The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	種々の測定法による電子線の深部線量測定
Author(s)	尾内, 能夫; 都丸, 禎三; 入船, 寅二 他
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1970, 29(12), p. 1474-1483
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/15417
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

種々の測定法による電子線の深部線量測定

癌研究会癌研究所第6研究室（物理）
尾内能夫，都丸 禎三，入船 寅二，内田 勲
国立がんセンター放射線部
梅垣洋一郎，松川収作

（昭和44年7月9日受付）

Depth-Dose Measurements of High-Energy Electrons by Different Methods

by

Yoshio Onai, Teizo Tomaru, Toraji Irifune and Isao Uchida
Department of Physics, Cancer Institute, Tokyo
Yoichiro Umegaki and Shusaku Matsukawa
Division of Radiology, National Cancer Center Hospital

Depth-dose measurements of electron beams by the Siemens 18-MeV betatron were made with different dosimeters and phantoms. The dosimeters used were shallow and thimble chambers, photographic films, ferrous sulphate dosimeter, and radiophotoluminescent glass rod, and materials of the phantom were water, polystyrene, acrylic plastic, and MixDp.

The results obtained are as follows:

1. Measured values of effective density, which is defined by Loevinger *et al.* as the ratio of the penetration in water to the penetration in a given substance, are shown in Table 1. Polystyrene and MixDp are the nearest to water equivalent.

2. The polarity effect was observed in a shallow chamber as shown in Figs. 2 and 3. Readings with the ionization chamber should be made with both polarities and a mean taken, as electrons which come to rest in the collecting electrode and in lead give rise to a greater observed current with negative polarity.

3. The ionization chamber seems to be less suitable than the ferrous sulphate dosimeter for measuring the depth-dose curve of an electron beam, because of its greater dependence on the energy spectrum of the electrons. However, if the corrections for density effect are made for the chamber readings on the assumption that the average electron energy at a depth d is E_0 $(1\text{-}d/R_p)$, where E_0 and R_p are initial electron energy and extrapolated range of electron, respectively, the results are in good agreement with those from the chemical method (Fig. 7).

4. The parallel film gives a density too low in the build-up region, as shown in Fig. 6, and film dosimetry seems to be less accurate than by other methods. However, if some technical precautions are taken, films can give useful indications for the routine clinical dose distribution studies.

5. Depth-dose curve varies with the incident electron energy, field size, scattering foil, and others, but the variation of the surface dose relative to peak dose may be less than 10% provided that the incident electron energy is the same, even when different types of betatron are used (Fig. 11).

6. Absolute absorbed dose at the peak was determined with the Fricke dosimeter, using a G value of 15.5, assumed to be independent of energy. Conversion factors obtained for the Baldwin-Ionex chamber are shown in Fig. 12. These conversion factors are in good agreement with the factors for the Baldwin-Farmer dosimeters obtained by Almond *et al.* and by Matsuzawa *et al.*

I. 緒 言

電子線の深部線量の測定に関する報告は多いが，種々の測定法を用いて得られる深部線量を比較検討した論文は少ない[2)3)8)14)22)].

Loevinger ら[14)]は測定法によつて，得られる深部量曲線に差異のあることを報告している．すなわち，密度だけ考慮しても phantom による相違があること，film 法では film の線束に対する向き（平行か垂直か）によつて表面近くの分布に差があること，電離箱では極性効果があることなどをあげている．

電子線とX線を比較すると，電子線は散乱も吸収も大きいが，特に異なる点は電子のエネルギーが深さによつて著しく変化することである．このことは電離箱によつて深部線量を測定すると密度効果のために，測定した電離とその場所の組織の吸収線量の比が深さによつて異なることになる．実際に Loevinger ら[14)]および Wambersie ら[22)]は電離箱による深部量曲線と film 法および化学線量計によるそれとが異なることを報告している．電離箱による値に密度効果の補正を行なえば正しい深部量曲線が得られるが，その補正を正確にするためには各深部での電子のエネルギースペクトルを知る必要がある[13)]．これを決めることは困難であるから，固体または液体の線量計を用いて深部量曲線を測定し，電離箱との相違を比較することによつて真の吸収線量を推定することが必要となる．

Siemens の18 MeV betatron からの電子線を用いて，phantom の種類による深部量曲線の相違，電離箱の極性効果および film 法，Fricke の化学線量計，蛍光ガラス線量計ならびに大きさの異なる電離箱を用いて深部量曲線を測定し，それらの値を比較検討した．また，Fricke 線量計により最大線量となる深さでの吸収線量を測定し，^{60}Co γ線で較正された電離箱の電子線に対するrad/'r' 換算係数を求めた．さらに表面線量の測定結果を文献に報告されている結果と比較した．

