



Title	10~30MeV電子線のエネルギーと実用飛程の関係
Author(s)	星野, 一雄; 稲田, 哲雄; 松沢, 秀夫
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1974, 34(6), p. 433-439
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/18725
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

10~30MeV 電子線のエネルギーと実用飛程の関係

放射線医学総会研究所物理研究部

星野 一雄 稲田 哲雄 松沢 秀夫

(昭和49年3月6日受付)

(昭和49年3月28日再受付)

Relation between Energy and Practical Range, for 10—30MeV Electrons

By

Kazuo Hoshino, Tetsuo Inada and Hideo Matsuzawa

Physics Division, National Institute of Radiological Sciences, Chiba, Japan

Research Code No.: 201

Key Words: Practical range, Electron energy

This investigation was performed for electrons generated by betatron with nominal energies between 10 to 29 MeV. The spectral distribution of electrons was measured using a magnetic spectrometer. On the basis of measured spectrum, the maximum energy, $(E_{\max})_0$, the most probable energy, $(E_p)_0$, and the mean energy, \bar{E}_0 , were determined at the surface of phantom. On the other hand, the practical range in water, R_p , was measured from depth ionization curve obtained with a thimble ionization chamber in water phantom. Thus, the following conclusions were drawn from the experimental results, for electrons falling on the phantom surface. (1) The relation between $(E_p)_0$ and R_p may be approximated by an empirical formula $R_p = 0.53 (E_p)_0 + 0.20$, where $(E_p)_0$ and R_p are expressed in MeV and cm units, respectively. (2) The relation between \bar{E}_0 and R_p will not be given by a single formula, since the relation changes depending on the thickness of scattering foil. (3) The maximum energy, $(E_{\max})_0$, will be close to accelerator energy, E_a , so long as the collision energy loss of electrons is less than about 2 MeV before they reach the phantom surface. (4) E_a may not be directly related to R_p by a single formula. However, if it is possible to calculate the collision energy loss, ΔE_{col} , of electrons before reaching the phantom surface, E_a may be given by $(E_p)_0$ plus ΔE_{col} .

1. 緒言

医療用加速器からの電子線のエネルギーの決定法の1つとして、その実用飛程 R_p (cm 単位) を測定しこれと電子線エネルギー E (MeV 単位) に関する実験式を用いる方法がある。代表的実験式は $R_p = 0.54 E - 0.3$ (Loevinger ら)⁴⁾, $R_p =$

0.521 $E - 0.376$ (Markus)⁵⁾ などがあげられる。実用飛程の測定には特別の測定装置を必要とするのでこの方法は実際上便利であるが、上記の実験式の適用について注意する必要がある。すなわち、これらの実験式は電子線の加速エネルギーに関するものであり、その適用は特定の場合に限ら

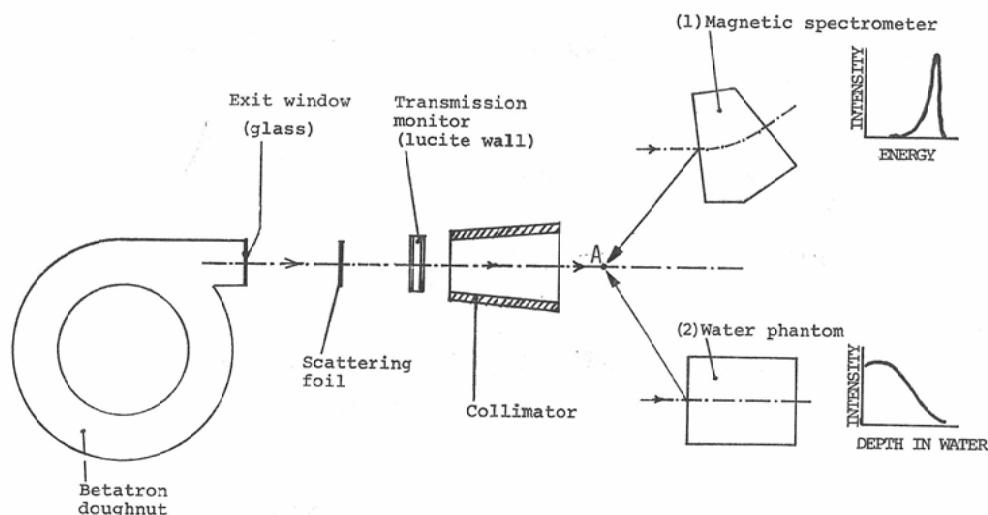


Fig. 1. Schematic diagram for the measurements of both (1) electron spectrum and (2) practical range in water.

