


PNC  J1214 88-001~~配布限定~~

本資料は 〇/年 10月 〆日付けで登録区分、  
変更する。

[技術情報室]

1-35-9

分置

# 中性子エネルギースペクトル及び実効線量当量評価法 の確立に関する研究

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1988年3月

三菱原子力工業株式会社

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

の  
転  
い


よう注意して下さい。

This document is not intended for publication. No public reference nor disclosure to the third party should be made without prior written consent of Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

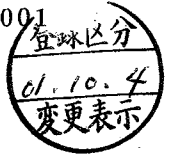
本資料についての問合せは下記に願います。

〒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

配布限定

PNC  J 1214 88-001

1988年3月



## 中性子エネルギースペクトル及び実効線量当量評価法の確立に関する研究

岩井 敏\*，林津 雄厚\*

### 要 旨

本研究では、中性子被ばく管理が必要とされる核燃料施設のうち、プルトニウム転換技術開発施設を対象にして中性子エネルギースペクトル測定評価を行い、得られたスペクトルを解析し、それに基づき中性子個人モニターおよびレムカウンタを用いた実効線量当量の評価法の検討を行い、以下に示す有用な成果を得た。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 本施設の中性子エネルギースペクトルは、Puからの $\alpha$ 線に起因する酸素( $\alpha, n$ )反応による2MeV付近のピークと、散乱中性子による $1/E$ 型のスペクトルから形成されていることがわかった。
- (2) プルトニウム燃料開発施設と異なり、Puの自発核分裂による数100keV付近のピークが見られない原因はグローブボックスのパネル厚と材質のちがいにより、本施設の中性子遮へい性能がよいためであることがわかった。
- (3) 本施設では中性子被ばく線量当量の98%以上が、線源からの直接成分(15keV以上)によることがわかった。
- (4) レムカウンタの指示値(パルス計数率からの線量当量率)は、メーカー提示の換算係数を用いれば、測定された中性子スペクトルから求めた値よりも20~40%低めであった。

---

本報告書は、三菱原子力工業(株)が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：620D001

事業団担当者：宮部 賢次郎，百瀬 琢磨(安全対策課)

\*：原子力開発センター 大宮研究所 放射線安全評価チーム

- (5) 本施設においては、 $1\text{ cm}$ 線量当量( $H_{1\text{cm}}$ )による評価は、実効線量当量に対して約45%過大である。
- (6) 現在、中性子個人モニターとして用いられているアルベド型TLD線量計の人体を含む体系における中性子エネルギー応答関数を3次元モンテカルロ計算で求め、標準場を用いた実験で検証した。同様に実験により求められた固体飛跡検出器(TS-16, およびCB-39)の中性子エネルギー応答関数に基づき、これらの検出器を人体に装着した体系におけるエネルギー応答関数を評価、検証した。そしてこの検証された応答関数を用いて、測定された中性子スペクトルに基づいて、本施設の代表的な作業環境で個人線量計の応答を評価した結果、エネルギー応答特性の観点から固体飛跡検出器が中性子線量評価用に有望であることがわかった。



Establishment of the Estimation Techniques on Neutron Energy Spectrum  
and Effective Dose Equivalent

Satoshi Iwai\*

Yuko Rintsu\*

This report describes the development of the estimation techniques on neutron effective dose equivalent by use of neutron personal dosimeters and rem counters in nuclear fuel facilities where neutron exposure control is required.

In this study, these analyses were performed on neutron spectra measured in the Pu-conversion facility, and the following results were obtained.

- (1) All neutron spectra measured in the Pu-conversion facilities are composed by two components: a peak around 2MeV and 1/E-shape spectrum in the intermediate and epithermal energy region. The peak is caused by  $O(\alpha, n)$  reactions due to  $\alpha$ -particles emitted from Pu, and 1/E-shape spectrum is made by scattered neutrons.
- (2) The superior neutron shielding ability of the glove box panels in the Pu conversion facility was confirmed by the absence of the peak around 500 keV caused by Pu spontaneous fissions, although the peak was found in the Pu-U mixed oxide fuel facilities.
- (3) In the Pu conversion facility, above 98 % of neutron dose equivalent is due to direct components (above 15 keV) from the sources.
- (4) The rem counter showed 20% through 40% lower dose equivalents than those based on the measured neutron spectra and conversion factors proposed by the vendor; the dose equivalents by the rem counter were derived from pulse count rates.
- (5) In the Pu conversion facility,  $H_{1cm}$  (1cm-dose equivalent) shows about 40% larger value than effective dose equivalent.
- (6) The energy response function of the albedo TLD badge situated on a human body was calculated by a three dimensional Monte Carlo code and was verified by the experiments in neutron standard fields; the albedo TLD badge is used as a personal neutron dosimeter in this facility. The energy response functions of solid state detectors (TS-16, and CR-39) on the same condition were also estimated by the three dimensional Monte Carlo calculation and verified by experiments. The solid state detectors are most suitable personal neutron dosimeters in this facility from the consideration of the evaluated energy response characters and the neutron spectra measured at the representative points in the facility.

---

Work performed by Mitsubishi Atomic Power Industries Inc. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

PNC Liaison: Kenjiro Miyabe and Takumaro Momose (Safety Administration Section, Health and Safety Division)

\* Radiation Safety Evaluation Team, Omiya Technical Institute, Nuclear Development Center

# 目 次

1. 緒 論 .....	1
1.1 序 論 .....	1
1.2 研究計画 .....	1
2. 中性子エネルギースペクトルの測定評価 .....	4
2.1 中性子スペクトロメータおよびデータ解析方法 .....	4
2.2 プルトニウム転換技術開発施設における測定評価 .....	9
2.2.1 プルトニウム転換技術開発施設の概要と測定点 .....	9
2.2.2 測定方法および測定結果 .....	13
2.2.3 中性子エネルギースペクトル測定評価結果と考察 .....	22
3. 実効線量当量，および深部，表層部線量当量の評価 .....	26
3.1 中性子に対する深部，表層部線量当量の評価の考え方 .....	26
3.2 レムカウンタによる深部，表層部線量当量の評価 .....	30
3.3 中性子個人モニターを用いた深部，表層部線量当量の評価 .....	31
3.3.1 中性子個人モニター .....	31
3.3.2 人体に装着したときの中性子個人モニターのエネルギー応答関数 .....	38
3.3.3 個人モニターによる深部，表層部線量当量の評価 .....	66
4. 結 語 .....	68
5. 謝 辞 .....	70
6. 参 考 文 献 .....	71
付 録 1 .....	73
付 録 2 .....	83

List of Tables

	Page
Table 1	Various dose equivalents . . . . . 2
Table 2(a)	Comparisons of calculated responses and experimental values at INS calibration fields ( $^3\text{He}$ 0.1 atm detector) . . . 6
Table 2(b)	Comparisons of calculated responses and experimental values at INS calibration fields ( $^3\text{He}$ 5 atm detector) . . . . 7
Table 3	Neutron group structure of PSL-40 library . . . . . 8
Table 4	Measured points, dates, neutron source, and shielding condition description in the Pu-conversion facility . . . 12
Table 5	Detector count rate in Pu-conversion facility . . . . . 14
Table 6	Average neutron energy in each measuring point . . . . . 21
Table 7	Percentage of dose equivalent rate above 15keV neutrons . . . 23
Table 8	Comparisons of dose equivalent rates measured with rem counter (Studsвик 2202D) to those calculated from measured spectra . . . . . 24
Table 9	Conversion coefficients from unit fluence to dose equivalent . . . . . 28
Table 10	The values of dose equivalents (ICRP 21), $H_E(\text{AP})$ , $H_E(\text{ROT})$ , $H_{1\text{cm}}$ , $H_{\text{SL}}$ , and $H_{\text{SS}}$ at the measured points in the Pu-conversion facility . . . . . 29
Table 11	Atomic density of TLD elements . . . . . 33
Table 12	Neutron energy response functions of thermoluminescence dosimeters ( $^6\text{Li}_2^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ , $^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ ) in free air condition . . . . . 36
Table 13	Atomic density of each material used for the calculations . . 40
Table 14(a)	Neutron energy response functions of a TLD element (Element 2) above the human phantom for various incident conditions . . . . . 48
Table 14(b)	Neutron energy response functions of a TLD element (Element 3) above the human phantom for various incident conditions . . . . . 49
Table 14(c)	Neutron energy response functions of a TLD element (Element 4) above the human phantom for various incident conditions . . . . . 50

	Page
Table 15	Neutron energy response functions of TS-16 dosimeter above the human phantom for various incident conditions . . . . . 52
Table 16	Neutron energy response functions of CR-39 dosimeter above the human phantom for various incident conditions . . . . . 54
Table 17	Comparisons of calculated TLD responses and experimental data at monoenergetic neutron standard fields in the Electrotechnical Laboratory . . . . . 58
Table 18	Comparisons of calculated and experimental response data of TLD and TS-16 respectively at the INS calibration field . . . 60
Table 19	Comparisons of calculated and experimental response data of TLD, TS-16, and CR-39 respectively at the PNC calibration facility . . . . . 61
Table A-1	Values of $a_1$ , $a_2$ , $a_3$ , $a_4$ , and $a_5$ . . . . . 85
Table A-2	Ratio of the calculated value to the true value in the energy range from thermal to 15MeV . . . 86
Table A-3	Comparisons of calculated and experimental values of $H_{1cm}$ , HSL, and HSS respectively at the PNC calibration facility . . 87



## List of Figures

		Page
Fig. 1	Cross sectional views of $^3\text{He}$ counter with the spherical polyethylene moderators covered with cadmium metal . . . . .	5
Fig. 2	Process flow diagram of the Pu-conversion facility . . . . .	10
Fig. 3	Plane view of Pu-conversion facility . . . . .	11
Fig. 4(a)~(f)	Unfolded neutron spectrum . . . . .	15~20
Fig. 5	Conversion coefficients from neutron fluence to dose equivalent . . . . .	27
Fig. 6	TLD badge for neutron dosimetry . . . . .	34
Fig. 7	Energy response function of thermoluminescence dosimeter (TLD). ( $^6\text{Li}_2^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ , $^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ ) . . . . .	35
Fig. 8	Energy response function of TS-16 dosimeter . . . . .	37
Fig. 9	Angular dependence of sensitivity of TS-16 dosimeter . . . . .	37
Fig. 10	Energy response function of CR-39 dosimeter . . . . .	39
Fig. 11	Angular dependence of sensitivity of CR-39 dosimeter . . . . .	39
Fig. 12	Calculational model of a human phantom for neutron dosimetry . . . . .	41
Fig. 13	Calculational model of skelton in a human phantom for neutron dosimetry . . . . .	42
Fig. 14(a)~(d)	Neutron energy response function of TLD elements above the human phantom for neutron dosimetry . . . . .	44~47
Fig. 15	Neutron energy response function of TS-16 dosimeter above the human phantom for neutron dosimetry . . . . .	51
Fig. 16	Neutron energy response function of CR-39 dosimeter above the human phantom for neutron dosimetry . . . . .	53
Fig. 17	Comparisons of calculated TLD response functions and experimental data at the Electrotechnical Laboratory . . . . .	57
Fig. 18(a)~(c)	Unfolded neutron spectrum at the PNC calibration facility . . . . .	62~64
Fig. A-1(a)(b)	Ratio of the calculated value to the true value in the energy range from thermal to 15MeV . . . . .	88~89

## 1. 緒 論

### 1.1 序 論

従来、中性子の被ばく線量評価には、現行法令に用いている国際放射線防護委員会勧告（ICRP）Pub. 21<sup>1)</sup>に示された線束-線量当量換算係数（ $\text{mrem h}^{-1} / \text{ncm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ ）に基づいて求められる線量当量値（レム線量）が用いられてきた。そしてこの線量当量値は、測定する場と同じ中性子エネルギースペクトルをもつ校正場で校正されたレムカウンターを用いればよい精度で直読できる値である<sup>2)</sup>。しかし、ICRP Pub. 26 の国内法令取入れに伴い、外部被ばくにおける実効線量当量（ $H_E$ ）を評価が必要となるが、現場でこの値を評価するのはいろいろと困難なため、かわりに1 cm線量当量（1 cm-深部線量当量）、3 mm線量当量（身体表面から3 mmの深さの表層部線量当量）、70  $\mu\text{m}$ 線量当量（身体表面から70  $\mu\text{m}$ の深さの表層部線量当量）の値を測定評価することが予想される。なお、これらの線量当量の定義と、被ばく評価する対象についてTable 1に示す。

現状では1 cm線量当量（以後  $H_{1\text{cm}}$  と記述する。）、3 mm線量当量（以後  $H_{\text{SL}}$  と記述）、および70  $\mu\text{m}$ 線量当量（以後  $H_{\text{SS}}$  と記述）を直読できる測定器および個人モニターは市販されておらず、ICRP Pub. 51<sup>3)</sup>に中性子エネルギースペクトルから  $H_{1\text{cm}}$ 、 $H_{\text{SL}}$  および  $H_{\text{SS}}$  を算出する換算係数が示されているのみである。現在  $H_{1\text{cm}}$ 、 $H_{\text{SL}}$  および  $H_{\text{SS}}$  を正確に評価するためには、対象となる場の中性子エネルギースペクトルとICRP Pub. 51の換算係数を用いることが必要である。したがって対象となる場の中性子エネルギースペクトルを正しく測定評価しておくことが不可欠である。

### 1.2 研究の目的および計画

今回の研究は、前回の研究<sup>4)</sup>に引き続き、中性子被ばく管理が必要とされる核燃料施設の1つであるプルトニウム転換技術開発施設内の代表点の中性子エネルギー測定評価を行い、測定されたスペクトルに基づいて中性子被ばく管理方法および遮へい方法の検討を行う。なお、このスペクトルに基づいて  $H_{1\text{cm}}$ 、 $H_{\text{SL}}$ 、 $H_{\text{SS}}$ 、ならびに  $H_E$  の評価を行うが、実際の現場において中性子エネルギースペクトルを日常的に測定することは実際的ではないため、通常使用されている個人モニターおよびレムカウンターを用いて  $H_{1\text{cm}}$ 、 $H_{\text{SL}}$  および  $H_{\text{SS}}$  を評価する方法について検討する。

本研究の手順および検討項目は以下のとおりである。

- (1) 熱中性子を防ぐためのカドミウムカバー付球形減速材付中性子スペクトロメータの校正

Table 1 Various dose equivalents

Dose equivalent	Definition	Estimated objects
1cm-dose equivalent	on the principle* axis at the depth of 10mm	dose equivalent of trunk
3mm-dose equivalent	on the principle axis at the depth of 3mm	dose equivalent of skin
70 m-dose equivalent	on the principle axis at the depth of 0.07mm	dose equivalent of lens

\* The principle axis is the axis of symmetry for parallel beam.

- (2) プルトニウム転換技術開発施設内の代表点における中性子エネルギースペクトルの測定評価（測定およびアンフォールディング）
- (3) 上記測定点における  $H_{1cm}$ ,  $H_{SL}$ ,  $H_{SS}$ , および ICRP Pub.21 に基づく線量当量率の評価と比較
- (4) 上記測定点におけるレムカウンタによる線量当量率と, (3)で求めた ICRP Pub.21 に基づく線量当量率の比較とその結果の検討
- (5) レムカウンターを用いて  $H_{1cm}$ ,  $H_{SL}$ ,  $H_{SS}$  を評価することの有効性の検討
- (6) アルベド型 TLD 中性子個人線量計, CR-39, TS-16 の自由空間 (free air) 中のエネルギー応答関数の評価
- (7) (6)に示した個人モニターを人体に装着したときのエネルギー応答関数のモンテカルロ計算による評価と標準校正場を用いた検証
- (8) 個人モニターを用いた  $H_{1cm}$ ,  $H_{SL}$ ,  $H_{SS}$  の評価に関する検討

## 2. 中性子エネルギースペクトルの測定評価

### 2.1 中性子スペクトロメータおよびデータ解析手法

本研究で使用した中性子スペクトロメータの断面図を Fig. 1 に示す。この検出器は前回の研究<sup>4)</sup>で設計、製作されたものである。この測定器は球形であるため中性子入射方向依存性が小さい。したがって、散乱線成分の多いプルトニウムを取扱う施設で使用する時、中性子の入射条件を考慮しなくてすむため、この検出器は適切である。前回の研究では、熱中性子が比較的少ない場での測定のため、カドミウムカバーを使用しなかった。今回は水溶液系又は厚いコンクリートを通過してくる中性子を測定するために熱中性子が多いと判断される。そのために、測定器にカドミウムのカバーをかけて測定し、熱中性子とそれ以外の中性子成分を別々に評価した。今回はカドミウムカバーをかけた状態で使用するために、東大原子核研究所の減速型中性子標準校正場（核研標準場<sup>5)</sup>を用い、カドミウムカバーをかけた状態での中性子スペクトロメータのエネルギー応答関数の積分的検証を行った。カドミウムカバー付の状態での中性子スペクトロメータのエネルギー応答関数は、カドミウムカバーなしのエネルギー応答関数にカドミウムの中性子吸収の補正を加えたものである。核研標準場で照射して得られた各検出器の計数率（E），および計算で得られた計数率（C）および、それらの比（C/E）を Table 2 に示す。

但し、
$$C = \int_L^U R(E) \cdot \phi(E) dE \quad \dots\dots\dots (1)$$

R(E) : カドミウムカバー付中性子スペクトロメータのエネルギー応答関数

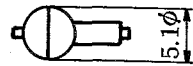
$\phi(E)$  : 核研標準場の中性子スペクトル

E : エネルギー

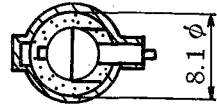
U : 上限エネルギー ( $1.5 \times 10^7 \text{ eV}$ )

L : 下限エネルギー ( $1.0 \times 10^{-4} \text{ eV}$ )

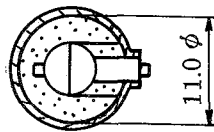
Table 2 には比較のために、カドミウムカバーをつけないときの測定値（E），計算値（C）および C/E も示してある。核研標準場ではシャドウブロックを使用する差し引き法で、直接線のみを用いて検出器を校正するため<sup>5)</sup>、シャドウブロックを用いた場合と用いない場合の検出器の応答の比すなわち散乱線の割合が大きい場合（50%を超える場合）は、精度よい校正が困難である。Table 2 から散乱線の割合が50%以下の場合の C/E について調べると、すべて±30%以内の精度に入っている。核研標準場の中性子束の値付



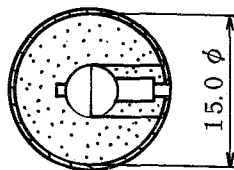
$^3\text{He}$  Counter



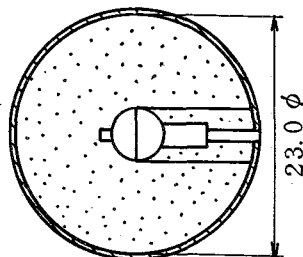
Polyethylene  
Thickness  
1.5 cm



Polyethylene  
Thickness  
1.5 cm



Polyethylene  
Thickness  
5.0 cm



Polyethylene  
Thickness  
9.0 cm

(unit in cm)

cadmium cover 0.05cm

Fig. 1 Cross sectional views of the  $^3\text{He}$  counter with the spherical polyethylene moderators covered with cadmium metal

Table 2(a) Comparisons of calculated responses and experimental values at INS calibration fields

(<sup>3</sup>He 0.1 atm detector)

Calibration Field	Detector		<sup>3</sup> He Detector covered with Cd	Moderator 1.5cm thickness	Moderator 3.0cm thickness	Moderator 5.0cm thickness	Moderator 9.0cm thickness
	Exp. or cal.	3He Detector					
BARE	E	0.0 ± 0.07 [1.0]*1	0.059 ± 0.022 [0.73]	1.85 ± 0.16 {1.78 ± 0.06} [0.73]	14.1 ± 0.3 {13.6 ± 0.13} [0.37]	31.8 ± 0.4 {25.2 ± 0.15} [0.22]	32.2 ± 0.4 {30.5 ± 0.18} [0.14]
	C	0.0219 (6.5-8)*2	0.0219	2.65 (3.2-10)	14.4 (4.6-11)	23.5 (1.3-11)	38.6 (2.4-12)
	C/E	-	0.37	1.40, {1.48}	1.02, {1.06}	0.74, {0.93}	1.20, {1.27}
IRON	E	0.23 ± 0.10 [0.92]	0.011 ± 0.022 [0.94]	3.17 ± 0.18 {2.84 ± 0.07} [0.62]	19.3 ± 0.3 {17.4 ± 0.17} [0.29]	34.7 ± 0.4 {33.9 ± 0.23} [0.20]	26.1 ± 0.4 {28.1 ± 0.07} [0.21]
	C	0.0211 (1.5-5)	0.021	4.06 (4.4-8)	19.1 (7.6-9)	27.6 (2.4-9)	33.8 (6.0-10)
	C/E	0.09	1.91	1.28, {1.43}	0.99, {1.10}	0.80, {0.81}	1.30, {1.20}
CARBON	E	0.15 ± 0.07 [0.95]	0.051 ± 0.021 [0.80]	4.41 ± 0.16 {4.31 ± 0.10} [0.80]	19.9 ± 0.31 {20.5 ± 0.37} [0.30]	33.8 ± 0.4 {33.1 ± 0.3} [0.20]	25.8 ± 0.3 {25.2 ± 0.3} [0.13]
	C	0.0712 (3.0-1)	0.050	6.25 (2.0-3)	23.1 (4.3-4)	29.4 (1.6-4)	30.8 (4.5-5)
	C/E	0.47	0.98	1.42, {1.45}	1.16, {1.13}	0.87, {0.89}	1.19, {1.22}
POLY-ETHYLENE	E	0.74 ± 0.02 [0.37]	0.33 ± 0.011 [0.32]	0.86 ± 0.04 {0.75 ± 0.005} [0.35]	1.21 ± 0.05 {1.04 ± 0.02} [0.31]	1.51 ± 0.05 {1.52 ± 0.02} [0.25]	1.23 ± 0.02 {1.38 ± 0.02} [0.14]
	C	3.99 (9.9-1)	0.040	2.79 (8.3-1)	3.09 (6.0-1)	2.27 (3.8-1)	1.93 (1.4-1)
	C/E	5.39	1.21	3.24, {1.00}	2.56, {1.18}	1.50, {0.93}	1.57, {1.21}

\*1 [ ] SCATTERING/TOTAL      \*3 Experimental value (unit: cps)

\*2 ( ) THERMAL NEUTRON CONTRIBUTION TO TOTAL      \*4 Calculated value

\*5 { } moderator with Cd cover

Table 2(b) Comparisons of calculated responses and experimental values at INS calibration fields  
(<sup>3</sup>He 5 atm detector)

Calibration Field	Detector		<sup>3</sup> He Detector covered with Cd	Moderator 1.5cm thickness	Moderator 3.0cm thickness	Moderator 5.0cm thickness	Moderator 9.0cm thickness
	Exp.	or cal.					
BARE	E	1.79 [0.97]*1	1.01 ± 0.19 [0.87]	30.3 ± 0.96 {29.1 ± 0.05} [0.69]	175.8 ± 1.1 {172.0 ± 1.0} [0.36]	366.7 ± 1.4 {341.0 ± 1.3} [0.22]	384.5 ± 1.2 {368.0 ± 1.4} [0.13]
	C	1.11 (2.8-8)*2	1.11	35.3 (2.9-10)	133.2 (4.4-11)	256.9 (1.3-11)	334.8 (2.4-12)
	C/E	0.62	1.10	1.17, {1.21}	0.76, {0.77}	0.71, {0.75}	0.87, {0.91}
IRON	E	4.97 ± 0.60 [0.93]	0.40 ± 0.26 [0.96]	47.7 ± 0.99 {47.8 ± 0.69} [0.61]	229.5 ± 1.6 {223.0 ± 1.4} [0.30]	418.0 ± 2.4 {405.0 ± 1.5} [0.19]	341.4 ± 2.0 {327.0 ± 1.4} [0.13]
	C	1.13 (5.9-6)	1.13	54.0 (4.1-8)	175.8 (7.2-9)	301.4 (2.4-9)	292.7 (5.9-10)
	C/E	0.23	2.83	1.13, {1.13}	0.77, {0.79}	0.72, {0.74}	0.86, {0.90}
CARBON	E	6.84 ± 1.02 [0.92]	1.78 ± 0.27 [0.84]	69.5 ± 1.2 {67.5 ± 0.8} [0.53]	253.6 ± 1.6 {242.0 ± 1.4} [0.28]	395.2 ± 1.8 {382.0 ± 2.1} [0.19]	311.0 ± 1.3 {312.0 ± 1.7} [0.13]
	C	2.88 (1.6-1)	2.41	82.7 (1.8-3)	211.9 (4.1-9)	320.2 (1.5-4)	266.3 (4.4-5)
	C/E	0.42	1.36	1.19, {1.23}	0.84, {0.87}	0.81, {0.84}	0.86, {0.85}
POLY-ETHYLENE	E	20.5 ± 0.38 [0.36]	0.97 ± 0.06 [0.35]	13.1 ± 0.3 {5.64 ± 0.09} [0.35]	16.3 ± 0.3 {12.3 ± 0.2} [0.29]	17.4 ± 0.2 {15.5 ± 0.9} [0.23]	13.4 ± 0.2 {14.8 ± 0.2} [0.16]
	C	86.1 (9.9-1)	0.87	34.3 (8.2-1)	27.4 (5.9-1)	24.4 (3.7-1)	16.7 (1.3-1)
	C/E	4.20	0.90	2.62, {1.09}	1.68, {0.91}	1.40, {0.99}	1.25, {0.98}

(unit: cps)

\*1 [ ] SCATTERING/TOTAL \*3 Experimental value

\*2 ( ) THERMAL NEUTRON CONTRIBUTION TO TOTAL \*4 Calculated value

\*5 { } moderator with Cs cover



Table 3 Neutron group structure of PSL-40 library

Group No.	PSL-40
1	1.492E + 07
2	1.000E + 07
3	6.703E + 06
4	4.966E + 06
5	4.066E + 06
6	3.012E + 06
7	2.466E + 06
8	1.827E + 06
9	1.353E + 06
10	9.072E + 05
11	6.081E + 05
12	4.076E + 05
13	1.111E + 05
14	1.503E + 04
15	3.355E + 03
16	5.830E + 02
17	1.013E + 02
18	2.902E + 01
19	1.068E + 01
20	3.059E + 00
21	1.125E + 00
22	4.140E - 01
	*1.000E - 04

\* lower limit (unit: eV)

け精度（100 keV以下で±20%，1 MeV程度で±15%，5 MeV以上で±50%）を考慮すれば、カドミウムカバー付のスペクトロメータの応答関数は正しく値付けられていると判断できる。

作成したカドミウムカバー付中性子スペクトロメータのエネルギー応答関数は DLC-37 ライブラリーの100 群構造であるが、アンフォールディングに使用するために、PSL-40<sup>7)</sup> の群構造をもつ22 群構造（Table 3に示す）とした。その理由は、プルトニウム施設の設計における遮へい計算に通常 PSL-40 群構造が使用されるため、この群構造でアンフォールディングすれば、測定値と設計計算値とを直接比較できること、およびこの群構造で求められている設計計算値をそのまま初期推定スペクトルとして、アンフォールディングに利用できるという利点があるためである。なお中性子エネルギースペクトルを求めるためのアンフォールディングコードには NEUPAC<sup>8)</sup> を使用するが、カドミウムカバー付の検出器は熱中性子にはほとんど感度がないため、熱中性子以外の中性子エネルギースペクトル（0.414 eV～15 MeV）を NEUPAC で求め、熱中性子束は独立に、カドミウムカバーを付けたときと付けないときの <sup>3</sup>He 検出器の計数率の差で評価する。

## 2.2 プルトニウム転換技術開発施設における中性子エネルギースペクトルの測定評価

### 2.2.1 プルトニウム転換技術開発施設の概要と測定点

本研究では測定対象としてプルトニウム転換技術開発施設内の中性子場を選んだ。この施設は再処理施設分離精製工場に隣接して建てられた地上4階、地下1階の施設である。この施設では再処理工場から送られてくる硝酸プルトニウムと硝酸ウラニルはそれぞれ別の受入計算槽に入れて計量した後、別々の貯槽に一時貯蔵される。この両液は一定の割合で混合槽に導かれた後混合されて貯槽に貯えられる。この混合槽から一定の割合が中間槽を経て脱硝加熱器に導かれる。ここでマイクロ波により一挙に蒸発、濃縮、脱硝されてケーキ状のプルトニウム・ウラン混合酸化物となる。このケーキは破碎、焙焼還元、粉碎、ふるいわけの後混合され、貯蔵容器につめられる。この施設の粉末生産能力は10 kg（プルトニウム・ウラン金属換算）/ day である。

この施設内では、多量の Pu の硝酸化合物および酸化物を取扱うため、Pu の自発核分裂および酸素との ( $\alpha$ , n) 反応による中性子に対する被ばく防護が必要となる。なお、この施設内のほとんどの作業は、内部被ばく防止および外部被ばく低減のため、グローブボックス内で行われる。グローブボックスの構造および材質は付録1に示すように、

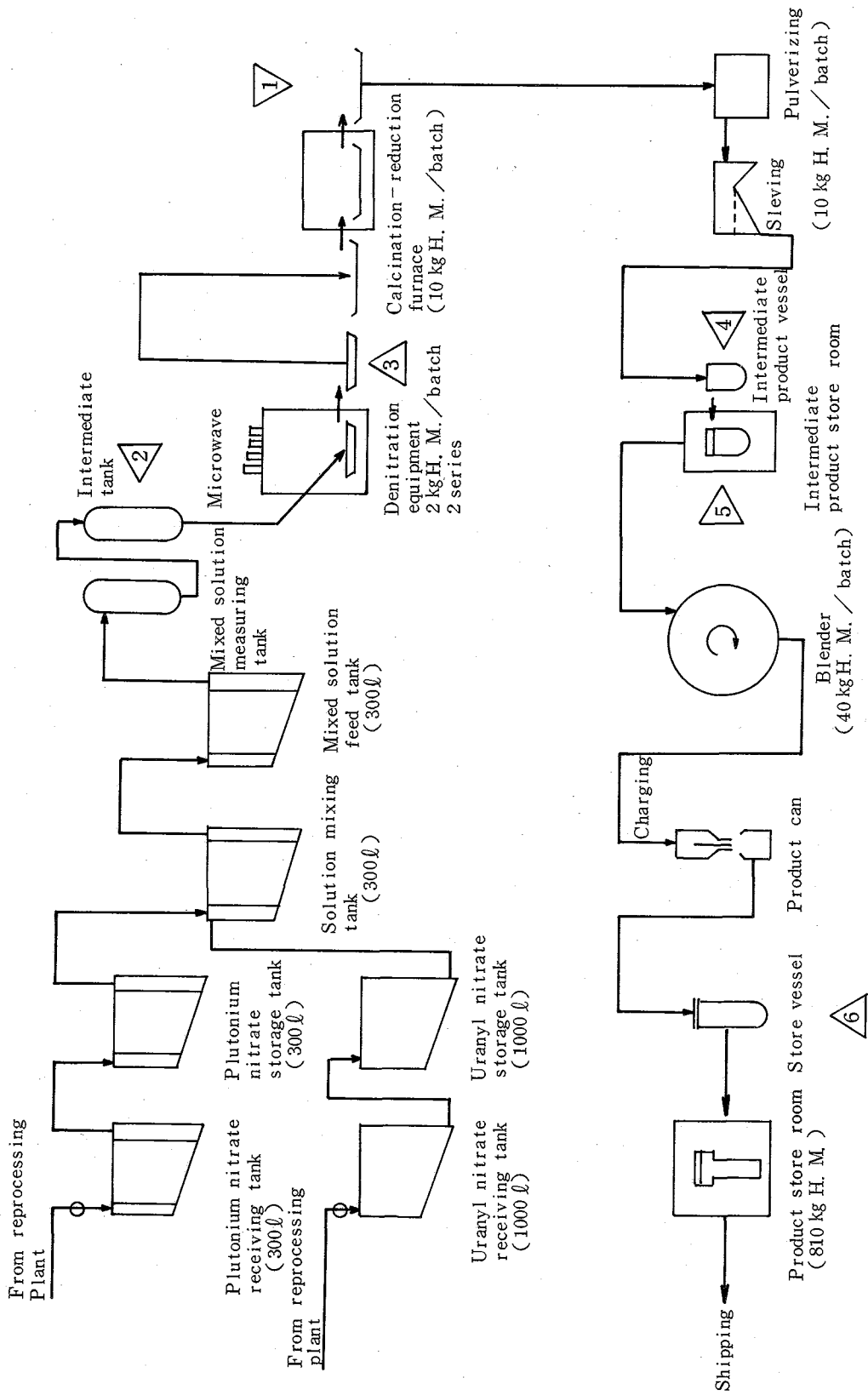
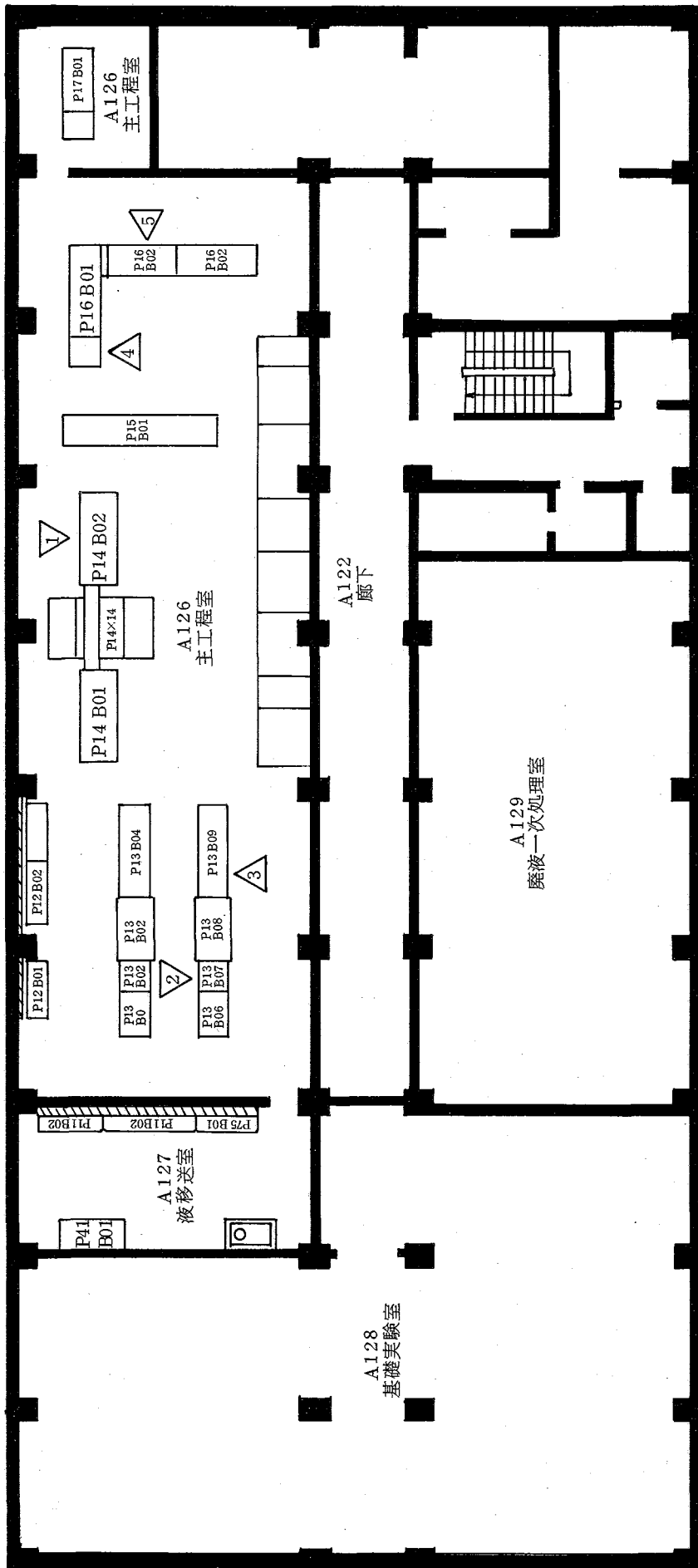


