原 著

電子線の吸収線量測定についての一考察
—平均入射エネルギーの決定法—

熊 谷 孝 三・石 松 健 二*・大 塚 辰 也*
井 芹 卓 見・荒 木 不次男・河 野 猛
西 本 博 美・文 字 洋 一・小 崎 一 宏
真 野 景 子・河 上 勝 美・吉 本 美加理

国立熊本病院

*日立メディコ

(論文受理 1990年6月24日)

(最終論文受理 1990年9月27日)

(Code No. 203, 222, 232)

Key words: electron beam, ionization chamber, mean energy, absorbed dose, JARP's protocol

A STUDY OF DOSIMETRY WITH ELECTRON BEAMS —MEAN ENERGY OF
ELECTRON BEAMS AT THE PHANTOM SURFACE—

KOZO KUMAGAI, KENJI ISHIMATSU*, TATSUYA OHTSUKA*,
TAKUMI ISERI, FUJIO ARAKI, TSUTOMU KAWANO,
HIROMI NIRSHIMOTO, YOICHI MONJI, KAZUHIRO KOSAKI,
KEIKO MANO, KATSUMI KAWAKAMI, and MIKARI YOSHIMOTO

Department of Radiology, Kumamoto National Hospital.

*Hitachi Medical Corp.

(Article received; Jun, 24, 1990)

Summary

For the purpose of calculating the absorbed dose in the water phantom, we studied a simplified procedure with which the mean energy of the electron beams at the phantom surface is determined. The mean energy is determined directly with the measured ionization half value depth in the water phantom applying the relation between the ionization half depth and the mean energy described in JARP's 1986 protocol. The procedure can be applied for both cylindrical and parallel plate ionization chambers.

We calculated and evaluated the deviation of the mean energy caused by applying the simplified procedure.

The value of the deviation for energy of 25 MeV or less is estimated to be or less than 2.5% applying the data described in the proceeding report. The deviation of the calculated absorbed dose caused by the deviation described above is estimated to be 0.5%. The simplified procedure reported is quite simple for application for clinical purposes, and almost equivalent to JARP's one.

1. 緒 言

JARP の線量測定に関する1986年の新プロトコルでは、吸収線量の計算が精密な方法に変更され、電子線またはX線のエネルギー測定法も変更された。この変更によって、特に電子線の吸収線量計算とエネルギー決定の手順が、従来のプロトコルより複雑になった。前報¹⁾では、新プロトコルを簡便に運用するために、電子線の吸収線量の計算を簡単に実行する方法を検討した。本報では、運用の簡便化の第二段階として、吸収線量計算に必要な電子線の平均入射エネルギーを決定する簡便な方法について検討する。

JARP の新プロトコルでは、ファントム表面での電子線の平均入射エネルギーは、水ファントム中の線量半価深によって求めることになった²⁾。したがって、ファントム表面の電子線の平均入射エネルギーを求めるには、まず水ファントム中で深部電離量曲線を測定し、電離量を吸収線量に変換して線量半価深を求める必要がある。

しかし、電離量を吸収線量に変換するには、ファントム表面での電子線の平均入射エネルギーの値が必要である。したがって、電子線の平均入射エネルギーは一義的に決定することができず、原則的には逐次近似法を利用して求めなければならない。この計算では、逐次近似法は速く収束するけれども、収束を確認するためには少なくとも3回計算を繰り返す必要がある。したがって、コンピュータを利用しない限り、計算にはかなりの時間がかかる。より簡単な計算で合理的な結果を得る方法があれば、プロトコルの運用が容易になる。

以下に、電子線のエネルギー決定法を簡略化する手段を提案し、その方法で求めた平均入射エネルギーの誤差について検討する。

2. ファントム表面での電子線の平均入射エネルギー

2.1 JARP プロトコルの手順

JARP プロトコル²⁾によると、ファントム表面での平均入射エネルギー $\bar{E}_0$ (MeV) は、水ファントム中の線量半価深 R_{50} (mm) から求められる。線量半価深と平均入射エネルギーの関係を Table 1 に示す。JARP プロトコ

Table 1 Mean energy $\bar{E}_0$ of the electron beams at the phantom surface as a function of absorbed dose half value depth R_{50} and ionization half value depth d_{50} .

