資 料

放射線疫学調査(第Ⅰ期)に係る個人線量の信頼性(2)[†]

——線量測定技術の変遷, 測定値の整合性, 加算性および品質保証——

(財)放射線影響協会放射線疫学調査センター 第Ⅰ期疫学調査線量評価グループ*

101 東京都千代田区鍛冶町 1-9-16

Key Words : epidemiological study, nuclear industry worker, personal dosimeter, film dosimeter, thermoluminescence dosimeter, TLD, quality assurance, intercomparison

前号では, 線量の概念, 定義, 単位および個人線量計の技術基準の歴史的な変遷ならびに放射線作業環境等について述べた。本号では, 線量測定技術の変遷, 測定値の整合性, 加算性および品質保証ならびに相互比較等について掲載する。

6. フィルムバッジによる X・γ線の線量測定方法の技術的仕様と実際

1974年(昭49)以前の個人線量の登録は, すべてフィルムバッジによる測定値であり, これ

以後もフィルムバッジによる測定値の登録が主(90%)である。また, フィルムバッジは, いろいろな工程をとおして線量を求めているので, この方法の技術的仕様と測定誤差等について以下に要約する。

小形で軽量のフィルムバッジは, 原子力時代の黎明期に考案された個人線量計である³⁰⁾。現在でもわが国のみならず世界各国で広く使用されている。フィルムバッジに使用するフィルムは, 初期の頃も現在も変わらない。大きく変わった点は, フィルムの包装材が紙からビニールに変わったことである。1976年(昭51)から完全防湿, 防水構造となり, フィルム線量計の欠点であった潜像退行現象(フェーディング)がきわめて改善され, 安定な特性を有する線量計となった。

6・1 フィルム³¹⁾

初期のころ, わが国で用いられた X・γ線用フィルムは, 富士写真フィルム(株)で製造されたものである。タイプ A, B, C の3種類のフィルムがまとめられて包装され, 富士γ線バッジフィルムとして市販され, 現在も使用されている。

このフィルムによる線量測定下限は, 1 か月間使用で 10 mR(mrem), 3 か月間使用で 20 mR(mrem) である。最大 60 R(rem) まで測定できる。タイプ A フィルムを温度 25 °C ± 5 °C

[†] Reliability of Individual Doses Relating to the Epidemiological Studies on Nuclear Industry Workers in Japan (2). Changes of Technology on Radiation Measurement, Coordination of Measured Doses, Addition of Doses and Quality Assurance. Epidemiological Study Group on Evaluation of Individual Doses: Institute of Radiation Epidemiology, Radiation Effects Association, 1-9-16, Kajicho, Chiyoda-ku, Tokyo 101, Japan.

* 沼宮内弼雄(座長, 放射線計測協会), 石黒秀治(動力炉・核燃料開発事業団), 河田 燕(成蹊大学), 南 賢太郎(日本原子力研究所), 吉本泰彦(放射線影響研究所)。

Correspondence should be addressed to Kentaro MINAMI: Department of Database, Research Organization for Information Science and Technology, 2-4, Sirakata, Sirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki Pref. 319-11, Japan.

資料作成担当連絡者: 南 賢太郎(高度情報科学技術研究機構, 319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4)。

の室内で相対湿度の異なる条件下で保存したとき、潜像退行は相対湿度 70% までは少ない。これ以上の湿度では急激に大きくなる。簡単な防湿包装（クレラップ、5-塩化ビニリデン膜）をすることにより、相対湿度 90% でも 1 か月間の潜像退行を約 10% に低減できる。

個人線量測定が開始されたときから 1970 年（昭 45）までは、フィルムは紙包装で、これをクレラップで再包装するなどして使用していた。1970 年から白色のビニール簡易包装に変更され、1976 年（昭 51）からは黒色のビニールによる完全防湿、防水包装となり、潜像退行はきわめて少なくなった。

個人線量測定サービスにおいては、フィルムを 1 か月ごとに回収し、測定を行っており、過去の測定における潜像退行による誤差は総合的に 10% 程度と判断される。

6・1・1 現像処理

フィルムの現像、定着処理は、JIS K 7557（1956，昭 31）に基づいて実施され、誤差の原因を排除して作業が進められていた。以後、本 JIS の温度条件を満たす自動現像装置および現像液等の商品化が急速に進展し、線量測定事業でも使用されるようになった。したがって、現像温度管理は初期の頃より良好で、現像処理による誤差の発生は排除されている。

6・1・2 写真濃度の測定

現像されたフィルムの濃度は、濃度計（JIS K 7605）で測定する。

測定時には、同種類の被ばくしていないフィルム（コントロールフィルムと呼ぶ）を測定対象フィルムと同時に現像して、この濃度をバックグラウンド濃度として差し引き、正味濃度を測定している。この方法により、カブリや自然放射線による影響は初期から排除している。

濃度計はステップ状の基準濃度片を用いて校正して使用しており、濃度計自体による誤差は排除されている。

6・1・3 線量と濃度の関係

照射線量率を I 、ばく射時間を t とすると

フィルム濃度 S は I と t の相乗積に比例し、 I と t は相反則（reciprocity law）の関係にある（Bunsen-Roscoe の法則）。したがって、濃度 S は線量率やばく射時間の長短により変わることはない³²⁾。

低線量域では、線量と濃度は比例関係にあるが、高線量域になると比例関係が崩れてくるので、線量と濃度曲線との関係を高次多項式で近似し、高線量域の測定精度の改善を図っている。

