

レントゲン治療における定量単位

Les unites quantinometriques en roentgen-therapie

Solomon I^{*1}. *J Rad Electrol.* 8:351-6, 1924

電離計測法 (ionométrie) の登場は、X線治療技術における大きな進歩であったことは誰しも認めるところであろう。実際の使用状況に似た条件下で、間欠的あるいは連続的な放射線を正確、鋭敏に初めて計測できるようになったのである。ここでは電離計測法の基本や装置^{*2}について説明する必要はないので、ここでは提唱されているさまざまな単位について論ずることとする。適切な計測法、装置を考えるだけでなく、異なる研究者のみならず同一研究者によるさまざまな実験の線量を簡単に比較できるような単位にで放射線量を表示できることが必要であり、適切な単位を採用することはきわめて重要である。線量単位として、例えば個人的に使うとしても、計測器の放電回数あるいは放電時間の逆数といったものは、科学的な視点を欠くもので、この種のものでは定量的な線量とはなりえない。すべての放射線科医が計測器を較正できるような精密、実際的な方法でX線量を表示することを可能とする定量的な単位システムを構築するのが目的である。この表示法は、どんな計測器であっても、その精度はその計測器にのみ依存して同じ放射線量であれば同じように評価できるものである。

早くも1908年、医用イオノメーター⁺¹を製作したVillard³は、標準温度・圧力下の空気1cc当り1静電単位を発生する放射線量を単位として提唱した。1914年、Szilard⁴は、静電単位の倍数メガ・メガ・イオン (mega-mega ion) を提唱した。これは100万倍の100万倍、すなわち 10^{12} 個のイオンを発生する放射線エネルギーを表す。イオン1個の電荷は 3.4×10^{-10} 静電単位なので、1メガ・メガ・イオン $= 3.4 \times 10^{-10} \times 10^{12} = 340$ 静電単位となる。

1918年には、Friedrichも静電単位による表示を提案しており、単位eは、電離によって空気1cc当り1静電単位の電荷を与える放射線量と定義されている。Krönig & Friedrich⁵は、紅斑を生ずる線量を170eとし、この他にも特定の生物学的効果を来たす線量として、55eで無月経、150eで発癌をみるとしている^{*6}。静電単位による表示はDuane⁷も使用しており、放射線強度の単位としてEを使用している。放射線強度は、電離によって空気1ccに与えられる量とされる。DuaneのEは強度の単位で、放射線量は強度に時間を掛けて得られる。

静電単位は 0.33×10^{-9} アンペアに相当し、e、メガ・メガ・イオン、E、アンペアを直接関係付けることは容易で、静電単位が相応しいものであれば、国際的な定量単位として採用できる。

計測器の静電容量をC、初期および末期の箔あるいは針の位置を V_0 、 V_1 、電離箱の容積をvとすると、放出される静電単位は、 $C(V_0 - V_1) / 300v$ である。

従って、計測装置の較正には、作動状態にある電離計測装置の精密な静電容量の測定、針の動きと電圧の較正、電離箱の容積の測定が必要である。これらのうち一部は、熟練した物理学者、非常に設備の整った実験室でしか実施できない。計測装置の一部を変更(導体の変更、検電器箔の変更など)した場合は、また初めから煩雑な較正が必要となる。このような困難があるが、以下に述べるような実際的な較正システムを用いれば、この静電単位を国際単位として採用することに、理論的にはなんら問題はない。残念ながら、静電単位の表示は、技術的に困難に加えて一定した結果が得られないことが経験から分かっている。我々は、電位および幾何学的定数に基づく計測法が、非常に大きな線量誤差を生むことを示した^{*8}。前述のようにKrönig & Friedrichは、170eを紅斑線量とした。電気高等専門学校⁺²の研究室で最も精密な較正を行なった我々のイオノメーターによる結果は、 $170e = 245R$ であった。単位Rについては後述する。

紅斑線量は少なくとも10倍高値なので、我々のイオノメーターによる計測では、1,700静電単位であろう。Sabouraud & Noiréのラジオメーターの色調B⁺³は、Szilardの4メガ・メガ・イオンに相当する。1メガ・メガ・イオンは540静電単位に相当し、ホルツクネヒトの5Hが1,360静電単位に相当するので、これもFriedrichの結果とはかなり異なる。

Duaneは前述の報告で、クーリッジ管を使用し、20万V、4mA、焦点距離80cm、0.5mm厚銅フィルターの条件下で、X線強度は約0.21Eであったとしている。従って170eの線量は13分で得られる。Duaneの条件では、紅斑線量を得るのに10倍長くかかる。

