The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	高エネルギー電子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(10), p. 956-963
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/19519
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

高エネルギー電子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52年3月31日受付)
(昭和52年4月22日最終原稿受付)

Theoretical Consideration of Dosimetry for High Energy Electrons

By

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, High energy electrons*

An approach to establish general cavity theory for high-energy electron dosimetry was attempted. The mean mass stopping power ratio was given by

$$f_{m,e}=d_e\cdot(S/\rho)^i_m$$

where de was approximately estimated by using an algorithm for the energy deposition by fast electrons.

The theory was applied to high-energy electron dosimetry in water by air ionization chamber, LiF-TLD and Fricke dosimeter. The absorbed dose conversion factor and the responses of these dosimeters to electrons relative to ^{60}Co γ-rays were discussed.

1. 序　論

高エネルギー電子線の吸収線量測定法について，ICRU[1]は1972年に一つの勧告を行なつた．これを受けてわが国においても1974年に日本医放学会物理部会[2]がその規準化を目指して標準測定法を提示した．これらの勧告は，他の線量計についても述べてはいるが，共に小 cavity 近似の成り立つ空気電離箱による測定法を基準にしている．我々[3]は先に高エネルギーX，γ 線の吸収線量測定に関して Burlin[4] の一般空洞理論の拡張を試みた．ここではさらに，種々の線量計により高エネルギー電子線の吸収線量を測定する際，エネルギーや cavity の大きさの違い，cavity 壁がどのような影響を及ぼすかについて，理論的考察を試みる．

高エネルギー電子線場での一般空洞理論確立の試みは Burlin ら[5]および Almond ら[6,7]によつてなされてきたが，彼等の間には意見の対立[8,9]がある．また Holt ら[10]は半経験的な理論を展開した．一方我々[11]は，これらの理論にはそれ自身の中にいくつかの問題点があり，実験結果との比較においても矛盾があることを指摘してきた．我々のここでの試みは，高エネルギー電子線場での一般空洞理論確立への一近似的接近である．

2. 理　論

理論を展開するに当つて次のような記号を使用する.

m：媒質

i：cavity

w：cavity 壁

λ：光子

c：exposure calibration に用いる光子，ここでは^{60}Co γ線

Co：^{60}Co γ線

e：電子

$(S/\rho)^i_m$：媒質物質に対する cavity 物質の平均質量阻止能の比

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

α：光子により媒質中で発生した2次電子の cavity への壁透過率[3]

d：Burlin[4]によつて与えられた重みづけ係数

B：cap displacement 補正係数

P：擾乱補正係数

D：吸収線量

f_m：平均質量阻止能比

媒質の吸収線量は次式で与えられる.

$$D_m=(D_i/f_m)\,BP \qquad (1)$$

ところで，高エネルギー電子線による小 cavity の吸収線量を ${}_eD_{i0}$ とすると

$${}_eD_m={}_eD_{i0}\,(S/\rho)^m_i\,B'_eP'_e \qquad (2)$$

となる．ここで′は′のないものと値が異なることを示す.

従つて，B_e, P_e, B_e', P_e' を1とすると，(1)(2)式より

$$f_{m,e}=d_e\,(S/\rho)^i_m \qquad (3)$$

$$d_e=(D_i/D_{i0})_e \qquad (4)$$

${}_eD_i$ 及び ${}_eD_{i0}$ を近似的に評価できれば d_e は求まる．取り扱う物質は低原子番号でしかも原子番号，質量数があまり大きくは違わないから，それら物質中での電子の散乱状況は大きくは異ならないであろう．そこで，次式により ${}_eD_i$, ${}_eD_{i0}$ を近似的に評価する[11]．電子線の場合，壁の影響は補正係数 B_e に含むものとする.

$${}_eD_{i0}=E_i\,(t_{i0})\,\frac{\eta_m(t_{m0})}{\eta_i\,(t_{i0})}$$

$${}_eD_i=\int_{t_2}^{t_2+T}E_i\,(t)\,dt/T_0\cdot\left\{\frac{\eta_m(t_1)}{\eta_i\,(t_2)}\right\}$$

$$T=T_0\cdot\cos(\bar{\theta}_{rms,i})/\cos(\bar{\theta}_{rms,m})$$

ここで各記号は次のことを意味する.

