

小型電離箱の理論的ならびに実験的研究

Eine theoretische und experimentelle Untersuchung der kleinen Ionisationskammer

Fricke H, Glasser O*. Fortschr Röntgenstr 33:239-50,1925

A. 緒言

特定の検体に対して、全波長域にわたるX線の物理学的作用を計測することは、理論的にも実際的にも重要な基本的問題である^{*1}。このような作用を実際に計測できれば、X線の生物学的作用の理想的な計測単位となりうる。さらに、このような物理学的作用は基本的に生物学作用と関連していると考えるのは理にかなったことであり、その計測、分析は、生体に対する放射線の影響のまさに本質の理解につながるものである。

我々が現在理解するところでは、X線的作用は物質中で放出される二次電子によるものであり、このような電子には2種類ある。その一つは光電子で、波長に反比例する等しいエネルギーを持つ(Planck-Einsteinの法則)。このエネルギーは、軽い物質についてはすべてほぼ同じである。生成される光電子の数は、波長および吸収物質の原子量に応じて急速に増加する。

吸収物質が化学元素とすれば、1g当りの光電子生成数は、原子番号の3乗に比例する。組成が $a_1N_1 + a_2N_2 + \dots$ の化合物であれば、生成数はいわゆる実効原子量、すなわち $N_{eff} = \sqrt[3]{\frac{a_1N_1^4 + a_2N_2^4 + \dots}{a_1N_1 + a_2N_2 + \dots}}$ に比例する。従って、

同じ実効原子量をもつ2つの軽い物質1gから発生する光電子は同数である。

2番目の種類の電子の存在は、以前にCompton[1], Debye[2]によって理論的に予測され、その特性については、Wilson[3], Bothe[4], Fricke & Glasser[5]によって実験的に研究されている。このいわゆる反跳電子は、原子がX線を散乱するときに生成されるものである。反跳電子の速度は、光電子に比較するとはるかに小さいが、波長が短くなると急速に増加する。1g当り生成される反跳電子の数と速度は、軽い物質についてはすべて同じである。その総エネルギーは、光電子に比較して、波長が短くなると急速に大きくなる。波長0.20 Åでは、水に吸収されるエネルギーの約半分が反跳電子によるものであるが、波長0.10 Åではほとんど全てが反跳電子によるものである。

異なる波長のX線の物理学的作用、生物学的作用を考えるに当たっては、もちろん両作用が光電子、反跳電子の相対生成数に依存するという一定条件が必要であ

る。つまり、いずれの場合も二次電子を生成する物質が、同じ実効原子量をもつ必要がある。これについて留意すべきは、ここで扱うのは、放射線が作用する生物の細胞の特定の部分であり、より厳密に言えば、光電子の平均飛程によって決まる一定の直径の範囲であるという点である。このため局所的な組成は、全体の平均的組成と大きく異なる可能性もある。従って、Na, Cl, K, Caなど金属塩も考慮する必要がある。例えば、1%のKClの存在が、光電子数を15%増加することがある。6%のKClが光電子吸収を100%増加させる。このような重い塩類が局所的に存在することは十分考えられることである。

この観点から、小型電離箱に発生する電離は、重要な放射線作用をもたらさう。すなわち後で見るように、放射線治療で使用される線質の範囲で使えるような小さな電離箱では、電離箱の壁から発生する二次電子による電離だけという状態がありうる。しかし、壁の材質が生体物質の組成に一致するように適切に選択することにより、上記の条件を常に満たすことができるようになる。さらに、放射線の生体に対する一時的な作用が化学的なものであるとすれば、理論的には放射線の生体への効果とガスの電離の間に密接な関係がありうる。既にX線的作用は、専ら二次電子によるものであることを述べた。この電子のエネルギーあるいはその一部は^{*2}、生体組織の一定数の分子を変化させて、化学的に強く活性化する。分子の完全電離はそのひとつであるが、他にも種々の段階が存在する。

このような変化した分子の一部あるいは全部が、新たな化学物質に取り込まれ、細胞に変異を引き起こす。その結果は、さまざまな変異の数に応じて決まる。この比率は、特に電子が非常に高速な場合は、電子のエネルギー^{*3}(従ってX線の波長)には依存しない(このことは、イオンの寿命は液体の中では急速に再結合するので非常に短いという事実とは無関係に成り立つ)。

