The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	MeV電子線・X線の線量測定
Author(s)	平岡, 武; 羽部, 孝; 松沢, 秀夫
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1968, 27(10), p. 1315-1322
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/19557
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

MeV 電子線・X線の線量測定

放射線医学総合研究所物理第2研究室
平岡 武 羽部 孝 松沢秀夫

(昭和42年3月29日受付)

Dosimetry of Megavoltage X-rays and Electrons

by

Takeshi Hiraoka, Takashi Habu and Hideo Matsuzawa
Division of Physics, National Institute of Radiological Sciences, Chiba, Japan

When the ionization is measured in an air-filled cavity placed at a point in the irradiated medium, the absorbed dose in the medium may be estimated by means of the Bragg-Gray relation. In order to measure the cavity ionization, a thimble ionization chamber (cavity wall: 0.5 mm lucite, cavity volume: 0.681 cc) has been developed at our laboratory. The performance test for the chamber has been carried out for Co-60 γ-rays, 20-30 MV x-rays and 10-30 MeV electrons. It has been confirmed that the stem leakage of the chamber is less than 0.2% of the cavity ionization, and the effect of 0.5 mm lucite wall upon the cavity ionization is negligible in water phantom. Since the conversion of the cavity ionization measured by the chamber into rads in the medium can be made by theoretical calculation, this chamber may be serviceable for practical use.

The response of several commercial dosemeters (R-scale) has been investigated, and the rad-"R" conversion factor, that is the ratio of the absorbed dose as measured by this chamber at a specified point in the medium to the scale reading as measured by "R"-dosemeter, has been estimated for water.

1. 緒 言

MeV 域の高エネルギー電子線やX線の医学利用は最近益々盛んになりつつあるが，これらの放射線に対する患者の吸収線量評価について国際的に承認された実用測定法は未だ決められていない．この分野の現況を展望すると，英国では，MV域のX線の測定に Baldwin-Farmer dosemeter が用いられ，Rから rad への換算係数が決められた[1)~4)]．米国では，高エネルギー電子線の線量測定に関する協定が最近提案されて，吸収線量が Fricke dosemeter（G値を15.5とする）か又は空洞電離箱によつて求められると述べている[5)]．しかし実用する電離箱の規格や rad 評価に必要な換算係数などは示されていない．またドイツ，スイスなどでは，ion dose（ρ 単位）の概念が提唱されて ρ 値から rad への換算係数が示されているが[6)7)]，実用測定器の規格は未定である．

一方，実際の放射線治療では在来のレントゲン単位線量計による測定値Rが out put として用いられる場合が多い．しかし，これは放射線場の強さを示す一つの尺度であり，患者の吸収線量を直接指示するものではない．

著者は，空洞原理が適用できるような薄い壁の電離箱を試作し，MeV 域の電子線，X線に対してこれを実用線量計として使用しようと企てた．この研究では，先ず試作電離箱の諸特性を検討し，次いで媒質の吸収線量評価に必要な換算係数を求めた．さらに，実用のレントゲン表示線量計

について電子線，X線に対する感度を実験的に検討した．ただし本論文では，ベータートロンから放射される10～30MeV 電子線，X線の broad beam に照射された水ファントム中の線量測定について述べる．

2. 電離箱

電子線，X銅に照射された媒質中の或る場所における吸収線量D rad はそこに置いた air cavity 中の電離密度Q esu/0.001293 g air を測定すれば，空洞原理によつて次式で与えられる[8]．

$$D = 0.869\,Q \cdot Sm \qquad (1)$$

ただし，Sm は電子について空気の質量阻止能に対する媒質の質量阻止能の比（平均値）であり，詳細は後に述べる．

Qを測定するために指頭型電離箱を試作した．その構造を Fig. 1に示す．air cavity の壁は厚さ 0.5㎜のルサイト（アクリル樹脂）から成り，内面にはアカダツクが塗布されている．これは同軸ケーブルの外皮（銅線で編んだもの）を通じて電池（120V）に接続される．収集電極は直径 0.5㎜のアルミニユム線であるが，これは同軸ケーブルの中心線そのものである．stem 部の中心線はポリエチレン中に埋められ，その周りは接地された金網の鞘で覆われている．電離箱として用いられる air cavity の体積は 0.681cm³ であり，内部の空気は細隙を経て大気に通じている．

