

Title	X線, γ 線の吸収線量測定に関する理論的考察
Author(s)	白貝, 彰宏
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1977, 37(6), p. 570-577
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/19220
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

X線, γ 線の吸収線量測定に関する理論的考察

放射線医学総合研究所物理研究部

白 貝 彰 宏

(昭和51年11月25日受付)

(昭和52年3月11日最終原稿受付)

Theoretical Consideration of Dosimetry for Photons

Akihiro Shiragai

Division of Physics, National Institute of Radiological Sciences, 9-1, 4-Chome, Anagawa, Chiba-Shi, 280

Research Code No.: 203

Key Words: Dosimetry, X-rays, γ -rays

The effects of the wall and the cavity size on the response of dosimeter for photon dosimetry were theoretically considered. The mean mass stopping power ratio was given by

$$f_{m,w} = d \{ \alpha (S/\rho)_m^i + \beta (S/\rho)_w^i (\mu_{en}/\rho)_m^w \} + (1-d) (\mu_{en}/\rho)_m^i$$

and approximately

$$\beta = 1 - \alpha$$

$$\alpha = e^{-\langle \mu/\rho \rangle t}$$

The dependences of dosimeter response on the wall material, the wall thickness, the cavity dimensions and photon energy can be estimated on the basis of the equation. The photon dosimetry in water by air ionisation chamber, LiF-TLD and Fricke dosimeter was concretely examined.

序 論

X, γ 線に対するファントム中での吸収線量を求めるための理論は、既に教科書等^{1)~5)}においても取り扱われており、多くの人々によつて研究されてきている。Burlin⁶⁾⁷⁾は小cavityや大cavityの近似が成り立たない中間的な大きさの線量計cavityにも適用できる一般空洞理論を導入した。ファントム中で吸収線量を測定するにはexposureで校正された線量計やFricke線量計等を用いるのが普通である。線量計にはTLDのように裸のまま使用できるものもあるが、大部分は壁をもち、その物質や厚さはさまざまである。従つて一般には光子のエネルギーが高くなるとcavityの吸収線量に寄与する2次電子には、内部で発生す

るものと壁からのものだけではなく、媒質からのものもある。壁のないcavityか2次電子平衡が成り立つだけの壁厚をもつcavityに対してはBurlinの理論を適用できるが、このような一般的な場合には適用できない。

空洞理論をさらに一般化するために、ここでは、種々の線量計のcavityの大きさや壁物質及びその厚さの違いによるレスポンスの変化について一つの理論的考察を試みる。空気電離箱線量計、LiF-TLD、Fricke線量計による水ファントム中でのX, γ 線の吸収線量測定について具体的に検討する。

吸収線量評価の一般式

吸収線量を求めるための理論式を導入するが、

その際次のような記号を用いる。

m : 媒質. 水を考えるが, ビルドアップキャップをつける場合はそれを示す.

i : cavity

w : 壁

D : 吸収線量

f : 一般空洞理論の意味での平均質量阻止能比
 $(S/\rho)_i^m$: 媒質物質と cavity 物質の平均質量阻止能の比

$(\mu_{en}/\rho)_i^m$: 媒質物質と cavity 物質の平均質量エネルギー吸収係数の比

d : 一般空洞理論における電子スペクトルの平均減弱係数. Burlin ら⁶⁾⁻⁸⁾に従って求める.

P : 擾乱補正係数

B : cap displacement 補正係数

なお, 式の繁雑さを避けるために大気条件やイオン再結合などの補正項は無視するが, 勿論これによつて一般性が失なわれることはない.

