

## X線管の起源、歴史、発展

*The origin, history and development of the x-ray tube*

*Gardiner JH. J Rönt Soc (London)\*. 5:66-80,1909*

少し以前に本学会の委員会の関心を集めた歴史的装置の収集が一段落し、貴重な管球のコレクションを Albert & Victoria 博物館の展示用に引渡した現在、この物理学者、医療関係者に供用されてきた優れた装置の歴史と発達を振り返る良い機会であると考えます。

### X線管の歴史\*\*

Röntgen 教授の「新種の光線」の発表に科学界が驚愕してから 13 年を経た現在、それを唯一放出することができる真空管は、「エリート」研究者の研究室の外ではほとんど知られることなく滅多に目にすることもないデリケートな実験器具から、少し器用な人間なら誰でも安全に扱える日用品へと変化しました。X線管の起源と発達を追跡することは、演者にとって大いに興味のあるところで、聴衆の皆様にもこれを分かち合いと存じます。しかし X線管そのものについてお話しする前に、現在では良く知られている装置の名称について前置きしたいと思います。

Röntgen 教授の発見時、そしてその後数年間、この発見が由来する高真空に関する古典的研究を尊重して Crookes 管と呼ばれてきました。しかし Crookes 管という言葉は、レントゲン線とは全く異なる効果を生み出す他のタイプの真空管についても使われるため、一般的には使われなくなりました。レントゲン管 (Röntgen tube) という言葉が提唱され、実際しばしば使われますが、光線の発見者は管球の起源、発達とはほとんど無関係であり、従ってこの呼称は適当とは言えません。現在広く使われている管球が、先の会長 Herbert Jackson 教授の示唆によるものであることから Jackson 管という名称も提唱されましたが、私は個人的な名称は避けて、意図することがそのまま伝わる X線管 (X-ray tube) を採用する方が良いと思います。

以下、X線管が現在のような効率的で美しい装置に発達する多くの段階を見る中で、X線を語るとき常に先達の研究を参照することになります。もちろん、X線管が現在に至る過程を語る度に William Crookes 卿について触れます。この飽くことのない研究者の仕事を核として、この進歩が生まれたのです。

Röntgen 教授の有名な発見に使われた Crookes 管は、洋梨型で、幅の狭い側に平たいまいる陰極があり、他端の小管の中に陽極があります。陰極線、あるいはもっと新しい呼び方をするなら、負に荷電した電子流は、

陰極版の面と直角に飛びだし、管の幅広い側の広い範囲に衝突して明るい蛍光、熱、そして X線を放出します。X線管の寿命は、初期の研究者なら皆が思い出す度に悲しくなるように、非常に短いものでした。せいぜい数回で、スパークで壊れたり、電子の衝突による熱でひび割れたりしたものです。寿命を延長するために様々な工夫がなされましたが、私が記憶している最も初期のものとしては、空冷 X線管のプロトタイプである、初代会長 Slivanus P. Thompson 教授によるもので、1896 年 3 月、私宛ての手紙に、当時としては理想的と考えられた X線管のスケッチがありました。使用時に、洋梨型の幅広い側を水を入れた薄いセルロイド製の皿に浸すもので、その下に写真乾板を置いて使います。当時、X線の発生はガラスの蛍光に依存すると一般に考えられていました。この考え方は間違いでしたが、これがラジウムその他の放射能の発見と、そこから生まれた多くの結果に結びついたことは興味深いことです。フランスの Poincare 氏が、X線が真空管壁の蛍光によって発生するのであれば、その他の蛍光物質からも X線は発生しうるのでないかと示唆したからです！現在では良く知られているように、この考え方は Henry Becquerel の実験で試験され、ウラン化合物の放射能の発見を生み、引き続き Sklodowska Curie 夫人によるラジウムの分離、その他の放射線元素の発見に結びついたのです。

話を X線管に戻しましょう。ちょうどこの頃、副会長の A. A. Campbell Swinton 氏によって、極めて興味深い X線管が考案されました。これは幸いなことに本学会のコレクションに無事残っています。この X線管は、実際に弾が的に当たらなくても目的を達しうることが多いということを良く示す例です (写真 V-1)。陰極線は管球端のガラス壁ではなく、その近くの薄い白金箔が受けます。あとは、Jackson 教授が数ヶ月後に提唱することになる Röntgen の発見以来最大の進歩と言われる彎曲した陰極の登場を待つのみでした。

この初期の、いわゆる焦点管球 (focus tube) が使われるようになる前の X線写真は、もちろん鮮鋭度を欠き、撮影にも長時間を要しました。しかし、生きた人間の手の骨を初めて目にした時のゾクゾクする感覚は決して忘れることができないでしょう。イギリスで初めて供覧された X線写真は、A. A. Campbell Swinton 副会長によるもので、王立写真協会の会合の席上、およびその直後の王立協会で供覧されたものです。Swinton 氏の御好意で、焦点管球が導入される以前に撮影された最も良い X線写真と考えられるものをここにスライドでご覧にいたします (写真 V-2)。

\* 訳注：本稿は Röntgen Society (London) 1909 年 4 月 1 日の例会で発表されたものである。

\*\* 本文中の小見出しは読みやすさを配慮して訳者が加えたもの。

Herbert Jackson 教授が、独立した電極あるいは陽極そのものの白金面に陰極線が焦点を結ぶ X 線管を提唱したことが、本格的な X 線写真の始まりであるという点については異論のないところでしょう。

陰極を彎曲させることによって陰極線を焦点に集中できることは数年前から知られており、現在の X 線管のプロトタイプについては、1894 年、王立協会誌の William Crookes 卿の論文に詳しく記載されています。Crookes 卿は、当時の実際の管球を寄贈してくださいました (写真 V-3)。

X 線はなぜ 1874 年に Crookes 卿ではなく、1895 年に Röntgen 博士により発見されたのか、という疑問が湧きます。私には、発見が可能な心理学的な時機というものが存在すると言えませんが、同じようなことは分子物理学の領域でも繰り返されています。大気中のアルゴンは、Rayleigh 卿と William Ramsay 卿が発見する 100 年も前に Cavendish によって分離されていたのです。

現在では、体のいかなる部位も驚くほど鮮明な X 線写真を撮影することができます。放射線の科学が生まれました。そしてこの間、Jackson 教授の提唱した管球を超えるものはありません。

様々な業者によって、電極の形状に、それぞれに固有の利点を謳った小さな改良が加えられました。そしてすぐに、忙しい臨床家はどの管球を買うべきか迷うようになりました。価格も 10 シリングから 5 ポンドまでさまざまで、これは大きな問題でした。当時の会長 J. Macintyre 博士は、「X 線撮影、透視用の最良の X 線管のメーカー」に金メダルを授与することにしました。

