

純粋な電子放出による強力な X 線管球

A powerful Röntgen ray tube with a pure electron discharge

Coolidge WD. Phys Rev 2:409-30, 1913*

1. はじめに

通常の X 線管の対陰極 (ターゲット) における鍛造タングステンの使用については既に述べた [1]。このターゲットの開発にあたっては、さまざまな異なる設計を管球に実装して、10kW 変圧器と機械式整流器から成る市販されている最も強力なレントゲン装置で試用した。ターゲットが破壊されるエネルギーを求めるこの管球の使用実験からは、通常とは異なる視点が得られる。この実験をもとに良いターゲットを開発し、X 線管球のその他の制約について研究を進めたいと考えている。この制約としては、次のようなものが挙げられる。

1. 放電電流が小さい場合、真空度が徐々に上昇し、X 線透過性が亢進する。
2. 放電電流が大きい場合、急速に真空度が、時に上昇、時に減弱する。
3. 強い放電電流を数秒以上持続させると、ターゲットが赤熱して大量のガスを放出し、再排気を必要とする場合がある。
4. 通常の銅で裏打ちしたターゲットが赤熱するまで高温にすると、管球壁に銅金属が急速に付着し、電流を切っても真空状態では温度の低下が非常に緩徐であるためにこれがしばらく持続する。
5. 試験した X 線管球の多くが、常に同じ場所、すなわち陰極周囲でガラスのひび割れをおこす。
6. 多くの管球で、ターゲットの焦点が急速に変動する [2]。変動しない場合も多くは、大量の放電後に焦点の位置が永続的に変化する。
7. さまざまなガス調整器で管球の抵抗を低下させることは比較的容易であるが、それに比べて上昇させることは難しい。
8. 著しい大放電では、アルミニウム製陰極の中心部が融解し、融解小滴 (molten globule) が形成されて管内に飛散、付着する。溶融範囲が狭ければ、陰極の彎曲が変化し、その結果焦点が移動すること以外に不都合はない。
9. 電氣的特性が同じ管球は 2 つと存在しない。
10. 管球の特性は、X 線の透過度が放電電流の大きさに応じて変化し、理想状態とはかけ離れている。
11. 周期的な間欠電流を通電する場合、電位が同じ

であっても、放出される X 線は非常に不均一である。これは、管球の耐電圧が運用電圧よりもはるかに高いことに起因する [3]。

このうち、制約 3 と 4 は、通常の銅で裏打ちしたターゲットではなく、大きな全タングステン製ターゲットを使用することで回避できることが判明した。このようなターゲットは、白熱化しても持続的に使用できる。全タングステン製ターゲットは、銅に関する問題を回避できるのみならず、管球の基本的な特性に影響を及ぼさない。

制約 8 については、アルミニウムの低融点に起因するもので、同じ大きさのタングステン製陰極に替えることで解決できた。このような管球は、従来の管球とは全く異なる振る舞いを示し、放射線技師の立場からは絶望的なものであった。放射線技師が従来の管球について「気難しい」(cranky) と表現とするような状態であった。すなわち、どのような強さの電流を流しても、抵抗が急速に上昇して、10 万ボルトという電位を加えても放電しないような状態になる。真空調整器からガスを放出すると、元の状態に回復することができる。この現象は、実験の度に繰返し発生した。わずか数秒の持続通電も論外であった。しかし、以下のような方法で回避できた。すなわち調整器からガスを導入し、1 回放電する。抵抗が上昇したらただちにさらにガスを追加し、再び通電する。これをできる限り素早く繰り返す。通電の度に陰極の温度は上昇する。対陰極、陰極ともに同程度に温度が上昇することから、対陰極を衝撃する電子と同程度に陰極に陽イオンが衝撃するものと考えられる。陰極の中心に生じる円錐状の陥凹から見て、この程度の真空度においては、陽イオンの衝撃 (bombardment) は、少なくともその主体は約 2mm の範囲に集中しているものと考えられた。陰極が強く白熱すると [4]、ただちに管球のふるまいは変化し、少なくとも数分にわたって連続使用できるようになる。放電を短時間中断して陰極を冷すと、再び「気難しい」状態に戻るが、上記の方法を繰り返すと再び連続使用できるようになる。

このようなタングステン陰極の管球は、使用すると急速に黒化する。この付着物は金属タングステンである。陰極の中心に必発する円錐形陥凹があることから、これが付着物の成因と思われるが、この金属破壊は明らかにこれを衝撃する陽イオンの機械的な作用によるものである。

* General Electric 社研究所, Schenectady, N.Y.

通常の X 線管球にタングステン陰極を使用することにより著しく不安定になることから、通常のアルミニウム陰極管球においてガスが果たす役割に注目する必要がある (タングステン陰極はその製造方法のため、ガスを著しく少ない状態にする必要がある)。

上記の制約を考察すると、これらはいずれもガスの使用に起因するもので、従って高度の真空とすることにより回避できるものと思われる。

Richardson らは [5]、陰極を単に加熱するだけで電子が発生することを示した。しかし熱電子現象で得られる電流は報告者によって大きな開きがあり、この原理に基づく X 線管球は、従来の X 線管球の抵抗値とおなじく不安定なものとなりうる。さらに白金、炭素など通常の物質は、完全にガスがない状態では使用することが難しいことから、タングステンを使用した高度真空条件下では、熱電子放出現象が完全に停止する可能性も考えられる [6]。しかし、高度真空状態での 2 つのタングステン電極間の熱電子放出現象に関する Irving Langmuir 博士の実験 [7] は、非常に期待の持てるものであった。この実験結果によると、高度に排気して管球内のガスが次第に減少しても、熱電子放出電流は一定の値まで上昇してゆく。