$\bar{E}_0$ (MeV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	22	25	30
d_{50} (mm)	3	7	12	16	21	25	30	34	38	43	51	59	67	76	84	92	104	123
R_{50} (mm)	3	7	12	16	21	25	30	34	38	43	51	60	68	78	86	94	107	128

ルでは、この表のほかに次式によっても両者の関係を示している。

$$\bar{E}_0 = 0.233R_{50} \quad \dots(1)$$

上式の適用範囲はプロトコルには明示されていない。

これらの記載はNACPの1980年のプロトコル³⁾から引用されている。それによると、同式は5 MeV 以上30 MeV 以下の範囲でのみ適用でき、厳密には無限大のSSDに対して成立するが、約20 MeV 以下ではSSD=1 mまで適用してよい。また、上式の適用できない範囲では、Table 1の値を使用しなければならない。Table 1はSSD=1 mでの測定値から求められたもので、この値が上式の基礎的データであることは明らかである。

2.2 簡略化手順

Table 1は、線量半価深と平均入射エネルギーとの関係のほかに、電離量半価深と線量半価深あるいは平均入射エネルギーとの関係も示してある。線量半価深と平均入射エネルギーの関係は、測定に使用する電離箱の種類に無関係である。一方、電離量半価深の方は、原則的には電離箱によって異なる。しかしながら、表のデータを測定した電離箱については、JARPプロトコルにもNACPプロトコルにも記載されていない。

われわれは、市販の円筒形電離箱では、電子線の吸収線量変換係数がほとんど変わらないことを示した⁴⁾。したがって、これらのどの電離箱で測定した電離量半価深も、同一条件ではほとんど同じ値を示すことが期待できる。Table 1の電離量半価深を求めるのに使われた電離箱も同様な円筒形電離箱であると仮定すれば、表の値をどの電離箱に適用しても、得られる平均入射エネルギーの誤差は小さいことが期待できる。一方、表の値が平行平板形電離箱で求められた可能性は大きい。この点については、後で検討する。

電子線の吸収線量測定についての一考察—平均入射エネルギーの決定法— (熊谷・他)

われわれは、平均入射エネルギーを決定する簡略化手順として、以下に述べる方法を提案する。

(1) 水ファントム中 (別材料のファントムを使うときには水ファントムに換算する) で、円筒形および平行平板形を含む任意の電離箱によって深部電離量曲線を測定する。

(2) 測定は SSD=1 m で行い、アプリケーションは手持ちの中で照射野が最大のものを使う。新プロトコルでは、照射野を電離量半価深の 2 倍以上に取ることが要求されるが、森川⁴⁾によれば、10 MeV 程度以上の電子線では、電離量半価深 (25 MeV では約 100 mm) の 1 倍以上で十分である。同筒形電離箱に対しては半径変位法を、平行平板型電離箱に対しては前壁変位法を使う。

(3) 得られた深部電離量曲線から電離量半価深を求める。

(4) Table 1 あるいは下記の式(2)を使って、求めた電離量半価深から電子線の平均入射エネルギーを求める。

電離量半価深 d_{50} (mm) から平均入射エネルギー $\bar{E}_0$ (MeV) を求めるとき、下式を利用する。

$$\bar{E}_0 = 0.36274 + 0.22000d_{50} + 1.6540 \times 10^{-4}d_{50}^2 \quad \dots(2)$$

この式は Table 1 のデータに最小二乗法を適用して求めたもので、1 MeV 以上 25 MeV 以下の電子線に対して利用することができる。得られる平均入射エネルギーは、原データが明らかに四捨五入によってばらついている箇所 (1~4 MeV) を除くと、原データと $\pm 1.3\%$ 以内で一致する。

3. 簡略化手順で生じる誤差

Table 1 中に示してある電離量半価深の欄は、特定の電離箱で測定された電離量半価深とその測定結果から計算された線量半価深とを対応させたものであると推定される。

したがって、仮に表の電離量半価深を求めるのに使われた電離箱と同じ電離箱を使えば、上記の簡略化手順は JARP プロトコルを忠実に実行するのと等価である。すなわち、簡略化手順では、表で使われた電離箱とは異なる電離箱を使って測定し、得られた電離量を表の電離箱の吸収線量変換係数で吸収線量に換算するために誤差が発生すると考えることができる。

電離箱に不適当な吸収線量変換係数を適用することによって、線量半価深、さらには平均入射エネルギーに発生する誤差について考える。Fig. 1 に模式的な深部電離量百分率曲線 (以下、PDI と略記する) と深部吸収線量百分率曲線 (以下、PDD と略記する) とを示す。電離量

Fig. 1 Percentage depth-ionization (PDI) and percentage depth-dose (PDD) curve and those parameters.

