蛍光ランプ陰極の予熱特性

正会員 明星 稔 (松下電子工業株式会社) 正会員 和氣 厚夫 (松下電子工業株式会社)
 専門会員 奥野 郁弘 (松下電子工業株式会社)

Preheating Characteristics of a Fluorescent Lamp Cathode

Member Minoru Myojo (Matsushita Electronics Corporation),

Member Atuo Waki (Matsushita Electronics Corporation)

and Fellow Member Ikuhiro Okuno (Matsushita Electronics Corporation)

ABSTRACT

High-frequency fluorescent lamp operation requires proper cathode preheating by electronic ballasts incorporating a preheating function. This paper examines minimum thermionic emission curves for three different ways of measuring emission times. One is based on a lamp ignition test, another on the ratio of hot to cold coil resistance (R_h/R_c), and the third on lamp voltage monitoring. The observation that the emission time measured by the lamp ignition method tends to be shorter than that measured by the lamp voltage monitoring method in a short preheat time may be understood in terms of the relaxation of the limited thermal conductivity of the emissive material due to the initial flow of the discharge current. We do not believe that the shorter emission time measured by the lamp ignition method causes premature thermionic emission. The R_h/R_c method needs much more investigation to measure emission times because it depends on the resistance of the whole cathode composed of the filament coil and the emissive material, whose specific heats differ.

This paper points out that the average resistance of a standardized cathode over the period up to the emission time should be regarded as a substitution resistor. Furthermore, the maximum preheating lines for the requirement in the present IEC should be changed into a maximum curve similar to the minimum thermionic emission curve.

KEYWORDS : fluorescent lamp, cathode, preheating, thermionic emission, electronic ballast.

1. はじめに

高周波点灯させる蛍光ランプの陰極を始動前に適正に予熱することは、蛍光ランプの寿命を確保する上において重要である。その適正予熱条件については、IEC(International Electrotechnical Commission)において定電流予熱モードの規格化が図られたが¹⁾、定電圧予熱モードについては規格化されずに今日に至っている。その中で規定されるべき擬似抵抗値の大きさと定電圧予熱モードに関する陰極特性については、最近新しい知見が報告された²⁾。一方、数年前より欧州ランプメーカーによる協議(ELMAPS/TC4)で、定電流予熱モードと定電圧予熱モードを一元化し、最小と最大の予熱条件をエネルギー表現で新しく規格化し直そうとする動きがある³⁾⁴⁾。

これらに関連して問題点は種々あるが、最も懸念すべき点は、規格化や陰極特性の記述に際して用いられたエミッション測定方法がそれぞれに異なることである。エミッション測定には、現時

点3つの方法、すなわちランプ始動試験法⁵⁾、ランプ電圧モニタ法²⁾⁶⁾および陰極抵抗比による方法³⁾⁴⁾が提案されている。これらエミッション測定方法が提案される前提条件は、蛍光ランプの管端黒化を抑制し、ランプ短寿命を防止できることであり、IECではランプ始動前に熱電子放出(エミッション)温度を越えて陰極が適正に予熱されることをそのコンセプトとしている。

上述のエミッション測定方法では、その各々がIECのコンセプトに準じていると信じられているが、果たしてそうであろうか？本論文の目的は、そうした疑問に回答を与えようとするものである。本論文はそうした目的に沿って論議を進めるが、それに先立って擬似抵抗値の大きさについての著者らの見解を示しつつ、現行のIEC予熱規格の考え方を解説する。それは今後の予熱規格化の動向を理解する上で役立つものと信じる。

本論文では、さらに最大予熱条件についても触れたい。

2. 現行のIEC予熱規格の考え方

2.1 定電流予熱モード

試験する電子バラストの予熱回路部の通電形式が定電圧予熱モードよりは定電流予熱モードにより近い(予熱回路部の内部インピーダンスが陰極抵抗よりかなり大きい)とき、その予熱回路

本論文の一部はIEC/SC34A, 34C 合同パネル会議(1998.6 London)で明星稔が報告した。

本論文の一部は平成10年度照明学会全国大会で和氣厚夫が報告した。

本論文の一部はThe 8th Int. Symp. Sci. Technol. Light Sourcesで明星稔が報告した。

につないだ擬似抵抗 R_{cs} に予熱時間 t_h だけ流れる電流 i_s は、次に示すエネルギー E_{cs} を与える。

$$E_{cs} = \int_0^{t_h} i_s^2 R_{cs} \, dt = R_{cs} \int_0^{t_h} i_s^2 \, dt = R_{cs} t_h (1/t_h) \int_0^{t_h} i_s^2 \, dt \\ = R_{cs} t_h < i_s^2 > \dots\dots\dots(1)$$

ここで $< i_s^2 >$ は電流 i_s を 2 乗した予熱時間 t_h までの平均である。
 一方、規格対象の陰極に流れる一定電流 i_k がエミッション時間 t_e を与えるとき、その関係は以下のとおりである。

$$i_k = (a/t_e + i_m^2)^{1/2} \dots\dots\dots(2)$$

ここで a と i_m は定数である。この曲線は規格対象陰極の最小のエミッション曲線である。その他の製造者のランプ陰極のエミッション点はほぼこの曲線上か、この曲線をやや下回るに止まるべきである。予熱時間 t_h だけ規格対象陰極 r_k に流す一定電流 i_k は、次に示すエネルギー E_{ck} を与える。