専門委員会が組織され、国内外の 28 社から管球が送られてきました。この種のものの常として、喜ぶのは一人だけでその他大勢は失望するので、ハンブルクの C. H. F. Müller 氏が受賞すると不満の声が多くの上がりしました。管球の選考に当たって行なわれた綿密な試験の内容が公表されなかったことを、常日頃残念に思ってきました。そこでこの機会にお話します。全く同一の条件下で、一見完璧に見える管球から出る X 線が、量的にも質的にも大きく異なることを証明して、受賞を決定づけた X 線乾板をご覧に入れたと思います。ここで質的というのは、主に鮮鋭な陰影をつくる性能のことを指しています。

予備審査で、管球は 6 本に絞られました。最終審査は写真で行なわれました。曝射、距離、現像の条件を完全に同一としましたが、陰影の濃度、鮮鋭度には大きなばらつきがありました。ベスト 2 が選ばれ、この二つについてさらに詳しく試験を行ない、安価な方に授賞することが決められました。その後、この 2 本は同じメーカーのものであることが判明しました。

この実際の管球はコレクションに見ることができます (写真 V-4)。

このような描出能の詳細にこだわる必要はないと考える方もあると思います。通常の医学用途については確かにそうかも知れません。しかし、X 線の用途の中には最大限の鮮鋭度が要求される場合があります。一例として、非常に小さなカエルの足を撮影して、動物学における疑問点を解決した X 線写真を供覧します (写真 V-5)。それぞれの足趾の先端に小さな鉤状の爪が、明瞭に描出されているのがお分かりと思います。この物体が顕微鏡的なサイズで、幅が 1/10mm に過ぎないということをお話したら、非常に高度な画質が重要であることが理解されるでしょう。

### X 線管の調整法

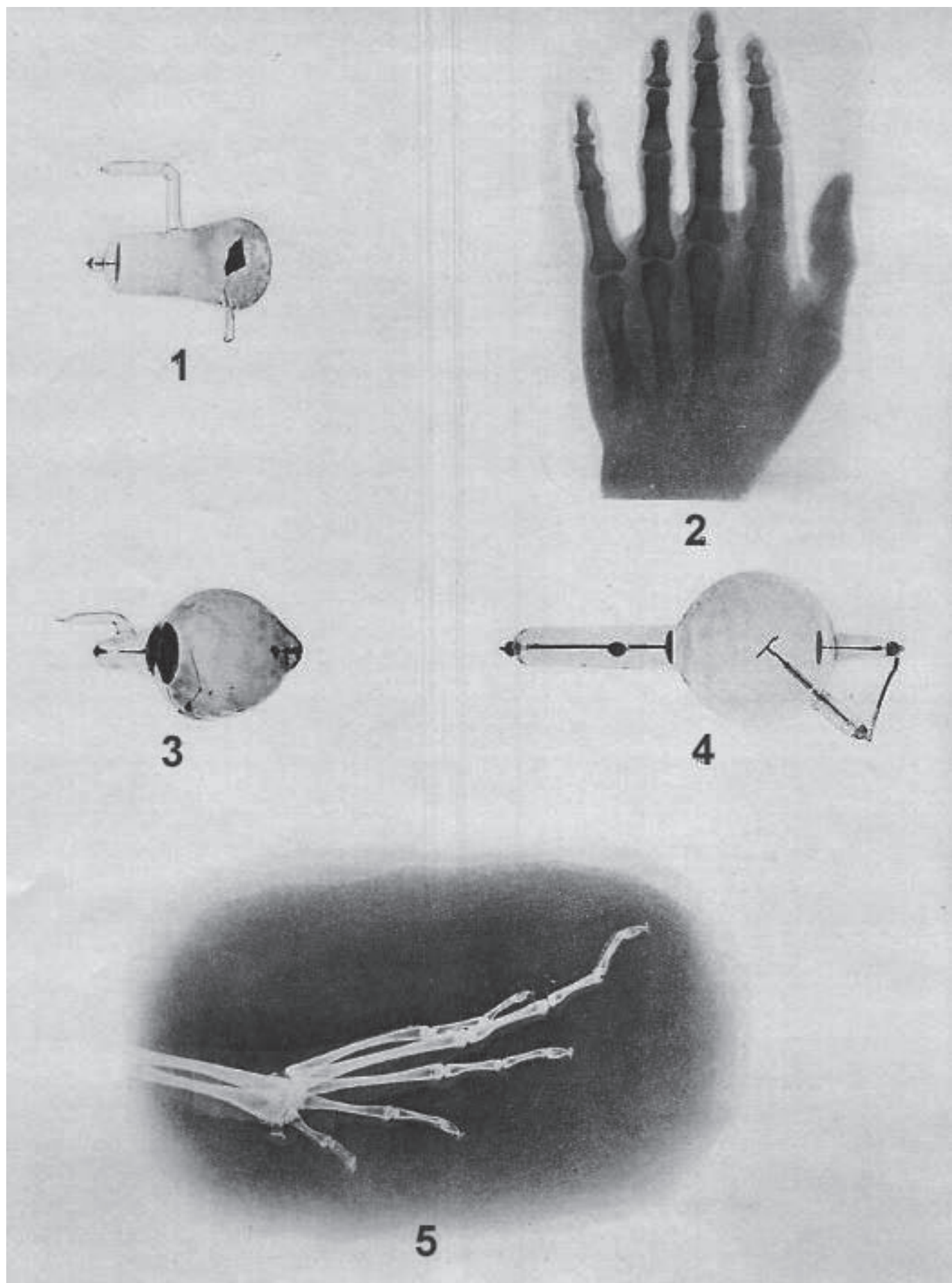
X 線管が恒常的に使用されるようになり、これまでも知られていた問題点が重大なトラブルの原因となってきました。つまり X 線の硬度、あるいは管球の電気抵抗が次第に大きくなることです。初期には、アルコールランプやバスバーナーで抵抗を下げるが行なわれていました。オープンで管球を焼く方法まで提唱されました。しかしこのような効果は一時的で、まもなく少量のガスを注入することで抵抗を下げる管球がいろいろ現われました。これには一般的に二つの方法があります。一つは管球に事前に封入されたいろいろな物質からガスを放出する方法、もう一つは外部からガスを注入する方法です。前者は William Crookes 卿が 1874 年の実験で採用した方法で、卿がコレクションに加えてくださった実際の管球の写真をご覧に入れます (写真 VI-1)。この管球は筒状で、水酸化カリウムを容れた小さなガラス管が付いています。ランプで加熱すると直ちにガスが放出されて真空度が低下します。この方法はさまざまメーカーに採用され、現在も使われています。

委員会のメンバー Harrison Glew 氏は、新しい独創的なアイデアの特許を出願しており、幸いにそのサンプルをコレクションに加えることができました。封蝋をコーティングした非常に小さな鉄片を容れた細い管が連結されており (写真 VI-2)、使用時にはその一つを磁石で分離して加熱するだけで真空度を低下させることができます。

まもなくこの封入法は自動化されました。ガスを含む物質を容れた小管が主管に接続されており、抵抗が増加すると小管にスパークをおこしてガスを発生させると抵抗を下げるすることができます。この方式は現在では日常的に使用されています。最も初期のタイプ、フィラデルフィアの Queens & Co. 社のものを写真 VI-3 に示します。

