

本資料は 年 月 日付けで登録区分、  
変更する。 2001. 6. - 6

社内一般

[技術情報室]

# Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> (Cu) 蛍光体を利用した自動読取型 TLDバッジの性能・特性

Dosimetric characteristics of an automatic-reading TLD badge using  
Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>(Cu) phosphor

1983年12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



社 内 一 般  
PNC 841-83-84  
1 9 8 3 年 1 2 月

## Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>(Cu) 蛍光体を利用した自動読取型 TLD バッジの性能・特性

Dosimetric characteristics of an automatic-reading TLD badge using  
Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>(Cu) phosphor

実施責任者 中 田 啓  
報告者 石 黒 秀 治  
宮 部 賢 次 郎  
野 村 幸 広

期 間 1981年4月1日 ~ 1983年3月31日

目 的 昭和 57 年 4 月に東海事業所での個人被曝管理に導入した Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> (Cu) 蛍光体を使用した自動読取型 TLD バッジの線量評価法を決定するとともに、線量評価上の諸性能・特性についてまとめた。

### 要 旨

動燃東海事業所においては、被曝管理対象者の増加に対処するとともに線量評価精度の向上を目的として、昭和 53 年度より Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> (Cu) 蛍光体を使用した自動読取方式の新しい TLD バッジの開発を行ってきた。そして、55 年度までに  $\gamma$ 、 $\beta$ 、中性子線に対する線量当量評価法の検討、試作線量計による基礎的な性能・特性試験を実施した。そこで、今回はさらに最終的に仕様を決定した TLD バッジに対して照射試験を行い、線量評価式の決定を行うとともに線量評価上の諸性能・特性を調べた。また、昭和 49 年度より使用している従来の TLD バッジ (手動読取方式) に代って新しい TLD バッジを個人被曝管理に使用するに際し、新・旧 TLD バッジの比較試験を実施した。この結果、新型 TLD バッジは自動読取方式の採用により測定処理が自動的に迅速に行えるだけでなく、 $\gamma$  線のみならず  $\beta$  線および中性子線に対しても低線量まで精度よく測定評価できることが確認された。

本書においては、Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> (Cu) 蛍光体を用いた新しい TLD バッジに対して実施した上記の照射試験の結果をまとめた。



# 目 次

第1章 序 論	1
第2章 TLD バッジの構造・構成	3
2-1 TLD 素子	3
2-2 TLD バッジの全体概要	5
2-3 $\gamma$ (X)・ $\beta$ 線用線量計	6
2-4 中性子線用線量計	7
2-5 バッジケース	7
第3章 TLD リーダ	17
3-1 TLD リーダの概要	17
3-2 TLD リーダの仕様	17
3-3 測定原理	17
3-4 線量の出力表示	18
第4章 $\gamma$ (X) 線量当量評価	24
4-1 概 要	24
4-2 $\gamma$ (X) 線量当量評価上の性能・特性	24
4-2-1 感度のバラツキ	27
4-2-2 くり返し照射に対する再現性	32
4-2-3 線量直線性	34
4-2-4 入射方向依存性	37
4-2-5 エネルギー依存性	41
4-2-6 残光線量	45
4-2-7 くり返し加熱による感度の変化	48
4-2-8 フェーディング特性	51
4-3 $\gamma$ (X) 線量当量評価法	54
第5章 $\beta$ 線量当量評価	58
5-1 概 要	58
5-2 $\beta$ 線量当量評価の原理および線量評価式	59
5-3 $\beta$ 線量当量評価上の性能・特性	60
5-3-1 感度のバラツキ	60
5-3-2 エネルギー依存性	63
5-3-3 入射方向依存性	70

5-3-4	$\beta$ 線と $\gamma$ 線の混在照射場での分離評価精度	72
第6章	中性子線量当量評価	76
6-1	概要	76
6-2	中性子線量の測定原理と線量当量評価式の組み立て	81
6-2-1	測定原理	81
6-2-2	線量当量評価式の基本式	81
6-2-3	線量当量評価式中の係数(反射率)の算出法	86
6-2-4	各反射率の測定および中性子線量当量評価式の決定	92
6-3	中性子線量当量評価における性能・特性	101
6-3-1	$\gamma$ (X)線エネルギー依存性	101
6-3-2	速中性子線に対する感度のバラツキ	106
6-3-3	速中性子線のくり返し照射に対する再現性	108
6-3-4	TLD バッジとファントム間の距離依存性	110
6-3-5	入射方向依存性	114
6-3-6	TLD バッジの着用角度による感度変化	116
6-3-7	速中性子線と $\gamma$ 線の混在照射場での分離評価精度	118
第7章	新型TLD バッジと旧型TLD バッジの比較試験	121
7-1	概要	121
7-2	標準線源による照射試験結果	123
7-3	作業フィールドでの照射試験結果	126
7-4	新・旧TLD バッジの2重着用試験結果	130
7-5	新・旧TLD バッジによる評価線量の相関関係	134
第8章	結論	138
8-1	線量当量評価式の決定	138
8-1-1	$\gamma$ (X)線量当量評価	138
8-1-2	$\beta$ 線量当量評価	138
8-1-3	中性子線量当量評価	139
8-2	線量当量評価における性能・特性	140
8-2-1	$\gamma$ (X)線量当量評価	140
8-2-2	$\beta$ 線量当量評価	140
8-2-3	中性子線量当量評価	141
8-3	新・旧TLD バッジの比較試験	143
参考文献		144

## 第 1 章 序 論

動力炉・核燃料開発事業団（動燃）東海事業所では、使用済核燃料再処理工場の運転開始やプルトニウム燃料施設での Pu 燃料製造の本格化にともない、これらの施設での  $\gamma$  線のみならず  $\beta$  線や中性子線による被曝線量の評価を精度よく行うため、また、測定処理の簡素化のために、昭和 49 年度よりそれまでのフィルムバッジ（原研Ⅳ型）に代って TLD バッジ（旧型 TLD バッジ）を使用して個人被曝管理を実施してきた。しかし、この旧型 TLD バッジでは、

- 1) TLD 素子の発光量の読取りが手動方式であり、さらに 1 つの TLD バッジ に複数個の素子が収納されているため測定に多大な時間を要していた。また、発光量の読取りに使用するリーダとデータ処理システムがオフラインであるため、多量のデータの迅速処理という点で問題があった。

このような理由により、ここ数年の個人被曝管理対象者の急増にともなう被曝データの増加に対し、定められた期間内に被曝線量の評価結果を関係各所へ報告することが難しくなってきた。

- 2)  $\gamma$  線のみならず  $\beta$  線や中性子線に対しても測定評価が可能であったが、とくに  $\beta$  線と中性子線については低線量までさらに精度よく評価するために検出感度の向上や混在放射場での分離評価精度の向上が管理上要求されていた。

これらの問題点を解決するために、昭和 53 年度より TLD 蛍光体として生体等価な  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) を使用し各放射線量に対して精度良く分離評価が可能であり、さらに TLD 素子の発光量の測定が迅速にかつ自動的に可能な新しい TLD バッジ（新型 TLD バッジと称す）の開発を行ってきた。

新型 TLD バッジの開発においては昭和 55 年度までに、各放射線に対する線量評価技術の見直しと開発を行い、また、実際に種々の  $\gamma$ ・ $\beta$ ・中性子線源による照射試験にて TLD 素子の基本的な性能・特性の検討を実施した。さらに、この結果に基づいて TLD バッジの基本仕様を決定するとともに、試作バッジを用いた照射試験により線量評価式を検討した。開発途中における試験・検討の結果は既に報告書「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<sup>1)</sup>」と「TLD による新型個人被曝線量計および線量評価法の開発<sup>2)</sup>」において詳しく述べられている。

今回、この新型 TLD バッジを東海事業所における個人被曝管理にて実用化するにあたり、これまでの経過をふまえて下記のような試験・検討を実施した。

- ① これまでの報告書<sup>1), 2)</sup>において検討された基本仕様に基づいて、最終的な TLD バッジの構造・構成を決定した。この際、とくに  $\beta$  線の入射窓の厚さについては、バッジケースのマイラ膜の厚さを薄くすることが製造上可能となったため当初の  $5 \text{ mg/cm}^2$  を  $3 \text{ mg/cm}^2$  に変更した。このため  $\beta$  線評価用素子に対する入射フィルターの厚さは合計で  $17 \text{ mg/cm}^2$  と  $63 \text{ mg/cm}^2$  となり、前回の報告書で示されている最適な厚さである  $13.4 \text{ mg/cm}^2$  と  $64.2 \text{ mg/cm}^2$  に

より等しくなった。

また、基本仕様では $\gamma$ ・ $\beta$ 線量計の第3素子( #<sub>3</sub> )が ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu)素子で第4素子( #<sub>4</sub> )が $\text{CaSO}_4$ (Tm)素子としていたが、 $\gamma$ (X)線量評価用 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu)素子に対するバッジケースの $\beta$ 線入射窓からの光子や $\beta$ 線の回り込みの寄与を防ぐため両素子の位置を逆にした。

- ② 以前の報告書において決定された線量当量評価式は、種々の試作のバッジケースにTLD線量計を収納した条件において求めたものである。そこで、今回あらためて最終仕様のバッジケースにTLD線量計を入れて照射試験を行い $\gamma$ 線、 $\beta$ 線、中性子線に対する線量当量評価式を決定した。また、以前の線量当量評価式はTLDバッジをファントムに密着させた条件で求めたものであるが、今回は実際の着用状態を考慮してTLDバッジとファントム間の距離を1.5cmと仮定した条件での線量当量評価式を求めた。
- ③ 新型TLDバッジの線量評価上の性能・特性に関してエネルギー依存性や方向依存性などの基本的な項目については、これまでの報告書においても検討が行われている。今回は最終仕様のTLDバッジに対して照射試験を実施し、これらの基本特性に加えてさらに種々の性能・特性を明らかにした。
- ④ 新型TLDバッジと旧型TLDバッジに対して同一条件にて照射試験を行い、両者の $\gamma$ 線・ $\beta$ 線・中性子線に対して評価した線量を比較した。

以上の試験・検討の結果、最終的に仕様を決定したTLDバッジが開発当初に意図した性能・特性を満たすとともに、線量評価上もとくに問題の無いことが判った。これに基づいて昭和57年4月より新型TLDバッジの実用を開始した。

以下、本報告においては上記の試験・検討の結果を示す。

## 第2章 TLDバッジの構造・構成

### 2-1 TLD素子

TLD素子の構造を図2.1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75 $\mu$ ）で蛍光体は、粒径約90 $\mu$ の顆粒で、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でカバーさせている。

蛍光体の実効厚さは約15mg/cm<sup>2</sup>，基板の厚さは約11mg/cm<sup>2</sup>，およびカバーの厚さは約28mg/cm<sup>2</sup>である。

本TLDバッジでは線量評価用として生体等価なLi<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>（Cu）を用い、 $\gamma$ 線のエネルギー評価用としてCaSO<sub>4</sub>（Tm）を使用している。このうちLi<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>（Cu）についてはLiおよびBを濃縮した<sup>7</sup>Li<sub>2</sub><sup>11</sup>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>（Cu）と<sup>6</sup>Li<sub>2</sub><sup>10</sup>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>（Cu）を用いる。

Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>（Cu），CaSO<sub>4</sub>（Tm）蛍光体のグロー曲線をそれぞれ図2-2，図2-3に示す。グローピークの生じる温度はLi<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>（Cu）で約200℃，CaSO<sub>4</sub>（Tm）で約250℃である。また，Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>（Cu）では主ピークよりも低温側の120℃付近にも小さいピークがみられる。

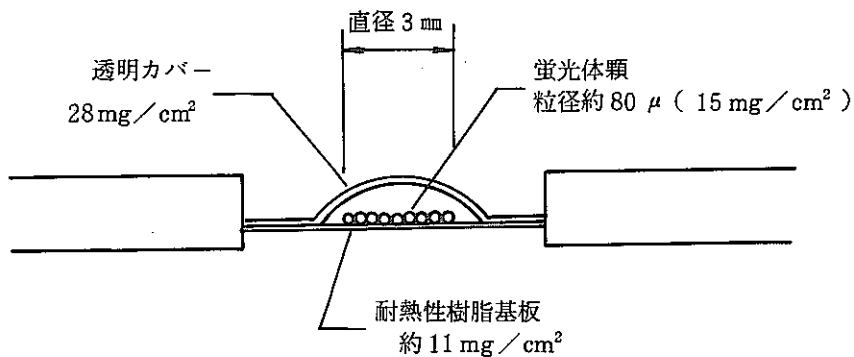


図2-1 TLD素子の構造



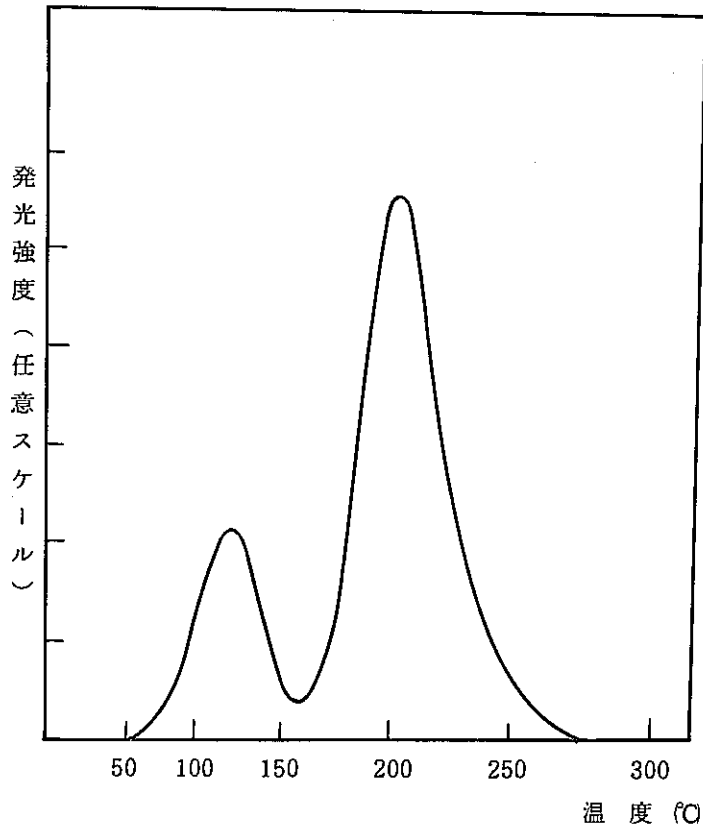


図 2 - 2  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$  蛍光体のグロー曲線

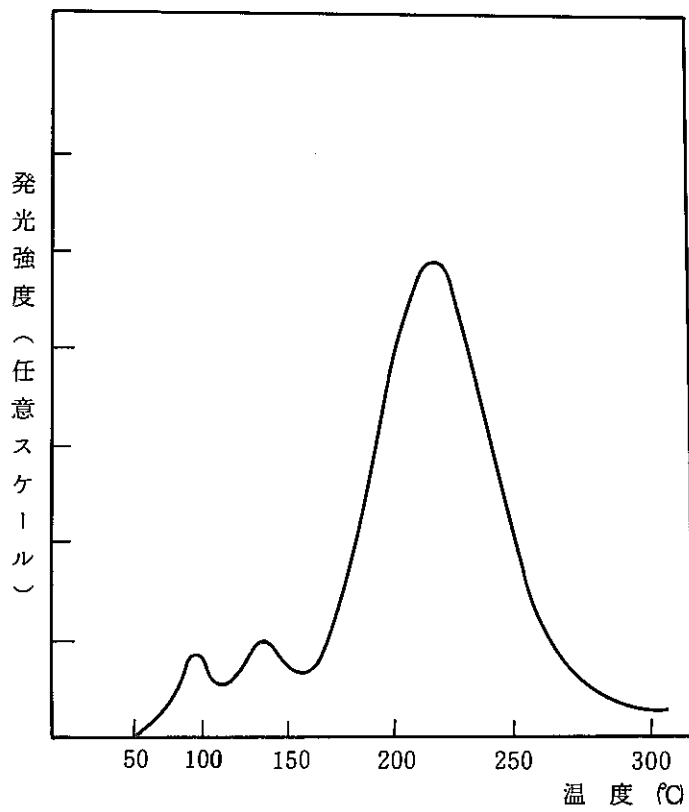


図 2 - 3  $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$  蛍光体のグロー曲線

## 2-2 TLD バッジの全体概要

TLD バッジの外観および全体構成を図 2-4, 2-5 に示す。また, TLD プレートおよびホルダーの構造を図 2-6 に示す。TLD バッジは 2 個の線量計 ( $\gamma(X)$ ・ $\beta$ 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る。バッジケースには 2 個の線量計が縦に並べて収納され, その背面には装着用のクリップが取付けられている。尚, TLD バッジによる線量評価は原則として  $\gamma(X)$  線,  $\beta$  線, 中性子線に対して 1 個のバッジで行うが, 中性子線による被曝がない作業員については  $\gamma(X)$ ・ $\beta$  線量計をバッジケースに入れて  $\gamma(X)$  線と  $\beta$  線だけに対して評価を行う。

以下, 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のよう定義する。

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。

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。それぞれの線量計の TLD 素子とフィルターの構成を表 2-1 に示す。

$\gamma(X)$  線については約  $1000 \text{ mg/cm}^2$  厚さの樹脂フィルター下の  ${}^7\text{Li}_2 \text{ } {}^{11}\text{B}_4 \text{ O}_7 (\text{Cu})$  蛍光体により深部線量当量指標<sup>注)</sup>の測定を行う。また, 同じフィルター下に  $\text{CaSO}_4 (\text{Tm})$  蛍光体をおくことにより,  $\text{CaSO}_4 (\text{Tm})$  素子と  ${}^7\text{Li}_2 \text{ } {}^{11}\text{B}_4 \text{ O}_7 (\text{Cu})$  素子のエネルギー依存性の差を利用して光子のエネルギー評価を行い, 大線量の被曝が生じた場合など必要に応じて実効線量当量の評価を行う時などに利用できる。

$\beta$  線については,  $17 \text{ mg/cm}^2$  と  $63 \text{ mg/cm}^2$  厚さの樹脂フィルター下の  ${}^7\text{Li}_2 \text{ } {}^{11}\text{B}_4 \text{ O}_7 (\text{Cu})$  素子の発光量の比から  $\beta$  線の実効エネルギーを求め, あらかじめ標準照射にて求められた TLD 素子の  $\beta$  線に対する感度を基にこの実効エネルギーに応じた感度補正を行うことにより線量当量を評価する。また, これらの 2 素子への  $\gamma(X)$  線の寄与の差し引きには  $\gamma(X)$  線量当量評価用の  $1000 \text{ mg/cm}^2$  樹脂フィルター下の  ${}^7\text{Li}_2 \text{ } {}^{11}\text{B}_4 \text{ O}_7 (\text{Cu})$  素子を利用する。

注) 深部線量当量指標は直径 30 cm の球において, 表面から 1 cm 以下の深さにおける最大線量当量と定義されているが, ここでは 1 cm の深さの位置での線量当量として考える<sup>10)</sup>

中性子線については、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 $\gamma$ 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。また、これらの素子は $\gamma$ (X)線に対しても有感であるため、その差し引きは ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$ (Cu)素子にて行う。

尚、 $\gamma$ (X)線、 $\beta$ 線、中性子線に対する線量評価は所定のTLD素子の発光量から算出する。しかし、各素子の発光量は $\gamma$ (X)に $\gamma$ (X)線照射に対しては相関性を有しているため、各素子の発光量の大小関係を比較することにより疑似発光による異常データを発見することができ、全体的に評価データの信頼性を確保することができる。例えば、 $\gamma$ (X)線の評価は基本的には $\gamma$ (X)・ $\beta$ 線量計の第4素子(#<sub>4</sub>): ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$ (Cu)発光量から求めるが、この発光量を $\gamma$ (X)・ $\beta$ 線量計の第3素子(#<sub>3</sub>): $\text{CaSO}_4$ (Tm)の発光量<sup>注1)</sup>あるいは中性子線量計の第1素子(#<sub>1</sub>): ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$ (Cu)や第3素子(#<sub>3</sub>): ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7$ (Cu)の発光量<sup>注2)</sup>と比較確認することが可能である。また、 $\beta$ 線および中性子線量の評価における $\gamma$ 線寄与の差し引きにおいても、同様の比較確認が適用できる。各素子間の相互比較の関係を表2-2に示す。

この他、個々の線量計にはホルダー部に40ビットの光学読取用サン孔コードを設け、線量計番号(7桁)の読取り、線量計の種類( $\gamma$ ・ $\beta$ 線量計、中性子線量計)の判別をリーダーにて自動的に行う。また、この線量計では1素子当りの蛍光体の量が微量であるため、蛍光体の量の多少により感度のバラツキが予想される。このため素子の感度補正に対応する係数がサン孔コードに設けられている。光学コードの構成を図2-7に示す。

### 2-3 $\gamma$ (X)・ $\beta$ 線用線量計

図2-8に $\gamma$ (X)・ $\beta$ 線用線量計(UD-808P型)の外観とバッジケースを含めた断面図を示す。第1・第2素子(#<sub>1</sub>, #<sub>2</sub>)が $\beta$ 線評価用であり、第3・第4素子(#<sub>3</sub>, #<sub>4</sub>)が $\gamma$ (X)線評価用である。

各種の蛍光体に対するフィルターの厚さは、TLD素子基板、ホルダー、バッジケースの全部を含めたものである。例えば、第4素子(#<sub>4</sub>)の ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$ (Cu)については、基板の11mg/cm<sup>2</sup>とホルダーの160mg/cm<sup>2</sup>およびバッジケースの840mg/cm<sup>2</sup>の合計で約1000mg/cm<sup>2</sup>となり、これにより $\gamma$ (X)に対して約1cmの深さにおける深部線量当量を評価する。また、同じフィルター厚下に第3素子(#<sub>3</sub>)として非生体等価な蛍光体 $\text{CaSO}_4$ (Tm)をおき、特に低エネルギー領域での $\text{CaSO}_4$ (Tm)素子と ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$ (Cu)素子との感度差から $\gamma$ (X)線のエネルギー評価を行う。

注1) 光子のエネルギーが高い場合

注2) 中性子線の寄与が少ない場合

$\beta$ 線用の2個のTLD素子については、これまでの報告書<sup>2)</sup>で最も正確に $\beta$ 線エネルギーの評価ができるという理由で入射窓厚は13.4 mg/cm<sup>2</sup>と63.2 mg/cm<sup>2</sup>と結論されている。しかし、バッジケースの入射窓は強度を保持する必要から極端に薄くすることができないため最終的に17 mg/cm<sup>2</sup>と63 mg/cm<sup>2</sup>になった。

#### 2-4 中性子線用線量計

図2-9に中性子線用線量計(UD-809P型)の外観図と、バッジケースを含めた断面図を示す。第2, 第3, 第4素子(#<sub>2</sub>, #<sub>3</sub>, #<sub>4</sub>)が中性子線量当量評価用であり, 第1素子(#<sub>1</sub>)は $\gamma$ 線寄与(捕獲 $\gamma$ 線含む)の差引用である。各TLD素子の両側には7.5×11×0.7(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囲り込みを防ぐためバッジケースの内側に厚さ0.5 mmのCdシールドが貼付されている。

#### 2-5 バッジケース

バッジケースはその用途に応じて下記の2種類がある。

UD-887 PH 1型ケース       $\gamma(X) \cdot \beta$ 線量計と中性子線量計を収納し,  $\gamma$ 線,  $\beta$ 線, 中性子線に対する線量評価を行う。

UD-887 PH 3型ケース<sup>注1)</sup>       $\gamma(X) \cdot \beta$ 線量計を収納し,  $\gamma$ 線と $\beta$ 線に対する線量評価を行う。

バッジケースの構造を図2-10に示す。バッジケースは下部の蝶番で開閉する構造であり, 蓋を閉めるとロックされ, 専用の治具を用いないと容易に開けられないようにしてある。バッジケース本体はABS樹脂<sup>注2)</sup>で作られており, 寸法は約60×62×10[mm]である。また, バッジケースの重量はUD-887 PH 1で約45 gであり, UD-887 PH 3で約35 gである。

2つの線量計を収納する際には, その入れ方を間違わないように構造的な工夫がなされている。また, 内部にゴム製のパッキングを用い, 水や湿気の入るのを防いでいる。

バッジケースの前面にはラベルスペースを設け, 管理上のバッジ番号及び氏名を明記したラベルを貼り付ける。

この他, バッジケース内側の中央部には臨界事故時の被曝線量のスクリーニング用として4.5<sup>W</sup> × 11.0<sup>L</sup> × 1.0<sup>t</sup> mmのIn箔(360 mg ± 15%)が貼られている。

注1) UD-887 PH 1型ケースから熱中性子線のまわり込み防止用のCdシールドを除いたもの。

注2) Acrylonitrile Butadiene Styrene

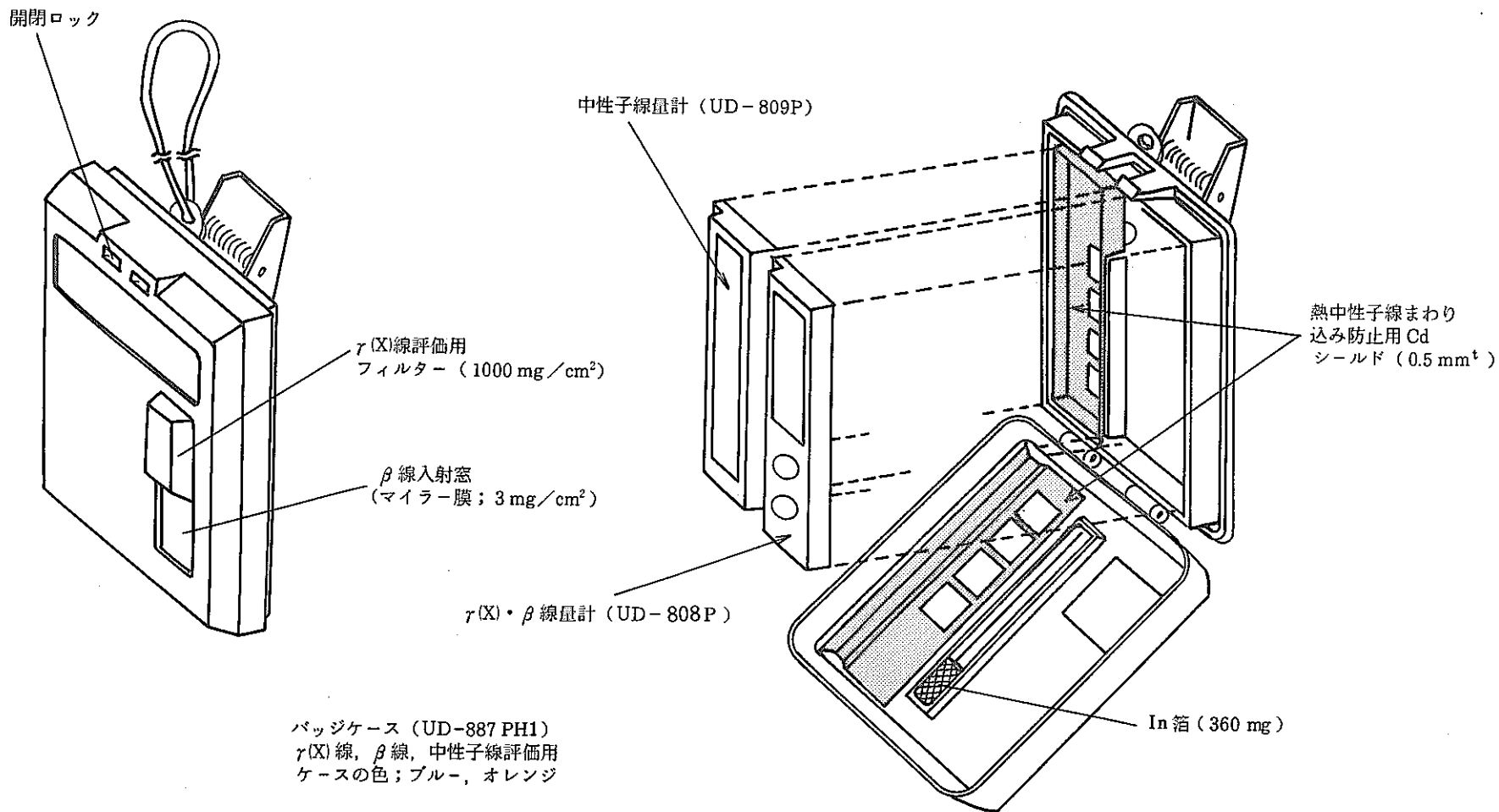


図 2 - 4 TLD バッジの全体構成 ( $\gamma$ (X)・ $\beta$ , 中性子線評価用)

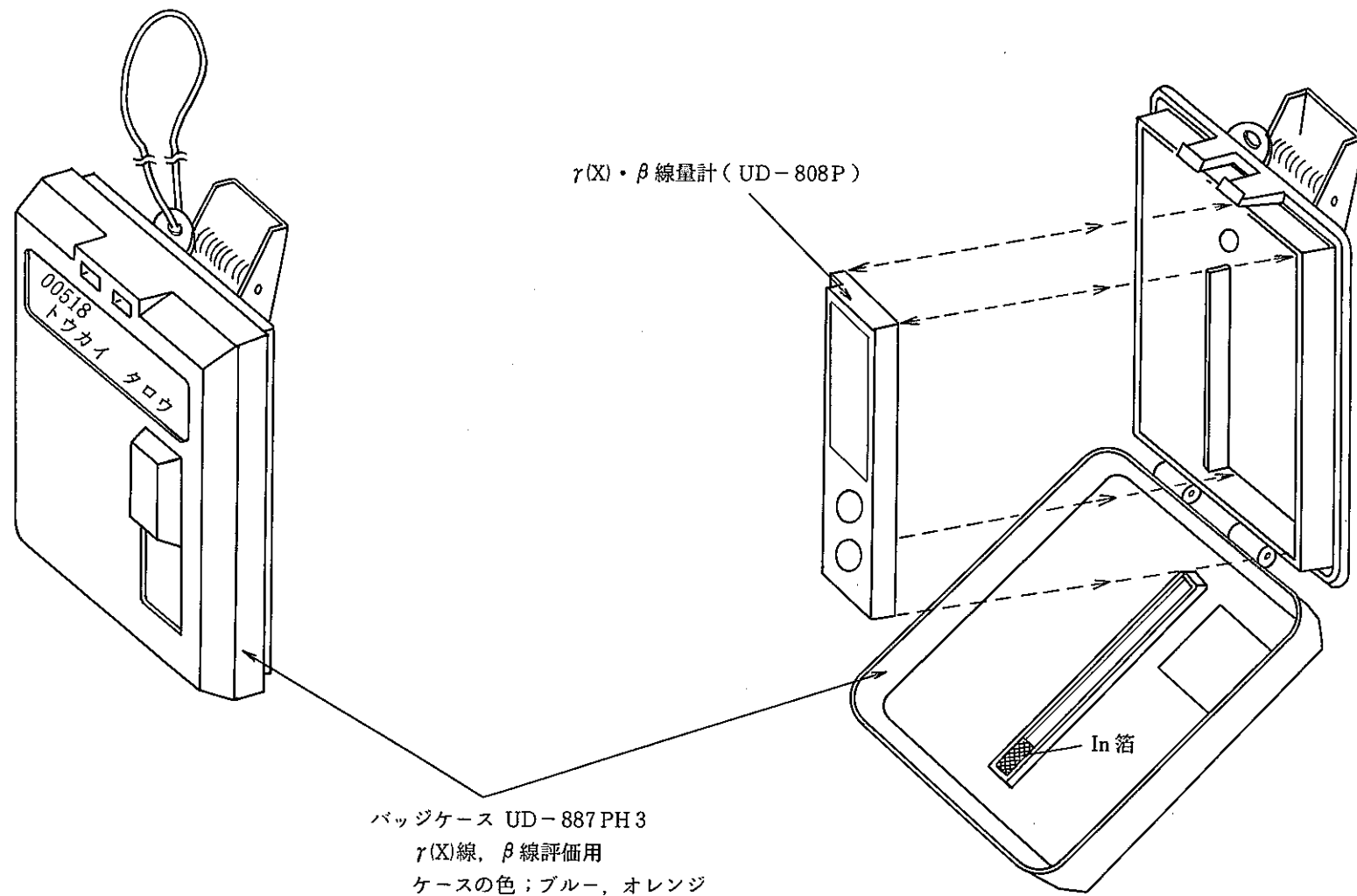
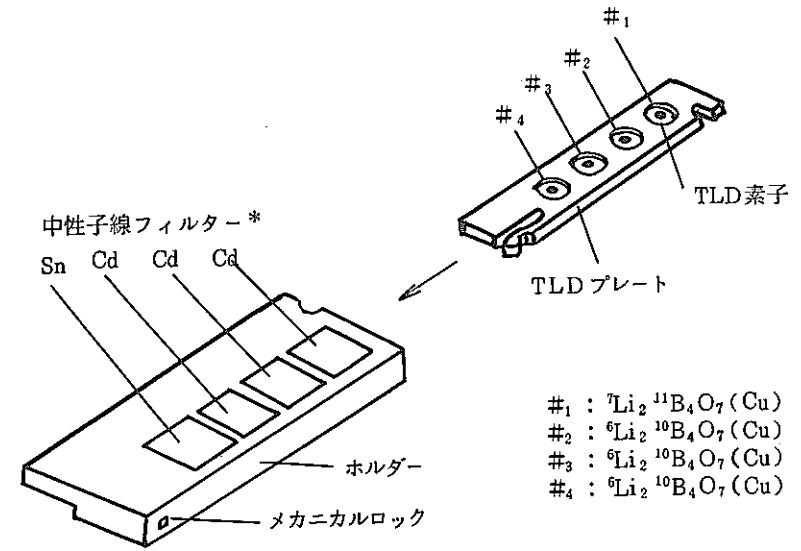
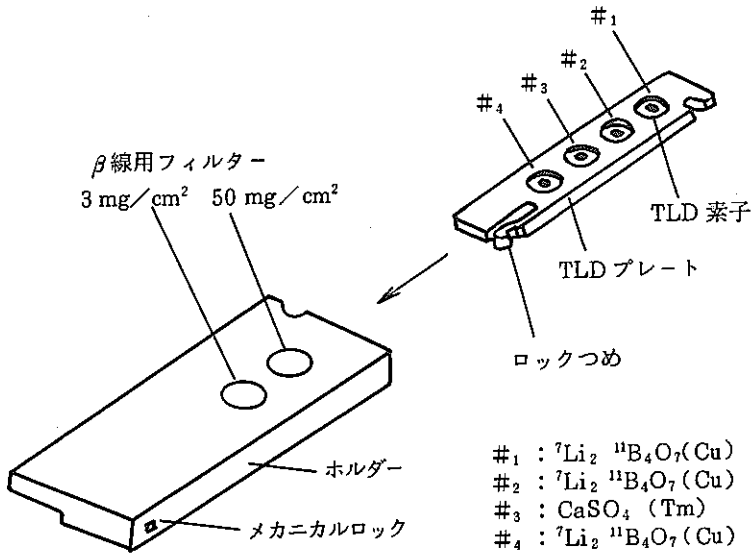
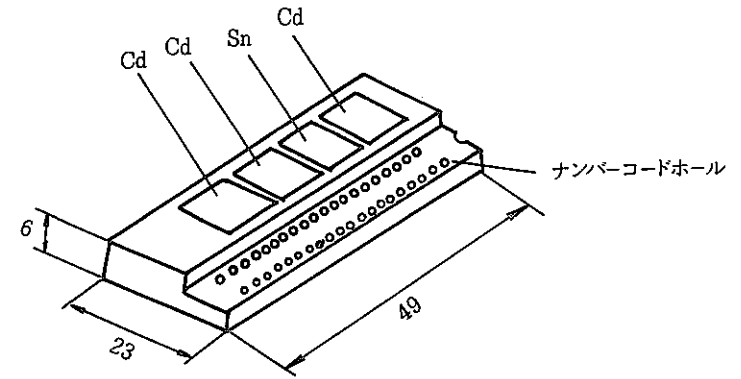
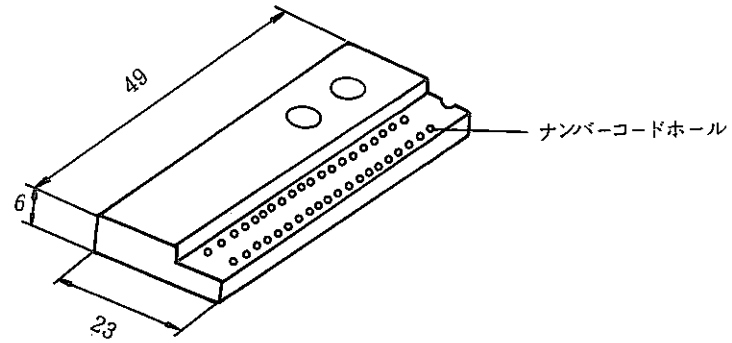


図2-5 TLD バッジの全体構成 (γ(X)・β線評価用)



- #1 :  ${}^7\text{Li}_2 {}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$
- #2 :  ${}^6\text{Li}_2 {}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$
- #3 :  $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$
- #4 :  ${}^7\text{Li}_2 {}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$

\*実際にはこの上にラベルが貼られている。

(a)  $r(X) \cdot \beta$ 線用

(b) 中性子線用

図2-6 TLDプレートおよびホルダーの構造

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

注)  $\gamma$  (X)線・ $\beta$ 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。

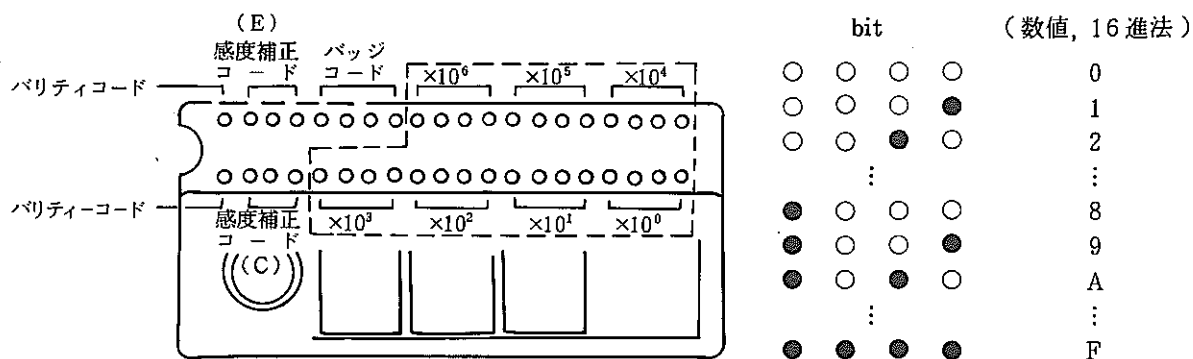


表 2-2 線量評価における各 TLD 素子の用途

線量計	素子	蛍光体およびシールド	線量評価に利用する素子		
			$\gamma$ 線	$\beta$ 線	中性子線
$\gamma$ (X)・ $\beta$ 線用 (UD-808P)	#1	${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$ (Cu) + 樹脂 17 mg/cm <sup>2</sup> フィルター		◎	
	#2	${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$ (Cu) + 樹脂 63 "		◎	
	#3	CaSO <sub>4</sub> (Tm) + 樹脂 1000 "	○	○	○
	#4	${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$ (Cu) + 樹脂 1000 "	◎	◎	○
中性子線用 (UD-809P)	#1	(前) Cd / ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$ (Cu) / Cd (後)	○	○	◎
	#2	Sn / ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7$ (Cu) / Cd			◎
	#3	Cd / ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7$ (Cu) / Cd			◎
	#4	Cd / ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7$ (Cu) / Sn			◎

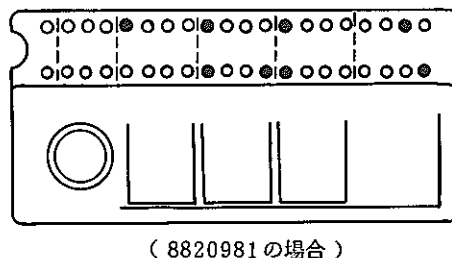
◎ 線量評価において直接に利用する素子

○ 測定値の信頼性の確認に利用できる素子



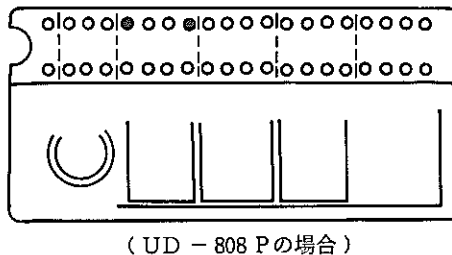
(a) 線量計番号 (4 bit × 7)

$\gamma \cdot \beta$  線量計 UD-808型; 882 0001  
 中性子線量計 UD-809型; 982 0001  
 SERIAL No.  
 型名  
 製造年 (西暦下2桁)



(b) バッジコード: 線量計の種類を示す。(4 bit)

線量計の種類	型名	バッジコード
$\gamma(X) \cdot \beta$ 線量計	UD-808P	8
中性子線量計	UD-809P	9



(c) 感度補正コード; 各TLD素子に対する感度の補正を行うための係数を定める。(3 bit × 2)

- UD-808P 線量計の場合  
 コードC:  ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$  素子の#<sub>1</sub>, #<sub>2</sub>, #<sub>4</sub> の感度を右表に定数にて補正  
 コードE:  $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$  素子の#<sub>3</sub> の感度を補正
- UD-809P 線量計の場合  
 コードC:  ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$  素子の#<sub>1</sub> の感度を補正  
 コードE:  ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$  素子の#<sub>2</sub>, #<sub>3</sub>, #<sub>4</sub> の感度を補正

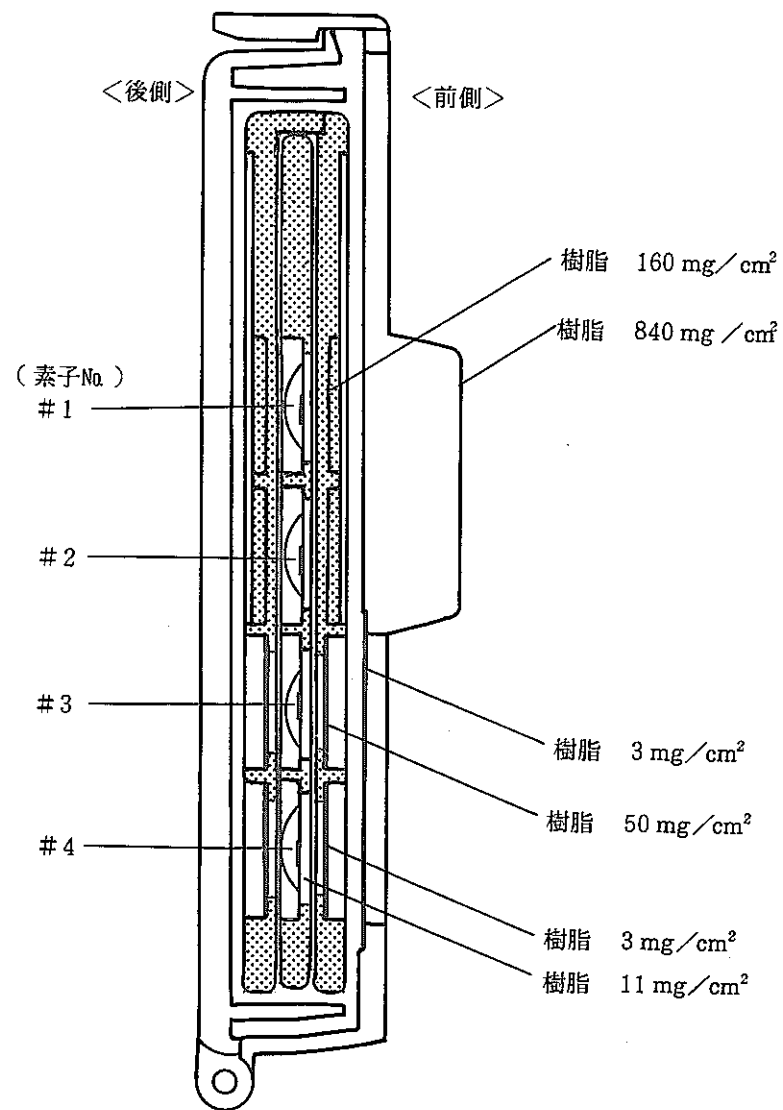
感度補正コード(4 bit)から読みとられる数値	補正定数*
5	×0.741
6	×0.819
7	×0.905
0 or 4	×1.000
1	×1.105
2	×1.222
3	×1.350

\*リーダにおいてこの数値がTLD発光量に自動的に乗じらせる。

(d) パリティコード; サン孔数の横方向の合計を寄数にするためのもの。これによりサン孔の状態が正常かどうか判断する。(1 bit × 2)

図2-7 光学コードの構成

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



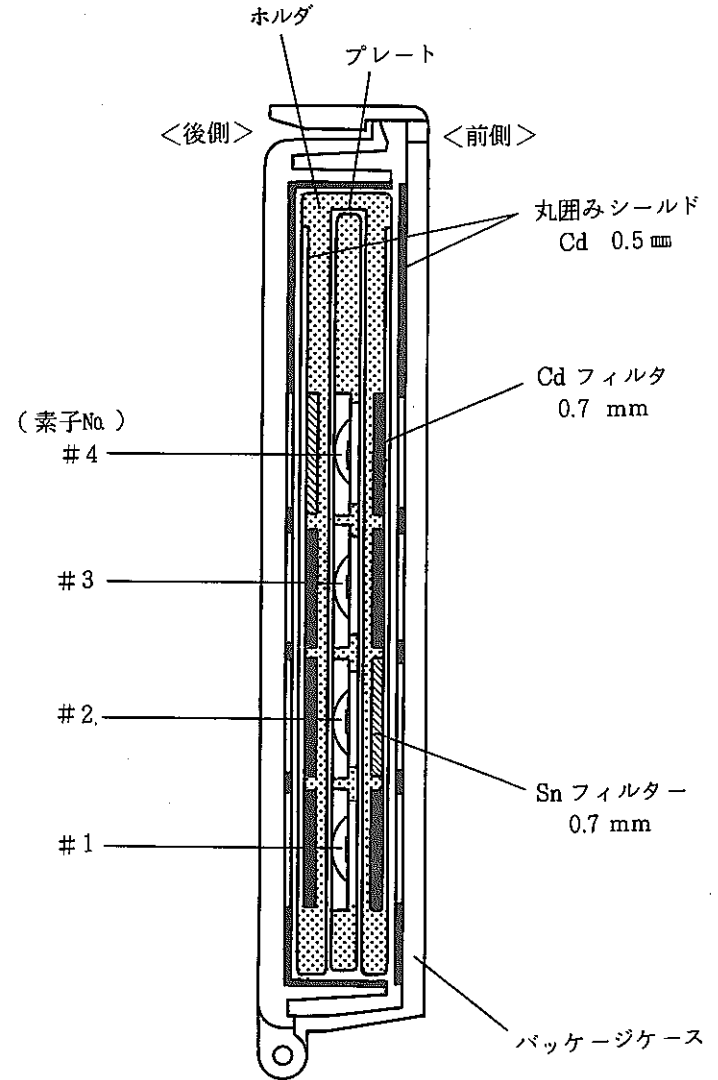
(a) TLD素子の構成

(b) ケースを含めた断面図

図 2 - 8  $\gamma(x) \cdot \beta$  用線量計 (UD - 808 P)