$$E_{ck} = \int_0^{t_h} i_k^2 r_k \, dt = i_k^2 \int_0^{t_h} r_k \, dt = i_k^2 t_h (1/t_h) \int_0^{t_h} r_k \, dt \\ = i_k^2 t_h < r_k > \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 $< r_k >$ は陰極の予熱時間 t_h までの平均抵抗である。
 電子バラストによる獲得エネルギー E_{cs} が要求エネルギー E_{ck} より大きいとき、すなわち $E_{cs}/E_{ck} > 1$ のとき、その予熱回路部は陰極をエミッション温度まで到達させることができる。陰極の平均抵抗 $< r_k >$ の値が擬似抵抗 R_{cs} と同値のとき、エネルギー比 E_{cs}/E_{ck} は次のように表される。

$$\frac{E_{cs}}{E_{ck}} = \frac{< i_s^2 >}{i_k^2} \dots\dots\dots(4)$$

$E_{cs}/E_{ck} > 1$ の条件は以下の関係を導く。
 $< i_s^2 > > i_k^2 \dots\dots\dots(5)$
 両者電流値 i_s と i_k は自然数 (> 0) であるから、 $E_{cs}/E_{ck} > 1$ の別の表現は、数学帰納的に

$$< i_s > > i_k = (a/t_h + i_m^2)^{1/2} \dots\dots\dots(6)$$

となる。ここで、 $< i_s >$ は擬似抵抗を流れる電流の予熱時間 t_h までの平均である。 $< i_s >$ の値が i_k のそれよりも大きいとき、その予熱回路部は陰極をエミッション温度まで到達させることができる。

(3)式に関して、 $< r_k >$ が一定の場合（規格化の目的に照らし、擬似抵抗 R_{cs} は時間区分による 2 段併記でなく一定値とすることが適当とされた⁷⁾）、要求エネルギー E_{ck} は

$$E_{ck} = a < r_k > + i_m^2 < r_k > t_h \dots\dots\dots(7)$$

と表され、予熱時間 t_h と正の直線関係にある。この結果は最近のフィリップス社提案⁹⁾に対応する。

2.2 定電圧予熱モード

この予熱モードは未だ規格化されていない。しかしながら、考え方は定電流予熱規格のそれとほぼ同じである。

試験する電子バラストの予熱回路部の通電形式が定電流予熱モードよりは定電圧予熱モードにより近い（予熱回路部の内部インピーダンスが陰極抵抗よりかなり小さい）とき、その予熱回路につないだ擬似抵抗 R_{vs} の両端に予熱時間 t_h だけ印加される電圧 v_s は、次に示すエネルギー E_{vs} を与える。

$$E_{vs} = \int_0^{t_h} v_s^2 (1/R_{vs}) \, dt = (1/R_{vs}) \int_0^{t_h} v_s^2 \, dt \\ = (1/R_{vs}) t_h (1/t_h) \int_0^{t_h} v_s^2 \, dt \\ = (1/R_{vs}) t_h < v_s^2 > \dots\dots\dots(8)$$

ここで $< v_s^2 >$ は電圧 v_s を 2 乗した予熱時間 t_h までの平均である。
 一方、予熱時間 t_h だけ規格対象陰極 r_k の両端に印加する電圧 v_k

は、次に示すエネルギー E_{vk} を与える。

$$E_{vk} = \int_0^{t_h} v_k^2 (1/r_k) \, dt = v_k^2 \int_0^{t_h} (1/r_k) \, dt = v_k^2 t_h (1/t_h) \int_0^{t_h} (1/r_k) \, dt \\ = v_k^2 t_h < 1/r_k > \dots\dots\dots(9)$$

ここで $< 1/r_k >$ は r_k の逆数の予熱時間 t_h までの平均である。
 電子バラストによる獲得エネルギー E_{vs} が要求エネルギー E_{vk} より大きく、その予熱回路が陰極をエミッション温度まで到達させることができる条件は、(4)～(6)式に依って

$$< v_s > > v_k \dots\dots\dots(10)$$

となる。ここで、 $< v_s >$ は擬似抵抗の両端に印加された電圧の予熱時間 t_h までの平均である。

しかしながら、これまでのところ（定電圧予熱モードにおけるランプ始動試験法に基くエミッション測定方法は確立されておらず、）印加電圧とそれによるエミッション時間の関係を表現する式が現行 IEC 規格にはない。もしも(9)式のエネルギー E_{vk} が予熱時間 t_h と正の直線関係にあると仮定されるなら、擬似抵抗 R_{vs} は一定であることが要求され、またエミッション時間 t_e を変数とする陰極印加電圧 v_k の式は次のようになる。

$$v_k = (b/t_e + v_m^2)^{1/2} \dots\dots\dots(11)$$

ここで b と v_m は定数である。仮定した要求エネルギー E_{vk} は
 $E_{vk} = b < 1/r_k > + v_m^2 < 1/r_k > t_h \dots\dots\dots(12)$
 と表現される。

以上の説明は、エミッション曲線（既存 IEC 規格）が陰極の平均抵抗を介してエネルギー曲線（直線）と関連付けられること、およびその陰極平均抵抗が陰極予熱時に使用すべき擬似抵抗と関連付けられることを強調している。また、(7)式と(12)式の提示は、各々要求エネルギーを満足する統一したエネルギー表現が可能かどうかについて問い掛けることを意図している。

3. エミッション測定方法

陰極予熱の最終目的は蛍光ランプの電極短寿命を防止することにあるが、IEC のコンセプトとして、蛍光ランプを始動させる前に陰極を適正に予熱することが求められている。この IEC コンセプトと電極短寿命を防止することの最終目的とはほとんど同じ意味を成すが、詳細ながら識別すべき点がある。そのことの理解が、3つのエミッション測定方法の違いを認識する上で役立つ。ここでは各々のエミッション測定方法について、本論文で採用した測定条件を交えながら紹介する。