Fig. 2 Process flow diagram of the Pu-conversion facility



(1st floor)

Fig.3 Plane view of Pu-conversion facility

Table 4 Measured points, dates, neutron source, and shielding condition description  
in the Pu-conversion facility

No.	Date	Points	Source	Shielding, distance
1	1987.10.26	In front of a glove box after the process of the calcination-reduction furnace	UO <sub>2</sub> -PuO <sub>2</sub>	Shielding: Glove box panel Distance : 146cm (from floor) 25cm (from panel)
2	1987.10.26	In front of a glove box containing intermediate tank after the process of the mixed solution measuring tank	UO <sub>2</sub> (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> -Pu(NO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub>	Shielding: Glove box panel Distance : 146cm (from floor) 25cm (from panel)
3	1987.10.26	In front of a glove box containing a cooler after the process of the denitration equipment	UO <sub>2</sub> -PuO <sub>2</sub>	Shielding: Glove box panel Distance : 146cm (from floor) 25cm (from panel)
4	1987.10.26	In front of a glove box including intermediate product vessel	UO <sub>2</sub> -PuO <sub>2</sub>	Shielding: Glove box panel Distance : 146cm (from floor) 25cm (from panel)
5	1987.10.26	In front of heavy concrete shielding of intermediate product store room	UO <sub>2</sub> -PuO <sub>2</sub>	Shielding: Heavy concrete (200mm) Distance : 114cm (from floor) 30cm (from heavy concrete shield)
6	1987.10.30	In front of a push-car mounting a store vessel	UO <sub>2</sub> -PuO <sub>2</sub>	Shielding: (concrete 200mm) Distance : 146cm (from floor) 25cm (from heavy concrete shield)

プルトニウム熱料開発施設のグローブボックス（パネル：10 mmアクリル+10 mm鉛ガラス（鉛含有量（2 mm Pb 当量）））よりもかなり遮へい効果が強化されている。

い効果が強化されている。

今回の研究では、プルトニウム転換工程の代表点として、以下の6点すなわち

- (1) 焙焼還元炉取出後工程グローブボックス前
- (2) 中間槽（脱硝工程溶液受入タンク後）グローブボックス前
- (3) 脱硝工程冷却器グローブボックス前
- (4) 中間貯蔵容器グローブボックス前
- (5) 中間貯蔵庫コンクリート遮へい前
- (6) 貯蔵容器運搬台車前

を選択した。そしてこれらの各点をプルトニウム転換工程フロー図（Fig. 2）および平面図（Fig. 3）に示す。なお、各測定点の作業場所名、測定日時、測定対象および環境条件（遮へい物および線源からの距離）についてはTable 4に示し、測定条件の詳細および各検出器の測定値の値については付録1に示す。

## 2.2.2 中性子測定方法および測定結果

測定には以下の3種類の測定器を使用した。

- (1) 球形減速材付中性子スペクトロメータ<sup>4)</sup>（<sup>3</sup>Heガス圧5気圧又は0.1気圧）
- (2) レムカウンタ（Studsvik 2202D又はALNOR 2202D）
- (3)  $\gamma$ 線電離箱サーベイメータ（NESCO-808）

球形減速材付中性子スペクトロメータは中性子エネルギースペクトルを測定するために使用され、測定システムは、減速材付<sup>3</sup>He検出器、プリアンプ、リニアアンプ およびPHA（パルス波高分析器）の4つの要素から成立している。なお、PHAはパルス波高分布を調べるわけではなくスケーラーとして用いるだけであるが、ノイズおよび $\gamma$ 線によって生ずるパルスと中性子によるパルスを分離するためには、パルス波高分布を見て行うのがもっとも正確であるためである。

レムカウンタは中性子線量当量率を測定するために使用する。測定値はパルス計数値およびレートメータ（rate meter）の指示値の両者を用いる。 $\gamma$ 線電離箱サーベイメータは $\gamma$ 線の線量率測定に使用する。

各検出器の測定値をTable 5に示す。

Table 5 Detector count rates in Pu-conversion facility

Detector Exp. No.	Spherical moderating type spectrometer (unit: cps)							Rem counter (Studsvik 2202D) (unit: cps)	γ-ray exposure dose Ion chamber (NESCO-808) (unit mR/n)
	Bare	with Cd	Mod*1 1.5cm with Cd	Mod. 3.0cm with Cd	Mod. 5.0cm with Cd	Mod. 9.0cm with Cd			
1 Δ	42.3 ± 0.5	10.5 ± 0.5	67.1 ± 0.2	146.5 ± 0.5	189.5 ± 1.4	138.8 ± 0.9	6.63 ± 0.16 [2.0]*2	0.68	
2 Δ	22.0 ± 0.3	7.1 ± 0.2	43.7 ± 0.5	87.3 ± 0.6	101.5 ± 0.7	59.3 ± 0.5	2.17 ± 0.06 [0.6]*2	1.2	
3 Δ	20.7 ± 0.3	5.4 ± 0.2	35.6 ± 0.4	77.1 ± 0.6	101.0 ± 0.6	74.3 ± 0.5	3.52 ± 0.08 [1.05]*2	0.8	
4 Δ	49.2 ± 0.5	14.6 ± 0.3	103.2 ± 0.7	243.2 ± 1.1	328.4 ± 1.0	239.8 ± 1.2	11.45 ± 0.18 [3.5]*2	1.0	
5 Δ	419.9 ± 1.5	57.8 ± 0.5	281.9 ± 1.6	489.0 ± 2.2	542.0 ± 2.3	334.9 ± 1.8	15.24 ± 0.2 [4.1]*2	1.3	
6 Δ	60.3 ± 0.5	7.3 ± 0.2	35.3 ± 0.4	60.0 ± 0.4	65.0 ± 0.4	37.5 ± 0.4	1.79 ± 0.05 [0.52]*2	—	

Δ Detector <sup>3</sup>He (5 atm)

\*2 Values of rate-meter (mrem/h)

\*1 Moderator

# NO-1 NEUTRON SPECTRUM (63)

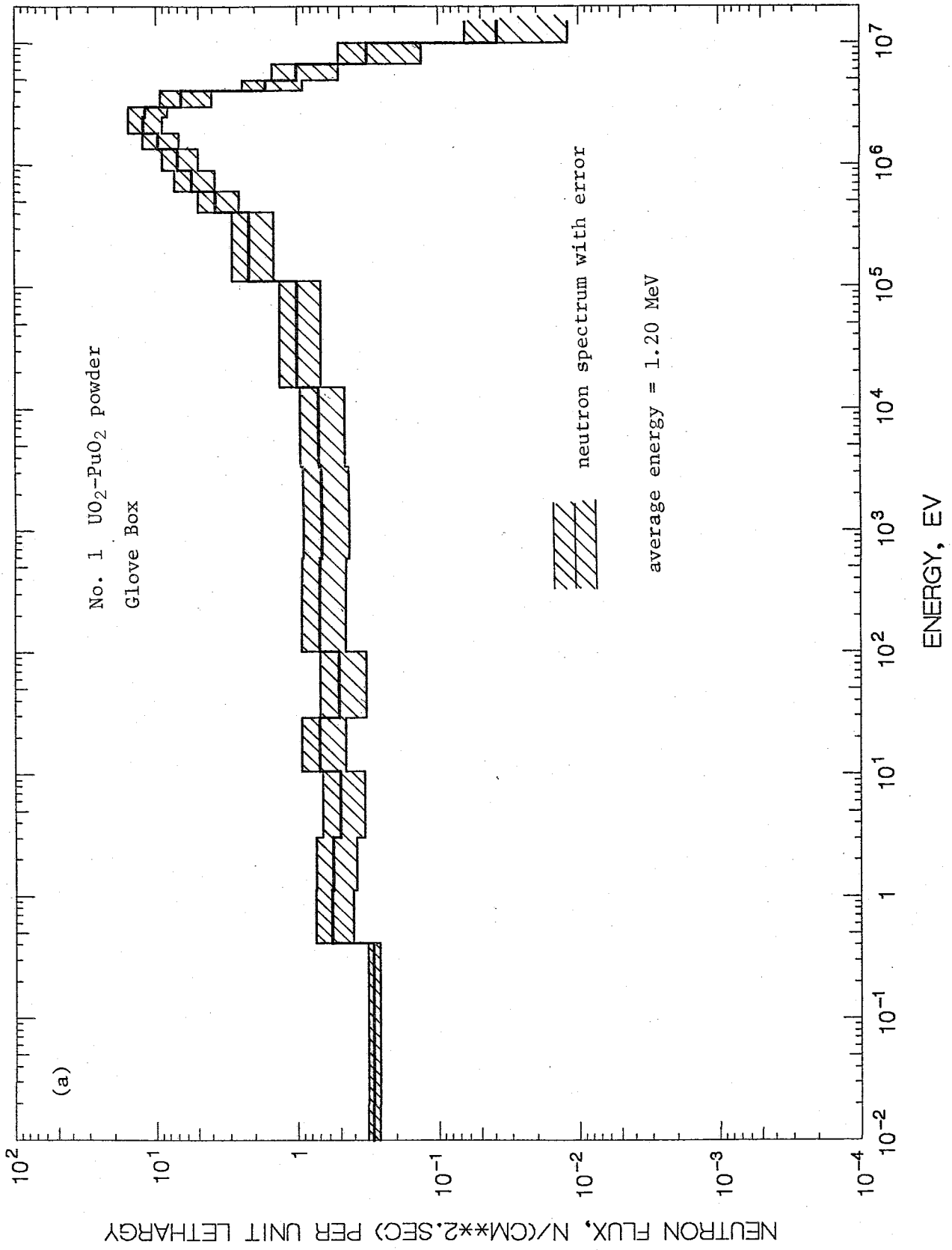


Fig. 4 Unfolded neutron spectra



NO-2 NEUTRON SPECTRUM (G5)

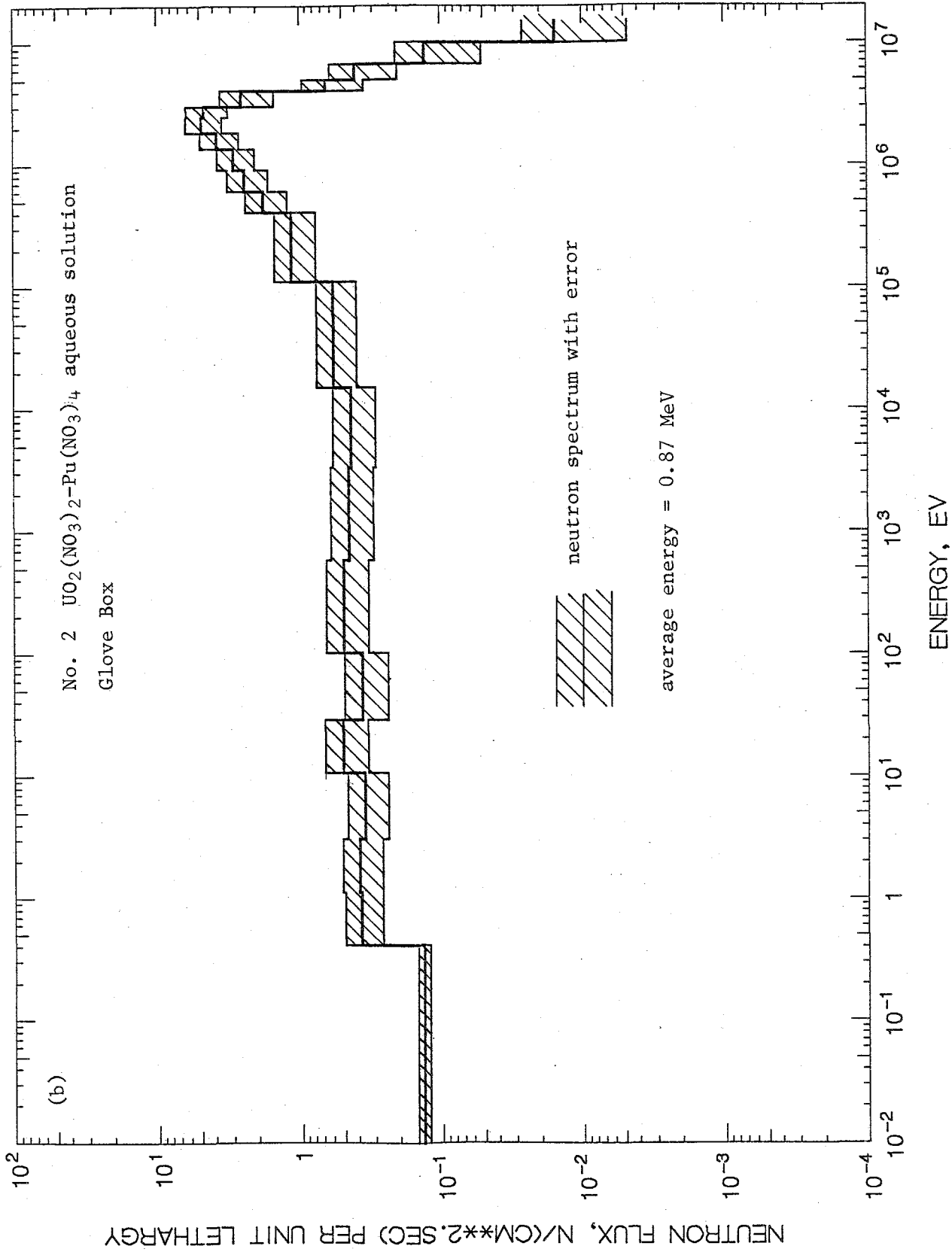


Fig. 4 (continued)

NO-3 NEUTRON SPECTRUM (G3)

No. 3 UO<sub>2</sub>-PuO<sub>2</sub> powder  
Glove Box

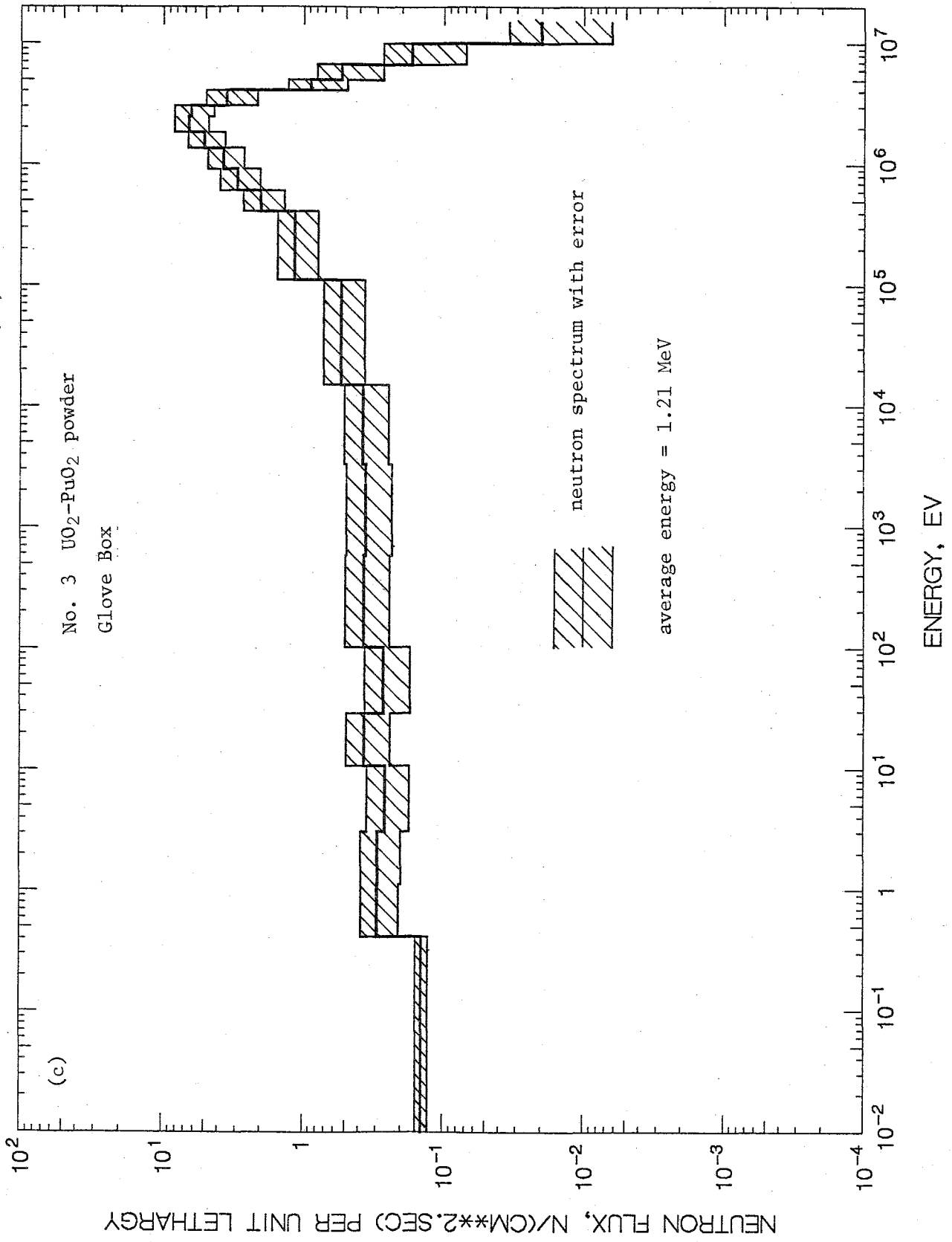


Fig. 4 (continued)

NO-4 NEUTRON SPECTRUM (G3)

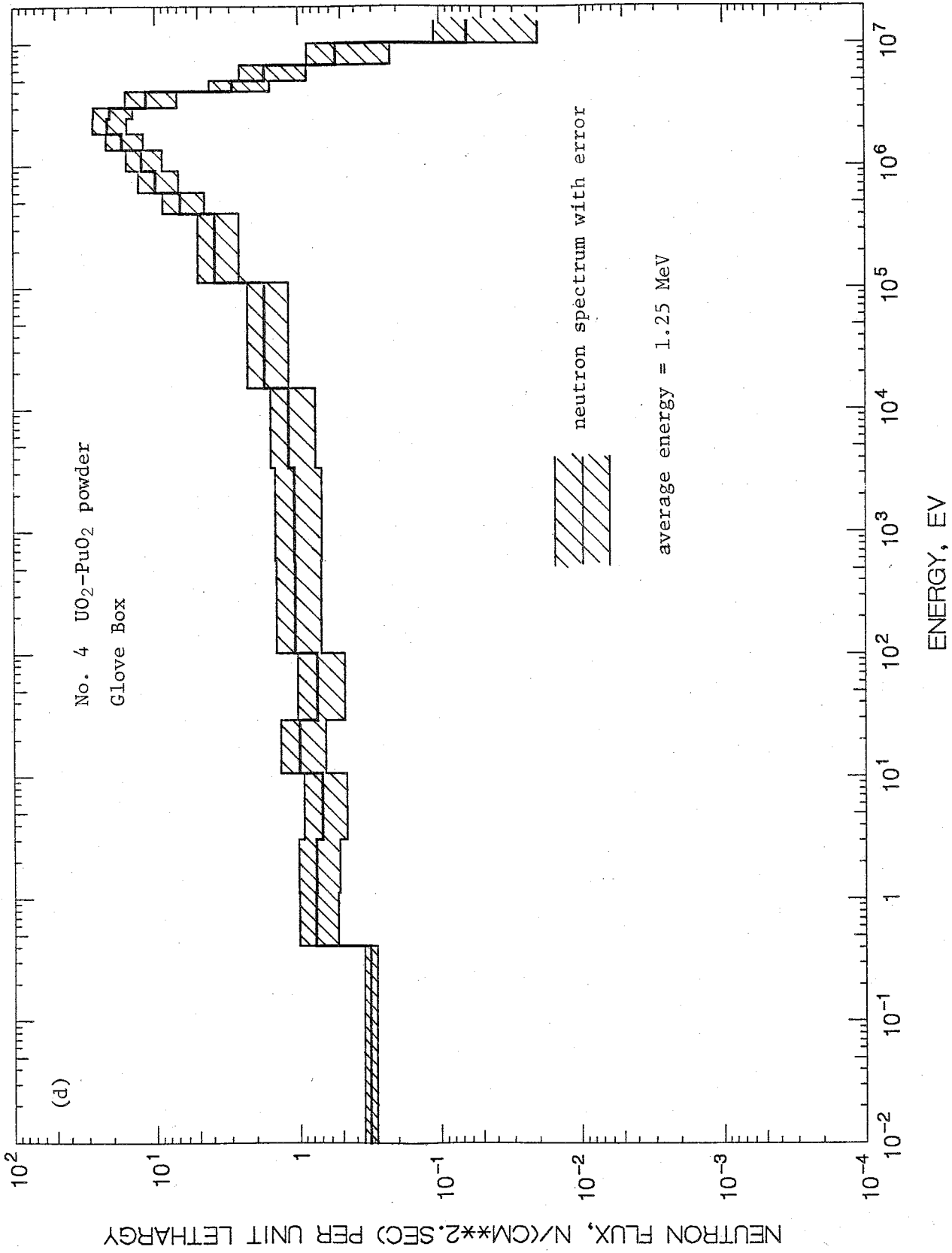


Fig. 4 (continued)

NO-5 NEUTRON SPECTRUM (G3)

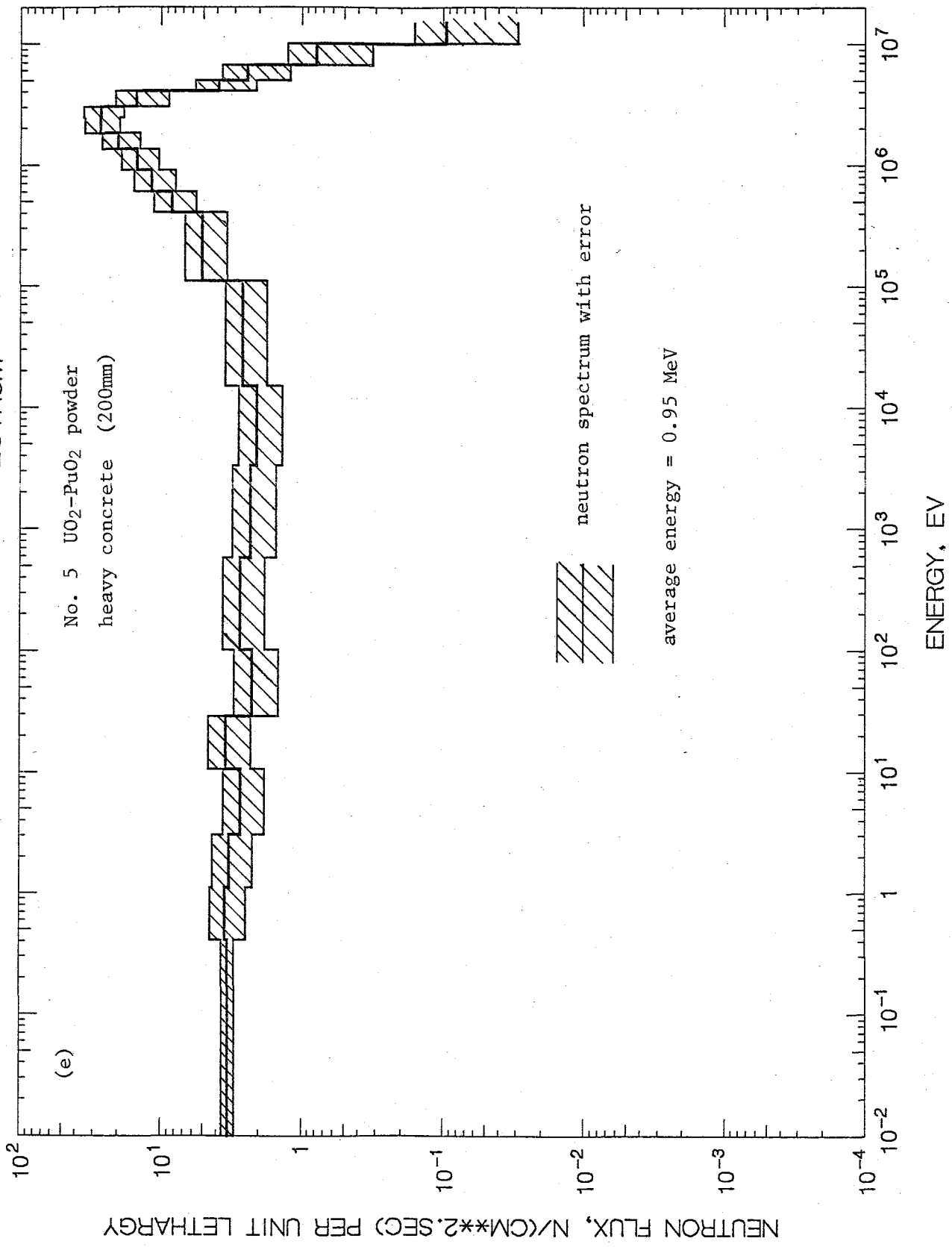
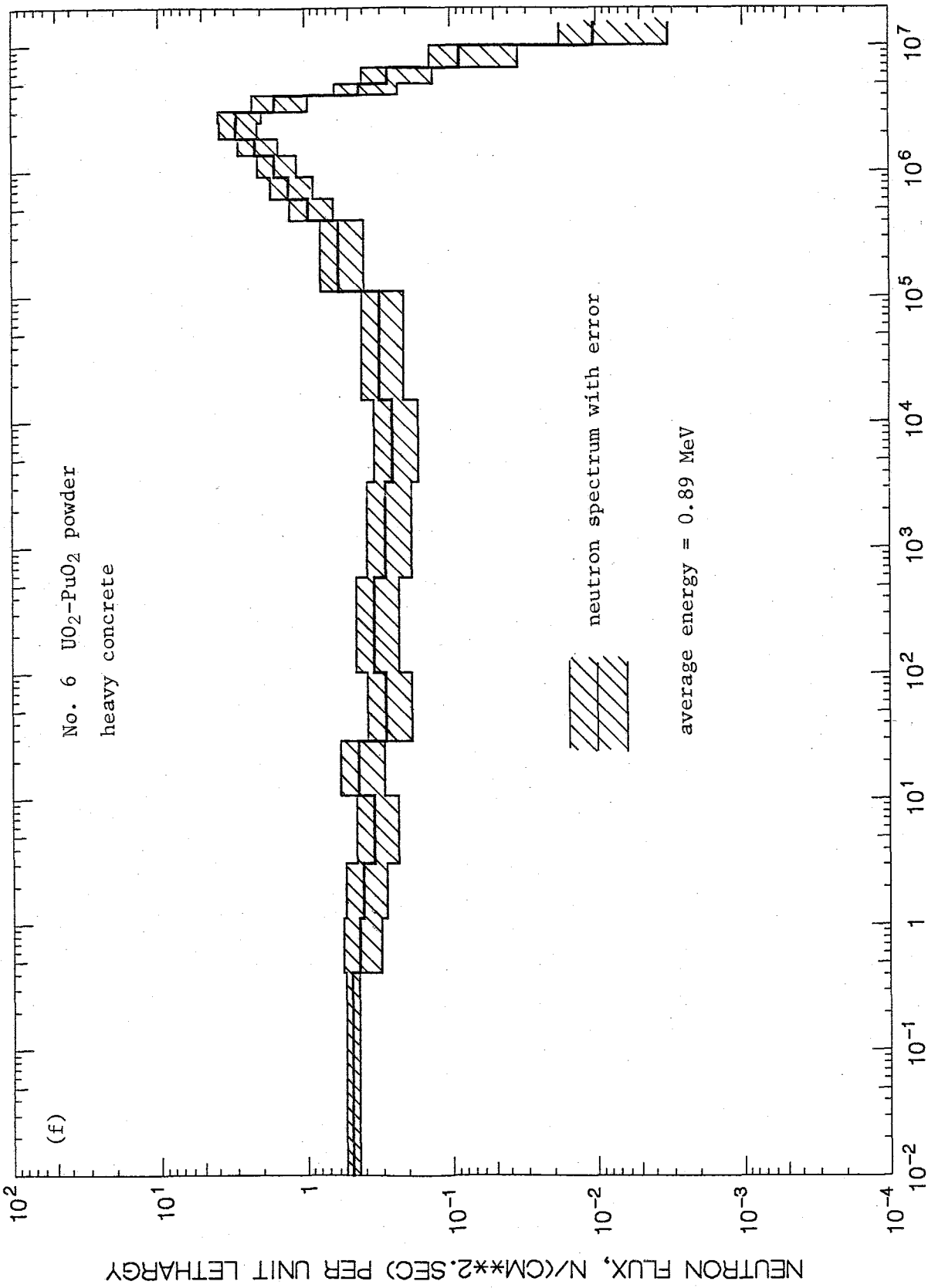


Fig. 4 (continued)

# NO-6 NEUTRON SPECTRUM

No. 6 UO<sub>2</sub>-PuO<sub>2</sub> powder  
heavy concrete



ENERGY, EV

Fig. 4 (continued)

Table 6 Average neutron energy in each measuring point

Exp. No.	Average neutron energy (MeV)
1	1.20
2	0.87
3	1.21
4	1.25
5	0.95
6	0.89

### 2.2.3 中性子エネルギースペクトル測定評価結果と考察

Table 4 に示した中性子スペクトロメータの測定値を NEUPAC コードに入力してアンフォールディングを行い、6つの測定点の中性子エネルギースペクトルを求めた。入力として使用した初期推定中性子エネルギースペクトルは以下のとおりである。

- (1) 線源が硝酸プルトニウム水溶液の場合は、混合溶液  $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4 - \text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 - \text{H}_2\text{O}$  まわりの中性子スペクトルを ANISN-W コード<sup>9)</sup> で計算した結果<sup>10)</sup>
- (2) 線源が酸化プルトニウム粉末である場合は、酸化プルトニウム原料缶周辺の中性子スペクトルを DOT-3.5 コード<sup>11)</sup> を用いて評価した結果<sup>12)</sup>

得られた中性子スペクトルを Fig. 4 に、平均中性子エネルギーを Table 6 に示す。これから次のことがわかる。

- (1) Na 1 ~ Na 6 の結果はすべて 2 ~ 3 MeV にピークをもち、中速および熱外領域で  $1/E$  型がそれに近い形状のスペクトルを形成している。とくに Na 5 ~ 6 は 15 keV 以下は典型的な  $1/E$  型の中性子スペクトルであり、かつ Na 1, 3 および 4 に比べて平均エネルギーが低い。その理由はすべて線源は  $\text{PuO}_2$  であるにもかかわらず、Na 1, 3 および 4 はグローブボックスのパネルのみを透過するスペクトルであるのに対し、Na 5 ~ 6 は厚さ 20 mm の重コンクリートを透過するため、散乱による減速で低エネルギー中粒子が大幅に増加したためであると考えられる。
- (2) Na 1 ~ 4 のスペクトルは、すべてグローブボックスパネルを通過してきたものであるにもかかわらず、Na 2 のみが平均中性子エネルギー 0.87 MeV であり、他はすべて 1.2 MeV 以上である。その原因は Na 2 のみ線源が硝酸水溶液状であるのに対し、Na 1, 3, 4 は  $\text{PuO}_2$  の粉末状である。Na 2 は他に比べて中性子の散乱減速効果が大きいため平均エネルギーが低下していると考えられる。
- (3) 前回の研究<sup>4)</sup>で測定したプルトニウム燃料開発施設内部の中性子エネルギースペクトル（グローブボックスパネル遮へい1枚、線源は  $\text{PuO}_2$  粉末の場合）は、すべて酸素 ( $\alpha, n$ ) 反応によるピーク (2 ~ 3 MeV) と自発核分裂ピーク (数 100 keV) が観測されたのに対し、今回のプルトニウム転換技術開発施設内の測定ではグローブボックス周辺等の作業環境がほとんど同じであるにもかかわらず、自発核分裂ピークは全く観測

Table 7 Percentage of dose equivalent rate above 15 keV neutrons

Exp. No.	Percentage (%)
1	99
2	98
3	99
4	98
5	98
6	98



Table 8 Comparisons of dose equivalent rates measured with rem counter (Studsvik 2202D) to those calculated from measured neutron spectra

Exp. No.	Dose equivalent (mrem/h)		Average energy*2 (eV)	Ratio of dose equivalents*3
	rem counter*1	spectrum*2		
1	1.84 [2.0]*5 (2%)*4	2.48 (15%)*4	1.20 + 6	0.74
2	0.60 [0.6] (3%)	1.00 (16%)	8.71 + 5	0.60
3	0.98 [1.05] (2%)	1.31 (15%)	1.21 + 6	0.75
4	3.18 [3.5] (2%)	4.37 (16%)	1.25 + 6	0.73
5	4.23 [4.1] (3%)	5.61 (16%)	9.50 + 5	0.75
6	0.50 [0.52] (3%)	0.623 (16%)	8.90 + 5	0.80

\*1 Calculated from pulse counts (1 mrem/h per 3.6 cps)

\*2 Calculated from neutron spectrum measured by the moderating neutron spectrometer

\*3 Rem counter/spectrum

\*4 Relative error

\*5 Rate meter value of rem counter

されていない。この原因はプルトニウム燃料開発施設内のグローブボックスパネルは10mm アクリル+ 10 mm鉛ガラスであるのに対し、プルトニウム転換技術開発施設では10mm アクリル+ 38 mm鉛ガラス+ 20 mmアクリルか又は10 mmアクリル+ 20 mm ボロン入りガラス+ 11 mm鉛ガラスであり、アクリルおよびガラス中の水素原子によれ1 MeV 以下の中性子に対する散乱効果が大きく効いてくるためであると考えられる。

(4) 得られた中性子スペクトルと ICRP Pub. 21 の換算係数を用いて算出した線量当量率と直接線成分が多い15 keV 以上の中性子の線量当量率に占める割合を Table 7 に示す。Table 7 からわかるように線量当量率の98 %以上が15 keV 以上の中性子成分による寄与である。したがって中性子線量当量の大半が酸素 ( $\alpha, n$ ) 反応などによる中性子の直接線成分である。

(5) Fig. 4 のエネルギースペクトルと ICRP Pub. 21 の変換係数 (中性子束線量当量変換) から求めた線量当量率と、レムカウンタのパルス計数率から換算 (1 mrem / h per 3.6 cps) した線量当量率の比を Table 8 に示す。レムカウンタによる値はエネルギースペクトルから求めた値よりも20 %~40 %低い値を示し、この値は中性子平均エネルギーに一義的に依存するものではない。しかし、レムカウンタは数100 keV 以上では、真値よりも低めの値を示す傾向があり<sup>2, 13)</sup> このことは平均エネルギーがすべて800 keV ~ 1.2 MeV 程度であるためレムカウンタの値の方が低い値を示す傾向と一致している。

しかし、Table 8 に示したように中性子スペクトルから求められる線量当量率は15 %程度の誤差をもっていることおよび、球形減速材付<sup>3</sup>He 中性子スペクトロメータから求めた線量当量率は、文献 25 によれば標準化された中性子場の線量当量率よりも25 %大きめの値を示すことから、とくに2 ~ 3 MeV 以上のエネルギー領域の中性子を有機シンチレーションカウンタを用いてより正確に評価して、レムカウンタの値の精度を議論する必要がある。

