

JAERI-Research

JP0450240

2003-029



FCAを用いた岩石型燃料に添加する共鳴吸収物質の
ドップラー効果測定

2003年12月

安藤 真樹・中野 佳洋・岡嶋 成晃・川崎 憲二

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（〒319-1195 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おこなっております。

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, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

FCAを用いた岩石型燃料に添加する共鳴吸収物質の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・中野 佳洋・岡嶋 成晃・川崎 憲二

(2003年10月24日受理)

岩石型酸化物(ROX)燃料として軽水炉でプルトニウム燃料を燃焼する際に、ドップラー反応度フィードバックを向上させる方法として共鳴反応を持つ物質を燃料に添加することが検討されている。本研究では、ROX燃料に添加する共鳴物質としてエルビウム、タンクスチン、トリウムに着目し、これら物質のドップラー効果に対する計算予測精度の検証を行うことを目的とした。

ドップラー効果測定実験は、ナトリウム冷却高速炉を模擬したFCA XX-2炉心と軽水減速を模擬した中速スペクトル場を持つFCA XXI-1D2炉心において、800°Cまでのサンプル加熱反応度価値測定法により行った。共鳴物質サンプルとして、金属エルビウム(Er)、金属タンクスチン(W)、二酸化トリウム(ThO_2)の円筒形サンプルを作成し測定に用いた。

解析では、核データにJENDL-3.2を用い、FCA標準解析手法を基本計算とし実験値と計算値を比較した。また、熱中性子炉解析のために開発されたSRACシステムを用いた解析を行い、予測精度の傾向を基本計算の解析結果と比較した。

輸送補正を施した基本計算の解析の結果、XX-2炉心では、C/E値は0.87～0.92となり全般的に過小評価となった。他方、XXI-1D2炉心では、C/E値は0.88～1.04となり、計算値は実験誤差の範囲内で実験値とほぼ一致した。詳細群計算を行った効果は、XX-2炉心では+2～+8%であったのに対し、XXI-1D2炉心では-4～+1%となり、軟らかい中性子スペクトル場においては詳細群効果がマイナス傾向になることが分かった。

SRACシステムを用いた拡散計算による解析の結果を基本計算と比較した結果、詳細群による断面積計算を行わない場合、両炉心においてErサンプルではSRACの方が3%～10%小さい計算値を与え、Wサンプルでは、SRACの方が2%～5%大きな計算値を与えることが分かった。また ThO_2 サンプルでは、XX-2炉心ではSRAC解析>基本計算であるのに対して、XXI-1D2炉心ではその逆となった。詳細群による断面積計算を行った場合、Wサンプルでは、両炉心においてSRACの方が1%～5%小さな計算値を与えることが分かった。

Measurement of Doppler Effect on Resonance Materials for ROX Fuel using FCA

Masaki ANDOH, Yoshihiro NAKANO, Shigeaki OKAJIMA and Kenji KAWASAKI

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

(Received October 24, 2003)

Adding resonance materials to the Rock-like oxide (ROX) fuel is considered to improve Doppler reactivity feedback of the ROX fueled light water reactor. The objectives of this study is to clarify calculation accuracy for the Doppler effect of the resonance materials; erbium (Er), tungsten (W) and thorium (Th).

Doppler effect measurements were carried out at FCA in a fast neutron spectrum in the sodium cooled FBR mock-up core (XX-2 core) and in an intermediate neutron spectrum in the water moderated simulated core (XXI-1D2 core) by the sample-heated and reactivity worth measurement method up to 800 °C. Newly fabricated three samples of resonance material for the ROX fuel, Er metal, W metal and Th dioxide (ThO_2) samples were used.

In the analysis, the standard analysis method for fast reactor cores at FCA (the standard analysis method) with the use of the JENDL-3.2 cross section library was used. Moreover, the SRAC system developed to analyze thermal reactors was used to compare the tendency of the calculation accuracy of the system with that of the standard analysis method.

The standard analysis method underestimated the experiment in the XX-2 core (the C/E values were 0.87~0.92). On the other hand, the C/E values in the XXI-1D2 core were 0.88~1.04, which means that calculation agreed the experimental values within the experimental errors. The effect of the ultra-fine energy group calculation showed a tendency that the effect was reduced in softened neutron spectrum, where the effect was +2~+8% and -4~-+1% in the XX-2 and XXI-1D2 core, respectively.

The analysis with the SRAC system without the ultra-fine energy group calculation gave smaller values in the range from 3 % to 10% for the Er sample and bigger values in the range from 2% to 5% for the W sample than the standard analysis method in both the cores. For the ThO_2 sample, the SRAC system gave bigger values than the standard analysis method in the XX-2 core and smaller ones in the XXI-1D2 core. The SRAC system with the ultra-fine energy group calculation gave smaller values in the range from 1% to 5% than the standard analysis method in both the cores.

Keywords: ROX Fuel, Resonance Material, Doppler Effect, Erbium, Tungsten, Thorium, Fast Critical Assembly, JENDL-3.2, SRAC System

目 次

1.	序文	-----	1
2.	実験	-----	1
	2.1 実験体系	-----	1
	2.1.1 高速スペクトル体系	-----	2
	2.1.2 中速スペクトル体系	-----	2
	2.2 測定手法および結果	-----	3
3.	解析	-----	13
	3.1 解析手法	-----	13
	3.1.1 基本計算	-----	13
	3.1.2 SRACを用いた解析	-----	15
	3.2 解析結果	-----	19
	3.2.1 基本計算の解析結果	-----	19
	3.2.2 SRACを用いた解析結果	-----	53
4.	まとめ	-----	64
	謝 辞	-----	66
	参考文献	-----	67
	付録	-----	69

Contents

1.	Introduction	-----	1
2.	Experiment	-----	1
	2.1 Experimental Core	-----	1
	2.1.1 Fast Neutron Spectrum Core	-----	2
	2.1.2 Intermediate Neutron Spectrum Core	-----	2
	2.2 Experimental Method and Results	-----	3
3.	Analysis	-----	13
	3.1 Analysis Method	-----	13
	3.1.1 Standard Analysis Method	-----	13
	3.1.2 SRAC System	-----	15
	3.2 Results of the Analysis	-----	19
	3.2.1 Standard Analysis Method	-----	19
	3.2.2 SRAC System	-----	53
4.	Summary	-----	64
	Acknowledgments	-----	66
	References	-----	67
	Appendix	-----	69

This is a blank page.

1. 序 文

高速炉開発の停滞や核兵器解体等により発生した余剰プルトニウムの安全な処分方法として、エネルギー資源の有効利用および核兵器への転用防止等の観点から、ルトニウムをワنس・スルー型原子炉燃料とすることが検討されている。日本原子力研究所（原研）では、難溶性の岩石型酸化物（ROX）を燃料形態とする概念について、計算シミュレーションによる核特性評価研究、中性子照射による燃焼挙動、反応度事故時の燃料挙動などに関する研究を進めてきた。^{1)~5)} その結果、ROX燃料を現行軽水炉に装荷して燃焼させる場合、ドップラー効果による負の反応度フィードバックがウラン燃料炉心に比べて小さくなり、反応度事故時の燃料健全性が危惧されることが指摘された。対応策として、 UO_2 や共鳴吸収物質である ThO_2 や ErO_2 を添加することが検討され、その結果ドップラー反応度係数の改善が期待できることが示された^{2),3)}。

ドップラー効果は高速炉において重要な反応度フィードバックであるため、これまで原研では、主に高速炉に関するドップラー効果の予測精度評価研究が行われてきた。実験データの取得では、高速炉臨界集合体（FCA）の広範囲にわたる中性子スペクトル場において組成の異なるサンプルを用いたドップラー効果の測定が行われてきた^{6),7)}。しかしながら、世界的に見てもウラン以外の共鳴吸収物質については実験データが乏しく、ステンレス等の構造材やトリウム⁸⁾についてのみで、その他の共鳴吸収物質に対してはこれまでほとんど測定されていない状況である。他方解析面では、原研においてドップラー効果計算精度向上のために超微細群セル計算コードPEACO-Xが開発される^{9),10)}など、FCAでの実験解析を系統的に行えるよう改良が重ねられてきた。

本研究では、ウラン以外の共鳴吸収物質として、エルビウム、タングステン、トリウムに着目し、これら共鳴物質のドップラー効果を測定し計算予測精度を評価することを目的とした。新たにエルビウム（Er）、タングステン（W）、二酸化トリウム（ ThO_2 ）の円筒形サンプルを作成し、第1段階として、 ^{238}U ドップラー効果の測定経験のある高速炉体系においてドップラー効果の測定を行った¹¹⁾。第2段階では、ROX燃料の軽水炉装荷を考慮し、水素により中性子を減速させた中速スペクトル体系において、これらサンプルのドップラー効果を測定した。高速炉および中速スペクトル炉両炉心での実験結果に対して、ドップラー効果の実験解析手法として実績のあるFCAでの標準解析手法を用いて解析を行った。また、熱中性子炉の核特性解析を主目的として開発されたSRACコードシステム¹²⁾を用い、標準解析手法と解析結果を比較した。

以下、第2章では、両実験体系について述べるとともに測定手法および測定結果について述べる。第3章では、実験解析についてその手法と結果について述べる。第4章において結果をまとめることとする。

2. 実 験

2.1 実験体系

高速スペクトル体系XX-2炉心¹³⁾および中速スペクトル体系XXI-1D2炉心においてエルビウム他のドップラー効果を測定した。以下、各実験体系について説明する。

2.1.1 高速スペクトル体系

実験体系XX-2炉心は、ナトリウム冷却混合窒化物燃料高速炉の部分モックアップ炉心であり、窒化物燃料を模擬したテスト領域と臨界維持のためのドライバー燃料からなる炉心部と軸方向および径方向のブランケット部により構成される。実験体系を構成する炉心部各燃料のセルパターンをFig. 1に示す。実験体系の水平断面図をFig. 2に示す。

炉心部テスト領域を構成するT2Nセルは、92%²³⁹Pu板（ステンレス被覆）および天然ウラン（金属）板のほか窒化物燃料を模擬するための窒化アルミニウム（AlN）板や冷却材模擬物質としてのナトリウム（ステンレス被覆）板からなる。T2Nセルのプルトニウム富化度は、12%（Pu-fissile/heavy metal）である。本テスト領域は、T2NセルからなるT2N引出69本（片側集合体当たり）を形状が円筒に近いものとなるよう配置した。ドライバー領域は、MOX燃料領域（MODセル）および高濃縮ウラン領域（EUDセル）の2種類である。また、炉心領域内には制御・安全棒SCR（Safety/Control Rod）が片側集合体当たり4系統（8本）装荷される。なお、ドップラー効果の測定では、臨界時の制御棒位置変位より反応度変化として求められるが、XX-2炉心では測定対象であるドップラー効果が制御棒の反応度値に対して小さいため、微分反応度値がSCRより小さい微調整棒FR（Fine Rod）1本を臨界調整に用いた。FRは高濃縮ウランドライバーEUD領域に配置した。

テスト領域の軸方向ブランケットとして、テスト領域のプルトニウムを天然ウランに換えたSBNセルを配置した。径方向ブランケットとして、ソフトブランケット（SBセル）を炉心領域周囲に配置し、さらにその外周には、金属劣化ウランからなるブランケット（DUB）領域を設けた。

2.1.2 中速スペクトル体系

実験体系XXI-1D2炉心は、ウランベンチマーク高速炉であるXXI-1炉心の炉心中央部に減速材を添加した中速スペクトル・テスト領域を設けた実験体系である。実験体系を構成する炉心部各燃料のセルパターンをFig. 3に示す。実験体系の水平断面図をFig. 4に示す。

炉心部テスト領域を構成する単位セルEUPセルは、19%濃縮ウラン板と天然ウラン板（ともに金属）および減速材（冷却材）模擬物質として80%ボイド率のポリスチレン（CH80V）板ならびにステンレス板からなる。EUPセルの²³⁵U平均濃縮度は15%、水素対²³⁵U比（H/²³⁵U）は3.3、水素対重金属比（H/HM）は0.50である。EUPセルを装填したEUP引出45本（片側集合体当たり）を炉心中心部に装荷しテスト領域とした。

テスト領域の径方向外周には濃縮ウラン燃料セルEUSが配置されており、その燃料引出本数で余剰

反応度の調整を行った。その際、炉心形状を円筒形にモデル化しやすいようにEUS燃料引出の配置を調整した。EUSセルと炉心外縁部で隣接するSBセルを半分ずつ装填した引出（EUSLあるいはEUSR）を使用した。片側集合体当たり、EUS引出：106本、EUSLおよびEUSR引出：6本とした体系（EUSの正味の引出本数：109本）をドップラー効果測定体系とした。

炉心領域内には制御・安全棒SCRが片側集合体当たり8本装荷されるが、XXI-1炉心は小型1領域炉心でありドップラー駆動装置設置と固定側制御棒駆動機構が干渉してしまうため、XXI-1D2炉心でのドップラー効果測定では、固定側（F側）SCR位置を2ピッチないし1ピッチ分炉心外側に移動した（Fig. 4参照）。よって、SCR位置はF-M非対称であり、かつ安全棒SR#6のみ他のF側制御・安全棒より1ピッチ内側に配置されている。炉心部の外側には、SBセルの軸方向プランケットおよびXX-2炉心と同様の径方向プランケット領域をもつ。

両炉心のドップラー効果測定場（テスト領域T2NセルおよびEUPセル）の均質化原子数密度をTable 1に示す。両炉心の炉心中心での中性子スペクトル（70群拡散計算値）の比較をFig. 5に示す。Fig. 5より、XXI-1D2炉心では水素の添加による中性子減速の効果が見られ、10keV以下のエネルギー範囲に感度のあるドップラー効果への寄与増加が期待される。

2.2 測定手法および結果

測定手法

ドップラー効果の測定には、800°C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呼ぶ）及び測定装置^{14),15)}を用い、サンプル加熱反応度価値測定法により行った。共鳴物質のドップラーサンプルとして、新たに金属エルビウム（Er）サンプル、金属タンゲステン（W）サンプルおよび二酸化トリウム（ThO₂）サンプルが作成された。エルビウムでは、金属の他に酸化物（Er₂O₃）とする選択肢もあるが、高速炉体系での測定を想定した予備解析の結果、酸化物とした場合に測定誤差に対して充分なドップラー効果を得ることが難しいと判断されたため、原子数密度の高い金属エルビウムとした。これらサンプル（以下、共鳴物質サンプルと呼ぶ）の他に、比較のため、金属ウラン（U-metal）サンプルおよび二酸化ウラン（UO₂）サンプルも使用した。各サンプルとも、ペレット（ミート部）とステンレス製被覆管から構成されており、加熱容器に封入し電気ヒーターにより昇温する。U-metalおよびUO₂サンプル（以下、ウランサンプルと呼ぶ）の²³⁵U濃縮度はいずれも0.7%（天然ウラン）である。測定に用いたドップラーサンプルの諸元をTable 2に示す。

サンプル加熱反応度価値測定法では、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価値 $\rho(T)$ と室温のドップラーサンプルの反応度価値 $\rho(室温)$ の反応度価値変化からドップラー反応度価値（ $\rho_{Doppler}(T)$ ）として求める。

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

ここで、ドップラー反応度価値の測定温度点Tは、300、550、800°Cの3点である。各温度点のサンプルの反応度価値 $\rho(T)$ と $\rho(\text{室温})$ 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求めた。

$$\rho(T) = \Delta \rho_{\text{Dummy} \rightarrow \text{Sample}(T)}$$

$$\rho(\text{室温}) = \Delta \rho_{\text{Dummy} \rightarrow \text{Sample}(\text{室温})}$$

ここで、反応度変化 $\Delta \rho$ は、ダミーサンプルとドップラーサンプルを炉心に挿入した際の臨界時の制御棒（微調整棒）位置の変化より、制御棒較正曲線を用いて求めた。測定誤差として、数回繰り返し測定した制御棒位置の標準偏差を採用した。

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ペレット正味（ミート部）のドップラー反応度価値を得るために、別途、被覆管のみ（Empty can）のドップラー反応度価値も測定し、各温度でのドップラー反応度価値から差し引いた。

また、ドップラー効果測定装置を含む実験体系のモデル化妥当性の目安となる実験データとして、炉心中心において加熱容器にEmpty canを入れた状態とドップラーサンプルを入れた状態の反応度差（サンプル反応度価値： ρ_{sample} ）を測定した。

\$単位から $\Delta k/k$ 単位の反応度とするのに用いた実効遅発中性子割合 β_{eff} の値は、各炉心について以下のとおりである。

炉心	β_{eff}
XX-2	5.029×10^{-3}
XXI-1D2	7.308×10^{-3}

測定結果

各サンプルでの $\rho_{\text{Doppler}}(T)$ 測定結果をTable 3に示す。Table 3より、XXI-1D2炉心では中性子スペクトルが軟らかくまた炉心体積が小さいため、ドップラー反応度価値の絶対値がXX-2炉心よりかなり大きな値となっている。両実験体系での測定結果を比較するために、金属サンプルであるErおよびWサンプルについてはU-metalサンプルの反応度価値により、ThO₂サンプルについてはUO₂サンプルの反応度価値により規格化した値をTable 4に示す。Table 4より、XXI-1D2炉心では、ウランサンプルに対する共鳴物質サンプルのドップラー反応度価値がXX-2炉心より12%～32%増加したことが分かる。低エネルギー側で共鳴吸収断面積が大きいErサンプルのドップラー反応度価値が最も増加している。

両炉心において測定したサンプル反応度価値 ρ_{sample} の測定結果をTable 5に示す。 $\rho_{\text{Doppler}}(T)$ と同様に金属サンプルと酸化物サンプルそれぞれについてウランサンプルの ρ_{sample} で規格化したサンプル反応度価値の比を併記した。Table 5より、共鳴物質サンプルの ρ_{sample} は、XXI-1D2炉心ではXX-2炉心より39%～56%増加したことが分かる。

Table 1 Homogenized atomic number density of the test regions of the experimental cores ($\times 10^{24}$ atom/cm 3)

	XX-2	XXI-1D2
	T2N cell	EUP cell
H	7.7586E-5*	4.9041E-3
B-10	3.1086E-7	
B-11	1.1309E-6	
C	7.0163E-5	4.8819E-3
N	9.1443E-3	
O	2.3107E-4	5.9483E-5
Na	7.6564E-3	
Al	9.2944E-3	
Si	2.1999E-5	
Cr	3.3850E-3	3.5382E-3
Fe	2.5007E-4	1.2615E-2
Ni	1.2226E-2	1.5209E-3
Mn	1.5471E-3	2.5191E-4
U-235	5.3037E-5	1.4878E-3
U-238	7.3148E-3	8.2733E-3
Pu-239	1.0455E-3	
Pu-240	9.1348E-5	
Pu-241	2.5270E-6	
Pu-242	8.0368E-7	
Am-241	6.1243E-6	

* Read as 7.7586×10^{-5}

Table 2 Properties of pellets of the Doppler samples

Sample	Outer diameter \times Length (mm)	Mass (g)
Er	23.4 \times 150.1	546 (Er)
W	23.4 \times 150.5	1,150 (W)
ThO ₂	23.4 \times 150.2	471 (²³² Th)
U-metal	24.8 \times 150.0	1,337 (²³⁸ U)
UO ₂	25.0 \times 150.0	601 (²³⁸ U)

Table 3 Experimental results of the Doppler reactivity worths in the XX-2 and XXI-1D2 cores

Sample	Temperature (°C)	$\rho_{\text{Doppler}}(T) \times 10^{-5} \Delta k/k$	
		XX-2	XXI-1D2
Er	300	-0.73±0.10*	-2.51±0.16
	550	-1.10±0.10	-3.93±0.16
	800	-1.44±0.10	-5.07±0.17
W	300	-0.55±0.10	-1.73±0.17
	550	-0.83±0.10	-2.75±0.17
	800	-1.13±0.11	-3.59±0.18
ThO_2	300	-0.46±0.11	-1.53±0.16
	550	-0.68±0.11	-2.36±0.15
	800	-0.87±0.10	-3.11±0.16
U-metal	300	-0.81±0.11	-2.14±0.18
	550	-1.27±0.11	-3.43±0.16
	800	-1.67±0.11	-4.60±0.18
UO_2	300	-0.46±0.10	-1.31±0.17
	550	-0.66±0.11	-2.03±0.16
	800	-0.88±0.10	-2.74±0.16

* Experimental error

Table 4 Comparison of the normalized Doppler reactivity worths $\rho_{\text{Doppler}}(T)$ between the XX-2 and XXI-1D2 cores

Sample	Temperature(°C)	Normalized $\rho_{\text{Doppler}}(T)^a$		
		XX-2	XXI-1D2	XXI-1D2/XX-2 ^b
Er	300	0.90±0.17 ^c	1.17±0.12	1.31±0.20
	550	0.87±0.11	1.15±0.07	1.32±0.13
	800	0.86±0.08	1.10±0.06	1.28±0.10
W	300	0.68±0.08	0.81±0.10	1.20±0.25
	550	0.65±0.10	0.80±0.06	1.23±0.17
	800	0.67±0.15	0.78±0.05	1.15±0.12
ThO_2	300	1.02±0.32	1.16±0.19	1.15±0.29
	550	1.03±0.23	1.16±0.12	1.12±0.23
	800	0.98±0.16	1.13±0.09	1.15±0.16

a) The $\rho_{\text{Doppler}}(T)$ for specific samples normalized to the uranium samples

b) The ratio of the normalized Doppler reactivity worth between the XXI-1D2 and XX-2 cores

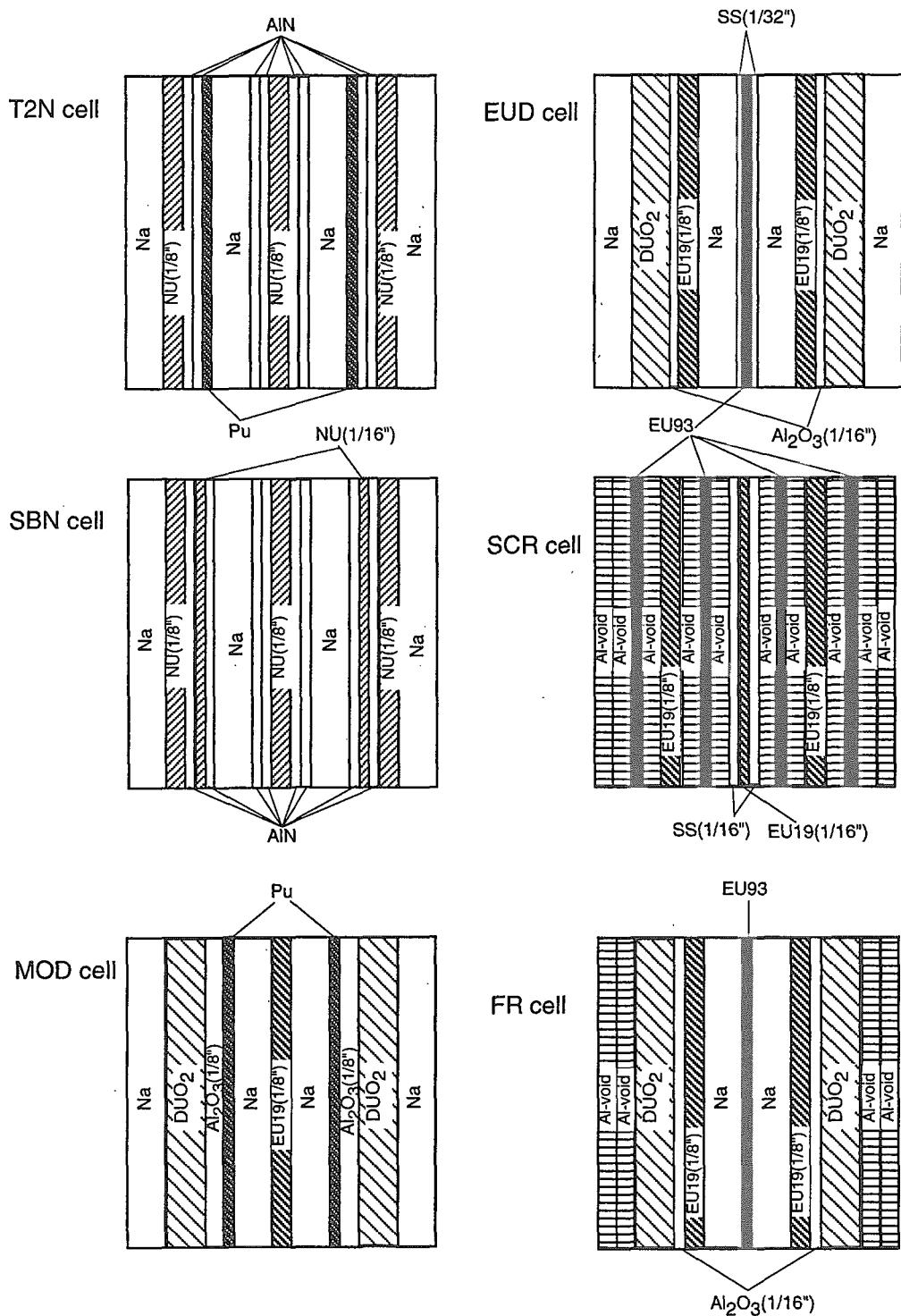
c) Experimental error

Table 5 Experimental results of the sample reactivity worths ρ_{sample}
in the XX-2 and XXI-1D2 cores

Sample	$\rho_{\text{sample}} (\times 10^4 \Delta k/k)$		ρ_{sample} ..
	XX-2	XXI-1D2	
Er	-2.82±0.04 ^b	-7.93±0.05	1.56±0.05
W	-2.29±0.04	-5.82±0.04	1.41±0.03
ThO ₂	-1.23±0.04	-2.29±0.04	1.39±0.02
U-metal	-1.60±0.04	-2.88±0.04	-
UO ₂	-0.97±0.03	-1.30±0.04	-

a) The ratio of the sample reactivity worths between the XXI-1D2 and
XX-2 cores normalized with the uranium samples

b) Experimental error

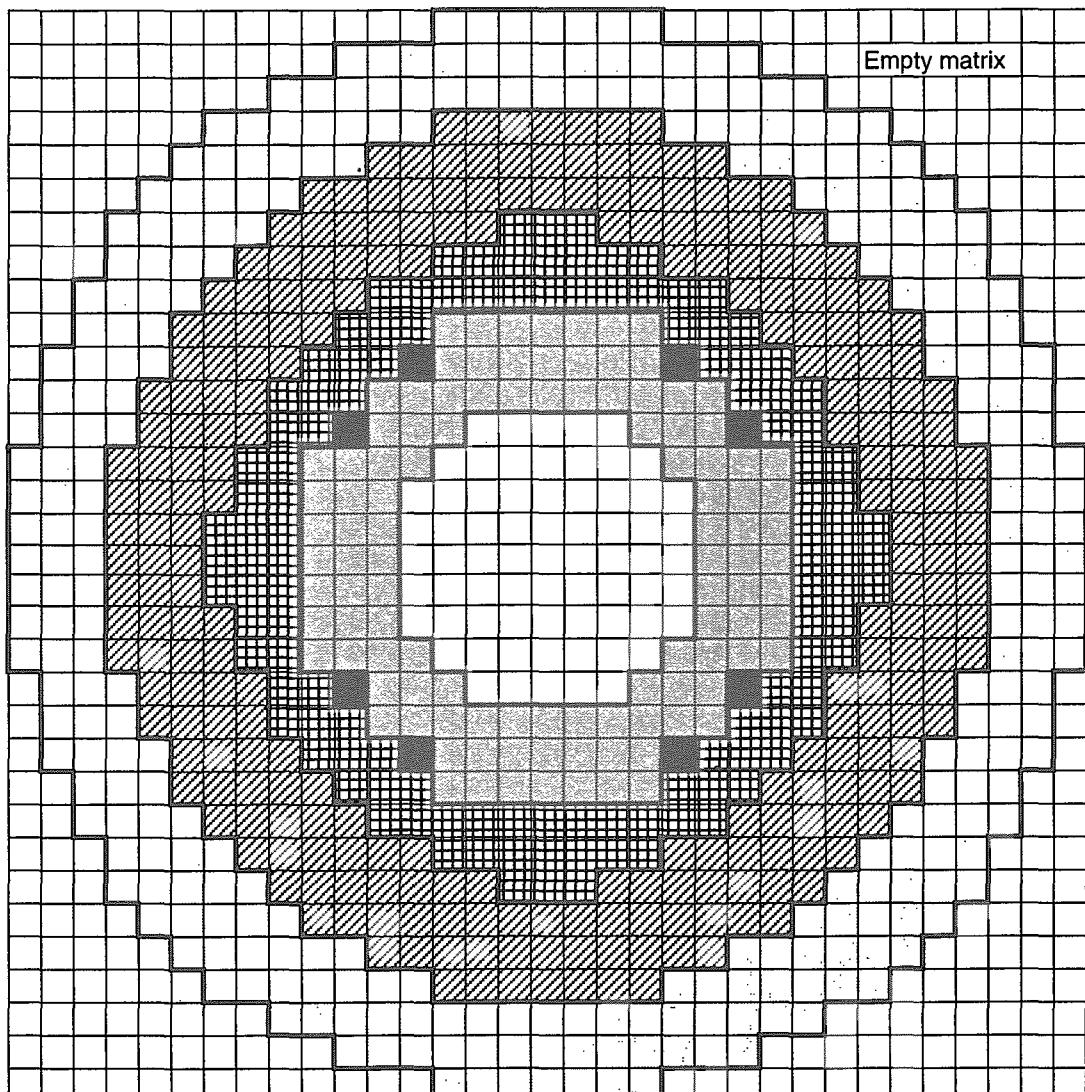


Note

Pu : 92% fissile plutonium metal (SS clad), 1/16"t
 EU19: 19% enriched uranium metal
 DUO₂: Depleted uranium di-oxide, 1/4"t
 Na : Sodium (SS clad) 1/4"t
 Al-void: Aluminium metal with void, 1/8"t

EU93 : 93% enriched uranium metal, 1/16"t
 NU : Natural uranium metal
 AlN : Aluminium nitride, 1/16"t
 Al₂O₃ : Aluminium oxide
 SS : Stainless steel