ガスを注入するもう一つの方法は、パリの Villard 教





写真V

授の考案になる浸透法 (osmosis method) と呼ばれるものです。一端を閉端としたパラジウムを容れた小管が、その終端が外に突出するように管球に連結されています。パラジウムは、赤熱状態では水素が浸透する性質を備えており、パラジウム入りの小管をガス炎で加熱するとただちに水素が管球内に放出されて抵抗が下がります。これは非常に便利で実用的な方法ですが、最新の最も巧妙な方法は Bower 管と言われるものです。ごく最近ここにも掲載されましたのであえて繰り返しますが、これは単に「ボタンを押す」だけで少量の空気が管球内に放出されます。

## X 線管硬化のメカニズム

使用時の管球抵抗の漸増は非常に興味深い現象で、常にガラス管壁の黒化を伴いますが、これは主に電極が電氣的刺激によって飛散した物質の付着によるものです。電極物質の崩壊は陰極でのみ発生しますが、William Crookes 卿が「電氣的揮発」と呼ぶこの性質

は、多かれ少なかれすべての金属に見られます。これは 1891 年の王立協会議事録の論文のテーマでしたが、この論文には多くの金属の相対的な揮発率のリストが掲載されています。

以下の表は、金を 100 とした相対的な揮発率です。

パラジウム	108.00
金	100.00
銀	82.58
鉛	75.04
錫	56.96
真鍮	51.58
白金	44.00
銅	40.24
カドミウム	31.99
ニッケル	10.99
イリジウム	10.49
鉄	5.50

また試験された金属のうち、マグネシウムとアルミニ

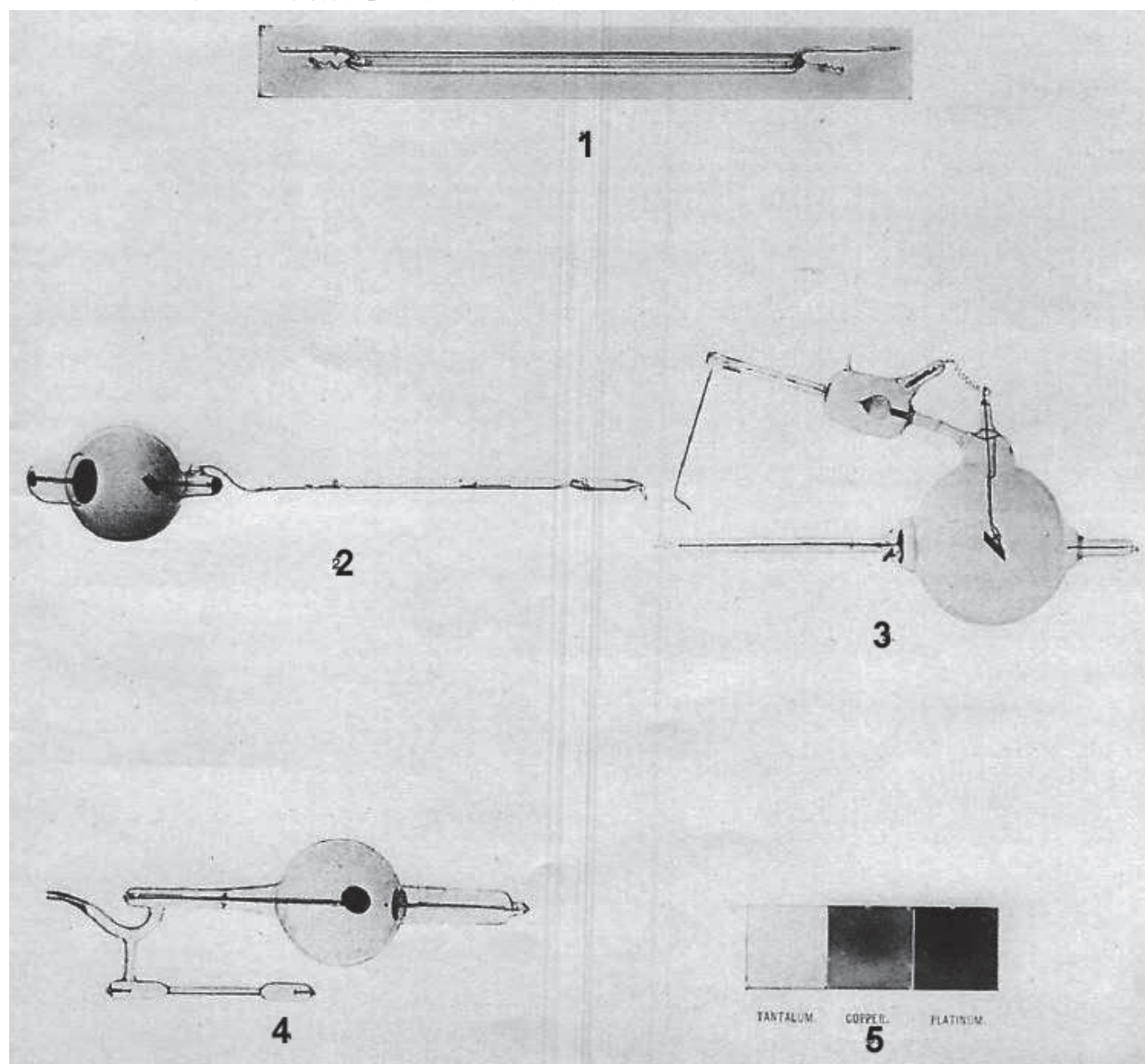


写真 VI



ウムの2つだけが、如何なる条件下でも非揮発性でした。これについて後にまた触れます。

常用するX線管の硬度が増す現象の原因については、さまざま説明がなされてきました。管球の硬度は、真空の程度、より正確に言えば残存ガス圧によって決まり、圧が低いほど管球は硬いことがわかっています。製造時にもともと残存していたガスがどうなるのか、という点については多くの推測があります。(数多くある)極端な説は除いて、ここではいずれもそれらしい二つの説明をとりあげます。本学会の重鎮 Swinton 氏は「叩き込み説」(Hammer it in)をとります。これは、管球のガス成分が、電氣的衝撃によってガラス壁内に埋入するというもので、Swinton 氏は、ガスが埋入した管球壁を軟化点まで加熱することによってその存在を美しい写真に示しました。

もう一つの説は、元会長の Frederick Soddy 氏による「塗り込み説」(Plaster it on)です。これによると、陰極からはガス成分に由来する電子流だけでなく、電極そのものからの金属片ともいうべきものが放出されています。私の理解するところでは、電流によって管球の内壁は硬いおぼじきのような電子流と、大きなセメント塊のような金属片に曝露されます。この硬い電子と粘着性の金属を浴びた管球壁には、多数の電子が埋め込まれた金属が貼り付き、その結果自由電子の数が減少し、真空度が上昇するというものです。

