

JAERI-Research
95-007



FCAを使った金属燃料及び酸化物燃料
高速炉模擬体系における
ナトリウムボイド反応度価値の測定と解析

1995年2月

大井川 宏之・飯島 進

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。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）で複写による実費領布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1995

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷(株)

F C Aを使った金属燃料及び酸化物燃料高速炉模擬体系における
ナトリウムボイド反応度値の測定と解析

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部
大井川宏之・飯島 進

(1995年1月10日受理)

高速炉のナトリウムボイド係数の予測精度向上に資することを目的として、F C Aを使った金属燃料高速炉模擬体系XVI-1及びXVI-2、並びに、酸化物燃料高速炉模擬体系XVII-1の3集合体においてナトリウムボイド反応度値を測定した。

測定は、1)局所的なボイドを炉心軸方向に移動させたステップボイド、2)ボイド領域を拡大させていくボイド規模依存性の2種類について、主に炉心中心軸に沿った固定側集合体3行×3列の領域で行った。ステップボイドの実験解析からナトリウムボイド反応度値の計算精度を非漏洩項と漏洩項に分けて評価し、ボイド規模依存性の実験解析から各項の計算精度に対するボイド規模の影響を評価した。

非漏洩項に支配される各集合体炉心中心付近での計算値/実験値(C/E値)は、JENDL-2を使った場合で1.08~1.20、JENDL-3.1を使った場合で0.95~1.09となった。一方、漏洩項の計算精度は3つの集合体に対して、本研究で使った計算手法によれば、測定を行った範囲内で良好であることが分かった。

その他、XVII-1集合体では、プルトニウム同位体組成を変化させた場合や、ナトリウムボイド反応度低減化のために炉心上部にナトリウム層を設けた場合等、非漏洩項及び漏洩項それぞれに着目した特殊な実験も行い、各項の計算精度のより詳細な検討を行った。

Experimental Study on Sodium Void Reactivity Worth
in Mockup Cores of Metallic-fueled and MOX-fueled Fast Reactors Using FCA

Hiroyuki OIGAWA and Susumu IIJIMA

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

(Received January 10, 1995)

To improve the calculation accuracy of the sodium void effect in fast reactors, the sodium void reactivity worths were measured at three FCA assemblies: XVI-1, XVI-2 and XVII-1. The former two assemblies simulate metallic-fueled fast reactors and the last one simulates a MOX-fueled fast reactor.

Two kinds of measurements, "step void" and "void volume dependence", were performed in the central 3×3 drawers of the fixed side of the assemblies. In the former measurement, the axial distribution of local sodium void reactivity worths was obtained to evaluate the calculation accuracy of the non-leakage term and the leakage term separately. In the latter one, various volumes of the sodium void were simulated to evaluate the influence of void volume on the calculation accuracy.

The ratios of the calculated reactivity worths to the experimental ones (C/E values) at the core center, which are dominated by the non-leakage term, are 1.08 - 1.20 by JENDL-2 and 0.95 - 1.09 by JENDL-3.1. For the leakage term, on the other hand, the present calculation shows good agreement with the measurements for three assemblies.

In addition to above measurements, various extra measurements were performed in assembly XVII-1 for the detailed investigation of the calculation accuracy. The sodium void reactivity worths were measured in various plutonium isotope composition and in the core with a sodium layer which is a design to reduce the sodium void reactivity worth.

Keywords: FCA, XVI-1, XVI-2, XVII-1, Metallic Fuel, Oxide Fuel, LMFBR, Critical

Experiment, Calculation Accuracy, Sodium Void, Reactivity Worth, Non-leakage Term, Leakage Term, JENDL-2, JENDL-3.1, JENDL-3.2, SLAROM, Anisotropic Diffusion Constant, Transport Correction, Perturbation Theory, Axial Blanket, Sodium Layer, Plutonium Isotope Composition

目 次

1. はじめに	1
2. 測 定	3
2.1 測定体系	3
2.2 各集合体の特徴の比較	4
2.3 測定手法と測定項目	5
2.4 測定結果及び考察	6
3. 計 算	27
3.1 計算手法と計算結果	27
3.2 計算手法に関する考察	29
3.3 JENDL-3.1とJENDL-3.2の比較	33
4. ナトリウムボイド反応度値の計算精度評価	51
4.1 各集合体共通で行った測定と計算の比較	51
4.2 非漏洩項の計算精度評価	52
4.3 漏洩項の計算精度評価	54
4.4 各項の計算精度のボイド規模依存性	55
4.5 XVII-1集合体のみで行った測定と計算の比較	55
5. まとめ	80
謝 辞	83
参考文献	83
付 録	84

Contents

1. Introduction	1
2. Measurement	3
2.1 FCA Assemblies XVI-1, XVI-2 and XVII-1	3
2.2 Comparison of Assemblies	4
2.3 Experimental Method and Measured Items	5
2.4 Discussion on Measured Results	6
3. Calculation	27
3.1 Calculation Method and Results	27
3.2 Discussion on Calculation Method	29
3.3 Comparison between JENDL-3.1 and JENDL-3.2	33
4. Evaluation of Calculation Accuracy for Sodium Void Reactivity Worth	51
4.1 Comparison between Experiment and Calculation for Commonly Measured Items ...	51
4.2 Evaluation of Calculation Accuracy for Non-leakage Term	52
4.3 Evaluation of Calculation Accuracy for Leakage Term	54
4.4 Void Volume Dependence on Calculation Accuracy for Each Term	55
4.5 Comparison between Experiment and Calculation for Extra Measurement in XVII-1	55
5. Summary	80
Acknowledgments	83
References	83
Appendix	84

1. はじめに

ナトリウムボイド係数は高速炉の安全性に大きな影響を及ぼす反応度係数であり、正の反応度値を持つ非漏洩項と負の反応度値を持つ漏洩項との足し合わせで正味の値が決まる。非漏洩項はさらに中性子スペクトルが高エネルギー側にシフトすることによる散乱項成分と、ナトリウムによる中性子の吸収がなくなること等による吸収項成分に分けられる。

これらの内、散乱項成分は非漏洩項のほとんどを占め、ナトリウムボイド効果の構成成分の内でも大きな成分であり、また、随伴中性子束のエネルギー分布の傾きによって影響を受けることから、その計算精度は燃料や制御棒の反応度値とは全く異なったものとなる。一方、漏洩項の計算ではボイド中の中性子ストリーミング効果や輸送補正を適切に取り入れる必要がある。さらに、これら非漏洩項と漏洩項が互いに打ち消しあう方向であることが、ナトリウムボイド係数の計算を一層難しくする。

本研究は、高速炉臨界実験装置（FCA）によりナトリウムボイド反応度値を測定し、非漏洩項及び漏洩項それぞれの計算精度を別々に評価することによって、ナトリウムボイド係数の計算精度向上に資することを目的とする。

測定を行った集合体は金属燃料高速炉模擬体系XVI-1及びXVI-2、並びに、酸化物燃料高速炉模擬体系XVII-1の3集合体である。各集合体は炉心の燃料組成や軸方向ブランケットの構成が異なるため、ナトリウムボイド反応度値に大きく影響を及ぼす中性子スペクトル、随伴中性子束のエネルギー分布、軸方向ブランケットでの中性子漏洩について以下のような特徴を有する。

- (1)金属燃料高速炉模擬体系の中性子スペクトルは酸化物燃料高速炉模擬体系のものに比べて硬く、ナトリウムボイド反応度値の高エネルギー側の成分の割合が大きくなる。
- (2)XVI-1集合体では内側炉心にプルトニウム板と20%濃縮ウラン板を用いており、プルトニウムのみを核分裂性物質とする他の集合体と随伴中性子束のエネルギー分布の形が異なる。これはナトリウムボイド反応度値の散乱項成分に影響を与える。
- (3)XVI-1及びXVI-2集合体の軸方向ブランケットは天然ウラン金属のブロックであるのに対して、XVII-1集合体ではナトリウムと劣化ウランにより実際のブランケットを模擬したものを用いており、軸方向への中性子漏洩が実用炉に近いため漏洩項の計算精度評価に適している。

特徴(1)及び(2)より、3集合体の非漏洩項はかなり異なったエネルギーブレイクダウンを持つことが予想され、それらの比較から広いエネルギー範囲にわたる計算精度評価が行える。

測定は、1)局所的なボイドを炉心軸方向に移動させたステップボイド、2)ボイド領域を拡大させていくボイド規模依存性の2種類について、主に炉心中心軸に沿った固定側集合体3行×3列の領域で行った。ステップボイドの実験解析からナトリウムボイド反応度値の計算精度を非漏洩項と漏洩項に分けて評価することができ、ボイド規模依存性の実験解析から小さなボイドから比較的大きなボイドまでの計算精度を系統的に評価できる。

さらにXVII-1集合体では非漏洩項及び漏洩項それぞれに着目した特殊な実験も行い、両項の計算精度向上に資した。この実験の中には、ナトリウムボイド係数低減化を狙った炉心概念であるナトリウム層付き炉心でのナトリウムボイド反応度価値、ナトリウム以外の散乱物質のサンプル反応度価値、プルトニウム同位体組成を変化させたときのナトリウムボイド反応度価値、燃料板の配列を変化させたときの中性子ストリーミングの変化、ナトリウムの液位低下模擬、等の測定項目が含まれる。

解析においては、核データとしてJENDL-2及びJENDL-3.1を用いた。また、一部にJENDL-3.2を用いた計算を行い、核データ間の比較を行った。衝突確率法に基づくセル計算コードSLAROMを用いてセルの均質化を行い、異方性拡散係数を使った70群2次元RZ拡散計算を用いて体系計算を行った。摂動計算に対して非漏洩項と漏洩項に分けた輸送補正を加えて反応度価値を求めた。また、セルモデルや輸送補正等のナトリウムボイド反応度価値の計算結果に大きく影響を与える事項については、それらの計算手法に関する詳しい検討を行った。

以下、第2章では測定方法及び測定結果について、第3章では計算方法及び計算結果並びに計算手法に関する検討について述べ、第4章では測定と計算を比較することによってナトリウムボイド反応度価値の計算精度を評価する。

2. 測定

2.1 測定体系

測定を行った集合体について概要及び特徴をTable 2.1にまとめた。以下、個々の集合体について解説する。各集合体を構成する引き出しの燃料板・模擬物質板の装填図は付録Aに、各引き出しを構成するセルの均質化した原子数密度は付録Bにまとめて示す。

XVI-1集合体 (Fig.2.1)

XVI-1集合体^{1,2)}は、内側炉心と外側炉心からなる2領域金属燃料高速炉模擬体系であり、内側炉心、外側炉心ともにプルトニウム(Pu)及び濃縮ウラン(EU)を使用していることが特徴である。内側炉心は、Pu板及び20%濃縮EU板（以下、EU20板と略す）を燃料とした対称なセルで構成される引き出し(IC1)と、非対称セルで構成される引き出し(IC2)から成るが、両引き出しの原子数密度はほぼ等しくなっている。外側炉心はPu板及びEU20板を燃料とした引き出し(OC1)、EU20板及びEU93板を燃料とした引き出し(OC2)、制御安全棒(SCR)から成る。

炉心高さは固定側、移動側の両集合体を合わせて91cm、内側炉心の等価直径は69cm、外側炉心まで含めた等価直径は91cmとなる。炉心の外側には、軸方向に天然ウランブロック(NUB)、径方向に劣化ウランブロック(DUB)のブランケットをそれぞれ厚さ20cm及び25cmにわたって設けた。

XVI-2集合体 (Fig.2.2)

XVI-2集合体³⁾は、Puを燃料とした金属燃料高速炉を模擬したテスト領域と、Pu及びEUを燃料としたドライバー領域から成るゾーン型炉心である。テスト領域は2種類の引き出し（ICA及びICB：前者の天然ウラン板(NU板)は全て1/8インチ厚さであるが、後者は1/16インチ厚さのものを2枚使用している）で構成され、ドライバー領域はPu板及びEU20板を燃料とした引き出し(OC1)、EU20板及びEU93板を燃料とした引き出し(OC2)、制御安全棒(SCR)から成る。

テスト領域の寸法はXVI-1集合体の内側炉心の寸法と全く同じであり、炉心全体でも等価直径が若干異なる程度である。ブランケットの構成もXVI-1集合体と同様である。XVI-1集合体との主な相違点はテスト領域にEUを使用していないことである。

XVII-1集合体 (Fig.2.3)

XVII-1集合体⁴⁾は、Puを燃料とした酸化物燃料高速炉を模擬したテスト領域と、Pu及びEUを燃料としたドライバー領域から成るゾーン型炉心である。テスト領域は1種類の引き出し(T2)で構成され、ドライバー領域はPu板及びEU20板を燃料とした引き出し(PD)、EU20板及びEU93板を燃料とした引き出し(UD)、制御安全棒(SCR)から成る。

テスト領域の寸法はXVI-1集合体の内側炉心及びXVI-2集合体のテスト領域と同じであり、ドライ

バーを含めた炉心等価直径は前出の2集合体より大きく約95cmである。テスト領域の軸方向外側に劣化ウラン酸化物を使ったブランケット（金属ウランブランケットと区別するためにソフトブランケット：SBと呼ぶ）の領域を30cm設けている。ソフトブランケットにはテスト領域と同密度のナトリウム(Na)が含まれており、軸方向ブランケット領域でのナトリウムボイド反応度値が測定できる。ドライバ領域の外側には、軸方向に天然ウランブロック(NUB)を、径方向に劣化ウランブロック(DUB)を配置している。

2.2 各集合体の特徴の比較

測定は主に集合体中心軸に沿った領域で行ったため（次項参照）、測定値に影響を及ぼす集合体の特徴は、テスト領域（XVI-1集合体では内側炉心）の組成による項目と、軸方向ブランケットの組成による項目に分けられる。Fig.2.4に各集合体のテスト領域及び軸方向ブランケットを構成するセルの燃料板・模擬物質板の装填図を示す。また、テスト領域及び軸方向ブランケットの組成の概略をTable 2.1に示す。

テスト領域

まず核分裂性物質の原子数密度を見ると、3集合体ともにPu-239+Pu-241の密度は等しく、XVI-1のみがU-235を多量に（概ねプルトニウムの半量）含んでいることが分かる。一方、U-238の密度は金属燃料高速炉模擬体系が酸化燃料高速炉模擬体系に比べて高く、核分裂性物質の富化度（Pu-fissile+U-235）／（Pu+U）はXVI-1、XVII-1、XVI-2の順に高い。また、金属燃料高速炉における燃料ペレットと被覆管の間のボンドナトリウムを模擬するために、XVI-1及びXVI-2集合体の場合にはナトリウムの密度を25%程度高くしてある。その他、金属燃料高速炉模擬体系では酸素が無い代りに、燃料合金を模擬するためのジルコニウムを含んでいる。

これらテスト領域の組成の相違は、中性子スペクトル及び随伴中性子束のエネルギー分布に影響を与え、その結果ナトリウムボイド反応度値に大きく影響を及ぼす。3集合体の中性子スペクトルをFig.2.5に示す。まずXVI-1、-2集合体とXVII-1集合体の中性子スペクトルを比較すると、XVII-1集合体では2MeV以下に存在する酸素の共鳴散乱によって中性子が減速されるため、数百keV近辺の中性子が少なく100keV以下の中性子の割合が大きいことが分かる。XVI-1集合体とXVI-2集合体を比較すると、富化度の高いXVI-1集合体の方が幾分高エネルギー側にシフトしているものの、両者は良く似た形の中性子スペクトルを持っていることが分かる。

次に随伴中性子束のエネルギー分布をFig.2.6に示す。XVI-1集合体が10keV～1MeVで他の集合体に比べて平坦な分布を持っていることが分かる。これは100keV以上におけるPu-239の大きな η 値がU-235による核分裂の寄与で低減されているためである。XVI-2集合体とXVII-1集合体を比較すると、XVI-2集合体の方が数十keV以上での傾きが大きい。これは、金属燃料の場合1MeV以下のエネルギー範囲では（Pu-239の η 値）／（U-238の σ_a ）の形がほぼ随伴中性子束のエネルギー分布に相当するの

に対し、酸化物燃料の場合には酸素による減速でその形が緩和されることによると考えられる。また、U-238の σ_f により一般に随伴中性子束は1MeV以上で大きくなるため、U-238密度の高いXVI-2集合体のほうが1MeV以上での傾きが急になっていると思われる。

軸方向ブランケット

XVI-1及びXVI-2集合体では金属ウランブランケットを、XVII-1集合体ではソフトブランケットをそれぞれ軸方向ブランケットとして用いており、軸方向ブランケットでのナトリウムボイド反応度価値を測定できるのはXVII-1集合体のみとなる。

XVII-1集合体のソフトブランケットの構成はテスト領域(T2セル)のPu板をNU板に換えたものであり、模擬物質板の配置はほとんどテスト領域と同様である。よって、ナトリウムがボイドになった時に起こる炉心部からブランケット部への中性子漏洩におけるボイド内の中性子ストリーミングを忠実に再現できる。

2.3 測定手法と測定項目

ナトリウム板(ステンレス鋼被覆で1/4インチ厚)を同じ大きさのステンレス鋼製ボイド缶に置換することによって標準状態からナトリウムのボイド状態への変化を模擬し、置換前後の臨界制御棒位置の差から反応度価値を得る。Na板とボイド缶の組成をTable 2.2に示す。ボイド缶で使われているステンレス鋼とNa板の被覆に使われているステンレス鋼は組成及び質量が若干異なるが、概ねナトリウムがボイドになった反応度価値だけを測定できていると考えて良い程度の差である。

FCAの2本の制御棒は基準となる反応度価値(安全棒#4を50mm引き抜き状態から全挿入状態にしたときの反応度価値)に対して置換法で校正する。さらに基準となる反応度価値は、Tomlinsonの遅発中性子放出率及び半減期⁵⁾並びにSaphierの遅発中性子スペクトル⁶⁾を使った計算による実効遅発中性子割合にベリオド法による測定を組み合わせて $\Delta k/k$ 単位に換算する。

測定誤差は、Na板を置換する前後の2つの体系について、臨界制御棒位置の読み取り精度、安全棒全挿入状態の再現性、体系の温度ドリフトによる反応度変化の補正に起因する誤差を考慮し評価した。各集合体とも概ね $\pm 2 \times 10^{-6} \Delta k/k$ 程度の測定誤差である。

測定は固定側集合体中心軸に沿った3行×3列領域の引き出しで行った。測定項目は、局所的なボイドを軸方向に移動させるステップボイドと、ボイド領域を軸方向に広げることによりボイド規模を変化させたボイド規模依存性の測定の2種類に大別できる。測定項目をTable 2.3にまとめる。表中で1zや9z等の表記は、FCA引き出しを構成するセルの軸方向位置を示す番号である。Fig.2.7に示したように、固定側集合体の引き出しについて炉心中心の密着面のセルを1zとし、ブランケット方向へ順に番号をつけ、炉心上端が9zとなる。ボイド規模依存性の測定項目で1-2zや1-6z等の表記は、両数字ではさまれるセルがボイド状態にあることを示す。例えば1-2zは1zと2zの2セルが、1-6zは1zから6zの計6セルが3行×3列領域でボイド状態にあることを示している。

XVII-1集合体はFCAにおける酸化物燃料高速炉模擬体系のリファレンスとして位置付けられるため、上記の測定の他にこの集合体のみで行った特殊な測定項目が多々ある。これらについては次節で測定結果と併せて詳しく述べる。

2.4 測定結果及び考察

ここでは測定結果を示すと共に、測定結果に基づいた考察を行う。計算との比較による考察は第4章で述べる。

各集合体共通で行った測定の結果

各集合体共通で行った測定の結果をTable 2.4にまとめる。また、各集合体でのステップボイドの測定結果をFig.2.8で比較する。

ステップボイドの場合、一般に炉心中心である1zでもっとも大きな反応度値を示し、中心から離れるに従って小さくなる。集合体によって差はあるが、6zから8z（炉心中心から25～40cm）で反応度値は正から負へと転ずる。これは、炉心中心付近では正の寄与である非漏洩項が支配的であるのに対して、中心から離れるに従って負の寄与である漏洩項の絶対値が大きくなるためである。

体系の大きさやドライバーの組成などが異なるために厳密な比較はできないが、炉心中心付近のナトリウムボイド反応度値を集合体間で比べると次の2点が分かる。

- 1) 金属燃料高速炉模擬体系が酸化物燃料高速炉模擬体系に比べて大きな値を示す。これは金属燃料高速炉模擬体系の方が硬い中性子スペクトルを持つためである。
- 2) 同じ金属燃料高速炉模擬体系でも、U-235を含むXVI-1集合体の方がXVI-2集合体よりも小さな値を示す。これは随伴中性子束のエネルギー分布の数百keV付近の傾きがU-235により緩和されるためである。

これら各集合体でのナトリウムボイド反応度値に関する特徴については第4章で計算値を交えて詳しく考察する。

ボイド規模依存性の結果をみると、1-6zで最大の反応度値となり、1-9zでは漏洩項の影響で小さな反応度値となっていることが分かる。XVII-1集合体で軸方向ブランケットまでボイドにした場合（1-15z）、非漏洩項と漏洩項はほぼ等しい値となり、反応度値はほとんどゼロとなる。

Table 2.4のボイド規模依存性の結果の横に示したカッコ内の値は、対象領域のステップボイドの測定値を足し合わせたものである。ステップボイドでの測定値の和と規模の大きなボイドでの測定値を比べると、1-2zでは両者に大きな差異はみられないが、1-6z、1-9zと領域が広がるにつれて前者の方が大きな反応度値を与えることが分かる。これは比較的大きな規模のナトリウムボイドでは反応度値の加算性が成り立たないことを示すものであり、計算を行うときに注意を要する点である。

XVII-1集合体のみで行った測定の結果

XVII-1集合体のみで行った測定の結果をTable 2.5にまとめる。以下、各項目について測定の目的及び方法を述べ、測定結果について考察する。

A) 散乱物質のサンプル反応度値

ナトリウムボイド反応度値の非漏洩項の大部分を占める散乱項成分は、ナトリウムがボイドになることによって中性子の減速が減少し、中性子インポートンスの高い高エネルギー中性子の割合が増えることに起因する。よって散乱項成分の計算精度は、随伴中性子束の計算精度とナトリウムの散乱断面積の精度に支配されると考えられる。ここでは、散乱項成分の計算精度の支配要因が随伴中性子束にあるか、ナトリウムの散乱断面積にあるかを特定するために、ナトリウムの代わりに他の散乱物質のサンプル反応度値を測定した。

散乱物質としては黒鉛及びアルミニウムを使用した。黒鉛については、3行×3列領域の1z又は1-2zのNa板を全て黒鉛板に変更した後、さらに黒鉛板を半分の大きさのものに置換することにより反応度値を測定した。アルミニウムについては同様の測定を3行×3列領域の1zで行った。この置換によって減少する各散乱物質の質量はTable 2.5に示した。

測定結果より、ナトリウムボイドと同様に正の反応度値が得られていることが分かった。計算精度についての詳しい検討は第4章で行う。

B) ナトリウム層付き炉心における測定

XVII-1集合体では、ナトリウムボイド係数低減化を目指したナトリウム層付き高速炉の概念を模擬したナトリウム層付きの体系 (Fig.2.9) を構築し、ナトリウムボイド反応度値に対してナトリウム層が及ぼす影響を測定した。ナトリウム層付きXVII-1集合体は、XVII-1集合体の中心軸周りの37本の引き出し (固定側のみ) について、ソフトブランケット領域をNa板のみからなる領域 (ナトリウム領域: NAB) に置換した炉心である。

Table 2.4にナトリウム層付きXVII-1集合体でのステップボイド及びボイド規模依存性の測定結果を他の集合体での結果と共にまとめた。表においてブランケット部の項目としてに「A-pattern」とあるのは、ナトリウム領域におけるボイド状態のセルのパターンを示している。「A」及び「B」は8枚のNa板の内4枚を、「all」は8枚全てをボイド缶に置換したものである。「A」と「B」の相違はFig.2.10に示した。

ナトリウム層付きXVII-1集合体でのステップボイドの結果をFig.2.11でXVII-1集合体のものと比較する。等しい量のナトリウムをボイドにする通常のXVII-1集合体の場合とナトリウム層付きでhalf-voidの場合を比較すると、炉心端付近から軸方向ブランケットにかけてナトリウム層による中性子漏洩の増加によるとみられる反応度値の食い違いがある。また、ナトリウム層でセルのナトリウムを全量ボイドにする場合の反応度値は半量の場合のほぼ倍になっていることが分かる。

ボイド規模依存性の測定では、軸方向ブランケットまでボイドにした場合、XVII-1集合体ではわず

かに正のナトリウムボイド反応度値となったのに対し、ナトリウム層付きの場合には大きく負の値を示し、ナトリウム層によるナトリウムボイド反応度値低減化の効果が大きいことが分かる。

C) ナトリウム液位の低下模擬

ナトリウムの大規模な漏洩や沸騰等によるナトリウム液位の低下をXVII-1及びナトリウム層付きXVII-1集合体において模擬した。ボイド規模依存性の測定とは異なり、漏洩項の大きな軸方向ブランケットからボイド化が始まるため、液位の低下につれて負の反応度値が一端負側に大きくなってから正に向かうという挙動を示す。

Fig.2.12に測定によって得た液位の低下に伴う反応度変化の様子を示す。ソフトブランケット付きのXVII-1集合体とナトリウム層付きXVII-1集合体の場合を比べると、後者で大きな負の反応度が得られることが分かる。ナトリウム層付きXVII-1集合体でXVII-1集合体と同様に1セル当たり4枚のNa板をボイドにする場合（half voidと記載）でもXVII-1集合体に比べて約2倍の反応度値が得られる。本測定の範囲において、ナトリウム液位がこのまま低下して炉心中心よりも低くなった場合、XVII-1集合体では正の反応度が印可されるのに対してナトリウム層付きXVII-1集合体では負のままであり、ナトリウム層を炉心上部に設ける設計はナトリウムボイド反応度値低減に有効であることが分かる。

D) 移動側集合体の影響

各集合体共通で行った測定では移動側集合体のナトリウムはボイドにしていなかったため、固定側集合体の一部をボイドにした場合に密着面に対して非対象な体系となる。一方、計算時間と記憶領域の節約の観点から、一般に計算体系は密着面に対して対象として扱う。そこで、実験体系と計算モデルの相違について実験による検討を行うために、移動側集合体3行×3列領域の1-15z又は1-2zのNa板をボイド缶に変更した体系でボイド規模依存性の測定を行った。Table 2.5に記したように、測定結果は移動側集合体がボイドになっていない場合とほとんど変わらない。よって、計算において密着面に対する非対象性を考慮する必要はないと考えられる。本項目については第3章において計算による確認も行う。

E) セルの変更の影響

XVII-1集合体では炉心部のセル(T2セル)と軸方向ブランケットのセル(SBセル)のナトリウム板の位置が一致しており、中性子ストリーミングの効果が大きいと考えられる。そこで、Fig.2.13に示したように、固定側集合体3行×3列領域の炉心部のセルを約1.6mmシフトした場合（T2セルをT2Aセルに変更）と、軸方向ブランケットのセルを約1.6mmシフトした場合（SBセルをSBAセルに変更）でそれぞれ軸方向ブランケット部分のナトリウムボイドを模擬した。

測定の結果、炉心部のセルをシフトした場合の軸方向ブランケット部（10-15z）のナトリウムボイド反応度値は正側に向かい、軸方向ブランケットのセルをシフトした場合にはほとんど変わらないことが分かった。これはボイド缶内の中性子ストリーミングがT2セル→T2Aセルでは少なくなり、

SBセル→SBAセルではあまり変わらないことを示していると考えられるが、その原因については不明である。実験前にはT2セルのPu板がソフトブランケットセルのNa板の位置にある場合には中性子ストリーミングのための中性子源が多いために、ナトリウムボイドによる中性子ストリーミングが増加すると予想していたが、反対の結果となっている。

本測定を計算により忠実に再現するにはT2セルとソフトブランケットセルの境界部分について燃料板配列を厳密に取り扱うことが必要であると考えられるが、現在のところそのような計算を簡便かつ精度良く行う方法がないため、本測定項目についての計算は行わない。

F) 垂直セルの影響

板状燃料の異方性拡散係数の妥当性を検証するために、通常は炉心中心軸に対して平行なセル配列を垂直にしてナトリウムボイド反応度値を測定した。垂直置きにしたセルは、固定側集合体3行×3列領域の1-9z、10-15z、1-15z、及びナトリウムボイド反応度値を測定するセルだけの4通りであり、通常の配列での測定と比較した。

測定結果をTable 2.6にまとめ、8zから11zの範囲についてはFig.2.14に図示する。まず通常状態での測定と1-15z垂直置きでの測定を比べる。1zは漏洩項がほとんどないために両者の差は小さい。一方8zから11zにかけては、中性子ストリーミングが小さいと考えられる垂直置きの方が正側の値、すなわち、中性子漏洩の少ない傾向を示していることが分かる。

次に他のケースについてみると、ボイドにする対象のセルの回りが垂直置きであろうと通常置きであろうと、垂直置きになっているセルのナトリウムボイド反応度値は1-15z垂直置きの結果に近く、通常置きのセルは全て通常置きの結果に近くなっていることが分かる。すなわち、セルを垂直置きに変更することによって中性子束の傾き等はほとんど変わらず、主に拡散係数が変化することによってナトリウムボイド反応度値が変化していることが分かる。よって、本測定結果を使えば、計算による板状燃料に平行な方向と垂直な方向の異方性拡散係数の妥当性が検証できる。

G) ナトリウム層付きXVII-1集合体におけるナトリウム領域の大きさの影響

前述のように、ナトリウム層付きXVII-1集合体は、固定側集合体中心付近の引き出し37本についてXVII-1集合体の軸方向ブランケット(SBセル)をナトリウム領域(NABセル)に変更したものである。ここでは、変更する引き出しの数の影響をみるために、3行×3列領域の9本の引き出しについてのみ軸方向ブランケットをナトリウム領域に変更し、ナトリウムボイド反応度値を測定した。

9z及び10zのステップボイドの測定結果はナトリウム領域の広さにあまり影響を受けていないが、10-15zのボイドではナトリウム領域が広い方が負側の反応度値を得られることが分かる。

H) 広領域ボイド(1-15z)

FCA保有のボイド缶は約2000枚であり、ナトリウムボイド反応度値を測定できる領域は限られている。ここでは、ボイド缶をほぼ全数使って、固定側集合体中心5×5領域及び中心から離れた領域で

1-15zのナトリウムボイド反応度値を測定した。中心から離れた領域にはFig.2.15で(X)と記した12本の引き出しと(Y)と記した12本の引き出しを選び、別々にボイドになった場合及び同時にボイドになった場合について測定することによって漏洩項の燃料板方向依存性を調べた。

測定結果は全て負の反応度値となっており、漏洩項の寄与が大きいことが分かる。中心から離れた領域での測定では、X方向とY方向でほとんど変わらない結果となっている。これは、前述の燃料板配列を炉心軸に対して垂直に変えた場合の結果と矛盾する結果である。しかし、前述の垂直セルの影響の測定領域（炉心中心）では中性子漏洩がほぼ軸方向に限られていたのに対して、本測定では中性子漏洩は軸方向及び径方向に分散しており、燃料板配列の相違が影響する径方向中性子漏洩の持ち分が少なかったためだと考えられる。この点については3次元の体系計算による詳細な考察を第4章で行う。

D) プルトニウム組成の影響

一般に、燃料に占める高次プルトニウムの割合が増えると、ナトリウムボイド反応度値は正側に移行する。ここではXVII-1集合体中心の5×5領域について移動側及び固定側集合体の1～3zをFCA保有の組成の異なるプルトニウム板により構成し、固定側3行×3列領域の1z、2z、1-2zにおけるナトリウムボイド反応度値を測定した。

使用したプルトニウム板の組成をTable 2.7に示す。燃料板名の括弧内の数字は核分裂性プルトニウムの割合を示しており、Pu(92)、Pu(81)、Pu(75)の順にPu-240の含有量が少ない。

Table 2.5に示した測定結果によると、Pu(92)の場合に比べてPu(81)の場合で13～18%、Pu(75)の場合で24%程度ナトリウムボイド反応度値が大きくなっていることが分かる。この測定結果を用いて第4章ではプルトニウム組成によるナトリウムボイド反応度値の計算精度への影響について考察する。

Table 2.1 Characteristics of three assemblies

Assembly name	XVI-1	XVI-2	XVII-1
Target of simulation	Metallic fueled LMFBR	Metallic fueled LMFBR	MOX fueled LMFBR
Axial blanket region	Natural uranium metal	Natural uranium metal	Soft blanket
Atomic number density (10^{21} atoms/cm ³)			
Central core region			
Pu-239 + Pu-241	1.05	1.05	1.05
U-235	0.54	0.07	0.01
U-238	9.26	9.75	6.87
O	0.01	0.05	17.04
Na	9.57	9.57	7.66
Zr	2.09	2.09	0.00
Fe	13.37	13.37	12.17
Axial blanket region			
U-235	0.29	0.29	0.03
U-238	39.89	39.89	9.31
O	0.00	0.00	17.07
Na	0.00	0.00	7.66
Fe	6.34	6.34	11.15
Enrichment ^{a)}	15 %	10 %	13 %
Volume of core region	593 ℓ	626 ℓ	644 ℓ
Pu plates sample worth ^{b)}	$2.39 \times 10^{-4} \Delta k/k$	$1.77 \times 10^{-4} \Delta k/k$	$1.98 \times 10^{-4} \Delta k/k$

a) (Pu-239 + Pu-241 + U-235) / (Pu + U)

b) Experimental values for 2 pieces of Pu(92) plate at the core center. (Pu : 70.23g)

Table 2.2 Sodium plate and void can

Item	Sodium plate	Void can
Dimension	5.08 cm ^L x 5.08 cm ^H x 0.625 cm ^t	
Thickness of cladding	0.058 cm	
Weight (g)		
Total	35.441	24.050
Na	11.310	0.000
Stainless Steel	24.131	24.050
Cr	4.368	4.160
Mn	0.241	0.240
Fe	17.169	16.440
Ni	2.353	3.210

Table 2.3 Step void measurement and void volume dependence measurement

Assembly	Step void	Void volume dependence
XVI-1	1z ~ 9z	1-2z, 1-6z, 1-9z
XVI-2	1z ~ 9z	1-2z, 1-6z, 1-9z
XVII-1	1z ~ 11z	1-2z, 1-6z, 1-9z, 1-15z

Table 2.4 Experimental results of step void measurements and void volume dependence measurements

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

Void cell	XVI-1	XVI-2	XVII-1	XVII-1 with sodium layer
Step void				
1z	$0.777 \pm 0.022^a)$	0.974 ± 0.024	0.536 ± 0.024	0.501 ± 0.024
2z	0.751	0.937	0.504	0.514
3z	0.630	0.858	0.387	0.418
4z	0.454	0.701	0.296	0.326
5z	0.192	0.507	0.180	0.146
6z	0.035	0.296	0.024	0.017
7z	-0.221	0.108	-0.117	-0.162
8z	-0.395	-0.092	-0.256	-0.304
9z	-0.542	-0.234	-0.361	-0.465
10z			-0.349	-0.972
11z			-0.183	-0.775
12z				-0.598
10z(A-pattern) ^{b)}				-0.470
11z(A-pattern) ^{b)}				-0.374
12z(A-pattern) ^{b)}				-0.273
Void volume dependence				
1-2z	1.519 (1.528) ^{c)}	1.922 (1.911)	1.006 (1.040)	1.014 (1.015)
1-6z	2.810 (2.839)	4.173 (4.273)	1.881 (1.927)	1.843 (1.922)
1-9z	1.452 (1.681)	3.741 (4.055)	0.968 (1.193)	0.722 (0.991)
1-15z			0.053	-3.553

a) Experimental error.

b) Patterns of void cell in sodium layer. See Fig.2.10.

c) Summation of step void reactivity worths.

