

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。 2001. 6. -6

[技術情報室]

社内一般

$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 蛍光体を利用したTLDバッジによる
中性子線量評価に関する検討

1984年9月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

この資料は、動燃事業団社内における検討及び周知を目的とする社内資料で

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)
2001



Li₂B₄O₇(Cu)蛍光体を利用したTLDバッジによる 中性子線量 評価に関する検討

宮部賢次郎 ，野村幸広
石黒秀治*，中田 啓

要 旨

東海事業所および大洗工学センターでの個人被曝管理に使用しているTLDバッジによる中性子線量評価では、入射した中性子線が身体中で減速・散乱し体外にでてくる低速中性子線を

⁶Li₂¹⁰B₄O₇(Cu)素子にて検出する方法(アルベド法)を採用し、さらにTLD素子にCdフィルターを組み合わせて、熱・熱外・速中性子線量の分離評価を行っている。

アルベド型の個人線量計による線量評価においては、特に中性子線に対する線量計のエネルギー特性が問題となる。そこで、電子技術総合研究所(電総研)のペレット型加速器による照射を行い、TLDバッジの144KeVから4MeVの領域の単色速中性子線に対するエネルギー特性を調べた。この結果、今後種々のエネルギー場での中性子線量評価法を確立するにおいて有効なデータが得られた。

一方、⁶Li₂¹⁰B₄O₇(Cu)素子を介して、TLDバッジの照射校正に利用している東海事業所の黒鉛パイル熱中性子線場と電総研の国家標準熱中性子線場とのトレーサビリティの関係を確立させ、熱中性子線量評価における精度向上を図った。

本報告書は、TLDバッジによる中性子線量評価に関して実施したこれらの照射試験の結果をまとめたものである。

((所属部・課名)) 安全管理部 安全対策課

* 現在 安全管理部放射線管理第1課

目 次

1. 目 的	1
2. 照射試験に使用したTLD線量計	3
3. 単色速中性子線に対するエネルギー依存性の評価	11
3.1 電総研・単色速中性子線照射場の概要	11
3.2 試験方法	11
3.3 試験結果	15
4. 熱中性子線量測定におけるトレーサビリティの確立	30
4.1 電総研・標準熱中性子線場での ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の熱中性子感度の評価	30
4.1.1 電総研・標準熱中性子線場(黒鉛パイル)の概要	30
4.1.2 試験方法	34
4.1.3 試験結果	36
4.2 動燃東海事業所・熱中性子線場の線量当量率の値付け	42
4.2.1 動燃・熱中性子線場(黒鉛パイル)の概要	42
4.2.2 線量当量率の測定方法	42
4.2.3 測定結果	43
5. 中性子線量当量評価式の検討	49
5.1 中性子線量当量評価の原理	49
5.2 中性子線量当量評価式の組み立て	53
5.3 中性子線量当量評価式の決定	59
6. 結 論	67
7. 謝 辞	71
8. 参考文献	72
Appendix. 中性子線量評価におけるトレーサビリティ体系	73

第 1 章 目 的

動燃・東海事業所では使用済核燃料の再処理施設、プルトニウム燃料開発施設、ウラン濃縮開発施設等の種々の核燃料施設において、TLD線量計（バッジ）を使用して γ （X）線、 β 線、中性子線による被曝線量の測定評価を実施している。このうち中性子線による被曝については主にプルトニウム燃料開発施設でのPu燃料製造工程におけるプルトニウム同位体の自発核分裂あるいは ^{16}O との（ α ，n）反応により放出される中性子線に起因するものであるが、近年再処理工場で回収された高次化プルトニウムの取扱いの増加あるいは転換技術開発施設の運転開始にともない中性子線による被曝が増加することが予想されており、中性子線に対する精度よい線量評価が要求されてきている。

現在使用しているTLDバッジにおいては、実効原子番号が7.26で生体等価な $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 蛍光体を利用したTLD素子により γ （X）線、 β 線、中性子線に対する線量当量の測定を行っている。このうち中性子線については入射した中性子線のうち人体で減速し後方散乱して体外に出てくる中性子線を熱中性子線に対して感度を有する $^6\text{Li}_2^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子にて測定する方法（アルベド法）を採用するとともに、TLD素子の前後にCdフィルターを組合せて、熱中性子線のCdカットオフ効果を利用して熱中性子線量、熱外中性子線量、速中性子線量を分離測定評価している。1), 2), 3)

このTLDバッジによる中性子線量の測定評価では、黒鉛パイルを利用した熱中性子線場および ^{252}Cf 、Am-Be線源による標準照射あるいは実際の作業環境での PuO_2 からの中性子線場等におけるフィールド校正を行うことにより、TLD素子の発光量から中性子線量を求めるための線量評価式を決定して実際の被曝管理に使用している。

これにより、現状において中性子線に対しても一応の線量評価法が確立していると考えられるが、熱中性子線から速中性子線の幅広いエネルギー領域に及んで精度よく線量評価を行うためには以下のような問題点が残されている。

1) 東海事業所では速中性子線の線量評価は、国家標準とのトレーサビリティが確立されたレムカウンターを基準にして、プルトニウム燃料製造施設の PuO_2 が収納されているグローブボックス周辺の標準的な作業環境場でフィールド校正を行い、その中性子線場に応じた線量当量評価式を決定して被曝線量の算出に用いている。

しかし、例えばプルトニウム燃料製造施設においては PuO_2 の自発核分裂及び ^{16}O との（ α ，n）反応による中性子だけでなく硝酸溶液プルトニウムの場合は溶液で減速された中性子線も存在すること、あるいは被曝低減化のため種々のしゃへい体を取り付けられている場合にはしゃへい体により中性子線の減速が考えられること等により、作業環境における中性子線のエネルギー分布は必ずしも一定且つ一様ではない。

そこでこのような種々のエネルギー場において中性子線量の測定評価を実施するには、TLD

バッジの速中性子線に対するエネルギー依存性を明らかにしておくとともに、種々のエネルギー場に適用できる校正法を確立する必要がある。

- 2) 熱中性子線に対する線量評価では、東海事業所安全管理別棟（F棟）の黒鉛パイルを利用した熱中性子線場での照射にてTLD素子の熱中性子線に対する感度あるいは熱中性子線の身体での後方散乱率（アルベド率）等を求めて、熱中性子線に対する線量当量評価式を決定している。しかし、従来からの東海事業所黒鉛パイル場のフルエンス〔 n/cm^2 〕及び線量当量率〔 $mrem/hr$ 〕は $CaSO_4(Tm) \cdot LiF$ 蛍光体を利用した松下製UD-136型素子（素子の熱中性子線に対する感度が古田らの計算結果により求められている⁴⁾）を用いて測定されたものであり、国家標準とのトレーサビリティに基づいた値付けではない。

この様な問題点をふまえて、今回 電子技術総合研究所（電総研）の標準中性子線場においてTLDバッジに対して下記のような照射試験および線量評価に関する検討を行った。

(1) 単色速中性子線に対するTLDバッジのエネルギー依存性の評価

種々のエネルギースペクトル場でのTLDバッジによる速中性子線量の評価について検討する場合、TLDバッジにおいて中性子線評価に使用するTLD素子のエネルギー特性が最も基本的なデータとなる。そこで、電総研のペトロロン型加速器を用いて144KeVから4MeVの範囲で単色速中性子線の照射を行い、このエネルギー領域での単位フルエンス及び単位線量当量当りのTLD素子の発光量（感度に相当する）の変化を調べた。

(2) 熱中性子線量測定におけるトレーサビリティの確立

電総研の標準熱中性子線場（黒鉛パイル）での照射にて ${}^6Li_2{}^{10}B_4O_7(Cu)$ 素子の熱中性子線に対する単位フルエンスおよび線量当量当りの発光量（感度）を求めた。そして、このTLD素子を介して、東海事業所F棟の黒鉛パイル場の熱中性子線のフルエンス率〔 $n/cm^2 \cdot s$ 〕および線量当量率（ $mrem/hr$ ）の値付けを行うことにより、熱中性子線量の測定評価におけるトレーサビリティ体系を確立させた。

(3) 中性子線量当量評価式の検討

(1)、(2)の結果に基づいて、単色速中性子線および熱中性子線の各照射におけるTLD素子の感度や中性子線の人体表面でのアルベド率等を算出し、単色速中性子線（144KeV～4MeV）に対する線量当量評価式を決定するとともに、一方従来より求められていた熱中性子線に対する線量当量評価式の見直しを行った。

本報告書では、上記の照射試験およびそれに基づくTLDバッジによる中性子線量当量評価式に関する検討結果を述べる。

第2章 照射試験に使用したTLD線量計(バッジ)

東海事業所および大洗工学センターにおける個人被曝管理に使用しているTLDバッジの外観および全体構成をFig 2-1に示す。TLDバッジは2個の線量計($\gamma(X) \cdot \beta$ 線量計および中性子線量計)とこれらの線量計を収納するバッジケースから構成されており、 $\gamma(X)$ 線、 β 線、中性子線に対して1個のバッジで線量評価を行うことができる。

2個の線量計はそれぞれ4個のTLD素子から構成されているが、TLD蛍光体としては線量評価用として生体等価な ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ および ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ が使用され、光子線に対するエネルギー評価用として $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$ が用いられている。 $\gamma(X) \cdot \beta$ 線量計および中性子線量計におけるTLD素子とフィルターの構成をTable 2-1に示す。また、TLDプレートおよびホルダーの構成をFig 2-2に示す。

ここで、TLDバッジの構造・構成に関し、用語の混乱を避けるため各部分の名称を下記のように定義する。

蛍光体 : 蛍光体層(基板とカバーは除く。)

TLD素子 : 蛍光体を基板に固着し、カバーしたもの。

プレート : TLD素子4個を組み込んだ樹脂板。

ホルダ : プレートを挿入するための容器。

線量計 : ホルダーにプレートを挿入したもの。

フィルター : 放射線入射部における蛍光体から最外部に至る部材の総称。

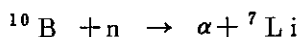
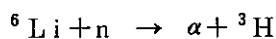
(基板, カバー, ホルダ, 外部ケースを含む)

シールド : 入射面外からの放射線の回り込みを防ぐための金属板。

バッジケース : 線量計を収納して、人体に装着するための容器で、クリップ付のもの。

TLDバッジ : バッジケースに線量計を入れたもの。

まず、TLD素子の構造をFig 2-3に示す。基板はカーボンを混入した耐熱性樹脂のポリイミドフィルム(厚さ約 75μ)で蛍光体は、粒径約 90μ の類粒で、これを基板表面の直径3mmの範囲に単一層となるように固着させている。蛍光体の重量は、およそ0.7mgである。この蛍光体は、湿気やほこりから保護するために透明な樹脂フィルムカバーされている。蛍光体の実効厚さは約 $15\text{mg}/\text{cm}^2$ 、基板の厚さは約 $11\text{mg}/\text{cm}^2$ 、およびカバーの厚さは約 $28\text{mg}/\text{cm}^2$ である。線量当量の評価に使用する蛍光体は、 ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ であるが、中性子線については ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ における ${}^6\text{Li}$ と ${}^{10}\text{B}$ の低速中性子線(熱中性子線)との



反応にて生じる荷電粒子と蛍光体との熱ルミネッセンス作用を利用して行くとともに、 γ 線寄与の差し引きは、中性子感度が無視できる ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ にて行う。このため、中性子線と γ 線を

精度よく分離評価するためには Li と B が高濃縮率であることが要求される。Li と B の濃縮率を Table. 2-2 に示す。

次に、 γ ・ β 線用線量計 (UD-808P 型) および中性子線用線量計 (UD-809P 型) の外観図と、パッケージを含めた断面図を Fig. 2-4 と Fig. 2-5 に示す。ここで、今回の試験で着目する中性子線用線量計については、第 2, 第 3, 第 4 素子 (# 2 , # 3 , # 4) が中性子線量当量評価用であり、第 1 素子 (# 1) は γ 線寄与 (捕獲 γ 線含む) の差引用である。各 TLD 素子の両側には $7.5 \times 11 \times 0.7$ (mm) の Cd 板または Sn 板がホルダーに貼付されている。また、周囲からの熱中性子線の回り込みを防ぐためパッケージの内側に厚さ 0.5 mm の Cd シールドが貼付されている。そして、3つの ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7$ 素子に熱中性子線をカットするための Cd および γ 線の減衰に対して Cd とほぼ等価な Sn のフィルターを組み合わせ、人体による中性子の反射・減速を利用したアルベド法により速中性子線、熱中性子線、熱外中性子線をそれぞれ分離して測定を行う。

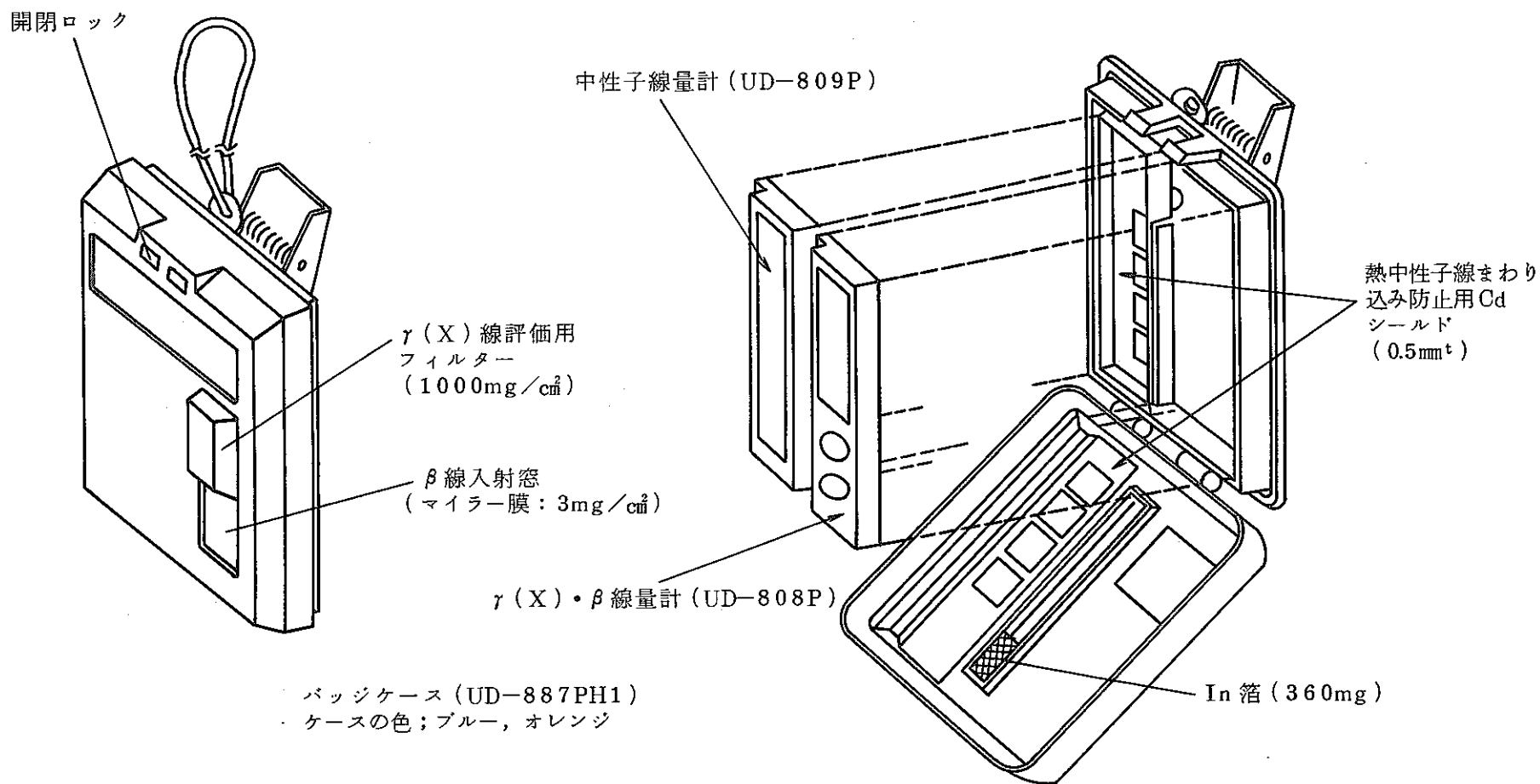


Fig. 2-1 TLDバッジの全体構成 (γ (X)・ β , 中性子線評価用)

Table. 2-1 新型TLDバッジの線量計の素子およびシールドの構成

線量計	素子	蛍光体およびシールド		備考
γ (X), β 線用 (UD-808P)	#1	${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ +樹脂	17 mg / cm^2 フィルター	β 線評価用
	#2	${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ +樹脂	63 "	β 線エネルギー評価用
	#3	$\text{CaSO}_4(\text{Tm})$ +樹脂	1000 "	γ 線エネルギー評価用
	#4	${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ +樹脂	1000 "	γ 線深部線量当量評価用 (β 線評価時の γ 線差引用)
中性子線用 (UD-809P)	#1	(前)Cd / ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ / Cd (後)	中性子入射窓 7×8mm Cd, Sn フィルター 但し, 入射窓 以外は全体を 0.5mm厚さの Cd シールド で囲む	γ 線差引用
	#2	Sn / ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ / Cd		中性子線評価用
	#3	Cd / ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ / Cd		
	#4	Cd / ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ / Sn		

注) γ (X)線・ β 線量だけの評価においてはUD-808P線量計をUD-887PH3型ケースに収納して使用する。

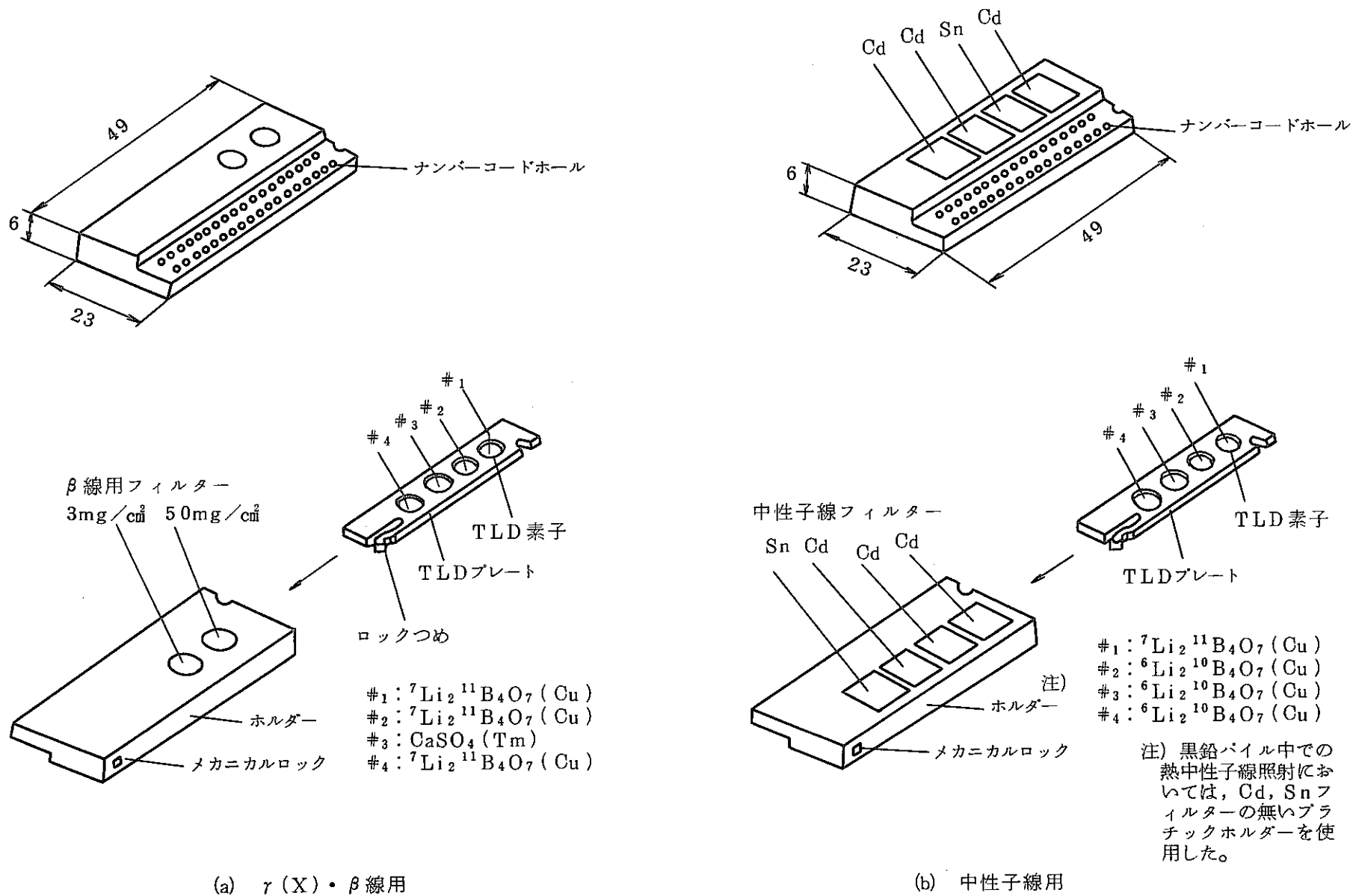


Fig. 2-2 TLDプレートおよびホルダーの構造

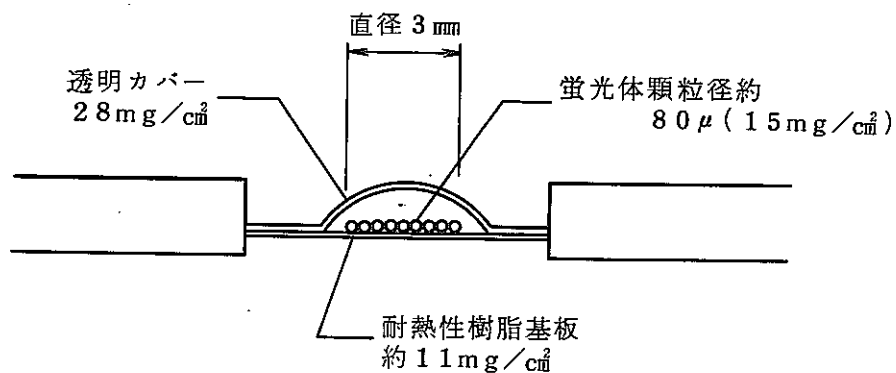


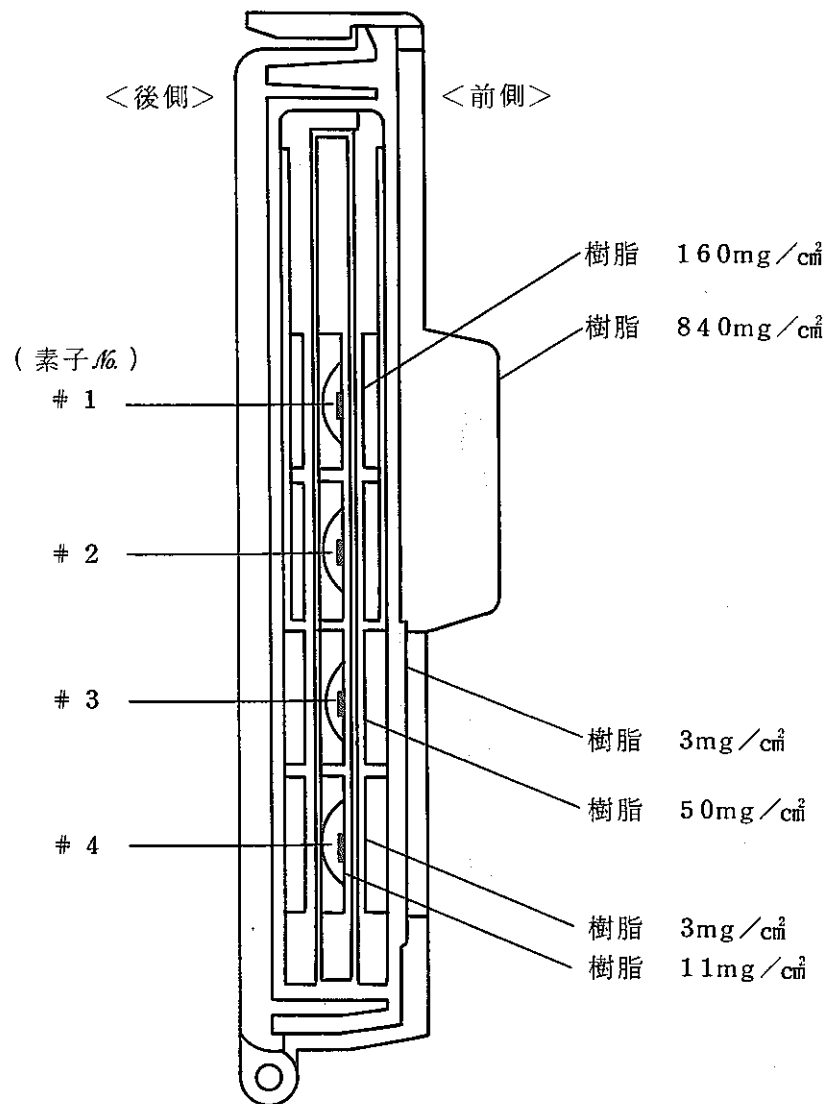
Fig. 2-3 TLD素子の構造

Table. 2-2 LiおよびBの濃縮率

同位体	原料	濃縮率 (%)
⁶ Li	⁶ LiOH	95.33
⁷ Li	⁷ LiOH	99.99
¹⁰ B	H ₃ ¹⁰ BO ₃	94.64
¹¹ B	H ₃ ¹⁰ BO ₃	99.65