### 3. 実効線量当量および深部、表層部線量当量の評価

#### 3.1 中性子に対する深部、表層部線量当量の評価

ICRPは1978年のストックホルム会議<sup>14)</sup>で、確率的影響を生じさせる被ばく線量を評価する量として実効線量当量 ( $H_E$ ) を用いることを勧告した。しかし、日常の放射線管理でこの量を正確に評価することは煩雑であり実際的ではない。したがって、実効線量当量にかわるものとして  $H_{1cm}$  (1 cm線量当量又は1 cm深部線量当量) を外部被ばくによる確率的影響に係るリスクを評価する量として法令改正に導入されることが検討されている。法令上、 $H_{1cm}$ の規定方法については、人体組織等価の直径30 cmの球ファントム<sup>15)</sup>に一方向からの平行中性子ビームが照射されたときの深さ1 cmの点の線量当量値を使用することが検討中である。入射条件については平行ビーム入射と多方向からの入射が考えられるが、平行ビーム入射の方が通常高い値を示すため、平行ビーム入射の値の方がより安全側であると考えられる。<sup>3)</sup>

このように規定された  $H_{1cm}$ の値は、次の理由により実効線量当量にかわる量として検討されている。

- (1)  $H_{1cm}$ は体幹部被ばく線量を見る指標としては、通常安全側でかつ実効線量当量に近い値であること<sup>3)</sup>
- (2) 内部被ばく線量評価の尺度が実効線量当量であるため、外部被ばくについても  $H_{1cm}$ を実効線量当量とみなすことにより、両者を合算して個人の被ばく線量とみなすことが可能であること。

なお、皮膚の被ばく線量を評価する尺度としては70  $\mu$ m線量当量 ( $H_{SS}$ ) が、眼(水晶体)の被ばく線量を評価する尺度としては3 mm線量当量 ( $H_{SL}$ ) が法令改正案として検討されている。

法令上の  $H_{SS}$ 、 $H_{SL}$ の規定方法は、 $H_{1cm}$ と同様の条件下で求めた値の採用が考えられている。

$H_{1cm}$ 、 $H_{SS}$ 、 $H_{SL}$ はICRP Pub.51に変換係数(中性子エネルギー-束-線量当量)がエネルギーの関数として表示されているが、これをDLC-37群構造に3次元スプライン関数を用いて内挿した値をTable 9およびFig.5に示す。なお、前方平行入射(AP)条件における実効線量当量 ( $H_E(AP)$ )、回転入射(ROT)条件の実効線量当量 ( $H_E(ROT)$ )、およびICRP Pub.21(又はPub.51)の線量当量をエネルギーの関数として表示したのもTable 9およびFig.5に示す。

CONVERSION FACTOR

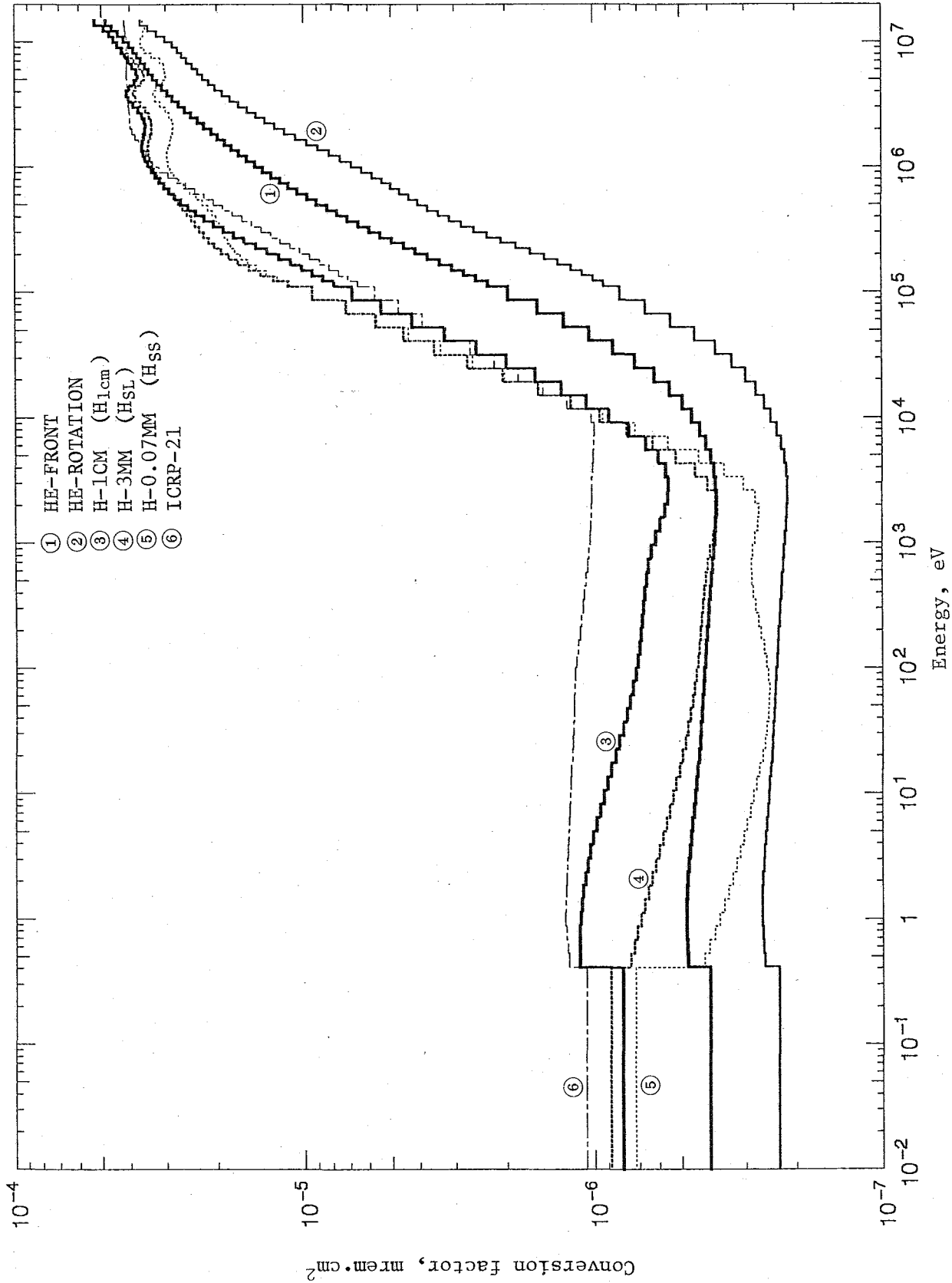


Fig. 5 Conversion coefficients from neutron fluence to dose equivalent

Table 9 Conversion coefficients from unit fluence to dose equivalent  
(unit mrem·cm<sup>2</sup>)

CONVERSION FUNCTION

ENERGY(EV)	HE-AP	HE-ROT	H-1CM	H-3MM	H-0.07MM	ICRP-21
1.492E+07	4.833E-05	3.681E-05	5.262E-05	5.259E-05	3.613E-05	4.179E-05
1.350E+07	4.608E-05	3.460E-05	4.910E-05	4.923E-05	3.537E-05	4.152E-05
1.221E+07	4.390E-05	3.227E-05	4.684E-05	4.701E-05	3.588E-05	4.125E-05
1.105E+07	4.190E-05	3.012E-05	4.529E-05	4.539E-05	3.664E-05	4.098E-05
1.000E+07	4.023E-05	2.847E-05	4.393E-05	4.381E-05	3.666E-05	4.085E-05
9.048E+06	3.888E-05	2.731E-05	4.259E-05	4.205E-05	3.555E-05	4.085E-05
8.187E+06	3.771E-05	2.636E-05	4.143E-05	4.024E-05	3.351E-05	4.085E-05
7.408E+06	3.659E-05	2.538E-05	4.039E-05	3.852E-05	3.133E-05	4.085E-05
6.703E+06	3.542E-05	2.434E-05	3.908E-05	3.711E-05	3.040E-05	4.085E-05
6.065E+06	3.428E-05	2.332E-05	3.792E-05	3.604E-05	3.006E-05	4.085E-05
5.488E+06	3.319E-05	2.234E-05	3.756E-05	3.561E-05	2.989E-05	4.085E-05
4.966E+06	3.206E-05	2.133E-05	3.850E-05	3.644E-05	3.071E-05	4.078E-05
4.493E+06	3.084E-05	2.026E-05	4.015E-05	3.800E-05	3.221E-05	4.065E-05
4.066E+06	2.959E-05	1.913E-05	4.100E-05	3.878E-05	3.300E-05	4.052E-05
3.679E+06	2.835E-05	1.798E-05	4.035E-05	3.810E-05	3.248E-05	4.039E-05
3.329E+06	2.709E-05	1.682E-05	3.888E-05	3.664E-05	3.123E-05	4.026E-05
3.012E+06	2.583E-05	1.570E-05	3.736E-05	3.521E-05	2.998E-05	4.014E-05
2.725E+06	2.457E-05	1.463E-05	3.622E-05	3.422E-05	2.908E-05	4.001E-05
2.466E+06	2.332E-05	1.359E-05	3.549E-05	3.365E-05	2.852E-05	3.988E-05
2.231E+06	2.211E-05	1.259E-05	3.518E-05	3.346E-05	2.829E-05	3.976E-05
2.019E+06	2.095E-05	1.162E-05	3.529E-05	3.358E-05	2.836E-05	3.923E-05
1.827E+06	1.986E-05	1.068E-05	3.569E-05	3.392E-05	2.864E-05	3.815E-05
1.653E+06	1.880E-05	9.782E-06	3.610E-05	3.428E-05	2.902E-05	3.710E-05
1.496E+06	1.777E-05	8.949E-06	3.620E-05	3.446E-05	2.937E-05	3.607E-05
1.353E+06	1.676E-05	8.188E-06	3.591E-05	3.438E-05	2.960E-05	3.508E-05
1.225E+06	1.577E-05	7.497E-06	3.531E-05	3.407E-05	2.964E-05	3.411E-05
1.108E+06	1.481E-05	6.876E-06	3.449E-05	3.355E-05	2.943E-05	3.316E-05
1.003E+06	1.387E-05	6.324E-06	3.356E-05	3.286E-05	2.892E-05	3.158E-05
9.072E+05	1.298E-05	5.836E-06	3.255E-05	3.204E-05	2.812E-05	2.939E-05
8.209E+05	1.212E-05	5.402E-06	3.147E-05	3.110E-05	2.709E-05	2.735E-05
7.427E+05	1.129E-05	5.014E-06	3.032E-05	3.010E-05	2.592E-05	2.545E-05
6.721E+05	1.050E-05	4.661E-06	2.910E-05	2.907E-05	2.469E-05	2.368E-05
6.081E+05	9.747E-06	4.334E-06	2.782E-05	2.804E-05	2.348E-05	2.204E-05
5.502E+05	9.026E-06	4.023E-06	2.646E-05	2.704E-05	2.237E-05	2.051E-05
4.979E+05	8.341E-06	3.719E-06	2.504E-05	2.612E-05	2.143E-05	1.903E-05
4.505E+05	7.690E-06	3.419E-06	2.355E-05	2.527E-05	2.068E-05	1.763E-05
4.076E+05	7.071E-06	3.122E-06	2.202E-05	2.447E-05	2.008E-05	1.632E-05
3.683E+05	6.490E-06	2.837E-06	2.049E-05	2.369E-05	1.959E-05	1.512E-05
3.337E+05	5.947E-06	2.565E-06	1.897E-05	2.293E-05	1.917E-05	1.401E-05
3.020E+05	5.435E-06	2.306E-06	1.747E-05	2.213E-05	1.877E-05	1.298E-05
2.732E+05	4.957E-06	2.064E-06	1.602E-05	2.127E-05	1.834E-05	1.202E-05
2.472E+05	4.513E-06	1.842E-06	1.464E-05	2.035E-05	1.785E-05	1.114E-05
2.237E+05	4.102E-06	1.643E-06	1.336E-05	1.932E-05	1.725E-05	1.032E-05
2.024E+05	3.726E-06	1.469E-06	1.218E-05	1.816E-05	1.651E-05	9.556E-06
1.832E+05	3.372E-06	1.317E-06	1.111E-05	1.684E-05	1.557E-05	8.832E-06
1.647E+05	3.059E-06	1.192E-06	1.017E-05	1.547E-05	1.454E-05	8.181E-06
1.500E+05	2.784E-06	1.089E-06	9.333E-06	1.411E-05	1.346E-05	7.596E-06
1.357E+05	2.527E-06	9.989E-07	8.589E-06	1.272E-05	1.232E-05	7.036E-06
1.228E+05	2.296E-06	9.207E-07	7.892E-06	1.138E-05	1.118E-05	6.517E-06
1.111E+05	1.958E-06	8.074E-07	6.827E-06	9.370E-06	9.380E-06	5.700E-06
8.652E+04	1.560E-06	6.618E-07	5.420E-06	7.158E-06	7.221E-06	4.707E-06
6.738E+04	1.261E-06	5.409E-07	4.223E-06	5.651E-06	5.593E-06	3.886E-06
5.248E+04	1.033E-06	4.469E-07	3.259E-06	4.517E-06	4.346E-06	3.209E-06
4.087E+04	8.549E-07	3.790E-07	2.527E-06	3.540E-06	3.365E-06	2.650E-06
3.183E+04	7.191E-07	3.317E-07	1.985E-06	2.712E-06	2.601E-06	2.188E-06
2.479E+04	6.183E-07	2.991E-07	1.586E-06	2.044E-06	2.012E-06	1.807E-06
1.931E+04	5.456E-07	2.752E-07	1.286E-06	1.547E-06	1.555E-06	1.492E-06
1.503E+04	4.943E-07	2.569E-07	1.057E-06	1.199E-06	1.201E-06	1.232E-06
1.171E+04	4.579E-07	2.429E-07	8.837E-07	9.534E-07	9.282E-07	1.017E-06
9.119E+03	4.304E-07	2.323E-07	7.543E-07	7.673E-07	7.157E-07	9.955E-07
7.102E+03	4.095E-07	2.243E-07	6.613E-07	6.247E-07	5.535E-07	9.994E-07
5.531E+03	3.944E-07	2.188E-07	5.997E-07	5.201E-07	4.349E-07	1.003E-06
4.307E+03	3.844E-07	2.154E-07	5.645E-07	4.480E-07	3.535E-07	1.007E-06
3.355E+03	3.785E-07	2.136E-07	5.509E-07	4.030E-07	3.028E-07	1.011E-06
2.613E+03	3.761E-07	2.133E-07	5.538E-07	3.798E-07	2.764E-07	1.015E-06
2.035E+03	3.764E-07	2.140E-07	5.683E-07	3.728E-07	2.676E-07	1.019E-06
1.585E+03	3.785E-07	2.155E-07	5.894E-07	3.768E-07	2.701E-07	1.023E-06
1.234E+03	3.817E-07	2.173E-07	6.121E-07	3.862E-07	2.774E-07	1.027E-06
9.611E+02	3.852E-07	2.192E-07	6.318E-07	3.959E-07	2.832E-07	1.037E-06
7.485E+02	3.887E-07	2.210E-07	6.470E-07	4.039E-07	2.853E-07	1.051E-06
5.829E+02	3.922E-07	2.228E-07	6.585E-07	4.104E-07	2.844E-07	1.064E-06
4.540E+02	3.957E-07	2.245E-07	6.673E-07	4.158E-07	2.811E-07	1.078E-06
3.536E+02	3.991E-07	2.261E-07	6.744E-07	4.204E-07	2.761E-07	1.092E-06
2.754E+02	4.025E-07	2.277E-07	6.806E-07	4.245E-07	2.700E-07	1.106E-06
2.144E+02	4.058E-07	2.292E-07	6.868E-07	4.284E-07	2.636E-07	1.120E-06
1.670E+02	4.090E-07	2.307E-07	6.941E-07	4.325E-07	2.574E-07	1.135E-06
1.301E+02	4.122E-07	2.322E-07	7.034E-07	4.370E-07	2.523E-07	1.149E-06
1.013E+02	4.153E-07	2.336E-07	7.154E-07	4.423E-07	2.488E-07	1.160E-06
7.889E+01	4.183E-07	2.350E-07	7.307E-07	4.486E-07	2.472E-07	1.165E-06
6.144E+01	4.212E-07	2.364E-07	7.489E-07	4.558E-07	2.474E-07	1.171E-06
4.785E+01	4.243E-07	2.378E-07	7.696E-07	4.640E-07	2.492E-07	1.176E-06
3.727E+01	4.274E-07	2.393E-07	7.925E-07	4.731E-07	2.523E-07	1.181E-06
2.902E+01	4.307E-07	2.409E-07	8.171E-07	4.832E-07	2.566E-07	1.187E-06
2.260E+01	4.343E-07	2.425E-07	8.431E-07	4.942E-07	2.618E-07	1.192E-06
1.760E+01	4.381E-07	2.443E-07	8.701E-07	5.062E-07	2.679E-07	1.198E-06
1.371E+01	4.424E-07	2.463E-07	8.978E-07	5.191E-07	2.745E-07	1.203E-06
1.068E+01	4.470E-07	2.485E-07	9.258E-07	5.329E-07	2.815E-07	1.209E-06
8.315E+00	4.520E-07	2.508E-07	9.537E-07	5.477E-07	2.887E-07	1.215E-06
6.476E+00	4.573E-07	2.532E-07	9.810E-07	5.633E-07	2.963E-07	1.221E-06
5.043E+00	4.626E-07	2.556E-07	1.007E-06	5.797E-07	3.044E-07	1.227E-06
3.928E+00	4.676E-07	2.578E-07	1.032E-06	5.968E-07	3.131E-07	1.233E-06
3.059E+00	4.722E-07	2.598E-07	1.055E-06	6.145E-07	3.225E-07	1.239E-06
2.382E+00	4.762E-07	2.614E-07	1.076E-06	6.327E-07	3.328E-07	1.245E-06
1.855E+00	4.793E-07	2.626E-07	1.094E-06	6.514E-07	3.441E-07	1.251E-06
1.445E+00	4.813E-07	2.631E-07	1.109E-06	6.705E-07	3.564E-07	1.257E-06
1.125E+00	4.820E-07	2.630E-07	1.120E-06	6.899E-07	3.699E-07	1.262E-06
8.764E-01	4.813E-07	2.621E-07	1.127E-06	7.096E-07	3.848E-07	1.250E-06
6.826E-01	4.792E-07	2.606E-07	1.130E-06	7.292E-07	4.009E-07	1.239E-06
5.316E-01	4.760E-07	2.584E-07	1.130E-06	7.486E-07	4.183E-07	1.227E-06
4.140E-01	4.000E-07	2.300E-07	8.000E-07	8.800E-07	7.200E-07	1.068E-06
1.000E-04						

Table 10 The values of dose equivalents (ICRP21), H<sub>E</sub>(AP), H<sub>E</sub>(ROT), H<sub>1cm</sub>, H<sub>ss</sub>, H<sub>sl</sub> at measuring points in the Pu-conversion facility

Dose (unit)	Exp. No.					
	1	2	3	4	5	6
dose equivalent (ICRP21)	2.49 (15%)*	1.04 (16%)	1.32 (15%)	4.37 (16%)	5.67 (16%)	0.630 (16%)
H <sub>E</sub> (AP)	1.36 (17%)	0.54 (18%)	0.73 (17%)	2.39 (17%)	3.08 (18%)	0.34 (18%)
H <sub>E</sub> (ROT)	0.756 (18%)	0.308 (19%)	0.404 (18%)	1.32 (18%)	1.71 (19%)	0.19 (16%)
H <sub>1cm</sub>	2.49 (15%)	1.05 (15%)	1.32 (15%)	4.38 (15%)	5.62 (16%)	0.62 (16%)
H <sub>sl</sub> (3mm)	2.36 (14%)	1.04 (15%)	1.31 (14%)	4.34 (14%)	5.56 (15%)	0.62 (15%)
H <sub>ss</sub> (70μm)	2.10 (14%)	0.89 (15%)	1.12 (14%)	3.71 (14%)	4.74 (15%)	0.52 (15%)

\* unfolding error

### 3.2 レムカウンタによる深部，表層部線量当量の評価

プルトニウム転換技術開発施設で測定した中性子スペクトルに基づいて，ICRP Pub. 51の変換係数を用いて， $H_{1cm}$ ， $H_{SL}$ ， $H_{SS}$ ， $H_E(AP)$ ， $H_E(ROT)$ ，およびICRP Pub. 21の線量当量（従来の線量当量）を求めた。その結果をTable 10に示す。Table 10から次のことがわかった。

- (1)  $H_{1cm}$ ， $H_{SL}$ は従来の線量当量（ICRP Pub. 21）にほぼ等しい値を示す。このことは，Fig. 5に示された $H_{1cm}$ ， $H_{SL}$ の変換係数（中性子束—線量当量）が10 keV以上で従来の線量当量の変換係数とほぼ等しく，本研究の測定対象はほとんどが15 keV以上の中性子であることから説明がつく。したがって現場と同じエネルギースペクトルをもつ校正場で校正されたレムカウンタの指示値は，従来の線量当量率にほぼ等しい値を示すはずであるから，15 keV以上の中性子が主体となる核燃料取扱施設の現場ではレムカウンタの指示値を $H_{1cm}$ ， $H_{SL}$ とみなしてもさしつかえないと考えられる。しかし，10 keV以下の中性子が主体となる現場ではFig. 5に示した各変換係数の比較からわかるように従来の線量当量が $H_{1cm}$ ， $H_{SS}$ より少し大きな値を示す。したがってレムカウンタの指示値をそのまま $H_{1cm}$ ， $H_{SL}$ とみなしても實際上，常に安全側の値である。
- (2)  $H_{SS}$ の変換係数は，10 keV以上では，従来の線量当量の変換係数より15%程度低いが，10 keV以下では $1/2 \sim 1/3$ 程度の値である。したがって15 keV以上の中性子が主体となる核燃料取扱施設の現場では，現場と同じスペクトルで校正されたレムカウンタの指示値より $H_{SS}$ の値は15%程度低めの値を示すはずであり，このことはTable 9で $H_{SS}$ の値が従来の線量当量より15%程度低めの値を示すことから確認できる。なお10 keV以下の中性子が主体となる現場では， $H_{SS}$ はレムカウンタの指示値の $1/2 \sim 1/3$ の値であることが想定される。したがってレムカウンタの指示値は， $H_{SS}$ に対しても実際上常に安全側の値である。
- (3) Fig. 5から $H_{1cm}$ の変換係数は， $H_E(AP)$ ， $H_E(ROT)$ の変換係数よりも全エネルギー範囲において常に大きい。したがって $H_{1cm}$ はどのようなスペクトルの場でも $H_E(AP)$ ， $H_E(ROT)$ より大きい値を示す。本研究で取扱った施設では $H_E(AP)$ は $H_{1cm}$ より常に45%程度低めである。

### 3.3 中性子個人モニターを用いた深部，表層部線量当量の評価

#### 3.3.1 中性子個人モニター

現場の中性子エネルギースペクトルを測定評価すれば， $H_{1cm}$ ， $H_{SL}$ ， $H_{SS}$ を算出することは可能である。しかし，日常的な中性子被ばく管理で現場のスペクトルを評価することは実際的ではないし，個人の $H_{1cm}$ ， $H_{SL}$ ， $H_{SS}$ は現場の空間の $H_{1cm}$ ， $H_{SL}$ ， $H_{SS}$ の線量当量率からは直接求まるものではなく，作業時間の因子が必要となり複雑である。

したがって個人の $H_{1cm}$ ， $H_{SL}$ ， $H_{SS}$ を評価するには，これらの値が直接測定評価できる個人モニターを使用するのが望ましいが，現状このような個人モニターは存在しない。本研究では，現在使用されているアルベド型TLD中性子線量計，<sup>16)</sup> TS-16<sup>17, 18)</sup> (厚さ1mmのポリエチレンラジエータ付ポリカーボネイト)に追加してCR-39<sup>17)</sup> (厚さ1mmのポリエチレンラジエータ付CR-39素子)のエネルギー応答関数を組み合わせることで $H_{1cm}$ ， $H_{SL}$ ，および $H_{SS}$ のエネルギー応答関数を近似し，これらの個人モニターの指示値を組み合わせることで $H_{1cm}$ ， $H_{SL}$ ， $H_{SS}$ を精度よく評価する手法を検討し，その成果を本章に記述する。

各個人モニターの概要を以下に示す。

#### (1) アルベド型TLD中性子線量計

TLD素子は中性子検出用に ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ を用い， $\gamma$ 線補償用に ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ を使用している。TLD素子の自由空間中のエネルギー応答関数はTanakaの方法<sup>19)</sup>に基づいてHasikuraらが開発した計算コード<sup>20)</sup>を用いて算出した。<sup>21)</sup> この計算原理の概要は以下のとおりである。

TLDの中性子エネルギー応答関数( $G(E_n)$ )は，以下のように表現できる。

$$G(E_n) = \sum_r \sum_i \eta(\bar{E}_{ri}) \cdot K_{ri}(E_n) \dots\dots\dots (2)$$

但し， $K_{ri}(E_n)$ はエネルギー $E_n$ の中性子により生ずる核反応 $r$ により発生する荷電粒子 $i$ による平均カーマ(ある物質の体積要素内で間接電離粒子によって自由にされた全荷電粒子の初期エネルギー和の平均値)である。そして $\eta(\bar{E}_{ri})$ は荷電粒子 $i$ の平均運動エネルギー $\bar{E}_{ri}$ に関するカーマからTLDの応答関数への変換係数である。



カーマ  $K_{ri}(E_n)$  は以下の要素から成立している。

$$K_{ri}(E_n) = C \cdot N_r \cdot \sigma_{ri}(E_n) \cdot \bar{E}_{ri}(E_n) \dots\dots\dots (3)$$

但し  $C$  は  $\text{MeV/g}$  から  $\text{erg}$  への変換係数,  $N_r$  は核反応  $r$  に関する核種の原子密度,  $\sigma_{ri}(\bar{E}_n)$  はエネルギー  $E_n$  の中性子に対する核反応断面積,  $\bar{E}_{ri}(E_n)$  はエネルギー  $E_n$  の中性子により生ずる核反応  $r$  により発生する荷電粒子  $i$  の平均運動エネルギー量である。

変換係数  $\eta(\bar{E}_{ri})$  は  $^{60}\text{Co}$  からの  $\gamma$  線に対する TLD の積分発光量の比  $\eta_i^{\text{rel}}(\bar{E}_{ri})$  を用いて式(4)のように表現できる。

$$\eta_i(\bar{E}_{ri}) = \eta(^{60}\text{Co}) \eta_i^{\text{rel}}(\bar{E}_{ri}) \dots\dots\dots (4)$$

$\eta(^{60}\text{Co})$  は  $^{60}\text{Co}$  からの  $\gamma$  線に対する TLD の変換係数 ( $\text{erg/gr} \rightarrow ^{60}\text{Co}$  の  $\gamma$  線に等する  $R$ ) である。そして空気と TLD 中の  $^{60}\text{Co}$  の  $\gamma$  線のエネルギー質量吸収係数 (それぞれ,  $m\mu_{\text{air}}(^{60}\text{Co})$ , および,  $m\mu_{\text{TLD}}(^{60}\text{Co})$ ) を用いれば

$$\eta(^{60}\text{Co}) = \frac{1}{86.9} \frac{m\mu_{\text{air}}(^{60}\text{Co})}{m\mu_{\text{TLD}}(^{60}\text{Co})} \dots\dots\dots (5)$$

で表現できる。

式(3), (4), (5)を式(2)に代入すると

$$G(E_n) = C \cdot \eta(^{60}\text{Co}) \cdot \sum N_r \cdot \sum \sigma_{ri}(E_n) \cdot \bar{E}_{ri}(E_n) \cdot \eta_i^{\text{rel}}(\bar{E}_{ri}) \dots (6)$$

となり, カーマを計算するのに必要となる断面積等のデータは ENDF/B-N<sup>22)</sup>, ENDL-78<sup>23)</sup>より, また  $\eta_i^{\text{rel}}$  を計算するための質量阻止能は Nuclear Data Table<sup>24)</sup> から取られている。

これらの TLD 素子 ( $^6\text{Li}_2^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ ,  $^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ ) は Fig. 6 に示すような Cd, Sn のフィルターがそれぞれ前後についた樹脂製 バッチケースに入れられ, アルベド型中性子線量計として使用される。TLD は約  $80 \mu\text{m}$  の粒子として直径  $3 \text{mm}$  の円板状の耐熱性樹脂基板 ( $11 \text{mg/cm}^2$ ) 上に厚さ  $15 \text{mg/cm}^2$  で付着させられている。<sup>25)</sup> このためこの TLD は入射中性子に対し, COS 型の角度依存性をもつ。<sup>26)</sup>

なお,  $^6\text{Li}_2^{10}\text{B}_4\text{O}_7$  素子の  $^6\text{Li}$  の濃縮度は  $95.33\%$ ,  $^{10}\text{B}$  の濃縮度は  $95.64\%$ , 密度は  $2.36 \pm 0.03 \text{gr/cm}^3$  であり,  $^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  素子の  $^7\text{Li}$ ,  $^{11}\text{B}$  の濃縮度はそれぞれ  $99.95\%$ ,  $99.61\%$ , そして密度は  $2.42 \pm 0.03 \text{gr/cm}^3$  である。<sup>27)</sup> したがって各素子の核種の原子密度 ( $N_r$ ) は Table 11 に示すとおりである。これらのデータと式(6)に基づいて算定したエネルギー応答関数に, 動燃東海事業所の熱中性子場で照射

Table 11 Atomic density of TLD element

(unit: Atoms/cm<sup>3</sup>×10<sup>24</sup>)

	<sup>6</sup> Li <sub>2</sub> <sup>10</sup> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> (Cu)	<sup>6</sup> Li <sub>2</sub> <sup>11</sup> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> (Cu)
<sup>6</sup> Li	1.65 - 2	8.57 - 6
<sup>7</sup> Li	8.08 - 4	1.71 - 2
<sup>10</sup> B	3.31 - 2	1.34 - 4
<sup>11</sup> B	1.51 - 3	3.42 - 2
<sup>16</sup> O	6.05 - 2	6.00 - 2

Constitution of TLD elements and filters

Element No.	Filter (Front)	Material	Filter (Rear)
#4	Cd	${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$	Sn
#3	Cd	${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$	Cd
#2	Sn	${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$	Cd
#1	Cd	${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$	Cd

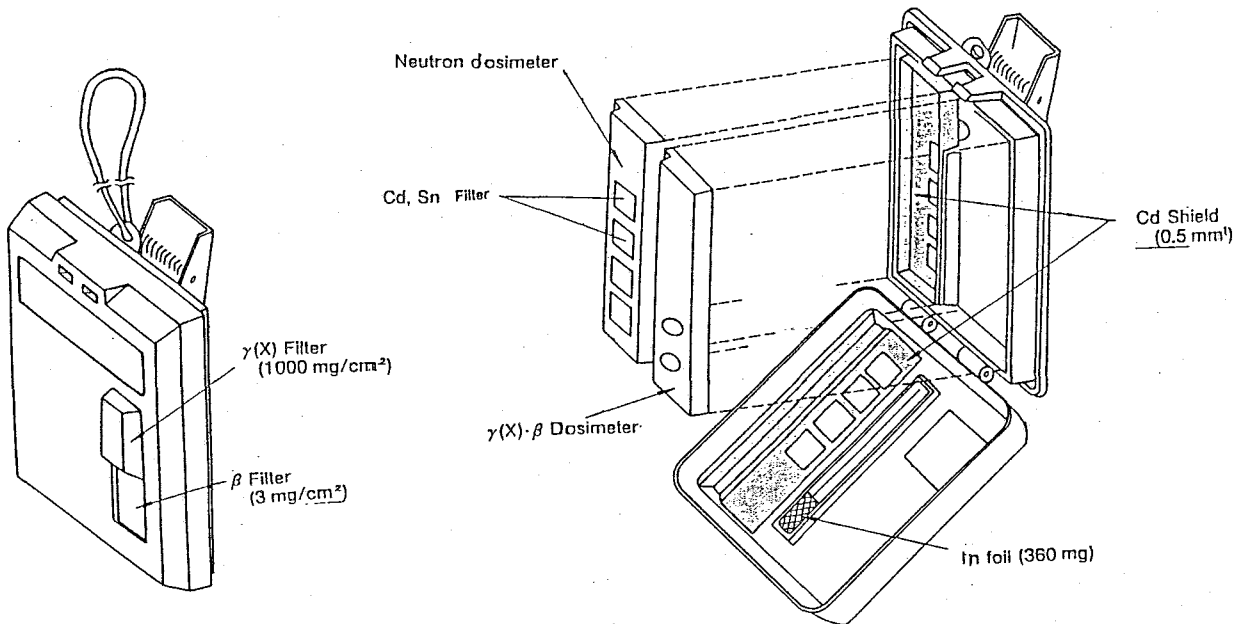
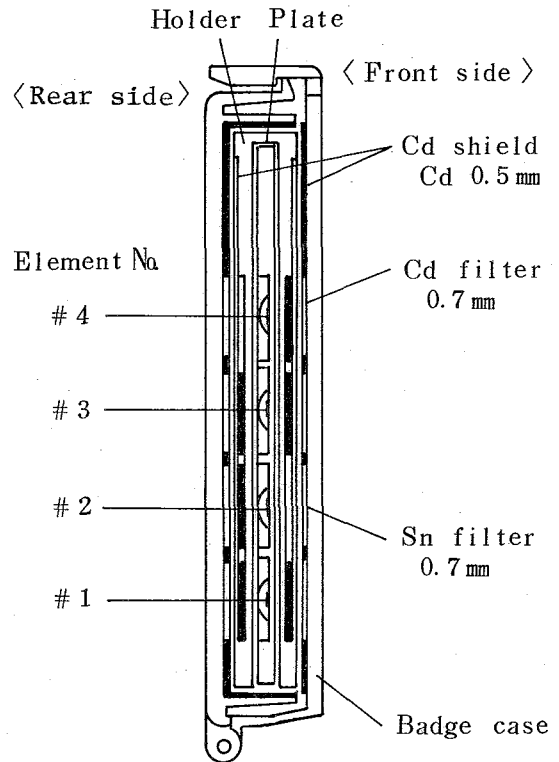


Fig. 6 TLD badge for neutron dosimetry (cited from Ref. 25)

