

JAERI-Research  
2001-017



JP0150709



FCA XVII-1 における種々のサンプルを  
用いた  $^{238}\text{U}$  ドップラー効果測定

2001年3月

安藤 真樹・岡嶋 成晃・大井川 宏之

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。

入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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行っております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

FCA XVII-1 における種々のサンプルを用いた  
 $^{238}\text{U}$ ドップラー効果測定

日本原子力研究所東海研究所エネルギーシステム研究部  
安藤 真樹・岡嶋 成晃・大井川 宏之\*

(2001年 2月 8日受理)

組成・外径の異なる6種類の円筒形サンプルを用い、 $^{238}\text{U}$ 自己遮蔽効果を変化させたドップラー効果測定実験を行い、FCA解析手法の予測精度を評価した。

実験は、Na冷却MOX燃料高速炉を模擬したFCA XVII-1集合体において、800℃までのサンプル加熱反応度値測定法により行った。解析では、PEACO-Xコードにより求めたサンプルの実効断面積を用いドップラー効果を計算した。

拡散理論に基づく解析の結果、金属ウラン及び二酸化ウランサンプルでは実験値と計算値はよく一致したが、背景断面積が大きく $^{238}\text{U}$ 自己遮蔽効果が小さいBeOを含むサンプルについては、10%~30%の過小評価となった。輸送計算によりこの過小評価は改善されたが、背景断面積が300barn以上であるサンプルに対しては、依然20%程度の過小評価であった。

Measurement of  $^{238}\text{U}$  Doppler Effect using Various Samples  
in FCA XVII-1

Masaki ANDOH, Shigeaki OKAJIMA and Hiroyuki OIGAWA<sup>+</sup>

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

(Received February 8, 2001)

$^{238}\text{U}$  Doppler effect measurements were carried out using 6 uranium samples with various composition or diameter varying self-shielding factors of  $^{238}\text{U}$ . Calculation accuracy of the standard analysis method for fast reactor cores at FCA was investigated.

The Doppler effect were measured by the sample-heated and reactivity worth measurement method up to 800 °C in the FCA XVII-1 assembly, which simulated Na-cooled MOX fueled FBR. In the analysis, the Doppler effect was calculated using the effective cross sections obtained by the PEACO-X code.

The calculated values based on the diffusion theory agreed well with the experiment for the U-metal and  $\text{UO}_2$  samples. The calculation underestimated the experiment from 10% to 30% for the  $\text{UO}_2$  samples containing BeO. This underestimation was improved by the use of the transport calculation. The calculation, however, underestimated about 20% for the sample whose background cross section is greater than 300 barns.

Keywords:  $^{238}\text{U}$  Doppler Effect, Doppler Reactivity Worth, MOX, Fast Breeder Reactor, Fast Critical Assembly, Self-shielding Factor, Background Cross Section, Collision Probability Code PEACO-X, Transport Effect

---

<sup>+</sup> Center for Neutron Science

## 目 次

1. 序文	1
2. 実験	1
3. 解析	8
3.1 解析手法	8
3.1.1 FCA標準解析手法	8
3.1.2 輸送補正計算	8
3.2 解析結果	9
4. まとめ	19
謝 辞	19
参考文献	20

## Contents

1. Introduction	1
2. Experiment	1
3. Analysis	8
3.1 Analysis method	8
3.1.1 Standard Analysis Method at FCA	8
3.1.2 Transport Correction	8
3.2 Results of the Analysis	9
4. Summary	19
Acknowledgments	19
References	20

(Title of Figs.)

- Fig. 1 Cell patterns of the FCA XVII-1 assembly
- Fig. 2 RZ-model of the FCA XVII-1 assembly (with the Doppler effect measurement devices)
- Fig. 3 Experimental results of the Doppler reactivity worth
- Fig. 4 C/E values for each Doppler sample
- Fig. 5 Comparison of the energy breakdown of the Doppler reactivity worth between the transport and diffusion calculations
- Fig. 6 Ratio of the calculated neutron spectra between the transport and diffusion calculations
- Fig. 7 Comparison of the calculated neutron flux distribution in the axial direction between the transport and diffusion calculations

## 1. 序 文

原子炉の過渡事象において、即発性の負の反応度フィードバックを与えるドップラー効果は安全上特に重要なものである。日本原子力研究所では、高速炉でのドップラー効果の計算予測精度を評価するため、これまで高速炉臨界集合体（FCA）を用い種々の中性子スペクトル場においてドップラー効果測定を行ってきた<sup>1)</sup>。解析手法の改良の面では、ドップラー効果測定用サンプルの実効断面積を作成するために、超微細群セル計算コードPEACOX<sup>2,3)</sup>が開発された。本コードを使用することにより、炉心燃料領域中の<sup>238</sup>Uによる共鳴遮蔽効果や実験装置に含まれる共鳴物質による共鳴干渉効果を考慮したサンプルの実効断面積を作成することができる。

本研究では、サンプルの自己遮蔽効果を変化させた際のドップラー効果解析手法の予測精度を評価することを目的とし、<sup>238</sup>Uの密度や外径の異なる6種類のサンプルを用いFCA標準的なMOX燃料炉心において800℃までの<sup>238</sup>Uドップラー効果の測定を行った。

以下では、第2章において実験体系及びドップラー効果の測定手法について述べ、第3章において解析手法及び解析結果について述べる。

## 2. 実 験

本研究でドップラー効果を測定した実験体系は、Na冷却MOX燃料高速炉を模擬したFCA-XVII-1集合体<sup>4)</sup>である。本実験体系は、炉心部にMOX燃料を模擬したテスト領域（T2セル）を持ち、その周囲を高濃縮度のドライバー燃料（PDおよびUDセル）が取り囲むゾーン型炉心である。実験体系の主要な燃料セルの構造とRZ体系図（ドップラー効果実験装置を含む）をそれぞれFig. 1及びFig. 2に示す。

本研究では、800℃まで昇温可能なドップラー効果測定用サンプル（以下、ドップラーサンプルとする）及び測定装置<sup>5)</sup>を用いた。

測定に用いたドップラーサンプルは、金属ウラン（U-metal）サンプル、二酸化ウラン（ $\text{UO}_2$ ）サンプル、二酸化ウランと酸化ベリリウムの混合（ $\text{UO}_2+\text{BeO}$ ）サンプルであり、いずれも天然ウランである。U-metalサンプル及び $\text{UO}_2$ サンプルは、各々外径25mmと20mmの2種類を用いた。以下、各サンプルをU-metal-25の様に記す（ただし、正確にはU-metal-25サンプルの外径は24.8mmである）。 $\text{UO}_2+\text{BeO}$ サンプルについては、 $\text{UO}_2$ とBeOの体積比が1：1と1：5の2つのサンプルを用いた（外径はいずれも25mm）。

各サンプルとも、ウラン・ペレットとステンレス製被覆管から構成されている。サンプ

ルのペレット長さは、いずれも150mmである。測定に用いたドップラーサンプルのウラン・ペレットの諸元をTable 1に示す。本実験では、背景断面積を約11~311barnの広範囲にわたり $^{238}\text{U}$ の自己遮蔽効果を変化させる。

ドップラー効果の測定は、サンプル加熱反応度値測定法により行った。同測定法では、昇温したドップラーサンプルを炉心中心に挿入した際の反応度値と、室温のドップラーサンプルの反応度値との差からドップラー効果による反応度値変化を求める。以下では、この測定量をドップラー反応度値 ( $\rho_{\text{Doppler}}(T)$ ) と呼ぶ。

$$\rho_{\text{Doppler}}(T) = \rho(T) - \rho(\text{室温})$$

ドップラー反応度値  $\rho_{\text{Doppler}}(T)$  の測定温度点Tは、300、550、800℃の3点である。ただし、 $\text{UO}_2+\text{BeO}(1:5)$ サンプルについては、ドップラー反応度値の絶対値が小さいため、550及び800℃の2温度点とした。

