップ 9、10) が 4 ρ_0 、145.78 mm (ステップ 11、12) が 5 ρ_0 、189.63 mm (ステップ 13、14) が 6 ρ_0 、247.54 mm (ステップ 15、16) が 7 ρ_0 、344.48 mm (ステップ 17) が 8 ρ_0 となる。これらは CR#1 の先端の位置である。

0.69 mm から順番に 4 点ずつのデータを 3 次式に当てはめた、これら 4 点の範囲をカバーする制御棒の校正曲線を、制御棒位置を x mm、その位置の制御棒値を y ρ_0 とする以下の 3 次式として求めた。

$$y = a \left(\frac{x}{100} \right)^3 + b \left(\frac{x}{100} \right)^2 + c \left(\frac{x}{100} \right) + d \quad (\text{B.32})$$

3 次式の係数、a、b、c、d を表 B.41 に示す。任意の位置の制御棒反応度値は、この 3 次式で内挿して求める。3 次式の係数の各セットの適用範囲もこの表に示す。これは、最小二乗法によるフィッティングではなくて 3 次式への当てはめなので、これに伴う不確かさは生じない。

同様に、CR#2 については、ステップ 1 から 18 のデータを用いて校正曲線を算出した。まず、全挿入である 0.07 mm (ステップ 18) を基準 0 ρ_0 とした。遡って、ステップ 17 と 16 で、CR#2 を 0.07 mm から 10.89 mm まで引き抜いた分の反応度値と補償するのは、SR#7 の 1 ρ_0 挿入分から CR#1 の 286.10mm から 344.48 mm までの引き抜き分の反応度値を差し引いたものとなる。後者は、上記の CR#1 の校正曲線の

表 B.42 XIV-2 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正前の制御棒 CR#2 校正曲線

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]
				a	b	c	d	
0.07	10.89	35.17	61.77	0.68080	-1.4401	4.6636	-0.0032638	0.07 ~ 35.17
10.89	35.17	61.77	91.13	0.092822	-0.80610	4.4738	0.010647	35.17 ~ 61.77
35.17	61.77	91.13	124.27	0.011157	-0.65251	4.3839	0.026814	61.77 ~ 91.13
61.77	91.13	124.27	163.13	0.0046351	-0.63444	4.3678	0.031376	91.13 ~ 124.27
91.13	124.27	163.13	211.32	0.037068	-0.75720	4.5185	-0.028540	124.27 ~ 163.13
124.27	163.13	211.32	279.06	0.036014	-0.75195	4.5100	-0.024023	163.13 ~ 211.32
163.13	211.32	279.06	430.58	0.053960	-0.86923	4.7594	-0.196669	211.32 ~ 430.58

式より算出した結果、 $8.0\rho_0 - 7.4884\rho_0 = 0.5116\rho_0$ であった。したがって、CR#2 の 10.89 mm の反応度値は、 $1.0\rho_0 - 0.5116\rho_0 = 0.4884\rho_0$ となる。35.17 mm(ステップ 15 と 14) が $1.4884 \rho_0$ 、61.77 mm(ステップ 13 と 12) が $2.4884 \rho_0$ 、91.13 mm(ステップ 11 と 10) が $3.4884 \rho_0$ 、124.27 mm(ステップ 9 と 8) が $4.4884 \rho_0$ 、163.13 mm(ステップ 7 と 6) が $5.4884 \rho_0$ 、211.32 mm(ステップ 5 と 4) が $6.4884 \rho_0$ 、279.06 mm(ステップ 3 と 2) が $7.4884 \rho_0$ 、430.58 mm(ステップ 1) が $8.4884 \rho_0$ となる。CR#1 と同様に、0.07 mm から遡って順番に 4 点ずつのデータを 3 次式に当てはめ、その係数、a、b、c、d を表 B.42 に示す。これら制御棒校正の不確かさの考え方は、XIV-1 炉心と同様である。

温度係数と集合体密着面間隙係数は、表 B.43 のように、温度と間隙をそれぞれ大きく変化させた 2 つの臨界データから測定した。炉心温度には、通常、集合体の格子管内のいくつかの場所に設置した熱電対の中から、代表的な位置にある固定側の F1、F2、F3 チャンネルと移動側の M1、M2、M3 チャンネルの合計 6 チャンネルの平均値を採用するが、F1 と M1 チャンネルに不具合が生じたため、これらを除く 4 チャンネルの平均値を採用した。熱電対で発生した電圧を温度に変換するために校正定数が必要となるが、本炉心では、この校正定数を温度係数の測定時に見直した。表 B.44 に示すように、校正定数の見直しにより、温度表示は一様に約 0.5°C 高くなるものの、両日の温度差に関しては、見直し前後で 0.11°C の相違に過ぎず、これは、集合体の分離と密着を行った時の温度差の不確かさ $\pm\sqrt{0.1^2 \times 2} = \pm 0.14^\circ\text{C}$ よりも小さい。制御棒校正、基準反応度の測定や間隙係数の測定といった主要な特性試験はこの校正定数の見直し前に行ったため、見直し前の温度表示を採用する。

間隙を全く変化させずに温度を変えたり、その逆を行うことはできなかった。そこで、反応度は温度変化と間隙変化について互いに独立に変化するとして、温度係数を $f_T \rho_0/^\circ\text{C}$ と間隙係数を $f_G \rho_0/\text{mm}$ とすると、各係数の測定のための各セットの臨界データ間の差から、連立方程式

$$0.4000(\pm 0.0082) = -5.64(\pm 0.14) \times f_T + -0.023(\pm 0.028) \times f_G \quad (\text{B.33})$$

$$-0.3992(\pm 0.0042) = 0.02(\pm 0.014) \times f_T + 0.488(\pm 0.028) \times f_G \quad (\text{B.34})$$

表 B.43 XIV-2 炉心における温度係数と間隙係数の測定データ (温度変化と間隙変化による反応度変化補正前の制御棒校正曲線を使用)

測定項目	実験日 ^{D)}	CR#1		CR#2		CR 2 本	温度	間隙
	Run No.	位置 [mm]	反応度値 [ρ_0]	位置 [mm]	反応度値 [ρ_0]	反応度値 合計 [ρ_0]	[°C]	[mm]
温度係数	3/6 No.2	25.00	1.0451	24.14	1.0482	2.0933	19.31	-0.044
	3/10 No.1	25.00	1.0451	14.58	0.6482	1.6933	24.95	-0.021
	差				0.4000	0.4000	-5.64	-0.023
間隙係数	3/5 No.6	99.99	3.7109	120.85	4.3915	8.1024	19.37	0.448
	3/5 No.7	100.01	3.7115	135.28	4.7901	8.5016	19.35	-0.040
	差				-0.3986	-0.3992	0.02	0.488

^{D)} いずれも 1987 年

間隙係数測定は図 B.3 の径方向に対称な炉心で実験実施、温度係数測定は、図 B.3 の炉心から F118/25、F118/26、F118/27、F125/18、F126/18、F127/18、F125/34、F126/34、F127/34、F134/25、F134/26、F134/27、M118/25、M118/26、M118/27、M125/18、M126/18、M127/18、M125/34、M126/34、M127/34、M134/25、M134/26、M134/27 の合計 24 本の EUDA 引出しを DUB 引出しに置き換え、片側集合体当たりの EUDA 引出し装荷本数を 32 本とした径方向に対称な炉心で実験実施、核計装 CH#6 は 0.5×10^{-7} A レベル

表 B.44 XIV-2 炉心における炉心温度測定のための熱電対校正定数見直し前後の温度表示

実験日 ^{D)}	見直し前の温度表示	見直し後の温度表示	温度表示差
Run No.	[°C]	[°C]	[°C]
3/6 No.2	19.31	19.83	0.52
3/10 No.1	24.95	25.36	0.41
温度差	5.64	5.53	0.11(2.0%)

^{D)} いずれも 1987 年

を立てることができる。ともに、左辺は各セットの臨界データ間の 2 本の制御棒 CR の反応度値の合計の差、右辺第 1 項は温度係数に温度差を乗じたもので、同第 2 項は間隙係数に間隙の差を乗じたものである。反応度の差、温度差や間隙の差の不確かさは () 内に示す。これら不確かさの評価については以下に記述する。

温度係数を測定する 2 つの Run では集合体を分離、密着させて全ての CR と安全棒 SR を動かした。このため、2 つの Run の間の反応度の差の不確かさは、CR と SR の位置再現性と CR の校正の不確かさから求めた。まず、同じ位置に戻したものの、2 つの Run の間で動かした合計 7 組の CR と SR の移動前後の位置再現性による反応度の不確かさは $\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 \times 7} = \pm 0.0075 \rho_0$ である。2 つの Run での CR#2 の移動前後の位置

は校正時のステップ 14、15 とステップ 16、17 の間に入るので、CR#2 による 2 つの Run の反応度差の不確かさは、CR#2 の移動の両端での位置の再現性による不確かさと校正の不確かさ $\pm 0.4\%$ によるものからなる。したがって、2 つの Run の反応度差の不確かさは、これら全てを合わせて

$$\pm\sqrt{0.0075^2 + 0.002^2 \times 2 + ((1.0482 - 0.6482) \times 0.004)^2} = \pm 0.0082 \rho_0 \text{ となる。}$$

間隙係数の測定では、6 組の安全棒 SR は 2 つの Run の間で動かさず CR#1 と CR#2 を動かした。CR#1 の位置は 2 つの Run ではほぼ同じ位置にしたが、CR#2 の移動前後の位置は校正時のステップを跨ぐ。したがって、2 つの Run の反応度差の不確かさは、CR#1 と CR#2 の移動の両端での位置再現性による不確かさと CR#2 の校正の不確かさから

$$\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 \times 2 + ((4.7901 - 4.4884) \times 0.004)^2 + ((4.4884 - 4.3915) \times 0.004)^2} = \pm 0.0042 \rho_0 \text{ となる。}$$

温度差の不確かさは、温度係数の測定では集合体の分離と密着を行ったため $\pm\sqrt{0.1^2 \times 2} = \pm 0.14^\circ\text{C}$ である。間隙係数の測定では集合体を分離したものの分離の距離は数 mm と僅かで、温度の時間変化は密着を保ったまま測定を行う場合と同じであったことから $\pm\sqrt{0.01^2 \times 2} = \pm 0.014^\circ\text{C}$ である。

間隙差の不確かさは、いずれの測定も集合体の分離と密着を行ったため、 $\pm\sqrt{0.02^2 \times 2} = \pm 0.028 \text{ mm}$ である。

