



Title	高エネルギー(10~29MeV)電子線X線遮蔽について
Author(s)	野田, 博治
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1964, 24(4), p. 387-394
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/17883
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

高エネルギー(10~29MeV)電子線 X線の遮蔽について

放射線医学総合研究所 物理研究部
野田博治

(昭和39年6月8日受付)

Fundamental Research on High Energy Radiation Shielding
by

Hiroji Noda
Physic Division, National Institute of Radiological Sciences
250, Kurosuna-cho, Chiba-Shi, Japan

Using the electron beam and X-rays of energy of 10-29 MeV Betatron for the medical uses, the experiment for the shielding purpose has been made.

The practical range of electron in various materials are measured to examine the atomic number of materials in range-energy relation. Following result, the practical range generally agree with the calculation which include the effect of multiple scattering of electrons in energy of 10-20 MeV, but in energy of above 25 MeV the large difference between the experiment and calculation is observed.

The intensity and angular distribution producing during the stopping of the electrons in various materials are measured to investigate the function of atomic number and energy. Its result shows that the bremsstrahlung intensity of forward direction is generally independent of the atomic number and of the energy of electrons, and the intensity of 90° direction is related with atomic number in exponential function.

When the water phantom is irradiated by the electron beam, the energy distribution of bremsstrahlung in each direction for the phantom is obtained by the attenuation measurement of Pb absorber.

The energy build-up factor in Al, Fe, Pb are obtained by the attenuation measurements of energy of 29 MeV X-ray.

I. 緒言

近年ベータトロン、線形加速器等が医学に利用されることが多くなつてきた。加速器を使用した放射治療については物理的な観点からの報告は Laughlinによるものその他に数多くある¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。又その場合の放射線遮蔽については NBS Hand book 55の他に 2.3見られる²⁾⁵⁾⁶⁾。ここでは東芝

製ベータトロン(31MeV)より発生する10~29 MeV のエネルギーの電子線、X線について遮蔽のための基礎的な実験を行なつたので報告する。

II. 研究目的

(1) 電子線の実用飛程
単一のエネルギーの電子が物質中を通過するときに、その電子の数は物質の厚みとともに減つて

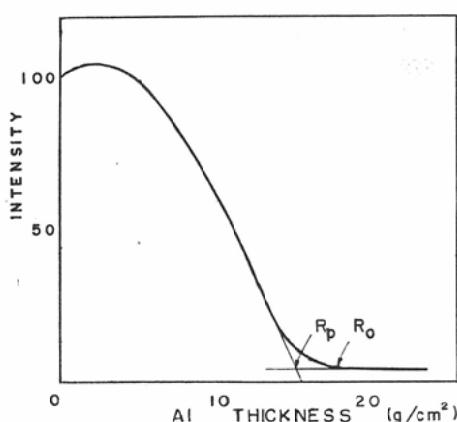


Fig. 1. Aluminum absorption curve for electron of 29 MeV energy, showing the linear fall-off which extrapolates to the background at the practical range R_p . The maximum range is R_0 .

いく。それで通過する電子の数（強度）を厚みの関数としてプロットすると飛程の終りの方で直線的に急激に減少し、それから尾を引いてバックグラウンドとなる。

この尾を引いた部分（これは電子のストラッギングによるものである）が消えるところが物質の中で多重散乱も、ストラッギングも、radiation loss をもうけないところのわずかの電子による飛程である。これが absolute maximum range (R_0) といわれるものである。これは Collision energy loss の逆数をエネルギーで積分することにより計算される。

$$R_0 = \int_0^E \frac{dE}{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{ion}} \quad (1)$$

radiation loss は数10MeV 以下ではこの R_0 にほとんどきていない。実験的には曲線の直線部分とバックグラウンドとを外挿する点が便利である。この点が practical maximum range 実用飛程 (R_p) といわれるものである⁷⁾。 R_0 と R_p との差は主として電子の物質中の多重散乱によるものであり平均の deflection の角度の Cosine に關係したものである。この効果により物質中の電子線の g/cm^2 で表わす実用飛程はエネルギー範囲によつてその物質の原子番号 Z に対する依存

