

JAERI-M
90-042

F C A 高転換軽水炉模擬実験における
反応度値実験

1990年3月

岡嶋 成晃・桜井 健・大杉 俊隆・大井川宏之

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

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

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1990

編集兼発行	日本原子力研究所
印刷	日立高速印刷株式会社

FCA高転換軽水炉模擬実験における反応度値実験

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

岡嶋 成晃・桜井 健・大杉 俊隆・大井川宏之

(1990年2月3日受理)

高転換軽水炉における反応度値実験を原研FCAを用いた一連の実験において実施した。測定項目は、核燃料物質および中性子吸収物質の中心サンプル反応度値と模擬制御棒反応度値である。これらの測定をウラン燃料装荷FCA-HCLWR炉心（第1フェーズ実験）およびプルトニウム燃料装荷FCA-HCLWR炉心（第2フェーズ実験）において実施した。測定結果を、JENDL-2とSRACシステムを用いた計算結果と比較した。

核燃料物質の中心サンプル反応度値では、第1フェーズ実験において全体に計算が20～25%実験値を過小評価した。一方、第2フェーズ実験では、計算は全体に0～20%実験値を過小評価したが、第1フェーズ実験の結果に比べて過小評価の程度は小さい。中性子吸収物質の中心サンプル反応度値は、第1フェーズ実験および第2フェーズ実験とも、計算は実験値を過小に評価する。しかし、C/E値は第1フェーズ実験結果に比べて、第2フェーズ実験の結果の方が1に近い値である。B-10濃縮度によるC/E値への依存性は両フェーズ実験とも観測されなかった。B₄CサンプルのC/E値のスペクトル依存性は、第1フェーズ実験では見られなかったが、第2フェーズ実験では、減速材ボイド率が0%から80%までの体系のC/E値はボイド率が大きくなるにつれて、B₄CのC/E値は1に近づく傾向を示した。Hfサンプルの反応度値のC/E値は、両フェーズ実験とも、B₄Cのそれより全般に小さい値を示した。なお、第2フェーズ実験のC/E値の傾向はB₄CのC/E値の傾向と異なり、スペクトル依存性を顕著に示さなかった。

模擬制御棒反応度値については、全般に、第1フェーズ実験および第2フェーズ実験とも同様な傾向を示し、反応度値の計算は、中心サンプル反応度値と同様に、実験値を過小に評価した。しかし、C/E値は、中性子吸収物質の中心サンプル反応度値の結果に比べて、1に近い値を示す。C/E値のスペクトル依存性は、第1フェーズ実験では、中性子スペクトルが軟らかくなるにつれて1に近づくのに対し、第2フェーズ実験では、XV-2 (45V), XV-2 (95V), XV-1の順にC/E値は1から遠ざかる。この両フェーズ実験での傾向は、中心サンプル反応度値の傾向と一致する。Hfについても、中心サンプル反応度値の結果と同様に、B₄Cに比べて、C/E値は小さい値を示した。

Experimental Study on Reactivity Worth
in High Conversion Light Water Reactor
Using FCA-HCLWR Cores

Shigeaki OKAJIMA, Takeshi SAKURAI, Toshitaka OSUGI
and Hiroyuki OIGAWA

Department of Reactor Engineering
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 3, 1990)

Experimental study on reactivity worth in HCLWR cores has been carried out in a series of experiments using the Fast Critical Assembly (FCA) in Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI). Both central reactivity worths for nuclear fuel materials as well as absorber materials and simulated control rod worth were measured in FCA-HCLWR cores fueled with enriched uranium (Phase-1 experiment) and fueled with plutonium (Phase-2 experiment). The experimental values are compared with the calculated ones which obtained from JENDL-2 data and the SRAC system.

The calculation for the central reactivity worth of the nuclear fuel materials underestimated the measured values by 20-25% in Phase-1 experiment and by 0-20% in Phase-2 experiment. For the absorber materials, the calculation also gave the underestimation in both Phase-1 and Phase-2 experiments. The ratios between calculated and measured values (C/E values) in Phase-2 experiment were closer to unity than those in Phase-1 experiment. The dependence of ^{10}B content in C/E values was not found through all cores. The C/E values did not show the spectral dependence in Phase-1 experiment, on the other hand, showed it in Phase-2 experiment. For the hafnium sample, the C/E values were smaller than those for B_4C sample in both Phase-1 and Phase-2 experiments. The spectral dependence was not found in all cores.

For the simulated control rod worth, the calculation gave underestimation in Phase-1 and Phase-2 experiments. The C/E values were closer to unity than those of the central reactivity worths of absorber materials. The C/E values in Phase-1 experiment approached to unity with softening neutron spectrum, while those in Phase-2 experiment left away from unity in the order XV-2(45V), XV-2(95V), XV-1 cores. This tendency was also found in the central reactivity worth of absorber materials. For the hafnium rod, the C/E values were smaller than those of B_4C rods.

Keywords : Reactivity Worth, High Conversion Light Water Reactor, Central Reactivity Worth, Control Rod, Uranium, Plutonium, Thorium, Boron Carbide, Hafnium, Fast Critical Assembly, JENDL-2, SRAC, Experiment

目 次

1. はじめに	1
2. 実験	2
2.1 実験体系	2
2.1.1 第1フェーズ実験	2
2.1.2 第2フェーズ実験	3
2.2 中心サンプル反応度値	3
2.2.1 第1フェーズ実験	4
2.2.2 第2フェーズ実験	5
2.3 模擬制御棒反応度値	6
2.3.1 第1フェーズ実験	6
2.3.2 第2フェーズ実験	6
3. 解析	21
3.1 解析手法	21
3.2 中心サンプル反応度値	21
3.2.1 第1フェーズ実験	21
3.2.2 第2フェーズ実験	22
3.3 模擬制御棒反応度値	23
3.3.1 第1フェーズ実験	23
3.3.2 第2フェーズ実験	23
4. 考察	31
4.1 中心サンプル反応度値	31
4.1.1 第1フェーズ実験	31
4.1.2 第2フェーズ実験	32
4.2 模擬制御棒反応度値	33
4.2.1 第1フェーズ実験	33
4.2.2 第2フェーズ実験	33
5. まとめ	50
5.1 中心サンプル反応度値	50
5.2 模擬制御棒反応度値	52
5.3 検討課題	52
謝 辞	53
参考文献	53

Contents

1. Introduction	1
2. Experiment	2
2.1 FCA-HCLWR cores	2
2.1.1 Phase-1 experiment	2
2.1.2 Phase-2 experiment	3
2.2 Central reactivity worth	3
2.2.1 Phase-1 experiment	4
2.2.2 Phase-2 experiment	5
2.3 Simulated control rod worth	6
2.3.1 Phase-1 experiment	6
2.3.2 Phase-2 experiment	6
3. Calculation	21
3.1 Calculation method	21
3.2 Central reactivity worth	21
3.2.1 Phase-1 experiment	21
3.2.2 Phase-2 experiment	22
3.3 Simulated control rod worth	23
3.3.1 Phase-1 experiment	23
3.3.2 Phase-2 experiment	23
4. Discussion	31
4.1 Central reactivity worth	31
4.1.1 Phase-1 experiment	31
4.1.2 Phase-2 experiment	32
4.2 Simulated control rod worth	33
4.2.1 Phase-1 experiment	33
4.2.2 Phase-2 experiment	33
5. Summary	50
5.1 Central reactivity worth	50
5.2 Simulated control rod worth	52
5.3 Future works	52
Acknowledgement	53
References	53

1. はじめに

近年、天然ウランの節約およびプルトニウムの有効利用の観点から高転換軽水炉の開発研究が実施されてきている。この高転換軽水炉は、燃料格子の稠密性と燃料濃縮度の特異性（6～8% Fissile/HM）のため共鳴エネルギー領域の核反応の寄与が増大し、従来の軽水炉域は高速炉とは非常に異なった炉特性を有する。そこで、高転換軽水炉に代表されるような共鳴エネルギー領域での中性子反応が支配的となる炉の炉物理特性を実験的に明確にし、得られた実験データの解析から高転換軽水炉の設計に使用する計算手法と核データの妥当性を検討することを目的として、基礎的な炉物理実験がFCAにおいて計画され、実施された。^{1),2)} 具体的には、解明すべき主要炉特性として、臨界性・転換比・減速材ボイド効果・制御棒反応度効果等が挙げられ、これらの特性に関する実験データを取得し、さらに実験解析を実施することにより高転換軽水炉に関する“Data & Method”の確立に資することである。

実験は、第1フェーズ（ウラン炉心）および第2フェーズ（プルトニウム炉心）の二段階にて構成された。第1フェーズ実験では、20%濃縮ウラン板を基に燃料セルを構成し、共鳴エネルギー領域に着目した基礎的な炉物理研究に重点を置く。ウラン炉心では、全体的には高転換軽水炉の基本的な中性子エネルギースペクトルをよく模擬し、かつ、プルトニウム核種の共鳴反応による影響を排除した比較的素直な中性子エネルギースペクトルを形成することができる。さらに、燃料濃縮度および減速材対燃料体積比を比較的容易に変えることができ、高転換軽水炉の炉物理特性のこれらのパラメータに対する依存性を検討することが可能となる。

第2フェーズ実験では、Pu-Al合金板を用いて燃料セルを構成し、プルトニウム炉心の特徴となる炉物理特性を実験的に明確にする。さらに、第1フェーズ実験と第2フェーズ実験の結果を、同一手法・データで統一的に解析することにより、ウラン炉心の場合と比較して、プルトニウム炉心の解析上の問題点を明確にする。また、減速材のボイド状態を変え、それらが高転換軽水炉の炉物理特性に及ぼす影響を明らかにすることも第2フェーズ実験の目的の一つである。

これらの実験体系において、臨界性、中性子スペクトル指標、中性子吸収物質の特性等に対する基礎的な実験データとして中心サンプル反応度値の測定を実施した。測定対象とした物質は核燃料物質であるウラン、プルトニウムおよびトリウムと、中性子吸収物質である炭化ボロンとハフニウムである。また、中性子吸収物質を用いて模擬制御棒セルを作成し、制御棒反応度効果の測定として模擬制御棒反応度値の測定を実施した。ここでは、第1フェーズ実験および第2フェーズ実験において実施したこれらの測定結果とその解析について述べる。本レポートでは、第2章において実験体系および実験方法について簡単に述べ、測定結果を示した。第3章では、計算手法と計算結果を記し、第4章において反応度値を規格化して炉心相互間で比較した。

2. 実 験

2.1 実験体系^{1),2)}

2.1.1 第1フェーズ実験

第1フェーズ実験は、3つの炉心XIV-1・XIV-1(45V)・XIV-2から成る。これらの炉心は、燃料濃縮度・減速材対燃料体積比等のパラメータの選択が比較的容易な20%濃縮ウランを基本的な燃料とし、テスト領域・バッファ領域・ドライバ領域から成るゾーン装荷型炉心である。テスト領域は、高転換軽水炉の炉心の中性子エネルギースペクトルを模擬した領域であり、形状は1辺が約50cmのほぼ正方形で高さが約90cm又は70cmの直方体であり、高さ方向の上下に約20cmの軸方向ブランケットを有している。ドライバ領域は系の臨界性を調節するために設けられたものであり、高速炉に近い中性子スペクトルを持つ組成となっている。各炉心のテスト領域に装荷される燃料セルの主要パラメータをTable 2.1.1に示す。

XIV-1炉心のテスト領域の平均の燃料濃縮度($U-235/U$)は6.47%、減速材対燃料体積比は0.6である。テスト領域に装荷される燃料セル内の物質板の配列をFig.2.1.1に示す。燃料を模擬するために、20%濃縮ウラン金属板・天然ウラン金属板・劣化ウラン酸化物板・酸化アルミニウム板を用い、また、減速材を模擬するためにボイド率0%のポリスチレン板を用いている。このポリスチレン板は水素の原子数密度に換算して0.7g/ccの軽水に相当する。

XIV-1(45V)炉心はXIV-1炉心のテスト領域セルのポリスチレン板のボイド率を0%から45%に変更して、高転換軽水炉の減速材ボイド状態を模擬したものである。テスト領域燃料セルの燃料濃縮度、減速材対燃料体積比はそれぞれ6.47%、0.6とXIV-1炉心のテスト領域燃料セルと同じであるが、水素とウラン原子数の比(H/U)は1.20から0.67と小さくなっている。水素の原子数が減少したためスペクトルが硬化し、熱群による中性子生成率がXIV-1炉心の燃料セルの38%からXIV-1(45V)炉心の燃料セルの21%へと減少している。テスト領域において減速材ボイド状態を模擬したことによる体系の反応度減少は、ドライバ領域の燃料組成と領域の大きさを調整することにより補償した。このため、炉心の領域別出力分担比を見ると、XIV-1(45V)炉心ではテスト領域の出力比がXIV-1炉心の57%から34%に減少し、ドライバ領域の出力比が36%から58%に増大している。

XIV-2炉心は、高転換軽水炉の炉特性に対する燃料濃縮度と減速材対燃料体積比の影響を調べることを目的とした炉心であり、そのテスト領域の燃料濃縮度は5.45%、減速材対燃料体積比は1.0である。水素とウランの原子数の比(H/U)は2.0とXIV-1炉心と比較して大きく、稠密度をゆるめた高転換軽水炉に対応している。このため、テスト領域の燃料セル内の中性子生成率に対する熱群の寄与が大きく57%となっている。

以上3つの炉心のテスト領域の燃料セルのセル平均の中性子スペクトルをFig.2.1.2に示す。3つのスペクトルは約20eVを境に交差し、XIV-2炉心の燃料セルでは熱群の中性子束が高く、より熱化された中性子スペクトルを模擬している。

2.1.2 第2フェーズ実験

第2フェーズ実験はプルトニウム燃料を用いた炉心により構成され、プルトニウム炉心の解析上の問題点を明確にし、さらに高転換軽水炉の減速材ボイド特性を把握することを目的としている。

第2フェーズ実験はXV-1, XV-2 (45V), XV-2 (65V), XV-2 (80V), XV-2 (95V)の5つの炉心からなる。これら第2フェーズ炉心(XV炉心)も第1フェーズ炉心(XIV炉心)と同様にゾーン装荷炉心であり、テスト領域、バッファ領域、ドライバ領域から成る。テスト領域の寸法はXIV-1炉心と同じく50cm×50cm×90cmである。Fig.2.1.3にこのXV炉心のテスト領域燃料セルの物質板配列を示す。第1フェーズ炉心のテスト領域燃料セルの20%濃縮ウラン金属板の代わりにPu-Al合金板(ステンレス被覆)を用いている。この燃料セルの燃料濃縮度($\text{Pu-fissile}/(\text{Pu}+\text{U})$)は、第1フェーズ実験のXIV-1炉心のテスト領域燃料セルと無限増倍率の値がほぼ等しくなるように天然ウラン金属板、劣化ウラン酸化物板の量を調整して8.11%とした。減速材対燃料体積比はXIV-1炉心のテスト領域燃料セルと同じく0.6である。これにより、ウラン燃料セルとプルトニウム燃料セルとの特性の直接的な比較が可能である。一方、XV-2炉心は、Fig.2.1.3に示したテスト領域燃料セルのポリスチレン板が45%, 65%, 80%および95%のボイド率のポリスチレン板にそれぞれ置き換えられたセルからなる。Table 2.1.2に、これらの燃料セルの主要パラメータを示す。また、Fig.2.1.4に各ボイド率のセル平均の中性子エネルギースペクトルを示す。