これらを f_T と f_G について解くと、温度係数と間隙係数は

$$\begin{aligned} f_T &= \frac{0.4000(\pm 0.0082) \times 0.488(\pm 0.028) - (-0.3992)(\pm 0.0042) \times (-0.023)(\pm 0.028)}{-5.64(\pm 0.14) \times 0.488(\pm 0.028) - 0.02(\pm 0.014) \times (-0.023)(\pm 0.028)} \\ &= -0.0676 \rho_0 / ^\circ\text{C} \pm 11\% \end{aligned} \quad (\text{B.35})$$

$$\begin{aligned} f_G &= \frac{0.4000(\pm 0.0082) \times 0.02(\pm 0.014) - (-0.3992)(\pm 0.0042) \times (-5.64)(\pm 0.14)}{-0.023(\pm 0.028) \times 0.02(\pm 0.014) - 0.488(\pm 0.028) \times (-5.64)(\pm 0.14)} \\ &= -0.815 \rho_0 / \text{mm} \pm 6.8\% \end{aligned} \quad (\text{B.36})$$

となる。

CR#1 に関して、校正の実験結果に温度変化や間隙変化に伴う反応度変化の補正を行った結果を表 B.45 に示す。この補正後の反応度値を用いた CR#1 の校正曲線の係数 a、b、c、d を表 B.46 に示す。

CR#2 に関して、校正の実験結果に温度変化や間隙変化に伴う反応度変化分の補正を行った結果を表 B.47 に示す。全挿入である 0.07 mm (ステップ 18) を基準 $0 \rho_0$ とし、遡って、ステップ 17 と 16 で、CR#2 を 0.07 mm から 10.89 mm まで引き抜いた分の反応度値と補償するのは、温度変化と間隙変化の補正を考えなければ、SR#3 の $1 \rho_0$ 挿入分から CR#1 の 286.10mm から 344.48 mm までの引き抜き分の反応度値を差し引いたものとなる。後者は、補正済みの CR#1 の校正曲線の式より算出した結果、 $8.0014\rho_0 - 7.4897\rho_0 = 0.5117\rho_0$ であった。したがって、表 B.47 に示す CR#2 の 10.89 mm の温度変化分補正前の反応度値は、 $1.0\rho_0 - 0.5117\rho_0 = 0.4883\rho_0$ となる。この補正後の反応度値を用いた CR#2 の校正曲線の係数 a、b、c、d を表 B.48 に示す。

ステップ間で最大で 0.03°C の温度変化がある。密着のまま一連の測定を行ったため、この温度変化の不確

表 B.45 XIV-2 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正後の制御棒 CR#1 校正曲線測定データ

ステップ	制御棒位置 [mm]	補正前反応度価値 [ρ_0]	補正量		補正後反応度価値 ¹⁾ [ρ_0]
			温度変化分 [ρ_0]	間隙変化分 [ρ_0]	
1,2	0.69	0.0	-	-	0.0
3,4	23.90	1.0	0.0007 ²⁾		1.0007
5,6	49.53	2.0			2.0007
7,8	77.91	3.0			3.0007
9,10	109.53	4.0	0.0007		4.0014
11,12	145.78	5.0	-0.0007 ³⁾		5.0007
13,14	189.63	6.0	0.0007		6.0014
15,16	247.54	7.0			7.0014
17	344.48	8.0			8.0014

¹⁾ 現ステップの補正量とともに、前ステップまでの補正量をすべて加える。

²⁾ 温度 -0.01°C の変化による反応度変化

³⁾ 温度 $+0.01^\circ\text{C}$ の変化による反応度変化

表 B.46 XIV-2 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正済みの制御棒 CR#1 校正曲線

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]
				a	b	c	d	
0.69	23.90	49.53	77.91	0.18016	-0.97266	4.5401	-0.031280	0.69 ~ 49.53
23.90	49.53	77.91	109.53	0.11904	-0.88016	4.4979	-0.025643	49.53 ~ 77.91
49.53	77.91	109.53	145.78	-0.0033260	-0.59018	4.2799	0.026076	77.91 ~ 109.53
77.91	109.53	145.78	189.63	0.0078477	-0.62742	4.3199	0.012176	109.53 ~ 145.78
109.53	145.78	189.63	247.54	0.033927	-0.74345	4.4878	-0.066788	145.78 ~ 189.63
145.78	189.63	247.54	344.48	0.048663	-0.82936	4.6509	-0.16763	189.63 ~ 344.48

かさは $\pm\sqrt{0.01^2 \times 2} = \pm 0.014^\circ\text{C}$ である。温度係数を用いて温度変化による反応度価値への補正量の不確かさを算出すると、温度変化が 0.03°C の時でも

$$\pm\sqrt{(-0.0676 \times 0.014)^2 + (0.03 \times (-0.0676) \times 0.11)^2} = \pm 0.0010\rho_0$$

である。ここで、温度変化が小さなため平方根内第 2 項の温度係数の不確かさ $\pm 11\%$ の寄与は小さい。集合体の密着を保つ場合、仮に温度変化が無くても温度測定に $\pm 0.01^\circ\text{C}$ の不確かさが有ることから $\pm\sqrt{0.01^2 \times 2} \times (-0.0676) = \pm 0.0010\rho_0$ の不確かさが生じる。

次に、ほとんどのステップ間で間隙の変化は 0.001 mm かこれより小さい。密着のまま一連の測定を行ったため、ステップ間でこの間隙変化の不確かさは $\pm\sqrt{0.001^2 \times 2} = \pm 0.0014\text{ mm}$ である。間隙係数を用いて、こ

表 B.47 XIV-2 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正後の制御棒 CR#2 校正曲線測定データ

ステップ	制御棒位置 [mm]	補正前反応度値 [ρ_0]	補正量		補正後反応度値 ^{d)} [ρ_0]
			温度変化分 [ρ_0]	間隙変化分 [ρ_0]	
18	0.07	0.0	-	-	0.0
17,16	10.89	0.4883			0.4883
15,14	35.17	1.4883	-0.0013 ^{II)}		1.4870
13,12	61.77	2.4883	-0.0007 ^{III)}		2.4863
11,10	91.13	3.4883	-0.0007		3.4856
9,8	124.27	4.4883			4.4856
7,6	163.13	5.4883			5.4856
5,4	211.32	6.4883	-0.0007		6.4849
3,2	279.06	7.4883	-0.0007		7.4842
1	430.58	8.4883	-0.0020 ^{IV)}	-0.0008 ^{V)}	8.4814

d) 現ステップの補正量とともに、前ステップまでの補正量をすべて加える。

II) 温度 +0.02°C の変化による反応度変化

III) 温度 +0.01°C の変化による反応度変化

IV) 温度 +0.03°C の変化による反応度変化

V) 間隙 +0.001 mm の変化による反応度変化

表 B.48 XIV-2 炉心における温度変化と間隙変化による反応度変化補正済みの制御棒 CR#2 校正曲線

使用データ位置 [mm]				3 次式係数				適用範囲 [mm]
				a	b	c	d	
0.07	10.89	35.17	61.77	0.70992	-1.4662	4.6652	-0.0032649	0.07 ~ 35.17
10.89	35.17	61.77	91.13	0.086704	-0.79415	4.4640	0.011479	35.17 ~ 61.77
35.17	61.77	91.13	124.27	0.014942	-0.65919	4.3850	0.025686	61.77 ~ 91.13
61.77	91.13	124.27	163.13	0.00087159	-0.62019	4.3503	0.035529	91.13 ~ 124.27
91.13	124.27	163.13	211.32	0.035680	-0.75195	4.5121	-0.028775	124.27 ~ 163.13
124.27	163.13	211.32	279.06	0.037325	-0.76016	4.5254	-0.035825	163.13 ~ 211.32
163.13	211.32	279.06	430.58	0.053686	-0.86708	4.7528	-0.19322	211.32 ~ 430.58

の不確かさによる反応度値への補正量の不確かさを算出すると、間隙変化が 0.001 mm の時に

$$\pm\sqrt{(-0.815 \times 0.0014)^2 + (0.001 \times (-0.815) \times 0.068)^2} = \pm 0.0011\rho_0$$

となる。ここで、間隙変化が僅かであるため平方根内第 2 項の間隙係数の不確かさ $\pm 6.8\%$ の寄与は小さく無視し得る。集合体の密着を保ったままで、仮に間隙変化が無くても間隙測定に ± 0.001 mm の不確かさが有ることから、 $\pm\sqrt{0.001^2} \times 2 \times (-0.815) = \pm 0.0011\rho_0$ の不確かさが生じる。

表 B.49 XIV-2 炉心における温度係数と間隙係数の測定データ (温度変化と間隙変化による反応度変化補正後の制御棒校正曲線を使用)

測定項目	実験日 ^{D)}	CR#1		CR#2		CR 2 本	温度	間隙
	Run No.	位置 [mm]	反応度値 [ρ_0]	位置 [mm]	反応度値 [ρ_0]	反応度値 合計 [ρ_0]	[°C]	[mm]
温度係数	3/6 No.2	25.00	1.0458	24.14	1.0475	2.0933	19.31	-0.044
	3/10 No.1	25.00	1.0458	14.58	0.6479	1.6937	24.95	-0.021
	差				0.3996	0.3996	-5.64	-0.023
間隙係数	3/5 No.6	99.99	3.7121	120.85	4.3887	8.1008	19.37	0.448
	3/5 No.7	100.01	3.7127	135.28	4.7874	8.5001	19.35	-0.040
	差				-0.3987	-0.3993	0.02	0.488

^{D)} いずれも 1987 年

間隙係数測定は図 B.3 の径方向に対称な炉心で実験実施、温度係数測定は、図 B.3 の炉心から F118/25、F118/26、F118/27、F125/18、F126/18、F127/18、F125/34、F126/34、F127/34、F134/25、F134/26、F134/27、M118/25、M118/26、M118/27、M125/18、M126/18、M127/18、M125/34、M126/34、M127/34、M134/25、M134/26、M134/27 の合計 24 本の EUDA 引出しを DUB 引出しに置き換え、片側集合体当たりの EUDA 引出し装荷本数を 32 本とした径方向に対称な炉心で実験実施、核計装 CH#6 は 0.5×10^{-7} A レベル

すなわち、ステップ間で温度や間隙の変化が無いか僅かであっても、温度や間隙の測定の不確かさにより $1 \rho_0$ に補正を行った後の反応度値の不確かさは、これまでの SR#3 の 25 mm 移動時の両端での位置再現性に伴う不確かさの他に、温度や間隙の測定による不確かさも合わせて $\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 + 0.0010^2 + 0.0011^2} = \pm 0.0032 \rho_0$ ($\pm 0.32\%$) となる。したがって、CR#1 や CR#2 のステップ間の移動時の位置再現性による不確かさ $\pm 0.28\%$ も合わせて、補正後の制御棒校正の不確かさは $\pm\sqrt{0.32^2 + 0.28^2} = \pm 0.43\%$ となる。