$E_i(t)$：線量計物質中での電子線によるエネルギー付与

$\eta(t)$：電子線の透過確率

t：深さ

t_{io}：電子の残余エネルギーが媒質中での線量計の中心の深さ t_{mo} での残余エネルギーに等しい線量計物質中での深さ

t_1：線量計の電子線入射面の媒質中での深さ

T_o：線量計の厚さ

$E_i(t)$, $\eta(t)$, t_{io}, t_2 は Tabata ら[12]に従つて求めうる．$\bar{\theta}_{rms}$ は Rossi[13] の教科書に従つて次式から求める.

$$\bar{\theta}_{rms}=\frac{E_s}{c}\left(\frac{x}{p_1p_2X_0}\right)^{1/2}$$

P_e は次式により求まる.

$$P_e=(1+P_{m,i}-P_{i,m})^{-1}$$

ここで $P_{m,i}$ は媒質中での電子の多重散乱による cavity 中電子数の増加，$P_{i,m}$ は cavity 中での電子の多重散乱による cavity 中電子数の減少を示し，Harder[14] に従つて求める．P_e を求める際には，壁は媒質等価であるとして扱かう.

B_e は壁の存在による電子線の flux やエネルギーの変化を補正する項であるが，その値はエネルギーや照射条件，線量計により異なる．ここでは一応1に等しいとして扱い，後にその値について議論する.

ところで cavity の吸収線量 D_i が線量計の読みMに比例するものとすると，a を比例定数として

$$D_i=aM \qquad (5)$$

となる．従つて^{60}Co γ 線に相対的な高エネルギー電子線への線量計のレスポンスは

$$R_r=\frac{(M/D_m)_e}{(M/D_m)_{Co}}=\frac{a_{Co}f_{m,e}B_{Co}P_{Co}}{a_e\ f_{m,Co}\ B_e\ P_e} \qquad (6)$$

で与えられることが (1) (5)式からわかる.

我々[3]はまた先に，X，γ 線の吸収線量を評価するための平均質量阻止能比 $f_{m,\lambda}$ に対する一般式を導入した.

$$f_{m,\lambda}=[d\{\alpha(S/\rho)^i_m+(1-\alpha)(S/\rho)^i_w(\mu_{en}/\rho)^w_m\}+(1-d)(\mu_{en}/\rho)^i_m]_\lambda \qquad (7)$$

故に (3) (6) (7)式より

$$R_r=\frac{a_{Co}[d(S/\rho^i_m]_e}{a_e[d\{\alpha(S/\rho)^i_m+(1-\alpha)(S/\rho)^i_w(\mu_{en}/\rho)^w_m\}+(1-d)(\mu_{en}/\rho)^i_m]_{Co}}\cdot\frac{B_{Co}P_{Co}}{B_eP_e} \qquad (8)$$

以下に，具体的に空気電離箱線量計，LiF-TLD，Fricke 線量計について検討するが，理論計算に当つては質量エネルギー吸収係数については Sinclair[15] の値，質量阻止能については Pages ら[16]の値を用いた．^{60}Co γ 線からの2次電子のの平均エネルギーは 0.59MeV である[17]とした．また電子線は全て平均エネルギーをもつものとし次式[1]から求めた.

$$(\bar{E})_z=E_0(1-z/R_p)$$

$$\rho R_p=0.521E_0-0.376$$

3. 種々の線量計

3．1　空気電離箱線量計

空気電離箱を用いて吸収線量を測定するには，一般に容積の小さなものを用い，高エネルギー電子線や ^{60}Co γ 線に対しては d=1で小 cavity の近似が成り立つであろう．従つてここでは $d_{co}=1$, $d_e=1$として扱かう.

