

高周波点灯時における蛍光ランプの寿命末期現象

正会員 明星 稔 (松下電器産業㈱) 専門会員 福政 修 (山口大学)

Phenomenon of End of Life in a Fluorescent Lamp under High-Frequency Operation

Member Minoru Myojo (Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.) and

Fellow member Osamu Fukumasa (Yamaguchi University)

ABSTRACT

The mechanism that causes the end of lamp life (EOLL) phenomenon in a fluorescent lamp should be clarified to better understand the EOLL. The phenomenon, including the tungsten sputtering from an electrode, is investigated. We observed the electron emission from a lead in the vicinity of the stem glass resulting in the intermittent pulse discharge that heated up the stem glass. The comparison of the stem glass resistance and the glow discharge impedance at an interval of leads after disconnection of the filament indicates whether or not the stem glass will begin to soften. It was shown that the heating of a small glass portion around the lead by the intermittent pulse discharge or the concentration of discharge current into one of leads was a dominant factor that resulted in the final stage of EOLL.

KEYWORDS : fluorescent lamp, end of lamp life (EOLL), emissive material (coating), depletion, electrode, filament, electronic ballast, electron emission, alkali metal adsorption, adsorbate.

1. はじめに

近年主流となった、インバータ電子点灯回路による蛍光ランプの高周波点灯システムは、効率向上や調光などの機能付加に大きく貢献した。しかしながら、この照明システムが普及する過程で、蛍光ランプの寿命末期にランプ端部の温度が過上昇する場合があることが分かり、システム全体における整合・最適化が新たな技術課題として認識された。

その解決のため、インバータ電子点灯回路に蛍光ランプの寿命末期検出手段を内蔵させて、蛍光ランプを点灯停止させるという技術対策が採られた¹⁾。そうした寿命末期検出手段の動作信頼性と適否を判定するための基準試験回路の規定化が、現在 IEC (International Electrotechnical Commission)²⁾、ANSI (American National Standards Institute) および(株)日本電球工業会で進められている。

一方、蛍光ランプにおいても、その口金内に温度ヒューズを内蔵しランプ端部の温度過上昇を停止させること³⁾、またランプ内に消弧性ガスを発生させ主放電を止めたり⁴⁾、あるいはセラミック板⁵⁾⁶⁾やリードガラス⁷⁾を電極近傍に設けたりして、電極寿命に至った蛍光ランプの温度過上昇移行確率を下げることの、さまざまな取り組みが知られている。

こうした対策を効果あるものとするためには、蛍光ランプの寿

命末期現象を正しく把握することが重要であるが、この分野の研究報告はこれまでのところない。そこで本論文では、寿命末期に至った蛍光ランプの電極近傍で生じる複雑でさまざまな現象のうち、とくに解明が未着手の、(a)ステム溶融開始のプロセスと(b)間欠的なスポット放電発生メカニズムについて考察する。

本論文の構成は次のとおりである。第2章で蛍光ランプ寿命末期現象を概説するとともに、解明すべき点を指摘した。第3章で実験装置および方法を述べ、第4章でステム溶融の開始条件とそれに至る直前の混合伝導の果たす役割と間欠的なスポット放電について、結果と考察を述べた。最後に第5章でそれらをまとめた。

2. 蛍光ランプ寿命末期現象の概要と検討事項

本論に入る前に、第3.2節に記述の強制点灯試験回路を用いて認識された蛍光ランプの寿命末期現象について、図1(現象のフロー)および図2(ランプ端部ピン間 $I-V$ 特性の模式図)に従って概説する。

図1前半を参照して説明する。

フィラメントに塗布したエミッタ〔電子放出物質：アルカリ土類三元系酸化物(BaSrCa)O〕が枯渇すると陰極降下電圧が上昇し、放電の電極ロスが増加して電極周辺温度は上昇する。陰極降下電圧の上昇は、ランプ電圧を上昇させるとともに、ランプに並列のコンデンサの端子間電圧を上昇させてフィラメント電流を増大させる。それによるフィラメント温度の過上昇はステム方向への輻射熱およびリード線を介した熱伝導を増大させる。その結果として、リード線根元部分を中心にステム表面温度は上昇する。

本論文の一部は平成14年度照明学会全国大会(2002.8.8)で明星稔が報告した。
本論文の一部は(株)日本電球工業会蛍光ランプ技術委員会(2002.9.27)で明星稔が報告した。

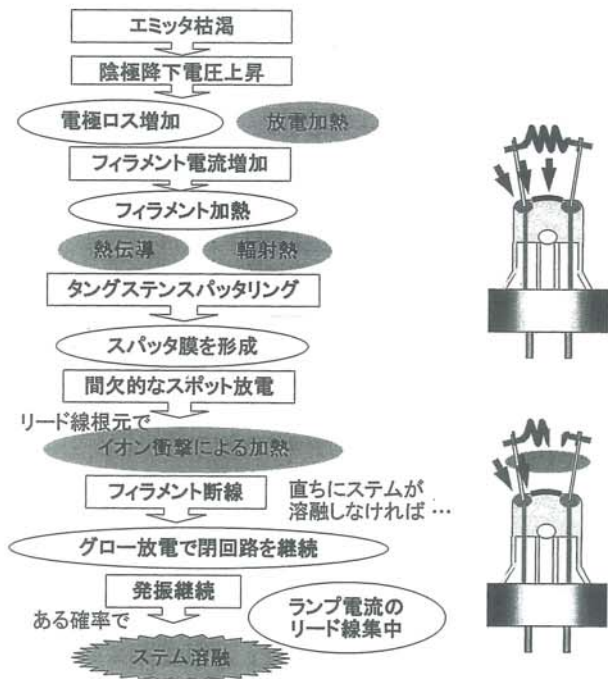


図1 蛍光ランプの寿命末期現象の概要
Fig. 1 Outline of phenomenon in end of life in a fluorescent lamp.

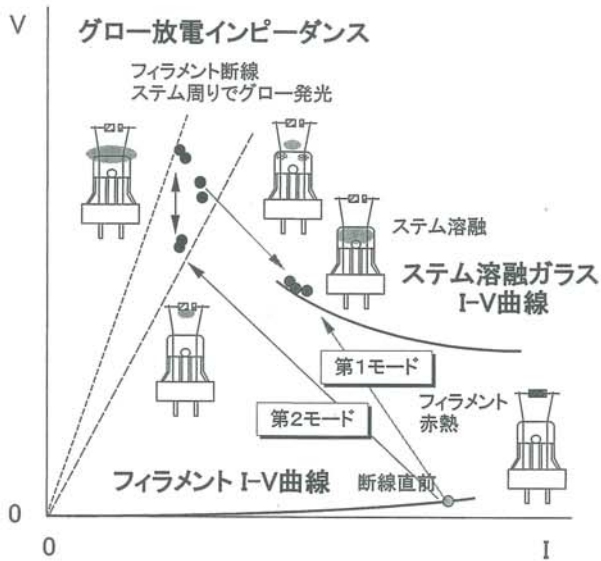


図2 ランプ端子間 I-V 特性の模式図
Fig. 2 View showing a frame format of I-V characteristic between leads.