温度係数と間隙係数の測定時の反応度の差をこれらの補正後の制御棒校正曲線を用いて求めた結果を表 B.49 に示す。温度と間隙のデータは表 B.43 と同じである。制御棒校正曲線を変更しても反応度の差は $0.0004 \rho_0$ だけ変化するに過ぎず、この変化は $1 \rho_0$ のオーダーの反応度の差と比べて僅かであった。補正後の制御棒校正の不確かさが補正前に比べて少し大きくなり $\pm 0.43\%$ となったが、温度係数と間隙係数の測定いずれにおいても反応度の差の不確かさは変わらなかった。温度係数と間隙係数の新たな値と不確かさは

$$f_T = \frac{0.3996(\pm 0.0082) \times 0.488(\pm 0.028) - (-0.3993)(\pm 0.0042) \times (-0.023)(\pm 0.028)}{-5.64(\pm 0.14) \times 0.488(\pm 0.028) - 0.02(\pm 0.014) \times (-0.023)(\pm 0.028)}$$

$$= -0.0675 \rho_0 / ^\circ\text{C} \pm 11\% \quad (\text{B.37})$$

$$f_G = \frac{0.3996(\pm 0.0082) \times 0.02(\pm 0.014) - (-0.3993)(\pm 0.0042) \times (-5.64)(\pm 0.14)}{-0.023(\pm 0.028) \times 0.02(\pm 0.014) - 0.488(\pm 0.028) \times (-5.64)(\pm 0.14)}$$

$$= -0.815 \rho_0 / \text{mm} \pm 6.8\% \quad (\text{B.38})$$

となる。新たな温度係数は補正前の制御棒校正曲線を用いた値から 0.15% の相違に過ぎず、間隙係数は変わらず、これら係数の不確かさも変わらない。

制御棒校正実験において、温度変化による反応度価値への補正は、表 B.45 や表 B.47 から積算しても $0.007 \rho_0$ 以下と小さいため、温度係数をこれらの新たな値に変更しても、温度変化による補正量への影響は無視し得るほど小さい。すなわち、 $0.007 \rho_0$ 以下の補正量が 0.15% 変化するに過ぎず無視し得る。したがって、最終的に、温度変化と間隙変化による反応度変化補正済みの制御棒校正曲線である表 B.46、表 B.48 と上記の新たな温度係数と間隙係数を採用する。

B.4.2 基準反応度の測定

SR#3 の 25 mm から全挿入位置である 0.28 mm への挿入による基準反応度 $1 \rho_0$ を正炉周期法により測定した。一定の原子炉出力で運転時は浅い未臨界なので、この状態から反応度 $1 \rho_0$ を印加しても、この印加反応度から印加前の未臨界度を差し引いた反応度だけ超臨界となる。そこで、補正のためにこの未臨界度を前もって測定した。

3.4 節のとおり、線形出力系の読みが C_a 、 C_b である時の未臨界度を、それぞれ ρ_a 、 ρ_b とすると、中性子源増倍法を基にして

$$\rho_b = \frac{\rho_a - \rho_b}{\frac{C_b}{C_a} - 1} \quad (\text{B.39})$$

である。

基準反応度測定のための安全棒と制御棒の配置を表 B.50 に示す。まず、SR#3 を 0.28 mm、CR#1 を 77.90 mm、CR#2 を 163.29 mm として核計装 CH#6 で 0.501×10^{-7} A (C_a) で定常とした。次に、CH#6 をこれより一桁高い 0.502×10^{-6} A (C_b) で定常とするために、CR#2 のみ調整したところ 161.62 mm となった。CR#2 の反応度価値は、制御棒校正曲線から全挿入 0.07 mm を基準として、163.29 mm が $5.4893 \rho_0$ 、161.62 mm が $5.4501 \rho_0$ である。さらに、この間に炉心温度が 0.02°C 上昇し、間隙が 0.001 mm 減少した。温度係数からこの温度上昇を反応度変化にすると $-0.0013 \rho_0 \pm 0.00097 \rho_0$ となる。これまでと同じく、この反応度変化の不確かさは、2つの原子炉出力レベル間での温度測定の不確かさ $\pm\sqrt{0.01^2 \times 2}$ と温度係数の不確かさ $\pm 11\%$ によるものである。間隙係数からこの間隙変化を反応度変化にすると $+0.0008 \rho_0 \pm 0.0012 \rho_0$ となる。この反応度変化の不確かさは、2つの原子炉出力レベル間での間隙測定の不確かさ $\pm\sqrt{0.001^2 \times 2}$ と間隙係数の不確かさ $\pm 6.8\%$ によるものである。2つの原子炉出力レベルの未臨界度の差は、この温度変化と間隙変化による反応度変化を補正して $\rho_a - \rho_b$ は $(5.4893 - 5.4501) - 0.0013 + 0.0008 = 0.0387 \rho_0 \pm 0.0032 \rho_0$ ($\pm 8.3\%$) となる。この不確かさは CR#2 の移動の両端での位置再現性による不確かさ、CR#2 の校正の不確かさ、温度変化と間隙変化による反応度変化の補正の不確かさから

$$\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 + ((5.4893 - 5.4501) \times 0.0043)^2 + 0.00097^2 + 0.0012^2} = \pm 0.0032 \rho_0$$

表 B.50 XIV-2 炉心における基準反応度測定のための安全棒と制御棒の配置

実験日 ^{D)} Run No.	ステップ	SR#3 ^{II)}		CR#2 ^{III)}		炉心温度 [°C]	間隙 [mm]	CH#6 電流値 [A]	反応度 [ρ_0]
		位置 [mm]	反応度 ^{IV)} [ρ_0]	位置 [mm]	反応度 ^{IV)} [ρ_0]				
3/3 No.20	1	0.28	0.0000	163.29	5.4893	19.21	-0.038	0.501×10^{-7}	-0.0430
3/3 No.21	2	0.28	0.0000	161.62	5.4501	19.23	-0.039	0.502×10^{-6}	-0.0043
3/3 No.23	3	25.00	1.0000	123.05	4.4512	19.23	-0.039	0.502×10^{-6}	-0.0043
	4	0.28	0.0000	123.05	4.4512				

D) いずれも 1987 年

II) 他の安全棒は全挿入で固定

III) CR#1 は、ステップ 1 から 3 では 77.90 mm に固定し、ステップ 3 の後に原子炉出力を下げるために 160 mm 程度まで引き抜き、ステップ 4 で元の位置に戻そうとして 77.92 mm となった。

IV) この SR または CR を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

図 B.3 の径方向に対称な炉心で実験実施

と算出した。制御棒校正のステップ 7、6 の CR#2 位置 163.13 mm が、CR#2 の 163.29 mm から 161.62 mm への移動の間にあるが、この移動距離が短いことからステップ 7、6 の CR#2 位置の前後に分けずに不確かさを評価した。

したがって、(B.39) 式を用いて核計装 CH#6 が 0.502×10^{-6} A で運転時の未臨界度は $0.0043 \rho_0 \pm 0.00036 \rho_0$ ($\pm 8.3\%$) となる。ここで、2つの原子炉出力レベルでの CH#6 の電流値の比の不確かさは、この $\pm 8.3\%$ に比べて十分小さいので無視した。SR#3 の挿入による $1 \rho_0$ の反応度に対してこの未臨界度分の補正を行う。

一連の未臨界度の測定を SR#3 を全挿入として行ったため、ステップ 3 において原子炉周期測定の準備として SR#3 を 25 mm まで引き抜き、これにより低下する $1 \rho_0$ の反応度を補償するために CR#1 を 161.62 mm から 123.05 mm まで挿入し、核計装 CH#6 をステップ 2 と同じ 0.502×10^{-6} A で定常とした。このようにして、反応度 $-0.0043 \rho_0 \pm 0.00036 \rho_0$ ($\pm 8.3\%$) の未臨界状態 (ステップ 3) から、SR#3 を 25.00 mm 挿入して $1.000 \rho_0 \pm 0.0028 \rho_0$ の反応度を印加し、ステップ 4 の $0.9957 \rho_0 \pm 0.0028 \rho_0$ の超臨界にした。

原子炉出力の増加は核計装 CH#6 でモニターし、これが 0.2×10^{-6} A から 0.4×10^{-6} A、 0.3×10^{-6} A から 0.6×10^{-6} A、 0.4×10^{-6} A から 0.8×10^{-6} A の間で、2名の測定者がそれぞれのストップウォッチで測定した倍加時間は、87.8 秒、87.2 秒、87.8 秒、88.2 秒、88.0 秒、88.6 秒であり、これらの平均 87.9 秒を採用した。その不確かさは、これまでの経験から ± 0.5 秒を見込んだ。これより、原子炉周期は $T = 87.9 / \ln(2) = 126.8 \pm 0.7$ 秒となる。この原子炉周期より、逆時間方程式 (4.1) と JENDL-4.0 の遅発中性子データ評価値に基づく動特性パラメータにより反応度を求めた結果、 $0.9957 \rho_0 \pm 0.0028 \rho_0$ ($\pm 0.28\%$) = $0.0525\% \Delta k/k$ であった。すなわち、 $1 \rho_0 = 0.0527\% \Delta k/k$ である。この基準反応度の不確かさは、用いた遅発中性子データによる不確かさの寄与を合わせて B.5 節に記述する。

B.4.3 炉心周辺部での燃料引出し反応度値の測定

測定結果を表 B.51 にまとめる。まず、EUDA 引出し装荷本数を片側集合体当たり 44 本とした図 B.3 の炉心で測定を行った後に集合体を分離して、周辺の EUDA 引出しを DUB 引出しに置換して EUDA 引出し装荷本数を片側集合体当たり 32 本とした炉心で再度測定を行った。この置換反応度値は、制御棒 CR で補償することにより測定した。すなわち、集合体を分離して引出しを入れ替えた後に集合体を再密着することによる引出しの置換前後の 2 つの Run の間での CR の位置の差を求めた。これを制御棒校正曲線より反応度値に換算して、さらに、2 つの Run の間での炉心温度差と集合体密着面間隙の差による反応度差を補正した。

表 B.51 では、この補正した置換反応度値を簡便に算出するため、制御棒に関しては、各 Run の制御棒の位置と基準とする全挿入位置の差を反応度値に換算して示す。この全挿入位置は、表 B.40 より CR#1 は 0.69 mm で CR#2 は 0.07 mm である。炉心温度に関しては、各 Run の温度と基準とする 20°C との差を反応度差に換算して示す。集合体密着面間隙に関しては、各 Run の間隙と基準とする 0.000 mm との差を反応度差に換算して示す。これら制御棒の反応度値、温度差と間隙の差による反応度差を全て足し合わすと、温度 20.00°C、間隙読み 0.000 mm の基準状態に補正した炉心の余剰反応度となる。2 つの Run の間でこれら補正した余剰反応度の差をとることにより、簡便に、2 つの Run の間の補正した反応度の差、すなわち引出しの置換反応度値を算出することができる。

