



# 「白熱電球Ⅱ」

●シリーズ● 大阪大学 接合科学研究所 教授  
工学博士 小溝 裕一

●材料の素顔に迫る



図1 白熱電球 外観写真

●はじめに

第31回の本コーナーで「白熱電球」を取り上げましたが、今回はその続編をお届けします。

1879年にエジソンによって発明された電球は、今日までに幾多の発明・改良がなされてきました。なかでも電球発達史上、大きな貢献をした下の6つの発明を「電球の6大発明」と称しています<sup>1)</sup>。

- (1) 実用炭素電球 (エジソン, 1879年)
- エジソンは木綿の縫糸を炭化してフィラメントとした最初の炭素電球を作ることになりました。これは1880年、エジソンランプ会社が初めて工業生産した電球です。
- (2) 引線タングステン電球 (クーリッジ, 1910年)

アメリカのクーリッジによって発明された引線タングステンフィラメントの出現は、その後の電球を飛躍的に発展させました。タングステンは高温発光体に適していますが、常温では脆く、なかなか細線に加工出来ませんでした。彼はスエーディング加工に着目し、細いタングステン素線の製造に成功しました。

- (3) ガス入り電球 (ラングミュアー, 1913年)
- タングステンフィラメントの熱による蒸発を防ぐため、電球バルブ内に不活性ガスを封入する、いわゆるガス入り電球がラングミュアーにより発明され、電球の寿命は著しく増大しました。
- (4) 二重コイル電球 (三浦順一, 1921年)

タングステンの単一コイルをもう一度螺旋状にする二重コイルが、日本の三浦順一により発明されました。この二重コイルフィラメントにより、熱損失が減少し、電球の一層の効率向上をもたらしました。

- (5) 内面つや消し電球 (不破橋三, 1925年)
- 電球の明るさが向上するにつれ、まぶしさが問題となり、これを解消するため、電球のガラス内部をすりガラスにした、内面つや消し電球が、日本の不破橋三により発明されました。
- (6) ハロゲン電球 (ズプラー, 1959年)

アメリカのズプラーは、電球の石英ガラス管内にハロゲン物質を封入することにより、電球の黒化を抑制する長寿命電球を発明しました。タングステンフィラメントは通電されると白熱し、高温になりタングステン(W)が昇華します。昇華したWは、比較的低温部である内壁面領域に移動し、ハロゲン(X)と化合し、ハロゲン化タングステン(WX<sub>2</sub>)を形成します。WX<sub>2</sub>の蒸気圧は比較的高いことから、ガスの状態で再びフィ

メント近傍に戻ります。フィラメント近傍で高温に加熱されると、WX<sub>2</sub>はWとXに分離し、Wはフィラメントに戻り、自由になったXは再び同じ反応を繰り返します。これによりフィラメントの細りなどの劣化が抑制され、長寿命の電球が実現されます。

このように6大発明のうち2つまでが日本人の手によるモノであることは特筆すべきことだと思います。

●白熱電球の構造と材料

一口に白熱電球といってもその種類は非常に豊富です。最もポピュラーな一般照明用電球のガラス球としては、図1に示すような白色拡散タイプと透明タイプがあります。この白熱電球の構造は、中心部のフィラメントとそれを支える部分、外側の球状のバルブ、さらに口金部分に分解できます。白熱電球構造の模式図を図2に示します。FE-SEM/EDXにより各部の元素分析を行った結果を表1に示します。フィラメント(部位2)はご存じのとおり高融点金属のタングステン(W)でできています。エジソンの時代には、フィラメント材に京都石清水八幡宮の真竹を炭化したものが利用されたこともよく知られていますが、このフィラメントは温度をあまり上げるとすぐ切れてしまうため、明るさは現在の白熱電球の約1/10程度でした。