Table 2.5 Experimental results of extra measurements in FCA XVII-1

Item	Reactivity worth ($10^{-4} \Delta k/k$)	Remarks
A) Sample worth of scattering material ^{a)}		
Carbon (3×3:1-2z)	1.702 ± 0.024 ^{b)}	Worth for 912.1 g of carbon
Carbon (3×3:1z)	0.999	Worth for 453.5 g of carbon
Aluminum (3×3:1z)	1.015	Worth for 777.4 g of aluminum
B) Influence of sodium layer		
Step void		
1z ~ 9z, 10z ~ 12z (A, all) ^{c)}		
Void scal dependence	Shown in Table 2.4	
1-2z, 1-6z, 1-9z, 1-15z		
C) Decrease of sodium level		
XVII-1		
10-15z void	-0.834	Na level : -30.48 cm
7-15z void	-1.753	Na level : -45.72 cm
3-15z void	-0.941	Na level : -66.04 cm
1-15z void	0.053	Na level : -76.20 cm
XVII-1 with sodium layer		
10-15z void(all) ^{c)}	-3.976	Na level : -30.48 cm
10-15z half-void(A) ^{c)}	-1.705	Na level : -30.48 cm
10-15z half-void(B) ^{c)}	-1.783	Na level : -30.48 cm
7-15z void	-5.282	Na level : -45.72 cm
1-15z void	-3.553	Na level : -76.20 cm
D) Influence of movable-side		
M:3×3:1-15z ; Na voided		
1-2z void	1.043	Refer 1.006 in Table 2.4
1-6z void	1.883	Refer 1.881 in Table 2.4
1-9z void	0.998	Refer 0.968 in Table 2.4
1-15z void	0.057	Refer 0.053 in Table 2.4
M:3×3:1-2z ; Na voided		
1-2z void	1.009	Refer 1.006 in Table 2.4
E) Influence of shifting cell		
F:3×3:1-9z ; T2 → T2A ^{d)}		
10-15z void	-0.739	Refer -0.834 in Item-C)
F:3×3:10-15z ; SB → SBA ^{d)}		
1z void	0.513	Refer 0.536 in Table 2.4
10-15z void	-0.835	Refer -0.834 in Item-C)
F) Influence of perpendicular cells		
	Shown in Table 2.6	

(Continuing)

- a) Sodium plates in the measured region were replaced by carbon and aluminum plates. Then, reactivity worths caused by replacing them by the half size plates were measured respectively.
- b) Experimental error.
- c) Patterns of void cell: "A" and "B" mean that 4 of 8 sodium plates in a cell are replaced by void cans. "all" means that all of the 8 plates are replaced. Difference between "A" and "B" is shown in Fig.2.10.
- d) Cell patterns are shown in Fig.2.13.

Table 2.5 Experimental results of extra measurements in FCA XVII-1 (Continued)

Item	Reactivity worth ($10^{-4} \Delta k/k$)	Remarks
G) Influence of Na region largeness F:3×3:10-15z; SB → NAB		
9z void	-0.487	Refer -0.465 in Table 2.4
10z half-void(A)	-0.449	Refer -0.470 in Table 2.4
10-15z half-void(A)	-1.492	Refer -1.705 in Item-C)
10-15z void	-3.558	Refer -3.976 in Item-C)
H) Large region void (1-15z void) ^{e)}		
Central 5×5 drawers	-0.247	Volume of void region : 58.0 ℓ
12 drawers at off center(X)	-0.595	Volume of void region : 27.9 ℓ
12 drawers at off center(Y)	-0.608	Volume of void region : 27.9 ℓ
24 drawers at off center(X+Y)	-1.194	Volume of void region : 55.7 ℓ
I) Influence of Pu composition		
F,M:5×5:1-3z; Pu(92) → Pu(75)		
1z void	0.616	Refer 0.501 in Table 2.4
2z void	0.639	Refer 0.514 in Table 2.4
1-2z void	1.259	Refer 1.014 in Table 2.4
F,M:5×5:1-3z; Pu(92) → Pu(81)		
1z void	0.592	Refer 0.501 in Table 2.4
2z void	0.583	Refer 0.514 in Table 2.4
1-2z void	1.141	Refer 1.014 in Table 2.4

e) Measured region is shown in Fig.2.15

Table 2.6 Experimental results of sodium void reactivity worth for perpendicularly arranged cell in FCA XVII-1

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

Measured cell	Perpendicularly arranged cell				Measured cell only
	None	1-9z	10-15z	1-15z	
1z	0.536			0.564	
8z	-0.256	-0.162	-0.272	-0.143	-0.207
9z	-0.361	-0.252	-0.373	-0.240	-0.274
10z	-0.349	-0.303	-0.267	-0.246	-0.219
11z	-0.183	-0.185	-0.149	-0.098	
10-15z	-0.834	-0.856	-0.616	-0.613	

Table 2.7 Plutonium isotope composition of FCA fuel in September, 1994

(unit : 10^{22} atoms/cm³)

Isotope	Plate name					
	Pu(92)		Pu(81)		Pu(75)	
Pu-239	1.8177	(91.2%)	1.7778	(78.5%)	1.6573	(70.0%)
Pu-240	0.1602	(8.0%)	0.4110	(18.1%)	0.5245	(22.2%)
Pu-241	0.0053	(0.3%)	0.0217	(1.0%)	0.0587	(2.5%)
Pu-242	0.0000	(0.0%)	0.0098	(0.4%)	0.0049	(0.2%)
Am-241	0.0097	(0.5%)	0.0447	(2.0%)	0.1210	(5.1%)
Total	1.9930	(100.0%)	2.2650	(100.0%)	2.3664	(100.0%)

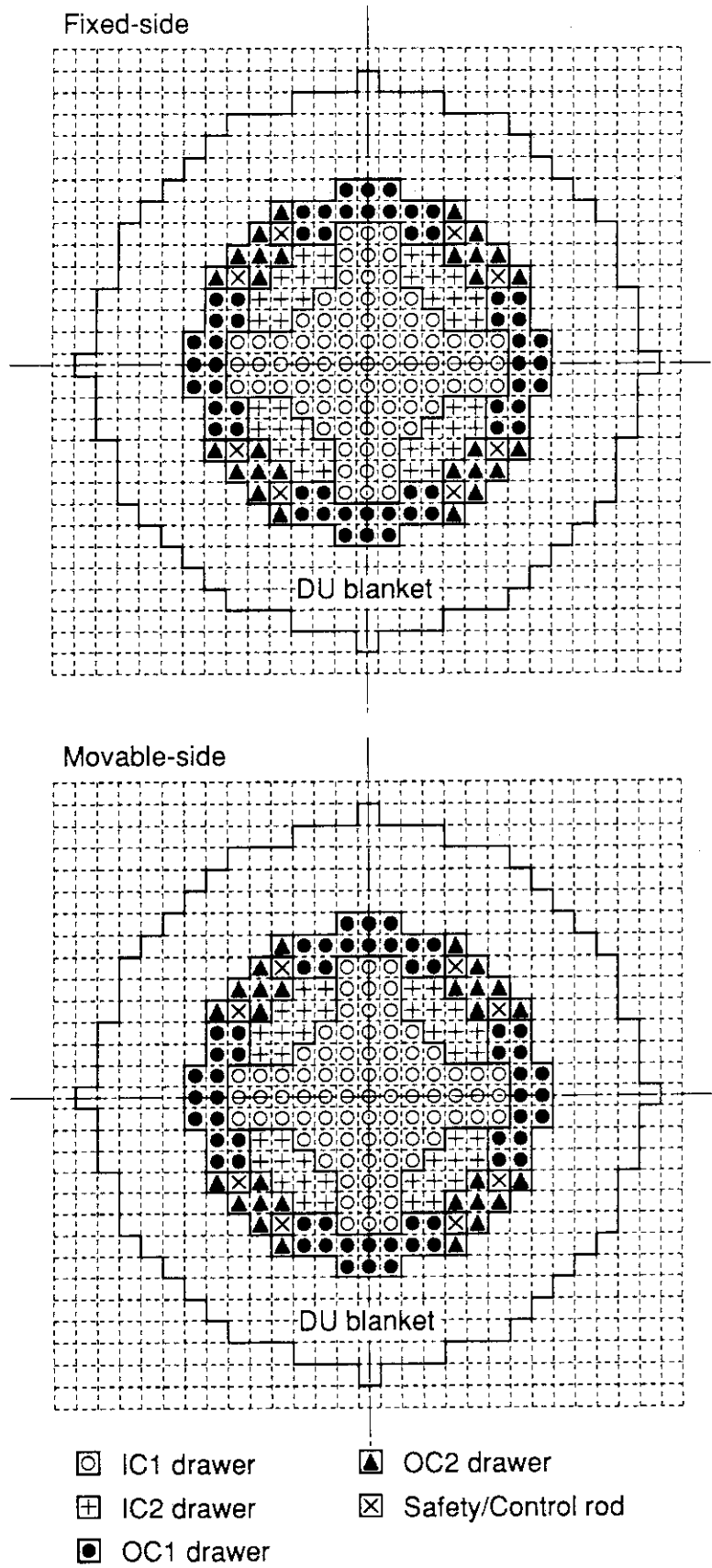


Fig. 2.1 Vertical cross sections of FCA XVI-1

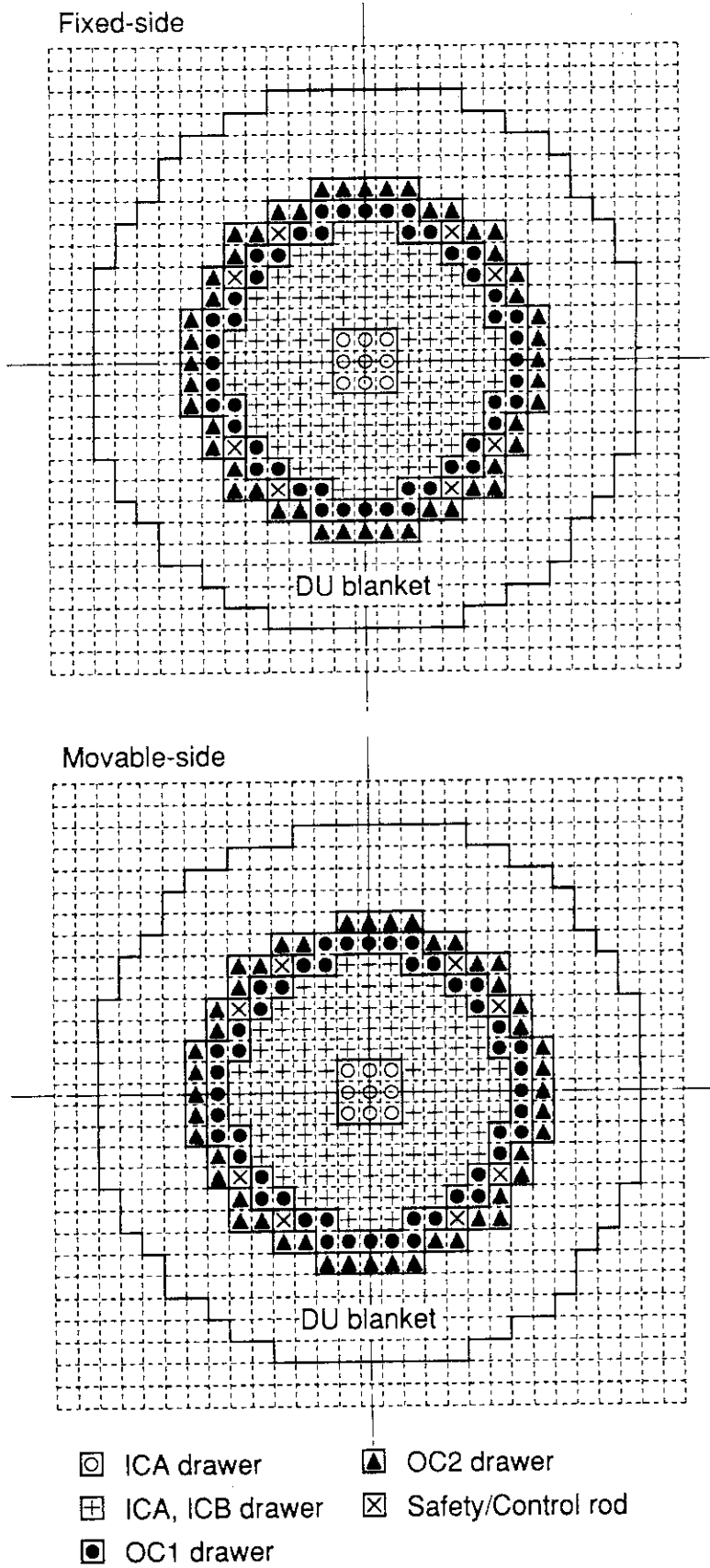


Fig. 2.2 Vertical cross sections of FCA XVI-2

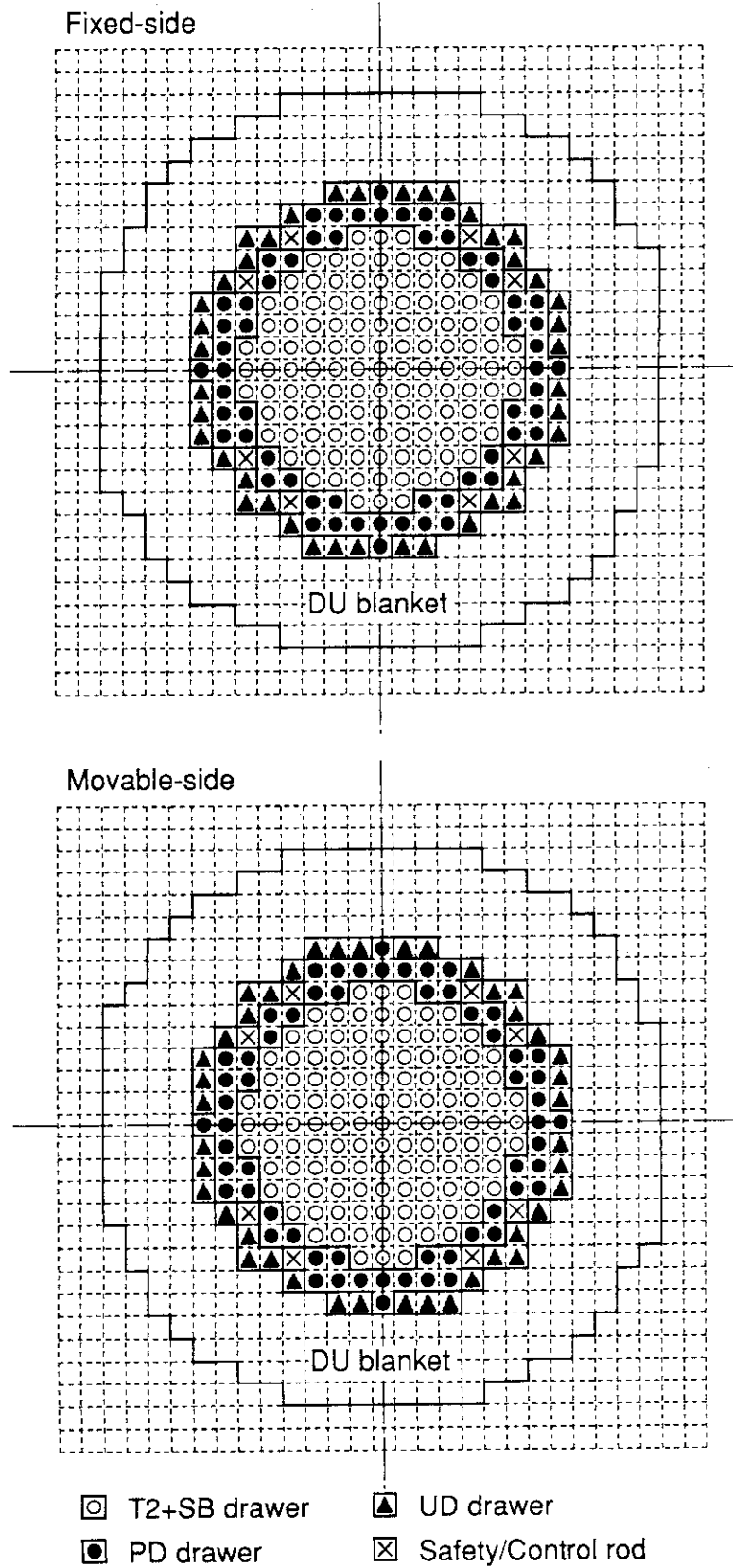


Fig.2.3 Vertical cross sections of FCA XVII-1

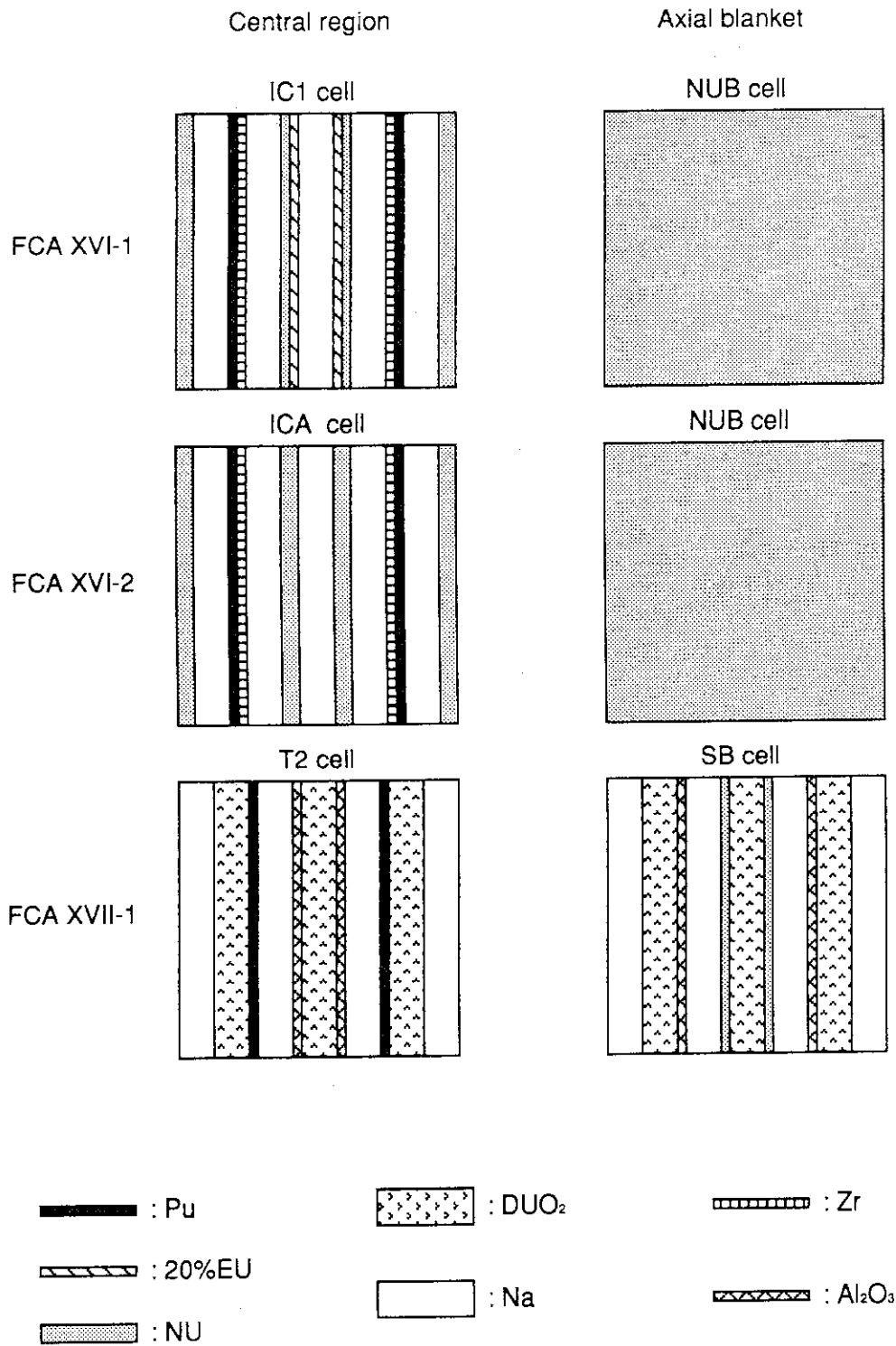


Fig. 2.4 Plate configurations of the cells composing central region and axial blanket region of the assemblies

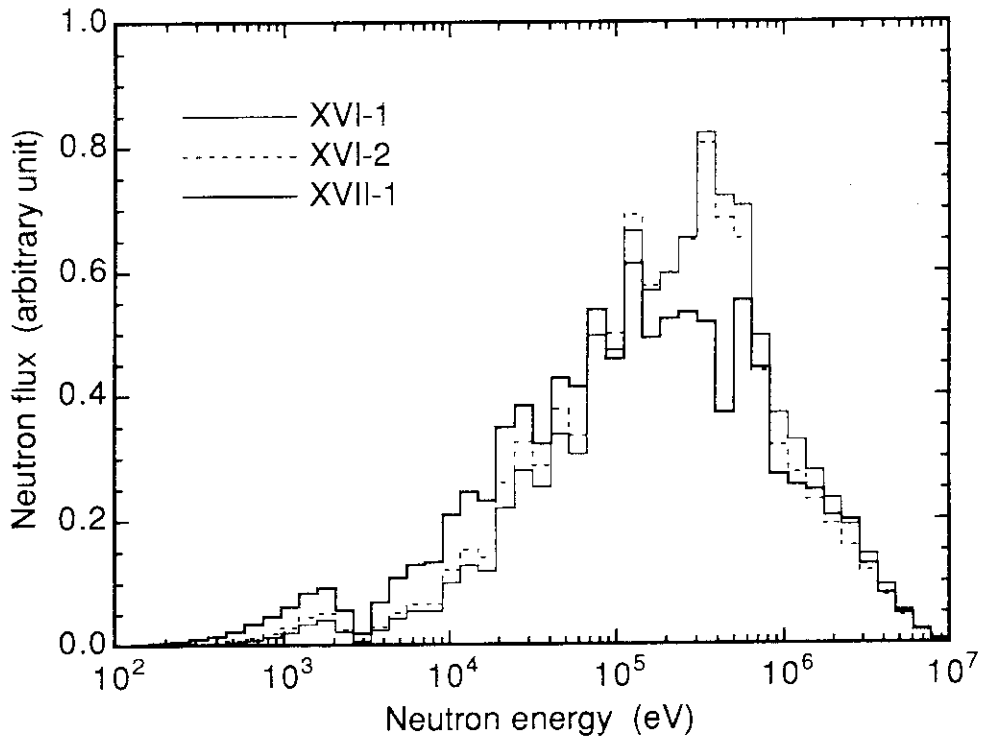


Fig.2.5 Comparison of neutron spectra at the core center of the assemblies

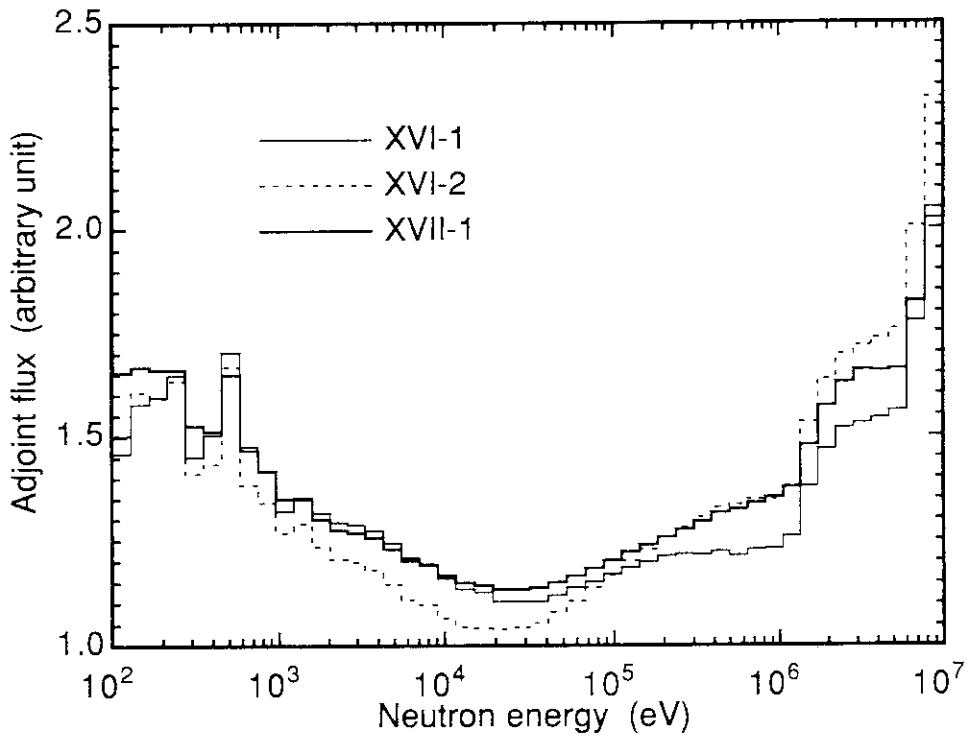


Fig.2.6 Comparison of energy distributions of adjoint neutron flux at the core center of the assemblies