6・1・4 見かけの線量³³⁾

同じフィルム濃度に対する各放射線の線量比はどの濃度においても等しくなる性質がある。ある基準放射線の線量-濃度曲線（特性曲線）を作り、他の放射線の任意線量 D によって生じる濃度に対する基準放射線の線量を D_s とすると、 D/D_s は線量によらずつねに一定となる。 D_s のことを見かけの線量（apparent dose）と呼び、濃度のかわりに D_s を用いれば線量と見かけの線量の関係はつねに直線となる。基準とする放射線には、 ^{137}Cs または ^{60}Co を主に用い、作業環境の γ 線エネルギーに近似させている。

6・1・5 フィルムの放射線に対する特性³³⁾

見かけの線量を利用すれば、ある一種類の放射線に対する線量の直線性は確保できるが、 D/D_s は放射線の種類、エネルギーにより異なる。したがって、ある放射線の真の線量を見かけの線量から得るためには、あらかじめ基準放射線に対するその放射線の感度を求めておかなければならない。

フィルムのための X・ γ 線エネルギー特性を、 ^{60}Co を基準とした相対感度で示すと図 2 中の [PI] に相当する感度となる。したがって、個人線量測定サービス機関では、フィルムバッジのエネルギー特性の調査を行い、線量評価式に結び付けている。

6・2 フィルムバッジによる線量評価

個人線量測定サービス機関では、測定サービ

図2 各フィルタ下のフィルムのエネルギー特性⁵¹⁾

を開始したときから1988年度(昭63)までX・ γ 線の線量測定をすべて照射線量で実施した(ただし、7・1, 9・3で述べるように、日本原子力研究所、動力炉・核燃料開発事業団等では、それぞれ、昭和49年、56年から直接深部線量当量を測定・評価する方法に変更した)。

したがって、個人線量計の校正時には、線量計を自由空間中に置き、照射線量で標準照射を行い、特性を求めた。この場合、個人の被ばく線量は個人線量計を人体に装着して人体からのX・ γ 線の後方散乱を含め、照射線量で測定していた。

6・2・1 フィルムバッジの構造

フィルムは、X・ γ 線のエネルギーに対してそれぞれ異なった感度を有している。このため、線量測定にフィルムを利用する場合には、放射線の種類やエネルギーに応じて適当なフィルタ(ろ過板)を使用する。このようなフィルタを組み込んだフィルム挿入ケースをフィルムバッジケースと呼ぶ。JISで規格化されたフィルムバッジケースのフィルタを表6-9に示す。なお、日本原子力研究所で使用しているフィル

表6 JIS Z 4301 (1956) X-I型X線用フィルムバッジケース

ろ過板の種類	ろ過板の物質	厚さ(mm)	許容差(mm)
A	ろ過板なし		
B	アルミニウム	1.40	± 0.08
C	銅	0.20	± 0.02
D	アルミニウム	1.20	± 0.08
	銅	0.60	± 0.02
	アルミニウム	0.80	± 0.06

表7 JIS Z 4302 (1956) γ -II型フィルムバッジケース (JIS-II型FB)

ろ過板の種類	ろ過板の物質	厚さ(mm)	許容差(mm)
A	ろ過板なし		
B	銅	1.0	± 0.1
C	カドミウム	1.0	± 0.1

ムバッジケースのデータを表10に示す。

6・2・2 エネルギー判定方式線量評価法

エネルギー依存性の平坦化が困難な低エネルギーの範囲では、まず、入射したX・ γ 線のエネルギーを判定することが必要である。エネルギーがわかれば等価線量と真の線量との関係が

わかる。

表6のX-1型X線用バッジの各フィルタ下のフィルムのエネルギー特性(相対感度)を求める。これを用いてX-1型X線用バッジの各

フィルタの下の等価線量の比をエネルギーに対して目盛った図を作る。この比はエネルギーに対応しているの、これを使って逆に被ばくしたX・ γ 線のエネルギーを判定することができる。エネルギーがわかれば、等価線量をその放射線の相対感度で割って真の線量が求まる。

6・2・3 120 keV 以上の線量評価法

Cd や Cd+Pb などの金属フィルタを用いると 120 keV 以下のフィルムの線量に対する感度はきわめて低下し、120 keV 以上のフィルムの線量に対する感度、すなわち、エネルギー特性はおおむね平坦となる。この方法を用いて、表7のJIS Z 4302の γ 線および硬X線用バッジが規格化された。

この規格のJIS II型 γ 線用フィルムバッジ(原研I型フィルムバッジはこれに対応する)は、初期の頃、原子力研究開発機関で使用された。線量測定誤差は、 $\pm 20\%$ である。

表8 JIS Z 4323 (1974) X線および γ 線用広範囲フィルムバッジケースのフィルタ物質とその厚さ(広範囲FBケースに相当)

種 類	フィルタの材質	厚さ(mm)	許容差(mm)
'74年形	なし	—	—
	プラスチック	1.50	± 0.15
	アルミニウム	0.60	± 0.06
	プラスチック	2.40	± 0.24
	スズ	0.80	± 0.08
	鉛	0.40	± 0.04
	プラスチック	1.80	± 0.18
	銅	0.30	± 0.03
	プラスチック	2.70	± 0.27

