

# 遮蔽性能評価の実験的研究

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1988年 3月



東京大学原子核研究所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術管理部 技術情報室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to : Technical Information Service, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation  
9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107, Japan

© 動力炉・核燃料開発事業団(Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1988

公開資料  
PNCT J2602 87-003  
1988年3月

## 遮蔽性能評価の実験的研究

東大核研 上 義 朋  
          大 久 保 徹  
          柴 田 誠 一  
          柴 田 徳 思

### 要 旨

1986年4月から実験が始まったJASPER・径方向遮蔽実験には、東大核研から持ち込んでいる $^3\text{He}$ カウンタ内臓高感度ボナーボールスペクトロメータが使われている。本研究では核研ボナーボール測定の結果を集積し、中性子スペクトルへのアンフォールディングを行った。アンフォールディングに必要な初期値はDOT3.5による計算値を用いた。また各ボナーボール球の計数に寄与する中性子のエネルギー分布の評価も行った。これらのデータはJASPER・径方向遮蔽実験を中性子断面積評価に反映させるために役立つ。

PNCT J2602 87-003  
March 1988

Experimental Research for Shielding of Combined Matters

Yoshitomo Uwamino  
To-oru Ohkubo  
Sei-ichi Shibata  
Tokushi Shibata  
Institute for Nuclear Study  
University of Tokyo

Abstract

The JASPER radial shielding study was started up in April, 1986, where the multi-sphere moderated He-3 counter, developed at the Institute for Nuclear Study (INS), has been used. In this study, the results of the INS Bonner ball counter were compiled and unfolded into neutron spectra where the calculated neutron spectra by the DOT3.5 code were used as the initial guess. The neutron energy importance function for each counter was also estimated. These results will help the JASPER experiment to be utilized in neutron cross section evaluation.

## I. はじめに

東京大学・原子核研究所で作られたHe-3検出器内蔵型高感度ボナーボール検出器の応答関数は、中性子の国家標準場である電子技術総合研究所の熱中性子及び144keVから15MeVの単色中性子場で校正実験がなされている。前年度の研究ではANISNによって計算された応答関数を実験値によって評価しなおし、信頼性の高い応答関数を得た。

1986年4月から始まったJASPER・径方向遮蔽実験には核研製ボナーボールが使われており、本報告書にはその測定結果をまとめた。輸送計算によって求めた中性子スペクトルに検出器の応答関数を用いて得た計算率と、実験値を直接比較する方法、すなわちC/E値は明確な値であるが、計算されたスペクトルのいずれのエネルギー領域に問題があるかを議論するには不向きな面がある。そこで本研究ではボナーボールの測定結果を中性子スペクトルにアンフォールディングし、スペクトルで実験値と計算値を比較することを試みた。さらに各々の検出器の計数率に寄与する中性子のエネルギー分布も求めた。

## II. 解析の方法

アンフォールディングに用いたSAND IIコードの概略を以下に示す。コードは初期値として与えられたスペクトルを実験値に繰り返し整合するように修正する方法で行う。初期値から始まりk番目の繰り返しの修正で得られたスペクトルを $\phi_j^{(k)}$  ( $j=1, \dots, n$ )とする。jは中性子のエネルギー群番号である。A<sub>i</sub>をi番目の検出器の計数率、A<sub>i</sub><sup>c</sup>を $\phi_j^{(k-1)}$ と検出器の応答関数R<sub>ij</sub>から求める計数率とすると、各検出器に対する修正計数C<sub>i</sub>は、

$$C_i = A_i / A_i^c = A_i / \sum_{j=1}^m R_{ij} \phi_j^{(k-1)}, \quad i=1, \dots, m \quad (1)$$

$\phi_j^{(0)}$  は入力した初期値である。 $\phi_j^{(k)}$  は次のように修正する。

$$\phi_j^{(k)} = M_j^{(k)} \phi_j^{(k-1)}, \quad j=1, \dots, m \quad (2)$$

ここで、

$$M_j^{(k)} = \frac{\sum_{i=1}^m w_{ij}^{(k)} \lambda_m C_i^{(k)}}{\sum_{i=1}^m w_{ij}^{(k)}}, \quad j=1, \dots, m \quad (3)$$

$$w_{ij}^{(k)} = R_{ij} \phi_j^{(k-1)} / \sum_{j=1}^m R_{ij} \phi_j^{(k-1)} \quad (4)$$

本研究の解析では $\phi_j^{(0)}$ はDOT3.5による計算値を用いた。図1に核研製ポナーボールの概略図を、図2に100群で表した応答関数を示した。表1にはアンフォールディングに採用した21群の群構造を、表2には21群の応答関数を数値で示した。

検出器のC/E値が1と異なった場合、その原因を考えるために検出器の計数率にどのエネルギー領域の中性子が主に寄与しているかを知ることができると便利である。そのための指標となる重み関数 $W(E)$ を次のように定義した。

$$W(E) = \frac{R(u) \phi(u)}{\int_{\text{thermal}}^{\infty} R(u) \phi(u) du} \quad (5)$$

ここで $u$ は中性子のレサジーであり、 $u = \ln(E_{\text{max}}/E)$ で定義される。

### III. 結果と検討

表3に径方向遮蔽実験で測定された体系の一覧を示した。核研のポナーボールの測定ケースは表の最も右にある。そこで、 $a, b, c$ は検出器位置を示し、 $a$ は供試体後面より30cmの位置に検出器の中心をおいて測定したことを示す。 $b, c, d$ は検出器中心を炉芯中心からそれぞれ304.8cm, 457.2cmおよび501.3cmの定点において測定している。大文字のA, B, Dも同じである。Eはバックグラウンドの影響を下げるために、検出器後方にもナトリウム板とLiH板を置いて、いわゆる体系内測定をしたものである。

表4には核研のポナーボールを用いて行われた径方向実験の全ての結果を示した。 $a$ 位置での測定値をアンフォールディングした結果の中性子スペクトルをDOT3.5の結果と共に、図3aから図11aに示した。図中の波線はJSD100群定数を用いて計算したスペクトルであり、一点鎖線はJSDJ2を用いたものである。重み関数を求めた結果は図3bから図11bに示した。

スペクトルモディファイアを測定したIAのスペクトルでは、高エネルギー一部で計算値の方が大きくなっている。B<sub>4</sub>C板の後方スペクトルを示したIIDでは、eV領域で計算値は測定値を大きく下まわっている。IVG、IVJの結果は実験値と測定値の一致はよい。VII Cでは、計算値はMeV領域で大きくeV領域で小さな値になっている。

謝辞

本研究をまとめるにあつて、DOT3.5の計算結果を提供して頂いた川崎重工、動力炉核燃料開発事業団、日本原子力事業、日立エンジニアリング、三菱原子力工業の各社に感謝します。とりわけ、これらの結果をまとめる作業をして下さった三菱総合研究所、佐藤理、角田弘和の両氏には厚く御礼を申し上げます。

Table 1 Energy structure of 21-group constant.

( unit : eV )

No.	Upper Energy	Corresponding Group Numbers of 100-group Structure	Lethergy Width
1	1.4918+07*	1 - 10	1.0
2	5.4881+06	11 - 15	0.5
3	3.3287+06	16 - 20	0.5
4	2.0190+06	21 - 25	0.5
5	1.2246+06	26 - 30	0.5
6	7.4274+05	31 - 35	0.5
7	4.5049+05	36 - 40	0.5
8	2.7324+05	41 - 45	0.5
9	1.6573+05	46 - 51	0.9
10	6.7379+04	52 - 55	1.0
11	2.4788+04	56 - 59	1.0
12	9.1188+03	60 - 63	1.0
13	3.3546+03	64 - 67	1.0
14	1.2341+03	68 - 71	1.0
15	4.5400+02	72 - 75	1.0
16	1.6702+02	76 - 80	1.25
17	4.7851+01	81 - 85	1.25
18	1.3710+01	86 - 90	1.25
19	3.9279+00	91 - 95	1.25
20	1.1254+00	96 - 99	1.0
21	4.1399-01**	100	6.026

\* Read as  $1.4918 \times 10^7$

\*\* Lower energy limit is  $1.0 \times 10^{-3}$  eV.



Table 2 Response functions of 21 energy groups.

unit:count/(n/cm<sup>2</sup>)

Grp.	R=116mm	R=76mm	R=56mm	R=41mm	Bare
1	3.2462E-02	1.6479E-02	5.8285E-03	9.2196E-04	1.3886E-04
2	5.7159E+00	3.1925E+00	1.0952E+00	1.7727E-01	2.9022E-02
3	6.2454E+00	4.0929E+00	1.5210E+00	2.5311E-01	3.6304E-02
4	7.9089E+00	5.1140E+00	2.0955E+00	3.8923E-01	4.1908E-02
5	8.5004E+00	6.2703E+00	2.8751E+00	6.1114E-01	4.3037E-02
6	7.9200E+00	7.3436E+00	3.8013E+00	8.9662E-01	1.8172E-02
7	6.6898E+00	8.2488E+00	4.8790E+00	1.2594E+00	1.2565E-02
8	5.3377E+00	8.6937E+00	5.9430E+00	1.6736E+00	1.4127E-02
9	4.4553E+00	8.7122E+00	6.8331E+00	2.0897E+00	1.7491E-02
10	2.6681E+00	5.8574E+00	5.4164E+00	1.8013E+00	1.8080E-02
11	3.8089E+00	9.5245E+00	1.0083E+01	3.9382E+00	5.5338E-02
12	2.9754E+00	8.5005E+00	1.0220E+01	4.8386E+00	1.1140E-01
13	2.6155E+00	8.0127E+00	1.0687E+01	5.8665E+00	2.2627E-01
14	2.3152E+00	7.6714E+00	1.1206E+01	6.8710E+00	4.3698E-01
15	1.9917E+00	7.1485E+00	1.1337E+01	7.8239E+00	8.0808E-01
16	1.2927E+00	4.9709E+00	8.6783E+00	6.8589E+00	1.1863E+00
17	1.2136E+00	4.9515E+00	9.4498E+00	8.7017E+00	2.1335E+00
18	1.0572E+00	4.3810E+00	9.0981E+00	9.7444E+00	3.7178E+00
19	8.2758E-01	3.4970E+00	7.7122E+00	9.7826E+00	6.1351E+00
20	4.1198E-01	1.7501E+00	4.1045E+00	5.9366E+00	8.9422E+00
21	1.4019E-05	4.5704E-05	1.0326E-04	1.7458E-04	1.4690E+01

Table 3 Configurations and measurements for radial shield experiment.