II. 各種 phantom物質の実効密度

軟組織部の phantom として種々の物質が用いられているが，それらの物質で得た深部量曲線を水中での値に換算する必要がある．この換算のために，その phantom の深さに乗ずる係数を実効密度（effective density）とよんでいるが[14)]，この値を acryl（密度 $\rho=1.18$），polystyrene（$\rho=1.04$）および MixDp[17)]（$\rho=1.00$）について測定した．

方法は，MixDpに埋めこんだ東芝製の shallow type の電離箱（実効電離容積10mmφ×2mm）の上側（マイラーにアルミニウムを蒸着した薄膜，3 mg/cm^2）にこれらの phantom 物質をのせて深部量曲線を測定した．この電離箱の下面は polyethylene（5 cmφ×2 cm）で，これを5 cm厚の MixDp に埋めこんであるので，これらの物質による背後散乱が問題となる．そこで，指頭型電離箱（Baldwin-Ionex，6 mmφ×6 mm）を用いて，全部が MixDp の場合と電離箱の前面が MixDp で後面が acryl の場合の深部量曲線を比較し，1％以上の相違はないことを確めた．

電子線のエネルギー 5.5, 11.2および16.2 MeV について得られた実効密度を Loevinger らの値と比較して Table 1 に示す．電子線のエネルギーは水中の外挿飛程より Rp=0.52 E−0.3の式[19)]より求めた値である．Fig. 1 は各種 phantom について，その深さにこれらの実効密度を乗じて水中での深部量曲線に換算したものである．各深部についていずれの phantom による値もよく一致している．

III. 電離箱の極性効果

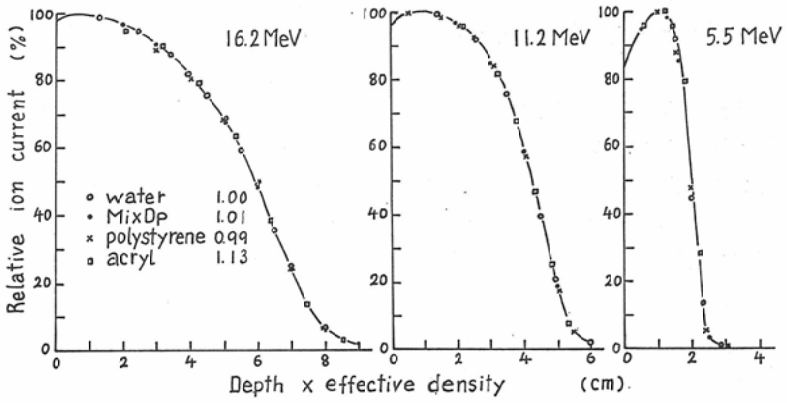
高エネルギーX線の場合には，電子平衡の成立していない領域において，電離箱の極性を変えると測定される電荷が異なるという極性効果（pol-

Table 1. Effective densities for various substances.

Material	Loevinger *et al.* 10—45 MeV				Authors 5.5—16.2 MeV
	Mass	Electron	Effective		Effective Experimental
			Calcd.	Exptl.	
MixD	0.97	0.99	0.95	0.94	—
MixDp	1.00	—	—	—	1.01
Polystyrene	1.04	1.01	0.97	0.965	0.99
Acrylic plastic	1.18	1.15	1.12	1.11	1.13
Water	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Calculated and experimental densities relative to water by Loevinger *et al.* are also shown.

Fig. 1. Depth-dose curves for electron beams in the four substances



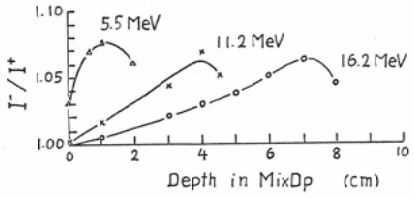
arity effect) のあることが理論的にも実験的にも確かめられている[9]，電子線の場合には表面近傍以外でも極性効果が認められている[3]．Laughlin[12]も述べているように，電子は飛程の終りでエネルギーを失ない静止するから，深部においてはそれらの電子の電荷も測定していることになり，電離容積が小さく電極面積の大きい電離箱では極性効果が表われる筈である．

前記 shallow type の電離箱を用いて，種々の深さについて極性効果を測定した．電圧は 500V である．結果を次に示す．

(1) Fig. 2に示すように，10 MeV 程度以上では表面近くでは極性効果は認められないが，深部では認められるようになり，飛程の終り近くで最も大きくなる．

(2) 10MeV 程度以下では表面においても極性効果が認められる．

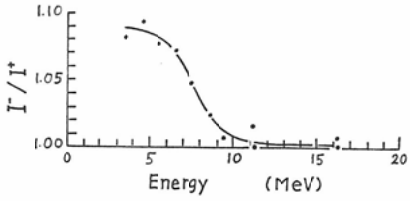
Fig. 2. Variation of polarity effect for high-energy electrons in a shallow chamber with depth