素子 №	蛍光体	フィルター
# 4	${}^7\text{Li}_2 {}^{11}\text{B}_4\text{O}_7 (\text{Cu})$	樹脂 1000mg/cm ²
# 3	$\text{CaSO}_4 (\text{Tm})$	樹脂 1000mg/cm ²
# 2	${}^7\text{Li}_2 {}^{11}\text{B}_4\text{O}_7 (\text{Cu})$	樹脂 63mg/cm ²
# 1	${}^7\text{Li}_2 {}^{11}\text{B}_4\text{O}_7 (\text{Cu})$	樹脂 17mg/cm ²

(a) TLD素子の構成

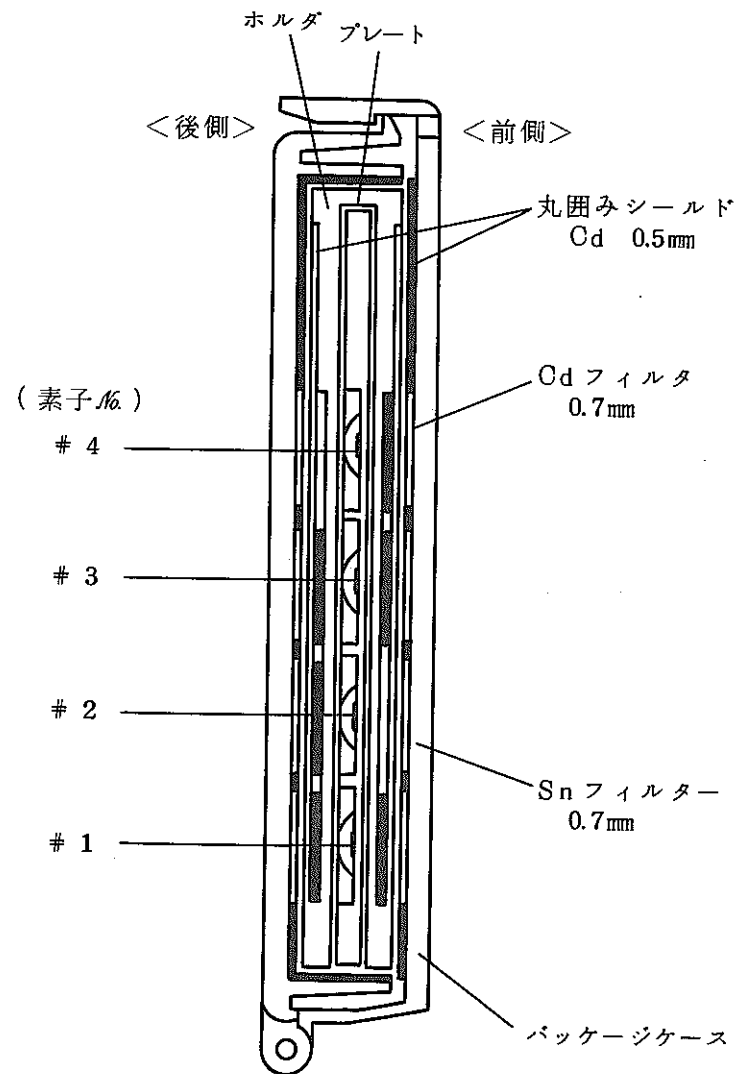


(b) ケースを含めた断面図

Fig. 2-4 $\gamma(X) \cdot \beta$ 用線量計 (UD-808P)

素子 №	フィルター (前)	蛍光体	フィルター (後)
# 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

(a) TLD素子の構成



(b) ケースを含めた断面図

Fig. 2-5 中性子線用線量計 (UD-809P)

第3章 単色速中性子線に対するエネルギー依存性の評価

電総研のペレトロン型加速器を用いた照射を行い、TLDバッジの単色速中性子線に対する感度のエネルギー依存性について調べた。

3.1 電総研・単色速中性子線照射場の概要

ペレトロン加速器は静電場で荷電粒子を加速する静電加速器の一種であり、電荷を金属ペレットのチェーンにて移動させて高電圧を得るものである。電総研のペレトロン加速器は最大加速電圧が4MVであり、一部のエネルギー領域を除き10KeVから20MeVまでの広いエネルギー領域に亘る単色エネルギーの中性子線ビームを発生することが可能であるが、今回の試験はTable 3-1に示すように陽子または重陽子を1.8~3.3MeVに加速し、重水素、三重水素、リチウムの各ターゲットにあてることにより生じる144, 565KeVおよび1.0, 2.5, 4.0MeVの単色中性子線ビームを照射に用いた。

中性子実験室は、 $1.1.3 \times 1.1.3 \times 1.1.3$ mの大きさで、そのほぼ中央部の格子床より150cmの高さにペレトロン加速器のターゲット部がある。床は散乱線の寄与をできるだけ少なくするため全面A₁格子で、深さ4.2mのピットが掘られている。ペレトロン型加速器本体と中性子実験室の配置をFig. 3-1に示す。

3.2 試験方法

試験はTLDバッジをパラフィンファントム(20×30×40cm)の表面に取り付けた状態(with phantom 照射)、およびファントムを使用せずA₁のフレームにTLDバッジを固定した状態(free air 照射)に2つの条件にて実施した。With phantom 条件での照射状況をFig. 3-2にまたfree air条件での照射状況をFig. 3-3に示す。但し、with phantom 照射の場合には、TLDバッジを実際に作業者が着用する場合には身体表面との間に多少の狭間が生じることを考慮し、TLDバッジとファントム表面の間は発泡スチロールを入れて1.5cm離れた。

TLDバッジは加速器ターゲット表面から50cmもしくは75cm距離に固定した。各々の位置での中性子フルエンスはモニター用ロングカウンターの計数值より求めた。尚、TLDバッジとターゲットの距離が小さく照射位置での中性子線ビームが狭いため、一回の照射におけるTLDバッジは4個とするとともに、中性子線量計が出来るだけビームの中心に納まるような配置でファントムに取り付けた。

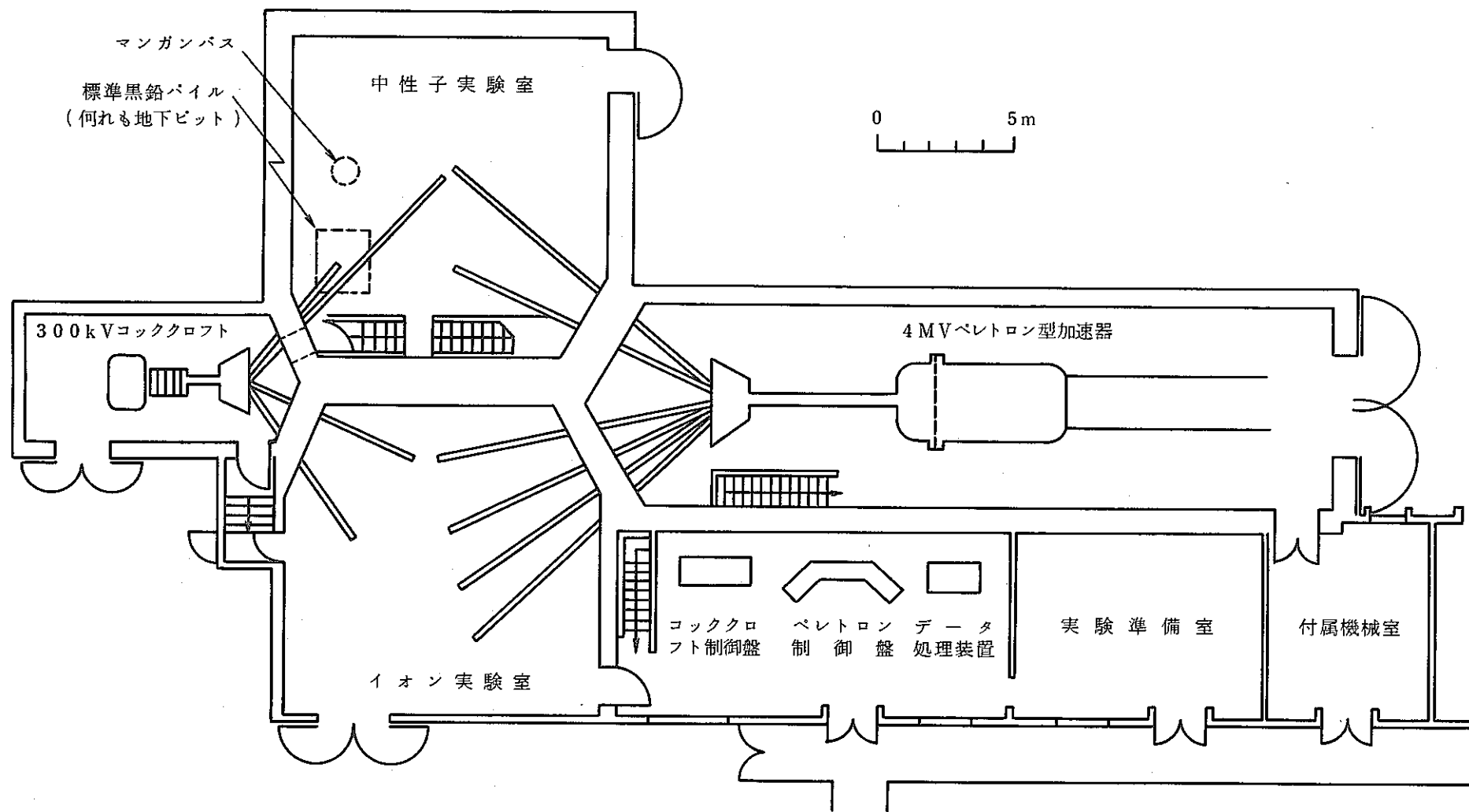


Fig. 3-1 電総研・中性子標準研究施設における加速器と中性子実験室の配置

Table.3-1 Monoenergetic neutron standard field in ETL

Neutron energy (MeV)	Neutron producing reactions	Incident particle energy (MeV)	Measuring angle ($^{\circ}$)
4.0	$D(d, n)^3\text{He}$	$d_2^+ = 1.88$	0
2.5	$T(p, n)^3\text{He}$	$p^+ = 3.30$	0
1.0	$T(p, n)^3\text{He}$	$p^+ = 1.83$	0
0.565	$^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$	$p^+ = 2.30$	0
0.144	$^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$	$p^+ = 1.94$	0

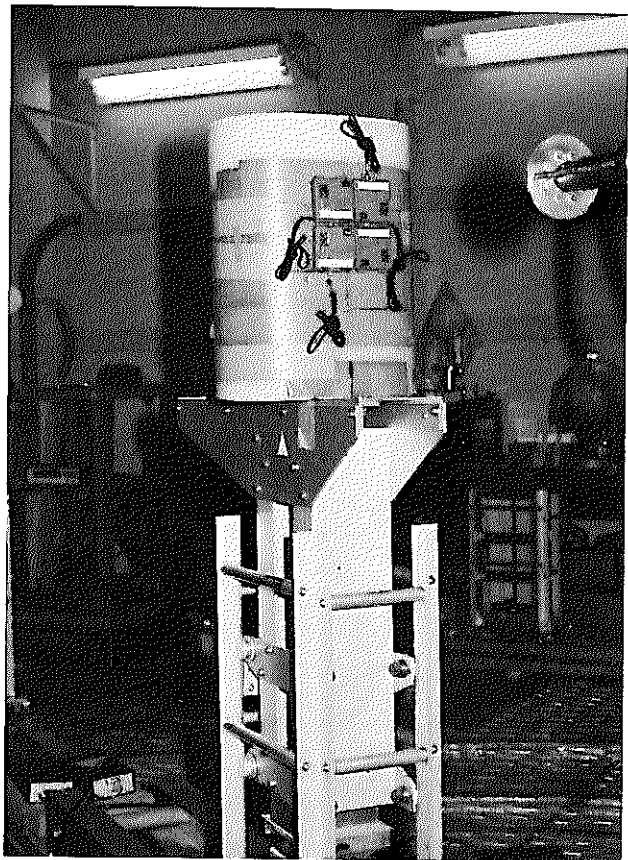


Fig. 3-2 単色速中性子線によるTLDバッジの照射状況
(パラフィンファントム装着)

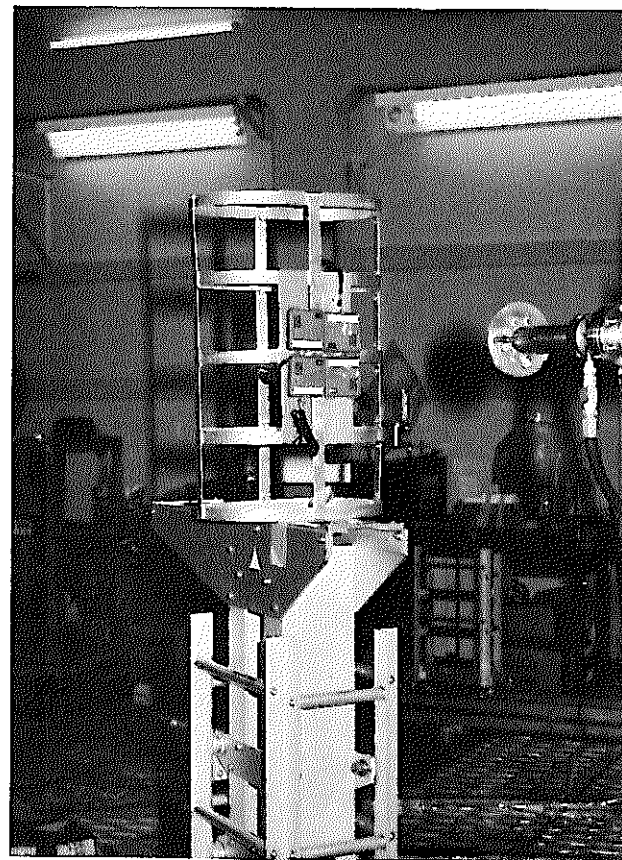


Fig. 3-3 単色速中性子線によるTLDバッジの照射状況
(フリーエア照射)

3.3 試験結果

TLDバッジをパラフィンファントム表面に取り付けた状態 (with phantom 照射) での照射条件を Table. 3-2 に示す。ターゲットからファントム表面までの距離は 0.144, 0.565, 1.0, 2.5 MeV については 5.25 cm, 4.0 MeV においては 7.75 cm とした。また TLD 素子の中性子線感度を求める場合の基準としてはファントム表面位置での前方から入射する中性子線のフルエンスおよび線量当量を考えた。この位置でのフルエンス率および線量当量率はモニター用ロングカウンターの計数値より求めることが可能であり、今回の試験における中性子フルエンスおよび線量当量^{注)}も Table. 3-2 に示す。

TLD バッジをパラフィンファントムに取り付けた with phantom 条件での試験の結果を Table. 3-3, 3-4, 3-5, 3-6 および 3-7 に示す。TLD 素子の発光量の測定は松下製 UD-710P 型自動リーダにて行ったが、表中には測定された TLD 素子の発光量からアニール時の残光線量と BG 値 (アニール日から測定日まで) に相当) を差し引いたものを TLD 発光量 ($\text{mR} \cdot \text{eq}^{-1}$) として示した。また、照射に際しては加速器ターゲットからは中性子のみならず微量の光子も放出される。このため TLD 素子に対する光子の寄与の差し引きは、 ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の発光量を利用して行った。即ち、 ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の発光量から ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ の発光量を減じたものを発光量補正值として表中に示した。この値が中性子線のみ起因する発光量であり、これを TLD バッジに照射した中性子量 (フルエンスおよび線量当量) で割ることにより ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の中性子線感度が求まる。

TLD バッジをパラフィンファントムに固定した状態で照射を行った場合の中性子線量計の各 ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子 (#2, #3, #4) の各エネルギーでの中性子線感度を Fig. 3-4 および Fig. 3-5 に示す。Fig. 3-4 は入射速中性子線の単位フルエンス当りの感度及び Fig. 3-5 は線量当量当りの感度を示しているが、両者においていずれの ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の感度も中性子エネルギーが高くなるにつれて小さくなっている。この原因としては、

- (1) 身体に入射する中性子線において体内で散乱し減速中性子線として後方散乱する割合 (アルベド率) は入射する中性子線のエネルギーにより変化する。アルベド率を計算した例として Adams が 30 cm 厚さの半無限平板ファントムに中性子線が入射した場合について検討した結果を Fig. 3-6 に示す。¹⁰⁾ 速中性子線として入射して熱・熱外中性子線として後方散乱する割合は入射中性子線のエネルギーが大きくなるにつれて小さくなっている。このため入射する中性子線のエネルギーが大きくなるにつれ人体で後方散乱して ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子に検出される割合が少なくなり、TLD バッジの入射中性子線に対する応答は小さくなる。

注) 線量当量は ICRP Pub 21⁵⁾ に示されたフルエンス線量当量変換係数を用いてフルエンスより求めた。

(2) 入射中性子線のエネルギーが大きくなるにつれ、人体で後方散乱したアルベド中性子線のエネルギー分布において高エネルギー成分が相対的に増加する。一方 ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子は Fig. 3-7 に示す ${}^6\text{Li}$ と ${}^{10}\text{B}$ の (n, α) 断面積から判るようにエネルギーが大きくなるに従い、素子自体の感度は小さくなっている。^{注)}このため TLD バッジの応答も、入射中性子線のエネルギーが大きくなるにつれて減少してくる。

などが考えられる。

今回の試験結果においても各 TLD 素子の速中性子線に対するエネルギー依存性としては、ファントムに入射する中性子線のエネルギーが大きくなるにつれて感度は小さくなっており、144 KeV の場合に比べ 4 MeV の中性子線に対する感度は、単位フルエンス当りでは約 $\frac{1}{2.5}$ であり線量当量当りでは約 $\frac{1}{1.5}$ であった。この ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の中性子エネルギー依存性を考慮して、実際の被曝管理においては前方より入射する中性子線のエネルギー情報を考慮した線量評価を行うことが必要である。

次に、中性子線量計の 3 個の ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子間の感度比として T_2/T_4 および T_3/T_4 とエネルギーの関係を Fig. 3-8 に示すが、144 KeV から 4 MeV の領域でこれらの比は全んど一定であった。このため、このエネルギー領域において各 TLD 素子間の感度比を利用して中性子線のエネルギー推定を行うことは困難であった。

また、今回の照射試験で得られた 144 KeV から 4 MeV の単色速中性子線に対する ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の感度、またさらに既に東海事業所での照射で求められた ${}^{252}\text{Cf}$, Am-Be, PuO_2 線源からの連続スペクトルの中性子線に対する感度を一諸にプロットしたものを Fig. 3-9 に示す。但し、 ${}^{252}\text{Cf}$, Am-Be, PuO_2 線源については各々の平均エネルギーに対してプロットを行った。この結果、これらの線源から放出される連続スペクトルの中性子線に対する ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ の感度は、その平均エネルギーに相当する単色速中性子線に対する感度より大きかった。

一方、TLD バッジをフリーエア条件（実際には Al フレームにバッジを装置）にて照射した結果を Table. 3-8 に示す。 ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の 144 KeV の単色速中性子線に対する感度は単位フルエンス当りで $5 \sim 6 \times 10^{-7} \text{ mR} \cdot \text{eq-}\gamma / \text{n} \cdot \text{cm}^{-2}$ であり線量当量当りで $0.08 \sim 0.10 \text{ R} \cdot \text{eq-}\gamma / \text{rem}$ であった。

注) ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子においては、 ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ および ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$ の (n, α) 反応で生じる荷電粒子の蛍光作用を利用している。

Table. 3-2 ペレトロン加速器によるパラフィンファントム装着時の単色速中性子線照射条件

Energy (MeV)	TLD条件	注1) 距離 (cm)	TLD素子№	時間 (S)	モニター用BF ₃ の 計数值 (cps)	PLCからフル エンスへ の変換係数	照射量	
							フルエンス (n/cm ²)	線量(mrem)
0.144	Badge case 組込 み	52.5	9824819 9824825 9824827 9825152	5127.7	PLC 600048 LCC 792008	13.2	7.95×10 ⁶	59.7
0.565	"	52.5	9824795 9824756 4824870 9824754	2560.5	PLC 500036 LLC 593604	15.4	7.71×10 ⁶	161
1.0	"	52.5	9824769 9824765 9824804 9824818	2530.2	PLC 500026 LLC 785038	11.8	5.90×10 ⁶	192
2.5	"	52.5	9824819 9824825 9824827 9825152	2569.7	PLC 400035 LLC 466127	15.6	6.24×10 ⁶	250
4.0	"	77.5	9824769 9824765 9824804 9824818	3771.2	PLC 800092 LLC 843487	10.2	8.17×10 ⁶	330

注1) ターゲットからファントム表面までの距離

注2) PLC: Polyethylene long counter

LLC: Lucite long counter

Table. 3-3 単色速中性子線に対するTLD素子の感度(1)

照射条件	照射量	TLD No.	T L D 発 光 量						感 度						
			読 取 値 (mR·eq-γ)				補 正 値 (mR·eq-γ)		フルエンス当り (mR·eq-γ/n·cm ⁻²)			線量当量当り (R·eq-γ/rem)			
			T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₂	T ₃	T ₂	T ₃	T ₄	T ₂	T ₃	T ₄	
エネルギー 144KeV ファントム 装着 (d=1.5cm) Badge case 組込 ターゲット からの距離 5.25cm 照射日 58.11.17 測定日 58.11.22	フルエンス 7.95×10 ⁶ n/cm ² 線量当量 59.7 mrem	9824769	17.3	62.4	70.0	185	46.4	54.0	169	5.84× 10 ⁻⁶	6.79× 10 ⁻⁶	2.13× 10 ⁻⁵	0.78	0.90	2.83
		9824765	17.3	63.0	64.7	190	47.0	48.7	174	5.91× 10 ⁻⁶	6.13× 10 ⁻⁶	2.19× 10 ⁻⁵	0.79	0.82	2.92
		9824804	17.3	51.0	57.6	168	35.0	41.6	152	4.41× 10 ⁻⁶	5.23× 10 ⁻⁵	1.91× 10 ⁻⁵	0.59	0.70	2.54
		9824818	12.1	51.1	51.1	185	35.1	51.0	173	4.42× 10 ⁻⁵	6.42× 10 ⁻⁵	2.18× 10 ⁻⁵	0.59	0.85	2.89
平 均		\bar{x}	16.0	56.9	64.8	182	40.9	48.8	167	5.15× 10 ⁻⁵	6.14× 10 ⁻⁵	2.10× 10 ⁻⁵	0.69	0.82	2.79
		σ_n	2.6	6.7	5.3	9.6	6.7	5.3	10.2	0.73× 10 ⁻⁵	0.58× 10 ⁻⁵	0.11× 10 ⁻⁵	0.10	0.27	0.15
		σ_n/\bar{x} ×100	16.3%	11.8%	8.2%	5.3%	16.5%	10.8%	6.2%	14.2%	9.4%	5.4%	14.2%	9.0%	5.3%