（a）電離電流測定回路

放射線照射時に電離箱内に生ずる電離電流を標準空気コンデンサ（1001.2pF）に充電させ，その電位変化を振動容量電位計（Applied Physics Co. Model31）で測定した．この方法は操作が容易なので実用上便利であるが，浮游容量に対する補正を行わねばならない．そこで，^{60}Coガンマ線を用いて，この方法と Townsend balance 法[9]とを比較したが，浮游容量の影響が3％であることを知つた．以下の実験では主に前者の回路を用い，測定値に3％の補正を施した．また，標準空気コンデンサの代りにスチロールコンデンサを用いても実際には差支えないことが確められた．

（b）電離箱の stem leakage

放射線場の中においた電離箱では，一般に air cavity 以外の部分も放射線に照射されるので所謂 stem leakage が生ずる[10]．試作した電離箱の stem leakage を検討するために，Fig. 1と同じ構造の stem 部分を作り，Fig. 2に示す配置で実験を行つた．すなわちFig. 2（a）は普通の電離箱使用条件，Fig. 2（b）は Fig. 2（a）の stem の位置に試作した stem 部分のみを置いた場合，Fig. 2（c）は stem での散乱線が air cavity の電離にどの程度寄与するかを知るための配置である．各放射線に対し適宜の壁厚のルサイト cap を電離箱に被ぶせ，それぞれ最大の電離電流が得られるようにした．ルサイト cap の壁の厚さは 4㎜（^{60}Coγ線），25㎜（10MVX線），50㎜（30MVX線），10㎜（10MeV電子線），20㎜（30MeV電子線）である．

Fig. 1. Diagrma of thimble ionization chamber (longitudinal section).

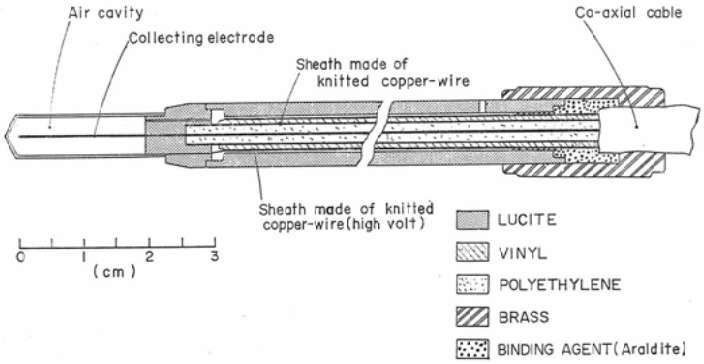


Fig. 2. Arrangement of ionization chamber and stem for radiation beam.

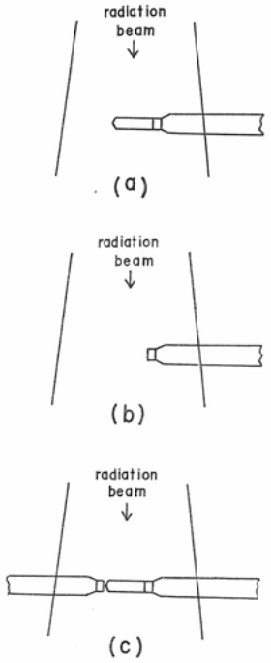


Table 1. Comparison of electric currents measured in cases (a), (b) and (c) shown in Fig. 2, for 10cm×10cm field.

Radiation	Experimental set-up shown in		
	Fig. 2 (a)	Fig. 2 (b)	Fig. 2 (c)
	ratio of electric currents		
^{60}Co γ-rays	1.00	2.0×10^{-3}	～1.0
10MV x-rays	1.00	1.4×10^{-3}	～1.0
30MV x-rays	1.00	2.0×10^{-3}	～1.0
10MeV Electrons	1.00	0.5×10^{-3}	～1.0
30MeV Electrons	1.00	0.4×10^{-3}	～1.0

Table 2. Change of measured electric charge with field size, for ^{60}Co gamma-rays.

