

J A E R I - M  
92-113

FCA XVI-1及びXVI-2炉心における  
 $^{238}\text{U}$  ドップラー反応度価値の測定と解析

1992年8月

大井川宏之・岡嶋 成晃・向山 武彦・佐藤 邦雄

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

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

入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこみください。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。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1992

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 ニッセイエプロ株式会社

FCA XVI-1及びXVI-2炉心における $^{238}\text{U}$  ドップラー反応度価値の測定と解析

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

大井川宏之・岡嶋 成晃・向山 武彦・佐藤 邦雄

(1992年7月6日受理)

金属燃料高速炉模擬炉心、FCA XVI-1 及びXVI-2 炉心において、天然ウランサンプルのドップラー反応度価値を、サンプル加熱法により測定した。金属燃料高速炉は炉心に酸素を含まないため、同出力規模の酸化物燃料高速炉に比べて中性子スペクトルが硬い。そこで、従来FCAで行われてきた酸化物炉心での測定・解析結果と比較することによって中性子スペクトルが硬くなつたことの計算精度に及ぼす影響を評価した。その結果、現状の70群群定数JFS-3-J2を金属燃料炉心に対して用いると $^{238}\text{U}$  ドップラー反応度価値の過小評価を招くことが判った。この過小評価の主な原因是、 $^{238}\text{U}$  の共鳴領域が50keVまでのJENDL-2から作成されたJFS-3-J2は、40.9keV以上のエネルギー群に $^{238}\text{U}$  の自己遮蔽因子を持たないため、高エネルギー領域のドップラー効果を考慮できないことにあると考えられる。そこで $^{238}\text{U}$  の共鳴領域を149keVまで考慮しているENDF/B-VIを用いて計算値にこのエネルギー領域の寄与分の補正を加えたところ、金属サンプルで13%、酸化物サンプルで8%程度ドップラー反応度価値の計算値は大きくなり、金属燃料炉心の解析のためにはJFS-3-J2でも40.9keV以上のエネルギー領域での共鳴を取り込む必要があることが判った。補正後のC/E値は0.6~1.0の間に広く分布しており、実験誤差を考慮しても依然として計算は実験よりも小さなドップラー反応度価値を与える。

Experimental Study of  $^{238}\text{U}$  Doppler Reactivity Worth  
in FCA XVI-1 and XVI-2 Cores

Hiroyuki OIGAWA, Shigeaki OKAJIMA, Takehiko MUKAIYAMA  
and Kunio SATOH

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

(Received July 6, 1992)

Doppler reactivity worths of natural uranium samples were measured in metallic fueled cores, FCA XVI-1 and XVI-2, using a sample heating technique. In a metallic fueled LMFBR, the neutron spectrum is generally harder than a similar size oxide fueled LMFBR owing to the lack of oxygen. The accuracy of Doppler effect calculation for a harder neutron spectrum was evaluated by comparing C/E values of Doppler reactivity worth in oxide fueled cores and in metallic fueled cores using FCA experiments. It was found that calculation using 70-group constant set JFS-3-J2 underestimates  $^{238}\text{U}$  Doppler reactivity worth in metallic fueled cores. An inadequate treatment of resonance parameters of  $^{238}\text{U}$  above 50 keV in JENDL-2 is one of the reasons for this underestimation. In JENDL-2 the resonance parameters of  $^{238}\text{U}$  above 50 keV are not included, and hence JFS-3-J2 which is processed from JENDL-2 does not have a self-shielding factor table above 40.9 keV of  $^{238}\text{U}$ . When the contribution of this energy region for Doppler reactivity worth was corrected using ENDF/B-VI, which includes resonance parameters of  $^{238}\text{U}$  up to 149 keV, the JFS-3-J2 based calculation gave 13% higher values for metallic sample experiments and 8% for oxide samples. Even after this correction, the calculation still gave smaller Doppler reactivity worths than the measurements, and the ratios of calculated value to experimental one vary widely from 0.6 to 1.0.

Keywords: Experiment, Uranium 238, Metallic Fueled LMFBR, Doppler Effect, Reactivity Worth, JENDL-2, ENDF/B-VI, FCA XVI Cores, Self-shielding Factor Table

## 目 次

1. 序 論 .....	1
2. 測 定 .....	2
2.1 測定体系 .....	2
2.2 測定方法 .....	3
3. 解 析 .....	8
3.1 標準計算 .....	8
3.2 高エネルギー中性子による $^{238}\text{U}$ ドップラー効果の評価 .....	8
3.3 炉心燃料中の $^{238}\text{U}$ による影響の評価 .....	9
4. 結果及び検討 .....	15
5. 結 論 .....	26
謝 辞 .....	27
参考文献 .....	27
付録 .....	29

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Experiment .....	2
2.1 FCA XVI Cores .....	2
2.2 Experimental Method .....	3
3. Calculation .....	8
3.1 Standard Calculation .....	8
3.2 Calculation Method of $^{238}\text{U}$ Doppler Reactivity Worth at High Energy Region .....	8
3.3 Calculation Method to Evaluate Influence of $^{238}\text{U}$ in Core Region .....	9
4. Results and Discussion .....	15
5. Conclusion .....	26
Acknowledgement .....	27
References .....	27
Appendix .....	29

## 1. 序　　論

金属燃料の高密度、高熱伝導率という特徴を活かした金属燃料高速炉は安全性、経済性の面から見て優れた性能を有している。核特性の面から見ると、金属燃料高速炉は炉心に酸素を含まないため、一般に同出力規模の酸化物燃料高速炉に比べて中性子スペクトルが硬くなる。その他、燃料密度が高い、燃料ペレットと被覆管の間にボンドナトリウムを充填する、燃料合金の材料としてジルコニウムを使用する等が酸化物燃料高速炉と異なる点である。これらの相違点が核特性に及ぼす影響を実験的に把握し、酸化物燃料高速炉の設計に使用してきた解析手法の金属燃料高速炉への適用性を検証するために、金属燃料高速炉模擬炉心FCA XVI-1及びXVI-2炉心を構築して基本核特性及び安全性に係る反応度係数の測定を行ってきた。

安全性に係る反応度係数のうち<sup>238</sup>Uのドップラー反応度係数は、金属燃料高速炉特有の硬い中性子スペクトルのために酸化物燃料高速炉に比べて絶対値が小さくなるものの、そのメカニズムが単純かつ燃料固有のものであるため、原子炉の異常な過渡変化時や事故時に負の即効性温度フィードバックとしての役割が大きく、その予測精度は金属燃料高速炉の安全性に大きく影響を及ぼす。

そこで、本研究では特に金属燃料高速炉での<sup>238</sup>Uドップラー反応度係数の予測精度の検証を行なうために、FCA XVI-1 及び XVI-2 炉心において、800℃までの<sup>238</sup>Uのドップラー反応度値を天然ウラン金属サンプル及び天然ウラン酸化物サンプルについてサンプル加熱法<sup>1)</sup>により測定した。

FCAでは従来、酸化物燃料炉心で<sup>238</sup>Uドップラー効果の測定を行ってきており、直徑25mm、長さ150mmの天然ウラン酸化物サンプル（U量：604.8g）を室温から800℃まで昇温した時の反応度変化のJFS-3-J2<sup>2)</sup>を用いた計算値と実験値の比（C/E値）は0.99～0.85であった<sup>3)</sup>。本研究では、まず酸化物炉心で標準的に行なってきた計算手法を用いて金属燃料炉心でのドップラー反応度値を計算し、酸化物燃料炉心における上記の予測精度と比較した。次に金属燃料高速炉特有の硬い中性子スペクトルの<sup>238</sup>Uドップラー反応度値に与える影響並びに炉心部の<sup>238</sup>Uがサンプルの<sup>238</sup>Uの共鳴自己遮蔽効果に及ぼす影響を評価した。

本報告書では、第2章で測定体系及び測定方法、第3章で標準計算の方法、高エネルギー中性子の影響及び炉心燃料中に含まれる<sup>238</sup>Uの影響の評価方法、第4章で実験及び計算の結果を示し、検討を行う。

## 2. 測 定

### 2.1 測定体系

#### FCA XVI-1 炉心

XVI-1 炉心は、プルトニウム (Pu) 及び濃縮ウラン (EU) を使った内側炉心と外側炉心を持つ2領域金属燃料高速炉模擬体系である。内側炉心はPu及び20%EUを燃料とした対称なセルで構成されるIC1引出し並びに非対称セルで構成されるIC2引出しが成るが、両引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及び20%EUを燃料としたOC1引出し及びEUのみを燃料としたOC2引出し、並びに制御安全棒(SCR)、微調整棒(FR)から成る。炉心装荷図をFig.2.1に示す。また、各引出しの装填図を付録Aに示す。

#### FCA XVI-2 炉心

XVI-2 炉心は、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ICA、ICBの2種の引出し（前者は厚さ1/8インチの天然ウラン板を使用、後者は1/16インチを2枚使用）で構成され、ドライバー領域はPu及び20%EUを燃料としたOC1引出し、EUのみを燃料としたOC2引出し並びに制御安全棒、微調整棒から成る。炉心装荷図をFig.2.2に示す。また、各引出しの装填図を付録Aに示す。

#### 両炉心の特徴

Table 2.1に両炉心の中心領域における諸元を、FCAにおける過去の代表的な酸化物燃料高速炉模擬炉心VI-1及びVI-2炉心（それぞれ高速原型炉もんじゅの外側及び内側炉心を模擬）の値と共に示す。

中心領域の核分裂性物質の原子数密度を見ると、XVI-1炉心はXVI-2炉心の約1.5倍となっており、それぞれVI-1及びVI-2炉心とほぼ対応している。一方、XVI炉心系の $^{238}\text{U}$ の密度は金属燃料を模擬しているため高く、核分裂性物質の富化度  $(\text{Pu-fissile} + ^{235}\text{U}) / (\text{Pu} + \text{U})$  はVI炉心系に比べて小さい。また、金属燃料の場合燃料ペレットと被覆管の間にボンドナトリウムを充填するため、ナトリウムの原子数密度は酸化物に比べて25%程度高い。その他、金属燃料では酸素の代わりに合金中のジルコニアを含む。

Fig.2.3に上記4炉心の炉心中心における中性子束のエネルギースペクトルを示す。2MeV以上のエネルギーを持つ中性子の割合は金属、酸化物に関係なく富化度の高い炉心ほど大きくなっている。しかし、酸化物炉心では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100keV近辺から下の中性子の割合が大きいことが判る。

一般に金属燃料高速炉では中性子スペクトルが硬いと言われているが、それは数百keVの中性子が多く、100keV以下の中性子が少ないと言うことであって、全体的に高エネルギー側へシフトしている訳ではない。 $^{238}\text{U}$ ドッpler効果は主に数十keV以下で起こり、上述の金属燃料高速

炉の中性子スペクトルの特徴の影響を大きく受ける。Table 2.1に示したスペクトルインデックスSPI-1は炉心中心における中性子の内<sup>238</sup>Uドップラー反応度価値に大きく寄与する40.9keV～101eV (JFS-3-J2の70群構造で23～46群) の中性子の割合である。金属燃料では富化度が低く、ナトリウムの密度も高いにも係わらず3～4割程度SPI-1は小さくなっており、中性子スペクトルが硬いことが判る。

## 2.2 測定方法

測定はFCAで従来から行われているサンプル加熱・オシレーション法<sup>1)</sup>で行った。ドップラー効果を測定したサンプルは直径25mm、長さ150mmの天然ウラン金属 (NU-metal(25\*)) 及び天然ウラン酸化物 (NUO<sub>2</sub>(25\*)) であり、XVI-2炉心では直径20mm、長さ150mmの天然ウラン酸化物サンプル (NUO<sub>2</sub>(20\*)) でも測定した。各サンプルの諸元をTable 2.2に示す。各サンプルはそれぞれ不銹鋼 (SUS) 製カンに封入されており、それをSUS製加熱容器に収納し、炉心中心軸上のドップラー引出しにセットする。ドップラー引出しには加熱容器の他に室温のダミーサンプルを置き、双方を交互に炉心中心に出し入れすることにより時間経過に伴う温度ドリフト等による反応度の変化を相殺する。

加熱によるサンプルの温度変化に伴う反応度変化は、原子炉出力を常に一定に保つような微調整棒の位置の変化から求める。この時、原子炉の出力を検出するUIC検出器の電流出力に90%のバックキングカレントを加えて出力変動を10倍に拡大して精度の良い制御を行った。微調整棒はPID制御で自動運転し、微調整棒の位置を0.5秒に1回の割合で数百回サンプリングしてその平均値を一つの測定点とした。サンプル正味のドップラー反応度価値はサンプルの入っていない空のカンで同様の測定を行って、サンプル以外 (カン、 加熱容器等) の温度変化による寄与を差し引いて得ることができる。測定を行った温度は室温から300℃、550℃及び800℃の3点である。ドップラー反応度価値の測定精度は同一サンプル、同一温度で数回行った測定値のばらつきから求め、概ね  $\pm 2 \times 10^{-7} \Delta k/k$  程度であった。付録Bに微調整棒の較正について示す。

Table 2.1 Cell parameters of central region in FCA XVI-1 and XVI-2 cores  
compared with those of oxide fueled cores at FCA

Core name	Metallic fuel		Oxide fuel	
	XVI-1	XVI-2	VI-1 <sup>a)</sup>	VI-2 <sup>b)</sup>
<b>Atomic number density (<math>10^{22}/\text{cm}^3</math>)</b>				
$^{239}\text{Pu} + ^{241}\text{Pu}$	0.105	0.105	0.158	0.105
$^{235}\text{U}$	0.054	0.007	0.001	0.002
$^{238}\text{U}$	0.926	0.975	0.687	0.692
Na	0.957	0.957	0.766	0.766
O	0.001	0.001	1.540	1.726
<b>Fissile enrichment<sup>c)</sup></b>	14.5%	10.2%	18.6%	13.3%
Zr (w/o)	6.8%	6.8%	0%	0%
SPI-1 <sup>d)</sup>	0.146	0.171	0.203	0.269
Pu plate sample worth <sup>e)</sup> ( $10^{-4} \Delta k/k$ )	1.19	0.89	1.70	1.16

a) Simulating outer core of "MONJU"

b) Simulating inner core of "MONJU"

c)  $[^{235}\text{U} + ^{239}\text{Pu} + ^{241}\text{Pu}] / [\text{U} + \text{Pu}]$  (w/o)

d) Spectrum index indicating the proportion of neutrons between 101eV~40.9keV

to all neutrons at core center

e) Measured value for 35.3g of Pu

Table 2.2 Doppler samples

Sample	Material	Enrichment	Diameter and length (mm)	Total U mass (g)
NU-metal(25 $\%$ )	U(metal)	Natural U	24.8 x 150.0	1346.7
NUO <sub>2</sub> (25 $\%$ )	UO <sub>2</sub>	Natural U	25.0 x 150.0	604.8
NUO <sub>2</sub> (20 $\%$ )	UO <sub>2</sub>	Natural U	20.0 x 150.0	376.7