注) 補正值=読取値-γ線の寄与

Table. 3-4 単色速中性子線に対するTLD素子の感度(2)

照射条件	照射量	TLD No.	T L D 発 光 量						感 度						
			読 取 値 (mR・eq-γ)				補 正 値 (mR・eq-γ)		フルエンス当り (mR・eq-γ/n・cm ⁻²)			線量当量当り (R・eq-γ/rem)			
			T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₂	T ₃	T ₄	T ₂	T ₃	T ₄	T ₂	T ₃	T ₄
エネルギー 565KeV ファントム 装着 (d=1.5cm) Badge case 組込 ターゲット からの距離 5.25cm 照射日 58. 11. 17 測定日 58. 11. 22	フルエンス 7.71×10 ⁶ n/cm ² 線量当量 161 mrem	9824759	9.9	41.3	35.3	126	31.6	25.6	116	4.10× 10 ⁻⁶	3.32× 10 ⁻⁶	1.50× 10 ⁻⁵	0.196	0.159	0.720
		9824756	9.8	37.0	36.2	120	27.3	26.5	110	3.54× 10 ⁻⁶	3.44× 10 ⁻⁶	1.42× 10 ⁻⁵	0.170	0.165	0.683
		9824870	10.1	31.8	36.7	125	22.1	27.0	116	2.86× 10 ⁻⁶	3.51× 10 ⁻⁶	1.51× 10 ⁻⁵	0.137	0.168	0.720
		9824759	9.1	39.1	38.9	107	29.4	29.2	98	3.82× 10 ⁻⁶	3.84× 10 ⁻⁶	1.27× 10 ⁻⁵	0.183	0.181	0.609
平 均		\bar{x}	9.7	37.3	36.8	120	27.6	27.0	110	3.58× 10 ⁻⁶	3.53× 10 ⁻⁶	1.43× 10 ⁻⁵	0.172	0.168	0.683
		σ_n	0.43	4.1	1.5	8.7	4.1	1.5	8.5	0.46× 10 ⁻⁶	0.19× 10 ⁻⁶	0.096× 10 ⁻⁵	0.022	0.008	0.045
		$\frac{\sigma_n}{\bar{x}} \times 100$	4.5 %	10.9 %	4.2 %	7.3 %	14.7 %	5.7 %	7.7 %	12.9 %	5.5 %	6.7 %	12.8 %	4.7 %	6.6 %

注) 補正值=読取値-γ線の寄与

Table. 3-5 単色速中性子線に対するTLD素子の感度(3)

照射条件	照射量	TLD No	T L D 発 光 量							感 度					
			読 取 値 (mR · eq-γ)				補 正 値 (mR · eq-γ)			フルエンス当り (mR · eq-γ / n · cm ⁻²)			線量当量当り (R · eq-γ / rem)		
			T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₂	T ₃	T ₄	T ₂	T ₃	T ₄	T ₂	T ₃	T ₄
エネルギー 1.0MeV ファントム 装着 (d=1.5cm) Badge case 組込 ターゲット からの距離 5.25cm 照射日 58. 11. 3 測定日 58. 11. 6	フルエンス 5.90×10 ⁶ n/cm ² 線量当量 192 mrem	9824795	3.5	21.6	21.6	87.2	17.3	18.6	84.2	2.93× 10 ⁻⁶	3.15× 10 ⁻⁶	1.43× 10 ⁻⁵	0.090	0.097	0.439
		9824765	3.6	25.1	25.1	84.1	17.4	22.1	81.1	2.95× 10 ⁻⁶	3.75× 10 ⁻⁶	1.37× 10 ⁻⁵	0.091	0.115	0.422
		9824804	1.9	20.5	20.5	71.3	13.1	17.5	68.3	2.22× 10 ⁻⁶	2.99× 10 ⁻⁶	1.16× 10 ⁻⁵	0.066	0.091	0.356
		9824818	(0.3)	20.2	20.2	84.0	13.7	17.2	81.0	2.32× 10 ⁻⁶	2.92× 10 ⁻⁶	1.37× 10 ⁻⁵	0.071	0.090	0.422
平 均		\bar{x}	3.0	21.9	21.9	81.7	15.4	18.9	78.7	2.61× 10 ⁻⁶	3.30× 10 ⁻⁶	1.33× 10 ⁻⁵	0.080	0.098	0.410
		σ_n	0.78	1.9	1.9	6.1	1.99	1.95	6.11	0.34× 10 ⁻⁶	0.33× 10 ⁻⁶	0.10× 10 ⁻⁵	0.011	0.010	0.032
		$\sigma_n / \bar{x} \times 100$	26.0 %	8.9%	8.9%	7.5%	12.9 %	10.3 %	7.8 %	12.9%	10.3%	7.7%	13.2 %	10.2 %	7.8 %

注) 補正值=読取值-r線の寄与

Table. 3-6 単色速中性子線に対するTLD素子の感度(4)

照射条件	照射量	TLD №	T L D 発 光 量						感 度						
			読 取 値 (mR・eq- γ)				補 正 値 (mR・eq- γ)		フルエンス当り (mR・eq- γ /n・cm ⁻²)			線量当量当り (R・eq- γ /rem)			
			T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₂	T ₃	T ₄	T ₂	T ₃	T ₄	T ₂	T ₃	T ₄
エネルギー 2.5MeV ファントム 装着 (d=1.5cm) Badge case 組込 ターゲット からの距 離 52.5cm 照射日 58. 11. 3 測定日 58. 11. 6	フルエンス 6.88×10 ⁶ n/cm ² 線量当量 250 mrem	9824819	3.1	12.6	17.7	59.8	10.1	15.2	57.3	1.47× 10 ⁻⁶	2.21× 10 ⁻⁶	8.33× 10 ⁻⁶	0.040	0.061	0.229
		9824825	1.3	14.5	15.4	65.8	12.0	12.9	63.3	1.74× 10 ⁻⁶	1.88× 10 ⁻⁶	9.20× 10 ⁻⁶	0.048	0.052	0.253
		9824827	1.2	13.1	17.7	59.2	10.6	15.2	56.7	1.54× 10 ⁻⁶	2.21× 10 ⁻⁶	8.24× 10 ⁻⁶	0.042	0.061	0.227
		9825152	4.2	13.2	19.5	68.5	10.7	17.0	66.1	1.56× 10 ⁻⁶	2.47× 10 ⁻⁶	9.61× 10 ⁻⁶	0.043	0.068	0.264
平 均		\bar{x}	2.45	13.4	17.6	63.4	10.9	15.1	60.9	1.58× 10 ⁻⁶	2.19× 10 ⁻⁶	8.85× 10 ⁻⁶	0.043	0.061	0.243
		σ_n	1.26	0.70	1.45	3.99	0.70	1.50	3.98	0.10× 10 ⁻⁶	0.21× 10 ⁻⁶	0.58× 10 ⁻⁶	0.003	0.006	0.016
		σ_n/\bar{x} ×100	51.5 %	5.3 %	8.3 %	6.3 %	6.5 %	9.7 %	6.5 %	6.3 %	9.5 %	6.5 %	6.8 %	9.4 %	6.5 %

注) 補正值=読取値- γ 線の寄与

Table. 3-7 単色速中性子線に対するTLD素子の感度(5)

照射条件	照射量	TLD No.	T L D 発 光 量							感 度					
			読 取 値 (mR・eq-γ)				補 正 値 (mR・eq-γ)			フルエンス当り (mR・eq-γ/n・cm ⁻²)			線量当量当り (R・eq-γ/rem)		
			T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₂	T ₃	T ₄	T ₂	T ₃	T ₄	T ₂	T ₃	T ₄
エネルギー 4.0MeV ファントム 装着 (d=1.5cm) Badge case 組込 ターゲット からの距離 77.5cm 照射日 58.12.3 測定日 58.12.6	フルエンス 8.17×10 ⁶ n/cm ² 線量当量 330 mrem	9824769	6.6	21.2	24.1	74.3	14.2	17.1	67.3	1.74× 10 ⁻⁶	2.09× 10 ⁻⁶	8.22× 10 ⁻⁶	0.0043	0.052	0.204
		9824765	5.9	21.4	23.3	72.9	14.4	16.3	65.9	1.76× 10 ⁻⁶	2.00× 10 ⁻⁶	8.07× 10 ⁻⁶	0.0044	0.049	0.200
		9824804	7.9	17.8	22.9	69.3	10.8	15.9	62.3	1.32× 10 ⁻⁶	1.95× 10 ⁻⁶	7.63× 10 ⁻⁶	0.033	0.048	0.189
		9824818	7.7	19.9	22.3	70.9	12.9	15.3	63.9	1.58× 10 ⁻⁶	1.87× 10 ⁻⁶	7.82× 10 ⁻⁶	0.039	0.046	0.194
平 均		\bar{x}	7.0	20.1	23.1	71.9	13.1	16.2	64.9	1.60× 10 ⁻⁶	1.98× 10 ⁻⁶	7.94× 10 ⁻⁶	0.040	0.049	0.197
		σ_n	0.82	1.4	6.5	1.9	1.4	0.65	1.9	0.18× 10 ⁻⁶	0.08× 10 ⁻⁶	0.23× 10 ⁻⁶	0.004	0.002	0.006
		σ_n/\bar{x} ×100	11.6%	7.1%	2.8%	2.3%	11.0%	4.0%	2.9%	11.0%	4.0%	2.9%	10.8%	4.4%	2.9%

注) 補正值=読取値-γ線の寄与

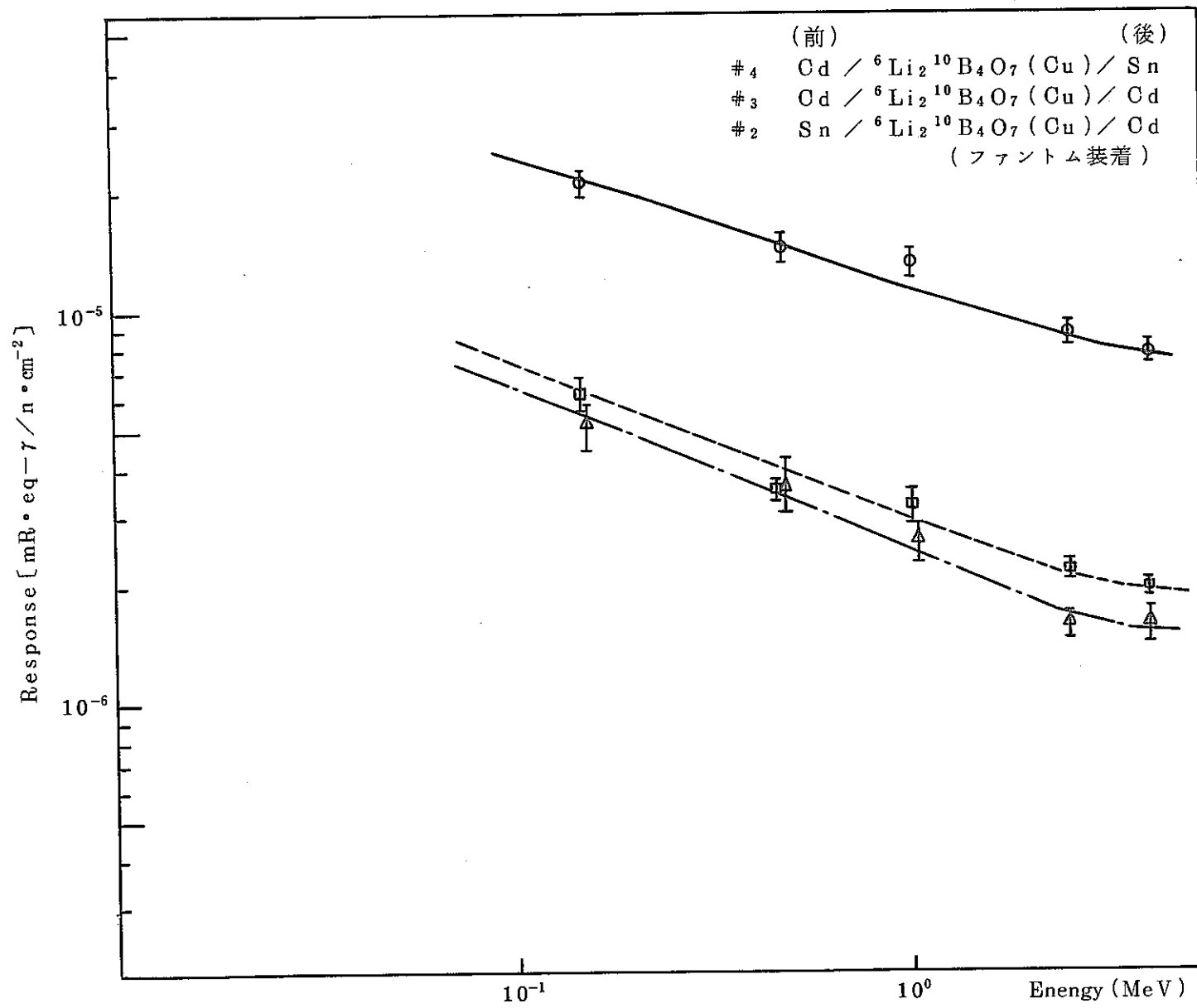


Fig. 3-4 ${}^6\text{Li}_2 {}^{10}\text{B}_4\text{O}_7 (\text{Cu})$ 素子の中性子線エネルギー依存性 (単位フルエンス当り)

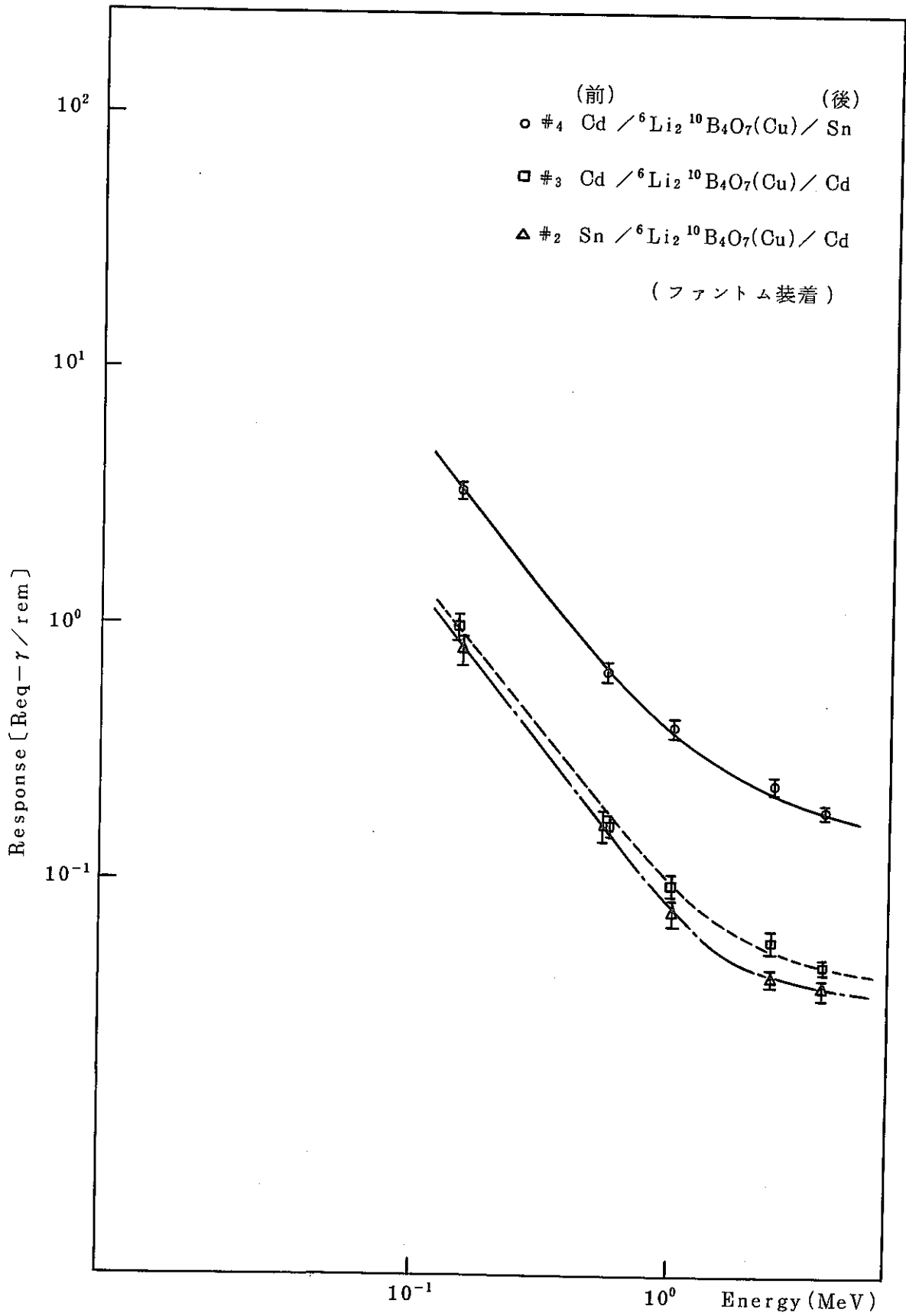


Fig. 3-5 ${}^6\text{Li}_2\text{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の中性子線エネルギー依存性 (線量当量当り)

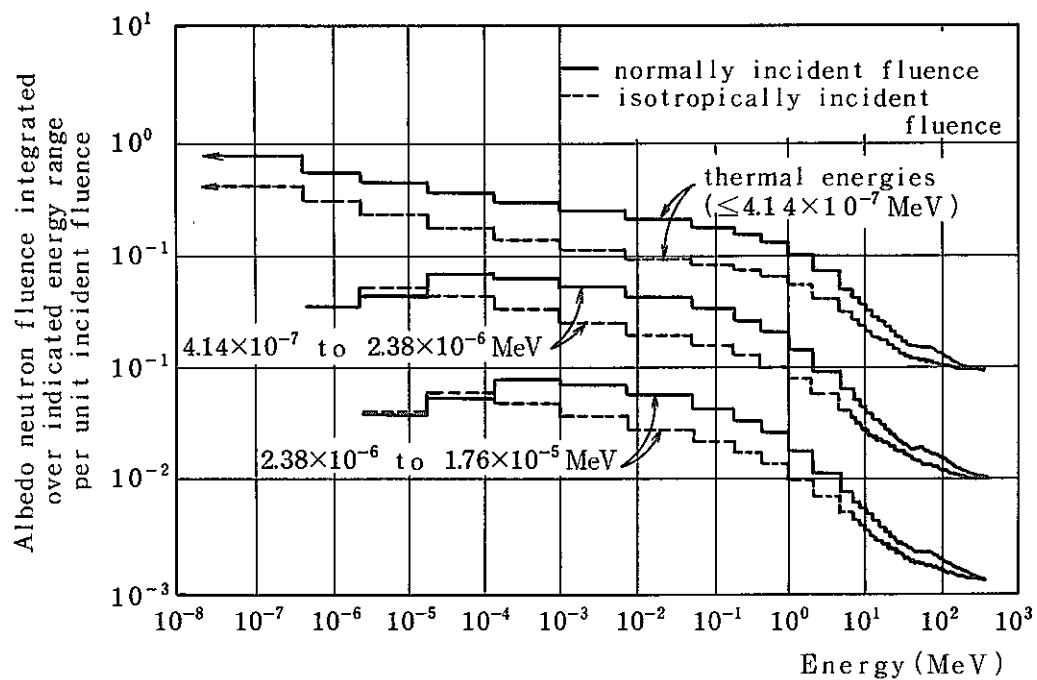
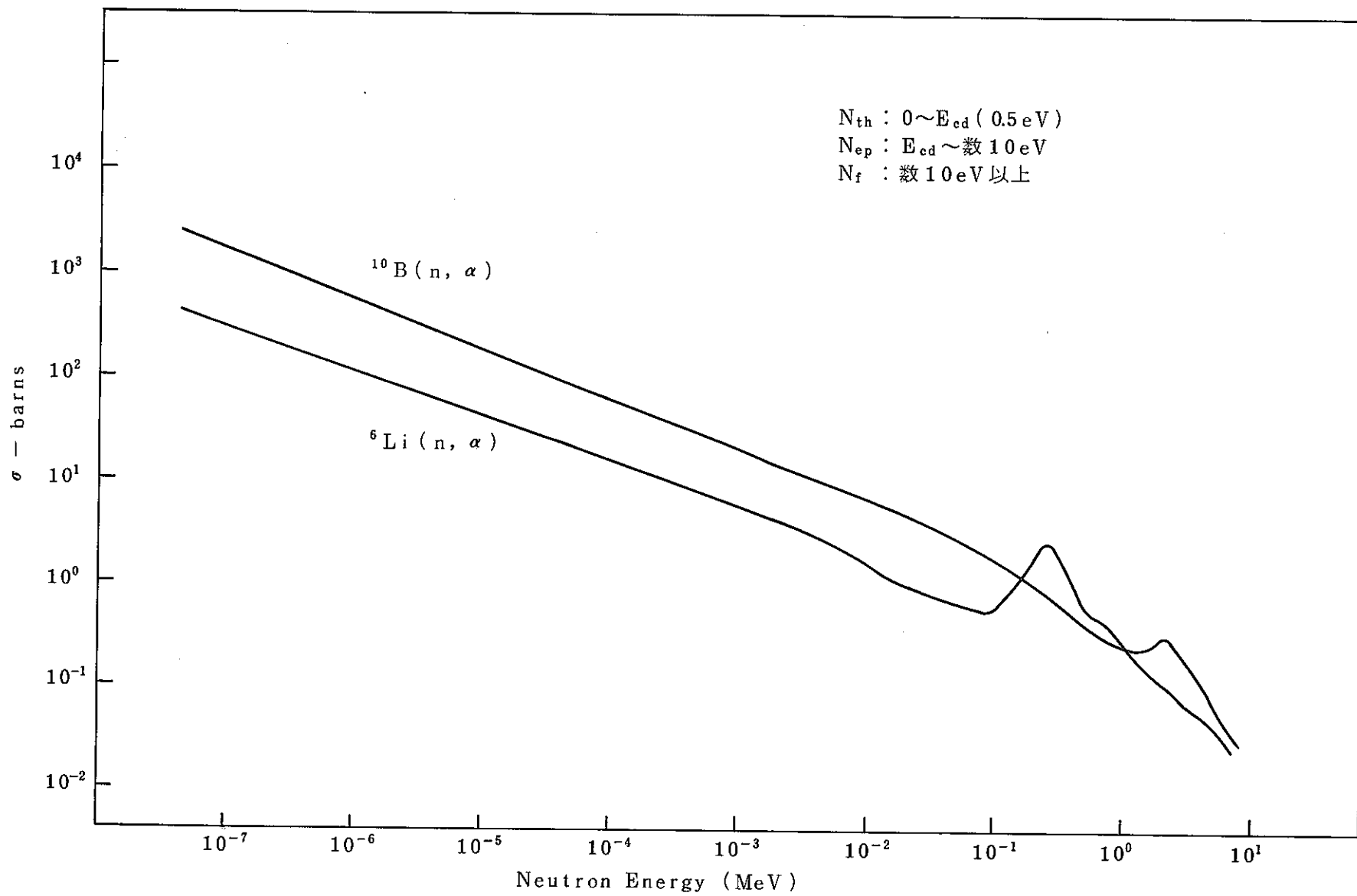


