《特集：イメージングプレートの放射線管理への応用》

個人モニタリングへの応用

山 寺 亮*¹

Application for Personal Dosimetry

Akira YAMADERA*¹

1. はじめに

個人被曝線量計にはフィルムバッジと TLD が広く使用されている。しかし、フィルムバッジの γ 線に対する測定限界は $100 \mu\text{Sv}$ で十分な感度とはいえない。

ちなみに、長瀬ラングウア株式会社の 1996 年度日本全国の個人線量当量の実態¹⁾を見ても、1 年間のすべての期間でフィルムバッジが検出限界以下の人の割合は、医療機関、研究教育機関、非破壊検査期間および一般工業でそれぞれ、68.8, 98.8, 42.3 および 96.9%となっていた。平均すると 78.3%となるが、約 8 割の業務従事者にとって、フィルムバッジによる被曝管理では不十分であることを示している。

1 桁高感度の個人線量計があれば、全体の 50~70%が測定にかかるようになると推定され、低レベルの被曝管理がより効果的に行われるようになるはずである。

また、TLD はフィルムバッジに比べて 1 桁高い感度を有するが、測定精度が悪く、素子毎の感度が変わることから、線量管理体制の行き届いた大規模施設以外では使われていないのが現状である。

イメージングプレート (IP) は光輝尽性発光体をフィルム状にした新しい放射線画像センサーで、写真フィルムに比較して約 100 倍の感度を有している。これを被曝線量測定器として使用することの可能性について検討した。

2. イメージングプレート法の原理

宮原ら^{2,3)} および雨宮ら⁴⁾によって詳しい解説がなされているので、ここでは原理についてのみ述べる。

IP は $\text{BaFBr}:\text{Eu}^{2+}$ の微細結晶をプラスチック表面に塗布したフィルムである。これに放射線が照射されると準安定状態のカラーセンターが形成され、記録として残る。これにある波長のレーザー光を照射すると光輝尽性吸収が起り、ついで $0.8 \mu\text{s}$ の短時間内に光輝尽性蛍光 (PSL) を発して基底状態に戻る。

レーザー光を IP フィilm 面に走査しながら照射し、発生した PSL 光を走査に同期させて測定すると、フィルム面上の放射線量分布が画像として読み出される。

写真フィルム法より優れた点は、①感度が 1 桁以上目的によっては 3 桁以上も高い。②ダイナミックレンジが 2 桁以上広い。③直線性がよい。④読み取り装置によって画像をデジタル化しているので、コンピューター処理が容易である。⑤短時間で読み取りができる。⑥繰り返し使用できるので、製品の性能をあらかじめチェックできる。⑦暗室を必要としない。⑧化学処理を必要としない、など数多くある。

3. 実 験

IP は BAS-UR を用いた。これを $2.9 \times 3.9 \text{ cm}$ に切断し、切断箇所からばらけないようにポリシーラーで溶封した。これを、遮光ポリエチレン袋 (厚さ 0.1 mm) に入れた後、株式会社千代田テクノ (以下、千代田テクノ社) の MD 型および XX 型のフィルムバッジケースまたはプラスチック、アルミニウム、銅、亜鉛、鉛の厚さを変えた特性のフィルターセットに挟んで放射線照射を行った。MD 型は広範囲用で $10 \text{ keV} \sim 3 \text{ MeV}$ の X, γ 線

*1 東北大学サイクロトン・ラジオアイソトープセンター放射線管理研究部；仙台市青葉区荒巻字青葉 (〒980-8578) Radiation Protection and Safety Control Division, Cyclotron and Radioisotope Center, Tohoku University ; Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8578, Japan.