従って、同じ放射線量でも、使用する計測器によって大きく異なる静電単位表示となることは明らかである。静電単位表示は、電離空気の静電容量、電位、容積だけを見ていることを考えれば、この差異は容易に説明可能である。電離箱の壁の厚さ、壁の材質、形状が、重要な役割を果たすが、静電単位による線量定量の式にはこれが考慮されていないからである。従って静電単位は普遍的な表示法とはできない。

Dauviller[9]は、ergを単位として提唱しており、エネルギーの定量としてこれは合理的とえている。Dauvillerの線量計はDuaneと同じく、非常に高感度

な検流計である。検流計で計測したイオン流の強さをI、静電単位と電磁単位の比をc、電離箱の容積をv、平均電離電位をP(空気では33V)とするとき、エネルギー(erg・秒)は、

$$W = c \text{ IP} / 3,000 \text{ v}$$

ここで、水1ccは空気1ccの830倍のエネルギーを吸収するので、水1ccの吸収エネルギー量は、

$$W = 830 \text{ c IP} / 3,000 \text{ v}$$

P=33ボルト、 $c = 3.10^{10}$ のときvを測定すれば、エネルギーは検流計による電離電流を測定して求められる。すなわちアンペアで表示される電離電流に定数を乗じればよい。しかしこの方法は、従前の方法と本質的に異なるものではなく、同じ問題を抱えている。電離箱、検流計が異なると、同量の放射線を計測してもしばしば大きく異なる結果となる。Dauvillerは紅斑線量を30,000ergとしている。Friedrichの計測器(iontoquantimeter)はこれを21,500erg、Szilardの計測器は240,000ergとし、我々のイオノメーターでは250,000ergである。

組織あるいは類似の条件下で吸収エネルギーを直接計測できるのであれば、ergによる表示は完璧であるが、これまで見たように間接的な計測にとどまる現状では、この表示法は理論的な興味は別として実際には使用できない。異なるイオノメーターの示度を比較できるようにするには、一定の電離源によって装置を較正すれば良い。放射線治療医が必要とすることは、十分な精度で照射線量を知り、同じ線量を繰返し照射でき、すべての治療医がこれを共有できることである。X線管を標準とすることはできない。常に同じX線強度を照射できる完全に一定の管球や高圧発生装置を製作することはほとんど不可能である。しかし幸いなことに、我々は絶対的に一定でイオノメーターの較正に理想的なもうひとつの線源を手に入れている。ラジウムの γ 線である。

我々はすでに1920年以来、放射能を応用して一定量のラジウムによりあらゆるイオノメーターを較正する非常に簡単、正確な方法を提唱してきた。その単位としてはR(レントゲン)を採用している。Rは次のように定義される。すなわちラジウム元素1gを電離箱から2cmの距離(線束の軸方向)に置き、0.5mm厚の白金でフィルターした放射線と毎秒同量の電離を来たすようなX線である。放射線量は、R/秒で表わされる放射線強度に照射時間を乗じて得られる。

X線が電離箱に入射すると、電離電流は任意の単位で

$$i = I / t$$

ここでtは、検電計を使う場合に箔が変位するのに要する時間(秒)である。いかなるものであれ異なるイ

オノメーターを比較できるようにするには、定数Kを決めるだけで良い。Kは既知量のラジウム元素を電離源することで決まる。これによって前掲の式は、

$$i = K / t$$

Kは、ラジウムの量(g)に検電計の箔の落下回数とその時間(秒)を乗じて求められる。いま10mgのラジウムを電離箱の軸上2cmに置いてイオノメーターを較正することを考える。計測器の較正全体にわたって、検電器の箔の落下時間が50,000秒の場合、Kは $10/1,000 \times 50,000 = 500$ で、単位Rで表わされる放射線の強さは、500を箔の落下時間で除したものとなる。この時間が100秒であれば、放射線強度はRで、放射線量は照射時間(秒)当りの放射線強度で与えられる。特定の条件下の線量率Rが分かれば、必要な照射線量を得るための照射時間は容易に計算できる。例えば、5R/秒であれば、1,000R照射するには200秒必要で、逆に線量率と照射時間が分かれば、線量率が一定であれば照射線量を計算できる。

ガスの電離に基づく測定装置イオノメーターは、2種類に分類できる。すなわちインテンシメーター(intensimètre ionométrique)とクオンティトメーター(quantitomètre ionométrique)である。前者は、放射線強度を測定し、放射線量は放射線強度に照射時間を乗じて求める。この装置は一定電位で動作する。後者は、放射線量の積分値を計測し、照射時間とは独立で、変動電位で動作し、一定の電荷の消失がX線エネルギー量に対応する。後者が臨床家にとって興味深い点は、測定装置の較正が直接R単位で行えることで、検電計の箔の落下は、そのその速度にかかわらず単位Rで表わされる放射線量を示すものである。上記の例では、測定装置の測定範囲は500Rで、箔が完全に閉じれば照射線量500Rとなる。

