

電離箱によるX線量測定

*Measurement of dosage by means of ionization chambers**

Duane W. Am J Roentgenol 10:399-405, 1923

X線発生装置が異なると、火花間隙から推測される電圧、管電流が同じでも、放出されるX線強度、実効波長が異なるという事実は、信頼に足るX線量を推定するにはX線束それ自体に結びついた何らかの計測法が必要であることを意味している。

同じフィルター、同じ距離でも、装置が異なるとX線強度に40%以上もの差があることは珍しいことではなく、極端な場合は2倍の開きがある。

現状では、電離箱が最も信頼性が高いことに疑いのないところではあるが、これも決して完璧なものではなく、その利用に当たっては大きな注意が必要である。

本稿は、我々が行なっている方法を述べ、これから電離箱を利用する、あるいは購入を考えている読者に役立つように、陥りやすいピットフォールに言及するのが目的である。

X線束が空気のような気体を通過する場合、気体分子を(イオンとよばれる)粒子に分割し、その一部は正に荷電し、一部は負に荷電する。放置すると、正の粒子が負の粒子に引きつけられてこれらの粒子は再結合する。しかし、この電離した気体に電界を与えると、正の粒子と負の粒子を分離できる。例えば、2枚の平行金属プレートの間に電離空気がある状態で、その一方を電池の正極に、他方を負極に連結する。すると、正に帶電したプレートは負の粒子を引きつけ、空気から除去する。負に帶電したプレートは正の粒子を引きつけ、反対方向に空気から除去する。このように電池によって、空気中に正の電気が一方向に、負の電気が反対方向に流れるようになる。この電流は、電気回路内に電位計を適切に置けば測定できる。電位計によって計測された電流値をX線強度として扱うことができ、一般にX線が強いほど多くのイオン対が生成される。

しかし、電位計で計測した電流は、イオンに作用する電界が、イオンが再結合する前に事実上全てのイオンを除去できないと、信頼のおけるX線強度の指標とはならない。例えば、2本の等しい同じようなX線がプレート間の空気を通過する場合、相当数のイオンがプレートに到達する前に再結合するので、発生する電流はX線が1本の場合の2倍とはならない。2本のX線が通過すると、毎秒2倍のイオン対が発生するので、

イオンが再結合する確率が大きくなるからである。再結合したイオンは、電流の生成に与らなくなる。しかし、電池の作る電界が、すべてのイオンが再結合する前に除去するほどの力があれば、2本のX線が作る電流は1本の時の2倍になる。この場合は、電流値はX線強度に比例することになる。

イオンに作用する起電力が、再結合前にすべてを除去するに十分な状態のとき、電離電流が「飽和」しているという。X線計測には、飽和電離電流だけを使わなければならない。

電離箱によっては、飽和電離電流を生成することが非常に難しいことがある。その一方、小さな電池で飽和状態を生み出すこともできる。これらの問題を、いくつかの実験によって解説する。以下に容易に飽和電流を生成できる例と、現状の電池では飽和電流を作るに不十分な例を示す。

