蛍光ランプへの水銀合金の応用

専門会員 広田 泰輔*

Fluorescent Lamps using a Mercury Dispenser

Taisuke Hirota (Fellow Member)

ABSTRACT

As a rule, fluorescent lamps are filled with mercury and argon. As regards mercury dosing into the bulb, the method which drops a few drops of liquid mercury through the exhaust tube has been employed. Such conventional method in production is of advantage to exhaust the gaseous impurities from the bulb but causes various defects of quality and characteristic. To eliminate such disadvantages, a manufacturing method which uses a mercury dispenser such as a strip mounted around the electrode and releases mercury within the tube by means of R. F heating after sealing is introduced. Advantages using mercury dispenser are as follows:

- (1) The quantity of mercury enclosed in the lamp is very precise.
- (2) The pressure fluctuation of argon fill can be reduced, therefore it is possible to reduce the fluctuation of lamp life and to increase its average life.
- (3) In addition, if the new production process is applied for conventional mercury dosing method it is possible to decrease the mercury contents of lamp.

1. ま え が き

蛍光ランプが実用化されて約半世紀になるが、高効率・長寿命の光源として、現在わが国では光源生産高の43% (822億円/年)¹⁾を占める主流製品となっており、省エネルギー面から社会的に大きな寄与をしている。

一方、周知のとおり現在の蛍光ランプは発光原理上ランプ内に水銀と希ガスが封入されている。この水銀の封入方法は一般に液状の水銀粒を製造工程中に滴下するか、希ガスで送り込む方法がとられている。このような方法では発光要素である水銀を封入するという本来の目的以外に、ランプの品質である安全、信頼性、性能に種々の影響を与える。

まず第1に必要な量の水銀を封入することが困難であり、大部分のランプには必要量以上水銀が封入される。これは、省資源面はもちろん、廃ランプの環境への影響をより安全にすることから改善の努力が必要となる。

第2に、ランプの信頼性、性能に直接関与している希ガス封入量の大きな変動原因になっているということである。

この解決策として新しい製造法が種々提案されているが^{2)~6)}、ここでは、その一つである水銀合金法の実用化に伴う技術的諸問題について検討を行なった。さらにこれらの技術を活用することにより水銀合金法によらず、精度の高い水銀の定量封入が可能と

なる。

2. 蛍光ランプの有用性

蛍光ランプの有用性については改めて述べる必要もないが、その現状について整理してみる。一般照明用の各種光源をその効率と平均演色評価数によって分類すると図1のとおりとなる。それぞれ代表的品種の寿命・価格を図中に記したが、このような単純な比較でも蛍光ランプは高効率、高品質で経済的な光源である。

図1 各種光源の効率と平均演色評価数

* 日立製作所青梅工場

図2 昭和57年電球類販売高内訳

ることがわかる。

図2は各種電球類の販売高内訳であるが¹⁾、蛍光ランプが光源の主流であり、さらに図3に示すごとく需要も着実に伸びていることがわかる。図4は日本の住宅におけるランプ使用の実態²⁾であるが、仮りにこのような住宅で蛍光ランプによる明るさを電球で補うとすれば、毎月86.5 kWhの追加電力が必要となり、これは経済的にも約2,600円の負担増に相当する。

図3 主要光源の国内需要の推移
(注) 1. 通産省生産動態統計調査による。2. 1985および1990年数値は、CIE TC4.9/照明経済調査国内委員会の見通しによる。

図4 住宅における照明用光源の実態

なお、現在の蛍光ランプは水銀を発光要素としているが、この水銀に代わる代替方式についても検討されており³⁾、最も効率の高いカドミウム励起を利用する場合でも理論的に46 lm/Wしか得られず、現在の蛍光ランプが40 Wですでに88 lm/Wのものが市販されている状況から、実用的な無水銀蛍光ランプの実現はきわめて期待が薄いといわれている。すなわち、現在の蛍光ランプは実用的にきわめて有用性が高いといえる。