しかし、実験結果では、異なる気体において高速電子が完全に吸収されて生成されるイオンの相対数は、電子の速度に依存しない(Owen)[6]。同様に、気体と液体、あるいは生体における電離の間には、生体の場合は再結合が非常に速くイオンを検出できないとしても、一定の関係があると考えることができる。

この事の実験による直接的な確認としては、 α 線、 β 線、 γ 線が液体(例えば $H_2O = H_2 + O$)中で吸収されて発生する新たな電子の数が、同じ放射線によって空

* クリーブランドクリニック 生物物理学部門 (Dep. of Biophysics, Cleveland Clinic Foundation, Cleveland, Ohio)

気中で発生するイオン数とほとんど同じあるいは整数倍であるという事実がある^{*4}。

異なる波長のX線が、空気を電離して生体組織に及ぼす影響の比較は、Friedrich[8], Holthusen[9], Martins[10], Ruß[11], Redfield & Bright[12], Wood[13]らによって行なわれている。その結果は大きく異なっているが、その原因のひとつは電離の計測法によるものである。しかし、計測可能な精度の範囲において、ある種の生体組織への作用は空気中の電離に比例し、その一方で他の組織への軟線の作用はこれより大きいことがわかっている。最も多く利用される生体反応である皮膚紅斑については、波長0.20Å以下のX線(～γ線)についてはその比は一定であるが、これより長い波長については生物学的効果が比較的大きい。

しかし現状の実験結果は、前述のような空気と放射線感受性組織の実効原子番号の差異による変化を部分的あるいは完全に説明しうるかという点について、確実な結論を導けるほどには質、量ともに十分ではない。我々は、この問題に対する確実な実験結果を準備しているところである。

このような研究の基礎として、以下、小型電離箱の理論をわれわれの説を実証する一連の重要な実験結果とともに示すものとする。

B. 実験方法

本研究の目的は、さまざまな小型電離箱で生成される電離電流の、電離箱の壁の組成、形状、大きさへの依存性を知ることである。

異なる容積の円筒型、直方型の電離箱を使用した。最も多く使用した電離箱の大きさを表1に示した。

電離箱の材質として、多くの元素を試みたが、最終的に使用できたのはその一部だけであった(表2)。その理由は、我々の目的に適した物質は、純粋で、安定かつ非含水性の物質に限られることにある。金属製の電離箱は、金属を薄くまげたシートで製作し、塩類製の電離箱は以下の様な方法で製作した。すなわち、溶解した塩に所望の大きさの金属型を沈めて溶解物質の薄層を型の上に形成し、冷却してから型を除去した。この技術をもってすると、数分の一ミリメートルの壁も作る事ができる。しかし、揮発性の塩や高温で不安定な塩、さらに融点の高い塩では製作できない。

表2に示した材質は、硫黄を除いてすべて十分に導電性である。硫黄性電離箱の内壁には、事前の試験で電離電流に影響しないことを確認した上で黒鉛の薄層を塗布した。

電離電流の測定は、金箔検電計で行なった。計測装置の詳細は他稿に詳述した[14]。図1bに、検電計と電

離箱のコネクターの一端を示す。金属箔の接続ワイヤWと電極の内腔は、セレンシワックスCと琥珀Aで周囲の真鍮製シリンダーTから絶縁されている。シリンダーと種々の電離箱の連結には、硬性ゴムのアダプターを(琥珀の絶縁体とともに)使用した。図1cは、立方型電離箱を真鍮製シリンダーに拡張アダプターを介して連結した状態である。ほとんどの実験に使用したⅡ型電離箱は、拡張アダプターなしに直接シリンダーに連結できる。絶縁体を使用することにより、電離箱の壁に電圧を負荷することが可能となり、検電計の電位を変化することなく内部電極と壁の間に任意の電位差を与えることができる。これは、個々の電離箱の飽和電流を測定する際に、実際に重要である。

すべての実験に、Kelley-Koett 280kV U型電源装置、円板整流器、Coolidge 汎用管球、タングステン対陰極を使用した

飽和電流：すべての電離箱について飽和電流を計測した。図2に、Ⅰ型およびⅡ型電離箱(表1)の飽和電流を示す。

Ⅱ型電離箱の曲線は、電離箱によってはかなり高電圧にしても完全な飽和を得ることが難しいことを示している。

C. 飽和電流と電離箱の壁の化学組成の関係

表2は、電離電流の電離箱壁の化学組成への依存性を示す測定結果を示す。Ⅱ型電離箱(表1)をそれぞれの物質で作し、200kV, 0.48mm Cu + 1mm Al フィルターの条件下で電離電流(炭素電離箱に対する相対値)を計測した。