Field size	Experimental set-up		(b)/(a)
	Fig. 2 (a)	Fig. 2 (b)	
(cm^2)	(coulomb)		
5× 5	5.15×10^{-9}	8.3×10^{-12}	0.0016
10×10	5.42×10^{-9}	10.7×10^{-12}	0.0020
15×15	5.64×10^{-9}	12.3×10^{-12}	0.0022

照射野が10cm×10cmの場合，Fig. 2（a）での測定値に対する Fig. 2（b），（c）での測定値の相対比を Table 1 に示す．この結果は，stem leakage が air cavity 中の電離電流の約 0.2%以下で実用上不都合でないこと，また stem による散乱を無視できることを示す．他の照射についても同様の結果が得られたが，一例として ^{60}Co γ 線についての測定結果を Table 2 に示す．

（c）ルサイト壁の影響

媒質の吸収線量評価に (1)式が適用されるためには，電離箱の air cavity が直接媒質に囲まれていなければならぬ．しかし試作した電離箱の air cavity は厚さ 0.5mmのルサイト壁で包まれているので，この電離箱を水中に入れてQを測定する場合測定値はルサイト壁の影響を受けるかも知れぬ．

ルサイト壁のない air cavity 中の電離電流Qを推定するために次のような外挿法を用いた．すなわち，40cm×40cm×50cmの水フアントム中の深さ3cm（電子線の場合）または6cm（^{60}Coγ，MV X線の場合）の位置に電離箱を固定し，これに壁厚の異るルサイト cap を被せてQを測定し壁厚と電離電流の関係を求めた．この実験結果から，2mm以下の壁厚では電離電流Qが一定であることが判つた．したがつて，0.5mmのルサイト壁から成るこの電離箱で測定されるQは (1)式に適応できると考えられる．

3. 電子質量阻止能と rad 換算係数

（a）電子線

筋肉，水，空気の電子質量阻止能について Berger の計算値[11]を引用し，空気に対する水および筋肉の質量阻止能比 S_m を求めた．単一エネルギーの1～30MeV 電子線に対する S_m を Table 3 に示す．また S_m に0.869を乗じたものはQから rad を評価するための換算係数であり，Table 3 の右上部に示される．

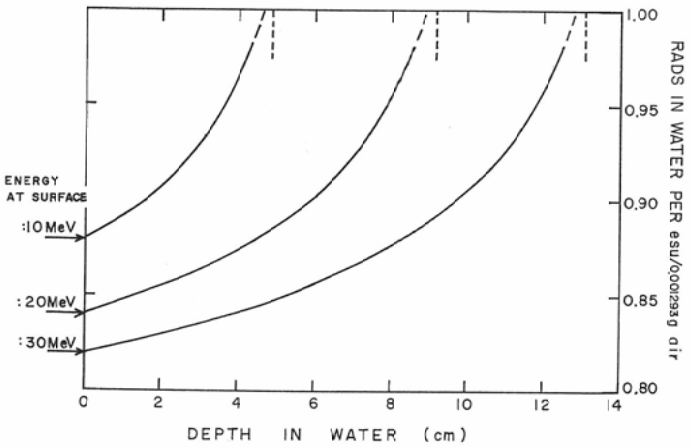
さて，媒質中の air cavity を通過する電子群のエネルギーが単一で既知ならば，Table 3 の値はそのまま適用できる．しかしこの様なことは実際には殆んどあり得ない．単一エネルギーの電子群

Table 3. Mass stopping power ratios, *Sm*, relative to air, and absorbed dose per esuper 0.001293 g air for water and muscle.

Radiation	*Sm*			Rads per esu per 0.001293 g air			
	water		muscle	Water		muscle	
Electrons; 1 MeV	1.131		1.116	0.983	0.98[d]	0.970	0.96[d]
3 MeV	1.084		1.071	0.942		0.931	
5 MeV	1.055		1.042	0.917	0.92[d]	0.905	0.90[d]
10 MeV	1.011		1.000	0.879	0.89[d]	0.869	0.87[d]
20 MeV	0.968		0.958	0.841		0.832	
30 MeV	0.944		0.934	0.820	0.83[d]	0.812	0.81[d]
^{60}Co r-rays	1.135[a]		1.133[a]	0.986[a]		0.985[a]	
X-rays;							
10MV	1.113	1.130[c]	—	0.967	0.97[d]	—	0.95[d]
15MV	1.104[b]		—	0.959		—	
20MV	1.098	1.100[c]	—	0.954		—	
25MV	1.092[b]	1.086	—	0.949		—	
30MV	1.087	1.082	—	0.944	0.94[d]	—	0.92[d]

a : ICRU Report 1962, NBS Handbook 85. b : Mean mass stopping power ratios were calculated by using the measured x-ray syectra for 15MV and 25MV x-rays.
c : Greene's calculation[3]. d : Schinz and Wideroe[7].

Fig. 3. Variation of rad/esu/0.001293g air with depth in water, for electrons.



