

白熱電球の技術の系統化調査

A Systematic Survey of Technical Development of Incandescent Lamps

石崎 有義 Ariyoshi Ishizaki

■ 要旨

白熱電球の歴史は 19 世紀初めから始まっており、当時の先端技術として多くの科学者による研究開発が行われている。発光材料は白金線からカーボンになりそれを入れる真空ガラス容器が開発され、エジソンの実用カーボン電球に至っている。エジソンによる電灯システムの設立により照明用光源として白熱電球の普及が始まった。その後より高温に耐えるフィラメント材料の探索が行われタングステンフィラメントが開発された。さらにガス入り電球の発明と二重コイルの発明により現在の一般電球の基礎が確立された。その間ゲッターやジュメット線などの材料開発がなされ、ロータリー真空ポンプの発明により生産技術も大きく進歩した。

我が国での電球は明治 19 年に東京電灯が輸入電球を使って電灯事業を始めてから本格的な使用が始まっている。電球の国内生産は明治 23 年の白熱舎での試作成功からで、製造設備は英国から輸入されていた。その後、東京電気（白熱舎）は GE の系列会社になり、主要技術を GE から導入し国内の中心企業になっている。国内でタングステン電球が製造されるようになってから、電球の普及は急速に進み昭和年代始めには普及率が米国や英国より高くなっている。

1930 年代中頃には電球の製品としての開発はほぼ終了し、技術開発は量産化に注力されるようになった。東京電気では GE から導入された機械を元に量産機の自主開発が行われ、電球製造機械のほかガラスバルブ、導入線、タングステンなど部品の製造機械も世界のトップクラスになり、海外への輸出も行われた。電球量産機は北九州小倉の工場に設置され我が国の一般電球の半数以上を生産していた。

この間に開発されたランプ製造技術とタングステンやガラスなど材料部品の製造技術は蛍光ランプや HID ランプに引き継がれている。

一般電球以外の特殊電球は多くの種類が作られており、第二次大戦後、一部は低価格を強さとして大量に輸出され、昭和末期には品質の高さにより自動車用電球なども多数輸出されている。

特殊電球は用途に対して多数の製品開発が行われてきた。国内生産が開始されてすぐに反射形や着色カーボン電球が開発され、その後、ガラスバルブや塗装の改良が行われ、紫外線、赤外線を利用する製品や反射光の配光を改善した製品が開発されている。自動車ヘッドランプや光学機器用や大型電球などはハロゲン電球化が進み現在も重要な光源である。

白熱電球は普及当初は石油ランプやガス灯に対して優位な光源として普及が進み数十年間にわたり照明光源の主流であったが、近年は蛍光ランプや HID (High Intensity Discharge) ランプや LED の性能向上により減少傾向が続いている。

■ Abstract

The history of the incandescent light bulb began in the early 19th century. As the cutting edge technology of the time, many scientists took part in its research and development. They developed a evacuated enclosure into which they inserted incandescent materials such as platinum or carbon wire, culminating in Edison's commercial carbon filament light bulb. The use of incandescent light bulbs began to spread as a source of light thanks to Edison's establishment of an electrical lighting system. Afterwards, scientists searched for filaments that could better withstand heat, and developed tungsten wire. The foundation of the general light bulb used today was completed with the invention of gas-filled bulbs and double coiled filaments. During this span of time, materials such as getter and Dumet wire were developed. Manufacturing technologies also made significant progress thanks to the invention of the rotary pump.

The full-scale use of light bulbs in Japan began in 1886 with the founding of the Tokyo Electric Light Company, which inaugurated the electric-lighting industry in Japan. The company used imported light bulbs. Domestic production of light bulbs began in 1890 by Ichisuke Fujioka of Hakunetu-sya. Afterwards, Tokyo Electric Company (Hakunetsu-sha) became an affiliate of the General Electric Company of the U.S. and imported its primary technologies from GE. Because Tokyo Electric Company became capable of manufacturing tungsten light bulbs domestically, the use of light bulbs grew rapidly. Around 1935, the penetration rate of light bulbs was higher in Japan than the U.S. and Great Britain.

By the mid-1930s, the development of the light bulb as a product had almost ended, and the technological focus shifted to mass production. By developing mass production equipment independently based on machinery introduced by GE, Tokyo Electric (forerunner of Toshiba) became a world-class leader in not only light bulb manufacturing facilities, but also facilities for manufacturing parts, including glass bulbs, lead-in wires and tungsten wires, which the company exported. The mass production factory was located in Kitakyushu, and produced more than half of the general light bulbs used in Japan.

The technologies for manufacturing lamps and materials of parts such as tungsten and glass have been carried over to the production of fluorescent lamps and high-intensity discharge (HID) lamps.

Besides general light bulbs, many different types of specialized light bulbs have been created in Japan. After World War II, a portion was exported on the strength of their low price. By the end of 1980s, a great quantity of specialized bulbs, such as automotive lights, was being exported because of their high quality.

Many developments in specialized light bulbs have been carried out to meet different needs. After production began in Japan, reflective and tinted carbon light bulbs were developed almost immediately. This was followed by improvements in glass bulbs and glass coating, and products were developed that used ultraviolet and infrared rays and improved the distribution of reflected light. Automotive headlights, light bulbs for optical instruments and large-scale light bulbs have changed to halogen lamps and remain important light sources today.

Incandescent light bulbs spread as a result of their superiority to oil lamps and gas lamps when they were first introduced, and after several decades became the main source of illumination. In recent years, their use has been falling thanks to improvements in the performance of fluorescent lamps, HID lamps and LED light bulbs.

■ Profile

石崎 有義 *Ariyoshi Ishizaki*

国立科学博物館産業技術史資料情報センター 主任調査員

昭和43年3月	東北大学理学部物理学科卒業
昭和49年3月	東北大学理学研究科 博士課程修了
昭和49年4月	東京芝浦電気株式会社入社
平成 3年4月	東芝ライテック株式会社 転籍
平成17年9月	同社退職
平成22年4月	国立科学博物館産業技術史資料情報センター

■ Contents

1. はじめに	03
2. 白熱電球について	04
3. 白熱電球の技術開発の歴史	06
4. 性能評価技術と規格	26
5. 我が国の電球産業の変遷	30
6. 量産技術	36
7. 特殊電球の変遷	55
8. 電球以外の光源	65
9. まとめ	71
謝辞	71
一般白熱電球の技術の系統化	72
付表	73
登録候補一覧	77

1 | はじめに

白熱電球は最も古くからある電気製品で、現在は旧式の光源になっているが我々の生活に深く溶け込んでいる製品である。電気を利用した産業の最初は通信工業であるが、各家庭で発電所から送電された電気を使用する現在の電化生活は白熱電球による照明から始まっている。

白熱電球の開発が始まったのは1802年の英国の化学者デービーによる白金線の発光の公開実験からとされている。その後数十年間に多数の科学者による研究開発と電池の改良や真空ポンプの発明が行われ、1879年のエジソンの実用電球の発明に繋がっている。エジソンによる電球の量産化と電灯システムの確立以降、電気の利用を促進するための重要な製品として急速に普及している。当時使用されていた石油ランプやガス灯に代わって、安全でスイッチを入れるだけで明るくなる近代的製品として世界中に普及してきた。20世紀中ごろに効率の良い蛍光灯などが登場するまで白熱電球は光源の主流として、屋内外の照明、表示用など多岐にわたって使用されてきた。

我が国における電球使用の開始は明治17年(1884)に上野駅で点灯されてからとされている。当初は輸入電球が使用されていたが、5年後の明治22年に白熱舎の藤岡市助により国産化が始められた。その後タングステンフィラメントなどの基本的技術が欧米から導入され、性能が大幅に向上し一般家庭への普及が急速に進んだ。昭和10年頃には普及率が89%に達して米国の68%や英国の44%を超して世界で最も高いレベルになっている¹⁾。この普及に対応して量産技術も進歩し、東京電気の北九州小倉工場では最盛期には年間6000万個以上を生産していた。また、一般電球以外に表示用小形電球、投光機に使用される大型電球、自動車用電球、映写機などの機器に使用される光学機器用電球、赤外線電球など種々の製品が開発され、大正末には6000種に及んでいる。昭和初期には一部の小形電球が低価格を武器に大量に輸出され、昭和60年代には自動車用小形電球が品質の高さから世界の生産

数の半数以上を占めていた。

近年、環境問題の対策として効率の低い電球の生産を中止する計画が世界的に進んでおり、白熱電球の役目はほぼ終わりに近づいていると言われている。しかし白熱電球の発展で築かれた材料技術や生産技術は他の光源に引き継がれており、照明技術も電球で確立された技術が使われている。

本調査研究は一般電球の材料開発による性能向上と量産化の技術を中心に調査を行い、多数の品種がある特殊電球について機能別に製品の歴史を調査し系統化を行った。

以下、本報告書の第2章で照明光源の基本的分類の紹介と白熱光源の効率の原理の解説を記載する。

第3章では技術の進歩について、重要な技術革新を項目に分けその技術の説明と歴史の概要を記載する。一般的に知られている項目以外にジユメット線とゲッターのほか赤外線反射膜も含めて記載する。第4章で性能評価技術として測光と電球設計の元になる寿命と効率の考えかたを説明する。第5章では電球で我が国の電球産業の変遷について、中心企業であった東京電気の歴史、電球の普及と小形電球の輸出について記載する。第6章で量産技術の発展について電球製造、ガラスバルブ製造、真空技術の発達、タングステン線製造技術に分けて記載する。特に製造技術では北九州小倉工場の量産技術を中心に進展を述べる。第7章では特殊電球について種類が多いので、発光分布変更電球、配光制御電球、表示用電球、装飾用電球に分けて、変遷を説明する。第8章では電球以外の蛍光灯などについて歴史の概要を紹介し、白熱電球の位置づけを行う。第9章でまとめとして白熱電球の技術発展による他分野への寄与の考察と、我が国の電球技術の特長について述べる。

引用文献

- 1) 栗原 東洋：「現代日本産業発達史 III 電力」，現代日本産業発達史研究会，P.181 (1964)

2 | 白熱電球について

2.1 照明用光源の種類

現在の照明用光源はその発光原理によって図 2.1 のように白熱、放電、エレクトロルミネセンス (EL) に分けられている。

白熱電球はタングステンフィラメントを通電加熱して発光させるランプで、最も古くから使用されており、製品の種類も多い。ハロゲン電球は基本的には一般電球と同じであるが、一般電球から少し進化したもので、形状や特性が少し異なるので分けて扱われている。放電を利用した光源は水銀蒸気からの紫外線で蛍光体を発光させる蛍光ランプと、封入された金属蒸気を発光させる HID (High Intensity Discharge) ランプに分けられている。蛍光ランプは屋内照明用として最も多く使用されている光源で、点灯回路を一体化した電球形が白熱電球に代わって普及している。HID ランプは屋外照明用が多いが、最近小形化と点灯回路の電子化が進み、店舗用や自動車ヘッドランプ用としても使われている。

エレクトロルミネセンス光源は LED が近年急激に進歩して表示用の他に一般照明用が開発されており、OELD (Organic Electroluminescent Display) はディスプレイ用として開発されているが、照明用途も検討されている。

各光源の発光効率¹⁾は白熱電球が 10 ~ 20lm/W、蛍光ランプが 50 ~ 100lm/W で HID ランプが 40 ~ 130lm/W である。白熱電球は原理的に効率が低いが、安価である、点灯回路が不要で使いやすいなどの他に演色性 (Ra) *) が高く調光が容易であるなどの特長がある。近年他の光源への置き換えが進んでいるが、

古くから使われ、その光色を好む人も多く現在も重要な光源である。

*) 物体の色の見え方は照明する光の分光分布によって変化するので、太陽光や白熱電球の光を基準 (100) として各色の光源による見え方を相対値で表わした数値が演色性 (平均演色評価指数: Ra) である。一般に演色性の高い方が色が自然に見えるので良いとされている。

2.2 一般白熱電球の構造

白熱電球の原理と構造は単純であるが部品名など専門用語が使用されているので概要を紹介する。図 2.2

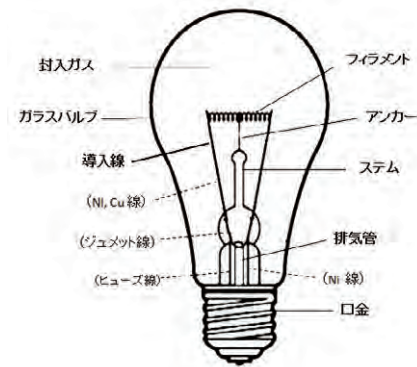


図 2.2 一般電球の構造図

に一般電球の構造図を示す。ガラス球はバルブと呼ばれ一般電球ではソーダガラスが使用されており、拡散形は内面にシリカやチタニアの微粒子を塗布してある。形状は洋なし (PS) 形が主である。フィラメントはタングステン線の 2 重コイルで、封入ガスとしてアルゴンと窒素が 9 対 1 の比率で、点灯中にほぼ 1 気圧になる量が入っている。フィラメントの支持と電流

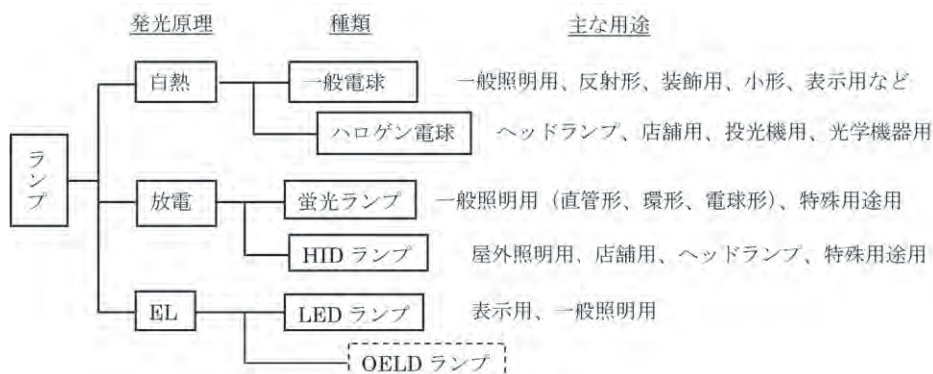


図 2.1 照明用光源の種類

を流す役割を兼ねる線を導入線と言う。導入線のうち、フィラメントに繋がっている部分はニッケル線あるいは銅線で作られており、ガラスと封止されている部分はジユメット線と呼ばれる合金線が使用されている。口金に繋がる部分は、一方がニッケル又は銅線で、もう一方の一部はヒューズとしての機能を持たせモネルかコンスタンタン線を使用している。ヒューズは点灯中フィラメントが断線した時、アーク放電が発生しバルブが破損するのを防ぐ目的で採用されている。導入線と排気管を固定している部分をステムと呼び、フィラメントの振動防止のためにステムから出ているモリブデン線をアンカーと言う。口金はアルミニウムで接着剤は炭酸カルシウムを混合したフェノール樹脂が使われている。

2.3 白熱光源の原理

照明用光源は枯れ木や草を燃やす松明から始まり油ランプやローソクに進化している。これらは化学反応(燃焼)により炎の中に含まれるカーボン微粒子を白熱状態にして熱輻射に含まれる可視光を利用する白熱光源である。

その歴史は古く、旧石器時代の洞窟からは簡単な油ランプが発見されており、古代エジプトの遺跡からはローソクの燭台が発掘されている。油ランプとローソクは18世紀を過ぎるまで長い間主要な光源として使われていた。19世紀になって電池が発明され、金属やカーボンの細い線に電流を流し白熱状態にして光を得る試みが行われたのが白熱電球の始まりである。

物体を加熱すると熱輻射が発生し、その波長分布は、物体が黒体の場合プランク (Planck) の式で与えられる。図 2.3 に熱輻射の分光分布の温度変化を示す。大部分は赤外線であるが温度の上昇とともに放射量が増大し、可視光成分が増える。図の中で点線は人間の目の分光感度 (比視感度曲線) である。

図から判るように白熱光源から放射される光の殆どは赤外線で、可視光成分は少なく 2400K では放射全体の 3% 程度で 3200K でも 10% 程度である。なお、実際の物体は選択放射体のため少し分光分布は変わり、例えばローソクや油ランプでは発光するカーボンが微粒子なので分布が青方向にずれ、少し高い温度の分布になる。

図 2.4 は各温度での熱輻射の可視光成分を比視感度で明るさに換算して、放射全体に対する比率を効率 (lm/W) で表わしたものである。温度上昇に従って効率が増加し、約 6000K で最高になる。6000K が最

高になるのは人間の目が太陽光を最も効率よく感ずるようになっているためである。

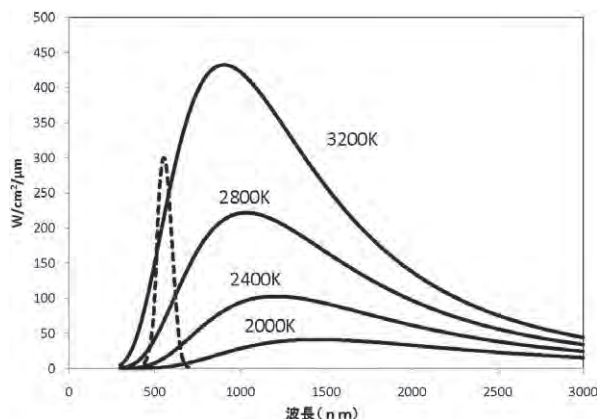


図 2.3 黒体からの熱輻射

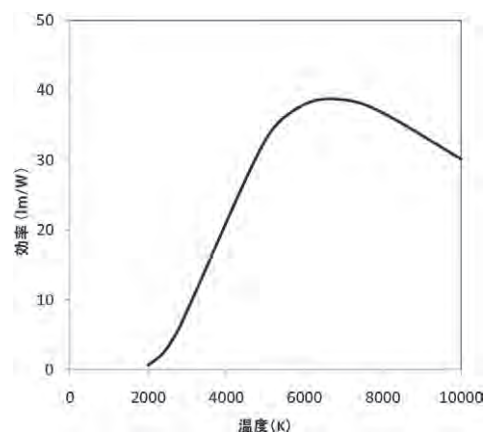


図 2.4 黒体熱輻射の光源としての効率

このように熱輻射を用いる光源では発光体の温度を高くすることにより発光の効率が良くなるので、白熱電球開発の歴史は、出来るだけ高温で長時間安定して加熱できるフィラメント材料の開発とそれを封入するガラスバルブや真空などの製造技術開発の歴史である。

カーボン(正確には昇華点)が 3600°C 以上と高く、比較的入手しやすいことから初期の実用電球に使われたが、昇華が激しく高温にすると寿命が短くなるという欠点がある。そのため最終的には金属の中で融点が 3695K (3422°C) と最も高いタングステンが使用されるようになった。タングステンは蒸発が少ないという特徴の他に、可視光領域より赤外線領域の放射率が小さいという発光体として有利な選択放射特性をもっており、効率が図 2.4 の値より 30 ~ 40% 高い値になる。

現在もこのタングステンより優れた材料は見つかっていないので、タングステン電球は松明から始まった長い白熱光源の歴史の最後に登場した光源であると言える。

3 | 白熱電球の技術開発の歴史

白熱電球の技術史については本や文献が多く出されている。ここではJ. W. Howell & H. SchroederによるHistory of the Incandescent Lamp (1927)¹⁾、電球工業会史²⁾、電球工業会報に連載された深津正の報告³⁾などから技術的に重要な事項を整理して記述する。

3.1 白熱電球の始まり

白熱電球は1802年に英国の王立科学研究所の化学者ハンフリー・デービー (Humphry Davy) が2年前に発明されたボルタ電池を用いて白金線を通電加熱し、白熱状態にすることにより、僅かな時間であるが光が得られることを示した時が始まりとされている。これは電球の可能性を示したもので電球にはなっていない。なお、デービーはカーボン電極で放電発光するアーク灯の発明者でもある。

記録されている最初の白熱電球は1820年に英国のデ・ラ・ルーエ (De la Rue) により作られた図3.1に示すようなガラス管の中に白金コイルを入れ真鍮のキャップをしたものである。内部は真空になっているとされているが方法は不明である。

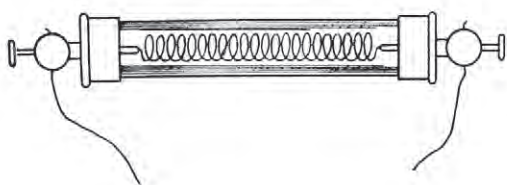


図 3.1 ルーエの電球¹⁾

当時は電源としてボルタ電池しかなかったので充分な研究開発を行うことが出来なかったが、その後1840年前後にダニエル電池、グローブ電池、ブンゼン電池など高性能の電池が発明され、白熱電球の開発が急速に進んだ。

電球の最初の特許は英国のフレドリック・デ・モーリン (Frederick De Moleyns) が1841年に取っており、この電球は球形のガラスグローブの中に白金コイルを入れ、中を真空にして点灯可能時間を長くしたものである。その後、スター (J. W. Starr) によるトリチェリーの真空を用いた電球やロバート (M. J. Roberts) による黒鉛を用いた電球など種々の開発が行われた。それらの中でドイツ人のハインリッヒ・ゲー

ベル (Heinrich Goebel) が1859年に発明した竹の繊維を炭化してフィラメントとして使用した電球は後にエジソンの特許と論争になっている。

1878年により実用的なカーボン電球がエジソンのライバルである英国のスワン (Joseph W. Swan) により発明された。この電球は図3.2のような形で直線フィラメントを白金導入線で固定したものである。この電球の発明で技術的に重要なポイントは1865年にハーマン・シュプレングエル (Herman Sprengel) により発明された水銀真空ポンプを使用して高真空にしていることと、フィラメントを通電加熱しながら排気してフィラメントから不純物を放出させている点である。これによりフィラメント温度を上げて点灯できる時間が長くなり、点灯中のガラスバルブ黒化も減らすことも出来た。なお、ほぼ同時期にエジソンも同じような方法で電球を試作している。

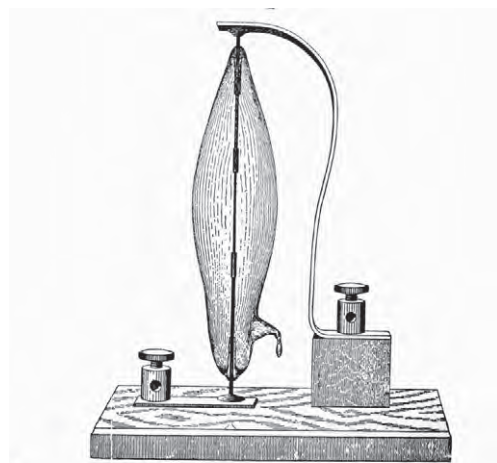


図 3.2 スワンの電球¹⁾

スワンはその後、1883年に木綿を混酸 (硫酸と硝酸) で処理してニトロセルロース化し、酢酸で半溶解状態にして細いノズルを通して押し出し線状にして、それを炭化するフィラメントの製造方法を発明した。この方法により太さと成分が均一なフィラメントが得られるようになった。

付記)

フィラメントの均一性は電球の性能に対し重要な項目である。フィラメントに部分的に細い部分や不純物などの欠陥があると、その部分の電気抵抗が大きくなり、通電加熱時欠陥部分の温度が高くなり蒸発が増え、さらに細くなりより温度が上昇するホットスポット現

象が発生し、短寿命になる。

このスワンにより発明された噴出法はその後英国人のポエル (L. S. Powell) により木綿を塩化亜鉛の熱溶液で溶融する方法に改良され、タングステンフィラメントが現れるまで使用された。

スワン以外にも米国のマキシム (H. S. Maxim) が 1859 年頃から電球の開発を行い、1880 年に後述するエジソンの電球に似た電球を完成し、United States Electric Lighting Co. という会社で製造を行っている。また英国ではレーフォックス (S. G. Lane-Fox) により 1880 年に植物繊維を炭化したフィラメントを使った電球が開発され、その後実用化された。

以上のようにエジソンの実用電球発明以前に多くの電球開発が行われ、いくつかは生産されて使用されたが、電球が普及するために必要な電源、電力供給設備や器具材料が整っておらず、本格的に普及するのはエジソン以降である。

3.2 エジソンの実用的白熱電球^{1),2)}

エジソンの電球開発の研究は 1877 年頃から始まっている。当時エジソンは電話機の研究を行っており、電球の研究も当時の新聞に“一般大衆が広く利用できる電灯を、ガス灯に比べて安い費用で供給できると考えている。電流を各所に分岐させて、それぞれの地点で少量の電気を使うということは不可能でない。ただ難しい問題は、あまり強すぎず快適な光を出し、ガス灯のように手軽に点滅できる光源を求めることにある。”と発表しているように、最初から電灯システムの開発を目標としていた。

電力の供給は、配線中の損失が電流の二乗に比例するので、電圧を高くして電流を減らし、配線を細くした方が有利である。そのため、エジソンの電球開発の大きな目標の一つは高い電圧で使用できる高抵抗のフィラメント開発であった。最初に発明された高抵抗フィラメント電球は細い白金線を陶器製のパイプに巻きつけ、白金の蒸発を防ぐため酸化ジルコニウムを被覆したフィラメントを使用したものである。この白金を使用した電球は効率が低く高価になるので、すぐにカーボンフィラメント電球の開発に方針が変更された。エジソンは当時カーボン粒子を使った電話の受話器を開発しており、カーボンについての知識を持っていたので、フィラメント用のカーボン線の寸法は太さ 0.4mm 以下である必要があると考え、縫い糸を炭化する検討を行った。木綿の糸を U 字形にしてカーボン粉

末に埋め、数時間高温に加熱して炭化する試験を何回も行い、カーボンフィラメントを完成した。これを白金線に繋ぎ、ガラス容器に入れ水銀真空ポンプで排気し、さらに通電しながら排気を行うことにより、1879 年 10 月 19 日に 40 時間の点灯に成功した。その後、実用的電球を製造するため、フィラメントの原材料の探索の他、ガラスバルブ製造法、導入線とフィラメントの接続方法、排気方法、口金とソケットなどの多くの技術開発が行われ、電球の生産が開始された。図 3.3 は 1881 年から 1884 年頃に製造された 110V 用と 55V 用の電球である。寿命は 600 時間とされていた。この電球のフィラメントに日本の八幡竹が原材料として使われていたことは良く知っている。



図 3.3 八幡の竹を使ったエジソン電球¹⁾

この日本から輸入された竹を使ったフィラメントは 10 年間以上製造されていたが、1894 年に品質と生産性を高めるため吹き出しセルロースカーボンフィラメントに変更された。この吹き出しフィラメントはスワンの発明をポエルが改良した吹き出し法で生産された。

エジソンは電球を開発すると同時にそれを点灯するシステムの開発に注力している。

電球を多数点灯する場合、電球は並列でつながれるので内部抵抗が小さく大電流が取り出せる発電機が必要になる。エジソンは太い線と大量の鉄を使用して定電流形の発電機を開発している。さらに配線は地下に埋めるべきと考え、そのための配管の製造も始めている。その他、鉛線のヒューズを発明し、使用した電力を測定するための積算電力計も開発している。この電力計は図 3.4 に示すように硫酸亜鉛の溶液に 2 個の亜鉛電極を入れ、通電による電極の重さの変化を測定して積算電力を求めるもので、エジソンがこだわった直流送電で使用できる電力計である。

電球の量産は 1880 年に電球製造会社 (エジソン・ランプ・カンパニー) を設立して開始されたが、この電球製造会社設立の前の 1878 年にエジソン・エレク

トリック・ライト・カンパニーという電灯システムを事業とする会社を設立している。この会社は電球製造会社の親会社で、後のゼネラル・エレクトリック（GE）の元になる会社である。その他に電灯システム事業のため、ソケット、スイッチなどを製造するバーグマン・カンパニー、発電機の製造を行うエジソン・マシン・ワークス、配線を埋設するチューブなどを製造するエレクトリック・チューブ・カンパニー、発電会社のニューヨーク・エジソン・エレクトリック・イルミネーション・カンパニーなどが設立された。これらのエジソン系の照明関係会社は1889年に統合され、エジソンGE会社になった。図3.5にこれらの会社の関係を示す。

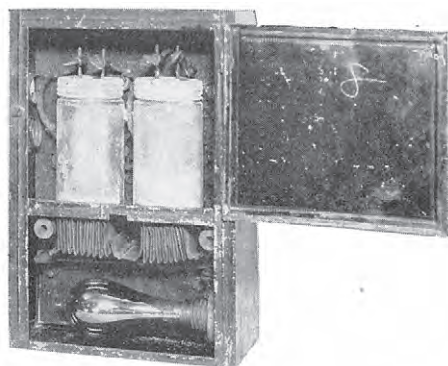


図3.4 エジソンの開発した積算電力計¹⁾

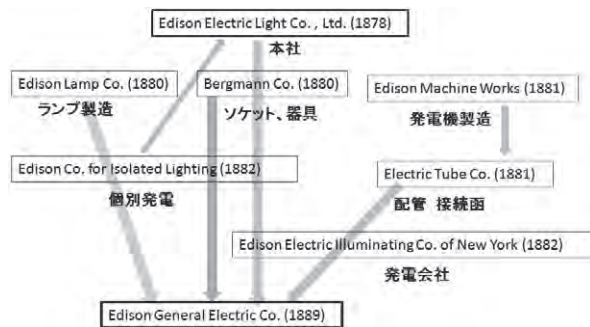


図3.5 エジソンの電灯システム会社の関係
(参考文献1)を参考に作成)

エジソンの偉大さは実用電球の発明だけでなく、それを点灯するために必要な部品や装置の殆どを開発し、事業化した点である。

我が国における電灯システムのはじまりは電球工業会史によれば明治15年（1882）に創立準備中であった東京電灯がアーク灯の点灯デモを行ったのが最初である。白熱電球の点灯は明治17年（1884）に行われている。当時使用された電球は輸入品で、国産は明治23年（1890）になってからである。

（この国産化については第5章で詳細に記述する）

電球を普及するためにエジソンが行った多くの開発の一つに口金がある。電球はソケットに取り付けて使用されるので使いやすい口金とソケットの開発と標準化は重要なテーマであった。

エジソン電球で最初に採用された口金は口金と呼べるものではなく、図3.6の①のように封止部の導入線に銅片を繋ぎ折り曲げて、先端を糸で巻いて固定したものであった。ソケットは木製で電球の銅線に対応する位置に銅片を取り付け、ネジで電球を固定していた。1880年に石油缶のネジ栓をヒントに考えだされた②のようなスクリュー（ねじ込み式）形の口金が開発された。電気接続はネジ部とバルブ側に取り付けられたコーン状の金属リングで行なうものである。1881年に電気接続を先端に付けた金属に変更し、それまで使われた絶縁材料を木から石膏に変更して、③のような形に改良された。その後電球を取り付ける時に手で持つ部分の石膏リングが取り除かれるなどの改良が行われ、1901年に絶縁部分の材料をガラスにしたものが開発され、現在使用されている口金と同じ④の形になった。

口金とガラスバルブの接着剤としては石膏と、アルコールに溶かしたセラックを混合したものが使用されていた。その後、ボルトランドセメント、大理石の粉（炭酸カルシウム）、フェノール樹脂を材料としたものが使われるようになった。



①ワイヤー接続口金



②最初のネジ込み式口金とソケット及び PAT. No.251554 の図



③改良ネジ込み式口金（1881）



④エジソン式口金（1901）

図3.6 エジソン口金の変化¹⁾

エジソンの電球製造開始をきっかけに米国では多くの会社が電球製造をするようになり、それらの会社で異なる口金を採用したので、1900年頃には米国で図3.7のように様々な口金が存在した。当時、最も多かったのはエジソン形①で70%、次がウェスチングハウス③が15%、トムソンハウストン②が10%、その他は5%以下であった。



図 3.7 1900 年頃の米国の口金の種類¹⁾

電球販売数は照明器具に取り付けられたソケット数に依存するのでエジソン口金への統一が進められた。既設のソケットは交換が難しいので形式の異なるソケットに取り付けてエジソン口金の電球が使用できるようなアダプターを作り販売を行った。この作戦が成功し米国では5年後にはエジソン口金以外の口金は消えていった。

エジソン口金は全世界に広がったが、エジソンのライバルであったスワンの出身国イギリスではスワンの発明した横にピンがある図3.8のようなスワン式口金(bayonet base形)が標準的に使われ、インド、オーストラリア、ニュージーランドやフランスでも使用されている。なおこのスワン式口金は振動に強いので、表示用や自動車用電球に多く使用されている。



写真 3.8 スワン式口金

3.3 タングステンフィラメント

3.3.1 タングステン電球以前の金属フィラメント電球

カーボンフィラメント電球の性能向上は1880年代の中頃にほぼ限界に近い状況になったので、新しい材料の開発が行われるようになった。カーボンフィラメントは、融点(昇華点)そのものは3600℃と高いが、昇華が大きいので点灯可能な温度は1600℃程度で、効率も3.4lm/W程度が限界であった。

最初にカーボン以外の材料を発光体とする電球として開発されたのは1897年ドイツのネルンスト(Hermann Walther Nernst)によるネルンスト電球(図3.9)である。このネルンスト電球は金属酸化物のジルコニアとイットリアで作られた発光体を加熱して発光させるもので、ヒーターにより発光体を加熱する図3.10のような複雑な構造をしていた。発光体が加熱され導電性が高くなるとそれ自体で発熱するのでヒーターは遮断されるようになっている。ネルンスト電球は高価であったが、効率が5lm/W程度ありカーボン電球より明るかったので欧米を中心にかなりの数量が販売された。



図 3.9 ネルンスト電球²⁾



図 3.10 発光部²⁾

金属フィラメント電球として最初に実用化されたのは1898年に発明されたオスmium電球で、発明者はガスマントルの発明者として知られているオーストリアのウェルスバッハ(Von Welsbach)である。オスmiumは白金族元素の一種で融点が2700℃で白金に比べてかなり高いが酸化されやすい性質を持ってい

る。硬くてもろいので、ウェルスバッハはその粉末を、ニトロセルロースや砂糖をバインダーとしてペースト状にして、押し出し法で細線にし、これを加熱してバインダーを炭化した後、水素雰囲気で通電加熱し、フィラメントにして電球を製作した。このオスミウム電球は寿命をカーボン電球と同じにした時の効率が5.9lm/Wと75%も高く高性能なものであった。しかしオスミウムは白金より高価で、フィラメントが脆いという欠点もあったので、販売では無く貸出の形で事業化され、断線したものを回収しフィラメント材料を再利用していた。ベルリンやウィーンで使用されていたがタングステン電球の登場により生産されなくなった。なお、ウェルスバッハの焼結によるオスミウム線の製法はタングステン線にも使われている粉末冶金法の先駆けである。

次に実用化されたのがタンタル電球で、1903年にドイツのジュークス・ハルスケ社のボルトン (W. Von Bolton) により発明された。タンタルは融点が2850℃と高く、延性があり線にした時の強度も高いという特徴を持っている。当時のタンタルは不純物が多く加工性が悪かったので、ボルトンはフッ化タンタルや酸化タンタルを還元する方法で純度の高い金属を得る方法を開発した。

この金属タンタルは加工が容易でダイスを通して細線にできるが、電気抵抗が小さいので、カーボンフィラメントに比べて細く長くする必要があり (例えば100V44W用で直径が45ミクロンで長さ50cm)、フィラメントは図3.11のように籠のような形に取り付けられた。電球の効率は4.8 lm/Wと良好でヨーロッパ以外に米国、日本でも販売された。我が国では、カーボン電球に比べて光色が白く明るいので好評で注文が殺到したと言われている。



図 3.11 タンタル電球¹⁾

このタンタル電球は点灯前はフィラメント強度が高いが、数十時間点灯すると、フィラメントが再結晶し脆くなるという欠点があり、交流点灯で寿命が短くなるという問題もあった。

その他、チタニウム、ジルコニウムやイリジウムなどの金属のフィラメントが研究されたが実用化までには至らなかった。

これらの金属フィラメントは主にヨーロッパで開発されたが、米国では1904年にGEのホイットニー (W. R. Whitney) によりカーボンフィラメントを改良した金属化カーボン電球が発明された。これはカーボンフィラメントに含まれている不純物を高温処理により除去して性能を向上したものである。