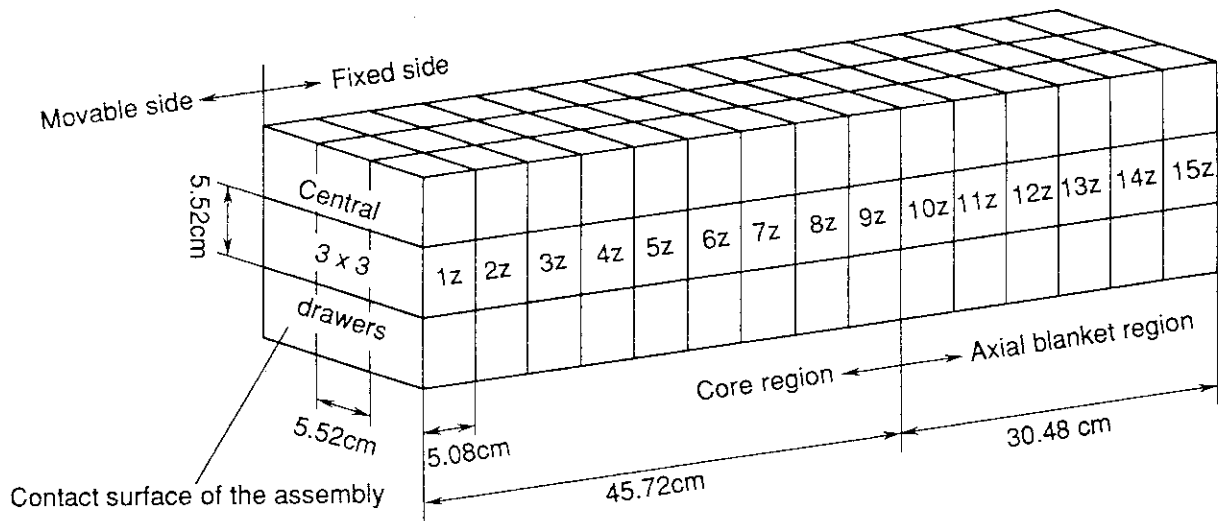


Fig.2.7 Illustration of central 3×3 drawers

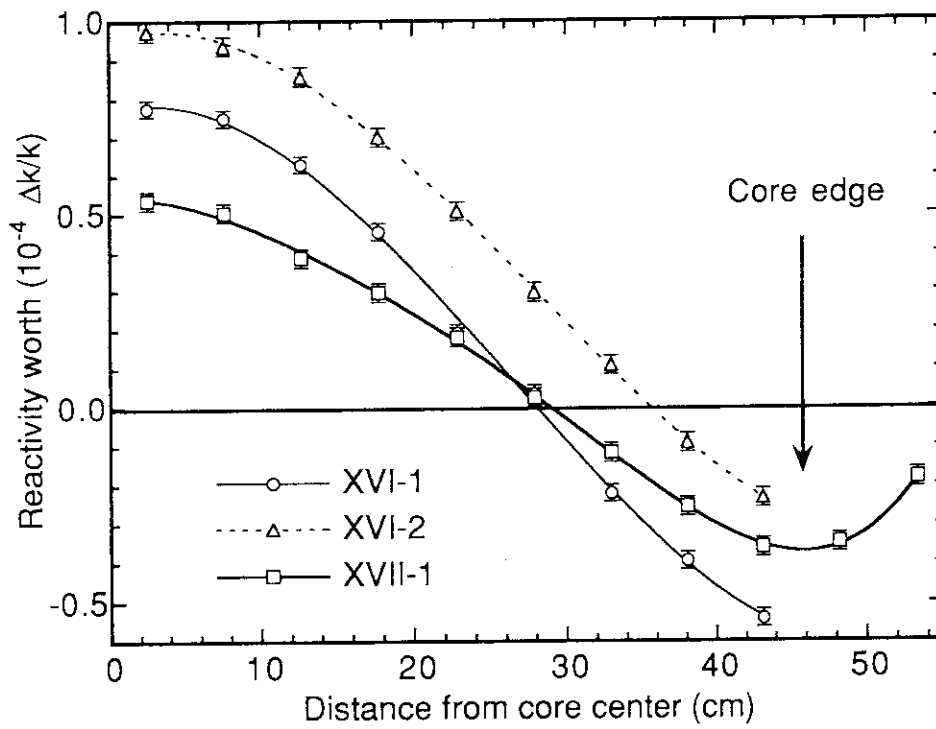


Fig.2.8 Step void measurements in FCA XVI-1, XVI-2 and XVII-1

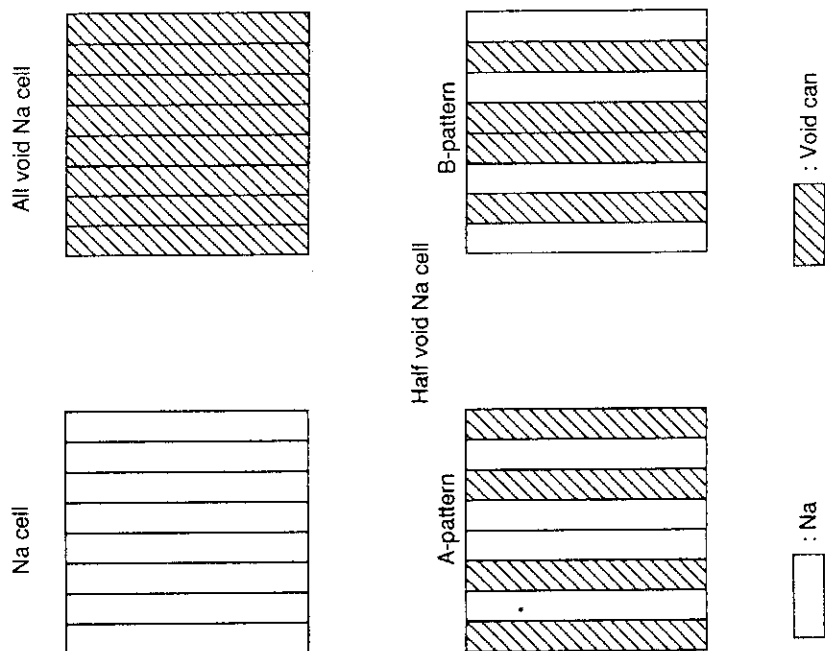


Fig. 2.10 Plate configurations of Na cell and void cell

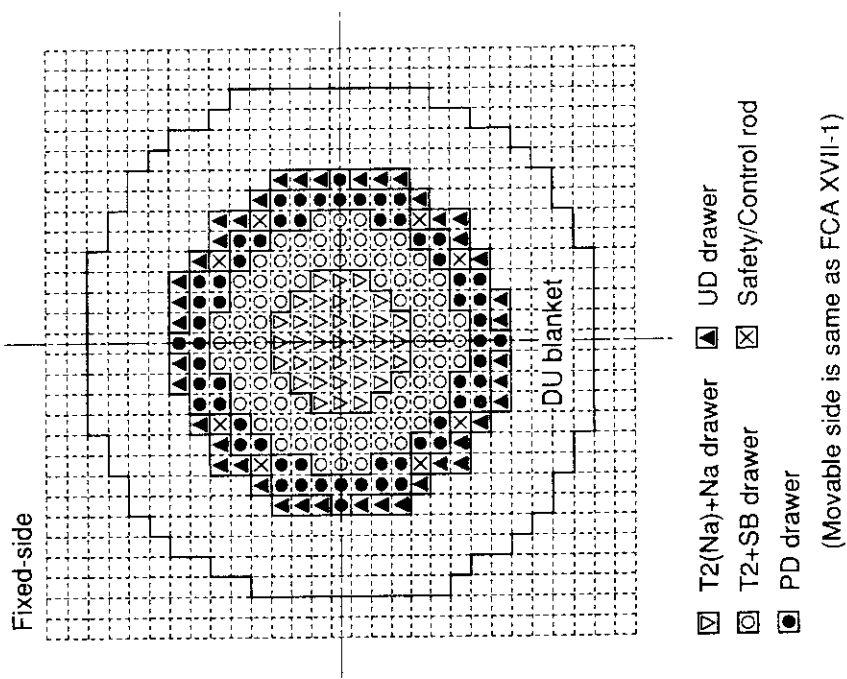


Fig. 2.9 Vertical cross section of FCA XVII-1 with sodium layer

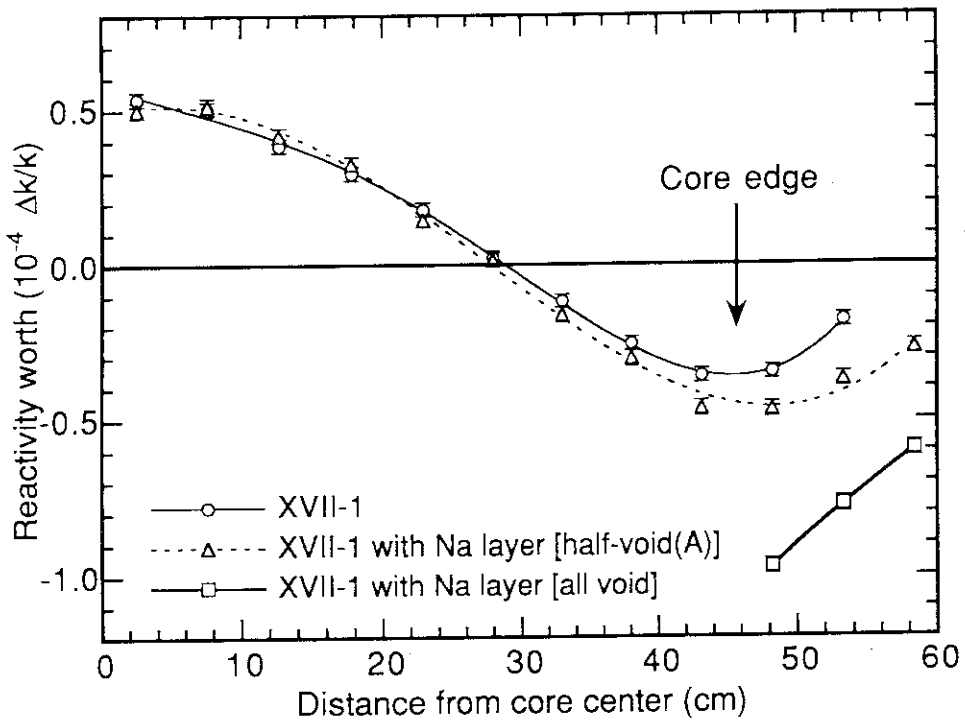


Fig. 2.11 Step void measurements in FCA XVII-1 with sodium layer

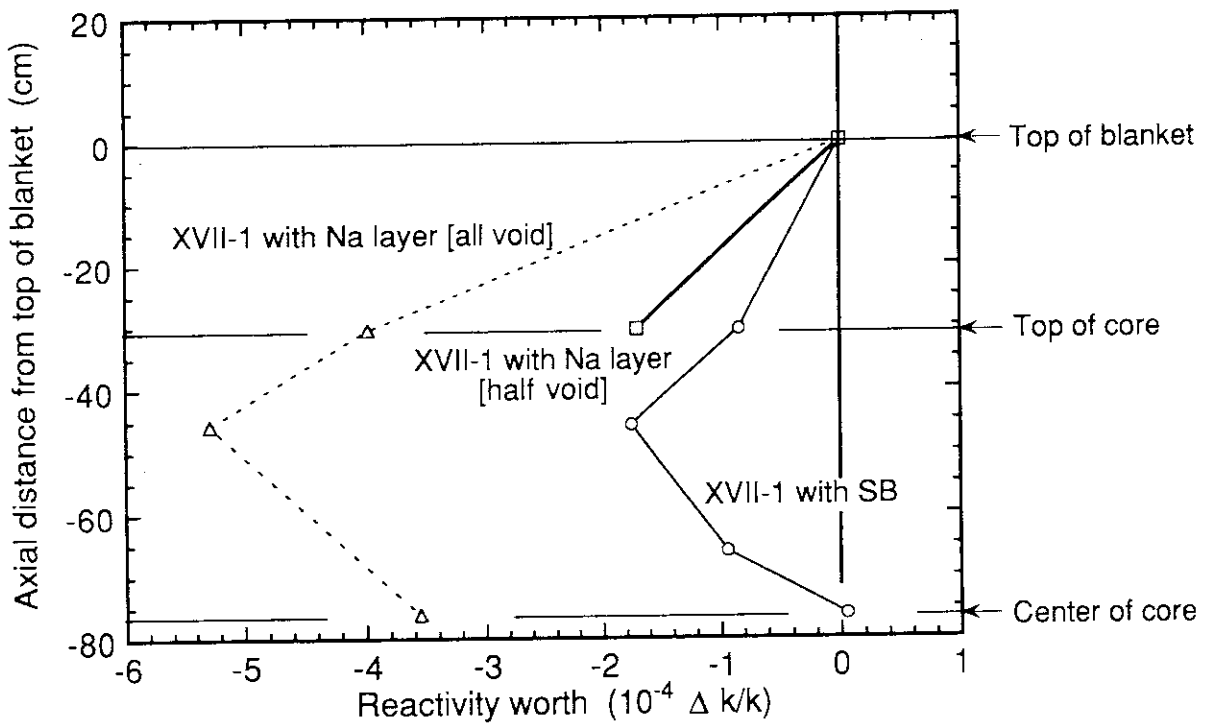


Fig. 2.12 Experimental results for simulation of decrease of sodium level

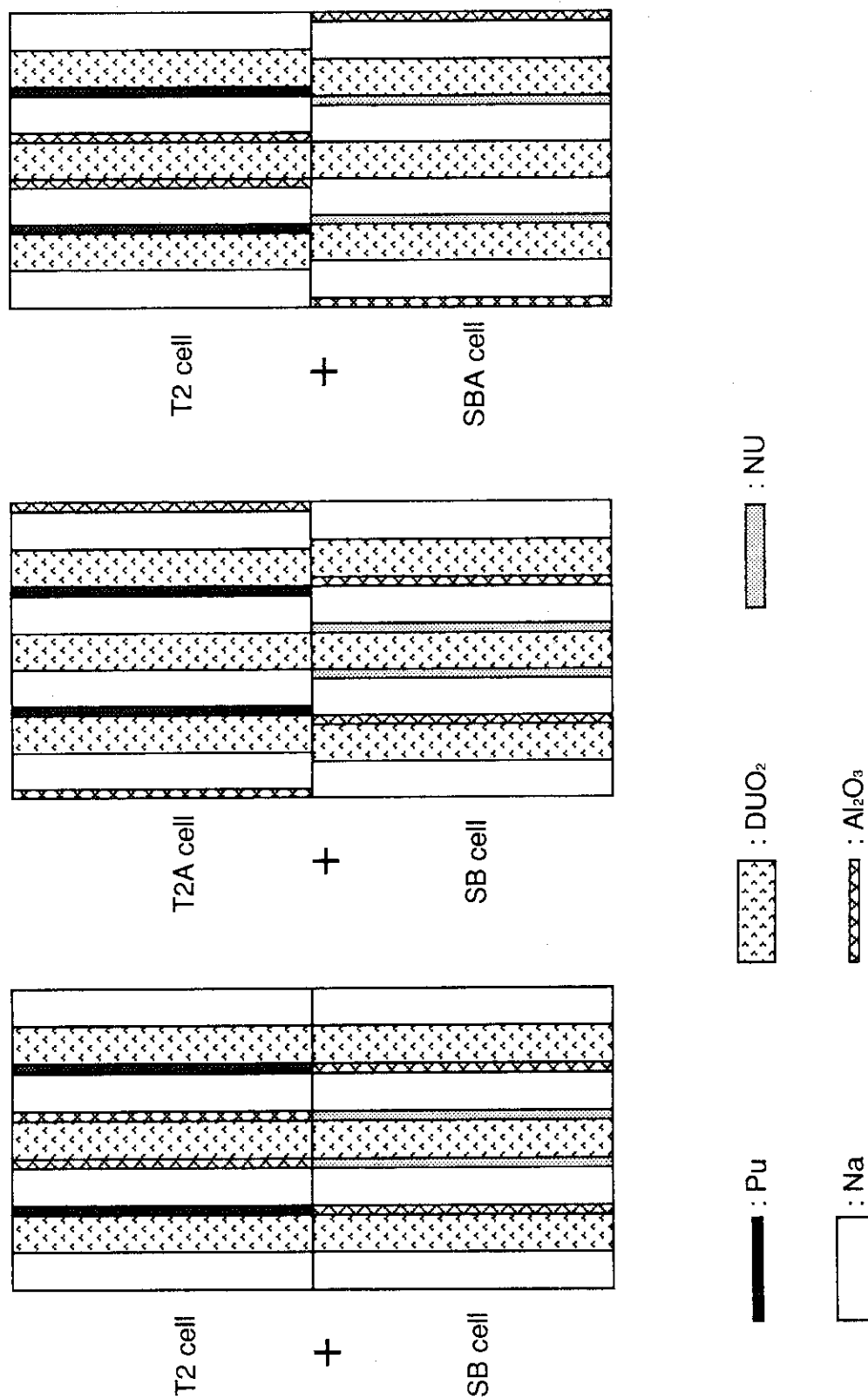


Fig. 2.13 Plate configurations of shifting cells

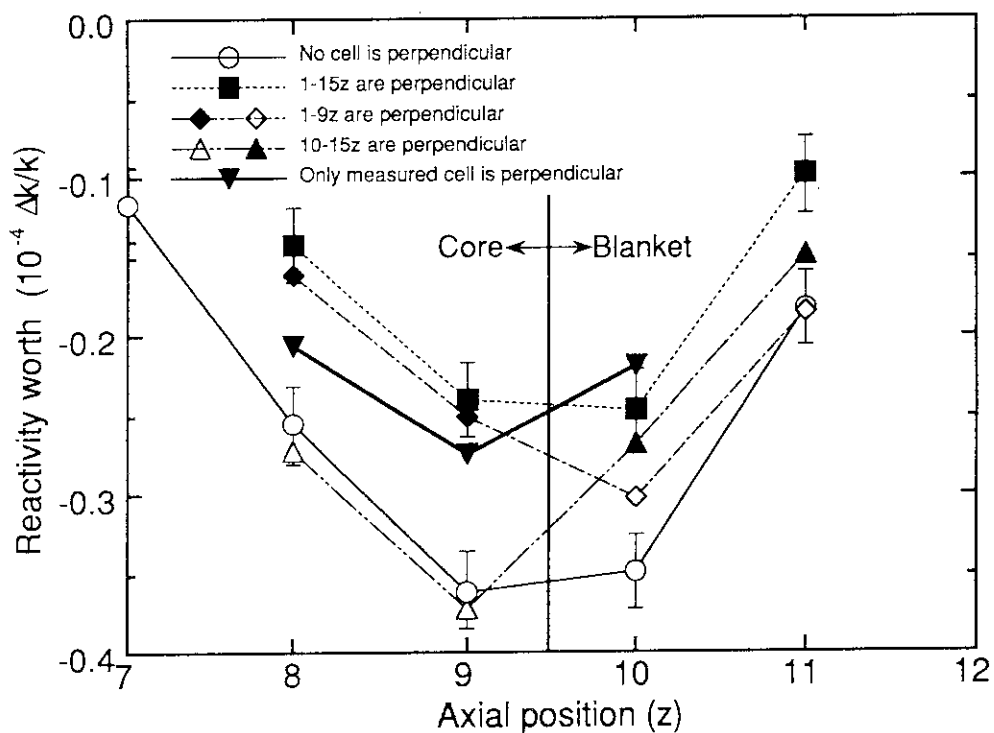


Fig. 2.14 Experimental results of influence of perpendicular cells
 (Empty marks: normal arrangement, Filled marks: perpendicular arrangement)

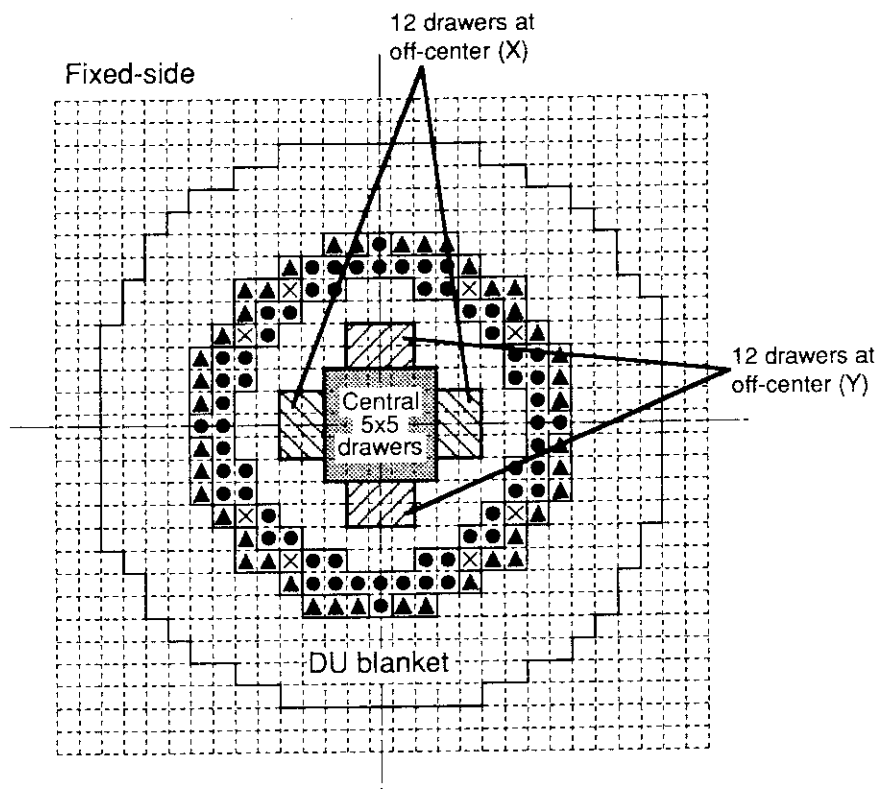


Fig. 2.15 Measured drawers in large region void measurement

3. 計 算

ナトリウムボイド反応度値の実験解析をFig.3.1に示した計算フローに従って行った。以下、計算手法の詳細と計算結果について述べ、本計算手法における問題点を検討する。

3.1 計算手法と計算結果

セル計算

群定数セットには、評価済み核データファイルJENDL-2⁷⁾及びJENDL-3.1⁸⁾をそれぞれ処理した70群構造のJFS-3-J2⁹⁾及びJ3.1¹⁰⁾を用いた。また、本研究の遂行中に公開されたJENDL-3.2¹¹⁾を使った計算も一部行った。JENDL-3.1と3.2の違いがナトリウムボイド反応度値に及ぼす影響は3.3節で議論する。

炉心やブランケットを構成するセルの実効断面積及び拡散係数は、衝突確率法に基づくセル計算コードSLAROM¹²⁾を使って、1次元無限平板モデルにより模擬物質板の非均質性を考慮して求めた。ただし、ブランケット部のウランブロック、ブランケット外周の空のFCA格子管及びXVII-1集合体の炉心上部ナトリウム領域については均質モデルで扱った。拡散係数にはBenoistのモデル¹³⁾による異方性拡散係数を用いた。主要なセルについてのセル計算時のバックリングサーチの有無等のオプション及び無限増倍率 k_{∞} 。(SLAROMのPREPステップで出力されるセルを均質化したモデルで計算した値)をTable 3.1にまとめる。

ナトリウムのボイド状態を模擬するために使用したボイド缶は、ステンレス被覆のみで構成されているために中空の部分を含んでいるが、中空部分をそのままセル計算に取り入れると拡散係数が発散してしまう。一方、ステンレス被覆をボイド缶全体に均質化すると、中空部分の中性子ストリーミングを過小に評価する恐れがある。そこで、ボイド缶を2枚の被覆と中空に分け、中空部分にFCA格子管と引き出し(どちらもステンレス製)の一部を薄めた組成を入れることにより、拡散係数の発散を防止するとともに中性子ストリーミングも考慮した。このモデルの詳細とモデルの相違によるナトリウムボイド反応度値の計算値の変化については3.2節で詳しく述べる。

通常のサンプル反応度値の計算では、サンプルを置換したセルが周りのセルと異なることによる中性子束分布の歪をセルの均質化に取り入れるために、スーパーセルモデルによる計算を行う。しかし、本計算ではNa板がボイド缶となったセルについてのスーパーセル計算は行わず、標準状態のセルと同様に無限セルモデルで計算を行った。これは、ナトリウムボイド反応度値の場合、ナトリウム板の置換前後で主に変化するのは散乱断面積であり、主に吸収断面積や核分裂断面積が変化する通常のサンプル反応度値に比べて中性子束分布の歪みが小さいためである。

体系計算

体系計算では、CITATION-FBRコード¹⁴⁾を使った2次元RZ70群拡散計算を行った。各集合体のRZモ

デルをFig.3.2に示す。体系計算はナトリウムがボイド化する前の標準状態と各ボイド状態について行うが、後述のように1次摂動法により反応度値を計算するステップボイドについてはボイド状態の体系計算は行わなかった。標準状態の体系計算では中性子束分布及び随伴中性子束分布を、ボイド状態の体系計算では中性子束分布のみを求め、次項の摂動計算のために保存する。

体系計算では、セル計算で均質モデルを採用した領域を除き、異方性拡散係数を用いた。異方性拡散係数は模擬物質板に平行な方向のもの ($D_{//}$) と垂直なもの (D_{\perp}) で構成されるが、FCAにおける燃料板及び模擬物質板の配列方向を考慮して、RZモデルにおけるR方向及びZ方向それぞれの拡散係数に

$$D_R = (D_{//} + D_{\perp}) / 2 \quad (3-1)$$

$$D_Z = D_{//} \quad (3-2)$$

を用いた。 D_R に(3-1式)を用いた影響については、3次元XYZ計算と2次元RZ計算の比較により3.2節で述べる。また、軸方向2.54cmとしたメッシュ幅の効果についても3.2節で述べる。体系計算によって得た主要な体系の実効増倍率 k_{eff} をTable 3.2(a)に示す。

XVII-1集合体のみで行った測定についても基本的には上述の体系計算を適用したが、項目H「広領域ボイド」については25群3次元XYZ計算を用いた。この体系計算による k_{eff} をTable 3.2(b)に示す。

摂動計算

体系計算で得た中性子束分布及び随伴中性子束分布と、セル計算で得たボイド化前後の実効断面積を用いて、摂動理論に基づく動特性パラメータ計算コードPERKY¹⁵⁾によりナトリウムボイド反応度値を計算した。ステップボイドについては1次摂動法を、ボイド規模依存性については厳密摂動法を用いた。ステップボイドにおける1次摂動法と厳密摂動法の比較は3.2節で行う。計算結果をXVII-1集合体のみで行った測定に関するものと併せてTable 3.3(a)~(j)に示す。

輸送補正

各体系計算により得た領域毎の70群中性子束分布を用いて断面積を縮約し、25群2次元RZ計算による輸送補正計算を行った。輸送計算では2次元輸送計算コードTWO TRAN-II¹⁶⁾を用い、全断面積 Σ_t の代わりに輸送断面積 Σ_{tr} を使った。輸送計算の近似の次数は S_2-P_0 である。一方、拡散計算では輸送計算と統一をとるため、異方性拡散係数を用いずに $D = 1 / (3 \Sigma_{tr})$ を全方向に使用した。

輸送計算で得た中性子束分布及び随伴中性子束分布を用いて輸送理論に基づく摂動計算コードSNPERT-II¹⁷⁾により輸送理論によるナトリウムボイド反応度値を求める。同様に、拡散理論によるナトリウムボイド反応度値も求め、両者の比から輸送補正係数(輸送理論/拡散理論)を導く。輸送補正係数はナトリウムボイド反応度値の非漏洩項と漏洩項それぞれ別個にもとめ、別々に補正を施した。Table 3.3(a)~(j)に補正係数と70群の摂動計算結果に補正を施した結果をまとめる。

3.2 計算手法に関する考察

前節で説明した計算手法は、十分な計算精度が得られ且つ計算時間ができるだけ短くなるように、いくつかの手法の中から選択した手法である。ここでは、本計算手法の採用に当たって行った計算精度確認のための計算、並びに、計算に際して気をつけなければ大きな誤りを生むと考えられる項目について解説する。

ボイド缶の模擬方法

本計算手法のセル計算では、前節で述べたようにボイド缶を被覆と中空に分けるモデルを採用した。まずこのモデルについて説明し、次にモデルの問題点について考察する。

本モデルでは、厚さ0.635cm (1/4インチ) のボイド缶は、厚さ0.058cmの被覆2枚とその間の厚さ0.519cmの中空から成るとした。中空部分の組成は以下の様にして求める。

現在の標準的なFCAセルの計算(1次元板状)では、燃料や模擬物質板の上下に存在するステンレス鋼製の引き出し及び格子管を燃料以外の模擬物質板に混合し、1セル当たりの実際の原子数と計算上の原子数を一致させている。燃料板に混合しないのは、燃料板に含まれるU-238等の共鳴自己遮蔽効果に対する希釈断面積を保存するためである。1セル(幅5.52cm×高さ5.52cm×奥行5.08cm)当たりに混合すべきステンレス鋼中の各核種の原子数を以下に示す。

$$\begin{aligned} \text{Cr} & : N_{24} = 1.2346 \times 10^{23} \text{ atoms} \\ \text{Mn} & : N_{25} = 6.2679 \times 10^{21} \text{ atoms} \\ \text{Fe} & : N_{26} = 4.4339 \times 10^{23} \text{ atoms} \\ \text{Ni} & : N_{28} = 5.3822 \times 10^{22} \text{ atoms} \end{aligned}$$

ボイド缶の中空部分の組成は、これらの原子数を混合対象の領域に均等に配分することによって決定した。例えばXVII-1集合体の炉心中心部(T2セル)の場合、混合対象となるのは4枚のナトリウム板(厚さ0.635cm)と2枚のアルミナ板(厚さ0.159cm)の計2.858cmであり、中空部分の原子数密度は

$$\begin{aligned} \text{Cr} & : N_{24} / (2.858 \times 5.52 \times 5.08) = 1.5408 \times 10^{21} \text{ atoms/cm}^3 \\ \text{Mn} & : N_{25} / (2.858 \times 5.52 \times 5.08) = 7.8222 \times 10^{19} \text{ atoms/cm}^3 \\ \text{Fe} & : N_{26} / (2.858 \times 5.52 \times 5.08) = 5.5335 \times 10^{21} \text{ atoms/cm}^3 \\ \text{Ni} & : N_{28} / (2.858 \times 5.52 \times 5.08) = 6.7170 \times 10^{21} \text{ atoms/cm}^3 \end{aligned}$$

となる。これはボイド缶の中空部分に1枚当たり約11gのステンレス鋼をスミアしたのに相当する。

次に、実際の中空部分を板に平行方向に取り巻く環境を考えることによって、本モデルの妥当性に

ついて考察する。

ボイド缶の周りには缶の縁部分（厚さ0.04cm）、格子管（厚さ0.10cm）、引き出し（厚さ0.08cm）合わせて約9g（ボイド缶1枚当たり）のステンレス鋼が存在しており、上述の11gとは若干の開きがある。また、この11gという値はナトリウム板の枚数や他の模擬物質板の枚数で変わることも注意を要する。

さらに、板に平行な方向の内でも集合体軸方向にはボイド缶の縁部分しか存在しないのに対し、集合体上下方向には格子管及び引き出しが存在するため、1次元のセル計算では扱えない非均質性もある。加えて、測定を行った中心3行×3列領域には、中心格子管が無い、実験孔用の穴が格子管に空いている等の特異性もある。

このようにボイド缶を精密にモデル化することは極めて困難であり、本研究で採用したモデルも不完全であることは否めない。そこで、モデルの変化に対するナトリウムボイド反応度値の感度を求め、計算の信頼性を明らかにする必要がある。ここでは、ボイド缶の被覆を中空部分にもスミアするモデル、中空部分の原子数密度を本モデルの1.5倍、1/3、1/30、1/1000としたモデル、及び本モデルの6ケースについて、XVII-1集合体の軸方向位置9zにおけるステップボイド反応度値の計算を行い、非漏洩項と漏洩項を分けて比較する。全てのケースでセルに含まれる原子数は保存されている。

計算結果をFig.3.3に示す。図では、中空部分の鉄の原子数密度を横軸にとった。図より、モデルの変化に伴って、非漏洩項はほとんど変化しないのに対して、漏洩項は大きく変化することが分かる。本モデルによる漏洩項は、ナトリウム板及びボイド缶を均質に取り扱う場合に比べて約10%大きくなる。

RZモデルとXYZモデルの比較

XVII-1集合体のステップボイド反応度値の計算を、25群拡散のRZモデル及びXYZモデルで行った結果をTable3.4に示す。RZモデルの拡散係数には(3-1)及び(3-2)式を、XYZモデルの拡散係数には3方向それぞれ D_{\perp} 、 $D_{//}$ 、 $D_{//}$ を用いた。

絶対値の小さな炉心中心での漏洩項を除いて、RZモデルとXYZモデルは良く一致しており、3行×3列領域をRZモデルで模擬すること及び拡散係数に(3-1)及び(3-2)式を用いることの影響は小さいことが分かる。

メッシュ効果

XVII-1集合体のステップボイドについて、7zから11zの間の軸方向（z方向）メッシュを標準（2.54cm間隔）からその半分（1.27cm間隔）と詳細にして体系計算を行い、ナトリウムボイド反応度値を比較した。

標準メッシュ幅の場合と詳細メッシュ幅の場合の比を、非漏洩項と漏洩項に分けてTable 3.5に示す。両項とも標準メッシュと詳細メッシュでほとんど変化しておらず、メッシュ効果が無視できることが分かる。

1次摂動法と厳密摂動法の比較

XVII-1集合体のステップボイド反応度値($1z$ 、 $6z$ 、 $10z$)について1次摂動法と厳密摂動法により行った計算の比較をTable 3.6に示す。非漏洩項では約2%の範囲内で両者は一致するが、漏洩項では絶対値の小さな $1z$ を除いて7~8%1次摂動法の方が大きな絶対値を与えることが分かる。これは、後述するようにPERKYで採用している1次摂動法の定式化に起因するものであり、1次摂動法と厳密摂動法には D/D なる係数が掛かっていることによるものである。この係数は輸送補正を施すことによって相殺されるため、問題とはならない。よって、ステップボイドにおいて1次摂動法を用いた影響は小さい。

移動側集合体の影響

本計算手法では体系計算において1/2炉心モデル ($z=0$ で反射境界条件) を採用している。ここではXVII-1集合体の1-2 z 及び1-15 z ボイドについて、1/2炉心モデル (標準モデル)、移動側集合体3行×3列領域のナトリウムがあらかじめボイドとなっている全炉心モデル (Table 2.5の項目D)に対応)、及び移動側集合体が通常状態のままである全炉心モデル (実際のボイド規模依存性の測定に対応) の3つのモデルで計算を行い、比較した。結果をTable 3.3(g)に示す。

どのモデルで計算を行っても結果はほとんど変わらないことから、1/2モデルによって実験解析を行うことの影響は小さいことが分かる。このことは前章の測定結果とも一致する。

縮約効果

XVII-1集合体の1-15 z ボイド反応度値について、70群と25群で計算した結果をTable 3.7に示す。両計算とも拡散係数には(3-1)及び(3-2)式の定義を用いており、両者の比較から群縮約効果が分かる。表より明らかなように、70群計算と25群計算の差は非常に小さく、輸送補正を25群で行った影響や、広領域ボイドで25群計算を体系計算とした影響は無視できると考えられる。

輸送効果

Table 3.3に示した輸送補正係数を見ると、非漏洩項はブランケット部を除いてほぼ1に近いのに対して、漏洩項は0.7~0.9 (炉心中心部を除く) と拡散計算が中性子漏洩を過大評価する傾向を示している。また、漏洩項についてステップボイドの場合とボイド規模依存性の場合を比べると、前者の方が一様に約1割程度小さな係数 (補正が大きくなる方向) を示していることが分かる。即ち、輸送補正はナトリウムボイド反応度値の計算には欠かせないものであり、かつ、1次摂動と厳密摂動で異なった係数を与えることに注意する必要がある。ここでは1次摂動と厳密摂動で異なった係数となる原因について考察する。

輸送理論に厳密摂動法を適用すると、第 g 群の中性子漏洩項は

$$L_g^{E,T} = \delta \Sigma_{t,g} \cdot \left\{ \phi_g^+ \cdot \phi_g' - 4\pi \langle \phi_g^+ \cdot \phi_g' \rangle \right\} \quad (3-3)$$

で与えられる。ここで、各記号の意味は通常用いられているものと同様であり、摂動分母は省略した。1次摂動の場合は摂動前の中性子束を用いて、

$$L_g^{F,T} = \delta \Sigma_{t,g} \cdot \left\{ \phi_g^+ \cdot \phi_g - 4\pi \langle \phi_g^+ \cdot \phi_g \rangle \right\} \quad (3-4)$$

となる。一方、拡散理論に基づく摂動計算コードPERKY¹⁵⁾で計算される厳密摂動法及び1次摂動法による中性子漏洩項は、

$$L_g^{E,D} = \delta D_g \cdot \nabla \phi_g^+ \cdot \nabla \phi_g' \quad (3-5)$$

$$L_g^{F,D} = \delta D_g \cdot \nabla \phi_g^+ \cdot \nabla \phi_g \quad (3-6)$$

で表される。

次に、(3-3)及び(3-4)式に拡散近似を導入して(3-5)及び(3-6)式と比較する。拡散近似は、角度中性子束に一次の非等方性を仮定し、かつ、中性子流が拡散係数と中性子束の傾きの積によって表される(フィックの法則)とするものであり、次の式で表される。

$$\phi_g(\Omega) = \frac{1}{4\pi} \phi_g + \frac{3}{4\pi} J_g \cdot \Omega \quad J_g = -D_g \cdot \nabla \phi_g \quad (3-7)$$

$$\phi_g^+(\Omega) = \frac{1}{4\pi} \phi_g^+ + \frac{3}{4\pi} J_g^+ \cdot \Omega \quad J_g^+ = -D_g \cdot \nabla \phi_g^+ \quad (3-8)$$

$$D_g = \frac{1}{3\Sigma_{tr,g}} \quad (3-9)$$

これらを(3-3)式に代入すると

$$L_g^{E,T \rightarrow D} = \delta \Sigma_{t,g} \cdot \left\{ -3 J_g^+ \cdot J_g' \right\} = \delta \Sigma_{t,g} \cdot \left\{ -3 D_g D_g' \nabla \phi_g^+ \cdot \nabla \phi_g' \right\} \quad (3-10)$$

となる。高速炉の炉心計算では、散乱の非等方性を近似的に扱う方法として、輸送方程式の全断面積を輸送断面積で置き換えることがあり、ここでもその方法を使っている。よって全断面積の差は

$$\delta \Sigma_{t,g} = \delta \Sigma_{tr,g} = \Sigma_{tr,g}' - \Sigma_{tr,g} = \frac{1}{3D_g'} - \frac{1}{3D_g} = \frac{D_g' - D_g}{-3 D_g' D_g} = \frac{\delta D_g}{-3 D_g' D_g} \quad (3-11)$$

と表され、これを(3-10)式に代入すると、

$$L_g^{E,T \rightarrow D} = \delta D_g \nabla \phi_g^+ \cdot \nabla \phi_g' = L_g^{E,D} \quad (3-12)$$

が得られる。即ち、(3-12)式は(3-5)式と等しく、厳密摂動の場合は輸送理論と拡散理論の差は(3-7)～(3-9)式の拡散近似のみに起因するものである。

一方、1次摂動法である(3-4)式に(3-7)～(3-9)式を代入すると、

$$L_g^{F,T \rightarrow D} = \delta \Sigma_{t,g} \cdot \{ -3 J_g^+ \cdot J_g \} = \delta \Sigma_{t,g} \cdot \{ -3 (D_g)^2 \nabla \phi_g^+ \cdot \nabla \phi_g \} \quad (3-13)$$

となり、さらに(3-11)式を代入すると

$$L_g^{F,T \rightarrow D} = \delta D_g \left(\frac{D_g}{D_g'} \right) \nabla \phi_g^+ \cdot \nabla \phi_g = \left(\frac{D_g}{D_g'} \right) L_g^{F,D} \quad (3-14)$$

となる。(3-14)式と(3-6)を比べると、 (D_g/D_g') なる因子が掛かっており、1次摂動法の場合には輸送理論と拡散理論の差は拡散近似に起因するものだけではないことが分かる。ナトリウムボイド反応度値の場合摂動前後で $D_g < D_g'$ であるから、この因子は1よりも小さくなり、輸送補正係数 $L^{F,T}/L^{F,D}$ 及び $L^{B,T}/L^{B,D}$ は1次摂動法による場合の方が厳密摂動法による場合よりも小さくなるのである。

このように、PERKYで採用されている1次摂動法の式を用いると、厳密摂動法と1次摂動法の間で異なる定義の輸送補正係数を用いることになる。従って、厳密摂動法によって求めた反応度値に1次摂動法によって求めた輸送補正係数を掛けるようなことを行うと、 (D_g/D_g') なる因子が余分に掛かり、誤った補正となってしまうので注意を要する。

3.3 JENDL-3.1とJENDL-3.2の比較

本研究は1990年から1994年までに行われた実験と計算に基づいたものであり、その間にJENDL-3.1は3.2に改訂された(1994年4月)。散乱物質のサンプル反応度値、広領域ナトリウムボイド反応度値、プルトニウム組成効果等の最近行った計算は、JENDL-3としてJENDL-3.2を用いているが、その他の計算にはJENDL-3.1を用いている。そこで、XVI-1、XVI-2、XVII-1の3集合体についてステップボイド反応度値をJENDL-3.2を使って計算し、JENDL-3.1との相違を検討する。

Table 3.8に、JENDL-3.1を使った計算結果に対するJENDL-3.2を使った計算結果の比を示す。XVI-1集合体では非漏洩項及び漏洩項に1～4%の差が見られるが、XVI-1及びXVII-1集合体ではほぼ1%以内でJENDL-3.1と3.2は一致している。JENDL-3.1からJENDL-3.2への改訂では、U-235の断面積が比較的大きく変化しており、炉心中心部にEU板を装荷したXVI-1集合体で変化が見られるのはこのためだと考えられる。

XVI-2集合体とXVII-1集合体で、JENDL-3.1と3.2の相違がほとんど見られないため、全ての計算値

をJENDL-3.2で計算し直すことはしない。以下の議論でJENDL-3と表記されている場合は、JENDL-3.1及び-3.2に共通な事項である。XVI-1の予測精度評価はJENDL-3.1と-3.2の両者で行う。

Table 3.1 Results of cell calculation

Cell name	Parameters in SLAROM			k_{∞}		
	NREG	ICASE	IBSW	JENDL-2	JENDL-3.1	JENDL-3.2
XVI-1						
IC1	27(17) ^{a)}	-1	2	1.4216	1.4244	1.4202
IC1(Na void)	27	-1	2	1.5098	1.5068	1.5023
IC2	15	-1	2	1.4278	1.4304	1.4264
OC1	15	-1	2	1.5635	1.5654	1.5623
OC2	15	-1	2	1.5467	1.5471	1.5482
SCR	21	-1	2	2.0327	2.0501	2.0483
NUB	1	-1	-1	0.4262	0.4238	0.4022 ^{b)}
DUB	1	-1	-1	0.3468	0.3454	0.3214 ^{b)}
XVI-2						
ICA	25(15) ^{a)}	-1	2	1.2421	1.2479	1.2412
ICA(Na void)	25	-1	2	1.3416	1.3381	1.3334
ICB	17	-1	2	1.2331	1.2396	1.2324
OC1A	17	-1	2	1.6695	1.6706	1.6689
OC1B	15	-1	2	1.6730	1.6742	1.6724
OC2	15	-1	2	1.6751	1.6784	1.6781
SCR	21	-1	2	2.0318	2.0492	2.0474
NUB	1	0	1	0.4356	0.4330	0.4022 ^{b)}
DUB	1	0	1	0.3555	0.3539	0.3214 ^{b)}
XVII-1						
T2	21	-1	2	1.2423	1.2616	1.2524
T2(Na void)	21	-1	2	1.2960	1.3106	1.3031
SB	21	-1	1	0.2292	0.2331	0.2179
SB(Na void)	21	-1	1	0.2450	0.2478	0.2314
PD	15	-1	2	1.6694	1.6759	1.6775
UD	15	-1	2	1.6896	1.6917	1.6982
SCR	21	-1	2	2.0318	2.0492	2.0474
NUB	3	0	-1	0.4262	0.4238	0.4022 ^{b)}
DUB	3	0	-1	0.3468	0.3454	0.3214 ^{b)}

- a) Numbers in parentheses indicate the case for homogenized sodium plate model.
b) Calculated using the parameters of NREG=1, ICASE=0 and IBSW=-1.

