

JAERI - M
85-218

FCA XII-1集合体におけるドップラー効果の測定

1986年1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。
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1986

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 いばらき印刷(株)

FCA XII-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

(1985年12月23日受理)

FCA XII-1 集合体において、内部ブランケットおよび炉心領域でのドップラー反応度値を測定した。また、炉心領域がナトリウムボイド状態でのドップラー効果も測定した。実験にはサンプル加熱法を用い、室温から 800 °C までサンプル温度が上昇した場合の反応度変化を $1 \times 10^{-7} \Delta k / k$ の精度で測定した。解析には、70 群定数 JFS-3-J2 を用い、測定値と比較した。内部ブランケット領域および炉心領域では、計算値と実験値は良い一致を示した。一方、ナトリウムボイド状態では、 ^{238}U に対して計算は実験値を 10% 過小評価している。

Doppler Effect Measurement in FCA Assembly XII-1

Shigeaki OKAJIMA and Takehiko MUKAIYAMA

Department of Reactor Engineering
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received December 23, 1985)

Doppler reactivity worths of ^{238}U and structural materials (iron and nickel) were measured at the internal blanket and the core region in FCA assembly XII-1 which is the mock-up of a large axially heterogeneous core. The measurements were also performed in sodium-voided core. The experiments were carried out using the heated sample oscillation technique with an accuracy of $1 \times 10^{-7} \Delta k/k$. The range of temperature change was from the room temperature up to 800°C . The analysis was made using the 70 group JFS-3-J2 data set and compared with the measured results. In the internal blanket and the core region the calculation agrees well with the measured values, on the other hand, in the sodium-voided core the calculation for ^{238}U underestimates the measurement by 10%.

Keywords: Doppler Effect Measurement, Large Axially Heterogeneous Core,
Fast Reactor, FCA Assembly XII-1, ^{238}U , Structural Material, JFS-3-J2

目 次

1. はじめに	1
2. 測 定	2
2.1 サンプル	2
2.2 測定体系	2
2.3 測定結果	3
3. 解 析	9
3.1 計算方法	9
3.2 熱膨脹効果	13
3.3 計算結果と考察	13
4. まとめ	18
謝 辞	18
参考文献	18
付 録	19

Contents

1. Introduction	1
2. Measurement	2
2.1 Sample	2
2.2 FCA assembly XII-1	2
2.3 Results	3
3. Analysis	9
3.1 Computational method	9
3.2 Thermal expansion effect	13
3.3 Computational results	13
4. Summary	18
Acknowledgement	18
References	18
Appendix	19

1. はじめに

FCA XII-1 集合体において、 ^{238}U および炉心構造材物質についてのドップラー効果の測定をサンプル加熱法を用いて行った。

FCA XII-1 集合体は、大型軸方向非均質炉心の軸方向形状を模擬した炉心であり、その構成は、軸方向中央部にある内部ブランケット領域、それをはさむように上下にある炉心領域、さらに外側の軸方向ブランケット領域の3領域からなっている¹⁾。炉心部における内部ブランケット領域と炉心領域の中性子スペクトルはそれぞれ大きく異なるので、それぞれの領域においてドップラー効果を測定した。事故時におけるドップラー効果の重要性を考慮して、ナトリウムボイド状態におけるドップラー効果も測定した。これらの測定値は、本集合体に関する特性を表わす量であるとともに、中性子スペクトル的な観点から、FCAで行われてきたドップラー効果の他の測定データと比較されるものである²⁾。

本報告は、文献(1)が概要であったのに対し、測定及び計算について詳細に述べたものである。第2章では測定について、第3章で計算について述べ、その後考察を行った。また、第2章では、ナトリウムボイド領域の選定についても記述した。さらに、第3章において、炉心部でのドップラー効果に対する熱膨脹による反応度価値への寄与を計算により評価した。これは、炉心部での測定では、軸方向中性子束分布がドップラーサンプル内で単調減少し、従来FCAで行われてきた熱膨脹効果の評価における仮定が成立しないことによる。

2. 測 定

2.1 サンプル

本測定に使用したサンプルは、天然ウラン酸化物 (NUO_2)、金属天然ウラン (NU) および炉心構造材である鉄 (Fe)、ニッケル (Ni) である。 NUO_2 と NU サンプルは、それぞれ NUO_2 ペレットと NU ペレットを SUS 304 製キャプセルに収納したものである。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のサンプルの他に、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。

Table 2.1 Doppler Samples

Sample	Material	Enrichment	Diameter and length (mm)	Total U mass (g)
NUO_2 -25 ϕ	UO_2	Nat.U	25.0 × 150.0	604.8
NUO_2 -20 ϕ	UO_2	Nat.U	20.0 × 150.0	376.7
NU-25 ϕ	U(metal)	Nat.U	24.8 × 150.0	1346.7
Fe	Fe	—	25.7 × 158.0	647.5(Fe)
Ni	Ni	—	26.1 × 158.0	754.6(Ni)

2.2 測定体系

測定を行った体系は、FCA XII-1 集合体である¹⁾。この XII-1 集合体は、一連の FCA における大型炉の軸方向非均質炉心模擬実験において基準となる炉心であり、軸方向には、中心に厚さ 20 cm の内部ブランケットが存在し、それを挟むように厚さ 35 cm の炉心、さらにその外側に厚さ 35 cm の軸方向ブランケットがある。また、径方向には、半径約 30 cm の大型炉の軸方向非均質炉心を模擬した試験領域を取り囲むように、体系を臨界に維持するためのドライバー領域（内側の厚さ 13 cm のプルトニウムドライバー領域と外側の厚さ 10 cm のウランドライバー領域からなる）が存在する。さらにその外側は、厚さ 23 cm の径方向ブランケットがある。中央部に内部ブランケットが存在するために、試験領域には内部ブランケットと炉心領域の 2 つの大きく異なる中性子スペクトル場が存在し、両領域それぞれでのドップラー効果の測定が必要となる。測定

位置は、体系の大きさ・中性子スペクトルへの他の領域からの影響のほか、サンプルの長さや測定するドップラー反応度値の大きさを考慮して、内部ブランケット領域では中心において、炉心領域では中心軸上の軸方向中心から約 26 cm 隔った位置において測定を行った。

さらに、事故時におけるドップラー効果の重要性を考慮して、ナトリウムボイド状態におけるドップラー効果も測定した。測定位置は、比較が容易なように炉心領域での測定位置と同じとした。ナトリウムボイド領域の大きさの決定に当たっては、ドップラー効果測定のための実験孔を中心とする 3 行×3 列（等価半径 9.3 cm）、5 行×5 列（等価半径 15.6 cm）および 7 行×7 列（等価半径 21.8 cm）の 3 ケースを考え、それぞれの体系について予備計算を行った。なお、軸方向については軸方向中心から約 50 cm（固定側集合体の密着面から 10 パック分）までの領域とし、この領域に存在するナトリウム模擬物質板をボイド缶に置換することにより、1 パック当り 45.2 g のナトリウムが除去された体系とした。予備計算の結果、ボイド領域が大きくなった場合の反応率およびドップラー反応度値（20 °C から 800 °C に温度を上昇した場合）の変化の様子を Fig. 2.1 に示す。図の値は、それぞれ標準状態（ナトリウムボイド領域がない）での値で規格化した。図より、ボイド領域が大きくなるにつれて、核分裂率およびドップラー反応度値の標準状態からの変化は大きくなり、それぞれの値が飽和していくことがわかる。3 行×3 列の場合、これらの値はその漸近値から程遠い。5 行×5 列と 7 行×7 列の場合、反応率比及びドップラー反応度値ともその漸近値に近く、これらの値に対する領域の大きさによる相違は小さい。しかし、7 行×7 列の場合、試験領域の等価半径 30 cm に比べてナトリウムボイド領域の占る割合が大きく、体系全体の特性にまで影響を及ぼすと考えられる。従って、ナトリウムボイド領域は、5 行×5 列とした。

測定を行った体系の断面図を Fig. 2.2 に示す。中心軸に測定用実験孔を設けたことによる体系の反応度の減少分は、ウランドライバ引出しの追加で補償するようにした。また測定に使用する微調整制御棒（以下 F/R と呼ぶ。付録 1 参照）は、移動側 1/2 集合体プルトニウムドライバ領域に取付けた。