3.1 ランプ始動試験法

A. Heidemann らの提案⁹⁾に基づき、図 1 に示すような始動試験回路（定電流予熱モード）を構成した。電源部は、NF 回路設計ブロック¹⁰⁾製の信号発生装置 1930 A にパワーアンプ S-4750 A を組み合わせたもので、およそ 700 V の回路電圧を印加できる。今回の試験で用いた電源周波数は 45 kHz である。抵抗器 A、B と抵抗器 D を合わせた抵抗値は、予熱の定電流性確保のため、陰極の抵抗変化を無視し得る程度に大きい値である。このとき回路電圧は、先の抵抗値の大きさに対応し、かつ冷陰極始動電圧以下の値である。予熱電流値の設定は、抵抗器 A、B と抵抗器 D を、陰極の代用抵抗 C、C' と共に閉回路（パス # 1）を形成し、実効値電流計を用いて行った。代用抵抗 C、C' の抵抗値は、前例⁹⁾に従い陰極冷間抵抗値の約 4 倍を採用した（この代用抵抗は、第 2 章で述べた擬似抵抗とは区別すべきことに注意されたい）。なお、この回路で用いた抵抗器はすべて巻線式の無誘導抵抗である。

予熱電流値を設定した後、スイッチをパス # 2 に切り替える（代

用抵抗C, C'を開放にする)と、実際の陰極の予熱が開始される。リレー付きタイマで一定時間陰極を予熱した後、(パス#3で抵抗器Aと抵抗器Dを開放して)抵抗器Bを限流素子としてランプは始動する。ランプ電流は回路電圧と抵抗器Bによって定格値に設定されることが望ましい。なお、A. Heidemann⁵⁾は、ランプ始動後にも一定のフィラメント電流を流し続けることに配慮したが、今回の始動試験に際しては、ランプ始動前の予熱条件を明確に識別する意味において、ランプ始動後のフィラメント電流は排除した。ところで、この試験回路に用いたリレーの動作時間は、20ms以下である。

この方法のエミッション判定基準は、一定時間陰極を予熱した後の回路電圧からランプ電圧への移行過程をオシロスコープで捉え、その電圧移行波形の急峻な立ち下がりを検出することによる。図2は、フィラメント電流の大小2つの条件下における、いずれ

図1 ランプ始動試験法に基づくエミッション時間測定回路
Fig. 1 Measuring circuit for thermionic emission time based on lamp ignition test.

も予熱時間の異なる4つのランプ電圧波形変化を示す。この図の中では、電圧の急峻な立ち下がりを識別することに注視したため、全体の予熱時間は示されていない。ランプ電圧が下がり切っていないか、あるいはランプ電圧が下がり切るまでにかなりの時間を要する場合(同図左側)には、熱電子放出(エミッション)は十分とは言えない。この場合、冷陰極始動状態を経て熱陰極となるため、ランプ管端の黒化ならびに電極短寿命は避け難い。図中には、ランプ始動直後の過渡的に上昇するランプ電流も同時に示した。

リレー付きタイマにより予熱時間を変えて、こうした判定を繰り返すことにより、エミッション時間は求められる。この方法は実際のランプ始動試験に基づいているので、この方法を他の測定方法と比較することは重要である。

3.2 ランプ電圧モニタ法

測定原理は、一定で微小の直流電流を流した蛍光ランプの両端電圧をモニタしながら測定対象の陰極を定電流あるいは定電圧で通電加熱し、冷陰極から熱陰極へと変化する陰極降下電圧の低下、すなわちランプ電圧の低下を検出することに基づいており、通電を開始してからランプ電圧が最小値に到達したと判断される最初の時間までをエミッション時間としている²⁾⁶⁾。

この測定方法の基本回路構成を図3に示す。一定で微小の直流ランプ電流の制御回路は、大抵の蛍光ランプが冷陰極始動する2 kV以上の起電力を有する直流電源に抵抗を直列に接続している。その抵抗値をランプインピーダンスよりも十分に大きくしてランプ電流に定電流性をもたせるとともに、そのランプ電流は高々0.5 mA程度に制御される。このランプ電流値は小さいながらランプ電圧を安定してモニタすることは可能で、かつ陰極への熱的影響も

図2 ランプ始動試験法に基づくエミッション時間測定回路を用いたランプ電圧変化
Fig. 2 Experimental results : time variation of lamp voltage using the measuring circuit for thermionic emission time based on lamp ignition test.

極力排除することができる。一方、フィラメント定電流制御回路は、測定対象となる陰極の抵抗変化を無視し得るくらい大きな抵抗と、それに見合う直流電源を具備し、種々の一定電流値を設定することができる。また、フィラメント定電圧制御回路は、その内部インピーダンスを極力排除した直流電源電圧が陰極に直接に印加される構成で、種々の一定電圧値を設定することができる。

ランプ電圧低下の検出(エミッション判定基準)は、従来提案²⁾⁶⁾とは異なり、ランプ電圧の1次微分曲線が、負のピークを越えた

図3 ランプ電圧モニタ法に基づくエミッション時間測定回路
Fig.3 Measuring circuit for thermionic emission time based on lamp voltage monitoring.

図4 ランプ電圧モニタ法によるエミッション時間の判定基準とその結果
Fig.4 Measuring criteria of thermionic emission time for lamp voltage monitoring method and its experimental results.