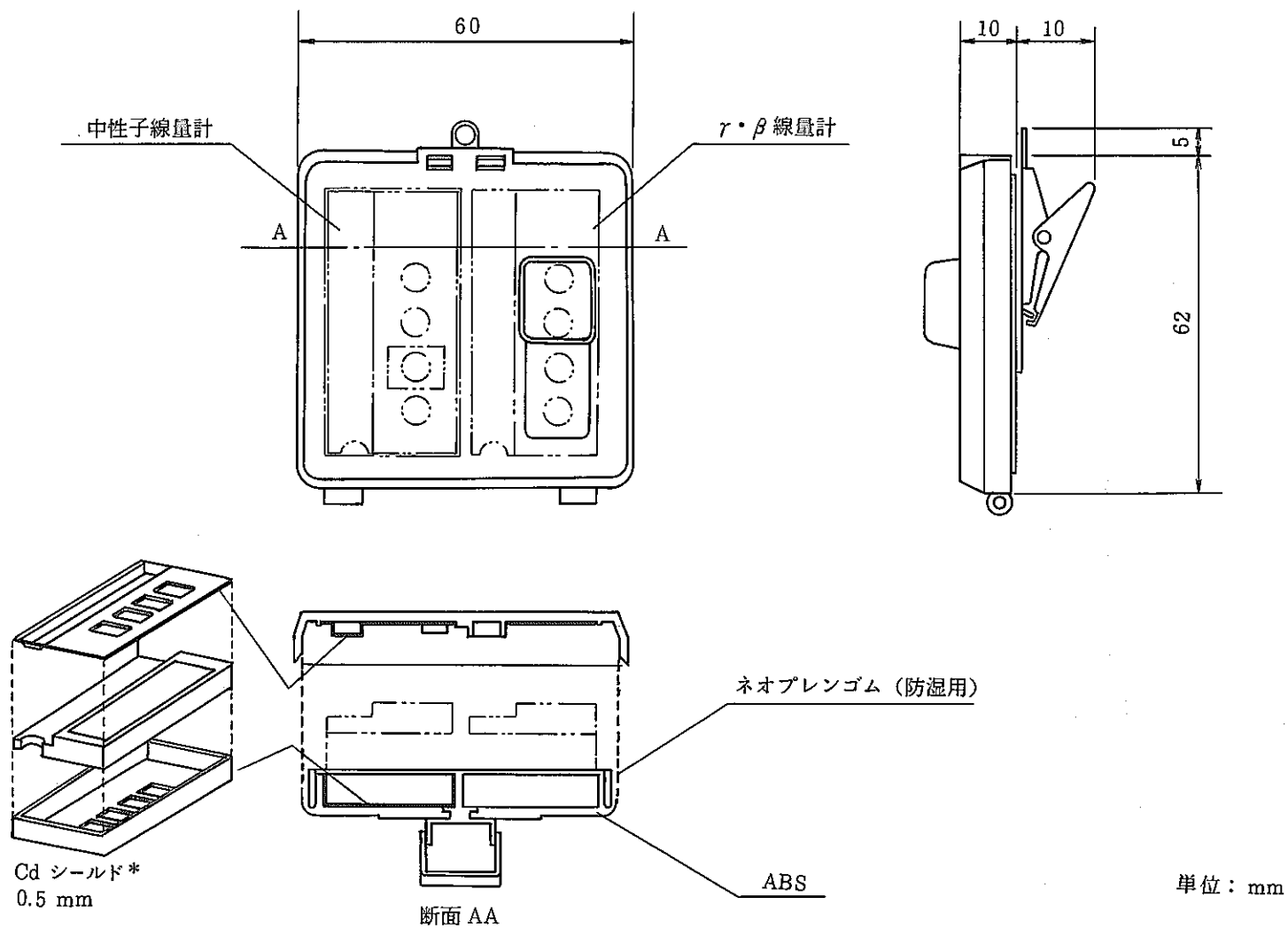
素子No.	フィルター (前)	蛍光体	フィルター (後)
#4	Cd	${}^6\text{Li}_2 {}^{10}\text{B}_4\text{O}_7 (\text{Cu})$	Sn
#3	Cd	${}^6\text{Li}_2 {}^{10}\text{B}_4\text{O}_7 (\text{Cu})$	Cd
#2	Sn	${}^6\text{Li}_2 {}^{10}\text{B}_4\text{O}_7 (\text{Cu})$	Cd
#1	Cd	${}^7\text{Li}_2 {}^{11}\text{B}_4\text{O}_7 (\text{Cu})$	Cd

(a) TLD 素子の構成



(b) ケースを含めた断面図

図 2 - 9 中性子線用線量計 (UD - 809P)



\*UD-887PH3 ケースは  $\gamma$  (X)  $\cdot \beta$  線評価用のため Cd シールドなし

図 2-10 バッジケースの構造 (UD-887PH1)

## 第3章 TLDリーダ

### 3-1 TLDリーダの概要

定常の被曝管理におけるTLDバッジの測定はUD-710P型自動リーダ（松下製）にて行う。このリーダにおいては多量の線量計を自動的に迅速に測定するとともに、測定データをオンラインで電子計算機に送信する機能を有している。

UD-710P型自動リーダの本体とマガジンチェンジャーを組み合わせた状態での外観を図3-1に示す。

### 3-2 TLDリーダの仕様

UD-710P型自動リーダの一般的な仕様は次のとおりである。

#### <主な仕様>

・形 式	大量自動処理型（ホルダのまま測定）
・適用素子	UD-800シリーズ（15種自動識別）
・処理能力	2.8時間／500線量計（マガジンチェンジャー使用）
・加熱方式	ランプ（フリップス 1338型）による赤外線加熱式 （プリアニール、消去アニール機能付）
・TL検出方式	光子計数法、電流積分法併用
・表 示	プラズマディスプレイパネル（線量表示3桁）
・出 力	RS-232C標準インターフェース
・自己診断機能	校正光源による自動感度補正他各種自己診断機能

### 3-3 測定原理

リーダは基本的にはTLD素子を移動し測定位置に固定させる駆動機構、素子を加熱する機構および素子が加熱された時に発生する蛍光を検出測定する機構からなっている。

本リーダではTLD素子の加熱手段として赤外線ランプを用い、蛍光測定手段としては光電子増倍管による光子計測法を用いている。赤外線ランプの構造を図3-2に示す。赤外線ランプはパルス電圧で加熱されるが、ここでは3つのパルスによる3回加熱法を用いている。すなわち、ランプを適当な時間で調整された3つのパルスで順次点灯することにより、素子の予備アニール、測定加熱および消去アニールを行っている。

予備アニール； 蛍光体のグロー曲線にみられる低温側のピーク（130℃付近）をあらかじめ消去するための加熱であり、素子の感度のバラツキを少なくするとともに、フェーディングの影響を小さくする。

測定加熱； グロー曲線の高温側のピークに寄与する加熱であり、この部分が TLD 発光量の測定対象となる。

消去アニール； TLD の残線量を完全に消去するための加熱である。

図 3-3 に TLD 素子の加熱および発光量の測定のタイミングチャートを示す。TLD の発光量の測定は測定加熱時のみにカウンターのゲートを開いて行う。

### 3-4 線量の出力表示

従来の TLD リーダではそのほとんどが光電子増倍管からの出力を電流として積分する方法（電流積分方式）であるが、本リーダでは検出感度を良くするために光電子増倍管の光電面で生じる光電子を 1 つずつのパルスとして測定する方式（光電子計数方式）も採用している。本リーダにおいては、光電子計数方式により計数された出力信号を最終的には  $\text{CaSO}_4$  (Tm) 素子の発光量相当に変換した線量値 (MR) として表示するために、いくつかの変換補正が行われるとともに、素子ごとの感度のバラツキを出来るだけ少なくするための感度の補正が自動的に行われている。そのフローを図 3-4 に示す。各変換補正の内容は以下のとおりである。

#### (a) $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (Cu) から $\text{CaSO}_4$ (Tm) への材質変換補正

UD-808P 型および UD-809P 型線量計では  $\gamma$  (X) 線、 $\beta$  線、中性子線の線量当量評価には  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) を用いている。しかし、本リーダでは  $\text{CaSO}_4$  (Tm) を基準素子としており、 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) 素子に関しては、その発光量を自動的に  $\text{CaSO}_4$  (Tm) 素子相当へ変換し、この値が TLD 素子の読取值として出力表示される。

#### (b) MR/counts 変換

前述したように本リーダでは光電子増倍管からの出力を光電子のパルスとして計数する光子計数方式を採用しているが、線量値として出力するためカウント数から線量 (MR) への変換を行う。この変換係数は定期的に標準線源で照射を行った校正用素子を用いてリーダの校正を行う際にリーダの感度変化に応じて変更する。尚、実際に  $^{60}\text{Co}$  線源で同一条件にて照射を行った素子 (UD-808P 型  $^7\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  : Cu) に対して MR/カウント 係数を変化させて測定を行った結果を図 3-5 に示す。

#### (c) 感度のランク補正

TLD バッジに用いている TLD 素子は、その構造からして 1 素子当りの TLD 蛍光体の量が極めて微量でありそのままでは素子ごとの感度のバラツキが大きい。このため第 2 章でも示したように本 TLD バッジでは各線量計のホルダーの光学読取用さん孔に感度補正コード (C.E) が指定されている。感度補正コードは 3 ビットからなり、0~7 までの各コード

にそれぞれ 0.741～1.350 までに示すような値が感度補正係数として対応している。即ち、リーダにて線量計毎に感度補正コードを読み取り、そのコードに対応する係数による補正を行っている。これを感度のランク補正と称す。 $^{60}\text{Co}$ 線源にて照射を行った素子に対して感度補正を行った場合と行わない場合の測定結果を表 3-1 に示す。この結果、感度の補正を行うことにより、 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) および  $\text{CaSO}_4$  (Tm) 素子とも感度のバラツキ(標準偏差  $\sigma_{n-1}$ ) が小さくなるとともに、基準照射線量に対する読取値 [MR] の偏差も小さくなった。

(d) 光学系の汚れに対する感度補正

TLD リーダは使用しているうちに光学系の汚れ等により感度が低下するおそれがある。このため、本リーダでは測定を行う際に基準光源に対する感度のチェックを行うとともに次式で示される補正係数による補正を自動的に行っている。

$$\text{感度補正係数} = \frac{\text{リーダ校正時の基準光源に対する読取係数}}{\text{測定時の基準光源に対する読取係数}}$$

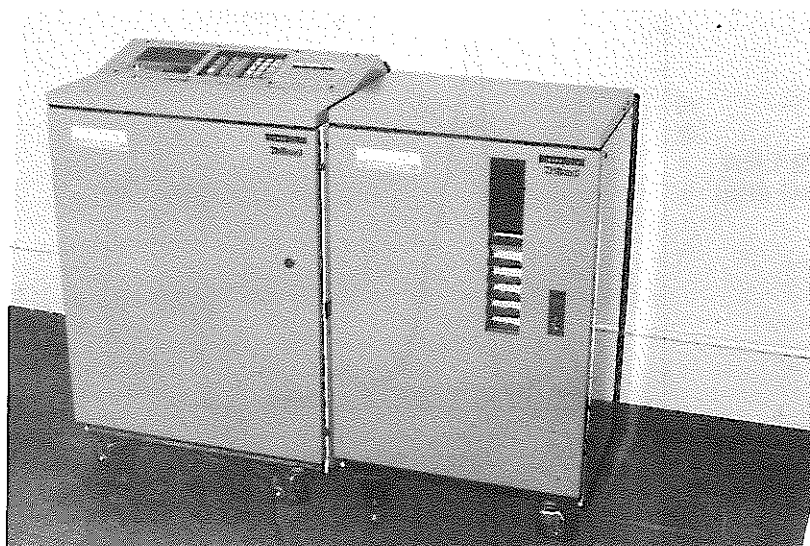


図 3-1 UD-710P型自動リーダの外観



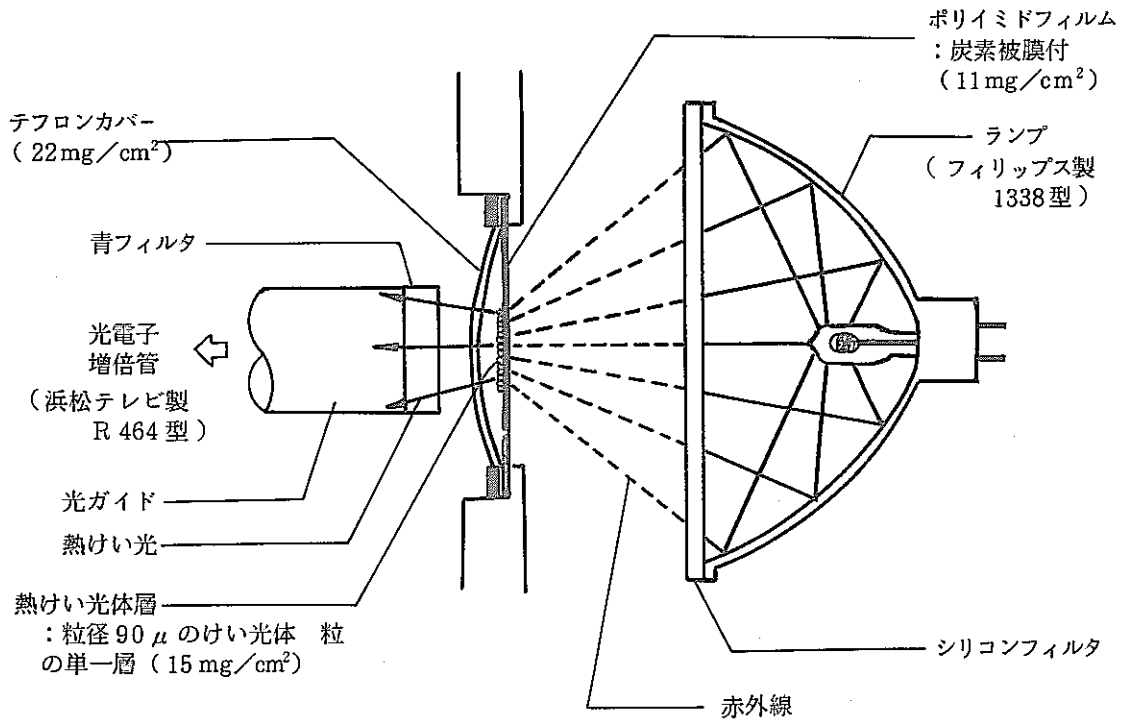


図 3-2 ランプ加熱法の概略図

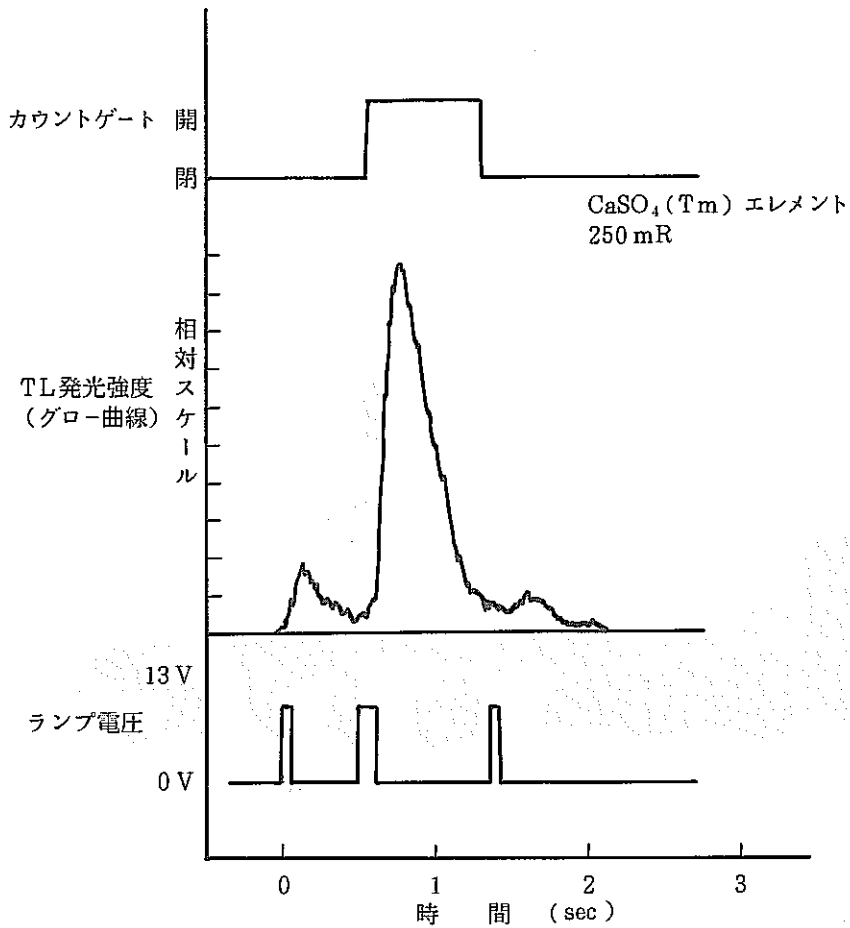


図 3-3 ランプ加熱法によるグロー曲線

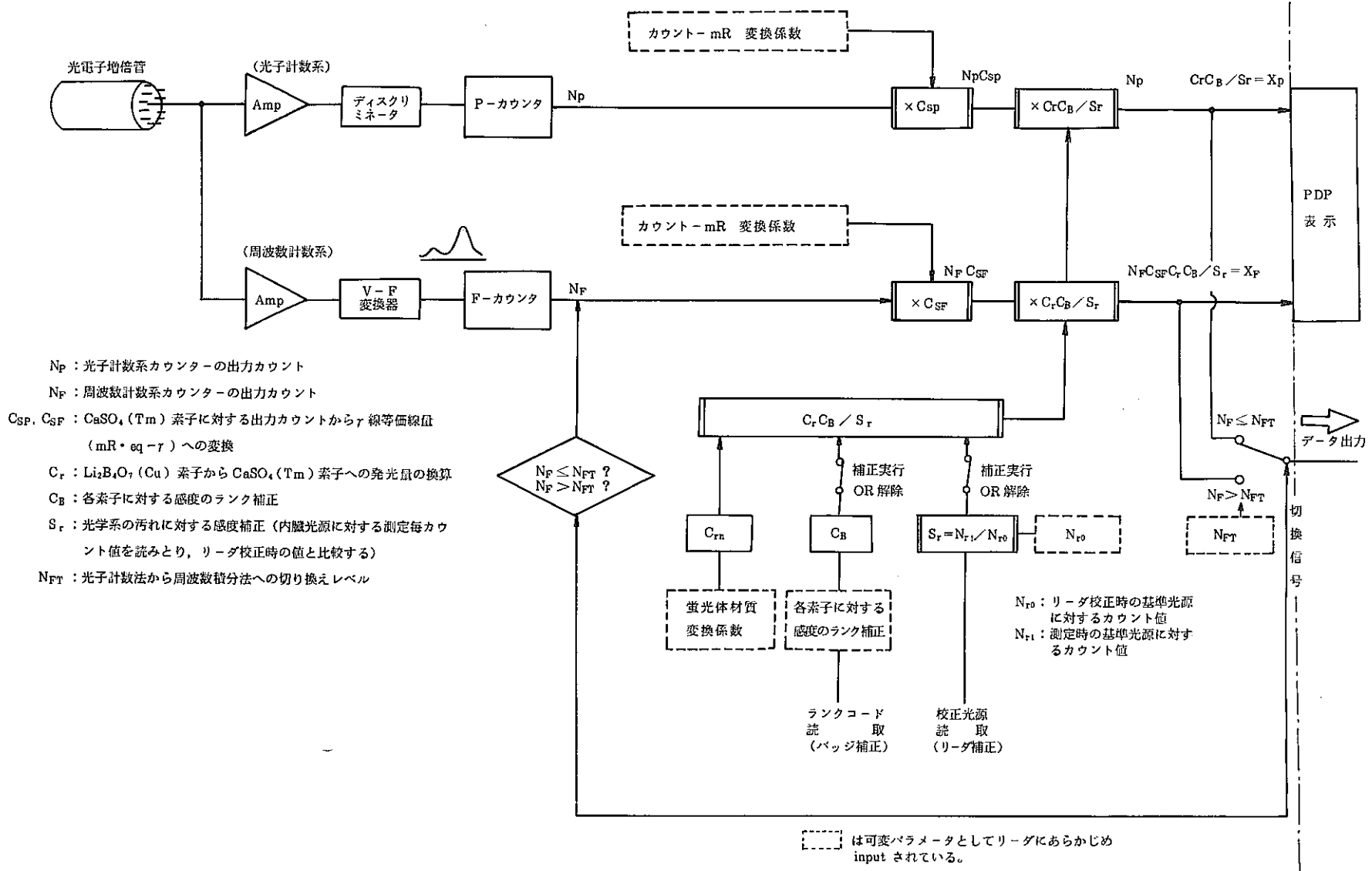


図 3 - 4 信号変換系の概念の一覧図

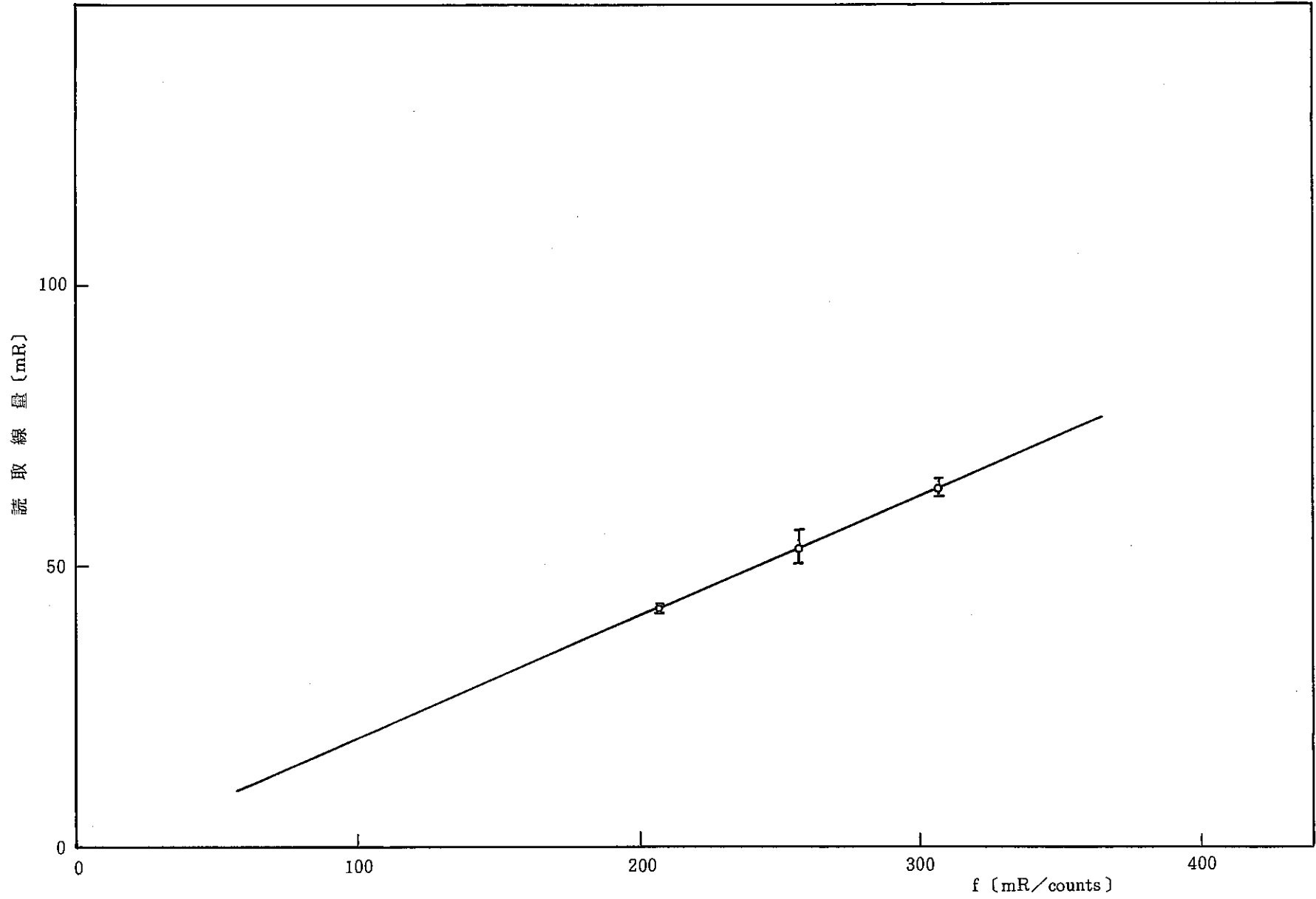


図3-5 換算係数 [mR/counts] の変化による読取線量の変化

表3-1 UD-710P型自動リーダにおけるランク補正の効果

蛍光体	条件	ランク補正無	ランク補正有
${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$ (Cu)		$x = 102.9 \text{ mR}$ $\sigma_{n-1} = 8.0 \text{ mR}$ $\sigma_{n-1}/\bar{x} \times 100 = 7.8 \%$ $\frac{\bar{x}}{x} = 0.96$ 照射線量	$x = 102.7 \text{ mR}$ $\sigma_{n-1} = 4.9 \text{ mR}$ $\sigma_{n-1}/\bar{x} \times 100 = 4.7 \%$ $\frac{\bar{x}}{x} = 0.96$ 照射線量
${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7$ (Cu)		$\bar{x} = 84.4 \text{ mR}$ $\sigma_{n-1} = 5.5 \text{ mR}$ $\sigma_{n-1}/\bar{x} \times 100 = 6.5 \%$ $\frac{\bar{x}}{\text{照射線量}} = 0.78$	$\bar{x} = 98.9 \text{ mR}$ $\sigma_{n-1} = 4.9 \text{ mR}$ $\sigma_{n-1}/\bar{x} \times 100 = 5.1 \%$ $\frac{\bar{x}}{\text{照射線量}} = 0.92$
$\text{CaSO}_4$ (Tm)		$\bar{x} = 124.2 \text{ mR}$ $\sigma_{n-1} = 16.5 \text{ mR}$ $\sigma_{n-1}/\bar{x} \times 100 = 13.3 \%$ $\frac{\bar{x}}{\text{照射線量}} = 1.15$	$\bar{x} = 105.4 \text{ mR}$ $\sigma_{n-1} = 4.9 \text{ mR}$ $\sigma_{n-1}/\bar{x} \times 100 = 4.6 \%$ $\frac{\bar{x}}{\text{照射線量}} = 0.98$

照射条件 線源 Cs-137

照射線量 107.6 mR

all plastic ケース\*

サンプル数 各10個

$\bar{x}$  : 平均値

$\sigma_{n-1}$  : 標準偏差

$$\left( \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \right)^{1/2}$$

$\sigma_{n-1}/\bar{x} \times 100$  : 百分率標準偏差

\* 照射時に電子平衡を確保するためのケースであり詳細は図4-1参照。

## 第4章 $\gamma(X)$ 線量当量評価

### 4-1 概 要

東海事業所で個人被曝管理用線量計として昭和49年より使用してきたTLDバッジ（旧型）においては $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$ 蛍光体（UD-200S）にて身体にバッジを装着した位置（胸部表面）での $\gamma(X)$ 線に対する照射線量を測定しそれを全身に対する線量当量としていた。しかし、1977年に勧告されたICRP 26においては、照射をうけた全ての臓器に対して確率的影響のリスクを考慮した実効線量当量の概念が導入され、さらに実効線量当量に対する補助限度として深部線量当量指標を測定評価することが示されている。深部線量当量指標は入射する放射線によって身体表面ではなくある適当な深さの位置における線量であるため個人線量計を用いて深部線量当量指標を評価するには人体の深部組織が実際に吸収する線量を測定する必要がある。このため、バッジにおいては $1000 \text{ mg/cm}^2$  フィルター下の $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 蛍光体にて深部線量当量指標の測定評価を行う。

また、この線量計においては線量だけでなく $\gamma(X)$ 線のエネルギーを評価することができる。エネルギーの評価は実効原子番号が15.3と大きい $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$ 蛍光体と深部線量当量指標の評価用である $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 蛍光体の感度比を用いて行う。

ここでは、TLDバッジの $\gamma(X)$ 線に対する性能・特性について試験を行った結果を示すとともに、 ${}^7\text{Li}_2\text{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子による深部線量当量指標の測定評価法について紹介する。

### 4-2 $\gamma(X)$ 線量当量評価上の性能・特性

$\gamma(X)$ 線量の評価を行う上で直接的に精度に寄与する下記の項目について検討を行った。

1. 感度のバラツキ
2. くり返し照射に対する再現性
3. 線量直線性
4. 入射方向依存性
5. エネルギー依存性
6. 残光線量
7. くり返し加熱による感度の変化
8. フェーディング特性

$\gamma$ 線とX線の照射に使用した線源を表4-1に、また照射の状況を図4-1に示す。

表4-1  $\gamma$ 線源およびX線発生装置一覧表(a)  $\gamma$ 線源

線源	強度	線量率	照射条件
$^{60}\text{Co}$	3.6 Ci (1983. 4. 1)	317 mR/hr at 4 m	ビーム状照射
$^{60}\text{Co}$	50 mCi (1983. 4. 1)	139 mR/hr at 70 cm	$4\pi$ 照射
$^{137}\text{Cs}$	88 mCi (1983. 4. 1)	68 mR/hr at 70 cm	$4\pi$ 照射

## (b) X線発生装置

実効エネルギー	照射条件		線量率 (距離 3 m)	
	X線管	フィルター	Rメータ読取値	補正值
40 KeV	85 KVp 2 mA	A1 3.99 mm	178 mR/5 min	175.6 mR/5 min
60 KeV	100 KVp 2 mA	A1 1.19 mm Cu 0.3 mm	154 mR/5 min	150.9 mR/5 min
80 KeV	110 KVp 5 mA	A1 1.19 mm Cu 2.01 mm	96 mR/5 min	94.7 mR/5 min
100 KeV	140 KVp 3 mA	A1 1.19 mm Cu 3.01 mm	108 mR/5 min	105.8 mR/5 min
120 KeV	180 KVp 1.5 mA	A1 1.19 mm Cu 3.01 mm	161 mR/5 min	157.8 mR/5 min
140 KeV	220 KVp 1 mA	A1 1.19 mm Cu 3.01 mm	234.5 mR/5 min	229.6 mR/5 min

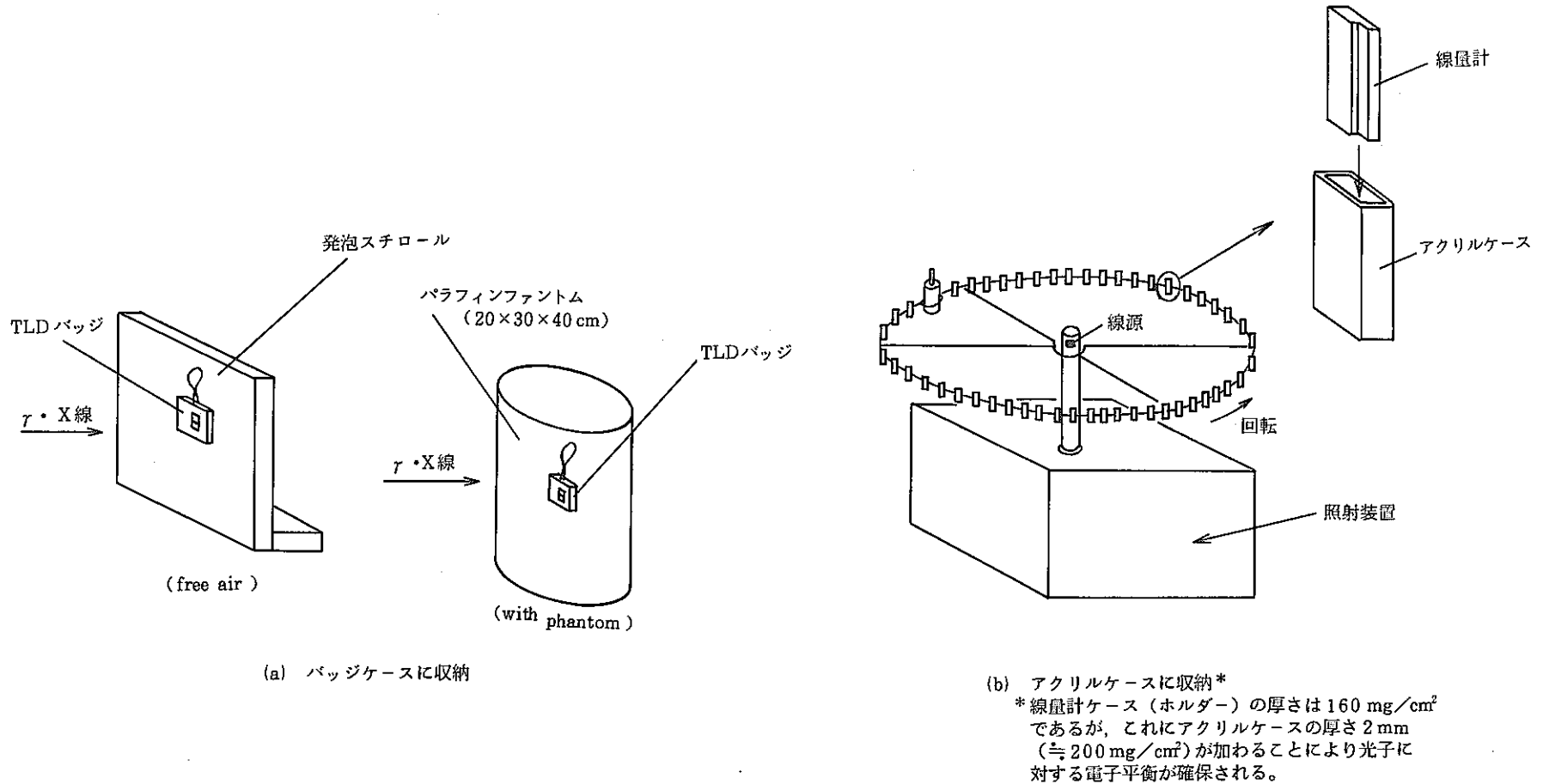


図 4-1  $\gamma$ (X)線の照射状況

## 4-2-1 感度のバラツキ

新型 TLD バッジにおいては 1 つの TLD 素子当りの蛍光体の量が 0.7 mg (従来の  $\gamma$  (X) 線評価用素子 ; UD-200S では 20 mg) と非常に少ない。このため、各素子においては蛍光体の量の多少に起因する感度のバラツキがかなり生じることが予想される。また、蛍光体が固定されている樹脂基板の状態によっても感度のバラツキが考えられる。

感度のバラツキは平均値に対する百分率標準偏差 (変動係数とも称す) により統計的に表現することができる。すなわち、あるサンプルを同一条件で照射した時の各 TLD 素子の読取値を  $x_i$ 、平均値を  $\bar{x}$  とすれば、標準偏差および百分率標準偏差は、

$$\text{標準偏差} \quad ; \quad \sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

$$\text{百分率標準偏差} \quad ; \quad \sigma_{n-1} / \bar{x} \times 100 \quad (\%)$$

で示され、この値が小さいほど統計的に感度のバラツキは小さいとすることができる。

まず、 $\gamma$  (X)  $\cdot \beta$  線量計と中性子線量計を 50 個づつ  $^{137}\text{Cs}$  線源により同一条件にて照射を行い  $\gamma$  線に対する感度のバラツキを調べた。照射は図 4-1 (b) 示した条件で各線量計を 2 mm 厚のアクリルケースに入れて行った。各 TLD 素子について 50 個当りの平均値と標準偏差 ( $\sigma_{n-1}$ ) を求めた結果を表 4-2 に示す。感度のバラツキは  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) 系素子については約 60 mR の照射に対しては百分率標準偏差で 6~8% であり、約 100 mR の照射においては 5~6% であった。また  $\text{CaSO}_4$  (Tm) 素子については約 60 mR と 100 mR の照射において 3~4% のバラツキであった。尚、標準偏差では統計的な量としてバラツキを表現できないため、さらに各素子の読取値を図 4-2 と図 4-3 に示すが、個々の素子の発光量の読取値は全て平均値から  $\pm 20\%$  以内であった。

次に照射線量による素子の感度のバラツキの変化を調べるために  $\gamma$  (X)  $\cdot \beta$  線量計と中性子線量計の各 20 個に対して  $^{60}\text{Co}$  線源により約 10, 35, 100 mR および 1, 10 R の照射を行った。この結果を図 4-4 に示す。素子の感度のバラツキを百分率標準偏差で考えると、100 mR 以上の照射に対して  $^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) 素子については 6% 以下であり  $\text{CaSO}_4$  (Tm) 素子については 4% 以下であった。また、10 mR 程度の低線量の照射においては  $^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) 素子で 10~12% 程度であり、 $\text{CaSO}_4$  (Tm) 素子については約 5% であった。

今回の試験で得られた新型 TLD バッジの感度のバラツキは、旧型 TLD バッジの UD-200 S 素子の感度のバラツキ (100 mR 照射で標準偏差が約  $\pm 3\sim 4\%$ ) に比較してやや大きかった。今後さらに、TLD 素子の製造時における蛍光体および活性体 (Cu, Tm) 量の均一化、あるいは TLD 素子基板の厚さの一様化 (加熱時における基板の熱容量の一定化につながる) 等の改良を行い、感度のバラツキを少しでも小さくすることが必要である。



表 4-2  $\gamma$ 線に対する感度のバラツキ

線量計	照射線量	測定値				
			# 1	# 2	# 3	# 4
$\gamma \cdot \beta$ 線量計 (UD-808P)	63 mR	$\bar{x}$ (mR)	63.3	60.9	61.6	61.1
		$\sigma_{n-1}$ (mR)	5.2	4.1	2.1	4.4
		$\sigma_{n-1}/\bar{x}$ (%)	8.1	6.8	3.4	7.2
	102 mR	$\bar{x}$ (mR)	101	100	98.7	101
		$\sigma_{n-1}$ (mR)	5.4	5.5	4.4	6.1
		$\sigma_{n-1}/\bar{x}$ (%)	5.4	5.5	4.4	6.0
中性子線量計 (UD-809P)	56 mR	$\bar{x}$ (mR)	55.5	54.9	55.8	54.3
		$\sigma_{n-1}$ (mR)	3.7	3.3	3.4	4.0
		$\sigma_{n-1}/\bar{x}$ (%)	6.7	6.0	6.1	7.4
	103 mR	$\bar{x}$ (mR)	104	101	101	102
		$\sigma_{n-1}$ (mR)	6.0	5.3	5.2	5.2
		$\sigma_{n-1}/\bar{x}$ (%)	5.7	5.2	5.2	5.1

線源 Cs-137

UD-808P プレートホルダー + 2mmt アクリルケース

free air

サンプル数 各50個

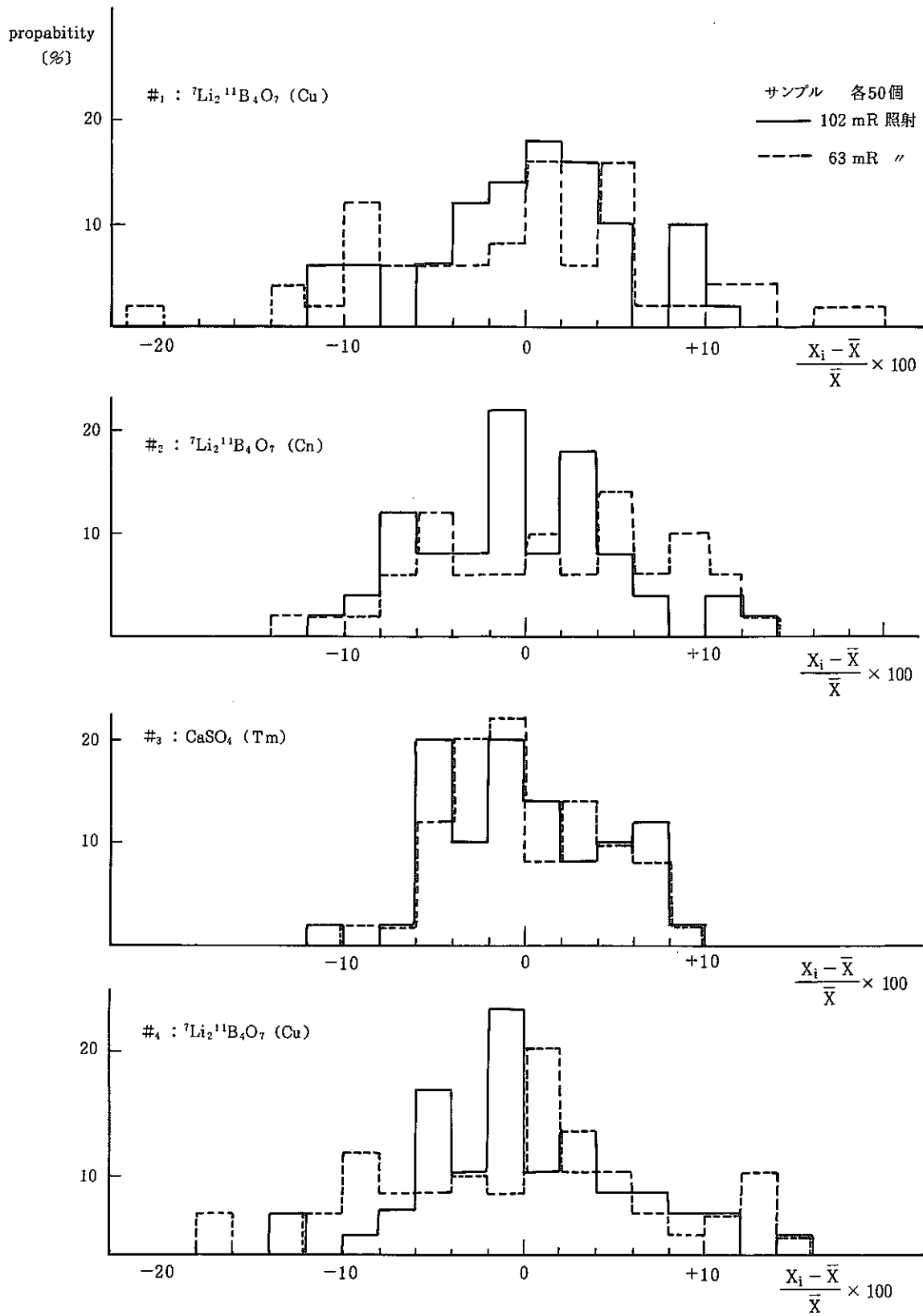


図4-2  $r(X) \cdot \beta$ 線量計における素子の感度のバラツキ

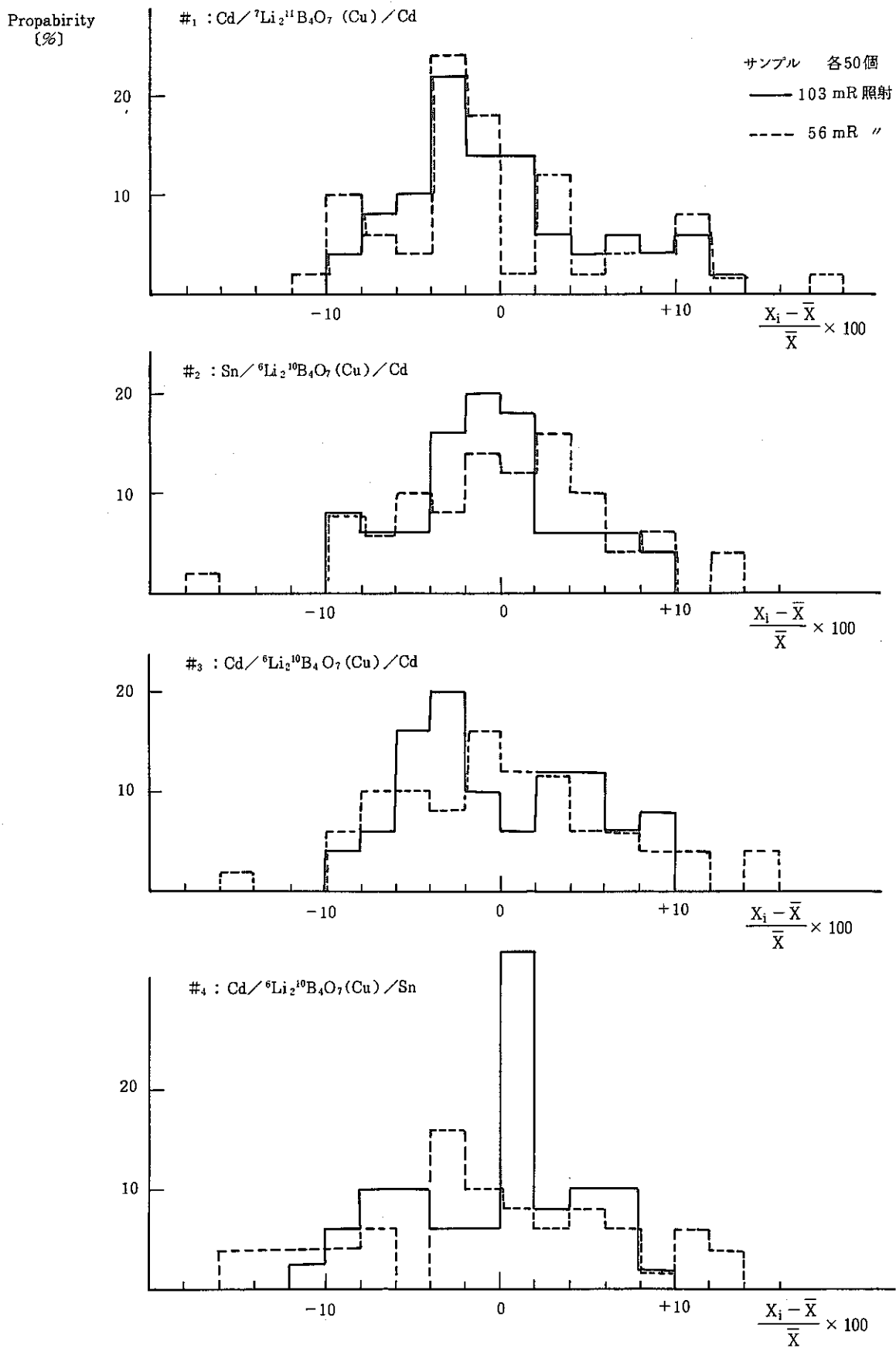


図 4 - 3 中性子線量計における素子の感度のバラツキ

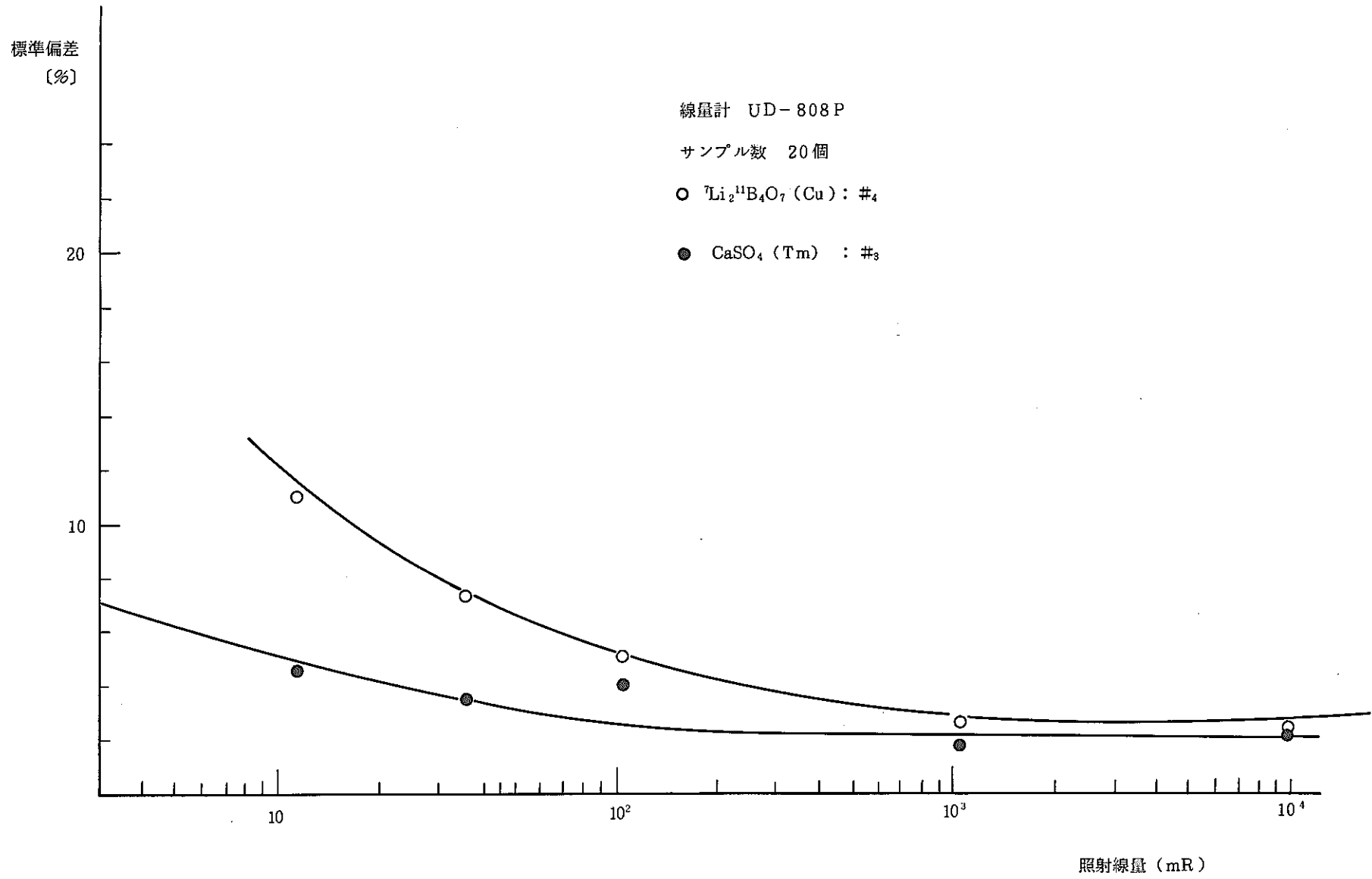


図4-4 照射線量による感度のバラツキの変化

#### 4-2-2 くり返し照射に対する再現性

$\gamma$ (X)・ $\beta$ 線量計と中性子線量計を組み込んだTLDバッジを5個準備し、バッジをファントムに取り付けた状態で $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 線源により約60 mRの照射を3回行い再現性の評価を行った。この結果を表4-3に示す。3回のくり返し測定に対する再現性は百分率標準偏差で $^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子に対して約3.5%,  $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$ 素子に対して約2.6%と良好であった。