CONFIGURATION <sup>a</sup>	MEASUREMENTS <sup>**</sup>			
	Benjamin, NE-213 & BB	BB Traverse	BB Centerline	IHS BB Centerline
I. Spectrum Modifier (SM-1)				
A. SM-1 (10cm Fe + 9cm Al + 2.5cm boron + 2 blanket slabs)	X	X	a,b,c	a,b,c
II. Stainless Steel and B <sub>2</sub> C (Loop type ref.)				
A. SM-1 + 1.3cm Al + 15cm SS		X	a,b	
B. + 1.3cm Al + 15cm B <sub>2</sub> C + 2.54cm SS <sup>***</sup>			a,b	
C. + 1.3cm Al + 15cm B <sub>2</sub> C			a,b	
D. + 1.3cm Al + 15cm B <sub>2</sub> C	X	X	a,b	a,b
E. + 30.5cm Na		X	a,b	
III. Stainless Steel and B <sub>2</sub> C (USA Model)				
A. SM-1 + 10cm SS		X	a,b	
B. SM-1 + 10cm SS + 5cm B <sub>2</sub> C		X	a,b	
C. SM-1 + 20cm SS		X	a,b	
D. SM-1 + 20cm SS + 5cm B <sub>2</sub> C			a,b	
E. SM-1 + 20cm SS + 10cm B <sub>2</sub> C		X	a,b	
IV. Graphite and B <sub>2</sub> C (Tank type ref.)				
A. SM-1 + 1.3cm Al + 15cm SS				
+ 1.3cm Al + 10cm C + 5cm SS		X	a,b	
B. + 1.3cm Al + 10cm C + 5cm SS			a,b	
C. + 1.3cm Al + 15cm B <sub>2</sub> C + 2.5cm SS	X	X	a,b,c	a,b,c
D. + 2.5cm Al + 5cm SS			a, c	
E. + 1.3cm Al + 10cm C + 5cm SS			a, c	
F. + 1.3cm Al + 10cm C + 5cm SS			a, c	
G. + 1.3cm Al + 10cm C + 5cm SS			a, c	a,
H. + 5cm SS			a, c	
I. + 30.5cm Na			A, Z	
J. + 30.5cm Na			Z	E
K. + 30.5cm Na			E	
L. + 30.5cm Na			E	
M. + 30.5cm Na			Z	Z
V. Near-Core-Sodium SM + SS and B <sub>2</sub> C (INX shield)				
A. SM-2 (10cm Fe + 9cm Al + 2.5cm Boron + 183cm Na)		X	A, D	A, D
B. SM-2 + 5cm SS		X	A, D	
C. SM-2 + 5cm SS + 30.5cm Na			A, D	
D. SM-2 + 5cm SS + 61cm Na		X	A, D	A, D
E. SM-2 + 5cm B <sub>2</sub> C + 5cm SS			A, D	
F. SM-2 + 5cm B <sub>2</sub> C + 5cm SS + 30.5cm Na			A, D	
G. SM-2 + 5cm B <sub>2</sub> C + 5cm SS + 61cm Na		X	A, D	A, D
H. SM-2 + 10cm B <sub>2</sub> C + 5cm SS			A, D	
I. SM-2 + 10cm B <sub>2</sub> C + 5cm SS + 30.5cm Na			A, D	
J. SM-2 + 10cm B <sub>2</sub> C + 5cm SS + 61cm Na		X	A, D	A, D
VI. SS and Graphite (Graphite benchmark)				
A. SM-1 + 1.3cm Al + 15cm SS + 10cm C	X	X	A,B	A,B
B. SM-1 + 1.3cm Al + 15cm SS + 20cm C		X	A,B	
C. SM-1 + 1.3cm Al + 15cm SS + 30cm C			A,B	
D. SM-1 + 1.3cm Al + 15cm SS + 41cm C		X	A,B	A,B
E. SM-1 + 1.3cm Al + 15cm SS + 51cm C			A,B	
F. SM-1 + 1.3cm Al + 15cm SS + 61cm C	X	X	A,B	A,B
VII. SS and B <sub>2</sub> C (Loop type alternate)				
A. SM-1 + 1.3cm Al + 15cm SS				
+ 1.3cm Al + 15cm SS		X	a,b	
B. + 1.3cm Al + 15cm SS		X	a,b	
C. + 1.3cm Al + 15cm B <sub>2</sub> C + 2.5cm SS		X	a,b	a,b
D. + 30.5cm Na			A,B	

<sup>a</sup> Nominal dimensions

<sup>\*\*</sup> Benjamin, NE-213 & BB: Spectrometer measurements on beam centerline as close as feasible and 3, 5, 10-in Borner balls at same location.

BB Traverse: 5-in Borner ball in horizontal traverse, 30cm behind mockup.

BB Centerline: 3, 5, 8, 10-in Borner balls on beam centerline; a - 30cm, b - 304.6cm, c - 457.2cm, d - 501.3cm behind mockup.

A, B, C, D same as a, b, c, d plus bare and Cd-covered BF<sub>3</sub>. Z all BB in situ

IHS BB Centerline: Same as above using Japanese IHS <sup>3</sup>He counter system.

<sup>\*\*\*</sup> Configurations which begin with a + include all previous lines up to and including the last line not beginning with +.

Table 4

## 径方向遮蔽実験における I N S ボナーホールの実験結果

体系 (検出器位置)	4.2cmR	5.6cmR	7.6cmR	11.6cmR	備考
I A (+30.0cm)	6.415+3*	1.437+4	1.731+4	8.193+3	
(304.8cm)	7.713+2	1.420+3	1.554+3	7.921+2	
(457.2cm)	2.690+2	5.826+2	6.477+2	3.329+2	
(304.8cm)	2.424+2	3.540+2	3.114+2	1.283+2	Background
(457.2cm)	1.186+2	1.782+2	1.640+2	6.538+1	Background
II D (+30.0cm)	1.281-1	3.416-1	4.423-1	2.933-1	
(+30.0cm)	1.234-1				再測定
(304.8cm)	4.957-2	1.576-1	2.062-1	1.342-1	
(304.8cm)	8.487-3	1.222-2	1.02 -2	4.454-3	Background
IV C (+30.0cm)	5.76 -1	1.42 +0	1.694+0	8.98 -1	
(304.8cm)	2.22 -1	5.48 -1	6.51 -1	3.59 -1	
(457.2cm)	4.50 -2	1.09 -1	1.34 -1	7.81 -2	
(304.8cm)	2.33 -2	3.46 -2	3.06 -2	1.180-2	Background
(457.2cm)	1.79 -2	2.65 -2	2.23 -2	9.54 -3	Background
IV G (+30.0cm)	9.36 -3	1.08 -2	7.95 -3	2.74 -3	
(+53.6cm)	6.76 -3	8.09 -3	5.85 -3	1.97 -3	
(+53.6cm)	3.54 -3	4.31 -3	3.25 -3	1.12 -3	Background
IV J (+13.0cm)	1.18 -3	1.35 -3	9.24 -4	2.78 -4	in situ B.G.の評価なし

\*6.415 x 10<sup>3</sup> を示す。Background は引いてある。

Table 4 (続き)

径方向遮蔽実験におけるINSボナーボールの実験結果 (続き)

体系(検出器位置)	4.2cmR	5.6cmR	7.6cmR	11.6cmR	備考
V A(+30.0cm)	1.910+4	2.186+4	1.438+4	4.599+3	
(304.8cm)	2.622+3	3.241+3	2.135+3	7.146+2	
V D(+30.0cm)	1.031+3	1.107+3	7.369+2	2.208+2	
(304.8cm)	3.711+2	3.827+2	2.431+2	7.133+1	
V G(+30.0cm)	3.892+1	5.456+1	4.475+1	1.816+1	
(304.8cm)	1.527+1	2.163+1	1.711+1	6.815+0	
V J(+30.0cm)	1.148+1	1.683+1	1.510+1	6.065+0	
(304.8cm)	4.351+0	7.013+0	6.140+0	2.422+0	
VI A(+30.0cm)	1.988+3	2.934+3	2.577+3	9.862+2	
(304.8cm)	4.110+2	6.178+2	5.213+2	2.040+2	
(304.8cm)	3.921+1	4.991+1	3.72 +1	1.226+1	Background
VI D(+30.0cm)	2.020+2	2.180+2	1.418+2	4.033+1	
(304.8cm)	6.039+1	6.423+1	4.054+1	1.223+1	
(304.8cm)	2.18 +0	2.31 +0	1.43 +0	4.12 -1	Background
VI F(+30.0cm)	1.907+1	1.794+1	1.201+1	3.051+0	
(304.8cm)	7.638+0	7.029+0	4.356+0	1.257+0	
(304.8cm)	1.394-1	1.329-1	8.122-2	2.37 -2	Background
VII C(+30.0cm)	3.684+0	9.024+0	1.015+1	4.521+0	
(304.8cm)	1.502+0	3.580+0	4.016+0	1.865+0	
(304.8cm)	1.065-1	1.597-1	1.391-1	5.01 -2	Background
参考値					
IV-M insitu	8.127-5	8.530-5	5.442-5	1.595-5	17-Oct-86
voidcenter					
insitu	7.629-5	7.972-5			22-Oct-86
12cm					
insitu	6.413-5	6.456-5	4.000-5	1.069-5	24-Oct-86
13.5cm					

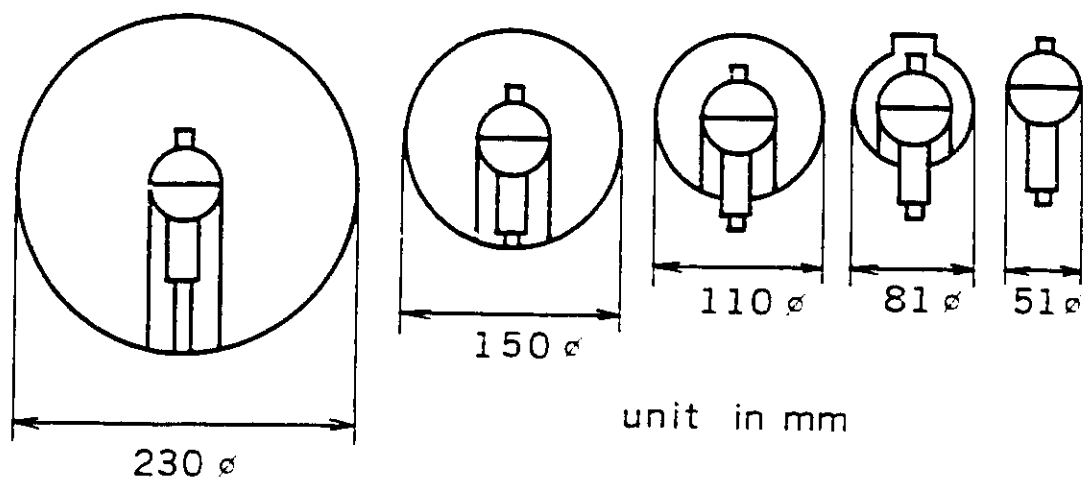


Fig. 1 Cross sectional view of the multi-sphere moderated  $^3\text{He}$  proportional counter.

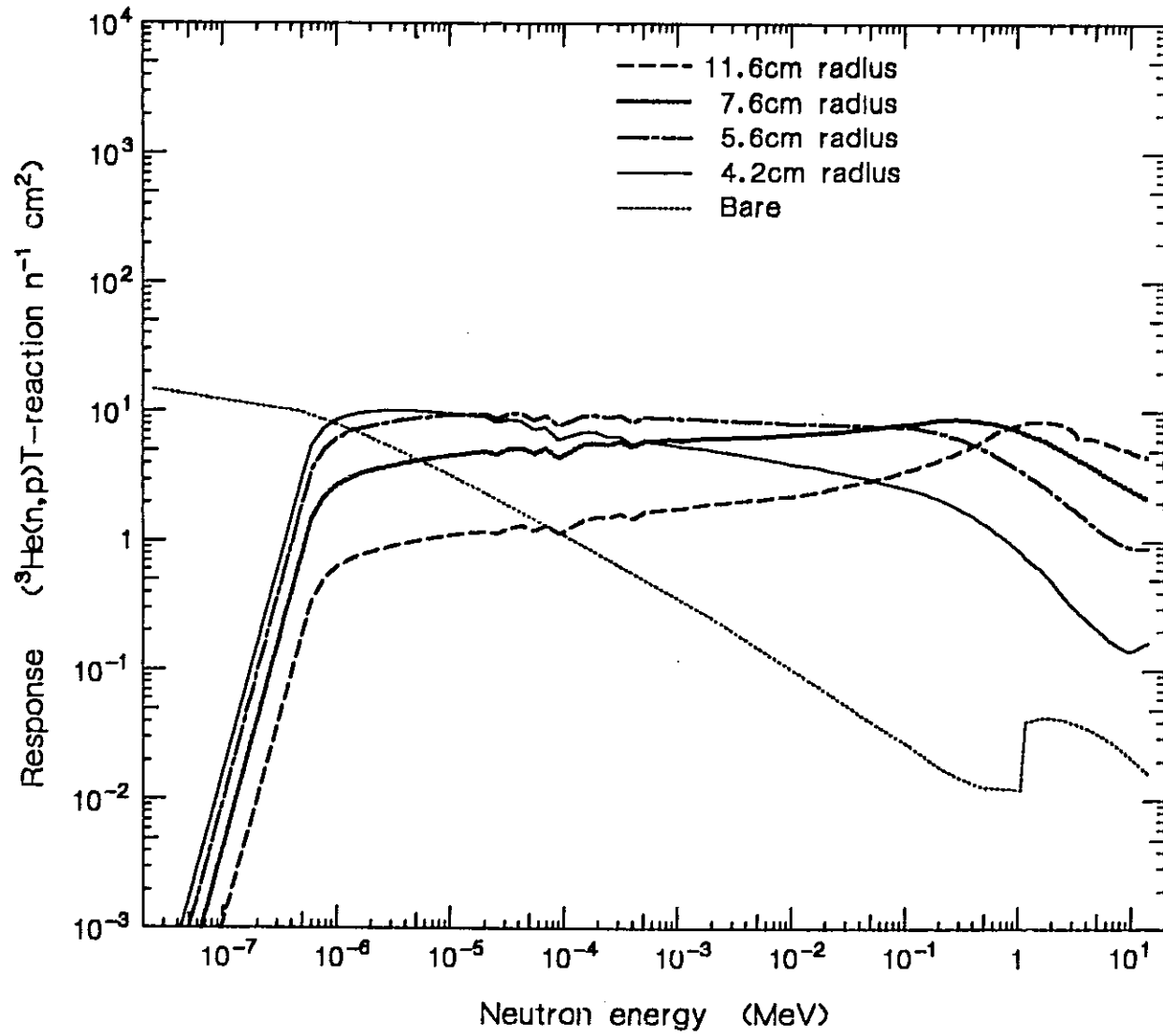


Fig. 2 Adjusted response functions of the multi-sphere moderated He-3 counter.