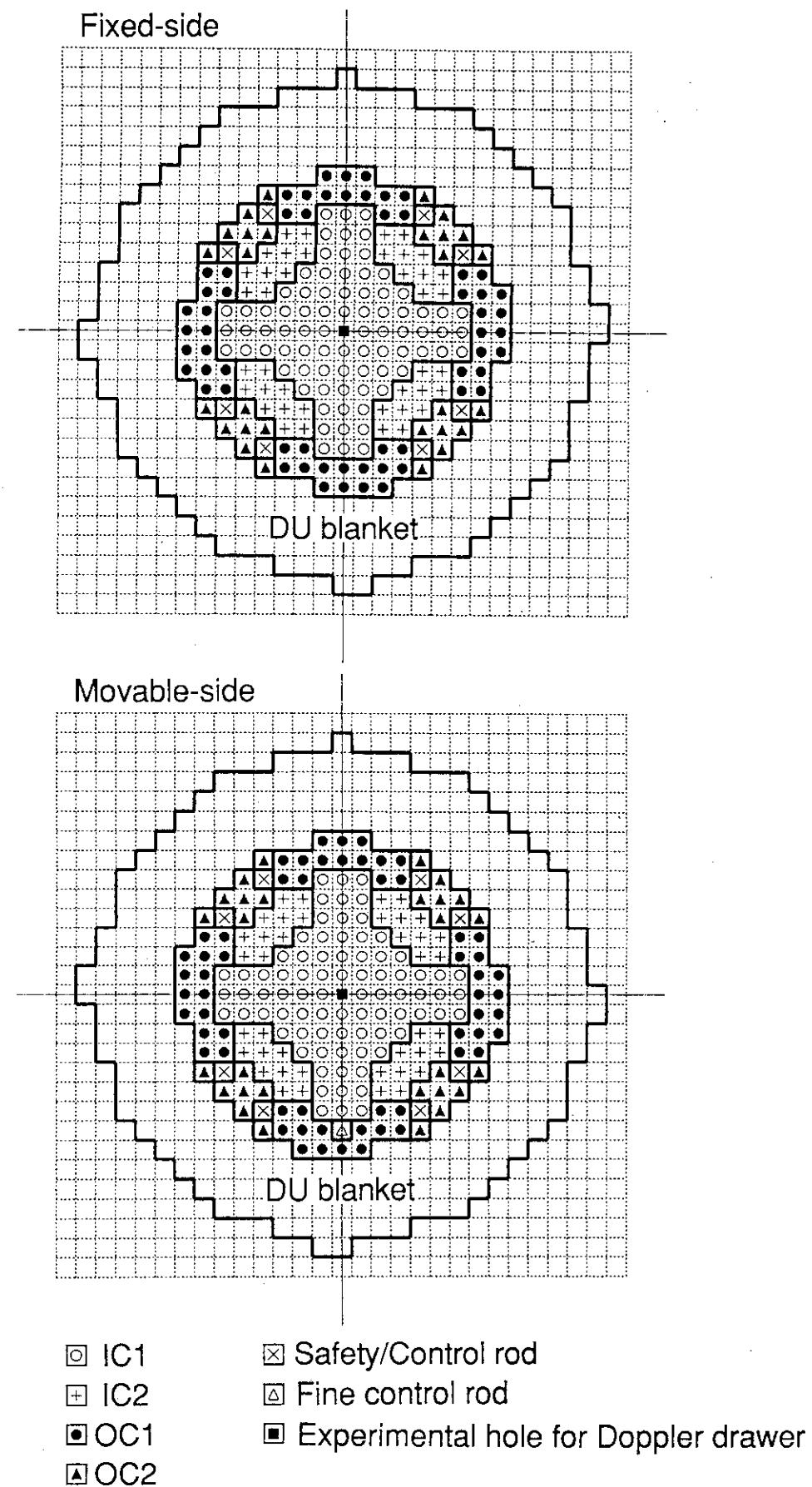


Fig.2.1 Vertical cross sections of FCA XVI-1 core for Doppler experiment

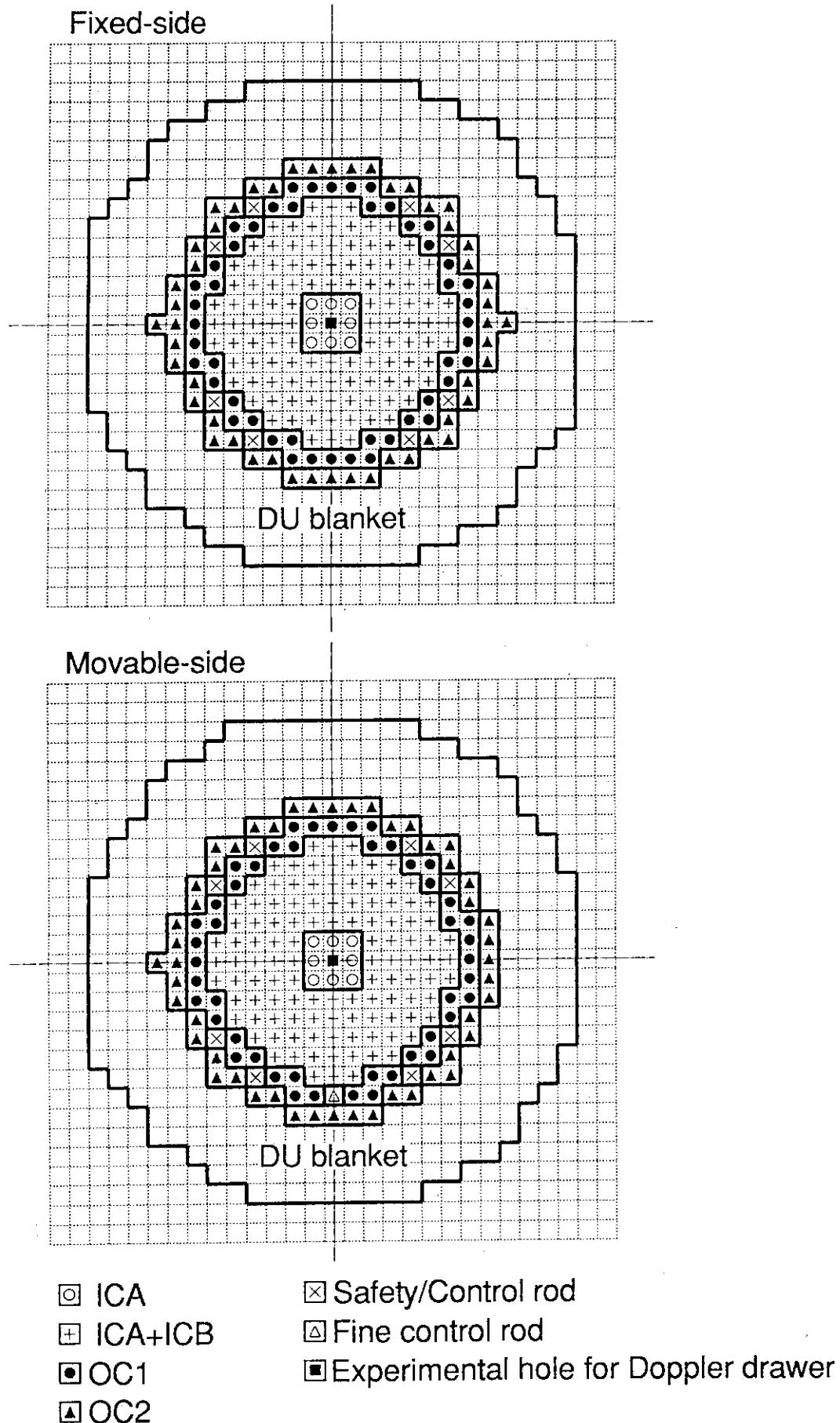


Fig.2.2 Vertical cross sections of FCA XVI-2 core for Doppler experiment

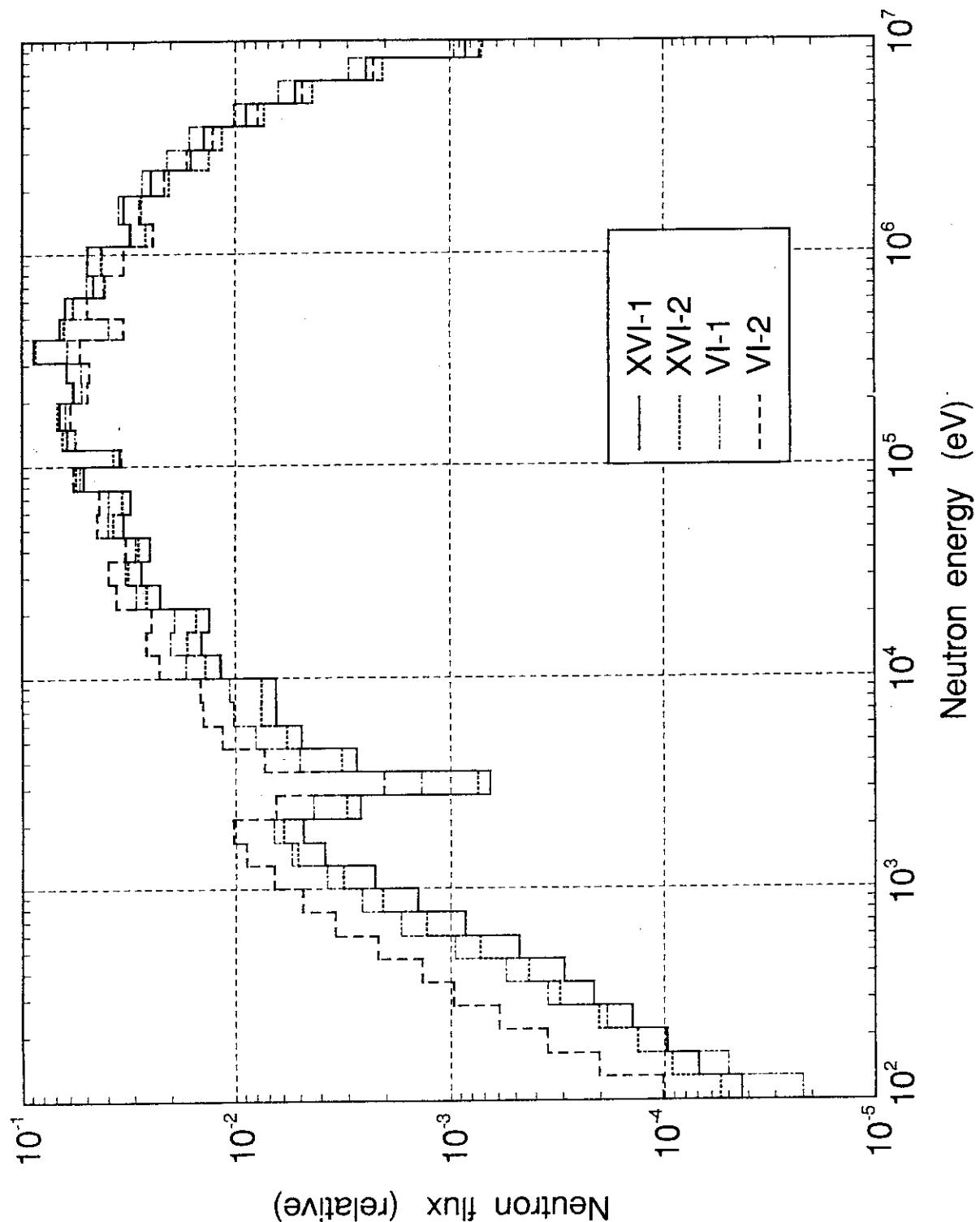


Fig. 2.3 Comparison of neutron energy spectra between FCA XVI cores and FCA VI cores  
(mockup cores of oxide fueled LMFR)

### 3. 解 析

FCAでこれまで行われてきたドップラー反応度価値の解析と同様の手法により標準計算を行い、次いで、高エネルギー中性子による寄与の補正のための計算及び炉心燃料中の<sup>238</sup>Uによるサンプルの<sup>238</sup>Uの共鳴自己遮蔽効果の評価のための計算を行った。

#### 3.1 標準計算

炉心やブランケットを構成するセル並びにドップラーサンプル及び加熱容器の実効断面積は、衝突確率法に基づくセル計算コードSLAROM<sup>4)</sup>を使ってJFS-3-J2 70群群定数セット<sup>2)</sup>より求め。ここで、炉心部は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たセル実効断面積を作成した。一方、サンプルについてはFig.3.1に示したようなサンプルを加熱容器（図のcapsule）及び炉心（均質媒質）が囲む1次元円柱スーパーセルモデルによりサンプル温度毎の実効断面積を求めた。このスーパーセルモデルによりサンプルの大きさが有限であること（非均質性）を考慮できる。

体系計算は、サンプル温度20°Cの場合について70群2次元R-Zモデル（Fig.3.2, 3.3）により、非等方拡散係数を用いてCITATION-FBRコード<sup>5)</sup>により行い、中性子束及び随伴中性子束を保存する。ドップラー反応度価値は1次摂動理論に基づき、摂動計算コードPERKY<sup>6)</sup>によりサンプル部の実効断面積が20°Cの時のものから各温度に変化した時の反応度から求める。

Table 3.1に各領域の原子数密度を示す。

#### 3.2 高エネルギー中性子による<sup>238</sup>Uドップラー効果の評価

標準計算に用いたJFS-3-J2 70群群定数セットは、<sup>238</sup>Uの共鳴領域が50keVまでの評価済み核データファイルJENDL-2<sup>7)</sup>に基づき作成されているため、第22群すなわち40.9keV以上の中性子エネルギーにおける<sup>238</sup>Uドップラー効果は取扱えない。しかし、金属燃料高速炉特有の硬い中性子スペクトルにおいてはこの40.9keV以上の寄与は無視できないと考えられる。

そこで、149keVまで共鳴を評価しているENDF/B-VI<sup>8)</sup>を処理して<sup>238</sup>UのJFS-3-J2タイプ70群群定数セットを作成した。それを用いて標準計算と同様のサンプル部のセル計算を行い、サンプル部の温度変化に伴う実効捕獲断面積の変化 $\Delta \Sigma_c$ を第18～第22群（143～40.9keV）について求めた。Fig.3.4に $\Delta \Sigma_c$ の例を示す。JFS-3-J2による $\Delta \Sigma_c$ （40.9keV以下）とENDF/B-VIによる $\Delta \Sigma_c$ （40.9keV以上）はほぼ連続的に変化している。また、 $\Delta \Sigma_c$ の対数は中性子エネルギーの対数に対してほぼ直線状に減少していることから、第17群すなわち143keV以上の $\Delta \Sigma_c$ は外挿によって求めた。以上で得られた40.9keV以上の $\Delta \Sigma_c$ から標準計算で求めた中性子束及び随伴中性子束を用いて1次摂動計算を行い、ドップラー反応度価値における40.9keV以上のエネルギー領域の寄与を評価した。

3.3 炉心燃料中の<sup>238</sup>Uによる影響の評価

SLAROMにおいて<sup>238</sup>Uの実効捕獲断面積は群平均の無限希釈断面積に自己遮蔽因子を乗じて計算される。

$$\langle \sigma_c \rangle = \overline{\sigma_c} \times f_c(T, \sigma_0) \quad (1)$$