2.3 測定結果

各サンプルに対する各領域でのサンプル反応度値およびドップラー効果の測定結果を、Table 2.2 に示す。これらの測定精度は、サンプル反応度値では $\pm 2.7 \times 10^{-2} \rho_0$ ($\pm 1.3 \times 10^{-5} \Delta k/k$) であり、ドップラー効果では $\pm 2 \times 10^{-4} \rho_0$ (約 $\pm 1 \times 10^{-7} \Delta k/k$) であった。また、温度上昇による反応度値変化の様子を Fig. 2.3 ~ 2.5 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値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、 $\pm 3 \times 10^{-4} \rho_0$ ($\pm 1.5 \times 10^{-7} \Delta k/k$) であった。これらのデータを用いて、各サンプルについて、 $d\rho/dT \propto T^{-1}$ の曲線に最小 2 乗法でフィッティングを行った。

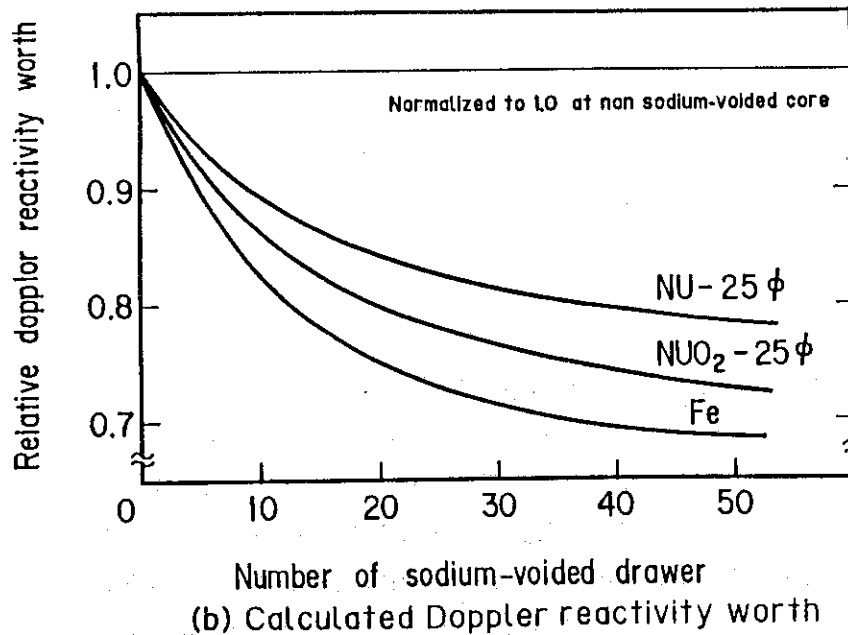
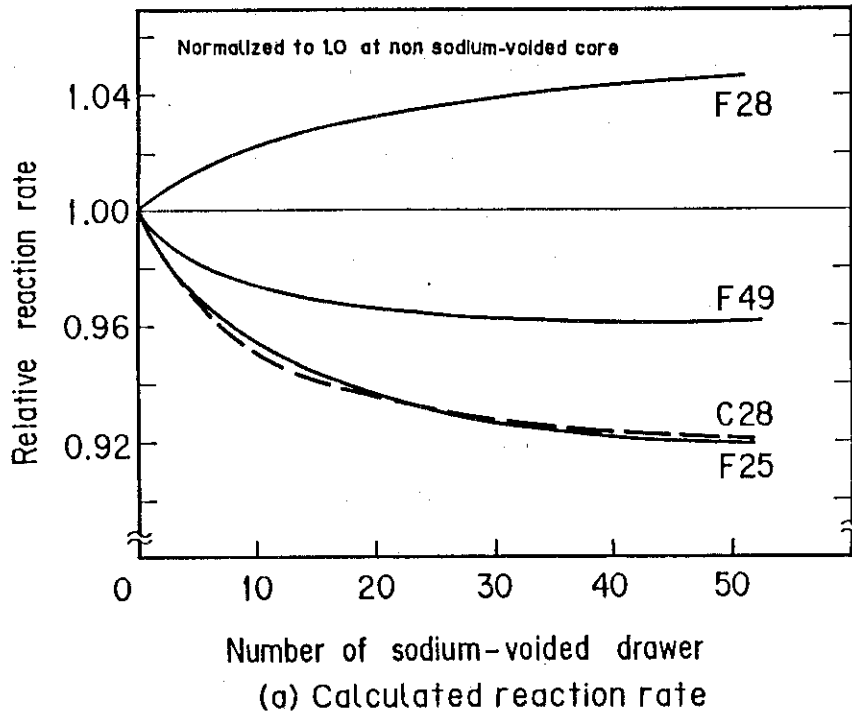


Fig. 2.1 Effect of volume of sodium-voided region on reaction rate and Doppler effect

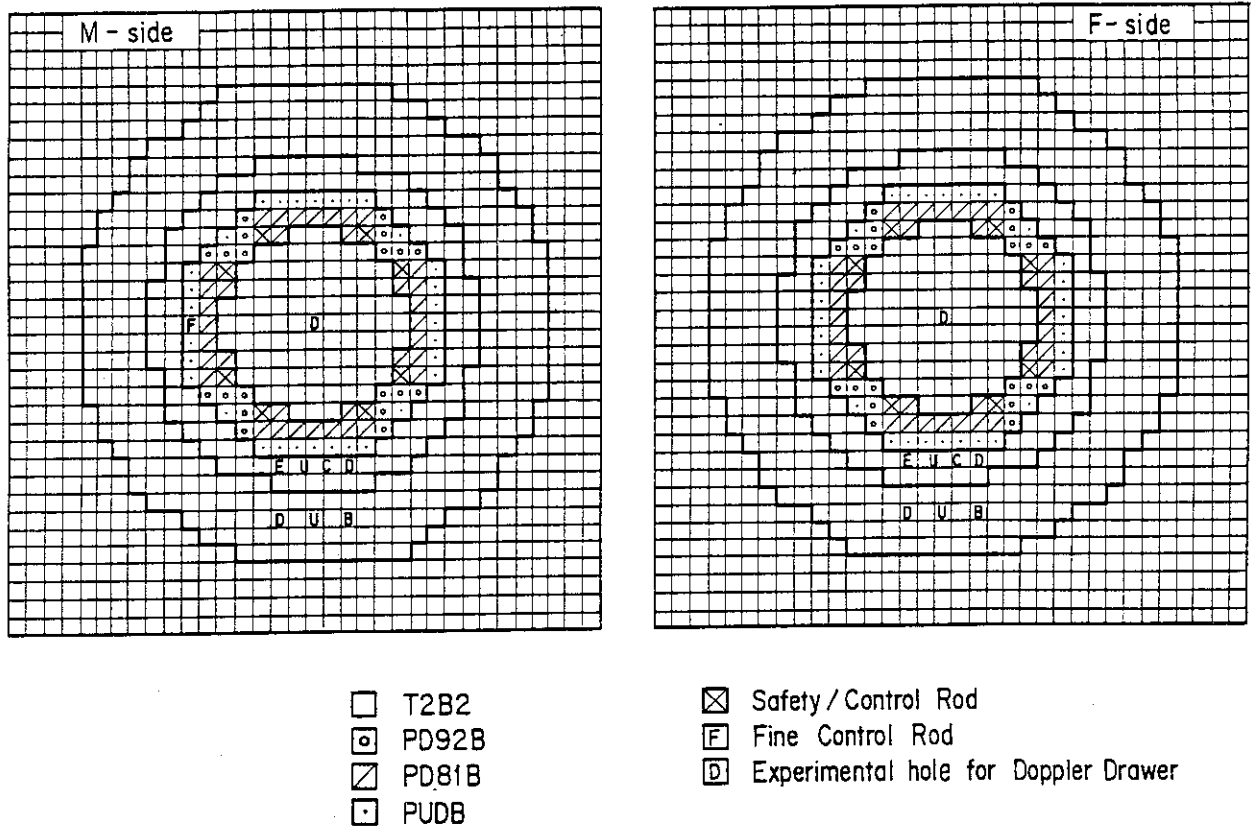


Fig. 2.2 Vertical cross sections of FCA assembly XII-1 for Doppler experiment

Table 2.2 Doppler reactivity worth measurement in FCA assembly XII-1

Internal blanket (I.B.) (Pos. 0.0mm*)