(3) 深部量が最大となる深さでの極性効果は Fig. 3に示すように，エネルギーが高くなると急激に減少し，10MeV 程度以上ではほとんど認められなくなる．

(4) 高圧側が負のときの方が電流が大きく（X線の場合と逆である），正のときと負のときの差の半分は電圧を印加しないときの電流と同程度

Fig. 3. Polarity effect at the peaks of depth-dose curves



である.

以上の結果より shallow type の電離箱による深部線量の測定結果は電極の極性を正および負に切換えて測定し，それらの平均値を電離電流とした.

IV. 各種測定器により得られる深部量曲線

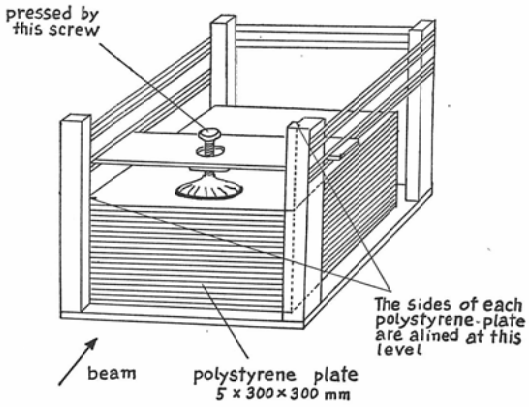
1. 測定器と測定方法

用いた測定器は shallow type および Baldwin-Ionex (6 mmφ×6 mm) の電離箱，X線フイルム (Kodak Type M), Fricke の化学線量計および東芝の蛍光ガラス線量計である.

(1) film は Cerenkov 輻射による感光を防ぐために，内面に黒のビニールカーボン塗料を塗つた2枚の polystyrene の間にはさんだ．この2枚の板はずれないように一方の板についている直径5 mm，長さ5 mmの棒を他方の板の穴にはめこむようになつている．また，film の位置を現像後確認するために板に小さな穴があけてあり，これより光を曝射する．filmをはさんだ2枚のpolystyrene の板を polystyrene phantom の間において，線束が film に平行および垂直になるようにして照射した．線束を film と平行にして照射する場合には Fig. 4 に示す潰物用を改良した圧縮装置で film と polystyrene の間に間隙ができないようにした．また，phantom の入射面を暗室でも平面にできるような工夫が施してある.

(2) Fricke線量計の溶液($FeSO_4(NH_4)_2SO_4 \cdot 6H_2O$ 1 mM, NaCl 1 mM の 0.8 N H_2SO_4 溶液) は，厚さ5 mmの polystyrene 板に直径3 cm，深さ2 mmの穴を掘りそれに入れた．phantom は polystyrene を用い，上記の板を目的の深さにはさんで照射した．吸光度の測定に際しては，照射液1 ml に 0.8 N H_2SO_4 液1 ml 当りに50mg

Fig. 4. Polystyrene phantom for photographic dose measurements



KSCNを溶かした液2 ml を加え，直ちに 474 mμ の吸光度を測定した．なお，ここで用いた polystyrene の容器には poisoning effect はみられなかつた[14].

(3) 蛍光ガラスは東芝製の1 mmφ×6 mmの rod を用いた．polystyrene の板に丁度ガラスが入る大きさのみぞを5個堀り，これにガラスを入れ，polystyrene phantom の間にはさみ，線束をガラス棒に垂直にして照射した.

2. 測定結果

(1) 電離箱による結果を Fig. 5 に示した．電離箱の空洞の前面までを深さとした．実線が shallow type, 破線が指頭型の電離箱で，空洞部の深さまたは直径はそれぞれ2 mmおよび6 mmであるが，空洞の前面までを深さとすると，大きさの異なる電離箱でも深部量曲線はほとんど一致する（電離箱以外ではその測定部の中心までを深さとした).

(2) film による結果を Fig. 6 に示した．film 法では同線量を与えても，film 面に対し線束が平行か垂直かで表面近くの黒化度が異なる．線束に直角においた場合の方が黒化度が大きく，その差は高エネルギーの電子線ほど著しくなる傾向にある.

この実験では film と polystyrene の板が密着するようにしたが，密着度が悪いと線束と平行においた filmでは表面近くの分布が著しく異なる.