Fig. 1 Cell patterns of the each fuel cell in the XX-2 core



Fixed and movable side

Number of drawers		
□	T2N	69
■	MOD	108
▨	EUD	120
■	SCR	8
▨	SB	256
□	DUB	292

Fig. 2 Horizontal cross section of the XX-2 core

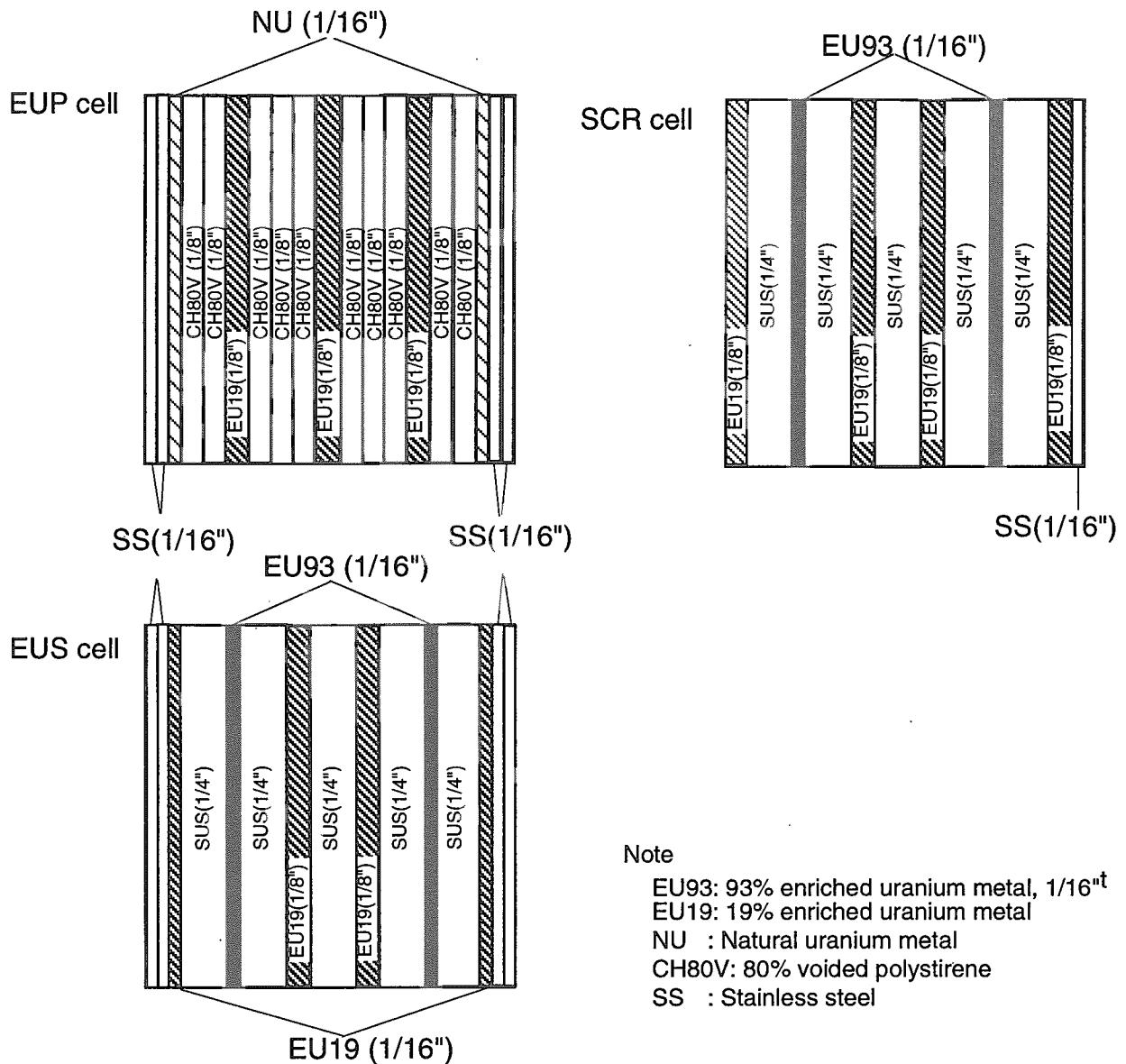


Fig. 3 Cell patterns of the each fuel cell in the XXI-1D2 core

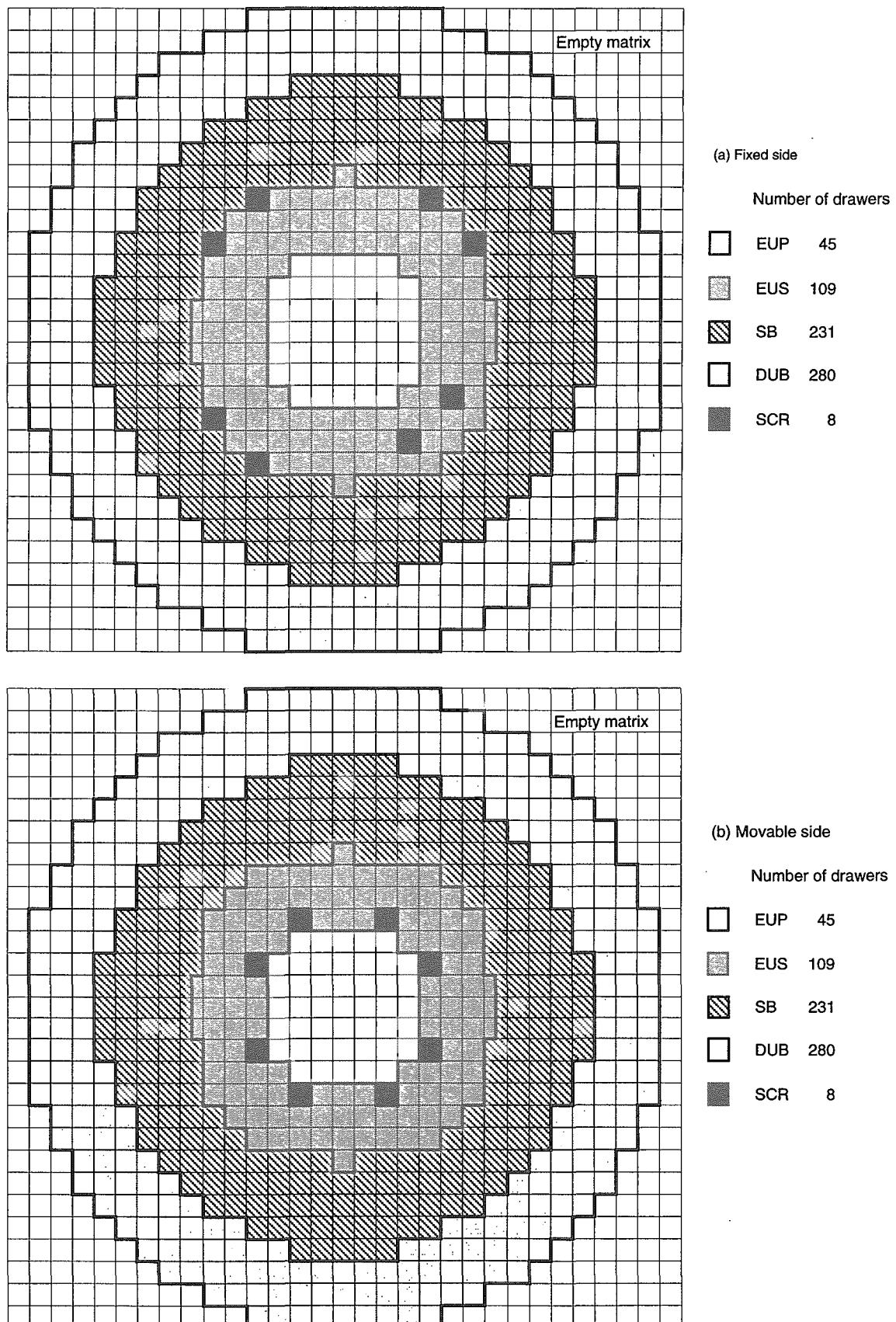


Fig. 4 Horizontal cross section of the XXI-1D2 core

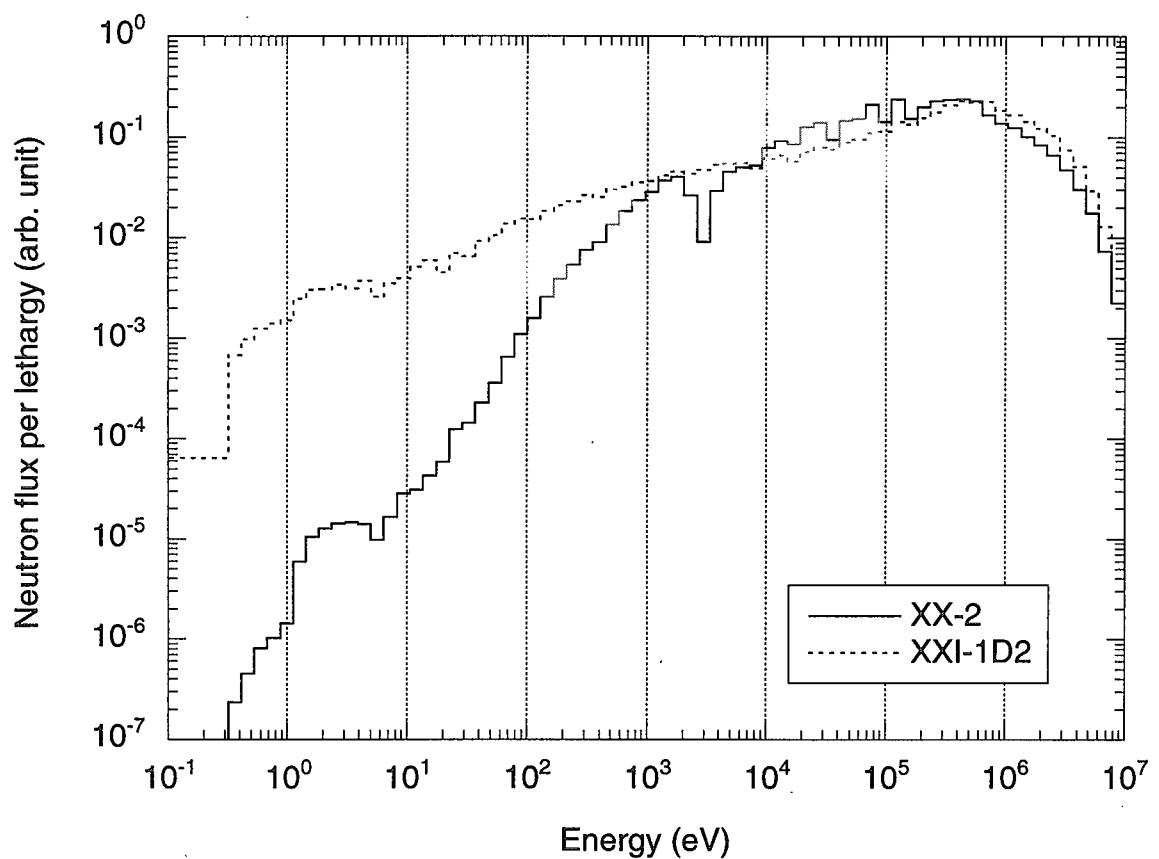


Fig. 5 Comparison of the neutron spectra at the core center between the XXI-1D2 and XX-2 cores

3. 解 析

本研究では、FCAにおいて標準的に用いられている解析手法（FCA calc.）を基本計算とし、その予測精度を評価する。また、XXI-1D2炉心は高速炉スペクトルより軟らかいスペクトル場を持つ体系であるため、熱中性子炉解析のために開発されたSRACシステムを用いた解析（SRAC calc.）を行い、これまでドップラー反応度価値の解析にあまり用いられていないかったSRACによる計算の予測精度の傾向を把握する。以下、基本計算およびSRACを用いた解析について順に説明する。

3.1 解析手法

3.1.1 基本計算

・核データ・ライブラリー

本計算には、核データJENDL-3.2¹⁶⁾にもとづく高速炉解析用70群定数セットJFS-3-J3.2を用いた。JENDL-3.2にないエルビウムについては、JENDL-3.3¹⁷⁾により補った (¹⁶²Er, ¹⁶⁴Er, ¹⁶⁶Er, ¹⁶⁷Er, ¹⁶⁸Er, ¹⁷⁰Erの6核種)。なお、当JFS-3-J3.2ライブラリーは平成13年度に見直されたもの¹⁸⁾である。

・セル計算

SLAROMコード¹⁹⁾を用いて炉心各領域のセル計算を1次元平板モデル（無限配列セル）にて行い、70群均質化断面積を作成した。

ドップラーサンプルの断面積の計算では、サンプル領域（ミート部）及びカプセル領域（ステンレス製被覆管や加熱容器等の実験装置を均質化したもの）の周囲を炉心燃料（T2NセルもしくはEUPセル）を均質化した領域が囲む3領域1次元無限円筒モデルとし、サンプルおよびカプセル領域の実効断面積を作成した。室温（293K）の他に、サンプル領域に含まれる核種の温度を300、550、800°Cの各温度点（それぞれ573K、823K、1073K）に変えた場合についても実効断面積を作成した。その際、SLAROMコードのほかに超微細群衝突確率計算コードPEACO-X⁸⁾を用いた。ただし、現時点ではPEACO-Xコード用断面積データセットにエルビウムとトリウムのデータが未整備であるため、これらサンプルについてはSLAROMコードのみを用いた。PEACO-Xでは、衝突確率法に基づき、100keVから0.2eVのエネルギー範囲を151,700群の微細群構造で各領域の中性子束を計算するため、サンプルの周囲にある共鳴核種（炉心燃料中の²³⁸Uなど）とサンプル中の共鳴核種の間の共鳴の重なりによる共鳴遮蔽効果（あるいは共鳴干渉効果）を考慮することが出来る。これに対し、SLAROM等を用いて孤立円筒モデルでドップラーサンプルの断面積を作成する場合、共鳴干渉効果を正確に取り扱えずその効果が背景断面積 σ_0 に反映されないため、実際の遮蔽効果を考慮した場合の値よりも大きめとなる。よって遮蔽因子 $f(T, \sigma_0)$ が1に近くなり、結果的に大きめの実効断面積を与えることになる。

各ドップラーサンプルおよびカプセルの原子数密度をTable 6に示す。原子数密度の計算に当たり、Er、WおよびThO₂サンプルについては、ペレット長さを15.0cmに統一し、体積とサンプル

重量から原子数密度を求めた。Erサンプルでは、天然エルビウムを構成する6核種それぞれの同位体存在比により原子数密度を求めた。ウランサンプルについては、直径を2.5cm ϕ として原子数密度を求めた。Empty Canのサンプル領域（ミート部）は本来空洞であるが、計算上はステンレス製被覆管に含まれる核種をサンプル領域にスマアした原子数密度とした。

なお、オリジナルのSLAROMコードでは、アクチノイド核種以外については、平均弦長により形状を考慮した自己遮蔽因子による実効断面積の計算ができないため、タンゲステンとエルビウムについてもアクチノイド核種と同様の計算を行うようプログラムを一部変更した。

・体系計算

体系計算には、拡散計算コードCITATION^{20),21)}を用いた。室温(293K)の各サンプルについて、炉心中心に置いた2次元RZ体系としエネルギー70群にて行った。各炉心のR-Zモデル図をFig. 6およびFig. 7に示す。XXI-1D2炉心では、制御・安全棒(SCR)がFM非対称であるため、R-Zモデル化する際、SCRのR方向位置を全8組の平均位置とした。

拡散係数には、Benoistの定義²²⁾による方向依存拡散係数を用い、各方向について以下のように指定した。

$$D_R = (D_{\text{(垂直)}} + D_{\text{(平行)}}) / 2$$

$$D_z = D_{\text{(垂直)}}$$

・摂動計算

ドップラー反応度価値 $\rho_{\text{Doppler}}(T)$ を求めるために、体系計算によって得られた中性子束および随伴中性子束を用い、摂動計算コードPERKY²³⁾を用いて1次摂動計算を行った。摂動反応度は、室温(293K)のサンプルを他の温度点(573K, 823K, 1073K)のサンプルに置換することにより求めた。

室温サンプル反応度価値 ρ_{sample} については、室温サンプルをEmpty canに置換した際の反応度価値を1次摂動により計算し、符号を逆転した。なお、後述するように、XXI-1D2炉心では1次摂動計算では、計算精度が悪いため1次摂動計算の他に厳密摂動計算も行った。その際、サンプルの断面積にはPEACO-Xコードにより計算したものを用いた。ただし、ErおよびThO₂サンプルについてはSLAROMコードにより計算したものを用いた。

・輸送補正計算

従来、²³⁸Uサンプルのドップラー反応度価値の解析には主に拡散計算を用いてきたが、今回実験に用いた共鳴物質は1keV以下のエネルギー領域に大きな共鳴断面積をもつため、低エネルギー領域における寄与が大きいXXI-1D2炉心に対して、輸送計算を行い拡散計算による摂動計算結果に補正を施すこととした。また、比較のため、XX-2炉心においても同様に輸送補正を施した。ただし、XX-2炉心では800°C(1073K)のみとした。

輸送計算では、輸送計算コードシステムDANTSYS²⁴⁾のTWODANTを用い、RZ70群にて計算し

た。全断面積 Σ_t の代わりに輸送断面積 Σ_{tr} を用いた。サンプルの断面積にはPEACO-Xコードにより計算したものを用いた。ただし、ErおよびThO₂サンプルについてはSLAROMコードにより計算したものを用いた。体系計算を行った後に摂動計算コードSNPERT²⁵⁾を用いて1次摂動計算を行い、ドップラー反応度価値を求めた。

輸送計算と統一をとるため、方向依存拡散係数を用いず、全方向について等方拡散係数D=1/(3 Σ_{tr})を用いた拡散計算をCITATIONコードにより行った。拡散係数の相違点のほか、計算方法は前述の方向依存拡散係数を用いた拡散計算と同じである。摂動計算コードPERKYを用いて1次摂動計算を行い、ドップラー反応度価値を求めた。

これら輸送計算と等方拡散係数を用いた拡散計算に基づき求められたドップラー反応度価値の比を輸送補正係数とし、前述の方向依存拡散係数を用いた拡散計算に基づくドップラー反応度価値に乗じた。

3.1.2 SRACを用いた解析

群定数セットにJENDL-3.2断面積ライブラリーに基づくSRAC用ライブラリー（パブリック・ライブラリー）を用い、SRAC95¹²⁾により基本計算と同様の計算を行った。本来、パブリック・ライブラリーは107群構造であるが、基本計算との比較を念頭に、ユーザー・ライブラリーとして高速群全域について等レサジー幅0.25としたエネルギー101群構造を選択した。Thermal cutt-off エネルギーは0.68256 eVとした。また、JENDL-3.2にないエルビウムについては、基本計算と同様に¹⁶²Er, ¹⁶⁴Er, ¹⁶⁶Er, ¹⁶⁷Er, ¹⁶⁸Er, ¹⁷⁰Erの6核種についてJENDL-3.3により補った。

・セル計算

基本計算同様、炉心各領域のセル計算を無限配列セルにて行った。実効微視的断面積作成には、NR近似に基づくf-table内挿法による方法を用い、衝突確率計算ルーチンにより炉心燃料セルの均質化を行った。

ドップラーサンプルの断面積の計算では、サンプルの周囲に炉心領域を配置した1次元円筒モデルでサンプルの自己遮蔽効果を考慮した実効断面積を作成した。その際、(1) f-table 内挿法のみによる方法と(2) 共鳴エネルギー領域（エネルギー領域：961eV～cut off）で超詳細エネルギー群衝突確率計算ルーチンPEACOを用いる方法の二通りの方法を用いた。本セル計算の(2)では、基本計算よりエネルギー領域の上限が低いほか、レサジー幅も若干大きい。

・体系計算および摂動計算

各サンプルについて、CITATIONにより基本計算と同様の2次元RZ体系にてエネルギー101群拡散計算を行い、続いて摂動計算ルーチンにより一次摂動計算を行いドップラー反応度価値を計算した。なお、SRACシステムには方向依存拡散係数の選択は出来るものの、2次元RZ体系による拡散計算

では $D_R = (D_{\text{(垂直)}} + D_{\text{(平行)}}) / 2$ の選択肢がないため、等方の拡散係数 ($D=1/(3\Sigma_b)$) を使用した。

Table 6 Atomic number density of each Doppler sample ($\times 10^{24}$ atom/cm³)

Nuclide	Er	W	ThO ₂	U-metal	UO ₂
(Sample region)					
O			3.793E-2		4.157E-2
W		5.838E-2			
Er-162	4.177E-5*				
Er-164	4.909E-4				
Er-166	1.024E-2				
Er-167	6.992E-3				
Er-168	8.169E-3				
Er-170	4.552E-3				
(Er total	3.050E-2)				
Th			1.896E-2		
U-235				3.351E-4	1.503E-4
U-238				4.593E-2	2.063E-2
(Capsule region)					
Cr	5.322E-3	5.322E-3	5.322E-3	5.185E-3	5.185E-3
Fe	1.938E-2	1.938E-2	1.938E-2	1.888E-2	1.888E-2
Ni	3.588E-3	3.588E-3	3.588E-3	3.496E-3	3.496E-3

* Read as 4.177×10^{-5}

Table 6 Atomic number density of each Doppler sample ($\times 10^{24}$ atom/cm³)
(Continued)

Nuclide	Empty Can	
	for Er, W and ThO ₂ samples	for U samples
(Sample region)		
Cr	2.703E-3*	2.368E-3
Fe	9.685E-3	8.485E-3
Ni	1.261E-3	1.105E-3
(Capsule region)		
Cr	5.322E-3	5.185E-3
Fe	1.938E-2	1.888E-2
Ni	3.588E-3	3.496E-3

* Read as 2.703×10^{-3}

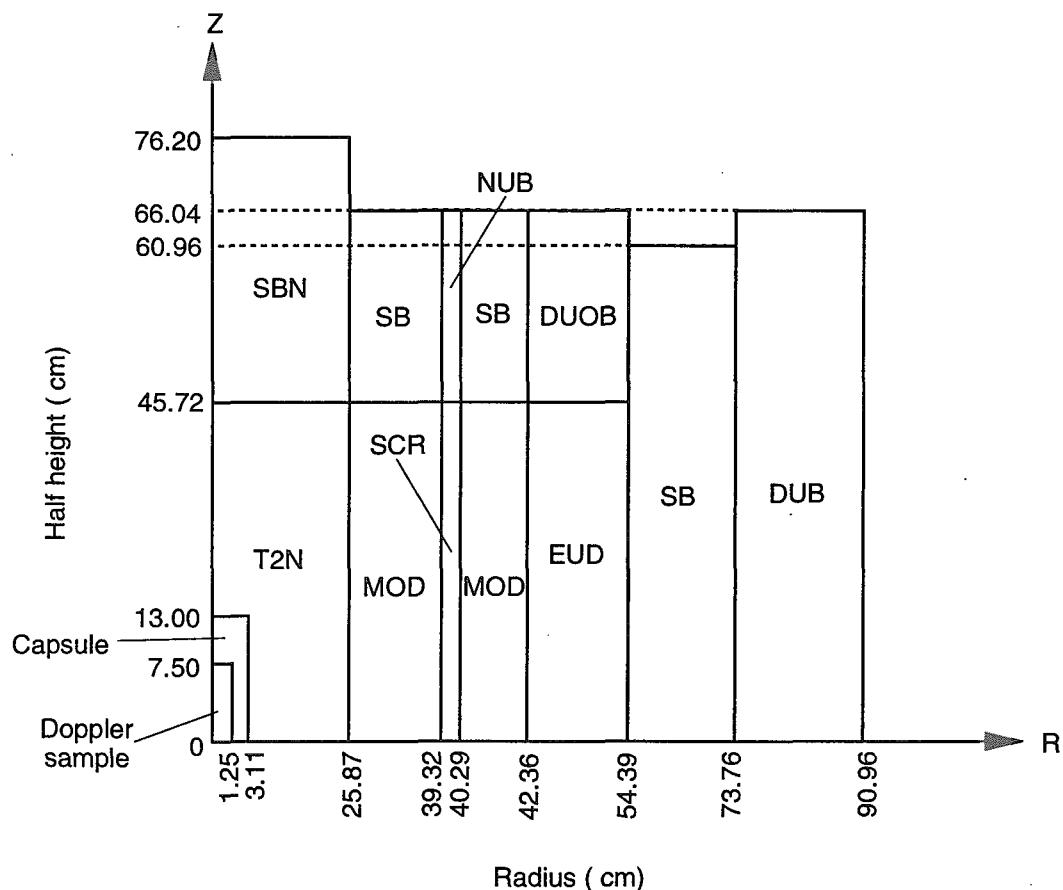


Fig. 6 RZ-model of the XX-2 core (with the Doppler effect measurement devices)

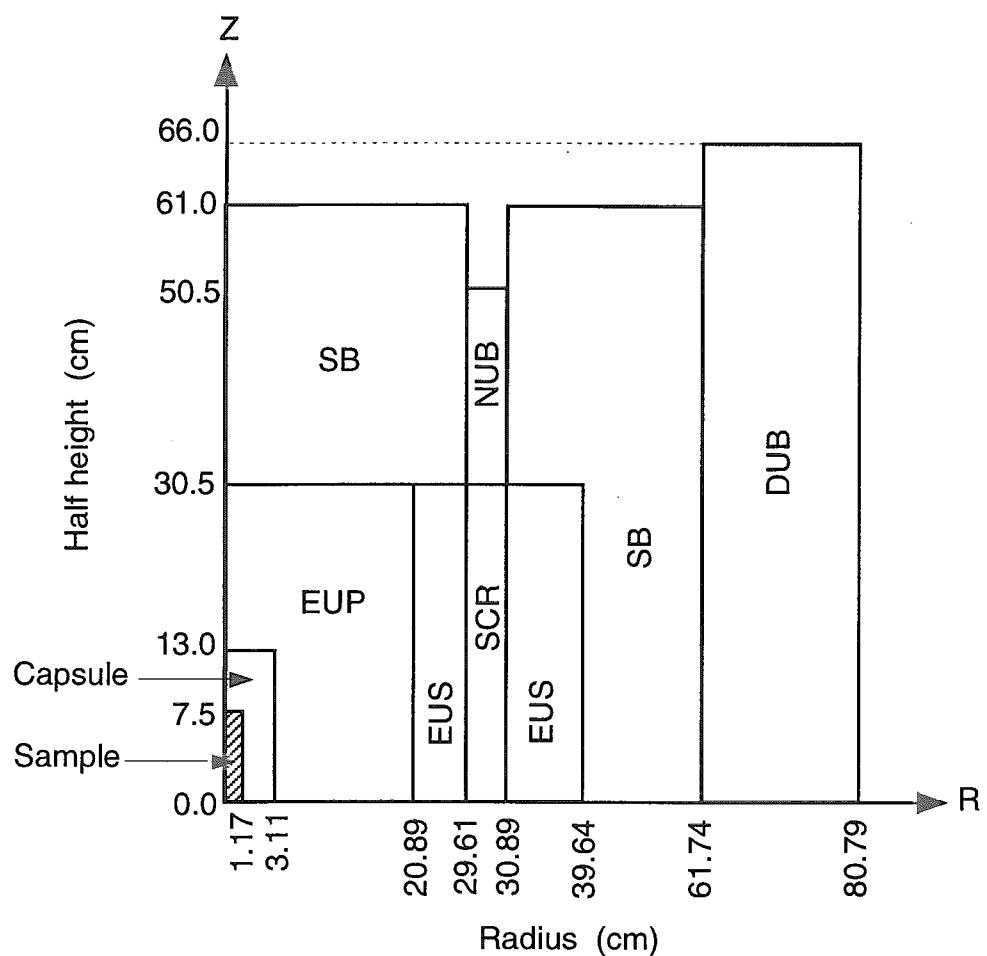


Fig. 7 RZ-model of the XXI-1D2 core (with the Doppler effect measurement devices)

3.2 解析結果

3.2.1 基本計算の解析結果

a) ドップラー反応度価値

拡散計算に基づく基本計算の解析結果（C/E値）をXX-2炉心およびXXI-1D2炉心についてそれぞれTable 7 およびTable 8に示す。

XX-2炉心では、WサンプルのC/E値が他のサンプルに比べて小さいが、ほぼ実験誤差の範囲内で実験値と計算値はよく一致している。

XXI-1D2炉心では、全サンプルについて数%～10数%の過大評価となった。特にErサンプルでは11～16%の過大評価となった。300eV以下の比較的低エネルギー範囲における断面積の計算精度に、あるいは中性子スペクトルの軟らかい炉心に対する体系計算の精度に問題があると考えられる。本研究では、体系計算の精度に着目し、拡散計算と輸送計算とを比較することにより輸送計算による改善点を調べた（後述）。

拡散計算では、中性子スペクトルの軟らかい体系においては、共鳴物質サンプルのドップラー反応度価値を過大評価する傾向があることが分かった。以下、両炉心の解析結果の違いについて調べる。

ドップラー反応度価値（293K→1073K）のエネルギー群ごとの寄与を両炉心で比較したものを、ドップラーサンプルの断面積計算にSLAROMを用いた場合についてFig. 8に示す。各サンプルとも、XXI-1D2炉心では、軟らかい中性子スペクトルのために、XX-2炉心より低エネルギーでの寄与が相対的に増加していることが分かる。特にThO₂サンプルでは、XX-2炉心ではほとんど寄与のない100eV以下の共鳴ピークの寄与が大きいことが分かる。ErやWサンプルにおいても300eV以下の寄与の増加が顕著である。軟らかい中性子スペクトル場では、これらエネルギー範囲の計算精度に注意する必要があるといえる。

次に、捕獲、散乱、漏れの各項の寄与を調べるために、XXI-1D2炉心の各サンプルについて、ドップラー反応度価値（293K→1073K）のエネルギー群ごとの寄与を各成分に分けてFig. 9に示す。Fig. 9より、各サンプルとも中性子捕獲反応によるドップラー反応度価値が支配的であることがわかる。参考までに、Er他、各サンプルについて、SLAROMにて求めた実効巨視的断面積Σ(293K)および温度変化（293K→1073K）による断面積の変化δΣ=Σ(1073K)-Σ(293K)をAppendixに示す。

詳細群効果

ここでは、PEACO-Xによる詳細群構造衝突確率計算の効果（以下、単に詳細群効果と呼ぶ）について、Wおよびウランサンプルの場合について調べる。

XX-2炉心では、WサンプルにおけるPEACO-Xによる詳細群効果（Table7および8中、P/S）はウランサンプルと同程度の+3～+5%であった。XXI-1D2炉心では、全般的にXX-2炉心より効果が小さく、1を下回る場合もある。両炉心におけるドップラー反応度価値（293K→1073K）のエネルギー群ご

との寄与についてWおよびU-metalサンプルの実効断面積計算に両計算コードを用いた場合の比較をそれぞれFig. 10およびFig. 11に示す。Fig. 10より、Wサンプルでは、両炉心とともに10keV付近から200eV付近までは、PEACO-Xを用いた方がドップラー反応度価値への寄与が大きく、XXI-1D2炉心では200eV付近を境に低エネルギー側ではPEACO-XがSLAROMを下回ることが分かる。XX-2炉心では、200eV以下のエネルギー範囲ではドップラー反応度に対する寄与がほとんどない。他方U-metalサンプルでは、Fig. 11より、両炉心ともに10keV付近から280eV付近までは、PEACO-Xを用いた方がドップラー反応度価値への寄与が大きく、XXI-1D2炉心では280eV付近を境に低エネルギー側ではPEACO-XがSLAROMを下回り、XX-2炉心でもわずかであるが280eV以下のエネルギー範囲ではPEACO-XがSLAROMを下回っている。