Sample	T (°C)	Experiment
		$\times 10^{-3} \rho_{\text{eff}}^{**}$
NUO ₂ -25Φ (U 604.8g)	20	-16.3 ± 2.7
	20-550	- 0.658 ± 0.015
	20-800	- 0.888 ± 0.009
NUO ₂ -20Φ (U 376.7g)	20	- 7.5 ± 2.7
	20-550	- 0.437 ± 0.019
	20-800	- 0.595 ± 0.019
NU-25Φ (U 1346.2g)	20	-18.5 ± 2.7
	20-550	- 1.37 ± 0.017
	20-800	- 1.78 ± 0.009
Fe (647.5g)	20	- 4.0 ± 2.7
	20-550	- 0.104 ± 0.017
	20-800	- 0.126 ± 0.009
Ni (754.6g)	20	- 9.4 ± 2.7
	20-550	_____
	20-800	- 0.146 ± 0.019

Core (Pos. 262.0mm*)

Sample	T (°C)	Experiment
		$\times 10^{-3} \rho_{\text{eff}}^{**}$
NUO ₂ -25Φ (U 604.8g)	20	-15.3 ± 2.7
	20-550	- 0.734 ± 0.018
	20-800	- 0.974 ± 0.011
NUO ₂ -20Φ (U 376.7g)	20	- 6.8 ± 2.7
	20-550	- 0.454 ± 0.019
	20-800	- 0.611 ± 0.011
NU-25Φ (U 1346.2g)	20	-18.6 ± 2.7
	20-550	- 1.401 ± 0.020
	20-800	- 1.818 ± 0.010
Fe (647.5g)	20	- 3.6 ± 2.7
	20-550	- 0.099 ± 0.020
	20-800	- 0.135 ± 0.016
Ni (754.6g)	20	- 6.8 ± 2.7
	20-550	_____
	20-800	_____

Na voided core (Pos. 262.0mm*)

Sample	T (°C)	Experiment
		$\times 10^{-3} \rho_{\text{eff}}^{**}$
NUO ₂ -25Φ (U 604.8g)	20	-10.8 ± 2.7
	20-550	- 0.655 ± 0.013
	20-800	- 0.848 ± 0.015
Fe (647.5g)	20	- 3.5 ± 2.7
	20-550	- 0.115 ± 0.012
	20-800	- 0.155 ± 0.013

* distance from the center of the internal blanket
 ** $\rho_{\text{eff}} = 0.0452 \times \Delta k/k$

