原 著

診断領域 X 線に対する 1 cm 線量当量換算係数

加 藤 秀 起・東 直 樹・清 水 郁 男
中 村 勝・鎌 田 貴 夫・立 木 佐江子

愛知医科大学附属病院中央放射線部

(論文受理 1991年 3月20日)

(最終論文受理 1991年 9月10日)

(Code No. 112, 114, 224)

Key words: Dose equivalent, Diagnostic X-ray, Photon spectrum, Monte Carlo simulation

DOSE EQUIVALENT, $H_{1\text{cm}}$, PER UNIT EXPOSURE
FOR DIAGNOSTIC X-RAYS

HIDEKI KATO, NAOKI HIGASHI, IKUO SHIMIZU,
MASARU NAKAMURA, TAKAO KAMADA, SAEKO TSUIKI

Department of Radiological Technology, Aichi Medical University Hospital

(Article received, Mar. 20. 1991)

Summary

The data table of a 1 cm dose equivalent per fluence to estimate the effective dose equivalents conservatively from external photon beams were given by ICRP. However these data were calculated with single energy photon beams; therefore, it must be careful when for applying the data to photon beams with spectral distributions.

In this paper, we calculated the 1 cm dose equivalent per unit exposure for spectral photon beams by means of a Monte Carlo simulation, and ascertained the suitability of the usual method which estimates dose equivalents by means of ICRP data corresponding to the effective energy of the spectral beam.

Consequently, the 1 cm dose equivalent per unit exposure calculated for primary X-ray beams and for scattered photon beams from an irradiated body were in good agreement with the ICRP data corresponding to the effective energies of each beam. However, those calculated for X-rays transmitted through a lead shield showed a considerably lower value than ICRP data corresponding to their effective energies.

1. はじめに

1989年, わが国の放射線関係法令に国際放射線防護委員会 (以下 ICRP と略す) 勧告 (1977年採択)¹⁾ が採り入

られ、放射線業務従事者の被曝量や環境の放射線量を評価するために、新しく実効線量当量という概念が導入された。しかし、これは直接測定することが不可能な線量である。そこで、体外放射線に対する実効線量当量を安全側に評価することを目的に ICRU 球²⁾の 1 cm 線量当量 $H_{1cm}[Sv]$ を使用し、放射線防護のための線量測定を行うよう定められた。光子束に対する 1 cm 線量当量は、自由空間中での照射線量 $[R]$ から光子エネルギーに対応する換算係数を乗じて算出するか、または、測定器により直接測定する方法がとられている^{3,4)}。そして、この目的のために各光子エネルギーに対する換算係数が与えられている。しかし、この換算係数は ICRU 球と単一エネルギー光子を用いたモンテカルロシミュレーションにより計算された値であり²⁻⁵⁾、これをエネルギースペクトル分布を持つ光子束に適用して 1 cm 線量当量を算出するためには、厳密には、その光子束のスペクトルを知る必要がある。

今回、いろいろなスペクトルを持った診断領域 X 線束に対して計算により 1 cm 線量を求める場合の換算係数をモンテカルロ法により計算し、その結果から、通常行われている線束の実効エネルギーに対応した換算係数を用いて算出する方法の適用精度について検討した。

2. 方 法

2.1 X 線スペクトルの計算

放射線防護の対象とすべき診断領域 X 線のスペクトルには、さまざまなものが考えられるが、今回は、次の 3 種類を想定し計算した。

- (1) X 線管球から放射される直接 X 線。
- (2) 直接 X 線が被検者に照射された時、体側面から放射される散乱 X 線。
- (3) 上記(1)(2)の線束を鉛板で遮蔽した時の透過 X 線。

2.1.1 直接線のスペクトル

X 線管球から放射される制動放射光子のスペクトルを Birch の近似計算式⁶⁾を用いて計算した。X 線管球の固有濾過を 1.5 mm Al 当量、ターゲット角度を 18 度一定とした。Birch の式には特性 X 線は考慮されていないので、計算された制動 X 線スペクトルに、タングステンターゲットから放出される $K\alpha_1$, $K\alpha_2$, $K\beta_1$, $K\beta_2$ の特性 X 線を追加して、直接線スペクトルとした。