2. 1 壁がない場合

媒質等価壁の場合も同じで, Burlin の一般空洞理論をそのまま適用できる.

$$D_m = (D_i/f_m)P \quad (1)$$

$$f_m = d(S/\rho)_m^i + (1-d)(\mu_{en}/\rho)_m^i \quad (2)$$

2. 2 壁でビルドアップしている場合

D_m は D_w に平均質量エネルギー吸収係数の比 $(\mu_{en}/\rho)_w^m$ を乗ずることによつて得られ, D_w を得るためには Burlin の一般空洞理論を適用できる.

$$D_m = D_w(\mu_{en}/\rho)_w^m PB \quad (3)$$

$$D_w = D_i/f_w \quad (4)$$

$$f_w = d(S/\rho)_w^i + (1-d)(\mu_{en}/\rho)_w^i \quad (5)$$

2. 3 一般的な場合

実際の線量計は 2. 1 節及び 2. 2 節で述べた場合の中間的な状況にあるのが普通である. 今, 媒質で発生した 2 次電子の壁透過率を α , 壁中で生ずる 2 次電子のビルドアップ率を β とし, 連続減速近似を適用すると, D_m は次式から求める.

$$D_m = (D_i/f_{m,w}) PB \quad (6)$$

$$f_{m,w} = d\{\alpha(S/\rho)_m^i + \beta(S/\rho)_w^i(\mu_{en}/\rho)_w^m\} + (1-d)(\mu_{en}/\rho)_m^i \quad (7)$$

この式において, 第一項は媒質中で, 第二項は壁中で, 第三項は cavity 中でそれぞれ発生した 2 次電子による cavity の吸収線量への寄与分の媒質の吸収線量に対する比を表わしている.

ところで Burlin⁶⁾ は電子スペクトルの減弱及びビルドアップを同じ指数関数により近似したが, (7)式にこの近似を適用すると

$$\beta = 1 - \alpha$$

$$\alpha = e^{-(\mu/\rho)t}$$

となり, (7)式は

$$f_{m,w} = d\{\alpha(S/\rho)_m^i + (1-\alpha)(S/\rho)_w^i(\mu_{en}/\rho)_w^m\} + (1-d)(\mu_{en}/\rho)_m^i \quad (7)'$$

となる. ただし (μ/ρ) は電子の実効質量吸収係数, t は実効壁厚である.

この式は明らかに, 壁が媒質からの 2 次電子の飛程より厚く, 従つて媒質からの 2 次電子は cavity 内に入つてこず, 壁でビルドアップした 2 次電子のみが cavity に入つてくる時, 即ち $\alpha = 0$ の時は 2. 2 節の場合と等しくなり, 壁がない場合 ($\alpha = 1$) 及び媒質等価壁の場合 ($w = m$) は 2. 1 節の場合と等しくなる.

種々の線量計

今 cavity の吸収線量 D_i が線量計の読み M に比例するものとし,

$$D_i = aM \quad (8)$$

とすると, (6) (8)式より, 線量計の相対的レスポンス R_r は次式で与えられる.

$$R_r = (M/D_m)' / (M/D_m) = \frac{af'_{m,w}PB}{a'f_{m,w}P'B'} \quad (9)$$

ここで ' は ' を付さないものと比較するものを示す.

同一 cavity で壁物質が異なる線量計について,

1) 壁物質が cavity 物質と同じで, ビルドアップした線量計に相対的な同一光子に対するレスポンスは, 当然 $a = a'$ でまた $w = i$ でもあるから (7)'(9)式より

$$R_r = [d\{\alpha(S/\rho)_m^i(\mu_{en}/\rho)_w^m + (1-\alpha)\} + (1-d)] \frac{PB}{P'B'} \quad (10)$$

2) 壁物質が媒質物質と同じ線量計に相対的な同一光子に対するレスポンスは, $a = a'$, $B = 1$ であるから (7)'(9)式より, (2)式を用いると

$$R_r = (f'_{m,w}/f_m) \frac{P}{P'B'} \quad (11)$$

3) 同一線量計に対する光子 λ に相対的な光子 λ' へのレスポンスは (7') (9)式より

$$R_r = (a_i/a_{i'}) (f_{m,w,i'}/f_{m,w,i}) \frac{P_i B_i}{P_{i'} B_{i'}} \quad (12)$$

となる。(10) (11) 式が (12) 式の特例として得られることは勿論のことである。

一般の線量計は光子エネルギーの低い領域では2次電子の壁によるビルドアップは十分であるが、高い領域では不十分である。従つて高エネルギー領域での壁の影響が主な問題となる。ここで述べる理論は一般的なもので全エネルギー領域に適用できるが、それ故に、 ^{60}Co γ 線および5 MeV, 10MeV の光子についてのみ理論値を示すとどめる。