各温度点のサンプルのドップラー反応度値は、炉心温度変化による臨界位置変化を補正するために、基準となるダミーサンプルとドップラーサンプルを交互に炉心中心に挿入した際の反応度変化として $\rho(T)$ および $\rho(\text{室温})$ を求めることにより得た。従って、この測定法をサンプル・オシレーション法とも呼ぶ。測定誤差として、数回繰り返し測定したドップラー反応度値の標準偏差を採用した。

ダミーおよびドップラーサンプルを炉心中心に挿入した際の反応度変化は、臨界時の微調整棒Fine Rod (以下、F/Rとする) 挿入位置の変化より求めた。F/Rは、制御・安全棒の反応度値の約1/10となるようPDドライバー領域に配置した。反応度の単位としては、 $\rho_0$ を用いることとした(制御棒を50mm引き抜かれた状態から全挿入した際に投入される反応度を $1\rho_0$ とする)。 $\rho_0$ 単位から $\Delta k/k$ 単位への換算係数として、正ベリオド法により求められた $1\rho_0=(6.01\pm 0.06)\times 10^{-4}(\Delta k/k)$ を採用した。各サンプルでの測定結果をFig. 3に示す。

なお、ステンレス製被覆管のドップラー効果寄与を除きサンプル正味のドップラー反応度値を得るために、別途、外径25mmと20mmの被覆管のみ (Empty can) のドップラー反応度値も測定し、各温度でのドップラー反応度値から差し引いた。また、ドップラー効果測定装置を含む実験体系の計算モデル化の妥当性を確認するために、室温のドップラーサンプルとステンレス製被覆管との置換反応度 (サンプル反応度値:  $\rho_{\text{sample}}$ ) を測定した。

各サンプルのドップラー反応度値の測定結果をTable 2に示す。また、 $\rho_{\text{sample}}$  の測定結果をTable 3に示す。ドップラー反応度値の絶対値が最も大きいU-metal-25サンプルでは、800℃でのドップラー反応度値の測定誤差は約1%と精度良く測定できたが、 $\text{UO}_2+\text{BeO}(1:5)$ サンプルでは、ドップラー反応度値 (絶対値) が小さく測定誤差は10%以上となっている。



Table 1 Properties of uranium pellets of the Doppler samples

Sample	Outer diameter (mm)	Mass of $^{238}\text{U}$ (g)	Density of $^{238}\text{U}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\sigma_0^*$ (barn)
U-metal-25	24.8	1337	18.2	11
U-metal-20	20.0	863	18.3	14
UO <sub>2</sub> -25	25.0	601	8.16	33
UO <sub>2</sub> -20	20.0	374	7.85	40
UO <sub>2</sub> +BeO(1:1)**	25.0	292	3.96	89
UO <sub>2</sub> +BeO(1:5)	25.0	97	1.32	311

\* Background cross section of  $^{238}\text{U}$  (energy averaged)

\*\* Values in parentheses are the volume ratio of UO<sub>2</sub> to BeO

Table 2 Experimental results of the Doppler reactivity worth

Sample	Temperature (°C)	$\rho_{\text{Doppler}}(\text{T})$	
		( $\times 10^2 \rho_0$ )	( $\times 10^5 \Delta k/k$ )*
U-metal-25	300	1.37±0.029**	0.823±0.019
	550	2.15±0.033	1.294±0.024
	800	2.79±0.038	1.678±0.028
U-metal-20	300	0.909±0.042	0.546±0.026
	550	1.42±0.040	0.856±0.026
	800	1.82±0.042	1.097±0.027
UO <sub>2</sub> -25	300	0.669±0.025	0.402±0.016
	550	1.04±0.033	0.627±0.021
	800	1.38±0.029	0.829±0.019
UO <sub>2</sub> -20	300	0.468±0.040	0.281±0.024
	550	0.682±0.038	0.410±0.023
	800	0.874±0.035	0.526±0.022
UO <sub>2</sub> +BeO(1:1)	300	4.08±0.024	0.245±0.015
	550	6.46±0.026	0.388±0.016
	800	8.13±0.027	0.489±0.017
UO <sub>2</sub> +BeO(1:5)	550	0.263±0.032	0.158±0.019
	800	0.324±0.030	0.195±0.018

\*  $1\rho_0=(6.01\pm 0.06)\times 10^{-4}\Delta k/k$  was adopted

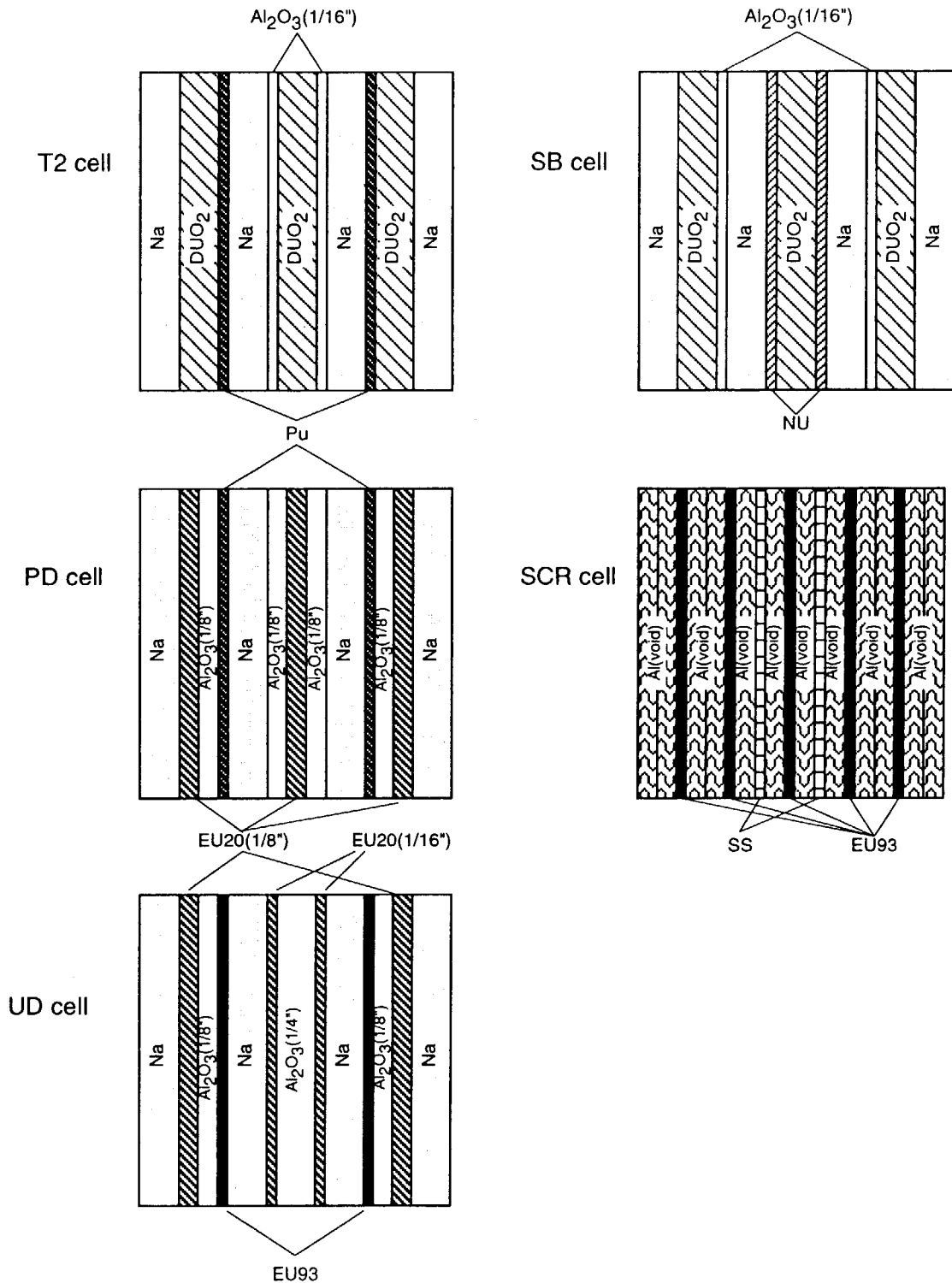
\*\* Experimental error

Table 3 Experimental results of the sample reactivity worth of the Doppler samples