2.2 中心サンプル反応度価値

燃料セル構成物質である燃料板のセル内での反応度持分に関するデータとして、或はテスト領域の中性子スペクトル指標、高転換軽水炉での中性子吸収物質の特性データ、後述の模擬制御棒反応度価値解析の基礎データ等として、炉心中心燃料セルにおいて、中心サンプル反応度価値測定を実施した。測定対象サンプルは、核燃料物質および中性子吸収物質の2つに大別することができる。核燃料物質としては、劣化ウラン、天然ウラン、20%濃縮ウラン、93%濃縮ウラン、Pu組成の異なるプルトニウムおよびトリウムのサンプル反応度価値を測定した。Pu組成の異なるプルトニウムでは、($\text{Pu-fissile}/\text{Pu}$)が、92%, 81%および75%の3種類があり、これらは、Pu-fissile(Pu-239+Pu-241)重量は等しいが、Pu-240重量が異なるものである。中性子吸収物質としては、濃縮度の異なる炭化ボロン(B₄C濃縮度:20%, 40%, 60%, 90%)およびハフニウムである。これらのサンプルのうち天然ウラン(NU), 20%濃縮ウラン(EU(20)), 93%濃縮ウラン(EU(93))およびプルトニウム(Pu(92), Pu(81), Pu(75))は、通常、FCAで燃料模擬物質として使用しているものを使用した。したがって、セルを構成する20%濃縮ウラン板と同様の形状(2インチ×2インチ×1/16インチ)である。一方、劣化ウラン(DUO2), トリウム(Th)および中性子吸収物質は、2インチ×2インチ×1/8インチを標準の寸法とし、炭化ボロン(B₄C(20), B₄C(40), B₄C(60), B₄C(90))はステンレス鋼で被覆されている。なお、ハフニウム(Hf)は2インチ×2インチ×1/16インチが1枚の寸法であるが、測定に際しては2枚を単

位として用いた。測定に使用したサンプル形状および組成をTable 2.2.1に示す。測定は、測定対象サンプルが装荷された場合の臨界点と、そのサンプルが取り除かれた場合、またはサンプルの代わりにアルミニウムまたはボイド缶（ステンレス鋼被覆だけから成る）が装荷された場合の臨界点のそれぞれを、校正された制御棒で求め、この2つの臨界点での制御棒位置の相違をサンプルの反応度値とした。さらに、この測定値には温度変化による反応度ドリフトの補正を温度係数により考慮した。測定誤差は、制御棒による臨界点の測定誤差および温度変化による反応度ドリフトの補正に対する誤差等を考慮した。その結果、測定誤差は $\pm 3 \sim 6 \times 10^{-6} \Delta k/k$ 程度である。測定値を後述の計算値と比較するために、制御棒の所定の長さに対する反応度をペリオド法にて測定し、逆時間方程式から、 $\Delta k/k$ 単位への換算係数を導出した。この計算において、遅発中性子データとしてTomlinsonの評価値³⁾を用いた。

2.2.1 第1フェーズ実験

(1) 核燃料物質

核分裂性物質（ウランおよびプルトニウム）

サンプルを、XIV-1およびXIV-1(45V)炉心では燃料セル中の中心の20%濃縮ウラン板の位置に、XIV-2炉心では外側の20%濃縮ウラン板の位置に装荷して測定した。したがって、XIV-1およびXIV-1(45V)炉心では燃料セル当り1枚の燃料板の反応度値を、一方、XIV-2炉心では2枚の燃料板の反応度値を測定した。これらの反応度は、XIV-1およびXIV-1(45V)炉心ではサンプル正味の反応度値（すなわち、ボイドとの置換反応度値）として、XIV-2炉心ではアルミニウム板（形状：2インチ×2インチ×1/16インチ）との置換反応度値として測定した。ここで、正味の反応度値の評価は、最初にアルミニウム板との置換反応度値を測定し、次に形状の異なるアルミニウム板を用いてアルミニウム単位重量当りの反応度値を評価し、その結果から導出した。XIV-1およびXIV-1(45V)炉心の結果では、アルミニウム板の反応度値は中心セルにおいて重量との間に直線性が成立していることを確認した。また、アルミニウム板の反応度値は、燃料物質の反応度値より小さいことが確認された。そこで、その後の炉心では、計算との比較の容易さの観点からも、アルミニウム板との置換反応度を測定値とした。

親物質（ウランおよびトリウム）

テスト領域燃料セルにおいて、XIV-1およびXIV-1(45V)炉心では燃料セル中の両側の劣化ウラン酸化物(DUO2)板の位置にて、XIV-2炉心では両側の劣化ウラン酸化物板の位置にて反応度値測定を実施した。測定は、①サンプル燃料板(2-2-1/8)1枚とDUO2板(2-2-1/8)1枚を組み合わせ、燃料セル中に合計2組挿入した場合および②サンプル燃料板(2-2-1/8)2枚を組合せて合計4枚挿入した場合の2ケースに対して実施した。なお、①のケースでは、燃料セル中心に対して内側の位置にサンプルを置き、外側にはDUO2板を置いた。これらの反応度は、上述のNU、EUおよびPuの中心サンプル反応度値測定と同様に、XIV-1およびXIV-1(45V)炉心ではサンプル正味の反応度値（すなわち、ボイドとの置換反応度値）として、XIV-2炉心では同一形状相当のアルミニウム板との置換反応度値として測定した。

(2) 中性子吸収物質 (炭化ボロンとハフニウム)

標準燃料セルを若干変更することにより模擬制御棒セルを作成した。作成に際し、セル内の燃料板等の配列の対称性と吸収物質対燃料体積比を考慮した。その結果、セルでの吸収物質対燃料体積比は現在設計されている高転換軽水炉のそれよりもやや大きく、XIV-1 および XIV-1 (45V) 炉心では 0.25, XIV-2 炉心では 0.143 となった。模擬制御棒セルの模擬物質板配列を Fig. 2. 2. 1 に示す。XIV-1 および XIV-1 (45V) 炉心の測定位置は上述の DUO2, NU および Th の測定位置に等しい。また、XIV-1 炉心では、1/8 インチ厚さのサンプルの他に、サンプルの形状の相違による反応度値への影響を調べる目的で、1/4 インチ厚さのサンプルの反応度値測定も実施した。1/4 インチ厚さのサンプルの挿入位置は Fig. 2. 2. 2 に示す。これらの反応度は、同一形状のボイド缶との置換反応度として測定した。したがって、B₄C ではサンプル正味の反応度値を測定したことになる。

2. 2. 2 第 2 フェーズ実験

(1) 核燃料物質

核分裂性物質 (ウランおよびプルトニウム)

サンプルを、燃料セル中の両側の 92% プルトニウム板の位置に装荷して測定した。ただし、NU 板を用いた測定は、燃料セル中の NU 板の位置で実施し、すべての NU 板すなわち 4 枚用いて測定した。測定方法等は第 1 フェーズ実験と同様であり、測定された反応度値はアルミニウム板との置換反応度値である。

親物質 (ウランおよびトリウム)

テスト領域燃料セル中の両外側の劣化ウラン酸化物 (DUO2) 板の位置にて、測定を実施した。測定は、第 1 フェーズ実験と同様に、① サンプル燃料板 (2-2-1/8) 1 枚と DUO2 板 (2-2-1/8) 1 枚を組み合わせて、燃料セル中に合計 2 組挿入した場合、および② サンプル燃料板 (2-2-1/8) 2 枚を組合せて合計 4 枚挿入した場合の 2 ケースに対して実施した。なお、① のケースでは、燃料セル中心に対して内側の位置にサンプルを置き、外側には DUO2 板を置いた。これらの反応度は、同一形状相当のアルミニウム板との置換反応度値として測定した。

(2) 中性子吸収物質 (炭化ボロンとハフニウム)

第 1 フェーズ実験と同様に、セル内の燃料板等の配列の対称性と吸収物質対燃料体積比を考慮して、模擬制御棒セルを作成した。その結果、標準燃料セルと若干異なり、吸収物質対燃料体積比は現在設計されている高転換軽水炉のそれより若干大きく 0.222 となった。模擬制御棒セルの模擬物質板配列を Fig. 2. 2. 3 に示す。

第 1 フェーズ実験および第 2 フェーズ実験で実施した中心サンプル反応度値測定結果を、Table 2. 2. 2 および Table 2. 2. 3 にそれぞれまとめて示す。

2.3 模擬制御棒反応度値

制御棒の炉心への装荷を模擬するために、炉心中心軸に沿って模擬制御棒セルを並べた。測定は、模擬制御棒セルが炉心領域すべてに並べられた場合（制御棒全挿入状態を模擬）と炉心中心から炉心上部にわたって並べられた場合（半挿入状態を模擬）について、修正中性子源増倍法^{4),5)}により実施した。測定は、模擬制御棒セルにおいてボイド缶が装填された状態を基準とした。測定に使用した検出器は、FCAの起動系として使用しているCh.1およびCh.2と運転に使用しているCh.5およびCh.6である。修正中性子源増倍法で使用する補正係数は10群2次元円柱形状拡散計算より求めた。測定誤差として、個々の検出器の計数値に対する統計的誤差、計数値から反応度へ換算する際に使用する基準反応度の測定誤差および測定に使用される4つの検出器による測定値のバラツキ等を考慮した。なお、補正係数の計算誤差は考慮しなかった。その結果、測定誤差は相対誤差で約2～3%程度である。第1フェーズ実験での測定結果をTable 2.3.1に示し、第2フェーズ実験での結果をTable 2.3.2に示す。

2.3.1 第1フェーズ実験

中心サンプル反応度値測定で用いた各体系の模擬制御棒セルを用いて、それぞれの体系の半挿入および全挿入の測定を実施した。

さらに、XIV-1炉心において、B₄C(20)を用いた模擬制御棒セルを用いて、制御棒反応度値分布の測定を実施した。併せて、この分布測定において、ポリスチレンとの置換反応度値の測定も実施した。これらの結果をTable 2.3.3に示す。

2.3.2 第2フェーズ実験

第1フェーズ実験と同様に、中心サンプル反応度値測定での模擬制御棒セルを炉心中心軸方向に並べて制御棒挿入状態を模擬して、XV-1炉心、XV-2(45V)炉心およびXV-2(95V)炉心での測定を実施した。測定は、XV-1炉心およびXV-2(45V)炉心では修正中性子源増倍法を、XV-2(95V)炉心では臨界法にて測定した。

Table 2.1.1 Main cell parameter of test zone cell of
Phase I cores in FCA

炉心名	XIV-1	XIV-1(45V)	XIV-2
燃料濃縮度	6.47	6.47	5.45
減速材対燃料体積比	0.6	0.6	1.0
減速材ポイド率	0	45	0
H/U 原子数比	1.20	0.67	2.01

Table 2.1.2 Main cell parameter of test zone cell of Phase II
cores in FCA

炉心名	XV-1	XV-2(45V)	XV-2(65V)	XV-2(80V)	XV-2(95V)
燃料濃縮度	8.11	8.11	8.11	8.11	8.11
減速材対燃料体積比	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
減速材ポイド率	0	45	65	80	95
H/(U+Pu) 原子数比	1.10	0.62	0.39	0.22	0.06

Table 2.2.1 Sample plate used for the measurement

Sample	<u>EU(93)</u>	<u>EU(20)</u>	<u>NU</u>	<u>NU</u>
Size	2-2-1/16	2-2-1/16	2-2-1/16	2-2-1/8
Weight	73.36 g	74.31 g	75.12 g	150.2 g
U-234		0.06 g		
U-235	68.12 g	14.82 g	0.53 g	1.17 g
U-236		0.13 g		
U-238	5.24 g	59.33 g	74.59 g	149.1 g

Sample	<u>DU02</u>	<u>DU02</u>	Sample	<u>Th</u>
Size	2-2-1/8	2-2-1/4	Size	2-2-1/8
Weight	78.73 g	159.7 g	Weight	92.26 g
0	9.4 g	19.4 g	Th-232	92.26 g
U-235	0.15 g	0.28 g		
U-238	69.2 g	140.0 g		

Sample	<u>Pu(92)</u>	<u>Pu(81)</u>	<u>Pu(75)</u>
Size	2-2-1/16	2-2-1/16	2-2-1/16
Weight	46.29 g	51.65 g	54.46 g
Can	10.39 g	10.95 g	10.90 g
Pu-A1	35.90 g	40.70 g	43.56 g
Pu	35.38 g	40.14 g	42.92 g
Pu-238	0.007 g	0.03 g	0.24 g
Pu-239	32.26 g	32.64 g	32.49 g
Pu-240	2.81 g	7.31 g	9.32 g
Pu-241	0.27 g		
Pu-242	0.03 g	0.18 g	0.88 g

Table 2.2.1 Sample plate used for the measurement (continued)

Sample	<u>B4C(20)</u>	<u>B4C(40)</u>	<u>B4C(60)</u>	<u>B4C(90)</u>
Size	2-2-1/8	2-2-1/8	2-2-1/8	2-2-1/8
Weight	24.54 g	24.35 g	24.04 g	23.84 g
Can	9.85 g	9.78 g	9.87 g	9.84 g
B-10	2.11 g	4.23 g	6.29 g	9.48 g
B-11	9.29 g	6.96 g	4.58 g	1.16 g
C	3.14 g	3.19 g	3.16 g	3.21 g

Sample	<u>B4C(20)</u>	<u>B4C(90)</u>
Size	2-2-1/4	2-2-1/4
Weight	38.66 g	36.95 g
Can	9.75 g	9.76 g
B-10	4.13 g	18.91 g
B-11	18.39 g	2.27 g
C	6.13 g	5.76 g

Sample	<u>Hf</u>
Size	2-2-1/16
Weight	48.34 g
Hf-174	0.07 g
Hf-176	2.42 g
Hf-177	8.64 g
Hf-178	12.76 g
Hf-179	6.42 g
Hf-180	16.58 g
Zr	1.45 g

Sample	<u>Void can</u>	<u>Void can</u>	<u>Al</u>	<u>Al</u>
Size	2-2-1/8	2-2-1/4	2-2-1/16	2-1-1/16
Weight	9.89 g	24.35 g	10.21 g	5.10 g
Fe	7.08 g	9.78 g		
Cr	1.79 g	4.23 g		
Ni	0.83 g	6.96 g		

Table 2.2.2 Experimental results of sample reactivity
worth in FCA XIV cores

unit: ρ_B

	XIV-1	XIV-1(45V)	XIV-2
EU(93)(1/16)	0.289	0.190	2.141
EU(20)(1/16)	0.074	0.033	0.873
NU(1/16)	—	-0.015	-0.134
Pu(92)(1/16)	0.129	0.095	1.191
Pu(81)(1/16)	0.084	0.075	0.880
Pu(75)(1/16)	0.053	0.063	0.661
Th(1/8)*2	-0.146	-0.083	-0.444
Th(1/8)*4	-0.262	-0.153	-0.804
DUO2(1/8)*2	-0.055	-0.030	-0.214
DUO2(1/4)*2	-0.133	-0.057	-0.364
NU(1/8)*2	-0.092	-0.052	-0.221
NU(1/8)*4		-0.103	-0.499
B ₄ C(20)(1/8)	-1.526	-0.711	-2.569
B ₄ C(40)(1/8)	-1.882	-0.923	-3.045
B ₄ C(60)(1/8)	-2.099	-1.073	-3.336
B ₄ C(90)(1/8)	-2.350	-1.236	-3.670
Hf(1/16)	-1.100	-0.482	-1.863
B ₄ C(20)(1/4)	-1.985		
B ₄ C(90)(1/4)	-2.940		
Error	± 0.005	± 0.008	± 0.005
$\rho_B (\times 10^{-4} \Delta k/k)$	10.32	8.03	5.63

Table 2.2.3 Experimental results of sample reactivity worth in
FCA XV coresunit: ρ_0

	XV-1	XV-2(45V)	XV-2(65V)	XV-2(80V)	XV-2(95V)
EU(93)(1/16)	0.887	0.711	0.603	0.494	0.397
EU(20)(1/16)	0.282		0.140	0.108	
NU(1/16)	-0.112	-0.086			-0.045
Pu(92)(1/16)	0.492	0.402	0.335	0.288	0.244
Pu(81)(1/16)	0.410	0.361	0.315	0.276	0.245
Pu(75)(1/16)	0.344	0.319	0.292	0.263	0.243
Th(1/8)*2	-0.168	-0.131	-0.104	-0.088	-0.054
Th(1/8)*4	-0.299	-0.221	-0.201	-0.151	-0.108
DUO2(1/8)*2	-0.083	-0.048	-0.028	-0.030	-0.026
DUO2(1/4)*2	-0.141	-0.104	-0.067	-0.057	-0.043
NU(1/8)*2	-0.087	-0.067	-0.058	-0.055	-0.032
NU(1/8)*4	-0.198	-0.144	-0.119	-0.099	-0.072
B ₄ C(20)(1/8)	-0.762	-0.513	-0.383	-0.264	-0.148
B ₄ C(40)(1/8)	-0.991	-0.720	-0.570	-0.412	-0.255
B ₄ C(60)(1/8)	-1.142	-0.858	-0.705	-0.518	-0.346
B ₄ C(90)(1/8)	-1.321	-1.018	-0.862	-0.664	-0.455
Hf(1/16)	-0.502	-0.321	-0.231	-0.151	-0.079
Error	±0.004	±0.006	±0.005	±0.005	±0.005
ρ_0 ($\times 10^{-4} \Delta k/k$)	8.52	6.34	5.98	6.38	7.00