ホイットニーはカーボンで作った筒に数千アンペアの電流を流し、カーボンの融点近くまで温度を上げられる電気炉を開発し、この炉を使用してフィラメントの不純物の除去処理を行った。処理温度は2700℃程度である。真空中でカーボンフィラメントをこの温度にすると昇華が激しく、十分な処理は行えないが、電気炉の筒の中はカーボン蒸気が高く昇華が押さえられるので不純物を蒸発させることが可能であった。この処理を行ったカーボンフィラメントは不純物が減りカーボンが緻密になるので常温での抵抗値が低く、温度上昇により抵抗が増加する金属的特性を示したのでGEM (General Electric Metalized) フィラメントと名付けられた。

ゼム (GEM) 電球はフィラメント温度をそれまでの1600℃から1700℃に上げることができたので、効率を25%向上できた。このゼム電球は主に米国で販売されタングステン電球が発明されるまで12年間製造された。

我が国でも東京電気がこのゼムフィラメントを輸入して明治43年から10燭と16燭の電球を販売したが、価格が従来品に比べて高かったためあまり売れず短期間で販売は終了している。

3.3.2 タングステン電球

タングstenは融点が3422℃で金属中最も高く、2500℃での蒸気圧がカーボンの1/5000と高温での蒸発が少ない金属である。

1781年にスウェーデンのシューレ (Karl Wilhelm Scheele) が灰重石からタングsten酸を分離することに成功し、1783年に同じスウェーデンのベルグマン (Torbern Olof Bergman) により鉄マンガン重石から金属タングstenが作られている。タングstenという名称はスウェーデン語の重い石 (tung (heavy), sten (stone)) からきている。発見当時から長年加工が困難な金属として扱われ、粉が合金 (タングsten鋼) の原料として使用されていた。

タングstenを電球のフィラメントに使う試みは

1887年頃から行われ、カーボンや白金のフィラメントにタングステンを付着する方法などが検討されたが成功しなかった。

タングステンをフィラメントに使うのに成功したのは、オーストリアのアレクサンダー・ユスト (Alexander Just) とフランツ・ハナマン (Franz Hanaman) である。彼らはタングステンフィラメントを作るのにいろいろな方法を検討した結果、押し線タングステンフィラメント (Pressed Tungsten Filament) を1904年に発明した。

タングステンは硬度が7.5と硬く、もろいので常温での加工は出来ない。彼らはタングステンの粉を砂糖、コaltar、アラビアゴムなどと混ぜ合わせ、ダイヤモンド・ダイスを通して押し出し、細い線にしてバインダーを炭化した後、水素ガス中で通電加熱して、ほぼ純粋なタングステン線を作成した。このタングステンフィラメントを使用することによりカーボン電球の倍近い7.75 lm/Wの効率の電球ができた。ユストとハナマンは資金が無かったので、この電球が商品化されたのは1906年であった。

GEはこの電球の特許権を購入し、1907年に110V用電球と低電圧用の電球の製造販売を行なった。押し線タングステンフィラメントは大変もろく衝撃に弱いという欠点があり、また電気抵抗が小さいのでフィラメントの抵抗を高くするため細く長くする必要があり、継線は複数のヘヤピン状のフィラメントをアンカーにかけ直列に繋ぐ工夫がなされた。形状を図3.12に示す。GEではこのランプを multiple tungsten filament lamp と名付けて販売し、効率が7.5 lm/Wで寿命800時間と大変高性能だったので、米国では1907年に50万個売れたと言われている。

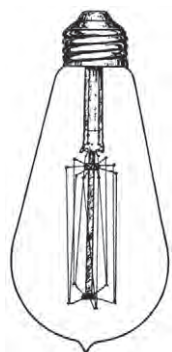


図 3.12 押し線タングステン電球²⁾

なお、明治41年(1909)の電気学会雑誌⁵⁾に紹介されている、ドイツの雑誌“Elektrotechnische Zeitschrift”(1908)に掲載された押し線タングステン電球の性能評価試験結果では220V50燭光の電球10

個の平均で10lm/Wで寿命が1400時間と報告されている。この報告は特に性能の良い電球についてであるかも知れないが、その性能は後の引き線タングステンに近く、押し線タングステン電球の残る欠点は脆く加工が難しく、衝撃に弱いという点であった。この欠点を解消したのがGEのクーリッジにより開発された引き線タングステン (Drawn Tungsten Wire) である。

GEの研究所でウィリアム・クーリッジ (William D. Coolidge) がタングステンの研究に着手したのは、1906年である。彼はまず出来るだけ純度の高いタングステン粉を入手し、それに添加物を加えて特性の変化を調べた。その結果タングステンのもろいという特性は不純物によるものではないという結論に達した。次にタングステン粉を水銀、カドミウムやビスマスと混合しダイスを通して押し出し、加熱して他の成分を除去し、それを焼結するタングステン線の製法を開発した。これはアマルガム法と呼ばれ、これにより太くて純度の高いタングステン線を製造することが可能になった。さらにクーリッジはタングステンの熱間加工の検討を行い、加熱しながらタングステン鋼のブロックを使って押しつぶすことによりある程度伸ばすことが可能で、室温で少し曲げることが出来ることを見出した。

次に彼らは加熱線引きを試み、ガスバーナーでダイスを加熱しながらタングステン線を加熱したプライヤーで引く作業を繰り返し、細い線にすることに成功した。このタングステン線は低温でも脆くなく、延性もあった。通常の金属は加工により延性を失い加熱すると延性が復活するが、タングステンはその常識が通用しない金属であることが判った。この性質はタングステンを高温にすると図3.13(a)に示すように結晶粒が成長し常温で脆くなるが、これをクーリッジの行ったような加工をすると図3.13(b)のように結晶が繊維状になり延性を示すようになるためである。

次にクーリッジはこの繊維構造を得る製造方法の開発を行った。タングステンの粉を加圧してインゴット(鑄塊)を作成し、水素炉中で加熱してある程度固めてから水素雰囲気中で通電加熱して焼結を行った。このインゴットを延性のある線にするため先ずローリングミルによる加工を試みたがうまくいかなかったので、スウエーディングマシンによる加工を行った。購入したスウエーディングマシンは針を加工する機械でそのままでは使えないので、ハンマーダイスの改良などを行い線径が0.75mmの細線にすることに成功した。この細線は加熱したダイヤモンド・ダイスを通すことにより目的にあった線径に加工でき、電球用フィラメン

トに適した曲げ加工が可能なタングステン線を得ることに成功した。(タングステン線の製法については第6章で説明する)

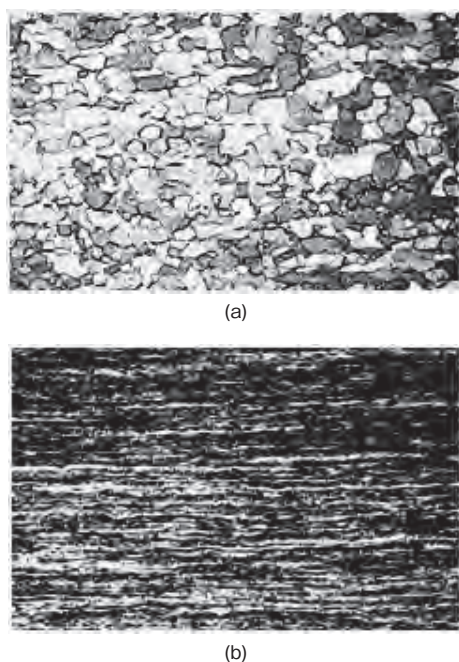


図 3.13 タングステン線の結晶状態⁵⁾

この延性のあるタングステン線開発の成功は1910年に発表され、約100年間続いたフィラメントの材料開発競争はここで終わったことになる。

タングステンフィラメントに残った問題は通電すると図3.14のように(a)の初期状態から温度上昇により(b)(c)のように再結晶化が進み、点灯中に(d)のように、粒界がずれるため短時間で断線するという現象であった。クーリッジは酸化タングステンの加熱に英国のバターシー(Battersea)で製造されたるつぼを使用するとこのずれが減るということを見つけており、るつぼの成分の混入が影響すると考えていた。

種々の添加物を検討した結果、微量の酸化トリウム(トリア)が添加物として優れていることを見つけた。トリアを添加することにより結晶成長が抑制され、点灯しても図3.14(b)の状態にとどまり粒界のずれが改善される。このトリア入りタングステン線はコイルフィラメントが主流になるまで世界中で標準的フィラメントとして使用された。

コイルフィラメントが作られるようになると問題になったのは点灯中徐々にコイルが垂れ下がるサグ(sag)という現象で、この対策としてトリアに代わる微量の添加物の検討が行われた。

1911年にGEのパッツ(Aladar Pacz)により粒界のずれとサグが発生しないノンサグワイヤーが発明さ

れた。パッツは多くの実験を行いアルミナとシリカに加えてカリウムを添加することにより、高温で図3.15のような線にそった細長い結晶になるノンサグワイヤーを開発した。何故カリウムがノンサグ性に効果があるのかは1960年以降まで不明であったが、その後の研究によりカリウムの蒸発により発生した微小な穴が加工により軸方向に列になり、結晶が径方向に成長するのを抑制するという現象が解明された⁶⁾。パッツによるノンサグワイヤーは218番目の試作で完成したのでGEでは218ワイヤーと名付けられた。

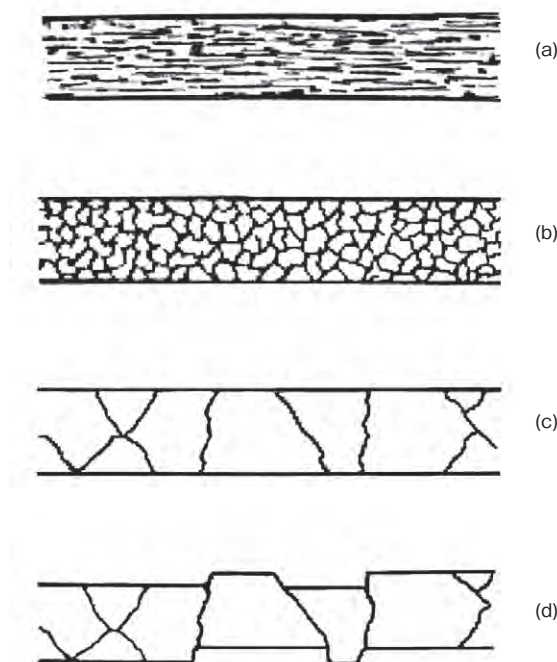


図 3.14 タングステン線の結晶状態の変化⁵⁾



図 3.15 ノンサグワイヤーの再結晶状態⁵⁾

なおトリア入りタングステン線はトリアが高い電子放射特性を示すので、電子管の陰極用コイルに使用され、HIDランプの電極やTIG溶接の電極にも使用されている。

ノンサグワイヤーについては、その後の二重コイルやハロゲン電球が発明されてより高いノンサグ性能が要求されるようになり継続して改良が行われた⁷⁾。自動車用電球や交通信号灯用電球用に耐震性の高いワイ

ヤーも開発され用途に合わせて使用されている。種類の例を表 3.1 に示す。

タングステン線の開発は主に白熱電球のフィラメント用として行われてきたが、蛍光ランプの電極として二重コイルや三重コイルが使用されており、HID ランプの電極もタングステンが使われている。これらのことからタングステンの技術開発の照明光源に対する寄与は大変大きいと言える。

3.4 ジュメット線

初期の白熱電球では、導入線のガラスと封着する部分（封着線）に白金線が使用されていた。封着線はガラスとの気密性が重要で、電球製造時および使用時の温度変化により発生する熱膨張係数の差による歪も問題となる。白金線は膨張係数がガラスに近く、またガラスとの濡れ性も良いので封着線として適しているが、大変高価で 1890 年頃の電球では原価の 3 分の 1 を白金導入線が占めていた。そのためより安価な封着線の開発がさかんに行われた。1893 年にドイツで考案された短い白金線に銅やニッケルの線を繋いだ導入線はシーメンス・シールと呼ばれ当時多くのメーカーで使用された。また白金に代わる材料として鉄や薄くした銅などが使用されたが熱膨張係数が違うため信頼性が不足していた。1899 年にスイスのギヨーム (C. E. Guillaume) によりガラスと熱膨張係数が近い、鉄とニッケルの合金線が開発されたが、そのままではガラスとの付着性が悪いという欠点があった。

1911 年に米国のエルドレッド (Byron. E. Eldred) によりギヨームが開発した鉄とニッケルの合金線を採用した封着線が発明された。この線は鉄とニッケルの合金の芯線を硫酸銅の液につけて、薄く銅を付着させ、その上に銀メッキを行い、さらに白金をかぶせたものである。この封着線は熱膨張係数が軟質ガラスより若干小さく、ガラス封止加工時の高温から室温への変化や点灯時の温度上昇に対しての歪変化が少なく、白金の被覆がされているのでガラスとの密着性も良かった。

この線は 1913 年まで使用されたが、1912 年に GE のフィンク (Colin. G. Fink) により安価なジュメット線と呼ばれる封着線が発明され使われなくなった。

フィンクの発明したジュメット線は鉄ニッケル合金線を硫酸銅液に浸して薄く銅を付着させ、これに真鍮のさやをかぶせ、さらにその上を銅のさやで覆うという構造である。この構造の線を線引きして目的の太さに加工された。真鍮は鉄ニッケル芯線と銅のなじみを良くするため入れられている。外側の銅と芯線の厚さの比率は 2 : 8 で、芯線の鉄とニッケルの比率は鉄 55%、ニッケル 45% で熱膨張係数は軟質ガラスとほぼ同じになっている。ジュメット (Dumet) 線という名前は 2 つの金属でできていることからきている。1913 年に GE のコイレレン (W. L. Van. Keuren) により表面に硼砂を塗布する改良がなされ、ガラスと封入線との密着性がさらに強くなった。

このジュメット線の発明は目立たないが、電球の信頼性の向上と生産性の向上に大きな貢献をし、電球の他、蛍光ランプや真空管、ブラウン管、ガラス封止ダイオードなど多くの製品に使われるようになった。

図 3.16 に現在のジュメット線の構造をしめす。

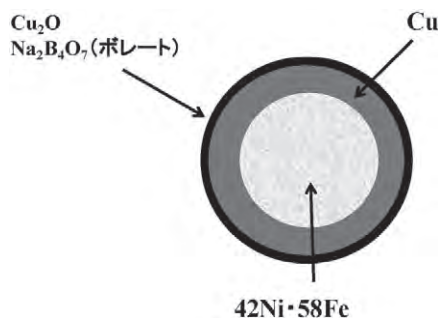


図 3.16 ジュメット線の構造

このジュメット線に使用されている鉄ニッケル合金は 1898 年にギヨームにより発見されたインバーと呼ばれる合金である。ギヨームはこの功績によりノーベル賞を受賞している。鉄とニッケルの合金は図 3.17 に示すようにニッケルが 30 ~ 40% の所で、急激に膨張係数が減少する。これはこの領域で合金の磁気特性

表 3.1 タングステン線の種類 (東芝マテリアル (株) カタログより)

材質区分	品名	特長	用途
ドープタングステン	W31	ノンサグ性 (0.4%SiO ₂ , 0.55%KCl, 0.03%Al ₂ O ₃)	一般電球
	W71	ノンサグ性と耐振性 (Co 添加)	自動車用電球
	W91	ノンサグ性と高温使用	ハロゲン電球
トリエーテッド タングステン	W51	耐振性 (0.7%トリア、0.015%Co 添加)	耐振電球
レニウムタングステン	H30	高温まで高強度と耐振性 (3%Re 添加)	特殊耐振電球

が大きく変化し、異常に自発体積磁歪が大きくなることによる。体積磁歪は磁化の変化により体積が変化する現象で、温度が高くなり磁化が減少すると体積が小さくなる。通常の熱膨張を減少させる方向に働くので全体として熱膨張係数が小さくなる⁸⁾。その原理を図3.18に示す。

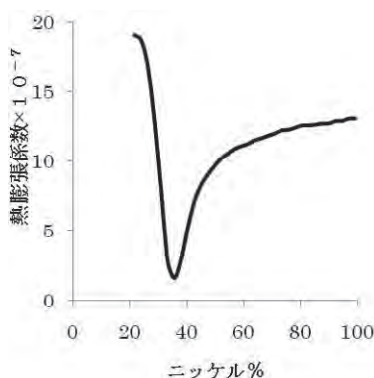


図 3.17 鉄ニッケル合金の組成と熱膨張係数の関係

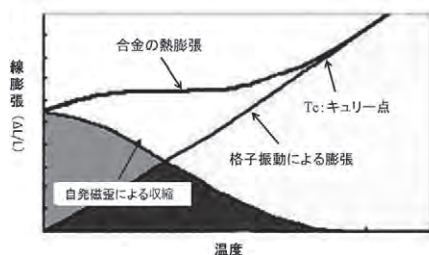


図 3.18 インバー合金の熱膨張係数変化の説明図

我が国でのジュメット線の製造は東京電気で大正7年(1918)より行われている。製法としてGEのエルドレッドにより発明された真鍮を使ったプラスレージング法を採用していたが、線径の種類が増えスロリークを発生する不良品が出てきたので、昭和34年(1959)頃から真鍮を使用しないプラスレスホットドロイング法で生産されるようになった⁹⁾。その後昭和56年(1981)にメッキ法(Spiral Feed Method)が開発され、品質の高さでシェアを拡大し、昭和56年頃には(株)東芝はGEを抜いて世界第一位の

生産量の会社になった。

現在の一般電球の導入線はガラスとの封着部はジュメット線で、バルブ内のフィラメントに繋がる部分(内部導入線)は真空電球では銅線が使用され、ガス入り電球ではニッケルかニッケルメッキ銅線が使用されている。口金に繋がる部分(外部導入線)は真空電球では銅線、ガス入り電球では断線時発生するアーク放電による急激な電流増加を防ぐため一方を熔融断線しやすいモネルあるいはコンスタンタン線にしている。

なお、硬質ガラスバルブを使う大型電球や硬質ガラスハロゲン電球などではガラスに合わせてタングステンやモリブデン、コパール(Ni: 29% Fe: 54% Co: 17%)などの線が使用されている。電球用ガラスと封止用金属の熱膨張係数の例を表3.2に示す。

3.5 ゲッターの発明

真空を使う製品で不要な不純ガスを取り除くために使われる化学材料をゲッターと呼んでいる。ゲッターは電球の製造や特性改善に、目立たないが重要な役割を果たしている。

このゲッターの最初の発明は1893年にイタリアのマリニャーニ(Arturo Malignani)により行われた。当時白熱電球製造に使用されていた真空ポンプはガイスラーやスプレングルの水銀ポンプで、これらのポンプは排気量が少なく、特に水蒸気に対する排気能力が小さいという問題があった。1881年のエジソンの工場では一個の電球を排気するのに5時間かけ作業者は一人で50台のポンプを担当していた。時間をかけた理由は水蒸気の排気で、水蒸気はカーボンフィラメントと反応してガラスバルブの黒化や短寿命の原因になるので出来るだけ取り除く必要があった。ガラスバルブは温度上昇により水分を放出するので、排気は電球を点灯時の温度以上(約300°C)に加熱しながら行われた。水蒸気の排気を補うため、図3.19のようにポンプと電球の間に乾燥剤として無水酸化燐の入ったガラス容器を取り付ける

表 3.2 電球用ガラスと封止金属の熱膨張係数 (10⁻⁵/°C)

ガラス	熱膨張係数	封止金属	熱膨張係数
ソーダガラス (一般電球)	9	ジュメット	径方向: 9 軸方向: 6.5
硬質ガラス (大型電球)	3.8	タングステン	4.3
		コパール	4.9
石英ガラス (ハロゲン電球)	0.5	モリブデン箔	5.1 (ナイフエッジ)
アルミノシリケートガラス (自動車用ハロゲン電球)	4.2	モリブデン	5.1

工夫などが行われた。その後ポンプの改良などを行い排気速度は向上したが、それでも 30 分近く必要であった。

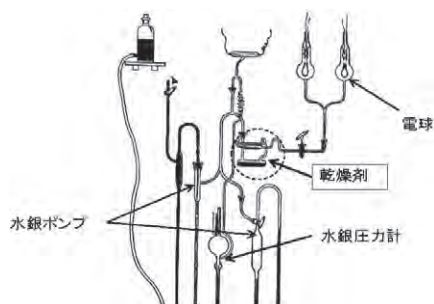


図 3.19 水銀ポンプに取り付けられた乾燥剤 (初期のエジソン工場)¹⁰⁾

イタリアのマリニャーニは小さな電球製造会社を作り電球製造を始めたが、水銀ポンプを購入する資金が無かったので、往復運動式機械ポンプを使用していた。このポンプは 1mmHg (133.3Pa*) 程度の真空度しか得られなかったため、他の方法を検討し、赤燐を排気管に付け加熱しながらフィラメントに通電しグロー放電を発生させることにより真空度を高める方法を発見した。GEはこのマリニャーニのゲッター(化学的排気)の特許を購入し、排気工程に導入することにより 30 分かかっていた時間を 1 分にまで短縮することができた。この燐ゲッターを使用する方法は 1909 年に GE のマーシャル (John T. Marshall) によってタングステンフィラメントを燐と水の混合液に浸し、ランプ排気後に通電しグロー放電を発生させて残留ガスを除去する方法に改良された。現在の電球製造でもこの方法が使用されている。赤燐は放電により活性化し残留酸素と反応し、五酸化リンになりガラスバルブに付着する。この五酸化リンが水分を吸着するので酸素と水分を除去することができる。図 3.20 は真空電球にアルゴンガスと空気を微量封入し、赤燐ゲッターをグロー放電で働かせた時の真空度の変化の測定例である。アルゴンの場合、圧力変化は少ないが空気の場合は赤燐のゲッター作用により真空度が高くなっている。

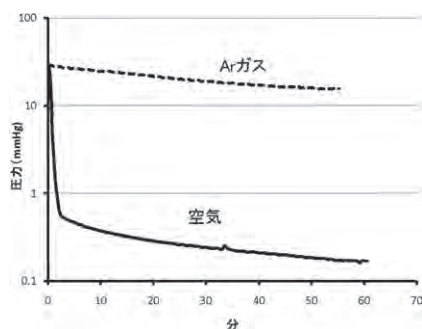


図 3.20 赤燐ゲッターの有無による真空度変化¹¹⁾

赤燐ゲッターは主に真空度を高める目的に使用されているが、その他にガラスバルブに付着するカーボンやタングステンと反応し黒化を防止するゲッターが開発された。1894 年に米国のワーリング (John Waring) によりカーボン真空電球に少量の臭素を封入しバルブの黒化を防ぐ方法が発明されている。1912 年にはオーストリアのスカウピー (Franz Skaupy) によりハロゲン化合物をガラスシステムの端部に固着するという方法が開発された。これは点灯中の熱で化合物が分解してハロゲン元素のガスが放出され、蒸発したタングステンと反応して淡黄色の化合物になりバルブの黒化を防ぐもので、ガラスバルブの面積に対しフィラメントの表面積が大きい高ワットの電球に対して有効であった。スカウピーのハロゲンゲッターはタングステンフィラメントとも反応するので低ワットの電球用には適していなかった。低ワット用のゲッターは GE のニードハム (Harry H. Needham) とギル (Frederic W Gill) によって 1912 年と 1915 年に開発された。ニードハムの方法はクライオライト (Na_3AlF_6) と赤燐を混合してアンカーに塗布するもので、ギルの方法はクライオライトと赤燐にニトロセルロースを加えてエチルアルコールを溶剤としてスラリーにしてフィラメントに塗布するものである。これらは真空度の向上と金属タングステンの付着によるバルブ黒化を低減させるもので、広く電球に使われた。その他種々のゲッターが開発され、例えばガス入り電球では赤燐以外に窒化バリウムにカオリンを混合したものをシステムの一部に塗布している。また、電力の大きいランプではジルコニウムとアルミニウムの粉を導入線に塗布して、点灯中にバルブ内に発生する不純ガス(水素など)を除去するようにしている。

ゲッターは、真空管やブラウン管では必須材料で、現在のプラズマディスプレイや有機 EL でも重要な技術になっている。

*) 以下読みやすくするため圧力を mmHg で記載する。

3.6 ガス入り電球

現在の電球は殆どがガス入り電球であるが、このガス入り電球も GE でラングミュアー (Irving Langmuir) によって発明されている。

電球にガスを封入するという試みそのものは、1872 年にロシアのロディギン (Alexander Lodyguine) が窒素ガスを封入したガラスバルブ中に V 字形の黒鉛を入れて点灯したり、1875 年に同じロシアのコスロフ (S. A. Kosloff) が数本の黒鉛フィラメントを窒素

ガス中で点灯したことが知られている。その他いくつかのガス入り電球が発明されているが、ガス封入本来の利点を理解してなされたものではなかった。

ラングミュアーは1909年にGEの研究所に入り、当時発明されたタングステン電球の黒化現象の原因についての研究を始めた。まず、ランプ内に酸素、一酸化炭素、ハロゲンガス、アルゴン、窒素などいろいろなガスを微量封入して実験した結果、黒化はランプ内に存在する水分によると考えた。そこでランプ内の水分を出来るだけ取り除くため真空度を上げベーキングを十分行った電球を作成し点灯試験を行った結果、予想されたほど黒化は減少しなかったため、黒化の原因はタングステンの本来の蒸発によるとの結論に達した。先に行った微量ガスの封入実験でタングステンに対し不活性なガスを少し封入すると黒化が抑制されることを発見していたので、次にガス封入による効果の実験を行った。最初に水素ガスを封入した電球について調べた結果、360時間点灯しても黒化は発生しなかったが、水素ガスによる伝導、対流による熱損失が大きく、フィラメント温度を真空電球と同じにするのに余分な電力が必要で、効率 (lm/W) は40%以上悪くなった。次に水銀蒸気と窒素ガスについてフィラメント温度を3000℃程度にして同様の実験を行った結果熱損失は小さく、黒化防止効果も大きかった。結論としてガス封入電球は熱伝導と対流によるエネルギー損失は発生するが、タングステンの蒸発を押さえるので、熱伝導の小さいガスを使用すれば、同じ寿命にした場合真空電球よりフィラメント温度を高くできる効果の方が大きくなり、最終的に効率を良くすることが出来る可能性があることが判った。

ラングミュアーはさらにこの対流による熱損失についての研究を行い、白金フィラメントを使用し、水素、水銀、窒素やアルゴンガス中で熱損失を測定した。その結果、熱伝導はガス種その他、フィラメント温度と線径 (表面積) により変化するが、対流損失は温度によりそれほど大きく変化せず、長さにはほぼ比例するが線径による変化は少なかった。この理由としてラングミュアーはフィラメントの周りに対流が起きない薄い層が存在し、この層の厚さは線径に依存しないためと考えた。対流による熱損失が線径にあまり依存しないことは、フィラメントはコイル状にした方が有利で、小ワットの電球より大ワットの電球のほうがガス入りにする効果が大きいことになる。ラングミュアーはフィラメントをコイル状にした110V1000Wのガス入り電球を試作して、真空電球に比べて同じ寿命の場合、効率を2倍に出きることを確認し、1913年に特

許提案を行った。同じ年に1000Wと750Wのガス入り電球が発売された。図3.21は封入ガス圧によるタングステン蒸発の抑制効果の測定例で、図3.22は電球のワット数とガス損失の関係である。ガス入りの効果はワット数の大きい方が大きいことを示している。

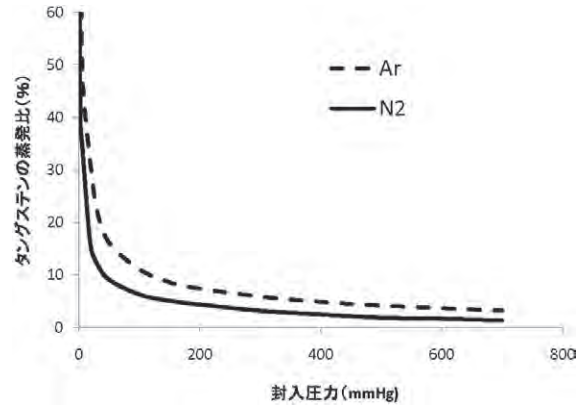


図 3.21 封入ガスによるタングステン蒸発の抑制¹²⁾

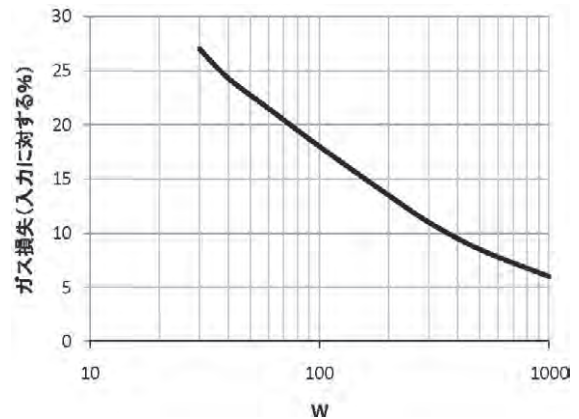


図 3.22 ワットとガス損失の関係¹²⁾

ガス入り電球は真空電球と区別するためGEではMAZDA Cランプと呼び、真空電球をMAZDA Bランプと呼ぶことにした。1914年に封入ガスは窒素ガスから、より熱伝導の少ない窒素を10%混合したアルゴンガスに変え、200Wや300Wの低ワット電球が開発された。

このガス入り電球の発明により白熱電球の基本的開発はほぼ完了した。

ラングミュアーはその後広い範囲の研究を行い、水銀拡散ポンプの発明等多くの業績を残している。1932年には表面化学を確立した功績によりノーベル賞を受賞している。

我が国でのガス入り電球の生産は大正2年(1913)に東京電気がGEから技術を導入し、翌年発売を開始している。当初は窒素電球であったが大正4年(1915)からより効率が高くなるアルゴンに変更し、昭和2年からはアルゴンガスの内製も行うようになった。

昭和 18 年頃の 100V40W の真空電球とガス入り電球の効率を次に示す。ガスを封入することにより約 7%効率が向上している。

		効率	寿命
100V 40W	真空電球	8.9 lm/W	2000時間
	ガス入り電球	9.5 lm/W	2000時間

封入ガスの効果はワットの大きい電球の方が大きいので、大ワットの電球からガス入りになっており、現在は 100V20W までガス入りになっている。

1968 年頃にアルゴンガスに変えてクリプトンガスを使用し、性能を向上させた電球が米国で発売された。クリプトンガスは原子量が大きいので、ガスの熱伝導率が低くなり、タングステンの蒸発を抑える効果も高くなることは以前から知られていたが、高価で供給量も少なくあまり使用されていなかった。製鉄産業などで酸素の需要が増加し、液体酸素製造での副産物として希ガスの価格が低下し一般電球に使用できる範囲になりクリプトン電球の商品化が行われた。120V 用の電球で寿命を同じにしてアルゴンガスをクリプトンに変えた場合の効率向上の実験結果の例を表 3.3 に示す。

表 3.3 クリプトンガス封入による効率向上¹³⁾

電力 (W)	25	40	60	100
効率の増加 (%)	12.3	11	10.2	9.2

我が国では昭和 49 年 (1974) に当時発生したオイルショックにより省エネルギー化の要望が高まり、バルブと口金を小形にした図 3.23 のようなクリプトンガスを封入したミニクリプトン電球が発売され、翌年には通常の E26 口金のクリプトン電球 (図 3.24) が発売された。



図 3.23 ミニクリプトン電球¹⁴⁾



図 3.24 クリプトン一般電球¹⁴⁾

小形化した E17 口金のミニクリプトン電球は、効率向上と長寿命化の他に器具を小形に出来る利点が歓迎されて普及が進み、現在もダウンライトやスタンドに広く使用されている。

3.7 チップレス電球と内面艶消し電球

3.7.1 チップレス電球

タングステンフィラメントとガス入り電球の発明により電球の基本的開発はほぼ完了したが、その後もいくつかの重要な開発が行われている。その一つがバルブのチップレス化である。1922 年ごろまでは電球の排気はガラスバルブの先端に付けた排気管から行なわれたので、図 3.25 のようにバルブ先端に突起が残っていた。この突起部分は破損の原因になり安全上も問題であったので、カーボン電球の頃から図 3.26 のように排気管を封止部に付ける方法が検討されていた。この方法は作業工程が多くなり、製造時に不良が多く発生したのでより生産性の良いものとして、1903 年に米国のイエーゲル (Hermann J. Jaeger) によりステムガラス管に排気管を取り付ける方法が発明された。これは図 3.27 のように L 字形の排気管をステム管に入れ、ステム管を小さな炎で加熱して、排気管から空気を吹き込んで穴を開けて溶着たものである。このステムを使用した電球はチップレス電球会社 (Tipless Lamp Company) で数年間販売された。



図 3.25 チップ付き電球



図 3.26 初期のチップレス化の方法¹⁾



図 3.27 L字排気管システム¹⁾

1919年になってGE社のミッチェル(L. E. Mitchell)とホワイト(A. J. White)によりイエーゲルのステムを改良したステムが開発された。形状は図3.28に示すように、導入線の封止部分に排気管を取り付け、排気用の穴を開けたものである。このシステムは機械による製造が可能で、製造コストも安価だったので世界中で広く使用されるようになり、チップ付き電球は製造されなくなった。尚、現在も一般電球や蛍光灯ランプでこの形式のステムが使用されている。(製造方法については第6章に記述する)

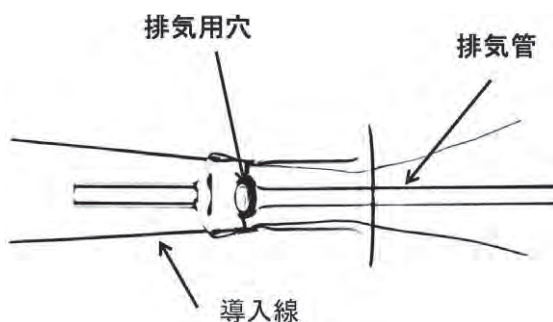


図 3.28 改良形ステム

3.7.2 内面艶消し電球

透明ガラスバルブの白熱電球はフィラメントの輝度が高いので眩しく感ずることがある。フィラメントがカーボンからタングステンコイルになると輝度がさらに数倍高くなり、眩しさの問題が大きくなった。眩しさを減らす方法としてバルブ外面に酸化物の微粒子の膜を塗布することや、ガラスそのものを乳白ガラスに変更することが行われた。これらの方法では膜やガラスによる光吸収が8～11%あり、フィラメントが赤く見えるという欠点があった。またバルブ外面を砂吹き艶消し(サンドブラスト)法や弗酸を使用した艶消し法で処理して光の拡散性を持たせる方法も行われたが、汚れが付きやすく取れにくいという不具合があった。

1923年に東京電気の不破橋三によりバルブ内面を弗酸とフッ化アンモニウムで艶消し(フロスト)処理する方法が発明された。ほぼ同じ頃GEのピプキン(M. Pipkin)により同様の発明がなされたが、特許出願は不破の特許が約1年早く出願されている。

不破は当時照明器具用として光の拡散性に優れていたアラバスターガラス(乳白色ガラスの一種)の国産化の検討を行い、大正9年(1920)に嫦娥(じょうが)ガラスを開発した。このガラスはクライライトなどの微粒子が入った気泡の多いガラスで、他の乳白色ガラスより透過率が高いものであった。不破はこれを電球バルブに応用することを検討したが、薄くすると拡散性が不足するので、内面を酸により艶消し処理することを考えた。処理液としてフッ化水素、フッ化アンモニウム、酢酸を水に混合したものを使用して艶消し処理を行ったが、ガラスバルブの強度が低下したので加熱による再処理を行って強度を確保し、薄い乳白色の艶消し電球を開発した。一般電球に使われている透明なソーダライムガラスバルブの艶消しではより深い凹凸を形成する必要があるため、艶消し処理による強度劣化が大きかったのでさらに処理法の検討が行われた。その結果艶消し処理したバルブを再度弗酸処理して凹凸を若干平滑することにより強度低下を防止する方法が考え出され、大正14年(1925)に内面艶消し電球が完成した。この電球は大正15年(1926)内面艶消し新マツダ電球として発売され、米国でも同じ頃GEから新製品としてバルブの形を変えて発売された。内面艶消しバルブは光の吸収が殆ど無く、電球単体でやわらかな光が得られるようになったので、大変歓迎され、艶消し電球の方が一般的に使用されるようになった。図3.29は当時のフロスト処理の作業現場で、図3.30はクリアー電球と艶消し電球の比較である。

