

JAERI-M  
84-086

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

1984年5月

岡嶋 成晃・向山 武彦

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

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 山田軽印刷所

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

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

岡嶋 成晃・向山 武彦

(1984年4月17日受理)

FCA X-3 (常陽Mark II模擬炉心)およびXI-1集合体(大型商用炉模擬炉心)において、U-238 および炉心構造材(鉄, 不銹鋼, ニッケル)の各サンプルについてドップラー反応度値を測定した。実験には、サンプル・オシレーション法を用いて、室温から最高 800℃までサンプルを加熱した時のサンプルの反応度値変化を測定した。

計算には70群データセットJFS-3-J2を使用し、実験値と比較した。U-238 サンプルについては、計算は約10%過小評価するが、他のサンプルについては計算値と実験値は非常によい一致を示した。

Doppler effect measurement in FCA assemblies X-3 and XI-1

Shigeaki OKAJIMA, Takehiko MUKAIYAMA

Department of Reactor Engineering  
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received April 17, 1984)

Doppler reactivity worths were measured in FCA assemblies X-3 (mock-up core for JOYO Mark II) and XI-1 (mock-up core for large scale LMFBR) for U-238 and structural materials of core (iron, stainless steel and nickel). The sample oscillation technique was used to measure the Doppler effect when a sample is heated up to 800°C from room temperature. The analysis was made using the 70 group JFS-3-J2 data set, and compared with the measured results. For U-238 samples, the calculation underestimates Doppler effects by 10%, on the other hand for other samples, the agreement between calculated values and measured values is quite good.

Keywords : Doppler Effect Measurement, Fast Reactor, FCA X-3, FCA XI-1, U-238, Structural Material

## 目 次

1 序	1
2 測 定	1
2.1 サンプル	1
2.2 測定体系	4
2.3 測定結果	7
3 計 算	11
4 ま と め	16
謝 辞	16
参 考 文 献	16
付 録	17

## Contents

1 Introduction	1
2 Experiment	1
2.1 Samples	1
2.2 Experimental cores	4
2.3 Experimental results	7
3 Calculation	11
4 Summary	16
Acknowledgement	16
References	16
Appendix	17

## 1. 序

高速増殖炉の安全性評価において、ドップラー効果の正確な評価が大変重要であることは言及するまでもない。FCAにおいては1968年から1973年にかけて様々な炉心についてのドップラー効果の測定が行われ<sup>1), 2)</sup>、サンプル・オシレーション法を用いた測定技術はすでに確立されている。

今回、FCA X-3及びXI-1集合体において、<sup>235</sup>Uおよび炉心構造材物質についての一連のドップラー効果の測定を行った。FCA X-3集合体は高速炉「常陽」Mark-II炉心の工学的模擬炉心であり<sup>3)</sup>、照射用炉心の模擬であるから炉心中心での中性子スペクトルはかなり硬い。一方、FCA XI-1集合体は大型ナトリウム冷却高速炉の内側炉心を模擬した炉心であり<sup>4)</sup>、原型炉におけるよりもさらに燃料原子数密度が低く、従って炉心中心での中性子スペクトルはかなり軟い。この2つの集合体は実験炉および大型炉クラスの典型的なモデルであり、これら集合体でのドップラー効果の測定は、実験炉および大型炉の安全性評価のために大きな意義を持っている。さらに、これら中性子スペクトルが大きく異なる2つの集合体におけるドップラー効果の測定値は、これまでの測定値とともに体系の中性子スペクトルが系統的に変わった時の測定値となり、ドップラー効果の解析の信頼性チェックのためのベンチマークとなる。

今回は10年ぶりの実験であり、測定開始には多大の労力を要した。今回の実験からマイクロコンピュータを用いた測定データの処理を行い、これまでより測定精度を向上させた。

本報告では、第2章で測定について、第3章で実験解析について述べた。また、実験装置及び測定方法については付録で簡略に記述した。サンプル軸方向の熱膨張効果をなくす測定方法についても付録で示した。

## 2. 測定

本実験では、FCA X-3集合体において天然ウラン酸化物( $\text{NUO}_2$ )、鉄( $\text{Fe}$ )、不銹鋼(以下SSと略す)、ニッケル( $\text{Ni}$ )の各サンプルについて、またFCA XI-1集合体では天然ウラン酸化物( $\text{NUO}_2$ )、金属天然ウラン( $\text{NU}$ )サンプルについて、それぞれ室温から550°C及び800°Cまで加熱した時の反応度値変化を測定した。測定方法は、サンプル・オシレーション法で行った。以下、この章では、サンプル、測定体系、測定結果について述べる。なお、実験装置および測定方法については、付録で簡単に述べる。

### 2.1 サンプル

本実験に使用したドップラーサンプルは、X-3集合体では $\text{NUO}_2$ 、 $\text{Fe}$ 、SS、 $\text{Ni}$ であり、XI-1集合体では $\text{NU}$ 、 $\text{NUO}_2$ である。 $\text{NU}$ あるいは $\text{NUO}_2$ サンプルは、 $\text{NU}$ ペレットまたは

## 1. 序

高速増殖炉の安全性評価において、ドップラー効果の正確な評価が大変重要であることは言及するまでもない。FCAにおいては1968年から1973年にかけて様々な炉心についてのドップラー効果の測定が行われ<sup>1), 2)</sup>、サンプル・オシレーション法を用いた測定技術はすでに確立されている。

今回、FCA X-3及びXI-1集合体において、<sup>235</sup>Uおよび炉心構造材物質についての一連のドップラー効果の測定を行った。FCA X-3集合体は高速炉「常陽」Mark-II炉心の工学的模擬炉心であり<sup>3)</sup>、照射用炉心の模擬であるから炉心中心での中性子スペクトルはかなり硬い。一方、FCA XI-1集合体は大型ナトリウム冷却高速炉の内側炉心を模擬した炉心であり<sup>4)</sup>、原型炉におけるよりもさらに燃料原子数密度が低く、従って炉心中心での中性子スペクトルはかなり軟い。この2つの集合体は実験炉および大型炉クラスの典型的なモデルであり、これら集合体でのドップラー効果の測定は、実験炉および大型炉の安全性評価のために大きな意義を持っている。さらに、これら中性子スペクトルが大きく異なる2つの集合体におけるドップラー効果の測定値は、これまでの測定値とともに体系の中性子スペクトルが系統的に変わった時の測定値となり、ドップラー効果の解析の信頼性チェックのためのベンチマークとなる。

今回は10年ぶりの実験であり、測定開始には多大の労力を要した。今回の実験からマイクロコンピュータを用いた測定データの処理を行い、これまでより測定精度を向上させた。

本報告では、第2章で測定について、第3章で実験解析について述べた。また、実験装置及び測定方法については付録で簡略に記述した。サンプル軸方向の熱膨張効果をなくす測定方法についても付録で示した。

## 2. 測定

本実験では、FCA X-3集合体において天然ウラン酸化物( $\text{NUO}_2$ )、鉄( $\text{Fe}$ )、不銹鋼(以下SSと略す)、ニッケル( $\text{Ni}$ )の各サンプルについて、またFCA XI-1集合体では天然ウラン酸化物( $\text{NUO}_2$ )、金属天然ウラン( $\text{NU}$ )サンプルについて、それぞれ室温から $550^\circ\text{C}$ 及び $800^\circ\text{C}$ まで加熱した時の反応度値変化を測定した。測定方法は、サンプル・オシレーション法で行った。以下、この章では、サンプル、測定体系、測定結果について述べる。なお、実験装置および測定方法については、付録で簡単に述べる。

### 2.1 サンプル

本実験に使用したドップラーサンプルは、X-3集合体では $\text{NUO}_2$ 、 $\text{Fe}$ 、SS、 $\text{Ni}$ であり、XI-1集合体では $\text{NU}$ 、 $\text{NUO}_2$ である。 $\text{NU}$ あるいは $\text{NUO}_2$ サンプルは、 $\text{NU}$ ペレットまたは

NUO<sub>2</sub> ペレット及びSUS 304 製のキャプセルより成る。これらキャプセルによる反応度の寄与を測定するために上述サンプルの他に、空のキャプセルも用意した。これら、測定に使用したサンプルの形状、重量等をTable 2.1に示す。

また、ドップラー効果測定時に加熱されたドップラーサンプルと室温のダミーサンプルを交互に炉心中心に挿入されるようにドップラー引出し中にセットする。このダミーサンプルは、通常、FCAで炉心模擬物質として使用される天然ウラン板等を用いてドップラーサンプルとほぼ同じ重量・長さになるようにした。その結果、ダミーサンプルは、1パック当り4枚の天然ウラン板(2"-1"-1/8")を使用し、長さ3パック(15 cm)、U重量902 gである。ドップラーサンプルとダミーサンプルが、駆動引出し中にセットされている様子をFig. 2.1に示す。

Table 2.1 Doppler Samples

Sample	Material	Enrichment	Diameter and length (mm)	Total U mass (g)
NUO <sub>2</sub> -25φ	UO <sub>2</sub>	Nat.U	25.0 X 150.0	604.8
NUO <sub>2</sub> -20φ	UO <sub>2</sub>	Nat.U	20.0 X 150.0	376.7
NU -25φ	U(metal)	Nat.U	24.8 X 150.0	1346.7
NU -20φ	U(metal)	Nat.U	20.0 X 150.0	869.2
Fe	Fe	—	25.7 X 158.0	647.5(Fe)
S.S.	Stainless steel	—	26.2 X 157.5	667.5(S.S.)
Ni	Ni	—	26.1 X 158.0	754.6(Ni)