この傾向の要因を調べるために、摂動反応度を計算する際に用いる中性子束と断面積に着目し、XXI-1D2炉心のサンプル領域における中性子スペクトルと温度変化(293K→1073K)による吸収反応断面積の変化 $\delta \Sigma_a = \Sigma_a(1073K) - \Sigma_a(293K)$ について、サンプル断面積計算にPEACO-Xを用いた場合とSLAROMを用いた場合の比をFig. 12に示す。Fig. 12より、中性子スペクトルより $\delta \Sigma_a$ の方がPEACO-XとSLAROMの比が相対的に大きく、両計算コードを用いたドップラー反応度価値の差異の主要因であることが分かる。中性子スペクトルには、Wサンプルで巨大共鳴ピークのある20eV付近で大きな違いが見られるが、このエネルギー領域ではドップラー反応度価値に対する影響は小さい。

以下、温度変化による断面積変化 $\delta \Sigma_a$ について詳しく調べる。Fig. 12より、Wサンプルの $\delta \Sigma_a$ は、10keV付近から167eVまでエネルギーが低いほどPEACO-X/SLAROMの比が1.0より大きくなり、167eVを境にして低エネルギー側では、逆にSLAROMの方がPEACO-Xより大きな $\delta \Sigma_a$ を与えるようになることが分かる。U-metalサンプルの $\delta \Sigma_a$ は、100keVから数百eV付近までPEACO-Xの方がSLAROMより大きな $\delta \Sigma_a$ を与え、より低エネルギー側ではSLAROMの方がPEACO-Xより大きな $\delta \Sigma_a$ を与えることが分かる。つまり、Wでは167eV付近を境に、²³⁸Uでは275eV付近を境に、無限希釈断面積に乘じる遮蔽因子 $f(1073K, \sigma_0)$ と $f(293K, \sigma_0)$ の差として求められるSLAROMによる $\delta \Sigma_a$ とPEACO-Xにより直接的に求めた $\delta \Sigma_a$ の大小関係が逆転している。 $f(293K, \sigma_0)$ を基準に考えるとすれば、f-tableのエネルギー依存により、あるエネルギー値を境に高エネルギー側では $f(1073K, \sigma_0)$ が小さく、低エネルギー側では $f(1073K, \sigma_0)$ が大きく(1に近く)計算されていると考えられる。

次に、293Kと1073Kでの巨視的吸収断面積のSLAROMとPEACO-Xを用いた場合の比較をこれらサンプルについてFig. 13およびFig. 14に示す。これらの図より、U-metalサンプルでは全エネルギー範囲でPEACO-Xの方がSLAROMより小さな断面積を与えている。これは、孤立円筒モデルとなるSLAROMに対して、PEACO-Xでは炉心燃料中の²³⁸Uによる共鳴遮蔽効果を考慮することに出来る(あるいは、SLAROMでは、 σ_0 が大きく見積もられ、 $f(T, \sigma_0)$ が1に近く大きな σ を与える)ためである。他方、Wサンプルでは、約30eV以下ではU-metalサンプルと同様にPEACO-Xの方がSLAROMより小さな断面積を与えているが、約30eV以上では逆にPEACO-Xの方がSLAROMより大きな断面積を与えていることが分かる。これについては、今後、JFS-3-J3.2に備わるタンクステンの遮蔽因子

(f-table)、今回改良を施したSLAROMにおける背景断面積と遮蔽因子の計算、あるいはPEACO-Xにおける実効断面積計算について検討する必要があると考えられる。

以上より、 $\delta \Sigma_a$ の差異の方が中性子スペクトルの差異以上にドップラー反応度価値に大きく影響を及ぼし、かつ、XXI-1D2炉心では中性子スペクトルが軟らかいため、XX-2炉心ではほとんど寄与の無い167eV以下のエネルギー範囲でのSLAROMとPEACO-Xの $\delta \Sigma_a$ の違いによる効果（PEACO-Xの方が小さいドップラー反応度価値を与える効果）が現れ、エネルギー積分の結果詳細群効果がXX-2炉心より小さくなつたといえる。

輸送補正

XX-2およびXXI-1D2炉心での拡散計算によるドップラー反応度価値に輸送補正を施した結果をTable 9に示す。輸送補正量は、各サンプルともXX-2炉心よりXXI-1D2炉心の方がわずかに大きく、XX-2炉心ではErサンプルで-10%、Wサンプルで-7%、ThO₂サンプルで-3%となつたのに対し、XXI-1D2炉心では、Erサンプルで-13%、WおよびThO₂サンプルではほぼ一様に-7%となつた。ウランサンプルについても、XX-2炉心では-5~-3%、XXI-1D2炉心では-7~-5%となつた。高速炉体系のXX-2炉心においても、輸送効果は無視できないといえる。輸送補正の結果、XX-2炉心では、共鳴物質サンプルのC/E値は0.87~0.92となり、いずれも拡散計算に比べて1.0から遠ざかりThO₂サンプルを除いて実験誤差の範囲を超えて過小評価となつた。XXI-1D2炉心では、共鳴物質サンプルのC/E値は0.88~1.04となり、Wサンプルの300°Cを除いて実験誤差の範囲内で計算値は実験値とほぼ一致するようになった。ウランサンプルについては、輸送補正の結果は両炉心とともに実験誤差の範囲内で計算値は実験値と一致した。今後、ErおよびThO₂サンプルについてもPEACO-Xを用いてサンプルの実効断面積の計算を行い、ウランサンプルと同程度の詳細群効果が得られC/E値が1.0に近づくかどうか調べる必要がある。

ドップラー反応度価値(800°C)のエネルギー群ごとの寄与を輸送計算と拡散計算(拡散係数D=1/(3Σ_{tr}))で比較したものを両炉心についてFig. 15およびFig. 16に示す。また、各サンプルについて、ドップラー反応度価値に主に寄与する10keVから10eVまでの各群毎に輸送計算と拡散計算のドップラー反応度価値(800°C)の比をとったものをFig. 17に示す。これらの図より、両炉心において全般的に輸送計算の方が小さめの値を与えており、また、低エネルギー側ほどその度合いが大きいことが分かる。これは、輸送計算による中性子スペクトルの勾配が拡散計算よりも大きいためと考えられる。XXI-1D2炉心の方がわずかに輸送の効果が大きいことが分かる。ThO₂サンプルとU-metalサンプルは非常に似た分布となっているが、Erサンプル、Wサンプルの順に他のサンプルより相対的に輸送と拡散の差が大きいことが分かる。また、XXI-1D2炉心のErサンプルでは、100eVにおいて輸送計算の方が逆に拡散計算より大きな値を与えている。Erサンプルについて、輸送計算と拡散計算によるドップラー反応度価値の中性子捕獲成分と中性子漏洩項のエネルギー群ごとの寄与をFig. 18に示す。Fig. 18より、中性子捕獲成分では図中の全エネルギー範囲で輸送計算の方が絶対値が小さく、中性子漏洩の成分が正負逆転していることが分かる。中性子漏洩項の違いにより、

100eVにおいて輸送計算の方が逆に拡散計算より大きな値を与えていたことが分かった。なお、Fig. 17では、Wサンプルでは、巨大共鳴ピークのある20eV付近では輸送計算と拡散計算の値が大きく異なるが、このエネルギー領域ではドップラー反応度価値に対する影響は小さい。

輸送計算による補正効果に寄与する要因として、1) エネルギースペクトル、2) サンプル領域における局所的な中性子束分布、3) 摂動分母が挙げられる。ここで、摂動分母における効果は炉心全体における中性子束分布の違いによる。以下では、輸送補正の比較的大きなXXI-1D2炉心において、これらの要因を詳しく調べる。

サンプル中の中性子スペクトル（エネルギー積分値で規格したもの）について各群毎に輸送計算と拡散計算の比をとったものをFig. 19に示す。Fig. 19より、ドップラー効果に寄与する10keV～10eVのエネルギー範囲では、いずれのサンプルについても低エネルギー側ほど輸送計算の方が中性子束が相対的に小さくなる傾向が見られる。特にErサンプルでは、数百eV付近と100eV付近において、他のサンプルより中性子束比が小さいことが分かる。WサンプルとThO₂サンプルはErサンプルより傾きが小さく、Fig. 17の結果と同様の傾向である。なお、Erサンプルでは、6eV付近において輸送計算と拡散計算の値が大きく異なるが、このエネルギー領域ではドップラー反応度価値に対する影響は小さい。

次に、サンプル領域における局所的な中性子束分布の効果について調べる。輸送計算と拡散計算による軸方向（炉心中心軸）中性子束分布の比較をErサンプルおよびU-metalサンプルについて、Fig. 20に示す。また、径方向（炉心中心面）中性子束分布の比較をErサンプルおよびU-metalサンプルについて、Fig. 21に示す。ここで、Erサンプルについてはドップラー反応度価値への寄与が大きいエネルギー第42群（353eV～275eV）とし、U-metalサンプルについては同第38群（961eV～748eV）とした。軸方向中性子束分布では、両サンプルともに中心より7.5cmまで（メッシュ点数6）のサンプル領域において大きな違いがみられる。Erサンプルでは、サンプル領域での中性子束分布の落ち込みかたが顕著であり、その程度は輸送計算の方が拡散計算より約10%大きい。U-metalサンプルにおいても輸送計算の方が拡散計算より約4%サンプル領域での中性子束分布の落ち込みが大きい。径方向中性子束分布については、サンプル領域のメッシュ点数は1点であるが、軸方向中性子束分布の場合と同様にErサンプルでは約10%、U-metalサンプルでは約4%の違いがみられる。

また、摂動分母の計算値を各サンプルについて調べたところ、拡散計算と輸送計算に違いはほとんど見られなかった。

以上より、輸送補正は、両炉心とも拡散計算に対して絶対値を小さくする効果があり、中性子スペクトルの軟らかいXXI-1D2炉心の方がその効果が大きいことが分かった。その主要因は、サンプル領域における中性子スペクトルとサンプルおよびその近傍での中性子束分布の計算精度向上にあるといえる。

感度解析

Erサンプルの実効断面積計算に用いた6核種のうち、ドップラー効果に対する核種毎の寄与割合

を調べるために、捕獲反応断面積のドップラー反応度価値（800°C）に対する感度係数を求めた。感度係数の計算には、高速炉の核特性量に対する感度係数計算を目的として開発されたSAGEPコード²⁶⁾を用いた。6核種のうち、個数密度と共に鳴断面積の点から主要な核種である¹⁶⁶Er、¹⁶⁷Erおよび¹⁶⁸Erを選択した。計算体系はXXI-1D2炉心とした。

ドップラー反応度価値に対する核種毎の寄与割合と寄与するエネルギー範囲の比較をFig. 22に示す。図より、ドップラー反応度価値に寄与するエネルギー範囲全域において¹⁶⁷Erの感度係数が最も大きいのが分かる。天然エルビウムの場合、¹⁶⁷Erの断面積がドップラー反応度価値の計算精度に及ぼす影響が最も大きいといえる。

次に、¹⁶⁷Erのドップラー効果に対する感度係数をXXI-1D2炉心とXX-2炉心について比較したものを見Fig. 23に示す。図より、XXI-1D2炉心の方が200eV付近から30eVの低エネルギー側の成分が多いことが分かる。

b) サンプル反応度価値

拡散計算に基づく基本計算によるサンプル反応度価値の解析結果（C/E値）を両炉心についてTable 10に示す。

XX-2炉心では、ドップラー反応度価値と同様にWサンプルに対して過小評価となった。他のサンプルではほぼ実験誤差の範囲内で実験値と計算値はよく一致した。Wサンプルに対するドップラー反応度価値の過小評価の原因として、Wサンプルを含む体系に対する拡散計算の計算精度に問題があると考えられる。PEACO-Xの方が3~4%小さめの反応度価値を与えており、共鳴遮蔽効果を詳細に計算するPEACO-Xの方がSLAROMより実効断面積を小さく計算した結果であると考えられる。

XXI-1D2炉心では、拡散計算および1次摂動計算によるC/E値は、全般的に1.0と大きく異なるものとなった。特にErサンプルとWサンプルでは、他のサンプルに比較して計算結果が実験値と大きく異なる。Wサンプルでは符号も逆になっている。ThO₂サンプルでは15%の過小評価、U-metalサンプルについても15%以上の過小評価となった。詳細群効果（表中P/S）は、ウランサンプルにおいても10%前後と大きな値となった。XXI-1D2炉心では中性子スペクトルが軟らかく、低エネルギー側において詳細群計算による効果が大きいと考えられる。以下、XXI-1D2炉心でのサンプル反応度価値について詳細に調べる。

中性子漏洩項（Leakage）および非漏洩項（Non-leakage）それぞれの寄与をTable 11に示す。Table 11より、ErおよびWサンプルでは、漏洩項が他のサンプルに対して相対的に大きいことが分かる。Wサンプルでは、漏洩項の方が非漏洩項（絶対値）より大きいため、Totalの正負が逆転している。拡散および1次摂動計算では、漏洩項の計算精度がC/Eに大きく影響を及ぼしていることが分かる。

XXI-1D2炉心については、1次摂動計算ではサンプル反応度価値の計算精度が悪いため、以下、摂動体系（サンプルをEmpty Canに置き換えた体系）についても拡散計算を行い、摂動体系と非摂動体系（炉心中心：ドップラーサンプル）の中性子束を用い厳密摂動計算を行った。また、ドップラー反応度価値と同様に輸送補正を行った。以下の計算では、各サンプルの断面積にはPEACO-Xコードに

より計算したものを用いた（ただし、ErおよびThO₂サンプルについてはSLAROMコードにより計算したもの用いた）。

拡散計算および厳密摂動計算

厳密摂動計算の結果をTable 12に示す。厳密摂動と1次摂動の比（表中Exact/1st）をみると、ErおよびWサンプルでは厳密摂動計算により漏洩項が2桁小さくなっていることが分かる。各サンプルとも、厳密摂動計算によってC/E値はかなり改善され、共鳴物質サンプルについては10%以内の誤差で一致した。Fig. 24に拡散計算での1次摂動と厳密摂動の結果（エネルギーブレイクダウン）を比較する。10keV付近から低エネルギー側において厳密摂動による効果が見られる。各サンプルとも、共鳴ピークのあるエネルギー群において1次摂動と厳密摂動の値が異なる。特に、Erサンプルでは1eV以下において、Wサンプルでは20eV付近において、1次摂動計算での中性子漏洩項の計算に問題があるものと考えられる。

参考までに、非摂動体系と摂動体系の実効増倍率から求めたサンプル反応度価値（ $1/k_{\text{eff}}^{\text{non}} - 1/k_{\text{eff}}^{\text{pert}}$ ）をTable 12に併記した。厳密摂動計算より2~15%大きめの結果となったが、これは実効増倍率の計算誤差によるものと考えられる。

輸送計算および1次摂動／厳密摂動計算

ドップラー反応度価値での輸送補正と同様に、拡散係数に等方拡散係数（ $D=1/(3\Sigma_{tr})$ ）を用いた拡散計算による摂動反応度に対する輸送計算による摂動反応度の比として輸送補正係数を求めた。輸送および1次摂動計算によりサンプル反応度価値の計算を行った結果をTable 13に示す。Table 13より、Erサンプルでは約20%の過大評価、Wサンプルでは約30%の過小評価となったが、拡散および1次摂動計算よりかなり改善されたことが分かる。これらサンプルでは、特に中性子漏洩項での輸送補正効果が大きい。他方、ThO₂サンプルでは輸送効果は負の効果（-4%）となり輸送計算により、拡散計算の過小評価は解消されない。ErおよびWサンプルについて、Fig. 25に輸送計算と拡散計算（ $D=1/(3\Sigma_{tr})$ ）による1次摂動計算の結果（エネルギーブレイクダウン）を示す。Fig. 25より、Erサンプルでは、6eV付近（Fig. 19参照）および1eV以下の中性子束の違いがサンプル反応度価値の計算精度に大きく影響を及ぼしていることが分かる。Wサンプルでは、20eV付近において、大きな違いが見られる。

さらに摂動計算を厳密摂動とした場合の輸送計算結果をTable 14に示す。ただし、この場合、等方拡散係数を用いた拡散計算は行わず輸送計算のみ行った。厳密摂動計算では、全般的に1次摂動計算よりC/E値が1.0に近づいた。

以上のXXI-1D2炉心におけるサンプル反応度価値に関する解析結果（C/E値のみ）を一つの表にまとめると以下のようになる。ErサンプルおよびWサンプルでは、明らかに拡散/1次摂動計算に計算上の問題があるといえる。本実験体系でのドップラー反応度価値より低いエネルギー範囲での問題と

いえるが、今後、拡散計算による中性子束の計算精度について検討する必要がある。厳密摂動計算により全般的にC/E値は改善されており、拡散計算でも $10^4 \Delta k/k$ オーダーの反応度価値計算については充分適応できるといえる。なお、U-metalサンプルでは1次摂動計算では10%以上の過小評価となり、輸送および厳密摂動計算でも実験値との一致はあまりよくない。UO₂サンプルでは他のサンプルよりも全般的に実験値との一致がよい。

サンプル	C/E値			
	拡散/1次摂動	拡散/厳密摂動	輸送/1次摂動	輸送/厳密摂動
Er	0.24	1.04	1.19	1.11
W	-0.28	0.94	0.71	0.91
ThO ₂	0.85	0.90	0.82	0.87
U-metal	0.79	0.88	0.86	0.93
UO ₂	0.95	1.01	0.99	1.07

Table 7 Results of the analysis by the FCA calc. on the Doppler reactivity worth in the XX-2 core

Sample	Temperature	Expt. $\times 10^{-5}\Delta k/k$	Calc. $\times 10^{-5}\Delta k/k$		
			SLAROM ^a (C/E) ^d	PEACO-X ^b (C/E)	P/S ^c
Er	300	-0.73±13.6% ^e	-0.701 (0.96)	-	-
	550	-1.10±9.3%	-1.12 (1.01)	-	-
	800	-1.44±6.9%	-1.44 (1.00)	-	-
W	300	-0.55±18.8%	-0.465 (0.85)	-0.481 (0.88)	1.03
	550	-0.83±12.3%	-0.763 (0.92)	-0.797 (0.96)	1.04
	800	-1.13±9.5%	-1.01 (0.89)	-1.06 (0.94)	1.05
ThO ₂	300	-0.46±23.1%	-0.404 (0.87)	-	-
	550	-0.68±16.0%	-0.648 (0.95)	-	-
	800	-0.87±11.9%	-0.834 (0.96)	-	-
U-metal	300	-0.81±13.2%	-0.820 (1.01)	-0.839 (1.03)	1.02
	550	-1.27±8.3%	-1.31 (1.03)	-1.35 (1.06)	1.03
	800	-1.67±6.6%	-1.68 (1.01)	-1.77 (1.06)	1.05
UO ₂	300	-0.46±22.0%	-0.415 (0.91)	-0.432 (0.94)	1.04
	550	-0.66±16.0%	-0.664 (1.00)	-0.700 (1.05)	1.05
	800	-0.88±11.0%	-0.855 (0.97)	-0.927 (1.05)	1.08

a) The SLAROM code was used to calculate the effective cross sections of the Doppler samples

b) The PEACO-X code was used to calculate the effective cross sections of the Doppler samples

c) The ratio of the calculations between the PEACO-X and SLAROM code

d) Values in parentheses are the ratios between the calculated and experimental values.

e) Experimental error (relative error)

Table 8 Results of the analysis by the FCA calc. on the Doppler reactivity worth in the XXI-1D2 core

Sample	Temperature	Expt. $\times 10^{-5}\Delta k/k$	Calc. $\times 10^{-5}\Delta k/k$		
			SLAROM ^a (C/E) ^d	PEACO-X ^b (C/E)	P/S ^c
Er	300	-2.51±6.3% ^e	-2.79 (1.11)	-	-
	550	-3.93±4.0%	-4.52 (1.15)	-	-
	800	-5.07±3.3%	-5.89 (1.16)	-	-
W	300	-1.73±9.6%	-1.68 (0.97)	-1.65 (0.95)	0.98
	550	-2.75±6.0%	-2.79 (1.01)	-2.76 (1.00)	0.99
	800	-3.59±5.0%	-3.72 (1.04)	-3.74 (1.04)	1.01
ThO ₂	300	-1.53±10.2%	-1.54 (1.01)	-	-
	550	-2.36±6.5%	-2.53 (1.07)	-	-
	800	-3.11±5.0%	-3.36 (1.08)	-	-
U-metal	300	-2.14±8.4%	-2.30 (1.07)	-2.24 (1.05)	0.97
	550	-3.43±4.7%	-3.74 (1.09)	-3.68 (1.07)	0.98
	800	-4.60±3.9%	-4.89 (1.06)	-4.93 (1.07)	1.01
UO ₂	300	-1.31±13.1%	-1.39 (1.06)	-1.33 (1.02)	0.96
	550	-2.03±7.7%	-2.29 (1.12)	-2.21 (1.09)	0.97
	800	-2.74±6.0%	-3.02 (1.10)	-3.00 (1.09)	0.99

a) The SLAROM code was used to calculate the effective cross sections of the Doppler samples

b) The PEACO-X code was used to calculate the effective cross sections of the Doppler samples

c) The ratio of the calculations between the PEACO-X and SLAROM code

d) Values in parentheses are the ratios between the calculated and experimental values.

e) Experimental error (relative error)

Table 9 Results of the transport correction of the FCA calc. on the Doppler reactivity worth in the XX-2 and XXI-1D2 cores

Sample	Temperature (°C)	T. C. ^a		corrected C/E ^b	
		XX-2	XXI-1D2	XX-2	XXI-1D2
Er	300	-	0.873	-	0.99±6.3%
	550	-	0.873	-	1.03±4.0%
	800	0.902	0.873	0.90±6.9% ^c	1.04±3.3%
W	300	-	0.924	-	0.88±9.6%
	550	-	0.926	-	0.93±6.0%
	800	0.928	0.927	0.87±9.5%	0.97±5.0%
ThO_2	300	-	0.930	-	0.94±10.2%
	550	-	0.929	-	1.00±6.5%
	800	0.965	0.928	0.92±11.9%	1.00±5.0%
U-metal	300	-	0.931	-	0.97±8.4%
	550	-	0.931	-	1.00±4.7%
	800	0.949	0.930	1.01±6.6%	1.00±3.9%
UO_2	300	-	0.946	-	0.96±13.1%
	550	-	0.945	-	1.03±7.7%
	800	0.971	0.945	1.02±11.0%	1.03±6.0%

- a) Transport correction factor : the ratio between the transport calculation and the diffusion calculation using $D=1/(3\Sigma_p)$ as the diffusion coefficients.
- b) Corrected with the transport correction factor
- c) Experimental error (relative error)

Table 10 C/E values of the FCA calc. with the first order perturbation calculation on the sample reactivity worth measured in the XX-2 and XXI-1D2 cores

Sample	XX-2			XXI-1D2		
	SLAROM ^a	PEACO-X ^b	P/S ^c	SLAROM	PEACO-X	P/S
Er	1.01±1.4% ^d	-	-	0.24±0.6% ^d	-	-
W	0.90±1.6%	0.87±1.6%	0.96	-0.03±0.7%	-0.28±0.7%	9.93
ThO_2	0.97±2.8%	-	-	0.85±1.7%	-	-
U-metal	1.03±2.2%	1.00±2.2%	0.97	0.85±1.4%	0.79±1.4%	0.92
UO_2	0.98±3.5%	0.94±3.5%	0.96	1.09±2.9%	0.95±2.9%	0.87

- a) The SLAROM code was used to calculate effective cross sections of the Doppler samples
- b) The PEACO-X code was used to calculate effective cross sections of the Doppler samples
- c) The ratio of the calculations between the PEACO-X and SLAROM code
- d) Experimental error (relative error)

Table 11 The leakage and non-leakage terms of the sample reactivity worth in the XXI-1D2 core by the FCA calc.

Sample	Leakage term $\Delta k/k$		Non-leakage term $\Delta k/k$	
	SLAROM ^a	PEACO-X ^b	SLAROM	PEACO-X
Er	4.98E-4 ^d		-6.86E-4	
W	4.74E-4	6.22E-4	-4.58E-4	-4.62E-4
ThO_2	6.47E-6		-2.02E-4	
U-metal	2.39E-5	2.09E-5	-2.70E-4	-2.47E-4
UO_2	1.06E-5	9.41E-6	-1.52E-4	-1.33E-4

a) The SLAROM code was used to calculate microscopic cross sections of the Doppler samples

b) The PEACO-X code was used to calculate microscopic cross sections of the Doppler samples

c) Read as 4.98×10^{-4}

Table 12 The results of the calculation on the sample reactivity worth in the XXI-1D2 core by the FCA calc.

Sample	Diffusion & Exact perturbation $\Delta k/k$			$1/k' - 1/k^b$	
	Leakage (Exact/1st) ^a	Non-leakage (Exact/1st)	Total (Exact/1st)	C/E	C/E
Er	2.40E-6 ^c (0.005)	-8.24E-4 (1.20)	-8.21E-4 (4.39)	$1.04 \pm 0.6\%^d$	1.08
W	2.70E-6 (0.004)	-5.52E-4 (1.19)	-5.49E-4 (-3.43)	$0.94 \pm 0.7\%$	0.96
ThO_2	2.91E-6 (0.45)	-2.09E-4 (1.03)	-2.06E-4 (1.05)	$0.90 \pm 1.7\%$	1.04
U-metal	3.71E-6 (0.18)	-2.60E-4 (1.04)	-2.53E-4 (1.12)	$0.88 \pm 1.4\%$	0.96
UO_2	3.82E-6 (0.41)	-1.35E-4 (1.02)	-1.31E-4 (1.06)	$1.01 \pm 2.9\%$	1.15

a) Values in parentheses are the ratio between the exact and first order perturbation calculation

b) The sample reactivity worth was calculated with the change of k_{eff}

c) Read as 2.40×10^{-6}

d) Experimental error (relative error)

Table 13 The results of the transport correction on the sample reactivity worth in the XXI-1D2 core by the FCA calc.

Sample	Transport calculation $\Delta k/k$			C/E ^a
	Leakage (T/D) ^b	Non-leakage (T/D)	Total (T/D)	
Er	-1.68E-5 ^c (-0.030)	-6.09E-4 (0.89)	-6.26E-4 (5.03)	1.19±0.6% ^d
W	-8.84E-6 (-0.014)	-4.20E-4 (0.89)	-4.28E-4 (-2.59)	0.71±0.7%
ThO ₂	2.96E-6 (0.43)	-1.95E-4 (0.94)	-1.92E-4 (0.96)	0.82±1.7%
U-metal	3.16E-6 (0.15)	-2.59E-4 (1.01)	-2.56E-4 (1.09)	0.86±1.4%
UO ₂	3.14E-6 (0.32)	-1.38E-4 (1.00)	-1.35E-4 (1.05)	0.99±2.9%

a) C/E values of the diffusion calculation in Table 10 is multiplied by the T/D values of the Total in this Table

b) Values in parentheses are the transport correction factor : the ratio between the transport and diffusion calculations using $D=1/(3\Sigma_{tr})$ as the diffusion coefficients for both the calculations.

c) Read as 1.68×10^{-5}

d) Experimental error (relative error)

Table 14 The results of the exact perturbation calculation with the transport calculation on the sample reactivity worth in the XXI-1D2 core by the FCA calc.