Table 2.3.1 Experimental results of reactivity worths of simulated control rod in FAC XIV cores

unit: ρ_0

	XIV-1	XIV-1(45V)	XIV-2
C/R half insertion			
B ₄ C(20)	- 7.08±0.13	- 3.65±0.09	-10.07±0.08
B ₄ C(40)	- 8.39±0.22	- 4.61±0.08	-11.97±0.10
B ₄ C(60)	- 9.20±0.17	- 5.24±0.08	-12.96±0.15
B ₄ C(90)	-10.07±0.16	- 5.86±0.08	-13.99±0.23
Hf	- 5.26±0.13	- 2.60±0.10	- 7.75±0.08
C/R full insertion			
B ₄ C(20)	-13.83±0.25	- 7.06±0.11	-18.71±0.25
B ₄ C(40)	-16.13±0.45	- 8.90±0.12	-21.57±0.59
B ₄ C(60)	-17.89±0.57	- 9.99±0.11	-24.49±0.46
B ₄ C(90)	-19.56±0.53	-11.33±0.12	-25.94±0.83
Hf	-10.26±0.18	- 5.01±0.12	-14.50±0.18
$\rho_0 (\times 10^{-4} \Delta k/k)$	10.32	8.03	5.63

Table 2.3.2 Experimental results of reactivity worths of simulated control rod in FCA XV cores

unit: ρ_0

	XV-1	XV-2(45V)	XV-2(95V)
C/R half insertion			
B ₄ C(20)	- 4.06±0.04	- 2.78±0.03	- 0.87±0.01
B ₄ C(40)	- 5.21±0.06		
B ₄ C(60)	- 5.88±0.07		
B ₄ C(90)	- 6.70±0.10	- 5.23±0.05	- 2.61±0.01
Hf			
C/R full insertion			
B ₄ C(20)	- 7.88±0.08	- 5.30±0.03	- 1.63±0.01
B ₄ C(40)	-10.09±0.17	- 7.30±0.12	- 2.78±0.01
B ₄ C(60)	-11.45±0.22	- 8.50±0.11	- 3.68±0.01
B ₄ C(90)	-13.12±0.29	- 9.88±0.10	- 4.87±0.01
Hf	- 5.32±0.04	- 3.41±0.05	- 0.87±0.01
$\rho_0 (\times 10^{-4} \Delta k/k)$	8.52	6.34	7.00

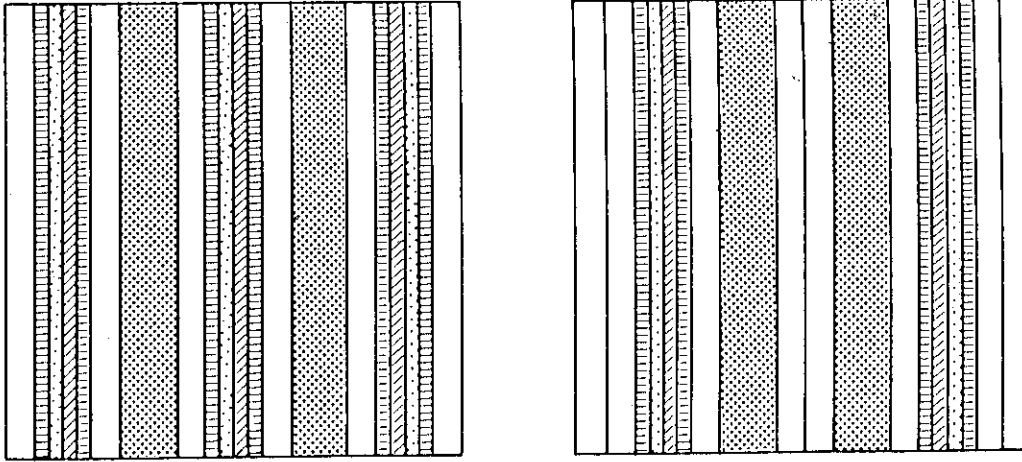
Table 2.3.3 Measured reactivity worth of 20% B4C rod with partial insertion in FCA XIV-1 core


unit: ρ_0


Simulated control rod position	Replacement from void can plate	Replacement from polystelene plate
(0/18)	0.12±7.8%	0.15±11%
(4/18)	1.78±1.9%	
(9/18)	7.09±1.9%	7.56±2.1%
(14/18)	12.28±1.4%	
(full in)	13.83±1.8%	15.15±2.4%


XIV-1 and XIV-1 (45V)


XIV-2




 20% Enriched Uranium Metal
 (t = 1/16)

 Natural Uranium Metal
 (t = 1/16)

 Depleted Uranium Oxide
 (t = 1/4)

 Aluminum Oxide
 (t = 1/16)

 Polystyrene
 (t = 1/8)

(t : thickness of plate in inch unit)
 (1 inch = 2.54cm)

Fig. 2.1.1 Plate configuration of test zone cell in Phase-1 experiment of FCA-HCLWR

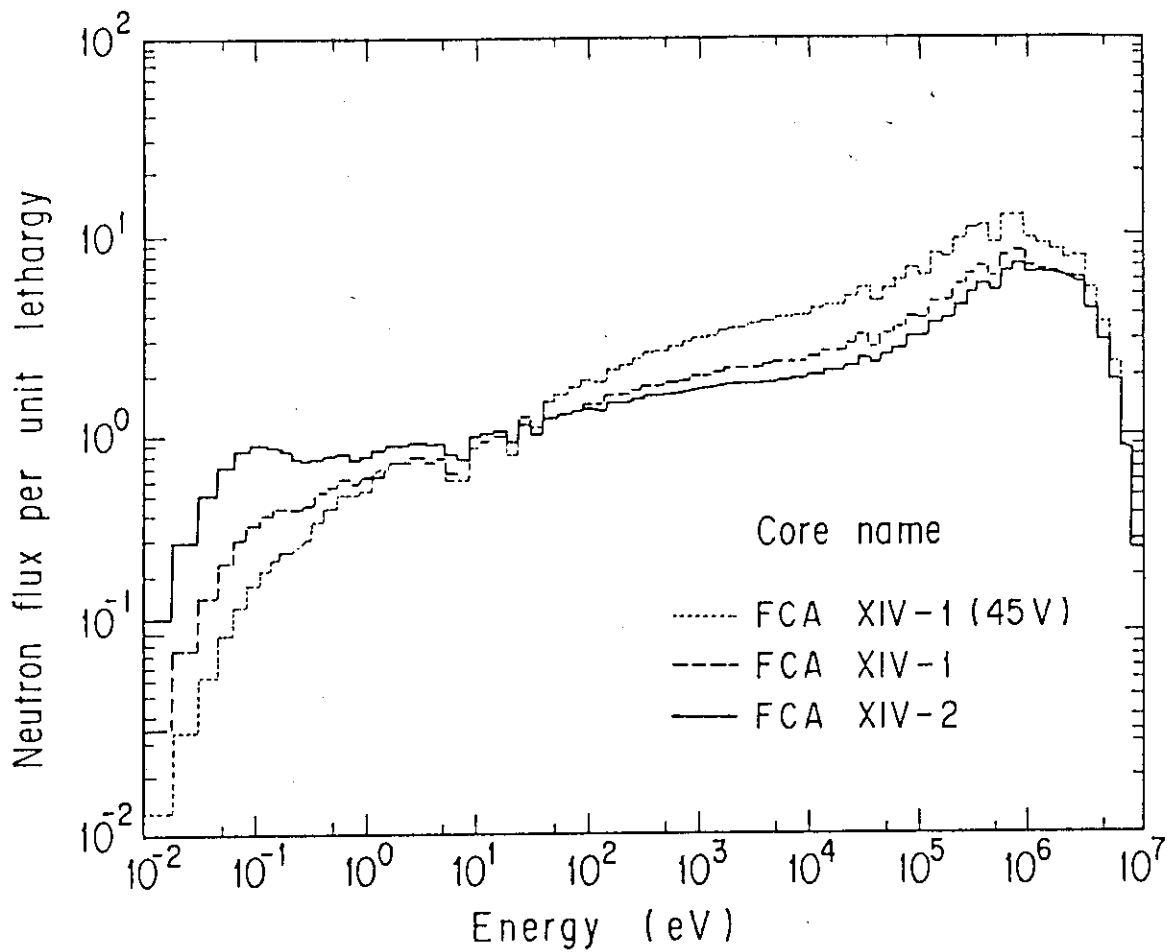
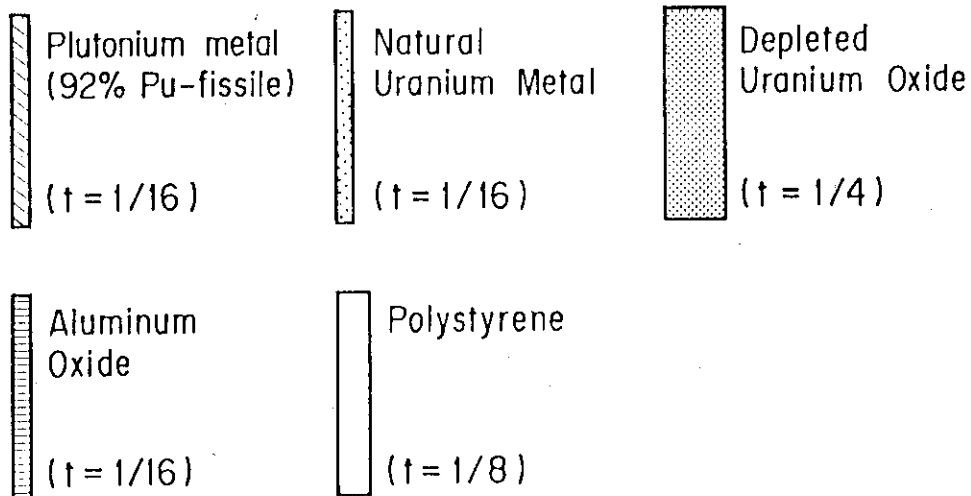
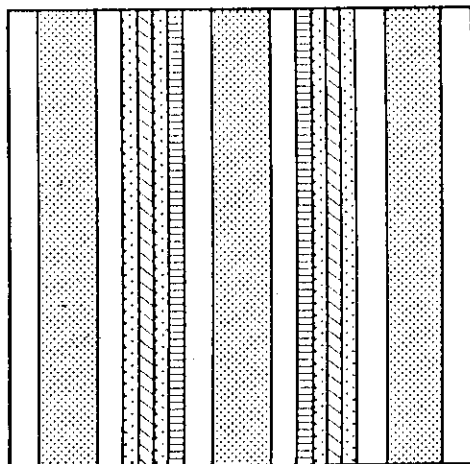


Fig. 2.1.2 Calculated neutron energy spectra in FCA XIV-1, XIV-1 (45V) and XIV-2



(t : thickness of plate in inch unit)
(1 inch = 2.54 cm)

Fig. 2.1.3 Plate configuration of test zone cell in Phase-2 experiment of FCA-HCLWR

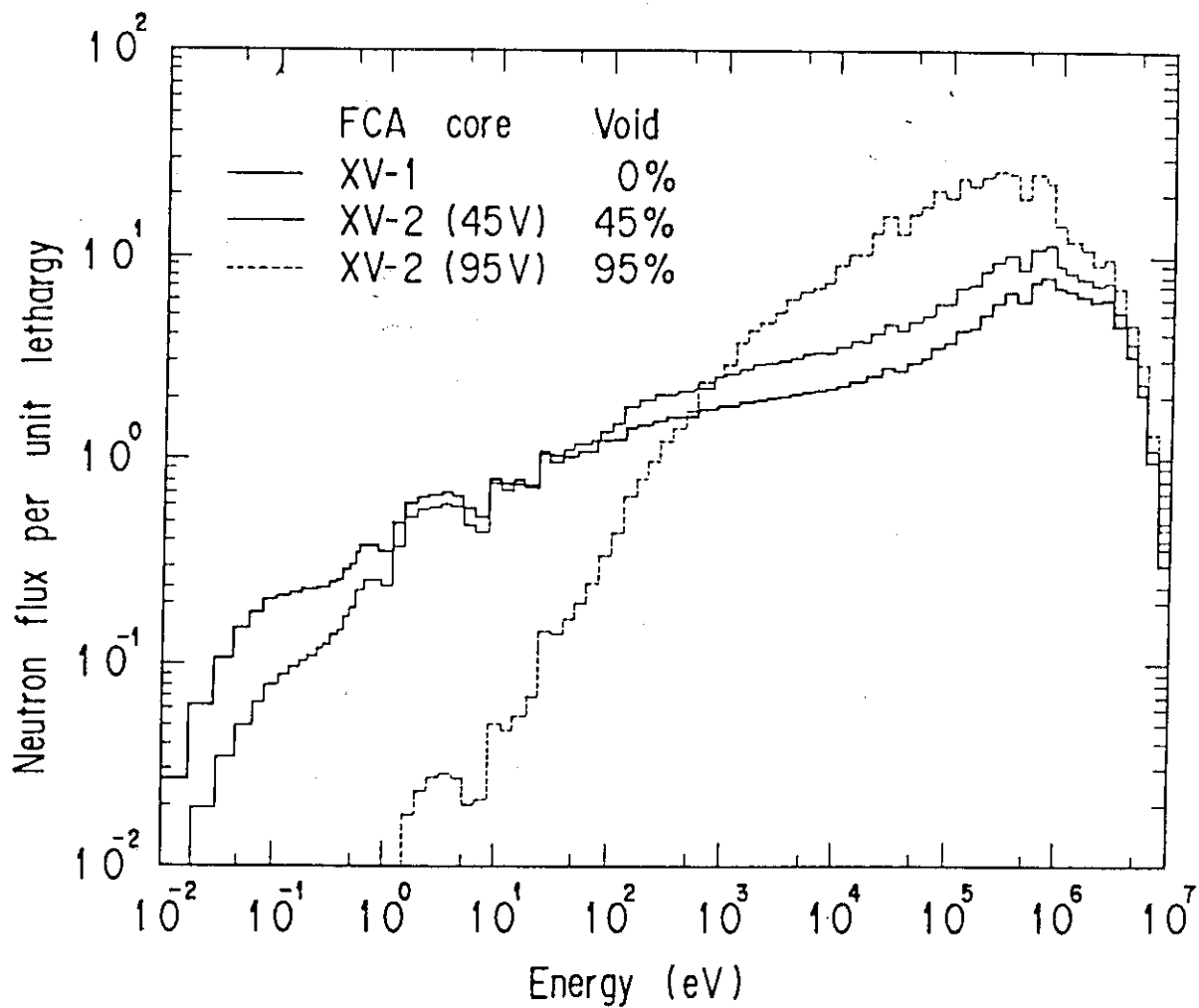


Fig. 2.1.4 Calculated neutron energy spectra in FCA XV-1, XV-2 (45V) and XV-2(95V) cores