表9 JIS Z 4323 (1987) X線、 γ 線および熱中性子用広範囲フィルムバッジケースの形式およびフィルタ物質とその厚さ

種 類	フィルタ名称	フィルタの材質	厚 さ(mm)	許容差(mm)
1 形	オープン	なし	—	—
	プラスチック	プラスチック	1.50	± 0.15
	アルミニウム	アルミニウム	0.60	± 0.06
		プラスチック	2.40	± 0.24
	銅	銅	0.30	± 0.03
		プラスチック	2.70	± 0.27
	スズ	スズ	0.80	± 0.08
		鉛	0.40	± 0.04
		プラスチック	1.80	± 0.18
	カドミウム	カドミウム	0.80	± 0.08
		鉛	0.40	± 0.04
		プラスチック	1.80	± 0.18
2 形	オープン	なし	—	—
	プラスチック	プラスチック	3.0	± 0.3
	アルミニウム	アルミニウム	1.0	± 0.1
		プラスチック	0.5	± 0.05
	スズ	スズ*	1.5	± 0.1
		プラスチック	1.5	± 0.15
	カドミウム	カドミウム**	1.5	± 0.1
		プラスチック	1.5	± 0.15

* スズは、スズと鉛(Sn 40% wt, Pb 60% wt)の合金とする。

** カドミウムは、カドミウムと鉛(Cd 40% wt, 60% wt)の合金とする。

表10 原研型フィルムバッジのフィルタ物質とその厚さ

バッジの形式(年)	バッジケースの材質	フィルタ物質とその厚さ
原研-I (1959)	Al	open window PI** (1.5mm) Cd (1.0mm) Sn (1.0mm)
原研-II (1960)*	Al	open window PI (1.5mm) Cd (1.0mm) Sn (1.0mm) Cu (1.0mm) Pb (0.35mm)
原研-III (1962)	プラスチック	PI (0.45mm) PI (1.20mm) PI (3.00mm) Al (160mg/cm ²) Ag (160mg/cm ²) Cd (1mm) Sn (1mm)
原研-IV (1963)*	プラスチック	PI (0.45mm) PI (1.20mm) PI (3.00mm) Al (150mg/cm ²) Sn (150mg/cm ²) Cd (0.8mm)+Pb (0.4mm) Sn (0.8mm)+Pb (0.4mm)

* 原研-II型バッジは、JIS Z 4302 (1957), JIS II型に、原研-IV型バッジは、JIS Z 4323 (1987) に相当する。

** PI はプラスチック

6・2・4 感度の線形結合による線量評価法

JIS Z 4323 は、各フィルタ下の X・γ 線エネルギーに対する感度の相違を利用し、各フィルタ感度の線形結合によりエネルギー特性を平坦化し、照射線量を測定する方式である。

各フィルタ下の濃度から得られた等価線量をそれぞれ [PI], [Sn+Pb], [Sn], [Al], [Cu] とすれば (PI はプラスチックの略), X・γ 線の線量 D は、広いエネルギー範囲にわたり, k_i を定数として、フィルム感度の線形結合の式で以下のように求められる。

$$D = k_1[\text{Sn+Pb}] + k_2[\text{Cu}] + k_3[\text{Al}]$$

$$+ k_4[\text{PI}]$$

このフィルムバッジの各フィルタ下のエネルギー特性の例を図2に示す。平坦化の限界は照射線量で $\pm 20\%$ である³⁴⁾。

線量測定サービス機関は、1969年(昭44)よりこの方法で線量評価を行っている。

6・2・5 線量評価誤差

上記の JIS Z 4323 (1974年, 昭49) のフィルムバッジと線量評価法の開発は、1967年(昭42)より進められ1969年(昭44)からサービスが開始された。ただし、JIS の制定は遅れて1974年である。この広範囲用フィルムバッジ(原研IV型フィルムバッジはこれに対応する)を使用した場合に、30 keV - 3 MeV の範囲の X・γ 線について、混合照射を含め、実際の測定サービスでどの程度の精度が期待できるか、電子技術総合研究所の協力のもとに実験が行われた³⁵⁾。

実験結果を図3に示す。この実験結果から広範囲型フィルムバッジは、98.3% の信頼度で

図3 JIS Z 4323 型フィルムバッジの測定誤差とその頻度分布

±20% の誤差であることが明らかにされている。表11にこれまでに使用されたフィルムバッジの諸特性を示す。

6・3 フィルムによる熱中性子の線量測定

Cd と Sn フィルタ下のフィルム濃度差, $[Cd + Pb] - [Sn + Pb]$ を熱中性子線量の測定に利用する。

Cd の捕獲 γ 線による感度は、Cd の厚さが 1 mm 程度ではフィルム単独の熱中性子感度の約 4 倍になることが知られており、これを利用して熱中性子線量を求めている³³⁾。

熱中性子の標準照射は、実験用原子炉、または中性子線源と黒鉛パイルを用いて行う。熱中性子フルエンスの測定は、金箔放射化法により行われ、約 ±3% である。フィルムによる総合的な熱中性子線量測定誤差は、約 ±20% である。

6・4 フィルムによる速中性子の線量測定

この線量測定法は、速中性子の弾性散乱により発生する反跳陽子が乳剤中に作る飛跡を計数するものである。この測定法には、1957年(昭32) 当時から、コダック社の NTA フィルム (Neutron Monitoring Film Type A) を使用し、現在に至っている。

飛跡を顕微鏡で識別できる中性子のエネルギーは、0.5 MeV 以上である。飛跡数は 0.5 - 4 MeV 程度までは中性子吸収線量におおむね比例するが、4 MeV 以上では実際の線量よりも過大評価となる。また、線量当量当たりの飛跡数は、中性子エネルギーが高くなるとともに増加する。したがって、被ばく線量を評価するためには、現場の中性子スペクトルを調査し、現場の中性子スペクトルを代表するようなスペクトルを有する中性子線源を用いて基準照射をし、飛跡数と線量の換算係数を求め、線量評価をする必要がある³⁶⁾。この問題が線量評価誤差となり、線量評価精度を阻害する原因となる。中性子線源の速中性子フルエンスの校正精度は