後ゼロへ向かいながら(図4(a)参照)、定電流予熱モードと定電圧予熱モードのそれぞれで新しく定義する2つの直線と交わる時点に変更した⁸⁾。この判定基準の変更は、ランプ電圧の低下という物理的意味をより分かりやすくするために行われたものであり、その基本的考え方は従来のエミッション判定基準²⁾⁶⁾にあっても変わらない。

今回採用した本方式の測定条件について、より詳細に述べる。

- (1) ランプ電圧とフィラメント電圧(フィラメント電流)の各々データは、ローパス・フィルタで雑音成分を除去した後、0.01 s以下のサンプリング間隔でコンピュータへ取り込まれる。とくに、ランプ電圧は2 msピッチの5データを平均処理し、1データ(10msピッチ)とした。
- (2) ランプを始動後、微小ランプ電流による安定点灯を機械的に認識してから(2 s前後)、予め設定された一定電流値(電圧値)による陰極予熱を開始する。
- (3) 下記のように定義した、ランプ電圧 v_L の予熱時間 t に対する1次微分曲線を逐次演算する。

$$dv_L/dt = \{v_L(t + \Delta t) - v_L(t)\} / \Delta t \dots\dots\dots (13)$$
 Δt が大きいほど微分波形は安定する(逆を言えば波形感度は低下する)が、実用面からは $\Delta t = 0.3s$ 前後が適当と思われる(本論文では $\Delta t = 0.3s$ に固定)。
- (4) 負のピークからゼロへ向かう1次微分曲線と交叉すべき直線として、新しく

・定電流予熱モードの場合(暫定)

$$y = 10t - 30 \quad (0 < t \leq 2.5) \dots\dots\dots (14)$$

$$y = -5 \quad (2.5 < t) \dots\dots\dots (15)$$

・定電圧予熱モードの場合(暫定)

$$y = 25t - 30 \quad (0 < t \leq 1.0) \dots\dots\dots (16)$$

$$y = -5 \quad (1.0 < t) \dots\dots\dots (17)$$

を設定し、(13)式の1次微分曲線が連続して5点(0.01s×5)以上これらの直線を越えた最初の時点をもエミッション時間とする。

- (5) エミッション時間を検出した後、すべての通電回路は速やかに遮断される。
- (6) 陰極の温度履歴を排除するため、エミッション時間の測定間隔は3分間以上とする。

予熱後半のエミッション判定に利用する(15)、(17)式の直線の数値は、微分ステップ Δt の大きさにも関係し、コンピュータ処理上の都合によるが、実質ゼロ($y = 0$)と読み直すことができる。また、予熱前半のエミッション判定に利用する(14)、(16)式の直線の傾きは、実際のランプ始動で起こりうるエミッタ熱伝導性の緩和(後述)に多少とも配慮して設けられたもので、定電流予熱モードと定電圧予熱モードでその大きさを違えた。また、この傾きを設けることにより、ランプ電圧の1次微分波形の変動を回避してエミッション判定が行えるという利点がある。

このランプ電圧モニタ法は、最初から蛍光ランプを始動させた状態でエミッション判定を行うため、一見すると始動前の適正な陰極予熱というIECコンセプトから外れているように思われる。しかしながら、前述したようにエミッション測定時のランプ電流は0.5mA前後と非常に小さいため、ランプ電流による陰極加熱はほとんどなく、また不要なコイルからエミッタへの熱伝達も避けることができる(後述)。

ところで、図5は50W形高周波点灯専用形蛍光ランプ(封入ガスはアルゴン)をランプ電流とフィラメント電流の各種組み合わせ

図5 ランプ電流とフィラメント電流の組み合わせによる陰極降下電圧が最小となる推定曲線（ランプ：FHF50）

Fig. 5 Estimation curve of minimized cathode fall voltage in various combinations of lamp and filament currents.

せ条件（電流位相差は 90° ）により高周波で安定点灯させた時の、電極近傍のガス発光状態から陰極降下電圧が最小となる曲線を推定したものである⁹⁾。図中の×印は特定のアルゴン発光の存在を示し、●印はそのアルゴン発光が消失した点を示す。図中の曲線を下回るほど、陰極降下電圧は高くなる傾向にある。図中のエミッション点Aは、本測定方式のランプ電流（0.5mA前後）を全て熱電子電流で補ったポイントであるが、ここで取り上げたランプの定格ランプ電流（0.55A）よりもはるかに小さい。陰極予熱後の始動で、ランプ電流はエミッション点Aから定格値まで途中の陰極降下電圧の僅かに高い領域（時間）を経て遷移することになるが、下記に示す結果から、電極寿命に影響するような陰極降下電圧の極めて高い領域を経由することはないと考える。

図4(b)に、図4(a)のエミッション判定で求めたエミッション点をランプ始動試験法の結果と合わせて示した。図4(b)から、ランプ電圧モニタ法はランプ始動試験法に比べて、少なくともエミッション時間を早めに検出する傾向は見られなかった。この結果は、微小ランプ電流だけを熱電子電流で置き換える場合であっても、エミッション測定法としてのランプ電圧モニタ法の存在価値が損なわれるものではないことを表している。

3.3 陰極抵抗比による方法

抵抗比 R_h/R_c は、直流通電前（室温）の陰極抵抗 R_c に対する通電後の陰極抵抗 R_h の比であり、通電安定時の抵抗比 R_h/R_c は温度の関数として表され、 $R_h/R_c=4.0$ は正常エミッタ（活性化したアルカリ土類3元系酸化物）のエミッション温度に相当する。この関係を過渡的に抵抗変化する陰極にも適用し、 $R_h/R_c=4.0$ に達した時をエミッション時間とすることが、この方法の基本的考え方である³⁾⁴⁾。この方法は欧州ランプメーカーによって取り上げられ（ELMAPS/TC4）、エミッション判定基準がランプの始動に依らないことが、IECのコンセプトに準拠していると考えられた。

前節のランプ電圧モニタ法では、図3に示すように定電流予熱モード、定電圧予熱モードそれぞれにフィラメント電圧とフィラメント電流をモニタしており、これらの情報から陰極抵抗変化は求まり、抵抗比 $R_h/R_c=4.0$ によるエミッション時間は算出される。したがって、本節と前節によって求めたそれぞれのエミッション時間は、同時測定の結果に基づいている。

陰極抵抗比による方法は、エミッタ材料が正常であり、かつランプ製造条件（エミッタの分解・活性化）も適正であることを前提としている。ところで、かなり大きなエネルギーが短時間に陰

図6 電極コイルの等価インダクタンスと抵抗の周波数依存性

Fig. 6 Frequency variations of equivalent inductance and resistance of a filament coil.