また空気に対するW値は光子エネルギー，電子エネルギーによらず33.73eV であると勧告[1,18,19]されており

$$a_\lambda=a_e \qquad (9)$$

3．1．1　ラド変換係数 C_E

電離箱を光子 c で校正した時の校正定数を N_c とすると

$$D_m=0.869M_cN_cA_{eq}[(\mu_{en}/\rho)^m_{air}]_c \qquad (10)$$

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

$$D_m=a_cM_c/f_{m,c} \qquad (11)$$

であるから，(10) (11) 式より

$$a_c=0.869N_cA_{eq}[(\mu_{en}/\rho)^m_{air}]_cf_{m,c} \qquad (12)$$

従つて高エネルギー電子線による水の吸収線量は (1) (5) (9) (12) 式より

$$D_{H_2O,e}=0.869N_cA_{eq}[(\mu_{en}/\rho)^m_{air}]_cf_{m,c}M_eB_eP_e/f_{m,e} \qquad (13)$$

ところで

$$D_{H_2O,e}=C_EN_cM_e \qquad (14)$$

であるから，(3) (7) (13) (14) 式より

1) α, B_e, P_e=1なら

$$C^1_E=0.869A_{eq}[(\mu_{en}/\rho)^m_{air}(S/\rho)^{air}_m]_c[(S/\rho)^{H_2O}_{air}]_e \qquad (15)$$

2) α=0, B_e, P_e=1なら

$$C^2_E=0.869A_{eq}[(\mu_{en}/\rho)^w_{air}(S/\rho)^{air}_w]_c[(S/\rho)^{H_2O}_{air}]_e \qquad (16)$$

ここでビルドアップキャップ物質と壁物質が等しいとすると，(15) (16) 式より

$$C^1_E=C^2_E$$

である．一般にラド変換係数 C_E は壁が空気等価で校正光子が ^{60}Co γ 線，A_{eq} は0.985であるとして求められる．即ち

$$C_E=0.856[(S/\rho)^{H_2O}_{air}]_e \qquad (17)$$

校正深[2]における C_E の値を Table 1に示す.

Table 1. Absorbed dose conversion factor, C_E.

electron energy MeV	calibration depth cm	recommendation*	calculated from eqn (16)	
			**	***
5	1	0.922	0.919	0.919
10	1.5	0.885	0.874	0.881
15	1.5	0.851	0.845	0.862
20	2	0.835	0.828	0.852
25	2	0.819	0.814	0.842
30	2	0.806	0.804	0.838

* From references (1) and (2).
** Based on ICRU[1] values of (S/ρ).
*** Based on Pages et al.[16] values of (S/ρ).

質量阻止能として ICRU[1] 及び Pages ら[16]の値を用いて（17）式から計算した結果と勧告値[1,2]とを比較すると，勧告値と前者に基づく計算値は大体よい一致を示しているが，質量阻止能の値として後者を用いた計算値とは電子線のエネルギーが高くなるとかなりの違いを示している．この一致は電子線のスペクトルがわからない場合，平均エネルギーで考えてもそれ程大きな違いはもたらさないであろうことを示しており，一方この違いは質量阻止能の理論値を決める際のdensity effectに対する項の違いに基因している．

キャップに壁物質と等しい物質を用いた時の種々壁物質の線量計に対するラド変換係数 C_E' の C_E に対する相対値は，（15）又は（16）式及び（17）式から

$$C_E'/C_E=[(\mu_{en}/\rho)_{air}^{w}(S/\rho)_{w}^{air}]_{Co} \qquad (18)$$

（18）式に基づく計算結果を Table 2に示す．

実際には壁あるいはキャップが完全に空気等価であるとは言えず，使用すべきラド変換係数は厳密には C_E の値とは異なることが Table 1及び2からわかる．

Table 2. C'_E/C_E from eqn (17). The values of C'_E/C_E are independent of electron energy.

wall material	C'_E/C_E
air	1.0
water	0.974
tissue	0.991
polystyrene	0.982
lucite	0.986
bakelite	0.995
C	1.009
Al	1.094

