

論	文
---	---

近畿大学炉を用いた標準的 1/E スペクトル中性子場における ^{51}V , ^{58}Fe , ^{181}Ta , ^{186}W の共鳴積分の測定

三木良太, 伊藤哲夫, 戸高政人*,
小林捷平**, 山本修二**, 木村逸郎**

Measurement of Resonance Integrals of ^{51}V , ^{58}Fe , ^{181}Ta and ^{186}W in the Standard 1/E Spectrum Neutron Field of Kinki University Research Reactor, UTR-KINKI

Ryota MIKI, Tetsuo ITOH, Masahito TOTAKA*, Katsuhei KOBAYASHI**,
Shuji YAMAMOTO** and Itsuro KIMURA**

(Received July 30, 1986)

Kinki University Reactor, UTR-KINKI, is a light-water moderated and cooled, graphite reflected, heterogeneous highly enriched uranium thermal reactor with 46cm-separated two-slab fuel arrangement. Between the two separated cores of UTR-KINKI, there exists a wide internal graphite reflector of 46cm thick, and a vertical graphite stringer, 9.6cm or 16.4cm square and 122cm long, at the center of internal reflector can be withdrawn to provide an experimental hole, where the neutron spectrum has been proved experimentally and analytically to have excellent 1/E characteristics. Analytical calculations on the neutron spectrum in this void region was carried out by JAERI Thermal Reactor Standard Code System (SRAC Code System)¹⁾, 2-D diffusion (CITATION) and 2-D SN transport (TWOTRAN), on X-Y and R-Z geometries. So far, we have measured the resonance integrals for (n, γ) reactions of several nuclides, ^{51}V , ^{58}V , ^{181}Ta and ^{186}W , relative to that of ^{197}Au (n, γ) ^{198}Au reaction. Our measured values agree very well with the recent reported and/or evaluated data.

KEYWORDS

resonance integral, ^{51}V , ^{58}V , ^{181}Ta , ^{186}W , 1/E spectrum neutron field, UTR-KINKI, SRAC Code System.

1. 緒 言

近畿大学炉の2分割炉心の中央にある内部黒鉛反射体中心の中央垂直黒鉛ストリンガーを引き抜いた空間

*近畿大学理工学部原子炉工学科
**京都大学原子炉実験所

は2分割炉心の中心にあるので、中性子束の勾配が極めて小さく、中性子スペクトルの方向依存性も少ないことが予想され、SRACコード・システム¹⁾による解析計算の結果、かなりの速中性子成分を伴い、かつ熱中性子領域の盛り上がり認められるものの、約1eVから数100keVまでの5桁以上にわたる広いエネルギー範囲にわたって、極めて平坦な分布をもつ優れた

三木他：近畿大学炉を用いた標準的 1/E スペクトル中性子場における ^{51}V , ^{56}Fe , ^{181}Ta , ^{186}W の共鳴積分の測定

1/E スペクトル中性子場であることが示されている。これらの特性の主なるものについては、種々の特性測定実験^{2)~10)}を通じて確認されており、またこの標準的な 1/E スペクトル中性子場としての特性を利用して、 ^{55}Mn , ^{232}Th および ^{238}U の共鳴積分の測定を行ない、Mughabghab の文献値と極めて良く一致したことを既に報告⁸⁾したが、今回は更に上記以外の数種の核種について、放射化法により共鳴積分値の測定を行なった。測定の結果は、最近の実験値および評価値と良く一致した。