れるであろう。他方、ICRU Report 21³⁾では患者またはファントムの表面における電子線のエネルギーが上記の実験式によつて近似できると述べているが、これは妥当であろうか。これらの問題点を明らかにするために著者らは後述の実験を試み、ファントム表面の電子線エネルギーと水中の実用飛程との関係について下記の結果を得たので報告する。

2. 実験方法

ペータトロン(東芝製 BMH-31型)によって加速された10MeVないし29MeV電子線について実験を行なつた。Fig. 1の概要図に示すように、電子線は種々の物質を通過した後にマグネチックスペクトロメータまたは水ファントムに入射した。電子線が通過する物質は加速管(ドーナツ)の窓、scattering foil、透過型モニタ電離箱、および厚さ約90cmの空気層である。これらの物質のうち scattering foilだけを変えて以下の実験を行なつた。使用した4種類の scattering foil を Table 1に示す。

a. 実用飛程の測定

まず、20cm×20cm×20cmの水ファントムと指頭型電離箱を用いて水中の深部電離量百分率曲線を求めた。この場合、電離箱の寸法は 6mmφ×20mm

Table 1. Classification of scattering foils used in this experiment.

No. 1	0.025mm Au + 0.5mm Al
No. 2	0.1mm Pb + 0.5mm Al
No. 3	0.3mm Pb + 0.5mm Al
No. 4	0.5mm Pb + 0.5mm Al

であるから、その幾何学的中心より前方へ2mm変位させた位置を電離箱の実効中心とした(半径 r)の電離箱では、測定の実効中心は電離箱の幾何学的中心より前方へ $\frac{2}{3}r$ だけ変位させた位置であることが知られている²⁾。電離箱の実効中心を Fig. 1 の A 点に固定し、その水中における深さは水ファントムを前後に移動させて変えた。

Fig. 1 の A 点における照射野を 10cm×10cm として電子線を照射し、ビーム中心軸上の各深さにおいて一定のモニタ指示値当たりの深部電離量を測定した。この測定値にもとづいて深部電離量百分率曲線を描き、その直線的に下降する部分の外挿直線と制動放射によるバックグラウンドの外挿直線との交わる深さとして実用飛程を求めた³⁾。測定誤差は ± 0.1cm であつた。

b. 電子線スペクトルの測定

ビーム中心軸に沿つて Fig. 1 の A 点を通る電

子線のスペクトルをマグネチックスペクトロメータ（日本電子製）を用いて測定した。これは45度偏向の分析電磁石、磁場測定器および電子線検出器から構成されている。電磁石の標準軌道半径 ρ の設計値は50cmである。この値は ^{137}Cs の内部転換電子（624keV）を用いて得られた実験結果に一致した。磁場測定器として、陽子共鳴によつて校正されたガウスメータ（ホール素子使用、F.W. Bell Inc. 製 640型）を用いた。この出力でX-Y記録器のX軸を駆動した。電子線検出器は純銅製のファラディ・ケージと振動容量電位計（Applied Physics Co. 製、Cary 31型）から成り、その出力はX-Y記録器のY軸に記録された。軌道半径 ρ を固定のまま磁場強度を変えて電子線スペクトル

を測定する場合、磁場Bのとき検出される電子数をPとすれば電子の運動量分布 $\phi_{B\rho}$ は P/B で与えられる⁶⁾。さらに、エネルギー分布 ϕ_E は $\phi_E \cdot dE = \phi_{B\rho} \cdot d(B\rho)$ と置き $dE = F(B\rho) \cdot d(B\rho)$ の関係⁶⁾を用いて次のように計算される。 $\phi_E = \phi_{B\rho} \cdot \frac{d(B\rho)}{dE} = \frac{P}{B} \times \frac{1}{F(B\rho)}$ 。任意の $B\rho$ に対する電子の運動エネルギーEおよび $F(B\rho)$ の値を Siegbahn の表⁶⁾から求め、方眼紙の横軸に電子のエネルギー、縦軸に $\frac{P}{B \cdot F(B\rho)}$ をプロットした。電子線のエネルギー測定において見積られる最大誤差は士0.3MeVであった。