約 ±10% である。なお、1985年代(昭60) から ±3% で校正できるようになった。

測定下限は、エネルギーや飛跡計数条件により異なる。最低 10 - 30 mrem からである。なお、測定誤差は飛跡計数個数と γ 線バックグラウンドによる。飛跡の読取りは、現在に至っても自動化されていない。

紙包装の NTA フィルムの潜像退行は、相対湿度 45% でも、1 か月間で 50% 以上となり、きわめて大きい。したがって、初期の頃はクレラップで再包装して使用し、1 か月交換で測定していた。

潜像退行を改善するため1984年(昭59) から、アルミニウムとプラスチックのラミネートフィルム中に NTA フィルムを乾燥窒素ガスとともに封入し、完全防湿構造としたことにより、常温 (20 °C) での潜像退行現象は 1 か月間で約 25% となった。

なお、1965年(昭40) より開始された速中性子線量測定サービスでは、2 週間ごとにフィルムを交換しており、また、完全防湿構造となつてからは 1 か月ごとに交換しているので、測定サービス期間中のフェーディング誤差は、全期間をとおして 25% を考慮すればよいと評価している。線量測定誤差は、約 ±20% である。

7. 熱ルミネセンス線量計 (TLD)

わが国では、1965年代(昭40) に TLD として安定な性能を有する蛍光体材料が多くの研究者、メーカー (松下産業機器(株)、根本特殊化学(株)、化成オプトニックス(株)) の努力によって研究・開発され、製品化された。松下産業機器(株) の TLD UD-200S (X・ γ 線のみ測定可能) は、1974年(昭49) から動力炉・核燃料開発事業団で個人線量の測定に用いられるようになった。このときの TLD による個人線量測定は、照射線量であった。

7・1 TLD バッジの仕様と性能

動力炉・核燃料開発事業団と松下産業機器(株)

表 11 測定サービス機関において提供するフィルムバッジの諸特性

FBの種類	検出限界および線量上限値	エネルギー特性	方向特性	フェーディング特性	備考
JIS II型γ線用FB	γ線 : 10 mR - 60 R	γ線 : ±20%以内 速中性子はエネルギー依存性が大きい	γ線 : 45度にて-10%以内 (正面向射を基準)	γ線フィルム : 10%以内/30日 (室内保管)	<ul style="list-style-type: none"> ● 昭和44年までのγ線測定上限は1 800 mR ● 昭和45年以降、超微粒子現象法を採用した際、γ線測定上限は600-800 R (以下同様) ● 昭和45年以降、NTAフィルム包装変更によりフェーディング特性が10%程度/60日に改善 (20℃, RH 60%保管)
中性子用FB	熱中性子 : 10 mrem - 6 rem 速中性子 : 10 mrem - 2 rem	速中性子はエネルギー依存性が大きい	速中性子 : 45度にて-15% (正面向射を基準)	NTAフィルム : 25%程度/30日 (クレラップ包装, 室内保管)	
広範囲型FB	γ線 : 10 mR - 60 R 熱中性子 : 10 mrem - 6 rem	γ線 : ±20%以内	γ線 : 45度にて-10%以内 (正面向射を基準)	γ線フィルム : 10%以内/30日 (室内保管)	
高エネルギー広範囲型FB	γ線 : 10 mR - 60 R 熱中性子 : 10 mrem - 6 rem	γ線 : 同上	γ線 : 同上	γ線フィルム : 同上	
中性子高エネルギー広範囲型FB	γ線 : 10 mR - 60 R 熱中性子 : 10 mrem - 6 rem 速中性子 : 10 mrem - 2 rem	γ線 : 同上 速中性子はエネルギー依存性が大きい	γ線 : 同上 速中性子 : 45度にて-15% (正面向射を基準)	γ線フィルム : 同上 NTAフィルム : 25%程度/30日 (クレラップ包装, 室内保管)	

(注) γ線および中性子に関する諸特性を記載した。

で共同開発された TLD バッジ (各種線種の線量測定が可能) は, 1981年 (昭56) から当該事業団で使用された³⁷⁾。

この TLD バッジは, ICRP 1977年勧告を踏まえて体幹部の 1 cm 深部線量当量を測定できるように製作された。この深部線量当量は, バッジケース (ハンガー) に付加された 1 000 mg/cm² の樹脂と TLD 素子を組み合わせて 1 cm 深部線量当量を直接測定できるように工夫したものである。なお, 図 4(a) に TLD バッジとその構成を示す。

TLD バッジは, X・ γ 線の線量評価用 TLB (I) と中性子線量評価用 TLB (II) をバッジケースに入れて使用する。TLB (I) と TLB (II) の TLD 素子を表12に示す。なお, 図 4(b) に TLB (I) の構造を示す。1 cm 深部線量当量 (以下, 1 cm 線量当量と呼ぶ) は, 厚さ 1 000 mg/cm² のバッジケース下の評価用 TLB (I) の No. 4 素子の値から測定する。

中性子線による被ばく線量の評価は, 評価用 TLB (II) の No. 1 素子 - No. 4 素子に Cd と Sn のフィルタを組み合わせ得られた値より,

(動力炉・核燃料開発事業団等のパンフレットより)