Table 3.2(a) Results of core calculation (70-group RZ-model)

Core name	Core condition	k_{eff}		
		JENDL-2	JENDL-3.1	JENDL-3.2
XVI-1	Standard	1.00235	0.99715	0.99201
	1-2z void	1.00270	0.99783	
	1-6z void	1.00299	0.99808	
	1-9z void	1.00269	0.99777	
XVI-2	Standard	1.00047	0.99647	0.99475
	1-2z void	1.00068	0.99666	
	1-6z void	1.00092	0.99686	
	1-9z void	1.00088	0.99681	
XVII-1	Standard	1.00363	1.00102	0.99682
	1-2z void	1.00387	1.00122	
	1-6z void	1.00408	1.00136	
	1-9z void	1.00390	1.00115	
	1-15z void	1.00370	1.00094	
	3-15z void	1.00346	1.00075	
	7-15z void	1.00326	1.00062	
	10-15z void	1.00345	1.00083	
XVII-1 with sodium layer	Standard	1.00267	0.99999	
	1-2z void	1.00291	1.00018	
	1-6z void	1.00311	1.00031	
	1-9z void	1.00285	1.00003	
	1-15z void	1.00155	0.99871	
	3-15z void	1.00132	0.99852	
	7-15z void	1.00116	0.99843	
	10-15z void	1.00149	0.99878	
	10-15z void(half)	1.00226	0.99956	

Table 3.2(b) Results of core calculation (Large region void in FCA XVII-1 calculated by 25-group XYZ-model)

Void region	k_{eff}	
	JENDL-2	JENDL-3.2
No void	0.99664	0.98965
Central 5×5	0.99674	0.98933
12 drawers at off center (X)	0.99655	0.98936
12 drawers at off center (Y)	0.99653	0.98934
24 drawers at off center (X+Y)	0.99645	0.98908

Table 3.3(a) Calculated sodium void worths in FCA XVI-1

Position	Non-leakage term		Leakage term		T.C. factor ^{a)}		Corrected N-L. ^{c)}		Corrected L. ^{c)}		Final result	
	J-2 ^{b)}	J-3.1 ^{b)}	J-2	J-3.1	N-L. ^{c)}	L. ^{c)}	J-2	J-3.1	J-2	J-3.1	J-2	J-3.1
Step void	$(10^{-4} \Delta k/k)$		$(10^{-4} \Delta k/k)$				$(10^{-4} \Delta k/k)$		$(10^{-4} \Delta k/k)$		$(10^{-4} \Delta k/k)$	
1z	0.9316	0.8493	-0.0414	-0.0410	1.039	0.524	0.9678	0.8823	-0.0217	-0.0215	0.9461	0.8608
2z	0.9043	0.8243	-0.0891	-0.0877	1.039	0.663	0.9396	0.8565	-0.0591	-0.0581	0.8805	0.7983
3z	0.8521	0.7765	-0.1811	-0.1778	1.038	0.729	0.8847	0.8062	-0.1319	-0.1296	0.7528	0.6766
4z	0.7796	0.7101	-0.3112	-0.3054	1.038	0.755	0.8091	0.7370	-0.2351	-0.2307	0.5741	0.5063
5z	0.6933	0.6312	-0.4703	-0.4615	1.037	0.769	0.7191	0.6548	-0.3615	-0.3547	0.3576	0.3000
6z	0.6015	0.5476	-0.6472	-0.6352	1.036	0.776	0.6233	0.5674	-0.5025	-0.4931	0.1209	0.0743
7z	0.5139	0.4681	-0.8285	-0.8133	1.026	0.782	0.5271	0.4801	-0.6475	-0.6356	-0.1204	-0.1555
8z	0.4402	0.4020	-1.0001	-0.9815	1.019	0.785	0.4488	0.4098	-0.7852	-0.7706	-0.3365	-0.3608
9z	0.3883	0.3569	-1.1509	-1.1262	1.005	0.784	0.3901	0.3586	-0.9021	-0.8827	-0.5120	-0.5242
Void volume dependence												
1-2z	1.8599	1.7060	-0.1314	-0.1312	1.045	0.719	1.9436	1.7827	-0.0944	-0.0944	1.8492	1.6884
1-6z	4.8444	4.4452	-1.6751	-1.6527	1.047	0.881	5.0730	4.6550	-1.4761	-1.4565	3.5969	3.1986
1-9z	6.2139	5.7042	-4.5563	-4.4840	1.043	0.906	6.4817	5.9501	-4.1294	-4.0639	2.3522	1.8861

a) T.C. : Transport correction. b) J-2 : JENDL-2 J-3.1 : JENDL-3.1 c) N-L. : Non-leakage term L. : Leakage term.

Table 3.3(b) Calculated sodium void worth in FCA XVI-2

Position	Non-leakage term		Leakage term		T.C. factor ^{a)}		Corrected N-L. ^{c)}		Corrected L. ^{c)}		Final result	
	J-2 ^{b)}	J-3.1 ^{b)}	J-2	J-3.1	N-L. ^{c)}	L. ^{c)}	J-2	J-3.1	J-2	J-3.1	J-2	J-3.1
Step void	(10 ⁻⁴ Δk/k)		(10 ⁻⁴ Δk/k)				(10 ⁻⁴ Δk/k)		(10 ⁻⁴ Δk/k)		(10 ⁻⁴ Δk/k)	
1z	1.0767	0.9560	-0.0079	-0.0081	0.982	0.132	1.0574	0.9388	-0.0010	-0.0011	1.0563	0.9377
2z	1.0440	0.9268	-0.0407	-0.0406	0.985	0.641	1.0283	0.9129	-0.0261	-0.0260	1.0022	0.8869
3z	0.9809	0.8706	-0.1042	-0.1032	0.985	0.716	0.9662	0.8576	-0.0746	-0.0739	0.8916	0.7836
4z	0.8927	0.7921	-0.1937	-0.1917	0.985	0.739	0.8793	0.7802	-0.1432	-0.1417	0.7361	0.6386
5z	0.7864	0.6978	-0.3027	-0.2995	0.985	0.750	0.7746	0.6873	-0.2271	-0.2246	0.5476	0.4627
6z	0.6711	0.5957	-0.4230	-0.4187	0.984	0.756	0.6604	0.5862	-0.3198	-0.3165	0.3406	0.2697
7z	0.5565	0.4948	-0.5453	-0.5401	0.984	0.760	0.5476	0.4869	-0.4144	-0.4104	0.1332	0.0765
8z	0.4522	0.4040	-0.6606	-0.6546	0.981	0.764	0.4436	0.3963	-0.5047	-0.5001	-0.0611	-0.1038
9z	0.3655	0.3301	-0.7646	-0.7570	0.971	0.762	0.3549	0.3205	-0.5826	-0.5769	-0.2277	-0.2564
Void volume dependence												
1-2z	2.1337	1.8975	-0.0518	-0.0518	0.989	0.684	2.1102	1.8766	-0.0355	-0.0354	2.0748	1.8412
1-6z	5.5128	4.9048	-1.0475	-1.0381	0.991	0.854	5.4632	4.8606	-0.8945	-0.8865	4.5686	3.9742
1-9z	6.9165	6.1621	-2.9683	-2.9432	0.992	0.868	6.8612	6.1129	-2.5765	-2.5547	4.2847	3.5582

a) T.C. : Transport correction. b) J-2 : JENDL-2 J-3.1 : JENDL-3.1 c) N-L. : Non-leakage term L. : Leakage term.

Table 3.3(c) Calculated sodium void worth in FCA XVII-1

Position	Non-leakage term		Leakage term		T.C. factor ^{a)}		Corrected N-L. ^{c)}		Corrected L. ^{c)}		Final result	
	J-2 ^{b)}	J-3.1 ^{b)}	J-2	J-3.1	N-L. ^{c)}	L. ^{c)}	J-2	J-3.1	J-2	J-3.1	J-2	J-3.1
Step void	$(10^{-4} \Delta k/k)$		$(10^{-4} \Delta k/k)$				$(10^{-4} \Delta k/k)$		$(10^{-4} \Delta k/k)$		$(10^{-4} \Delta k/k)$	
1z	0.6235	0.5125	-0.0077	-0.0085	0.992	0.279	0.6185	0.5084	-0.0022	-0.0024	0.6164	0.5061
2z	0.6028	0.4957	-0.0357	-0.0367	0.992	0.703	0.5980	0.4918	-0.0251	-0.0258	0.5729	0.4660
3z	0.5630	0.4635	-0.0896	-0.0913	0.992	0.776	0.5585	0.4598	-0.0695	-0.0708	0.4889	0.3890
4z	0.5073	0.4184	-0.1656	-0.1682	0.993	0.798	0.5037	0.4155	-0.1322	-0.1342	0.3716	0.2813
5z	0.4402	0.3644	-0.2581	-0.2619	0.995	0.807	0.4380	0.3625	-0.2083	-0.2114	0.2298	0.1512
6z	0.3675	0.3059	-0.3599	-0.3653	0.997	0.811	0.3664	0.3050	-0.2918	-0.2962	0.0745	0.0087
7z	0.2952	0.2482	-0.4623	-0.4696	1.000	0.814	0.2952	0.2482	-0.3763	-0.3822	-0.0811	-0.1341
8z	0.2293	0.1964	-0.5548	-0.5642	1.004	0.817	0.2302	0.1972	-0.4533	-0.4610	-0.2231	-0.2638
9z	0.1745	0.1548	-0.6231	-0.6342	0.992	0.821	0.1731	0.1536	-0.5116	-0.5207	-0.3385	-0.3671
10z	0.1323	0.1244	-0.5122	-0.5259	0.948	0.808	0.1255	0.1180	-0.4138	-0.4250	-0.2884	-0.3070
11z	0.0852	0.0831	-0.3172	-0.3312	0.944	0.791	0.0804	0.0785	-0.2509	-0.2619	-0.1705	-0.1835
Void volume dependence												
1-2z	1.2481	1.0294	-0.0535	-0.0556	0.995	0.701	1.2419	1.0243	-0.0375	-0.0390	1.2043	0.9853
1-6z	3.1761	2.6276	-0.9264	-0.9418	0.996	0.892	3.1634	2.6171	-0.8263	-0.8401	2.3370	1.7770
1-9z	3.8962	3.2470	-2.5544	-2.5970	0.997	0.910	3.8845	3.2373	-2.3245	-2.3633	1.5600	0.8740
1-15z	4.1908	3.5325	-3.8205	-3.9198	0.995	0.906	4.1699	3.5148	-3.4613	-3.5514	0.7085	-0.0365

a) T.C. : Transport correction. b) J-2 : JENDL-2 J-3.1 : JENDL-3.1 c) N-L. : Non-leakage term L. : Leakage term.

Table 3.3(d) Calculated results for extra measurements in FCA XVII-1
 A) Sample worths of scattering material (Exact perturbation theory)

Item	Non-leakage term		Leakage term		T.C. factor ^{a)}		Reactivity worth		Remarks
	JENDL-2	JENDL-3.1	JENDL-2	JENDL-3.1	N-L. ^{b)}	L. ^{b)}	JENDL-2	JENDL-3.1	
Carbon (912.1g)	2.1207	1.5454	-0.0790	-0.0810	0.969	0.695	2.0007	1.4417	($10^{-4} \Delta k/k$)
Carbon (453.5g)	1.2230	0.9255	-0.0169	-0.0184	0.979	0.453	1.1897	0.8977	
Aluminum (777.4g)	1.1803	1.0034	-0.0056	-0.0053	0.986	0.289	1.1617	0.9875	

a) T.C. : Transport correction. b) N-L. : Non-leakage term L. : Leakage term.

Table 3.3(e) Calculated results for extra measurements in PCA XVIII-1
 B) Influence of sodium layer

Position	Non-leakage term		Leakage term		T.C. factor ^{a)}		Corrected N-L ^{c)}		Corrected L ^{c)}		Final result	
	J-2 ^{b)}	J-3.1 ^{b)}	J-2	J-3.1	N-L ^{c)}	L ^{c)}	J-2	J-3.1	J-2	J-3.1	J-2	J-3.1
Step void	$(10^{-4} \Delta k/k)$											
1z	0.6221	0.5111	-0.0078	-0.0086	0.993	0.269	0.6177	0.5075	-0.0021	-0.0023	0.6156	0.5052
2z	0.6006	0.4936	-0.0370	-0.0382	0.993	0.693	0.5964	0.4902	-0.0257	-0.0264	0.5708	0.4637
3z	0.5593	0.4600	-0.0936	-0.0955	0.994	0.763	0.5559	0.4572	-0.0714	-0.0729	0.4845	0.3844
4z	0.5009	0.4126	-0.1740	-0.1770	0.996	0.784	0.4989	0.4110	-0.1364	-0.1388	0.3626	0.2722
5z	0.4299	0.3550	-0.2735	-0.2782	1.000	0.791	0.4299	0.3550	-0.2164	-0.2201	0.2134	0.1349
6z	0.3511	0.2912	-0.3867	-0.3934	1.007	0.793	0.3536	0.2932	-0.3067	-0.3120	0.0469	-0.0188
7z	0.2703	0.2259	-0.5079	-0.5171	1.017	0.793	0.2749	0.2298	-0.4025	-0.4099	-0.1276	-0.1801
8z	0.1929	0.1636	-0.6310	-0.6433	1.036	0.791	0.1999	0.1695	-0.4990	-0.5087	-0.2991	-0.3392
9z	0.1244	0.1086	-0.7454	-0.7611	1.045	0.790	0.1300	0.1135	-0.5886	-0.6010	-0.4586	-0.4875
10z	0.1467	0.1289	-2.0852	-2.0875	0.977	0.486	0.1434	0.1259	-1.0143	-1.0154	-0.8709	-0.8895
11z	0.0974	0.0868	-1.6787	-1.6814	0.985	0.480	0.0959	0.0854	-0.8058	-0.8071	-0.7098	-0.7216
12z	0.0636	0.0575	-1.3122	-1.3187	1.052	0.473	0.0670	0.0605	-0.6207	-0.6237	-0.5537	-0.5632
10z(A-pattern)	0.0719	0.0630	-0.6561	-0.6690	0.976	0.706	0.0702	0.0615	-0.4634	-0.4725	-0.3932	-0.4110
11z(A-pattern)	0.0475	0.0422	-0.5330	-0.5448	0.984	0.693	0.0467	0.0415	-0.3693	-0.3774	-0.3225	-0.3359
12z(A-pattern)	0.0310	0.0279	-0.4181	-0.4291	1.052	0.681	0.0326	0.0294	-0.2846	-0.2921	-0.2520	-0.2627
Void volume dependence												
1-2z	1.2445	1.0258	-0.0550	-0.0572	0.996	0.692	1.2395	1.0217	-0.0381	-0.0396	1.2014	0.9821
1-6z	3.1340	2.5892	-0.9808	-0.9989	1.000	0.876	3.1340	2.5892	-0.8590	-0.8748	2.2750	1.7143
1-9z	3.7407	3.1065	-2.8514	-2.9043	1.005	0.885	3.7594	3.1221	-2.5242	-2.5709	1.2352	0.5511
1-15z	4.0932	3.4256	-9.8235	-9.9513	1.014	0.738	4.1505	3.4736	-7.2524	-7.3467	-3.1018	-3.8731

a) T.C. : Transport correction. b) J-2 : JENDL-2 J-3.1 : JENDL-3.1 c) N-L : Non-leakage term L : Leakage term.

Table 3.3(f) Calculated results for extra measurements in FCA XVII-1
 C) Decrease of sodium level (Exact perturbation theory)

Item	Non-leakage term		Leakage term		T.C. factor ^{a)}		Reactivity worth		Sodium level	
	J-2 ^{b)}	J-3.1 ^{b)}	J-2	J-3.1	N-L. ^{c)}	L. ^{c)}	J-2	J-3.1		
XVII-1	(10 ⁻⁴ Δk/k)									
	10-15z void	0.2925	0.2836	-1.1845	-1.2402	0.965	0.891	-0.7731	-0.8314	-30.48cm
	7-15z void	1.0054	0.8968	-2.8073	-2.8916	0.992	0.908	-1.5517	-1.7359	-45.72cm
	3-15z void	2.9264	2.4898	-3.7402	-3.8381	0.995	0.908	-0.4843	-1.0077	-66.04cm
1-15z void	4.1908	3.5325	-3.8205	-3.9198	0.995	0.906	0.7085	-0.0365	-76.20cm	
XVII-1(37Na)	(10 ⁻⁴ Δk/k)									
	10-15z void	0.3633	0.3261	-6.5185	-6.6009	1.087	0.682	-4.0511	-4.1478	-30.48cm
	10-15z half void	0.1809	0.1615	-2.2665	-2.3300	1.057	0.792	-1.6039	-1.6747	-30.48cm
	7-15z void	0.9580	0.8343	-8.6642	-8.7781	1.059	0.723	-5.2500	-5.4632	-45.72cm
3-15z void	2.8333	2.3872	-9.7329	-9.8596	1.023	0.738	-4.2837	-4.8335	-66.04cm	
1-15z void	4.0932	3.4256	-9.8235	-9.9513	1.014	0.738	-3.1018	-3.8731	-76.20cm	

a) T.C. : Transport correction. b) J-2 : JENDL-2 J-3.1 : JENDL-3.1 c) N-L. : Non-leakage term L. : Leakage term.

Table 3.3(g) Calculated results for extra measurements in FCA XVII-1

D) Influence of movable side (Calculated with JENDL-2. No transport correction.)

Void region	Reflective condition at z=0 (standard)		M:3 × 3:1-15z ; Na voided		Na void only in fixed side	
	Non-leakage	Leakage	Non-leakage	Leakage	Non-leakage	Leakage
	(10 ⁻⁴ Δk/k)		(10 ⁻⁴ Δk/k)		(10 ⁻⁴ Δk/k)	
1-2z	1.2481	-0.0535	1.2475	-0.0515	1.2430	-0.0496
1-15z	4.1908	-3.8205	4.1890	-3.8166	4.1812	-3.8134
	Total		Total		Total	
	(10 ⁻⁴ Δk/k)		(10 ⁻⁴ Δk/k)		(10 ⁻⁴ Δk/k)	
	1.1946	0.3703	1.1960	0.3724	1.1933	0.3679

Table 3.3(h) Calculated results for extra measurements in FCA XVII-1
 F) Influence of perpendicular cells (Calculated with JENDL-3.1)

Item	Non-leakage term		Leakage term		T.C. factor ^{a)}		Reactivity worth		Remarks
	Standard ^{b)}	Perpendicular ^{b)}	Standard	Perpendicular	N-L. ^{c)}	L. ^{c)}	Standard	Perpendicular	
	$(10^{-4} \Delta k/k)$		$(10^{-4} \Delta k/k)$				$(10^{-4} \Delta k/k)$		
7z void	0.2482	0.2513	-0.4696	-0.3656	1.000	0.814	-0.1341	-0.0449	FOP ^{d)}
8z void	0.1964	0.1987	-0.5642	-0.4409	1.004	0.817	-0.2638	-0.1595	FOP
9z void	0.1548	0.1569	-0.6342	-0.4986	0.992	0.821	-0.3671	-0.2532	FOP
10z void	0.1244	0.1265	-0.5259	-0.4188	0.948	0.808	-0.3070	-0.2185	FOP
11z void	0.0831	0.0845	-0.3312	-0.2588	0.944	0.791	-0.1835	-0.1247	FOP
12z void	0.0491	0.0500	-0.1968	-0.1513	0.944	0.785	-0.1072	-0.0704	FOP
10-15z void	0.2836	0.2872	-1.2402	-0.9696	0.965	0.891	-0.8314	-0.5837	EOP ^{e)}

a) T.C. : Transport correction. b) Cell arrangement c) N-L : Non-leakage term L. : Leakage term.
 d) FOP : 1st. order perturbation theory. EP : Exact perturbation theory.

Table 3.3(i) Calculated results for extra measurements in FCA XVII-1
 H) Large region void (Exact perturbation theory)

Item	Non-leakage term		Leakage term		T.C. factor ^{d)}		Reactivity worth		Remarks
	J-2 ^{b)}	J-3.2 ^{b)}	J-2	J-3.2	N-L. ^{c)}	L. ^{c)}	J-2	J-3.2	
	$(10^{-4} \Delta k/k)$		$(10^{-4} \Delta k/k)$				$(10^{-4} \Delta k/k)$		
Central 5x5 drawers	11.3743	9.7133	-10.5718	-10.9613	0.998	0.911	1.7125	-0.2995	70-group RZ-model
Central 5x5 drawers	11.4964	9.8146	-10.8631	-11.2289	0.998	0.911	1.5688	-0.4422	25-group XYZ-model
12 drawers at off center (X)	4.5845	3.8620	-5.0068	-5.1819	0.996	0.889	0.1148	-0.7608	25-group XYZ-model
12 drawers at off center (Y)	4.5253	3.8195	-5.0535	-5.2422	0.996	0.889	0.0144	-0.8569	25-group XYZ-model
24 drawers at off center (X+Y)	9.1482	7.7124	-10.0681	-10.4256	0.996	0.889	0.1606	-1.5882	25-group XYZ-model

a) T.C. : Transport correction. b) J-2 : JENDL-2 J-3.2 : JENDL-3.2 c) N-L. : Non-leakage term L. : Leakage term.

Table 3.3(j) Calculated results for extra measurements in FCA XVII-1
 1) Influence of plutonium composition

Item	Non-leakage term		Leakage term		T.C. factor ^{a)}		Reactivity worth		Remarks
	J-2 ^{b)}	J-3.2 ^{b)}	J-2	J-3.2	N-L. ^{c)}	L. ^{c)}	J-2	J-3.2	
F ₃ M:5×5:1-3z; Pu(92) → Pu(75)	(10 ⁻⁴ Δk/k)		(10 ⁻⁴ Δk/k)				(10 ⁻⁴ Δk/k)		
	0.7347	0.6341	-0.0060	-0.0066	0.992	0.216	0.7274	0.6275	
	0.7025	0.6047	-0.0310	-0.0324	0.993	0.701	0.6760	0.5778	
1-2z void	1.4631	1.2768	-0.0466	-0.0487	0.997	0.698	1.4267	1.2394	
F ₃ M:5×5:1-3z; Pu(92) → Pu(81)	0.6884	0.5799	-0.0076	-0.0082	0.993	0.285	0.6815	0.5736	
	0.6609	0.5560	-0.0354	-0.0368	0.996	0.704	0.6330	0.5276	
	1.3746	1.1745	-0.0531	-0.0554	0.999	0.705	1.3362	1.1346	

a) T.C. : Transport correction. b) J-2 : JENDL-2 J-3.2 : JENDL-3.2 c) N-L : Non-leakage term L. : Leakage term.

Table 3.4 Comparison between RZ and XYZ-model
(Calculated with JENDL-2 for 1z, 6z and 10z step void in FCA XVII-1)

Axial position	Non-leakage term			Leakage term		
	RZ ^{a)}	XYZ ^{b)}	RZ/XYZ	RZ ^{a)}	XYZ ^{b)}	RZ/XYZ
	(10 ⁻⁴ Δk/k)	(10 ⁻⁴ Δk/k)		(10 ⁻⁴ Δk/k)	(10 ⁻⁴ Δk/k)	
1z	0.6459	0.6482	0.996	-0.0084	-0.0088	0.955
6z	0.3803	0.3818	0.996	-0.3714	-0.3737	0.994
10z	0.1358	0.1365	0.995	-0.5268	-0.5303	0.993

a) 25-group RZ-model with $D_R = (D_{\perp} + D_{\parallel}) / 2$ and $D_Z = D_{\parallel}$.

b) 25-group XYZ-model with $D_X = D_{\perp}$ and $D_Y = D_Z = D_{\parallel}$.

Table 3.5 Mesh effect
(Calculated with JENDL-2 for step void in FCA XVII-1)

Axial position	Non-leakage term			Leakage term		
	SM ^{a)}	FM ^{b)}	SM/FM	SM ^{a)}	FM ^{b)}	SM/FM
	(10 ⁻⁴ Δk/k)	(10 ⁻⁴ Δk/k)		(10 ⁻⁴ Δk/k)	(10 ⁻⁴ Δk/k)	
7z	0.2952	0.2950	1.001	-0.4623	-0.4626	0.999
8z	0.2293	0.2292	1.000	-0.5548	-0.5552	0.999
9z	0.1745	0.1745	1.000	-0.6231	-0.6234	0.999
10z	0.1323	0.1322	1.001	-0.5122	-0.5109	1.002
11z	0.0852	0.0851	1.001	-0.3172	-0.3161	1.003

a) Standard mesh width (2.54 cm in axial direction).

b) Fine mesh width (1.27 cm in axial direction).

Table 3.6 Comparison between exact perturbation and first order perturbation theory
(Calculated with JENDL-2 for 1z, 6z and 10z step void in FCA XVII-1)

Axial position	Non-leakage term			Leakage term		
	FOP ^{a)}	EP ^{b)}	FOP/EP	FOP ^{a)}	EP ^{b)}	FOP/EP
	($10^{-4} \Delta k/k$)	($10^{-4} \Delta k/k$)		($10^{-4} \Delta k/k$)	($10^{-4} \Delta k/k$)	
1z	0.6235	0.6319	0.987	-0.0077	-0.0118	0.654
6z	0.3675	0.3712	0.990	-0.3599	-0.3351	1.074
10z	0.1323	0.1296	1.021	-0.5122	-0.4743	1.080

a) FOP : First order perturbation theory.

b) EP : Exact perturbation theory.

Table 3.7 Group collapsing effect
(Calculated with JENDL-2 for 1-15z void in FCA XVII-1)

Number of groups	Non-leakage term	Leakage term
70-group ($10^{-4} \Delta k/k$)	4.1908	-3.8205
25-group ($10^{-4} \Delta k/k$)	4.1864	-3.8008
25-group / 70-group	0.999	0.995

Table 3.8 Ratios of sodium void reactivity worths calculated with JENDL-3.2 to those with JENDL-3.1

Position	XVI-1		XVI-2		XVII-1	
	Non-leakage term	Leakage term	Non-leakage term	Leakage term	Non-leakage term	Leakage term
1z	0.962	1.018	0.996	0.962	0.997	0.982
2z	0.962	1.022	0.996	0.996	0.997	1.006
3z	0.963	1.023	0.997	1.000	0.997	1.010
4z	0.964	1.024	0.998	1.001	0.997	1.011
5z	0.965	1.025	1.000	1.001	0.996	1.011
6z	0.968	1.025	1.002	1.001	0.996	1.011
7z	0.971	1.026	1.005	1.001	0.996	1.011
8z	0.977	1.028	1.009	1.001	0.997	1.011
9z	0.988	1.035	1.011	1.002	0.997	1.011
10z					0.996	1.013
11z					1.000	1.011