I-A at 30 cm; Solid: Meas. Broken: Calc. (JSD100) Dashed: Calc. (JSDJ2)

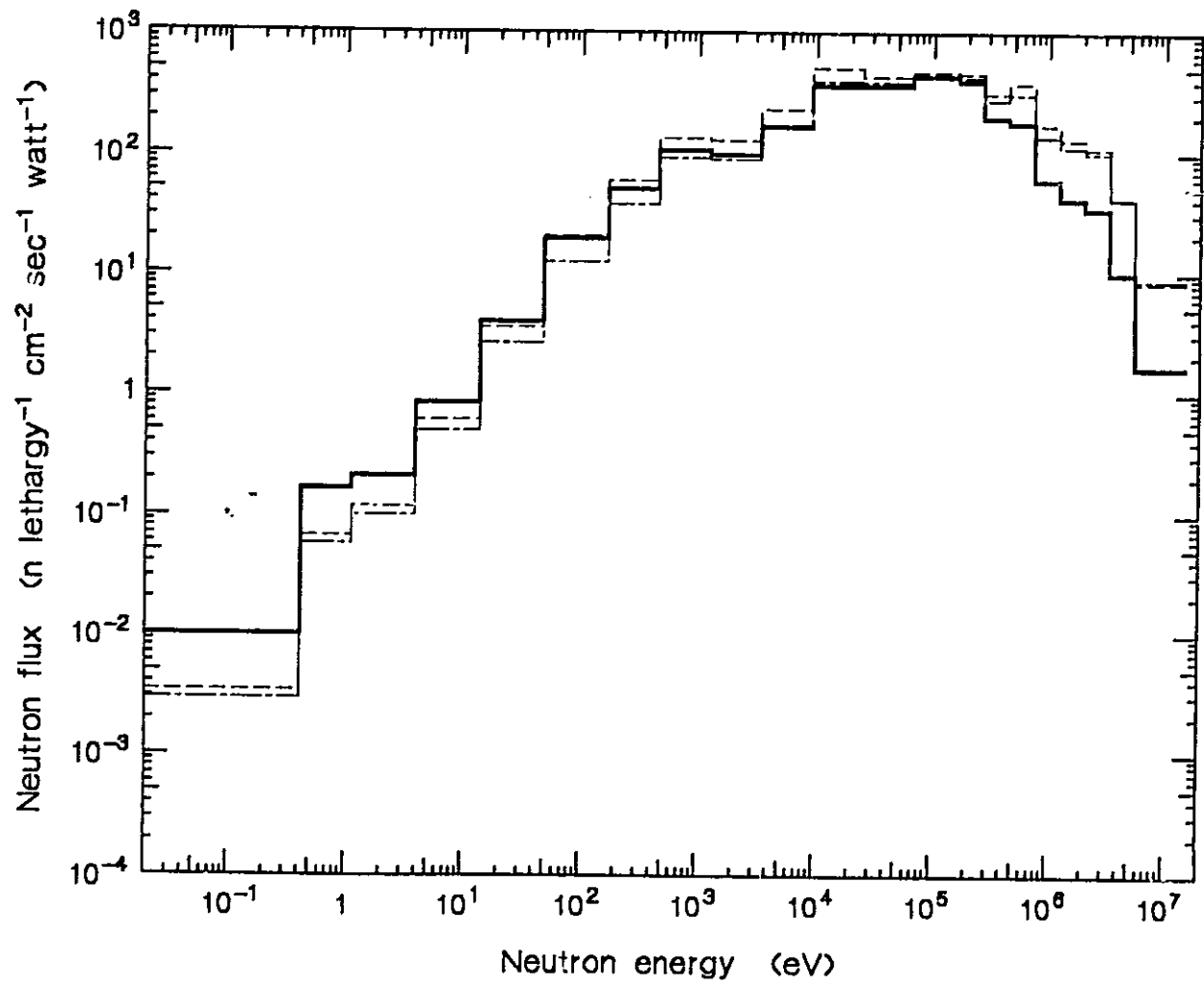


Fig. 3a Measured and calculated neutron spectra of I-A configuration.

I-A at 30 cm Solid:11.6R Dashed:7.6R Dotted:5.6R Thin-solid:4.2R

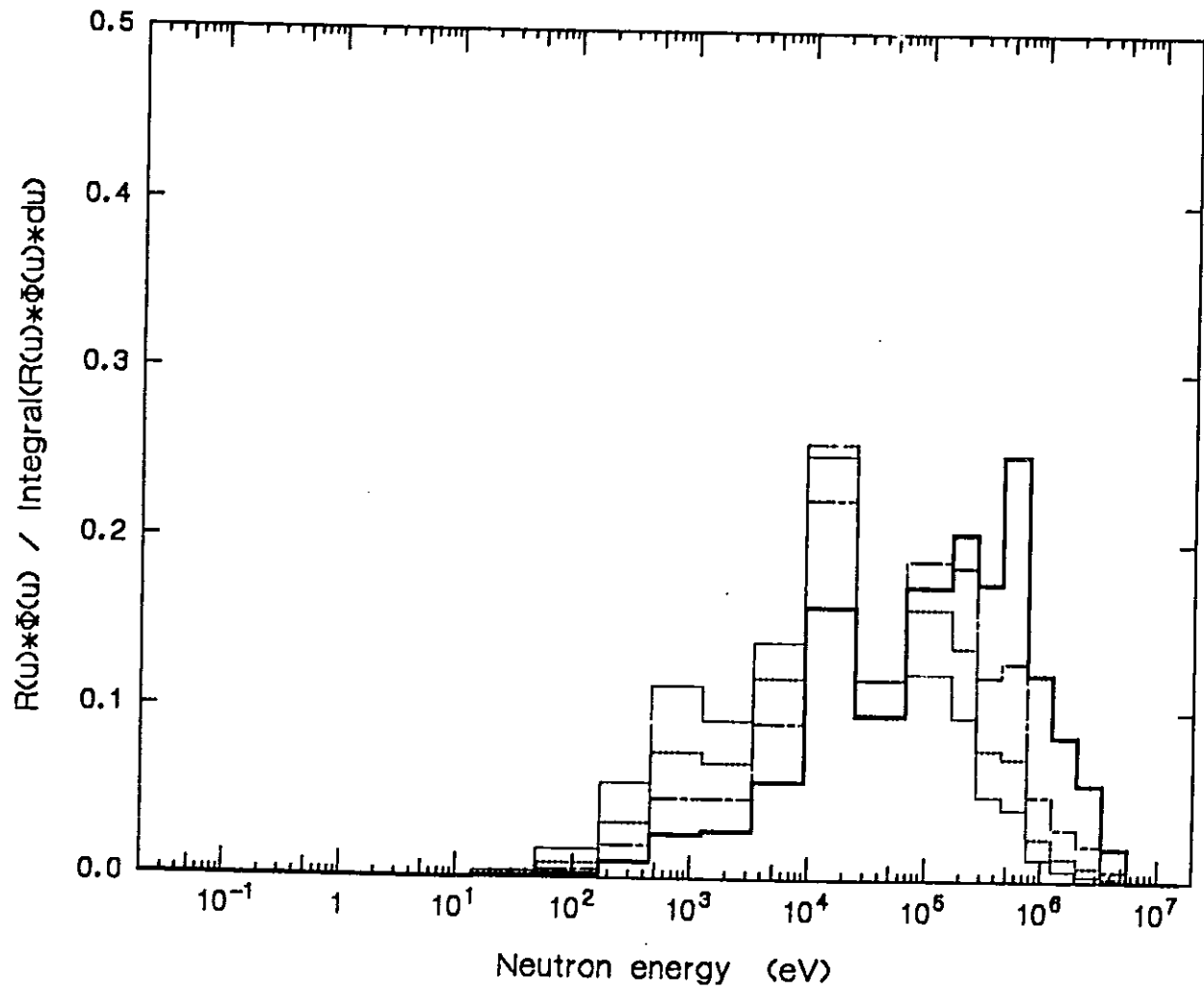


Fig. 3b Importance functions for counter responses of I-A configuration.



II-D at 30 cm; Solid: Meas. Broken: Calc. (JSD100) Dashed: Calc. (JSDJ2)

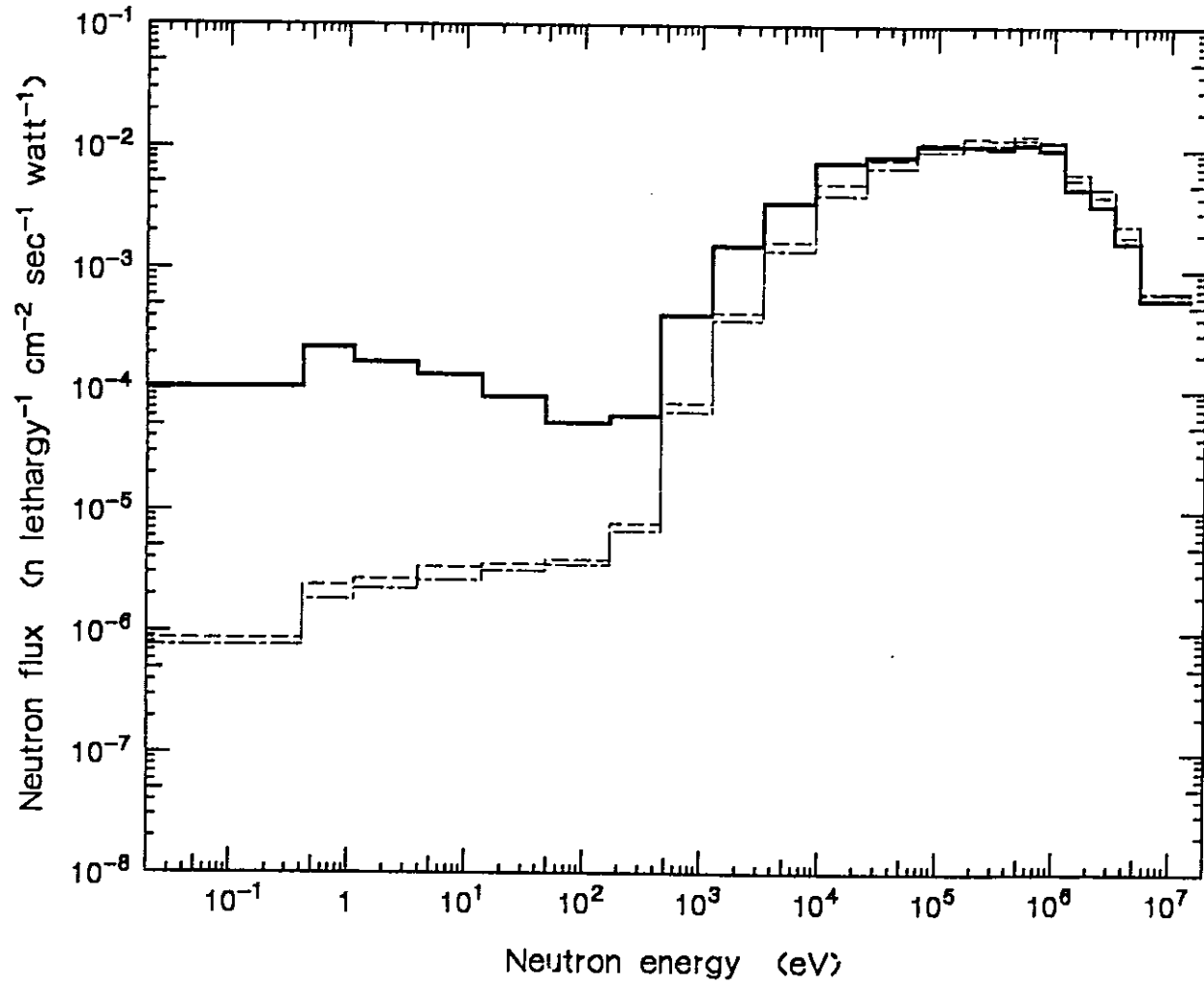


Fig. 4a Measured and calculated neutron spectra of II-D configuration.