図 4 TLD バッジの構造

表12 評価用 TLB (I) および (II) の TLD エLEMENT 構成

評価用 TLB (I) UD-808P				
エレメントNo.	蛍光体	シールド		測定線種等
1	$^7\text{Li}_2\text{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$	ABS 樹脂	17 mg/cm ²	β 線, γ 線
2	"	"	63 mg/cm ²	"
3	$\text{CaSO}_4 (\text{Tm})$	"	1 000 mg/cm ²	γ 線
4	$^7\text{Li}_2\text{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$	"	1 000 mg/cm ²	"
評価用 TLB (II) UD-809P				
エレメントNo.	蛍光体	シールド		測定線種等
1	$^7\text{Li}_2\text{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$	(前) Cd 0.7 mm (後) Cd 0.7 mm		γ 線
2	$^6\text{Li}_2\text{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$	Sn 0.7 mm	Cd 0.7 mm	中性子線
3	"	Sn 0.7 mm	Cd 0.7 mm	"
4	"	Cd 0.7 mm	Sn 0.7 mm	"

熱中性子、熱外中性子（カドミカット）、速中性子別に算出している³⁸⁾。なお、速中性子の測定は、当該中性子が人体で減速され反射された熱中性子を利用するアルベド法で測定している。表13に主測定器として使用した TLD バッジ等の性能を示す。

TLD バッジはフィルム線量計と異なり出荷時に線量測定精度（不確かさ）が保証される。また、使用開始後の測定の不確かさは、定期校正により $\pm 20\%$ で管理されているので、測定値の信頼性は確保されている³⁹⁾。

8. 副測定器

8.1 副測定器の選定と仕様の変遷

副測定器として実際に使用されてきた線量計の利用状況を表14および表15に示す。表に示すようにいくつかの種類があり性能および機能が異なるが、測定器は、作業現場での放射線の種類とエネルギー、測定の目的、作業内容等を考慮して適切に選択されてきた。

8.2 直読式ポケット線量計

初期（1957-1970年、昭32-45年）に副測定器として用いられた直読式ポケット線量計は、理研計器(株)の PD-100MR, PD-200MR 等であった。これに加え、1970年（昭45）頃からフィジオテクニク(株)の SEQ5 または 6, ステファン(株)の 2200B-02 型線量計が用いられるようになった。

直読式ポケット線量計の規格は、JIS Z 4308-1959：「X 線および γ 線用直読式ポケット線量計」として1959年（昭34年）に制定された。そして、現在もこの規格は改定され、使用されている。

1989年（平1）にアロカ(株)から、1 cm 線量当量測定用の半導体検出器を用いる電子式ポケット線量計（EPD）が市販され、広く使用されるようになった。

これらの製品は直読式であるため点検・校正はきわめて容易で、使用期間中における測定誤

差は、定期的に点検・校正を実施することにより $\pm 10 - 15\%$ で管理されている。

8.3 警報付線量計

電離箱式の「警報付線量計（APD）」は、1961年（昭36）にアロカ(株)から、PCA-1B, PCA-2 として市販された。初期の APD は、電離箱と電位計用真空管（CK 5886）を用いる方式であった。

1974年（昭49）から小型 GM 管を用いた線量表示機能付 APD が富士電機(株)から市販され、原子力発電所等で用いられるようになった。1982年（昭57）に同社は、検出器を GM 管から常温で動作する半導体検出器に変えたので、信頼性がきわめて改善され現在に至っている。

使用期間中における点検・校正はきわめて容易であり、測定誤差は、定期的に点検・校正を実施することにより $\pm 10\%$ で管理されている。

8.4 熱ルミネセンス線量計（TLD）

TLD は、原子力発電所等で作業管理を主目的とした被ばく線量の日管理用線量計として使用されている。各事業所において副測定器として使用している TLD の代表的なものは、UD-200S, UD-300P2, UD-801P, UD-811（松下産業機器(株)）である。

TLD 素子として硫酸カルシウムを用いるものは、 γ 線に対する感度が高く、測定下限は $0.1 - 1 \text{ mR (mrem)}$ からである。

使用期間中における点検・校正はきわめて容易であり、測定誤差は定期的に点検・校正を実施することにより $\pm 10 - 20\%$ で管理されている。

9. 単位の変遷に対する対応

9.1 照射線量から個人線量当量への換算

従来、照射線量 $X \text{ (R)}$ とその場に置かれた微小な人体軟組織の線量当量 $H \text{ (rem)}$ の比 f ($f=H/X$) は約 1 とみなせるので、照射線量から実務的に rem を求めていた。このため、照

表 13 主測定器として使用した TLD に関する諸特性

TLD の種類	検出限界および線量上限値	エネルギー特性	方 向 特 性	フェーディング特性	備 考
UD-200 S	γ 線 : 0.1 mR - 200 R	γ 線 : ±30%	γ 線 : 45度にて±10%以内 (正面入射を基準)	5 %以内/3 月	
評価用 TLB	γ 線 : 10 mrem - 20 rem 熱中性子 : 10 mrem - 20 rem 熱外中性子 : 50 mrem - 20 rem 高速中性子 : 50 mrem - 20 rem	γ 線 : ±20% 熱中性子以外の中性子のエネルギー依存性は大きい	γ 線 : 同上	硫酸カルム素子 5 %以内/3 月 (20°C) ホウ酸リチウム素子 10%以内/3 月 (20°C)	熱中性子以外の中性子測定には身体からのアルベド中性子を利用するので、場のエネルギー分布に適した補正係数を使用する
動燃型 TLD バッジ (自動)	γ 線 : 10 mrem - 1000 rem 中性子 : 20 mrem - 200 rem (熱〜数 MeV)	評価用 TLB と同様	評価用 TLB と同様	同 上	同 上
動燃型 TLD バッジ (手動)	γ 線 : 10 mR - 200 R 中性子 : 20 mrem - (熱〜数 MeV)	γ 線 : 200 S 同様熱中性子以外の中性子のエネルギー依存性は大きい	γ 線 : 45度にて±10%以内 (正面入射を基準)	同 上	γ 線測定用として UD-200 S を : 中性子測定用としてフッ化リチウム素子 (UD-136, 137) を使用 (中性子測定については同上)