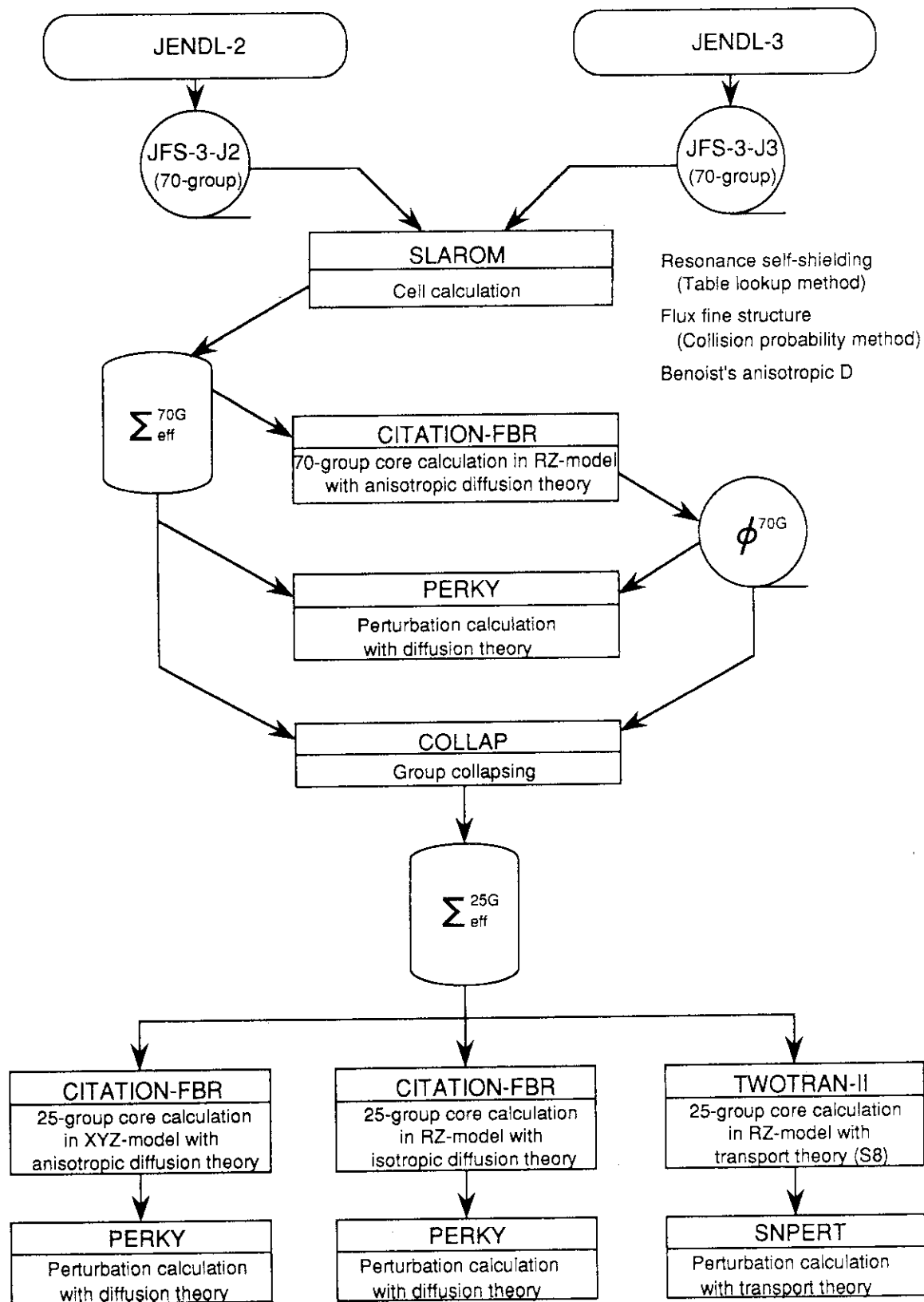


Fig.3.1 Calculation method for sodium void reactivity worths

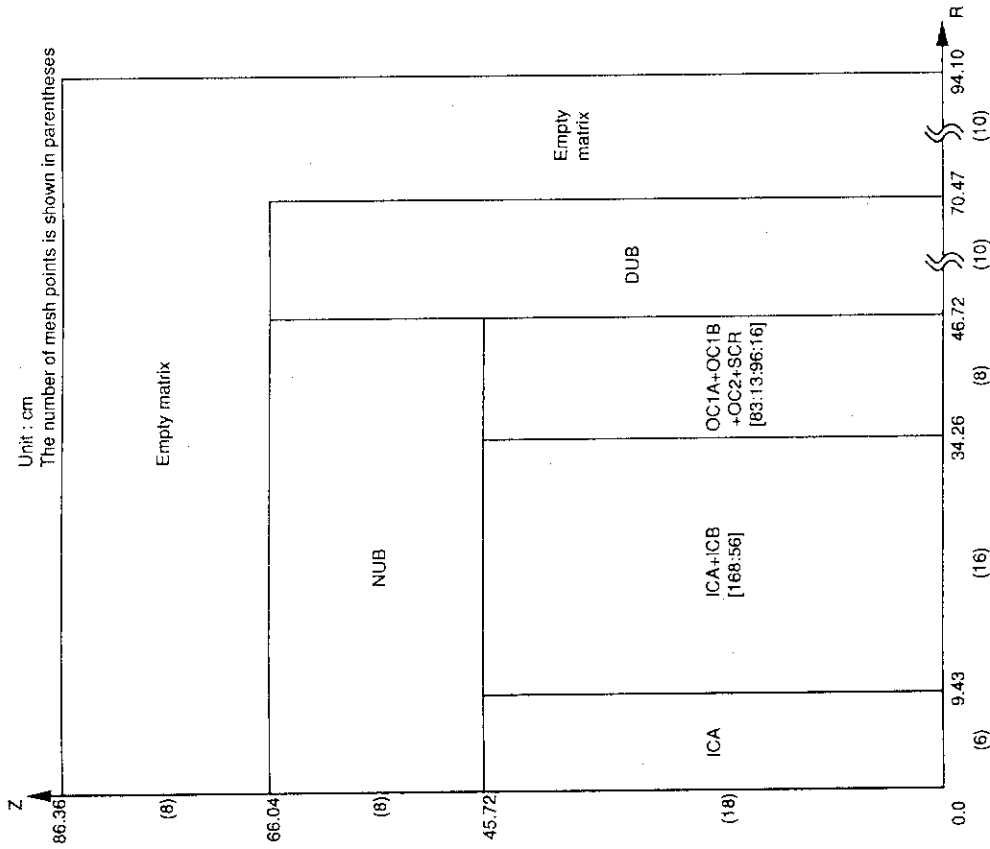


Fig. 3.2(b) RZ-model of FCA XVI-2

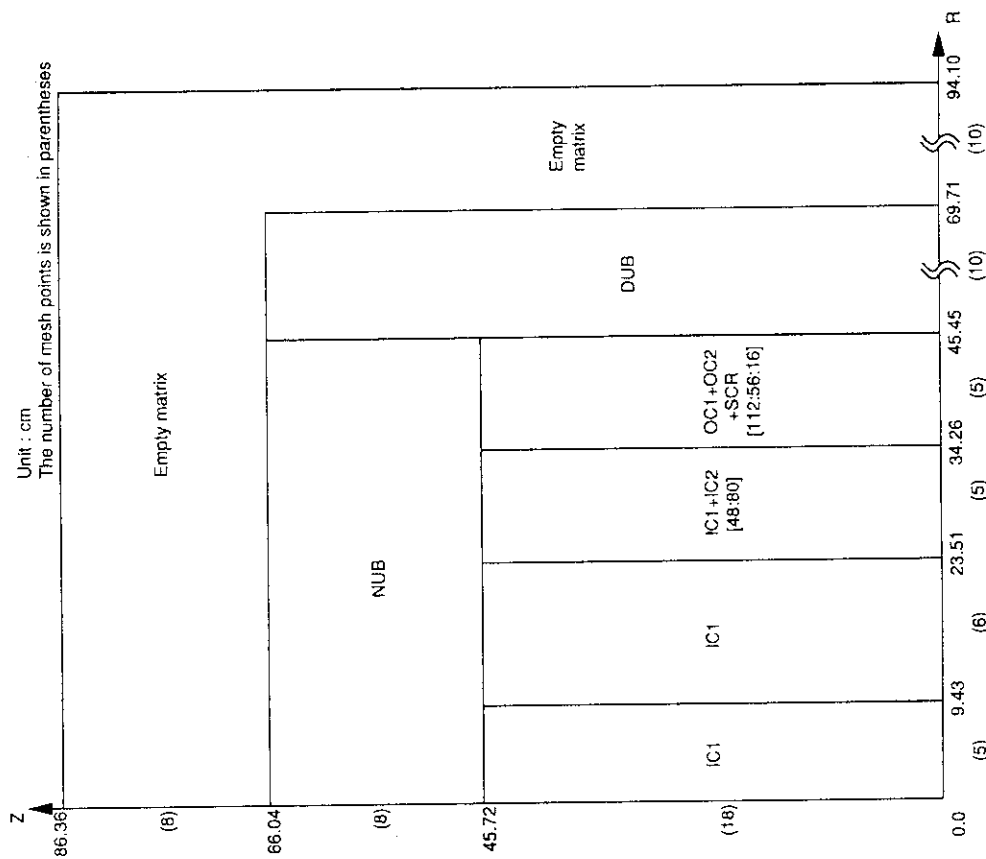


Fig. 3.2(a) RZ-model of FCA XVI-1

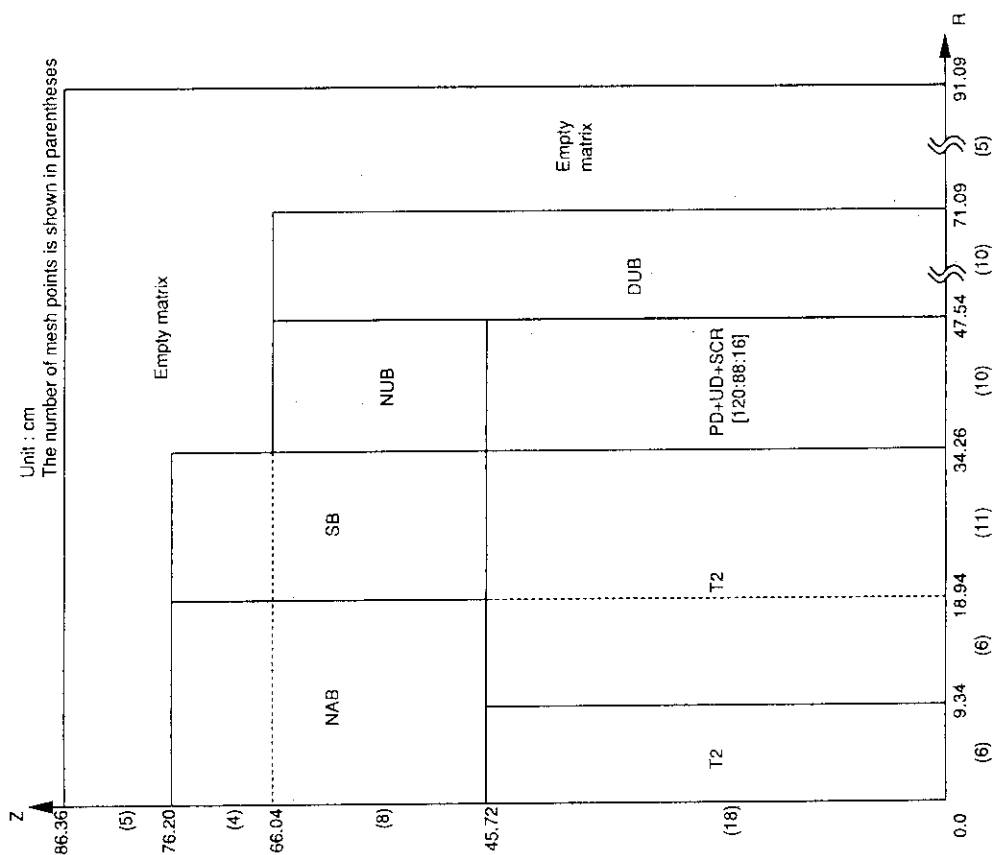


Fig. 3.2(d) RZ-model of FCA XVII-1 with sodium layer

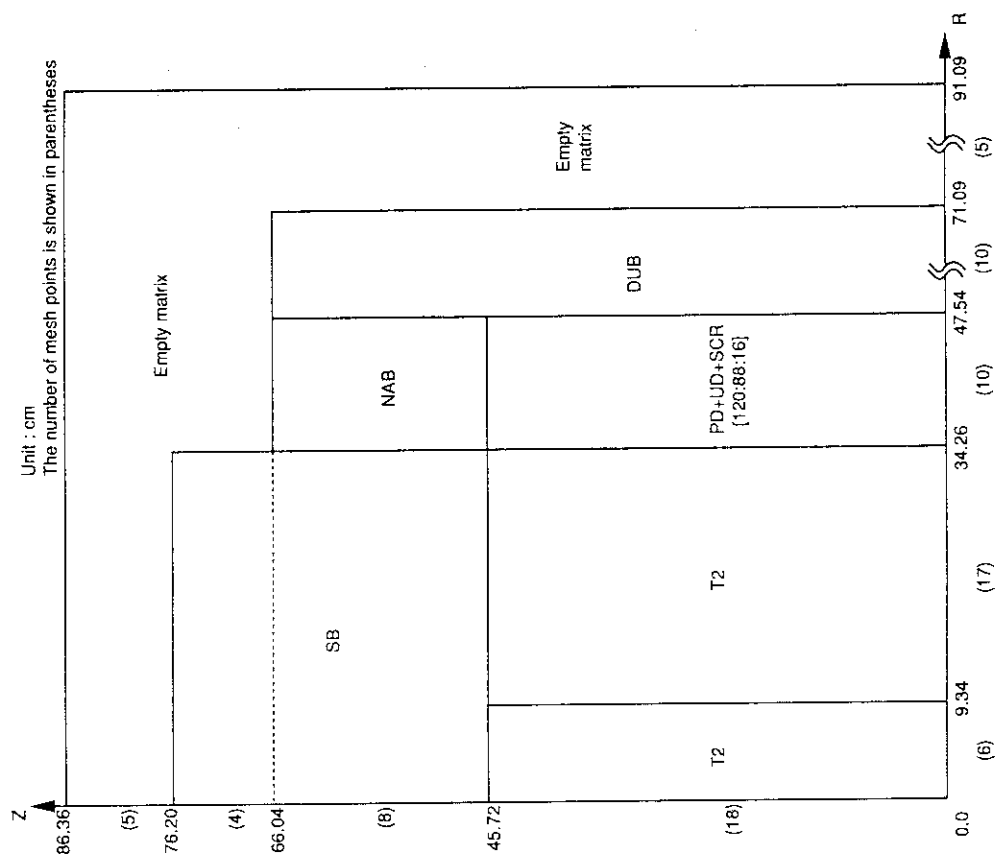


Fig. 3.2(c) RZ-model of FCA XVII-1

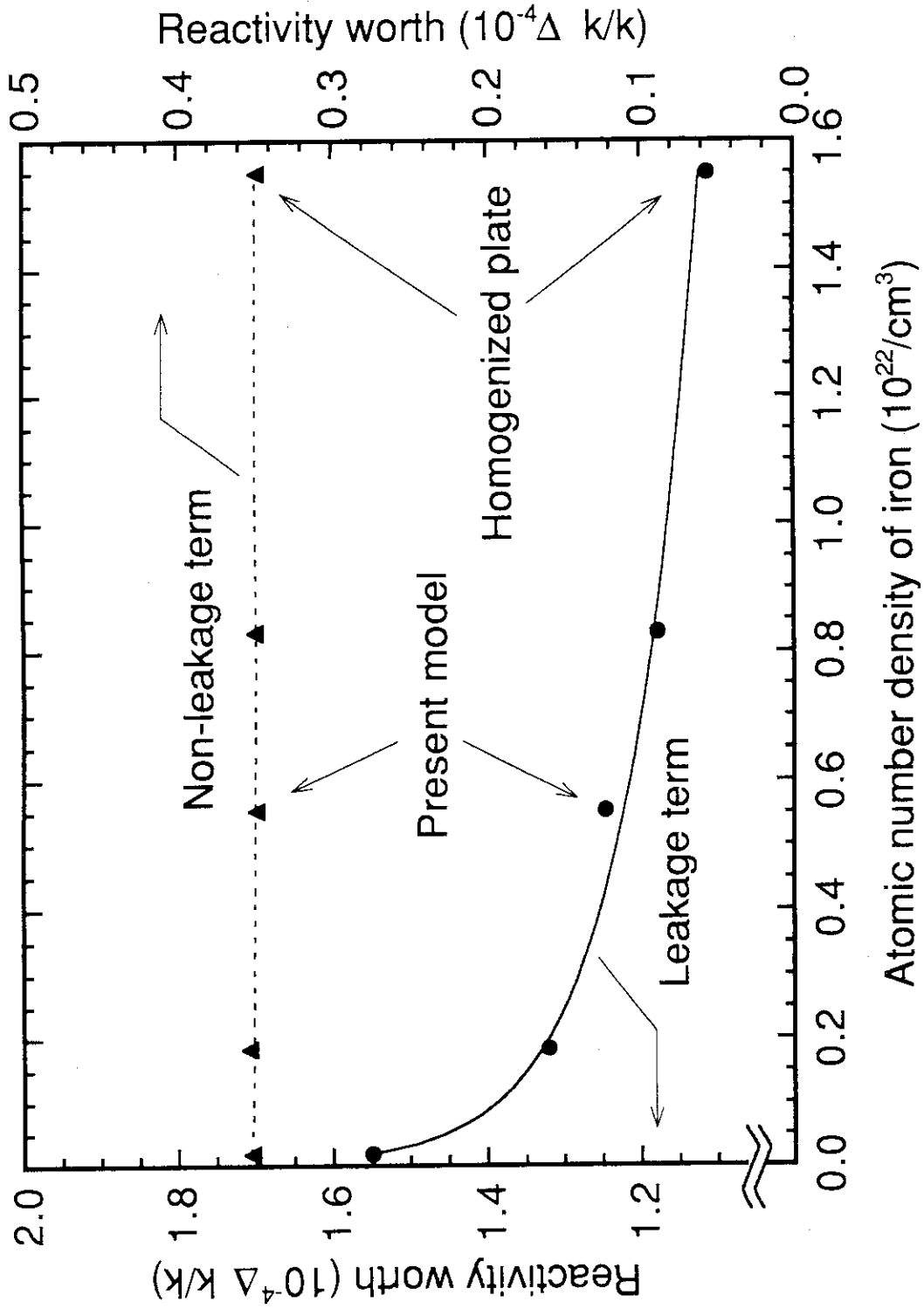


Fig. 3.3 Relationship between cell model and sodium void reactivity worth

4. ナトリウムボイド反応度値の計算精度評価

本章では、まず各集合体共通で行った測定について実験と計算を比較し、その結果を基にナトリウムボイド反応度値のJENDL-2及びJENDL-3による計算精度を評価する。計算精度の評価は非漏洩項及び漏洩項に分けて行い、さらに、計算精度のボイド規模依存性についても考察する。

その後、XVII-1集合体のみで行った測定について考察を行い、非漏洩項及び漏洩項についてのより詳細な検討を加えると共に、ナトリウム層がある時のナトリウムボイド反応度値やプルトニウム組成のナトリウムボイド反応度値に及ぼす影響等について検討する。

各集合体でのステップボイド反応度値及びボイド規模依存性の測定並びにXVII-1集合体のみで行った種々の測定について、実験値と計算値の比較をTable 4.1にまとめる。以下、この表を基に考察を行う。

4.1 各集合体共通で行った測定と計算の比較

Table 4.1(a)~(c)にXVI-1、XVI-2、及びXVII-1集合体それぞれのステップボイド反応度値及びボイド規模依存性の測定のC/E値及びC-E値を示す。

ステップボイド反応度値

ステップボイド反応度値は炉心中心では正、炉心端では負の値を取り、中間部で反応度値がほとんどゼロになる場所が存在する。そのような場所では実験誤差の相対値が大きくなり、C/E値も1から大きくずれる。そこで、計算と実験の比較を炉心中心から端まで通して行うには、C/E値よりもC-E値を使った方が好都合である。

C-E値の比較から各集合体共通に次の傾向があるといえる。

- ・ JENDL-3はJENDL-2よりも小さい（負側の）計算値を与え、実験値との一致が良い。
- ・ 炉心中心よりも炉心端付近の方がC-Eの絶対値が小さい。

これらの傾向は、次節で述べるようにナトリウムボイド反応度値の計算誤差は概ね非漏洩項に起因しており、JENDL-3ではJENDL-2に比べてその誤差が改善されていることにある。そのため、非漏洩項の小さくなる炉心端では実験と計算の一致が比較的良くなると考えられる。ただし、XVII-1集合体の10zはその回りに比べて異なる傾向のC-E値を示しており、計算値は実験値よりも正側の反応度値を与えている。これは、炉心とブランケットの境界部での計算精度がブランケット側で悪いためであると思われるが、その原因は分かっていない。

ボイド規模依存性

Table 4.1(a)~(c)に示したボイド規模依存性のC/E値は、一般にボイド規模が大きくなるに従って1から離れていく。これは、ボイド規模が大きくなるにつれて非漏洩項による誤差が大きくなっていく

のに対して、ナトリウムボイド反応度値自体は漏洩項の影響でそれほど大きくならない（1-6zから1-9zの場合は小さくなる）からである。

このように、ナトリウムボイド反応度値は非漏洩項と漏洩項の持ち分によって相対的な計算精度が大きく変わってしまうため、高速炉の安全設計においては常に計算値がどの程度信頼できるかを掴んでおく必要がある。4.2節及び4.3節で非漏洩項と漏洩項それぞれの計算精度を評価するのはこのためである。

4.2 非漏洩項の計算精度評価

炉心中心の1z及び2zにおけるナトリウムボイド反応度値では漏洩項の占める割合は、XVI-1集合体で7%以下、XVI-2集合体で3%以下、XVII-1集合体で5%以下であり（Table 3.3(a)～(c)参照）、この領域での解析結果より非漏洩項の計算精度を評価することができる。Table 4.2に、Table 4.1(a)～(c)から抜粋した1z、2z及び1-2zの測定のC/E値をまとめ、それらの平均値及び標準偏差を示した。

Table 4.2より非漏洩項の計算精度について以下のことが分かる。

- (1)JENDL-2を使った計算のC/E値は1.08～1.20であり、全ての集合体で非漏洩項を過大評価する。
- (2)JENDL-3.1を使った計算のC/E値は0.95～1.09であり、XVI-1集合体で過大評価である他は5%程度の過小評価である。
- (3)JENDL-2と-3.1の相違はXVI-1、XVI-2、XVII-1集合体それぞれで9%、11%、18%であり、集合体間で差異が見られる。
- (4)JENDL-3.2を使うとXVI-1集合体における過大評価は約4%改善される。

Fig.4.1に1zステップボイド反応度値のエネルギーブレイクダウンを示す。この図を使って上に示した計算精度についてさらに詳しい考察を行う。

非漏洩項の計算精度の支配要因

Fig.4.2に、XVII-1集合体炉心中心部（1z）のナトリウムボイド反応度値について、各成分毎のエネルギーブレイクダウンを示す。図から明らかなように、10keV以上では散乱項成分が支配しており、10keV以下でも吸収項成分が若干正の値を示すものの散乱項成分の割合の方が数倍大きい。即ち、1zにおけるナトリウムボイド反応度値は非漏洩項、とりわけ散乱項成分によって支配されていることが分かる。このことはXVI-1及びXVI-2集合体でも同様である。

摂動法による第g群の散乱項成分には次の2通りの表記法がある。（式中の表記は通常用いられるものであり、摂動分母は省略した。）

$$S_g^A = -(\delta\Sigma_{er,g} + \delta\Sigma_{in,g}) \cdot \phi_g^+ \cdot \phi_g + \sum_{g'=1}^{g-1} \delta\Sigma_{s,g}^{g' \rightarrow g} \cdot \phi_{g'}^+ \cdot \phi_{g'} \quad (4-1)$$

$$S_g^B = \sum_{g'=g+1}^G \delta\Sigma_{s,g}^{g \rightarrow g'} \cdot (\phi_{g'}^+ - \phi_g^+) \cdot \phi_g \quad (4-2)$$

(4-1)式は、第g群から除去される中性子と第g群に減速されてくる中性子のインポートランスのバランスを表す。一方(4-2)式は、第g群から減速された中性子のインポートランスが、行き先の群でどう変化するかを表す。(4-2)式の表記方法は(4-1)式に比べて簡単であり、第g群の散乱マトリックスの変化で反応度値を表せるという利点がある。Fig.4.2に示した散乱項成分はこの(4-2)式の表記方法を使ったものである。

(4-2)式によれば、散乱項成分は、散乱マトリックスの変化、随伴中性子束のエネルギー依存性、中性子束の値の3つの項の積で表され、これらが非漏洩項の計算精度の支配要因であることが分かる。以下、この3つの支配要因について集合体間、核データ間で比較しながら、散乱項成分の予測精度について考察する。

集合体間の比較

Fig.4.1から、各集合体中心でのナトリウムボイド反応度値のエネルギーブレイクダウンには次のような特徴があることが分かる。

- (イ) XVI-1集合体では1MeV以上の正の成分が大きな割合を占める。
- (ロ) XVI-2集合体では30keV～1MeVの正の成分が大きな割合を占める。
- (ハ) XVII-1集合体では30keV以下の負の成分が他の集合体に比べて大きい。

これらの特徴は、Fig.4.3及びFig.4.4に示した集合体中心での中性子スペクトル及び随伴中性子束のエネルギー分布の特徴から説明できる。

- ・一般に随伴中性子束のエネルギー分布は、1MeV以上の急勾配な部分、30keV～1MeVのなだらかな勾配の部分、30keV以下の逆勾配の部分の三つの部分に分けられる。それぞれの部分は、ナトリウムボイド反応度値のエネルギーブレイクダウンにおいて、1MeV以上の正の成分、30keV～1MeVの正の成分、30keV以下の負の成分に相当する。
- ・XVI-1集合体は、中性子スペクトルが硬く、随伴中性子束のエネルギー分布の30keV～1MeVの勾配が緩やかである。→ 相対的に1MeV以上が大きく見えて(イ)の原因となる。
- ・XVI-2集合体は、中性子スペクトルが硬く、かつ随伴中性子束のエネルギー分布の30keV～1MeVの勾配が急である。→ (ロ)の原因となる。
- ・XVII-1集合体の中性子スペクトルは柔らかい。→ (ハ)の原因となる。

JENDL-2とJENDL-3.1の比較

次に、Fig.4.1において核データ間の相違に着目すると、次のような特徴があることが分かる。

- (ニ) 4MeV以上でJENDL-2>JENDL-3.1
- (ホ) 1～2MeVでJENDL-2<JENDL-3.1

(へ) 50~700keVでJENDL-2>JENDL-3.1

(ト) 30keV以下では若干の凹凸はあるものの、合計すると核データ間の相違はほとんど無い。

Fig.4.5に示したナトリウムの弾性除去断面積及び非弾性散乱断面積と、前出のFig.4.3及びFig.4.4から、上の特徴の原因を考察すると以下ようになる。

- ・非弾性散乱断面積は3MeV以上でJENDL-2>JENDL-3.1 → (ニ)の原因
- ・弾性除去断面積は1keV近辺でJENDL-2<JENDL-3.1 → (ト)の凹凸の原因
- ・中性子スペクトルはJENDL-3.1で若干高エネルギー側にシフトするが、反応度値にはほとんど影響しない。
- ・随伴中性子束のエネルギー分布は1~4MeVでJENDL-3.1の方が勾配が急 → (ホ)の原因
- ・随伴中性子束のエネルギー分布は30keV~1MeVでJENDL-3.1の方が勾配が緩やか → (へ)の原因
- ・随伴中性子束のエネルギー分布は数keV~30keVでJENDL-3.1の方が勾配が急 → (ト)の凹凸の原因

Table 4.3には、1zにおけるステップボイド反応度値を821keVと25keVで区切った3つのエネルギー領域に分けて表したものである。上記(ニ)と(ホ)は互いに打ち消し合うため、JENDL-2と-3.1の差はほとんど25~821keVのエネルギー領域に起因していることが分かる。JENDL-2から-3.1に変えると、このエネルギー領域の持ち分は各集合体それぞれ19%、12%、19%小さくなるが、全エネルギーの反応度値に対するこのエネルギー領域の持ち分の違いによって、JENDL-3.1とJENDL-2の差がXVI-1集合体では小さく、XVII-1集合体では大きく現れる。

以上まとめると、JENDL-2は8~20%の過大評価、JENDL-3はU-235を含む場合を除いて5%の過小評価であり、核データ間の差は主に数百keV近辺の随伴中性子束のエネルギー分布の勾配が緩やかになることに起因する。核データの違いによる効果が集合体間で異なるのは、ナトリウムボイド反応度値全体に占める数百keV近辺の持ち分の相違によることが分かった。

4.3 漏洩項の計算精度評価

全ての実験値には大きな割合で非漏洩項が含まれているため、漏洩項のみの計算精度を実験と計算の単純な比較のみで議論することはできない。そこで、前節で求めた非漏洩項のC/E値で計算の非漏洩項のみを補正し、非漏洩項の計算精度による誤差を除去した計算値(以下、補正後計算値と呼ぶ)を実験値と比較して、漏洩項の計算精度を議論する。補正後計算値を式で表すと次のようになる。

$$\text{補正後計算値} = (\text{非漏洩項計算値}) / (\text{C/E値}) + (\text{漏洩項計算値}) \quad (4-3)$$

Fig.4.6にステップボイド反応度値の補正後計算値と実験値を比較する。各集合体共に炉心中心から炉心端にかけて、実験と計算は非常に良い一致を示している。漏洩項の少ない炉心中心と漏洩項の

大きな炉心端で同等な精度で計算が行われていることから、本研究で採用している計算手法によれば、ステップボイド反応度値の漏洩項の計算精度は良好であると結論できる。ただし、第3章でも触れたように、漏洩項の計算にはセル内でのボイド缶のモデル化及び正しい輸送補正の適用が大きな影響を及ぼすため、細心の注意が必要である。

一方ブランケット部では、XVII-1集合体の炉心とブランケットの境界で計算が実験よりも正側の値を示すが、それ以外はほぼ良好に計算されている。(4-3)式で用いているC/E値は炉心中心のものでありブランケット部にも適用できる保障はないので、ブランケット部の漏洩項の計算精度を適正に評価できていない可能性はあるが、概ね良好な計算精度が得られていると考えられる。

4.4 各項の計算精度のボイド規模依存性

4.3節と同様に、非漏洩項の補正をボイド規模依存性の計算結果に対して行った結果をTable 4.4に示す。補正前には、1-6z、1-9zとボイド規模が大きくなるにつれて1-2zでの過大評価や過小評価の傾向が拡大されていたが、非漏洩項に補正を施したことによりこの傾向は改善され、一部を除いて1に非常に近いC/E値となった。

補正を施してもなおC/E値が1より離れる場合があるのは、補正係数の誤差に起因していると考えられる。そこで、Table 4.2に示した非漏洩項のC/E値のばらつき幅で補正係数を変化させたときの補正後C/E値の幅をTable 4.4のカッコ内に示した。ボイド規模依存性の実験は補正後計算値と補正係数の誤差及び実験誤差の範囲内で一致していることが分かる。これより、

- ・4.2節で求めた非漏洩項の予測精度はボイド領域が広がってもほぼそのまま適用できる。
- ・漏洩項の計算精度はボイド領域が広がったことによる影響を受けていない。

と考えられる。

4.5 XVII-1集合体のみで行った測定と計算の比較

A) 散乱物質のサンプル反応度値

Table 4.1(d)に黒鉛及びアルミニウムの反応度値のC/E値を示す。JENDL-2では計算が15~20%過大評価、JENDL-3.1では反対に最大15%の過小評価となっており、ナトリウムボイドの場合と同様の傾向を示している。

Fig.4.7にナトリウム、黒鉛、アルミニウムの1zステップボイド反応度値のエネルギーブレイクダウンを示す。図はそれぞれの反応度値が1になるように規格化したものである。ナトリウムの反応度値のエネルギーブレイクダウンに比べて、各物質の反応度値は

- ・黒鉛は正の部分と負の部分が共に大きく、エネルギー依存性の大きな分布を示す。
- ・アルミニウムは負の成分がほとんどない。

という特徴を持つ。これらの特徴は中性子束の軟化の程度、散乱物質の断面積のエネルギー依存性等

の相違によるものである。黒鉛の反応度値のC/E値がアルミニウムよりも悪いのは、黒鉛の反応度値が比較的大きな正の部分と負の部分の引き算で決まっているためである。

ナトリウム以外の物質反応度値でもナトリウムボイド反応度値と同じ傾向のC/E値が得られることから、JENDL-2が実験値を過大評価し、JENDL-3が過小評価するのはナトリウム等の断面積に起因するのではなく、体系の随伴中性子束のエネルギー依存性に起因することが分かる。

B) ナトリウム層付き炉心における測定

Table 4.1(e)にナトリウム層付き炉心におけるステップボイド及びボイド規模依存性の結果を示す。また、Fig.4.8にステップボイドの実験値と補正後計算値を比較する。

通常のXVII-1集合体と同様に、炉心中心部でJENDL-2は過大評価、JENDL-3.1は過小評価を示しており、不一致の程度もほぼXVII-1集合体と同様である（Table 4.2 参照）。炉心中心部を離れても炉心内ではXVII-1集合体と同様に補正後計算値は実験値と良い一致を示すが、ナトリウム領域ではXVII-1集合体とは異なり、境界から離れた場所でも補正後計算値は実験値よりも正側の値を示している。しかし、実験項目C)ナトリウム液位の低下模擬においてナトリウム層を10-15zでボイド状態にした場合、計算は実験よりも負側の値を示しており、ステップボイドの場合と矛盾する結果となっている。

C) ナトリウム液位の低下模擬

Fig.4.9にナトリウム液位の低下模擬について、実験と計算を比較する。図ではX軸に反応度値をY軸にナトリウム液位をとった。JENDL-2は非漏洩項の過大評価のために、液位が下がるにつれて実験値よりも正側の値を与える。一方JENDL-3.1による計算は、軸方向ブランケット付きである通常のXVII-1集合体では実験値と良い一致を示し、ナトリウム層付きXVII-1集合体ではナトリウム層での不一致の影響により実験値よりも負側の値を示す。ナトリウム層のナトリウムの半分がボイド化する場合にはJENDL-2、-3.1共にほぼ実験と一致する。

D) 移動側集合体の影響

この項目は計算モデルの妥当性検討（第3章ですでに検討済み）のために行ったものであり、ここでは特に触れない。

E) セルの変更の影響

実験結果から分かるように、本項目を詳細に解析するには、燃料板が食い違っている場合の燃料板に平行な方向への中性子漏洩についての厳密な取り扱いが必要であると考えられ、現在の手法では簡便かつ精度良く行う計算を行うことができないため、本測定項目についての計算は行っていない。

F) 垂直セルの影響

炉心とブランケット境界付近の実験値と計算値をFig.4.10に示す。ここで、計算値は非漏洩項の計

算誤差が少ないJENDL-3.1によるものを用いた。第2章で述べたように、セルを垂直に並べ換えた場合、中性子ストリーミングの減少によって漏洩項が小さくなるために、ナトリウムボイド反応度値は正の方に向かう。計算はこの傾向を非常に良く再現しており、セルに垂直な方向と平行な方向の拡散係数が共にナトリウムのボイド前後で良好に計算されていることが分かった。10zでの不一致はセルの配置に関係なく見られるので、境界領域における非漏洩項の計算精度によるものであると思われる。

G) ナトリウム領域の大きさの影響

本項目は実験で採用したナトリウム領域の広さが十分であるか否かを検討するために行った実験であり、計算は行っていない。

H) 広領域ボイド

実験と計算の比較をTable 4.1(h)に示す。広領域ボイドの測定値は全て負の反応度値となったが、JENDL-2による計算値は逆に全て正の値を示しており、JENDL-3でも30~80%の不一致を示している。これは、XVII-1集合体では1-15zのナトリウムをボイドにした場合、非漏洩項と漏洩項がほぼ等しい値を示すため、計算の相対的な信頼性は極めて悪くなるためである。

中心から離れた領域では、測定値はX方向とY方向でほとんど変わらない結果を示したが、計算ではY方向の方が若干負側の値を示していることが分かる。Table 4.5はX方向とY方向の計算値について、漏洩項の成分をX、Y、Zそれぞれの方向の成分に分解して示したものである。表より、

イ)非漏洩項はX方向ボイドの方が若干大きい。

ロ)径方向(X及びY方向)への漏洩項はY方向ボイドの方が大きい。

ハ)Z方向への漏洩項はX方向ボイドの方が若干大きい。

ことが分かる。この内ロ)は実験目的である燃料板配列方向に依存する事項であるが、その他は、XVII-1集合体がX方向とY方向で対象になっていないこと(Fig.2.3参照)等に起因する事項であると考えられる。これらイ)及びハ)の相違はロ)の相違と同程度の大きさを持っており、各成分の微妙な変化で最終的な反応度値が大きく変化してしまうことが分かる。よって測定値がX方向とY方向でほとんど変わらない結果を示したのは燃料板配列方向の依存性が無いことを示しているのではなく、様々な要因が打ち消しあった結果であると考えられる。

4.4項では各項の計算精度にボイド規模依存性が無いことを示したが、広領域ボイドの場合でも(4-3)式の補正を行い、4.4項の結論の妥当性を検証した。補正前後のC/E値をTable 4.6に示す。表のカッコ内に示したように、Table 4.2の補正係数の精度を考慮すれば、補正によってC/E値をほぼ1にすることができる。従って、補正係数すなわち非漏洩項の計算精度が広領域の場合にも適用でき、かつ、漏洩項は広領域の場合でもほぼ良好に計算されていることが分かった。

I) プルトニウム組成の影響

プルトニウムの組成を5×5領域の固定側及び移動側集合体1～3zで変化させて行ったナトリウムボイド反応度値の測定について考察する。Fig.4.11にはプルトニウム板としてPu(92)、Pu(81)、Pu(75)それぞれを使った場合の中性子スペクトル及び随伴中性子束のエネルギー分布を示す。プルトニウム組成を変化させても中性子スペクトルはほとんど変化しないが、随伴中性子束のエネルギー分布はPu-240が増えるに従って30keV以上の勾配が急に、30keV以下の逆勾配が緩やかになっていることが分かる。この影響により、Fig.4.12に示したナトリウムボイド反応度値のエネルギーブレイクダウンは、ほぼ全エネルギーにわたってPu(75)>Pu(81)>Pu(92)となっている。

Table 4.1(i)に実験と計算の比較を示す。実験誤差が2～5%程度あることを考えると、プルトニウムの組成が変わっても、JENDL-2は10%以上の過大評価、JENDL-3は5%程度の過小評価という結果は同様である。よって、計算はプルトニウム組成の劣化に伴うナトリウムボイド反応度値の増加を良く再現しているといえる。

Table 4.1(a) Comparison between measured and calculated sodium void worth in FCA XVI-1

Position	Experiment ($10^{-4} \Delta k/k$)	Calculation with JENDL-2			Calculation with JENDL-3.1		
		Reactivity worth ($10^{-4} \Delta k/k$)	C/E	C-E ($10^{-4} \Delta k/k$)	Reactivity worth ($10^{-4} \Delta k/k$)	C/E	C-E ($10^{-4} \Delta k/k$)
Step void	0.777 ± 0.022^a ($\pm 2.8\%$) ^{a)}	0.9461	1.218	0.169	0.8608	1.108	0.084
1z	0.751 ($\pm 2.9\%$)	0.8805	1.172	0.130	0.7983	1.063	0.047
2z	0.630 ($\pm 3.5\%$)	0.7528	1.195	0.123	0.6766	1.074	0.047
3z	0.454 ($\pm 4.8\%$)	0.5741	1.264	0.120	0.5063	1.115	0.052
4z	0.192 ($\pm 11.5\%$)	0.3576	1.863	0.166	0.3000	1.563	0.108
5z	0.035 ($\pm 62.9\%$)	0.1209	3.453	0.086	0.0743	2.123	0.039
6z	-0.221 ($\pm 10.0\%$)	-0.1204	0.545	0.101	-0.1555	0.703	0.066
7z	-0.395 ($\pm 5.6\%$)	-0.3365	0.852	0.059	-0.3608	0.913	0.034
8z	-0.542 ($\pm 4.1\%$)	-0.5120	0.945	0.030	-0.5242	0.967	0.018
9z							
Void volume dependence							
1-2z	1.519 ($\pm 1.4\%$)	1.8492	1.217	0.330	1.6884	1.112	0.169
1-6z	2.810 ($\pm 0.8\%$)	3.5969	1.280	0.787	3.1986	1.138	0.389
1-9z	1.452 ($\pm 1.5\%$)	2.3522	1.620	0.900	1.8861	1.299	0.434

a) Experimental error

Position	Calculation with JENDL-3.2		
	Reactivity worth ($10^{-4} \Delta k/k$)	C/E	C-E ($10^{-4} \Delta k/k$)
Step void	0.8267	1.064	0.050
1z	0.7645	1.018	0.014
2z	0.6434	1.021	0.013
3z	0.4739	1.044	0.020
4z	0.2685	1.398	0.076
5z	0.0435	1.243	0.009
6z	-0.1857	0.840	0.035
7z	-0.3916	0.991	0.003
8z	-0.5598	1.033	-0.018
9z			

Table 4.1(b) Comparison between measured and calculated sodium void worth in FCA XVI-2

Position	Experiment	Calculation with JENDL-2			Calculation with JENDL-3.1		
		Reactivity worth	C/E	($10^{-4} \Delta k/k$)	Reactivity worth	C/E	($10^{-4} \Delta k/k$)
Step void	($10^{-4} \Delta k/k$)	($10^{-4} \Delta k/k$)	($10^{-4} \Delta k/k$)	($10^{-4} \Delta k/k$)	($10^{-4} \Delta k/k$)	($10^{-4} \Delta k/k$)	
1z	0.974 ± 0.022 ^{a)} (±2.5%) ^{a)}	1.0563	1.085	0.082	0.9377	0.963	
2z	0.937 (±2.6%)	1.0022	1.070	0.065	0.8869	0.947	
3z	0.858 (±2.8%)	0.8916	1.039	0.034	0.7836	0.913	
4z	0.701 (±3.4%)	0.7361	1.050	0.035	0.6386	0.911	
5z	0.507 (±4.7%)	0.5476	1.080	0.041	0.4627	0.913	
6z	0.296 (±8.1%)	0.3406	1.151	0.045	0.2697	0.911	
7z	0.108 (±22.2%)	0.1332	1.233	0.025	0.0765	0.708	
8z	-0.092 (±26.1%)	-0.0611	0.664	0.031	-0.1038	1.128	
9z	-0.234 (±10.3%)	-0.2277	0.973	0.006	-0.2564	1.096	
Void volume dependence							
1-2z	1.922 (±1.2%)	2.0748	1.079	0.153	1.8412	0.958	
1-6z	4.173 (±0.6%)	4.5686	1.095	0.396	3.9742	0.952	
1-9z	3.741 (±0.6%)	4.2847	1.145	0.544	3.5582	0.951	

a) Experimental error

Table 4.1(c) Comparison between measured and calculated sodium void worth in FCA XVII-1

