個人線量計校正用ファントムとしての TLD 内蔵中性子線量当量計の適用検討

辻村憲雄^{*1}, 金井克太^{*1}, 百瀬琢磨^{*1}, 林 直美^{*2}

(2001 年 2 月 28 日受理)

(2001 年 4 月 25 日再受理)

Application of the Neutron Dose Equivalent Monitor with TLDs to Calibration of Personal Neutron Dosimeters

Norio TSUJIMURA^{*1}, Katsuta KANAI^{*1}, Takumaro MOMOSE^{*1} and Naomi HAYASHI^{*2}

KEY WORDS : neutron dose equivalent monitor with TLDs, calibration phantom, albedo TLD

I 緒 言

原子力施設周辺での積算中性子線量の測定を目的に、TLD とポリエチレンモデレータを組み合わせた TLD 内蔵中性子線量当量計¹⁾が開発されている。我々は、本線量当量計が立方体型であるという点に着目し、個人線量計の校正用ファントムとして利用することについて検討した。この方法の場合、基準とする線量は TLD 内蔵中性子線量当量計から得られるので、その場における線量の基準値が不明でも簡便に個人線量計を校正できる可能性がある。同様の試みとしては、PIESH らによって提案された Single Sphere Albedo Technique²⁾があるが、この方法では球形ファントムを使用しており、立方体で

ある TLD 内蔵中性子線量当量計の方が扱いやすいという利点がある。

TLD 内蔵中性子線量当量計を個人線量計校正用ファントムとして利用する手法について、アルベド型個人線量計を適用例に実験的検証を行ったので報告する。

II 線量計の仕様

1. TLD 内蔵中性子線量当量計

TLD 内蔵中性子線量当量計（以下、TLD レムカウンタと記す）は、松下産業機器株式会社製の TLD (UD-813PQ4) を同社製の 1 辺が約 22 cm の立方体型ポリエチレンモデレータ (UD-893P) の中心部に配置したものである。**Fig. 1** に TLD レムカウンタの外観写真を示す。モデレータ内部には、2 個の TLD を収納する鉛箱、中性子エネルギー応答特性を改善するための柵状の熱中性子吸収材 (Cd 板) が配置されている。UD-813 PQ4 は、それぞれ 2 個の ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ と ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ からなり、両素子の指示値の差引きによって中性子による正味の指示値が得られる。

Fig. 2 に TLD レムカウンタの中性子エネルギー応答特性を示す。図には、加速器を利用した単色中性子場等

^{*1} 核燃料サイクル開発機構東海事業所放射線安全部；茨城県那珂郡東海村村松 4-33 (〒319-1194)

Radiation Protection Division, Tokai Works, Japan Nuclear Cycle Development Institute; 4-33, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194, Japan.

^{*2} 核燃料サイクル開発機構東海事業所保安管理部；茨城県那珂郡東海村村松 4-33 (〒319-1194)

Safety Administration Division, Tokai Works, Japan Nuclear Cycle Development Institute; 4-33, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194, Japan.

Fig. 1 External view of the UD-893P cubic moderator (TLD rem counter).

での実験結果¹⁾とモンテカルロ計算による結果³⁾を, ICRP Publication 74⁴⁾によるフルエンスー周辺線量当量換算係数(任意単位)とともに示している。実験値と計算値は良く一致しており, また核分裂スペクトル近傍のエネルギー領域ではフルエンスー周辺線量当量換算係数にも良く一致している。

2. TLD バッジ

TLD バッジ⁵⁾は, 旧動力炉・核燃料開発事業団時代の1982年からサイクル機構で放射線業務従事者の個人被ばく管理に使用されてきた個人線量計であり, β/γ 線

測定用の UD-808P と中性子測定用の UD-809P (いずれも松下産業機器株式会社製) からなる。

中性子の測定はアルベド法を使用しており, 次式から中性子線量 H を算出する。

$$H = T_n \cdot K_1 \cdot K_2 \quad (1)$$

ここで, T_n は人体から反射された中性子による TLD の発光量, K_1 は ^{252}Cf に対する校正定数, K_2 は中性子スペクトルに応じた無次元の補正係数(workplace-dependent correction factor)であり, 核分裂スペクトルに対しては 1.0, 核分裂スペクトルが含水素物質で減速された場合には減速の度合いによっても変化するが平均エネルギーが 0.2 MeV 程度の場合で約 0.1 である。通常の個人被ばく管理業務では, K_2 の値に約 0.3 を使用しており, これは東海事業所の MOX 燃料施設内の代表的な作業工程近傍でのフィールド実験から決定した値である。