X 線管に熱陰極を使用する考え方は新しいものではないが、著者の知る限り、陽イオンが優位の役割を果たさなくなるほど十分な真空状態にこれが適用されたことはない。

Wehnelt と Trenkle は [8]、高温石灰陰極を用いて、400 ~ 1,000 ボルトで非常に軟らかい X 線を発生させた。Wehnelt はまた別の論文で、この熱石灰陰極をブラウン管に使用したことを報告しているが、1,000 ボルト以上にすると白金の裸の部分から陰極線が発生し、陰極をひどく破壊するとしている。

1,000 ボルトという低い電圧で発生する X 線は、当然のことながら通常の使用には「軟らか」過ぎる。

Lilienfeld と Rosenthal は [9]、X 線の透過性は X 線管の真空度とは無関係であると述べている。彼らが使用したアルミニウム陰極と白金対陰極は、通常の X 線管球の電極と同じような形状、位置である。これに加えて、彼らの管球は陽極と補助熱陰極を備えている。低電圧電源からの電流は、熱陰極から陽極に流れ、この電流が陽イオンを発生して主陰極を衝撃してそこから電子を発生する。この管球の動作は、陽イオンの存在に依存している。これなくして、アルミニウム主陰極から電子を取り出す手段は存在しないからである。Lilienfeld は、さらに管球を排気する実験を行ない、管球からガスが完全になると電極は陽イオンを発生しないことを示した。この見解では、純粋な電子放出というものはあり得ないことになる。管球およびガラ

スからガスを脱気する Lilienfeld の実験は完璧なものに思えるが、著者の経験では、この結論を導くほど十分に電極から脱気されているとは思えない。非常に高温に加熱できるタングステン電極を備えた管球でも、陽イオン効果が数時間持続するが、電極から十分にガスが脱気されると消失することを著者は経験している。

Langmuir 博士の研究では、高真空度下では高温タングステン陰極が、その温度によって決まる放出速度で持続的に電子を放出することが知られている。

さらなる実験では、10 万ボルト以上の非常に高電圧では、この放出速度が一定になることが示されている。X 線撮影や X 線透視にこれを応用するには、焦点に集中させるための適切な方法の開発が必要である。そして最後に、X 線管内で大量のエネルギーが熱に変換されることから、非常に重いターゲットが必要であり、従って大きな金属塊から十分に脱気する技術の開発も必要となる。

このような開発努力が成功し、この原理に基づく、前述の制約をすべて回避した管球が得られた。これは、X 線管のすべての特性を最新の電子伝導や気体分子化学の概念で説明できるようになったという点において、特に物理学的に興味深いものといえる。以下にはひとつの型 (焦点型 focusing type) についてのみ詳述し、その他の型については続報に譲ることとする。

2. 新型管球の一般的な記載

新型管球の構造が従来型と異なるところは、主に以下のような点である。

管内圧は、従来型では数 μ 気圧であったのに対して、新型では可能な限り低く、数百分の一 μ 気圧以下である。

陰極の主体は、タングステンあるいはタンタルフィラメントなど電氣的に加熱できる物体で、これをモリブデン、タングステン、あるいはその他の高融点金属製の導電性のリングあるいはシリンダー内に置く。リング、シリンダーは陰極の加熱部、あるいは加熱部の電位を任意に調整できる外部電源に接続する。陰極の加熱部は電子源となり、リング、シリンダーは陰極周囲の電界を調整して、陰極線がターゲットに所望の焦点を結ぶように働く。

対陰極 (ターゲット) は、陽極と同時に動作する。

管球は真空度が著しく高度で、従来の管球では 10 万ボルトでも電流が流れない程度に高度である場合のみ、正常に動作する。

3. 動作原理

この管球の動作では、第 5 節に述べる管球の特性からわかるように陽イオンは発生しない。この結果、動

作原理は著しく単純なものとなる。

電子放出の原理は、純粋に熱電子放出 (thermionic) によるものである。

フィラメントからの電子放出率は、Richardson の法則に従う。すなわち、加熱フィラメントからの最大熱電子放出電流は、

$$i = a\sqrt{T}e^{\frac{b}{T}}$$

ここで T は絶対温度、 e は自然対数の底、 a, b は定数である。

本稿に述べる管球についていえば、表 1 に示す温度と電圧の範囲において、この単純な法則によって管球の伝導性を完全に記述できる。しかしさらに高温域では、放出電流の増加はこの法則から予測されるよりはるかに遅いものとなる。陰極と陽極の距離が大きい別の型の管球では、表 1 の温度範囲においても、同様のことが言える。このような場合における Richardson の法則からの逸脱は、Langmuir 博士によって、陰極近傍の負電荷の空間密度によることが説明されている [10]

4. 管球 No.147 の詳細

以下の表のデータ収集に使用した管球 No.147 について述べる。図 1 に全体像を示す。図 2 には、陰極およびターゲット前面の詳細を示す。

陰極

図中、25 は密にらせん状に巻いた扁平なタングステンフィラメントである。直径 0.216mm、長さ 33.4mm のフィラメントを 5½ 巻したもので、最外周の直径は 3.5mm である。これは重いモリブデン線 14, 15 に電気溶接されており、その他端は 2 つの銅線 16, 17 に溶接され、これらはそれぞれ白金線 18, 19 に溶接されている。モリブデン線は、膨張係数がモリブデンに等しい特別なガラス塊 12 に直接密着している。この最初の密着部分は単に高温フィラメントを確実に支持する