3. 蛍光ランプと水銀との関連

3.1 蛍光ランプの必要水銀量

現在の蛍光ランプは、原理上水銀放電での共鳴線を利用しているが、理論的な水銀必要量はどの程度であろうか。水銀蒸気放電での共鳴線(185, 253.7 nm)発生効率は40 °Cに相当する水銀蒸気圧 6.08×10^{-3} Torrで最大であり⁹⁾、一般に蛍光ランプは周囲温度20~25 °Cでこのような条件になるよう設計されている。この蒸気圧に相当する水銀飽和濃度は 62.5 mg/m^3 となり、通常の40 W 蛍光ランプの体積から計算すると、必要な水銀量は0.055 mgとなる。しかし、現実はこの程度の量では早期に水銀欠乏による短寿命現象を起こす。すなわち、実際のランプでは次のような要因により水銀が消費される¹⁰⁾。

- (1) ランプ製作時の残留不純ガスが、水銀と化学的に結合しランプ管壁上に酸化水銀などで沈積物を作る。
- (2) 電極の電子放射物質が、ランプ点灯中蒸散分解後その成分である酸素が水銀と化合し酸化水銀となって管壁に沈積する。
- (3) 水銀イオンが蛍光体粒子中に浸入し、蛍光体成分との間に化合物を作る。
- (4) ガラス管成分から析出するナトリウム分が、水銀と結合して合金を作る。

これらを実際のランプについて推定計算することは、関与する要因がきわめて多く、正確さへの期待が小さいといわれている。また、実験による実際の必要量に関する計算式なども種々提案されているが¹¹⁾¹²⁾、主なものを示すと図5のとおりとなる。これらのことから、一般には点灯条件などの変動要因を加味して40 Wランプの場合、実用必要量は約10 mgとされている。

図5 蛍光ランプの封入水銀量と水銀欠乏による寿命の関係
(注) (1) 昭和53年度電気器具中の重金属の経年変化に関する調査研究報告書 昭和56年6月電球工業会 p.1~5
(2) J. Light & Vis. Env. Vol. 1 No. 1 1977 p. 2

3.2 品質との関連

従来の一般的製造工程の概要は図6のとおりであり、水銀の影響は排気工程で生じその内容は次の二つになる。

- (1) 封入水銀量が一定でなく必要以上に封入される

排気工程で液状水銀を封入する場合、通常ランプは排気脱ガス操作のため450 °C程度の高温状態にあるが、この状態下で液状水銀が封入されると、ランプ内は直ちにランプ管壁温度で決まる水銀蒸気圧で飽和される(図7参照)。この水銀蒸気は、その圧力に応じ排気助成作用として排気系に排出されるが、一部は水銀滴

* 蛍光ランプのシステム効率50 lm/W、電球14 lm/Wとし、設備ワット数に比例して使用されていると仮定した計算。

図 6 蛍光ランプの製造工程図

図 7 ランプのバルブ壁温度、水銀量と水銀蒸気圧の関係

下器内の排気管部分などのより冷却された部分に凝集される。したがって、排気最終工程での封入水銀がこれら凝集水銀に接触補足されたり、凝集水銀を伴ってランプ内に封入される。このような水銀の挙動のため、実際にランプ内に封入される水銀量は大きな変動を示す。たとえば、40 W ランプの場合の必要量は前述のとおり10 mg 程度であるが、上記理由により従来は5～60 mg 程度封入されていた¹³⁾。この実態を品質面からみると次のようにいえる。

(a) 省資源的に好ましくない。また、寿命後の廃棄物として必要以上の量は低減の努力が必要である。

(b) 過剰な水銀を含む場合、ランプ点灯中管壁の冷却部分に水銀が凝集し外観上好ましくないのはもちろん、ランプ内にネサ膜を有するラピッドスタート形ランプでは、ネサ膜破壊に結びつき異状光束劣化を起こす場合がある¹⁴⁾。

