技術論文

校正用蛍光 X 線照射場の確立

神之浦文三*¹, 南賢太郎*¹(1989 年 11 月 9 日受理)
(1989 年 12 月 26 日再受理)Establishment of Fluorescent X-ray Irradiation Field for
Calibrating Radiation Measuring InstrumentsBunzo KOHNOURA*¹ and Kentaro MINAMI*¹

For the purpose of the calibration and the energy response test, *etc.* of radiation measuring instruments in a low-energy region (8–75 keV), the calibration fluorescent X-ray generator has been constructed to provide the suitable fluorescent X-ray calibration field. And further, its characteristics have been studied.

The fluorescent X-ray spectra of radiators of Cu, Mo, Sn, Er, W, Au and Pb were measured with a high purity Ge detector. The fluorescent X-ray exposure rate were measured with standard ionization chamber. Maximum exposure rate at 80 cm from radiator is about 2.58×10^{-5} C/kg/h (100 mR/h) when Sn and Ag are used as the radiator and filter respectively. The influences of scattered X-ray from radiator on the fluorescent X-rays exposure rate was less than 10%.

KEY WORDS : fluorescent X-ray, monoenergetic photon, calibration, energy response, radiation measuring instrument

I 緒 言

「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律」等の改正に対応するための 1 cm 線量当量測定器の開発等に関連して、低エネルギー (10~300 keV) 光子に対するエネルギー特性試験等の要求が高まってきた。現在、このエネルギー範囲における測定器の特性試験等には通常連続 X 線が用いられているが、測定器のエネルギー特性は連続 X 線と単色光子を使用した場合では若干異なることが報告されている^{1,2)}。さらに、X 線管球の加速電圧が 80 kV 以上では連続 X 線のスペクトル分布を基に計算した、空気吸収線量から線量当量への換算係数

(以下、線量当量換算係数と呼び、[H/X] で表す) と、連続 X 線の実効エネルギーに対して ICRP Publication 51 の Table 10³⁾ に示される値を内挿して求めた [H/X] との偏差は小さく無視できるが、加速電圧が 80 kV 以下ではこの偏差は無視できなくなり^{4,5)}、このエネルギー領域においては単色光子の利用が有効となる。また、法令改正で導入された実効線量当量 H_E の実際の評価には 1 cm 線量当量 (H_{1cm}) が用いられる。 H_{1cm} は従来のサーベイメータで測定した照射線量を吸収線量に変換した後、ICRP Publication 51 の Table 10 に示される [H/X] および測定器の校正定数を乗じて評価するか、または、エネルギー特性が [H/X] のエネルギー曲線と良く一致するように製作されたサーベイメータで直接測定される。しかし、[H/X] は単色光子に対する計算値であるから、従来のサーベイメータの校正および線量当量測定用サーベイメータ開発のための特性試験等は、単色光子

*¹ 日本原子力研究所保健物理部線量計測課; 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4 (〒319-11)
Department of Health Physics, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibarai-ken 319-11, Japan.

でも行うことが重要となる。本報告では、8~75 keV のエネルギー領域におけるサーベイメータの校正等を単色性に優れている蛍光X線で行うことを目的とし、校正用蛍光X線発生装置を製作し蛍光X線照射場を整備するとともに、照射場の単色性、照射線量率、均一性および漏洩線量の影響を調査し、本照射場がサーベイメータ等の校正および特性試験等に利用可能であることを確認した。

II 線量当量測定器の校正等における連続X線の適用性

線質指標 (QI) が 0.6, 0.7 および 0.8 の連続X線スペクトルを計算で発生させ、ICRP Publication 51 の Table 10 を用いて、これらの連続X線のスペクトル分布に対する $[H/X]$ を計算で求めた。さらに、これら連続X線の実効エネルギー、および平均エネルギーに対応する $[H/X]_{\text{eff}}$ および $[H/X]_{\text{mean}}$ を求め、 $[H/X]_{\text{eff}}/[H/X]$ および $[H/X]_{\text{mean}}/[H/X]$ を計算した。以上の結果より、線量当量用測定器の校正等に連続X線を使用する場合の問題点を明らかにした。以下、これらの計算および評価の方法について述べる。