ためのもので、外側の密着部分が真空を維持するためのものである。支持管の外縁 13 は管球自体と同じドイツガラス (German glass) で、このため 12 と 13 の膨張係数の差を吸収するために S の部分に一連の中間ガラスを挿入する必要がある。小さなガラス管 20 は銅線 16, 17 の短絡を防止するためである。

フィラメントは、電気的に良く絶縁された小さな蓄電池からの電流により加熱される。

回路には電流計と調節可能なレオスタットが挿入されており、フィラメントの電流はレオスタットによって 3~5A の範囲で非常に細かく調節できる。この電流の範囲において、フィラメント端の電位は 1.8~4.6V、フィラメント温度は 1,890~2,540K である。

焦点装置

焦点装置はモリブデン製の円筒管 21 から成る。内径 6.3mm で、タングステンフィラメントと同心に取付けられており、その内縁はタングステンフィラメント面より 1.0mm 突出している。ガラス管 12 の端に密着した 2 本の頑丈なモリブデン線 22, 23 で支持されている。24 において、フィラメントリードの 1 つと金属的に連結している。

これは焦点装置としての機能のほかに、陰極の加熱部の背後からの放射を防ぐ働きもある。

対陰極 (ターゲット)

対陰極 (ターゲット) 2 は、陽極としても働き、鍛造タングステン単体から成り、陰極に対する面の直径は 1.9cm、重量は約 100g である。モリブデン線 5 によって、モリブデン製支持台 6 に堅固に結合されている。この支持台は、この支持台は長方形でこれに 3 つのすべてモリブデン製の分割リング 11, 11, 11 がリベット固定されている。分割リングはガラス陽極 7 にぴったりはまっている。これには、陽極を適切に支持するこ

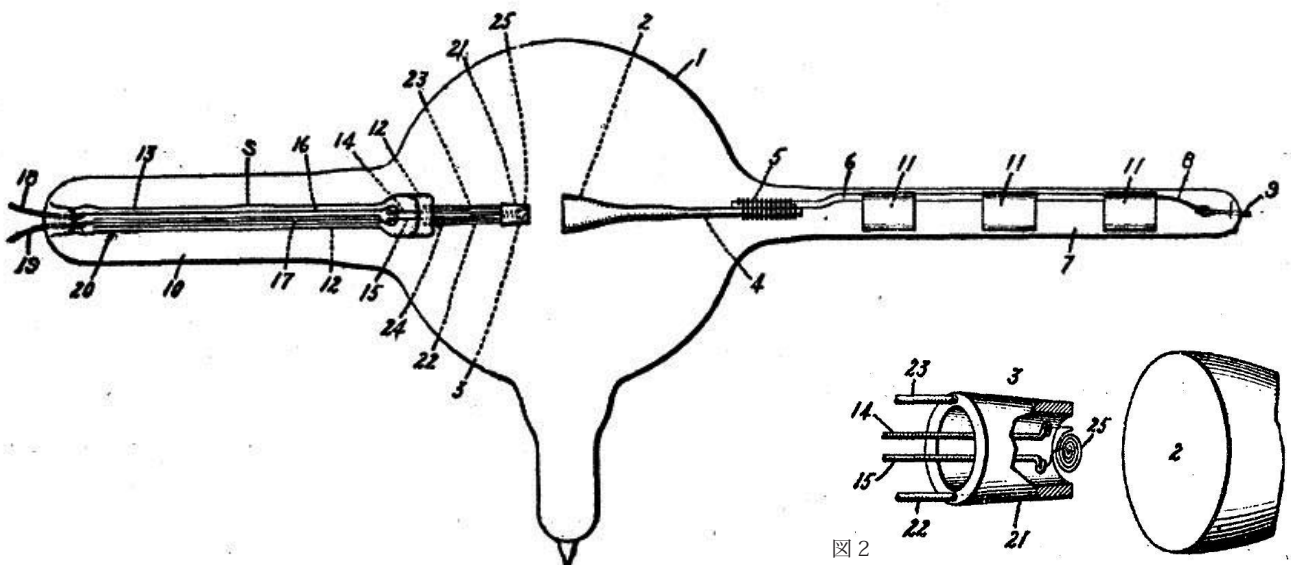


図 1

図 2

とと、長方形の支持台からの熱を伝導して、引き込み線 9 に大量の熱が流入しないようにするという 2 つの役割がある。

管球

ドイツガラス製で、直径約 18cm である。

排気

できる限り徹底的に排気する。

初期には水銀ポンプが使用され、管球とポンプの間に液体-空気トラップを置いて水銀蒸気を除去するようになっていた。ポンプに接続している間、管球全体をオープンに置いて間欠的に 470℃ まで加熱する。加熱と加熱の間には、その真空状態が許す限り最大限の放電を行なう。管球は、数時間にわたって従来型管球の特性を示し、この処理によってこの特性を失って完全な電子放出特性を獲得するには数日を要すること多い。

排気時間を大幅に短縮するには 2 つの方法がある。タングステン陽極を、タングステン管用真空炉 [11] にいれて非常な高温で予備加熱する。モリブデン製支持台も同様な方法で、やや低い温度に加熱する。もうひとつは、水銀ポンプの代わりに Gaede 分子ポンプを使用し、さらに管球とポンプの接続部を非常に大きく短いものとする。

排気の最終段階では、非常に強い放電を 1 時間は持続し、ファンを回して管球の温度が高くなりすぎないようにする。

最終的な管球の圧力は非常に低く、数百分の一 μ 気圧を超えることはなく、おそらくさらに低いものとなる。

接続および使用方法

管球の接続法を図 3 に示す。T：管球、B：小型蓄電池、A：電流計、R：レオスタット（操作者を X 線から保護する鉛遮蔽の後ろから調節整できる）、S：スパークギャップ（尖った電極間でやはり鉛遮蔽の後ろから距離を調節できる）、M：ミリアンペア電流計（遮蔽の後ろから読める）。