導入線(部位3)としてガラス部材との熱膨張係数の近いFe(鉄)-Ni(ニッケル)合金芯線の表面あるいは芯線上のCu(銅)層の表面にNi(ニッケル)層を形成した封着線(ジュメット線)が開発されました。今回のサンプルでは銅線の上にNiめっきされました。Ni以外にりん(P)も検出されましたが、これは細線加工時の潤滑剤でしょうか? 材料の伸線時に使用するリン酸系の潤滑剤が何らかの過程で蒸発し、付着したのではないかと考えられます。アンカーワイヤ(部位4)はフィラメントの短絡事故を防止し、フィラメントを支持するものですが、モリブデン(Mo)でできています。口金(部位6)はアルミニウム合金(AI-Mg)、中心電極(部位7)はCuで強化されたスズ(Sn)ハンダです。ガラスの球状バルブ(部位1)は耐熱性を有するガラスとして石英ガラス(70.9%SiO<sub>2</sub>-14.5%Na<sub>2</sub>O-5.5%CaO-3.8%MgO-1.7%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-1.03%K<sub>2</sub>O-1.3%B<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)が使用されており、コーティングバルブの

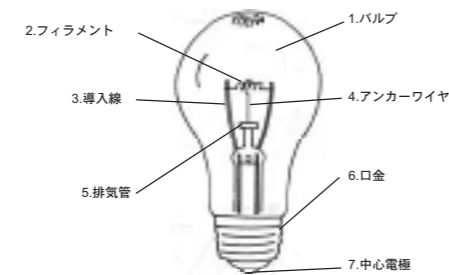


図2 白熱電球構造の模式図

表1 FE-SEM/EDXによる各部表面の元素分析 (mass%)

| 部位 | 名称      | 成分                                       |
|----|---------|--|
| 2  | フィラメント  | 100%W                                    |
| 3  | 導入線     | 99.5%Ni-0.5%P                            |
| 4  | アンカーワイヤ | 99.04%Mo-0.96%P                          |
| 6  | 口金      | 97.33%Al-1.23%Mg-0.84%Mn-0.34%Fe-0.26%Si |
| 7  | 中心電極    | 97.5%Sn-2.5%Cu                           |

場合、クリアバルブの内面にシリカの粉末を静電塗装しています。

●電球の組立工程(図3)<sup>2)</sup>

図3に示すように白熱電球の構造は、中心部のフィラメント部と外側のバルブ部からなります。このうちフィラメント部は、まずガラスのチューブをガスバーナーで加熱して、溶かして広げることでフレアーと呼ばれる部品を作ります。このフレアーに、フィラメントを取り付けるための導入線を2本組み込みます。その時、合わせて後で空気を抜くための細いガラスの排気管を、導入部の間に挿入して、これらをガスで加熱・溶着させます。その後フレアーに空気を抜くための穴をあけ、排気管の上部にアンカーワイヤを差し込みます。そして導入線の先端にコイル状のフィラメントを設置し、中心部をアンカーワイヤで巻き付けて固定させれば、フィラメント部は出来上がります。なお、導入線とフィラメントの接合はカシメ加工で行われています。

つぎに、ガラスの球状バルブにこれを溶着して密閉(封止)して組み立てます。封止の終わった段階で、バルブ内の空気を抜いて真空状態にしておき、そこに排気管より窒素ガスとアルゴンガスを注入します。それに口金を被せて、焼き付けることで電球が完成します。