具体的な線量計として空気電離箱線量計及びLiF-TLD, Fricke 線量計を取り上げるが、計算に際しては、測定条件を限定しないで議論するために、厳密さを欠くが光子や2次電子のエネルギースペクトルを考慮せず前者は入射エネルギーに等しく後者は平均エネルギーに等しいエネルギーをもち共に単色であると仮定した。2次電子の平均エネルギーは Jones と Cunningham³⁾ に従つて求め、質量エネルギー吸収係数は Sinclair⁹⁾ の値、質量阻止能は Pages ら¹⁰⁾ の値を用いた。また d の計算に当つて2次電子の最大エネルギーを用いるが、対象とする cavity は低原子番号物質であるので Compton 電子の最大エネルギーに等しいとする。

ある一つの線量計に注目すれば、光子のエネルギーが高くなれば α は1に近づき、低くなれば0に近づくが、各線量計により、また光子エネルギーや照射条件によつても異なるであろうから、一般的に α (又は t) の値を評価するのは困難で、ここでは $\alpha = 1$ 及び $\alpha = 0$ の両極限を考え線量計の壁効果を検討することとする。

3. 1 空気電離箱線量計

気体電離箱の一例として最も一般的な空気電離箱を取りあげる。ファントム中で吸収線量を測定するには cavity の小さいものを用いるのが普通

である。標準的なものとして JAPM 準標準線量計や Farmer 準標準線量計等があるが、ここではエネルギーの高い領域を対象としているので、これらは $d \approx 1$ で小 cavity として扱える。従つてこの節では $d = 1$ の場合についてのみ考察する。

3. 1. 1 同一光子への相対的レスポンス

同一光子に対する種々壁物質の電離箱の媒質等価壁電離箱への相対的レスポンスは、(11) 式および (2)(7)'式において d と P は1であり、 P' と B' も1であると仮定すると

$$R_r = \alpha + (1 - \alpha)(S/\rho)_w^m (\mu_{en}/\rho)_m^w \quad (13)$$

媒質を水として (13) 式から得た結果を Table 1 に示す。(10) 式は (13) 式と相対的な関係にあり、(10) 式から得られる結果は Table 1 から

Table 1 Relative response of air chamber normalized to water-equivalent wall for each photon energy.

	wall	Co-60	5 MeV	10 MeV
$\alpha = 1$	all	1.000	1.000	1.000
$\alpha = 0$	air	1.028	0.988	0.971
	water	1.	1.	1.
	lucite	1.014	1.018	1.000
	polystyrene	1.009	1.000	0.972
	C	1.039	1.039	1.021
	Al	1.128	1.171	1.302

簡単に求める。数 MeV 程度のエネルギー領域では polystyrene 壁を用いれば壁の水等価性が非常によく、1%以下の違いで壁の存在を無視できることがわかる。lucite 壁では壁の存在を無視すると最大2%程度の違いが出てくるであろう。

3. 1. 2 エネルギー依存性

各種壁物質の電離箱について、媒質等価壁電離箱の ^{60}Co γ 線へのレスポンスに相対的なエネルギー依存性を求める。(12) 式において $\lambda = \text{Co}$, $\lambda' = \lambda$ と書きかえる。

光子に対する空気のW値はエネルギーに関係なく 33.73eV であると勧告⁴⁾⁵⁾されており

$$a_i = a_{i'} \quad (14)$$

である。従つて (12) (7)'式において d_{Co} , d_i , P_{Co} , B_{Co} は1であり、 P_i , B_i も1であると仮定す

Table 2 Energy dependence of air chamber normalized to water-equivalent wall.

wall	α_{c_0}	^{60}Co	α_λ	5 MeV	10 MeV
air	1	1.000	1	1.055	1.088
	0	1.028	0	1.042	1.057
water	1	1.	1	1.055	1.088
	0	1.000	0	1.055	1.088
lucite	1	1.000	1	1.055	1.088
	0	1.014	0	1.074	1.087
polystyrene	1	1.000	1	1.055	1.088
	0	1.009	0	1.055	1.058
C	1	1.000	1	1.055	1.088
	0	1.039	0	1.097	1.111
Al	1	1.000	1	1.055	1.088
	0	1.128	0	1.236	1.417