Sample	Transport & Exact perturbation calculation $\Delta k/k$			1/k'-1/k ^b	
	Leakage (Exact/1st) ^a	Non-leakage (Exact/1st)	Total (Exact/1st)	C/E	C/E
Er	3.98E-6 ^c (-0.24)	-8.85E-4 (1.45)	-8.81E-4 (1.41)	1.11±0.6% ^d	0.93
W	5.72E-6 (-0.62)	-5.35E-4 (1.27)	-5.29E-4 (1.23)	0.91±0.7%	0.88
ThO ₂	3.24E-6 (1.10)	-2.04E-4 (1.04)	-2.00E-4 (1.04)	0.87±1.7%	0.87
U-metal	4.57E-6 (1.44)	-2.74E-4 (1.06)	-2.69E-4 (1.05)	0.93±1.4%	1.05
UO ₂	3.68E-6 (1.17)	-1.42E-4 (1.03)	-1.39E-4 (1.03)	1.07±2.9%	1.09

a) Values in parentheses are the ratio between the exact and first perturbation calculation

b) The sample reactivity worth was calculated with the change of k_{eff}

c) Read as 3.98×10^{-6}

d) Experimental error (relative error)

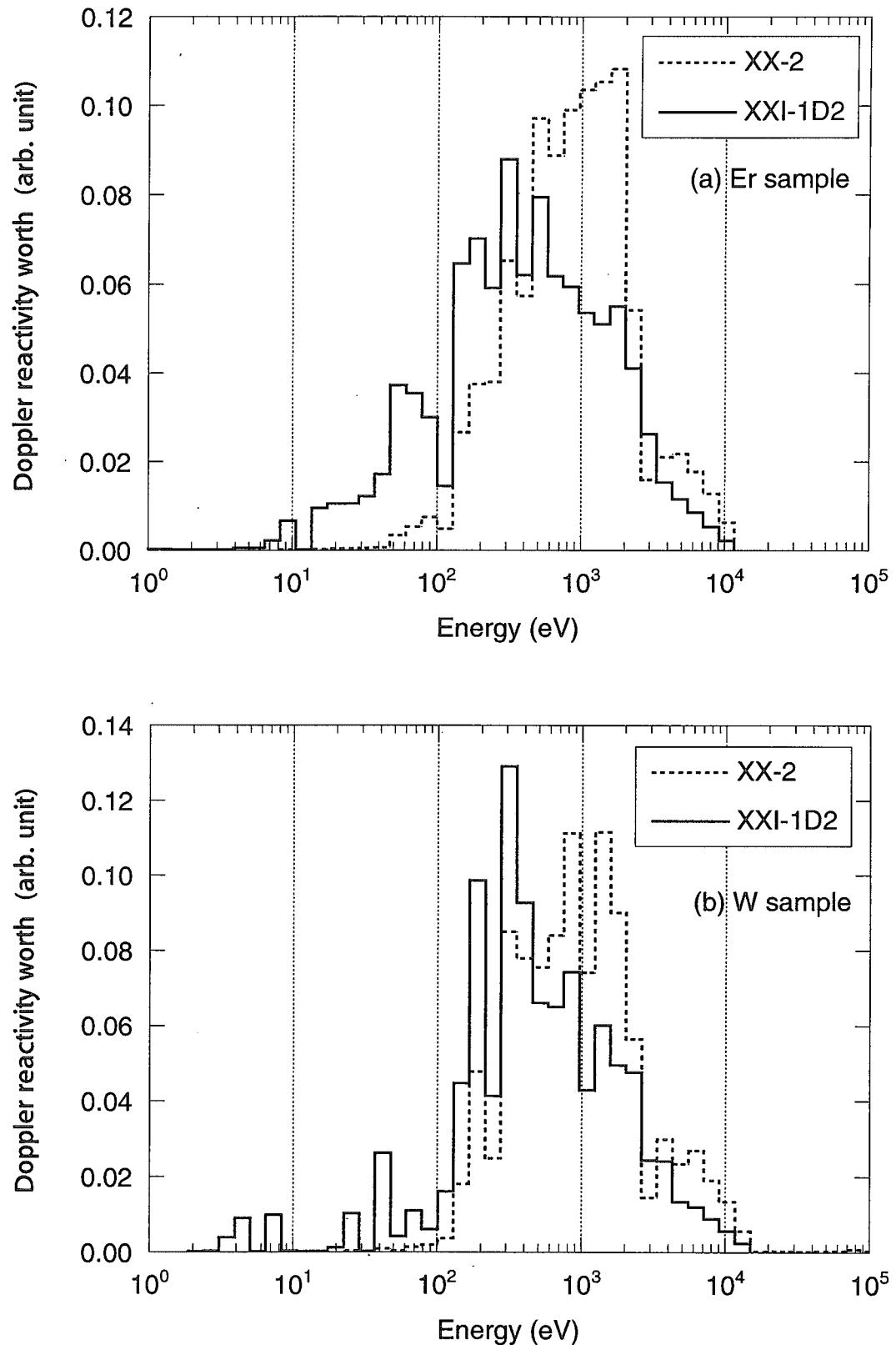


Fig. 8 Comparison of the energy breakdown of the Doppler reactivity worth ($293\text{K} \rightarrow 1073\text{K}$) between the XXI-1D2 and XX-2 cores

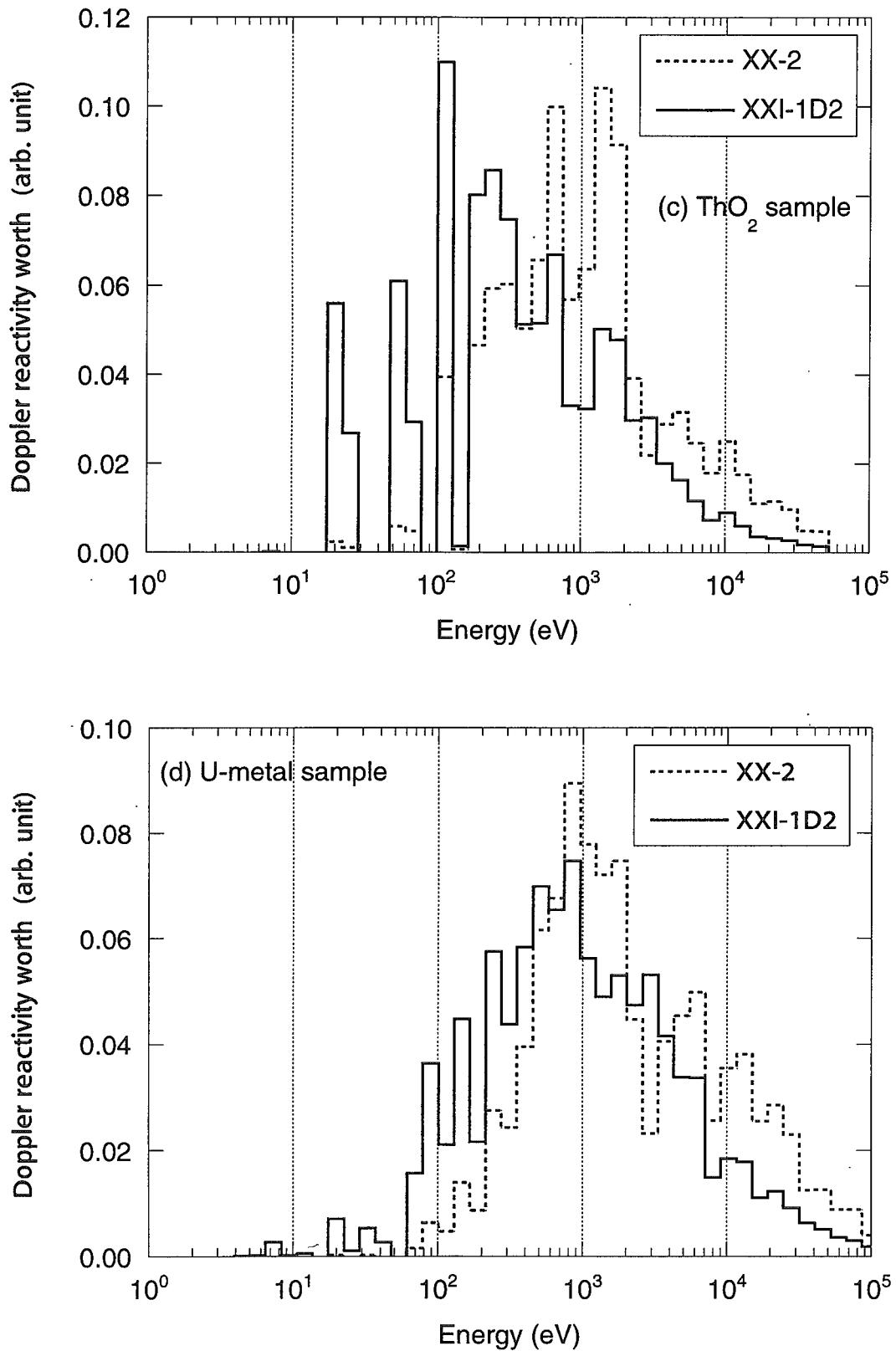


Fig. 8 Comparison of the energy breakdown of the Doppler reactivity worth (293K→1073K) between the XXI-1D2 and XXI-1D2 cores (continued)

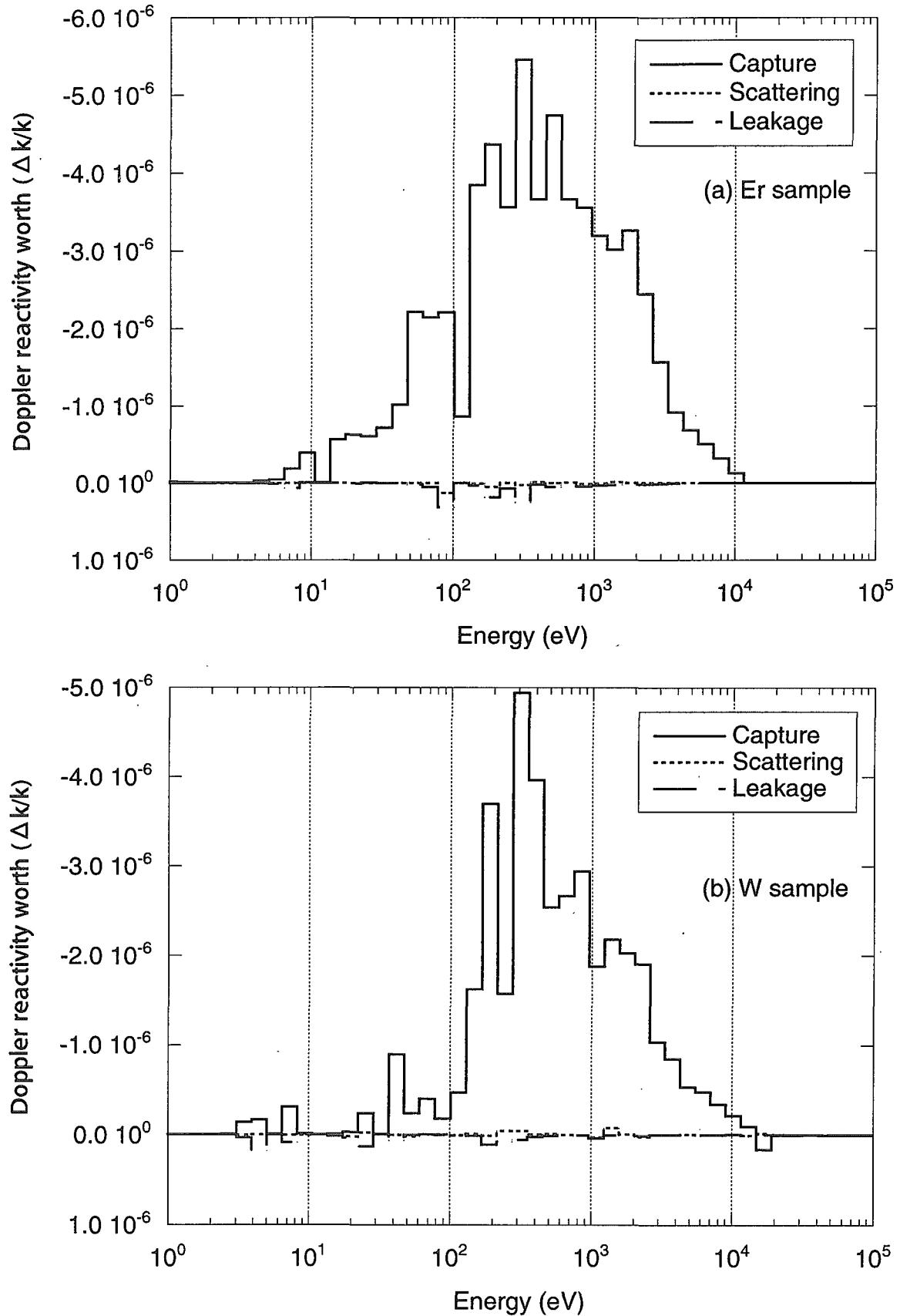


Fig. 9 Comparison of the energy breakdown among the capture, scattering and leakage terms of the Doppler reactivity worth ($293\text{K} \rightarrow 1073\text{K}$) of the Er sample

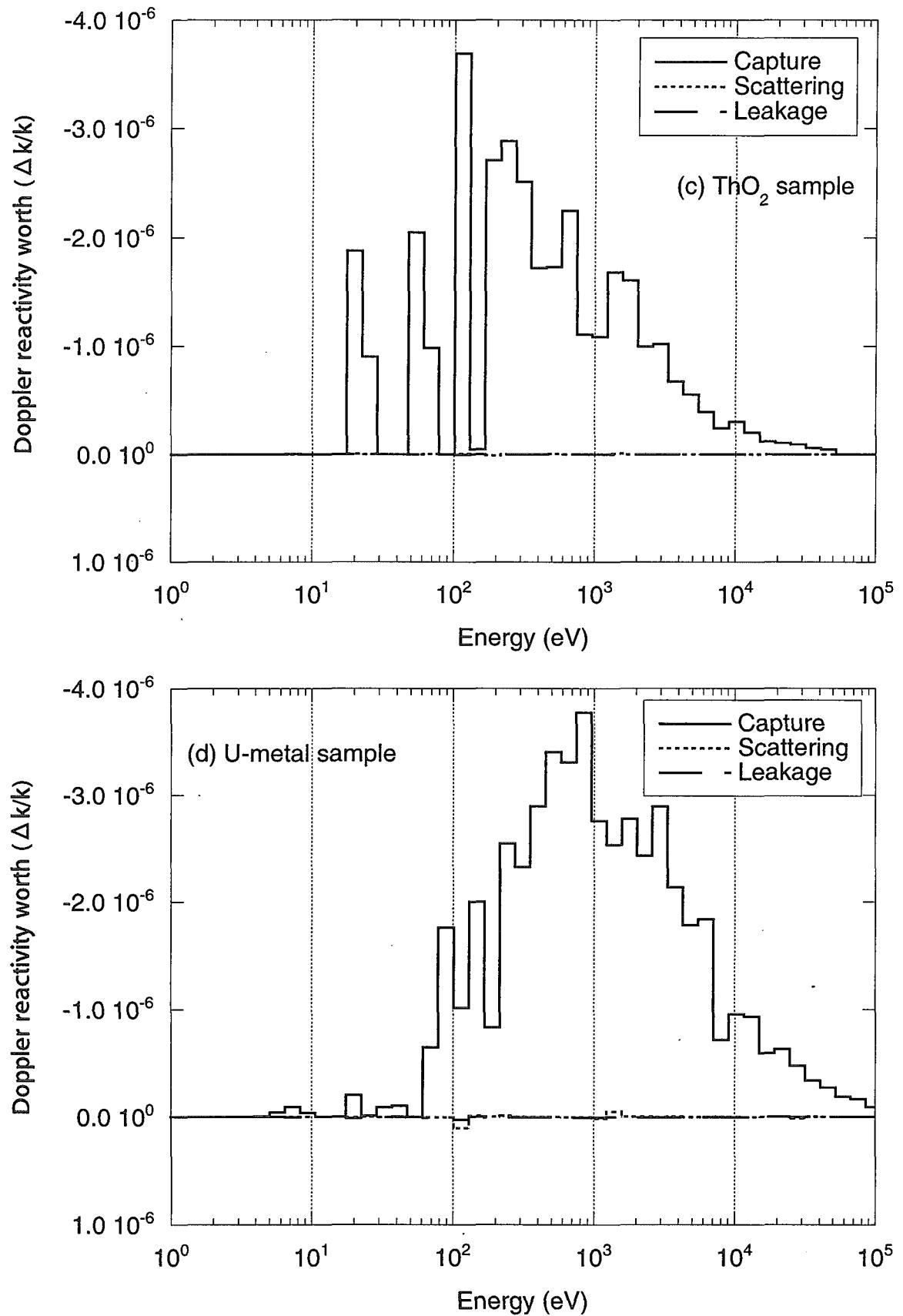


Fig. 9 Comparison of the energy breakdown among the capture, scattering and leakage terms of the Doppler reactivity worth (293K→1073K) of the Er sample (continued)

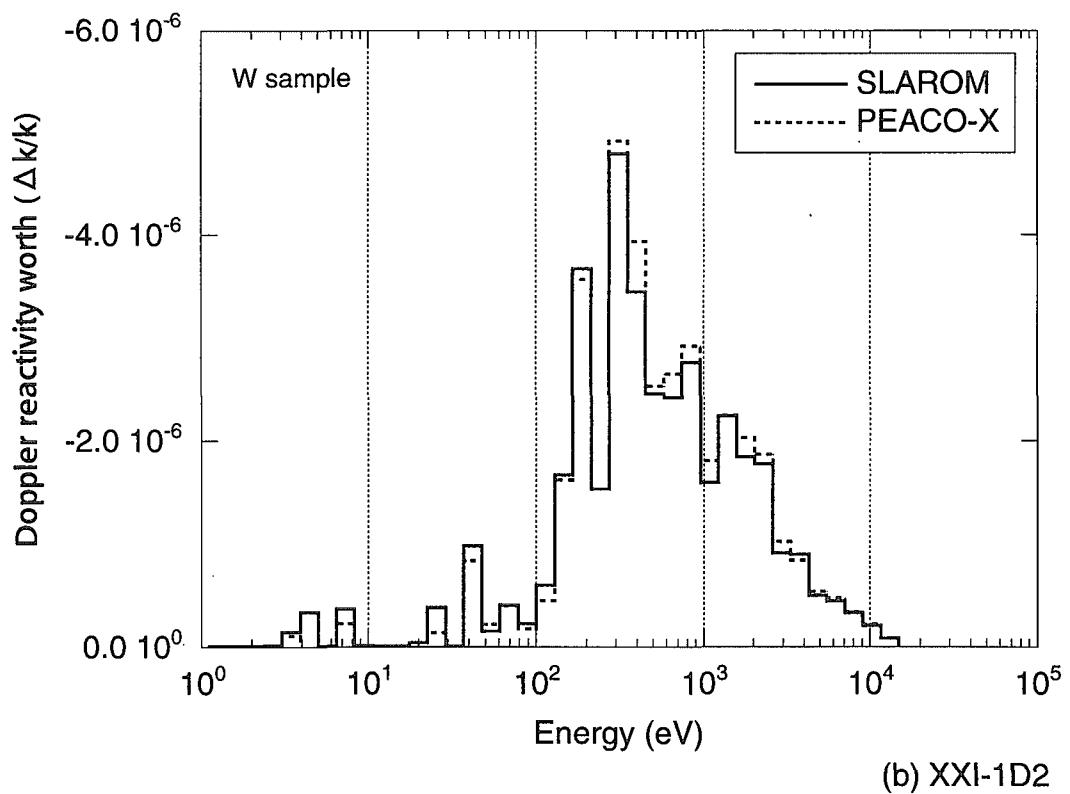
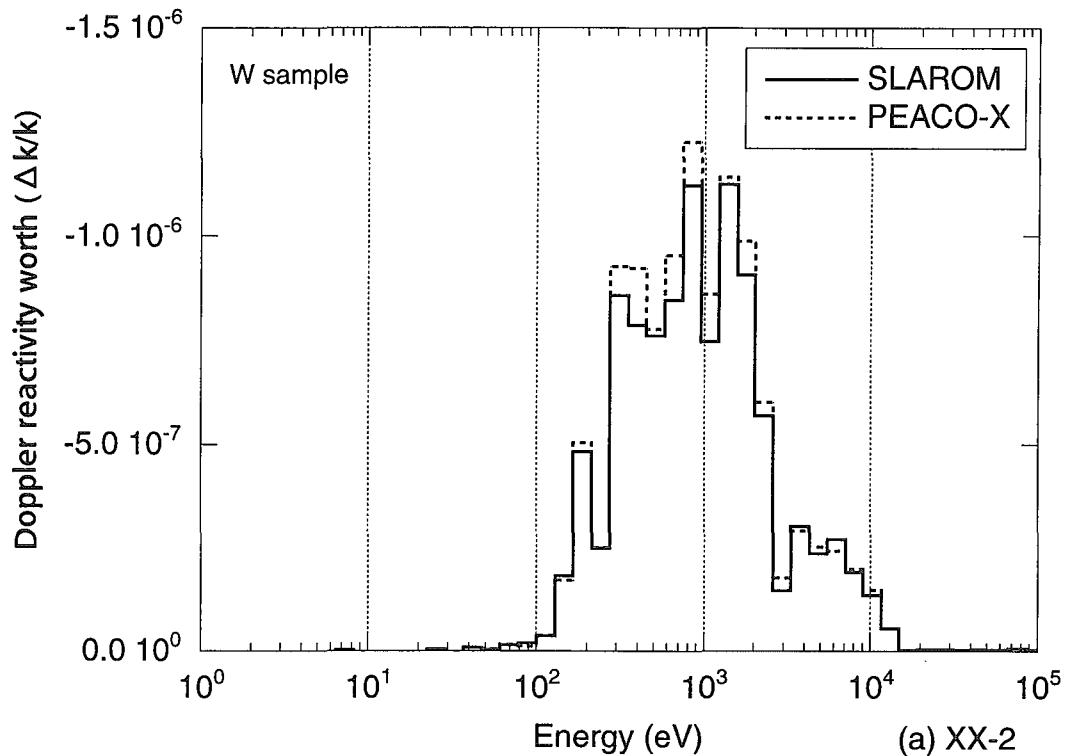


Fig. 10 Comparison of the energy breakdown of the Doppler reactivity worth ($293\text{K} \rightarrow 1073\text{K}$) of the W sample between the SLAROM and PEACO-X codes

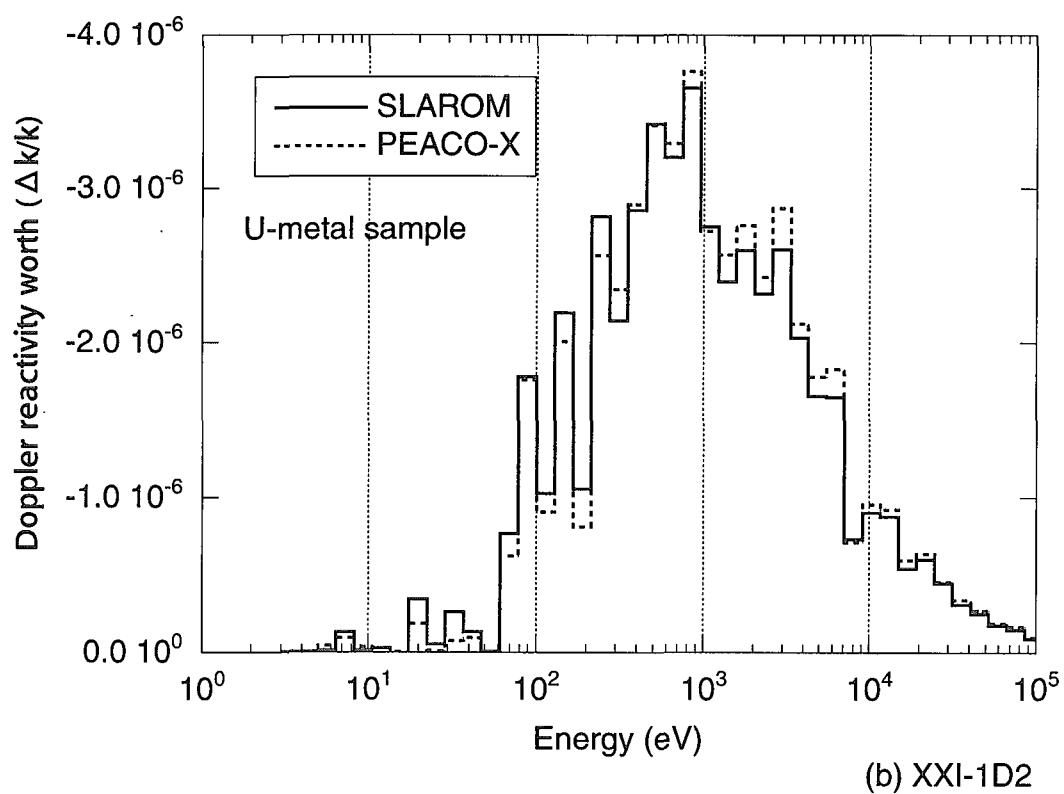
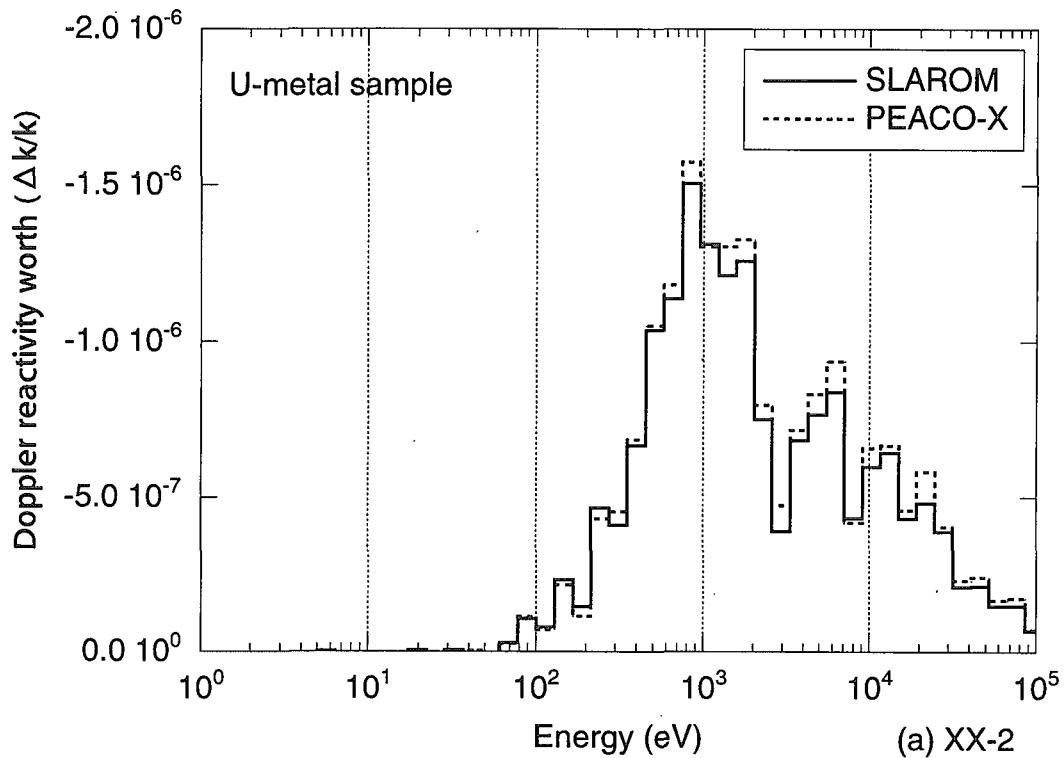


Fig. 11 Comparison of the energy breakdown of the Doppler reactivity worth (293K→1073K) of the U-metal sample between the SLAROM and PEACO-X codes

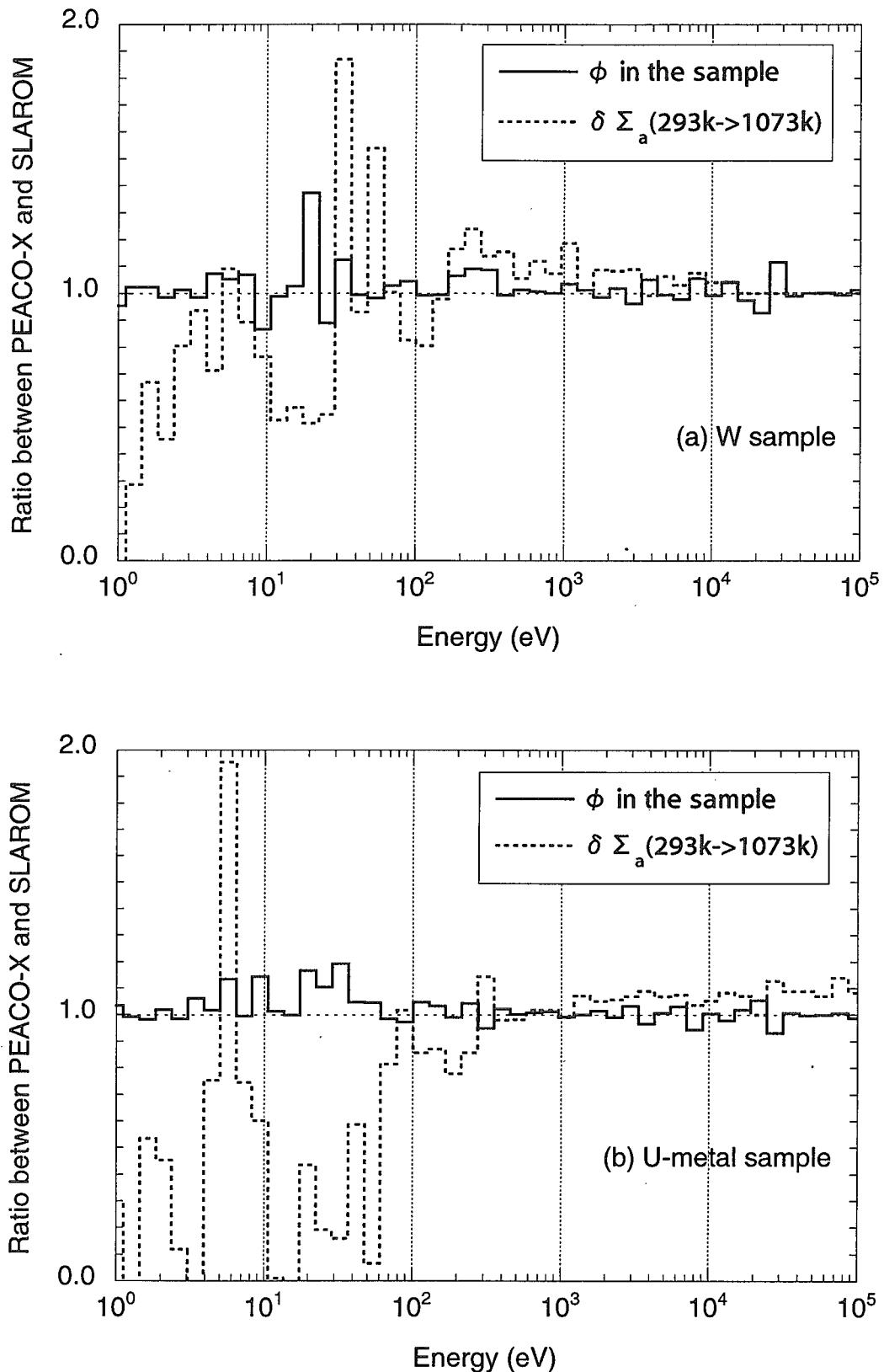


Fig. 12 Ratio between the PEACO-X and SLAROM code for the neutron flux in the sample region and the change of the macroscopic absorption cross section of the Doppler sample with the temperature change (293K \rightarrow 1073K)

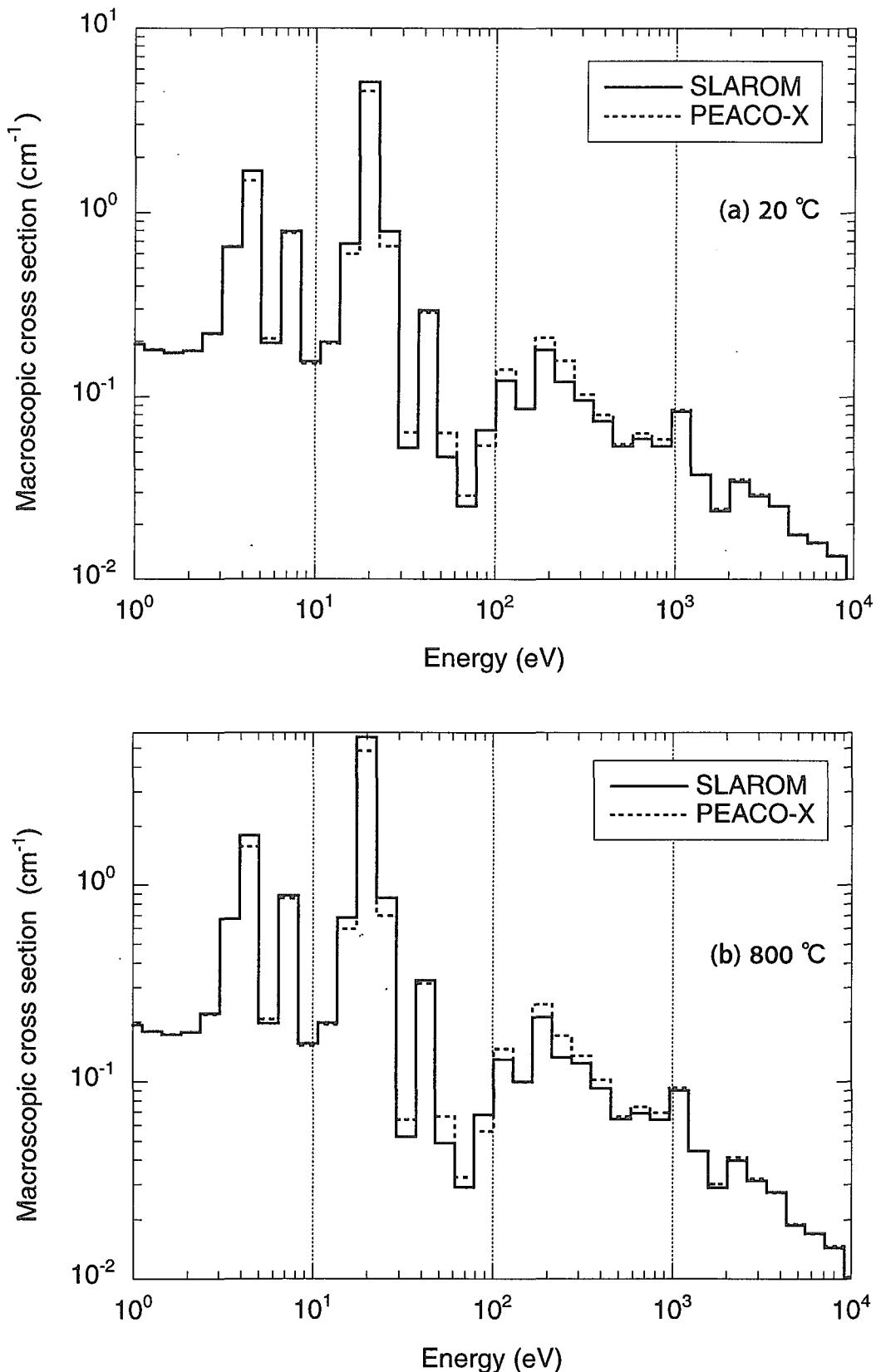


Fig. 13 Comparison of the macroscopic absorption cross section of the W sample between the SLAROM and PEACO-X codes

