OUKA
Osaka University Knowledge Archive

Title	Betatron X-線の線量測定について
Author(s)	木村, 幾生; 森川, 進
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1959, 18(10), p. 1441-1445
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/20043
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

Betatron X-線の線量測定について

京都大学医学部放射線医学教室（主任　福田正教授）
木村幾生，森川　進

（昭和33年11月7日受付）

緒　言

3 MeV 以上の高エナージーX線或はγ線の線量測定は未だ確立された方法がない．レントゲン単位で表示することは，二次電子平衡条件をうることの困難さ，二次制動輻射を一次X線から分離することの困難さのため妥当な方法ではない．また，直接吸収線量を温度上昇から測定せんとする試みもあるが，実用には程遠い．一方各種の高エナージーX線発生装置は実用に供されはじめており，生物学的効果の比較のためにもできるだけ正確な線量測定或は表示が要請される．現在では電離槽法により被照射体内の電離を測定して Bragg-Gray の式にもとずき吸収線量を測定するのが一応適当な方法であろう．

とくに，ベータートロンX線は著しい脈動を示すために，電離槽による測定では再結合による能率の低下がある．以上の点を考慮して，吸収線量測定の前段階としてのレントゲン単位によるベータトロンX線の測定を試みた．

実験方法

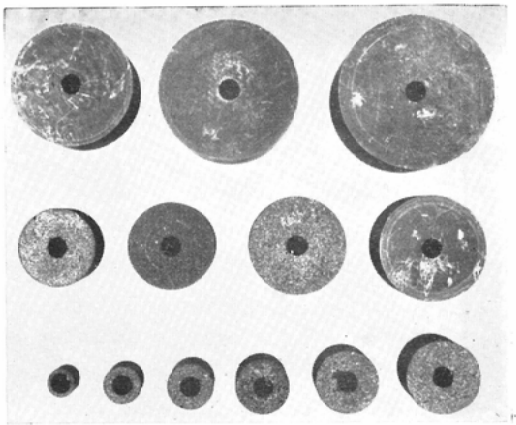
1　X線発生装置：島津製作所製15MeV ベータトロン．励磁電流から計算した励起X線最大エナージーは11.5MeV．濾過板として30mmAl．測定点はターゲットより75cm．

測定装置：東芝製深部線量率計を若干 modify して使用した．

2　二次電子平衡用カーボンキャップ(第一図)

線量をレントゲン単位で表示するために必要な第一の条件は，電離測定容積内で二次電子平衡が成立していることである．したがつて，電離槽壁の厚さは空気等価物質で，二次電子平衡をうるために充分な厚さを必要とする．このために指頭電離槽を種々の厚さのカーボンキャップで蔽い，電離が最大となるカーボンの厚さを測定した．カーボンの密度は1.65gm/cm³．この線質領域における空気の実効原子番号は7.36，カーボンの原子番号は6で，かなり近似しているから，これによる誤差は無視してよいと考えられる．

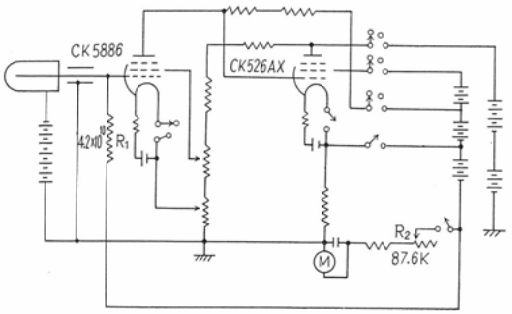
Fig. 1　二次電子平衡用カーボンキャップ（写真）



3　電離電流増巾回路

使用した東芝製深部線量率計の電離電流直流増巾部回路を第2図に示す．この回路の回路素子から明な如く負饋還率は殆ど 100%である．これは電離電流測定にあたり電離槽の測定電極の電位変動を極小にせんとする零電位法の要求からも当然のことである．したがつて，第2図において，電離電流によつて初段増巾管のグリッドに誘起された電圧は殆ど完全に負饋還電圧でキヤンセルされ，この値は第2図に示す μA 計の指示と抵抗値 R_2 の積によつて求め得る．故にグリッド抵抗 R_1

