エジソン発明以降 100 年の電球の発達†

専門会員 染谷 彰*

1. ま え が き

1979年に、T. A. Edison が実用炭素電球を発明してからちょうど 100 年になる。この間の白熱電球の発展の歴史を振り返ると、発光部であるフェラメントの材料を含めた開発を軸として、ガラス球の処理方式の研究、封入する物質の研究などにより効率の向上が著しく、またこれら応用分野の拡大がはかられてきた。ここで白熱電球の六大発明として知られる炭素電球、引線タングステン電球、ガス入り電球、二重コイル電球、内面つや消し電球、そしてハロゲン電球を主体として電球の発達の歴史をたどってみる。

2. タングステン以前のフィラメントの改良

実用炭素電球が発明されて以来、フィラメント材料の改良による効率向上の研究が数多く実施された。カーボン（炭素）そのものの作り方が研究され、英国の L. S. Powell は 1888 年に、まず木綿を加熱した塩化亜鉛中に入れて溶解、柔らかくした後に孔型を通して線状にし、アルコールの中に浸して固ませたものを水洗してからドラムに巻き取り乾燥させた。これを必要な寸法に切って炭化することにより、均質で、強じんなフィラメントを作ることができた。カーボンフィラメントとしてはこの改良でほぼ頂点に達し、以後は金属または金属の酸化物などに研究の方向が変わっていった。

ネルンストランプは、1897年にドイツの W. Nernst が発明したもので、マグネシウム、カルシウム、ジルコニウム、希土類などの酸化物を混合し、ペースト状にしてダイスを通し引き伸ばしたもので、点灯は白金その他の加熱用コイルを用い温度上昇し、加熱後は、自動的に回路をしゃ断して点灯を続ける構造となっていた。効率は当時の炭素電球 3.4 lm/W に対し 5 lm/W と高効率

であったが、点灯の操作がややこしい上に、構造が複雑なため値段が高いなどの難点があり、1912 年ごろまでかなりの普及をみたが、完全に炭素電球の代わりを努めるまでに至らなかった。

ネルンストランプに次いで、金属フィラメントとして最初の電球は、オスミウム電球である。白金の中ではいちばん融点の高いオスミウムの使用は研究されていたが、細い線にする方法が見出さなかった。

1898 年オーストリアの C. A. von Welsbach は粉末のオスミウムをバインダといっしょにしてダイスを通して引き伸ばした後、高温で焼結してフィラメントに形成する方法を開発した。オスミウム電球は溶融点が高く、点灯温度も高くできるので、初効率 5.5 lm/W で従来のもよりいちだんと効率が上がり、寿命中の光出力の維持も良好で、さらに電圧の変動に対してもきわめて強い特長があった。

図 1 タングステン以前の各種の電球
左から炭素電球、ゼム電球、オスミウム電球、
タンタル電球、イリジウム電球

ただし、このオスミウム電球にも希少金属のため非常に値段が高く、しかもフィラメントに用いる場合、非常に長い線を必要とするなどの欠点があり、主力の電球とはなり得なかった。

タンタル電球は、ドイツの W. von Bolton らにより 1903 年に開発されたもので、タンタルは融点 2850℃ とき

† Development of Incandescent Lamp During 100 Years After Edison Invention

* 東京芝浦電気㈱

Akira Someya

わめて高く、使用が研究されきわめて高純度のタンタルの製造法が開発され、可延性に富み自由に細い線に加工できるようになった。タンタル電球の効率 5 lm/W とオスミウム電球ほど良くないが、強度が強く振動に対して強いこと、オスミウムに比べ製造コストが安いなどの長所があった。しかし交流点灯でフィラメントが急速に結晶化し断線を起こす欠点があり、当時普及し出した交流発電との関係で、急速な利用拡大には至らなかった。

このように、種々のフィラメント材料についての研究開発が行なわれている中で、米国の W. R. Whitney 博士は、カーボンフィラメントの改良研究に力を注いだ。炭素電球の寿命中の黒化現象は、蒸発したカーボンのほかに、ある種の灰分（たとえばシリカ）の酸化物の存在に大きな影響のあることを発見し、従来の製造方法では容易に取りきれないことを知り、フィラメントを使用温度（当時の炭素電球は約 $1,700^{\circ}\text{C}$ ）よりはるかに高い温度で加熱処理することにより、灰分の酸化物が急速に減少し、電球としても寿命中の黒化が著しく少なくなることを見出した。

また、カーボンフィラメントの表面層がより硬く強くなるため、金属のような性質をもつようになり、点灯温度も $1,900^{\circ}\text{C}$ まで上げることができるようになった。この金属化カーボン電球をゼム GEM (General Electric Metalized) ランプと呼び、1905年に商品化され、以後タングステン電球が出現するまで市場にあった。