二つの説の優劣を論ずる立場にはありませんが、ここではもう一つ、ガス圧とは独立に管球の抵抗を増大させる要因があることを指摘したいと思います。

そこであらためて William Crookes 卿の研究について触れる必要がありますが、卿は1901年の電気技術者協会(Institute of Electrical Engineers)の講演で、高度真空状態の管球の電気抵抗は、管球の内壁の物理的状态に大きく依存することを示しました。透明なソーダガラスのような場合は、壁は容易に蛍光を發し、抵抗は比較的低値です。その一方、同じガス圧でも、内壁を導電性あるいは非導電性金属、あるいはどんなものであれ蛍光發生を阻害するようなものをコーティングすると、抵抗は直ちに上昇します。

この実験に手を加えたものを供覧します。ここに1本の管球があります(図1)。二つの電極が対面しており、周囲は透明なソーダガラスで覆われていて、非常に蛍光を發しやすい状態です。この管球の抵抗は非常に低く、火花間隙1/10インチ、約2,300ボルト相当です。管球内にはアルミニウム箔のシリンダー状スリーブがあり、スライドさせて金属チェンバー内の電極に接近させることができます。この状態では、管球の抵抗は非常に大きくなって23,000ボルト相当です。これから、残存ガスの量に関わらず単に電極からの金属物質が内壁に付着するだけで、X線管の抵抗が上昇す

ることが分ります。

この脱線話をする理由はまもなく御理解いただけと思いますが、まずはX線管の話に戻しましょう。

## 対陰極の溶融

近年のX線研究の進歩の結果、以前にも増して大電流が要求されるようになり、1~2mAではなく20~30mAを短時間に通電する必要があります。このような大電流では、対陰極の表面の過熱を防ぐ何らかの複雑な機構が必要です。現状では二つの方法が利用されています。一つは、Swinton 氏の方法で、対陰極面を金属塊で裏打ちして熱伝導熱により熱を放散する方法です。もう一つは、対陰極を外部から水を満たした箱あるは管の端に接する方法です。三つ目として、対陰極を一般に使われている白金より融点の高い金属に替える方法があります。最初期の試みの一つは、Mackenzie Davidson 氏によるオスミウム製対陰極でした。発明者から本学会に提供されたその一例を写真V-4に示しました。このX線管では非常に良い結果が得られましたが、金属の入手困難から一般的な利用には至りませんでした。この結果、水冷方式、大金属塊方式の二つの方法が現在行なわれています。

X線管の発展の最新状況に進む前に、過去13年の状況を簡単に振り返ってみましょう。洋梨型の古いCrookes管は、時に写真がぼやけ、すぐに割れるので過去のものとなっています。彎曲陰極を用いて、管球ガラス壁ではなく非融解性ターゲットに陰極線を集中させる方法が普及しました。急速な管球の硬化は、補助電極の導入、ガスの追加機構などによって大部分克服されました。対陰極の過熱をほぼ防ぐ方法も導入されました。比較的大きな電流に耐えるように大きな電極が作られ、ガラス成型法にも大きな進歩があり、現在では主な関心は対陰極の形状と材質に移っています。

陰極線がターゲットに衝突する部分は、一般に直径1~2mm以下で、ここで驚くべき性質を持つ一つのエネルギーの形が、全く異なる今もって驚異的かつ完全には理解されていない別の形のエネルギーに変換される部分であり、物理学者の最大事でもあります。陰極線を構成する物質の粒子は、これを分子、原子、電子など何と呼ぼうと構いませんが、何にせよ非常に大きな速度で飛翔して電気インパルスのもとで衝突し、これまで経験したことがないような状態をひきおこします。

X線と同時に、熱と物理的な力が発生することを我々

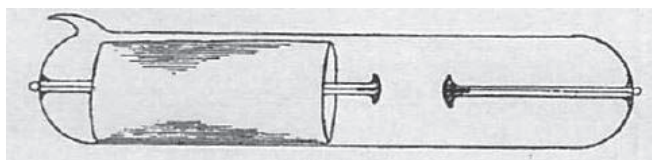


図1

は良く知っています。白金やルビーでさえも、蠟のように溶けてしまうことを知っています。小さな羽根車が回転して線路の上を転がることも知っています。しかしそれでも私は、陰極線の X 線への変換に随伴する熱と力の大きさを、我々はしばしば過小評価しているように思うのです。

しかしまた X 線管の話に戻しましょう。ターゲットの材質には、高融点、高原子量が求められることは以前から知られています。この条件により、物質の選択肢の範囲は比較的狭いものとなり、白金族の金属が通常選択されます。しかし、比較的小電流が使われた初期においても、発生する熱に十分注意しないとターゲットが熔融して破壊されることはすぐに明らかとなりました。

この問題はまだ部分的にしか解決されておらず、対陰極を大きな金属塊の上に設け、熱を逃がす特別な設計や、水冷法などより複雑な構造を備えた最新の X 線管においても、対陰極面の陰極線衝突部分が破壊される大きな危険は常に存在しています。

既に私が指摘したように、ここで発生する熱は、我々がこれまで扱ったことが無いほど大きなもののなのです。やかんに水をいっぱい入れてガスの熱い炎の上に置いても、やかんの底が焼け焦げる心配はありません。しかし、陰極の焦点の熱はこの炎の熱とはオーダーが違うもので、またきわめて限局性である点でも特殊です。対陰極面上で陰極線が衝突する場所だけで発生し、陰極線が止まれば直ちに止まるもののなのです。

本学会のメンバー数人の御厚意により、私は熔融してしまった相当数の対陰極を調べる機会に恵まれました。初期の薄い白金板のものは、顕微鏡下に非常に美しく見えました。白金が熱によって塑性になり、中空の陥凹が一つ形成され、そこに四方八方にのびる熔融した奇妙な線が見られました。写真 VII-1 に試料の顕微鏡写真を示しました。

白金が高価なため、メーカーはニッケルの表面に非常に薄く白金をコーティングした対陰極を作りましたが、これは二つの点で基本的に良くありません。一つは、白金の原子量が 58.7 と非常に小さいこと、もう一つは白金の薄いコーティングは、発生する非常な高熱に耐えられないことです。写真 VII-2 にこのようなターゲットの状態を示します。白金、ニッケルともに完全に貫通しています。