1. 連続X線スペクトルの計算

タングステンをターゲットとするX線管球から放射されるエネルギー E のX線の単位エネルギー当りのフルエンス $\Phi(E)$ は(1)式で求められる。

$$\Phi(E) = \phi(E) \cdot \exp[-\{\mu_w(E) \cdot t_w + \mu_B(E) \cdot t_B + \mu_A(E) \cdot t_A\}] / E$$

photons/keV · mA · sr · s (1)

ここで、

$\phi(E)$: タングステンターゲットに衝突する電子により発生する制動放射線の単位エネルギー当りのエネルギーフルエンス^{6,7)}

$\mu_w(E)$: タングステンの線減弱係数 (cm^{-1})

$\mu_B(E)$: ベリリウムの線減弱係数 (cm^{-1})

$\mu_A(E)$: 標準状態空気の線減弱係数 (cm^{-1})

t_w : 考慮するタングステンの厚み (cm)

t_B : ベリリウムの厚み (0.7 cm)

t_A : 空気層の厚み (96.5 cm)

である。また、単位入射電子により発生されるタングステンの特性 K-X 線の個数 N_k は(2)式で求められる⁸⁾。

$$N_k = 9.535 \times 10^4 \cdot \frac{R}{A_r \cdot C} \cdot \{U_0 \cdot \ln U_0 - (U_0 - 1)\}$$

(2)

ここで、

A_r : ターゲットの質量数

C : 定数 ~ 1

R : 電子の後方散乱に対する補正值 ~ 1

U_0 : E_0/E_k

E_k : ターゲットのK吸収端エネルギー

E_0 : 入射電子のエネルギー

さらに、特性 L-X 線の個数 N_L は(3)式で求められる⁹⁾。

$$N_L \sim \frac{8}{3} \cdot \left(\frac{E_k}{E_L} \right)^2 \cdot N_k$$

(3)

連続X線により発生される特性X線の計算は複雑であるのでここでは省略する。

よって、連続X線のスペクトルは(1)~(3)式の和として求める。計算で求めた連続X線のスペクトル、および高純度 Ge 半導体検出器と波高分析器を組み合わせたX線スペクトロメータで実測したX線スペクトルの一例を Fig. 1 に示す。

2. 連続X線の線量当量換算係数

ICRP Publication 51 の Table 10 を用いて、II. 1 で求めた連続X線のスペクトルに対する線量当量換算係数を算出した。以下に、計算方法を記す。

電子平衡の成り立つ自由空気中における連続X線による空気吸収線量 X は(4)で求められる。

$$X = \int \Phi(E) \cdot E \cdot \mu_{\text{en}}(E) dE$$

(4)

Fig. 1 Spectra measured and calculated for filtered X-rays (Quality Index=0.6).

Fig. 2 Deviation of the ratio of conversion coefficients from absorbed dose to dose equivalent for filtered X-rays (QI=0.8) between the calculation for its effective or mean energy and its energy spectrum.

ここで,

$\Phi(E)$: 光子フルエンス

E : 光子エネルギー

一方, 同じ場所に置かれた ICRU 球ファントムの関心深さにおける線量当量 H は (5) 式で求められる。

$$H = \int F(E) \cdot \Phi(E) \cdot E \cdot \mu_{en}(E) dE \quad (5)$$

よって, 連続X線の空気吸収線量から線量当量への換算係数 $[H/X]$ は,

$$[H/X] = \frac{\int F(E) \cdot \Phi(E) \cdot E \cdot \mu_{en}(E) dE}{\int \Phi(E) \cdot E \cdot \mu_{en}(E) dE} \quad (6)$$

で表される。ここで, $F(E)$ は ICRP Publication 51 の Table 10 に示された係数を, $\mu_{en}(E)$ は HUBBELL の発表した空気質量エネルギー吸収係数¹⁰⁾を用いた。