Fig. 3-6 単一エネルギー入射中性子線のフルエンス当りのアルベド中性子線のフルエンス (30 cm厚さの半無限組織等価平板への入射)¹⁰⁾

Fig. 3-7 ^6Li , ^{10}B の中性子線核反応断面積

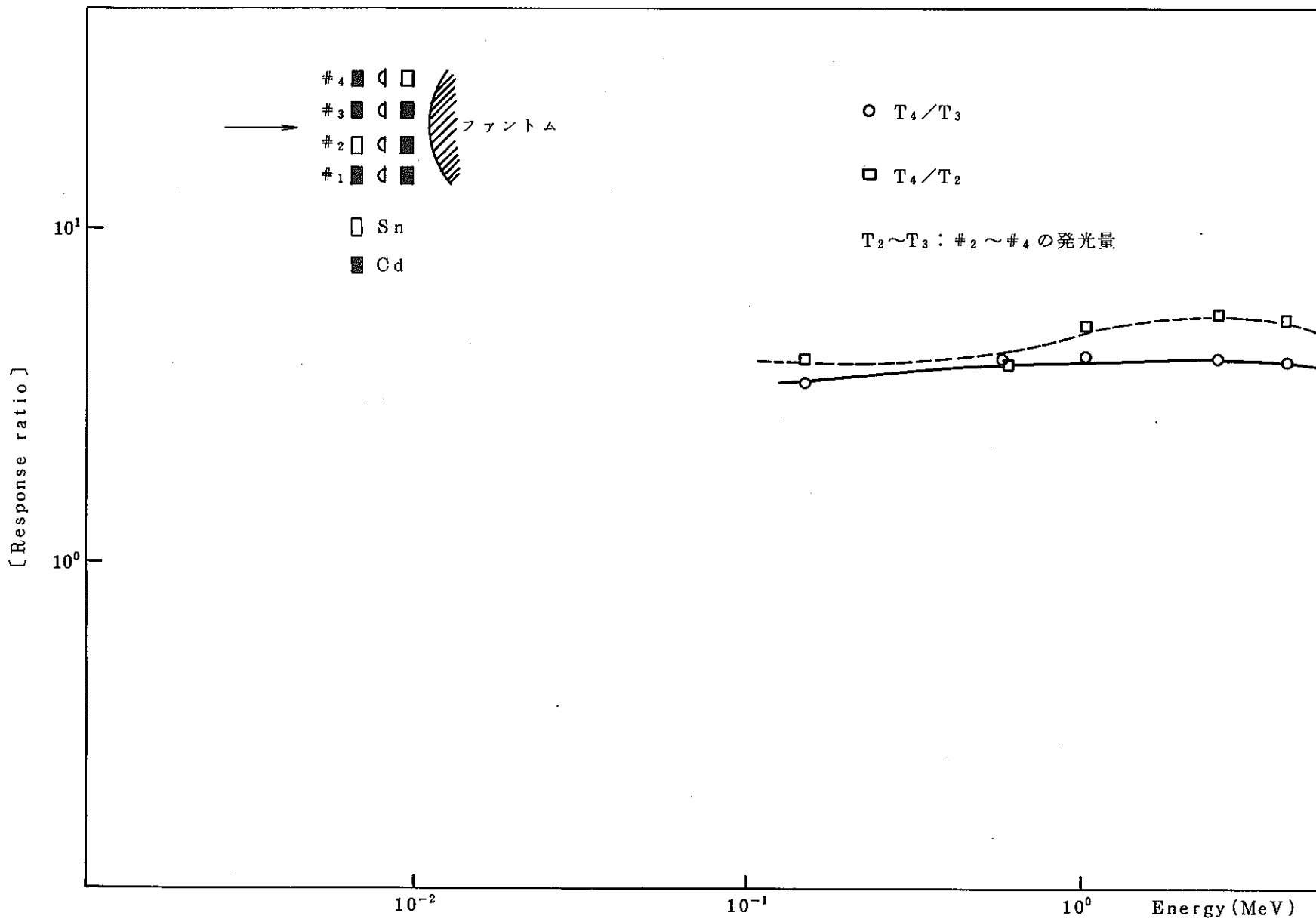


Fig. 3-8 TLD素子間の発光量比の中性子エネルギーによる変化

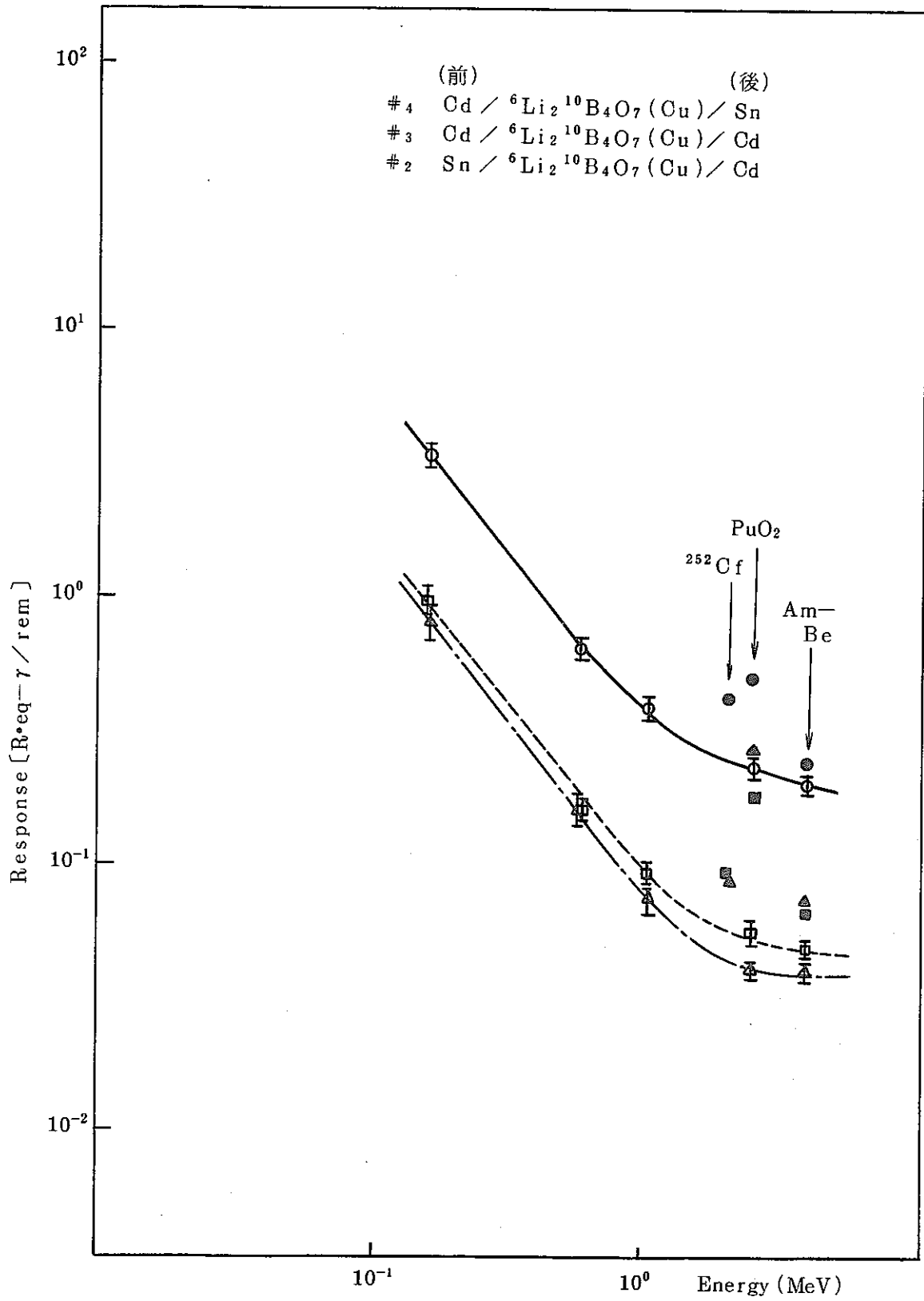


Fig. 3-9 ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の中性子線エネルギー依存性 (線量当量当り)

Table. 3-8 単色速中性子線に対するTLD素子の感度(6)

照射条件	照射量	TLD No.	T L D 発 光 量							感 度					
			読 取 値 (mR・eq-γ)				補 正 値 (mR・eq-γ)			フルエンス当り (mR・eq-γ/n・cm ⁻²)			線量当量当り (R・eq-γ/rem)		
			T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₂	T ₃	T ₄	T ₂	T ₃	T ₄	T ₂	T ₃	T ₄
エネルギー 144KeV フリーエ ー中での照 射 Badge case 組込 ターゲット からの距 離 52.5cm 照射日 58.11.17 測定日 58.11.22	フルエンス 8.76×10 ⁶ n/cm ² 線量当量 55.0 mrem	9824819	11.8	12.7	15.9	13.4	3.5	6.7	4.2	4.00× 10 ⁻⁷	7.65× 10 ⁻⁷	4.79× 10 ⁻⁷	0.064	0.122	0.076
		9824825	(16.9)	13.7	11.6	15.5	4.5	2.4	6.3	5.14× 10 ⁻⁷	2.74× 10 ⁻⁷	7.19× 10 ⁻⁷	0.082	0.044	0.115
		9824827	9.1	12.6	14.4	14.3	3.4	5.2	5.1	3.88× 10 ⁻⁷	5.94× 10 ⁻⁷	5.82× 10 ⁻⁷	0.062	0.095	0.093
		9825152	6.7	15.0	(6.9)	15.3	5.8	—	6.1	6.62× 10 ⁻⁷	—	6.96× 10 ⁻⁷	0.105	—	0.111
平 均		\bar{x}	9.2	13.5	14.0	14.6	4.3	4.8	5.4	4.91× 10 ⁻⁷	5.44× 10 ⁻⁷	6.19× 10 ⁻⁷	0.078	0.087	0.099
		σ_n	2.1	0.97	1.80	0.84	0.97	1.8	0.84	1.10× 10 ⁻⁷	2.04× 10 ⁻⁷	0.96× 10 ⁻⁷	0.017	0.032	0.016
		σ_n/\bar{x} ×100	22.6%	7.2%	12.8%	22.5%	22.5%	37.4%	15.5%	22.5%	37.3%	15.5%	22.1%	37.2%	15.7%

注) 補正值 = 読取値 - γ線の寄与

第4章 熱中性子線量測定におけるトレーサビリティの確立

4.1 電総研・標準熱中性子線場での ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の熱中性子感度の評価

4.1.1 電総研・標準熱中性子線場(黒鉛パイル)の概要

中性子線量計(UD-809P型)の ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の熱中性子線に対する感度の評価は、黒鉛パイルを利用した電総研の標準熱中性子線場にて行った。

電総研の標準熱中性子線場を構成する黒鉛パイルは寸法が230ℓ×190w×190h cmであるとともに、中心からいろいろの距離に検出器を挿入できるように水平方向の貫通孔(30mmφ)及び小穴(30mmφ×70mmh)が設けられている。また、中性子線源は上面から黒鉛パイルの中心に収納される。

黒鉛パイル中心の中性子線源から放出された中性子線は、黒鉛パイル中で徐々に減速し熱中性子化する。黒鉛パイル中での種々の位置での熱中性子線のフルエンス率[n/cm²・s]はAu箔の放射化法を利用して値付けされている。すなわち、25mmφで25μm厚さの金箔を、Alケース(厚さ1mm)入りとCdケース(厚さ1mm)入りの2種類で照射を行い、誘導放射能を4πβ-γ同時計数装置により測定し、次式にて金箔誘導放射能から熱中性子フルエンス率が求められている。⁶⁾

$$n_{thV_0} = \frac{196.9665 \times G_{Al} \times (R - F_{cd} R_{cd})}{60 \times 10^{-3} \times 6.0220 \times 10^{23} \times g \times \sigma_0 \times F}$$

(cm⁻²・s⁻¹)

ここに、

n_{thV_0} : Cd切断エネルギー以下の2200・s⁻¹中性子束密度

G_{Al} : Alケースによる熱中性子吸収に対する補正で、 $G_{Al} = 1.003$

R : Alケース入り金箔のmg当たり照射直後・飽和誘導放射能(dpm・mg⁻¹)

R_{cd} : Cdケース入り金箔についての上と同様の値(dpm・mg⁻¹)

F_{cd} : Cdケースによる熱外中性子吸収に対する補正($F_{cd} = 1.01$)。1966~68年の国際比較

g : ${}^{197}\text{Au}$ の熱中性子吸収断面積のnon/v因子($g = 1.0059$)

σ_0 : 2200m・s⁻¹の熱中性子に対する ${}^{197}\text{Au}$ の吸収断面積($\sigma_0 = 98.65 \pm 0.09$ b)

F : 金箔の熱中性子に対する自己遮蔽および金箔による熱中性子束の乱れに対する補正項($F = 0.9588$)

Au箔の放射化法による熱中性子線のフルエンス率の例として、黒鉛パイルの230cm軸（長軸）方向でAm-Be及び ^{252}Cf 線源について、また190cm軸（短軸）方向でAm-BeとRa(α)-Be線源について、それぞれTable 4-1およびTable 4-2に示すような絶対測定の結果が報告されている。また、この他BF₃計数管を介して、 ^{252}Cf 、Ra(α)-Be、 ^{239}Pu -Be線源に対して190cm軸方向での熱中性子線フルエンス率の測定結果がTable 4-3に示すように求められている。⁶⁾

Table. 4-1 Results of absolute measurements of thermal neutron fluence rates $n_{th} v_0$ by gold foil activation method along the axis of 230cm long in the graphite pile

Distance from neutron source located at the center of the pile (cm)	Am-Be (4 Ci) neutron source $Q=1.133 \times 10^7 \pm 0.6\% s^{-1}$ (May, 1981)				^{252}Cf neutron source $Q=1.652 \times 10^7 \times 0.4\% s^{-1}$ (Jan. 1, 1981)			
	Induced activities of aluminium covered gold foil R (dpm mg^{-1})	Induced activities of cadmium covered gold foil R_{cd} (dpm mg^{-1})	$R-F_{cd}R_{cd}$ (dpm mg^{-1})	$n_{th} v_0$ ($cm^{-2} s^{-1}$)	Induced activities of aluminium covered gold foil R (dpm mg^{-1})	Induced activities of cadmium covered gold foil R_{cd} (dpm mg^{-1})	$R-F_{cd}R_{cd}$ (dpm mg^{-1})	$n_{th} v_0$ ($cm^{-2} s^{-1}$)
10	338.37	85.45	252.06	1.449×10^4	338.71	94.46	243.30	1.398×10^4
30	222.46	34.67	187.45	1.077×10^4	202.89	32.08	170.49	9.797×10^3
50	116.72	7.85	108.79	6.252×10^3	100.17	5.57	94.55	5.433×10^3
70	57.76	1.38	56.36	3.239×10^3	46.91	0.67	46.23	2.657×10^3
90	25.32	0.18	25.14	1.445×10^3	20.28	0.076	20.20	1.161×10^3
Date of measurements	April, 1983				April 20, 1983			

Table. 4-2 Results of absolute measurements of thermal neutron fluence rates $n_{th} v_0$ by gold foil activation method along the axis of 190cm long in the graphite pile

Distance from neutron source located at the center of the pile (cm)	Am-Be (4 Ci) neutron source $Q=1.133 \times 10^7 \pm 0.6\% s^{-1}$ (May, 1981)				Ra (α) - Be (1 Ci) neutron source $Q=1.509 \times 10^7 \pm 0.6\% s^{-1}$ (May, 1981)			
	Induced activities of aluminium covered gold foil R (dpm mg^{-1})	Induced activities of cadmium covered gold foil R_{cd} (dpm mg^{-1})	$R-F_{cd}R_{cd}$ (dpm mg^{-1})	$n_{th} v_0$ ($cm^{-2} s^{-1}$)	Induced activities of aluminium covered gold foil R (dpm mg^{-1})	Induced activities of cadmium covered gold foil R_{cd} (dpm mg^{-1})	$R-F_{cd}R_{cd}$ (dpm mg^{-1})	$n_{th} v_0$ ($cm^{-2} s^{-1}$)
10	337.25	87.99	248.39	1.427×10^4	495.14	137.78	354.99	2.040×10^4
30	221.80	34.73	186.72	1.073×10^4	308.90	48.93	259.48	1.491×10^4
50	113.75	7.73	105.94	6.088×10^3	154.13	9.93	144.10	8.281×10^3
70	50.89	1.35	49.52	2.846×10^3	68.04	1.65	66.37	3.814×10^3
Data measurements	November, 1980				January, 1981			

Table.4-3 Thermal neutron fluence rates $n_{th}v_0$ measured with a calibrated $^{10}\text{BF}_3$ counter along the axis of 190cm long in the graphite pile

Distance from neutron source located at the center of the pile (cm)	^{252}Cf source $Q=1.652 \times 10^7 \pm 0.4\% \text{ s}^{-1}$ (Jan. 1, 1981)	Ra(α)-Be (0.1 Ci) $Q=1.617 \times 10^6 \pm 0.6\% \text{ s}^{-1}$ (May, 1981)	^{239}Pu -Be source $Q=4.65 \times 10^6 \pm 0.6\% \text{ s}^{-1}$ (May, 1981)
10	$2.345 \times 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$2.206 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$5.684 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
30	1.659×10^4	1.597×10^3	4.321×10^3
50	9.054×10^3	8.906×10^2	2.471×10^3
70	4.149×10^3	4.125×10^2	1.154×10^3
Date of measurements	February 10, 1981	December, 1980	December, 1980

4.1.2 試験方法

前項で示した電総研の標準熱中性子線場で ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ TLD素子の熱中性子線に対する感度を調べた。ここでは素子自体の感度を求めるため、中性子線量計(UD-809P)のプレート(素子4個を組み込んだ樹脂板)を 160 mg/cm^2 厚さのプラスチックケース(ホルダー)に入れた状態で照射を行った。

照射は黒鉛パイル中心に ${}^{252}\text{Cf}$ 4 Ci の中性子線源を置き、あらかじめ熱中性子フルエンスの求められている位置で行った。尚、TLDの設置方向は蛍光体カバー面を線源側にした。また、黒鉛パイル中では熱中性子のみならず熱外中性子線も存在するため、プレートをプラスチックホルダーに収納した状態及びこれを厚さ0.5mmのCdで覆った状態の2通りで照射を行い、Cdの熱中性子線に対するCut off効果を利用して熱外中性子線による寄与の差し引きを行い、熱中性子線だけに対する感度を求めた。

黒鉛パイル中での照射におけるTLD線量計の位置をFig. 4-1に示す。TLD線量計は黒鉛パイルの中心(線源位置)から長軸方向(230cm方向)の30, 50, 70, 90cmの位置の $25\text{ mm}\phi \times 50\text{ mm}$ の小隙にて1個ずつ照射を行い、 ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の熱中性子感度を求めた。尚、線源から30cmの距離については黒鉛パイルの短軸方向(190cm方向)の位置においても照射を行った。

参考として90cmの位置については、線源としてAm-Be線源(4Ci)を黒鉛パイルの中心においても照射を行い、 ${}^{252}\text{Cf}$ 線源の場合と同様に ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の熱中性子感度を調べた。

TLD線量計の配置

- A, A', A'' ; 線源から 30 cm
- B ; " 50 cm
- C ; " 70 cm
- D ; " 90 cm

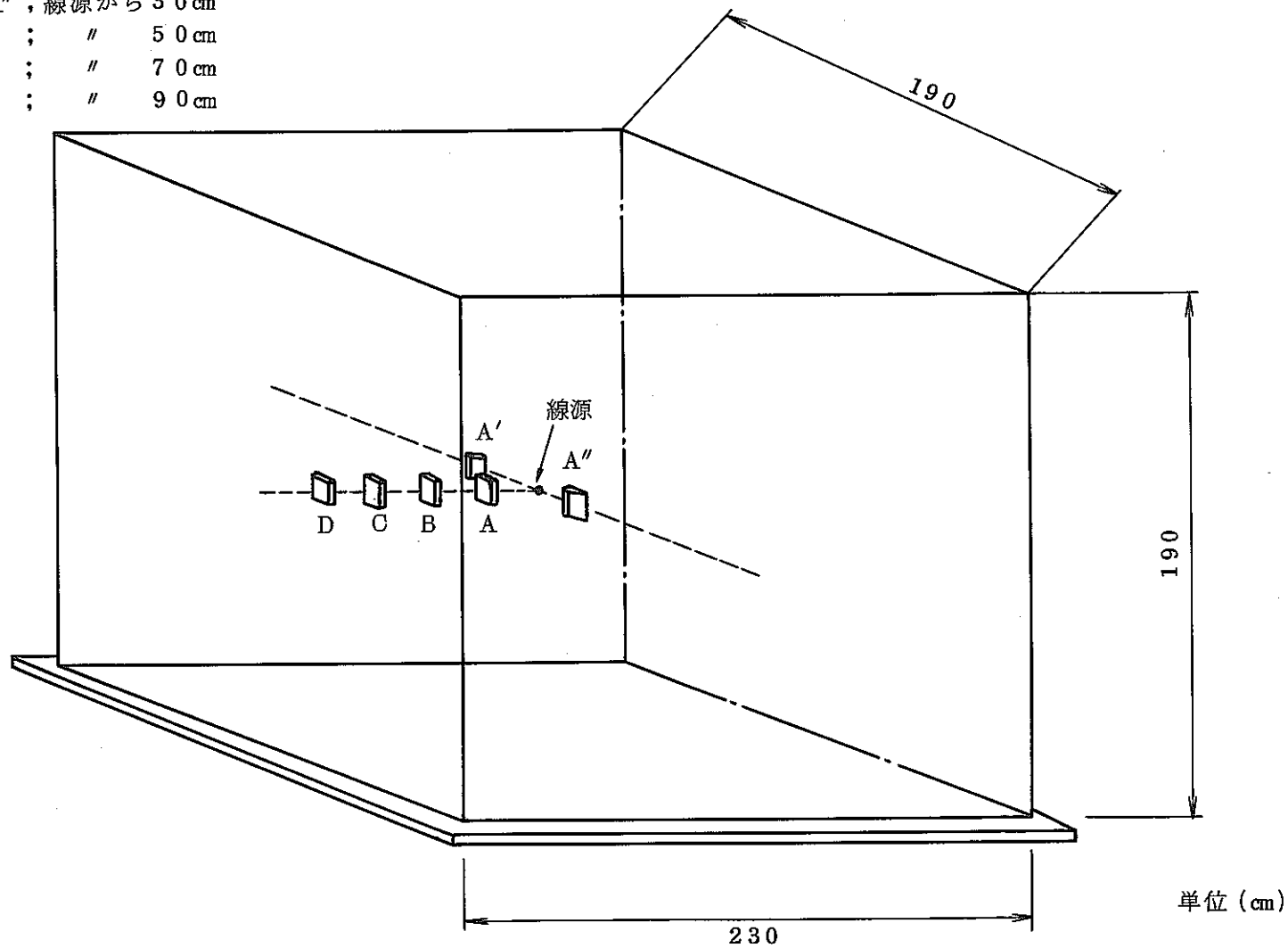


Fig. 4-1 電総研黒鉛パイル中での TLD線量計の配置

4.1.3 試験結果

${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の熱中性子線に対する感度を求めるために電総研の黒鉛パイル標準熱中性子線場で照射し TLD の発光量を測定した結果を Table. 4-4 に示す。表中において $T_1 \sim T_4$ は中性子線量計の第 1 ~ 第 4 素子の発光量を示している。実際の照射においては照射時間が一定でないことおよび照射位置のフルエンスの相異 (30 cm での長・短軸方向) のため個々の TLD 素子に位する中性子線照射は量少しづつ異なっていたが、表中には同一照射量に規格化した発光量を示した。