II-D at 30 cm Solid:11.6R Dashed:7.6R Dotted:5.6R Thin-solid:4.2R

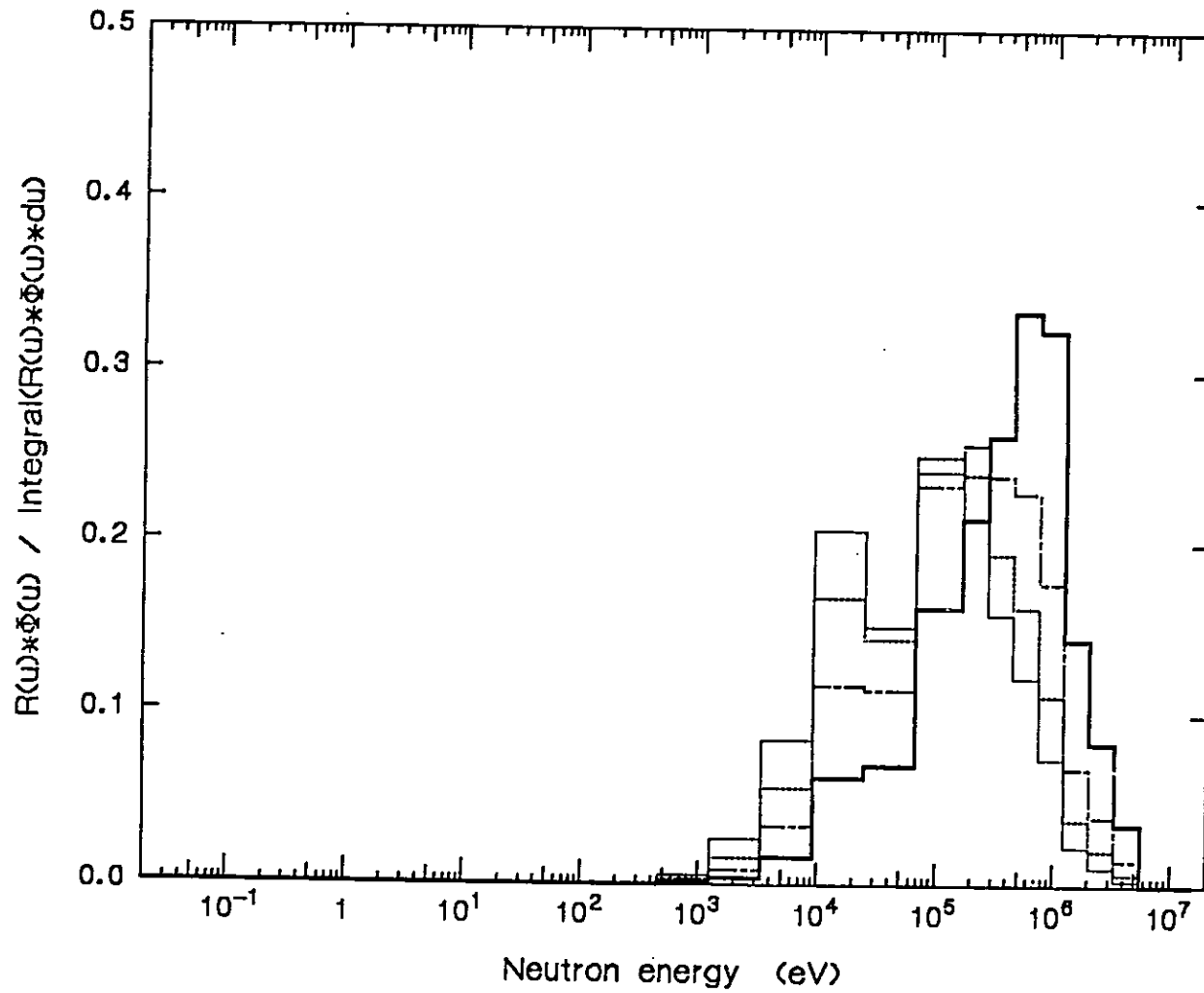


Fig. 4b Importance functions for counter responses of II-D configuration.

IV-G at 30 cm; Solid: Meas. Broken: Calc. (JSD100) Dashed: Calc. (JSDJ2)

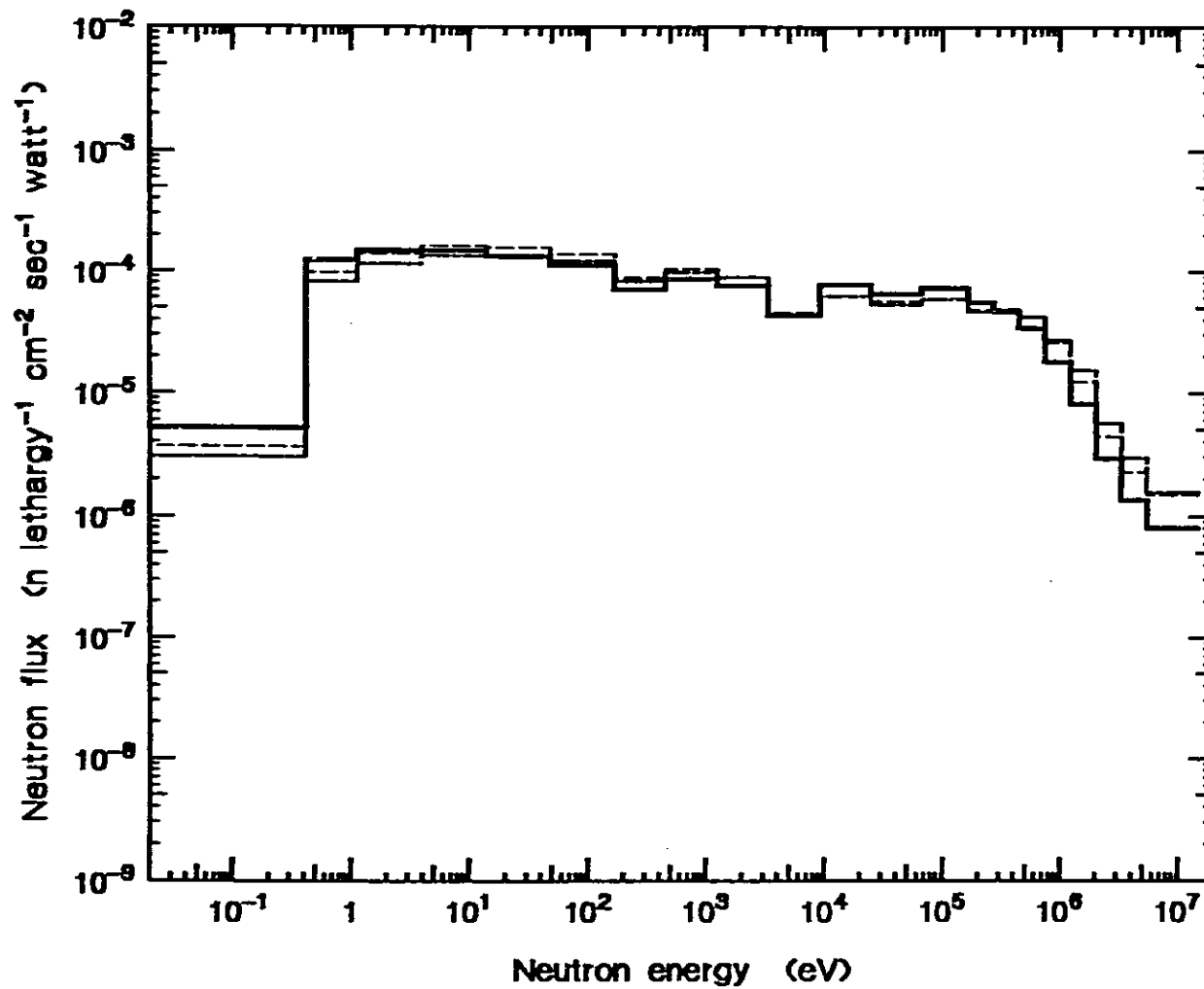


Fig. 5a Measured and calculated neutron spectra of IV-G configuration.

IV-G at 30 cm Solid:11.6R Dashed:7.6R Dotted:5.6R Thin-solid:4.2R

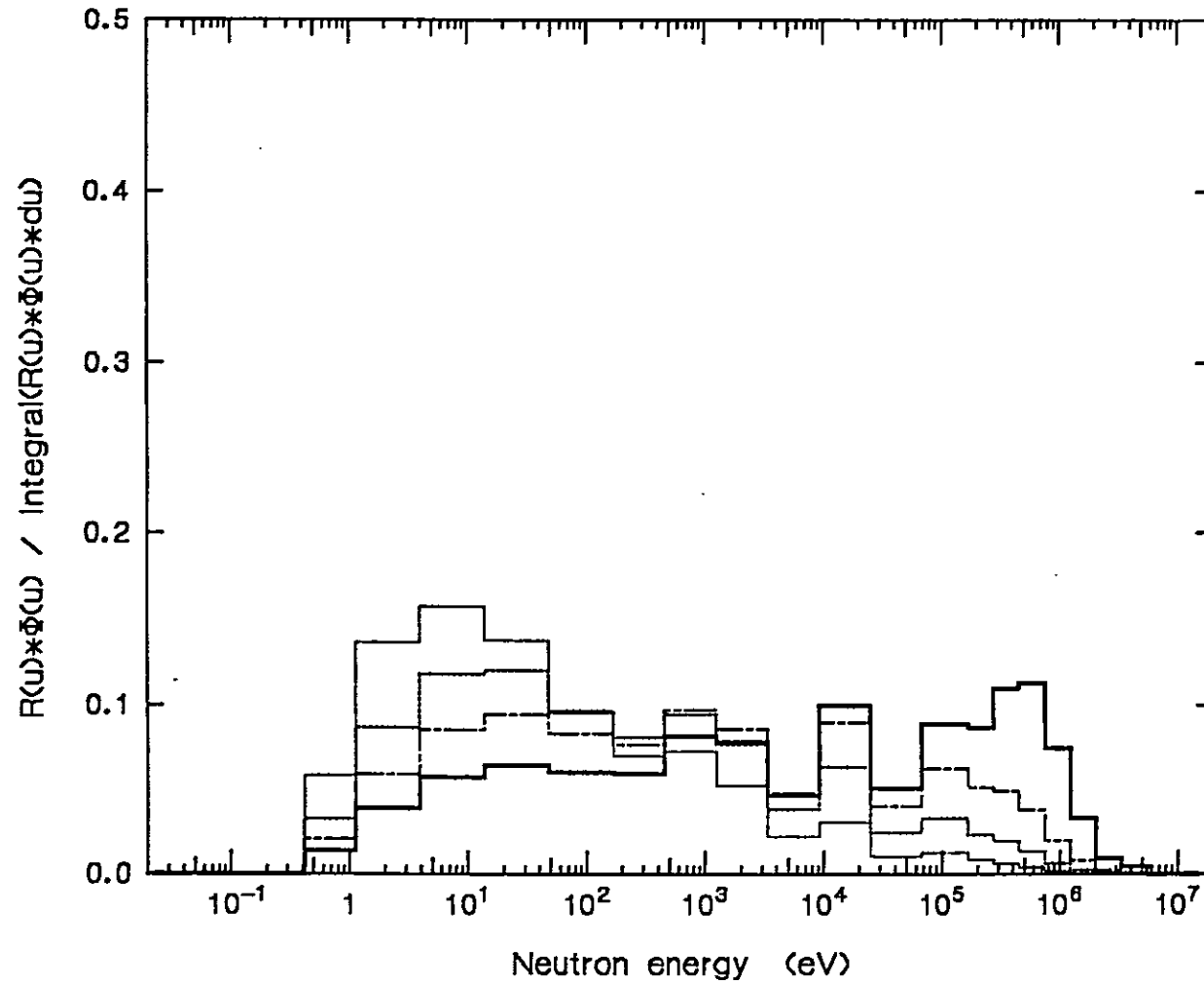


Fig. 5b Importance functions for counter responses of IV-G configuration.