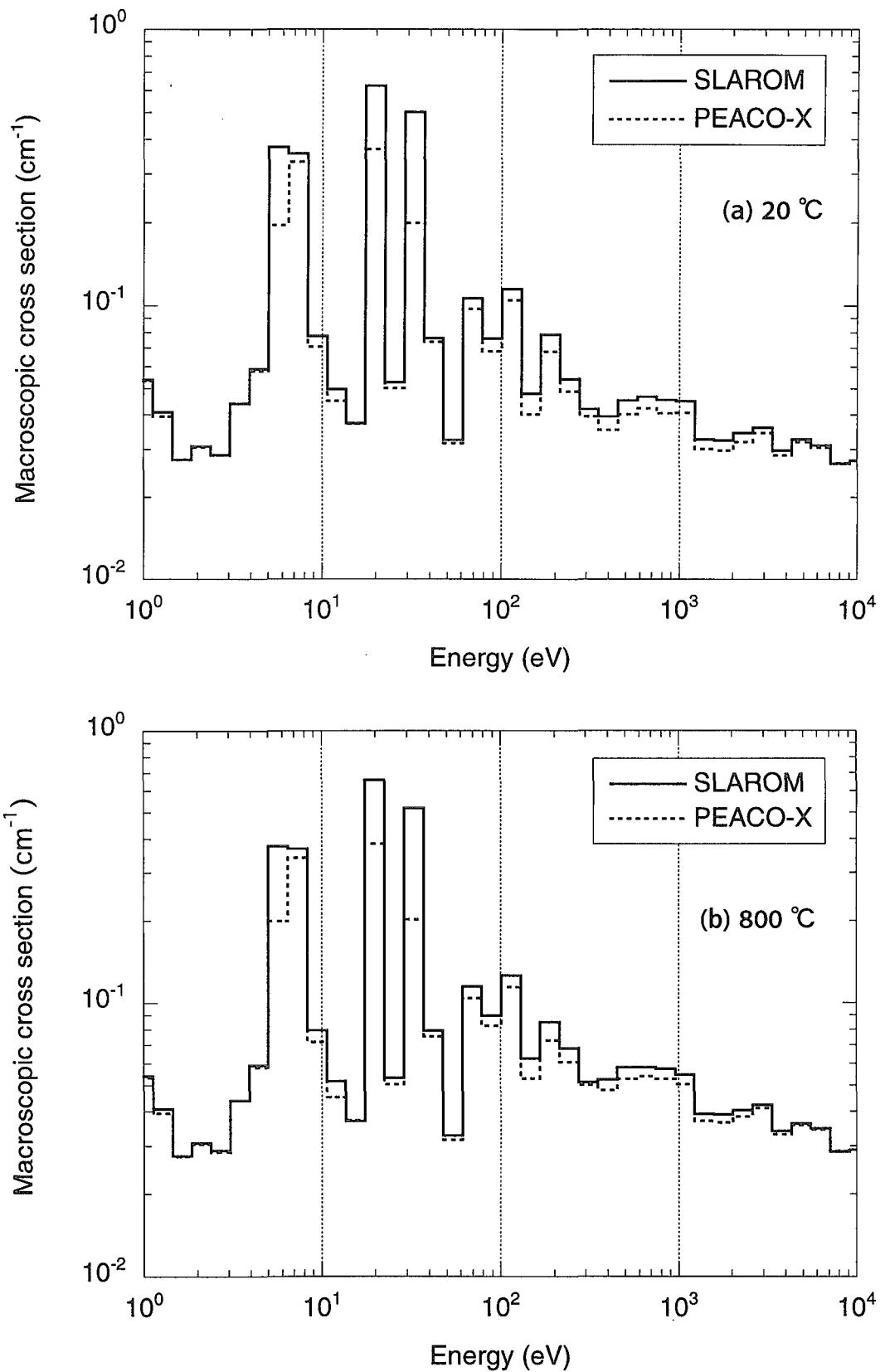


Fig. 14 Comparison of the macroscopic absorption cross section of the U-metal sample between the SLAROM and PEACO-X codes

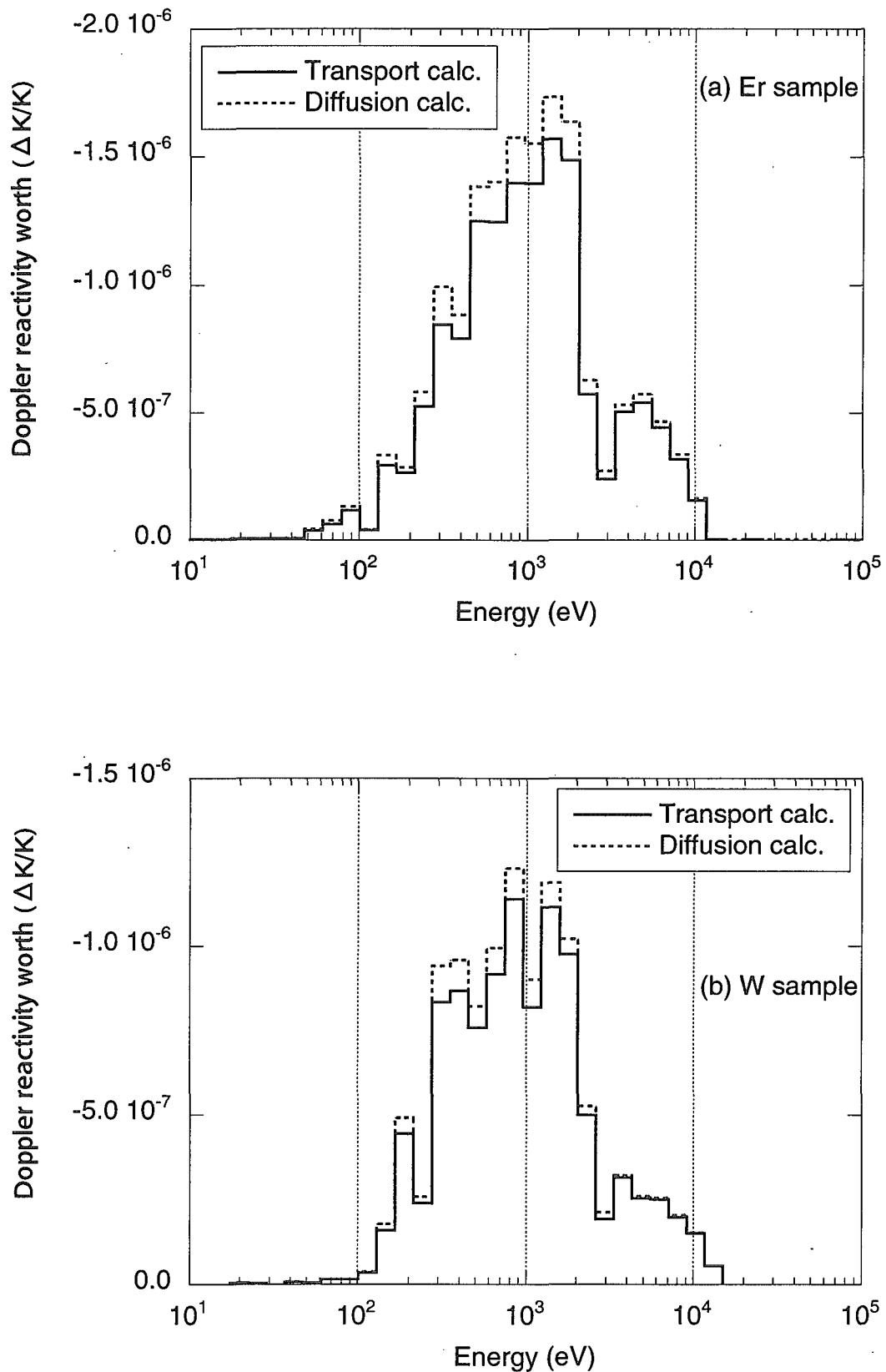


Fig. 15 Comparison of the energy breakdown of the Doppler reactivity worth ($293K \rightarrow 1073K$) in the XX-2 core between the transport and diffusion calculations

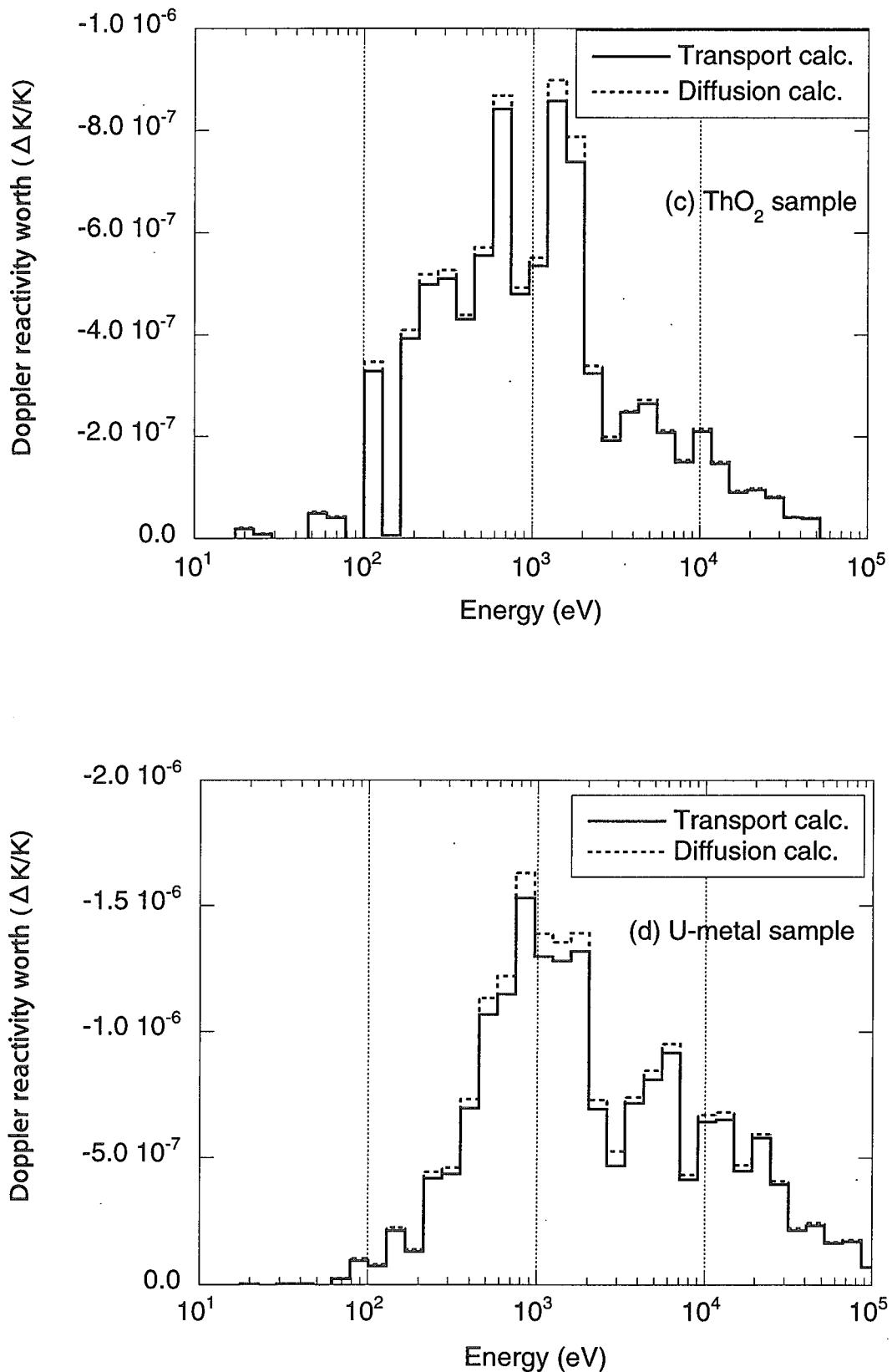


Fig. 15 Comparison of the energy breakdown of the Doppler reactivity worth ($293K \rightarrow 1073K$) in the XX-2 core between the transport and diffusion calculations (continued)

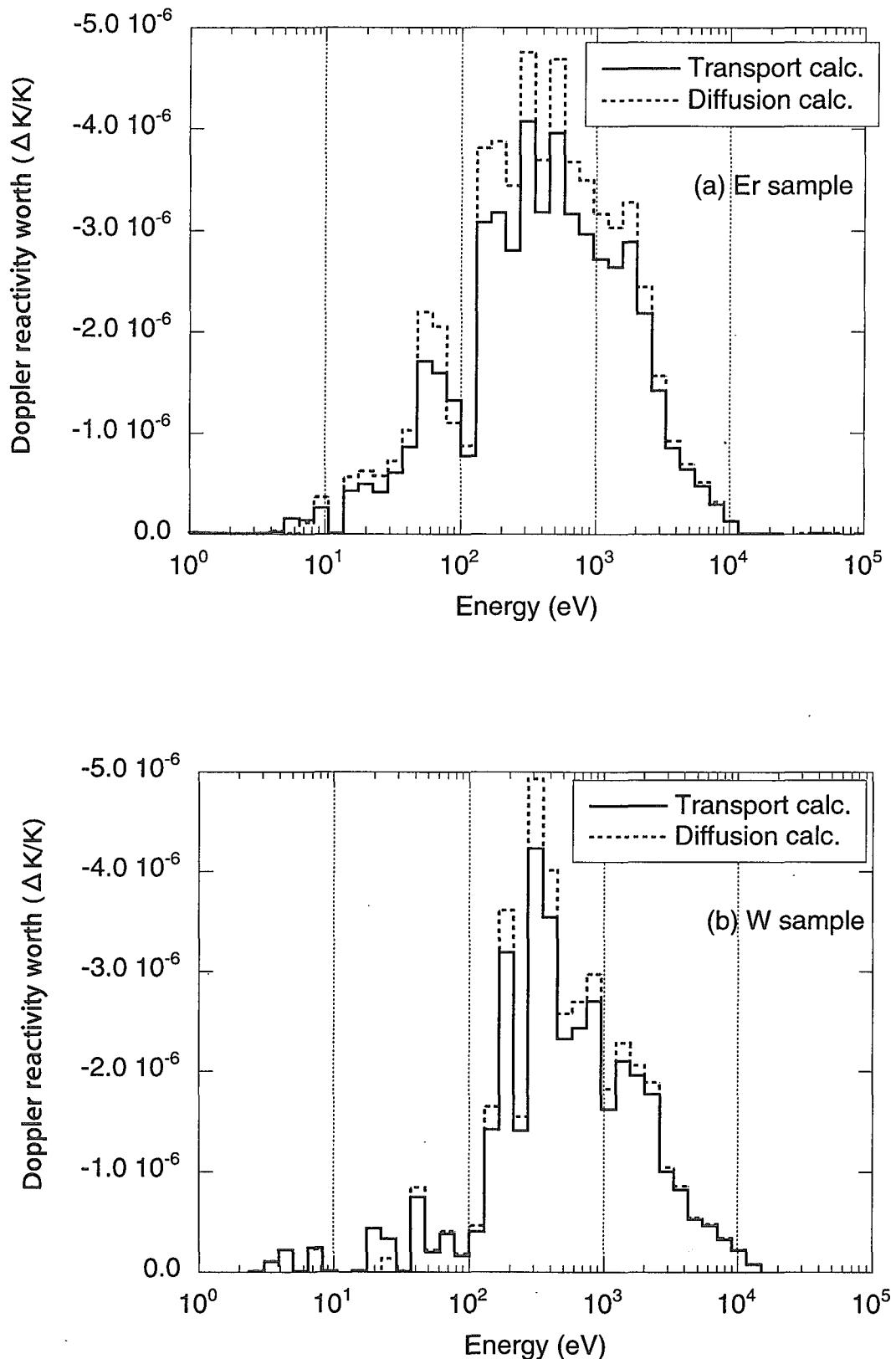


Fig. 16 Comparison of the energy breakdown of the Doppler reactivity worth ($293\text{K} \rightarrow 1073\text{K}$) in the XXI-1D2 core between the transport and diffusion calculations

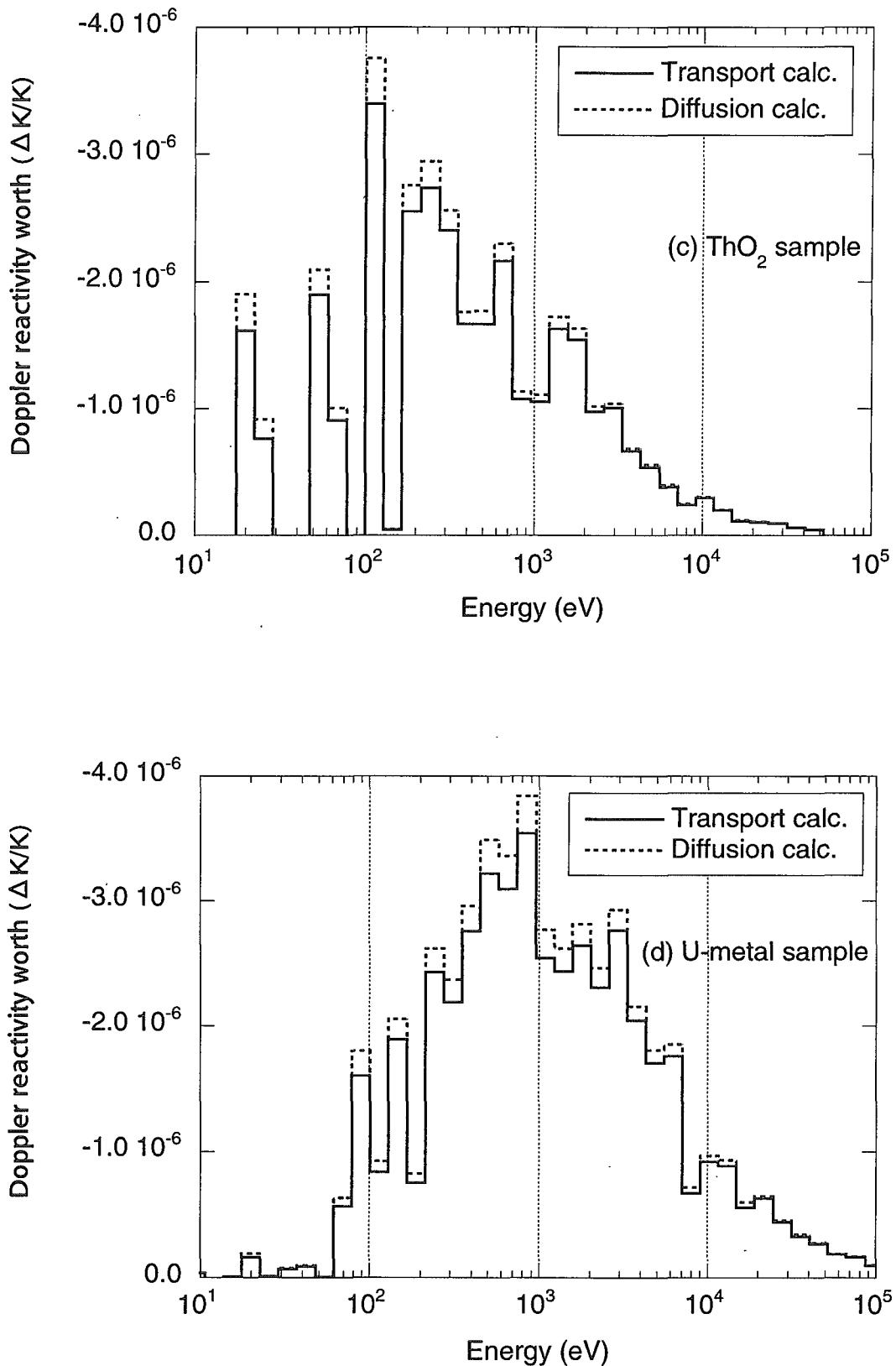


Fig. 16 Comparison of the energy breakdown of the Doppler reactivity worth (293K→1073K) in the XXI-1D2 core between the transport and diffusion calculations (continued)

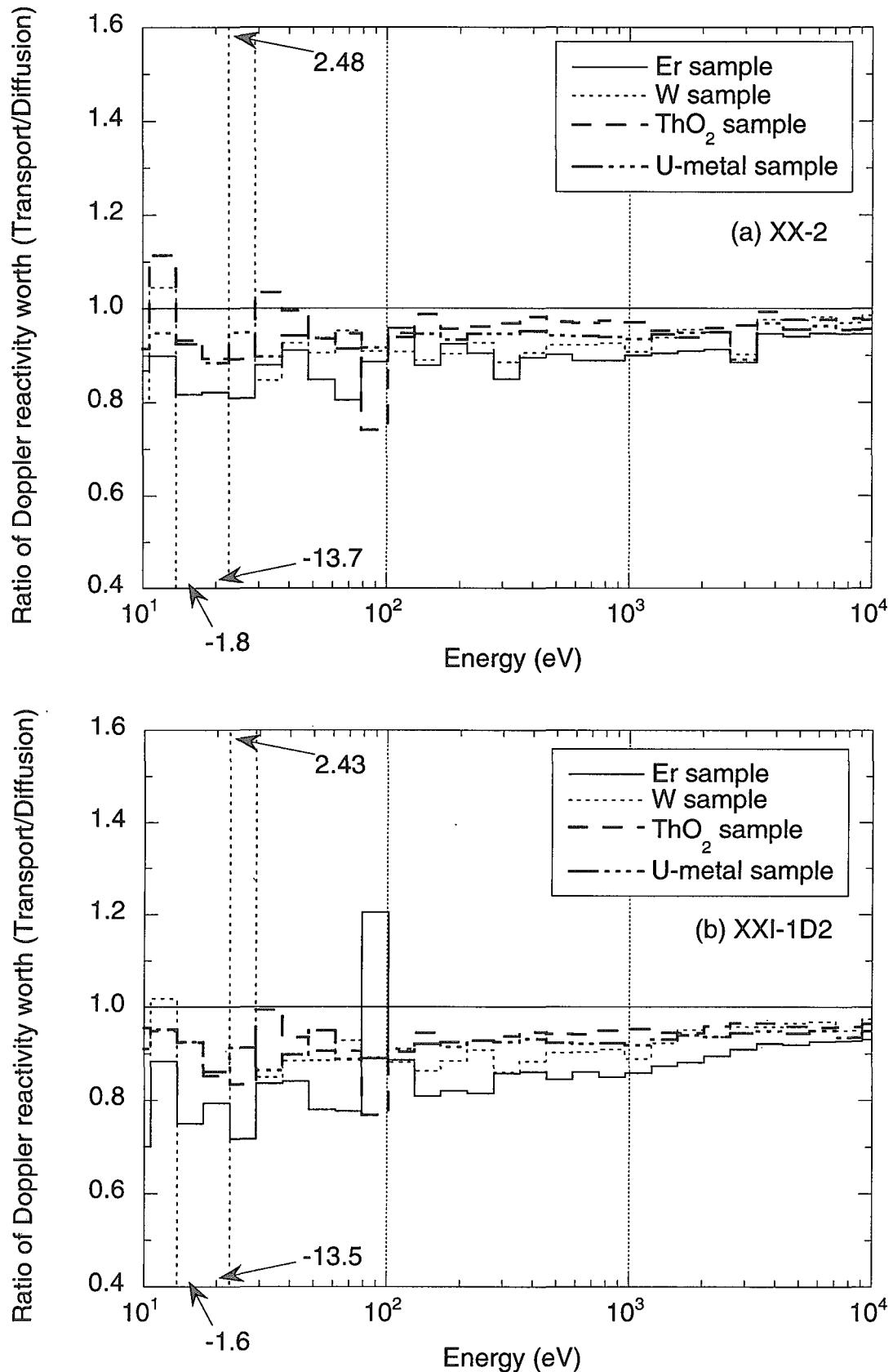


Fig. 17 Ratio of the energy breakdown of the Doppler reactivity worth ($293\text{K} \rightarrow 1073\text{K}$) between the transport and diffusion calculations

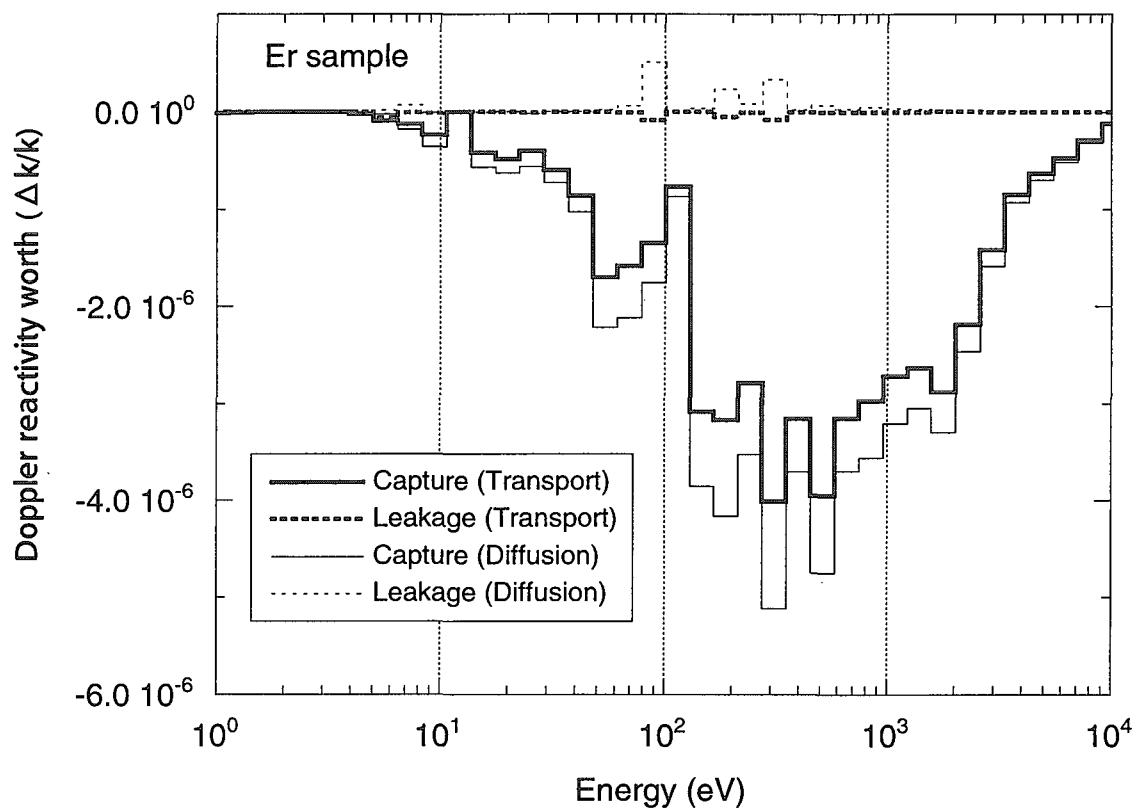


Fig. 18 Comparison of the capture and leakage terms of the energy breakdown of the Doppler reactivity worth ($293\text{K} \rightarrow 1073\text{K}$) in the XXI-1D2 core between the transport and diffusion calculations

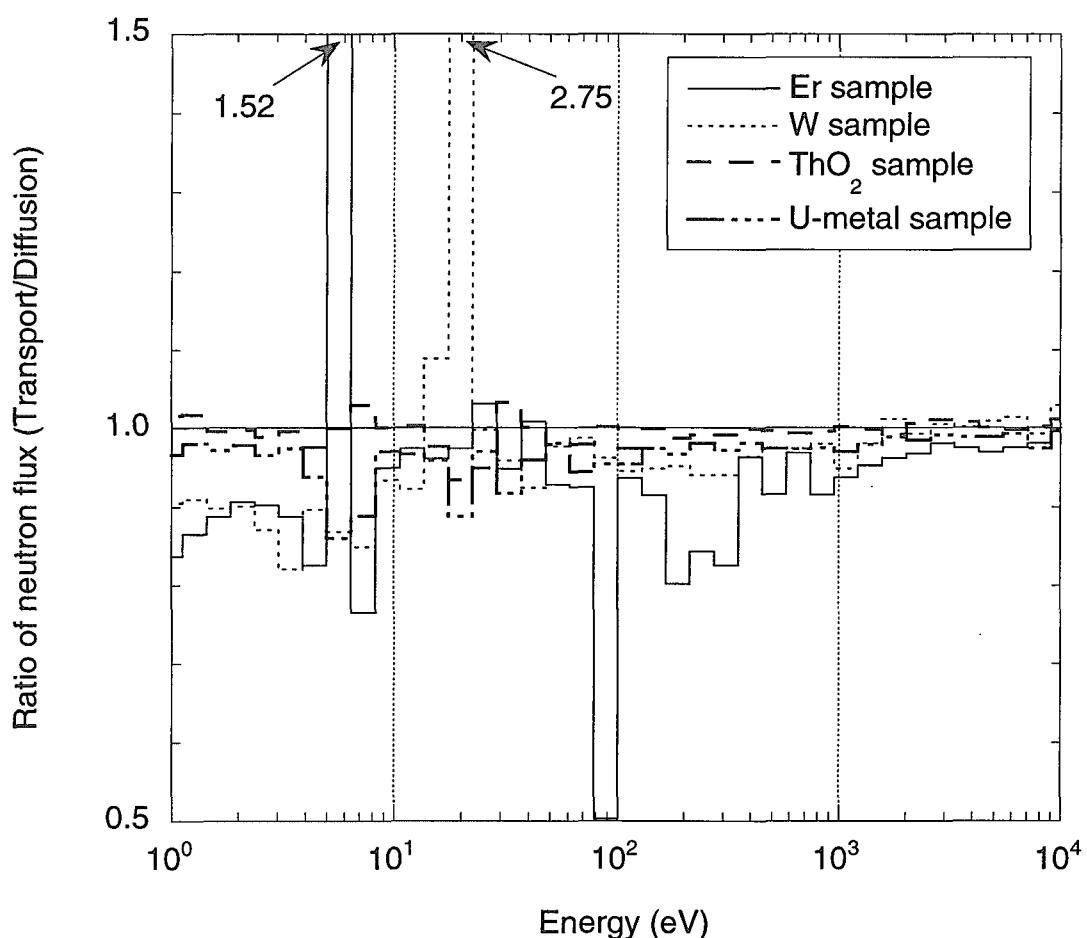


Fig. 19 Ratio of the neutron flux in the sample region between the transport and diffusion calculations