と吸収線量のピーク深を、それぞれ d_p , R_p , 半価深を d_{50} , R_{50} とする。また、上記のそれぞれの深さにおける電離量を $X(d_p)$, $X(R_p)$, $X(d_{50})$, $X(R_{50})$, 吸収線量を $D(d_p)$, $D(R_p)$, $D(d_{50})$, $D(R_{50})$, とする。さらに、深さ d_p , d_{50} における吸収線量変換係数を $C_E(d_p)$, $C_E(d_{50})$ とする。

電離量ピーク深と同半価深における電離量と吸収線量の関係は、次式で表される。

$$D(d_p) = C_E(d_p) \cdot X(d_p) \quad \dots(3)$$

$$D(d_{50}) = C_E(d_{50}) \cdot X(d_{50}) \quad \dots(4)$$

ピーク深近傍では、電離量と吸収線量の値は共に変化が少なく、次式が近似的に成立する。

$$D(R_p) \div D(d_p) = C_E(d_p) \cdot X(d_p) \quad \dots(5)$$

$X(d_p) = 2X(d_{50})$ であることを考慮すると、式(4)と(5)から、次式が得られる。

$$\frac{D(d_{50})}{D(R_p)} = \frac{C_E(d_{50}) \cdot X(d_{50})}{C_E(d_p) \cdot X(d_p)} = \frac{C_E(d_{50})}{2C_E(d_p)} \quad \dots(6)$$

また、半価深近傍での PDD 傾斜 dD/dR は、次のように表すことができる。

$$\frac{dD}{dR} = \frac{D(R_{50}) - D(d_{50})}{R_{50} - d_{50}} \quad \dots(7)$$

$D(R_p) = 2D(R_{50})$ を考慮すると、式(6), (7)から次式が得られる。

$$R_{50} = \frac{D(R_{50}) - D(d_{50})}{dD/dR} + d_{50}$$

$$= \frac{1 - C_E(d_{50})/C_E(d_p)}{2 \cdot \frac{dD}{D(R_p)} \cdot \frac{dD}{dR}} + d_{50} \quad \dots(8)$$

上式の右辺の第1項は、線量半価深と電離量半価深との食い違いを示す。

簡略化手順は、使用するすべての電離箱が Table 1 のデータを測定した電離箱と同じものであると仮定することと同じことである。実際に使用する電離箱の吸収線量変換係数を $C_E(d_{50})$, $C_E(d_p)$ とすれば、その値を式(8)に適用して得られる線量半価深 R_{50} は正しい値である。一方、Table 1 の電離箱に対する値 $C'_E(d_{50})$, $C'_E(d_p)$ を使って得られた線量半価深 R'_{50} は、簡略化手順に対応し、簡略化手順を使用することによって発生する誤差を含むと考えることができる。

この簡略化手順の使用によって発生する誤差（相対誤差を考慮） δR_{50} は、式(8)を考慮して次式のような。

$$\delta R_{50} = \frac{R'_{50} - R_{50}}{R_{50}}$$

$$= \frac{C_E(d_{50})/C_E(d_p) - C'_E(d_{50})/C'_E(d_p)}{2 \cdot \frac{dD/D(R_p)}{dR/R_{50}}} \quad \dots(9)$$

R_{50} と平均入射エネルギー $\bar{E}_0$ とは、式(1)のように比例するとして取り扱われることが多い^{2,3,5)}。両者が比例する場合には、 $\bar{E}_0$ の相対誤差 $\delta \bar{E}_0$ は次式のような。

$$\delta \bar{E}_0 = \delta R_{50} \quad \dots(10)$$

したがって、式(9)が簡略化手順を使うことによって発生する平均入射エネルギーの相対誤差を示す。

4. 簡略化手順の評価

簡略化手順によって生じる平均入射エネルギーの誤差は、式(9)に示されるとおり、二つの部分からなる。

第1の部分は、式(9)の右辺分子の項であり、測定に使用する電離箱と Table 1 のデータを測定した電離箱との吸収線量変換係数が関与する。これは、測定に使用される各電離箱間で、この値がどの程度食い違うかによって評価することができる。