計算した照射条件は次のとおりである。

- P-1: 管電圧 60 kV, 付加フィルタ(—)
- P-2: 管電圧 80 kV, 付加フィルタ(—)
- P-3: 管電圧 100 kV, 付加フィルタ(—)

P-4: 管電圧 120 kV, 付加フィルタ 2 mm Al + 0.5 mm Cu

P-5: 管電圧 80 kV, 付加フィルタ 2 mm Al + 0.5 mm Cu

P-6: 管電圧 100 kV, 付加フィルタ 2 mm Al + 0.5 mm Cu

P-7: 管電圧 80 kV, 付加フィルタ 0.1 mm Gd_2O_3S : Tb

2.1.2 散乱線のスペクトル

散乱線には、さまざまな種類のものが考えられるが、今回は被照射体から発生する側方向散乱線束を想定して、そのスペクトルをモンテカルロ法で計算した。直径 30 cm, 厚さ 30 cm の円柱型組織等価物質をファントムとして、その軸方向に直径 29 cm の円形平行 X 線束を照射した時、被照射体側面から放出される散乱光子のうち、入射線束に対して 90 度 ± 30 度方向に射出したものだけをカウントして散乱光子スペクトルを求めた。

入射 X 線束には 2.1.1 項で計算された線束番号 P-1 から P-4 までの 4 種類の光子スペクトルを用いた。これにより求められた散乱線束の番号を次のとおりとする。

S-1: 入射直接線束 P-1

S-2: 入射直接線束 P-2

S-3: 入射直接線束 P-3

S-4: 入射直接線束 P-4

被照射体として設定した組織等価物質は、ICRU 球と同じ成分(酸素 76.2%, 炭素 11.1%, 水素 10.1%, 窒素 2.6%)とした。計算で処理した光子ヒストリー数は、それぞれ 500 万個である。

2.1.3 遮蔽物の背面における光子スペクトル

遮蔽物として鉛板 (1 mm および 2 mm 厚, 側方無限) を想定した。そして、X 線束がこの遮蔽物に対して垂直に入射した時、遮蔽物の背面に射出するすべての光子をモンテカルロ法で計算し、そのスペクトルを求めた。

入射 X 線束は 2.1.1 項で計算した管電圧 120 kV の直接線束 (線束番号 P-4) および、この線束に対して 2.1.2 項で計算された散乱線束 (線束番号 S-4) の 2 種類とした。これによって得られる線束の番号は次のとおりとする。

T-1: 入射線束 P-4, 鉛板 1 mm

T-2: 入射線束 S-4, 鉛板 1 mm

T-3: 入射線束 P-4, 鉛板 2 mm

T-4: 入射線束 S-4, 鉛板 2 mm

入射線束はペンシルビームとして計算した。鉛からの特性 X 線は近似的に、光電効果を起こした光子のエネルギーが K 吸収端 (88.001 keV) 以上の場合 KX 線, K 吸

診断領域X線に対する1 cm線量当量換算係数 (加藤・他)

収端以下でL吸収端 (13.044 keV) 以上の場合 LX 線が発生するものとし、その放射方向は等確率性として処理した。2次電子による制動X線は考慮しなかった。計算で処理した光子ヒストリー数はそれぞれ1000万個である。

今回の1 cm線量当量換算係数の計算に用いた線束の一覧表を Table 1 に示す。

Table 1 Property of X-ray beams for which conversion factors $f_{1\text{cm}}$ were calculated.