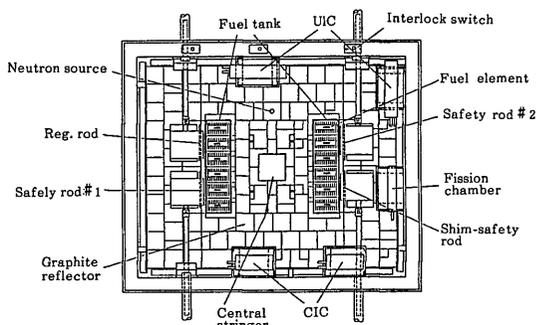


Fig. 1 Reactor core plan of UTR-KINKI

2. 1/E スペクトル中性子場の解析計算

近畿大学炉は、熱出力 1W の軽水減速・黒鉛反射、高濃縮ウラン非均質燃料熱中性子炉で、2分割炉心をもち、2つの燃料タンクは幅 46cm の内部黒鉛反射体によって隔てられており、その中央部にある 9.6cm 角または 16.4cm 角、122cm 長の垂直黒鉛ストリンガーを引き抜くことができる。近畿大炉の炉心平面図を Fig. 1 に示す。このストリンガーを引き抜いた空間の上下または下部のみに、種々の高さの黒鉛ブロックを挿入することにより、任意の寸法の空洞または実験孔を設けることが可能で、この空間を標準中性子場をはじめとする種々の目的に使用することができる。この空間部分の概念図を Fig. 2 に示す。Fig. 3 は、上下に 28cm 高の黒鉛ブロックを挿入して、高さ 66cm の空間を設定した場合の上下方向の中心部における中性子スペクトルを、SRAC コード・システムによって解

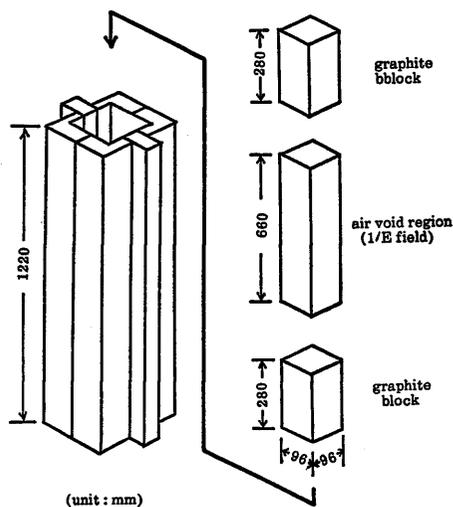


Fig. 2 Details of experimental space

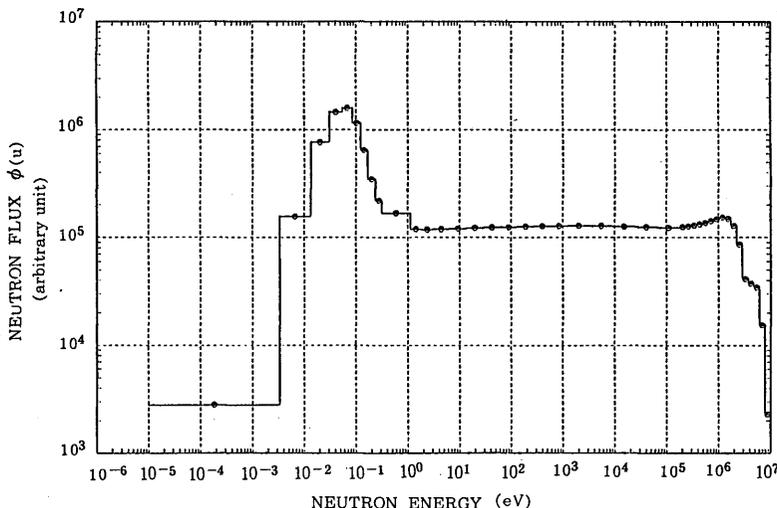


Fig. 3 Neutron spectrum of central void region calculated by SRAC Code System

析計算した結果を示す。

SRAC コード・システムは、日本原子力研究所で開発された原子炉設計・解析用熱中性子炉体系標準核設計コード・システムで、核データ・ライブラリー、群定数ライブラリーとそのため処理コード、中性子スペクトルの計算ルーチンおよび各種の輸送計算コード、1, 2, 3 次元拡散ルーチンや動特性パラメータ、格子燃焼ルーチンなどから成っており、これまでに多くのベンチマーク計算や複雑な炉心構造をもつ研究炉の解析計算を通じて、その適用性が高く評価されている。