性が異なつてくる。10KeV 以下のエネルギーでは測定の技術によるが大体飛程はすべての物質の中で同じである⁸⁾⁹⁾。又40～160KeV のエネルギー範囲でも大体物質の原子番号に依存しない¹⁰⁾。約 200KeVあたりより物質による差が生じるが、1, 2 MeV まではあまり大きい相違はない¹¹⁾。エネルギーが約 3 MeV 以上になると電子の多重散乱の効果により実用飛程は最大飛程より小さくなり物質による差が大きく生じる¹²⁾。ここでは 10～29MeV のエネルギー範囲のベータトロンの電子線の実用飛程とエネルギーの関係の中に物質の原子番号との依存性を検討する。

(2) 制動輻射線

電子線をいろんな物質に照射したときに、その物質より発生する制動輻射線の強度は Bethe-Hitler の理論によれば非常にうすいターゲットに対してはその物質の原子番号の 2 乗に比例する。厚いターゲットに対しては原子番号の 2 乗ではなく 1 乗に比例する。しかしながら Loevinger, et al¹³⁾, Ward, Dolphin¹⁴⁾ によれば高エネルギーの電子線を飛程以上の厚さの物質に照射したときに生じる前方方向の制動輻射線の強度は物質の原子番号に依存しない。

電子線を飛程以上の厚さのいろんな物質に照射したときに生じる制動輻射線の度を前方方向とともに 90° 方向の強度の測定を行ない、原子番号との関係を求め、さらに制動輻射線のエネルギー・ペクトルを物質の原子番号と電子線のエネルギーとの関係に調べる。

(3) X線のビルドアップ係数

ビルドアップ係数 (Buildup factor) は物質の中のある点 (μx) でのすべての photon (2次線を含む) と 1 次線だけの量の比である。photon の強度を測定する測定器に対してはエネルギー・ビルドアップ係数、エネルギー吸收を測る線量計を用いるときには線量ビルドアップ係数と呼ばれる。X, γ 線の線束を絞り、一次線だけの減弱の測定 (理想的なもの)

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

と、広い線束について測定した

$$I^* = I_0^* B(\mu x) e^{-\mu x}$$

からビルドアップ係数B (μ_x) はそれらの比として求められる。

$$B (\mu_x) = \frac{I^*}{I_0^*} / \frac{I^o}{I_0^o}$$

ビルドアップ係数のモーメント法による計算は Spencer, Fano¹⁵⁾, Goldstein, Wilkins¹⁶⁾ によつてエネルギー10MeVまで行なわれて、実験とも一致している¹⁷⁾¹⁸⁾。

10MeV以上の高エネルギーのX線についてはその物質中の減弱よりビルドアップ係数は大体1に近いと思われるが⁵⁾、ここでは29MeVのX線について測定し実験式について検討する。

III. 実験方法

電子線照射により生じる制動輻射線の測定は第2図のような実験配置で行なつた。照射対象物は永ファントム ($40 \times 30 \times 25\text{cm}$) と、 $20 \times 20\text{cm}$ の大きさのアクリル樹脂、Al, Fe, Cd, Pb等の物質である。電子線の絞りには直径4.5cmの孔をあけた厚さ7.8cmのアクリル樹脂を用い、これをドーナツの中心から54cmの所においてた。それで電子線の照射野はドーナツの中心から100cmの所で約8cm ϕ になつた。測定器は容量約600ccのアクリル樹脂壁の円筒空気電離箱である。前面の壁の厚みは電子線のエネルギーによって適当に交換した。電離箱の前面を除いた周囲は5cm厚さの鉛ブロックで囲んだ。電離箱の電離電流は20mの長さのケーブルで結んだ振動容量電位計で測定した。この実験の場合はベータトロンのドーナツの遮蔽

として前面に鉛ブロックを積み上げただけであるので多少漏れて出る放射線が測定に混入した。それで電離箱を全部鉛ブロックで囲んだときの値をバックグラウンドとしてそれぞれの測定値より差引いた。

電子線の実用飛程の測定は第3図のような配置で行なつた。電子線の絞りは第2図と同様のものである。実用飛程は電子線の照射野にはよらないが、あまり電子線のビームを小さく絞ると電子線強度の曲線は指数関数的になり実際には飛程の測定は困難になる¹⁹⁾。電子線の強度は直径20mm、間隔5mmのアルミニウム極板による空気電離箱で測定した。