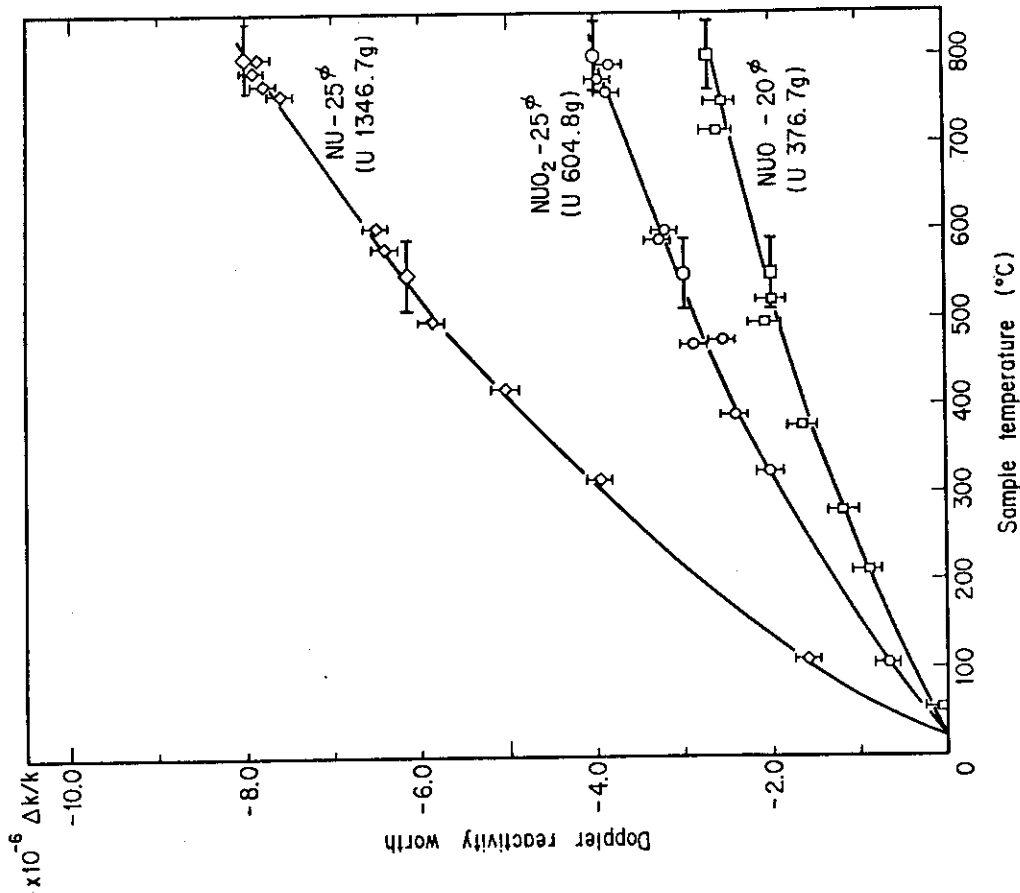


Fig. 2.3a Doppler reactivity effects measured at I.B. zone of FCA assembly XII-1

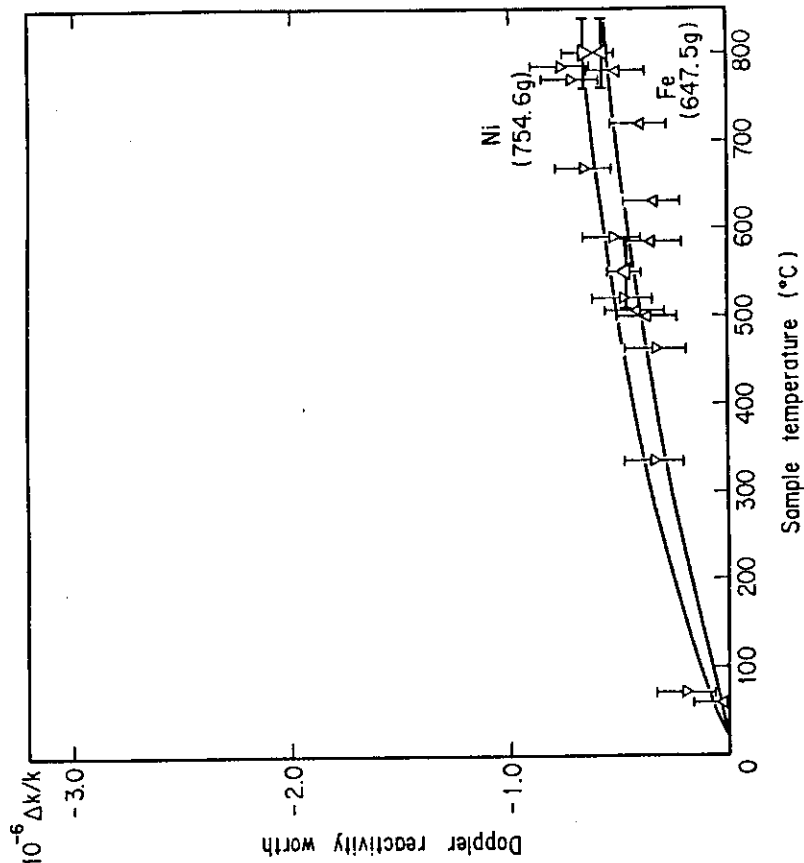


Fig. 2.3b Doppler reactivity effects measured at I.B. zone of FCA assembly XII-1

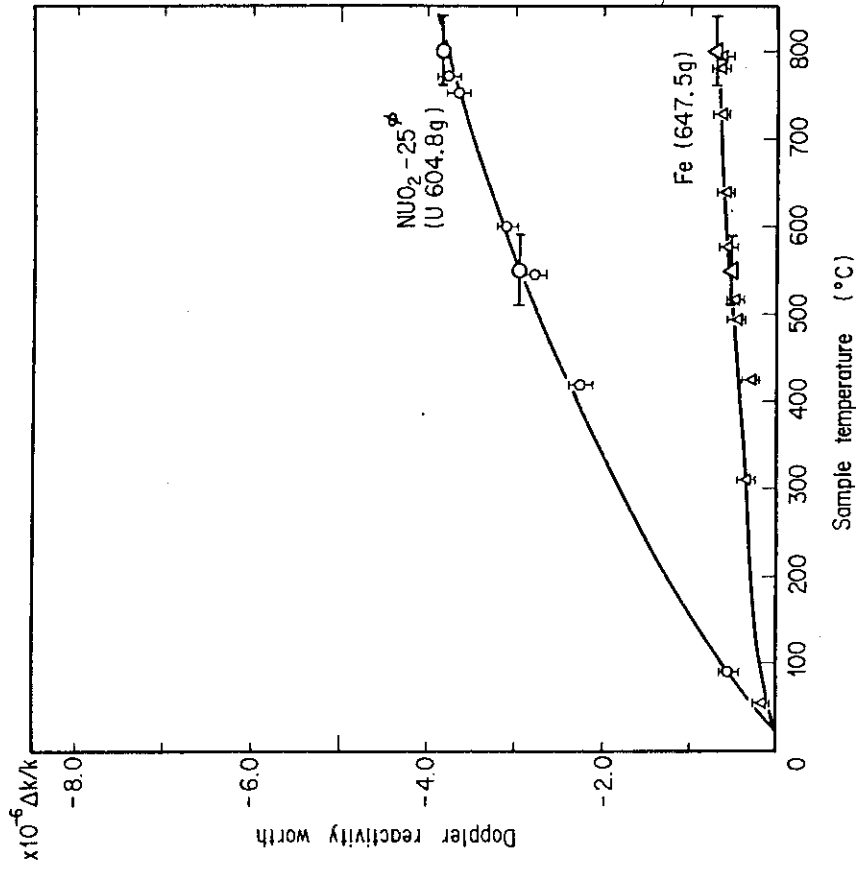


Fig. 2.5 Doppler reactivity effects measured at sodium-voided core of FCA assembly XII-1

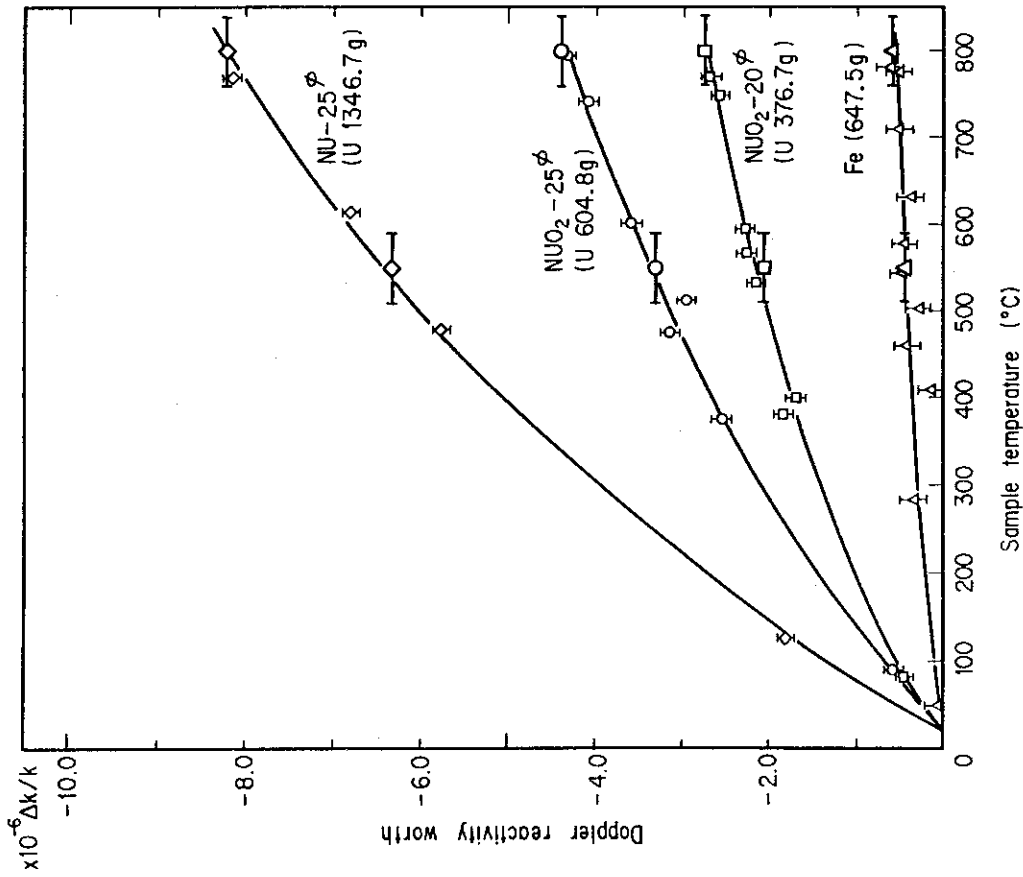


Fig. 2.4 Doppler reactivity effects measured at core region of FCA assembly XII-1

3. 解 析

3.1 計算方法

計算には、大型高速炉の炉心スペクトルで JENDL-2 を縮約した 70 群定数セット JFS-3-J2³⁾ を使用した。セル計算には衝突確率法により積分型輸送方程式を解く SLAROM⁴⁾ を用い、体系計算には 2 次元拡散計算コード CITATION を使用して、70 群計算を行った。

計算体系は、FCA XII-1 集合体の解析における標準的な 2 次元 RZ モデルに対して、ドップラー領域を測定位置に対応するように設けたものである。従って、内部および軸方向ブランケット領域・炉心領域・ドライバー領域には、通常、高速炉の解析で取り扱われている模擬物質板に伴う非均質性を考慮した 70 群セル平均断面積を用いた。一方、ドップラー領域では、サンプルとそれを取り囲むカプセル（ドップラーサンプルを収納する容器）の 2 領域に分け、サンプルが NUO_2 または NU である場合、共鳴非均質効果を考慮するために Fig. 3.1 に示すような 3 領域の円柱化スーパーセルモデルによりセル平均断面積を求めた。このスーパーセルモデルによるセル計算において、ドップラーサンプルおよびカプセルの外側に巻く炉心領域は均質セルとした。外側に巻き巻く炉心領域の大きさは、測定体系の大きさ・中性子平均自由行程等を考慮して、半径 30 cm の領域とした。また、内部ブランケット領域中に設けたドップラー領域に対して、スーパーセル計算時の外側に巻き巻く炉心領域では、内側から均質モデルのブランケット領域、均質モデルのブランケットと炉心の混合領域（7:13）の 2 領域に分け、できるだけ測定体系に近いセルモデルとした。サンプルが Fe および Ni の場合は、サンプルの断面積として均質モデルによるセル平均断面積を用いた。カプセル領域は、測定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として取り扱い、セル平均断面積を求めた。ナトリウムボイド状態での場合も、同様の考え方によってセルモデルを選定した。

計算に使用した各領域の原子数密度を Table 3.1 に、また計算体系である 2 次元 RZ モデルを Fig. 3.2 に示す。

上述のモデルにおいて、温度 20 °C でドップラーサンプルが存在する場合を本解析における基準体系とし、中性子束および随伴中性子束を計算した。この計算結果を用いて、一次摂動コード PERKY⁵⁾ によりサンプル反応度値およびドップラー効果を求めた。