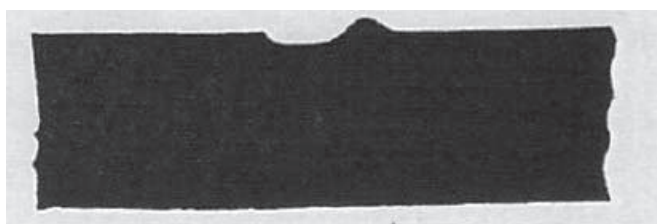


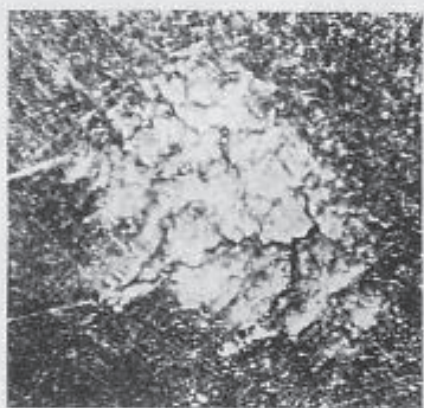
図 2

## タンタル電極

シーメンス社 (Siemens Bros. & Co.) が導入したタンタル性対陰極は、疑いなく非常に大きな前進でした。タンタルは非常に面白い金属です。その基本的性質は 1 世紀以上前から知られていましたが、コンパクトに成型できるようになったのは最近のことです。金属学におけるこの成果は、シーメンス社の二人の研究員の功績で、タンタル白熱電球の導入でその名前は広く親しまれることになりました。現在ではインゴット、シート、ワイヤなどの形で製造されており、数々の貴重な性質を備えています。非常に硬く丈夫で、原子量は 181 (白金は 195)、融点は  $2,300^{\circ}\text{C}$  以上 (白金は  $1,700^{\circ}\text{C}$ ) です [訳注：現在の知識ではタンタルの融点は約  $3,000^{\circ}\text{C}$ ]。この金属は X 線管の対陰極には特に適しており、シーメンス社の御好意でこの貴重な材料の十分量を実験用に提供していただきました。また焦点の影響が明らかに見られる対陰極のタンタル製プレートも頂戴しました。これらの試料の一つには、熱と物理的力の強さ、電流の停止に伴ってきわめて急速にこれが消失するというものについて先に述べたことを強く裏付ける所見がありました。写真 VII-3 に、プレートの焦点の顕微鏡写真を示します。これは William Crookes 卿の御好意で撮影されたもので、電流が相当の強さの場合に生じる顕著な効果が明らかです。このケースの電流は 30 mA 程度だと思います。金属が液化して、溶けた金属が吹き飛ばされて焦点の一端に土手状に盛り上がっているのが分ります。しかし、この影響が完全に限局性、一過性のものであるため、厚さ約 1mm のプレートの下面は全く無傷で、電流停止後に急激に冷却されるので、土手状になった熔融金属はその場で固化して、作用した力の大きさと新しさを記録にとどめているのです。図 2 は、プレートの長軸方向の断面の拡大像で、陥凹と土手状の隆起を示しています。プレートの厚さは 0.98mm、隆起の高さは表面から 0.11mm、陥凹の深さは約 0.1mm です。

タンタルは、その大分子量、高融点に加えて、X 線管の対陰極としてのみならず真空管一般についてきわめて好適な性質を持っています。先に、真空状態での陰極放射における金属の揮発性と、その結果としての金属電極物質の管球内壁への付着について述べたことを思い出してください。William Crookes 卿が実験で発見した非揮発性のただ二つの金属は、マグネシウムとアルミニウムでした。後者が真空管に広く使われているのは主にこの理由によります。これに対して、白金族の金属はすぐに揮発して、陰極の放射によってただちに崩壊し、管球壁に付着して抵抗を増加させます。タンタルは、作動中の X 線管において完全に非揮発性であるという顕著な特性を備えているのです。この特性は非常に大きな価値を持つもので、私はこれを示すために特別な実験を行ないました。シーメンス社提供の

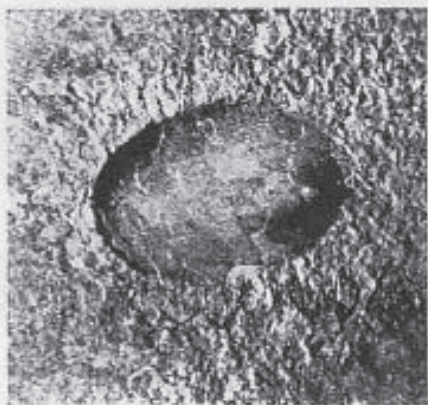




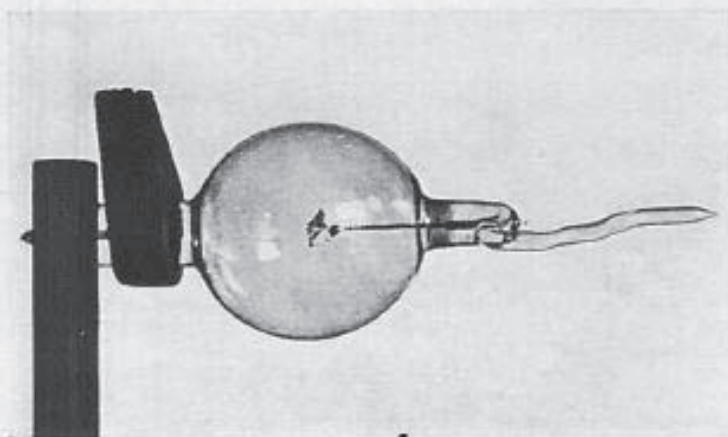
1



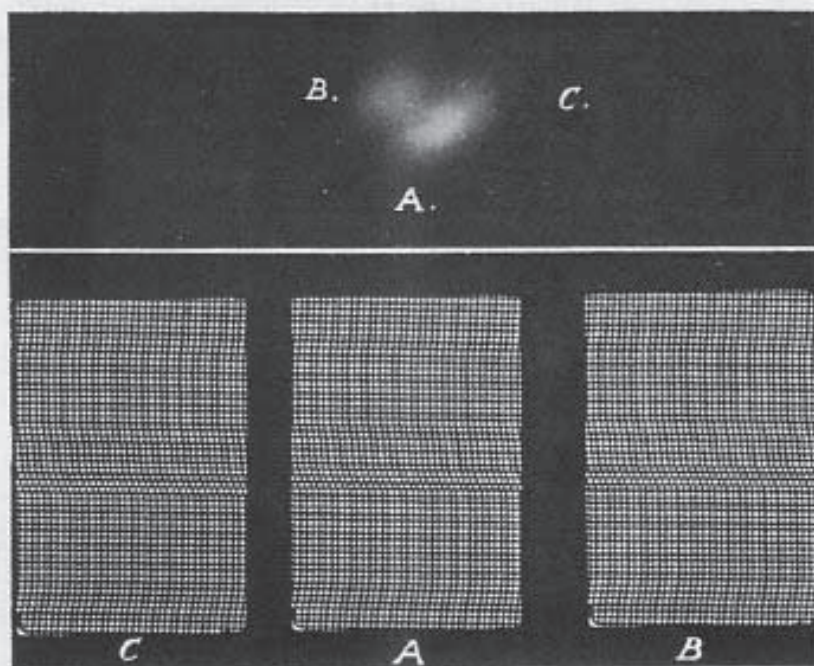
2



3



4



5

タンタルから、長さ 12mm、厚さ 0.5mm のロッドを作るとともに、全く同じ大きさの白金、銅のロッドを作りました。図 3 に実験装置を示します。真空管の上部をプレートで閉鎖し、セメントで固めます。一端に陽極があり、陰極はばねクリップの形で、1mm 突出したガラス管で完全にシールドされています。このクリップの中に試料のロッドを鉗子で挟んで、ガラス管の上に約 1cm 突出するように押し込みます。このロッドに面して小さな鉤が固定されており、ここに小さな正方形のカバーガラスをはめ込みます。実験では 3 種類の金属を順に使い、真空管をいずれも同程度に排気し、同じ電流を 5 分間流します。3 枚の小さなガラスの写真を写真 VI-5 に示しました。白金が最も濃い沈着物を生じ、銅はやや薄く、タンタルは完全にきれいであることが分ります。タンタルについてはさらに 15 分間通電を続けましたが、変化はありませんでした。通電中のロッドはいずれも赤熱状態でした。

