情報読み取り用希ガス蛍光ランプのエネルギーバランスを中心とした特性

正会員 溝尻 貴文 (ウシオ電機株式会社)
非会員 岡本 哲 (ウシオ電機株式会社)

非会員 園田 良太 (ウシオ電機株式会社)
正会員 吉岡 正樹 (ウシオ電機株式会社)

Energy Balance and Other Characteristics of Rare Gas Fluorescent Lamps for Image Illumination

Member Takafumi Mizojiri (USHIO INC.), Non Member Ryouta Sonoda (USHIO INC.),

Non Member Tetsu Okamoto (USHIO INC.) and Member Masaki Yoshioka (USHIO INC.)

ABSTRACT

A rare gas fluorescent lamp, which has a pair of external electrodes, is widely used as a means for image illumination in offices. However, few studies and reports have been conducted on this lamp. Thus, we examined its energy balance. What we found was that over 90% of the lamp input power changes into thermal energy. To improve the luminous efficacy, we developed a novel structure in which a pair of electrodes was used, one on an inner and the other on an outer surface of a lamp bulb. A comparison was done with a conventional bulb. At the same inverter conditions, the new lamp could be run at only 80% of the voltage of the conventional one. Consequently, the lamp input power increased about 6%, and the illuminance increased about 7%. No luminous efficacy improvement was observed.

KEYWORDS : rare gas fluorescent lamp of external electrodes type, rare gas fluorescent lamp of an internal and external electrodes type, image illumination, energy balance

1. 緒言

近年、デジタル複写機やスキャナーに代表される OA 機器の情報読み取り用光源に、外部電極型希ガス蛍光ランプが使用されている。

このランプは1991年、藤岡ら¹⁾によって発表され、それまで主流とされてきたハロゲンランプや水銀入りの蛍光ランプに代わって使用されている。その理由は周囲の温度依存性が少ないことや光の立ち上がり特性が良いこと、さらには水銀レスであるために環境負荷が小さいことなどが挙げられる。

しかし昨今のカラー化・高速化に伴い、さらなる高輝度化が求められている。そのため、ランプへ投入される電力は増加する傾向にあり、ランプ管壁温度の上昇が問題となり、ランプ材料の見直しや機器周辺に与える影響が無視できなくなっている。

そこで我々はランプの効率改善を目指し、通常ガラス管の外表面にある一対の帯状の電極のうち、片側の電極をガラス管の内表面に配置した「内外電極型希ガス蛍光ランプ」を開発し、従来の外部電極型との比較を行い、その特性を明らかにした。

さらに本ランプの効率を把握するために、投入された電力の行方、いわゆるエネルギーバランスを明らかにすることを試みた。これまで白熱球、ハロゲンランプ、水銀入り蛍光ランプ等のエネルギーバランスはよく知られるところであるが、希ガス蛍光ランプについての報告例はない。その理由としては発光原理が誘電体

バリア放電であること、エキシマ光の発光効率や蛍光体の量子効率が不明確であることなどが推測される。本論文では、ランプから放射された光エネルギーと熱損失を見積もることで希ガス蛍光ランプのエネルギーバランスを検討した²⁾。

2. 希ガス蛍光ランプ

2.1 ランプ構造

希ガス蛍光ランプの構造を、今回開発した内外電極型の基本構成図(図1)を用いて説明する。発光管には外径 ϕ 8 mm ~ ϕ 10 mm の無鉛ガラスを用い、その内表面と外表面に一対の内部電極と外部電極を管軸方向へ帯状に配置した。電極は銀を主成分としており、印刷技術を用いて形成している。

図1 内外電極型希ガス蛍光ランプの基本構成図

Fig.1 Cross and side sectional views of a rare gas fluorescent lamp of an internal and external electrodes type.