III 実験方法

1. TLD レムカウンタの校正及び特性評価

TLD レムカウンタの校正及び特性評価のため, ^{252}Cf , ^{252}Cf の減速中性子校正場及び $^{241}\text{Am-Be}$ による中性子の照射を行った。本減速中性子校正場⁶⁾は, ^{252}Cf を中空円筒型の含鉛アクリルで覆ったもので, 内外径の異なる計 4 体の中空円筒を組み合わせることで減速材の厚さを変化させ, MOX 燃料施設内の作業環境下の中性子スペクトルに近似した中性子場を作成することができる。

Fig. 2 Response function per unit neutron fluence of TLD rem counter. The solid curve represents the fluence-to-ambient dose equivalent conversion coefficients recommended in ICRP Publ. 74. The closed squares are experimental results by UWAMINO *et al.*¹⁾. The open circles are calculated results by the authors.

中性子スペクトルは、照射室内の床、壁、天井などからの散乱成分も含めてモンテカルロ計算と中性子スペクトロメータによる実測によって評価されている。

実験では、TLD レムカウンタ中心部の TLD の指示値と照射した周辺線量当量を比較し、TLD 指示値から線量に換算する校正定数を決定した。また、 ^{252}Cf の減速スペクトルに対するエネルギー依存性も調べた。なお、この実験では線源から TLD レムカウンタの幾何学的中心までを 100 cm とした。

2. 校正用ファントムとしての適用試験

裸の ^{252}Cf 及び含鉛アクリルを被せた体系（厚さを変えた 2 点）で以下の試験を行った。ただしここでは線源からファントム表面までの距離を 100 cm とした。

① TLD バッジを TLD レムカウンタ表面に設置した場合と JIS Z 4915⁷⁾ に規定される楕円柱水ファントム上に設置した場合の 2 回の照射を行い、両ファントム上での指示値の相違を調べた。楕円柱水ファントムは人体形状ファントムにその後方散乱特性が似ているとの報告がある⁸⁾。

② 楕円柱水ファントム上で照射したものについては、照射した個人線量当量 ($H_p(10)$) と TLD バッジの指示値 ($T_{n,\text{water}}$) を比較し、校正定数を求めた。ここで得られた校正定数は、比較基準になるものであり次式から求めた。

$$K_{\text{water}} = H_p(10) / T_{n,\text{water}} \quad (2)$$

③ TLD レムカウンタ表面上で照射したものについては、TLD レムカウンタ自身から評価した線量 (H_{RC})

と表面の TLD バッジの指示値 ($T_{n,\text{RC}}$) を比較し校正定数を求めた。

$$K_{\text{RC}} = H_{\text{RC}} / (T_{n,\text{RC}} \cdot \alpha) \quad (3)$$

ここで係数 α は楕円柱水ファントムと TLD レムカウンタ表面での後方散乱特性の違いが TLD の指示値に与える影響の補正である。また、校正の基準とする線量 (H_{RC}) を求める際には、モデレータの中心と表面との線源からの距離の違いを逆二乗則を用いてあらかじめ補正した。

IV 結果と考察

Fig. 3 に実験によって得られた TLD レムカウンタのエネルギー特性を示す。横軸に室内散乱線による寄与を含めた平均中性子エネルギー、縦軸にレスポンス（レムカウンタ中央の TLD 指示値/照射した周辺線量当量）を示しており、ここでは裸の ^{252}Cf を照射した場合のレスポンスを 1 に規格化している。スペクトルの変化に依らず評価値と照射した線量の値は $\pm 10\%$ の範囲内で一致している。(3) 式から TLD バッジの校正定数を算出する際には、本実験結果から得られた ^{252}Cf に対する校正定数を用いて H_{RC} を算出した。

また、楕円柱水ファントムと TLD レムカウンタの表面に TLD バッジを設置した場合の指示値を比較した結果、楕円柱水ファントムに設置した場合の方が指示値が中性子スペクトルに依らず約 20% 大きいという結果が得られた。検証計算を現在実施しているが、この差は、ファントム材質の違いよりはサイズ、すなわち後方散乱

Fig. 3 Response of TLD rem counter as a function of neutron energy averaged over the spectrum. The values are normalized to 1 at ^{252}Cf result.