Position	Experiment	Calculation with JENDL-2			Calculation with JENDL-3.1		
		Reactivity worth	C/E	($10^{-4} \Delta k/k$)	Reactivity worth	C/E	($10^{-4} \Delta k/k$)
Step void	($10^{-4} \Delta k/k$)	($10^{-4} \Delta k/k$)	($10^{-4} \Delta k/k$)	($10^{-4} \Delta k/k$)	($10^{-4} \Delta k/k$)	($10^{-4} \Delta k/k$)	($10^{-4} \Delta k/k$)
1z	0.536 ± 0.022^b ($\pm 4.5\%$) ^{a)}	0.6164	1.150	0.080	0.5061	0.944	-0.030
2z	0.504 ($\pm 4.8\%$)	0.5729	1.137	0.069	0.4660	0.925	-0.038
3z	0.387 ($\pm 6.2\%$)	0.4889	1.263	0.102	0.3890	1.005	0.002
4z	0.296 ($\pm 8.1\%$)	0.3716	1.255	0.076	0.2813	0.950	-0.015
5z	0.180 ($\pm 13.3\%$)	0.2298	1.276	0.050	0.1512	0.840	-0.029
6z	0.024 ($\pm 100.0\%$)	0.0745	3.106	0.051	0.0087	0.364	-0.015
7z	-0.117 ($\pm 20.5\%$)	-0.0811	0.693	0.036	-0.1341	1.146	-0.017
8z	-0.256 ($\pm 9.4\%$)	-0.2231	0.872	0.033	-0.2638	1.030	-0.008
9z	-0.361 ($\pm 6.6\%$)	-0.3385	0.938	0.023	-0.3671	1.017	-0.006
10z	-0.349 ($\pm 6.9\%$)	-0.2884	0.826	0.061	-0.3070	0.880	0.042
11z	-0.183 ($\pm 13.1\%$)	-0.1705	0.932	0.013	-0.1835	1.003	-0.000
Void volume dependence							
1-2z	1.006 ($\pm 2.4\%$)	1.2043	1.197	0.198	0.9853	0.979	-0.021
1-6z	1.881 ($\pm 1.3\%$)	2.3370	1.242	0.456	1.7770	0.945	-0.104
1-9z	0.968 ($\pm 2.5\%$)	1.5600	1.612	0.592	0.8740	0.903	-0.094
1-15z	0.053 ($\pm 45.3\%$)	0.7085	13.368	0.656	-0.0365	-0.689	-0.090

a) Experimental error

Table 4.1(d) Comparison between experiments and calculations for extra measurements in FCA XVII-1
 A) Sample worth of scattering material

Item	Experiment	Calculation with JENDL-2		Calculation with JENDL-3.2	
		Reactivity worth	C/E	Reactivity worth	C/E
	($10^{-4} \Delta k/k$)	($10^{-4} \Delta k/k$)		($10^{-4} \Delta k/k$)	
Carbon (912.1g)	1.702 ± 0.024^a	2.0007	1.175	1.4417	0.847
Carbon (453.5g)	0.999	1.1897	1.191	0.8977	0.899
Aluminum (777.4g)	1.015	1.1617	1.145	0.9875	0.973

a) Experimental error

Table 4.1(e) Comparison between experiments and calculations for extra measurements in FCA XVII-1
 B) Influence of sodium layer

Position	Experiment	Calculation with JENDL-2			Calculation with JENDL-3.1		
		Reactivity worth	C/E	C-E	Reactivity worth	C/E	C-E
Step void	($10^{-4} \Delta k/k$)	($10^{-4} \Delta k/k$)	($10^{-4} \Delta k/k$)	($10^{-4} \Delta k/k$)	($10^{-4} \Delta k/k$)	($10^{-4} \Delta k/k$)	($10^{-4} \Delta k/k$)
1z	0.501 ± 0.022^a ($\pm 4.8\%$) ^{b)}	0.6156	1.229	0.115	0.5052	1.008	0.004
2z	0.514 ($\pm 4.7\%$)	0.5708	1.110	0.057	0.4637	0.902	-0.050
3z	0.418 ($\pm 5.7\%$)	0.4845	1.159	0.066	0.3844	0.919	-0.034
4z	0.326 ($\pm 7.4\%$)	0.3626	1.112	0.037	0.2722	0.835	-0.054
5z	0.146 ($\pm 16.4\%$)	0.2134	1.460	0.067	0.1349	0.922	-0.011
6z	0.017 ($\pm 142.9\%$)	0.0469	2.790	0.030	-0.0188	-1.120	-0.036
7z	-0.162 ($\pm 14.8\%$)	-0.1276	0.789	0.034	-0.1801	1.114	-0.018
8z	-0.304 ($\pm 7.9\%$)	-0.2991	0.983	0.005	-0.3392	1.115	-0.035
9z	-0.465 ($\pm 5.2\%$)	-0.4586	0.987	0.006	-0.4875	1.049	-0.023
10z	-0.972 ($\pm 2.5\%$)	-0.8709	0.896	0.101	-0.8895	0.915	0.083
11z	-0.775 ($\pm 3.1\%$)	-0.7098	0.917	0.065	-0.7216	0.932	0.053
12z	-0.598 ($\pm 4.0\%$)	-0.5537	0.925	0.045	-0.5632	0.941	0.035
10z(A-pattern)	-0.470 ($\pm 5.1\%$)	-0.3932	0.837	0.076	-0.4110	0.875	0.059
11z(A-pattern)	-0.374 ($\pm 6.4\%$)	-0.3225	0.863	0.051	-0.3359	0.899	0.038
12z(A-pattern)	-0.273 ($\pm 8.8\%$)	-0.2520	0.923	0.021	-0.2627	0.962	0.010
Void volume dependence							
1-2z	1.014 ($\pm 2.4\%$)	1.2014	1.185	0.187	0.9821	0.968	-0.032
1-6z	1.843 ($\pm 1.3\%$)	2.2750	1.234	0.432	1.7143	0.930	-0.129
1-9z	0.722 ($\pm 3.3\%$)	1.2352	1.710	0.513	0.5511	0.763	-0.171
1-15z	-3.553 ($\pm 0.7\%$)	-3.1018	0.873	0.451	-3.8731	1.090	-0.320

a) Experimental error

Table 4.1(f) Comparison between experiments and calculations for extra measurements in FCA XVII-1
 C) Decrease of sodium level

Sodium level	Experiment	Calculation with JENDL-2			Calculation with JENDL-3.1		
		Reactivity worth	C/E	C-E ($10^{-4} \Delta k/k$)	Reactivity worth	C/E	C-E ($10^{-4} \Delta k/k$)
XVII-1	($10^{-4} \Delta k/k$)	($10^{-4} \Delta k/k$)	C/E	C-E	($10^{-4} \Delta k/k$)	C/E	C-E
-30.48 cm	-0.834 ± 0.024 ^{a)} (±2.9%) ^{b)}	-0.7731	0.927	0.061	-0.8314	0.997	0.003
-45.72 cm	-1.753 (±1.4%)	-1.5517	0.885	0.201	-1.7359	0.990	0.017
-66.04 cm	-0.941 (±2.6%)	-0.4843	0.515	0.457	-1.0077	1.071	-0.067
-76.20 cm	0.053 (±45.3%)	0.7085	13.368	0.656	-0.0365	-0.689	-0.089
XVII-1(37Na)							
-30.48 cm	-3.976 (±0.6%)	-4.0511	1.019	-0.076	-4.1478	1.043	-0.172
-30.48 cm ^{b)}	-1.705 (±1.4%)	-1.6039	0.940	0.102	-1.6747	0.982	0.031
-30.48 cm ^{c)}	-1.783 (±1.3%)	-1.6039	0.900	0.179	-1.6747	0.939	0.108
-45.72 cm	-5.282 (±0.5%)	-5.2500	0.994	0.032	-5.4632	1.034	-0.181
-76.20 cm	-3.553 (±0.7%)	-3.1018	0.873	0.451	-3.8731	1.090	-0.320

a) Experimental error b) Half-void by A-pattern c) Half-void by B-pattern

Table 4.1(g) Comparison between experiments and calculations for extra measurements in FCA XVII-1
 D) Influence of perpendicular cells (Calculation: JENDL-3.1)

Void region	Experiment ($10^{-4} \Delta k/k$)	Calculation ($10^{-4} \Delta k/k$)	C/E	C-E ($10^{-4} \Delta k/k$)
Standard cell arrangement				
8z	-0.256 ± 0.024^a ($\pm 9.4\%$) ^b	-0.2638	1.030	-0.008
9z	-0.361 ($\pm 6.6\%$)	-0.3671	1.017	-0.006
10z	-0.349 ($\pm 6.9\%$)	-0.3070	0.880	0.042
11z	-0.183 ($\pm 13.1\%$)	-0.1835	1.003	-0.001
10-15z	-0.834 ($\pm 2.9\%$)	-0.8314	0.997	0.003
Perpendicular cell arrangement				
8z	-0.143 ($\pm 16.8\%$)	-0.1595	1.115	-0.016
9z	-0.240 ($\pm 10.0\%$)	-0.2532	1.055	-0.013
10z	-0.246 ($\pm 9.8\%$)	-0.2185	0.888	0.028
11z	-0.098 ($\pm 24.5\%$)	-0.1247	1.272	-0.027
10-15z	-0.613 ($\pm 3.9\%$)	-0.5837	0.952	0.029

a) Experimental error

Table 4.1(h) Comparison between experiments and calculations for extra measurements in FCA XVII-1
 E) Large region void (Calculation: Exact perturbation theory with 25-group XYZ-model)

Void region	Experiment ($10^{-4} \Delta k/k$)	Calculation with JENDL-2		Calculation with JENDL-3.2	
		Reactivity worth ($10^{-4} \Delta k/k$)	C/E	Reactivity worth ($10^{-4} \Delta k/k$)	C-E
Central 5 X 5 drawers	-0.247 ± 0.024^a ($\pm 9.7\%$) ^b	1.5688	1.816	-0.4422	1.790
12 drawers at off center (X)	-0.595 ($\pm 4.0\%$)	0.1148	0.710	-0.7608	1.279
12 drawers at off center (Y)	-0.608 ($\pm 3.9\%$)	0.0144	0.622	-0.8569	1.409
24 drawers at off center (X+Y)	-1.194 ($\pm 2.0\%$)	0.1606	1.355	-1.5882	1.330

a) Experimental error

Table 4.1(i) Comparison between experiments and calculations for extra measurements in FCA XVII-1
 F) Influence of plutonium composition

Void region	Experiment ($10^{-4} \Delta k/k$)	Calculation with JENDL-2		Calculation with JENDL-3.2	
		Reactivity worth ($10^{-4} \Delta k/k$)	C-E ($10^{-4} \Delta k/k$)	Reactivity worth ($10^{-4} \Delta k/k$)	C-E ($10^{-4} \Delta k/k$)
F,M:5×5:1-3z; Pu(92) → Pu(75)					
1z void	0.616±0.024 ^{a)} (±3.9%) ^{a)}	0.7274	1.181	0.6275	1.019
2z void	0.639 (±3.8%)	0.6760	1.058	0.5778	0.904
1-2z void	1.259 (±1.9%)	1.4267	1.133	1.2394	0.984
F,M:5×5:1-3z; Pu(92) → Pu(81)					
1z void	0.592 (±4.1%)	0.6815	1.151	0.5736	0.969
2z void	0.583 (±4.1%)	0.6330	1.086	0.5276	0.905
1-2z void	1.141 (±2.1%)	1.3362	1.171	1.1346	0.994
Normal XVII-1					
1z void	0.536 (±4.5%)	0.6164	1.150	0.5061	0.944
2z void	0.504 (±4.8%)	0.5729	1.137	0.4660	0.925
1-2z void	1.006 (±2.4%)	1.2043	1.197	0.9853	0.979

a) Experimental error

Table 4.2 Summary of C/E values at the core center

Void region	XVI-1		XVI-2		XVII-1		XVII-1 with sodium layer	
	JENDL-2	JENDL-3.1	JENDL-3.2	JENDL-3.1	JENDL-2	JENDL-3.1	JENDL-2	JENDL-3.1
1z	1.218 (2.8%) ^{a)}	1.108 (2.8%)	1.064 (2.8%)	1.085 (2.5%)	0.963 (2.5%)	1.150 (4.5%)	0.944 (4.5%)	1.229 (4.8%)
2z	1.172 (2.9%)	1.063 (2.9%)	1.018 (2.9%)	1.070 (2.6%)	0.947 (2.6%)	1.137 (4.8%)	0.925 (4.8%)	1.110 (4.7%)
1-2z	1.217 (1.4%)	1.112 (1.4%)	—	1.079 (1.2%)	0.958 (1.2%)	1.197 (2.4%)	0.979 (2.4%)	1.185 (2.4%)
Average	1.20±0.03 ^{b)}	1.09±0.03	1.04±0.03	1.08±0.01	0.96±0.01	1.16±0.03	0.95±0.03	1.17±0.06

a) Experimental error b) Standard deviation

Table 4.3 Energy breakdown of sodium void reactivity worths at core center

Assembly	Data file	Reactivity worth (10 ⁻⁴ Δk/k)		
		Total	below 25 keV	25~821 keV above 821 keV
XVI-1	JENDL-2	0.89	-0.13	0.45
	JENDL-3.1	0.81 (-9%) ^{a)}	-0.13	0.37 (-19%) ^{a)}
XVI-2	JENDL-2	1.07	-0.08	0.76
	JENDL-3.1	0.95 (-11%)	-0.09	0.66 (-12%)
XVII-1	JENDL-2	0.62	-0.15	0.46
	JENDL-3.1	0.50 (-18%)	-0.16	0.38 (-19%)

a) (JENDL-3.1 - JENDL-2) / JENDL-2

Table 4.4 Comparison of C/E values before and after the correction for non-leakage term (Void volume dependence)

Assembly	Void region	Experimental error	Before correction			After correction		
			JENDL-2	JENDL-3.1	JENDL-2	JENDL-3.1	JENDL-2	JENDL-3.1
XVI-1	1-2z	±1.4 %	1.217	1.112	1.004	0.978 ~ 1.031 ^{a)}	1.015	0.986 ~ 1.045 ^{a)}
	1-6z	±0.8 %	1.280	1.138	0.979	0.942 ~ 1.018	1.001	0.961 ~ 1.045
	1-9z	±1.5 %	1.620	1.299	0.876	0.785 ~ 0.971	0.961	0.860 ~ 1.067
XVI-2	1-2z	±1.2 %	1.079	0.958	0.998	0.989 ~ 1.008	0.999	0.988 ~ 1.009
	1-6z	±0.6 %	1.095	0.952	0.998	0.987 ~ 1.009	1.001	0.988 ~ 1.014
	1-9z	±0.6 %	1.145	0.951	1.009	0.994 ~ 1.025	1.019	1.002 ~ 1.037
XVII-1	1-2z	±2.4 %	1.197	0.979	1.027	1.000 ~ 1.055	1.033	1.000 ~ 1.068
	1-6z	±1.3 %	1.242	0.945	1.010	0.974 ~ 1.049	1.018	0.973 ~ 1.066
	1-9z	±2.5 %	1.612	0.903	1.058	0.971 ~ 1.150	1.079	0.971 ~ 1.194
	1-15z	±45.3 %	13.368	-0.689	2.516	0.806 ~ 4.317	2.801	0.664 ~ 5.077

a) Range of C/E value derived from the accuracy of correction factor in Table 4.2.

Table 4.5 Components of large region void at off center of FCA XVII-1
(Calculated with JENDL-2. Transport correction is not applied)

Component	12 drawers at off center (X)	12 drawers at off center (Y)
Non-leakage term	($10^{-4} \Delta k/k$)	($10^{-4} \Delta k/k$)
Leakage term	4.5845	4.5253
X-direction	-5.0068	-5.0535
Y-direction	-0.1474	-0.0045
Z-direction	-0.0107	-0.3102
	-4.8487	-4.7388
Total	-0.4224	-0.5282

Table 4.6 Comparison of C/E values before and after the correction for non-leakage term
(Large region void in FCA XVII-1. Calculation: 25-group XYZ-model)

Void region	Experimental error	Before correction		After correction	
		JENDL-2	JENDL-3.2	JENDL-2	JENDL-3.2
Central 5x5 drawer	±9.7 %	-6.351	1.790	0.053 (1.062~-1.010) ^{a)}	-0.296 (0.981~-1.657) ^{a)}
12 drawers at off center (X)	±4.0 %	-0.193	1.279	0.866 (1.033~0.690)	0.938 (1.147~0.716)
12 drawers at off center (Y)	±3.9 %	-0.024	1.409	0.999 (1.160~0.830)	1.080 (1.282~0.865)
24 drawers at off center (X+Y)	±2.0 %	-0.135	1.330	0.919 (1.084~0.744)	0.991 (1.199~0.770)

a) Range of C/E value derived from accuracy of correction factor in Table 4.2.

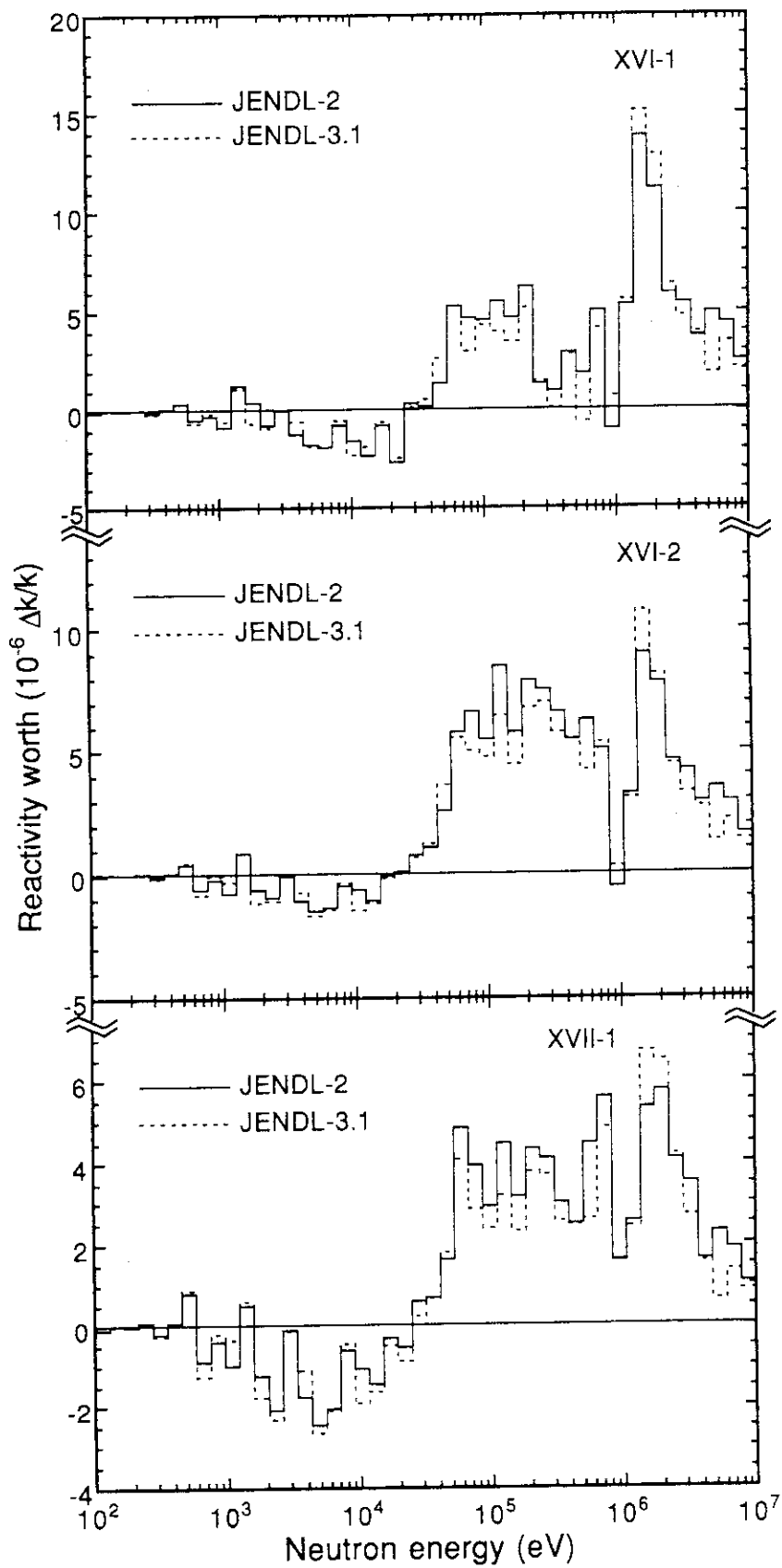


Fig. 4.1 Energy breakdown of sodium void reactivity worth at the core center

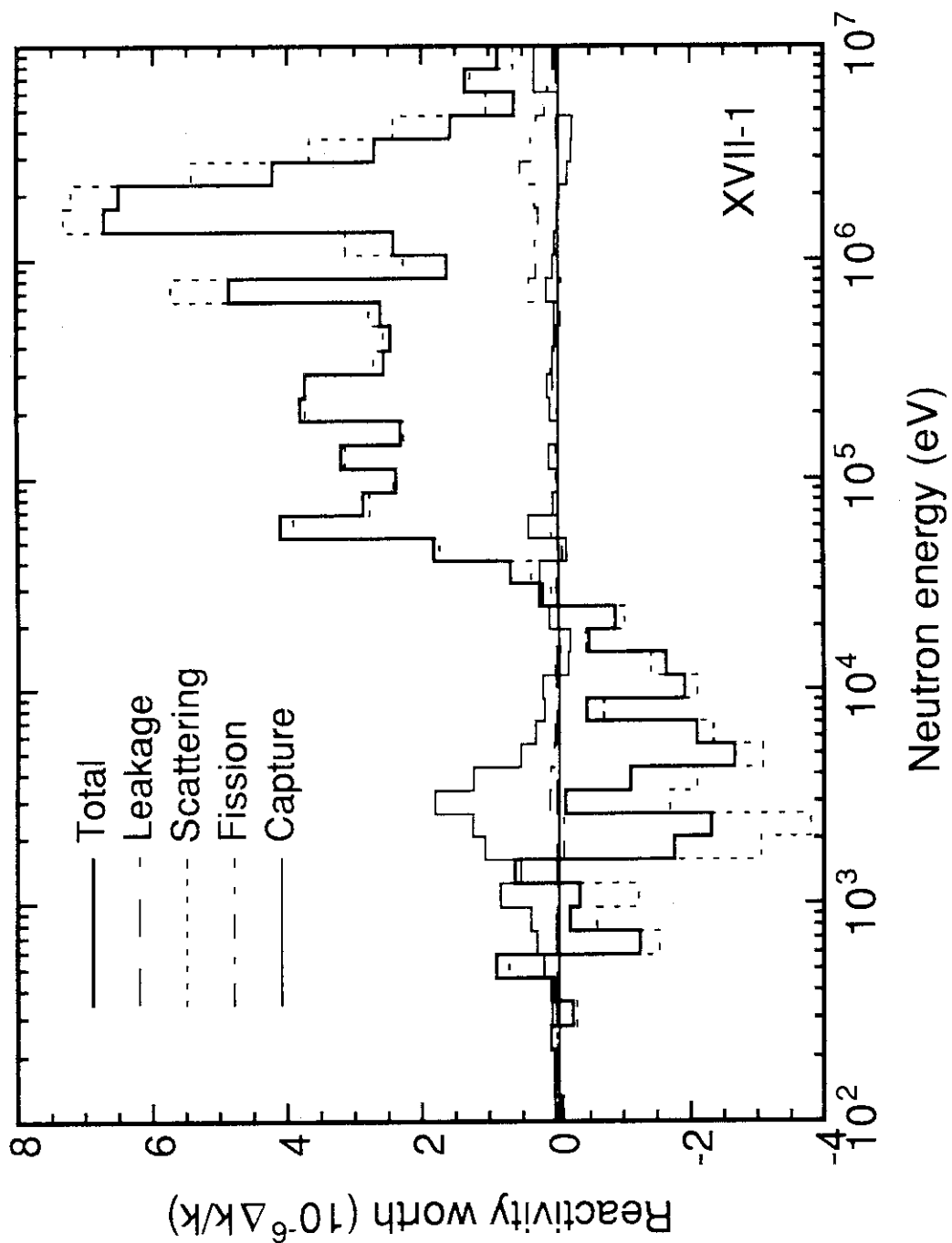


Fig. 4.2 Energy breakdown of various components of sodium void reactivity worth at the core center of FCA XVII-1

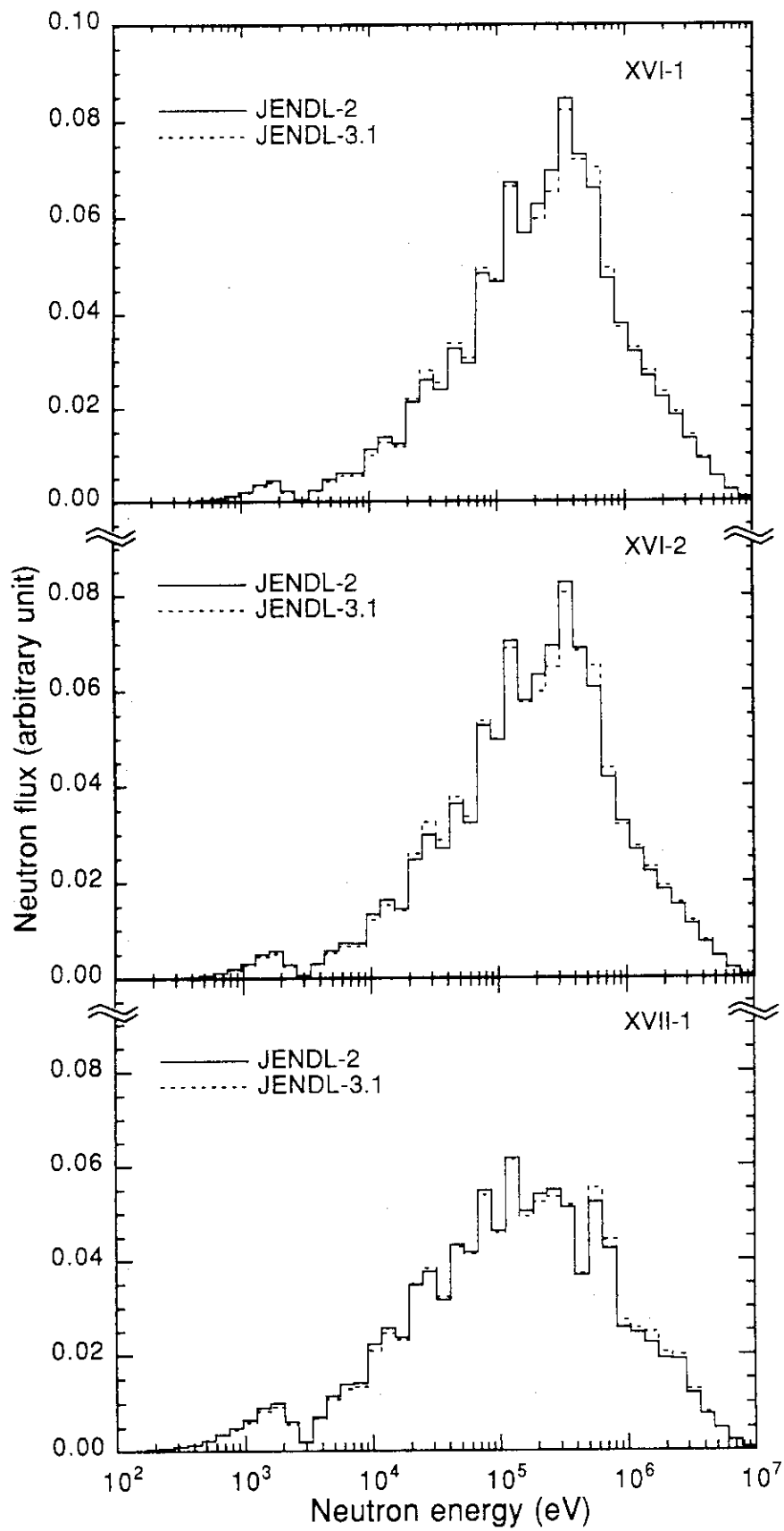


Fig.4.3 Neutron spectra at the core center

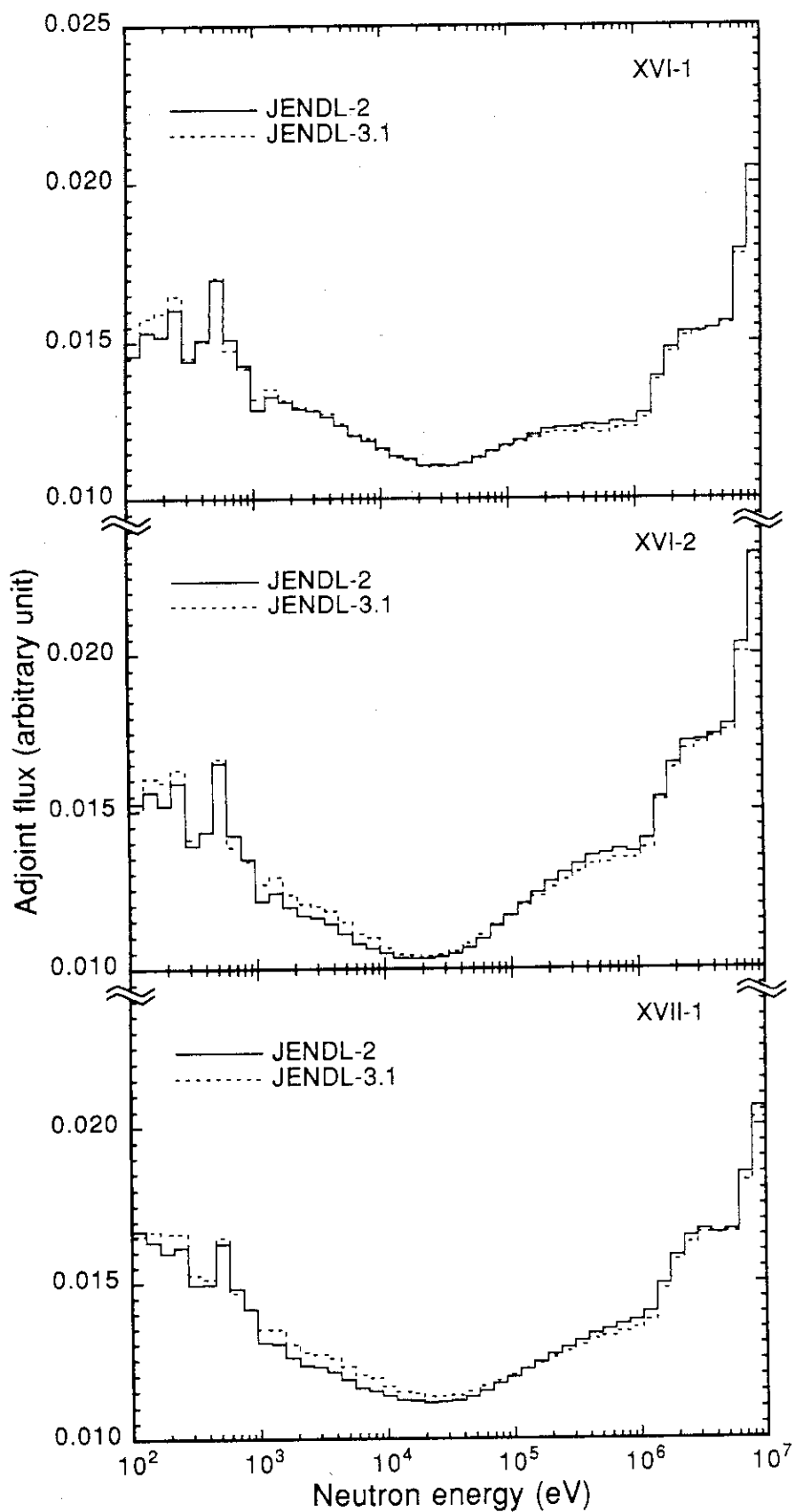


Fig. 4.4 Energy distribution of adjoint neutron flux at the core center

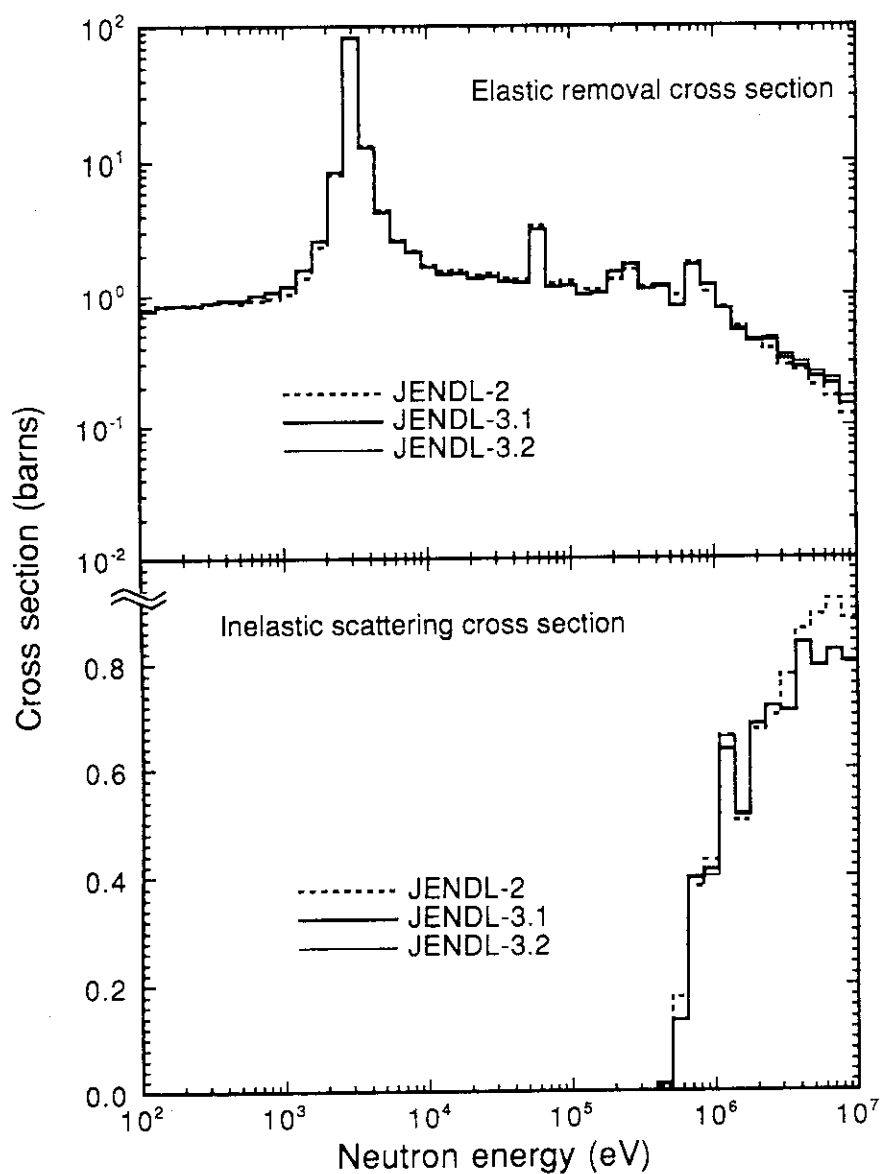


Fig. 4.5 Comparisons of elastic removal and inelastic scattering cross sections of sodium among three nuclear data files

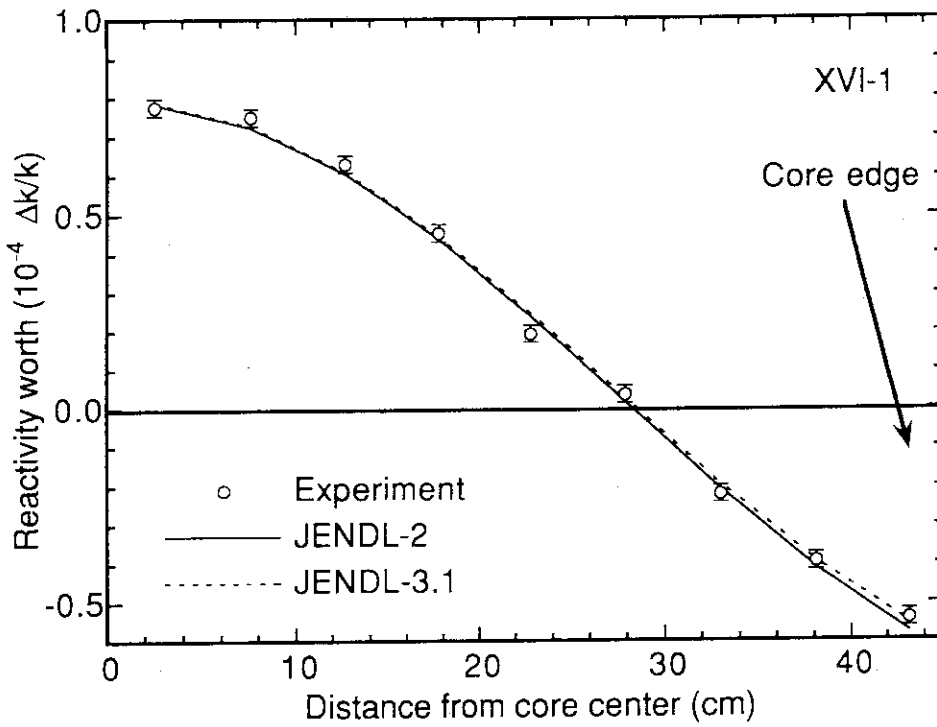


Fig. 4.6(a) Comparison between experimental and calculated step void reactivity worth in FCA XVI-1 (Calculation is corrected only for non-leakage term.)