本論文の一部は平成14年度照明学会全国大会で溝尻貴文が講演した。

ランプの最内表面には蛍光体が形成されているが、蛍光体とガラス管内表面との間には、必要に応じて反射膜など機能的な層が設けられる。ここでは内部電極の絶縁と可視光の反射を目的に絶縁反射膜を設けた。なお、これらの層のうち、およそ電極間に位置する部分は光を取り出すために、管軸方向に沿って削除したアパーチャ形の蛍光ランプを形成した。

封入ガスとしては主に Xe ガスを使用し、また図には示していないが、ランプの片側に給電部を設け、両電極上にリード線を取り付けてある。さらにランプ端部には機器の取り付けに応じたホルダーを接着剤で固定してある。

2.2 外部電極型との相違点

以上は内外部電極型のランプ構造であるが、現在市販されている希ガス蛍光ランプは「キセノン蛍光ランプ」や「外部電極式希ガス蛍光ランプ」などと称され、一対の電極がガラス管の外表面に帯状に形成されている。電極がランプ内部に存在しないため、ガラス管の両端が封じ切られた構造となっている。

一方、内外部電極型は気密性を保ちながら内部電極と導通させる必要があるために、ガラス端面を利用して外表面の給電部と連通させ、その部分は図1に示すようにガラス製のフタ材を用いて封着した。封着には低融点ガラスを用いた。

またランプの外表面について、市販の外部電極型では高電圧部が剥き出しになるので、絶縁対策にランプ全体を光透過性の熱収縮チューブで覆っている。しかし内外部電極型では高電圧側がガラス管内部に配置されているので、給電部以外はこれらの絶縁対策が不要である。

2.3 発光原理

希ガス蛍光ランプの発光原理は誘電体バリア放電を利用しており、一般の水銀入り蛍光ランプとは大きく異なる。この放電形態は工業的にはオゾン生成機（オゾナイザー）やエキシマランプ、プラズマディスプレイ（PDP）にも利用されている。

誘電体バリア放電とは少なくとも一方の電極に誘電体（バリア）を設けて、誘電体間もしくは誘電体と電極間に存在するガスを交流点灯で放電させるものである。この時発生する放電はマイクロディスチャージといわれ、微細な柱状の放電が無数に電極間に発生する。希ガス蛍光ランプ内では管軸方向とは垂直な方向に放電が生じている。

この放電における誘電体の働きは1つのマイクロディスチャージに電荷が集中するのを防ぎ、局所的に気体温度が上昇することを抑制している。

誘電体バリア放電では電子温度が高い非平衡プラズマが発生しているので、希ガスを主とした気体が封入されると、エキシマが比較的効率良く生成されることが知られている³⁾。

希ガス蛍光ランプでは、発光管であるガラス管そのものが誘電体であり、なおかつガラス管内面に形成した蛍光体層や反射膜等の粉末層も同様に誘電体として考えられる。

ランプ内には通常、Xe が分圧しておよそ 8 kPa から 15 kPa 封入されている。筆者らは Xe 圧力が 13.3 kPa の時にピーク波長が 172 nm、半値幅が 19 nm の発光スペクトルを得ており、希ガス蛍光ランプが誘電体バリア放電による Xe エキシマ光を利用した光源であることを確認している⁴⁾。

希ガス蛍光ランプではこの Xe エキシマ光が蛍光体を励起する。蛍光体の発光による可視光がランプ内部で反射を繰り返し、アパーチャから放射される。

3. 希ガス蛍光ランプのエネルギーバランス

今回開発した内外部電極型のランプの効率を把握するために、エネルギーバランスの見積もりを行った。

3.1 考え方

ランプに投入されたエネルギーの流れとその内訳について、検討した結果を図2と図3に示す。この図をもとにエネルギーバランスの考え方を順に述べる。

3.1.1 Xe エキシマ発光と誘電体・放電損失

ランプにはインバータ等の電源から交流電力 W_L が入力され、誘電体を介して放電空間内に供給される。ここで誘電体はガラスと蛍光体等の粉末層で、入力された W_L のうち、これら誘電体で消費されたエネルギーが誘電体損失になる。図2では外部電極型を示しているが、内外部電極型の場合は高圧側の電極をガラス管内部へ設けているので、その分だけ誘電体損失が減るものと予想される。

ランプ内部では入力電力 W_L から誘電体損失を差し引いた分のエネルギーが、放電電力となり誘電体バリア放電に使用される。封入ガスが Xe の場合の発光はそのエネルギー遷移図³⁾⁵⁾から、上記のエキシマ光以外にも存在する。ガラスを透過して、放射される光は可視光 1、UV 光、赤外光になる。

可視光 1 は僅かに放射されるが、UV 光はほとんど透過しないので無視することができる。また赤外域では波長 828 nm に代表される Xe 原子の発光がみられる。しかし、そのエネルギーは可視域 (380 nm ~ 780 nm) のエネルギーに比べて通常 3 ~ 4 % である

図2 希ガス蛍光ランプのエネルギーの流れ

Fig.2 A schematic diagram of energy flows in a rare gas fluorescent lamp of external electrodes type.