Sample	$\rho_{\text{sample}}$	
	$(\rho_0)$	$(\times 10^{-5} \Delta k/k)^*$
U-metal-25	0.293±0.004**	17.6±0.24*
U-metal-25	0.195	11.7±0.24
UO <sub>2</sub> -25	0.169	10.2±0.24
UO <sub>2</sub> -20	0.105	6.31±0.24
UO <sub>2</sub> +BeO(1:1)	0.126	7.57±0.24
UO <sub>2</sub> +BeO(1:5)	0.087	5.23±0.24

\* $1\rho_0=(6.01\pm 0.06)\times 10^{-4}\Delta k/k$  was adopted

\*\* Experimental error



Note

Pu : 92% fissile plutonium metal (SS clad), 1/16"t  
 EU20 : 20% enriched uranium metal, 1/16"t  
 DUO<sub>2</sub> : Depleted uranium dioxide, 1/4"t  
 Al(void) : Aluminum metal with void, 1/8"t  
 Na : Sodium (SS clad), 1/4"t  
 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : Aluminum oxide  
 SS : Stainless steel, 1/16"t  
 EU93 : 93% enriched uranium metal, 1/16"t  
 NU : Natural uranium metal, 1/16"t  
 Al(void) : Aluminum metal with void, 1/8"t

The numbers in the parenthesis are thickness of the plates.

Fig. 1 Cell patterns of the FCA XVII-1 assembly

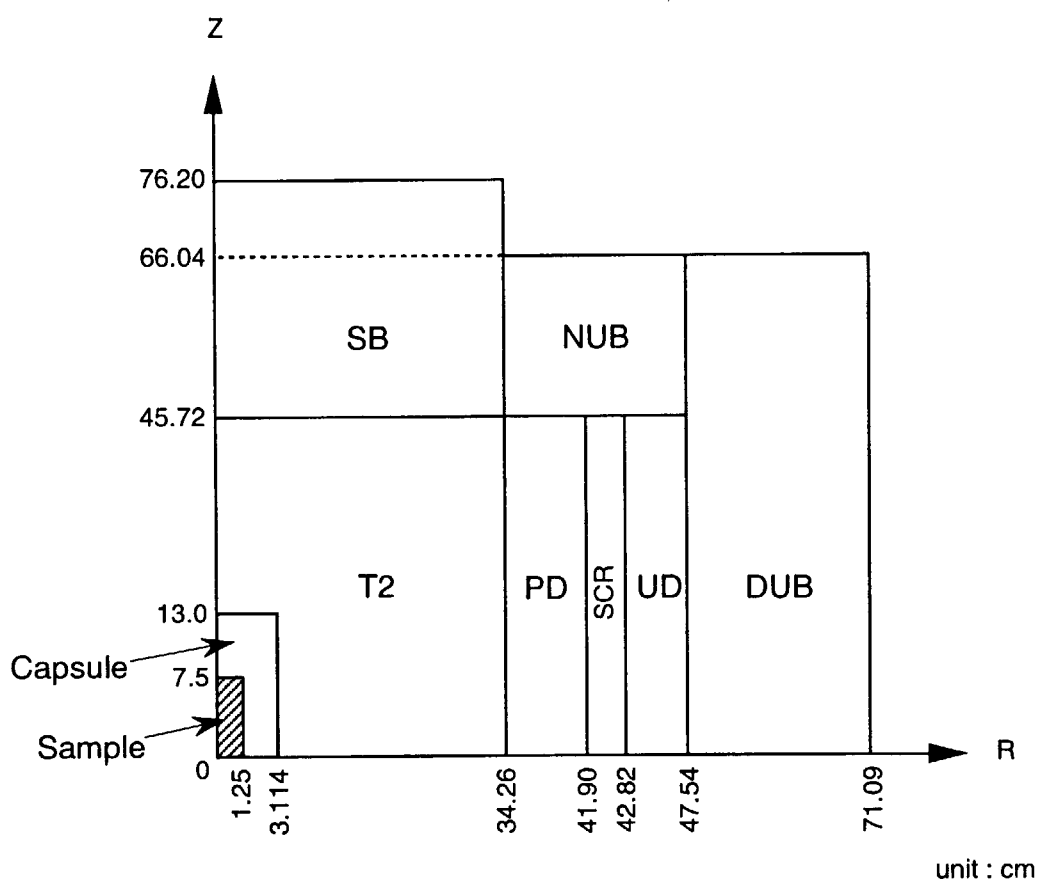


Fig. 2 RZ-model of the FCA XVII-1 assembly (with the Doppler effect measurement devices)