${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の熱中性子線に対する感度は次式にて求めた。

$$\begin{aligned} \text{熱中性子感度} = & \left\{ ({}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7 : \text{Cu})_{\text{Cd無}} - ({}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7 : \text{Cu})_{\text{Cd有}} \right\} \\ & - \left\{ (\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 : \text{Cu})_{\text{Cd有}} - (\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 : \text{Cu})_{\text{Cd有}} \right\} / \text{熱中性子照射量} \end{aligned}$$

但し, $({}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7 : \text{Cu})_{\text{Cd無}}$; 熱中性子線, 熱外中性子線および γ 線による ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の発光量 ($\text{mR} \cdot \text{eq} - \gamma$)

$({}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7 : \text{Cu})_{\text{Cd無}}$; γ 線による ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の発光量 ($\text{mR} \cdot \text{eq} - \gamma$)

$({}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7 : \text{Cu})_{\text{Cd有}}$; 熱外中性子線および γ 線 (補獲 γ 線を含む) による ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の発光量 ($\text{mR} \cdot \text{eq} - \gamma$)

$({}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7 : \text{Cu})_{\text{Cd有}}$; γ 線 (補獲 γ 線を含む) による ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の発光量

熱中性子線照射量 ; フルエンス (n/cm^2) 及び線量当量 (mr em)

TLD 素子の熱中性子線に対する感度を決定する要因のなかで, TLD に関係する要因としては

- (1) TLD 素子の蛍光体およびアクチベータの量とその混入状態
- (2) TLD 素子における ${}^6\text{Li}$ および ${}^{10}\text{B}$ の濃縮率 (含有量)
- (3) TLD リーダの加熱条件
- (4) TLD 素子表面の汚れ

等が考えられるが, この他標準との比較校正を行う場合の照射場の問題として

- (1) 熱中性子線のエネルギー分布 (熱中性子線と称しても線源からの距離によりそのエネルギー分布は少しづつ異っており, ${}^6\text{Li}$ と ${}^{10}\text{B}$ の (n, α) 反応断面積に応じて感度が変化する)
- (2) 黒鉛パイル中に TLD 素子を置くことによる熱中性子線の乱れ (perturbation)

などによっても比較校正の結果として求められる感度の値が異なってくる。そしてこれらの要因は熱中性子線に対する TLD 素子の感度の絶対値だけでなく, 素子間の感度のバラツキにも

影響を及ぼす。

今回の照射試験の結果では、黒鉛パイルの中心に ^{252}Cf 線源を置いた場合に線源から30cm, 50cm, 70cm, 90cm位置での照射に対して、 $^6\text{Li}_2^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の熱中性子線の単位フルエンス当りの感度の平均はそれぞれ 1.14×10^{-4} , 1.24×10^{-4} , 1.23×10^{-4} , $1.29 \times 10^{-4} \text{mR} \cdot \text{eq-}\gamma / \text{n} \cdot \text{cm}^{-2}$ であった。また、これは単位線量当量当りではそれぞれ107, 116, 116, 121 $\text{mR} \cdot \text{eq-}\gamma / \text{mrem}$ であった。この結果、 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の熱中性子線に対する感度は、単位フルエンス当りで約 $1.1 \sim 1.3 \times 10^{-4} \text{mR} \cdot \text{eq-}\gamma / \text{ncm}^{-2}$ 、単位線量当量当りで約105~120 $\text{mR} \cdot \text{eq-}\gamma / \text{mrem}$ であった。また、Am-Be線源にて照射で90cm位置において求めた感度は $1.28 \times 10^{-4} \text{mR} \cdot \text{eq-}\gamma / \text{n} \cdot \text{cm}^2$ および120 $\text{mR} \cdot \text{eq-}\gamma / \text{mrem}$ であった。

^{252}Cf 線源による照射において線源からの距離によって各位置で求めた感度に差があることが判った。即ち線源から30cmでは線量当量当りで107 $\text{mR} \cdot \text{eq-}\gamma / \text{mrem}$ で90cmの位置では121 $\text{mR} \cdot \text{eq-}\gamma / \text{mrem}$ であり両者には約10%の相違があり、50cmと70cmの位置で求めた感度はこの間にあった。ここで各位置での照射に使用したTLD素子の感度のバラツキについては、同一条件で一定線量の照射に対するTLD素子の感度のバラツキを調べた結果をTable.4-5に示すが、電総研黒鉛パイル中の30cmと90cm位置での照射に使用した各TLD素子においては著しい感度差はなかった。このため各照射位置で得られた $^6\text{Li}_2^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の熱中性子感度の相違については今回の試験データからだけでは説明することが出来なかつたので今後さらに検討を行う必要がある。

次にCdシールドがある場合と無い場合の $^6\text{Li}_2^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の発光量の比として、次式にてCd比を求めた。

$$\text{Cd比} = \frac{\text{Cdシールドが無い場合の}^6\text{Li}_2^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})\text{素子の発光量}^*}{\text{Cdシールドが有る場合の}^6\text{Li}_2^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})\text{素子の発光量}^*}$$

$$= \frac{T_{\text{th}} + T_{\text{ep}}}{T_{\text{ep}}}$$

T_{th} : 熱中性子線に起因する発光量

T_{ep} : 熱外中性子線に起因する発光量

今回の照射では、 ^{252}Cf 線源を黒鉛パイルの中心においた場合、Cd比は30, 50, 70, 90cmの位置において各々31, 98, 388, 446であり、この結果から黒鉛パイル中心から所い距離においては線源から放出される中性子は充分には熱化されておらず一部は熱外中性子成分として存在しているが、距離が大きくなるにつれて熱平衡に達した中性子の割合が多くなっていると考えられる。

* 同一条件で照射された $^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子にて γ 線の寄与を差し引いた発光量

Table. 4-4 電総研標準熱中性子場（黒鉛パイプ）での ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7$ (Cu) 素子の熱中性子線感度の評価

線源からの距離 (cm)	Cdシールド条件	照射日	照射量		TLD% TLD#	設置場所	TLD発光量の読取値 (mR·eq-γ)				熱中性子1 mrem 照射相当の発光量 (mR·eq-γ)			熱中性子感度						Cd比	
			フルエンス (n/cm ²)	線量当量 (mrem)			T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₂	T ₃	T ₄	線量当量当り (R·eq-γ/rem)			フルエンス当り (×10 ⁻⁴ mR·eq-γ/cm ²)				Ave
														T ₂	T ₃	T ₄	T ₂	T ₃	T ₄		
30	Cd 無	第1回目 (58.6.23)	5.35×10 ⁶	5.72	9823921	A'	8.2	570	592	621	98.2	102	107	94.2	98.3	104	1.01	1.05	1.14	○線量当量当り x̄ = 107 σ _n = 7.0 σ _n /x̄ = 6.6%	31.2
			5.62×10 ⁶	6.00	9824072	A	7.8	689	715	693	113	114	109	114	110	1.17	1.17	1.21	1.18		
			5.35×10 ⁶	5.72	9823937	A''	10.1	631	598	641	109	102	111	105	97.9	107	1.12	1.05	1.14		
		第2回目 (58.8.26)	6.96×10 ⁶	7.44	9823921	A'	8.8	780	853	834	104	114	111	98.9	110	108	1.05	1.16	1.13		
			8.32×10 ⁶	8.89	9824072	A	8.2	1045	1154	1045	116	129	116	113	125	112	1.20	1.34	1.20		
			7.67×10 ⁶	7.44	9823937	A''	9.3	936	877	935	113	106	113	109	102	109	1.17	1.09	1.17		
	Cd 無	第1回目 (58.6.23)	5.41×10 ⁸	57.8	9824074	A'	101	304	306	289	356	360	330	-	-	-	-	-	-	○フルエンス当り x̄ = 1.14×10 ⁻⁴ σ _n = 0.07×10 ⁻⁴ σ _n /x̄ = 6.5%	
			5.68×10 ⁸	60.7	9824748	A	98.9	309	318	311	346	362	351	-	-	-	-	-	-		
			5.41×10 ⁸	57.8	9824749	A''	99.0	338	289	309	(4.15)	330	365	-	-	-	-	-	-		
		第2回目 (58.8.26)	6.19×10 ⁷	66.1	9824074	A'	118	369	365	340	318	375	337	-	-	-	-	-	-		
			6.55×10 ⁷	70.0	9824748	A	124	377	353	366	362	327	346	-	-	-	-	-	-		
			6.21×10 ⁷	66.4	9824749	A''	115	403	373	391	(4.33)	387	384	-	-	-	-	-	-		
50	Cd 無	(59.2.17)	7.86×10 ⁶	8.38	9823921	B	12.1	897	960	937	106	113	115	105	112	114	1.12	1.20	1.22	○線量当量当り x̄ = 116 σ _n = 8.8 σ _n /x̄ = 7.6%	98.3
					9824072	B	12.0	1112	1119	1022	131	132	121	130	131	120	1.39	1.40	1.28		
					9823937	B	11.1	988	902	981	117	106	116	116	105	115	1.24	1.12	1.23		
	Cd 有	(59.2.18)	2.36×10 ⁸	253	9824074	B	477	830	806	812	1.37	1.27	1.30	-	-	-	-	-	-		
			2.62×10 ⁸	280	9824748	B	552	884	803	798	1.25	0.96	0.94	-	-	-	-	-	-		
			2.67×10 ⁸	286	9824749	B	537	906	848	919	1.26	1.06	1.30	-	-	-	-	-	-		
70	Cd 無	(59.2.17)	5.13×10 ⁸	5.48	9824819	C	10.2	641	654	603	115	117	108	115	117	108	1.23	1.25	1.15	○線量当量当り x̄ = 116 σ _n = 44 σ _n /x̄ = 3.8%	38.8
					9824825	C	12.0	658	650	653	118	117	117	118	117	117	1.26	1.25	1.25		
					9824827	C	7.9	603	678	659	108	122	118	108	122	118	1.15	1.30	1.26		
	Cd 有	(59.2.18)	1.16×10 ⁸	124	9824795	C	259	275	284	283	0.32	0.40	0.39	-	-	-	-	-	-		
			1.28×10 ⁸	137	9824756	C	230	250	277	295	-	0.13	0.26	-	-	-	-	-	-		
			1.31×10 ⁸	140	9824870	C	266	312	304	301	0.34	0.28	0.26	-	-	-	-	-	-		

線源 ${}^{252}\text{Cf}$
放出率 $1.652 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ (Jan. 1, 1981)

Table. 4-4 電総研標準熱中性子線場（黒鉛パイプ）での ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7$ (Cu) 素子の熱中性子線感度（つづき）

線源からの距離 (cm)	Cdシールド 条件	照射日	照射量		TLD板	設置 場所	TLD発光量の読取値 (mR·eq-γ)				熱中性子1mrem 照射相当の発光量 (mR·eq-γ)			熱中性子感度						Cd比	
			フルエンス (n/cm ²)	線量当量 (mrem)			T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₂	T ₃	T ₄	線量当量当り (R·eq-γ/rem)			フルエンス当り (10 ⁻⁴ mR·eq-γ/n ^{cm²})				Ave
														T ₂	T ₃	T ₄	T ₂	T ₃	T ₄		
90	Cd無	第1回目 (58.6.23)	2.60×10 ⁶	2.78	9824662	D	2.3	3.35	3.39	3.47	1.19	1.21	1.24	1.19	1.21	1.24	1.27	1.29	1.32	○線量当量当り $\bar{x} = 121$ $\sigma_n = 4.8$ $\sigma_n/\bar{x} = 4.0$ ○フルエンス当り $\bar{x} = 1.29 \times 10^{-4}$ $\sigma_n = 0.05 \times 10^{-4}$ $\sigma_n/\bar{x} = 4.0\%$	446
					9824582	D	3.2	3.36	3.25	3.52	1.20	1.16	1.26	1.20	1.16	1.26	1.28	1.24	1.35		
					9823764	D	3.8	3.17	3.20	3.14	1.13	1.14	1.12	1.13	1.14	1.12	1.21	1.22	1.20		
		第2回目 (58.8.26)	3.05×10 ⁶ 2.86×10 ⁶ "	3.26 2.72 "	9824662	D	4.2	3.35	3.36	3.51	1.21	1.24	1.29	1.21	1.24	1.29	1.29	1.32	1.38		
					9824582	D	4.7	3.41	3.23	3.43	1.23	1.16	1.24	1.23	1.16	1.24	1.31	1.24	1.32		
					9823650	D	6.4	3.41	3.40	3.55	1.23	1.22	1.28	1.23	1.22	1.28	1.31	1.30	1.37		
	第3回目 (59.2.19)	3.36×10 ⁶	3.59	9824662	D	8.7	4.53	4.37	4.77	1.23	1.19	1.30	1.23	1.19	1.30	1.31	1.27	1.39			
				9823650	D	11.4	4.25	4.46	4.61	1.15	1.21	1.25	1.15	1.21	1.25	1.23	1.29	1.34			
Cd有	第1回目 (58.8.26)	8.12×10 ⁷	86.8	9823800	D	1.31	1.68	1.57	1.53	0.36	0.23	0.18	-	-	-	-	-	-			
				9823885	D	1.42	1.58	1.70	1.68	0.24	0.38	1.36	-	-	-	-	-	-			
第2回目 (59.2.18)	5.05×10 ⁶ 5.60×10 ⁶ 5.71×10 ⁶	5.40 5.98 6.10	9823800	D	1.00	1.22	1.15	1.02	0.47	0.34	0.09	-	-	-	-	-	-				
			9823885	D	1.06	1.14	1.27	1.24	0.12	0.33	0.28	-	-	-	-	-	-				
			9824162	D	1.06	1.26	1.18	1.30	0.28	0.14	0.34	-	-	-	-	-	-				

線源 ${}^{252}\text{Cf}$
 放出率 $1.652 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ (Jan. 1, 1981)

Table. 4-4 電総研標準熱中性子線場（黒鉛パイル）での $^6\text{Li}_2^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の熱中性子線感度（つづき）

線源からの距離 (cm)	Cdシールド 条件	照射日	照射量		TLD No	設置 場所	TLD発光量の読取値 (mR·eq-γ)				熱中性子1mrem 照射相当の発光量 (mR·eq-γ)			熱中性子感度						Ave	
			フルエンス (n/cm ²)	線量当量 (mrem)			T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₂	T ₃	T ₄	線量当量当り (R·eq-γ/rem)			フルエンス当り (×10 ⁻⁴ mR·eq-γ/cm ⁻²)				
														T ₂	T ₃	T ₄	T ₂	T ₃	T ₄		
90	Cd無	(59.2.17)	3.47×10 ⁶	3.71	9824769	D	39	494	480	471	132	128	125	132	128	125	1.41	1.37	1.34	○線量当量当り $\bar{x} = 120$ $\sigma_n = 9.8$ $\sigma_n/\bar{x} = 8.1\%$ ○フルエンス当り $\bar{x} = 1.28 \times 10^{-4}$ $\sigma_n = 0.11 \times 10^{-4}$ $\sigma_n/\bar{x} = 8.3\%$	
					9824765	D	7.5	456	489	474	121	130	126	121	130	126	1.29	1.39	1.35		
					9824804	D	(7.0)	(411)	(396)	(408)	109	105	108	109	105	108	1.16	1.12	1.15		
	Cd有	(59.2.18)	7.40×10 ⁷	79.1	9825152	D	170	170	169	166	0.17	0.16	0.12	-	-	-	-	-	-		
					9824832	D	89	110	109	109	0.25	0.23	0.23	-	-	-	-	-	-		-
					4.62×10 ⁷	49.4	9824832	D	89	110	109	109	0.25	0.23	0.23	-	-	-	-		-

線源 Am-Be
放出率 1.133×10⁷s⁻¹ (May, 1981)

Table. 4-5 ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の感度のバラツキ

区 分	TLD №	TLD発光量 (mR・eq- γ)				γ 線差引補正值* (mR・eq- γ)			Ave
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₂	T ₃	T ₄	
電総研黒鉛パイルの 90 cm位置での照射 に使用した素子	9823921	7.4	163	177	180	156	170	173	$\bar{x} = 166$ $\sigma_n = 9.8$ $\sigma_n/\bar{x} \times 100 = 5.9\%$
	9823937	8.5	180	165	170	173	158	163	
	9824072	4.5	169	178	171	162	171	164	
電総研黒鉛パイルの 30 cm位置での照射 に使用した素子	9824662	4.4	173	162	176	167	156	170	$\bar{x} = 165$ $\sigma_n = 10.2$ $\sigma_n/\bar{x} \times 100 = 6.2\%$
	9824582	4.1	170	155	173	164	149	167	
	9823764	8.4	175	172	165	169	166	159	
	9823650	8.7	176	173	177	170	167	171	

照 射 ; 東海事業所 F棟黒鉛パイル

線源からの距離 ; 35 cm

* TLD発光量-T₁の平均値

4.2 動燃東海事業所・熱中性子線場の中性子線量当量率の測定

4.2.1 動燃・熱中性子線場（黒鉛パイル）の概要

動燃の黒鉛パイル熱中性子線場は東海事業所・安全管理別棟（F棟）の個人被曝線量計校正室に設けられている。動燃においてはこの黒鉛パイルを利用して熱中性子線および熱外中性子線の照射を行い、TLDバッジによる中性子線量当量評価式における種々の係数（アルベド係数、TLD素子の発光量から線量当量への変換係数等^{注)}）の決定あるいはTLD素子の感度試験を実施している。

動燃所有の黒鉛パイルは $1.0 \times 1.0 \times 1.0$ (m)の寸法であり、線源は中心の $25\text{mm}\phi \times 50\text{mm}$ の穴に収納して使用する。この黒鉛パイルにおいては側面中央部から $78 \times 78 \times 500\text{mm}$ の黒鉛ブロックを中心方向へ出し入れすることが可能であるが、この黒鉛ブロックには線源から10, 15, 20, 25, 30, 35, 40の位置に $50 \times 58 \times 10\text{mm}$ の小空隙があり、ここにTLD素子を入れて照射を行う。但し、照射は1度に1ヶ所の位置で行うものとし、照射に使用しない空隙は小片の黒鉛をつめておくものとする。また、TLD照射用の小孔とは別の位置に、中心から35cmのところ^{*}にBF₃計数管を挿入できる $30 \times 50 \times 350\text{mm}$ の空隙が設けられている。

4.2.2 線量当量率の測定方法

電総研の黒鉛パイル標準中性子線場で照射を行うことにより熱中性子線に対する感度（単位フルエンスおよび単位線量当量当りの発光量）を求めた⁶Li₂¹⁰B₄O₇ (Cu)素子を使用して、動燃の黒鉛パイル中における熱中性子線によるフルエンス及び線量当量率の比較校正を行った。即ち、中性子評価用TLDプレートを $160\text{mg}/\text{cm}^2$ 厚さのプラスチックケースに入れた線量計を動燃所有の黒鉛パイル中で中心から20, 30, 35, 40cmの位置および黒鉛パイル表面から20cmの位置に置いて照射し、その発光量から電総研標準中性子線場で得られた校正定数を使って各位置における中性子線のフルエンス及び線量当量率を求めた。この場合に、各位置においては熱中性子線だけでなく熱外中性子線も存在するため、素子プレートをプラスチックケースに入れた状態の他にさらにこれをCdシールド^{*}(0.5mm厚)で囲んだ状態で照射を行い、熱外中性子線の寄与の差し引きを行って熱中性子線だけによる線量を求めた。即ちまずTLD素子を一定時間照射した後で測定を行い、単位時間時間(1hr)当りの素子の発光量を求める。次に、Cdシールドが有る条件での発光量からCdシールドが有る条件での発光量を差し引いて熱中性子だけに起因する発光量を求め、この発光量にTable. 4-4に示した熱中性子感度による補正を行い黒鉛パイルの各位置における熱中性子線のフルエンスおよび線量当量率を求める。

注) 詳細は第5章を参照のこと。

* 熱中性子カット用: Cut off energy 0.5 eV

黒鉛パイル中のTLDを挿入する空隙は小さいため一度に1個のTLDに対して照射を2回繰り返して行い、その平均よりフルエンス率及び線量当量率を求めた。尚、TLD素子の方向は全て素子カバー面が線源側を向くようにした。

4.2.3 測定結果

${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ TLD素子を使用して動燃の黒鉛パイルにおいてパイル中心に101 μCi の ${}^{252}\text{Cf}$ 線源を置いた時の熱中性子線のフルエンスおよび線量当量率を測定した結果の一覧をTable. 4-6に示す。表中において T_1 , T_2 , T_4 はTLD線量計の第2, 第3, 第4素子(いずれも ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$)の発光量であり、ここでは第1素子(${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$)により γ 線の寄与(Cdシールド使用の場合は熱中性子捕獲 γ 線も含む)を差し引いた値として示した。

黒鉛パイル中での熱中性子線のフルエンスおよび線量当量率の線源からの距離による変化をFig 4-2, Fig 4-3に示す。また、さらに ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子をCd(0.5mm厚)シールドで覆った場合のCdの変化をFig 4-4に示す。この結果、黒鉛パイル中で線源から20cm~40cmの範囲で熱中性子線のフルエンスは141~300n/cm²・sであり、熱中性子線量当量率は0.54~1.43mrem/hrであった。また、さらに黒鉛パイル表面から20cmの位置における熱中性子線のフルエンスは1.55n/cm²・sであり線量当量率は 6.0×10^{-8} mrem/hrであった。

動燃の黒鉛パイル中における熱中性子線のフルエンスおよび線量当量率については、昭和52年に $\text{CaSO}_4(\text{Tm}):\text{LiF}$ 蛍光体を用いたTLD UD-136N, UD-137N(松下製)素子を用いて既に値付を実施しており、各種TLD素子の熱中性子線に対する線度の評価あるいはTLDバッジにおける線量評価式の決定等に利用されてきた。この方法はUD-136およびUD-137N素子の熱中性子線に対する感度として古田らの計算した値⁴⁾を用いてフルエンス率および線量当量率の測定を行ったものであり、この値をTable. 4-7に示す。この従来から測付けされていた熱中性子線のフルエンスおよび線量当量率と今回 ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子を用いて測定した値と比較すれば両者の間の差は10~15%以内であった。従来のUD-137, UD-137N素子による値付けが国家標準とのトレーサビリティが確立されていない状態で測定した結果であることを考えれば、両者は比較的良く一致したものと考えられる。

