

回転陽極を備えた金属 X 線管球

Eine Metallröntgenröhre mit drehbarer Anode

Bouwers A. Verhand Dtsch Rönt Ges. 20:102-7, 1929

放射線科医は、鮮明な画像を、可及的短時間で撮影するために、できる限り小さな焦点、大きな出力を要求する。しかし焦点の負荷には上限があり、これは焦点の表面、照射時間、陽極に依存する。タンゲステンと銅で適切に作られた陽極は、1秒間、 $200W/mm^2$ の負荷に耐えることができる。しかし、さらに強い負荷をかけると、陽極の相応の蒸散や溶融は不可避である。焦点を拡大しても、鮮鋭度のために距離をとる必要があるのでさらに大きな負荷がかかり、実質的な利点はない。そこで陽極を回転させるなどして、焦点を移動せずに陽極を動かすしかない。

移動陽極の考え方は決して新しいものではなく、1897年に既に知られていた。J. L. Breton の著書「陰極線と X 線」の「1898-90年の科学および産業レビュー」には、既に撮影中に回転して「放出部位を常に変化させて、危険なほど過熱しないようにする」管球の記載がある。その後いろいろな回転陽極を記載した特許がいくつも出されており、1928年、ストックホルムの第2回国際会議では、E. Pohl が非常にゆっくりと動く陽極のモデルを提示した。

著者とその共同研究者は昨年、任意の X 線装置になんら付加装置なく接続でき、同じ焦点面積の静止陽極にくらべて数倍の負荷に耐える回転陽極の開発に成功した。この Metalix 管 [→訳注] の原理は、以下の記述からわかるように、その構造に重要な意味をもつものである。

しかし管球について述べる前に、まず回転速度と回転陽極に求められる特別な構造についていくつ理論的に考察を加える。特に回転速度については、従前の設計はしばしば誤解を生むものである。耐容量を 3 倍にするには、撮影時の焦点距離を 3 倍とすれば良いとするこれまでの前提は誤りである。このような速度では、これはほとんど得るところがない。

回転陽極では負荷時間が常に非常に短いことから、負荷中の温度を比較的簡単に計算することができる。負荷時間 t 、焦点と陽極の距離 x 、温度 T 、焦点面 $1mm^2$ 当りのワット数 W とすると [1]、

$$T = CW\sqrt{t}$$

ここで C は、陽極の熱伝導率、熱容量で決まる定数である。非常に薄いタンゲステン板を張った銅陽極では概ね、

* Natuurkundig 研究所、Philips, Gloelampenfabrieken(電球工場), Eindhoven, オランダ

$$T = 40W\sqrt{t}$$

温度 T が時間 t に比例せず、その平方根に比例することは、一見理解し難いが、高温における陽極の熱が浸透することを考えれば理解できる。物質に加わる全体の熱量は、負荷時間に比例すると同時に、温度と熱の平均浸透度の積に比例する。この深達度がさらに温度に比例することを考えれば、 T^2 が t に比例する、あるいは T が \sqrt{t} に比例することがわかる。

従って、負荷時間を $1/4$ にすれば、温度は半分になり、 $1/9$ にすれば $1/3$ にすることができる。

回転陽極ではどうだろうか。

簡単のために、図 1 のように陽極が静止しており、陽極の表面を長方形の焦点が左右に移動する場合を考える。曝射中に焦点がその直径の n 倍の距離移動すると、その移動経路上のいずれの位置においても負荷時間は $1/n$ になることは明らかである。従って温度は \sqrt{n} だけ減少する。

図 1において、曲線 1 は静止陽極、曲線 2 は移動陽極のそれぞれに同じ負荷を加えた場合の温度を示す。移動速度は、曝射時間中に焦点幅の 16 倍である。温度は、 T_1 の最大値の $1/4$ に低減している。この温度は、これは右に向かって移動する焦点の左側のものであり、右側は冷たいままである。

さらに図 1 は、4 倍の負荷をかけた場合の回転陽極温度は T_4 、静止陽極の温度は T_3 であることを示している。温度 T_1 が最大許容温度(約 $3,000^\circ\text{C}$)とすれば、この 4 倍の負荷も可能であることがわかる。