RESPONSE FUNCTION OF PNC-ALBODO-TLD

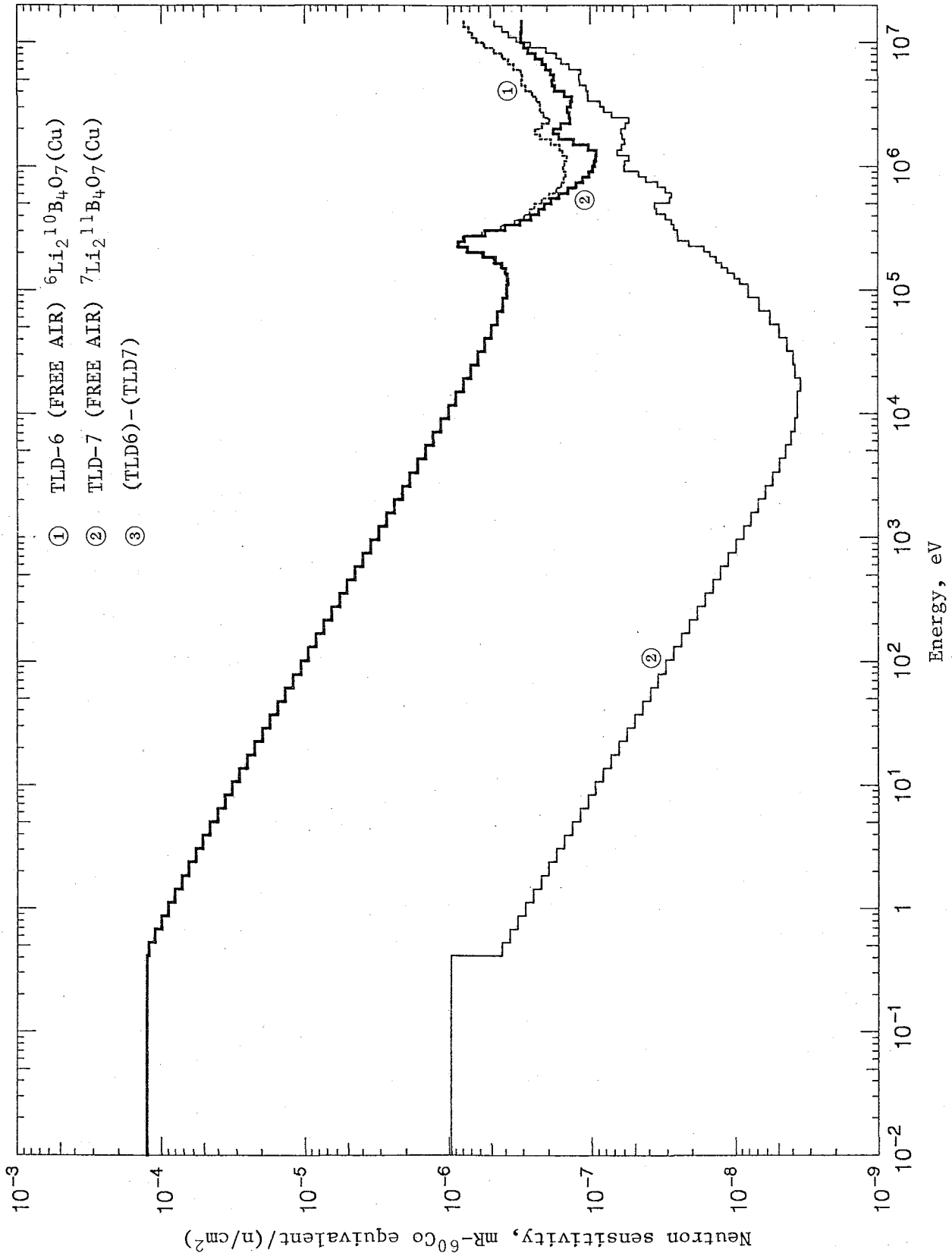


Fig. 7 Energy response function of thermoluminescence dosimeter ( ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ ,  ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ )

Table 12 Energy response functions of thermoluminescence dosimeters ( ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ ,  ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ ) in free air condition

(unit:  $\text{mR}-{}^{60}\text{Co}\cdot\text{eq}/(\text{n}\cdot\text{cm}^{-2})$ )

\*\*\*\*\*FREE AIR RESPONSE\*\*\*\*\*  
MR-CO-60 EQ./ (N/CN\*\*2)

ENERGY (EV)	TLD-6 *1	TLD-7 *2	ENERGY (EV)	TLD-6 *1	TLD-7 *2
1.492E+07	7.669E-07	4.658E-07	4.087E+04	5.536E-07	4.263E-09
1.350E+07	7.133E-07	4.129E-07	3.183E+04	6.183E-07	3.881E-09
1.221E+07	6.736E-07	3.684E-07	2.479E+04	6.940E-07	3.769E-09
1.105E+07	6.285E-07	3.244E-07	1.931E+04	7.812E-07	3.443E-09
1.000E+07	5.512E-07	2.607E-07	1.503E+04	8.824E-07	3.613E-09
9.048E+06	4.737E-07	2.028E-07	1.171E+04	9.966E-07	3.603E-09
8.187E+06	4.120E-07	1.717E-07	9.119E+03	1.128E-06	3.753E-09
7.408E+06	3.746E-07	1.585E-07	7.102E+03	1.277E-06	4.029E-09
6.703E+06	3.436E-07	1.400E-07	5.531E+03	1.447E-06	4.393E-09
6.065E+06	3.045E-07	1.158E-07	4.307E+03	1.641E-06	4.846E-09
5.488E+06	2.996E-07	1.196E-07	3.355E+03	1.861E-06	5.394E-09
4.966E+06	3.022E-07	1.178E-07	2.613E+03	2.110E-06	6.037E-09
4.493E+06	2.843E-07	1.068E-07	2.035E+03	2.393E-06	6.784E-09
4.066E+06	2.563E-07	1.040E-07	1.585E+03	2.714E-06	7.648E-09
3.679E+06	2.394E-07	1.040E-07	1.234E+03	3.077E-06	8.635E-09
3.329E+06	2.247E-07	8.595E-08	9.611E+02	3.490E-06	9.770E-09
3.012E+06	2.255E-07	8.059E-08	7.485E+02	3.955E-06	1.105E-08
2.725E+06	2.116E-07	7.117E-08	5.829E+02	4.483E-06	1.252E-08
2.466E+06	1.941E-07	5.415E-08	4.540E+02	5.080E-06	1.419E-08
2.231E+06	2.195E-07	5.757E-08	3.536E+02	5.756E-06	1.608E-08
2.019E+06	2.429E-07	6.153E-08	2.754E+02	6.522E-06	1.823E-08
1.827E+06	2.258E-07	6.020E-08	2.144E+02	7.388E-06	2.067E-08
1.653E+06	1.889E-07	5.786E-08	1.670E+02	8.369E-06	2.344E-08
1.496E+06	1.656E-07	6.095E-08	1.301E+02	9.477E-06	2.659E-08
1.353E+06	1.571E-07	6.542E-08	1.013E+02	1.073E-05	3.015E-08
1.225E+06	1.471E-07	5.449E-08	7.889E+01	1.214E-05	3.417E-08
1.108E+06	1.527E-07	5.780E-08	6.144E+01	1.373E-05	3.873E-08
1.003E+06	1.555E-07	5.852E-08	4.785E+01	1.552E-05	4.391E-08
9.072E+05	1.494E-07	4.632E-08	3.727E+01	1.754E-05	4.976E-08
8.209E+05	1.547E-07	4.142E-08	2.902E+01	1.983E-05	5.642E-08
7.427E+05	1.606E-07	3.433E-08	2.260E+01	2.240E-05	6.397E-08
6.721E+05	1.739E-07	3.033E-08	1.760E+01	2.528E-05	7.251E-08
6.081E+05	1.936E-07	2.751E-08	1.371E+01	2.853E-05	8.223E-08
5.502E+05	2.177E-07	2.816E-08	1.068E+01	3.216E-05	9.316E-08
4.979E+05	2.453E-07	3.611E-08	8.315E+00	3.624E-05	1.056E-07
4.505E+05	2.645E-07	3.503E-08	6.476E+00	4.079E-05	1.197E-07
4.076E+05	2.907E-07	3.011E-08	5.043E+00	4.600E-05	1.360E-07
3.683E+05	3.391E-07	2.743E-08	3.928E+00	5.170E-05	1.542E-07
3.337E+05	4.231E-07	2.628E-08	3.059E+00	5.784E-05	1.742E-07
3.020E+05	5.719E-07	2.494E-08	2.382E+00	6.483E-05	1.974E-07
2.732E+05	7.873E-07	2.459E-08	1.855E+00	7.255E-05	2.238E-07
2.472E+05	8.560E-07	2.058E-08	1.445E+00	8.107E-05	2.536E-07
2.237E+05	7.395E-07	1.623E-08	1.125E+00	9.040E-05	2.874E-07
2.024E+05	5.752E-07	1.463E-08	8.764E-01	1.006E-04	3.257E-07
1.832E+05	4.762E-07	1.335E-08	6.826E-01	1.117E-04	3.691E-07
1.647E+05	4.260E-07	1.226E-08	5.316E-01	1.234E-04	4.182E-07
1.500E+05	4.013E-07	1.108E-08	4.140E-01	1.280E-04	9.653E-07
1.357E+05	3.899E-07	9.945E-09	1.000E-04		
1.228E+05	3.868E-07	9.110E-09			
1.111E+05	3.929E-07	7.990E-09			
8.652E+04	4.169E-07	6.649E-09			
6.738E+04	4.529E-07	5.612E-09			
5.248E+04	4.986E-07	4.831E-09			

\*1  ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$

\*2  ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$

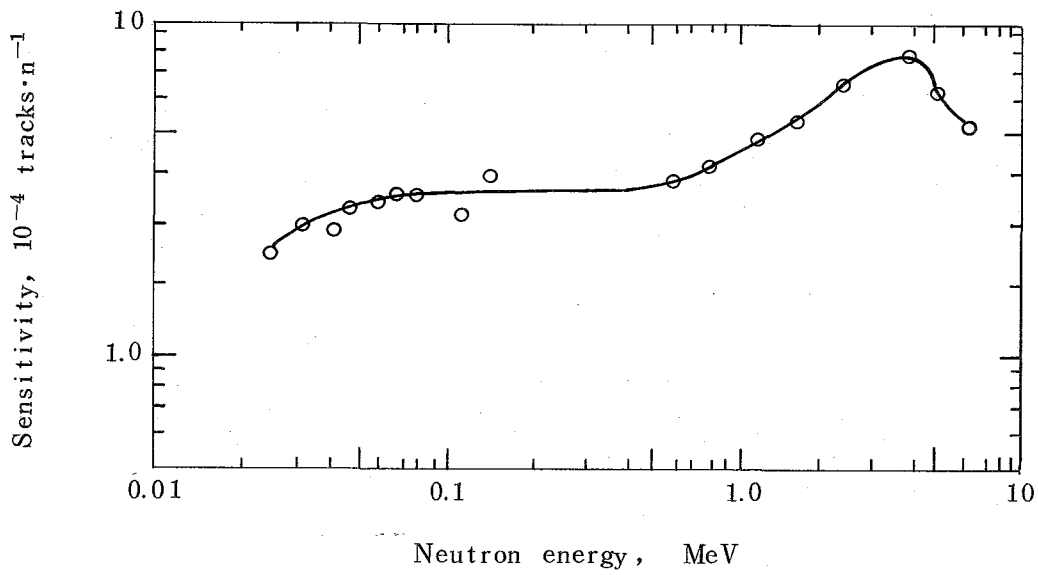


Fig. 8 Energy response function of TS-16 dosimeter (cited from Ref. 17, 18)

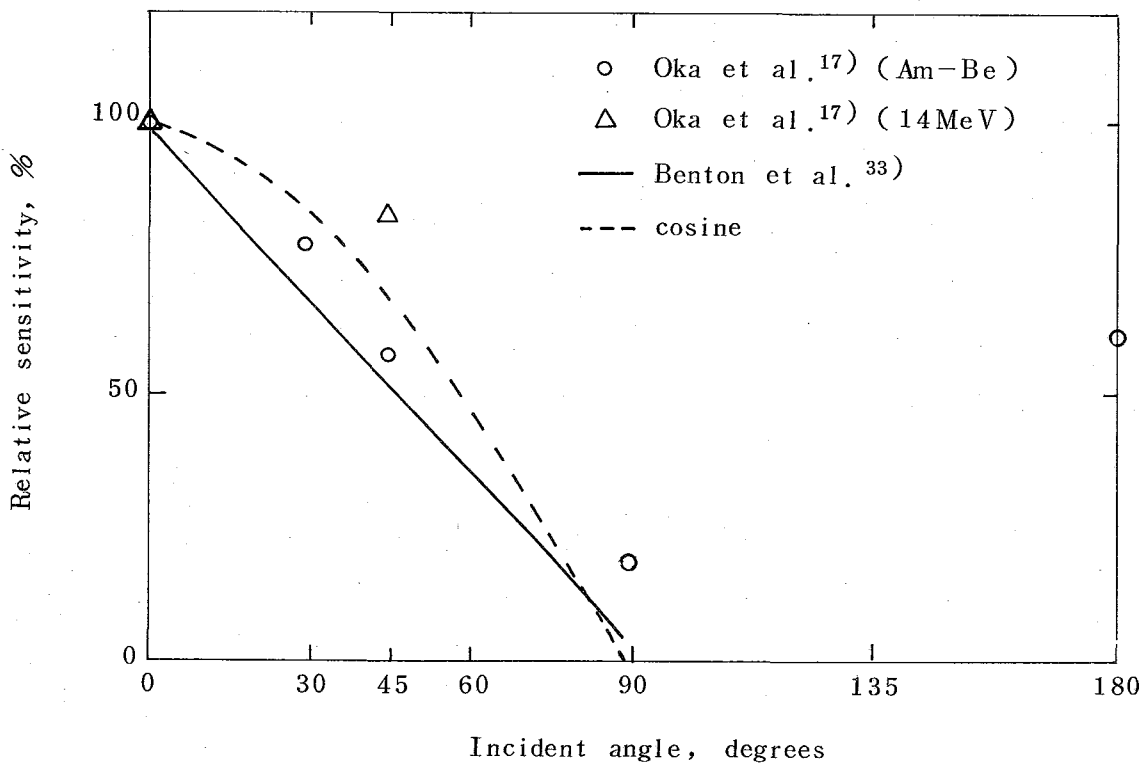


Fig. 9 Angular dependence of sensitivity of TS-16 dosimeter (cited from Ref. 17, 18)

して評価した実験値<sup>25)</sup>を用いて自己吸収補正を行ったものがFig. 7 および Table 12 である。

## (2) TS - 16

TS - 16 素子の前方平行ビームに対する自由空間中の中性子に対するエネルギー応答関数の実測値<sup>17, 18)</sup>はFig. 8 に示すとおりであり、入射中性子に対する角度依存性<sup>17, 18)</sup>はFig. 9 に示すとおりである。Fig. 9 から入射中性子に対するTS - 16素子の感度は中性子入射角度の方向余弦 (Cosine) の絶対値で近似できる。

このTS - 16素子はTLD素子と同じバッヂケースに入れられて使用される。

## (3) CR - 39

CR - 39 素子の前方平行ビームに対する自由空間中のエネルギー応答関数の実測値は、Fig. 10 に示すとおりであり、<sup>17)</sup>その入射角度依存性はFig. 11<sup>17)</sup> からTS-16と同様であると考えることができる。

### 3.3.2 人体に装着したときの中性子個人モニターのエネルギー応答関数の評価

#### (1) 計算による評価

3.3.1 に示した3種類の中性子個人モニターを人体に装着したときのエネルギー応答関数をMORSE-CGコード<sup>28)</sup>を用いて計算した。人体モデル外形は電力中央研究所(財)(電中研)より借用した人骨入り中性子用ファントム<sup>29)</sup>形状として、MORSE-CGコードで用いられているCG方式を用いて表現した。なお、骨および肺はMIRDモデル<sup>30)</sup>に基づいてCG方式で表現を行った。骨、肺、およびその他の組織の密度および原子密度はMIRDモデルの値を使用した。なお、TLDバッヂのケースおよび金属フィルターの密度および原子密度についても評価を行い、<sup>31)</sup>計算に使用する全物質の核種ごとの原子密度をTable 13に表示した。断面積データはDLC-37ライブラリーから取った100群のP<sub>8</sub>ルジャンドル展開のデータで、熱群の値のみをBNL-325<sup>32)</sup>の値に基づいてMaxwell分布の平均値として算定したものに置換えたデータを使用した。なお、計算に使用した人体外形、肺、および骨の幾何学的形状モデルをFig. 12 および 13 に示す。

アルベド型のエネルギー応答関数を評価する対象の中性子検出器は、3.3.1 に示し

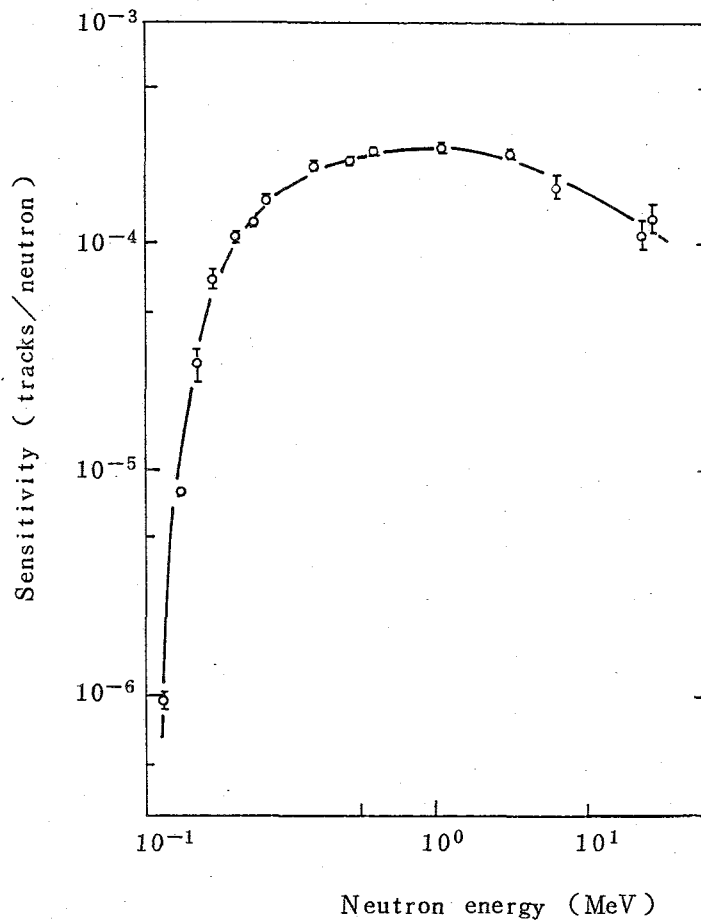


Fig. 10 Energy response function of CR-39 dosimeter ( cited from Ref 17 )

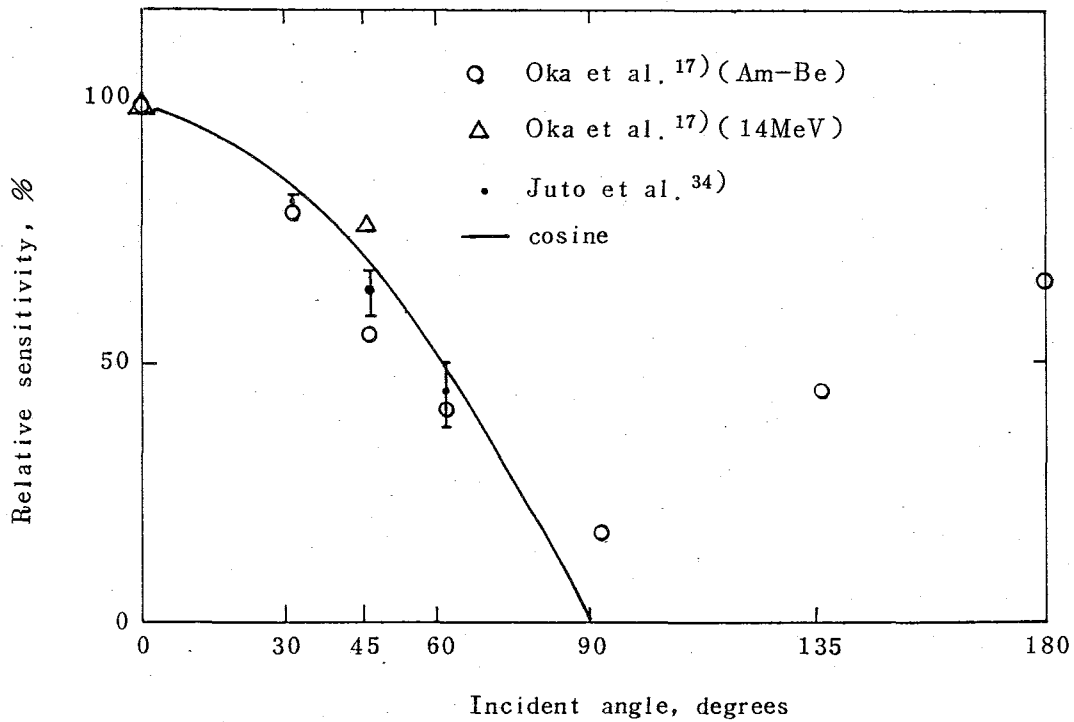


Fig. 11 Angular dependence of sensitivity of CR-39 dosimeter ( cited from Ref. 17 )



Table 13 Atomic density of each material used for the calculations

(unit in Atoms/cm<sup>3</sup>×10<sup>24</sup>)

Material Element	lung	muscle	bone	badge case	Cd filter	Sn filter	air
H	1.80-2	6.17-2	6.25-2	4.94-2	0.0	0.0	0.0
C	1.48-3	1.14-2	1.70-2	4.56-2	0.0	0.0	0.0
N	3.56-4	9.93-4	2.47-3	2.51-3	0.0	0.0	3.68-5
O	8.45-3	2.35-2	2.72-2	0.0	0.0	0.0	1.11-5
Na	1.47-5	3.40-5	1.25-4	0.0	0.0	0.0	0.0
Mg	5.40-7	3.70-6	4.10-5	0.0	0.0	0.0	0.0
P	4.70-6	4.60-5	2.01-3	0.0	0.0	0.0	0.0
S	1.27-5	4.10-5	4.70-5	0.0	0.0	0.0	0.0
Cl	1.36-5	2.30-5	3.50-5	0.0	0.0	0.0	0.0
K	9.10-6	3.20-5	3.40-5	0.0	0.0	0.0	0.0
Ca	3.10-7	0.0	2.21-3	0.0	0.0	0.0	0.0
Fe	1.20-6	6.70-7	1.30-6	0.0	0.0	0.0	0.0
Cd	0.0	0.0	0.0	0.0	4.63-2	0.0	0.0
Sn	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.69-2	0.0

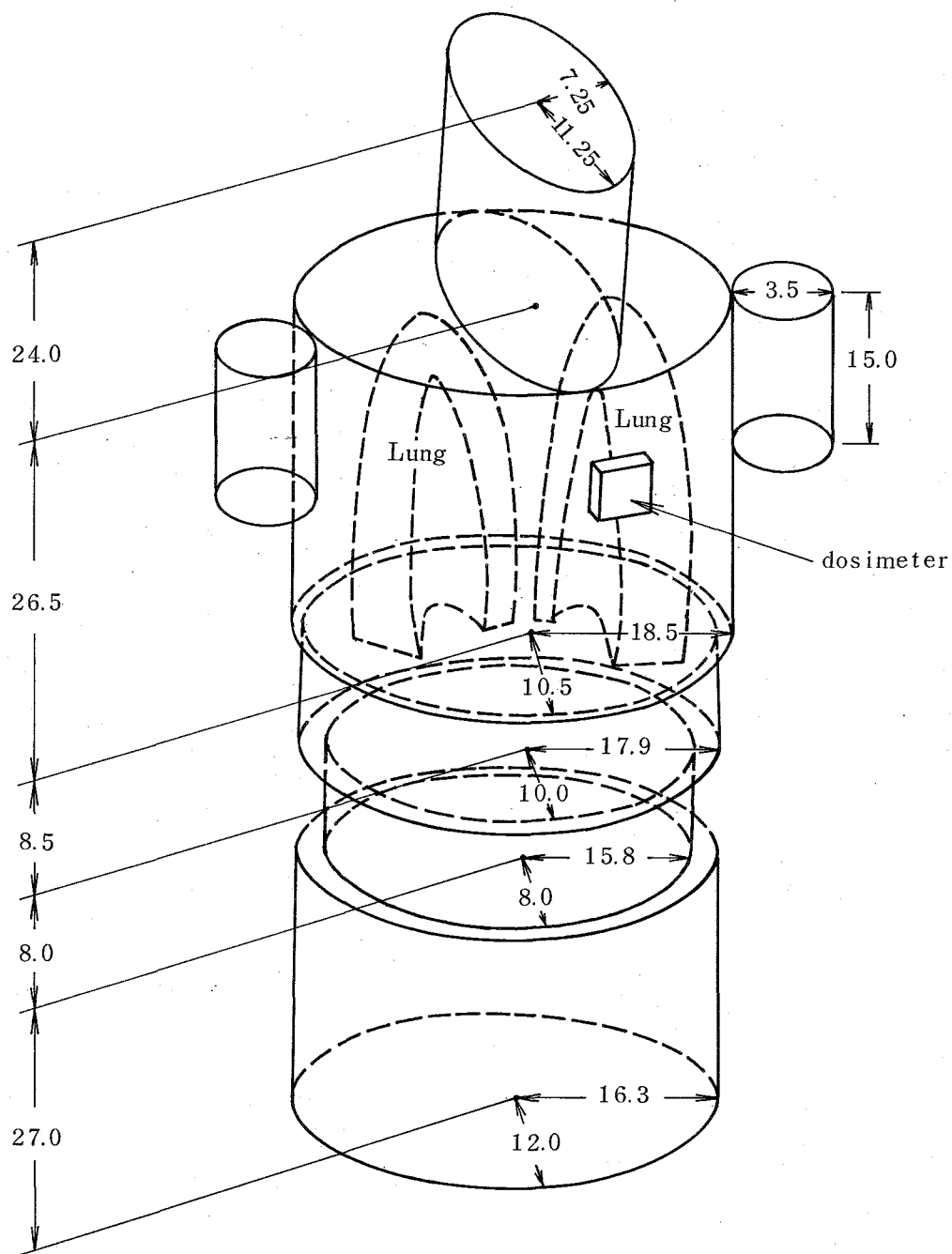


Fig. 12 Calculational model of a human phantom for neutron dosimetry

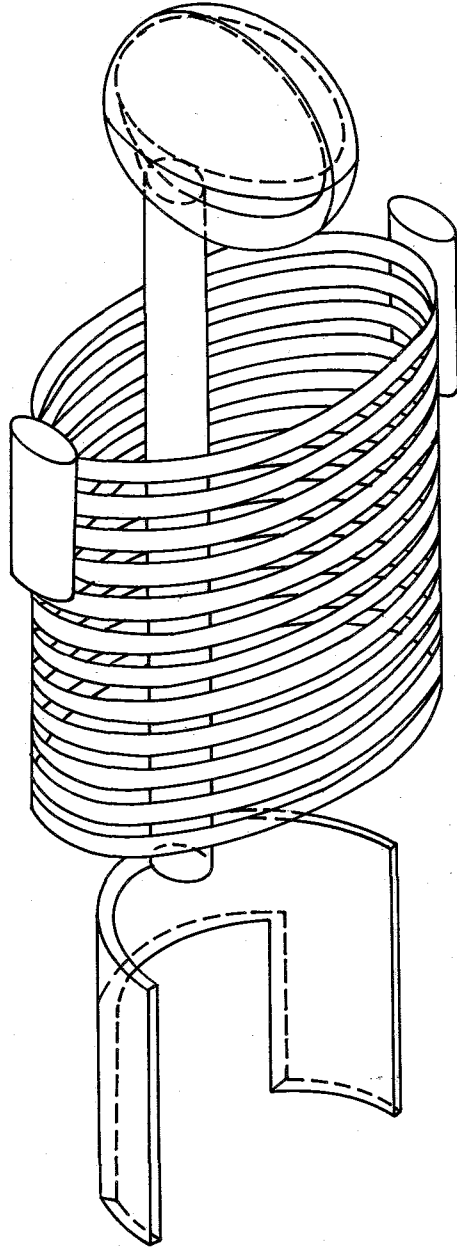


Fig. 13    Calculational model of skelton in a human phantom  
for neutron dosimetry

たアルベド型 TLD 中性子線量計, TS-16, および CR-39 であるが, これらは胸部バッヂケースが 1 cm 離れた状態で計算を行った。なお照射条件は(1)前方平行 (AP), (2)側方平行 (LAT), (3)後方平行 (PA), および(4)回転 (ROT) について評価するため, AP, LAT, PA 条件についてのみ計算し, 回転条件については, 式(7)の方式で評価した。

$$ROT = \frac{1}{4} (AP + PA + 2 * LAT) \dots\dots\dots (7)$$

estimator は next event surface crossing estimator を使用したが, 3.3.1 に示したように検出器は入射角度に対して表裏共 Cosine 型に近い応答をもつため, estimator で評価される値に入射角の方向余弦の絶対値をかけたものをレスポンスとした。

ヒストリーは約 50 万であり, 約 25 群について単色中性子を照射して各個人モニターのエネルギー応答関数を算定評価し, 計算しなかったエネルギーについては 3 次元スプライン関数を用いた内挿により求めた。アルベド型 TLD 中性子個人モニターの各素子の応答関数を Fig. 14 および Table 14 に, TS-16 の応答関数を Fig. 15 および Table 15 に, CR-39 の応答関数を Fig. 16 および Table 16 に示した。但し, アルベド型 TLD 素子のエネルギー応答関数として Fig. 14 および Table 14 に示した値は,  ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7$  素子の値から  ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  の値をさしひいた値である。その理由は  $\gamma$  線補償として常に  ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  の指示値をさしひくが,  ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  素子も中性子には感度をもっているため, Fig. 7 からわかるように 500 keV 以上では,  ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7$  の値と ( ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7 - {}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$ ) の値とは有意差が現れるためである。

Fig. 14 (a) - (d) および Fig. 15 から次のことがわかる。

- (a) TLD 素子は熱中性子に高い感度をもつために, 人体による反射効果 (アルベド効果) が数 eV 以上で現れる。後方に Sn フィルターを付けた TLD 素子の応答関数は数 keV 以上で約 100 倍高く, 後方に Cd フィルターを付けた場合でも数 keV 以上で 10 倍近く大きい (Fig. 14 (a) より)。
- (b) Fig. 15 からわかるように, TS-16 は 10 keV 以上の中性子にのみ感度をもつため, 人体によるアルベド効果の影響はあまり大きくなく, 前方入射条件のときの応答関数は, 自由空間の値より 5~15% 程度高いだけである。
- (c) Fig. 14 からわかるように TLD の場合側方入射のエネルギー応答関数は, 前方入射の場合に比べ, 数 MeV 以上ではほぼ等しいかわずかに小さいが, 数 MeV 以下

RESPONSE FUNCTION OF PNC-ALBODO-TLD

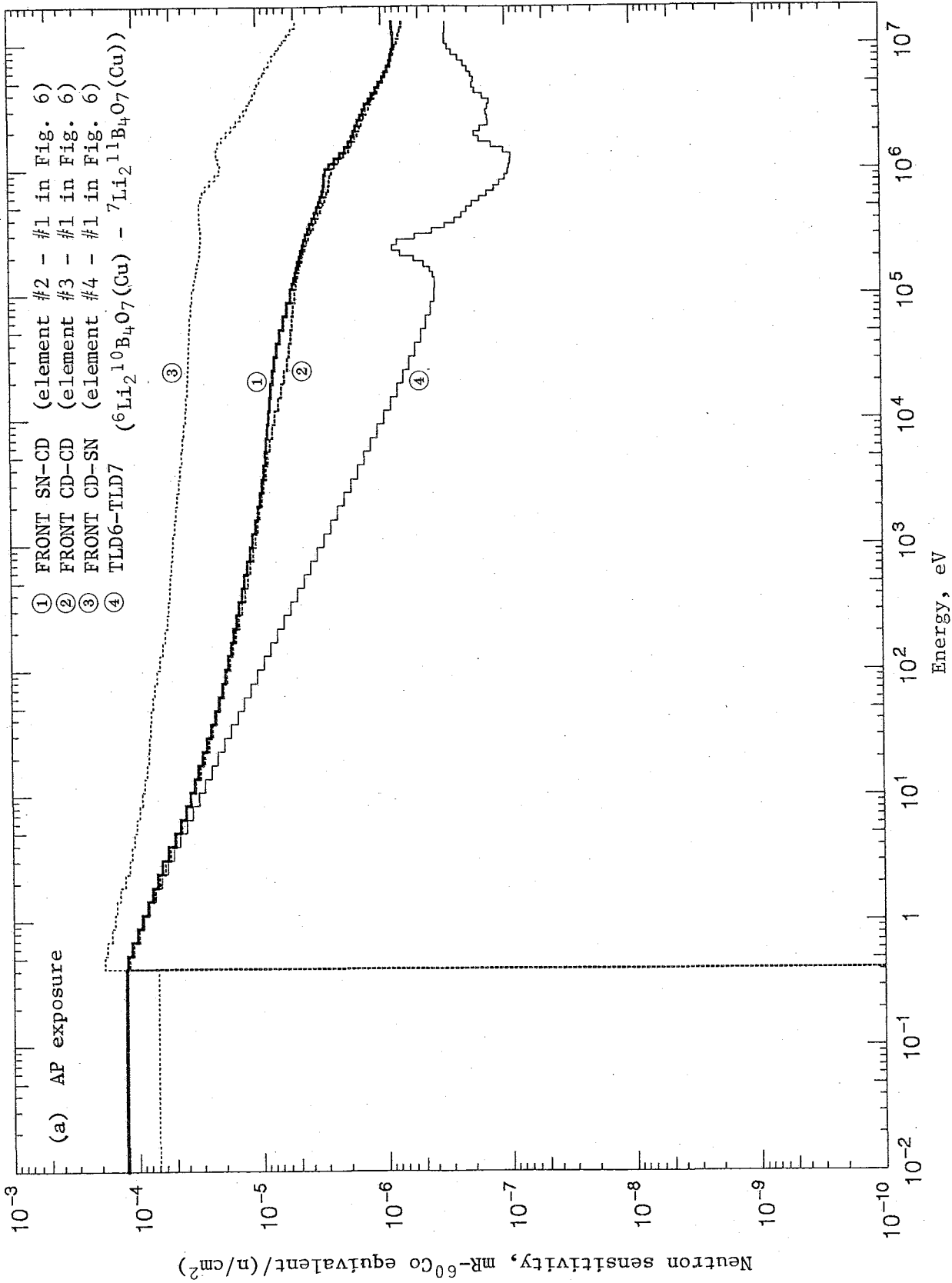


Fig. 14 Neutron energy response function of TLD elements above the human phantom for neutron dosimetry

RESPONSE FUNCTION OF PNC-ALBØDO-TLD

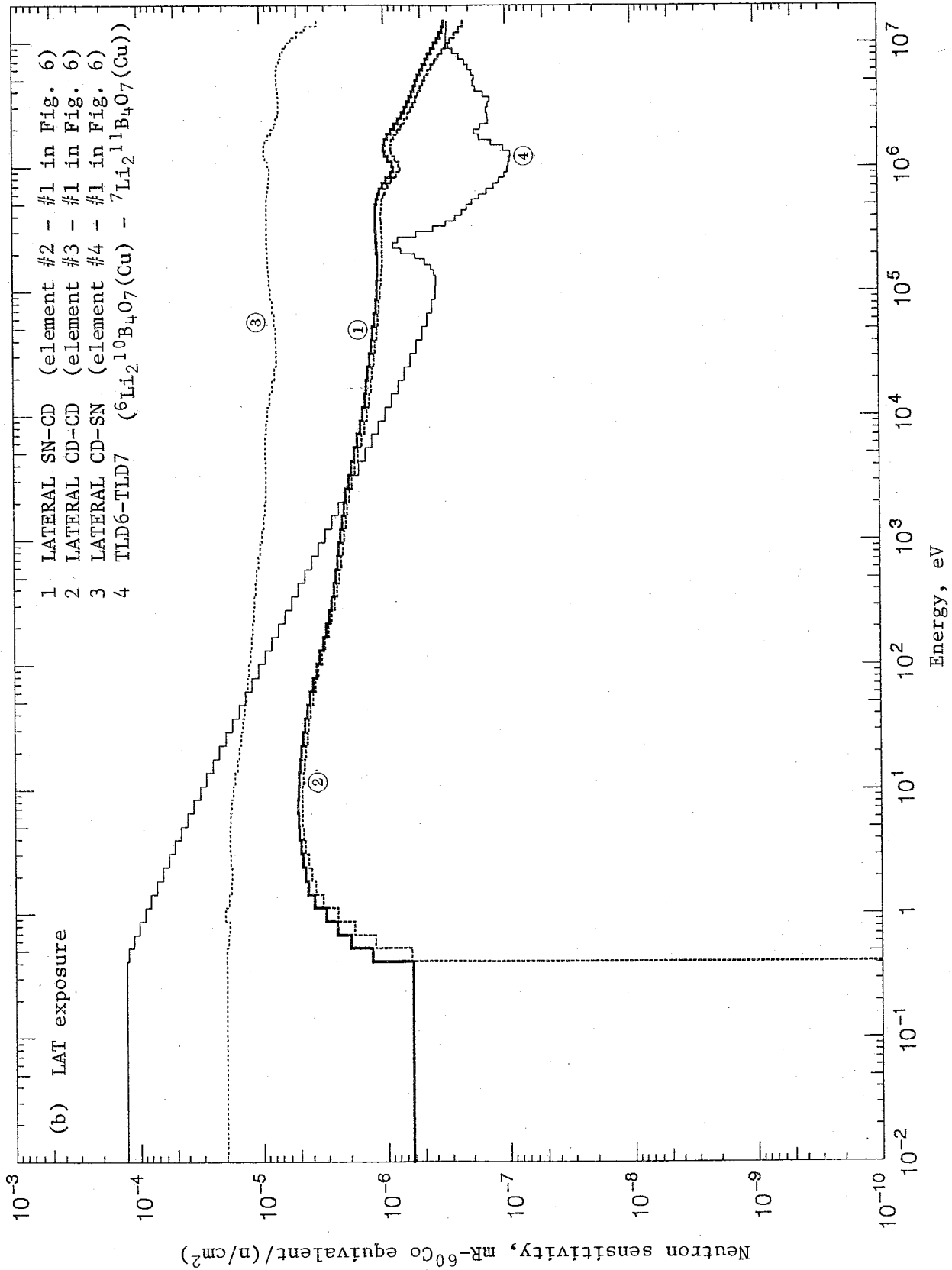


Fig. 14 (continued)