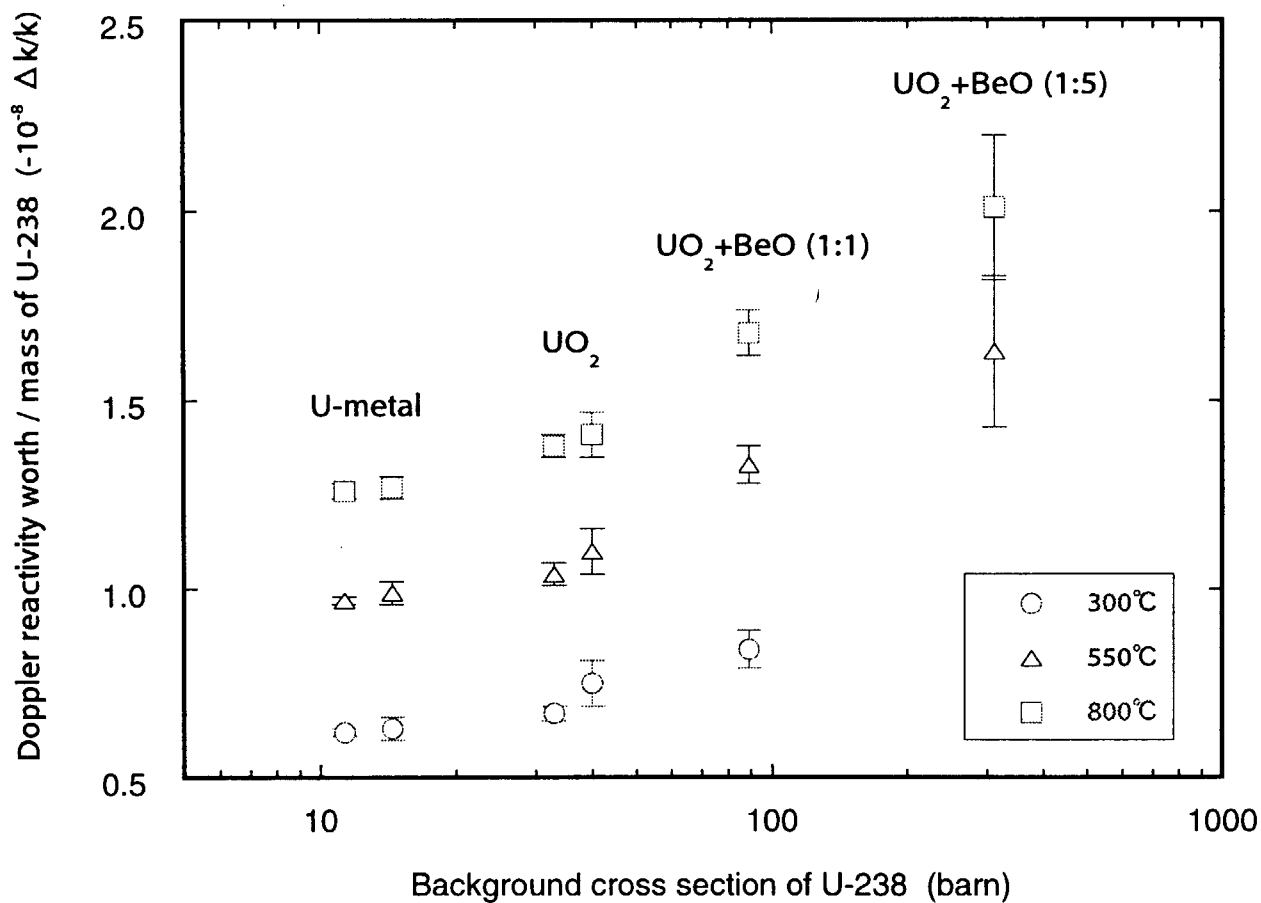


Fig. 3 Experimental results of the Doppler reactivity worth

## 3. 解析

### 3.1 解析手法

以下、FCA標準解析手法および輸送補正計算について述べる。核データにはJENDL-3.2<sup>6)</sup>を用いた。

#### 3.1.1 FCA標準解析手法

超微細群衝突確率計算コードPEACO-Xを用い、炉心部の<sup>238</sup>Uとの共鳴干渉効果を考慮したドップラーサンプルの実効断面積を作成した。計算体系は、ドップラー効果測定装置（ドップラーサンプルや周辺の加熱容器）とその周囲の炉心領域からなる1次元円筒モデルとした。炉心領域にはT2セルを均質化した原子数密度を与えた。ドップラー効果測定装置のモデル化については、<sup>238</sup>Uを含むウラン・ペレットと、ステンレス製被覆管及びその他の加熱容器（以下、単にカプセル部とする）の2領域構造とした。また、ウラン・ペレット領域を各測定温度（300K, 573K, 823K, 1073K）に変えそれぞれの温度点について断面積を作成した。PEACO-X計算に用いた各ウラン・ペレットおよびEmpty can、カプセル部ならびに炉心領域（T2セル）の原子数密度をTable 4に示す。PEACO-Xにより求められた詳細群の中性子エネルギースペクトルを用い、ドップラーサンプル及びカプセル部の断面積をそれぞれJFS-3タイプのエネルギー群構造に縮約した。

体系計算に用いる炉心の各燃料領域の均質化実効断面積はSLAROMコード<sup>7)</sup>により計算した。計算体系はドップラー効果測定装置（ウラン・ペレットおよびカプセル部）を炉心中心に配置した2次元RZ体系（Fig2参照）とし、エネルギー群数は70群とした。PEACO-Xコードを用いて得られたドップラーサンプルの実効断面積とSLAROMコードを用いて得られた炉心各燃料領域の均質化実効断面積を用い、拡散理論に基づくPOPLARSコード<sup>8)</sup>により体系計算を行った。なお、拡散係数には、Benoistの異方拡散係数<sup>9)</sup>を用いた。

体系計算により中性子束及び随伴中性子束を求め、一次摂動計算コードPERKY<sup>10)</sup>を用いドップラー反応度値およびサンプル反応度値を計算した。ドップラー反応度値の計算では、室温サンプル（300K）から各温度点のサンプルへの置換反応度とし、サンプル反応度値の計算では、室温のサンプルからEmpty Canへの置換反応度を計算し正負を逆にした。

#### 3.1.2 輸送補正計算

中性子散乱物質であるベリリウムを含むサンプルに対して、拡散計算と輸送計算を組み合わせた輸送補正計算を行った。計算体系は、計算容量を節約するために制御安全棒をUD

に変更し簡略化した。計算コードに $S_N$ 輸送計算コードTWOTRAN-II<sup>11)</sup>を用い、RZ体系において中性子束及び随伴中性子束を求めた。その際、 $P_0$ 、 $S_4$ 、エネルギー群数は70群とした。1次摂動計算には、SNPERT-IIコード<sup>12)</sup>を用いた。また、POPLARSおよびPERKYコードを用い輸送計算と同様の計算モデルにて拡散計算を行った。その際、異方性拡散係数を用いず $D=1/3\Sigma_t$ とした。これら輸送計算と拡散計算によるドップラー反応度値の比(Trans/Diff)を輸送補正とし、標準解析手法により求めた値に乗じた。

### 3.2 解析結果

FCA標準解析手法を用いた各サンプルに対するドップラー反応度値の解析結果をTable 5に示す。また、C/E値を背景断面積に対してプロットしたものをFig. 4に示す。

U-metal及び $UO_2$ サンプルではC/E値は1をわずかに下回っており、サンプルの径や密度に対する依存性はほとんど見られない。 $UO_2$ -20サンプルの300℃を除き、実験値と計算値はほぼ実験誤差の範囲内で一致している。また、全般的に800℃の場合に比べて300℃や550℃でのC/E値が若干小さめとなる傾向がある。実験上の温度測定精度や解析面でのドップラー拡がりの評価手法などに問題があると考えられる。 $UO_2$ -20の300℃のドップラー効果については、測定精度に問題があると考えられる。他方、BeOを含むサンプル( $UO_2+BeO(1:1)$ )及び(1:5)についてはC/E値が悪く、特に、 $UO_2+BeO(1:5)$ サンプルについては約30%の過小評価となった。

室温のドップラーサンプルの反応度値( $\rho_{sample}$ )の解析結果をTable 6に示す。U-metal及び $UO_2$ サンプルではC/E値は1をわずかに下回る程度で実験値と計算値はよく一致している。他方、BeOを含むサンプルの $\rho_{sample}$ のC/E値は、9%及び17%の過大評価となっており、U-metal及び $UO_2$ サンプルでのC/E値と傾向が異なる。この結果から、ドップラー反応度の解析精度が悪いのは、拡散計算ではベリリウムによる局所的な中性子散乱がサンプル近傍の中性子スペクトルや中性子束分布に及ぼす影響を十分に考慮できないとため考えられる。

そこで、輸送計算を行いドップラー反応度値とサンプル反応度値に対して輸送補正を施すこととした。参考のため、U-metal及び $UO_2$ サンプルについて、ペレット外径-25mmφのみについて計算した。

輸送補正係数及び補正結果をTable 7に示す。輸送効果は、サンプルの温度に依存せず、 $UO_2+BeO(1:1)$ 及び(1:5)サンプルそれぞれ、約3%と10%であった。この結果、 $UO_2+BeO(1:1)$ サンプルについては、C/E値は0.87~0.92となりほぼ10%以内で実験値と良く一致するようになった。他方、 $UO_2+BeO(1:5)$ サンプルについては、C/E値は1.0に近づくものの依然として

20%程度の過小評価である。また、U-metal-25及び $\text{UO}_2$ -25サンプルについては、輸送補正量はそれぞれ約6%と3%であり、 $\text{UO}_2+\text{BeO}$ サンプルとは逆に過小評価の傾向を強める結果となった。特に金属ウランサンプルでは、輸送効果が約6%と比較的大きな値となった。今後、他の体系においても輸送補正の必要性について検討を行うべきである。

各サンプルについて輸送計算と拡散計算のドップラー反応度値のエネルギーブレイクダウンを比較したものをFig. 5に示す。 $\text{UO}_2+\text{BeO}(1:1)$ 及び $(1:5)$ サンプルでは、1keV以下のエネルギー範囲でドップラー反応度値が増加しており、中性子スペクトルの変化が輸送補正に寄与していると考えられる。他方、U-metal-25及び $\text{UO}_2$ -25サンプルでは、ほぼ一様に輸送計算の方が低めの値になっている。

ドップラー・サンプル中心での中性子スペクトルの輸送計算と拡散計算の比を各サンプルについて比較した結果をFig. 6に示す。ドップラー効果に寄与する $10^5\text{eV}$ 以下に着目すると、U-metal-25と $\text{UO}_2$ -25サンプルではほとんどエネルギーに依存していないことが分かる。対して、 $\text{UO}_2+\text{BeO}(1:1)$ および $(1:5)$ サンプルでは、10keV以下の低エネルギー側での寄与が大きいことが分かる。

ドップラー効果に最も大きく寄与する第38群(961~749eV)での軸方向中性子束分布(炉心中心軸)を、 $\text{UO}_2+\text{BeO}(1:5)$ サンプルについて、輸送と拡散の計算値をFig. 7に比較した。図より、サンプル近傍での中性子束の傾きが大きく異なることが分かる。輸送計算においてサンプル領域での中性子インポートランスが大きくなったこともドップラー反応度値の計算精度を改善した一因であるといえる。