Table. 4-6 動燃黒鉛パイプ標準場の熱中性子線量率の値付け

線源からの距離 (cm)	Cd条件	照射時間	TLD枚	TLD発光量の読取値 (mR·eq-γ)			1時間当りのTLD 発光量(mR·eq-γ)			熱中性子のみによる① 発光量(mR·eq-γ)			熱中性子線の線量当量率 (mrem/hr) および② フルエンス率 (n/cm ² ·s)					Cd比
				T ₂	T ₃	T ₄	T ₂	T ₃	T ₄	T ₁	T ₂	T ₃	T ₁	T ₂	T ₃	平均		
20	Cd無	h m s 4:40:00	9824582	852	808	882	183	173	189	172	164	181	1.42 (369)	1.43 (372)	1.45 (377)	○線量率 $\bar{x} = 1.43 \text{ mrem/h}$ $\sigma_n = 0.012$ " ○フルエンス率 $\bar{x} = 373 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ $\sigma_n = 3.30$ "	20.3	
	Cd有	26:04:00	"	247	248	206	9.48	9.51	7.90	-	-	-	-	-	-			
30	Cd無	1:16:00	9824662	155	162	166	122	128	131	118	123	126	0.99 (257)	1.00 (260)	1.00 (260)	○線量当量率 $\bar{x} = 1.00 \text{ mrem/h}$ $\sigma_n = 0.005$ " ○フルエンス率 $\bar{x} = 259 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ $\sigma_n = 1.41$ "	27.9	
	Cd有	24:58:00	"	98	120	123	3.92	4.81	4.93	-	-	-	-	-	-			
35	Cd無	4:28:00	9824072	447	457	442	100	102	99.0	97.0	98.2	96.0	0.87 (226)	0.82 (211)	0.82 (213)	○線量当量率 $\bar{x} = 0.83 \text{ mrem/h}$ $\sigma_n = 0.026$ " ○フルエンス率 $\bar{x} = 217 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ $\sigma_n = 6.6$ "	34.3	
	Cd有	47:36:00	"	144	178	133	3.03	(3.79)	2.79	-	-	-	-	-	-			
40	Cd無	3:04:00	9824852	202	196	219	65.9	63.9	71.4	64.4	62.6	69.8	0.53 (138)	0.54 (140)	0.56 (146)	○線量当量率 $\bar{x} = 0.54 \text{ mrem/h}$ $\sigma_n = 0.012$ " ○フルエンス率 $\bar{x} = 141 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ $\sigma_n = 3.40$ "	42.1	
	Cd有	25:42:00	"	38.6	41.8	41.8	1.50	1.63	1.63	-	-	-	-	-	-			
70 (黒鉛パイプ表 面から20cm)	Cd無	68:46:00	9824662	64.6	57.3	66.4	0.94	0.83	0.80	0.75	0.64	0.81	6.3×10^{-3} (1.64)	5.2×10^{-3} (1.35)	6.4×10^{-3} (1.66)	○線量当量率 $\bar{x} = 6.0 \times 10^{-3} \text{ mrem/h}$ $\sigma_n = 0.54 \times 10^{-3}$ " ○フルエンス率 $\bar{x} = 1.55 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ $\sigma_n = 0.14$ "	-	
	Cd有	46:30:00	"	8.8	8.8	7.9	0.19	0.19	0.17	-	-	-	-	-	-			

① Cd無での発光量-Cd有での発光量

② S. 59. 1. 20 現在

()外;線量当量率

()内;フルエンス率

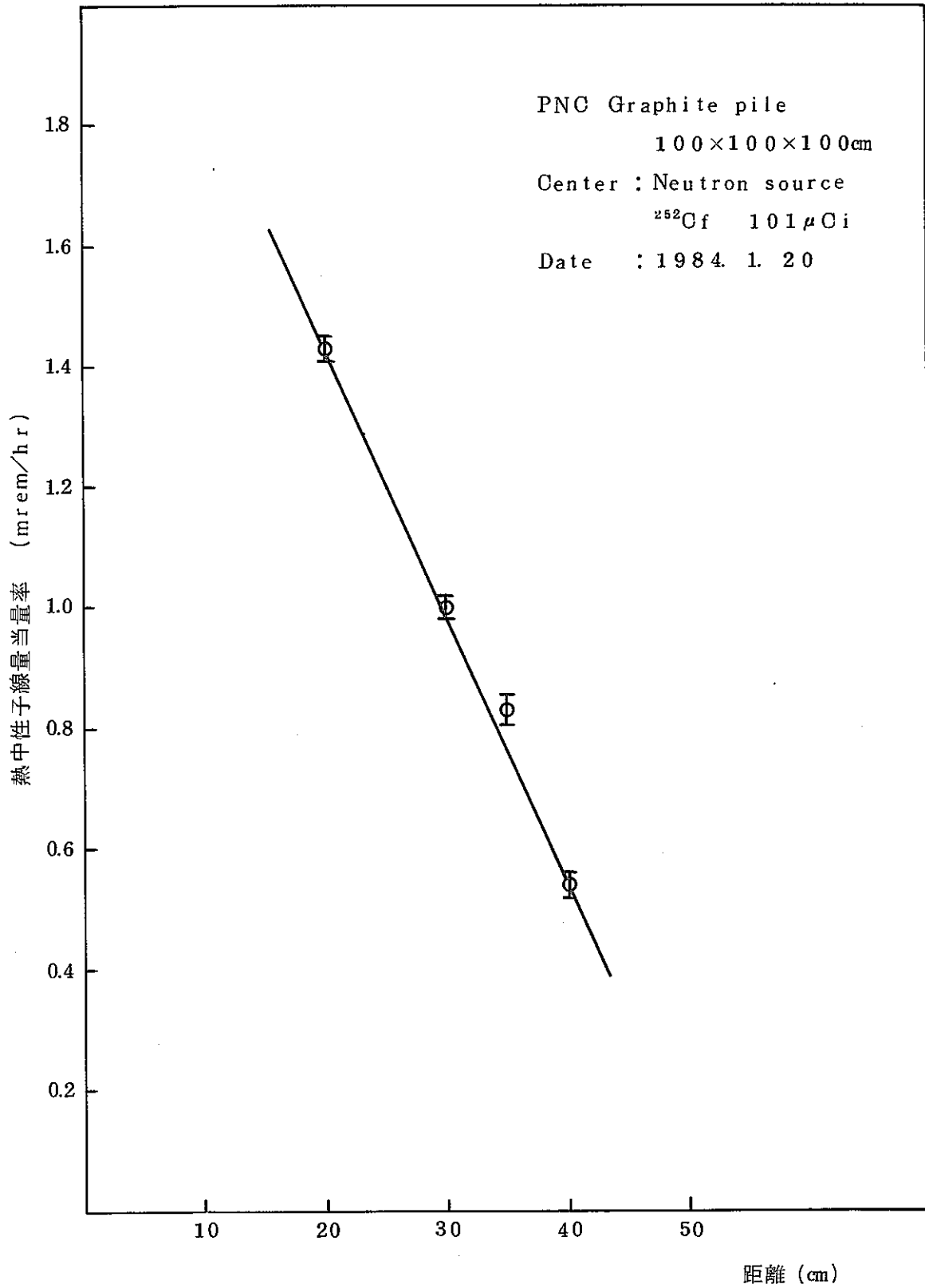


Fig. 4-3 PNC黒鉛パイプ中の熱中性子線量率

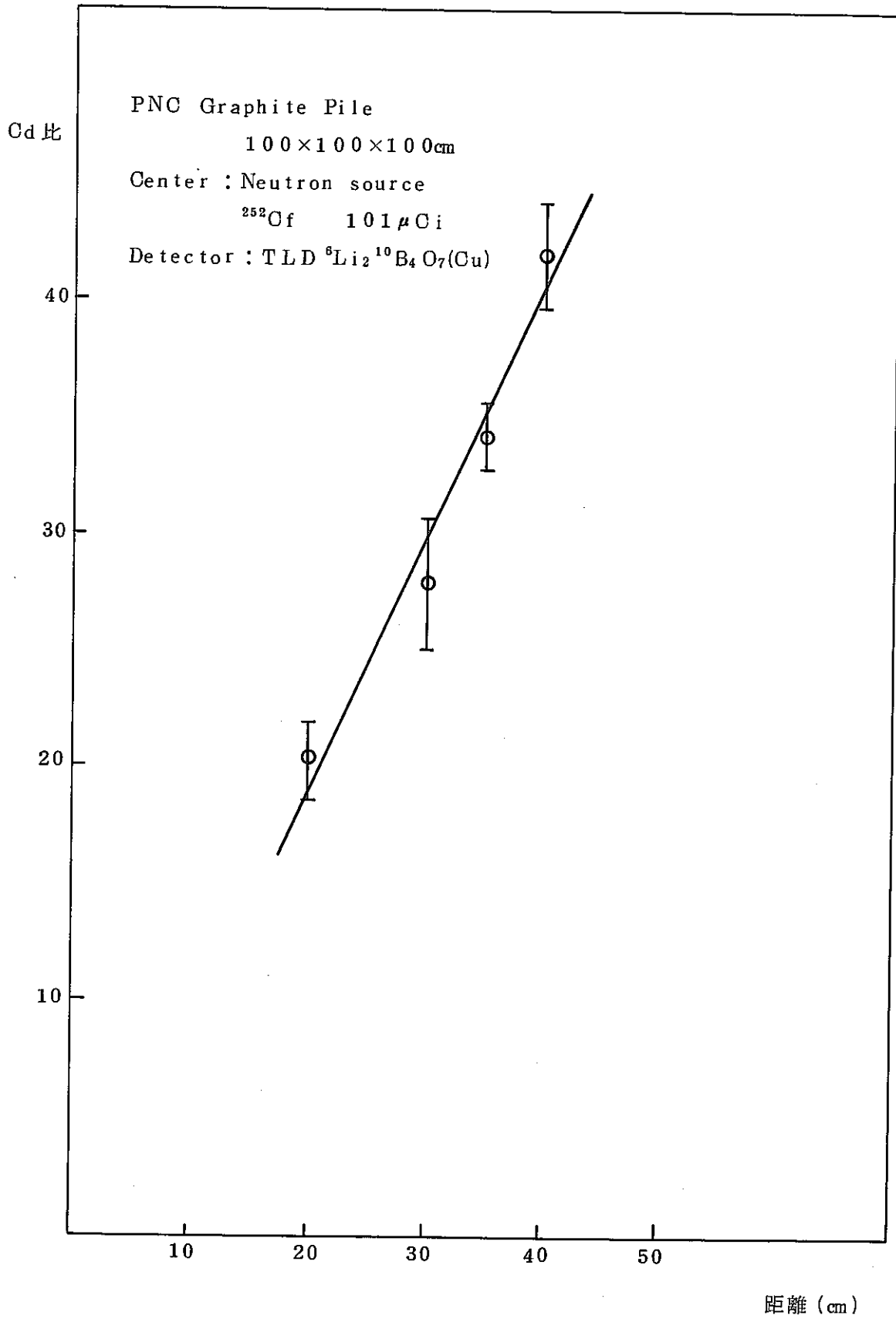


Fig. 4-4 PNC黒鉛パイル場におけるCd比 ($^6\text{Li}_2^{10}\text{B}_4\text{O}_7 : \text{Cu}$ 使用)

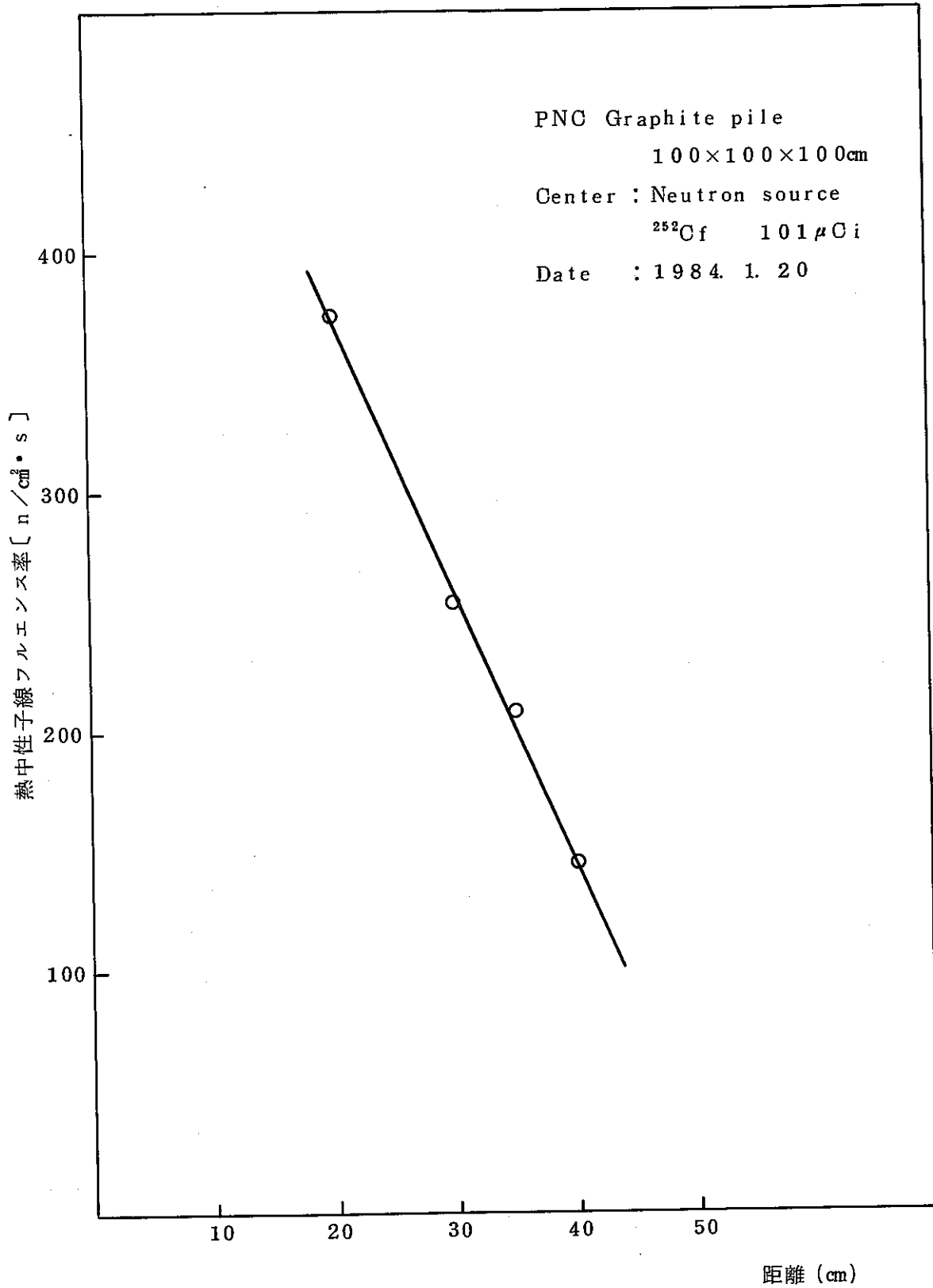


Fig. 4-2 PNC黒鉛パイル中における熱中性子フルエンス率

Table.4-7 動燃・黒鉛パイルにおける熱中性子線量率(変更前)

1984. 1. 20現在

線源	線量値付の条件	中性子束密度 $n / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$		中性子線量 mrem/hr		値付けに使用した TLD素子
		ϕ_{th}	ϕ_{ep}	D_{th}	D_{ep}	
黒鉛パイル中 100×100×100 (cm) ^{252}Cf 102 μCi	黒鉛パイル中線源 より at 35 cm	1.88×10^2	11.2	0.72	4.8×10^{-2}	UD-136N
	黒鉛パイル表面よ り at 20 cm (表面Cdシールド)	1.68	0.49	6.46×10^{-3}	2.0×10^{-3}	UD-137N

注) 黒鉛パイル中線源から35 cm位置の値は1980. 6. 30の測定値より、また表面より20 cm位置での値は1980. 6. 30の測定値より線源の半減期補正を行ったものである。

第5章 中性子線量当量評価式の検討

東海事業所と大洗工学センターで使用しているTLDバッジによる中性子線量当量の測定評価原理や算出方法については、既にいくつかの報告書において、東海事業所の黒鉛・パイル熱中性子線場や ^{252}Cf 、Am-Be、PuO₂線源等による照射を行い熱中性子線及び各線源からの速中性子線に対する具体的な線量評価式を求めた結果が示され、これらの評価式は実際の被曝管理に使用されている。

ここでは、今回実施した種々の照射試験の結果に基づいて中性子線量評価式の再検討を行った。既に、

- 1) 単色速中性子線に対する線量当量評価式の決定電総研のペレトロン型加速器による単色速中性子線の照射データより、144KeVから4MeVの領域での中性子線に対する線量当量評価式を新たに求めた。
- 2) TLD線量計を介して電総研の標準熱中性子線場と動燃・黒鉛・パイル熱中性子線場のトレーサビリティを確立したのを機に、東海事業所で従来より使用している線量当量評価の見直しを行った。本章ではTLDバッジによる中性子線量当量の測定原理、線量当量を算出するための基本式の概要を示すとともに、今回の照射試験に対し上記の検討にて求めた中性子線量当量評価式について記す。

5.1 中性子線量当量評価の原理

5.1.1 測定原理

中性子線の測定は $^6\text{Li}_2^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ のTLD素子にCdおよびSnのフィルターを組合せ、アルベド法(身体により後方散乱された中性子を測定)により熱中性子線、熱外中性子線、速中性子線の線量当量を分離測定する。即ち、Fig. 3-7にて示したように $^6\text{Li}_2^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 蛍光体中の ^6Li と ^{10}B の衝突断面積は速中性子線に対しては、比較的小さく、熱中性子線に対して大きいので、入射する速中性子線を直接的に測定せず、人体内において減速し後方散乱されて熱化された中性子を測定する。

中性子のエネルギー領域は次のように区分する。

N_{th} : Thermal Neutron	$0 \sim E_{\text{cd}}$	$(E_{\text{cd}}: \text{Cd cut off energy} \approx 0.5 \text{ eV})$
N_{ep} : Epithermal Neutron	$E_{\text{cd}} \sim \text{数}10 \text{ eV}$	
N_{f} : Fast Neutron	数10 eV以上	

5.1.2 線量当量評価方式

中性子線量評価においては、中性子の人体での後方散乱率(アルベド係数)をfluence-Luminescence変換係数 $[\text{mR} \cdot \text{eq-}\gamma/\text{n}/\text{cm}^2]$ を用いて中性子フルエンスとTLD読取値

を結び付け、その読取値から線量当量を求める線量評価式の組立てを行った。

まずUD-809P型線量計において各TLD素子とフィルターの組合せに対応する各係数の関係をTable 5-1に示す。これを基にして熱中性子線、熱外中性子線、速中性子線のフルエンスと各TLD素子の発光量の関係を式にすれば次のようになる。

$$T_1 = G_\gamma \phi_\gamma + G_{\gamma \cdot c} \phi_{th} \dots\dots\dots (5.1)$$

$$T_2 = G_{th} \phi_{th} + (1 + b_{Bep}) G_{ep} \phi_{ep} + C_{Bep} G_f \phi_f + G_\gamma \phi_\gamma + G_{\gamma \cdot c} \phi_{th} \dots\dots\dots (5.2)$$

$$T_3 = (1 + b_{Bep}) G_{ep} \phi_{ep} + C_{Bep} G_f \phi_f + G_\gamma \phi_f + G_{\gamma \cdot c} \phi_{th} \dots\dots\dots (5.3)$$

$$T_4 = \alpha_{Bth} G_{th} \phi_{th} + (1 + b_{Bth} + b_{Bep}) G_{ep} \phi_{ep} + (C_{Bth} + C_{Bep}) G_f \phi_f + G_\gamma \phi_\gamma + G_{\gamma \cdot c} \phi_{th} \dots\dots\dots (5.4)$$

- ϕ : Neutron fluence [n/cm²]
- T : Luminescence [mR·eq- γ]
- G : fluenceからluminescenceへの変換係数 [mR·eq- γ /n/cm²]
- G $_\gamma$: gamma rays conversion factor ["]
- G $_{\gamma \cdot c}$: capture gamma rays " ["]
- G $_{th}$: thermal neutron conversion factor ["]
- G $_{ep}$: epithermal neutron " ["]
- G $_f$: fast neutron " ["]

尚、上記の式において各係数はいずれも中性子エネルギーの関係であるが、簡略化のため熱中性子線、熱外中性子線、速中性子線の各領域での平均エネルギーを仮定した。

一方、中性子線量は、

$$H_f = \Gamma_f \cdot G_f \cdot \phi_f \dots\dots\dots (5.5)$$

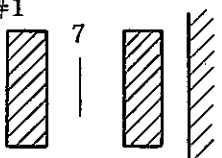
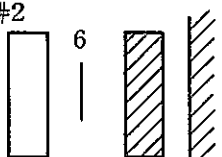
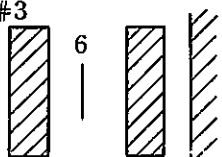
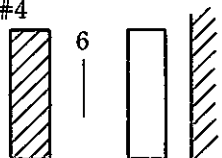
$$H_{ep} = \Gamma_{ep} \cdot G_{ep} \cdot \phi_{ep} \dots\dots\dots (5.6)$$

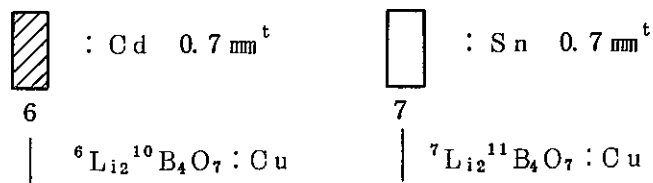
$$H_{th} = \Gamma_{th} \cdot G_{th} \cdot \phi_{th} \dots\dots\dots (5.7)$$

但し Γ : [mrem/mR·eq- γ]

にて示されるため、これらの関係と(5.1)(5.2)(5.3)(5.4)式からTLD素子の発光量から中性子線量を求めるための線量評価式を導くことができる。熱中性子線、熱外中性子線、速中性子線に対する線量当量評価の基本式をTable 5-2に示す。

Table 5-1 TLD素子と各放射線との関係

シールド構成及び TLD	ϕ_{th}	ϕ_{ep}	ϕ_f	ϕ_γ
#1 				$\gamma + \gamma_c$
#2 	I	I b_{Bep}	C_{Bep}	$\gamma + \gamma_c$
#3 		I b_{Bep}	C_{Bep}	$\gamma + \gamma_c$
#4 	a_{Bth}	I b_{Bth} b_{Bep}	C_{Bth} C_{Bep}	$\gamma + \gamma_c$



- a_{Bth} : 入射 ϕ_{th} から後方散乱により ϕ_{th} する割合
- b_{Bth} : 入射 ϕ_{ep} から後方散乱により ϕ_{th} する割合
- b_{Bep} : 入射 ϕ_{ep} から後方散乱により ϕ_{ep} する割合
- C_{Bth} : 入射 ϕ_f から後方散乱により ϕ_{th} する割合
- C_{Bep} : 入射 ϕ_f から後方散乱により ϕ_{ep} する割合
- γ_c : 捕獲 γ 線量
- ϕ_{th} : 熱中性子フエンス (n/cm^2)
- ϕ_{ep} : 熱外中性子フエンス (n/cm^2)
- ϕ_f : 速中性子フエンス (n/cm^2)

Table 5-2 中性子線量当量評価の基本式

Energy group	Neutron dose equivalent evaluation formula
Fast neutron dose equivalent	$H_f = \Gamma_f \cdot G_f \cdot \phi_f = \Gamma_f \frac{1 + b_{Bep}}{C_{Bth} + b_{Bep} \cdot C_{Bth} - b_{Bth} \cdot C_{Bep}} \left\{ (T_4 - T_3) - \alpha_{Bth} (T_2 - T_3) - \frac{b_{Bth}}{1 + b_{Bep}} (T_3 - T_1) \right\}$
Epithermal neutron dose equivalent	$H_{ep} = \Gamma_{ep} \cdot G_{ep} \cdot \phi_{ep} = \Gamma_{ep} \left[\left\{ \frac{1}{1 + b_{Bep}} \frac{b_{Bth} \cdot C_{Bep}}{1 + b_{Bep}} \cdot \frac{1}{C_{Bth} + b_{Bep} \cdot C_{Bth} - b_{Bth} \cdot C_{Bep}} \right\} (T_3 - T_1) \right. \\ \left. - \frac{C_{Bep}}{C_{Bth} + b_{Bep} \cdot C_{Bth} - b_{Bth} \cdot C_{Bep}} \times ((T_4 - T_3) - \alpha_{Bth} (T_2 - T_3)) \right]$
Thermal neutron dose equivalent	$H_{th} = \Gamma_{th} \cdot G_{th} \cdot \phi_{th} = \Gamma_{th} (T_2 - T_3)$