A(図1)は、中空の金属シリンダーで、その一端は閉

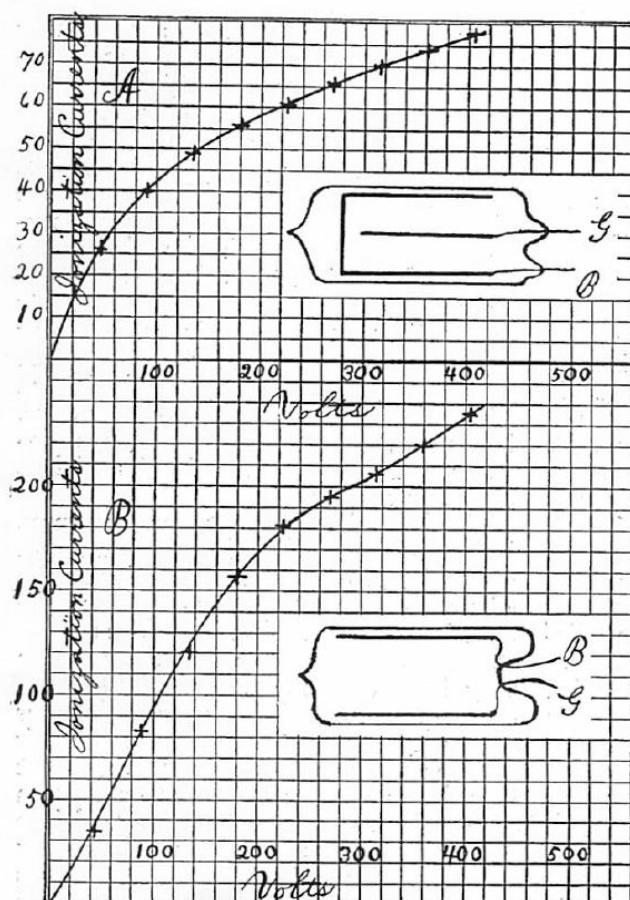


図1

* ハーバード大学 生物物理学教授 (Professor of Biophysics, Harvard University, Boston, Massachusetts)

鎖しており、シリンダーの長軸に沿ってロッドがあり、シリンダーは電池に、ロッドは電位計に接続され、電池の反対極は電位計につながれて、完全な電気回路を構成している。図のように、シリンダーとロッドは、閉鎖したガラス容器に収められている。

X線を電離箱に照射しながら、電池の数を変える、すなわちシリンダーにかかる電圧を変えると、それぞれに対して電離箱内の電流が得られる。グラフA(図1)は、異なる電圧に対する電位計の読みをプロットしたものである。

電池の数を増やしてシリンダーの電圧を高くすると、電位計で計測される電離電流は増え続け、一定値に落ち着くことはない。このことは、イオンに働く電気力が増加すると、より多くの陽イオンが再結合する前に陰イオンから分離することを意味している。しかしこ

の場合も、電気力は全てのイオンを再結合前に除去するほど十分には強くない。つまり、飽和電流は生成されていない。このような特性をもつ電離箱は、X線の計測には使えない。このタイプの円筒型電離箱は、シリンダー長軸に張る電線が非常に細くない限りは、使用できない。

B(図1)は、両電極がいずれも金属プレートで、その一方が電池に、他方が電位計に接続されている。プレートに加える電圧を大きくすると、グラフBが得られる。この場合も飽和は見られず、電圧が上がると電離電流も増加する。この電離箱は、金属プレートがガラス容器の前面を覆っていないので、容器の角の部分に電気力でイオンを除去できない場所が残る。このタイプの電離箱も、X線計測には使えない。