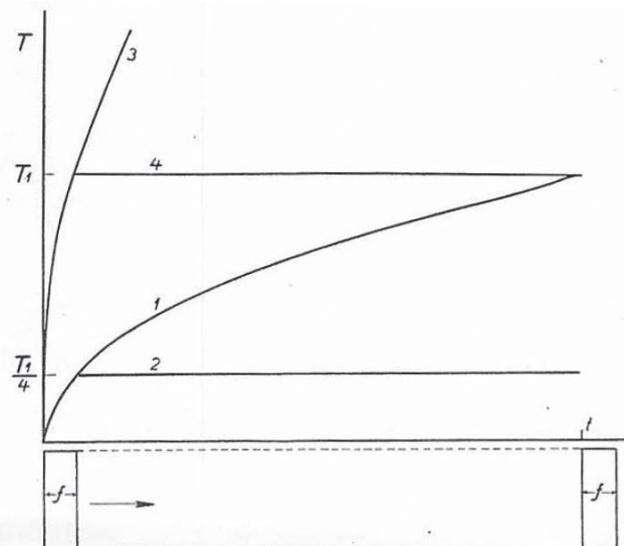


図 1

このことから、静止陽極の耐容量を4倍にしたければ、この短期間に焦点幅の少なくとも16倍移動するほど高速に動かす必要があることがわかる。耐容量を10倍にするには、曝射中に焦点幅の100倍という非常に高速が必要であり、一般的には p 倍するには p^2 倍の速度が必要である。そしてこの速度は下限であり、実際には様々な副条件によってさらに高速が求められる。例えば、熱は焦点の後ろだけでなくある程度側方にも伝わるので、陽極の移動に際しては完全に冷たいわけではなく、ある程度加温された状態となる。またある程度時間が経つと、温度上昇は \sqrt{t} よりも遅くなる。

しかしこれに加えて、一般により重要なことは、実際の使用に当っては、均一な非脈動性の負荷ではなく、脈動性の負荷が加わることである。負荷の脈動があると、回転陽極でも静止陽極でも同様に、一定の負荷の場合より温度が高くなるであろうことは用意に理解できる。しかしこのような効果は、静止陽極よりも回転陽極においてはるかに顕著である。これは、静止陽極では負荷中に温度が持続的に上昇するのに対して、回転陽極ではその瞬間の負荷に応じて増減するからである。負荷は、焦点がその幅だけ移動するのに必要な時間続くだけで、陽極の（焦点の左側の）温度もそれに応じて上昇するだけである。このことは、図1からすぐにわかる。

正常の交流を負荷する場合、最大瞬間負荷値は平均値の約1.5倍で、回転陽極の最高温度も同じエネルギーを平均的に加えた場合の約1.5倍となる。従って、脈動性負荷では2倍以上の回転速度が必要となる。三相交流の場合、最大値は平均値より約10%大きく、従って約20%増しの回転速度が必要となる。

以上のことから、 p 倍の改善を得るための回転速度は、焦点の幅を f とする時、曝射中の移動距離は、

- a) 完全に一定の負荷では少なくとも $p^2f\text{ mm}$
- b) 三相交流では $1.2 p^2f\text{ mm}$
- c) 一般的な交流では $2.3 p^2f\text{ mm}$

ここで焦点の大きさについて、その形状とともにさらに検討してみたい。静止陽極の場合、焦点の大きさは一定の範囲であれば無関係である。焦点が大きいと、画像鮮鋭度の観点から撮影距離を長くとるので耐容量が増加し、大きさによって得られる以上の負荷に耐えるからである。小さい側については、実用的な焦点の大きさには像の「歪み」の出現による限界値がある[2]。回転陽極の場合、原理的に小焦点の方が大焦点より有利である。これは、回転速度による改善が、焦点が小さいほど大きく感じられるからである。この限界をどこに置くかは、短時間撮影、高鮮鋭度のいずれに重点を置くか、歪みをどの程度問題にするかによって決まる。しかし、実際のおおきさはいわゆる「線状焦点」