3．1．2 ^{60}Co γ線に相対的なレスポンス

1） $\alpha=1$の電離箱の場合

d=1であるから，B，P を無視すると（8）（9）式より

$$R_r=[(S/\rho)_{H_2O}^{air}]_e[(S/\rho)_{air}^{H_2O}]_{Co} \qquad (19)$$

2） $\alpha=0$の電離箱の場合

1)の場合と同様にして

$$R_r=[(S/\rho)_{H_2O}^{air}]_e[(S/\rho)_{air}^{w}(\mu_{en}/\rho)_{w}^{H_2O}]_{Co} \qquad (20)$$

Table 3. Relative responses of air chamber normalized to ^{60}Co γ-rays for $\alpha=1$. The case of $\alpha=0$ is equivalent to water-equivalent wall.

wall material	electron energy (MeV)				
	1	5	10	20	30
air	0.984	1.050	1.083	1.114	1.125
water	1.012	1.080	1.114	1.146	1.157
tissue	0.993	1.060	1.093	1.124	1.136
polystyrene	1.003	1.069	1.103	1.135	1.146
lucite	0.998	1.065	1.098	1.130	1.141
bakelite	0.989	1.055	1.089	1.120	1.131
C	0.975	1.040	1.073	1.103	1.114
Al	0.897	0.957	0.987	1.015	1.025

（19）（20）式に基づく計算結果を Table 3に示す．

3．2 LiF-TLD

TLD 用 LiF 素子にはカプセルに入れないで照射できるものもあり，カプセルに入れて照射する場合でも非常に薄いものを用いるのが通例である．そこで$\alpha=1$と近似すると（8)式より，B_{Co}, B_e, P_{Co} は1とおけるであろうから

$$R_r=\frac{a_{Co}}{a_e}\frac{[d(S/\rho)_{H_2O}^{LiF}]_e}{[d(S/\rho)_{H_2O}^{LiF}+(1-d)(\mu_{en}/\rho)_{H_2O}^{LiF}]_{Co}P_e} \qquad (21)$$

LiF-TLD の高エネルギー電子線に対するエネルギー依存性については多くの研究があるが，実験的にも理論的にもまだ結論は得られていないと言えよう．我々[11]はすでにこの問題についての詳細な考察を試みてきたので，ここでは（21）式から導かれる結果のみを示すにとどめる．

a_{Co} 及び a_e の値は実験と理論との相関から求まるもので，上に述べたような理由で a_{Co}/a_e の値がエネルギーの違いに対してどのようになるかは不明である．

Table 4に10×10×1mm（密度2.64gm/cm³）の ^{n}LiF 熱蛍光体について $a_{Co}=a_e$ として（21）式から得られた結果を示す．照射は校正深[2]で行なつたものとした．

3．3 Fricke 線量計

Table 4. Relative responses of LiF-TLD and Fricke dosimeters normalized to ^{60}Co γ-rays for $\alpha=1$.

electron energy MeV	depth cm	^{n}LiF-TLD 1×1×0.1cm 2.64gm/cm^3	Fricke dosimeter 1.024gm/cm^3	
			3ϕ×0.5cm	3ϕ×1cm
5	1	0.923	0.983	0.946
10	1.5	0.950	1.000	1.001
15	1.5	0.947	1.001	1.004
20	2	0.943	1.000	1.002
25	2	0.940	1.000	1.001
30	2	0.938	1.000	1.001

Fricke 溶液は水等価であり，ICRU[1,18] は1～30MeV の電子線については G=15.7，^{60}Co γ線については G=15.5を勧告していて a の値の比はG値の逆比で与えられるから，^{60}Co γ 線に対する高エネルギー電子線への相対的レスポンスは(8)式より，B_{Co}，P_{Co}，B_e を無視すると

$$R_r=1.013\frac{d_e}{[d\{\alpha+(1-\alpha)(S/\rho)_w^{H_2O}(\mu_{en}/\rho)_{H_2O}^w\}+(1-d)]_{Co}P_e} \quad (22)$$