このゼム電球と炭素電球を比較すると、寿命を同じとすると効率は炭素電球の 3.4 lm/W に対して 4.25 lm/W と約25%向上した。効率だけでみると前述のオスミウム、タンタル電球などに比べ高いとはいえなかったが、量産が可能であり製造コストがきわめて安いことと、他のものより寿命が長いという利点があり、炭素電球からしだいにこの電球に変わって行った。

3. タングステン電球の発明

炭素以外の新しいフィラメント材料の研究は絶え間なく続けられ、 $3,360^{\circ}\text{C}$ の融点をもつタングステンが、その材料の入手やすさから注目されるようになった。当初はタングステンを固体のまま、あるいは粉末から線材にする多くの試みが行なわれたが、実現までに至らなかった。1905年になって、オーストラリアの A. Just と F. Hanaman はタングステンに化学的操作を加えて、フィラメントとすることに成功した。タングステンの粉末をバインダと混ぜて凝集性に優れた混合物を作り、これをダイスを通して押し出し、水素、水蒸気などのふん囲気で熱処理してバインダなどの不純物を除き、タングステンのフィラメントを作る方法で、これを用いた最初のタングステン電球は効率 7.85 lm/W と、従来の炭素電

球の2倍以上の高率で格段の進歩を遂げた。

しかし、この押し出し（または押線）タングステンフィラメントそのものはきわめてもろく、炭素に比べて相当の長さを必要としたため、電球の取り扱いに非常な注意が必要であった。こうした間にオーストリアでは、オスミウム電球の改良を研究し、オスミウムとタングステンを混ぜ合わせると良い性能が出るが発見され、この電球に“Osram”の名称をつけた。これは Osmium の頭文字と Wolfram の語尾を合わせたものであるが、以後改良されるに従い、タングステンの量が多くなり、遂にはタングステン電球と同じになってしまった。

図 2 初期の引線タングステン電球

この実用面からの最大の欠点であるタングステンのもろさを解決したのが米国の W. D. Coolidge で、1908年には引線タングステンの開発に成功した。始めは水銀、カドミウムなどを結着剤としてタングステン粉末を固めて、ダイスを通して押し出す方式で、比較的高性能なタングステン線が得られてきたが、さらに延性をもたせる方式について研究を続け、タングステンに各種の加工を加えると機械的強度が向上することを発見し、遂に小さなダイスの孔を加熱したタングステンを通すことにより、線材としてもろさが減少し、金属として組成も結晶組織から繊維状組織とすることにより強化することができ、ダイスの選定により、繰り返しの引線加工により各種の電球の定格に応じた線径のタングステン線を作ることができるようになった。さらに結晶組織の改善のために、微量の添加物として酸化ナトリウムを加えることにより可能にするなど一連の引線技術を確立、実用電球に適用を始めたのが1910年である。この引線タングステンフィラメントを用いた電球の効率は、 10 lm/W とこれまで最高となり、また、設計条件に合わせた線径の線が可能となり、製品の品質も安定するなど多大の改良がはかれ、引線タンダステン電球の出現となった。

引線タングステン電球の発明に続くのが、ガス入り電球である。米国の I. Langmuir は、電球の黒化現象を研究の結果、黒化の原因がタングステンフィラメントの

図 3 初期のガス入り電球

蒸発にあることをつきとめ、電球の内部に窒素のような不活性ガスを封入することにより、高温タングステンから蒸発する量を低下することを発見した（いわゆる蒸発抑制作用）のであるが、一方、黒化を防止（すなわち蒸発抑制）する効果とうらはらに、不活性ガスによりフィラメントから熱をうばい、フィラメントの温度を下げて効率低下をきたす問題（封入ガスによる熱損失）があり、Langmuir は1913年ガス中のフィラメントの熱損失の研究を重ね、熱損失はフィラメントの長さに影響することを追求し、フィラメントを直線からコイルにすることにより、熱損失を少なくすることが可能であることを見出した。不活性ガス中でフィラメントが点灯すると、フィラメントの表面には、不活性ガスの層ができて、さやのように包むことになり、また、その中で熱損失となる率は、フィラメントの長さに比例することがわかり、フィラメントをコイルにすることにより有効長を短くすることが考えられ、いわゆる単コイルガス入り電球が1913年に誕生した。

このようにして熱損失を少なくしたガス入り電球は、60 W級で初効率11 lm/Wを達成することになった。初期のガス入り電球は窒素ガスを封入していたが、さらに熱伝導率が低く、分子量が大きい（すなわち蒸発抑制効果が大きい）アルゴンが使用されるようになり、アルゴンの入手が容易になった1919年以降、標準品種にはアルゴンを主体にして、少量の窒素を封入したガス入り電球が主流になってきた。このようにアルゴンガスの採用によりガス入り電球は大成の域に達した。