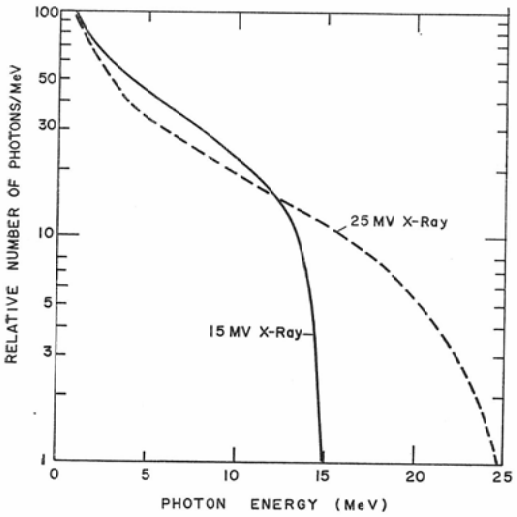
が媒質に入射しても，そのエネルギーは深さと共に減少しかつ一層 broad なエネルギー分布を呈するであろう．したがつて電子スペクトルを考慮した平均の質量阻止能比を計算する必要がある．しかし媒質中ではこの計算は困難であるので，次の様な方法によつて電子線の *Sm* を推定した．即ち，電子が連続的にエネルギーを失いながら媒質中を直進し，入射エネルギー E_0 から或るエネルギー E まで減速する間に進む距離は E_0 および E に対応する飛程の差に等しいと仮定する．例えば，水中における電子の飛程は10MeV で4.88 cm，8 MeV で3.95cm，6 MeV で2.99cmであるから[11]，エネルギーが10MeV から8 にMeV に低下するまでに0.93cm(=4.88—3.95)進み，さらに6

MeV になるまでに1.89cm（=4.88—2.99）進むと考える．この方法によつて水中の各深さでの電子エネルギーを推定し，それに対する Sm および rad 換算係数を求めた．単一エネルギーの 10-, 20-, 30-MeV 電子線が水に入射した場合，水中の深さと rad 換算係数の関係を Fig. 3 に示す．

（b）X線

15MV，25MVX線のスペクトルを NaI シンチレーションスペクトルメーターで測定した[14]（Fig. 4）．この結果を用い水中の2次電子スペクトルを計算し，この電子群について空気に対する水の平均質量阻止能比[12]を求めた．得られた Sm 値は15MVで 1.104，25MVで 1.092である．これらの値および ^{60}Co γ線の値[8]を結ぶ曲線から他のエネルギーのX線に対する Sm を推定した．水の Sm および rad 換算係数を Table 3 に示す．10〜30MV 域では Sm のX線エネルギー依存性は少く，またX線スペクトルも媒質中で殆んど変らないであろう．したがつて Table 3 に示される rad 換算係数は実用上役立つと考えられる．

Fig. 4. Spectral distribution of photons for 15MV- and 25MV- x-rays from a betatron.



4. 実用線量計の感度比較

（a）^{60}Co γ線に対する感度

Table 4 に示す実用線量計（R単位）の高エネルギーX線，電子線に対する感度を検討する前に，^{60}Co γ線について各線量計の感度を測定してR値の較正を行つた．テレコバルト治療装置（島津製RT— 2,000）を用い，γ線源から75cmの空中に線量計を置き10cm×10cm の照射野で実験した．ここで用いた Baldwin-Farmer sub-standard dosemeter MK2 の 2MVX線に対する較正係数（multiplying factor）は NPL によつて1.08と与えられているので，^{60}Co γ線にもこの値が適用されると仮定した．これを基準として求めた各線量計の較正係数はTable 4 の multiplying factorの列に示されるが，感度の差異は可成り著明である．

Table 4. Response of dosemeters for ^{60}Co gamma-rays (source-dosemeter distance: 75 cm, field size: 10cm×10cm).

Dosemeter	Scale readings of dosemeter at 22C, 760mmHg (R)	Corrected exposure (R)	Multiplying factor
Baldwin-Farmer Mk. 2	21.5	23.2a)	1.08a)
Victoreen R-meter(Model 553)	24.4		0.951
Victoreen R-meter (Model 621)	24.4		0.951
Radocon (Probe: Model 606)	22.1		1.05
Siemens Universal (Midget thimble)	19.5		1.19
Philips(Probe: 37486/10)	25.9		0.895

a) The response of Baldwin-Farmer dosemeter has been calibrated at NPL, England. The multiplying factor is 1.08 for 2MV x-rays. Assuming that this value may be adapted to ^{60}Co gamma-rays, the corrected exposure will be determined to be 23.2R (=21.5×1.08).