電池には高压を接続するため、地面から完全に絶縁しておくことが必要である。

高電圧源としては、Röntgen Appratus 社の 10kW Snook 装置を使用した。これは直流により駆動される回転式変換機から成り、150V、60 サイクル/秒の交流を閉鎖磁気回路の油で絶縁された変圧器に送出する。この変圧器の二次側から、高压電流が（回転軸に直接接続されている）機械式整流スイッチとミリアンペア電流計 M を介して管球に流れる。変圧器の出力は、一次側の可変抵抗で調節できる。

実験を通して、常に管球にはファンで送気する。ファ

ンを使用しないと、管球のガス圧がやや上昇し、その結果電流がやや小さくなる。

5. 管球の特性

A. フィラメントを加熱しなければ放電電流は流れないこと

フィラメントを加熱しなければ、電圧を 10 万 V にしても、管球はいずれの方向にも電導性を示さない。

B. 管球は電流を一方向にしか流さないこと

管球は、加熱フィラメントが陰極にならない方向に電流を抑制する。従って、交流電源を供給するとそれ自体に整流作用をもつ。

しかし焦点管球の場合、交流を使用すると最大許容入力エネルギーがかなり低下する。ターゲットの焦点の温度がフィラメントと同程度まで上昇すると、管球は整流作用を完全に停止し、焦点の温度がさらに上昇すると逆方向に電流が増加ようになる。この現象は、従来型管球のように真空度に悪影響を及ぼしたり管球壁に金属付着物を生じることはないが、ターゲットからの陰極線に衝撃される管球部位の無用な上昇を招き、そのガラス壁から余分な X 線が発生することになる。非焦点管球の場合は、陰極線が陽極面全体を衝撃するので、管球が完全整流できる許容入力エネルギーは、単に陽極の面積を増やすことによりいくらかでも大きくできる。

C. 放電電流は基本的にフィラメントの温度によって決まること

この設計では、管内に放電する電流量は、基本的にフィラメントの温度によって決まり、その増減にただちにに応じて変化する。

図 1 に示す管球 No.147 において、管球をポンプからとりはずして完成した状態で温度と電圧が放電電流に及ぼす影響を表 1 に示す。焦点の直径は 3mm である。

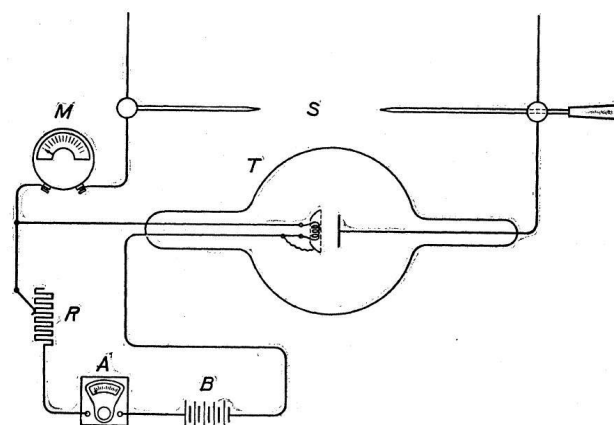


図 3

表 1

I.	II.	III.	IV.	V.	VI.
Equivalent Spark Gap (Cm.).	Filament Current C (Amps.).	Filament Temp. T (Degs. Abs.).	Discharge Current i (Milliamps.).	$-\text{Log} \frac{i}{\sqrt{T}}$	$\frac{.434}{T} \times 10^6$
4	3.40	2010	1.7	1.4212	216.1
	3.45	2028	3.5	1.1094	214.1
	3.51	2049	6.4	.4985	212.0
	3.60	2077	11.3	.6056	209.1
	3.66	2088	15.8	.4611	208.0
	3.67	2104	24.0	.2813	206.4
	3.71	2116	27.0	.2313	205.3
	3.73	2121	40.0	.0611	204.8
6	3.29	1976	1.6	1.4438	219.8
	3.43	2020	3.3	1.1341	215.0
	3.52	2053	6.5	.8433	211.5
	3.59	2074	10.6	.6331	209.4
	3.64	2090	15.3	.4753	207.8
	3.70	2110	22.3	.3138	205.8
	3.72	2120	28.3	.2113	204.9
8	3.27	1970	1.6	1.4431	220.4
	3.43	2020	2.9	1.1902	215.0
	3.53	2055	5.7	.9005	211.3
	3.59	2074	9.7	.6716	209.4
	3.64	2090	13.8	.5201	207.8
	3.71	2116	21.8	.3242	205.3
	3.73	2121	26.2	.2449	204.8
	4.07	2240	36.2	.1164	193.9
10	3.09	1909	0.6	1.8411	227.5
	3.31	1980	2.5	1.2504	219.4
	3.40	2010	4.4	1.0081	216.1
	3.50	2046	8.2	.7416	212.3
	3.57	2070	12.6	.5576	209.8
	3.67	2104	20.7	.3455	206.4
	3.65	2096	21.8	.3222	207.2
	3.71	2116	27.0	.2313	205.2
	4.13	2259	35.4	.1279	192.3
12	3.28	1973	1.7	1.4171	220.2
	3.44	2023	3.4	1.1215	214.7
	3.55	2061	7.3	.7937	210.7
	3.57	2070	10.1	.6537	209.8
	3.65	2093	16.9	.4325	207.5
	3.68	2107	22.4	.3116	206.1
	3.68	2107	20.1	.3586	206.1
14	3.11	1917	1.0	1.6413	226.6
	3.36	1998	2.5	1.2624	217.4
	3.52	2053	4.5	1.0030	211.5
	3.64	2090	8.6	.7255	207.8
	3.71	2116	14.7	.4954	205.3
	3.72	2120	19.6	.3708	204.9
	3.73	2121	26.0	.2482	204.8