室温サンプルの反応度値( $\rho_{\text{sample}}$ )の輸送補正係数及び補正結果を各サンプルについてTable 8に示す。U-metal-25及び $\text{UO}_2$ -25サンプルに対しては輸送補正係数(Trans/Diff)はほぼ1.0であった。 $\text{UO}_2+\text{BeO}(1:1)$ サンプルについては、過大評価が改善されC/E値は1.0に近づいた。他方、 $\text{UO}_2+\text{BeO}(1:5)$ サンプルについては、輸送補正量が約30%もあり、17%の過大評価から逆に19%の過小評価となった。

以上の解析結果より、輸送計算によりドップラーサンプルを含む体系に対する計算精度が向上したと考えられる。しかし、散乱物質を多く含む $\text{UO}_2+\text{BeO}(1:5)$ サンプルに対しては、現段階での輸送補正計算にはまだ問題があるといえる。



Table 4 Atomic number density of each region used for the PEACO-X calculation

	$\times 10^{24}$ atom/cm <sup>3</sup>					
Nuclide	U-metal-25 <sup>+</sup>	U-metal-20	UO <sub>2</sub> -25	UO <sub>2</sub> -20	UO <sub>2</sub> +BeO(1:1)	UO <sub>2</sub> +BeO(1:5)
<sup>235</sup> U	3.351E-4*	3.377E-4	1.503E-4	1.463E-4	7.302E-5	2.433E-5
<sup>238</sup> U	4.593E-2	4.633E-2	2.063E-2	2.008E-2	1.002E-2	3.328E-3
Be					3.006E-2	5.650E-2
O			4.157E-2	4.045E-2	5.024E-2	4.980E-2

\* Read as  $3.351 \times 10^{-4}$

Table 4 (continued)

	$\times 10^{24}$ atom/cm <sup>3</sup>				
Nuclide	Empty Can-25	Empty Can-20	Capsule-25	Capsule-20	Core
<sup>235</sup> U					1.3954E-5
<sup>238</sup> U					6.8690E-3
<sup>239</sup> Pu					1.0455E-3
<sup>240</sup> Pu					9.2158E-5
<sup>241</sup> Pu					3.4518E-6
<sup>241</sup> Am					5.1994E-6
O					1.7038E-2
Na					7.6564E-3
Al					2.3188E-3
Cr	2.368E-3	3.109E-3	5.185E-3	4.929E-3	3.3473E-3
Mn					1.7733E-4
Fe	8.485E-3	1.114E-2	1.888E-2	1.794E-2	1.2175E-2
Ni	1.105E-3	1.451E-3	3.496E-3	4.198E-3	1.5301E-3

\* U-metal-25サンプルのペレット直径は正確には2.48cmφであるが、他のサンプルと計算モデルを統一させ2.50cmφとした。これに伴い、ペレット中の原子数を保存するように原子数密度を調整した。

Table 5 Results of the analysis on the Doppler reactivity worth

Sample	Temperature (°C)	$\rho_{\text{Doppler}}$ (T) ( $\times 10^{-5} \Delta k/k$ )	C/E value
U-metal-25	300	0.7919	0.962±2.2%*
	550	1.258	0.972±1.5%
	800	1.644	0.980±1.4%
U-metal-20	300	0.5240	0.960±4.6%
	550	0.8343	0.974±2.8%
	800	1.0918	0.995±2.3%
UO <sub>2</sub> -25	300	0.3865	0.961±3.7%
	550	0.6193	0.988±3.2%
	800	0.8139	0.982±2.2%
UO <sub>2</sub> -20	300	0.2439	0.868±8.5%
	550	0.3914	0.954±5.6%
	800	0.5149	0.979±4.0%
UO <sub>2</sub> +BeO(1:1)	300	0.2085	0.851±5.7%
	550	0.3350	0.863±3.9%
	800	0.4408	0.901±3.5%
UO <sub>2</sub> +BeO(1:5)	550	0.1116	0.706±12%
	800	0.1466	0.752±9.2%

\* Experimental error

Table 6 Results of the analysis on the sample reactivity worth of the Doppler samples

Sample	$\rho_{\text{sample}}$ ( $\times 10^{-5} \Delta k/k$ )	C/E value
U-metal-25	17.36	0.986±1.4%*
U-metal-20	11.35	0.970±2.1%
UO <sub>2</sub> -25	9.843	0.965±2.4%
UO <sub>2</sub> -20	6.068	0.962±3.8%
UO <sub>2</sub> +BeO(1:1)	8.238	1.09±3.2%
UO <sub>2</sub> +BeO(1:5)	6.137	1.17±4.6%

\* Experimental error

Table 7 Results of the analysis with transport correction on the Doppler reactivity worth

Sample	Temperature (°C)	$\rho_{\text{Doppler}}(T) (\times 10^{-5} \Delta k/k)$		Trans/Diff <sup>a)</sup>	C/E value <sup>b)</sup>
		Transport	Diffusion		
U-metal-25	300	0.8620	0.9136	0.944	0.908±2.2% <sup>c)</sup>
	550	1.370	1.452	0.944	0.917±1.5%
	800	1.790	1.898	0.943	0.924±1.4%
UO <sub>2</sub> -25	300	0.4353	0.4477	0.972	0.934±3.7%
	550	0.6982	0.7176	0.973	0.961±3.2%
	800	0.9176	0.9433	0.973	0.955±2.2%
UO <sub>2</sub> +BeO(1:1)	300	0.2488	0.2429	1.024	0.871±5.7%
	550	0.4003	0.3904	1.025	0.885±3.9%
	800	0.5273	0.5139	1.026	0.924±3.5%
UO <sub>2</sub> +BeO(1:5)	550	0.1429	0.1307	1.093	0.775±12%
	800	0.1883	0.1718	1.097	0.826±9.2%

a) Transport correction facto: ratio between the transport and diffusion calculation

b) Transport corrected on the results of Table 5

c) Experimental error

Table 8 Results of the analysis with transport correction on the sample reactivity worth ( $\rho_{\text{sample}}$ )

Sample	$\rho_{\text{sample}} (\times 10^{-5} \Delta k/k)$		Trans/Diff <sup>a)</sup>	C/E value <sup>b)</sup>
	Transport	Diffusion		
U-metal-25	19.81	19.84	0.998	0.984±1.4% <sup>c)</sup>
UO <sub>2</sub> -25	11.30	11.28	1.002	0.967±2.4%
UO <sub>2</sub> +BeO(1:1)	8.105	9.331	0.869	0.945±3.2%
UO <sub>2</sub> +BeO(1:5)	4.572	6.638	0.689	0.809±4.6%

a) Ratio between the transport and diffusion calculation

b) Transport corrected on the results of Table 6: Trans/Diff for  $\rho_{\text{sample}}$  was multiplied on C/E values of Table 6