電離箱壁の原子量が増加すると電離電流が増大することは、電離電流の一部がX線によって電離箱の内壁から発生する光電子によることから明らかである。既に緒言で、その数が実効原子番号の3乗に比例することを示した。従って、表2に示す値は、横軸を原子番号の3乗、縦軸を電離電流の計測値(炭素を1とする相対値)としてプロットすると非常に簡単なグラフになる。このようにして表2を表わしたものが図3で、グラフは直線となる。

このグラフによって、どのような壁の材質であっても実効原子番号が分かれば、所定の放射線に対する電離電流を求めることができる。以下に、電離箱の大きさが一定以下であれば、電離箱の形によらずこのグラフが使えることを示す。しかしグラフは波長に依存する。所定の放射線に対してこれを求めるには、2つの異なる物質(例えば炭素壁とマグネシウム壁)について電離電流を計測することが最も簡単である。計測値を前述のような座標(横軸に壁の材質の原子番号の3乗、縦軸に電離電流)にプロットする。所定の放射線に対して2点を結ぶ直線が得られる。いくつかの例を後に

表 1. 電離箱の大きさ

I	II	III			IV			V
型	形状	電離箱			電極			実効容積 (cc)
		長さ (cm)	直径 (cm)	容積 (cc)	長さ (cm)	直径 (cm)	容積 (cc)	
I	円筒型	2.060	0.558	0.503	2.000	0.119	0.022	0.481
II	円筒型	1.112	1.095	1.050	1.000	0.119	0.011	1.039
III	円筒型	1.540	2.020	4,928	1.400	0.119	0.015	4.913
IV	直方型	3.0 × 3.0 × 0.5		4,500	2.4 × 2.4 × 0.023		0.133	4.467

表 2 (照射条件 200kV, 0.48mm Cu + 1mmAl. 電離箱 II 型, 容積 1.039cc)

I	II	III	IV	V	VI	VII
材質	組成	N _{eff}	N _{eff} ³	I _{beob}	I _{ber}	Δ %
黒鉛	C	6	216	1.00	1.00	0
尿素	N ₂ H ₄ CO	6.25	244.4	1.03	1.02	+1
マレイン酸	C ₂ H ₂ O ₂	7.11	359.7	1.08	1.11	-3
硝酸アンモニウム	NH ₄ NO ₃	7.47	416.8	1.15	1.16	-1
空気	23.2% O+ 75.5% N+ 1.3% Ar	7.69	454.5			
硝酸ナトリウム	NaNO ₃	8.85	692.9	1.39	1.39	0
マグネシウム	Mg	12	1728	2.23	2.23	0
アルミニウム	Al	13	2197	2.60	2.61	0
硝酸カリウム	KNO ₃	14.3	2924.4	3.16	3.19	-1
硫黄	S	16	4096	4.00	4.15	-4

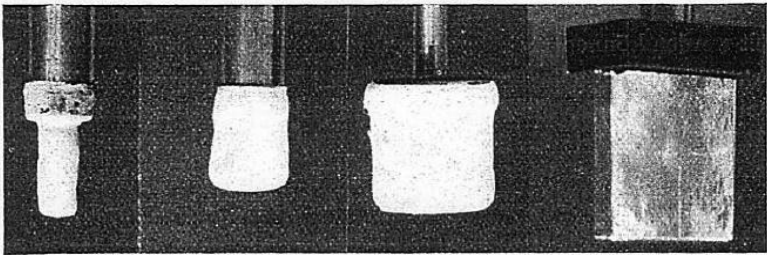


Fig. 1a.

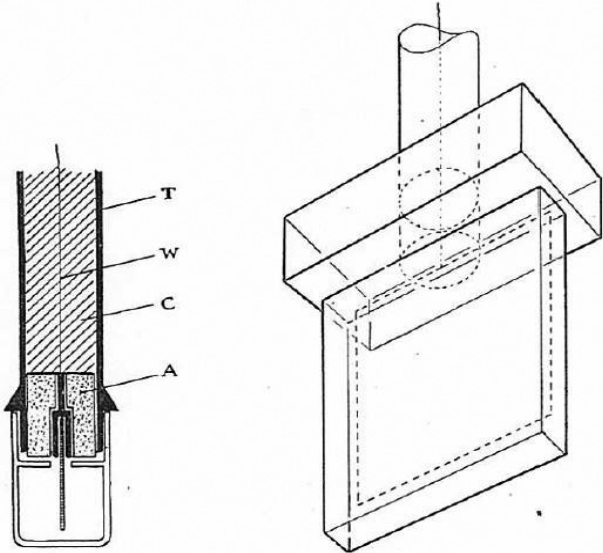


Fig. 1b.