ると

$$R_r = [(S/\rho)_m^m]_{c_0} [\alpha(S/\rho)_m^i + (1-\alpha)(S/\rho)_w^i (\mu_{en}/\rho)_m^w]_{\lambda} \quad (15)$$

媒質を水として (15) 式から得た結果を Table 2 に示す. どの電離箱についてもエネルギー依存性があることがわかる.

3. 1. 3 ラド変換係数 C_λ

次にラド変換係数 C_λ について考察する. 今空気電離箱線量計を光子 c で校正した時の校正定数を N_c とすると

$$D_m = 0.869 M_c N_c [(\mu_{en}/\rho)_{air}^m]_c A_{eq} \quad (16)$$

ここで, 校正は空中で行なわれるので m はビルドアップキャップを意味し, A_{eq} は壁とビルドアップキャップによる光子の減弱に対する補正係数である. 一方

$$D_m = D_{air,c} / f_{m,w,c} = a_c M_c / f_{m,w,c} \quad (17)$$

であるから, (16) (17) 式より

$$a_c = 0.869 N_c A_{eq} [(\mu_{en}/\rho)_{air}^m]_c f_{m,w,c} \quad (18)$$

また (14) 式より

$$a_c = a_\lambda \quad (19)$$

従つて水の吸収線量 $D_{H_2O,\lambda}$ は (6) 式および (8)

(18) (19) 式より

$$D_{H_2O,\lambda} = (D_{air,\lambda} / f_{H_2O,w,\lambda}) B_\lambda P_\lambda = (a_\lambda M_\lambda / f_{H_2O,w,\lambda}) B_\lambda P_\lambda$$

$$= (a_c M_\lambda / f_{H_2O,w,\lambda}) B_\lambda P_\lambda = 0.869 N_c A_{eq} [(\mu_{en}/\rho)_{air}^m]_c (f_{m,w,c} / f_{H_2O,w,\lambda}) \cdot M_\lambda B_\lambda P_\lambda \quad (20)$$

ところで

$$D_{H_2O,\lambda} = C_\lambda N_c M_\lambda \quad (21)$$

であるから, $d=1$ とすると, (20) (7)' 式より

1) $\alpha_c, \alpha_\lambda, P_\lambda, B_\lambda = 1$ なら

$$C_\lambda^1 = 0.869 A_{eq} [(\mu_{en}/\rho)_{air}^m (S/\rho)_m^{air}]_c [(S/\rho)_{air}^{H_2O}]_\lambda \quad (22)$$

2) $\alpha_c = 0$; $\alpha_\lambda, P_\lambda, B_\lambda = 1$ なら

$$C_\lambda^2 = 0.869 A_{eq} [(\mu_{en}/\rho)_{air}^w (S/\rho)_w^{air}]_c [(S/\rho)_{air}^{H_2O}]_\lambda \quad (23)$$

3) $\alpha_c, \alpha_\lambda = 0$; $P_\lambda, B_\lambda = 1$ なら

$$C_\lambda^3 = 0.869 A_{eq} [(\mu_{en}/\rho)_{air}^w (S/\rho)_w^{air}]_c [(S/\rho)_{air}^w \cdot (\mu_{en}/\rho)_w^{H_2O}]_\lambda \quad (24)$$

一般にラド変換係数 C_λ は m が水, c が ^{60}Co γ 線, A_{eq} は 0.985 であるとして (22) 式から求める. これは (23) (24) 式において壁を水等価とした場合と同じである. (22) ~ (24) 式に基づいて計算した結果を Table 3 に示す. 実際の空気電離箱線量計で吸収線量を測定する場合, 使用すべきラド変換係数は, 正しくは C_λ^1 とは異なるであろう.