Table 3.1 Atomic number densities used for calculation

(a) FCA assembly XII-1

 $(\times 10^{22} \text{#/cm}^3)$

Region	① Core	② IB&AB	③ PD(92)	④ PD(81)	⑤ CRD	⑥ PUD	⑦ EUCD
Pu-239	0.10455	—	0.2091	0.2080	—	0.1568	—
Pu-240	0.00922	—	0.01843	0.02564	—	0.01382	—
Pu-241	0.00048	—	0.00097	0.00171	—	0.00073	—
Pu-242	—	—	—	0.00028	—	—	—
Am-241	0.00038	—	0.00076	0.00150	—	0.00057	—
U-235	0.00140	0.00316	0.00140	0.00140	0.4521	0.1144	0.2845
U-238	0.6869	0.9307	0.6869	0.6869	0.0342	0.6954	0.6892
O	1.7038	1.7038	1.3762	1.3762	—	1.3762	1.3623
Na	0.7656	0.7656	0.7656	0.7656	—	0.7656	—
Al	0.2319	0.2169	0.0300	0.0307	1.8364	0.0225	0.9082
Cr	0.3347	0.3079	0.3615	0.3624	0.2936	0.3481	0.1772
Fe	1.2351	1.1304	1.3397	1.3431	1.0684	1.2873	0.6452
Ni	0.1530	0.1396	0.1664	0.1666	0.5275	0.1597	0.0772
C	—	—	—	—	—	—	3.5969

Region	⑧ ABBL	⑨ RBBL	⑩ DUO2	⑪ MATRIX
Pu-239	—	—	—	—
Pu-240	—	—	—	—
Pu-241	—	—	—	—
Pu-242	—	—	—	—
Am-241	—	—	—	—
U-235	0.0289	0.00840	0.00372	—
U-238	3.9889	4.0174	1.8317	—
O	—	—	—	—
Na	—	—	—	—
Al	—	—	—	—
Cr	0.1846	0.1846	0.1772	0.1228
Fe	0.6722	0.6722	0.6452	0.4473
Ni	0.0804	0.0804	0.0772	0.0535
C	—	—	—	—

Table 3.1(continued) Atomic number densities used for calculation

(b) Doppler samples, Empty Cans and Capsules

 $(\times 10^{22} \#/\text{cm}^3)$

Sample	NUO ₂ -25 ϕ	NUO ₂ -20 ϕ	NU-25 ϕ	Fe	Ni
U-235	0.0150	0.0146	0.0341	—	—
U-238	2.063	2.008	4.667	—	—
O	4.157	4.045	—	—	—
Fe	—	—	—	9.483	—
Cr	—	—	—	—	—
Ni	—	—	—	—	10.51

Sample	Empty Can 25 ϕ	Empty Can 20 ϕ	Capsule 25	Capsule 20
U-235	—	—	—	—
U-238	—	—	—	—
O	—	—	—	—
Fe	0.8485	1.114	1.888	1.794
Cr	0.2368	0.3109	0.5185	0.4929
Ni	0.1105	0.1451	0.3496	0.4198

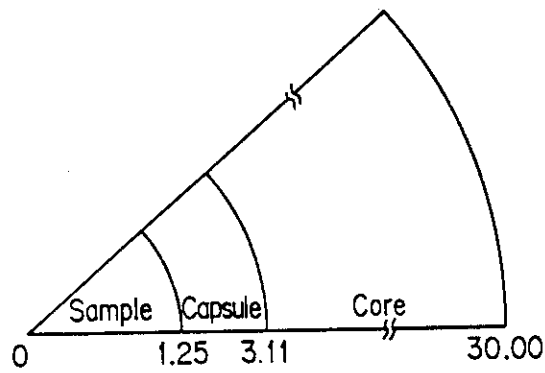


Fig. 3.1 Cell model for doppler reactivity worth calculation

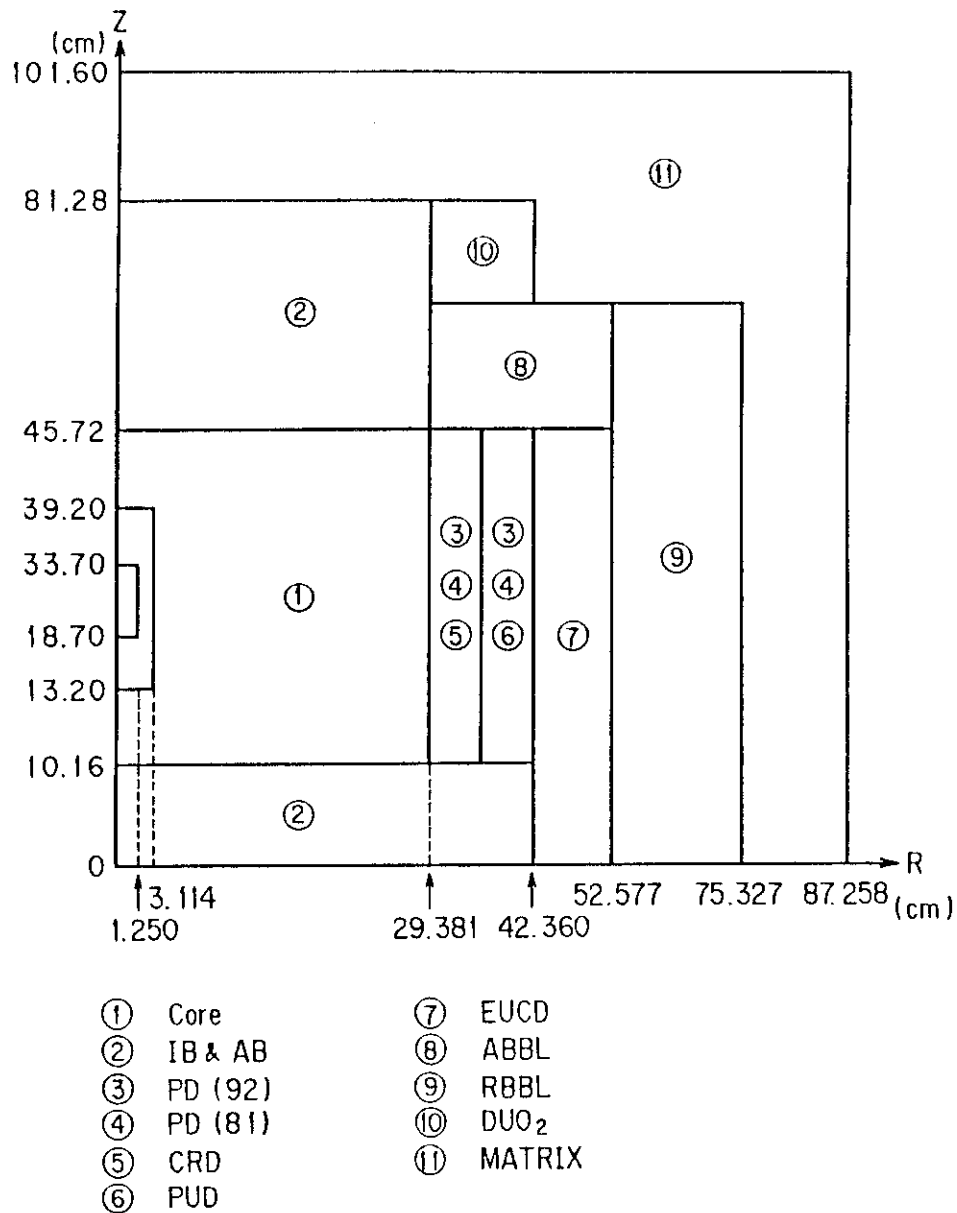


Fig. 3.2 RZ model of FCA assembly XII-1 for doppler reactivity worth calculation

3.2 熱膨脹効果

ドップラーサンプルが加熱され、温度上昇した場合に測定される反応度変化は、温度上昇による反応度変化（ドップラー効果）と温度上昇に伴うサンプルの熱膨脹による伸びおよび体積の変化による反応度変化（熱膨脹効果）との和である。過去、FCAで測定されたドップラー効果は炉心中心での測定のみであり、この場合には軸方向熱膨脹効果を実験的にゼロにするようにサンプルをセットできた⁶⁾が、今回の測定のように、炉心中心以外の点では、サンプル内の中性子束分布が単調に減少するために、前述のようにゼロにするような点を選ぶことができない。そこで、計算により熱膨脹効果を求めた。