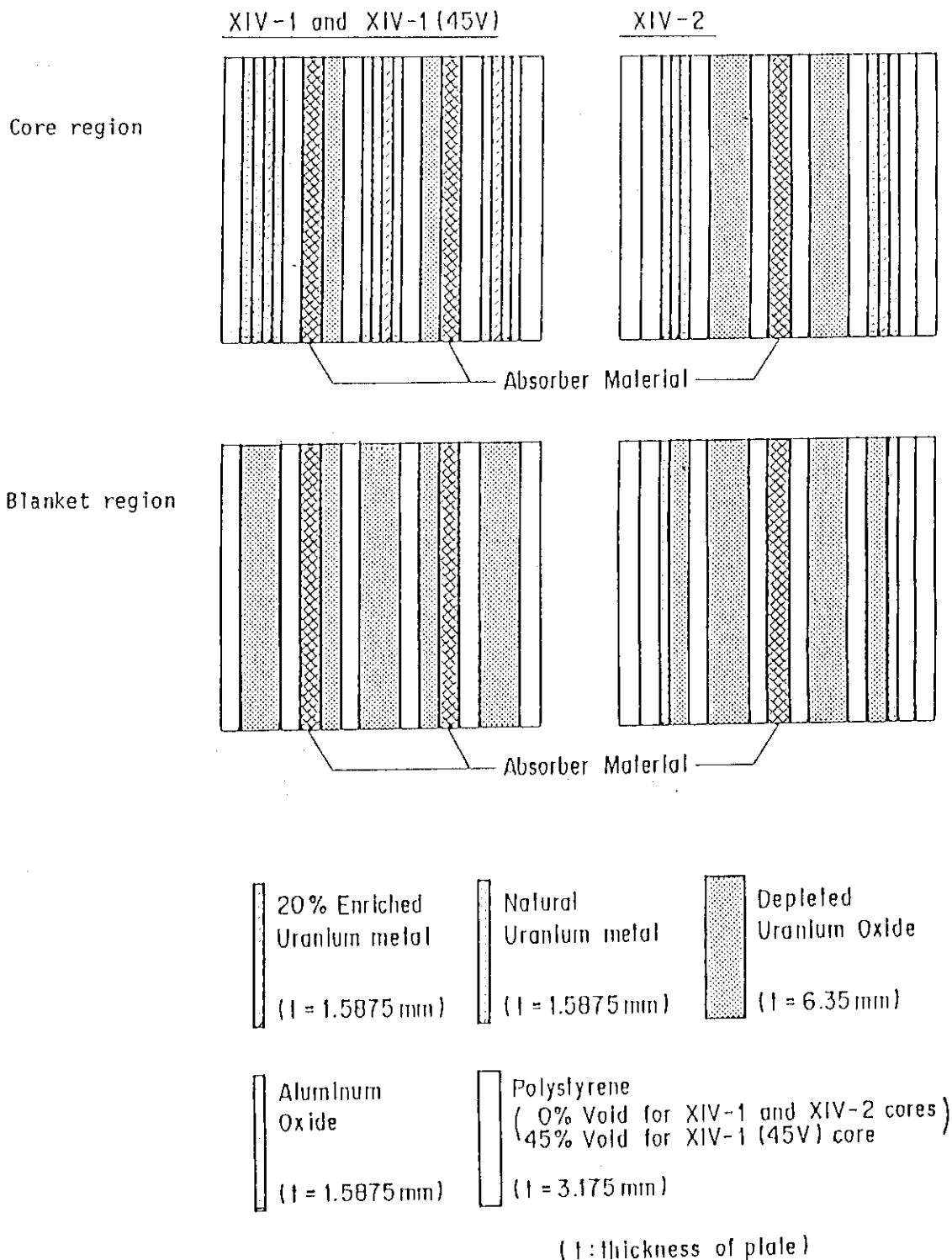


Fig. 2.2.1 Plate configuration of simulated control rod cell in Phase-1 experiment of FCA-HCLWR

XIV-1

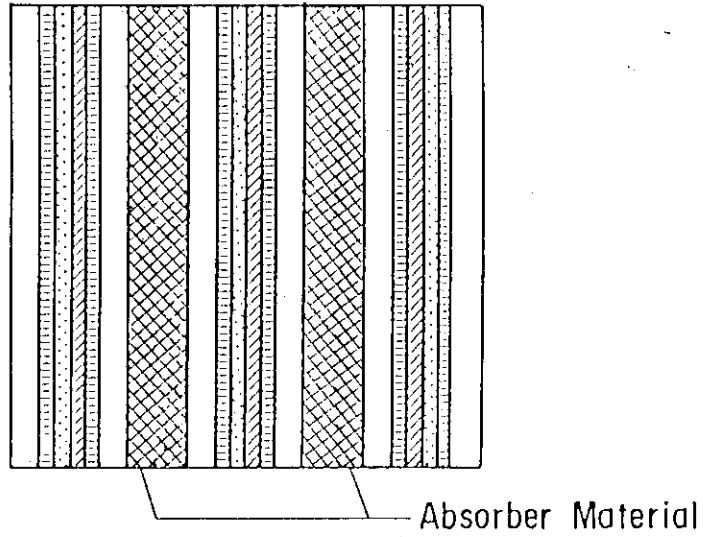
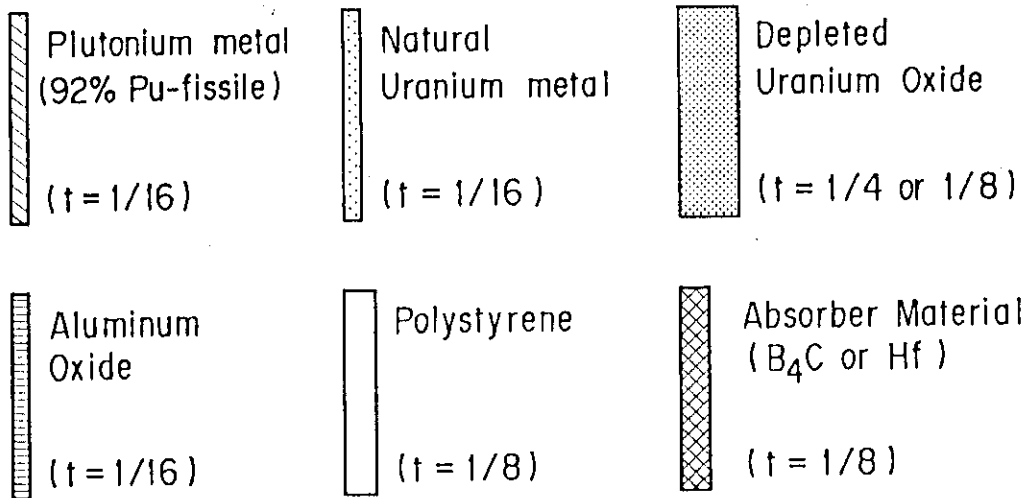
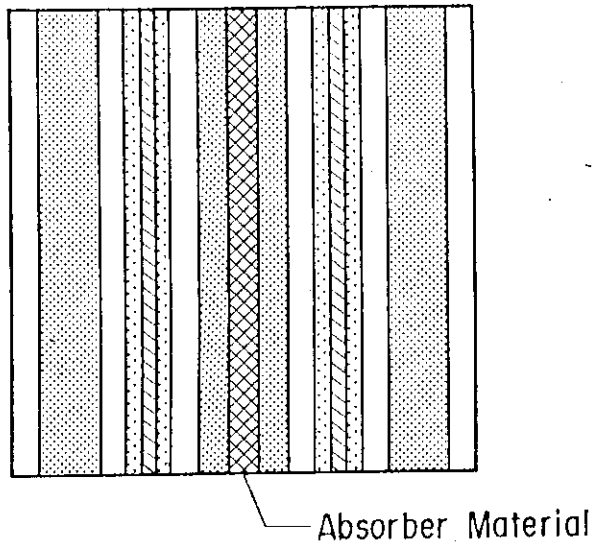


Fig. 2.2.2. Plate configuration of simulated control rod cell with B_4C plate of 1/4 inch thickness in Phase-1 experiment of FCA-HCLWR



(t : thickness of plate in inch unit)
(1 inch = 2.54cm)

Fig. 2.2.3 Plate configuration of simulated control rod cell in Phase-2 experiment of FCA-HCLWR

3. 解 析

3.1 解析方法

解析は、原研での標準的な熱中性子炉設計コードであるSRAC⁶⁾を用いた。Fig.2.2.1, Fig.2.2.2に示した炉心の各領域の燃料セルおよび軸方向ブランケットセルについて、SRACコード及びJENDL-2⁷⁾に基づく断面積ファイルを用いて86群(高速群:66群,熱群:20群)の無限板状セル計算を行いセル実効断面積を作成した。ただし、不銹鋼バッファ領域および径方向ブランケット領域(劣化ウラン金属)については均質断面積を作成した。共鳴領域の取扱いはNR近似に基づくTable-Look-Up法とし、計算メッシュは格子管および引出しを模擬したステンレス鋼の領域を除き1/16インチとした。現在のSRAC用断面積ファイルには減速材として選択したポリスチレンの熱中性子散乱データが整備されていないのでポリエチレンのデータにて代用した。また、非等方拡散係数はSRACシステム内のBenoistの式により導出した。

これらのセル実効断面積を用いて、86群2次元円柱拡散の体系計算を行い、各体系の実効増倍係数から反応度値を算出した。Table 3.1.1に86群エネルギー群構造を示す。高速群と熱群との境界エネルギーは0.683eVとした。ここで、反応度値計算は高速炉の解析では1次摂動論に基づいて実施される場合が多いが、本解析においては、中性子吸収物質等の場合中性子スペクトルが高速炉に比べて軟らかいことから、中性子束のへこみをできるだけ厳密に求める必要があることから、1次摂動論を用いなかった。

3.2 中心サンプル反応度値

2次元86群拡散計算による第1フェーズ実験での中心サンプル反応度値結果をTable 3.2.1に、計算結果と実験値との比較として、C/E値をTable 3.2.2に示す。また、第2フェーズ実験での中心サンプル反応度値結果をTable 3.2.3に、そのC/E値をTable 3.2.4に示す。この実験と計算の比較を第1フェーズ実験について3.2.1項で、第2フェーズ実験について3.2.2項で述べる。

3.2.1 第1フェーズ実験

(1) 核燃料物質

核分裂性物質(ウランおよびプルトニウム)

Table 3.2.2より明らかなように、全体に計算は20~25%実験値を過小評価する。C/E値は、XIV-1(45V), XIV-1, XIV-2の順に1に近づく。すなわち、中性子スペクトルが軟らかくなるにつれて、C/E値は1に近づく傾向を示す。

親物質(ウランおよびトリウム)

上述の核分裂性物質と同様に、全体に計算が実験値を過小評価する。XIV-1 (45V) 炉心での相対誤差が大きいため、C/E値の系統的なスペクトル依存性等を考察するのは困難である。しかし、ThのC/E値はXIV-1とXIV-2炉心で0.75と同程度の値を示す。一方、NUは核分裂性物質での傾向と同様に、XIV-1炉心でのC/E値がXIV-2炉心でのそれより小さい。

(2) 中性子吸収物質 (炭化ボロンとハフニウム)

上述の核燃料物質と同様に、計算は実験値を過小に評価する。B₄CのC/E値は、XIV-1炉心で0.71、XIV-1 (45V) 炉心で0.77、XIV-2炉心で0.80であり、B-10濃縮度によるC/E値への依存はない。HfのC/E値は、B₄Cのそれより全般に小さい値を示す。

3.2.2 第2フェーズ実験

(1) 核燃料物質

核分裂性物質 (ウランおよびプルトニウム)

Table 3.2.4より明らかなように、計算は全体に0~15%実験値を過小評価するが、過小評価の程度は、第1フェーズ実験の結果より小さい。PuのC/E値をみると、XV-1炉心で0.88、XV-2 (45V) 炉心で0.93、XV-2 (65V) 炉心で1.0、XV-2 (80V) 炉心で0.98、XV-2 (95V) 炉心で0.92であり、減速材ボイド率が0%から80%まではボイド率が大きくなるにつれて、すなわち中性子スペクトルが硬くなるにつれてC/E値が1に近づく。しかし、95%ボイドでは、この傾向から逸脱する。

親物質 (ウランおよびトリウム)

Thについては、全体に計算が実験値を20%程度過小に評価する。一方、DUO2およびNUでは、 $(1/8) * 2$ の場合相対誤差が大きいため傾向を論じるのは困難であるが、 $(1/8) * 4$ の場合では、XV-2 (80V) 炉心とXV-2 (95V) 炉心のC/E値は誤差の範囲内で一致している。

(2) 中性子吸収物質 (炭化ボロンとハフニウム)

第1フェーズ実験の結果と同様に、計算は実験値を過小評価する。しかし、C/E値は第1フェーズ実験結果に比べて、1に近い値である。B₄CのC/E値は、XV-1炉心で0.82、XV-2 (45V) 炉心で0.91、XV-2 (65V) 炉心で0.92、XV-2 (80V) 炉心で0.93、XV-2 (95V) 炉心で0.88であり、上記の核分裂性物質と同様に、減速材ボイド率が0%から80%まではボイド率が大きくなるにつれて、すなわち中性子スペクトルが硬くなるにつれてC/E値が1に近づく。しかし、95%ボイドでは、この傾向から逸脱する。C/E値のB-10濃縮度依存性はないが、第1フェーズ実験の結果と比較すると、第2フェーズ実験でのC/E値はB-10濃縮度に対してC/E値の平均値に対するバラツキが大きい傾向にある。HfのC/E値は、第1フェーズ実験結果と同様に、B₄Cのそれより全般に小さい値を示す。

3.3 模擬制御棒反応度値

2次元86群拡散計算による第1フェーズ実験での模擬制御棒反応度値結果をTable 3.3.1に、計算結果と実験値との比較として、C/E値をTable 3.3.2に示す。また、第2フェーズ実験での模擬制御棒反応度値結果をTable 3.3.3に、そのC/E値をTable 3.3.4に示す。これらの結果には、比較のために中性子吸収物質の中心サンプル反応度値結果も併せて示す。

3.3.1 第1フェーズ実験

計算は、中心サンプル反応度値と同様に、実験値を過小に評価する。しかし、C/E値は、中性子吸収物質の中心サンプル反応度値の結果に比べて、1に近い値を示す。模擬制御棒挿入状態でのC/E値を比較すると、全挿入状態のC/E値が半挿入状態のそれよりも若干1に近い値を示す。Hfについては、中心サンプル反応度値の結果と同様に、 B_4C に比べて、C/E値は小さな値を示す。

3.3.2 第2フェーズ実験

計算は、第1フェーズ実験と同様に、実験値を過小に評価する。しかし、XV-1炉心およびXV-2(95V)炉心では、中心サンプル反応度値と半挿入状態のC/Eは測定の誤差の範囲内で一致する。模擬制御棒の挿入状態を比較すると、全挿入状態と半挿入状態とでC/E値が若干異なり、全挿入状態の方がC/E値はやや1に近い値を示す。Hfに対して、中心サンプル反応度値の結果と同様に、 B_4C に比べて、C/E値は小さな値を示す。

Table 3.1.1 86 Energy group structure used for calculation

group	E_{upper} (eV)	ΔU	group	E_{upper} (eV)	ΔU
	<<<< fast >>>>		45	0.16702 E + 03	0.2500
1	0.10000 E + 08	0.2500	46	0.13007 E + 03	0.2500
2	0.77880 E + 07	0.2500	47	0.10130 E + 03	0.2500
3	0.60653 E + 07	0.2500	48	0.78893 E + 02	0.2500
4	0.47237 E + 07	0.2500	49	0.61442 E + 02	0.2500
5	0.36788 E + 07	0.2500	50	0.47851 E + 02	0.2500
6	0.28651 E + 07	0.2500	51	0.37266 E + 02	0.2500
7	0.22313 E + 07	0.2500	52	0.29023 E + 02	0.2500
8	0.17377 E + 07	0.2500	53	0.22603 E + 02	0.2500
9	0.13534 E + 07	0.2500	54	0.17604 E + 02	0.2500
10	0.10540 E + 07	0.2500	55	0.13710 E + 02	0.2500
11	0.82065 E + 06	0.2500	56	0.10677 E + 02	0.2500
12	0.63928 E + 06	0.2500	57	0.83153 E + 01	0.2500
13	0.49787 E + 06	0.2500	58	0.64760 E + 01	0.2500
14	0.38774 E + 06	0.2500	59	0.50435 E + 01	0.2500
15	0.30197 E + 06	0.2500	60	0.39279 E + 01	0.2500
16	0.23518 E + 06	0.2500	61	0.30590 E + 01	0.2500
17	0.18316 E + 06	0.2500	62	0.23824 E + 01	0.2500
18	0.14264 E + 06	0.2500	63	0.18554 E + 01	0.2500
19	0.11109 E + 06	0.2500	64	0.14450 E + 01	0.2500
20	0.86517 E + 05	0.2500	65	0.11253 E + 01	0.2500
21	0.67380 E + 05	0.2500	66	0.87643 E + 00	0.2500
22	0.52475 E + 05	0.2500		<<<< thermal >>>>	
23	0.40868 E + 05	0.2500	67	0.68256 E + 00	0.1250
24	0.31828 E + 05	0.2500	68	0.60236 E + 00	0.1250
25	0.24788 E + 05	0.2500	69	0.53158 E + 00	0.1250
26	0.19305 E + 05	0.2500	70	0.46912 E + 00	0.1250
27	0.15034 E + 05	0.2500	71	0.41399 E + 00	0.1252
28	0.11709 E + 05	0.2500	72	0.36528 E + 00	0.1252
29	0.91188 E + 04	0.2500	73	0.31961 E + 00	0.1432
30	0.71017 E + 04	0.2500	74	0.27699 E + 00	0.1541
31	0.55308 E + 04	0.2500	75	0.23742 E + 00	0.1670
32	0.43074 E + 04	0.2500	76	0.20090 E + 00	0.1823
33	0.33546 E + 04	0.2500	77	0.16743 E + 00	0.2006
34	0.26126 E + 04	0.2500	78	0.13700 E + 00	0.2228
35	0.20347 E + 04	0.2500	79	0.10963 E + 00	0.2498
36	0.15846 E + 04	0.2500	80	0.85397 E - 01	0.2882
37	0.12341 E + 04	0.2500	81	0.64017 E - 01	0.3352
38	0.96112 E + 03	0.2500	82	0.45785 E - 01	0.4029
39	0.74852 E + 03	0.2500	83	0.30602 E - 01	0.5051
40	0.58295 E + 03	0.2500	84	0.18467 E - 01	0.6773
41	0.45400 E + 03	0.2500	85	0.93805 E - 02	1.0320
42	0.35357 E + 03	0.2500	86	0.33423 E - 02	5.8117
43	0.27536 E + 03	0.2500		1.00000 E - 05	
44	0.21445 E + 03	0.2500			