X線の物質中の減弱の測定は第3図の電子線用の電離箱の代りにX線用の電離箱をおりた。この場合測定器として Victoreen のコンデンサー

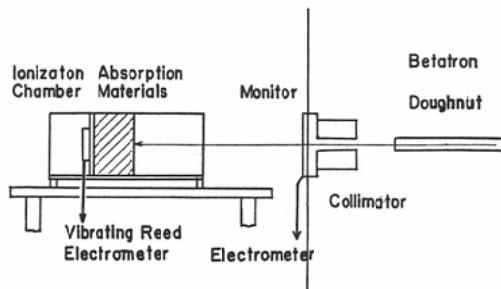


Fig. 3. Arangement for measurments of practi-
cal range of electron and of X-rays attenu-
ation.

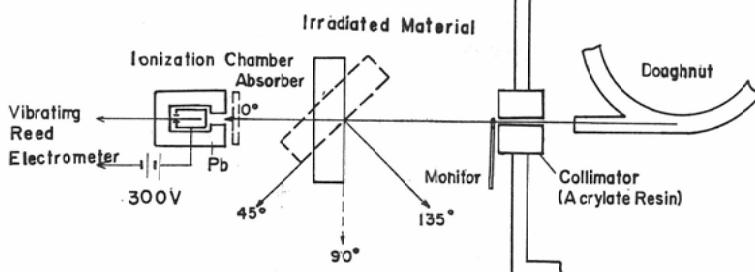


Fig. 2. Arangement for measurements of bremsstrahlung produced in various materials irradiated by electron beam.

エンバー 552を使用した。モニターはベータトロンに附属したものを使つた。この実験配置ではベータトロンのドーナツの周から漏れ出る放射線はほとんど測定に影響しない状態である。

IV. 実験結果と考察

1. 電子線の実用飛程

ベータトロンのエネルギー10~29MeV の電子線について Al, Fe, Cd, Pb 等の物質中の実用飛程を第1図の様な測定から求めて、エネルギーと飛程の関係を第4図の点で示す。

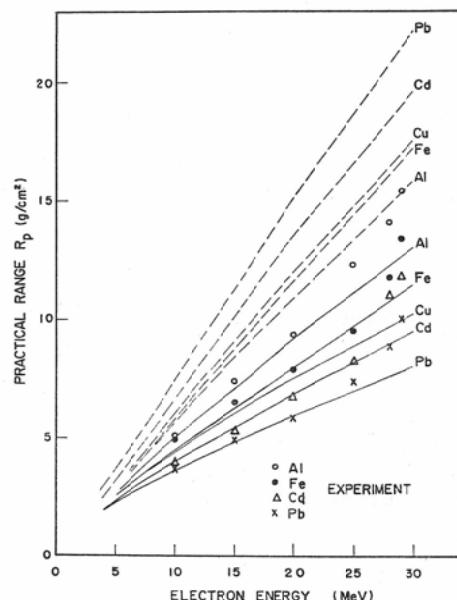


Fig. 4. Range-energy relation for various materials.

この結果によると、実用飛程 (g/cm^2) とエネルギー29MeV では直線的関係よりはずれた大きい値となつた。同一エネルギーでは物質による相違があり、エネルギーが増すとともに物質の原子番号の高いものと低いものとの差が大きくなつてゐる。

第4図の点線は(1)式より Fowler et al²⁰ の計算方法で Heitler によって与えられる理論的エネルギー損失 (collision lossだけ) の積分をそれぞれの物質について行なつたものである。実験値はこれらの計算値よりずっと小さくなつてゐる。10MeV 以下のエネルギーについては Spen-

cer²¹, Nelms²², の計算があるが、同様に実験も小さい値になつてゐる⁹。第4図の実線は12MeV までのエネルギーで行なつた Herford, Swann¹² の計算方法を使って29MeV までそれぞれの物質について行なつた計算結果である。これは電子の物質中での多重散乱の効果を入れたものである。その計算式は Fowler の計算式に電子の多重散乱の項をかけたもので、結果は次のような指數積分の形になり数値計算ができる。