今、 $\text{NUO}_2 - 25 \phi$ サンプルで考える。①サンプルの形状が $25 \text{ mm } \phi \times 150 \text{ mm L}$ と比較的棒状に近い。②径方向の熱膨脹は、軸方向に比べてその伸びが小さい。③径方向の中性子束および随伴中性子束がサンプル中心軸に対して対称であり、またサンプル内でのそれらの分布がほぼ平坦である、などの理由より、温度上昇による熱膨脹効果は軸方向のみを考えることにした。そこで、 $20^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$ まで温度上昇した場合のサンプル軸方向の伸び Δl は、線膨脹係数 $\alpha = 9.9 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ を用いて、

$$\begin{aligned} \Delta l &= \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T \\ &= 9.9 \times 10^{-6} \times 150 \times (800 - 20) \\ &= 1.16 \text{ (mm)} \end{aligned}$$

であり、この伸びに対する体積の変化割合 ΔV は、

$$\Delta V = \frac{\pi \times (12.5)^2 \times 151.16}{\pi \times (12.5)^2 \times 150} - 1 = 0.0077$$

となり、0.77%の体積増加である。よって、このサンプルの原子数密度は、0.77%減少する。サンプル軸方向の伸びによる反応度変化 ($\leq 1 \times 10^{-7} \Delta k/k$) と原子数密度変化による反応度変化 ($\sim 4 \times 10^{-7} \Delta k/k$) を比較すると、後者による反応度変化の方が大きい。そこで、ここでは原子数密度変化による反応度変化を計算より求め、それを熱膨脹効果とした。一次摂動計算によれば、 $\text{NUO}_2 - 25 \phi$ サンプル、 $20^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$ の温度変化による炉心領域での熱膨脹効果は、 $3.8 \times 10^{-7} \Delta k/k$ であった。これをドップラー効果の計算値に対する熱膨脹効果による補正值とした。同様に、 $20^\circ\text{C} \sim 550^\circ\text{C}$ 、あるいは $\text{NUO}_2 - 20 \phi$ および $\text{NU} - 25 \phi$ に対しても熱膨脹効果を求めた。また、ナトリウムボイド体系での $\text{NUO}_2 - 25 \phi$ サンプルについても熱膨脹効果を求めた。なお、構造材核種に対しては、そのサンプルワースが NUO_2 などに比べて小さいことから、熱膨脹効果としての値が小さく、測定誤差の範囲程度と予想されるので、ここでは補正は行わなかった。

3.3 計算結果と考察

計算結果を Table 3.2 に示し、実験値と比較した。以下に、サンプル反応度値およびドップラー効果それぞれについて検討する。

サンプル反応度値

計算値は、全般的に実験値よりやや大きい、測定誤差範囲内で一致している。その中で、内部ブランケットおよび炉心領域での $\text{NUO}_2 - 25 \phi$ に対する結果は、他のサンプルと傾向が異なり、計算値と実験値に不一致が見られる。さらに、ドップラーサンプルの反応度値測定結果を DUO_2 およびNUの標準模擬物質板を用いたサンプル反応度値測定結果¹⁾と比較した場合、 $\text{NUO}_2 - 20 \phi$ やNU-25 ϕ サンプルでは両測定結果がよく一致しているが、 $\text{NUO}_2 - 25 \phi$ サンプルに関しては大きく異なっている。これら2点より、 $\text{NUO}_2 - 25 \phi$ サンプルの測定値に問題があることが考えられる。その原因として、 $\text{NUO}_2 - 25 \phi$ サンプルの測定時において、原子炉がその集合体の密着状態および炉内温度分布等十分に安定していない状態であったために、測定値に対するこれらの補正が十分にできなかったことによると考えられる。

ドップラー効果

内部ブランケット領域では、 $\text{NUO}_2 - 25 \phi$ 、 $\text{NUO}_2 - 20 \phi$ 、NU-25 ϕ サンプルのドップラー効果のC/Eが0.98～1.07と計算値と実験値は測定誤差内ではほぼ一致している。また、構造材核種では、FeはそのC/Eが1.1～1.2であり、これは今までFCAで測定されたFeのドップラー効果と同程度のC/Eである。一方、Niに対しては、C/Eが0.76と他のサンプルに比べて計算値が実験値より小さくなっている。

炉心領域では、 $\text{NUO}_2 - 25 \phi$ 、 $\text{NUO}_2 - 20 \phi$ 、NU-25 ϕ に関しては、そのC/Eが0.90～0.98とやや計算は過小評価するが、これら計算値に対して熱膨脹効果を考慮するとC/Eは0.98～1.11となる。その結果、C/Eは内部ブランケット領域のそれと同様の値となり、中性子スペクトルの相違による計算値と実験値間の有為な差は観測されなかった。また、Feについては、そのC/Eが1.2と内部ブランケット領域でのそれと等しく、実験値と計算値は測定誤差を考慮するとほぼ一致している。

ナトリウムボイド状態の炉心領域では、 $\text{NUO}_2 - 25 \phi$ およびFe両サンプルに対して、計算はドップラー効果を過小評価している。 $\text{NUO}_2 - 25 \phi$ サンプルに対して熱膨脹を考慮してもC/Eは0.89であり、上述の内部ブランケット領域や炉心領域での $\text{NUO}_2 - 25 \phi$ サンプルのC/Eに比べると1.0からの隔りは大きく、計算値と実験値の間には差がある。この原因の一つとして、体系計算においてナトリウムボイド領域の中性子スペクトルが精度良く計算できていない事が考えられる。この計算精度を向上させるため、ナトリウムボイド領域を径方向に2領域に分け、ナトリウムボイド外側領域のセル平均断面積として、隣接する炉心領域の影響を考慮したマルチドロウセルモデルによって得た結果を用いた。一方、ナトリウムボイド内側領域のセル平均断面積は、無限セルモデルによる計算結果を用いた。ナトリウムボイド領域を2領域に分けた事により、ドップラー効果測定位置での中性子スペクトルに対して約2 keV以下のエネルギー領域における中性子割合が各エネルギー群当り1～3%増加した。その結果、ドップラー効果はC/Eで0.894から0.906へと1.0に近づく傾向にある（Table 3.3参照）。しかし、ノンボイド状態の内部ブランケットおよび炉心領域での結果に比べて、依然として計算が実験値より過小評価しており、さらに検討を行う必要がある。

次に、同一核種で重量の異なるサンプルについて考えると、 $\text{NUO}_2 - 25 \phi$ と $\text{NUO}_2 - 20 \phi$ ではそのC/Eはそれぞれ0.98～1.07、および0.98～1.03と、両サンプルとも非常に良く一致し

ている。従って、FCA X-3 集合体や FCA XI-1 集合体での結果⁶⁾であった 25φ サンプルの C/E が、20φ サンプルのそれよりも 1.0 に近い傾向は、本集合体では観測されなかった。

Table 3.2 Comparison of calculated and measured Doppler reactivity worths in FCA assembly XII-1

Internal blanket

Sample	T (°C)	Experiment	Calculation	C/E
NUO ₂ -25Φ (U 604.8g)	20	-73.6 ± 12.4 $\times 10^{-6} \Delta k/k$	-60.52 $\times 10^{-6} \Delta k/k$	0.822
	20-550	-2.97 ± 0.07	-3.173	1.07
	20-800	-4.01 ± 0.05	-4.092	1.02
NUO ₂ -20Φ (U 376.7g)	20	-34.0 ± 12.4	-38.38	1.129
	20-550	-1.98 ± 0.09	-2.036	1.03
	20-800	-2.69 ± 0.09	-2.624	0.975
NU-25Φ (U 1346.2g)	20	-83.5 ± 12.4	-93.39	1.118
	20-550	-6.17 ± 0.08	-6.153	0.997
	20-800	-8.02 ± 0.05	-7.932	0.989
Fe (647.5g)	20	-18.1 ± 12.4	-24.01	1.327
	20-550	-0.47 ± 0.08	-0.514	1.09
	20-800	-0.57 ± 0.05	-0.673	1.18
Ni (754.6g)	20	-42.4 ± 12.4	-52.54	1.239
	20-550	-0.66 ± 0.09	-0.390	0.76
	20-800	-0.66 ± 0.09	-0.499	