内面フロスト処理は弗酸を使用するので作業の安全

性と環境の問題があり、昭和48年(1973)頃にケイ酸ジルコニウム、酸化亜鉛、酸化チタン粒子を混合した内面塗装膜になっている。当初、塗布方法は酢酸ブチルを分散媒とした湿式塗装法であったが、その後有機溶剤の使用をシリカ(SiO₂)粒子の静電塗装法に替えて生産されている。

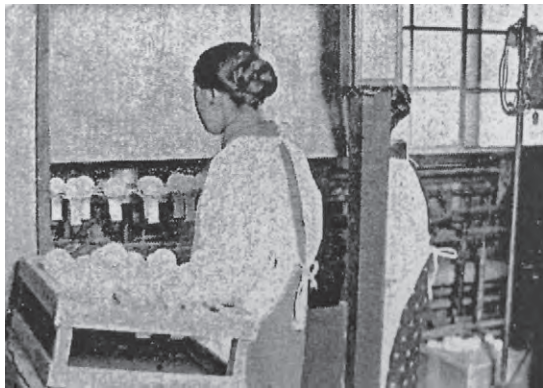


図 3.29 フロスト処理作業 (昭和初期)¹⁵⁾

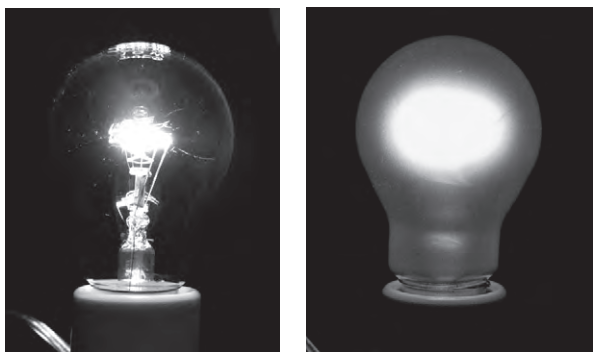


図 3.30 クリアー電球と艶消し電球の見え方

3.8 二重コイル電球

延性タングステン線の発明とガス入り電球の発明により殆どの電球のフィラメントはコイルになった。このコイルをさらに巻いた二重コイルが東京電気の三浦順一により大正10年(1921)に発明された。ラングミュアーの理論ではガス入り電球のガスによる熱損失はフィラメント長さにはほぼ比例し、太さにはあまり依存しないので、二重コイルにすることにより効率が向上する。図3.31は三浦順一により提案された特許の図である。図3.32は二重コイルの拡大で図3.33は最初に製造された二重コイル電球のレプリカである。

二重コイル電球そのものは、欧米で1913年頃から映写機用として使用されていた。映写機のような光学機器では点光源に近い二重コイルの方がレンズなどで配光制御を行うとき有利になるため、熱損失などは考慮されていなかった。

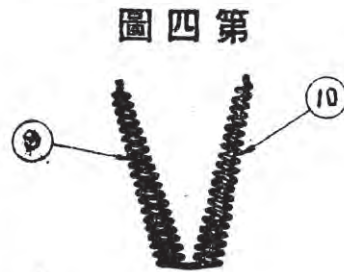


図 3.31 二重コイル特許の図¹⁶⁾



図 3.32 二重コイル



図 3.33 最初の二重コイル電球のレプリカ

当時の技術ではこの二重コイルをすぐに一般電球に応用することは出来なかった。その原因はコイルフィラメントの耐サグ特性不足と二重コイルの製造技術の不足であった。

東京電気ではノンサグタングステン線にSiO₂ 0.4% KCl 0.3% NaCl 0.2%をドーブしていたが、ノンサグ性を改良するためドーブ剤と粉の粒度などの検討を行った。その結果タングステン酸にSiO₂ 0.4% KCl 0.3% Al₂O₃ 0.02%を加え、還元条件を変えて粒度分布の異なる粉を製造し、これらを適当な比率で混合して優れたノンサグワイヤーが開発された¹⁷⁾。

このノンサグワイヤーの採用とコイル製造時の芯金除去方法改良により、昭和11年(1936)に二重コイルの一般電球が発売された。ほぼ同時期に米国でも二重コイルを使用した一般電球が発売された。これ以降、ほとんどのガス入り電球は二重コイル電球になった。

コイルを二重にすることによる効果は上記のガス損失が減る他に、コイル内では蒸発したタングステン原子の濃度勾配が少なくなるので蒸発量が減少し、寿命が長くなることもある。二重コイル化による電球の効率向上を、寿命一定としてガス損失と蒸発抑制効果に分けて理論計算した例を図3.34に示す。ワットが大きい場合は二重コイル化の効果は少なくなるが、低ワットでは十数%の効率向上になる。また、高電圧用の電球の方がコイルが長いので二重コイル化の効果が大きくなる。表3.4に220V用と110V用電球の二重コイルと二重コイルの実験より求めた効率差を示す。

この二重コイル電球の登場でほぼ一般電球の開発は終了している。これまでの開発での効率変化を東京電気の製品についてまとめて表3.5に示す。

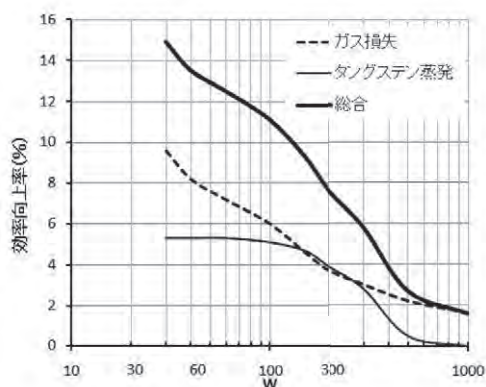


図 3.34 二重コイル化による効率向上の効果の比率 (理論計算)¹⁸⁾

表 3.4 一重コイルを二重コイルにした時の効率向上¹⁹⁾

電圧	電力	効率向上 (%)
110V	40W	10
	60W	5
	75W	4
220V	40W	20
	60W	17
	75W	13

3.9 ハロゲン電球

一般電球については二重コイルの発明で重要な開発は完了したが、1959年に特殊電球の分野でハロゲンガスを利用して特性を向上させた電球が開発された。

カーボンフィラメントの時代から点灯中にガラスバルブが黒くなる現象が問題になっていた。これはフィラメントのカーボンやタングステンが蒸発し、ガラスバルブに付着する現象である。この現象はバルブ内に含まれる微量の水分や酸素などの不純ガスにより加速されるので、対策として種々のゲッターが研究開発されていた。ガス入り電球になってもこの問題は残り、特に大出力電球(スタジオ用など)や映写用ランプで大きな問題であった。図3.35は映写機用電球の黒化の例である。

ハロゲン元素をゲッターとして利用し黒化を減少する方法は古くから採用されており、1892年には塩素を入れたカーボンフィラメント電球が発売されている。1933年にはヨウ素を封入し、蒸発したタングステンを活性化タングステンにしてバルブに付着するのを

表 3.5 白熱電球の効率変化

年	電球種類	フィラメント		効率(lm/W)
		材料	形状	
1900 (明治33年)	カーボン電球	カーボン	ハヤピン	1.6
1906 (明治39年)	同	処理カーボン	ループ形	3.0
1910 (明治43年)	同	金属化カーボン	同	3.8
1909 (明治42年)	真空タングステン電球	押出タングステン	ハヤピン	7.8
1911 (明治44年)	同	引線タングステン	直線形	8.9
1914 (大正03年)	同	同	同	10.0
1919 (大正08年)	同	同	単コイル	10.2
1918 (大正07年)	ガス入りタングステン電球	同	同	11.1
1936 (昭和11年)	同	同	二重コイル	11.9
1950 (昭和25年)	同	同	二重コイル	12.0
1959 (昭和34年)	同	同	二重コイル	12.4

防ぐアイデアが特許提案されている。このように従来の電球にハロゲン化合物を封入する方法はバルブの黒化を防ぐ効果はあったが、低温部分のタングステンフィラメントと反応し短寿命になるという問題が発生し、実用化はあまり進まなかった。

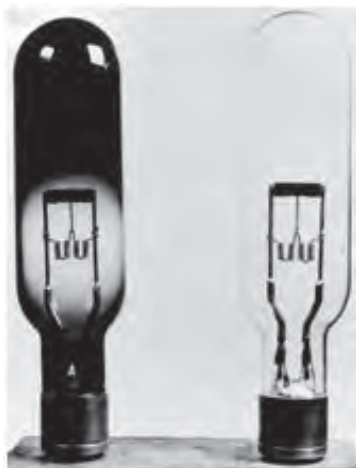


図 3.35 ガラスバルブ黒化の例

1959年にGEのツブラー (E. G. Zubler) とモスピー (F. A. Mosby) により石英ガラス管を使用し、不活性ガスとヨウ素を封入して黒化が発生しない電球が発明された。構造は図 3.36 に示すように当時製造されていた赤外線電球と同じで、石英ガラスの管を使用したものである。



図 3.36 ヨウ素電球の構造図

黒化防止の原理を単純化して図 3.37 に示す。点灯中にフィラメントから蒸発したタングステン原子とヨウ素が反応しヨウ化タングステンになる。ヨウ化タングステンは蒸気圧が高いのでバルブ温度を高くしておけば内面に付着せず黒化は発生しない。ヨウ化タングステンはフィラメント近傍でヨウ素とタングステン原子に分解し、タングステン原子はフィラメントの低温部に付着しヨウ素ガスは再度蒸発したタングステンと反応する。このヨウ素の作用はハロゲンサイクルと呼ばれている。

ヨウ化タングステンの付着を防ぐために必要なバルブ温度は最冷部で 250℃ 以上であるため、バルブ用ガラスとして石英ガラス管が使用された。石英ガラスは熱膨張係数が小さいのでガラスと導入線の封止部は図 3.38 のように端部をナイフエッジにしたモリブデン箔

(厚さ: 20 ~ 30 μ m) が使用されている。モリブデン箔封止は 1930 年頃高圧水銀ランプ用に開発されたものである。

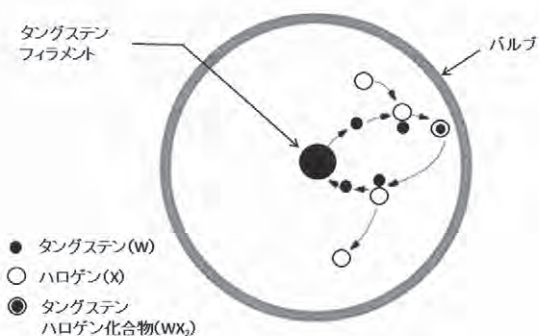


図 3.37 ハロゲンサイクルの説明図

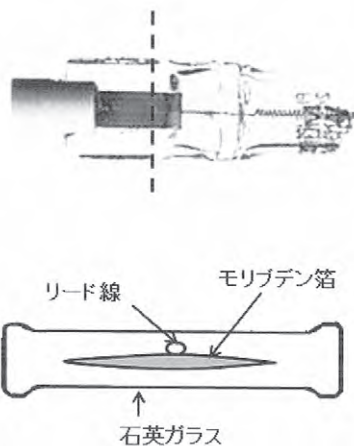


図 3.38 石英ガラスハロゲン電球の封止部と断面図

このヨウ素電球の発明により長年問題であったバルブ黒化問題は解決し、大出力電球や映写機用などの光学機器用電球はヨウ素電球に代わっていった。

さらにハロゲン電球は黒化しないので、封入ガスの圧力を高くすることが可能になり、電球の効率向上のため不活性ガスの高圧封入が行われるようになった。図 3.39 は寿命を同じにしたときの封入ガスのガス圧と効率向上の関係を示したものである。横軸は電球が 20℃ の時の圧力で、縦軸はアルゴンガスを 600mmHg 封入した時の効率を 100% としてある。2 気圧にすると 18%、4 気圧では 30% 近く効率が向上する。

ヨウ素は製造時に気化してバルブ内に入れる作業が必要で、またハロゲンサイクルが安定作用する範囲が狭いなどの欠点があったので他のハロゲンガスが検討された。1965年にフィリップスのヤーペンス (T. Jampens) とウェイヤー (van der Weijer) により臭素の有機化合物を使用する電球が発表された。臭素の化合物 (CHBr_3 、 CH_2Br_2 など) は蒸気圧が高いの

でそのまま気体として封入することができ、活性が高いのでハロゲン電球の種類を広げることが出来るようになった。その後塩素の化合物も使用されるようになり、複写機露光用のランプに使用されている。

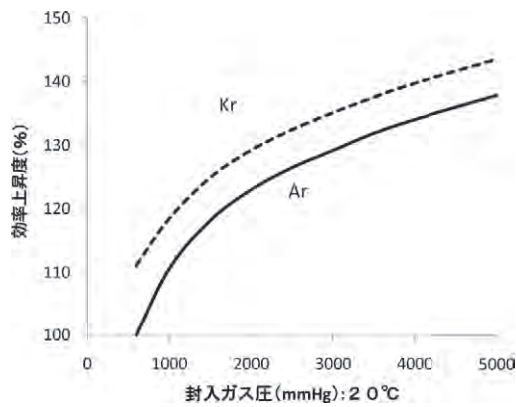


図 3.39 封入ガス圧による効率変化 (Ar: 600mmHg での効率を 100%とした場合)²⁰⁾

ハロゲン電球の発明により投光用、スタジオ用なども大型電球はハロゲン電球になり、フィラメント温度の高い光学機器用や自動車ヘッドランプもハロゲン電球になっている。その他にもミラー付きハロゲン電球が店舗用として普及している。製品の例を図 3.40 に示す。

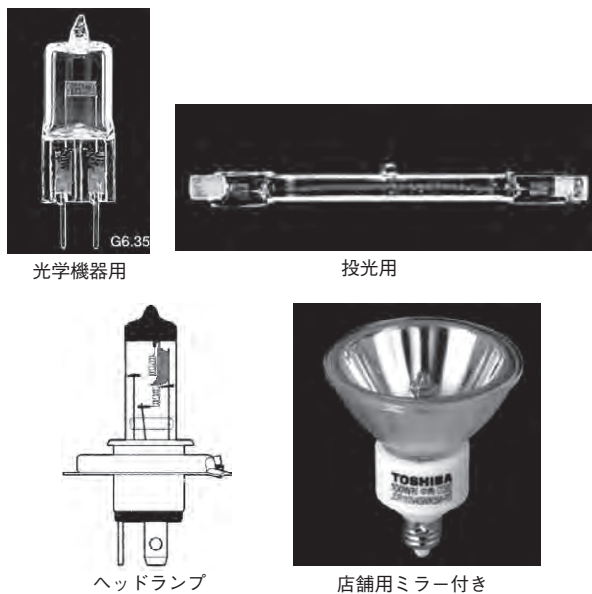


図 3.40 各種のハロゲン電球¹⁴⁾

ハロゲン電球はバルブ温度が高いため一般家庭用としてはスタンド用の低電圧タイプしか普及していないが、最近一般電球のバルブの中に小形のハロゲン電球を取り付けて効率を高めた電球が販売されるようになってきている。

3.10 赤外線反射膜電球

1970年代に起きたオイルショックをきっかけに省エネルギー化が求められるようになり、白熱電球ではクリプトンガスを封入した電球が開発されたが、新しい効率向上案も検討された。

電球のフィラメント温度を上げて効率を高めるのは限界と考えられたので、別の方法としてガラスバルブに可視光を透過し赤外線を反射する選択反射膜を付着し、フィラメントに赤外線を戻して効率を上げた電球が昭和 58 年 (1983) に開発された。

このアイデアは単純なので古くから考案されており、1922年にはアイデア特許が提案され、1953年に酸化チタン膜での検討が報告されている。本格的な検討が行われたのは 1970 年代末からで、1977年に図 3.41 のような球形バルブに選択反射膜を付けた電球の理論検討が発表され、膜の材料としてマサチューセッツ工科大学 (MIT) で開発された $TiO_2-Ag-TiO_2$ の薄膜が提案された。しかし球形バルブではフィラメントの中央部が集中的に加熱されるため短寿命になり、また $TiO_2-Ag-TiO_2$ の膜は耐熱性が無く実用化には至らなかった。

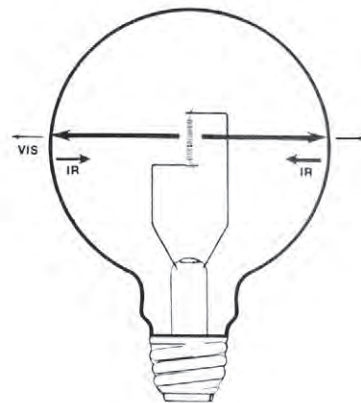


図 3.41 赤外線反射膜電球の案²¹⁾

昭和 58 年 (1983) に東京芝浦電気の石崎有義らは反射された赤外線がフィラメントの一部に集中しないように図 3.42 のような円柱形のハロゲン電球を採用し外面にチタニア (TiO_2) とシリカ (SiO_2) の多層干渉膜を塗布した赤外線反射膜電球を開発・商品化した。

赤外線反射膜応用電球での最も大きな課題は選択反射膜で、上記 $TiO_2-Ag-TiO_2$ のような金属薄膜以外に酸化インジウムスズ (ITO) 膜やアンチモン添加酸化スズ膜などの半導体が検討されたが可視光透過率や赤外線の反射率が悪く、現在でも赤外線反射膜応用

電球に使用可能な膜としては金属酸化物の干渉フィルター以外は見つからない。成膜方法としては蒸着、スパッターリング、CVD法が一般的であるが、装置が高価で、多層膜を曲面に均一に塗布するには時間がかかり電球に応用するには費用が問題であった。石崎らはより低価格で金属酸化膜を製造する方法としてゾルゲル法を選択して開発を行った。当時ファインセラミックス用として種々の有機金属液が開発されており、ゾルゲル法による薄膜も検討されていた。有機金属の液に基板を漬け、一定速度で引き上げると、液面で溶剤の蒸発と加水分解によるゲル化が起り膜になる。この膜の厚さは図 3.43 に示すように引き上げ速度により変化するので膜厚が制御でき、ゲル化した膜は大気中で加熱することにより酸化膜になる。

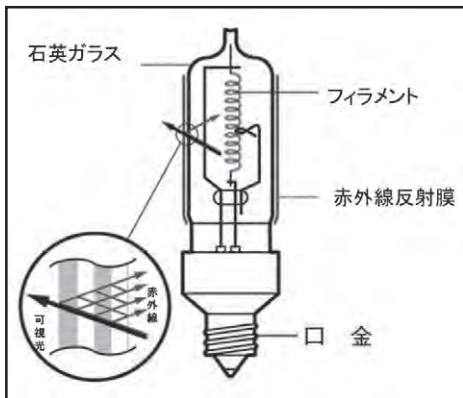


図 3.42 赤外線反射膜応用電球の原理図¹⁴⁾

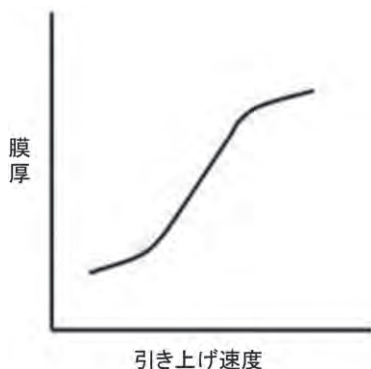


図 3.43 ゾルゲル法による引き上げ速度と膜厚の関係

この特性を利用して酸化チタンと酸化ケイ素の干渉フィルターを円筒形のハロゲン電球に成膜する方法を開発した。手順は図 3.44 に示すように

有機金属 (Ti) ゾルに浸漬 ⇒ 引き上げ (加水分解、縮合によりゲル化) ⇒ 焼成 ⇒ 冷却 ⇒ 有機金属 (Si) ゾルに浸漬 ⇒ 引き上げ ⇒ 焼成 ⇒ 冷却 ⇒ ・・

の繰り返しで多層化する方法である。膜厚は 100 ~ 200nm 程度で、可視光の透過率と赤外線反射率が最適になるように各層毎に調整して塗布された。

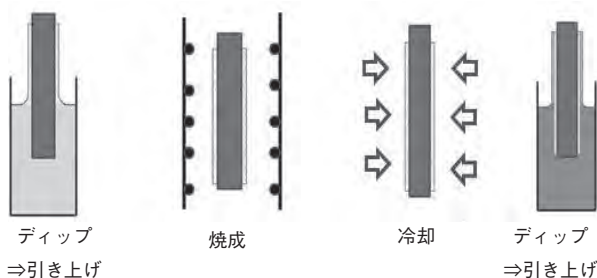


図 3.44 赤外線反射膜の塗布工程の説明

このゾルゲル法は大気中で成膜できるので、設備として速度可変の引き上げ機と加熱炉があればよいので、他の方法に比べて安価であった。

最初に商品化されたのは図 3.45 に示す片口金の JD タイプと呼ばれるハロゲン電球で、主に店舗用として使われている電球である。その後、図 3.46 に示すスタジオ用ハロゲン電球や複写機露光用などへの応用展開が行われた。



図 3.45 片口形赤外線反射膜ハロゲン電球¹⁴⁾

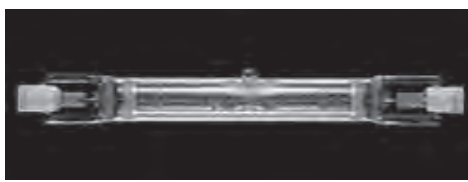


図 3.46 赤外線反射膜スタジオ用ハロゲン電球¹⁴⁾

このゾルゲル法の欠点は、10層以上になると剥離が発生することがあり、多層化に限界があることである。そのため初期の電球では赤外線の反射率も少なく、電球の効率向上は 10 ~ 15% 程度であった。(その後液剤の改良により 30層以上の塗布が可能になっている。)

1984年にGEから酸化タンタル (Ta₂O₅) とシリカ (SiO₂) の 30層以上の干渉フィルターを塗布した両口形赤外線反射膜ハロゲン電球が発売された。成膜には当時開発された高速で成膜できる反応性スパッタ法を利用しており、この電球の効率は従来品に比べ

て30%向上していた。その後プラズマインパルス化学気相成長法 (PICVD) が開発され安価な塩化チタン (TiCl₄) を使用してチタニアとシリカの干渉フィルターが作れるようになり赤外線反射膜付き電球に使用されている。

赤外線反射膜電球のもう一つの改良はバルブ形状で、反射した赤外線が短いフィラメントにもどる比率を高めるため回転楕円体のバルブを使用した電球が平成6年(1994)に松下電子工業で開発商品化され、1998年にはハリソン東芝ライティングで赤外線反射膜自動車用ヘッドランプが開発された(図3.47)。

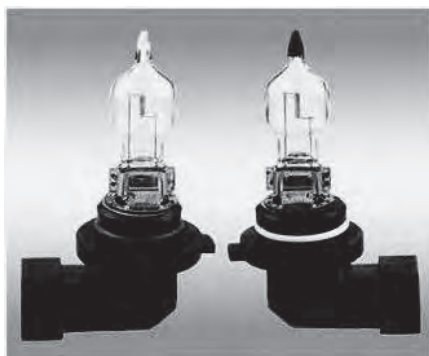


図 3.47 赤外線反射膜自動車用ヘッドランプ
(ハリソン東芝ライティング(株)ホームページより引用)

現在、欧米で効率の低い一般電球の生産を順次中止する計画が進められており、その計画ではこの赤外線反射膜 (IRC: Infra Red Coating) を付けた電球を次世代白熱電球として存続させることとしている。そのIRCランプの例を図3.48に示す。



図 3.48 IRC 白熱電球の例
(各社ホームページより引用)

3.11 技術開発まとめ

白熱電球の技術開発は、19世紀初めに通電加熱した高温の物体を光源として利用する研究開発として始められた。数十年間種々の電球の基礎的研究開発が行

われ、真空技術、電源の発達によりカーボン電球が開発された。1880年代にエジソンにより実用カーボン電球とそれを使用するための電灯システムが開発されカーボン電球の時代になった。その後より明るい電球を求めて再びフィラメントの検討が行われ、カーボンに代わる材料としてタングステン線が開発され、コイルフィラメントとガス入り電球が開発されて現在の白熱電球が完成した。この間、効率向上以外に Getter やジュメット線の発明により品質と生産性も大きく改善された。

図3.49に一般電球の効率の年代による変化を示す。20世紀初めのタングステンコイルとガス入り電球で急激に性能が向上している。その後、内面拡散膜やクリプトン電球が開発され、生産技術の進歩と用途の拡大が進み、生活に深く溶け込んだ電気製品になっている。また、1959年に発明されたハロゲン電球により特殊電球の性能が大きく向上し、1980年頃から一般電球形も開発され、赤外線反射膜を応用することにより、従来の電球に対して約50%効率が高くなっている。

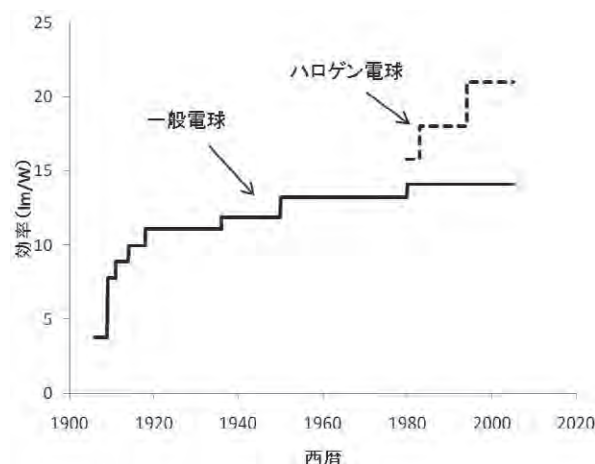


図 3.49 一般電球の効率変化 (寿命 1000Hr)

引用文献

- 1) J. W. Howell & H. Schroeder : 「The History of the Incandescent Lamp」 The Maqua company, (1927)
- 2) 日本電球工業会編「日本電球工業史」日本電球工業会 (1963)
- 3) 深津 正 : 「灯火と照明の歴史」日本電球工業会報 100 ~ 262 号
- 4) International Library of Technology, International Textbook Company, Scranton, Section 32, pp 37-45. (1905)
- 5) Colin J. Smithells : Tungsten "A treatise on its metallurgy, properties and applications"

- Chapman & Hall Ltd. P.105-108 (1952)
- 6) S. Yamazaki et.al : Planseeber Pulvermetallurgie P.22 (1974)
 - 7) (株) 東芝 横浜金属部品工場編「東芝タンモリ 85年のあゆみ」 P.9 (1994)
 - 8) 近角 聰信 : 「強磁性体の物理」、裳華房、P.134 (1984)
 - 9) 平岩、山田 : 東芝レビュー 21,1 P.1 (1966)
 - 10) Francis R. Upton, "Edison's Electric Light", Scribner's Monthly", Feb, pp 531-544 (1980)
 - 11) S. Dushman "Scientific Foundations of Vacuum Technique" J. Wiley & Sons P.192 (1972)
 - 12) 清水 勝「白熱電球」東芝商事株式会社 P.17, P.22 (1955)
 - 13) W. E. Thouret, H. A. Anderson and R. Kaufman, Illuminating Engineering, Vol. 65, p. 231, April (1970)
 - 14) 東芝ライテック株式会社 東芝ランプ総合カタログ
 - 15) 本城 巖 マツダ新報 vol. 16, No.8, P27 (1928)
 - 16) 三浦 順一 特許第 50022 白熱電灯 出願大正 11 年 8 月 18 日
 - 17) (株) 東芝 横浜金属部品工場編「東芝タンモリ 85年のあゆみ」 (1994)
 - 18) 夏目他、東芝レビュー 12、10、P.1151 (1957)
 - 19) 山下 俊彦「電球」共立出版 P.53 (1943)
 - 20) W. Schilling ; ETZ, B 13, S, P.485 (1961)
 - 21) Brett. et.al. J. of IES P.214 (1981)

4 | 性能評価技術と規格

4.1 測光技術の歴史

白熱電球の歴史であり目立たないが関連する重要な技術として発達したのが測光技術である。電球の開発の第一の目標は明るさの向上なので測光の精度向上と基準光源の標準化が行われた。

4.1.1 標準光源

現在は白熱電球の大きさを W（電力）で表わしているが、電球が製造され始めた当初は燭あるいは燭光が使われていた。燭という単位は candle の訳で、1830 年にフランスでステアリン酸のろうそく一本（重量が 83～100g で一時間に 10g 燃焼し、炎の長さ 5.2cm のもの）を光の単位として決めたのが始まりである。その他イギリスでは 1860 年に都市ガス条例で鯨油（ワックス）標準ろうそくを規定しており、ドイツでも独自に標準ろうそくが使われていた。その後ろうそくによって 1877 年にイギリスのハコート（Harcourt）により作られたペンタン（ C_5H_{12} ）ランプが、1898 年にイギリスのガス灯の標準器として採用された。我国では明治 44 年（1911）に電気事業法施行細則によってこのランプの 1/10 の明るさが単位燭とされ、電気試験所で燭の標準器「ハーコート 10 燭ペンタン燈」を維持することになった。この燭は国際燭と呼ばれイギリス、フランス、アメリカで国際比較を行い決定した単位である。尚、ドイツでは独自に酢酸アミールなどを燃料とするヘフネル灯（Hefner Lamp）を基準にしていた。

その後白熱電球の安定性が向上してペンタン灯で付けされた二次標準として電球が使用されるようになったが、ドイツのヘフネル灯を基準にする所もあり統一性がとれていなかった。そこで新しい定義として 1948 年の第 9 回国際度量衡総会（CGPM）で、1 気圧の圧力下での白金の凝固点温度（2042K）の黒体の 1cm^2 の光度の 1/60 が 1 カンデラと定義された。1 燭は 1.0067 カンデラに相当する。この基準を元に各国の値を合わせるため国際比較が行われた。1965 年の測光諮問委員会では国際比較使用する電球の一つとして東京芝浦電気が開発製造した図 4.1 の M 字型光度標準電球（10V15cd、2042K）が選定された。

この標準電球はアメリカ、カナダ、イギリス、フランス、ドイツなどに計百数十個輸出され、当時の日本の電球技

術が世界トップレベルであったことを示している。



図 4.1 東芝製M字型光度標準電球

尚、白金の凝固点の黒体放射を基準とするカンデラの定義は実現がかなり難しく、その後放射エネルギーを測定する技術が進歩したことから、1979 年に、周波数 $540 \times 10^{12}\text{Hz}$ の単色放射を放出し、所定の方向におけるその放射強度が $1/638\text{W/str}$ である光源のその方向における光度を 1 カンデラとする現在の定義に変更されている。また、現在も明るさを測定する際の基準光源は白熱電球が使用されている。

4.1.2 測光技術¹⁾

一方、測光技術は 1725 年にフランスのピエール・ブーゲ（Pierre Bouguer）が光の強さを測定したのが最初とされている。その測光方法は図 4.2 のような単純な装置で、二つの光源を仕切りで隔離し各々の光源で照射される位置に小さな穴を開け、油紙で塞ぎその明るさを目で確認し、二つの穴の明るさが同じになるように光源の距離を変え、その距離により光源の明るさを求めるものである。1792 年にラムフォード（C. Rumford）が開発した図 4.3 に示す影を利用した光度計は高い精度が得られたと言われている。

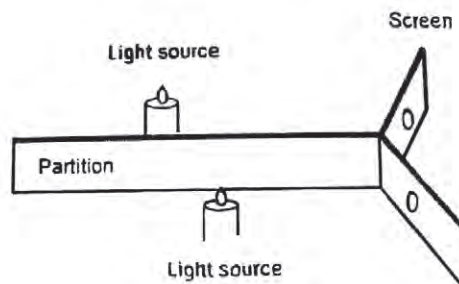


図 4.2 ピエール・ブーゲの測光法²⁾

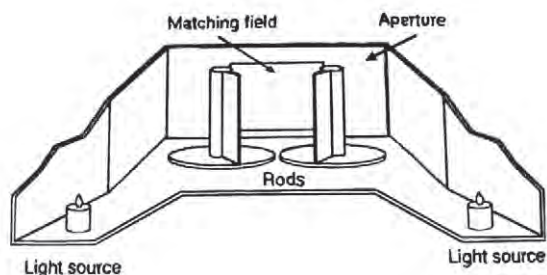


図 4.3 ラムフォードの測光器²⁾

その後ブンゼン (R. Bunsen) により開発された図 4.4 のような光度計は我が国でも電球工場に 1920 年代まで使用されていた。原理は台の中心にある反射板に映る影の濃さを比較して、測定電球の位置を動かして距離から明るさを測定するものである。

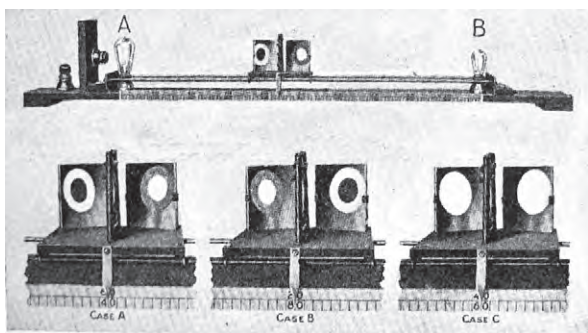


図 4.4 ブンゼンの測光器²⁾

タングステンフィラメントが発明されてからはいろいろな形のフィラメント構造の電球が作られるようになり、電球の向きによる光度差が問題になり図 4.5 のような球形光束計が使われるようになった。内面を白色塗装 (現在は硫酸バリウム) した球形グローブの中に電球 (A) を入れ、小さな穴 (B) から出る光を標準電球の光と比較する方法で、比較は図 4.6 のように人間の目で行っていた。写真 4.6 は 1920 年頃の GE での測光状況である。

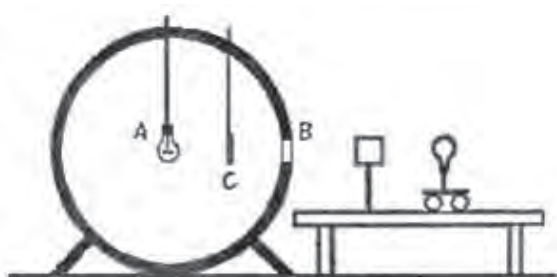


図 4.5 球形光束計

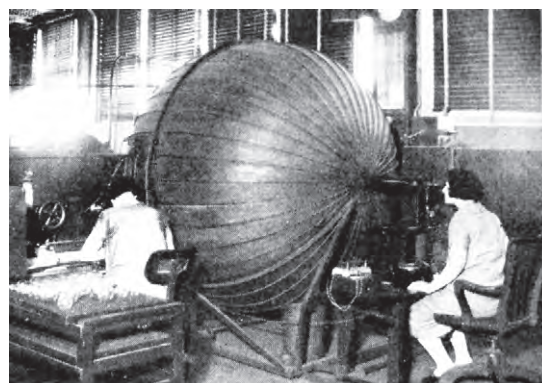


図 4.6 1920 年頃の測光作業³⁾

その後、人間が目で見ても明るさを比較する方法は作業性が悪いので、センサーを用いる方法が検討された。熱電堆 (サーモパイル) やボロメーターは赤外線への感度が大きく使用出来なかったため、可視光領域に感度があるセレンウムの光導電性を利用した素子や光電効果を利用した光電管が開発された。図 4.7 は GE で開発された光電管である。

これらのセンサーを用いた時間問題になるのは、感度の波長依存性で電球の光はフィラメント温度により波長分布が変化するので目でも見た明るさとセンサーの出力の相関性がずれることである。この問題を解決するため種々のフィルターを使った検討がなされたが、測光技術が完成したのは人間の目の分光感度 (比視感度) が決められてからである。

目の分光感度分布は 1888 年にラングレイ、1892 年にケーニッヒがプリズムを用いて測定し、その結果をヌッティングが目の感度の波長分布 (比視感度) としてまとめている。静止状態での比視感度の測定は再現性が低く誤差が多かったが、1893 年にルードにより開発されたフリッカー法により再現性の良いデータがとれるようになった。これは色と明るさが違う光を交互に点滅すると色は混合した色になりフリッカーは消えるが明るさが違うとフリッカーが消えないという目の特性を利用したものである。図 4.8 は従来法とフリッカー法の精度差を示したものである。比視感度は個人差や人種による差があるので国際的にデータを採取し、1924 年に国際照明委員会 (CIE) で標準比視感度曲線が決められた。この CIE のデータには宗正路のデータが東洋人としてただ一人採用されている。なお、現在は、1972 年に国際度量衡総会 (CIPM) において勧告された図 4.9 のような比視感度曲線が使用されている。