(Strichfokus)の場合、約1.5~2mmで静止陽極と同程度の鮮鋭度、時間が得られる。

焦点の形状については、回転陽極の場合、線状焦点が明らかに最適である。他の利点を別にしても、耐容力が大きい回転方向に小辺を取ることができるからである。 $1.5 \times 6\text{mm}^2$ の線状焦点は、2倍の回転速度を持つ径3mmの円形焦点よりも効率的であり、後者は同じ負荷に耐えるために実際には3mm以上である必要がある。このように、線状焦点には全く新たな利点があることがわかる。

理論的な考察はここまでにして、図を供覧して我々が製作した回転陽極を備えたX線管球について述べる（図2-I）。

X線管については、Metalix管球の一般的な特徴として知られているように、金属筐体はクロム製で、ガラス管が陰極と陽極絶縁体に直接融着され、ガラス窓から光線が透過する。この筐体部分の周囲には鉛の被覆があつて放射線遮蔽となっている。陽極Aは銅製で、円錐状タンクスチタン薄板Wとともに軸Cの回りに回転する。Sは三相交流モーターの格納ケースで、管球の筐体と金属的に結合している。このモーターは、それほど高圧でなければ問題なく筐体を接地できるので、任意の回路に接続することができる。固定子の回転磁場は陽極の銅に渦電流を発生させ、回転電圧が加わるとこれによって陽極が回転する。固定子と陽極で、いわゆる誘導モーターが構成される。陽極の銅ができるだけ多くの磁力線が通過するように、陽極内に鉄製円筒Eを設け、この円筒と固定子の磁片の間隙はできるだけ狭くする。ここで再び非常に重要なことは、管球の筐体が接地されていることで、これによって金属部分に密接するガラス部分の電圧が低くなり、磁片とガラスを1mm程度まで接近させることができる。これはガラス管球では考えられない方法である。

図のように、陰極は偏心性に配置されている。線状焦点は、陽極表面の円錐状被覆の母線上に結ぶ。図2-IIに示すように、焦点Fは台形で、その直径は外側ほど径に比例して大きくなる。従って、焦点径に対する回転速度はどこでも一定である。

現状の管球の焦点平均長は約40mm、焦点平均径は約2.2mm、回転速度は毎秒20回転である。

静止陽極に対する改善率は、上述のことから簡単に知ることができる。例えば、曝射時間1/20秒とすると、この間に陽極はちょうど1回転し、その移動距離は $\pi \times 40\text{mm} = 125\text{mm}$ である。三相交流の場合の改善率 p は、 $1.2 p^2f = 56$ より $p \approx 6.5$ である。