第2の部分は、式(9)の右辺分母の項であり、この部分は PDD の半価深近傍での傾斜を示す。これは、使用する電子加速装置に依存する。

4.1 PDD 半価深近傍での傾斜

式(9)によれば、PDD の半価深近傍の傾斜

$$G' = \frac{dD/D(R_p)}{dR/R_{50}} \quad \dots(11)$$

が大きければ、得られる平均入射エネルギーの誤差は小さくなる。したがって、通常の電子加速装置で得られる傾斜 G' の値を知る必要がある。

半価深近傍の傾斜は、式(11)と同様に無次元化されているのが普通である^{3,6)}。各種の電子加速装置に対する傾斜を Fig. 2 に示す³⁾。図中の縦軸に示されている傾斜 G は、式(11)中の R_{50} の代わりに R_p が使われている。そのためには、 G から G' を求めるには次の変換式を使う必要がある。

$$G' = G - 0.5 \quad \dots(12)$$

Fig. 2 Dose gradient G of the electron beams as a function of the most probable energy $(E_p)_0$ at the phantom surface³⁾.

また、横軸はファントム表面での最頻エネルギーである。平均入射エネルギーは、最頻エネルギーより 1 MeV 程度小さい値を示すのが普通である⁷⁾。ここでは、精密な値は必要ないので、平均入射エネルギーとして読んでも實際上支障はない。

ベータトロンによる約 30 MeV 以上の電子線以外では、図中の傾斜 G は 2 以上の値を示す。したがって、特殊な装置以外では、式(11)の G' は 1.5 を下回ることはない。ここでは、平均入射エネルギーの誤差を過小評価しないために、 $G' = 1$ として評価を行う。

4.2 平均入射エネルギーの誤差

式(9)の G' の部分を 1 と置き、式(10)を考慮すると、平均入射エネルギーの誤差は次式で示すことができる。

$$\delta \bar{E}_0 = \frac{C_E(d_{50})/C_E(d_p) - C'_E(d_{50})/C'_E(d_p)}{2} \quad \dots(13)$$

電子線の吸収線量測定についての一考察—平均入射エネルギーの決定法— (熊谷・他)

Table 2 Ionization to absorbed dose conversion factors with parallel plate ionization chambers.

Depth mm	a,b) ABSORBED DOSE CONVERSION FACTORS, C_E Unit: Gy/(C/kg)															
	Shallow Mean incident energy (MeV)															
	25.0	20.0	18.0	16.0	14.0	12.0	10.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0
0	30.89	31.38	31.58	31.84	32.10	32.40	32.76	32.96	33.22	33.48	33.81	34.17	34.79	35.42	36.04	36.67
1	30.92	31.38	31.61	31.84	32.13	32.43	32.79	33.02	33.25	33.51	33.84	34.24	34.86	35.52	36.17	
2	30.95	31.41	31.64	31.87	32.13	32.46	32.82	33.05	33.28	33.58	33.91	34.30	34.96	35.62	36.34	
3	30.98	31.44	31.67	31.90	32.17	32.50	32.86	33.09	33.35	33.64	33.97	34.37	35.06	35.78	36.54	
4	31.02	31.48	31.71	31.94	32.20	32.53	32.92	33.15	33.41	33.71	34.04	34.50	35.19	35.91	36.70	
5	31.05	31.51	31.74	31.97	32.27	32.58	32.96	33.19	33.48	33.78	34.14	34.63	35.35	36.08	36.86	
6	31.08	31.54	31.77	32.00	32.30	32.63	33.02	33.25	33.55	33.87	34.27	34.76	35.48	36.24		
8	31.15	31.61	31.84	32.07	32.36	32.73	33.15	33.38	33.71	34.07	34.50	35.08	35.81	36.57		
10	31.21	31.67	31.90	32.17	32.46	32.82	33.28	33.55	33.87	34.27	34.76	35.35	36.11	36.83		
12	31.28	31.74	31.97	32.23	32.56	32.92	33.41	33.71	34.07	34.50	35.02	35.65	36.40			
14	31.35	31.81	32.07	32.33	32.66	33.05	33.58	33.91	34.30	34.76	35.32	35.98	36.70			
16	31.41	31.90	32.13	32.43	32.76	33.19	33.74	34.10	34.50	35.02	35.62	36.27	36.93			
18	31.44	31.97	32.23	32.53	32.89	33.32	33.91	34.30	34.73	35.29	35.91	36.54				
20	31.51	32.04	32.30	32.63	32.99	33.45	34.10	34.50	34.99	35.55	36.17	36.80				
25	31.67	32.23	32.53	32.86	33.28	33.84	34.60	35.06	35.58	36.21	36.80					
30	31.84	32.43	32.76	33.12	33.61	34.24	35.12	35.62	36.21	36.77						
35	32.00	32.66	32.99	33.41	33.97	34.70	35.65	36.21	36.73							
40	32.17	32.89	33.25	33.74	34.37	35.19	36.17	36.67								
45	32.36	33.12	33.55	34.07	34.79	35.68	36.63	36.96								
50	32.53	33.38	33.84	34.47	35.22	36.17	36.90									
55	32.73	33.64	34.17	34.86	35.68	36.57										
60	32.92	33.94	34.53	35.29	36.14	36.83										
70	33.41	34.63	35.32	36.11	36.73											
80	33.91	35.35	36.08	36.67												
90	34.47	36.08	36.60													
100	35.09	36.54														
120	36.24															