(2) 封入ガス圧の変動要因となっている

希ガスであるアルゴンは、排気工程の最終段階で封入されるが、前述のとおり封入水銀量の変動に起因してランプ内の水銀蒸気圧が変動しており、この状態で通常2～3 Torr のアルゴンを封入しても、ランプ排気管が溶封される前に一部のアルゴンが排出され、結果的にランプ内のガス圧が一定にならない(図 8 参照)。

一方、アルゴン圧はランプの性能に大きな関連を持っており、一定の最適値が存在する。主な性能への影響程度は次のとおりである。

(a) 寿命への影響は、アルゴン圧 ± 0.1 Torr に対し寿命約 ±

図 8 排気工程中での水銀滴下による封入アルゴンの変動への影響原因説明図

(a) 水銀滴下部 (b) アルゴン封入部 (c) チップ・オフ部

1,000時間の変動になる。

(b) 光束への影響は、アルゴン圧 ± 0.1 Torr に対し光束約 ± 0.5% の変動になる。

従来製法では、前記の理由によりガス圧がほぼ ± 0.2～0.3 Torr の変動をする。これは製品個々にみると寿命のばらつき範囲4,000～6,000時間に相当する。この値は実際のランプ母集団の寿命変動¹⁵⁾のほぼ1/2を占めていることになる。

以上のとおり、従来製法は寿命、光束などの信頼性の面で改善の必要がある。そして、この水銀粒滴下に基因する影響を除くには、(1) 水銀による排気助成に代わる排気方法の開発、(2) 水銀量を高精度で封入するか、水銀蒸気の影響のない水銀封入法の開発が必要となる。

3.3 各種水銀封入方法

蛍光ランプが実用化されて以来、水銀の封入はいわゆる液状の金属水銀を粒状にして封入する方法が採用されていたが、ここ10年ほどの間に各種の改良方法が実用化されてきた。これらの水銀の封入方法は主に次の三つに分類できる。

(1) 水銀粒直接封入法

液状の水銀粒を重力を利用あるいは、封入ガスなどにより封入する方法であり古くから実用され、現在でも広く利用されている。図 9 は代表的な封入装置の構造を示すが、分離した水銀粒が排気管ストップ部などに一部付着したり、40 W ランプの必要量約10 mg (直径約1 mm の球) 程度では、排気管壁に付着するなどの欠点がある。

図 9 水銀粒、直接封入法による蛍光ランプへの水銀封入装置

(2) 水銀合金法

水銀を金属との合金とし電極などに取り付け、排気完了後高周波などの外部加熱で必要な液体水銀を分離する方法であり、古く

図 10 水銀合金法による蛍光ランプへの水銀封入法

から考えられていたが²⁹，実用化されたのは比較的新しい¹⁶⁾。
図 10 はこの構造例を示す。この方法は水銀を正確に定量封入する方法としては優れている。

(3) 水銀カプセル法

液体水銀を硝子などのカプセルに封入し，これを電極などに取り付け，排気完了後何らかの方法でこれを破り水銀を分離する方法であり，実験的にはやはり古くから考えられているが¹⁰⁾実用化は新しい¹⁷⁾。図 11 は構造例を示す。この方法も水銀合金法と同じ利点がある。

図 11 水銀カプセル法による蛍光ランプへの水銀封入法

4. 蛍光ランプへの水銀合金の応用

4.1 水銀合金法の概要

水銀合金を応用する製法とは液体水銀を使用せず，水銀合金などの金属固形物をあらかじめ電極付近に取り付けておき，ランプを排気し，排気管溶封後に高周波加熱などの間接加熱で必要な液体水銀をランプ内に分離する方法である。

この方法は排気工程では液体水銀は使用しないため，前述の液体水銀の挙動に伴う不具合が解決される¹⁹⁾ことは，もちろん製造環境もより改善される¹⁹⁾ことになる。一方，この水銀合金法を採用するにあたっては，大別して次のような新しい技術が必要になる。