IV-J at 30 cm; Solid:Meas. Broken:Calc.(JSD100) Dashed:Calc.(JSDJ2)

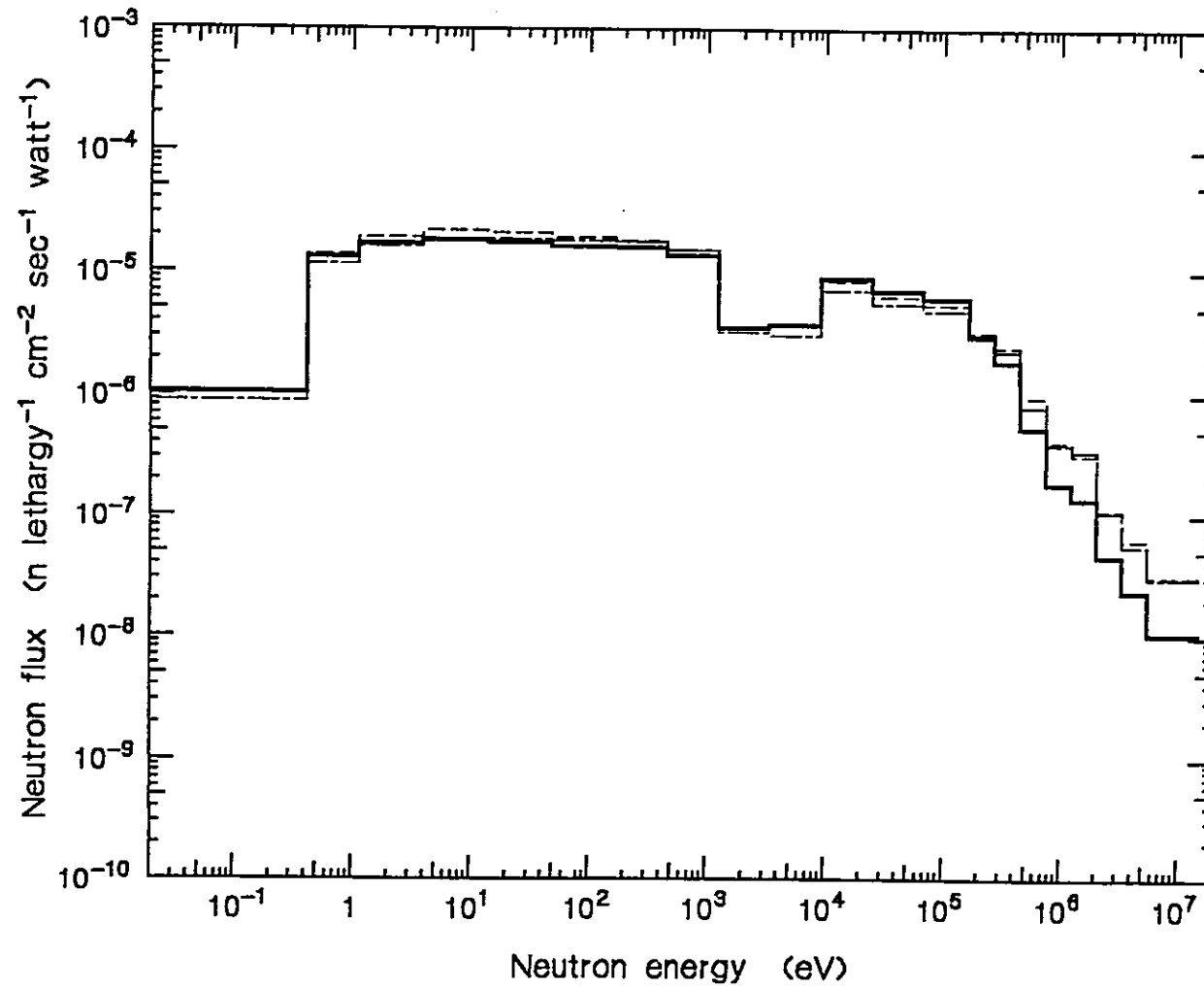


Fig. 6a Measured and calculated neutron spectra of IV-J configuration.

IV-J at 30 cm Solid:11.6R Dashed:7.6R Dotted:5.6R Thin-solid:4.2R

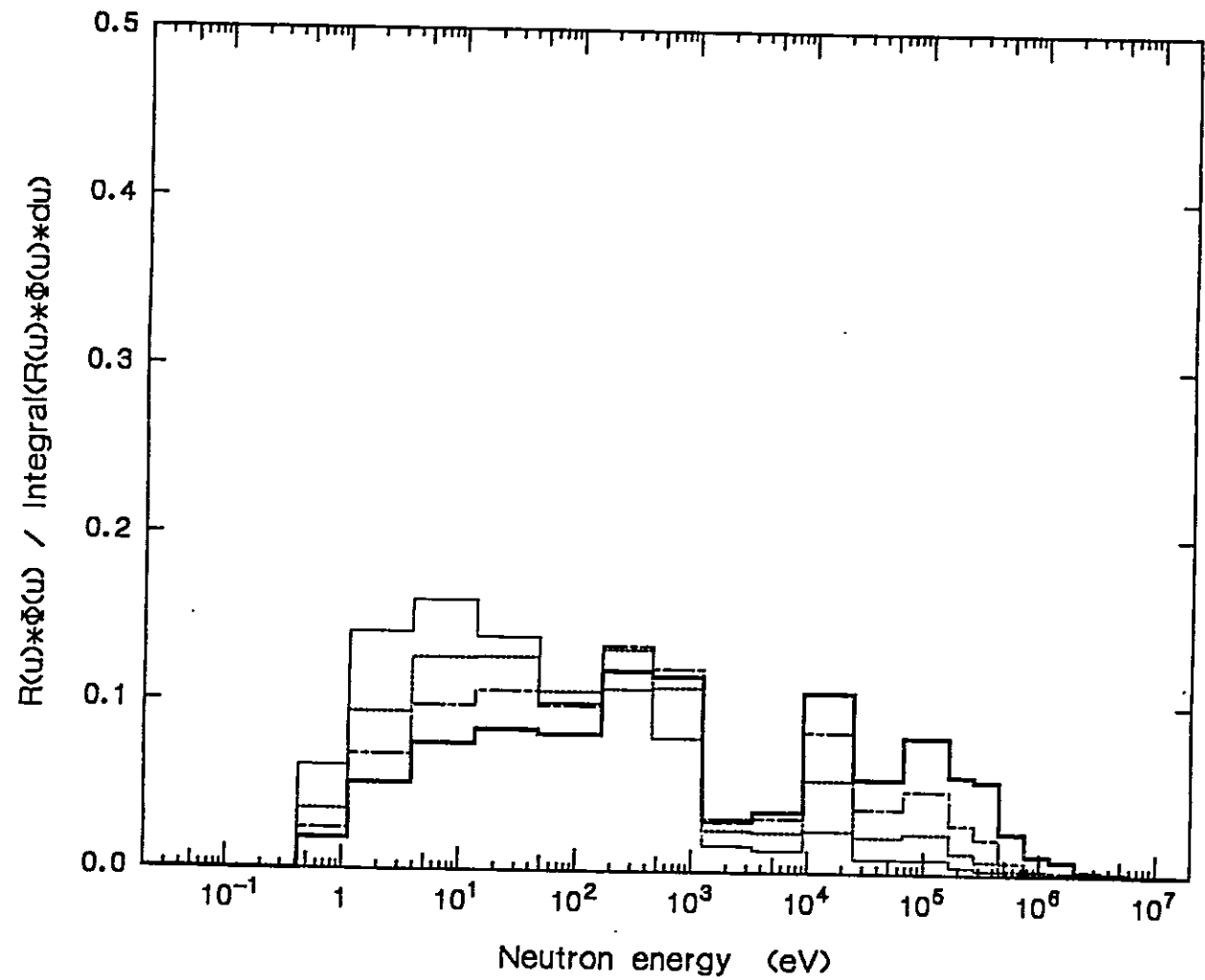


Fig. 6b Importance functions for counter responses of IV-J configuration.

V-D at 30 cm; Solid: Meas. Broken: Calc. (JSD100) Dashed: Calc. (JSDJ2)

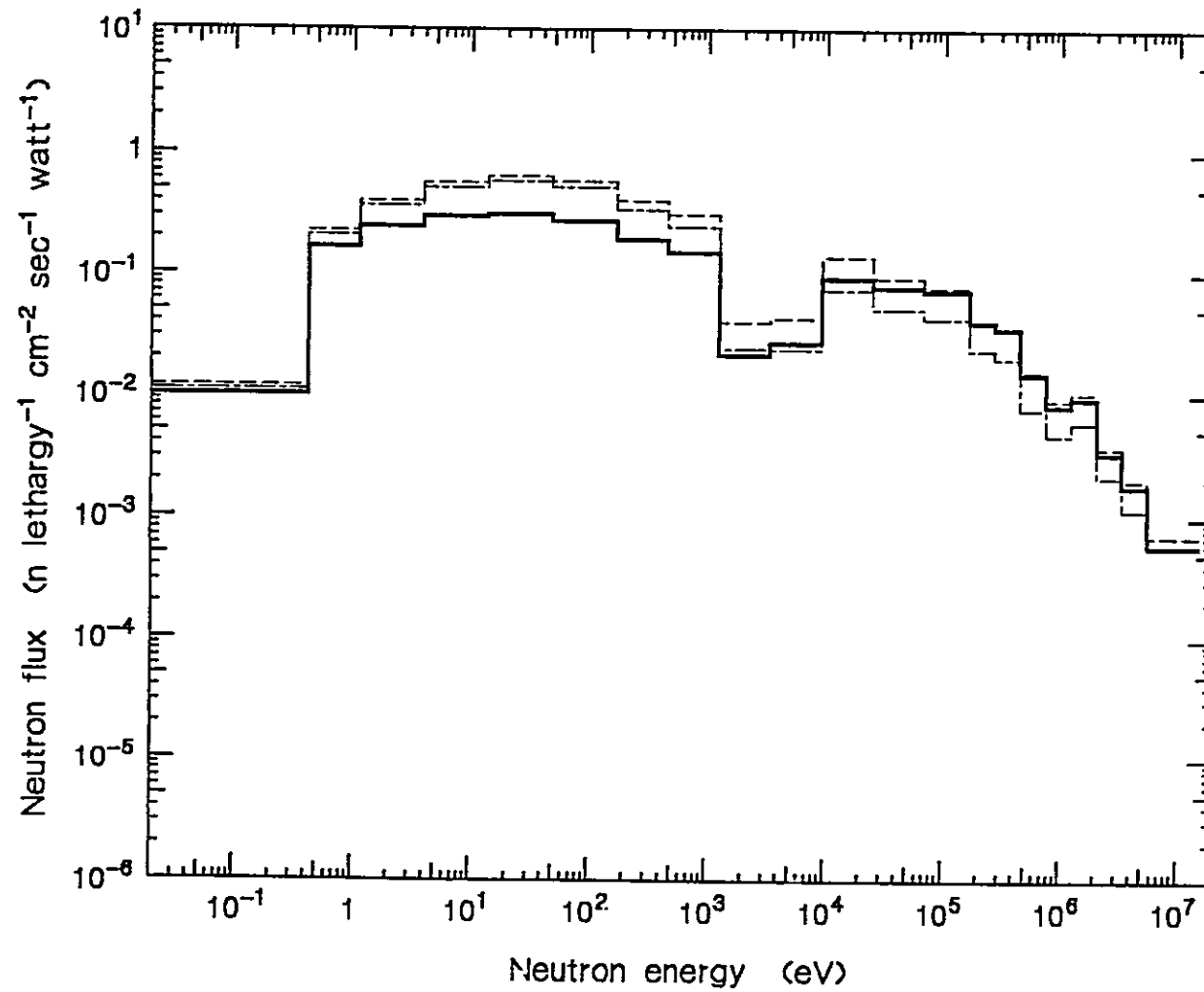


Fig. 7a Measured and calculated neutron spectra of V-D configuration.