Beam No.	Property of spectrum kV, added filter, etc.
P-1	60 kV, filter(-), primary beam
P-2	80 kV, filter(-), primary beam
P-3	100 kV, filter(-), primary beam
P-4	120 kV, 2 mmAl+0.5 mmCu, primary beam
P-5	80 kV, 2 mmAl+0.5 mmCu, primary beam
P-6	100 kV, 2 mmAl+0.5 mmCu, primary beam
P-7	80 kV, 0.1 mmGd ₂ O ₂ S : Tb, primary beam
S-1	60 kV, side direction scattered beam
S-2	80 kV, side direction scattered beam
S-3	100 kV, side direction scattered beam
S-4	120 kV, side direction scattered beam
T-1	120 kV primary, 1 mm Pb transmitted beam
T-2	120 kV scatter, 1 mm Pb transmitted beam
T-3	120 kV primary, 2 mm Pb transmitted beam
T-4	120 kV scatter, 2 mm Pb transmitted beam

2.2 1 cm線量当量換算係数の計算

法令に1 cm線量当量換算係数として与えられているデータ (以下ICRPデータと書く) は、ICRU球 (直径30 cm) に単一エネルギー平行光子束が入射した時の、球主軸上の深さ1 cmの点における吸収線量をモンテカルロ法で計算し、それを入射光子フルエンス当りの線量当量 [$\text{Sv} \cdot \text{cm}^2$], または空気吸収線量当りの線量当量 [$\text{Sv} \cdot \text{Gy}^{-1}$] として表した数値である。

まず、今回のモンテカルロプログラムの精度を調べるために、10 keV~150 keVの単色光子束に対して上記とまったく同じ計算を行い、照射線量当りの1 cm線量当量換算係数を求めて、ICRPデータと比較した。

次に、ここで用いられている単一エネルギー平行光子束を、前項で計算されたスペクトル分布を持つ平行光子束に置き換えて、おのおの場合の1 cm線量当量換算

係数をモンテカルロ法で計算した。ただしスペクトルを持つ光子束の場合、吸収線量と入射光子フルエンス当りの線量当量で換算係数を表すのは不都合であるので、入射光子フルエンスの代わりに、次式から計算される入射光子束の自由空間中における照射線量を用いた。

$$X[R] = \Sigma \Phi_E \cdot E \cdot (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{air,E}} / 86.9$$

ここで、

Φ_E : エネルギーE [erg]の光子フルエンス

$(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{air,E}}$: 空気の質量エネルギー吸収係数

ICRU球へ入射する光子スペクトルについて、照射線量が1/2になるアルミニウム厚を逐次近似法で求めて、その半価層値から実効エネルギーを計算し、それに対応するICRP換算係数値と比較した。

ICRU球に入射する線束は30 cm ϕ とし、線量計算点は線束中心軸上の深さ1 cmとした。おのおの入射光子スペクトルに対して計算で処理した光子ヒストリー数は1000万個である。線質係数は1として処理した。

使用したコンピュータは愛知医科大学情報処理センターのHITAC M-660D (使用言語: Fortran 77 (VOS3)) である。

モンテカルロ計算で用いた光子と物質との相互作用断面積, Incoherent scattering function, Atomic form factor, および、入射光子束に対する照射線量計算に用い

Fig. 1 Spectra of primary X-rays calculated by means of Birch's formula with attenuation coefficients of filter materials.

た空気の質量エネルギー吸収係数には, JH. Hubbell らのデータ⁷⁻⁹⁾を利用した。

3. 結 果

3.1 入射光子スペクトル

2.1.1項で, Birch による近似計算式を基にして計算した直接線のスペクトルを Fig. 1(1)~(7)に示す。

2.1.2項で, 直接線 (Fig. 1(1)~(4)) に対する被照射体からの側方向散乱線として求めたスペクトルを Fig. 2(1)~(4)に示す。

2.1.3項で計算した, 120 kV 直接線 (Fig. 1(4)) および側方向散乱線 (Fig. 2(4)) に対する, 鉛板 1 mm, 2 mm 透過後の光子スペクトルを Fig. 3(1)~(4)に示す。

Fig. 2 Spectra of scattered X-rays calculated by means of a Monte Carlo simulation with primary X-rays shown in Fig. 1(1)~(4).