Fig. 2 電離電流増巾回路



の値が知られゝば電離電流は計算できる．

4 電離実効体積の測定

電離槽の実効体積は N.B.S. Handbook No. 62 中 5.7項に従い，既知の線量率 (r/min) の $Co^{60}\gamma$ 線を線量計に曝射した場合の電離電流の実測から計算した．勿論槽壁は Co^{60} ガンマ線に対して二次電子平衡をうるに充分な厚さの空気等価物質で蔽い，線量率は Victoreen Radocon (Chamber: Type No. 606) によつて得られた値を信用して用いた．われわれの実験では，上記 Handbook 5.7項を適用するにあたつて電離電流の測定は上述グリッド抵抗値 R_1 の測定から計算可能であり，又 $\frac{m^{air}_{\mu en}}{m^{wall}_{\mu en}} \cdot Sm^{wall}_{air}$ の値は同 Handbook 中カーボンに対する吸収係数 ($m_{\mu gn}$) および比質量阻止能値 Sm^{wall}_{air} を用いた．一方電離実効体積は電離槽の寸法からも知りうるはずであるから，われわれは電離槽のX線写真を撮影し，拡大率を考慮して電離体積を決定した．

上記二方法による結果はかなりよい一致を示したので，その平均値0.74cm^3 を採用した．

5 電離槽壁による減弱の補正

電離槽壁の厚さに原因するX線吸収およびこれに付随しておこる測定点の移動に関しては Mayneord にしたがつて補正をおこなつた．

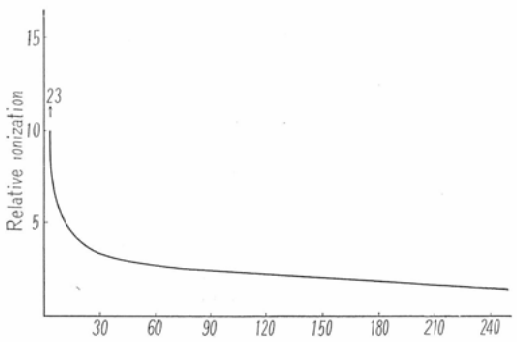
6 再結合に対する補正

ベータトロンの如く極めて短時間の脈動として入射するX線の線量測定には電離の再結合に対する補正が問題となる．上述の測定方法による結果がたとえ低線量率を示しても，一つの脈波について考えると大きな線量率となり，このため collection efficiencyがかなり低くなることが予想される．この点は生物学的比効果を考えるときに重大な誤謬の原因となりうるから注意を要する．これに関しては，Boag に従い適当な補正を試みた．

実験結果

1 第3図に励起エナージー11.5MeV のベータトロンX線のアルミニウム (Al) 減弱曲線を示す．横軸は Al 厚さ (mm)，縦軸は二次電子平衡相当電離電流値 (相対値) を示す．二次電子平衡相当時の電離電流は第4図に示す Build-up curve の maximum point に相当する電離電流値で，原理的には個々のフィルターに応じて第4回の如き Build-up curve を作つて求めなければならないが，結果的にはフィルターなき場合のキヤップ厚さは殆ど維持された．これは Build-up curve の形がかなり巾広いピークをもち，キヤップ厚さにはかなりの allowance があると考えられるからである．第3図の減弱曲線を求めるのに用いたカーボンキヤップの厚さは18mm．第3図からわかるようにベータトロンX線にはかなり軟線が含まれている．この軟線部は Al 30mmを挿入することによつて著明に除きうる．従つて吾々はフィルターとして Al 30mmを採用することにした．

Fig. 3 Attenuation curve
(Aluminum thickness in mm)



2 第4図に Al 30mmフィルターの場合の Build-up curve を示す．測定距離は75cm．横軸は電離槽壁のカーボンの厚さ (mm)，縦軸は電離電流値 (相対値)．最大電離電流はカーボンキヤップの厚さ14mm～18mmにみられ，したがつて，二次電子平