3. 2 LiF-TLD

Table 3 Absorbed dose conversion factor calculated according to eqns (22) to (24).

wall	Co-60			5 MeV			10 MeV		
	C ₁ (C ₂)	C ₂	C ₃	C ₁ (C ₂)	C ₂	C ₃	C ₁ (C ₂)	C ₂	C ₃
water	0.95	0.95	0.95	0.90	0.90	0.90	0.88	0.88	0.88
air		0.98	0.95		0.93	0.94		0.90	0.93
lucite		0.97	0.95		0.92	0.90		0.89	0.89
polystyrene		0.96	0.95		0.91	0.91		0.88	0.91
C		0.99	0.95		0.94	0.90		0.91	0.89
Al		1.07	0.95		1.02	0.87		0.99	0.76

固体線量計の一例として ⁶LiF-TLD について考える。LiF 蛍光体は粉末状のものはカプセルに入れて照射するが、ペレット状やチップ状のものなどは裸のままで照射することが多い。密度が大きいため小 cavity として扱える例はほとんどないであろう。

3. 2. 1 壁のない場合

同一光子に対して小 cavity (d=1) の場合に規格化した相対的レスポンスは、(11)式において f_{m,w}=f_m, P=1, B'=1 であるから、(2)式を用いると

$$R_r = \{d' + (1-d')(\mu_{en}/\rho)_{H_2O}^{LiF} (S/\rho)_{LiF}^{H_2O}\} / P' \quad (25)$$

P'=1とした時(25)式による計算結果を Table 4 に示す。エネルギー依存性については次の 3. 2. 2 節の特例として得られ Table 5 に示すのでこの節では述べない。

Table 4 Cavity size dependence of LiF-TLD without wall for each photon energy.

	d = 1	d = 0.5	d = 0
Co-60	1.	1.023	1.046
5MeV	1.	1.031	1.062
10 MeV	1.	1.040	1.080

3. 2. 2 壁のある場合

もしも LiF-TLD についても(8)式における a の値が光子エネルギーに依存しないで一定であるなら¹¹⁾, a_{co}=a₂ であるから、⁶⁰Co γ線に対して水等価壁(又は壁なしで α_{co}=1)で小 cavity (d_{co}=1) の場合に規格化した相対的レスポンスは、P_{co}, B_{co} が1であるから(12)(7)'式より

$$R_r = \{f_{H_2O,w,2} [(S/\rho)_{LiF}^{H_2O}]_{co}\} / (B_2 P_2) \quad (26)$$

(26)式において B₂, P₂ を1とした時の値を Table 5 に示す。具体例として第5欄に 10×10×

Table 5 Energy and cavity size dependence of LiF-TLD with various wall.

wall	Energy	d ₂ = 1		d ₂ = 0	1 × 1 × 0.1cm(2.64gr/cm ³)		
		α ₂ = 1	α ₂ = 0		d ₂	α ₂ = 1	α ₂ = 0
lucite	Co-60	1.	1.014	1.046	0.1228	1.	1.002
	5 MeV	0.995	1.013	1.056	0.6387	0.978	0.989
	10 MeV	0.990	0.990	1.069	0.8385	0.964	0.964
polystyrene	Co-60	1.	1.009	1.046		1.	1.001
	5 MeV	0.995	0.995	1.056		0.978	0.978
	10 MeV	0.990	0.963	1.069		0.964	0.942
polyethylene	Co-60	1.	0.994	1.046		1.	0.999
	5 MeV	0.995	0.981	1.056		0.978	0.969
	10 MeV	0.990	0.937	1.069		0.964	0.922

Table 6 Energy and cavity size dependence of Fricke dosimeter with various wall.

wall	Energy	d ₂ = 1		d ₂ = 0	3φ×1cm (1.024gr/cm ³)		
		α ₂ = 1	α ₂ = 0		d ₂	α ₂ = 1	α ₂ = 0
pyrex glass (<i>corning</i>) # 7740	Co-60	1.	1.082	1.000	0.0440	1.	1.004
	5 MeV	1.000	1.116	1.000	0.3430	1.000	1.040
	10 MeV	1.000	1.184	1.000	0.6283	1.000	1.116
polystyrene	Co-60	1.	1.009	1.000		1.	1.000
	5 MeV	1.000	1.000	1.000		1.000	1.000
	10 MeV	1.000	0.972	1.000		1.000	0.983
lucite	Co-60	1.	1.014	1.000		1.	1.001
	5 MeV	1.000	1.018	1.000		1.000	1.006
	10 MeV	1.000	1.000	1.000		1.000	1.000