この構造の管球を数多く、長時間にわたって主に三相交流で試験した。この結果、現状では静止陽極に対して事実上約6倍の改善率を得ていると考えられた。焦

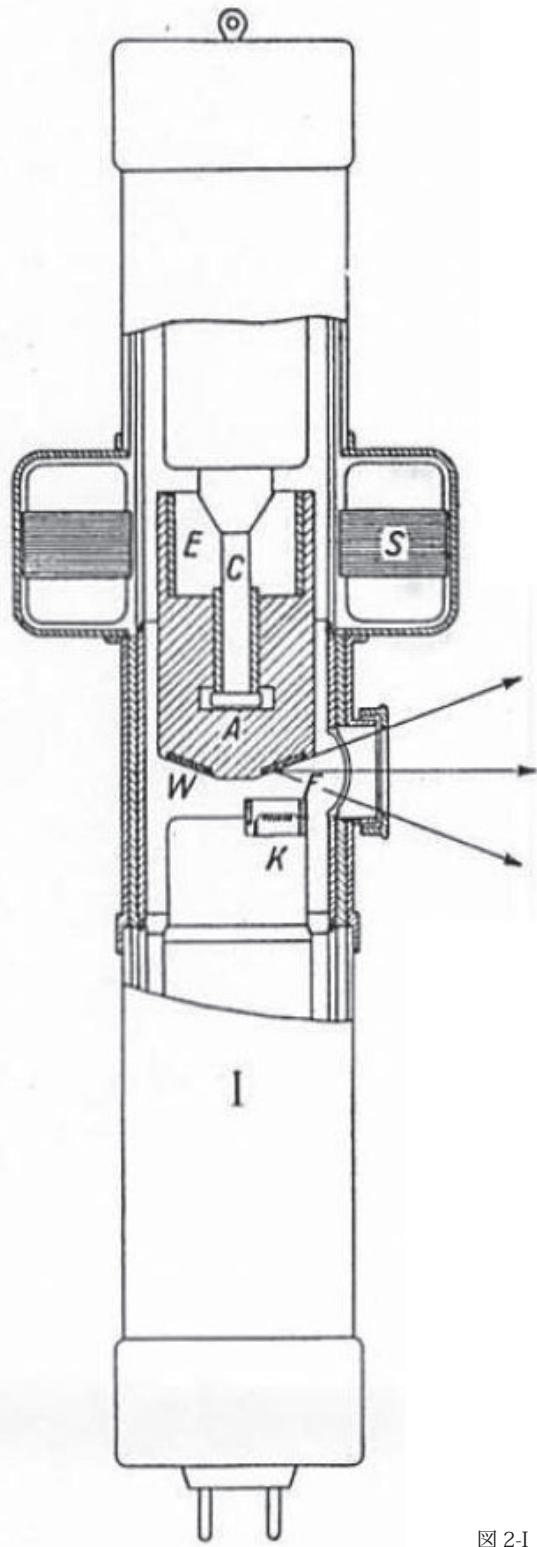


図 2-I

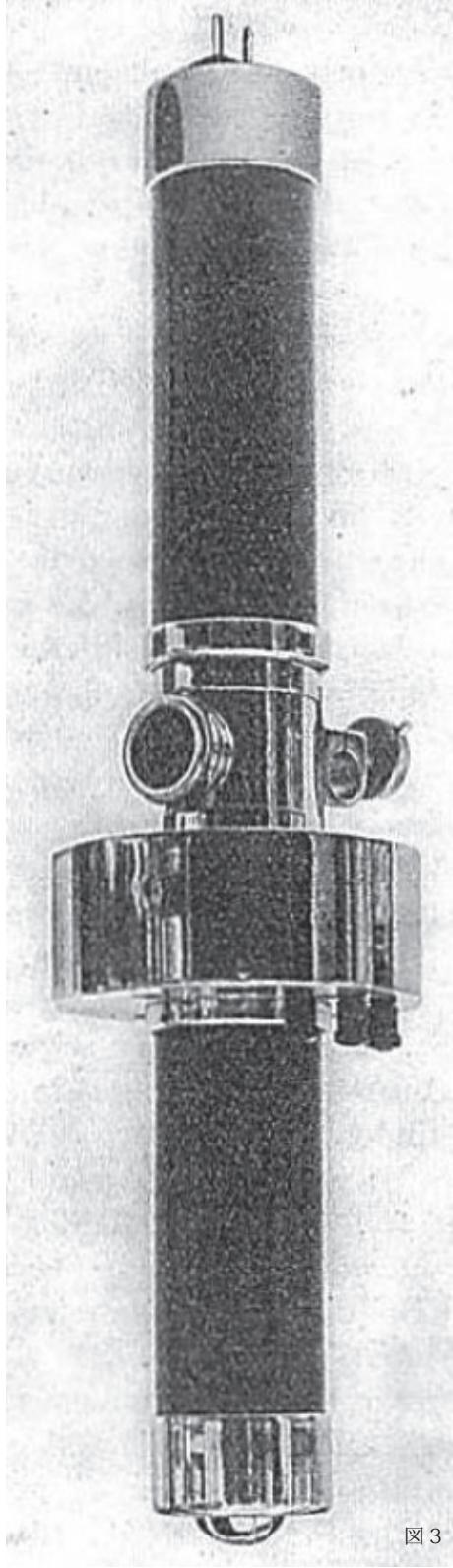


図 3

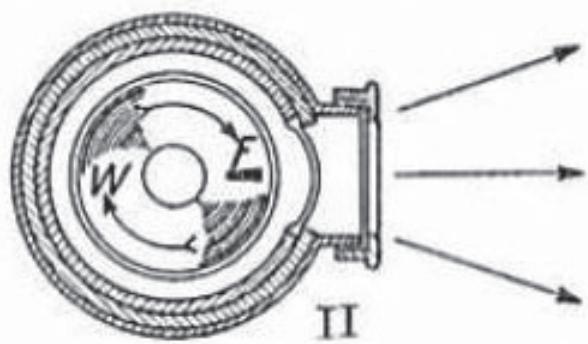


図 2-II

点表面積約 15mm² の管球は、0.1 秒、30kW の負荷に耐えた。

この管球を製作する上で特に困難なことは、当然のことながら潤滑が不可能な真空中に配置する必要があることである。しかしこれは、適当な金属を選択し、自己潤滑ベアリングを作る事で解決し、これまでのところ非常に満足な結果を得ている。

陽極体は、硬い銅塊から成り、約 50 回連続曝射しても熱くならない程度の十分な熱容量をもつ。冷却は一部は放射冷却により、また Metalix 管のガス圧（水素あるいはヘリウム）も重要な役割を果たしている。これによって、現状の管球では毎時約 20 回の連続使用が可能である。必要があれば、この数字は原理的に実現可能である。

回転陽極を備えた管球（図 3）と、この管球で撮影した画像を数多く供覧した。

【発言】

Chantraine (Betzdorf-Sieg) : Bouwers 博士の御厚意で、回転陽極を備えた管球を使う機会を得て、既に 200 以上の撮影を行なった。Götze の焦点は残念ながら推奨できない。焦点は幅 2.5mm、長さもほぼ同じで、不均等である。均等に配置すれば、幅約 1.5mm となる。この管球は、直流 38kV、600mA、1/10 秒で 200 回以上の曝射に耐え、焦点にはわずかな劣化の痕跡も見られなかった。焦点は、曝射時にわずかに明るくなるだけであった。管球の寿命は、この程度の負荷ではフィラメントの寿命によってのみ制約される。使用した管球は、800 mA 以上で任意の回数の曝射に耐えた。この管球の陽極回転数は、毎秒 12 回転にとどまったが、