Fig. 4 Build-up curve
11.5 MeV; Filter 30mm Al.
Target-Chamber Distance 75cm

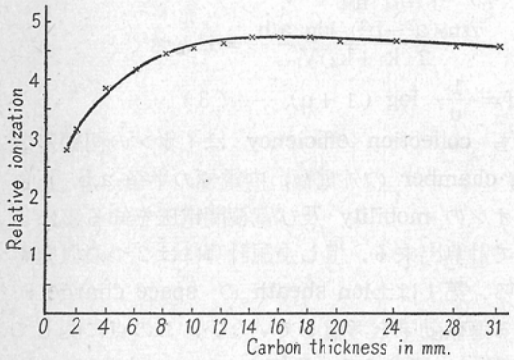
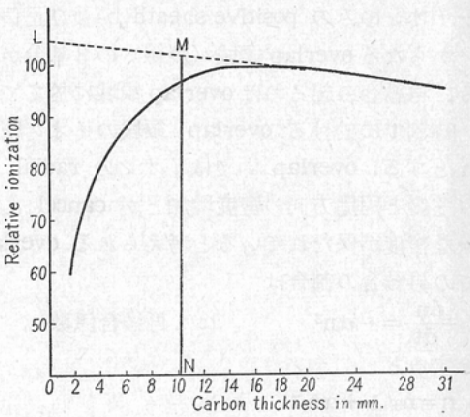


Fig. 5 The Mayneord's correction



衡をうるためにはこの程度の厚さのカーボンキャップの必要なことがわかる．このときの電離電流は18.8×10^{-6}Aに相当した(μA計の読み)．

3 第2図に示す抵抗値 R_2 は87.6 KΩ．この値は電位差計で測定した．したがつて，グリッド抵抗値を R_1 (Ω)，電離電流を i (A) とすると

$iR_1=18.8\times10^{-6}\times87.6\times10^{3}=1.65$ (volt)

R_1の値は島津製作所計器工場での測定結果によると，$4.2\times10^{10}\Omega$ (公称値 $5\times10^{10}\Omega$)．したがつて，電離電流の強さは

$i=0.39\times10^{-10}$ A

単位体積あたりの電離電流は

0.39×10^{-10} A/0.74cm^3 $=0.53\times10^{-10}$ A/cm^3
$=0.159$e.s.u./cm^3

したがつて，線量率は

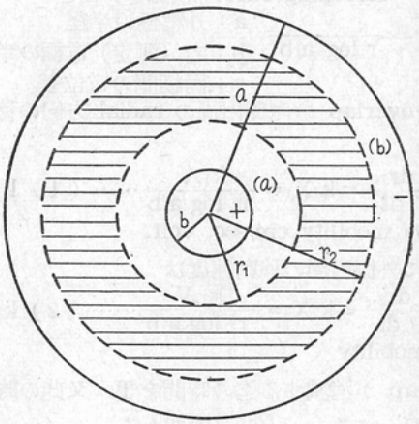
$0.159\times60=9.5$r/min (ただし温度，気圧について未補正)

4 電離槽壁による減弱の補正

Mayneord によると，高エナージーX線或はγ線の線量測定に際して，測定電離電流の原因である二次電子の源泉は Build-up curve の Build-up 部の重心にあるという．第5図にこの重心位置をMNで示す．このMNが線量測定の実効的な位置である．また MN/LO が槽壁の平均の減弱率に相当する．われわれの実験では最大の電離を 100 とすると，MN= 103, LO= 108, したがつて平均減弱率は$\frac{1}{1.048}$．故に槽壁の減弱を補正した線量率は

9.5r/min×1.048≒10.0r/min

Fig. 6 電離槽内のイオン分布



5 再結合に対する補正については特に考按の項で詳述するが，われわれの測定条件（電離槽の寸法，電圧およびベータートロンの励磁サイクル）から collection efficiency は67%と計算されたから

10.0r/min× 100/67=14.9r/min

考 按

1 再結合に対する補正について

collection efficiency に関しては Boag に倣い次の如く考える．γ線 pulse が電離槽に入射されこの為に生じる初期電離密度を正負イオン各々について n_0 とする．t 時間後の電離槽内のイオン配布状態は fig. 6 の如くなつている．即ち槽内の