Core

Sample	T (°C)	Experiment*	Calculation		C/E
			Doppler effect	Expansion effect	
NUO ₂ -25Φ (U 604.8g)	20	-69.3 ± 12.4 $\times 10^{-6} \Delta k/k$	-51.55 $\times 10^{-6} \Delta k/k$		0.744
	20-550	-3.32 ± 0.09	-3.058	-0.265	1.000
	20-800	-4.40 ± 0.05	-3.924	-0.386	0.980
NUO ₂ -20Φ (U 376.7g)	20	-30.5 ± 12.4	-33.06		1.084
	20-550	-2.05 ± 0.09	-1.933	-0.175	1.028
	20-800	-2.76 ± 0.05	-2.479	-0.255	0.991
NU-25Φ (U 1346.2g)	20	-83.9 ± 12.4	-91.84		1.095
	20-550	-6.33 ± 0.10	-6.179	-0.791	1.101
	20-800	-8.22 ± 0.05	-7.926	-1.166	1.106
Fe (647.5g)	20	-16.2 ± 12.4	-21.12		1.304
	20-550	-0.45 ± 0.10	-0.557		1.24
	20-800	-0.61 ± 0.08	-0.728		1.19
Ni (754.6g)	20	-30.7 ± 12.4	-44.92		1.463
	20-550				
	20-800				

Na voided core

Sample	T (°C)	Experiment*	Calculation		C/E
			Doppler effect	Expansion effect	
NUO ₂ -25Φ (U 604.8g)	20	-48.7 ± 12.4 $\times 10^{-6} \Delta k/k$	-49.26 $\times 10^{-6} \Delta k/k$		1.011
	20-550	-2.96 ± 0.06	-2.388	-0.259	0.894
	20-800	-3.83 ± 0.07	-3.046	-0.377	0.894
Fe (647.5g)	20	-15.6 ± 12.4	-22.37		1.434
	20-550	-0.52 ± 0.06	-0.405		0.78
	20-800	-0.70 ± 0.06	-0.527		0.75

* The measured values include the reactivity contribution of thermal expansion effect.

Table 3.3 Comparison of the method of neutron spectrum calculation for Doppler reactivity worths in the sodium voided core

Sample T(°C)	C/E for Doppler reactivity worths	
	single region model for the Na voided core	devided region model for the Na voided core
NUO ₂ - 25 φ 20°C	1.011	1.011
20-550 °C	0.894	0.906
20-800 °C	0.894	0.906
Fe 20°C	1.437	1.433
20-550 °C	0.78	0.78
20-800 °C	0.75	0.76

4. ま と め

FCA XII-1 集合体におけるドップラー効果の測定を、内部ブランケット領域および炉心領域で行った。また、ナトリウムボイド状態での炉心領域に対しても測定を行った。測定精度は、 $\pm 1 \times 10^{-7} \Delta k/k$ である。

計算は、70 群群定数セット JFS-3-J2 を用いて 70 群拡散計算を行い、実験値と比較した。ドップラー効果に対して、内部ブランケットおよび炉心領域において、 ^{238}U サンプルでは C/E が 0.98 ~ 1.1, 鉄サンプルでは 1.1 ~ 1.2 と測定誤差範囲内で計算値と実験値はほぼ一致した。中性子スペクトルの大きく異なる 2 つの領域 (内部ブランケット及び炉心領域) における測定より、C/E の中性子スペクトル依存性は見出されなかった。一方、ナトリウムボイド状態での炉心領域では、 $\text{NUO}_2 - 25 \phi$ サンプルに対して、その C/E が 0.9 程度であり、ノンボイド状態のブランケットおよび炉心領域での $\text{NUO}_2 - 25 \phi$ の C/E に比べて 1.0 からの隔りは大きく、計算はドップラー効果を過小評価している。

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。また、計算において御協力を頂いたカナザワコンピュータの軍司康義氏に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 飯島進, 他: "FCA XII-1 集合体による大型軸方向非均質炉心模擬実験とその解析" JAERI-M 85-045 (1985)。
- 2) Mukaiyama T., Okajima S.: J. Nucl. Sci. Technol., 22, 243~246 (1985)。
- 3) Takano H., Ishiguro Y.: "Production and benchmark tests of fast reactor group constant set JFS-3-J2", JAERI-M 82-135 (1982)。
- 4) Nakagawa M., Tsuchihashi K.: "SLAROM", JAERI 1294 (1984)。
- 5) 飯島進, 吉田弘幸, 桜木廣隆: "PERKY", JAERI-M 6993 (1977)。
- 6) 岡嶋成晃, 向山武彦: "FCA X-3 および XII-1 集合体におけるドップラー効果の測定" JAERI-M 84-086 (1984)。
- 7) 長谷川正義, 三島良績: 原子炉材料ハンドブック, 日刊工業新聞社 (1977)。

4. ま と め

FCA XII-1 集合体におけるドップラー効果の測定を、内部ブランケット領域および炉心領域で行った。また、ナトリウムボイド状態での炉心領域に対しても測定を行った。測定精度は、 $\pm 1 \times 10^{-7} \Delta k/k$ である。

計算は、70 群群定数セット JFS-3-J2 を用いて 70 群拡散計算を行い、実験値と比較した。ドップラー効果に対して、内部ブランケットおよび炉心領域において、 ^{238}U サンプルでは C/E が 0.98 ~ 1.1、鉄サンプルでは 1.1 ~ 1.2 と測定誤差範囲内で計算値と実験値はほぼ一致した。中性子スペクトルの大きく異なる 2 つの領域（内部ブランケット及び炉心領域）における測定より、C/E の中性子スペクトル依存性は見出されなかった。一方、ナトリウムボイド状態での炉心領域では、 $\text{NUO}_2-25 \phi$ サンプルに対して、その C/E が 0.9 程度であり、ノンボイド状態のブランケットおよび炉心領域での $\text{NUO}_2-25 \phi$ の C/E に比べて 1.0 からの隔りは大きく、計算はドップラー効果を過小評価している。

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。また、計算において御協力を頂いたカナザワコンピュータの軍司康義氏に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 飯島進, 他: "FCA XII-1 集合体による大型軸方向非均質炉心模擬実験とその解析" JAERI-M 85-045 (1985)。
- 2) Mukaiyama T., Okajima S.: J. Nucl. Sci. Technol., 22, 243~246 (1985)。
- 3) Takano H., Ishiguro Y.: "Production and benchmark tests of fast reactor group constant set JFS-3-J2", JAERI-M 82-135 (1982)。
- 4) Nakagawa M., Tsuchihashi K.: "SLAROM", JAERI 1294 (1984)。
- 5) 飯島進, 吉田弘幸, 桜木廣隆: "PERKY", JAERI-M 6993 (1977)。
- 6) 岡嶋成晃, 向山武彦: "FCA X-3 および XII-1 集合体におけるドップラー効果の測定" JAERI-M 84-086 (1984)。
- 7) 長谷川正義, 三島良績: 原子炉材料ハンドブック, 日刊工業新聞社 (1977)。

4. ま と め

FCA XII-1 集合体におけるドップラー効果の測定を、内部ブランケット領域および炉心領域で行った。また、ナトリウムボイド状態での炉心領域に対しても測定を行った。測定精度は、 $\pm 1 \times 10^{-7} \Delta k/k$ である。

計算は、70 群群定数セット JFS-3-J2 を用いて 70 群拡散計算を行い、実験値と比較した。ドップラー効果に対して、内部ブランケットおよび炉心領域において、 ^{238}U サンプルでは C/E が 0.98 ~ 1.1, 鉄サンプルでは 1.1 ~ 1.2 と測定誤差範囲内で計算値と実験値はほぼ一致した。中性子スペクトルの大きく異なる 2 つの領域 (内部ブランケット及び炉心領域) における測定より、C/E の中性子スペクトル依存性は見出されなかった。一方、ナトリウムボイド状態での炉心領域では、 $\text{NUO}_2-25 \phi$ サンプルに対して、その C/E が 0.9 程度であり、ノンボイド状態のブランケットおよび炉心領域での $\text{NUO}_2-25 \phi$ の C/E に比べて 1.0 からの隔りは大きく、計算はドップラー効果を過小評価している。