3. 実験結果

Table 2において、第1列の Nominal energy

Table 2. Measured paractical range in water and electron energy, and calculated collision energy loss in absorber, for electrons with nominal energies between 10 to 29MeV.

1 Nominal energy (MeV)	2 Scattering foil	3 Range in water, R_p (cm)	4 $(E_{\max})_0$	5 $(E_p)_0$ (MeV)	6 \bar{E}_0	7 ΔE_{col}
10	nonuse	4.7 (4.8)	9.7	8.6	8.3	0.95
	No. 1	4.6 (4.7)	9.7	8.5	8.2	1.23
	No. 2	4.5	9.7	8.1	7.9	1.31
	No. 3	4.3	9.6	8.0	7.5	1.58
	nonuse	7.4 (7.5)	14.6	13.5	12.9	0.98
15	No. 1	7.2	14.6	13.3	12.8	1.27
	No. 2	7.2 (7.2)	14.6	13.2	12.5	1.35
	No. 3	7.1	14.5	13.0	12.1	1.62
	No. 4	7.0	14.4	12.7	11.8	1.89
	nonuse	10.3 (10.5)	20.4	19.2	18.5	1.00
20	No. 1	10.2	20.3	19.1	18.1	1.29
	No. 2	10.1	20.3	19.0	17.9	1.38
	No. 3	10.0 (9.9)	20.3	18.8	17.5	1.67
	No. 4	9.9	20.3	18.4	16.5	1.96
	nonuse	13.4 (13.2)	25.9	24.8	24.1	1.02
25	No. 1	13.2	25.8	24.7	23.3	1.91
	No. 2	13.1	25.8	24.4	22.6	1.40
	No. 3	13.0	25.8	24.2	21.9	1.70
	No. 4	12.9 (12.7)	25.7	23.7	21.4	2.00
	nonuse	15.2 (15.1)	29.7	28.6	28.1	1.03
29	No. 1	15.2	29.7	28.5	27.7	1.33
	No. 2	15.0	29.7	28.4	27.3	1.42
	No. 3	14.8	29.7	28.2	26.6	1.72
	No. 4	14.7 (14.5)	29.7	27.7	25.9	2.02

はベータトロン装置のメータが指示するエネルギー値である。第2列にはこの実験に用いた scattering foil (Table 1 参照) を示す。このような電子線について前記 2.a の方法で得られた実用飛程の測定値を第3列に示す。同列の括弧内の値は、ファントム表面を Fig. 1 の A 点のまま電離箱線量計を移動させて測定した深部電離量百分率曲線にもとづいて得られた実用飛程である。この値と前記 2.a の方法による値とは実験誤差の範囲内で一致した。

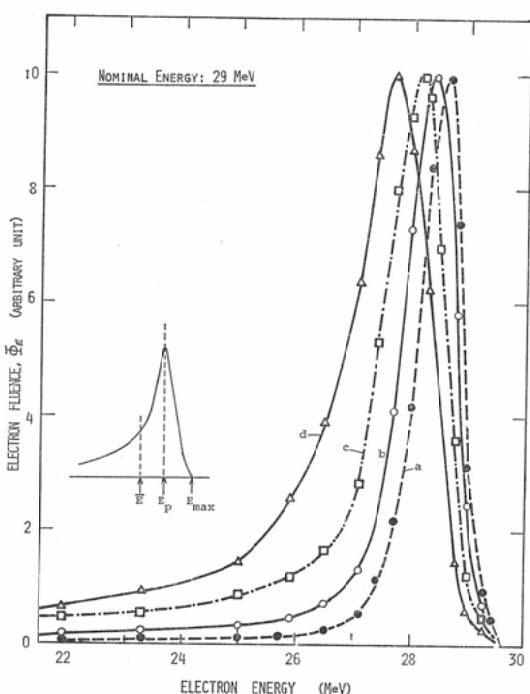


Fig. 2. Distribution of electron fluorescence in energy, Φ_E , as a function of electron energy, E , at the point A shown in Fig. 1, for nominal energy of 29 MeV. Curve a was obtained without scattering foil. Curves b, c and d were obtained with No. 2, No. 3 and No. 4 scattering foils, respectively.