C(図2)は、平行な金属プレートが、空気に満たされ

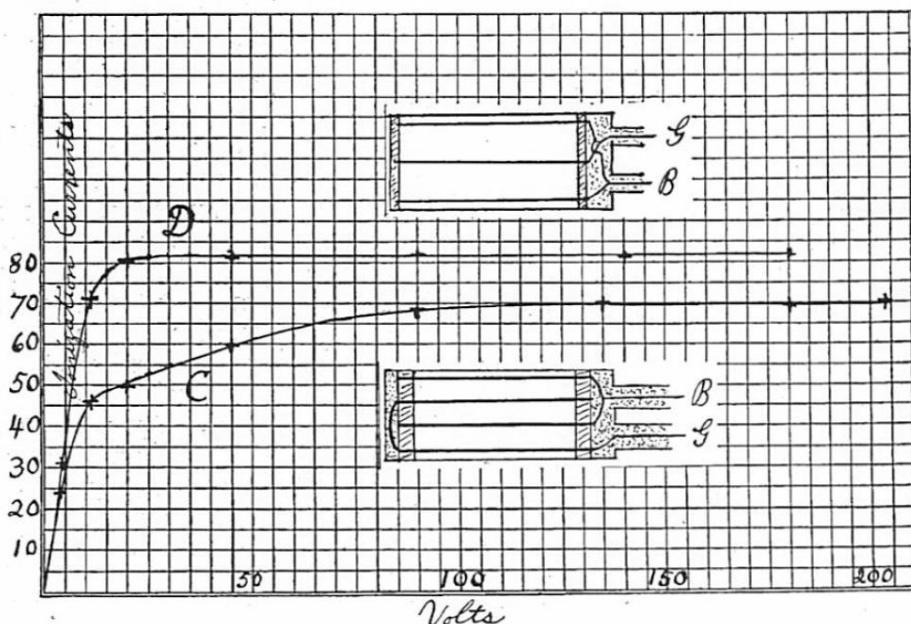


図2

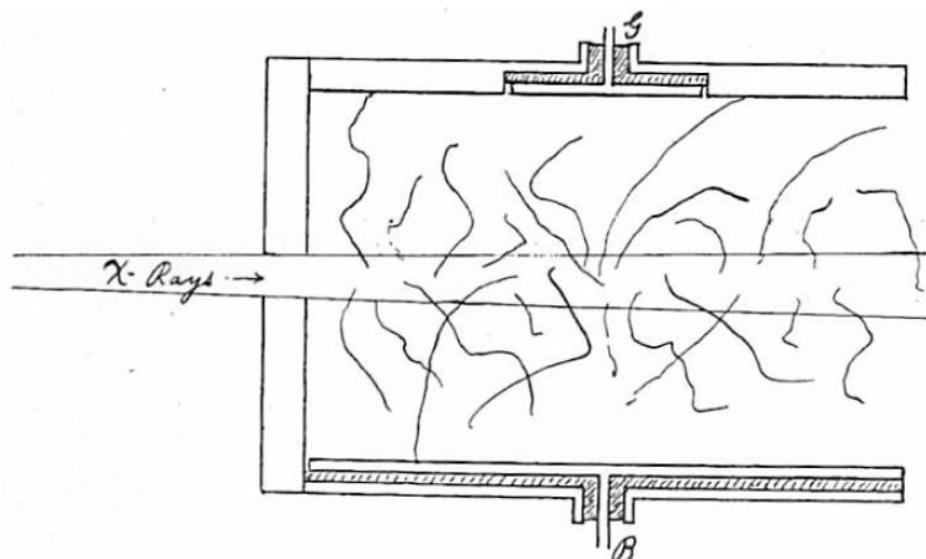


図3

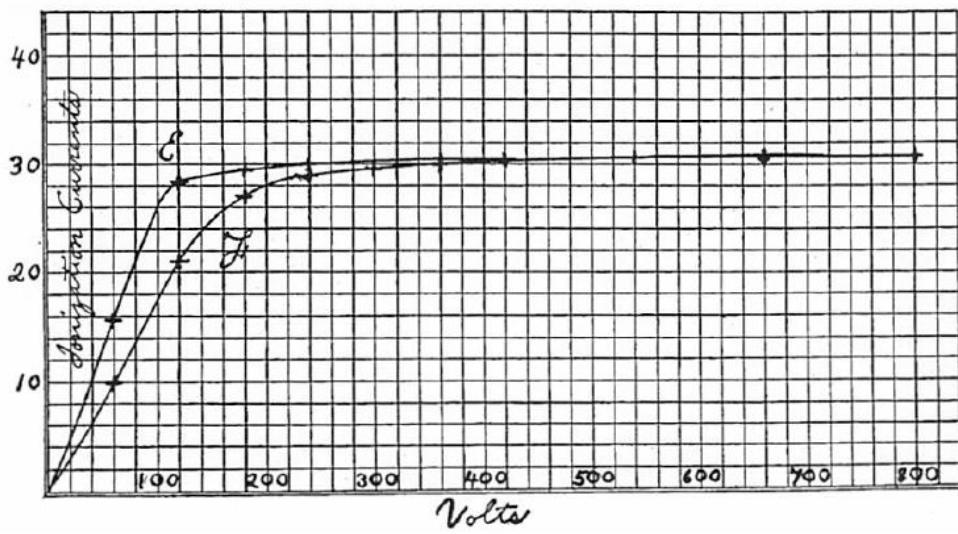


図 4

た閉鎖空間の端まで伸びた形である。しかし、この閉鎖空間の、図の平面と直交する方向には伸びていない。さらに、図示のようにプレートの1枚は、電離箱を保護するために取りまいている金属シートに近接しておかれた電位計に連結している。電圧に対する電流のグラフは、前の2つに比べるとずっと飽和に接近している。つまり、このタイプの電離箱は前の2つよりも良い設計である。

しかし、3枚すべてのプレートが完全に閉鎖空間に伸びているD(図2)の方がさらに良い。この場合は、2枚の外部プレートが電池に、内部の1枚が電位計に接続している。グラフD(図2)は、200V*以上の電圧でほぼ飽和していることがわかる。飽和に関しては、この電位計が最も良い設計である。我々がX線の強度、実効波長を測定しているのは、この装置である。