表 B.51 XIV-2 炉心におけるドライバー領域の燃料引出しの置換反応度値

実験日 ^{Ⅰ)}	片側集合体 Run No. EUDA 引出し 本数	CR#1		CR#2		炉心温度		密着面間隙		余剰 反応度 ^{Ⅴ)} [ρ_0]	反応度 値 ^{Ⅵ)} [ρ_0]
		位置 [mm]	反応度 ^{Ⅱ)} [ρ_0]	位置 [mm]	反応度 ^{Ⅱ)} [ρ_0]	温度 [°C]	反応度 ^{Ⅲ)} [ρ_0]	間隙 [mm]	反応度 ^{Ⅳ)} [ρ_0]		
3/6 No.1	44	100.01	3.7127	134.54	4.7675	19.58	-0.0284	-0.036	-0.0293	8.4225	6.412
3/6 No.2	32	25.00	1.0458	24.14	1.0475	19.31	-0.0466	-0.044	-0.0359	2.0108	

Ⅰ) いずれも 1987 年

Ⅱ) この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

Ⅲ) 炉心温度を左記の読みから基準とする 20.00°C に変化させる時に加わる反応度

Ⅳ) 集合体密着面間隙を左記の読みから基準とする 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

Ⅴ) 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00°C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度

Ⅵ) Run No.2 を基準とした余剰反応度の差で不確かさは $\pm 0.027 \rho_0$

Run No.1 は図 B.3 の径方向に対称な炉心で実験実施、Run No.2 は、図 B.3 の炉心から F118/25、F118/26、F118/27、F125/18、F126/18、F127/18、F125/34、F126/34、F127/34、F134/25、F134/26、F134/27、M118/25、M118/26、M118/27、M125/18、M126/18、M127/18、M125/34、M126/34、M127/34、M134/25、M134/26、M134/27 の合計 24 本の EUDA 引出しを DUB 引出しに置き換えた径方向に対称な炉心で実験実施、核計装 CH#6 は 0.5×10^{-7} A レベル

このように、補正した余剰反応度の差として引出しの置換反応度値を算出するものの、その内訳は、2つの Run の間で制御棒の位置の差を反応度値に換算し、これに温度や間隙の差を反応度差に換算して補正したものである。したがって、この置換反応度値の不確かさは、制御棒、安全棒の位置の再現性による不確かさと校正の不確かさ、温度測定と温度係数の不確かさや間隙測定と間隙係数の不確かさから算出した。

制御棒に関しては、2つの Run の間での移動の両端での位置再現性による不確かさと校正の不確かさ ± 0.43% によるものを合わせる。CR#1 の移動前後の位置の間には制御棒校正ステップ 7、8 の 77.91 mm とステップ 5、6 の 49.53 mm があるため、CR#1 の反応度差の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 + ((3.7127 - 3.0007) \times 0.0043)^2 + 0.0032^2 + ((2.0007 - 1.0458) \times 0.0043)^2 + 0.002^2 \times 2} \\ = \pm 0.0072 \rho_0$$

となる。平方根内の第 1 項は、Run No.1 の 100.01 mm と No.2 の 25.00 mm の位置の再現性による不確かさである。第 2 項は、Run No.1 の 100.01 mm とステップ 7、8 の 77.91 mm の反応度差に対する校正の不確かさで、第 4 項は、ステップ 5、6 の 49.53 mm と Run No.2 の 25.00 mm の反応度差に対する校正の不確かさである。第 3 項は、ステップ 7、8 とステップ 5、6 間の基準反応度の不確かさ ± 0.0032 ρ₀ で、既に記述したように温度変化による反応度変化補正と間隙測定による不確かさを含む。第 5 項は、校正時のステップ 7、8 とステップ 5、6 の CR#1 の位置 77.91 mm と 49.53 mm の再現性による不確かさである。CR#2 の移動前後の位置の間には制御棒校正ステップ 8、9 の 124.27 mm、ステップ 10、11 の 91.13 mm、ステップ 12、13 の 61.77 mm とステップ 14、15 の 35.17 mm があるため、CR#2 の反応度差の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 + ((4.7675 - 4.4856) \times 0.0043)^2 + 0.0032^2 \times 3 + ((1.4870 - 1.0475) \times 0.0043)^2 + 0.002^2 \times 2} \\ = \pm 0.0072 \rho_0$$

となる。この場合、CR#2 の移動前後の位置の間には 4 つの校正ステップ位置があるため、基準反応度の不確かさ ± 0.0032 ρ₀ が 3 つ積みあがる。

安全棒に関しては、同一日であれば集合体の分離と再密着を行っても全挿入位置から動かすことはなく不確かさは生じない。

炉心温度に関しては、集合体の分離と密着を行う時の温度測定の不確かさ ± 0.1°C と温度係数の不確かさ ± 11% を合わせて、温度変化による反応度変化の補正の不確かさは

$$\pm\sqrt{(\sqrt{0.1^2 \times 2} \times (-0.0675))^2 + (-0.0675 \times 0.11 \times (19.58 - 19.31))^2} = \pm 0.0098 \rho_0$$

となる。温度差が小さなため、前者の寄与がこの不確かさの大部分を占める。

集合体密着面間隙に関しては、集合体の分離と密着を行う時の間隙測定の不確かさ ± 0.02 mm と間隙係数の不確かさ ± 6.8% を合わせて、間隙の差による反応度差の補正の不確かさは

$$\pm\sqrt{(\sqrt{0.02^2 \times 2} \times (-0.815))^2 + (-0.815 \times 0.068 \times (-0.036 - (-0.044)))^2} = \pm 0.023 \rho_0$$

となる。間隙の差が小さなため、前者の寄与がこの不確かさの大部分を占める。

これら 4 つの不確かさを合わせて、引出し置換反応度値の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.0072^2 + 0.0072^2 + 0.0098^2 + 0.023^2} = \pm 0.027 \rho_0$$

となる。間隙の差による反応度差の補正の不確かさの寄与が大きい。

B.4.4 未臨界度の測定

実効増倍率は主に2本の制御棒CRの余剰反応度から算定するが、これに種々の補正を行う。そのうちの1つが未臨界度である。基準反応度の測定時と同様に、浅い未臨界で核計装CH#6の読みが C_a 、 C_b である時の未臨界度をそれぞれ ρ_a 、 ρ_b とすると、中性子源増倍法を基にしてこれらには(B.39)式の関係がある。表B.52に示すように、原子炉出力レベルを2段階に変えたRunを3組実施して、それぞれ未臨界度を求めた。各日の2つのRunで余剰反応度の差が $\rho_a - \rho_b$ である。これら2つのRunの間で、CR#1と全ての安全棒SRは動かさず、集合体は密着したままであり間隙の変化も無いか僅かなので、この余剰反応度の差の不確かさは、CR#2の移動による反応度差の不確かさと温度変化や間隙変化による反応度変化の補正の不確かさから以下のように算定した。

例えば、3/6の2つのRunでは、CR#2の移動の両端での位置の再現性と制御棒校正の不確かさより

表 B.52 XIV-2 炉心における未臨界度

実験日 ¹⁾ Run No.	CR#1		CR#2		炉心温度		密着面間隙		余剰 反応度 ^{v)} [ρ_0]	CH#6 電流 [$\times 10^{-7}$ A]	未臨界度 [ρ_0]
	位置 [mm]	反応度 ⁱⁱ⁾ [ρ_0]	位置 [mm]	反応度 ⁱⁱ⁾ [ρ_0]	温度 [$^{\circ}$ C]	反応度 ⁱⁱⁱ⁾ [ρ_0]	間隙 [mm]	反応度 ^{iv)} [ρ_0]			
3/2 No.9	50.00	2.0181	46.18	1.9121	19.56	-0.0297	-0.049	-0.0399	3.8606	0.503	0.0507 $\pm 0.0035(7.0\%)$
3/2 No.10	50.00	2.0181	44.96	1.8658	19.57	-0.0290	-0.049	-0.0399	3.8150	5.03	0.0051 $\pm 0.00036(7.0\%)$
3/3 No.20	77.90	3.0004	163.29	5.4893	19.21	-0.0533	-0.038	-0.0310	8.4054	0.501	0.0430 $\pm 0.0036(8.3\%)$
3/3 No.21	77.90	3.0004	161.62	5.4501	19.23	-0.0520	-0.039	-0.0318	8.3667	5.02	0.0043 $\pm 0.00036(8.3\%)$
3/6 No.2	25.00	1.0458	24.14	1.0475	19.31	-0.0466	-0.044	-0.0359	2.0108	0.502	0.0512 $\pm 0.0036(7.0\%)$
3/6 No.3	25.00	1.0458	22.98	1.0000	19.33	-0.0452	-0.044	-0.0359	1.9647	5.02	0.0051 $\pm 0.00036(7.0\%)$

¹⁾ いずれも 1987 年

ⁱⁱ⁾ この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

ⁱⁱⁱ⁾ 炉心温度の読みを左記の値から基準の 20.00 $^{\circ}$ C に変化させる時に加わる反応度

^{iv)} 集合体密着面間隙の読みを左記の値から基準の 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

^{v)} 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00 $^{\circ}$ C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度

3/2 は、図 B.3 の炉心から一部の EUDA 引出しを DUB 引出しに置き換え、片側集合体当たりの EUDA 引出し装荷本数を 36 本とした炉心で実験実施、3/3 は図 B.3 の径方向に対称な炉心で実験実施、3/6 は、表 B.51 に記載の片側集合体当たりの EUDA 引出し装荷本数を 32 本とした径方向に対称な炉心で実験実施、6 組の SR は全挿入

$$\pm\sqrt{0.002^2 \times 2 + ((1.0475 - 1.0000) \times 0.0043)^2} = \pm 0.0028 \rho_0$$

の不確かさが生じる。集合体の密着を保持した時の温度測定の不確かさ $\pm 0.01^\circ\text{C}$ と温度係数の不確かさ $\pm 11\%$ より

$$\pm\sqrt{(\sqrt{0.01^2 \times 2} \times (-0.0675))^2 + (-0.0675 \times 0.11 \times (19.33 - 19.31))^2} = \pm 0.00096 \rho_0$$

の不確かさが生じる。集合体の密着を保持した時の間隙測定の不確かさ $\pm 0.001 \text{ mm}$ より

$$\pm\sqrt{(\sqrt{0.001^2 \times 2} \times (-0.815))^2} = \pm 0.0011 \rho_0$$

の不確かさが生じる。余剰反応度の差の不確かさは、これらを合わせて

$$\pm\sqrt{0.0028^2 + 0.00096^2 + 0.0011^2} = \pm 0.0032 \rho_0$$

となる。したがって、(B.39) 式を用いて核計装 CH#6 が $0.502 \times 10^{-7} \text{ A}$ で運転時の未臨界度は $0.0512 \rho_0 \pm 0.0036 \rho_0$ ($\pm 7.0\%$) となる。ここで、2つの原子炉出力レベルでの CH#6 の電流値の比の不確かさは、この $\pm 7.0\%$ に比べて十分小さいので無視した。