幅 1.5mm の完全な Götze 焦点を備えた管球であれば、さらに高回転数で 1500mA でも陽極の損傷なく使えるであろう。供覧した画像は、肺の軟線撮影の画質としては、まだ目標に遠いものである。切除標本の検査から、肺血管には 3~4mm の振動があることが分った。1/10mm の鮮鋭な画像を得るには、撮影時間は 1/40 秒以下に短縮する必要がある。撮影は距離 1.10m で行なった。現状の画像では、目標の達成率はまだ 10% である。管球性能が向上し、焦点が小さくなれば、さらに 3.5 倍の鮮鋭度が得られるであろう。その他には、フィルム、増感紙の改良が必要であろう。

【脚注】

1. 初期には、熱の放散が 1 方向だけであるとすると、微分方程式は簡単に次のように書ける。

$$\frac{dT}{dt} = \frac{k}{c} \frac{d^2T}{dx^2}$$

ここで当面の問題に便宜的な境界条件 $t < 0.05$ 秒としてこれを解くと、

$$T = \frac{2Q}{\sqrt{kcn}} \sqrt{t}$$

ここで Q は熱量 (/cm²/ 秒)、 c は熱容量、 k は熱伝導率である。（A. Bouwers. Über den Temperaturverlauf an der Anode einer Röntgenröhre. Zeitschr Techn Phys. 8:271, 1927 も参照。ただし論文中の式では係数 2 が欠落している）

2. A. Bouwers. Der Brennfleck einer Röntgenröhre und die Belastbarkeit. Fortschr Röntgenstr 40, 2, S. 284, 1929

【訳注】

Metalix 管 : 1925 年に Philips 社が開発した筐体を円筒状の金属製とし、小さなガラス窓から X 線を照射することで X 線漏洩を防ぐとともに耐衝撃性を高めた製品の商品名。ここではこれに回転陽極を組込んでおり、その後 Rotalix の名称で市販された。