RESPONSE FUNCTION OF PNC-ALBEDO-TLD

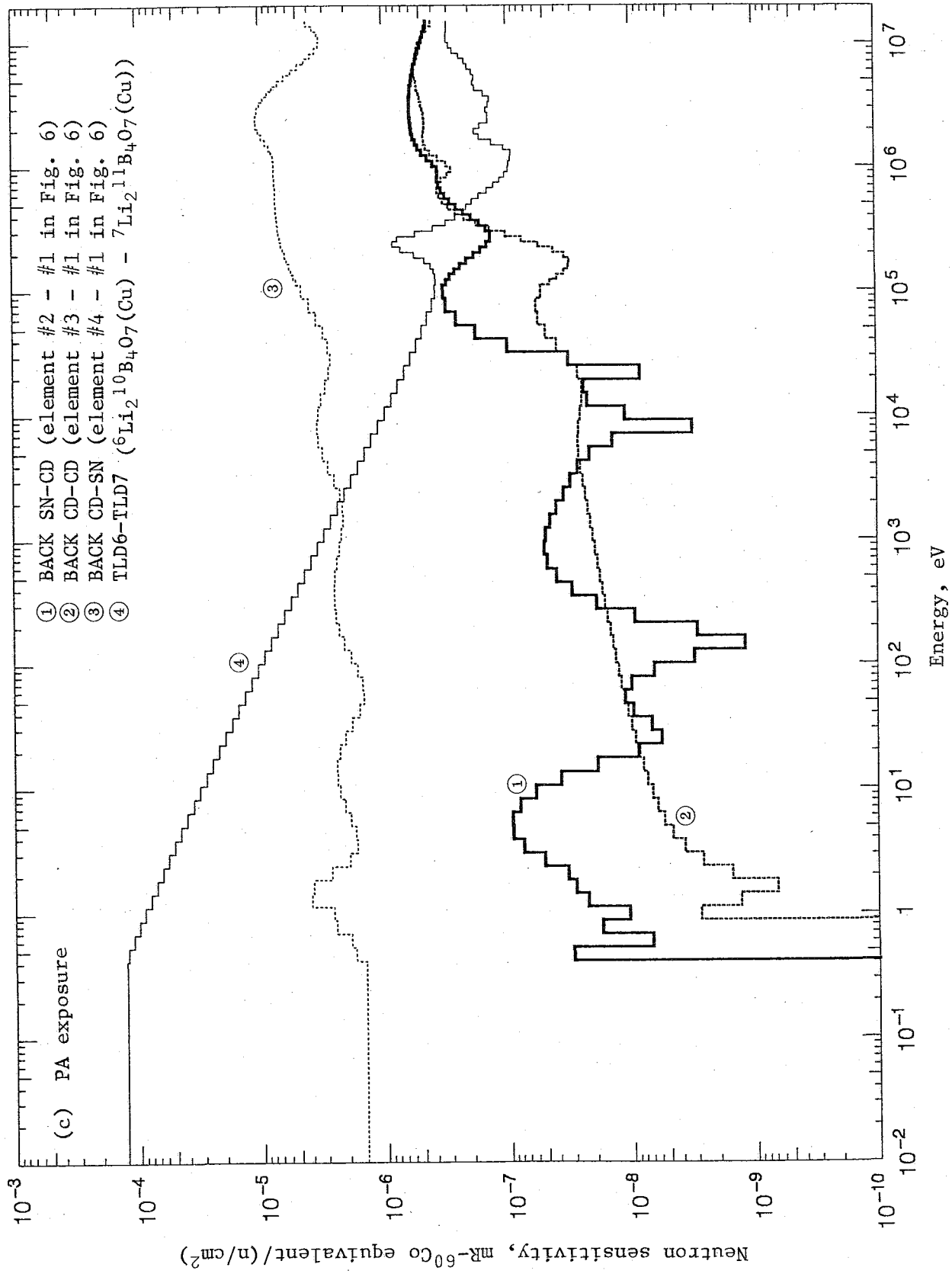


Fig. 14 (continued)

RESPONSE FUNCTION OF PNC-ALBØDO-TLD

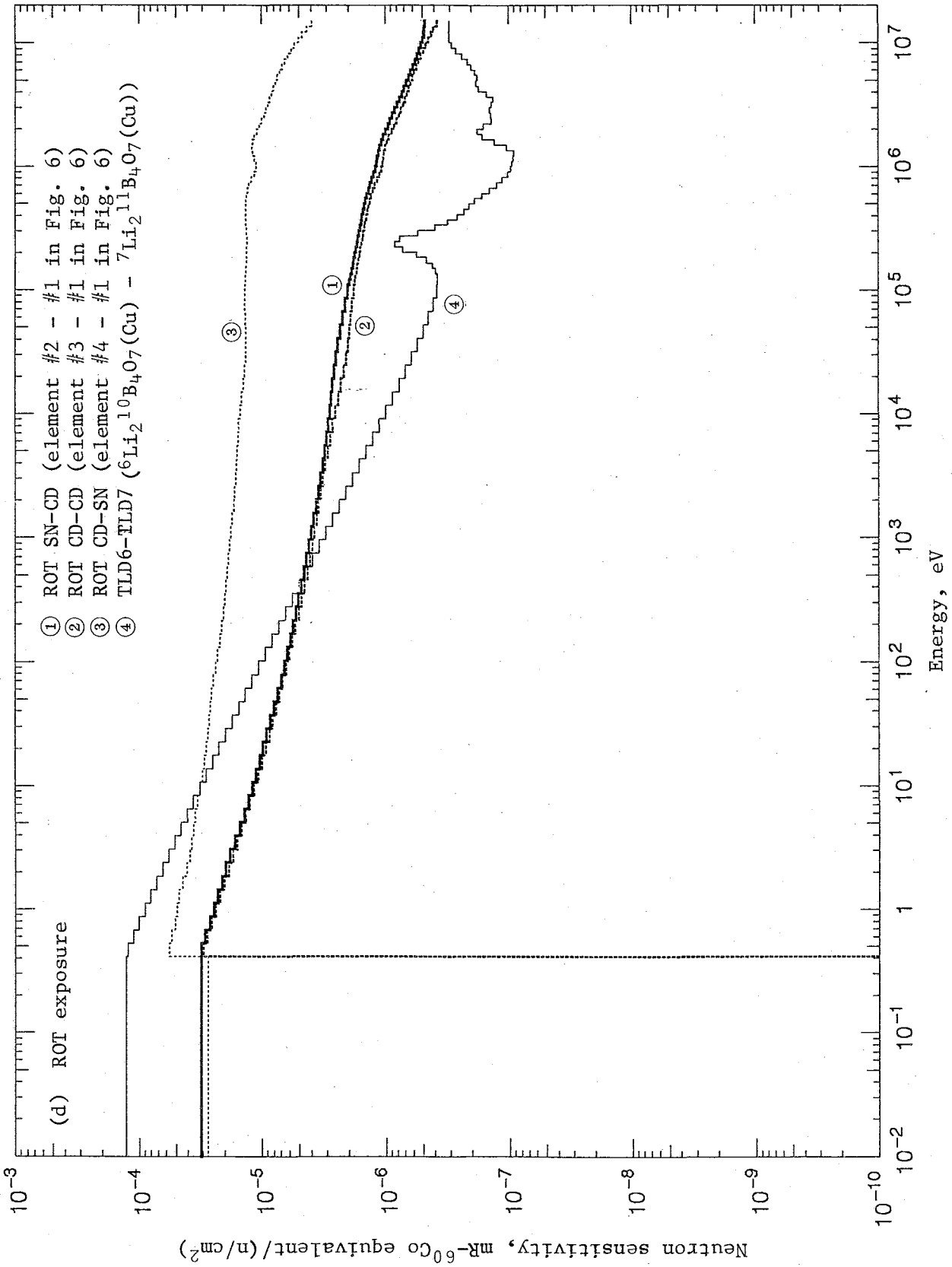


Fig. 14 (continued)



Table 14(a) Neutron energy response functions of a TLD element (Element 2) above the human phantom for various incident conditions

(unit: mR-<sup>60</sup>Co·eq./ (n·cm<sup>-2</sup>)

-ALBEDO-TLD RESPONSE SH-CD, (MR-CO-60 EQ.)/(N/CM\*\*2)

-NERGY(EV)	AP	LAT	PA	ROT
1.492E+07	8.106E-07	3.201E-07	4.413E-07	4.730E-07
1.350E+07	7.990E-07	3.312E-07	4.539E-07	4.788E-07
1.221E+07	7.924E-07	3.457E-07	4.675E-07	4.878E-07
1.105E+07	7.912E-07	3.632E-07	4.818E-07	4.998E-07
1.000E+07	7.960E-07	3.830E-07	4.964E-07	5.146E-07
9.048E+06	8.073E-07	4.046E-07	5.111E-07	5.319E-07
8.187E+06	8.256E-07	4.275E-07	5.256E-07	5.515E-07
7.408E+06	8.512E-07	4.511E-07	5.397E-07	5.733E-07
6.703E+06	8.848E-07	4.750E-07	5.529E-07	5.969E-07
6.065E+06	9.268E-07	4.984E-07	5.650E-07	6.221E-07
5.488E+06	9.776E-07	5.210E-07	5.757E-07	6.488E-07
4.966E+06	1.037E-06	5.425E-07	5.847E-07	6.767E-07
4.493E+06	1.105E-06	5.638E-07	5.920E-07	7.061E-07
4.066E+06	1.177E-06	5.861E-07	5.975E-07	7.367E-07
3.679E+06	1.253E-06	6.106E-07	6.011E-07	7.688E-07
3.329E+06	1.331E-06	6.387E-07	6.027E-07	8.028E-07
3.012E+06	1.408E-06	6.714E-07	6.024E-07	8.383E-07
2.725E+06	1.483E-06	7.101E-07	5.999E-07	8.758E-07
2.466E+06	1.553E-06	7.560E-07	5.952E-07	9.150E-07
2.231E+06	1.617E-06	8.103E-07	5.884E-07	9.565E-07
2.019E+06	1.676E-06	8.720E-07	5.789E-07	9.997E-07
1.827E+06	1.743E-06	9.313E-07	5.654E-07	1.043E-06
1.653E+06	1.834E-06	9.762E-07	5.460E-07	1.083E-06
1.496E+06	1.965E-06	9.948E-07	5.191E-07	1.118E-06
1.353E+06	2.154E-06	9.750E-07	4.827E-07	1.147E-06
1.225E+06	2.402E-06	9.145E-07	4.377E-07	1.167E-06
1.108E+06	2.652E-06	8.494E-07	3.947E-07	1.186E-06
1.003E+06	2.831E-06	8.255E-07	3.669E-07	1.212E-06
9.072E+05	2.894E-06	8.721E-07	3.617E-07	1.250E-06
8.209E+05	2.905E-06	9.529E-07	3.645E-07	1.294E-06
7.427E+05	2.936E-06	1.024E-06	3.585E-07	1.336E-06
6.721E+05	2.999E-06	1.079E-06	3.424E-07	1.375E-06
6.081E+05	3.090E-06	1.120E-06	3.185E-07	1.412E-06
5.502E+05	3.203E-06	1.147E-06	2.893E-07	1.447E-06
4.979E+05	3.335E-06	1.164E-06	2.571E-07	1.480E-06
4.505E+05	3.479E-06	1.172E-06	2.245E-07	1.512E-06
4.076E+05	3.634E-06	1.173E-06	1.934E-07	1.543E-06
3.683E+05	3.793E-06	1.170E-06	1.669E-07	1.575E-06
3.337E+05	3.950E-06	1.163E-06	1.471E-07	1.606E-06
3.020E+05	4.103E-06	1.156E-06	1.362E-07	1.638E-06
2.732E+05	4.249E-06	1.149E-06	1.360E-07	1.671E-06
2.472E+05	4.386E-06	1.143E-06	1.453E-07	1.704E-06
2.237E+05	4.518E-06	1.138E-06	1.621E-07	1.739E-06
2.024E+05	4.645E-06	1.134E-06	1.845E-07	1.774E-06
1.832E+05	4.773E-06	1.132E-06	2.112E-07	1.812E-06
1.647E+05	4.896E-06	1.131E-06	2.390E-07	1.849E-06
1.500E+05	5.016E-06	1.131E-06	2.654E-07	1.886E-06
1.357E+05	5.142E-06	1.133E-06	2.905E-07	1.925E-06
1.228E+05	5.271E-06	1.137E-06	3.113E-07	1.964E-06
1.111E+05	5.502E-06	1.147E-06	3.314E-07	2.032E-06
8.652E+04	5.881E-06	1.171E-06	3.169E-07	2.135E-06
6.738E+04	6.287E-06	1.204E-06	2.615E-07	2.239E-06
5.248E+04	6.696E-06	1.244E-06	1.834E-07	2.342E-06
4.087E+04	7.086E-06	1.286E-06	1.009E-07	2.440E-06
3.183E+04	7.432E-06	1.328E-06	3.222E-08	2.530E-06
2.479E+04	7.719E-06	1.368E-06	8.505E-09	2.616E-06
1.931E+04	7.956E-06	1.409E-06	2.441E-08	2.700E-06
1.503E+04	8.161E-06	1.456E-06	2.285E-08	2.774E-06
1.171E+04	8.349E-06	1.513E-06	1.120E-08	2.847E-06
9.119E+03	8.539E-06	1.583E-06	3.183E-09	2.927E-06
7.102E+03	8.746E-06	1.671E-06	1.436E-08	3.026E-06
5.531E+03	8.981E-06	1.770E-06	2.207E-08	3.136E-06
4.307E+03	9.252E-06	1.875E-06	2.748E-08	3.257E-06
3.355E+03	9.569E-06	1.979E-06	3.175E-08	3.390E-06
2.613E+03	9.942E-06	2.076E-06	3.603E-08	3.533E-06
2.035E+03	1.038E-05	2.162E-06	4.109E-08	3.686E-06
1.585E+03	1.087E-05	2.238E-06	4.607E-08	3.848E-06
1.234E+03	1.143E-05	2.309E-06	4.973E-08	4.024E-06
9.611E+02	1.203E-05	2.379E-06	5.080E-08	4.210E-06
7.485E+02	1.268E-05	2.452E-06	4.804E-08	4.408E-06
5.829E+02	1.338E-05	2.533E-06	4.074E-08	4.622E-06
4.540E+02	1.411E-05	2.625E-06	3.047E-08	4.848E-06
3.536E+02	1.488E-05	2.736E-06	1.934E-08	5.093E-06
2.754E+02	1.568E-05	2.868E-06	9.450E-09	5.356E-06
2.144E+02	1.651E-05	3.029E-06	2.927E-09	5.643E-06
1.670E+02	1.736E-05	3.219E-06	1.215E-09	5.950E-06
1.301E+02	1.828E-05	3.432E-06	3.102E-09	6.287E-06
1.013E+02	1.932E-05	3.657E-06	6.709E-09	6.660E-06
7.889E+01	2.051E-05	3.886E-06	1.016E-08	7.073E-06
6.144E+01	2.191E-05	4.107E-06	1.158E-08	7.534E-06
4.785E+01	2.355E-05	4.313E-06	9.855E-09	8.046E-06
3.727E+01	2.542E-05	4.502E-06	7.001E-09	8.608E-06
2.902E+01	2.748E-05	4.672E-06	5.791E-09	9.207E-06
2.260E+01	2.972E-05	4.822E-06	9.003E-09	9.843E-06
1.760E+01	3.211E-05	4.952E-06	1.942E-08	1.051E-05
1.371E+01	3.466E-05	5.059E-06	3.835E-08	1.120E-05
1.068E+01	3.756E-05	5.135E-06	6.129E-08	1.197E-05
8.315E+00	4.100E-05	5.167E-06	8.224E-08	1.285E-05
6.476E+00	4.522E-05	5.147E-06	9.525E-08	1.390E-05
5.043E+00	5.043E-05	5.063E-06	9.433E-08	1.516E-05
3.928E+00	5.670E-05	4.912E-06	7.668E-08	1.665E-05
3.059E+00	6.350E-05	4.724E-06	5.217E-08	1.825E-05
2.382E+00	7.017E-05	4.532E-06	3.385E-08	1.982E-05
1.855E+00	7.644E-05	4.321E-06	2.919E-08	2.128E-05
1.445E+00	8.358E-05	3.862E-06	2.330E-08	2.283E-05
1.125E+00	9.246E-05	3.092E-06	1.078E-08	2.466E-05
8.764E-01	1.018E-04	2.541E-06	1.785E-08	2.672E-05
6.826E-01	1.125E-04	1.960E-06	6.960E-09	2.911E-05
5.316E-01	1.218E-04	1.321E-06	3.087E-08	3.112E-05
4.140E-01	1.235E-04	6.224E-07	1.000E-20	3.119E-05
1.000E-04				

Table 14(b) (continued) (Element 3)

(unit: mR-<sup>60</sup>Co·eq./ (n·cm<sup>-2</sup>))

PNC-ALBODO-TLD RESPONSE CD-CD (HR-CD-60 EQ.)/(N/CM\*\*2)

ENERGY(EV)	AP	LAT	PA	ROT
1.492E+07	6.756E-07	2.233E-07	4.026E-07	3.812E-07
1.350E+07	6.975E-07	2.407E-07	4.365E-07	4.038E-07
1.221E+07	7.193E-07	2.605E-07	4.658E-07	4.265E-07
1.105E+07	7.417E-07	2.823E-07	4.904E-07	4.492E-07
1.000E+07	7.652E-07	3.057E-07	5.105E-07	4.718E-07
9.048E+06	7.906E-07	3.302E-07	5.262E-07	4.943E-07
8.187E+06	8.185E-07	3.554E-07	5.376E-07	5.167E-07
7.408E+06	8.494E-07	3.808E-07	5.447E-07	5.389E-07
6.703E+06	8.840E-07	4.060E-07	5.478E-07	5.609E-07
6.065E+06	9.230E-07	4.305E-07	5.468E-07	5.827E-07
5.488E+06	9.670E-07	4.539E-07	5.419E-07	6.042E-07
4.966E+06	1.016E-06	4.760E-07	5.334E-07	6.253E-07
4.493E+06	1.070E-06	4.976E-07	5.221E-07	6.468E-07
4.066E+06	1.128E-06	5.196E-07	5.092E-07	6.691E-07
3.679E+06	1.189E-06	5.431E-07	4.957E-07	6.927E-07
3.329E+06	1.252E-06	5.692E-07	4.827E-07	7.183E-07
3.012E+06	1.317E-06	5.988E-07	4.714E-07	7.465E-07
2.725E+06	1.381E-06	6.329E-07	4.627E-07	7.774E-07
2.466E+06	1.446E-06	6.727E-07	4.578E-07	8.123E-07
2.231E+06	1.509E-06	7.191E-07	4.577E-07	8.512E-07
2.019E+06	1.571E-06	7.713E-07	4.624E-07	8.940E-07
1.827E+06	1.642E-06	8.212E-07	4.668E-07	9.378E-07
1.653E+06	1.731E-06	8.587E-07	4.645E-07	9.782E-07
1.496E+06	1.849E-06	8.739E-07	4.492E-07	1.011E-06
1.353E+06	2.006E-06	8.569E-07	4.148E-07	1.034E-06
1.225E+06	2.203E-06	8.058E-07	3.603E-07	1.044E-06
1.108E+06	2.399E-06	7.523E-07	3.072E-07	1.053E-06
1.003E+06	2.544E-06	7.363E-07	2.822E-07	1.075E-06
9.072E+05	2.677E-06	7.830E-07	3.013E-07	1.119E-06
8.209E+05	2.635E-06	8.592E-07	3.376E-07	1.173E-06
7.427E+05	2.683E-06	9.253E-07	3.598E-07	1.223E-06
6.721E+05	2.758E-06	9.751E-07	3.640E-07	1.268E-06
6.081E+05	2.857E-06	1.011E-06	3.533E-07	1.308E-06
5.502E+05	2.976E-06	1.034E-06	3.305E-07	1.344E-06
4.979E+05	3.110E-06	1.047E-06	2.985E-07	1.376E-06
4.505E+05	3.257E-06	1.053E-06	2.601E-07	1.406E-06
4.076E+05	3.412E-06	1.052E-06	2.182E-07	1.434E-06
3.683E+05	3.572E-06	1.047E-06	1.759E-07	1.460E-06
3.337E+05	3.730E-06	1.041E-06	1.364E-07	1.487E-06
3.020E+05	3.886E-06	1.035E-06	1.020E-07	1.514E-06
2.732E+05	4.036E-06	1.030E-06	7.507E-08	1.543E-06
2.472E+05	4.178E-06	1.028E-06	5.547E-08	1.572E-06
2.237E+05	4.313E-06	1.027E-06	4.224E-08	1.602E-06
2.024E+05	4.440E-06	1.029E-06	3.445E-08	1.633E-06
1.832E+05	4.563E-06	1.032E-06	3.114E-08	1.665E-06
1.647E+05	4.674E-06	1.037E-06	3.154E-08	1.695E-06
1.500E+05	4.775E-06	1.043E-06	3.445E-08	1.724E-06
1.357E+05	4.870E-06	1.050E-06	3.915E-08	1.752E-06
1.228E+05	4.957E-06	1.058E-06	4.466E-08	1.779E-06
1.111E+05	5.085E-06	1.074E-06	5.318E-08	1.822E-06
8.652E+04	5.236E-06	1.100E-06	5.859E-08	1.874E-06
6.738E+04	5.362E-06	1.130E-06	5.633E-08	1.920E-06
5.248E+04	5.492E-06	1.161E-06	4.928E-08	1.966E-06
4.087E+04	5.638E-06	1.194E-06	4.028E-08	2.022E-06
3.183E+04	5.886E-06	1.228E-06	3.222E-08	2.094E-06
2.479E+04	6.198E-06	1.261E-06	2.731E-08	2.187E-06
1.931E+04	6.575E-06	1.299E-06	2.526E-08	2.300E-06
1.503E+04	6.991E-06	1.344E-06	2.515E-08	2.426E-06
1.171E+04	7.419E-06	1.400E-06	2.604E-08	2.561E-06
9.119E+03	7.830E-06	1.472E-06	2.700E-08	2.700E-06
7.102E+03	8.207E-06	1.561E-06	2.730E-08	2.839E-06
5.531E+03	8.555E-06	1.661E-06	2.693E-08	2.976E-06
4.307E+03	8.891E-06	1.766E-06	2.610E-08	3.112E-06
3.355E+03	9.229E-06	1.867E-06	2.499E-08	3.247E-06
2.613E+03	9.585E-06	1.958E-06	2.381E-08	3.381E-06
2.035E+03	9.972E-06	2.032E-06	2.270E-08	3.515E-06
1.585E+03	1.040E-05	2.095E-06	2.169E-08	3.653E-06
1.234E+03	1.087E-05	2.154E-06	2.075E-08	3.800E-06
9.611E+02	1.138E-05	2.215E-06	1.986E-08	3.957E-06
7.485E+02	1.196E-05	2.287E-06	1.900E-08	4.138E-06
5.829E+02	1.259E-05	2.374E-06	1.816E-08	4.339E-06
4.540E+02	1.328E-05	2.480E-06	1.733E-08	4.564E-06
3.536E+02	1.404E-05	2.605E-06	1.653E-08	4.817E-06
2.754E+02	1.486E-05	2.750E-06	1.575E-08	5.094E-06
2.144E+02	1.573E-05	2.917E-06	1.500E-08	5.395E-06
1.670E+02	1.668E-05	3.104E-06	1.429E-08	5.726E-06
1.301E+02	1.770E-05	3.304E-06	1.360E-08	6.080E-06
1.013E+02	1.881E-05	3.509E-06	1.293E-08	6.460E-06
7.889E+01	2.003E-05	3.710E-06	1.225E-08	6.866E-06
6.144E+01	2.138E-05	3.896E-06	1.158E-08	7.296E-06
4.785E+01	2.287E-05	4.062E-06	1.088E-08	7.751E-06
3.727E+01	2.454E-05	4.209E-06	1.018E-08	8.242E-06
2.902E+01	2.643E-05	4.341E-06	9.483E-09	8.780E-06
2.260E+01	2.857E-05	4.461E-06	8.805E-09	9.375E-06
1.760E+01	3.100E-05	4.574E-06	8.158E-09	1.004E-05
1.371E+01	3.377E-05	4.679E-06	7.545E-09	1.078E-05
1.068E+01	3.692E-05	4.761E-06	6.936E-09	1.161E-05
8.315E+00	4.053E-05	4.803E-06	6.292E-09	1.254E-05
6.476E+00	4.464E-05	4.786E-06	5.574E-09	1.355E-05
5.043E+00	4.932E-05	4.691E-06	4.741E-09	1.468E-05
3.928E+00	5.461E-05	4.511E-06	3.770E-09	1.591E-05
3.059E+00	6.046E-05	4.277E-06	2.694E-09	1.725E-05
2.382E+00	6.680E-05	4.033E-06	1.561E-09	1.872E-05
1.855E+00	7.369E-05	3.773E-06	6.701E-10	2.031E-05
1.445E+00	8.166E-05	3.290E-06	1.320E-09	2.206E-05
1.125E+00	9.053E-05	2.502E-06	2.802E-09	2.388E-05
8.764E-01	9.889E-05	1.838E-06	1.000E-20	2.564E-05
6.826E-01	1.096E-04	1.253E-06	1.000E-20	2.803E-05
5.316E-01	1.179E-04	6.379E-07	1.000E-20	2.979E-05
4.140E-01	1.000E-20	1.000E-20	1.000E-20	1.000E-20
1.000E-04				

Table 14(c) (continued) (Element 4)

(unit: mR-<sup>60</sup>Co·eq./ (n·cm<sup>-2</sup>))

ENERGY(EV)	AP	LAT	PA	ROT
1.492E+07	4.866E-06	3.437E-06	4.102E-06	3.960E-06
1.350E+07	5.230E-06	4.250E-06	3.604E-06	4.333E-06
1.221E+07	5.630E-06	4.951E-06	3.308E-06	4.710E-06
1.105E+07	6.060E-06	5.547E-06	3.196E-06	5.087E-06
1.000E+07	6.512E-06	6.045E-06	3.252E-06	5.463E-06
9.048E+06	6.980E-06	6.450E-06	3.458E-06	5.834E-06
8.187E+06	7.457E-06	6.767E-06	3.798E-06	6.197E-06
7.408E+06	7.937E-06	7.004E-06	4.255E-06	6.550E-06
6.703E+06	8.412E-06	7.166E-06	4.811E-06	6.889E-06
6.065E+06	8.875E-06	7.260E-06	5.451E-06	7.211E-06
5.488E+06	9.321E-06	7.290E-06	6.156E-06	7.514E-06
4.966E+06	9.747E-06	7.266E-06	6.907E-06	7.796E-06
4.493E+06	1.018E-05	7.207E-06	7.671E-06	8.066E-06
4.066E+06	1.065E-05	7.136E-06	8.413E-06	8.334E-06
3.679E+06	1.119E-05	7.073E-06	9.097E-06	8.608E-06
3.329E+06	1.183E-05	7.042E-06	9.687E-06	8.900E-06
3.012E+06	1.260E-05	7.063E-06	1.015E-05	9.219E-06
2.725E+06	1.353E-05	7.160E-06	1.044E-05	9.572E-06
2.466E+06	1.466E-05	7.353E-06	1.054E-05	9.976E-06
2.231E+06	1.601E-05	7.665E-06	1.039E-05	1.043E-05
2.019E+06	1.757E-05	8.099E-06	1.000E-05	1.094E-05
1.827E+06	1.914E-05	8.576E-06	9.442E-06	1.143E-05
1.653E+06	2.045E-05	8.998E-06	8.819E-06	1.182E-05
1.496E+06	2.126E-05	9.270E-06	8.239E-06	1.201E-05
1.353E+06	2.131E-05	9.292E-06	7.805E-06	1.192E-05
1.225E+06	2.056E-05	9.022E-06	7.588E-06	1.155E-05
1.108E+06	1.979E-05	8.630E-06	7.524E-06	1.114E-05
1.003E+06	1.999E-05	8.341E-06	7.515E-06	1.105E-05
9.072E+05	2.175E-05	8.312E-06	7.484E-06	1.146E-05
8.209E+05	2.417E-05	8.433E-06	7.436E-06	1.212E-05
7.427E+05	2.615E-05	8.558E-06	7.395E-06	1.267E-05
6.721E+05	2.757E-05	8.660E-06	7.361E-06	1.306E-05
6.081E+05	2.849E-05	8.741E-06	7.330E-06	1.333E-05
5.502E+05	2.902E-05	8.801E-06	7.300E-06	1.348E-05
4.979E+05	2.922E-05	8.845E-06	7.265E-06	1.354E-05
4.505E+05	2.919E-05	8.872E-06	7.223E-06	1.354E-05
4.076E+05	2.902E-05	8.885E-06	7.167E-06	1.349E-05
3.683E+05	2.878E-05	8.887E-06	7.097E-06	1.341E-05
3.337E+05	2.856E-05	8.879E-06	7.007E-06	1.333E-05
3.020E+05	2.844E-05	8.863E-06	6.893E-06	1.326E-05
2.732E+05	2.850E-05	8.840E-06	6.753E-06	1.323E-05
2.472E+05	2.871E-05	8.811E-06	6.588E-06	1.323E-05
2.237E+05	2.907E-05	8.776E-06	6.402E-06	1.326E-05
2.024E+05	2.954E-05	8.734E-06	6.198E-06	1.330E-05
1.832E+05	3.012E-05	8.683E-06	5.972E-06	1.336E-05
1.647E+05	3.074E-05	8.627E-06	5.740E-06	1.343E-05
1.500E+05	3.138E-05	8.566E-06	5.507E-06	1.350E-05
1.357E+05	3.204E-05	8.496E-06	5.260E-06	1.357E-05
1.228E+05	3.269E-05	8.418E-06	5.011E-06	1.363E-05
1.111E+05	3.369E-05	8.269E-06	4.594E-06	1.371E-05
8.652E+04	3.477E-05	8.013E-06	4.005E-06	1.370E-05
6.738E+04	3.547E-05	7.758E-06	3.484E-06	1.362E-05
5.248E+04	3.590E-05	7.551E-06	3.066E-06	1.352E-05
4.087E+04	3.621E-05	7.445E-06	2.785E-06	1.347E-05
3.183E+04	3.651E-05	7.487E-06	2.675E-06	1.354E-05
2.479E+04	3.693E-05	7.708E-06	2.752E-06	1.377E-05
1.931E+04	3.748E-05	8.054E-06	2.951E-06	1.413E-05
1.503E+04	3.816E-05	8.450E-06	3.193E-06	1.456E-05
1.171E+04	3.897E-05	8.820E-06	3.393E-06	1.500E-05
9.119E+03	3.990E-05	9.091E-06	3.470E-06	1.539E-05
7.102E+03	4.096E-05	9.209E-06	3.368E-06	1.569E-05
5.531E+03	4.212E-05	9.215E-06	3.129E-06	1.592E-05
4.307E+03	4.335E-05	9.171E-06	2.823E-06	1.613E-05
3.355E+03	4.462E-05	9.139E-06	2.517E-06	1.635E-05
2.613E+03	4.590E-05	9.181E-06	2.280E-06	1.664E-05
2.035E+03	4.716E-05	9.344E-06	2.163E-06	1.700E-05
1.585E+03	4.838E-05	9.606E-06	2.152E-06	1.744E-05
1.234E+03	4.954E-05	9.932E-06	2.211E-06	1.790E-05
9.611E+02	5.060E-05	1.028E-05	2.309E-06	1.837E-05
7.485E+02	5.155E-05	1.062E-05	2.412E-06	1.880E-05
5.829E+02	5.241E-05	1.092E-05	2.491E-06	1.919E-05
4.540E+02	5.332E-05	1.119E-05	2.532E-06	1.956E-05
3.536E+02	5.448E-05	1.144E-05	2.524E-06	1.997E-05
2.754E+02	5.608E-05	1.168E-05	2.458E-06	2.047E-05
2.144E+02	5.832E-05	1.193E-05	2.322E-06	2.113E-05
1.670E+02	6.129E-05	1.220E-05	2.116E-06	2.195E-05
1.301E+02	6.474E-05	1.250E-05	1.881E-06	2.291E-05
1.013E+02	6.830E-05	1.282E-05	1.665E-06	2.390E-05
7.889E+01	7.162E-05	1.316E-05	1.520E-06	2.486E-05
6.144E+01	7.434E-05	1.353E-05	1.494E-06	2.572E-05
4.785E+01	7.624E-05	1.393E-05	1.617E-06	2.643E-05
3.727E+01	7.764E-05	1.437E-05	1.843E-06	2.706E-05
2.902E+01	7.897E-05	1.486E-05	2.104E-06	2.770E-05
2.260E+01	8.067E-05	1.541E-05	2.333E-06	2.846E-05
1.760E+01	8.319E-05	1.602E-05	2.462E-06	2.942E-05
1.371E+01	8.683E-05	1.669E-05	2.445E-06	3.066E-05
1.068E+01	9.136E-05	1.736E-05	2.313E-06	3.210E-05
8.315E+00	9.640E-05	1.795E-05	2.119E-06	3.360E-05
6.476E+00	1.016E-04	1.838E-05	1.915E-06	3.507E-05
5.043E+00	1.065E-04	1.857E-05	1.753E-06	3.635E-05
3.928E+00	1.112E-04	1.847E-05	1.711E-06	3.746E-05
3.059E+00	1.172E-04	1.823E-05	1.968E-06	3.891E-05
2.382E+00	1.262E-04	1.799E-05	2.729E-06	4.123E-05
1.855E+00	1.386E-04	1.803E-05	3.875E-06	4.463E-05
1.445E+00	1.487E-04	1.900E-05	4.002E-06	4.768E-05
1.125E+00	1.536E-04	2.025E-05	2.632E-06	4.918E-05
8.764E-01	1.632E-04	1.863E-05	2.528E-06	5.075E-05
6.826E-01	1.780E-04	1.920E-05	1.910E-06	5.458E-05
5.316E-01	1.857E-04	1.980E-05	1.771E-06	5.677E-05
4.140E-01	6.899E-05	1.980E-05	1.474E-06	2.752E-05
1.000E-04				