5.2 中性子線量当量評価式の組み立て

実際に線量当量評価式を決定するには前項で示した線量当量評価式における各係数を具体的な数値として求める必要がある。

TLDバッジを用いて線量当量評価式中の諸係数を求めるには既知のエネルギースペクトル場での中性子照射を行う。

即ち、黒鉛パイルを用いた熱外中性子を熱中性子の混在場での照射及び熱外中性子のみでの照射さらに種々のエネルギーの速中性子線による照射を行う。熱外中性子のみでの照射は、黒鉛パイル表面の全面をCd(1mm)板でシールドし熱中性子をカットすることにより行う。又、熱外中性子と熱中性子の混在照射は、黒鉛パイル側面の一面の中心に8cm×8cmのCdシールドなしの窓を設置することによって実施した。線量計は黒鉛パイル表面より20cmの距離で、ファントムに装着した場合としない場合(free air)の両者の条件にてそれぞれ行った。

(a) 熱外中性子と熱中性子の混在照射 ($\phi_{ep} + \phi_{th}$)

この条件下での照射の各TLD発光量を示す式が以下に示される。基本式は5.1.2で与えられたものに準ずる。

Cd 6 Sn phantom
 $L_1 = G_{ep} \phi_{ep} + G_{\gamma} \phi_{\gamma} + G_{\gamma \cdot c} \phi_{th}$
 (5.8)

$L_2 = a_{Bth} G_{th} \phi_{th} + (1 + b_{Bth} + b_{Bep}) G_{ep} \phi_{ep} + G'_{\gamma} \phi'_{\gamma} + G'_{\gamma \cdot c} \phi'_{th}$
 (5.9)

$L_3 = G_{ep} \phi_{ep} + G_{\gamma} \phi_{\gamma} + G_{\gamma \cdot c} \phi_{th}$
 (5.10)

$L_4 = (1 + b_{Bep}) G_{ep} \phi_{ep} + G'_{\gamma} \phi'_{\gamma} + G'_{\gamma \cdot c} \phi'_{th}$
 (5.11)

$L_5 = G_{th} \phi_{th} + G_{ep} \phi_{ep} + G_{\gamma} \phi_{\gamma} + G_{\gamma \cdot c} \phi_{th}$
 (5.12)

$L_6 = G_{th} \phi_{th} + (1 + b_{Bep}) G_{ep} \phi_{ep} + G'_{\gamma} \phi'_{\gamma} + G'_{\gamma \cdot c} \phi'_{th}$
 (5.13)

$L_7 = G_{\gamma} \phi_{\gamma} + G_{\gamma \cdot c} \phi_{th}$
 (5.14)

$L_8 = G'_{\gamma} \phi'_{\gamma} + G'_{\gamma \cdot c} \phi'_{th}$
 (5.15)

L_n : 発光量 [mR · e q - r]

6 : ${}^6\text{Li}_2 {}^{10}\text{B}_4 \text{O}_7 : \text{Cu}$

7 : ${}^7\text{Li}_2 {}^{11}\text{B}_4 \text{O}_7 : \text{Cu}$

$L_1 - L_7 = G_{ep} \phi_{ep}$
 $L_3 - L_7 = G_{ep} \phi_{ep} \quad \therefore L_1 = L_3$
 $L_5 - L_3 = G_{th} \phi_{th}$
 $L_6 - L_8 = G_{th} \phi_{th} + (1 + b_{Bep}) G_{ep} \phi_{ep}$
 $= (L_5 - L_3) + (1 + b_{Bep})(L_1 - L_7)$
 $(L_1 - L_7) b_{Bep} = L_6 - L_8 - L_5 + L_3 - L_1 + L_7$
 $= L_3 + L_6 + L_7 - L_1 - L_5 - L_8$

$$\therefore b_{\text{Bep}} = \frac{L_6 + L_7 - L_5 - L_8}{L_1 - L_7} \dots\dots\dots (5.16)$$

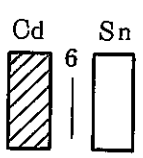
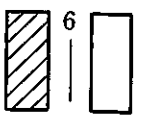
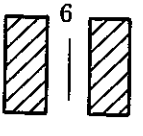
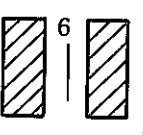
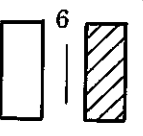
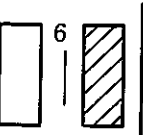
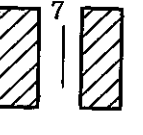
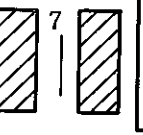
$$\begin{aligned} L_2 - L_4 &= \alpha_{\text{Bth}} G_{\text{th}} + b_{\text{Bth}} G_{\text{ep}} \phi_{\text{ep}} \\ &= \alpha_{\text{Bth}} (L_5 - L_3) + b_{\text{Bth}} (L_1 - L_7) \\ &= \alpha_{\text{Bth}} (L_5 - L_3) + \frac{L'_2 - L'_4}{L'_1 - L'_7} (L_1 - L_7) \end{aligned}$$

$$\therefore \alpha_{\text{Bth}} = \frac{1}{L_5 - L_3} \left\{ (L_2 - L_4) - \frac{L'_2 - L'_4}{L'_1 - L'_7} (L_1 - L_7) \right\} \dots\dots\dots (5.17)$$

$\therefore L'_n$ は熱外中性子のみ照射での発光量

(b) 熱外中性子のみの照射 (ϕ_{ep})

同様に各条件下での各TLDの発光量を示す式を以下に示される。

	$L'_1 =$	$G_{ep} \phi_{ep} + G_{\gamma} \phi_{\gamma} + G_{\gamma \cdot c} \phi_{th}$ (5.18)
	$L'_2 =$	$(1 + b_{Bth} + b_{Bep}) G_{ep} \phi_{ep} + G'_{\gamma} \phi'_{\gamma} + G'_{\gamma \cdot c} \phi'_{th}$ (5.19)
	$L'_3 =$	$G_{ep} \phi_{ep} + G_{\gamma} \phi_{\gamma} + G_{\gamma \cdot c} \phi_{th}$ (5.20)
	$L'_4 =$	$(1 + b_{Bep}) G_{ep} \phi_{ep} + G'_{\gamma} \phi'_{\gamma} + G'_{\gamma \cdot c} \phi'_{th}$ (5.21)
	$L'_5 =$	$G_{ep} \phi_{ep} + G_{\gamma} \phi_{\gamma} + G_{\gamma \cdot c} \phi_{th}$ (5.22)
	$L'_6 =$	$(1 + b_{Bep}) G_{ep} \phi_{ep} + G'_{\gamma} \phi'_{\gamma} + G_{\gamma \cdot c} \phi'_{th}$ (5.23)
	$L'_7 =$	$G_{\gamma} \phi_{\gamma} + G_{\gamma \cdot c} \phi_{th}$ (5.24)
	$L'_8 =$	$G'_{\gamma} \phi'_{\gamma} + G'_{\gamma \cdot c} \phi'_{th}$ (5.25)

6 : $^6Li_2^{10}B_4O_7 : Cu$

7 : $^7Li_2^{11}B_4O_7 : Cu$

L'_n : 発光量 (mR · eq- γ)

$$L'_1 - L'_7 = G_{ep} \phi_{ep}$$

$$L'_3 - L'_7 = G_{ep} \phi_{ep}$$

$$L'_4 - L'_8 = (1 + b_{Bep}) G_{ep} \phi_{ep}$$

$$L'_4 = L'_6$$

$$L'_6 - L'_8 = (1 + b_{Bep}) G_{ep} \phi_{ep}$$

$$L'_2 - L'_4 = b_{Bth} G_{ep} \phi_{ep}$$

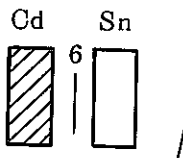
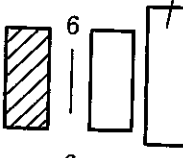
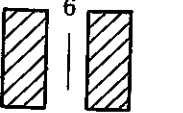
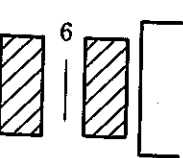
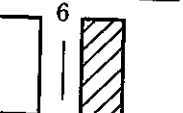
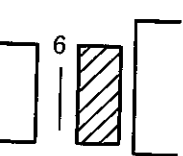
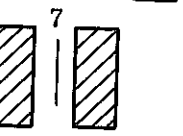
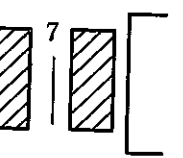
$$\therefore b_{\text{Bth}} = \frac{L'_2 - L'_4}{G_{\text{ep}} \phi_{\text{ep}}} = \frac{L'_1 - L'_4}{L'_1 - L'_7} \dots\dots\dots (5.26)$$

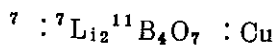
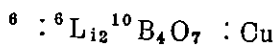
$$\therefore b_{\text{Bep}} = \frac{L'_6 - L'_8}{L'_1 - L'_7} - 1 = \frac{L'_6 + L'_7 - L'_1 - L'_8}{L'_1 - L'_7}$$

$$= \frac{L'_6 + L'_7 - L'_3 - L'_8}{L'_3 - L'_7} \dots\dots\dots (5.27)$$

(c) 遠中性子のみの照射 (ϕ_f)

同様に各条件下での各TLDの発光量を示す式を以下に示される。

	$L_1' =$	$G_\gamma \phi_\gamma + G_{\gamma \cdot c} \phi_{th}$ (5.28)
	$L_2' =$	$(C_{Bth} + C_{Bth}) G_f \phi_f + G'_\gamma \phi'_\gamma + G'_{\gamma \cdot c} \phi'_{th}$ (5.29)
	$L_3' =$	$G_\gamma \phi_\gamma + G_{\gamma \cdot c} \phi_{th}$ (5.30)
	$L_4' =$	$C_{Bep} G_f \phi_f + G'_\gamma \phi'_\gamma + G'_{\gamma \cdot c} \phi'_{th}$ (5.31)
	$L_5' =$	$G_\gamma \phi_\gamma + G_{\gamma \cdot c} \phi_{th}$ (5.32)
	$L_6' =$	$C_{Bep} G_f \phi_f + G'_\gamma \phi'_\gamma + G'_{\gamma \cdot c} \phi'_{th}$ (5.33)
	$L_7' =$	$G_\gamma \phi_\gamma + G_{\gamma \cdot c} \phi_{th}$ (5.34)
	$L_8' =$	$G'_\gamma \phi'_\gamma + G'_{\gamma \cdot c} \phi'_{th}$ (5.35)



$L_2'' - L_4'' = C_{Bth} G_f \phi_f$

$L_4'' - L_8'' = C_{Bep} G_f \phi_f$

$C_{Bth} = \frac{L_2'' - L_4''}{G_f \phi_{th}}$ (5.36)

$C_{Bep} = \frac{L_4'' - L_8''}{G_f \phi_f}$ (5.37)

5.3 中性子線量当量評価式の決定

前項での中性子線量当量評価式中の係数の算出法に従い、従来より東海事業所の黒鉛パイル場での照射結果より求められている熱中性子線に対する線量当量評価式の見直し（国家標準とのトレーサビリティ体系の確立に伴う基準フルエンス及び線量当量の見直しによる）及び電総研のペレットロトン型加速器での照射による単色速中性子線に対する線量当量評価式の決定を行った。

(a) 熱外中性子と熱中性子の混在照射

照射条件

黒鉛パイル 1000×1000×1000mm
 中性子線源 黒鉛パイル中心 Cf-252
 距離 黒鉛パイル表面より20cm
 照射線量 $H_{th}=0.24\text{ mrem}$
 $H_{ep}=0.082\text{ mrem}$
 使用ハンガー UD-887PH1
 TLD UD-809P

測定結果： $L_1=11.0\text{ mR}\cdot\text{eq}^{60}\text{Co}-\gamma$

$L_2=25.5$ "

$L_3=10.9$ "

$L_4=14.5$ "

$L_5=20.7$ "

$L_6=25.0$ "

$L_7=3.3$ "

$L_8=4.2$ "

$L_1-L_7=G_{ep}\phi_{ep}=7.7\text{ mR}\cdot\text{eq}-\gamma$

$L_3-L_7=G_{ep}\phi_{ep}=7.6$ "

$L_5-L_3=G_{ep}\phi_{th}=9.8$ "

(b) 熱外中性子のみの照射

照射条件

黒鉛パイル 1000×1000×1000mm
 パイル表面 全面Cd 1mm tでシールド
 中性子線源 黒鉛パイル中心 Cf-252
 距離 黒鉛パイル表面より20cm
 照射時間 24時間
 照射線量 $H_{ep}=0.082\text{ mrem}$
 使用ハンガー UD-887PH1

TLD UD-809P

測定結果: $L'_1 = 1.05 \text{ mReq-}\gamma$

$$L'_2 = 13.5 \quad "$$

$$L'_3 = 10.3 \quad "$$

$$L'_4 = 10.0 \quad "$$

$$L'_5 = 10.6 \quad "$$

$$L'_6 = 12.0 \quad "$$

$$L'_7 = 4.1 \quad "$$

$$L'_8 = 3.7 \quad "$$

$$G_{ep} \phi_{ep} = L_1 - L_7 = 7.7 \text{ mReq-}\gamma$$

$$G_{ep} \phi_{ep} = L_8 - L_7 = 7.6 \quad "$$

$$G_{ep} \phi_{ep} = L'_1 - L'_7 = 6.4 \quad "$$

$$G_{ep} \phi_{ep} = L'_3 - L'_7 = 6.2 \quad "$$

故に平均値として

$$G_{ep} \phi_{ep} = 7.0 \text{ mReq-}\gamma$$

となる。

次に (5.47), (5.48) 式より

$$b_{Bth} = \frac{L'_2 - L'_4}{G_{ep} \phi_{ep}} = \frac{13.0 - 10.0}{7.0} = 0.50$$

$$b_{Bep} = \frac{L'_6 - L'_8 - G_{ep} \phi_{ep}}{G_{ep} \phi_{ep}} = \frac{13.0 - 3.7 - 7.0}{7.0} = 0.33$$

また,

$$b_{Bep} = \frac{L_6 + L_7 - L_5 + L_8}{L_1 - L_7} = 0.44$$

故に平均値として

$$b_{Bep} = 0.39$$

が得られる。

$$\text{次に, } G_{th} = L_5 - L_3 = 9.8 \text{ mReq-}\gamma$$

$$\text{更なる, } L_2 - L_4 = \alpha_{Bth} G_{th} + b_{Bth} G_{ep} \phi_{ep} \text{ より}$$

$$\alpha_{Bth} = \frac{1}{G_{th} \phi_{th}} \{ (L_2 - L_4) - b_{Bth} G_{ep} \phi_{ep} \}$$

$$= \frac{1}{9.8} \{ (25.5 - 14.5) - 0.50 \times 7.0 \} = 0.765$$

$$= 0.765$$

が得られる。

ここで実際に照射したフルエンス及び線量当量は、

$$\begin{cases} \phi_{th} = 2.24 \times 10^5 \text{ n/cm}^2 \\ H_{th} = 0.24 \text{ mrem} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \phi_{ep} = 7.07 \times 10^5 \text{ n/cm} \\ H_{ep} = 0.082 \text{ mrem} \end{cases}$$

よってTLDの測定値より各換算係数 G_{th} , G_{ep} , Γ_{th} , Γ_{ep} は

$$G_{ep} \phi_{ep} = 7.0 \text{ mReq-}\gamma$$

$$\therefore G_{ep} = \frac{7.0}{G_{ep}} = \frac{7.0}{7.07 \times 10^5}$$

$$= 9.90 \times 10^5 \text{ mReq-}\gamma / \text{n/cm}^2$$

$$G_{th} \phi_{th} = 9.8 \text{ mReq-}\gamma$$

$$\therefore G_{th} = \frac{9.8}{\phi_{th}} = \frac{9.8}{2.24 \times 10^5}$$

$$= 4.38 \times 10^{-5} \text{ mReq-}\gamma / \text{n/cm}^2$$

又 $H_{ep} = \Gamma_{ep} \cdot G_{ep} \cdot \phi_{ep}$

$$H_{th} = \Gamma_{th} \cdot G_{th} \cdot \phi_{th} \quad \text{より}$$

$$\Gamma_{ep} = \frac{H_{ep}}{G_{ep} \cdot \phi_{ep}} = \frac{0.082}{7.0} = 0.012 \text{ mrem/mReq-}\gamma$$

$$\Gamma_{th} = \frac{H_{th}}{G_{th} \cdot \phi_{th}} = \frac{0.24}{9.8} = 0.024 \text{ mrem/mReq-}\gamma$$

(c) 単色速中性子線照射

電子技術総合研究所

照射条件：144 KeV 単色ビーム

線 源 ベトロン加速器
 距 離 5.25cm
 照 射 線 59.7mrem
 TLDバッジとphantomの間隔 15mm
 バッジケース UD-887PH1
 TLD UD-809p

測定結果

#₁ ⁷Li₂¹¹B₄O₇ (Cd-Cd) : 16.0mReq-γ L₈'
 #₂ ⁶Li₂¹¹B₄O₇ (Sn-Cd) : 56.9mReq-γ L₆'
 #₃ ⁶Li₂¹⁰B₄O₇ (Cd-Cd) : 64.8mReq-γ L₄'
 #₄ ⁶Li₂¹⁰B₄O₇ (Cd-Sn) : 182mReq-γ L₂'

この結果より

$$\frac{C_{Bth}(Cf)}{C_{Bep}(Cf)} = \frac{L_2' - L_4'}{L_4' - L_8'} = \frac{182 - 64.8}{64.8 - 16.0} = 2.40$$

となる。また、

$$L_2' - L_4' = C_{Bth}(Cf) \cdot C_f \cdot \phi_f = C_{Bth}(Cf) \cdot \frac{H_f}{\Gamma_f}$$

より

$$\frac{\Gamma_f}{C_{Bth}(Cf)} = \frac{H_f}{L_2' - L_4'} = \frac{59.7}{182 - 64.8} = 0.51$$

となる。

ここで、C_{Bth}、C_{Bep}の各反射率および変換係数Γ_fについては、それぞれ具体的にその数値を求めることが望ましいが、評価式を決定する上においてはC_{Bth}(Cf)/C_{Bep}(Cf)、およびΓ_f/C_{Bth}(Cf)の値が求まっていれば充分である。

上記と同様の検討を565KeV、1MeV、2.5MeV、4MeVのエネルギーの中性子線照射に対して行い、それぞれにおけるC_{Bth}/C_{Bep}およびΓ_f/C_{Bth}の値を求める。

これまでの熱中性子の照射、熱中性子と熱外中性子の混在照射、速中性子照射により求めた各係数の値をまとめるとTable 5-3のようになる。尚この表には参考として以前動燃東海事業所において²⁵²CfおよびAm-Beの中性子線源(校正室)、さらにPuO₂線源(プルトニウム燃料施設フィールド)の連続スペクトルの速中性子線に対して照射を行った結果も示した。

Table 5-3 中性子線量当量評価式中の係数值

項目	係 数 値	
Albedo rate of thermal neutron	$\alpha_{Bth} = 0.756$	
Albedo rate of epithermal neutron	$b_{Bth} = 0.50$ $b_{Bep} = 0.39$	
Conversion factor of neutron flux to TLD luminescence (mR·eq- γ /n/cm ²)	$G_{th} = 4.03 \times 10^{-5}$ $G_{ep} = 9.90 \times 10^{-5}$ G_f : 個々には評価せず	
Conversion factor (mrem/mR·eq- γ)	$\Gamma_{th} = 0.027$ $\Gamma_{ep} = 0.012$ Γ_f (独自には評価せず)	
another	$\frac{C_{Bth}(144\text{KeV})}{C_{Bep}(144\text{KeV})} = 2.40$ $\frac{C_{Bth}(565\text{KeV})}{C_{Bep}(565\text{KeV})} = 3.07$ $\frac{C_{Bth}(1.0\text{MeV})}{C_{Bep}(1.0\text{MeV})} = 3.34$ $\frac{C_{Bth}(2.5\text{MeV})}{C_{Bep}(2.5\text{MeV})} = 3.02$ $\frac{C_{Bth}(4.0\text{MeV})}{C_{Bep}(4.0\text{MeV})} = 3.03$ $\frac{C_{Bth}(^{252}\text{Cf})}{C_{Bep}(^{252}\text{Cf})} = 3.33$ $\frac{C_{Bth}(\text{Am-Be})}{C_{Bep}(\text{Am-Be})} = 2.59$ $\frac{C_{Bth}(\text{PuO}_2)}{C_{Bep}(\text{PuO}_2)} = 1.74$	$\Gamma_f/C_{Bth}(144\text{KeV}) = 0.51$ $\Gamma_f/C_{Bth}(565\text{KeV}) = 1.93$ $\Gamma_f/C_{Bth}(1.0\text{MeV}) = 3.04$ $\Gamma_f/C_{Bth}(2.5\text{MeV}) = 5.31$ $\Gamma_f/C_{Bth}(4.0\text{MeV}) = 6.76$ $\Gamma_f/C_{Bth}(C_f) = 2.84$ $\Gamma_f/C_{Bth}(\text{Am-Be}) = 5.26$ $\Gamma_f/C_{Bth}(\text{PuO}_2) = 2.86$

ここで、Table 5-2 の各線量評価式を次の様に変形する。

$$\begin{aligned}
 D_f &= \Gamma_f \cdot \left(\frac{1 + b_{Bep}}{C_{Bth} + b_{Bep} C_{Bth} - b_{Bth} C_{Bep}} \right) \left\{ (T_4 - T_3) - \alpha_{Bth} \cdot (T_2 - T_3) \right. \\
 &\quad \left. - \frac{b_{Bth}}{1 + b_{Bep}} (T_3 - T_4) \right\} \\
 &= \frac{\Gamma_f}{C_{Bth}} \cdot \frac{1 + b_{Bep}}{1 + b_{Bep} - b_{Bth} \cdot \frac{C_{Bep}}{C_{Bth}}} \left\{ (T_4 - T_3) - \alpha_{Bth} \cdot (T_2 - T_3) \right. \\
 &\quad \left. - \frac{b_{Bth}}{1 + b_{Bep}} (T_3 - T_1) \right\} \dots\dots\dots (5.38)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D_f &= \Gamma_{ep} \cdot \left\{ \left[\frac{1}{1 + b_{Bep}} + \frac{b_{Bth} \cdot C_{Bep}}{1 + b_{Bep}} \cdot \frac{1}{C_{Bth} + b_{Bep} \cdot C_{Bth} - b_{Bth} \cdot C_{Bep}} \right] \right. \\
 &\quad \left. \cdot (T_3 - T_1) \cdot \frac{C_{Bep}}{C_{Bth} + b_{Bep} \cdot C_{Bth} - b_{Bth} \cdot C_{Bep}} \right. \\
 &\quad \left. \left\{ (T_4 - T_3) - \alpha_{Bth} (T_2 - T_3) \right\} \right\} \\
 &= \Gamma_{ep} \cdot \left\{ \left[\frac{1}{1 + b_{Bep}} + \frac{b_{Bth}}{1 + b_{Bep}} \cdot \frac{1}{\frac{C_{Bth}}{C_{Bep}} + b_{Bep} \frac{C_{Bth}}{C_{Bep}} - b_{Bep}} \right] \cdot (T_3 - T_1) \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{\frac{C_{Bth}}{C_{Bep}} + b_{Bep} \frac{C_{Bth}}{C_{Bep}} - b_{Bth}} \cdot \left\{ (T_4 - T_3) - \alpha_{Bth} \cdot (T_2 - T_3) \right\} \right\} \\
 &\dots\dots\dots (5.39)
 \end{aligned}$$

$$D_{th} = \Gamma_{ep} (T_2 - T_3) \dots\dots\dots (5.40)$$

この(5.38)(5.39)(5.40)式にTable 5-3の各値を代入することにより、熱中性子線、熱外中性子線、速中性子線に対する線量当量評価式を導くことができる。実際に求めた中性子線量当量評価式をまとめてTable 5-4に示す。