- (1) 水銀合金材の開発
- (2) 水銀合金材の設置場所の検討
- (3) 排気プロセスの変更
- (4) 水銀分離法の開発

4.2 水銀合金材について

蛍光ランプ用の水銀合金材としては，次の性能が要求される。

- (1) 排気工程終了までに加熱される温度約 500°C 以下では水銀が分離せず，それ以上の温度では可及的低い温度で分離する。
- (2) 水銀分離のための加熱で放出される不純ガスを，完全に再吸収するゲッタ材を有する構造であること。

(3) 必要量の水銀を含有すること。

このような水銀合金材としては，各種の水銀合金²⁰⁾または酸化水銀とゲッタ材の組み合わせが考えられる³⁾。いずれでも実用可能なものが製作できる。一例を 表 1 に示す。

表 1 蛍光ランプ用水銀合金材の例²¹⁾

項目	内 容
仕 様	水銀分離材 Ti-Hg の金属間化合物 ゲッタ材 Zr-Al 合金 基 板 Ni めっき Fe 水銀含有量 $4.5 \pm 0.5 \text{ mg/cm}$
特 性	水銀放出量 $3.0 \pm 0.5 \text{ mg/cm}$ ガス放出量 900°C 加熱で最大 $7 \text{ Torr}\cdot\text{cc/cm}$

図 12 水銀合金材の加熱によるガス放出と吸収

水銀合金材の吸蔵ガスの放出再吸収特性は 図 12 のとおりであり，蛍光ランプの体積の大小によって放出ガスが完全に再吸収されるため，ゲッタ材にある必要面積が要求される。すなわち，一般的には体積も大きく必要水銀量も大であるランプには，いわゆる帯状の合金材が適し，小型ランプでは，従来から数字表示管などに使用されているリングタイプが使用可能となる。

4.3 水銀合金による蛍光ランプの製法

(1) ランプ構造の選定

水銀合金材をどの部分にどのように取り付けるかは特性，および生産技術上の利欠点を加味して定める必要がある。現実には蛍光ランプ全品種に共通な構造は困難であり，図 13 に示す三つのタイプで全品種をカバーできる。

図 13 各種水銀合金の取付け位置の例
(a) ラビッド・スタート形 (b) グロースタート形
(c) 小ワット形

ランプ点灯中の水銀合金材の温度はほぼ 300°C 以上の場合，ゲッタ材の酸化性ガスの吸収能力が良くなり，酸化第 2 水銀などによる蛍光体の着色や，スポット状黒化が抑制されてくる。この点から一般に高出力タイプのランプほどゲッタ効果が顕著になる。

(2) 排気プロセスの変更

液体水銀の封入機構を有する従来の排気システムでは、ランプに必要な水銀を封入する以外に、排気操作中に液体水銀を導入し、この水銀蒸気によって、ランプ内のガスを排出するいわゆる排気助成作用を行なうことができる。この方法は排気管を一端に置けた蛍光ランプでは、より高速に排気を行なう有効な方法であり一般に広く採用されていた。

図 14 排気工程中での水銀滴下による排気助成効果の例

水銀合金法では液体水銀の封入機構を有しないため、上記に代わる排気方法を採用する必要がある。図 14 は水銀蒸気による排気助成の有無による、排気機各ヘッドの真空度変化の記録例である。この排気助成に代わり得るものとして、排気中にアルゴンガスを封入しランプ内の分解ガスなどと混合、真空ポンプの能力の高い真空度領域で排気するいわゆるアルゴン洗い法を改善する方法がある。表 2 はアルゴン洗い圧と分解ガスである CO の残量との関係であるが、圧力を10~20 Torr とすることで基本的には十分補うことができる。もちろんこのような方法では、アルゴンによる電極冷却作用のため、両電極炭酸塩の分解のバランスについて考慮する必要がある。

表 2 排気工程中のアルゴン洗い圧力とランプ内残留ガスの関係

水銀による排気助成	あり	なし			
アルゴン洗い圧力 (Torr)	3.0	3.0	10.0	20.0	30.0
ランプ内残留 CO 量 (相対値)	1.0	4.7	1.3	1.0	0.8
エージング前起動電圧 (V)	169	203	176	170	167