前述のように、電離電流の飽和は、非常に重要な問題のひとつである。電気力が飽和することが実験で確認できない電離箱は使用したり、購入したりしてはならない。

飽和電流が得られなければ、電位計の示度はX線の計測値として信頼できない。強力なX線でも示度は低かったり、あるいはその逆に弱いX線が大きな示度を示すこともある。一部の研究者が報告している著しく大きな深部線量は、完全に飽和した電離電流を利用してないことによるものであろう。

異なる研究室、異なる診療施設における計測値を比較するには、X線照射の標準単位、標準計測法があることが望ましい。著者が過去9~10年間使用している単位は「X線が通過する空気1cc当たり1絶対静電単位の電流を生じるようなX線量、ただしその電流が飽和していること」である。

電離箱D(図2)は、2つの理由でこの単位による電流計測には不適である。一つは、一次X線束によりプレートおよび壁から発生する大量の二次線が、電離の大きな部分を占める点である。二次線は、電離電流を増加させるので電位計の示度は高値となる。この二次線の影響は、金属プレートの代わりに低原子量物質を使うことで大幅に軽減される。Dr. Huntと著者による実効波長の計測に関する論文[1]では、薄い紙に淡く鉛筆を塗ったものを使用した。つまり非常に薄い炭素層をプレートとしたことになる。しかしながら良い方法は、著者が以前に電離箱の較正に用いた方法である。これは、較正すべき電離箱と、その内部で何にも衝突しないように設計した標準電離箱に同じX線を照射して、発生する電流を比べるものである。図3は、このような標準電離箱である。X線は、既知の面積の開口部から電離箱内に進入し、プレート間を壁に衝突することなく通過する。プレートは、Kelvin卿の装置と同じような保護リングコンデンサーを備えている。Bを介して電池に接続されているプレートは、電離箱のほぼ全長にわたって伸びている。電離箱の反対側は、3つの区画に分割されている。2つの両端部分は、外部の金属筐体に連結しており、保護のために接地されている。中央の部分は、筐体から絶縁されており、Gを介して電位計に接続されている。中央部分は一定の幅をもち、電離電流をそれと同じ長さのX線束から取り込む。X線束は一定の既知の断面積を持っているので、電位計に流れる電流は一定体積の空気に由来することになる。著者の装置では、この空気量は25ccである。この電離箱を使って、電位計で25静電単位の電流が得られれば、25ccの空気がこの量を生成していることになり、先の定義に従ってこのX線は1静電単位の強度をもつことになる。これが、我々が実際の放射線治療でX線計測に使う小さな電離箱の較正に使用している標準電離箱である。

* 訳注：原文では20Vとなっているが、200Vの誤りと思われる。

この種の標準電離箱を設計するにあたって留意すべき、もうひとつ重要な点がある。X線が気体を電離する際、一次放射線が気体の原子や分子から一定量の二次放射線を発生させる。この二次放射線は、電離の大きな部分を占める。二次線は一次線の経路から一定距離を移動するが、これには2種類ある。すなわち粒子線とX線である。二次X線は非常に透過性が強く、一次線から遠くまで到達する。しかし粒子線は図3に示すように非常に曲がりくねった経路をとり、一次線から遠くまで行くのはわずかである。

1905年、著者は、ラジウムエマネーションの量を電離法で計測するには、電離箱の壁に衝突する放射線、壁から発生する放射線に対する補正が必要であることを指摘した[2]。実験で求めた補正值は、電離箱の表面積と容積の比に比例することがわかった。容積が小さいとこの比が非常に大きくなることから、非常に小さな電離箱を使用することは不利であることがわかる。

理論的には、標準電離箱は、すべての二次線から生成されるすべてのイオンを捉えるために、無限に大きい必要がある。しかし、実際には二次線の大部分は曲がった経路をたどるので一次線からそれほど遠くには到達しない。従って、少なくとも放射線治療の目的には、非常に大きな電離箱は必要としない。9年前、著者は500～2,000ccのものを使用していたが、当時は実用上十分であった[3]。

標準電離箱の適合性を試験するためには、まず電離電流が飽和していること、そしてそれが一次線が気体分子に衝突して発生する事実上すべての二次線を含んでいることが必要である。

図4のグラフは、大きさが異なる2つの標準電離箱の電圧と電離電流の関係である。これから、小さい電離箱は約300V、大きい電離箱は約500Vで飽和することがわかる。著者はこのいずれを使う場合も、飽和を確実とするため800V付近で使用する。

図4の実験では、X線管球の電圧は約10万Vで、大小いずれの電離箱でも電離電流の大きさには差がなかった。従って、いずれの電離箱も二次線によって空気から発生するすべての影響を含んでいると考えられる。