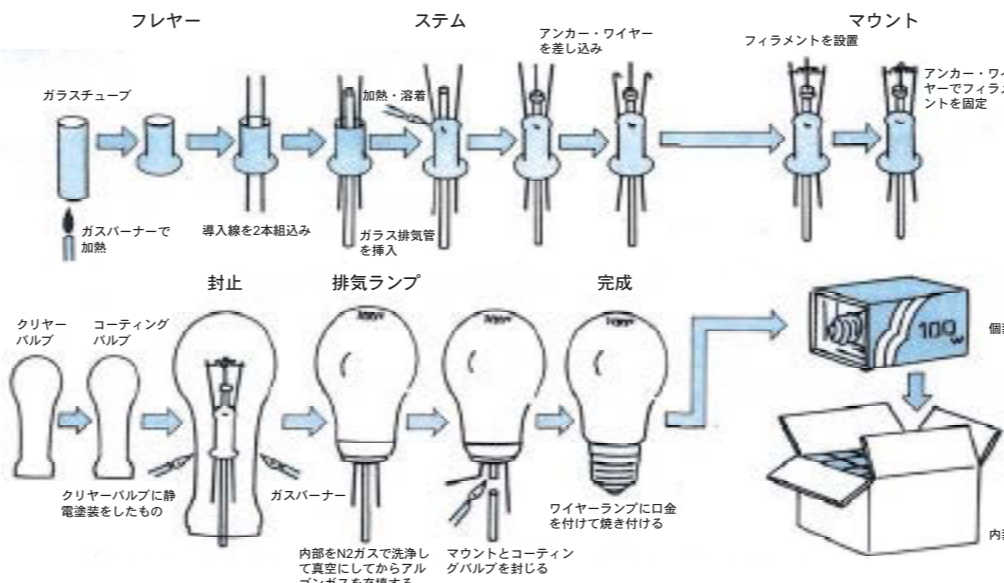


図3 電球の組み立て工程

●タングステン・フィラメントの寿命

ティグ(TIG)溶接というをご存じでしょうか? Tungsten Inert Gas (TIG)溶接とは、シールドガスにアルゴンやヘリウムなどの不活性ガス(inert gas)を用い、高融点金属であるタングステンを非溶極式電極として、母材との間にアークを発生させて溶接する方法です。ここで電極にタングステンを使うのは、融点が高く、高温で使用できることが大きな理由ですが、熱電子放出特性が高いためアークを安定に維持することができることも理由の一つです。

タングステンのフィラメントに電流が流れると、フィラメント自体の電気抵抗によって2千数百度に熱せられ、白熱化し、やや赤みを帯びた白色光を放射します。電球のフィラメントに電流を流すとフィラメントが発熱し、発熱量は電流の二乗で増えます。常温ではフィラメントの抵抗値が小さいため、スイッチ・オンの瞬間には定格電流の10倍以上の電流が流れます。頻繁にオン・オフを繰り返すとフィラメントの寿命が短くなると言われるゆえんです。40W,60W,および100Wの電球を用いて、フィラメントの電気抵抗を測定しました。結果は表2に示すように、ワット数によって抵抗値が異なっています。

フィラメントが切れるメカニズムを考えると、同じ40W球の新品フィラメントと使用済み電球のフィラメントを調査しました。新品フィラメントのオージェ分析による表面の状況とSEM像を図4に、使用済みフィラメントのオージェ分析とSEM像を図5に示します。オージェ分析結果からは、フィラメント表面は使用前には表面にPがあり、使用後はPがなくなり、さらに使用後にCが少し付着することが分かります。表1で観察されたPはフィラメント伸線時の潤滑剤の可能性がありますが、またフィラメントは全く酸化せず、逆に清浄化しています。新品フィラメントの径は約39μm、破断したフィラメントの径は約35μmでした。破断フィラメントは一割程度径が細くなっています。また、切れたフィラメントの破断面を図6に示します。結晶粒が粗粒化し、破断面は粒界破壊を示しています。タングステンが高温で劣化・破断するメカニズムは二つ考えられます。一つは昇華による損耗、もう一つは

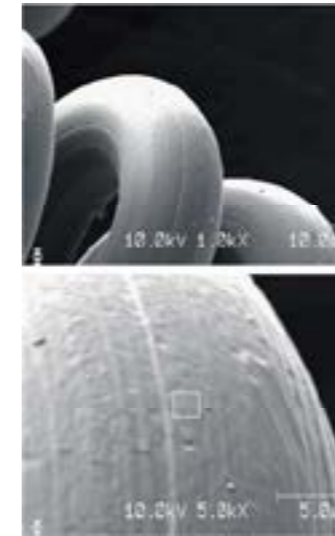
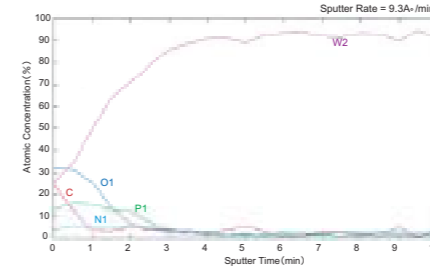