イオン分布は負イオンのみの negative sheath(a) と正イオンのみの positive sheath(b)及び正負イオンからなる overlap 領域（斜線）の3部分から成る．再結合の起るのは overlap 領域に於てである．時刻 t に於ける overlap 領域のイオン密度を n とする．overlap 中ではイオンの radial 方向の速度と円周方向の密度増加とが cancel して一様な密度が保たれていると考えられる．overlap 中での再結合の割合は

$$\frac{dn}{dt}=-\alpha n^2 \qquad \alpha：再結合係数$$

積分すると

$$n=n_0/1+\alpha n_0 t$$

中心からrなる距離における電場の強さ Xr はイオンの screening effect を無視すると

$$Xr=\frac{V}{r\log a/b}$$

a：外電極の半径
b：内（測定）電極の半径
v：両極間の電位差

故に overlap の内側円周の radial 方向の移動速度は

$$\frac{dr_1.}{dt}=k_1X_1=\frac{k_1.V}{r_1\log a/b}\cdots\cdots(1)$$

k_1：+ ion の mobility cm/sec. volt.

同様に外側円周の移動速度は

$$-\frac{dr_2.}{dt}=k_2X_2=\frac{k_2.V}{r_2\log a/b}\cdots\cdots(2)$$

k_2：− ion mobility

overlap が消滅する迄の時間を T，又此の時の位置を R とすると，(1)(2)式から

$$\frac{R^2+b^2}{2}=\frac{k_1VT.}{\log a/b}$$

$$\frac{a^2+R^2}{2}=\frac{k_2VT.}{\log a/b}$$

これら2式から R，T を求めると，

$$R=\sqrt{\frac{k_1a^2+k_2b^2}{k_1^2+k_2^2}}$$

$$T=\frac{(a^2-b^2)\log a/b}{2(k_1+k_2)V}$$

overlap 領域から negative sheath に dt 時間に移項する正イオン数は電離槽1cmにつき

$$2\pi r_1 n(k_1+k_2)\times\frac{V}{r_1\log a/b}\times dt$$

$$=\frac{2\pi n_0(k_1+k_2)V}{\log a/b}\times\frac{dt}{1+\alpha n_0 t}$$

pulse 入射直後のイオン数は電離槽1cmにつき

$$\pi(a^2-b^2)n_0$$

従つて Collection efficiency は

$$f=\frac{1}{\pi(a^2+b^2)n_0}\times\frac{2\pi n_0(k_1+k_2)V}{\log a/b}\times\int_0^T\frac{dt}{1+\alpha n_0 t}$$

今 $\frac{\alpha n_0(a^2-b^2)\log a/b}{2(k_1+k_2)V}=u$ とおくと

$$f=\frac{1}{u}\log(1+u)\cdots\cdots(3)$$

即ち collection efficiency はイオンの初期密度 n_0，chamber の外電極，内電極の半径 a,b，正負イオンの mobility 及び電極間電圧を知る事によつて計算出来る．但し上記計算には2つの仮定がある．第1は±ion sheath の space charge による遮蔽効果を考慮していない．この点に関しては Boag が述べている如く，space charge の影響は無視出来る程小さい．従つて我々は上記結果を使用する事にした．第2は ion の chamber内走行時間に比し pulse と次の pulse 間の間隙時間は充分長く，各 pulse は瞬間的で且つ互に独立に取り扱い得るという事である．この点に関しては Betatron の pulse 巾は10μs 以下，且つ ion の mobility（下述），chamber の dimension (a=0.3cm b=0.025cm)，電圧（75V）及び励磁 cycle（180cycle）から考えて第2の仮定は充分成立し得ると考える．従つて(3)式は第1近似として充分正しいと考えられる．