Table 4に 3ϕ×0.5cm 及び 3ϕ×1cm の Fricke 線量計について，(22) 式に基づいて計算した結果を示す．$\alpha=1$ の場合について，定数1.013を除いた値を示した．溶液密度は1.024gm/cm^3 であるとし，照射は校正深で行なつたものとした．

4. 議　論

高エネルギー電子線場での一般空洞理論確立への一つの近似的接近を試み，平均質量阻止能比として (3)式を導入した．

d_e の評価において，次のような点で不充分さがあるかもしれない．1)電子線は単一エネルギーでしかも媒質に垂直に入射するとしたこと，2)半無限吸収体中でのエネルギー付与分布を小さな cavity 中でのエネルギー付与に適用したこと，3)重みづけ因子 $\cos(\bar{\theta}_{rms,i})/\cos(\bar{\theta}_{rms,m})$ を線量計物質中と媒質中とでの電子の散乱の違いを補正するために用いたことなどである．Fig. 1に水中での10MeV 電子線の線量分布を示した．実線が曲型的な実測値[20]で，点線は $E_{H_2O}(t)$ から計算した値である．E(t) に基づくエネルギー付与の

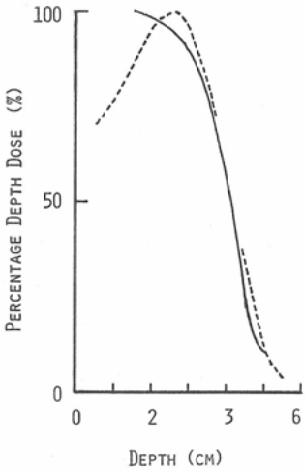

Fig. 1 Depth dose curves of 10 MeV electrons in water. The solid line is a typical curve measured for field size of 8×8cm[20]. The dashed line was calculated according to Tabata et al.[12]

計算は，実験値との比較の際には，あまりよい近似ではないかもしれない．しかしながら，LiF-TLD の高エネルギー電子線に対するエネルギー依存性に関する実験との比較では，この理論のいくつかのデータとの一致を認めてきた[11]．

空気電離箱については d=1という近似が成り立つ場合についてのみ扱つたが，勿論もつと大きな cavity のものについてもこの理論は適用できる．一般にラド変換係数 C_E は壁が空気等価であると仮定して決められるが，実際の電離箱ではわずかながら異なるであろうことが Table 1，2からわかる．Matsuzawa ら[21]はルサイトビルドアップキャップで校正したルサイト壁電離箱については，C_E の値は3％減じられるべきことを示した．Table 2に示したように，我々の解析では約1.4％減じればよいことになつている．この違いは，Matsuzawa らは ICRU[1] の C_E の値が，Kessaris[22] の値を引用しているので，Kessaris が与えた単位 rad・esu^{-1}・cm^3 をもつものとして，rad/R の単位にするには0.985を乗ずるべきであるとしているが，我々は IURU の C_E の値は一応 rad/R で表わされているとみなして，0.985を乗じないで求めたことに起因しており，決して矛

盾するものではない．また C_2 の値を求める際には壁が水等価であるとされ[3]，一方 C_E の値を求める際には壁は空気等価とされる点に一つの問題があると言える．

Table 2から Bakelite, C. 組織等価物質などがよい空気等価性を示すことがわかる．

Table 1に質量阻止能の値として ICRU[1] の値及び Pages ら[16]の値を用いて計算した C_E の値を示したが，両者はエネルギーが高くなると数%も違つてくる．これは density effect の値の取り方の違いに起因しているが，このことは dosimetry の最も基本的な重要な問題であり，この面での一層の研究が望まれる．