Fig 1c.

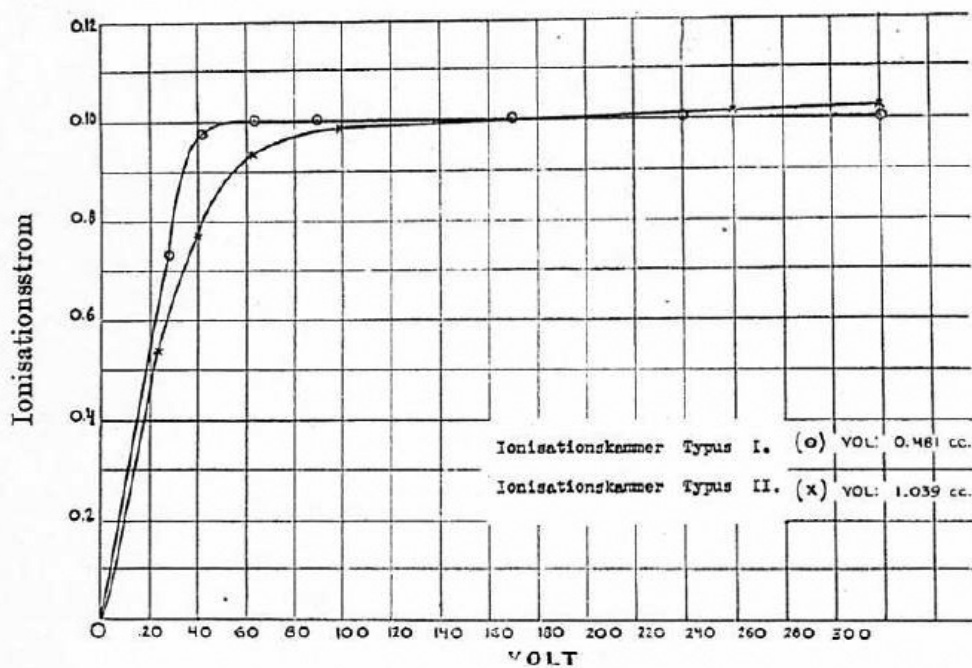


図2. I型(○) およびII型(×) 電離箱の飽和電流

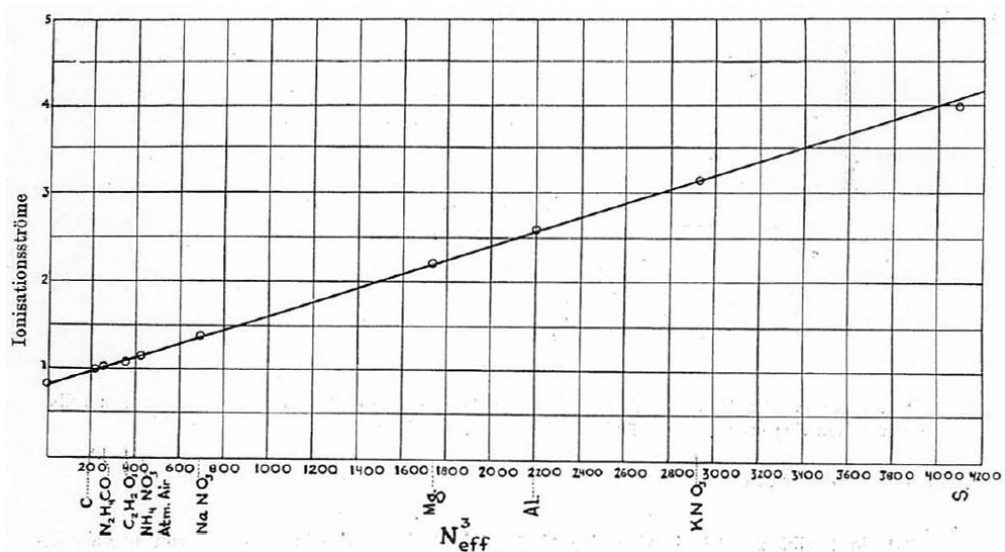


図3. 表2のプロット

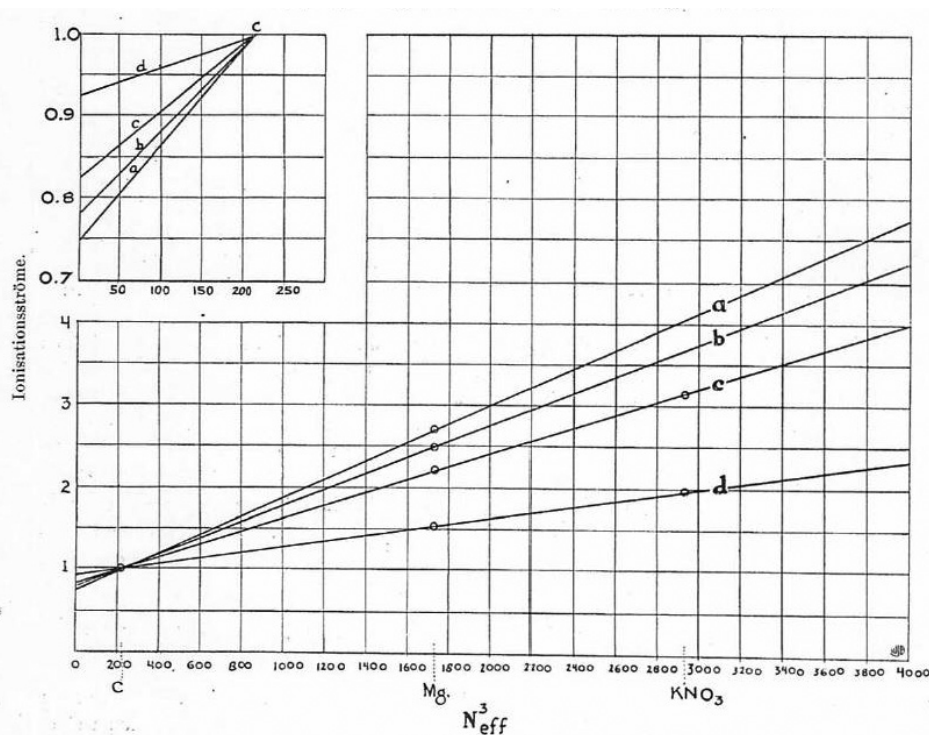


図4. X線硬度による差

示す。電離電流の計測値が壁の材質の原子番号の 3 乗に対して直線となることは、以下のように説明できる：電離箱内で X 線により生成される電離電流は、3 つ部分から成ると考えられる。緒言で触れた反跳電子、空気中の光電子によるもの、および電離箱壁の光電子である。理論的研究 [5] から、第 1 の部分は壁の材質に依存しない。第 2 の部分も同様である。しかし、第 3 の部分は壁の材質の原子番号の 3 乗に比例する^{*5}。

総電離電流は、次の式で表わされる

$$I = C_1 + C_2 N_{\text{eff}}^3 \quad (\text{a})$$

この式は、 N_{eff}^3 について線形である。

表 2 の第 6 列は、式 (a) から計算された電離電流で、定数 C_1 , C_2 はそれぞれ 0.825, $0.175/6^3$ である。実測値 I_{beob} と計算値 I_{ber} の一致は非常に良好である。

放射線の硬度が増加すると、反跳電子に比して光電子の強度が減少することが、図 3 の直線が平らになることで示されている。硬度の差がグラフに及ぼす影響を図 4 に示す (図 3 の直線を比較のために再掲している)。4 本のグラフに示す線質は以下の通りである。

a: 100kV, 2mm Al

b: 100kV, 0.43g/cm タングステン酸 + 0.13mm Cu + 1mm Al, $\lambda_{\text{eff}} = 0.180 \text{ \AA}$

c: 200kV, 0.48mm CU + 1mm Al

d: 200kV, 0.55g/cm Ag + 0.75mm Cu + 1mmAl, $\lambda_{\text{eff}} = 0.115 \text{ \AA}$