一方、陰極降下部のイオンは、イオン衝撃によってフィラメントやリード線表面からタングステン金属原子やニッケル金属原子を叩き出し、ライフ中に蒸発飛散したエミッタ由来の皮膜に積層する形でステム表面などに金属皮膜を形成する。

さらに、新たに認識すべき寿命末期現象として、著者らはエミッタが枯渇後しばらく時間が経過してから、ステムガラス近傍のリード線根元において、間欠的なスポット放電を観測した。このスポット放電によって、リード線根元とその近傍の温度は他よりもさらに上昇すると考えられる。

図1後半と図2を参照して説明を続ける。

ステム表面への上記熱履歴を背景にしてフィラメントが断線す

ると、速やかにステム溶融に至る場合（第1モードと呼ぶ）とそうでない場合（第2モードと呼ぶ）の2通りの移行プロセスが考えられる。

速やかにステムが溶融する第1モードの場合に、その前駆現象として

- (1) 片側リード線にランプ電流が集中し、それに伴う発熱と熱伝導により、リード線根元のステムガラスが急峻に軟化し流動し始める
- (2) リード線間ステム表面の金属皮膜中の電子伝導がステム発熱に関与する⁶⁾⁷⁾

ことが、それぞれ可能性として考えられる。(1)に関しては、第1モードの前駆現象に必ずしも限定されないが、これまでの試験サンプルの解析でリード線が溶融しその溶融部が根元方向に移動してその先端を丸めた状況証拠が、実際に確認されている。

一方、速やかにステムが溶融しない第2モードならば、フィラメント断線部を含むリード線間でグロー放電が生じ、それによってコンデンサ予熱型電子点灯回路（後述）のフィラメント電流回路は閉回路のまま、点灯を継続することができる。フィラメントが断線した蛍光ランプにおいても点灯が継続されることで、その後の点灯経過次第でステムが溶融する場合が考えられる。

その他に、第2モードの状態でも何も無く一旦は点灯を終了し、電極部が冷却した後の再起動時に、第1モード前駆現象の可能性(1)と同じ現象が生じてステム溶融に至る場合（第3モードと呼ぶ）が考えられる。

以上で述べた現象などを踏まえ、本論文では、

- (a) ステム溶融開始のプロセス
- (b) 間欠的なスポット放電発生メカニズム

の2点の解明を目指す。そのための実験装置および方法を次章に記す。

3. 実験装置および方法

3.1 供試ランプ

試験に供せられた蛍光ランプは、ベースライト照明を主用途とする36形2本管コンパクト蛍光ランプ（FPL36）と、20形直管蛍光ランプ（FL20SS/18）である。ステム溶融開始のプロセス解析にはFPL36が、間欠的なスポット放電発生メカニズム解析にはFL20SS/18が、それぞれ用いられた。

3.2 強制点灯試験回路

蛍光ランプの寿命末期現象を追跡調査するためには、特殊な電子点灯回路を用意する必要がある。一般的に実用される回路構成に少し変更を加えて、強制点灯可能な回路を用意した。

蛍光ランプをインバータ点灯させる電子回路は、フィラメント予熱回路方式によって、大きくはコンデンサ予熱型（以降C予熱型と記す）と巻線予熱型の2タイプ（図3(a), (b)参照）に区別される。両者回路方式のうち、蛍光ランプの寿命末期現象がとくに問題となるのは、C予熱型電子点灯回路の方である。それは、C予熱型電子点灯回路内部のフィラメント電流回路が比較的高い定電流性を有し、それがフィラメント断線後のリード線間の通電特性にも強く影響するためである。

C予熱型電子点灯回路は通常、図3(a)に示すC1の位置にコンデンサを配置して実用点灯されるが、本実験では、蛍光ランプの寿命末期現象を強制的に進行させるために、図3(a)の構成にさらにコンデンサC2を配置する構成の、1灯用電子点灯回路（図4参照）を使用した。図4のスイッチ短絡操作により、フィラメントが断

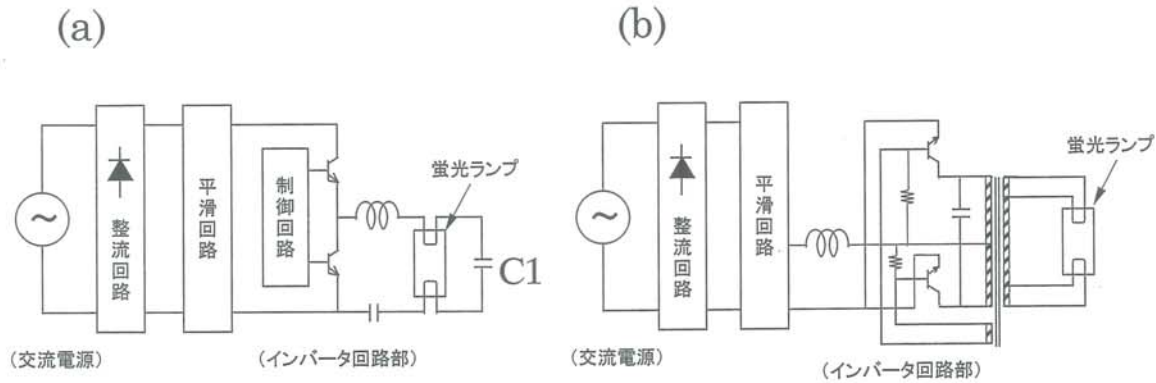


図3 C予熱型電子点灯回路(a)および巻線予熱型電子点灯回路(b)
Fig. 3 Electronic lighting ballasts having a cathode heating device with capacitor (a) and with winding transformer (b).

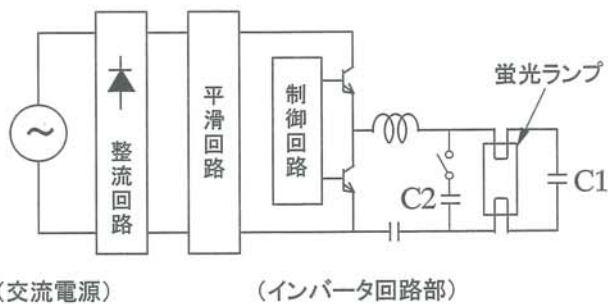


図4 強制発振式電子点灯回路
Fig. 4 Electronic lighting ballast having a forced oscillation function.

線した後もランプ端子間の電圧を高く維持したまま、点灯を継続させることができる。

3.3 測定装置および方法

図4の点灯試験回路と組み合わせて点灯させた蛍光ランプのランプ電圧および電流波形を、オシロスコープ (Tektronix 製, TDS3014) とカレントプローブ (Tektronix 製, TCP202) を用いて測定した。フィラメントに塗布したエミッタが枯渇する状態を想定し、蛍光ランプの片側フィラメントには、少量のエミッタを塗布するか、あるいは全くエミッタを塗布しないフィラメントを使用した。その電極側リード線間の電流、電圧および電力 (実効値) を高周波パワーメータ (YOKOGAWA 製, WT1030) により測定し、そのデータを0.4秒毎にサンプリングしコンピュータに取り込んだ。また、寿命末期現象の推移を、必要に応じて市販のデジタルビデオカメラを用いて観察した。