図 4.7 初期の光電管³⁾

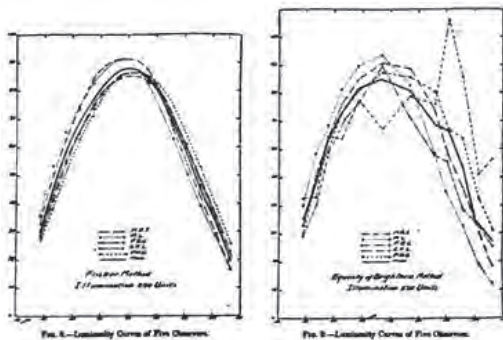


図 4.8 フリッカー法での比視感度測定結果¹⁾

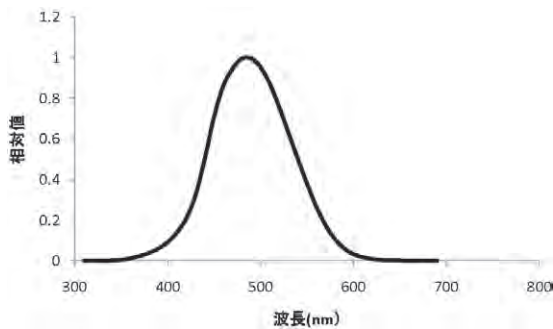


図 4.9 現在の比視感度曲線

4.2 一般電球の寿命特性と効率(経済寿命)

一般電球の寿命は通常はフィラメントが溶断するまでの時間である。理論的にはフィラメントが均一に蒸発して細くなれば電気抵抗が増加し温度が低下するので寿命は半永久的になるが、実際はフィラメントに温度分布があり、さらに欠陥(不純物のやコイルのピッチムラなど)による部分的温度上昇がある。この温度が高い部分は蒸発量が多く、線径が細くなりより温度が上昇してホットスポットが発生し溶断する。この欠陥はいろいろな種類があり、又制御が難しいものが多いので電球の寿命にはばらつきが発生する。タングステン線の製造工程やコイル製造工程の改善で欠陥を減

らす努力が長年続けられて寿命のばらつきは大幅に改善されている。図 4.10 は 1950 年頃と 1980 年頃の電球の寿命分布の例である。このばらつき改善により短時間での断線が減り、平均寿命を短くして効率を高くすることが出来るので 1980 年頃の効率向上につながっている。尚、分布はガウス分布にほぼ一致している。

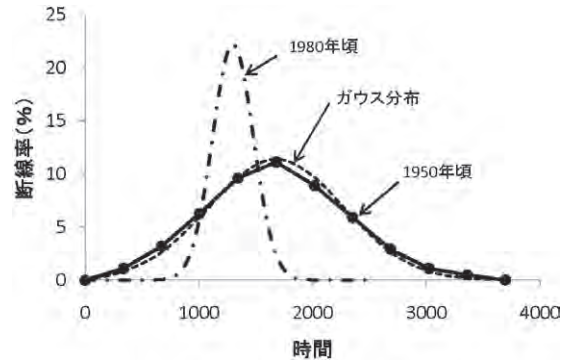


図 4.10 電球の寿命分布の例⁴⁾

一般電球は他のランプに比べて効率と平均寿命に良い相関がある。基本構造や製造工程が同じ場合、平均寿命はフィラメントの温度(あるいは効率)によって決まる。効率と寿命の関係は、ガス入りタングステンフィラメントの場合ほぼ寿命 \propto (効率) $^{-7}$ になる。効率(フィラメント温度)は実績値をもとに設計で変更できるので、平均寿命も設計で決めることができる。

白熱電球が普及し始めた頃から、電球は明るさを提供する製品なので、使用者に電気料金と電球の価格を考慮して最も安価に明るさを提供すべきであるという考え方で寿命が決められている。この考え方はエジソンが実用電球を開発した当初から採用されており、一般電球の開発は寿命ではなく効率向上の競争になっていた。尚、効率向上の方が有利になるのは電球の価格が電力料金(電球の使用開始から寿命になるまでに使用した電気料金)に比べてかなり安価な場合である。

単位明るさにかかる費用は電気料金と電球の価格なので、寿命を長くすると電球の価格の分は減るが効率が下がるので電気料金が増える。寿命を短くした場合は逆になるので、単位明るさの費用が最低になる寿命があることになる。この寿命は経済寿命と言われ、大正 8 年の日本電気工芸委員会の電球標準仕様では真空電球の平均寿命を通常では 1600 時間(A 種)とし、電気料金が高い場合は 1000 時間(B 種)という値に決められていた。現在は昭和 25 年(1950)に JIS で一般電球は 1000 時間に決められている。なお、寿命は図 4.11 のように点灯電圧で大きく変化するので、実際の使用条件ではかなりばらついている。

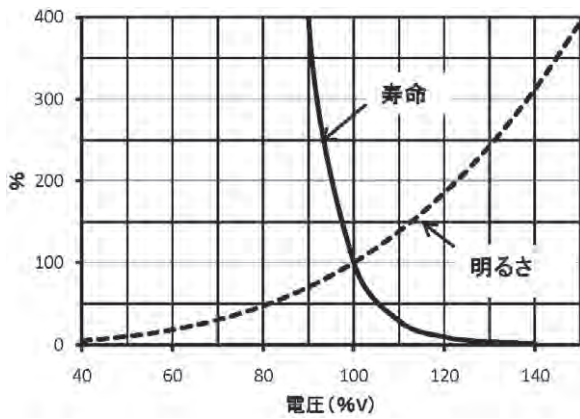


図 4.11 電球の点灯電圧と寿命、明るさの関係

寿命や明るさの特性以外の寸法、形状についても、器具（ソケット）に取り付けて使用されるため、電球メーカー間での互換性が重要で、口金、フィラメント位置、バルブ形状など早くから JIS 化されている。

引用文献

- 1) W. E. Barrows "Light, Photometry and Illumination" McGraw-Hill Book Co. (1912)
- 2) J. Z. Buchwald, Alan Franklin "Wrong for the right reasons" Springer p.164 (2005)
- 3) J. W. Howell & H. Schroeder 「The History of the Incandescent Lamp」 The Maqua company, p.198 (1927)
- 4) 柏木 秀一：「電球の製作技術」日本電球工業会 P.149 (1973)

5 | 我が国の電球産業の変遷

5.1 基礎確立時代

我国で電灯が使われたのは明治11年(1878)3月25日で、工部大学校のホールで開催された祝宴で教師のエアトン(W. R. Ayrton)と生徒の藤岡市助らによってアーク灯が点灯されたのが最初である。電源はグローブ電池でフランス製のアーク灯を点灯したが、点灯時間は15分程度であったと言われている。白熱電球は明治17年(1884)に上野駅の鉄道開通式で24個が点灯されたのが最初である。

白熱電球の製造は明治23年*(1890)に、東京電灯会社(現在の東京電力)から独立して設立された電球製造会社の白熱舎で藤岡市助らによる12個の電球の試作成功から始まっている。製造開始した当時は親会社の東京電灯会社の他に神戸電灯(明治21年)に大阪電灯(明治22年)、品川、横浜、深川(明治23年)などの電灯会社が開業し、これらの会社はすべて欧米から輸入した電球を使用していた。欧米ではカーボン電球は技術的に完成し、量産が行われており、新規参入の白熱舎は品質と価格で大変苦勞することになる。その状況を東京電気株式会社五十年史²⁾、日本電球工業史¹⁾から要約して紹介する。

白熱舎を設立する前の明治22年*(1889)に藤岡市助は東京電灯会社内で、イギリスから購入した製造設備(水銀ポンプ、光度計、フラッシング・テーブル、セルローズ製造用器具、ダイス、マッフル炉など)を使用して試作を開始している。藤岡の他2名とガラス職工1名で試作の開始をしたが、当時のガラス職工はバーナーによるガラス加工をしたことがなく、購入した設備の解説書も無く、試作に必要な薬品、諸材料の入手に苦勞する状態であった。白熱舎を設立してからも当初は試作の繰り返しで、購入したフィラメントの製造器具が、スワンの開発した綿糸をニトロセルローズにしてから炭化する複雑な方法に使用するものであったため、使用可能なフィラメントを作ることが出来なかった。その後、米国では日本の竹を使用しているとの情報を得て、竹を細く削って炭化することにより良好なフィラメントが得られ、明治23年(1890)8月12日に初めて点灯出来る電球が12個完成した。しかしこの電球は2時間程度で断線してしまう試作品レベルであった。その後、排気方法などの改善を行い実用レベルの電球が得られるようになったが、歩留まり

は半分程度で、輸送中の断線も多かった。また当時の送電は夜間のみであったため、排気やフラッシングのような電気が必要な工程は夜間にしかできず、生産能力は一日10個から15個で1ヶ月平均300個程度であった。

販売先は東京電灯で、電灯取り付け数は明治24年には10036台になっていたが、当時使用されていた欧米の輸入電球と比べて、新規参入の白熱舎の電球は品質と価格に大きな問題があった。

白熱舎の電球の価格は明治24年1月の時点で

	8~16燭光	24燭光	32~50燭光
1個	80銭	1円	1円25銭

であったが、輸入電球の24燭光1個40銭~50銭に比べて高価で、品質クレームも多かった。¹⁾

当時の電気料金は定額電灯の場合、
半夜灯(日暮れから12時頃)は

8燭光	1ヶ月	85銭
10燭光	1ヶ月	1円
16燭光	1ヶ月	1円50銭

終夜灯(日暮れから夜明け:門燈など)は

8燭光	1ヶ月	1円50銭
10燭光	1ヶ月	1円70銭
16燭光	1ヶ月	2円50銭

とされていた。

点灯器具としては図5.1のようなペンダントが1ヶ月10銭で貸し出されていた。



図5.1 コード・ペンダント¹⁾

また、電球はガラス球が壊れずに切れた場合は無料交換するが、過失により破損した場合エジソン球は1円20銭で新球と交換するなどとなっていた。当時の1円は現在の1万円以上に当たると言われているので、電球による照明はかなりの贅沢品であった。

その後、白熱舎は、機械ポンプの追加による排気の改良や竹フィラメントの炭化温度の高温化などにより品質改善を行い、発電機の設置など設備拡張と従業員を30名に増員して明治26年には月産2500個程度まで生産能力を上げた。明治27,28年の好景気で電灯会社が増えて需要も増えてきたので、会社を株式会社にして、社名を明治29年に東京白熱電球製造株式会社、明治32年(1899)に東京電気株式会社にした。製造技術も向上して白熱舎時代に失敗した木綿からのフィラメント製造も明治32年に可能になり、1日で800~1000個製造できるようになった。

また明治33年初頭には新製品として反射鏡付電球、藤岡式電球(明るさ切り替え式)、着色電球が発売された。このうち藤岡式電球は明治27年に特許提案されており、2種類のフィラメントをバルブ内に入れ、ソケットのスイッチで明るさを切り替えるものである。図5.2に特許の図と図5.3に現物の写真を示す。輸入電球に対抗するための技術力向上の努力と同時に新製品の開発も行っていたことは特筆に値する。

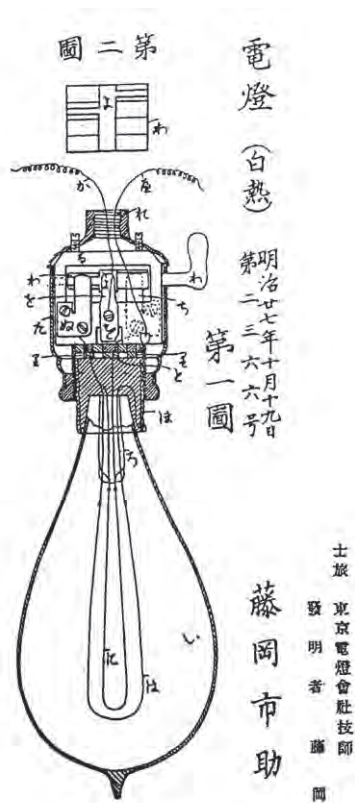


図 5.2 藤岡式電球の特許の図²⁾

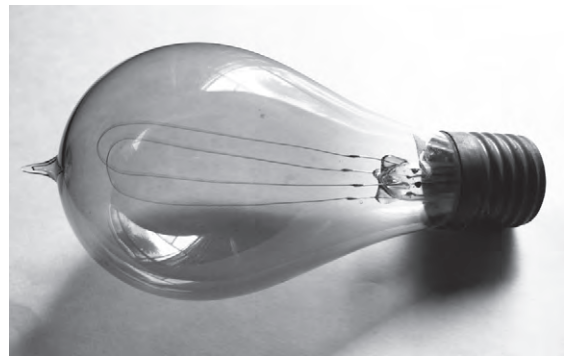


図 5.3 藤岡式電球
東芝ライテック(株)所有

しかし安価な海外製の電球の輸入増加により在庫が増え、明治34年(1901)頃には減産する状況になった。特にドイツ製の電球が一個17.8銭という戦略価格で販売を行ったので、東京電気ではさらに製造原価低減が必要になり、対策として口金とガラスバルブの内製化を行った。当時口金は輸入電球の回収品か町工場少量生産したものを使用していたが、回収品は品質が悪く、購入品は少量生産品のため高価であったので口金製造機械を購入し内製化を行った。ガラスバルブも購入品を使用していたが、内製の準備を行いながら、ガラスの材料をソーダガラスから加工性の良い鉛ガラスに変更した。

これらの原価低減の努力を行っても経営は苦しく明治36、37年は月の収入2500円に対し支出3500円のような赤字経営が続き、経営が成り立たなくなり、明治38年(1905)にGEの資金と技術援助を受けることになった。

なお、現在世界最大のランプメーカーであるオランダのフィリップス社も1891年にカーボン電球の製造会社として創立されている。白熱舎と同様に月1000個程度生産する小さな工場スタートしているが1899年には年間180万個生産するようになっていた。この成長は経営者の営業努力によると言われているが、白熱舎との違いはヨーロッパには周辺に多くの電球製造に関係する基礎技術があり、我が国には近くに無かったという地理的要因も大きかったと考えられる。

(*明治22年という説もある：深津正、電球工業会報No.455 P.43(2003))

5.2 電球産業の確立³⁾

GEの系列会社になった東京電気は日露戦争後の景気回復により急激に業績が向上し、明治39年(1906)には日産2500個と生産数が大きく増加し、その後も図5.4のように生産数は急激に伸びた。明治38年か

らはガラスバルブの内製化を開始し、それまで輸入品が使用されていたソケットの製造も開始した。

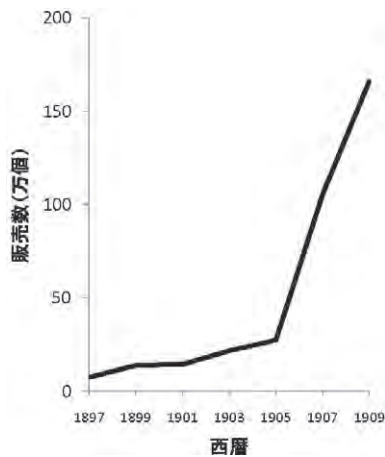


図 5.4 明治末期の生産数変化³⁾

製品のマークとして明治 39 (1906) 年から図 5.5 の GE のマーク①を採用し、大正 14 年 (1925) にマツダマーク②になるまで使用された。

このマツダマークは 1909 年に GE がゾロアスター教の光の神のアウラ・マツダの名前にちなんで MAZDA をトレードマークとして採用し、その後 GE と技術提携している電球メーカーが使用したものである。



図 5.5 東京電気製電球のマーク

1904 年に押し出しタングステンが発明され、東京電気では GE から技術導入し明治 42 年 (1909) から押し出しタングステン電球の製造を開始した。この電球は効率が良く明るい電球であったが、フィラメントが大変ろく輸送中や使用時の断線が多く、また価格がカーボン電球に比べて十倍以上と高価であったため、販売数は少なかった。1910 年に GE で線引きタングステンが開発され、東京電気では翌年の明治 44 年 (1911) から線引きタングステン電球の生産を始めた。タングステン電球はカーボン電球に比べてかなり高価であったが、効率が 2.3 ~ 2.4 倍と高く性能が優れていたため明治 44 年頃から急速に普及した。当時のタングステンフィラメントは GE からの購入品であったが、大正 4 年 (1915) から東京電気内での内製

化の検討が進められ翌年には生産が開始されている。1913 年に GE のラングミュアーによりガス入り電球が発明され、大正 3 年 (1914) に東京電気からも発売された。発売当初は 1500W や 1000W などの大ワットのガス入り電球のみであったが、バルブ形状を球形から長丸形に変更して低ワットのガス入り電球が発売された。東京電気ではこのガス入り電球を GE と同様にマツダ C 電球、真空電球をマツダ B 電球、押し出しタングステン電球をマツダ A 電球と名付けて販売した。

当時電球は主に電灯会社が購入し、使用者に貸し出す方式が取られていたため、このタングステン電球は従量制 (使用電気量に対して電気代金を徴収する方式) では電灯会社の収入減に繋がり、定額制 (取り付けた電球の数で定額の料金を徴収する方式) では使用者から使用電気料が減るのに料金が減らないという不満がおきたので、東京電気では一般小売を増やすための営業強化を行った。また電灯会社と共同で電球の使用数を増やす「増灯運動」やより明るい電球にする「高燭勧誘運動」を展開した。当時一般的に使用されていた電球は 10 ~ 16 燭光 (現在の蛍光ランプでは 4 ~ 6WW 程度の明るさ) で、欧米に比べてもかなり暗かった。その後電灯会社の定額料金も値下げされ、タングステン電球が普及した。なお、定額制電灯はかなり長く続き、従量制が 50% を超えるのは昭和 10 年頃である。

各電球の生産数の変化を図 5.6 に示す。タングステン電球の登場により急激に生産数が増えている。

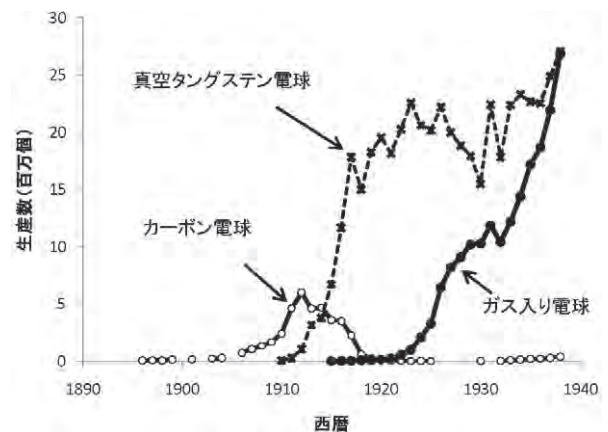


図 5.6 カーボン電球とタングステン真空電球とガス入りの生産数³⁾

我が国の電灯の普及率は明治 40 年 (1907) には 2.3% であったが、大正 5 年 (1916) に 37.4% になり、昭和 10 年 (1935) に 89% になっている⁴⁾。この 89% の普及率は当時の米国 (68%) や英国 (44%) に比べてもかなり高く、我が国が新しい技術を素早く導入でき

る特性を持っていることを示している。尚、定額制の家が多かったこともあり、一戸当たりの灯数は1個が50.6%（2個は25.7%）で、当時の一般家庭では電球による照明は贅沢品であったようである。

5.3 電球企業の創設と組織化

明治37年（1904）頃までは東京電気が国内唯一の電球メーカーであったが、明治37年に大阪に錦商会（後の大阪電球株式会社）、明治39年に日本電球製作所（43年に日本電球株式会社）、明治41年に東京に東京電球製作所など電球製造会社が多数創設された。これらの会社はタングステン電球の出現により特許問題などの制約が生じ、東京電気との統合が行われた。

第一次大戦の勃発による交戦国からの軍需品の注文増加と国内電灯の普及により大正3年（1914）から13年（1924）の間に45社の電球製造会社が全国各地に設立されたが、一部は東京電気に吸収合併された（例えば小倉市の大正電球）。このように東京電気がGEからの高い技術と企業の吸収合併により市場を支配したため、対立する国内電球業者の組織化が進み、関東では東京標準電球工業組合、関西では関西標準電球工業組合が組織された。また後述するように電球輸出の急増に伴い東京輸出電球工業組合、大阪輸出電球工業組合が結成された。これらの4組織は昭和6年（1931）に日本電球工業組合連合会として結集する。ちなみにこの結集をまとめた東電電球は東京電灯が作った会社である。連合会と東京電気は対立を避けるため協定を結び昭和9年（1934）に調印が行われた。連合会側は会員の13社がまとまって共同販売会社の東西電球会社を設立し、価格などのカルテルを結び、図5.7のようなトウマークを商標とした。



図5.7 東西電球会社の製品マーク

東京電気と東西電球の契約時の販売比率は東京電気60%強、東西電気40%弱と設定された。

東京電気は昭和7年にGEが株の一部を日本企業に売却し、GEの出資比率が過半数以下になったので正式に日本企業にもどり、昭和14年（1939）には重電会社の芝浦製作所と合併し、総合電機メーカーの東京

芝浦電気株式会社になっている。

5.4 電球の輸出⁵⁾

我が国の電球輸出は明治32年（1899）から明治33年（1900）に東京電気がマニラ、シンガポール、上海などに輸出したのが最初であるが、大量の輸出が始まったのは第一次大戦時（大正3年）のロシアからの軍用豆電球の注文への対応からである。その後GEのタングステン電球の特許やガス入り電球の特許の期限が終了したこともあり急激に増加した。輸出先は米国、英国、中華民国などが主であったが昭和10年頃には50ヶ国以上に広がっていた。図5.8に昭和初期からの輸出電球の数量変化を示す。主な電球の種類は小形電球の装飾用や懐中電灯用が主で一般電球も輸出された。これらは町球と呼ばれた零細企業で生産され、当時町球企業は東京品川地区を中心に1000から3000社あったとされている。

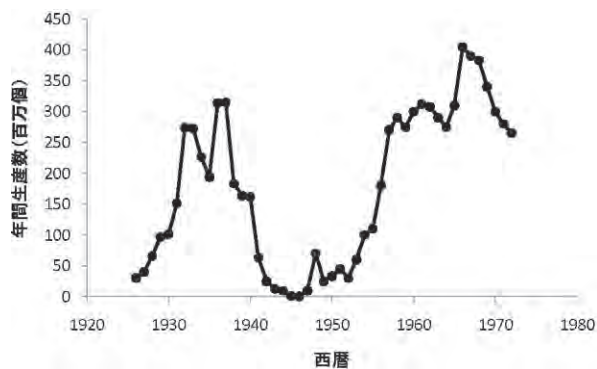


図5.8 輸出用電球の生産数
(1)の史料より作成

これらの輸出は第二次大戦の始まりとともに減少したが、大戦後は欧米向けの図5.9のようなクリスマスツリー用電球が急増し、昭和46年（1971）頃まで大量に輸出された。図5.10は当時の製造の様子である。これらの輸出電球の急増は輸出先の各国で問題となり、ダンピング防止法の適用、輸入関税の引き上げ、特許提訴などが行われた。その対策として国内では生産調整や品質向上のため工業会による品質検査が行われた。



図5.9 クリスマス電球の例



図 5.10 小形電球の製造状
(品川歴史館資料より)

これらの輸出電球は図 5.11 のような組織で生産されており、問屋が輸入業者から注文を受け、コイル、口金などの材料を下請け業者に渡し、製品を集めて輸入業者に納入する流れであった。

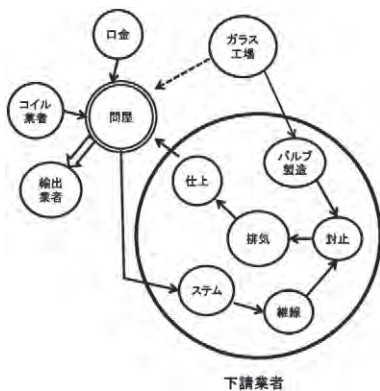


図 5.11 輸出用電球の生産組織⁴⁾

輸出用小形電球は人件費の安い零細企業で生産されており、低価格が強みで、当時の米国製に比べて 1/3 程度の価格であった。

昭和 30 年頃からの高度成長で人件費が上昇し、台湾、韓国、香港などとの価格競争に勝てなくなり輸出が減少し、競争力を高めるため製造工場を中心地であった品川区から秋田県など地方に移転して対抗したが成功せず、生産数は昭和 46 年頃から大きく減少した。

一方、昭和 46 年頃 (1971) から図 5.13 に示すように自動車用電球が増加し輸出も増えている。この自動車用電球は主に図 5.12 に示すようなウエッジベースと呼ばれるパネル表示用の小型電球が主体で、製品の強さは品質の高さであった。国内大手自動車メーカーの高い品質要求に対し、品質改善に努力を続けて、世界最高の品質レベルに到達し、最終的には不良率を

PPM で管理するまでになっている。我が国の製造現場の強さを示す例である。



ウエッジベース電球



自動車用パネル

図 5.12 ウエッジベース電球とパネル

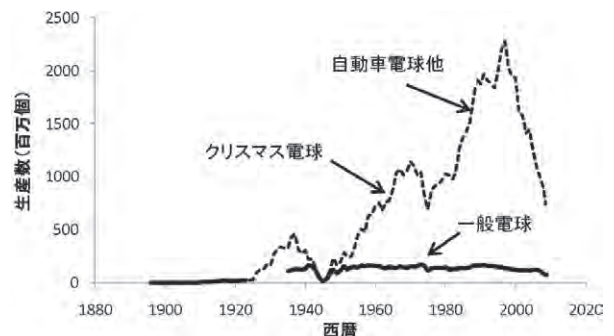


図 5.13 小形と一般電球の生産数
(電球工業会報資料より作成)

平成 5 年 (1993) 頃から LED 電球が登場し、この自動車用小型電球も生産数が急激に減少している。

一般照明用電球については第二次世界大戦後も東京電気が国内最大のメーカーであったが、昭和 11 年 (1936) から一般電球を製造していた松下電器が昭和 27 年 (1952) にオランダのフィリップス社から技術を導入し、大きくシェアを拡大し東芝と並ぶ電球メーカーになっており、日立製作所、三菱電機などの大手電機メーカーも白熱電球の製造販売を行うようになった。

しかし、国内生産数は昭和 30 年 (1955) 頃から蛍光灯ランプが一般家庭に急速に普及してきたため、ほぼ

一定の生産で推移している。近年になって電球形蛍光灯の形状や効率以外の特性が電球に近くなり置き換えが進み、生産数が減少している。さらに環境問題の対策として白熱電球の生産中止が世界的に進んでおり、我が国でも最大メーカーであった東芝が2010年一般電球の生産を中止した。

引用文献

1) 日本電球工業会「日本電球工業史」(1963)

- 2) 東京芝浦電気株式会社「東京電気株式会社五十年史」(1940)
- 3) 東京芝浦電気株式会社編「東京芝浦電気株式会社八十五年史」(1963)
- 4) 栗原 東洋：「現代日本産業発達史Ⅲ電力」，現代日本産業発達史研究会，P.181 (1964)
- 5) 瀧谷 善一編「輸出雑貨工業論」有斐閣 P.219 (1942)

6 | 量産技術

一般電球は1930年頃に基本的技術がほぼ完成しており、製品構造が簡単で付加価値を付けるなどの製品開発を行って販売量を増やすことが難しく、大手メーカーでは大量生産による製造原価の削減と品質向上に注力するようになった。そのためのガラスバルブなどの部材を含め量産設備の開発が継続して行われた。

白熱電球の製造法は現在でも、手作業によるものから一秒一個生産する機械による大量生産まで種々存在する。製造技術はメーカー毎に開発されており、各社のknowhowとなっているのでこの章ではGEで開発された技術と、それを元に開発された東京芝浦電気での一般電球に関する技術を中心に製造技術の変遷について述べる。

6.1 電球製造技術^{1), 2)}

エジソンが電球の開発を始めた当初はガラスに固定した導入線にフィラメントを取り付けた部品（ステム）とガラスバルブをゴム栓のようなもので固定して、フィラメントが切れたらステム部分を交換できる図6.1のようなものを検討していた。しかし、この方式では真空度の確保がうまくいかなかったので、ステムとガラスバルブの端部を溶融して一体化する図6.2の方法に変更した。フィラメントが切れたら電球を破棄することになるので、エジソンが“私はフィラメントが断線したら捨てても良いような寿命が長く安価な電球を作りたい”と言ったと伝えられている。

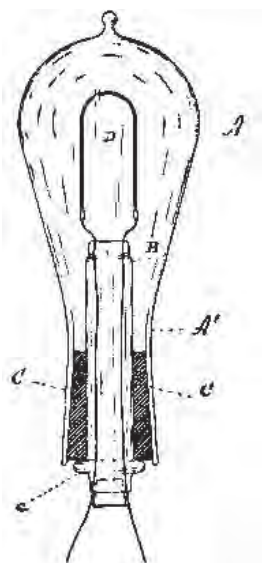


図 6.1 エジソンのゴム栓電球¹⁾

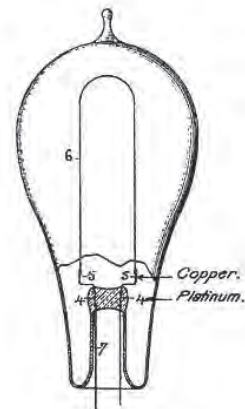


図 6.2 ステム封止電球¹⁾

電球の製造は先ず導入線を封着したステムを製造し、それにフィラメントを取り付け、ガラスバルブと溶着した後、排気を行い、ガスを封入して排気管をチップオフし、口金を付けて完成する。

初期のステムは図6.3のようにガラス管の中央部に膨らみを作ってこの部分とガラスバルブを溶着し、余分な部分をカットする方法がとられていた。その後1893年に図6.4に示す端部をフレアー（つば）状に加工してバルブに封着する方法が開発され生産性がよくなり、クラック発生も減少した。



図 6.3 初期のステム²⁾

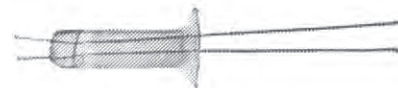


図 6.4 フレアーステム²⁾

1901年にハウエル (J. W. Howell) とバロース (W. R. Burrows) によって図6.5に示すようなステム製造機械が開発され、手作業が機械化された。この機械はフレアー付きのガラス管をヘッドに差し込み、中に2

本の導入線を入れ、三か所のバーナーで加熱し、端部を平らに加工するようになっていた。それまで熟練工2～3名で行っていた作業を非熟練工1名で行えるもので、現在使用されているステムマシンと基本的によく似たものである。

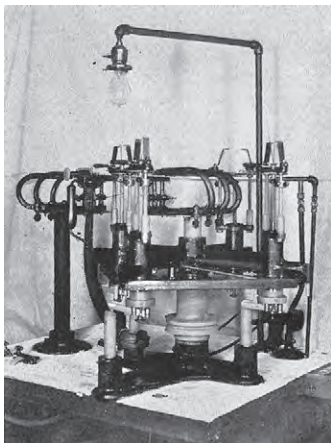


図 6.5 初期のステムマシン²⁾

1919年にはGEのミッチェル (Mitchell) とホワイト (White) によりステム内に排気管を設置して排気する方法が開発された。

この発明によりガラスバルブ先端にあったチップが無くなり排気管を付ける作業も不要になったので、品質と同時にバルブ生産性も大きく向上した。製造方法は図 6.6 のように排気管を導入線の入ったステムガラス管内に入れ、両者を同時に加熱して溶着加工し、溶着部のガラスが柔らかい間に排気管に空気を吹き込みステム先端部分に排気用の穴をあけるものである。この方法は我国でも大正 14 年 (1925) から採用され、現在の電球ステムの標準的製法となっている。現在のステムの例を図 6.7 に示す。

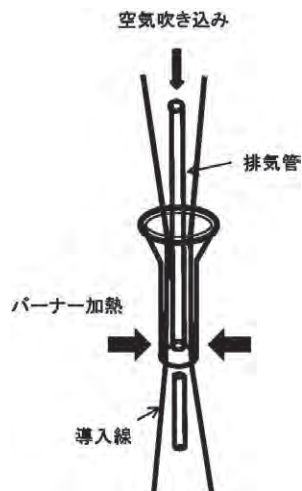


図 6.6 ステムの製法

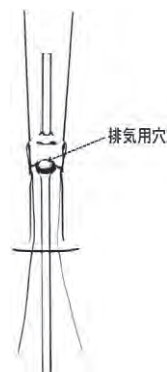


図 6.7 現在のステム

初期のガラスバルブとコイルを取り付けたステムの封止加工は工具を使った手作業で行われていた。1895年にGEで図 6.8 のような4ヘッドの封止マシンが開発された。この機械はバルブ内にステム設置し、回転させながらバーナーで加熱封止するもので、現在のものとほぼ同じ機構である。この機械により非熟練工1名で一日 600 個生産することが可能になった。

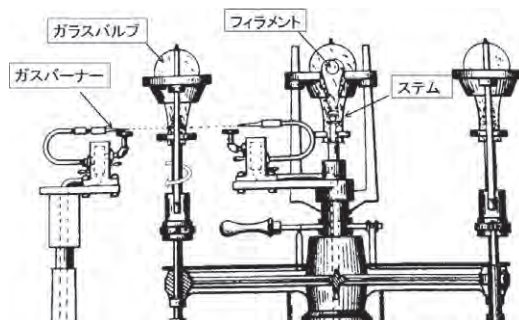


図 6.8 4ヘッド封止マシン¹⁵⁾

第一次世界大戦前までは電球の製造プロセスはステム製造、コイル継線、封止・排気、口金付けの各工程に分けられており、工程の速度差のため仕掛品が多く、また広い場所が必要であった。第一次大戦後GEのパロースにより各機械の速度を合わせるなどの工夫が行われ、ユニットマシンと呼ばれるアンカー巻きつけ機、封止マシン、排気マシン、口金付け機、フラッシング機を同一テーブルに設置した機械が開発された。図 6.9 に外観を示す。

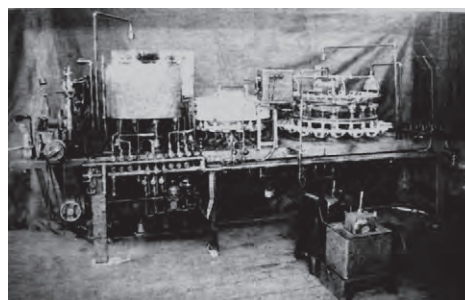


図 6.9 ユニットマシン²⁾

この機械では各工程で部品が回転しながら加工され、排気マシンの中心にはセンターバルブと呼ばれる回転機械用の真空部品が使用されている。これは図 6.10 に示すように表面を研磨した円盤に同心円に穴を開けたものを 2 つ重ねて、回転により繋がる穴が順次切り替わるようにしたものである。上下のディスクの間には薄い油の膜があり真空が保たれるようになっている。このセンターバルブは図 6.11 のように排気マシンの中心に取り付けられ、下方盤の穴は図のように排気ポンプや封入ガス管に繋がっており、上方盤は電球の排気管が挿入される排気ヘッドに繋がっている。

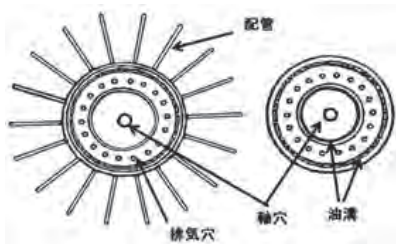


図 6.10 センターバルブ構造図³⁾

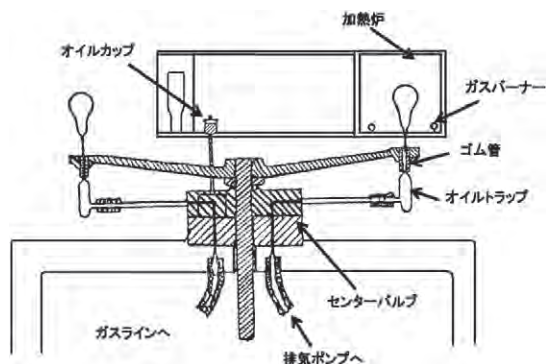


図 6.11 排気マシンのセンターバルブの組み込み図³⁾

図 6.12 に排気マシンの配管例を示す。排気動作は①の所で電球が挿入され、回転に従い、電球のリークチェックが行われたのち、加熱されながら排気が行われる。この図の例では⑥と⑨の所で窒素を入れ再び排気するという入りウオッシング工程が入っている。後半で高真空にした後、アルゴンが封入され、チップオフされる。