表 4-3  $\gamma$ 線に対する感度の再現性

線量計 UD-808P

線量計 No.	エレメント	測定値			$\bar{x}$ (mR)	$\sigma/\bar{x}$ (%)
		1回目	2回目	3回目		
1	# <sub>1</sub> ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$	75.2	79.3	80.1	78.2	2.7
	# <sub>2</sub> ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$	70.0	69.1	72.7	70.6	2.2
	# <sub>3</sub> $\text{CaSO}_4$	63.2	63.6	65.4	64.1	1.5
	# <sub>4</sub> ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$	59.0	56.0	59.6	58.2	2.7
2	# <sub>1</sub> ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$	84.9	77.0	81.9	81.3	4.0
	# <sub>2</sub> ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$	69.7	70.9	75.8	72.1	3.7
	# <sub>3</sub> $\text{CaSO}_4$	60.3	67.4	59.7	62.5	5.6
	# <sub>4</sub> ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$	63.9	56.1	59.2	59.7	5.4
3	# <sub>1</sub> ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$	88.2	80.3	87.3	85.3	4.1
	# <sub>2</sub> ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$	77.5	74.2	82.4	78.0	4.3
	# <sub>3</sub> $\text{CaSO}_4$	57.3	55.5	58.5	57.1	2.2
	# <sub>4</sub> ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$	63.0	61.2	63.3	62.5	1.5
4	# <sub>1</sub> ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$	79.7	74.9	83.2	79.3	4.3
	# <sub>2</sub> ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$	77.0	69.9	75.3	73.5	4.8
	# <sub>3</sub> $\text{CaSO}_4$	58.3	56.5	58.4	57.7	1.5
	# <sub>4</sub> ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$	64.3	61.2	63.3	62.9	2.1
5	# <sub>1</sub> ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$	84.9	83.2	88.2	85.4	2.4
	# <sub>2</sub> ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$	80.2	73.0	79.0	77.4	4.1
	# <sub>3</sub> $\text{CaSO}_4$	56.9	56.0	58.9	57.3	2.1
	# <sub>4</sub> ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$	58.2	55.4	57.2	56.9	2.0

照射条件 線源  ${}^{60}\text{Co}$   
 線源との距離 70 cm  
 照射線量 56.6 mR  
 with phantom  
 バッジケース組込み

## 4-2-3 線量直線性

$\gamma(X) \cdot \beta$ 線量計 (UD-808P) の  $\gamma$ 線量評価用素子 ( ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ ) とエネルギー評価用素子 ( $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ ) について、照射線量に対する感度応答の直線性を調べた。照射は 6 mR から 10 R の線量においては  ${}^{60}\text{Co}$  の約 50 mCi と 5 Ci の線源を使用して行ったが、80 R の照射については X線発生装置 ( $E_{\text{eff}} = 60 \text{ KeV}$ ) を使用し測定値を  ${}^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 線に換算して評価を行った。

結果を図 4-5 と図 4-6 に示す。まず  ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$  素子については約 10 mR から 100 R の線量範囲において、測定線量の平均値と照射線量のずれは  $\pm 3\%$  以内であり線量直線性は良好であった。TLD 素子の実際の発光量においては、とくに低線量領域ではアニール処理の加熱不足にともなう残光線量あるいは測定加熱時の熱輻射やフォトマルの暗電流に起因する残光線量が TLD 読取値に影響するが、UD-710P 型自動リーダにおいては自動的にこれらの残光線量の差し引き補正を行っているため低線量まで良好な直線性が得られている。一方、 $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$  についても 6 mR から 100 R の線量において直線性は  $\pm 5\%$  以内と良好であった。今回の試験に使用した線源では約 100 R よりもさらに大きい線量については直線性の確認を行うことができなかったが、製造メーカーにおける試験結果では 2 種類の素子とも約 1000 R の線量まで良好な直線性が確認されている。

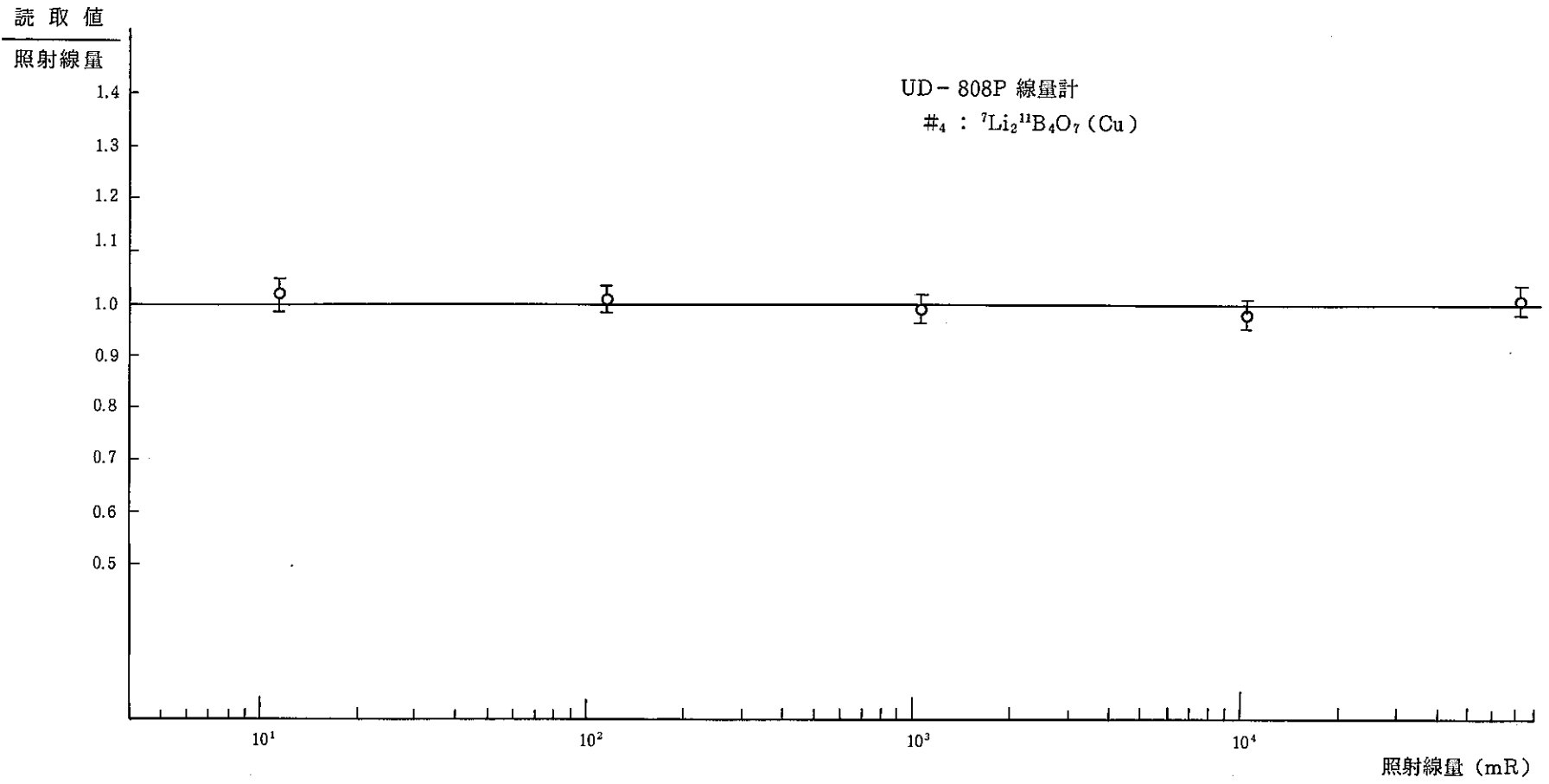


図 4 - 5  ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) 素子の線量直線性



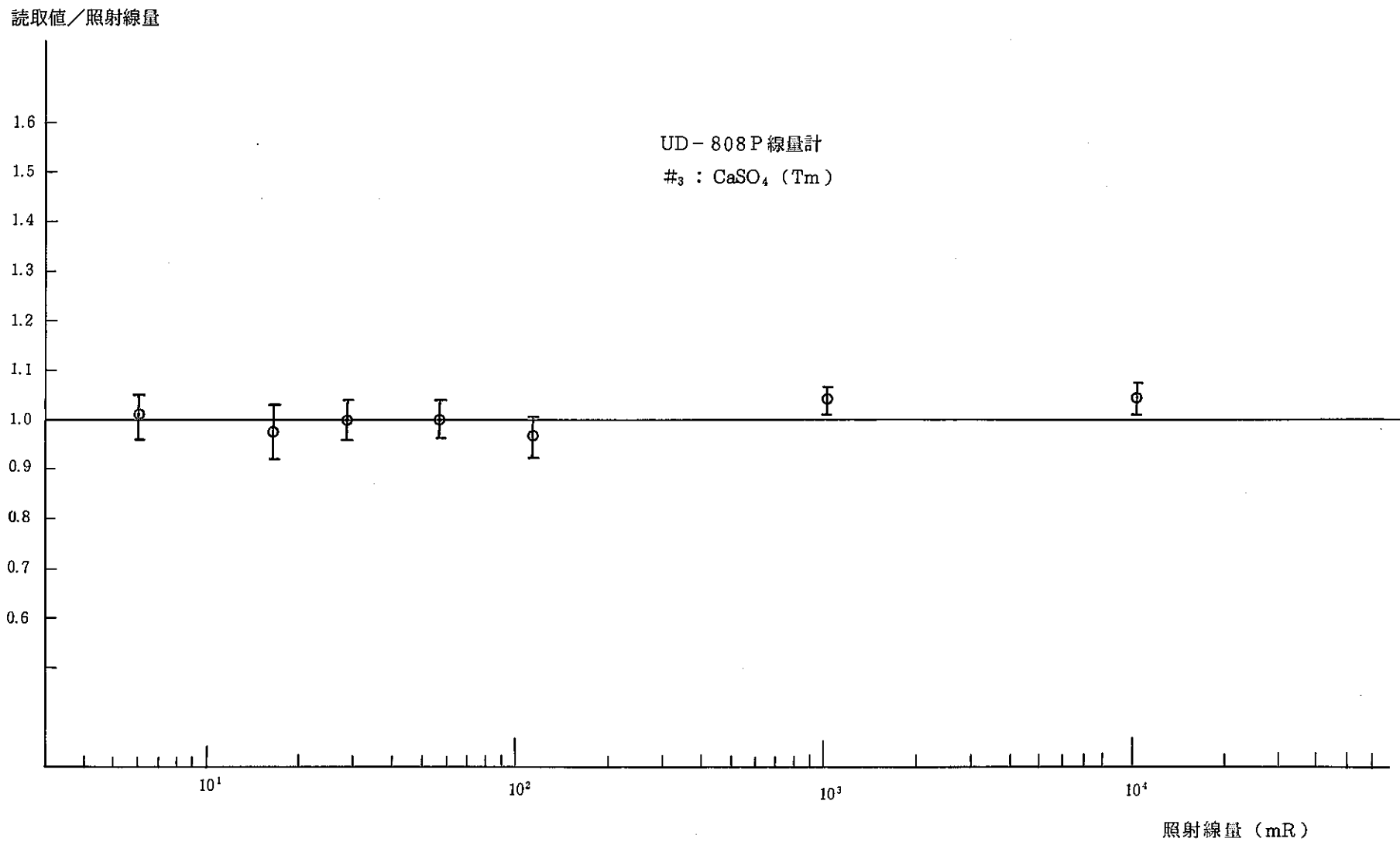


図 4 - 6 CaSO<sub>4</sub> (Tm) 素子の直線性

## 4-2-4 入射方向依存性

$\gamma$ (X)線の入射方向に対するTLDバッジの感度依存性を調べた。照射はTLDバッジをパラフィンファントムに固定し、図4-7で示すよう左右方向面と上下方向面からの入射に対して $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 線源とX線発生装置( $E_{\text{eff}} = 60 \text{ KeV}$ )を用いて行った。

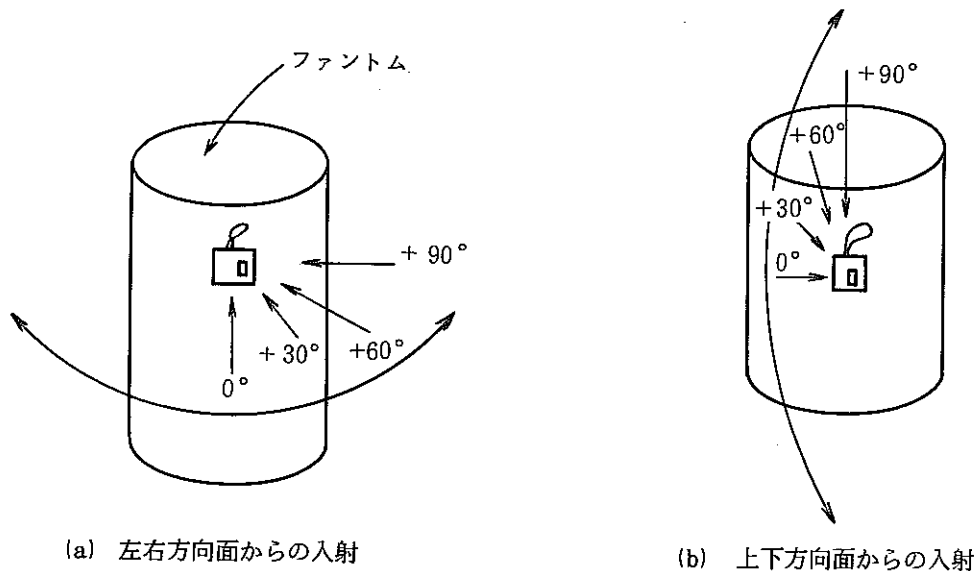


図4-7 光子の入射方向の定義

まず、 $\gamma$ (X)・ $\beta$ 線量計と中性子線量計をUD-887 PH 1型バッジケース( $\gamma$ ,  $\beta$ , 中性子線用)に組み込んだ状態での方向依存性の結果を図4-8, 図4-9に示す。 $^{60}\text{Co}$ の $\gamma$ 線については左右方向および上下方向からの入射とも、正面を中心に $90^\circ$ の角度範囲内での $\gamma$ (X)線量評価用素子( ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7 : \text{Cu}$ )とエネルギー評価用素子( $\text{CaSO}_4 : \text{Tm}$ )の感度の変化は $\pm 10\%$ 以内であった。一方、実効エネルギー60 KeVのX線については、正面から $60^\circ$ 以内の角度では感度の変化は $20\%$ 以内であったが、 $60^\circ$ から $90^\circ$ の間においてはバッジケース側面内壁のCdおよびSnシールドによる減衰のためかなり感度の低下がみられた。

次に、 $\gamma$ (X)・ $\beta$ 線量計をUD-887 PH 3型バッジケース( $\gamma$ ,  $\beta$ 線用)に組み込んだ状態での方向依存性の結果を図4-10に示す。照射は左右方向面についてバッジ正面および正面から $45^\circ$ と $90^\circ$ の入射角において、 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 線源とX線発生装置( $E_{\text{eff}} = 60 \text{ KeV}$ )を用いて行った。 $^{60}\text{Co}$ の $\gamma$ 線に対しては正面から $90^\circ$ 以内の角度入射において感度の変化は $10\%$ 以内であった。しかし、60 KeVのX線については $90^\circ$ 方向からの入射においては $\gamma$ (X)・ $\beta$ 線量計をとり囲むSnシールドによる減衰のためかなり感度の低下がみられた。

バッジケース UD-887 PH 1

線量計 UD-808 P および UD-809 P

○  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 線 #<sub>4</sub>:  $^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu)

● " #<sub>3</sub>:  $\text{CaSO}_4$  (Tm)

□ X線 (60KeV) #<sub>4</sub>:  $^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu)

■ " #<sub>3</sub>:  $\text{CaSO}_4$  (Tm)

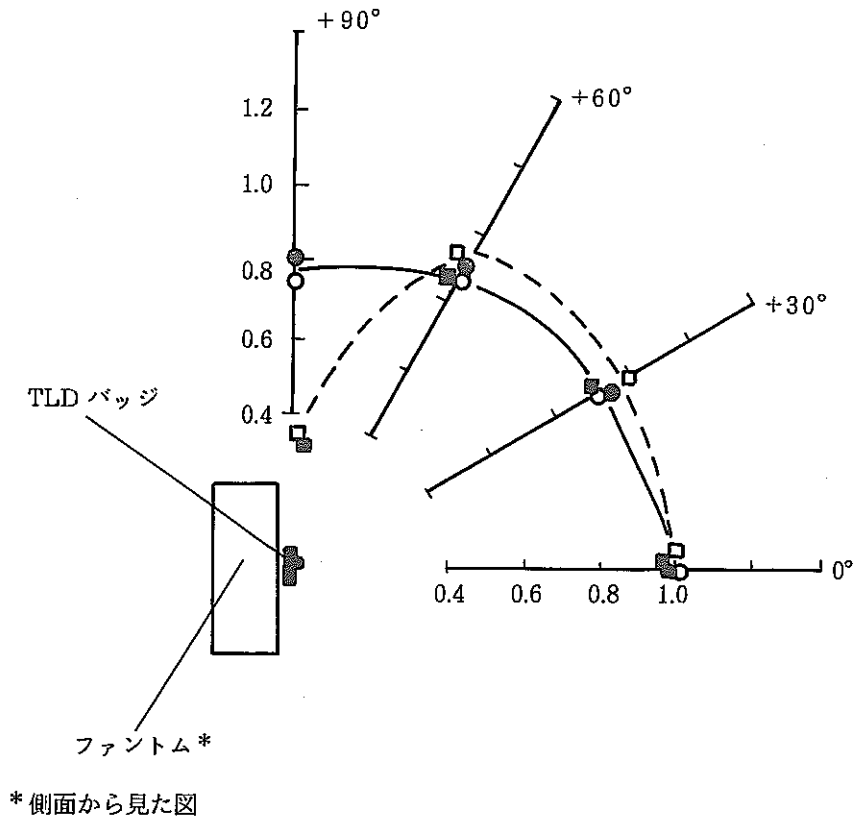


図4-8 光子入射方向依存性 (上下方向面からの入射)

バッジケース UD-887PH1

線量計 UD-808P および UD-809P

- $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  線 #<sub>4</sub> :  $^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu)
- " #<sub>3</sub> :  $\text{CaSO}_4$  (Tm)
- X線(60 KeV) #<sub>4</sub> :  $^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu)
- " #<sub>3</sub> :  $\text{CaSO}_4$  (Tm)

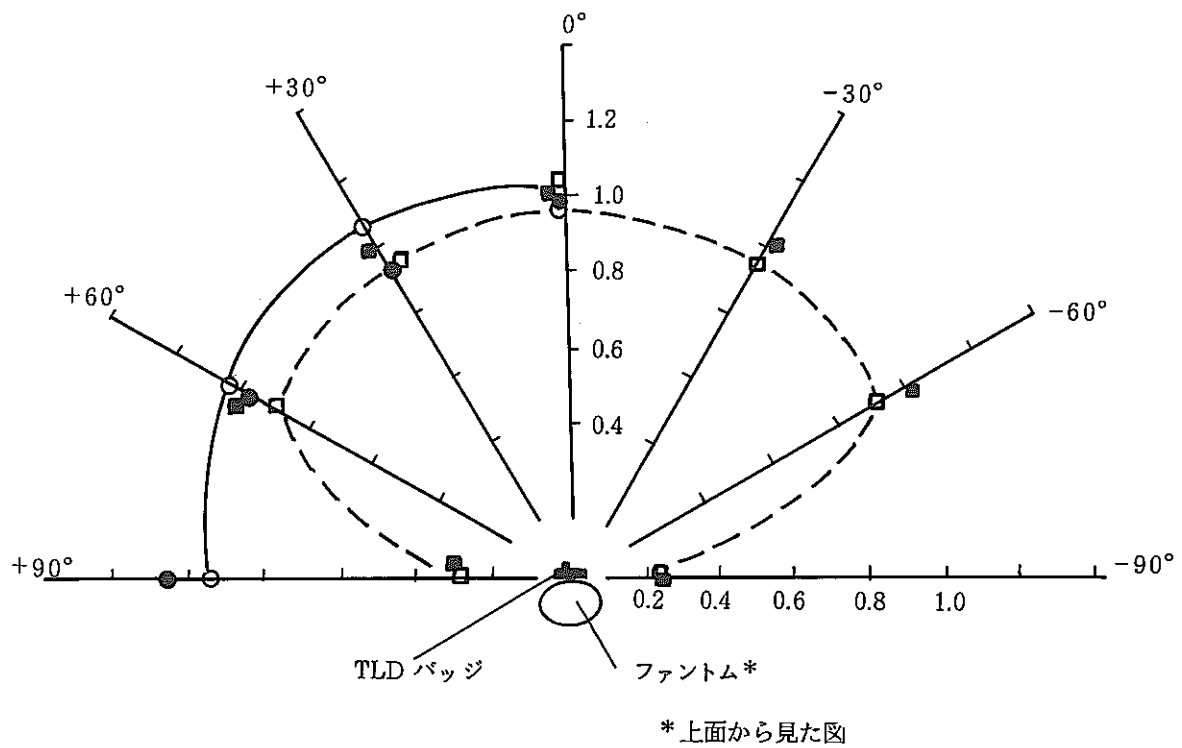


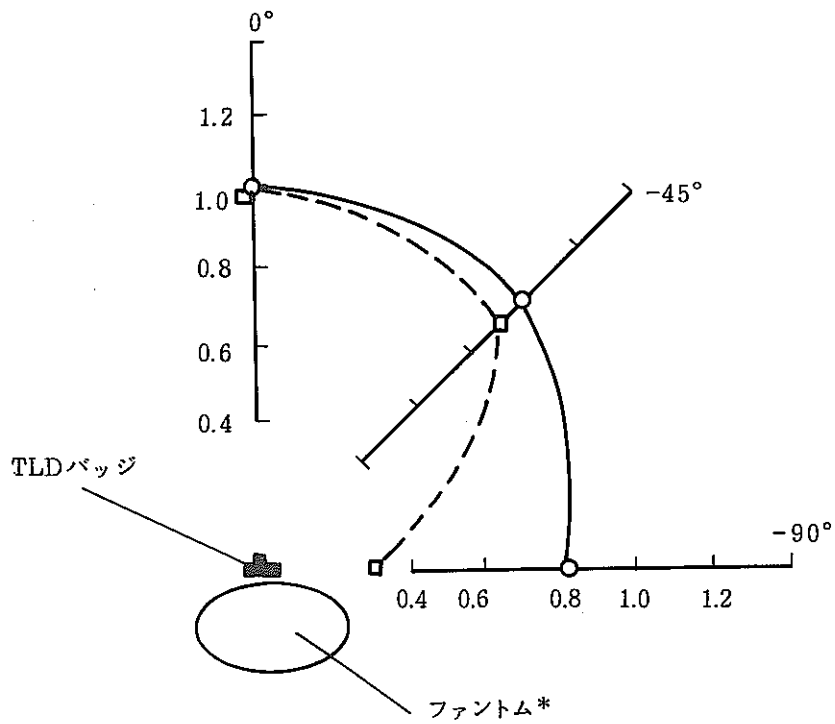
図4-9 光子入射方向依存性 (左右方向面からの入射)

バッジケース UD-887 PH3

線量計 UD-808 P

○  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  線 #4 :  ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu)

□ X線(60 KeV) #4 :  ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu)



\*上面から見た図

図4-10 光子入射方向依存性(左右方向面からの入射)

## 4-2-5 エネルギー依存性

実効エネルギーが 40, 60, 80, 100, 120, 140 KeV の X 線および  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{60}\text{Co}$  の  $\gamma$  線を照射して、 $1000 \text{ mg/cm}^2$  樹脂フィルター下の  $^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) 素子と  $\text{CaSO}_4$  (Tm) 素子のエネルギー依存性をしらべた。

エネルギー依存性の評価は、TLD バッジをパラフィンファントム (長径 30 cm, 短径 20 cm, 高さ 40 cm のだ円柱) に固定した場合、およびファントムを用いずフリーエア中に TLD バッジをおいた場合について行った。また、さらにパラフィンファントムを使用した場合は、TLD バッジをファントム表面に密着させて固定した条件、および実際に作業者が着用した状態を考慮して TLD バッジとファントム表面の間を 1.5 cm 離して固定した場合の両方について照射を行った。

まず、 $1000 \text{ mg/cm}^2$  樹脂フィルター下の  $^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) 素子 (第 4 素子) については図 4-11 に示すようなエネルギー依存性が得られた。尚、エネルギー依存性としては TLD バッジの位置の照射線量 (Rメータ線量計にて測定) に対する TLD 素子の発光量の比で示した。まず、フリーエア中での照射については約 200 ~ 300 KeV 以下のエネルギーにおいて感度が低くなっており、60 KeV 付近においては約 -10 % の応答であった。これは  $^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7$

(Cu) 素子の実効原子番号  $Z = 7.26$  と空気の  $Z_{\text{air}} = 7.64$  のちがいによる質量エネルギー吸収係数の相違に起因しているものと考えられる。一方、TLD バッジをファントムに取り付けた場合は、ファントムでのビルドアップによる効果が生じるため、とくに低エネルギー領域においてはフリーエアの場合よりもレスポンスが大きくなっている。TLD バッジをファントムに密着させた場合では、60 KeV 付近のエネルギーにおいて +20 ~ 25 % のレスポンスであった。また、TLD バッジをファントム表面から 1.5 cm 離して条件においては、密着の場合に比べてビルドアップの寄与がやや小さくなるため 60 KeV 付近において +15 % 程度の応答であった。

尚、図 4-11 には照射線量と深部線量当量指標の関係として ANSI <sup>5)</sup> が示している値もプロットした。TLD バッジの測定結果から深部線量当量指標を評価するためには、 $\gamma$  (X) 線量評価用の  $^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) 素子のレスポンスがこの曲線にできるだけ一致することが望ましい。今回のエネルギー依存性の試験結果においては、 $1000 \text{ mg/cm}^2$  樹脂フィルター下の  $^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) 素子のレスポンスと ANSI の示す照射線量と深部線量当量指標の関係を示す曲線からの誤差は、TLD バッジがファントムに密着した状態では  $\pm 10\%$  以内であり、TLD バッジがファントム表面の間が 1.5 cm 離れた状態では  $\pm 20\%$  以内であった。このため  $^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) 素子の発光量から 20 % 以内の精度で直接に深部線量当量指標を評価することが可能であった。

次に、 $\text{CaSO}_4$  (Tm) 素子のエネルギー依存性を図 4-12 に示す。 $\text{CaSO}_4$  (Cu) 素子においては低エネルギー領域で著しい感度がオーバーレスポンスが見られた。この  $\text{CaSO}_4$  (Tm)

素子と  ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) 素子のエネルギー依存性の差を利用することにより  $\gamma$ (X)線のエネルギーを推定することが可能である。

読取値  
照射線量

1.5

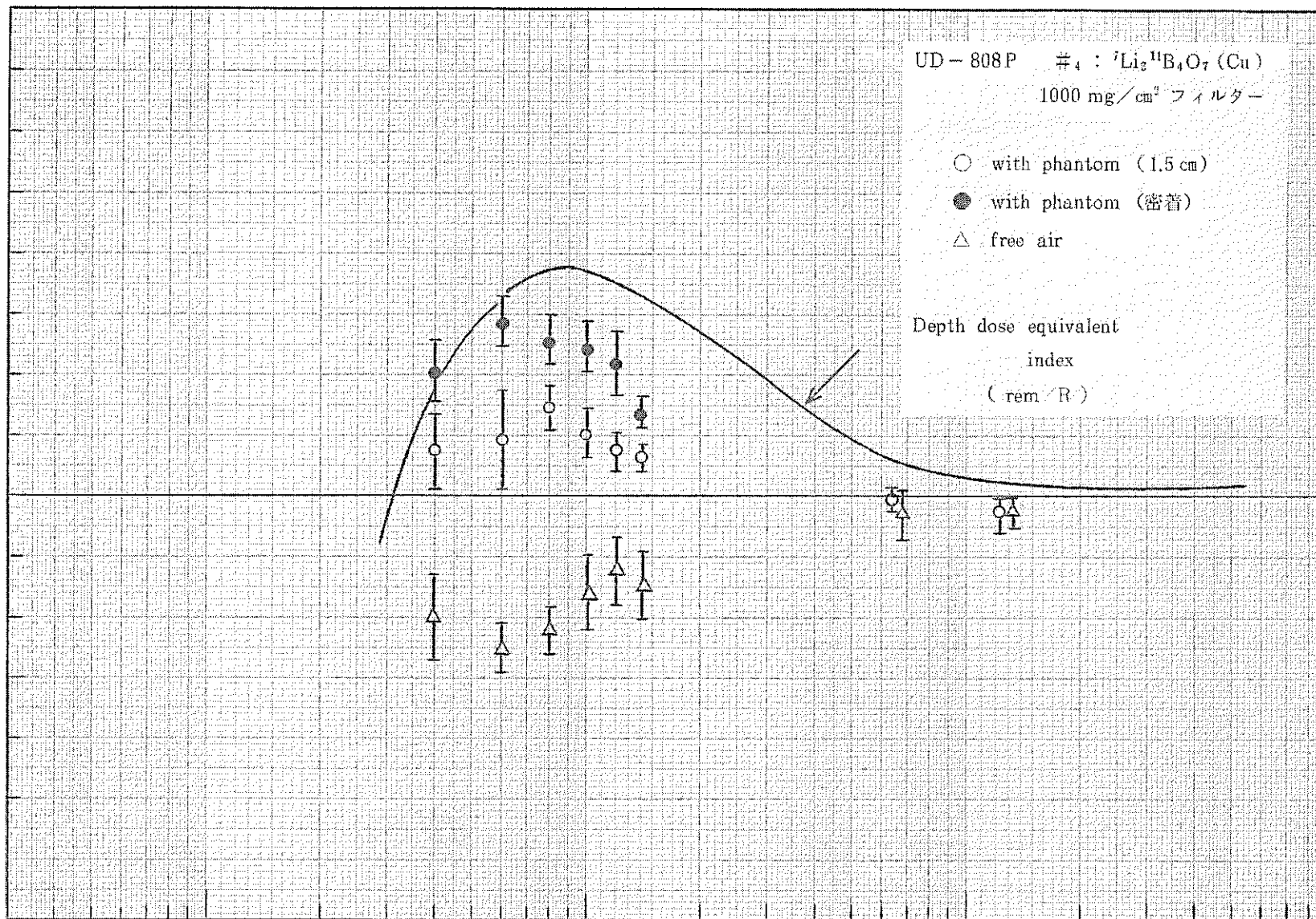
1.0

0.5

UD-808P #4 :  ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$   
1000 mg/cm<sup>2</sup> フィルター

- with phantom (1.5 cm)
- with phantom (密着)
- △ free air

Depth dose equivalent  
index  
(rem/R)



10<sup>1</sup>

10<sup>2</sup>

10<sup>3</sup>

光子エネルギー (KeV)

図4-11 1000 mg/cm<sup>2</sup> 樹脂フィルター下での ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$  素子のエネルギー依存性



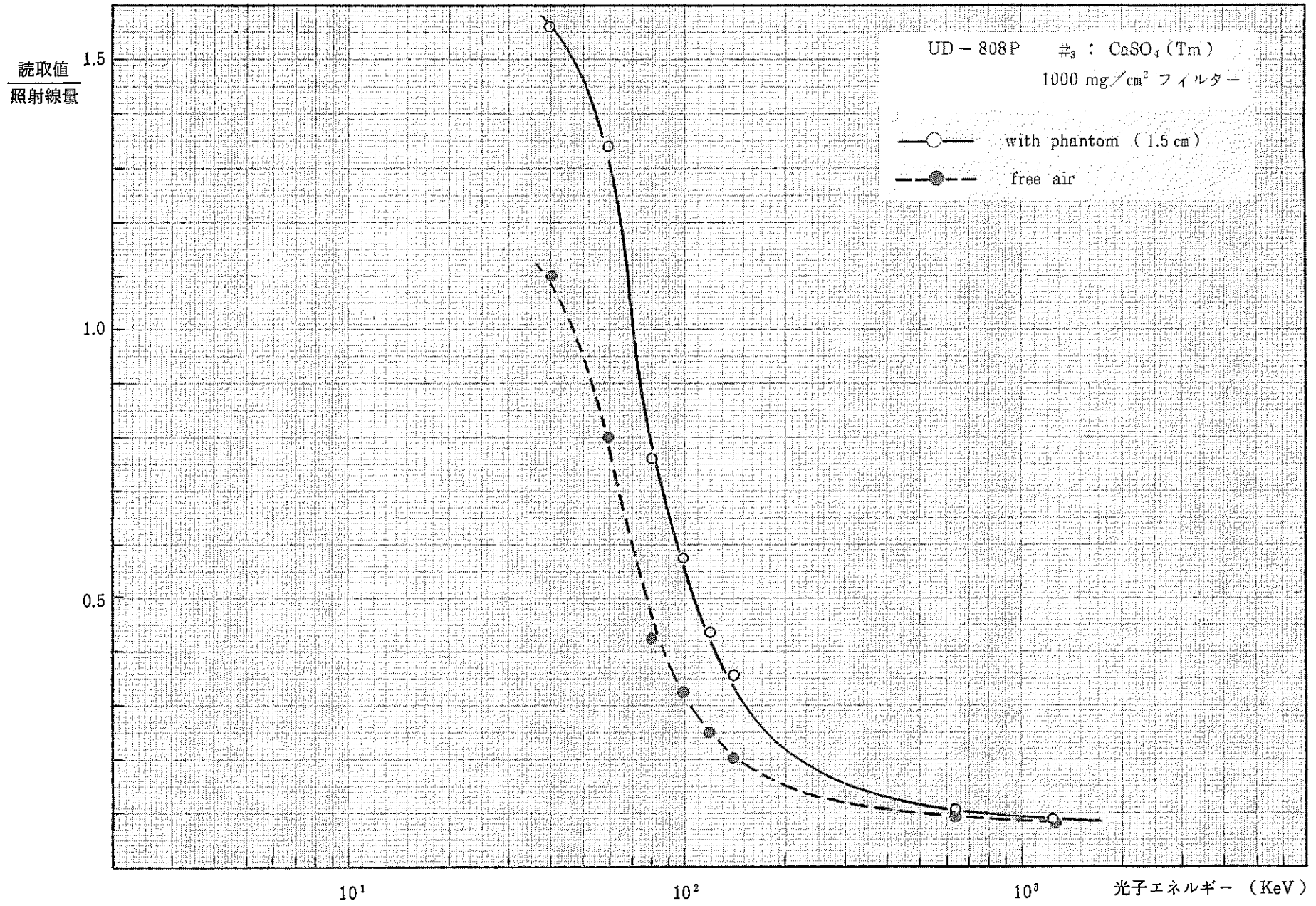
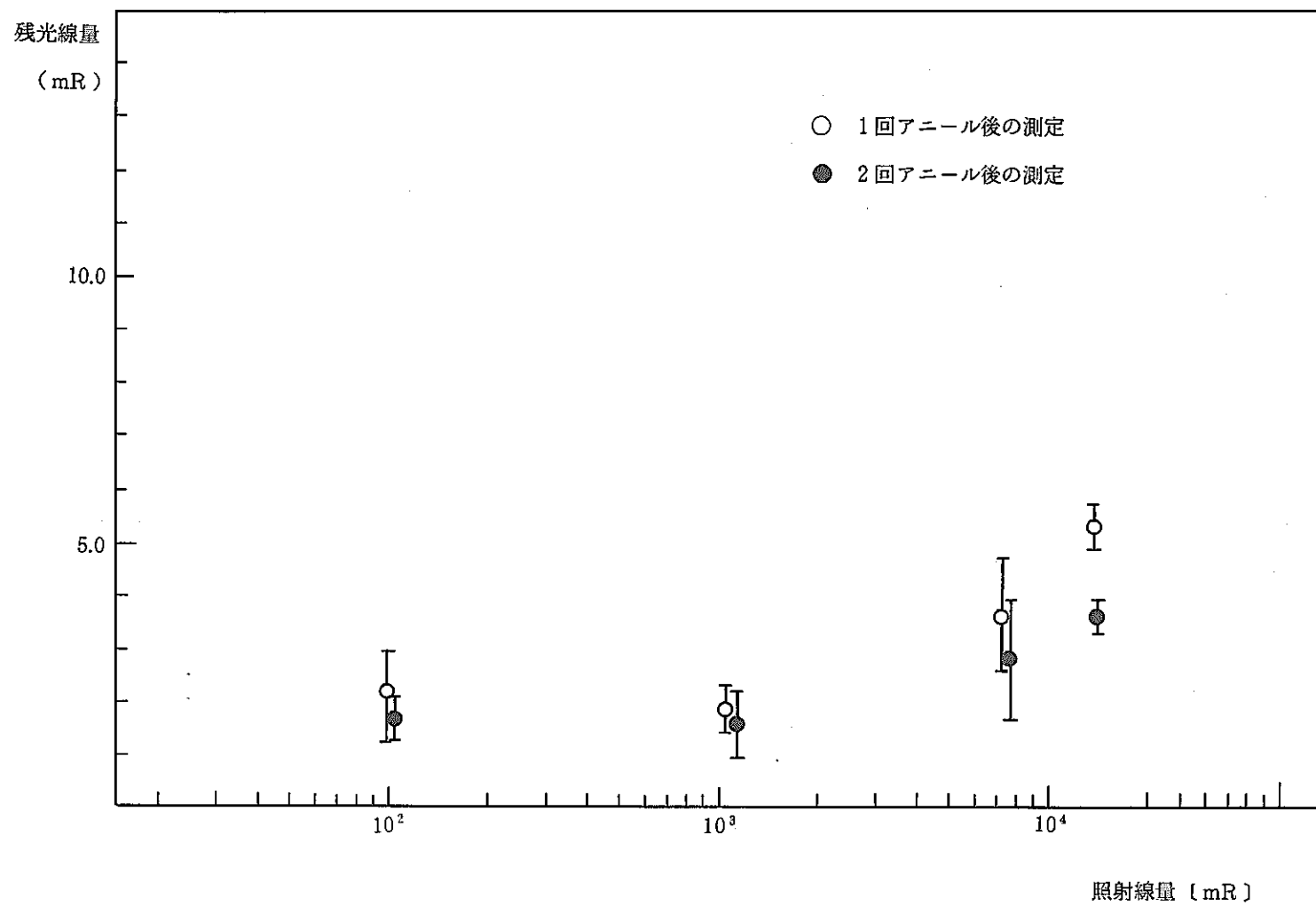


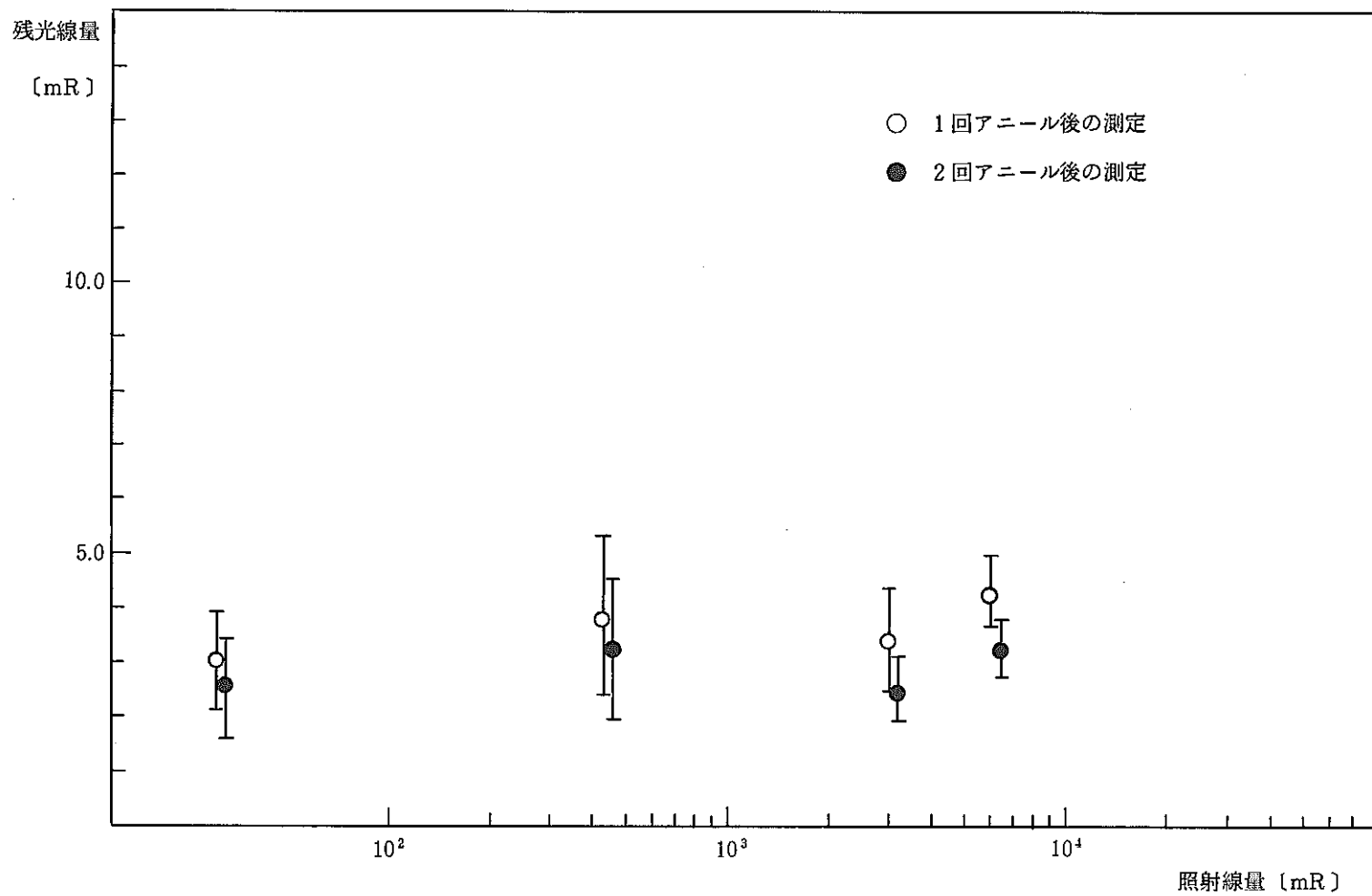
図4-12 1000 mg/cm<sup>2</sup> 樹脂フィルター下での  $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$  素子のエネルギー依存性

## 4-2-6 残光線量

TLD素子の測定においては、アニール処理時の加熱不足にともなう残光線量あるいは測定加熱時の熱輻射やフォトマルの暗電流などに起因する残光線量のため、全く照射されていない状態においても多少の発光量が見られる。この残光線量はTLD素子による線量測定の検出限界に影響するためできるだけ少ないことが望ましい。

$\gamma(X) \cdot \beta$ 線量計と中性子線量計各10個に対し約100 mRから40 Rの線量で照射を行った後、アニール処理を2度くり返し行い各アニール処理後に測定した残光線量を図4-13と図4-14に示す。この結果 ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子および ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子とも残光線量は4~5 mR以下であった。

図4-13  ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$  素子の残光線量

図4-14  ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$  素子の残光線量

#### 4-2-7 くり返し加熱による感度の変化

TLD素子はアニール処理および測定を行う場合に、赤外線ランプにより急激に約300℃まで熱せられる。このようなくり返し加熱によるTLD素子の感度変化について今回は特に試験を実施しなかったが、製造メーカーにて試験で得られている結果を参考のため図4-15と図4-16に示す。

$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu)系素子および $\text{CaSO}_4$  (Tm)とも1000回までのくり返し測定にともなう著しい感度の変化はなかった。

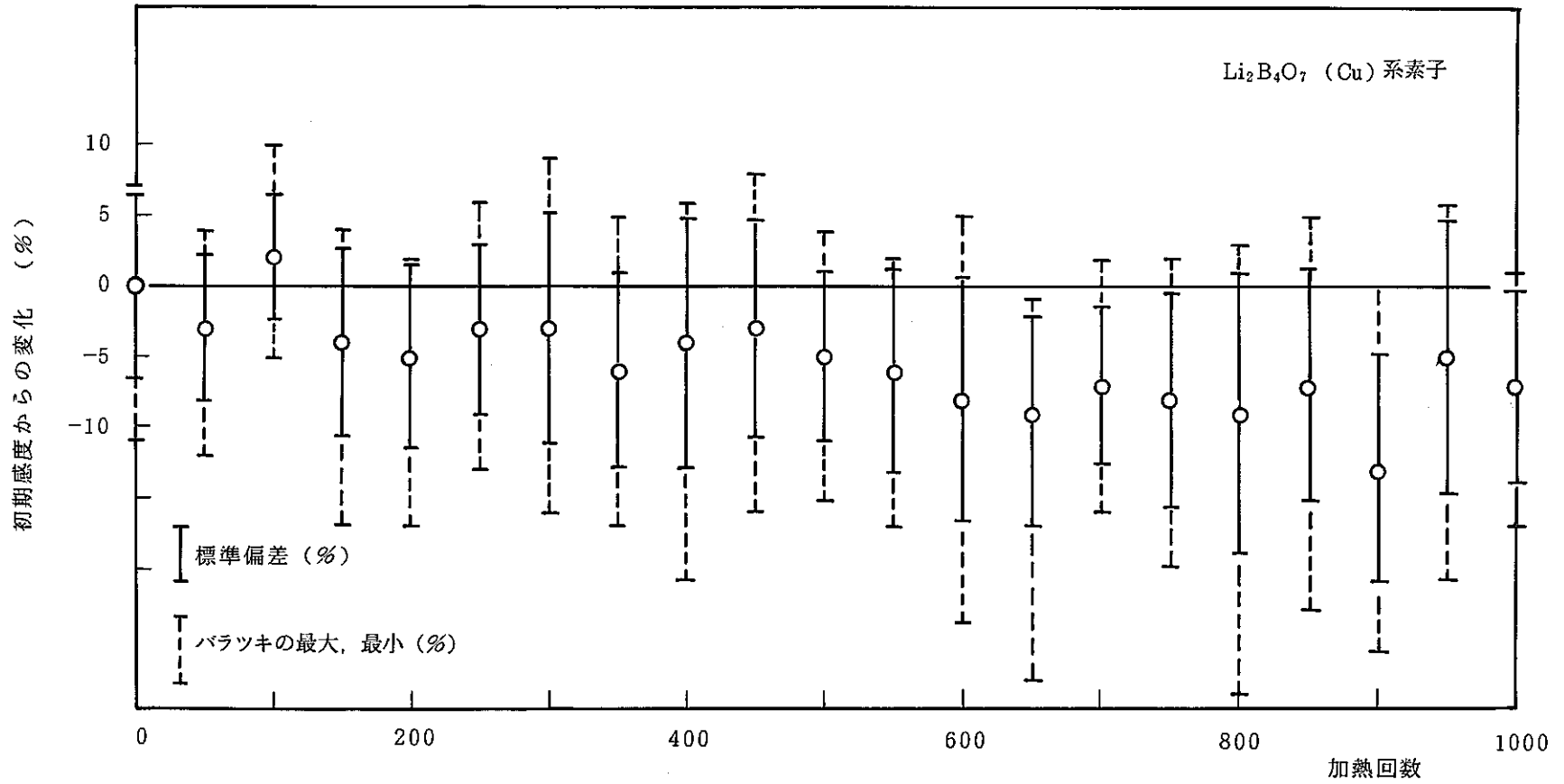


図4-15 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> (Cu) 素子のくり返し加熱による感度変化