1 mm (密度2.64gr/cm³) の大きさの LiF 蛍光体について示した。LiF が、自身からの2次電子が十分にビルドアップする程度に、大きい場合 (d ≈ 0) は当然壁の厚さはレスポンスに無関係となる。lucite 壁ではエネルギーに無関係にほとんど壁厚の影響はなく、polystyrene や polyethylene では数 MeV までは壁厚の影響はないが、さらに高エネルギーになると影響が出てくる。

3.3 Fricke 線量計

液体線量計の一例として Fricke 線量計について考える。LiF-TLD と同様に小 cavity としては扱えない。Fricke 溶液は水と等価と考慮してよい。⁶⁰Co γ線に対して水等価壁 (α_{co} = 1) で小 cavity (d_{co} = 1) の場合に規格化した相対的レスポンスは、P_{co} と B_{co} は1であるから (12) (7)'式より

$$R_r = (a_{co}/a_2) [d\{\alpha + (1-\alpha)(S/\rho)_w^{Fricke} (\mu_{en}/\rho)_{H_2O}^w\} + (1-d)]_2 / (P_2 B_2) \quad (27)$$

この式で a_{co} = a₂, B₂ と P₂ が1と仮定して計算した値を Table 6 に示す。pyrex glass 容器を用いる場合、壁効果が大きく出てくるので注意を要する。具体例として第5欄に3φ×1 cm (密度1.024gr/cm³) の Fricke 線量計についての値を示した。

光子エネルギーによるG値の違いがaの値の違いとして現われる。ICRU⁴⁾⁵⁾ は光子エネルギーにより異なるG値を勧告しており、a_{co} ≠ a₂ であ

る。両者の比がG値の逆比になることは容易にわかる。従つてそれらが等しいと仮定して求めた Table 6 の値は実際にはわずかながら異なる。

議 論

cavity の吸収線量と媒質の吸収線量の比としての平均質量阻止能に対する一般式として (7) (7)'式を導入したが、これは cavity の大きさや壁厚の違いのX線、γ線線量計測への影響を考慮に入れたより一般的なものである。さらに一般的に壁が何種類かの物質の積層からなる場合、(7)式が次のようになることは容易にわかる。

$$f_{m,w} = d\{\alpha(S/\rho)_m^i + \sum_{j=1}^n [\alpha'_j \beta_j (S/\rho)_w^i (\mu_{en}/\rho)_m^w]_j\} + (1-d)(\mu_{en}/\rho)_m^i$$

ただしnは壁の積層数、α'_j はj番目の層で発生し割合β_jまでビルドアップした2次電子のcavity までへの透過率である。

(7)'式は2つのパラメータdとαとを含んでいる。dの評価については Burlin ら^{6)~8)12)} や Janssens ら¹⁸⁾ により研究されてきている。αやβに関連したものとしては Barnard ら^{14)~16)} の精力的な研究があり、Baldwin-Farmer chamber や Graphite cavity chamber について具体的に検討し、壁及びcapからの電子によるcavity中の電離量を別々に評価する一般式を得た。しかしながらその式に含まれる各パラメータの値は個々の線量計、照

射条件に依存するためその一般的な評価は困難である。従つてここでは $\alpha = 1$ と $\alpha = 0$ の極限の場合についてのみ理論値を示すにとどめた。

具体例として空気電離箱線量計, LiF-TLD, Fricke 線量計の3つを取り上げ, ^{60}Co γ 線以上のエネルギーの光子について理論値を示した。しかしながら, ここで与えた理論は線量計の種類, エネルギーによらず適用できることはいうまでもない。