他方，試作電離箱に壁厚4mmのルサイト cap を被せ前記と同一の照射条件でQを測定し，次式によつてR値を算定した[2]．

$$R = \frac{(\mu_{en}/\rho)_{air}}{(\mu_{en}/\rho)_{lucite}} \times (Sm)_{air}^{lucite} \times f \times Q = 1.052Q \qquad (2)$$

ただし，

$(\mu_{en}/\rho)_{air}/(\mu_{en}/\rho)_{lucite}=0.9302$[8]，$(Sm)_{air}^{licite} = 1.109$[8]，

fはルサイト壁によるγ線の減弱に対する補正で1.02とする[13].

Q＝22.1esu/0.001293g air と測定されたので，(2) 式によりR値は23.0と算定された．Baldwin-Farmer dosemeter による測定値は23.2Rであるから，両者の一致は良好である．

(b) MeV 電子線，X線に対する感度

ベータトロンから放射される電子線またはX線ビームを40cm×40cm×50cmの水フアントムに側面（40cm×40cmの面）から入射させる．フアントム表面の照射野は10cm×10cm，ビームの中心軸はこの面の中心に垂直に入射する．ビーム軸に沿い入射面から2cm（電子線の場合）または5cm（X線の場合）の深さの水中に試作電離箱を置いてQを測定し，(1)式によつて水の吸収線量Dを求めた．次に，同じ位置に実用線量計を置いてR値（^{60}Coγ線に対する較正係数を線量計の読みに乗じたもの）を求めた．

さて，同一照射条件下で得られたR値とD値の比 R/D を実用線量計の感度とすれば，これは水中の或る場所で吸収線量が1rad であるときそこに実用線量計を置けば何Rを示すかを意味する．各種線量計の感度について，実験結果を Fig. 5 に示す．この図に示される如く，総ての線量計が^{06}Coγ線に対して同一のR値を与えるように較正されていても，MeV 域の電子線やX線に対してはそれぞれの線量計で感度が異る．また，各線量計の感度は放射線エネルギーの増加に従つて高くなる．例えば Baldwin-Farmer dosemeter では，^{60}Coγ 線に対する感度に比し 30MVX線で約5%，20MeV 電子線で約15%，30MeV 電子線で約25%感度が増加する．したがつて，実際の放射線治療においてR値を目安とすることは避けるべきである．

R値からradを評価するための換算係数は各線量計について前記感度の逆数で与えられる．著者の使用した線量計についての換算係数を Table 5 に示す．Baldwin-Farmer dosemeter については Bewley[4], Greene[3] らの結果と良く一致した．

実用線量計の R→rad 換算係数は上述の方法で求められるが，その数値が線量計の種類によつて異ることは実際上不便である．また，レントゲン単位が適用されない放射線の線量測定にレントゲン表示の測定器を用いることは原則として不適当である．現状で最も合理的な線量評価法は空洞原理を直接利用することであろう．

(c) Fricke dosemeter との比較（28MeV 電子線）

電子線について Fricke dosemeter を仲介とする線量の相互比較が国際原子力機関（IAEA）の主催で実施されたので，これに参加した（1965年4月）．IAEAから送られて来た3個の MixD

Fig. 5. Response of conventional dosemeters for 20-30MV x-rays and 10-30MeV electrons. 1; Baldwin-Farmer, 2; Radocon (606), 3; Victoreen R-meter (621), 4; Philips, 5; Siemens Universal