Table 3.2.1 Calculated results of sample reactivity worth
in FCA XIV cores

unit: $10^{-4} \Delta k/k$

	XIV-1	XIV-1(45V)	XIV-2
EU(93)(1/16)	2.25	1.12	9.23
EU(20)(1/16)	0.53	0.23	3.82
NU(1/16)	-0.20	-0.08	-0.63
Pu(92)(1/16)	1.05	0.57	5.54
Pu(81)(1/16)	0.68	0.44	4.21
Pu(75)(1/16)	0.38	0.34	3.19
Th(1/8)*2	-1.14	-0.48	-1.89
Th(1/8)*4	-2.02	-0.84	-3.40
DUO2(1/8)*2	-0.45	-0.20	-0.66
DUO2(1/4)*2	-1.08	-0.45	-1.70
NU(1/8)*2	-0.71	-0.32	-1.02
NU(1/8)*4	-1.59	-0.68	-2.38
B ₄ C(20)(1/8)	-11.28	-4.37	-11.51
B ₄ C(40)(1/8)	-13.86	-5.73	-13.69
B ₄ C(60)(1/8)	-15.47	-6.63	-15.01
B ₄ C(90)(1/8)	-17.23	-7.64	-16.46
Hf(1/16)	-7.77	-2.81	-7.96
B ₄ C(20)(1/4)*2	-14.55		
B ₄ C(90)(1/4)*2	-21.25		

Table 3.2.2 C/E values of sample reactivity worth in FCA
XIV cores

	XIV-1	XIV-1(45V)	XIV-2
EU(93)(1/16)	0.754±1.7%	0.731±4.2%	0.765±0.2%
EU(20)(1/16)	0.694±6.8%	0.850±24%	0.776±0.6%
NU(1/16)		0.664±53%	0.835±3.7%
Pu(92)(1/16)	0.789±3.9%	0.741±8.4%	0.825±0.4%
Pu(81)(1/16)	0.779±6.0%	0.731±11%	0.850±0.6%
Pu(75)(1/16)	0.695±9.4%	0.672±13%	0.857±0.8%
Th(1/8)*2	0.767±3.4%	0.713±9.6%	0.754±1.1%
Th(1/8)*4	0.747±1.9%	0.680±5.2%	0.751±0.6%
DUO2(1/8)*2	0.793±9.1%	0.830±27%	0.548±2.3%
DUO2(1/4)*2	0.783±3.8%	0.972±14%	0.830±1.4%
NU(1/8)*2	0.743±5.4%	0.766±15%	0.816±2.3%
NU(1/8)*4		0.816±7.8%	0.847±1.0%
B ₄ C(20)(1/8)	0.716±0.3%	0.765±1.1%	0.796±0.2%
B ₄ C(40)(1/8)	0.714±0.3%	0.773±0.9%	0.798±0.2%
B ₄ C(60)(1/8)	0.714±0.2%	0.769±0.7%	0.799±0.1%
B ₄ C(90)(1/8)	0.710±0.2%	0.769±0.6%	0.797±0.1%
Hf(1/16)	0.684±0.5%	0.726±0.7%	0.759±0.3%
B ₄ C(20)(1/4)*2	0.710±0.3%		
B ₄ C(90)(1/4)*2	0.700±0.2%		

Table 3.2.3 Calculated results of sample reactivity worth in FCA
XV cores

unit: $10^{-4} \Delta k/k$

	XV-1	XV-2(45V)	XV-2(65V)	XV-2(80V)	XV-2(95V)
EU(93)(1/16)	6.24	4.05	3.39	3.02	2.61
EU(20)(1/16)	1.93	1.02	0.78	0.64	0.50
NU(1/16)	-0.83	-0.49	-0.38	-0.32	-0.24
Pu(92)(1/16)	3.66	2.37	2.00	1.78	1.57
Pu(81)(1/16)	3.07	2.14	1.88	1.73	1.57
Pu(75)(1/16)	2.59	1.92	1.76	1.65	1.53
Th(1/8)*2	-1.13	-0.69	-0.55	-0.46	-0.34
Th(1/8)*4	-1.92	-1.18	-0.93	-0.80	-0.62
DUO2(1/8)*2	-0.45	-0.27	-0.22	-0.18	-0.14
DUO2(1/4)*2	-1.06	-0.60	-0.45	-0.36	-0.28
NU(1/8)*2	-0.62	-0.39	-0.32	-0.27	-0.22
NU(1/8)*4	-1.51	-0.91	-0.71	-0.60	-0.47
B ₄ C(20)(1/8)	-5.16	-2.92	-2.08	-1.51	-0.90
B ₄ C(40)(1/8)	-6.88	-4.14	-3.13	-2.42	-1.56
B ₄ C(60)(1/8)	-7.99	-4.99	-3.87	-3.10	-2.11
B ₄ C(90)(1/8)	-9.25	-5.97	-4.77	-3.95	-2.84
Hf(1/16)	-3.21	-1.70	-1.16	-0.80	-0.44

Table 3.2.4 C/E values of sample reactivity worth in FCA XV cores

	XV-1	XV-2(45V)	XV-2(65V)	XV-2(80V)	XV-2(95V)
EU(93)(1/16)	0.826±0.5%	0.898±0.8%	0.941±0.8%	0.957±1.0%	0.939±1.3%
EU(20)(1/16)	0.805±1.4%		0.927±3.6%	0.922±4.6%	
NU(1/16)	0.869±3.6%	0.899±7.0%			0.771±11%
Pu(92)(1/16)	0.874±0.8%	0.929±1.5%	0.996±1.5%	0.967±1.7%	0.916±2.0%
Pu(81)(1/16)	0.879±1.0%	0.934±1.7%	0.999±1.6%	0.985±1.8%	0.915±2.0%
Pu(75)(1/16)	0.883±1.2%	0.951±1.9%	1.008±1.7%	0.985±1.9%	0.900±2.1%
Th(1/8)*2	0.790±2.4%	0.826±4.6%	0.878±4.8%	0.816±5.7%	0.894±9.3%
Th(1/8)*4	0.755±1.3%	0.839±2.7%	0.777±2.5%	0.829±3.3%	0.815±4.6%
DUO2(1/8)*2	0.636±4.8%	0.887±13%	1.284±18%	0.946±17%	0.786±19%
DUO2(1/4)*2	0.881±2.8%	0.911±5.8%	1.118±7.5%	0.995±8.8%	0.934±12%
NU(1/8)*2	0.836±4.6%	0.906±9.0%	0.908±8.6%	0.775±9.1%	0.996±16%
NU(1/8)*4	0.897±2.0%	0.998±4.2%	0.996±4.2%	0.952±5.1%	0.935±6.9%
B ₄ C(20)(1/8)	0.795±0.5%	0.896±1.2%	0.908±1.3%	0.897±1.9%	0.867±3.4%
B ₄ C(40)(1/8)	0.815±0.4%	0.907±0.8%	0.917±0.9%	0.919±1.2%	0.876±2.0%
B ₄ C(60)(1/8)	0.821±0.4%	0.916±0.7%	0.918±0.7%	0.937±1.0%	0.871±1.4%
B ₄ C(90)(1/8)	0.821±0.3%	0.925±0.6%	0.926±0.6%	0.932±0.8%	0.891±1.1%
Hf(1/16)	0.750±0.8%	0.834±1.9%	0.836±2.2%	0.830±3.3%	0.801±6.3%

Table 3.3.1 Calculated results of reactivity worths of simulated control rod in FCA XIV cores

unit: $10^{-4} \Delta k/k$

	XIV-1	XIV-1(45V)	XIV-2
C/R half insertion			
B ₄ C(20)	-57.83	-23.44	-49.98
B ₄ C(40)	-69.20	-30.27	-58.78
B ₄ C(60)	-76.88	-34.60	-64.05
B ₄ C(90)	-84.70	-39.33	-69.73
Hf	-40.76	-15.42	-35.05
C/R full insertion			
B ₄ C(20)	-114.6	-45.39	-97.67
B ₄ C(40)	-138.5	-58.41	-115.0
B ₄ C(60)	-152.9	-66.61	-125.5
B ₄ C(90)	-168.4	-75.74	-136.8
Hf	-80.73	-29.98	-68.48

Table 3.3.2 C/E value of reactivity worths of simulated control rod in FCA XIV cores

	XIV-1	XIV-1(45V)	XIV-2
C/R half insertion			
B ₄ C(20)	0.791±1.8%	0.799±2.5%	0.882±0.8%
B ₄ C(40)	0.799±2.6%	0.818±1.8%	0.872±0.6%
B ₄ C(60)	0.810±1.8%	0.823±1.5%	0.878±1.2%
B ₄ C(90)	0.815±1.6%	0.835±1.4%	0.885±1.6%
Hf	0.751±2.5%	0.738±4.0%	0.804±1.0%
C/R full insertion			
B ₄ C(20)	0.803±1.8%	0.801±1.6%	0.927±1.3%
B ₄ C(40)	0.832±2.8%	0.817±1.4%	0.947±2.7%
B ₄ C(60)	0.828±3.2%	0.830±1.1%	0.910±1.9%
B ₄ C(90)	0.834±2.7%	0.833±1.1%	0.937±3.3%
Hf	0.762±1.8%	0.745±2.4%	0.839±1.2%

Table 3.3.3 Calculated results of reactivity worths of simulated control rod in FCA XV cores

unit: $10^{-4} \Delta k/k$

	XV-1	XV-2(45V)	XV-2(95V)
C/R half insertion			
B ₄ C(20)	-27.23	-15.90	- 5.19
B ₄ C(40)	-35.67	-22.32	- 8.98
B ₄ C(60)	-41.10	-26.64	-12.07
B ₄ C(90)	-47.15	-31.57	-16.07
Hf	-17.10	- 9.30	- 2.49
C/R full insertion			
B ₄ C(20)	-53.71	-30.96	-10.07
B ₄ C(40)	-70.89	-43.44	-17.37
B ₄ C(60)	-81.84	-51.91	-23.27
B ₄ C(90)	-94.04	-61.61	-30.99
Hf	-33.56	-18.11	- 4.89

Table 3.3.4 C/E values of reactivity worths of simulated control rod in FCA XV cores

	XV-1	XV-2(45V)	XV-2(95V)
C/R half insertion			
B ₄ C(20)	0.787±1.0%	0.902±1.1%	0.853±1.1%
B ₄ C(40)	0.804±1.2%		
B ₄ C(60)	0.820±1.2%		
B ₄ C(90)	0.826±1.5%	0.952±1.0%	0.879±0.4%
Hf			
C/R full insertion			
B ₄ C(20)	0.800±1.0%	0.921±0.6%	0.883±0.6%
B ₄ C(40)	0.825±1.7%	0.939±1.6%	0.893±0.4%
B ₄ C(60)	0.839±1.9%	0.963±1.3%	0.903±0.3%
B ₄ C(90)	0.841±2.2%	0.984±1.0%	0.909±0.2%
Hf	0.740±0.8%	0.838±1.5%	0.801±1.1%

4. 考 察

4.1 中心サンプル反応度価値

各フェーズ実験の炉心間で測定値を相互比較するため、全ての測定値を基準物質の反応度価値で規格化した。規格化因子は、体系を構成する核種であり、反応断面積が熟知された核種であることから、第1フェーズ実験ではE U (93)の中心サンプル反応度価値を、第2フェーズ実験ではPu (92)の中心サンプル反応度価値とした。これらの規格化された中心サンプル反応度価値に関して、第1フェーズ実験での測定結果をTable 4.1.1に計算と実験の比較(C/E値)をTable 4.1.2に示す。また、第2フェーズ実験での測定結果をTable 4.1.3に計算と実験の比較をTable 4.1.4に示す。中性子吸収物質の特性を検討するために、中心サンプル反応度価値および模擬制御棒価値の比較を容易にするためにそれぞれの測定値をB₄C (20)の結果で規格化した。この中性子吸収物質の特性に関する規格化反応度価値を、第1フェーズ実験結果に関してTable 4.1.5およびFig.4.1.1に、そのC/E値をTable 4.1.6に示し、第2フェーズ実験結果をTable 4.1.7およびFig.4.1.2に示し、そのC/E値をTable 4.1.8に示す。

4.1.1 第1フェーズ実験

(1) 核燃料物質

核分裂性物質 (ウランおよびプルトニウム)

規格化された反応度価値の結果では、濃縮ウランの反応度価値に対して、E U (93)とE U (20)の計算による予測精度に相違が見られる。また、プルトニウムに関して、X I V - 1およびX I V - 1 (45 V) 炉心ではPu (92)の結果とE U (93)の結果の予測精度に一致が見られる。X I V - 2炉心ではPu (92)の計算は、E U (93)の反応度価値に比べて10%過大に評価する。また、Pu (75)の反応度価値の計算は、他のプルトニウムの反応度価値に比べて著しく実験値との一致が悪い。

親物質 (ウランおよびトリウム)

Table 4.1.2から、規格化された反応度価値の計算値と実験値を比較すると、X I V - 1炉心では良い一致が見られたのに対し、X I V - 1 (45 V)やX I V - 2では計算と実験の一致は悪い。ただし、Thはすべての炉心で過小評価の傾向を示している。

(2) 中性子吸収物質 (炭化ボロンとハフニウム)

B₄C (20)とB₄C (90)に対して、サンプルの形状の相違による反応度価値への影響をみると、B₄C (40) (1/8インチ厚さ)とB₄C (20) (1/4インチ厚さ)の反応度価値比がB₄C (40)とB₄C (20)の反応度価値比より5%小さい。これは、B₄C (20)サンプル内での中性子束の凹みがB₄C (40)のそれより小さいことによるものである。また、B₄C (90)とB₄C (20)の反応度価値比は、1/8インチの場合が1.54であるのに対し、1/4インチでは1.48と小さくなる。計算は、1/4インチ厚さのB₄C (90)サンプルを除いて、良く一致して

いる。

B-10濃縮度の観点から、 $B_4C(20)$ で規格化された反応度値はB-10濃縮度の増加とともに大きくなり、この比は90%濃縮においても飽和しない (Fig. 4. 1. 1 参照)。たとえば、 $B_4C(90)$ の反応度値は $B_4C(20)$ 反応度値に対して、XIV-2炉心で1.43倍、XIV-1炉心で1.54倍、XIV-1 (45V) 炉心で1.74倍になる。この値は、中性子スペクトルが硬くなるにつれて、増加する。計算は、反応度値比では実験誤差の範囲内で良く一致している。

Hfサンプルは、 $B_4C(20)$ の反応度値に対してXIV-1炉心で0.72倍、XIV-1 (45V) 炉心で0.68倍、XIV-2炉心で0.73倍になり、すべての炉心において $B_4C(20)$ の反応度値より小さな値となる。計算は、反応度値比に対して、すべての炉心で5%程度過小に評価する。

