



熱蛍光線量計(TLDバッジ)による 被曝線量評価法

宮部賢次郎 石黒 秀治

東海事業所安全管理課

資料番号: 53-10

Dose evaluation method by thermoluminescence
dosimeter (TLD Badge)

Kenjiro Miyabe Hideharu Ishiguro
(Health and Safety Division Tokai Works)

放射線作業者の被曝線量の測定評価は、種々の個人被曝線量計を用いて行われている。動燃東海事業所では、昭和49年より使用されていた手動読取方式のTLDバッジに代るものとして、昭和53年より自動読取方式で多量の測定処理が自動的に迅速に可能であるとともに、 γ 線のみならず β 線や中性子線に対しても精度よく被曝線量の測定評価を行うことが可能な新しいTLDバッジの開発を行い、現在、東海事業所と大洗工学センターの個人被曝管理に使用している。本報告では、この自動読取方式のTLDバッジによる γ 線、 β 線、中性子線に対する被曝線量評価法及び線量評価上の性能・特性について述べる。

Key Words : thermoluminescence dosimeter, TLD, TLD badge, $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$, TLD reader, deep dose equivalent, effective dose equivalent, albedo type neutron dosimeter.

1. はじめに

TLDを用いた個人被曝線量計は、蛍光体物質に放射線を照射した後に加熱すると蛍光を発するという現象(熱ルミネッセンス現象)を利用して被曝線量を測定するものであり、測定処理が容易なことや性能・特性が比較的安定していること及び γ 線のみならず β 線、中性子線量評価への適用が容易なこと等から、近年、被曝線量測定のみならず環境の集積線量の分野でも広く実用化されている。

動燃東海事業所でも昭和49年より、それまでのフィルムバッジに代ってTLDバッジを個人被曝線量計として使用している。しかし、その後再処理工場の本格運転、その他CFR施設やプルトニウム転換技術開発施設等の新施設の運転に伴い被曝管理対象者が増加し、それに対応することが必要となって来た。また、線量評価においてもより精度良い評価が要求され、特に β 線や中性子線に対して低線量まで測定評価が可能な線量評価技術を確立することが必要となった。

そこで、昭和53年度より、

- ①自動読取方式で被曝線量の迅速な測定評価が可能なこと。
- ② γ 線のみならず β 線や中性子線に対しても精度良く線量評価が可能なこと。
- ③ICRP(国際放射線防護委員会)Publ.26に示されている新しい線量評価の概念にも対応可能なこと。

等を考慮して新しいTLDバッジの開発を行った。

現在、このTLDバッジは既に東海事業所と大洗工学センターでの被曝管理に実用化されているとともに、一部の原子力発電所でも使用されている。また、昭和60年4月からは「ふげん」発電所においても導入が予定されている。