表の各列は以下の値である。

I：スパークギャップの等価長 [cm]

II：加熱電流 C[A]

III：II列のCに対応するフィラメント温度T[K]. 温度は、事前に較正したタングステンランプと比較して計測した。

IV：管内の放電電流 i[mA]

V：計算値 $-\log i/\sqrt{T}$

VI：計算値 $.434/T \times 10^6$

このデータを得るための実験手順は以下の通りである。まずフィラメント電流を所定の値に設定する。次にスパークギャップを所定の値に設定する。次いで管球に通電し、スパークギャップをスパークが時々飛ぶ程度に両極間電圧を(変圧器の一次側抵抗を変化させて)調整する。放電電流値をミリアンペア電流計で読む。

次にフィラメント電流を、次の設定値まで増大する。これにより放電電流は上昇、電極間電圧は低下するが、電圧をもとの値まで増加させて新たな放電電流を読み取る。

このようにして、管球がついに不安定になるまで各電圧に対する放電電流をひとつずつ測定してゆく。さらに異なる電圧について温度-放電電流の関係の測定を繰り返す。

各電圧に対する電流と温度の関係を図4に示す。各曲線は非常に接近しており、測定した電圧範囲においては、放電電流の大きさは事実上電圧に依存しないことを示している。このことから、電流は常に飽和値にあることがわかる [12]。

Richardsonによると、加熱フィラメントの飽和電流とフィラメントの絶対温度は、式 $i = a\sqrt{T}e^{\frac{b}{T}}$ で示される。ここで i は電流、 T は温度、 a, b は定数で、 a は加熱物質中の電子密度に関係し、 b は電子が金属表面を

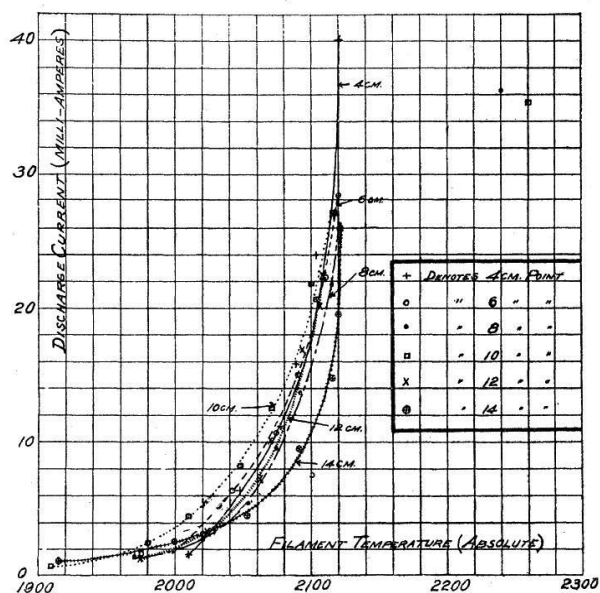


図4

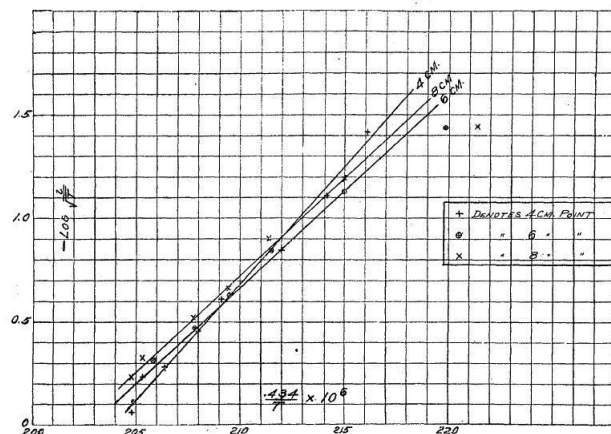


図5

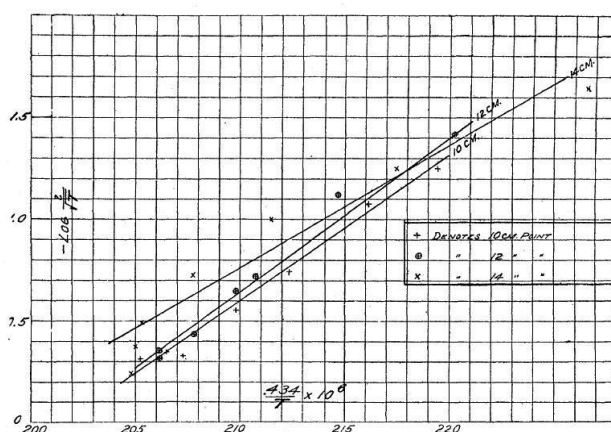


図6

通過するための仕事量を表わす。 e は自然対数の底である。

Richardson は [13], この式を彼のデータに、まず両辺の 10 を底とする対数をとって当てはめた。この時

$$\log i = \log a + \frac{1}{2} \log T$$

あるいは

$$-\log \frac{i}{\sqrt{T}} = b \frac{.434}{T} - \log a$$

これは直線の式である。

この時、IV列、V列の式をプロットするといずれも直線となり、使用した電圧範囲において Richardson の法則が成り立てば、管球の伝導率を表わす。

図5、図6のグラフは、データがほぼ直線上に乗ることを示している。直線が横軸と成す角から、以下のよう定数 b を得る。

Voltage Corresponding to Spark Gap of	Value of b .
4 cm.....	115,000
6 cm.....	93,000
8 cm.....	94,000
10 cm.....	71,000
12 cm.....	76,000
14 cm.....	60,000
Average.....	85,000