$$R_p(E) - R_{p_0} = \frac{1}{\xi\gamma} [E_i(\ln \gamma W) - E_i(\ln \gamma W_0)] \\ \times [1 - \alpha k \{E_i(-\ln \gamma W) - E_i(-\ln \gamma W_0)\}] \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここで

$$W = E + mc^2 \quad W: \text{電子の全エネルギー} \\ \xi = 6\pi r_0^2 N \quad mc^2: \text{電子の静止エネルギー}$$

$$\gamma = (2mc^2 I_0^2 Z^2)^{-\frac{1}{3}} \quad r_0^2: \text{古典電子半径}$$

$$k = E_s^2 \gamma / \xi \quad X_0$$

N: 単位体積中の物質の原子数

α : ここで定めるべき常数

I_0 : 平均イオン化エネルギー

R_{p_0} : エネルギー E_0 における実用飛程の値

Z: 物質の原子番号: $E_s = \text{常数} (21.2 \text{ MeV})$

X_0 : radiation length (g/cm^2)

この場合 E_0 は $-(\frac{dE}{dx})_{\text{ion}}$ が Heitler によって与えられる相対論的近似になる様に十分大きく選らぶ必要がある。この場合次のような値をとつた。

	Al	Cu	Fe	Cd	Pb
E_0 (MeV)	1.53	3.79	2.0	2.0	2.0
R_{p_0} (g/cm^2)	0.7	1.92	0.88	0.75	0.59

この10~29MeV のエネルギー範囲では実用飛程は高い原子番号の物質中の方が低い原子番号のものより小さな値になる。それぞれの物質については電子の多量散乱の効果を入れた計算とは10~25MeV では大体合が29MeV でははずれてくる。

このことは電子の collision loss だけではなく radiation loss にもよるものと考えられる²³。制動輻射による radiation energy loss は10MeV 以下のエネルギーでは大体無視できるが、物質によつてちがうが、25MeV 以上のエネルギーの電子線ではこのエネルギー損失が主となり制動輻射線によつて電子のシャワーがつくられる。この効果を入れる場合は実用飛程は collision loss だけ

でなく定義できないので次の式のような平均の到達距離 (mean range)²⁴⁾ となると考えられる。

$$-\frac{dE}{dx} = \left(-\frac{dE}{dx} \right)_{rad} + \left(-\frac{dE}{dx} \right)_{coll}$$

$$R(E_0) = \int_{mc^2}^{E_0} dE / \left(-\frac{dE}{dx} \right) \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

2. 制動輻射線

15, 29MeV のエネルギーの電子線を飛程以上の厚みの Al, Fe, Cd, Pb 等の物質に照射した場合にその物質中でつくられる制動輻射線の強度を前方方向で測定すると第1表のようになつた。

Tabl. 1. Intensity of forward bremsstrahlung produced in various materials irradiated by electron beam of energy 15, 29 MeV.

29 MeV		15 MeV	
Material	Intensity	Material	Intensity
Aluminium	194	Aluminium	140
Iron	225	Iron	108
Copper	208	Cadmium	127
Cadmium	216		
Lead	200		

これによると、大体において物質によって変わらないような値になつていて。このことはLoeiven-ger, Ward, Dolphin らの実験と同じく物質の原子番号には依らないことがいえる。

電子線に直角方向の制動輻射線の強度を20, 29 MeV のエネルギーの電子線について測定し、物質の原子番号に対してプロットすると第5図のようになつた。横軸は原子番号Zを対数目盛でとつたのである。この結果より直角方向の制動輻射線の強度Bと物質の原子番号との間に次のような関係式を得た。

$$B = 2 \log_e Z + C \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

C: constant

いろんな物質に電子線を照射したときにつくられる制動輻射線の大体のエネルギースペクトルを知るために電離箱の前面に鉛の吸収板をおいて減弱曲線をつくり、このカーブの様子から推定しようとした。この結果は第6図で示すように15MeV のエネルギーの電子線では制動輻射線のスペクトルは物質によつて差はない。