V-D at 30 cm Solid:11.6R Dashed:7.6R Dotted:5.6R Thin-solid:4.2R

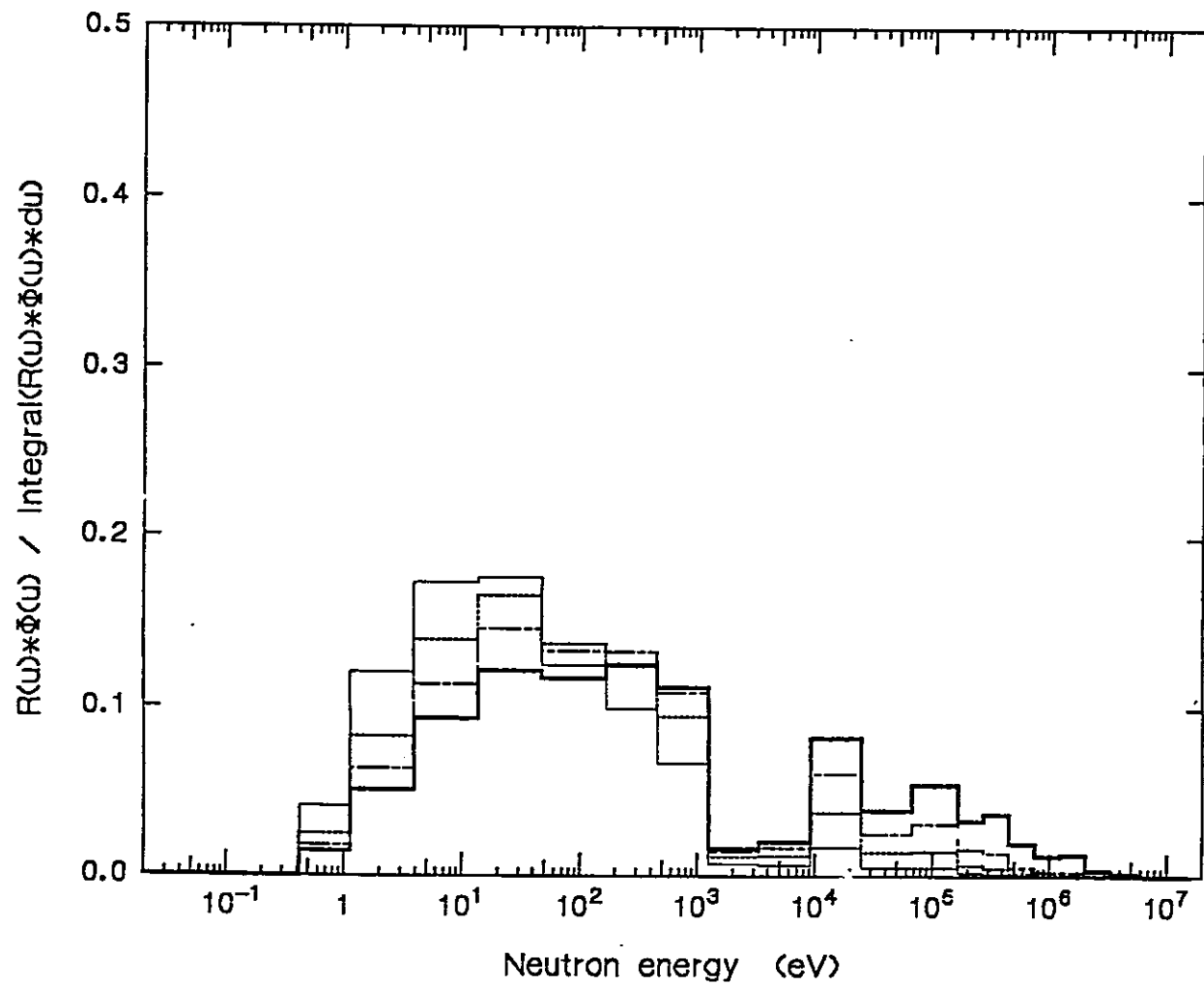


Fig. 7b Importance functions for counter responses of V-D configuration.



V-G at 30 cm; Solid: Meas. Broken: Calc.(JSD100) Dashed: Calc.(JSDJ2)

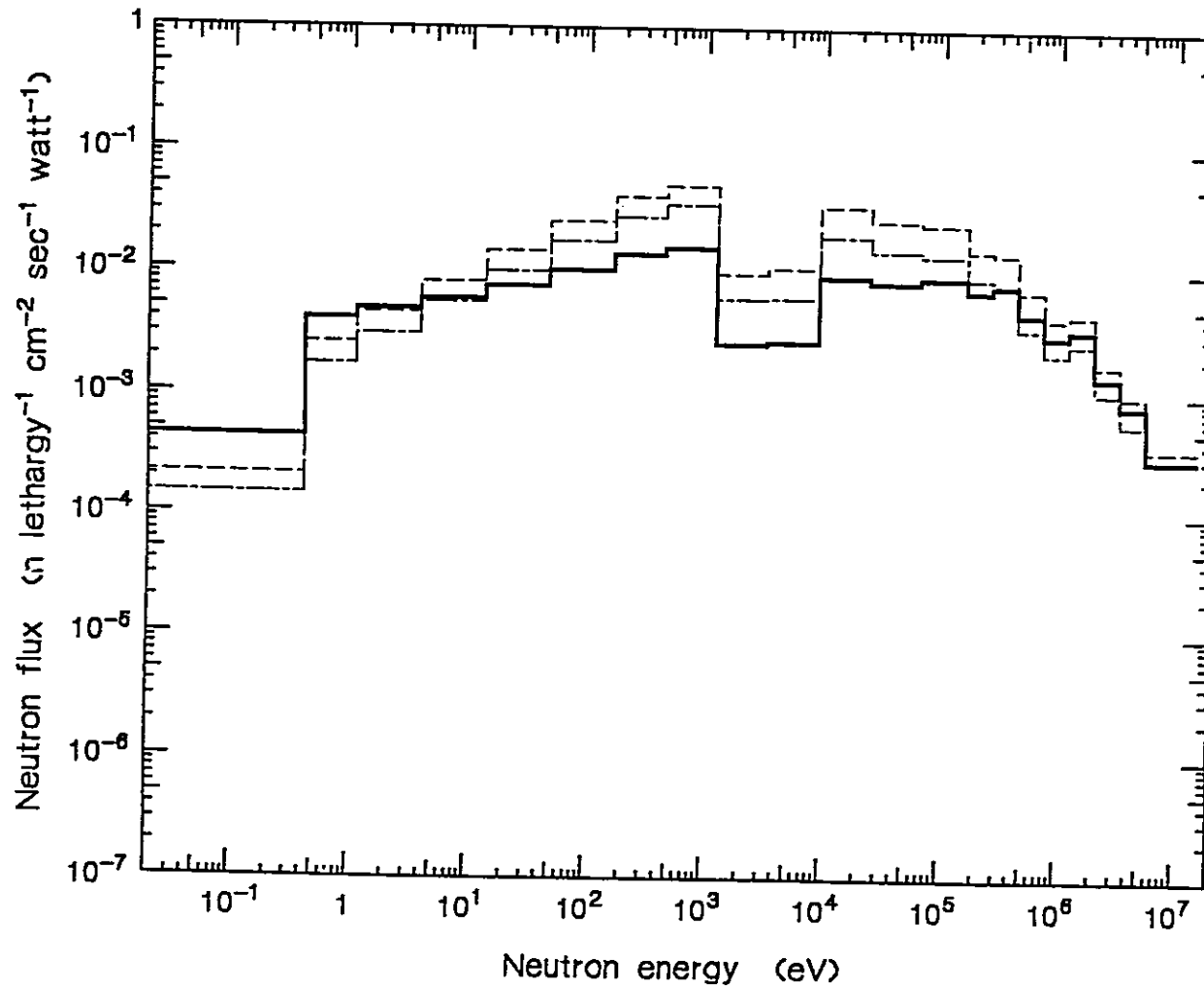


Fig. 8a Measured and calculated neutron spectra of V-G configuration.

V-G at 30 cm Solid:11.6R Dashed:7.6R Dotted:5.6R Thin-solid:4.2R

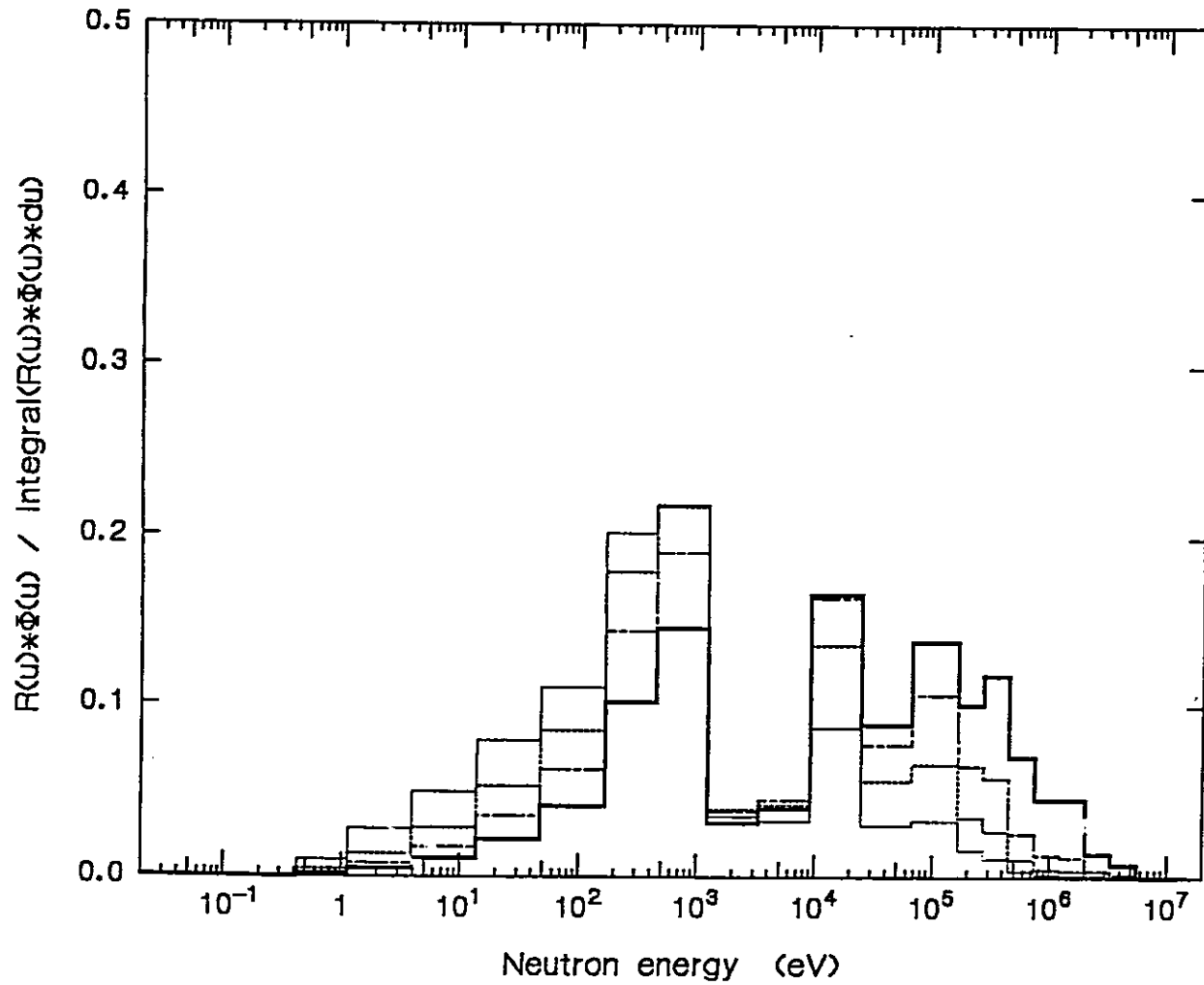


Fig. 8b Importance functions for counter responses of V-G configuration.