(注) γ 線および中性子に関する諸特性を記載した。

表14 原子力研究開発機関における副測定器の種類と使用状況

種類	名 称 (型式)	使 用 年 度 (西暦下 2 桁)
P D	〔γ線用〕 理研計器：PD 100mR, 200mR 東 芝：ポケットチェンバー フィジオテクニク：SEQ-5, 6 ステファン：220 A-02 〔中性子用〕 ベンディックス：Model 609	64—92 57—74 71—92 78—84 57—88
	〔γ線用〕 松下産業：TLD, UD-200 S 〔γ線・中性子用〕 松下産業：TLD, UD-810	78—84 85—92
A P D	〔γ線用〕 ア ロ カ：PCA-1 B 理研計器：PAD-300 富士電機*：レマスター-M, D, C レマスター-S, Q 松下産業：ZP-110	60—74 63—74 74—92 83—92 75—92

* レマスター M, D, C (GM 式), レマスター S, Q (SSD 式)

表15 原子力発電施設における副測定器の種類と使用状況

種類	名 称 (型式)	使 用 年 度 (西暦下 2 桁)
P D	〔γ線用〕 理研計器：PD-200 フィジオテクニク：SEQ-5, 6 ステファン：2200 B-02, 05 〔中性子用〕 ドジメーター：884, 609 コーポレーション	70—80 69—84 65—92 74—92
	〔γ線用〕 松下産業：TLD, UD-200 S ATLD, 300-P 2 TLB, UD-801 UD-811 〔γ線・中性子用〕 松下産業：TLD, UD-808, 809 UD-810	69—92 76—92 86—92 81—92 83—92 81—92
A P D	〔γ線用〕 理研計器：PAD-201 富士電機*：レマスター-M, D, C レマスター-S, Q 松下産業：ZP-110 ZP-120, 121, 131	74—81 74—82 82—92 74—84 81—92

* レマスター M, D, C (GM 式), レマスター S, Q (SSD 式)

射線量に対して平坦なエネルギー特性を有する個人照射線量計の開発が長期にわたり行われるとともに、照射線量の測定値を線量当量に読み替えて1988年度(昭63)まで線量登録が行われた。

なお、個人照射線量計は、すべて自由空間中で照射線量で校正された。

9・2 照射線量測定値と1 cm 線量当量の関係
照射線量でエネルギー特性を平坦化した線量計を人体の胸部または腹部に装着すると人体か

らの後方散乱⁴⁰⁾のため、その測定値は1989年度(平1)より使用された1 cm 線量当量にきわめて近似した値を示す。図5に、自由空間中で照射線量に対してエネルギー特性を平坦化した TLD バッジをファントムに装着した場合のエネルギー特性を示す。このエネルギー特性は、図中の1 cm 線量当量にきわめて近似していることがわかる。また、図6にフィルムバッジについても同様の実験結果を示す⁴¹⁾。この場合もファントムに装着したエネルギー特性は1 cm 線量当量に近似していることがわかる。以

図5 自由空間中で照射線量に対して平坦な特性を有する TLD 型個人線量計をファントムに装着して求めたエネルギー特性

図6 自由空間中で照射線量に対して平坦な特性を有するフィルムバッジをファントムに装着して求めたエネルギー特性

上の理由により、個人線量測定値は、過去の測定結果（登録線量）の rem も単に SI 単位への変換として 10^{-2} 倍することにより、平成元年より施行された放射線障害防止法の 1 cm 線量当量 (Sv) に近似的に変換することができる。

9.3 個人線量当量の直接的な測定・評価

初めて制定された放射線障害防止法では、最大許容線量の勧告は人体の臓器別に行われた。このため、照射線量による個人線量測定結果を各臓器の許容線量へ結び付ける試みが行われた。しかし、各臓器線量への結び付けはきわめて困難であるので、各臓器の線量当量を安全側に評価することを目的に、被ばく線量を体幹部の最大線量当量 (MADE と呼ぶ) で代表し、この MADE を個人線量計で直接測定・評価（測定単位は、rem）する試みが日本原子力研究所で行われた。その結果、日本原子力研究所の個人線量測定は、1974年（昭49）から、フィルムバッジを用い線形結合法により、MADE で実施されるようになった。この方法による測定結果は、1 cm 線量当量にきわめて近い値である。なお、測定誤差は $\pm 20\%$ である。

動力炉・核燃料開発事業団等は、ICRP 1977年勧告を参考に、ICRU 25 に示された体幹部の深部線量当量（1 cm 線量当量に相当）を直接測定する TLD バッジを開発し、1981年（昭56）から使用した。

このような測定方法の採用により個人線量測定上説明の困難な $1 R \approx 1 \text{ rem}$ の問題は、おおむね解決された。

9.4 個人線量当量測定値の加算性

初期から1988年度（昭63）まで実施された個人の照射線量測定値から線量当量を求めた値は、上記 9.2 で説明したように、結果的に 1 cm 線量当量にきわめて近似しており、過去の個人線量測定値と現在のそれを加算することについては何ら問題はない。

なお、中性子線については放射線障害防止法

制定当時から、ファントムを用いて計算により求められた MADE の 1 mrem に相当する中性子の粒子束密度の時間積分量（フルエンス）が示されていたので、これを換算指標として中性子フルエンスおよびスペクトルの測定から線量を rem で評価するか、またはこの換算指標を基に作られたレムカウンタで測定された結果から線量を評価しており、したがって、線量の加算については問題はない。