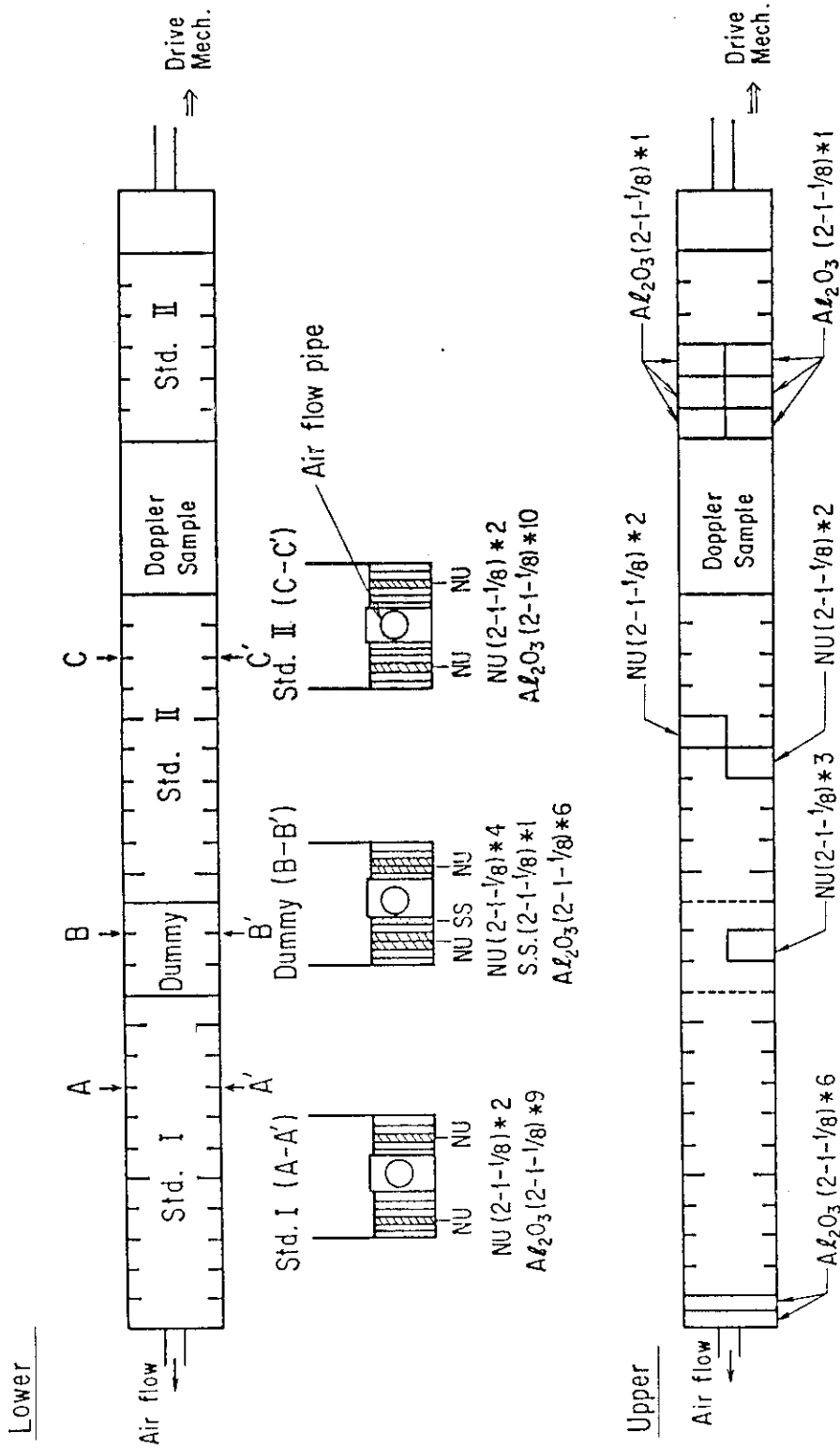


Fig. 2.1 Typical example of Doppler drawer's plate configuration

## 2.2 測定体系

今回ドップラー効果測定を行った体系は、FCA X-3 集合体およびXI-1 集合体である。X-3 集合体は六角形の炉心（炉心高さ 51 cm）を反射体領域（径方向約 17 cm, 軸方向 36 cm）が囲んでおり、さらにその外側に厚さ約 17 cm の SUS ブロックが存在する。また、炉心内には 6 ケ所の制御棒領域が設置されている<sup>3)</sup>。ドップラー効果測定実験を行うにあたって、駆動装置を取付るために固定側 1/2 集合体の制御・安全棒（合計 4 本）を標準 FCA X-3 集合体より約 16 cm 外側へ移動した。また、固定側 1/2 集合体の SS ブロック領域に微調整制御棒（F/R）を取付けた。炉心中心引出し（固定側及び移動側）を引抜き、駆動引出しを格子管集合体中心において挿入引抜きし、ドップラー効果を測定した。測定を行った体系の断面図を Fig. 2.2 に示す。

一方、XI-1 集合体は、大型高速炉の内側炉心を模擬した体系である。炉心は、試験領域（半径約 29 cm, 高さ 91 cm）と体系を臨界に維持するためのドライバー領域（径方向厚さ約 19 cm, 高さ 91 cm）からなる。さらに、ドライバー領域の外側に劣化ウランブランケット領域（厚さ約 24 cm）が存在する<sup>4)</sup>。F/R は固定側 1/2 集合体の試験領域とドライバー領域の境界に取付けた。ドップラー効果測定を行った XI-1 集合体の炉心断面図を Fig. 2.3 に示す。

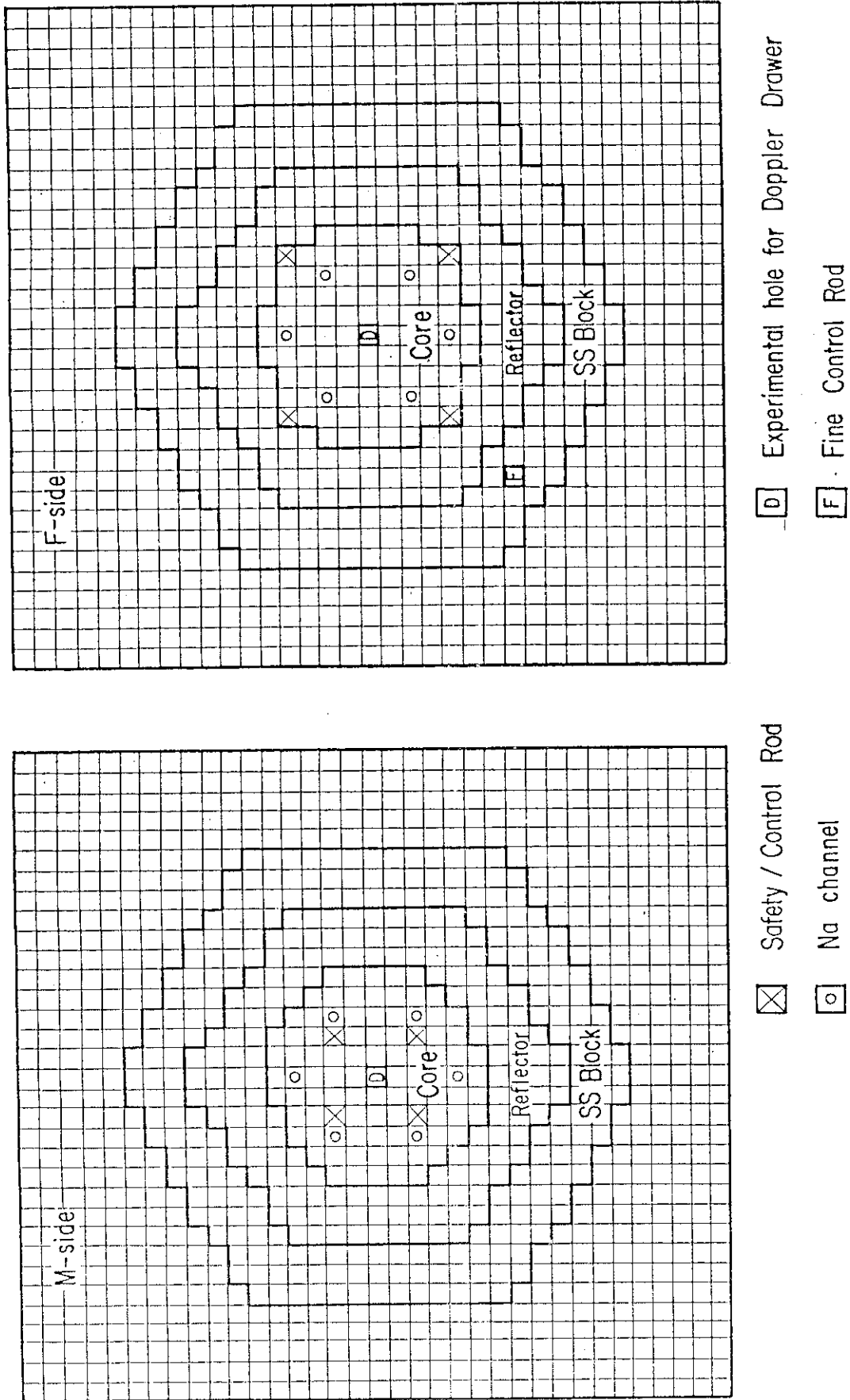
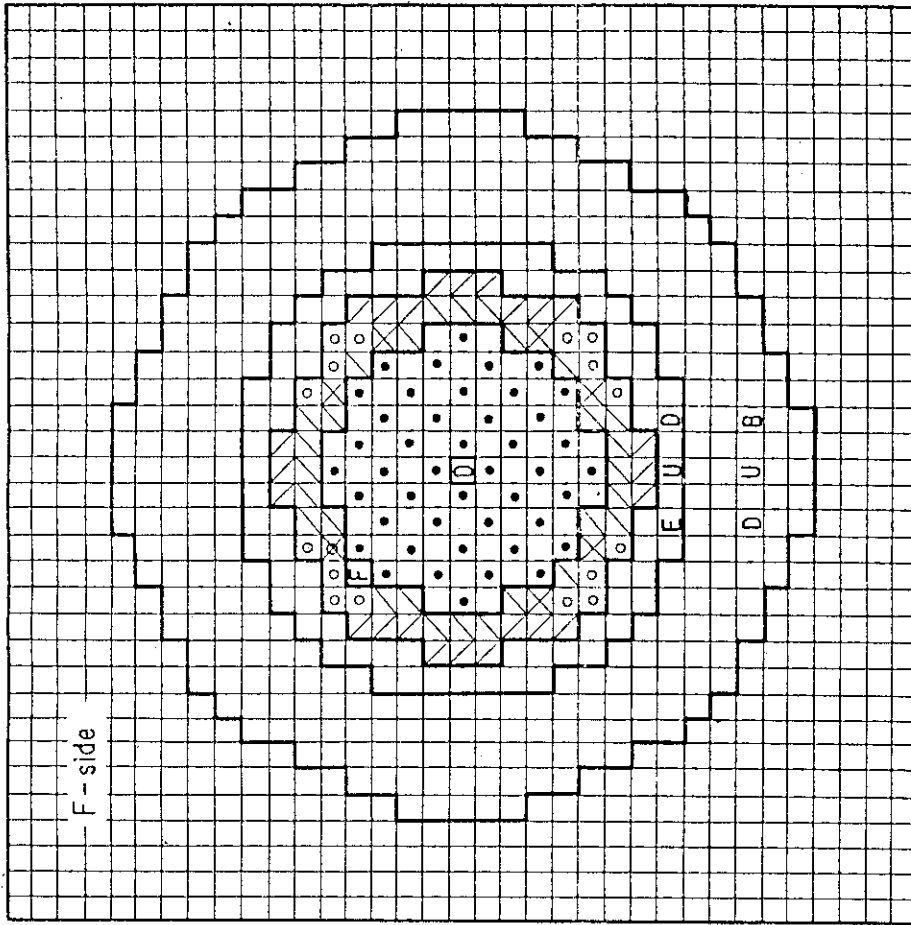
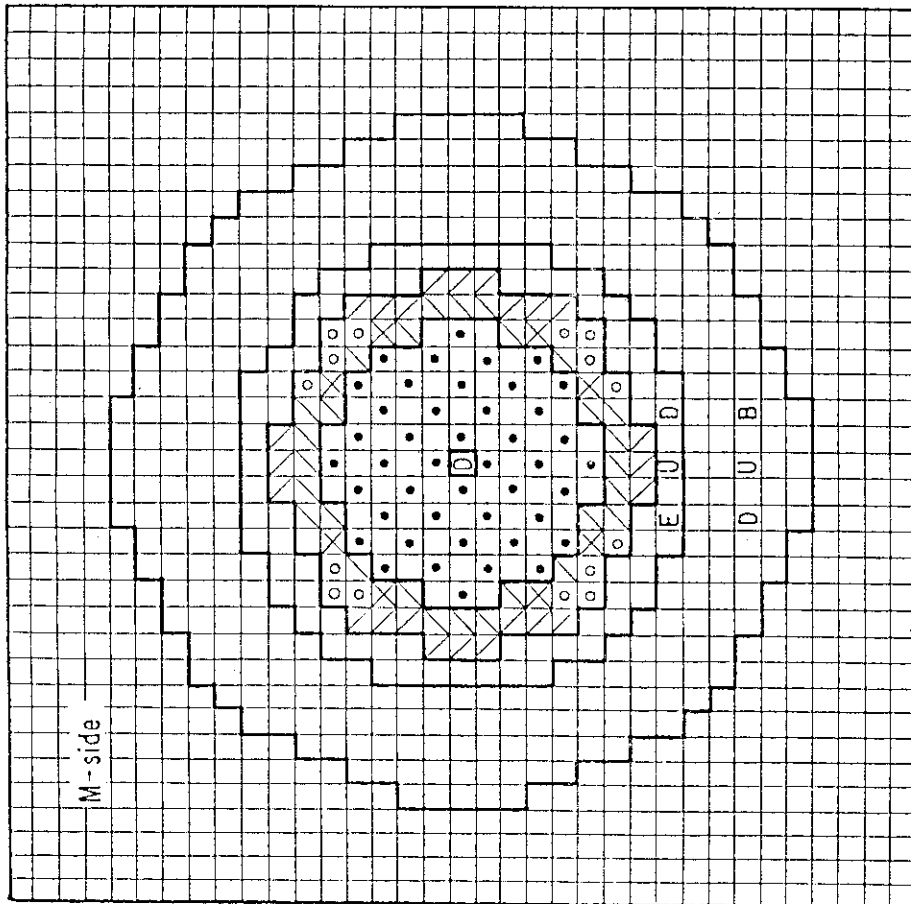