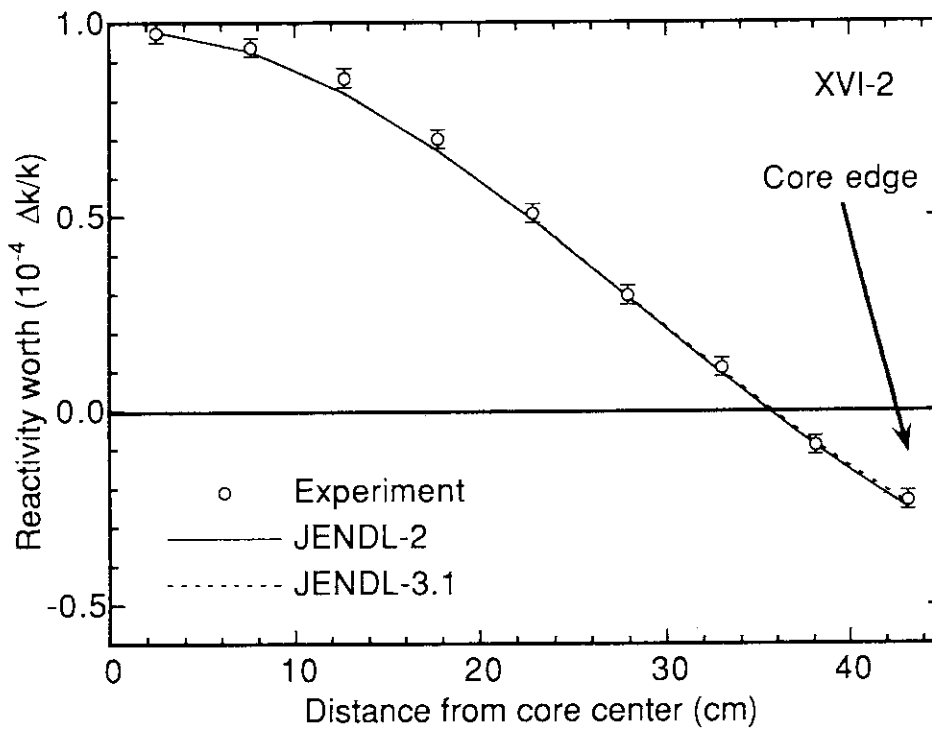


Fig. 4.6(b) Comparison between experimental and calculated step void reactivity worth in FCA XVI-2 (Calculation is corrected only for non-leakage term.)

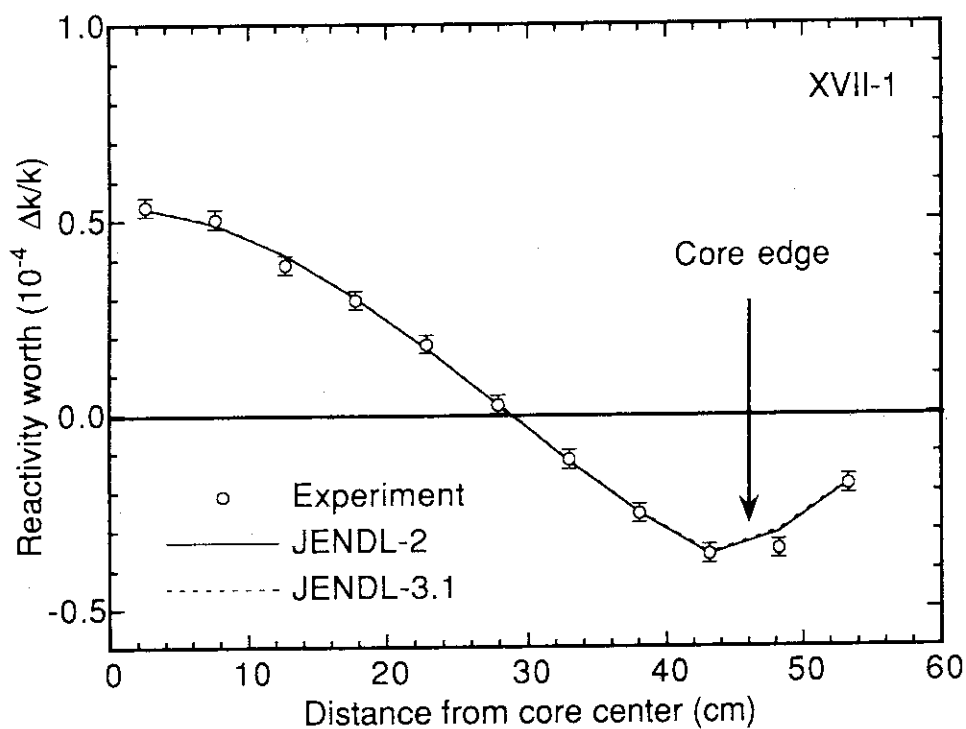


Fig. 4.6(c) Comparison between experimental and calculated step void reactivity worth in FCA XVII-1 (Calculation is corrected only for non-leakage term.)

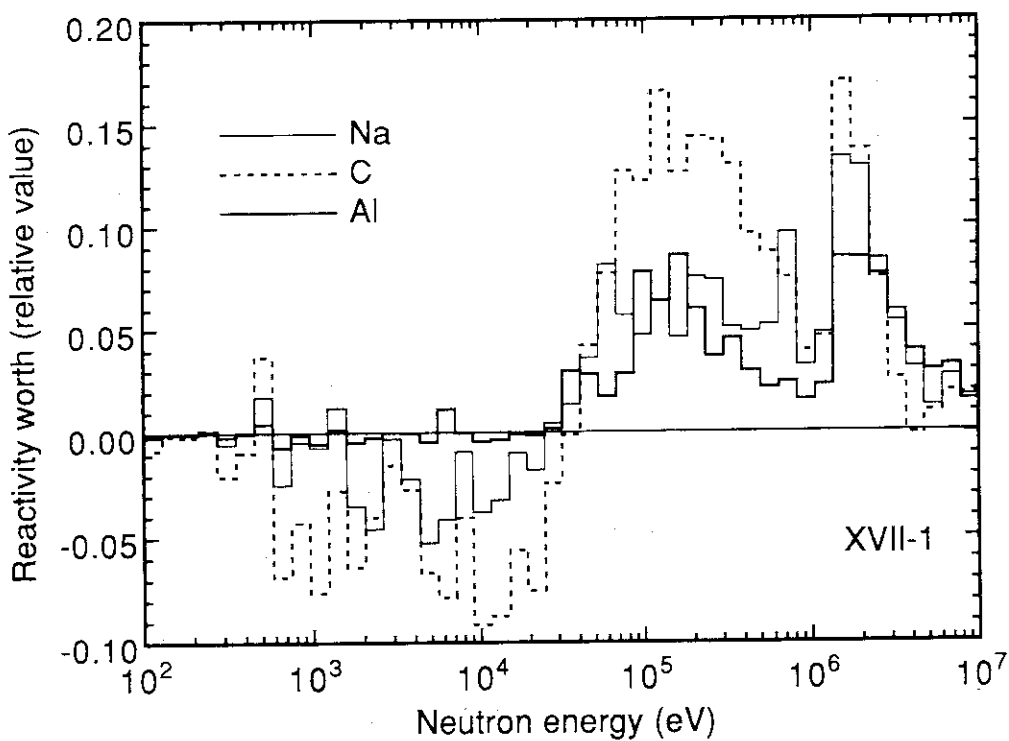


Fig. 4.7 Energy breakdown of sample reactivity worths of sodium, carbon and aluminum

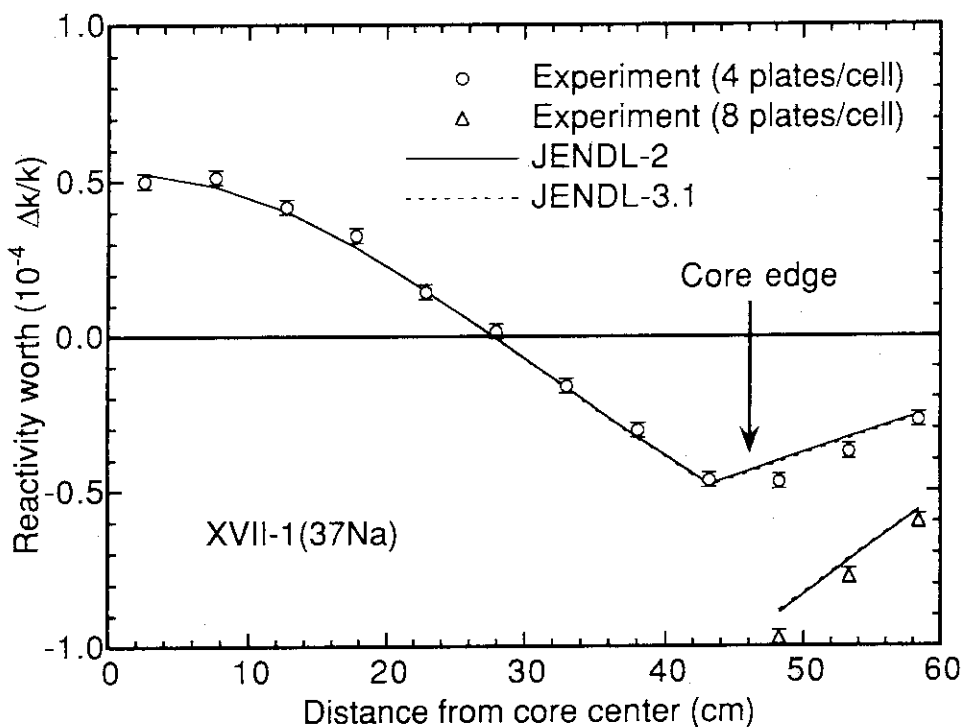


Fig. 4.8 Comparison between experimental and calculated step void reactivity worth in FCA XVII-1 with sodium layer (Calculation is corrected only for non-leakage term.)

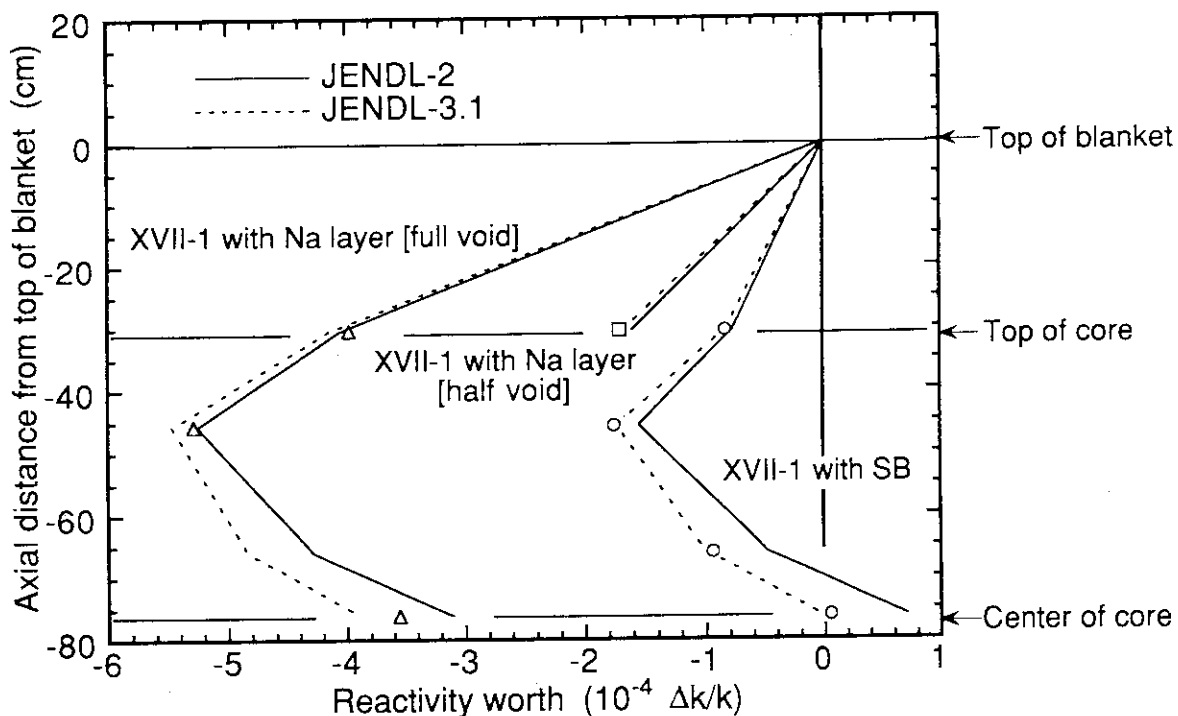


Fig. 4.9 Comparison between experimental and calculated sodium void reactivity worth for simulation of decrease of sodium level

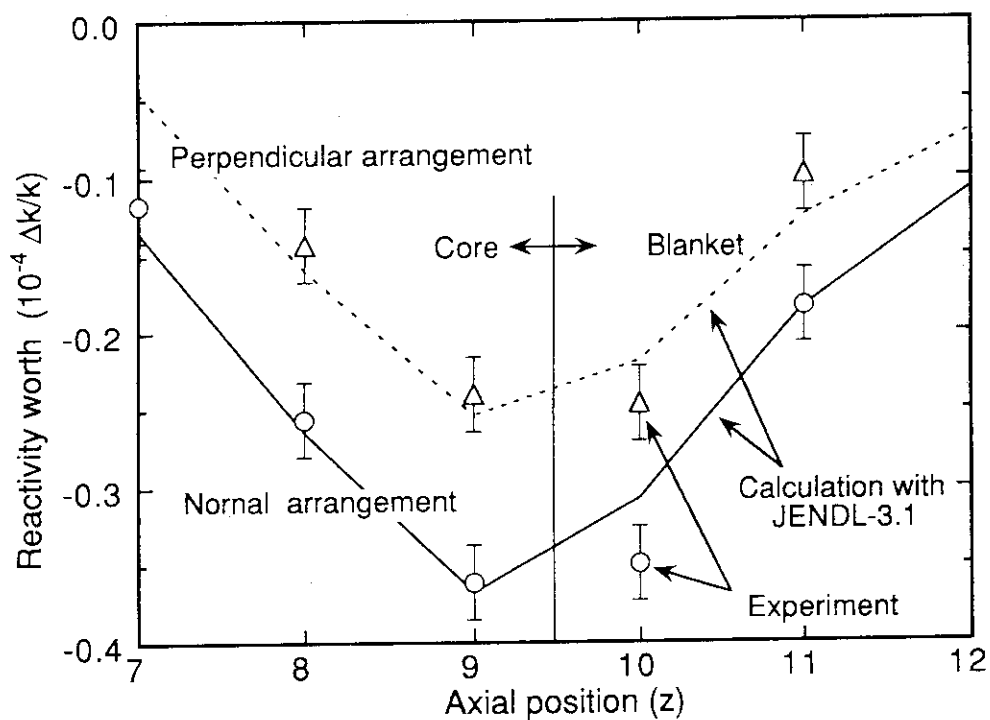


Fig. 4.10 Comparison between experimental and calculated sodium void reactivity worth for normal cell and perpendicularly arranged cell

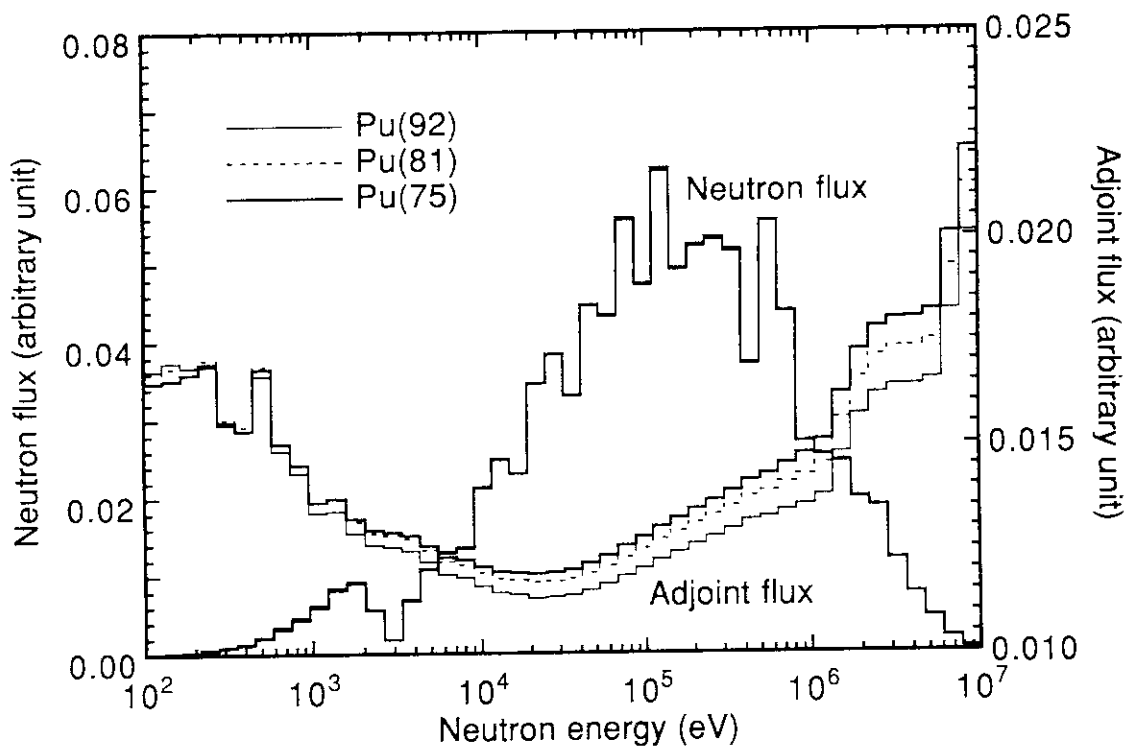


Fig. 4.11 Neutron spectra and energy distributions of adjoint neutron flux in FCA XVII-1 with various isotope composition of plutonium

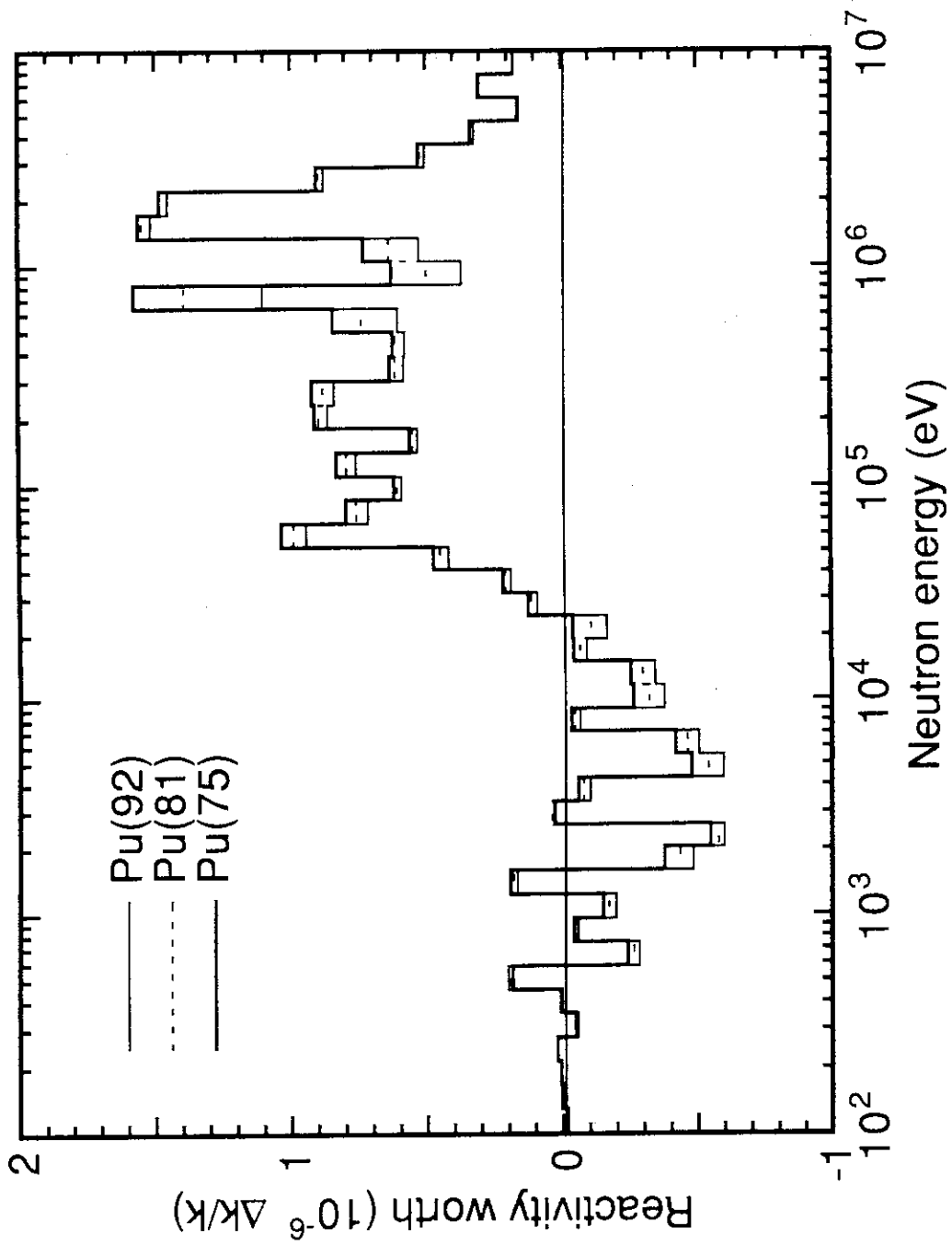


Fig. 4.12 Energy breakdown of sodium void reactivity worths in FCA XVI-1 with various isotope composition of plutonium

5. まとめ

高速炉のナトリウムボイド係数の予測精度向上に資することを目的として、FCAを使った金属燃料高速炉模擬体系XVI-1及びXVI-2、並びに、酸化物燃料高速炉模擬体系XVII-1の3集合体においてナトリウムボイド反応度値を測定した。

各集合体の特徴は次の3点である。(1)金属燃料高速炉模擬体系の中性子スペクトルは酸化物燃料高速炉模擬体系に比べて硬い。(2)内側炉心にプルトニウム板と20%濃縮ウラン板を用いているXVI-1集合体の随伴中性子束のエネルギー分布の形は濃縮ウラン板を使っていない他の集合体と異なる。(3)XVI-1及びXVI-2集合体の軸方向ブランケットは天然ウラン金属のブロックであるのに対して、XVII-1集合体は実際のブランケットを模擬したものである。よって、軸方向ブランケット内でのナトリウムボイド反応度値も測定できる。

測定は、1)局所的なボイドを炉心軸方向に移動させたステップボイド、2)ボイド領域を拡大させていくボイド規模依存性の2種類について、主に炉心中心軸に沿った固定側集合体3行×3列の領域で行った。ステップボイドの実験解析からナトリウムボイド反応度値の計算精度を非漏洩項と漏洩項に分けて評価し、ボイド規模依存性の実験解析から各項の計算精度に対するボイド規模の影響を系統的に評価した。その他に、XVII-1集合体では非漏洩項及び漏洩項それぞれに着目した種々の実験を行い、各項の計算精度に対する詳細な検討を行った。

解析においては、核データとしてJENDL-2及びJENDL-3.1を用いた。また、一部にJENDL-3.2を用いた計算を行い、核データ間の比較を行った。衝突確率法に基づくセル計算コードSLAROMを用いてセルの均質化を行い、異方性拡散係数を使った70群2次元RZ拡散計算を用いて体系計算を行った。摂動計算に対して非漏洩項と漏洩項に分けた輸送補正を加えて反応度値を求めた。また、セルモデルや輸送補正等のナトリウムボイド反応度値の計算結果に大きく影響を与える事項については、それらの計算手法に関する詳しい検討を行った。

ステップボイド及びボイド規模依存性の実験解析から次の点が明らかになった。

- (1) 非漏洩項に支配される各集合体炉心中心でのC/E値は、XVI-1、XVI-2、XVII-1集合体それぞれに対して、JENDL-2を用いた場合で1.20、1.08、1.16、JENDL-3.1を用いた場合で1.09、0.96、0.95となった。JENDL-3.1の計算値がJENDL-2よりも小さい主な理由は、数百keV近辺の随伴中性子束のエネルギー分布の勾配が緩やかになるためである。核データの違いによる効果が集合体間で異なるのは、ナトリウムボイド反応度値全体に占める数百keV近辺の持ち分の相違による。
- (2) JENDL-3.2を用いるとXVI-1集合体のみC/E値は1.04と改善されるが、他の集合体ではJENDL-3.1とほぼ等しい結果となる。
- (3) XVI-1集合体のようにU-235を含む場合の非漏洩項の計算精度はU-235を含まない場合と異なる傾向を示す。
- (4) 本研究で使った計算手法による漏洩項の計算精度は3つの集合体において良好であることが分かった。

た。しかし、漏洩項の計算値はセルの計算モデル、拡散係数の異方性を考慮するかどうか、輸送補正が適正に行われているかどうか等の計算手法に大きく影響を受けるため、注意を要することが分かった。

- (5) 炉心と軸方向ブランケットの境界では、ブランケット側で計算値が実験値よりも正側の値を示す傾向がある。
- (6) ボイド規模が大きくなった場合、正の寄与の非漏洩項と負の寄与の漏洩項が互いに打ち消しあうため、計算の相対的な精度は悪くなる。一方、非漏洩項を集合体中心付近でのC/E値で補正してやれば実験と計算はほぼ一致することが分かった。このことから、非漏洩項の計算精度が全体の計算精度を支配しており、漏洩項の計算精度はほぼ良好であると言える。すなわち、各項の計算精度にボイド規模依存性は見られなかった。

次に、XVII-1集合体のみで行った測定の実験解析から次の点が明らかとなった。

- (7) 散乱物質（アルミニウム及び黒鉛）のサンプル反応度値の炉心中心での計算精度は、ナトリウムボイド反応度値と同様に、JENDL-2が過大評価、JENDL-3が若干過小評価という傾向を示した。従って、これらの傾向はナトリウム等の散乱物質の断面積によるものではなく、体系の随伴中性子束のエネルギー分布の計算精度によるものであることが裏付けられた。
- (8) ナトリウム層はナトリウムボイド反応度値の低減化に有効であることが分かった。また、ナトリウム層付きの炉心におけるナトリウムボイド反応度値の予測精度は、炉心内では通常の軸方向ブランケット付きの場合と同様であるが、ナトリウム層内のボイドに対する計算精度は異なった傾向を示すことが分かった。
- (9) ナトリウム液位の低下模擬実験により、ナトリウム層が正のナトリウムボイド反応度係数抑制に有効であることが分かった。JENDL-3を用いた計算は、ナトリウム層での全ボイドを負側に評価する以外はほぼ良い精度でナトリウム液位の低下に伴う反応度変化を与えることが分かった。
- (10) 炉心中心軸に対してセルを垂直な方向に配置した場合でも、漏洩項の計算精度は良好であった。従って、異方性拡散係数の燃料板に平行な方向及び垂直な方向の双方の成分について、ナトリウムがボイドになったときの拡散係数の変化を計算は精度良く評価できていることが分かった。
- (11) ボイド規模依存性の測定を超えるような広領域ボイドの場合は、正の寄与の非漏洩項と負の寄与の漏洩項がともに大きいため、計算は非常に難しい。非漏洩項の計算精度を考慮しなければ、JENDL-2の場合は正負さえ不確かであり、JENDL-3でも30～80%の不一致があることが分かった。しかし、ボイド規模依存性の解析結果（上の(6)）と同様に、実験と計算の不一致は主に非漏洩項の計算精度によるものであり、漏洩項はほぼ良好に計算されていることが分かった。
- (12) プルトニウムの組成をPu-240の多いものに変えていくと、随伴中性子束のエネルギー分布の勾配が変化し、ナトリウムボイド反応度は正側に向かう。計算はこの傾向を良好に再現できることが分かった。

今後、ナトリウムボイド係数低減化を狙った炉心概念のうち、中性子スペクトルを柔らかくした炉心、偏平炉心、GEM(Gas Expansion Module)を持った炉心等のナトリウムボイド反応度値の測定を行っていく。

謝 辞

本研究を進めるに当たって多くの有益な助言と激励を戴いた高速炉物理研究室室長向山武彦氏並びに前室長中野正文氏に感謝いたします。また、実験の一部に参加して戴いた高速炉物理研究室安藤真樹氏並びに日立製作所エネルギー研究所坂東勝氏に感謝いたします。最後に、実験の遂行等の面で種々のご協力を戴いた大野秋男氏をはじめFCA管理機関員の諸氏に深く感謝いたします。

参考文献

- (1) 飯島 進, 大井川 宏之, 坂東 勝, 中野 正文: "FCAによる金属燃料高速炉ベンチマーク実験(I) - FCA XVI-1炉心の選定と臨界性-", JAERI-M 92-196 (1992).
- (2) 飯島 進, 大井川 宏之, 坂東 勝, 他: "FCAによる金属燃料高速炉ベンチマーク実験(II) - FCA XVI-1炉心の実験と解析-", JAERI-M 93-186 (1993).
- (3) 飯島 進, 大井川 宏之, 他: "FCA XVI-2", (公刊予定).
- (4) 飯島 進, 大井川 宏之, 他: "FCA XVII-1", (公刊予定).
- (5) Tomlinson L.: "Delayed Neutron from Fission", AERE-R 6993 (1972).
- (6) Saphier D., Ilberg D., Shalev S., and Yiftah S.: "Evaluated Delayed Neutron Spectra and Their Importance in Reactor Calculations", Nucl. Sci. Eng., 62, 660 (1997).
- (7) Nakagawa T.: "Summary of JENDL-2 General Purpose File", JAERI-M 84-103 (1984).
- (8) Shibata K., et al.: "Japanese Evaluated Nuclear Data Library, Version-3 - JENDL-3 -", JAERI 1319 (1990).
- (9) Takano H. and Ishiguro Y.: "Production and Benchmark Tests of Fast Reactor Group Constant set JFS-3-J2", JAERI-M 82-135 (1982).
- (10) 高野 秀機, 金子 邦男: "JENDL-3Tと-3T/Rev.1のベンチマーク・テスト", JAERI-M 89-147 (1989).
- (11) 原研核データセンター: 私信 (1994).
- (12) Nakagawa M. and Tsuchihashi K.: "SLAROM: A Code for Cell Homogenization Calculation of Fast Reactor", JAERI 1294 (1984).
- (13) Benoist P.: CEA-R-2278 (1964).
- (14) 飯島 進: "CITATION-FBR" (公刊予定).
- (15) 飯島 進, 吉田 弘幸, 桜木 廣隆: "高速炉設計用計算プログラム・2 (2次元・3次元拡散摂動理論計算コード: PERKY)", JAERI-M 6993 (1977).
- (16) Lathrop K. D. and Brinkley F. W.: "TWOTRAN-II: An Interfaced, Exportable Version of the TWOTRAN Code for Two-Dimensional Transport", LA-4848-MS (1973).
- (17) 角田 弘和: "角度依存摂動計算コード:SNPERT-II", 私信.