2 分割の特異な炉心構造を有し、内外の反射体として黒鉛を用いているため、通常の研究炉に比べて中性子漏洩率がかなり大きい特徴をもつ近畿大学炉につき、SRAC コード・システムを用いて解析計算を実施した結果、実効増倍係数（固有値）、反応度効果、ボイド反応度、 l/β 、温度係数などをはじめ、中央反射体中心部に組み込んだトリウム体系の反応度効果や中性子束分布についても実測値と極めて良い一致が得られており¹³⁾、この種の複雑な炉心体系の計算における SRAC コード・システムの実用性が確認されている。

近畿大学炉の内部黒鉛反射体中央の垂直黒鉛ストリンガーを引き抜いた空間内に設けた実験孔の中性子スペクトルの解析計算は、以下のようにして行なった。なお使用した核データ・ライブラリーは、日本原子力研究所において行なわれた種々の体系に関するベンチマーク計算において、実験値に対して最も良い結果が得られた JENDL-2 (U-238, Al-27), ENDF/B-V (U-235) および ENDF/B-IV (前記以外の核種) の組み合わせを採用した。

(1) fast 74群, thermal 48群, 合計122群の核データ・ライブラリーから、多群定数（高速中性子領域31群, 熱中性子領域31群）を作成するため、単一燃料合金部、被覆材および冷却材から成る燃料領域モデルにつき、1 次元スラブ体系で衝突確率計算コードを用いてセル計算を実施した。セル計算のために使用した燃料領域モデルを Fig. 4 に示す。

(2) 全炉心に対する少数群計算を2次元拡散コード (CITATION-X, Y) および2次元輸送コード (TWO-TRAN-R, Z) を用いて行なった。2次元 (X, Y) 拡散コードによる計算では、近畿大炉の実際の炉心構造に対して出来るだけ忠実にデータを入力し、2次元 (R, Z) 輸送コードによる計算では、炉心構造をリング状にモデル化した。計算に使用したリング構造炉心モデルを Fig. 5 に示す。