(8)式に示したように, 線量計 cavity の吸収線量は線量計の読みに比例するとしたが, その比例定数 a は気体電離箱線量計では W 値に, 化学線量計では G 値に依存する。空気電離箱では, 光子のエネルギーによらず空気に対する W 値は一定である⁴⁾⁵⁾とされているために, 線量計の相対レスポンスを考える場合には a の比は全て1となり, a を考慮する必要はない。Fricke 溶液では光子エネルギーにより G 値は異なる⁴⁾⁵⁾とされているために線量計の相対レスポンスを考える場合 a を考慮する必要があるが, その比が G 値 \rightarrow の比の逆比になることは容易にわかる。LiF-TLD については十分研究されているとは言えず, ここでは一応 a の光子エネルギーへの依存性はない¹¹⁾ものとして扱つたが, さらに慎重な研究が必要であろう。

空気電離箱線量計については小 cavity についてのみ考えたが, LiF-TLD や Fricke 線量計のような一般的な取り扱いもこの理論により出来ることは言うまでもない。Table 1 から数 MeV 程度では polystyrene 壁が壁厚効果もなくよい水等価性を示すことがわかる。平岡等¹⁷⁾は水中で ^{60}Co γ 線を照射した時, 空気電離箱のルサイト壁厚を増しても電離量は変らなかつたと報告している。理論的には Table 1 から見られるように壁のない場合に比して 1.4%位増加するはずである。この違いは, もともと電離箱は 0.5mm の壁をもっており, また集電極が Al であることなどにより, 実験では, 基準となる cavity が理論における壁のない完全な空気 cavity とは異なるということに起因していると思われる。また Table 3 は理論

的に与えられたラド変換係数 C_2 の使用は実際の吸収線量よりも少し異なるであろうことを示唆している。Barnard¹⁸⁾ や川島ら¹⁹⁾も同様の理論的考察を行なつているが, ここで展開した理論はこれらと矛盾することなく拡張した形になつている。なお大気条件やイオン再結合等に対する補正は式の複雑さを避けるために無視したが, このことがこの理論の一般性を失わせるものではないことは明らかである。その他実際上の問題点については ICRU²⁾⁴⁾⁵⁾ や物理部会²⁰⁾によつて標準測定法として提起されている。

LiF-TLD については密度が大きいために例え粉末状のものを使用しても, 熱発光の測定に必要な量を考えると, 小 cavity の仮定の成り立つ例はほとんどないであろう。Table 5 の5欄に具体例を示したが, この蛍光体では ^{60}Co γ 線に対しては d は小さく, 蛍光体内で発生した2次電子からの蛍光体の吸収線量への寄与が大きいために壁の影響がほとんどないことがわかる。エネルギーが高くなると d は大きくなり壁の影響が出てくる。壁のない場合は cavity の大きさだけが問題となる。一般にはこの例よりも小さな cavity が用いられるであろうが, 同様の傾向を示すことは明らかである。

Fricke 線量計についても LiF-TLD の場合と同様に小 cavity の仮定は成り立たない。Table 6 の第5欄に具体例を示した。通例この程度の大きさのものが使用される。 ^{60}Co γ 線に対しては LiF-TLD の例よりもさらに d は小さく, 当然壁の影響は無視できる。エネルギーが高くなると d は大きくなり, 壁の影響が出てくるが, G 値すなわち a の値のエネルギーによる違いを別にすれば, ルサイト容器を用いるとエネルギー依存性があらわれないようである。Burlin ら¹²⁾はビルドアップ壁をもつシリカ製容器の内容積を変え, 壁効果のない十分に大きいものに相対的な Fricke 線量計のレスポンス変化を研究し, 理論との一致を示した。ここでの理論からは, その相対的レスポンスは

$$R_r = d(S/\rho)_w^{\text{Fricke}} (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{Fricke}}^W + (1-d)$$

で与えられるが、これは彼等の理論と一致する。

理論値の計算に当つて、光子と2次電子のスペクトルを考慮せず単色エネルギーとしたために、厳密には各テーブルに示した値はわずかながら正確な値とは違つてであろうが、一般的な傾向は変わらないはずである。