中性子源増倍法より、未臨界度と、その時の原子炉出力レベルとしての核計装 CH#6 の電流値の積は一定となる。この積は、3/2 が $2.55 \times 10^{-9} \rho_0 \text{ A} \pm 7.0\%$ 、3/3 が $2.15 \times 10^{-9} \rho_0 \text{ A} \pm 8.3\%$ 、3/6 が $2.57 \times 10^{-9} \rho_0 \text{ A} \pm 7.0\%$ となった。3/3 と 3/6 の値の間には 20% に及ぶ相違があり、各日の不確かさの範囲を超える。3つの値の平均である $2.42 \times 10^{-9} \rho_0 \text{ A}$ を採用し、その不確かさには3つの値の間の標準偏差 $\pm 0.19 \times 10^{-9} \rho_0 \text{ A}$ ($\pm 8.0\%$) を採用する。これを基に余剰反応度に補正を行い実効増倍率を求める。

B.4.5 全挿入時の制御棒と安全棒引出しの先端面の密着面からのへこみの深さ分の反応度値測定

XV 炉心系と同様に全挿入時の制御棒と安全棒の引出しの前端面の密着面からのへこみの深さを測定して反応度値に換算した。16本の引出しのへこみ深さの平均値は、本炉心では -0.99 mm であった。この深さに、密着面近傍での制御棒や安全棒の微分反応度値である $1 \rho_0 / 25 \text{ mm}$ を乗じることにより、深さを反応度値に換算して8倍することにより $0.322 \rho_0 \pm 0.011 \rho_0$ の補正量を得た。この不確かさも、1箇所の深さ測定の不確かさ $\pm 0.1 \text{ mm}$ を換算して $\sqrt{8}$ 倍したものである。

B.4.6 密着面でのステンレス鋼反応度値の測定

本炉心でも XIV-1(45V) 炉心と同様に密着面でのステンレス鋼反応度値の測定は行わなかったため、付録 B.3.6 項にて記述したように他の炉心での測定結果を基にこの反応度値を評価する。本炉心では、XIV-1 炉心での測定値 $-0.073 \% \Delta k/k \pm 0.012 \% \Delta k/k$ を採用した。これは、 ρ_0 単位では $1.39 \rho_0 \pm 0.22 \rho_0$ である。

B.4.7 余剰反応度の再現性と不確かさの評価

実効増倍率は余剰反応度を基に算出する。原子炉運転時は、6組の安全棒 SR は全挿入で2組の制御棒 CR を途中まで引き抜くので、これら2組の CR を全挿入する時に増加する反応度の和が余剰反応度となる。ただし、この余剰反応度は、本来の臨界からの余剰反応度に一定の原子炉出力で運転時の未臨界度を加えた反応度

表 B.53 XIV-2 炉心における集合体分離密着時の余剰反応度の再現性

実験日 ^{d)}	CR#1	CR#2	炉心温度		密着面間隙		余剰	CH#6	備考	
Run No.	位置 [mm]	反応度 ⁱⁱ⁾ [ρ_0]	位置 [mm]	反応度 ⁱⁱ⁾ [ρ_0]	温度 [°C]	反応度 ⁱⁱⁱ⁾ [ρ_0]	間隙 [mm]	反応度 ^{iv)} [ρ_0]	反応度 ^{v)} [ρ_0]	電流 [$\times 10^{-7}$ A]
3/3 No.1	100.01	3.7127	134.47	4.7657	19.34	-0.0446	-0.037	-0.0302	8.404	0.502
3/5 No.2	99.99	3.7121	135.04	4.7809	19.42	-0.0391	-0.038	-0.0310	8.423	0.502
3/6 No.1	100.01	3.7127	134.54	4.7675	19.58	-0.0284	-0.036	-0.0293	8.423	0.502

^{d)} いずれも 1987 年

ⁱⁱ⁾ この制御棒を左記の位置から全挿入する時に加わる反応度

ⁱⁱⁱ⁾ 炉心温度の読みを左記の値から基準の 20.00°C に変化させる時に加わる反応度

^{iv)} 集合体密着面間隙の読みを左記の値から基準の 0.000 mm に変化させる時に加わる反応度

^{v)} 制御棒 2 本の反応度、炉心温度の反応度と集合体密着面間隙の反応度を加えたもので、温度読み 20.00°C、間隙読み 0.000 mm の基準状態とする時の余剰反応度

いずれも、図 B.3 の径方向に対称な炉心で実験実施

である。これまでと同様に、この余剰反応度に、炉心温度や集合体密着面間隙に関する補正を行う。

炉心に特別な実験用装荷物等が無く標準である Run のデータを抽出して、集合体の分離、密着に伴う余剰反応度の再現性として変化(ばらつき)を見た。いずれの Run も浅い未臨界なので、この余剰反応度は原子炉出力レベルに依存する。したがって、この出力レベルやその他の炉心の状態が同じである Run を抽出して、データを表 B.53 にまとめる。この表の各 Run の余剰反応度は、基準の 20°C、間隙読み 0.000 mm での値となるように、既に反応度の温度補正と間隙補正を行った値である。EUDA 引出しを片側集合体当たり 44 本装荷した炉心のみで余剰反応度の変化(ばらつき)を見ることができた^{v)}。

同表内で Run の間の余剰反応度の変化(ばらつき)は 0.019 ρ_0 の範囲内である。一方で、余剰反応度の再現性は、CR と SR の位置再現性、温度測定の不確かさ、間隙測定の不確かさからも、以下のように評価できる。

8 組の CR と SR の位置再現性により生じる反応度の不確かさは

$$\pm\sqrt{0.002^2 \times 8} = \pm 0.0057 \rho_0$$

である。集合体の分離と密着を行う時の温度測定の不確かさ $\pm 0.1^\circ\text{C}$ より

$$\pm 0.1^\circ\text{C} \times (-0.0675) \rho_0 / ^\circ\text{C} = \pm 0.0068 \rho_0$$

が、これに伴う反応度の不確かさとなる。集合体の分離と密着を行う時の間隙測定の不確かさ ± 0.02 mm より

$$\pm 0.02 \text{ mm} \times (-0.815) \rho_0 / \text{mm} = \pm 0.016 \rho_0$$

が、これに伴う反応度の不確かさとなる。これら 3 つの不確かさを合わせて、余剰反応度の再現性は

$$\pm\sqrt{0.0057^2 + 0.0068^2 + 0.016^2} = \pm 0.018 \rho_0$$

^{v)} 表 B.51 に記載の片側集合体当たりの EUDA 引出し装荷本数を 32 本とした径方向に対称な炉心では 3/6 と 3/10 に標準の炉心構成で測定を行ったが、これら両日には温度係数の測定を行ったために再現性を見ることには使えない。図 B.3 の炉心から一部の EUDA 引出しを DUB 引出しに置き換え、片側集合体当たりの EUDA 引出し装荷本数を 36 本とした炉心では 3/2、3/25、3/26、4/10、5/6 に標準の炉心構成で測定を行ったが、3/10 前後に炉心温度の校正を見直したために再現性を見ることには使えない。

となる。このように算出した余剰反応度の再現性と比べて、余剰反応度の変化(ばらつき) $0.019 \rho_0$ は有意ではない。

なお、いずれの Run も CR の位置は近く、この CR 位置の差から余剰反応度の差を計算するための制御棒校正の不確かさは、余剰反応度の再現性には影響しない。さらに、Run の間で炉心温度の差は 0.3°C 以内であるため、温度係数の不確かさによる反応度差の不確かさは $\pm 0.002 \rho_0$ よりも小さく、集合体密着面間隙の差も 0.01 mm 以内であるため、間隙係数の不確かさによる反応度差の不確かさは $\pm 0.0006 \rho_0$ よりも小さく、いずれも余剰反応度の再現性への影響は小さい。

実効増倍率を評価するための基となる炉心の余剰反応度は、表 B.53 に記載の片側集合体当たりに EUDA 引出しを 44 本装荷した径方向に対称な炉心での 3 回の Run の平均値を採用する。これらの平均値は $8.416 \rho_0$ であり、この平均値の不確かさは余剰反応度の再現性の算出結果 $\pm 0.018 \rho_0$ とし、これに 2 組の CR の反応度値の校正に起因する不確かさを合わせる。3 回の Run いずれも、CR#1 は 100 mm 、CR#2 は 135 mm 程度引き抜き、CR#1 では制御棒校正ステップ 7、8 の 77.91 mm 、CR#2 ではステップ 9、8 の 124.27 mm が直近の制御棒校正ステップ位置である。全挿入位置からこれらステップの位置に至るまでに基準反応度に温度変化と間隙変化による反応度変化の補正を加えた結果 $\pm 0.0032 \rho_0$ の不確かさを持つ反応度値をそれぞれ 3 回と 5 回積み重ねることになる。 100 mm や 135 mm からこれら直近の校正ステップ位置までの間の反応度値の不確かさと、両 CR の全挿入とこれら直近の校正ステップの両端での校正時の位置の再現性による不確かさも合わせると、制御棒校正の不確かさによる 2 組の CR の反応度値の不確かさは

$$\begin{aligned} & \pm \sqrt{0.0032^2 \times (3 + 5) + ((3.7127 - 3.0007) \times 0.0043)^2 + ((4.7809 - 4.4856) \times 0.0043)^2 + 0.002^2 \times 2 \times 2} \\ & = \pm 0.010 \rho_0 \end{aligned}$$

となり、先の平均値の不確かさ $\pm 0.018 \rho_0$ と合わせると $\pm 0.021 \rho_0$ となる。なお、先に記述したように、表 B.53 の余剰反応度測定時の SR や CR の位置再現性に伴う不確かさは、既に平均値の不確かさ $\pm 0.018 \rho_0$ に含まれる。これら 3 回の Run は、3 月 3 日から 3 月 6 日の 4 日間の間に行われ、余剰反応度の平均値 $8.416 \rho_0 \pm 0.021 \rho_0$ は、この期間の中央となる 1987 年 3 月 5 日時点の値である。

B.5 計算や核データによる実効増倍率の不確かさへの寄与分の評価

4章と同様な方法で、

- 正炉周期法による基準反応度測定の不確かさ
- 格子管の外寸法の不確かさによる反応度の不確かさ
- 実験炉心への装荷物や格子管の重量、燃料組成の不確かさによる反応度の不確かさ

を XIV 炉心系でも評価した。ここでは、その結果のみ表 B.54 ~ 表 B.56 に記載する。

表 B.54 XIV 炉心系における基準反応度測定の不確かさ

炉心	XIV-1	XIV-1(45V)	XIV-2
不確かさ内訳			
ρ_0 単位の反応度 ¹⁾	0.40%	0.40%	0.28%
T	0.4%	0.8%	0.5%
β_{eff} (遅発中性子収率)	2.7%	2.6%	2.8%
α_i^j	2.7%	2.6%	2.8%
λ_i^j	1.3%	1.1%	1.3%
基準反応度の不確かさ	4.1%	3.9%	4.2%

¹⁾ XIV-1 炉心では ρ_1 単位の反応度

表 B.55 XIV 炉心系における格子管の外寸法の不確かさによる反応度の不確かさ

炉心	XIV-1	XIV-1(45V)	XIV-2
反応度差 [$\% \Delta k/k$]	0.028 ± 0.002 ¹⁾	0.036 ± 0.002	0.027 ± 0.002
不確かさ [$\% \Delta k/k$] ²⁾	0.030	0.038	0.029