Fig. 2.2 Vertical cross sections of FCA Assembly X-3 for Doppler experiment



D : Experimental hole for Doppler Drawer  
F : Fine Control Rod



• : T<sub>1</sub> } Test Region  
□ : T<sub>2</sub> }  
⊗ : Safety / Control Rod  
⊠ : Pu - Driver  
 EUD : EU - Driver  
 DUB : Radial Blanket

Fig. 2.3 Vertical cross sections of FCA Assembly XI-1 for Doppler experiment

### 2.3 測定結果

X-3 集合体およびXI-1 集合体において、各サンプルに対するドップラー効果をサンプル・オシレーション法(付録2参照)にて測定した。これら両集合体における測定結果をTable 2.2に示す。また、測定精度・再現性の確認を行うために、XI-1集合体においてNU-25φ及びNU-20φサンプルに対してはドップラー反応度値を2度測定した。NU-25φサンプルに対しては、引出し駆動ストローク及びダミーサンプルの量を同じにして測定を行った。一方、NU-20φサンプルに対しては、ストローク、ダミーサンプルの量を変えて測定した。これらの測定から、測定条件を変化させてもドップラー効果測定の再現性は非常に良いことを確認した。ドップラー反応度値の測定精度は、X-3集合体では $\pm 2 \times 10^{-7} \Delta k/k$ であり、XI-1集合体では $\pm 6 \times 10^{-8} \Delta k/k$ であった。一方、室温での各サンプルの反応度値の測定精度は、X-3集合体では $\pm 2.4 \times 10^{-5} \Delta k/k$ であった。ただし、 $\text{NUO}_2$ -20φサンプルについては、 $\pm 3.5 \times 10^{-5} \Delta k/k$ の測定精度であった。XI-1集合体においては、C/Rの微分反応度がX-3集合体のC/Rのそれより小さいため $\pm 7.4 \times 10^{-6} \Delta k/k$ と幾分向上している。

各サンプルの温度上昇による反応度変化をFig. 2.4に示す。図中では、サンプル加熱中あるいは冷却中の反応度変化も併せて示した。加熱中あるいは冷却中の反応度値測定誤差は、X-3集合体では $\pm 3 \times 10^{-7} \Delta k/k$ 、XI-1集合体では $\pm 1.5 \times 10^{-7} \Delta k/k$ である。

Table 2.2-1 Doppler reactivity worth measurement in FCA Assembly X-3

Sample	T ( °C )	Worth (ρ <sub>0</sub> )
NUO <sub>2</sub> - 25φ (U 604.8g)	20	-0.184(±0.062) 0
	20 + 550	-1.782(±0.032) -2
	20 + 800	-2.174(±0.033) -2
NUO <sub>2</sub> - 20φ (U 376.7g)	20	-0.076(±0.088) 0
	20 + 550	-1.157(±0.039) -2
	20 + 800	-1.468(±0.020) -2
Fe (647.5g)	20	-0.249(±0.062) 0
	20 + 550	—
	20 + 800	-0.539(±0.032) -2
S.S. (667.5g)	20	-0.246(±0.062) 0
	20 + 550	-0.432(±0.044) -2
	20 + 800	-0.536(±0.034) -2
NI (754.6g)	20	-0.363(±0.062) 0
	20 + 550	-0.722(±0.028) -2
	20 + 800	-0.909(±0.031) -2

ρ<sub>0</sub> = 0.0394 % Δk/k  
 -0.184 ( ±0.062 ) 0 ; read as -0.184 ( ±0.062 ) × 10<sup>0</sup>

Table 2.2-2 Doppler reactivity worth measurement in FCA Assembly XI-1

Sample	T ( °C )	Worth (ρ <sub>0</sub> )
NU-25φ (U 1346.2g)	20	-0.239(±0.012) 0
	20 + 550	-1.593(±0.008) -2
	20 + 800	-1.609(±0.009) -2
NU-20φ (U 869.2g)	20	-0.135(±0.012) 0
	20 + 550	-1.082(±0.009) -2
	20 + 800	-1.385(±0.008) -2
NUO <sub>2</sub> -20φ (U 376.7g)	20	-0.086(±0.012) 0
	20 + 550	-0.536(±0.009) -2
	20 + 800	-0.661(±0.008) -2

ρ<sub>0</sub> = 0.0629 %Δk/k  
 -0.239 ( ±0.012 ) 0 ; read as -0.239 ( ±0.012 ) × 10<sup>0</sup>

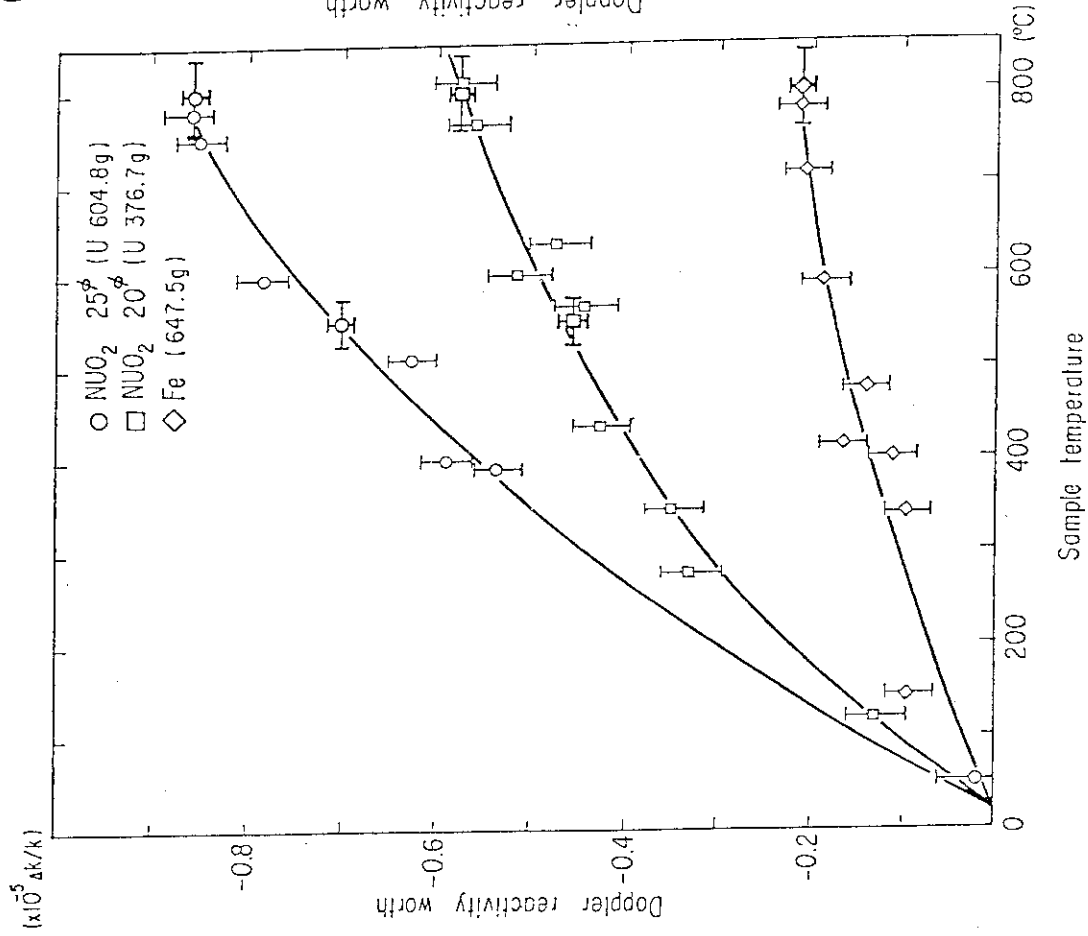
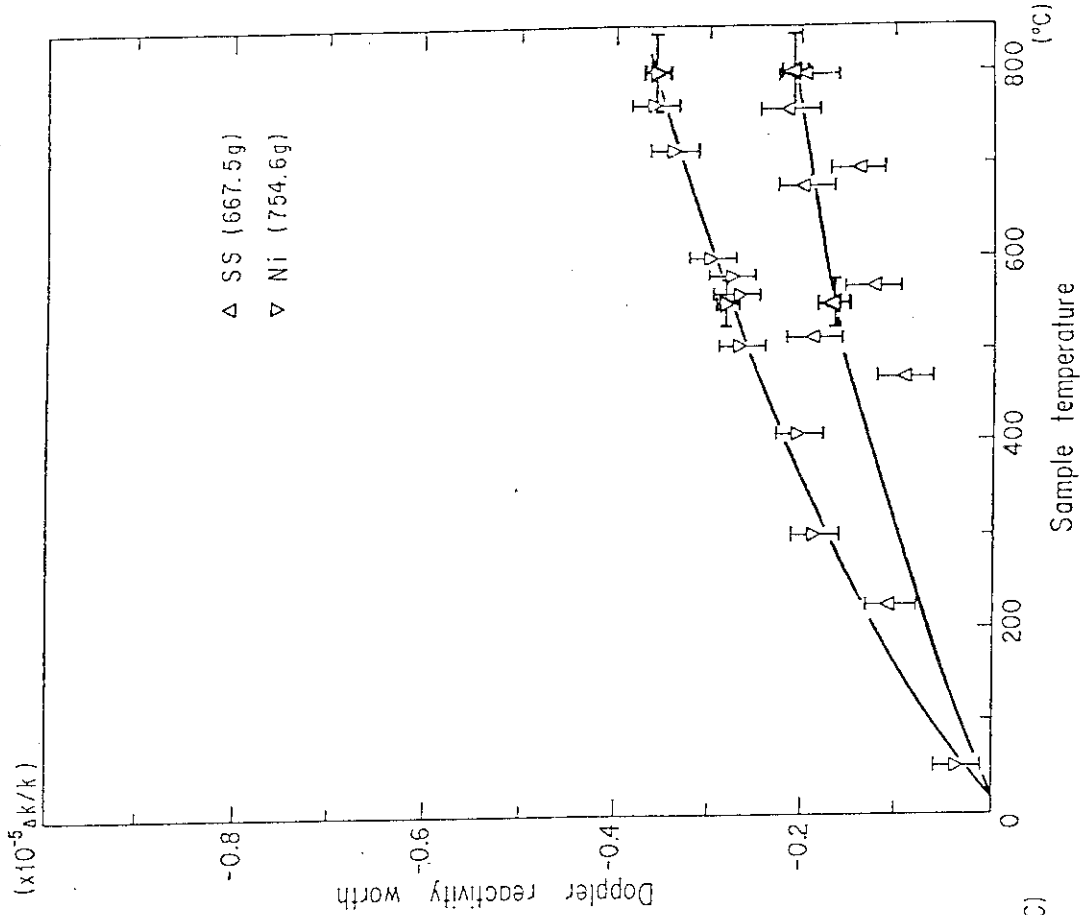


Fig. 2.4-1 Doppler reactivity worths measured in FCA X-3 Fig. 2.4-2 Doppler reactivity worths measured in FCA X-3