### 磁石による焦点の移動法

これから、タンタルを X 線管の対陰極に使用することの明らかな有利性に同意していただけるものと思います。しかし決して最終的なものではありません。焦点に発生する熱は非常に大きくかつ急激なので、1mm 厚のタンタルでもその一端に液体金属の溜まりを生じ、下面は無傷であることから、プレートの裏面を水あるいは金属で冷却しても表面への影響は避けられないことが分ります。そして高画質を得るには、焦点を結ぶ表面は完全に平面で、可能なら研磨状態であることが必須です。X 線を発生するのはこのわずか径 1mm の領域ですから、ここが破壊されたら新しい面が曝

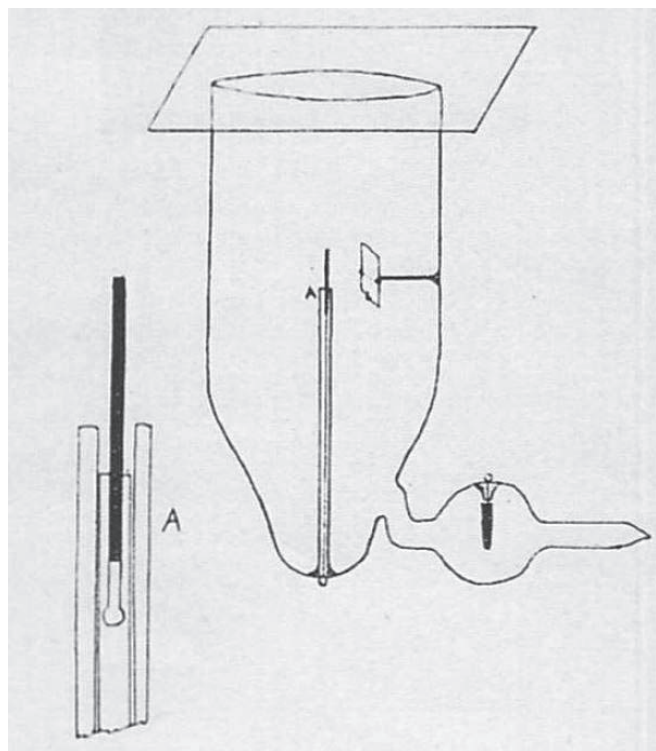


図 3

露されるようにプレートを移動できるようにすることが、次のステップとなります。こうすれば非常に高価な管球の寿命をずっと延長できます。これは実に単純なことなので、提案するのをためらったほどなのですが、この方式が採用されたのを見たことがありません。新たな焦点を結ぶように対陰極を移動させるのではなく、焦点の位置を動かせば良いのです。これがいかに容易にできるか、簡単な実験を用意しました。古い X 線管から対陰極を取り外して、非常に薄い白金箔に替え、焦点が分りやすいようにしました。彎曲陰極のある一端には、任意に上下したり回転させられる木製ブロックを置いてあります。このブロックには穴が開けてあって磁石を入れられるようになっています。写真 VII-4 にこれを示しました。

使い方を説明します。先ず磁石なしで、対陰極の表面が劣化するまで管球を使います。そして磁石を入れてまた使います。焦点は上または下に移動し、新鮮な焦点を結びます。これも劣化したら、ブロックを 1/2 インチ回転してまた新たな焦点を結びます。そしてまた回転すれば、その都度新しい焦点が得られます。一連の回転が終わったら、磁石を陰極に少し近づけます。すると偏向が大きくなり、また 1 周回転させることができます。後はこれの繰り返しです。こうすれば、あなたの管球の寿命は大幅に延長します。この装置が 3 ないし 4 ポンドで手に入るのであれば、これはなかなかのメリットでしょう。

現状では、タンタルの生産はシーメンス社に占有権があるので、これがただちに市販されることは期待できません。しかし世界各地に大量の鉍石がありますから、ほどなくして対陰極だけでなく真空管の電極がすべてこの金属で作られるようになることを願っています。そうすれば、50mA 以上を安全に通電できる X 線管を作ることができ、これまで見てきたもの、あるいは夢見てきたものを遥かに超える結果が得られるでしょう。

### 討論

#### 会長 (Deane Butcher 博士)

この非常に興味深い発表に対して、本学会に祝意を表します。学会がこれまで行ってきた業績、そして間違いなくこれからその上に積み重なってゆく業績を取上げた内容でした。また、焦点管球とその先駆けとなった Crookes 管について誰よりも詳しい Gardiner 氏をその任に選んだ我々の選択をも祝したいと思います。ただ一点、私がさらに詳しく知りたいことは、アルミニウム管の抵抗増大の原因に関することです。Gardiner さん、この現象の物理を説明していただけますか？

#### C.E.S. Phillips 氏

Gardiner 氏が再び壮健になられたことを拝見してた



いへん喜ばしくと思いますが、これはここに集まった皆の気持ちを代表するところでもあります。彼の興味深い発表にはとても驚きました。もちろん Gardiner 氏の話はすべて興味深いことは承知の上でここに來たわけですが、我々が既に知るべき事はすべて知っている、と考えている内容について話されるものとばかり思っていたのです。しかし Gardiner 氏はこの発表に素晴らしい情熱を注ぎ、数多くの新たな内容は注目すべきものばかりでした。特に印象を受けたのは、陰極線の著しい物理的な力についてです。自らの経験でも、陰極からの粒子の影響で対陰極が実際に曲がることを知っていますが、これは対陰極自体の不規則な縮小、あるいは支持構造の脆弱性によるものだと考えていました。明らかに放射の影響で対陰極が裏返しになった管球を見たことがあります。

これは引き続き追究して徹底的に解明すべき課題です。他には特に議論すべきことはありませんが、X 線管の端に磁石を置くアイデアは、実に単純かつ独創的です。たいへん自明なことであり、どうしてもっと早くこれを思いつかなかったのか不思議です。Gardiner 氏には、蛍光の観点から黒色ガラスのふるまいがどのようなものか御存知か伺いたいと思います。管球を不透明ガラスにして放電したら、どのように見えるのでしょうか。

#### A. A. Campbell Swinton 氏

私も同じくこの非常に貴重かつ興味深い発表に賛辞を送る者です。アルミニウムの移動遮蔽を使った実験については、先日の学会で Duddell 氏がまさにこの点について私に質問しました。私も非常に良く似た装置で数多く実験を行ないましたが、Gardiner 氏のような一定の結果は得られませんでした。私は、管球の大きさ、形状によって結果が大きく異なり、また電極間距離に対するアルミニウム製シリンダーの相対的直径を考慮すべきであることを見いだしました。また蓄電池の放電を使うと、誘導コイルの場合と全く異なる結果となりました。明らかに、結果は放電の性質によって異なります。Duddell 氏に対しては、実験結果は非常に複雑で一定せず、Gardiner 氏が示した素晴らしい実験から考えられるような簡単なものではないと回答しました。Gardiner 氏が他の管球でも実験されたのか、あるいは期待通りの結果を示した 1 本の管球だけのデータを信じたものか知りたいと思います。