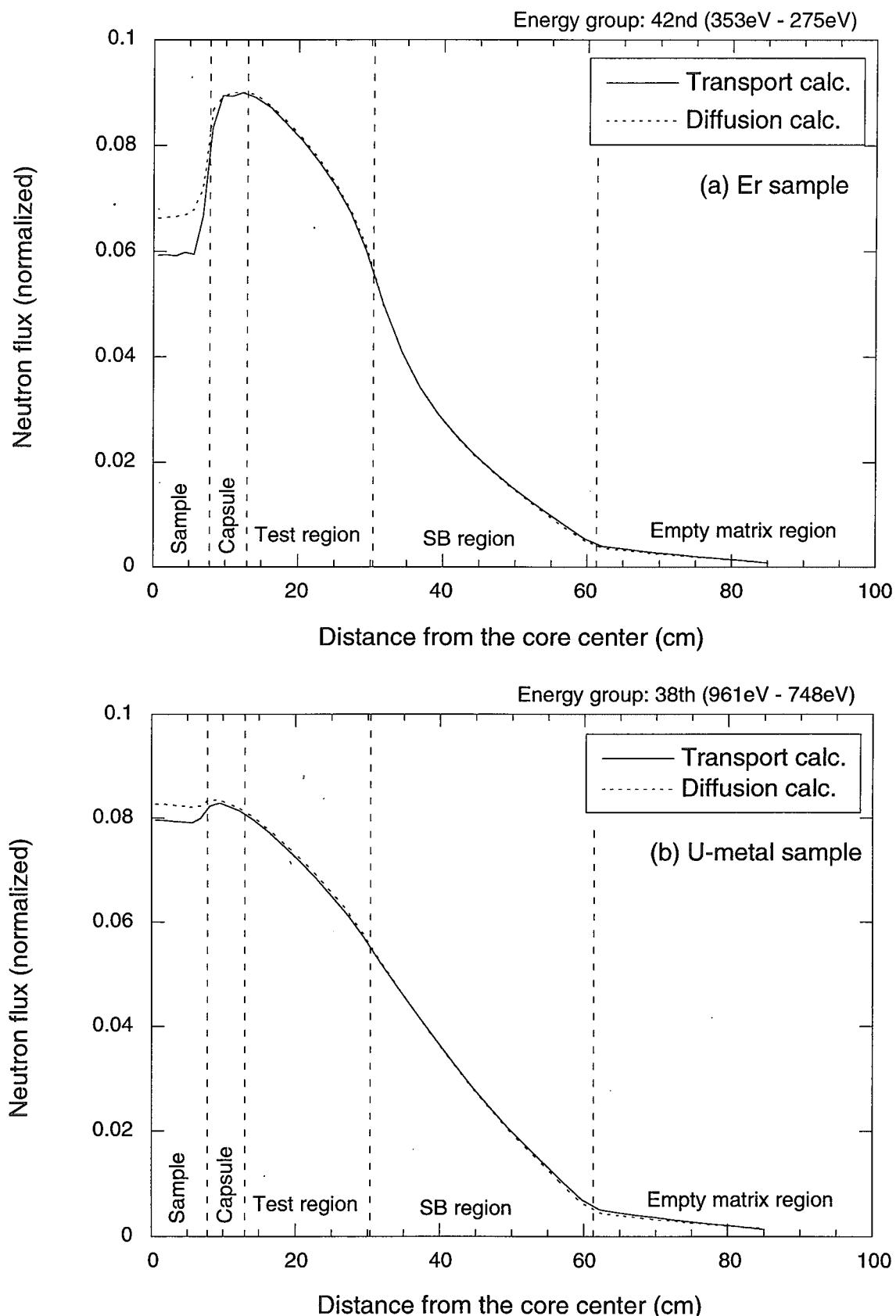


Fig. 20 Comparison of the axial neutron flux distribution between the transport and diffusion calculations

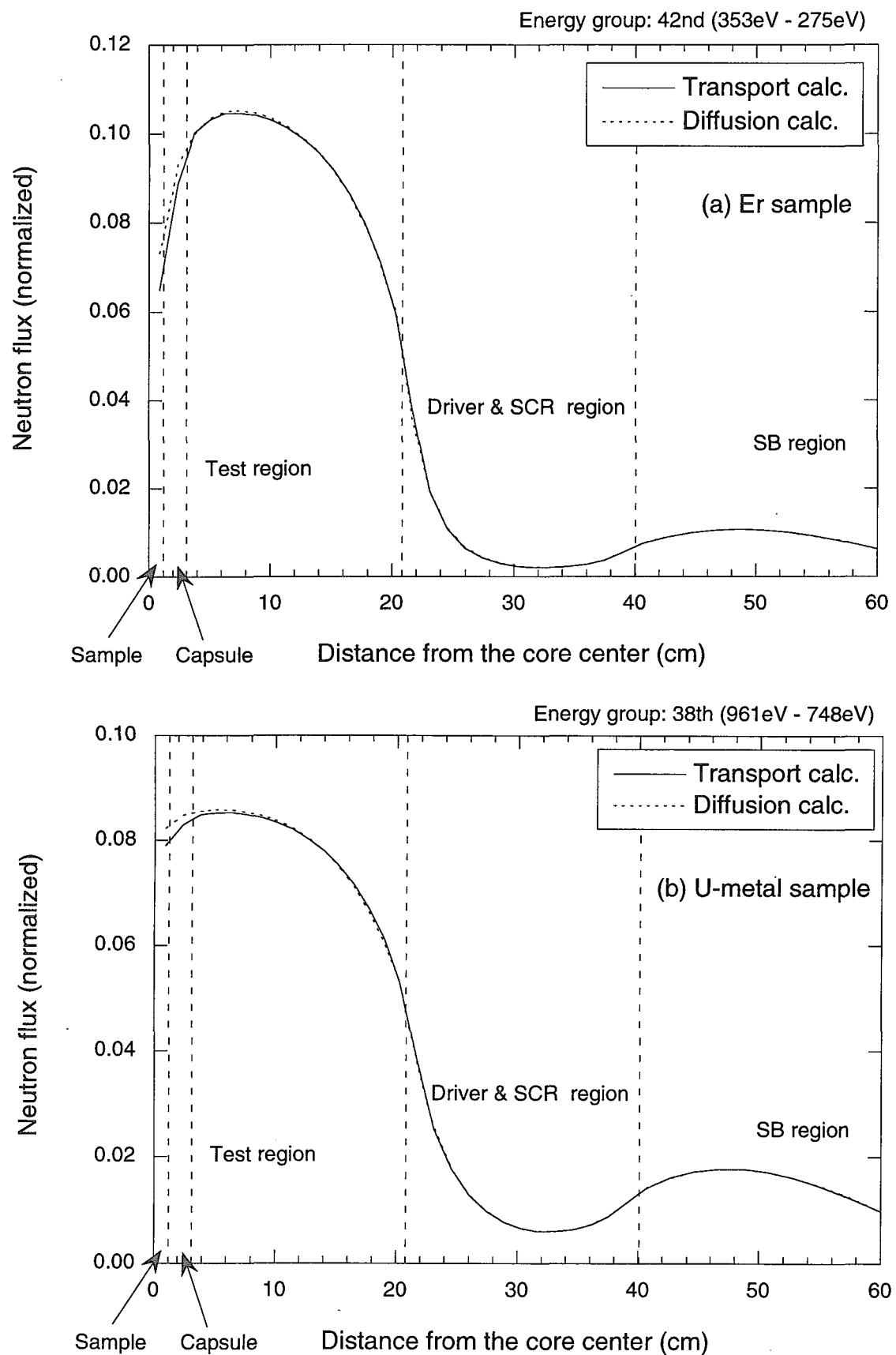


Fig. 21 Comparison of the radial neutron flux distribution between the transport and diffusion calculations

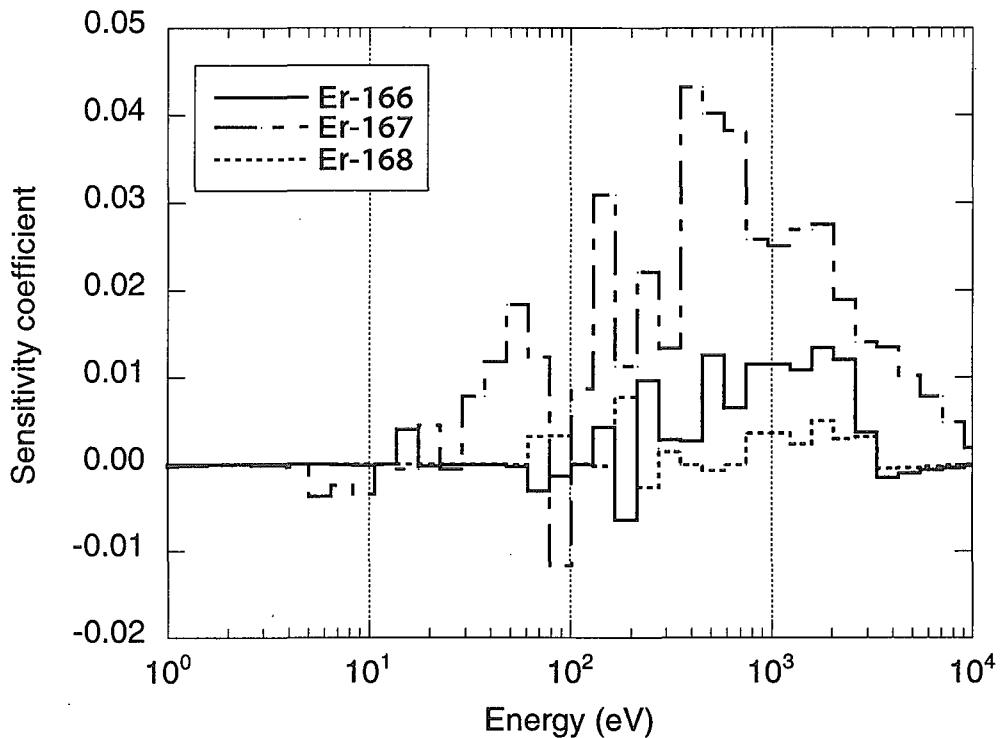


Fig. 22 Sensitivity coefficient of the capture reaction of ^{166}Er , ^{167}Er and of ^{168}Er on the Doppler reactivity worth in the XXI-1D2 core

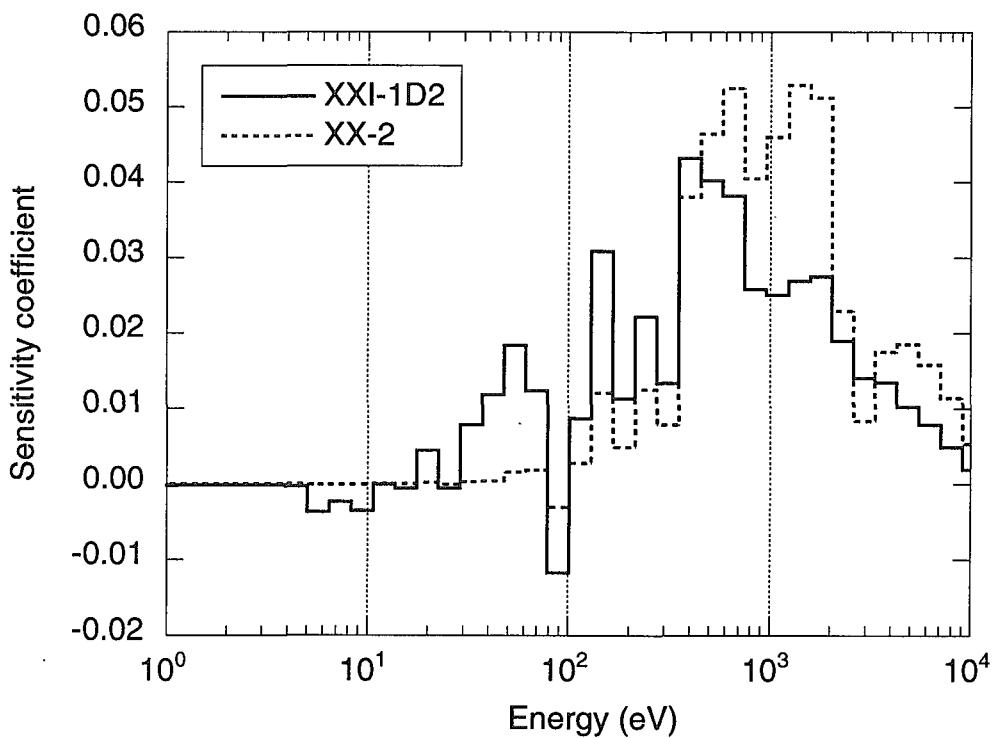


Fig. 23 Comparison of the sensitivity coefficient of the capture reaction of ^{167}Er between the XXI-1D2 and XX-2 cores

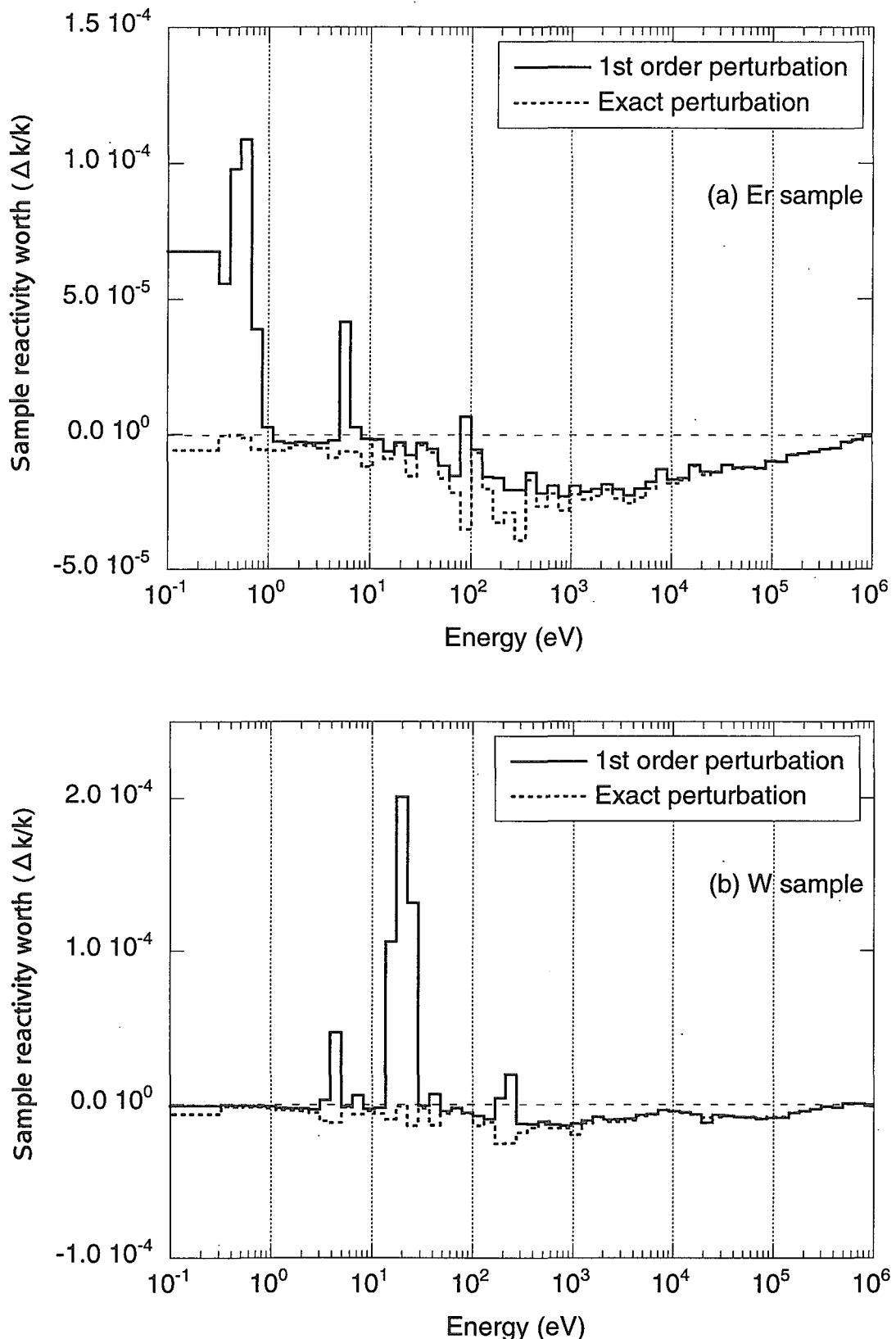


Fig. 24 Comparison of the energy breakdown of the sample reactivity worth in the XXI-1D2 core between the first-order and exact perturbation calculations by the diffusion calculation

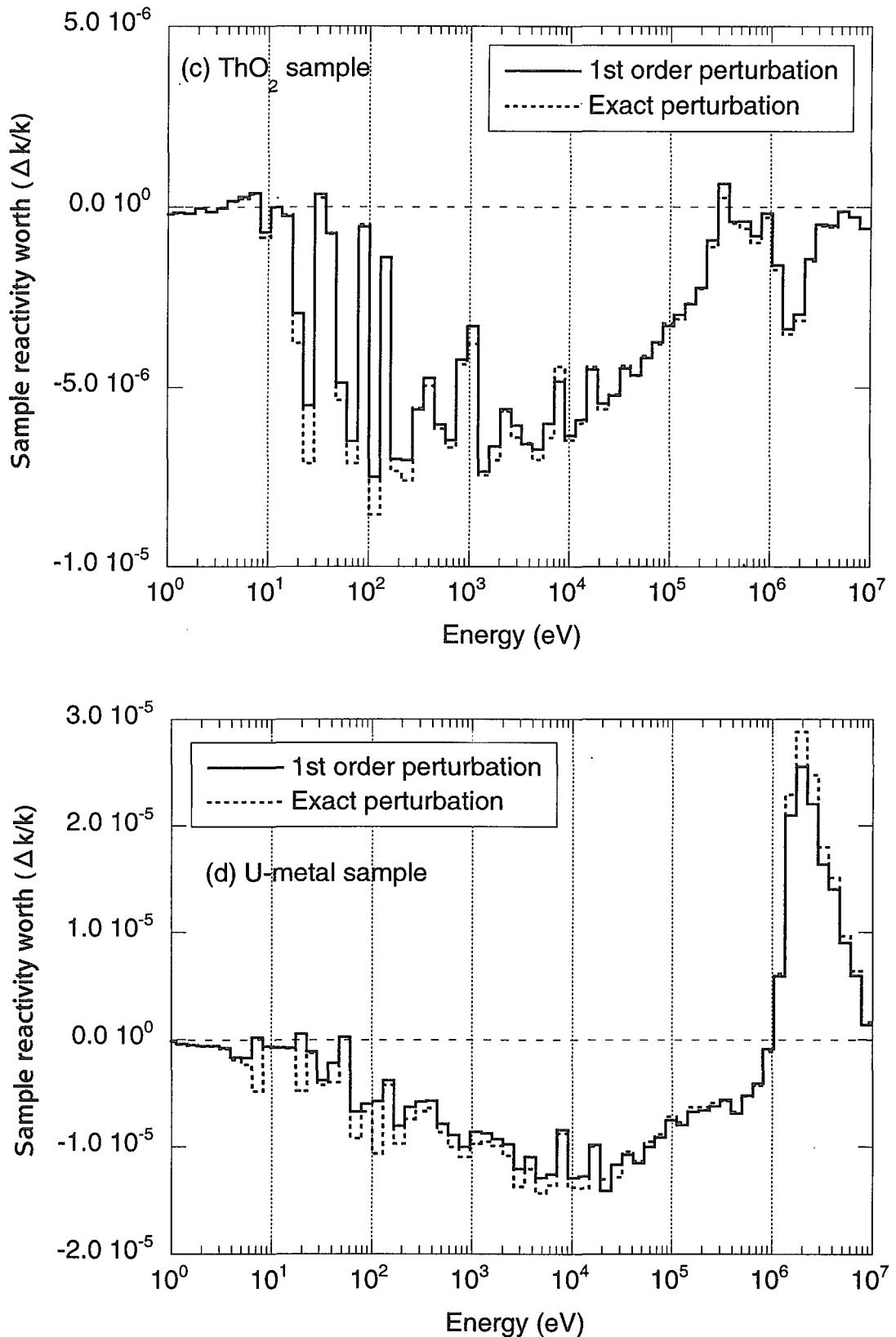


Fig. 24 Comparison of the energy breakdown of the sample reactivity worth in the XXI-1D2 core between the first-order and exact perturbation calculations by the diffusion calculation (continued)

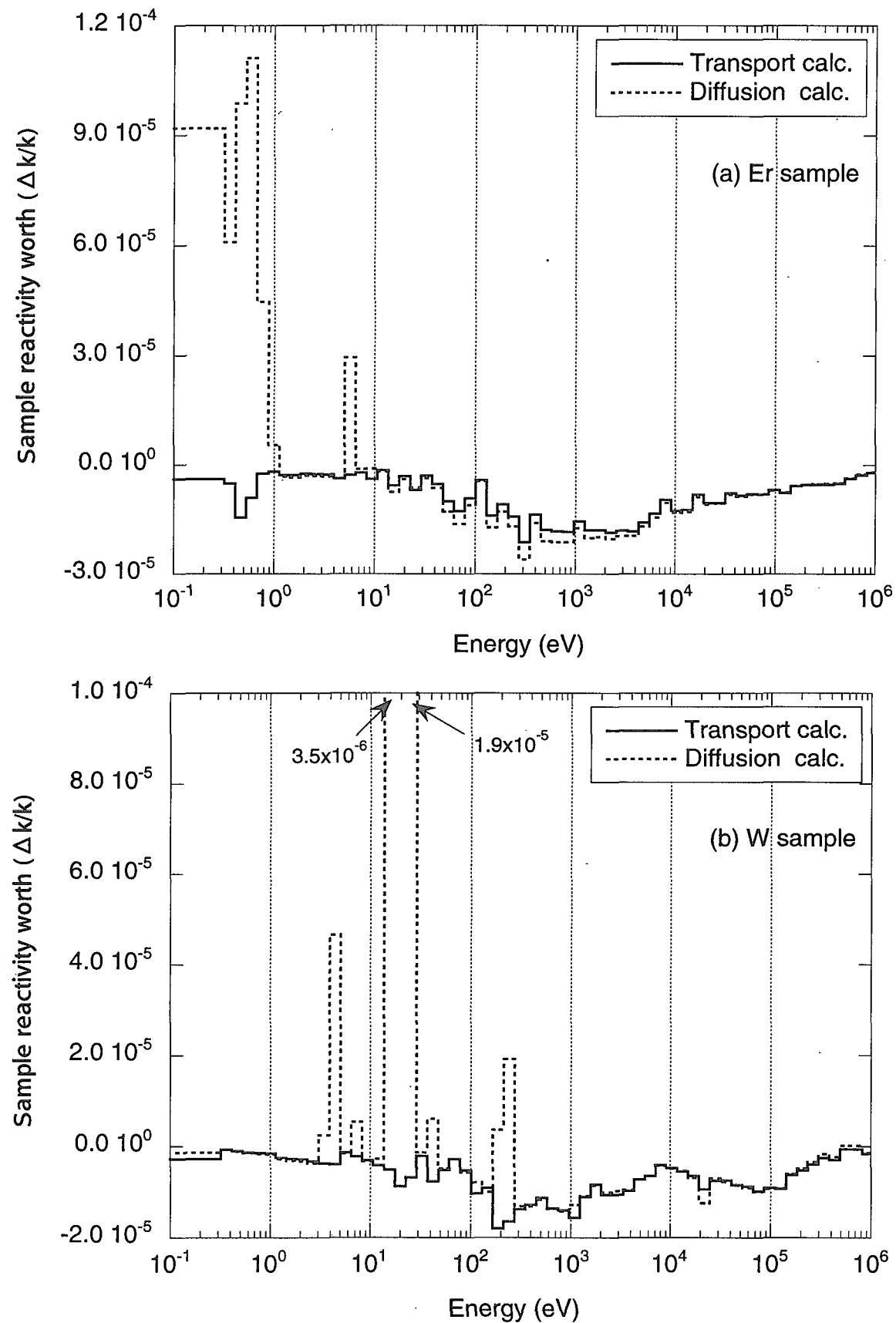


Fig. 25 Comparison of the energy breakdown of the sample reactivity worth of the Er and W samples in the XXI-1D2 core calculated by the first-order perturbation theory between the transport and diffusion calculations

3.2.2 SRACを用いた解析結果

SRACを用いたドップラー反応度価値解析の結果をXX-2炉心およびXXI-1D2炉心についてそれぞれTable 15 およびTable 16に示す。

・XX-2炉心

ThO_2 サンプルについてはC/E値はほぼ1.0となったが、ErおよびWサンプルについて約10%の過小評価となった。測定誤差が比較的小さい800°Cでは、Erサンプル(PEACOを用いない計算)の他は実験値とほぼ一致した。

PEACOルーチンを用いた詳細群構造による衝突確率計算の効果(詳細群効果; Table 16 および17中P/f)は、共鳴物質では最大でも+3%でありその効果は小さい。ウランサンプルでは、共鳴物質サンプルより若干大きい+4～+8%の効果がある。

・XXI-1D2炉心

Erサンプルでは、XX-2炉心とは逆に12%の過大評価となった。800°CでのWおよび ThO_2 サンプルについては、WサンプルでのPEACOを用いない計算の他は-1～+4%の差で実験値と一致した。

詳細群効果は、共鳴物質サンプルでは-7%～+2%となり、基本計算と同様であったが、ウランサンプルでは基本計算(-4%～+1%)と異なり+7～+15%の大きなプラス効果がある。

次に、詳細群効果について炉心間の比較を詳しく行う。

共鳴物質サンプルの詳細群効果は、XXI-1D2炉心でのWサンプルを除き両炉心とも-1%～+3%と小さく、炉心間の差も2～4%程度しかない。Wサンプルでは両炉心ともに他のサンプルと傾向が異なり、詳細群効果が-7%～-2%のマイナス方向となっている。ウランサンプルについては、基本計算では詳細群効果に両炉心間に系統的な差(スペクトルの軟らかいXXI-1D2炉心の方が小さい)が見られたが、SRAC計算では逆にXXI-1D2炉心の方がXX-2炉心より3～6%大きくなっている。

XX-2およびXXI-1D2炉心におけるドップラー反応度価値(293K→1073K)のエネルギー一群ごとの寄与について、サンプル断面積にPEACOを用いた場合と用いない場合(f-table)の比較をEr、W、 ThO_2 およびU-metalサンプルについてそれぞれFig. 26～Fig. 29に示す。これらの図より、 ThO_2 サンプルを除き両炉心において各サンプルとも、PEACOとf-tableのドップラー反応度価値への寄与の大小関係が逆転し、低エネルギー側でf-tableの方が大きくなる傾向にあることが分かる。大小関係が逆転するエネルギー値はサンプルによって異なり、Erサンプルでは約130eV、Wサンプルでは比較的高く約300eVとなっており、 ThO_2 サンプルでは明瞭でない。ウランサンプルでは大小関係が逆転するエネルギー値は20～30eVと他のサンプルより低く、比較的広いエネルギー範囲でプラス効果となっていることが分かる。

PEACOルーチンでは1keV以上のエネルギー範囲を扱えないが、基本計算のPEACO-Xを用いた計算

により中速スペクトル体系の解析においても1keV以上10keVまで詳細群効果があることを確認した。今後、SRACを用いてドップラー反応度価値の解析を詳細に行うためには、詳細エネルギー群構造での衝突確率計算を1keV以上10keV程度まで拡張する必要があるといえる。

・基本計算とSRACを用いた計算値の比較

次に、各炉心について拡散計算に基づく基本計算とSRACを用いた計算値を比較する。ドップラー反応度価値計算値の基本計算に対するSRAC計算の比を両炉心についてTable 17に示す。基本計算とSRACを用いた解析結果(C/E値)をXX-2炉心およびXXI-1D2炉心についてFig. 30に示す。

XX-2炉心では、PEACOを用いない場合について比較すると、ErサンプルではSRAC計算の方が約10%小さな値となっているが、他のサンプルでは逆にSRACの方が+3～+5%大きめとなっている。ウランサンプルでは、0～+3%の違いしかない。

XXI-1D2炉心では、PEACOを用いない場合については、全般的にSRACの方が基本計算より小さめの計算値となっている(ErおよびThO₂サンプルではSRACの方が3～6%小さな値となっている)が、Wサンプルでは逆に+2%となっている。ウランサンプルでは、PEACOを用いない場合ではSRACの方が基本計算より9～16%小さな値となっているが、SRACでの詳細群効果が+7～+15%と大きいため、PEACOを用いた場合では基本計算と一致している。

両炉心に共通している傾向は、以下の点である。

- 1) ErサンプルではSRACの方が数%～10%小さい計算値を与える。
- 2) Wサンプルでは、詳細群による断面積計算を行わない場合、SRACの方が数%大きな計算値を与える。詳細群効果はSRACの方が小さく、詳細群による断面積計算を行った場合には、SRACの方が数%小さな計算値を与える。
- 3) ウランサンプルでは、PEACOを用いれば、基本計算とSRAC両手法の解析精度は同程度となる。

また、詳細群による断面積計算を行わない場合の両炉心間での相違点としては、ThO₂サンプルでは、XX-2炉心ではSRAC解析>基本計算であるのに対して、XXI-1D2炉心ではSRAC解析<基本計算となったことが挙げられる。ウランサンプルについても同様の傾向がみられる。

本研究では、SRACによる計算の予測精度の傾向を把握することに重点を置いて解析を進めたが、今後、以上のSRACと基本計算結果の差異について詳細に検討する必要がある。

Table 15 Results of the analysis by the SRAC calc. on the Doppler reactivity worth in the XX-2 core

Sample	Temperature °C	Expt. $\times 10^5 \Delta k/k$	Calc. $\times 10^5 \Delta k/k$		
			f-table ^a (C/E) ^d	PEACO ^b (C/E)	P/f ^c
Er	300	-0.73±14% ^e	-0.650 (0.89)	-0.656 (0.90)	1.01
	550	-1.10±9.3%	-1.02 (0.92)	-1.04 (0.94)	1.02
	800	-1.44±6.9%	-1.30 (0.90)	-1.33 (0.93)	1.03
W	300	-0.55±19%	-0.488 (0.89)	-0.475 (0.87)	0.97
	550	-0.83±12%	-0.793 (0.95)	-0.777 (0.94)	0.98
	800	-1.13±10%	-1.04 (0.92)	-1.02 (0.90)	0.98
ThO_2	300	-0.46±23%	-0.425 (0.92)	-0.429 (0.92)	1.01
	550	-0.68±16%	-0.672 (0.98)	-0.683 (1.00)	1.02
	800	-0.87±12%	-0.861 (0.99)	-0.876 (1.01)	1.02
U-metal	300	-0.81±13%	-0.846 (1.04)	-0.879 (1.08)	1.04
	550	-1.27±8.3%	-1.33 (1.05)	-1.39 (1.10)	1.05
	800	-1.67±6.6%	-1.70 (1.02)	-1.78 (1.07)	1.05
UO_2	300	-0.46±22%	-0.424 (0.93)	-0.451 (0.99)	1.06
	550	-0.66±16%	-0.669 (1.01)	-0.719 (1.08)	1.07
	800	-0.88±11%	-0.856 (0.97)	-0.925 (1.05)	1.08

a) f-table was used to calculate effective cross section of the Doppler samples

b) PEACO routine was used to calculate effective cross section of the Doppler samples

c) The ratio of the calculations between PEACO and f-table

d) Values in parentheses are the ratios between the calculated and experimental values.