このグラフは、炭素およびマグネシウム壁の電離箱によるもので、 KNO_3 の電離箱も含まれている。計測値を表 3 に示す。

D. 全電離電流に占める反跳電子の割合

図 3 の直線を延長した横軸との交点は、実効原子番号 0 の材質で作った電離箱壁で生成される電離電流を示す。この場合、電離電流の一部は、前述のように原子番号に依存しない反跳電子によるものであり、一部は電離箱内の空気からの光電子によるものである。しかし、空気の容積が光電子の飛程の長さに比して小さいと、空気由来の光電子の比率が小さくなる。前述のように、これは放射線の線質、電離箱の大きさに関係する。従って、上記の例で $N_{\text{eff}}=0$ における横軸の値は、反跳電子による電離のみを表わしており、この場合は約 0.83 である。炭素壁電離箱の総電離電流を 1 とするとき、その 8% が反跳電子、17 が光電子によるものとなる。同様に、図 4 に異なる線質の放射線に対するこの比率を示した (図 4 の左上は見やすいように縦軸を拡大したものである)。これから、線質が硬くなるほど、電離箱の材質の違いによる電離電流の差は小さくなることがわかる。200 kV, 強いフィルターをかけてこの程度の硬度の X 線を生成することは既に可能であ

り、炭素電離箱、アルミニウム電離箱による電離の差は 15% 程度である。硬い γ 線では、炭素電離箱で生成される電離電流は、アルミニウム電離箱とほぼ同程度である。

E. 電離電流の電離箱の形状、大きさへの依存性

小型電離箱における電離のメカニズムを以下の様な簡単なモデルで説明する。均一な材質の限りなく小さな空間が一定の X 線照射野内にあり、そこには高速電子が存在し、その一部は反跳電子、その他は光電子とする。電子の組成は、二次電子の生成と吸収 (制動放射線を含む) によって決まる。いずれの作用も、同じ化学物質の密度に比例するので、電子環境の組成は物質の密度には依存しない。電子 1g 当りの吸収と反跳電子の生成が当該化学物質の組成に (軽い物質である限り) 依存せず、光電子の生成は実効原子番号の 3 乗に比例するとすれば、化学物質の組成が変化した場合の電子環境の変化は、実効原子番号の 3 乗に比例して速度が厳密に分かっている光電子数の増加のみである。いまこの空間を気体で満たすと、一定数のイオンが生成される。その空間が、既存の平衡に影響しない程度に小さければ、生成されるイオン数は空間の容積に比例する。反跳電子の量は原子番号に依存しないので、これは空間の大きさが気体中の光電子の飛程に比して小さい場合の問題である。以下の様に結論できる：電離箱の大きさが気体中の光電子の飛程に比して小さい場合、電離箱内に生成される電離電流は電離箱の容積に比例する。上述の 4 つの線質 a, b, c, d は、いずれもこの条件と満たしている。

表 4 の結果は、黒鉛およびアルミニウムの電離箱について、このことを証明している。

(各数値は、4 つの電離箱の強度／容積比を示す。黒鉛電離箱 II 型を 1 とする相対値)

この比例関係は、非常に大きな電離箱には適用できない。その場合は、壁の材質が空気と同じ実効原子番号である場合、すなわち緒言に示した式により 7.69 である場合のみ適用できる。このような電離箱で生成される電離電流は、無限に広い空気中で等量の空気から生成される電流と常に同じである。

F. 小型標準空気電離箱

これまで、X 線を単位「レントゲン」で計測するためには、大きな電離箱が使用されてきた。これは、一定の空気内で発生するすべての二次電子による電離を検出するように設計されたもので、大容量の電離箱 (Friedrich ら), あるいは高圧電離箱 (Siemens 社) [15] (Behken) [16] として実装されている。

このような電離箱は、例えば患者の実際の計測には利用できないことから、指頭型電離箱を大きな電離箱と

表 3 (線質 a, b, c, d. 電離箱 II 型, 容積 1.039cc)

I	II	III		IV		V		VI	
材質	N _{eff}	線質 a		線質 b		線質 c		線質 d	
		I _{beob}	I _{ber}	I _{beob}	I _{ber}	I _{beob}	I _{ber}	I _{beob}	I _{ber}
黒鉛 C	6	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
空気	7.69	1.30	1.27	1.23	1.23	1.19	1.19	1.09	1.09
マグネシウム Mg	12	2.71	2.71	2.50	2.50	2.23	2.23	1.55	1.55
硝酸カリウム KNO ₃	14.3	-	-	-	-	3.16	3.19	2.00	2.00

表 4 (表中の値は各線質における 4 つの型の電離箱それぞれの強度 / 容積比. 2 型の炭素壁電離箱に対する相対値)