本研究を行なうに当つて御指導下さつた当研究部第3研究室長加藤義雄博士に感謝いたします。

文 献

- 1) Whyte, G.N.: Measurement of absorbed dose for X-rays. (In) Principles of radiation dosimetry. Chap. 6, pp. 72~85, 1959, Wiley, New York
- 2) ICRU Report 10b: Physical aspects of irradiation. (1962), (NBS Handbook 85), U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- 3) Johns, H.E., Cunningham, J.R.: The measurement of absorbed dose (The rad). (In) The physics of radiology. Third Edition, Chap. 9, pp. 272~310, 1969, Charles C. Thomas, Springfield, Illinois
- 4) ICRU Report 14: Radiation dosimetry: X rays and gamma rays with maximum photon energies between 0.6 and 50 MeV. (1969), ICRU Publications, Washington, D.C.
- 5) ICRU Report 17: Radiation dosimetry: X rays generated at potentials of 5 to 150 kV. (1970), ICRU Publications, Washington, D.C.
- 6) Burlin, T.E.: A general theory of cavity ionisation. Brit. J. Radiol. 39: 727~734, 1966
- 7) Burlin, T.E.: Cavity-chamber theory. (In) Attix, F.H., Roesch, W.C., Tochilin, E., ed.: Radiation dosimetry. Second Edition, Vol. 1, Chap. 8, pp. 331~392, 1968, Academic Press, New York and London
- 8) Chan, F.K., Burlin, T.E.: An experimental examination of a general cavity theory using a solid state dosimeter. Brit. J. Radiol. 43: 54~61, 1970
- 9) Sinclair, W.K.: Radiobiological dosimetry. (In) Attix, F.H., Roesch, W.C., Tochilin, E., ed.: Radiation dosimetry. Second Edition, Vol. 3, Chap. 29, pp. 617~676, 1969, Academic Press, New York and London
- 10) Pages, L., Bertel, E., Joffre, H., Sklavinitis, L.: Energy loss, range, and bremsstrahlung yield for 10-keV to 100-MeV electrons. Atomic Data. Vol. 4, No. 1, 1972, Academic Press, New York and London
- 11) Turner, A.P., Anderson, D.W.: Thermoluminescent response of lithium fluoride to high energy photons. Phys. Med. Biol. 18: 46~52, 1973
- 12) Burlin, T.E., Chan, F.K.: The effect of the wall on the Fricke dosimeter. Int. J. appl. Radiat. Isotopes 20: 767~775, 1969
- 13) Janssens, A., Eggermont, G., Jacobs, R., Thielens, G.: Spectrum perturbation and energy deposition models for stopping power ratio calculations in general cavity theory. Phys. Med. Biol. 19: 619~630, 1974
- 14) Barnard, G.P., Axton, E.J., Marsh, A.R.S.: A study of cavity ion chambers for use with 2 MV X-rays: Equilibrium wall thickness: Wall-absorption correction. Phys. Med. Biol. 3: 366~394, 1959
- 15) Barnard, G.P., Axton, E.J., Marsh, A.R.S.: On the use of roentgen-calibrated, cavity-ionization chambers in tissue-like phantoms to determine absorbed dose. Phys. Med. Biol. 7: 229~240, 1962
- 16) Barnard, G.P., Marsh, A.R.S., Hitchman, D.J.I.: Studies of cavity ionization chambers with megavoltage X-rays. Phys. Med. Biol. 9: 295~319, 1964
- 17) 平岡 武, 羽部 孝, 松沢秀夫: MeV 電子線・X線の線量測定. 日本医放会誌, 27: 1315~1322, 1968
- 18) Barnard, G.P.: Dose-exposure conversion factors for megavoltage X-ray dosimetry. Phys. Med. Biol. 9: 321~332, 1964
- 19) 川島勝弘, 小山一郎, 佐藤真男: 電離箱による高エネルギー放射線の吸収線量の測定—理論的考察—。日本医放会誌, 29: 626~632, 1969
- 20) 日本医学放射線学会物理部会: 放射線治療における⁶⁰Coガンマ線および高エネルギーX線の吸収線量の標準測定法. 日本医放会誌, 31: 723~772, 1971