図3 希ガス蛍光ランプのエネルギーの内訳

Fig.3 A block diagram of energy flow breakdown of input power in a rare gas fluorescent lamp of external electrodes type.

ので、ここでは無視することにした。

Xeエキシマ光の入力電力に対する変換効率についてはいくつか報告例があるが、およそ20%~50%である³⁾。筆者らの見積もりでは正弦波点灯の場合、約26%であった⁴⁾。

以上の考察より、放電電力の中で可視光、UV光、赤外光の発光に使用されなかったエネルギーを放電損失とした。

3.1.2 蛍光体の発光と蛍光体損失

誘電体バリア放電で得られた波長172nmのXeエキシマ光は7.2eVのフォトンエネルギーをもっており、蛍光体を励起し、可視光に変換される。例えば波長540nmに発光をもつ緑色蛍光体であれば2.3eVのフォトンエネルギーに変換されたことになる。蛍光体によって得られた可視光を図3では可視光2と表記した。しかしXeエキシマ光のエネルギーのうち、可視光2の発光に使用されなかったエネルギーは蛍光体損失と表現した。

以上の考察より、可視光1と可視光2の和がランプのアパーチャ部から最終的に放射され、利用されることとなる。このエネルギーを可視光出力 W_{out} とした。

3.1.3 伝熱量

3.1.1で述べた誘電体損失と放電損失、さらに3.1.2で述べた蛍光体損失は最終的に熱となる。図2、図3に示したように、これらの熱は放射、対流、伝導の3つの伝熱形態によって伝わっていく。そこで、希ガス蛍光ランプの場合の内訳を考察した。

ランプ径方向の伝熱を考えると、プラズマの熱（放電損失）など上記の損失熱はランプ内部から発光管外表面に向けて伝わっていく。ランプ外表面に伝わった熱は、その部分の放射率に応じた放射と、空気との境界層で熱の伝達が行われる対流とに分かれる。従ってランプ径方向での損失は放射と対流による伝熱量を見積もることとした。

一方、ランプ軸方向の伝熱を考えると、ランプ端部の給電部では銅を主成分とするリード線が接続されているので、この部分から伝導によって熱が奪われている。

放射による伝熱量を Q_{rad} 、対流による伝熱量を Q_{conv} 、伝導による伝熱量を Q_{cond} とすると、希ガス蛍光ランプのエネルギーバランスの基本式は次式で表される。

$$W_L = W_{out} + (Q_{rad} + Q_{conv} + Q_{cond}) [W] \quad (1)$$

次にこれらの量を実験・計算によって算出することを試みた。

3.2 関係式

3.2.1 ランプ入力電力 W_L

ランプ入力 W_L は $V-q$ リサージュの面積から求めた。この手法はオゾナイザー放電の研究では広く用いられており、最近では誘電体バリア放電を用いたVUV発光の研究にも利用されている⁶⁾。 V はランプ電圧波形、 q はランプ電流を積分した電荷の波形である。電荷 q は電極の低圧側に直列接続したコンデンサ C の両端の電圧 V_c を測定し、 $q = CV_c$ の関係から求めた。コンデンサ C の容量は V_c がランプ電圧に比べておよそ1%以下になるように選定した。

得られた V 、 q を両軸にとり、プロットしたグラフが $V-q$ リサージュ図形である。この $V-q$ リサージュ図形が囲む領域を、左側に見てループを作る領域を加算し、右側に見て作るループは減算して得られる面積 S_L が、放電1サイクルで使用されたエネルギーを示している。よってこの S_L に周波数 f を乗じることで、ランプ入力電力は求めることができる。