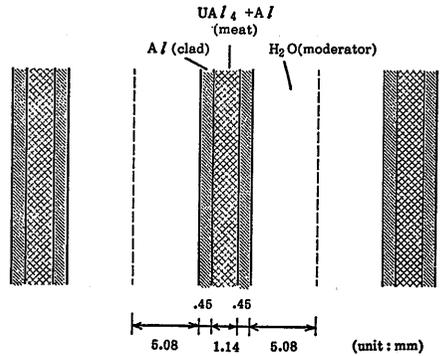


Fig. 4 Cell calculation model for fuel region

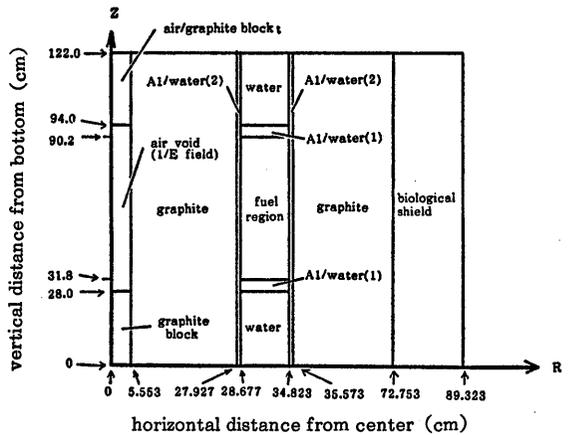


Fig. 5 Cylindrical ring core model of UTR-KINKI for TWOTRAN (R, Z) calculation

Table 1 Energy group structure for neutron spectrum calculation

Group	Fast Energy Group		Thermal Energy Group	
	Energy Range (eV)		Energy Range (eV)	
	Upper	Lower	Upper	Lower
1	0.10000E+8	0.77880E+7	0.11254E+1	0.31961E+0
2	0.77880E+7	0.60653E+7	0.31961E+0	0.23742E+0
3	0.60653E+7	0.47237E+7	0.23742E+0	0.16743E+0
4	0.47237E+7	0.36788E+7	0.16743E+0	0.12293E+0
5	0.36788E+7	0.28651E+7	0.12293E+0	0.85397E-1
6	0.28651E+7	0.22313E+7	0.85397E-1	0.54520E-7
7	0.22313E+7	0.17377E+7	0.54520E-7	0.30602E-1
8	0.17377E+7	0.13534E+7	0.30602E-1	0.13543E-1
9	0.13534E+7	0.10540E+7	0.13543E-1	0.33423E-2
10	0.10540E+7	0.82085E+6	0.33423E-2	0.10000E-4
11	0.82085E+6	0.63928E+6		
12	0.63928E+6	0.49787E+6		
13	0.49787E+6	0.38774E+6		
14	0.38774E+6	0.30197E+6		
15	0.30197E+6	0.23518E+6		
16	0.23518E+6	0.18316E+6		
17	0.18316E+6	0.67380E+5		
18	0.67380E+5	0.24788E+5		
19	0.24788E+5	0.91188E+4		
20	0.91188E+4	0.33546E+4		
21	0.33546E+4	0.12341E+4		
22	0.12341E+4	0.58295E+3		
23	0.58295E+3	0.27536E+3		
24	0.27536E+3	0.13007E+3		
25	0.13007E+3	0.61442E+2		
26	0.61442E+2	0.29023E+2		
27	0.29023E+2	0.13710E+2		
28	0.13710E+2	0.64760E+1		
29	0.64760E+1	0.30590E+1		
30	0.30590E+1	0.18554E+1		
31	0.18554E+1	0.11253E+1		

Table 2 Experimental data of irradiated sample foils

target nuclide	atomic mass (amu)	abundance (%)	γ -ray measured (MeV)	γ -ray intensity (%)	HPGe detection efficiency	foi thickness (mm)	self shield correction	main resonance energy(eV)
^{197}Au	196.96656	100.00	0.412	95.51	8.60 E-3	0.050	2.85	4.9
^{181}Ta	180.94801	99.988	1.121	35.15	2.70 E-3	0.100	2.36	4.28
^{186}W	185.95438	28.6	0.480	21.0	7.3 E-3	0.127	2.68	18.8
^{58}Fe	57.93328	0.29	1.292	44.12	2.32 E-3	0.250	1.	230
^{51}V	50.94396	99.75	1.434	100	2.15 E-3	0.050	0.99	3000

内部反射体中心の垂直黒鉛ストリンガーを挿入したままの場合および完全に引き抜いた場合について、2D-CITATION (X, Y) および 2D-TWOTRAN (R, Z) の双方により中性子スペクトルの計算を行なったところ、ほぼ同一の結果が得られたので、垂直黒鉛ストリンガーを引き抜いた空間内に部分的に空洞を設けた場合の中性子スペクトルの計算については、上下の非対称性を入力することができる 2D-TWOTRAN (R, Z) によって計算を進めた。

Fig. 2 は、空間内の上下に 28cm 高の黒鉛ブロックを挿入して、高さが 66cm の空洞を設け、この部分に照射用の金属箔を取り付けるためのアルミ角棒製のフレームを置いた時の中性子エネルギー・スペクトルの計算結果を、単位レサージ当りの中性子束としてあらわしたもので、高速中性子領域は31群、熱中性子領域は10群とした。これらのエネルギー・群構造を Table 1 に示す。約 1eV から数 100keV までの5桁以上にわたる広いエネルギー範囲にわたって、 $\pm 4.5\%$ 以内の極めて平坦な分布をもち、標準的 1/E スペクトル中性子場として優れた特性をもつことが示されている。

3. 実験の概要

共鳴積分値の測定は、 ^{197}Au (n, γ) 反応のデータ ($1550 \pm 28\text{b}$)¹²⁾ を標準として選び、これに対するそれぞれの核種の (n, γ) 反応の共鳴積分値を放射法化により求めた。照射試料はいずれも直径 12.7mm の高純度箔または合金箔を用い、それぞれ 0.5mm 厚の Cd ケースに入れ、近畿大学炉の中央垂直黒鉛ストリンガーを引き抜いた空間の中心部において、モニター箔と共に炉出力 1W で照射した後、各箔の誘導放射能を HPGe 検出器により測定した。照射試料に関するデータを Table 2 に示す。