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。また、計算において御協力を頂いたカナザワコンピュータの軍司康義氏に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 飯島進, 他: "FCA XII-1 集合体による大型軸方向非均質炉心模擬実験とその解析" JAERI-M 85-045 (1985)。
- 2) Mukaiyama T., Okajima S.: J. Nucl. Sci. Technol., 22, 243~246 (1985)。
- 3) Takano H., Ishiguro Y.: "Production and benchmark tests of fast reactor group constant set JFS-3-J2", JAERI-M 82-135 (1982)。
- 4) Nakagawa M., Tsuchihashi K.: "SLAROM", JAERI 1294 (1984)。
- 5) 飯島進, 吉田弘幸, 桜木廣隆: "PERKY", JAERI-M 6993 (1977)。
- 6) 岡嶋成晃, 向山武彦: "FCA X-3 および XII-1 集合体におけるドップラー効果の測定" JAERI-M 84-086 (1984)。
- 7) 長谷川正義, 三島良績: 原子炉材料ハンドブック, 日刊工業新聞社 (1977)。

付 録 微調整制御棒の較正

ドップラー効果測定を行う前に、微小反応度測定のために体系に取付けた微調整制御棒（F/R）の較正を行った。

このF/Rの燃料板装填状態をFig. A. 1に示す。F/RはFig. 2.2に示したように、移動側集合体のPuドライバー領域内に取付けた。ドップラー効果測定は、FCA XII-1 集合体標準体系にウランドライバー引出しを固定側および移動側集合体に1本ずつ追加し、中心引出しを固定および移動側より取除いたものであり、体系全体としての変化は小さい。従って、標準体系で較正された制御棒（C/R）の較正データを利用できるので、この制御棒を用いて、臨界法によりF/Rの較正を行った。出力倍増時間 T_d 、標準反応度 ρ_0 は、標準体系での測定値

$$T_d = 68.8 (\pm 0.3) \text{ sec}$$

$$\rho_0 = 0.0452 \% \Delta k/k$$

を用いた。

以下に、F/R較正データをTable A. 1に、またこれらのデータのフィッティングを行い、それより導出した微分反応度曲線をFig. A. 2に示す。較正の結果、F/Rの単位長さ当りの反応度は $2.2 \times 10^{-3} \rho_0/\text{mm}$ であり、これはC/Rのその約1/10である。

Table A.1 F/R Calibration by substitution method

Step	F/R Pos. (mm)	C/R #2 Pos. (mm)	Corrected C/R #2 Pos. (mm)
1	0.15	144.60	144.60
2	40.00	140.97	140.86
3	79.99	137.19	136.97
4	120.00	133.15	132.84
5	159.99	129.14	128.72
6	0.15	145.16	144.60

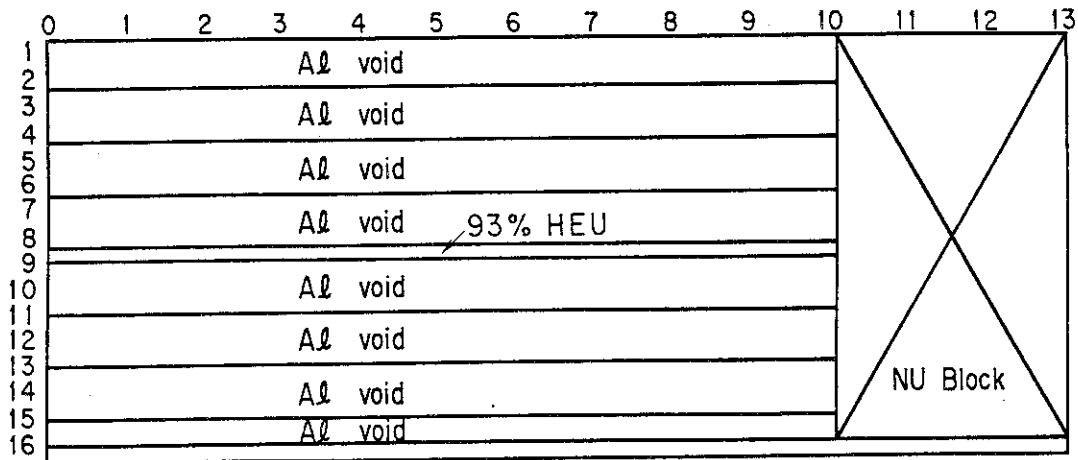


Fig. A.1 Plate configuration in F/R drawer

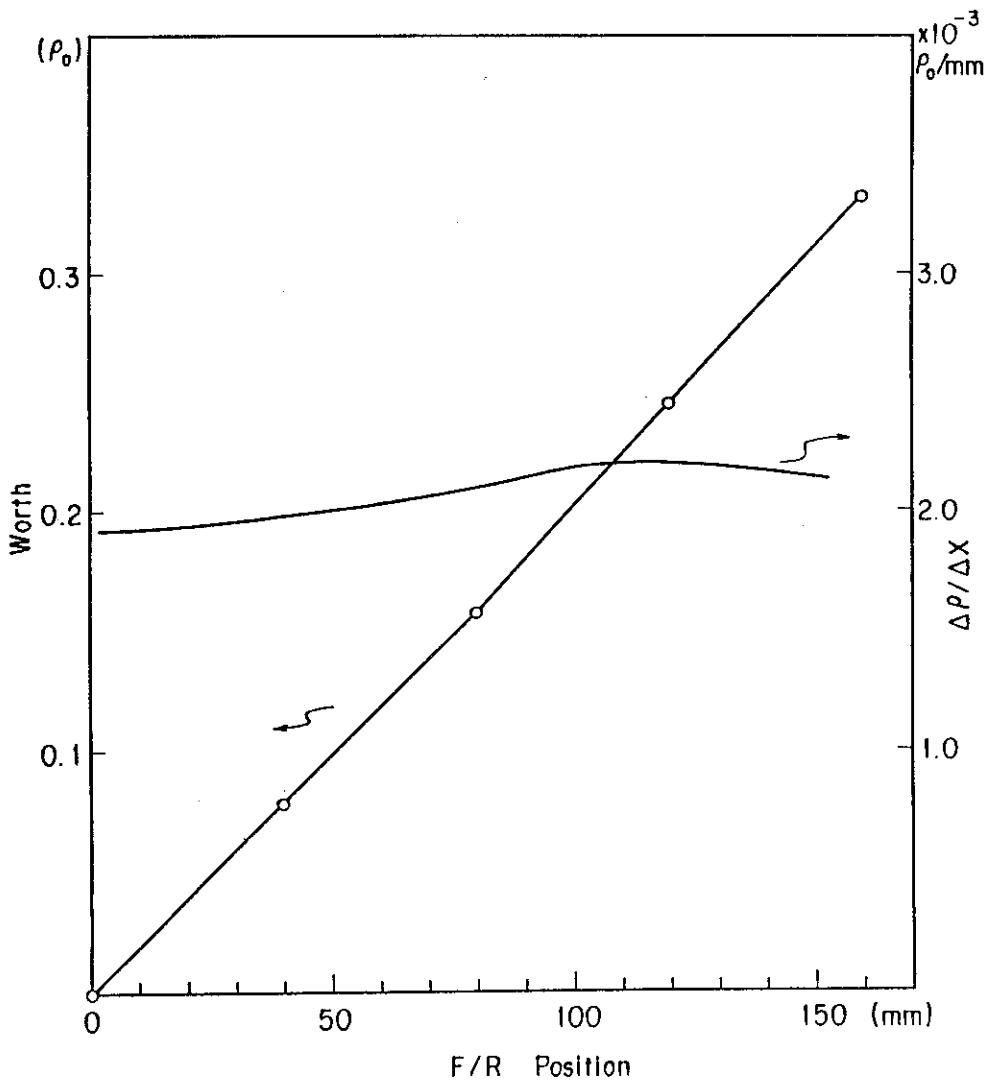


Fig. A.2 Calibration curve of F/R of FCA assembly XII-1