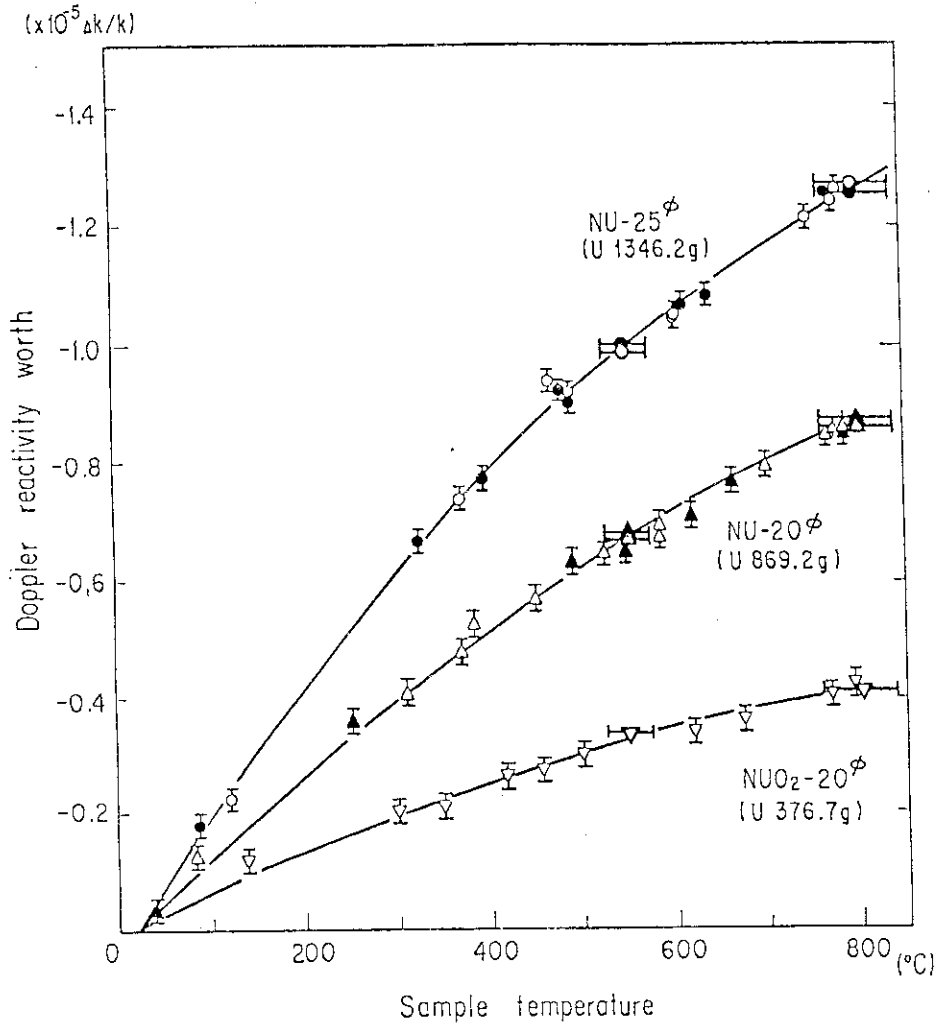


Fig.2.4-3 Doppler reactivity worths measured in FCA XI-1



### 3. 計 算

計算には、JENDL-2 を代表的な高速炉心スペクトルで縮約した70群定数 JFS-3-J2<sup>5)</sup> を使用した。セル計算には、衝突確率法を用いて積分型輸送方程式を解く SLAROM<sup>6)</sup> を、体系計算には2次元拡散計算コード CITATION を使用した。ドップラー効果及びサンプルワース計算は、体系計算で得た中性子束及び随伴中性子束を用いて一次摂動計算コード PERKY<sup>7)</sup> により行った。

特に、ドップラー効果の解析を行うには、炉心非均質効果、SUS カプセル効果、共鳴非均質効果に注意を払うことが重要であると言われている<sup>8)</sup>。そこで、本解析では、炉心非均質効果の考慮として、セル計算時に炉心燃料およびドライバー領域に対しては模擬物質板の配列に伴う非均質性を考慮してセル平均断面積を作成した。また、SUS カプセル効果は、ドップラーサンプルの外側に実験に使用したカプセルと同体積で総原子数が等しい均質なカプセルがあるモデルで計算した。さらに、共鳴非均質効果を考慮して、ドップラーサンプルのセル計算を行う際に、 $\text{NUO}_2$ 、 $\text{NU}$  サンプルに対しては3領域(サンプル・SUSカプセル・炉心)円柱化セルモデルでダンコフ因子を求め、サンプル・SUSカプセルの実効断面積を作成した。一方、 $\text{Fe}$ 、 $\text{SS}$ 、 $\text{Ni}$  サンプルに対しては、均質モデルでセル計算を行った。Fig. 3.1, Fig. 3.2にX-3集合体およびXI-1集合体の計算体系およびセルモデルを示し、Table 3.1, 3.2に両集合体の各領域での原子数密度を、Table 3.3にドップラーサンプルの原子数密度を記す。

上述のモデルで行った両集合体についての計算結果をTable 3.4 に示す。

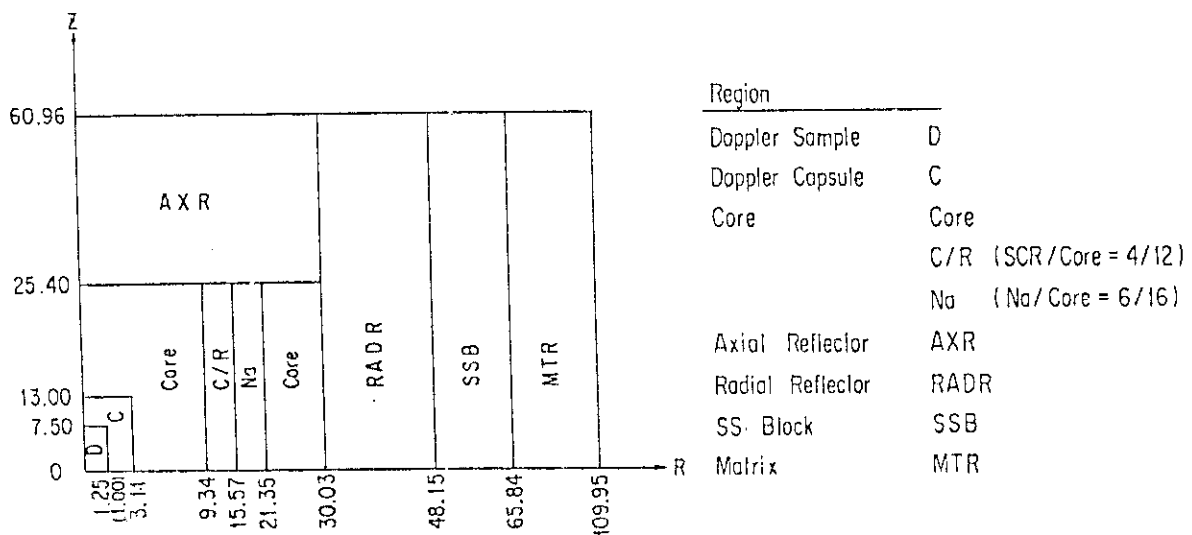
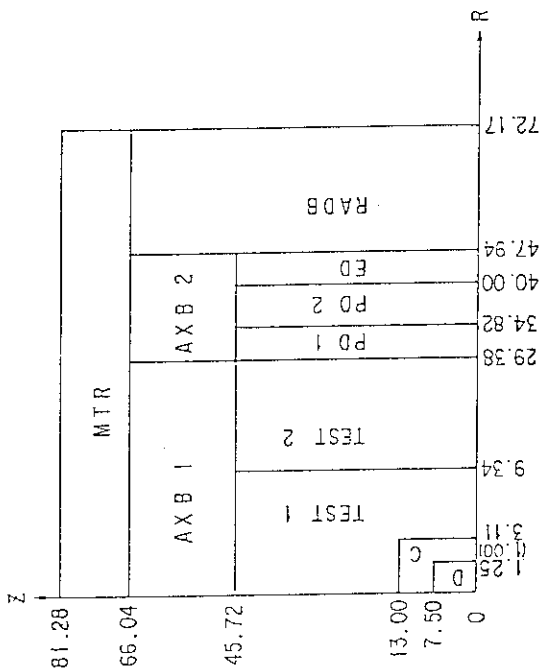


Fig.3.1 RZ model of FCA Assembly X-3

Table 3.1 Atomic number densities for RZ model of FCA Assembly X-3

$10^{24}$  atoms/cm<sup>3</sup>

	Core	C/R	Na	Axial Reflector	Radial Reflector	SS Block	Matrix
Pu-239	2.090-3	1.568-3	1.520-3				
240	1.804-4	1.353-4	1.312-4				
241	1.749-5	1.312-5	1.272-5				
U-235	7.397-4	1.588-3	5.380-4				
238	5.207-3	5.271-3	3.787-3				
0	1.283-2	1.281-2	9.328-3				
Na	7.656-3	7.656-3	9.744-3	7.656-3	5.742-3		
Cr	3.542-3	3.616-3	3.772-3	1.014-2	1.161-2	1.601-2	1.827-3
Fe	1.303-2	1.329-2	1.388-2	3.643-2	4.139-2	5.829-2	6.652-3
Ni	1.684-3	1.695-3	1.775-3	4.462-3	5.116-3	6.980-3	7.964-4
Al	5.763-3	5.678-3	4.191-3				



- Region
- Doppler Sample D
- Doppler Capsule C
- Test Region TEST 1 (T1/T2=4/5)
- TEST 2 (T1/T2=40/40)
- Pu Driver PD 1 (SCR-2/PD01)=8/28)
- PD 2 (PD1921/PUD=16/24)
- EU Driver ED
- Axial Blanket AXB 1
- AXB 2
- Radial Blanket RADB
- Matrix MTR

Fig. 3.2 RZ model of FCA Assembly XI-1

Table 3.2 Atomic number densities for RZ model of FCA  
Assembly XI-1

$10^{24}$  atoms/cm<sup>3</sup>

	Test 1	Test 2	PD 1	PD 2	ED
Pu-239	8.132-4	7.841-4	1.617-3	1.777-3	
240	7.168-5	6.912-5	2.020-4	1.567-4	
241	3.860-6	3.722-6	2.494-5	1.471-5	
U -235	2.181-5	2.279-5	1.016-3	6.921-4	2.845-3
238	7.953-3	8.008-3	5.418-3	6.920-3	6.892-3
O	1.631-2	1.622-2	2.017-2	1.376-2	1.362-2
Na	7.656-3	7.656-3	5.955-3	7.656-3	7.656-3
Cr	3.288-3	3.280-3	3.445-3	3.535-3	3.079-3
Fe	1.212-2	1.209-2	1.273-2	1.308-2	1.130-2
Ni	1.500-3	1.497-3	2.456-3	1.624-3	1.396-3
Al	1.803-3	1.739-3	6.504-3	2.549-4	9.082-3

	Axial Blanket 1	Axial Blanket 2	Radial Blanket	Matrix
Pu-239				
240				
241				
U -235	3.163-5	2.890-4	8.600-5	
238	9.307-3	3.988-2	4.007-2	
O	1.704-2			
Na	7.656-3			
Cr	3.079-3	1.827-3	1.827-3	1.029-3
Fe	1.130-2	6.652-3	6.652-3	3.745-3
Ni	1.396-3	7.960-4	7.960-4	4.480-4
Al	2.169-3			

Table 3.3 Atomic compositions of Doppler samples, Empty Cans and Capsules.