29MeV のエネルギーについては銅の吸収板を

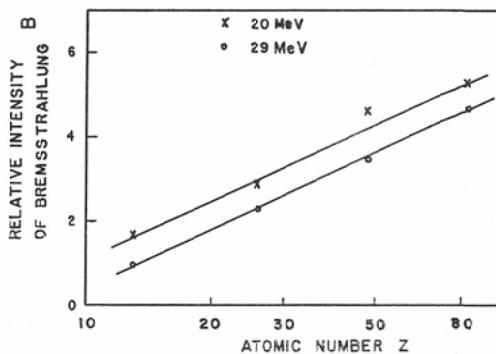


Fig. 5. Relation between bremsstrahlung intensity of 90° direction for electron beam and atomic number of materials.

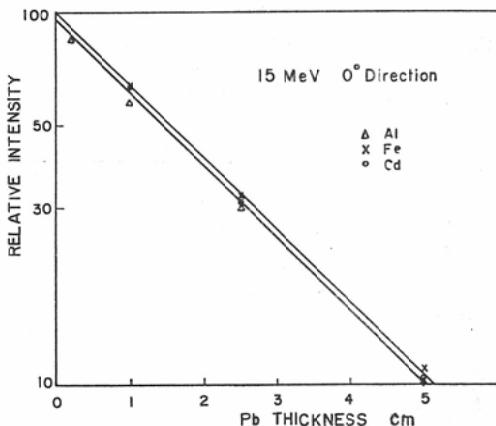


Fig. 6. Pb attenuation of forward bremsstrahlung intensity produced in various materials by irradiation of 15 MeV electron.

おいて減弱曲線をつくると第7図が示すように大体物質によつて差はないが、コンクリートだけは少し違がつている。

電子線のエネルギーを変えてアクリル樹脂に照射したときの制動輻射線の強度は15~25 MeV では大体変わらないが、10, 29 MeV では少しづがつている。

直角方向では第8図のように物質による違いはない。

直角 (90°) 方向で鉛について電子線のエネルギーを変えた場合は第9図のように 15~29 MeV では大体同じだが、10 MeV では少し違つている。これらのことから制動輻射線のエネルギー

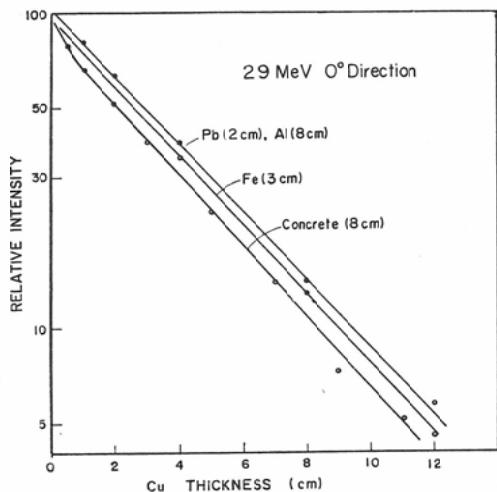


Fig. 7. Cu attenuation of forward bremsstrahlung intensity produced in various materials by irradiation of 29 MeV electron.

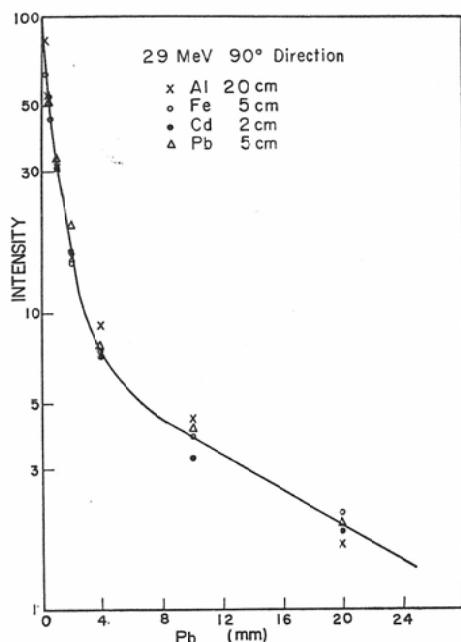


Fig. 8. Pp attenuation of 90° direction bremsstrahlung intensity produced in various materials by irradiation of 29 MeV electron.