c) Experimental error

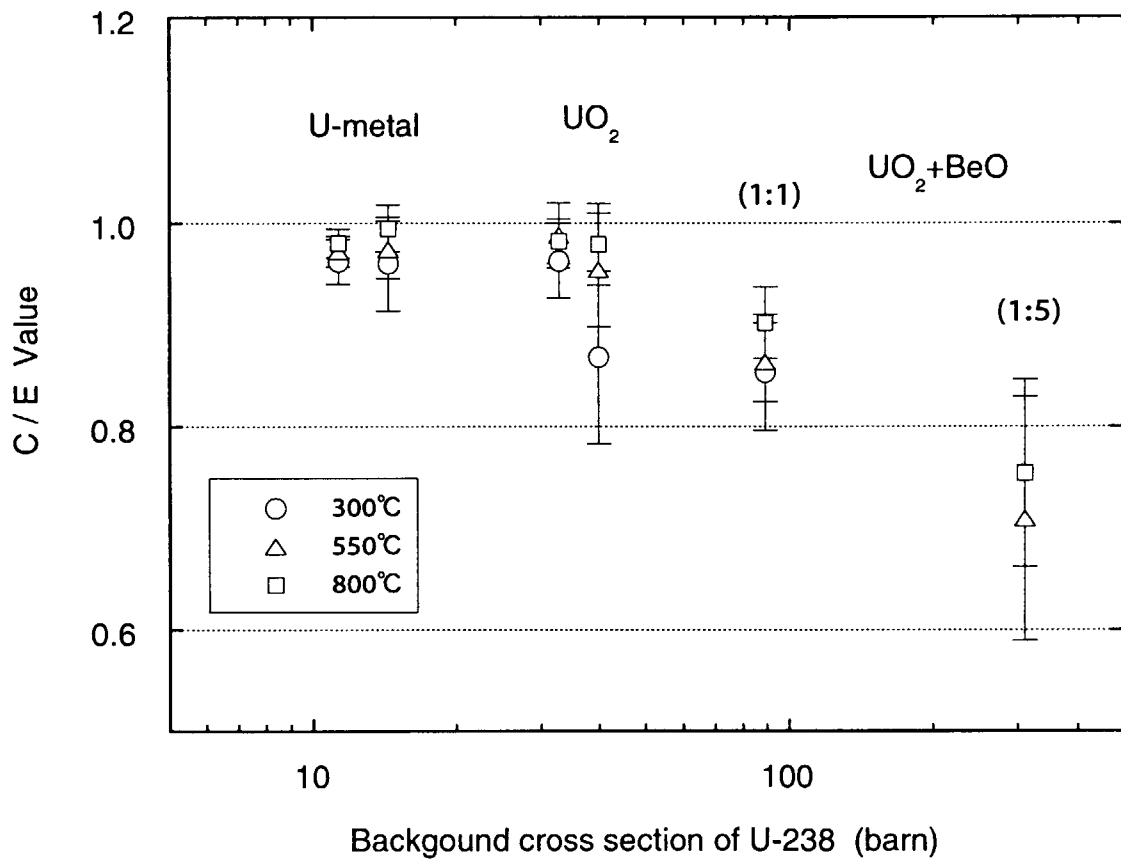
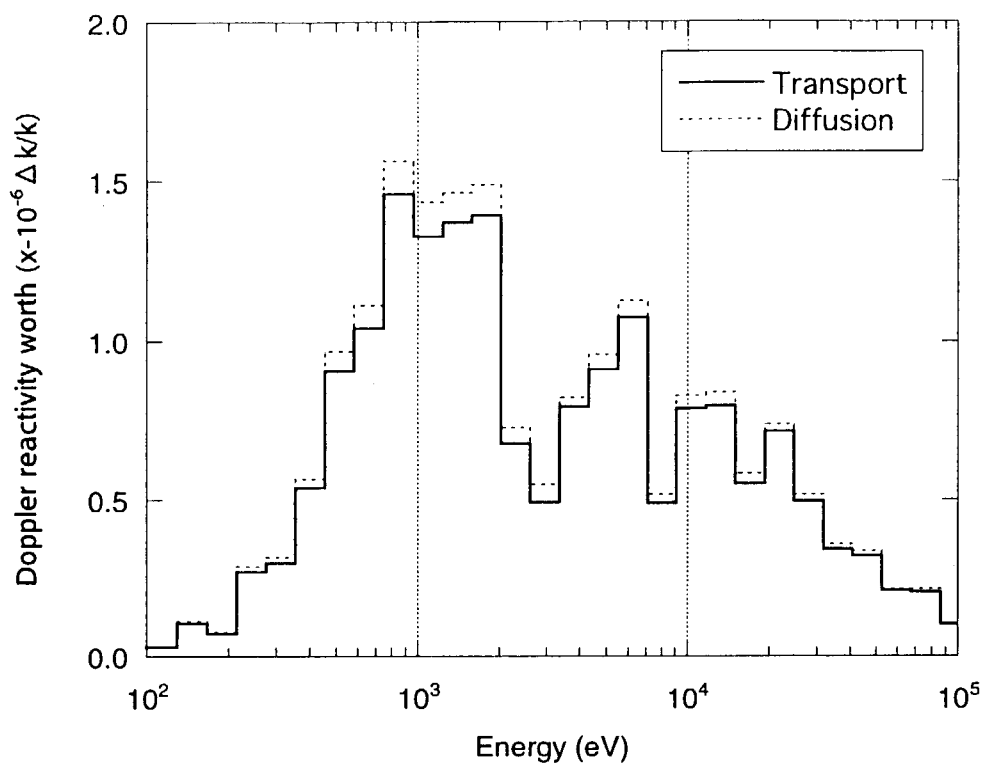
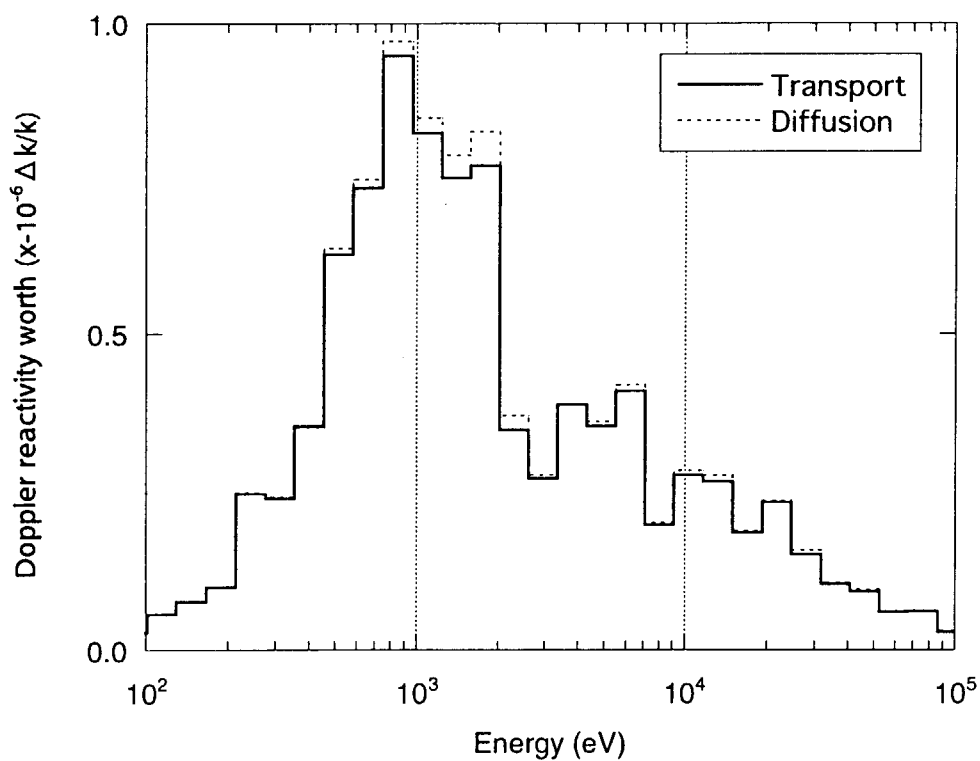