I (型)	II (容積)	III (強度 / 容積比)							
		線質 a(軟)		線質 b		線質 c		線質 d(硬)	
		C	Al	C	Al	C	Al	C	Al
I	0.481	-	3.25	0.98	2.92	1.00	2.56	-	-
II	1.039	1.00	3.25	1.00	2.96	1.00	2.57	1.00	1.73
III	4.913	1.03	3.32	0.98	2.94	1.01	2.57	-	-
IV	4.467	1.01	3.25	0.98	2.96	-	-	0.99	1.71

表 5 (電離箱 II 型, 容積 1.039cc)

I (材質)	II (電離電流)		
	線質 a(軟)	線質 c	線質 d(硬)
黒鉛	0.77	0.84	0.91
レドマノール	0.81	0.87	0.93
セルロイド	0.82	0.83	0.88
濾紙	0.92	0.89	0.96
筆記用紙	0.92	0.90	0.97
角	0.87	0.92	0.99
空気	1.00	1.00	1.00

比べて較正する。しかしこのような小型電離箱の較正は、波長に依存しており、それもしばしば大きく依存する。特に、角、セルロイド、紙、黒鉛、アルミニウムなどの小型電離箱の材質が不純物を含み、その特性 X 線が使用する X 線の範囲にある場合である。このような例は、我々も実験でしばしば経験したが、小型電離箱では X 線の線質がわずかに変化するだけで、電離電流の示度が大きく変化する。さらに、小型電離箱では、材質が空気と同じ実効原子番号を持たない場合は、電離電流が常に波長に依存する。コンプトンの反跳電子効果と電離箱の有限容積により、小型電離箱と大型電離箱の電離電流の比は一定ではなく、特定の波長で最大となる^{*6}。

これは実際的には、個々の小型電離箱は使用する波長域全体を含むデータで較正を行ない、使用時には所定の線質のデータを再現されなくてはならないことを意

味している。

この問題を回避するために、上述の我々の検討から、単位「R」の計測、再現には、壁が空気と同じ実効原子番号を持つ小型電離箱を使用することが实际的である。

我々の定義は以下のようなものである：

X 線量の全体単位「レントゲン」は、空気の実効原子番号をもつ材質壁の電離箱において、X 線エネルギーが 1cc の標準状態の空気に飽和電流によって生成する電氣量を静電単位で表したものである。

このような空気電離箱^{*7}として、我々は黒鉛 100 に対してマグネシウム 18.6 の組成のものを使用している。

前述の 4 つの線質について、この空気電離箱で電離電流を計測した。表 3 に 4 つ全ての値を示す。C 項に

記載の方法を用い、空気の実効原子番号は 7.69 として電離電流を計算した。表 3 の計算値 I_{ber} は実測値と良く一致している。

G. 技術的物質による電離箱の電離電流

技術的物質の電離箱と小型空気電離箱の比較は興味深いところである。表 5 に 3 つの異なる線質について示した。いずれも小型電離箱の値を 1 とした相対値である。

(表に示した変動に加えて、多くの電離箱で日常的に不規則な変動が経験される。例えば、アルミニウムや紙では、不純物によると思われる不規則な電離電流がしばしば表示される。角、セルロイドの電離箱では、空気中の湿度の差による容積の変化に起因する変動が認められる)。

H. レントゲン (R) 単位による紅斑線量

我々の小型標準空気電離箱を、紅斑線量を R 単位で決定するために多くの患者に直接使用した。X 線の皮膚への生体作用は、一般に軽度の第 1 度紅斑である。以下に例を示す。

撮影条件：管電圧 200kV, フィルター 1mm Cu + 1mm Al, 距離 50cm, 照射野 20 × 20cm, 管電流 8mA

検電計の容量 63.7cm

検電計の電圧感度 4.0 V/ 目盛

標準空気電離箱で 10 目盛の移動に要する時間 23.1 秒

(電離箱は照射野の中心、患者の皮膚上)

電離箱の容積 1.04cc

紅斑時間 65 分 (Cleveland Clinic 放射線部長 Dr. U. V. Portmann による)

式 $Q = C \times V / 300$ により、以下の値が得られる。

紅斑線量 = $(63.7 \times 40 \times 65 \times 60) / (23.1 \times 300 \times 1.04)$
= 1,380R