# RESPONSE FUNCTION OF TS16

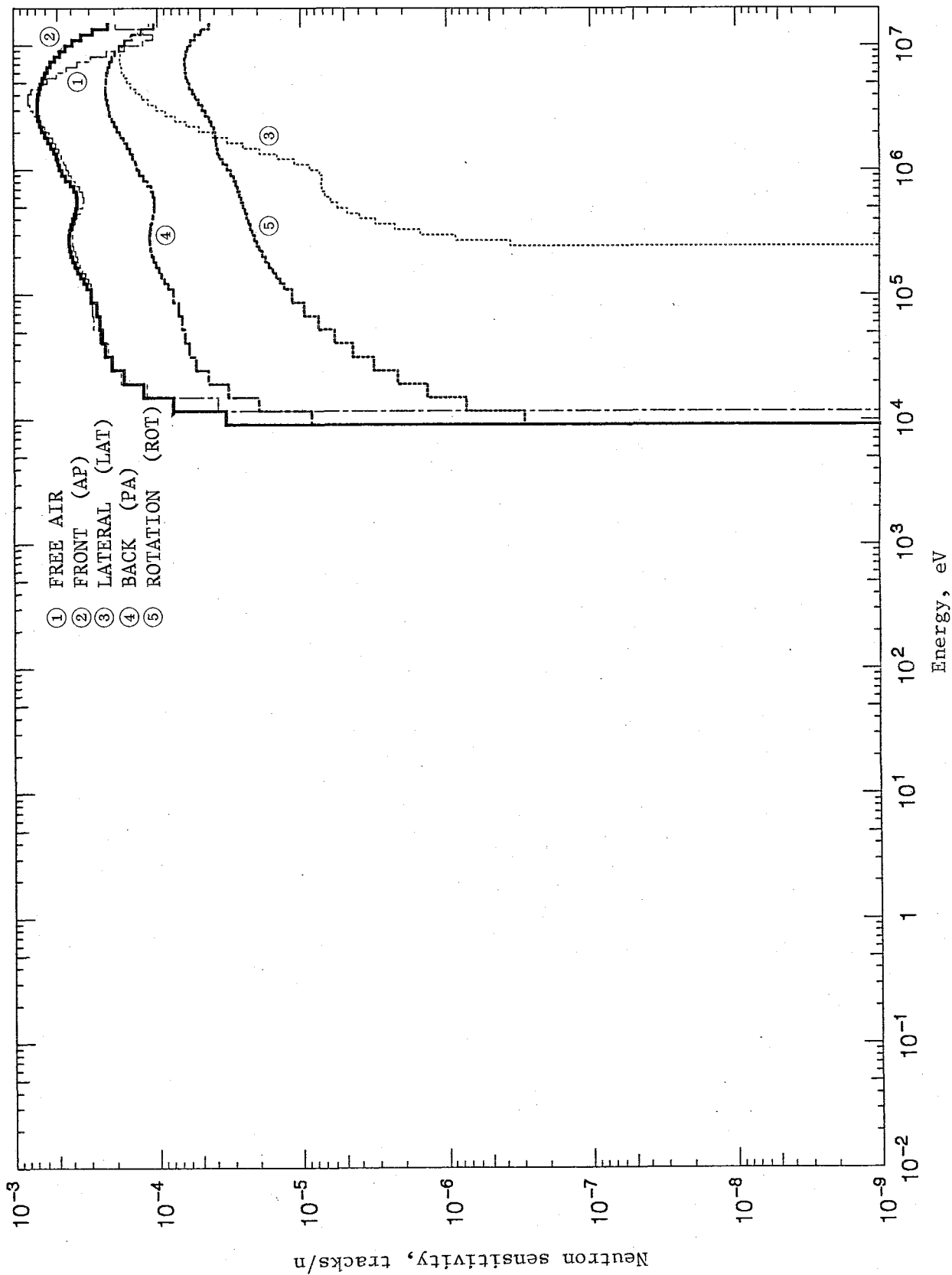


Fig. 15 Neutron energy response function of TS-16 dosimeter above the human phantom for neutron dosimetry

Table 15 Neutron energy response functions of TS-16 dosimeter above the human phantom for various incident conditions (tracks/n)

UPPER ENERGY (eV)	FREE-AIR	AP	LAT	PA	ROT
1.492E+07	1.966E-04	2.231E-04	4.361E-05	1.145E-04	1.062E-04
1.350E+07	1.245E-04	2.844E-04	4.962E-05	1.361E-04	1.299E-04
1.221E+07	1.070E-04	3.407E-04	5.451E-05	1.532E-04	1.507E-04
1.105E+07	1.263E-04	3.923E-04	5.834E-05	1.660E-04	1.687E-04
1.000E+07	1.694E-04	4.390E-04	6.118E-05	1.750E-04	1.841E-04
9.048E+06	2.272E-04	4.814E-04	6.310E-05	1.803E-04	1.970E-04
8.187E+06	2.931E-04	5.193E-04	6.419E-05	1.821E-04	2.074E-04
7.408E+06	3.628E-04	5.531E-04	6.449E-05	1.811E-04	2.158E-04
6.703E+06	4.330E-04	5.828E-04	6.410E-05	1.774E-04	2.221E-04
6.065E+06	5.052E-04	6.087E-04	6.307E-05	1.712E-04	2.265E-04
5.488E+06	5.846E-04	6.309E-04	6.148E-05	1.629E-04	2.292E-04
4.966E+06	6.726E-04	6.497E-04	5.941E-05	1.529E-04	2.303E-04
4.493E+06	7.487E-04	6.645E-04	5.697E-05	1.414E-04	2.300E-04
4.066E+06	7.878E-04	6.753E-04	5.430E-05	1.288E-04	2.282E-04
3.679E+06	7.880E-04	6.814E-04	5.152E-05	1.156E-04	2.250E-04
3.329E+06	7.643E-04	6.830E-04	4.876E-05	1.020E-04	2.206E-04
3.012E+06	7.278E-04	6.794E-04	4.615E-05	8.835E-05	2.150E-04
2.725E+06	6.861E-04	6.703E-04	4.380E-05	7.513E-05	2.083E-04
2.466E+06	6.436E-04	6.557E-04	4.186E-05	6.263E-05	2.005E-04
2.231E+06	6.032E-04	6.348E-04	4.045E-05	5.123E-05	1.917E-04
2.019E+06	5.667E-04	6.082E-04	3.962E-05	4.121E-05	1.822E-04
1.827E+06	5.347E-04	5.785E-04	3.916E-05	3.259E-05	1.724E-04
1.653E+06	5.075E-04	5.491E-04	3.875E-05	2.531E-05	1.630E-04
1.496E+06	4.844E-04	5.235E-04	3.812E-05	1.936E-05	1.548E-04
1.353E+06	4.650E-04	5.048E-04	3.696E-05	1.464E-05	1.483E-04
1.225E+06	4.486E-04	4.943E-04	3.510E-05	1.112E-05	1.439E-04
1.108E+06	4.336E-04	4.853E-04	3.295E-05	8.759E-06	1.400E-04
1.003E+06	4.170E-04	4.684E-04	3.100E-05	7.497E-06	1.345E-04
9.072E+05	3.975E-04	4.387E-04	2.963E-05	7.183E-06	1.263E-04
8.209E+05	3.744E-04	4.064E-04	2.866E-05	7.255E-06	1.178E-04
7.427E+05	3.510E-04	3.831E-04	2.781E-05	7.163E-06	1.115E-04
6.721E+05	3.346E-04	3.694E-04	2.702E-05	6.830E-06	1.076E-04
6.081E+05	3.294E-04	3.641E-04	2.626E-05	6.304E-06	1.057E-04
5.502E+05	3.360E-04	3.653E-04	2.554E-05	5.626E-06	1.055E-04
4.979E+05	3.494E-04	3.711E-04	2.484E-05	4.841E-06	1.064E-04
4.505E+05	3.641E-04	3.803E-04	2.415E-05	3.994E-06	1.082E-04
4.076E+05	3.770E-04	3.909E-04	2.345E-05	3.124E-06	1.102E-04
3.683E+05	3.863E-04	4.011E-04	2.275E-05	2.286E-06	1.122E-04
3.337E+05	3.913E-04	4.095E-04	2.202E-05	1.523E-06	1.138E-04
3.020E+05	3.922E-04	4.145E-04	2.125E-05	8.684E-07	1.145E-04
2.732E+05	3.892E-04	4.145E-04	2.044E-05	6.222E-07	1.139E-04
2.472E+05	3.828E-04	4.100E-04	1.959E-05	0.000E+00	1.123E-04
2.237E+05	3.734E-04	4.018E-04	1.870E-05	0.000E+00	1.098E-04
2.024E+05	3.618E-04	3.906E-04	1.779E-05	0.000E+00	1.065E-04
1.832E+05	3.481E-04	3.766E-04	1.684E-05	0.000E+00	1.026E-04
1.647E+05	3.335E-04	3.612E-04	1.589E-05	0.000E+00	9.825E-05
1.500E+05	3.187E-04	3.457E-04	1.498E-05	0.000E+00	9.391E-05
1.357E+05	3.039E-04	3.295E-04	1.404E-05	0.000E+00	8.938E-05
1.228E+05	2.926E-04	3.139E-04	1.312E-05	0.000E+00	8.504E-05
1.111E+05	2.850E-04	2.910E-04	1.160E-05	0.000E+00	7.856E-05
8.652E+04	2.853E-04	2.685E-04	9.513E-06	0.000E+00	7.188E-05
6.738E+04	2.819E-04	2.555E-04	7.623E-06	0.000E+00	6.770E-05
5.248E+04	2.558E-04	2.458E-04	5.941E-06	0.000E+00	6.442E-05
4.087E+04	2.232E-04	2.327E-04	4.471E-06	0.000E+00	6.040E-05
3.183E+04	2.126E-04	2.098E-04	3.220E-06	0.000E+00	5.406E-05
2.479E+04	1.806E-04	1.729E-04	2.189E-06	0.000E+00	4.432E-05
1.931E+04	1.194E-04	1.268E-04	1.368E-06	0.000E+00	3.239E-05
1.503E+04	3.818E-05	7.804E-05	7.390E-07	0.000E+00	1.988E-05
1.171E+04	0.000E+00	3.351E-05	2.883E-07	0.000E+00	8.521E-06
9.119E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
7.102E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
5.531E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
4.307E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3.355E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2.613E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2.035E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.585E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.234E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
9.611E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
7.485E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
5.829E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
4.540E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3.536E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2.754E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2.144E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.670E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.301E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.013E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
7.889E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
6.144E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
4.785E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3.727E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2.902E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2.260E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.760E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.371E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.068E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
8.315E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
6.476E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
5.043E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3.928E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3.059E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2.382E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.855E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.445E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.125E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
8.764E-01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
6.826E-01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
5.316E-01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
4.140E-01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.000E-04					

# RESPONSE FUNCTION OF CR39

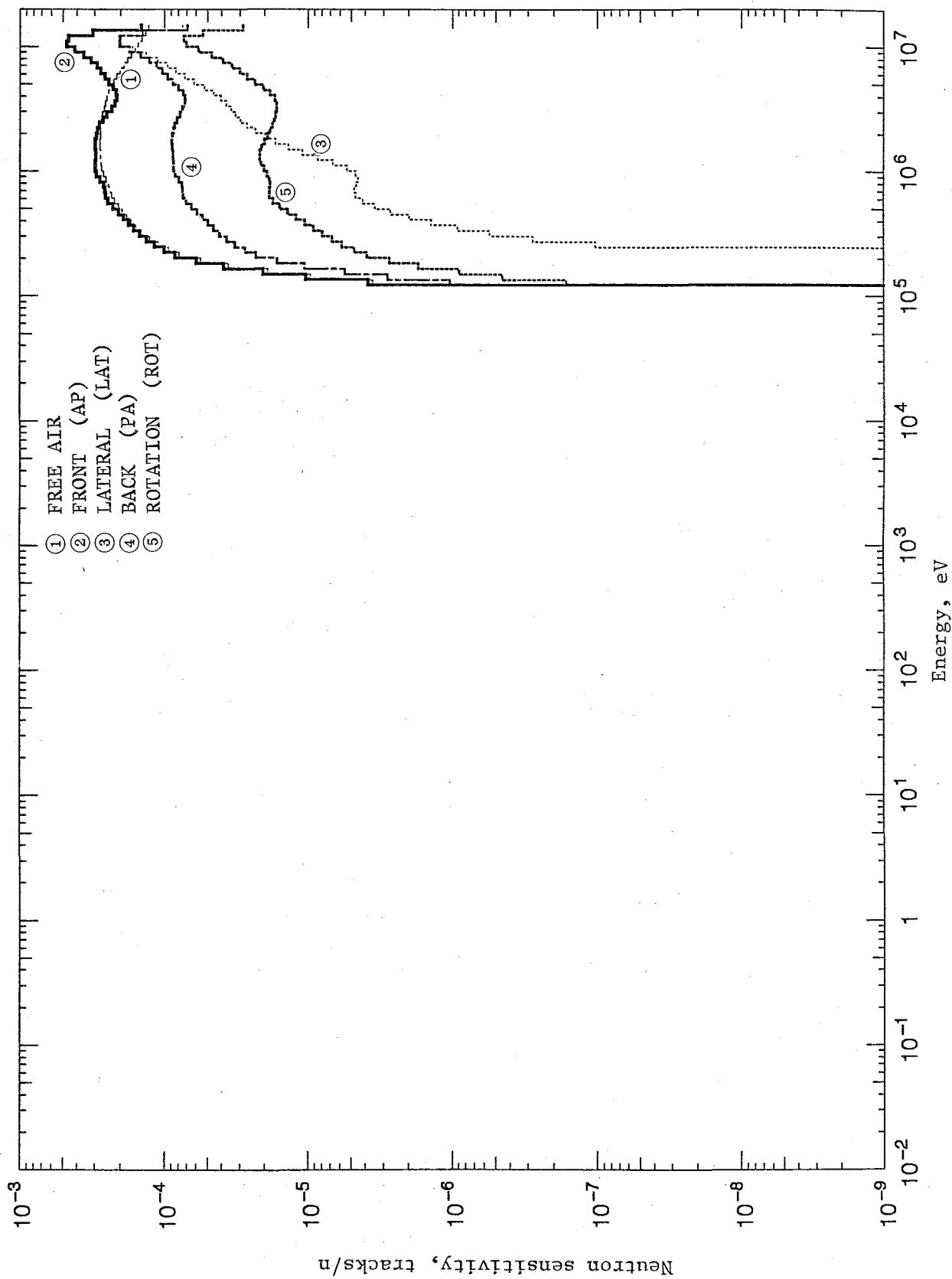


Fig. 16 Neutron energy response function of CR-39 dosimeter above the human phantom for neutron dosimetry

Table 16 Neutron energy response functions of CR-39 dosimeter above the human phantom for various incident conditions (tracks/n)

UPPER ENERGY (eV)	FREE-AIR	AP	LA	PA	ROT
1.492E+07	1.281E-04	1.454E-04	2.842E-05	7.459E-05	6.920E-05
1.350E+07	1.355E-04	3.095E-04	5.400E-05	1.481E-04	1.414E-04
1.221E+07	1.434E-04	4.566E-04	7.305E-05	2.053E-04	2.020E-04
1.105E+07	1.517E-04	4.712E-04	7.007E-05	1.994E-04	2.027E-04
1.000E+07	1.600E-04	4.147E-04	5.779E-05	1.653E-04	1.739E-04
9.048E+06	1.690E-04	3.581E-04	4.694E-05	1.341E-04	1.465E-04
8.187E+06	1.793E-04	3.177E-04	3.927E-05	1.114E-04	1.269E-04
7.408E+06	1.906E-04	2.906E-04	3.388E-05	9.515E-05	1.134E-04
6.703E+06	2.018E-04	2.716E-04	2.987E-05	8.266E-05	1.035E-04
6.065E+06	2.125E-04	2.560E-04	2.653E-05	7.202E-05	9.528E-05
5.488E+06	2.226E-04	2.402E-04	2.341E-05	6.203E-05	8.727E-05
4.966E+06	2.321E-04	2.242E-04	2.050E-05	5.275E-05	7.949E-05
4.493E+06	2.403E-04	2.133E-04	1.828E-05	4.538E-05	7.381E-05
4.066E+06	2.467E-04	2.115E-04	1.700E-05	4.034E-05	7.145E-05
3.679E+06	2.518E-04	2.177E-04	1.646E-05	3.693E-05	7.190E-05
3.329E+06	2.572E-04	2.298E-04	1.641E-05	3.431E-05	7.424E-05
3.012E+06	2.638E-04	2.463E-04	1.673E-05	3.203E-05	7.793E-05
2.725E+06	2.695E-04	2.633E-04	1.720E-05	2.951E-05	8.181E-05
2.466E+06	2.720E-04	2.771E-04	1.769E-05	2.647E-05	8.474E-05
2.231E+06	2.721E-04	2.864E-04	1.825E-05	2.311E-05	8.649E-05
2.019E+06	2.730E-04	2.930E-04	1.909E-05	1.985E-05	8.775E-05
1.827E+06	2.746E-04	2.971E-04	2.011E-05	1.674E-05	8.851E-05
1.653E+06	2.751E-04	2.977E-04	2.101E-05	1.372E-05	8.835E-05
1.496E+06	2.739E-04	2.960E-04	2.155E-05	1.095E-05	8.752E-05
1.353E+06	2.720E-04	2.953E-04	2.162E-05	8.564E-06	8.677E-05
1.225E+06	2.699E-04	2.974E-04	2.112E-05	6.693E-06	8.659E-05
1.108E+06	2.665E-04	2.983E-04	2.025E-05	5.383E-06	8.604E-05
1.003E+06	2.594E-04	2.914E-04	1.928E-05	4.664E-06	8.365E-05
9.072E+05	2.490E-04	2.748E-04	1.856E-05	4.500E-06	7.911E-05
8.209E+05	2.396E-04	2.601E-04	1.834E-05	4.643E-06	7.536E-05
7.427E+05	2.343E-04	2.557E-04	1.856E-05	4.781E-06	7.440E-05
6.721E+05	2.290E-04	2.528E-04	1.849E-05	4.674E-06	7.362E-05
6.081E+05	2.187E-04	2.417E-04	1.743E-05	4.185E-06	7.020E-05
5.502E+05	2.057E-04	2.236E-04	1.564E-05	3.444E-06	6.459E-05
4.979E+05	1.936E-04	2.056E-04	1.376E-05	2.682E-06	5.896E-05
4.505E+05	1.818E-04	1.899E-04	1.206E-05	1.994E-06	5.400E-05
4.076E+05	1.696E-04	1.759E-04	1.055E-05	1.405E-06	4.959E-05
3.683E+05	1.562E-04	1.622E-04	9.199E-06	9.242E-07	4.538E-05
3.337E+05	1.412E-04	1.478E-04	7.946E-06	5.494E-07	4.105E-05
3.020E+05	1.258E-04	1.329E-04	6.816E-06	2.785E-07	3.671E-05
2.732E+05	1.101E-04	1.172E-04	5.782E-06	1.025E-07	3.223E-05
2.472E+05	9.346E-05	1.001E-04	4.783E-06	0.000E+00	2.742E-05
2.237E+05	7.809E-05	8.404E-05	3.911E-06	0.000E+00	2.296E-05
2.024E+05	5.541E-05	5.981E-05	2.725E-06	0.000E+00	1.632E-05
1.832E+05	3.565E-05	3.857E-05	1.725E-06	0.000E+00	1.050E-05
1.647E+05	1.880E-05	2.036E-05	8.957E-07	0.000E+00	5.538E-06
1.500E+05	9.499E-06	1.030E-05	4.465E-07	0.000E+00	2.799E-06
1.357E+05	3.529E-06	3.826E-06	1.630E-07	0.000E+00	1.038E-06
1.228E+05	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.111E+05	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
8.652E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
6.738E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
5.248E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
4.087E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3.183E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2.479E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.931E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.503E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.171E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
9.119E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
7.102E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
5.531E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
4.307E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3.355E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2.613E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2.035E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.585E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.234E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
9.611E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
7.485E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
5.829E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
4.540E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3.536E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2.754E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2.144E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.670E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.301E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.013E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
7.889E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
6.144E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
4.785E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3.727E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2.902E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2.260E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.760E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.371E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.068E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
8.315E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
6.476E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
5.043E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3.928E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3.059E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2.382E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.855E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.445E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.125E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
8.764E-01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
6.826E-01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
5.316E-01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
4.140E-01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.000E-04					

では1ケタ以上小さくなる。

- (d) Fig.15からわかるように, TS-16の場合, 側方入射のエネルギー応答関数は, 前方入射の場合に比べ1ケタ以上小さいが, 後方入射は数倍小さい程度である。
- (e) Fig.16とFig.15を比較すればわかるように, CR-39はTS-16とほぼ同様の結果を示す。

## (2) 実験による検証

人体に装着した場合のアルベド型TLD中性子線量計, TS-16, およびCR-39の計算で評価したエネルギー応答関数を実験的に検証するため以下に示す3種類の実験値を使用した。

- (a) 文献25より引用した電子総合技術研究所(電総研)の標準単色中性子場においてパラフィンファントムに装着したアルベド型TLD中性子線量計の応答値。
- (b) 東大核研中性子標準場 ( $^{252}\text{Cf}$ 核分裂中性子場, 鉄減速場, 黒鉛減速場)で電中研の中性子用人体ファントムに装着したアルベド型TLD中性子線量計およびTS-16の応答値。
- (c) 動燃東海事業所の校正施設で  $^{252}\text{Cf}$ ,  $^{238}\text{Pu}-\text{Be}$ で照射した, 水ファントムに装着したアルベド型TLD中性子線量計, TS-16, およびCR-39の応答値。

以下, 計算値と実験値の比較検討を行う。

- (a) Table 17 および Fig. 17 に第3.3.2節で示したTLDのエネルギー応答関数の計算値と電総研の単色中性子場を用いた実験値との比較を示す。これらの比較について検討を行う。但し, TLD素子のIDについては,  $\gamma$ 線補償用  $^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  素子, 前方Sn後方Cdフィルタ付  $^6\text{Li}_2^{10}\text{B}_4\text{O}_7$  素子, 前方Cd後方Cdフィルタ付  $^6\text{Li}_2^{10}\text{B}_4\text{O}_7$  素子, 前方Cd後方Snフィルタ付  $^6\text{Li}_2^{10}\text{B}_4\text{O}_7$  素子をそれぞれ素子1, 2, 3, および4と付番する。

計算値と実験値の比較から次のことがわかる。

- (i)  $\gamma$ 線補償を行った素子2 (Sn-Cd)の実験値と $\gamma$ 線補償を行った素子(Cd-Cd)の実験値を比較すると,  $\gamma$ 線補償を行った素子2の値の方が7ケースのうち5ケースについて小さめの値を示す。 $\gamma$ 線補償が正しく行われていれば, 10



keV以上の中性子に対しSnとCdの核反応断面積は大きくかわらないため、両者はほぼ等しい値を示すはずである。しかし、有意の差が出る原因は、 $\gamma$ 線補償すなわち素子1の値にある。すなわち、素子1および3は前後にCdフィルターが付いているため、前後のフィルターに熱中性子が吸収されて発生するCd( $n, \gamma$ )の $\gamma$ 線により照射される。したがって素子は正しく $\gamma$ 線補償される。しかし素子2は前Sn、後Cdフィルターであるため、素子2から素子1をさし引くと前方から入射する熱中性子で生ずるCd( $n, \gamma$ )反応による $\gamma$ 線の効果を余分にさしひいているためである。

- (ii)  $\gamma$ 線補償を行った素子3(Cd-Cd)の計算値と実験値の比(C/E)は0.50~0.81と計算値の方が低めの値である。この原因は使用したファントムのちがいであると考えられる。すなわち、第3.3.2節に示すように計算に使用した人体モデルは肺および骨モデルが考慮されているが、照射実験ではパラフィンファントムが用いられているため、アルベド効果が大きい。したがって実験値の方が少し大きめの値を示す。
- (iii)  $\gamma$ 線補償を行った素子2(Sn-Cd)の計算値と実験値との比(C/E)は0.74~1.31の値を示し、約±30%の精度で一致する。実験値はパラフィンファントムを使用しているため、計算で用いた人体モデルよりアルベド効果が大きいため計算値より大きめの値を示すが、 $\gamma$ 線補償を行うことにより $\gamma$ 線の寄与分のさし引きを過剰に行うことになる。したがって素子3に比べればC/Eは多少高めの値を示し、C/Eは1に近づいているが、これは2つの差引きの正負の過剰分が相互に補い合った結果にすぎない。
- (iv)  $\gamma$ 線補償を行った素子4(Cd-Sn)の計算値と実験値との比(C/E)は1.22~1.99である。実験にはパラフィンファントムを用いているため、 $\gamma$ 線補償を行わなければ実験値は計算値より大きいはずであるため、素子2に比べ $\gamma$ 線のさしひきを多めに行っているはずである。このことは、MORSE-CGの計算結果によれば10 keV~5 MeVの中性子で人体モデル上のアルベド型TLD中性子線量計を照射したとき、後方からバッヂケースに入射する熱中性子は前方から入射する熱中性子の数10倍~100倍多いため、 $\gamma$ 線補償用の素子1(Cd-Cd)は、前方に比べはるかに多いCd( $n, \gamma$ )反応による $\gamma$ 線を後方からうけていることになる。したがって素子2(Sn-Cd)に比べ、素子4(Cd-Sn)の方

# RESPONSE FUNCTION OF PNC-ALBODO-TLD

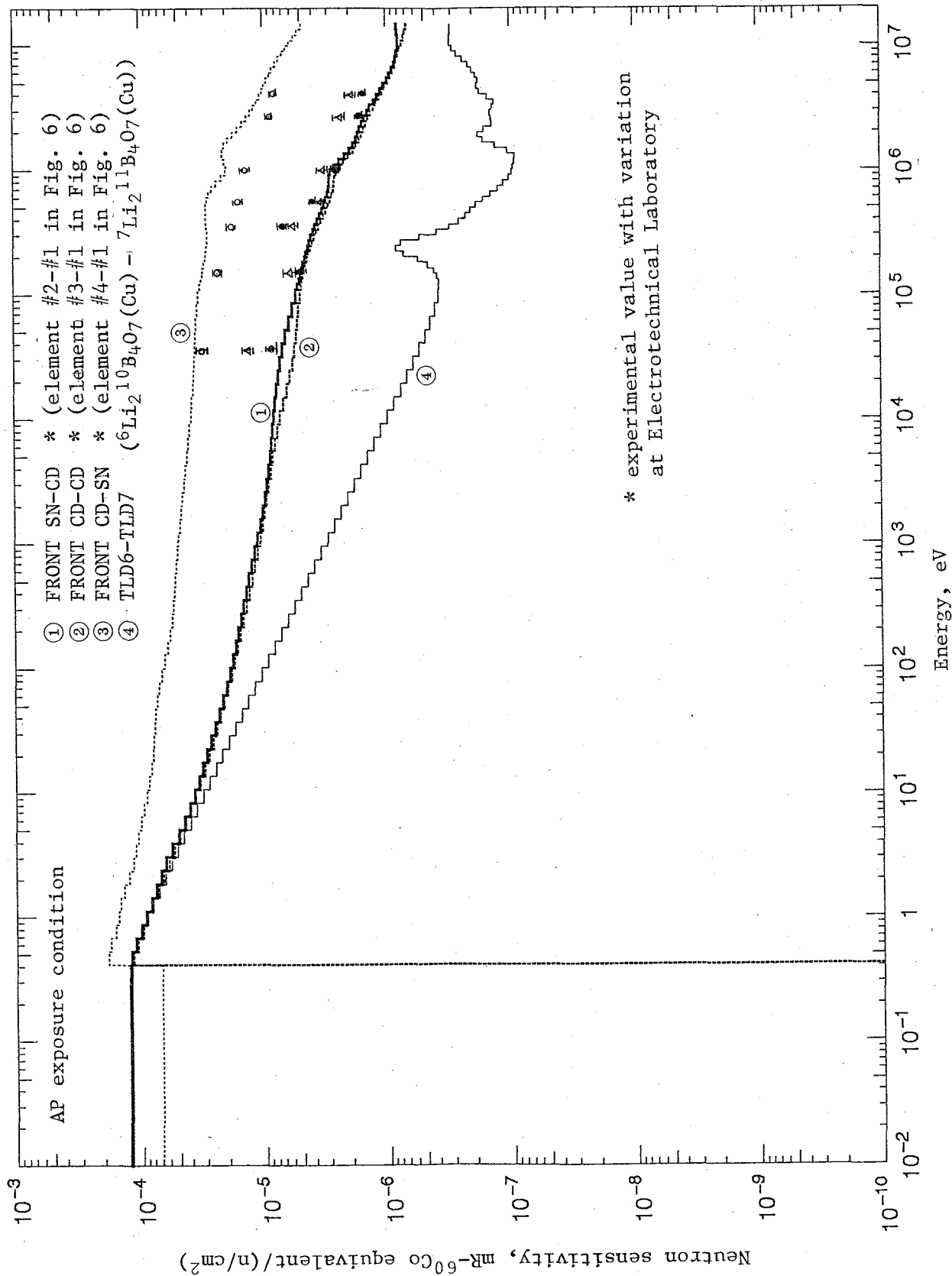


Fig. 17 Comparisons of calculated TLD response functions and experimental data at the Electrotechnical Laboratory

Table 17 Comparisons of calculated TLD responses and experimental data at monoenergetic neutron standard fields in the Electrotechnical Laboratory

Exposure condition	TLD element	#2 - #1 <sup>*4</sup>	#3 - #1	#4 - #1
	<sup>*6</sup>	(Sn - Cd) <sup>*5</sup>	(Cd - Cd)	(Cd - Sn)
4.0 MeV (on phantom)	C <sup>*1</sup>	1.18 - 6 <sup>*7</sup>	1.13 - 6	1.07 - 5
	E <sup>*2</sup>	1.60 - 6 (11.0%) <sup>*8</sup>	1.98 - 6 (4.0%)	7.94 - 6 (2.9%)
	C/E <sup>*3</sup>	0.74	0.57	1.35
2.5 MeV (on phantom)	C	1.48 - 6	1.38 - 6	1.35 - 5
	E	1.58 - 6 (6.3%)	2.19 - 6 (9.5%)	8.85 - 6 (6.5%)
	C/E	0.94	0.63	1.53
1.0 MeV (on phantom)	C	2.83 - 6	2.54 - 6	2.18 - 5
	E	2.16 - 6 (12.9%)	3.30 - 6 (10.3%)	1.33 - 5 (7.7%)
	C/E	1.31	0.77	1.64
565 keV (on phantom)	C	3.09 - 6	2.86 - 6	2.85 - 5
	E	3.58 - 6 (12.9%)	3.53 - 6 (5.5%)	1.43 - 5 (6.7%)
	C/E	0.86	0.81	1.99
365 keV (on phantom)	C	3.79 - 6	3.57 - 6	2.88 - 5
	E	6.68 - 6 (5.7%)	5.93 - 6 (17.3%)	1.76 - 5 (14.2%)
	C/E	0.57	0.60	1.64
144 keV (on phantom)	C	5.02 - 6	4.78 - 6	3.14 - 5
	E	5.15 - 6 (14.2%)	6.14 - 6 (9.4%)	2.10 - 5 (5.4%)
	C/E	0.97	0.78	1.50
35 keV (on phantom)	C	7.09 - 6	5.66 - 6	3.62 - 5
	E	9.66 - 6 (8.4%)	1.14 - 5 (8.0%)	2.96 - 5 (10.0%)
	C/E	0.73	0.50	1.22

(unit: mR-<sup>60</sup>Co eq/n/(cm<sup>2</sup>·sec<sup>-1</sup>))

- \*1 Calculated value      \*2 Experimental value
- \*3 Ratio of C/E          \*4 γ-ray compensation      \*5 Filter
- \*6 See Fig. 6            \*7 Read as 1.18 × 10<sup>-6</sup>      \*8 Experimental deviation

が $\gamma$ 線さし引きの過剰分ははるかに多い。したがって $\gamma$ 線補償をきわめて多く行いすぎているため、本来は計算値より大きいはずである実験値は逆に小さめになってしまう。なお、後方と前方から入射する熱中性子の比率は数10倍から100倍近くちがうが、この比率ほど $\gamma$ 線補償分が異なる理由は、CdおよびSnフィルターの部分を除けばTLDがCdの厚さ0.5 mmの箱に入っているため、その部分からのCd ( $n, r$ )の $\gamma$ 線の影響もあるためであると考えられる。

したがって、 $\gamma$ 線補償の問題、および実験と計算に使用したファントムの材質のちがいがあるため、この実験データを用いて計算値を高精度で検証することはできない。しかし、これらの違いによる影響はあまり大きいものではないため、計算で求めたエネルギー応答関数を35 keV～5 MeVの領域で単色エネルギーで定性的に検証することができ、この領域における計算で求めたエネルギー応答関数の絶対値と形は適切であると判断できる。

- (b) Table 18 に核研標準場を用いて評価した中性子用人体ファントム装着時のTLDとTS-16のエネルギー応答関数の積分的検証を行った結果を示す。この表に示した結果は、前方平行ビーム照射(AP)条件についてである。

これらの結果から以下のことがわかる。

- (i) TLDの計算値と実験値との比(C/E)は、AP条件のもとでそれぞれ $\gamma$ 線補償を行った素子2(Sn-Cd)は0.77～1.20、素子3(Cd-Cd)は0.35～1.88、素子4は1.83～2.00であり、電総研での実験と同様素子4のC/Eが比較的高いが、これは $\gamma$ 線補償で説明できる。照射線量が比較的小なかつたためバックグラウンドとのS/N比があまり高くないこと、および実験条件は、床および壁により生ずる散乱線に高い感度をもつため計算条件とは異っているために生ずる誤差を考慮に入れれば、AP条件のもとでのTLDのエネルギー応答関数は積分的に十分検証されていると考えられる。
- (ii) TS-16の計算値と実験値との比(C/E)は、AP条件のもとで0.94～0.96であり計算値と実験値はよく一致している。TS-16は10 keV以上のエネルギーをもつ中性子のみには感度をもたないため床および壁からの散乱線をほとんどうけない。そのため前方からの平行ビーム照射条件にきわめて近い。したがってこの条件のもとでTS-16のエネルギー応答関数は積分的に十分検証されていると考えられる。

Table 18 Comparisons of calculated and experimental response data for TLD and TS-16 respectively at the INS calibration field

Calibration Field	Dosimeter	TLD element (mR-60Coeq/(n·cm <sup>-2</sup> ·sec <sup>-1</sup> ))			TS-16 (tracks/cm <sup>2</sup> ·sec)
		(Sn - Cd) #2 - #1 <sup>*2</sup>	(Cd - Cd) #3 - #1	(Cd - Sn) #4 - #1	
BARE	Calculated	2.88 - 4	9.45 - 5	6.81 - 4	1.29 - 2
	Experimental	2.78 - 4 (58%)*1	5.04 - 5 (58%)	3.70 - 4 (58%)	1.34 - 2 (5%)
	C/E	1.04	1.88	1.84	0.96
IRON	Calculated	2.94 - 4	1.05 - 4	7.36 - 4	9.61 - 3
	Experimental	3.81 - 4 (4%)	3.04 - 4 (9%)	3.68 - 4 (5%)	1.03 - 2 (12%)
	C/E	0.77	0.35	2.00	0.94
CARBON	Calculated	3.57 - 4	1.32 - 4	8.12 - 4	9.33 - 3
	Experimental	2.97 - 4 (15%)	2.61 - 4 (18%)	4.43 - 4 (18%)	9.71 - 3 (5%)
	C/E	1.20	0.50	1.83	0.96