 $10^{24}$  atoms/cm<sup>3</sup>

	NUO <sub>2</sub> -25 φ	NUO <sub>2</sub> -20 φ	NU-25 φ	NU-20 φ	Fe	SS	Ni
U-235	1.503-4	1.463-4	3.405-4	3.377-4			
U-238	2.063-2	2.008-2	4.667-2	4.633-2			
O	4.157-2	4.045-2					
Fe					9.483-2	7.014-2	
Cr						1.986-2	
Ni						8.687-3	1.051-1

	Empty Can 25 φ	Empty Can 20 φ	Capsule 25	Capsule 20
U-235				
U-238				
O				
Fe	8.485-3	1.114-2	1.888-2	1.794-2
Cr	2.368-3	3.109-3	5.185-3	4.929-3
Ni	1.105-3	1.451-3	3.496-3	4.198-3

Table 3.4-1 Comparison of calculated and experimental values of Doppler Effect in FCA Assembly X-3

Sample	Temperature ( °C )	Reactivity change( $10^{-6}\Delta K/K$ )		C/E
		Experimental	Calculated	
NUO <sub>2</sub> 25φ (U 604.8g)	20 → 550	-7.02 ± 0.13	-6.59	0.939
	20 → 800	-8.57 ± 0.13	-8.30	0.968
NUO <sub>2</sub> 20φ (U 376.7g)	20 → 550	-4.56 ± 0.15	-3.99	0.875
	20 → 800	-5.78 ± 0.15	-5.03	0.870
Fe 25φ (647.5g)	20 → 550	—	-1.62	—
	20 → 800	-2.12 ± 0.13	-2.13	1.00
S.S. 25φ (667.5g)	20 → 550	-1.70 ± 0.17	-1.69	0.99
	20 → 800	-2.11 ± 0.17	-2.20	1.04
Ni 25φ (754.6g)	20 → 550	-2.84 ± 0.11	-2.87	1.01
	20 → 800	-3.58 ± 0.12	-3.71	1.04

Table 3.4-2 Comparison of calculated and experimental values of Doppler Effect in FCA Assembly XI-1

Sample	Temperature ( °C )	Reactivity change( $10^{-6}\Delta K/K$ )		C/E
		Experimental	Calculated	
NU 25φ (U 1346.2g)	20 → 550	-10.07 ± 0.05	-9.78	0.971
	20 → 800	-12.80 ± 0.04	-12.54	0.980
NU 20φ (U 869.2g)	20 → 550	-6.84 ± 0.06	-6.43	0.940
	20 → 800	-8.78 ± 0.05	-8.24	0.938
NUO <sub>2</sub> 20φ (U 376.7g)	20 → 550	-3.37 ± 0.06	-3.01	0.893
	20 → 800	-4.16 ± 0.05	-3.86	0.929

## 4. ま と め

ドップラー反応度値は、X-3集合体では2%~10%の精度で、XI-1集合体では0.3%~2%の精度と、非常に精度良く求めることができた。

実験値と計算値を比較すると、構造材核種であるF<sub>e</sub>, S, Niは測定誤差内で、非常に良い一致を示した。一方、NUO<sub>2</sub>, NU両サンプルは、C/Eが0.87~0.99であった。特に、X-3集合体の方が、実験値と計算値の差は若干大きい<sup>5)</sup>が、かってFCAで測定されたドップラー反応度値実験についてのJFS-3-J2を用いた解析でのC/Eが0.86~0.94であったのと比べると、それと同程度かそれよりも幾分良い結果を得たと考えられる。

しかし、同一核種で重量の異なるサンプルについて考えると、25φサンプルのC/Eが、20φサンプルのそれよりも1に近い傾向があると言える。この傾向が、本実験に対してのみであるのかどうか、今後検討していく必要がある。

## 謝 辞

本実験を遂行するに当り種々の御協力を頂いたFCA管理機関の諸氏に深く感謝いたします。特に、10年振りに実験装置を運転するにあたって、御協力を頂いた炉物理施設管理室藤崎伸吾氏に深く感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) Yasuno T., Nakano M., Mukaiyama T., Iijima T. and Hirota J.: J. Nucl. Sci Technol., 7(1970) P 271 ~ 273
- 2) Iijima T., Mukaiyama T., Nakano M. and Hirota J.: "Doppler Experiment in FCA" EACRP report, Stockholm, June 1971
- 3) 飯島 進, 小坪龍男, 大杉俊隆, 岡嶋成晃, 中野正文: FCA X-3 集合体による「常陽」MK-II炉心の模擬実験, 私信(1983)
- 4) 大杉俊隆, 他: JAERI-M 83-211 (1983)
- 5) Takano H. and Ishiguro Y.: JAERI-M 82-135 (1982)
- 6) 中川正幸, 土橋敬一郎: JAERI-M 5916 (1974)
- 7) 飯島進, 吉田弘幸・桜木廣隆: JAERI-M 6993 (1977)
- 8) 高野秀機・松井泰: JAERI-M 7195 (1977)
- 9) 藤崎伸吾, ドップラーグループ: ドップラー係数測定装置の概要と測定方法, 私信(1969)
- 10) 長谷川正義, 三島良積: 原子炉材料ハンドブック, 日刊工業新聞社(1977)

## 4. ま と め

ドップラー反応度値は、X-3集合体では2%~10%の精度で、XI-1集合体では0.3%~2%の精度と、非常に精度良く求めることができた。

実験値と計算値を比較すると、構造材核種であるF<sub>o</sub>、SS、Niは測定誤差内で、非常に良い一致を示した。一方、NUO<sub>2</sub>、NU両サンプルは、C/Eが0.87~0.99であった。特に、X-3集合体の方が、実験値と計算値の差は若干大きい<sup>5)</sup>が、かってFCAで測定されたドップラー反応度値実験についてのJFS-3-J2を用いた解析でのC/Eが0.86~0.94であったのと比べると、それと同程度かそれよりも幾分良い結果を得たと考えられる。

しかし、同一核種で重量の異なるサンプルについて考えると、25φサンプルのC/Eが、20φサンプルのそれよりも1に近い傾向があると言える。この傾向が、本実験に対してのみであるのかどうか、今後検討していく必要がある。

## 謝 辞

本実験を遂行するに当り種々の御協力を頂いたFCA管理機関の諸氏に深く感謝いたします。特に、10年振りに実験装置を運転するにあたって、御協力を頂いた炉物理施設管理室藤崎伸吾氏に深く感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) Yasuno T., Nakano M., Mukaiyawa T., Iijima T. and Hirota J.: J. Nucl. Sci Technol., 7(1970) P 271 ~ 273
- 2) Iijima T., Mukaiyama T., Nakano M. and Hirota J.: "Doppler Experiment in FCA" EACRP report, Stockholm, June 1971
- 3) 飯島 進, 小坪龍男, 大杉俊隆, 岡嶋成晃, 中野正文: FCA X-3 集合体による「常陽」MK-II炉心の模擬実験, 私信(1983)
- 4) 大杉俊隆, 他: JAERI-M 83-211 (1983)
- 5) Takano H. and Ishiguro Y.: JAERI-M 82-135 (1982)
- 6) 中川正幸, 土橋敬一郎: JAERI-M 5916 (1974)
- 7) 飯島進, 吉田弘幸・桜木廣隆: JAERI-M 6993 (1977)
- 8) 高野秀機・松井泰: JAERI-M 7195 (1977)
- 9) 藤崎伸吾, ドップラーグループ: ドップラー係数測定装置の概要と測定方法, 私信(1969)
- 10) 長谷川正義, 三島良積: 原子炉材料ハンドブック, 日刊工業新聞社(1977)

## 4. ま と め

ドップラー反応度値は、X-3集合体では2%~10%の精度で、XI-1集合体では0.3%~2%の精度と、非常に精度良く求めることができた。

実験値と計算値を比較すると、構造材核種であるF<sub>e</sub>, S, Niは測定誤差内で、非常に良い一致を示した。一方、NUO<sub>2</sub>, NU両サンプルは、C/Eが0.87~0.99であった。特に、X-3集合体の方が、実験値と計算値の差は若干大きい<sup>5)</sup>が、かってFCAで測定されたドップラー反応度値実験についてのJFS-3-J2を用いた解析でのC/Eが0.86~0.94であったのと比べると、それと同程度かそれよりも幾分良い結果を得たと考えられる。

しかし、同一核種で重量の異なるサンプルについて考えると、25φサンプルのC/Eが、20φサンプルのそれよりも1に近い傾向があると言える。この傾向が、本実験に対してのみであるのかどうか、今後検討していく必要がある。

## 謝 辞

本実験を遂行するに当り種々の御協力を頂いたFCA管理機関の諸氏に深く感謝いたします。特に、10年振りに実験装置を運転するにあたって、御協力を頂いた炉物理施設管理室藤崎伸吾氏に深く感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) Yasuno T., Nakano M., Mukaiyama T., Iijima T. and Hirota J.: J. Nucl. Sci Technol., 7(1970) P 271 ~ 273
- 2) Iijima T., Mukaiyama T., Nakano M. and Hirota J.: "Doppler Experiment in FCA" EACRP report, Stockholm, June 1971
- 3) 飯島 進, 小坪龍男, 大杉俊隆, 岡嶋成晃, 中野正文: FCA X-3 集合体による「常陽」MK-II炉心の模擬実験, 私信(1983)
- 4) 大杉俊隆, 他: JAERI-M 83-211 (1983)
- 5) Takano H. and Ishiguro Y.: JAERI-M 82-135 (1982)
- 6) 中川正幸, 土橋敬一郎: JAERI-M 5916 (1974)
- 7) 飯島進, 吉田弘幸・桜木廣隆: JAERI-M 6993 (1977)
- 8) 高野秀機・松井泰: JAERI-M 7195 (1977)
- 9) 藤崎伸吾, ドップラーグループ: ドップラー係数測定装置の概要と測定方法, 私信(1969)
- 10) 長谷川正義, 三島良積: 原子炉材料ハンドブック, 日刊工業新聞社(1977)



## 付録1. ドップラー効果測定装置<sup>1), 9)</sup>

ドップラー効果測定装置は、サンプル加熱装置、駆動引出し、駆動機構、微小反応度測定装置から成る。ここでは、これらの装置について述べる。装置のブロック図をFig. A. 1. 1に示す。

### サンプル容器

ドップラーサンプルを収納する容器であり、ヒーター・熱電対・熱反射板（Ni製）・真空容器・外容器から構成される。この容器の断面図をFig. A. 1. 2に示す。真空容器及び外容器はSUS 304製であり、外容器は外径48mmφ、全長260mmである。サンプルの加熱は、サンプル外側をらせん状に巻いたヒーター（ニクロム線）によって行ない、サンプル中心で最高800℃まで加熱できる。サンプルの温度は、サンプル中央部に挿入されたクロメル・アルメル熱電対<sup>\*</sup>によって測定する。この熱電対の較正は金属ウランの相転移温度を利用して行い、精度は±20℃である。サンプルの保持にはアルミナ磁器製のスペーサを用いている。サンプルの軸方向分布は、このスペーサによる熱リークのために、サンプル両端の温度が中心部の温度に比べて低くなる。NUO<sub>2</sub>-25φサンプルを800℃に加熱した時の軸方向分布をFig. A. 1. 3に示す。

加熱されたサンプルから炉心部への熱リークを遮断するために、サンプル及びヒーターの外側はNi板の熱反射板で包み、これらを真空容器に入れる。真空度は約10<sup>-3</sup>Torr程度である。真空容器の外側は約4℃の冷却空気を流し、リークしてきた熱を格子管集合体外に排出する。

### 駆動引出し

サンプル及び真空系、冷却系、またダミーサンプル及び引出し移動中の反応度変化を小さくするための充填物を収納する引出しであり、駆動機構に取付られる。引出しの全長は約2m、板厚は1.5mmである。引出し先端部には、冷却空気排気用の筒（外径13.8mmφ、長さ870mm）を取付け、温い排気を格子管集合体外に吹き出す様になっている。

### 駆動機構

サンプルを収納した駆動引出しを、FCA中心格子管において挿入引抜する装置である。駆動速度、ストローク及びサンプルが炉心中心に滞在する時間等は、任意の値に設定が可能であり、これらの値は反応度調整のためのドップラー引出しのトラバース実験やマイクロコンピュータによるデータの取込み時間を勘案して決定される。ストロークの調整はストッパーを用いて行うが、この時の停止位置の再現性は0.05mm以下である。

### 微小反応度測定装置

微調整制御棒（Fine control rod、以下F/Rと記す）、F/R自動運転装置及びF/R位置データ処理部から成る。反応度の微小変化による炉出力の変動を電離箱で測定し、変動分を約100倍に増幅した信号を入力とし、自動運転装置によりF/Rで炉出力を一定に保つようにする。サンプル反応度値は、サンプルが炉心に挿入された時と引抜かれた時のF/Rの位置変