$\langle \sigma_c \rangle$  : 実効捕獲断面積  
 $\overline{\sigma_c}$  : 無限希釈捕獲断面積  
 $f_c(T, \sigma_0)$  : 温度 T, 希釈断面積  $\sigma_0$  の時の捕獲反応に対する自己遮蔽因子

$f_c(T, \sigma_0)$ はT,  $\sigma_0$ の関数のf-tableとして群定数セットに収納されており、T,  $\sigma_0$ の値から内挿して求める。希釈断面積  $\sigma_0$ は円柱非均質セルの場合、

$$\sigma_0 = \sigma_0^* + \frac{1}{2N^{28}R} \cdot \frac{a(1-C)}{1 + (a-1)C} \quad (2)$$

$$\text{ここで, } \sigma_0^* = \sum_{k \neq 28} \frac{N^k \sigma_1^k}{N^{28}}$$

$$C = 1 - \gamma - \gamma^4(1-\gamma)$$

$$\gamma = \frac{1}{1 + \sum_{el} / \sum_1}$$

$$\sum_{el} = \frac{R}{2R_0^2}$$

$N^k$  : 核種kの中心領域（燃料領域）における原子数密度 ( $k=28$  : <sup>238</sup>U)

$\sigma_1^k$  : 核種kの全断面積

$\sum_1$  : 外側領域（希釈領域）の巨視的平均全断面積

R : 中心領域の半径 (Fig.3.1では  $R_s$ )

$R_0$  : 外側境界の半径 (Fig.3.1では 31cm)

a : レビンファクタ

で与えられ、通常の高速炉ピン配列では他の燃料棒による自己遮蔽はダンコフ係数 C により考慮される。しかし、SLAROMにおいてはFig.3.1に示したスーパーセルモデルでは中心のサンプルを取り囲む炉心領域は単なる散乱体と見なされ、 $\gamma \sim 1$ ,  $C \sim 0$ となり結局  $\sigma_0$ は、

$$\sigma_0 \sim \sigma_0^* + \frac{a}{2N^{28}R} \quad (3)$$

となる。つまり、サンプルにある $^{238}\text{U}$ は炉心燃料中の $^{238}\text{U}$ による共鳴の自己遮蔽を受けないことがある。このようなモデルを「孤立円柱モデル（Isolated cylinder model）」と呼ぶことにする。孤立円柱モデルでのNU-metalサンプル及び $\text{NUO}_2$ サンプルの $\sigma_0$ の大凡の値は以下の通りである。

$$\begin{aligned} \text{NU-metal}(25\%) & N^{28} = 4.667 \times 10^{-2} \text{ atoms/b.cm} \\ & N^{25} = 3.405 \times 10^{-4} \text{ atoms/b.cm} \\ & \sigma_i^{25} \sim 16b, R = 1.24\text{cm}, a = 1.3 \text{ として} \\ & \sigma_0 = 0.12 + 11.2 = 11.3b \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{NUO}_2(25\%) & N^{28} = 2.063 \times 10^{-2} \text{ atoms/b.cm} \\ & N^{25} = 1.503 \times 10^{-4} \text{ atoms/b.cm} \\ & N^8 = 4.157 \times 10^{-2} \text{ atoms/b.cm} \\ & \sigma_i^{25} \sim 16b, \sigma_i^8 \sim 3.7b, R = 1.25\text{cm}, a = 1.3 \text{ として} \\ & \sigma_0 = 7.6 + 25.2 = 32.8b \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{NUO}_2(20\%) & N^{28} = 2.008 \times 10^{-2} \text{ atoms/b.cm} \\ & N^{25} = 1.463 \times 10^{-4} \text{ atoms/b.cm} \\ & N^8 = 4.045 \times 10^{-2} \text{ atoms/b.cm} \\ & \sigma_i^{25} \sim 16b, \sigma_i^8 \sim 3.7b, R = 1.00\text{cm}, a = 1.3 \text{ として} \\ & \sigma_0 = 7.6 + 32.4 = 40.0b \end{aligned}$$

これより、サンプル中の $^{238}\text{U}$ 共鳴自己遮蔽は(3)式の右辺第2項に大きく支配されていることが分かる。炉心の $^{238}\text{U}$ によるサンプルの $^{238}\text{U}$ の自己遮蔽を考慮すると(2)式で $0 < \gamma < 1, 0 < C < 1$ であり、よって $\sigma_0$ の値は右辺第2項が小さくなることによる影響を大きく受けると考えられる。

この影響をSLAROMを使って評価する。ここではFig.3.5に示したように、燃料棒と希釈材からなる単位セルを考える。燃料棒はサンプルと同一組成、同一半径とし、炉心の各核種の原子数密度を保存するようにセルの半径 $R_{\text{cell}}$ 及び希釈材の原子数密度を定める。このモデルを「円柱配列モデル（Cylindrical rod array model）」と呼ぶことにし、セルの境界を反射条件にすることによりダンコフファクタCにより炉心の $^{238}\text{U}$ による自己遮蔽を考慮する。本モデルでサンプル部の温度変化に伴う実効捕獲断面積の変化 $\Delta\Sigma_e$ を計算し、標準計算で求めた中性子束及び随伴中性子束を用いて一次摂動計算によりドップラー反応度を求める。

円柱配列モデルの問題点としては

- (1) 実験では温度変化するのはサンプルのみであるが、本モデルでは炉心の $^{238}\text{U}$ も温度変化する。
- (2) カン及び加熱容器での中性子散乱による希釈が扱えない。
- (3) 金属燃料炉心で $\text{NUO}_2$ サンプルについてセルモデルを作ると、酸素により余分に希釈される。

の3点が挙げられるが、試験的に炉心の $^{238}\text{U}$ の影響を評価するには適当であると考えられる。但し、(1)の温度非均質性の問題は孤立円柱モデルでも無視されており、今後の検討が必要と考えられる。

Table 3.1 Atomic number density of each region ( $10^{24}$ atoms/cm $^3$ )

## (a) Doppler sample and capsule

Sample	NU-metal( $25^{\#}$ )	NUO <sub>2</sub> ( $25^{\#}$ )	NUO <sub>2</sub> ( $20^{\#}$ )
<sup>238</sup> U	4.667-2 <sup>a)</sup>	2.063-2	2.008-2
<sup>235</sup> U	3.405-4	1.503-4	1.463-4
O	0	4.157-2	4.045-2

a) Read as  $4.667 \times 10^{-2}$ 

Capsule	for $25^{\#}$ sample	for $20^{\#}$ sample
Fe	1.888-2	1.794-2
Cr	5.185-3	4.929-3
Ni	3.496-3	4.198-3

## (b) FCA XVI-1 core

Region	IC1	ICM <sup>a)</sup>	OCM <sup>b)</sup>	NUB	DUB
<sup>239</sup> Pu	1.0455-3	1.0455-3	6.3641-4		
<sup>240</sup> Pu	9.2158-5	9.2158-5	5.6096-5		
<sup>241</sup> Pu	3.7173-6	3.7173-6	2.2627-6		
<sup>235</sup> U	5.4285-4	5.4299-4	2.1119-3	2.8968-4	8.4422-5
<sup>238</sup> U	9.2593-3	9.2596-3	8.8354-3	3.9888-2	4.0174-2
H	1.5959-4	1.2284-4	1.4104-4		
O	7.9764-6	7.9764-6	4.8552-6		
Na	9.5705-3	9.5705-3	8.7383-3		
Al	1.4997-4	1.4997-4	1.5653-3		
Cr	3.6741-3	3.6741-3	3.5659-3	1.7719-3	1.7719-3
Mn	1.9442-4	1.9442-4	1.8662-4	1.1779-4	1.1779-4
Fe	1.3373-2	1.3373-2	1.2947-2	6.3353-3	6.3353-3
Ni	1.6860-3	1.6860-3	1.6254-3	7.7241-4	7.7241-4
Zr	2.0906-3	2.0906-3	1.2725-3		

a) Mixture of 24 drawers of IC1 and 40 drawers of IC2

b) Mixture of 56 drawers of OC1, 28 drawers of OC2 and 8 drawers of SCR

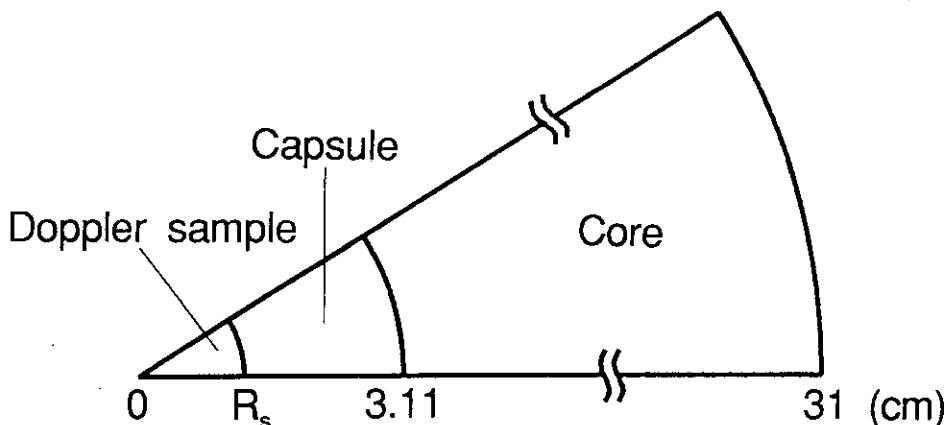
Table 3.1 (continued)

## (c) FCA XVI-2 core

Region	ICA	ICM <sup>a)</sup>	OCM <sup>b)</sup>	NUB	DUB
<sup>239</sup> Pu	1.0455-3	1.0455-3	4.8255-4		
<sup>240</sup> Pu	9.2158-5	9.2158-5	4.2535-5		
<sup>241</sup> Pu	3.6512-6	3.6512-6	1.6852-6		
<sup>235</sup> U	7.0716-5	7.0716-5	3.3036-3	2.8968-4	8.4422-5
<sup>238</sup> U	9.7531-3	9.7532-3	9.5434-3	3.9888-2	4.0174-2
H	1.0277-4	1.2303-4	1.0023-4		
O	7.9764-6	7.9764-6			
Na	9.5705-3	9.5705-3	8.8343-3		
Al	1.4997-4	1.4997-4	1.3731-3		
Cr	3.6741-3	3.6741-3	3.5269-3	1.7719-3	1.7719-3
Mn	1.9442-4	1.9442-4	1.8387-4	1.1779-4	1.1779-4
Fe	1.3373-2	1.3373-2	1.2797-2	6.3353-3	6.3353-3
Ni	1.6860-3	1.6860-3	1.6067-3	7.7241-4	7.7241-4
Zr	2.0906-3	2.0906-3			

a) Mixture of 84 drawers of ICA and 28 drawers of ICB

b) Mixture of 48 drawers of OC1, 48 drawers of OC2 and 8 drawers of SCR



- $R_s$ : 1.24 cm for NU-metal (25°) sample  
 : 1.25 cm for  $\text{NUO}_2$  (25°) sample  
 : 1.00 cm for  $\text{NUO}_2$  (20°) sample

Fig.3.1 Cell model for calculation of effective cross section of Doppler samples.  
(Isolated cylinder model)