a) It is the value to water phantom

b) The displacement effect is corrected for by using an effective point of measurement.

Table 3 Contribution of types of ionization chambers to conversion factors C_E : C_E (0) means C_E at the phantom surface, and $C_E(d_{50})$ means C_E at ionization half value depth d_{50} .

$\bar{E}_0$ (MeV)	JARP's CYLINDRICAL IONIZATION CHAMBER			PLANE-PARALLEL IONIZATION CHAMBER		
	$C_E(0)$	$C_E(d_{50})$	$C_E(d_{50}) / C_E(0)$	$C_E'(0)$	$C_E'(d_{50})$	$C_E'(d_{50}) / C_E'(0)$
1	34.74	—	—	36.67	—	—
2	34.31	—	—	36.04	—	—
3	33.87	—	—	35.42	—	—
4	33.41	34.91	1.045	34.79	36.93	1.062
5	32.94	34.82	1.057	34.17	36.80	1.077
6	32.71	34.82	1.065	33.81	36.80	1.088
7	32.50	34.81	1.071	33.48	36.77	1.098
8	32.34	34.71	1.073	33.22	36.63	1.103
9	32.18	34.61	1.076	32.96	36.49	1.107
10	32.07	34.59	1.079	32.76	36.45	1.113
12	31.85	34.46	1.082	32.40	36.25	1.119
14	31.67	34.39	1.086	32.10	36.14	1.126
16	31.50	34.24	1.087	31.84	35.95	1.129
18	31.31	34.23	1.093	31.58	35.93	1.138
20	31.16	34.13	1.095	31.38	35.79	1.141
25	30.73	33.92	1.100	30.89	35.49	1.149

上式の C_E は、われわれが測定に使う電離箱に対する吸収線量変換係数であり、 C_E は Table 1 のデータを測定した電離箱に対するものである。 C_E の値は不明であるが、この値を適宜に想定すれば簡略化手順で生じる誤差を評価することができる。

5. 考 察

通常の市販の円筒形電離箱に対する吸収線量変換係数の値はほぼ等しく、8種類の電離箱について±1.7%程度の偏差の範囲に納まっている¹⁾。吸収線量変換係数の値が、電離箱によっても深さによってもあまり変化しないことを考慮すると、式(13)の右辺分子の部分は、電離箱間での吸収線量変換係数そのものの相対偏差で近似することができる。

Table 4 Deviation $\delta\bar{E}_0$ of the mean energy of electron beam $\bar{E}_0$ at the phantom surface caused by applying the simplified procedure.

$\bar{E}_0$ (keV)	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	25
$-\delta\bar{E}_0$ (%)	0.9	1.0	1.2	1.4	1.5	1.6	1.7	1.9	2.0	2.1	2.3	2.3	2.5

したがって、もし Table 1 の電離箱が円筒形であれば、簡略化手順の誤差は、式(13)によって $1.7/2=0.85\%$ になる。この値は、上記の近似が粗いことを考慮しても、電離量測定の実現性と同等に近い偏差といえる。

始めに述べたように、Table 1 のデータは平行平板形電離箱で測定された可能性を否定できない。平行平板形電離箱では、電子フルエンス係数 P_f は定数 (=1) として取り扱われる²⁾。すなわち、円筒形電離箱とは吸収線量変換係数の傾向が異なる。

したがって、Table 1 の電離箱を平行平板形と想定すると、円筒形電離箱で測定する場合の誤差が大きくなる可能性がある。簡略化手順の実用性を確認するためには、この場合に対する検討が不可欠である。式(13)の吸収線量変換係数の項は、 $C_E(d_{50})/C_E(d_p)$ の形をとる。しかし、電離箱ピーク深は d_p は個々の治療装置によって変動する。その一方では、 C_E の値はあまり変化しないので、 $C_E(d_{50})/C_E(d_p)$ の代わりに $C_E(d_{50})/C_E(0)$ を使うことにする。 $C_E(0)$ は、ファントム表面での C_E の値である。