\* 金属ウランの相転移温度は、 $\alpha \rightarrow \beta$  669 ± 1℃、 $\beta \rightarrow \gamma$  774 ± 2℃、 $\gamma \rightarrow \beta$  765 ± 1℃、 $\beta \rightarrow \alpha$  657 ± 2℃である<sup>10)</sup>。

化より測定できる。このF/R位置の読取りは、マイクロコンピュータを利用した微少反応度読取装置にて行った。本実験では、1回の測定時間3分間に900回F/Rの位置を読取り、その平均値を1測定点とした。

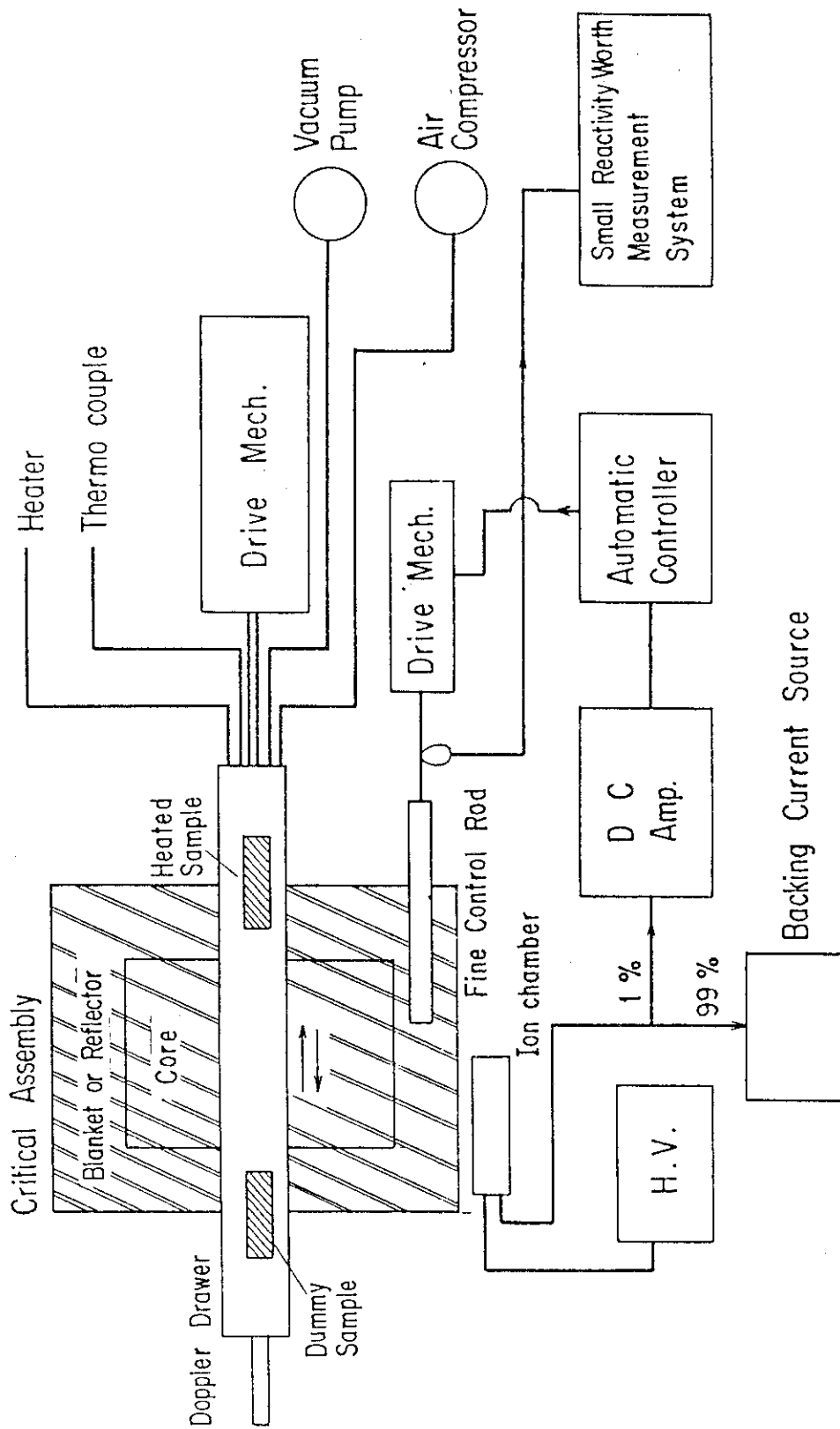


Fig.A.1.1.1 Block diagram of Doppler Effect Measurement System

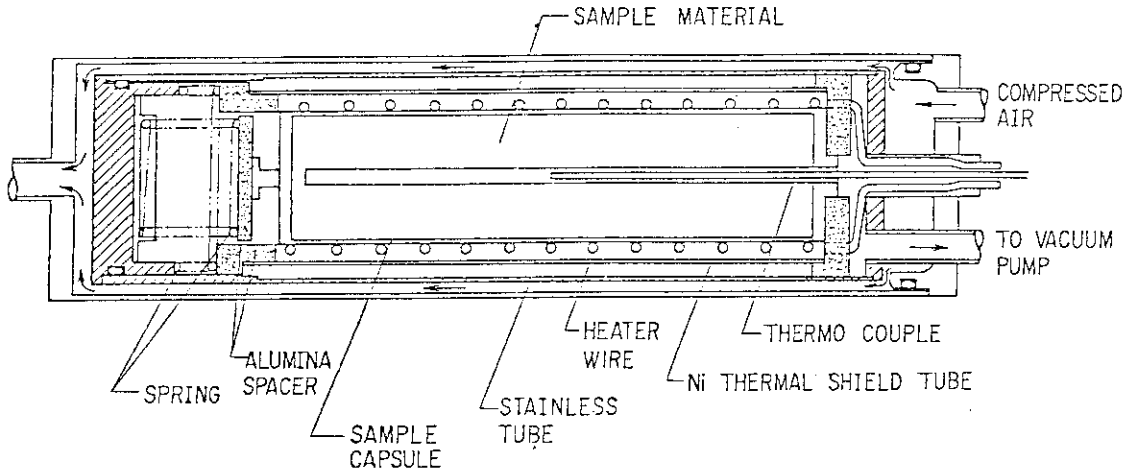


Fig.A.1.2 Configuration of Doppler element

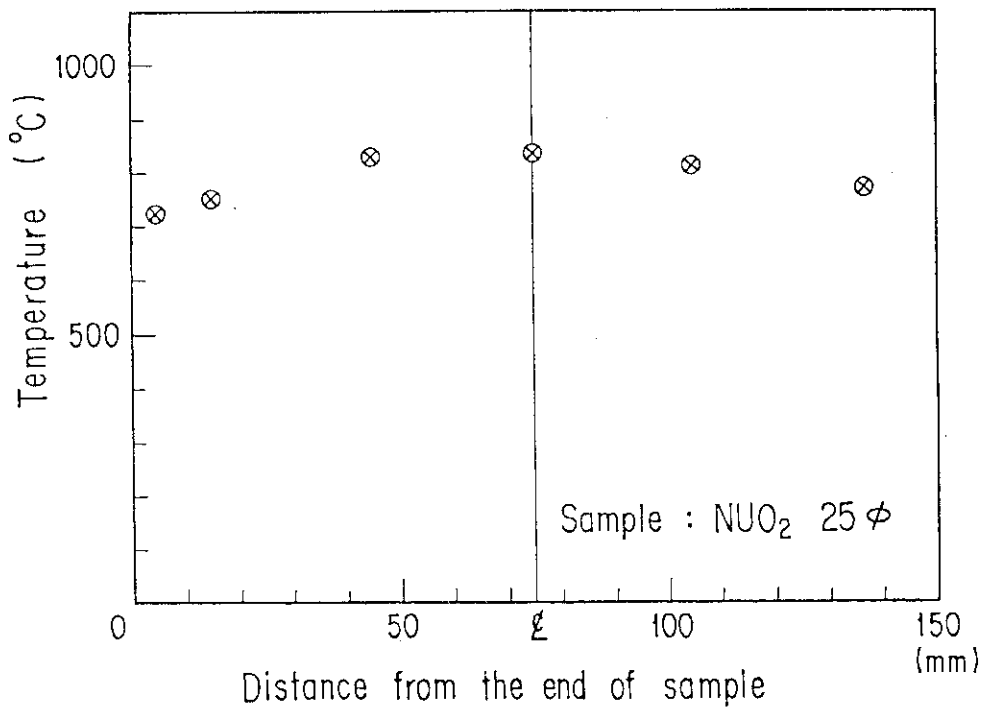


Fig.A.1.3 Axial temperature distribution in  $\text{NUO}_2$  - 25  $\phi$  sample at 800 °C

## 付録2. 測定方法

測定は、サンプル・オシレーション法によって行う。サンプル・オシレーション法とは、ドップラー効果測定用のサンプルを炉心に挿入した場合と体系外へ引き抜き、代わりに室温のダミーサンプルを炉心に挿入した場合の反応度変化をサンプルの温度を変えて繰り返し測定し、サンプルの反応度変化の温度依存性からドップラー効果を求める方法である。この方法では、加熱する必要のあるのはサンプルだけであるので、炉心の一部或は全部を加熱する場合に比べて実験が容易であり、かなり広範囲にわたって温度を変化させることができる。また、ドップラーサンプルは炉心の組成とは独立に選ぶことができるので、一つの炉心に対して種々のドップラー効果をサンプルを取り換えることにより測定が可能である。しかし、サンプルのドップラー効果による反応度変化は小さいので、この微小反応度変化の精度よい測定は、サンプルの周囲の中性子束を乱さず、しかもサンプルの挿入時、移動中及び引抜き時の反応度変化をうまくバランスさせることが必要となる。従って、ドップラー効果測定実験を行う前に、引出し移動によって生じる中性子束変化の過渡状態をできるだけ短くするための反応度調整が必要である。この反応度調整の結果をFig. A. 2. 1に、またその時のドップラー引出しの装填をFig. A. 2. 2に示す。この図よりドップラー引出し位置0. 0 mmと775. 0 mmとの反応度差は、調整前 $\Delta X_{(C/R*2)} = 4. 76 \text{ mm}$  ( $= 10. 5 \times 10^{-2} \rho_0$ )であったのが、調整後 $\Delta X_{(C/R*2)} = -0. 05 \text{ mm}$  ( $= -1. 1 \times 10^{-4} \rho_0$ )になった。これは、ドップラーサンプル部に取り付けたNU (492g)によるものである。また、0. 0 mmから775. 0 mmまでの引出し移動による反応度変化は、調整後において、 $+2. 3 \text{ mm}$  ( $= 5. 09 \times 10^{-2} \rho_0$ )、 $-0. 5 \text{ mm}$  ( $= -1. 11 \times 10^{-2} \rho_0$ )の範囲内である。

この反応度調整後、ドップラー効果測定実験を行う。本実験では、ドップラーサンプルが20℃から550℃、また20℃から800℃まで温度変化した時のサンプル反応度値変化を測定する。併せて、サンプル温度上昇中及び下降中の反応度値変化も測定する。測定の一例として、XI-1集合体におけるNU-20φサンプルの実験結果をFig. A. 2. 3に示す。20℃におけるドップラーサンプルが炉心に挿入された場合の臨界点およびダミーサンプルが炉心に挿入された場合の臨界点をF/R位置で数回繰り返し測定し、そのF/R位置の差の平均値を20℃でのドップラーサンプルとダミーサンプルとの反応度差とする。同様にして、550℃、800℃でのドップラーサンプルとダミーサンプルの反応度差を求め、それらより、20℃から550℃、または20℃から800℃まで温度変化した時のサンプル反応度値変化を得る。ここで、図中の1測定点は、3分間に900回F/Rの位置を読取り、それを平均したものである。なお、室温のサンプルが炉心中心に存在する時の臨界点の変化(ドリフト)は、原子炉運転時の条件(炉心温度、密着状態等)の変化によるものである。特に密着直後から約3時間は、炉心密着による炉心冷却条件の変化・それに伴う炉心温度の変化・炉心密着状態の不安定性などによる臨界点への変化が大きいため、通常この時間帯のデータは測定値として採用しない。