ステムガラスのガラス比抵抗を求めるための実験装置を図5に示す。リード線間のステムガラスを輻射加熱しながら、リード線上部とフィラメントを除いたリード線間のDC抵抗を、高抵抗の測定が可能なマルチメータ (HP 製, 34401A) を用いて測定した。図5の2つのステムガラスには少量のセラミック接着剤で熱電対を固定し、両者ステムガラスの温度に大差のないことを確認して後に、測定対象のステム (熱電対なし) が支持体 (材質 SUS304) にセットされた。また、構成が図5とほぼ同様ながらステム支持体の材質をベークライト板に変更した治具、および上述のマルチメータに代わる LCR メータ (HP 製, 4194A) を用いて、リード線間ステムガラスの高周波インピーダンスも測定した。なお、ステムガラスを一方から輻射加熱する条件は、実際の寿命末期現象における熱の流れがランプ中央方向から端部方向に向うことに

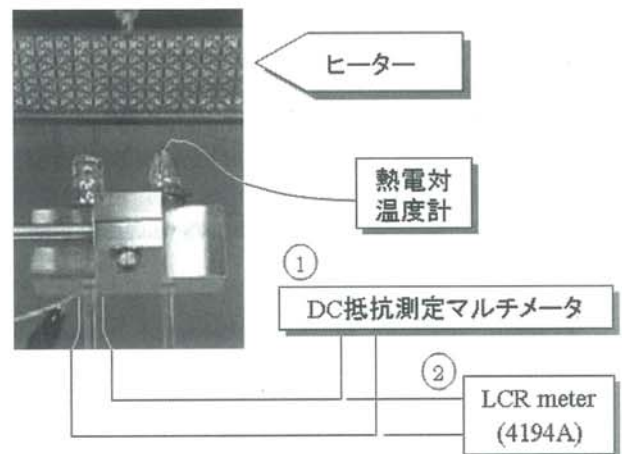


図5 ステム輻射加熱装置
Fig. 5 Apparatus that heats a stem glass by radiation.

配慮して決められた。

ステムガラス近傍のリード線表面でアルカリ吸着層の存在を確認するため、走査型電子顕微鏡 (SEM: 日立製, S-2380N)、オージェ電子分光 (AES: 日本電子製, JAMP-10S) および電子線マイクロアナライザ (EPMA: 日本電子製, JXA-8900R) を用いて分析した。

4. 実験結果と考察

本章では次の2点:

- (a) ステム溶融開始のプロセス
(ステム溶融開始インピーダンスとグロー放電インピーダンスの関係)
- (b) 間欠的なスポット放電発生メカニズム
を中心に議論を進める。

4.1 ステム溶融開始のプロセス

4.1.1 リード線間 I-V 特性

蛍光ランプ FPL36の片側フィラメントにエミッタを塗布しないランプを図4の強制点灯試験回路と組み合わせて点灯させ、エミッタを塗布しない電極側のリード線間の電流、電圧および電力を測定した。16例測定したサンプルのうち2例の結果につき、電流、電圧の経時変化とそれら I-V 特性を図6(a)~(d)に示す。

各ランプの電極近傍の状態に応じて、リード線間の電流、電圧

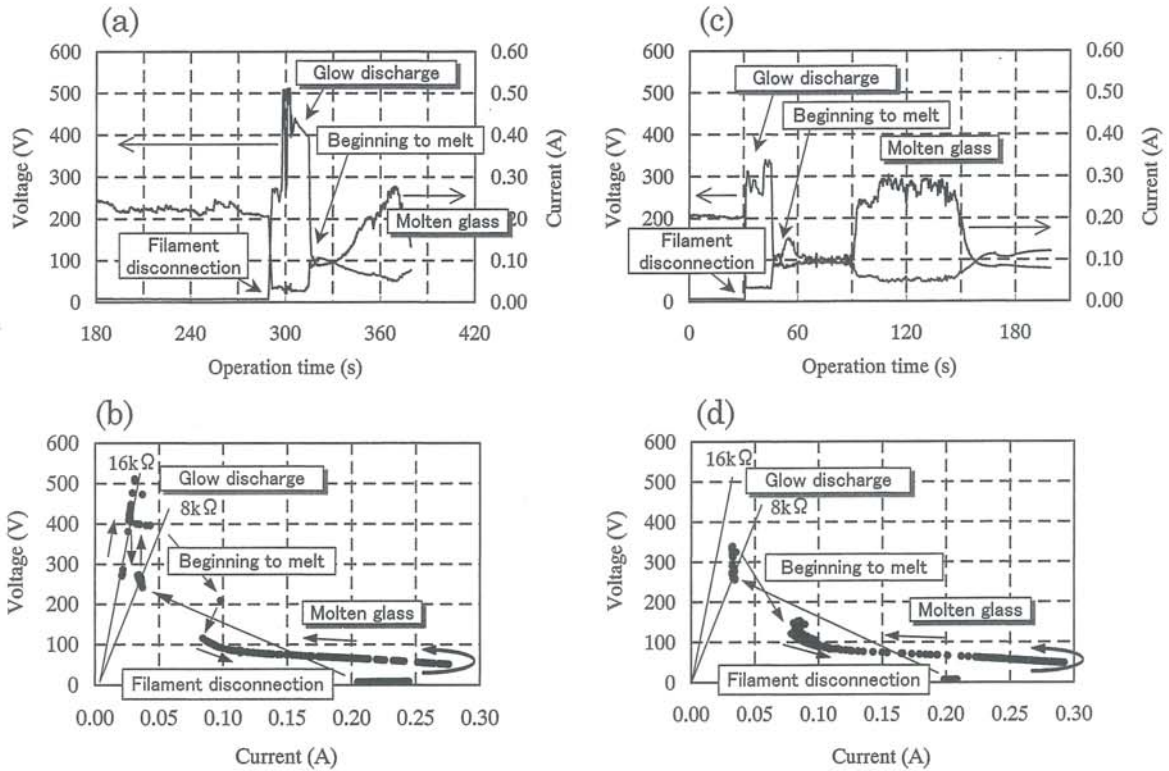


図6 リード線間の電流、電圧変化(a), (c)およびその I - V 特性(b), (d) (2例: FPL36)
 Fig. 6 Time variations of current and voltage at an interval of leads (a),(c) and their I - V characteristics (b),(d) (FPL36).

の経時変化はさまざまな形態を示すが、図6(a), (c)の結果もその例外ではない。しかしながら、それぞれの電流、電圧の経時変化を I - V 特性の形に変換すれば、図6(b), (d)に示すように、その現象推移はある一定のパターンで表すことができる。すなわち、断線前のフィラメント→断線後のグロー放電→ステム溶融開始直後→ステム溶融進展といった各ステップにおいて、リード線間インピーダンスはそれぞれの値あるいは範囲に収斂している。そのパターンの変動要素として、フィラメント寸法、フィラメント断線形態、リード線間距離、ステムガラス材質、封入ガス組成・圧力などを挙げることができる。