平行平板形電離箱について、厳密に計算した吸収線量変換係数表を Table 2 に示す。一方、円筒形電離箱には JAPR 電離箱を想定する。その厳密な吸収線量変換係数表は、前報に述べてある¹⁾。これらの表から求めた $C_E(d_{50})/C_E(0)$ の値を Table 3 に示す。これらの値を式(13)に適用して、簡略化手順を使用することによって発生する誤差 $\delta\bar{E}_0$ を求めることができる。その値を Table 4 に示す。25 MeV 以下の電子線に対しては、誤差は 2.5% 以下であることが分かる。森川⁴⁾によれば、電離量から吸収線量への変換の際に、平均入射エネルギーの誤差が原因になって発生する吸収線量の誤差は、平均入射エネルギーの誤差の約 1/5 になる。したがって、簡略化手順によって平均入射エネルギーに 2.5% の誤差が発生する場合、その値を使って計算された吸収線量には、 $2.5/5=0.5\%$ の誤差が発生するにすぎない。この値は、電離量測定の実現性とほぼ等しい。

前報¹⁾で述べたように、厳密に求められた吸収線量の全不確定度は 2.3% と評価されている。これに、上記の誤差 0.5% が付加されると、その場合の全不確定度は

$$\sqrt{2.3^2 + 0.5^2} = 2.35\%$$

になり、厳密な場合とほとんど変わらない。したがって、吸収線量の計算に使う場合には、簡略化手順は JARP プロトコルが規定する原則的な手順とほぼ同等である。

6. 結 論

JARP の新プロトコルを臨床的に円滑に運用することを目的として、前報では各電離箱の吸収線量変換係数表を利用することを検討した。市販の円筒形電離箱を使用する場合、その電離箱の吸収線量変換係数表の代わりに JARP 電離箱のそれを代用しても、そのために生じる吸収線量変換係数の誤差は 1.7% 程度以下であることが明らかにになった。

同様な目的をもって、本報では、ファントム表面での電子線の平均入射エネルギーの測定法について検討した。平均入射エネルギーは線量半価深から換算されるので、原則的には逐次近似計算が必要になる。この複雑さを避けるために、JARP プロトコルに示された表を利用して、電離量半価深から直接平均入射エネルギーを求める簡略化手順を提案し、それによって発生する誤差について考察した。この方法は、円筒形電離箱だけでなく平行平板形電離箱にも適用することができ、この手順が原因になって発生する平均入射エネルギーの誤差は、2.5% 以内である。その平均入射エネルギーで計算したために発生する吸収線量の誤差は、25 MeV 以下の電子線では 0.5% 以下である。この値は、通常の電離量測定の実現性と同等であり、手順の簡単さも考慮すれば十分に実用的である。

(本研究の一部は、平成元年 10 月の第 40 回日本放射線技術学会九州部会で報告した。)

文 献

- 1) 熊谷孝三、石松健二、大塚辰也、他：電子線の吸収線量測定についての一考察：第 1 報 各種電離箱線量計の吸収線量変換係数、日本放射線技術学会雑誌, **47**, 1-7, (1991)
- 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 X 線および電子線の吸収線量の標準測定法, PP 111-112, 通商産業研究社, 東京, (1986)
- 3) NACP: Procedures in external radiation therapy dosimetry with electron and photon beams with maximum energies between 1 and 50 MeV, Acta Radiol, Oncol. Rad. Phys. Biol., **19**, 55-80, (1980)
- 4) 森川賀根雄：アプリケーションと電子線の特性(2)：エネ

電子線の吸収線量測定についての一考察—平均入射エネルギーの決定法— (熊谷・他)

- ルギーの測定とアプリケーション寸法, 日本放射線技術学会雑誌, 45(8), 1140, (1989)
- 5) AAPM: A protocol for the determination of absorbed dose from high-energy photon and electron beams, Med. Phys., 10, 741-771, (1983)
- 6) A Zuppinger, J.B. Bataini, J.m. Irigarayand and F. Chu: High energy electrons in radiation therapy, pp.12-19, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1980)
- 7) 星野一雄, 稲田哲雄, 松沢秀夫: 10~20 MeV 電子線のエネルギーと実用飛程の関係, 日本医学放射線学会雑誌, 34(6), 433-439, (1974)