以下に、新しく開発されたTLDバッジの構造・構成及び γ 線、 β 線、中性子線に対する線量評価法について述べる。

2. TLDバッジの構造・構成

TLDバッジは2個の線量計(γ ・ β 線量計、中性子線量計)とこれを収納するバッジケースより

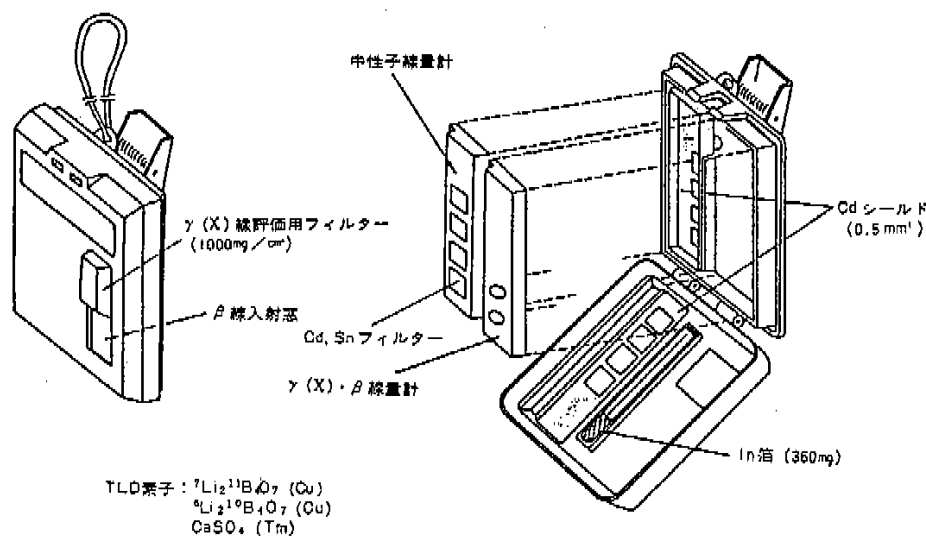


図1 TLDバッジの全体構成

表1 新型TLDバッジの線量計の素子およびフィルターの構成

線量計	素子	蛍光体およびフィルター	備考
γ (X), β線用 (UD-808P)	#1	${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$ (Cu) + 樹脂17mg/cm ² フィルター	β線評価用
	#2	${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$ (Cu) + 樹脂63	β線エネルギー評価用
	#3	CaSO_4 (Tm) + 樹脂1000	γ線エネルギー評価用
	#4	${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$ (Cu) + 樹脂1000	γ線深部線量当量評価用 (β線評価時のγ線差引用)
中性子線用 (UD-809P)	#1	(前)Cd/ ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$ (Cu)/Cd(後)	中性子線評価用
	#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	

構成されている(図1参照)。

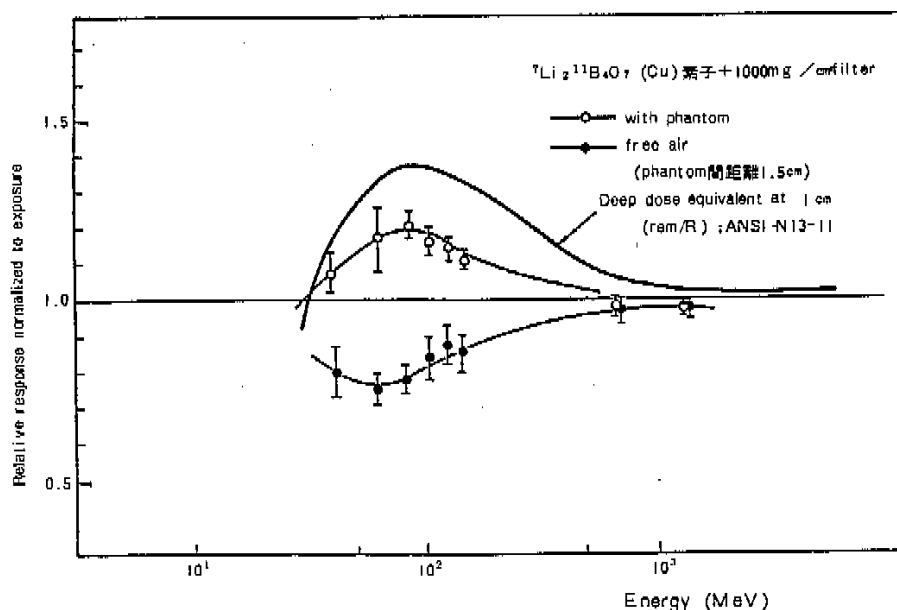
2個の線量計はおおの4個のTLD素子から構成されており、TLD蛍光体には線量評価用に生体等価な ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$ (Cu) 及び ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7$ (Cu) が使用され、また、γ(X)線エネルギー評価用として $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (Cu) とのエネルギー応答特性の異なる CaSO_4 (Tm) が用いられている。TLDバッジにおける素子の構成を表1に示す。

バッジケースにはγ(X)線に対する深部線量当量を評価するための1000mg/cm²厚さの樹脂フィルター、β線評価用のマイラー製入射窓(3mg/cm²)が取り付けられている。また、中性子線量計については熱、熱外、速中性子線量を分離測定するため7×8mmの大きさで0.7mm厚さのCdフィルター(Cdフィルターを

必要としない部分にはSnフィルター)を素子の前後に設けると共に、入射部以外からの中性子の回り込みを防ぐためバッジケース内側にCdシールドが貼られている。

また、各線量計には40bitの光学コードを設け、7桁の線量計番号、線量計の種別コードが設けられている。

TLD素子の発光量の測定は専用のTLDリーダー(松下製UD-710P)にて行う。このリーダーはTLD素子の加熱に、従来のヒータを用いた熱風加熱法に代り赤外線ランプによる直接加熱法を採用し測定の迅速化を図っている。また、TLD素子の発光が、光電子増倍管にて電気信号に変換された後の出力信号の処理に、以前の電流積分法に代ってフォトンパルスと