(注) 1. アルゴン洗い回数は、炭酸塩分解開始後 4 回。
2. CO 量測定は質量分析計による。

(3) 水銀分離法の開発

水銀合金材から水銀を分離するには、一定温度で一定時間加熱が必要である。この加熱には高周波誘導加熱が適している。この分離工程を 図 15 に示すが、ここでは次の 2 点が重要なプロセス条件となる。

(a) 加熱時のバルブ温度

加熱により水銀合金材からは各種のガスが放出されるが、バルブ温度が低い場合は、ゲッタ材がガス吸収するまえに一部が蛍光体などに吸着されランプ特性に悪影響する。また、温度が高過ぎる場合は、排気管溶封後も内部でバルブ硝子などからのガス放出が続く真空度を低下させる。最適値は200~300℃にある。

図 15 高周波による水銀分離工程

(b) 高周波電界の強さ

水銀合金材から水銀の放出が始まった場合、高周波電界が強いと水銀原子が励起され、ランプはいわゆる高周波放電を起こす。このような高周波放電状態では、水銀合金材から放出されたガスのうち、主に水素が活性化され蛍光体に吸着し発光効率を低下させる²²⁾。また、酸化錫膜を有するピッドタイプのランプでは、酸化錫膜が環元され黒色の二価あるいは金属錫となり、初期光束を低下させる。電界の強さの限界は高周波コイルの形状やランプの設計で異なるが、ほぼ高周波コイルの電圧で 100V 以下が好ましい²³⁾。

4.4 品質への効果

(1) 封入水銀量の精度向上

水銀合金法では、ランプ内に封入される水銀量は合金材に含有される水銀量と加熱温度、時間で主に決まる。たとえば 10 mg を中心に封入する場合の変動要因について考えると、表 1 の合金材を全長 47 mm のリング状に加工取り付けした場合の、放出可能水銀量は 11.7~16.4 mg となる。一方、加熱時間は製作工程上一定とし、加熱温度 (高周波出力) により水銀放出割合が変化する。したがって高周波出力をコントロールすることにより、ランプ内への水銀放出量を制御することになる。図 16 は実際のランプでの水銀量分布例である。この例では封入量は従来法の 1/3 となっている。また、従来法でもアルゴン洗い法の改善で水銀による排気助成を止めることで 2/3 となることわかる。

図 16 各種水銀封入法によるランプ内水銀量の分布

- ① 水銀粒滴下法 (水銀による排気助成あり) $\bar{X}$ 30, σ 7
- ② 水銀粒滴下法 (水銀による排気助成なし) $\bar{X}$ 18, σ 4
- ③ 水銀合金法 (水銀による排気助成なし) $\bar{X}$ 10, σ 0.7

(注) 水銀量の測定は次による。
水銀粒滴下法：ランプ内の水銀を採集し、その量をジチゾンクロロホルム抽出法で測定、測定誤差は10%以内。水銀合金法：水銀放出前後の重量差を水銀量とする。誤差5%以内。

(2) 封入ガス圧の精度向上に伴う特性改善

水銀合金法では、前述のとおり水銀蒸気の挙動に伴う封入ガス圧への影響がない。したがって封入ガス圧の精度は図17程度に向上する。このため封入ガス圧に影響される特性、たとえば絶対寿命の信頼性が向上する。図18はその一例である。

図17 水銀封入法によるランプ内アルゴン圧の分布
① 水銀粒滴下法 (アルゴン圧設計値 2.7 Torr)
 $\bar{X}$ 2.7 σ 0.12
② 水銀合金法 (アルゴン圧設計値 2.8 Torr)
 $\bar{X}$ 2.8 σ 0.03