川島ら[23]もルサイト空気電離箱について同様の考察を行なつているが，我々の理論はさらに拡張して種々の空気電離箱に適用できるようになつている．

高エネルギー電子線場での一般空洞理論確立の試みは主に固体線量計のレスポンス解析を主眼としてきた[5~7,10,11]．殊に LiF-TLD のエネルギー依存性に関する研究には，これらの理論が種々適用[6,7,10,11]されてきたが，様々な傾向を示す多くの実験結果を統一的に説明できてはいない[11]．実験そのものの再検討も必要であろう．Burlin ら[5]や Holt ら[10]の理論はエネルギーの減少と共に相対感度は低くなることを示しているが，Almond ら[6,7]の理論は $[(S/\rho)_m^{LiF}]_e/[(en/\rho)_m^{LiF}]_{Co}$ の値より低くはなりえないことを示している．一方我々の理

Table 5. Transmissions and energy losses of electrons in wall and water.

(a) for wall of 0.5mm thickness.

electron energy (MeV)	1		5		10		20		30	
wall material	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
water*	1.000	0.0	1.000	0.0	1.000	0.0	1.000	0.0	1.000	0.0
air*	0.998	0.011	0.999	0.005	1.000	0.002	1.000	0.000	1.000	0.001
tissue*	1.000	0.003	1.000	0.002	1.000	0.002	1.000	0.003	1.000	0.003
polystyrene	0.993	0.004	0.999	0.005	1.000	0.005	1.000	0.006	1.000	0.007
lucite	0.999	0.013	0.999	0.013	1.000	0.013	1.000	0.013	1.000	0.013
bakelite	1.002	0.027	1.000	0.027	1.000	0.029	1.000	0.029	1.000	0.029
pyrex glass	1.098	0.093	1.001	0.099	1.001	0.105	1.000	0.108	1.000	0.110
C	1.038	0.117	1.000	0.120	1.000	0.126	1.000	0.130	1.000	0.132
Al	1.195	0.110	1.003	0.122	1.001	0.128	1.000	0.133	1.000	0.136

(b) for wall of $(t_w \cdot \rho_w)$** gm/cm² thickness.

	(3)	(4)	(3)	(4)	(3)	(4)	(3)	(4)	(3)	(4)
water*	1.0	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0
air*	1.002	0.110	1.0	0.056	1.0	0.027	1.0	0.001	1.0	0.012
tissue*	0.933	0.025	1.0	0.019	1.0	0.021	1.0	0.026	1.0	0.030
polystyrene	0.871	0.018	0.997	0.011	0.999	0.008	1.0	0.003	1.0	0.001
lucite	2.093	0.100	1.0	0.094	1.0	0.094	1.0	0.095	1.0	0.093
bakelite	3.670	0.191	1.002	0.188	1.0	0.194	1.0	0.196	1.0	0.199
pyrex glass	20.589	0.382	1.014	0.406	1.003	0.428	1.001	0.445	1.001	0.454
C	13.055	0.460	1.004	0.473	1.001	0.493	1.0	0.511	1.0	0.519
Al	57.000	0.448	1.027	0.490	1.005	0.514	1.002	0.534	1.001	0.546

* Equivalent material. The densities were assumed to be 1.0 gm/cm³.

** The thicknesses are equal to the ranges of 1.04 MeV electrons in various materials.

(1) $[\eta(t)]_{wall}^{water}$. (2) $|\Delta E_{water}(t)-\Delta E_{wall}(t)|$MeV. (3) $[\eta(t_w)]_{wall}^{water}$.

(4) $|\Delta E_{water}(t_w)-\Delta E_{wall}(t_w)|$MeV.

論はエネルギーだけでなく，媒質中での深さによつても相対感度が異なることを示し，一層複雑になる[11]．

Fricke 溶液は水等価であり，壁効果が無視できるなら相対感度はG値にのみ依存すると考えられているが，実際には密度が2％強異なり，またかなりの大きさをもつために，Table 4からわかるように，照射条件によつては必ずしもそうではないことが予測される．