Fig. 2~4 に計算で求めた連続X線の線量当量換算係数と, 連続X線の実効エネルギーおよび平均エネルギーに対して ICRP Publication 51 の Table 10 から補間して求めた線量当量換算係数との比の偏差を示す。ここで, 連続X線の平均エネルギーは (7) 式で, 実効エネルギーは, (8) 式で求められる。

$$E_{\text{mean}} = \frac{\int \Phi(E) \cdot E dE}{\int \Phi(E) dE} \quad (7)$$

$$E_{\text{eff}} = \frac{\int A \cdot \Phi(E) \cdot E \cdot \mu_{en}(E) \cdot E dE}{\int A \cdot \Phi(E) \cdot E \cdot \mu_{en}(E) dE} \quad (8)$$

ここで, A は定数である。

Fig. 3 Deviation of the ratio of conversion coefficients from absorbed dose to dose equivalent for filtered X-rays (QI=0.7) between the calculation for its effective or mean energy and its energy spectrum.

Fig. 4 Deviation of the ratio of conversion coefficients from absorbed dose to dose equivalent for filtered X-rays (QI=0.6) between the calculation for its effective or mean energy and its energy spectrum.

3. 連続X線の適用性

Fig. 2~4 に示した計算結果より, 加速電圧が 80 kV 以上では (6) 式で求めた連続 X 線の $[H/X]$ と, ICRP Publication 51 の Table 10 より内挿して求めた連続 X 線の実効エネルギーに対する $[H/X]_{\text{eff}}$ および平均エネルギーに対する $[H/X]_{\text{mean}}$ との比はほぼ 1.0 に等しくなるのに対し, 加速電圧が 80 kV 以下では, 加速電圧が低下するにつれて偏差は増大することがわかる。この傾向は, 1 cm 線量当量換算係数についてとくに顕著であり, 連続X線の線質指標が小さいほど顕著である。さらに, 低エネルギーにおいては, $[H/X]_{\text{mean}}$ の偏差は $[H/X]_{\text{eff}}$ の偏差よりもつねに大きい。よって, 連続X線の空気吸

Fig. 5 Arrangement for producing fluorescent X-rays.

収線量（または、照射線量）を線量当量に変換する場合には、連続X線の実効エネルギーに対応する線量当量換算係数を用いるほうが適切である。しかし、低い加速電圧では誤差が大きくなることに注意する必要がある。

ここで評価した連続X線（線質指標（QI）は0.6、0.7および0.8である）は放射線防護用の線量当量測定器の精度（電離箱式の線量計の場合±10%以内）を考慮すればその校正や特性試験に十分使用可能であるが、前記のように、連続X線の線質指標に起因する系統誤差は、低エネルギー領域において特に顕著となる。よって、高精度な校正や特性試験等では、できるだけその誤差を少なくできる特性X線の利用が期待される。

Ⅲ 蛍光X線発生装置

蛍光X線発生装置の平面図を Fig. 5 に示す。本装置は、X線発生装置（英国 Pantak 社製、HF-420C、以下、1次X線発生装置と呼ぶ）に付加して使用する。ラジエータはX線管球ターゲットより 104 cm の位置に装着され、直径約 8 cm の中央部のみが1次X線で照射される。ラジエータで発生した蛍光X線はフィルタでLおよ

Table 1 Radiators and filters used for K-fluorescent X-rays.

Radiator Material (mg/cm ²)	Theoretical energy K _α Line (keV)	Filter Material (mg/cm ²)
Cu (89.3)	8.1	
Mo (204)	17.5	Zr (65.3)
Sn (72.8)	25.3	Ag (73.5)
Er (421)	49.1	Gd (404)
W (573)	59.3	Yb (360)
Au (579)	68.8	W (573)
Pb (227)	75.0	Au (579)