図2 $\gamma(X)$ 線に対するエネルギー依存性

して計数する光子計数法を用いて、測定感度の向上を図っている。なお、リーダの処理速度は約500バッチ/2.5時間であり、多量の測定を自動的に行うことが可能であると共に、リーダは電算機システムに接続されておりTLD素子の発光量の読取値から被曝量の算出等の処理がオンラインにて可能である。

3. 線量評価法

3.1 $\gamma(X)$ 線量評価

従来から、 $\gamma(X)$ 線による被曝線量の評価においては、作業者の胸部に着用した個人線量計の着用位置での照射線量(R)を測定し、その値をそのまま線量当量(rem)へ変換し全身に対する被曝線量としていた。

一方、ICRP Publ.26(1977)では、被曝をうけたすべての臓器の放射線に対するリスクを考慮した実効線量当量の概念を提案している。実効線量当量は人体の放射線に対するリスクの程度を定量的に且つ直接的に示すものであるが、その評価のためには各臓器ごとの線量を知る必要があり、管理実務上は困難で实际的でない。このため、実際の被曝評価においては、実効線量当量に代って身体表面下のある深さでの線量(深部線量当量)を測定評価することが考えられ、その場合その深さを適当に選ぶことにより、実効線量当量を評価した場合と同等の防護レベルを

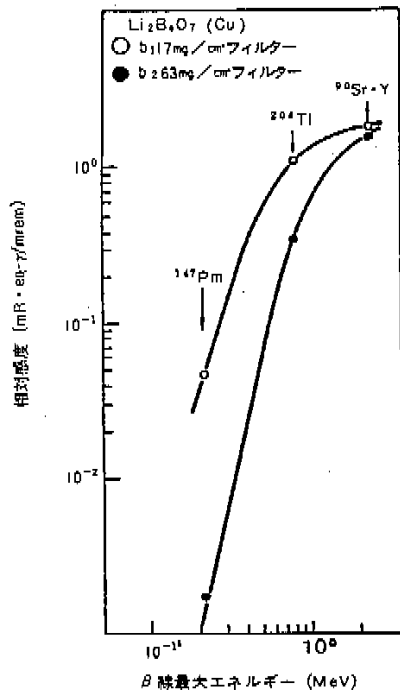
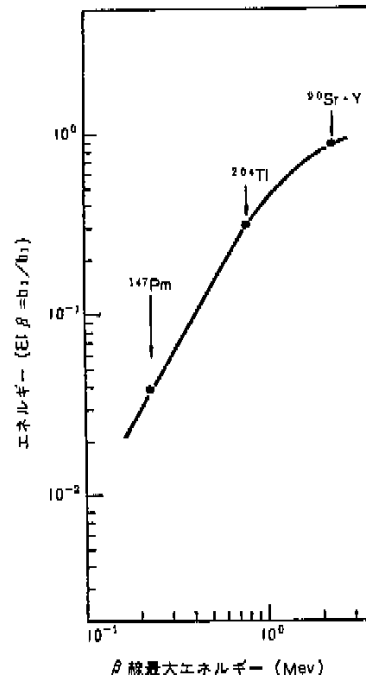
確保することができる。その深さとしては1cmとすることが適当である。

実際のTLDパッチによる深部線量当量の評価は、1cmの身体中深さを模擬した1000mg/cm²厚さの樹脂フィルター下の⁷Li₂¹¹B₄O₇(Cu)素子で行う。 $\gamma(X)$ 線評価用TLD素子の $\gamma(X)$ 線に対するエネルギー応答特性を図2に示す。⁷Li₂¹¹B₄O₇(Cu)素子の応答特性は理想的な1cm深さの深部線量当量の曲線に対して20%以内で一致しており、TLD素子の発光量の読取値から直接そのまま深部線量当量を評価することが可能である。また、このTLDパッチでは、同じ1000mg/cm²フィルター下のCaSO₄(Tm)素子と⁷Li₂¹¹B₄O₇(Cu)との感度比から $\gamma(X)$ 線のエネルギーを求めることも可能であり、そのエネルギー情報に基づく補正を行えば更に精度よく深部線量当量を評価することも可能である。