図6(b), (d)の2例につき、詳述すると以下のとおりである。フィラメントが断線する直前のコイルインピーダンスは30~35Ω (電力は約1.5W, 力率は約0.98)で、フィラメント断線直後のグロー放電インピーダンスは8.0k~8.4kΩ (電力は6.8W, 力率は約0.73)であった。グロー放電インピーダンスは、その発生部位に依存し、8k~16kΩの間で変化した (その間の電力は3.2~7.4W, 力率は0.33~0.82)。ステム溶融開始直後のインピーダンスは1.4kΩ (電力は約9.7W, 力率は0.99)であった。その後ステム溶融の進行に伴い、0.99以上の高力率を維持したままステム溶融のインピーダンスは、図中の Molten glass に記載の往復の矢印が示すように、1.4kΩ→0.2kΩ→1.5kΩ (その間の電力は9~14W)と変化した。ステム溶融のこうしたインピーダンス変化の結果より、ガラスの軟化が進行するにしたがってイオン伝導の導電断面積を拡大させていく様子や、その後に、ガラス母体が流動してその導電距離を延長させながら、逆に導電断面積を縮小させていく様子などが伺い知れる。ちなみに、一般にステムに使用される軟質系ガラス内部の電気伝導形態はイオン伝導であり、金属中の電気伝導形態の電子伝導とは異なる。

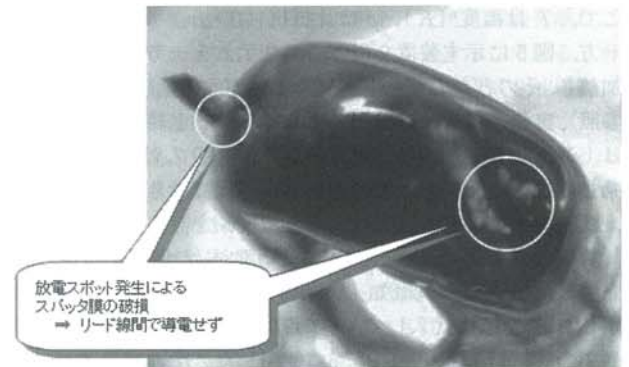


図7 リード線根元の金属皮膜破損箇所 (FL20SS/18)
 Fig. 7 Places that intercept electronic conduction of metallic film on the stem glass in the vicinity of both leads (FL20SS/18).

図6(b), (d)のような I - V 特性評価は、ステム溶融開始前後のリード線間インピーダンスを明らかにできる点で重要である。その結果は、次項以降で進めるステム溶融開始の条件把握やメカニズムの理解に役立てることができた。

ところで、第2章に記載の、前駆現象の可能性(2)で取り上げたように、ステム表面に形成された金属皮膜は、リード線間で電子伝導しフィラメント断線後のジュール加熱によってステムを溶融させるとの諸説⁹⁾がある。その場合には、金属皮膜による電子伝導のリード線間抵抗は、グロー放電インピーダンスよりも十分に小さいと言える。すなわち I - V 特性で見れば、フィラメント断線後の動作点 (I, V) はグロー放電を経由せずに、直接ステム溶融モードに入ることが予想される (第1モード: 図2参照)。

しかしながら、図6(b), (d)など今回の多くの実験結果 (16例)

を見る限りにおいて、そのような兆候はなく、すべてのサンプルがグロー放電モードを経由した。そうした実験結果や、スポット放電の発生（第4.2節参照）によってリード線根元に電子伝導を妨げる金属皮膜消失部位が生じるという結果（図7参照）は、リード線間では電気伝導せず、したがって金属皮膜の電子伝導だけでは、ステムは熔融に至らないことを示している。実際にフィラメントが断線し寿命末期試験を終えたサンプルを見る限り、リード線間の抵抗値は絶縁レベルであった。ただし、スポット放電が発生しない設計のランプの場合には別の議論が必要であり、また後述する混合伝導の議論と合わせ、本論文は金属皮膜の果たす役割を過小評価しない。

4.1.2 ステムガラスのイオン伝導特性評価と混合伝導

ステムガラスのイオン伝導特性ならびに金属皮膜を被着させたステムガラスの混合伝導特性を評価するため、まずDC抵抗測定からステムガラス内部の有効導電断面積を推定した。実際のステムは高周波点灯（数十kHz）で高温下に晒されたランプ内部に存在しており、DC測定時の有効導電断面積の値が高周波インピーダンス（抵抗成分）にも適用できると仮定して、高温時における高周波インピーダンスの大きさおよびイオン伝導による導電距離を見積もった。その計算結果より、リード線根元部分のステム温度とその部分の母体ガラスが、それぞれどの程度の大きさ、どのような状態となってステム熔融に至るかを推察した。

(a) 有効導電断面積の推定

高温域を含むステムガラスの比抵抗は、図8に示すようにガラスメーカー情報（3点のプロットデータ）から式(1)で与えられる。

$$\log \rho = -2.720 + 5.672 (1000/T) \quad \text{.....(1)}$$

ここで、 T は温度[K]、 ρ は比抵抗[$\Omega \cdot \text{cm}$]である。

一方、図5に示す装置を用いて、ステムを一方向から一定温度に加熱し、そのときのリード線間のDCガラス抵抗を測定した（表1参照）。実測の各ステム温度(i)におけるリード線間のガラス抵抗(ii)は、適当な S/L 値（ S は導電断面積[cm^2]、 L は導電距離[cm]）を乗じることによりある値の比抵抗(iii)に換算できる。その比抵抗は、式(1)を用いてその値に対応する温度(iv)を与えるから、実測(i)と計算(iv)のステム温度が一致するように S/L 値を決定すれば良い。導電距離 L は実測既知（ $L=0.70\text{cm}$ ）であるから、その値を、決定した S/L 値に代入して、有効導電断面積 S は算出される。

表1の計算結果より、FPL36に使用したステムガラスの有効導電断面積は $S=0.009\text{cm}^2$ と見積もられた。その断面形状を円形に見立てたとき、その直径は約1mmである。この結果に関連して、有

効導電断面積の温度依存性と導電距離依存性について考える。温度が高いほど有効導電断面積は増大することも予想されたが、計算結果からは、その温度依存性はかなり小さいと思われる。一方、上記結果は表面から約1mmの表層のみがイオン伝導に関与していることを示すが、外部一方向からステムガラスを放射加熱する本条件下では、有効導電断面積は導電距離には依存しないと言える。

(b) ステムガラスの高周波インピーダンス特性

DC抵抗からの比抵抗算出で求めた上述の有効導電断面積の値（ $S=0.009\text{cm}^2$ ）が、高周波インピーダンスに対しても適用できると仮定した。

周波数をパラメータにした、室温におけるリード線間ステムガラスの高周波インピーダンス特性を図9に示す。容量成分は極めて小さく（数100fF）、そのほとんどを抵抗成分とみなすことができる。周波数10k~100kHzにおける高周波インピーダンスは42.7M~4.2M Ω で、代表的点灯周波数である45kHzでは10M Ω 弱であった。周波数45kHz、各ステム温度における高周波インピーダンスの実測値から、図10に示すような高周波比抵抗直線を求めた。このArrheniusプロット表現で2直線が得られたことに関して、ここでは考察しない。2直線のうち、高温 T [K]側の直線：

$$\log \rho = 4.422 + 0.240 (1000/T) \quad \text{.....(2)}$$

を用いて、軟化点までの領域の比抵抗 ρ [$\Omega \cdot \text{cm}$]を見積もった。式(2)に従うと、周波数45kHz、ガラス軟化点（615 $^{\circ}\text{C}$ ）における比抵抗は $\log \rho = 4.69$ と与えられる。寿命末期時には電子点灯回路の

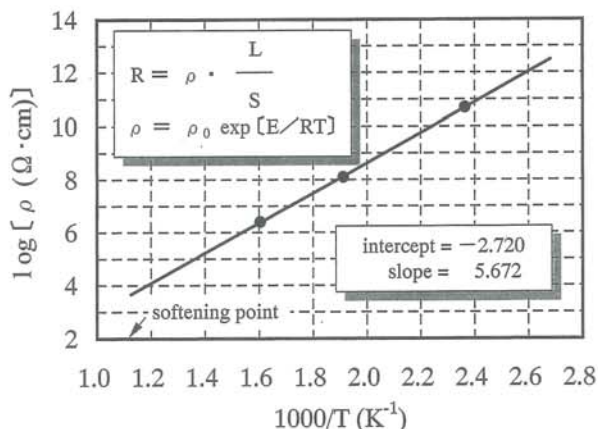


図8 ステムガラスの比抵抗 (FPL36)
Fig. 8 Electrical resistivity of the stem glass (FPL36).