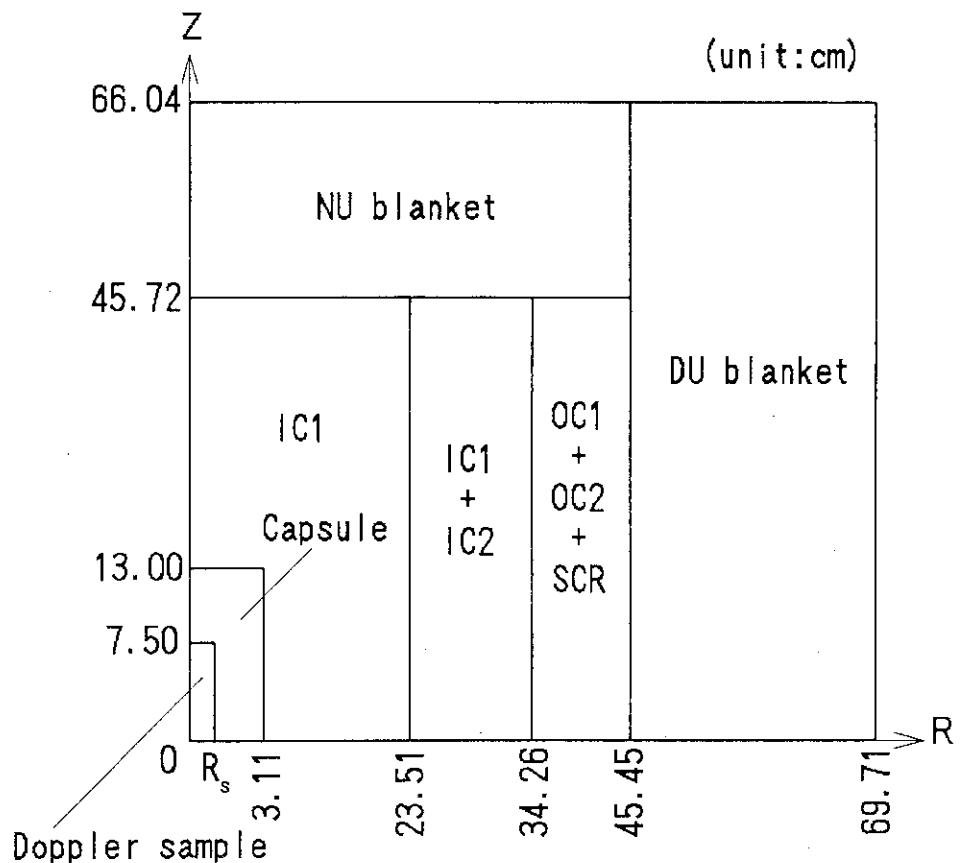


Fig.3.2 RZ model of FCA XVI-1 core for Doppler reactivity worth calculation

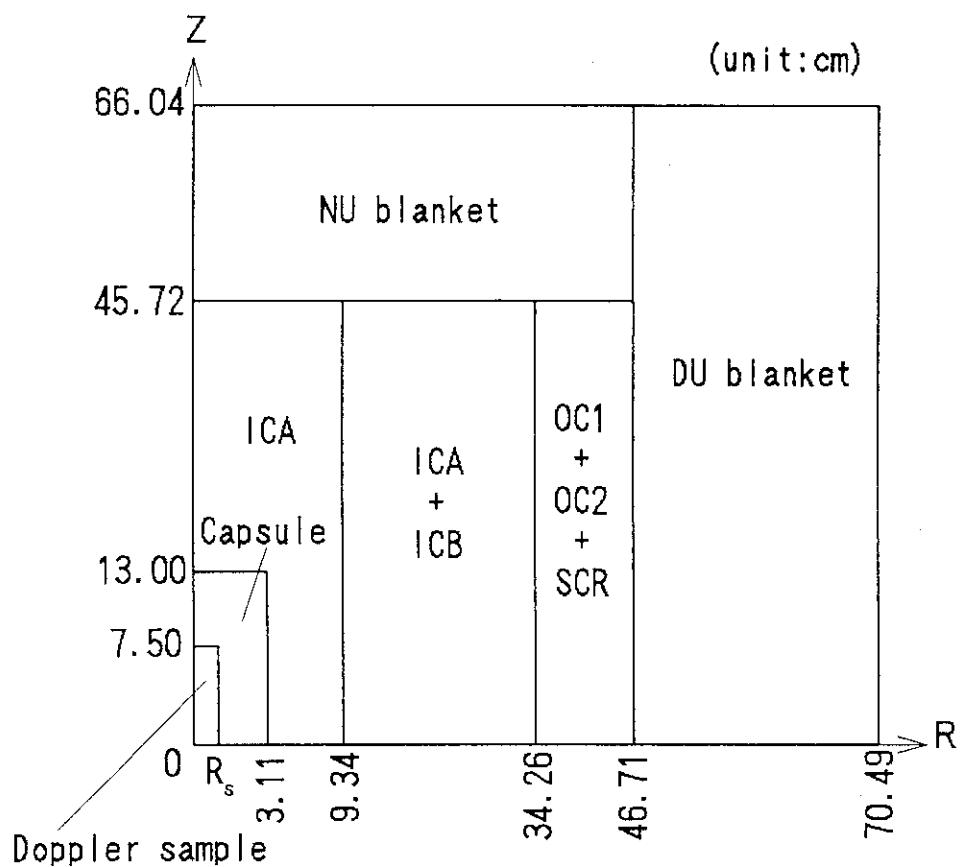
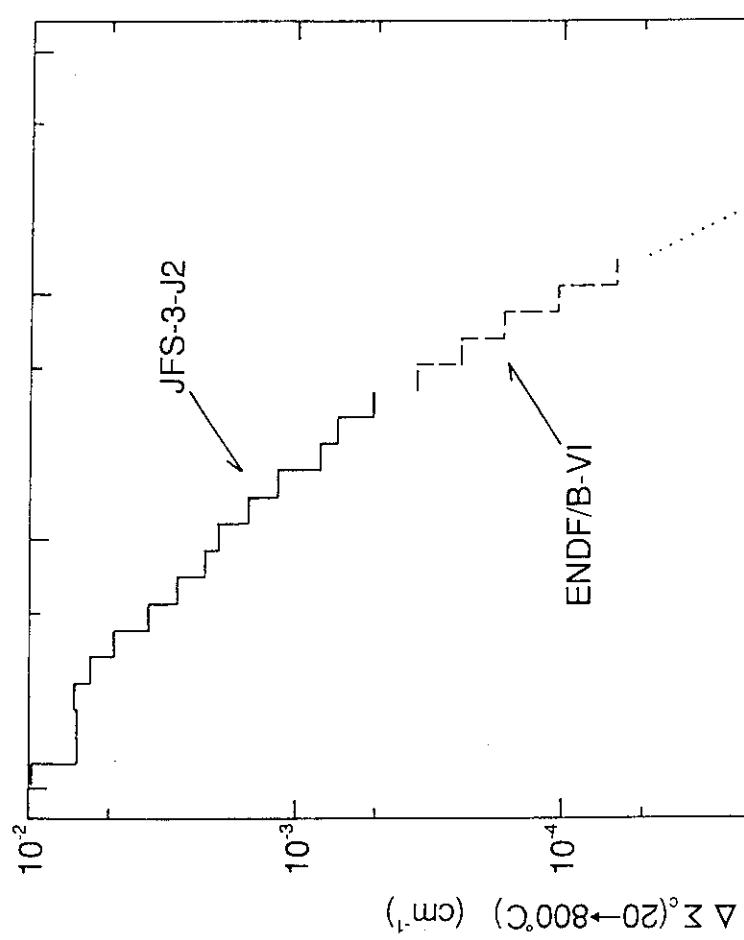
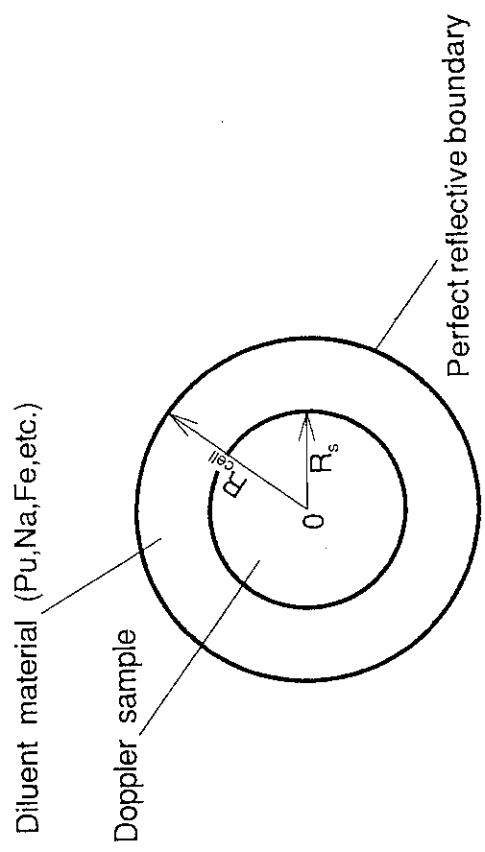


Fig.3.3 RZ model of FCA XVI-2 core for Doppler reactivity worth calculation



— 14 —



Sample	R <sub>cell</sub> (cm)			
	XVI-1	XVI-2	VI-1	VI-2
NU-metal (25%)	2.78	2.71	-----	-----
NUO <sub>2</sub> (25%)	1.87	1.82	2.17	2.16
NUO <sub>2</sub> (20%)	-----	1.43	-----	-----

Fig. 3.5

Cell model to evaluate influence of <sup>238</sup>U in core region on resonance self-shielding of <sup>238</sup>U in Doppler sample  
(Cylindrical rod array model)

Fig. 3.4  
Effect of temperature rise of Doppler sample from 20°C to 800°C

## 4. 結果及び検討

### 実験結果

FCA XVI-1炉心及びXVI-2炉心の実験結果をTable 4.1及び4.2に示す。サンプル反応度価値は加熱容器に収納した空のキャップセルとサンプル入りキャップセルを炉心に中心に置いた時の臨界制御棒位置の差から求めたものである。ドップラー反応度価値の誤差は一定温度で数回測定した値のばらつきを統計処理して求めた。

Fig.4.1及び4.2には $^{238}\text{U}$  1 g当りのドップラー反応度価値を示した。XVI-1炉心ではNU-metal(25 $\%$ )と $\text{NUO}_2$ (25 $\%$ )の結果は良く一致している。一方、XVI-2炉心ではサンプル間のばらつきが大きく、NU-metal(25 $\%$ )に比べて $\text{NUO}_2$ (20 $\%$ )は2~3割程度大きな値を示し、 $\text{NUO}_2$ (25 $\%$ )は両者の中間にある。また、実験誤差のため一概には言えないが、温度依存性にもサンプル間で相違がみられる。 $^{238}\text{U}$  1 g当りのドップラー反応度価値は、中性子束や随伴中性子束のサンプル自体による低下の度合い、サンプル中の $^{238}\text{U}$ 密度の相違、サンプル径の相違等の要因で変化すると考えられるが、2つの炉心で異なる傾向を示していることは興味深い。計算値との比較及び詳しい検討は後で述べる。

次にFCAでの過去の実験と比較する。FCAの酸化物炉心では、Puプレート反応度価値で規格化した $\text{NUO}_2$ (25 $\%$ )サンプルの20°C→800°Cのドップラー反応度価値は、炉心の中性子のうち101eV~40.9keVの中性子が占める割合(SPI-1)の増加に伴って直線状に増加する結果が得られている<sup>3)</sup>。Fig.4.3に今回の炉心の測定結果を以前の結果に加えて示した。XVI-1及びXVI-2炉心のSPI-1はそれぞれ0.146及び0.171である。今回の測定値は以前の炉心より若干大きな値となっているがほぼ同じ傾向を示し、実験値に金属燃料高速炉特有の問題点は見られなかった。

### 標準計算との比較

Table 4.3、4.4に両炉心での標準計算による計算値及び実験値/計算値(C/E値)を示す。XVI-1炉心ではC/Eは0.82~0.92、XVI-2炉心では0.59~0.82であり、XVI-2炉心で小さい。特にXVI-2炉心でのみ測定した $\text{NUO}_2$ (20 $\%$ )は0.7以下とかなり小さな値を示している。同じ手法、データで解析した酸化物炉心でのC/E値は0.99~0.85であり、今回の金属燃料炉心でのC/E値は全体的に小さめの値となっている。 $\text{NUO}_2$ (20 $\%$ )に対するC/E値は、X-3炉心で $\text{NUO}_2$ (25 $\%$ )に比べて小さいものの<sup>1)</sup>XII-1炉心では顕著な差は無く<sup>9)</sup>、今後の炉心でも測定、解析を続けていくことが必要だと考えられる。

### 高エネルギー中性子の影響

3.2節で述べた計算法により、標準計算では取り込めていない40.9keV以上の中性子によるドップラー反応度価値を評価した。結果をFCAの代表的な酸化物炉心であるVI-1、VI-2炉心のもの<sup>10)</sup>と共にTable 4.5に示す。40.9keV以上の効果を考慮するとNU-metalサンプルで13%程度、 $\text{NUO}_2$ サンプルで8%程度計算値は大きくなる。一方、VI-1、VI-2炉心ではそれぞれ6%、4%程度であり、金属燃料高速炉特有の硬い中性子スペクトル場では40.9keV以上の中性子の効果は無

視できないことが判った。Fig.4.4にXVI-1炉心におけるNU-metal(25')サンプルのドップラー反応度価値 ( $20 \rightarrow 800^{\circ}\text{C}$ ) のエネルギーブレークダウンを示す。ドップラー効果は数百keVまで続き、少なくともENDF/B-VIで評価している150keV近辺まで考慮に入れないと大きな過小評価となることが判る。

次に補正因子を詳しく見ると、XVI-1炉心の方がXVI-2炉心に比べてスペクトルが硬いため若干大きな値となっていることが判る。また、同じ炉心でもサンプルが変わると補正の大きさが異なるのは、Fig.4.5に示したように温度変化に伴う $^{238}\text{U}$ の捕獲断面積の変化 ( $\Delta\sigma_c$ ) の違いによるものである。すなわち、金属サンプルは酸化物サンプルに比べて希釈断面積  $\sigma_0$  が小さいため  $\Delta\sigma_c$  が約2keV以上で大きく、それより下では小さくなっている。金属燃料高速炉ではスペクトルが硬いことに加えて、 $^{238}\text{U}$ の密度が高いため  $\Delta\sigma_c$  が高エネルギー領域でも比較的大きいことも40.9keV以上の効果を大きくしている要因となっていることが判る。さらに、補正因子は温度が高くなるにつれ小さくなっているが、これは高エネルギー領域では高温になると共鳴が広がり、自己遮蔽因子が1に近づき温度変化に対して鈍感になるためであると考えられる。金属燃料高速炉の通常運転時の燃料平均温度 ( $\sim 900\text{K}$ ) は酸化物燃料高速炉 ( $\sim 1500\text{K}$ ) に比べてかなり低いため、高エネルギー中性子のドップラー効果はさらに重要なものとなる。

#### 炉心 $^{238}\text{U}$ による影響

3.3節で述べた方法により標準計算では取り込めていない炉心 $^{238}\text{U}$ の影響を評価した。結果をTable 4.6に示す。この効果は両炉心のどのサンプルでも約3%以下と小さなものであった。これはFig.4.6に示したように  $\sigma_0$  が小さくなることにより約2keV以上では  $\Delta\Sigma_c$  が大きく、それ以下では小さくなり、相殺したためだと考えられる。しかし、この効果はNU-metal、 $\text{NUO}_2(25')$ 、 $\text{NUO}_2(20')$ の順に大きくなっている。 $^{238}\text{U}$ 密度が小さく、径の小さいサンプルほど炉心の $^{238}\text{U}$ の効果を受けやすいことが判る。

#### C/E値の傾向

Fig.4.7に40.9keV以上の効果を補正した後のC/E値を示す。誤差棒は実験誤差を伝播させたものである。全体としてC/E値は1より小さく、かつXVI-2炉心の $\text{NUO}_2(20')$ サンプル以外は温度上昇に伴って小さくなっているように見える。但し、 $300^{\circ}\text{C}$ や $550^{\circ}\text{C}$ の実験誤差が大きいためC/E値の温度依存性についてこれ以上の議論はできない。

次に炉心間で比較すると、XVI-1炉心は両サンプルのC/Eがほぼ揃っており、XVI-2炉心よりも1に近い。一方、XVI-2炉心ではサンプル間でのばらつきが大きい。これはFig.4.2に示したように単位 $^{238}\text{U}$ 質量当りのドップラー反応度価値でみると、実験値はサンプル間でのばらつきが大きいのに対して計算値 (Fig.4.2は40.9keV以上の効果を補正した後の値である) はサンプル間での相違が殆ど見られないことに起因している。

Table 4.7はXVI-2炉心における各サンプルのドップラー反応度価値 ( $20 \rightarrow 800^{\circ}\text{C}$ ) の成分 ( $\Delta\sigma_c$ 、サンプルにおける中性子束  $\phi$ 、随伴中性子束  $\phi^+$ ) を10keV近辺及び1keV近辺について比較したものである。これら  $\Delta\sigma_c$ 、 $\phi$ 、 $\phi^+$ を掛け合わせて摂動分母IPで割ると単位 $^{238}\text{U}$ 質量当りのドップラー反応度価値に比例した値が得られる。さて、各サンプルを成分毎に比較すると、 $\Delta\sigma_c$

は高エネルギー側で金属サンプルが大きく、低エネルギー側で酸化物サンプルが大きい。これは前述のように  $\Delta \sigma_c$  に対する希釈断面積の影響の傾向が 2keV 近辺で逆転するためである (Fig.4.5 参照)。また、 $\phi$  及び  $\phi^+$  は吸収の大きい金属サンプルで小さな値となっている。

結局、これらを掛け合わせて得られる単位  $^{238}\text{U}$  質量当たりのドップラー反応度価値は、特に  $\Delta \sigma_c$  の影響を受けて、金属サンプルでは高エネルギー側の持ち分が大きく、酸化物サンプルでは低エネルギー側の持ち分が大きくなり、Fig.4.2 の計算値がサンプル間で殆ど一致しているのは高エネルギー側と低エネルギー側でうまくバランスしているためだと思われる。よって、もし実際の中性子スペクトルが計算で得られているものよりも低エネルギー中性子の割合が大きいものになるとすれば、全サンプルのドップラー効果が大きくなるものの、特に酸化物サンプルにその効果は顕著に現れることになり、C/E のばらつきがなくなる方向へ動くと考えられる。