謝 辞

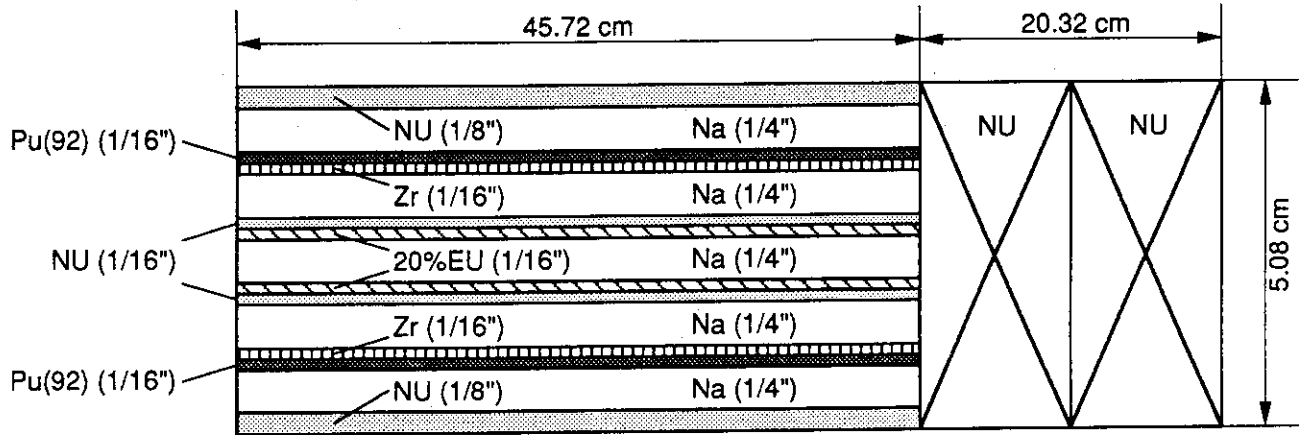
本研究を進めるに当たって多くの有益な助言と激励を戴いた高速炉物理研究室室長向山武彦氏並びに前室長中野正文氏に感謝いたします。また、実験の一部に参加して戴いた高速炉物理研究室安藤真樹氏並びに日立製作所エネルギー研究所坂東勝氏に感謝いたします。最後に、実験の遂行等の面でご協力を戴いた大野秋男氏をはじめFCA管理機関員の諸氏に深く感謝いたします。

参考文献

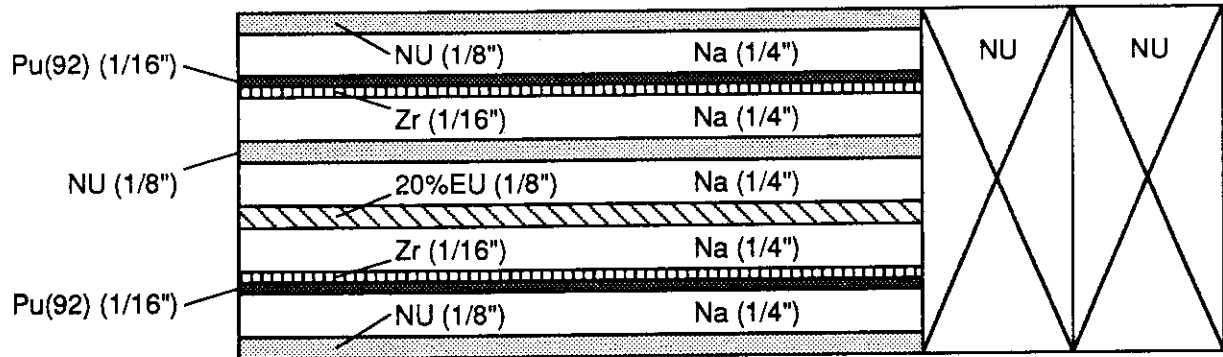
- (1) 飯島 進, 大井川 宏之, 坂東 勝, 中野 正文: "FCAによる金属燃料高速炉ベンチマーク実験(I) - FCA XVI-1炉心の選定と臨界性-", JAERI-M 92-196 (1992).
- (2) 飯島 進, 大井川 宏之, 坂東 勝, 他: "FCAによる金属燃料高速炉ベンチマーク実験(II) - FCA XVI-1炉心の実験と解析-", JAERI-M 93-186 (1993).
- (3) 飯島 進, 大井川 宏之, 他: "FCA XVI-2", (公刊予定) .
- (4) 飯島 進, 大井川 宏之, 他: "FCA XVII-1", (公刊予定) .
- (5) Tomlinson L.: "Delayed Neutron from Fission", AERE-R 6993 (1972).
- (6) Saphier D., Ilberg D., Shalev S., and Yiftah S.: "Evaluated Delayed Neutron Spectra and Their Importance in Reactor Calculations", Nucl. Sci. Eng., 62, 660 (1997).
- (7) Nakagawa T.: "Summary of JENDL-2 General Purpose File", JAERI-M 84-103 (1984).
- (8) Shibata K., et al.: "Japanese Evaluated Nuclear Data Library, Version-3 - JENDL-3 -", JAERI 1319 (1990).
- (9) Takano H. and Ishiguro Y.: "Production and Benchmark Tests of Fast Reactor Group Constant set JFS-3-J2", JAERI-M 82-135 (1982).
- (10) 高野 秀機, 金子 邦男: "JENDL-3Tと-3T/Rev.1のベンチマーク・テスト", JAERI-M 89-147 (1989).
- (11) 原研核データセンター: 私信 (1994).
- (12) Nakagawa M. and Tsuchihashi K.: "SLAROM: A Code for Cell Homogenization Calculation of Fast Reactor", JAERI 1294 (1984).
- (13) Benoist P.: CEA-R-2278 (1964).
- (14) 飯島 進: "CITATION-FBR" (公刊予定) .
- (15) 飯島 進, 吉田 弘幸, 桜木 廣隆: "高速炉設計用計算プログラム・2 (2次元・3次元拡散摂動理論計算コード: PERKY)", JAERI-M 6993 (1977).
- (16) Lathrop K. D. and Brinkley F. W.: "TWOTRAN-II: An Interfaced, Exportable Version of the TWOTRAN Code for Two-Dimensional Transport", LA-4848-MS (1973).
- (17) 角田 弘和: "角度依存摂動計算コード:SNPERT-II", 私信.

付録A 引き出し装填図

(a) IC1 drawer



(b) IC2 drawer



(c) OC1 drawer

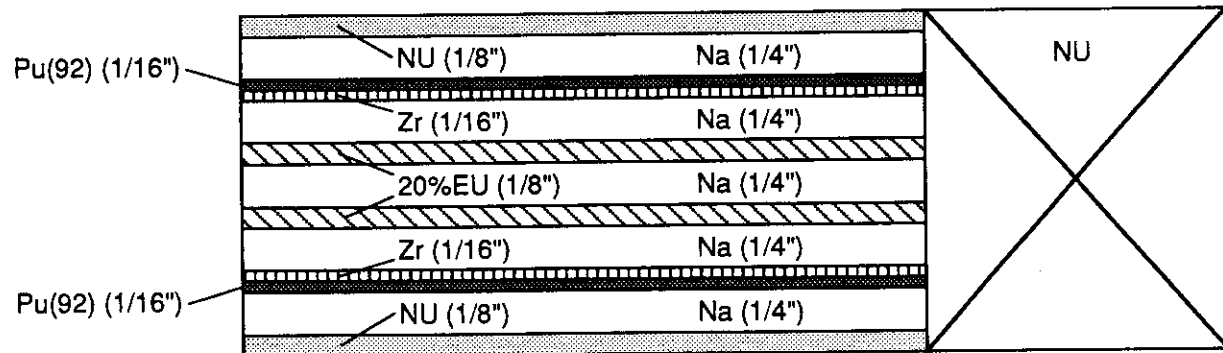
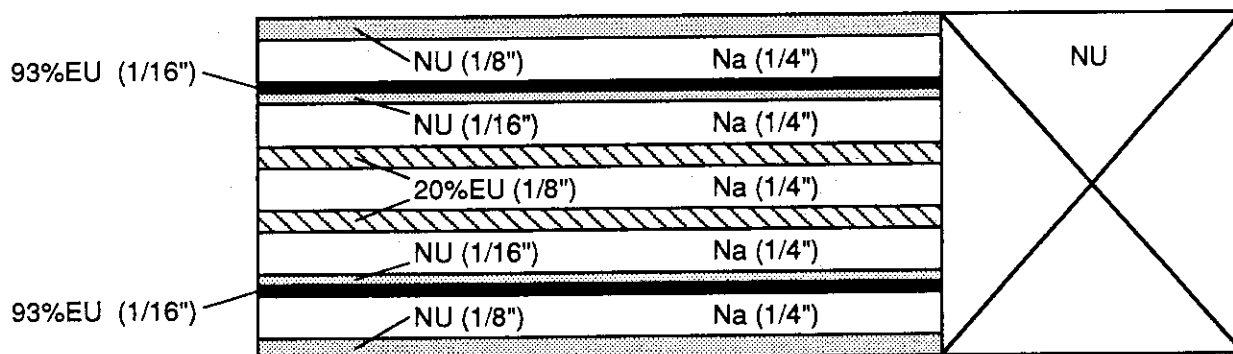


Fig. A.1 Plate configurations of drawers in FCA XVI-1

(d) OC2 drawer



(e) SCR drawer (Safety/Control rod)

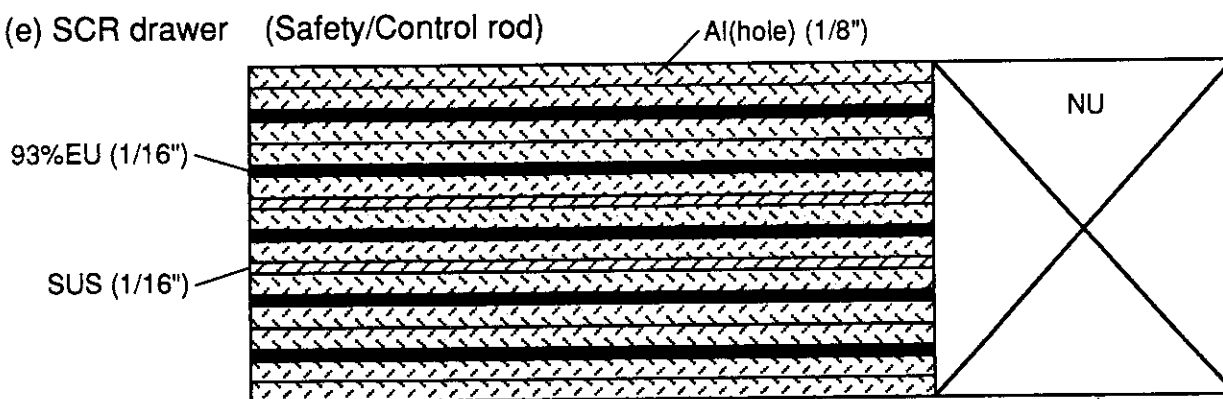
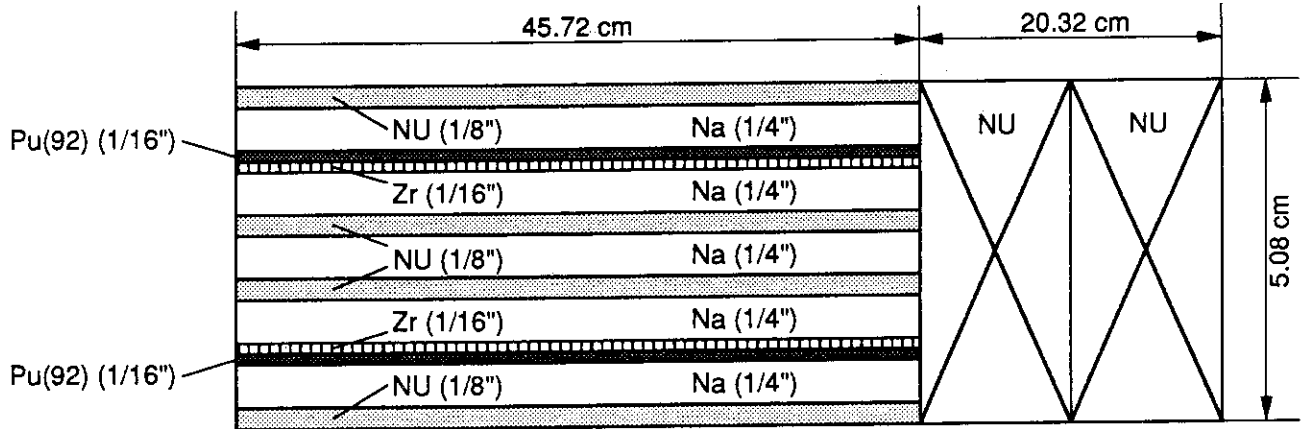
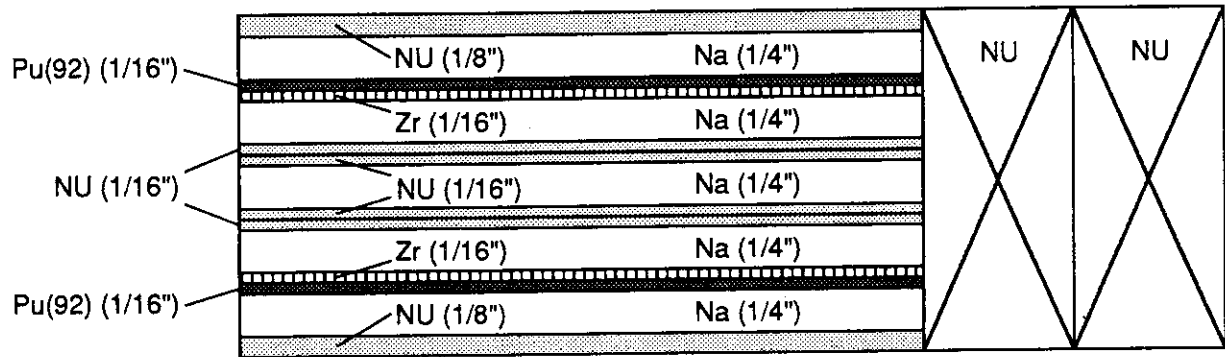


Fig. A.1 Plate configurations of drawers in FCA XVI-1 (continued)

(a) ICA drawer



(b) ICB drawer



(c) OC1A drawer

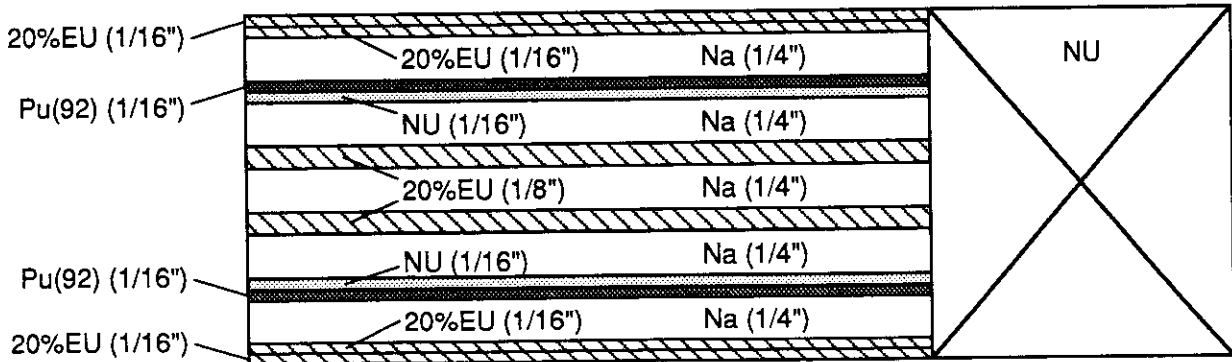
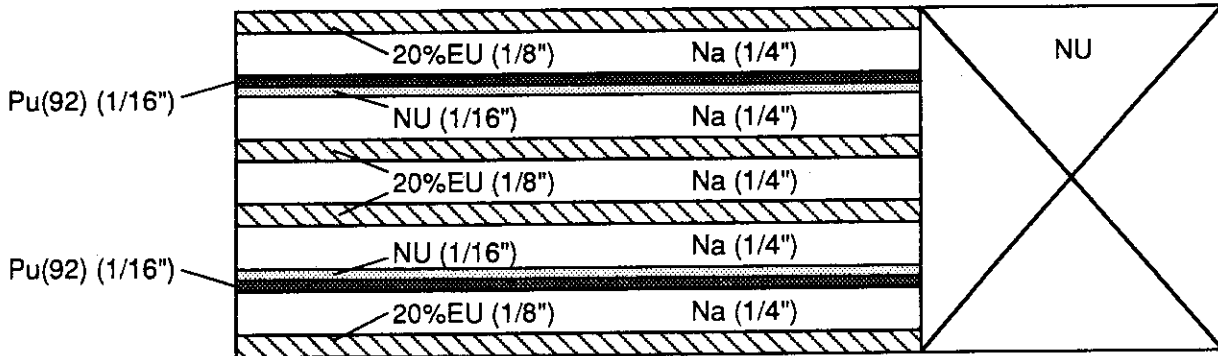
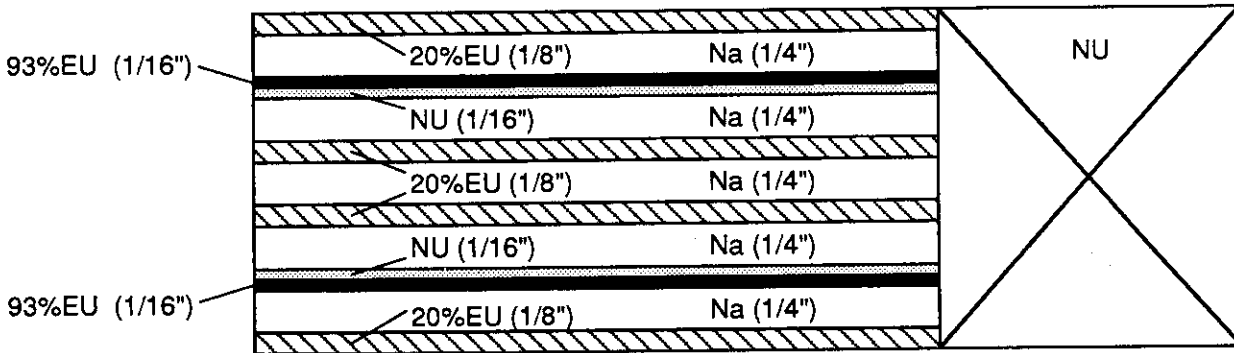


Fig. A.2 Plate configurations of drawers in FCA XVI-2

(d) OC1B drawer



(e) OC2 drawer



(f) SCR drawer (Safety/Control rod)

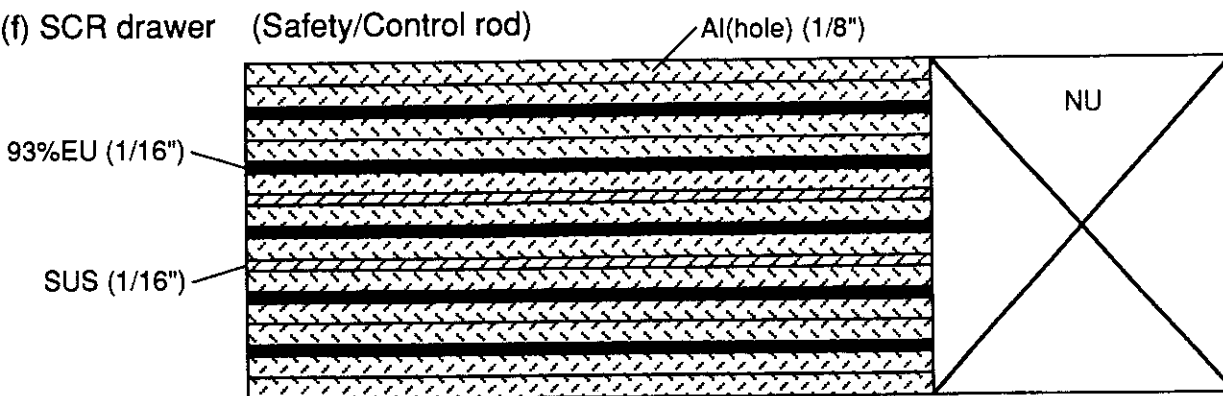
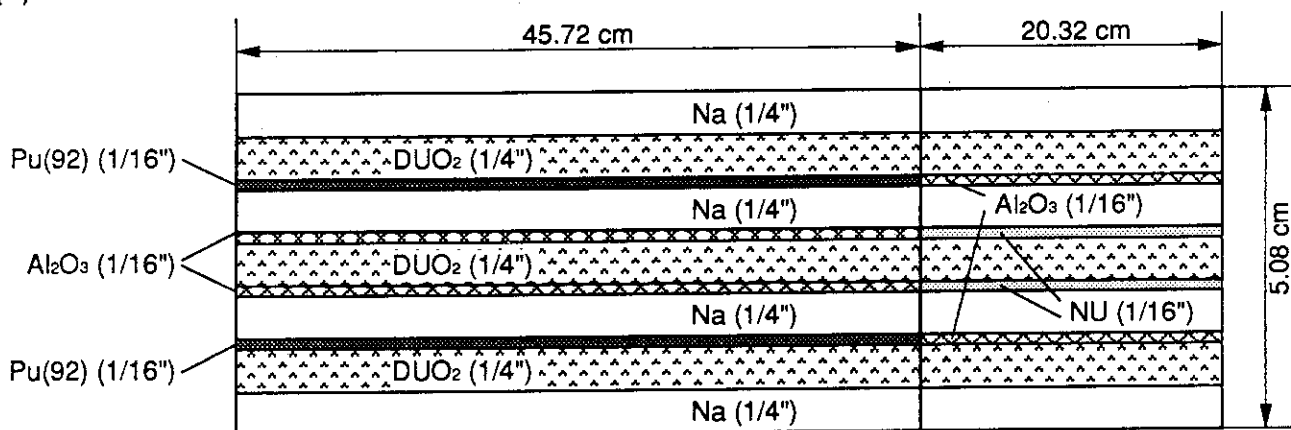
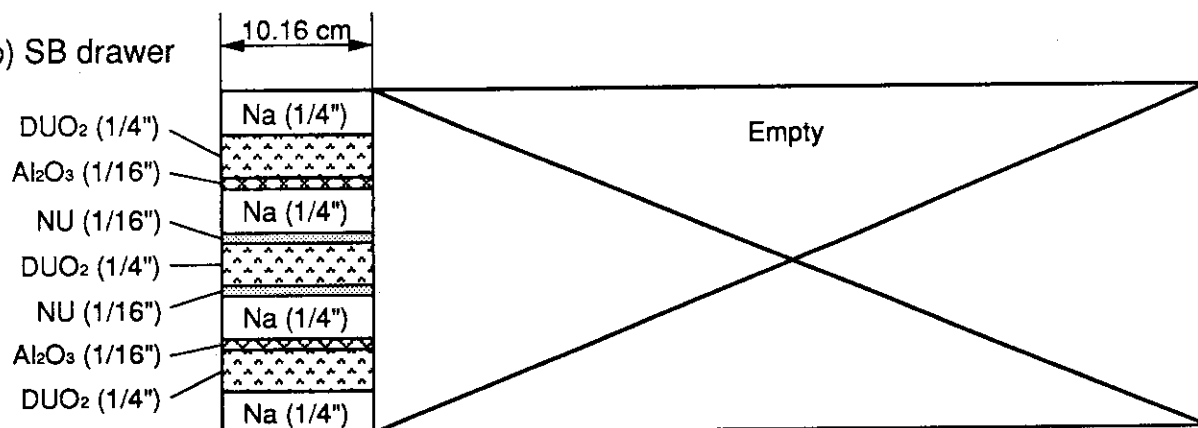


Fig. A.2 Plate configurations of drawers in FCA XVI-2 (continued)

(a) T2 drawer



(b) SB drawer



(c) PD drawer

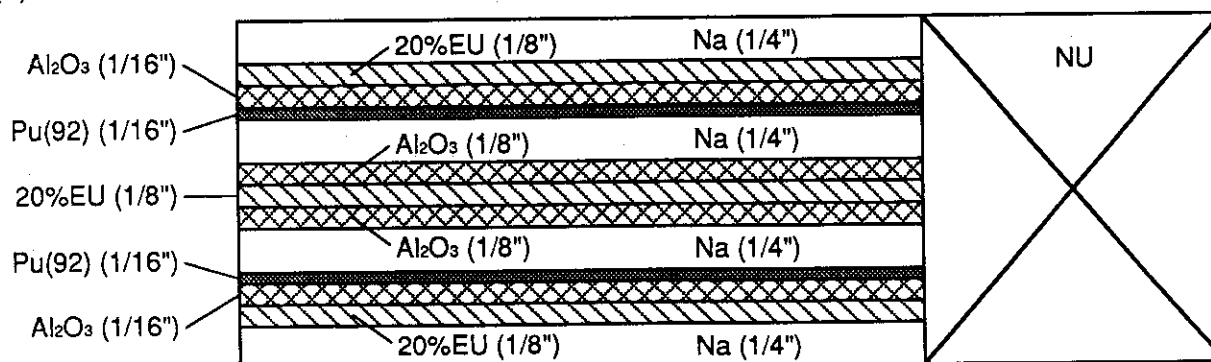
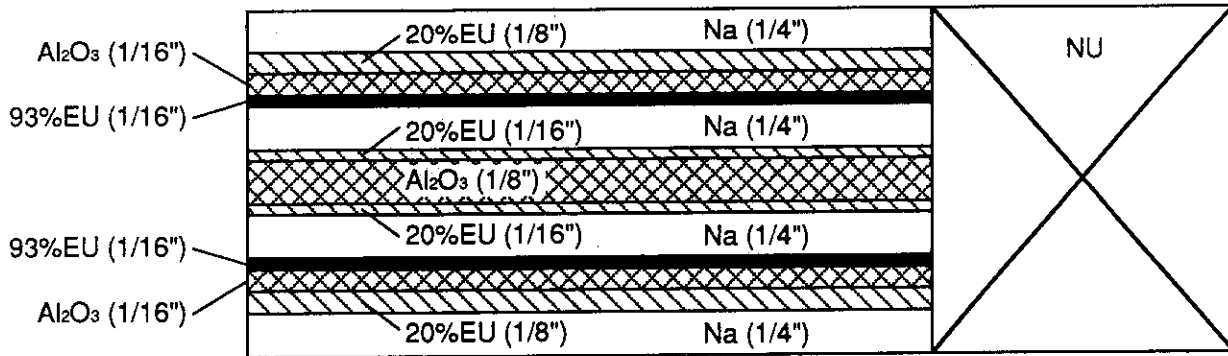


Fig. A.3 Plate configurations of drawers in FCA XVII-1

(d) UD drawer



(e) SCR drawer

(Safety/Control rod)

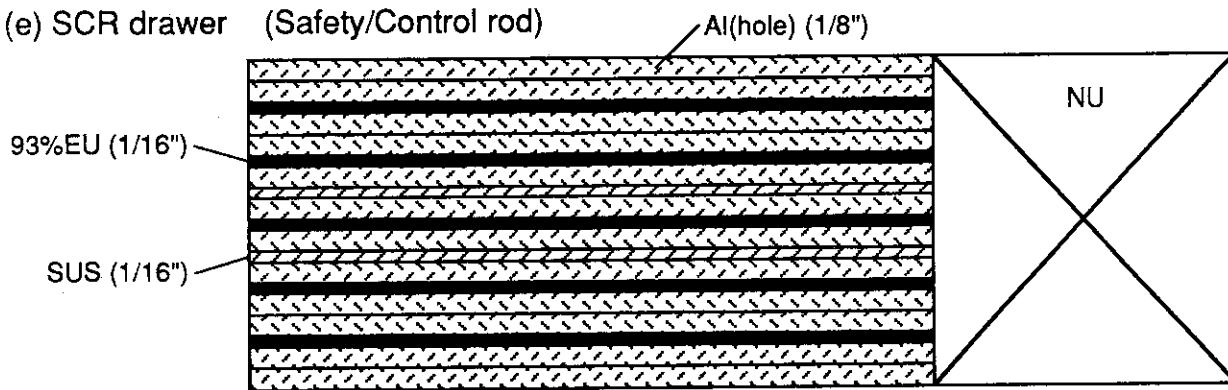
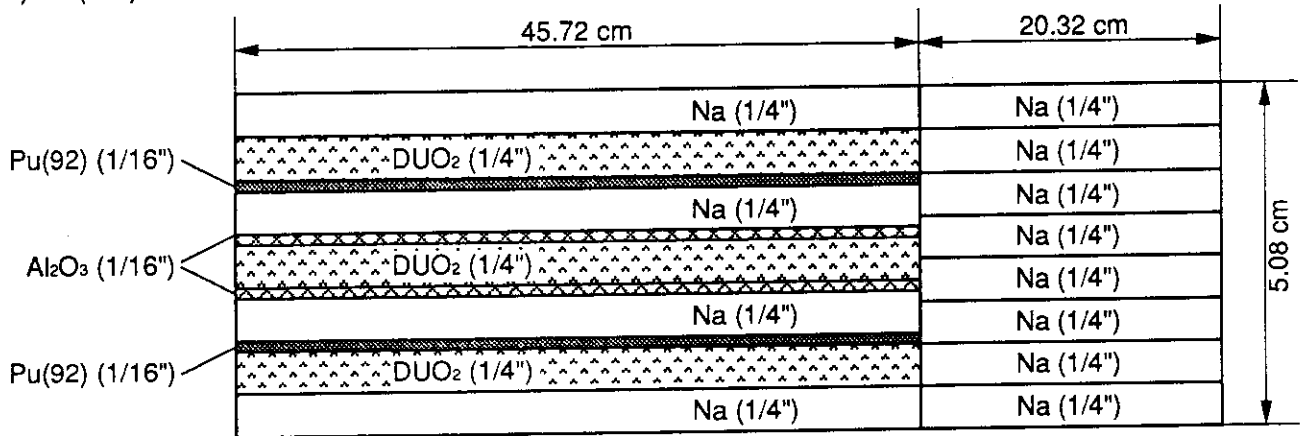


Fig. A.3 Plate configurations of drawers in FCA XVII-1 (continued)

(a) T2(Na) drawer



(b) Na drawer

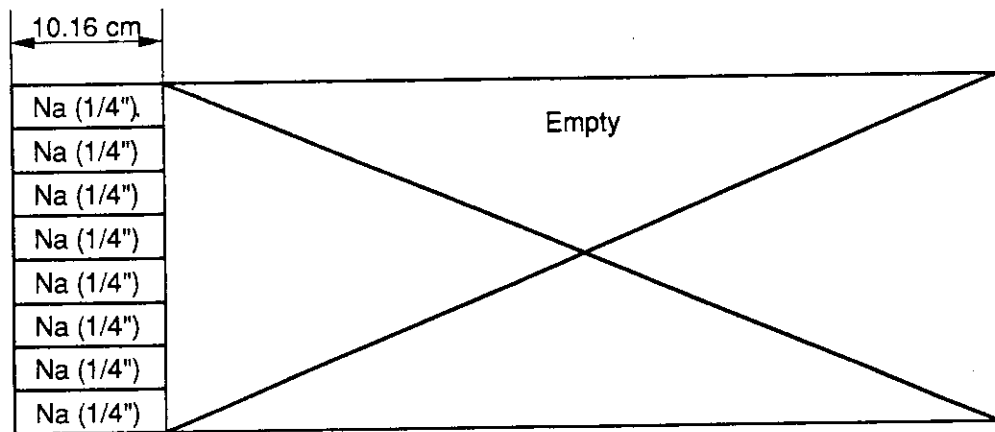


Fig.A.4 Plate configurations of drawers in FCA XVII-1 with sodium layer

付録B 原子数密度

Table B.1 Atomic number density of cells in FCA XVI-1

Cell name	ICI	IC2	OC1	OC2	SCR	NUB	DUB
H	1.5959E-4 ^{a)}	1.0079E-4	9.8816E-5	2.2380E-4	1.4696E-4		
C							
O	7.9764E-6	7.9764E-6	7.9764E-6				
Na	9.5705E-3	9.5705E-3	9.5705E-3	9.5705E-3			
Al	1.4997E-4	1.4997E-4	1.4997E-4		1.6951E-2	1.7719E-3	1.7719E-3
Cr	3.6741E-3	3.6741E-3	3.6741E-3	3.4062E-3	3.3675E-3	1.1779E-4	1.1779E-4
Mn	1.9442E-4	1.9442E-4	1.9442E-4	1.7544E-4	1.7113E-4	6.3353E-3	6.3353E-3
Fe	1.3373E-2	1.3373E-2	1.3373E-2	1.2343E-2	1.2081E-2	7.7241E-4	7.7241E-4
Ni	1.6860E-3	1.6860E-3	1.6860E-3	1.5522E-3	1.4575E-3		
Zr	2.0906E-3	2.0906E-3	2.0906E-3				
U-235	5.4285E-4	5.4307E-4	1.0154E-3	3.2937E-3	5.6514E-3	2.8968E-4	8.4422E-5
U-238	9.2592E-3	9.2597E-3	8.7664E-3	1.1376E-2	4.2724E-4	3.9888E-2	4.0174E-2
Pu-239	1.0455E-3	1.0455E-3	1.0455E-3				
Pu-240	9.2158E-5	9.2158E-5	9.2158E-5				
Pu-241	3.8615E-6	3.8615E-6	3.8615E-6				
Am-241	4.7898E-6	4.7898E-6	4.7898E-6				

a) Read as 1.5959×10^{-4} .

Table B.2 Atomic number density of cells in FCA XVI-2

Cell name	ICA	ICB	OCIA	OCIB	OC2	SCR	NUB	DUB
H	1.0277E-4 ^{a)}	1.8378E-4	1.9762E-4	1.6106E-4	2.1984E-4	1.4695E-4		
C	8.6256E-5	1.5425E-4	1.6585E-4	1.3517E-4	1.8451E-4	1.2335E-4		
O	5.2498E-5	8.7579E-5	8.5585E-5	6.9759E-5	9.5220E-5	6.3652E-5		
Na	9.5705E-3	9.5705E-3	9.5705E-3	9.5705E-3	9.5705E-3	1.6951E-2		
Al	1.4997E-4	1.4997E-4	1.4997E-4	1.4997E-4	1.4997E-4	3.3675E-3	9.7437E-4	9.7437E-4
Cr	3.6741E-3	3.6741E-3	3.6741E-3	3.6741E-3	3.4062E-3	1.7113E-4	4.9500E-5	4.9500E-5
Mn	1.9442E-4	1.9442E-4	1.9442E-4	1.9442E-4	1.7544E-4	1.2081E-2	3.4979E-3	3.4979E-3
Fe	1.3373E-2	1.3373E-2	1.3371E-2	1.3371E-2	1.2343E-2	1.4575E-3	4.2477E-4	4.2477E-4
Ni	1.6860E-3	1.6860E-3	1.6860E-3	1.6860E-3	1.5522E-3			
Zr	2.0906E-3	2.0906E-3						
U-235	7.0716E-5	7.0716E-5	1.9774E-3	1.9778E-3	4.2384E-3	5.6514E-3	2.8968E-4	8.4422E-5
U-238	9.7531E-3	9.7536E-3	1.0217E-2	1.0218E-2	1.0389E-2	4.2724E-4	3.9888E-2	4.0174E-2
Pu-239	1.0455E-3	1.0455E-3	1.0455E-3	1.0455E-3				
Pu-240	9.2158E-5	9.2158E-5	9.2158E-5	9.2158E-5				
Pu-241	3.6471E-6	3.6471E-6	3.6471E-6	3.6471E-6				
Am-241	5.0041E-6	5.0041E-6	5.0041E-6	5.0041E-6				

a) Read as 1.0277×10^{-4} .

Table B.3 Atomic number density of cells in FCA XVII-1

Cell name	T2	PD	UD	SCR	SB	NAB	NUB	DUB
H		7.1148E-5	1.4821E-4	1.4695E-4	6.6199E-5			
C		5.9707E-5	1.2439E-4	1.2335E-4	5.5560E-5			
O	1.7038E-2 ^{a)}	1.3133E-2	1.3427E-2	6.3652E-5	1.7066E-2	1.5313E-2		
Na	7.6564E-3	7.6564E-3	7.6564E-3	1.6951E-2	7.6564E-3			
Al	2.3188E-3	8.8251E-3	8.8785E-3	3.3675E-3	2.1688E-3	4.3868E-3	1.7719E-3	1.7719E-3
Cr	3.3473E-3	3.3473E-3	3.0794E-3	1.7113E-4	3.0794E-3	2.2671E-4	1.1779E-4	1.1779E-4
Mn	1.7733E-4	1.7733E-4	1.5835E-4	1.2081E-2	1.5835E-4	1.5931E-2	6.3353E-3	6.3353E-3
Fe	1.2175E-2	1.2175E-2	1.1147E-2	1.4575E-3	1.1147E-2	2.0200E-2	7.7241E-4	7.7241E-4
Ni	1.5301E-3	1.5301E-3	1.3962E-3		1.3962E-3			
Zr								
U-235	1.3954E-5	1.4701E-3	3.7305E-3	5.6514E-3	3.1633E-5		2.8968E-4	8.4422E-5
U-238	6.8690E-3	5.8348E-3	6.0049E-3	4.2724E-4	9.3075E-3		3.9888E-2	4.0174E-2
Pu-239	1.0455E-3	1.0455E-3						
Pu-240	9.2158E-5	9.2158E-5						
Pu-241	3.4653E-6	3.4653E-6						
Am-241	5.1860E-6	5.1860E-6						

a) Read as 1.7038×10^{-2} .