$$W_L = S_L \times f [W] \quad (2)$$

3.2.2 可視光出力 W_{out}

ランプから出力される可視光の出力 W_{out} は、全光束 ϕ とルーメン等量 L_e ⁷⁾を用いて、(3)式から求める。

$$W_{out} = \phi / L_e [W] \quad (3)$$

全光束はアパーチャ面が完全拡散面光源とみなすことができる⁸⁾ため、(4)式で表すことができる。

$$\phi = \pi SL [\text{lm}] \quad (4)$$

S はアパーチャ部の投影面積、 L は輝度である。

ルーメン当量 L_e は可視域の放射エネルギー（単位；W）に対して、人の目が感じる放射エネルギー、いわゆる光束（単位；lm）の比を当量で与え、(5)式で定義される。理論上、 L_e の値は555nm発光のYG（Yellow Green）光源で最大値683 lm/Wをとり、単純白色光源（可視域で強度が一様な光源）で182 lm/Wとなる。

$$L_e = K_m \frac{\int_{380}^{780} P(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} P(\lambda) d\lambda} [\text{lm} / W] \quad (5)$$

$P(\lambda)$ は規格化されたランプの分光エネルギー分布、 $V(\lambda)$ は比視感度曲線、定数 K_m は最大比視感度683 lm/Wである。

ここで(6)式のように光出力効率 η_{out} を定義した。

$$\eta_{out} = W_{out} / W_L \quad (6)$$

3.2.3 放射による伝熱量

放射による伝熱量 Q_{rad} は(7)式のステファン・ボルツマンの式から求めた。

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma (T_w^4 - T_f^4) S [W] \quad (7)$$

ここで ε は放射率、 σ はステファン・ボルツマン定数で $5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2/\text{K}^4$ 、 T_w はランプの管壁温度（単位：K）、 T_f は流体温度（単位：K）であるが、ここでの流体とは空気であるために周囲温度とした。

またランプ外表面は一定の管壁温度ではないので分割して考えた。特に内外部電極型ではランプ外表面がガラスと外部電極からなるので、放射率をそれぞれに求めた。従ってランプ全体からの放射量 Q_{rad} はそれらの総和とした。ここで放射損失 η_{rad} を(8)式のように定義した。

$$\eta_{rad} = Q_{rad} / W_L \quad (8)$$

3.2.4 対流による伝熱量

対流による伝熱量 Q_{conv} はランプを自然対流下においた水平円柱と考えることで求めた。基本式を下記に示す⁹⁾¹⁰⁾。

$$Q_{conv} = hS(T_w - T_f) [W] \quad (9)$$

S はランプ表面積、 h は熱伝達率であり次式で表される。

$$h = N_u \cdot \kappa / l \quad (10)$$

κ は空気の熱伝導率で、この物性値を決める温度は(11)式のSparrowの式で表される T_v （単位：K）を用いた。 l は特性長さでここではランプの直径となる。

$$T_v = T_w - 0.38 (T_w - T_f) [K] \quad (11)$$

(9)式の Q_{conv} を求めることは熱伝達率 h を求めることに帰着し、 N_u ；ヌッセルト数、 G_r ；グラスホフ数、 P_r ；プラントル数の3つの無次元数で表記されている。

$$N_u = x(G_r \cdot P_r)^y \quad (12)$$

$$G_r = g\beta l^3(T_w - T_f) / \nu^2 \quad (13)$$

x 、 y は G_r 、 P_r の範囲より決定される係数で、 g は重力加速度で 9.8m/s^2 、 β は空気の膨張係数で $1/T_v$ 、 ν は空気の動粘性係数である。 ν 、 P_r はいずれも温度 T_v で決まる値である。ここで対流損失 η_{conv}

を(14)式のように定義した.

$$\eta_{\text{conv}} = Q_{\text{conv}} / W_L \dots\dots\dots(14)$$

3.2.5 伝導による伝熱量

3.1.3で述べたように本ランプの伝導の見積もりは、ランプ軸方向の給電部分での伝熱を考えた. 伝導による伝熱量 Q_{cond} は温度差 $\Delta T = T_w - T_f$ が存在する部分の断面積を A , 長さを L_c とすると(15)式から求めることができる.

$$Q_{\text{cond}} = \lambda \Delta T \cdot A / L_c \dots\dots\dots(15)$$

λ は物質の熱伝導率である. ここで伝導損失 η_{cond} を(16)式のように定義した.