Fig. 5. Depth-dose curves for electron beams measured with shallow (10mmφ× 2mm) and thimble (6mmφ× 6mm) chambers

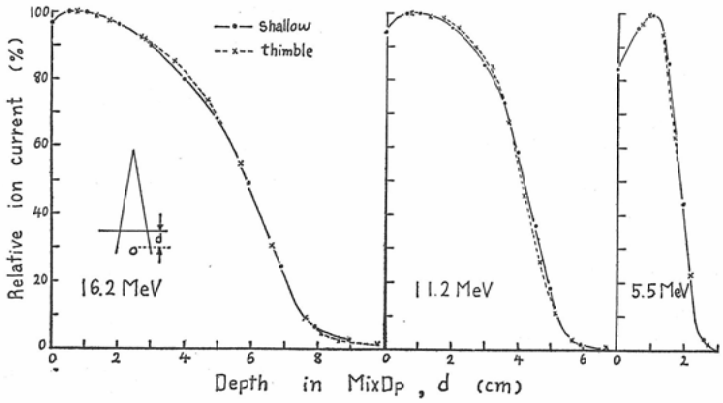


Fig. 6. Depth-dose curves for electron beams measured with films parallel and perpendicular to the beam axis

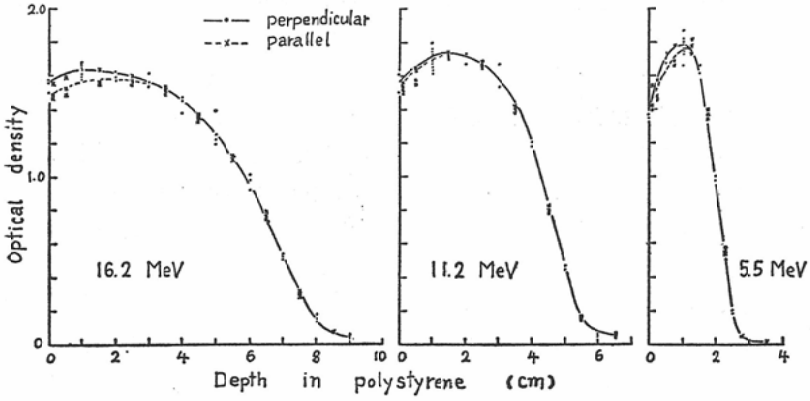
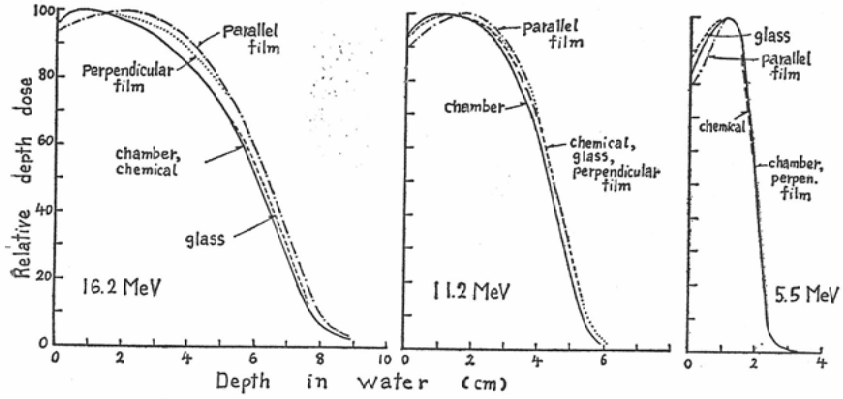


Fig. 7. Comparison of depth-dose curves for electron beams in water (depth effective density) determined by different methods



(3) 電離箱による深部量曲線に，その深さdでの電子の平均エネルギーを $E_m = E_o(1-d/Rp)$ として密度効果の補正を行なうと，化学線量計による結果とよく一致する．E_o は入射電子のエネルギーで外挿飛程 Rp より $Rp=0.52\,E_o-0.3$ を用いて決めた．Fig. 7 に最大値を 100 として種々の測定器による深部量曲線を示した．

表面近くの深部量百分率は shallow type の電離箱，化学線量計および線束に垂直においた film ではよく一致するが，線束に平行においた film では低目にでる．ガラス線量計では電子のエネルギーが高いときには一致がよいが，低いときには相違がみられる．

しかし，film 法以外ではいずれの測定器による結果も各深部について等線量曲線で2㎜以下または線量で5％以下の相違である．

V. 表面線量

電子線の場合にはエネルギーが同じでも装置によつて深部量曲線が著しく異なるといわれている[15]．表面線量についても同様のことがいえるわけであるが，装置によつてどの程度異なるかを検討した報告は少ない[6]．