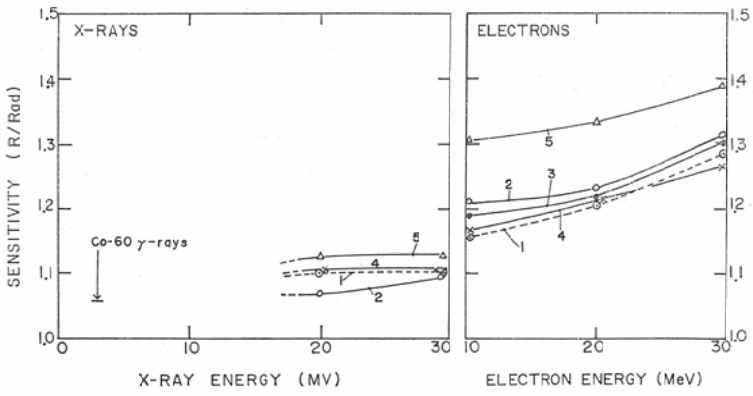


Table 5. Roentgen-rad conversion factor in water for conventional dosemeters

Incident radiation	rads in water per R for conventional dosemeters				
	Baldwin-Farmer	Radocon (606)	Victoreen R-meter (621)	Philips	Siemens
X-rays: 20 MV	0.907 0.900[a] 0.878[b]	0.933	—	0.903	0.886
30 MV	0.905 0.883[b]	0.908	—	0.904	0.882
Electrons:					
10 MeV	0.864	0.826	0.844	0.858	0.765
20 MeV	0.828	0.812	0.821	0.824	0.749
30 MeV	0.775	0.761	0.766	0.789	0.718

The tabulated values can be applied to the dosemeter placed at a depth of 2cm in water (for electrons) or at a depth of 5cm in water (for x-rays).
a : Bewley (calorimetry)[4]. b : Greene(calculation)[3].

フアントム（11cm×10cm×5cm）のうち，2個には Fricke dosemeter が封入されていた．他の1個のフアントムの中央に穴をあけてわれわれの試作電離箱を挿入し，28MeV 電子線について Fricke dosemeter に与える線量を評価した（モニタの較正）．同一の条件で前記2個のフアントムを照射してＩＡＥＤへ返送した．ＩＡＥＤでは Fricke dosemeter の $G(Fe^{3+})$ 値を 15.45 として線量を評価したが，この値に比しこの電離箱による評価線量は平均 2.5%大であつた．媒質内の電子スペクトルおよび電子阻止能に関する実験データが乏しいので，上記の差異が Sm 値の誤りによると判断するのは困難である．

5. 結　論

MeV 域の電子線，X線の線量測定に実用する目的で，指頭型電離箱を試作した．air cavity 中の電離電流測定はコンデンサ充電法によつた．測定値に及ぼす stem leakage の影響および電離箱を水フアントム中に置いたときの空洞壁（0.5mm ルサイト）の効果などが実用上は無視できることが知られた．次に，空洞原理によつて吸収線量を評価する際に必要な因子である電子質量阻止能比を検討し，電離密度から rad を評価するための換算係数を求めた．また，試作電離箱により水フアントム中の吸収線量を評価し，これに対する各種線量計（R表示）の感度を検討した．これらの線量計の感度は，^{60}Co γ線で同一R値を指示するように較正されているにかかわらず，MeV域では線量計の種類によつて差異があること，また放射線エネルギーの増加と共に大となることなどが知られた．R→rad 換算係数を Table 5 に示す．このような較正は煩雑なので，一定規格の esu 測定電離箱が実用されることが望まれる．

文　献

1) Hospital Physicst Association : Phys. Med. Biol. 9, 457—463, 1964.
2) Barnard, G.P.: Phys. Med. Biol. 9, 321—332, 1964.
3) Greene, D. and Massey, J.B.: Phys. Med. Biol. 11, 569—597, 1966.
4) Bewley, D.K.: Brit. J. Radiol. 36, 865—878, 1963.
5) American Association of physics in Medicine: Phys. Med. Biol. 11, 505—520, 1966.
6) Deutsche Normen DIN 6809, 1963.
7) Schinz, H.R. and Wideroe, R.: Strahlentherapie 127, 1—13, 1966.
8) ICRU Report 10b 1962, Physical Aspect of Irradiation. NBS Handbook 85, 1964.
9) Hine, G.J. and Brownell, G.L.: Radiation Dosimetry, p. 194. Academic Press Inc. Publishers, New York, 1956.
10) ICRU Report 10d 1962. Clinical Dosimetry. NBS Handbook 87, 1964.
11) Berger, M.J. and Seltzer, S.M.: Tables of

Energy Losses and Ranges of Electrons and Positrons, Studies in Penetration of Charged Particles in Matter. Publication 1133, National Academy of Sciencences, Washington, D.C., 1964. Additional Tables of Energy Losses and Ranges of Electrons.

12) ICRU Reprt 1959. NBS Handbook 78, 1961.
13) Barnard, G.P., Marsh, A.R.S. and Hitchman, D.G.I.: PhysMed. Biol. 9, 295—319, 1964.
14) 佐方周防，稲田哲雄，松沢秀夫：日医放会誌 第27巻，6号，671—676，1967.