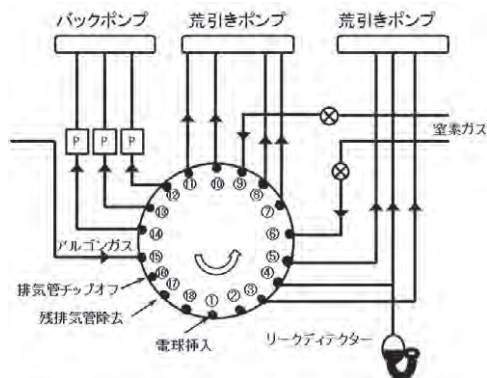


図 6.12 排気マシンの配管の例³⁾

6.2 我国の電球量産技術

我が国の電球製造も初期にはすべて工具を使用した手作業で行われていたが、生産数が増えるに従い、機械を導入し、工場の生産方式になった。最初に工程毎に分業するデパートメント方式が採用され、次に電球の品種毎にグループを形成し製品の流れを良くしたグループ生産方式になっていった。この方式は自動排気機械が開発されたことにより可能になった。その後、大正 13 年（1924）に GE 社よりステム製造機械とその後の工程を一台の機械にまとめたユニットマシンが輸入され、高速で品質の安定した電球を製造できるユニットシステムで生産されるようになった。東京電気ではこの GE ユニットマシンは同じものを約 20 台製作し、小倉、大阪、川崎の工場に設置して、昭和 20 年代まで使用していた。その後、この GE ユニットマシンを元により高速の機械が開発され、各地の工場で使用された。昭和 43 年に一般電球の製造が小倉工場に集約され、より高速の機械が開発設置されている。これらの電球量産技術開発の経緯を、国内最大の電球工場であった東京電気の北九州小倉工場の歴史に従って説明する。

6.2.1 東京電気北九州小倉工場^{4),5)}

小倉工場の元は大正 5 年（1916）に創立された大正電球株式会社である。この会社は北九州地区と山口県にあった電気事業会社（九州電灯鉄道、九州水力電気、九州電気軌道、鹿児島電気、山陽電気株式会社など）が出資して、電球の内製化を目的として設立された。工場場所は小倉市室町 65 番地で従業員は約 80 名の規模であった。製造技術についてはドイツの AEG 社の技術を導入していた大阪電球の支援を受け、京都大学の青柳教授の技術指導も受けていた。当時は国産推奨運動が盛り上がり、GE の支援を受けていた

東京電気のマツダランプに対抗するために年間生産数50万個を目標に、桜マークの真空電球の生産を開始した。

大正7年(1918)頃には月産3～5万個の生産を行っていたが、不良品が多く価格も高かったので売れ行きが伸びず在庫が増えて経営不振に陥り、東京電気の援助を受けて製造を行うことになった。大正9年(1920)には東京電気の経営になり、東京電気小倉工場としてマツダランプの生産を開始した。当時はガラスバルブも図6.13のように手吹き作業であったが、日産約7千個の生産数で、大正12年(1923)の関東大震災の時には九州、中国地方向けをすべて小倉工場で生産し、日産2万個まで増産が行われた。



図 6.13 ガラスバルブの手吹き作業現場(小倉工場)⁴⁾

増産に伴い工場拡張が必要になり、昭和2年(1927)に下道津にあった魔法瓶会社の跡地を購入し、工場移転を行った。新工場にはGE社で開発されたユニットマシンが図6.14のように10台設置された。このマシンは東京電気ではエジソンの名前をとってエジソンマシンと呼ばれ、真空電球一個を13秒程度で生産できる機械であった。同時にガラス工場も新設されたが、川崎にアイバンホームシンが設置され量産化が進んだので、このガラス工場は一時廃止された。その後昭和17年(1942)に小倉工場にアイバンホームシンとタンク窯、ドーソン式ガス発生炉が設置されバルブ製造も行われるようになった。(アイバンホームシンについてはガラスバルブの章で説明する)

昭和5年(1930)からはフロスト作業も行うようになった。

昭和10年頃よりエジソンユニットマシンを元に自社で改良した真空電球とガス入り電球の兼用TEユニットマシンが設置された。この機械は図6.15に示すような外観で、アンカー取り付け機と9ヘッドの封止機と18ヘッドの排気機が一つにまとめられており、電球一個を6秒で生産できる能力であった。この機械の導入により工場の生産数は倍増した。

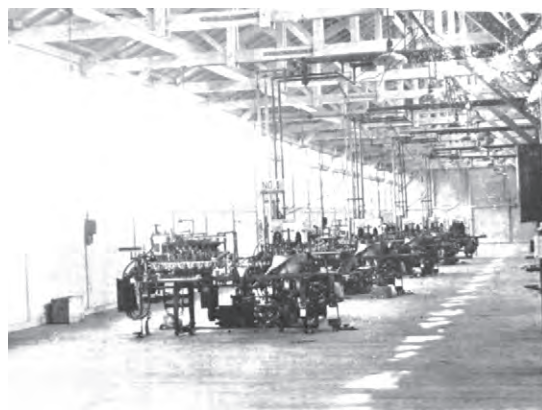


図 6.14 小倉工場のユニットマシンの設置状況⁴⁾

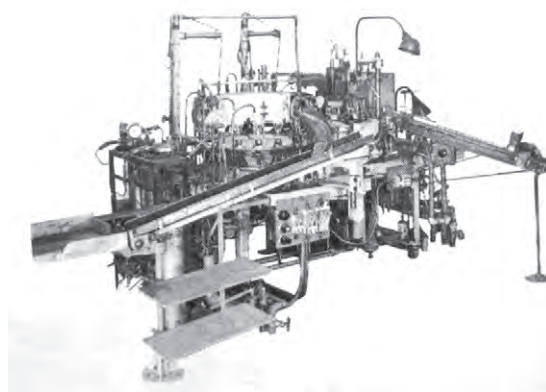


図 6.15 TEユニットマシン⁵⁾

昭和28年(1953)に大水害に見舞われ、それを契機に建屋が新設され、昭和32年(1957)頃から自社開発のハイスピードマシンと呼ばれる一個2～3秒で生産できる機械が図6.17のように12台導入された。これにより生産数は月350万個になった。このハイスピードマシンは図6.16のようなレイアウトで、封止機と排気機が一つの台に設置され、ステムにマウントマシンでコイルを取り付けたマウントとバルブを封止し、排気後口金付けの機械に送るものである。その後フィラメント供給の自動化、マウントマシンの連結や手作業で行われていた口金付けでの外部導入線伸ばしの機械化などの改良が行われ、当初図6.16(a)に示すレイアウトのように一台の機械を12～13名で担当していたが、最終的には6.16(b)のように4～5名で生産出来るようになった。これらの改良は製造現場で定期修理時に行われ、次の量産機開発の技術に繋がっている。このハイスピードマシンはインド、インドネシア、台湾や韓国など海外へも輸出された。

その後、海外で一個1.2秒の機械が開発され、国内でも一個1.8秒の輸入機械が稼働しているとの情報があり、より高速のマシンの開発が進められた。

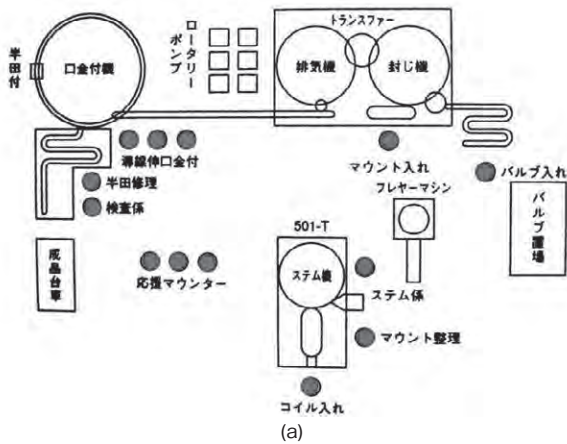


図 6.17 ハイスピードマシン 12 台の稼働状況

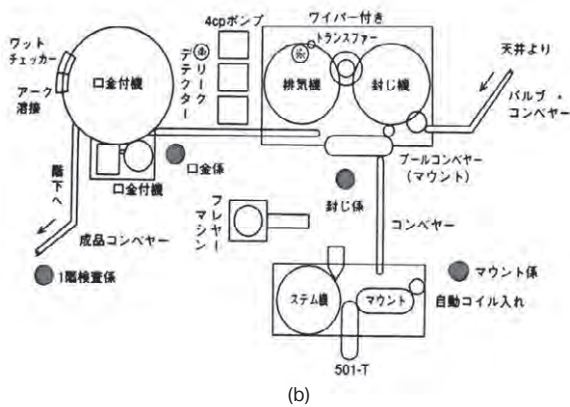


図 6.16 ハイスピードマシンの設置と作業員の配置図

排気機は2×24ヘッドで構成されていた。口金付け機はチェーンコンベア方式が採用された。この機械はアメリカ、東ドイツなどに輸出されたことから判るように当時の最先端の機械であった。外観を図 6.19 に示す。

この機械の設置により生産数は年間7000万個になっている。当時の工場の外観を図 6.21 に示す。

表 6.1 に小倉工場に設置された電球製造マシンの概要をまとめて示す。

小倉工場では昭和32年(1957)から導入線の製造も行っており、電球用以外のダイオード用も含めて多いときには年間20億本が生産されていた。

小倉工場は半導体製造が増加したことと、電球の市場変化による採算性の悪化で小倉工場の位置による物流コストが問題になり、電球生産を日本の中心に近い栃木県鹿沼に移転することになった。昭和58年(1983)

昭和45年(1970)には1秒一個の世界トップクラスの超高速マシン(Gマシン)が完成し、3台が小倉工場に設置された。この機械は図 6.18 に示すレイアウトのような機械で、高速で動かすため継線機械以外はダブルインデックス方式で封止機は2×18ヘッド、

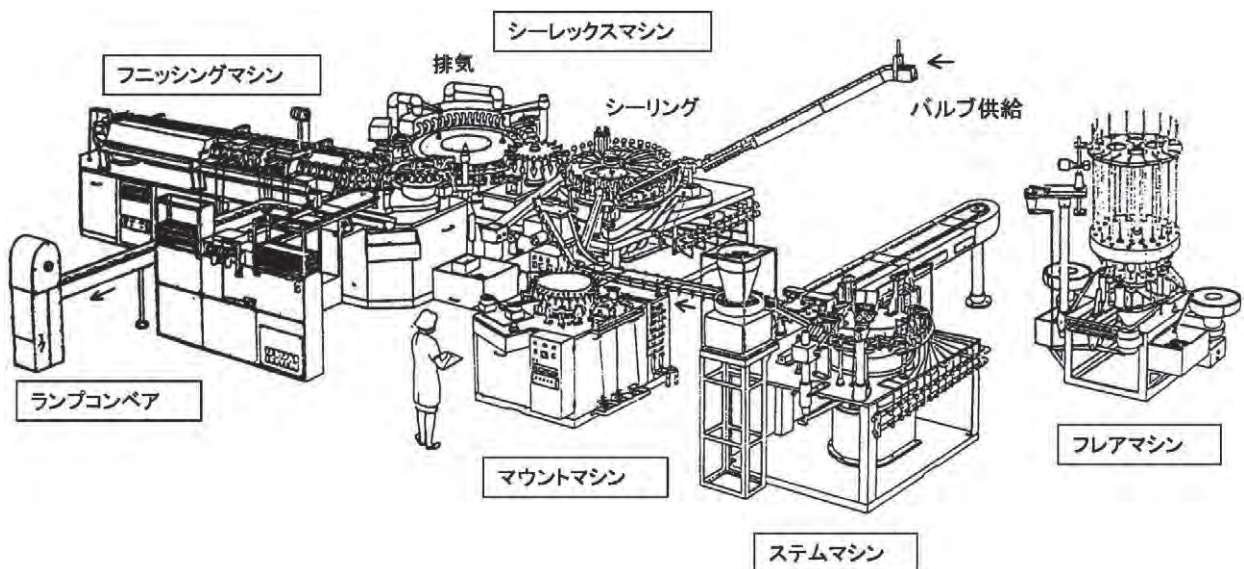


図 6.18 超高速マシンのレイアウト⁵⁾

に小倉工場での生産が終了し、超高速マシンは鹿沼工場に移設され平成 20 年に一般電球生産が中止されるまで稼働していた。小倉工場の生産終了までの電球、導入線の生産数を図 6.21 と 6.22 に示す。

6.2.2 電球量産技術の特長

ほぼ半世紀にわたる電球の量産技術は原価低減と品質向上を目的として行われている。白熱電球は簡単な構造でコイル、バルブなどの部品が入手出来れば人件費の安い小さな企業でも製造可能なので、大手企業では対抗上少ない人員で高速で量産できる機械の開発に注力した。我が国の電球量産機械が世界のトップクラ

スになった背景には、国内の大手電気メーカー数社が電球製造を行っており、競争が激しかったことと、消費者の製品に対する要求レベルが高かったことがある。米国などでは電球は 6 個や 12 個単位で購入されることが多いと言われているのに対し、我が国では 1 個か 2 個を購入することが多く、不良品の混入の影響が大きく、きずや汚れなどの外観についても他の電気製品と同様に厳しい見方をされている。これらの要求を満たすため製造機械には種々の改良がされた。

電球は構造が単純なので加工工程は少ないが、ガラス加工と真空排気があり、機械設計開発には長年の knowhow の積み重ねによって行われている。

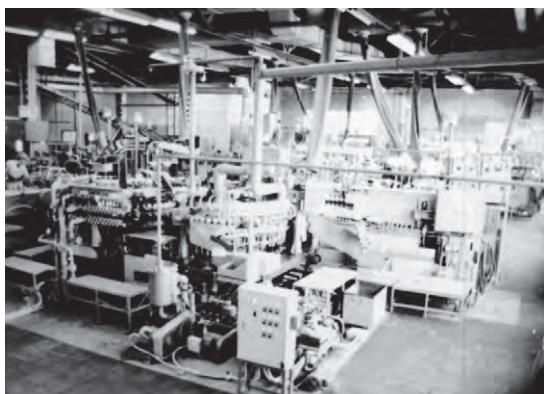


図 6.19 超高速マシンの外観⁵⁾

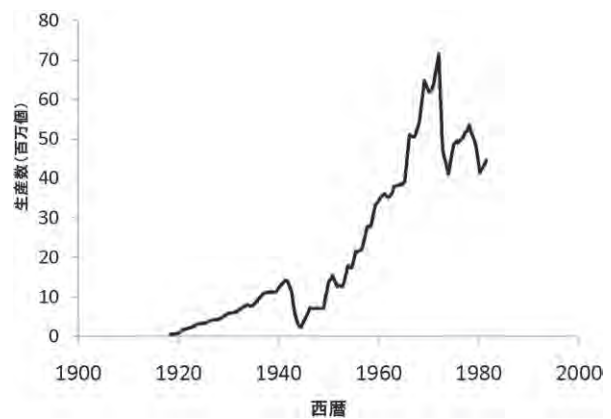


図 6.21 北九州小倉工場での電球生産数



図 6.20 昭和 4 8 年頃の小倉工場⁴⁾

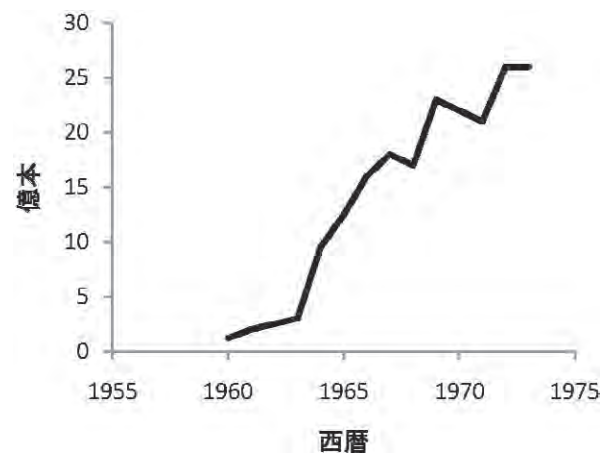


図 6.22 北九州小倉工場での導入線の生産数

表 6.1 小倉工場に設置された電球製造マシン

機械名	設置年代	電球品種	生産速度(秒/個)	作業員数	設計
ユニットマシン	1927	真空電球	13	7~8	GE
T Eマシン	1935	ガス入・真空電球	7	6~7	東京電気が改良
ハイスマシン	1957	ガス入り電球	3	4~5	東京電気改良
Gマシン	1970	ガス入り電球	1	4~8	自社開発

製造機械の設計での課題は

- ① ガラスの材質が軟質ガラスなので歪を残さない加工であること。
(電球は頭上で使用されることが多いので使用中の割れは大きな問題になる)
- ② ガラスバルブ内の残留空気や点灯中に使用部材から放出される水分などを出来るだけ短時間で除去できること。
- ③ 製品価格が安いので、単価の低いばらつきのある部材も使用出来るように機械に余裕があること。
- ④ パーナーや加熱炉の熱で機械が膨張するので、調整可能であること。
(大きい所では数ミリメートル変化する)

などである。

これらの課題の対策案は大部分製造現場での機械の改造で得られており、電球量産機が海外に輸出できる世界トップレベルになった背景には製造現場のレベルの高さも一つの要因である。

約半世紀に亘って開発された電球量産技術は他の分野に応用されており、例えば薬品業界ではアンプル管の製造にはほぼ同じ機構が使われている。電球製造機械の間欠動作の機構は移動時間が短く停止位置精度が高いので、それ自体をインデックステーブルという装置にしていろいろな業界に販売されている。

6.2.3 口金の製造

我が国の電球口金は白熱舎による電球製造が始まった当初(明治23年)は、主に断線した輸入電球から回収した口金を再生して使用していた。輸入電球にはエジソン形とスワン形の口金があったが、明治34年(1901)に東京電気が米国から口金製造設備を輸入し、自社でエジソン口金を製造するようになったので国産電球はエジソン形が主流になった。

当時回収口金を再生する会社が数社あり、一部の会社では後に口金を製造するようになった。なお、断線電球からの口金の再生は導入線が白金でガラスも回収して販売出来たので経営が成り立っていた。東京電気の口金は、当初は社内向けのみであったが量産化が進み、後に外販するようになった。

口金の材料は真鍮が使われていたが、昭和14年(1939)に真鍮が軍需資材になり使用が禁止されたので、亜鉛メッキの鉄製口金が製造された。この口金は酸化などの問題があり再び真鍮に戻っている。昭和25年(1950)に始まった朝鮮動乱の影響で銅が不足してきたのでアルミニウムへの切り替えが検討された。当時米国ではアルミ口金が使われていたが、国

内では真鍮に比べて安っぽく見えるという意見が強く、また性能的に腐食しやすい、半田付けが難しいなどの問題があったのですぐにアルミニウム化は行われなかった。アルミニウム素材の改良などを行い昭和31年(1956)に一部がアルミニウム口金になり、昭和39年(1964)に全面的にアルミニウムに変更され、現在の口金になった。小倉工場では昭和36年から口金を製造するようになり昭和48年には月産1200万個の生産数に増加した。図6.23は小倉工場の口金製造マシンで、図6.24は生産数の変化である。

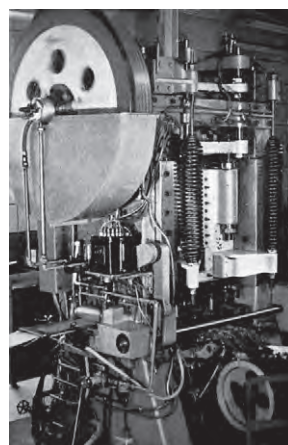


図 6.23 口金製造機械 (小倉工場) ⁶⁾



図 6.24 北九州工場の口金の生産数 ⁴⁾

口金の接着剤は最初石膏であったが接着強度を上げるためセラック(天然樹脂)やポルトランドセメントが使用されるようになった。ガス入り電球になってから口金の温度が高くなったので耐熱性が必要になりフェノール樹脂系の接着剤に変更された。フェノール樹脂は熱硬化形なので加熱状態は現在もマラカイトグリーンと呼ばれる色素を混合し、その色の変化で管理されている。口金の接着剤は付着力が不足すると電球使用時に安全上の問題が発生するので、耐熱性向上の改良は継続して行われた。

6.3 真空ポンプ

真空ポンプはその能力が電球の性能と生産速度を決定するので、電球製造機械で最も重要な装置の一つである。残存酸素や水分は電球の寿命とバルブの黒化に大きく影響するので、到達真空度が高く、排気量の大きいポンプが必要である。初期の電球開発は真空ポンプの発達により開発が進んでいる。

6.3.1 真空ポンプの発達

エジソンが白熱電球の開発を行っていた時代はガイスラー水銀ポンプとスプレングル水銀ポンプの他、補助ポンプとして往復動作式機械ポンプが使用されていた。

ガイスラー水銀ポンプは1855年にガイスラー (H. Geissler) により発明された図 6.25 のようなガラスで作られたポンプで、原理を図 6.26 に示す。排気する電球を配管 D に取り付け、コック C を図のように E に繋がる状態にしておき水銀が入った容器 A を持ちあげ、B の部分を水銀で満たした後、コック C を配管 D につながる位置に回転し、A を下げることで D から電球の空気を抜きとる。次にコック C を図の位置に戻して再び A を上げ B に入った空気を E から外に出し一回の排気を完了する。この操作を繰り返して排気を行うものである。到達真空度は 10^3 mmHg 程度の高い値が得られるが、水銀は比重が大きく重いので (1リッターで 13.5kg) 上下動作に労力が必要で、コックの切り替えも煩雑であった。その後改良が行われ、図 6.27 のようなスインバーン式ポンプと呼ばれる改良形のポンプが開発された。このポンプは機械式補助ポンプを使って水銀の上下動作を不要にしたもので、白熱舎で初めて電球が作られた時に使用されている。

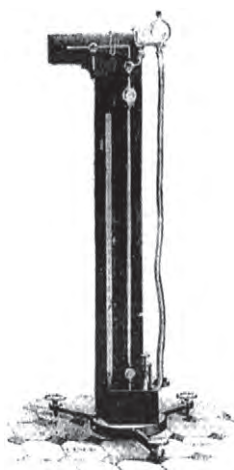


図 6.25 ガイスラーポンプ⁷⁾

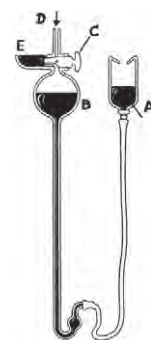


図 6.26 ガイスラーポンプの原理



図 6.27 スインバーン式ポンプ⁸⁾

スプレングルポンプは1865年にスプレングル (H. Sprengel) によって発明された図 6.28 のようなポンプである。原理は図 6.29 に示すように単純でガラス管に上にある容器 A から水銀を注入し、排気する電球に繋がれた枝管 C から空気を吸い込んで、下の水銀溜めに流れ出るようにしたものである。このポンプはガイスラーポンプのように水銀の上下運動や煩雑なコック切り替えがなく、比較的作業性の良いポンプである。図 6.30 は有名なエジソンが初めて電球点灯に成功した時を描いた絵であるが、スプレングルポンプを使用し、台に上がっている人物が水銀を注いでいる様子が見える。尚、エジソンは中央でポケットに手を入れている人物である。



図 6.28 スプレングルポンプ⁷⁾

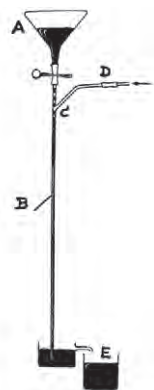


図 6.29 原理図

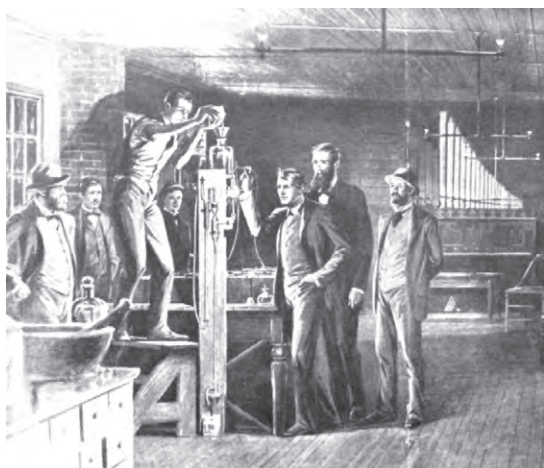


図 6.30 エジソンの電球発明の絵⁹⁾

エジソンは、最初図 6.31 のようなガイスラーポンプと Sprengel ポンプを組み合わせたものを使用していたが、電球工場では水銀をポンプ（スクリューポンプ）で汲み上げて連続稼働できる Sprengel ポンプを採用し、1884 年頃には 500 台の真空ポンプが稼働し数百リッターの水銀が使われていた。その後水銀を流す管を酸化水銀が付着しにくい鉄製にして複数本並列にして排気量を増やした図 6.32 のような真空ポンプが使用されるようになった。⁸⁾

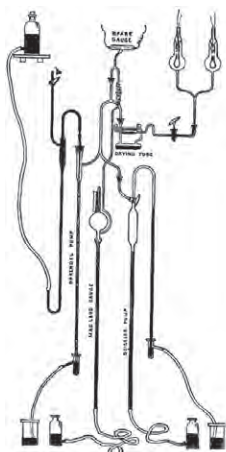


図 6.31 初期の電球排気用ポンプ⁷⁾

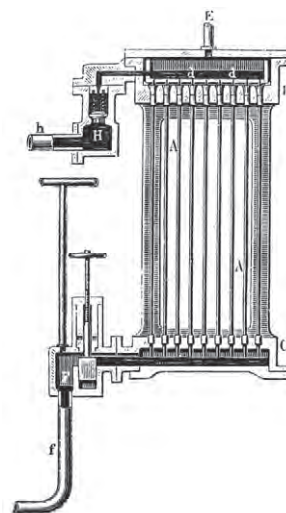


図 6.32 鉄製 Sprengel ポンプ⁸⁾

これらの水銀ポンプは排気速度が遅く、一個の電球を排気するのに 30 分以上かかっていたので、1893 年のマリグナニによる燐ゲッターの発明とゲーデ (W. Gaede) の機械式ポンプの発明により使用されなくなった。

機械式ポンプの歴史は古く 1640 年頃にゲーリック (O. Guericke) が発明した手動式のポンプが最初とされている。その後 1658 年に英国のボイル (R. Boyle) とフック (R. Hooke) によりラックピニオンを使ってピストンを動かすポンプが発明された。ボイルは水銀マンオメータを作り、ポンプによる真空度を測定し、6 mmHg 程度の真空であることを確認している。

その後 2 世紀の間、このボイルのピストンポンプと水銀マンオメータが唯一のポンプと圧力計であった。

約 200 年後の 1850 年にニューマン (Newman) により図 6.33 のような 2 連シリンダー式の改良形が開発された。このポンプの到達真空度は 0.5mmHg 程度で、1874 年頃エジソンも電球製造に使用していた。

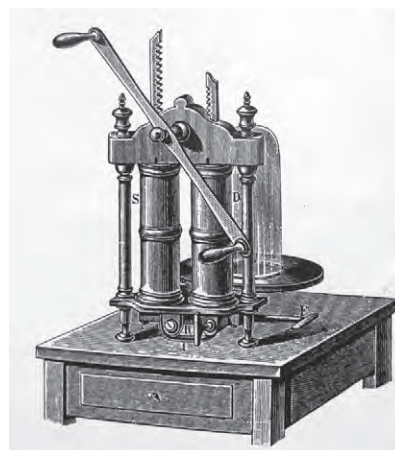


図 6.33 2 連式ピストンポンプ⁹⁾

1900～1920年にドイツのゲーデと米国のラングミュアーにより真空ポンプは大きく進化した。ゲーデは1905年に図6.34の水銀回転ポンプ、1907年に図6.35の油回転ポンプを発明している。これらのポンプはモーターで駆動され、排気量が大きく、水銀回転ポンプは補助ポンプが必要であったが 10^6 mmHgの高真空が得られ電球や真空管の製造に広く使われるようになった。油回転ポンプは当時の加工精度の不足などにより $1 \sim 10^1$ mmHg程度であったので、水銀回転ポンプの補助ポンプとして使われた。



図 6.34 ゲーデの水銀回転ポンプ⁹⁾

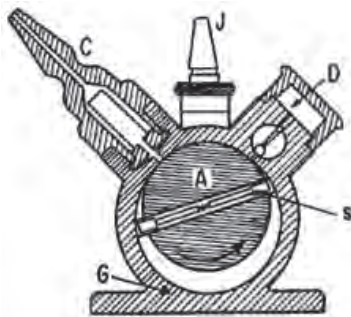


図 6.35 ゲーデの油回転ポンプ⁹⁾

水銀回転ポンプは、到達真空度は高かったが回転数を20 rpm以上に上げることが困難で、大量の水銀を使用する欠点もあったので、その後、拡散ポンプが発明されてからは使用されなくなった。

拡散ポンプは可動部の無いポンプで1915、16年にゲーデとラングミュアーにより各々独自に発明された。このポンプは水銀（後には油）を加熱し、蒸気をノズルから噴き出し空気を巻き込んで排気し、 10^6 mmHg以上の真空度が得られるので、高真空が必要な産業分野で必須のポンプとなっている。又、ゲーデは1909年に分子ポンプを発明しており、このポンプは現在の超高真空用のターボモレキュラーポンプにつながっている。

電球の製造では 10^3 mmHg程度の真空度が得られれば良いので、現在も特殊な製品を除き油回転ポンプが

使用されている。ポンプに要求される性能としては高い到達真空度と排気速度の他に、安価で壊れにくいことや低騒音でメンテナンスが容易であることがあり、センコ形やキニー形などの改良形が開発されている。

ゲーデの油回転ポンプは回転翼型と呼ばれ現在も多く使用されている。

図6.36にゲーデの油回転ポンプの原理図を示す。シリンダー内にローターを内接するように設置し、ローターには翼板が取り付けられており、シリンダー内壁を常に摺動するようになっている。

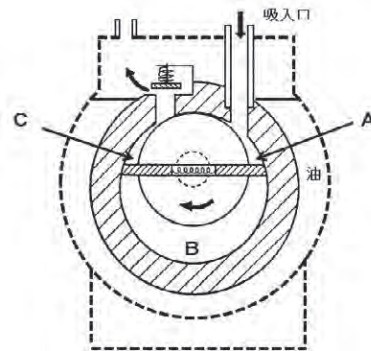


図 6.36 油回転ポンプの原理図

ローターの回転に従い、Aの部分に吸入口から空気が入り、BからCに圧縮され、弁を押し上げ放出される。シリンダー内には潤滑と気密を保つように油が入れており、この油は真空度が高くなって弁を開くためのCの圧力が不足するのを補うため空気と一緒に排出されるので適当量流れ込むようになっている。初期のポンプは油溜めをシャフトの外に取り付けていたが、1925年にポンプ全体を油に浸すように改良された。また到達真空度を高めるためポンプを2段直列にしたものが開発された。2段式ポンプの原理と排気速度の差を図6.37に示す。①と③が排気量48l/minと144l/minの1段式のポンプの性能で②と④が48l/minと144l/minの2段式ポンプの性能で、2段式では 10^3 mmHg以下でも排気性能があることを示している。

電球製造では水蒸気の排気が重要であるが、油回転ポンプでは圧縮工程で凝縮され水になって油に混じってしまい水蒸気の真空度が飽和する問題があった。この対策として1935年にゲーデによりガスバラスト方式が発明された。これは圧縮工程にはいる時に外部から空気を吸入し、蒸気が凝縮しないようにして排気弁から放出するようにしたもので、現在でも油回転ポンプの重要な機能として使われている。

これらの改良により油回転ポンプのみで 10^3 mmHg程度の真空度が得られるようになった。

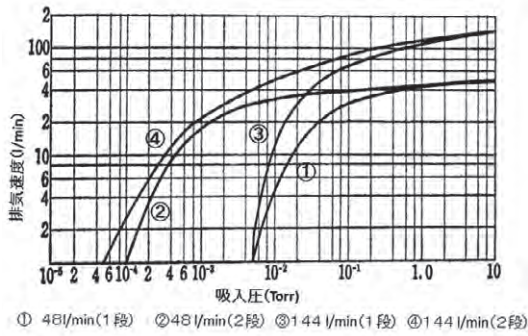
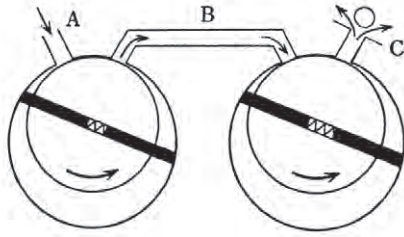


図 6.37 2 段式ポンプの原理図と効果のデータ

その後米国の Central Scientific 社により回転翼板をカム式に変えたセンコ形ポンプ、Kinney Manufacturing 社により揺動ピストン式のキニー形ポンプが開発された。原理図を図 6.38 と図 6.39 に示す。

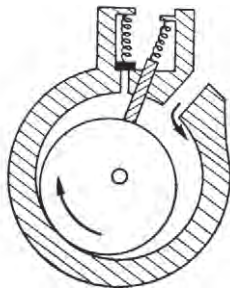


図 6.38 センコ形油回転ポンプ

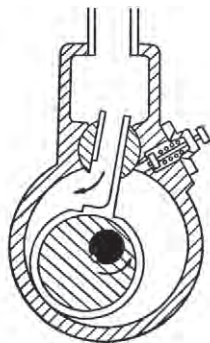


図 6.39 キニー型油回転ポンプ

共にローターが偏心しているので騒音が大きいですが、回転翼が無いので故障が少なく、工場用として用いられている。

6.3.2 我国の真空ポンプの歴史

東京電気 50 年史によると、明治 21 年我が国で初めて電球製造を始めるため藤岡市助が英国より購入した機械一式に含まれていた真空ポンプはスウィンバーン式水銀ポンプである。それ以前に工部大学校では実験室でスプレングルポンプを使用して真空管や豆ランプの実験が行われていた。当時の水銀ポンプはガラス製であったため、酸化水銀がガラス管に付着して真空度が低下する問題が発生するので頻繁に水銀の洗浄が必要であった。明治 25 年 (1892) 頃からは機械式ポンプも併用することにより生産数が大きく増加した。明治 29 年 (1896) に白熱舎から新会社東京白熱電球製造会社になった時、白熱舎から引き継がれた機械の目録よればスウィンバーン式水銀ポンプが 6 台になっている。その後、海外で油回転ポンプが発明されたので、輸入して使用するようになった。

国内での真空ポンプの製造は、島津製作所が明治 14 年 (1881) 頃から往復動式ポンプの製作を始めたのが最初である¹⁰⁾。図 6.40 はそのポンプの明治 41 年 (1908) 頃の改良形で、電球の製造にも使われていた。同社では明治 41 年 (1908) にはゲーデが発明した油回転ポンプや水銀回転ポンプの他マクラウド真空計の製造も開始している。



図 6.40 往復動式真空ポンプ¹⁰⁾

当時の加工技術では十分な精度が得られなかったので、軸封に麻糸を使用して気密を保ち、ローターの加工は手仕上げで行うなど大変苦勞し、真空度を確保するため一台作るのに一週間かかったとされている。

この当時、白熱電球製造に使われた真空技術は他の産業にも応用され、大正元年 (1912) に電球製造会社の日本電球株式会社で国内初の魔法瓶が作られている。

昭和初期頃に電球や真空管の製造がさかんになり真空ポンプの需要が増加したので、島津製作所では米国のセンコ社からポンプを輸入販売するようになり、昭和 8 年 (1933) からは自社で製造するようになった。

図 6.41 と図 6.42 はその当時のポンプである。

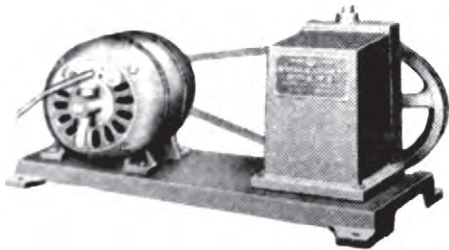


図 6.41 島津ハイバック回転式真空ポンプ¹⁰⁾

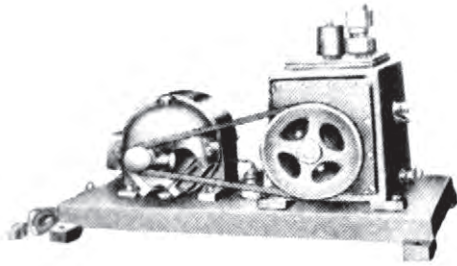


図 6.42 2 段式回転真空ポンプ¹⁰⁾

昭和6年(1931)には国内で大亜真空、昭和7年(1932)に徳田製作所が真空ポンプメーカーとして設立され、国産真空ポンプが普及してきた。

徳田製作所で昭和31年(1956)に管球製造用として開発された図 6.43 のキニー型 2 段多頭真空ポンプ(4CP ポンプ)は、小形で丈夫なことから電球製造に多く使用された。