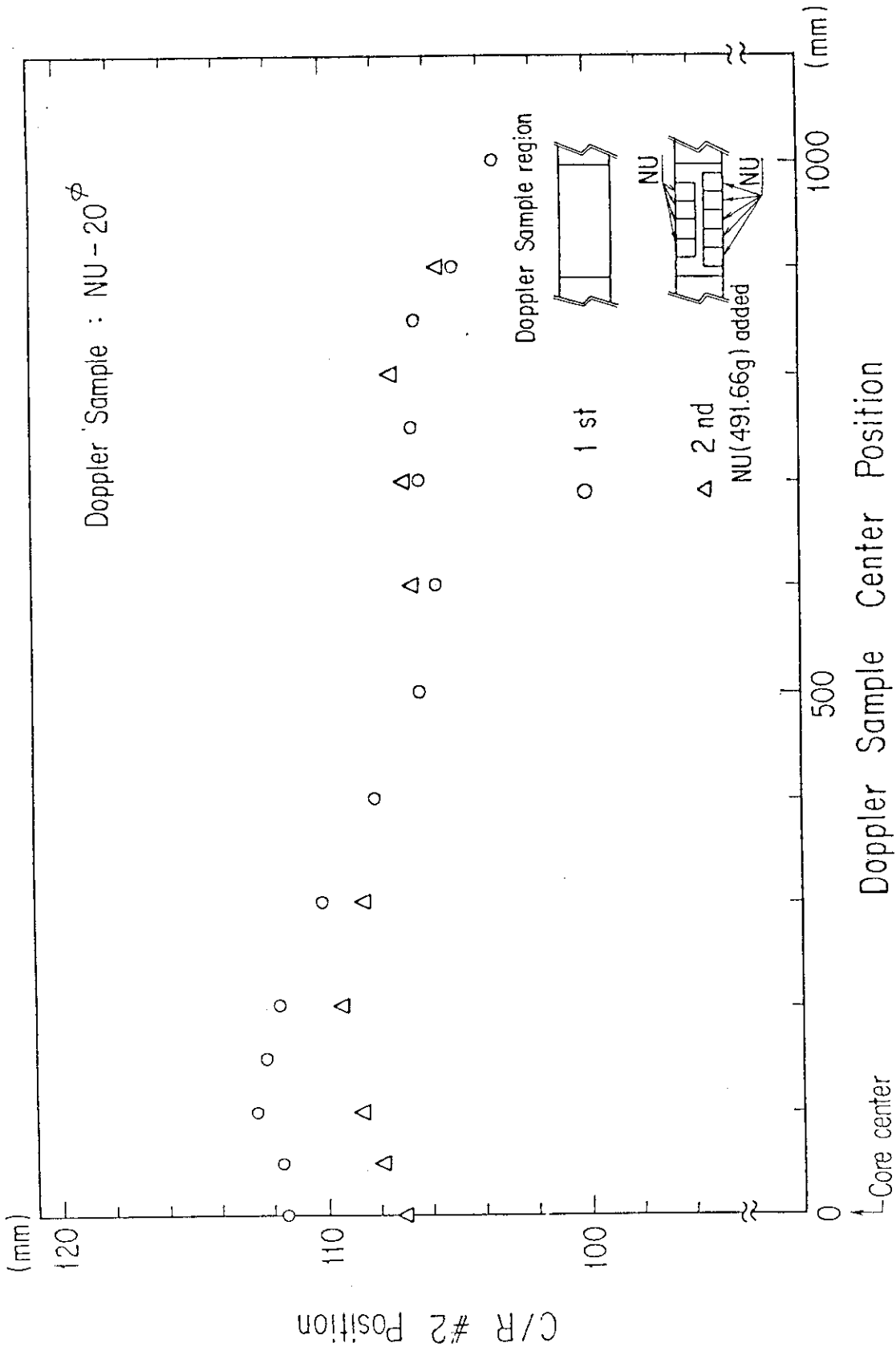


Fig.A.2.1 Typical raw data of Doppler drawer traverse experiment

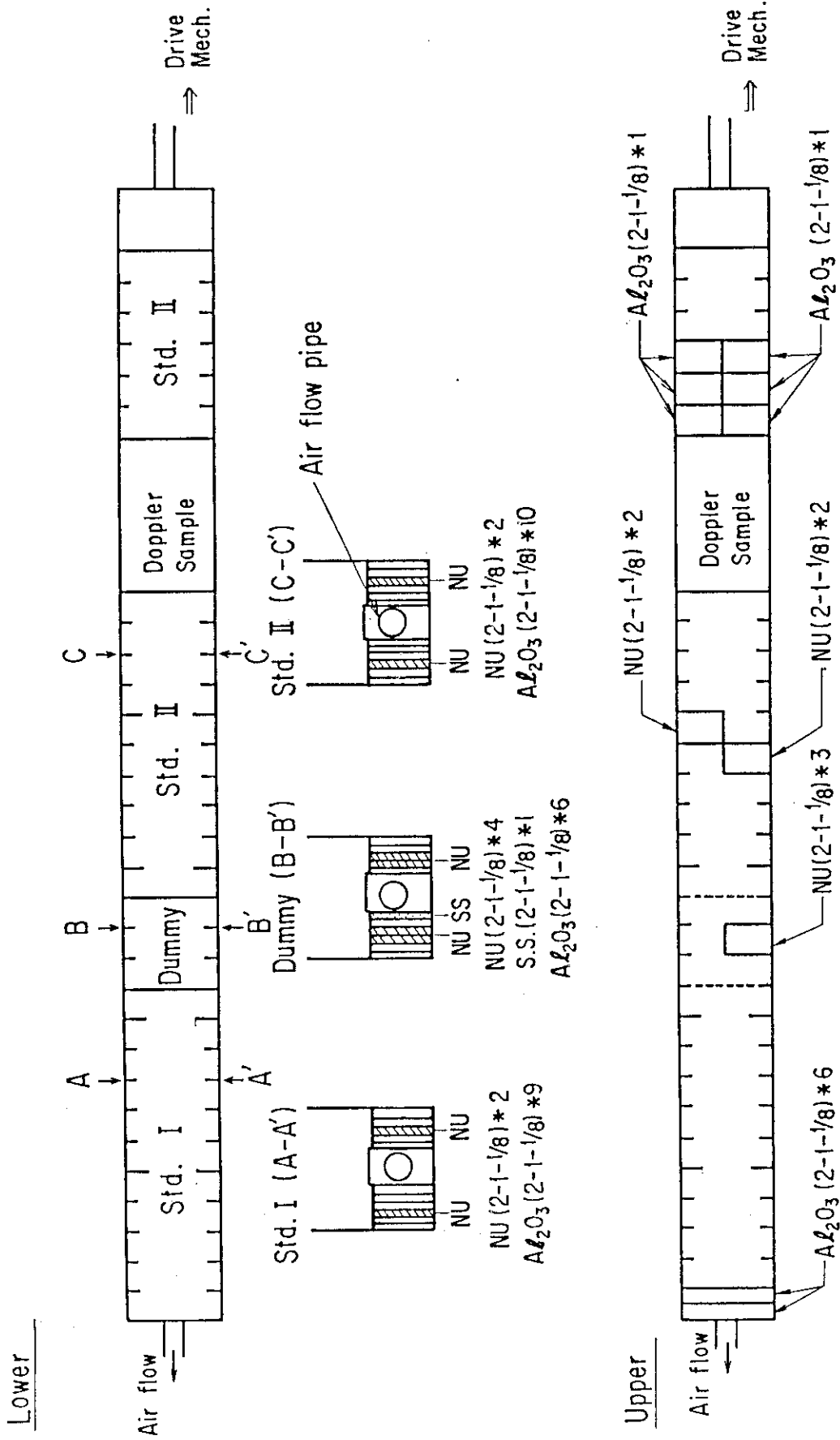


Fig.A.2.2 Typical example of Doppler drawer's plate configuration

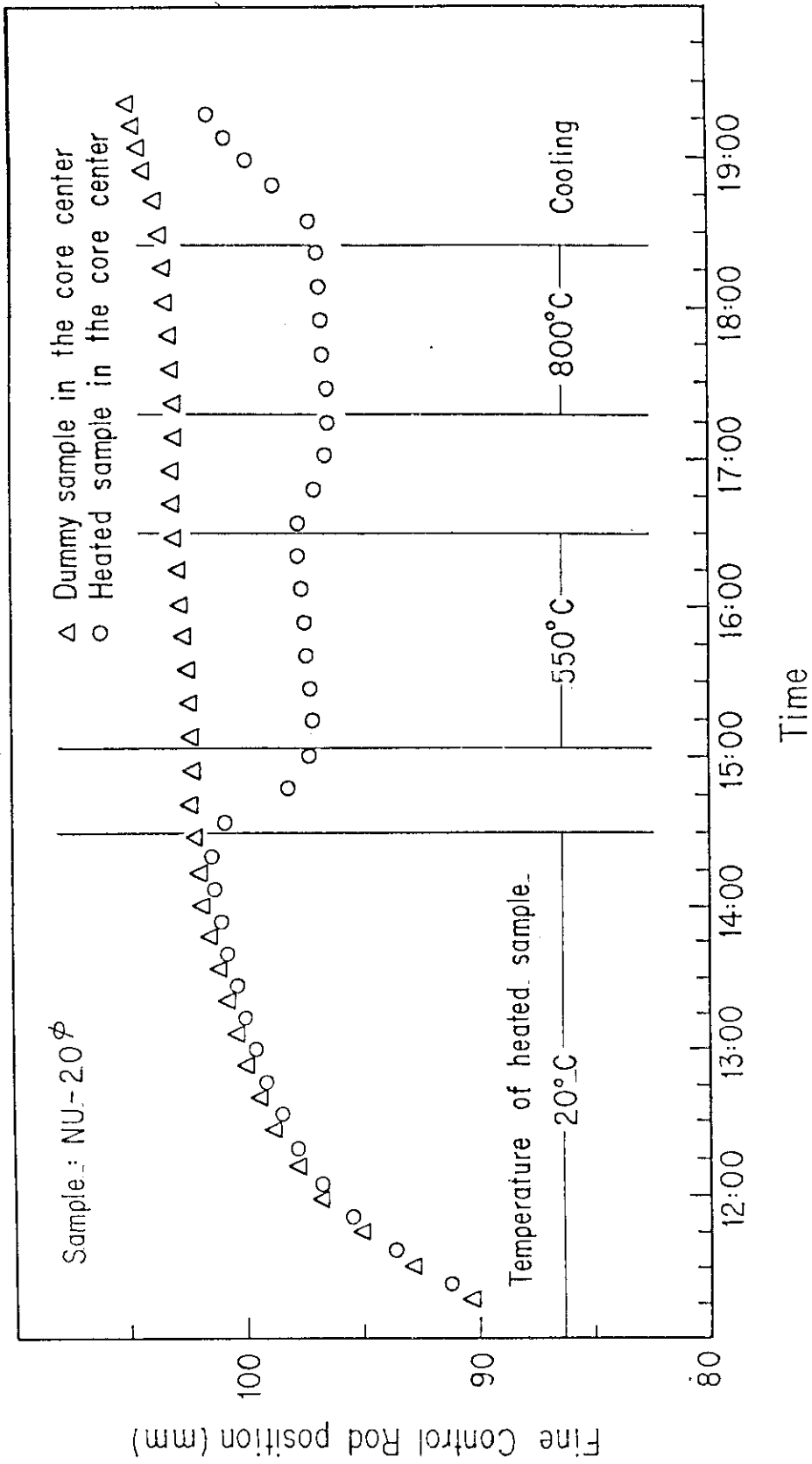


Fig.A.2.3 Typical raw data of Doppler effect measurement



## 付録3. 微調整制御棒の較正

X-3 集合体及びXI-1 集合体で使用した微調整制御棒 ( F/R ) の較正実験結果について述べる。

X-3 集合体

固定側安全棒 S/R# 12 を密着面から 30 mm 引抜いた時の反応度を標準反応度  $\rho_0$  とした。臨界体系に  $\rho_0$  なる反応度を投入した時の倍增時間測定データを Table A. 3. 1 に示す。倍增時間 Td として、炉出力  $0.3 \times 10^{-5}$  から  $0.6 \times 10^{-5}$  A まで、および  $0.4 \times 10^{-5}$  から  $0.8 \times 10^{-5}$  A ( ch, No. 6 ) までの値の平均値を採り、

$$Td = 65.6 \pm 0.2 \text{ sec}$$

を得た。この値より、X-3 集合体特性実験における  $\rho_0$  の計算方法<sup>3)</sup>と同様に行って、

$$\rho_0 = 0.0394 \% \Delta k / k$$

を得た。

臨界法による微調整制御棒較正データを Table A. 3. 2 に示す。ここで、F/R 較正時 ( 約 1 時間 ) の臨界点のドリフト ( Pu の崩壊に伴う温度変化による ) による影響を除く必要がある。臨界点のドリフトは集合体密着時からの時間ではほぼ定まるので、他日に行った臨界点時間変化についてのデータを用いて補正を行った。

Table A. 3. 1 Doubling time for the standard reactivity  $\rho_0$ .