および0.5~3 MeVの β 線測定用で、XX型は10~80 keVのX、 γ 線測定用である。

東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター(CYRIC)の照射実験では、線源として電子技術総合研究所で値付けした一次照射線量基準の ^{137}Cs および ^{60}Co を用いた。千代田テクノル社での照射では、一次基準 γ 線源(^{60}Co)と一次基準X線照射装置を用いた。照射線量を1 cm線量当量に換算してTable 1に示す。ここでX線のエネルギーは制動放射線の実効エネルギーで示したので、最大エネルギーはこの値の1.7~2.0倍である。

画像の読取りとデータ処理は、VM型のバッジケースによる測定では富士写真フィルム(株)のバイオイメージングアナライザーBAS3000で、それ以外はBAS1000で

Table 1 γ - and X-ray standard sources used for IP irradiations.

Source	Energy (keV)	Irradiated Dose (mSv)
^{60}Co	1173+1332	$10^{-4}\sim 10^1$
^{137}Cs	662	"
X-rays	12~140	0.4~0.8

行った^{5,6)}。

4. 結果と考察

(1) γ 線照射IPフィルムの陰影

Fig. 1にMD型バッジケースを用いて照射したIPフィルムの像を示す。数字はフィルターの番号(Table 2)を、四角は測定領域を示す。面積はフィルターの面積(最小で $12\times 12\text{ mm}^2$)を考慮して 64.8 mm^2 にした。(a)は ^{60}Co 線源を0.193 mSv照射したときのIP像である。(b)は ^{137}Cs 線源を0.262 mSv照射したときのIP像であるが、フィルターの陰影は ^{60}Co ほどには明瞭に示されていない。これは、イメージングアナライザーのグラデーションを ^{60}Co の陰影がはっきり写るよう調整したためである。

フィルターの種類によるPSL密度および検出感度をまとめてTable 2に示す。フィルターの違いでPSL密度に差がみられる。例えばNo. 7のフィルターのPSL密度に対し ^{60}Co ではNo. 2フィルターが1.47倍の値を、 ^{137}Cs 線源ではNo. 4のフィルターが1.16倍を示している。

(2) 測定可能レンジ

Fig. 2に、 ^{60}Co と ^{137}Cs を照射した時の1 cm線量当量(mSv)とPSL密度(PSL/ mm^2)との関係を示す。 ^{60}Co

(a)

(b)

Fig. 1 IP images with various filters irradiated by ^{60}Co and ^{137}Cs standard sources. (a) : 0.193 mSv with ^{60}Co γ -rays. (b) : 0.262 mSv with ^{137}Cs γ -rays.

Table 2 PSL densities irradiated with ^{60}Co and ^{137}Cs .

No.	Filters (Thickness in mm)	PSL/mm ²	
		^{60}Co (0.234 mSv)	^{137}Cs (2.78 mSv)
1	—	66.33	940.8
2	PL* (0.5)	72.97	899.2
3	PL (1.5)	72.94	1072
4	PL (3.0)	70.21	1146
5	Al (0.6)	66.38	1152
6	Cu (0.3)	55.59	991.0
7	Sn (0.8) + Pb (0.4)	49.71	990.1
8	Cd (0.8) + Pb (0.4)	50.22	993.0

* PL means ABS copolymerized plastic.

Fig. 2 Linearity of PSL density on No. 7 filter area to irradiated dose.

では1 cm線量当量は5桁のレンジにわたってPSL密度と直線関係にあり、その傾きは1を示している。PSL密度が 10^4 を越えるとリーダーの初期設定の感度(=S10000)では測定できないが、感度を落として計測すれば、より高線量の測定まで可能になる。例えば、最低のS400にすれば感度は1/25倍の感度になって、計算上は1 Sv程度まで測定できることになる。

イメージングプレートは1回目の測定で測定レンジをオーバーしても、感度を落として2回目の測定を行うことが可能で、2回目の測定値から外挿して1回目の値を求めることができる。2回目の測定値は、1回目の70~80%の値を示し、IPフィルムの保管の期間と温度が