Fig. 3 Spectra of X-rays transmitted through a lead shield by means of a Monte Carlo simulation with X-ray beams shown in Fig. 1(4) and Fig. 2(4).

3.2 1 cm 線量当量換算係数

3.2.1 単一エネルギー光子束に対する換算係数

ICRP データが得られたのと同じ方法で, 今回のモン

Table 2 Conversion factors of 1 cm dose equivalent, f_{1cm} [mSv/R], for single energy photon beams.

Photon energy [keV]	mSv/R		Deviation %
	ICRP data	Present study	
10	0.090	0.088	-2.2
15	2.37	2.42	+2.1
20	5.25	5.56	+5.9
30	9.50	9.84	+3.6
40	12.5	12.8	+2.4
50	14.2	14.6	+2.8
60	15.2	15.3	+0.7
80	15.1	15.4	+2.0
100	14.4	14.5	+0.7
150	13.0	13.2	+1.5

Fig. 4 Graph showing conversion factors of 1 cm dose equivalent, f_{1cm} [mSv/R], calculated by means of a Monte Carlo simulation for single energy photon beams. Solid line: Present study. Dotted line: ICRP data.

テカルロ計算を使って求めた 1 cm 線量当量換算係数を Table 2 および Fig. 4 に示す。いずれも, 照射線量に対する換算係数として, ICRP データと対比して表してある。

3.2.2 スペクトル分布を持つ光子束に対する換算係数

Fig. 1~3 に示した各スペクトル分布を持つ光子束に対する 1 cm 線量当量換算係数を Table 3 に示す。第 1 欄は Fig. 1~3 に示すスペクトルに対応させた線束番号

Table 3 Effective energy, exposure in free space and conversion factors of 1 cm dose equivalent, $f_{1\text{cm}}$ [mSv/R], for spectral photon beams.

Beam No.	Effective energy [keV]	$R \cdot \text{cm}^2 / \text{photon} \times 10^{-12}$	$f_{1\text{cm}}$ mSv/R	Deviation %
P-1	25.5	92.6	8.84	+8.5
P-2	28.5	74.4	9.92	+7.2
P-3	31.0	64.7	10.7	+4.1
P-4	65.0	37.8	15.2	-1.9
P-5	52.0	37.6	14.6	-1.4
P-6	58.5	36.9	15.4	+1.0
P-7	35.5	56.3	12.0	+1.7
S-1	32.5	66.0	11.2	+3.7
S-2	37.0	54.1	12.2	+0.4
S-3	40.0	48.9	13.3	+3.3
S-4	50.5	39.8	14.9	+1.4
T-1	65.0	41.0	13.9	-11.5
T-2	63.5	40.5	13.6	-13.6
T-3	69.0	41.3	14.0	-10.7
T-4	65.5	42.1	13.3	-16.5

を示す。第2欄はアルミニウム半価層から計算した各線束の実効エネルギー [keV]、第3欄は光子フルエンス当りの照射線量 [$R \cdot \text{cm}^2 / \text{光子}$]、第4欄が1 cm 線量当量換算係数である。第5欄は、実効エネルギーに対応する、単一エネルギー光子束で計算された換算係数値との差異を示す。

Table 3 に示したスペクトル公布を持つ光子束に対する1 cm 線量当量換算係数を単一エネルギー光子束で計算されたデータに重ね合わせたグラフを Fig. 5 に示す。

4. 考 察

4.1 光子スペクトルについて

Birch 式を用いて計算された直接線光子スペクトル (Fig. 1) についてはこれまでに多数の報告¹⁰⁻¹²⁾があり、その精度が確認されている。

被照射体から発生する散乱光子スペクトルは、その散乱方向や照射野サイズなどによって、かなりスペクトル分布が異なることが考えられる。散乱線スペクトルの実測定報告^{13,14)}は若干あるものの、それらを精度よく実測

Fig. 5 Graph showing conversion factors of 1 cm dose equivalent, $f_{1\text{cm}}$ [mSv/R], for single energy photon beams and spectral photon beams shown in Fig. 1~Fig. 3.