び K_β 蛍光X線を除去した後、1次X線に対して 90° 方向にコリメートして取り出す。コリメータの角度は約 15° に設計した。

本装置は、目的に応じて蛍光X線発生用のラジエータおよびフィルタを交換することが可能で、蛍光X線エネルギーを約 8 keV～75 keV の範囲で選択できる。ラジエータおよびフィルタの組合せは、ISO-4037-1979(E)¹¹⁾を参考にした。整備したラジエータおよびフィルタの材質および厚みを Table 1 に示す。1次X線発生装置の加速電圧は ISO の推奨値を参考にするとともに、V章で述べるように、実際に加速電圧を変えてエネルギースペクトルを測定することにより蛍光X線成分とその他の散乱X線成分等との比を評価し、さらに、その時の照射線量率を測定することにより、照射線量率が測定器の校正に十分であり、かつ、散乱X線成分等が蛍光X線成分の 10% 以下となるように設定した。

Ⅳ 実験方法

1. 蛍光X線のエネルギースペクトル

本装置で発生される蛍光X線のエネルギースペクトルの測定は、高純度 Ge 半導体検出器（米国、EG & G ORTEC 社製 GMX-08180）と多重波高分析器（米国、D.S. DAVIDSON 社製 MODEL 2056-4K-A）とを組み合わせたγ線スペクトロメータで行った。このとき、高純度 Ge 半導体検出器の入射窓表面はラジエータ中心より 80 cm の位置になるように設置した。検出器の設置位置を Fig. 6 に示す。各蛍光X線のエネルギースペクトルの測定は、多重波高分析器のデッドタイムが 3% 以下となるように1次X線発生装置の管電流を調整して行った。

2. 蛍光X線の純度

蛍光X線の純度は、Ⅳ. 1 で測定したエネルギースペ

クトルを基に計算で評価した。1次X線発生装置の加速電圧を変えて測定した蛍光X線のエネルギースペクトルを5 keV 間隔で分割し、各区分の計数率に検出器の検出効率の逆数、各区分の中心エネルギーに対する空気質量エネルギー吸収係数¹⁰⁾、および eV から C/kg への換算係数等乗じて蛍光X線による照射線量率 X_k およびそれ以外の光子(散乱線等)による照射線量率 X_E を評価し、(9)式で蛍光X線の純度 P_k を求めた。

$$P_k = \frac{X_k}{X_k + X_E} \times 100(\%) \quad (9)$$

さらに、1 cm 線量当量に換算した場合の純度についても評価を行った。計算に必要な高純度 Ge 半導体検出器の相対検出効率は光子エネルギーが60 keV 以上では²⁴¹Am等の基準 γ 線源を用いて求め、60 keV 未満については計算で求めた。また、本評価においては検出器に入射した光子はすべて全吸収されるものと仮定した。さらに、本結果より蛍光 γ 線の純度が90%以上となるように1次X線発生装置の加速電圧を決定した。

3. 照射線量率

1次X線発生装置の加速電圧をIV. 2で決定した値に設定し、ラジエータ中心より80 cmの位置において、各ラジエータより放出された蛍光X線による基準照射線量率を測定した。基準照射線量率は、国家標準機関である電子技術総合研究所に依頼して校正された電離箱式基準線量計(英国, Nuclear Enterprises 社製 IONEX 線量計, 本体: 2500/3, 電離箱: 2511/3(600 cc))で測定した。

4. 照射野の均一性

ラジエータ中心より80 cmの位置における照射野の均一性を調査した。測定は、富士写真フイルム株式会社の工業用X線フィルム(400番)を用いて行った。このときのラジエータはタングステン(W, 59.3 keV)であり、フィルタはYb₂O₃である。1次X線発生装置の加速電圧は170 kV、管電流は20 mAであり、照射線量は約200 mRである。照射後フィルムを現像し、黒化度を光学濃度計(米国, Kollmorgen 社製, Macbeth TD 504)で測定し、あらかじめ作成した検量曲線を用いて照射線量を求めた。フィルム黒化部中心の評価線量値で規格化して等線量図を作図し、照射野の均一性を評価した。

5. 漏洩線量

1次X線発生装置を蛍光X線を発生させる場合の最大設定値(加速電圧: 190 kV)以上である加速電圧200 kV(電流: 10 mA)で運転し、ラジエータ中心より80 cmの位置の照射野内、さらに、装置表面および周囲における漏洩線量を測定した。測定はラドコン線量計(米国, Victoreen 社製, 本体: 500 型, 電離箱検出器: 550-3

Fig. 6 Diagram of system used to measure photon spectrum of fluorescent X-rays.