3.2 β 線量評価

再処理工場の核分裂生成物を取扱う工程等においては、 γ 線のみならず β 線に対する被曝管理が重要である。 β 線による被曝では皮膚での被曝が問題となり、TLDパッチでは皮膚表面7mg/cm²不感層下の吸収線量を求める。

β 線による被曝線量の測定評価は、基本的には β 線に対する入射窓の厚さが異なる2つの⁷Li₂¹¹B₄O₇(Cu)素子により行う。すなわち、まず厚さの異なる

図3 β 線量評価用素子の β 線エネルギー依存性図4 エネルギー指数(EI)の β 線最大エネルギーの関係

2つの入射窓での β 線の透過率とそのエネルギーにより異なることを利用して2個のTLD素子の感度差より β 線のエネルギーを推定する。そしてTLD素子の発光量の読取値に対してそのエネルギーに対応する感度補正を行うことにより線量評価を行う。なお、この場合、 β 線量評価用の2個のTLD素子は $\gamma(X)$ 線に対しても感度を有しているため、3.1で示した1000mg/cm厚さのフィルター下の $\gamma(X)$ 線量評価用の $^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子を利用して $\gamma(X)$ 線の寄与分の差し引きを行う。

β 線量評価用の2つの $^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の β 線に対する感度を、 $^{90}\text{Sr-Y}$ 、 ^{204}Tl 、 ^{241}Pm の標準線源にて求めた結果を図3に示す。ここで β 線感度(b_1, b_2)としては単位線量(mrem)あたりのTLD素子の発光量の読取値($\text{mR}\cdot\text{eq-}\gamma$)にて示されている。次に、図3より求めた2個のTLD素子の感度比(b_2/b_1)を図4に示すが、この感度比は β 線のエネルギーによる関数であり β 線エネルギー指数と称する。

実際の被曝管理においては β 線量評価用の2個の

TLD素子の発光量の読取値から $\gamma(X)$ 線寄与分の差し引きを行った後に、両者の比(b_2/b_1 に相当)から図4を用いて β 線のエネルギーを求める。そして、そのエネルギーに対応する感度 b_1 と b_2 の具体的な値を図3から求め、TLD素子の発光量の読取値(但し $\gamma(X)$ 線の寄与の差し引きを行った値)に対して b_1 及び b_2 による感度補正を行うことにより被曝線量の算出を行う。なお、この線量算出はすべて電算機にて自動的に行われている。

上記のように β 線の被曝線量を求めるには、まず、 β 線のエネルギーを推定することが必要であり、そのエネルギー推定の精度が線量評価の精度を決定することになる。このため、TLDパッジの開発に際しては、種々のフィルター厚さの組合せにて照射試験を行い、その結果、 β 線入射窓の厚さが約13mg/cm²と63mg/cm²の場合に最も精度よく β 線のエネルギー推定が可能であることが解った。そこで、2つの β 線評価用のTLD素子に対する入射窓の厚さはその強度等も考慮した結果17mg/cm²と63mg/cm²としている。

注)、TLDリーダは ^{137}Cs γ 線にて標準照射されたTLD素子にて感度校正がなされており、TLD素子の発光量の読取値は γ 線等価線量($\text{mR}\cdot\text{eq-}\gamma$)として出力表示される。