極に投入されるとき、陰極の構成材料（タングステンコイルとエミッタ）の熱容量の違いから陰極は不均一に加熱される²⁾。このため、コイルからエミッタへの熱伝達が困難なタイプの陰極を試験する場合には、この方法によっては正しくエミッション時間を測定することが難しいことが懸念される。

以上3つのエミッション測定方法において、ランプ始動試験法の陰極予熱は45kHzの高周波電流によって行われたが、ランプ電圧モニタ法と陰極抵抗比による方法の陰極予熱は直流電流（電圧）によって行われた。図6は32W形高周波点灯専用形蛍光ランプで使用される代表的なトリプルコイルフィラメントの等価インダクタンスと抵抗の周波数依存性を示す。45kHzにおける等価インダクタンスは46nHであり、その誘導リアクタンスはコイル抵抗1.84Ω（室温時）の0.7%に過ぎない。この結果より、高周波予熱を直流予熱に置き換えて考察しても問題はないと言えよう。

4. エミッション比較

それでは実例を上げて、3つのエミッション測定方法を比較する。図7は、海外他社の高周波点灯専用の32W形直管蛍光ランプを用いての、定電流予熱モードにおける（最小）エミッション曲線を表す。図7(a)と図7(c)がスティックコイルの例を示し、図7(b)がトリプルコイルの例を示す。

これらの図より、それぞれのエミッション曲線は、相互に概ね近似しているといえるが、その詳細は異なる。それは、とくに図7(c)で顕著であるが、同じ予熱電流を流したとき、測定方法によっては0.5s以上のエミッション時間の違いが認められた。一般的に、エミッション時間はランプ始動試験法を挟んで、陰極抵抗比による方法で短く、ランプ電圧モニタ法で長くなる傾向にある。そして図7(c)のように、予熱電流がかなり大きいとき、ランプ電圧モニタ法によるエミッション時間だけが長くなる。それは、図4(b)においても同様である。

図7(c)の中の、予熱電流が0.6Aのときの各測定方法によるエミッション時間について、以下に考察する。図8に示すように、陰極抵抗比 $R_h/R_c=4.0$ が与えるエミッション時間は、ランプ電圧モニタ法が与えるエミッション時間よりもかなり早く、ランプ電圧すなわち陰極降下電圧がまだ十分に低下していない時点である。一方、ランプ始動試験法によるエミッション時間は、図7(c)に図示したように、陰極抵抗比で求めた早めのエミッション時間とほぼ同じ時点にある。

図7 3つの測定方法（定電流予熱モード）によるエミッション曲線の比較
Fig.7 Comparison between emission curves by three methods under current-controlled preheating mode.

予熱電流がかなり大きいときの、陰極抵抗比による早めのエミッション時間は、エミッタ前面の温度がエミッション温度に達していなくても、エミッタ未塗布部コイルの過度の温度（抵抗）上昇が影響して抵抗比 $R_h/R_c=4.0$ に達したとの理解で容易に考察できるが²⁾、それではランプ始動試験法による早めのエミッション時間は、どのように理解したら良いのであろうか？

5. エミッタ前面への熱伝達モデル

その理解を助けるために、エミッタ前面へ熱を伝達する、図9に示すようなモデルを提案した。このモデル中の“コ”の字はフィラメントコイルを表し、そのコイル両端を残してエミッタがコイルの上に塗布されている。前述のエミッタ前面とは、放電に寄与するエミッタ表面のことをいい、ここではエミッタモデルの

図8 陰極抵抗比とランプ電圧モニタ法（フィラメント定電流0.6 A）によるエミッション時間の比較（コイル#3：スティックコイル形）
Fig.8 Comparison between emission times by the method based on the ratio of hot to cold coil resistance (R_h/R_c) and by the lamp voltage monitoring method at the fixed cathode current of 0.6 A (coil #3: stick coil type) .

右端面がそれに相当すると考えた。

電極を加熱する手段は、コイルに流れる電流によるジュール加熱だけで、エミッタはその熱を受けるのみである。一方伝熱手段であるが、コイルの伝熱手段は電子により、急峻に熱を伝えることができるが、エミッタの伝熱手段は低温では主に構成原子の格子振動により、急峻に熱を伝えることはできない（フォノンの自由行程が短い）。ただし、高温になるとエミッタ中に伝導帯に持ち上げられた電子が増え、伝熱因子として無視できなくなる。

この状況をイメージしたのが図9(a)中の電子による伝熱モデル（熱非平衡状態）で、このボックスモデルの中、比較的高エネルギーの電子がエミッタ未塗布のコイル側に多く、相対的に低エネルギーの電子がエミッタ側に存在すると考える。予熱途中のこうした状況下で、エミッタ前面からコイル方向に横断する電流（すなわちランプ電流）が皆無か（ランプ電圧モニタ法のように）微小なれば、高エネルギー電子と低エネルギー電子は電荷の移動をほとんど伴わずに時間をかけて相互拡散する。その結果、高エネルギー電子の到達（熱移動）を受けてエミッタ前面がエミッション温度に達する時間は、図8に示すようになりに遅れることとなる（余談ながら、ランプ電圧モニタ法による新しいエミッション曲線式の提案の動機はここにあった⁶⁾）。こうした測定状況は、IECの陰極予熱のコンセプトに合致していると言えよう。