¹⁾ モンテカルロ計算の統計誤差

²⁾ 反応度差とモンテカルロ計算の統計誤差を加算して \pm 両側の不確かさとした。

表 B.56 XIV 炉心系における実験炉心への装荷物の重量、燃料組成の不確かさによる反応度の不確かさ

炉心	XIV-1	XIV-1(45V)	XIV-1
不確かさ内訳			
装荷物と格子管の重量 [$\% \Delta k/k$]	0.029	0.059	0.030
ウランやプルトニウムの同位体比 [$\% \Delta k/k$]	0.029	0.028	0.037
塗料の組成と塗布量 [$\% \Delta k/k$]	0.024	0.027	0.019
不確かさ [$\% \Delta k/k$]	0.048	0.071	0.051

装荷物の種類といった項目別に詳細に評価した不確かさは付録 D の表 D.1、表 D.2、表 D.3 に記載する。

B.6 実効増倍率の実験結果と不確かさの評価

3つの炉心の実効増倍率の評価日を表 B.57 に示す。評価結果を表 B.58、表 B.59、表 B.60 に示す。

5章と同様に、既に 20°C での値に補正した運転時の余剰反応度を基に種々の補正を行い実効増倍率を求める。この余剰反応度の不確かさには、付録 B.2.7、B.3.7、B.4.7 の各項に記述したように、再現性に伴う寄与に加えて、引き抜いた 2 組 4 本の制御棒反応度値の不確かさの寄与も含めた。

解析で実効増倍率の実験結果と計算結果と比較するために、この余剰反応度に対してさらなる補正を行った。これらは既に記述したように、まず、(1) 未臨界度の補正、(2) 径方向に対称な炉心形状相当とするための炉心周辺部でのドライバー燃料引出し置換反応度値の補正と (3) 全挿入時の制御棒と安全棒引出しの先端面の密着面からのへこみの深さ分の反応度値補正である。(1) の補正は、付録 B.2.4、B.3.4、B.4.4 の各項に記載の未臨界度と核計装の線形出力系の電流値の積を、余剰反応度測定時の電流値で除して求めた。(2) の補正は XIV-1 炉心でのみ行った。この炉心の運転時の余剰反応度として採用した表 B.22 と表 B.23 の Run は、片側集合体当たりの PuDA 引出し装荷本数が 67 本の炉心であり径方向に非対称である。この炉心から F119/20、F133/20、F133/32 と M119/20、M133/20、M133/32 の位置で合計 6 本の PuDA 引出しを DUB 引出しに置換し、図 B.1 の径方向に対称な炉心の実効増倍率を求める。このため、これら 6 箇所の位置と等価な F133/20 の表 B.13 に記載した DUB 引出しと PuDA 引出しの置換反応度値 $0.596 \rho_1 \pm 0.027 \rho_1$ の 6 倍を余剰反応度に補正した。XIV-1(45V) と XIV-2 の 2 炉心では、既に対称の炉心で余剰反応度を求めたためこの補正は不要である。(3) の補正には、付録 B.2.5、B.3.5、B.4.5 の各項に記載の補正量を用いた。これらの補正を行った余剰反応度による実効増倍率を、後の付録 B.7 において、実験炉心を詳細に模擬できる連続エネルギーモンテカルロ法による中性子輸送計算の結果と比較した。

このように補正した余剰反応度の不確かさには、さらに、実験による 2 つの不確かさ寄与分と計算や核データを用いて評価した 3 つの不確かさ寄与分を合わせる。5章で記述したように、炉心温度の測定に用いた熱電対の温度校正の不確かさ $\pm 0.5^\circ\text{C}$ の不確かさに付録 B.2.1、B.3.1、B.4.1 の各項に記載した各炉心の温度係数を乗じて、温度測定系の校正の不確かさによる反応度の不確かさへの寄与分を算出した。移動側集合体の位置再現性による不確かさ $\pm 0.02 \text{ mm}$ に、付録 B.2.1、B.3.1、B.4.1 の各項に記載した集合体密着面間隙係数を乗じて両集合体間の距離の不確かさによる反応度の不確かさへの寄与分を算出した。

余剰反応度を ρ_0 単位から $\% \Delta k/k$ 単位に変換する時に用いる基準反応度の不確かさは、相対値として求めて表 B.54 に記載した。これに補正後の余剰反応度を乗じて $\% \Delta k/k$ 単位の不確かさ寄与分として表 B.58 ~ 表 B.60 に示す。格子管の外寸法の不確かさによる反応度の不確かさ寄与分には、表 B.55 の値を用いた。燃料組成の不確かさによる反応度の不確かさ寄与分には、表 B.56 の値を用いた。

これら 5 つの不確かさの寄与分も合わせた補正後の余剰反応度の不確かさは、 $0.06\% \Delta k/k \sim 0.09\% \Delta k/k$ となった。燃料組成の不確かさによる反応度の不確かさ寄与分が大きな寄与を占める。XV 炉心系の 5 つの炉心と比べて、XIV 炉心系の 3 つの炉心の不確かさはやや小さくなった。これは、プルトニウム燃料と比べてウラン燃料の組成の不確かさが小さなためである。

実効増倍率 k_{eff} は余剰反応度 ρ から $k_{eff} = 1/(1 - \rho)$ と求め、不確かさ δk_{eff} は、余剰反応度の不確かさ $\delta\rho$ から、 $\delta k_{eff} = \delta\rho/(1 - \rho)^2$ と求めた。

さらに、5章と同様に、炉心のモデル化を簡便にして決定論手法による解析を容易に行うために、余剰反応度に (4) 両集合体間の密着面のステンレス鋼の反応度値の補正と (5) 両集合体間の密着面の間隙補正の2つの補正を追加することにより、密着面のステンレス鋼を取り除き、かつ、移動側と固定側の両集合体間の間隙を除いた余剰反応度と実効増倍率を求めた。前者の補正は、付録 B.2.6、B.3.6、B.4.6 の各項に記載の値を用いた。後者は、5章と同様に、両集合体間の間隙 2.1 mm に各集合体の密着面間隙係数を乗じて反応度に換算して補正した。この間隙補正の不確かさには間隙係数の不確かさのみを考慮し、固定側集合体の位置の再現性による不確かさ ± 0.02 mm による反応度の不確かさは、先に記述したように別に扱う。

これら2つの補正を追加した余剰反応度にも、補正追加前と同様に、熱電対の温度校正と移動側集合体の位置再現性による反応度の不確かさ寄与分と計算や核データを用いて評価した3つの不確かさ寄与分を合わせる。これら5つの不確かさ寄与分も合わせた補正後の余剰反応度の不確かさは、いずれの炉心も補正追加前とほぼ同じで $0.06\% \Delta k/k \sim 0.09\% \Delta k/k$ となった。これは、燃料組成の不確かさによる反応度の不確かさが大きな寄与を占めていることによる。

表 B.57 XIV 炉心系の実効増倍率の評価日

炉心	XIV-1	XIV-1(45V)	XIV-2
評価日	1986年8月1日	1986年12月11日	1987年3月5日

表 B.58 XIV-1 炉心の実効増倍率^{D)}

一定の原子炉出力で運転時の余剰反応度 $[\rho_1]$ ^{II) III)}	7.514 ± 0.071
実験による補正と不確かさ	
補正 (1~5)	
1 未臨界度補正 $[\rho_1]$ ^{III)}	-0.1352 ± 0.0037
2 径方向に対称な炉心相当とするためのドライバー引出し置換反応度価値補正 $[\rho_1]$ ^{IV)}	-3.576 ± 0.162
3 全挿入時の制御棒と安全棒の先端の密着面からのへこみ分の反応度価値補正 $[\rho_1]$	0.292 ± 0.011
4 集合体密着面のステンレス鋼の反応度価値補正 $[\rho_1]$	1.49 ± 0.24
5 集合体密着面間隙 2.1 mm 分の反応度価値補正 $[\rho_1]$	1.41 ± 0.21
不確かさ (a, b)	
a 温度測定系の校正の不確かさによる反応度の不確かさ $[\rho_1]$	± 0.064
b 両集合体間の距離の不確かさによる反応度の不確かさ $[\rho_1]$	± 0.013
1~3 の補正を行った余剰反応度と a, b も合わせた不確かさ $[\rho_1]$	4.095 ± 0.189
同上 $[\% \Delta k/k]$ ^{V)}	0.2015 ± 0.0093
1~5 の補正を行った余剰反応度と a, b も合わせた不確かさ $[\rho_1]$	7.00 ± 0.37
同上 $[\% \Delta k/k]$ ^{V)}	0.344 ± 0.018
計算や核データを用いた評価による不確かさ (c~e)	
c 正炉周期法による反応度校正の不確かさ [%]	(± 4.1)
c-i 1~3 の補正を行った余剰反応度に対する不確かさ $[\% \Delta k/k]$ ^{VI)}	± 0.0083
c-ii 1~5 の補正を行った余剰反応度に対する不確かさ $[\% \Delta k/k]$ ^{VI)}	± 0.014
d 格子管外寸法の不確かさによる反応度の不確かさ $[\% \Delta k/k]$	± 0.030
e 燃料組成の不確かさによる反応度の不確かさ $[\% \Delta k/k]$	± 0.048
1~3 の補正を行った余剰反応度と a, b, c-i, d, e も合わせた不確かさ $[\% \Delta k/k]$	0.202 ± 0.058
1~5 の補正を行った余剰反応度と a, b, c-ii, d, e も合わせた不確かさ $[\% \Delta k/k]$	0.344 ± 0.061
実効増倍率	
1~3 の補正を行った余剰反応度と a, b, c-i, d, e も合わせた不確かさによる値	1.00202 ± 0.00058
1~5 の補正を行った余剰反応度と a, b, c-ii, d, e も合わせた不確かさによる値	1.00345 ± 0.00061

^{D)} 1986 年 8 月 1 日時点における片側集合体当たりにはドライバー燃料引出し PuDA を 64 本装荷した径方向に対称な炉心での値

^{II)} 径方向に対称な炉心から、F119/20、F133/20、F133/32 と M119/20、M133/20、M133/32 の位置で合計 6 本の DUB 引出しを PuDA 引出しに置換した片側集合体当たりには PuDA 引出しを 67 本装荷した炉心での値

^{III)} 核計装 CH#5 電流値 0.210×10^{-7} A の原子炉出力時の値

^{IV)} PuDA 引出しが 67 本の炉心から PuDA 引出しが 64 本の対称な炉心への反応度差を補正するために、F133/20 の位置で表 B.13 に示す DUB 引出しと PuDA 引出しの置換反応度価値の 6 倍

^{V)} いずれも、補正後の ρ_1 単位の余剰反応度とその不確かさに、基準反応度 $1 \rho_1 = 0.0492\% \Delta k/k$ を乗じたもの