ベクトルは物質にも電子線のエネルギーにも（この場合10MeVだけ多小ちがつてゐるが）変らないことになる。このことは Wyard²⁵⁾による制動輻射線の強度分布の形は大ざつぱにいつて物質の

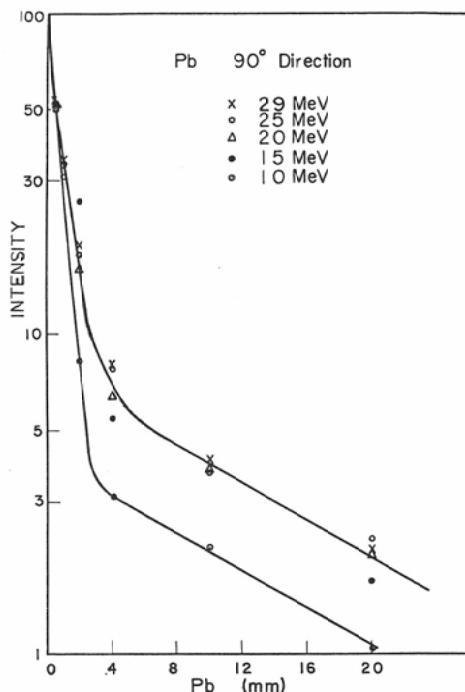


Fig. 9. Pb attenuation of 90° direction bremsstrahlung intensity produced in Pb by irradiation of electrons of different energy.

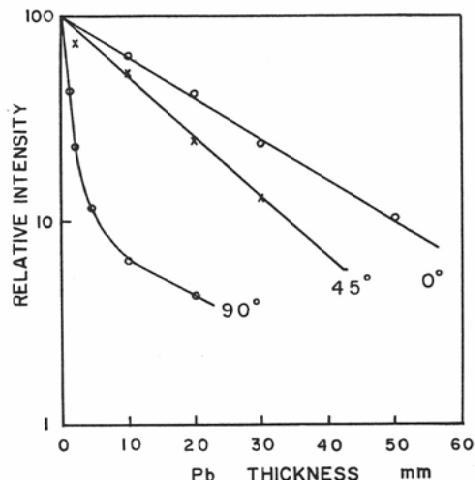


Fig. 10. Pb attenuation of bremsstrahlung intensity produced in water phantom by irradiation of 29 MeV energy electron.

原子番号と電子のエネルギーによらないということに一致する。

水ファントムより生じる制動輻射線のエネルギー

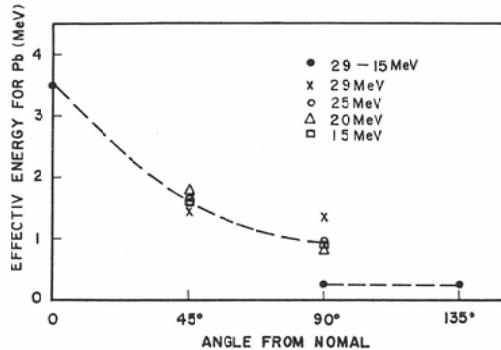


Fig. 11. Angular distribution of energy of bremsstrahlung produced in water phantom by irradiation of electron beam.

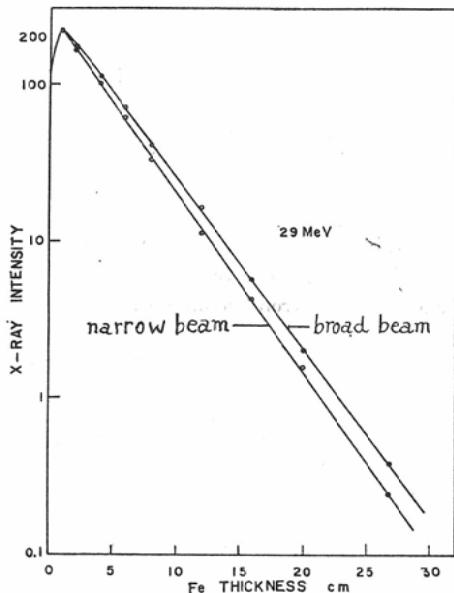


Fig. 12. Fe attenuation curves of broad and narrow beam of 29 MeV X-ray.