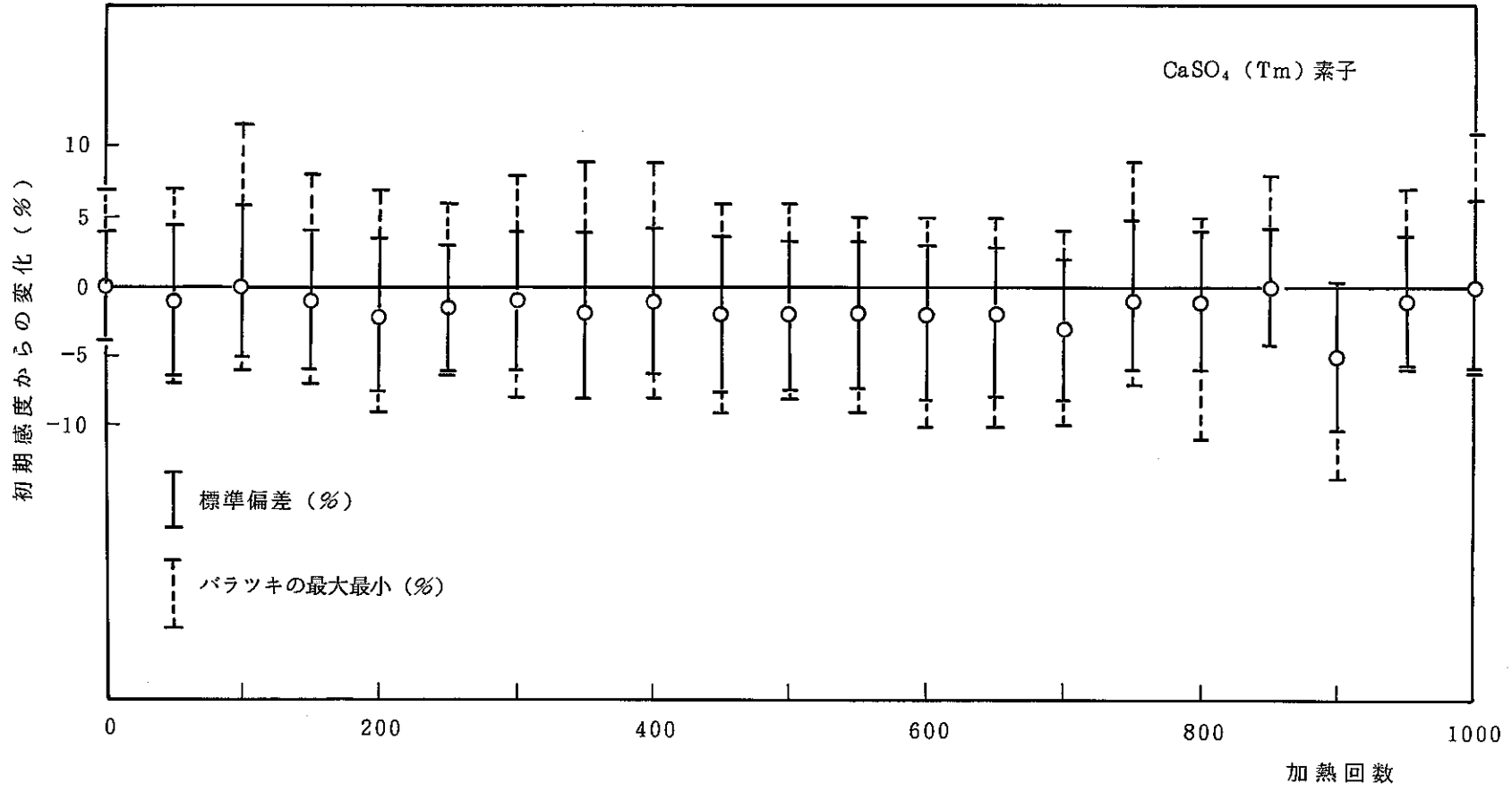


図4-16 CaSO<sub>4</sub> (Tm) 素子のくり返し加熱による感度変化

## 4-2-8 フェーディング特性

TLDが照射されてからの日数にともなう感度の経時変化の現象をフェーディングと言う。

${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$  蛍光体および  $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$  蛍光体のグロー曲線においては線量評価に用いる主ピークの他に低温側にも小さなピークがある。この低温側のピークは主ピークに比べてフェーディングが早いこと誤差要因となり易いので、UD-710P型リーダにおいては主ピークの測定の前に微弱な加熱を行い低温側のピークを消去するプリアニール法を採用している。しかし、線量測定の対象となる主ピークにおいてもフェーディング特性がわずかながらみられ、この傾向は主ピークが生じる温度が  $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$  蛍光体よりも低い  ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$  蛍光体がいくぶん大きい。

${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$  素子および  $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$  素子に 200 mR の  $\gamma$  線を照射し、安全管理棟居室内に 1 日、2 日、5 日、12 日、22 日、41 日間放置した後で測定を行い、同居室内でのバックグラウンド値の補正を行ってフェーディング特性を調べた。この結果を図 4-17 と図 4-18 に示す。また、これらの図には製造メーカーにおいて恒温槽の中に 23 $^{\circ}$ 、35 $^{\circ}$ 、50 $^{\circ}$ 、75 $^{\circ}$ C の一定の温度で保管した状態でのフェーディング特性を調べた結果も合せて示した。

まず、 ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$  素子については約 5 $^{\circ}$ ~15 $^{\circ}$ C の温度においてフェーディングは 10 日で約 4%、40 日で約 7% あった。しかし、温度が高くなるにつれフェーディングの程度は大きくなり 35 $^{\circ}$ C においては 60 日で約 8%、60 日で約 15% であった。実際の被曝管理での TLD バッジの使用・保管における温度はほとんど 0 $^{\circ}$ ~35 $^{\circ}$ C で考えられるため、 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$  素子におけるフェーディングは 30 日で約 10% 以内である。

次に、 $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$  素子については 35 $^{\circ}$ C 以下の条件においてはフェーディングは 60 日で 5% 以下と非常に小さく、実際の被曝管理においてもほとんど無視しえる。

以上の結果、 ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$  素子においては 30 日で 10% 以内のフェーディングが見られ、 $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$  素子においては著しいフェーディングは無かった。このため 1 ヶ月毎の線量評価においてはフェーディングの影響はとくに問題ないと考えられる。一方、3 ヶ月管理のように長期の使用において、尚かつ、TLD バッジの着用開始直後に限って被曝があった様な場合には、 $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$  素子と  ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$  素子の読取値にフェーディングの大小にともなう差が生じるため、この差を利用してフェーディングに対する補正を行うこともできる。



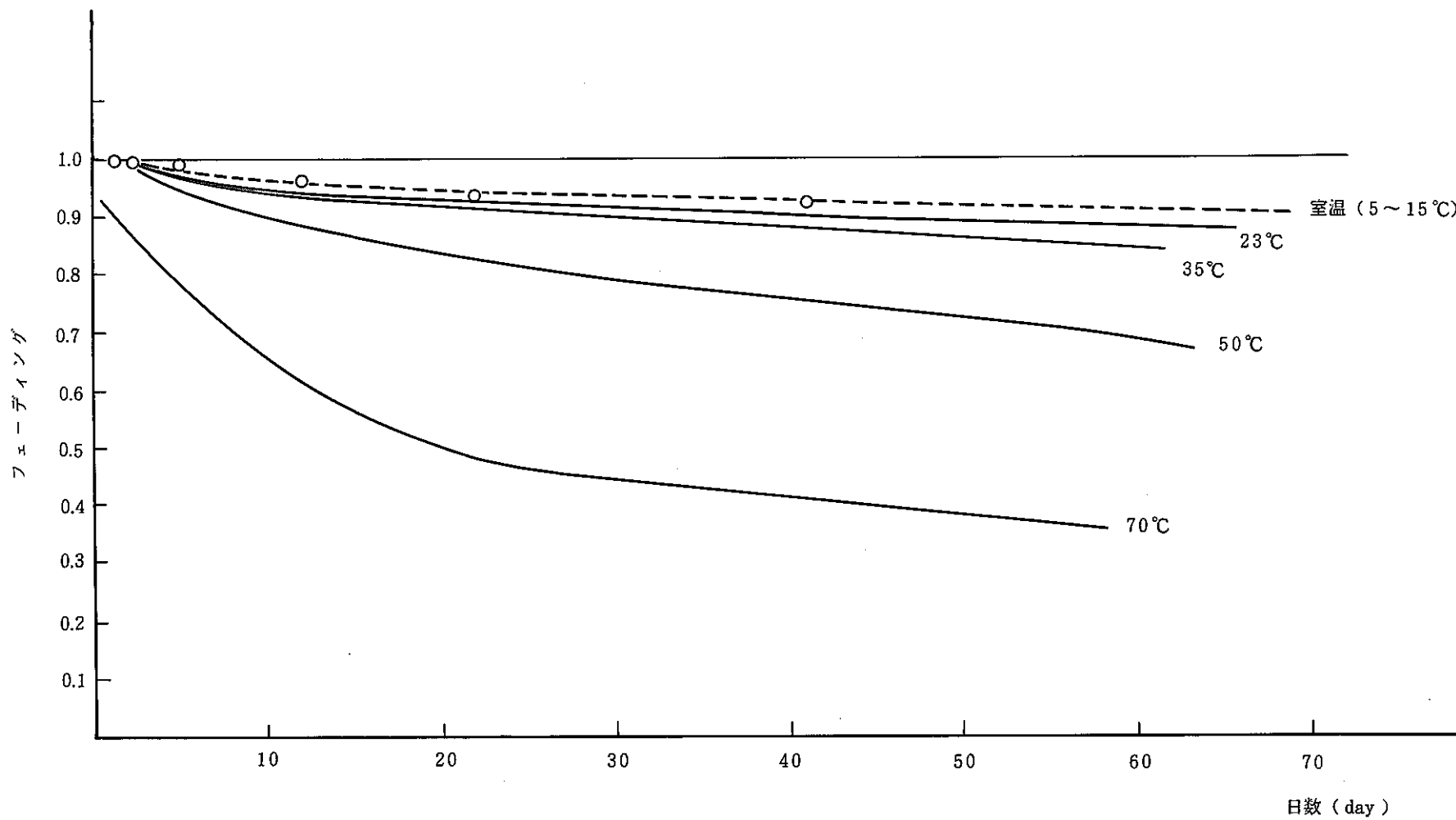


図4-17  ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$  素子のフェーディング特性

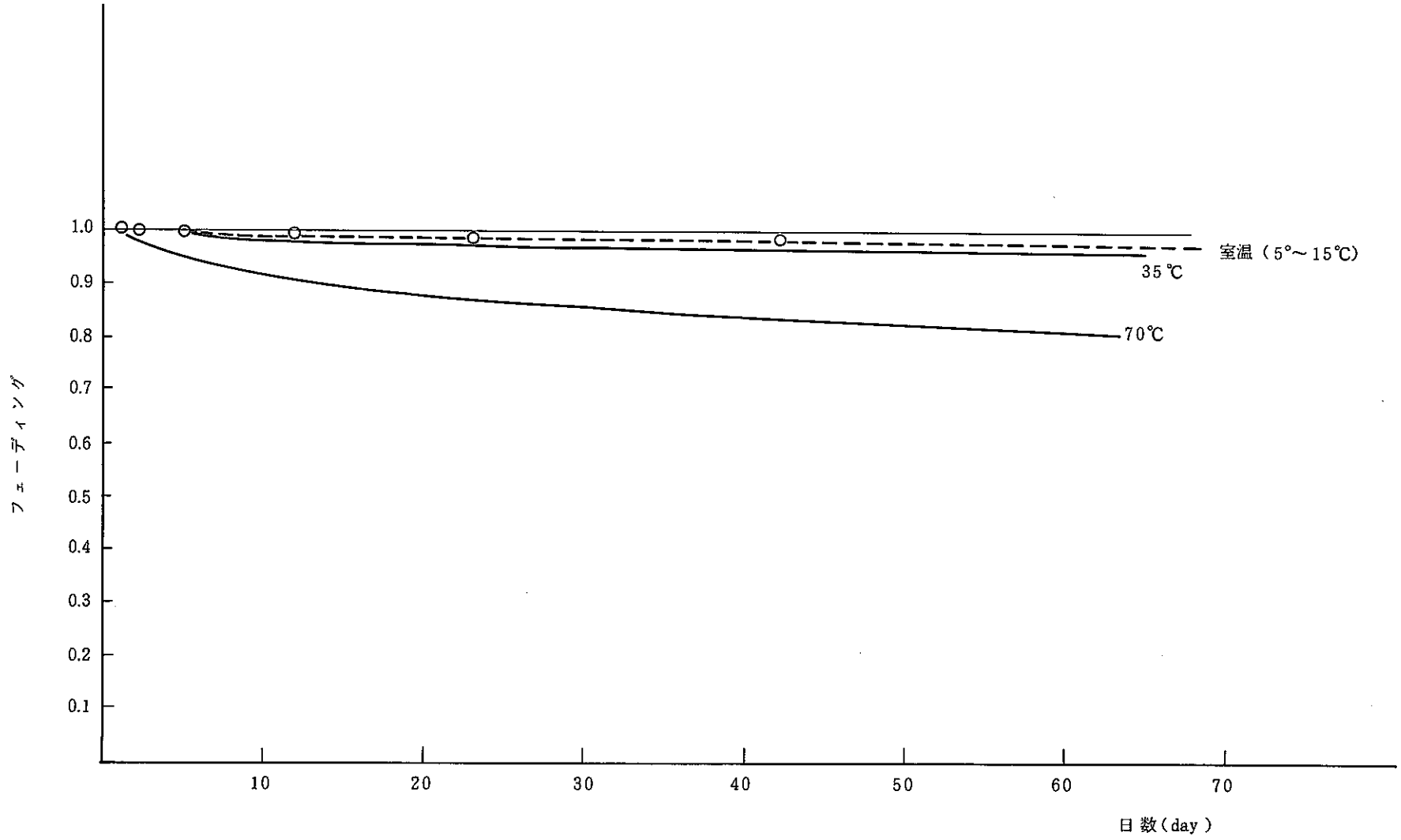


図4-18 CaSO<sub>4</sub> (Tm)素子のフェーディング特性

4-3  $\gamma$  (X) 線量当量評価法

深部線量当量指標は入射する放射線によって身体表面でなくある深さの位置における線量を表現するものであるため、個人線量計を用いて深部線量当量指標を評価するには人体の深部組織が実際に吸収する線量を測定する必要がある。このため $\gamma$  (X) 線に対しては第4素子 (#4) である  $1000 \text{ mg/cm}^2$  樹脂フィルター下の  ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) 素子の発光量から次式にて深部線量当量指標を求める。

$$H_i = Q P (T_4 - BG)$$

- 但し  $H_i$  : 深部線量当量指標  
 $Q$  : 線質係数 ( $\cong 1$ )  
 $P$  : R-rad 変換係数 ( $\cong 1$ )  
 $T_4$  : UD-808P 第4素子の発光量  
 $BG$  : TLD 素子のBG値<sup>注)</sup>

上記の式において厳密に考えれば、 ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) 素子の応答と理想的な深部線量当量指標は図4-11で示したように必ずしも一致していない。しかし、 $1000 \text{ mg/cm}^2$  樹脂フィルター下の  ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) 素子の応答とANSIが示している理想的な深部線量当量指標の関係を図4-19に示すが、その誤差は約40 KeV ~ 1.3 MeVの領域で0 ~ 20%であった。

一方、新型TLDバッジにおいては  $1000 \text{ mg/cm}^2$  樹脂フィルター下の  $\text{CaSO}_4$  (Tm) 素子と  ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) 素子の応答の比から $\gamma$  (X) 線の実効的なエネルギーを評価することができる。ここで  ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) 素子と  $\text{CaSO}_4$  (Tm) 素子の感度の比を $\gamma$  線エネルギー指標として、次式で定義する。

$$(EI)_j = \frac{T_3 - BG_3}{T_4 - BG_4}$$

- $T_3, T_4$ : UD-808P 線量計第3および第4素子の発光量  
 $BG_n$ : バックグラウンド値

${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) 素子と  $\text{CaSO}_4$  (Tm) 素子の $\gamma$  (X) 線に対するエネルギー応答については、既に図4-11に示されているが、両者の比をエネルギーの関数として求めると図4-21のようになる。これが上式の $\gamma$  線エネルギー指標に相当するものであり、この関係を用いてTLD素子の発光量の実測データより $\gamma$  (X) 線の実効エネルギーを求めることができる。また、この方法にて評価したエネルギーに基づいた補正を行えば、深部線量当量指標をより精度よく求めることが可能である。

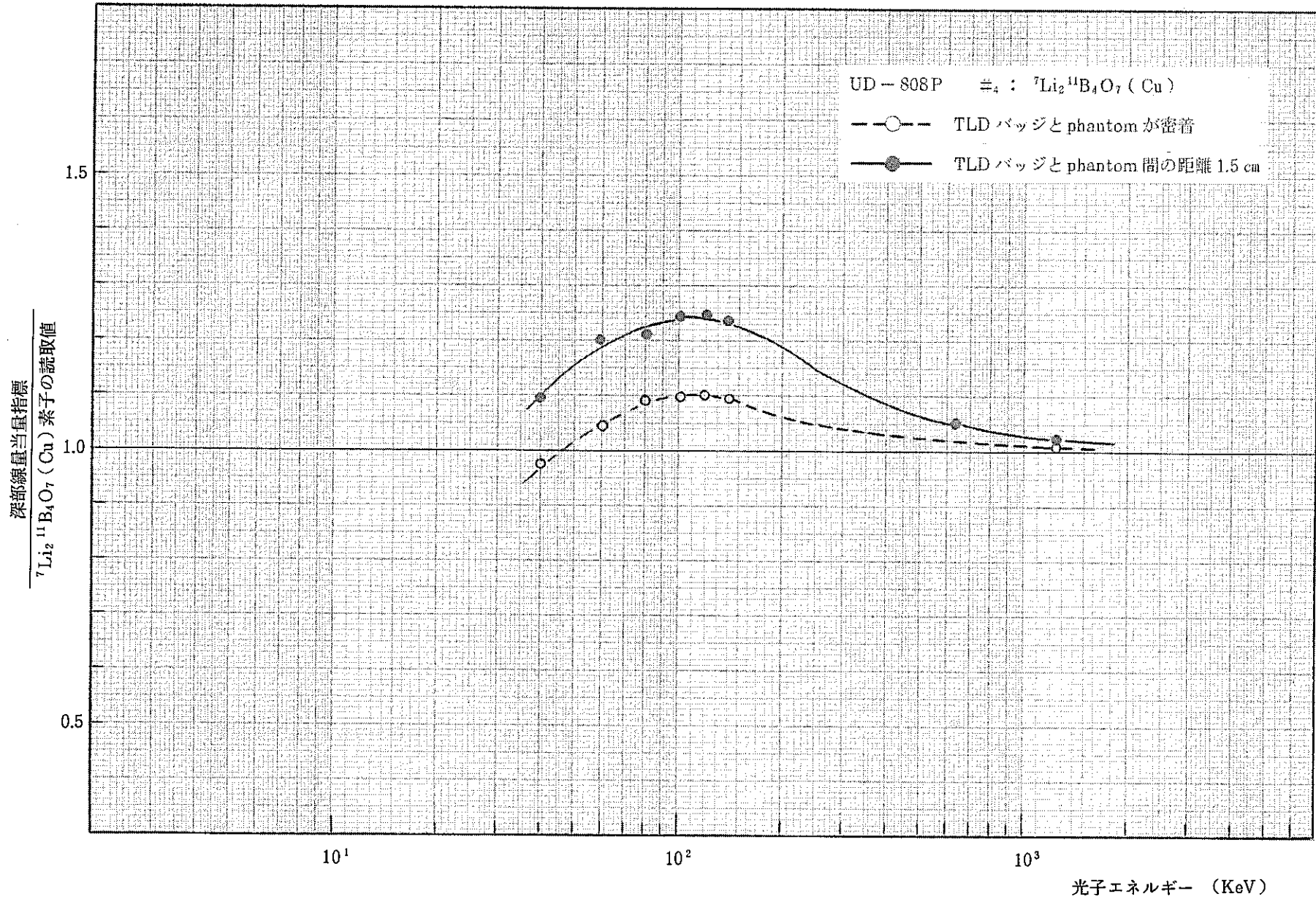


図4-19 深部線量当量指標と  ${}^7\text{Li}_2 {}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) 素子のレスポンスの関係

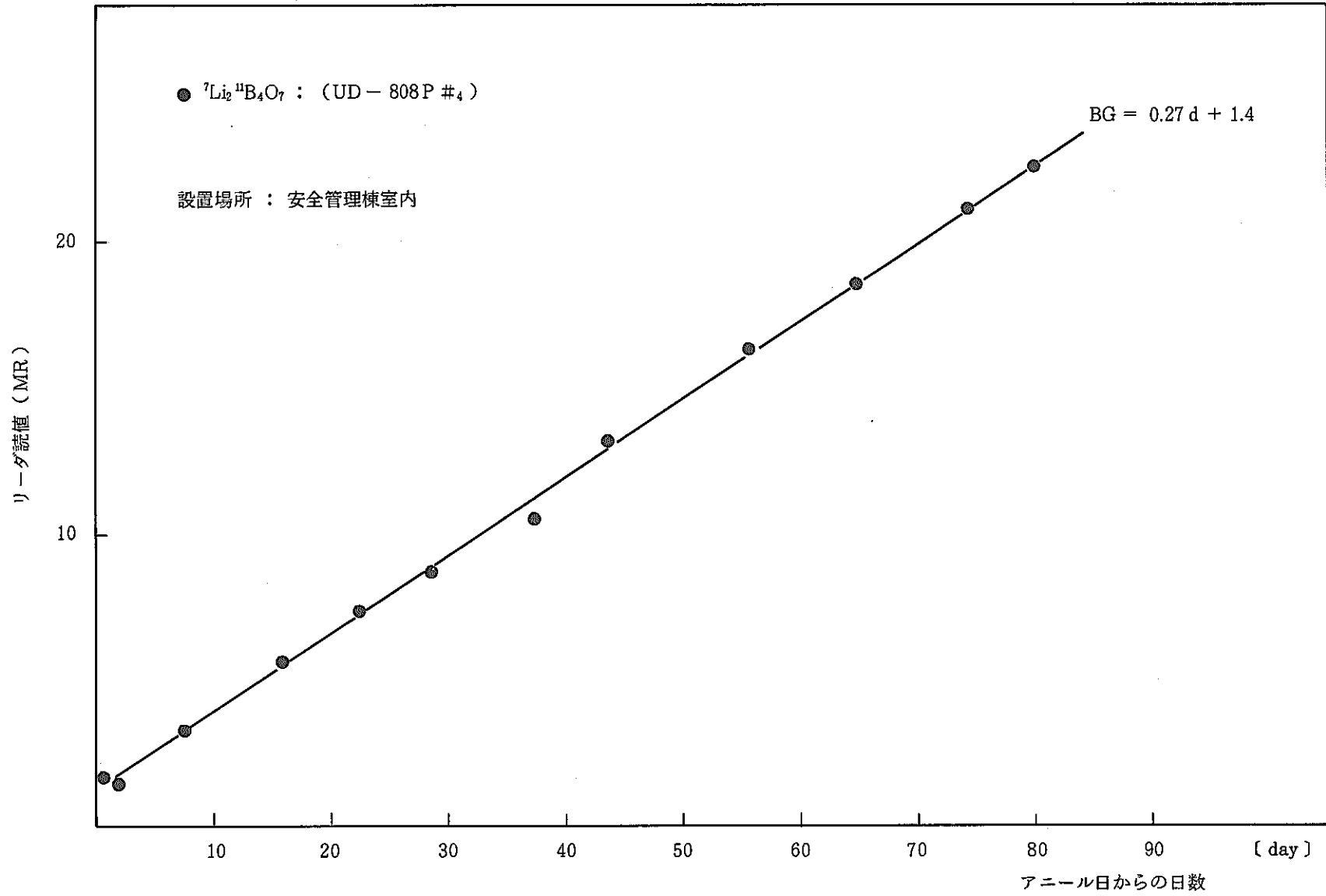


図 4 - 20 アニール処理からの日数に対する BG 値の変化

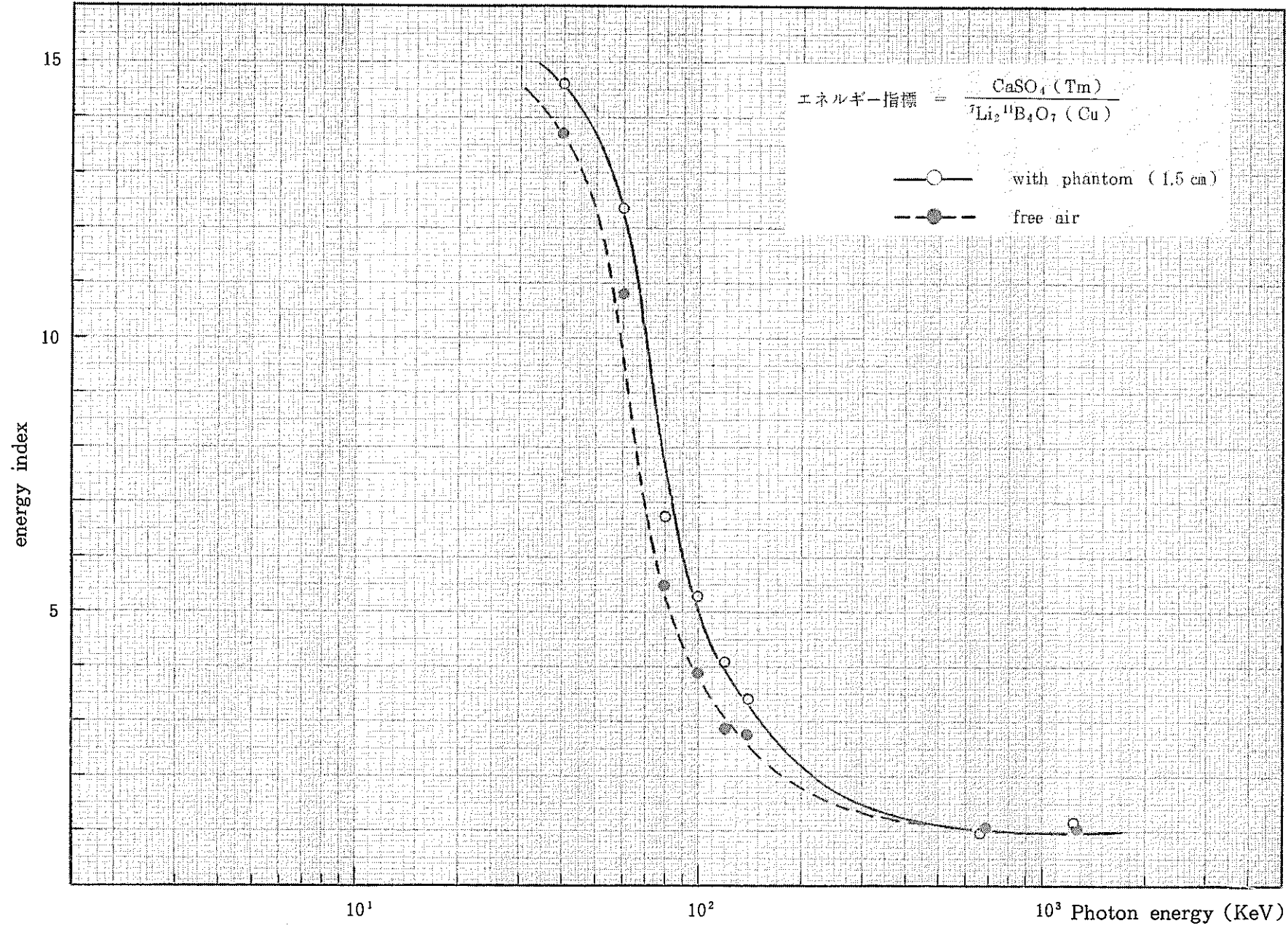


図 4 - 21 光子エネルギー指標

## 第5章 $\beta$ 線量当量評価

### 5-1 概 要

動燃・東海事業所では再処理工場などにおいて、核分裂生成物を直接的に取扱うため $\beta$ 線による被曝が予想される。 $\beta$ 線による被曝は $\gamma$ 線と比較して物質との相互作用が大きい局所的となりその部位で多大な吸収線量を与える。即ち、 $\beta$ 線については皮フにおける被曝が重要となり、ICRP Pub26では表面下 $5\text{mg}/\text{cm}^2$ から $10\text{mg}/\text{cm}^2$ の間における吸収線量を測定することを勧めている。

また、 $\beta$ 線の放射線場は $\gamma$ 線と混在場であることが多い。最近、皮フの被曝については $\beta$ 線や低エネルギーの $\gamma(X)$ 線に対して、線種にこだわらず不感層下での skin dose を評価することも検討されている。

しかし、被曝評価の結果を実際の放射線作業へ反映させるにおいて単に皮フ線量として評価するのではなく、 $\beta$ 線と $\gamma$ 線をそれぞれ分離して線量評価することは極めて有意義である。

新しいTLDバッジにおいては $\beta$ 線による皮フ ( $7\text{mg}/\text{cm}^2$  不感層下)での吸収線量の評価が可能であるとともに、 $\gamma$ 線との混在場においても両者を分離測定評価できる。

本章では、UD-710P型自動リータによるTLD素子の発光量の読取値から $\beta$ 線量当量を算出する方法を線量評価式の組み立てに基づいて示す。また、TLDバッジケースの $\beta$ 線入射窓のマイラー膜の厚さは、製造上うすくすることが可能となったので最終的に $3\text{mg}/\text{cm}^2$ に決定したことにより $\gamma(X) \cdot \beta$ 線量計の第1素子(#<sub>1</sub>)と第2素子(#<sub>2</sub>)に対するフィルターの合計の厚さが $17\text{mg}/\text{cm}^2$ と $63\text{mg}/\text{cm}^2$ になったので、この条件において $\beta$ 線量評価上の下記の性能・特性について $\beta$ 線源による照射試験を行い検討した結果について述べる。

- 1) 感度のバラツキ
- 2) エネルギー依存性
- 3) 入射方向依存性
- 4)  $\beta$ 線と $\gamma(X)$ 線の混在場での線量分離評価の精度

尚、照射試験に使用した $\beta$ 線源を表5-1に示す。

表 5-1  $\beta$ 線源一覧表

Source	Activity (mCi)	Capsule type	E <sub>max</sub> (MeV)	Half life	Reference date of calibration	
<sup>147</sup> Pm	1	X.110	0.224	2.62 Y	5 DEC '75	Disc of promethium-147/silver foil mounted in a stainless steele .
<sup>204</sup> Tl	1	X.114	0.766	3.81 Y	16 DEC '75	Thallium-204 incorporated in a pellet of ionexchange material mounted in a metal capsule.
<sup>90</sup> Sr ( <sup>90</sup> Y)	1	X.111	0.546 (2.27)	27.7 Y	28 NOV '75	Strontium-90 in the form of a 1mm diameter glass bead sealed in a welded stainless steel capsule window thickness 0.05 mm.

5-2  $\beta$ 線量当量評価の原理および線量評価式

$\beta$ 線量当量の評価は3個のTLD素子を用いて行なう。3個のTLD素子のうち2個は $\gamma(X)$ 線だけでなく $\beta$ 線にも感度を示すように薄いフィルターを入射窓とし、残り1個は $\beta$ 線を遮へいし、 $\gamma(X)$ 線だけに感度を持つ存厚いフィルターを入射窓としている。また、2個の $\beta$ 線用TLDの入射窓の厚さは多少異っており、それぞれ $\beta$ 線に対する遮へい効果が異なる。新型TLDバッジの $\gamma(X) \cdot \beta$ 線量計(UD-808P)では、入射窓の厚さをそれぞれ $17\text{mg}/\text{cm}^2$ (#1),  $63\text{mg}/\text{cm}^2$ (#2) および  $1000\text{mg}/\text{cm}^2$ (#4) である。

LID-710P型自動リーダにおいては、TLD素子の発光は光電子増倍管からの出力を光子数として計数されるが、この計数値は自動的にCasOg(Tm)素子を基準とした $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 線換算線量(MR)に変換されて出力される。今TLDの測定値( $\gamma$ 線等価線量に変換された発光量)と $\gamma(X)$ 線量当量および $\beta$ 線量当量との関係式は次のようになる。

$$T_1 = b_1(E_\beta) \cdot D_\beta + g_1(E_\gamma) \cdot D_\gamma + C_{BG} \quad \text{————— (5.1)}$$

$$T_2 = b_2(E_\beta) \cdot D_\beta + g_2(E_\gamma) \cdot D_\gamma + C_{BG} \quad \text{————— (5.2)}$$

$$T_4 = g_4(E_\gamma) \cdot D_\gamma + C_{BG} \quad \text{————— (5.3)}$$

但し

$T_n$ ; 各フィルター厚み下のTLD-nの測定値 ( $\text{mR} \cdot \text{eq} - \gamma$ )

$b_n(E_\beta)$ ; TLD-nの最大エネルギー  $E_\beta$  の $\beta$ 線に対する感度

( $\text{mR} \cdot \text{eq} - \gamma / \text{mrem}$ )

$g_n(E_\gamma)$ ; TLD-nのエネルギー  $E_\gamma$  の $\gamma(X)$ 線に対する感度

( $\text{mR} \cdot \text{eq} - \gamma / \text{mrem}$ )

$E_\beta$ ;  $\beta$ 線最大エネルギー (MeV)

$E_\gamma$ ;  $\gamma(X)$ 線の実効エネルギー (MeV)

$D_\beta$ ;  $\beta$ 線線量当量 (mrem)

$D_\gamma$ ;  $\gamma(X)$ 線線量当量 (mrem)

$C_{BG}$ ; TLD-nのバックグラウンド測定値 ( $\text{mR} \cdot \text{eq} - \gamma$ )

(5.1)式, (5.2)式, (5.3)式より

$$Q_1 = b_1(E_\beta) \cdot D_\beta + g_1(E_\gamma) \cdot D_\gamma \quad \text{————— (5.4)}$$

$$Q_2 = b_2(E_\beta) \cdot D_\beta + g_2(E_\gamma) \cdot D_\gamma \quad \text{————— (5.5)}$$

$$Q_4 = g_4(E_\gamma) \cdot D_\gamma \quad \text{————— (5.6)}$$

ここで  $Q_n = T_n - C_{BG}$

(5.6)式より

$$D_\gamma = \frac{Q_4}{g_4(E_\gamma)} \quad \text{————— (5.7)}$$



(5.4) 式と (6.7) 式より

$$D_{\beta} = \frac{Q_1 - g_1(E_T) D_T}{b_1(E_{\beta})} = \frac{Q_1 - \frac{g_1(E_T)}{g_4(E_T)} Q_4}{b_1(E_{\beta})} \quad (5.8)$$

(5.5) 式と (6.7) 式より

$$D_{\beta} = \frac{Q_2 - g_2(E_T) \cdot D_T}{b_2(E_{\beta})} = \frac{Q_2 - \frac{g_2(E_T)}{g_4(E_T)} Q_4}{b_2(E_{\beta})} \quad (5.9)$$

となる。また (5.8) 式と (5.9) 式は等しいものであるから、これを整理すると

$$\frac{b_2(E_{\beta})}{b_1(E_{\beta})} = \frac{Q_2 - \frac{g_2(E_T)}{g_4(E_T)} Q_4}{Q_1 - \frac{g_1(E_T)}{g_4(E_T)} Q_4} = (EI_{\beta}) \quad (5.10)$$

となる。(5.10) 式は  $\beta$  線の最大エネルギーの関数であり、 $EI_{\beta}$  と  $\beta$  線のエネルギー情報を示す指標と考へて  $\beta$  線最大エネルギー指標と定義する。

以上のことにより  $b_n(E_{\beta})$  および  $g_n(E_T)$  が既知であれば各 TLD 素子の発光量から、(5.10) 式により  $\beta$  線の最大エネルギーが推定でき、また (5.8) 式および (5.9) 式により、 $\beta$  線量当量の評価が可能である。

各 TLD 素子の  $\beta$  線に対する感度 ( $b_1, b_2$ )、光子に対する感度 ( $g_1, g_2, g_4$ ) および  $\beta$  線エネルギー指標 ( $EI_{\beta}$ ) の具体的な値は 5-3-2 にて述べる。

### 5-3 $\beta$ 線量評価における性能・特性

#### 5-3-1. 感度のバラツキ

5 個の TLD バッジに対して  $^{90}\text{Sr}-\text{Y}$  線源により 9.9 mrad, 19.7 mrad, 483 mrad の照射を行い、 $\beta$  線に対する感度のバラツキを検討した。この結果を表 5-2 に示す。

まず、各  $\beta$  線量評価素子 ( $\#_1, \#_2$ ) の発光量のバラツキは 5 個の素子に対する百分率標準偏差で見た場合に、483 mrad の照射においては 2.5 ~ 4% と良好であり、9.9 mrad および 19.7 mrad の低線量の照射においては 4 ~ 8% 程度であった。

次に、これらの発光量から求めたエネルギー指標より評価した  $\beta$  線の実効最大エネルギーは 483 mrad の照射に対して 2.5 MeV  $\pm$  8.9% であり、 $^{90}\text{Sr}-\text{Y}$   $\beta$  線源の最大エネルギーである 2.27 MeV に良く一致していた。また、実際に  $\beta$  線量当量評価式より 5 個の TLD バッジにて算出した  $\beta$

線量のバラツキは百分率標準偏差で±7%以内であった。さらに5個のTLDバッジにより評価したβ線量の平均値の照射β線量からの誤差は±10%以内であった。

以上の結果<sup>90</sup>Sr-Y線源のようにエネルギーの大きいβ線の単一照射の場合は約10mradまで精度よく測定評価することが可能である。

表 5-2  $\beta$ 線に対する感度のバラツキ

線源	線量 (mrad)		TLD読取値 (mR $\cdot$ eq $\cdot$ r)				$\beta$ 線エネルギー -指標(EI)	EIから求めた $\beta$ 線最大実効エ ネルギー(MeV)	評価 $\beta$ 線量 (mrad)	評価 $\beta$ 線量 照射 $\beta$ 線量
			# <sub>1</sub>	# <sub>2</sub>	# <sub>3</sub>	# <sub>4</sub>				
核種 <sup>90</sup> Sr-Y 強度 1mCi 距離 30cm	9.9	$\bar{x}$	19.4	16.8	0.4	1.3	0.85	2.25	10.5	1.06 $\pm$ 0.04
		$\sigma_n$	0.94	1.37	—	—*	0.11	0.5	0.43	
		$\sigma_n/\bar{x}$	4.1%	8.1%	—	—	12%	23%	4.1%	
	19.7	$\bar{x}$	39.5	36.1	0.5	1.7	0.91	2.3	21.7	1.10 $\pm$ 0.07
		$\sigma_n$	1.8	2.3	—	—	0.05	0.1	1.4	
		$\sigma_n/\bar{x}$	4.5%	6.2%	—	—	5.8%	3.5%	6.3%	
	483	$\bar{x}$	889	772	13.6	4.3	0.86	2.25	491	1.02 $\pm$ 0.02
		$\sigma_n$	22	32	0.83	0.50	0.04	0.2	9.3	
		$\sigma_n/\bar{x}$	2.5%	4.0%	6.2%	13%	4.9%	8.9%	2.0%	

\* 発光量が小さいため評価せず

## 5-3-2 エネルギー依存性

a.  $\beta$ 線エネルギー依存性

$^{90}\text{Sr}-\text{Y}$ ,  $^{204}\text{Tl}$ ,  $^{107}\text{Pm}$  の  $\beta$ 線源を用いて  $\beta$ 線評価用素子の  $\beta$ 線に対するエネルギー依存性を求めた。結果を  $17\text{mg}/\text{cm}^2$  および  $63\text{mg}/\text{cm}^2$  フィルター下の  $^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) 素子の  $\beta$ 線に対する感度 ( $b_n$ ) と  $\beta$ 線最大エネルギーとの関係として図 5-1 に示す。2つの素子の感度 ( $b_1$ ,  $b_2$ ) は明らかに異なっており,  $b_1$  と  $b_2$  の比をエネルギー指標を  $\beta$ 線最大エネルギーの関数として図 5-2 に示すが, この図を用いて  $\beta$ 線の実効最大エネルギーを求めることができる。

## b. 光子エネルギー依存性

$17\text{mg}/\text{cm}^2$  および  $63\text{mg}/\text{cm}^2$  フィルター下の  $\beta$ 線量評価用  $^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) 素子は  $\beta$ 線のみならず  $\gamma$ 線に対しても感度を有している。このため  $^{137}\text{Cs}$  88 mCi と  $^{60}\text{Co}$  50 mCi の  $\gamma$ 線源および X 線発生装置 ( $E_{\text{eff}} = 40 \sim 140 \text{ KeV}$ ) を用いた照射を行い,  $\beta$ 線量評価用素子の光子に対するエネルギー依存性を調べた。結果を図 5-3 と図 5-4 に示す。

$17\text{mg}/\text{cm}^2$  および  $63\text{mg}/\text{cm}^2$  フィルター下の  $^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) 素子に関して, 約 40 KeV から 1.3 MeV の領域においてほぼ等しいエネルギー依存性が得られた。例えば 60 KeV の実効エネルギーの X 線に対する相対感度は, free-air の条件で約 0.8 であり, with-phantom の条件では約 1.2 であった。

尚,  $^{137}\text{Cs}$  および  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 線について照射線量に対する相対感度が 10%~20%程度大きくなっているのは, 入射窓の厚さが薄く光子に対する電子平衡が成立していないため, 周囲から散乱した二次電子線が寄与していると考えられる。

次に,  $\beta$ 線量評価用素子に対する  $\gamma$ 線の寄与を差し引くために使用する  $1000\text{mg}/\text{cm}^2$  フィルター下の  $^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) 素子の光子エネルギー依存性については既に 4-2-5 でも述べたがここで再度図 5-5 に示す。 $\gamma$ 線の寄与の差し引きを正確に行うには  $\beta$ 線量評価用素子 (#1 および #2) の  $\gamma$ 線差引用素子 (#4) に対する感度の比である  $g_1/g_4$  と  $g_2/g_4$  (5-8, 5-9, 5-10 式) をあらかじめ明らかにしておく必要がある。 $g_1/g_4$  と  $g_2/g_4$  を光子エネルギーの関数として図 5-6 に示す。

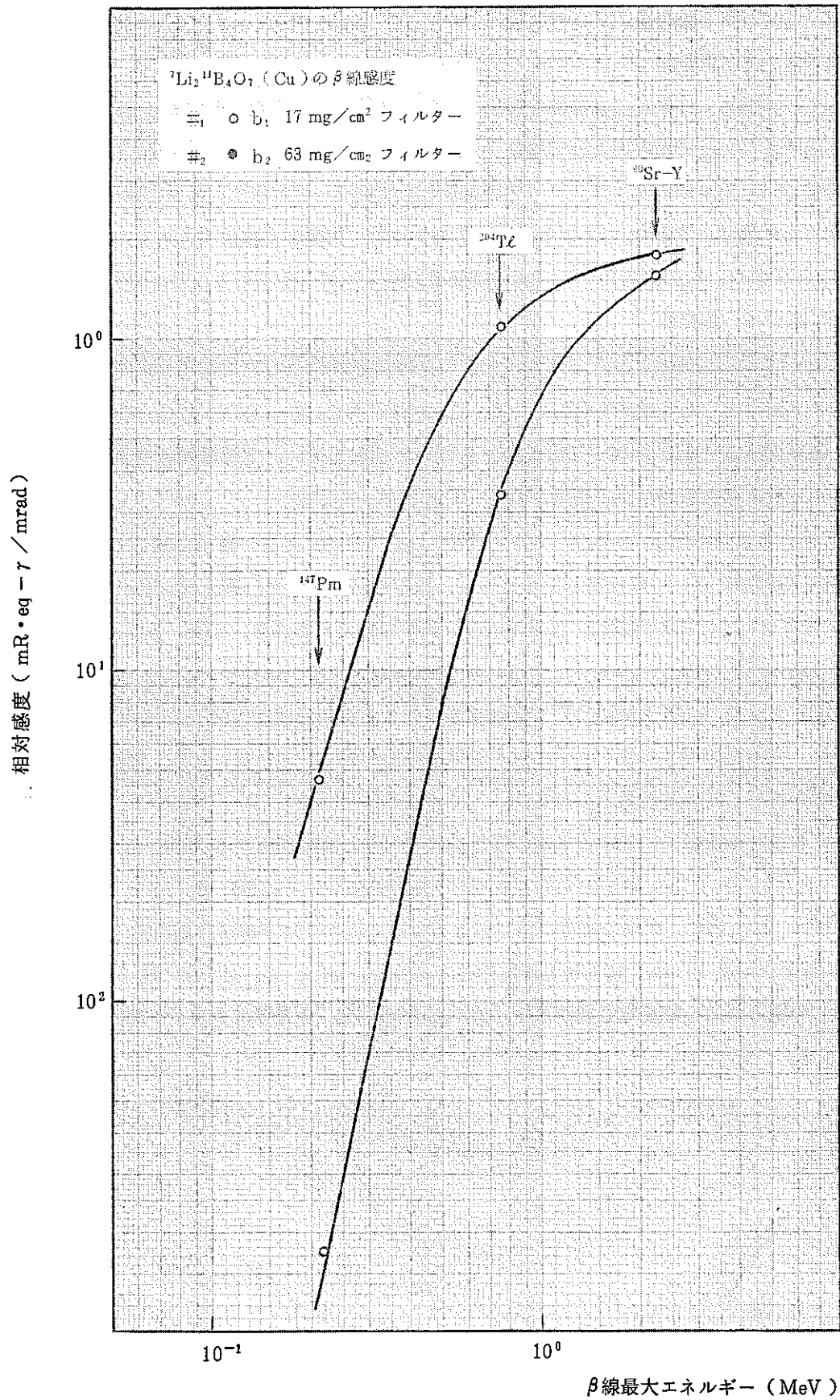


図 5-1  $\beta$  線量評価用  ${}^7\text{Li}_2 {}^{11}\text{B}_4\text{O}_7 (\text{Cu})$  素子の  $\beta$  線エネルギー依存性