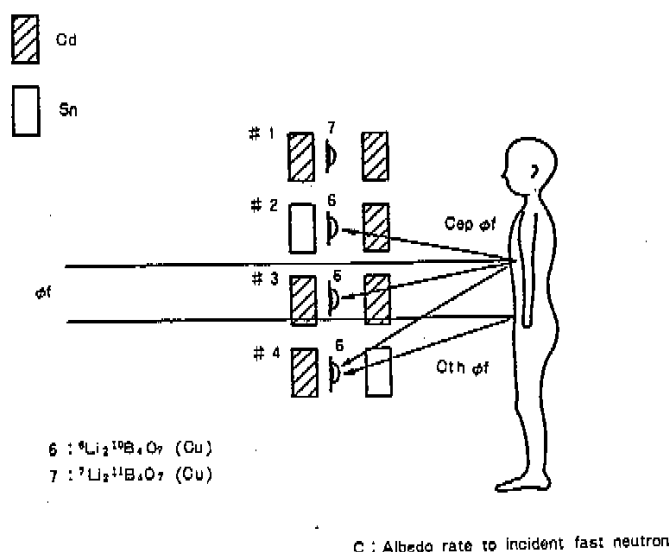


図5 入射速中性子線とTLDの関係図

3.3 中性子線量評価

プルトニウム燃料の製造及び取り扱い工程においてはγ線のみならず中性子線に対する被曝線量の評価が重要である。

中性子に対する線量評価は、 ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子中の ${}^6\text{Li}$ 及び ${}^{10}\text{B}$ の中性子との(n, α)反応により生じるα粒子による素子の蛍光作用を利用して行う。一方、実際の作業フィールドにおける中性子線のエネルギー分布は熱中性子領域から数MeVの速中性子領域まで広範囲に及んでいるが、前記の(n, α)反応の断面積は熱中性子に対しては大きいものの高エネルギーになるにつれて小さくなっており、そのままでは前方から入射する速中性子線を ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子にて直接検出することはできない。このため動燃で開発したTLDパッチにおいては、前方から入射した中性子のうち身体中で減速し後方散乱した減速中性子線を検出する方法(アルベド法)にて中性子線量の評価を行っている。また、更に3個の ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の前後に適当な組み合わせでCdフィルター(Cdを必要としない位置にはSnフィルター)を置き、熱、熱外、速中性子線量の分離測定を行う。なお、これらの中性子評価用の ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子はγ線に対しても感度を有しているため、その寄与の差し引きを同じCdフィルター下の ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子を利用して行う。

中性子線量評価の原理として、前方から速中性子線が入射した場合の、中性子線と各TLD素子との

関係を図5に示すが、入射した速中性子線のうち熱中性子線として後方散乱したもの(後方散乱率: C_{Bth})はTLD4に、また熱外中性子線として後方散乱したもの(後方散乱率: C_{Bep})はTLD2、3、4に対して作用を及ぼす。同様に熱、熱外中性子線の入射についても検討を行い、その結果をまとめれば、入射する熱、熱外、速中性子のフルエンスと各TLD素子の発光量の読取値は以下の関係式で示すことができる。

$$T_1 = G\gamma\phi_r + G\gamma_c\phi_h \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$T_2 = G_{th}\phi_h + (1 + b_{Bep})G_{ep}\phi_p + C_{Bep}G_{r\phi} + G\gamma\phi_r + G\gamma_c\phi_h \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$T_3 = (1 + b_{Bep})G_{ep}\phi_p + C_{Bep}G_{r\phi} + G\gamma\phi_r + G\gamma_c\phi_h \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$T_4 = a_{th}G_{th}\phi_h + (1 + b_{Bth} + b_{Bep})G_{ep}\phi_p + (C_{Bth} + C_{Bep})G_{r\phi} + G\gamma\phi_r + G\gamma_c\phi_h \quad \dots\dots\dots (4)$$

ϕ : Neutron fluence [n/cm^2]

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

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

$G\gamma$: gamma rays conversion factor [$\text{mR}\cdot\text{eq}\cdot\gamma/\text{n}/\text{cm}^2$]

$G\gamma_c$: capture gamma rays conversion factor [$\text{mR}\cdot\text{eq}\cdot\gamma/\text{n}/\text{cm}^2$]

G_{th} : thermal neutron conversion factor [$\text{mR}\cdot\text{eq}\cdot\gamma/\text{n}/\text{cm}^2$]

G_{ep} : epithermal neutron conversion factor

$$[mR \cdot eq \cdot g/n/cm^2]$$

G_f : fast neutron conversion factor

$$[mR \cdot eq \cdot g/n/cm^2]$$

なお、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

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

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

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

ただし、 Γ : [mrem/mR·eq·g]

にて示されるため、これらの関係と(1)(2)(3)(4)式からTLD素子の発光量から中性子線量を求めるための線量評価式を導くことができる。熱中性子線、熱外中性子線、速中性子線に対する線量当量評価式を表2に示す。