ターゲットが劣化した時に、磁石を使って陰極線を別の場所に偏向させる最後の実験については、このような方法が鮮鋭度の面で何か違いをもたらさないか、という点を伺いたいと思います。蓄電池の放電を使う場合は、違わないと思います。しかし電圧が常に変動する誘導コイルの場合は、Birkeland の陰極線スペクトル

に似た結果が予想されると思います。Birkeland によると、陰極線がガラスに当たるところに生じる幅の狭い蛍光帯が、磁石による偏向によって数本の帯に分裂することを見だし、彼はこれを磁気スペクトルと呼んでいます。この結果、明瞭な画像ではなく一連の重複した画像、あるいはおそらくボケた画像になるのではないかと思います。X 線を発生するのは陰極線のごく一部であり、光線を偏向するとその全長にわたって X 線を発生しないスペクトルを生み出すと思います。しかしその両極端の間には、一点からではなく楕円や線から発生する X 線がおそらく存在し、鮮鋭度を劣化させるでしょう [→訳注]。

Gardiner 氏がタンタルについて話されたことについては嬉しく思います。我々が行なっている大出力の実験について言うと、Gardiner 氏は 50mA と話されましたが、我々は時に 50mA 以上を扱っており、問題の一つは陰極の融解です。アルミニウムが赤熱することは珍しいことではありません。白金陰極の難しいところは管球に沈着物が発生することで、マグネシウムはこの問題がありませんが融点はアルミニウムと同程度です。タンタルの陰極を作れば、タンタルの融点は非常に高いので非常に意義のあることであり、非常に大きな放電も危険なく耐えることができるでしょう。

#### G. Rodman 博士

Gardiner 氏の素晴らしい顕微鏡写真は賞賛に値するものです。私が伺いたいのは、拡大率がどの程度かということと、スライドに示されたような良い結果を得るにはどのような困難があったかという点です。陰極線の影響を受けた対陰極では、実際に電弧放電と同じような見かけになります。電弧が通過する炭素陽極は光り輝くクレーター状の中空になり、Gardiner 氏が供覧された対陰極の顕微鏡写真とかなりよく似た状態になります。両者のもう一つの類似点は、電弧の光はクレーターの中心部から発生しますが、X 線もスライドに見事に映し出されたクレーターの中心部から発生するものと考ええる点です。従って、通常のアーク灯と事実上同じものを見ているのでしょう。

#### W. Duddell 氏

Gardiner 氏の素晴らしい発表に対し、X 線産業に大きく貢献するものの一つとして私も賛辞を惜しまない者です。対陰極の焦点を移動させる提案は、確かに独創的です。しかしタンタルのような金属でなければあまり意味がありません。従ってこれが適切に応用できるのはもっと新しい管球になるでしょう。Rodman 博士の X 線管の写真にも賛辞を送るものです。次回はこれについて彼の話をもっと聞きたいと思います。

G. B. Batten 博士：Gardiner 氏には、この問題に関す

る彼のこれまでの研究、現在の研究に対して謝意を述べなくてはなりません。Duddell氏を含め我々の多くは、いかに Gardiner 氏に負うところが大きいかを実感していません。

アルミニウムシリンダーの実験について、Campell Swinton 氏は結果が一定しないとされましたが、管球を硬化させる手段としてこれを使えないか知りたいと思います。X 線管に関する一般的な問題は、硬くなりすぎるのですが、時に軟らかくなりすぎることもあり、その場合はこれを硬くする必要があります。管球を硬くするための一般的な装置は満足なものではなく、管球内、あるいは管球外に可動性金属コーティングがあれば、この目的に使うことができるでしょう。

対陰極にオスミウムを使用する話で思い出しましたが、Mackenzie Davidson の助言により Cossor が製作した良い管球の対陰極はオスミウムでした。小さな管球で、すばらしい画質でした。しかし結局硬くなりすぎて、メーカーに浸透圧調整器を付けられないかたずねました。やってみたがうまく行かなかったという返事でした。オスミウムは稀なものですが供給源はあり、おそらく我々の多くはオスミウム製対陰極の管球を管球棚に備えているでしょう。

X 線管の寿命を延長する非常におもしろい簡単な方法については、既に発言があったように、X 線が主焦点からはずれると画質はそれほど良くないかも知れません。

Gardiner 氏には、より小さな、より単純な管球をつくる方法をメーカーに示唆されたことに感謝してはなりません。現在の管球の多くは、ガラス吹き技術の良い見本であっても、実用的に最適な器具とは言えません。医療者は管球を撮影のためだけでなく治療にも使用し、現在市販されている複雑な形状の管球を適切に保護するのはしばしば困難です。二つないし三つの異なる管球がある場合、そのすべてに適合する保護器具は非常に大きなものになってしまい、これを作ったとしても一つの管球に開口部を合わせれば、他の管球には合わなくなります。タンタルを使い、浸透法調整器や新しい Bauer 空気管、あるいは Bauer 管と自動調整器などを使えば、より便利な管球ができると思います。もしこのようなものが登場しない場合は、Gardiner 氏にはメーカーに「即時解散」を命ずるようおすすめします。

## F. H. Glew 氏

タンタルの導入は、X 線管における X 線発生原理の一部を最終的に説明しうるものかも知れません。Mackenzie Davidson 氏の論文では、X 線源をピンホール写真によって求めています。彼は鉛のシートに穴をあけ、もちろんピンホール写真は X 線源を示します。

最初の提示によってターゲット上の活性化範囲が分ります。理論的に、X 線パルスの源は、電子線がターゲットで急激に制止された結果エーテル中に発生するパルスです。J. J. Thomson 卿が示したように、急激に制止されるほど放射線は強くなります。しかしこれは機械的な説明であり、実際に起こっていることが機械的なものであれば、陰極では銃の反跳のような現象が起こるはずで、Mackenzie Davidson の実験では、陰極自体が X 線源であるという証拠はないと考えます。これをさらに突き詰めて、これが可能かどうか知ることには非常に興味深いところです。この反跳効果が実際に存在しても、アルミニウムはターゲットとして弱く、X 線線源としても弱いものであることから、効果がマスクされている可能性があります。従ってタンタル陰極の導入によって、小原子量が故にこの効果が現れない可能性があるアルミニウムを廃して、この問題に決着が付くと思います。

今夜、Raffety 氏は、焦点を白金あるいはアルミニウムのいずれにも設定できて、両者の違いを知ることができる非常におもしろい管球を持ってきてくれました。タンタルの原子量は 181 と非常に大きく、従っておそらくこのピンホール法によって、陰極そのものが、電子が放出されるとき反跳による X 線源であるか否かを知ることができるでしょう。陰極には反跳があり、透過性の弱い X 線のようなものが生成されていることが考えられます。Gardiner 氏はこの点に関してなにか実験されたでしょうか。