定することは非常に困難である。

今回モンテカルロ法で計算した側方向 (90 ± 30 度) 散乱光子スペクトル (Fig. 2) はその平均的なデータと考えられるものである。シミュレーションにおいて 90 ± 15 度 に射出する光子だけをカウントしても、スペクトル分布の形状には、ほとんど差は見られなかった。

計算された散乱光子スペクトル分布および、その実効エネルギーをみると、120 kV を除いていずれの場合も、被照射体に入射する直接線束よりも実効エネルギーは高くなっていて、今回想定したような散乱光子束のエネルギーは一般に推測されるほど低くならないことがわかる。これは、低エネルギー光子は被照射体内でほとんど光電効果によって吸収されてしまうためと考えられる。

直接線、散乱線を鉛板で遮蔽した時の、鉛板を通り抜けた光子スペクトルも、実測定することは非常に困難である。今回のモンテカルロ法で120 kV 直接線、散乱線について計算したスペクトル (Fig. 3) では、鉛のK吸収端である88 keV 以上のエネルギーを持つ光子は、ほとんど0に等しくなり、約71 keV, 73 keV, 83 keV, 87 keV に鉛の $K\alpha$, $K\beta$ 特性X線が、約10 keV に $L\alpha$ 特性X線が観察できる。120 kV 直接線の鉛板1 mm の透過光子スペクトルでは、さらにタングステンターゲットからの $K\alpha$, $K\beta$ 特性X線の残存が見られる。

特性X線を除くと、スペクトル分布ピークは鉛のK吸収端直下にあり、50 keV 以下の光子はほとんど0に等しくなっている。また、光子の大部分が分布するエネルギー範囲に比較して実効エネルギーがかなり低くなっているのは、10 keV 付近の $L\alpha$ 特性X線の存在が、半価層の計算に関与する照射線量に大きく影響しているためと考

えられる。

4.2 1 cm 線量当量換算係数について

今回計算した単一エネルギー光子束に対する 1 cm 線量当量換算係数 (Table 2 および Fig. 4) は、ICRP データと比較して、全体的にはほぼ 5 % 以下の差異であった。ICRP データが 2 組のモンテカルロ計算結果の平均値を採用している²⁾ことを考えれば、今回使用したモンテカルロ計算アルゴリズムは本目的には十分な精度を持っていると言える。

スペクトル分布を持つ光子束のうち、直接線および被照射体からの側方散乱線に対して計算した 1 cm 線量当量換算係数は、単一エネルギー光子束で計算された 1 cm 線量当量換算係数データのおおのの実効エネルギーに対応する値に比べて、やや高くなる傾向にあるが、全体的によく一致している。したがって、これらの線束については、その実効エネルギーを評価し、これに対応する ICRP の 1 cm 線量当量換算係数を用いる算出法が妥当であることがわかる。

一方、鉛遮蔽板を透過する X 線束に対して計算した 1 cm 線量当量換算係数は、単一エネルギー光子束による換算係数データより、かなり低くなっている。この場合、実効エネルギーに対応する ICRP データを使って計算した 1 cm 線量当量値では、過大評価になってしまう。

これは、先にも述べたように、スペクトル分布上で鉛の L 特性 X 線の存在が、自由空間中における照射線量計算および実効エネルギーの評価に、大きく影響しているためと考えられる。

鉛の L 特性 X 線の 1 cm 線量当量換算係数値への影響を調べるために、Fig. 3(1) に示したスペクトル分布から作為的に L 特性 X 線を取り除いたスペクトル線束で 1 cm 線量当量換算係数を計算してみた。その結果、換算係数は 1.52 [mSv/R] となり、この線束の実効エネルギー 83.0 keV に対応させてみると、単一エネルギーによる 1 cm 線量当量データによく一致することがわかった。