$$\eta_{\text{cond}} = Q_{\text{cond}} / W_L \dots\dots\dots(16)$$

4. 実験

上記の関係式からエネルギーバランスを見積もるために、ランプ入力電力 W_L , 可視光出力 W_{out} , ランプ外表面の放射率 ε として管壁温度 T_w を実験により求めた. 測定したランプは内外部電極型で、ガラス管の外径が $\phi 8 \text{ mm}$, 肉厚が 0.55 mm , 発光管長が 370 mm , 電極長が 357 mm である. また蛍光体は R, G, B それぞれにおいて $(\text{Y,Gd,Eu})\text{BO}_3$, $(\text{Ce,Tb})\text{LaPO}_4$ (LAP), $(\text{Ba,Mg})\text{Al}_{17}\text{O}_{10}$ (BAM) を混合して3波長混合型の白色とした. 封入ガスは $\text{Xe} 13.3 \text{ kPa}$ である. なお電源には図4に示すようにフライバックインバータを使用し、高電圧パルス駆動で点灯させた.

4.1 ランプ入力電力 W_L

図5 (a)にインバータ入力電流が 0.7 A の時のランプ電圧波形 V と電荷 q の波形を示す. この時、電流積分用のコンデンサ C は 100 nF を使用した. これより V のピーク値は -1270 V , q のピーク値は -1.34 V であった. なお周波数は 71 kHz であった. 負の値になっているのはマイナス高圧のフライバックインバータを使用しているためである.

続いて、図5 (b)に $V-q$ リサージュ図形をプロットした結果を示す. この図形の解析から、今回点灯した条件でのランプ入力 W_L は(2)式より 11.7 W であった.

なお、インバータ入力電力が $24 \text{ V} \times 0.7 \text{ A}$ で 16.8 W であるため、 W_L との比からインバータの効率が算出でき、今回用いたフライバックのインバータ効率は約 70% であった.

4.2 可視光出力 W_{out}

(4)式に基づき、全光束を求めた. 本ランプの輝度 L を TOPCON 製の色彩輝度計 BM-7 で測定した結果、 42810 cd/m^2 であった. またアパーチャの角度は 65° であるため、発光部の投影面積 S は $1.34 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ となり全光束 ϕ は 180 lm と算出された.

次にルーメン当量を求めた. 分光器に USHIO 製 SPECTRO RADIO-METER USR-20A を使用し、今回検討したランプの発光

図4 フライバックインバータの基本回路図

Fig.4 A flyback-type inverter circuit to be used in this report chapter4.

スペクトルを測定した. 結果を図6の $P(\lambda)$ に示す. また同じグラフ上に CIE の比視感度曲線 $V(\lambda)$ とそれらの積 $P(\lambda)V(\lambda)$ を示す. これらのスペクトルと(5)式より、ルーメン当量 L_e は 281 lm/W であった.

よって、可視光の出力 W_{out} は(3)式より、 0.64 W と見積もることができた. また(6)式より光出力効率 η_{out} は 5.5% となった.

4.3 放射率の測定

ランプの外表面は外部電極型の場合、熱収縮チューブで覆われているが、内外部電極型の場合はガラス管と電極である. 表面の放射率は材料により異なり、文献からの値付けも困難であること

図5 (a) ランプ電圧 V , 電荷 q の各波形 (b) $V-q$ リサージュ図形

Fig.5 (a) Typical voltage and charges waveforms of a rare gas fluorescent lamp of external electrodes type. (b) A typical $V-q$ Lissajous curve acquired from voltage and charges waveforms in Fig. 5(a).

図6 ルーメン当量の算出に使用したスペクトル; $P(\lambda)$ = 内外部電極型希ガス蛍光ランプの発光スペクトル, $V(\lambda)$ = CIE 視感度曲線

Fig.6 Emission $P(\lambda)$ and luminosity $V(\lambda)$ curves to estimate lumen a rare gas fluorescent lamp of an internal and external electrodes type.

図7 放射率と管壁温度の測定図

Fig.7 An experimental setup to estimate emissivity of rare gas fluorescent lamps by measuring surface temperatures.