真鍮製の cone を用い，scattering foil，照射野およびエネルギーによる最大線量に対する表面線量の比（以下表面線量百分率とよぶ）の変化を shallow type の電離箱により測定し，他の装置と文献的に比較した．最大値と表面における線量比は電離電流の比をとつた．

Fig. 8. Variation of depth-dose curve and surface dose relative to peak dose with scattering foil

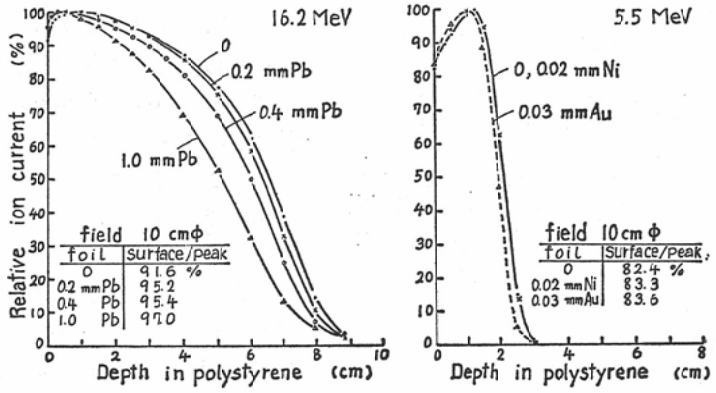
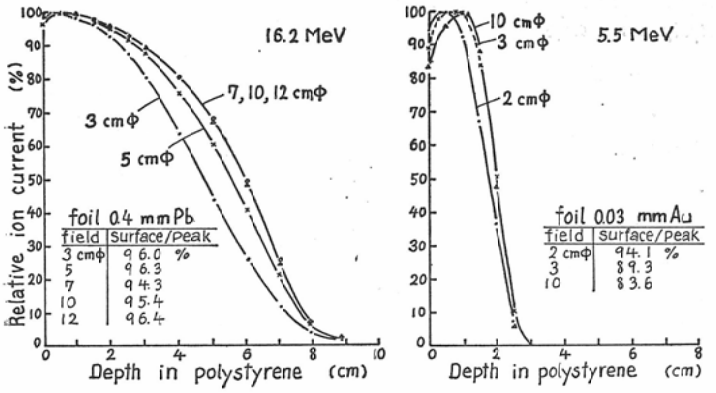


Fig. 9. Variation of depth-dose curve and surface dose relative to peak dose with field size



1.　scattering foil による相違

電子線のエネルギー 5.5MeV と16.2MeVについて照射野10cmφの表面線量百分率を測定した．Fig. 8 に示すように，表面線量百分率は scattering foil の種類によつて数%の相違で，foil のないときが最も小さく，foil が厚くなるほど大きくなる．この傾向は服部ら[6]，白貝ら[20]および Turano ら[21]の結果と同じである．

2.　照射野による相違

Fig. 9 に 5.5MeV と16.2MeV の電子線の深部量曲線と表面線量百分率を示した．

16.2MeV では照射野によつて表面線量百分率はほとんど変化しないが，5.5MeV では照射野が大きいほど小さい．しかし，その相違は10%程度である．この傾向も服部らおよび Turano らの結果と同じである．

3.　エネルギーによる相違

Fig. 10に深部量百分率と測定した電子のエネルギー，そのときの scattering foil の種類および表面線量百分率を示した．照射野は10cmφ であるが，電子線のエネルギーが増大すると表面線量百分率も大きくなる．

Fig. 10. Variation of depth-dose curve and surface dose relative to peak dose with electron energy

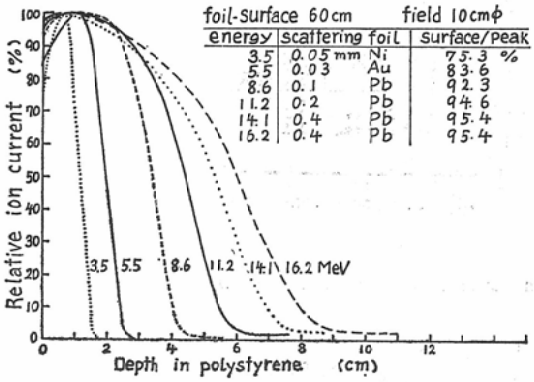
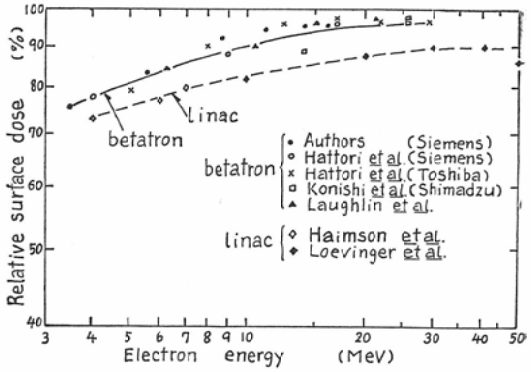