ファントムに入射する電子線のスペクトルは前記 2.b の方法によつて測定された。Fig. 2 は Nominal energy が 29 MeV の場合の測定例であり、電子線のエネルギーに関するフルエンスの分布を示す。この分布にもとづいて、最高エネルギー

E_{\max} および最頻エネルギー (most probable energy) E_p の値が決められた (Fig. 2 の模式図参照)。また、平均エネルギー \bar{E} は測定されたフルエンス Φ_E の分布を用い、(1)式で計算された³⁾。

$$= \bar{E} \frac{\int_0^{E_{\max}} E \cdot \Phi_E \cdot dE}{\int_0^{E_{\max}} \Phi_E \cdot dE} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

この実験ではファントム表面に入射する電子線のスペクトルが測定され、 E_{\max} 、 E_p および \bar{E} が評価された。これらを $(E_{\max})_0$ 、 $(E_p)_0$ および \bar{E}_0 で表わしファントム表面の入射電子線に関する量であることを明記する。測定値を Table 2 の第4～6列に示す。 $(E_{\max})_0$ は scattering foil の種類に関係なくほぼ一定であつた。しかし、 $(E_p)_0$ および \bar{E}_0 は scattering foil の厚さの増加に伴なつて減少した。

Table 2 に示す測定値にもとづき、電子線のエネルギー (MeV 単位) と水中の実用飛程 R_p (cm 単位) との関係を Fig. 3 にプロットする。Fig. 3 に示されるように、 $(E_{\max})_0$ と R_p の関係および \bar{E}_0 と R_p の関係は何れも単一の一般式で表示できないことが判つた。しかし、 $(E_p)_0$ と R_p の関係は (2)式により近似できる。

$$R_p = 0.53(E_p)_0 + 0.20 \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

4. 考 察

(1) 電子線の加速エネルギー E_a の推定

この実験において、加速管の電子線出射窓は $0.15 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ のガラス、透過型モニタ電離箱の壁は $0.24 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ のルサイト、また空気層は 90 cm で $0.12 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ であつた。さらに、Table 1 に示す scattering foil が用いられた。電子線がこれらの物質を通過する際の衝突エネルギー損失 ΔE_{col} の計算値^{1,3)}を Table 2 の第7列に示す。電子線の加速エネルギー E_a は、 $(E_p)_0$ と ΔE_{col} の関係を用い、 $\Delta E_{\text{col}} \rightarrow 0$ に対する $(E_p)_0$ の外挿値として求められる (Fig. 4)。結果を Table 3 の第2列に示す。この場合、次の近似式³⁾ が成り立つ。

$$(E_p)_0 \approx E_a - \Delta E_{\text{col}} \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