以上の議論は定性的なものであるが、今後、 $\text{B}_4\text{C}$  サンプル反応度価値や各種の反応率比等の実験解析と併せて XVI-2 炉心の中性子スペクトルの予測精度を検証する必要があると考えられる。また、今回評価できなかった炉心の  $^{238}\text{U}$  とサンプルの  $^{238}\text{U}$  の温度が異なることの影響は炉心の  $^{238}\text{U}$  による共鳴自己遮蔽の大きな  $\text{NUO}_2(20^\ell)$  サンプルに最も大きく効くと考えられるので今後の検討が必要である。

Table 4.1 Experimental results of Doppler reactivity worth in FCA XVI-1

Sample	Temperature (°C)	Reactivity worth ( $10^{-2} \rho_0$ )
NU-metal(25 <sup>#</sup> )	20	-28.3 ± 0.4
	20→300	-0.851 ± 0.037
	20→550	-1.358 ± 0.039
	20→800	-1.765 ± 0.035
NUO <sub>2</sub> (25 <sup>#</sup> )	20	-16.8 ± 0.4
	20→300	-0.359 ± 0.037
	20→550	-0.582 ± 0.032
	20→800	-0.797 ± 0.034

$$1 \rho_0 = 5.46 \times 10^{-4} \Delta k/k$$

Table 4.2 Experimental results of Doppler reactivity worth in FCA XVI-2

Sample	Temperature (°C)	Reactivity worth ( $10^{-2} \rho_0$ )
NU-metal(25 <sup>#</sup> )	20	-21.7 ± 0.4
	20→300	-0.635 ± 0.043
	20→550	-0.989 ± 0.033
	20→800	-1.290 ± 0.036
NUO <sub>2</sub> (25 <sup>#</sup> )	20	-15.0 ± 0.4
	20→300	-0.301 ± 0.037
	20→550	-0.498 ± 0.041
	20→800	-0.666 ± 0.045
NUO <sub>2</sub> (20 <sup>#</sup> )	20	-9.2 ± 0.4
	20→300	-0.248 ± 0.031
	20→550	-0.373 ± 0.034
	20→800	-0.428 ± 0.033

$$1 \rho_0 = 5.79 \times 10^{-4} \Delta k/k \text{ for NU-metal(25<sup>#</sup>) and NUO}_2(25<sup>#</sup>) \text{ samples}$$

$$1 \rho_0 = 5.82 \times 10^{-4} \Delta k/k \text{ for NUO}_2(20<sup>#</sup>) \text{ sample}$$

Table 4.3 Comparison of calculated and measured Doppler reactivity worths  
in FCA XVI-1 core

Sample	Temperature (°C)	Experiment ( $10^{-6} \Delta k/k$ )	Calculation ( $10^{-6} \Delta k/k$ )	C/E
NU-metal(25%)	20	-154.5 ± 2.2	-152.2	0.985
	20→300	-4.65 ± 0.20	-3.99	0.858
	20→550	-7.42 ± 0.21	-6.27	0.846
	20→800	-9.64 ± 0.19	-7.95	0.825
NUO <sub>2</sub> (25%)	20	-91.7 ± 2.2	-84.8	0.925
	20→300	-1.96 ± 0.20	-1.80	0.919
	20→550	-3.18 ± 0.18	-2.84	0.894
	20→800	-4.35 ± 0.18	-3.61	0.829

Table 4.4 Comparison of calculated and measured Doppler reactivity worth  
in FCA XVI-2 core

Sample	Temperature (°C)	Experiment ( $10^{-6} \Delta k/k$ )	Calculation ( $10^{-6} \Delta k/k$ )	C/E
NU-metal(25%)	20	-125.6 ± 2.3	-123.5	0.983
	20→300	-3.68 ± 0.25	-2.97	0.805
	20→550	-5.73 ± 0.19	-4.68	0.817
	20→800	-7.47 ± 0.21	-5.95	0.797
NUO <sub>2</sub> (25%)	20	-86.9 ± 2.3	-81.2	0.934
	20→300	-1.74 ± 0.22	-1.38	0.791
	20→550	-2.89 ± 0.24	-2.18	0.755
	20→800	-3.86 ± 0.26	-2.78	0.719
NUO <sub>2</sub> (20%)	20	-53.3 ± 2.3	-49.5	0.929
	20→300	-1.44 ± 0.18	-0.85	0.592
	20→550	-2.17 ± 0.20	-1.35	0.621
	20→800	-2.49 ± 0.19	-1.72	0.690

Table 4.5 Correction of Doppler reactivity worth for high energy contribution above 40.9 keV

Core	Sample	Temperature(°C)	Correction factor	C/E after correction
XVI-1	NU-metal(25 $\phi$ )	20→300	1.147	0.984 ( $\pm 4.3\%$ ) <sup>a)</sup>
		20→550	1.138	0.963 ( $\pm 2.9\%$ )
		20→800	1.130	0.932 ( $\pm 2.0\%$ )
	NUO <sub>2</sub> (25 $\phi$ )	20→300	1.089	1.001 ( $\pm 10.3\%$ )
		20→550	1.083	0.968 ( $\pm 5.5\%$ )
		20→800	1.078	0.894 ( $\pm 4.3\%$ )
XVI-2	NU-metal(25 $\phi$ )	20→300	1.136	0.914 ( $\pm 6.8\%$ )
		20→550	1.127	0.921 ( $\pm 3.3\%$ )
		20→800	1.120	0.893 ( $\pm 2.8\%$ )
	NUO <sub>2</sub> (25 $\phi$ )	20→300	1.080	0.854 ( $\pm 12.3\%$ )
		20→550	1.075	0.812 ( $\pm 8.2\%$ )
		20→800	1.070	0.769 ( $\pm 6.8\%$ )
VI-1	NUO <sub>2</sub> (20 $\phi$ )	20→300	1.070	0.633 ( $\pm 12.5\%$ )
		20→550	1.065	0.661 ( $\pm 9.1\%$ )
		20→800	1.062	0.733 ( $\pm 7.7\%$ )
VI-2	NUO <sub>2</sub> (25 $\phi$ )	20→800	1.059	0.983 <sup>b)</sup> ( $\pm 2.0\%$ )
VI-2	NUO <sub>2</sub> (25 $\phi$ )	20→800	1.039	0.968 <sup>c)</sup> ( $\pm 0.9\%$ )

a) Experimental error

b) C/E value before correction was 0.928

c) C/E value before correction was 0.932

Table 4.6 Influence of  $^{238}\text{U}$  in core region on Doppler reactivity worth

Core	Sample	Temperature (°C)	[Cylindrical rod array model]
			[Isolated cylinder model]
XVI-1	NU-metal(25 ‰)	20→300	1.014
		20→550	1.013
		20→800	1.012
	NUO <sub>2</sub> (25 ‰)	20→300	1.029
		20→550	1.028
		20→800	1.027
XVI-2	NU-metal(25 ‰)	20→300	1.010
		20→550	1.010
		20→800	1.009
	NUO <sub>2</sub> (25 ‰)	20→300	1.019
		20→550	1.018
		20→800	1.017
VI-1	NUO <sub>2</sub> (20 ‰)	20→300	1.025
		20→550	1.024
		20→800	1.024
	VI-2	20→800	1.023
		20→800	1.008

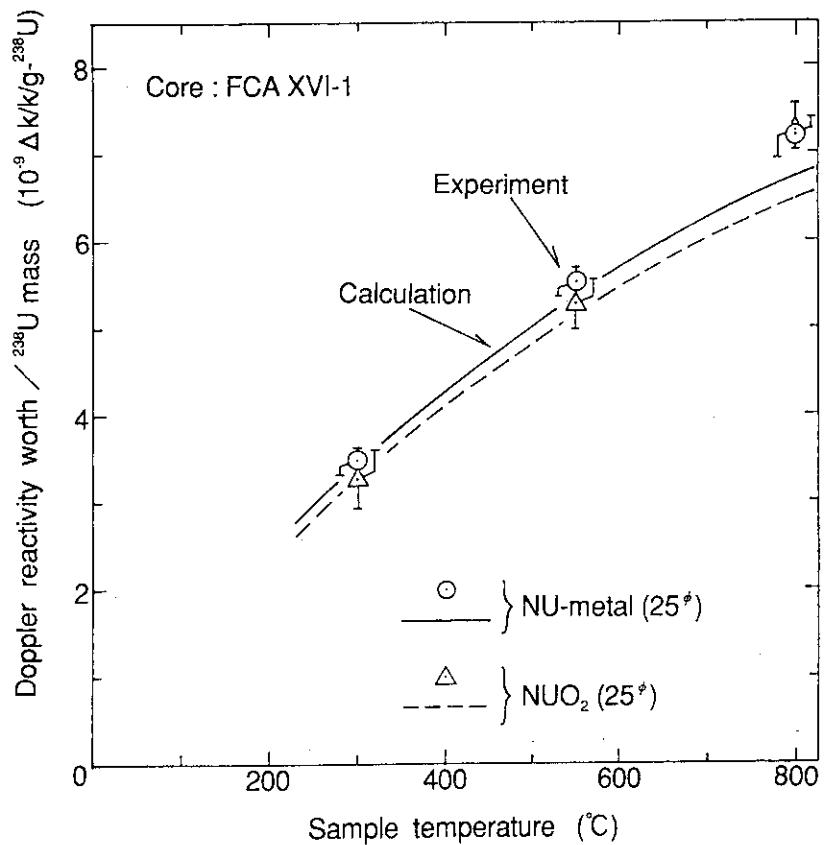
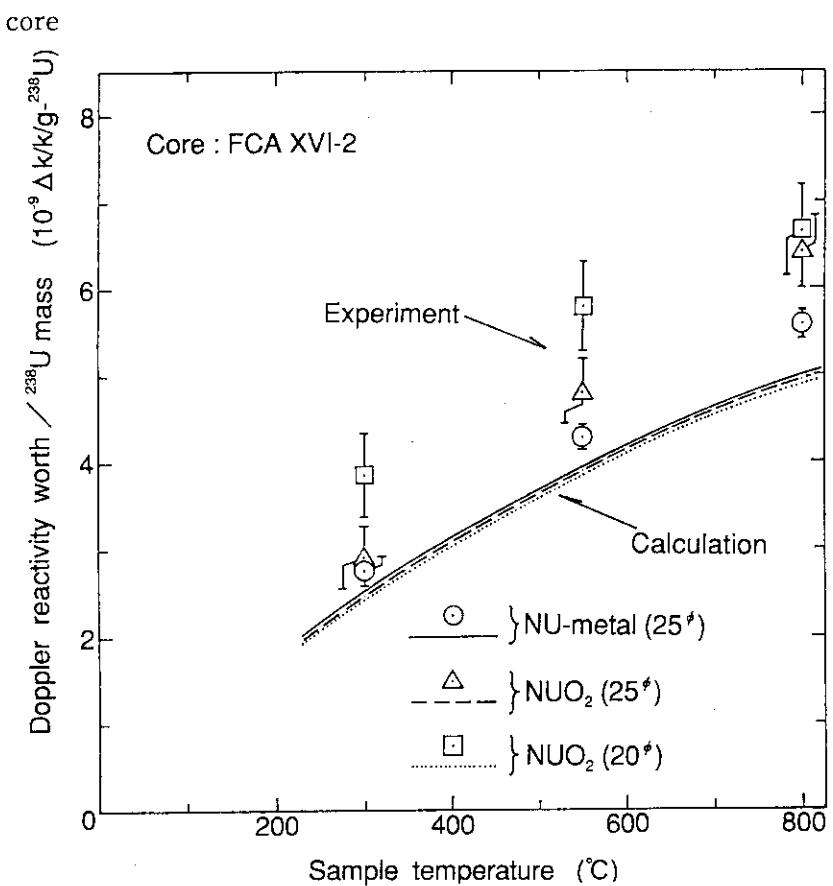
Table 4.7 Component parts of Doppler reactivity worth in FCA XVI-2 core  
for temperature rise from 20°C to 800°C

Sample	Energy group	$\Delta \sigma_c$ (barn)	$\phi^a$ ( $10^{-5}$ )	$\phi^+ b)$ ( $10^{-7}$ )	$\Delta \sigma_a \phi \phi^+ / IP^c$ ( $10^{-7}$ )
NU-metal(25 ‰)	28 <sup>d)</sup>	0.0415	1.440	6.619	2.216
	37 <sup>e)</sup>	0.2115	0.315	7.445	2.779
NUO <sub>2</sub> (25 ‰)	28	0.0292	1.488	6.766	1.647
	37	0.2341	0.342	7.702	3.455
NUO <sub>2</sub> (20 ‰)	28	0.0267	1.515	6.798	1.540
	37	0.2378	0.342	7.735	3.522

a) Average neutron flux at sample      b) Average adjoint flux at sample

c) Perturbation denominator :  $1.785 \times 10^{-6}$  for all samples

d) 9.12~11.7 keV    e) 0.961~1.23 keV

Fig.4.1 Doppler reactivity worth per unit  $^{238}\text{U}$  mass in Doppler sample at FCA XVI-1Fig.4.2 Doppler reactivity worth per unit  $^{238}\text{U}$  mass in Doppler sample at FCA XVI-2

core

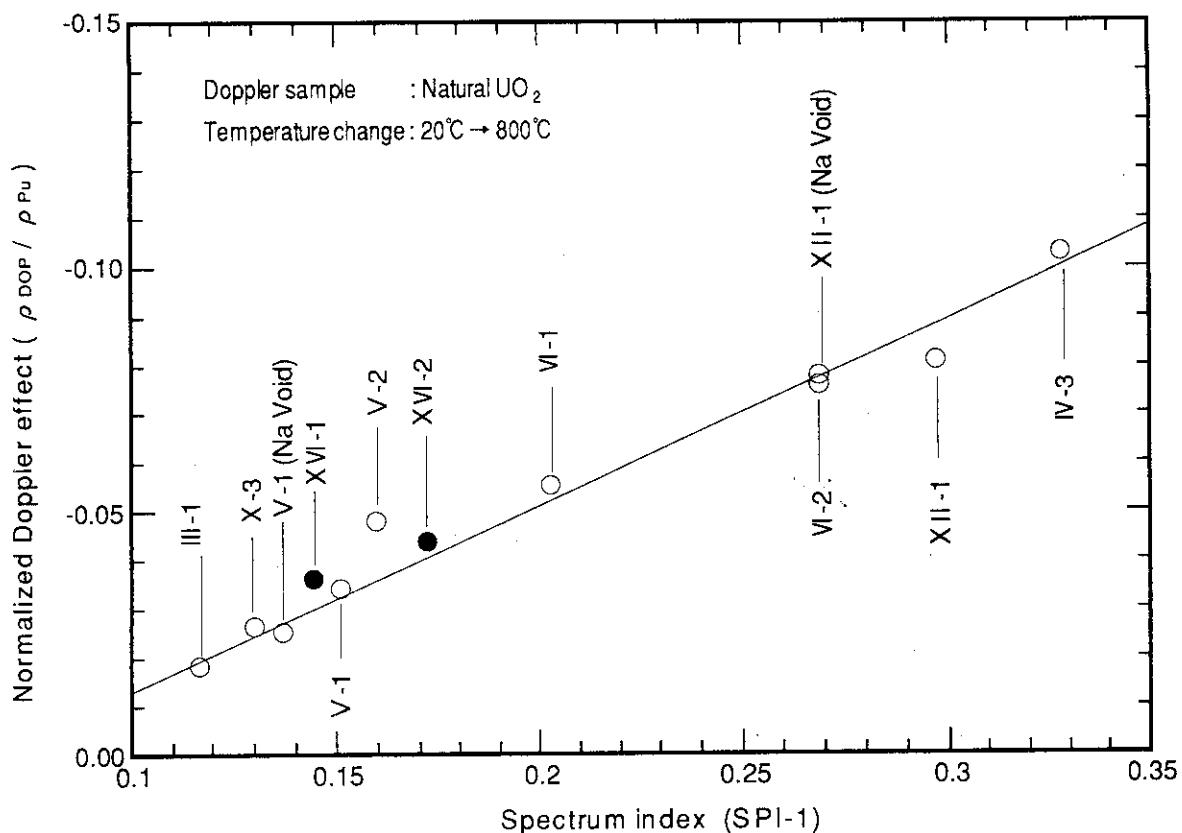


Fig.4.3 Normalized Doppler effect measured in FCA as a function of spectrum index (SPI-1)