Fig. 11はこれを横軸にエネルギーをとつて示したものである．betatronを用いたLaughlinら[11]，服部[6]ら，小西ら[10]および linac を用いた Haimson ら[4]，Loevinger ら[14]の結果を比較して示してある．小西らは蛍光ガラス，他は電離箱による測定結果である．同一エネルギーで比較すると，betatron の方が linac の電子線より 10 %程度表面線量百分率が大きいが，betatron では機種による相違は±5 %以内である．linac の方が低くなる原因は明らかでない．

Fig. 11. Variation of relative surface dose with electron energy



VI.　電離箱の rad/'r' 換算係数

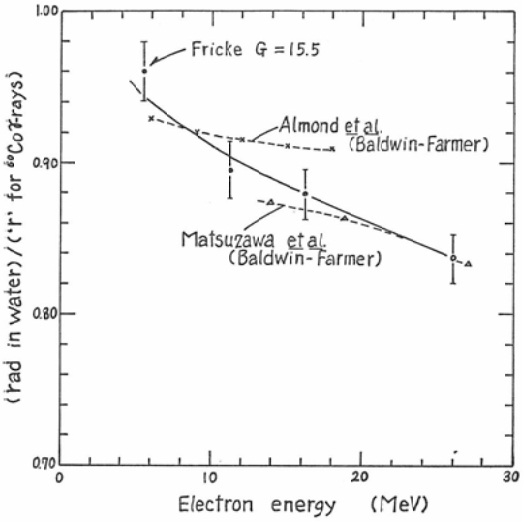
電子線の出力は ^{60}Co γ 線で較正した電離箱を用いて polystyrene phantom内の深部量曲線の最大値における深さのよみから決めるのが普通である[7)19)]．この方法による出力を，'r'/min または ,R'/min で表わすが，これを水中での吸収線量に換算するためには，電子線のエネルギーに応じて適正な換算係数を乗じなければならない．最大値における電子線のエネルギースペクトルが知れていれば空洞原理を用いて水中の吸収線量を求めることができるが，このスペクトルを知ることは困難である．

ここでは Fricke の化学線量計を用いて最大値における線量を測定し，G値を15.5[19]として 'r' を水中での rad に換算する係数を求めた．

測定器は Baldwin-Ionex（0.6cc，0.2 cc）Siemens の universal dosimeter（0.5cc）および前記の shallow type の電離箱である．

^{60}Co γ 線に対する較正係数は Baldwin-Ionex を標準として決めた．この線量計の較正係数は1.05で，この値は癌研所有の 50mg Ra 10本を用いて較正した値および Fricke 線量計を用いて G＝15.7として求めた値と2 %以上の相違はない．各種電離箱の rad/'r' 換算係数には5 %以上

Fig.12. Conversion factor for Baldwin-Ionex chamber



の相違はなかつた．松沢ら[19]との協同研究による結果も5％以上の相違はない

Fig. 12に電子線の入射エネルギーを横軸にとつて最大値における Baldwin-Ionex（0.6cc）の rad/'r' 換算係数を示した．Ionex と同じ構造をもつ Baldwin-Farmer の電離箱について Almond ら[1]および松沢ら[16]の求めた結果を比較して示してある．Almond らの結果は Fricke の線量計（G＝15.4）による値であり，松沢らの結果は2㎝深部で測定した電子のスペクトルより求めた換算係数である．いずれの結果も3％以上の相違はない．また，線量計は異なるが，Loevinger ら[14]の結果（G＝15.7）および Harder ら[5]の計算値とも5％以上の相違はみられない．

VII. 考　察

1．実効密度

Table 1に示すように polystyrene と acryl については Loevinger らの実測値より2％程度大きい実効密度が得られたが，実際の密度の比よりは小さく，Loevinger らの理論が正しいことが確認された．

MixDに松脂を加えて密度を1.00にしたMixDpでは実効密度が1.01で，MixD について Loevinger らによつて得られた値0.94より水に近い．したがつて MixDp は電子線に対しても水の代用として使用できる．

2．極性効果

Laughlin[12]によれば，電子線の場合でも表面においては2次電子の放出により高圧側が正のときの方が大きい電流となる筈だが，この実験では10MeV 以上のエネルギーでは正負で差はみられず，10MeV 以下では負の方が逆に大きくなつた．これらは cone 等で散乱された低いエネルギーの電子が表面位置で静止するためと考えられるが明らかでない．