図18 水銀封入法によるランプ絶対寿命の分布
① 水銀粒滴下法 (封入アルゴン圧 2.7 Torr)
② 水銀合金法 (封入アルゴン圧 2.8 Torr)
(注) 寿命は 3.0 h 点灯 0.5 h 消灯サイクルによる。
②の試料数は75本。

(3) その他の特性改善

水銀合金法では、前述のとおりゲッタ材を併用しているためランプ点灯中ランプ内の酸化性ガスが吸収され、その結果、光束維持率が改善される。改善の程度は高ワットのランプほど顕著でありランプの相対寿命も1.2~1.4倍程度の改善が期待できる²⁴⁾。

5. 今後の動向

蛍光ランプは、現有光源の中でもきわめて有用なランプであるが、このランプの水銀量の精度向上は単なる品質の向上にとどまらず、省資源の面からも引き続き努力を要する課題である。本報は、一つの解決策である水銀合金法の実用化に関するものである

図19 最近の水銀粒滴下法によるランプ内水銀量の分布
(注) 水銀による排気助成なし、水銀粒20 mg 滴下、水銀量測定はジチゾンクロロホルム抽出法による。

が、同じような効果の得られる水銀カプセル法も一部実用化されており、さらに単にランプ内の水銀量の上限に関する改善に限れば、水銀粒直接滴下法でも機械精度の向上などで、現在では図19程度の精度が得られている。この実績では、たとえば水銀合金材 47 mm の水銀含有量 (表1参照) 19~24 mg とほぼ同程度の絶対値以下におさえられている。もちろん水銀蒸気の挙動に伴う品質上の改善が必要であり、そのため、(1)水銀封入法の一層の改善、(2)ランプ内の水銀消費プロセスの解明が今後の課題であるといえる。

6. 結 言

水銀を必要としない蛍光ランプに代わり得る高効率の実用光源の開発見込みが薄い現在、蛍光ランプの品質向上にとどまらず、省資源面からも定水銀の新しい製法の開発が要求される。水銀合金法も現実的に有効な解決策であり、またその技術は他の水銀封入法にも応用が広い。

現在、蛍光ランプは単なる直管や円形状のものにとどまらず、電球形などさまざまな応用展開が行なわれている²⁵⁾。水銀の封入は、これらの基本技術としてますます重要な課題であるといえる。

参 考 文 献

- (1) 電球工業会報 302 (昭58.4)
- (2) 米国特許：3,385,644 (1966)
- (3) 特公昭 48-12385
- (4) 特開昭 52-146075
- (5) Giorgi, T. A., dellaporta, P.: Residual Gass in Electron Tubes (1972) 123
- (6) 特開昭51-172708
- (7) 大森：照学誌 64-1 (昭55) 30
- (8) 照明学会：けい光ランプの水銀代替に関する調査研究報告書 (昭49)
- (9) 照明学会：照明のデータブック (昭45) 107
- (10) 真室：照学誌 42 (昭33) 135
- (11) 特公昭51-38191
- (12) ㈱日本電球工業会：昭和52年度電気器具の有害物質除去に関する調査研究報告書 (昭53.5)
- (13) ㈱日本電球工業会：蛍光ランプ処理対策調査報告書 (昭49) 24~25
- (14) 広田ほか：照学誌 60-2 (昭51) 72
- (15) 照明学会：照明のデータブック (昭45) 114
- (16) 広田ほか：昭49照学東京支部大会 (昭49) 3
- (17) 電波新聞 昭52.2.1
- (18) Hirota, T. et. al.: J. Light & Vis. Env. 1-1 (1977) 1
- (19) Rabusin, E., Perego, R.: Light. Res. Tech. 15-1 (1983) 32
- (20) たとえば特公昭49-5659
- (21) SAES社：GEMEDIS 仕様 (St 101, St 505) による。
- (22) Тугелд, Е. М.: Светотехника 2-7 (1963)
- (23) 特公昭55-46617
- (24) 広田ほか：昭50照学全国大会 (昭50) 16
- (25) 広田、鈴木：照学誌 67-11 (昭58) 552

(受付1983年11月9日)