スペクトルの角度分布は第10図のような鉛の減弱曲線から鉛に対する実効エネルギーをとると第11図のようになつた。

これによると照射電子線エネルギーによってスペクトルは変わらないと云えるが、鉛に対する実効エネルギーであるので（最も吸収係数が小さいところが約3.5MeV），実際のスペクトルとは違つてゐるかもしれない。90°方向では鉛の減弱曲線に低エネルギーの部分が現われるが、これは制動輻射線のコンプトン散乱線が増加したものと思わ

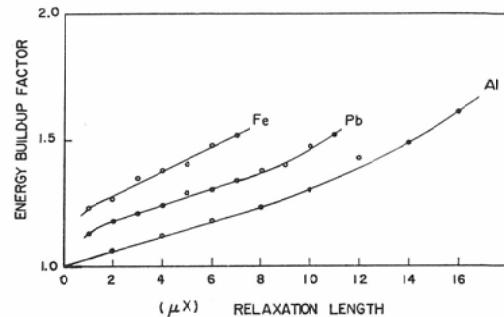


Fig. 13. Energy build-up factor for 29 MeV X-ray as function of shield thickness x .

れる。この90°以上の方向で認められる散乱線は約5mmの鉛で約1/10となり、鉛10mm以上でバツクグラウンドとなる。

3. X線のビルドアップ係数

エネルギー-29MeVのX線の $20 \times 20\text{cm}$ の大きさのAl, Fe, Pb等の物質による減弱をX線用の絞りを開いた場合と最小限に絞つた場合（照射野は $14 \times 13\text{cm}$ と $7 \times 4.6\text{cm}$ について測定した結果は例えればFeについては第12図のようになつた。

これよりエネルギー-29MeVのX線の線吸収係数はそれぞれ $\mu(\text{Al}) = 0.59\text{cm}^{-1}$, $\mu(\text{Fe}) = 0.267\text{cm}^{-1}$, $\mu(\text{Pb}) = 0.8\text{cm}^{-1}$ となつた。

これから(2)式で与えられるエネルギー-ビルドアップ係数を求める第13図のようになつた。

この図の示す結果によるとAlの場合は厚みが小さい $\mu x < 10$ なるところではエネルギー-ビルドアップ係数Bは

$$B = 1 + 0.03\mu x \quad \dots \dots \dots (6)$$

という形で表わされる。 $\mu x > 10$ で厚くなると直線的関係からはずれて大きくなる。

Fe, Pbについても厚みが小さいところ ($\mu x < 10$) では大体Bと μx は直線的な関係になる。

Taylor²⁶⁾によるとビルドアップ係数は2つの指數関数の和として表わされ

$$B(\mu x) = A_1 e^{-a_1 \mu x} + A_2 e^{-a_2 \mu x} \quad \dots \dots \dots (7)$$

$$A_2 = 1 - A, \quad a_1, a_2: \text{常数}$$

μx が小さくこれらの常数が小さいときは近似的に

$$B(\mu x) = 1 + Ax \quad \dots \dots \dots (8)$$

となる。実験の結果は大体この(8)式の形にな

る。

エネルギー・ビルドアップ係数の物質の原子番号との関係は Fe などの中位の原子番号のものが最も大きいビルドアップ係数を示す。これは μ_x が大きくなるにつれてこの差が大きくなると思われる。

V. 結 語

(1) 電子線の実用飛程 (g/cm^2) はエネルギー -20MeV 位までは電子の多量散乱の補正を加えた計算と一致したが、 25MeV 以上になると実験値は大きくなる。これは電子線の制動輻射によるエネルギー損失によって電子のシャワーがつくられ、見かけ上飛程が大きく測定されたと思われる。このようにエネルギーが高くなると電子の吸収曲線の直線部分とバックグラウンドとの外挿点に相当な誤差が生じる。それで 25MeV 以上の電子については最初に定義した実用飛程を適用するには困難である。

(2) 電子線を物質に照射したときに生じる制動輻射線の強度とエネルギー分布は測定器又は測定方法によって誤差を生じる。又線量を測定するためには高エネルギーX線のエネルギー吸収を測るものが必要である。