型(ビルドアップキャップなし))で行った。

V 実験結果および検討

1. 蛍光X線エネルギースペクトル

Fig. 7に測定した蛍光X線のエネルギースペクトルの例として、ラジエータにW、フィルタにGdを使用したときのWの蛍光X線エネルギースペクトルを示す。本測定結果より、目的とする蛍光X線以外のフォトピークは観測されず、使用したフィルタによりLおよびK β 蛍光X線はほぼ完全に除去されていることがわかる。また、散乱X線成分も少ないことがわかる。Fig. 8は²⁴¹Amリファレンス線源をラジエータ位置に取り付け、蛍光X線エネルギースペクトルの測定と同一の条件で測定した²⁴¹Am γ 線(59.5 keV)のエネルギースペクトルである。これらの結果から、Gdフィルタ通過後のWの蛍光X線は、²⁴¹Am γ 線と比較して単色性に遜色のないことがわかる。

2. 蛍光X線の純度

V. 1のエネルギースペクトル測定結果より計算で評価した蛍光X線の純度をFig. 9に示す。この結果より蛍光X線の純度は1次X線発生装置の加速電圧が増加するとともに低下することがわかる。とくに、ラジエータにEr使用した場合純度の低下が最も大きい。これは、ラジエータとして使用したErが金属状態ではなく、Er₂O₃の粉末であり原子番号の小さい酸素が多く含まれるために散乱線が多く発生することに起因する。Cu,

Fig. 7 Spectral distribution of fluorescent X-rays from the radiator of W, where Gd_2O_3 (404 mg/cm^2) was used for filter.

Fig. 8 Spectral distribution of ^{241}Am reference source, which was detected under the same condition of Fig. 7.

Fig. 9 The K-fluorescent X-ray spectral purity (per cent) for representative radiators of Cu, Mo, Sn, Er, W, Au and Pb as a function of X-ray tube potential, which were evaluated in exposure (C/kg).

Mo, Sn の場合に純度が高いのは、空気質量エネルギー吸収係数が低エネルギー光子に対して大きい値となるためである。

Fig. 10 The K-fluorescent X-ray spectral purity (per cent) for representative radiators of Cu, Mo, Sn, Er, W, Au and Pb as a function of X-ray tube potential, which were evaluated in ambient dose equivalent (Sv).

線量当量単位で蛍光X線の純度を計算した結果を **Fig. 10** に示す。この結果は **Fig. 9** の結果とは逆で、低エネルギーの蛍光X線ほど純度が急激に低下する。これは、吸収線量（あるいは照射線量）から線量当量への換算係数が 60 keV 以下の光子に対してはエネルギーの低下とともに小さくなるからである。

Fig. 9 および **Fig. 10** の結果より決定した、1次X線発生装置の加速電圧を **Table 2** に示す。よって、原則として、放射線測定器の校正および特性試験等に本装置を使用する場合、1次X線発生装置の加速電圧は **Table 2** に示す値に設定するものとする。しかし、より高い照射線量率を必要とする場合にはさらに高い加速電圧に設定することも可能であるが、蛍光X線の純度の低下に十分注意する必要がある。

3. 照射線量率

ラジエータ中心より 80 cm の位置における各蛍光X線の基準照射線量率の測定結果を **Table 2** に示す。このときの1次X線発生装置の加速電圧は、**V. 2** で決定した値とした。照射線量率の最大はラジエータに Sn, フィルタに Ag を使用したときで、 $2.6 \times 10^{-5} \text{ C/kg/h}$ (約 100 mR/h) である。最小でもラジエータに Mo, フィルタに Zr を使用したときの $2.4 \times 10^{-6} \text{ C/kg/h}$ (約 9 mR/h) である。これらの結果より、各蛍光X線による照射線量率はサーベイメータ等の校正や特性試験等に十分な量であることがわかる。

4. 照射野の均一性

Fig. 11 に本装置のラジエータ中心より 80 cm の位置

Table 2 Primary X-ray generator tube potential to produce fluorescent X-rays and exposure rate at 80 cm from the centre of the radiators.