測定装置の較正、すなわち定数Kの決定は以下のように行なう。作動中の装置の電離箱を、外径5cm、内径4cmの中空鉛製シリンダーの開口部に当てる。着脱可能カバーによってトレイに載せたラジウム管を鉛製シリンダーの中に挿入し、ラジウム管と電離箱の距離を2cmとする。ラジウム管の壁は白金製で、厚さ0.5mmが必要である。このフィルター条件が満たされない場合は補正が必要で、補正は多くの放射能関連の論文に出ているデータを使って容易に可能である。例えば、ラジウムが1mm厚白金の壁でフィルターされる場合の補正は6%である。この較正装置は非常に簡単で、どこでも行える。

ラジウム管と電離箱の距離が小さいことから、ラジウム管の形状も重要である。2cmという距離は専ら経済的な理由によるもので、較正の精度を向上させるにはより距離をもっと長く、例えば10cmとする方が良いが、必要なラジウム量がデシグラムの単位となり、臨

床家には手が届かなくなる。

しかし近接照射で通常用いる 2cm の距離でも、ラジウム量が 5mg 以上あれば大きな問題なく校正可能である。我々の場合、ラジウム管の容量 7～12mg、直径 2～5mm、長さ 12～16mm である。定数 K の計算に当たっては、計測装置からの自然漏洩の補正を忘れてはならない。これは特に使用するラジウム量が非常に少ない場合には重要である。

現在の放射線治療で使用されている最も透過性の強い X 線の約 5 倍、100 万ボルトオーダーに相当する非常に透過性の高い γ 線で電離箱を校正することに対しては批判がある。しかし、Friedrich の研究や、さらに最近では Glasser 自身の研究によって、適切な電離箱を使えば γ 線と X 線の電離作用には完全な相同性があることが確認されている。これは、定数が大きく異なる 2 つの装置で、それぞれの放射線を測定してみれば容易にわかることである。2 つの定数の比を a とすると、同じ X 線照射による放電時間の比も実験誤差を除けば a となる。Friedrich のように、静電単位の使用を唱える一派は、計測装置の恒常性を確認するために既知量のラジウムを使用していることを加えておく必要がある。

以上まとめると、R 単位表示には 2 つの利点がある。

(1) すべての放射線治療医がその計測装置を、それがどんな装置であっても、どのような設定でも校正できる。(2) 厳密に同一な実際的な国際単位を導入できる。フランス語圏の放射線治療医の多くが、既にこれを使用しており、治療線量を精密に計測している^{*10}。

この較正法の発展は、光学におけるそれをなぞっているといえる。可視光線のスペクトルについては、光の強度は単色光であれば erg で測定することができるが、実際には一定の条件下の白熱電灯で標準化された国際的な単位「燭光」で評価されている^{*11}。

【注】

1. 1924 年 8 月, AFAS 総会 (Liège) での発表
2. Iser Solmon. La Radiothérapie profonde. 401 頁
3. Arch d'Electricité medicale 1908
4. Arch d'Electricité medicale 1914, 表 II, 51 頁
5. Krönig, Friedrich. Physikalische und biologische Grundlagen 他. 77 頁
6. Solomon. Les doses biologique. J Radiol 1925
7. Am J Roentgenol. 787,1922
8. Radio-Electricité, 1922 年 5 月号
9. Revue générale d'Électricité 887,1925
- 10 残念ながら, Behnkin には誤解があり, 我々の R(レントゲン)の定義を知らずに, これを 10 気圧の圧縮空気をいれた電離箱で計測した静電単位による較正に基づく単位として定義している (H. Künstner. Die Standardisierung der Röntgen-Dosis Messung in Klinische Wochenschrift, 25 avril 1924).
- 11 A. BLANC. Rayonnement. Principes scientifiques de l'Eclairage. Paris (Colin)

【訳注】

† 1. ionometer: 放射線の電離作用を利用した線量測定装置の総称。基本的に電離箱と検電器を備える。この名称は 1950 年代まで使われたが、現在では液体のイオン濃度測定器を指して使われる。

† 2. École supérieure d'Électricité. フランスのエリート養成大学組織 Grandes Écoles(グランゼコール)のひとつ。昔も今も電気・電子工学系の最高レベルの教育の場となっている。

† 3. Sabouraud and Noiré. X 線によるシアン化白金バリウムの変色を利用した線量測定法。照射前の色(緑)を Tinte A, 皮膚線量照射時の色(黄褐色)を Tinte B とした。