(3) 高エネルギーX線のビルドアップ係数の測定についても測定器又は測定方法によってちがつてくる。

参考文献

- 1) Von K. Gund: Die physikalischen Eigenschaften der Strahlenbündel der 15-MeV Elektronensleuder der Siemens-Reiniger-Werke. Strahlentherapie 92, 506 (1953). — 2) J.S. Laughlin: Use of a 23-MeV Medical Betatron. Nucleonics Vol. 8, No. 4, 5 (1951). — 3) J.S. Laughlin: Some Physical Aspects of Electron Beam Therapy. Radiology 60, 165 (1953). — 4) R. Loevinger, C.J. Karzmark, M. Weissbluth: Radiation Therapy with High-Energy Electron. Radiology 77, 906 (1961). — 5) Protection Against Betatron-Synchrotron Radiations up to 100 Million Electron Volts. NBS Handbook 55 (1954). — 6) M. McGregor: X-ray Production with Linear Accelerators. Nucleonics Vol. 17, No. 2, 104 (1959). — 7) L. Katz, S. Penford: Range-Energy

- Relations for Electrons and the Determination of Beta-Ray End-Point Energies by Absorption. Rev. of Mod. Phys. 24, 28 (1952). — 8) H. Kanter, E.J. Sternglass: Interpretation of Range Measurements for Kilovolt Electrons in Solid. Phys. Rev. 126, 620 (1962). — 9) J. Holliday, E. Sternglass: New Method for Range Measurements of Low Energy Electron in Solid. J. of Appl. Phys. 30, 1428 (1959). — 10) K. Guberman, A. Flammersfeld: Die Reichweite von Elektronen und Positronen kleiner Energie in Kupfer Silber und Gold. Z. Physik. 156, 179 (1959). — 11) H.H. Seliger: Transmission of Positron and Electrons. Phys. Rev. 100, 1029 (1955). — 12) F.L. Herford, C.P. Swann: The Maximum Range of High Energy Electrons in Aluminium and Copper. Phys. Rev. 78, 727 (1950). — 13) C.S. Wu: The Continuous X-rays Exited by the Beta-Particles of P^{32} . Phys. Rev. 59, 481 (1941). — 14) G. Ward, G.W. Dolyhin: Energy and Angular Distribution of X-rays Produced by 13 MeV Electrons at Thick Target Phys. Med. Biol. Vol. 4 No. 391 (1960). — 15) L.V. Spence, U. Fano: Penetration and Diffusion of X-rays Calculation of Spatial Distribution by Polynomial Expansion. Phys. Rev. 81, 464 (1951). — 16) H. Goldstein, J.E. Wilkins: U.S.A.E.C. Report NYO-3075 (1954). — 17) P.A. Roys: Penetration of 6-MeV Gamma Rays in water. Phys. Rev. 95, 911 (1954). — 18) C. Garrett, G.N. Whyte: Build-up Measurements on Cobalt-60 Gamma Radiation in Iron and Lead. Phys. Rev. 6095, 889 (1954). — 19) C.B. Decken: Tiefendosiskurven bei der Bestrahlung mit schnellen Elektronen in Abhängigkeit von der Energie und der Feldgratze. Strahlentherapie 101, 204 (1956). — 20) W.A. Fowler, C.C. Lauritsen, T. Lauritsen: Gamma-Radiation from Excited States of Light Nuclei. Rev. Modern Phys. 20, 1597 (1955). — 21) L.V. Spencer: Theory of Electron Penetration. Phys. Rev. 98, 1597 (1955). — 22) A.T. Nelms: Energy Loss and Range of Electrons and Positrons. N.B.S. Circular 577 (1958). — 23) R. Wilson: The Range and Straggling of High Energy Electrons. Phys. Rev. 84, 100 (1951). — 24) W. Heitler: "Quantum Theory of Radiation" (Oxford University Press). — 25) S.J. Wyard: Intensity Distribution of Bremsstrahlung from Beta-Rays. Proc. Phys. Soc. A 65, 377 (1952). — 26) B.T. Price, C.C. Horton, K.T. Sinney: "Radiation Shielding" Pergamon Press. 1957.