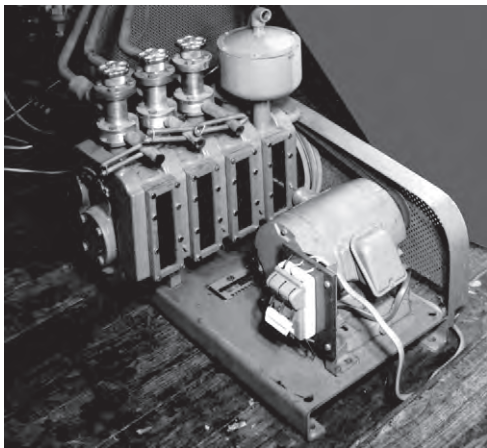


図 6.43 2 段多頭式ポンプ (4 CP 形)

6.4 ガラスバルブ製造技術^{10), 11)}

ガラスバルブの量産技術は電球製造技術と共に発展している。この電球用ガラスバルブの技術史について

は黒川高明、神谷牧男により電球工業会誌¹¹⁾と「電球バルブ 100 年」¹²⁾に詳しく紹介されている。

ここではそれを要約して記述する。

6.4.1 手吹き法

エジソンが電球の開発を始めたときは1インチのガラス管を加工してバルブにしていたが、工場での生産はコーニング (Corning Glass Works) から手ぶき法で製造されたバルブを購入して行われた。この手ぶき法によるバルブ製造は25年間、バルブ成形の機械化が完成するまで続いていた。

白熱舎で電球製造を開始した当初はヨーロッパから鉛ガラスの手吹きバルブを輸入していたが、加工時に酸化鉛が還元され黒くなる不具合が発生していた。このため、岩城硝子商会に黒くならない鉛ガラスバルブの開発を依頼したが成功しなかったので岩城硝子製のソーダ石灰ガラスバルブを明治34年(1901)まで使用していた。このソーダ石灰ガラスは、鉛ガラスに比べて加工性が悪く、不純物が多く赤外線の吸収が大きく割れやすい欠点があったので明治35年(1902)に鉛ガラスバルブの内製化を開始した。元工部省品川硝子製造所内にあった品川硝子会社跡に120kgのるつぽが2個入るジャパン窯を設置して、手吹き法で電球バルブの試作を始めた。

ジャパン窯は、図 6.44 のように熔融ガラスを巻き取り易いように2個のるつぽを45度斜めに傾けて配置し、るつぽの下から石炭を燃焼して加熱し、煙を上部から出す簡単な構造の窯である。るつぽはジャパンるつぽと呼ばれるもので、江戸時代からビードロ吹きに使用されていたガラス溶融用るつぽで、元は信楽の粘度で作られていたが明治28年(1895)頃から、耐熱性を良くするため瀬戸地方の粘土、三石産の蠟石、シャモット(アルミナ・シリカ)を混合調整して作られるようになった。

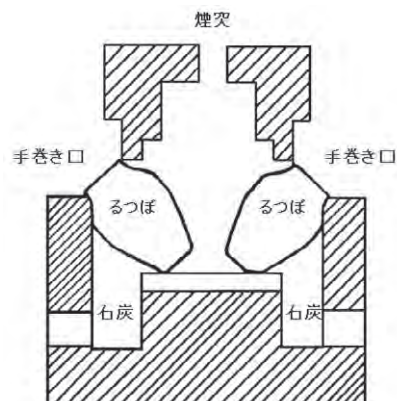


図 6.44 ジャパン窯の構造図

ジャパン窯は燃料効率が悪く、るつぼの温度も低かったため、明治38年（1905）に建設された工場では洋式るつぼ窯を築造して生産が行われた。

手吹き作業は、図6.45に示すように職人が竿と屋バレル鉄パイプに溶融ガラスを巻き取り、金盤の上で回転させてマーベリングし、シャボン玉の要領で息を吹き込んで膨らませ、小僧と呼ばれた補助員が押さえる木型に入れ回転させながらさらに息を吹き込んで成型するという完全な手作業で、生産数は職人一人当たり一日800～1000個程度であった。

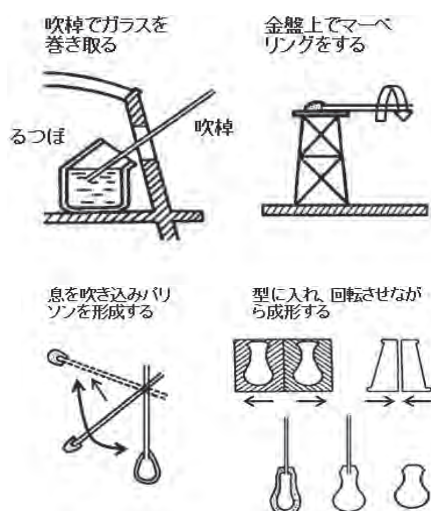


図 6.45 手吹きバルブの工程

この手吹きによる電球バルブ製造は関東の深川、大井、川崎の工場や北九州小倉工場で行われた。

現在も量産機械では製造できない形状のバルブはこの手吹き作業で行われている。

6.4.2 エンパイヤマシン

東京電気では白熱電球の需要急増に伴い、バルブ生産数を増やす必要がでてきたので、大正5年（1916）にGEから図6.46のようなエンパイヤマシン（半自動バルブ製造マシン）を購入し、深川工場に設置した。この機械により生産数は一時間に400～500個になり、手吹きに比べて4～5倍増加した。また品質も均一化され電球の良品率も向上した。

エンパイヤマシンは米国コーニング社の子会社のエンパイヤ社が1912年に開発した世界最初のバルブ成形マシンである。

成形工程は職人がるつぼより吹き棹に溶融ガラスを巻き取り、機械のアームにセットし、金盤が回転して形状成形を行い、アームがスイングする間に空気を吹き込み膨らませた後、金型に入れ成形するもので、手吹き法と同じ方法を機械化したものである。

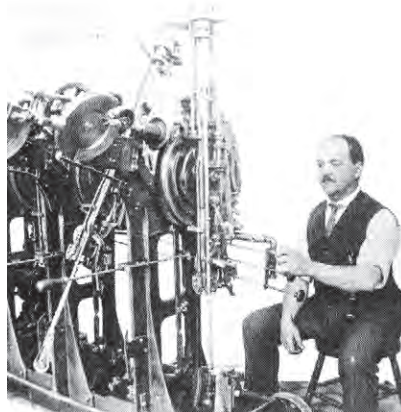


図 6.46 エンパイヤマシン¹¹⁾

エンパイヤマシンは昭和初期に図6.47のように約20台導入され生産数は増加したが、まだ手作業の部分がだったので、さらに生産数を増やすため全自動化が進められた。

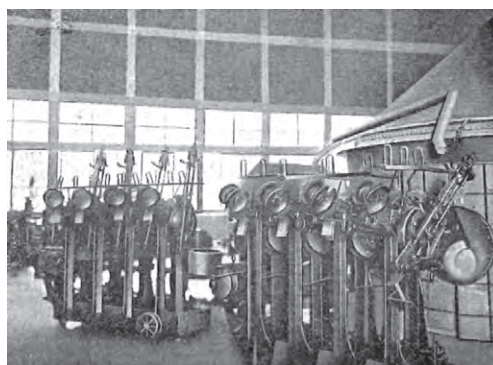


図 6.47 東京電気のエンパイヤマシン設置状態¹³⁾

6.4.3 アイバンホームマシン

東京電気では昭和4年（1929）にGEよりアイバンホームと呼ばれる全自動バルブ製造機2台とジューメンズ式タンク窯とウェルマン・シルバー・モルガン式石炭ガス発生炉を導入し、川崎工場に設置した。

アイバンホームマシンはGEが開発した溶融ガラスを吸い込む方式の24ヘッドの機械で、名称はW・スコットの小説の騎士Ivanhoeからきている。この機械は4の吸い込みアームで溶融炉から同時に4ガラス塊を取り出し、4ヘッドが一組になって動く形式である。

成形工程を図6.48に示す。各工程は①サクシオンヘッドが溶融ガラスを吸い込む、②はさみでガラスを切り取る、③パリソン（ガラスのかたまり）をブローヘッドに移す、④プランジャーをパリソンに差し込む、⑤空気を入れ膨らませる、⑥回転して下向きにする、⑦鋳型で包み込み空気を吹き込みバルブ形にするという流れである。

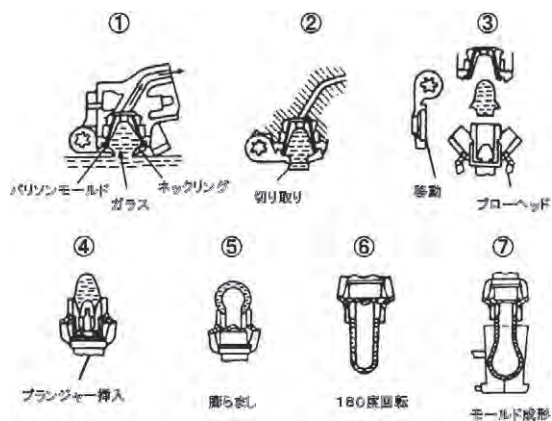


図 6.48 バルブ成形工程

この機械の導入当初は時間あたり 1200～1300 個の生産数であったが、種々の改善により昭和 31 年頃には 4000～4500 個になっている。台数も昭和 11 年 (1936) より国内で製作して 6 台が稼働し、昭和 17 年 (1942) に小倉工場にも移設された (図 6.49)。

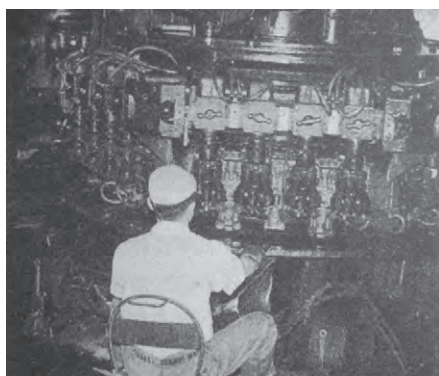


図 6.49 小倉工場のアイバンホーマシン¹¹⁾

6.4.4 リボンマシン

昭和 24 年頃に国内の電球生産数の増加に対応するため、高性能なガラスバルブ製造機械の検討が始められた。米国では 1920 年代後半にコーニングで開発された重力供給方式によるリボンマシンと呼ばれるガラスバルブ製造機械が使用されていた。この機械は一日 100 万個の生産能力がある大きな機械で、国内用には適していなかったため、東京電気では市場規模にあった機械の独自開発に着手した。

設計開始と並行してシミュレーション実験を行いリボン成形が容易に出来ることを確認し、アスファルトを使って実験を行いガラス流量制御が小形の機械でも可能なことを理論解析した。次に回転タイプのリボンマシンの開発を行った。理由は生産数が多いストレート式ではなく、アイバンホーマシンの 2～3 倍程度の機械の開発を目標にしたことと、アイバンホーマシンの機構が使用でき、ランプ製造機械の開発で回転式機

械の知識が豊富であったためである。この機械は昭和 30 年 (1955) に機械は完成したが、モールドの間が狭く、一般電球用のバルブ (60 mm 径) の不良品の除去がうまくいかず、最終的には小形電球用のバルブ製造機として使用されることになった。その後、昭和 33 年 (1958) からロータリー式機械の開発で得られた知見をもとに、日産 50 万個のストレートタイプのリボンマシンの開発が開始され、昭和 35 年 (1960) に製作完了した。さらにこの機械を川崎の工場に設置し、約 2 年間試験を行い、ガラス材料の見直しを含めて種々の改良を行い、昭和 37 年 (1962) に生産機械として完成した。図 6.50 がこのリボンマシンである。図 6.51 はリボンマシンの成形工程の説明図である。

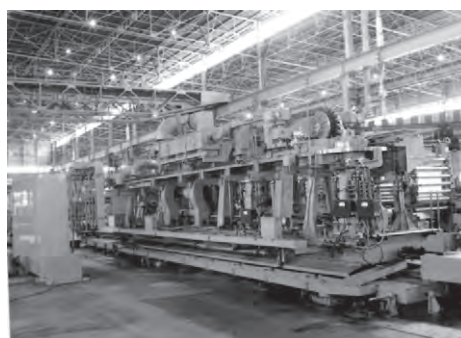


図 6.50 リボンマシン

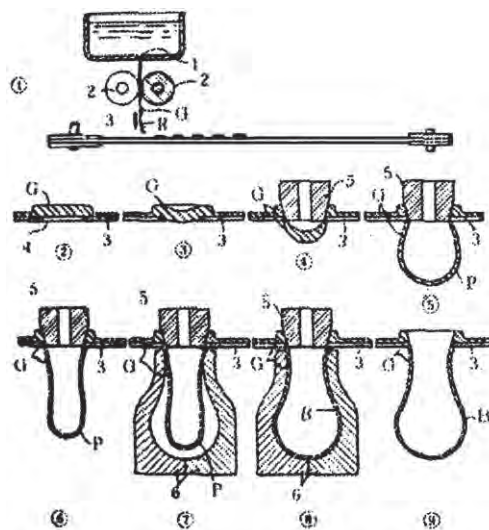


図 6.51 成形工程

しかし、完成当時一般電球の需要が停滞し、一時休止状態になった。昭和 38 年 (1963) になってクリスマス電球や自動車用小型電球の需要が急激に拡大したので、小形バルブ用に改造し生産を行った。その後、昭和 43 年 (1968) に北九州小倉工場で電球の高速機械 (G マシン) が稼働したのに合わせて一般電球用のバルブの製造を開始した。

このリボンマシンは振動が少なく、製造されたバルブの品質（外観や肉厚の均一性）が良いという特長があり、計6台製作され、ポーランドや東ドイツにも輸出された。

その他、電球用バルブの製造機械としてはフランスで開発され、イタリアの機械メーカーが製作したロータリー式の機械（昭和33年（1958年）に日本電気硝子（株）が輸入）やオランダ・フィリップス社が開発したカルセルマシン、それを改造したカリボマシンがある。

6.4.5 ガラス組成

ガラスバルブ製造技術の進展と同様にガラス組成も改良されてきている。表6.2に組成の変化を示す。

表 6.2 一般電球用ガラスの成分

	年代(頃)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	PbO
①チュリンゲン（独）	1885	67.7	3.0	16.0	3.4	7.3	0.3	...
②米国（エジソン）	1889	63.0	0.6	7.6	6.0	0.3	0.3	21.0
③白熱舎（岩城硝子）	1890	73.0	2.0	17.0	...	7.0	...	
④東京電気	1902	58.5	0.3	7.5	4.5	29.0
⑤東京芝浦電気	1929	67.6	2.7	16.4	1.2	7.3	4.2	...

スワンやエジソンが電球試作に使用したガラスは加工性の良い①のドイツ製ガラスとされている。エジソンが実用電球に使用したガラスは②のコーニング製ソーダカリ鉛ガラスであった。我が国で最初の電球試作時に使用された輸入品の鉛ガラスバルブは、前述したように酸化鉛が還元され黒変し良品が出来なかったため、岩城硝子商会に③のソーダ石灰ガラスのバルブを製造依頼した。このガラスは割れやすい欠点があったため明治35年（1902）に④のソーダカリ鉛ガラスが東京電気が開発された。その後、鉛原料が他のガラス原料より高価なので、大正13年（1924）頃から無鉛ガラスの開発が行われ昭和4年（1929）に⑤の電球用ソーダ石灰ガラスが完成し、当時稼働を始めたアイバンホームマシンで使用された。この組成は電球の製造機械やバルブ製造機械の進化に合わせて少しずつ改良され現在に至っている。

6.4.6 電球用ガラス製造の現状

1990年頃から電球の生産数が減少し、さらに海外製の安価なバルブの輸入が増えたので国内生産が困難

になってきた。我が国の生産性は世界トップクラスであったが、表6.3に示すように原材料の価格に大きな差があり、ガラスバルブの単価の差も大きくなっていった。それまで国産バルブは海外製に比べて品質が高く、輸入品はあまり使用されていなかったが価格差が広がり輸入が増えてきた。その結果国内最大メーカーの東芝硝子は電球バルブの生産から撤退した。

表 6.3 電球用溶融ガラスの単価比較¹²⁾

日本	米国	インドネシア	中国
100	39	36	28

*日本を100として換算

6.5 タングステンとコイルの製造技術

タングステンフィラメントの製造技術開発により白熱電球の性能は大きく進歩している。

最初のタングステンフィラメントはユストとハナマンの押線タングステンフィラメント（pressed tungsten filament）であるが、もろく僅かな衝撃でも断線するという欠点があり、クーリッジによる引線タングステン線の発明により使用されなくなった。クーリッジは前述のようにタングステンの基礎研究から製造プロセス、製造機械の開発まで行っており現在もほぼクーリッジと同様な方法で製造されている。

6.5.1 タングステン粉の製法

タングステンの教科書として有名なスミッシェルの本によると「クーリッジの成功は純度の高いタングステンを使用したこと、結晶構造の最適化による」とされている。金属タングステン粉を製造する方法にはいくつかあるがここでは代表的な方法を簡単に記載する。

タングステンの原材料は鉄・マンガン重石 (Fe,Mn) WO_3 や重灰石 ($CaWO_4$) である。鉄・マンガン重石の場合は粉碎して100メッシュ程度の微粒子にしたものに高濃度の苛性ソーダ溶液を加え、加熱してタングステン酸ソーダ (Na_2WO_4) を生成させる。次に純度を高めるため塩化カルシウムを加えてタングステン酸カルシウム ($CaWO_4$) を沈殿させる。これを塩酸でタングステン酸 (H_2WO_4) にする。

さらに不純物を取り除くためタングステン酸をアンモニアで溶解し、アンモニウム塩 (APT: パラタングステン酸アンモニウム ($(NH_4)_{10}(H_2W_{12}O_{42}) \cdot 4H_2O$)) の結晶にする。この結晶を塩酸で分解して酸化タングステン酸にして、良く洗浄してから再度アンモニアで溶解し、アンモニウム塩 (APT) の結晶にする。この繰り返しにより純度の高いAPTにしてから、大気中で加熱し酸化タングステン (WO_3) にする。この酸化タングステン粉にフィラメントの高温での変形 (サグ) を防止するための酸化トリウムなどが添加される。金属タングステン粉はこの WO_3 を水素雰囲気中で還元して得られる。炉の温度は $700 \sim 900^\circ C$ で、金属タングステン粉の粒度分布はフィラメントの高温特性 (対サグ、強度など) に関係するので各社の knowhow になっている。

6.5.2 クーリッジのタングステン線の製法

クーリッジの引線タングステンの製造法の発明はタングステン粉をフィラメントに加工する方法で1910年の特許には製法が詳しく記載されている。その製法は完成度が高く現在でもあまり変わっていない。

上記のようにして得られたタングステン粉末を鑄鉄製の型に入れ圧力を加えて、長さ20cmで一片が1cm程度の四角柱にする。この状態ではまだもろいので、水素中で $1200^\circ C$ 2時間程度加熱して丈夫にしたものを図6.52に示すような装置に取り付け水素雰囲気中でタングステン棒 (インゴット) に電流を流し焼結する。この焼結は短時間 (30分程度) で行われるが、最終的には $3000^\circ C$ 程度まで加熱するので、結晶化が進み不純物が放出される。焼結後棒は硬くなり、常温では加工出来ないが高温にすることにより鉋打可能になる。クーリッジはスエージング・マシンと呼ばれる高速で回転しながら金属線を軽打して加工する機械を改良し、図6.53のような加工機を発明した。水素炉で加熱したインゴットを図6.54のようにスエージング・マシンにかけ、順次ハンマーリングダイスを交換し細くしていく。一回の加工で8%程度細くするので径を1mmにするためにダイスは30個程度使用する。

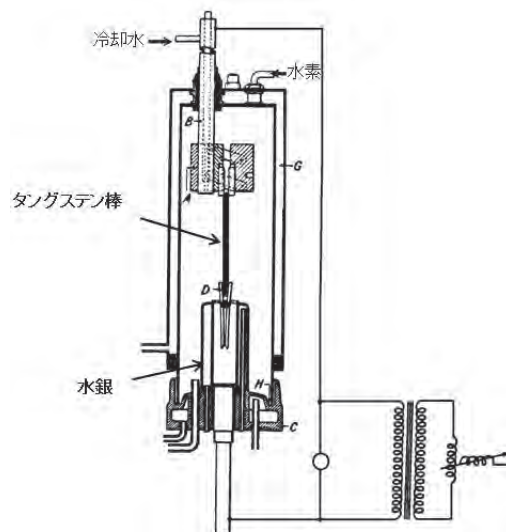


図 6.52 焼結装置の説明図¹⁶⁾

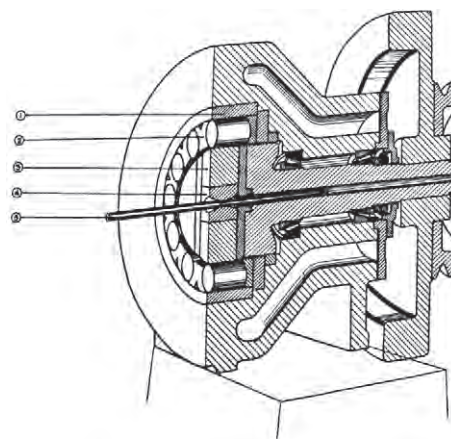


図 6.53 スエージング・マシンの構造¹⁶⁾



図 6.54 スエージング作業 (1925年頃)¹⁵⁾

0.9mm 程度まで細くした後ダイヤモンド・ダイスによる線引きが行われる。

線引きは図 6.55 のように線とダイスを加熱しながら行う。タングステン線には潤滑と酸化防止のためアクアダックと呼ばれるグラファイトと寒天、アンモニウム塩、砂糖を混合した液が塗布される。ダイスは初期にはダイヤモンド製しか使用されなかったが、太いところではタングステンカーバイト製が使用されるようになった。0.25mm 以下の太さの線の線引きには摩耗の点から現在もダイヤモンド製が使用されている。一回の加工で約 10% 程度細くし、1.0mm から 0.01mm まで細くするのに 80～90 回ダイスを通過させる。このようにして加工されたタングステンは強靱で室温で曲げても折れないものになる。

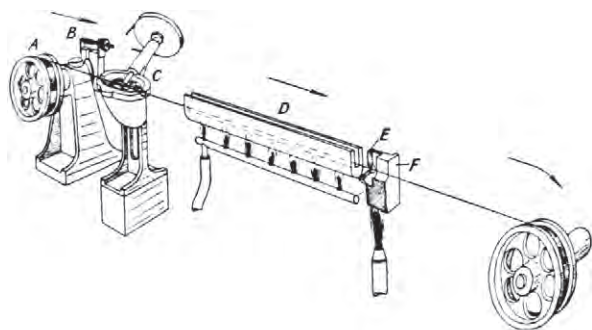


図 6.55 線引き機械¹⁶⁾

なお、フィラメント用のタングステン線は細いものは数十ミクロンなので線径を精度よく測定することが難しいので、通常 20 cm の重量をミリグラム単位で測定し MG という単位で管理されている。図 6.56 は重さを測定するための秤でトーションバランスと呼ばれる。



図 6.56 トーションバランス

6.5.3 我が国のタングステン線製造¹⁷⁾

我が国におけるタングステン線の製造は明治 42 年 (1909) 東京電気が GE から押し出しタングステン製造用の機械、材料を購入して製造を開始したのが最初である。このタングステン線を使用した電球は断線が多く価格も高かったので、明治 44 年 (1911) 年からはクーリッジの発明した引き線タングステンフィラメントを輸入し、引き線タングステン電球の製造販売を行った。引き線タングステンの自社製造は大正 4 年 (1915) から研究が始められ、大正 5 年 (1916) に GE から製造設備を購入して製造を開始した。同時にダイヤモンド・ダイスの加工も研究され自社でダイスを製造するようになった。

当初鉍石溶解は 1 バッチ 50 kg 単位で、粉碎は多摩川の小石を使用し、塩酸沈殿はガラスフラスコで行っていた。大正 8 年 (1919) 頃には粉碎に鉄製ボールを使用するようになり 1 バッチ 150 kg でメタル生産量は 600kg/月程度にまで増加した。昭和 6 年 (1931) にはモリブデンの製造も開始している。

東京電気のタングステン線は自社用として製造されていたので、大正 7 年 (1918) に日本冶金株式会社が設立され一般市販用のタングステン線の製造が開始された。製造技術は米国のインデペンデント・ランプ・アンド・ワイヤー・カンパニーから導入し、京都大学の中澤良夫教授の指導も受けているが、製法はクーリッジの発明と殆ど同じであった。

昭和 6 年 (1931) 日本冶金から独立した技術者により日本タングステン株式会社が北九州の福岡市に設立された。日本タングステンは一時期東京芝浦電気の援助を受けていたが、独自に改良研究を行い、黄色の酸化タングステンに変えて青色酸化タングステンを還元して金属タングステンにする方法を確立し、世界トップクラスの高品質のワイヤーを開発している。

東京電気は昭和 14 年 (1939) 年に東京芝浦電気になり、同年勃発した第二次世界大戦のため軍需用超硬合金の需要が急増したので、昭和 17 年より新たにタングステン・モリブデン工場を建設した。鉍石の溶解は 1 バッチ 4.5 トンで世界第 3 位 (一位の GE は 6 トン) の大きさで昭和 19 年から稼働した。昭和 20 年 1 月から軍需工場になり、製造技術のすべてを国内同業社に公開したので各社の製造技術が向上した。図 6.57 は当時の沈殿タンクで図 6.58 はドープ作業用の皿である。

昭和 30 年頃から各工程の自動化、各省力化が進められ、精錬工程ではそれまでのバッチ法にフローシステムを取り入れ、鉍石粉碎の粒径を 5 ミクロン以下に

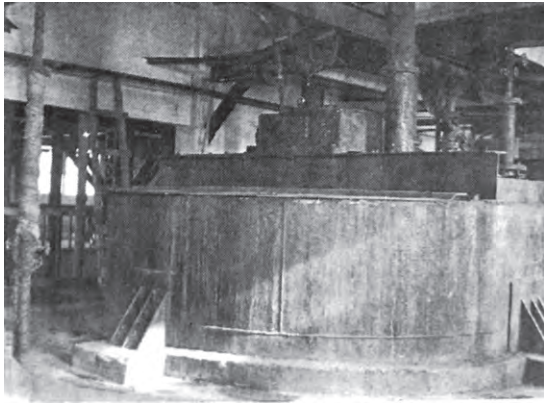


図 6.57 沈殿タンク¹⁷⁾

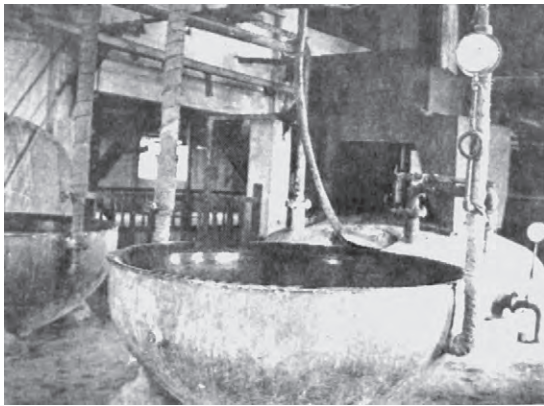


図 6.58 ドープ作業用の皿¹⁷⁾

して溶解工程を簡略化し、タングステン酸ソーダ以降は沈殿槽を最上階に設置し、自然流下方式にした。増加する需要に対応するため線引きでは多段引き法が開発され、それまでは一回に1個のダイスを通していたが、これにより1回で6個のダイスを通すことができるようになった。昭和40年頃からタングステン線の輸出を増やすためさらに合理化が進められた。電球製造やガラスパルプではコスト低下のため生産速度を上げることが行われていたが、タングステン線では長尺化が合理化の目標になっていた。そのためインゴットの大型化が行われ、当初の600gから1.2kgにして、さらに1.5kgになり、インゴットを溶接する技術も開発され一本のインゴットを長くすることが行われた。またスエージング加工も多連化され、スエージングに代わる三方ロール圧延加工も開発された。図6.59は多連スエージング・マシンで図6.60は当時の線引き工程である。

昭和50年代の東京芝浦電気のタングステン製造は世界トップクラスになっており、製造プラントが電球メーカーとして世界的に有名なハンガリーのタングスラム社に輸出されている。また、中国へはインゴットから細線(0.7mm)までの製造プラントが輸出された。



図 6.59 多連スエージング・マシン¹⁷⁾

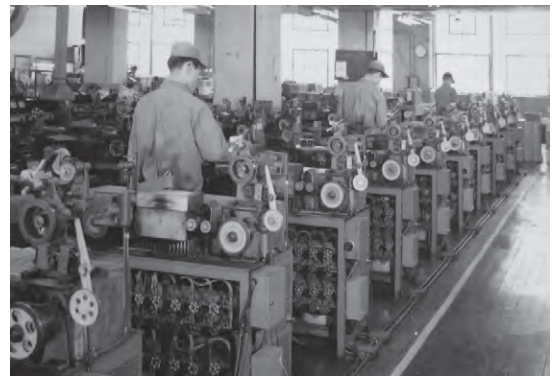


図 6.60 線引き工程¹⁷⁾

タングステン鉱石の埋蔵量は中国が40%で最も多く、生産量も1990年代に入って増加し、現在は中国が世界の生産量の80%以上を占めている。中国製の安価なAPTを輸入できるようになってからは国内での精錬加工は縮小され、タングステン線も中国での生産が増えている。

6.5.4 コイル製造

線引き加工したタングステン線は線径が細くなるにつれて引っ張り強度が高くなり、同時に靱性も増加し二次加工性が向上するのでコイル加工自体は比較的容易であるが、加熱処理や酸処理があるので、現在の製法確立には長年に亙る開発努力が必要であった。線径が数十マイクロンでピッチムラや加工時の歪や金属汚染が残っていると電球の特性に大きく影響する。そのため熱処理方法や芯線の材質など各所にknowhowがあり例えばニッケルは合金になり易いのでステンレスは避けるなど多くの知識が蓄積されている。

コイル製造の最初は図6.61のような機械で手巻きで巻かれていたが、比較的早くから電動の機械になっている。図6.62はその例の一つである。芯線は洋白、鉄などが使用され、一般電球の2重コイルではモリブデンが使用されている。巻き線後設計寸法に切断し、洋白線の場合は硝酸、鉄芯線の場合は塩酸と硫酸

の混合液で芯線を溶解し、中和後、水素炉中で 900～950℃で熱処理を行ってコイルが完成する。二重コイルの場合は心線にモリブデン線を使用し、一次コイルを連続巻き、これを再度モリブデンの心線に巻く。これを加湿水素雰囲気の中で、1500～1600℃で熱処理し混酸（硝酸3：硫酸1：蒸留水1）でモリブデンを溶解除去する。その後アルカリ中和して水洗乾燥後加熱処理して完成する。昭和20年頃（1945）の一次コイルは8000 rpmで巻かれていたが、その後高回転化が進み30000 rpmの高速で巻かれるようになった。昭和30年（1955）頃からは二次コイルの心線にピアノ線を使用しコイルリングが終了した時点で引き抜く自動コイルリングマシンが使用されるようになった。当時のコイル製造の様子を図6.63に示す。大型電球用の太いフィラメントはレースマシンと呼ばれる旋盤形の機械が使用され延性-脆性遷移温度が高いので加熱しながら加工されている。

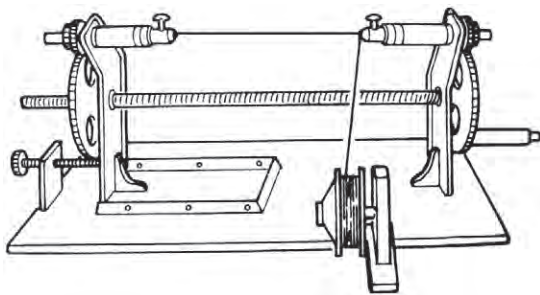


図 6.61 手巻き機³⁾

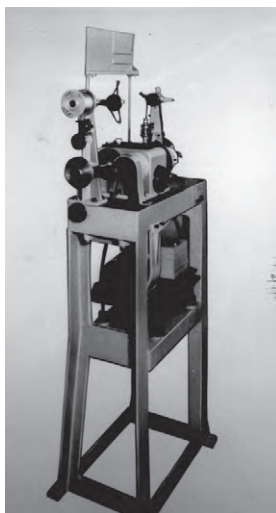


図 6.62 コイルリングマシン



図 6.63 コイル製造工場⁵⁾

参考文献

- 1) Francis Jehl "Menlo Park Reminiscences" Edison Institute (1936)
- 2) J. W. Howell & H. Schroeder 「The History of the Incandescent Lamp」 The Maqua company, (1927)
- 3) 柏木 秀一「電球の製作技術」日本電球工業会 P104,105 (1950)
- 4) 東京芝浦電気株式会社北九州工場「50年史」(1968)
- 5) 東芝ライテック株式会社「マツダランプの後裔たち」(1996)
- 6) 東芝北九州工場パンフレット「東芝北九州工場とその製品」1965
- 7) R. K. Waits, J. Vac. Sci. Technol. A 21 (4), P.881, (2003)
- 8) P. A. Redhead, J. Vac. Sci. Technol. A 23 (4), P.1254, (2005)
- 9) V. L. Fabel, Vakuum-Technik 35, P.128 (1985)
- 10) 島津製作所「島津製作所百十年史」P.306-308 (1985)
- 11) 電球工業会誌 (2003,1～2005,1)
- 12) 東芝硝友会「電球バルブ100年」(2002)
- 13) 本城 巖 マツダ新報 vol.16, 9. P.22 (1928)
- 14) Colin J. Smithells; Tungsten "A treatise on its metallurgy, properties and applications" Chapman & Hall Ltd. (1952)
- 15) J. A. Cox、A Century of Light P.148 (1979)
- 16) 松山 芳治 日本金属学会誌 第一巻 08号 P.533 (1937)
- 17) 東芝金属部品工場「東芝タンモリ 85年のあゆみ」(1994)

7 | 特殊電球の変遷

初期の白熱電球は一般照明用が主で特殊用途用は信号用や電話交換用などしか無かったが、タンゲステン電球が開発されてから種々の製品が製造されるようになった。フィラメントをコイルにすることにより発光源を小さくして集光性を向上した電球や着色ガラスを使用した電球などがそれぞれの分野で開発され発展している。

特殊電球は種類が非常に多いので、ここでは機能別に整理して品種の変遷を表にまとめ、その表に基づいて記述する。

7.1 分光分布を制御した電球

白熱電球の分光分布は基本的にあまり変えることが出来ないが、ガラスバルブの着色とフィラメント温度の変更により分光分布を変えた製品が開発されている。製品の変遷を表 A に示す。

7.1.1 着色電球

ガラスバルブを着色して光の色を変えたカーボン電球は明治 33 年(1900)に東京電気から発売されている。この電球は赤と青色で店舗や劇場で装飾用として使用され、赤色電球は写真現像の時にも使用された。

白熱電球は色温度が低く光色が黄色みを帯びて見えるので、大正 7 年 (1918) に色温度を高くした昼光色電球が開発された。これはガラスに酸化コバルトを加えて青色に着色したガラスを用いたもので、明るさは 30 ~ 40% 低下していたが、自然光と電球による照明との色の見え方が問題になる呉服店や花屋などで使用された。

大正 9 年 (1920) に図 7.1 のようなカナリア電球という名前の電球が開発された。この電球はウランガラスを使用した特殊な電球で、ガラスバルブが黄緑色 (カナリア色) に見える電球である。ウランガラスは蛍光特性を持っており、紫外線や青色光を吸収して 520nm 近傍の光 (黄緑色) を放射するので、明るさを減らさずに、紫外線と青色を減らすことが出来る。効果としては眼精疲労を減らすことが実験的に確かめられ、目に良い電球として販売された。

昭和 32 年 (1957) に無機顔料を入れたシリカをバルブ内面に塗布した淡青色、淡黄色、淡赤色の電球がホテルや店舗のいわゆるムード照明用として発売された。同じような淡青色の電球が昭和 57 年頃から目に優しい