こうした中でも、白熱フィラメントについての種々の実際研究は続けられている。日本でも、三浦順一技師は、単コイルフィラメントが採用されることになった理論的な解明、実験を行なった結果、従来の単コイルをもう一度コイルリングしたいわゆる二重コイルフィラメン

図 4 二重コイル電球
左：三浦順一技術による初めてのもの
右：現在の二重コイル電球

トを1921年に発明した。この二重コイル電球は、従来の単コイル電球に比べさらに効率が高く、また点光源としても効果がありながら、フィラメントを作るという点で実用に至らなかったが、1936年にはそれまで実験的研究の成果として、一般照明用二重コイル電球が世に出されることになり、60 W電球で効率が13.8 lm/Wと単コイル（12.5 lm/W）より約10%向上し、今日の一般照明用電球の基礎はこの時期にはば完成したといえよう。

さらにフィラメントの形状として、従来主力となってきた二重コイルフィラメントは、ガラス球の軸に対して垂直に配置していたが、1955年米国ではフィラメントを軸方向に取り付けるいわゆる縦形フィラメント方式が採用された。フィラメントをこのように取り付けた場合、点灯時の封入ガスによる熱損失が少なくなるため、電球の効率が約5%ぐらい向上する。米国では近年一般照明用にはほとんどこの縦形フィラメントが採用されている。

表 1 電球の効率と変化

年	フィラメント	封入ガス	効 率 (lm/W)	寿 命 (h)
1879	炭化紙	真 空	1.4	45
1881	炭化竹	真 空	2.25	600
1884	繊維素	真 空	3.4	400
1897	ネルンスト(ランプ)	真 空	5.0	800 (AC点灯)
1898	オスミウム	真 空	5.5	1,000
1902	タンタル	真 空	5.0	300 (AC点灯)
1904	押線タングステン	真 空	7.85	800
1910	引線タングステン	真 空	10	1,000
1913	単コイル	窒 素	11	1,000
1917	単コイル	アルゴン	12.5	1,000
1936	二重コイル	アルゴン	13.8	1,000
1936	二重コイル	クリプトン	15	1,000

3. 電球ガラス球の発達

Edison が電球を発明して以来、タングステン電球の時代にはいつてしばらくの間、電球のガラス球の頂部にチップと呼ばれる光った部分がついていた。これは、当時の電球は、排気管をガラス球の頂部にあらかじめ溶着しておき、コイルなどの封入物を封着後、この排気管を

通して真空にし、またガスを封入していたものである。このチップは機械化までされて溶着されていたが、軽い衝撃でもこわれやすく、取り除く研究が続けられていた。1919年には、米同で L. E. Mitchell ほかにによりこの問題が解決された。これは、コイルを取り付けるステム部分にあらかじめ排気管を取り付けて、封着部に排気孔を作っておく方式で、現在の電球はすべてこの方式を採用している。

チップレス電球に続いて、ガラス球として解決しなければならぬ問題は、電球の効率が向上し、発光部分も小さくなったので、透明なガラスでは非常にまぶしい状態となった。このグレアを防止するための研究が行なわれ、乳白ガラスを用いたり、ガラス球の外面をつや消したり、白色エナメルをコートするなどが考えられたが、それぞれまぶしさは減少するが、光の透過性が低下したり、強度が著しく下ったり、また点灯中に汚れがつき、寿命中の明るさが大きく変わってしまうなど欠点があった。1925年に日本の不破橋三技師は、ガラスの組成、処理方法について物理的、化学的な研究を続けた結果、ガラス球の内面つや消し処理方法を完成した。

一方、米国でも M. Pipkin が内面つや消しの研究を行ない、ほとんど同時に日本と同じ処理方法を開発し、以後の電球は、急速にこの内面つや消しガラス球に変わっていった。

内面つや消し電球の研究の副産物として、ガラス球内面にフィラメントからの熱に対して、安定な拡散性の良い白色材料をコートした全面白色の全光電球が開発されている。1949年にはシリカ微粒子を静電塗装でコートした拡散電球が商品化され、今日、日本でも一般照明用電球は白色拡散形が主力となっている。

4. ハロゲン電球

1959年米国の E. G. Zubler らにより発明されたハロゲン電球（開発当初はよう素電球）は、白熱電球の効率を1913年のガス入り電球の発明以来、いちだんと向上し、しかも働程特性（寿命中の光束維持率）をほとんど初期と変わらない特性をもった画期的な光源である。白熱電球にハロゲン元素を使用することは、すでに1915年ごろより研究されていたが、その熱力学的な解明、石英ガラスの加工技術などが得られず、製品化にまでは至らなかった。