上記の線量当量評価の基本式において、後方散乱係数等を具体的な数値として求めれば、熱・熱外・

速中性子に対する線量当量評価式を決定することができる。そこで、黒鉛バイル(中心に ^{252}Cf)の熱・熱外中性子線場、 ^{252}Cf Am-Be線源及び実作業フィールド(PuO_2)速中性子線での校正を行い、その結果、表3に示す線量評価式を得、実際の被曝管理において使用している。

一方、中性子線の身体で後方散乱する場合は、入射中性子線のエネルギーにより異なるため、TLDバッジの感度も入射中性子線のエネルギーにて変化する。そこで、電子技術総合研究所のペレトロン型加速器を利用して、144KeVから4MeV領域でのTLDバッジの単色速中性子線に対するエネルギー応答特性の評価を行った。この結果として中性子線量評価に使用する3個の $^6\text{Li}_2^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子の感度の変化を図6に示すがその感度は、入射中性子線のエネルギーが大きくなるにつれて小さくなっていることが判った。このエネルギー応答特性の結果より、TLDバッジにおいては中性子のエネルギーに応じた線量評価を行うことが重要である。

表2 中性子線量当量算出式

速 中 性 子	$D_f = \Gamma_f \cdot \frac{1 + b_{ep}}{G_{th} + b_{ep}G_{th} - b_{th}G_{ep}} \cdot \{ (T_4 - T_3) - a_{th}(T_2 - T_3) - \frac{b_{th}}{1 + b_{ep}}(T_3 - T_1) \}$
熱 外 中 性 子	$D_{ep} = \Gamma_{ep} \cdot \left\{ \left(\frac{1}{1 + b_{ep}} + \frac{b_{th}G_{ep}}{1 + b_{ep}} \cdot \frac{1}{G_{th} + b_{ep}G_{th} - b_{th}G_{ep}} \right) \cdot (T_3 - T_1) - \frac{G_{ep}}{G_{th} + b_{ep}G_{th} - b_{th}G_{ep}} \cdot \{ (T_4 - T_3) - a_{th}(T_2 - T_3) \} \right\}$
熱 中 性 子	$D_{th} = \Gamma_{th}(T_2 - T_3)$

表3 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}Cf	$D_f = 3.21 \cdot \{ (T_4 - T_3) - 0.765(T_2 - T_3) - 0.36(T_3 - T_1) \}$ $D_{ep} = 0.0094 \cdot \{ (T_3 - T_1) + 0.23(T_2 - T_3) - 0.30(T_4 - T_3) \}$ $D_{th} = 0.027(T_2 - T_3)$
$^{241}\text{Am}-\text{Be}$	$D_f = 6.12 \cdot \{ (T_4 - T_3) - 0.765(T_2 - T_3) - 0.36(T_3 - T_1) \}$ $D_{ep} = 0.0098 \cdot \{ (T_3 - T_1) + 0.29(T_2 - T_3) - 0.39(T_4 - T_3) \}$ $D_{th} = 0.027(T_2 - T_3)$
PuO_2	$D_f = 3.60 \{ (T_4 - T_3) - 0.765(T_2 - T_3) - 0.36(T_3 - T_1) \}$ $D_{ep} = 0.011 \{ (T_3 - T_1) + 0.43(T_2 - T_3) - 0.57(T_4 - T_3) \}$ $D_{th} = 0.027(T_2 - T_3)$