我々の計測では、120kV 4mm Al から 200KV 1mm Cu の間で、平均的な紅斑線量は約 1,400R であった。

付言すると、上記の条件で、Fürstenau インテンシメータ (No.70402) の示度 1.0F を、手元にある Fürstenau インテンシメータ No.70712 の帝国物理学研究所の校正証書 (1924 年 4 月 11 日) に記載の換算係数 (F/R) 5.3 を適用すると紅斑線量は約 1200R となり、これは変換

係数が不確実であることを考えると、我々の求めた紅斑線量に近いことは興味深いところである。

I. 要約

1. 空気中で光電子の飛程に比して小さな電離箱において、電離電流は電離箱の形状に依存せず、電離箱の容積に比例する。これは、容積約 1cc の電離箱、深部治療に用いられる X 線にも適用できる。

2. 小型電離箱で生成される電離電流の壁材質への依存性は、式 $I = C_1 + C_2 N_{\text{eff}}^3$ (N_{eff} は壁材質の実効原子番号) で表される。

3. この関係は、実効原子番号の 3 乗を横軸、電離電流を縦軸とするグラフに表すと直線となる。個々の照射条件について C_1 , C_2 を求めたり、グラフを描くには、異なる 2 つの壁材質 (例えば炭素とマグネシウム) について電離電流を求めれば良い。

4. このグラフにより、小型電離箱の総電離に対する反跳電子の比を直接求めることができる。

5. レントゲン単位で絶対線量を計測するには、空気と同じ実効原子番号 (7.69) をもつ材質、容積 1cc の小型電離箱の使用が推奨される。

6. 比較的硬い線質に対する紅斑線量は、この型電離箱により約 1,400R と計測された。

【注】

1. もちろん、生物学的作用の質が同じ波長領域についてのことである。

2. 詳しい議論については、H. Fricke & O. Glasser [5] を参照されたい

3. さまざまな速度の電子による相対的電離が、速度に依存しないことは、理論的考察だけでなく実験的にも後述の事実により支持されるしかし、発生した変化の数、例えばイオンの数が、全体的な影響を支配する場合がある。

4. Lind による総説を参照されたい [7]。

5. これについては、必ずしも完全ではないが理論的な説明が下記にある。Holthusen. Fortschr XXVI:222 [9]

6. この良く知られた現象を Holthusen は「壁放射の過小利用」としているが、理論的には不正確で、実際にはここに示すように Compton 効果により説明される。

7. これまでのところ、実効原子番号 7.69 をもつ単一の明確物質を発見できていない。2 つの塩の混合物、例えば硝酸アンモニウム 100 に対して硝酸ナトリウム 15.8 の物質を試みたが、このような塩類の電離箱は恒久的ではない。

【参考文献】

1. Compton, H. A.: Phys. Rev. 21, 483, 1923. — Compton, H. A. und Hubbard, I. C.: Phys. Rev. 23, 439, 1924. — 2. Debye, P.: Phys. Zschr. 8, 24, 1923. — 3. Wilson, C. T. R.: Proc. Roy. Soc. A. 104, 1 und 192, 1923. — 4. Bothe, W.: Zschr. f. Physik 16, 319, 1923. — Bothe, W.: Zschr. f. Physik 20, 237, 1923. — 5. Fricke, H., und Glasser, O.: Zschr. f. Physik 1924. Nat. Acad. Sc. (10), 441, 1924. — 6. Owen, E. A.: Proc. Roy. Soc. A. 86, 430, 1912. — 7. Lind, S. C.: „The Chemical Effects of Alpha-Particles and Electrons“, p. 85ff., 1921. — 8. Friedrich, W., und Kroenig, B.: Strahlenther., Sonderbd. III, 1918. — 9. Holthusen, H.: Fortschr. d. Röntgenstr., Bd. XXVI/2, S. 211, 1918/19. — 10. Martius, H.: Fortschr. d. Röntgenstr., Kongreßh. 1922, S. 158. — 11. Russ, S.: Proc. Roy. Soc. B. Vol. 95, 1923. — 12. Redfield, A. C., und Bright, M. E.: Am. J. Physiol. LXVIII/2, 354, 1924. — 13. Wood, F. C.: Am. J. Roentg. and Rad. Ther. 1924. (Im Druck.) — 14. Fricke, H. und Glasser, O.: Am. J. Roentg. and Rad. Ther. 4, 435, 1924. — 15. Siemens & Halske, Berlin. D.R.P. Nr. 362 456. — 16. Behnken, H.: Zschr. f. techn. Physik 1, 1924.