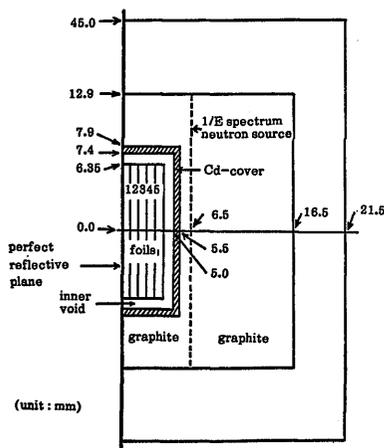


Fig. 6 1/2 model for self-shielding correction factor calculation with VIM Code

共鳴領域では、Fe を除く各試料とも中性子自己遮蔽効果が著しく、箔の内部の反応率分布に大きな影響を与える。先に報告した ^{55}Mn 、 ^{232}Th および ^{238}U の共鳴積分の測定⁸⁾ においては、箔を5枚重ね、0.5mm 厚の Cd ケースに入れて照射し、実験的に求めた箔内の放射化率分布が VIM コード¹³⁾ によるモンテカルロ計算の結果と良い一致を示したので、自己遮蔽効果の補正量として計算による値を使用した。今回も同様に VIM コードによるモンテカルロ計算を各試料について行ない、自己遮蔽効果の補正量として使用した。

VIM コードによる自己遮蔽効果のモンテカルロ計算では、Fig. 6 に示す 1/2 モデルを用い、図に示した位置にある一様な 1/E スペクトルをもつ円板状中性子面線源より発生した中性子の挙動を追跡して、照射箔を片側5分割した各領域における反応率を、計算誤差が数%以下になるまで、発生中性子数を増やして計算を続行し、一方照射箔内の原子密度を100万分の1に薄めた場合の計算結果を無限希釈として比較し、自己

遮蔽効果の補正量とした。中性子エネルギー群は20 MeV から 0.00001eV までの10群とし、全発生中性子数は、核種により異なるが約240万以上である。

4. 実験結果

共鳴積分値については、1950年代以降、これまでに多くの報告がなされているが、実験データ、評価値同士にもかなりの差異が見られ、1970年代以降に発表されたものに限っても、データ間のばらつきが大きい核種も少なくない。Table 3~6 に、 ^{58}Fe 、 ^{51}V 、 ^{181}Ta および ^{186}W の共鳴積分値に関する最近の実験値及び評価値を、われわれの測定結果とともに示す。われわれの測定値は最近の値と良く一致しており、この事実は、実験を行なった空間が優れた 1/E スペクトル特性を有していることを間接的に示している。また SRAC コード・システムによるスペクトルの解析計算の結果の妥当性を実証したことにもなる。なお各 Table に記した誤差は、主として統計誤差 (1.6~31%)、 ^{197}Au の共鳴積分誤差 (1.81%)、中性子自己遮蔽効果の補正誤差 (1.4~4.2%)、HPGe 検出器の測定効率誤差 (~2.5%)、重量測定誤差 (0.02~0.07%) 等を独立誤差として考慮したものである。

5. 結 言

近畿大学炉の2分割炉心の中央にある内部黒鉛反射体中心の垂直黒鉛ストリングを引抜いた空間が、約 1eV から数 100keV までの広いエネルギー範囲にわたって、極めて平坦な分布をもつ優れた特性をもつ 1/E スペクトル中性子場であることを利用して、数種の核種につき、放射化法により共鳴積分値の測定を行なった。われわれの測定値は最近の実験値および評価値と良く一致した。この事実により、この空間を標準

Table 3 Resonance intergral of ^{58}Fe

Resonance intergral (barn)	Reference
2.3±0.4	BECKURTS (1964)
1.23±0.07	STEINNES (1972)
1.7±0.1	VAN DER LINDEN (1973)
1.558	ECN-70 (1979)
1.58	CARLOS (1985)
1.56±0.5	Present work