から実測を行った。その手法について図7を用いて説明する。

ランプの一部(図7ではランプ中央)を放射率が分かっている擬似黒体で覆う。覆う領域はその部分からの放熱がランプ温度に影響しないよう、ランプの表面積に対して十分小さくする。本実験では放射率が0.94の堀場製作所製の黒体スプレーを用いて、幅3mmでランプ一周を覆った。

この状態でランプを点灯し、放射率を求めたい部分、例えばここではガラス管の放射率とすると、その上に設けられた擬似黒体の温度を測定する。この時の測定器は放射温度計を用い、放射率の設定に擬似黒体の値を使用する。本実験ではKEYENCE製の放射温度計IT-02を用いて、放射率を擬似黒体の0.94に設定した。測定部のスポット径は $\phi 1.2\text{mm}$ で管径に比べて小さく、検出波長は $6\sim 12\mu\text{m}$ である。希ガス蛍光ランプの発光管である無鉛ガラスはこの波長域ではほとんど光を透過しないので、放射温度計が示す値はガラス管外表面の温度といえる。

次に、放射温度計を水平に僅かに移動させて、擬似黒体近傍の求めたい箇所(ここではガラス管上)の温度を測定する。この時、先の擬似黒体の温度と同じになる放射率が求めたい放射率となる。

このようにして測定した結果、各部の放射率はガラス管上が0.90、銀を主成分とする印刷電極上が0.17、熱収縮チューブ上が0.97であった。

4.4 温度測定

以上の放射率の実測データを用いてランプ管壁温度を測定した。測定箇所は図7に示すようにランプ軸方向においては、ラン

プ中央部と $\pm 155\text{mm}$ の部分(給電部側と反給電部側)の計3点である。また、円周方向では図8に示すように、アパーチャ側と反アパーチャ側、電極上は外部電極と内部電極上の各2点で計6点とした。これら18点の管壁温度 T_w を実測し、温度上昇 ΔT をまとめた結果を図8に示す。このとき、周囲温度 T_f は点灯前のランプ管壁温度とした。これらの結果から、ランプ点灯後の温度上昇は軸方向においてはランプ中央部が最も高く、円周方向においては、アパーチャ側の温度が最も低いことがわかった。

5. 伝熱量の見積もり

5.1 放射

放射率と温度分布の測定結果を用いて、各部の放射による伝熱量を(7)式から求めた。この時、表面積 S は図8のように円周方向に6等分、軸方向には図7のように全長370mmのランプを中央部が250mm、その両端がそれぞれ60mmの範囲をもつと仮定して計算した。従って、ランプ全体の放射 Q_{rad} はこれら18箇所の総和となり、結果3.8Wと算出され、放射損失 η_{rad} は(8)式より32.6%となった。

5.2 対流

対流の計算は管壁の周りに存在する空気との境界層における熱伝達を考えているので、ランプの上下で境界層の状態が異なる。従って円周方向の温度は平均値とし、軸方向では放射と同様に60mm、250mm、60mmの3つに分けて計算し、ランプ全体の対流 Q_{conv} はこれら3箇所の和とした。

詳細な計算は3.2.4に示した式を用いた。各部の物性値を決める温度 T_f を(11)式より算出し空気の膨張係数 β を求めた。また T_f の値を用いて文献⁽¹⁰⁾から空気の熱伝導率 κ 、空気の動粘性係数 ν 、プラントル数 Pr を求めた。以上の値からグラスホフ数 Gr が(13)式より求まる。そこで Gr と Pr の積が $10^3 < Gr \cdot Pr < 10^8$ を満たすので、ヌセルト数 Nu の式(12)の係数は文献⁽¹⁰⁾より x は0.53、 y は1/4として計算した。最終的に熱伝達率 h は(10)式からランプ中央部で $12.9\text{W/m}^2\text{K}$ 、反給電部側で $12.5\text{W/m}^2\text{K}$ 、給電部側で $12.4\text{W/m}^2\text{K}$ と求めることができた。

従って対流による伝熱量 Q_{conv} は(9)式よりランプ中央部で6.2W、反給電部側で1.3W、給電部側で1.2Wとなり、計8.7Wと算出され、対流損失 η_{conv} は74%となった。

5.3 伝導

伝導による伝熱量を算出した。ランプから取り出しているリード線の導体はすずめっき軟銅線で素線径0.26mmのものを7本束ねている。従って、その断面積 A は $3.7 \times 10^{-7}\text{mm}^2$ である。温度の値は4.4の結果を用いて、給電部側の外部電極上の温度である 94°C とした。さらにリード線は約100mmのところでは室温 26°C となることから、温度差 ΔT は68Kとなった。また導体部の熱伝導率は銅の値、約 400W/mK とした結果、(15)式から Q_{cond} は0.1W、(16)式から η_{cond} は0.9%となり、ほとんど無視できる値であることが分かった。