したがつて、ある電子線について $(E_p)_0$ および

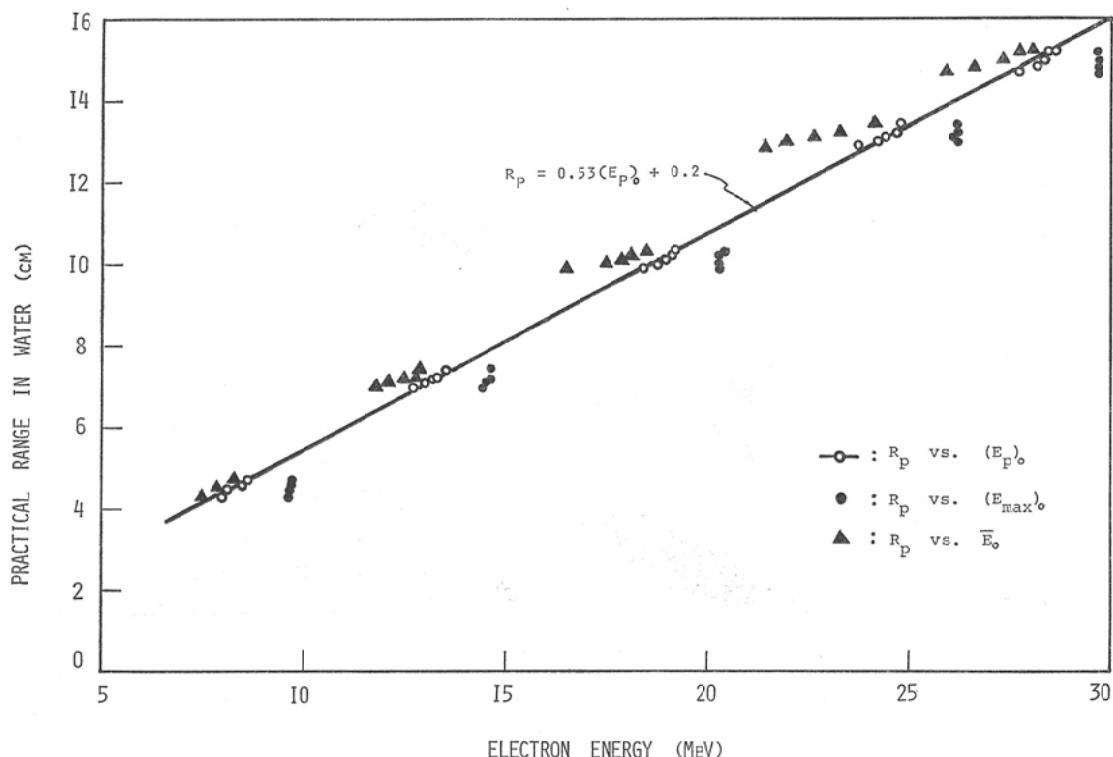
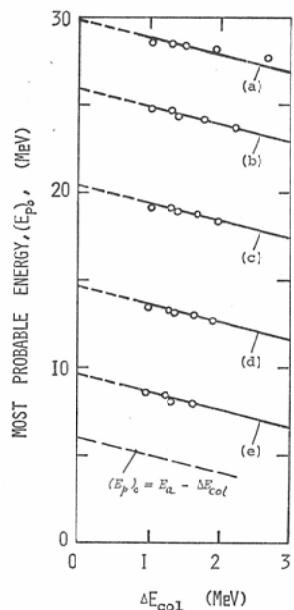


Fig. 3. Relationships between practical range and electron energy, for 10 to 30 MeV electrons.

Fig. 4. Extrapolation of $(E_p)_0$ for $\Delta E_{\text{col}} \rightarrow 0$. Nominal energy of electrons: (a) 29 MeV, (b) 25 MeV, (c) 20 MeV, (d) 15 MeV, (e) 10 MeV.Table 3. Extrapolated values of energy and practical range in water for $\Delta E_{\text{col}} \rightarrow 0$, for electrons with nominal energies between 10 to 29 MeV.

1	2	3
Nominal energy (MeV)	E_a (MeV)	$(R_p)_a$ (cm)
10	9.6	5.3
15	14.6	7.7
20	20.4	10.8
25	25.8	13.9
29	29.8	15.8

ΔE_{col} が知られれば加速エネルギー E_a は (3)式によつて推定できるであろう。

同様に、 $\Delta E_{\text{col}} \rightarrow 0$ に対する実用飛程の外挿値 $(R_p)_a$ を求めた。結果を Table 3 の第 3 列に示す。Table 3 の第 2 列と 3 列の対は加速管内とフ