ランプに封入されているハロゲンは、点灯中は高温部で原子状に解離し蒸発したタングステンと化合し、蒸気圧の高い物質を形成し、タングステンがガラス球内面に蒸着することを防止している。タングステン化合物が蒸着しない程度の温度と、熱解離しない温度の範囲にガラス球が保たれていれば、従来の電球のような黒化現象は

図 5 ハロゲン電球（両端子形）

起こらず、これをハロゲンサイクルと呼ぶ。

これらの条件を満足させるために、従来のランプより小型、高出力とする必要があり、ガラス球は主に石英を使用する。

このハロゲン電球は、小型高出力を生かして各種の新しい用途を開発し、電球としての一分野を開いている。1959年に実用化されたハロゲン電球は、よう素を封入した両端子形の電球で、投光用として発表された。最近はやう素より活性な臭素化合物も封入され、寿命特性の安定がはかられている。これをさらに改良して片端子形のランプが開発され、商店のスポット照明、ダウンライト照明などに数多く普及している。

もう一方は、フィラメントから出る熱を利用して焼き付けるヒータ用ランプで、赤外線効率良く出す設計となっている。そのほか小型で高輝度を生かして自動車用、映写用、光学機器用など、各種新用途の開発が行なわれている。

5. 各種電球の発達

電球の基本的な開発は二重コイルタングステン電球の出現により大部分は完成したと考えられるが、現在まで実に様々なものが商品化され実用に供されている。

日本も含めた諸外国の電球の歴史を図に表わしたものが図6の「光の歴史」である。

当初、Edison の実用炭素電球から始まった電球も、1920年代にはいって、ガス入りタングステン電球の普及とともに大幅に用途の拡大が始まっている。一般照明用では、つや消しから始まり、近年は大部分が白色ランプに代わり、暖かい落ち着いた照明を実現している。最近では省エネルギー時代に対応した効率を向上した省電力形電球、バルブ頂部を透明にして光の配光を変化させて、ガラス球頂部方向への光を多くした高照度形電球、熱伝導率の小さいクリプトンを封入した高効率クリプトン電球など地道な改良が行なわれている。

店舗を主体とした装飾用電球としては、球形ガラス球に白色コートしたボール電球の普及が著しい。さらにラングミュアシーズを利用した片端子形棒状電球、クリスタルカットの厚肉ガラスを熔融ガラス封止で加工したクリスタルランプなどが市場に現われている。

図 6 光の歴史 (日本電球工業会「日本電球工業史」より抜粋し、一部追加したもの)

店舗照明に普及が特に目立つものに反射形電球がある。吹き形のR形ガラス球を用いて、ガラス球内面の反射部にアルミニウムの反射面を蒸着し、頂部方向に光を集光するものである。押型のガラス球を使ったビームランプは、反射面の精度が高く、また前面レンズで配光を正確にコントロールするため、高照度のスポット照明に適している。特に前面ガラスに熱線カットの熱線反射膜を備えたものと、反射面を赤外線透過で可視光反射のいわゆるコールドミラー形の電球が開発され、高照度でしかも熱の少ない照明を得ることができた。

自動車用電球も各種の電球が商品化されている。自動車の前照灯用としては、オールガラスのシールドビーム形電球が主力となっており、最近では従来の円形のほか角形もできている。またハロゲン電球を内蔵したものも開発されている。車内の表示用としてはガラス球径 10 mm と 5 mm の 2 種類のウェッジベースランプが主力で、そのソケットとの組み合わせで、大きな信頼性を確立している。赤外線電球は、従来の工業用、乾燥用のほかに医療用ややぐらこたつ用電球が開発されている。

5. ま と め

以上、白熱電球の発達の歴史をたどって来たが、初期の二重コイルタングステン電球の開発に至るまでの経過、近年の画期的発明といわれるハロゲン電球のように、電球の発達は新しい材料の出現と、地道な基礎研究が基本であり、今後も同様の傾向が続くと考えられる。

すでに種々発表されているように、新発光材料の研究、白熱フィラメントから放射される赤外線を球形ガラス球の内面に施した透明赤外線反射膜により、フィラメントへ戻し、再加熱に利用し高効率化をはかるなどの新材料、新技術の開発が大いに期待される。

最後に、本稿は日本電球工業会発行の「日本電球工業史」、「日本電球工業会報」、東京電気協会編「東京電気 50 年史」、James A. Cox: 「A Century of Light」、照明学会誌 23-6, 23-8, 62-4 などを参考にさせていただいた。

(受付 1979 年 8 月 8 日)