Fig. 4 C/E values for each Doppler sample

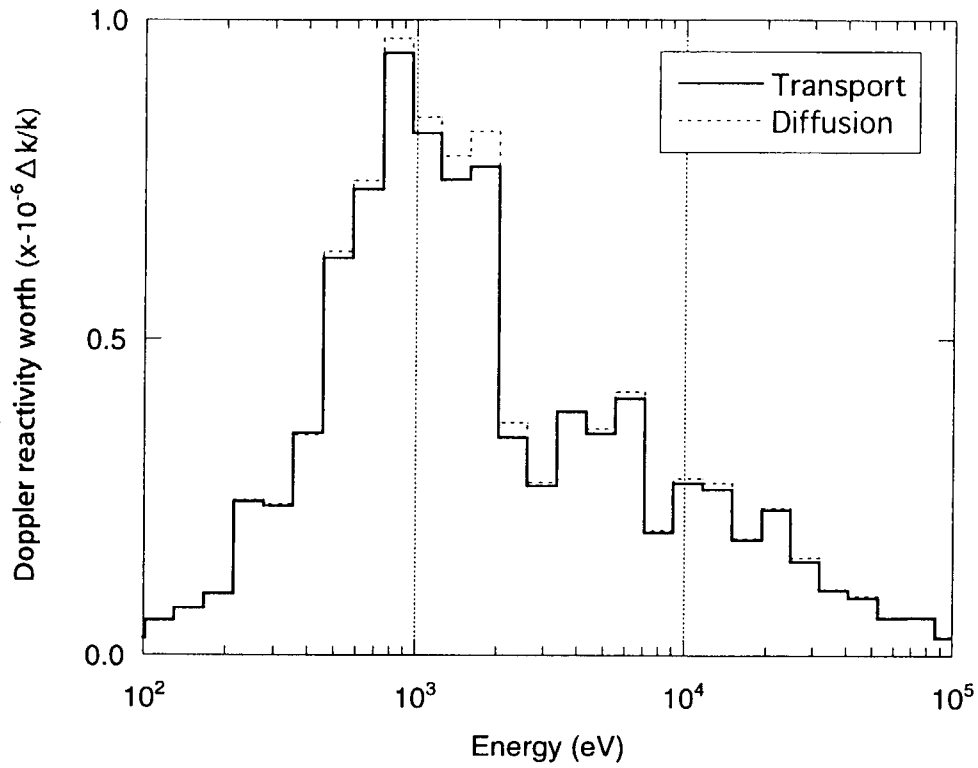


(a) U-metal-25

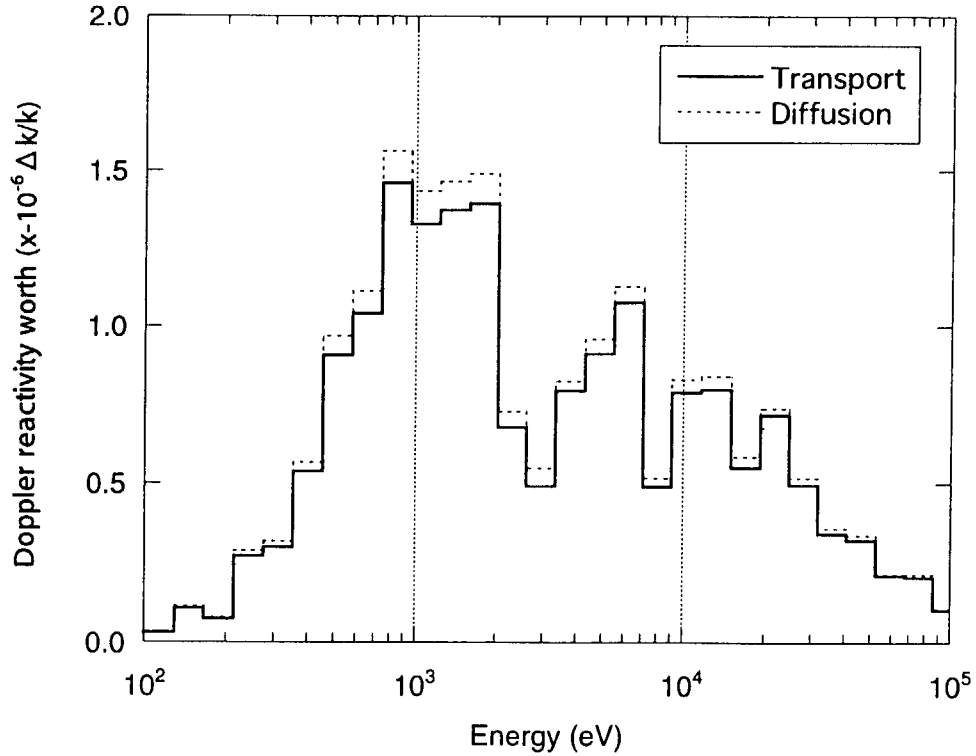


(b)  $\text{UO}_2$ -25

Fig. 5 Comparison of the energy breakdown of the Doppler reactivity worth between the transport and diffusion calculations



(c)  $\text{UO}_2+\text{BeO}(1:1)$



(d)  $\text{UO}_2+\text{BeO}(1:5)$

Fig. 5 Comparison of the energy breakdown of the Doppler reactivity worth between the transport and diffusion calculations (continued)

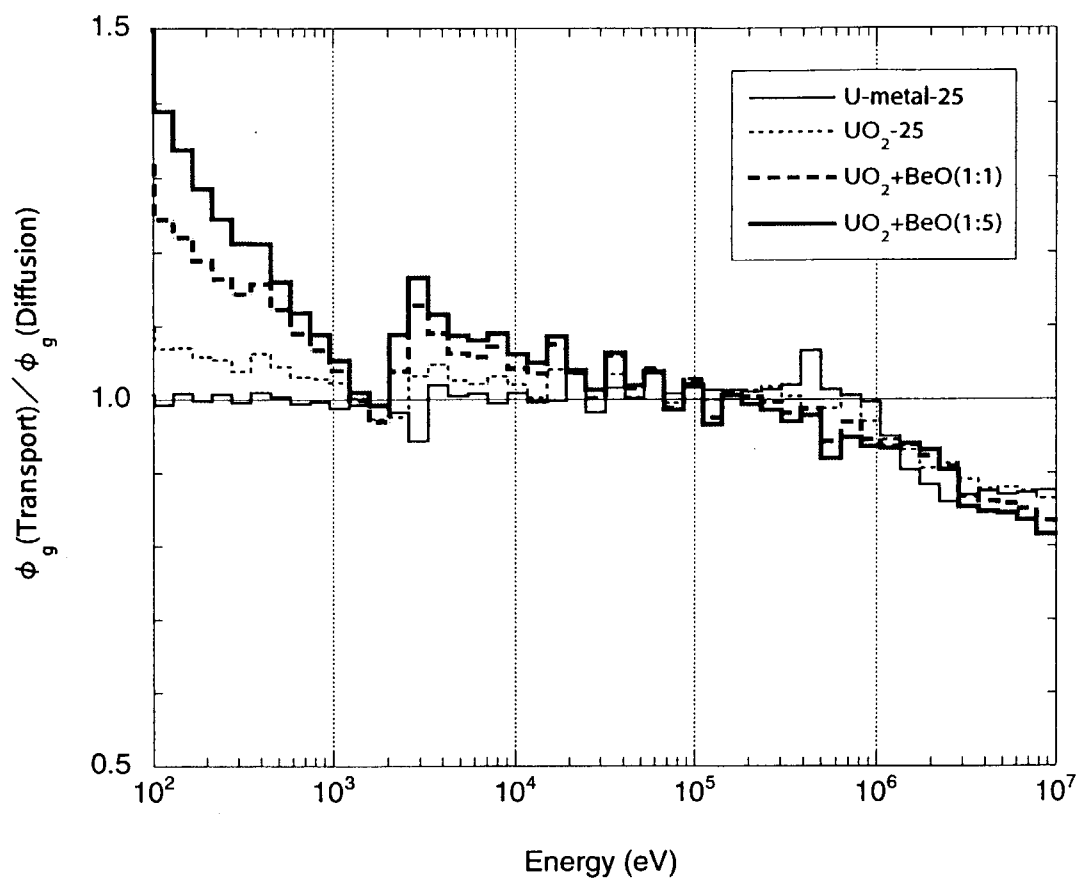


Fig. 6 Ratio of the calculated neutron spectra between the transport and diffusion calculations