4. 1. 2 第2フェーズ実験

(1) 核燃料物質

核分裂性物質 (ウランおよびプルトニウム)

Puサンプルの組成から明らかなように、各ボイド体系でのPu-240の共鳴吸収の反応度値への解析精度を検討するために、Pu(92)、Pu(81)、Pu(75)の反応度値の比較を実施した。その結果をFig. 4. 1. 3に示す。Pu(92)に対するPu(75)の反応度値の比は、XV-1炉心での0.70からXV-2 (95V) 炉心での1.0までボイド率が大きくなるすなわち中性子スペクトルが硬くなるに伴って、単調に増加する。計算はこの傾向を十分に再現でき、実験値と非常によく一致する。

親物質 (ウランおよびトリウム)

Table 4. 1. 3からこれらの反応度値は、Th、NU、DUO2の順に小さくなっていることがわかる。さらに、減速材ボイド率が大きくなるにつれて、すなわち中性子スペクトルが硬くなるにつれて、反応度値は全体的に小さくなる傾向がある。ただし、Th*4の場合他と傾向が異なり、XV-2 (45V) 炉心での反応度値比はXV-1およびXV-2 (65V) 炉心での測定値より小さい。

実験と計算を比較すると、Th燃料板では計算は一樣に過小評価する傾向がある。一方、NU燃料板の場合は、XV-2 (80V) でのNU*2を除くと測定誤差の範囲内ではほぼ一致する。

(2) 中性子吸収物質 (炭化ボロンとハフニウム)

$B_4C(20)$ で規格化された反応度値は、第1フェーズ実験での結果と同様にB-10濃縮度の増加とともに大きくなり、この比は90%濃縮においても飽和しない (Fig. 4. 1. 2 参照)。たとえば、 $B_4C(90)$ の反応度値は $B_4C(20)$ の反応度値に対して、XV-1炉心で1.73倍、XV-2 (45V) 炉心で1.98倍、XV-2 (65V) 炉心で2.25倍、XV-2 (80V) 炉心で2.52倍、XV-2 (95V) 炉心で3.07倍になる。XV-2 (95V) 炉心での値は、大型LMFBRでの比とほぼ同程度の値を示す。これらの値は、ボイド率が増加する、すなわち中性子スペクトルが硬くなるにつれて、増加する。計算値と実験値はよく一致しているが、計算は若干実験値を過大に評価する傾向があると言える。

Hfサンプルは、 $B_4C(20)$ の反応度値に対してXV-1炉心で0.66倍、XV-2(45V)炉心で0.63倍、XV-2(65V)炉心で0.60倍、XV-2(80V)炉心で0.57倍、XV-2(95V)炉心で0.53倍になり、すべての炉心において $B_4C(20)$ の反応度値より小さな値となる。この反応度値比は、ボイド率が増加するにつれて減少する。これは、Hf同位体の反応度値への共鳴吸収の寄与が、中性子スペクトルが硬くなるにつれて、減少することに依存する。計算は、これらの炉心で実験値を過小に評価する。この傾向は、第1フェーズ実験の結果と一致する。

4.2 模擬制御棒反応度値

4.2.1 第1フェーズ実験

模擬制御棒反応度値は、中心サンプル反応度値と同様に、B-10濃縮度が増加するにつれて増加し、 $B_4C(90)$ でもその値は飽和しない。その様子をTable 4.2.1及びFig.4.2.1に示す。 $B_4C(90)$ 制御棒反応度値は $B_4C(20)$ のそれに対して、XIV-2炉心で1.39倍、XIV-1炉心で1.41倍、XIV-1(45V)炉心で1.61倍になり、中心サンプル反応度値の場合と同様に、中性子スペクトルが硬くなるにつれて、値は増加する傾向にある。しかし、この値は中心サンプル反応度値の時より小さい。これは、模擬制御棒セルを並べたことによる中性子遮蔽効果によるものである。計算は、Table 4.2.2に示すように反応度値比に関して、よく実験値を再現しているが、XIV-1およびXIV-1(45V)炉心に対して若干過大評価の傾向がみられる。

Hfを用いた模擬制御棒反応度値は、 $B_4C(20)$ を用いた模擬制御棒反応度値に対してXIV-1炉心で0.74倍、XIV-1(45V)炉心で0.71倍、XIV-2炉心で0.77倍になり、中心サンプル反応度値と同様、すべての炉心において $B_4C(20)$ を用いた模擬制御棒反応度値に比べて小さい。計算は、実験値を過小に評価する傾向がある。この傾向は、中心サンプル反応度値においてもみられた。

部分挿入では、ポリスチレン板と置換した場合の方が、ボイド缶と置換した場合よりも約10%大きな値となる。これは、ポリスチレン板が減速材として寄与することによるものである。しかし、分布の傾向は両者ともよく一致する(Fig.4.2.2参照)。計算は、この傾向をよく再現している。

4.2.2 第2フェーズ実験

模擬制御棒反応度値は、中心サンプル反応度値と同様に、B-10濃縮度が増加するにつれて増加し、 $B_4C(90)$ でもその値は飽和しない。その様子をTable 4.2.3に示す。 $B_4C(90)$ 制御棒反応度値は $B_4C(20)$ のそれに対して、XV-1炉心で1.7倍、XV-2(45V)炉心で1.9倍、XV-2(95V)炉心で3.0倍になり、中心サンプル反応度値の場合と同様に、減速材ボイド率が増加するにつれて、すなわち中性子スペクトルが硬くなるにつれて、値は増加する傾向にある。XV-2(95V)炉心でのこの比は、大型LMFBRでの値に近い。しかし、この値は中心サンプル反応度値の時より若干小さい。

Hfを用いた模擬制御棒反応度値は、 $B_4C(20)$ を用いた模擬制御棒反応度値に対してXV-1炉心で0.68倍、XV-2(45V)炉心で0.64倍、XV-2(95V)炉心で0.54倍になり、この比は減速材ポイド率が増加するにつれて、すなわち中性子スペクトルが硬くなるにつれて減少する。また、中心サンプル反応度値と同様、すべての炉心において $B_4C(20)$ を用いた模擬制御棒反応度値に比べて小さい。

実験値と計算値の比較をTable 4.2.4に示す。XV-2(95V)炉心では中心サンプル反応度値と模擬制御棒反応度値のC/E値は一致するが、XV-1およびXV-2(45V)炉心では模擬制御棒値のC/E値が大きい。B-10濃縮度の観点からは、B-10濃縮度が増加するにつれてC/E値は増加する傾向を示す。HfのC/E値は減速材ポイド率に依存し、ポイド率の増加に伴い、すなわち中性子スペクトルが硬くなるにつれてC/E値は小さくなる。

Table 4.1.1 Experimental results of normalized reactivity worths in FCA XIV cores

	XIV-1	XIV-1(45V)	XIV-2
EU(93)(1/16)	1.000	1.000	1.000
EU(20)(1/16)	0.256	0.174	0.408
NU(1/16)	—	-0.079	-0.063
Pu(92)(1/16)	0.446	0.500	0.556
Pu(81)(1/16)	0.291	0.395	0.411
Pu(75)(1/16)	0.183	0.332	0.309
Th(1/8)*2	-0.505	-0.437	-0.207
Th(1/8)*4	-0.907	-0.805	-0.376
DUO2(1/8)*2	-0.190	-0.158	-0.100
DUO2(1/4)*2	-0.460	-0.300	-0.170
NU(1/8)*2	-0.318	-0.274	-0.103
NU(1/8)*4		-0.542	-0.233
B ₄ C(20)(1/8)	-5.280	-3.742	-1.200
B ₄ C(40)(1/8)	-6.512	-4.858	-1.422
B ₄ C(60)(1/8)	-7.263	-5.647	-1.558
B ₄ C(90)(1/8)	-8.131	-6.505	-1.714
Hf(1/16)	-3.806	-2.537	-0.870

Table 4.1.2 C/E values of normalized sample reactivity
worth in FCA XIV cores

	XIV-1	XIV-1(45V)	XIV-2
EU(93)(1/16)	1.000±1.7%	1.000±4.2%	1.000±0.2%
EU(20)(1/16) NU(1/16)	0.922±6.8%	1.161±24% 0.911±53%	1.015±0.6% 1.079±3.7%
Pu(92)(1/16)	1.047±3.9%	1.014±8.4%	1.079±0.4%
Pu(81)(1/16)	1.031±6.0%	1.000±11%	1.109±0.6%
Pu(75)(1/16)	0.923±9.4%	0.919±13%	1.120±0.8%
Th(1/8)*2	1.004±3.4%	0.975±9.6%	0.986±1.1%
Th(1/8)*4	0.990±1.9%	0.930±5.2%	0.981±0.6%
DUO2(1/8)*2	1.053±9.1%	1.133±27%	0.720±2.3%
DUO2(1/4)*2	1.039±3.8%	1.330±14%	1.082±1.4%
NU(1/8)*2	0.984±5.4%	1.816±15%	1.068±2.3%
NU(1/8)*4		1.116±7.8%	1.107±1.0%
B ₄ C(20)(1/8)	0.949±0.3%	1.046±1.1%	1.040±0.2%
B ₄ C(40)(1/8)	0.946±0.3%	1.058±0.9%	1.043±0.2%
B ₄ C(60)(1/8)	0.946±0.2%	1.053±0.7%	1.044±0.1%
B ₄ C(90)(1/8)	0.942±0.2%	1.053±0.6%	1.041±0.1%
Hf(1/16)	0.907±0.5%	0.993±0.7%	0.992±0.3%

Table 4.1.3 Experimental results of normalized sample reactivity
worth in FCA XV cores

	XV-1	XV-2(45V)	XV-2(65V)	XV-2(80V)	XV-2(95V)
Pu(92)(1/16)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
EU(93)(1/16)	1.803	1.769	1.800	1.715	1.627
EU(20)(1/16)	0.573		0.418	0.375	
NU(1/16)	-0.228	-0.214			-0.184
Pu(81)(1/16)	0.833	0.898	0.940	0.958	1.004
Pu(75)(1/16)	0.699	0.794	0.872	0.913	0.996
Th(1/8)*2	-0.341	-0.326	-0.310	-0.306	-0.221
Th(1/8)*4	-0.608	-0.550	-0.600	-0.524	-0.443
DUO2(1/8)*2	-0.169	-0.119	-0.084	-0.104	-0.107
DUO2(1/4)*2	-0.287	-0.259	-0.200	-0.198	-0.176
NU(1/8)*2	-0.177	-0.167	-0.173	-0.191	-0.131
NU(1/8)*4	-0.402	-0.358	-0.355	-0.344	-0.295
B ₄ C(20)(1/8)	-1.549	-1.276	-1.143	-0.917	-0.607
B ₄ C(40)(1/8)	-2.014	-1.791	-1.701	-1.431	-1.045
B ₄ C(60)(1/8)	-2.321	-2.134	-2.104	-1.799	-1.418
B ₄ C(90)(1/8)	-2.685	-2.532	-2.573	-2.306	-1.865
Hf(1/16)	-1.020	-0.799	-0.690	-0.524	-0.324

Table 4.1.4 C/E values of normalized sample reactivity worth in FCA XV cores

	XV-1	XV-2(45V)	XV-2(65V)	XV-2(80V)	XV-2(95V)
Pu(92)(1/16)	1.000±0.8%	1.000±1.5%	1.000±1.5%	1.000±1.7%	1.000±2.0%
EU(93)(1/16)	0.945±0.5%	0.967±0.8%	0.945±0.8%	0.990±1.0%	1.025±1.3%
EU(20)(1/16)	0.921±1.4%	0.000	0.931±3.6%	0.953±4.6%	0.000
NU(1/16)	0.994±3.6%	0.968±7.0%	0.000	0.000	0.842±11%
Pu(81)(1/16)	1.006±1.0%	1.005±1.7%	1.003±1.6%	1.019±1.8%	0.999±2.0%
Pu(75)(1/16)	1.010±1.2%	1.024±1.9%	1.012±1.7%	1.019±1.9%	0.983±2.1%
Th(1/8)*2	0.904±2.4%	0.889±4.6%	0.882±4.8%	0.844±5.7%	0.976±9.3%
Th(1/8)*4	0.864±1.3%	0.903±2.7%	0.780±2.5%	0.857±3.3%	0.890±4.6%
DUO2(1/8)*2	0.728±4.8%	0.955±13%	1.289±18%	0.978±17%	0.858±19%
DUO2(1/4)*2	1.008±2.8%	0.981±5.8%	1.122±7.5%	1.029±8.8%	1.020±12%
NU(1/8)*2	0.956±4.6%	0.975±9.0%	0.912±8.6%	0.801±9.1%	1.087±16%
NU(1/8)*4	1.027±2.0%	1.074±4.2%	1.000±4.2%	0.984±5.1%	1.021±6.9%
B ₄ C(20)(1/8)	0.910±0.5%	0.964±1.2%	0.912±1.3%	0.928±1.9%	0.947±3.4%
B ₄ C(40)(1/8)	0.932±0.4%	0.976±0.8%	0.921±0.9%	0.950±1.2%	0.956±2.0%
B ₄ C(60)(1/8)	0.939±0.4%	0.986±0.7%	0.922±0.7%	0.969±1.0%	0.951±1.4%
B ₄ C(90)(1/8)	0.939±0.3%	0.996±0.6%	0.930±0.6%	0.964±0.8%	0.973±1.1%
Hf(1/16)	0.858±0.8%	0.898±1.9%	0.839±2.2%	0.858±3.3%	0.874±6.3%

Table 4.1.5 Experimental results of normalized reactivity worths of absorber material in FCA XIV cores

	XIV-1	XIV-1(45V)	XIV-2
B ₄ C(20)(1/8)	1.000	1.000	1.000
B ₄ C(40)(1/8)	1.233	1.298	1.185
B ₄ C(60)(1/8)	1.375	1.509	1.299
B ₄ C(90)(1/8)	1.540	1.738	1.429
Hf(1/16)	0.721	0.678	0.725
B ₄ C(20)(1/4)	1.301		
B ₄ C(90)(1/4)	1.927		

Table 4.1.6 C/E values of normalized sample reactivity worths of absorber materials in FCA XIV cores

	XIV-1	XIV-1(45V)	XIV-2
B ₄ C(20)(1/8)	1.000±0.3%	1.000±1.1%	1.000±0.2%
B ₄ C(40)(1/8)	0.997±0.3%	1.012±0.9%	1.003±0.2%
B ₄ C(60)(1/8)	0.998±0.2%	1.007±0.7%	1.004±0.1%
B ₄ C(90)(1/8)	0.992±0.2%	1.006±0.6%	1.001±0.1%
Hf(1/16)	0.956±0.5%	0.950±0.7%	0.954±0.3%
B ₄ C(20)(1/4)	0.992±0.3%		
B ₄ C(90)(1/4)	0.978±0.2%		

Table 4.1.7 Experimental results of normalized reactivity worths of absorber material in FCA XV cores

	XV-1	XV-2(45V)	XV-2(65V)	XV-2(80V)	XV-2(95V)
B ₄ C(20)(1/8)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
B ₄ C(40)(1/8)	1.301	1.404	1.488	1.561	1.723
B ₄ C(60)(1/8)	1.499	1.673	1.841	1.962	2.338
B ₄ C(90)(1/8)	1.734	1.984	2.251	2.515	3.074
Hf(1/16)	0.659	0.626	0.603	0.572	0.534

Table 4.1.8 C/E values of normalized sample reactivity worths of absorber materials in FCA XV cores

	XV-1	XV-2(45V)	XV-2(65V)	XV-2(80V)	XV-2(95V)
B ₄ C(20)(1/8)	1.000±0.5%	1.000±1.2%	1.000±1.3%	1.000±1.9%	1.000±3.4%
B ₄ C(40)(1/8)	1.025±0.4%	1.012±0.8%	1.010±0.9%	1.025±1.2%	1.010±2.0%
B ₄ C(60)(1/8)	1.033±0.4%	1.022±0.7%	1.011±0.7%	1.045±1.0%	1.005±1.4%
B ₄ C(90)(1/8)	1.033±0.3%	1.032±0.6%	1.020±0.6%	1.039±0.8%	1.028±1.1%
Hf(1/16)	0.943±0.8%	0.931±1.9%	0.921±2.2%	0.925±3.3%	0.924±6.3%