電球として学習スタンド用として販売されている。



図 7.1 カナリア電球

昭和 53 年 (1978) に、ガラスに希土類のネオジウムを入れたネオジウム電球が製品化された。この電球はネオジウム入りガラスが 570 ~ 580nm の黄色光を吸収するので、黄ばみが減り野菜や肉を鮮やかに見せる効果があり、1965 年頃から北欧を中心に使われていた。国内では反射型やボール形など数種類が開発され、主に生鮮食料品店用として販売されているが一般家庭の食卓用も販売されている。図 7.2 に分光分布を示す。

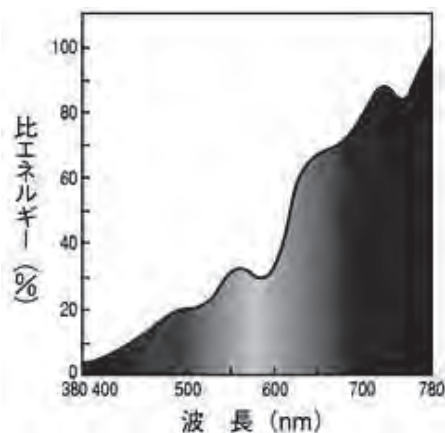


図 7.2 ネオジウム電球の分光分布³⁾

7.1.2 紫外線電球

白熱電球は放電灯に比べて量は少ないが近紫外線を放出する。昭和 5 年 (1930) バイタライタランプという名前で紫外線透過ガラスと高温のフィラメントを組み合わせ紫外線を多くした電球が発売された。これ

はドイツと米国で開発された電球で、当時すでに存在した紫外線水銀ランプより紫外線量が少なく、波長も長いので一般消費者が使用しても安全で、病弱な人や子供部屋、浴室に適しているとされていた。なお、米国では養鶏などの動物用としても販売されていた。昭和7年(1932)にはフィラメント温度を下げた長寿命にしたものが発売され、昭和12年には健康ランプという名称で図7.3のような紫外線透過青色ガラスを使用した電球が開発された。その後、同じような電球が鑑定用電球として発売された。これは蛍光を発する物質を鑑定するためのもので、現在もブラックライト電球として販売されている。



図 7.3 健康ランプ¹⁾

7.1.3 紫外線カット電球

昭和35年(1960)に外面に黄色の塗料を塗布し虫が感ずる500nm以下の波長の光をカットした図7.4のような分光分布の虫よけ電球が発売された。普通の電球に比べて虫が集まりにくいので食品工場などで使用されている。

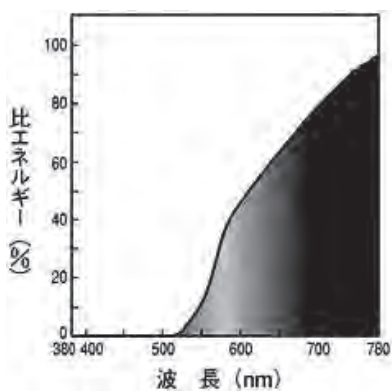


図 7.4 虫よけ電球の分光分布³⁾

電球から放射される紫外線は僅かで問題視されていなかったが1985年頃からのオゾンホール現象をきっかけに紫外線への関心が高まり、照明用光源からの近紫外光が問題になった。ハロゲン電球は紫外線透過率の高い石英ガラスを使用しており、フィラメント温度も高いので、一般電球より多く紫外線を放射する。欧米でハロゲン電球からの紫外線を減らすため紫外線を吸収する石英ガラスを使用したハロゲン電球が開発され、国内でも1992年からセリウムを添加した石英ガラスを使用した紫外線カット形ハロゲン電球が販売されている。

7.1.4 赤外線電球

白熱電球はもともと赤外線が多い光源であるが、フィラメント温度を低くしてより赤外部を増やしたのが赤外線電球である。我が国で最初に赤外線電球が製造されたのは昭和6年(1931)で、図7.5に示すような形の電球が医療、健康用として販売された。赤外線は皮膚の内部に浸透するので血行が良くなるとして販売された。この赤外線の医療効果を利用した電球はガラスバルブを赤色ガラスにして昭和33年(1958)に家庭用赤外線医療用電球という名称で発売されている。



図 7.5 初期の医療用赤外線電球¹⁾

昭和16年(1941)に海軍向けに乾燥用として20V100W、100V250Wの赤外線電球が製造された。白熱電球は加熱、乾燥等に適した光源なので、種々の赤外線電球が作られ、昭和27年にはJIS化が行われている。現在は図7.6のような反射形が多く使われている。

昭和36年(1961)に我が国でも石英ガラス管を使用した管形赤外線電球が製造されるようになり、電球自体の耐熱性が高く小形なので、加熱、乾燥用の他、複写機定着用などとして用途が広がった。



図 7.6 反射形赤外線電球³⁾

赤外線電球で我が国のみで発達したのがこたつ用電球である。昭和 39 年（1964）に図 7.7 下のようなレモン形の赤色ガラスバルブを使用したこたつ用電球が発売された。ニクロム線ヒーターに比べて立ち上がりが早く、赤い光の心理効果もあり広く普及した。昭和 49 年には不透明石英ガラス管を使用した図 7.7 上のような電球が開発された。こたつ内の空間が広がるのでレモン形に代わって普及したが、近年はこたつ内にファンを取り付け、ニクロム線を不透明石英ガラス管に入れたヒーターが増えている。



図 7.7 こたつ用電球

7.1.5 赤外線カット電球

反射形電球によるスポット照明が普及するに従って電球から放射される赤外線が問題視されるようになり、照射光の赤外線を減らした電球が開発された。昭和 36 年（1961）にシールドビーム形電球の反射鏡にゲルマニウムと酸化チタンの干渉フィルターを蒸着したクールレイランプ（図 7.8）が東京芝浦電気が開発された。反射鏡のフィルターは可視光を反射し赤外線を透過するので通常のシールドビームランプに比べて照射光中の赤外線が約 1/3 になり、特に皮膚を透過する $0.9 \mu\text{m}$ からの赤外線を減らす工夫がされていた。

分光分布を図 7.9 に示す。この電球は照度が高く熱が問題になるスタジオ照明や相撲中継の照明に使用されたが、価格が高かったので、翌年前面ガラスに赤外反射特性を持った透明導電膜（ SnO_2+Sb ）を熱分解法で塗布したクールビーム電球が開発され、店舗照明用として普及した。



図 7.8 クールレイランプ

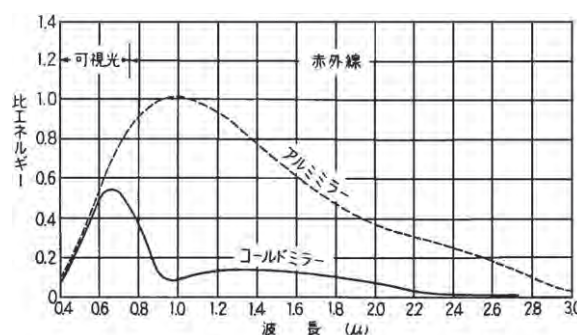


図 7.9 クールレイランプの分光分布⁴⁾

昭和 45 年（1970）にはフッ化マグネシウムと硫化亜鉛の干渉フィルターを使ったダイクロイックミラー付きハロゲン電球が光学機器用に開発され、昭和 56 年（1981）に店舗用が開発された。小形で熱線が少ないので店舗照明用として普及している。

7.2 配光を制御した電球

タングステンコイルフィラメントが発明されて急速に発展したのが配光を制御した電球である。フィラメントをコイルにして発光源を小さくすることにより、反射鏡やレンズで配光制御が可能になるので種々の電球が開発されている。この発光源を小さくできることは電球の特長の一つで、効率の低さを補えるので現在も反射鏡付電球が多く使用されている。製品の変遷を表 B に示す。

7.2.1 反射形電球

反射形電球は光を一定方向に集めるので高い照度が得られ、看板照明や店舗用として使用されている。最初のバルブに反射膜を付けて配光を変えた反射形電球は明治33年(1900)に藤岡市助により考案され、白熱舎から売り出されている。この電球はカーボンフィラメントで図7.10のような形状をしており、一般電球に比べて3倍の明るさが得られたとされている。昭和5年(1930)にバルブ形状をキノコ形にして反射面を大きくしたアルミ蒸着の反射形電球が発売され、その後反射鏡の部分のバルブの形状を回転放物面や回転楕円面にして、配光を良くした図7.11のような電球が商品化されている。昭和51年(1976)に米国で回転楕円反射面に銀を蒸着し、集光性を高めた電球が開発された。この電球は75Wで150W相当の直下照度を得られる電球で、昭和54年(1979)に国内でも商品化された(図7.12)。



図 7.10 藤岡式反射形電球¹⁾



図 7.11 反射型電球³⁾



図 7.12 回転楕円反射形電球³⁾

7.2.2 シールドビーム電球

シールドビーム電球は自動車ヘッドライトとして昭和29年(1954)から生産されていたが、フィラメントを商用電圧用に変更し口金をE26にした電球が昭和37年(1962)に開発された。外観は図7.13に示すようなもので、押型で製造したガラス反射鏡にアルミ蒸着し、端部をナイフエッジにしたコパール合金のつばを通して導入線を入れ、反射鏡の焦点にフィラメントを配置して前面ガラスレンズを溶着したものである。構造図を図7.14に示す。反射形電球より強く集光でき、投光用、手術灯用などが作られ、電球それ自体の形状も装飾効果があるので店舗用としても普及した。



図 7.13 シールドビーム形電球³⁾

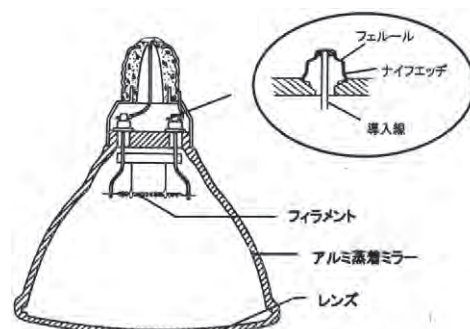


図 7.14 シールドビームランプの構造

参考として図7.15にきのこ型、回転楕円型反射電球、シールドビーム電球の配光パターンを示す。



きのこ型反射電球



回転楕円反射形電球



シールドビーム電球

図 7.15 反射形電球とシールドビーム電球の配光³⁾

昭和 8 年 (1933) に防空のための灯火管制用電球が作られた。これは図 7.16 のようにガラスの透明部分を頭部のみにして、他の部分は青色と白色の塗料を重ねて塗布して光を遮断したものである。昭和 13 年頃から種類が増え、家庭用や店舗用などが製造された。

反射形電球とは逆にバルブ先端部分の外面に反射膜を付け、フィラメントから直接光が下に出ないようにした間接照明用電球が 1935 年米国で製造された。我が国では、昭和 36 年 (1961) にシルバーボウルランプとして発売された (図 7.17)。電球のみで間接照明ができるので、現在も販売されている。



図 7.16 灯火管制用電球



図 7.17 間接照明用電球

用途が異なるが昭和 55 年 (1980) に図 7.18 のようにバルブ頭部にリング状にアルミ反射鏡を付けたバンドミラー電球が交通信号機用として開発された。従来の 100W 電球と同等の輝度が 70W で得られるので日本全国に普及したが、現在は LED 化が進んでいる。



図 7.18 バンドミラー形交通信号灯

昭和 56 年 (1981) にハロゲン電球とダイクロミックミラーを組み合わせて赤外線を減らした電球が発売され、小形で色温度も高いことから店舗用として普及した。100W など高出力型では耐熱性のある酸化チタンとシリカが干渉フィルターの材料として使用されるようになり、昭和 60 年 (1985) には反射鏡を多面体反射面 (マルチファセット) にした製品も発売された。さらに反射鏡の反射波長を変更して光の色温度を 3400 ~ 4200K と高くして光に高級感を持たせた電球も開発され、ガラス製品や宝石・貴金属店で使用されている。図 7.19 に外観、図 7.20 に原理図を示す。



図 7.19 ダイクロリックミラー付きハロゲン電球³⁾

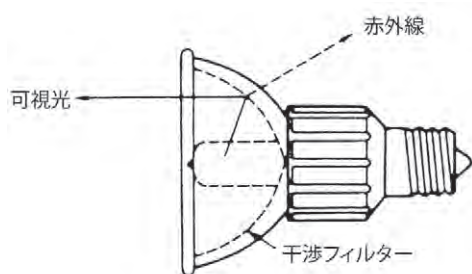


図 7.20 原理図

7.2.3 投光用電球・スポットライト用電球

投光用電球はフィラメントをコンパクトにして、器具による集光性が高くなるようにした電球である。我が国では大正4年(1915)に初めて製作された。図7.21は初期の1kW投光用電球である。

映画撮影やスタジオで使用されるスポットライト用電球はコイルを平面状にして、寿命を犠牲にして効率と色温度を高くしたものである。最初はカーボンアークランプが使用されていたが、安全性と取り扱い易さから白熱電球に代わってきた。劇場や映画撮影用では高い照度が必要なので大ワット化が進められた。我国では大正14年(1925)に10kWが試作されたが、工業的に製造を始めたのは昭和4年頃で2~10kWの電球が製造された。その後20kWがラインナップされた。さらに大ワット化が進み、昭和32年(1957)に30kWが開発され、昭和35年に図7.22に示すような50kWが開発された。これらの大きなワットの電球ではタングステンの粉が封入されており、電球を振ってバルブの黒化を取り除いていた。

30kWと50kWの電球の特性は

	電圧	電流	効率	色温度	寿命	重量
30 kW	100V	300A	32.5 lm/W	3350K	500Hr	7.6kg
50 kW	100V	500A	34.0 lm/W	3400K	—	23.14kg

である。

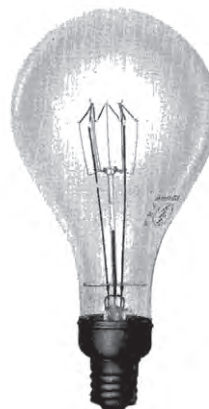


図 7.21 初期の投光用電球 (1kW)¹⁾



図 7.22 50 kW バイポスト電球
(東芝ライテック(株)所有)

1959年にハロゲン電球が発明されてからは、これらの電球はハロゲン電球に代わっていった。ハロゲン電球にすることにより、黒化が無くなり、バルブを小さくできるので器具も小形になるなど大きな利点がある。

我が国では昭和36年(1961)に投光器用沃素電球が製造されたのが初めて、昭和44年(1969)に両端口金形の200V4kWが製作されている。昭和37年頃からテレビのカラー化に伴い、スタジオで使用される電球はハロゲン電球化が進み、昭和38年(1963)に両端口金形の500W~1kWの電球、昭和42年(1967)にはG形口金の1kW、2kWが発売された。これらはカラー撮像管の感度に合わせた色温度3200Kで、平面フィラメント形状をしている。図7.23に2kWの例を示す。図7.24は20kWのバイポスト電球とハロゲン電球を比較したものである。

スタジオ用ハロゲン電球は演色性が高く、調光が容易なので一部はメタルハライドランプに代わっているが、現在も多く使用されている。



図 7.23 スタジオ用ハロゲン電球⁵⁾
100V2kW 3050K 500Hr

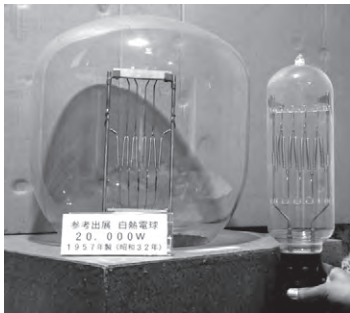


図 7.24 20kW バイポスト電球と 20kW ハロゲン電球
(江東電気所有)

7.2.4 自動車用ヘッドランプ

ヘッドランプは視認性や対向車へのグレアなど安全性に関係するので高精度の配光制御が要求される電球である。

自動車のヘッドランプとして 1870 年頃には灯油ランプが使われ、1888 年にアセチレンランプが登場している。白熱電球を最初にヘッドランプとして使用したのはフランスで 1909 年と言われている。我が国では大正 8 年 (1919) に自動車用ガス入り電球が製作されたのが始まりである。昭和 3 年 (1928) には 6～8V の電圧用で 32/3 燭、32/21 燭、50/3 燭、50/21 燭などの切り替え点灯用電球が発売された。昭和 2 年 (1927) には対向車のまぶしさを減らす目的で図 7.25 のようなひだ付きバルブの電球が開発されている。

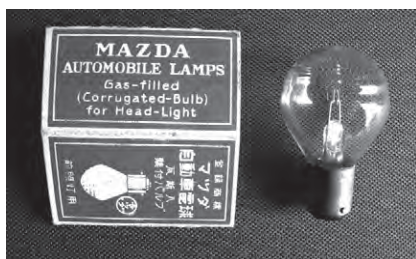


図 7.25 ひだ付きヘッドランプ
(東芝ライテック (株) 所有)

自動車が増加するに従ってより配光が制御されたヘッドランプが必要になりフィラメントと反射鏡、レンズが一体になった図 7.26 のようなシールドビームランプが開発された。

シールドビーム電球は 1940 年に米国で発売され、新車への取り付けが義務化されたため急速に普及した。我が国では昭和 29 年 (1954) に主コイルが 6V45W で副コイルが 35W の電球が発売された。昭和 36 年に違いビームと補助走行ビームの 2 本のフィラメントを持った電球を組み合わせた 4 灯式シールドビームが発売された。従来の 2 灯式より配光性能が良かったので短期間で普及した。その後、前面ガラスをアンバー色に着色したフォグランプや自動車のデザインからの要求で図 7.27 の角形シールドビーム電球が開発され、昭和 51 年 (1977) から生産が開始された。シールドビーム電球は国内の自動車台数の増加により、年間生産数が昭和 37 年 (1962) の年間 350 万個に対し昭和 45 年 (1970) には 2400 万個に急増した。全体がガラスのシールドビームランプの他に、反射鏡を金属にしたセミシールドランプとメタルバックランプも昭和 31 年 (1956) から発売されている。セミシールドランプは図 7.28 に示すように小形電球を装着したもので電球の交換が可能なものである。



図 7.26 シールドビームヘッドランプ¹⁾



図 7.27 角型シールドビームランプ¹⁾

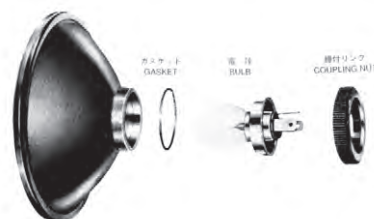


図 7.28 セミシールドヘッドランプ²⁾

自動車の性能向上と台数の増加により、ヘッドランプの視認距離向上の要求が強まり、ヘッドランプ用ハロゲン電球の開発が進められた。開発は主にヨーロッパで進められ、国内でも昭和40年(1965)にH-1タイプ(縦形単フィラメント)、昭和42年(1967)にH-3(横形単フィラメント)がフォグランプ用として発売された(図7.29)。走行用とすれ違い用の2本フィラメントを入れたハロゲン電球はハロゲンサイクルの問題があり難しいとされていたが1969年オランダで開発に成功し、国内でもH-4タイプ(12V60/55W)(図7.30)が多く使用されるようになった。昭和55年(1980)に硬質ガラス(アルミナシリケートガラス)を使用したH-6タイプのハロゲン電球がセミシールド形用として開発された。この電球はモリブデン線をシールド部に使用しているため、フィラメント位置精度を高く出来、封入ガス圧を5気圧以上封入し効率も向上していた。米国ではシールドビーム電球しか認めていなかったが1983年交換式前照灯が認められ、世界的にハロゲン電球を使用した異型ヘッドランプの普及が進んだ。ハロゲン電球は小形なのでヘッドランプのデザイン変更も容易になり、1986年にはドイツでプロジェクターランプ登場し、翌年1987年日本でも発売された。

その後車のデザインに対応しやすいプラスチック製のヘッドランプも開発され、紫外線に弱い欠点があるので硬質バルブ製の電球が使用されている。平成10年(1998)には赤外線反射膜付きヘッドランプが製品化され、効率が向上したが、更に、大幅に効率が高いHIDランプが開発され、普及し始めている。

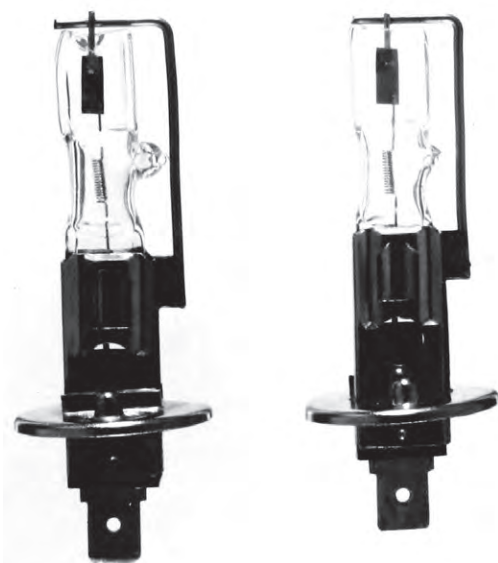


図 7.29 ハロゲンヘッドランプ²⁾

7.2.5 光学機器用電球

光学機器用電球の中で一般的なのは映写機用電球で、大正8年(1919)に活動写真用として製造された(図7.30)。ただし興行用の35mm映画用にはカーボンアーク灯(後にはキセノンランプ)が使用されていたので、白熱電球は16mm以下の映画用であった。



図 7.30 H4形ヘッドランプ

映写用電球は高い輝度の小さな光源である必要があるので、昭和8年(1933)に2重コイルが出現したのは大きな進歩であった。輸出品を含め種々の電球が販売されたが、フィラメントの色温度は3000~3200℃と高く寿命も25~50時間程度である。昭和34年(1959)には8mm映写機用として8V50Wのミラー内蔵形(通商タヌキ)(図7.31)が発売され、性能が高く好評であった。ハロゲン電球が登場してからは図7.32のようなミラーと組み合わせた小形映写用が開発され、昭和45年(1970)にコールドミラーと組み合わせたものが発売された(図7.33)。この電球はその後店舗用のダイクロミラー付きハロゲン電球に繋がっていった。



図 7.31 初期の映写用電球¹⁾



図 7.32 ミラー内蔵形電球²⁾



図 7.33 ミラー付きハロゲン映写用電球²⁾

7.3 表示用小形電球

我が国の最初の表示用小形電球は明治 25 年（1892）に白熱舎が海軍からの注文を受けて製造した信号灯用と電話交換用の電球である。その後大正 5 年（1916）に専用の工場が設立され量産が開始された。明治 36 年（1903）にはランプ式並列電話交換機用に輸入電球が使用され始め、大正の初めに国産化された。当初は大手が製造していたが、次第に中小の専門メーカーで生産されるようになった。昭和 30 年にカーボン電球とタンゲステン電球の両方が JIS 化されている。

その他、配電盤用、ラジオパネル用、浮標灯用、漁網表示用、エレベーター用、計器用など種々の用途の電球が生産された（図 7.34）。



図 7.34 表示用小形電球の例²⁾

表示用電球として最も多く生産されるようになったのは自動車用である。

昭和 4 年（1929）にテールライト用の 6～8V10 燭光のガス入り電球が作られ、翌年には 3 燭光の電球が製作された。その後ルームライト、スピードメーター、方向指示用などが製造されるようになった。自動車の数量が増えるに従って取り付け易さや価格低下の要望が強くなり、昭和 36 年（1961）に英国でウエッジベース形の自動車計器盤用電球が開発された。昭和 38 年（1963）AEI 社と特許契約をして国内でも T10、12V3.4W が生産されるようになった。

ウエッジベース電球は図 7.35 のように口金が無く導入線を封止部で折り曲げ計器基板に付けられたソケットのばねで電気接触を確保している。この構造により価格を安くでき、ソケットに押し込むだけで設置できるので作業性が良くなるという利点がある。



図 7.35 ウエッジベース電球

最初は真空電球であったが昭和 44 年（1969）にはガス入りの 12V10W が製作された。その後品種と生産数が増え、性能も向上し、昭和 59 年（1984）キセノンガス封入車幅灯用が開発され、フィラメント材料として振動に強いレニウム入りタンゲステンを使用した品種も開発されている。

自動車用電球は信頼性が重要で厳しい品質管理が行われている。平成 15 年頃には四国のハリソン東芝ライティングが世界の 40% 近くを生産していた。

現在はより効率が高く壊れにくい LED 電球に代わっており、生産数は減少している。

7.4 小形特殊電球

小形電球の分野で表示用以外に電球の特性を生かした医療用や顕微鏡用電球が 1950 年頃から開発された。胃カメラ用などの医療用は血管や胃壁の色の見え方が重要で演色性の良い電球が適している。図 7.36 は昭和 29 年（1954）に開発された胃壁のカラー撮影用電球でかまぼこ形のバルブを使用し観察用と写真撮影用

の2個の電球が組み合わされている。医療用は各機器に合わせて設計されるので種類が多くあり、小さいものは径が2mm以下である。



図 7.36 胃壁撮影用電球
(細測電球株式会社所有)

その他、一時期腕時計用として超小形電球が製造された。図 7.37 に示すように径が 0.5mm 程度でフィラメントは $2.5 \mu\text{m}$ の極細線が使用されていた。これらも最近では LED 化が進んでいる。

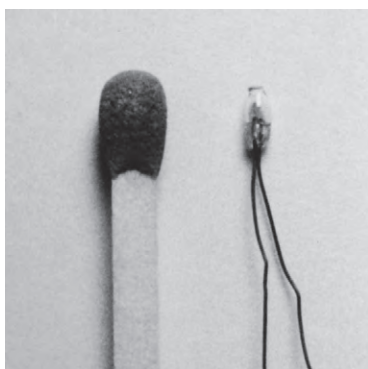


図 7.37 超小形電球²⁾

7.5 装飾用電球

装飾専用ではないが、全光電球という名称で拡散性の高い膜を塗布してバルブ全体が均一に光るようにした電球が昭和 6 年 (1931) に発売された。膜による光吸収は 10% 程度で、照明用として使用しても問題は無く、点灯しない状態では装飾効果があるので店舗や一般家庭でも使用された。この種の電球は一時期生産中止されていたが昭和 28 年 (1953) に内面塗装にシリカなどを使用して吸収を 5% 程度まで減らした電球が発売された。ガラスバルブ形状を球形にしてボール形電球としたものも発売された。現在の塗装膜はチタニアとシリカの混合粉が塗布されている (図 7.38)。



図 7.38 ボール形電球³⁾

装飾用電球はガラスバルブの形状を変え、着色したもので代表的なものがクリスマス電球である。大正 5 年頃米国から注文があり、その後トンガリと呼ばれた炎型や果物、花、人形などの形をした変形電球 (ファンシーランプ) として大量に輸出された。例を図 7.39 に示す。



図 7.39 ファンシーランプの例

照明用途も兼ねた一般露出用ろうそく型電球 (シャンデリア電球) が大正 12 年に発売され現在も販売されている。大正 15 年に赤、黄、緑、青、濃青など数種類の色を付けた着色電球が発売された。現在、シャンデリア電球以外は殆ど国内での生産が無くなっている。

参考文献

- 1) 東京芝浦電気「東京電気株式会社五十年史」1940
- 2) 日本電球工業会編「日本電球工業史」日本電球工業会 1963
- 3) 東芝ライテック株式会社 東芝ランプ総合カタログ (2010)
- 4) 森 礼於、他 東芝レビュー、vol.16、10、P. 1271 (1961)
- 5) 江東電気株式会社カタログ

8 | 電球以外の光源

照明用光源には白熱電球以外にいくつかあり、時代によりそれぞれの光源と性能と価格の競争が行われている。電球が使われ始めた当時にはろうそく、油ランプ、ガス灯、アーク灯が使用されており、電球が普及してから30年後頃に蛍光ランプ、HIDランプが普及し始め、近年にはLEDの性能が大きく向上し強力な競争相手になっている。この章ではそれらの光源の進化の歴史と白熱電球との関係について記述する。表Cに白熱電球が登場する時代の光源の歴史の概略、表Dに電球が普及してから競合した光源の歴史の概略を示す。

8.1 石油ランプ

油を使ったランプの歴史は古く、旧石器時代から獣脂と植物繊維の芯を使ったオイルランプが使われていた。その後古代ギリシャ時代に植物性油が使われるようになり、ろうそくと並んで照明光源として使われていた。1780年にアルガン (A. Argan) によりガラス製のほやと筒型の芯を組み合わせたランプが発明され明るさと使いやすさが大幅に改良された。原油をランプの燃料に使うことは古くから行われていたが、灯油を使用するようになったのは、1859年に米国で石油掘削に成功し、シリマン (Benjamin Silliman) により原油から精製した灯油を使用する効率の良い石油ランプが発表されてからである。この石油ランプは燃料が安価で性能が良かったので世界中に普及した。

我が国に入ってきたのは明治維新直前の1860年頃とされている。当時使用されていた灯明や行灯に比べて明るさが数倍(約3燭光)であったことと灯油が菜種油より安価であったことから急速に普及した。明治2年(1869)に国内で「ほや」の製造が始まり、その後ランプ用笠、バーナーの国産化が行われるようになり、種類も平芯、両芯、細芯など開発され一般家庭では平芯が使用された。石油ランプの例を図8.1に示す。

石油ランプはガス灯や電灯と異なり配管や配線が不要で、ランプと灯油を購入すれば使用でき移動も簡単だったので、地方の町村では電球が全国に普及する昭和初期まで使用されていた。

白熱電球と比較すると、明るさは一般的な石油ランプの場合当時のカーボン電球に比べて半分程度で、同じ明るさにするための石油代金はほぼ電球の電気料金と同じであった。しかし、火災などの危険性の問題と、点灯する際「ほや」をずらして火を付ける必要が

あるなどの短所があり、電球の普及に伴い使用されなくなった。



図 8.1 石油ランプ

8.2 ガス灯

ガスを照明に使い始めたのは英国のマードック (W. Murdoch) で、1792年に石炭ガスを燃やしてガス灯の実験を行っている。マードックはガス灯だけでなく石炭の乾留装置、石炭ガスの貯蔵タンクや配管などガス灯のシステムを開発し、1813年にロンドンでウエストミンスター橋の照明を行った。後にエジソンが電灯システムを開発する際、このマードックのシステムを詳細に調べたことは良く知られている。

ガス灯は当時使われていたろうそくや油ランプより明るく、点けたり消したりするのが簡単であったので急速に普及した。さらに1880年にオーストリアのウエルスバッハにより高性能なマンテルが発明された。1891年に改良されたマンテルでは、裸のガス灯に比べて明るさが約5倍になり色温度の高い白い光が得られるようになったので、世界各地で使用され、電球の普及を30年遅らせたと言われている。このマンテルはトリア (ThO_2) に微量のセリア (CeO_2) を混合し木綿の網に染み込ませたもので、トリアの選択放射特性を利用したものである。

我が国では明治5年(1872)に横浜で初めてガス灯が点灯され(図8.2)、2年後に東京で点灯された。その後、神戸、長崎など各地でガス会社が設立され、ガス灯が広がった。



図 8.2 ガス灯

ガス灯は白熱電球と似たシステムで普及しており、費用も電球に比べて安かったので電球と激しい競争が行われた。特にマンツルが發明されてからはガス灯の方が白い光を出せるようになったので、衣料店などではガス灯を好んで使用していた。表 8.1 に明治末期の東京市内のガス灯と電球の取り付け数を示す。白熱電球が急増しているが、ガス灯も増えている。

表 8.1 東京市内のガス灯と電灯の灯数の変化¹⁾

年	ガス灯	電灯
明治 37 年 (1904)	103,733	106,977
明治 39 年 (1906)	142,704	191,444
明治 41 年 (1908)	201,829	344,571
明治 43 年 (1910)	267,701	490,341
明治 45 年 (1912)	667,701	1,177,448

ガス灯も、石油ランプと同様に火を使うため安全上の問題や利便性で電球に劣っていたため、電球の性能向上と価格低下とともに使用されなくなって行った。

8.3 アーク灯

アーク灯は白熱電球の可能性を提案したディヴィーにより 1808 年に發明された。アーク灯は二つのカーボン電極を近づけて電圧をかけて電極間に放電を起こし発光させるものである。発光させるためには高い電圧と大きな電流が必要で、カーボン電極の間隙を一定に保つ必要もあるので種々の改良が行われた。実用化は発電機が発達した 1870 年代になってからで、米国では 1877 年にウォレス (William Wallace)、が最初の実用化を行い、1879 年にブラッシュ (Charles F. Brush) によりアーク灯電灯会社が設立されている。我が国では明治 11 年 (1878) にエアトンの指導で藤

岡市助、中野初子らにより工部大学校でアーク灯が点灯された。その後明治 15 年 (1882) に東京電灯により銀座でアーク灯のデモンストレーション点灯が行われた。アーク灯は輝度が高く光量も大きいので一般照明には適していなかったが、電球が普及した後も街路灯の他探照灯や映写機用として使用されていた。

8.4 蛍光ランプ

現在、屋内照明用光源として白熱電球に代わって最も普及しているのは蛍光ランプである。

蛍光ランプの始まりは 1859 年のフランスのベクレル (E. Becquerel) のガイスラー管に蛍光体を入れて発光させた実験とされている。現在の蛍光ランプの原理と同じ水銀ガス放電を使ったランプは 1901 年にヒューイット (P. C. Hewitt) により發明された。このランプはガラス管の外面にローダミン B を塗布したもので、劣化が激しく実用化には至らなかった。1910 年にフランスのクロードによりネオン管が發明され、1926 年にドイツのゲルマーら (Meyer, Spanner and Germer) により現在の蛍光ランプと同じ構造の蛍光ランプの特許が提案され、1939 年に権利化された。この特許は後に GE に売却されている。1934 年に英国の GEC で 34lm/W の緑色の蛍光ランプが開発され、これをきっかけに GE でランプと点灯回路を含めた開発が行われ、1938 年に実用となる蛍光ランプが発売された。この開発中にランプ開発のリーダーであったインマン (George E. Inman) が提案した特許が実用蛍光ランプの最初とされている。

その後、1942 年にアルフレッド・マーキグ (A.H. McKeag) により白色に発光するハロリン酸カルシウム蛍光体が發明され効率は 60lm/W に向上した。

我が国で蛍光ランプが製造されたのは、昭和 15 年 (1940) に東京芝浦電気が GE から技術導入して 10W と 20W のランプを商品化したのが最初である。性能は効率が白熱電球の 2.5 倍の約 30lm/W 程度で、寿命は 1000 時間とされていた。昭和 26 年 (1951) からハロリン酸カルシウム蛍光体を使用したランプが製造されるようになり、効率は 40lm/W を超し、エミッターの改良で寿命も 3000 時間になった。昭和 31 年に GE で開発された環形のランプが国内で生産され、一般家庭への普及が進んだ。当初は白熱電球に比べて色の見え方が悪く、またスイッチをいれてもすぐ点灯しないなどいくつかの欠点があったが、効率が高い、白い光で熱くないなどの長所が多く、特に我が国では家庭用として急速に普及した。

1973年にオランダのフィリップス社が希土類を使用したRGBの三原色の蛍光体を使った三波長形蛍光ランプを開発し、蛍光ランプの演色性が80以上になり、色の見え方が悪いという欠点が大きく改良された。また、点灯回路の改良も進み、鉄心の磁気回路式からトランジスターを使用したインバータ回路になり、効率の向上と共にすぐ点灯しないという欠点も無くなった。平成3年(1991)にはランプと点灯回路を最適化した高周波専用形ランプが開発され、効率は100lm/Wになっている。

1978年に点灯回路とランプを一体にして電球のソケットに取り付けて使用できる電球口金付き蛍光ランプが開発され、昭和55年(1980)には蛍光管を曲げて球形カバーに入れた電球形蛍光ランプが開発された。この電球形蛍光ランプは点灯回路の電子化、水銀アマルガムの改良により図8.3のように一般電球と同じ大きさ形状になり、また発光色も電球色形が作られ一般電球からの取り換えが進んでいる。



図 8.3 電球形蛍光ランプの例⁴⁾

8.5 HIDランプ(高輝度放電灯)

HIDランプは比較的大きなワットのものが多く、開発当初から大形電球に代わって道路灯など屋外照明に多く使用されている。最近は店舗用や自動車のヘッドランプ用など小形のものが開発され、ハロゲン電球に代わって増えてきている。

高圧水銀ランプはランプ内の水銀蒸気圧を高くして可視光の発光を増やしたランプで、1934年にジャーマ(Edmund Germer)により発明され、1947年にGEから製品として発売された。