この b の値が、Langmuir 博士が報告した値の範囲に収まっていることは興味深い。Langmuir 博士の値は、この管球の陰極と比べて質量が 10 万分の 1 程度のタ

ングステンフィラメントを使用した管球で得たもので、ガスが h に莫大な影響を与えることを示している。従って非常に大きなタングステンは、融点近くまで熱しても真空状態を有意に損なうことなく使用することができるという結論を引き出すことができる。

フィラメント温度が低い場合、放出される電子の数が少なく、従って管内の放電電流（飽和電流）も小さい。印加電圧をそれ以上大きくしても電流は増加せず、単に陰極線の速度が上昇してX線の透過性が亢進する。

フィラメント温度がさらに高い場合は、高温フィラメントから放出される電子の数以外に、優位にはたらく電流制限因子が存在する。これは陰極前面の陰電荷の空間密度で、これは事実上逆起電力となる。この因子は、低電圧域では非常に重要な役割を果たす。しかしX線管の場合、電圧が非常に高いため、適切な設計であれば表1に示すようにその影響を完全に回避することができる。

D. X線の透過性は電極間の電圧によって決まること

管球から放出されるX線の透過性は、電極間の電位差に応じて増大する。

変圧器のような可変電圧電源で駆動される管球の場合、スパークギャップが同じだからと言って、写真学的にX線の透過性が従来型の管球と等価であると予想することは安全とは言えない。しかしBenoistの透過計 (penetrometer)[14] を使った実験により、等価であることが見いだされた。

この実験は、新型管球を一定の条件にいかにか速やかに適合させられるかという観点から興味深いものである。

まず従来型の管球で撮影し、放電電流、スパークギャップを記録する。次いで管球を新型管球に替える。従来型と同じ放電電流、スパークギャップの長さを示すように調整するには多少の手間がかかるが、2つの管球で得られた透過計の読みは同じ値を示した。

E. 安定した特性で連続使用が可能であること

図1に示した管球No.147において、有意の特性変化なく管球を持続的に使用できた。

フィラメント電流は4.1Aとする。この時放電電流は25mAである。印加電圧は、スパークギャップ7cm相当とする。

そして管球にいかなる調整も加えることなく50分間連続使用する。放電電流、スパークギャップ等価長を2分おきに測定したものを表2に示した。

F. 焦点の鮮鋭度

焦点の鮮鋭度 (sharpness) は、主に管球設計によって決まる。所定の電圧において放電電流が飽和値に達し

表 2

Time.	Discharge Current (Milliamps.).	Equivalent Spark Gap (Cm.).
11:48 A.M.	25	7.0
:50	25	7.0
:52	25	6.9
:54	25	6.5
:56	25	6.5
12:00 P.M.	25	6.7
:02	25	6.9
:04	25	6.5
:06	24	6.4
:08	24	6.5
:10	24	6.5
:12	23	6.6
:14	25	7.0
:16	25	6.8
:18	24	6.8
:20	25	6.9
:23	23	6.7
:26	23	6.9
:28	25	6.9
:30	25	6.9
:32	25	7.0
:34	24	6.9
:36	25	7.0
:38	24	7.1

ないようなフィラメント温度であれば、焦点の大きさは印加電圧で変化する。しかし図1の管球では、スパークギャップ等価長4～14cm相当の電圧の範囲では、焦点の大きさに有意の変化はなかった。

管球の焦点は、フィラメントとモリブデン管の前面（ターゲットに面する側）の距離を離すことにより、より鮮鋭にすることができる。この設計変更は、管球の温度－電流特性にも影響を及ぼし、同じ放電電流値を得るために必要なフィラメント温度が高くなる方向に変化する。

同様に、フィラメント温度と焦点装置前面の距離を短くすると、焦点はより不鮮鋭になる。

以上の観察結果はいずれも、焦点は陰極と陽極の間の等電位面の形状によって決まること、そして陰極側の表面が優位な影響をもつことを示している。

陰極近傍では電子の速度は比較的遅く、従ってその移動方向は強い電気力の方向に一致する。陽極近傍では、電子の速度は非常に速いので、同じ力が同じ飛程距離に働いても偏向は小さなものとなる。

G. 焦点位置の固定性

陽極の焦点は変動することなく、完全に固定している。これは、焦点が揺動し、時に非常に短い撮影時間中にも明らかに移動する従来型のX線管球と大きく異なる点である [15]。焦点移動の影響はもちろん、X線写真や透視画面で、移動方向に平行な線を除いてボケとなる。新しい管球において真空状態が比較的悪い状態で使用される排気の初期においては、焦点が揺動する場合があるが、電極、管球からガスが抜けるに従って移動性は減少し、最終的には完全に消失する。J項に述べるようにこの移動性の消失は、ガラスの蛍光の消失と並行する。焦点の移動は、陽イオンが管球ガラス壁の静電気の分布を攪乱することに起因するものと思われる。