Table 4.2.1 Experimental results of normalized reactivity
worths of simulated control rod in FCA XIV cores

	XIV-1	XIV-1(45V)	XIV-2
Plate sample worth			
B ₄ C(20)	1.000	1.000	1.000
B ₄ C(40)	1.233	1.298	1.185
B ₄ C(60)	1.375	1.509	1.299
B ₄ C(90)	1.540	1.738	1.429
Hf	0.721	0.678	0.725
C/R half insertion			
B ₄ C(20)	1.000	1.000	1.000
B ₄ C(40)	1.185	1.261	1.189
B ₄ C(60)	1.299	1.433	1.287
B ₄ C(90)	1.422	1.605	1.389
Hf	0.743	0.712	0.769
C/R full insertion			
B ₄ C(20)	1.000	1.000	1.000
B ₄ C(40)	1.166	1.261	1.153
B ₄ C(60)	1.294	1.416	1.309
B ₄ C(90)	1.414	1.605	1.386
Hf	0.742	0.710	0.775

Table 4.2.2 C/E values of reactivity worths of simulated control rod in FCA XIV cores

	XIV-1	XIV-1(45V)	XIV-2
Plate sample worth			
B ₄ C(20)	1.000±0.3%	1.000±1.1%	1.000±0.2%
B ₄ C(40)	0.997±0.3%	1.010±0.9%	1.004±0.2%
B ₄ C(60)	0.997±0.2%	1.005±0.7%	1.004±0.1%
B ₄ C(90)	0.992±0.2%	1.005±0.6%	1.001±0.1%
Hf	0.955±0.5%	0.949±0.7%	0.954±0.3%
C/R half insertion			
B ₄ C(20)	1.000±1.8%	1.000±2.5%	1.000±0.8%
B ₄ C(40)	1.010±2.6%	1.024±1.8%	0.989±0.6%
B ₄ C(60)	1.024±1.8%	1.030±1.5%	0.995±1.2%
B ₄ C(90)	1.030±1.6%	1.045±1.4%	1.003±1.6%
Hf	0.949±2.5%	0.924±4.0%	0.912±1.0%
C/R full insertion			
B ₄ C(20)	1.000±1.8%	1.000±1.6%	1.000±1.3%
B ₄ C(40)	1.036±2.8%	1.020±1.4%	1.022±2.7%
B ₄ C(60)	1.031±3.2%	1.036±1.1%	0.982±1.9%
B ₄ C(90)	1.039±2.7%	1.040±1.1%	1.011±3.3%
Hf	0.949±1.8%	0.930±2.4%	0.905±1.2%

Table 4.2.3 Experimental results of normalized reactivity
worths of simulated control rod in FCA XV cores

	XV-1	XV-2(45V)	XV-2(95V)
Plate sample worth			
B ₄ C(20)	1.000	1.000	1.000
B ₄ C(40)	1.301	1.404	1.723
B ₄ C(60)	1.499	1.673	2.338
B ₄ C(90)	1.734	1.984	3.074
Hf	0.659	0.626	0.534
C/R half insertion			
B ₄ C(20)	1.000	1.000	1.000
B ₄ C(40)	1.283		
B ₄ C(60)	1.448		
B ₄ C(90)	1.650	1.881	3.005
Hf			
C/R full insertion			
B ₄ C(20)	1.000	1.000	1.000
B ₄ C(40)	1.280	1.377	1.706
B ₄ C(60)	1.453	1.604	2.258
B ₄ C(90)	1.665	1.864	2.988
Hf	0.675	0.643	0.535

Table 4.2.4 C/E values of normalized reactivity worths of simulated control rod in FCA XV cores

	XV-1	XV-2(45V)	XV-2(95V)
Plate sample worth			
B ₄ C(20)	1.000±0.5%	1.000±1.2%	1.000±3.4%
B ₄ C(40)	1.025±0.4%	1.012±0.8%	1.010±2.0%
B ₄ C(60)	1.033±0.4%	1.022±0.7%	1.005±1.4%
B ₄ C(90)	1.033±0.3%	1.032±0.6%	1.028±1.1%
Hf	0.943±0.8%	0.931±1.9%	0.924±6.3%
C/R half insertion			
B ₄ C(20)	1.000±1.0%	1.000±1.1%	1.000±1.1%
B ₄ C(40)	1.022±1.2%		
B ₄ C(60)	1.042±1.2%		
B ₄ C(90)	1.050±1.5%	1.055±1.0%	1.030±0.4%
Hf			
C/R full insertion			
B ₄ C(20)	1.000±1.0%	1.000±0.6%	1.000±0.6%
B ₄ C(40)	1.031±1.7%	1.020±1.6%	1.011±0.4%
B ₄ C(60)	1.049±1.9%	1.046±1.3%	1.023±0.3%
B ₄ C(90)	1.051±2.2%	1.068±1.0%	1.029±0.2%
Hf	0.925±0.8%	0.910±1.5%	0.907±1.1%

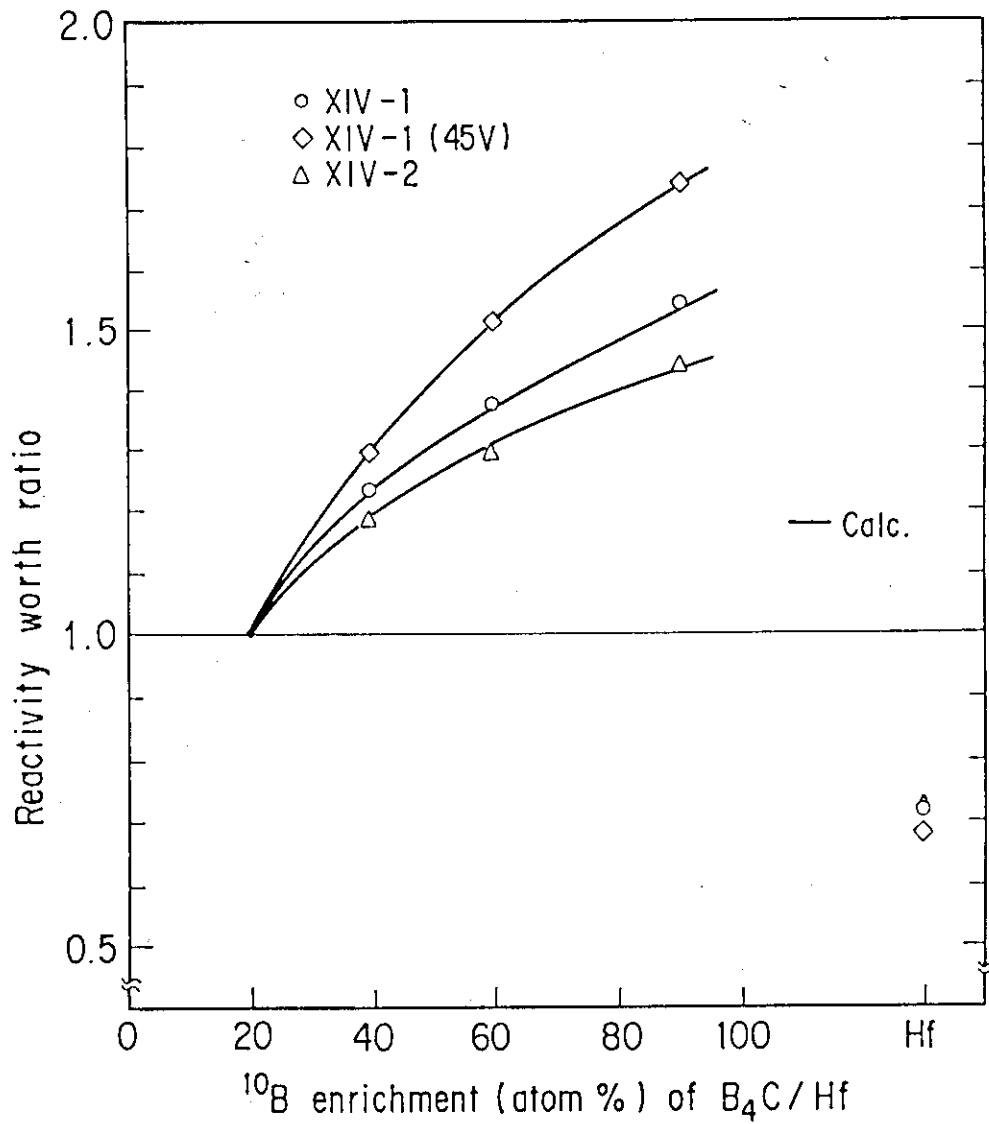


Fig. 4.1.1 Experimental results of central reactivity worths with various absorber material in FCA XIV cores (rel. to the central reactivity worth of 20% B_4C)

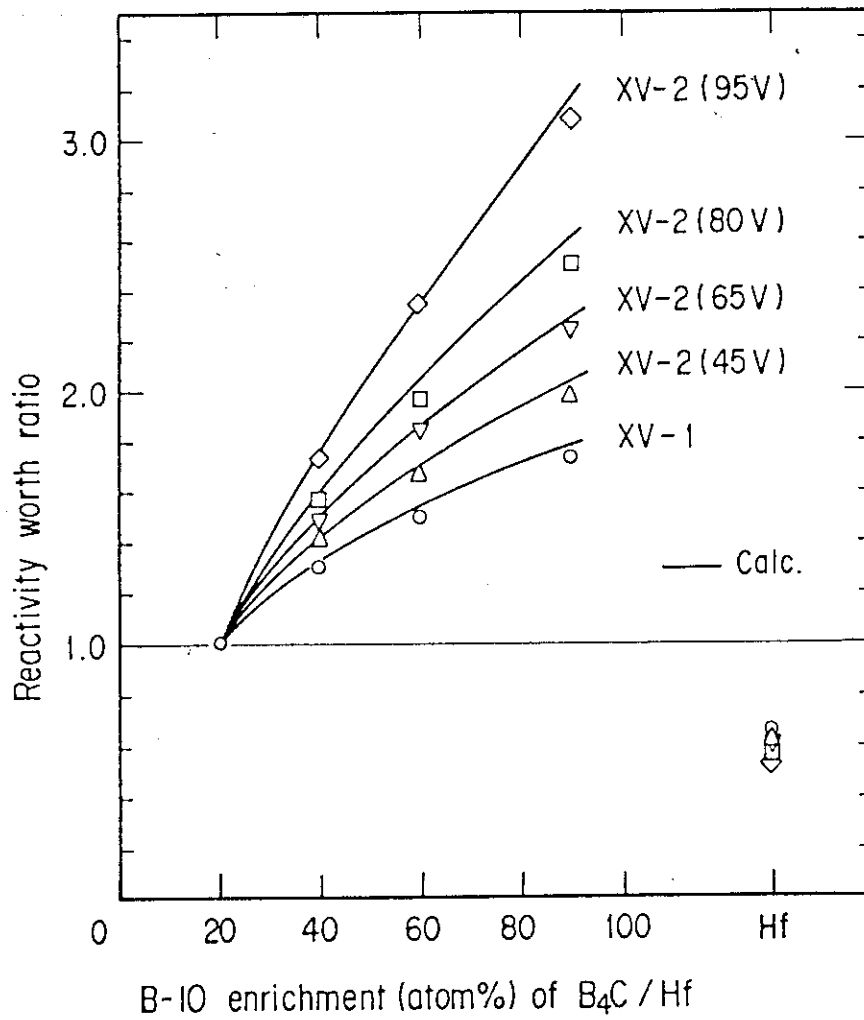


Fig. 4.1.2 Reactivity worth ratio of various absorber sample in FCA-XV cores

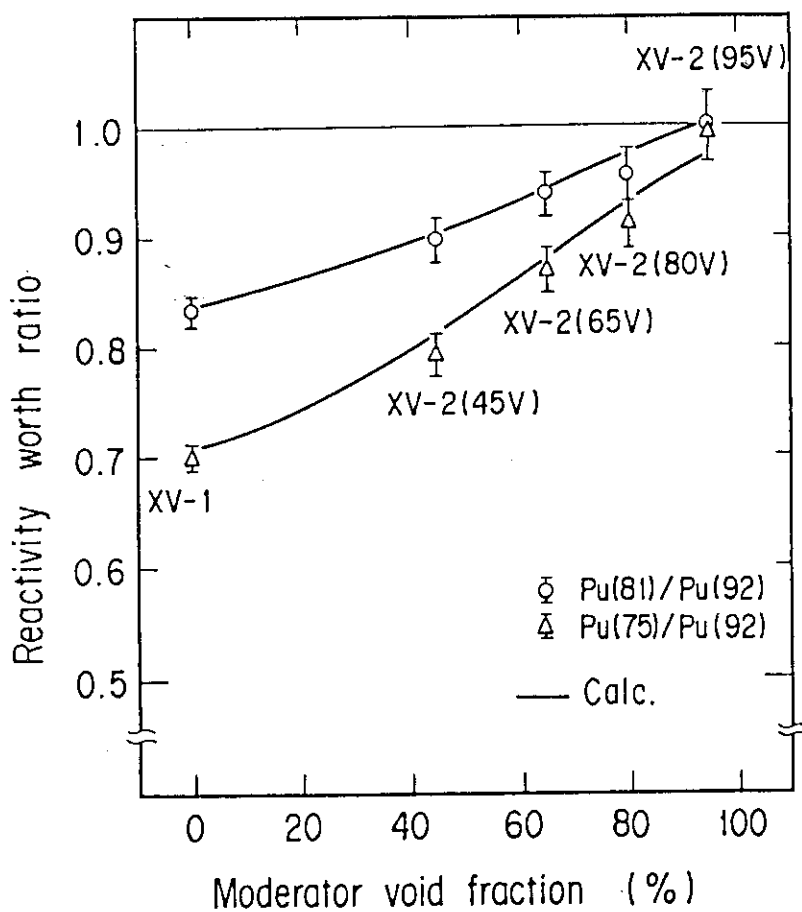


Fig. 4.1.3 Reactivity worth ratio of Pu sample with different isotopic composition in FCA-XV cores.