(3)式によつて efficiency を計算するには初期 ion density n_0 が既知でなければならないが，この値は一般に未知で我々の知り得る値は recombination 後の集束 ion density n/pulse である．即ち

$$n=fn_0$$

よつて

$$\frac{\alpha n(a^2-b^2)\log a/b}{2(k_1+k_2)V}=\nu$$

とおくと

$$\nu=fu=\log(1+u)$$

$$1+u=e^{\nu}$$

$$u=e^{\nu}-1$$

$$f=\frac{\nu}{e^{\nu}-1}\cdots\cdots(4)$$

(4)式によつて我々は測定結果から collection efficiency を計算した．f を計算するに当り次の数値を用いた．

$$\alpha=1.6\times10^{-6}$$

$$\left.\begin{aligned} k_1 &= 1.3 \frac{\text{cm}}{\text{sec}} \text{ per} \frac{\text{volt}}{\text{cm}} \\ k_2 &= 1.8 \frac{\text{cm}}{\text{sec}} \text{ per} \frac{\text{volt}}{\text{cm}} \end{aligned}\right\} 760\text{mmHg}20^\circ\text{C}$$

$n = 2.09 \times 10^9 \times r/cm^3$

但しrは1個の pulse 巾 (10μs) についてのレントゲン数. 従つて

$$r = \frac{9.5}{60} \times \frac{1}{180} \times 10^6 \times \frac{1}{180}$$

$a = 0.3cm$ $b = 0.025cm$

$V = 75volt.$

これらの数値を (4) 式に代入すると $f = 0.67$ 即ち collection efficiency は約67%.

2 精度について

上述測定に関する精度については勿論高きを期待出来ない. 先ず高抵抗R_1測定の精度はその測定技術の困難さから最も低いであろう. 期待出来る精度は5～8%であろう. 次に R_2 の精度は電位差計による方法で 0.1%. 電流計 (μA) の精度は 0.5%. 従つて電離電流測定の精度は約6～9%. 次に電離容積の推定に伴う誤差は大体 1.5%. 従つてr/min.の値に予期せねばならぬ誤差は大約10%内外と考えてよいであろう.

結 論

最大エナージー11.5MeV ベータトロンX線の線量測定についての一方法を述べ, 同時に脈動波の場合考慮すべき再結合に対する補正についての考察を行つた. 予期する精度は10%内外で満定足すべきものではないが, 高エナージーX線の線量測定の一手段であることを信ずる.

謝辞. 終りにあたり御指導を頂いた福田教授ならびに終始実験に協力していたゞいた平井昭一, 山田勝彦, 近藤茂の諸氏に深く感謝いたします. また, 島津製作所藤本博士, 中堀レントゲン工場長, 佐野技術課長, および瀬和居, 服部両技師の諸氏には篤い御援助と御指導を賜りましたことを厚く感謝いたします.

(本論文の要旨は一部昭和32年5月新潟における第16回日本医学放射線学会総会にて発表した).

文 献

1) Gerald J. Hine and Gordon L. Brownell: Radiation Dosimetry: 1956, Academic Press Inc. N.Y. — 2) N.B.S. Handbook No. 62, (1956). — 3) Mayneord, W.V.: Brit. J. Radiol. Supplement. No. 2, (1950). — 4) Boag, W.: Brit. J. Radiol. 23, 601, (1950).

Study on the dosimetry of the Betatron X-rays

By

Ikuo Kimura & Susumu Morikawa

Department of Radiology, Faculty of Medicine, University of Kyoto.

(Director: Prof. Masasi Fukuda)

We attempted to estimate the dose rate of X-rays generated from the 11.5 MeV Betatron.

To obtain the secondary electronic equilibrium, a thimble ionization chamber was covered with the carbon caps of various thickness (density = 1.65 gm/cm^3). It was arrived at the thickness from 14 mm to 18 mm of carbon walls. The ionization current was measured by a D.C. amplifier whose negative feedback ratio was almost 100%. The grid leak value was measured to be 4.2×10^{10} ohms. The effective ionization volume was determined directly by radiography whose enlargement was corrected and also it was determined by the use of Co-60 standard gamma-rays, measuring the ionization current. Then the Mayneord's method was adopted to correct the attenuation of X-rays in the chamber wall. Also the collection efficiency which was thought necessary, when the pulsed radiations were irradiated to the chamber, was calculated following the W. Boag's system.

The maximum error of measured dose rate was to be 10%.