\*1 relative error

\*2  $\gamma$ -compensation

Table 19 Comparisons of calculated and experimental values of TLD, TS-16, and CR-39 at PNC calibration facility

Exp. No.	Dosimeter	TLD ( $\text{mR} - {}^{60}\text{Co eq}/(\text{n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1})$ )				CR-39 (Tracks/n)	TS-16 (Tracks/n)
		(Sn - Cd) #2 - #1 *2	(Cd - Cd) #3 - #1	(Cd - Sn) #4 - #1			
7	Calculated	4.26 - 3	2.76 - 3	1.90 - 2	1.86 - 1	4.04 - 1	
	Experimental	3.90 - 3 (22%)*1	4.69 - 3 (13%)	1.19 - 2 (8%)	2.34 - 1 (4%)	4.40 - 1 (6%)	
	C/E	1.09	0.59	1.60	0.79	0.92	
8	Calculated	1.03 - 3	6.85 - 4	4.06 - 3	4.72 - 2	1.06 - 1	
	Experimental	1.14 - 3 (26%)*1	1.13 - 3 (25%)	2.88 - 3 (14%)	6.62 - 2 (7%)	1.20 - 1 (11%)	
	C/E	0.90	0.61	1.41	0.71	0.88	
9	Calculated	6.78 - 3	4.70 - 3	1.04 - 2	1.05 - 1	2.69 - 1	
	Experimental	5.66 - 3 (24%)*1	5.56 - 3 (24%)	1.45 - 2 (19%)	1.61 - 1 (6%)	3.73 - 1 (8%)	
	C/E	1.20	0.85	0.72	0.65	0.72	

\*1 relative error

\*2  $\gamma$ -compensation

# NO-7 NEUTRON SPECTRUM

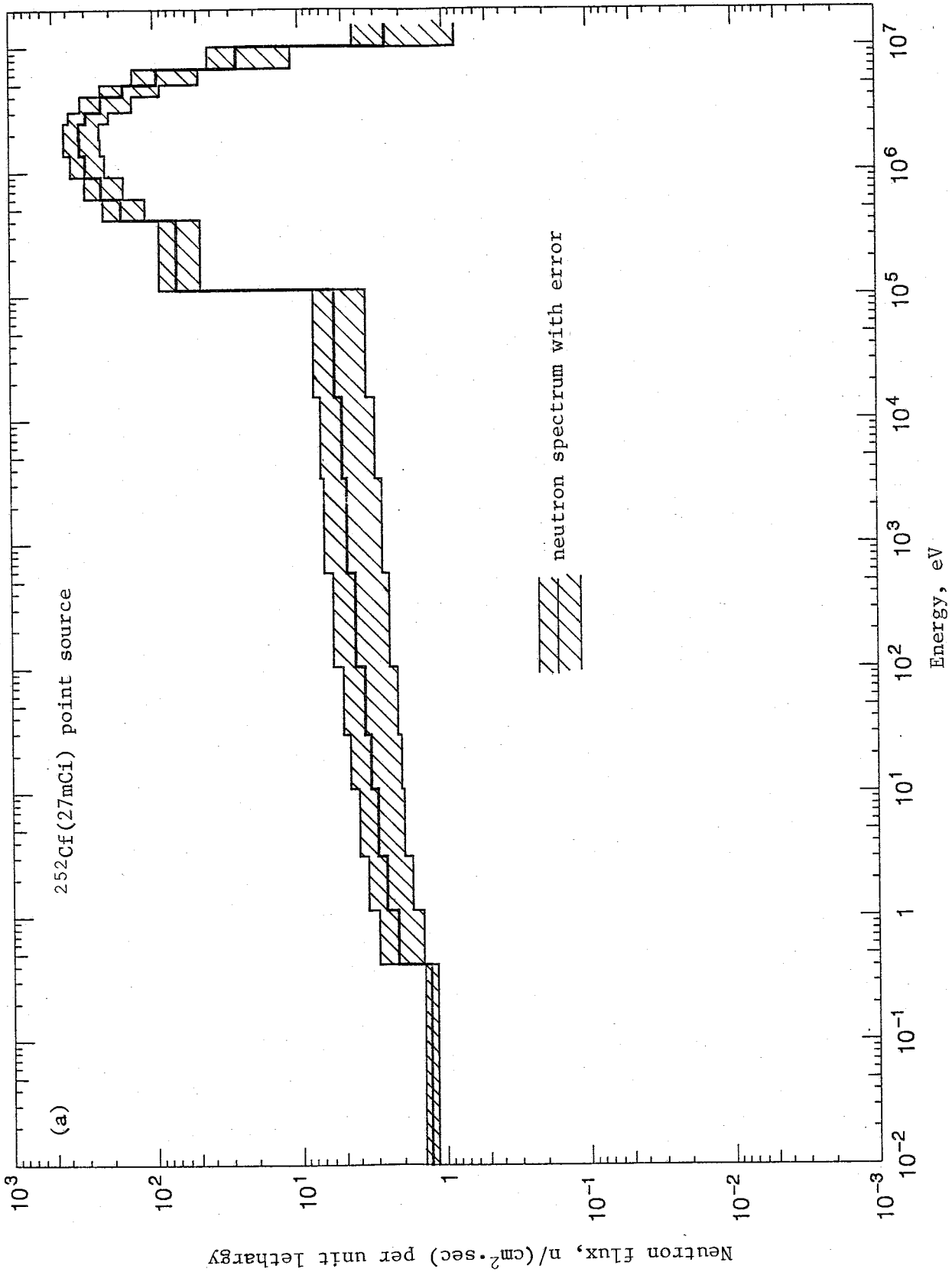


Fig. 18 Unfolded neutron spectrum at the PNC calibration facility

# NO-8 NEUTRON SPECTRUM

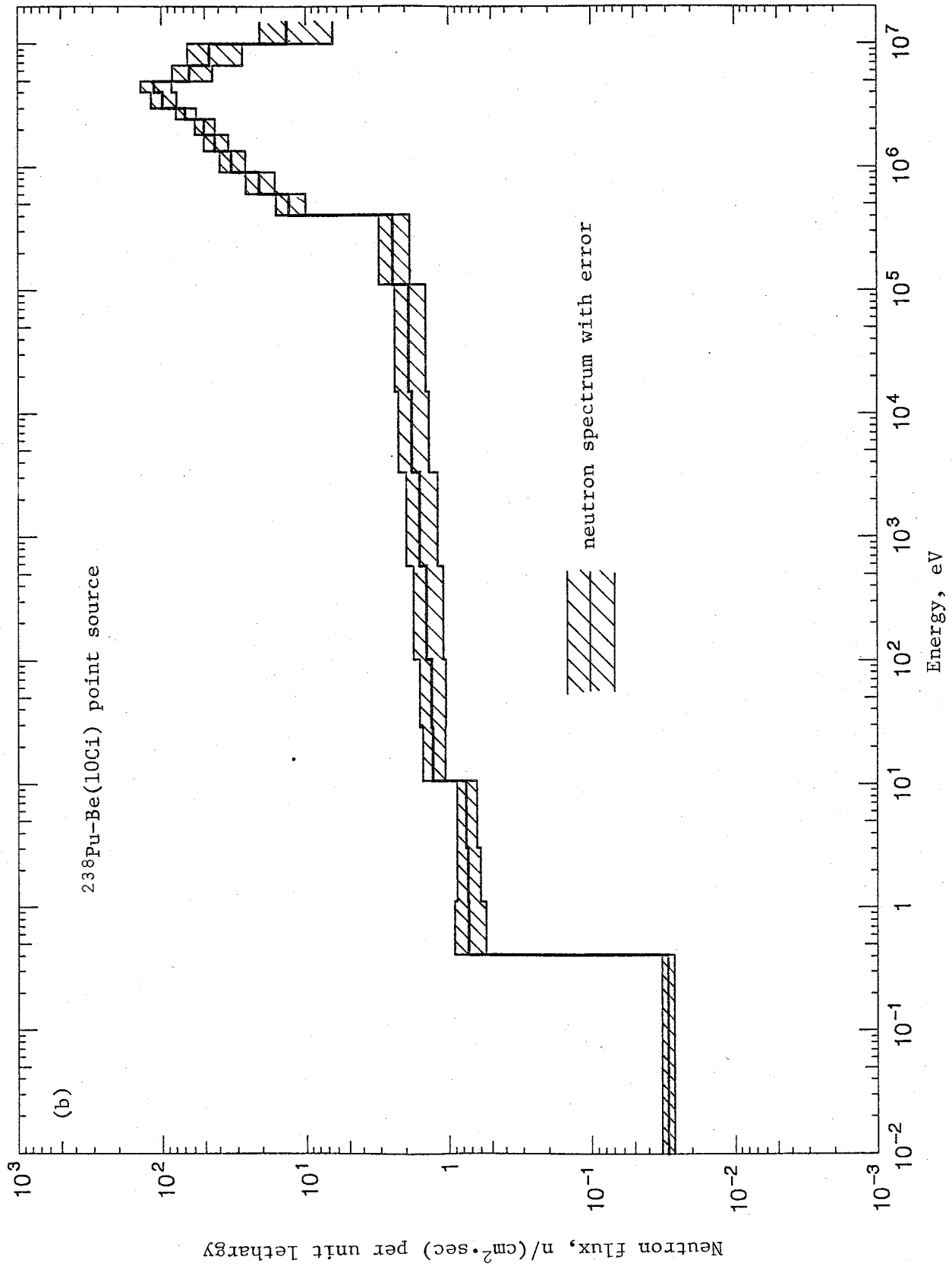


Fig. 18 (continued)



# NO-9 NEUTRON SPECTRUM

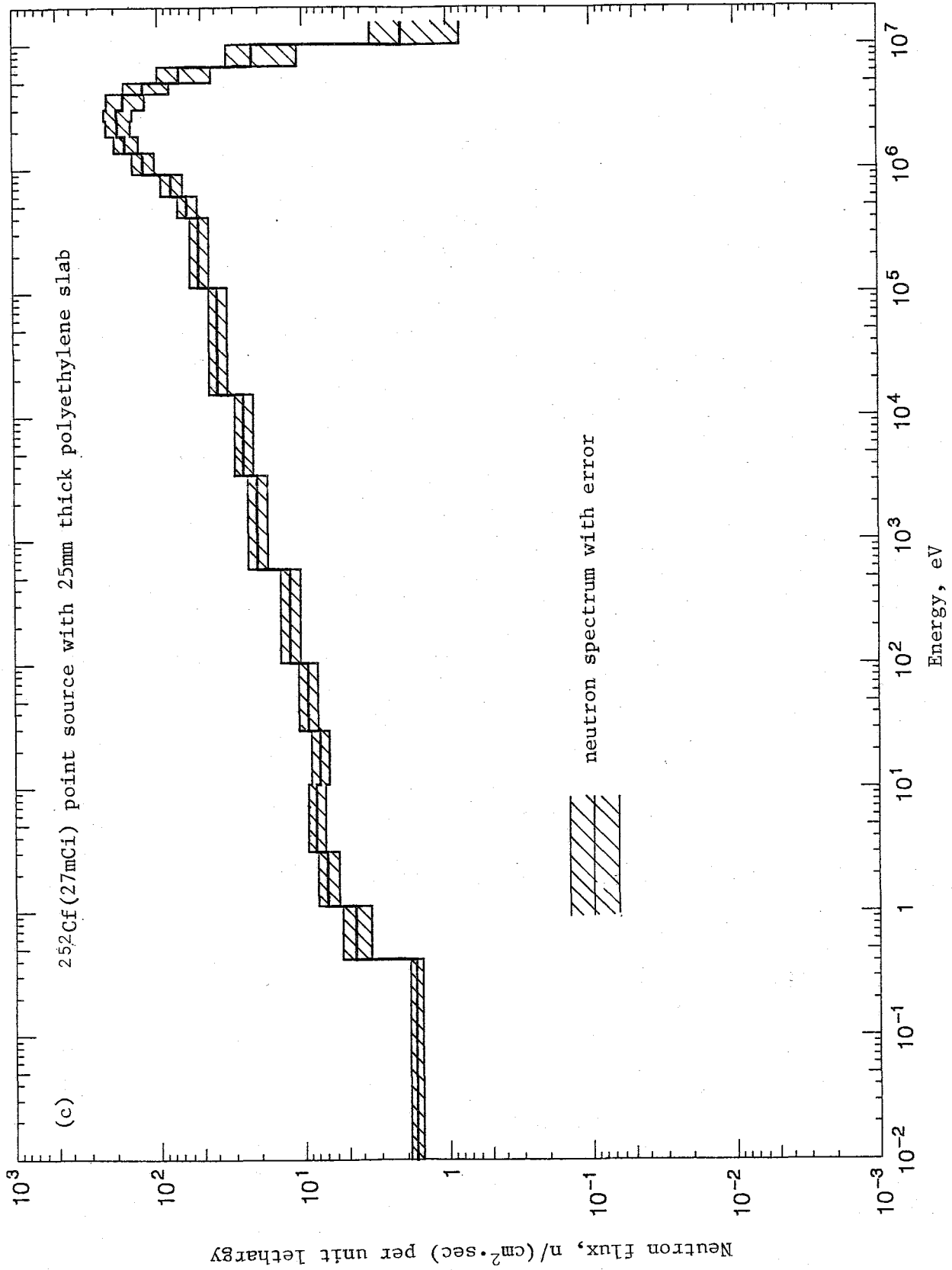


Fig. 18 (continued)

(c) 動燃東海事業所の校正施設において、 $^{252}\text{Cf}$  (27mCi)、 $^{238}\text{Pu}-\text{Be}$  (10 Ci)、および  $^{252}\text{Cf}$  中性子源 (27mCi) を 25 mm ポリエチレン板で減速したものの3種類の中性子場で水ファントムにアルベド型 TLD 中性子線量計、TS-16、および CR-39 を装着して照射を行った。そのときの各測定器の計算値と実験値を Table 19 に示す。なお、この3種類の中性子場の中性子エネルギースペクトルは、球形減速材中性子スペクトロメータを用いて測定評価した。(この3つの場の中性子エネルギースペクトルを Fig.18 に示す。なお、各検出器の値等については付録1に示す。なお、この3つの照射実験の ID は、2.2 のプルトニウム転換技術開発施設における測定 (Na1~6) にひきつづき Na7~9 と付番する。)

Table 19 から次のことがわかる。

- (i) TLD の計算値と実験値との比 (C/E) は、AP 条件のもとでそれぞれ  $\gamma$  線補償を行った素子 2 (Sn-Cd) は 0.90~1.20、素子 3 (Cd-Cd) は 0.59~0.85、素子 4 (Cd-Sn) は 0.72~1.60 である。素子 2 は実験値のばらつき (約 25%) を考慮すれば C/E はほぼ 1.0 であるとみなすことができる。素子 3 の C/E は 1.0 より 15%~40% 低めの値を示し、素子 4 は -30%~60% の値を示す。これらは、計算条件が平行ビーム照射であるのに対し、実験条件が点等方入射であること、計算では中性子用人体ファントムモデルで行ったが実験は水ファントムで行ったことの問題以外にも、使用した中性子場が標準化された場ではないため、計算値の精度保証が十分でないという問題点がある。
- (ii) CR-39 の C/E は 0.65~0.79、TS-16 の C/E は 0.72~0.92 の値を示す。C/E の値が 1.0 より小さいことについては、計算では肺を考慮した中性子用人体ファントムモデルを用いているのに対し、実験は水ファントムを用いているため、実験値の方がアルベド効果が大きく効いてくることが考えられる。

以上の考察の結果をまとめると、電総研および東大核研の中性子標準場を用いて照射した実験結果から、計算で求めたアルベド型 TLD 中性子線量計と TS-16 の応答関数は十分に検証されたと考えられる。なお、動燃東海事業所の校正施設を用いた実験は、場の中性子スペクトルの精度が十分に確認されていないこと、計算条件と実験条件が多少異なることを考慮すれば、C/E はほぼ 1.0 近傍にばらついており、計算値に大きな誤りがないことを検証していると考えられる。

### 3.3.3 個人モニターによる深部、表層部線量当量の評価

以下の3とおりの考察を行う。

- (a) CR-39又はTS-16の指示値から $H_{1cm}$ ,  $H_{SL}$ ,  $H_{SS}$ を評価する方法
  - (b) アルベド型TLD中性子線量計の各素子の値から $H_{1cm}$ ,  $H_{SL}$ ,  $H_{SS}$ を評価する方法
  - (c) アルベド型TLD中性子線量計, CR-39, TS-16の各指示値を組み合わせて $H_{1cm}$ ,  $H_{SL}$ ,  $H_{SS}$ を評価する方法
- (a)  $H_{1cm}$ ,  $H_{SL}$ ,  $H_{SS}$ はFig.5に示されているように、10 keV以上から値が立ち上がり、1 MeV以上では10 keV以下よりも数10倍大きい値を示す。一方、Fig.15および16からわかるようにTS-16およびCR-39はそれぞれ約10 keV以上のエネルギー応答関数をもっている。とくに核燃料取扱施設（プルトニウム燃料開発施設および、プルトニウム転換技術開発施設）では数10 keV以上の中性子が多いために、 $H_{1cm}$ ,  $H_{SL}$ ,  $H_{SS}$ に寄与するのはほとんどが数10 keV以上の中性子である。したがって速いエネルギーの中性子のみに感度をもつTS-16やCR-39は、核燃料取扱施設における $H_{1cm}$ ,  $H_{SL}$ ,  $H_{SS}$ に大きく寄与する中性子と同じエネルギー領域に感度をもつため、各場の換算係数を求めておけば、TS-16およびCR-39の指示値から $H_{1cm}$ ,  $H_{SL}$ ,  $H_{SS}$ を評価することは可能である。ただし数10 keV以下の中性子が支配的な場でCR-39やTS-16を用いて線量評価を行うのは適切ではない。
- (b) 上記したように核燃料取扱施設において $H_{1cm}$ ,  $H_{SL}$ ,  $H_{SS}$ に寄与するのはほとんどが10 keV以上の中性子であるが、アルベド型中性子線量計の各素子はFig.15に示すように低エネルギー側に比較的高い感度をもっているため、各素子の指示値と $H_{1cm}$ ,  $H_{SL}$ ,  $H_{SS}$ の値は強い相関関係をもたない。例えば、プルトニウム転換技術開発施設では $H_{1cm}$ ,  $H_{SL}$ ,  $H_{SS}$ が10 keV以上の線源からの直接線による中性子に支配され、散乱線成分はほとんど影響しないが、TLD各素子は散乱線成分に高い感度をもつため、散乱線成分が増加しても $H_{1cm}$ ,  $H_{SL}$ ,  $H_{SS}$ は変化しないが、TLD各素子の値は増大すると考えられる。したがって、散乱線成分と直接線成分の比が一定の場合、ほとんどが10 keV以下の成分しかない場で、アルベド型TLD中性子線量計を用いて $H_{1cm}$ ,  $H_{SL}$ ,  $H_{SS}$ を評価することは有効であるが、直接線成分と散乱線成分の割合が変化する可能性のある場で使用するの適切ではない。
- (c) アルベド型TLD中性子線量計は主に数10 keV以下に高い感度を持ち、CR-39, TS-16は数10 keV以上の中性子に高い感度をもつため、これらの個人モニターの

エネルギー応答関数を組み合わせて  $H_{1cm}$ ,  $H_{SL}$ ,  $H_{SS}$  の感度曲線（換算係数）を近似することは可能である（詳細については付録 2 を参照）。しかし、多くの素子を用いるための費用の増大と煩雑さの増加についても十分検討する必要がある。

#### 4. 結 語

本研究では、中性子被ばく管理が必要とされる核燃料取扱施設の中性子エネルギースペクトルを評価し、それに基づいた実効線量当量評価法の確立を目的として、プルトニウム転換技術開発施設内の代表点の中性子スペクトルを球形減速材付中性子スペクトロメータを用いて測定した。そしてこのスペクトルに基づいて通常使用されている個人モニターおよびレムカウンタを用いて実効線量当量にかわるものとして法令により評価が必要となる  $H_{1cm}$ ,  $H_{SL}$ ,  $H_{SS}$  を評価する検討を行って以下の成果を得た。

##### (1) プルトニウム転換技術開発施設の中性子スペクトル測定評価

- (a) 測定により、中性子スペクトルは酸素 ( $\alpha, n$ ) 反応に基づく 2 MeV 付近のピークをもち、散乱中性子によって形成される I/E 型に近いスペクトルが数 10 keV 以下に連なる形であることがわかった。
- (b) プルトニウム燃料開発施設と異なり、Pu の自発核分裂による数 100 keV 付近のピークは見られないことが確認された。この原因はグローブボックスのパネル厚と材質のちがいによる遮へい性能のちがいであることがわかった。
- (c) この施設における中性子被ばくの主要因は酸素 ( $\alpha, n$ ) 反応からの直接線による中性子であり、そして直性線が主成分となる 15 keV 以上の中性子が従来の線量当量率の 98% 以上に寄与していることがわかった。
- (d) レムカウンタのパルス計数率から求めた従来の線量当量率は、中性子スペクトルから求めた値より 20 ~ 40% 低めの値を示した。レムカウンタは数 100 keV 以上の中性子に対して真値より低めの値を示す傾向にあり、このことは場の平均エネルギーがすべて 800 keV ~ 1.2 MeV であることと一致した。

##### (2) 中性子スペクトルに基づく実効線量当量と $H_{1cm}$ , $H_{SL}$ , $H_{SS}$ の関係の評価

プルトニウム転換技術開発施設において、測定された中性子スペクトルから求められた実効線量当量は、法令により評価が必要となる  $H_{1cm}$  よりも 45% 程度低めの値を示すことが確認された。

##### (3) レムカウンタおよび人体に装着した個人モニターを用いた $H_{1cm}$ , $H_{SL}$ , $H_{SS}$ の評価

- (a) プルトニウム転換技術開発施設において、従来の線量当量 (ICRP 21) は  $H_{1cm}$ ,

$H_{SL}$ ,  $H_{SS}$  にほぼ等しいか少し高めの値を示すことが確認された。

- (b) 人体に装着したアルベド型 TLD 中性子線量計, TS-16 および CR-39 のエネルギー応答関数を 3 次元モンテカルロコード MORSE-CGM を用いた計算で評価し, その結果を実験で検証した。このようにしてこれらの中性子個人モニターの人体装着時のエネルギー応答関数を熱中性子から 15 MeV までのエネルギー領域にわたってはじめて求めることができた。このデータは現場の中性子スペクトルのデータと組み合わせるとさまざまな現場における個人モニターの指示値を評価できる有用なデータである。
- (c) 人体装着時の個人モニターのエネルギー応答関数を用いて, 個人モニターで  $H_{1cm}$ ,  $H_{SL}$ ,  $H_{SS}$  を評価することを検討した。そして TS-16 又は CR-39 を用いればプルトニウム転換技術開発施設の中性子の  $H_{1cm}$ ,  $H_{SL}$ ,  $H_{SS}$  を高い信頼度で評価できることがわかった。なお, 経済性および実用性の検討を除けば, TS-16, CR-39 およびアルベド TLD 中性子線量計を組み合わせることにより, よい精度で  $H_{1cm}$ ,  $H_{SL}$ ,  $H_{SS}$  を評価できることがわかった。

今後のテーマとして, 中性子線量評価に大きく寄与する 1 MeV 以上の中性子スペクトルを正しく値付けるため, NE-213 等の有機シンチレーションカウンターなどを用いて, 速中性子エネルギー成分を測定することが重要である。なお中性子検出用固体飛跡検出器の現場での使用上の問題点等についても十分検討する必要がある。

## 5. 謝 辞

本研究の遂行に際し、御協力をいただいた動力炉・核燃料開発事業団・東海事業所安全管理部：木下 睦部長，安全対策課：大和 愛司課長，宮部 賢次郎係長（線量計測係），百瀬 琢磨研究員（線量計測係），他関係各位に深く感謝致します。

## 6 参 考 文 献

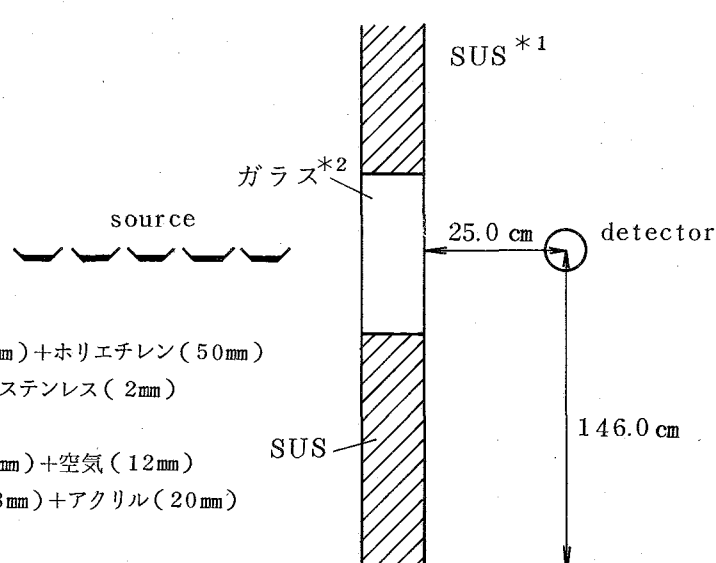
- 1) ICRP, Data for Protection against Ionization Radiation from External Sources, Publication 21, Pergamon Press, Oxford (1973)
- 2) T. Kosako et al., J. At. Energy Soc. Japan 139(1982)24 (in Japanese)
- 3) ICRP, Data for Use in Protection Against External Radiation, Publication 51, Annals of the ICRP Vol. 17 No. 2/3 (1987)
- 4) S. Iwai and Y. Lintz: PNC SJ1214 87-001 (1987) (in Japanese)
- 5) S. Iwai et al., Nucl. Instr. and Meth., 159(1987)A254
- 6) W. E. Ford III et al.: ORNL/TM-5249 (1976)
- 7) R. Yamamoto et al.: PNC N841-79-4 (1984) (in Japanese)
- 8) T. Taniguchi et al.: NEUT Research Report 83-10 (1983)
- 9) R. G. Soltes: WANL-TMI-1967 (1969)
- 10) H. Yamamoto: private communication (1988)
- 11) W. A. Rhoadas et al.: ORNL-TM-4280 (1973)
- 12) A. Yamato et al.: PNC SN8410 86-08 (1986)
- 13) Y. Uwamino et al.: Nucl. Instr. and Meth. A239(1985)299
- 14) Statement from the 1978 Stockholm Meeting of the Internal Commission on Radiological Protection, in Annals of the ICRP. Vol. 2 No. 1 (1978)
- 15) ICRU, Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources, Report 39, Internal Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, Maryland
- 16) H. Ishiguro et al.: Hoken Butsuri 27(1982)17
- 17) Y. Oka et al., Measurement of Fast Neutron Streaming with Plastic Track Recorders Recoil Protons, in Proc. of the Tropical Conference on Theory and Practices in Radiation Protection and Shielding April 22-24 (1987) Knoxville, Tennessee
- 18) 技術案内資料, エッチピット法による速中性子測定用ニュートラックバッジサービス長瀬ランダウア株式会社 (1987)
- 19) S. Tanaka et al., Nucl. Instr. Meth. 140(1977)395
- 20) H. Hashikura et al., Journal of the Faculty of Engineering, the University of Tokyo (B) Vol. XXXIX, No. 1 (1987)
- 21) S. Tanaka: private communication



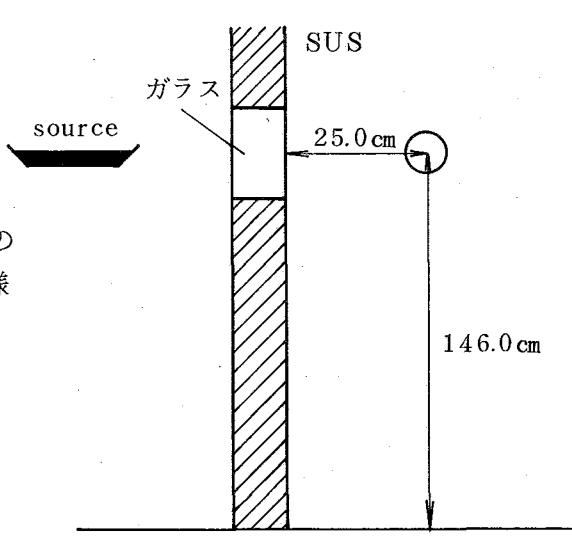
- 22) ENDF/B Summary Documentation, BNL-NCS-17541 (ENDF-201), 2nd ed. (ENDF/B-IV) D. Ed. Garber, available from the Brookhaven National Laboratory, Upton, New York (Oct. 1975)
- 23) R. J. Howerton et al., UCRL-50400 col. 15 Part A (Sept. 1975)
- 24) L. C. Northcliffe and R. F. Shilling: Range and Stopping Power Tables For Heavy Ions, Nucl. Data Tables A7, 233-463 Academic Press, Inc. (1970)
- 25) K. Miyabe et al., PNC 841 84-48 (1984)
- 26) 熱ルミネッセンス線量計の測定精度の確保に関する試験研究成果報告書 (S61.2) 放計協
- 27) Y. Yasuno: private communication (Matsushita Industrial Equipment Co., LTD.) (1988)
- 28) M. B. Emmett, ORNL-4972 (1975)
- 29) 石田健二, 高野研一, 松村哲夫: 電力中央研究所・研究報告 TN86009 (1986)
- 30) W. S. Snyder et al., MIRD pamphlet No. 5 Journal of Nuclear Medicine supplement Vol. 10 No. 3 (1969)
- 31) K. Miyabe: private communication (1986)
- 32) S. F. Mughabghab and D. I. Garber, BNL-325 (1973)
- 33) E. V. Benton et al.: Health Phys. 40(1981)801
- 34) N. Juto: private communication (Chiyoda Safety Appliance Co., LTD.) (1988)

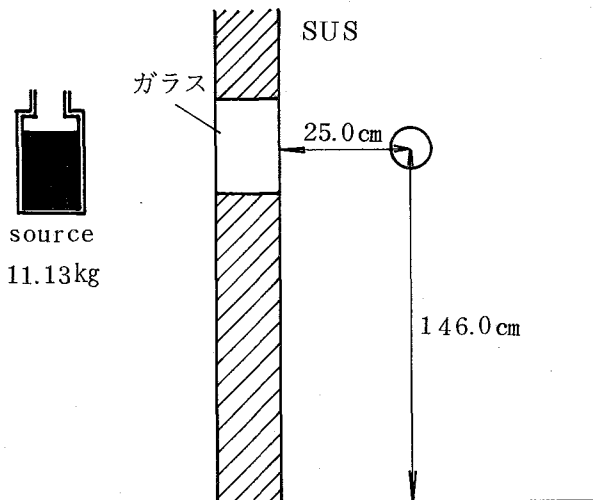
付 録 1

プルトニウム転換技術開発施設および中性子線量計較正施設における中性子測定データおよび測定条件の詳細

		試験No	1					
測定年月日	1987.10.26 10:01~		測定者	百瀬, 岩井				
測定場所	プルトニウム転換技術開発施設 主工程室 焙焼還元炉取出後グローブボックス前							
測定対象	UO <sub>2</sub> - PuO <sub>2</sub> 混合粉末							
遮蔽・距離	遮蔽 グローブボックス (ガラス窓) 距離 床面からの高さ146 cm 遮蔽体表面より25 cm							
線量率測定結果	中性子線量当量率	レムカウンター (studsuk) 22020 ( )内は rate meter	1回目: 1180 counts / 180 sec 2回目: 1208 counts / 180 sec  Ave (6.63 cps 2.0 mrem / hr)					
	γ線線量率	電離箱サーベイメータ	0.68 mR / hr					
減速体付中性子(検出器) (5気圧) <sup>3</sup> Heガス圧	減速材カバー	bare	Cd 1 mm カバー	poly(Cd付) 1.5 cm	poly(Cd付) 3.0 cm	poly(Cd付) 5.0 cm	poly(Cd付) 9.0 cm	
	counts	6429	2915	20799	14654	18952	23039	
	測定時間 (sec)	152	278	310	100	100	166	
	計数率 (cps)	42.3	10.5	67.1	146.5	189.5	138.8	
測定状況	 <p>*1 ステンレス(6mm)+ホリエチレン(50mm) +鉛(7mm)+ステンレス(2mm)</p> <p>*2 アクリル(10mm)+空気(12mm) +鉛ガラス(38mm)+アクリル(20mm)</p>							

		試験No.	2					
測定年月日		1987.10.26 12:15~		測定者	百瀬, 岩井			
測定場所		プルトニウム転換技術開発施設 主工程室 脱硝工程 溶液受入タンク グローブボックス前						
測定対象		Pu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub> (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 混合水溶液						
遮蔽・距離		遮蔽 グローブボックス 距離 床面からの高さ146cm, 遮蔽体表面より25cm						
線量率測定結果	中性子線量当量率	レムカウンター (studsuik) (22020) ( )内は rate meter	1回目: 380 counts / 180 sec 2回目: 404 counts / 180 sec 3回目: 387 counts / 180 sec Ave (2.17 cps (0.6 mrem/hr))					
	γ線線量率	電離箱サーベイメータ	1.2 mR/hr					
減速体付中性子(検出器) (5気圧) <sup>3</sup> Heガス圧		減速材カバー	bare	Cd 1mm カバー	poly(Cd付) 1.5cm	poly(Cd付) 3.0cm	poly(Cd付) 5.0cm	poly(Cd付) 9.0cm
		counts	4393	1635	9184	18771	20814	12458
		測定時間 (sec)	200	230	210	215	205	210
		計数率	22.0	7.1	43.7	87.3	101.5	59.3
測定状況	<p>U(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> + Pu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 溶液</p> <p>*1 ステンレス(6mm)+ホリエチレン(20mm)+鉛(2mm)+ステンレス(2mm)</p> <p>*2 アクリル(10mm)+空気(6mm)+ボロン入りガラス(20mm)+鉛ガラス(11mm)</p>							

		試験No.	3					
測定年月日	1987.10.26 14:37~		測定者	百瀬, 岩井				
測定場所	プルトニウム転換技術開発施設 主工程室 脱硝工程・冷却器 グローブボックス前							
測定対象	PuO <sub>2</sub> + UO <sub>2</sub> 混合粉末							
遮蔽・距離	遮蔽 グローブボックス (ガラス窓) 距離 床面からの高さ146 cm, グローブボックス表面より25 cm							
線量率測定結果	中性子線量当量率	レムカウンター ( studsuik ) 22020 ( )内は rate meter	1回目: 649 counts / 180 sec 2回目: 603 counts / 180 sec 648 counts / 180 sec Ave ( 3.52 cps ( 1.05 mrem / hr )					
	γ線線量率	電離箱 サーベイメータ	0.8 mR / hr					
減速体付中性子(検出器) ( <sup>3</sup> Heガス圧)	減速材カバー	bare	Cd 1mm カバー	poly(Cd付) 1.5 cm	poly(Cd付) 3.0 cm	poly(Cd付) 5.0 cm	poly(Cd付) 9.0 cm	
	counts	4148	1238	8178	15411	25243	22280	
	測定時間 (sec)	200	231	230	200	250	300	
	計数率	20.7	5.4	35.6	77.1	101.0	74.3	
測定状況	 <p>グローブボックスの材質はNo.2と同様</p>							