VI-A at 30 cm; Solid: Meas. Broken: Calc.(JSD100) Dashed: Calc.(JSDJ2)

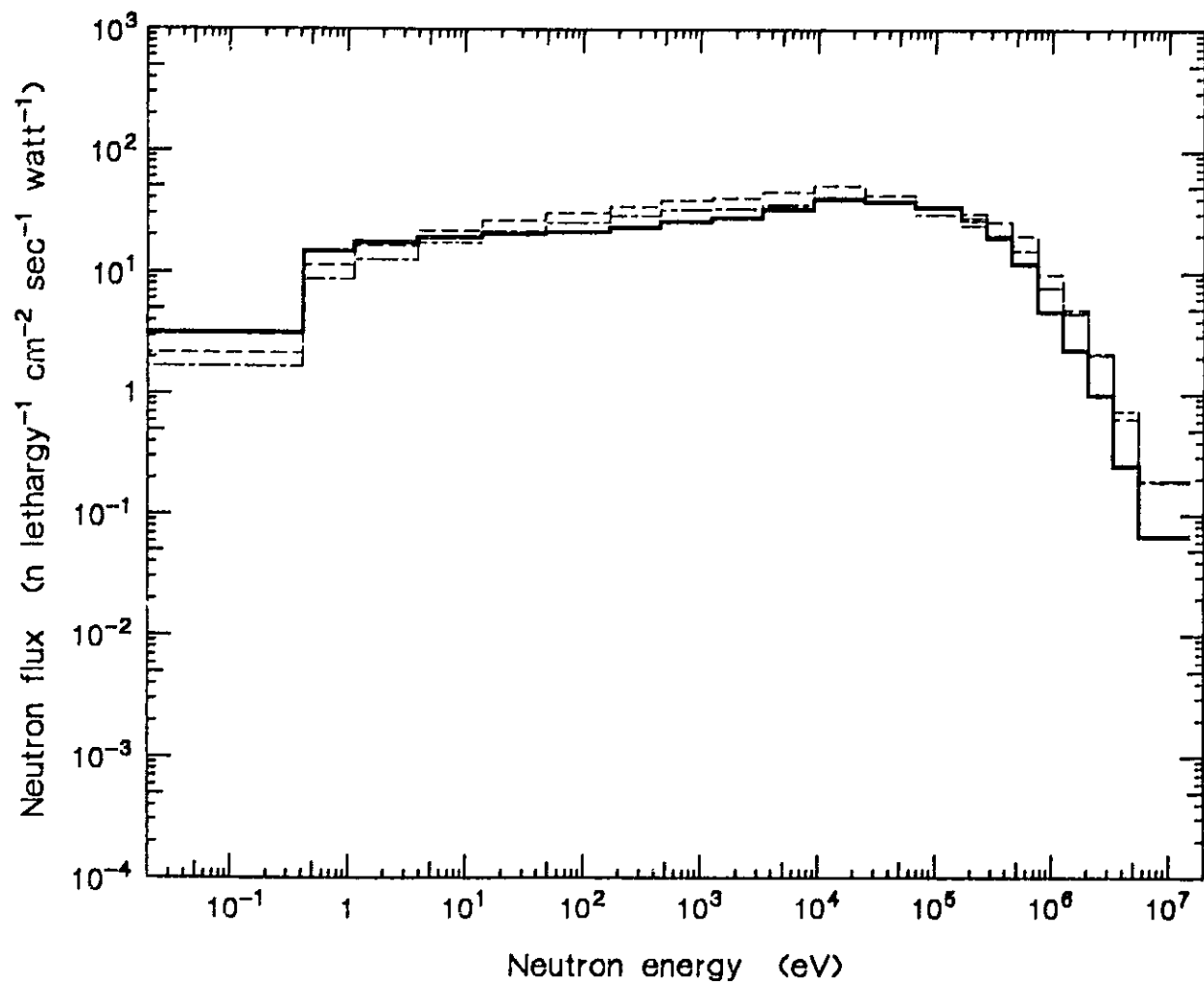


Fig. 9a Measured and calculated neutron spectra of VI-A configuration.

VI-A at 30 cm Solid:11.6R Dashed:7.6R Dotted:5.6R Thin-solid:4.2R

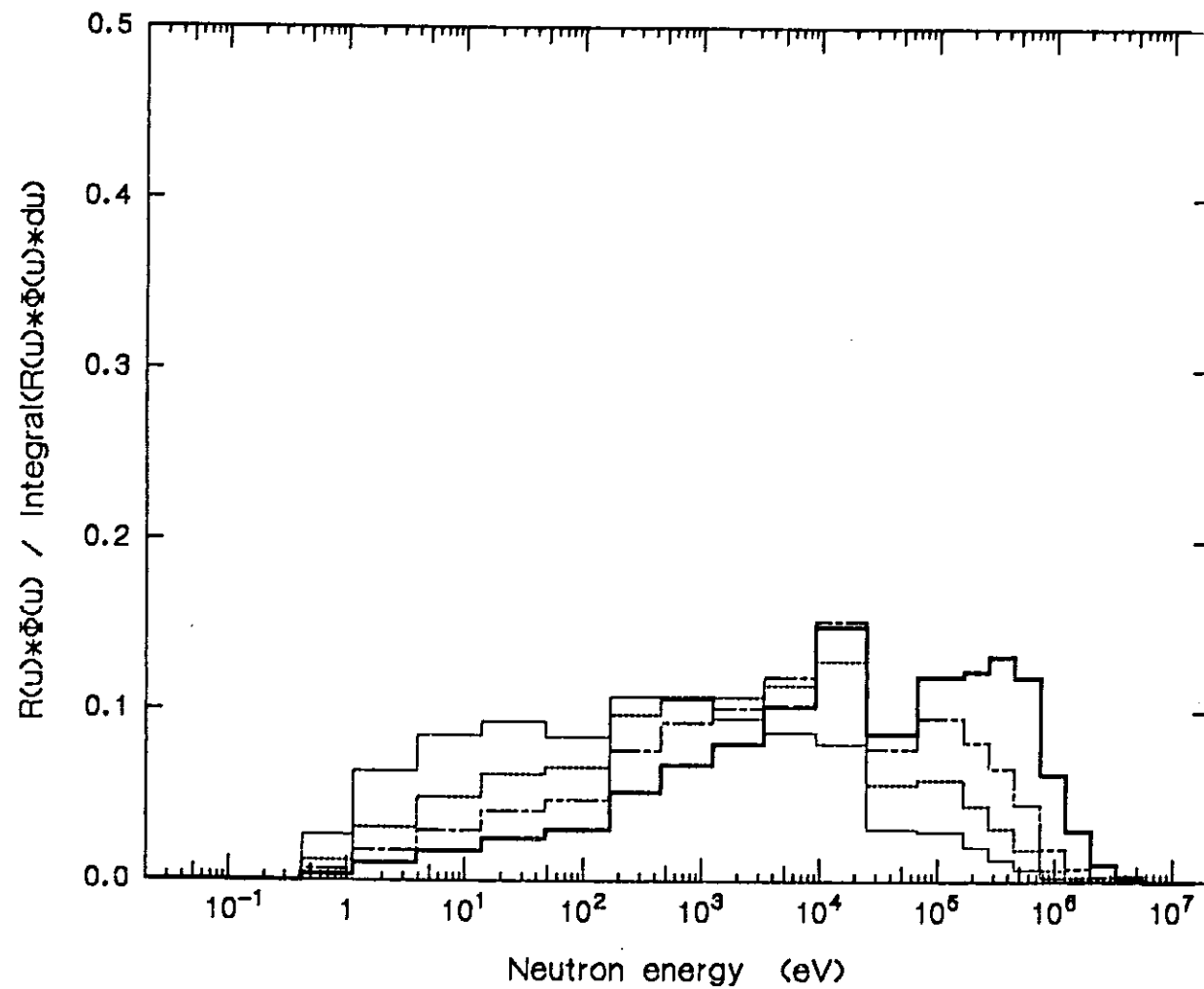


Fig. 9b Importance functions for counter responses of VI-A configuration.

VI-D at 30 cm; Solid: Meas. Broken: Calc.(JSD100) Dashed: Calc.(JSDJ2)

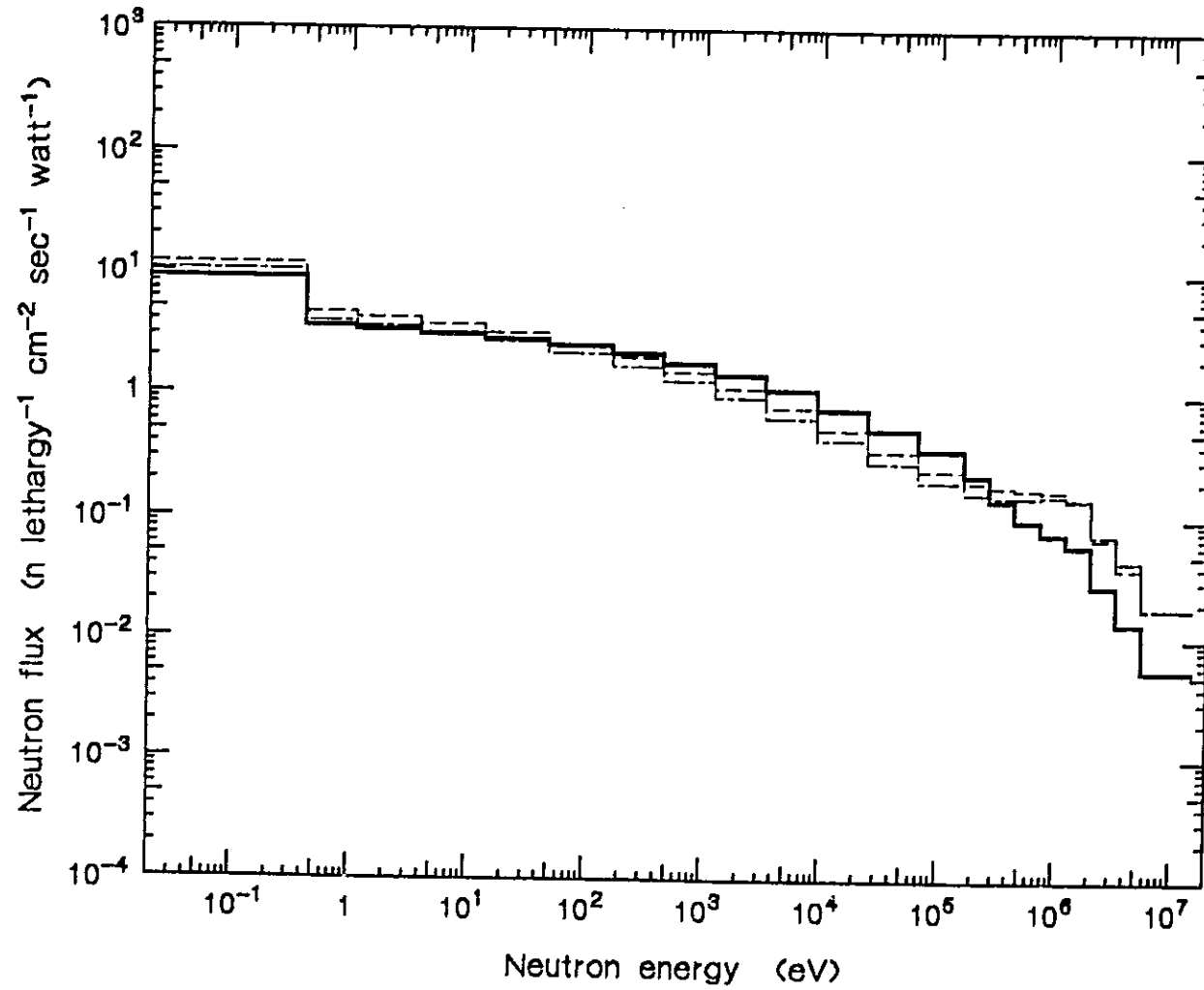


Fig. 10a Measured and calculated neutron spectra of VI-D configuration.