表1 ステムガラスの比抵抗と有効導電断面積の見積もり (FPL36)

Table 1 Estimation of an effective cross-section area for ionic conduction of the stem glass having some value of electrical resistivity (FPL36).

輻射加熱された ステムの表面温度 ($^{\circ}\text{C}$)	リード線間抵抗 (Ω)	導電距離 $L = 0.70$ cm (実測)	比抵抗 $\log [\rho (\Omega \cdot \text{cm})]$	ステム表面温度 (計算値) ($^{\circ}\text{C}$)
450	7,590,000	有効 導電断面積 $S = 0.009$ cm^2 (Fitting)	4.989	463
500	2,954,500		4.580	504
550	1,364,000		4.244	542
600	500,000		3.808	596

(i)

(ii)

(iii)

(iv)

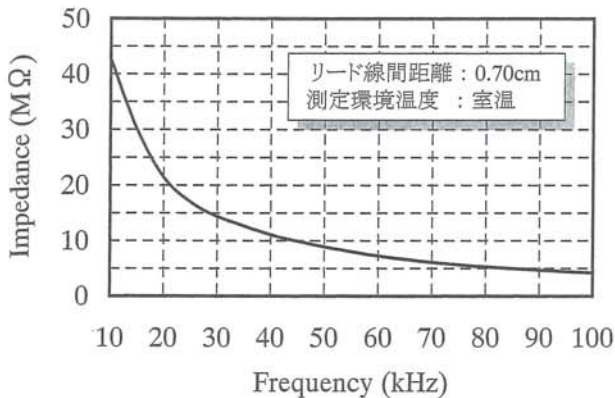


図9 リード線間ステムガラスの高周波インピーダンス特性 (FPL36)
Fig. 9 High-frequency impedance characteristic of the stem glass between leads at room temperature (FPL36).

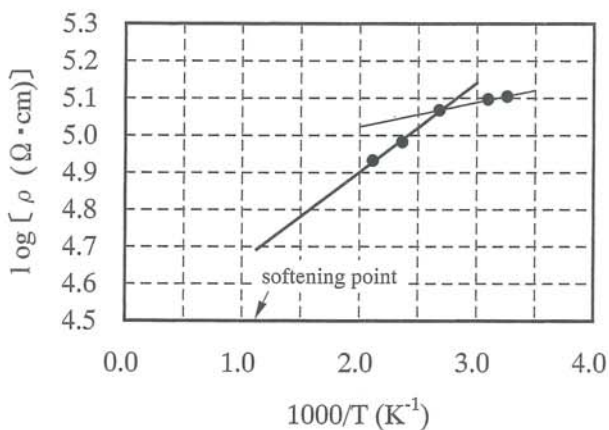


図10 ステムガラスの高周波・比抵抗特性 (FPL36)
Fig.10 High-frequency electrical resistivity of the stem glass (FPL36).

動作周波数が上昇することに配慮し、同様に、周波数100kHzのときの比抵抗も見積もった (概略 $\log \rho = 4.34$).

(c) ステムガラス溶融開始に關与する混合伝導

第4.1.1項で、金属皮膜の電子伝導だけでステムは溶融しないと述べたが、それではガラス中のイオン伝導だけでステムは溶融するのであろうか？ まずはそれを検証する。

リード線間のステム表層の全域が軟化点温度 (615°C) にまで達していたとすると、それによるリード線間のインピーダンスは：

$$R = \rho \cdot (L/S) = 10^{4.69} \cdot (0.7/0.009) = 3.8 \text{ [M}\Omega\text{]} \quad \dots\dots\dots(3)$$

となり、この値は図6(b), (d)で求めたグロー放電インピーダンス (8 k~16kΩ) よりもかなり大きい。この計算結果は、フィラメント断線後にフィラメント電流回路の電流は、ガラス中よりも放電空間を導電経路として選択し流れることを意味し、それと同時に、ガラス中のイオン伝導だけではステム溶融を開始させることができないことを物語っている。

これまでの検討内容を総合すると、金属皮膜の電子伝導単独、あるいはガラス中のイオン伝導単独では、ステム溶融を開始できないことが明らかとなった。したがって、ステムガラス内部と表面におけるリード線間の“最初の”電気導電機構は、それら両者が關与した“混合伝導”であると結論付けられた。その点につい

て、図6(b), (d)の2例を参照しながら、さらに考察を続ける。

(d) リード線根元部の温度

次に、ステムガラスの表面とその内部表面近傍の混合伝導によって、どのような条件下で、リード線間インピーダンスがグロー放電インピーダンスを下回ることができるか、すなわちフィラメント電流回路の電流がステムガラス内部を流れ始めることができるか、を検証する。そのために、次の3点：

- (1) 電子伝導にかかる金属皮膜の抵抗はゼロ
- (2) 両側 (あるいは片側) のリード線根元部合計のイオン伝導導電距離は $L=0.1\sim 0.2\text{cm}$
- (3) その導電断面積は $S=0.009\text{cm}^2$

を仮定する。

第4.1.1項より、ステム溶融開始プロセスに至る直前のグロー放電インピーダンスは約8 kΩ、またステム溶融開始直前のインピーダンスは約2 kΩであったから、リード線根元ガラスの比抵抗は：

$$\begin{aligned} \text{(i) } L=0.1\text{cm, } S=0.009\text{cm}^2\text{のとき,} \\ \rho &= R \cdot (S/L) \\ &= (2000\sim 8000) \cdot (0.009/0.1) \\ &= 180\sim 720 \text{ [}\Omega \cdot \text{cm}\text{]} \quad \dots\dots\dots(4) \\ \log \rho &= 2.26\sim 2.86 \quad \dots\dots\dots(4)' \end{aligned}$$

$$\text{(ii) } L=0.2\text{cm, } S=0.009\text{cm}^2\text{のとき,} \\ \log \rho = 1.95\sim 2.56 \quad \dots\dots\dots(5)$$

となる。これら比抵抗の値は、ガラス軟化点 (615°C) における比抵抗 $\log \rho = 4.69$ (45kHz) [参考： $\log \rho = 4.34$ (100kHz), $\log \rho = 3.67$ (DC)] よりもかなり小さい。この計算結果は、リード線根元部ガラスの温度が軟化点をはるかに超え、比抵抗評価を離れ、その部分の母体ガラスは既に流動していることを示している。導電断面積の大きさ ($S=0.009\text{cm}^2$) を1/2~2倍だけ増減させ再計算しても、得られる結論に変わりはない。