しかし、20万Vにすると、より短波長のX線が放出され、二次線の透過性がさらに大きくなる。この場合は、2つの電離箱の電離電流に約5%の差が認められ、大きな電離箱の方が大きな電流を発生した。しかし、大きな電離箱でプレート間距離を離すと、電離電流に有意の増加はなかった。従って、20万Vでも標準電離箱として使用するに十分な大きさであるといえる。管電圧20万Vでも、プレート間距離10cmで十分である。

組織に吸収されるX線量は波長に依存することから、

線量(例えば紅斑線量)を推定する場合は、強度のみならず実効波長を測定する必要があることは自明であろう。

このような波長測定は、標準電離箱でも小さな金属電離箱でも可能である。しかし、小さな電離箱は、波長計測用に標準電離箱と比較しておく必要がある。

ここに示す計測法について重要なことは、電位計の示度はX線の強度を示すものであって、患者が受ける総線量を示すものではないという点である。総線量を知るには、強度に照射時間を乗ずる必要がある。

大きな標準電離箱は、治療中の計測には不適である。治療中には数回、小さな電離箱を使用して患者が受けたX線の強度を測定している。X線の強度は、患者の体内にX線が入射する部位の表面、および出射する部位の表面で測定している。これによって、患者の体から発生する二次線の量を推定できるが、この推定量は過小である。水ファントムを使い、小さな電離箱自体を水中に置くことでも推定できるが、この場合は常に過大となる。さまざまな患者から治療中に得られた二次線の推定量は、非常にばらつきが大きい。二次線は入射門の大きさだけでなく、患者の体格、照射部位の刑場、組成によっても変化する。紅斑線量を推定するには、これらすべての要因を考慮にいれなくてはならない。最も安全な方法は、実際に治療中の患者を測定することである。

電離法による線量測定では、検電計の箔が目盛上を移動するタイミングをストップウォッチで測って電離電流を求めるのが普通である。この方法では、電流が飽和しているか否かを決めることがしばしば難しい。この点について、特に注意が必要である。

もうひとつ、検電計による測定で非常に多い誤りについて述べる。この方法では、常に計器の「リーク」を測定する必要がある。これは、X線管を作動させた状態で行なう。完全に遮蔽されていない限り、X線は常に検電計内、電離箱以外の部分にも電離電流を発生するからである。リークが存在する場合は、これを補正する必要がある。

水ファントムで深部線量百分率を計測する場合は、水の表面、およびさまざまな深さで電離箱のリークを求めなければならない。リークを求める最も良い方法は、厚い鉛のシート(すべてのX線を遮蔽するだけの厚さが必要である)をX線束の断面積を決める開口部に置いて、電流を測定することである。このリーク電流を、鉛シートを取り除いた後に測定する電離電流から差し引く。2つの電流は、検電計の箔が目盛の1点から他の点に移動する時間に反比例する。

深部線量百分率を測定する場合は、次の良く知られた式によって、リークを補正できる。電離箱が水ファ

ントムの表面にある場合, リーク (鉛シートで X 線が遮蔽された状態) の秒数を L_0 とし, 電離電流の場合 (鉛シートの除去後) の秒数を T_0 とする. さらに, 電離箱が水面下の任意の位置 (例えば 10cm) にある場合の秒数をそれぞれ L_1 , T_1 とする場合, 深部線量百分率 (percentage depth dose, PDD) は,

$$PDD = \frac{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{L_1}}{\frac{1}{T_0} - \frac{1}{L_0}}$$

リーク電流の補正をせずに, 単純に時間の比を計算すると, 大きな誤差を生ずることになる. 著者の経験した実験では, 管電圧 20 万 V で, 補正無しでは 40% 以上であったが, 補正すると同じ深さで 34% となった

異なる X 線波長に対して, X 線の生物学的効果が電離電流に比例するかという問題については, 非常に重要な研究が行なわれている. 生物学的線量が議論され, 特に生物学的線量が決定的な量となる. しかし, 生物学的線量について語る前に, X 線の波長が異なる場合に, 多くの異なる生物学的効果が互いに比例することを実験によって示す必要があろう.

【注】

1. Phys Rev Aug. 1915, p.166
2. Compt Rend Acad d Sci and J de Physique, 1905
3. Friedrich もここに記載したものと同じような標準電離箱を使用している.