10. 測定値の品質保証の実際

10.1 フィルムバッジ

10.1.1 フィルムの品質保証

フィルムバッジに用いるフィルムは、フィルムの製造ロットにより、感度にばらつきがある。この感度のばらつきによる線量測定誤差を排除するため、個人線量測定サービス機関では入荷フィルムのロットごとに基準線量（ ^{60}Co または ^{137}Cs 線源）でフィルムを照射し、照射線量とフィルム濃度の関係を示す線量特性曲線を作り、これを用いて感度の補正を行っている。また、フィルムバッジによる個人線量測定サービスを実施するときは、コントロール用フィルムも同時に使用者の施設へ発送し、使用者の施設ではこれを施設の環境条件、バックグラウンド条件を代表する場所に保管した後、フィルムバッジとともに返却して、バックグラウンドとカブリによる測定誤差を排除し、測定値の精度を高めている。

10.1.2 線量測定サービス機関の監察制度

フィルムバッジは現像等の多くの工程を経て線量を評価している。そこで、1985年（昭60）3月から、(株)日本保安用品協会は、原子力事業者の要請により、学職経験者の協力を得てフィルムバッジ等技術監察委員会を設置し、フィルムバッジによる個人線量測定サービス事業を行う者に対して技術的内容の監察を開始した。

この監察は、フィルムバッジ等の取扱いに係る現像、濃度測定、線量の評価などの技術上の事項が適正に行われるよう指導することを目的

としたものである。

監察は、年度ごとに定期的に行うものと必要のつど臨時に行うものがある。また、監察の内容はフィルムバッジ等の取扱い場所において、その取扱い方法について行う現地監察と、放射線量の判定についての精度を調べる精度試験監察とがある。

精度試験監察は、(財)放射線計測協会に標準照射を依頼して線量評価誤差を定期的にチェックしている。

10・2 TLD バッジ

TLD バッジの利点は、照射による感度検査が容易に行える点である。したがって、JIS に基づき生産者と使用者は受渡検査により測定誤差を確認できる。その上、使用開始後も定期的に点検・校正を実施し、測定誤差を $\pm 20\%$ で管理している。このように線量計の性能は保証されるので、TLD バッジによる測定値の信頼性は良好である。

10・3 校正とトレーサビリティ

初期の頃には原子力研究開発機関および個人線量測定サービス機関では、購入先において線源の線量率が値付けされた ^{226}Ra 線源を使用して個人線量計の校正を行っていたが、1959年代(昭34)から ^{60}Co 照射装置、 ^{137}Cs 照射装置を整備するとともに、ビクトリーン(株)の R メータを準備して、これを用いて電気試験所から放射線量の標準を各事業所へ移行した。

個人線量計は移行された基準線量により、フィルムバッジについてはフィルムロットごと、TLD バッジ等については年1-2回の頻度で原子炉等規制法に基づく保安規定に従って点検・校正を実施した。

1965年代(昭40)になりトレーサビリティの考え方が導入されるようになった。

わが国においても、放射線測定器の校正方法にトレーサビリティの考え方を導入して線量標準の移行手法および校正手法の規格化を進め、

これを JIS Z 4511「放射線量測定器および放射線量率測定器の校正方法」として、1975年(昭50)に制定した。

1965年代(昭40)から運転を開始した原子力発電所は、すべて校正室を備えており、個人線量計やサーベイメータ等を上記の保安規定等に基づき JIS の手法を用い年1回点検・校正し、その記録を作成している。

以上のように、わが国においては早い時期から測定器の JIS 化、トレーサビリティの導入と校正手法の JIS 化が図られ、測定器の点検・校正が実施されたことにより、過去における線量測定値も十分に信頼性が確保されているとともに、個人線量測定サービス機関における測定値の整合性も十分に確保されていたと考察される。

11. 個人線量計の相互比較

放射線測定器は、計量法の検定制度に馴染みにくい面があり、歴史的に依頼試験制度、すなわち、トレーサビリティに近い考え方で校正が行われてきた。

個人線量測定値は、行政機関への報告、訴訟、保険などの社会制度との係わりにより、トレーサビリティシステムではカバーできない測定値の社会的信頼性(事業所の測定値を横ならびに見たときの整合性)の確保が求められる。このため、各個人線量測定機関の測定値の整合性を相互比較により明らかにし、その結果を社会に示さなければならない^{42), 43)}。

国際原子力機関(IAEA)は、1988年に第1回相互比較を、また、1990年に第2回相互比較を開催した。日本原子力研究所はこの相互比較に原研IV型フィルムバッジで参加した⁴⁴⁾。その結果は、ICRP Publ. 35 に示される個人線量の測定精度内であった。

また、IAEA は、RCA(地域協力協定)により1990年から1995年にわたり4回相互比較を開催した⁴⁵⁾。千代田テクノル(株)は、1995年に自社のフィルムバッジでこの相互比較に参加し

図 7 IAEA/RCA 個人線量計相互比較参加結果 (千代田テクノル(株))

$H_p(10)$: 1 cm 線量当量, $H_p(0.07)$: 70 μ m 線量当量

た。その結果を図 7 に示す⁴⁶⁾。動力炉・核燃料開発事業団も TLD バッジでこの相互比較に参加した。その結果、いずれの測定誤差も $\pm 20\%$ で、きわめて良好であった。