^{VI)} いずれも、() 内に示す反応度校正の不確かさの相対値を、補正後の $\% \Delta k/k$ 単位の余剰反応度に乗じたもの

表 B.59 XIV-1(45V) 炉心の実効増倍率¹⁾

一定の原子炉出力で運転時の余剰反応度 $[\rho_0]$ ^{II) III)}	3.824 ± 0.044
実験による補正と不確かさ	
補正 (1~5)	
1 未臨界度補正 $[\rho_0]$ ^{III)}	-0.0119 ± 0.0002
2 径方向に対称な炉心相当とするためのドライバー引出し置換反応度値補正 $[\rho_0]$ ^{IV)}	—
3 全挿入時の制御棒と安全棒の先端の密着面からのへこみ分の反応度値補正 $[\rho_0]$	0.318 ± 0.011
4 集合体密着面のステンレス鋼の反応度値補正 $[\rho_0]$	0.387 ± 0.097
5 集合体密着面間隙 2.1 mm 分の反応度値補正 $[\rho_0]$	1.25 ± 0.20
不確かさ (a, b)	
a 温度測定系の校正の不確かさによる反応度の不確かさ $[\rho_0]$	± 0.038
b 両集合体間の距離の不確かさによる反応度の不確かさ $[\rho_0]$	± 0.012
1~3 の補正を行った余剰反応度と a, b も合わせた不確かさ $[\rho_0]$	4.130 ± 0.060
同上 $[\% \Delta k/k]$ ^{V)}	0.3091 ± 0.0045
1~5 の補正を行った余剰反応度と a, b も合わせた不確かさ $[\rho_0]$	5.77 ± 0.23
同上 $[\% \Delta k/k]$ ^{V)}	0.432 ± 0.017
計算や核データを用いた評価による不確かさ (c~e)	
c 正炉周期法による反応度校正の不確かさ $[\%]$	(± 3.9)
c-i 1~3 の補正を行った余剰反応度に対する不確かさ $[\% \Delta k/k]$ ^{VI)}	± 0.012
c-ii 1~5 の補正を行った余剰反応度に対する不確かさ $[\% \Delta k/k]$ ^{VI)}	± 0.017
d 格子管外寸法の不確かさによる反応度の不確かさ $[\% \Delta k/k]$	± 0.038
e 燃料組成の不確かさによる反応度の不確かさ $[\% \Delta k/k]$	± 0.071
1~3 の補正を行った余剰反応度と a, b, c-i, d, e も合わせた不確かさ $[\% \Delta k/k]$	0.309 ± 0.081
1~5 の補正を行った余剰反応度と a, b, c-ii, d, e も合わせた不確かさ $[\% \Delta k/k]$	0.432 ± 0.084
実効増倍率	
1~3 の補正を行った余剰反応度と a, b, c-i, d, e も合わせた不確かさによる値	1.00310 ± 0.00082
1~5 の補正を行った余剰反応度と a, b, c-ii, d, e も合わせた不確かさによる値	1.00434 ± 0.00085

¹⁾ 1986 年 12 月 11 日時点における片側集合体当たりにはドライバー燃料引出し PuDA を 100 本装荷した径方向に対称な炉心での値

^{II)} 片側集合体当たりには PuDA 引出しを 100 本装荷した径方向に対称な炉心での値

^{III)} 核計装 CH#6 電流値 0.502×10^{-6} A の原子炉出力時の値

^{IV)} 既に対称な炉心であるためこの補正は不要

^{V)} いずれも、補正後の ρ_0 単位の余剰反応度とその不確かさに、基準反応度 $1 \rho_0 = 0.0748\% \Delta k/k$ を乗じたもの

^{VI)} いずれも、() 内に示す反応度校正の不確かさの相対値を、補正後の $\% \Delta k/k$ 単位の余剰反応度に乗じたもの

表 B.60 XIV-2 炉心の実効増倍率¹⁾

一定の原子炉出力で運転時の余剰反応度 [ρ_0] ^{II) III)}	8.416 ± 0.021
実験による補正と不確かさ	
補正 (1~5)	
1 未臨界度補正 [ρ_0] ^{III)}	-0.0482 ± 0.0039
2 径方向に対称な炉心相当とするためのドライバー引出し置換反応度値補正 [ρ_0] ^{IV)}	—
3 全挿入時の制御棒と安全棒の先端の密着面からのへこみ分の反応度値補正 [ρ_0]	0.322 ± 0.011
4 集合体密着面のステンレス鋼の反応度値補正 [ρ_0]	1.39 ± 0.22
5 集合体密着面間隙 2.1 mm 分の反応度値補正 [ρ_0]	1.71 ± 0.27
不確かさ (a, b)	
a 温度測定系の校正の不確かさによる反応度の不確かさ [ρ_0]	± 0.034
b 両集合体間の距離の不確かさによる反応度の不確かさ [ρ_0]	± 0.016
1~3 の補正を行った余剰反応度と a, b も合わせた不確かさ [ρ_0]	8.690 ± 0.045
同上 [% $\Delta k/k$] ^{V)}	0.4582 ± 0.0024
1~5 の補正を行った余剰反応度と a, b も合わせた不確かさ [ρ_0]	11.79 ± 0.35
同上 [% $\Delta k/k$] ^{V)}	0.622 ± 0.019
計算や核データを用いた評価による不確かさ (c~e)	
c 正炉周期法による反応度校正の不確かさ [%]	(± 4.2)
c-i 1~3 の補正を行った余剰反応度に対する不確かさ [% $\Delta k/k$] ^{VI)}	± 0.019
c-ii 1~5 の補正を行った余剰反応度に対する不確かさ [% $\Delta k/k$] ^{VI)}	± 0.026
d 格子管外寸法の不確かさによる反応度の不確かさ [% $\Delta k/k$]	± 0.029
e 燃料組成の不確かさによる反応度の不確かさ [% $\Delta k/k$]	± 0.051
1~3 の補正を行った余剰反応度と a, b, c-i, d, e も合わせた不確かさ [% $\Delta k/k$]	0.458 ± 0.062
1~5 の補正を行った余剰反応度と a, b, c-ii, d, e も合わせた不確かさ [% $\Delta k/k$]	0.622 ± 0.067
実効増倍率	
1~3 の補正を行った余剰反応度と a, b, c-i, d, e も合わせた不確かさによる値 ^{VII)}	1.00460 ± 0.00063
1~5 の補正を行った余剰反応度と a, b, c-ii, d, e も合わせた不確かさによる値 ^{VII)}	1.00626 ± 0.00068

¹⁾ 1987年3月5日時点における片側集合体当たりにはドライバー燃料引出し EUDA を 44 本装荷した径方向に対称な炉心での値

^{II)} 片側集合体当たりには EUDA 引出しを 44 本装荷した径方向に対称な炉心での値

^{III)} 核計装 CH#6 電流値 0.502×10^{-7} A の原子炉出力時の値

^{IV)} 既に対称な炉心であるためこの補正は不要

^{V)} いずれも、補正後の ρ_0 単位の余剰反応度とその不確かさに、基準反応度 $1 \rho_0 = 0.0527\% \Delta k/k$ を乗じたもの

^{VI)} いずれも、() 内に示す反応度校正の不確かさの相対値を、補正後の $\% \Delta k/k$ 単位の余剰反応度に乗じたもの

^{VII)} 片側集合体当たりには EUDA 引出しを 32 本装荷した径方向に対称な炉心では、ドライバー燃料引出し置換反応度値補正の測定結果 ($-6.412 \rho_0 \pm 0.027 \rho_0$) を用いて、それぞれ 1.00120 ± 0.00059 及び 1.00284 ± 0.00063 となる。

B.7 実効増倍率の計算

6章と同様に、MVP3 コード、核データ JENDL-4.0 と JENDL-5 を用いて、炉心の詳細なモデル化により実効増倍率を計算し実験結果と比較した。本節では、その結果のみ表 B.61 に掲載する。実効増倍率の実験値は、表 B.58、表 B.59、表 B.60 の 1~3 の補正を行った値である。XV 炉心系とは逆に、XIV 炉心系の 3 つの炉心では、JENDL-4.0 と JENDL-5 とともに、計算は実験を過少評価する結果となった。

表 B.61 XIV 炉心系の実効増倍率の計算結果

炉心	XIV-1	XIV-1(45V)	XIV-2
実験値 (E)	1.00202 ± 0.00058	1.00310 ± 0.00082	1.00460 ± 0.00063
計算値 (C) ^D JENDL-4.0	0.99912	1.00217	1.00318
計算値 (C) ^D JENDL-5	0.99702	1.00231	0.99949
C / E JENDL-4.0	0.99711	0.99907	0.99859
C / E JENDL-5	0.99501	0.99921	0.99491

^D モンテカルロ計算の統計誤差はいずれの炉心も ±0.00002

C. 炉周期法による基準反応度測定の不確かさ評価の詳細

各パラメータの不確かさの相対値 $\delta\beta_{eff} / \beta_{eff}$ 、 $\delta T / T$ 、 $\delta a_i^j / a_i^j$ 、 $\delta\lambda_i^j / \lambda_i^j$ から、これらパラメータ間の相関を考えなければ、反応度の不確かさ $\delta\rho / \rho$ は分散として

$$\left(\frac{\delta\rho}{\rho}\right)^2 = \left(S_{\beta_{eff}}^\rho\right)^2 \left(\frac{\delta\beta_{eff}}{\beta_{eff}}\right)^2 + \left(S_T^\rho\right)^2 \left(\frac{\delta T}{T}\right)^2 + \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^6 \left(S_{a_i^j}^\rho\right)^2 \left(\frac{\delta a_i^j}{a_i^j}\right)^2 + \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^6 \left(S_{\lambda_i^j}^\rho\right)^2 \left(\frac{\delta\lambda_i^j}{\lambda_i^j}\right)^2 \quad (C.1)$$

から求めることができる。ここで、 $S_{\beta_{eff}}^\rho$ 、 S_T^ρ 、 $S_{a_i^j}^\rho$ 、 $S_{\lambda_i^j}^\rho$ は、各パラメータの ρ への感度であり、4.1 節に記載した逆時間方程式 (4.1) より

$$S_{\beta_{eff}}^\rho \equiv \frac{\partial\rho / \rho}{\partial\beta_{eff} / \beta_{eff}} = 1 \quad (C.2)$$

$$S_T^\rho \equiv \frac{\partial\rho / \rho}{\partial T / T} = -T \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^6 \frac{a_i^j \lambda_i^j}{(1 + \lambda_i^j T)^2}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^6 \frac{a_i^j}{1 + \lambda_i^j T}} \quad (C.3)$$

$$S_{a_i^j}^\rho \equiv \frac{\partial\rho / \rho}{\partial a_i^j / a_i^j} = \frac{\frac{a_i^j}{1 + \lambda_i^j T}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^6 \frac{a_i^j}{1 + \lambda_i^j T}} \quad (C.4)$$

$$S_{\lambda_i^j}^\rho \equiv \frac{\partial\rho / \rho}{\partial\lambda_i^j / \lambda_i^j} = -T \frac{\frac{a_i^j \lambda_i^j}{(1 + \lambda_i^j T)^2}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^6 \frac{a_i^j}{1 + \lambda_i^j T}} \quad (C.5)$$