はつきりしていればより正確な補正が可能となる。

^{137}Cs は0.15~8 mSvでしか測定していないがこの範囲で直線性が認められた。感度は ^{60}Co の1.68倍であった。

検出の下限は、自然放射線によって生成するPSL密度との有意の差でもって考察すべきであろう。筆者らの職場環境でIPを3日間放置したところ2.47 PSL/64.8 mm²(電離箱による測定では $H_{1\text{cm}}=0.03 \mu\text{Sv/h}$ であった)になった。この値を抛り所に、バックグラウンドの平方根の2倍が検出限界として、 ^{60}Co 換算で検出限界を求めると8時間使用の線量計(1日線量計)としては0.6 μSv 、1週間使用の線量計としては2.8 μSv になった。

(3) IPフィルムの均一性

1枚のIPフィルムの、場所によるPSL密度のばらつきをBAS-URで調べた。IPフィルムに ^{60}Co 線源で1.65 mSvを均一に照射し、64.8 mm²の面積の中にあるPSL密度を140箇所(14×10)で測定した。密度の平均は398.44 PSL/mm²で実測値の偏差は6.53 PSL/mm²であった。この偏差からPSL密度の統計的変動を差し引いたものが、IPフィルムの場所による不均一性と判断すれば、不均一性は1.5%になる。この値は個人被曝線量計の精度としては十分小さな値である。なお、雨宮ら⁷⁾は長周期の不均一性は0.4%、短周期の不均一性は0.1%と筆者らの値より小さな値を報告している。

同様にフィルムごとのばらつきを10枚のIPフィルムで調べたが、照射線量など照射時の誤差も含めて1.5%以下におさまっていた。

(4) X, γ 線に対するエネルギー特性

Fig. 3にIPの γ 線に対するエネルギー特性を示す。

Fig. 3(a)はフィルターのない場合および3種類のプラ

Fig. 3 Dependence of PSL sensitivities for 6 kinds of filters per 1 cm dose equivalent on photon energy.

スチックフィルターを使用した場合であるが、30～60 keV で高い感度を示し、60 keV をすぎると感度は指数関数的に低下し、500 keV 以上になると傾きはゆるやかになった。

低エネルギー部ではプラスチックフィルターの厚さを増しても感度は変わらない。高エネルギー部ではフィルターを厚くするに従って感度が高くなっている。これは入射光子エネルギーが高くなるほどフィルター内で発生する2次電子のエネルギーも高くなってフィルターを突き抜けてIP フィルムに達する電子の数が増加することによるものである。

Fig. 3(b) は金属フィルターを使用した場合である。アルミニウムフィルターの場合はプラスチックフィルターの感度曲線とほぼ同様である。銅フィルターを用いると、低エネルギー部で感度が低下して、60 keV 付近にピークを持つようになる。錫と鉛のフィルターではピークは140 keV 付近にまで移動し、低エネルギー部の感度はさらに1桁以上低下するが、数100 keV の γ 線に対しては感度の低下はあまり見られない。これらのことから、各フィルターのPSL密度を比較検討することによって、X、 γ 線のおおまかなエネルギーを推定することもできる。

なお、西らの⁹⁾フィルムバッジによる測定では、いずれのフィルターにおいても γ 線のエネルギー500 keV 付近で最も感度が低くなり、それよりエネルギーが上がると緩やかに感度が高くなる傾向を示していて、筆者らのIPによる測定傾向とは若干異なっていた。検出器を

Fig. 4 Dependence of PSL sensitivities for 3 kinds of filters per 1 cm dose equivalent on 12～120 keV X rays.

構成する元素の質量エネルギー吸収係数の違いであろう。

X線発生装置を抱えた医療現場ではX線専用の個人被ばく線量計が必要とされる。Fig. 4 はX線専用に開発したフィルターセットによるエネルギー特性を示す。アルミニウムフィルター(厚さ0.5 mm)は全エネルギー範囲で比較的に平らな感度を有し、最もエネルギー特性が良い。他のフィルターは20 keV 以下のX線に対し感度

Fig. 5 Fading of latent image on Tin-filter area of imaging plate.