一方のランプ始動試験法であるが、ここで、陰極予熱後に蛍光ランプ両端に電圧を印加してランプを始動させた直後の、ランプ電流の立ち上がり過程を想起していただきたい(図2参照)。この立ち上がり時のランプ電流は、始動時の外部電界により生じるもので、電荷の移動を伴い、図9(b)のようにコイルからエミッタ前面まで熱の移動を伴って高エネルギー電子を瞬時に移動させることができる。予熱電流がかなり大きい（陰極が熱非平衡状態にある）ときの、ランプ始動試験法による早めのエミッション時間は、このような理由（仮想的には図10のようにランプ電圧が急峻に立ち下がった結果）で説明することができる。このような測定状況は、IECの陰極予熱のコンセプトに合致しているかどうかは疑問ながら、少なくとも最終目的である電極短寿命を防止することは可能で、規格化を目的としたエミッション測定方法として、ランプ始動試験法は十分に存在価値がある。この測定方法の問題点

図9 コイルからエミッタ前面への熱伝達モデル
Fig.9 Heat conductive model from the coil to the surface of emissive coating.

図10 予想されるランプ電圧変化 (ランプ始動試験法)
Fig.10 Time variation of expected lamp voltage by the method based on lamp ignition tests.

は、定電圧予熱モードにおける測り方が確立していない点である。

予熱電流がかなり大きいときの、ランプ電圧モニタ法とランプ始動試験法のエミッション時間の違いは、エミッタ未塗布のコイル側でより多く存在する高エネルギー電子の、電荷の移動を伴うか伴わないかの条件に依存しての、エミッタ前面への熱移動の速さの違いにあった。したがって、陰極全体の熱バランスが取れながら (ゆっくり熱移動を伴って) エミッタ前面がエミッション温度に達する予熱条件下では、エミッタ未塗布のコイル側に高エネルギー電子が偏在する状況下には既になく、両者測定方法によるエミッション時間に大きな差異は見られない (図7(c)参照)。

6. エミッションエネルギー表現と擬似抵抗

第4章で測定対象とした蛍光ランプを用い、2つの測定方法(ラ

ンプ電圧モニタ法と陰極抵抗比による方法)と2つのターミナル予熱条件 (定電流予熱モードと定電圧予熱モード)を切り口に、各々エミッション曲線、陰極平均抵抗ならびにエミッションに要求されるエネルギーを図11から図13に示した。図11と図13がステイックコイルの例を示し、図12がトリプルコイルの例を示す。現在欧州ランプメーカーの協議 (ELMAPS/TC4) では、陰極抵抗比によるエミッションエネルギーを直線で表現し、しかもその規格エネルギー直線は定電流と定電圧の両者予熱モードを包含する (上回る) 考え方に立っており、これらの図はその参考にしていただけるように、IEC/SC34A, 34C 合同パネル会議 (1998.6 London) に提出された¹⁰⁾。

これらの図より一般的に言えることは、エミッション測定方法と予熱モードの組み合わせで、それぞれのエミッション曲線の特徴的な違いを示すが、それに比べてエネルギー曲線 (直線) の違いはエミッション曲線ほど明白ではない。その中であって、エネルギー直線の傾きは、概して陰極抵抗比による方法で大きく、また定電流予熱モードより定電圧予熱モードで大きい傾向にある。それは、予熱電流や電圧が大きければ陰極は不均一に加熱され $R_h/R_c=4.0$ となる時間はかなり短くなるためであり、さらに定電圧予熱モードの場合、その陰極電流特性から分かるように、予熱電圧が小さいあるレベルからはエミッション時間は急に長く、また得られにくくなり、その間の陰極加熱に寄与しないロスエネルギーの割合が増大するためである²⁾。したがって、定電流と定電圧の両者予熱モードを包含するエネルギー表現による予熱規格化が、定電流予熱モードに近い通電形式の予熱回路部を設計する電子バラストメーカーにとって大きな負担とならないか、確認が必要である。

一方、陰極平均抵抗 (擬似抵抗に相当) は、定電流予熱モードよりは定電圧予熱モードで、より大きな値となる結果を得た。ただし、予熱モードの一元化を目指す立場にあっては、擬似抵抗は予熱モードに関係なく一定値であることが求められよう。さら

図11 2つの予熱モードと2つの測定方法によるエミッション曲線，陰極平均抵抗ならびにエミッションエネルギーの比較（コイル#1：スティックコイル形）
Fig.11 Comparisons of emission curves, average resistance curves of a cathode and emission energies between two preheating modes and two measuring methods (coil #1: stick coil type).

に擬似抵抗に関していえば，現行 IEC 規格の擬似抵抗値は，定められた基準電流による通電安定時の陰極抵抗値に相当する（第3.1節における代用抵抗Cに近似）と考えられ，第2章で考察した擬似抵抗値とは異なる．これについては，今後規格値の修正が望まれる．

図14は，管径16mm，長さ550mmの24W形直管蛍光ランプに対して設計された陰極の，ランプ電圧モニター法で求めたエミッション点と陰極平均抵抗の等抵抗曲線を示す．図中には最小と最大の予熱規格（IEC ILCOS：FHD-24-L/P-G5-16/550）も示した．もしもこの陰極が規格対象の陰極と仮定されるなら，エミッション曲線と最小予熱規格曲線は一致し，このランプの擬似抵抗値は7Ωと認められるべきである．規格対象の陰極のエミッション曲線は，最小予熱規格曲線と本来同じであるべきだが，たとえ下方で得られるにせよ，あまり大きく下回るべきではない．もしも大きく下回るような場合には，擬似抵抗は最小予熱規格曲線上の時間までの陰極平均抵抗に相当し，擬似抵抗値は上昇する（この場合は，8～9Ω）．予熱規格を決めることのできる立場からは，陰極設計はランプ点灯条件（静特性）を基本に決定でき，そのエミッション特性（動特性）から最小予熱規格曲線を与えれば良いが，その立場にない者にとっては，予熱規格（動特性）も設計要素の1つに加える必要がある．したがって予熱規格の提示に際しては，より慎重な対応が求められる．