e) Experimental error (relative error)

Table 16 Results of the analysis by the SRAC calc. on the Doppler reactivity worth in the XXI-1D2 core

Sample	Temperature °C	Expt. $\times 10^{-5} \Delta k/k$	Calc. $\times 10^{-5} \Delta k/k$		
			f-table ^a (C/E) ^d	PEACO ^b (C/E)	P/f ^c
Er	300	-2.51±6.3% ^e	-2.69 (1.07)	-2.66 (1.06)	0.99
	550	-3.93±4.0%	-4.35 (1.11)	-4.36 (1.11)	1.00
	800	-5.07±3.3%	-5.66 (1.12)	-5.71 (1.13)	1.01
W	300	-1.73±9.6%	-1.72 (1.00)	-1.60 (0.93)	0.93
	550	-2.75±6.0%	-2.85 (1.04)	-2.68 (0.97)	0.94
	800	-3.59±5.0%	-3.81 (1.06)	-3.57 (0.99)	0.94
ThO ₂	300	-1.53±10.2%	-1.47 (0.96)	-1.47 (0.96)	1.00
	550	-2.36±6.5%	-2.41 (1.02)	-2.45 (1.03)	1.02
	800	-3.11±5.0%	-3.17 (1.02)	-3.23 (1.04)	1.02
U-metal	300	-2.14±8.4%	-2.11 (0.99)	-2.25 (1.05)	1.07
	550	-3.43±4.7%	-3.41 (1.00)	-3.69 (1.08)	1.08
	800	-4.60±3.9%	-4.45 (0.97)	-4.83 (1.05)	1.09
UO ₂	300	-1.31±13.1%	-1.20 (0.91)	-1.34 (1.02)	1.12
	550	-2.03±7.7%	-1.95 (0.96)	-2.22 (1.09)	1.14
	800	-2.74±6.0%	-2.55 (0.93)	-2.94 (1.07)	1.15

a) f-table was used to calculate effective cross section of the Doppler samples

b) PEACO routine was used to calculate effective cross section of the Doppler samples

c) The ratio of the calculations between PEACO and f-table

d) Values in parentheses are the ratios between the calculated and experimental values.

e) Experimental error (relative error)

Table 17 Comparison of the calculated Doppler reactivity worths between the SRAC and FCA calc. in the XX-2 and XXI-1D2 cores

Sample	T °C	SRAC calc. / FCA calc. ^a					
		XX-2			XXI-1D2		
		f-table ^b	PEACO ^c	P/f ^d	f-table ^b	PEACO ^c	P/f ^d
Er	300	0.93	-	-	0.97	-	-
	550	0.91	-	-	0.96	-	-
	800	0.90	-	-	0.96	-	-
W	300	1.05	0.99	0.94	1.02	0.97	0.95
	550	1.04	0.97	0.94	1.02	0.97	0.95
	800	1.04	0.96	0.93	1.02	0.95	0.93
ThO_2	300	1.05	-	-	0.96	-	-
	550	1.04	-	-	0.95	-	-
	800	1.03	-	-	0.94	-	-
U-metal	300	1.03	1.05	1.02	0.92	1.00	1.09
	550	1.02	1.03	1.02	0.91	1.00	1.10
	800	1.01	1.01	1.00	0.91	0.98	1.08
UO_2	300	1.02	1.04	1.02	0.86	1.00	1.17
	550	1.01	1.03	1.02	0.85	1.00	1.18
	800	1.00	1.00	1.00	0.84	0.98	1.16

a) The ratio of the C/E values between the SRAC and FCA calc.

b) The f-table method or the SLAROM code was used to calculate the effective microscopic cross sections of the Doppler samples

c) The ultra-fine energy group collision probability calculation by the PEACO routine or by the PEACO-X code was used to obtain the effective cross sections of the Doppler samples

d) The effect of the ultra-fine energy group calculation; ratio between PEACO and f-table or PEACO-X and SLAROM

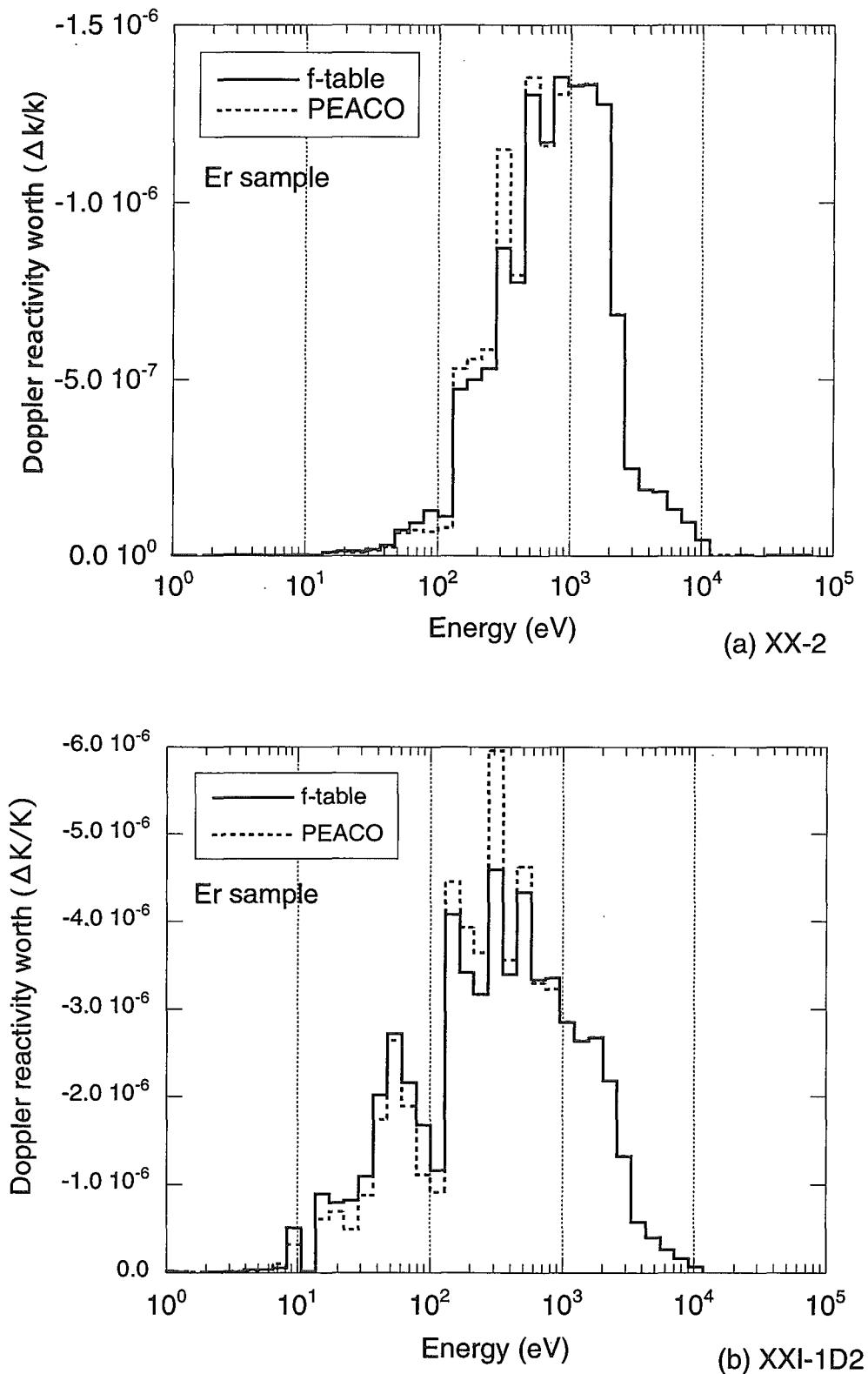
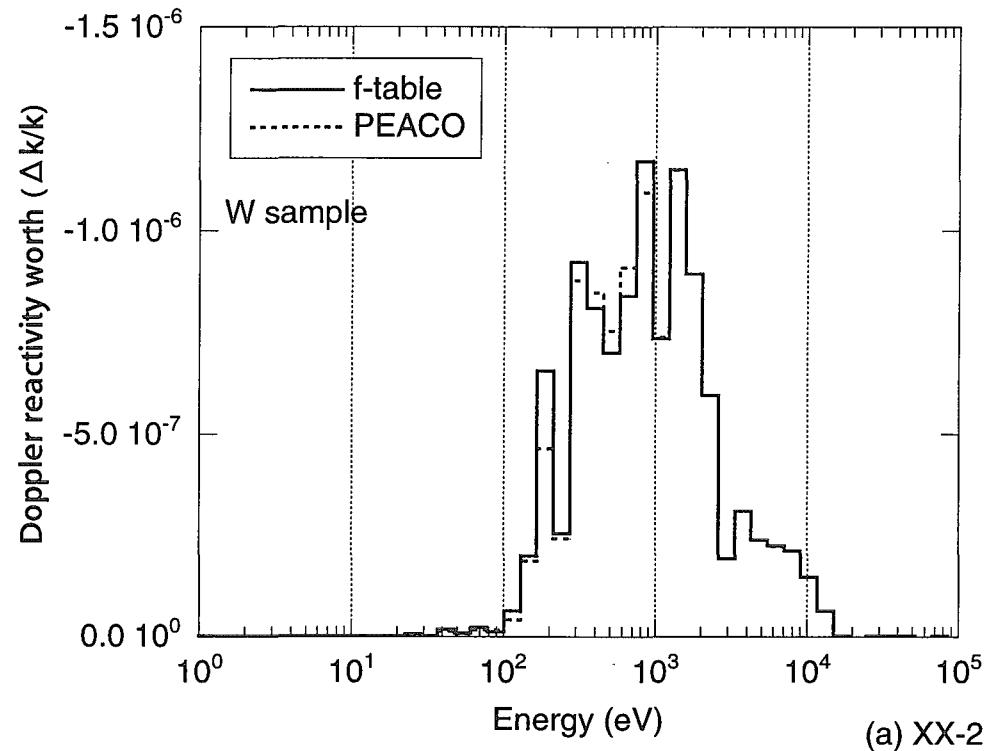
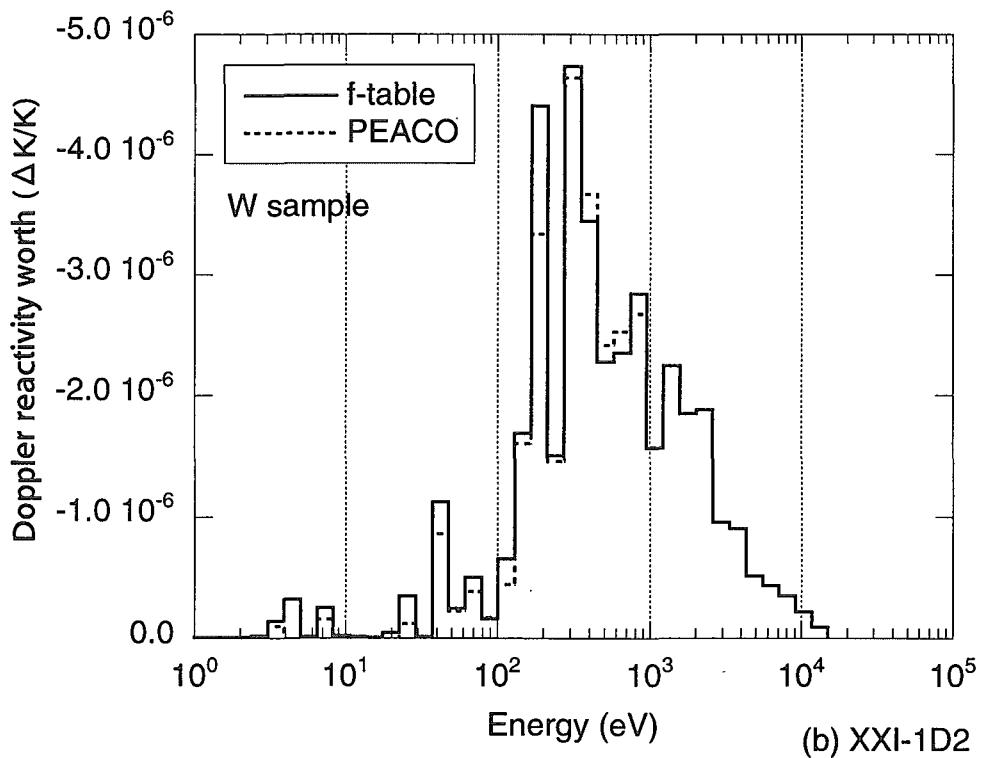


Fig. 26 Comparison of the energy breakdown of the Doppler reactivity worth ($293\text{K} \rightarrow 1073\text{K}$) of the Er sample between the calculations with and without the PEACO routine by the SRAC calc.



(a) XX-2



(b) XXI-1D2

Fig. 27 Comparison of the energy breakdown of the Doppler reactivity worth ($293\text{K} \rightarrow 1073\text{K}$) of the W sample between the calculations with and without the PEACO routine by the SRAC calc.

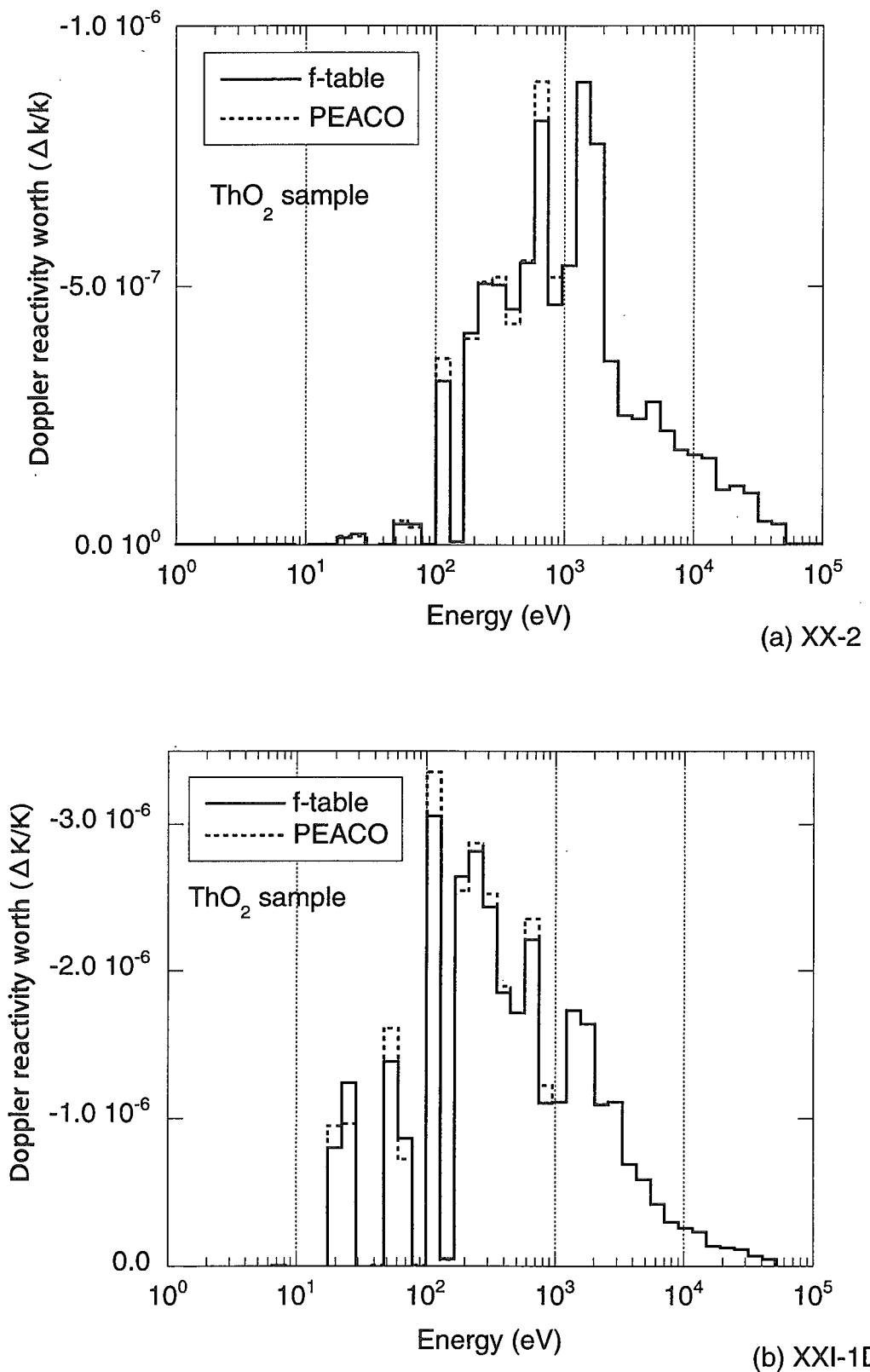
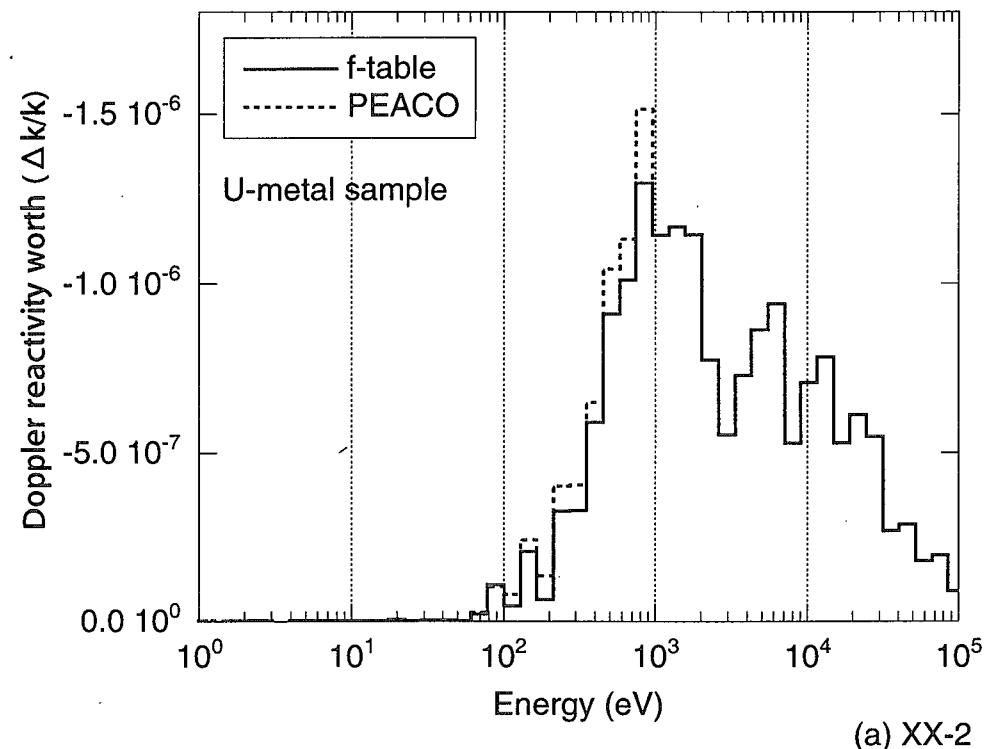
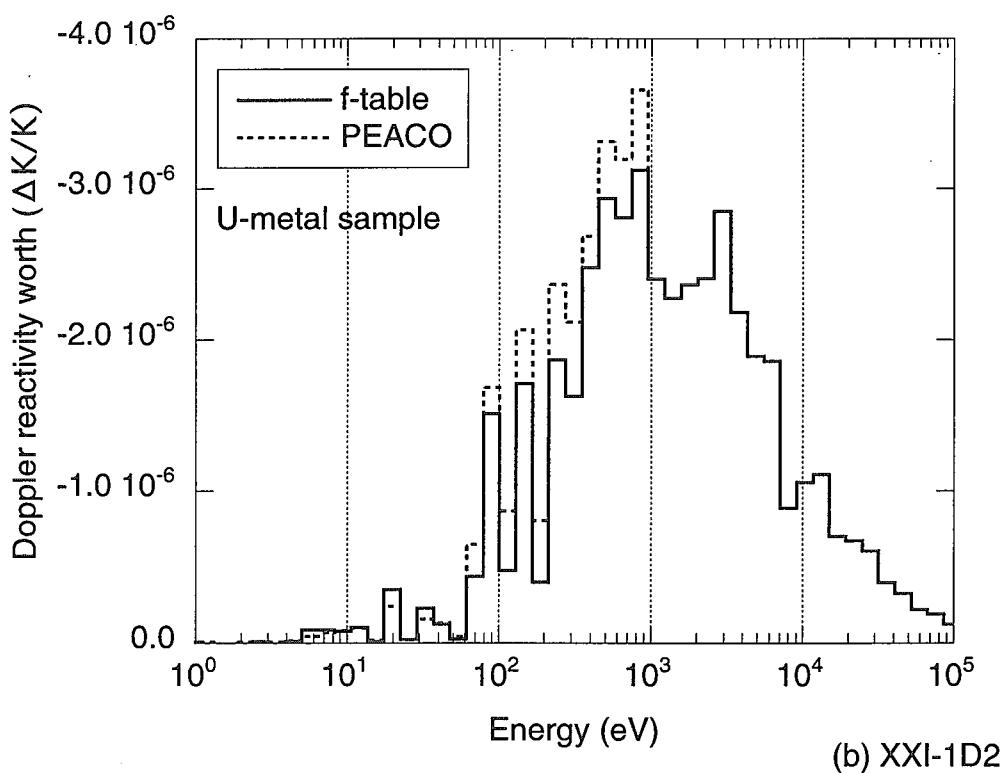


Fig. 28 Comparison of the energy breakdown of the Doppler reactivity worth ($293\text{K} \rightarrow 1073\text{K}$) of the ThO_2 sample between the calculations with and without the PEACO routine by the SRAC calc.



(a) XX-2



(b) XXI-1D2

Fig. 29 Comparison of the energy breakdown of the Doppler reactivity worth ($293\text{K} \rightarrow 1073\text{K}$) of the U-metal sample between the calculations with and without the PEACO routine by the SRAC calc.

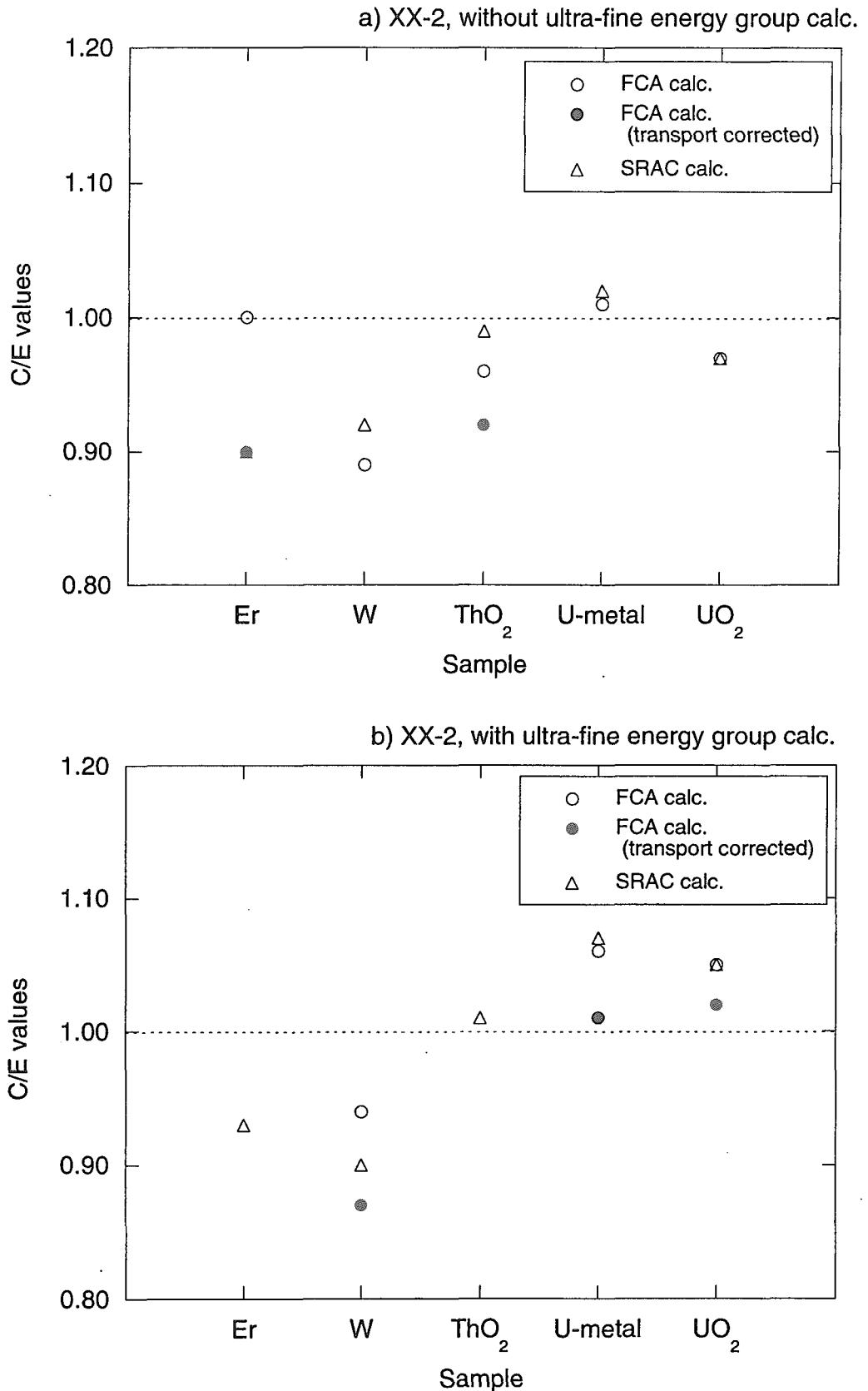
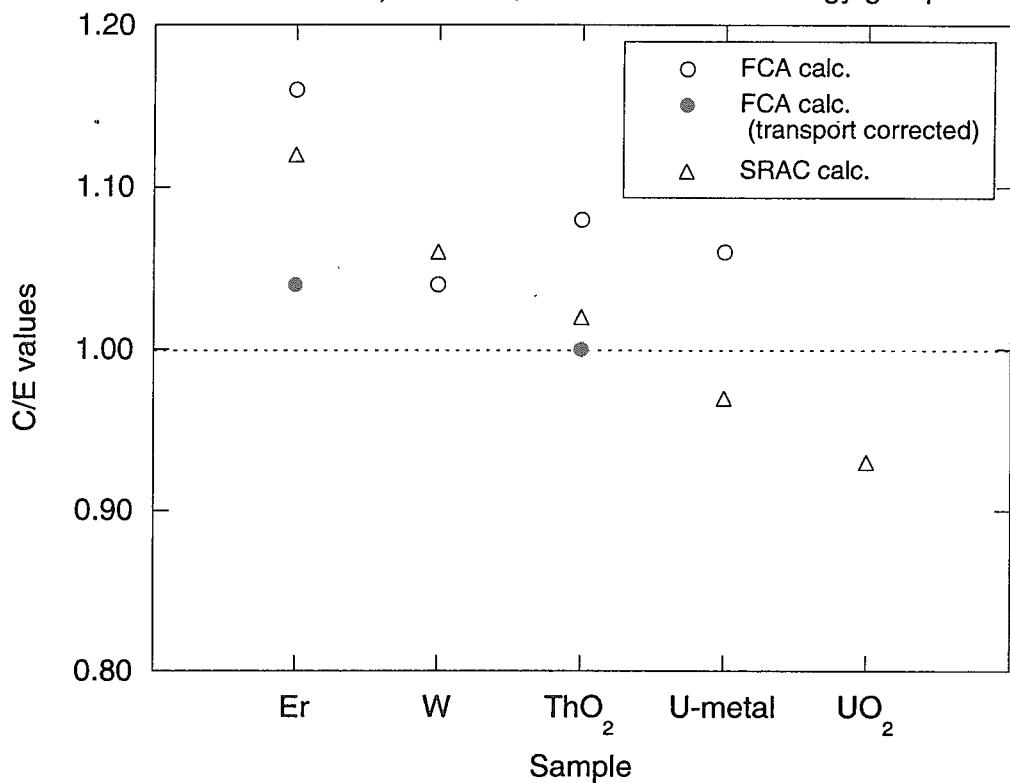


Fig. 30 Comparison of the C/E values of the Doppler reactivity worth (293K→1073K) for each Doppler sample between the FCA calc. and SRAC calc.

c) XXI-1D2, without ultra-fine energy group calc.



d) XXI-1D2, with ultra-fine energy group calc.