フィルムバッジの場合、測定のつどフィルムが交換されること、放射線の入射エネルギーの高低と入射方向で感度が異なること、線量の高低により評価式を選択する必要があること、また、全国的に現像（化学処理）・測定所があること、などの理由により定常的な線量測定サービスにおいては上記のような高精度を毎期待することは困難である。したがって、定期的に相互比較を行い、測定誤差を確かめ、測定値の全国的な調和を図る必要がある⁴⁷⁾。

このように繰り返し実施される相互比較による個人線量計の測定誤差の許容は、ICRP の Publ. 35 (1982年採択) に示される考え方で規格化が図られている^{48)~50)}。

上記のような相互比較参加結果とわが国の個人線量評価技術から、登録された個人線量は ICRP Publ. 35 の測定精度を十分に満たしているものと考察される。

おわりに

本調査を通じ以下の点が明らかになった。

(1) 放射線防護に係る線量は、物理的に明解な照射線量から、リスクの概念を含む実効線量当量（実効線量）へと歴史的に変遷してきた。実効線量当量は、一点で定義できない線量であり、物理的な量ではない。したがって、一個の線量計を人体に装着して作業者の実効線量当量を測定することは不可能である。このため、物理的に明解な計測実用量が定義され、現在使用されている。

(2) 1 cm 線量当量（計測実用量）による個人線量測定値と従来の照射線量で測定した過去の個人線量測定値間には、齟齬はきわめて少なく、両者の線量は加算できる。

(3) 日本最初の原子炉が稼動したとき、すでに個人線量計の JIS 規格が制定されており、これを基に製作された線量計で線量測定が開始され、測定値の信頼性の確保が図られていた。

(4) 事業者は、原子炉等規制法に基づく保安規定により測定器の点検・校正を定期的を実施し、測定誤差を $\pm 10 - \pm 20\%$ で管理し、使用期間中の測定値の信頼性を確保していた。

(5) フィルムバッジ線量計の場合、定期的に相互比較が実施され誤差が確認されていないが、線量測定サービス機関に対する監察制度が機能していることにより、測定値の信頼性が高

められている。数少ないが相互比較への参加結果から、わが国の個人線量の定常的な測定値はICRPのPubl. 35の測定誤差を十分に満たしているものと考察できる。

以上の結果から、過去の個人線量登録値は放射線疫学調査に十分利用できることが確認された。

本調査結果を取りまとめるに当たり、線量記録の整合性に関するデータ収集に当たっては千代田テクノル(株)寿藤紀道氏に、フィルムバッジの照射線量エネルギー特性データの作成に当たっては同社の福本善巳氏にご協力をいただきました。厚くお礼申し上げます。また、フィルムバッジ等による個人線量評価手法について、ご教示をいただきました日本原子力研究所、村上博幸氏に感謝致します。

本報告のとりまとめに際し、ご指導をいただきました(財)放射線影響協会理事長熊取敏之氏ならびにご協力いただきました放射線疫学調査センターの岩崎民子氏、三宅敏雄氏、大島澄男氏に謝意を表します。

文 献

- 30) Ehrlich, M.: Photographic Dosimetry of X- and Gamma Rays, NBS Handbook, 57 (1954)
- 31) 日本放射性同位元素協会: “個人外部被曝モニタリングの手引” (1964)
- 32) 菊地真一, 他: “科学写真便覧”, 上, p. 43, 丸善 (1960)
- 33) 日本アイソトープ協会編: “外部被ばくモニタリング”, 日本アイソトープ協会, 東京 (1986)
- 34) 西 健雄, 他: フィルムバッジによるガンマ線量の評価方法とその誤差, JAERI-memo, 5856 (1974)
- 35) 荒川 昌: フィルムバッジサービスとともに—25年の歩み—, p. 76, 千代田テクノル(株) (1983)
- 36) 百瀬琢磨, 宮部賢次郎, 他: 日本原子力学会「昭和63秋の大会」, 予稿集 (第 I 分冊), F45 (1988)
- 37) 石黒秀治, 武田伸荘: 保健物理, **16**, 305-316 (1981)
- 38) 石黒秀治, 武田伸荘: 同上, **17**, 27-35 (1982)
- 39) 石黒秀治, 武田伸荘, 野村幸広: 同上, **16**, 213-218 (1982)
- 40) 南 賢太郎: 同上, **20**, 328-333 (1985)
- 41) 寿藤紀道: 千代田テクノル(株), フィルムバッジニュース, No. 157 (1990)
- 42) 立田初巳, 森内和之, 他: 保健物理, **7**, 34-41 (1972)
- 43) 南 賢太郎: 同上, **31**, 49-56 (1996)
- 44) 村上博幸, 南 賢太郎: *Radioisotopes*, **42**, (11), 19-23 (1993)
- 45) Murakami, H., Minami, K. and Griffith, R. V.: *Radiat. Prot. Dosim.*, **51**, (1), 19-23 (1994)
- 46) 福本善巳: IAEA/RCA の個人線量計相互比較プログラムへの参加, 千代田テクノル(株), フィルムバッジニュース, pp. 11-12, No. 244 (1997)
- 47) Böhm, J. und Großwendt, B.: 10 Years Intercomparison Measurements of Dosimeter Systems for the Individual Monitoring of Photon and Beta Radiation, PTB-Mitteilungen 99 2/89 (1989)
- 48) ICRP Publication 12 (1968)
- 49) ICRP Publication 35 (1982)
- 50) Böhm, J. and Ambrosi, P.: *Radiat. Prot. Dosim.*, **43**, No. 1/4, 123-126 (1990)
- 51) Minami, K. and Murakami, H.: Intercomparison for Individual Monitoring, PTB-Dos-20, pp. 167-170, Braunschweig, Oct. 1991