以上の結果から、ランプに投入された電力のうち、約7割が対流によって消費され、次いで放射によって3割程度が消費され、ランプから放射された可視光はおよそ6%であるということが分かった。

なお(6)、(8)、(14)、(16)より光出力効率と各熱損失の合計を η とすると、 $\eta = \eta_{\text{out}} + \eta_{\text{conv}} + \eta_{\text{rad}} + \eta_{\text{cond}}$ より、およそ113%となった。

図8 ランプ管壁温度上昇の円周方向・軸方向分布

Fig.8 A schematic view of radial and axial distributions of surface temperature in rare gas fluorescent lamps of an internal and external electrodes type.

5.4 考察

5.4.1 エネルギーバランスの見積もりについて

全割合 η が100%を超える結果となり、見積もり精度を上げることが今後の課題として残された。

しかし、今回の検討から大局的には希ガス蛍光ランプに投入されたエネルギーのほとんどが、熱に変換されていることがわかった。その中でも熱の伝熱形態が放射よりも対流が支配的であることがわかった。

これよりランプ周囲では蓄熱が大きいことが推測される。

5.4.2 熱対策における一考

以上の結果より、熱対策の一考として、ランプの蓄熱を低減することを検討した。通常は強制空冷を行うことが考えられる。この手法はランプ管壁と接する流体（ここでは空気）との境界層を多くして、対流による伝熱量を増やすことになる。しかしこの場合、ランプ管壁温度の分布が不均一となり、明るさや安定性にムラが生じるなどの問題が生じる。

そこで、ここでは放射による伝熱量を高めることで、ランプ全体の温度を均一に下げることが検討した。

(7)式と(8)式よりランプ管壁温度 T_w は(17)次で表すことができる。

$$T_w = \{(\eta_{\text{rad}} \cdot W_L + \varepsilon \sigma T_f^4) / \varepsilon \sigma\}^{1/4} \dots\dots\dots (17)$$

これより図9に示すように、放射率をパラメータとして管壁温度のランプ外径依存性を求めた。この図は外径 ϕ 8mm、放射率0.90での管壁温度（破線）を基準にした時の相対温度差を示す。

これによるとランプ表面の放射率を高くして、ランプ外径を太くすれば、管壁温度は下がることが分かる。

例として、ランプ表面を放射率0.96とし、外径を ϕ 8.5mm にすると、ランプ外表面温度は約7℃の低下が期待できる。この例はちょうど内外部電極型希ガス蛍光ランプに熱収縮チューブを被覆したことに相当し、実測でも同様の温度低減を確認できた。

5.4.3 光出力への変換効率 η_{out} について

4.2で述べたように今回の見積もりから、内外部電極型希ガス蛍光ランプの可視光への変換効率は約6%である結果が得られた。この値の妥当性を一般照明用の水銀蛍光ランプのエネルギーバランスから検討した。

40Wの白色蛍光ランプの場合、可視光への変換効率は約25%である¹¹⁾。これをエネルギー変換の観点から希ガス蛍光ランプと比較した。

図9 管壁の温度上昇とランプ外径・放射率の関係（外径 ϕ 8mm、放射率0.90基準）

Fig.9 Relative temperature lowering effect of bulb diameters and their emissivities as a parameter.

(1)蛍光体の励起波長の違い；蛍光体から可視光を得るために、水銀蛍光ランプでは波長254nm、光子エネルギーに換算して4.9eVの光を使用する。これに対して、希ガス蛍光ランプでは前述したように7.2eVの光子エネルギーの光を利用する。従って、励起光から可視光へのエネルギー変換効率を考えると、希ガス蛍光ランプは水銀蛍光ランプの0.68倍となる。

(2)励起光発生効率の違い；ランプに投入された電気エネルギーが励起光へ変換される割合を考える。水銀蛍光ランプの場合およそ60%であるという報告例¹¹⁾がある。これに対して、希ガス蛍光ランプは3.1.1で述べたように20～50%と範囲を持っている。そこで、我々が報告⁴⁾した26%を利用して考察した。

前報告では正弦波点灯における見積もりであったが、今回はフライバックインバータを用いたパルス波形であるため、点灯方式が異なる。しかし照度（輝度）測定において、パルス波形点灯の方が正弦波点灯の場合に比べて約1.5倍明るいことがわかっていて、そこでこの理由が、点灯方式によるXeエキシマ光の生成効率の違いであると仮定すると、先の26%の値を用いてフライバック方式でのXeエキシマ発光効率は39%と試算される。従って水銀蛍光ランプとの比は0.65倍となる。