Radiator material	Filter material	X-ray Tube		Exposure rate	
		potential (kV)	current (mA)	(C/kg/h)	(mR/h)
Cu		30	10	2.5×10^{-5}	97.1
Mo	Zr	50	10	2.4×10^{-6}	9.2
Sn	Ag	100	20	2.6×10^{-5}	100.4
Er	Gd	120	20	6.2×10^{-6}	24.2
W	Yb	170	20	8.2×10^{-6}	31.9
Au	W	170	20	5.2×10^{-6}	20.1
Pb	Au	190	20	4.9×10^{-6}	19.1

における照射野の等線量図を示す。本図は、フィルム黒化部中心の評価線量を1.0として規格化し、等線量線の間隔を0.05として作図した。線量の測定間隔は2 cmである。本測定位置における照射野の直径は約20 cmであり、本装置のラジエータ中心により40 cmの位置に設置されている出口コリメータの直径は10 cmであるから、コリメータの角度は約15度であることがわかる。**Fig. 11**は評価線量に対して距離の補正は行っておらず、この場合、均一性±3%以内となる照射野の直径は約12 cmであり、通常のサーベイメータ等の校正等には十分な広さである。均一性±5%以内となる照射野の直径は約16 cmとなる。

5. 漏洩線量

電離箱線量計での測定により、ラジエータ中心より80 cmの位置の照射野における漏洩X線による照射線量は3 mR/h(加速電圧200 kV、電流10 mA)であることがわかった。実際の最大使用電圧は190 kVであり、さらに、蛍光X線発生装置内部で散乱した1次X線はフィルタの使用により減弱されるので、照射野内における漏洩X線の影響は無視できることがわかる。また、本装置表面の漏洩線量にも異常のないことが確認された。

VI 結 論

本報告では、低エネルギー領域におけるサーベイメータ等の校正および特性試験等を単色性に優れている蛍光X線で行うことを目的とし、校正用蛍光X線発生装置を製作し蛍光X線照射場を整備するとともにその特性を明らかにした。その結果、本蛍光X線照射場は単色性に優れ、十分な照射線量率が得られ、照射線量率分布が均一で、散乱X線の影響も少なく、より高精度なサーベイメータの校正および特性試験等に利用可能となった。

本照射場の整備により、日本原子力研究所、東海研究

- 3) Data for use in protection against external radiation, ICRP Publication 51 (1987).
- 4) 崎原克彦; フィルムバッジニュース, No. 148 (1989).
- 5) A. TILIKIDIS, J.E. GRINDBORG and L. LINDBORG; *Radiation Protection Dosimetry*, **28**, 53-57 (1989).
- 6) M.H. UNSWORTH, J.S. GREENING; *Phys. Med. Biol.*, **15**, 621-630 (1970).
- 7) N.A. DYSON; *Proc. Phys. Soc.*, **73**, 924 (1959).
- 8) M. GREEN and V.E. COSSLETT; *Proc. Phys. Soc.*, **78**, 1206 (1961).
- 9) N. SPILEBERG; *Philips Res. Rept.*, **14**, 215 (1959).
- 10) J.H. HUBBELL; Photon mass attenuation and energy absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV, *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, **33**, 1269 (1982).
- 11) X and γ reference radiations for calibrating dosimeters and dose ratemeters and for determining their response as a function of photon energy, ISO-4037 (1979).
- 12) 神之浦文三, 南賢太郎; 放射線測定器校正のための ^{16}N 高エネルギー線照射場の特性, 保健物理, **23**, 27 (1988).