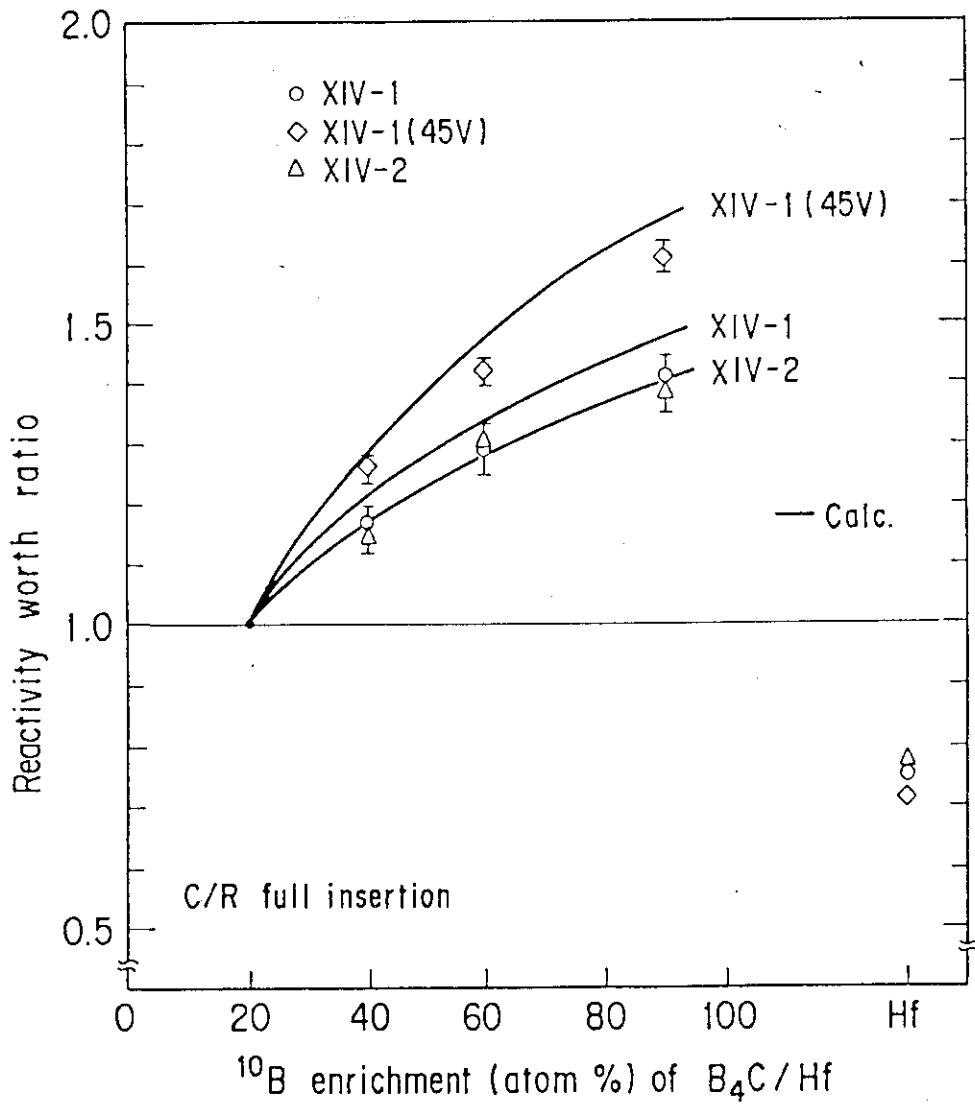


Fig. 4.2.1 Experimental results of reactivity worths of simulated control rods with different absorber material in FCA XIV cores. (rel. to reactivity of simulated control rod with 20% B_4C)

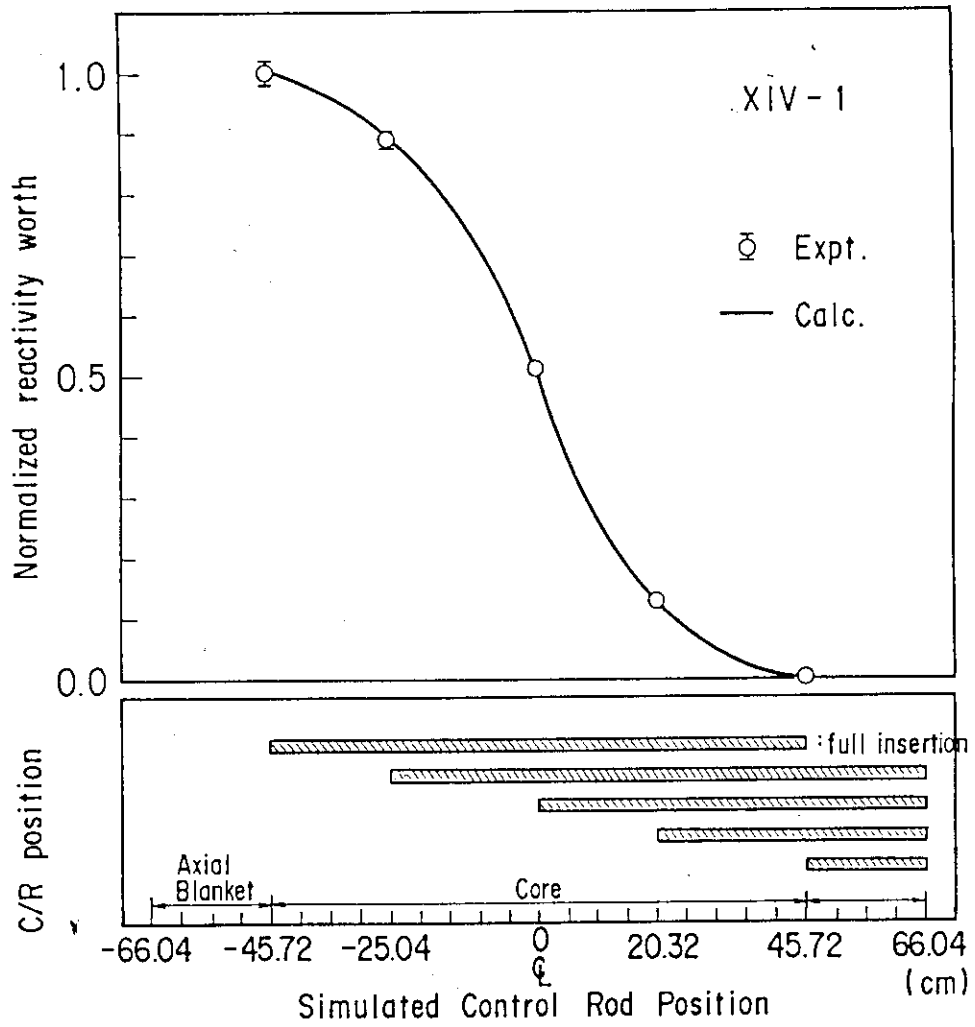


Fig. 4.2.2 Integral worth of 20% B₄C rod with partial insertion in FCA XIV core. (the replacement of 20% B₄C plate from void can plate in the simulated control rod cell)

5. ま と め

FCAでの高転換軽水炉模擬実験において、炉特性に関する実験データの取得と高転換軽水炉の“Data & Method”の確立を目的として、中心サンプル反応度値と模擬制御棒値の測定を実施し、その結果を計算値と比較した。計算は、JENDL-2と原研での標準的な熱中性子炉設計コードであるSRACを用いて、86群2次元円柱非等方拡散計算を行い、各体系の実効増倍係数から反応度値を算出した。

計算は、第1フェーズおよび第2フェーズ実験とも、反応度値（絶対値）を全般に過小評価する傾向が見られた。それぞれのフェーズ実験において炉心相互間で中心サンプル反応度値を比較するために、第1フェーズ実験ではEU(93)の、第2フェーズ実験ではPu(92)の中心サンプル反応度値で規格化した。また、中性子吸収物質に関しては、両フェーズのすべての炉心相互間で比較できるようにB₄C(20)の測定値で規格化した。これらの反応度値および規格化された反応度値の結果について、以下にまとめる。

5.1 中心サンプル反応度値

(1) 核燃料物質

核分裂性物質（ウランおよびプルトニウム）

反応度値では、第1フェーズ実験において全体に計算が20～25%実験値を過小評価する。一方、第2フェーズ実験では、計算は全体に0～15%実験値を過小評価し、第1フェーズ実験の結果に比べて過小評価の程度は小さい。第1フェーズ実験のC/E値は、中性子スペクトルが軟らかくなるにつれて1に近づく傾向を示すのに対し、第2フェーズ実験では、減速材ボイド率が0%から80%まではボイド率が大きくなるすなわち中性子スペクトルが硬くなるにつれて、PuのC/E値は1に近づく。ただし、95%ボイドはこの限りではない。

規格化された反応度値では、第1フェーズ実験においてXIV-1およびXIV-1(45V)炉心ではPu(92)とEU(93)の計算の予測精度に一致が見られるが、XIV-2炉心ではPu(92)の計算が、EU(93)の反応度値に比べて10%程過大評価する。また、Pu(75)の反応度値の計算は、他のプルトニウムの反応度値に比べて著しく実験値との一致が悪い。一方、第2フェーズ実験では、Pu(92)に対するPu(75)の反応度値の比は、ボイド率が大きくなるすなわち中性子スペクトルが硬くなるにつれて、単調に増加する。計算はこの傾向をよく再現し、実験値と非常によく一致する。

親物質（ウランおよびトリウム）

反応度値の計算は、第1フェーズ実験において全体に実験値を過小評価する。ThのC/E値はXIV-1とXIV-2炉心で0.75と同程度の値を示すのに対し、NUサンプルの場合XIV-1炉心でのC/E値がXIV-2炉心でのそれより小さい。一方、第2フェーズ実験では、Thについては、全体に計算が実験値を20%程度過小評価する。

第1フェーズ実験において、規格化した反応度値の計算値と実験値を比較すると、XIV-1炉心では良い一致が見られたのに対し、XIV-1 (45V) やXIV-2炉心では計算と実験の一致は悪い。また、Thサンプルの場合、すべての炉心で計算が実験値を過小評価する傾向を示す。一方、第2フェーズ実験では、減速材ボイド率が大きくなるにつれて、すなわち中性子スペクトルが硬くなるにつれて、規格化した反応度値が全体的に小さくなる傾向がある。ただし、Th*2の場合は他と傾向が異なり、XV-2 (45V) 炉心での反応度値比はXV-1およびXV-2 (65V) 炉心での測定値より小さい。

(2) 中性子吸収物質 (炭化ボロンとハフニウム)

第1フェーズ実験および第2フェーズ実験とも、反応度値の計算は実験値を過小に評価する。しかし、C/E値は第1フェーズ実験結果に比べて、第2フェーズ実験の結果の方が1に近い値である。B-10濃縮度によるC/E値への依存性は両フェーズ実験とも観測されないが、第1フェーズ実験の結果と比較すると、第2フェーズ実験でのC/E値はB-10濃縮度に対してC/E値の平均値に対するバラツキが大きい傾向にある。第2フェーズ実験では、減速材ボイド率が0%から80%までの体系では、核燃料物質の結果と同様にボイド率が大きくなるすなわち中性子スペクトルが硬くなるにつれて、 B_4C のC/E値は1に近づく傾向を示した。ただし、95%ボイドはこの限りではない。

Hfサンプルの反応度値のC/E値は、両フェーズ実験とも、 B_4C のそれより全般に小さい値を示す。

B-10濃縮度の観点から、 $B_4C(20)$ で規格化された反応度値は、両フェーズ実験においてB-10濃縮度の増加とともに大きくなり、この比は90%濃縮においても飽和しない。この値は、中性子スペクトルが硬くなるにつれて、増加する。計算は、第1フェーズ実験では実験誤差の範囲内で良く一致した。一方、第2フェーズでは、計算値と実験値は一致するが、若干計算が実験値を過大に評価する傾向を示す。

第1フェーズ実験では、サンプルの形状の相違による反応度値への影響も調べた。その結果、 $B_4C(40)$ (1/8インチ厚さ) と $B_4C(20)$ (1/4インチ厚さ) の反応度値比は $B_4C(40)$ と $B_4C(20)$ の反応度値比より5%小さい値を示す。これは、 $B_4C(20)$ サンプル内での中性子束の凹みが $B_4C(40)$ のそれより小さいことによるものである。また、 $B_4C(90)$ と $B_4C(20)$ の反応度値比は、1/8インチの場合が1.54であるのに対し、1/4インチでは1.48と小さくなる。計算は、1/4インチ厚さの $B_4C(90)$ サンプルを除いて、良く一致している。

Hfサンプルの規格化した反応度値は、第1フェーズおよび第2フェーズ実験ともすべての炉心において1より小さな値を示す。特に、第2フェーズ実験ではボイド率が増加するにつれて、すなわち中性子スペクトルが硬くなるにつれて規格化した反応度値は減少する。これは、Hf同位体の反応度値への共鳴吸収の寄与が、中性子スペクトルが硬くなるにつれて、減少することに依存する。計算は、この反応度値比に対して、第1フェーズおよび第2フェーズ実験のすべての炉心において過小に評価する。

5.2 模擬制御棒反応度価値

全般に、第1フェーズ実験および第2フェーズ実験とも同様な傾向を示す。

反応度価値の計算は、中心サンプル反応度価値と同様に、実験値を過小に評価する。しかし、C/E値は、中性子吸収物質の中心サンプル反応度価値の結果に比べて、1に近い値を示す。模擬制御棒挿入状態でのC/E値を比較すると、全挿入状態のC/E値が半挿入状態のそれよりも若干1に近い値を示す。Hfについて、中心サンプル反応度価値の結果と同様に、 B_4C に比べて、C/E値は小さい。

第1フェーズおよび第2フェーズ実験とも規格化した模擬制御棒反応度価値は、中心サンプル反応度価値の場合と同様に、B-10濃縮度が増加するにつれて増加し、 $B_4C(90)$ でもその値は飽和しない。中性子スペクトルが硬くなるにつれて、反応度価値比は増加する傾向にある。しかし、この比は中心サンプル反応度価値の時より小さい。これは、模擬制御棒セルを並べたことによる中性子遮蔽効果によるものである。規格化した反応度価値の計算は、第1フェーズ実験では実験値をよく再現するが、XIV-1およびXIV-1(45V)炉心に対して若干過大評価の傾向がみられた。一方、第2フェーズ実験では、B-10濃縮度が増加するにつれてC/E値は増加する傾向を示す。

Hfを用いた模擬制御棒の規格化した反応度価値は、中心サンプル反応度価値の場合と同様、両フェーズ実験のすべての炉心において $B_4C(20)$ を用いた模擬制御棒反応度価値に比べて小さい。また、計算は両フェーズ実験において実験値を過小に評価する傾向を示し、これは中心サンプル反応度価値の場合と同様である。

さらに、第1フェーズ実験では、部分挿入体系での模擬制御棒反応度価値も測定した。部分挿入では、ポリスチレン板と置換した場合の方が、ボイド缶と置換した場合よりも約10%大きな値となる。しかし、分布の傾向は両者ともよく一致する。計算は、この傾向をよく再現した。

5.3 検討課題

本報告では、実験結果とFCAでの標準的な高転換軽水炉模擬実験解析手法による結果について述べたものである。したがって、更に詳細な解析および検討すべき点が多々ある。そこで、それらについては今後の検討課題として以下に述べる。

- ・計算値が全体に測定値を過小評価する原因について
- ・中心サンプル反応度価値における第2フェーズ実験のC/E値のスペクトル依存性
- ・模擬制御棒反応度価値と中性子吸収物質のC/E値の相違
- ・模擬制御棒反応度価値の半挿入と全挿入におけるC/E値の相違

これらは、体系がゾーン体系であることに由来するものや反応度価値計算時の中性子束の空間的およびエネルギー的に詳細な記述を必要とするもの等が考えられる。これらの項目は、高速炉模擬体系での測定結果等と系統的な比較検討が必要であろう。

謝 辞

本実験を遂行するにあたり、種々の御協力を戴いたFCA管理機関の皆様へ感謝致します。また、Thサンプルの使用にあたっては、協力研究に基づき京都大学原子炉実験所の協力を得ました。その手続きに際し、種々の御甚力をして頂いた京都大学原子核工学科木村逸郎教授および京都大学原子炉実験所小林圭二助手に深く感謝致します。最後に、本研究を遂行するにあたり、種々の議論に参加し、時には激励を下された前高速炉物理研究室長吉田弘幸氏および現高速炉物現研究室長中野正文氏へ感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Osugi T., et al.: J.Nucl. Sci. Technol., 26, 477 (1989).
- 2) Osugi T.: private communication.
- 3) Tomlinson L.: AERE-R6993, "Delayed Neutrons from Fission" (1972).
- 4) Mukaiyama T., et al.: JAERI-M 6067, "Reactivity Measurement in a Far-Subcritical Fast System (II)" (1975) [in Japanese].
- 5) Mizoo N.: JAERI-M 7753, "Theoretical and Experimental Studies on Measurement of Large Negative Reactivities" (1978) [in Japanese].
- 6) Tsuchihashi K., et al.: JAERI 1302, "Revised SRAC Code System" (1986).
- 7) Nakagawa T. (Ed.): JAERI-M 84-103, "Summary of JENDL-2 General Purpose File" (1984).

謝 辞

本実験を遂行するにあたり、種々の御協力を戴いたFCA管理機関の皆様に感謝致します。また、Thサンプルの使用にあたっては、協力研究に基づき京都大学原子炉実験所の協力を得ました。その手続きに際し、種々の御甚力をして頂いた京都大学原子核工学科木村逸郎教授および京都大学原子炉実験所小林圭二助手に深く感謝致します。最後に、本研究を遂行するにあたり、種々の議論に参加し、時には激励を下された前高速炉物理研究室長吉田弘幸氏および現高速炉物現研究室長中野正文氏に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Osugi T., et al. : J.Nucl. Sci. Technol., 26, 477 (1989).
- 2) Osugi T. : private communication.
- 3) Tomlinson L. : AERE-R6993, "Delayed Neutrons from Fission" (1972).
- 4) Mukaiyama T., et al. : JAERI-M 6067, "Reactivity Measurement in a Far-Subcritical Fast System (II)" (1975) [in Japanese].
- 5) Mizoo N. : JAERI-M 7753, "Theoretical and Experimental Studies on Measurement of Large Negative Reactivities" (1978) [in Japanese].
- 6) Tsuchihashi K., et al. : JAERI 1302, "Revised SRAC Code System" (1986).
- 7) Nakagawa T. (Ed.) : JAERI-M 84-103, "Summary of JENDL-2 General Purpose File" (1984).