と導くことができる。

これらのパラメータで、 β_{eff} は炉心の核分裂性核種の遅発中性子収率と即発中性子収率の他に、核分裂断面積を始めとする炉心に装荷した物質の断面積を用いて計算する。これらの核データの中で、 β_{eff} の不確かさへの大部分の寄与を占める遅発中性子収率 ν_d^j ($j = 1 \sim m$ は核種) の不確かさのみ伝搬させて、 β_{eff} の不確かさを求めた。

例えば、JENDL の遅発中性子収率の不確かさは入射中性子エネルギー依存性が大きくないので、この依存

性が無いものと近似すると、 β_{eff} への遅発中性子収率の感度 $S_{\nu_d^j}^{\beta_{eff}}$ は

$$S_{\nu_d^j}^{\beta_{eff}} \equiv \frac{\partial \beta_{eff} / \beta_{eff}}{\partial \nu_d^j / \nu_d^j} \approx \frac{\beta_{eff}^j}{\beta_{eff}} = \sum_{i=1}^6 \alpha_i^j \quad (C.6)$$

と近似できる。すなわち、この感度は β_{eff} への核種 j の寄与割合であり、遅発中性子収率の不確かさに核種間の相関を考えなければ、この感度を用いて

$$\left(\frac{\partial \beta_{eff}}{\beta_{eff}} \right)^2 = \sum_{j=1}^m \left(S_{\nu_d^j}^{\beta_{eff}} \right)^2 \left(\frac{\delta \nu_d^j}{\nu_d^j} \right)^2 \quad (C.7)$$

より β_{eff} の不確かさを求めることができる。さらに、(C.2) 式より $S_{\beta_{eff}}^\rho = 1$ なので、(C.1) 式は

$$\left(\frac{\delta \rho}{\rho} \right)^2 = \sum_{j=1}^m \left(S_{\nu_d^j}^{\beta_{eff}} \right)^2 \left(\frac{\delta \nu_d^j}{\nu_d^j} \right)^2 + (S_T^\rho)^2 \left(\frac{\delta T}{T} \right)^2 + \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^6 \left(S_{a_i^j}^\rho \right)^2 \left(\frac{\delta a_i^j}{a_i^j} \right)^2 + \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^6 \left(S_{\lambda_i^j}^\rho \right)^2 \left(\frac{\delta \lambda_i^j}{\lambda_i^j} \right)^2 \quad (C.8)$$

に置き換えることができ、これにより基準反応度の不確かさを求めた。

遅発中性子収率の不確かさの相対値 $\delta \nu_d^j / \nu_d^j$ には JENDL の共分散を用いた。 ^{235}U と ^{239}Pu には熱中性子核分裂での不確かさであるそれぞれ 3.5% と 6.5% を使い、 ^{238}U には高速中性子核分裂での不確かさ 3.4% を用いた。 ^{240}Pu と ^{241}Pu の不確かさにはエネルギー依存性は無く 5% であり、これを用いた。なお、これら 5 核種に関しては、JENDL の遅発中性子収率の共分散には核種間の相関は無い。

$\delta T / T$ は 3.3 節に記述した倍加時間測定の不確かさ ± 0.5 s を相対値に変換して用いた。

$\delta a_i^j / a_i^j$ に関しては、JENDL には共分散は与えられていないので、Keepin の測定結果 [33] を用いた。 ^{235}U と ^{239}Pu では、Keepin の熱中性子核分裂の測定結果と不確かさから求め、同様に、 ^{238}U と ^{240}Pu には高速中性子核分裂のデータを用いた。炉心の核分裂への寄与が小さな ^{241}Pu のデータは Keepin の測定結果に無く、基準反応度の不確かさ評価には含めなかった。

$\delta \lambda_i^j / \lambda_i^j$ に関しても、JENDL に共分散は与えられていないので、 $\delta a_i^j / a_i^j$ と同様に Keepin の測定結果を用いた。

基準反応度の不確かさは、4.1 節の表 4.1 と付録 B.5 節の表 B.54 に記載したように、8 つの炉心の基準反応度の不確かさは、いずれもおおよそ 4% となった。

D. 実験炉心への装荷物の重量、燃料組成の不確かさによる 反応度の不確かさ評価の詳細

表 D.1 実験炉心への装荷物の重量の不確かさによる反応度の不確かさとその内訳

炉心	XIV-1	XIV-1 (45V)	XIV-2	XV-1	XV-2 (45V)	XV-2 (65V)	XV-2 (80V)	XV-2 (95V)
不確かさ内訳								
プルトニウム燃料板 101	1.3	2.4	1.5	—	2.5	2.8	3.0	3.3
プルトニウム燃料板 102	0.8	1.6	0.7	1.5	1.7	1.6	1.6	1.5
プルトニウム燃料板 103	0.4	0.7	0.5	—	0.6	0.7	0.8	0.8
プルトニウム燃料板 104	0.2	0.4	0.2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
プルトニウム燃料板 105	—	1.3	—	6.9	6.2	5.9	5.4	5.2
93% 濃縮ウラン燃料板 201	1.4	2.2	1.2	2.6	3.8	4.6	5.1	5.7
20% 濃縮ウラン燃料板 204	2.4	3.8	0.7	1.2	1.6	2.0	2.3	2.5
20% 濃縮ウラン燃料板 208	3.9	2.3	5.9	1.2	—	—	—	—
天然ウラン燃料板 301	0.8	0.4	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.6
天然ウラン燃料板 315	—	—	—	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4
天然ウラン燃料板 325	1.5	0.9	1.4	1.5	1.3	1.1	1.0	0.9
天然ウランブロック 402	0.3	0.5	0.2	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5
天然ウランブロック 409	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
劣化ウラン燃料板	2.8	1.8	2.8	3.5	2.9	2.6	2.4	2.2
劣化ウランブロック 601	0.4	0.6	0.4	0.3	0.5	0.6	0.6	0.6
劣化ウランブロック 603	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
ポリエチレン板	6.6	9.0	6.0	5.0	6.6	7.8	8.4	9.4
ポリスチレン板 ボイド無し	16.1	—	19.0	10.8	—	—	—	—
ポリスチレン板 45% ボイド	—	4.4	—	—	3.2	—	—	—
ポリスチレン板 65% ボイド	—	—	—	—	—	1.4	—	—
ポリスチレン板 80% ボイド	—	—	—	—	—	—	0.5	—
ポリスチレン板 95% ボイド	—	—	—	—	—	—	—	0.2
黒鉛板 (1/4×2×2 サイズ)	21.7	58.1	20.7	12.3	36.9	44.8	49.6	54.7
黒鉛板 (1/8×2×2 サイズ)	—	—	—	0.3	0.4	0.5	0.6	0.6
黒鉛板 (1/16×2×2 サイズ)	0.2	0.4	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4
ステンレス板 (1/16×2×2 サイズ)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
ステンレス板 (1/4×2×2 サイズ)	0.4	0.4	0.5	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4
ステンレスブロック	0.9	1.0	1.0	0.8	1.1	1.1	1.0	0.8
アルミナ板 (1/16×2×2 サイズ)	0.1	0.1	0.3	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2
穴開きアルミ (1/8×2×2 サイズ)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
不確かさ	28.5	59.3	29.6	19.2	38.6	46.4	51.1	56.3

不確かさの単位は全て pcm ($10^{-3}\% \Delta k/k$)

表 D.2 実験炉心に装荷したプルトニウム燃料板、ウラン燃料板と劣化ウランブロックの同位体組成の不確かさによる反応度の不確かさとその内訳

炉心	XIV-1	XIV-1 (45V)	XIV-2	XV-1	XV-2 (45V)	XV-2 (65V)	XV-2 (80V)	XV-2 (95V)
不確かさ内訳								
プルトニウム燃料板 101	5.7	9.9	6.9	—	10.8	12.1	13.0	14.1
プルトニウム燃料板 102	1.4	3.2	1.4	7.5	6.0	4.9	3.9	3.2
プルトニウム燃料板 103	0.9	1.4	1.1	—	1.4	1.5	1.6	1.7
プルトニウム燃料板 104	0.8	1.7	0.9	5.3	4.1	3.3	2.6	2.1
プルトニウム燃料板 105	—	8.0	—	125.9	78.1	58.1	43.5	34.1
93% 濃縮ウラン燃料板 201	0.2	0.4	0.3	0.2	0.5	0.6	0.7	0.7
20% 濃縮ウラン燃料板 204	9.1	16.1	2.3	4.0	5.5	6.8	7.9	8.7
20% 濃縮ウラン燃料板 208	26.7	15.9	36.1	—	—	—	—	—
劣化ウランブロック 601	5.1	9.0	4.6	4.2	6.1	6.8	7.2	7.9
劣化ウランブロック 603	1.1	1.9	1.2	0.9	1.3	1.4	1.5	1.6
不確かさ	29.3	27.8	37.2	126.4	79.6	60.4	46.9	39.0

不確かさの単位は全て pcm ($10^{-3}\% \Delta k/k$)

表 D.3 実験炉心に装荷したウラン燃料板と劣化ウランブロックの塗料の組成の不確かさによる反応度の不確かさとその内訳

炉心	XIV-1	XIV-1 (45V)	XIV-2	XV-1	XV-2 (45V)	XV-2 (65V)	XV-2 (80V)	XV-2 (95V)
不確かさ内訳								
93% 濃縮ウラン燃料板 201	5.9	10.1	5.6	13.2	17.9	21.6	24.2	26.7
20% 濃縮ウラン燃料板 204	4.3	13.8	1.6	5.6	7.8	13.4	11.3	12.6
20% 濃縮ウラン燃料板 208	9.6	4.9	7.3	—	—	—	—	—
天然ウラン燃料板 301	1.8	0.4	0.5	1.1	4.2	6.2	8.0	9.2
天然ウラン燃料板 315	—	—	—	1.7	0.4	0.8	1.1	1.4
天然ウラン燃料板 325	14.5	7.2	9.4	8.8	4.6	2.5	1.5	2.4
天然ウランブロック 402	0.5	0.9	0.2	0.4	0.7	0.9	1.0	1.2
天然ウランブロック 409	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2
劣化ウラン燃料板	10.8	3.9	8.4	6.3	2.7	0.6	1.8	4.2
劣化ウランブロック 601	10.4	17.7	10.8	11.2	16.3	17.9	19.2	21.0
劣化ウランブロック 603	2.7	4.4	2.8	2.9	4.1	4.5	4.8	5.2
不確かさ	24.3	26.8	19.3	21.5	26.7	32.1	34.3	38.1

不確かさの単位は全て pcm ($10^{-3}\% \Delta k/k$)

This is a blank page.