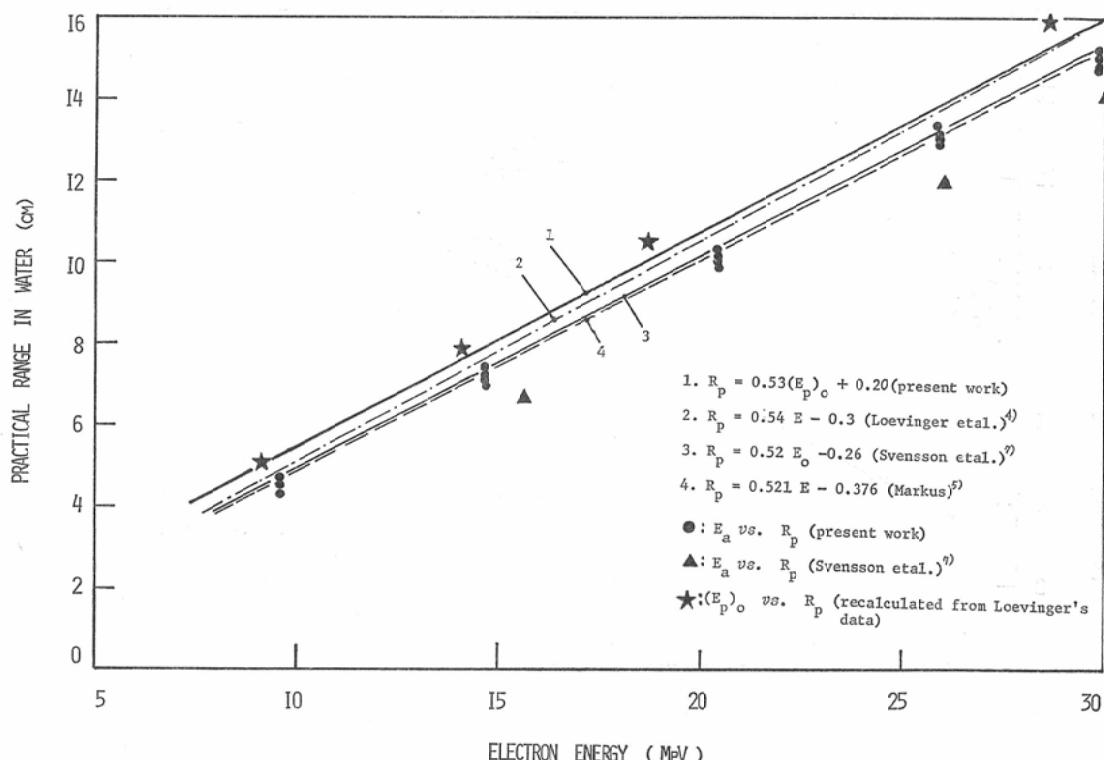


Fig. 5. Comparison of experimental results concerning energy-range relation, for 10 to 30 MeV electrons.

アントムの間に吸収体のない場合の電子線エネルギーと実用飛程の関係を示唆する。

(2) $(E_p)_0$ と R_p の関係

実験結果の項で述べたように、 $(E_p)_0$ と R_p の関係は (2)式で近似される。しかも、(2)式は通常の scattering foil を用いる限り何れの場合にも適用できる一般式であるから実際に便利であろう。しかし、他の著者の結果と比べると相違がみられる。これについて考察する (Fig. 5)。

Svensson ら⁷によると、 E_0 (アントム表面の電子線エネルギー) と R_p の関係は Fig. 5 の直線 3 で示される。この場合、しきいエネルギー測定法にもとづいて E_a が校正され、 E_0 は $E_a - \Delta E_{col}$ として計算された。したがつて、この E_0 は $(E_p)_0$ に相当し、直線 3 は $(E_p)_0$ と R_p の関係を与える筈である。しかし、著者らの直線 1 に一致しない。同一の R_p に対して直線 3 によれば $(E_p)_0$ が

約 1 MeV 過大に評価される。

Loevinger ら⁴によると、 E_a と R_q の関係が Fig. 5 の直線 2 で与えられる。この場合、 E_a は (γ, n) 反応のしきいエネルギーで校正された。また、scattering foil および空気層の厚さが指定されているので、われわれはこれらの吸収体による ΔE_{col} を再計算し $(E_p)_0 = E_a - \Delta E_{col}$ (前記(3)式) によって $(E_p)_0$ を求めた。この $(E_p)_0$ と R_p の関係は Fig. 5 の星印で示される。これらを直線 1 と比較すると、同一の R_p に対し 20 MeV 以上のエネルギー域では $(E_p)_0$ が過少に評価される。