先にも述べたように、鉛遮蔽板を透過する X 線束スペクトルの実測定は非常に困難であるため、今回のモンテカルロ計算で得られたスペクトル分布の精度、特に鉛の L 特性 X 線の関与を確認することができない。その一方、鉛の L 特性 X 線の存在が、線束の実効エネルギーおよび 1 cm 線量当量換算係数に大きく影響することがわかった。

このように、エネルギー範囲が極端に分離したスペクトルを持つことが考えられ、実効エネルギーを推定することが困難な線束の場合、ICRP データの最大値を用い

た 1 cm 線量当量評価法が妥当であると考ええる。

ただし、今回の計算で設定した照射ジオメトリーは、すべて面平行線束であり、特に被照射体からの側方向散乱線、鉛遮蔽板を透過する X 線については、実際の状況とはかなり異なるものである。

5. 結 論

スペクトル分布を持った診断領域 X 線束に対する 1 cm 線量当量換算係数をモンテカルロ法を用いて計算し、通常行われている、線束の実効エネルギーを評価し、これより ICRP データを利用して 1 cm 線量当量を評価する方法の適用精度について検討した。

直接 X 線および被照射体から発生する側方向散乱 X 線については、その実効エネルギーに対応する ICRP データの利用は適当であることがわかった。

鉛遮蔽板を透過する X 線束に対する 1 cm 線量当量換算係数は、その実効エネルギーに対応する ICRP データより、かなり低くなることがわかった。ただし、実測定によるスペクトル分布の確認が困難であるので、この場合の 1 cm 線量当量換算係数には ICRP データの最大値を用いるのが妥当であると考ええる。

文 献

- 1) ICRP: 国際放射線防護委員会勧告 (Publication 26), 日本アイソトープ協会, (1977)
- 2) ICRU: Determination of dose equivalents resulting from external radiation sources (Report 39), ICRU, (1985)
- 3) ICRP: 体外放射線に対する防護のためのデータ (Publication 51), 日本アイソトープ協会, (1988)
- 4) 放射線障害防止中央協議会: 放射線安全管理講習会資料, (1988)
- 5) ICRU: Determination of dose equivalents from external radiation sources — Part 2 (Report 43), ICRU, (1988)
- 6) Birch R, Marshall M: Computation of bremsstrahlung X-ray spectra and comparison with spectra measured with a Ge(Li) detector, Phys. Med. Biol., **24**(3), 505-517, (1979)
- 7) Hubbell JH: Photon cross sections, attenuation coefficients, and energy absorption coefficients from 10 keV to 100 GeV, NSRDS-29, National Bureau of Standards, (1969)
- 8) Hubbell JH, Viegale WJ, Briggs EA et al.:

診断領域X線に対する1 cm線量当量換算係数(加藤・他)

-
- Atomic form factors, incoherent scattering functions, and photon scattering cross sections, J. Phys. Chem. Ref. Data, **4**(3), 471-538, (1975)
- 9) Hubbell JH: Photon mass attenuation and energy-absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV, Int. J. Appl. Radiat. Isot., **33**, 1269-1290, (1982)
- 10) 小林嘉雄, 宮田伸樹, 綾川良雄, 他: 診断領域におけるX線スペクトルの検討, 放射線像研究, **10**(1), 16-22, (1980)
- 11) 金森仁志: 診断用X線スペクトル, 日医放物理部会誌, suppl. **21**, 33-80, (1985)
- 12) 清水郁男, 東 直樹, 加藤秀起: Personal computerによるX線スペクトルの近似計算, 日放技学誌, **45**(8), 1056, (1989)
- 13) 菊池 透, 伊勢孝雄: X線撮影室内の散乱X線スペクトル解析, 日放技学会第40回総会予稿集, 738-739, (1984)
- 14) 津坂昌利, 前越 久: ファントム材質による散乱X線スペクトルの変化, 日放技学会第41回総会予稿集, 217, (1985)