水銀の発光だけでは演色性が悪いので、蛍光体を外管に塗布したものが開発され、1967年にリン酸バナジウム蛍光体を使用して、演色指数が65で効率が

60lm/Wのランプが開発された。

1992年にフィリップスにより、点灯中の水銀蒸気の圧力が200気圧の超高圧水銀ランプが開発され、プロジェクター用光源として使用されている。

水銀ランプの演色性や効率を改善する目的で、封入物として金属のハロゲン化物を封入したメタルハライドランプが開発された。1939年にGEのシュネツラー(K. J. Schnetzler)により水銀—タリウムを封入して70lm/Wのランプが開発され、1961年には100lm/Wまで向上した。最近では図8.4のような発光管にセラミックスを使用したランプも開発され、演色性が90近くあるので店舗照明などに使用されている*)。また点灯回路の電子化により高電圧パルスによる瞬時点灯も可能になり、キセノンガスの発光と組み合わせた図8.5に示す自動車ヘッドランプが開発されている。35Wでハロゲン電球のヘッドランプ60W以上の明るさが得られ、視認性が良くなることから普及が進んでいる。

*) 一般家庭やオフィスの室内で使う照明でRaが80以上、廊下などでは70以上、美術館や店舗など演色性を気にする用途向けで90以上が向くとされている。



図 8.4 セラミックメタルハライドランプ⁴⁾



図 8.5 自動車用HIDランプ

8.6 ナトリウムランプ

低圧ナトリウムランプは1919年に米国のWestinghouse Electricのコンプトン(Arthur H. Compton)により発明された。ナトリウムは蒸気圧が高く、黄色に発光するので高い効率が得られる。1930年頃は50lm/W程度であったが、道路照明に使用された。その後ガラス管の材料と構造の改良が行われ、効率は200lm/W近くまで向上し、寿命も16000時間になっている。低圧ナトリウムランプは最も効率の良いランプであるが、発光が589nmの線スペクトルであるため演色性が悪く、道路照明や工場照明にしか使用されていない。

発光管に透光性アルミナを使用してナトリウム蒸気の圧力を高くし、発光波長を広げて演色性を改善した高圧ナトリウムランプが1960年にGEで開発され、1967年に発売された。その後より演色性の高いランプも開発されスポーツ照明や屋内の照明にも使用されている。

8.7 LED

LEDは1907年英国のラウンド(H. J. Round)がシリコンカーバイト(SiC)の鉱石検波器を光らせたのが始まりとされている。1927年にロシアでもSiCの発光が報告されているが、実用的LEDが開発されたのは、1955年にRCAのブラウンシュタイン(Rubin Braunstein)によるダイオードからの赤外線放射の報告からである。彼はGaAsやInPのダイオードが液体窒素(77K)で赤外線を発光することを発見した。1961年に米国のビアード(Robert Biard)とピットマン(Gary Pittman)により赤外線LEDが発明され、1962年にGEのホロニャク(N Holonyak J.)により赤色LEDが発明された。その後、1980年代後半にInGaAlP系のLEDが開発され黄色や緑の発光が得られるようになった。表示用小形電球に比べて、明るく寿命も長いので表示用光源は殆どLEDになっている。1993年に我が国で名古屋大学の赤崎勇と日亜化学の中村修二によりGaN系の青色LEDが発明され、赤、緑、青の三原色が揃い照明用として利用できるようになった。1996年には日亜化学でこの青色LEDとYAG:Ce蛍光体を組み合わせた白色LEDが開発され、近年急速に性能が向上し照明用として図8.6のようなLED電球などが普及しはじめている。

この青色LEDと白色LEDは150年の照明光源の

技術開発の歴史で、初めて我が国が世界をリードした発明である。



図 8.6 LED電球の例

8.8 電球以外の光源との関係のまとめと白熱電球の現状

白熱電球は約130年前に開発され、当時使用されていた油ランプ、ガス灯などに比べて明るく使いやすい光源として電灯配線の広がりとともに普及した。その後数十年間にわたり照明光源の主流であったが、1940年頃に、より効率の良い蛍光ランプが開発され、我が国では一般照明分野は蛍光ランプが主流になっている。また、特殊電球の分野ではハロゲン電球が現在でも多く使用されているが、HIDランプの改良が進み徐々にハロゲン電球が減少している。白熱電球の弱点は効率の低さで、図8.7に示すように電球以外の光源の効率が高く年代と共に差が大きくなっている。

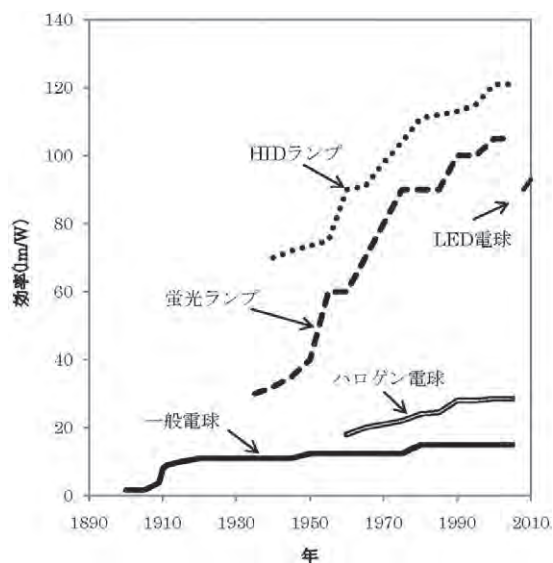


図 8.7 各種光源の効率変化

表 8.2 電球の長所に対する各光源の性能比較

白熱電球の特長	蛍光ランプ	HID	LED
◎色の見え方が良い Ra:100	○(三波長蛍光体の採用) Ra:80	○(封入金属の選択) Ra:80~95	○Ra:80
◎すぐ明るくなる	△(電子点灯回路化)	×~△(パルス点灯)(キセノンガス)	◎
○点滅に強い	△(電極余熱化)	×	○
◎調光が容易	△(電子回路で制御可)	×	○
◎点灯回路が不要	△(電球形化)(回路一体形)	×	△(電球形)
◎小形化が可能(表示用など)	×	×	◎
○大光量化が可能(投光用など)	×	◎	×
◎水銀を使わない	×	×	◎

- ◎：優れている
- ：良好(改善方法)
- △：普通(改善方法)
- ×：問題あり

なお、照明用光源では効率以外の色の見え方、点滅の容易さなどの特性も重要で表 8.2 のように電球が優れている点が多くあったが、各光源の改良が行われて電球に近づいている。

蛍光ランプや HID ランプと比較すると電球には小形化が可能、水銀を使用しない等の有利な点があつたが、白色(青色)LED の登場によりこれらの項目が同等になっている。

なる。この傾向は我が国で特に進んでおり、図 8.9 に 2005 年頃の我が国と EU と中国の各光源の生産数の比率を示す。^{3) 5)}

8.9 我が国の現状と動向

図 8.8 に我が国の一般電球と蛍光ランプの生産数の変化を示す。一般電球は 1950 年頃から約 40 年間は 1 億個前後生産されていたが 1990 年頃から減少が続いている。一方蛍光ランプは 1950 年頃から増加し 1990 年頃には 4 億個になっている。

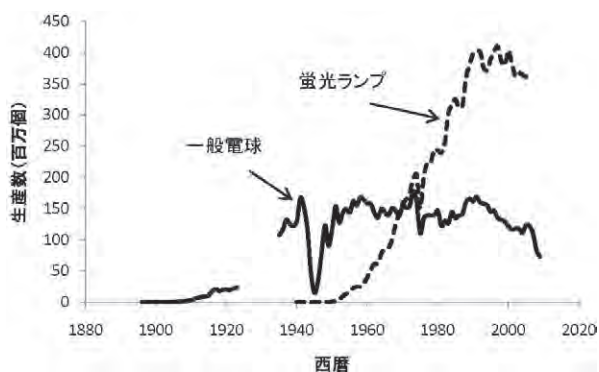


図 8.8 我が国の電球と蛍光ランプの生産数

電球の寿命は蛍光ランプのほぼ数分の 1 以下なので、屋内照明は殆どが蛍光ランプになっていることに

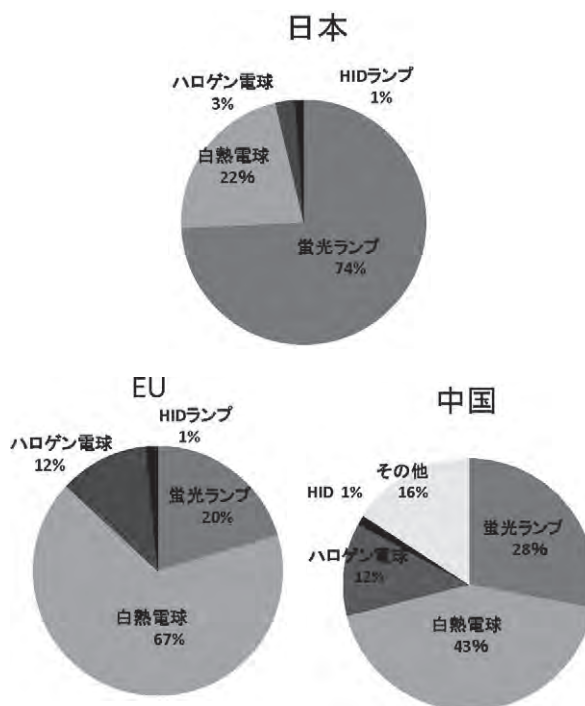


図 8.9 日本と EU と中国の照明用光源の生産数の比率 (2005 年頃)

我が国では蛍光ランプが 74% になっているが、EU では蛍光ランプは 20% で白熱電球は 66% でハロゲン電球を加えると 78% である。中国では輸出が多いので国内使用数は不明であるが日本と EU との中間である。

米国の状況は IEA (International Energy Agency) の調査⁶⁾によると 2001 年での家庭用ランプでは 86%

表 8.3 家庭でのランプ数と平均効率と点灯時間 (IEA データ 2006)

	ランプ個数	一戸の平均効率 (lm/W)	1 日の点灯時間
英国	20.1	25	1.60
ドイツ	30.3	27	1.48
イタリア	27.0	27	1.03
フランス	18.5	18	0.97
ギリシャ	10.4	26	1.30
米国	43.0	18	1.92
日本	17.0	49	3.38

が白熱電球で 14% が蛍光ランプである。表 8.3 は同じ IEA の調査報告に記載されている 2006 年の各国の家庭で使用されているランプの数とその平均効率と 1 日の点灯時間である。先進国で日本が飛びぬけて照明用ランプの効率が高く、蛍光ランプが多く使われていることを示している。

このように我が国で一般家庭に蛍光ランプを多く使われる理由は、①部屋全体を明るくするフラットな照明を好む、②湿気が多い夏があるので色温度の高い光が気候に合っている、③新しいものが好きなどと言われている。

以上のように蛍光ランプが普及した 2005 年頃でも白熱は数千万個の生産が行われ、重要な光源であった。しかし、最近、環境問題の対策として一般白熱電球の製造を中止する方針が各国で出され、EU ではすでに生産中止が始まっており、我が国でも東芝が 2010 年に中止し、他のメーカーも中止計画を発表している。また白熱電球と交換できる LED 電球が開発され、急速に普及し始めており白熱電球の使用数はさらに減少

すると考えられる。しかし、ヨーロッパでは一般電球の生産中止によりハロゲン電球が増えているという情報もあり、白熱電球は今後も重要な光源として継続して使用されると考えられる。

参考文献

- 1) 日本電球工業会編「日本電球工業史」日本電球工業会 1963
- 2) 東京芝浦電気「東京電気株式会社五十年史」1940
- 3) 電球工業会報
- 4) 東芝ライテック株式会社 東芝ランプ総合カタログ
- 5) Chen Yansheng, Light Source 2007, IL01 FAST-LS
- 6) IEA International Energy Agency ECBCS Energy Conservation in Buildings and Community System- Annex 45 -Energy Efficient Electric Lighting for Buildings 2 P.30 (2010)

9 | まとめ

白熱電球は最も古い家電製品で、最初は発電所から送電された電気を使用する家庭電化の先駆けとして普及し、その後数十年間にわたり光源の主流として多岐にわたる分野で使用されている。

白熱電球開発の歴史はボルタの電池を使って白金線を通電加熱して光らせるという単純な実験から始まっている。当時の科学者により高温に耐える材料の探索と酸化を防ぐ容器の開発が行われ、1879年にエジソンにより商用電圧で点灯出来る実用的なカーボンフィラメント電球が発明された。同時に発電所から送電し、電球を使用する電灯システムが確立され、電気による照明の普及が始まっている。

その後、より高温に出来るフィラメント材料が検討され、オスミウムやタンタルを経てタングステンに到達している。さらにタングステンの蒸発を押さえるための不活性ガスを封入したガス入り電球の発明により、1930年頃に現在の電球の基礎が完成している。このタングステン線の発明は照明用光源にとって大変重要な発明で、電球フィラメント以外の蛍光灯や HID ランプの電極材料としてかかせないものになっている。フィラメントなどの開発と同時にゲッター、ジュメット線やステムに排気管を付ける方式が開発されて電球生産技術が確立された。これらの重要な技術開発は殆どエジソンの会社である米国の GE 社で行われている。

我が国で電球製造が始まったのは明治 23 年（1890）でエジソンの実用電球開発の約 10 年後である。当時欧米ではカーボン電球は製品としてほぼ完成し量産化されていたのでこの 10 年の遅れは大きく、国産電球は輸入品との価格競争に苦戦し、当時唯一製造を行っていた東京電気は GE の支援を受け系列会社になっている。その後東京電気が我が国の電球産業の中心企業となり、技術は殆ど GE から導入されることになる。なお東京電気では単に技術を導入するだけでなく、自主研究も行っており、二重コイル、内面フロストバルブの発明が GE に先行して行われていることは特記すべきことである。

我が国における電球の普及はタングステン電球が登場してから急速に進み、昭和 10 年頃の普及率は米国や英国を大きく上回っている。この普及率の高さは電灯産業の広がりを表わしているが、日本人が当時使用されていた石油ランプなどの光より電球の光を好んだことも一つの要因と考えられる。この光色に対する好み

は、現在我が国の一般家庭での蛍光灯の比率が欧米に比べて極めて高くなっていることに繋がっている。

電球の製品としての基本開発は 1930 年代中頃ではほぼ終了し、その後ランプメーカーの技術開発の主体は量産技術と蛍光灯や HID などの他の光源の開発に移っている。

我が国の一般電球の量産技術開発は主に東京芝浦電気で行われた。東京電気時代に GE から導入された機械を元に自社開発を行い、北九州小倉工場を中心に量産機を設置し、昭和 45 年には世界トップクラスの高速機械で生産が行われていた。電球製造機械の他、ガラスバルブ製造機械、タングステン線製造機械も量産機が開発され海外に輸出されている。この我が国における量産技術の進歩は国内での競争が激しかったこと他に消費者の品質に対する要求レベルが高いことがある。

近年の環境問題と蛍光灯の性能向上により効率の悪い白熱電球は苦しい状況になり、2005 年ごろからこれらの量産機は電球の需要縮小により順次稼働終了している。また、最近、地球温暖化対策として世界的にも一般電球の製造中止と LED 電球の普及が進んでおり、電球の光源としての役割は少なくなっている。しかし電球で築かれた材料と量産の技術は蛍光灯や HID ランプに繋がっており、蛍光灯や HID ランプは今後も重要な光源として使われていくことは確実である。

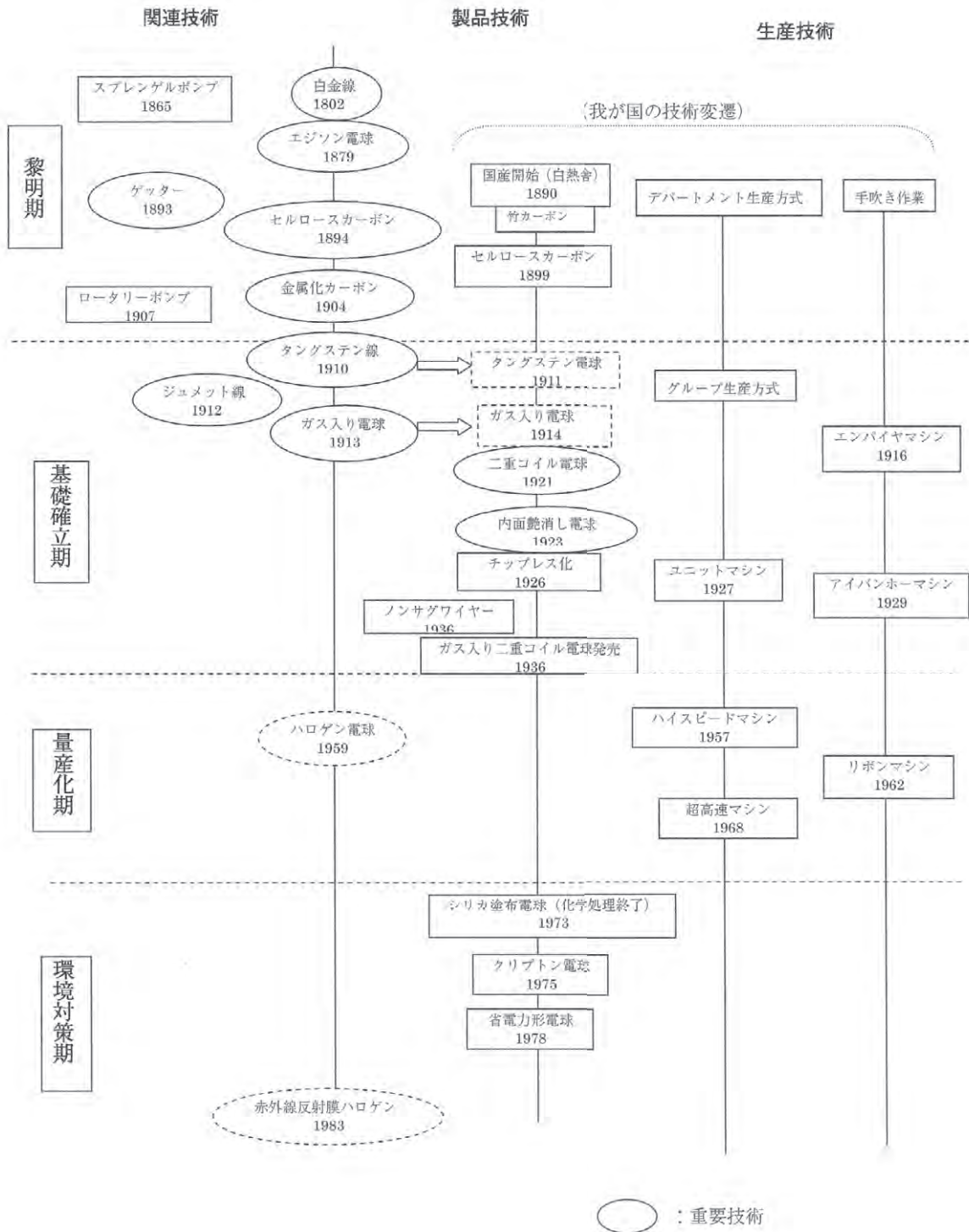
本報告書では主に一般電球の技術について系列化を行ったが、他に種々の特殊電球がありそれぞれの分野で技術開発が行われており、特にハロゲン電球は現在も重要な役割を担っている。また白熱電球は照明光源の一部なので他の蛍光灯、HID ランプ、LED などを含めて光源全体としての技術動向の把握が重要と思われる。

白熱電球の技術系統図を次に示す。

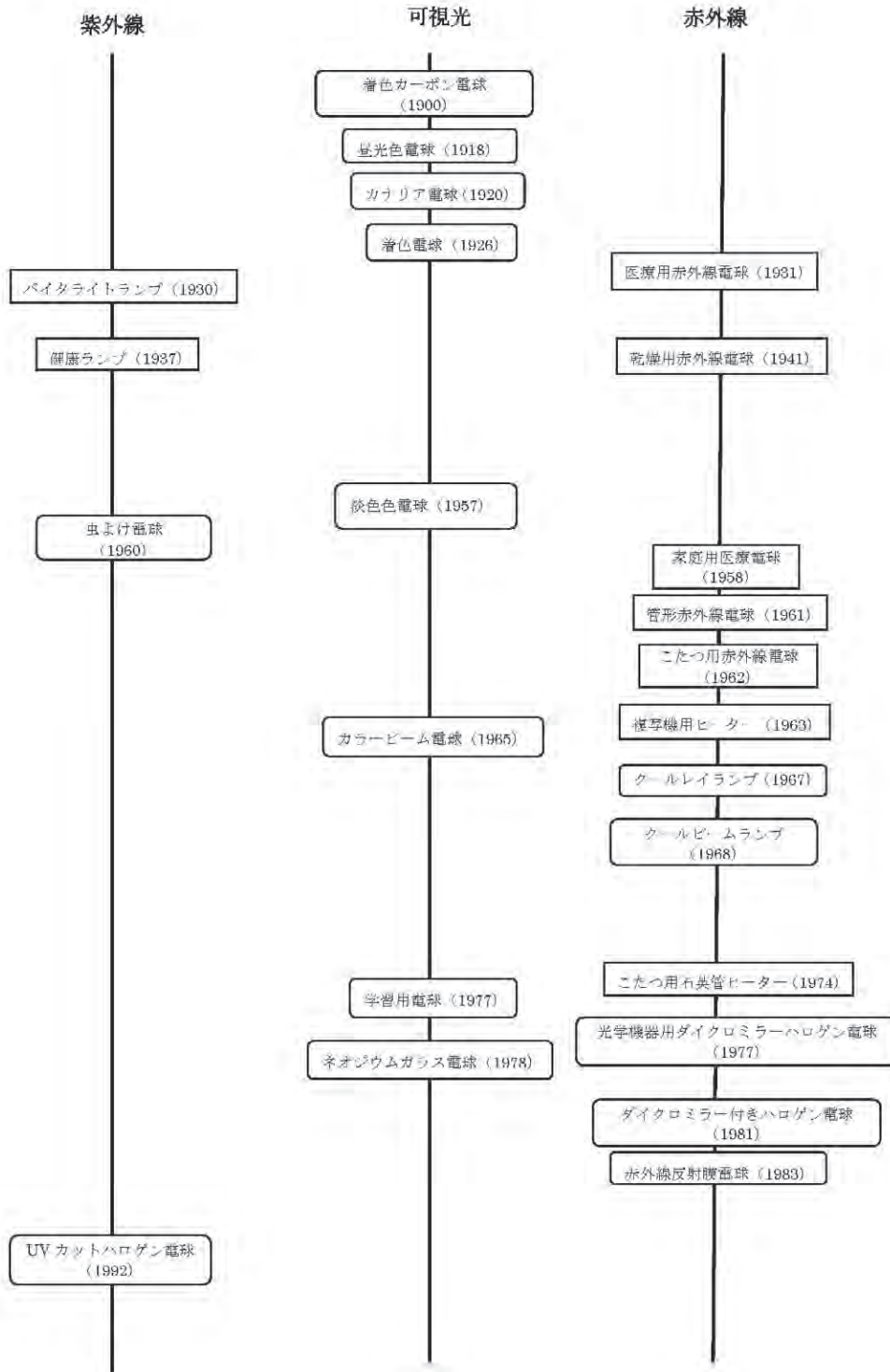
謝辞

本調査を行うにあたり多数の方にご協力戴いた。特に照明文化研究所の伊藤安雄氏には貴重な史料提供とご指導を受け、東芝ライテック株式会社の夏目匡治氏には史料収集に多大なご協力を戴いた。また東芝ライテックの先輩、染谷 彰氏、塚原 淳一氏、神谷 明宏氏には多くのご助言を戴いた。これに対し深く感謝する。

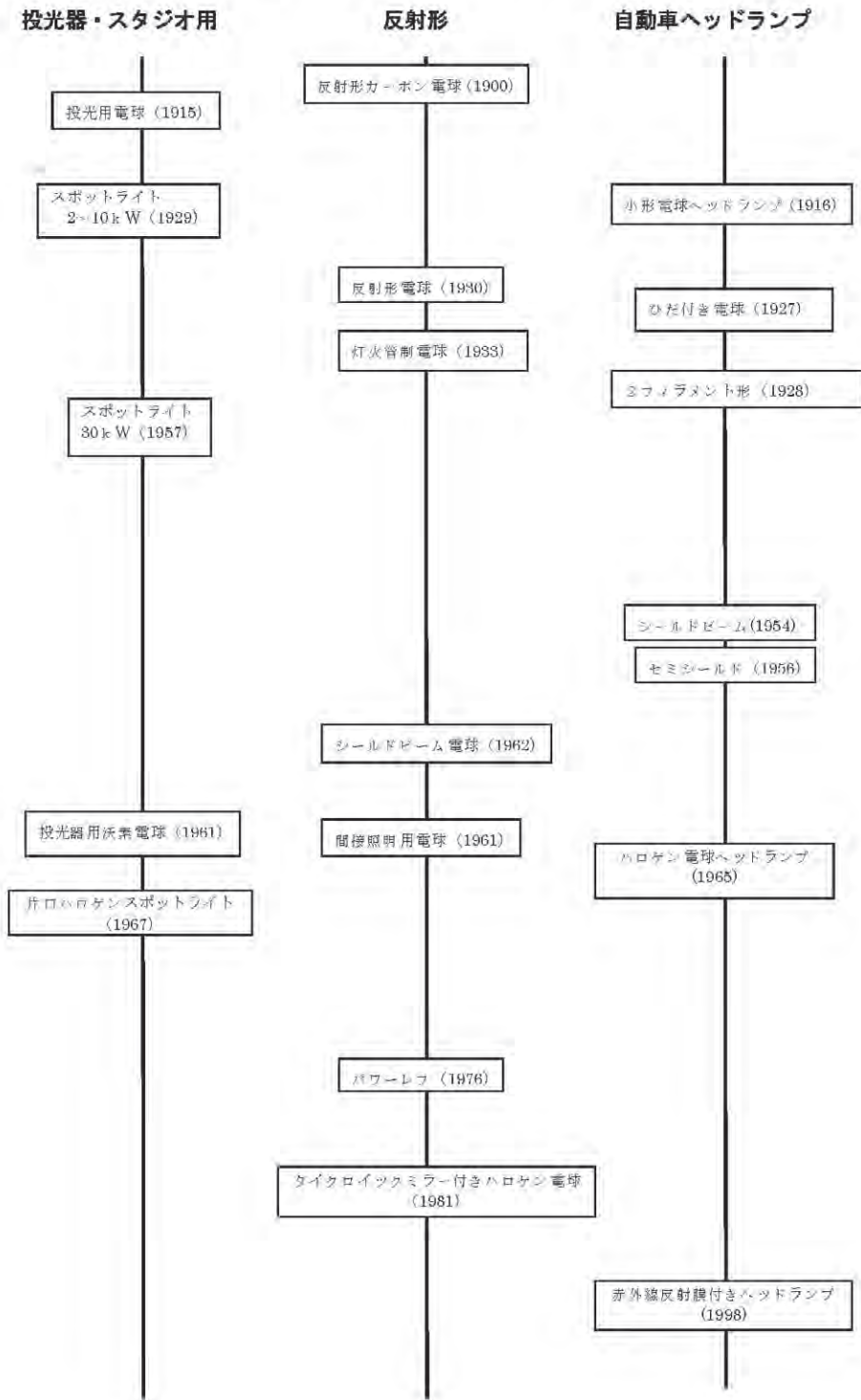
一般白熱電球の技術の系統化



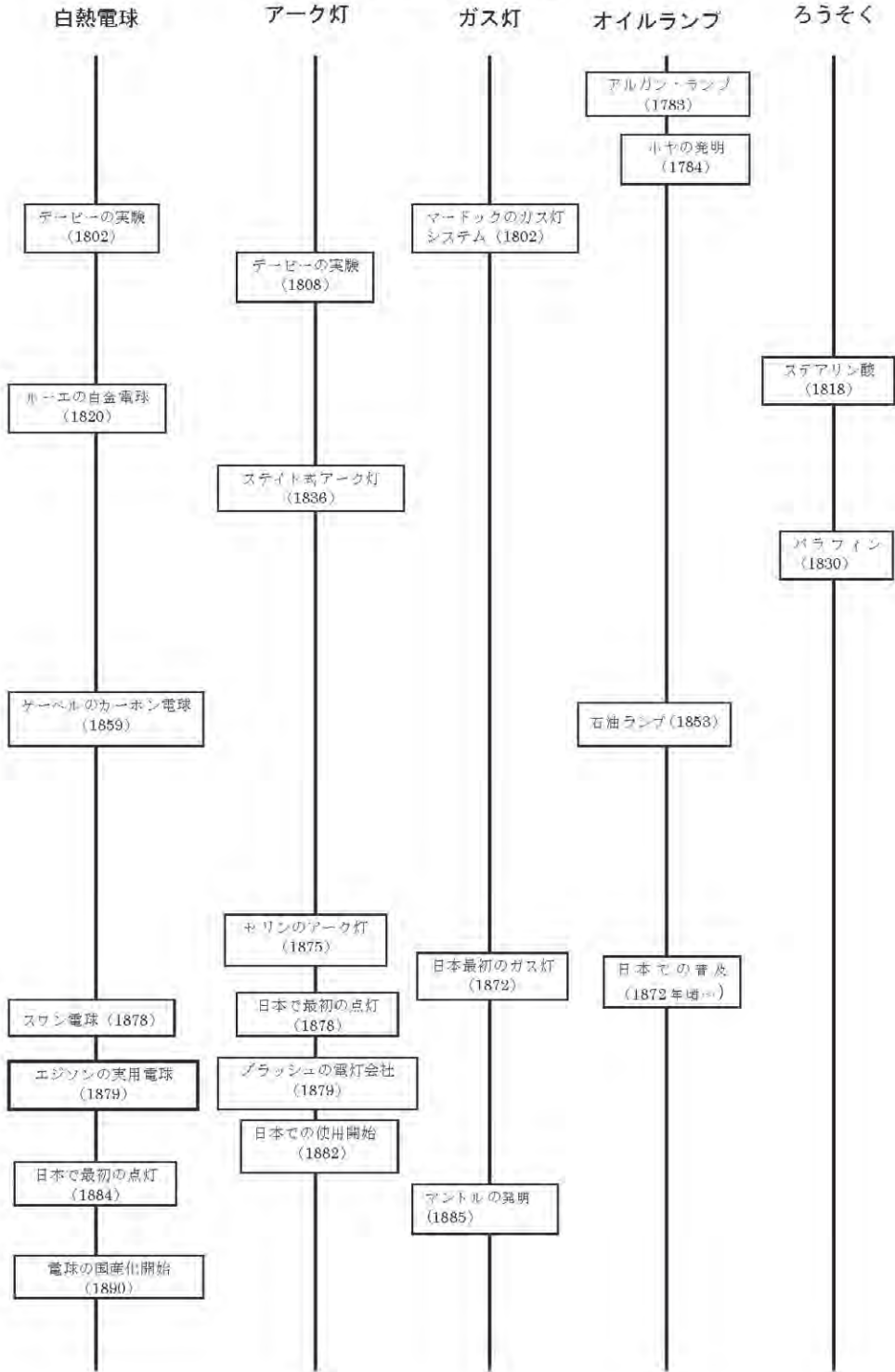
表A：分光分布制御電球の変遷



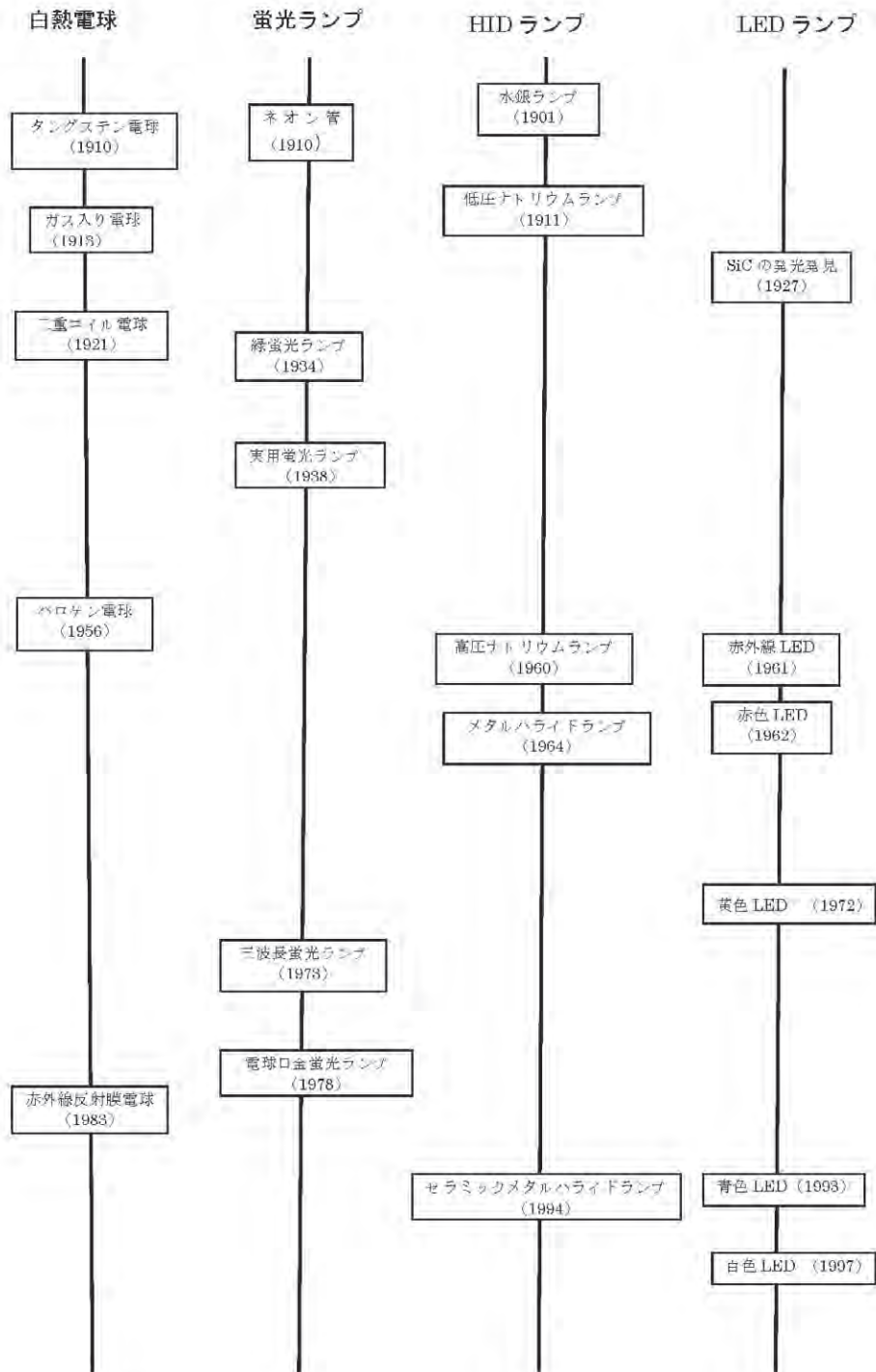
表B：配光制御電球の変遷



表C：各種光源の歴史 ～1900年



表D：各種光源の歴史 1900年～



平成 22 年度産業技術史資料 登録候補一覧（白熱電球）

番号	登録対象品	資料形態	所在地	製作者	製作年	コメント
1	藤岡式カーボン電球	製品	東芝ライテック株式会社	東京電気 (現㈱東芝)	1899	我が国最初の電球製造会社（白熱舎）の創立者藤岡市助が発明し、製造販売された明るさを切り替えられる電球。
2	カナリア電球	製品	東芝ライテック株式会社	東京電気 (現㈱東芝)	1920	東京電気で開発されたウランガラスを使用した電球で、ガラスからの蛍光を利用した最初の電球
3	胃壁のカラー撮影用電球	製品	細瀬電球株式会社 本社	細瀬電球	1954	カラー撮影用の小形胃カメラ用電球で、この電球により世界で初めて胃壁のカラー撮影に成功した。

国立科学博物館 北九州産業技術保存継承センター
技術の系統化調査報告
共同研究編 第4集

平成 23 (2011) 年 3 月 31 日

- 編集 独立行政法人 国立科学博物館
産業技術史資料情報センター
(担当：コーディネイト・エディット 永田宇征)
- 発行 独立行政法人 国立科学博物館
〒110-8718 東京都台東区上野公園 7-20
TEL：03-3822-0111
北九州産業技術保存継承センター
〒805-0071 福岡県北九州市八幡東区東田 2-2-11
TEL：093-663-5411
- デザイン・印刷 株式会社ジェイ・スパーク