ところで、上述の仮定(2)でイオン伝導の導電距離 L を“リード線根元部合計の導電距離 L ”と表現したが、両サイドのリード線根元部がいつも同時に軟化点以上の温度になっている必要はない。ランプ端子間の主放電ランプ電流が片側リード線に集中する場合のあることを考えれば、片側リード線根元部のガラス中イオン伝導導電距離のみに注目することは許される。すなわち、片側のリード線根元部がイオン伝導して、インバータ電源側に接続されたリード線と金属皮膜を電氣的に結合すれば、この金属皮膜はランプ端子間主放電の電極として機能する。そして、電極として機能した金属皮膜の温度が上昇し、金属皮膜の地下・表面近傍のステムガラスを通じて、イオン伝導した側のリード線根元部は反対側のリード線根元部へとイオン伝導導電距離を伸ばし、最終的にはリード線間でイオン伝導することが考えられる。図6(b), (d)のグロー放電から溶融ガラスへのインピーダンス変化は、上述した現象推移の最終過程を表していると考えられる。

4.2 間欠的なスポット放電発生メカニズム

第4.1節は、リード線間ステムの混合伝導のうち、リード線根元部ガラスのイオン伝導に力点を置いて、ステム溶融開始のプロセスを解明した。

ここでは、リード線根元部ガラスを局所加熱する原因の1つと推察される、リード線根元からの間欠的な電子放出現象 (図11参照) の、発生メカニズムについて考察する。

スポット放電に關連すると思われるランプ電流波形として、図12(a), (b)に示すように2パターン振幅の大きい電流波形が観測



図11 間欠的スポット放電をもたらすリード線根元からの電子放出現象 (FL20SS/18)

Fig.11 Electron emission phenomenon from a lead in the vicinity of the stem glass that causes an intermittent electric spot discharge (FL20SS/18).

された。ただし、前者の波形パターン (図12(a)) は、リード線根元からの電子放出現象 (図11) とは必ずしも同時には発生しないことが明らかとなったため、本考察からは除外した。常に同時に観測される後者の波形パターン (図12(b)) が、リード線根元からの間欠的な電子放出現象を表していると言える。ランプ内の特定箇所からのこのような現象は、外部回路の駆動システムで説明することが難しく、ランプ内の要因に基づいていると考えるべきである。

以下では、電子放出に関係する物理現象の一つである“金属表面にアルカリ金属原子が吸着してその表面の仕事関数が低下する現象”⁹⁾に注目した。なお、アルカリ金属原子の吸着層に関連して、放電空間における特定部位の γ 値(2次電子放出係数)が増大する可能性⁹⁾についても配慮を要するが、この点についてはさらに調査を継続することとし、本論文では取り上げない。以下で述べる仕事関数低減に因るとする現象に対して、 γ 作用の影響が排除されていないことに注意を要する。

4.2.1 アルカリ金属原子の金属表面吸着

1932年に Langmuir¹⁰⁾がアルカリ金属原子の吸着によりタングステンの仕事関数が低下することを見出して以来、近年におけるアルカリ吸着層に関する理論には、2通りの考え方がある。その一つは、イオン化ポテンシャルの小さいアルカリ金属原子が金属表面上で正にイオン化または分極し、表面垂直方向を向いた双極子が生じる結果、とくにアルカリ吸着原子の被覆率が小さい範囲では、その双極子の数、すなわち吸着原子の被覆率に比例して、アルカリ吸着層の仕事関数は低下する⁹⁾¹¹⁾という考え方であり、部分的イオン化を含めて“イオン吸着”説を容認している。もう一方は、アルカリ金属の正イオン化条件：

$$\text{表面金属の仕事関数} > \text{アルカリ金属原子のイオン化ポテンシャル}$$

には無関係に、アルカリ吸着原子の真空側から表面側への電子分布の偏り、すなわち中間領域でのたまりによって大きな双極子能率が誘導され、アルカリ吸着層の仕事関数が低下する¹²⁾¹³⁾という考え方であり、“イオン吸着”説を否定している。この論争の課題認識は、海外においても同様である¹⁴⁾。

蛍光ランプの寿命末期現象におけるリード線根元からの電子放出現象に関して、アルカリ吸着層でイオン吸着が支配的であるか否かの知見は、電極近傍部材の材料設計を再調査する上で興味深い(別途報告予定)。しかしながら、本論文でまず認識すべきことは、一般によく知られた電極近傍部材である、鉄線にニッケルをめっきしたリード線と、ガラス中のアルカリ成分の酸化物換算含有量が Na_2O 約8重量%と K_2O 約4重量%のステムガラスを用いた蛍光ランプにあって、アルカリ金属が吸着したリード線金属表面の仕事関数は、他例(Cu(001)-K系)⁹⁾と同様であるならば、元の表面に比べて最大で約3 eVも低下し得るということである。この考えに従えば、仕事関数1.5~2.0eVのエミッタが枯渇した後の、電極およびその周辺金属部材の仕事関数が高い(W: 4.55eV, Fe: 4.5eV, Ni: 5.15eV)¹⁵⁾中にあって、赤熱したフィラメントのエミッション性を上回るレベルにまで、リード線根元の仕事関数が低下すればそこからの電子放出(図11参照)が可能となる。

リード線金属表面へのアルカリ金属吸着の事実を確認するため、寿命末期を想定したランプ点灯実験を行い、リード線根元か

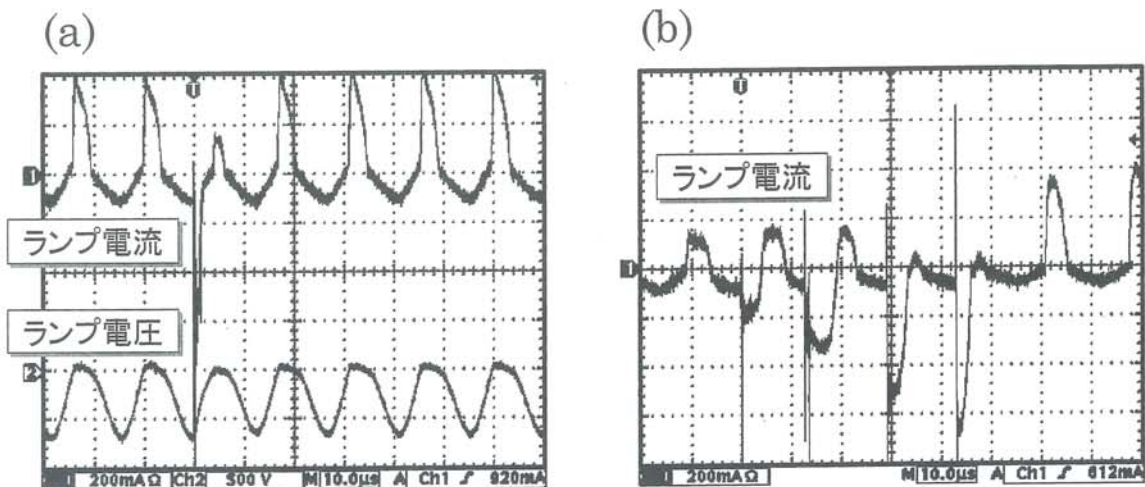


図12 大きな振幅を有する2パターンのランプ電流波形(a), (b) [片側電極にエミッタがない蛍光ランプ (FL20SS/18)]

Fig.12 Lamp current waveforms having a large pulse amplitude of two patterns (a), (b) in a fluorescent lamp (FL20SS/18) having no emissive coating on one of electrodes.