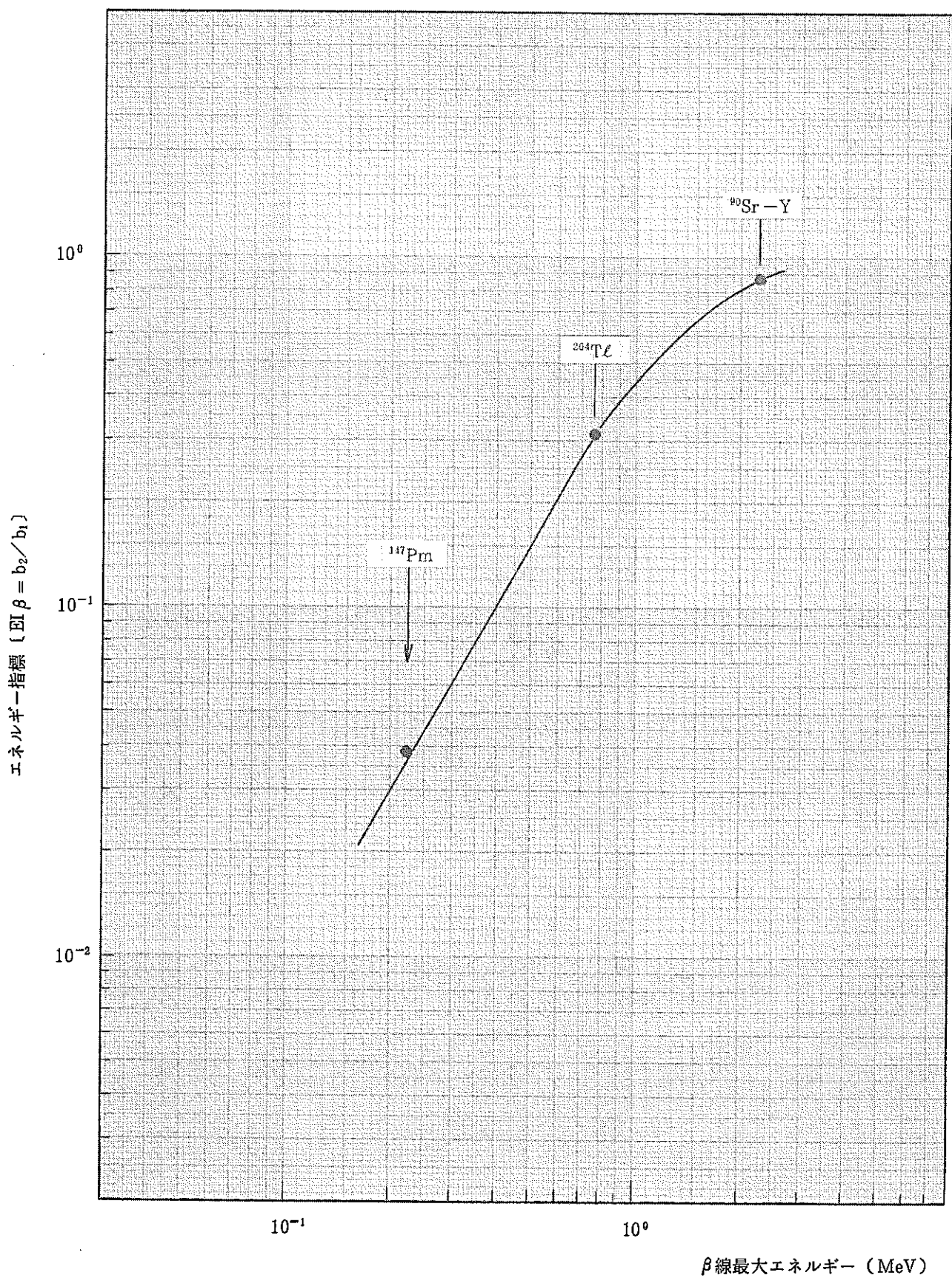


図5-2 エネルギー指標 (EI) と  $\beta$ 線最大エネルギーの関係

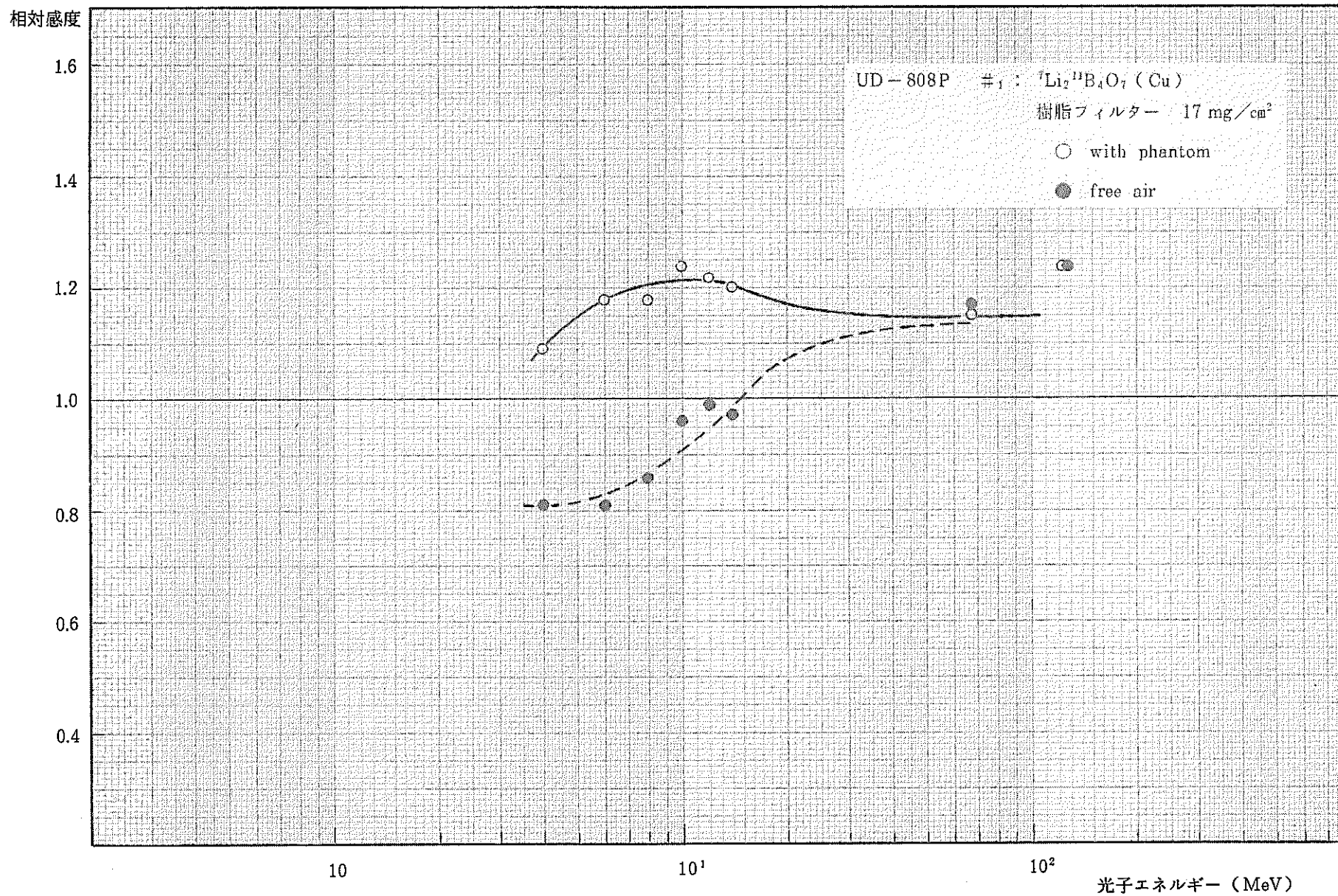


図5-3 17 mg/cm<sup>2</sup> フィルター下の  ${}^7\text{Li}_2 {}^{11}\text{B}_4\text{O}_7 (\text{Cu})$  素子の光子エネルギー依存性

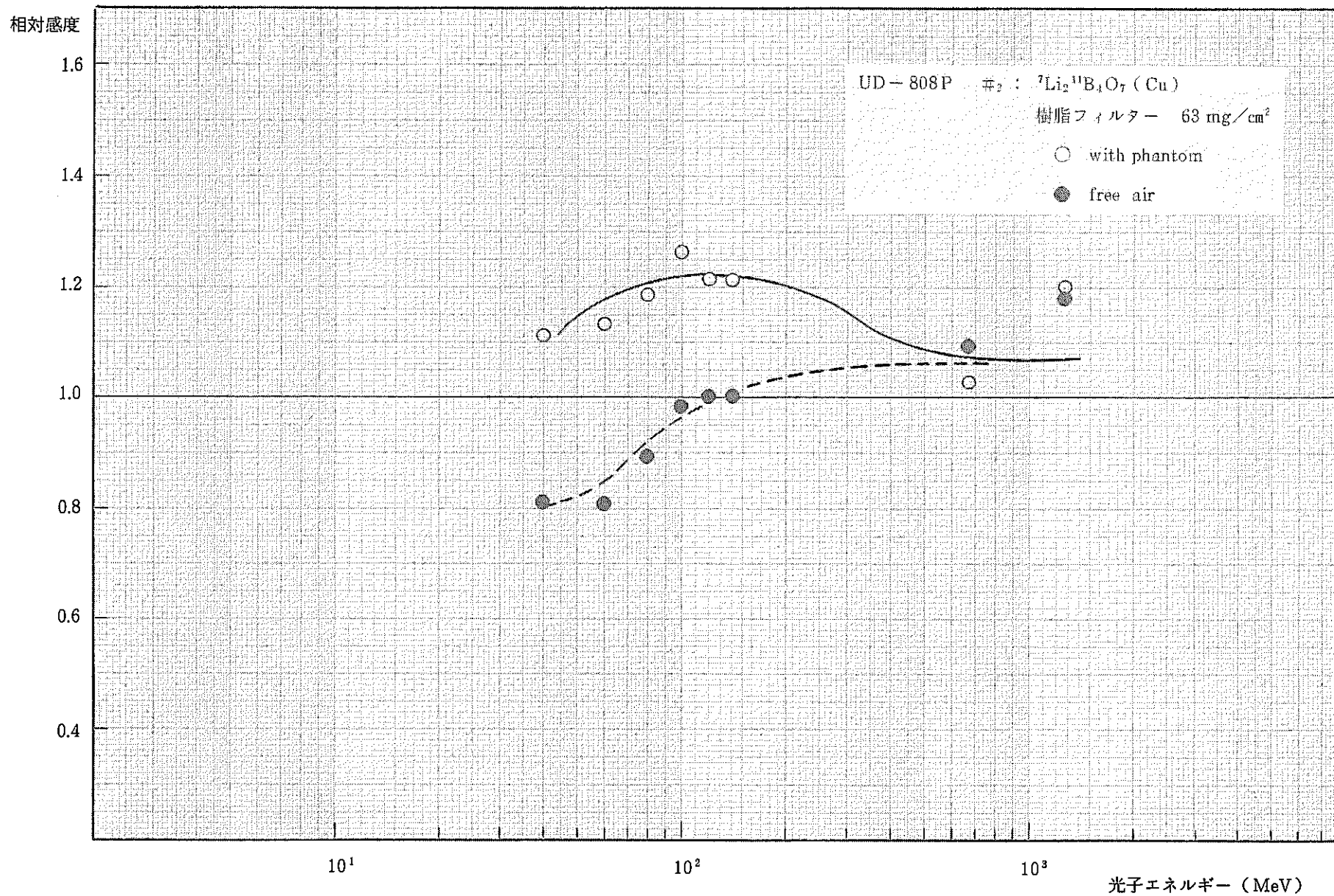


図 5-4 63 mg/cm<sup>2</sup> フィルター下の  ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$  素子のエネルギー依存性



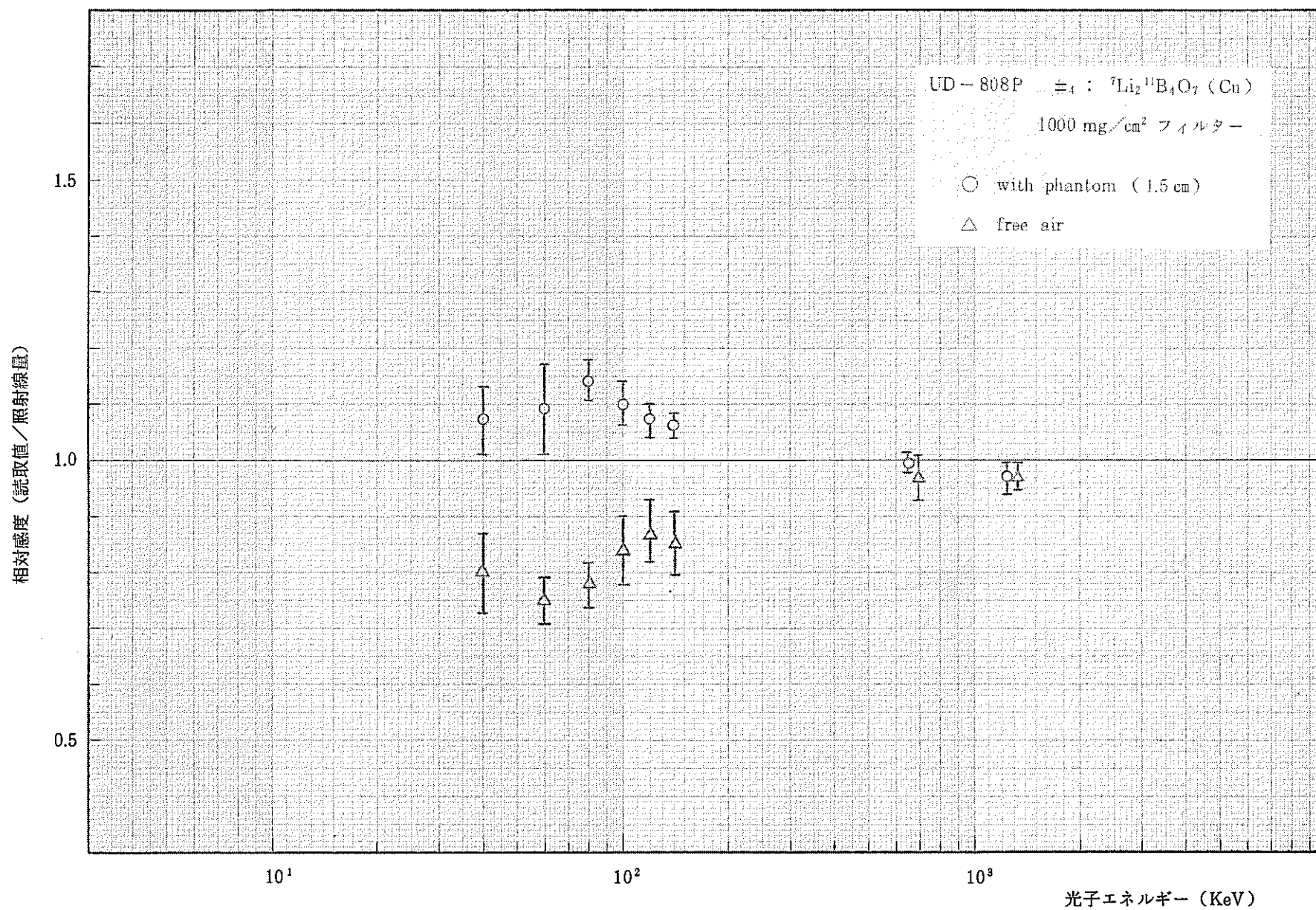


図 5-5 1000 mg/cm<sup>2</sup> 樹脂フィルター下の  ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) 素子のエネルギー依存性

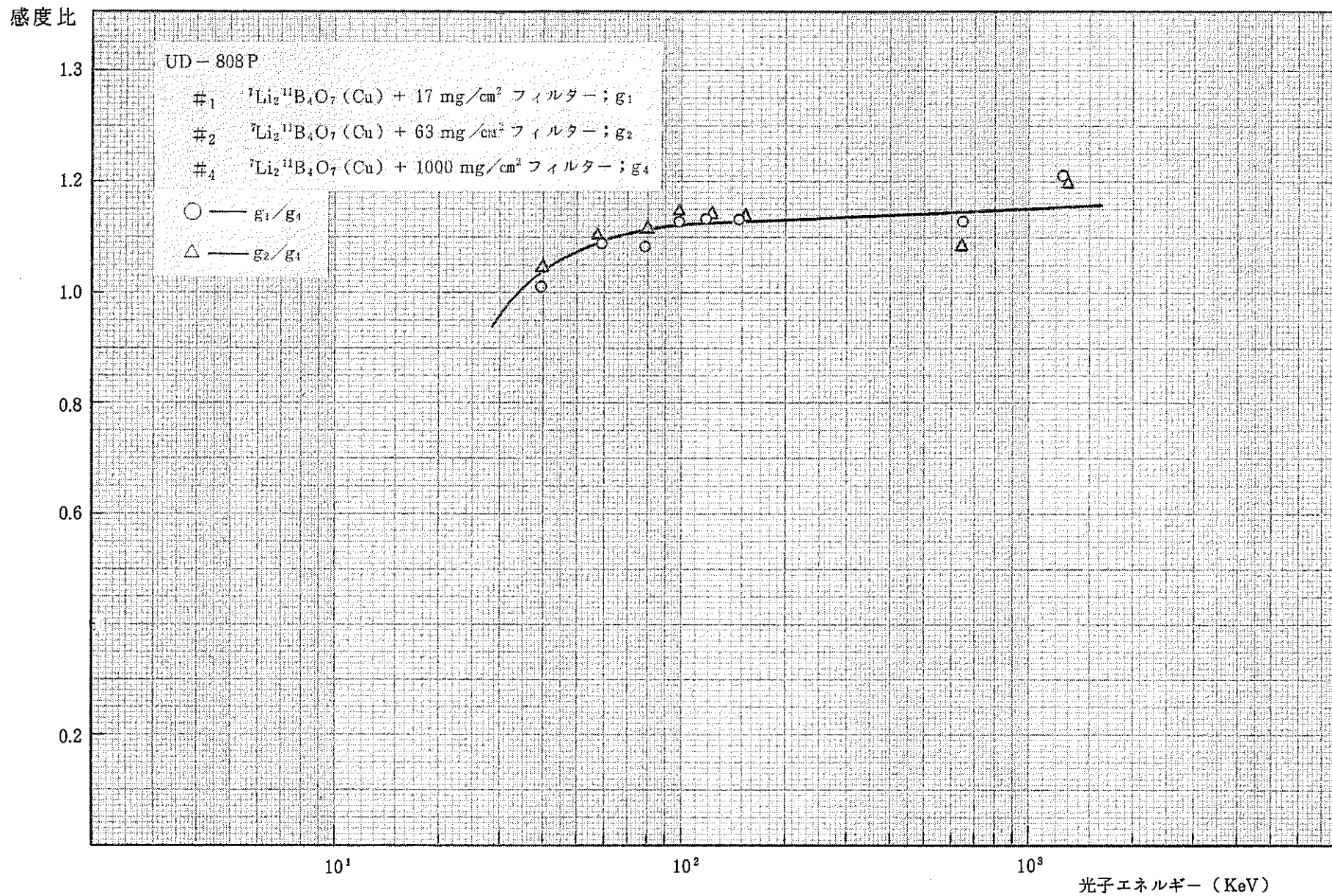


図 5-6  $\beta$ 線評価用  ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$  素子と  $\gamma(\text{X})$  線量評価用  ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$  素子の光子に対する感度比

### 5-3-3 入射方向依存性

$^{90}\text{Sr}$ -Y線源による照射を行い、TLDバッジの $\beta$ 線に対する入射方向依存性を調べた。試験は、TLDバッジをパラフィンファントムに固定し、正面を中心にして左右方向に $30^\circ$ づつの角度で同一線量の照射を行った。また、TLDバッジを線源の間の距離が30cmと小さく、僅かの距離の相違でも線量に大きく変化することが予想されるため、バッジケースの $\beta$ 線入射窓のマイラー膜の中心から線源までの距離が常に一定となるようにした。試験結果を図5-7に示す。

ここでは各方向からの入射においてTLD素子の発光量から図5-1と図5-2を利用して $\beta$ 線の吸収線量を求め、正面入射の場合を1.0として相対的な評価線量の変化を示した。

この結果、正面から左右方向へ $30^\circ$ 以内の入射角においては感度の変化は約20%以内であった。しかし、 $30^\circ$ より大きな入射角においてはバッジケース本体などでの吸収のため感度は小さくなっていた。再処理工場等において実際に $\beta$ 線による被曝の可能性のある作業においてはほとんどが正面から $\beta$ 線が入射するものと考えられるが、極端に入射方向が偏っている場合等においては十分に注意する必要がある。

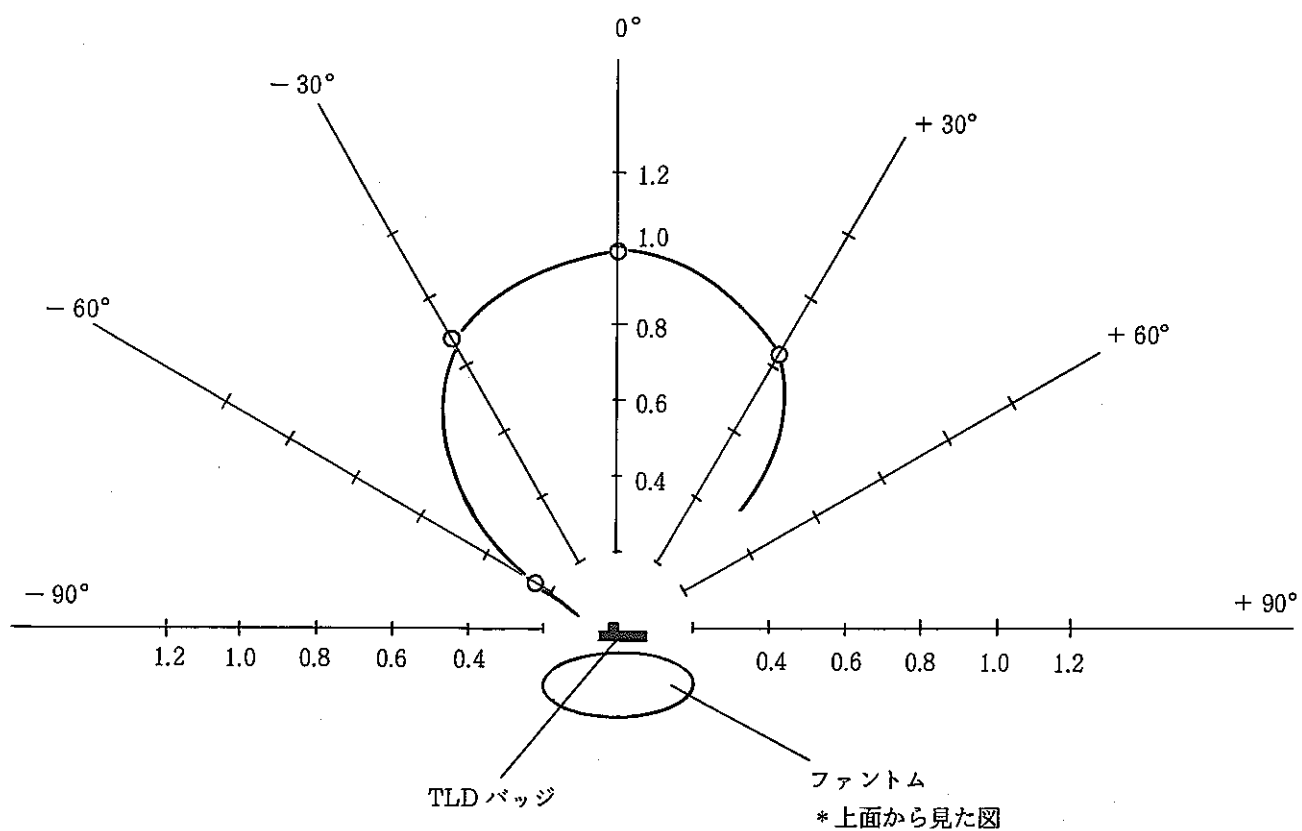


図5-7  $\beta$ 線入射方向依存性 (左右方向面からの入射)

5-3-4  $\beta$ 線と $\gamma$ 線の混在照射場での分離評価精度

再処理工場等において核分裂生成物（FP）を取扱うような作業場では $\beta$ 線と $\gamma$ 線の混在場であることがほとんどであり、 $\beta$ 線と $\gamma$ 線の実効測定によりそれぞれの線量評価を行う必要がある。

TLDバッジの開発においては、当初4種類のフィルター厚下の ${}^{6}\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 素子に対して種々の $\beta$ 線単独および $\beta$ 線と $\gamma$ 線の混在場での分離測定精度の評価を行った。その結果、 $13.4\text{mg}/\text{cm}^2$ と $63.2\text{mg}/\text{cm}^2$ のフィルターを用いた組合せが最も精度よく $\beta$ 線最大実効エネルギーを評価することが可能であり、約500 KeV以上のエネルギーの $\beta$ 線に対しては約 $\pm 15\%$ の精度で最大実効エネルギーを評価することが出来た。また、同時にこの条件で $\beta$ 線と $\gamma$ 線の混在場での分離測定による $\beta$ 線量の測定精度は約 $\pm 20\%$ であった。そこで、今回もこれまでの試験と同様に ${}^{90}\text{Sr-Y}$ 、 ${}^{204}\text{Tl}$  $\beta$ 線源および ${}^{60}\text{Co}$  $\gamma$ 線源、X線発生装置を用いて最終仕様の線量計に対して照射試験を行った。

この結果を表5-3および表5-4に示す。

まず、表5-3は約176～204 mRの $\gamma$ およびX線を照射した線量計に $\beta$ 線を173～1257 mrad照射したものであり、 $\beta/\gamma$ 比は0.85～6.26である。このような混在照射場においては、約 $\pm 15\%$ の精度で評価 $\beta$ 線量が照射 $\beta$ 線量に一致し、エネルギー指標から求めた実効最大エネルギーについても約 $\pm 15\%$ の精度で評価可能であった。また、この時の $\gamma$ (X)線の線量当量については、第4素子(#4)の位置に $\gamma$ (X)線評価用素子を設置したため、 $\beta$ 線入射窓からの囲り込み入射による $\beta$ 線の影響がほとんどなくなったこともあり、約 $\pm 12\%$ の精度で $\gamma$ (X)線の線量当量の評価が可能であった。

また、表5-4はさらに $\beta$ 線の照射線量が少ない条件での $\gamma$ 線との分離評価を行った結果である。それぞれ、40mR、57mR、59mRの $\gamma$ 線照射を行ったTLDバッジにさらに ${}^{90}\text{Sr-Y}$ の $\beta$ 線を照射したものである。 $\beta$ 線を50mradおよび26mrad照射した場合は、評価した $\beta$ 線量の平均値の照射 $\beta$ 線量からの誤差は $\pm 20\%$ 以内であり、また評価 $\beta$ 線量のバラツキは百分率標準偏差で $\pm 10\%$ 程度であった。しかし、10mradの $\beta$ 線照射においては評価 $\beta$ 線量の平均値の照射 $\beta$ 線量からの誤差は $+70\%$ と大きく、またバラツキは約 $9\%$ であった。

以上の結果においてTLDバッジより評価した $\beta$ 線量の照射された $\beta$ 線量の比を図にすると図5-8のようになる。この結果より、 $\gamma$ 線と $\beta$ 線の混在場においても約50mradより大きい線量においては $\pm 20\%$ 以内の誤差で $\beta$ 線の評価を行うことが可能と思われる。

表5-3  $\beta$ 線と $\gamma$ (X)線混在場での分離測定結果(1)

回	$\beta$ 線照射量 (mrad)		$\gamma$ 線照射量 (mR)	全 $\beta$ 線照射量 (mrad)	全 $\beta$ 線照射量 $\gamma$ 線照射線量	エネルギー指標 (EI)	① EIから求めた $\beta$ 線実効最大 エネルギー (MeV)	② 計算により求 めた $\beta$ 線実効 最大エネルギー (MeV)	評価 $\beta$ 線量 (mrem)	評価 $\gamma$ 線量 (mrem)	評価 $\beta$ 線量 全 $\beta$ 線 照射量	評価 $\gamma$ 線量 $\gamma$ 線 照射線量	①/②
	$^{90}\text{Sr-Y}$	$^{204}\text{Tl}$											
1	868	389	—	1257	—	0.74	1.60	1.80	1163	—	0.93	—	0.89
2	—	1101	176 (Co-60)	1101	6.26	0.35	0.82	0.77	1216	161	1.10	0.91	1.06
3	—	534	176 (Co-60)	534	—	0.34	0.80	0.77	585	176	1.10	1.00	1.04
4	533	386	176 (Co-60)	919	5.22	0.64	1.40	1.64	966	184	1.05	1.05	0.85
5	396	—	204 (X-ray 60KeV)	396	1.94	0.88	2.20	2.27	432	210	1.09	1.03	0.97
6	420	—	204 (X-ray 60KeV)	420	2.06	0.92	2.60	2.27	470	247	1.12	1.21	1.15
7	502	—	204 (X-ray 60KeV)	502	2.46	0.86	2.20	2.27	473	233	0.94	1.14	0.97
8	—	173	204 (X-ray 60KeV)	173	0.85	0.41	0.90	0.77	185	211	1.07	1.03	1.15

Ave

1.05±7%

表5-4  $\beta$ 線と $\gamma$ 線混在場での分離測定結果(2)

回	$\beta$ 線照射量 (mrad)	$\gamma$ 線照射線量 (mR)	エネルギー 指標(EI)	① EI から求め た $\beta$ 線最大実 効エネルギー (MeV)	② 計算により求 められた $\beta$ 線 最大実効エネ ルギー (MeV)	評価 $\beta$ 線量 (mrem)	評価 $\gamma$ 線量 (mrem)	評価 $\beta$ 線量 照射 $\beta$ 線量	評価 $\gamma$ 線量 $\gamma$ 線照射線量	① / ②
1	10( $^{90}\text{Sr}-\text{Y}$ )	40( $\text{Cs}-137$ )	0.50	1.1	2.27	19	34	1.91	0.85	0.48
2	10 "	40 "	0.65	1.4	"	15	38	1.48	0.94	0.62
3	10 "	40 "	0.58	1.3	"	18	32	1.78	0.81	0.57
4	10 "	40 "	0.64	1.4	"	16	43	1.59	1.08	0.62
Ave	10 "	40 "	0.59	1.3	"	17	37	1.69 $\pm$ 8.8%	0.92	0.57
1	26( $^{90}\text{Sr}-\text{Y}$ )	57( $\text{Co}-60$ )	0.87	2.3	2.27	31	56	1.19	0.98	1.01
2	26 "	"	0.88	2.2	"	30	62	1.15	1.09	0.97
3	26 "	"	0.79	1.9	"	31	59	1.19	1.04	0.84
4	26 "	"	0.70	1.6	"	35	59	1.35	1.04	0.70
Ave	26 ""	"	0.81	2.0	"	32	59	1.22 $\pm$ 5.6%	1.04	0.88
1	50( $^{90}\text{Sr}-\text{Y}$ )	59( $\text{Co}-60$ )	0.71	1.6	2.27	51	58	1.02	0.98	0.70
2	"	59 "	0.81	2.0	"	47	57	0.94	0.97	0.88
3	"	59 "	0.78	1.8	"	38	55	0.76	0.93	0.79
4	"	59 "	0.90	2.3	"	42	52	0.84	0.88	1.01
Ave	"	59 "	0.82	2.0	"	45	56	0.90 $\pm$ 10%	0.94	0.85

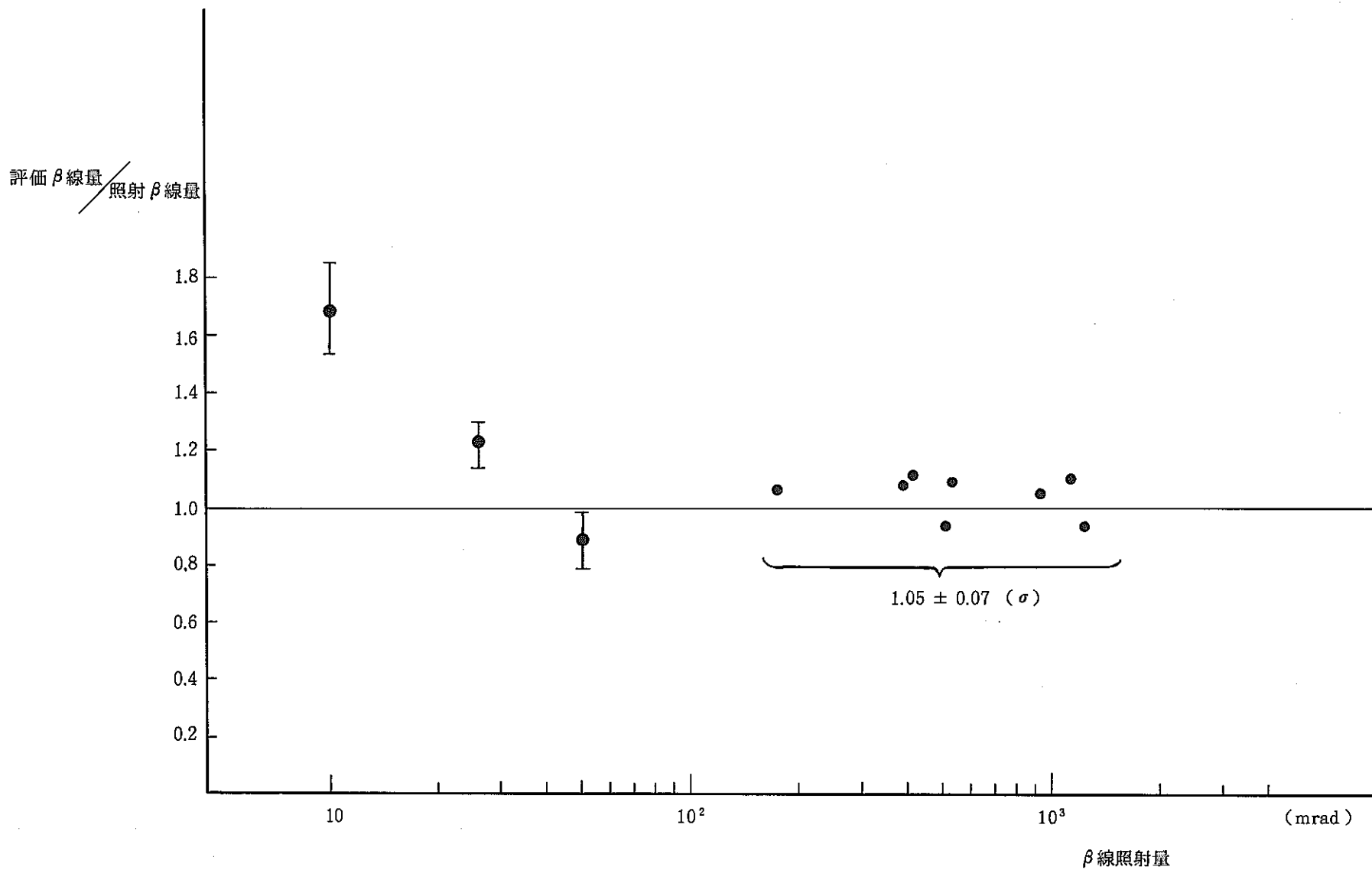


図5-8 β線・γ(X)線混在場でのβ線量評価の誤差



## 第6章 中性子線量評価

### 6-1 概 要

動燃・東海事業所においては $\gamma$ 線だけでなく、特にプルトニウム燃料製造工程、再処理工場でのPu抽出工程等においては中性子線場が存在し、作業者の中性子被曝線に対する線量評価が必要である。

一般に中性子線量当量の測定を行うには、線量当量率を直読できる測定器（例えば、レムカウンター等）を用いるか、又は中性子フルエンス（率）を測定して線量当量（率）に換算する方法がとられる。

ここで中性子線量当量率 $\dot{H}$  (rem/h)は

$$\dot{H} = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \phi(E) h(E) dE$$

であり、 $\phi(E)$ は、エネルギー $E$ での単位エネルギー幅内の中性子フルエンス率、 $h(E)$ は、フルエンス率から線量当量率への換算係数 (rem/h/n/cm<sup>2</sup>sec) である。ICRP Pub 21 は単位中性子線量当量率当りの中性子フルエンス率（換算係数 $h(E)$ の逆数）を表6-1に示す値で勧告している。

一般にPuO<sub>2</sub>燃料を直接取扱うプローブボックス作業では、自発核分裂スペクトル及び( $\alpha$ , n)反応による中性子スペクトルが直接人体の被曝に関与し、又原子炉等でのコンクリートなどの遮へいの外に漏えいしてくる中性子エネルギーは熱中性子領域(0.025 eV)から高速中性子領域まで広く分布している。このため中性子線による被曝線量の評価に使用する個人モニターは広範囲の中性子エネルギーに有感であることが重要である。また中性子線は、ほとんどの場合 $\gamma$ 線と混在するため、中性子線と $\gamma$ 線を精度よく分離評価することが必要である。

新型TLDバッジにおいては熱中性子線に対して感度の優れた<sup>6</sup>Li<sub>2</sub><sup>10</sup>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>(Cu)蛍光体と中性子線に対して感度が無視される<sup>7</sup>Li<sub>2</sub><sup>11</sup>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>(Cu)蛍光体を用い、人体での中性子線の後方散乱を利用したアルベド法にて中性子線量の測定評価を行う。

本章ではTLDバッジにおける中性子線量評価の原理およびこの原理に基づいて中性子線量当量の基本評価式を紹介するとともに、最終仕様のTLDバッジに対してTLDバッジとファントムの間を1.5 cm 離れた条件において中性子線源による照射試験により求めた線量当量評価式を示す。またさらに、中性子線量評価の精度に寄与する下記のような性能・特性について照射試験を実施して検討を行ったのでその結果を示す。

- i) 中性子線量評価用素子の $\gamma(X)$ 線エネルギー依存性
- ii) 速中性子線に対する感度のバラツキ
- iii) 速中性子線に対する感度の再現性

IV) TLD バッジと phantom間の距離による感度の変化

V) 速中性子線に対する方向依存性

VI) TLD バッジの着用状態による感度の変化

VII)  $\gamma$  線と中性子線混在照射場での分離評価精度

尚、中性子線の照射試験に使用した線源を表 6-2 に、また照射の状況を図 6-1 に示す。

表6-1 中性子についての換算係数と実効線質係数

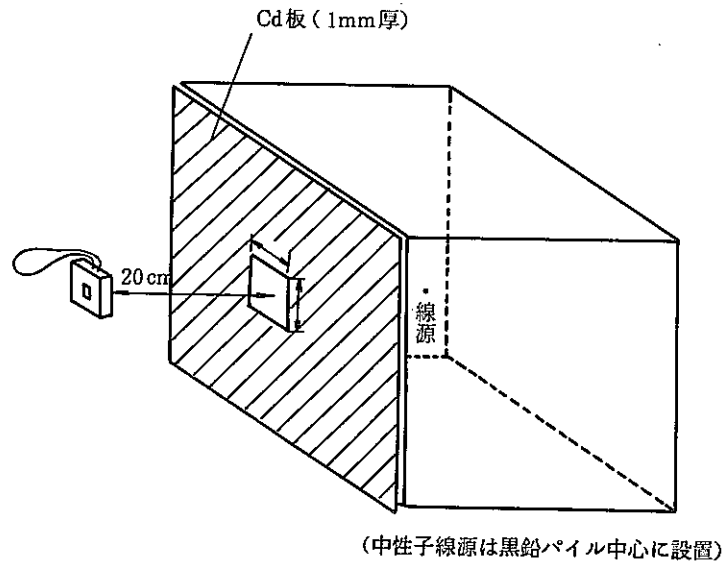
中性子のエネルギー ( MeV )	換算係数* 1 mrem/h あたりの 中性子数 / cm <sup>2</sup> · s	実効線質係数 $\bar{Q}^{**}$
$2.5 \times 10^{-8}$ (熱中性子)	260	2.3
$1 \times 10^{-7}$	240	2
$1 \times 10^{-6}$	220	2
$1 \times 10^{-5}$	230	2
$1 \times 10^{-4}$	240	2
$1 \times 10^{-3}$	270	2
$1 \times 10^{-2}$	280	2
$1 \times 10^{-1}$	48	7.4
$5 \times 10^{-1}$	14	11
1	8.5	10.6
2	7.0	9.3
5	6.8	7.8
10	6.8	6.8
20	6.5	6.0
50	6.1	5.0
$1 \times 10^2$	5.6	4.4
$2 \times 10^2$	5.1	3.8
$5 \times 10^2$	3.6	3.2
$1 \times 10^3$	2.2	2.8
$2 \times 10^3$	1.6	2.6
$3 \times 10^3$	1.4	2.5

\* 深さ—線量当量曲線の最大において計算された値

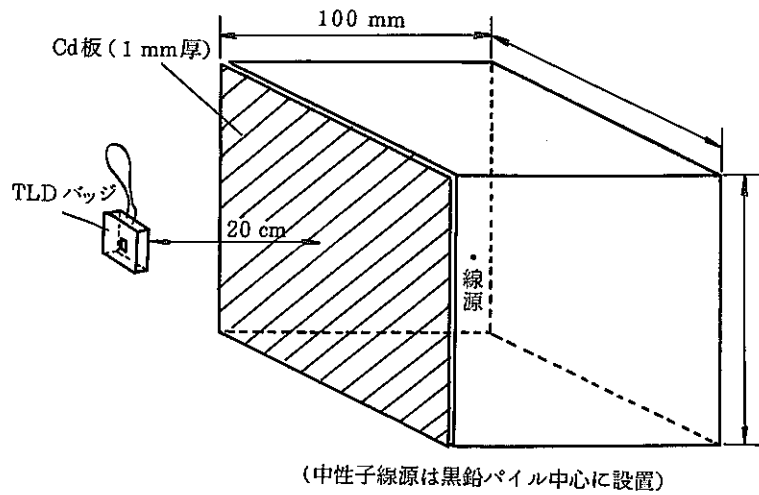
\*\* 線量当量の最大値を、その最大値が現れた深さにおける吸収線量で除して得た値 (ICRP, Pub. 21)

表6-2. 中性子線源一覧表

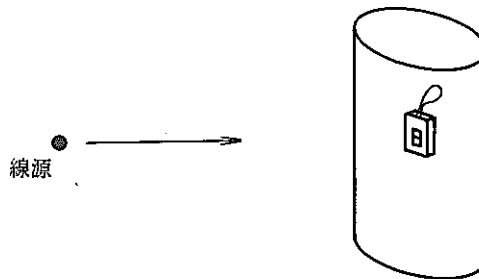
線源	設置場所	強度	線量率			
			Nf	Nep	Nth	r
$^{252}\text{Cf}$	校正室	3.7mCi $1.61 \times 10^7 \text{n/s}$ (1982.10.1)	27.6 mrem/hr at 80 cm	-	-	2.0 mR/hr at 80 cm
$^{252}\text{Cf}$	F棟	140 $\mu\text{Ci}$ $6.2 \times 10^5 \text{n/s}$ (1982.10.1)	0.61 mrem/hr at 50 cm	$6.5 \times 10^{-2} \text{mrem/hr}$ ( $15.5 \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ ) 黒鉛パイル中心から 35cm	0.99 mrem/hr ( $2.59 \times 10^2 \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ ) 黒鉛パイル中心から 35cm	0.18 mR/hr at 50 cm
				$2.82 \times 10^{-3} \text{mrem/hr}$ ( $0.68 \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ ) 黒鉛パイル表面から 20cm	$8.9 \times 10^{-3} \text{mrem/hr}$ ( $2.32 \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ ) 黒鉛パイル表面から 20cm	
$^{241}\text{Am-Be}$	校正室	1 Ci $2.42 \times 10^6 \text{n/s}$	3.75 mrem/hr at 80 cm	-	-	0.58 mR/hr at 80 cm



(a) 熱中性子+熱外中性子 ( $2\pi$ 方向)



(b) 熱外中性子照射 ( $2\pi$ 方向)



(c) 速中性子線照射 ( $4\pi$ 方向)

図 6 - 1 中性子線照射の状況

## 6-2. 中性子線の測定原理と線量当量評価式の組立て

### 6-2-1 測定原理

中性子線の測定は ${}^6\text{Li}_2\text{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ と ${}^7\text{Li}_2\text{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 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、図6.2に示すように ${}^6\text{Li}_2\text{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 蛍光体中の ${}^6\text{Li}$ と ${}^{10}\text{B}$ 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、人体において後方散乱されて熱化された中性子を測定する。

第2章で示したように、中性子線量当量の評価はUD-809型線量計を用いて行うが、この線量計は4個のTLD蛍光体とCd, Snのフィルターの組合せにより構成されている。第1素子(#<sub>1</sub>)の ${}^7\text{Li}_2\text{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子は入射 $\gamma$ 線と捕獲 $\gamma$ 線の差引用であり、第2~第4素子(#<sub>2</sub>, #<sub>3</sub>, #<sub>4</sub>)の ${}^6\text{Li}_2\text{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子にて中性子線量の評価を行う。

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 ~ E <sub>cd</sub> ( E <sub>cd</sub> : Cd cut off energy $\approx$ 0.5 eV )
$N_{ep}$ : Epithermal Neutron	E <sub>cd</sub> ~ 数 10 eV
$N_f$ : Fast Neutron	数 10 eV 以上

### 6-2-2 線量当量評価の基本式

中性子線量の評価においては、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表6-3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。

$$T_1 = G_\gamma \phi_\gamma + G_{\gamma,c} \phi_{th} \quad \dots\dots (6.1)$$

$$T_2 = G_{th} \phi_{th} + (1 + b_{Bep}) G_{ep} \phi_{ep} + C_{Bep} G_f \phi_f + G_\gamma \phi_\gamma + G_{\gamma,c} \phi_{th} \quad \dots\dots (6.2)$$

$$T_3 = (1 + b_{Bep}) G_{ep} \phi_{ep} + C_{Bep} G_f \phi_f + G_\gamma \phi_\gamma + G_{\gamma,c} \phi_{th} \quad \dots\dots (6.3)$$

$$T_4 = a_{Bth} G_{th} \phi_{th} + (1 + b_{Bth} + b_{Bep}) G_{ep} \phi_{ep} + (C_{Bth} + C_{Bep}) G_f \phi_f + G_\gamma \phi_\gamma + G_{\gamma,c} \phi_{th} \quad \dots\dots (6.4)$$

$\phi$  : Neutron fluence [  $\text{n} / \text{cm}^2$  ]

$T$  : Luminescence [  $\text{mR} \cdot \text{eq} - \gamma$  ]

$G$  : fluence から luminescence への変換係数 [  $\text{mR} \cdot \text{eq} - \gamma / \text{n} / \text{cm}^2$  ]

$G_\gamma$  : gamma rays conversion factor [ " ]

$G_{\gamma,c}$  : capture gamma rays " [ " ]

$G_{th}$  : thermal neutron conversion factor ( mR•eq- $\gamma$ /n/cm<sup>2</sup> )

$G_{ep}$  : 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数であるが, 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

$$H_f = \Gamma_f \cdot G_f \cdot \phi_f \quad \dots\dots (6-5)$$

$$H_{ep} = \Gamma_{ep} \cdot G_{ep} \cdot \phi_{ep} \quad \dots\dots (6-6)$$

$$H_{th} = \Gamma_{th} \cdot G_{th} \cdot \phi_{th} \quad \dots\dots (6-7)$$

但し  $\Gamma$  : { mrem/mR•eq- $\gamma$  }

にて示されるため, これらの関係と(6-1)(6-2)(6-3)(6-4)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熱量評価式を表 6-4 に示す。