7. 最大予熱条件

以上述べてきたエミッション曲線は，厳密に言えば最小のエミッション曲線であり，電極短寿命を回避するための最小予熱条

件である．これに対する最大予熱条件は，規格としてはこれまで図4(b)に示すような，3つの折れ線で表現された．ちなみに，図4(b)と図14中に示す予熱規格（IEC ILCOS：FHD-24-L/P-G5-16/550）の最大予熱条件は，加熱し過ぎによるランプの管端黒化を避けるために，より詳細に決められる方が良い．著者らはここに，折れ線ではなく，最小予熱曲線と同様に曲線で表現する新しい最大予熱条件の提案を試みた．

定電圧予熱モードに関して言えば，その電流制限のために最大予熱条件を決めることはそれほど重要ではない．それは定電流予熱モードにおいて，とくに重要である．その決定方法について，以下に説明する．

ランプ始動試験法による一定電流を試験ランプの陰極に一定時間繰り返して流し，10回以内に予熱し過ぎでランプ管端が黒化するかどうかを試験する．そして，試験電流の大きさと予熱時間の，ランプ管端が黒化する関係を調査する．それと同時に，3時間以内でランプ管端が黒化する電流，いわゆる絶対最大予熱電流 $i_{\max}$ も決定する．3時間という長さは，予熱時間を1sと仮定したとき，1万回以上の点滅試験回数に相当する．以上より，新しい最大予熱曲線は次のように与えられる．

$$i_k = (c/t_h + i_{\max}^2)^{1/2} \quad (18)$$

ここで， c は定数である． $i_{\max}$ の値は既に与えられているので， c の値はランプ管端を黒化させる代表点（ t_h ， i_k ）を(18)式に代入することにより，簡単に決定することができる．この最大曲線は，（ランプ管端を黒化させる境界であるから）適正予熱条件には含まない．

図15は，管径16mm，長さ550mmの24W形直管蛍光ランプについて，

図12 2つの予熱モードと2つの測定方法によるエミッション曲線、陰極平均抵抗ならびにエミッションエネルギーの比較（コイル#2：トリプルコイル形）
Fig.12 Comparisons of emission curves, average resistance curves of a cathode and emission energies between two preheating modes and two measuring methods (coil #2: triple coil type).

上述の手法に従って最大予熱曲線を求めた結果である。図中には、現行予熱規格（IEC ILCOS：FHD-24-L/P-G5-16/550）とランプ電圧モニタ法で求めたエミッション点（曲線）も同時に示す。この最大予熱曲線と既存最大予熱規格（折れ線）との隔たりは、この陰極のエミッション点が既存最小予熱規格を大きく下回ったことが一因している。

現在、最小予熱規格と同様に、最大予熱規格もエネルギー表現（最小エネルギー直線の倍数）で規定しようとする動きがある。(18)式の提案は、そうしたエネルギー表現を検証する上で役立つ。ある予熱時間における最大予熱曲線上のエネルギーを、同じ時間における最小予熱曲線上のエネルギーと比較した（図15中にエネルギー実測値を記載）。その結果より、最大予熱エネルギーは最小予熱エネルギーの2.5倍程度が適当と思われる。ただし、以上の最小予熱エネルギーは定電流予熱モードにおける場合についてである。また、その被試験数は少ないため、その決定のためには被試験数の増加と他の予熱時間における調査が必要である。

欧州ランプメーカー（ELMAPS/TC4）が目指す最小エネルギー直線は、定電流予熱モードと定電圧予熱モードを一元化して与えられるものであるから、最大エネルギー直線を定める倍数は、著者らの見積もり（2.5倍程度）より小さく設定されるのが妥当であろう。

8. 今後の規格化方向に対する見解

欧州ランプメーカー（ELMAPS/TC4）の間では、陰極設計は（動特性ではなく）その静特性だけに依存して、陰極抵抗比 $R_h/R_c = 4.75$ （通電安定時の最大・最小予熱条件のほぼ中間）で決められ

るべきと考えられている¹¹⁾¹²⁾。これに対して著者らは、陰極設計は静特性を基本にしながらも動特性にも配慮して行われるべきであると²⁾、そのために規格対象の陰極はコイル設計だけでなく、その上に塗布されるエミッタの量や付着状態にも配慮されるべき必要性を指摘した¹⁰⁾。

新しいIEC提案（陰極抵抗比による方法で定電流と定電圧の両予熱モードを一元化したエネルギー直線による規格化）によれば¹³⁾、電子バラストの予熱回路部の通電形式を問う必要はなく、規格も評価方法も簡素化される方向ではある。しかしながら、ここで確認されるべきは、変更後の規格においても蛍光ランプの電極短寿命が防止できることを、ランプメーカーと電子バラストメーカーの双方が認識することである。

陰極の適性予熱の目的に照らしてこうした規格化を考えると、統計処理からくる公差を考慮に入れる必要がある。この公差設定では、ロット間バラツキだけでなく既存ランプの場合には各社間の違いも考慮の対象となり得る。本論文では、陰極抵抗比による動的なエミッション判定基準について理論面からかなり否定的な見解を示したが、上述した規格化のための公差設定が、陰極抵抗比による方法で決定した予熱規格の、他のエミッション測定方法との表現の違いを小さくする可能性はある。また、定電流予熱モードと定電圧予熱モードのエネルギー差を埋めて、エネルギー直線による予熱規格を受け入れ可能と判断するとき、エミッション測定方法の違いを問題にする必要は既にもないかも知れない。

今後の新しい予熱規格化の動きの中で、国内の蛍光ランプと蛍光ランプ用電子バラストのそれぞれのメーカーは、欧州ランプメーカーからのIEC提案¹⁴⁾を受けて回答の必要があるが、陰極抵抗比に

図13 2つの予熱モードと2つの測定方法によるエミッション曲線、陰極平均抵抗ならびにエミッションエネルギーの比較 (コイル#3:スティックコイル形)
Fig.13 Comparisons of emission curves, average resistance curves of a cathode and emission energies between two preheating modes and two measuring methods (coil #3: stick coil type).