図4 未使用40Wフィラメントのオージェ深さ方向分析結果(半定量)とSEM像

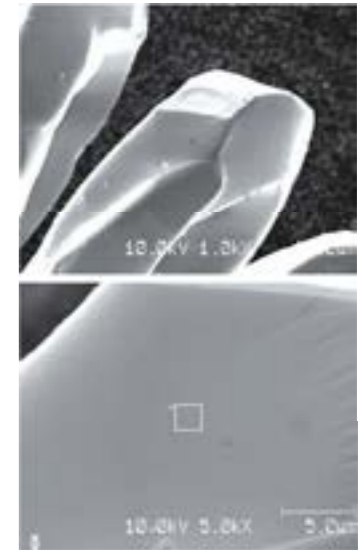
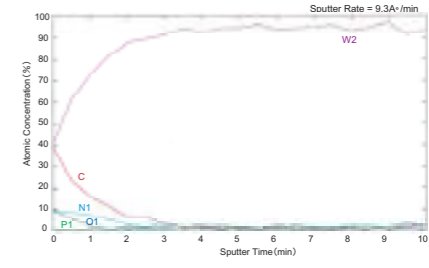


図5 使用済み40Wフィラメントのオージェ深さ方向分析結果(半定量)とSEM像

表2 フィラメントの電気抵抗測定 (測定電流:5mA)

|       | 抵抗(Ω) |
|-------|-------|
| 40W球  | 20.9  |
| 60W球  | 14.2  |
| 100W球 | 9.0   |

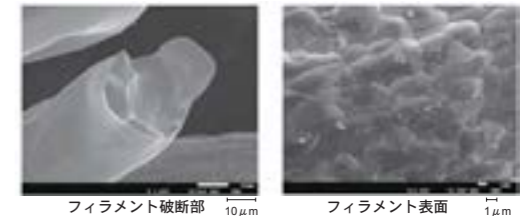


図6 切れたフィラメント(40W)SEM像

再結晶による脆化です。

タングステンを大気中で加熱すると、周囲の酸素と反応して、あっという間に損耗してしまいます。しかし、使用済みフィラメントからは酸化している様子は見受けられません。いまの電球は酸化を防ぐため、真空を引き、不活性ガスで封入してあります。これにより酸化による損耗は抑制することが出来ますが、タングステンが蒸発する、いわゆる昇華による損耗は生じます。そのため径が細くなってしまいます。また、線加工したタングステンは、細く伸びた繊維組織をしています。高温で使用していると再結晶を生じて、等方結晶に粗粒化してきます。冷間加工したタングステンを焼鈍すると、1,300K付近から繊維組織の中にサブグレインの形成が見られ、さらに高温でひずみのない再結晶粒を形成することにより粗粒化が生じます。粗粒化すると粒界破壊を起こして破断します。このように、昇華と粗粒化がフィラメントが切れる原因だと考えられます。

●おわりに

一般の白熱電球の器具には、一部を除いて電球型蛍光灯を使用できます。地球温暖化防止・環境保護の観点から電力消費が多く短寿命である白熱電球は今後生産・販売を終了し、消費電力が少なく長寿命である電球型蛍光灯への切替を消費者やメーカーに促す動きが世界的に広がっています(特にオーストラリア、フランスやアメリカ(州による)などは白熱電球の生産・販売が今後法律で禁止される)。日本でも「エコ替え」と称して、PRが始まっていますが、まだまだ白熱電球も頑張っています。新しい技術開発に期待しましょう。

参考文献

- 1) <http://www.den9.jp/cgi-bin/den9/>
- 2) モノづくり解体新書の巻、日刊工業新聞社