ところで，ここでは $B_e=1$ として扱つたが，実際には B_e がどの程度の値となるかを検討しておく必要があろう．Table 5に0.5mmおよび ^{60}Co γ 線による2次電子の最大飛程に相当する厚さの種々物質について，等しい厚さの水に対する電子の透過率 $\eta(t)$ の比および減少エネルギー ΔE の差の絶対値を示した．これらの値は B_e の値を推定する指標となるであろう．0.5mm 程度の壁厚では，どの壁物質の場合にも，高エネルギー電子線に対して $B_e=1$ とおけるであろう．

理論的な取り扱いは厳密なものであるが，具体的な計算においてはスペクトルを考慮しなかつたために，実際にはここで示した数値については少し異なるであろうことを注意しておく．

本研究を進めるに当り終始御指導下さつた当研究部室長加藤義雄博士に深く感謝いたします．

文　献

1) ICRU Report 21: Radiation dosimetry: Electrons with initial energies between 1 and 50 MeV. (1972), ICRU Publications, Washington, D.C.
2) 日本医学放射線学会物理部会：放射線治療における高エネルギー電子線の吸収線量の標準測定法．(1974)，通商産業研究社．
3) 白貝彰宏：X線，γ線の吸収線量測定に関する理論的考察，日本医放会誌，37：570—577，1977．
4) Burlin, T.E.: A general theory of cavity ionisation. Brit. J. Radiol., 39: 727—734, 1966
5) Burlin, T.E., Snelling, R.J., Owen, B.: The application of general cavity ionization theory to the dosimetryof electron fields. (In) Proc. 2nd Symp. on Microdosimetry: 455—473, 1969
6) Almond, P.R., McCray, K.: The energy response of LiF, CaF_2, and $Li_2B_4O_7$: Mn to high energy radiations. Phys. Med. Biol., 15: 335—342, 1970
7) Paliwal, B.R., Almond, P.R.: Applications of cavity theories for electrons to LiF dosemeters. Phys. Med. Biol., 20: 547—558, 1975
8) Burlin, T.E.: The energy response of LiF, CaF_2 and $Li_2B_4O_7$ to high energy radiations. Phys. Med. Biol., 15: 558—560, 1970
9) Almond, P.R., McCray, K.: The energy response of LiF, CaF_2 and $Li_2B_4O_7$ to high energy radiation. Phys. Med. Biol., 15: 746—747, 1970
10) Holt, J.G., Edelstein, G.R., Clark, T.E.: Energy dependence of the response of lithium fluoride TLD rods in high energy electron fields. Phys. Med. Biol., 20: 559—570, 1975
11) Shiragai, A.: An approach to analysis of energy response of LiF-TLD to high energy electrons. Phys. Med. Biol. 22: 490—499, 1977.
12) Tabata, T. and Ito, R.: An algorithm for the energy deposition by fast electrons. Nucl. Sci. Engin., 53: 226—239, 1974
13) Rossi, B.: Theory of electromagnetic interactions. (In) High-energy particles. Chap. 2, pp. 10—90, 1956, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.
14) Harder, D.: Einfluß der Vielfachstreuung von Elektronen auf die Ionisation in gasgefülten Hohlräumen. Biophysik, 5: 157—164, 1968.
15) 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.
16) Pages, L., Bertel, E., Joffre, H. and Sklavenitis, 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.
17) Johns, H.E. and Cunningham, J.R.: The measurement of absorbed dose (The rad). (In) The physics of radiology. Third Edition, Chap. 9, pp. 272—310, 1969, Chales C. Thomas, Springfield, Illinois.
18) 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.
19) ICRU Report 17: Radiation dosimetry: X rays generated at potentials of 5 to 150 kV. (1970). ICRU Publications, Washington, D.C.
20) Brit. J. Radiol. Supplement No. 11: Central

axis depth dose data for use in radiotherapy. 1972

21) Matsuzawa, H., Kawashima, K. and Hiraoka, T.: Dose conversion factors for electrons. Phys. Med. Biol., 19: 744—746, 1974

22) Kessaris, N.D.: Absorbed dose and cavity ionization for high-energy electron beams. Radiat. Res., 43: 288—301, 1970

23) 川島勝弘, 小山一郎, 佐藤貞男：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.