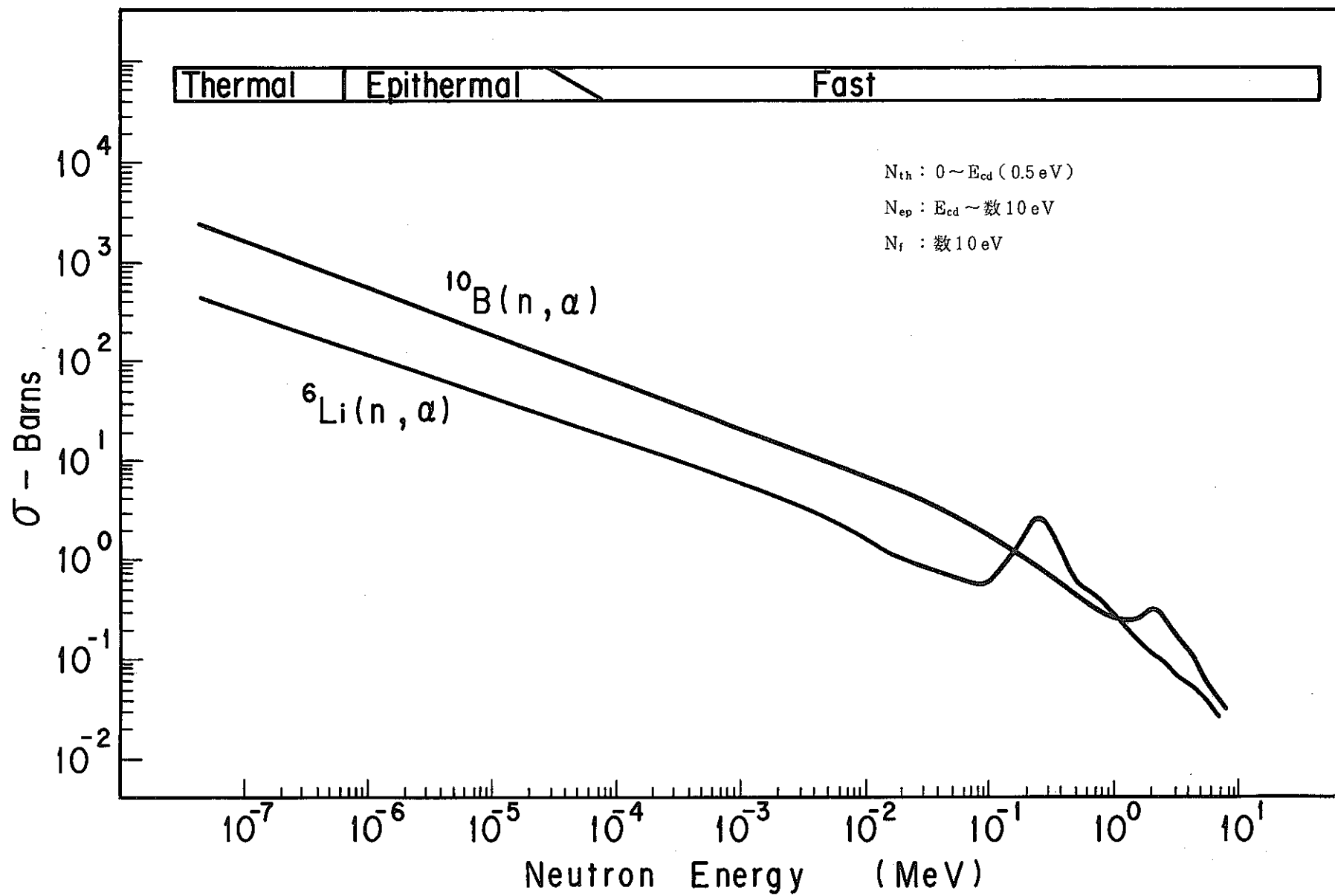
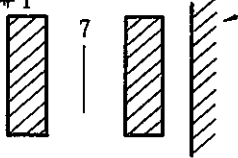
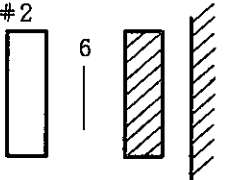
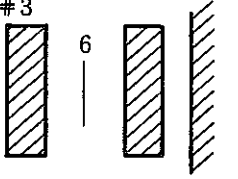
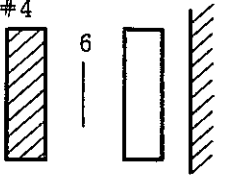
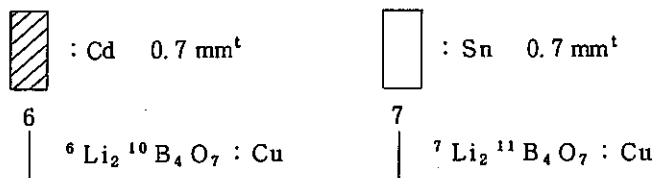


図6-2  $^6\text{Li}$ ,  $^{10}\text{B}$ , 中性子線エネルギーに対する核反応断面積



表 6-3 TLD 素子と各放射線との関係

シールド構成及びTLD	$\phi_{th}$	$\phi_{ep}$	$\phi_f$	$\phi_r$
#1 				$\gamma + \gamma_c$
#2 	1	1 $b_{BeP}$	$C_{BeP}$	$\gamma + \gamma_c$
#3 		1 $b_{BeP}$	$C_{BeP}$	$\gamma + \gamma_c$
#4 	$a_{Bth}$	1 $b_{Bth}$ $b_{BeP}$	$C_{Bth}$ $C_{BeP}$	$\gamma + \gamma_c$



- $a_{Bth}$  : 入射  $\phi_{th}$  から 後方散乱により  $\phi_{th}$  する割合
- $b_{Bth}$  : 入射  $\phi_{ep}$  から 後方散乱により  $\phi_{th}$  する割合
- $b_{BeP}$  : 入射  $\phi_{ep}$  から 後方散乱により  $\phi_{ep}$  する割合
- $C_{Bth}$  : 入射  $\phi_f$  から 後方散乱により  $\phi_{th}$  する割合
- $C_{BeP}$  : 入射  $\phi_f$  から 後方散乱により  $\phi_{ep}$  する割合
- $\gamma_c$  : 捕獲  $\gamma$  線量
- $\phi_{th}$  : 熱中性子フルエンス ( $n/cm^2$ )
- $\phi_{ep}$  : 熱外中性子フルエンス ( $n/cm^2$ )
- $\phi_f$  : 速中性子フルエンス ( $n/cm^2$ )

表6-4 中性子線量当量評価の基本式

Energy Group	Neutron Dose Equivalent Evaluation Formula (rem)
Fast Neutron Dose Equivalent	$H_f = \Gamma_f \cdot G_f \cdot \phi_f = \Gamma_f \left( \frac{1 + b_{Bep}}{C_{Bth} + b_{Bep} \cdot C_{Bth} - b_{Bth} \cdot C_{Bep}} \right) \{ (T_4 - T_3) - a_{Bth} (T_2 - T_3) - \frac{b_{Bth}}{1 + b_{Bep}} (T_3 - T_1) \}$
Epithermal Neutron Dose Equivalent	$H_{ep} = \Gamma_{ep} \cdot G_{ep} \cdot \phi_{ep} = \Gamma_{ep} \left[ \left( \frac{1}{1 + b_{Bep}} + \frac{b_{Bth} \cdot C_{Bep}}{1 + b_{Bep}} \cdot \frac{1}{C_{Bth} + b_{Bep} \cdot C_{Bth} - b_{Bth} \cdot C_{Bep}} \right) (T_3 - T_1) - \frac{C_{Bep}}{C_{Bth} + b_{Bep} \cdot C_{Bth} - b_{Bth} \cdot C_{Bep}} \times \{ (T_4 - T_3) - a_{Bth} (T_2 - T_3) \} \right]$
Thermal Neutron Dose Equivalent	$H_{th} = \Gamma_{th} \cdot G_{th} \cdot \phi_{th} = \Gamma_{th} (T_2 - T_3)$

## 6-2-3 中性子線量当量評価式中の係数（反射率）の算出

実際に線量評価式を決定するには前項で示した線量評価基本式における各係数を具体的な数値をして求める必要がある。前回の報告書<sup>2)</sup>においてはベークライト製の試作バッジケースに中性子線量計を収納してファントムに密着させた状態で照射試験を行い線量評価式が求められている。そこで今回は、中性子線量計を最終仕様のUD-887 PH1ケースに入れてファントムから1.5 cm離れた状態で、前回と同様の方法により線量評価式を決定した。

## a. 算出法の基本

TLD バッジを用いて線量当量評価式中の係数（反射率）を求めるには以下に示すフィルタ構成の組合せに既知のエネルギースペクトルをもつ中性子照射を行う。

今、照射条件として、RI 速中性子線源(<sup>252</sup>Cf, Am-Be)のみでの照射、黒鉛パイルを用いた熱外中性子と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8 cm × 8 cm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20 cm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。

b. 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6-2-2で与えられたものに準ずる。

Cd | 6 | Sn phantom  
 $L_1 = G_{ep} \phi_{ep} + G_r \phi_r + G_{r \cdot c} \phi_{th}$  (6.8)

Cd | 6 | Sn  
 $L_2 = a_{Bth} G_{th} \phi_{th} + (1 + b_{Bth} + b_{Bep}) G_{ep} \phi_{ep} + G'_r \phi'_r + G'_{r \cdot c} \phi'_{th}$  (6.9)

Cd | 6 | Cd  
 $L_3 = G_{ep} \phi_{ep} + G_r \phi_r + G_{r \cdot c} \phi_{th}$  (6.10)

Cd | 6 | Cd  
 $L_4 = (1 + b_{Bep}) G_{ep} \phi_{ep} + G'_r \phi'_r + G'_{r \cdot c} \phi'_{th}$  (6.11)

Sn | 6 | Cd  
 $L_5 = G_{th} \phi_{th} + G_{ep} \phi_{ep} + G_r \phi_r + G_{r \cdot c} \phi_{th}$  (6.12)

Sn | 6 | Cd  
 $L_6 = G_{th} \phi_{th} + (1 + b_{Bep}) G_{ep} \phi_{ep} + G'_r \phi'_r + G'_{r \cdot c} \phi'_{th}$  (6.13)

Cd | 7 | Cd  
 $L_7 = G_r \phi_r + G_{r \cdot c} \phi_{th}$  (6.14)

Cd | 7 | Cd  
 $L_8 = G'_r \phi'_r + G'_{r \cdot c} \phi'_{th}$  (6.15)

$L_n$  : 発光量 [ mR·eq-r ]

6 :  ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7$  : Cu      | :  ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  : Cu

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

$$\therefore b_{\text{Bep}} = \frac{L_6 + L_7 - L_5 - L_8}{L_1 - L_7} \quad (6.16)$$

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

$$\therefore a_{\text{Bth}} = \frac{1}{L_5 - L_3} \left\{ (L_2 - L_4) - \frac{L'_2 - L'_4}{L'_1 - L'_7} (L_1 - L_7) \right\} \quad (6.17)$$

$\therefore L'_n$  は熱外中性子のみでの照射の発行量

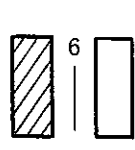
c. 熱外中性子のみの照射 ( $\phi_{ep}$ )

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。

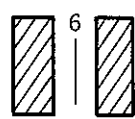
Phantom



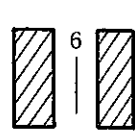
$$L'_1 = G_{ep} \phi_{ep} + G_T \phi_T + G_{T \cdot c} \phi_{th} \quad (6.18)$$



$$L'_2 = (1 + b_{Bth} + b_{Bep}) G_{ep} \phi_{ep} + G'_T \phi'_T + G'_{T \cdot c} \phi'_{th} \quad (6.19)$$



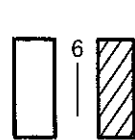
$$L'_3 = G_{ep} \phi_{ep} + G_T \phi_T + G_{T \cdot c} \phi_{th} \quad (6.20)$$



$$L'_4 = (1 + b_{Bep}) G_{ep} \phi_{ep} + G'_T \phi'_T + G'_{T \cdot c} \phi'_{th} \quad (6.21)$$



$$L'_5 = G_{ep} \phi_{ep} + G_T \phi_T + G_{T \cdot c} \phi_{th} \quad (6.22)$$



$$L'_6 = (1 + b_{Bep}) G_{ep} \phi_{ep} + G'_T \phi'_T + G'_{T \cdot c} \phi'_{th} \quad (6.23)$$



$$L'_7 = G_T \phi_T + G_{T \cdot c} \phi_{th} \quad (6.24)$$



$$L'_8 = G'_T \phi'_T + G'_{T \cdot c} \phi'_{th} \quad (6.25)$$

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

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

$L'_n$  : 発光量 ( mR · eq - r )

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

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

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

$$L'_4 = L'_6$$

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

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

$$\therefore b_{\text{Bth}} = \frac{L'_2 - L'_4}{G_{\text{ep}} \phi_{\text{ep}}} = \frac{L'_1 - L'_4}{L'_1 - L'_7} \quad (6.26)$$

$$\begin{aligned} \therefore b_{\text{Bep}} &= \frac{L'_6 - L'_8}{L'_1 - L'_7} - 1 = \frac{L'_6 + L'_7 - L'_1 - L'_8}{L'_1 - L'_7} \\ &= \frac{L'_6 + L'_7 - L'_3 - L'_8}{L'_3 - L'_7} \quad (6.27) \end{aligned}$$

d. 速中性子のみの照射 ( $\phi_f$ )

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。

$$L_1' = G_T \phi_T + G_{T \cdot c} \phi_{th} \quad (6.28)$$

$$L_2' = (C_{Bth} + C_{Bth}) G_f \phi_f + G_T' \phi_T' + G_{T \cdot c}' \phi_{th} \quad (6.29)$$

$$L_3' = G_T \phi_T + G_{T \cdot c} \phi_{th} \quad (6.30)$$

$$L_4'' = C_{Bep} G_f \phi_f + G_T' \phi_T' + G_{T \cdot c}' \phi_{th} \quad (6.31)$$

$$L_5'' = G_T \phi_T + G_{T \cdot c} \phi_{th} \quad (6.32)$$

$$L_6'' = C_{Bep} G_f \phi_f + G_T' \phi_T' + G_{T \cdot c}' \phi_{th} \quad (6.33)$$

$$L_7'' = G_T \phi_T + G_{T \cdot c} \phi_{th} \quad (6.34)$$

$$L_8'' = G_T' \phi_T' + G_{T \cdot c}' \phi_{th} \quad (6.35)$$

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

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

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

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

$$C_{Bth} = \frac{L_2'' - L_4''}{G_f \phi_{th}} \quad (6.36)$$

$$C_{Bep} = \frac{L_4'' - L_8''}{G_f \phi_f} \quad (6.37)$$



6-2-4 各反射率の測定および中性子線量当量評価式の決定

a. 測定結果

(イ) 熱外中性子と熱中性子の混在照射

照射条件：安管部 F棟

黒鉛パイル 1000 × 1000 × 1000 mm

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 20 cm

照射時間 24時間

照射線量  $H_{th} = 0.26$  mrem

$H_{ep} = 0.082$  mrem

使用ハンガー UD-887 PHI

TLD UD-809 P

測定結果： $L_1 = 11.0$  mR·eq- $\gamma$

$L_2 = 25.5$  "

$L_3 = 10.9$  "

$L_4 = 14.5$  "

$L_5 = 20.7$  "

$L_6 = 25.0$  "

$L_7 = 3.3$  "

$L_8 = 4.2$  "

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

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

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

(ロ) 熱外中性子のみの照射

照射条件：安管部 F棟

黒鉛パイル 1000 × 1000 × 1000 mm

パイル表面 全面 Cd 1mmt 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 20 cm

照射時間 24時間

照射線量  $H_{ep} = 0.082$  mrem

使用ハンガー UD-887 PH1

TLD UD-809 P

測定結果：  $L'_1 = 10.5 \text{ mR} \cdot \text{eq} - r$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

故に平均値として

$$G_{ep} \phi_{ep} = 7.0 \text{ mR} \cdot \text{eq} - r$$

となる。

次に ( 6.47 ), ( 6.48 ) 式より

$$b_{Bth} = \frac{L'_2 - L'_4}{G_{ep} \phi_{ep}} = \frac{13.5 - 10.0}{7.0} = 0.50$$

$$b_{Bep} = \frac{L'_6 - L'_8 - G_{ep} \phi_{ep}}{G_{ep} \phi_{ep}} = \frac{12.0 - 3.7 - 7.0}{7.0} = 0.33$$

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。

次に  $G_{th} \phi_{th} = L_5 - L_3 = 9.8 \text{ mR} \cdot \text{eq} - r$

更に  $L_2 - L_4 = \alpha_{Bth} G_{th} \phi_{th} + b_{Bth} G_{ep} \phi_{ep}$  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。

黒鉛パイル表面より距離 20 cm 地点での熱中性子，熱外中性子のフルエンス率及び線量率は

$$\begin{cases} \phi_{th} : 2.78 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s} \\ H_{th} : 1.07 \times 10^{-2} \text{ mrem/hr} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \phi_{ep} : 0.81 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s} \\ H_{ep} : 3.40 \times 10^{-3} \text{ mrem/hr} \end{cases}$$

又，照射時間 24 時間でのフルエンス及び線量に直すと

$$\begin{cases} \phi_{th} = 2.43 \times 10^5 \text{ n/cm}^2 \\ H_{th} = 0.26 \text{ mrem} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \phi_{ep} = 7.07 \times 10^4 \text{ n/cm}^2 \\ H_{ep} = 0.082 \text{ mrem} \end{cases}$$

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

$$G_{ep} \phi_{ep} = 7.0 \text{ mR} \cdot \text{eq} - r$$

$$\therefore G_{ep} = \frac{7.0}{\phi_{ep}} = \frac{7.0}{7.07 \times 10^4}$$

$$= 9.90 \times 10^{-5} \text{ mR} \cdot \text{eq} - r / \text{n/cm}^2$$

$$G_{th} \phi_{th} = 9.8 \text{ mR} \cdot \text{eq} - r$$

$$\therefore G_{th} = \frac{9.8}{\phi_{th}} = \frac{9.8}{2.43 \times 10^5}$$

$$= 4.03 \times 10^{-5} \text{ mR} \cdot \text{eq} - r / \text{n/cm}^2$$

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

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

$$\Gamma_{ep} = \frac{H_{ep}}{G_{ep} \cdot \phi_{ep}} = \frac{0.082}{7.0} = 0.012 \text{ mrem/mR} \cdot \text{eq} - r$$

$$\Gamma_{th} = \frac{H_{th}}{G_{th} \cdot \phi_{th}} = \frac{0.26}{9.8} = 0.027 \text{ mrem/mR} \cdot \text{eq} - r$$

(ハ) 速中性子のみの照射

$^{252}\text{Cf}$  中性子線源による照射

照射条件：安管部計測器管理棟（校正室）

線源  $^{252}\text{Cf}$ （ $4\pi$  方向照射）

距離 80 cm

照射線源 42 mrem

TLD バッジと phantom の間隔 15 mm

バッジケース UD-887 PH1

TLD UD-809p

測定結果

# <sub>1</sub>	<sup>7</sup> Li <sub>2</sub> <sup>11</sup> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> (Cd-Cd) : 4.33 ± 0.53 mR·eq-γ	L <sub>8</sub> <sup>''</sup>
# <sub>2</sub>	<sup>6</sup> Li <sub>2</sub> <sup>10</sup> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> (Sn-Cd) : 8.72 ± 0.86 mR·eq-γ	L <sub>6</sub> <sup>''</sup>
# <sub>3</sub>	<sup>6</sup> Li <sub>2</sub> <sup>10</sup> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> (Cd-Cd) : 8.78 ± 0.76 mR·eq-γ	L <sub>4</sub> <sup>''</sup>
# <sub>4</sub>	<sup>6</sup> Li <sub>2</sub> <sup>10</sup> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> (Cd-Sn) : 23.58 ± 1.11 mR·eq-γ	L <sub>2</sub> <sup>''</sup>

この結果より

$$\frac{C_{\text{Bth}}(C_f)}{C_{\text{Bep}}(C_f)} = \frac{L_2'' - L_4''}{L_4'' - L_8''} = \frac{23.58 - 8.78}{8.78 - 4.33} = 3.33$$

となる。また

$$L_2'' - L_4'' = C_{\text{Bth}(cf)} \cdot G_f \cdot \phi_f = C_{\text{Bth}(cf)} \cdot \frac{H_f}{\Gamma_f}$$

より

$$\frac{\Gamma_f}{C_{\text{Bth}(cf)}} = \frac{H_f}{L_2'' - L_4''} = \frac{4.2}{23.58 - 8.78} = 2.84$$

となる。

ここで、C<sub>Bth</sub>、C<sub>Bep</sub>の各反射率および変換係数Γ<sub>f</sub>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<sub>Bth</sub>(C<sub>f</sub>)/C<sub>Bep</sub>(C<sub>f</sub>)、およびΓ<sub>f</sub>/C<sub>Bth</sub>(C<sub>f</sub>)の値が求まっていれば充分である。

## (二) Am-Be 中性子線源による照射

照射条件：安管部計測器管理棟（校正室）

線源 Am-Be（4π方向照射）

線源間距離 80 cm

照射線量 29.7 mrem

with phantom

TLDバッジとファントムの間隔 15 mm

バッジケース UD-889 PH1

TLD UD-809 p

測定結果

# <sub>1</sub>	<sup>7</sup> Li <sub>2</sub> <sup>11</sup> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> (Cd-Cd) : 2.4 ± 0.41 mR·eq-γ	L <sub>8</sub> <sup>''</sup>
# <sub>2</sub>	<sup>6</sup> Li <sub>2</sub> <sup>10</sup> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> (Sn-Cd) : 4.8 ± 1.58 "	L <sub>6</sub> <sup>''</sup>
# <sub>3</sub>	<sup>6</sup> Li <sub>2</sub> <sup>10</sup> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> (Cd-Cd) : 4.6 ± 1.30 "	L <sub>4</sub> <sup>''</sup>
# <sub>4</sub>	<sup>6</sup> Li <sub>2</sub> <sup>10</sup> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> (Cd-Sn) : 10.3 ± 0.83 "	L <sub>2</sub> <sup>''</sup>

この結果より

$$\frac{C_{\text{Bth}}(\text{Am-Be})}{C_{\text{Bep}}(\text{Am-Be})} = \frac{L_2'' - L_4''}{L_4'' - L_8''} = \frac{10.3 - 4.6}{4.6 - 2.4} = 2.59$$

となる。また

$$L_2'' - L_4'' = C_{\text{Bth}}(\text{Am-Be}) \cdot G_f \cdot \phi_f = C_{\text{Bth}}$$

より

$$\frac{\Gamma_f}{C_{\text{Bth}}(\text{Am-Be})} = \frac{H_f}{L_2'' - L_4''} = \frac{29.7}{10.3 - 4.6} = 5.26$$

となる。

(ホ) PuO<sub>2</sub> 中性子線による照射

照射条件：プルトニウム燃料部第二開発室 F103 room

線源 PuO<sub>2</sub> 7 kg

線源との距離 PuO<sub>2</sub> より約 60 cm

(グローブボックス表面より 40 cm)

with phantom

照射線量 51.9 mrem

TLD バッジを phantom の間隔 15 mm

バッジケース UD-887 PH1

TLD UD-809P

測定結果

#1	<sup>7</sup> Li <sub>2</sub> <sup>11</sup> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> (Cd-Cd): 11.6 mR·eq-γ	L <sub>8</sub> ''
#2	<sup>6</sup> Li <sub>2</sub> <sup>10</sup> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> (Sn-Cd): 26.7 "	L <sub>6</sub> ''
#3	<sup>6</sup> Li <sub>2</sub> <sup>10</sup> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> (Cd-Cd): 21.7 "	L <sub>4</sub> ''
#4	<sup>6</sup> Li <sub>2</sub> <sup>10</sup> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> (Cd-Sn): 39.9 "	L <sub>2</sub> ''

この結果より

$$\frac{C_{\text{Bth}}(\text{PuO}_2)}{C_{\text{Bep}}(\text{PuO}_2)} = \frac{L_2'' - L_4''}{L_4'' - L_8''} = \frac{39.9 - 21.7}{21.7 - 11.6} = 1.74$$

となる。また

$$L_2 - L_4 = C_{\text{Bth}}(\text{PuO}_2) \cdot G_f \cdot \phi_f = C_{\text{Bth}}(\text{PuO}_2) \cdot \frac{H_f}{\Gamma_f}$$

より

$$\frac{\Gamma_f}{C_{\text{Bth}}(\text{PuO}_2)} = \frac{H_f}{L_2'' - L_4''} = \frac{51.9}{39.9 - 21.7} = 2.86$$

となる。

表 6 - 5 中性子線量当量評価式中の係数值

項 目	V a l u e	
	今回 (バッジとphantom間15mm)	前回 (バッジとphantomを密着)
Albedo Rate of Thermal Neutron	$\alpha_{Bth} = 0.765$	$\alpha_{Bth} = 0.796$
Albedo Rate of Epithermal Neutron	$b_{Bth} = 0.50$ $b_{Bep} = 0.39$	$b_{Bth} = 0.224$ $b_{Bep} = 0.163$
Albedo Rate of Fast Neutron	$C_{Bth}(Cf)$ : 個々には評価せず $C_{Bth}(Am-Be)$ : " $C_{Bth}(PuO_2)$ : " $C_{Bep}(Cf)$ : " $C_{Bep}(Am-Be)$ : " $C_{Bep}(PuO_2)$ : "	$C_{Bth}(Cf) = 0.493$ $C_{Bth}(Am-Be) = 0.324$ $C_{Bth}(PuO_2) = 0.450$ $C_{Bep}(Cf) = 0.0879$ $C_{Bep}(Am-Be) = 0.0913$ $C_{Bep}(PuO_2) = 0.219$
Conversion Factor of Neutron Flux to TLD Luminescence ( $mR \cdot eq - r/n/cm^2$ )	$G_{th} = 4.03 \times 10^{-5}$ $G_{ep} = 9.90 \times 10^{-5}$ $G_f$ : 個々には評価せず	$G_{th} = 3.23 \times 10^{-5}$ $G_{ep} = 9.29 \times 10^{-5}$ $G_f(Cf) = 3.83 \times 10^{-5}$ $G_f(Am-Be) = 3.32 \times 10^{-5}$
Conversion Factor ( $mrem/mR \cdot eq - r$ )	$\Gamma_{th} = 0.027$ $\Gamma_{ep} = 0.012$ $\Gamma_f$ (独自には評価せず)	$\Gamma_{th} = 0.033$ $\Gamma_{ep} = 0.012$ $\Gamma_f = 1.0$ (仮定)
$K_f$	$K_f(Cf) = 0.31$ $K_f(Am-Be) = 0.16$ $K_f(PuO_2) = 0.28$	$K_f(Cf) = 0.422$ $K_f(Am-Be) = 0.306$ $K_f(PuO_2) = 0.408$
another	$\frac{C_{Bth}(Cf)}{C_{Bep}(Cf)} = 3.33$ $\frac{C_{Bth}(Am-Be)}{C_{Bep}(Am-Be)} = 2.59$ $\frac{C_{Bth}(PuO_2)}{C_{Bep}(PuO_2)} = 1.74$ $\Gamma_f/C_{Bth}(Cf) = 2.84$ $\Gamma_f/C_{Bth}(Am-Be) = 5.26$ $\Gamma_f/C_{Bth}(PuO_2) = 2.86$	-

これまでの熱外中性子だけの照射，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表 6-5 のようになる。尚表 6-5 には参考として前回の照射試験<sup>2)</sup>（ベークライト製の試作バッジケースを phantom に密着）で求めた値も一諸に示す。

b. 中性子線量当量評価式の算出

表 6-4 の各線量評価式を次の様に変形する。

$$\begin{aligned}
 D_f &= \Gamma_f \cdot \left( \frac{1+b_{\text{Bep}}}{C_{\text{Bth}}+b_{\text{Bep}} C_{\text{Bth}}-b_{\text{Bth}} C_{\text{Bep}}} \right) \left\{ (T_4-T_3) - \alpha_{\text{Bth}} \cdot (T_2-T_3) - \frac{b_{\text{Bth}}}{1+b_{\text{Bep}}} (T_3-T_1) \right\} \\
 &= \frac{\Gamma_f}{C_{\text{Bth}}} \cdot \frac{1+b_{\text{Bep}}}{1+b_{\text{Bep}}-b_{\text{Bth}} \cdot \frac{C_{\text{Bep}}}{C_{\text{Bth}}}} \left\{ (T_4-T_3) - \alpha_{\text{Bth}} \cdot (T_2-T_3) - \frac{b_{\text{Bth}}}{1+b_{\text{Bep}}} (T_3-T_1) \right\} \quad (6-38)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D_{\text{ep}} &= \Gamma_{\text{ep}} \cdot \left\{ \left[ \frac{1}{1+b_{\text{Bep}}} + \frac{b_{\text{Bth}} \cdot C_{\text{Bep}}}{1+b_{\text{Bep}}} \cdot \frac{1}{C_{\text{Bth}}+b_{\text{Bep}} \cdot C_{\text{Bth}}-b_{\text{Bth}} \cdot C_{\text{Bep}}} \right] \times (T_3-T_1) \right. \\
 &\quad \left. - \frac{C_{\text{Bep}}}{C_{\text{Bth}}+b_{\text{Bep}} \cdot C_{\text{Bth}}-b_{\text{Bth}} \cdot C_{\text{Bep}}} \left\{ (T_4-T_3) - \alpha_{\text{Bth}} (T_2-T_3) \right\} \right\} \\
 &= \Gamma_{\text{ep}} \cdot \left\{ \left[ \frac{1}{1+b_{\text{Bep}}} + \frac{b_{\text{Bth}}}{1+b_{\text{Bep}}} \cdot \frac{1}{\frac{C_{\text{Bth}}}{C_{\text{Bep}}} + b_{\text{Bep}} \frac{C_{\text{Bth}}}{C_{\text{Bep}}} - b_{\text{Bth}}} \right] \times (T_3-T_1) \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{\frac{C_{\text{Bth}}}{C_{\text{Bep}}} + b_{\text{Bep}} \frac{C_{\text{Bth}}}{C_{\text{Bep}}} - b_{\text{Bth}}} \cdot \left\{ (T_4-T_3) - \alpha_{\text{Bth}} \cdot (T_2-T_3) \right\} \right\} \quad (6-39)
 \end{aligned}$$

$$D_{\text{th}} = \Gamma_{\text{th}} (T_2-T_3) \quad (6-40)$$

(6-59) (6.60) (6.61) 式に表 6-5 の中の各値を代入し，最終仕様の TLD バッジを phantom から 15mm 離して固定した状態での中性子線量当量評価式を表 6-6 に示す。また各速中性子線源に対する  $\Gamma_f$  を中性子の平均エネルギーに対してプロットしたものを図 6-6 に示す。

表 6-6 各中性子線源場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
$^{252}\text{Cf}$	$D_f = 3.21 \cdot \{(T_4 - T_3) - 0.765(T_2 - T_3) - 0.36(T_3 - T_1)\}$ $D_{ep} = 0.0094 \cdot \{(T_3 - T_1) + 0.23(T_2 - T_3) - 0.30(T_4 - T_3)\}$ $D_{th} = 0.027(T_2 - T_3)$
$^{241}\text{Am} - \text{Be}$	$D_f = 6.12 \cdot \{(T_4 - T_3) - 0.765(T_2 - T_3) - 0.36(T_3 - T_1)\}$ $D_{ep} = 0.0098 \cdot \{(T_3 - T_1) + 0.29(T_3 - T_1) - 0.39(T_4 - T_3)\}$ $D_{th} = 0.027(T_2 - T_3)$
$\text{PuO}_2$	$D_f = 3.60 \cdot \{(T_4 - T_3) - 0.765(T_2 - T_3) - 0.36(T_3 - T_1)\}$ $D_{ep} = 0.011 \cdot \{(T_3 - T_1) + 0.43(T_2 - T_3) - 0.57(T_4 - T_3)\}$ $D_{th} = 0.027(T_2 - T_3)$

注) TLD バッジと phantom 間 1.5 cm



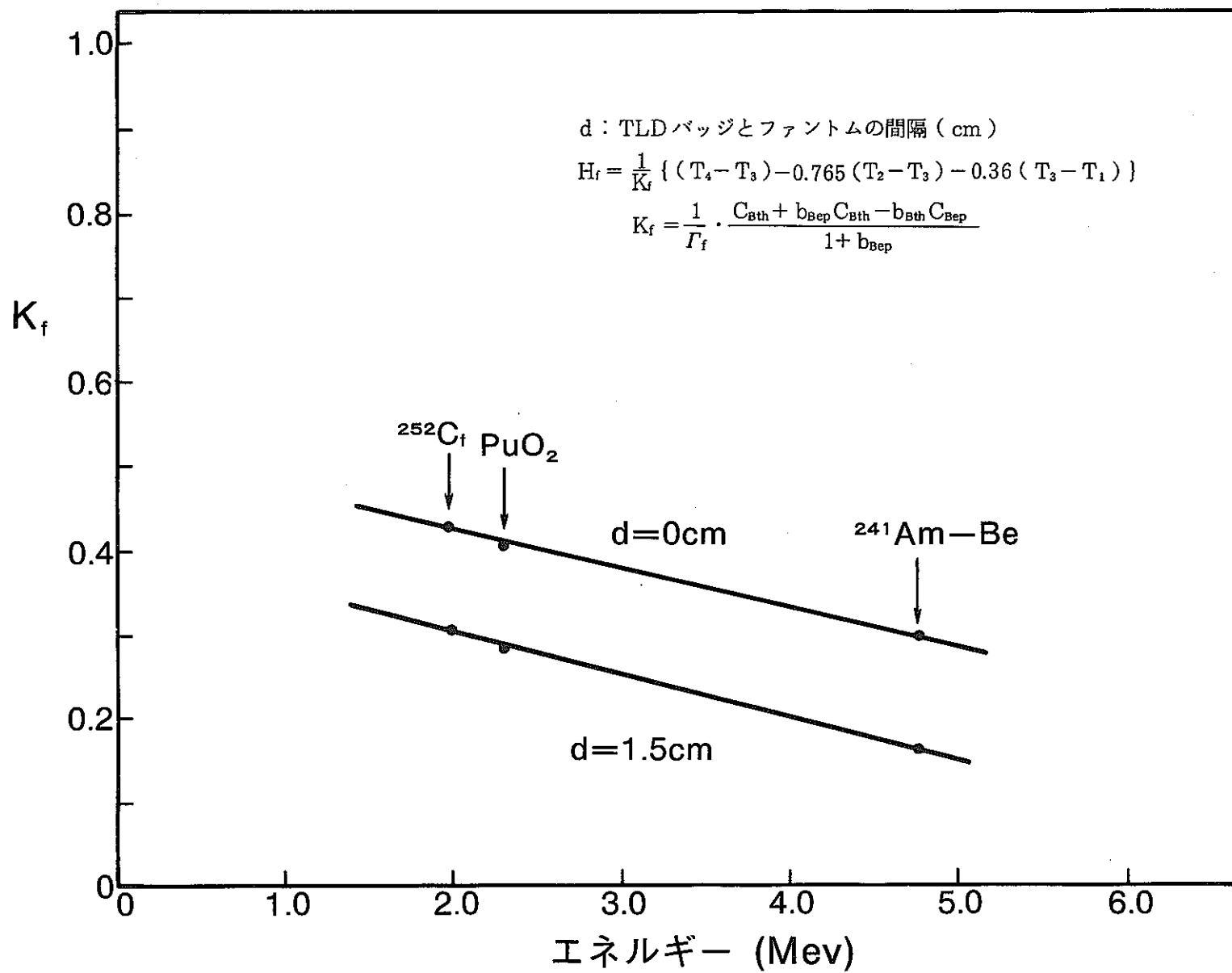


図 6 - 6 速中性子線量当量算出式中の係数  $K_f$  と中性子線エネルギーの関係

### 6-3 中性子線量評価における性能・特性

#### 6-3-1 $\gamma$ (X) 線エネルギー依存性

中性子線量当量評価用の線量計 (UD-809P) をバッジケースに組込んだ状態で、X線・ $\gamma$ 線に対するエネルギーの応答試験を行った。測定結果を図6-7～図6-10に示すが、前回の報告書<sup>2)</sup>とほぼ同様の結果が得られた。

この結果より、各TLD素子 (#<sub>1</sub>, #<sub>2</sub>, #<sub>3</sub>, #<sub>4</sub>) の光子に対するエネルギー依存性はほぼ同じであった。すなわち、CdおよびSnフィルターによる光子の減衰はほぼ同じであり、<sup>6</sup>Li<sub>2</sub><sup>10</sup>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> (Cu) 素子と<sup>7</sup>Li<sub>2</sub><sup>11</sup>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> (Cu) 素子の読取値の相違はほとんどなかった。

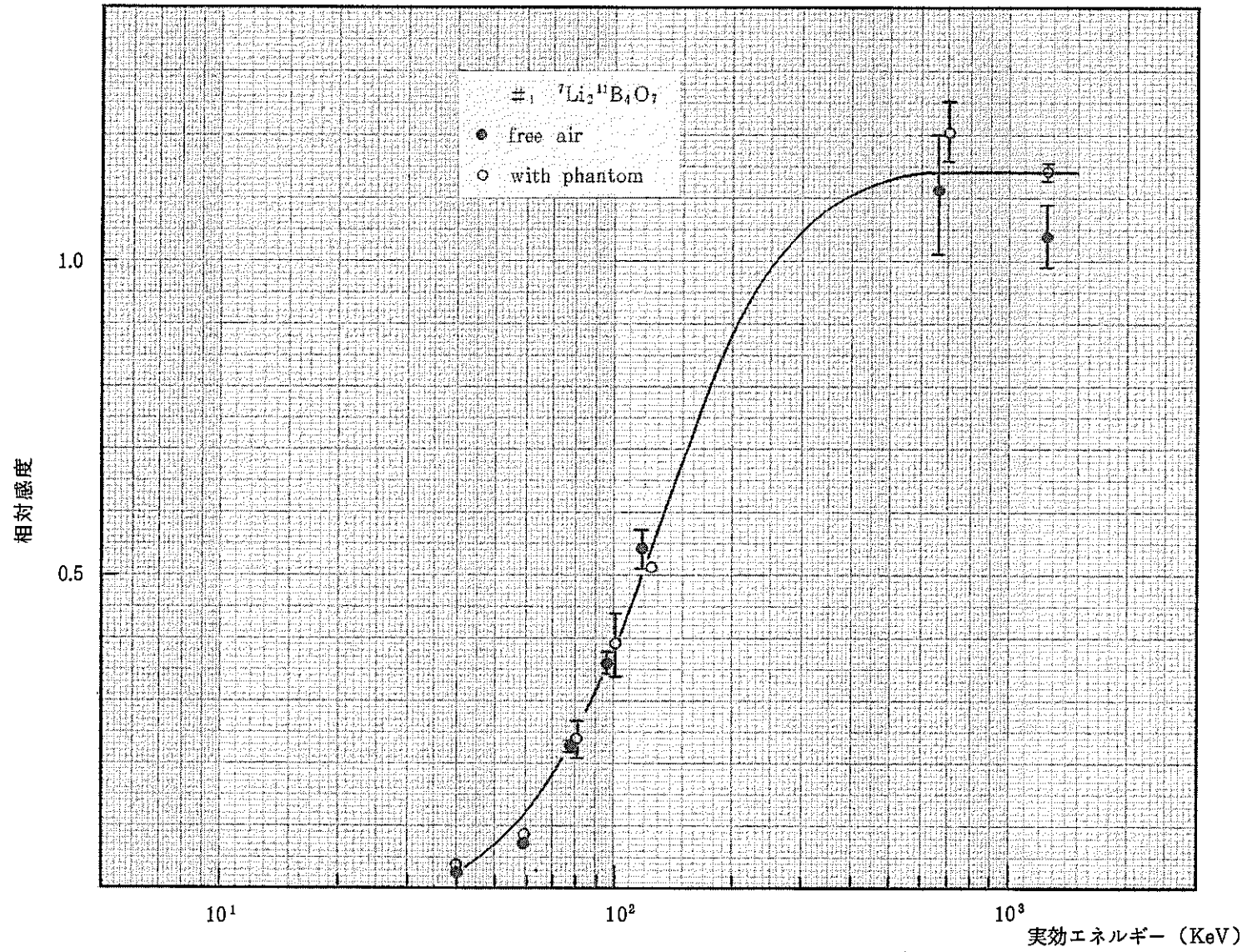


図6-7 中性子線用線量計の  ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$  (Cd-Cd) の  $\gamma$  線エネルギー-応答特性

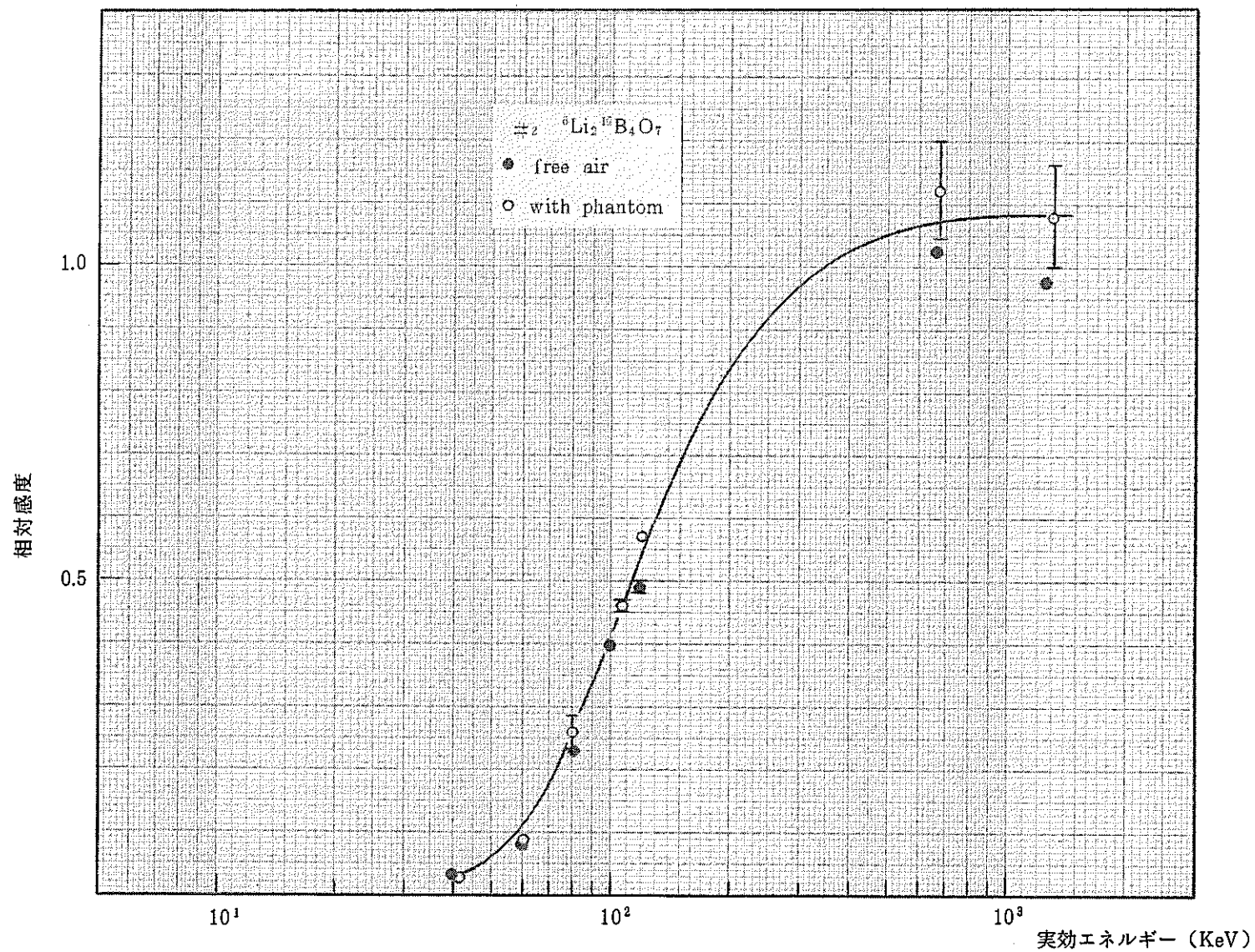


図6-8 中性子線用線量計の ${}^6\text{Li}_2 {}^{10}\text{B}_4\text{O}_7$  (Sn-Cd) の $\gamma$ 線エネルギー応答特性

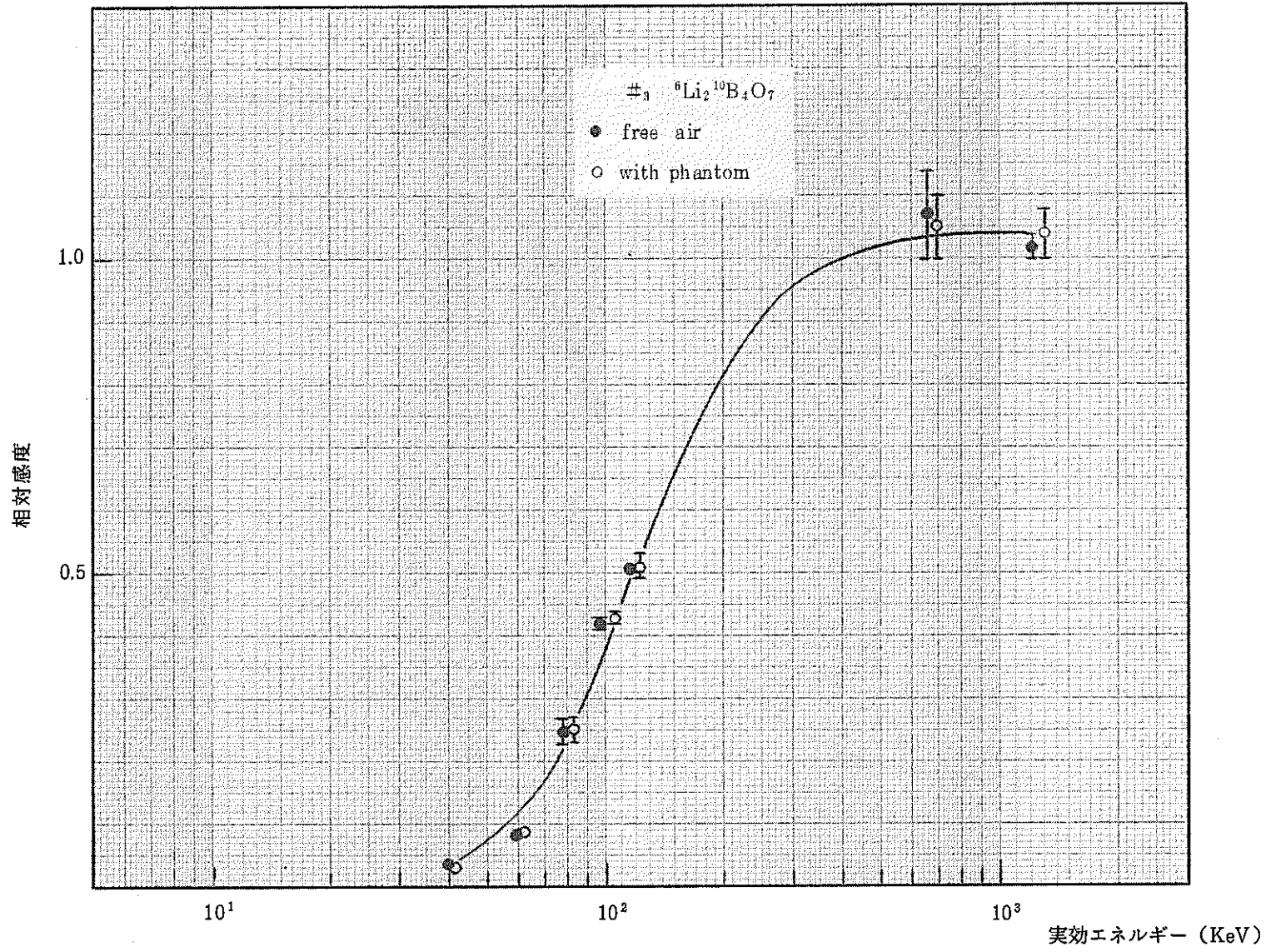


図6-9 中性子線用線量計の ${}^6\text{Li}_2 {}^{10}\text{B}_4\text{O}_7$  (Cd-Cd) の $\gamma$ 線エネルギー-応答特性

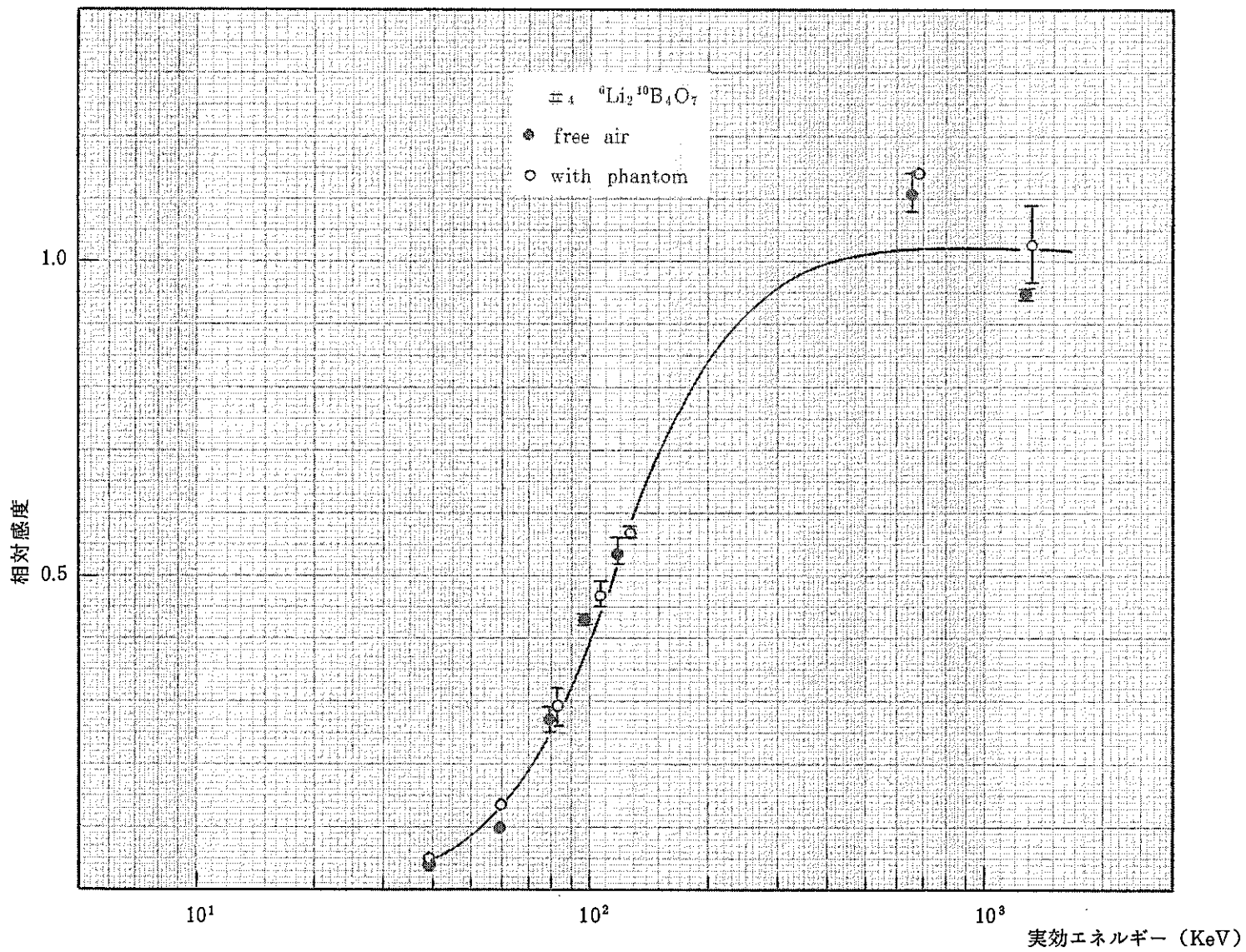


図6-10 中性子線用線量計の ${}^6\text{Li}_2 {}^{10}\text{B}_4\text{O}_7$  (Cd-Sn) の $\gamma$ 線エネルギー応答特性