Power range ( A )	Doubling time ( sec )
$(0.2-0.4) \times 10^{-6}$	58.4
$(0.3-0.6) \times 10^{-6}$	60.8
$(0.4-0.8) \times 10^{-6}$	61.0
$(0.2-0.4) \times 10^{-5}$	64.8
$(0.3-0.6) \times 10^{-5}$	65.5
$(0.4-0.8) \times 10^{-5}$	65.7

Table A. 3. 2 Fine Red Calibration by substitution method

Step	Measurement time from contact point	C/R# 1 Pos.	F/R Pos.	Corrected F/R Pos.
1	22 min	92.152	0.00	0.00
2	33	89.975	30.00	26.01
3	44	87.580	59.99	53.03
4	55	85.195	89.99	80.67
5	66	82.718	120.00	109.04
6	88	80.469	149.99	136.35

XI-1 集合体

XI-1 集合体では、X-3 集合体での場合と異なり、F/R を新たに作成した以外に炉心変更は行っていない。従って、C/R 及び S/R の校正及び倍増時間  $T_d$  は、特性試験で測定結果と同じである。特性試験での測定結果<sup>4)</sup>より、倍増時間  $T_d$  及び標準反応度  $\rho_0$  は、

$$T_d = 42.4 \pm 0.3 \text{ sec}$$

$$\rho_0 = 0.0620 \% \Delta k / k$$

である。

F/R の校正は、X-3 集合体と同様臨界法によって行った。また、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 1.5 時間）経過後の測定であるため、密着直後の測定とは異なり、F/R 校正開始の臨界点と終了後の臨界点との間は、ほぼ時間に比例して F/R の位置において変化していくことが知られている。そこで、XI-1 集合体においては、臨界点のドリフトによる F/R 位置の補正は、校正の開始時、終了後の臨界点の変化を時間によって補正した。この校正データを Table A. 3.3 に示す。

Table A. 3.3 Fine Rod Calibration by substitution method

Step.	C/R #2 Pos.	F/R Pos.	Corrected F/R Pos.
1	108.01	17.570	17.570
2	104.99	46.739	44.719
3	102.01	73.414	70.020
4	99.01	100.858	96.150
5	96.00	128.396	122.375
6	93.00	157.046	149.793
7	108.02	27.47	

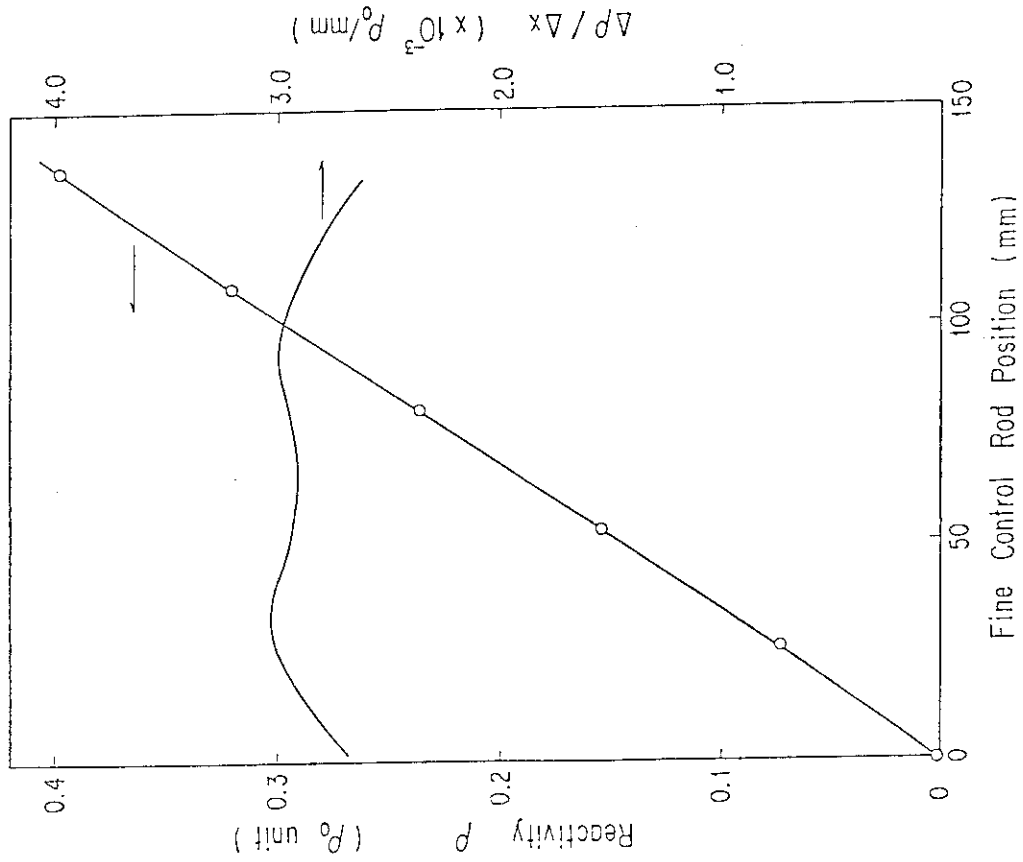


Fig.A.3.1 Calibration curve of F/R of FCA Assembly X-3

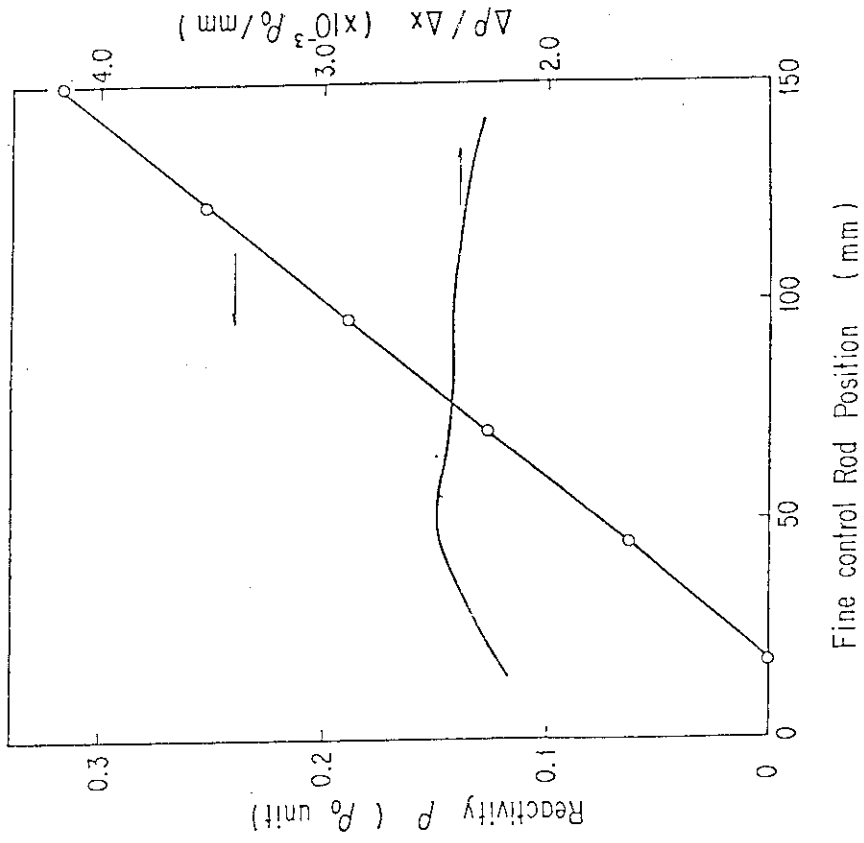


Fig.A.3.2 Calibration curve of F/R of FCA Assembly XI-1

## 付録4. 軸方向熱膨脹効果の補正

ドップラー効果測定においてはサンプル自体の反応度値は大きい、ドップラー効果そのものは小さい。そのため、サンプルの熱膨脹による反応度値変化がドップラー効果と同程度となる場合もあり、その補正が実験上重要となる。この熱膨脹の効果は、(1)軸方向膨脹による反応度値変化と、(2)径方向膨脹にもとづくサンプルの形状・密度の変化によるサンプル内の衝突確率の変化の2つが主要であると考えられる。ここでは、実験による補正が可能な軸方向膨脹効果について述べる。

今、サンプルの単位長さ当りの反応度値を  $f(x)$  とすると、中心が  $x=X$  にある長さ  $L$  のサンプルの反応度値は、

$$\rho(x) = \int_{X - \frac{L}{2}}^{X + \frac{L}{2}} f(x) dx \quad (1)$$

と書ける。また、長さ  $L$  のサンプルがマイナス側へ一様に  $\Delta L$  だけ延びた\*時の反応度値  $\rho'(x)$  は、

$$\rho'(x) = \int_{X - (\frac{L}{2} + \Delta L)}^{X + \frac{L}{2}} \frac{L}{L + \Delta L} f(x) dx \quad (2)$$

と書ける。従って、膨脹による反応度値変化  $\Delta \rho_{\text{expansion}}$  は、

$$\Delta \rho_{\text{expansion}} = \rho'(x) - \rho(x) \quad (3)$$

となる。ここで、小さなサンプルの反応度値変化分布は、炉心中心部では2次式で精度よく表わすことが可能である。 $x=0$  での対称性を考慮に入れて、

$$f(x) = ax^2 + b \quad (4)$$

として、(1)、(2)式に代入し、さらにその結果を(3)式に代入して  $\Delta \rho_{\text{expansion}}$  を求めると、

$$\Delta \rho_{\text{expansion}} = a \cdot L \cdot \Delta L \cdot \left( -X + \frac{L}{2} + \frac{\Delta L}{3} \right) \quad (5)$$

となる。ここで、 $L \gg \Delta L$  (金属ウランの場合、 $T=800$ ℃で  $\Delta L \approx 0.3$  mm程度である) より(5)式は、

$$\Delta \rho_{\text{expansion}} = a \cdot L \cdot \Delta L \cdot \left( -X + \frac{L}{6} \right) \quad (6)$$

となる。(6)式より、 $x = \frac{L}{6}$  (炉心中心からのサンプル中心までの距離)にサンプルを置くと軸方向

\* 実験に使用したサンプルは、サンプル収納容器の一端がバネで保持されており、バネのついている一方向にのみ伸びると考えられる。

熱膨脹による反応度値変化がゼロとなり、補正の必要がなくなる。他方、径方向熱膨脹は、800℃においてもmm以下であり、熱膨脹による反応度の変化は無視する。