Table 1 Comparison of evaluated calibration factors of TLD badge, calibrated on a water-filled ellipsoidal cylinder phantom and UD-893P cubic moderator (TLD rem counter).

Source/Moderator	Neutron energy* [MeV]	K_{water}	K_{RC}
^{252}Cf	1.9	1.00 ± 0.19	0.97 ± 0.13
$^{252}\text{Cf}/\text{PMMA}$ 35 mm	1.3	0.48 ± 0.06	0.60 ± 0.04
$^{252}\text{Cf}/\text{PMMA}$ 54 mm	1.1	0.39 ± 0.02	0.43 ± 0.06

*Neutron energy averaged over the spectrum

体としての大きさの違いによってもたらされると予想している。従って、(3) 式で TLD バッジの校正定数を導出するには後方散乱の違いの補正が必要であり、ここでは得られたデータの平均値から $\alpha=1/0.8$ とした。

(2) 及び (3) 式から得られた TLD バッジの校正定数を比較した結果を **Table 1** に示す。この表では、裸の ^{252}Cf に対する K_{water} の値でそれぞれの校正定数を規格化しているので、(1) 式で言う K_2 に相当する値を表している。比較の結果、2 種類の方法から得られた校正定数の値は主に TLD 指示値に起因するランダムエラーの範囲内程度で一致している。

なお、今回の実験では、線源からの距離が 100 cm の地点での室内散乱線による線量への寄与は 5% 程度でしかないことから、個人線量当量と周辺線量当量の数値的な差が小さく、(2) 及び (3) 式からそれぞれ得られる校正定数の値に有意な差が生じにくい条件であったと考えられる。ただし、TLD レムカウンタが測定する線量は周辺線量当量に相当することになるので、室内散乱線の寄与が大きかったり、放射線の主たる入射方向が特定できない条件では、(3) 式から得られる校正定数の値の解釈が難しい場合が予想される。

V 結 論

中性子エネルギー分布や基準とする線量が不明な場で個人線量計を簡便に校正する方法として、立方体型の

TLD レムカウンタを校正用ファントムかつ基準とする線量の測定器として利用する方法について検討した。

^{252}Cf 及びその減速場での照射実験から、楕円柱水ファントムと TLD レムカウンタをファントムとして利用した場合を比較した場合、それぞれの方法から得られる個人線量計 (TLD バッジ) の校正定数は、ファントムによる後方散乱特性の違いを補正すれば、ほぼ一致することが分かった。従って、TLD レムカウンタを校正用ファントムとして活用する本校正手法は十分に適用可能であることが分かった。

ただし、前述したように TLD レムカウンタが測定する量は周辺線量当量であるため、多方向からの中性子の入射が予想される条件では、個人線量計の指示値と個人線量当量 ($H_p(10)$) の比に相当すべき校正定数の値とは数値的にも意味的にも異なる結果が得られる可能性がある。今後は、MOX 燃料施設内の実作業環境下で本校正手法の適用実験を行い、TLD レムカウンタ自身のエネルギー依存性の問題も含めその適用可能範囲の確認あるいは算出される校正定数の値の解釈の方法について検討を進めていく予定である。

参 考 文 献

- 1) Y. UWAMINO *et al.*; to be submitted to *Radiat. Prot. Dosim.*
- 2) E. PIESH, B. BURGHARDT and W. COMPER; *Radiat. Prot. Dosim.*, **10**(1/4), 159-173 (1985).
- 3) 金井克太, 辻村憲雄, 百瀬琢麿, 林 直美; 原子力学会「2000 年春の年会」予稿集, M12 (2000).
- 4) ICRP; ICRP Publication 74 (1996).
- 5) 石黒秀治, 武田伸荘; 保健物理, **17**(1), 27-36 (1982).
- 6) 辻村憲雄, 金井克太, 吉田忠義, 小嶋 昇, 百瀬琢麿, 林 直美; 原子力学会「2000 年秋の大会」予稿集, A27 (2000).
- 7) 日本規格協会; JIS Z 4915 (1974).
- 8) 百瀬琢麿, 伴 信彦, 二之宮和重, 石黒秀治, 中村尚司; 動燃技報, **81**, 46-49 (1992).