H. ガス圧のかんりの変動にも安定であること

管内のガス圧は非常に低いので、他の特性に影響することなく数倍増加したり限りなく低下することがありうる。

ガス圧のわずかな影響は以下の実験から知ることができる：管球を持続的にポンプにつなぎ、McLeod 圧力計で 0.113μ 気圧から 0.035μ 気圧まで低下させる [16]。管球の放電電流は 3.1mA を保ち、管球のスパークギャップが 7.9cm から 8.6cm に変化するだけである。従来型の X 線管球で同様の気圧変化を起こせば、電流、電圧に非常に大きな変化をもたらす。

I. 高エネルギー出力状態で連続使用が可能であること

タングステン製ターゲットは非常な高温で使用できることから、高エネルギーを持続的に放出可能である。

J. ガラス壁に蛍光を発生しないこと

適性に使用されれば、管球のガラス壁のいかなる場所にも蛍光は発生しない。また同時に、前壁の強い限局性高温部も認められない。蛍光、限局性高温部の欠如は、ターゲットからの二次陰極線によるガラス壁の衝撃が無いことを示すものと思われる。これは従来型の X 線管球において、白金ターゲットの場合、一次陰極線としてガラスを衝撃する電子の $3/4$ もの電子がターゲットから放出されて二次陰極線としてガラス面を衝撃することが知られていることと大きく異なる点である。二次陰極線を除去すれば、従来型の X 線管球のガラスから発生する無用かつ有害な X 線の多くを防ぐことができる。

ガラス壁の衝撃がないことは、理論的にも実際的にも興味深いものである。蛍光が発生しないことのその他の説明として、まず次のようなものが考えられる。考えやすい仮説として、衝撃は発生しているが従来型にくらべてガラス面のガスがはるかに少ないために蛍光が発生しない、というものがある。しかし微量のガスを生じると蛍光が突然発生すること、蛍光が線状に認められ急速に場所を移動することからこの仮説は否定的である。蛍光は存在するが、フィラメントやターゲットからの強い放射のために見えない、という仮説も考えられる。しかしこれは、フィラメント、ターゲットが最高温度の状態で、ガスを放出すると蛍光が突然発生することからやはり否定的である。

簡単な説明として、従来型 X 線管球では大量の陽イオンが存在するという事実に基づくものと考えられる。管球使用の初期には、ガラス内面が強く負に荷電しており、相当数の陽イオンを引きつけられなければその状態にとどまる。ガラス面の負電荷の存在は、一次陰極線、二次陰極線いずれの形でも陰極線がそこに到達することを阻害するように働く。

K. 起動時電圧および作動時電圧の本態

起動時 / 切断時の電圧は、作動時電圧に等しい。これは起動時 / 切断時電圧が作動時電圧よりはるかに高い従来型の X 線管球と大きく異なる点である [17]。この違いは次のように説明できる。従来型管球では、電源回路を閉じた時のイオン数は、近傍の放射性物質に起因する自然発生イオンだけなので非常に少ない。回路が閉じると、衝突によってイオン数が急増し、電極間の電圧は低下する。一方新型管球の場合は、回路を閉じる週間、あるいはそれ以前から大量の電子が存在し、その数は放電電流によって変化しない。

L. 均一な X 線束の実現

X 線管は、所望の透過性をもつ強力、均一な一次 X 線束を放出しなくてはならない。この目的のためには、定電位の電源で駆動される必要がある。放電が間欠的である場合も、このことが必要とされる [18]。

M. 放電電流により陰極が加熱されず、陰極破壊も起きないこと

初期の実験から、従来型の X 線管球では、2 つの同型の凹型タングステン電極を管球内に対称に配置して直流で使用すると、陰極が陽極と同程度に強く加熱されることが知られている。実際のところ、作動中の管球を見ると、白熱した電極のいずれが陰極でいずれが陽極か判断できないほどである。このような状態では、管球は急速に黒化するが、その付着物は明らかに加熱部に深く明瞭な陥凹を生じた陰極に由来するものである。簡単な説明は、陰極線が陽イオンにより衝撃され、この衝撃により陰極線を作る電子が放出されるというものであり、従って加熱効果も陰極の破壊もこれによるものと考えられる。

高真空度で無ガス電極をもつ新型管球では、陰極が衝撃を受ける証拠はない。排気の初期段階において、フィラメントを加熱せずに放電させると、放電によってフィラメントが、陽イオンによる衝撃と同じように強く加熱される。しかし排気完了後にフィラメントを加熱して使用すると、非常に強く放電させてもフィラメント回路の電圧計、電流計に変化はない。陽イオンの衝撃が相応に存在すれば、温度が上昇し、タングステンフィラメントの抵抗が増大してこれが計器に現われるはずである。またこの現象が非常に限局性かつそれなりの程度であれば、フィラメントの当該部分が溶融するはずである。このような抵抗の変化やフィラメントの限局性破壊は、蛍光発生など他の現象から管球の真空度が不十分であることが知れた管球でのみ発生している。

陰極の破壊は、管球の黒化としても認められる。数時間使用した後でも、管球の付着物は非常にわずかであり、このわずかな付着物もターゲットの焦点における

タングステンの蒸散によりすべて説明しうるものである。

N. ターゲットが入力エネルギーの制約因子であること

新型管球にはひとつ制約がある。小焦点管球で一定以上のエネルギーを入力すると、管球抵抗が不安定になり、突然大きく低下し、放電を停止したり限界値まで低下させると元に復する現象が発生する。この現象の原因は以下のようなものと思われる。