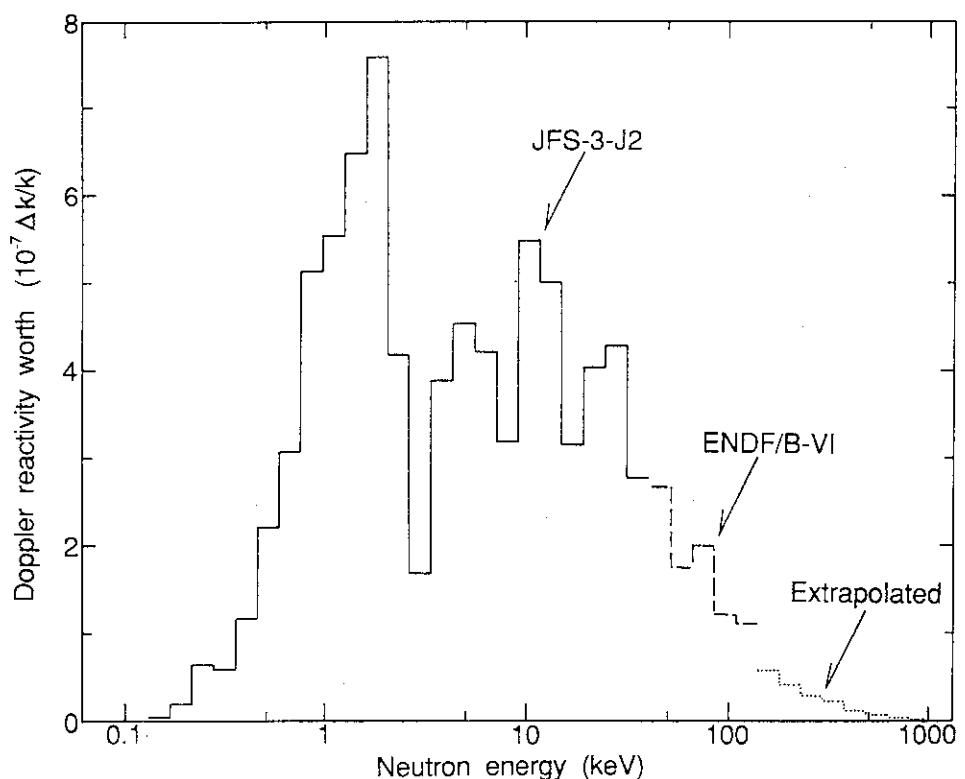


Fig.4.4 Energy breakdown of Doppler reactivity worth in FCA XVI-1 core.  
 (NU-meral(25%) sample, 20→800°C)

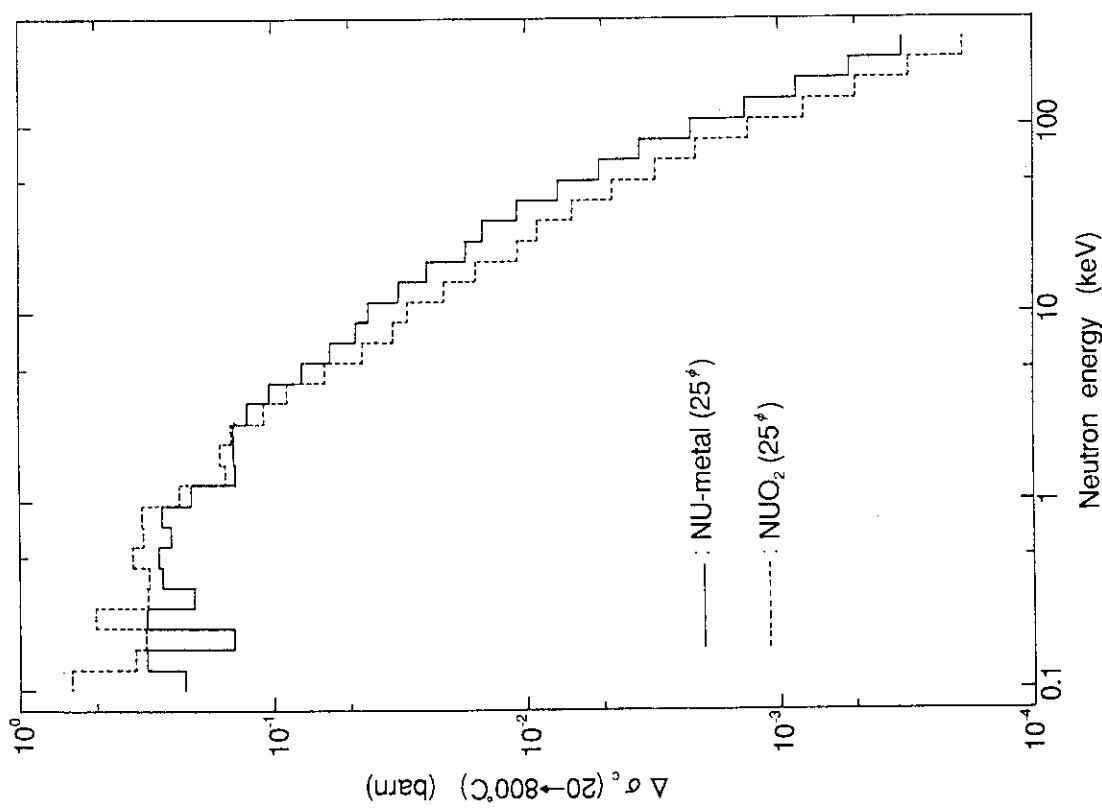


Fig. 4.5 Comparison between effective capture cross section change caused by temperature rise of metallic sample and that of oxide sample

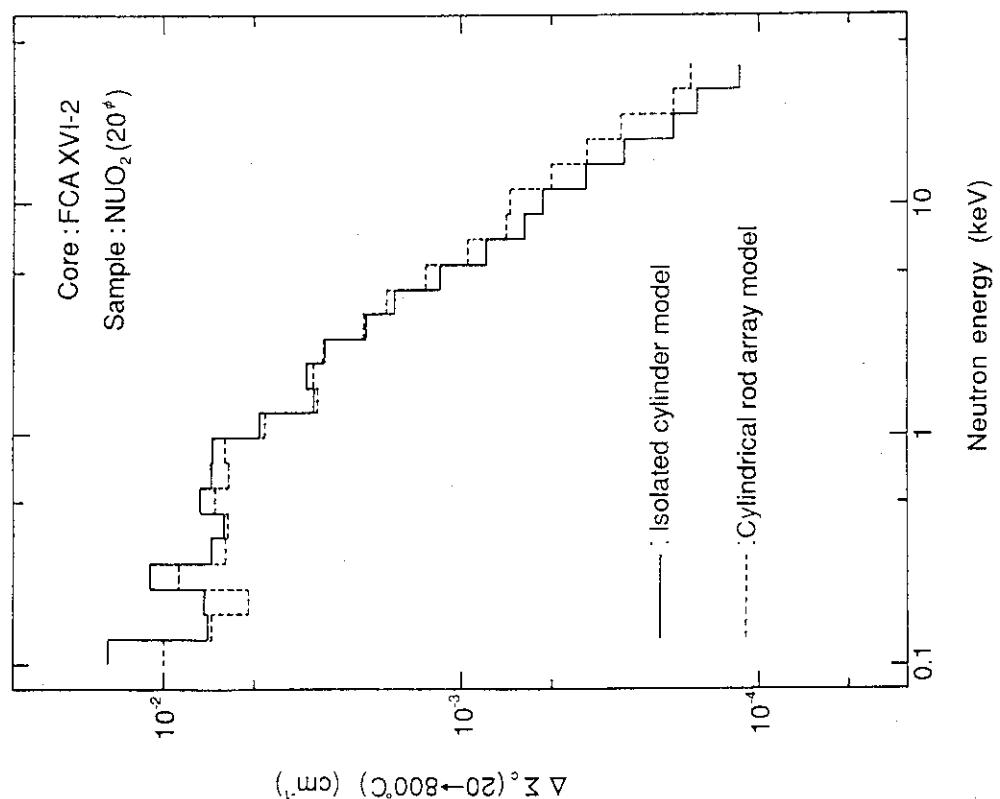


Fig. 4.6 Comparison between effective capture cross section change calculated by isolated cylinder model and cylindrical rod array model

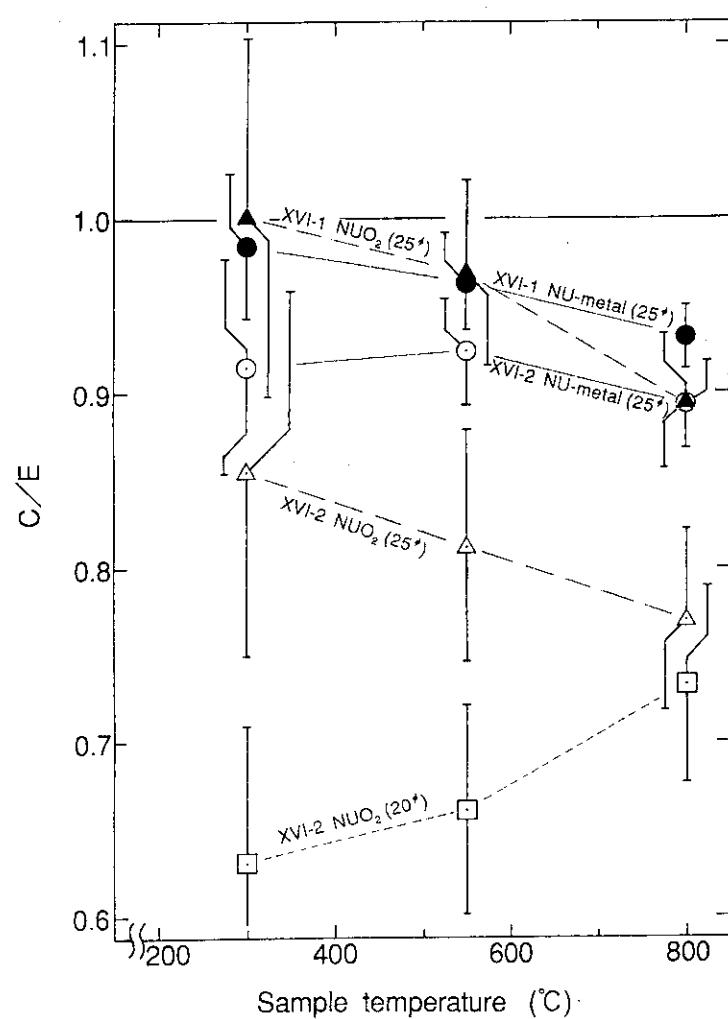


Fig.4.7 C/E trend of Doppler reactivity worth in FCA XVI-1 and XVI-2 cores

## 5. 結 論

金属燃料高速炉模擬炉心FCA XVI-1及びXVI-2炉心で $^{238}\text{U}$ のドップラー反応度価値を測定し計算値と比較した。

JFS-3-J2及びSLAROMを用いたこれまでと同じ計算手法では、FCAを用いた酸化物燃料炉心におけるドップラー反応度価値の解析では見られなかった過小評価を招くことが判った。

金属燃料高速炉特有の硬い中性子場で問題となると予想される40.9keV以上の中性子によるドップラー効果への寄与は、現状のJFS-3-J2では計算できないので、149keVまで $^{238}\text{U}$ の共鳴領域を持つENDF/B-VIに基づいて評価し、計算に補正を加えた。その結果、金属サンプルで約13%、酸化物サンプルで約8%程度計算値は改善されたものの、依然としてC/E値は小さい傾向を示した。SLAROMのセルモデルを変えて炉心の $^{238}\text{U}$ による影響を考慮しても計算値は約3%以下の改善しか見られなかった。特にXVI-2炉心の $\text{NUO}_2(20^\circ)$ 及び $(25^\circ)$ は他に比べて小さいC/E値を示した。

今後、XVI-2炉心の中性子スペクトルの計算精度及び炉心とサンプルの温度が異なる効果について検討する必要があると考えられる。

## 謝　　辞

本実験を遂行するに当り、種々の御協力をいただいた大野秋男氏及びFCA管理機関の諸氏に深く感謝いたします。

また、本研究を遂行するに当たり、激励と有益なコメントを戴いた前高速炉物理研究室長 中野正文氏に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 岡嶋 成晃, 向山 武彦 : "FCA X-3およびXI-1集合体におけるドップラー効果の測定", JAERI-M 84-086 (1984).
- 2) Takano H. and Ishiguro Y. : "Production and Benchmark Tests of Fast Reactor Group Constant Set JFS-3-J2", JAERI-M 82-135(1982).
- 3) Mukaiyama T. and Okajima S. : J. Nucl. Sci. Technol., 22, 243 (1985).
- 4) Nakagawa M. and Tsuchihashi K. : "SLAROM : A Code for Cell Homogenization Calculation of Fast Reactor", JAERI-1294 (1984).
- 5) 飯島 進 : "CITATION-FBR" (公刊予定).
- 6) 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).
- 7) JENDL-2 (1983) File for  $^{238}\text{U}$  (MAT=2925) evaluated by Kanda Y., Nakagawa T. and Kikuchi Y.
- 8) ENDF/B-VI (1990) File for  $^{238}\text{U}$  (MAT=9237) evaluated by Weston L.W., Young P.G. and Poenitz W.
- 9) 岡嶋 成晃, 向山 武彦 : "FCA XII-1集合体におけるドップラー効果の測定", JAERI-M 85-218 (1986).
- 10) 弘田 実弥 : "FCAにおける高速炉臨界実験とその解析", JAERI-1289 (1984).
- 11) 飯島 進, 他 : "FCAによる金属燃料高速炉ベンチマーク実験(I) FCA XVI-1 炉心の選定と特性試験", 公刊予定.