また、速中性子線に対する線量当量評価式 (D_f) において、

$$D_f = \frac{1}{K_f} \cdot \left\{ (T_4 - T_3) - \alpha_{Bth} \cdot (T_2 - T_3) - \frac{b_{Bth}}{1 + b_{Bep}} (T_3 - T_1) \right\}$$

とした場合に、中性子線エネルギーによる K_f 値の変化を Fig. 5-1 に示す。

Table 5-4 各中性子線に対して算出した中性子線量評価式

中性子線源	中性子線量当量評価式
144KeV	$D_f = 0.60 \cdot \{(T_4 - T_3) - 0.76(T_2 - T_3) - 0.36(T_3 - T_1)\}$
565KeV	$D_f = 2.18 \cdot \{(T_4 - T_3) - 0.76(T_2 - T_3) - 0.36(T_3 - T_1)\}$
1.0MeV	$D_f = 3.40 \cdot \{(T_4 - T_3) - 0.76(T_2 - T_3) - 0.36(T_3 - T_1)\}$
2.5MeV	$D_f = 6.03 \cdot \{(T_4 - T_3) - 0.76(T_2 - T_3) - 0.36(T_3 - T_1)\}$
4.0MeV	$D_f = 7.67 \cdot \{(T_4 - T_3) - 0.76(T_2 - T_3) - 0.36(T_3 - T_1)\}$
^{252}Cf	$D_f = 3.21 \cdot \{(T_4 - T_3) - 0.76(T_2 - T_3) - 0.36(T_3 - T_1)\}$ $D_{ep} = 0.0094 \cdot \{(T_3 - T_1) + 0.23(T_2 - T_3) - 0.30(T_4 - T_3)\}$ $D_{th} = 0.027(T_2 - T_3)$
$^{241}\text{Am-Be}$	$D_f = 6.12 \cdot \{(T_4 - T_3) - 0.76(T_2 - T_3) - 0.36(T_3 - T_1)\}$ $D_{ep} = 0.0098 \cdot \{(T_3 - T_1) + 0.29(T_2 - T_3) - 0.39(T_4 - T_3)\}$ $D_{th} = 0.027(T_2 - T_3)$
PuO_2	$D_f = 3.60 \cdot \{(T_4 - T_3) - 0.76(T_2 - T_3) - 0.36(T_3 - T_1)\}$ $D_{ep} = 0.011 \cdot \{(T_3 - T_1) + 0.43(T_2 - T_3) - 0.57(T_4 - T_3)\}$ $D_{th} = 0.027(T_2 - T_3)$

注) TLDバッジとPhantom間1.5cm

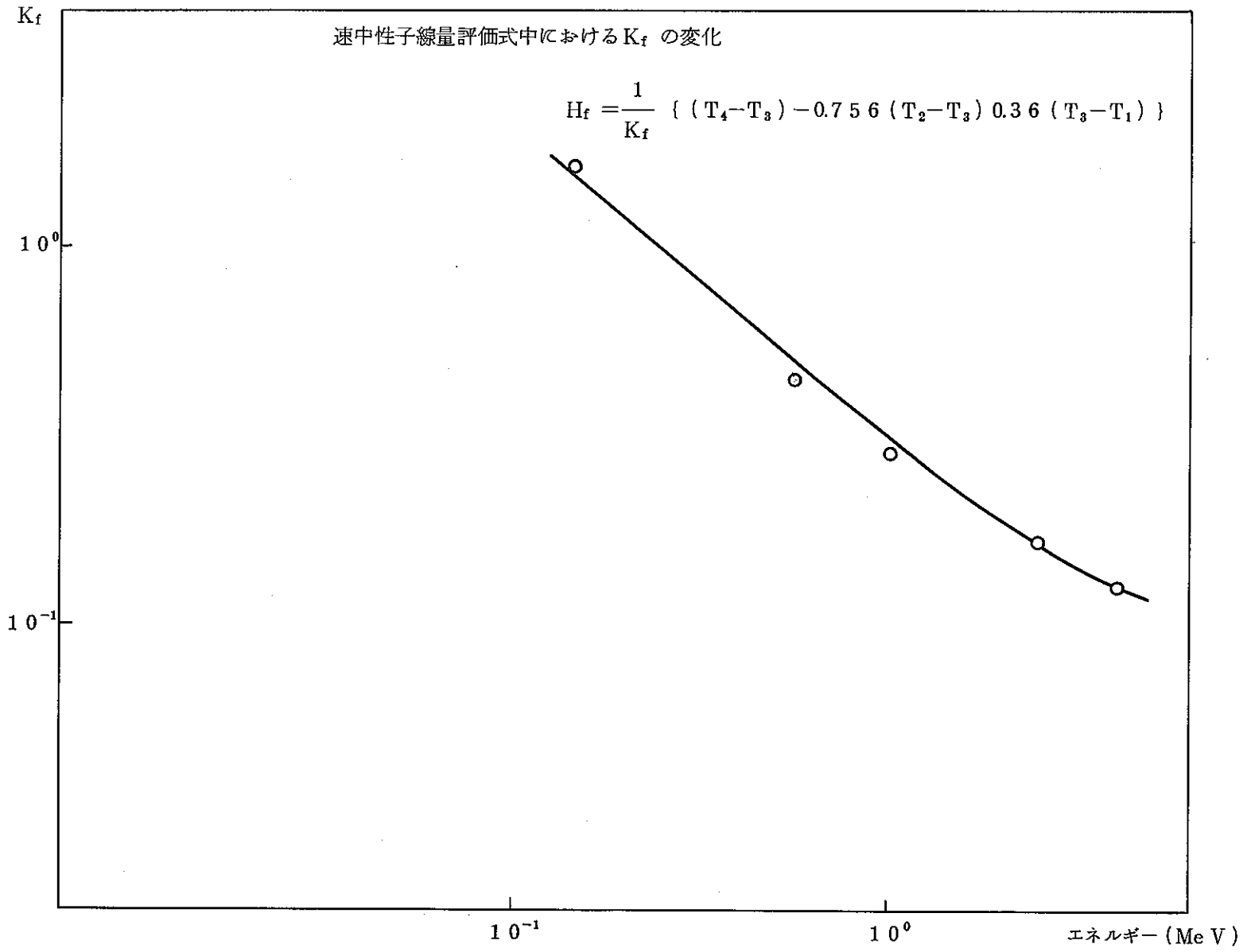


Fig. 5-1 速中性子線量評価式中における K_f のエネルギーによる変化

第6章 結 論

TLDバッジによる中性子線量評価精度の向上を目的として、電総研の標準熱中性子線場を利用し、速中性子線に対するTLDバッジのエネルギー依存性を明らかにすることおよび熱中性子線量測定における国家標準とのトレーサビリティを確立することを目的として種々の照射試験を実施した。そして、さらに、その試験データに基づいて単色速中性子線に対する線量当量評価式を求めるとともに、従来より使用していた熱中性子線に対する線量評価式の見直しを行った。この結果、以下の結論が得られた。

1) 単色速中性子線に対するエネルギー依存性

中性子線量評価に用いる ${}^6\text{Li}_2\text{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の144KeVから4.0MeVの単色速中性子線に対する感度のエネルギー依存性を調べた。この結果TLDバッジをファントムに装置した状態で中性子線のエネルギーが大きくなるととも各 ${}^6\text{Li}_2\text{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の感度は小さくなっており、例えば第4素子(#4)については4MeVの中性子線に対しては144KeVの場合に比べてその感度は単位フルエンス当りで約1/2.5であり線量当量当りで約1/16であった。

このように ${}^6\text{Li}_2\text{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の速中性子線に対する感度は中性子線のエネルギーによって変化するため、種々のエネルギー場において中性子線量当量の測定評価を行う場合には、TLDバッジのエネルギー依存性を考慮して実際の作業環境での中性子線エネルギー分布に応じた線量当量評価式を求めて被曝評価に使用する必要がある。

一方、中性子線量評価用の3個の素子(#2 , #3 , #4)の中性子線に対する感度のエネルギーによる変化の傾向はほぼ同様であった。このため各TLD素子間の感度比(例えば T_2/T_1 、 T_3/T_4)は144KeVから4MeVの範囲でほぼ一定であり、素子間の感度差を利用して入射中性子線のエネルギー情報を得ることは困難であった。

2) 熱中性子線量測定におけるトレーサビリティの確立

電総研の黒鉛パイル標準熱中性子線場において160mg/cm²厚さのall plastic ケースに収納した ${}^6\text{Li}_2\text{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の熱中性子線に対する感度を求めたところ、単位フルエンス当りで $1.23 \times 10^{-4} \text{ mR} \cdot \text{eq-}\gamma / \text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \pm 7.3\%$ であり線量当量当りで $115 \text{ R} \cdot \text{eq-}\gamma / \text{rem} \pm 7.0\%$ であった。

このTLD素子を利用して、動燃東海事業所の黒鉛パイルで中心に ${}^{252}\text{Cf}$ 線源(102 μCi)を置いた時の線源から20, 30, 35, 40cmの位置及びパイル表面から20cmの位置で照射を行い、その発光量と電総研にて求めた ${}^6\text{Li}_2\text{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の熱中性子線に対する感度より、各位置における熱中性子線のフルエンス率(n/cm²・s)および線量当量率(mrem/hr)を求めた。これによりTLDバッジの校正照射に使用している動燃・黒鉛パイル熱中性子線場と国家標準とのトレーサビリティが確立したものと考えられる。動燃・黒鉛パイルにおけるフ

ルエンス率および線量当量率は次のとおりである。

動燃・東海事業所の黒鉛パイルの熱中性子線場のフルエンス及び線量当量率

位 置	フルエンス率 (n/cm ² ・s)	線量当量率 (mrem/hr)
黒鉛パイル中線源から30cm	373	1.43
" 線源から30cm	259	1.00
" 線源から35cm	217	0.83
" 線源から40cm	141	0.54
黒鉛パイル表面から20cm	1.55	6.0 × 10 ⁻³

一方、これらの数値と比較して従来よりCaSO₄・⁶LiF蛍光体を用いたUD-136N, UD-137N型TLD素子(松下製)による実測値は10~15%以内で一致していた。

3) 中性子線量当量評価式の検討

TLDバッジにおける中性子線量計(UD-809P)の4つのTLD素子から中性子線量当量を求めるための評価式に関し、今回の照射試験の結果から得られた具体的な線量当量評価式を下表に示す。尚ここには以前より求められていた東海事業所のC_f, A_m-B_e線源及び実作業フィールドのP_uO₂線源からの中性子線に対する線量当量評価式も参考として示した。

中性子線量当量評価式一覧

区 分	中性子線量当量評価式
熱中性子線	$D_{th} = 0.024 (T_2 - T_3)$
単色速中性子線	144KeV $D_f = 0.6q \cdot \{ (T_4 - T_3) - 0.76 (T_2 - T_3) - 0.36 (T_3 - T_1) \}$
	565KeV $D_f = 1.54 \cdot \{ (T_4 - T_3) - 0.76 (T_2 - T_3) - 0.36 (T_3 - T_1) \}$
	1.0MeV $D_f = 3.40 \cdot \{ (T_4 - T_3) - 0.76 (T_2 - T_3) - 0.36 (T_3 - T_1) \}$
	2.5MeV $D_f = 6.03 \cdot \{ (T_4 - T_3) - 0.76 (T_2 - T_3) - 0.36 (T_3 - T_1) \}$
	4.0MeV $D_f = 7.67 \cdot \{ (T_4 - T_3) - 0.76 (T_2 - T_3) - 0.36 (T_3 - T_1) \}$
速中性子線 (連続スペクトル)	²⁵² C _f $D_f = 3.21 \cdot \{ (T_4 - T_3) - 0.76 (T_2 - T_3) - 0.36 (T_3 - T_1) \}$ $D_{ep} = 0.0094 \cdot \{ (T_3 - T_1) + 0.23 (T_2 - T_3) - 0.30 (T_4 - T_3) \}$ $D_{th} = 0.027 (T_2 - T_3)$
	A _m -B _e $D_f = 6.12 \cdot \{ (T_4 - T_3) - 0.76 (T_2 - T_3) - 0.36 (T_3 - T_1) \}$ $D_{ep} = 0.0098 \cdot \{ (T_3 - T_1) + 0.29 (T_2 - T_3) - 0.39 (T_4 - T_3) \}$ $D_{th} = 0.027 (T_2 - T_3)$
	P _u O ₂ $D_f = 3.60 \cdot \{ (T_4 - T_3) - 0.76 (T_2 - T_3) - 0.36 (T_3 - T_1) \}$ $D_{ep} = 0.011 \cdot \{ (T_3 - T_1) + 0.43 (T_2 - T_3) - 0.57 (T_4 - T_3) \}$ $D_{th} = 0.027 (T_2 - T_3)$

注1) 太枠内は今回の試験で決定された評価式

一方、今回の照射試験の結果から明らかになった課題は以下のとおりである。

i) 速中性子線に対するエネルギー依存性

(1) 種々のエネルギー場での線量評価

今回の試験でより、144KeVから4MeVのエネルギー領域で中性子線評価用の ${}^6\text{Li}_2\text{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の感度はエネルギーとともに大きく変化することが判った。このため実際の被曝管理においては、TLDバッジのエネルギー依存性を考慮して作業環境のエネルギー分布に応じた線量当量評価式を決定して被曝線量の算出を行うことが必須である。

各作業環境においてエネルギー分布に応じた線量当量評価式を決定するには、その場の中性子線のスペクトル分布を線量当量(率)を正確に求めることが重要である。それ故、今後線量評価の精度をより向上させるためには、特に正確な中性子線スペクトルの評価技術を確立する必要がある。

(2) 入射方向およびTLDバッジとファントム間距離等の寄与

今回の単色速中性子線の照射においては、中性子線の入射方向としては全て前方からのビーム状照射とし、また、TLDバッジのファントム表面の間隔は1.5cmに固定した。しかし、TLDバッジの中性子線に対するエネルギー依存性は中性子の入射方向あるいはTLDバッジとファントムとの距離などの着用条件によっても変化すると考えられる。今後、これらのエネルギー依存性に影響する種々の要因についてさらに詳細な検討を行う必要がある。

4) 熱・熱外中性子線量測定におけるトレーサビリティの確立

TLD線量計の場合はTLD素子間の感度のバラツキだけでなく、TLD素子の発光量の測定に使用するリーダの感度変動が、線量測定における誤差要因となる。このため国家標準とのトレーサビリティ体系の確立をTLD線量計を介して行う場合には、使用するTLD線量計における素子の感度が均一でかつくり返し測定に対して安定であるとともに、リーダ感度が常に一定であることが望ましい。しかし、今回の照射試験においては素子のくり返し測定に対する再現性は約2%でリーダの感度の変動率は±5%以内で、これらが測定における誤差要因となっている。これらの要因については、今後さらに検討を行い誤差をできるだけ小さくする必要がある。

熱中性子線量測定の標準化としては、TLD線量計を介して国家標準とのトレーサビリティ体系を確立する方法の他に、Auなどの金属foilの放射化法にてフルエンスの絶対測定を行う方法がある。今後、熱中性子線量の測定評価の精度をより向上させるにはフルエンスの絶対測定も試みる必要がある。

一方、今回の照射では熱外中性子線については、熱外中性子線という定義自体がエネルギー領域からして幅広く必ずしも熱外中性子線の標準校正場というものは確立されていない。動燃

では現在東海事業所の黒鉛パイルの表面から20cmの位置で一義的に熱外中性子線場を設けている。そこでの照射にて熱外中性子線に対する線量評価式を決定している。しかし、熱外中性子線の場合は速中性子線の場合と同じく実際の放射線フィールドにおけるIn-situ calibrationが必要であり、今後、その校正方法およびトレーサビリティ体系の明確化を行う必要がある。

第 7 章 謝 辞

今回の電総研における黒鉛パイル標準場での熱中性子線照射及びペレトロン型加速器による単色速中性子線の照射について御協力いただき、また、照射試験データの解析のみならず中性子線量測定標準化及びアルベド線量計による線量評価等の全体に及んで多大の助言をいただいた電子技術総合研究所量子技術部放射線物性研究室の道川太一室長、木下民祥氏に深く感謝致します。

第8章 参 考 文 献

- 1) 福田整司, 志賀健一朗, 石黒秀治, 武田伸荘, 野村幸広, 深井正一, 山下忠興, 山本 理, 馬場末喜, 筒井博司
(非公開), (1979)
“中性子線用TLD個人被曝線量計及び中性子線量評価法の開発”(中間報告書)
- 2) 福田整司, 三浦 信, 石黒秀治, 武田伸荘, 野村幸広, 北村三郎, 安野喜剛, 空増 昇
“TLDによる新型個人被曝線量計及び線量当量評価法の開発”SN841~81-03, (1980)
- 3) 中田 啓, 石黒秀治, 宮部賢次郎, 野村幸広,
“ $L_{12}B_4O_7(Cu)$ 蛍光体を利用した自動読取型TLDバッジの性能・特性”PNC N841-83-84 (1983)
- 4) Tanaka.S, Furuta.Y; Nucl. Instr. Meth. vol133 P495 (1976)
- 5) ICRP Publication 21 (1971)
- 6) 電子技術総合研究所彙報, 第47巻 (1983)
- 7) 小佐古敏荘, 中村尚司, 道川太一他, “減速材付き線量計による中性子線量測定の標準化とその移行法の検討”原子力学会誌, Vol 24, №2, P53 (1982)
- 8) 道川太一, “中性子線の計測標準”, 原子力学会誌, vol 24, №12, P197 (1982)
- 9) 伊藤直次, 沼宮内弼雄他, “中速領域中性子被曝線量評価に関する調査”, JAERI-memo 9423 (1981)
- 10) R.G. ALSMILLER, J. BARISH, “The calculated response of 6LiF albedo dosimeters to neutrons with energies ≤ 400 MeV”, Health physics pergamon press, vol 26, p13-28 (1974)
- 11) E. PIESCH, “Progress in albedo neutron dosimetry”, Nuclear instruments and methods, vol 145, 613-619 (1977)

Appendix. 中性子線量評価におけるトレーサビリティ体系

動燃・東海事業所でのTLDバッジを用いた中性子線量当量の測定評価におけるトレーサビリティ体系をTable, App-1に示す。

1) 速中性子線量評価

現在, 速中性子線量の測定評価においては, 実作業フィールドの線量当量率 (mrem/hr) をレムカウンターにて実測し, この線量当量を基準にして In-situ calibration により TLD バッジにおける中性子線量当量評価式を決定している。ここで使用するレムカウンターは東海事業所の校正室において, A_m-B_0 線源により定期的に校正が行われているものであり, この A_m-B_0 線源は電総研の黒鉛パイルにおいて国家標準との比較検定にて中性子放出率が値付けされている。即ち, 東海事業所の速中性子線量測定においてはこの A_m-B_0 線源を一次標準として一応のトレーサビリティ体系を確立している。

このトレーサビリティ体系において, A_m-B_0 線源によるレムカウンターの照射校正時の散乱線の評価, またレムカウンターのエネルギー依存性に基づく作業フィールドの線量当量率の測定における誤差等については今後さらに検討する必要がある。

2) 熱中性子線量評価

熱中性子線量の測定評価については, 今回の照射試験により電総研の国家標準場 (黒鉛パイル) での照射にて熱中性子線に対する感度を求めた ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ TLD 素子を用いて東海事業所の熱中性子線場 (黒鉛パイル) のフルエンス率及び線量当量率の値付けを行った。そして, この校正場において TLD バッジの照射を行い熱中性子線に対する線量当量評価式を決定し, 国家標準とのトレーサビリティ体系に基づいた線量評価法を確立した。

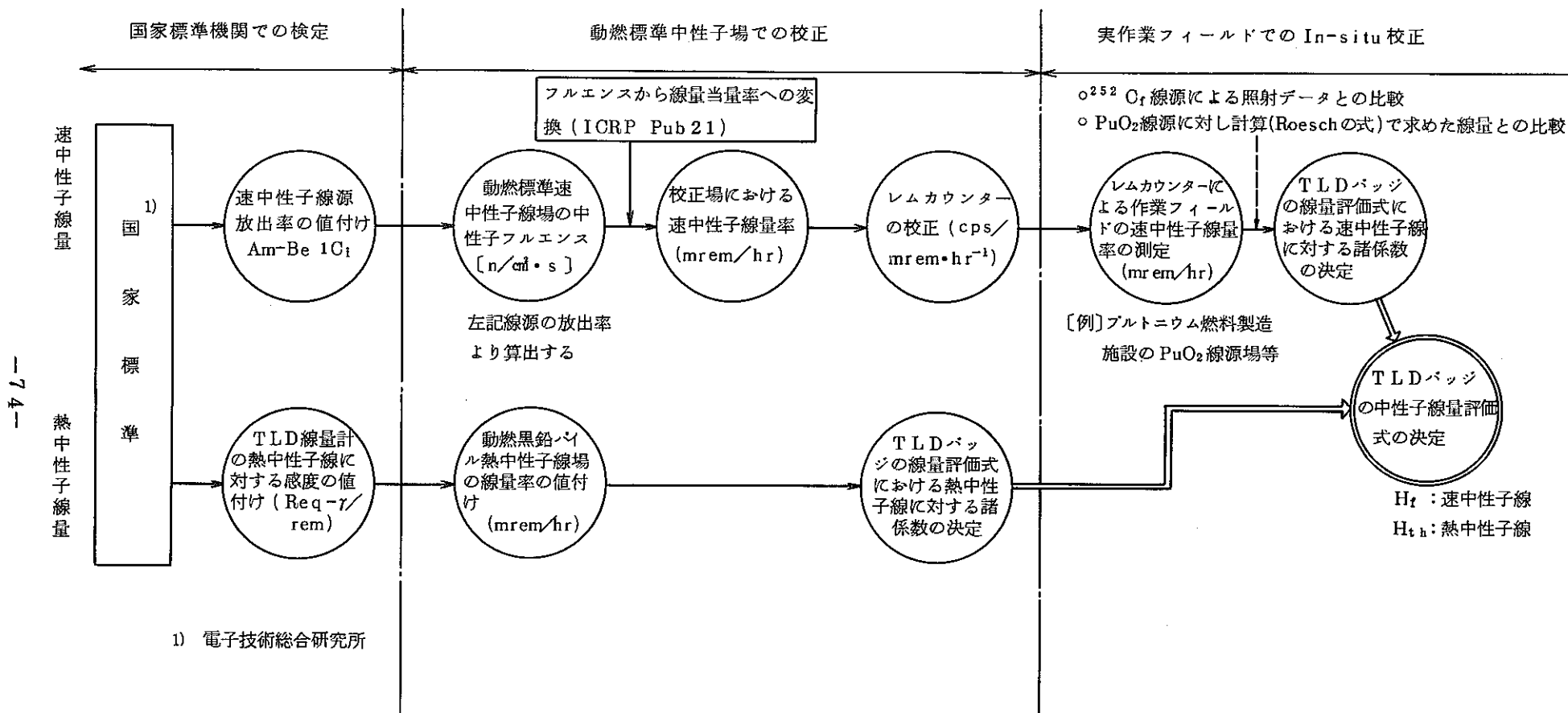


Fig. App. 1 中性子線量評価におけるトレーサビリティ体系