深部にいくに従つて負の場合の方が大きくなり，飛程の終り近くで最大となる傾向は Laughlin の結果と同様であることから，電子線の場合の極性効果の原因の大部分は静止する電子による電荷であると考えてよいであろう．

このように電子線では深部においても極性効果があるから，正確な深部量曲線あるいは深部の吸収線量を得たいときには各深部について極性効果を考慮する必要がある．

しかし，Fig. 2および3から判るように，この電離箱の場合には正負の相違は最大で10％，したがつて平均値を真の電離電流とすれば，正または負のみで測定したとしても真の電離電流との相違は5％である．最大値を 100として深部量を表わすとその差はさらに小さくなり，最大で3％程度となるから実際には極性効果を無視できる．

3．深部量曲線の測定

電離箱による測定では，電離箱の空洞の前面までを深さとしてとると，2㎜と6㎜の深さの空洞をもつ電離箱の結果がよく一致したが，これは後方に散乱される電子が少ないためと考えられる[14]．実際には後方散乱も存在するから空洞の前面までを深さとすることには疑問がある．しかし，電離箱による測定結果に密度効果の補正をすると化学線量計による測定値とよく一致することから，実際には空洞の前面までを深さとして問題はないであろう．電離箱による深部量曲線の測定は他の方法にくらべて容易であるから，これで測定した結果に密度効果の補正をして深部量曲線を求めるのが最もよい方法である．

film による結果は線束に対して平行か垂直かで

得られる深部量曲線に相違がみられる．またいずれの向きの場合でも他の測定器による結果と異なる．特に高いエネルギーの電子ほどその差が著しくなつた．Loevinger ら[14]および Wambersie ら[22]の結果では film と化学線量計とがよく一致しているが，この実験では一致しなかつた．これらの原因は明らかでないが，Bewley[3]も述べているように，film は低いエネルギーのX線に対して感度が大きくなるし，質量阻止能も水と異なることから，X線の汚染の程度あるいは電子のスペクトルの相違によつて化学線量計の結果と異なることがありうる．また film と phantom の密着度によつても得られる深部量曲線が異なるから film は正確な線量測定には適さない．しかし，Fig. 7 から判るように，他の測定器による結果と比較すると，深部量百分率の大きいところでは10％以下の相違であり，また深部量百分率の小さいところでは同じ百分率になる深さの相違が5㎜以下であるから，技術的に十分な注意をして測定すれば，臨床的にはさしつかえないであろう．特に等線量曲線の測定には便利である．

蛍光ガラス線量計は小さいのである深さでの線量の測定には適しているが，1回の曝射で各深部の線量を同時に測定するには，ガラスの密度が大きいためにガラスの重なりが影響して精度が悪くなる．この実験ではある深部にだけガラスを置いて照射したが，深部量曲線の測定法としては能率的でない．また，ガラスは個体差があり，しかもエネルギー依存性が電離箱に近いという結果もあるので[18]，この点を解明しないと正確な線量測定には適さないであろう．

Fricke の線量計は水とほとんど等価であるから，1回の照射で各深部を同時に測定できるし，質量阻止能も水と等しいからエネルギー依存性も水と同じであると考えられる．したがつて正確な深部量曲線の測定に適している．しかし，多くの条件について深部量曲線を測るには手間がかかつて不便である．特に大線量を必要とする欠点がある．

4．表面線量と絶対線量

表面線量百分率はエネルギーが同一であれば，装置によつて10％以上の相違はないと考えられる．したがつて同一のエネルギーの電子線で最大値の線量を同一にして照射すれば，どの装置でも皮膚障害は同程度で臨床的には差は認められないであろう．差があるとすれば絶対線量の評価に相違があると考えた方が妥当であろう．

絶対線量の評価には Fricke の化学線量計を用い，G値を15.5として求めるのが簡単で，しかも真の値に近いものと考える．臨床的には Fig. 12 に示す rad/'r' 換算係数を用いて電離箱による測定値を水の吸収線量に換算すればよいであろう．

VIII　総括ならびに結語

Siemens の18 MeV betatron からの電子線を用いて，種々の測定法により深部量曲線を測定し，次の結果を得た．

(1)　水の代用としての固体 phantom では polystyrene と MixDpが最も適している．

(2)　shallow type の電離箱には極性効果がある．しかも深部において最大となるから，正確な深部量を測定するためにはこれを考慮する必要がある．

(3)　深部量曲線の測定には化学線量計を用いるのが最も正確であるが，電離箱による測定値にその深さでの平均エネルギー E_m を E_0 (1—d/Rp) より求めて，密度効果の補正をするのが最も簡単で精度もよい．この場合，電離箱の空洞の前面までを深さとすべきである．

(4)　film は同一線量を照射しても線束に対する向きによつて，build-up 領域の黒化度が異なり，精度はよくないが，注意して測定すれば臨床的には有用な方法である．

(5)　表面線量百分率は電子線のエネルギーが同一であれば，装置によつて10％以上の相違はないであろう．

(6)　絶対線量の測定には Fricke の化学線量計を用い，そのG値を15.5とするのが妥当であると考える．^{60}Coγ 線で較正した電離箱によるよみから水中での吸収線量に換算する係数を求めた．

この研究は厚生省がん研究助成金ならびに文部省科学研究費の援助により行なわれた．尚，本論文の一部は第18回日本医学放射線学会物理部会（1967．10．12）

および第27回日本医学放射線学会総会（1968. 4. 9）において発表した.