入力エネルギーが非常に大きく小焦点である場合、ターゲット面の焦点が溶融して蒸散する。このタングステンの蒸発は焦点で発生することから、一次陰極線はすべてここを通過して衝突し、イオン化する。これによってももちろん管球抵抗は低下する。焦点が大きい場合は、この現象が起こる限界電流も大きい。ターゲットが薄ければ、厚い場合に比較してはるかに低いエネルギーで蒸散するので、管球の設計が限界値を大きく左右する。非常に短期間の通電では、長時間の場合に比較して限界値は大きくなるが、数秒間の通電は無制限に可能である。

ターゲットのタングステンを他の高融点金属に替えれば、最大許容入力エネルギーを大きくできるであろう。ターゲットの物質に求められる必須条件は、高密度、高融点、高熱伝導度、低蒸気圧である。タングステンは、他のいずれの金属よりも高融点、低蒸気圧である。融点の面で最も近い競合候補はタンタルであるが、熱伝導度は 1/3 しかない。モリブデン、イリジウムは、融点では候補となりうるが蒸気圧が高すぎる。オスミウムは、熱伝導度がタングステン管の 1/2 しかない。

一般的な銅で裏打ちしたタングステンターゲットは、完全に脱気することが非常に難しいが、その他の面においては瞬間最大エネルギー入力が多いことから特定の目的には相応しいといえる。

6. 管球使用に伴う危険

従来型の管球は、安全面から非常に大きな入力エネルギーで連続使用することはできなかった。新型管球は、小焦点であっても、例えばスパークギャップ 7cm、管電流 25mA で、数時間にわたって何も手を加えずに連続使用できる。

診断、撮影を除けば、ほとんどの目的には焦点管球を使用する利点はない。焦点管球を使用しなければ、前述のエネルギー入力に関する制約は消失し、どのようなエネルギー入力にも対応して管球を設計できる。これによって、従来使われてきたものよりもはるかに大きな X 線強度を使用可能である。

上記のことから、従来型の X 線管球について長年の経験から培われてきた注意事項は、新型管球につい

ては不要である。

7. 要約

以上、新しい強力な X 線管球について述べた。従来型とは、その原理が放電電流が純粋に熱電子放出現象によるという点で異なっている。管球、電極ともに可能な限り脱気されており、その特性はすべて陽イオンが有意の役割を果たしていないことを示している。

管球は、電流を一方向にのみ流し、従って直流、交流いずれでも作動する。

発生する X 線の強度、透過性は、使用者が完全に制御することができ、それぞれ独立に増減できる。

数時間にわたって、高出力、低出力いずれの状態でも、放射線の強度、透過性に有意の変化を来たすことなく連続使用できる。

作動中の管球は、ガラス壁の蛍光や前面の限局性高温部を認めない。

起動時電圧と作動時電圧は同じである。

任意の透過性をもつ強力、均一な一次 X 線を発生する。

新型管球の撮影、診断、治療目的への応用については、間もなく X 線関連雑誌に報告する予定である。

最後に、本研究を通じて支援を惜しまれなかった Lonard Dempster 氏に謝意を表するものである。

【注】

1. Coolidge. Trans Am Inst EE. June, 870-872, 1912
2. X 線撮影では、露光中の焦点の移動は当然のことながら画質を損なう。
3. F. Dessauer. Phys Zeitschr 14:246-247, 1913
4. 陰極の加熱効果は、アルミニウム陰極にくらべてタングステンでははるかに大きかった。陰極、および対陰極でもある陽極がいずれも同じ大きさ、形状のタングステン製で、管球内に凹面が相対するように対称性に配置した管球で実験した。持続通電すると、両極とも白熱し、目視で判断する限り同程度の温度と思われた。陰極をアルミニウム製とする場合、陰極に発生する熱はターゲットほど大きくない。Willey は、従来型の X 線管球では、管球壁、管球内に発生する熱の 75～85% がターゲットで発生することを示している [Vernon J. Willey. Archives of the Roentgen Ray, XII:250, 1908]。
5. Proc Camb phil Soc. XI:286, 1092. Proc roy Soc. LXXI:415-518, 1903
6. Goldstein. Ann der Physik 24:91, 1885. Goldstein は、白金が有意の熱電子放出現象を示すためにはほとんど融点まで加熱する必要があることを示し、次のように結論している。「完全な真空状態で加熱した純粋な白金線は、検電器 (galvanometer) で検出できる限りにおいて、陰電荷、陽電荷いずれも放出しない。」
7. この研究は発表されたばかりである。
8. A. Wehnelt, W. Trenkle. Sitzungsber d. Phys-Meic Soc in Erlangen. 37:312-315, 1905
9. J. E. Lilienfeld, W. J. Rosenthal. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen. 18:256-263, 1912
10. 同上

11. この真空炉の詳細については近い将来報告する予定である。加熱部は、内径 2.5cm, 長さ 30cm のタングステン管で、これが 100kW 変圧器に適当な端子で垂直に固定されている。加熱部は水冷金属シリンドー内にあり、その内腔は炉の最高温度下で数 μ 気圧に保つポンプに接続されている。

12. 曲線の右端の 2 点は、管球の不安定状態を示す。フィラメント温度を下げると不安定性はただちに消失する。

13. O. W. Richardson. Proc Camb Phil Soc. 11:293,1901

14. M. L. Benoist. C. R. 134:225,1902

15. Dr. Pfähler. Fortschritte auf dem Gebiete dr Röntgenstrahlen. 18:340-343,1911-1912

16. その後の実験では、さらにどれほど減圧しても、管球の性質が有意に変化するかという点には疑問がある。

17. Dessauer. 上記 3 を参照。

18. 従来型管球による透視では、管球の温度上昇、患者や使用者の危険を低減するために間欠的な放電が望ましいと考えられる。装置スクリーンの蛍光があるので、頻繁に断続してもあまり暗くならない。