$(E_p)_0$ の評価について不一致の生ずる原因は電子線エネルギーの測定法の相違によるものと思われる。これについて今後さらに検討する必要がある。

(3) E_a と R_p の関係

Fig. 5において、直線 2 および 4 はそれぞ

Loevinger ら⁴⁾および Markus⁵⁾の実験式で与えられる電子線エネルギーと実用飛程との関係を示し、原著によれば E_a と R_p の関係であるが両者は一致しない。また、Svensson ら⁶⁾の実験値 (Fig. 5 の三角印) もこれらの両直線に一致しない。われわれの実験結果 (Fig. 5 の円印) では、同一の E_a に対し scattering foil の厚さが増すと R_p が減少し、特定の場合以外は直線 4 に一致しない。

これらの不一致は加速管内とファントムの間に存在する吸収体の違いによるものであり、 E_a と R_p の関係が唯一の近似式で与えられないことを示唆する。Loevinger らおよび Markus の実験式は特定の吸収体の場合にだけ適用される E_a と R_p の関係であろう。したがつて、これらの実験式の利用に関する ICRU Report 21³⁾の記述注) は適切でないと考えられる。

5. 結論

マグネチックスペクトロメータを用いて電子線のスペクトルを測定した。また、電離箱線量計を用いて水中における電子線の実用飛程を測定した。これらの実験結果にもとづき、電子線のエネルギーと実用飛程の関係について次の結論を得た。

(1) ファントム表面における電子線の最頻エネルギー (E_p)₀ と水中の実用飛程 R_p との関係は (2)式で近似できる。電子線がファントムに達するまでに通過する物質中の衝突エネルギー損失 ΔE_{col} が 2 MeV 程度以下ならば、10~30 MeV 電

注) (イ) minimum absorber ならば、Markus の式を用いて single-valued surface energy E_0 が決められ、 E_0 と ΔE_{tot} の和として E_a が計算できるであろう。(ロ) some scattering foil を用いる場合、Markus の式による計算値は (E_p)₀ に近いであろう。(ハ) special thickness of scattering foil を用いる場合、Loevinger らの式で \bar{E}_0 が計算できる。

子線について (2) 式はほぼ成立する。したがつて、通常の治療条件 (ただし照射野は 10 cm × 10 cm とする) で R_p を測定すれば (2) 式によつて (E_p)₀ が評価できる。

(2) ファントム表面における電子線の平均エネルギー \bar{E}_0 と R_p の関係を唯一の近似式で示すことはできない。

(3) 電子線がファントムに達するまでに通過する物質中の衝突エネルギー損失 ΔE_{col} が 2 MeV 程度以下ならば、ファントム表面における電子線の最高エネルギー (E_{max})₀ は加速エネルギー E_a にはほぼ一致する。

(4) E_a と R_p の関係は唯一の近似式で与えられない。しかし、ある治療条件で R_p が測定されると、(2)式により (E_p)₀ が決められ、さらに (3)式によつて E_a が推定できる。

本研究の要旨は第26回物理部会 (昭和48年10月) において発表した。また、本研究は厚生省がん研究助成金の援助を受けたことを記し感謝の意を表する。

文 献

- 1) Berger, M.J., and Seltzer, S.M.: NASA SP-3012, Natl. Aeronautics and Space Administ., Washington, D.C., 1964.
- 2) 平岡, 川島: 日本医学会誌 31 (1971), 96 (抄).
- 3) ICRU: ICRU Report 21, Radiation Dosimetry; Electrons with initial energies between 1 and 50 MeV, ICRU Publication, Washington, D.C., 1972.
- 4) Loevinger, R., Karzmark, C.J., and Weissbluth, M.: Radiology 77 (1961), 906—926.
- 5) Markus, B.: Strahlentherapie 116 (1961), 280—286.
- 6) Siegbahn, K.: Alpha-, beta- and gamma-ray spectroscopy, p. 83, appendix 2 (B), North Holland Publishing Company, Amsterdam, 1965.
- 7) Svensson, H., and Hettinger, G.: Acta Radiol. Ther. Phys. Biol. 10 (1971), 369—384.