## 謝　　辞

本実験を遂行するに当たり、種々の御協力をいただいた大野秋男氏及びFCA管理機関の諸氏に深く感謝いたします。

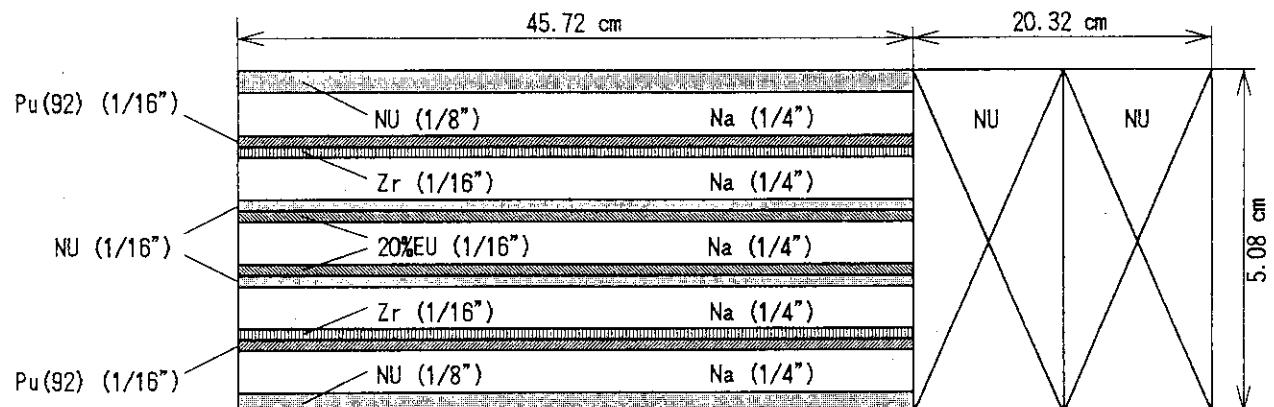
また、本研究を遂行するに当たり、激励と有益なコメントを戴いた前高速炉物理研究室長 中野正文氏に感謝いたします。

## 参考文献

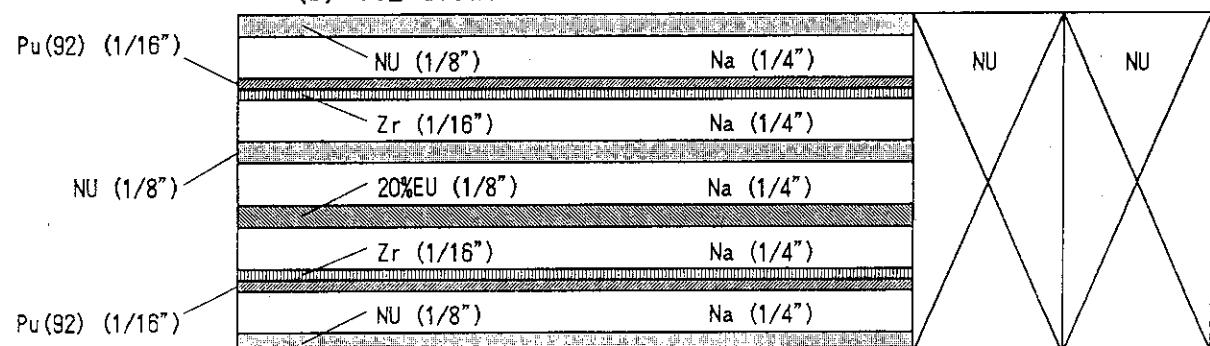
- 1) 岡嶋 成晃, 向山 武彦 : "FCA X-3およびXI-1集合体におけるドップラー効果の測定", JAERI-M 84-086 (1984).
- 2) Takano H. and Ishiguro Y. : "Production and Benchmark Tests of Fast Reactor Group Constant Set JFS-3-J2", JAERI-M 82-135(1982).
- 3) Mukaiyama T. and Okajima S. : J. Nucl. Sci. Technol., 22, 243 (1985).
- 4) Nakagawa M. and Tsuchihashi K. : "SLAROM : A Code for Cell Homogenization Calculation of Fast Reactor", JAERI-1294 (1984).
- 5) 飯島 進 : "CITATION-FBR" (公刊予定) .
- 6) 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).
- 7) JENDL-2 (1983) File for  $^{238}\text{U}$  (MAT=2925) evaluated by Kanda Y., Nakagawa T. and Kikuchi Y.
- 8) ENDF/B-VI (1990) File for  $^{238}\text{U}$  (MAT=9237) evaluated by Weston L.W., Young P.G. and Poenitz W.
- 9) 岡嶋 成晃, 向山 武彦 : "FCA XII-1集合体におけるドップラー効果の測定", JAERI-M 85-218 (1986).
- 10) 弘田 実弥 : "FCAにおける高速炉臨界実験とその解析", JAERI-1289 (1984).
- 11) 飯島 進, 他 : "FCAによる金属燃料高速炉ベンチマーク実験(I) FCA XVI-1 炉心の選定と特性試験", 公刊予定.

付録 A 引出し装填図

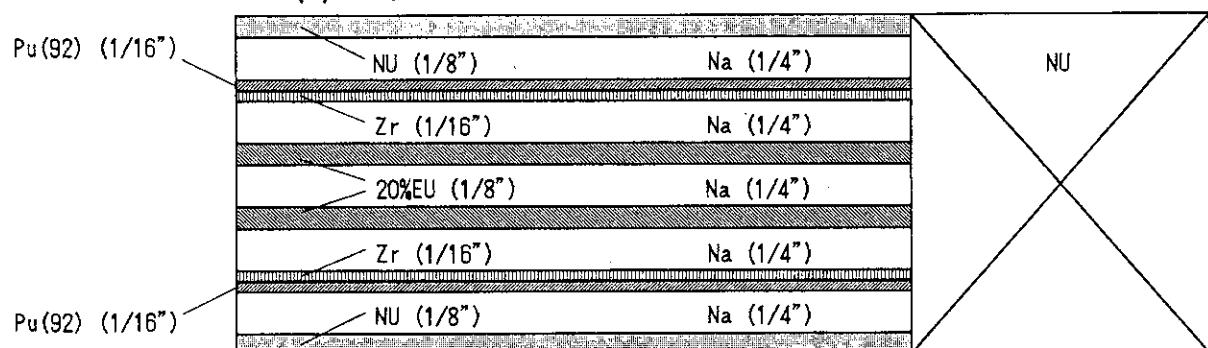
(a) IC1 drawer



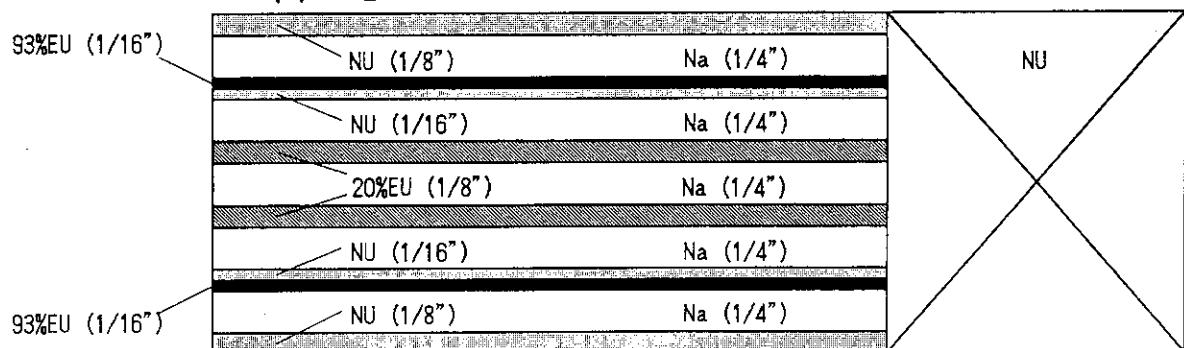
(b) IC2 drawer



(c) OC1 drawer



(d) OC2 drawer



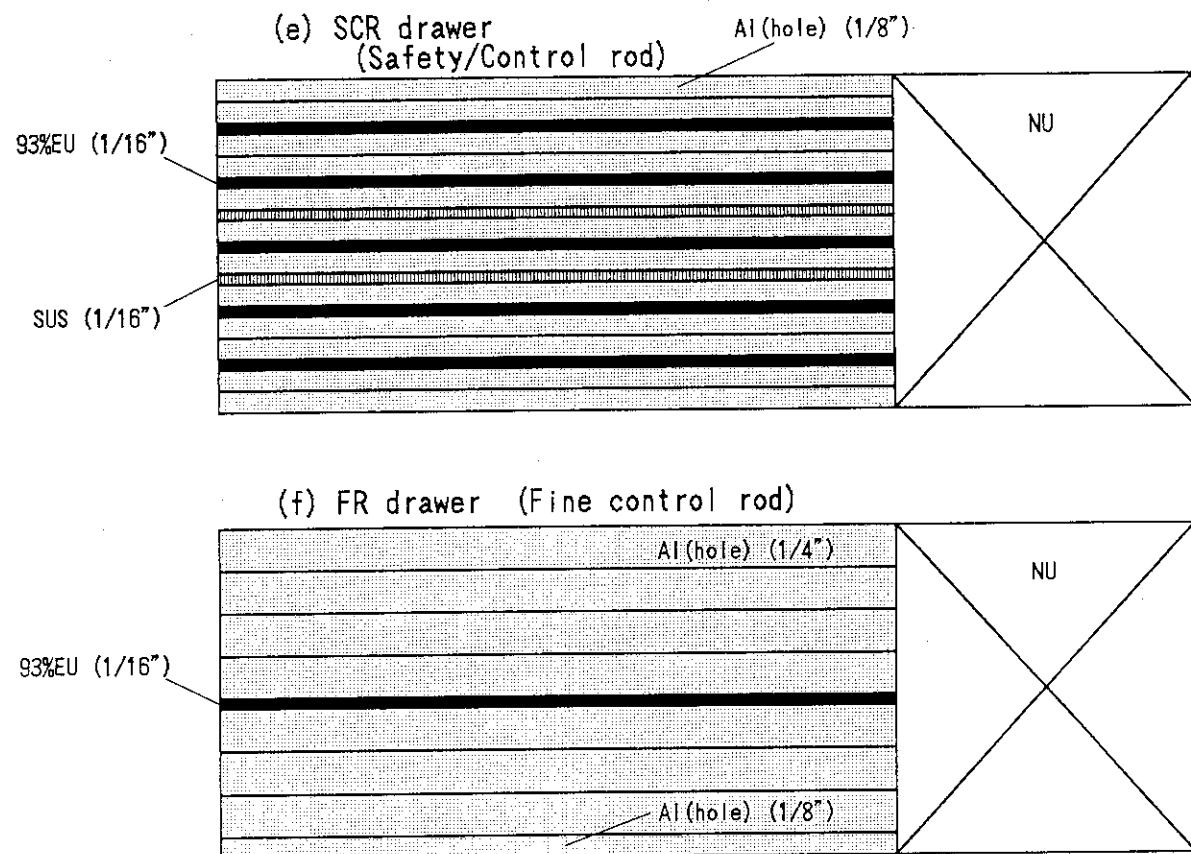
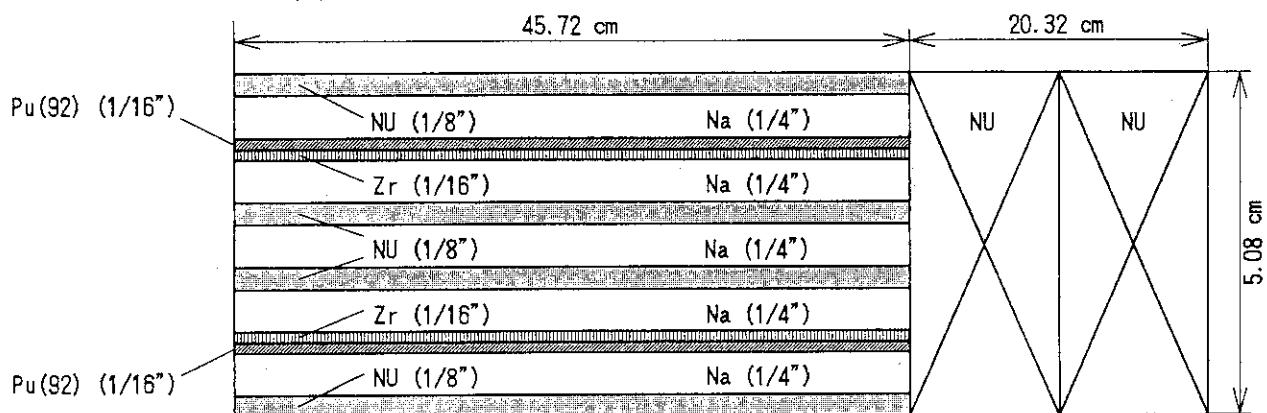
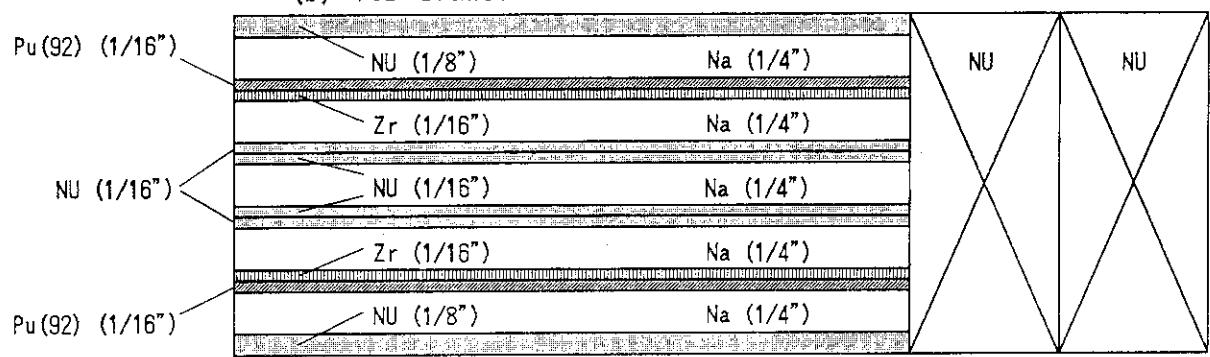