VI-D at 30 cm Solid:11.6R Dashed:7.6R Dotted:5.6R Thin-solid:4.2R

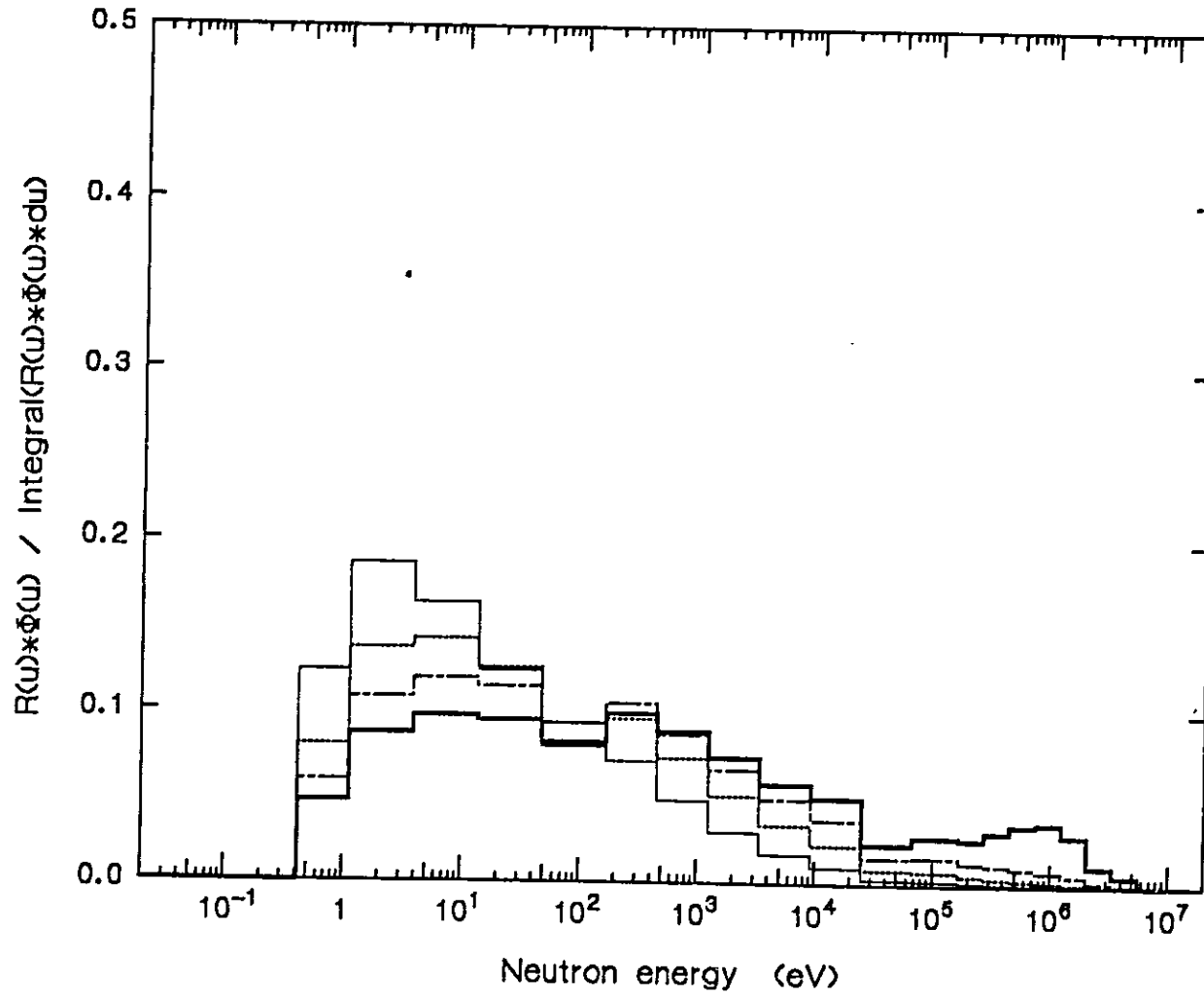


Fig. 10b Importance functions for counter responses of VI-D configuration.

VII-C at 30 cm; Solid: Meas. Broken: Calc.(JSD100) Dashed: Calc.(JSDJ2)

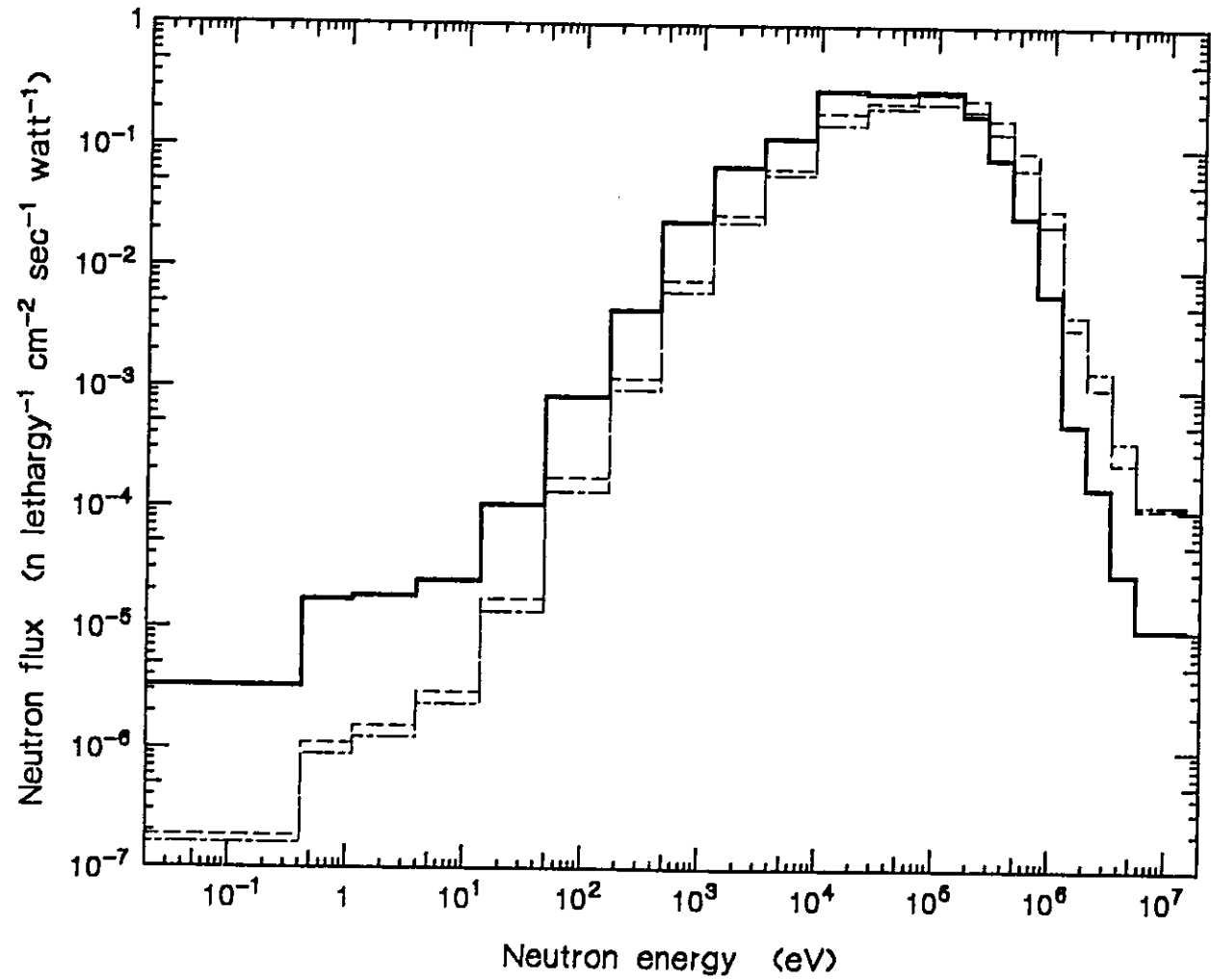


Fig. 11a Measured and calculated neutron spectra of VII-C configuration.

VII-C at 30 cm Solid:11.6R Dashed:7.6R Dotted:5.6R Thin-solid:4.2R

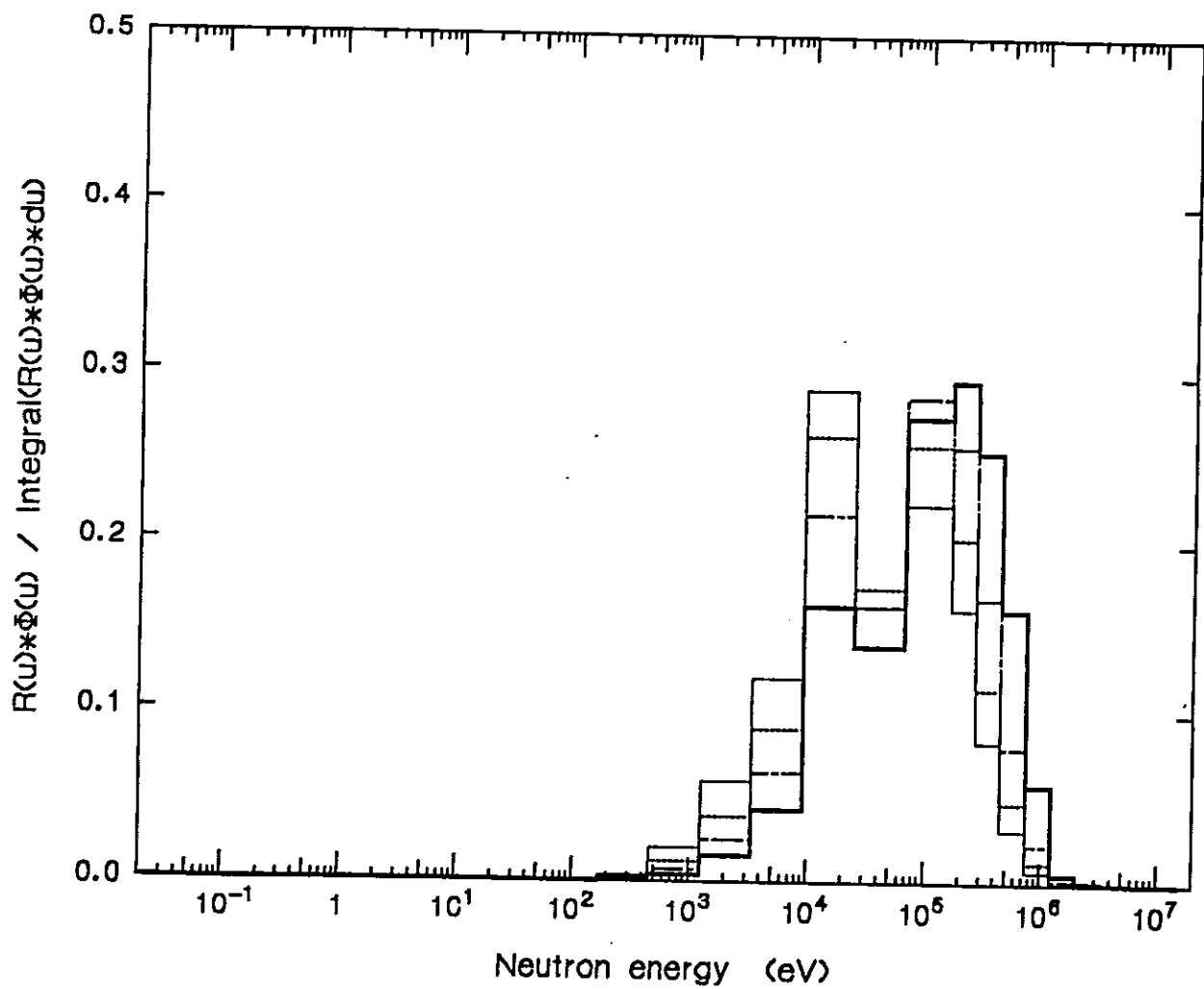


Fig. 11b Importance functions for counter responses of VII-C configuration.