磁石の偏向でターゲット上の焦点を移動する非常に独創的な方法については、一定の条件下では非常に有用と思われますが、Gardiner 氏も述べたようにまずターゲットを移動することが適切でしょう。管球に良好、堅固な支持があって、ターゲットをジャイロスコープのように回転させる方法があれば、数百 mA の通電も可能でしょう。もちろんターゲットは常にその平面が焦点にあるように回転する必要があります。簡単な方法としては、内部に振り子を置いて、強い放射によって動くようにすることが考えられます。私は数年前、X 線発生時の磁場の影響を指摘し、一次コイルにチョークコイルを使用して、チョークコイルを管球の異なる位置に近づけることによりこれを証明しました。これによって焦点は移動し、点ではなく線状の焦点が得られました。X 線パルス発生時、あるいはむしろ電子の飛翔中に、磁場が変化しますが、X 線パルスが止まった後も磁場の影響は残ります。磁場の消失には時間がかかり、同様の効果は、管球をコイルに近接させた場合にも見られます。

A. H. Pirie 博士は、シリンダーの影響は、一部の X 線管でその内面に大量の沈着物を生じる現象に対応するものと考え、同じ原理に則って調整装置として使える可能性を考えています。陰極線の焦点を磁石によ



て移動する件については、Pirie 博士は磁石と陰極線の電子の距離の二乗に依存するとしています。彼は、Gardiner 氏が大きな管球においてこのような方法が焦点の鮮鋭度に影響することを見いだしたかどうか、知りたがると思います。X 線撮影ではなく治療用途であれば、この方法は大いに役立つでしょう。

### C. W. Raffety 氏：

私も Gardiner 氏の素晴らしい発表を評価する者です。真空管の金属シリンダーについては、管球の抵抗増加は、ガラス壁の蛍光によるものよりも、金属の静電効果によって電極間の直線経路から放射線を牽引するためだろうと思います。Glew 氏は、対陰極をその面内で振動させることによって、一点が過熱すること避ける方法を提唱されました。管球外に置いた電磁石の回路を適当な周期で断続することによって振動を制御すれば、おそらくは振り子方式によって可能でしょう。

陰極表面からの電子の放出に伴う反跳現象による陰極自体からの「X 線」放射についても言及がありました。しかしこれは、人工的な放射能生成のような陰極の金属の爆発的な作用を仮定するものです。陰極と対陰極間に存在する静電場における電子の加速は比較的緩徐なものですから、このような作用を期待する理由はないと考えます。おそらく電子は、持続的に陰極に向かって移動する陽イオンの作用によって陰極から放出されるもので、その加速は物体の落下のようなものでしょう。このようにして、陰極電位が持続的に解放されるものと思います。

陰極線の焦点の位置を変える方法は非常に興味深いもので、Pirie 博士も指摘した通り、鮮鋭な画像が不要な治療用途において最も有用だと思います。しかし、陰極線の散乱はいずれにせよ非常に小さいので、通常の X 線撮影にも画質の低下なく使えると思います。しかし非常に精密な用途には、放射範囲のわずかな拡大も障害となるかも知れません。

### J. H. Gardiner 氏

歴史的な X 線管のスライドは、Rodman 博士が作られたものであることを言い漏らしたことをまずお詫びします。Rodman 博士には次の会で講演していただくことになっており、このため今日はその内容に関することはできるだけ避けました。Butcher 博士からは、金属シリンダーの影響の説明に関する質問をいただきました。抵抗増加の原因は非常にはっきりせず、ここでは理論的な議論は避けて、私自身の実験の経験にとどめました。申し訳ありませんが Butcher 博士には、金属チェンバー内での放電は、蛍光ガラス製チェンバー内での放電よりも管球の抵抗ははるかに大きくなるという実験結果で、当面はご満足いただきたいと思います。

Phillips 氏からは、不透明ガラス内の蛍光について質問をいただきました。不透明ガラスでの実験はやったことがありません。しかし、非常に多くの不透明な物質が美しい蛍光を発するのは確かです。例えばコランダムは褐色のぱっとしない鉱物ですが、ルビー色の蛍光を発します。(Phillips 氏：私が意図したのは、内面の蛍光によって外からみるとガラスが暗く見えるのではないかということでした)。

Swinton 氏の言われた、磁石による偏向によって画質が低下するという点については、まだ実験したことがありませんが、焦点をわずかに移動させるだけの磁場は非常に小さく、Swinton 氏も言われた Birkeland 氏のスペクトル程度なので、大きな影響はないだろうと思います。私は単に、タンタルの対陰極の寿命を延ばす一つの簡単な方法としてこのアイデアを紹介したものです。

Swinton 氏が指摘された、様々な抵抗をもつ管球を作ることの困難については、この 1891 年(だったと思いますが)に電気技術者協会で William Crookes 卿が発表された研究をご紹介します。あらゆる種類の非常に X 線管を作って、同じ効果が得られることを示しました。ガラスにどんなものでも蛍光を抑制するものを塗ると、ただちに抵抗が上昇します。このような管球を作って、いくつか詳しい知見が得られました。電極は全長にわたってガラスで覆われている必要があります、放電させる前面のみ露出させておきます。これによって電流の作用は直接ガラスに作用します。このような注意を払えば、ガラス被覆内は非常に軟らかく、金属被覆は非常に硬い X 線管が得られます。このような状態で、X 線管の抵抗は、蛍光物質によってのみ決まることは明らかだと思います。例えば、容易に蛍光を発するソーダガラスでも一定の電流抵抗がありますが、ソーダガラスに替えて蛍光を発しにくいガラスにすると、抵抗は上昇します。

Rodman 博士へのお答えとしては、顕微鏡写真の拡大率は 100 倍以下です。

オスミウム管については、オスミウムを使っても X 線管の画質には影響しません。唯一の利点は、オスミウムの融点がやや高いことです。オスミウムは白金族に属しますが、オスミウム製対陰極は、白金やイリジウムに比べると良くありません。

管球の適切な形に関しては、Batten 博士に同意する者です。時として「すばらしい、おそろべき」X 線を目にしますが、未来の X 線管は、もっと小さく、単純で、頑丈なものになるだろうと思います。Batten 博士が指摘された問題を解決するような X 線管を作ることが私の意図でした。この方向で、任意の硬さの X 線を、管球内の物質に何ら影響を与えずに放出する X 線管を作る事ができるだろうと思います。

【訳注】討論の中で、多くの質問者が指摘している磁石による焦点移動が画質の劣化をもたらすのではないかという疑問について、著者はただちに実験を追加し、そのような問題はないという結論を得て、1909年5月6日の例会で発表している。その内容は短報として本稿のすぐ後ろに続いて掲載されている [Gardiner JH. X-rays from a magnetically deflected cathode focus. J Rönt Soc (London). 5:80-81, 1909]