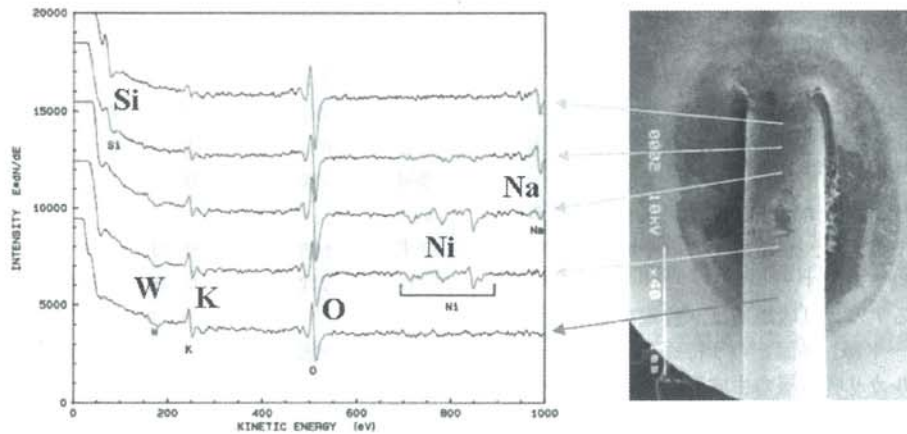


図13 リード線根元のオージェ電子分光分析 (FL20SS/18)
 Fig.13 Surface analysis of the lead in the vicinity of the stem glass by Auger Electron Spectroscopy (FL20SS/18).

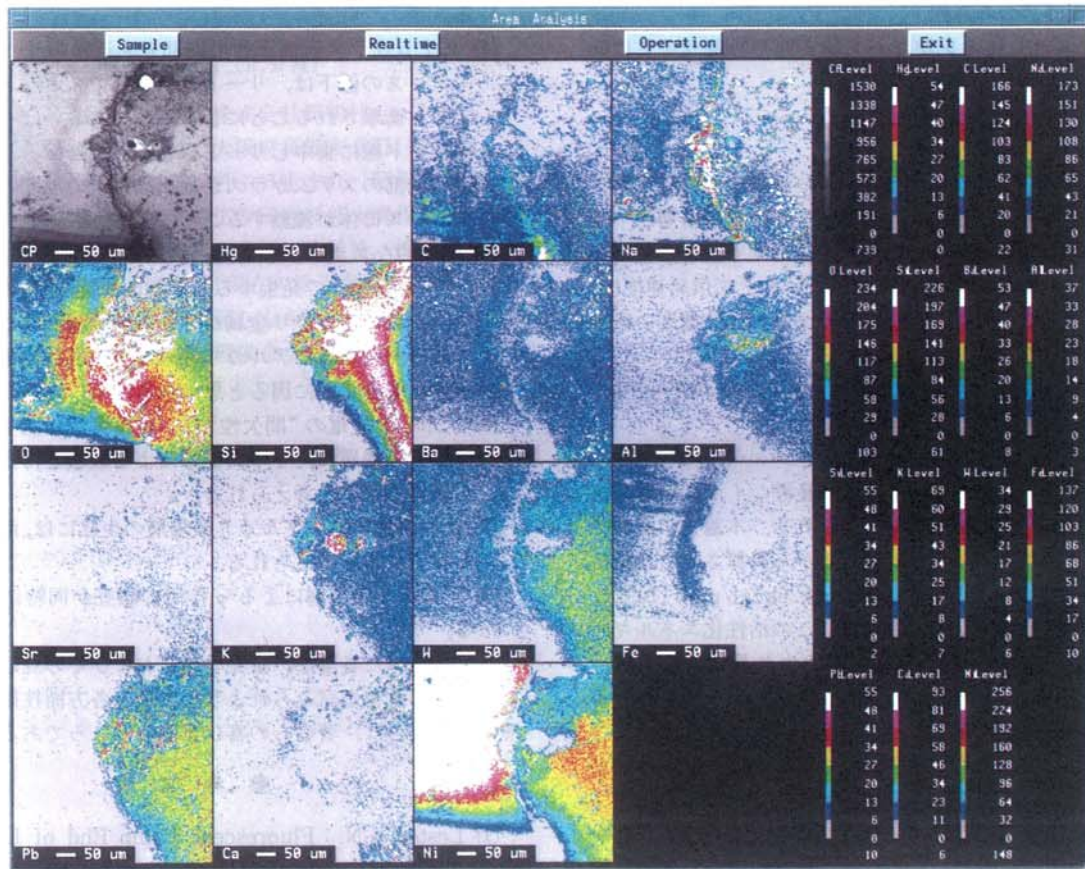


図14 リード線根元の電子線マイクロアナライザによる分析 (FL20SS/18)
 Fig.14 Surface analysis of the lead in the vicinity of the stem glass by Electron Probe Microanalyzer (FL20SS/18).

らの電子放出を2~3回経験したサンプルについて、表面分析を行った。図13にSEM写真とオージェ電子分光の結果を、図14に電子線マイクロアナライザによる分析結果を示す。それらによると、リード線とステムガラスの界面ではカリウムとより多くのナトリウムが検出され、ステムガラス界面から1~2mm程度離れたリード線表面からはカリウムがより多く検出された。両者のアルカリ金属は、上述いずれかの理論に基づいて、リード線根元からの電子放出に強く関与したことが考えられる。

4.2.2 アルカリ吸着層と間欠的スポット放電

ランプ内の対象部位の仕事関数が低下すればそこからの電子放出が可能になるが、その部位の仕事関数が十分に低い(500℃以下でも電子放出が可能なレベル)か否かによって、電子放出の形態は異なることが予想される。

すなわち、アルカリ吸着層の仕事関数の低下レベルおよび速度によって、その部位を陰極とする陰極降下電圧の大きさは制約を受け、電子放出に伴って発生するイオン衝撃の大きさは異なるこ

とが予想される。それによって、アルカリ吸着層は破壊されるか否かに分かれ、「間欠的」な電子放出形態をとるか「連続的」な電子放出形態をとるかが決まると言える。仕事関数が比較的高く、イオン衝撃が大きく間欠的な電子放出形態をとる場合に、リード線根元部ガラスは放電スポットとして局所的に高温になると考えられる。

したがって、以下に、仕事関数の低下速度に関係するアルカリ吸着層の生成速度について考える。現時点での取り組みは不十分なため、その考え方のみ以下に記す。

リード線根元に生成するアルカリ吸着層は、放電空間に接する固体(ガラス)－固体(リード線)界面という特殊な表面部位および環境下にある。そのアルカリ吸着層の生成過程には、まずはアルカリ金属原子が金属表面吸着サイトまで運ばれること、次に吸着の初期段階としての物理吸着過程があり、この吸着系ではさらに活性化遷移状態を経る活性化吸着過程があると考えた。主要過程の活性化エネルギーを比較することで、アルカリ吸着層生成に関する律速段階を特定することができる。