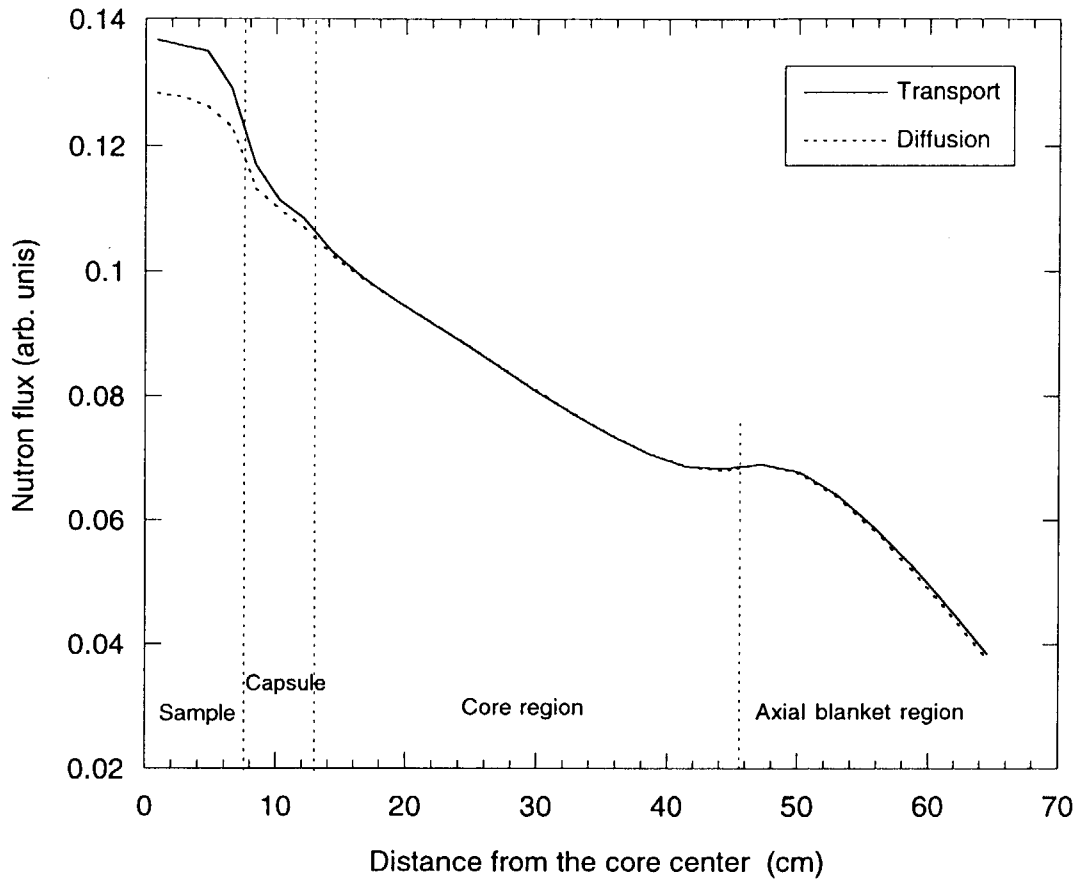


Fig.7 Comparison of the calculated neutron flux distribution in the axial direction between the transport and diffusion calculations



#### 4. まとめ

$^{238}\text{U}$ の自己遮蔽効果に対するドップラー効果解析手法の予測精度を評価することを目的として、FCA XVII-1 炉心において組成・外径の異なる種々のサンプルを用いることによりサンプル中の $^{238}\text{U}$ の背景断面積を広範囲にわたり変化させ $^{238}\text{U}$ ドップラー効果測定実験を行った。実験では、サンプル加熱反応度値測定法により800°Cまでの $^{238}\text{U}$ ドップラー効果を測定した。他方、解析では、JENDL3.2を用い拡散理論ベースの一次摂動計算によりドップラー反応度値を求めた。サンプル領域の実効断面積作成においてPEACO-X コードを用い炉心領域中の $^{238}\text{U}$ との共鳴干渉効果を考慮した。

解析の結果、U-metal及び $\text{UO}_2$ サンプルでは実験値と計算値はよく一致しており、C/E値のサンプルの $^{238}\text{U}$ 背景断面積依存性はなかった。BeOを含むサンプル ( $\text{UO}_2+\text{BeO}(1:1)$ 及び $(1:5)$ サンプル) については、10%~30%の過小評価となった。室温サンプルの反応度値のC/E値が悪いことから、拡散計算では中性子スペクトルや中性子束分布の計算精度が不十分であると考えられる。輸送計算を行い輸送補正を施した結果、この過小評価は改善され、 $\text{UO}_2+\text{BeO}(1:1)$ サンプルについてはほぼ10%以内で実験値と一致したが、 $\text{UO}_2+\text{BeO}(1:5)$ サンプルについてはなお20%程度の過小評価であった。他方、U-metalサンプルでも約6%の輸送効果を考慮すべきであることが分かった。

輸送補正を施すことにより、測定誤差の比較的小さい800°Cのドップラー効果に関しては、 $^{238}\text{U}$ の背景断面積11~89barnのサンプルではほぼ10%以内の予測誤差で実験値と一致した。本研究で用いた解析手法により、これらサンプルに対してかなりの精度で $^{238}\text{U}$ のドップラー効果を予測できるといえる。しかしながら、散乱物質を多く含み $^{238}\text{U}$ の背景断面積が300barn以上の $\text{UO}_2+\text{BeO}(1:5)$ サンプルに対しては、輸送補正の計算に問題がありさらに詳細な解析を行う必要があると考えられる。

#### 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頂いた前炉物理研究グループ・リーダー大杉俊隆氏並びに元炉物理研究室長向山武彦氏に感謝いたします。輸送計算では、当時、夏期実習生として従事した名古屋大学工学部（現、日立製作所）の伏木勝己氏に協力していただいた。最後に、本実験を行うに当たり長時間にわたりFCAの運転をしていただいたFCAスタッフに感謝します。

## 参考文献

- 1) Yasuno T., Nakano M., Mukaiyama T., Iijima T. and Hirota J. : J. Nucl. Sci. Technol., 7, 271(1970).
- 2) Okajima S., Oigawa H. and Mukaiyama T. : J. Nucl. Sci. and Tecnol., 31, 1097 (1994).
- 3) 岡嶋成晃, 大井川宏之, 向山武彦 :JAERI-M 92-185, "FCA における高温ドップラー効果測定 (3) -超微細群によるセル計算コード(PEACO-X)の開発-", (1992).
- 4) Iijima S., Oigawa H., Sakurai T., Nemoto T. and Okajima S. : "Benchmark Experiment for Physics Parameters of Metallic-Fueled LMFBR at FCA", Mito, Ibaraki, Japan (1996).
- 5) 岡嶋成晃, 向山武彦 :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).
- 6) Nakagawa T., et al. : J. Nucl. Sci. and Tecnol., 32, 1259 (1995).
- 7) Nakagawa M. and Tsuchihashi K. :JAERI 1294, "SLAROM: A Code for Cell Homogenization Calculation of Fast Reactor", (1984).
- 8) 飯島 進, 他: "拡散理論に基づく体系計算コード: POPLARS", 私信.
- 9) Benoist P. : CEA-R-2278(1964).
- 10) 飯島進, 吉田弘幸, 桜木廣隆 :JAERI-M 6993, "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)", (1977).
- 11) 角田弘和 : "角度依存摂動計算コード: SNPERT-II", 私信.
- 12) Lathlop K. D. and Brinkly F. W. :LA-4848-MS, "TWOTRAN-II: An Interfaced, Exportable Version of the TWOTRAN Code for Two-dimensional Transport", (1973).

# 国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10<sup>-19</sup> J

1 u = 1.66054 × 10<sup>-27</sup> kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10<sup>-10</sup> m

1 b = 100 fm<sup>2</sup> = 10<sup>-28</sup> m<sup>2</sup>

1 bar = 0.1 MPa = 10<sup>5</sup> Pa

1 Gal = 1 cm/s<sup>2</sup> = 10<sup>-2</sup> m/s<sup>2</sup>

1 Ci = 3.7 × 10<sup>10</sup> Bq

1 R = 2.58 × 10<sup>-4</sup> C/kg

1 rad = 1 cGy = 10<sup>-2</sup> Gy

1 rem = 1 cSv = 10<sup>-2</sup> Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値は CODATA の1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- bar は, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換算表

力	N (=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m<sup>2</sup>) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s = 10<sup>4</sup> St (ストークス) (cm<sup>2</sup>/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg (Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal = 4.18605 J (計量法)
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>	= 4.184 J (熱化学)
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>	= 4.1855 J (15 °C)
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>	= 4.1868 J (国際蒸気表)
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>	仕事率 1 PS (仏馬力)
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>	= 735.499 W
	1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