## 6-3-2 速中性子線に対する感度のバラツキ

速中性子線に対する TLD 素子の感度のバラツキを検討するために、 $^{252}\text{Cf}$  線源を用い、線量計を組み込んだ TLD バッジ 5 個に対し、ファントムと TLD バッジ間の距離を 1.5 cm にした状態で同一条件のもとに照射を行った。尚、線源とファントム表面との距離は 80 cm とし、照射線量は 12 mrem, 28 mrem, 56 mrem, 86 mrem の 4 点とした。

測定結果を表 6-7 に示す。第 1 素子 ( $\#_1$ ) は  $\gamma$  線評価用素子であり、第 2・第 3 エレメント ( $\#_2, \#_3$ ) はフィルターの構成上熱中性子線と熱外中性子線の線量当量評価用素子であるため、速中性子線の照射に対してそれぞれの発光量の読取値は第 4 素子 ( $\#_4$ ) と比較して小さい。各素子の速中性子線照射に対する感度のバラツキを読取値の平均値に対する百分率標準偏差 ( $\sigma_n / \bar{x} \times 100$ ) で考えれば、ほぼ 6% から 8% 程度であり比較的に良好であった。

次に、6-2 章に示す線量当量評価式を用いて計算した線量当量値とその標準偏差も表 6-7 に同時に示す。この結果は、照射線量が 86 mrem で標準偏差が 8.5%、照射線量が 12 mrem で標準偏差が  $\pm 18.7\%$  であった。また、この時照射線量値と測定値から評価した線量当量の平均値との相違はいずれも  $\pm 10\%$  以内であった。

以上のことより、中性子線の単一照射に対する線量評価の精度は、約 20 mrem 以上の線量において評価線量 ( $\bar{x}$ )  $\pm 2\sigma_n$  の照射量からの誤差は  $\pm 20\%$  以内であった。

表 6-7 速中性子線照射に対する感度のバラツキ

照射条件	線量計 No	Luminessence [mR·eq-r]				Hf [mrem]	Hf / Df
		# <sub>1</sub>	# <sub>2</sub>	# <sub>3</sub>	# <sub>4</sub>		
線源 Cf-252 距離 50 cm with phantom (1.5 cm 間隔) 照射線量 Df = 12 mrem	1	2.6	4.3	4.6	8.0	9.6	-
	2	2.7	4.3	5.5	9.3	10.1	-
	3	4.0	5.1	5.0	8.5	11.3	-
	4	2.9	4.8	4.5	9.5	15.1	-
	$\bar{x}$	3.1	4.6	4.9	8.8	11.5	0.96
	$\sigma_n$	0.56	0.34	0.39	0.61	2.2	
	$\sigma_n / \bar{x}$	18%	7.4%	8.0%	6.9%	18.7%	
同上 照射線量 Df = 28 mrem	1	4.8	9.5	7.2	17.2	26.6	-
	2	3.1	9.3	8.5	19.6	27.4	-
	3	4.5	8.1	8.5	16.8	25.5	-
	4	4.2	8.0	8.0	17.7	30.0	-
	$\bar{x}$	4.2	8.7	8.1	17.8	27.1	0.97
	$\sigma_n$	0.64	0.68	0.53	1.07	2.0	
	$\sigma_n / \bar{x}$	15%	7.8%	6.6%	6.0%	7.3%	
同上 照射線量 Df = 56 mrem	1	4.7	14.9	12.6	34.5	55.6	-
	2	5.9	15.0	13.0	36.3	61.7	-
	3	5.6	13.0	12.1	29.9	54.0	-
	4	6.0	15.0	14.9	33.1	48.0	-
	$\bar{x}$	5.6	14.5	13.2	33.5	54.8	0.98
	$\sigma_n$	0.51	0.85	1.06	2.3	4.9	
	$\sigma_n / \bar{x}$	9.2%	5.9%	8.1%	7.0%	8.9%	
同上 照射線量 Df = 86 mrem	1	5.9	22.3	19.6	55.9	94.0	-
	2	6.7	22.0	17.0	45.6	76.0	-
	3	6.5	20.2	17.3	47.7	78.1	-
	4	7.4	20.4	20.3	48.9	86.2	-
	$\bar{x}$	6.6	21.2	18.6	49.5	83.5	0.99
	$\sigma_n$	0.54	0.93	1.4	3.9	7.1	
	$\sigma_n / \bar{x}$	8.1%	4.4%	7.7%	7.8%	8.5%	



### 6-3-3 中性子線照射のくり返し照射に対する再現性

速中性子線に対する中性子線用線量計の再現性の検討を行った。

照射条件は、最終仕様の線量計をバッジケースに組込んでファントムに装着し、線源（Cf-252）とファントム面間の距離を 80 cm、照射線量を 30.1 mrem とした。また、一回の照射に 3 個の線量計を用い、照射は出来るだけ同じ条件で 3 回くり返して行った。

測定結果を表 6-8 に示す。中性子線量計の各 TLD 素子について考えると、前項でも述べたように第 4 素子（#<sub>4</sub>）に比べて第 1～第 3 素子（#<sub>1</sub>～#<sub>3</sub>）の発光量は小さいので誤差が大きく相対的に標準偏差も大きい。第 4 素子（#<sub>4</sub>）について考えれば、30 mrem の照射線量で 3 回のくり返し測定に対する各素子の読取値再現性は約平均値に対する百分率標準偏差で 4～11%であった。

更に、各 TLD 素子の読取線量より 6-2 章の評価式にて算出した線量当量についても、3 回のくり返し測定に対しての再現性を評価したので同時に表 6-8 に示す。この結果では、3 回のくり返し測定に対する線量当量評価の再現性は百分率標準偏差で約 9～14%であった。

表 6-8 中性子線用線量計の速中性子照射に対する再現性

照射条件	線量計 No	回数	読取線量 [mR・eq-γ]				評価線量 [mrem]
			# <sub>1</sub> Cd/ <sup>7</sup> Li <sup>11</sup> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> /Cd	# <sub>2</sub> Sn/ <sup>6</sup> Li <sup>10</sup> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> /Cd	# <sub>3</sub> Cd/ <sup>6</sup> Li <sup>10</sup> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> /Cd	# <sub>4</sub> Cd/ <sup>6</sup> Li <sup>10</sup> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> /Sn	
線源 <sup>252</sup> Cf 線源からの距離 80 cm with phantom (15 mm 間隔) 最終仕様パッケージ 組込 照射線量 25 mrem	1	1	3.3	8.2	5.0	16.6	26.4
		2	2.8	7.5	7.1	16.4	24.6
		3	2.3	7.2	6.0	15.0	21.1
		$\bar{x}$	2.8	7.6	6.0	16.0	24.0
		$\sigma$	0.41	0.42	0.86	0.71	2.2
		$\sigma/\bar{x}$	14.6 %	5.5 %	14.3 %	4.4 %	9.2 %
		2	1	2.9	4.9	5.2	15.2
	2		4.2	6.4	5.9	14.0	22.3
	3		3.1	6.9	6.4	14.5	21.3
	$\bar{x}$		3.4	6.1	5.8	14.6	24.1
	$\sigma$		0.57	0.85	0.49	0.49	3.3
	$\sigma/\bar{x}$		16.8 %	13.9 %	8.4 %	3.4 %	13.6 %
	3		1	3.1	6.2	5.5	15.4
		2	3.2	7.7	6.7	17.5	28.2
		3	2.9	6.7	5.0	16.8	3.4
		$\bar{x}$	3.1	6.9	5.7	16.6	29.5
$\sigma$		0.12	0.62	0.71	0.87	2.8	
$\sigma/\bar{x}$		3.9 %	9.0 %	12.5 %	5.2 %	9.6 %	
4		1	3.2	7.7	8.2	16.0	20.6
	2	2.9	8.1	6.2	16.8	25.5	
	3	2.7	6.9	5.5	14.8	23.1	
	$\bar{x}$	2.9	7.6	6.6	15.9	23.1	
	$\sigma$	0.21	0.50	1.14	0.82	2.0	
	$\sigma/\bar{x}$	7.2 %	6.6 %	17.3 %	5.2 %	8.7 %	

## 6-3-4 TLD バッジとファントム間の距離依存性

実際の放射線作業においてはほとんどの場合において作業服（カバーオールなど）の胸ポケットに TLD バッジを装置しているが、TLD バッジと人体表面の間の距離は必ずしも一定ではない。新型 TLD バッジは中性子線量の測定において人体での中性子線の後方散乱を利用するアルベド法を採用しているため、TLD バッジの人体表面の間の距離によって TLD のレスポンスが変化し、線量評価上の誤差要因となる。このためパラフィンファントムを用い、TLD バッジとパラフィンファントム表面との距離を変えて照射試験を行い、ファントム間距離による感度変化を調べた。

中性子線源として  $^{252}\text{Cf}$  を使用し、線源とファントム表面までの距離は 80 cm にし、照射量は中性子線量で 23 mrem および  $\gamma$  線量で約 2.0 mrem であった。また、TLD バッジとファントム間の距離の変化は、その間に発泡スチロールを入れて固定した。

結果を表 6-9、図 6-11 および図 6-12 に示す。まず、表 6-9 は TLD 素子の発光量の読取値およびこれらの値から表 6-6 に示した速中性子線量評価式（ファントム間距離 1.5 cm の場合の式）にて算出した評価線量を示す。次に 1.5 cm を基準にした時の各距離における第 4 素子（#4）の発光量の相対変化およびアルベド係数（ $C_{\text{Bth}}$ ）の相対変化を図 6-11 に示した。さらに、評価中性子線量の変化については図 6-12 に図化して示した。

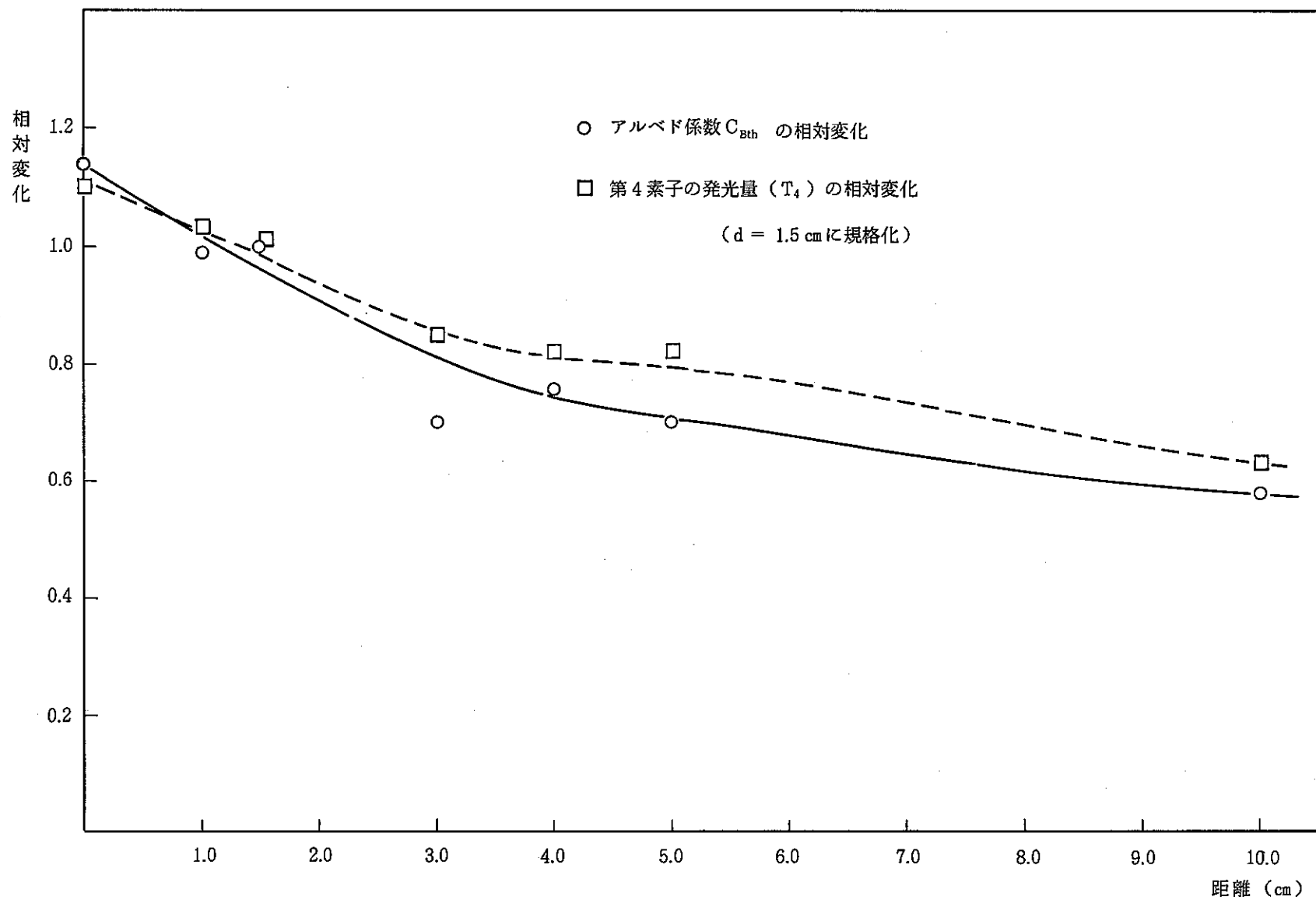
結果としては TLD バッジとファントム間の距離が 0 ~ 2.5 cm において評価線量としての相対感度の低下が見られる。しかし、2.5 cm から 5 cm の間においては感度の低下はほとんどなかった。また、これ以上の距離になると少しずつ感度の低下が見られた。これをさらに TLD 素子の発光量についてみれば、速中性子線の評価上において最も重要な第 4 素子（#4）の発光量はほぼ同様の変化を示しており、これが直接に線量評価上の応答変化に結びついている。

TLD バッジの着用の際にはバッジ裏側のクリップにて完全に作業服に固定してバッジとファントム間の距離が変化しないように注意することが重要である。しかし、通常の着用状態では TLD バッジと身体との間の距離は 1 ~ 4 cm 程度であると考えられるため、これによる速中性子線量の評価の誤差は 20 % 以内であろう。

表 6-9 ファントムと TLD バッジ間の距離依存性

照射条件	距離 (cm)	Luminessense (mR・eq- $\gamma$ )				T <sub>4</sub> の相対 変化 (1.5 cm 基準)	アルベド率 (C <sub>Bth</sub> )の相 対変化*	速中性子線量	
		T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>			評価線量 (mrem)	相対値 (1.5 cm 基準)
線源 Cf-252 with phantom 線源と phantom 表 面間の距離 80 cm 照射線量 23 mrem	0	3.6	7.0	7.6	17.2	1.10	1.14	26.2	1.16
	1.0	4.1	7.0	7.8	16.1	1.03	0.99	22.4	1.00
	1.5	3.4	6.8	7.3	15.7	1.00	1.00	22.5	1.00
	3	3.4	5.9	7.5	13.4	0.85	0.70	19.0	0.84
	4	4.5	6.3	6.2	12.8	0.82	0.76	19.2	0.85
	5	3.4	6.6	6.2	12.9	0.82	0.80	17.9	0.80
	10	3.4	5.3	5.0	9.9	0.63	0.58	13.1	0.58

\*  $\Gamma_f$  と  $H_f$  を一定と仮定して求めた値

図6-11 ファントムとTLDバッジ間の距離によるアルベド係数 ( $C_{Bth}$ ) およびTLD発光量 ( $T_4$ ) の変化

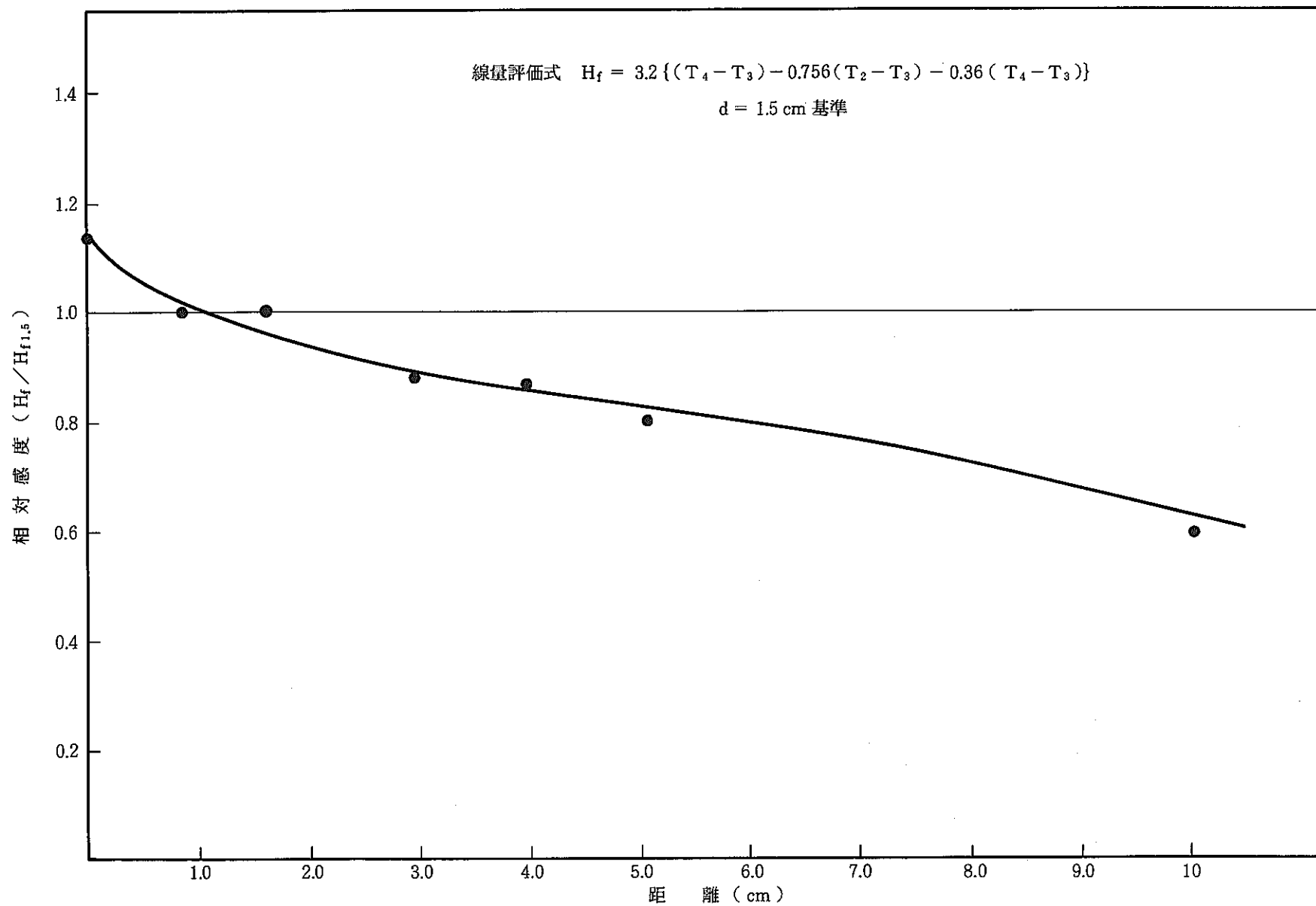


図6-12 ファントムとTLDバッジ間の距離の変化による中性子に対する感度の変化

## 6-3-5 入射方向依存性

速中性子線に対する方向依存性については、今回は線量計をベークライトハンガー組込み、またバッジをファントムに密着した状態で良好な結果が得られたことが報告されている。今回は、線量計をUD-887PH 1型バッジケースに組込むとともに、バッジとファントム間の間隔を1.5 cmにして同様の特性試験を行った。線源は<sup>252</sup>Cf中性子線源を使用し、線源とTLDバッジの中心との距離を80 cmとした。

測定結果を図6-13に示す。ここでは、6-2章で述べた最終の線量当量評価式にて各入射方向に対しての線量当量を算出し、バッジ正面からの入射方向を基準にして規格化したものである。

この結果より考察すれば、正面から±60°以内の入射角であれば、表6-6で示した線量当量評価式（正面入射に対する式）を用いて評価しても方向依存性に起因する誤差は±30%以内であることが判った。また、前回の報告書<sup>2)</sup>に示されている密着条件の場合と比較して、バッジをファントム表面より1.5 cm離れたことによる入射方向依存性の変化はとくに見られなかった。

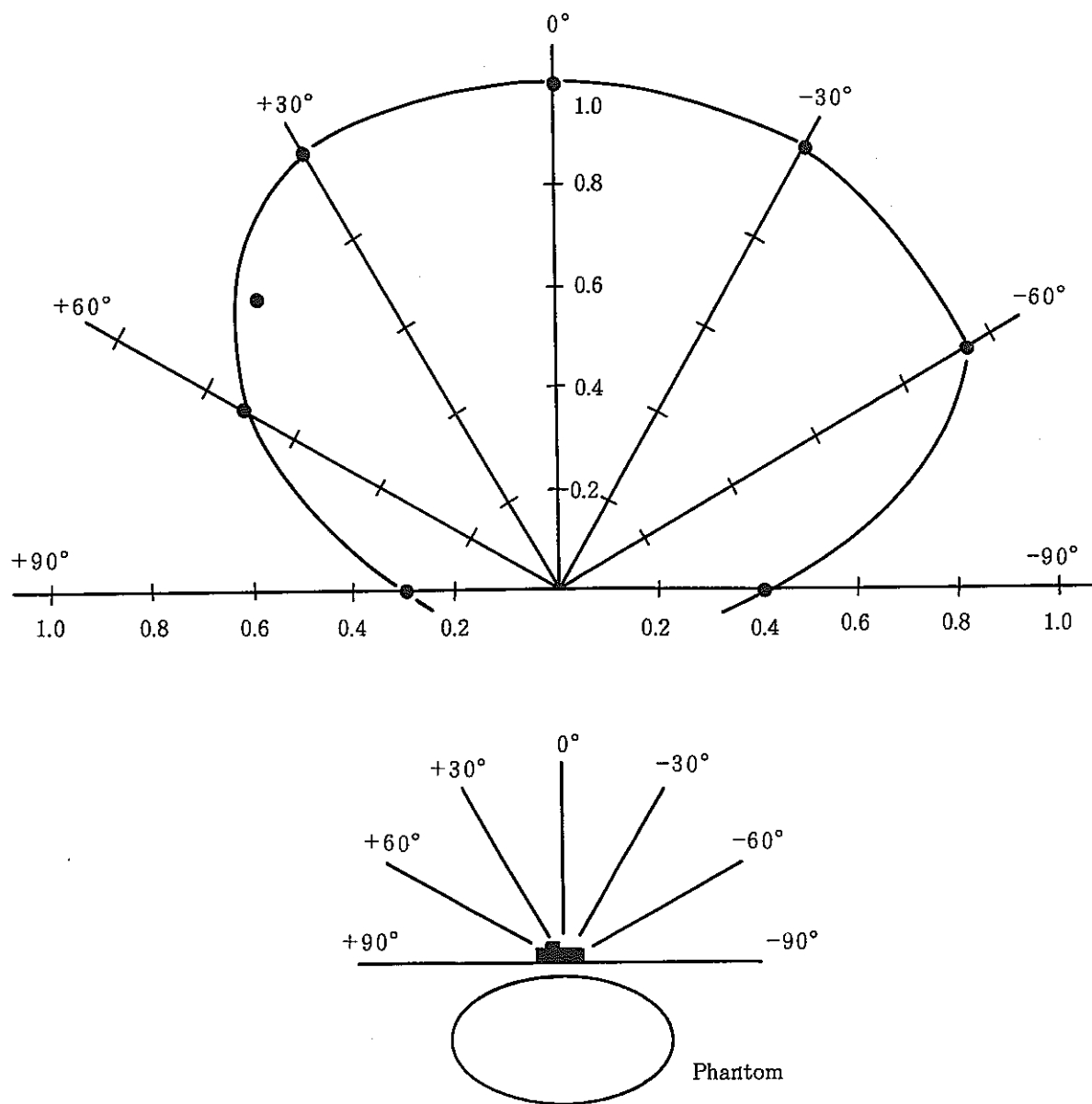


図6-13 速中性子線に対する線量計の方向依存性



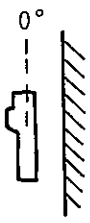

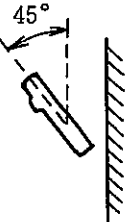
## 6-3-6 TLD バッジの着用角度による感度変化

TLD バッジの着用に際しては、バッジ裏面のクリップで作業服のポケットへ固定している。しかし、着用の具合によってはTLD バッジが身体から離れるだけでなく、バッジ自体が身体に対して斜めに傾くことが考えられる。ここでは、パラフィンファントムを使用し、TLD バッジの着用状態（とくに身体表面に対する傾きの程度）による感度変化について検討した。

中性子線源として<sup>252</sup>Cfを用い、線源とファントムとの距離を80 cmにして、中性子線量で49 mremとγ線量で3.6 mremの照射を行った。バッジ中心とファントム表面までの間隔は1.5 cmと一定にし、その間に発泡スチロールを入れてバッジの身体表面に対する傾きを0°、15°、45°とした。

結果を表6-10に示す。TLD バッジの身体表面に対する傾きが変化すれば、身体から各TLD 素子の入射窓（CdおよびSnフィルター；7×8 mm）をのぞむ立体角が大きく変化するため、各TLD 素子に寄与する正面入射およびアルベ中性子の割合が変化する。このためとくに第4エレメント（#4）発光量がTLD バッジの傾きに応じて大きく変化しており、表6-7の速中性子線量評価式にて速中性子線量を求めた場合に、0°の場合の傾きに対する45°の傾きの比は0.45であった。

表 6-10 TLD バッジの着用角度による感度の変化

照射条件	着用条件	TLD 読取值 (mR・eq- $\gamma$ )				評 価	
		T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	評価線量 (mrem)	評価線量 照射線量
線源 <sup>252</sup> Cf 線源とファントム表面 の距離 80 cm  TLD バッジ中心とファ ントム表面の距離 1.5 cm  照射線量 49.0 mrem		$\bar{x} = 9.95$ $\sigma_n = 1.8$ $\sigma_n/\bar{x} = 18.3\%$	$\bar{x} = 19.1$ $\sigma_n = 2.2$ $\sigma_n/\bar{x} = 11.6\%$	$\bar{x} = 17.6$ $\sigma_n = 1.2$ $\sigma_n/\bar{x} = 7.0\%$	$\bar{x} = 34.7$ $\sigma_n = 2.7$ $\sigma_n/\bar{x} = 7.9\%$	mrem 47.5	0.97
		$\bar{x} = 7.80$ $\sigma_n = 0.35$ $\sigma_n/\bar{x} = 4.5\%$	$\bar{x} = 13.8$ $\sigma_n = 1.40$ $\sigma_n/\bar{x} = 10.0\%$	$\bar{x} = 15.0$ $\sigma_n = 0.73$ $\sigma_n/\bar{x} = 4.9\%$	$\bar{x} = 28.8$ $\sigma_n = 1.47$ $\sigma_n/\bar{x} = 5.1\%$	43.6	0.89
		$\bar{x} = 8.58$ $\sigma_n = 1.7$ $\sigma_n/\bar{x} = 19.9\%$	$\bar{x} = 17.2$ $\sigma_n = 1.3$ $\sigma_n/\bar{x} = 7.6\%$	$\bar{x} = 15.7$ $\sigma_n = 1.35$ $\sigma_n/\bar{x} = 8.6\%$	$\bar{x} = 25.3$ $\sigma_n = 2.5$ $\sigma_n/\bar{x} = 9.7\%$	21.2	0.43

照射回数：各条件 4個

6-3-7 速中性子線と $\gamma$ 線の混在照射場での分離評価精度

前回の報告書<sup>2)</sup>において、ベークライト製の試作バッジケースに線量計を組み込み、ファントムに密着した状態において、混在場での分離測定は、熱中性子線に対して約 $\pm 20\%$ 、熱外中性子線に対して約 $\pm 30\%$ 、速中性子線に対して約 $20\%$ の誤差で線量当量の評価が可能であることが述べられている。

今回は、UD-887PH1型バッジケースに線量計を組み込み、バッジをファントムから1.5cm離した状態で固定し、中性子線と $\gamma$ 線の混在場での分離測定精度を評価した。中性子線源には $^{252}\text{Cf}$ 、 $\gamma$ 線源には $^{60}\text{Co}$ を用い、中性子線と $\gamma$ 線の照射線量をいろいろ変化させて照射を行った。

まず、速中性子線と $\gamma$ 線の混在照射試験の結果を表6-11に示す。中性子線と $\gamma$ 線の線量比が1:1から1:2程度の条件において、まず、各照射での評価中性子線量の平均値の照射量からの誤差は10 mremの線量においては約 $+10\%$ であったが30 mrem以上の線量においては $\pm 5\%$ 以内であった。また、評価中性子線量のバラツキについては、10 mremの線量においては百分率標準偏差で $\pm 19\%$ であり、30 mrem以上の線量においては $\pm 15\%$ 以内であった。これらの結果は6-3-2で示した速中性子線単独照射における結果と合せて図6-14に示す。

表6-11 速中性子線と $\gamma$ 線の混在照射場での分離評価精度

回	線量計 No	照射量 (mrem)		Luminescence (mR · eq - $\gamma$ )				評価線量 (mrem)		Hf / Df	Hr / Dr
		Df	Dr	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	Hf	Hr		
1	1	10.0	20.0	19.5	23.8	20.6	26.0	8.0	19.3	0.80	0.97
	2	10.0	20.0	19.4	22.6	18.8	25.5	12.2	21.3	1.22	1.07
	3	10.0	20.0	18.6	20.2	18.3	23.5	11.1	20.9	1.11	1.05
	4	10.0	20.0	21.1	22.0	20.9	26.4	14.0	19.1	1.40	0.96
	5	10.0	20.0	19.3	21.8	20.6	25.0	9.7	19.3	0.97	0.07
	Ave	10.0	20.0	19.2	22.5	19.8	24.7	11±19%	20.0±9.6%	1.10	1.00
2	1	30.0	57.9	56.5	58.3	58.0	66.8	25.8	61.6	0.86	1.06
	2	30.0	57.9	51.6	55.4	56.2	68.0	32.0	57.9	1.07	1.00
	3	30.0	57.9	53.0	55.0	54.8	64.8	29.5	57.2	0.98	0.99
	4	30.0	57.9	58.5	59.1	58.0	70.5	37.4	62.9	1.24	1.09
	5	30.0	57.9	54.0	57.2	59.4	71.2	31.6	57.7	1.05	1.00
	Ave	30.0	57.9	54.7	57.0	57.2	68.3	31.4±12%	59.5±4.4%	1.05	1.03
3	1	40.2	59.3	57.3	58.4	58.3	71.2	38.1	68.0	0.95	0.98
	2	40.2	59.3	60.5	61.5	60.3	72.8	37.2	65.2	0.93	1.10
	3	40.2	59.3	57.2	59.0	58.6	70.7	36.3	64.9	0.90	1.09
	4	40.2	59.3	56.9	58.3	58.1	73.5	48.0	61.4	1.00	1.04
	5	40.2	59.3	61.6	67.4	59.3	77.5	35.6	62.8	0.89	1.06
	Ave	40.2	59.3	59.7	62.1	59.7	72.8	39.0±12%	62.5±4.7%	0.97	1.05
4	1	50.0	63.9	62.7	73.6	69.9	89.0	44.0	65.6	0.88	1.03
	2	50.0	63.9	61.5	76.4	71.7	92.5	43.5	68.6	0.87	1.07
	3	50.0	63.9	62.5	69.0	68.3	89.0	58.0	65.0	1.16	1.02
	4	50.0	63.9	65.4	69.5	63.5	85.8	56.9	68.3	1.14	1.07
	5	50.0	63.9	62.3	78.1	65.6	90.0	40.0	66.7	0.80	1.04
	Ave	50.0	63.9	62.9	72.9	67.4	89.3	48.5±15%	66.9±2.4%	0.97	1.05

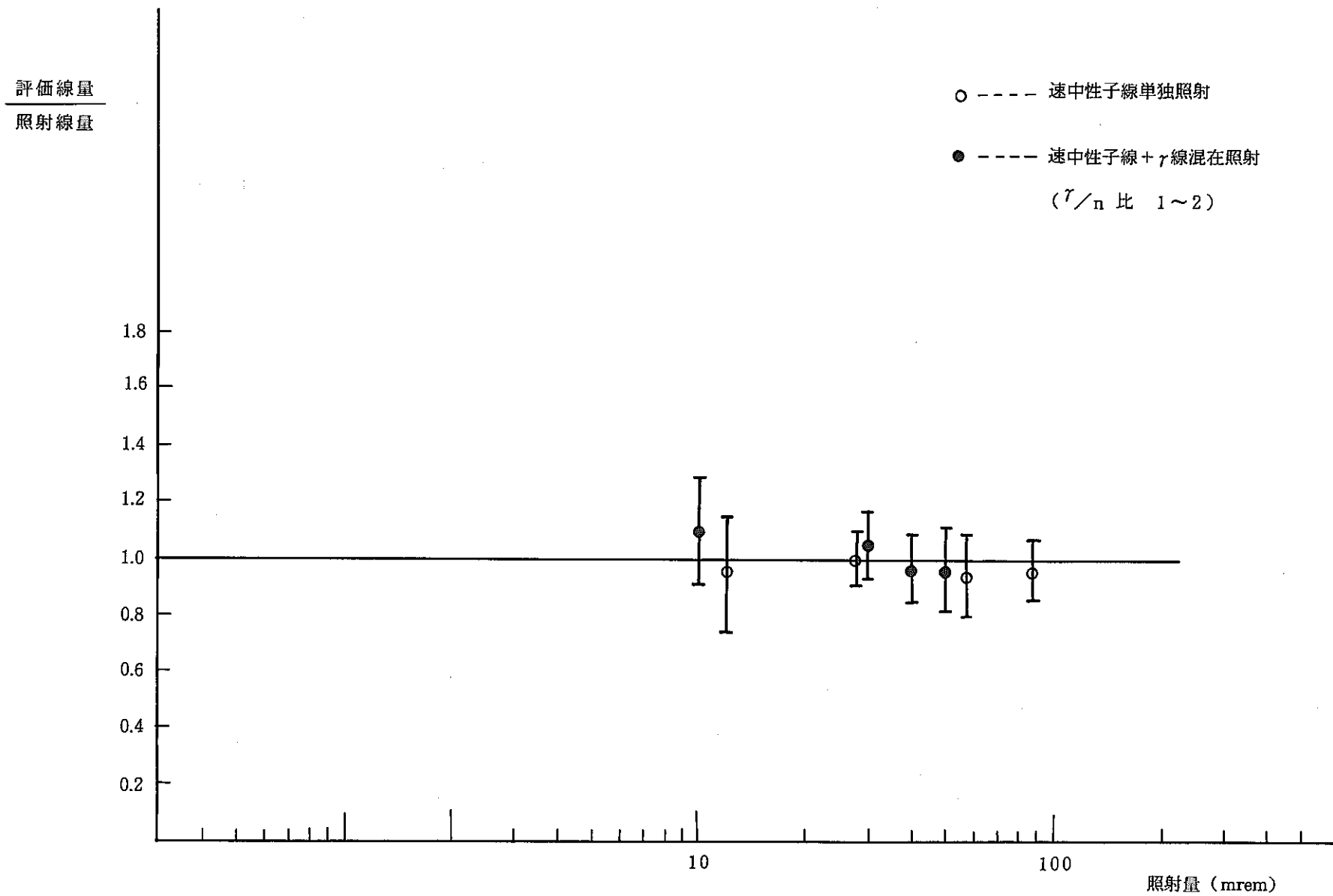


図 6 - 14 中性子線量当量の評価精度

## 第7章 新型TLDバッジと旧型TLDバッジの比較試験

### 7-1 概 要

新しいTLDバッジ（自動読取型）を従来より使用していた旧型TLDバッジ（手動読取型）に代って個人被曝管理に使用するに際し、両者による線量評価上の性能・特性の比較検討を行うために次のような照射試験を行った。

- i) 標準線源 ( $\gamma$ ,  $\beta$ , 中性子) による比較照射試験
  - ii) 作業フィールドに新・旧 TLD バッジを設置したフィールド照射試験
  - iii) 再処理工場, Pu 燃料部の一部の作業者を対象にした新・旧 TLD バッジの2重着用試験
- 尚, 新・旧 TLD バッジの一般的な仕様の比較を表 7-1 に示す。

表7-1 新型TLDバッジと旧型TLDバッジの仕様の比較

項目		バッジの種類	
		旧型TLDバッジ	新型TLDバッジ
測定対象		$\gamma$ (X) 線 $\beta$ 線 中性子線	$\gamma$ (X) 線 $\beta$ 線 中性子線
読取方式		手動測定 (約10分/1バッジ)	自動測定 (約40秒/1バッジ)
電算機へのデータ入力		CRTのキーボード入力	On-line処理
TLD素子	$\gamma$ (X)線測定用	CaSO <sub>4</sub> (Tm)	<sup>7</sup> Li <sub>2</sub> <sup>11</sup> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> (Cu), CaSO <sub>4</sub> (Tm)
	$\beta$ 線測定用	CaSO <sub>4</sub> (Tm)	<sup>7</sup> Li <sub>2</sub> <sup>11</sup> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> (Cu)
	中性子線測定用	CaSO <sub>4</sub> (Tm)・ <sup>6</sup> LiF, CaSO <sub>4</sub> (Tm)・ <sup>7</sup> LiF	<sup>6</sup> Li <sub>2</sub> <sup>10</sup> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> (Cu), <sup>7</sup> Li <sub>2</sub> <sup>11</sup> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> (Cu)

## 7-2 標準線源による照射試験

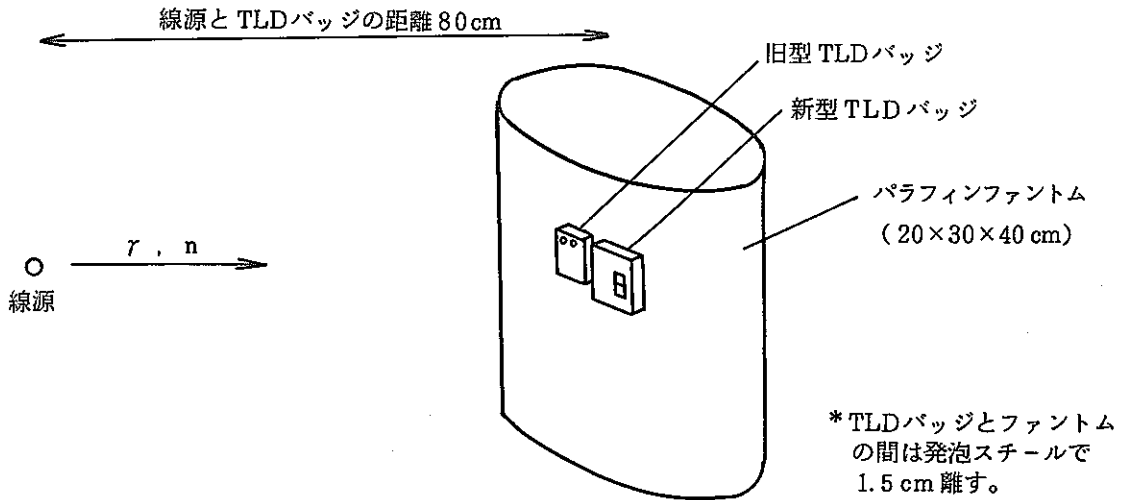
安全管理部所有の標準線源を用いて静的条件での照射試験を行ったが、その照射状況を図7-1に示す。照射はファントム寄与が考えられる $\gamma$ 線と中性子線に対してはバッジをファントムから1.5 cm 離して固定した条件で行った。 $\beta$ 線の照射については TLD バッジを発泡スチロールに固定した。

試験結果を表7-2, 7-3, 7-4に示す。まず、 $\gamma$ 線については $^{137}\text{Cs}$ 線源にて117mR, 51.7 mR, 29.3mRの照射を行ったが、この時の旧型バッジに対する新型 TLD バッジの感度の比は、 $1.04 \pm 6\%$ であった。また、照射線量に対し新型 TLD バッジの測定値は $\pm 10\%$ と良く一致していた。新・旧両 TLD バッジの測定に用いる TLD リーダ (UD-710P 型および UD-502B 型) は共に $^{137}\text{Cs}$ 線源で標準照射を行った TLD 素子で校正を行っており、即ち $^{137}\text{Cs}$ がトレーサビリティの基準線源であるため新旧 TLD バッジによる測定評価値は良く一致していた。

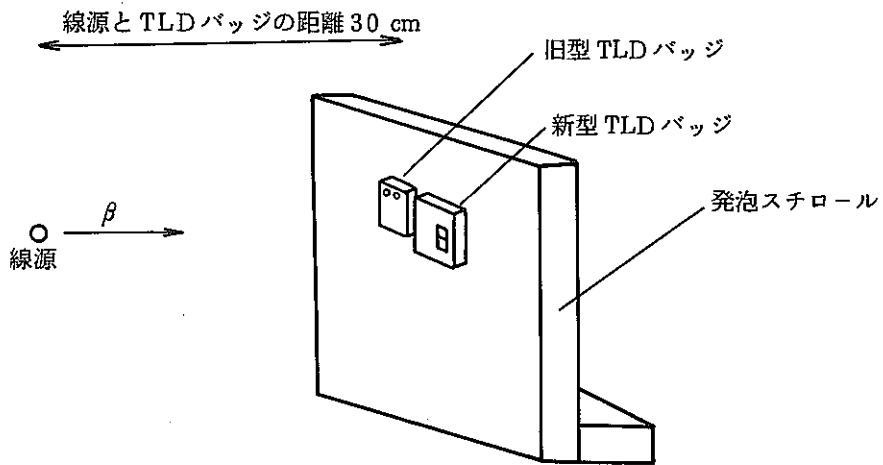
$\beta$ 線については $^{90}\text{Sr-Y}$ 線源にて346mrad ( $7 \text{ mg/cm}^2$  不感層下の吸収線量)の照射を行った。線源と TLD バッジとの距離が30cm と小さく固定位置により照射場の線量率が多少異なるためか測定値にややバラツキがあるものの表7-2に示すように旧型 TLD バッジに対する新型 TLD バッジの測定の比は1.09であった。

中性子に対しては $^{252}\text{Cf}$ 線源で33 mrem の照射を行った結果、表7-2に示すように旧型 TLD バッジに対する新型 TLD バッジの感度の比は1.21であった。





(a)  $\gamma$  線, 中性子線照射



(b)  $\beta$  線照射

図 7-1 標準線源による照射の状況

表7-2  $\gamma$ 線源照射による新型TLDバッジと旧型TLDバッジの比較

回数	照射条件	照射線量 [mR]	評価線量 [mrem]		新型バッジ	新型バッジ
			新型バッジ	旧型バッジ	旧型バッジ	照射線量
1	線源 Cs-137 at 70cm with phantom	117	116	106	1.09	0.99
2	"	117	113	108	1.05	1.04
3	"	117	116	112	1.04	0.99
4	"	51.7	51.0	50.1	1.02	0.99
5	"	51.7	48.0	47.3	1.01	0.93
6	"	51.7	46.3	50.8	0.91	0.90
7	"	29.3	30.6	29.7	1.03	1.04
8	"	29.3	32.3	28.7	1.13	1.10
9	"	29.3	27.6	28.3	0.98	0.95
Ave	—	—	—	—	1.04 ± 6%	0.99 ± 6%

表7-3  $\beta$ 線源照射による新型TLDバッジと旧型TLDバッジの比較

回数	照射条件	照射線量 [mrad]	評価線量 [mrad]		新型バッジ	新型バッジ
			新型バッジ	旧型バッジ	旧型バッジ	照射線量
1	線源 $^{90}\text{Sr}-\text{Y}$ at 30 cm	346	338	336	1.01	0.97
2	"	346	358	321	1.12	0.93
3	"	346	338	298	1.13	0.86
Ave	—	—	—	—	1.09	0.92

表7-4 中性子線源照射による新型TLDバッジと旧型TLDバッジの比較

回数	照射条件	照射線量 [mrem]	評価線量 [mrem]		新型バッジ	新型バッジ
			新型バッジ	旧型バッジ	旧型バッジ	照射線量
1	線源 Cf-252 at 80 cm with phantom	33.5	39.0	30.1	1.30	0.90
2	"	"	39.2	32.9	1.19	0.98
3	"	"	40.8	35.3	1.16	1.05
4	"	"	31.1	25.9	1.20	0.77
Ave	—	—	—	—	1.21	0.93

### 7-3 作業フィールドでの照射試験

作業フィールドに新・旧 TLD バッジを設置して照射試験を行った状況を図 7-2 に示す。

まず、 $\gamma$ 線と中性子線の混在照射はプルトニウム燃料部第二開発室 F103 にて行った。粉末  $\text{PuO}_2$  が置かれたグローブボックスの前にファントムを配置して新・旧 TLD バッジを固定し照射を行った。また、 $\gamma$ 線だけを対象にしてグローブボックスの表面に新・旧 TLD バッジを並べて貼り付けた。TLD バッジを固定した場所の照射線量はレムカウンター (Studsvik 社製 2202 型) と電離箱サーベイメータ (Nesco 社製 808 型) にて求めた。