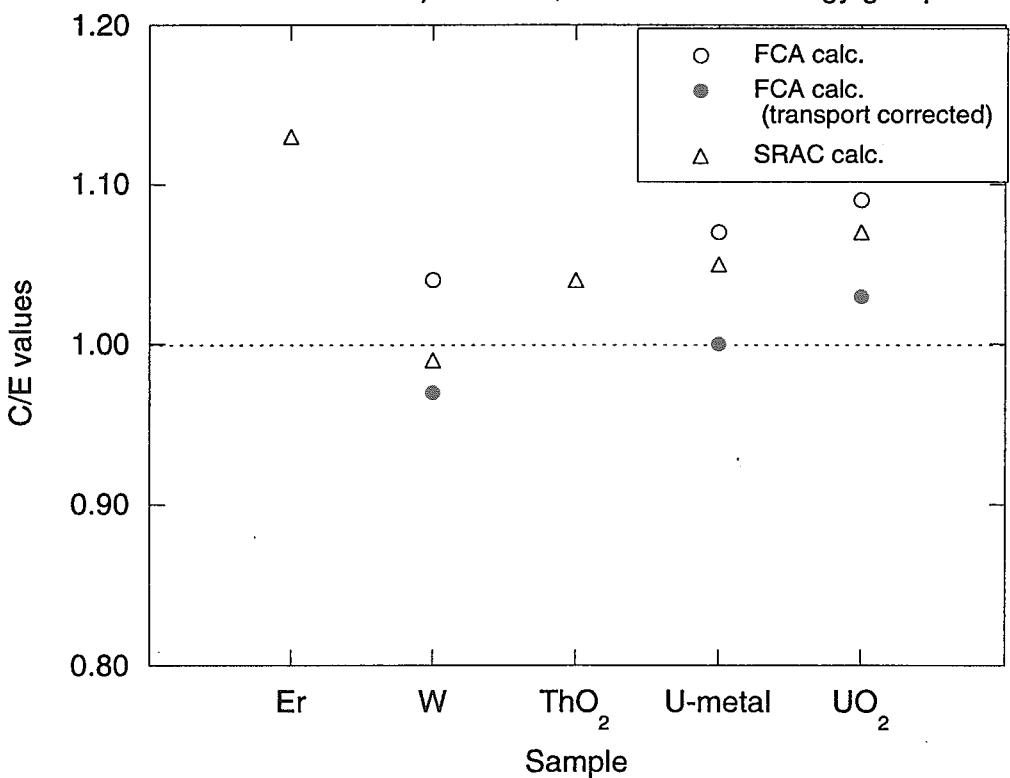


Fig. 30 Comparison of the C/E values of the Doppler reactivity worth (293K→1073K) for each Doppler sample between the FCA calc. and SRAC calc. (continued)

4. まとめ

本研究では、ROX燃料燃焼炉のドップラー反応度フィードバックを向上させるために添加する共鳴吸収物質としてエルビウム (Er) 、タンゲステン (W) およびトリウム (ThO_2) に着目し、これらサンプルのドップラー反応度価値に対する計算予測精度を評価することとした。

FCAを用い、高速スペクトル炉心XX-2および軽水減速中速スペクトル炉心XXI-1D2において、800 °Cまで測定可能なサンプル加熱反応度価値測定法によりこれら共鳴物質サンプルのドップラー反応度価値を測定した。測定の結果、ウランサンプルのドップラー反応度価値によって規格化した共鳴物質のドップラー反応度価値は、軟スペクトルであるXXI-1D2炉心ではXX-2炉心より12%～32%増加したことが分かった。

JENDL-3.2ライブラリーを用い、高速炉体系でのドップラー効果の解析のために開発された解析手法を基本計算として、C/E値、詳細群構造衝突確率計算の効果（詳細群効果）、輸送補正等について、両炉心での解析結果を比較した。また、熱中性子炉解析のために開発されたSRACシステムを用い拡散計算による解析を行い、同システムによる計算の予測精度の傾向を調べるとともに、基本計算の結果と比較した。

ドップラー反応度価値について基本計算の解析結果を以下にまとめる。

1) 拡散計算に基づく解析

- ・ XX-2炉心では、WサンプルのC/E値が他のサンプルに比べて小さくなつたが、ほぼ実験誤差の範囲内で実験値と計算値はよく一致した。
- ・ XXI-1D2炉心では、全サンプルについて数%～10数%の過大評価となつた。特にErサンプルでは800°Cで16%の過大評価となつた。

2) 詳細群効果

- ・ XXI-1D2炉心においては-4～+1%であり、XX-2炉心 (+2～+8%) より小さくなつた。
- ・ Wサンプルでは、両炉心ともに10keV付近から200eV付近までは、PEACO-Xを用いた詳細群計算を行つた方がドップラー反応度価値への寄与が大きくなつた。XXI-1D2炉心では200eV付近を境に低エネルギー側ではPEACO-Xの方がSLAROMより寄与が小さくなつた。
- ・ XXI-1D2炉心では中性子スペクトルが軟らかいため、XX-2炉心ではほとんど寄与の無い167eV以下のエネルギー範囲において、SLAROMとPEACO-Xの $\delta \Sigma_a$ (サンプル領域の温度変化による吸収反応断面積の変化) の違いによる効果が現れ、エネルギー積分の結果詳細群効果がXX-2炉心より小さくなつたことが分かった。
- ・ タングステンの実効断面積は、約30eV以上では、ウランサンプルの場合と異なりPEACO-Xの方がSLAROMより大きな断面積を与えていることが分かった。

3) 輸送補正

- ・ 輸送補正是、両炉心とも拡散計算に対して絶対値を小さくする効果があり、中性子スペクトルの軟らかいXXI-1D2炉心の方がその効果が大きいことが分かった。

- ・ウランサンプルについては両炉心とともに実験誤差の範囲内で計算値は実験値と一致した。
- ・XX-2炉心では、共鳴物質サンプルのC/E値は0.87～0.92となり、 ThO_2 サンプルを除いて実験誤差の範囲を超えて過小評価となつた。
- ・XXI-1D2炉心では、Wサンプルでは過小評価の傾向となつたが、C/E値は0.88～1.04となり、共鳴物質サンプルについては実験誤差の範囲内で計算値は実験値とほぼ一致した。
- ・輸送計算では、サンプル領域における中性子スペクトルとサンプルおよびその近傍での中性子束分布の計算精度向上がドップラー反応度価値の改善に大きく寄与していることが分かった。

4) 感度解析

- ・ドップラー反応度価値に寄与するエネルギー範囲全域において、エルビウム6核種の中で ^{167}Er の感度が最も大きいことが分かった。

サンプル反応度価値について基本計算の解析結果を以下にまとめる。

- ・XX-2炉心では、Wサンプルに対して過小評価したが、他のサンプルではほぼ実験誤差の範囲内で実験値と計算値はよく一致した。
- ・XXI-1D2炉心では、全般的にC/E値は1.0と大きく異なつた。
- ・以下、XXI-1D2炉心についての考察をまとめる。
 - 1) 拡散および1次摂動計算では、漏洩項の計算精度がC/E値に大きく影響を及ぼしていることが分かった。
 - 2) 厳密摂動計算によってC/E値はかなり改善され、拡散計算でも $10^4 \Delta k/k$ オーダーの反応度価値計算については充分適応できることが分かった。
 - 3) 拡散および1次摂動計算に輸送補正を施した結果、C/E値はかなり改善された。
 - 4) ThO_2 サンプルでは輸送効果は負の効果となり、拡散計算の過小評価は解消されなかつた。

SRACを用いた解析について、基本計算との比較の結果を以下にまとめる。

- ・両炉心において、以下の共通した傾向があることがわかつた。
 - 1) ErサンプルではSRACの方が3%～10%小さい計算値を与える。
 - 2) Wサンプルでは、詳細群による断面積計算を行わない場合、SRACの方が2%～5%大きな計算値を与えるが、詳細群効果はSRACの方がマイナスの効果が大きいため、詳細群による断面積計算を行った場合には逆にSRACの方が1%～5%小さな計算値を与える。
 - 3) ウランサンプルでは、PEACOを用いれば、基本計算とSRAC両手法の解析精度は同程度となる。
- ・両炉心間での相違点としては、詳細群による断面積計算を行わない場合、 ThO_2 サンプルではXX-2炉心ではSRAC解析>基本計算であるのに対して、XXI-1D2炉心ではSRAC解析<基本計算となつた。ウランサンプルについても同様の傾向がみられた。

謝 辞

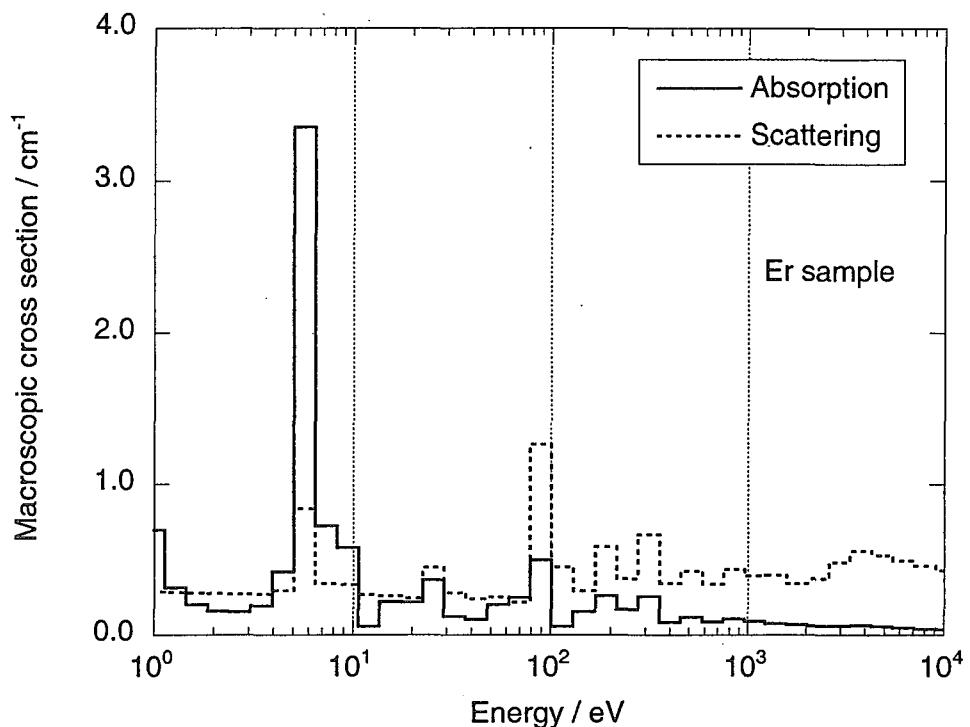
本研究を進めるに当たって多くの有益な助言と激励を頂いた炉物理研究グループ・リーダー森貴正氏に感謝いたします。本研究を行うに当たり、長時間にわたりFCAの運転をしていただき、また実験解析を担当していただいたFCAスタッフに感謝します。本実験に使用するサンプルの作成に当たっては、白鳥徹雄氏にご尽力いただいた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

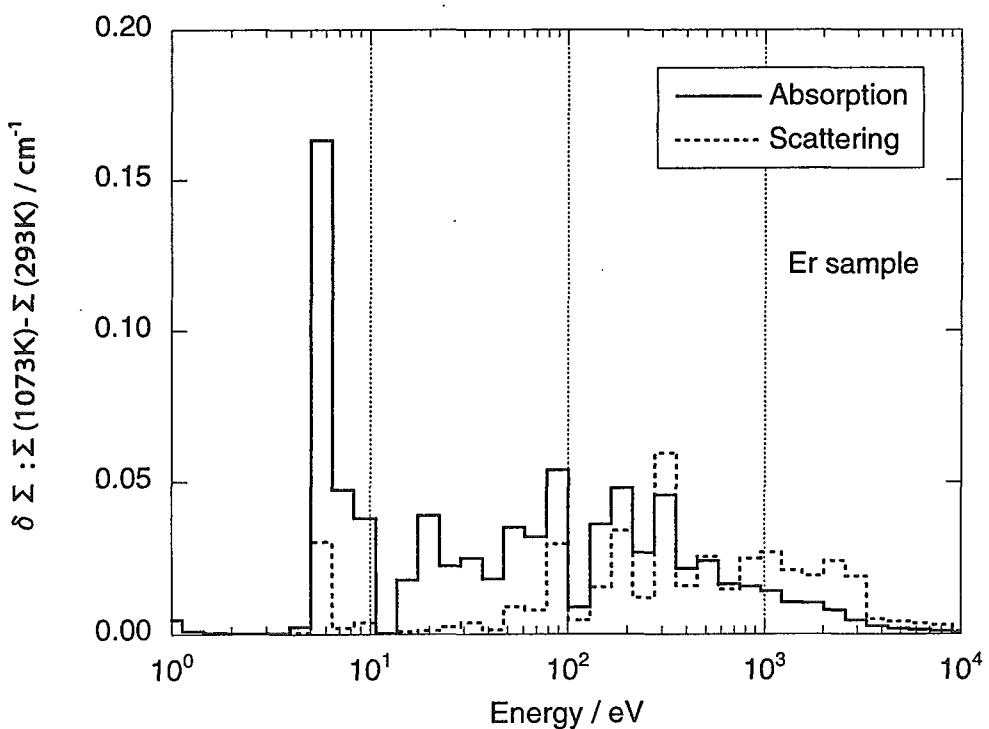
- 1 H. Akie, T. Muromura, H. Takano and S. Matsuura: "A New Fuel Material for Once-through Weapons Plutonium Burning," *Nucl. Technol.*, 107, pp.182(1994).
- 2 H. Akie, N. Nitani, T. Muromura, H. Takano and T. Ohmichi: "Plutonium burning of inert matrix fuel with rock-like structure in LWR", International conference on evaluation of emerging nuclear fuel cycle systems Versailles (France) 11-14 Sep 1995(1995).
- 3 秋江拓志、安濃田良成、高野秀機、山口兆一、菅生幸博: JAERI-Research 98-009, "岩石型プルトニウム燃料軽水炉の核特性と事故時過渡特性" (1998).
- 4 白数訓子、山下利之、金沢浩之、木村康彦、須藤健次、間柄正明、伊奈川潤、河野信昭、中原嘉則: JAERI-Research 2001-018, "岩石型燃料照射試料の燃焼率測定"(2001).
- 5 草ヶ谷和幸、中村武彦、吉永真希夫、小此木一成、上塙寛: JAERI-Research 2001-010, "岩石型燃料の反応度事故条件下における挙動" (2001).
- 6 T. Mukaiyama and S. Okajima: "Neutron Spectrum Dependence of Natural UO₂ Doppler Effect Measured in FCA" *J. Nucl. Sci. and Technol.*, 22, pp.243-246(1985).
- 7 安藤真樹・岡嶋成晃・大井川宏之: JAERI-Research 2001-017, "FCA XVII-1 における種々のサンプルを用いた²³⁸U ドップラー効果測定" (2001).
- 8 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).
- 9 S. Oajima, H. Oigawa and T. Mukaiyama: "Resonance Interaction Effect between Hot Sample and Cold Core in Analysis of Doppler Effect Measurement", *J. Nucl. Sci. and Tecnol.*, 31, pp.1097-1104 (1994).
- 10 G. W. Rodeback : "Temperature coefficients of Uranium and Thorium Resonance Integrals", Atomics International(1956).
- 11 Y. Nakano, M. Andoh, S. Okajima, H. Takano and A. Akie : "Doppler effect experiment of resonance materials for ROX fuels", *Progress in Nuclear Energy*, 38, 343(2001).
- 12 K. Okumura, K. Kaneko and K. Tsuchihashi: JAERI-Data/Code 96-015, " SRAC95; 汎用核計算コードシステム" (1996).
- 13 S. Iijima, M. Andoh and H. Oigawa: "Benchmark Experiment for Physics Parameters of Advanced Fuel LMFBR at FCA", Proc. of Int. Conf. on the New Frontiers of Nuclear Technology: Reactor Physics, Safety and High-Performance Computing (PHYSOR 2002), 8C-02, Seoul, Korea, 7-10 October, (2002).
- 14 T. Yasuno, M. Nakano, T. Mukaiyama, T. Iijima and J. Hirota:"Doppler coefficient measurements in FCA" *J. Nucl. Sci. Technol.*, 7, 271(1970).
- 15 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).
- 16 T. Nakagawa, K. Shibata and S. Chiba : "Japanese Evaluated Nuclear Data Library version 3 revision-2:

- JENDL-3.2", *J. Nucl. Sci. and Tecnol.*, 32, 1259 (1995).
- 17 K. Shibata, et al.: "Japanese Evaluated Nuclear Data Library version 3 revision-3: JENDL-3.3", *J. Nucl. Sci. and Technol.*, 39, 1125 (2002).
- 18 千葉豪, 羽様平, 石川真 :"高速炉用炉定数セットJFS-3-J3.2の改訂", *Trans. At. Energy Soc. Jpn.*, 1, 335 (2002).
- 19 M. Nakagawa and K. Tsuchihashi :JAERI 1294, "SLAROM: A Code for Cell Homogenization Calculation of Fast Reactor" (1984).
- 20 飯島進, 加藤雄一, 高崎謙一, 岡嶋成晃 :JAERI-Data/Code, "拡散理論に基づく体系計算コード: POPLARS" (2003). (発行予定)
- 21 T. B. Fowler, D. R. Vondy, and G. W. Cunningham : "Nuclear Reactor Analysis Code; CITATION", LA-4432 (1970).
- 22 P. Benoist: CEA-R-2278(1964).
- 23 飯島進, 岡嶋成晃 :JAERI-Data/Code 2002-023, "多群拡散摂動計算コード:PERKY (2002年版)"(2002).
- 24 R. E. Alcouffe, R. S. Baker, F. W. Brinkley, D. R. Marr, R. D. O'Dell and W. F. Walters : LA-12969M (1995).
- 25 角田弘和 :"角度依存摂動計算コード: SNPERT-II"私信.
- 26 原昭浩, 竹田敏一, 菊池康之 :JAERI-M 84-027, "SAGEP : 一般化摂動論に基づく二次元感度解析コード" (1984).

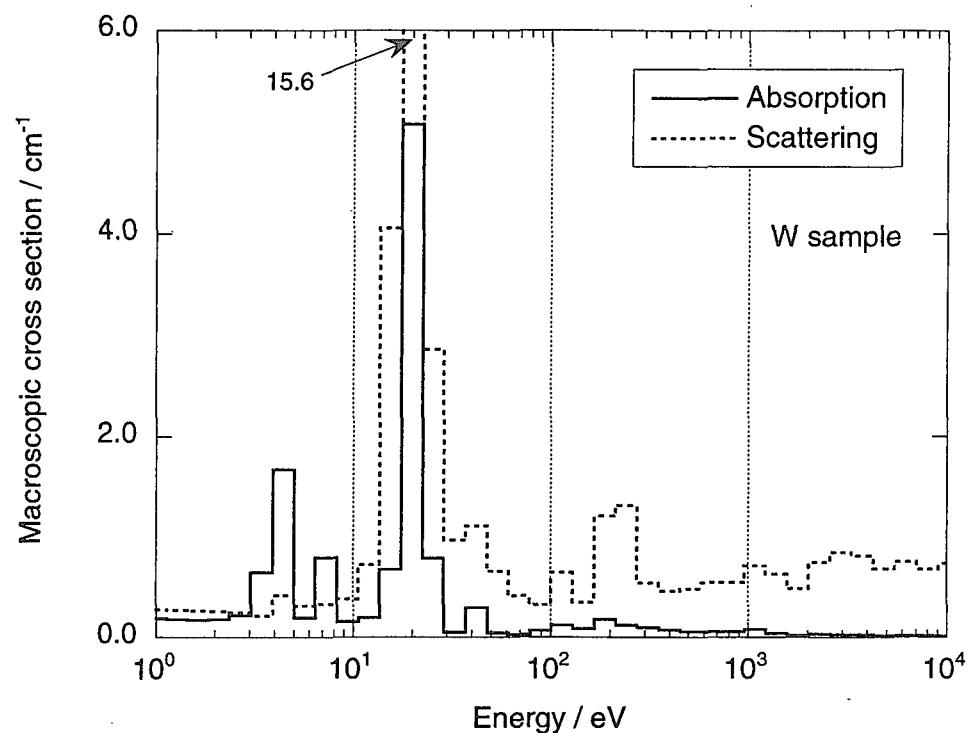
Appendix SLAROMによる各サンプルの巨視的実効断面積



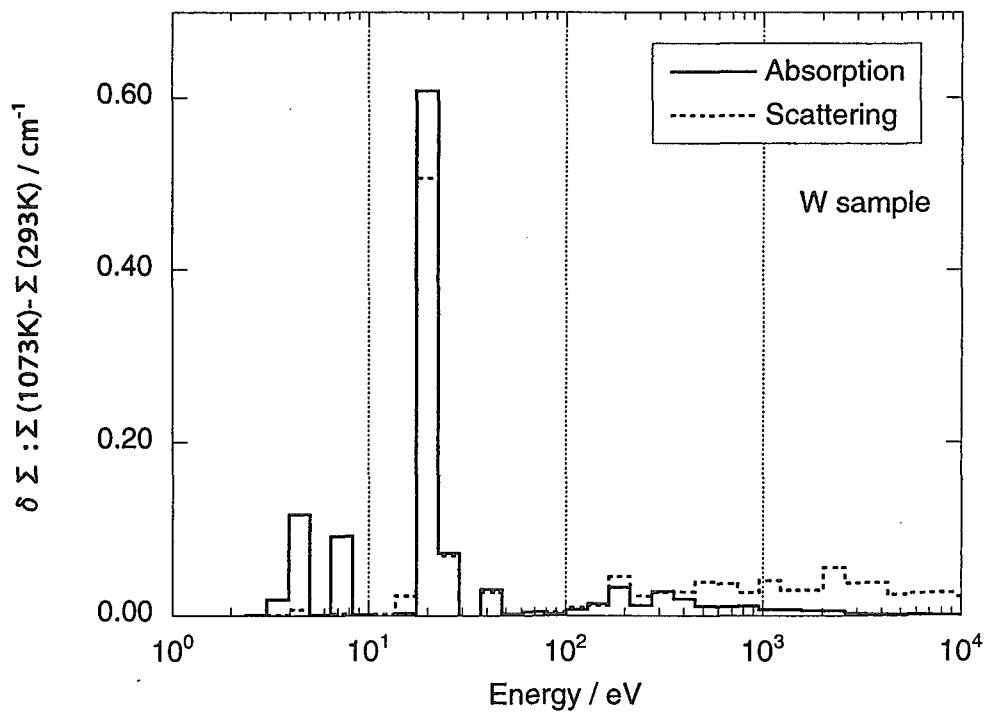
(a) Macroscopic effective cross sections at 293K



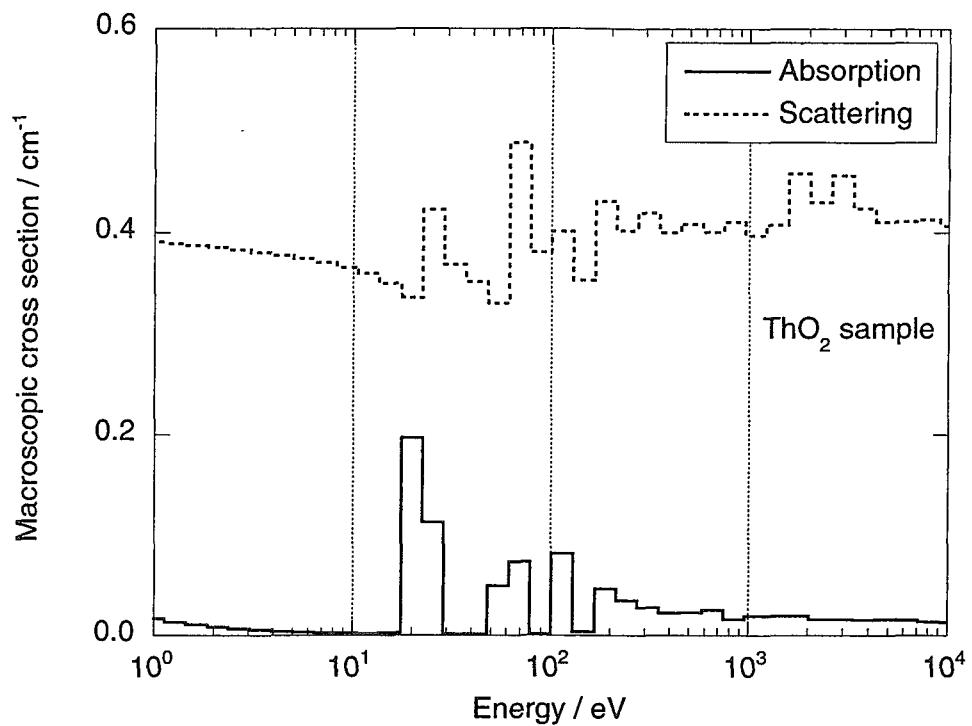
(b) Change of macroscopic effective cross sections by temperature change



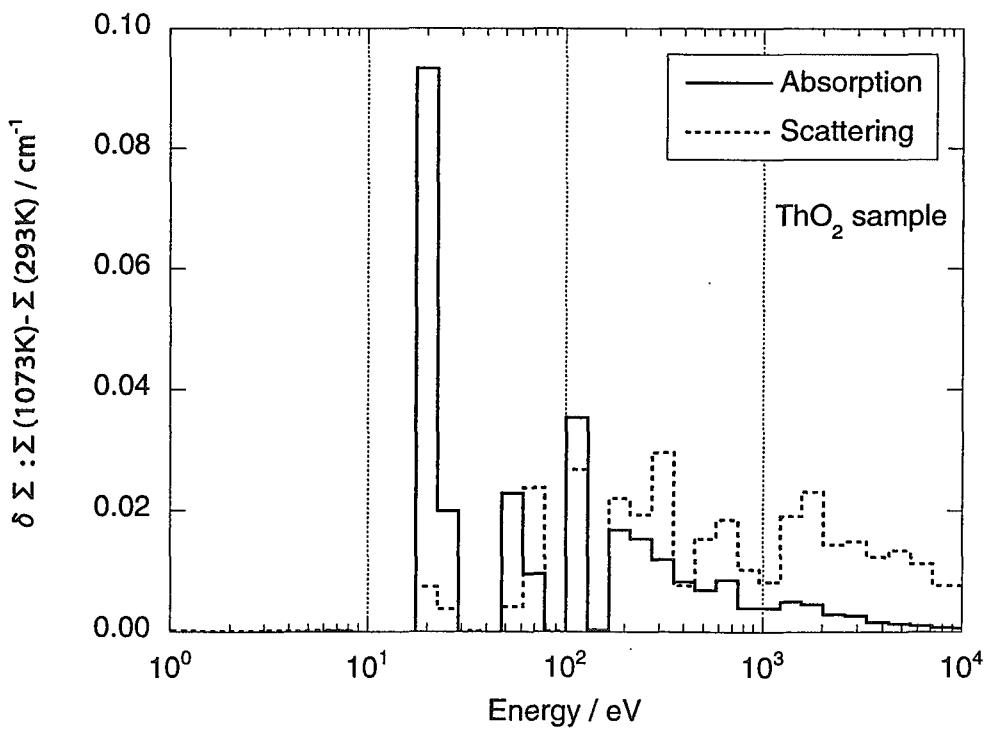
(a) Macroscopic effective cross sections at 293K



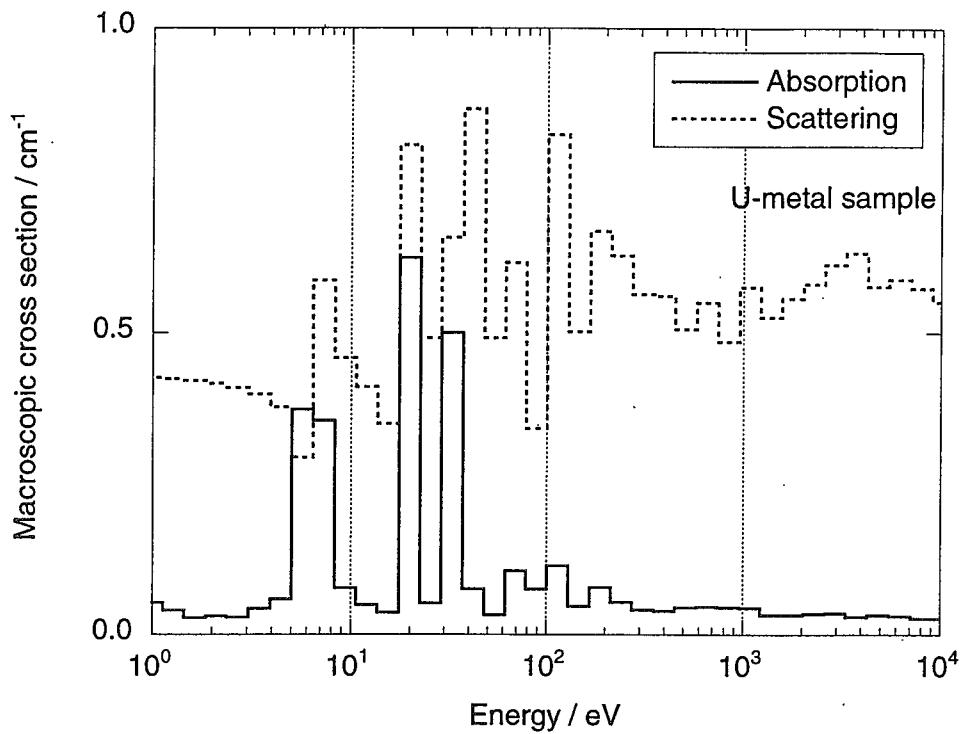
(b) Change of macroscopic effective cross sections by temperature change



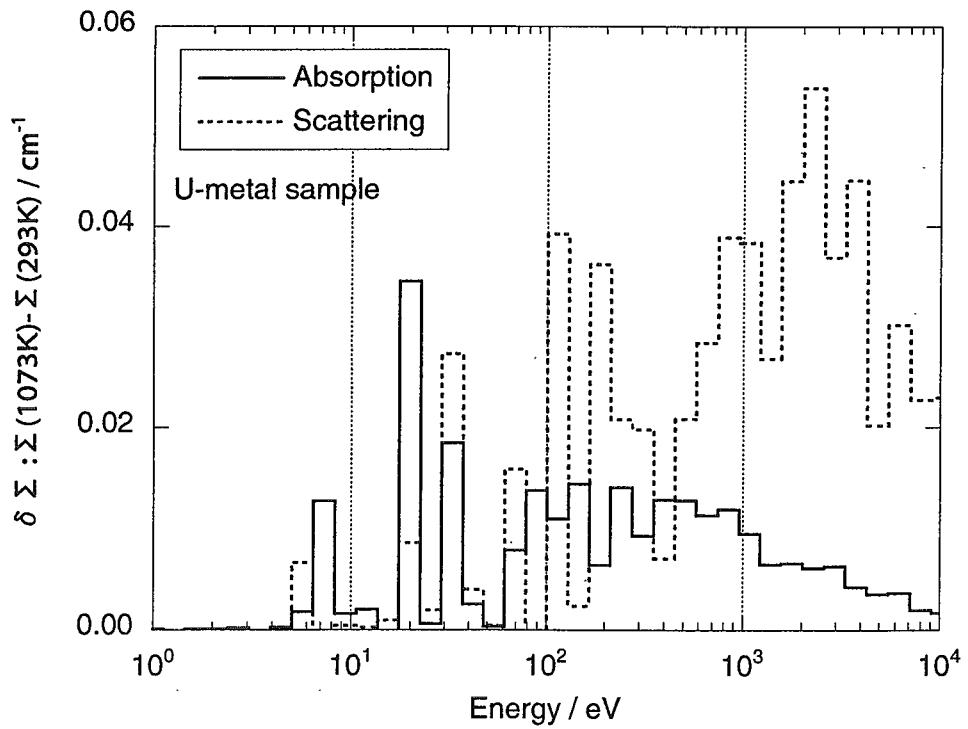
(a) Macroscopic effective cross sections at 293K



(b) Change of macroscopic effective cross sections by temperature change



(a) Macroscopic effective cross sections at 293K



(b) Change of macroscopic effective cross sections by temperature change

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^{-1}
力	ニュートン	N	$m \cdot kg/s^2$
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N \cdot m$
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	$A \cdot s$
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	フーラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジemens	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	$V \cdot s$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
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	
光束度	ルーメン	lm	$cd \cdot sr$
光強度	ルクス	lx	lm/m^2
放射能	ベクレル	Bq	s^{-1}
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
ト	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	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、1eVおよび1u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、ヘクタ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関係理事会指令では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($=10^5$ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(N\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)}(\text{cm}^2/\text{s})$$

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

エネルギー・仕事・熱量	J($=10^7$ 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^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{-18}	$= 4.184 \text{ J (熱化学)}$
	9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{-19}	$= 4.1855 \text{ J (15 }^\circ\text{C)}$
	3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}	$= 4.1868 \text{ J (国際蒸気表)}$
	4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{-19}	仕事率 1 PS(仏馬力)
	1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}	$= 75 \text{ kgf}\cdot\text{m/s}$
	1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{-18}	$= 735.499 \text{ W}$
	1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1	

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照 射 線 量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem
	1	2.70270×10^{-11}		1	100		1	3876		100	
	3.7×10^{10}	1		0.01	1		2.58×10^{-4}	1	0.01	1	

(86年12月26日現在)

ECAを用いた岩石型燃料に添加する共吸収物質のドップラー効果測定

R100
古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています