



日時：平成 8 年 4 月 2 日
会場：パシフィコ横浜会議センター

放射線治療における 高エネルギー電子線の線量測定法と問題点

熊谷孝三

国立療養所南福岡病院

Procedure and Problems in Radiation Therapy Dosimetry with High Energy Electron Beams

Kozo Kumagai

Department of Radiology, National Minami Fukuoka Chest Hospital

1. 緒 言

高エネルギー電子線は、1950年代からベータトロンによって放射線治療に用いられてきた。現在では、リニアックやマイクロトロンの電子線が悪性腫瘍の治療に積極的に使用されている。

電子線治療の有効エネルギー範囲は、4-15MeVであり、主な適応疾患は頭頸部腫瘍、口腔内腫瘍、皮膚癌、リンパ節照射、乳癌の胸壁照射や脾臓癌などの術中照射である¹。

このような悪性腫瘍を高エネルギー電子線治療によって治療させるためには、患者への投与線量の精度が重要な問題となり、吸収線量測定法の正確な運用が望まれる^{2,3,4}。

本邦では、1986年に高エネルギー電子線における標準吸収線量測定法(JARPの測定プロトコル)⁵を大幅に改定し、吸収線量の計算を厳密な方法に変更した。

この測定プロトコルは、Burlinの空洞理論を厳密に適用し、電離箱やファントムの材料に対する諸定数に最新の値を採用して精度の向上をはかった。その反面、吸収線量の計算は複雑で手数がかるようになった。

そこで、JARPの測定プロトコルを臨床の現場で円滑に運用することを目的として高エネルギー電子線の吸収線量測定法とその問題点について検討する。また、JARPの測定プロトコルに準拠して電子線の吸収線量の計算を簡単に実行できる方法を合わせて報告する^{4,6,7}。

2. 高エネルギー電子線と物質の相互作用

電子線の質と量を決定するためには、電子線の特性と電子線が物質に入射した場合の物理現象を理解することが重要である。

電子線と物質の相互作用をFig.1に示す^{1,8,9}。医療用加速器から放出された電子が物質中を通過するとき、電子はクーロン力の影響を受けて原子と相互作用を行う。この相互作用では、入射電子は原子内の原子核や電子と弾性衝突や非弾性衝突を起こす。弾性衝突では、電子はその質量が陽子の1/1800であるために、エネルギーは損失せずに方向だけを変化させる。非弾性

衝突では、電子は物質中で原子内の電子と衝突を多数回繰り返す連続減速過程によってエネルギーを失う。この過程のエネルギー損失が衝突損失である。この結果、電子が通過した物質中に電離や励起が生じる。また、制動X線を発生する放射損失によってもエネルギーを失う。衝突損失は原子番号Zに比例し、放射損失は原子番号Zの二乗に比例し、電子のエネルギーの増加とともに増大する。

電離した電子がさらに物質を電離させるのに十分な運動エネルギーをもつ二次電子は δ 線と呼ばれ、物質中で同様な物理現象を生じる。電離能力のなくなった二次電子は熱エネルギーに変換する。

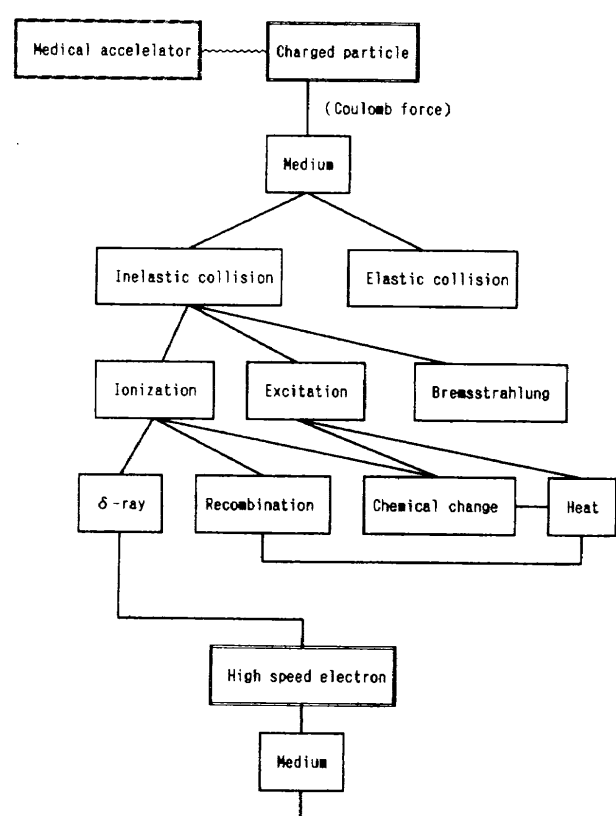


Fig. 1 Interaction between material and high energy electron beams.

3. 放射線治療における線量測定の方法

3-1 放射線治療における線量測定の目的

放射線治療における線量測定の最終目的は、患者体内の任意の場所に正確な吸収線量を投与することである。吸収線量測定の方法図をFig.2に示す¹⁰。

まず、線量測定では、照射線量と吸収線量の違いを明確にしなければならない。電子線測定では照射線量は定義されないで、ここでは電離量で表現する。

線量測定の方法を理解するために、傘をささずに外を歩き、雨に遭った場合を想定する。雨雲から降った雨量が電離量であり、身体が濡れた雨量が吸収線量であると考え、身体が濡れた雨量は降った雨量から衣服に染み込んだ雨量を差し引いて求めることができる。この場合、雨雲から降った雨量は雨量計で直接測定できるが、身体が濡れた量は直接測定することはできない。したがって、電子線測定では、電離量という降った雨量を直接測定して、身体が濡れた雨量である吸収線量を間接的に決定することになる。このときの衣服に染み込んだ雨量が吸収線量を求めるための補正係数である。

3-1 照射線量と吸収線量

照射線量は光子にしか適用できないのに対して、吸収線量はすべての電離放射線に適用できる。ただし、吸収物質を明記する必要があるが、水の場合にだけ慣例として物質名は省略される。

電離放射線は、それが発生させる電離イオンによって測定される。気体で放出されたイオンを収集するこ

とは、液体や固体中で生じるイオンを収集するより簡単である。照射線量 X の定義¹¹は dQ を dm で割った商である($X=dQ/dm$)。 dQ は質量 dm の空气中で光子によって放出された全ての電子(陰電子と陽電子)が空气中で完全に止まった時、空气中で発生した正イオンか負イオンの全電荷の総和の絶対値である。高エネルギーになると制動放射による電離が大きくなるが、この制動放射による電離は dQ に含まない。単位はC/kgである。以前は特殊な名称として R ($1R=2.58 \times 10^{-4}C/kg$)が用いられた。

吸収線量は、荷電粒子の飛跡にそって沈積したエネルギーの総和として表される。吸収線量 D の定義¹¹は $d\epsilon$ を dm で割った商である($D=d\epsilon/dm$)。 $d\epsilon$ は電離放射線によって質量 dm の物質に付与された平均エネルギーである。単位はJ/kgであり、特別な名称はGyである。

3-2 Bragg-Grayの空洞理論

気体電離による吸収線量の測定はBragg-Grayの空洞理論^{1,8,9,12}に基づいて行われる。

一様に照射されている電子線場の線量測定モデルをFig.3に示す¹³。ファントム中に電離箱線量計が挿入され、その電離箱は空気の小空洞から成り立っている。また、ファントム物質と電離箱壁物質は同じ材質で作られており、この電離箱空洞の大きさは、ファントム中で二次電子数やその分布状態が変化しない程度に小さいものと仮定する。そうすると、空洞を通過するすべての二次電子は周囲のファントム中で作られたものであると考えられる。これから、ファントム中の吸収線量 D_m は次式で求められる。

$$D_m = J_g \cdot (W_g/e) \cdot (S/p)_{m,g} \quad (1)$$

ここで、 J_g は電離箱で生じた電気量、 W_g は空气中で1イオン対を作るのに必要な平均エネルギー、 $(S/p)_{m,g}$ は空気に対するファントムの衝突質量阻止能比である。この衝突質量阻止能比はそれぞれの物質で吸収されるエネルギーの比に等しい。

しかしながら、実際にはファントム中に挿入される線量計の電離箱壁とファントムの材質は異なる。したがって、ファントム中の任意の点における吸収線量の決定は、段階的な計算手順を採る。この媒質の違いによる線量測定モデルをFig.4に示す。

まず、電離箱内の空気中の任意の点Pにおける吸収線量を求める。次に電離箱壁物質の吸収線量を求め、そして電離箱がない状態でのファントム中の点Pの吸収線量を決定する。このときの吸収線量の換算にはそれぞれの物質に対する衝突質量阻止能比を使用する。

電離箱内の任意の点Pにおける空気の吸収線量 D_g は次式で表される。

$$D_g = J_g \cdot (W_g/e) \quad (2)$$

次に、電離箱壁物質の吸収線量 D_w は、空気に対する電離箱壁物質の衝突質量阻止能比を $(S/p)_{w,g}$ とすれば、次式で表される。

$$D_w = D_g \cdot (S/p)_{w,g} \\ = J_g \cdot (W_g/e) \cdot (S/p)_{w,g} \quad (3)$$

さらに、ファントム中の任意の点Pにおける吸収線量

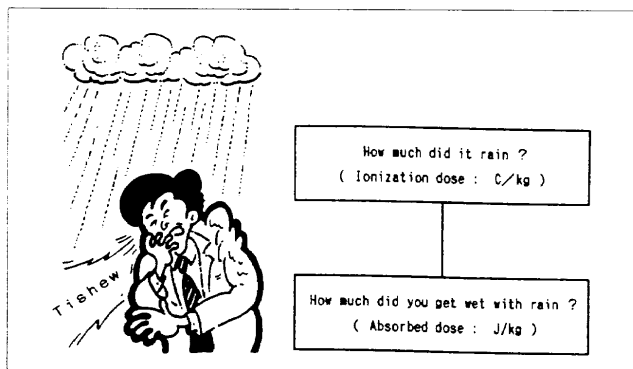


Fig. 2 A conception of dosimetry of high energy electron beams in radiotherapy.

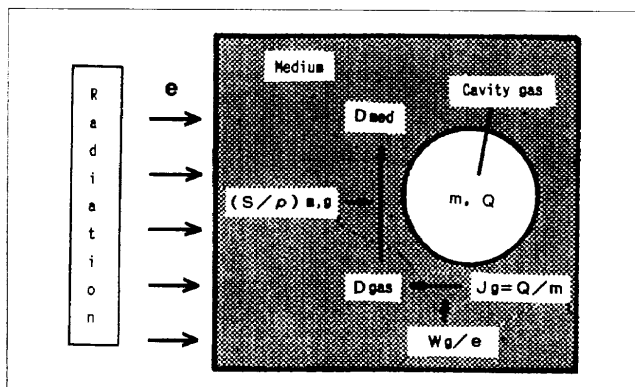


Fig. 3 Model of dosimetry with electron field irradiated equally.

D_m は、電離箱壁物質に対するファントム物質の衝突質量阻止能比を $(S/p)_{m,w}$ とすれば、次式で表される。

$$\begin{aligned} D_m &= D_w \cdot (S/p)_{m,w} \\ &= J_g \cdot (W_g/e) \cdot (S/p)_{w,g} \cdot (S/p)_{m,w} \\ &= J_g \cdot (W_g/e) \cdot (S/p)_{m,g} \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

このBragg-Grayの空洞理論は、Spencer-Attixの空洞理論、Burlinの空洞理論へと発展した。Spencer-Attixは物質中で生じる二次電子のδ線の役割に注目し、衝突質量阻止能の計算にはエネルギー損失が、あるカットオフエネルギーΔ値よりも小さい衝突を用いるべきだと指摘し、Burlinがこれらの予測性を実験的に検証した^{1,9,12}。

4. 放射線治療用電離箱線量計

4-1 電離箱線量計の特徴

線量計は、目的別に種々の原理のものが使用されるが、放射線治療では、主として電離箱線量計が用いられる。電離箱には指頭形と平行平板形がある。電離箱には、次の特徴がある¹²。

- 1) 絶対線量への換算ができる。
- 2) 測定精度が高い(正確度と精度)。
- 3) 測定値の即時読みだしができる。
- 4) 治療用放射線の種類とエネルギーに適用できる。
- 5) 積算線量および線量率の測定ができ、測定範囲が広い。
- 6) 電離箱の種類によっては、表面領域の線量測定ができる。
- 7) 電離箱の材質がファントム物質に一致している。
- 8) 電離箱の大きさが小さい。
- 9) 使用しやすい。
- 10) 堅牢性は比較的強い。
- 11) 比較的高価である。

4-2 電離箱線量計の測定原理

指頭形電離箱と平行平板形電離箱の構造をFig.5に示す。

測定原理を指頭形電離箱について述べる^{1,8,9}。電離箱は互いによく絶縁された2個の電極とその間の空気から成り立つ。電極の一方は、電離箱内壁に導電性塗料を塗布した高圧電極であり、通常-300～-500 Vの高電圧が印加される。他方は、アースと等しい電位の集電極である。また、高圧電極からの漏れ電流が集電極に流れ込むのを防ぐための保護電極が作られている。

電子線が電離箱に入射すると、入射電子は空気を電離して正イオンと負イオンを生じる。電場がないとすぐ再結合してイオン電流は流れない。

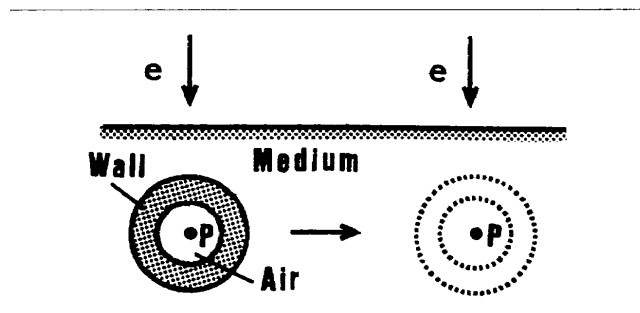


Fig. 4 Model of dosimetry according to the difference between phantom and ionization chamber wall.

電場があれば正イオンは高圧電極へ移動し、負イオンは集電極へ移動して電離電流として捕らえられる。この電離電流は $10^{-8} \sim 10^{-15}$ A程度の微弱電流であるので、高抵抗をもつ電位計、または利得のよいオペアンプで出力電圧を測定できる。

4-3 電離箱線量計による測定の検討

電子線は光子の測定とは異なり、直接電離放射線であることや概して線量率が高いなどの特徴がある。したがって、電離箱による電子線測定では、高精度な測定を行い、正確な吸収線量を決定するためには、物理的な補正や使用上の注意が必要になる。指頭形電離箱と平行平板形電離箱での測定時に必要な補正をTable 1に示す^{8,14}。

これらの電離箱はテレコバルトγ線による国家標準線量計との校正、漏れ電流の確認、大気補正、イオン再結合損失補正、実効中心の補正、電離量から吸収線量への変換が不可欠である。とくに指頭形電離箱では電子線場の擾乱補正が必要であり、平行平板形電離箱では印加電圧の極正の違いによって測定値に差が生じるために極正効果の補正が必要になる。

5. 電子線用測定ファントム

5-1 ファントム

人体内の吸収線量を直接測定することは不可能であ

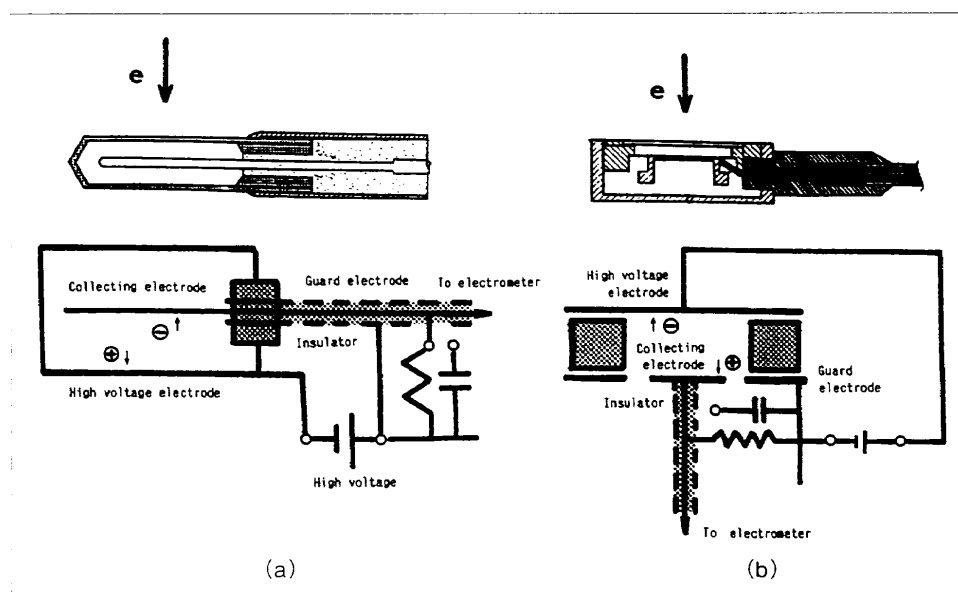


Fig. 5 Schematic diagram of ionization chamber design. a. Thimble-type, b. Flat-type.

Table 1 Correction items for measurement by ionization chamber.

Correction items	Thimble-type	Flat-type
Calibration by standard dosimeter	◎	◎
Leakage current	◎	◎
Stem effect	×	×
Polarity effect	×	◎
Temperature and pressure	◎	◎
Humidity correction	×	×
Ion recombination correction factor	◎	◎
Back scattering	×	×
Perturbation correction factor	◎	×
Effective depth	◎	◎
Conversion to absorbed dose from ionization dose	◎	◎

◎ indispensability × unnecessary

るので、人体の代用としてファントムが用いられる。ファントムは放射線の吸収と散乱の相互作用が人体組織に類似している物質でなければならない。人体組織は水等価物質で構成されているので、電子線測定用ファントムは衝突線阻止能、放射線阻止能、線散乱能の物理量が水に近似することが重要になる。しかしながら、通常、これらの物理量を評価する方法は困難であるため、質量密度、電子密度、実効原子番号が水に近似していれば理想的なファントム物質とみなされる。ファントム物質には、水、MixDP、ポリスチレン、アクリルなどが使用される¹⁵。

5-2 固体ファントムの補正

固体ファントムを使用する場合には、ファントムサイズは、30×30×30cm³以上であり、アプリケーションよりも5cm以上のマージンをもち、十分な散乱状態を作り出す必要がある。測定深は電子線の線連続減速飛程がファントム物質によって異なるため、水等価厚に換算しなければならない。この固体ファントム中の深さ d_{med} を水中の深さ d_w に換算するのは、次式によって行う⁵。

$$d_{water} = d_{med} \cdot (d_{eff})_c \quad \text{.....(5)}$$

ただし $(d_{eff})_c = 1/(\gamma_0/\rho)_{med, water}$

$(\gamma_0/\rho)_{med, water}$ は、連続減速モデルで計算されたファントム物質と水に対する飛程の比である。 $(d_{eff})_c$ は、実

効深係数と呼ばれる。

また、ピーク深における固体ファントムの吸収線量を水ファントムの吸収線量に変換するためには、ファントム物質に対する水の衝突質量阻止能比と電子フルエンス補正を用いて行う⁵。これについては、後述する。

良好な絶縁体のプラスチックファントムは、電子線を照射した場合に電荷を蓄積して測定誤差を誘導するものがあるので使用上の注意が必要である^{5, 15}。

5-3 ファントムの諸特性

電子線測定に用いられる主なファントムの特性をTable 2に示す。理想的な固体ファントムは、質量密度、電子密

度、実効原子番号が水とよく近似しているMixDPが最適である。ポリスチレンやアクリルもファントムとして十分に使用できるが、実効深係数や電子フルエンス補正係数を用いて水の吸収線量に変換しなければならない。これ以外のファントム物質を用いる場合には、水ファントムと種々の条件で比較測定を行い、必要な補正係数を決定する必要がある。

6. 電子線標準測定法の改訂のポイント

6-1 標準測定法の改訂された内容

1986年にJARPは新しい測定プロトコルを発表し、Burlinの空洞理論を厳密に適用して信頼性の向上をはかった。

この測定プロトコルに新しく採用された内容^{5, 16, 17}は次の通りである。

- 1) ICRUの勧告に基づく国際単位系(SI単位)の採用
- 2) 制限平均衝突質量阻止能などの新しい物理定数の採用
- 3) δ線などを考慮した修正された空洞理論の採用
- 4) コバルト校正時のγ線における電離箱壁材とビルドアップキャップの吸収散乱補正
- 5) 電離箱を置いた場合の放射線場の補正
- 6) 電子線エネルギーの決定法

Table 2 Characteristics of phantoms

Characteristic	Water	MixDP	Polystyrene	Lucite
Phase/Form	Liquid	Solid	Solid	Solid
Mass density (kg/m ³)	1000	1000	1044	1180
Effective atomic number	7.51	7.57	5.74	6.56
Electron density (×10 ²³ e/kg)	3.344	3.344	3.238	3.248
Effective depth factor (d_{eff})	1.00	1.01 (6-20MeV)	1.022~1.007 (1-30MeV)	1.144~1.130 (1-30MeV)
Electron fluence correction factor ($\Phi_{e, m}$)	1.000	1.000	1.039~1.009 (5-16MeV)	1.000
Stopping power ratio (S/p) _{w, m}	1.000	1.000	1.030 (0.1-50MeV)	1.033 (0.1-50MeV)
Electrical conductivity	Safety	Safety	Caution	Caution
Mechanical strength	Weak	Slightly weak	Strong	Strong
Handling	Hard	Easy	Easy	Easy

7) ファントムの材質に対する補正

このように改訂は広範囲におよび、線量測定の精度と正確度はさらに向上した。しかしながら、反面、臨床の場で運用するためには、非常に複雑で手数がかかるようになった。

6-2 JARPの新旧測定プロトコルの違い

JARPの新旧測定プロトコルの違いをTable 3に示す。これらのプロトコルの大きな違いは、(1)吸収線量変換係数が電離箱の種類によって異なり、(2)吸収線量の決定に必要なエネルギーが最頻入射エネルギーから平均入射エネルギーに変わったことである^{2-5,18}。また、測定するエネルギー範囲で指頭形と平行平板形の電離箱を使い分ける必要があり、コバルト校正時の補正係数 A_c 、 A_w および電子フルエンス係数 P_f による補正を行わなければならない。質量衝突阻止能比はカットオフエネルギーを制限しない値から制限した値に修正された。

7. 電子線エネルギーの決定法

7-1 電子線のエネルギー分布

医療用加速器から放出される線束のエネルギーを正確に決定することは、吸収線量の決定に不可欠である。したがって、電子線治療での線量測定は、最初に「エネルギー決定ありき」から始めることになる¹⁹。

電子線のエネルギー分布をFig.6に示す¹⁹⁻²¹。加速管の窓を通して放射された電子線は、ファントムに到達するまでにスキヤッターリングホイール、モニタ線量計、および空気層を通過する。加速管内では電子線エネルギーは比較的均一であるが、ファントム表面に入

射する電子線は吸収体によってエネルギーを損失するので、エネルギースペクトルは低エネルギー領域に広がる。さらに、ファントム中ではこの分布領域が広がる。このように電子線エネルギーは幅広い分布を示すので、エネルギーの代表値として最高エネルギー、最頻エネルギー、平均エネルギーの3種類を定義することができる。これらの中で電子線の吸収線量の決定のために必要なエネルギーはファントム表面の平均入射エネルギーである。

7-2 電子線エネルギーの指標となるパラメータ

平均入射エネルギーの決定には、深部線量百分率曲線が利用される。深部線量百分率曲線は同一機種でも異なるので、エネルギーを数値的に表示することが必要である。ピーク領域は電子線束に含まれる低エネルギー散乱電子の影響を受け、エネルギーが増大するほど散乱電子の散乱角が減少するので表面線量が増加する。線量が急峻に落下する領域は、電子線の散乱角度分布とエネルギースペクトルの違いによって線量分布の形状が変化する。また、制動X線領域はスキヤッターリングホイールの影響を受け、主としてこの散乱体から発生する。したがって、エネルギーの決定指標としてどの領域を採用すればよいか問題になる。平均入射エネルギーの決定では、深部線量百分率が半分になる深さの電離半価深または線量半価深が利用され、最頻入射エネルギーの決定には実用飛程が用いられる。半価深は実用飛程からの換算が可能である。

7-3 電子線エネルギーと実験式

電子線エネルギーを決定するための近似式は、種々の報告がある^{19,21-24}。電子線エネルギーと実験式を

Table 3 Difference between JARP's old protocol and new protocols.

Correction items	Old JARP's protocol		New JARP's protocol	
	Thimble-type	Flat-type	Thimble-type	Flat-type
Ionization chamber				
Range of measured energy	Not specified		5~30MeV	2~10MeV
Temperature and pressuer correction factor	760mmHg		101.3kPa	
Ion recombination correction factor	Boag's equation		Boag's equation Half potential techique	
Exposure caribration factor	N_c (Measured in air)		N_c (Measured in air) A_c , A_w	
Mean energy lost in ionized gas to produce one pair of ion	W_{air}/e		W_{air}/e	
Mean mass stopping power	$(S/\rho)_{med air}$		$(\bar{L}/\rho)_{med air}$	
Electron fluence perturbation factor	—		P_f	
Displacement factor	Radial replacement method	Frontal wall replacement method	Radial replacement method	Frontal wall replacement method
Determination of energy (Index)	Most probably energy (Practical range)		Mean incident energy (Half value depth)	
Absorbed dose conversion factor	Independent of the size of cavity and the kind of the chamber.		Influenced by the size of it's cavity and the kind of the chamber.	

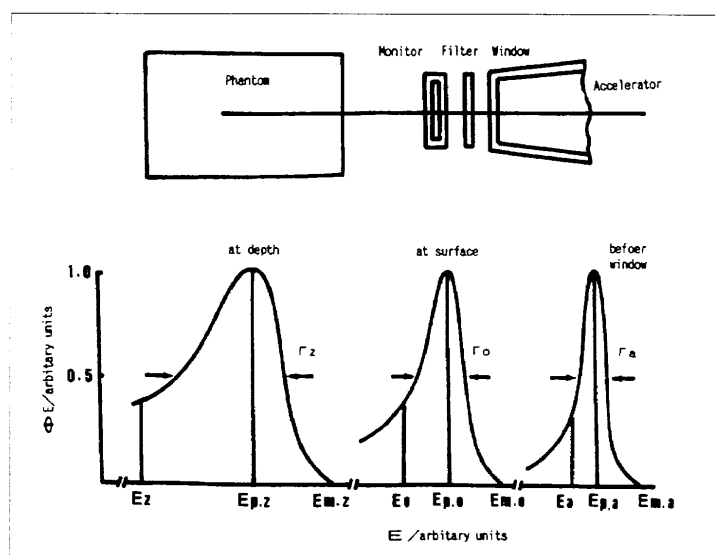


Fig. 6 Distribution of electron fluence in energy.

Table 4に示す。

とくに問題となるのは吸収線量を求める場合であり、平均入射エネルギーがエネルギーの代表値として用いられる。

7-4 電子線の平均入射エネルギーの決定法

平均入射エネルギーと半価深の関係をFig.7に示す²³⁾。これは、出力が飽和する程度に大きな照射野で測定されたものである。

平均入射エネルギーと半価深の近似式はa, b, cのそれぞれの曲線を回帰して次のように表される。

aは、SSD=∞で測定された深部線量百分率から求めた線量半価深と平均入射エネルギーの関係を示す。平均入射エネルギー E_o (MeV)は次式から求められる^{5, 18)}。

R_{50} は線量半価深(cm)である。

$$\bar{E}_o = 2.33 \cdot R_{50} \quad \text{..... (6)}$$

JARPでは上式の適用できるエネルギー範囲は明記し

ていないが、NACPではエネルギーの適用範囲は5-30MeVとしている²³⁾。この式では、SSD=∞での測定が実用的な方法でなく、 E_o の決定には逐次近似法による計算を行うために非常に煩雑になる。

bは、SSD=1mで測定された深部線量百分率から求めた線量半価深と平均入射エネルギーの関係を示す。JARPはAppendix 1の R_{50} と E_o の関係を与えているが、NACPでは明確に d_{50} から E_o を求めることを奨めている²³⁾。

cは、SSD=1mで測定された深部電離量百分率曲線から求めた電離半価深と平均入射エネルギーの関係を示す。平均入射エネルギー E_o (MeV)は次式^{3, 6, 15)}から求められる。

d_{50} は電離半価深(mm)である。

$$\bar{E}_o = 0.36274 + 0.22000 \cdot d_{50} + 0.00016340 \cdot d_{50}^2 \quad \text{..... (7)}$$

上式は、実用的な測定方法で便利である。

平均入射エネルギーと半価深の関係式は、大照射野で測定されているため、半価深の決定には大きなアプリケーションを用いなければならない。平均入射エネルギーは各アプリケーションサイズごとに半価深を測定して求めるのではない。適切な運用が必要である。

8. 電子線の吸収線量の計算

8-1 物質のファントムに対する吸収線量の計算式

質量mのファントム中で測定された電離量から吸収線量を求める一般式は次式⁵⁾で示される。

$$\begin{aligned} D_m &= M_m \cdot k_1 \cdot P_{ion} \cdot N_c \cdot A_c \cdot A_w \cdot (W_{air}/e) \cdot (1/f_m) \cdot P_d \cdot P_f \\ &= M_m \cdot k_1 \cdot P_{ion} \cdot N_c \cdot A_c \cdot A_w \cdot (W_{air}/e) \\ &\quad \cdot [(1/\alpha) (\bar{L}/\rho)_{m, air}] \cdot P_d \cdot P_f \quad \text{..... (8)} \end{aligned}$$

$$= M_m \cdot k_1 \cdot P_{ion} \cdot N_c \cdot (C_E)_m \quad \text{..... (9)}$$

ただし、 $f_m = \alpha (\bar{L}/\rho)_{air, m}$

$$(C_E)_m = A_c \cdot A_w \cdot (W_{air}/e)$$

$$\cdot [(1/\alpha) (\bar{L}/\rho)_{m, air}] \cdot P_d \cdot P_f \quad \text{..... (10)}$$

Table 4 Experimental formula for determination of mean incident energy.

Quantity	Relation	Recommended
$E_{p,a}$	(1) $E_{p,a} \approx E_{p,o} + Z_{col} \cdot \Delta x$ (1MeV $\leq E_{p,a} \leq 50$ MeV)	NACP
$E_{p,o}$	(1) $E_{p,o} = 1.95 \cdot R_p + 0.48$ (3MeV $\leq E_{p,o} \leq 25$ MeV, R_p :cm) (2) $E_{p,o} = 0.22 + 1.98 \cdot R_p + 0.0025 \cdot R_p^2$ (1MeV $\leq E_{p,o} \leq 50$ MeV, R_p :cm) (3) $R_p = 0.53 \cdot E_{p,o} + 0.2$ (4) $E_{p,o} = 1.92 \cdot R_p + 0.58$ (7MeV $\leq E_{p,o} \leq 20$ MeV, R_p :cm) (5) $R_p = 0.52 \cdot E_{p,o} - 0.3$ (1MeV $\leq E_{p,o} \leq 50$ MeV, R_p :cm) (6) $E_{p,o} = 1.89 \cdot R_p - 0.38$ (R_p :cm)	NACP, ICPU 35 (Markus) NACP, ICPU 35 JARP (Matsuzawa) NACP NACP JARP
$\bar{E}_o$	(1) $\bar{E}_o = 2.33 \cdot R_{50}$ (R_{50} :cm) (2) $\bar{E}_o = 2.33 \cdot d_{50} \cdot f$ (f: scaling factor, d_{50} :cm) (3) $\bar{E}_o = 0.36274 + 0.22000 \cdot d_{50} + 0.0001654 \cdot d_{50}^2$ (d_{50} :mm) (4) $\bar{E}_o = 0.35205 + 2.2324 \cdot d_{50} + 0.0067 \cdot d_{50}^2$ (d_{50} :cm) (5) $E = 1.57558 + 1.29181 \cdot d_{50} + 0.42116 \cdot d_{50}^2 - 0.02366 \cdot d_{50}^3$ (d_{50} :cm) (6) $d_{50} = 0.8 \cdot R_p$ (d_{50} :cm, R_p :cm)	NACP (Brahme & Svensson) AAPM Kumagai et al Morikawa HPA
E_z	(1) $E_z = \bar{E}_o (1 - Z/R_p)$ (2) $E_z = E_{p,o} (1 - Z/R_p)$	AAPM, NACP JARP

D_m は吸収線量, M_m は電離箱の読み値, k_1 は大気補正係数, A_c , A_w はコバルト校正時の補正係数, W_{air} は空气中で生成される1イオン対あたりの消費エネルギー, e は電子の電荷, f_m は放射線が入射した結果, 物質 m のファントム中の電離箱空洞を通過する二次電子に対する電離箱壁と空気(空洞内ガス)の実効平均衝突阻止能比, α は電離箱を取り囲む物質で発生した二次電子の電離箱壁に対する透過率, P_d は変位係数(ここでは変位法を採用する), P_r は電子フルエンス係数である.

8-2 水ファントムに対する吸収線量の変換

物質 m からなる固体ファントムの吸収線量は, 水ファントムの吸収線量に換算しなければならない⁵.

$$\begin{aligned} D_{water} &= D_m \cdot (S/p)_{water, m} \cdot \phi_{water, m} \\ &= M_m \cdot k_1 \cdot P_{ion} \cdot N_c \cdot (C_E)_m \cdot (S/p)_{water, m} \\ &\quad \cdot \phi_{water, m} \\ &= M_m \cdot k_1 \cdot P_{ion} \cdot N_c \cdot A_c \cdot A_w \cdot (W_{air}/e) \\ &\quad \cdot (\bar{L}/\rho)_{m, air} \cdot P_d \cdot P_r \cdot (S/p)_{water, m} \\ &\quad \cdot \phi_{water, m} \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

ここで,

$$(\bar{L}/\rho)_{m, air} \cdot (S/p)_{water, m} \doteq (\bar{L}/\rho)_{water, air}$$

この相違は最大0.3%である.

ゆえに

$$\begin{aligned} D_{water} &= M_m \cdot k_1 \cdot P_{ion} \cdot N_c \cdot A_c \cdot A_w \cdot (W_{air}/e) \\ &\quad \cdot (\bar{L}/\rho)_{water, air} \cdot P_d \cdot P_r \cdot \phi_{water, m} \\ &= M_m \cdot k_1 \cdot P_{ion} \cdot N_c \cdot (C_E)_{water} \\ &\quad \cdot \phi_{water, m} \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

したがって, 水ファントムに換算した吸収線量は, 固体ファントムの測定値に水の吸収線量変換係数を乗じた値に電子フルエンス補正を行うだけで換算できる.

吸収線量 D_m は, 各種電離箱の水ファントムに対する吸収線量変換係数 C_E をあらかじめ決定すれば, 簡単に求めることができる.

8-3 各種の補正係数

(1) N_c

N_c は電離箱のコバルト校正定数であり, テレコバルト γ 線を用いて国家標準線量計との比較測定で求めることができる. この校正定数は, それぞれの電離箱空洞(空気)の照射線量の比較であり, 電離箱壁の材質と空洞の大きさは無視される.

(2) k_1

k_1 は電離箱の大気補正係数であり, 開放形電離箱に対して補正が必要になる. これは, 電離箱内の気体の体積は絶対温度に比例し, 圧力に反比例するというボイルーシャルルの法則に基づくものである. また, 式(1)の J_g が気体密度に関係するため, この補正が必要になる.

(3) P_{ion}

P_{ion} は電離箱のイオン再結合損失補正係数であり, Boagの理論計算式や2点電圧法による実測値から求めることができる⁵. 電子線では, パルスあたりの電離密度が高いので電離イオンの再結合が起こる場合がある. とくに1秒間あたりのパルス繰り返し周波数が

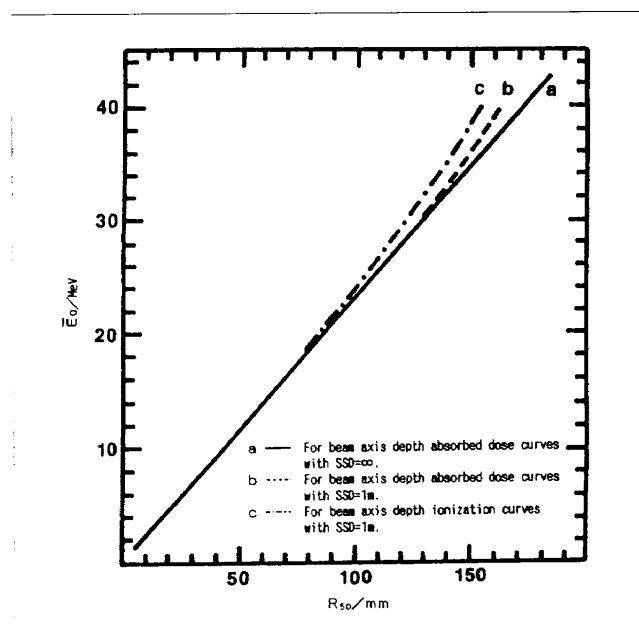


Fig. 7 Relation mean incident energy and half depth value

20ppsぐらいの医療用加速器では, イオン再結合の損失が問題になり, 各測定深ごとに補正しなければならない.

(4) A_c

A_c は, テレコバルト γ 線による電離箱の校正の際の測定条件を対象とする補正項であり, 次式⁶で表される.

$$A_c = (\beta \Delta_m)_{wall} \cdot (A \Delta_m)_{wall} / P_c \dots\dots\dots (13)$$

$(\beta \Delta_m)_{wall}$ は, 校正のために電離箱が置かれた空気中の一点における物質(電離箱壁とビルドアップキャップの材料)の吸収線量 Δ_m と衝突カーマ $k \Delta_m$ との比である. 密度が 1.18 g/cm^3 のアクリル樹脂では1.005である. Δ_m はその中心部で吸収線量のビルドアップが成立する大きさを持つ球状の物質の質量(水の場合, その半径は $0.45 \pm 0.05 \text{ g/cm}^2$)である.

$(A \Delta_m)_{wall}$ は, 質量 Δ_m の物質 $wall$ を置くことによって起こる γ 線の吸収と散乱による照射線量 X_{air} の変化に対する補正係数(半径 0.45 g/cm^2 の水に対して0.990)である.

P_c は, 電離箱とビルドアップキャップによるテレコバルト γ 線に対する擾乱係数($P_c = P_d \cdot P_r \doteq 1.0$)である. JARPでは, 電離箱の壁とビルドアップキャップが同じ材質から成り立つことを条件にしている. したがって, 空洞の寸法と壁厚から A_c を求める次の実験式(14)を推奨している.

$$A_c = 1 - \kappa t / 100 \dots\dots\dots (14)$$

ここで, κ は空洞の内径と内軸長によってきまるパラメータ(cm^2/g), t はビルドアップキャップと電離箱の壁の厚さ(cm^2/g)である.

(5) A_w

A_w は, テレコバルト γ 線による電離箱の校正の際の測定条件を対象とする補正項であり, 次式⁶で表される.

$$A_w = [(\bar{\mu}_{en}/\rho)_{cap, air} \cdot f_{cap}]_c \dots\dots\dots (15)$$

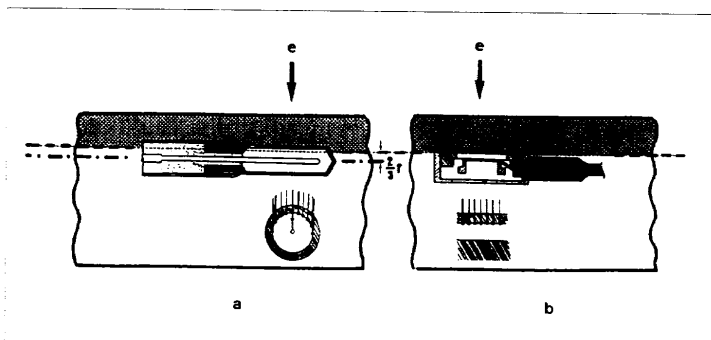


Fig. 8 Correction for displacement at effective center by entering cavity of ionization chamber. a. Thimble-type, b. Flat-type

$(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{cap, air}}$ は、テレコバルト γ 線に対するビルドアップキャップの材料のエネルギー吸収係数と空気に対するそれとの比、 f_{cap} は、ビルドアップキャップの材質に対する f_m である。

$$f_{\text{cap}} = \frac{[\alpha/(\bar{L}/\rho)_{\text{cap, air}} + \gamma \cdot \beta_{\text{wall, cap}} \cdot (\bar{\mu}_{\text{en}}/\rho)_{\text{wall, cap}}]}{(\bar{L}/\rho)_{\text{wall, air}}]_{\text{c}}} \quad (16)$$

また、ビルドアップキャップが電離箱と同じ材質でできている場合には次式が成立する。

$$f_{\text{cap}} = [1/(\bar{L}/\rho)_{\text{cap, air}}]_{\text{c}} \quad (17)$$

(6) f_m

f_m は、物質 m に囲まれた電離箱の空洞を通過する二次電子に対する物質 m と空気の実効平均衝突質量阻止能比である。電子線の場合はX線と取扱いが異なり、次式で表される。

$$f_m = \alpha/(\bar{L}/\rho)_{\text{m, air}} \quad (18)$$

ここで、 α は電離箱を取り囲むファントムやビルドアップキャップで発生した二次電子の電離箱壁に対する透過率、 $(\bar{L}/\rho)_{\text{m, air}}$ は空洞を通過する二次電子に対する物質 m と空気の制限衝突質量阻止能比である。 α は電子線エネルギーが1 MeV以上では、電離箱の壁厚70 mg/cm²程度の組織近似のプラスチックでは、 $\alpha \approx 1.0$ である。

(7) $\bar{L}/\rho$

$\bar{L}/\rho$ は制限衝突質量阻止能である。阻止能には衝突阻止能と放射阻止能があるが、吸収線量には制動放射

線で生成する電線子のエネルギー損失の放射阻止能は含まない。電子は物質中で非常に小さいエネルギー損失を多数回行うことによってエネルギーを失う。二次電子の中で電離を起こすのに十分なエネルギーを持っている δ 線は、空洞で吸収されずに逃げる。したがって、質量阻止能の計算には、あるカットオフエネルギー以下の二次電子が起こす小さな衝突だけを用いる。質量衝突阻止能は線衝突阻止能を密度で割れば求めることができる。線衝突阻止能 L は $L = (dE/dL) \Delta$ で表され、 dE は荷電粒子が距離 dL を通過中に電子と衝突してカットオフ値以下のエネルギーを失った量である¹¹。

(8) W_{air}

W_{air} は、電子が電離箱の空洞を通過するとき、1 イオン対を作るのに必要な消費エネルギーである。この空気に対する値はICRU 21 (1972)²⁰では33.73 eVが採用されたが、1979年に再評価され、乾燥空気に対して33.85 eVが推奨された。水蒸気を含む空気ではこの値よりも最大0.6%の低い値を示す。また、1985年の国際度量衡委員会では33.97 eVが報告された²¹。JARPでは、湿度を含んだ空気に対する阻止能やエネルギー吸収係数などの諸データが満足すべきものでなく、また、放射線治療室が乾燥した空気状態にあることは少ないので、湿度補正は施さずに33.73 eVを採用している。

(9) P_d

P_d は電離箱の変位係数であり、実効中心の補正のために変位法が採用される。変位法をFig.8に示し、指頭形電離箱には半径変位法、平行平板形電離箱には前壁変位法が適用される。

指頭形電離箱では、測定の実効中心の変位は、半径を r とした場合に幾何学的中心から $(1/2)r \sim (3/4)r$ だけ線源側へ変位した点であり、JARPは $(2/3)r$ を採用している⁵。

ピーク深ではファントム中の吸収線量が一定になるため、実効中心の位置の補正は考慮する必要がない。

また、この補正值は電子線エネルギーの違いによっても変化するので、厳密に言えば、エネルギーごとにを行う必要がある。

平行平板形電離箱では、空洞の線源側の前面の中央を実効中心とする。

(10) P_r

P_r は電子フルエンス係数である。一様な電子線場のファントム内に指頭形電離箱を挿入すると、電離箱の大きさに関してファントムの線散乱能が変わるため、電子フルエンスに乱れが生じる。この電子線場の乱れは補正しなければならない。

電離箱の空洞の大きさについて平均エネルギー($E(d)$)と電子フルエンス係数(P_r)の関係をFig.9に示す。この電子フルエンス係数の決定には、ファントム中の平均エネルギーが必要になる。平均エネルギーの決定には、平均入射エネルギーを求めなければならない。

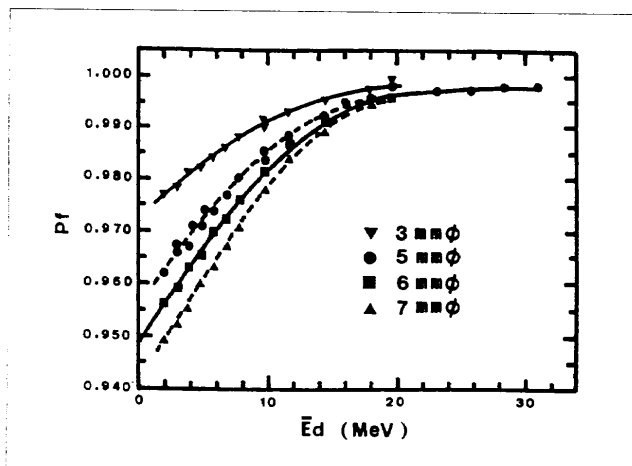


Fig. 9 Relation mean electron energy and electron fluence perturbation factor

JARPは、 P_f を次の計算式⁶⁾で求めている。しかしながら、この式は6mmφの空洞の大きさの電離箱だけにしか適用できない。

$$P_f = 0.9452 + 0.005086 \cdot \bar{E}(d) + 0.0001595$$

$$\cdot \bar{E}(d)^2 + 0.000001618 \cdot \bar{E}(d)^3 \dots \dots \dots (19)$$

熊谷ら³⁾は空洞内径 D_c (mm)が3~7mmφの電離箱サイズの P_f を求める次式を導き出した。これは、 $\bar{E}(d)$ を2~24MeVの範囲で±0.1%の精度で決定できる。

$$P_f = A_0 + A_1 \cdot \bar{E}(d) + A_2 \cdot \bar{E}(d)^2 + A_3 \cdot \bar{E}(d)^3 \dots \dots \dots (20)$$

$$A_0 = +9.941 \times 10^{-1} - 7.988 \times 10^{-3} \cdot D_c - 2.893 \times 10^{-5} \cdot D_c^2$$

$$A_1 = -1.781 \times 10^{-4} + 1.130 \times 10^{-3} \cdot D_c - 4.102 \times 10^{-5} \cdot D_c^2$$

$$A_2 = +3.645 \times 10^{-5} - 5.807 \times 10^{-5} \cdot D_c + 4.145 \times 10^{-6} \cdot D_c^2$$

$$A_3 = -9.036 \times 10^{-7} + 1.065 \times 10^{-6} \cdot D_c - 1.052 \times 10^{-7} \cdot D_c^2$$

9. 電子線の吸収線量変換係数

9-1 水ファントムの吸収線量変換係数の換算

電子線測定では、吸収線量変換係数を日常使用している電離箱線量計についてあらかじめ計算して表にまとめておけば便利である^{4,7)}。この吸収線量変換係数はJARPの測定プロトコルに厳密に従って決定すれば全く問題はない。人体は水等価物質で代用できるため、水ファントムの吸収線量変換係数を求めれば、吸収線量の変換が簡単である。

9種類の市販電離箱(C110, PTW 23333, Victoreen

550-6A, Nucler Enterprises(NE)2505/3A, NE 2505/3b, NE 2571, NE 2581, Capintec PR-06C, NE2534)の吸収線量変換係数を求めるための諸データと式をTable 5に示す。吸収線量変換係数は式(10)で求められる。

補正項 A_c 、 A_w は、都丸らの計算値^{16,17)}を利用し、 $W_{air/e}$ は33.73J/Cを用いる。 P_d は変位法を採用し、 P_f はJohannsonのデータから求めた式(20)を用いる。 P_f の決定には、水ファントム中の平均エネルギーが必要になるためAppendix 2を利用する。水に対する空気の制限平均衝突質量阻止能比はAppendix 3のBergerのデータを用いる。

このようにして計算した各種電離箱の吸収線量変換をAppendix 4(a),(b),(c),(d),(e),(f),(g),(h),(i)に示す。

10. 電子線の吸収線量測定の手順

10-1 JARPの測定プロトコル

JARPの測定プロトコル⁶⁾による電子線の深部線量百分率測定の手順をFig.10に示す。

電離箱は半径変位法を採用し、ファントム中の電離箱の指示値(M)から指示値の百分率(PID)を求める。この指示値の百分率から仮の電離半価深(d_{50}')を求め、仮の電離半価深から仮の線量半価深(R_{50}')を決定する。この半価深を用いて仮の平均入射エネルギー($\bar{E}_0'$)を求

Table 5 Various data for determination of absorbed dose conversion factor.

Items	Thimble-type								Flat-type
	AE C-100 (JARP)	PTW 23333	VC 550-6A	NE 2505/3A	NE 2505/3B	NE 2571	NE 2581	CA PR-06C	NE 2534
Ionization chamber									
Material	Lucite	Lucite	Polystyrene	Graphite	Nylon	Graphite	A-150	C-552	Graphite
Diameter (cmφ)	0.6	0.6	0.48	0.63	0.63	0.63	0.63	0.64	1.43
Length (cm)	2.2	2.36	2.3	2.25	2.25	2.45	2.41	2.3	0.2
Wall (g/cm ²)	0.059	0.059	0.117	0.065	0.041	0.065	0.040	0.050	0.0027
Volume (ml)	0.6	0.6	0.3	0.6	0.6	0.69	0.69	0.6	1.9
Build up cap	Lucite	Lucite	Lucite	Lucite	Lucite	Delrin	Lucentine	Polystyrene	Lucite
Thickness (g/cm ²)	0.472	0.462	0.5	0.551	0.551	0.551	0.554	0.539	0.472
A_c	0.991	0.992	0.991	0.990	0.990	0.990	0.990	0.990	0.994
A_w	0.980	0.980	0.972	0.986	0.973	0.986	0.967	0.983	0.980
$W_{air/e}$ (J/C)	33.73	33.73	33.73	33.73	33.73	33.73	33.73	33.73	33.73
P_f	$P_f = A_0 + A_1 \cdot \bar{E}(d) + A_2 \cdot \bar{E}(d)^2 + A_3 \cdot \bar{E}(d)^3$ $A_0 = +9.941 \times 10^{-1} - 7.988 \times 10^{-3} D_c - 2.893 \times 10^{-5} D_c^2$ $A_1 = -1.781 \times 10^{-4} + 1.130 \times 10^{-3} D_c - 4.102 \times 10^{-5} D_c^2$ $A_2 = +3.645 \times 10^{-5} - 5.807 \times 10^{-5} D_c + 4.145 \times 10^{-6} D_c^2$ $A_3 = -9.036 \times 10^{-7} + 1.065 \times 10^{-6} D_c - 1.052 \times 10^{-7} D_c^2$ $\bar{E}(d)$: Mean energy of electron (MeV) D_c : Inner diameter of cavity of ionization chamber (mm)								1.000
$\bar{E}(d)$	Use of table in appendix 2 (Mean energy of electron in water)								
P_d	Radial displacement method						Frontal wall replacement method		
$(\bar{L}/\rho)_{w,air}$	Use of table in appendix 3 (Water/Air mean resticated mass collision stopping power ratio)								
C_E (Gy/C/kg)	$C_E = A_c \cdot A_w \cdot (W_{air/e}) \cdot [(\bar{L}/\rho)_{water,air}] \cdot P_d \cdot P_f$								

める。仮の平均入射エネルギーが求まれば、仮の平均エネルギー($\bar{E}_d'$)が決定できるので電子フルエンス係数(P_f)が計算できる。厳密に言えばこの電子フルエンス係数は仮の電子フルエンス係数になるが、JARPの測定プロトコルでは無視されている。

次に、電離箱の指示値に大気補正係数(k_1)、イオン再結合損失補正係数(P_{ion})、コバルト校正係数(N_c)、電子フルエンス係数(P_f)を掛けて電離量(X)を求める。この電離量から深部電離量百分率曲線が得られ、この曲線から電離半価深を求めることができる。求めた電離半価深を利用して換算式から線量半価深を求めて、平均入射エネルギーを計算式から決定する。この平均入射エネルギーが分かれば、平均制限衝突質量阻止能比を求めることができるので、吸収線量の計算ができる。

平均入射エネルギーの決定には逐次近似法が行われ、計算は、値が収束するまで行う必要がある。このようにJARPの測定プロトコルは非常に複雑であり、臨床現場の測定では実用的な方法とは言えない。したがって、測定精度を保持して簡単に実施できる測定手順が望まれる。

10-2 簡略化手順による測定プロトコル

この方法の特徴は(1)平均入射エネルギーを電離半価深(d_{50})から直接求め、そして(2)各種の電離箱の吸収線量変換係数をあらかじめJARPの測定プロトコルに厳密に従って計算し、表にして利用することである^{2,3,4}。

簡略化手順による測定プロトコルをFig.11に示す。電離箱は半径変位法を採用する。ファントム中の電離箱の指示値(M)に大気補正係数(k_1)、イオン再結合損失補正係数(P_{ion})、コバルト校正係数(N_c)を掛けたものを電離量とする。ここでは、電子フルエンス係数(P_f)は吸収線量変換係数(C_E)に含まれるために掛けない。この電離量から深部電離量百分率(PID)を求めて電離半価深(d_{50})を決定する。そして、平均入射エネルギーは電離半価深から直接決定する。平均入射エネルギーが決まれば、Appendix 4から吸収線量変換係数を求めて吸収線量を決定する。

10-3 吸収線量測定の実際

実際的な吸収線量測定手順をFig.12に示す。

- ① 吸収線量変換係数は、あらかじめJARPの測定プロトコルに忠実に従って計算して作表にしてまとめておく。平均入射エネルギーが求まれば、この表を利用して吸収線量変換係数を決定する。
- ② 医療用加速器の平均入射エネルギーをあらかじめ大きなアプリケーションを用い

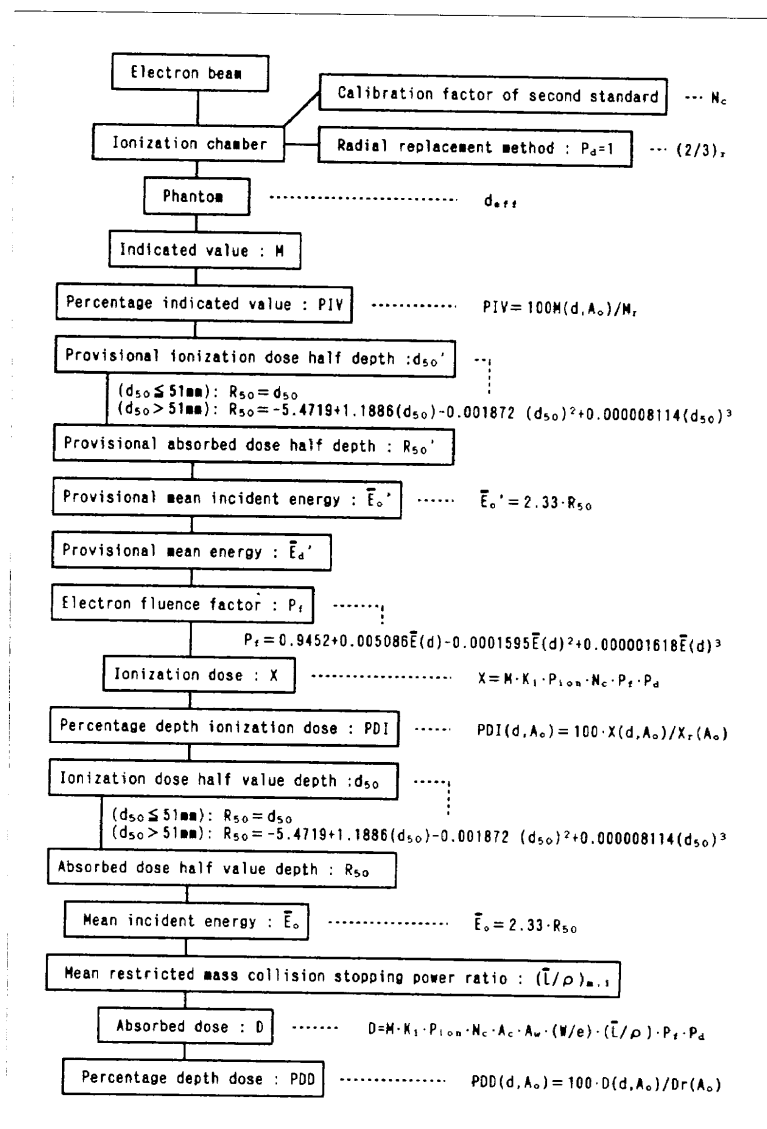


Fig.10 The measurement of percentage depth dose with high energy electron beams according to JARP's protocol.

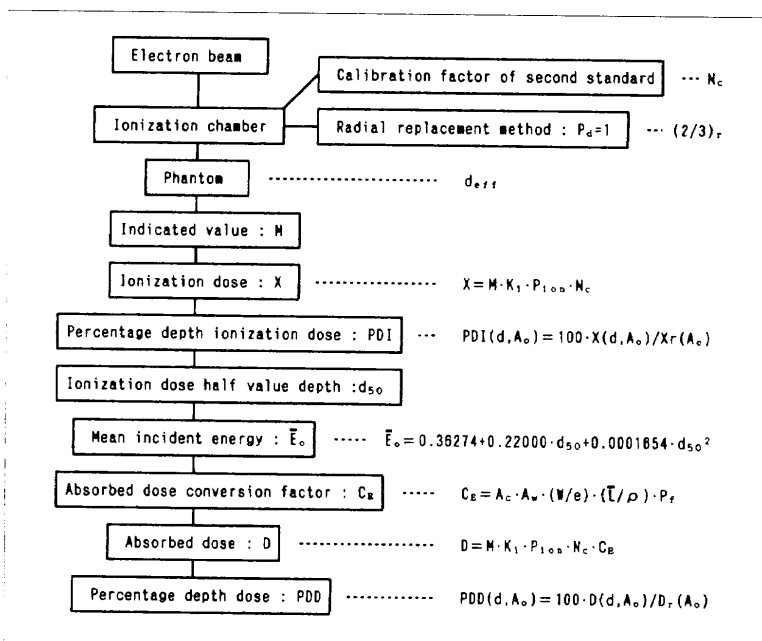


Fig.11 The measurement of percentage depth dose with high energy electron beams according to a simplified procedure.

て決定する。この平均入射エネルギーは、電離半価深から直接測定し、測定時の公称エネルギーが同じならばアプリケーションが異なっても同じ値を用いる。すなわち、吸収線量は、同じ公称エネルギーであればアプリケーションサイズに関係なく同じ値を用いる。

- ③ 実際の線量測定では、電離量を測定する。このとき使用する電子線の公称エネルギーに対して平均入射エネルギーがあらかじめ決定されているので、吸収線量変換係数表からその値を求めて、電離量に掛ければ吸収線量が決定される。

また、ファントムが水やMixDP以外であれば、この吸収線量に電子フルエンス補正係数を掛ければ、水ファントムの吸収線量に換算できる。

11. 考 察

1980年代に、高エネルギーX線や電子線の線量測定技術の向上を反映して、NACP²³、AAPM²⁴などの吸収線量測定法に関するプロトコルの改訂が行われた。本邦でも、1986年に、JARPが線量測定法の新しいプロトコルを発表し⁵、精度の向上を図った。このプロトコルでは電離量と吸収線量の変換の手順は複雑である。

電子線の吸収線量を求めるためには、ファントムに入射する電子線の平均入射エネルギーが分かっている必要はない。吸収線量変換係数を知るために平均入射エネルギーの値が必要であるからである。この平均入射エネルギーは線量半価深から換算されるので一義的に決定することができず、原則的に逐次近似法に頼ることになり、コンピュータが無いと計算は困難である。吸収線量の決定は、治療現場の測定で簡単に計算できることが要求される。したがって、吸収線量を簡単に求める手順が必要になる。著者らは、吸収線量を決定する簡略化手順を作成した。この方法は、平均入射エネルギーの決定には電離半価深を利用し、吸収線量変換係数は市販の電離箱についてあらかじめ計算しておくことである。このときの発生する吸収線量の誤差は、JARPの測定プロトコルとまったく変わらない^{13,4}。本報は測定精度に加えて手順の簡単さを考慮すれば非常に実用的な方法であり、各施設で採用されることが強く望まれる。

また、JARPの測定プロトコルには、いくつかの問題点を指摘できる。

測定に際して電離箱の選択では、平均入射エネルギーが10MeV以上では円筒

形電離箱、10MeV未満では平行平板形電離箱を使用するように明確に定めている。しかしながら、この記載には十分な理由付けがないように思われる。現在の電離箱線量計は、電離容積が小さく壁厚も薄いので、どちらの電離箱も適宜使用しても良いと思われる²⁵。

平均入射エネルギー決定のための線量半価深は、SSD=1mで測定した深部線量百分率曲線から求めるとしている。この平均入射エネルギーの決定に利用したデータは、Fig.9の直線aを利用したものであり、この測定法は治療現場では不可能である。したがって、平均入射エネルギーの決定には、曲線cのSSD=1mで測定した深部電離量百分率曲線を利用して決定するのが実用的な方法である。

JARPの測定プロトコルでは、この半価深を測定するときには、水ファントムを用いて、SSDを100cmにし、照射野は半価深の2倍以上の大きさで測定するように要求している。アプリケーションからの電子線の散乱拡散によるエネルギーの変化は主としてファントム表面近くの線量分布にだけ影響し、半価深が関係する深部領域にあまり影響を与えない。また、平均エネルギーは厳密には電子線の入射エネルギースペクトルを測定して決定しなければならないが、実際には困難である。一方、一般的な条件下では、大照射野で測定した半価深が平均入射エネルギーとはほぼ一定の関係にあることが見いだされている²³。したがって、平均入射エネルギーの決定には、出力が飽和する程度に大きな照射を使うことが条件になる。実用的には、各公称エネルギーで最大の照射野(照射野は10×10cm²でよい)で深部電離量百分率曲線から電離半価深を求めて平均入射エネルギーを決定しても問題にならない²⁵。この半価深から平均入射エネルギーを決定する方法は、理論的な可能性を無視して実地的な方法で決定したものであり、まだ検討の余地が残されている。

臨床における線量測定の最終目的は、患者体内の明記した点に定めた吸収線量を正確に投与することである。したがって、治療現場において高エネルギー電子

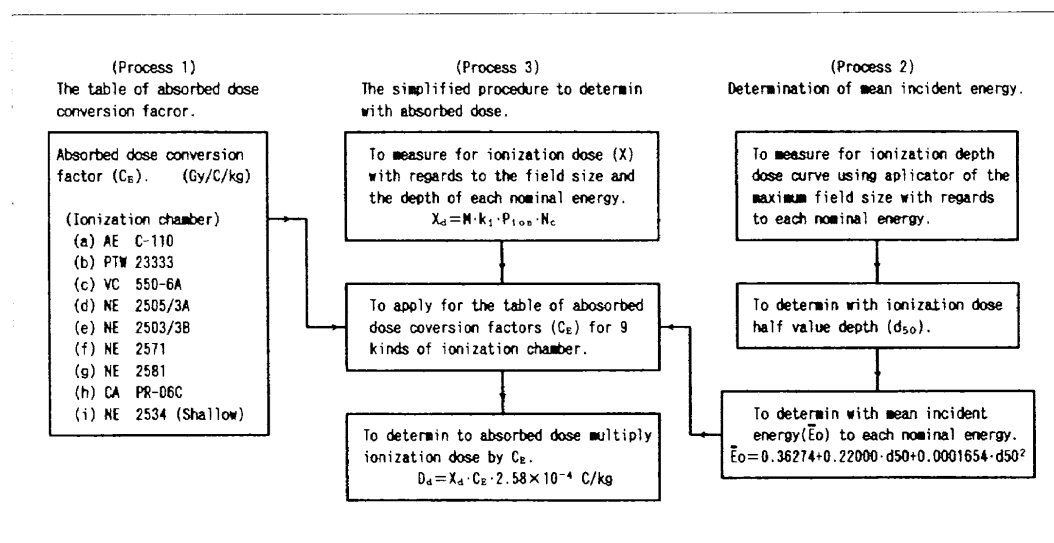


Fig.12 The practical method for absorbed dose measurement by a simplified procedure.

線の吸収線量測定法を正確に運用していくためには、測定理論の修得とともに高い測定精度と簡単な手順による測定プロトコルが必要である。このことが、結果的に癌患者の治療成績を高める。

今後は、放射線技師が高精度で運用しやすい測定プロトコルのさらなる確立に向けて積極的に努力していく必要がある。なぜなら、治療現場で線量測定から癌患者への照射まで一貫した仕事を実施しているのは放射線技師であるからである。

12. まとめ

高エネルギー電子線の吸収線量測定法と問題点について報告した。電子線の特性、電子線と物質との相互作用、電離箱線量計、ファントム、電子線測定の基礎

概念と測定原理、エネルギーの決定法、吸収線量変換係数、吸収線量測定の実際な手順について検討し、とくに、吸収線量の決定では、放射線治療現場で運用しやすく、JARPの測定プロトコルと測定精度が同等である簡略化手順による測定プロトコルを作成した。

謝 辞

稿終えるにあたり、第52回日本放射線技術学会総会において宿題報告の機会を与えて下さいました川上壽昭学会長、小室裕冉大会長、および関係役員の方々、ならびに座長の東田善治先生に厚くお礼申し上げます。また、1987年のマイクロトロンの設置以来、線量測定に関する議論と貴重なご意見を頂いた石松健二氏(日立メディコ)に深謝致します。

Appendix 1 Relation between mean incident energy and absorbed dose half depth value, ionization dose half depth value.

Mean Incident Energy $\bar{E}_0$ (MeV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	22	25	30	35	40
Ionization Half Value Depth d_{50} (mm)	3	7	12	16	21	25	30	34	38	43	51	59	67	76	84	92	104	123	140	154
Absorbed Dose Half Value Depth R_{50} (mm)	3	7	12	16	21	25	30	34	38	43	51	60	68	78	86	94	107	128	146	163
Most Probable Incident Energy E_{p0} (MeV)	1.0	2.0	3.2	4.2	5.4	6.4	7.7	8.7	9.7	10.9	12.9	15.2	17.2	19.8	21.8	23.8	27.2	32.5	35.6	39.3

Appendix 2 Relation between mean electron energy and depth in water phantom as a function of mean incident energy E_0 of an electron beam.

$\bar{E}_0$ (MeV) R_{50} (cm)	Mean Incident Energy and Dose Half Value Depth															
	30.0	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
	12.88	10.73	8.58	7.73	6.87	6.01	5.15	4.29	3.86	3.43	3.00	2.58	2.15	1.72	1.29	0.86
Depth d (cm)	Mean Electron Energy (MeV)															
0.4	28.3	23.6	19.0	17.0	15.2	13.3	11.3	9.2	8.2	7.3	6.3	5.4	4.5	3.4	2.2	1.0
0.5	27.9	23.2	18.7	16.7	15.0	12.9	11.0	9.0	8.1	7.0	6.1	5.1	4.3	3.1	1.9	0.7
0.6	27.5	22.9	18.4	16.5	14.7	12.7	10.7	8.8	7.8	6.8	5.9	4.9	4.0	2.9	1.7	
0.8	26.6	22.2	17.8	16.0	14.0	12.2	10.2	8.2	7.4	6.3	5.3	4.5	3.6	2.4	1.2	
1.0	25.8	21.6	17.2	15.5	13.6	11.6	9.6	7.7	6.8	5.9	4.9	4.0	3.1	1.9	0.8	
1.2	25.0	20.9	16.7	15.0	13.1	11.1	9.2	7.2	6.3	5.3	4.5	3.6	2.5	1.4		
1.4	24.3	20.3	16.2	14.2	12.5	10.5	8.6	6.7	5.7	4.8	4.0	3.1	2.1	1.0		
1.6	23.6	19.7	15.5	13.8	11.8	10.0	8.1	6.2	5.2	4.5	3.6	2.7	1.6	0.6		
1.8	23.2	19.4	15.0	13.1	11.3	9.4	7.6	5.7	4.8	4.1	3.2	2.2	1.2			
2.0	22.6	18.7	14.5	12.7	10.7	8.9	7.2	5.2	4.5	3.7	2.8	1.8	0.8			
2.5	20.9	17.2	13.1	11.3	9.5	7.7	5.9	4.3	3.6	2.7	1.8	0.8				
3.0	19.7	16.0	11.8	10.0	8.3	6.6	4.9	3.5	2.7	1.7	0.9					
3.5	18.4	14.7	10.5	8.9	7.3	5.5	4.1	2.5	1.7	0.9						
4.0	17.2	13.6	9.4	7.8	6.2	4.7	3.3	1.8	1.0							
4.5	16.0	12.2	8.4	6.8	5.3	4.0	2.6	1.1	0.5							
5.0	15.0	11.2	7.4	5.9	4.6	3.3	1.8	0.6								
5.5	13.8	10.2	6.5	5.0	3.9	2.6	1.2									
6.0	12.7	9.2	5.7	4.4	3.2	1.9	0.8									
7.0	10.7	7.3	4.3	3.1	1.9	0.9										
8.0	8.8	5.8	3.1	2.0	1.0											
9.0	7.2	4.6	2.0	1.1												
10.0	5.8	3.5	1.2													
12.0	3.9	1.7														
14.0	2.1															
16.0	1.7															

Appendix 3 Water/Air restricted mass collision stopping power ratio.

$\bar{E}_c$ (MeV)	Mean Incident Energy																
	30.0	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
Depth d (cm)																	
0.0	0.928	0.940	0.955	0.961	0.969	0.977	0.986	0.997	1.003	1.011	1.019	1.029	1.040	1.059	1.078	1.097	1.116
0.1	0.929	0.941	0.955	0.962	0.969	0.978	0.987	0.998	1.005	1.012	1.020	1.030	1.042	1.061	1.081	1.101	1.124
0.2	0.930	0.942	0.956	0.963	0.970	0.978	0.988	0.999	1.006	1.013	1.022	1.032	1.044	1.064	1.084	1.106	1.131
0.3	0.931	0.943	0.957	0.964	0.971	0.979	0.989	1.000	1.007	1.015	1.024	1.034	1.046	1.067	1.089	1.112	1.135
0.4	0.932	0.944	0.958	0.965	0.972	0.980	0.990	1.002	1.009	1.017	1.026	1.036	1.050	1.071	1.093	1.117	1.136
0.5	0.933	0.945	0.959	0.966	0.973	0.982	0.991	1.003	1.010	1.019	1.028	1.039	1.054	1.076	1.098	1.122	
0.6	0.934	0.946	0.960	0.967	0.974	0.983	0.993	1.005	1.012	1.021	1.031	1.043	1.058	1.080	1.103	1.126	
0.8	0.936	0.948	0.962	0.969	0.976	0.985	0.996	1.009	1.016	1.026	1.037	1.050	1.067	1.090	1.113	1.133	
1.0	0.938	0.950	0.964	0.971	0.979	0.988	0.999	1.013	1.021	1.031	1.043	1.058	1.076	1.099	1.121		
1.2	0.940	0.952	0.966	0.973	0.981	0.991	1.002	1.017	1.026	1.037	1.050	1.066	1.085	1.108	1.129		
1.4	0.942	0.954	0.968	0.976	0.984	0.994	1.006	1.022	1.032	1.044	1.058	1.075	1.095	1.117	1.133		
1.6	0.944	0.956	0.971	0.978	0.987	0.997	1.010	1.027	1.038	1.050	1.066	1.084	1.104	1.124			
1.8	0.945	0.957	0.973	0.981	0.990	1.001	1.014	1.032	1.044	1.057	1.071	1.093	1.112	1.130			
2.0	0.947	0.959	0.975	0.983	0.993	1.004	1.018	1.038	1.050	1.065	1.082	1.101	1.120	1.133			
2.5	0.952	0.964	0.981	0.990	1.000	1.013	1.030	1.053	1.067	1.083	1.102	1.120	1.133				
3.0	0.956	0.969	0.987	0.997	1.008	1.023	1.042	1.069	1.084	1.102	1.119	1.129					
3.5	0.960	0.974	0.994	1.004	1.017	1.034	1.056	1.085	1.102	1.118	1.128						
4.0	0.964	0.979	1.001	1.012	1.027	1.046	1.071	1.101	1.116	1.126							
4.5	0.969	0.985	1.008	1.021	1.037	1.059	1.086	1.115	1.125	1.127							
5.0	0.973	0.990	1.016	1.030	1.049	1.072	1.101	1.123	1.126								
5.5	0.978	0.996	1.024	1.040	1.061	1.086	1.113	1.125									
6.0	0.983	1.002	1.033	1.051	1.074	1.100	1.121										
7.0	0.993	1.017	1.054	1.075	1.099	1.118	1.122										
8.0	1.005	1.032	1.076	1.098	1.116	1.120											
9.0	1.018	1.049	1.098	1.114	1.118												
10.0	1.032	1.068	1.112	1.116													
12.0	1.062	1.103															
14.0	1.095	1.107															
16.0	1.103																

Appendix 4 Absorbed dose conversion factor of various ionization chambers.

(a) : Absorbed dose conversion factor of electron with AE C-110(JARP type)ionization chamber.

AE C-110 (JARP)

Unit : Gy/ (C/kg)

Depth (mm)	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	30.73	31.16	31.31	31.50	31.67	31.85	32.07	32.18	32.34	32.50	32.71	32.94	33.41	33.87	34.31	34.74	
1	30.76	31.16	31.34	31.49	31.70	31.87	32.08	32.22	32.36	32.51	32.73	32.99	33.46	33.93	34.40		
2	30.79	31.18	31.36	31.52	31.69	31.90	32.10	32.24	32.38	32.57	32.77	33.04	33.53	34.00	34.51		
3	30.82	31.21	31.39	31.54	31.71	31.92	32.11	32.25	32.42	32.61	32.82	33.08	33.61	34.12	34.66		
4	30.85	31.24	31.41	31.57	31.73	31.94	32.16	32.30	32.47	32.65	32.86	33.20	33.71	34.22	34.77		
5	30.88	31.26	31.43	31.59	31.78	31.95	32.18	32.32	32.50	32.69	32.92	33.30	33.82	34.33	34.87		
6	30.91	31.29	31.46	31.61	31.80	31.99	32.22	32.36	32.54	32.76	33.02	33.38	33.92	34.45			
8	30.97	31.34	31.50	31.64	31.83	32.05	32.30	32.45	32.65	32.88	33.20	33.61	34.16	34.68			
10	31.03	31.38	31.55	31.72	31.89	32.10	32.38	32.54	32.76	33.02	33.38	33.82	34.36	34.86			
12	31.08	31.43	31.59	31.76	31.95	32.16	32.46	32.65	32.88	33.20	33.58	34.01	34.55				
14	31.14	31.48	31.65	31.82	32.01	32.24	32.57	32.77	33.04	33.38	33.79	34.26	34.77				
16	31.19	31.55	31.70	31.87	32.07	32.32	32.67	32.90	33.20	33.58	34.01	34.46	34.91				
18	31.21	31.59	31.76	31.94	32.15	32.40	32.77	33.04	33.36	33.77	34.22	34.65					
20	31.26	31.63	31.80	31.99	32.20	32.49	32.90	33.20	33.56	33.97	34.40	34.82					
25	31.38	31.76	31.94	32.12	32.38	32.73	33.26	33.61	33.98	34.43	34.82						
30	31.50	31.87	32.07	32.28	32.59	32.99	33.66	34.01	34.42	34.81							
35	31.61	32.01	32.20	32.47	32.81	33.33	34.01	34.42	34.78								
40	31.72	32.15	32.36	32.67	33.09	33.69	34.40	34.74									
45	31.83	32.28	32.54	32.88	33.41	34.06	34.72	34.93									
50	31.93	32.45	32.73	33.18	33.73	34.40	34.88										
55	32.05	32.61	32.94	33.46	34.06	34.68											
60	32.16	32.80	33.21	33.77	34.39	34.86											
70	32.47	33.30	33.79	34.36	34.78												
80	32.78	33.82	34.34	34.74													
90	33.18	34.34	34.69														
100	33.63	34.65															
120	34.45																

Note 1 : Conversion factor is value for water phantom, Note 2 : Depth is determined by radius displacement method

Appendix 4 (b) : Absorbed dose conversion factor of electron with PTW 23333 ionization chamber.

PTW 23333

Unit : Gy/ (C/kg)

Depth (mm)	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	30.76	31.19	31.34	31.53	31.71	31.89	32.10	32.21	32.38	32.53	32.74	32.98	33.45	33.90	34.35	34.77
1	30.80	31.19	31.37	31.53	31.73	31.90	32.12	32.26	32.39	32.55	32.77	33.03	33.50	33.97	34.44	
2	30.83	31.22	31.39	31.55	31.72	31.93	32.13	32.27	32.41	32.60	32.81	33.08	33.56	34.03	34.55	
3	30.86	31.24	31.42	31.58	31.75	31.95	32.15	32.29	32.46	32.64	32.86	33.12	33.64	34.16	34.70	
4	30.89	31.27	31.44	31.60	31.77	31.97	32.20	32.33	32.50	32.68	32.90	33.23	33.74	34.25	34.80	
5	30.91	31.30	31.46	31.62	31.81	31.98	32.21	32.35	32.53	32.72	32.96	33.33	33.86	34.36	34.90	
6	30.94	31.32	31.49	31.64	31.83	32.02	32.26	32.39	32.58	32.80	33.06	33.42	33.95	34.48		
8	31.00	31.37	31.53	31.67	31.87	32.08	32.33	32.48	32.68	32.92	33.23	33.64	34.19	34.71		
10	31.06	31.41	31.58	31.75	31.92	32.13	32.41	32.58	32.80	33.06	33.42	33.86	34.39	34.89		
12	31.11	31.46	31.62	31.79	31.99	32.20	32.49	32.68	32.92	33.23	33.61	34.05	34.59			
14	31.17	31.51	31.68	31.85	32.04	32.27	32.60	32.81	33.08	33.42	33.83	34.30	34.80			
16	31.22	31.58	31.73	31.90	32.10	32.35	32.70	32.94	33.23	33.61	34.05	34.50	34.95			
18	31.25	31.62	31.79	31.97	32.18	32.43	32.81	33.08	33.40	33.81	34.25	34.68				
20	31.30	31.67	31.83	32.02	32.23	32.52	32.94	33.23	33.60	34.00	34.44	34.86				
25	31.41	31.79	31.97	32.16	32.41	32.77	33.30	33.64	34.02	34.47	34.86					
30	31.53	31.90	32.10	32.31	32.62	33.03	33.69	34.05	34.45	34.85						
35	31.64	32.04	32.23	32.50	32.85	33.37	34.05	34.45	34.82							
40	31.75	32.18	32.39	32.70	33.13	33.73	34.44	34.77								
45	31.87	32.32	32.58	32.92	33.45	34.10	34.76	34.96								
50	31.96	32.48	32.77	33.21	33.76	34.44	34.92									
55	32.08	32.64	32.98	33.50	34.10	34.71										
60	32.20	32.84	33.25	33.81	34.42	34.89										
70	32.50	33.33	33.83	34.39	34.82											
80	32.82	33.86	34.38	34.77												
90	33.21	34.38	34.73													
100	33.66	34.68														
120	34.48															

Note 1 : Conversion factor is value for water phantom, Note 2 : Depth is determined by radius displacement method

Appendix 4 (c) : Absorbed dose conversion factor of electron with VC 550-6A ionization chamber.

VC 550-6A

Unit : Gy/ (C/kg)

Depth (mm)	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	30.50	30.93	31.08	31.28	31.47	31.67	31.92	32.04	32.23	32.40	32.63	32.89	33.38	33.86	34.33	34.78
1	30.53	30.93	31.11	31.28	31.50	31.70	31.94	32.09	32.24	32.42	32.66	32.94	33.43	33.93	34.43	
2	30.56	30.95	31.13	31.30	31.49	31.72	31.95	32.11	32.27	32.47	32.70	32.99	33.50	34.00	34.54	
3	30.59	30.98	31.16	31.33	31.52	31.74	31.97	32.13	32.32	32.52	32.75	33.03	33.59	34.13	34.70	
4	30.62	31.00	31.18	31.36	31.54	31.77	32.02	32.18	32.36	32.56	32.80	33.15	33.69	34.23	34.82	
5	30.65	31.03	31.21	31.38	31.59	31.78	32.04	32.20	32.40	32.61	32.86	33.25	33.81	34.35	34.93	
6	30.68	31.06	31.23	31.40	31.61	31.83	32.09	32.24	32.45	32.69	32.97	33.35	33.91	34.48		
8	30.73	31.11	31.28	31.44	31.65	31.90	32.18	32.34	32.56	32.82	33.15	33.59	34.16	34.72		
10	30.79	31.16	31.33	31.52	31.72	31.95	32.27	32.45	32.69	32.97	33.35	33.81	34.38	34.91		
12	30.84	31.21	31.38	31.56	31.79	32.02	32.35	32.56	32.82	33.15	33.56	34.02	34.59			
14	30.90	31.26	31.45	31.63	31.85	32.11	32.47	32.70	32.99	33.35	33.78	34.28	34.82			
16	30.95	31.33	31.50	31.70	31.92	32.20	32.59	32.84	33.15	33.56	34.01	34.49	34.97			
18	30.98	31.38	31.56	31.77	32.01	32.29	32.70	32.99	33.33	33.76	34.23	34.69				
20	31.03	31.43	31.61	31.83	32.07	32.39	32.84	33.15	33.54	33.96	34.43	34.88				
25	31.16	31.56	31.77	31.98	32.27	32.66	33.22	33.59	33.98	34.46	34.88					
30	31.28	31.70	31.92	32.15	32.50	32.94	33.64	34.01	34.45	34.86						
35	31.40	31.85	32.07	32.36	32.74	33.30	34.02	34.45	34.83							
40	31.52	32.01	32.24	32.59	33.04	33.68	34.43	34.78								
45	31.65	32.16	32.45	32.82	33.38	34.06	34.77	34.99								
50	31.76	32.34	32.66	33.13	33.71	34.43	34.94									
55	31.90	32.52	32.89	33.43	34.06	34.72										
60	32.02	32.73	33.17	33.76	34.41	34.91										
70	32.36	33.25	33.78	34.38	34.83											
80	32.71	33.81	34.36	34.78												
90	33.13	34.36	34.74													
100	33.61	34.69														
120	34.48															

Note 1 : Conversion factor is value for water phantom, Note 2 : Depth is determined by radius displacement method

Appendix 4 (d) : Absorbed dose conversion factor of electron with NE 2505/3A ionization chamber.

NE 2505/3A

Unit : Gy/ (C/kg)

Depth (mm)	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	30.88	31.31	31.46	31.64	31.82	31.99	32.20	32.31	32.47	32.62	32.83	33.05	33.52	33.97	34.41	34.83
1	30.91	31.31	31.49	31.64	31.84	32.01	32.21	32.35	32.48	32.63	32.85	33.10	33.57	34.03	34.50	
2	30.94	31.34	31.51	31.67	31.83	32.04	32.23	32.37	32.50	32.68	32.89	33.15	33.63	34.10	34.60	
3	30.97	31.36	31.54	31.69	31.86	32.05	32.24	32.38	32.55	32.72	32.94	33.19	33.71	34.22	34.75	
4	31.00	31.39	31.56	31.71	31.88	32.07	32.29	32.42	32.59	32.77	32.98	33.30	33.81	34.31	34.86	
5	31.03	31.41	31.58	31.74	31.92	32.08	32.31	32.45	32.62	32.81	33.03	33.40	33.92	34.42	34.96	
6	31.06	31.44	31.61	31.76	31.94	32.12	32.35	32.48	32.66	32.88	33.13	33.49	34.02	34.54		
8	31.12	31.49	31.65	31.79	31.97	32.18	32.42	32.57	32.77	33.00	33.30	33.71	34.25	34.77		
10	31.18	31.53	31.70	31.86	32.03	32.23	32.50	32.66	32.88	33.13	33.49	33.92	34.45	34.94		
12	31.23	31.58	31.74	31.90	32.09	32.29	32.58	32.77	33.00	33.30	33.68	34.11	34.65			
14	31.29	31.63	31.80	31.96	32.14	32.37	32.68	32.89	33.15	33.49	33.89	34.36	34.86			
16	31.34	31.70	31.84	32.01	32.20	32.45	32.79	33.01	33.30	33.68	34.11	34.56	35.00			
18	31.37	31.74	31.90	32.07	32.28	32.52	32.89	33.15	33.47	33.88	34.31	34.74				
20	31.41	31.78	31.94	32.12	32.33	32.61	33.01	33.30	33.67	34.07	34.50	34.91				
25	31.53	31.90	32.07	32.25	32.50	32.85	33.37	33.71	34.08	34.53	34.91					
30	31.65	32.01	32.20	32.40	32.70	33.10	33.76	34.11	34.51	34.90						
35	31.76	32.14	32.33	32.59	32.93	33.44	34.11	34.51	34.87							
40	31.86	32.28	32.48	32.79	33.20	33.80	34.50	34.83								
45	31.97	32.41	32.66	33.00	33.52	34.16	34.81	35.01								
50	32.06	32.57	32.85	33.29	33.83	34.50	34.97									
55	32.18	32.72	33.05	33.57	34.16	34.77										
60	32.29	32.92	33.32	33.88	34.48	34.94										
70	32.59	33.40	33.89	34.45	34.87											
80	32.90	33.92	34.44	34.83												
90	33.29	34.44	34.78													
100	33.73	34.74														
120	34.54															

Note 1 : Conversion factor is value for water phantom, Note 2 : Depth is determined by radius displacement method

Appendix 4 (e) : Absorbed dose conversion factor of electron with NE 2505/3B ionization chamber.

NE 2505/3B

Unit : Gy/ (C/kg)

Depth (mm)	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	30.48	30.90	31.05	31.24	31.40	31.57	31.78	31.88	32.04	32.19	32.40	32.62	33.08	33.53	33.96	34.37
1	30.51	30.90	31.07	31.24	31.42	31.59	31.79	31.93	32.05	32.20	32.42	32.67	33.13	33.59	34.05	
2	30.54	30.93	31.10	31.25	31.42	31.62	31.81	31.94	32.08	32.25	32.45	32.72	33.19	33.65	34.15	
3	30.57	30.95	31.12	31.28	31.44	31.63	31.82	31.95	32.12	32.30	32.51	32.76	33.27	33.77	34.30	
4	30.60	30.98	31.14	31.30	31.46	31.65	31.87	32.00	32.16	32.34	32.54	32.87	33.37	33.86	34.40	
5	30.63	31.00	31.17	31.32	31.50	31.66	31.88	32.02	32.19	32.38	32.60	32.97	33.48	33.97	34.50	
6	30.66	31.03	31.19	31.34	31.52	31.70	31.93	32.05	32.23	32.45	32.70	33.05	33.57	34.09		
8	30.71	31.07	31.24	31.37	31.55	31.76	32.00	32.14	32.34	32.56	32.87	33.27	33.80	34.31		
10	30.77	31.12	31.28	31.44	31.61	31.81	32.08	32.23	32.45	32.70	33.05	33.48	34.00	34.49		
12	30.82	31.17	31.32	31.48	31.67	31.87	32.15	32.34	32.56	32.87	33.24	33.67	34.19			
14	30.88	31.21	31.38	31.54	31.72	31.94	32.25	32.45	32.72	33.05	33.45	33.91	34.40			
16	30.93	31.28	31.42	31.59	31.78	32.02	32.36	32.58	32.87	33.24	33.67	34.10	34.54			
18	30.96	31.32	31.48	31.65	31.85	32.10	32.45	32.72	33.03	33.43	33.86	34.28				
20	31.00	31.36	31.52	31.70	31.90	32.18	32.58	32.87	33.22	33.62	34.05	34.46				
25	31.12	31.48	31.65	31.83	32.08	32.42	32.93	33.27	33.63	34.08	34.46					
30	31.24	31.59	31.78	31.98	32.28	32.67	33.32	33.67	34.06	34.44						
35	31.34	31.72	31.90	32.16	32.49	33.00	33.67	34.06	34.41							
40	31.44	31.85	32.05	32.36	32.77	33.35	34.05	34.37								
45	31.55	31.99	32.23	32.56	33.08	33.71	34.36	34.55								
50	31.64	32.14	32.42	32.85	33.38	34.05	34.51									
55	31.76	32.30	32.62	33.13	33.71	34.31										
60	31.87	32.49	32.88	33.43	34.03	34.49										
70	32.16	32.97	33.45	34.00	34.41											
80	32.47	33.48	33.99	34.37												
90	32.85	33.99	34.32													
100	33.29	34.28														
120	34.09															

Note 1 : Conversion factor is value for water phantom, Note 2 : Depth is determined by radius displacement method

Appendix 4 (f) : Absorbed dose conversion factor of electron with NE 2571 ionization chamber.

NE 2571

Unit : Gy/ (C/kg)

Depth (mm)	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	30.88	31.31	31.46	31.65	31.82	31.99	32.20	32.31	32.47	32.62	32.83	33.05	33.52	33.97	34.41	34.83
1	30.91	31.31	31.49	31.65	31.84	32.01	32.21	32.35	32.48	32.63	32.85	33.10	33.57	34.03	34.50	
2	30.94	31.34	31.51	31.67	31.83	32.04	32.23	32.37	32.50	32.68	32.89	33.15	33.63	34.10	34.60	
3	30.97	31.36	31.54	31.69	31.86	32.05	32.24	32.38	32.55	32.72	32.94	33.19	33.71	34.22	34.75	
4	31.00	31.39	31.56	31.71	31.88	32.07	32.29	32.43	32.59	32.77	32.98	33.30	33.81	34.31	34.86	
5	31.03	31.41	31.58	31.74	31.92	32.08	32.31	32.45	32.62	32.81	33.03	33.40	33.92	34.42	34.96	
6	31.06	31.44	31.61	31.76	31.94	32.12	32.35	32.48	32.66	32.88	33.13	33.49	34.02	34.54		
8	31.12	31.49	31.65	31.79	31.97	32.18	32.42	32.57	32.77	33.00	33.30	33.71	34.25	34.77		
10	31.18	31.53	31.70	31.86	32.03	32.23	32.50	32.66	32.88	33.13	33.49	33.92	34.45	34.94		
12	31.23	31.58	31.74	31.90	32.09	32.29	32.58	32.77	33.00	33.30	33.68	34.11	34.65			
14	31.29	31.63	31.80	31.96	32.14	32.37	32.68	32.89	33.15	33.49	33.89	34.36	34.86			
16	31.34	31.70	31.84	32.01	32.20	32.45	32.79	33.01	33.30	33.68	34.11	34.56	35.00			
18	31.37	31.74	31.90	32.07	32.28	32.52	32.89	33.15	33.47	33.88	34.31	34.74				
20	31.41	31.78	31.94	32.12	32.33	32.61	33.01	33.30	33.67	34.07	34.50	34.91				
25	31.53	31.90	32.07	32.25	32.50	32.85	33.37	33.71	34.08	34.53	34.91					
30	31.65	32.01	32.20	32.40	32.70	33.10	33.76	34.11	34.51	34.90						
35	31.76	32.14	32.33	32.59	32.93	33.44	34.11	34.51	34.87							
40	31.86	32.28	32.48	32.79	33.20	33.80	34.50	34.83								
45	31.97	32.41	32.66	33.00	33.52	34.16	34.81	35.01								
50	32.06	32.57	32.85	33.29	33.83	34.50	34.97									
55	32.18	32.72	33.05	33.57	34.16	34.77										
60	32.29	32.92	33.32	33.88	34.48	34.94										
70	32.59	33.40	33.89	34.45	34.87											
80	32.90	33.92	34.44	34.83												
90	33.29	34.44	34.78													
100	33.73	34.74														
120	34.54															

Note 1 : Conversion factor is value for water phantom, Note 2 : Depth is determined by radius displacement method

Appendix 4 (g) : Absorbed dose conversion factor of electron with NE 2581 ionization chamber.

NE 2581

Unit : Gy/ (C/kg)

Depth (mm)	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	30.29	30.71	30.85	31.04	31.21	31.37	31.58	31.68	31.84	31.99	32.19	32.42	32.87	33.32	33.74	34.15
1	30.32	30.71	30.88	31.03	31.21	31.39	31.59	31.73	31.85	32.00	32.21	32.47	32.92	33.38	33.83	
2	30.35	30.73	30.90	31.06	31.22	31.42	31.61	31.74	31.88	32.05	32.25	32.51	32.99	33.44	33.94	
3	30.38	30.76	30.93	31.08	31.24	31.44	31.62	31.75	31.92	32.09	32.30	32.55	33.07	33.56	34.09	
4	30.41	30.79	30.95	31.10	31.26	31.45	31.67	31.80	31.96	32.13	32.34	32.66	33.16	33.65	34.19	
5	30.44	30.81	30.97	31.13	31.30	31.46	31.68	31.82	31.99	32.17	32.40	32.76	33.27	33.76	34.28	
6	30.47	30.83	31.00	31.14	31.32	31.51	31.73	31.85	32.03	32.25	32.50	32.84	33.36	33.88		
8	30.52	30.88	31.04	31.17	31.36	31.56	31.80	31.94	32.13	32.36	32.66	33.07	33.59	34.10		
10	30.58	30.93	31.08	31.25	31.41	31.61	31.88	32.03	32.25	32.50	32.84	33.27	33.79	34.27		
12	30.63	30.97	31.13	31.28	31.47	31.67	31.95	32.13	32.36	32.66	33.03	33.46	33.98			
14	30.69	31.02	31.18	31.34	31.52	31.74	32.05	32.25	32.51	32.84	33.24	33.70	34.19			
16	30.74	31.08	31.23	31.39	31.58	31.82	32.15	32.38	32.66	33.03	33.46	33.89	34.33			
18	30.76	31.13	31.28	31.45	31.66	31.90	32.25	32.51	32.83	33.22	33.65	34.07				
20	30.81	31.17	31.32	31.51	31.71	31.98	32.38	32.66	33.02	33.41	33.83	34.24				
25	30.93	31.28	31.45	31.63	31.88	32.21	32.73	33.07	33.43	33.86	34.24					
30	31.04	31.39	31.58	31.78	32.07	32.47	33.11	33.46	33.85	34.23						
35	31.14	31.52	31.71	31.96	32.29	32.79	33.46	33.85	34.20							
40	31.25	31.66	31.85	32.15	32.56	33.15	33.83	34.15								
45	31.36	31.79	32.03	32.36	32.87	33.50	34.14	34.34								
50	31.45	31.94	32.21	32.64	33.18	33.83	34.30									
55	31.56	32.09	32.42	32.92	33.50	34.10										
60	31.67	32.28	32.68	33.22	33.82	34.27										
70	31.96	32.76	33.24	33.79	34.20											
80	32.26	33.27	33.77	34.15												
90	32.64	33.77	34.11													
100	33.08	34.07														
120	33.88															

Note 1 : Conversion factor is value for water phantom, Note 2 : Depth is determined by radius displacement method

Appendix 4 (h) : Absorbed dose conversion factor of electron with CA PR-06C ionization chamber.

CA PR-06C

Unit : Gy/ (C/kg)

Depth (mm)	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	30.79	31.22	31.36	31.54	31.72	31.89	32.09	32.20	32.36	32.51	32.71	32.94	33.40	33.85	34.28	34.69
1	30.82	31.22	31.39	31.54	31.74	31.91	32.11	32.24	32.37	32.52	32.73	32.99	33.45	33.91	34.37	
2	30.85	31.24	31.41	31.57	31.75	31.93	32.12	32.26	32.39	32.57	32.77	33.04	33.51	33.97	34.47	
3	30.88	31.27	31.44	31.59	31.76	31.95	32.14	32.27	32.43	32.61	32.82	33.07	33.59	34.10	34.62	
4	30.91	31.29	31.46	31.62	31.78	31.97	32.18	32.31	32.48	32.65	32.86	33.18	33.69	34.19	34.72	
5	30.94	31.32	31.48	31.64	31.82	31.98	32.20	32.34	32.51	32.69	32.92	33.28	33.80	34.29	34.82	
6	30.97	31.34	31.51	31.66	31.84	32.02	32.24	32.37	32.55	32.76	33.02	33.37	33.89	34.41		
8	31.03	31.39	31.55	31.69	31.87	32.08	32.31	32.46	32.65	32.88	33.18	33.59	34.13	34.64		
10	31.09	31.44	31.60	31.76	31.93	32.12	32.39	32.55	32.76	33.02	33.37	33.80	34.32	34.81		
12	31.14	31.48	31.64	31.80	31.99	32.18	32.47	32.65	32.88	33.18	33.56	33.99	34.52			
14	31.19	31.53	31.70	31.86	32.04	32.26	32.57	32.77	33.04	33.37	33.77	34.23	34.72			
16	31.25	31.60	31.74	31.91	32.09	32.34	32.67	32.90	33.18	33.56	33.99	34.43	34.87			
18	31.27	31.64	31.80	31.97	32.17	32.41	32.77	33.04	33.35	33.75	34.19	34.61				
20	31.32	31.68	31.84	32.02	32.22	32.50	32.90	33.18	33.54	33.94	34.37	34.78				
25	31.44	31.80	31.97	32.15	32.39	32.73	33.25	33.59	33.96	34.40	34.78					
30	31.55	31.91	32.09	32.29	32.59	32.99	33.64	33.99	34.38	34.77						
35	31.66	32.04	32.22	32.48	32.81	33.32	33.99	34.38	34.74							
40	31.76	32.17	32.37	32.67	33.09	33.67	34.37	34.69								
45	31.87	32.30	32.55	32.88	33.40	34.03	34.68	34.88								
50	31.96	32.46	32.73	33.17	33.70	34.37	34.84									
55	32.08	32.61	32.94	33.45	34.03	34.64										
60	32.18	32.80	33.20	33.75	34.36	34.81										
70	32.48	33.28	33.77	34.32	34.74											
80	32.78	33.80	34.31	34.69												
90	33.17	34.31	34.65													
100	33.61	34.61														
120	34.41															

Note 1 : Conversion factor is value for water phantom. Note 2 : Depth is determined by radius displacement method

Appendix 4 (i) : Absorbed dose conversion factor of electron with NE 2534 (Shallow) ionization chamber.

NE 2534 (Shallow)

Unit : Gy/ (C/kg)

Depth (mm)	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	32.56	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	35.06	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	34.78	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															

Note 1 : Conversion factor is value for water phantom. Note 2 : Depth is determined by radius displacement method

参考文献

- 1) Faiz M. Khan: The Physics of Radiation Therapy, Williams & Wilkins, 299-353, (1984).
- 2) 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(各種電離箱線量計の吸収線量変換係数). 日放技学誌, **47**(1), 8-14, (1991).
- 3) 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(平均入射エネルギーの決定法). 日放技学誌, **47**(1), 15-21, (1991).
- 4) 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(吸収線量測定の簡便法). 日放技学誌, **47**(4), 630-636, (1991).
- 5) 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, 通商産業研究社, (1986).
- 6) 熊谷孝三, 石松健二, 大塚辰也, 他: 高エネルギー電子線治療の線量測定マニュアル, 日放技学誌, **47**(9), (1991).
- 7) 熊谷孝三, 荒木不次男, 井芹卓見, 他: 電子線治療における吸収線量測定のプロトコル(I)ー簡略化手順による吸収線量測定, 日放技師会誌, **38**(6), 695-705, (1991).
- 8) 川島勝弘, 山田勝彦: 放射線測定技術, 通商産業研究社, 11-25, (1983).
- 9) Frank H. Attix: Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry, Wiley interscience, 231-263, (1986).
- 10) 放射線の単位: ナガセFBだより, No.208, 4, 6, (1995).
- 11) ICRU REPORT 33: Radiation Quantities and Units, International Commission on Radiation Units and Measurements, (1980).
- 12) 森内和之, 高田信久: 放射線計測の基礎, 地人書館, (1988).
- 13) 川島勝弘, 星野一雄, 平岡 武: 放射線治療のための線量測定 その3, 空洞電離箱による吸収線量の測定, 放治システム研究, **3**, 27-36, (1986).
- 14) 川島勝弘, 星野一雄, 平岡 武: 電離箱線量計の取扱い15条, 放治システム研究, **4**, 31-38, (1987).
- 15) 熊谷孝三: 放射線治療における線量測定法の諸問題ー測定理論と臨床応用ー, 放射線治療用測定ファントム, 日放技学誌, **51**(4), 508-518, (1995).
- 16) 都丸禎三, 入船寅二, 他: JARP及びAAPMプロトコールに従って数種の円柱形電離箱により測定した高エネルギーX線の校正点吸収線量の比較, 日医放物理会誌, **8**(2), 970-110, (1988).
- 17) 都丸禎三: 吸収線量の標準測定法について, 日本医学放射線学会物理部会誌, Suppl. 27, 3, 27-48, (1988).
- 18) 川島勝弘, 星野一雄, 平岡 武: 放射線治療のための線量測定 その2, 電子線の平均エネルギーの決定法, 放治システム研究, **2**, 261-269, (1985).
- 19) 熊谷孝三: 標準測定法の電子線エネルギーの問題点, コニカX-レイ写真研究, No.227, 46(4), 100-104, (1995).
- 20) ICRU 21: Radiation Dosimetry: Electron with Initial Energies Between 1 and 50 MeV, International Commission on Radiation Units and Measurements, (1974).
- 21) ICRU 35: Radiation Dosimetry: Electron Beams with Energies Between 1 and 50 MeV, International Commission on Radiation Units and Measurements, (1984).
- 22) 川島勝弘: 放射線治療のための線量測定, PCユーザ・グループのあゆみ, PCユーザーズグループ事務局, 105-106, (1993).
- 23) NACP: Procedures in external radiation therapy dosimetry with electron and photon beams with maximum energies between 1 and 50 MeV, Acta Radiol. Rad. Phys. Biol., **19**, 55-80, (1980).
- 24) AAPM: A protocol for the determination of absorbed dose from high-energy photon and electron beams, Med. Phys., **10**, 741-771, (1983).
- 25) 森川賀根雄: 治療用電子ビームの特性ーアプリケーションの影響ー, 日放技学誌, **48**(5), (1992).