Fig.A.1 Plate configurations of drawers in FCA XVI-1 core

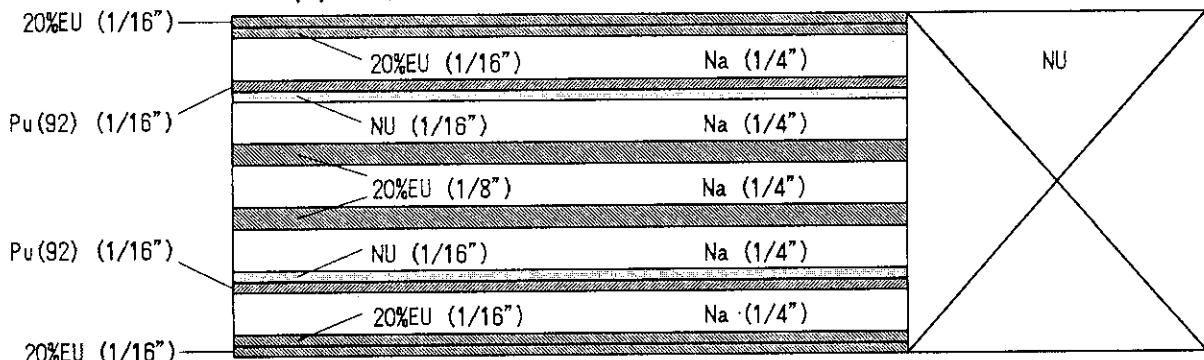
(a) ICA drawer



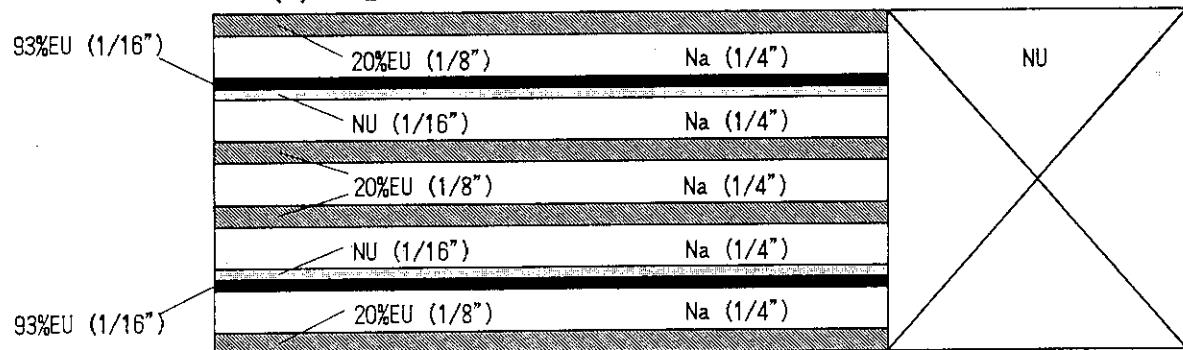
(b) ICB drawer



(c) OC1 drawer



(d) OC2 drawer



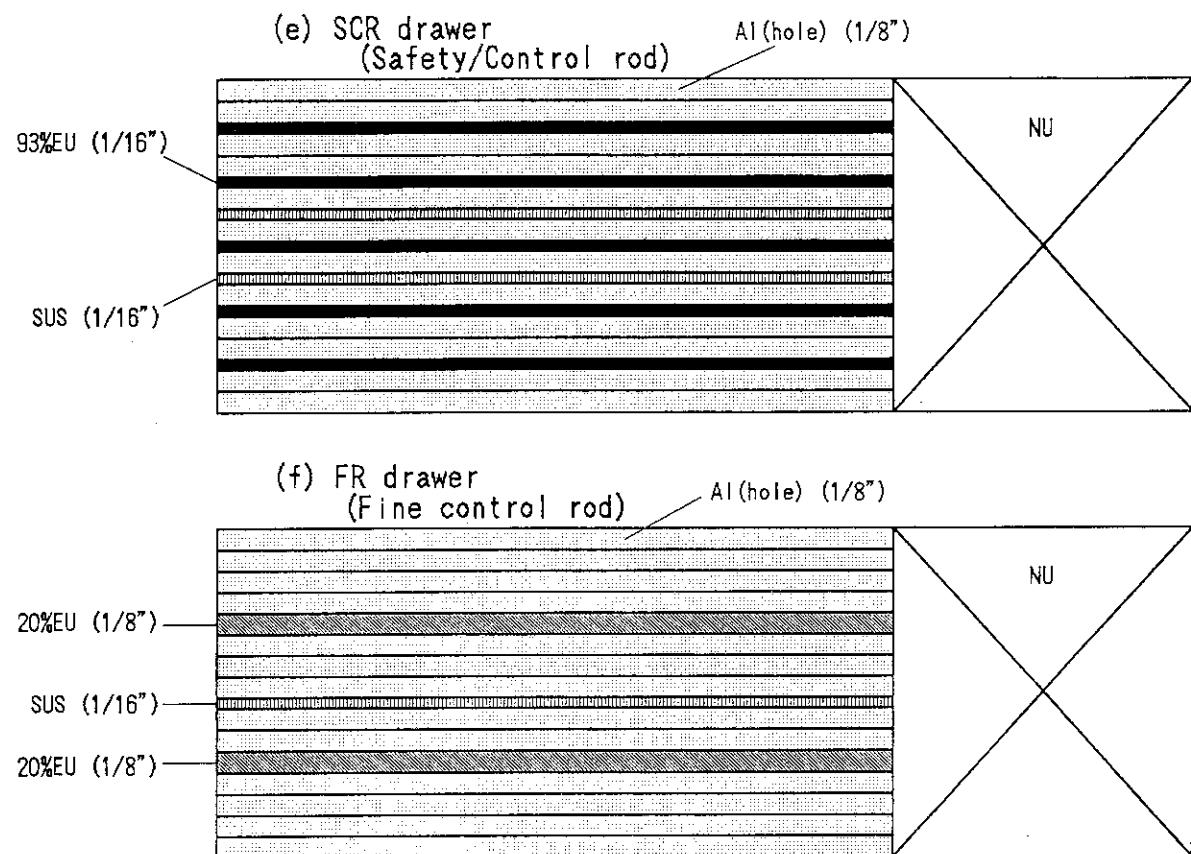


Fig.A.2 Plate configurations of drawers in FCA XVI-2 core

## 付録 B 微調整棒の較正

ドップラー反応度価値測定に使用した微調整棒（FR）の較正実験について述べる。

### XVI-1炉心

XVI-1炉心におけるドップラー反応度価値の測定は、XVI-1炉心の標準体系（移動側、固定側ともOC1：56本）からFig.2.1に示したように変更した体系で行った。即ち、中心引出しをドップラー引出しに変更し、反応度測定用の微調整棒を取り付け、体系を臨界に保つようにOC1引出しを5本追加した。FRの較正は移動側上部右側の制御棒1番（CR1）との置換法により行った。CR1の近傍にはOC1引出しを追加しなかったので、CR1の制御棒較正是標準体系のものが使用できると考えられる。標準体系での基準の反応度（安全棒4番の0～50mmの反応度価値に相当） $1 \rho_0$ はペリオド法によって求められており、 $1 \rho_0 = 5.46 \times 10^{-4} \Delta k/k$ である<sup>11)</sup>。

較正の具体的な手順では、FR位置を全挿入(0mm)から200mmまで40mm毎に引き抜き、それぞれのステップで体系を臨界に保つCR1の位置を測定し、CR1の較正データより各ステップ間の反応度変化を求めた。Table B.1に較正データを、Fig.B.1にFRの較正曲線を示す。臨界点のドリフトによる影響は、集合体密着後十分な時間（約3時間）経過後の測定であるため、較正前後のCR1臨界位置の変化から時刻による内挿を行って補正した。

### XVI-2炉心

XVI-2炉心における測定は、XVI-2炉心の標準体系（移動側、固定側ともOC1：56本、OC2は固定側：48本、移動側：47本）からFig.2.2に示したように変更した体系で行った。即ち、中心引出しをドップラー引出しに変更し、移動側のOC1引出しを1本引き抜き、その位置に反応度測定用の微調整棒を取り付け、体系を臨界に保つようにOC2引出しを4本追加した。XVI-1炉心と同様に、FRの較正は移動側上部右側の制御棒1番（CR1）との置換法により行った。追加した引出しはCR1の近傍を避けて置いたので、CR1の制御棒較正是標準体系のものが使用できると考えられるが、ここでは再度基準反応度（安全棒4番の0～50mmの反応度価値に相当）のペリオド法による測定及び制御棒の較正を行い、その結果をFRの較正に使用した。

基準反応度は、標準体系の時は $6.00 \times 10^{-4} \Delta k/k$ であったが、ドップラー反応度価値実験体系では $5.82 \times 10^{-4} \Delta k/k$ と約3%小さくなった。一方、CR1の微分反応度は50～100mm近傍で $0.0200 \rho_0/mm$ から $0.0207 \rho_0/mm$ に約3%大きくなり、結局 $\Delta k/k$ 単位にした場合標準体系と実験体系でCR1の微分反応度に有為な差は見られなかった。また、NUO<sub>2</sub>(20°)の測定とNU-metal(25°)及びNUO<sub>2</sub>(25°)の測定の間に他の実験を行ったため、後者の測定を行う前に再度基準の反応度を測定した。その結果、 $5.79 \times 10^{-4} \Delta k/k$ を得た。変化は1%以下で小さいが、NU-metal(25°)及びNUO<sub>2</sub>(25°)の測定ではこの値を使った。

較正は0～160mmの範囲でXVI-1炉心と同様に行った。結果をTable B.2及びFig.B.2に示す。

Table B.1 Fine rod calibration in FCA XVI-1 core

Step	Time (min.)	FR position (mm)	CR1 position (mm)	CR1 worth ( $\rho_{\text{o}}$ )	Corrected worth ( $\rho_{\text{o}}$ )
1	0	0.07	95.93	0	0
2	26	40.01	90.02	0.1200	0.1213
3	36	80.00	84.30	0.2366	0.2384
4	48	120.00	78.77	0.3497	0.3521
5	62	160.00	73.45	0.4588	0.4619
6	74	200.00	68.62	0.5580	0.5618
7	115	0.07	96.22	-0.0059	0

Table B.2 Fine rod calibration in FCA XVI-2 core

Step	Time (min.)	FR position (mm)	CR1 position (mm)	CR1 worth ( $\rho_{\text{o}}$ )	Corrected worth ( $\rho_{\text{o}}$ )
1	0	0.10	104.03	0	0
2	12	40.00	100.70	0.0676	0.0677
3	21	80.00	97.49	0.1329	0.1330
4	33	120.0	94.29	0.1982	0.1985
5	43	160.00	92.29	0.2596	0.2599
6	55	0.10	104.05	-0.0004	0

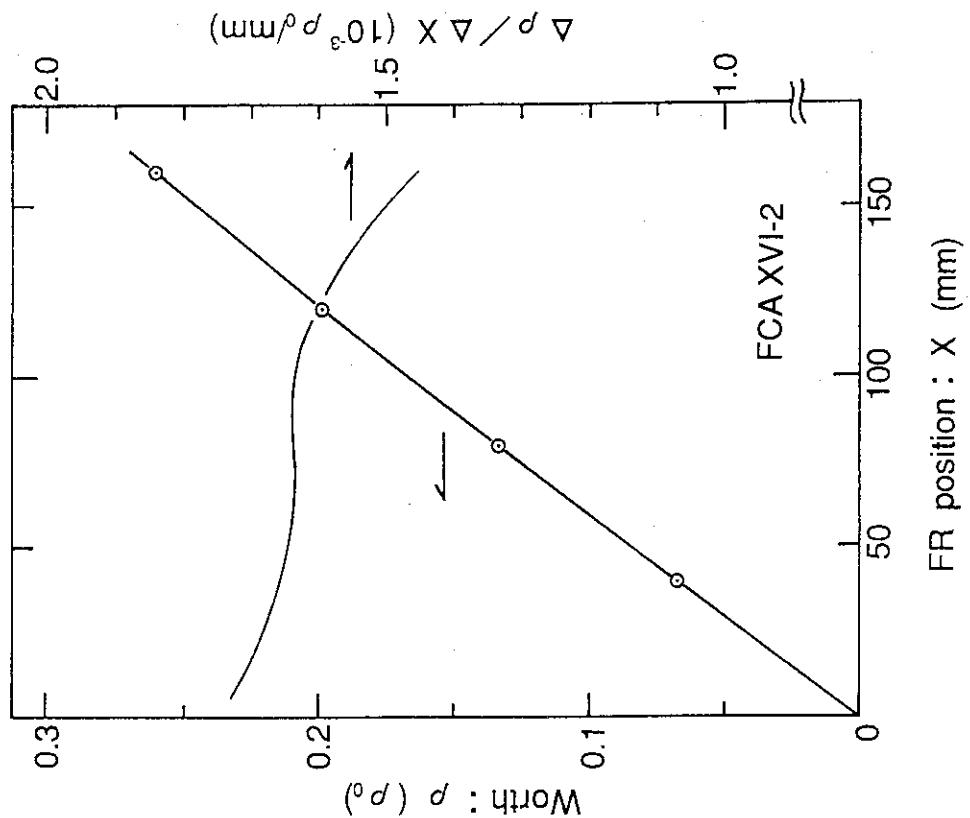


Fig.B.1 Calibration curve of FR in FCA XVI-1 core

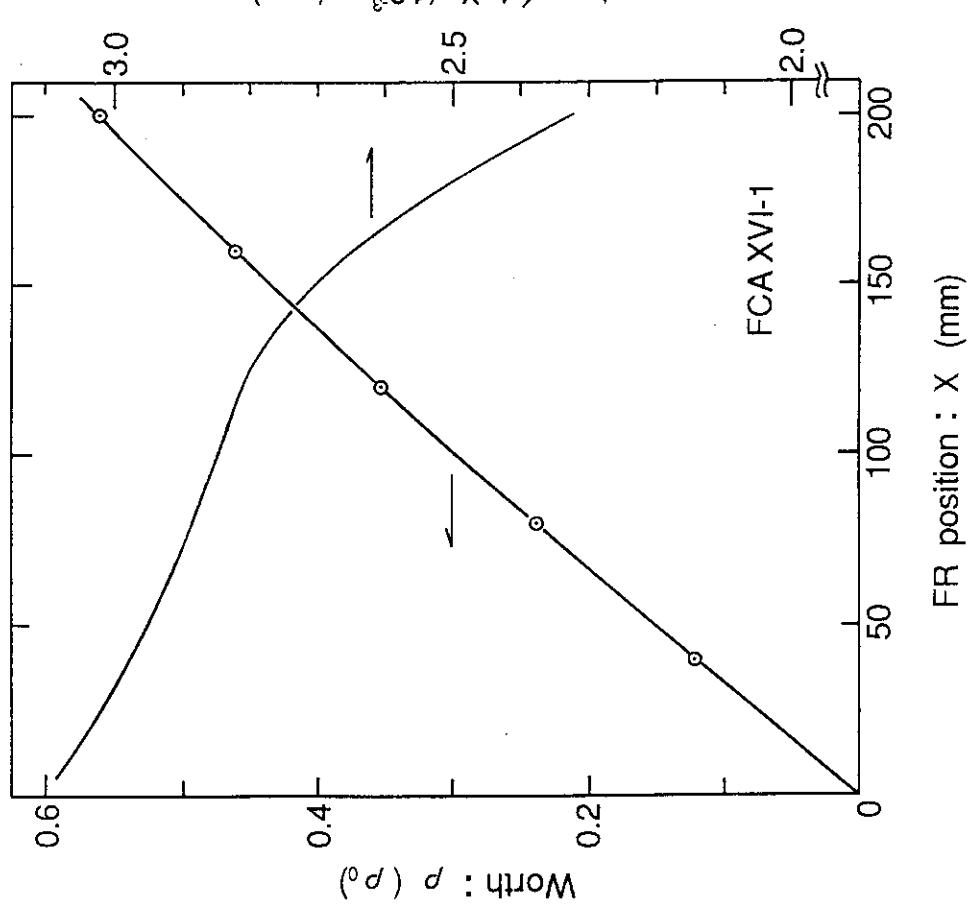


Fig.B.2 Calibration curve of FR in FCA XVI-2 core