		試験No	4					
測定年月日	1987.10.26 16:59~		測定者	百瀬, 岩井				
測定場所	プルトニウム転換技術開発施設 主工程室 中間貯蔵工程 中間貯蔵容器 グローブボックス前							
測定対象	PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub> 混合粉末 (水分含有量 0.2 w/o 11.13 kg)							
遮蔽・距離	遮蔽 グローブボックス 距離 床面からの高さ146.0 cm, グローブボックス表面より25 cm							
線量率測定結果	中性子線量当量率	レムカウンター (studsuk) (22020) ( )内は rate meter	1回目: 2037 counts / 180 sec 2回目: 2085 counts / 180 sec  Ave ( 11.45 cps 3.5 mrem / hr )					
	γ線線量率	電離箱 サーベイメータ	1.0 mR / hr					
減速体付中性子(検出器) (5気圧) <sup>3</sup> Heガス圧	減速材カバー	bare	Cd 1mm カバー	poly(Cd付) 1.5 cm	poly(Cd付) 3.0 cm	poly(Cd付) 5.0 cm	poly(Cd付) 9.0 cm	
	counts	10375	2910	20648	51200	59035 ----- 59206	40722	
	測定時間 (sec)	211	200	200	210	180 ----- 180	170	
	計数率	49.2	14.6	103.2	243.8	328.4	239.8	
測定状況	 <p>source 11.13kg</p> <p>ガラス</p> <p>SUS</p> <p>25.0cm</p> <p>146.0cm</p> <p>グローブボックス の材質はNo.2と同様</p>							

		試験No	5					
測定年月日	1987.10.26 17:52~		測定者	百瀬, 岩井				
測定場所	プルトニウム転換技術開発施設 主工程室 中間貯蔵工程 中間貯蔵容器 グローブボックス前							
測定対象	PuO <sub>2</sub> - UO <sub>2</sub> 粉末							
遮蔽・距離	遮蔽 コンクリート 距離 床面からの高さ114 cm, コンクリート表面より30 cm							
線量率測定結果	中性子線量当量率	レムカウンター (studsuk) (22020) ( ) 内は rate meter	1回目: 2785 counts / 180 sec 2回目: 2700 counts / 180 sec  Ave (15.24 cps (4.1 mrem/hr))					
	γ線線量率	電離箱サーベイメータ	1.3 mR/hr					
減速体付中性子(検出器) (5気圧) <sup>3</sup> Heガス圧	減速材カバー	bare	Cd 1mm カバー	poly(Cd付) 1.5 cm	poly(Cd付) 3.0 cm	poly(Cd付) 5.0 cm	poly(Cd付) 9.0 cm	
	counts	75578	11792	28187	48900	54262	33491	
	測定時間 (sec)	180	204	100	100	100	100	
	計数率	419.9	57.8	281.9	489.0	542.6	334.9	
測定状況	<p>グローブボックスの材質はNo.2と同じ</p> <p>中間貯蔵容器 source</p> <p>グローブボックス</p> <p>コンクリート (重コンクリート200mm)</p> <p>30.0cm</p> <p>114.0cm</p>							

		試験No.	6					
測定年月日	1987.10.30		測定者	百瀬, 岩井				
測定場所	プルトニウム転換技術開発施設 充てん室 貯蔵容器運搬台車							
測定対象	PuO <sub>2</sub> - UO <sub>2</sub> 混合粉末							
遮蔽・距離	遮蔽台車 距離 床面からの高さ 146 cm, 台車表面より 25 cm							
線量率測定結果	中性子線量当量率	レムカウンター (Studsuik) (22020) ( )内は rate meter	1回目: 298 counts / 180 sec 2回目: 355 counts / 180 sec 315 counts / 180 sec Ave (1.79 cps (0.52 mrem/hr)					
	γ線線量率	電離箱サーベイメータ	(測定せず)					
減速体付中性子(検出器) (5.0気圧) <sup>3</sup> Heガス圧	減速材カバー	bare	Cd 1mm カバー	poly(Cd付) 1.5 cm	poly(Cd付) 3.0 cm	poly(Cd付) 5.0 cm	poly(Cd付) 9.0 cm	
	counts	15072	1455	7413	46137	30539	11255	
	測定時間 (sec)	250	200	210	769	470	300	
	計数率	60.3	7.3	35.3	60.0	65.0	37.5	
測定状況	<p>貯蔵容器台車 貯蔵容器(ステンレス12mm) 重コンクリート (200mm) source 25.0cm detector 146.0cm</p>							



		試験No	7					
測定年月日	1988.1.29 13:30~		測定者	百瀬, 永井, ANCHALI				
測定場所	計測機器校正施設 照射室 (B)							
測定対象	$^{252}\text{Cf}$ 27 mCi 線源							
遮蔽・距離	遮蔽 なし 距離 1 m							
線量率測定結果	中性子線量当量率	レムカウンター (Studsuik) (22020)	1 回目: 55188 counts / 180 sec 2 回目: 54833 counts / 180 sec ALNOR 61876 counts / 180 sec 61850 counts / 180 sec Ave 305.6 cps					
	$\gamma$ 線量率	電離箱サーベイメータ	6.1 mR / hr					
減速体付中性子 (検出器) (0.1 atm) $^3\text{He}$ ガス圧	減速材カバー	bare	Cd 1 mm カバー	poly(Cd付) 1.5 cm	poly(Cd付) 3.0 cm	poly(Cd付) 5.0 cm	poly(Cd付) 9.0 cm	
	counts	2399	446	17673	84594	158901	152344	
	測定時間 (sec)	300	300	300	300	300	300	
	計数率	8.00	1.49	58.91	281.98	529.67	507.81	
測定状況	<p>252Cf 27 mCi 線源 電磁ホルダー 3He 検出器 照射筒 1 m 1.2 m 鉄製グレーチング</p>							

		試験No.	8					
測定年月日	1988.1.29 13:30~		測定者	百瀬, 永井, ANCHALI				
測定場所	計測機器校正施設 照射室(B)							
測定対象	$^{238}\text{Pu}-\text{Be}$							
遮蔽・距離	遮蔽なし 距離 1 m							
線量率測定結果	中性子線量当量率	レムカウンター (Studsuk) (22020)	1回目: 16191 counts / 180 sec 2回目: 16313 counts / 180 sec ALNOR 17967 counts / 180 sec 17723 counts / 180 sec Ave 90.29 cps					
	$\gamma$ 線線量率	電離箱 サーベイメータ	1.82 mR / hr					
減速体付中性子(検出器) (0.1 atm) $^3\text{He}$ ガス圧	減速材カバー	bare	Cd 1mm カバー	poly(Cd付) 1.5 cm	poly(Cd付) 3.0 cm	poly(Cd付) 5.0 cm	poly(Cd付) 9.0 cm	
	counts	608	162	3403	17065	35339	42932	
	測定時間 (sec)	300	300	300	300	300	300	
	計数率	2.03	0.54	11.34	56.88	117.79	143.11	
測定状況	試験No.7に同じ							

		試験No	9					
測定年月日	1988.2.11		測定者	百瀬, 永井, ANCHALI				
測定場所	計測機器校正施設 照射室 (B)							
測定対象	$^{252}\text{Cf}$ 27 mCi 線源							
遮蔽・距離	遮蔽 ポリエチレン 25 mm 距離 1.0 m							
線量率測定結果	中性子線量当量率	レムカウンター (Studsuk) (22020)	1 回目: 41622 counts / 180 sec 2 回目: 41384 counts / 180 sec ALNOR 45838 counts / 180 sec 45829 counts / 180 sec Ave 230.57 cps					
	$\gamma$ 線線量率	電離箱サーベイメータ	(測定せず)					
減速体付中性子 (検出器) ( $^3\text{He}$ ガス圧)	減速材カバー	bare	Cd 1 mm カバー	poly(Cd付) 1.5 cm	poly(Cd付) 3.0 cm	poly(Cd付) 5.0 cm	poly(Cd付) 9.0 cm	
	counts	2472	732	20012	63996	98054	78307	
	測定時間 (sec)	200	200	200	200	200	200	
	計数率	12.36	3.66	100.1	320.0	490.3	391.5	
測定状況	<p>ポリエチレン板 25mm</p> <p><math>^{252}\text{Cf}</math> 27mCi 線源</p> <p>9 cm</p> <p>1 m</p> <p>検出器</p> <p>1.2 m</p>							

付録2 複合型中性子個人モニターによる深部、表層部個人モニターの評価方法の開発

1. 評価手順

本研究に取扱った中性子個人モニターすなわちアルベド型TLD中性子線量計，TS-16，およびCR-39の指示値を用いて $H_{1cm}$ ， $H_{SS}$ ， $H_{SL}$ を評価する方法を検討した。ただし， $H_{1cm}$ ， $H_{SS}$ ， $H_{SL}$ をそれぞれ中性子エネルギー（E）の関数とし， $H_{1cm}(E)$ ， $H_{SS}(E)$ ，および $H_{SL}(E)$ と表示し，アルベド型TLD中性子個人モニターの $\gamma$ 線補償を行った素子2，3，4のエネルギー応答関数をそれぞれ $T_2(E)$ ， $T_3(E)$ ， $T_4(E)$ とし，TS-16およびCR-39のエネルギー応答関数をTS(E)，CR(E)と表示する。そうすると， $H_{1cm}(E)$ ， $H_{SS}(E)$ ， $H_{SL}(E)$ の関数形を $T_2(E)$ ， $T_3(E)$ ， $T_4(E)$ ，TS(E)，およびCR(E)の線形結合で近似することにより，各個人モニターの指示値から $H_{1cm}$ ， $H_{SS}$ ， $H_{SL}$ の値を評価する方式が確立できる。この方式を定式化すると以下のとおりである。

$$H_{1cm}(E) \doteq a_1 T_2(E) + a_2 T_3(E) + a_3 T_4(E) + a_4 TS(E) + a_5 CR(E) \dots\dots\dots (A1)$$

$$H_{SL}(E) \doteq a_1 T_2(E) + a_2 T_3(E) + a_3 T_4(E) + a_4 TS(E) + a_5 CR(E) \dots\dots\dots (A2)$$

$$H_{SS}(E) \doteq a_1 T_2(E) + a_2 T_3(E) + a_3 T_4(E) + a_4 TS(E) + a_5 CR(E) \dots\dots\dots (A3)$$

式(A1)(A2)(A3)において最小二乗法により適切な $a_1$ ， $a_2$ ， $a_3$ ， $a_4$ ， $a_5$ を求めればよい。ただし， $T_2(E)$ ， $T_3(E)$ ， $T_4(E)$ は関数形が似ているため，これらの関数を全部用いると評価式に大きな誤差をもちこむ結果となる。したがってこれらの関数はそれぞれ $H_{1cm}(E)$ ， $H_{SS}(E)$ ， $H_{SL}(E)$ の10 keV以下の領域をよく近似しているものを選択して最小二乗の計算を行い， $a_1 \sim a_5$ を求めた。ここで求めた $a_1 \sim a_5$ の値は特定のエネルギースペクトルをもつ場，たとえば $^{252}\text{Cf}$ 核分裂中性子場とかプルトニウム転換技術開発施設の場についての値ではなく，とくに特定の中性子エネルギースペクトルについて求めているわけではない。特定のエネルギースペクトル $\phi(E)$ に適切な $a_1 \sim a_5$ の値を求めるのならば， $\phi(E)$ で各 $H_{1cm}(E)$ ， $H_{SL}(E)$ ， $H_{SS}(E)$ に重み付けを行った式

$$H_{1cm}(E) \cdot \frac{\phi(E)}{\phi(E) dE} \doteq a_1 T_2(E) + a_2 T_3(E) + a_3 T_4(E) + a_4 TS(E) + a_5 CR(E) \dots\dots\dots (A4)$$

$$H_{SL}(E) \cdot \frac{\phi(E)}{\phi(E) dE} \doteq a_1 T_2(E) + a_2 T_3(E) + a_3 T_4(E) + a_4 TS(E) + a_5 CR(E) \dots\dots\dots (A5)$$

$$H_{SS}(E) \cdot \frac{\phi(E)}{\phi(E) dE} \doteq a_1 T_2(E) + a_2 T_3(E) + a_3 T_4(E) + a_4 TS(E) + a_5 CR(E) \dots\dots\dots (A6)$$

を解けばよい。しかし今回はエネルギーの重み関数 $\phi(E) = 1$ として $a_1 \sim a_5$ の値を求め，その結果をTable A-1に示し，この近似方法により作成した評価式と実際の $H_{1cm}(E)$ ，

$H_{SS}(E)$ ,  $H_{SL}(E)$  との比を Table A-2 および Fig. A-1 に示す。但し,  $T_2(E)$ ,  $T_3(E)$ ,  $T_4(E)$ ,  $TS(E)$  および  $CR(E)$  については AP 条件と ROT 条件の 2 種類についての  $a_1 \sim a_5$  を作成した。Fig. A-1 からわかるように, CR-39, TS-16 とも有意の応答をもつ 100 keV ~ 5 MeV では比がほぼ 1 に近いよい近似を示しているが, TS-16 は応答をもつが CR-39 は有意の応答を示さない 10 keV ~ 100 keV で最大 3 倍程度の高めの値を示し, TLD しか応答をもたない 10 keV 以下の領域では近似式は比が 0.1 ~ 1.0 の低めの値を示す。したがって数 10 keV 以上の中性子が大半をしめるプルトニウム転換技術開発施設およびウラン・プルトニウム混合酸化物燃料製造施設では, この近似式はかなりよい精度を示すと思われる。なお, 数 10 keV 以下の中性子が多いよく減速された場では, より精度を向上させるため式 (A 4) ~ (A 6) のスペクトルの重み付けを行った式で近似式を作成する方が望ましい。

## 2. 評価式の検証

3. 3. 2 (2)(c) で記述したように動燃東海事業所の較正施設において水ファントムにアルベド型 TLD 中性子線量計, TS-16 および CR-39 を装着して  $^{252}\text{Cf}$  又は  $^{238}\text{Pu}-\text{Be}$  等の中性子源で照射した試験 (付録 1 の No. 7 ~ 9 の試験) 結果を式 (A 1) ~ (A 3) に代入し, Table A-1 の  $a_1 \sim a_5$  の係数を用いて求めた  $H_{1\text{cm}}$ ,  $H_{SL}$ ,  $H_{SS}$  の値 (実験値, E と表示する。) と中性子スペクトルと換算係数から求めた  $H_{1\text{cm}}$ ,  $H_{SL}$ ,  $H_{SS}$  (計算値 C と表示する。) を Table A-3 に示す。C/E は 0.69 ~ 1.21 の範囲にあり, 個人モニターの精度の目安として認められている範囲  $\pm 50\%$  に十分入っていると考えられる。したがってこの評価式は十分に有効である。

Table A-1 Values of  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$ , and  $a_5$

Parameter	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
Unit	mrem/(mR- <sup>60</sup> Co·eq)		mrem/(tracks/cm <sup>2</sup> )		
Value					
H <sub>1cm</sub> (AP)	0.	0.	2.738 - 3	1.120 - 2	5.325 - 2
H <sub>SS</sub> (AP)	7.126 - 3	1.210 - 3	0.	1.628 - 2	4.129 - 2
H <sub>SL</sub> (AP)	5.830 - 3	-1.291 - 3	0.	1.529 - 2	3.122 - 2
H <sub>1cm</sub> (ROT)	0.	0.	7.799 - 3	4.471 - 2	2.115 - 1
H <sub>SS</sub> (ROT)	2.821 - 2	2.040 - 3	0.	6.495 - 2	1.640 - 1
H <sub>SL</sub> (ROT)	2.308 - 2	-6.660 - 3	0.	6.100 - 2	1.240 - 1

Table A-2 Ratio of the calculated value to the true value in the energy range from thermal to 15MeV

RATIO (ESTIMATED VALUE/TRUE VALUE)						
ENERGY(EV)	H-1CM(AP)	H-3MM(AP)	H-0.07MM(AP)	H-1CM(ROT)	H-3MM(ROT)	H-0.07MM(ROT)
1.492E+07	3.414E-01	3.203E-01	3.843E-01	3.413E-01	3.202E-01	3.841E-01
1.350E+07	4.073E-01	3.914E-01	4.536E-01	4.075E-01	3.916E-01	4.539E-01
1.221E+07	4.696E-01	4.594E-01	5.048E-01	4.700E-01	4.598E-01	5.053E-01
1.105E+07	5.288E-01	5.251E-01	5.483E-01	5.293E-01	5.257E-01	5.488E-01
1.000E+07	5.877E-01	5.923E-01	5.987E-01	5.883E-01	5.929E-01	5.993E-01
9.048E+06	6.498E-01	6.658E-01	6.677E-01	6.505E-01	6.666E-01	6.685E-01
8.187E+06	7.143E-01	7.464E-01	7.609E-01	7.146E-01	7.469E-01	7.613E-01
7.408E+06	7.808E-01	8.319E-01	8.685E-01	7.812E-01	8.324E-01	8.691E-01
6.703E+06	8.544E-01	9.142E-01	9.477E-01	8.542E-01	9.142E-01	9.476E-01
6.065E+06	9.260E-01	9.894E-01	1.007E+00	9.256E-01	9.891E-01	1.007E+00
5.488E+06	9.770E-01	1.045E+00	1.057E+00	9.767E-01	1.045E+00	1.057E+00
4.966E+06	9.907E-01	1.060E+00	1.067E+00	9.900E-01	1.060E+00	1.067E+00
4.493E+06	9.805E-01	1.048E+00	1.049E+00	9.796E-01	1.047E+00	1.048E+00
4.066E+06	9.833E-01	1.051E+00	1.046E+00	9.820E-01	1.049E+00	1.045E+00
3.679E+06	1.017E+00	1.087E+00	1.080E+00	1.015E+00	1.085E+00	1.078E+00
3.329E+06	1.072E+00	1.145E+00	1.137E+00	1.070E+00	1.143E+00	1.135E+00
3.012E+06	1.133E+00	1.205E+00	1.196E+00	1.131E+00	1.203E+00	1.193E+00
2.725E+06	1.181E+00	1.246E+00	1.237E+00	1.178E+00	1.244E+00	1.235E+00
2.466E+06	1.204E+00	1.260E+00	1.252E+00	1.202E+00	1.258E+00	1.250E+00
2.231E+06	1.203E+00	1.249E+00	1.242E+00	1.201E+00	1.248E+00	1.240E+00
2.019E+06	1.186E+00	1.222E+00	1.214E+00	1.184E+00	1.221E+00	1.212E+00
1.827E+06	1.159E+00	1.186E+00	1.174E+00	1.159E+00	1.186E+00	1.174E+00
1.653E+06	1.129E+00	1.147E+00	1.129E+00	1.130E+00	1.148E+00	1.130E+00
1.496E+06	1.106E+00	1.112E+00	1.084E+00	1.106E+00	1.113E+00	1.085E+00
1.353E+06	1.095E+00	1.089E+00	1.049E+00	1.096E+00	1.090E+00	1.050E+00
1.225E+06	1.097E+00	1.079E+00	1.026E+00	1.097E+00	1.079E+00	1.027E+00
1.108E+06	1.104E+00	1.074E+00	1.013E+00	1.104E+00	1.074E+00	1.013E+00
1.003E+06	1.102E+00	1.063E+00	9.989E-01	1.101E+00	1.063E+00	9.988E-01
9.072E+05	1.088E+00	1.043E+00	9.818E-01	1.088E+00	1.044E+00	9.824E-01
8.209E+05	1.079E+00	1.028E+00	9.745E-01	1.080E+00	1.030E+00	9.759E-01
7.427E+05	1.091E+00	1.033E+00	9.891E-01	1.093E+00	1.035E+00	9.913E-01
6.721E+05	1.112E+00	1.046E+00	1.016E+00	1.114E+00	1.049E+00	1.018E+00
6.081E+05	1.122E+00	1.051E+00	1.038E+00	1.125E+00	1.055E+00	1.041E+00
5.502E+05	1.129E+00	1.053E+00	1.056E+00	1.132E+00	1.056E+00	1.059E+00
4.979E+05	1.146E+00	1.058E+00	1.074E+00	1.149E+00	1.061E+00	1.077E+00
4.505E+05	1.172E+00	1.064E+00	1.088E+00	1.175E+00	1.067E+00	1.091E+00
4.076E+05	1.202E+00	1.068E+00	1.094E+00	1.204E+00	1.071E+00	1.097E+00
3.683E+05	1.230E+00	1.066E+00	1.090E+00	1.232E+00	1.068E+00	1.092E+00
3.337E+05	1.250E+00	1.055E+00	1.073E+00	1.252E+00	1.057E+00	1.075E+00
3.020E+05	1.267E+00	1.039E+00	1.049E+00	1.269E+00	1.041E+00	1.050E+00
2.732E+05	1.275E+00	1.018E+00	1.017E+00	1.277E+00	1.020E+00	1.019E+00
2.472E+05	1.267E+00	9.888E-01	9.788E-01	1.269E+00	9.903E-01	9.802E-01
2.237E+05	1.252E+00	9.627E-01	9.434E-01	1.255E+00	9.642E-01	9.447E-01
2.024E+05	1.157E+00	9.030E-01	8.812E-01	1.159E+00	9.047E-01	8.827E-01
1.832E+05	1.055E+00	8.534E-01	8.313E-01	1.058E+00	8.553E-01	8.329E-01
1.647E+05	9.470E-01	8.115E-01	7.903E-01	9.503E-01	8.136E-01	7.921E-01
1.500E+05	8.924E-01	8.049E-01	7.806E-01	8.960E-01	8.072E-01	7.826E-01
1.357E+05	8.627E-01	8.196E-01	7.891E-01	8.665E-01	8.221E-01	7.912E-01
1.228E+05	8.546E-01	8.534E-01	8.144E-01	8.586E-01	8.562E-01	8.166E-01
1.111E+05	9.266E-01	9.713E-01	9.095E-01	9.308E-01	9.745E-01	9.119E-01
8.652E+04	1.093E+00	1.189E+00	1.104E+00	1.097E+00	1.193E+00	1.107E+00
6.738E+04	1.347E+00	1.446E+00	1.369E+00	1.351E+00	1.450E+00	1.372E+00
5.248E+04	1.687E+00	1.748E+00	1.702E+00	1.692E+00	1.752E+00	1.705E+00
4.087E+04	2.065E+00	2.114E+00	2.083E+00	2.069E+00	2.120E+00	2.087E+00
3.183E+04	2.374E+00	2.489E+00	2.430E+00	2.379E+00	2.496E+00	2.434E+00
2.479E+04	2.461E+00	2.728E+00	2.592E+00	2.466E+00	2.735E+00	2.597E+00
1.931E+04	2.247E+00	2.653E+00	2.465E+00	2.254E+00	2.663E+00	2.471E+00
1.503E+04	1.720E+00	2.126E+00	1.974E+00	1.730E+00	2.139E+00	1.982E+00
1.171E+04	9.534E-01	1.186E+00	1.118E+00	9.654E-01	1.203E+00	1.127E+00
9.119E+03	1.448E-01	8.507E-02	4.966E-02	1.591E-01	1.064E-01	6.194E-02
7.102E+03	1.696E-01	1.095E-01	6.730E-02	1.850E-01	1.375E-01	8.422E-02
5.531E+03	1.923E-01	1.371E-01	8.929E-02	2.070E-01	1.731E-01	1.124E-01
4.307E+03	2.103E-01	1.654E-01	1.142E-01	2.228E-01	2.101E-01	1.446E-01
3.355E+03	2.218E-01	1.909E-01	1.383E-01	2.315E-01	2.437E-01	1.761E-01
2.613E+03	2.269E-01	2.104E-01	1.574E-01	2.343E-01	2.693E-01	2.009E-01
2.035E+03	2.272E-01	2.230E-01	1.691E-01	2.333E-01	2.852E-01	2.157E-01
1.585E+03	2.247E-01	2.301E-01	1.748E-01	2.308E-01	2.933E-01	2.221E-01
1.234E+03	2.216E-01	2.346E-01	1.779E-01	2.281E-01	2.976E-01	2.249E-01
9.611E+02	2.193E-01	2.396E-01	1.824E-01	2.268E-01	3.023E-01	2.294E-01
7.485E+02	2.182E-01	2.468E-01	1.903E-01	2.266E-01	3.099E-01	2.382E-01
5.829E+02	2.179E-01	2.557E-01	2.009E-01	2.273E-01	3.198E-01	2.505E-01
4.540E+02	2.188E-01	2.662E-01	2.144E-01	2.286E-01	3.320E-01	2.666E-01
3.536E+02	2.212E-01	2.784E-01	2.308E-01	2.309E-01	3.466E-01	2.865E-01
2.754E+02	2.256E-01	2.918E-01	2.498E-01	2.346E-01	3.630E-01	3.098E-01
2.144E+02	2.325E-01	3.061E-01	2.709E-01	2.399E-01	3.809E-01	3.361E-01
1.670E+02	2.418E-01	3.215E-01	2.941E-01	2.466E-01	4.005E-01	3.653E-01
1.301E+02	2.520E-01	3.376E-01	3.184E-01	2.540E-01	4.209E-01	3.957E-01
1.013E+02	2.614E-01	3.545E-01	3.432E-01	2.605E-01	4.418E-01	4.263E-01
7.889E+01	2.684E-01	3.722E-01	3.678E-01	2.653E-01	4.630E-01	4.561E-01
6.144E+01	2.718E-01	3.910E-01	3.923E-01	2.678E-01	4.842E-01	4.842E-01
4.785E+01	2.712E-01	4.109E-01	4.166E-01	2.678E-01	5.053E-01	5.107E-01
3.727E+01	2.682E-01	4.324E-01	4.415E-01	2.663E-01	5.270E-01	5.364E-01
2.902E+01	2.646E-01	4.560E-01	4.675E-01	2.644E-01	5.497E-01	5.618E-01
2.260E+01	2.620E-01	4.819E-01	4.953E-01	2.633E-01	5.738E-01	5.880E-01
1.760E+01	2.618E-01	5.105E-01	5.252E-01	2.637E-01	6.000E-01	6.154E-01
1.371E+01	2.648E-01	5.423E-01	5.584E-01	2.663E-01	6.282E-01	6.448E-01
1.068E+01	2.702E-01	5.775E-01	5.953E-01	2.704E-01	6.590E-01	6.772E-01
8.315E+00	2.768E-01	6.169E-01	6.372E-01	2.748E-01	6.926E-01	7.132E-01
6.476E+00	2.836E-01	6.606E-01	6.838E-01	2.788E-01	7.277E-01	7.509E-01
5.043E+00	2.896E-01	7.092E-01	7.354E-01	2.815E-01	7.660E-01	7.919E-01
3.928E+00	2.950E-01	7.628E-01	7.917E-01	2.831E-01	8.064E-01	8.344E-01
3.059E+00	3.042E-01	8.202E-01	8.509E-01	2.876E-01	8.492E-01	8.783E-01
2.382E+00	3.211E-01	8.801E-01	9.111E-01	2.988E-01	8.950E-01	9.236E-01
1.855E+00	3.469E-01	9.430E-01	9.720E-01	3.182E-01	9.432E-01	9.692E-01
1.445E+00	3.671E-01	1.015E+00	1.040E+00	3.353E-01	9.952E-01	1.016E+00
1.125E+00	3.755E-01	1.094E+00	1.111E+00	3.425E-01	1.047E+00	1.060E+00
8.764E-01	3.965E-01	1.162E+00	1.166E+00	3.512E-01	1.093E+00	1.094E+00
6.826E-01	4.313E-01	1.253E+00	1.241E+00	3.767E-01	1.163E+00	1.148E+00
5.316E-01	4.500E-01	1.313E+00	1.279E+00	3.918E-01	1.204E+00	1.169E+00
4.140E-01	3.110E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.290E+00	1.000E+00	1.000E+00
1.000E-04						

Table A-3 Comparisons of calculated and experimental values of  $H_{1cm}$ , HSL,  $H_{SS}$ , and  $H_{SS}$  respectively at the PNC calibration fields

(unit: mrem/sec)

Exp. No.	$H_{1cm}$	HSL	$H_{SS}$
7 *1	C *4	2.47 - 2	2.44 - 2
	E *5	2.61 - 2	2.20 - 2
	C/E	0.95	1.11
8 *2	C	6.75 - 3	6.56 - 3
	E	7.14 - 3	6.04 - 3
	C/E	0.95	1.09
9 *3	C	1.49 - 2	1.49 - 2
	E	2.17 - 2	1.80 - 2
	C/E	0.69	0.83

\*1  $^{252}Cf$  fission neutron field

\*2  $^{238}Pu$ -Be neutron field

\*3 25mm polyethylene slab moderated  $^{252}Cf$  neutron field

\*4 calculated from measured spectrum and conversion factors of  $H_{1cm}$ , HSL, and  $H_{SS}$

\*5 calculated from measured values of TLD, TS-16, and CR-39



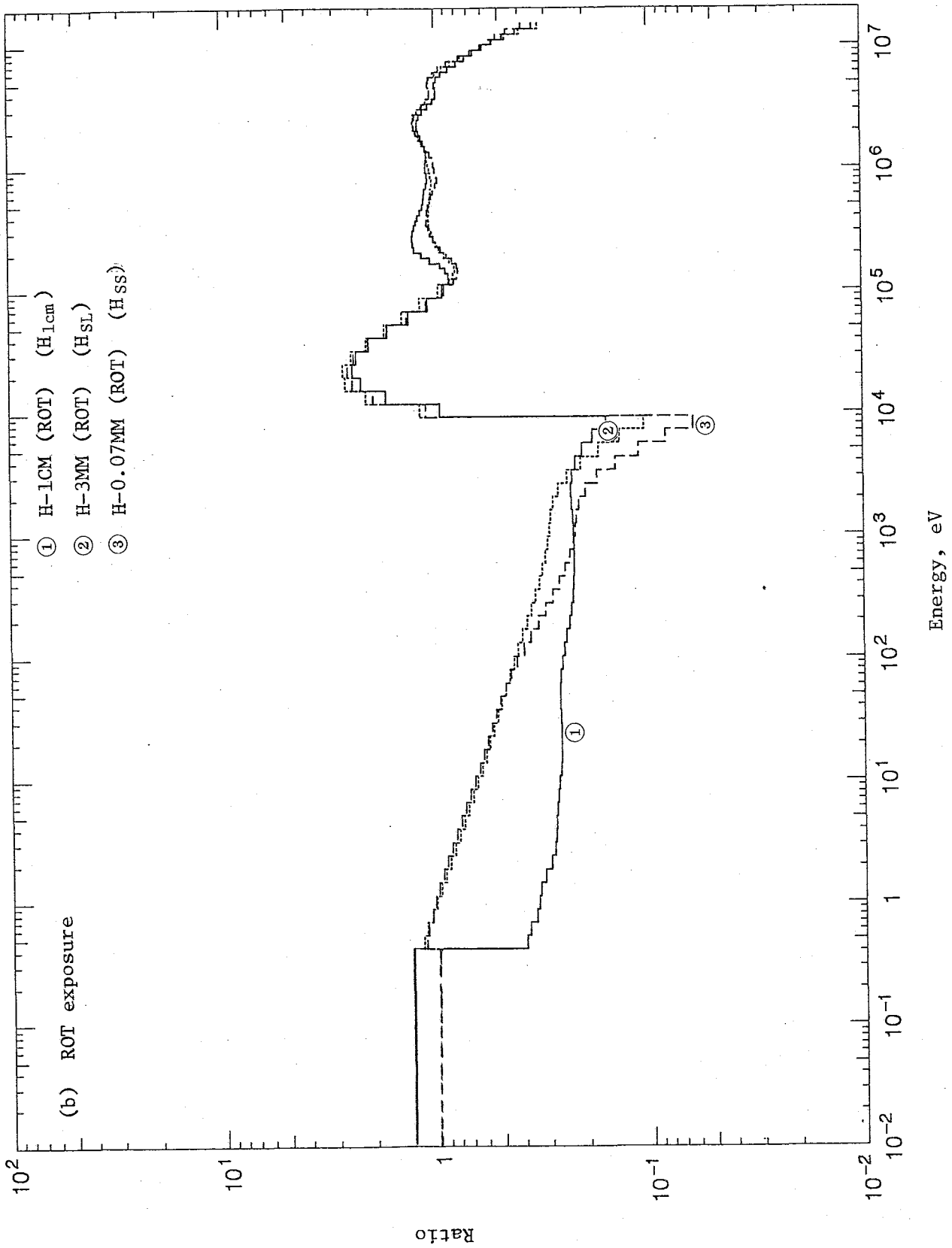


Fig. A-1 (continued)

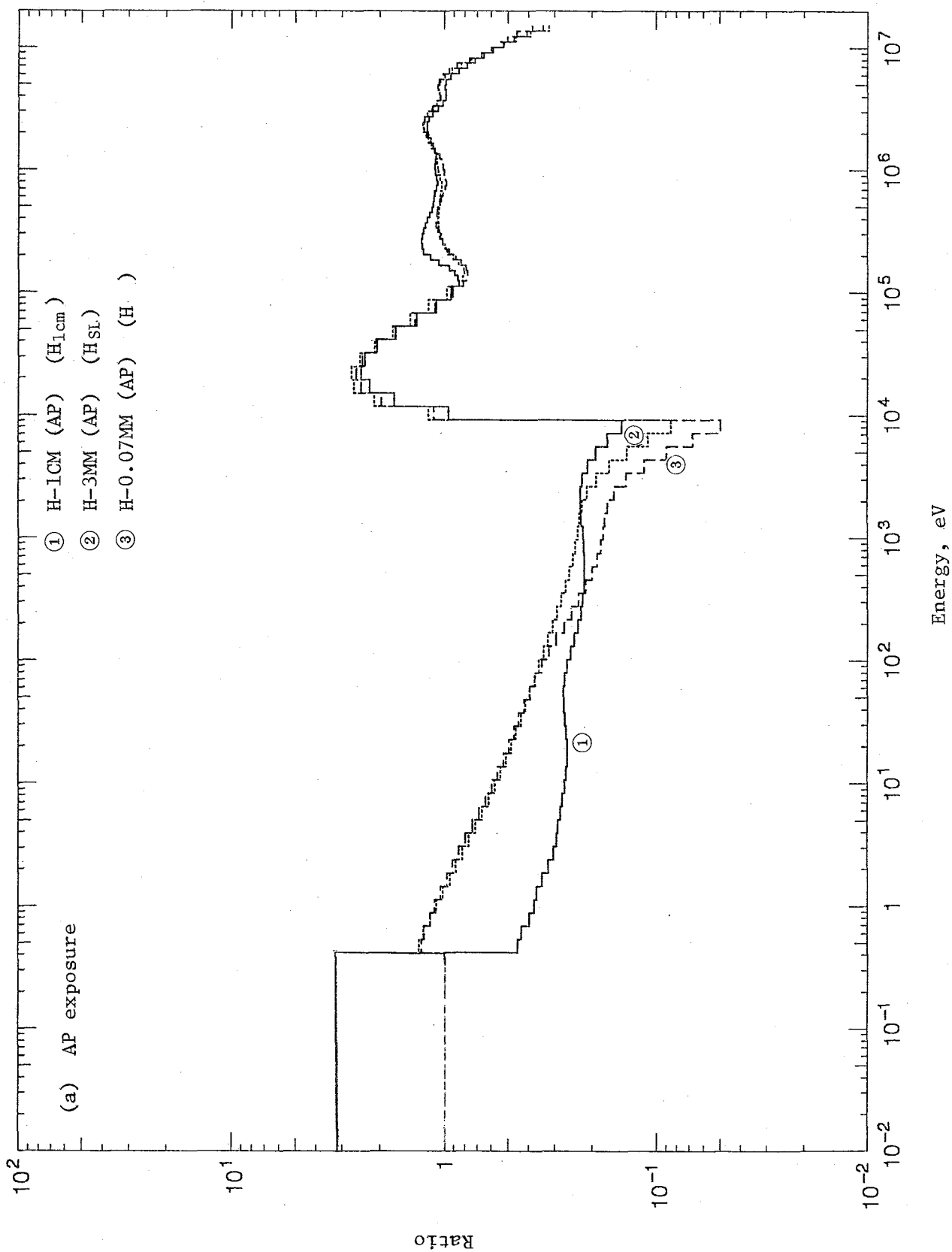


Fig. A-1 Ratio of the calculated value to the true value in the energy range from thermal to 15MeV