図14 エミッション点と陰極平均抵抗の等抵抗曲線 (ランプ電圧モニター法)
Fig.14 Average resistance curves of a cathode together with thermionic emission points by lamp voltage monitoring.

図15 新提案による最大予熱曲線
Fig.15 A newly proposed maximum preheating curve.

よるランプ評価とエネルギー直線の予熱規格案による電子バラスト評価を行う際には、本論文で述べた「蛍光ランプ陰極の予熱特性」に関する各論を参考にいただければ幸いです。

9. まとめ

本論文は次のようにまとめられる。

- (1) 蛍光ランプの始動前に陰極を適正に予熱する IEC コンセプトに従えば、ランプ電圧モニター法がエミッション測定方法として適している。

- (2) ランプ始動試験法は、適正予熱 (エミッタ前面がエミッション温度に達する) 前に蛍光ランプを始動させることを許す条件を含むが、電極短寿命を防止する目的に従えば、エミッション測定方法として適している。
- (3) 陰極抵抗比による方法は、ランプ始動試験に依らず IEC コンセプトに準拠していると思われがちであるが、条件によっては必ずしもエミッタ前面温度をエミッション温度として評価しているとは限らず、その動的測定には注意を要する。
- (4) 擬似抵抗は、規格対象の陰極のエミッション時間までの平均抵抗に相当すると考えるのが妥当である。

- (5) 最大予熱条件について、現行規格のような折れ線に変えて、最小予熱曲線と同様の曲線で表すことを提案した。
- (6) 定電流予熱モードと定電圧予熱モードを一元化し、エネルギー直線で予熱規格を見直す提案に対しては、陰極抵抗比による方法の採用も視野に入れながら、蛍光ランプ側と電子バラスト側双方の立ち場に配慮して回答する必要がある。

参 考 文 献

- (1) IEC publication 81 Amendment 3: "Tubular Fluorescent lamp data sheet for high-frequency operation" (Geneva: International Electrotechnical Commission) (1992).
- (2) M. Myojo and A. Waki: "Fluorescent lamp cathodes: Voltage-controlled preheating characteristics", Lighting Res. Technol., 30-1, pp.12-18 (1998).
- (3) IEC document: 34A/PRESKO (PCD) 685 (日本電球工業会34A受付 No.5026), 693 (日本電球工業会34A受付 No.6108).
- (4) IEC document: 34A/PRESKO (PCD) 688 (日本電球工業会34A受付 No.5113).
- (5) A. Heidemann, W. Denz and W. Roche: "Specifications for the operation of preheated cathode fluorescent lamps on electronic ballasts", J. Illum. Engng. Soc., 23-1, pp.115-120 (1994).
- (6) M. Myojo and I. Okuno: "Thermionic emission characteristics on current-controlled preheating of fluorescent lamp cathodes", J. Light and Vis. Env., 20-2, pp.7-14 (1996).
- (7) IEC document: 34A/PRESKO (MF) 25 (日本電球工業会34A受付 No.8084).
- (8) M. Myojo and A. Waki: "Preheating characteristics of a fluorescent lamp cathode", Proc. 8th Int. Symp. Sci. Technol. Light Sources (LS-8), #15, pp.134-135 (Greifswald-Germany: Institute for Low-Temperature Plasma Physics and Department of Physics University of Greifswald) (1998).
- (9) 明星, 和氣, 奥野: 「蛍光ランプ陰極の予熱特性と規格化提案」, 平成10年度照学全大, p.52 (1998).
- (10) PRESKO/COMEX 合同パネル資料, (日本電球工業会34A受付 No.8210).

- (11) PRESKO/COMEX 合同パネル会議事後配布資料, L4 DW710 (日本電球工業会34A受付 No.8142).
- (12) PRESKO/COMEX 合同パネル資料, (日本電球工業会34A受付 No.8124, No.8126).
- (13) PRESKO/COMEX 合同パネル資料, (日本電球工業会34A受付 No.8120, No.8121).
- (14) PRESKO/COMEX 合同パネル会議議事録, 34C/COMEX (AT) 53 (日本電球工業会34A受付 No.8133).
(受付日1999年1月4日/採録日1999年2月4日)

みょうじょう みのる (正会員)

松下電子工業株式会社

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工業化学専攻修士課程修了。同年4月松下電器産業㈱に入社後松下電子工業㈱照明事業部に配属。現在照明事業本部技術センターで蛍光ランプの研究開発業務に従事。

わき あつお (正会員)

松下電子工業株式会社

昭和38年7月21日生まれ、昭和62年3月岡山大学工学部電気工学科卒業。同年4月松下電器産業㈱に入社、照明研究所に配属され蛍光ランプの電子点灯回路の研究開発業務に従事。平成3年松下電子工業㈱照明事業本部に転属し、現在照明事業本部技術センターで蛍光ランプの研究開発業務に従事。

おくの ひろひろ (専門会員)

松下電子工業株式会社

昭和19年9月19日生まれ、昭和46年3月名古屋工業大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月松下電器産業㈱に入社後松下電子工業㈱照明事業部に配属。現在照明事業本部技術センターで蛍光ランプの研究開発業務に従事。電気学会会員。