注) TLDバッジとphantom間 1.5cm

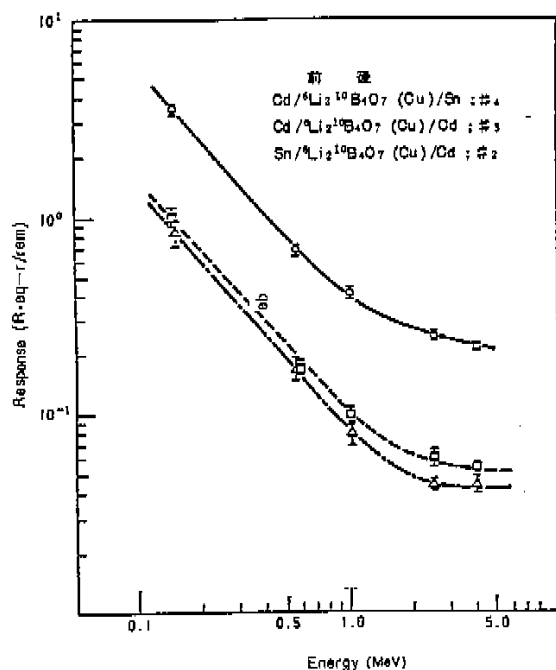


図6 単色中性子線に対するエネルギー特性

4. TLDバッジの性能・特性

TLDバッジを用いて被曝線量の測定評価を行う場合には、3章の線量評価法において示したエネルギー応答特性の他に、TLD素子の感度のバラツキ、再現性、感度応答の線量直線性など種々の線量評価の精度に影響を与える因子が存在する。TLDバッジの開発においてはこれらの項目に対して十分な検討を行ってきた。

TLDバッジの線量評価上の性能、特性及び機能等をまとめて表4に示す。線量評価の精度は線量評価上の各誤差要因の程度により決定されるが、それはまた実際の被曝における放射線の混在割合(γ線とβ線の混在比、γ線と中性子線の混在比)によっても変化する。再処理工場やプルトニウム燃料施設の通常の作業でのβ/γ線量比は1~10程度、また、n/γ線量比は0.5~2程度であり、その条件での線量評価の精度が表中に示されている。また、被曝管理上の記録レベルとしての検出限界値はこれらの線量評価精度及び線量限度を考慮して、γ(X)線、β線、中性子線に対しておのおの10、100、20mremと定めている。

表4 TLDバッジの性能・特性

項 目	性 能・特 性
測 定 範 囲	エネルギー
	γ(X)線 30KeV~数MeV
	β線 300KeV~数MeV
	中性子線 熱中性子~数MeV
感度のバラツキ	線 量
	γ(X)線 1mrem~1000rem
	β線 100 // ~ 200 //
	中性子線 20 // ~ 100 //
再現性	100mR
	Li2B4O7(Cu) ± 6 %
線量直線性	CaSO4(Tm) ± 3 %
	± 3 %以内
方向依存性	± 5 %以内
	γ(X)線 ± 20% (0~60°方向)
エネルギー特性	γ(X)線 ± 20% (1cm深部線量)
	β線、中性子線 エネルギーを考慮した評価
分離測定精度	γ(X)線 10mrem±20%
	β線 50mrem±20%
	中性子線 20mrem±20%

注) 変動係数 = $\frac{\text{標準偏差}}{\text{平均値}} \times 100\%$

5. まとめ

以上、動燃で新しく開発を行った自動読取型のTLDバッジによるγ(X)線、β線、中性子線に対する被曝線量評価法及び線量評価上の性能特性について述べた。γ(X)線、β線、中性子線に対する基本的な線量評価の原理・方法については、このTLDバッジにおいてほぼ確立されたものと考えられるが、今後、

- (1)品質管理体系に基づく、TLD素子の感度の均一化あるいはTLDリーダの感度・加熱条件の安定化の向上
- (2)中性子線エネルギースペクトルの測定評価も含めた、種々のエネルギー場での中性子評価法の確立

等について更に検討を行い、TLDバッジによる線量評価のより精度向上を図る予定である。

また、近年、中性子線量評価におけるCR-39等の飛跳検出器などの新しい線量評価法及び個人線量計の開発も行われている。その状況もふまえ、より優れた新しい被曝線量評価技術の開発も継続して行う必要がある。

更に、現在、ICRPの新勧告について、その国内法令への取り入れも含め、放射線防護への適用が活発に議論されている。今後、被曝線量評価の面でもその対応をより充分に検討する必要がある。

参 考 文 献

- i) 石黒秀治、武田伸荘 ; $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 (\text{Cu})$ 素子による自動
読取型個人被曝線量計の開発〔I〕保健物理、16、305
~316 (1981)
- ii) 石黒秀治、武田伸荘 ; $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 (\text{Cu})$ 素子による自動
読取型個人被曝線量計の開発〔II〕、保健物理、17、27
~36 (1982)
- iii) 宮部賢次郎、石黒秀治他 ; アルベド型 TLD バッジの速
中性子線に対するエネルギー依存性について、日本原子
力学会予稿集、1984年10月
- iv) ICRP Publication 26 (1977)