をもたない。

これらの感度曲線に、試行錯誤的に重み係数をかけて次式の感度式を合成した。

$$PSL_{\text{sum}} = 0.3 \times R_{\text{Al}} - 0.2 \times R_{\text{Cu}} + 0.9 \times R_{\text{Cd}}$$

ここで、 R_{Al} 、 R_{Cu} および R_{Cd} は、それぞれ、アルミニウム、銅およびカドミウムフィルター使用時の感度特性 ($PSL \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{mSv}^{-1}$) である。測定した 12~120 keV の制動放射線に対し、変動幅±10%以下のフラットなエネルギー特性が得られた。

(5) フェーディング

Fig. 5 に ^{60}Co 線源で照射した BAS-UR を BAS-3000 で測定したフェーディング特性を示す。これは、PSL 密度の経時変化を示したもので、照射した IP は鉛 1 cm で内張りした鉄容器 (鉄の厚さ 0.5 cm) に入れ 25°C (±0.5°C) に調整した恒温室に置いた。測定は照射後 1 時間後から開始したので短寿命成分は測定していない。また、照射後 1 カ月以上になると自然放射線による影響も無視できなくなるので、それ以上の測定は行わなかった。この時間帯でのフェーディング曲線を Fig. 5 に、フィッティングした関数を次式で表わす。

$$(PSL)_t / (PSL)_0 = 0.473 e^{-0.693 \times t / 2.29} + 0.527 e^{-0.693 \times t / 24.37}$$

ここで、 t は経過時間 (日) である。フェーディング成分には 2 種類あり、第 1 成分は半減期 2.29 日で第 2 成分は 24.37 日で減衰する。この式では、IP を用いた被ばく線量測定器を 1 カ月着用すると、着用初期の被曝量が 22% に減少してしまい、長期間の被ばく線量計としては

使えないことが明らかである。

フェーディングが大きいことは積分型の検出器としては致命的欠陥で応用範囲が大きく制限される。

フェーディングの詳細については、次章の大内浩子氏に譲る。

5. ま と め

イメージングプレートを個人被曝線量計として開発できないか基礎検討を行った。その結果、1 cm 線量当量と PSL 密度とは 5 桁のレンジにわたり直線性を示し、0.6 μSv から 1 Sv 程度の被曝線量が測定できることがわかった。X 線量域で線質係数の均一な線量計が開発された。また、フェーディングが 1 カ月で 78% も発生し、長期間の着用には向いていないことが示された。

しかし、他の検出器に比べて格段に感度が高いことを生かして、短期間の被ばく線量測定器としては応用は期待できる。たとえば、入退域管理システムに組み込んだ 1 日毎の線量読取装置を開発すれば、被ばく線量の値 (自然放射線による被ばくを含む) が必ずアウトプットされるので、その値を参考に毎日のきめの細かい放射線管理が可能になる。また、X 線照射をしながら診断を行う医療現場では、直接 X 線が当たる線量の高い場所と散乱線の届く線量の弱い場所があるが、このような環境中の測定にはダイナミックレンジの広い検出器が必要である。医師や看護婦が局部的にどの程度の被ばくを受け、それが胸に着用した既存の線量計で正しく評価されているかなどの調査研究には IP は最適の線量計であろう。

参 考 文 献

- 1) ナガセ FB だより (長瀬ラングウア株式会社), No. 237, 4 (1997).
- 2) 宮原諄二: 日本の科学と技術, **23**, 28 (1985).
- 3) M. SONODA, M. TAKANO, J. MIYAHARA and H. KATO; *Radiology*, **148**, 833 (1983).
- 4) Y. AMEMIYA and J. MIYAHARA; *Nature (London)*, **336**, 89 (1988).
- 5) 山寺 亮, 金 珉珠, 宮田孝元, 中村尚司; *RADIO-ISOTOPES*, **42**(12), 676 (1993).
- 6) S. TANIGUCHI, A. YAMADERA, T. NAKAMURA and K. FUKUDA; *International Conference on Radiation Dosimetry and Safety*, p. 92 (1997).
- 7) 雨宮慶幸; 応用物理, **62**(7), 724-725 (1993).
- 8) 西 健雄, 伊藤 精, 龍 福広, 立田初巳; JAERI-memo5856.