文　献

1) Almond, P.R.: The physical measurements of electron beams from 6 to 18 MeV: absorbed dose and energy calibration. Phys. Med. Biol. 12 (1967), 13—24.
2) Almond, P.R., Wright, A., and Lontz, J.F.: The use of lithium flouride thermoluminescent dosemeters to measure the dose distribution of a 15 MeV electron beam. Phys. Med. Biol. 12 (1967), 389—394.
3) Bewley, D.K.: Measurement of the polarization correction using the Fricke dosimeter. Symposium on high-energy electrons, Montreux, Switzerland. edited by Zuppinger and Poretti, Springer-Verlag, Berlin. 1965, 48—51.
4) Haimson, J. and Karzmark, C.J.: A new design 6 MeV linear accelerator system for supervoltage radiotherapy. Brit. J. Radiol. 36 (1963), 650—659.
5) Harder, D.: Berechnung der Energiedosis aus Ionisationsmessungen bei Sekundärelektronen-Gleichgewicht. (文献3), 40—48.
6) 服部，松田，北畠：Betatron 電子線の表面近傍での線量分布，日本医放会誌，28 (1968), 994—1001.
7) 平岡，羽部，松沢：MeV 電子線. X線の線量測定，日本医放会誌，27 (1968), 1315—1322.
8) Holloway, A.F., and Campbell, E.M.: A lithium fluoride thermoluminescent dosimeter. 文献 3), 61—65.
9) Johns, H.E., Aspin, N. and Baker, R.G.: Currents induced in the dielectrics of ionization chambers through the action of high-energy radiation. Rad. Res. 91 (1958), 573—588.
10) 鎌田，春山，丸山，榊原：電子線照射による皮膚反応第1報肉眼的観察，日本医放会誌，28 (1969), 1688—1694.
11) Laughlin, J.S., Ovadia, J., Beattie, J.W., Henderson, W.J., Harvey, R.A., and Haas, L.L.: Some physical aspects of electron beam therapy. Radiol. 60 (1953), 165—185.
12) Laughlin, J.S.: Studies of absorption of high energy electron beams. 文献 3), 11—16.
13) Laughlin, J.S.: Physical aspects of high energy electron therapy. Amer. J. Roentgenol. 99 (1967), 915—923.
14) Loevinger, R., Karzmark, C.J., and Weissbluth, M.: Radiation therapy with high-energy electrons part I. physical considerations, 10 to 60 MeV. Radiol. 77 (1961), 906—927.
15) 松沢，川島，平岡：高エネルギー電子線の線量分布，日本医放会誌，26 (1966), 221—227.
16) 松沢，稲田，星野：水中の電子スペクトルおよび質量阻止能に関する研究，文部省研究報告集録昭43，放射線影響編，1969, 32—33.
17) 尾内，楠本：水と等価な固形 phantom の試作，日本医放会誌，19 (1959), 1012—1015.
18) 尾内，松沢，小西，都丸，入船，平岡：各種測定器による高エネルギー電子線の線量評価，文部省研究報告集録，昭43，放射線影響編，1969, 35—36.
19) SCRAD of the American Association of physics in Medicine. Protocol for the dosimetry of high energy electrons. Phys. Med. Biol. 11 (1966), 505—520.
20) 白貝，野田，加藤：弗化リチウム熱ルミネッセンス線量計による高エネルギー電子線の線量分布測定，日本医放会誌. 28 (1969), 1360—1364.
21) Turano, L., Biagini, C., Bompiani, C., und Paleani-Vettori, P.G.: Radiobiologische, dosimetrische und klinische Grundlagen der Therapie mit schnellen Elektronen eines 15-MeV-Betatrons. Strahlentherapie 109 (1959), 489—504.
22) Wambersie, A., Dutreix, A., Dutreix, J., and Tubiana, M.: Depth dose curves determined by ionization, film density, ferrous sulphate and survival rate of coli bacteria and diploid yeasts using a 20 MeV electron beam. 文献 3) 140—142.