的な 1/E スペクトル中性子場として利用できることが証明された。

謝 辞

本研究の実施にあたって、SRAC コード・システム

Table 4 Resonance intergral of ^{51}V

Resonance intergral (barn)	Reference
3.3±0.8	KLIMENTOV (1957)
3.3±0.8	BECKURTS (1964)
2.45±0.03	KAPCHIGASHIV (1965)
2.62	KOHLER (1967)
4.1±0.4	STIEGLITZ (1970)
3.0±0.1	VAN DER LINDEN (1973)
3.35±0.5	Present work

Table 5 Resonance intergral of ^{181}Ta

Resonance intergral (barn)	Reference
1220±400	TATTERSALL (1960)
590	BECKURTS (1964)
690±40	LESAGE (1966)
700±25	LATEK (1968)
750±50	STEINNES (1972)
715±70	VAN DER LINDEN (1973)
720	ECN-70 (1979)
710±30	Present work

Table 6 Resonance intergral of ^{186}W

Resonance intergral (barn)	Reference
390	MACKLIN (1955)
490±100	FAST (1962)
551	JOANOU (1964)
476±50	BAUMANN (1965)
450±36	BELLER (1967)
441±22	PIERCE (1968)
486±50	RAHN (1972)
420±45	VAN DER LINDEN (1973)
500±54	AERE-R-8654 (1977)
499±25	Present work

三木他：近畿大学炉を用いた標準的 1/E スペクトル中性子場における ^{51}V , ^{58}Fe , ^{181}Ta , ^{186}W の共鳴積分の測定

による解析計算については、日本原子力研究所原子炉工学部炉物理実験研究室主任研究員土橋敬一郎氏、また VIM コードによる中性子自己遮蔽効果の計算については、同原子炉システム研究室の森貴正氏に大変お世話になりました。厚く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) K. Tsuchihashi et al.; SRAC: JAERI Thermal Reactor Standard Code System for Reactor Design and Analysis, JAERI 1285 (1983)
- 2) 木村逸郎他；近大炉を用いた標準中性子場の研究 近畿大学原子炉共同利用研究経過報告書（昭和55年度），p.p. 20~24 (1980)
- 3) 木村逸郎他；近大炉を用いた標準中性子場の研究 近畿大学原子炉共同利用研究経過報告書（昭和56年度），p.p. 4~8 (1981)
- 4) 木村逸郎他；近大炉を用いた標準中性子場の研究 近畿大学原子炉共同利用研究経過報告書（昭和57年度），p.p. 1~4 (1982)
- 5) 木村逸郎他；近大炉における炉内中性子分布の測定，日本原子力学会昭和58年年会，B-39 (1983)
- 6) 木村逸郎他；近大炉を用いた標準中性子場の研究 近畿大学原子炉共同利用研究経過報告書（昭和58年度），p.p. 1~4 (1983)
- 7) 木村逸郎他；近大炉標準中性子場における中性子断面積の測定，近畿大学原子炉共同利用研究経過報告書（昭和59年度），p.p. 1~6 (1984)
- 8) 小林捷平他；近畿大炉の標準的な 1/E 中性子スペクトル場における共鳴積分の測定，日本原子力学会昭和60年年会，D-3 (1985)
- 9) 三木良太他；近畿大炉を用いた標準中性子場の開発に関する研究(I)，日本原子力学会昭和60年秋の分科会，B-29 (1985)
- 10) R. Miki et al.; Standard 1/E Spectrum Neutron Field installed in UTR-KINKI, p.p. 386~392, NEANDC(J) 120/U, JAERI-M-86-080 (1986)
- 11) 伊藤哲夫也；近畿大学炉におけるトリウム体系の臨界実験と解析，近畿大学原子力研究所年報，Vol. 22, p.p. 15~21 (1985)
- 12) S. F. Mughabghab, Neutron Cross Section, Vol. 1, Part B (1984)
- 13) R. N. Blomquist, et al.; ORNL/RSIC 44 (1980)