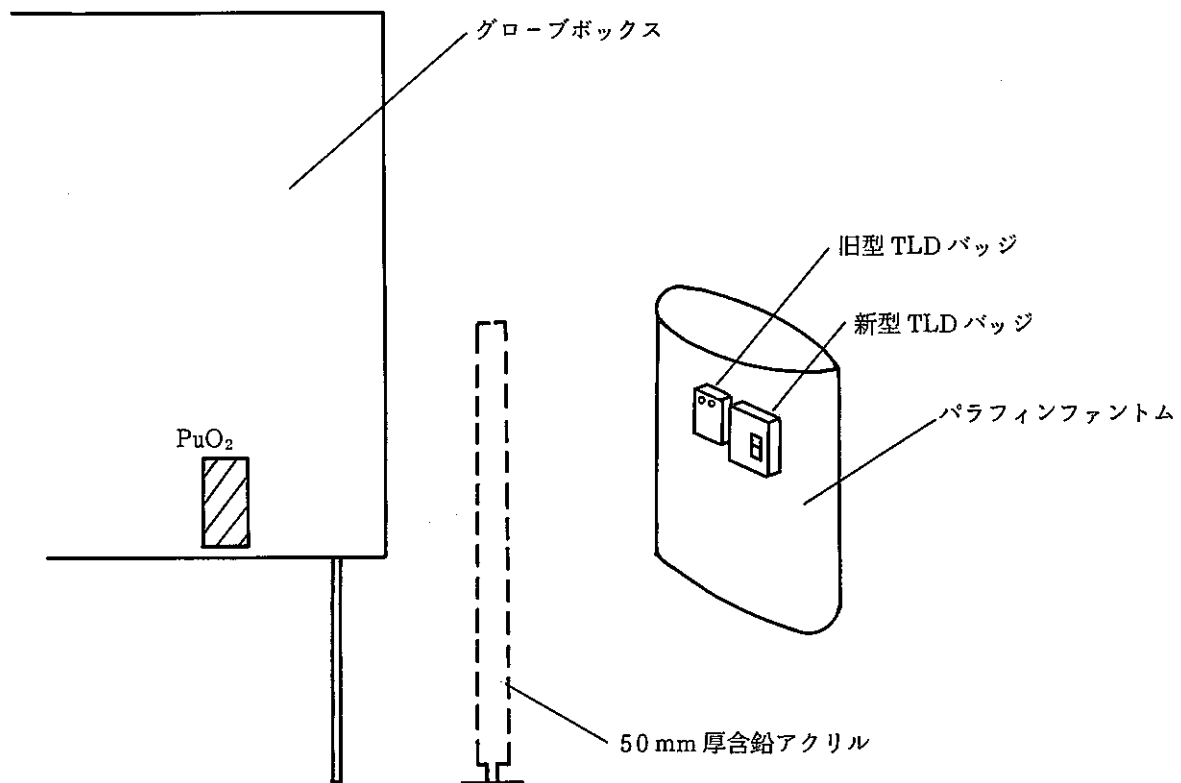
照射試験の結果を表 7-5 に示す。旧型 TLD バッジに対する新型 TLD バッジの評価線量の比は  $\gamma$ 線について  $0.84 \pm 13\%$ 、中性子線に対しては  $1.12 \pm 14\%$ であった。まず、 $\gamma$ 線についてはそのほとんどが Pu と混在する  $^{241}\text{Am}$  から放出される約 60 KeV のエネルギーのものであるが、このエネルギー付近では旧型 TLD バッジの  $\gamma$ 線に対する感度が多少オーバーレスポンスであるため、また新型バッジの低エネルギー域での方向依存性による感度低下のため、旧型 TLD バッジに対し新型 TLD バッジの評価線量がやや小さかった。また、 $\gamma$ 線の照射線量に対して新型バッジの評価線量は全体的に with phantom の条件では 10% 程度高めであり free air の条件では 10% 程度低めであったが、これは作業場の  $\gamma$ 線のエネルギーが約 60 KeV であることを考えれば図 4-13 に示すエネルギー特性と比較的一致している。一方中性子線量の評価については旧型 TLD バッジより新型 TLD バッジの評価線量が全体的に 10% ほど高めであった。また、さらに中性子線の照射量に対して新型 TLD バッジの評価線量は多少低めの傾向であったが、このことはとくに TLD バッジと線源の間にアクリル板等のしゃへい体がある場合 (今回の試験では回数 1, 2) には中性子線のエネルギー分布が全体として低エネルギー側へ変化するため、しゃへい体が無い条件で  $\text{PuO}_2$  線源に対して求めた評価式をそのまま用いると TLD バッジの評価線量が過小になるので注意を要する。

次に、 $\beta$ 線と  $\gamma$ 線の混在場での照射を再処理工場廃棄物処理場にて行った。照射は図 7-3 に示すように  $^{137}\text{Cs}$  や  $^{106}\text{Ru-Rh}$  の混在した放射性廃棄物をビニール袋でつつみ、これから約 30cm の距離に新・旧 TLD バッジを設置した。

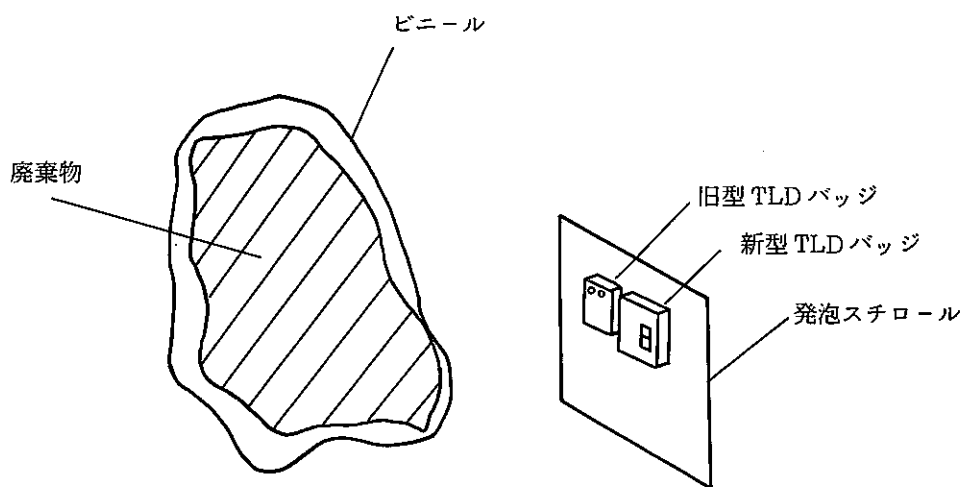
測定結果を表 7-6 に示すが、旧型 TLD バッジに対する新型 TLD バッジの評価線量の比は  $\gamma$ 線で 1.23 及び  $\beta$ 線で 1.07 であった。ここで  $\beta$ 線については、新型 TLD バッジにおいては  $\gamma(X)$ 線評価用の入射窓の厚さは  $1000\text{mg}/\text{cm}^2$  であるが、 $^{106}\text{Ru-Rh}$  から放出される  $\beta$ 線 ( $E_{\beta\text{max}} = 3.2\text{ MeV}$ ) のようにエネルギーが大きい場合は  $\gamma(X)$ 線評価用の TLD 素子に対しても  $\beta$ 線寄与があるため、今回の試験においても  $\gamma$ 線に対する評価線量は新型 TLD バッジの方が 20% 程度大きくなっていた。<sup>注1)</sup> このため、 $\gamma$ 線よりも  $\beta$ 線による被曝が極端に大きい場合においては十分に注意して線量評価を行う必要がある。<sup>注2)</sup>

注1) 旧型 TLD バッジにおいては、 $\gamma$ 線評価用の UD-200S のフィルターおよびバッジケースの厚さが約  $1500\text{mg}/\text{cm}^2$  以上であり、 $\gamma$ 線量評価用素子に対する  $\beta$ 線の寄与はほとんどない。

注2) 例えば  $\gamma(X) \cdot \beta$ 線量計の  $\gamma$ 線評価用  $^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$  素子と中性子線量計の  $^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$  素子の発光量を比較し  $\beta$ 線の寄与の有無を推定することも可能である。



(a)  $\gamma$  線と中性子線の混在照射 (Pu 燃第 2 開発室 F 103)



(b)  $\gamma$  線と $\beta$ 線の混在照射 (再処理 AAF)

図 7-2 作業フィールドにおけるエリア照射の状況

表7-5 プル燃部に於るγ線と中性子線混在場での新型TLDバッジと旧型TLDバッジの測定比較

回数	照射条件	設置場の線量		新型TLDバッジ							旧型TLDバッジ (mrem)		新型バッジ / 旧型バッジ	
				測定値 (mR·eq-γ)				評価線量 (mrem)		Hγ'	Hn'	Hγ/Hγ'	Hn/Hn'	
		γ線 (mR)	中性子線 (mrem)	線量計	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	Hγ					Hn
1	F-103 GB:B-7 PuO <sub>2</sub> (粉末) 庶へい:GB+50mm厚含鉛アクリル with phantom	54.2	107	808-P	62.3	59.5	335	59.4	59	85	70	92	0.84	0.92
				809-P	37.6	143	82.3	168						
2	"	"	107	808-P	51.6	52.1	262	543	54	93	63	98	0.86	0.95
				809-P	38.6	146	78.4	170						
3	F103 GB:D-03 PuO <sub>2</sub> (粉末) with phantom	618	893	808-P	907	817	5820	689	689	830	780	810	0.88	1.02
				809-P	410	583	522	839						
4	"	51.2	198	808-P	66.1	68.3	282	548	55	187	68	162	0.81	1.15
				809-P	43.5	83.4	77.4	146						
5	"	54.5	271	808-P	76.4	77.6	311	67.7	68	270	86	211	0.79	1.28
				809-P	48.9	90.6	92.4	185						
6	"	60.4	282	808-P	78.6	73.0	274	66.9	67	239	80	185	0.84	1.29
				809-P	46.4	99.4	91.5	180						
7	"	"	"	808-P	63.0	62.8	287	63.3	63	222	78	220	0.81	1.01
				809-P	45.6	93.3	93.3	172						
8	"	39	147	808-P	51.2	47.9	248	42.2	42	121	43	126	0.98	0.96
				809-P	24.1	73.8	66.6	122						
9	"	"	"	808-P	38.5	37.1	192	40.1	40	122	49	108	0.82	1.13
				809-P	23.1	76.1	67.8	124						
10	F103 GB:D-03 PuO <sub>2</sub> (粉末) free air (GB貼付)	355	—	808-P	300	305	2050	324	324	—	333	—	0.97	—
				809-P	135	239	240	317						
11	F103 GB:D-07 PuO <sub>2</sub> (粉末) free air (GB貼付)	634	893	808-P	877	803	11300	616	616	—	597	—	1.03	—
				809-P	56.9	95.9	63.4	83.3						
Ave	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.84±13%	1.12±14%

表7-6 再処理工場における $\gamma$ 線と $\beta$ 線混在場での新型TLDバッジと旧型TLDバッジの測定比較

回数	照射条件	新型 T L D バ ッ ジ						旧型 TLD バッジ (mrem)		新型バッジ / 旧型バッジ	
		測定値 (mR·eq- $\gamma$ )				評価線量 (mrem)		$H_{\gamma}'$	$H_{\beta}'$	$H_{\gamma}/H_{\gamma}'$	$H_{\beta}/H_{\beta}'$
		$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$H_{\gamma}$	$H_{\beta}$				
1	核種： $^{137}\text{Cs}$ , $^{106}\text{Ru-Rb}$ 等(ビニール袋2重シールド)	1080	885	109	48.5	49	580	38	537	1.29	1.08
2	“	981	844	146	49.8	50	515	43	483	1.16	1.07
3	“	1117	971	144	59.1	59	625	48	583	1.23	1.07
Ave	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.23	1.07

#### 7-4 新・旧 TLD バッジの2重着用試験

昭和57年1月より3月までプルトニウム燃料部と再処理工場の作業員64名を対象に旧型 TLD バッジに併せて新型 TLD バッジを着用し、実作業に使用した条件での比較試験を行った。

尚、測定評価は1ヶ月毎に実施した。

(対象)

Pu 燃料部製造1課 22名

高速増殖炉「常陽」に使用する Pu 燃料の製造を行っており、主にグローブボックス作業にて  $\text{PuO}_2$  を取扱うため  $\gamma$  線と中性子線の被曝が予想される。

Pu 燃料部製造2課 29名

新型転換炉「ふげん」に使用する Pu 燃料の製造を行っており、主にグローブボックス作業にて  $\text{PuO}_2$  を取扱うため  $\gamma$  線と中性子線の被曝が予想される。

再処理工場保守課 14名

再処理工場の種々の機器、装置の保守を行っており、主として  $^{137}\text{Cs}$  等の FP からの  $\gamma$  線被曝が予想される。

試験着用の結果を表 7-7, 7-8, 7-9 に示す。新型 TLD バッジと旧型 TLD バッジの評価線量の両方とも 20mrem 以上の場合に限定して両 TLD バッジを比較すると、 $\gamma$  線と中性子線とも±20%以内で一致した。

表7-7 新型TLDバッジ試験着用結果(1)

(Pu 燃 製造1課)

期間 評価値 作業者	1 月						2 月						3 月					
	γ 線量 (mrem)			中性子線量 (mrem)			γ 線量 (mrem)			中性子線量 (mrem)			γ 線量 (mrem)			中性子線量 (mrem)		
	新型 バッジ	旧型 バッジ	比	新型 バッジ	旧型 バッジ	比	新型 バッジ	旧型 バッジ	比	新型 バッジ	旧型 バッジ	比	新型 バッジ	旧型 バッジ	比	新型 バッジ	旧型 バッジ	比
A	0	0	—	20	20	1.0	0	0	—	0	0	—	0	0	—	0	0	—
B	10	20	—	20	40	0.5	0	10	—	30	30	1.0	0	10	—	30	30	1.0
C	0	0	—	0	0	—	0	0	—	0	0	—	0	0	—	0	0	—
D	30	30	1.0	50	60	0.83	20	20	1.0	40	40	1.0	10	20	—	10	20	—
E	20	20	1.0	30	50	0.6	0	10	—	20	20	1.0	0	0	—	0	0	—
F	10	0	—	10	20	—	0	10	—	20	20	1.0	0	10	—	10	20	—
G	20	20	1.0	40	20	2.0	20	20	1.0	40	60	0.67	20	20	1.0	60	50	1.2
H	20	30	0.67	30	50	0.6	20	20	1.0	30	40	0.75	10	20	—	20	30	1.5
I	0	0	—	20	30	0.67	10	20	—	40	30	1.33	30	20	1.5	60	50	1.2
J	20	20	1.0	30	20	1.5	20	30	0.67	30	30	1.0	30	30	1.0	70	70	1.0
K	20	20	1.0	20	20	1.0	10	20	—	20	10	—	30	30	1.0	30	40	0.75
L	20	20	1.0	20	10	—	10	20	—	50	40	1.25	10	20	—	30	40	0.75
M	20	20	1.0	10	20	—	20	30	0.67	50	50	1.0	20	20	1.0	0	20	—
N	30	30	1.0	60	70	0.86	20	20	1.0	40	50	0.8	10	20	—	30	40	0.75
O	20	20	1.0	40	20	2.0	20	30	0.67	30	20	1.5	30	30	1.0	40	30	1.33
P	20	20	1.0	60	40	1.5	10	20	—	50	50	1.0	0	10	—	40	30	1.33
Q	20	20	1.0	40	50	0.8	20	30	0.67	50	50	1.0	10	20	—	40	40	1.0
R	10	10	—	20	30	0.67	0	10	—	0	20	—	0	10	—	30	30	1.0
S	20	20	1.0	30	30	1.0	20	30	0.67	30	40	0.75	10	20	—	60	50	1.2
T	10	0	—	40	30	1.33	0	10	—	40	20	2.0	0	10	—	30	30	—
U	10	0	—	30	20	1.5	0	0	—	20	20	1.0	0	0	—	10	0	—
	Ave	0.97		Ave	1.08		Ave	0.82		Ave	1.06		Ave	1.08		Ave	1.08	

注) 比 =  $\frac{\text{新型バッジの評価線量}}{\text{旧型バッジの評価線量}}$



表7-8 新型 T L D バッジ 試験着用結果 (2)

(Pu 燃 製造2課)

期間 評価値 作業者	1 月						2 月						3 月					
	γ 線量 (mrem)			中性子線量 (mrem)			γ 線量 (mrem)			中性子線量 (mrem)			γ 線量 (mrem)			中性子線量 (mrem)		
	新型 バッジ	旧型 バッジ	比	新型 バッジ	旧型 バッジ	比	新型 バッジ	旧型 バッジ	比	新型 バッジ	旧型 バッジ	比	新型 バッジ	旧型 バッジ	比	新型 バッジ	旧型 バッジ	比
A	0	20	—	10	20	—	10	20	—	20	0	—	0	20	—	0	0	—
B	0	0	—	10	0	—	0	0	—	0	0	—	10	0	—	0	0	—
C	0	0	—	0	20	—	0	0	—	10	0	—	0	0	—	0	0	—
D	20	30	0.67	30	50	0.6	10	20	—	50	30	1.67	10	10	—	30	30	1.0
E	10	20	—	10	20	—	0	0	—	0	0	—	—	20	—	20	30	0.67
F	10	20	—	10	20	—	0	20	—	20	0	—	10	20	—	0	0	—
G	30	30	1.0	20	0	—	0	10	—	10	0	—	10	20	—	40	40	1.0
H	10	20	—	30	50	0.6	0	10	—	0	10	—	10	10	—	30	20	1.5
I	20	20	1.0	50	30	1.67	20	20	1.0	20	20	1.0	10	10	—	20	30	0.67
J	0	0	—	0	0	—	0	0	—	20	0	—	0	0	—	0	0	—
K	20	30	1.5	40	20	2.0	0	10	—	0	0	—	10	10	—	10	20	—
L	20	20	1.0	40	20	2.0	20	20	1.0	30	40	0.75	20	20	1.0	10	30	—
M	20	10	—	0	10	—	10	20	—	20	30	0.67	10	20	—	20	20	1.0
N	0	0	—	0	0	—	0	0	—	0	0	—	0	0	—	0	0	—
O	20	20	1.0	30	50	0.6	20	20	1.0	30	40	0.75	20	20	1.0	20	20	1.0
P	20	20	1.0	10	0	—	20	30	0.67	40	30	1.33	30	30	1.0	0	20	—
Q	20	10	—	0	0	—	0	10	—	20	10	—	0	10	—	10	0	—
R	20	20	1.0	40	30	1.33	20	30	0.67	10	30	—	20	30	0.67	30	40	0.75
S	20	20	1.0	10	0	—	20	20	1.0	20	0	—	10	20	—	20	20	11.1
T	30	40	0.75	0	0	—	10	20	—	20	20	1.0	20	30	0.67	40	60	0.67
U	20	10	—	30	40	0.75	20	20	1.0	0	0	—	10	20	—	0	0	—
V	30	40	0.75	20	20	1.0	10	20	—	20	10	—	0	10	—	20	30	0.67
W	20	30	0.67	10	30	—	20	30	0.67	10	30	—	20	30	0.67	30	30	1.0
X	20	20	1.0	30	10	—	10	20	—	20	30	0.67	10	10	—	10	0	—
Y	30	40	0.75	40	60	0.67	10	20	—	30	20	1.50	30	20	1.5	50	60	0.83
Z	20	20	1.0	30	50	0.6	20	20	1.0	50	40	1.25	20	10	—	40	40	1.0
A	30	40	0.75	0	20	—	20	30	0.67	0	20	—	20	20	1.0	0	0	—

Ave 0.93

Ave 1.07

Ave 0.87

Ave 1.06

Ave 0.92

Ave 0.91

表7-9 新型TLDバッジ試験着用結果(3)

(再処理 保守課)

期間 評価値 作業者	1 月						2 月						3 月					
	γ線量 (mrem)			皮フβ線量 (mrem)			γ線量 (mrem)			皮フβ線量 (mrem)			γ線量 (mrem)			皮フβ線量 (mrem)		
	新型 バッジ	旧型 バッジ	比	新型 バッジ	旧型 バッジ	比	新型 バッジ	旧型 バッジ	比	新型 バッジ	旧型 バッジ	比	新型 バッジ	旧型 バッジ	比	新型 バッジ	旧型 バッジ	比
A	0	0	—	0	0	—	0	0	—	0	0	—	0	0	—	0	0	—
B	40	30	1.33	0	0	—	0	0	—	0	0	—	0	0	—	0	0	—
C	90	100	0.9	0	0	—	20	20	1.0	0	0	—	30	30	1.0	0	0	—
D	110	130	0.85	0	0	—	10	20	—	0	0	—	20	20	1.0	0	0	—
E	90	90	1.0	0	0	—	20	20	1.0	0	0	—	30	30	1.0	0	0	—
F	10	0	—	0	0	—	20	20	1.0	0	0	—	0	10	—	0	0	—
G	140	130	1.08	0	0	—	30	40	0.75	0	0	—	30	30	1.0	0	0	—
H	170	170	1.0	0	0	—	30	30	1.0	0	0	—	40	50	0.8	0	0	—
I	120	90	1.33	0	0	—	10	10	—	0	0	—	40	30	1.33	0	0	—
J	50	40	1.25	0	0	—	20	20	1.0	0	0	—	30	20	1.50	0	0	—
K	80	80	1.0	0	0	—	20	20	1.0	0	0	—	20	20	1.0	0	0	—
L	110	90	1.2	0	0	—	30	40	0.75	0	0	—	20	30	0.67	0	0	—
M	120	110	1.09	0	0	—	30	30	1.0	0	0	—	40	40	1.0	0	0	—
	Ave 1.09						Ave 0.95						Ave 1.03					

$$\text{比} = \frac{\text{新型バッジの評価線量}}{\text{旧型バッジの評価線量}}$$

#### 7-5 新・旧型 TLD バッジによる評価線量の相関関係

新型 TLD バッジと旧型 TLD バッジによる評価線量をさらに詳しく比較するため、両者の評価線量の相関関係をグラフにプロットし図 7-3, 4, 5 に示す。作業フィールドでのエリア照射では $\gamma$ 線に対し相関係数は 0.99 であり、中性子線に対しても 0.99 であった。また、新旧 TLD バッジの試験着用においては $\gamma$ 線に対し 0.98 であった。いずれの場合も比較的良好な相関関係が得られ、個人被曝管理において旧型 TLD バッジに代って新しい TLD バッジを使用しても線量評価上問題のないことが判った。

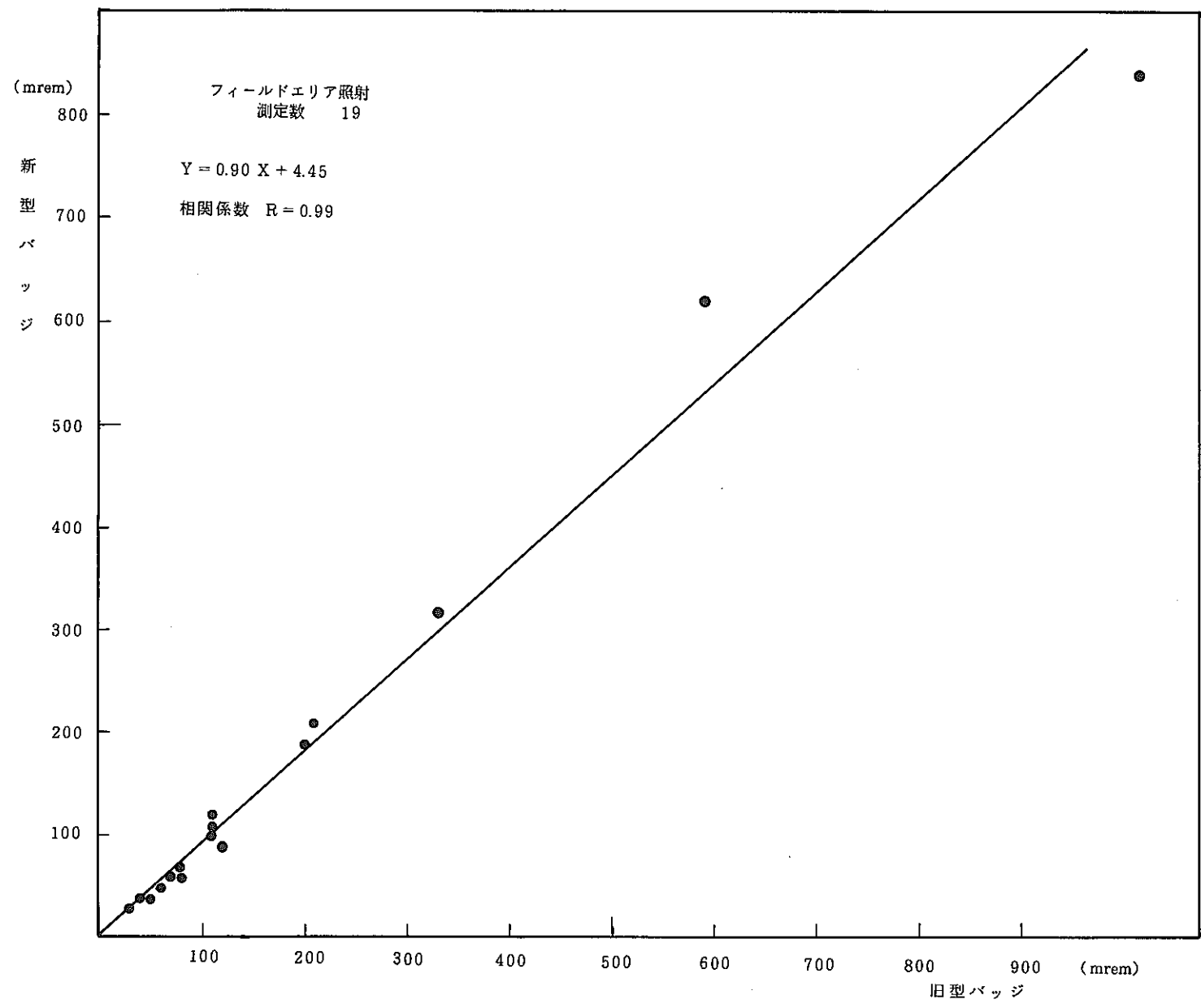


図7-3 旧型バッジと新型バッジによる線量測定の比較 (r線量)

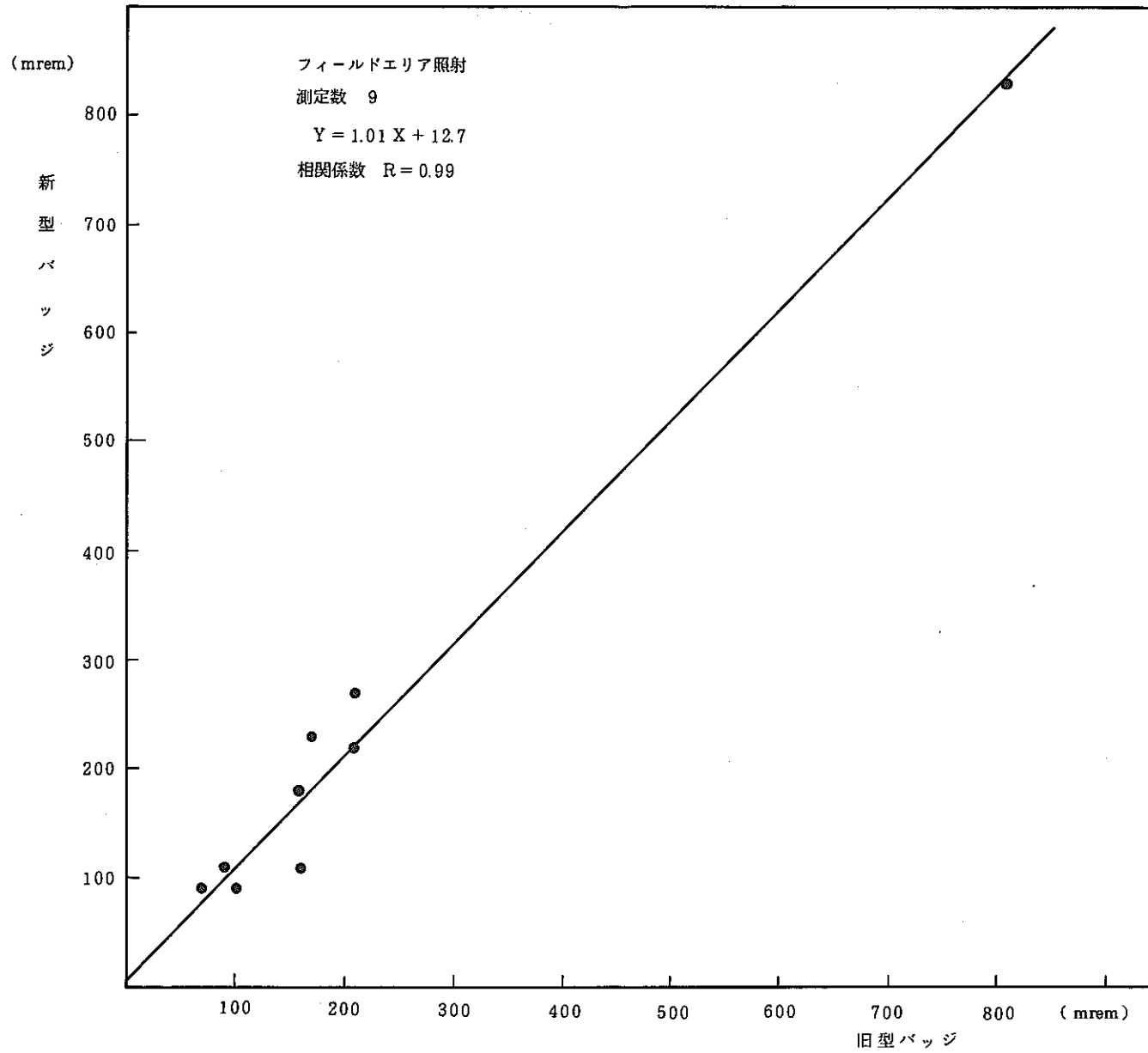


図7-4 旧型バッジと新型バッジによる線量測定の比較 (中性子線量)

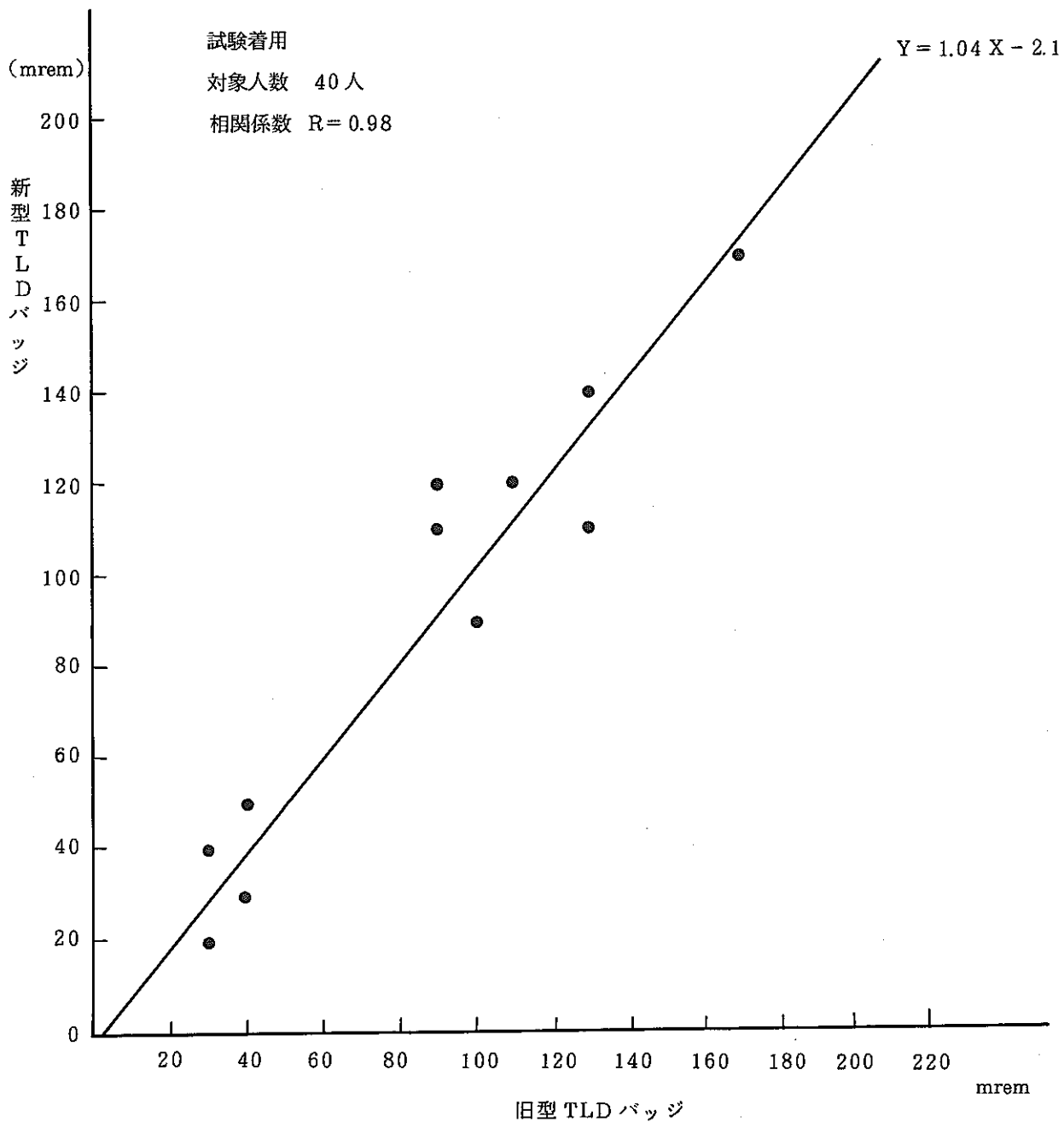


図7-5 新型TLDバッジと旧型TLDバッジによる線量測定の比較 (γ線量)

## 第 8 章 結 論

新型 TLD バッジを東海事業所の個人被曝管理において実用化するに際し、今回、昭和53年度からの開発経過の中で得られた多量の試験データや知見に基づいて最終的にバッジの詳細な仕様の決定を行った。そして、最終仕様の TLD バッジに対して種々の照射試験を行い  $\gamma$ (X)線、 $\beta$ 線、中性子線に対する線量当量評価式を決定するとともに、各放射線に対する線量評価上の種々の性能・特性について検討を行った。また、さらに従来より使用していた旧型の TLD バッジに代って新型 TLD バッジをスムーズに導入するために両 TLD バッジの線量評価における比較試験を実施した。以下、今回の試験において得られた結論を述べる。

### 8-1 線量当量評価式の決定

#### 8-1-1 $\gamma$ (X)線量当量評価

$\gamma$ (X)線については UD-808P 線量計の第4素子(#<sub>4</sub>)の  ${}^7\text{Li}{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$  素子に  $1000\text{mg}/\text{cm}^2$  の樹脂フィルターを組合せ、この  ${}^7\text{Li}{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$  素子の発光量から身体表面下約10mmでの深部線量当量指標を次式にて評価できることがわかった。<sup>10)</sup>

$$H_r = T_4 - \text{BG}$$

$H_r$  ; 深部線量当量指標

$T_4$  ; UD-808P 線量計の第4素子(#<sub>4</sub>)の発光量

BG値 ;  ${}^7\text{Li}{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$  素子の BG 値\*

\* 安全管理棟での例

$$\text{BG} = 0.27d - 1.4$$

$d$  ; アニール日からの日数

尚、深部線量当量指標の評価精度は 40KeV から 1.3 MeV のエネルギーで正面から入射する光子に対して  $\pm 20\%$  以内であった。

#### 8-1-2 $\beta$ 線量当量評価

$\beta$ 線については UD-808P 線量計の第1, 第2素子(#<sub>1</sub>, #<sub>2</sub>)の  ${}^7\text{Li}{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$  素子に  $17\text{mg}/\text{cm}^2$  および  $63\text{mg}/\text{cm}^2$  の厚さの樹脂フィルターを組合せ、これらの入射窓厚さの異なる TLD 素子の感度比から  $\beta$ 線のエネルギーを求め、このエネルギーに対応する感度補正を行い皮膚表面の  $7\text{mg}/\text{cm}^2$  不感層下の吸収線量を評価する。また、これらの素子に対する  $\gamma$ (X)線の寄与の差し引きは  $\gamma$ 線評価用  ${}^7\text{Li}{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$  素子を利用して行う。このため  ${}^{90}\text{Sr}-\text{Y}$ ,  ${}^{204}\text{Tl}$ ,  ${}^{147}\text{Pm}$   $\beta$ 線源による照射試験を行い、 $\beta$ 線量評価用の各  ${}^7\text{Li}{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$  素子の  $\beta$ 線および  $\gamma$ (X)線エネルギーに対する感度 (図5-1, 5-3, 5-4, 5-5), および  $\beta$ 線の最大エネルギーとエネルギー指標の関係 (図5-2) を具体的に求めた。この結果より、次式に2

$\beta$ 線量を求めることができる。

$$D_{\beta} = \frac{Q_1 - \frac{g_1(E_r)}{g_4(E_r)} \cdot Q_4}{b_1(E_{\beta})} = \frac{Q_2 - \frac{g_2(E_r)}{g_4(E_r)} \cdot Q_4}{b_2(E_{\beta})}$$

$Q_n$  : TLDn の発光量から BG 値を差し引いた値

$b_n$  : TLDn の  $\beta$ 線エネルギーに対する感度

$g_4$  : TLD<sub>4</sub> の  $\gamma$ (X)線エネルギーに対する感度

### 8-1-3 中性子線量当量評価

中性子線については UD-809 P 線量計の第 2, 3, 4 素子である  ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$  素子にて人体で後方散乱された中性子 (アルベド中性子) を測定し, さらに各素子の前後に Cd および Sn のフィルターを適当に組合せて熱中性子線, 熱外中性子線, 速中性子線の 3 領域に分けてそれぞれの線量を評価する。また, これらの素子に対する  $\gamma$ 線の寄与の差し引きは第 4 素子 ( $\#_1$ ) の  ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$  を利用して行う。

TLD 素子の発光量から中性子線量を求めるため線量評価式は照射場の中性子エネルギー分布に応じて決定されるものであるが, その一例としてプルトニウム燃料施設のグローブボックス内の  $\text{PuO}_2$  線源からの中性子線に対する線量評価式は次のように決定された。

$$\text{速中性子線量} \quad H_f = 3.6 \{ (T_4 - T_3) - 0.765 (T_2 - T_3) - 0.36 (T_3 - T_1) \}$$

$$\text{熱外中性子線量} \quad H_{ep} = 0.011 \{ (T_4 - T_1) + 0.43 (T_2 - T_3) - 0.57 (T_4 - T_3) \}$$

$$\text{熱中性子線量} \quad H_{th} = 0.027 (T_2 - T_3)$$



## 8-2 線量当量評価における性能・特性試験結果

8-2-1  $\gamma$  (X) 線量当量評価

- ①  $\gamma$  (X) 線照射に対する TLD 素子の感度のバラツキは約 50mR 以上の線量においては百分率標準偏差で  ${}^7\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) 素子について 6~8% 以内であり,  $\text{CaSO}_4$  (Tm) 素子については  ${}^7\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) 素子で  $\pm 10\%$  であり  $\text{CaSO}_4$  (Tm) 素子で  $\pm 5\%$  であった。
- ② 約 60mR の線量において 3 回のくり返し照射に対する感度の再現性は  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) 系素子で  $\pm 3.5\%$  であり  $\text{CaSO}_4$  (Tm) 素子で  $\pm 2.6\%$  と良好であった。
- ③  $\gamma$  (X) 線照射に対する線量直線性は,  ${}^7\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) 素子については低線量側では多少残光線量の上のせ寄与が見られたものの全体的には 10mR~数 10R の範囲で直線性は良好であり, 各評価線量の照射線量からの誤差は  $\pm 10\%$  以内であった。また,  $\text{CaSO}_4$  (Tm) 素子についても数 mR~数 10R の線量において直線性は良好であった。
- ④  $\gamma$  (X) 線の入射方向依存性については,  ${}^{60}\text{Co}$   $\gamma$  線に対しては正面から  $90^\circ$  以内の方向においては感度応答の変化はほとんどなかった。また, 実効エネルギー 60KeV の X 線に対しては正面から  $60^\circ$  以内の方向入射については感度の低下は 20% 以内であったが  $90^\circ$  方向からの入射に対してはかなり感度が低くなっていた。
- ⑤ 1000 mg/cm<sup>2</sup> フィルター下の  ${}^7\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) 素子のエネルギー依存性は, 照射線量を基準にした場合の相対感度が  ${}^{60}\text{Co}$ ,  ${}^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  線エネルギーでは with phantom (ファントム間距離 1.5 cm) および free air の条件ともほぼ 1 であり, 60~100 KeV のエネルギーにおいては with phantom 条件で約 +10% で free air 条件で約 -20% であった。  
また, 同じフィルター下の  $\text{CaSO}_4$  (Tm) 素子については 200KeV 前後より低いエネルギーにおいて著しくオーバレスポンスになっており,  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) 素子との感度比より  $\gamma$  (X) のエネルギー評価を行うに有効であった。
- ⑥ アニール処理後の残光線量は, 約 10R の線量照射を行った直後でも  ${}^7\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) 素子とも 4~5 mR 以下であった。
- ⑦ 加熱処理のくり返しにともなう感度の変化は 1000 回までの試験結果ではほとんどなかった。
- ⑧ 約  $5\sim 20^\circ$  の室温状態におけるフェーディングは  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) 素子において 40 日で 10% 以内であり,  $\text{CaSO}_4$  (Tm) 素子においては 40 日で 5% 以内であった。

8-2-2  $\beta$  線量当量評価

- ①  ${}^{90}\text{Sr}$ -Y  $\beta$  線照射による 17mg/cm<sup>2</sup> および 63mg/cm<sup>2</sup> フィルター下の  ${}^7\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  (Cu) 素子の発光量の読取値のバラツキは 9.9 mrad 以上の線量において百分率標準偏差で  $\pm 4\sim 8\%$  以内であった。また, この発光量から算出した  $\beta$  線量当量のバラツキは 7% であった。
- ②  $\beta$  線に対する入射方向依存性については,  ${}^{90}\text{Sr}$ -Y 線源の照射において正面から  $30^\circ$  以内においては感度の変化は約 20% であった。
- ③  $\gamma$  線との混在場での  $\beta$  線量の評価精度は, まず照射した線量が  $\gamma$  線で 176~204mR および

$\beta$ 線で173～1257mradという条件において、評価 $\beta$ 線量の平均値の照射 $\beta$ 線量からの誤差は+5%であり、バラツキは百分率標準偏差で±7%であった。また、これより低い線量で例えば26mradの $\beta$ 線照射については、評価 $\beta$ 線量の平均値の $\beta$ 線照射量からの誤差は約+20%であり、バラツキは約±6%であった。

- ④  $\gamma$ (X)線との混在場において $\beta$ 線の実効エネルギーの評価は約1.0MeV以上においては±70%以内で可能であった。

#### 8-2-3 中性子線量当量評価

- ① 約10～90mremの線量の速中性子線照射において中性子線評価用UD-808P線量計の第2, 第3, 第4素子(#<sub>2</sub>, #<sub>3</sub>, #<sub>4</sub>)の発光量のバラツキは百分率標準偏差で6～8%であった。そして、この発光量から算出した中性子線量の評価値のバラツキは約90mremの線量に対して±19%であった。
- ② 速中性子線のくり返し照射に対する再現性は、第4素子(#<sub>4</sub>)の発光量について百分率標準偏差で約±10%以内であった。また、速中性子線量の評価値の再現性は約±14%以内であった。
- ③ 速中性子線照射にともなうTLDバッジとファントム間距離の依存性は0～1.5cmの間でやや立上りが見られるが2cmから5cmの間においては感度の変化はほとんどなかった。これより、実際の着用において身体とTLDバッジ間の距離の変化による誤差は約20%以内と思われる。
- ④ 速中性子線に対する入射方向依存性は、正面から±60°以内の角度において中性子線量計側からの入射に対しては20%以内であり、90°以内でも感度変化は30%以内であった。
- ⑤ TLDバッジを身体表面と傾斜させた場合の感度変化は、正常に着用(身体表面と平行)した場合に比べて15°の傾きの場合は約10%また45°の傾きの場合は約55%の減少であった。
- ⑥  $\gamma$ 線との混在照射場での速中性子線の分離評価の精度として、評価した中性子線量の平均値の中性子線照射量からの誤差を考えれば、約10mremの線量においては+10%あり約30mrem以上の線量においては±5%以内であった。また、同一条件の照射における中性子評価線量のバラツキは約10mremの線量においては百分率標準偏差で±19%であり、約30mrem以上の線量においては±15%程度であった。

尚、以上の性能・特性のなかでとくに線量評価の精度についてまとめたものを表8-1に示す。

表8-1 新型TLDバッジによる線量評価の精度と検出限界

放射線	線量評価の精度	
	単一放射線照射	混在放射線照射
$\gamma$ 線	10 mrem $\pm$ 20 % ( 2 mrem $\pm$ 100 % )	10 mer $\pm$ 20 % ( 5 mrem $\pm$ 100 % )
$\beta$ 線	10 mrem $\pm$ 20 % ( 5 mrem $\pm$ 100 % )	30 mrem $\pm$ 20 % ( 10 mrem $\pm$ 100 % )
熱中性子線*	0.2 mrem $\pm$ 20 % ( 0.03 mrem $\pm$ 100 % )	0.5 mrem $\pm$ 20 % ( 0.1 mrem $\pm$ 100 % )
速中性子線	20 mrem $\pm$ 20 % ( 5 mrem $\pm$ 100 % )	20 mrem $\pm$ 30 % ( 10 mrem $\pm$ 100 % )

\* 前回の報告書<sup>2)</sup>から引用

### 8-3 新・旧型TLDバッジの比較試験結果

新型 TLD バッジを旧型 TLD バッジに代って東海事業所での個人被曝管理に導入するに際して行った両者の線量評価上の比較試験の結果は全体的にみて良好であった。個々の比較データに注目してみれば、両 TLD バッジのエネルギー依存性や方向依存性等の特性の相異によって、標準線源やフィールド照射試験では一部において±25%程度また試験着用では±30%の誤差が見られた。しかし、両 TLD バッジによる評価線量を全体的な平均値で見た場合の誤差は±20%以内であった。各 TLD バッジはそれぞれに固有の測定誤差を有していること、また今回とくに着用試験などにおいては比較的誤差の大きくなりやすい低線量照射でのデータに基づいて比較検討を行ったことにもかかわらず、両 TLD バッジによる評価線量は良く一致していた。

## 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”, SN 841 ~ 81-03, 1980
- 3) M. TAKENAGA et al, “A New phosphor  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$  for TLD”, Health physics, vol 44, No 2, 1983
- 4) R. Kramer, G. Drexler “Practical implications of the dose equivalent index”  
IAEA-SR-36/30 (1979)
- 5) ANSI N13.11 “Draft American National Standard Criteria for Testing Personnel Dosimetry Performance” July 1978.
- 6) ICRP Publication 21 (1971)
- 7) ICRP Publication 26 (1977)
- 8) ICRP Publication 35 (1983)
- 9) ICRU Report 25 (1976)
- 10) 中田 啓, 石黒秀治, 宮部賢次郎, 野村幸広  
“個人被曝線量評価における深部線量当量指標の適用”  
PNCT 843-82-06 (1982)
- 11) 斉藤節子, 石黒秀治, 野田喜美雄, “TLD による  $\beta$  線吸収線量測定法の開発”  
N841-78-54, 1978
- 12) 福田整司  
JAERI-1065 (1964)  
“外部被曝による  $\beta$  線吸収線量の評価”
- 13) 備後一義  
JAERI-memo-3591 (1967)  
“ $\beta$  線表面吸収線量の評価”
- 14) 龍福 広, 中戸喜寄, 備後一義, 立田初三, 福田整司, 南賢太郎  
JAERI-M-7354 “点積分核法による  $\beta$  線皮膚線量の評価”
- 15) D. F. Regulla, et al “Beta response of TL personnel and environmental surveillance dose meters” Proceeding of the 5th congress of the international

- Radiation Protection Society, Jerusalem, 1980
- 16) 加藤仁三, 武田伸莊, 野村幸広, 石黒秀治  
N 843-80-17 (1980) PNC Report  
“ TLD による局部被曝線量評価法 ”
  - 17) G. UCHRIN, “ A new type of extremity dosimeter ”  
Nuclear instruments and methods, 175, 1980
  - 18) P. GUPTA, “ Estimation of shallow dose equivalent using a two-element dosimeter ” Health physics, vol 44, No 4, 1983
  - 19) S. Takeda, K. Noda and S. Saito,  
PNCT 831-79-01 178-184 (1979)  
“ Neutron Dose Measurement by Thermoluminescent Dosimeter(III). ”
  - 20) H. Ishiguro, K. Noda and T. Kobayashi, PNCT 831-75-01 P 111-114 (1975)  
“ Neutron Dose Measurement by Thermoluminescent Dosimeter. ”
  - 21) I. Sumazaki, S. Saito, K. Noda, T. Kobayashi and K. Yamanaka,  
PNCT 831-75-02 P 152-162 (1975)  
“ Neutron Dose Measurement by Thermoluminescent Dosimeter (II). ”
  - 22) E. PIESCH et al, “ Advances in albedo neutron dosimetry ”  
IAEA-SM-229/05
  - 23) E. PIESCH et al, “ Study of the phantom distance effect of albedo neutron dosimeter ”, Radiation protection dosimetry, vol 3, No 1, 1982