そのために、次の2つの過程：

- (1) ガラス中アルカリイオンがリード線表面の吸着サイトに向かう移動拡散過程
- (2) アルカリ吸着層の生成過程

に注目した。

まず、(1)ガラス中のアルカリイオンがリード線表面の吸着サイトに向かう移動拡散過程について考える。アルカリ吸着層が一度破壊された後に再度生成されるためには、吸着サイトまで新たなアルカリ金属原子が供給されなければならない。その供給速度は、ある温度に晒されたガラス中のアルカリイオンの拡散速度に依存すると考えることができる。

アルカリイオンの拡散係数 D は、その活性化エネルギー E_D で規定でき、

$$D = D_0 \exp(-E_D/RT) \dots\dots\dots(6)$$

その値はおおよそ $E_D = 15 \sim 20 \text{ kcal/mol}$ (参考：イオン伝導の活性化エネルギーは $15 \sim 30 \text{ kcal/mol}$)¹⁰⁾とされる。本論文の実験で使用したステムガラスの、図8および式(1)から計算された比抵抗 ρ (導電率 σ の逆数)の活性化エネルギーは 26 kcal/mol (109 kJ/mol)であり、上記文献値とはほぼ一致する。この活性化エネルギーが小さいほど、対象イオンの伝導や拡散が生じ易いと言える。 $E_D = 15 \sim 20 \text{ kcal/mol}$ という値の大きさも、ガラス中アルカリイオンの移動拡散の容易さを表している。

次に、(2)アルカリ吸着層の生成過程について考察する。リード線表面の吸着サイトに直接接触する初期アルカリ原子は、ランプ製作時の排気処理直後にも既に存在していたと考えられる。しかしながら、第4.2.2項に記載したものと同一材料組み合わせの電極近傍部材を用いた、片側フィラメントにエミッタを塗布しない蛍光灯ランプ(FL20SS/18)の点灯試験では、リード線根元からの電子放出は試験を開始してから直には観測されず、大抵の場合十数分以上の時間が経過してから観測された。この結果より、単なる初期物理吸着過程だけでは仕事関数の低下は難しく、さらなる吸着過程の進行を経てアルカリ吸着層は仕事関数を低下させたことが推察できる。ここに、活性化吸着を議論する余地がある。さらなる議論のためには、アルカリ吸着層の生成に関する、熱力学的考察を含めた速度論的説明が望まれる。

5. 結 言

本論文では2つのテーマ：

- (a) ステム溶融開始のプロセス
- (b) 間欠的なスポット放電発生メカニズム

を中心に、蛍光灯ランプの寿命末期時にランプ内で生じる現象について論じた。

得られた結果は以下のとおりである。

- (a) ステム溶融開始のプロセスに関して、
 - (1) フィラメント断線後、ステム溶融前にリード線間で発生するグロー放電インピーダンスは $8 \sim 16 \text{ k}\Omega$ であった(リード線間距離がおおよそ 7 mm の場合)。
 - (2) ステムガラス表面とその内部表面近傍のリード線間インピーダンスが $2 \text{ k}\Omega$ を下回ってから、ステムは溶融し始めた。
 - (3) ステムガラス表面とその内部表面近傍のリード線間の初期電気伝導は、リード線根元部ガラスのイオン伝導とステム表面金属皮膜中の電子伝導の組み合わせからなる混合伝導に因る。
 - (4) ステムガラス表面とその内部表面近傍のリード線間インピーダンスの低下は、リード線根元部でスポット放電が発生しイオン衝撃されることによる加熱、あるいはランプ電流が片側リード線に集中しリード線を介した熱伝導により、リード線根元部のステムガラスが軟化点以上の温度となり、局所的にガラス母体が流動することに因る。
- (b) 間欠的なスポット放電発生メカニズムに関して、
 - (5) リード線根元で発生するスポット放電は、ステムガラスから供給されたアルカリ金属がリード線金属表面に吸着し、そこで仕事関数の低いアルカリ吸着層を生成し、その部位から電子放出することに因ると思われる。
 - (6) スポット放電の“間欠性”は、仕事関数の低下が不十分なアルカリ吸着層の、イオン衝撃による破壊と再生が繰り返される結果であると考えられる。
 - (7) 仕事関数の低いアルカリ吸着層の生成には、活性化吸着過程が含まれると考えられる。
 - (8) アルカリ吸着層による γ 作用の調査が同時に求められている。

本文で述べた各論が、蛍光灯ランプおよびその点灯システムについて、より改善を試みられようとする各方面技術者の方々に参照されるならば、著者らの喜びとするところである。

参 考 文 献

- (1) Lester, J.N.: Fluorescent Lamp End of Life Shutdown Sense Methods, J. Illum. Engng. Soc., 31-2, pp.78-85 (2002).
- (2) IEC document: IEC34C Ballast Tests:EOLL (version: 000223a) (2000).
- (3) 日本国特許：特許第3032504号。
- (4) 日本国特許：特許第2980548号。
- (5) 日本国特許：特公昭42-22020。
- (6) 日本国特許：特開平11-238458。
- (7) 日本国特許：特開平6-338289。
- (8) 柄原浩、村田好正：アルカリ金属吸着層，応用物理，55-9, pp.850-862 (1986)。
- (9) 電気学会編著：電離気体論，オーム社，p.196 (1996)。

- (10) Langmuir, I. : J. Am. Chem. Soc., 54, p.2798 (1932).
- (11) 水野清義, 柝原浩 : 金属表面上のアルカリ金属吸着構造, 表面科学, 18-12, pp.789-795 (1997).
- (12) 塚田捷, 島信幸 : アルカリ単原子吸着層の電子構造, 応用物理, 57-11, pp.1678-1685 (1988).
- (13) 塚田捷著 : 表面物理入門, 東京大学出版会, pp.129-132 (1989).
- (14) Ebinger, H.D. et al. : Adsorption and diffusion of Li on an Ru(001) surface: an NMR study, Surface Science, 412/413 pp.586-615 (1998).
- (15) Michaelson, H.B. : The work function of the elements and its periodicity, J. Appl. Phys., 48-11, pp.4729-4732 (1977).
- (16) 作花済夫, 境野照夫, 高橋克明編集 : ガラスハンドブック, 朝倉書店, pp.717-737 (1981).

(受付日2002年11月21日/採録日2003年5月9日)

明星 稔 (正会員)



松下電器産業株式会社照明社
〒569-1143 大阪府高槻市幸町1-1
昭和31年10月7日生まれ。昭和56年3月広島大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月松下電器産業(株)に入社後、松下電子工業(株)照明事業部(現在の松下電器産業(株)照明社)に配属。蛍光灯設計グループに所属しながら、現在、山口大学大学院理工学研究科に在籍。応用物理学会会員。

福政 修 (専門会員)



山口大学工学部
〒755-8611 宇部市常盤台2丁目15-1
昭和21年1月8日生まれ。昭和48年3月京都大学大学院工学研究科(博士課程)学修。同年4月京都大学工学部助手, 昭和57年4月山口大学工学部講師, 昭和58年4月同助教授を経て, 昭和63年11月より山口大学工学部教授, 現在に至る。工学博士。電気学会, プラズマ・核融合学会, 応用物理学会, 日本物理学会, 電子情報通信学会, 電気設備学会会員。