(3)蛍光体の量子効率の違い；励起波長の違いによる蛍光体の量子効率への影響を考察した。波長254nmに対する量子効率は蛍光体の種類によって異なるが、ここでは緑色蛍光体のLAP (LaPO₄:Ce,Tb)を代表値として考えた。その場合0.84との報告例がある¹²⁾。一方、172nm励起時の詳細なデータは広く公開されていないが、ここでは前報⁴⁾の0.68で検討した。よって両者の違いは0.81倍となる。

(4)アパーチャ形と透過形における全光束の違い；透過形の水銀蛍光ランプでは蛍光体膜厚が薄く、発生した可視光は蛍光体で反射・散乱を繰り返す、最終的には蛍光体を透過し、ランプの外部に放出すると考えられる。

一方、アパーチャ形の蛍光ランプでは、蛍光体膜厚が厚いため、可視光は基本的には蛍光体を透過せず、アパーチャの部分からのみ放出される。そこで、取り出し効率を求めた結果を前報⁴⁾から引用すると64%であった。よって水銀蛍光ランプとの差は0.64/1=0.64倍となる。

以上の考察より、一般照明用の蛍光ランプを基準に、希ガス蛍光ランプの可視光出力を見積もると25%×0.68×0.65×0.81×0.64=5.7%と算出される。これらの試算は172nm励起の蛍光体量子効率など、議論の余地が残っているが、今回4.2で求めた値とよい一致を示しており、本見積もりの妥当性を確認できた。

6. 内外部電極型希ガス蛍光ランプの特性

内外部電極型希ガス蛍光ランプの特性について述べる。

6.1 電極幅と配置の最適化

片側の電極をガラス管の内側に形成することで、電極の幅や配置の自由度が外部電極型に比べて増えるため、最適条件を求めた。

実験には内径が ϕ 6.9mm、外径が ϕ 8mmのガラス管を用いた。実験の一例を図10に示す。図の下側がアパーチャで、その角度は65°である。また内部電極幅が4mm、外部電極幅は6mmで一定とした。さらに内部電極の絶縁を行うために、内部電極からアパーチャのエッジまでの距離を1.5mm (24.9°)とし、これも一定とした。図10の(a)～(d)は外部電極の位置をアパーチャのエッジから1mm (14.3°)づつ離していく様子を示している。

ランプ特性の評価には照度を用いた。その定義はアパーチャか

図10 内外部電極型希ガス蛍光ランプの電極幅・配置の最適化 (実験の一例)
Fig.10 Several cross sectional configurations and widths of electrodes of a rare gas fluorescent lamp of an internal and external electrodes type to optimize luminous efficacy.

ら8mmの距離に置いた照度計(ミノルタ製;デジタル照度計T-1M)の値である。

実験の結果を以下にまとめる。

- (1) 内部電極を外部電極より狭くするほうが明るい。
- (2) 内部電極と外部電極の配置は対称位置付近からアパーチャとは反対側に偏在していくほうが明るい。
- (3) しかし図10(d)のように、内部電極端と外部電極端を結ぶ直線が放電空間内を通らず、ガラスの肉厚部のみを通るような条件に、両電極が接近してくると暗くなる。また、その部分の外表面温度も高くなる。
- (4) (1)の条件を進めていくと、ランプ端部でのちらつきや不点灯の領域が生じる電力(=インバータの入力電流)が上がってくる。つまり使用範囲が狭くなってくる。

以上の結果から、設計上、高照度を目的とする場合と低入力での安定性が必要な場合の2つのタイプに最適値があることがわかった。

設計例として入力電流を0.8Aで点灯させる場合の結果を図11に示す。これより内部電極が4mm、外部電極が6mmでアパーチャから1mm離れた位置にある場合(図では内4;外6-1と表記)、ランプ端部の不点灯が問題とならない実使用上で、最も明るい電極配置であった(0.6Aでは端部の不点灯が発生)。一方、内部電極が6mm、外部電極が8mmでアパーチャから1mm離れた位置にある場合(図では内6;外8-1と表記)、照度は前者よ

図11 内外部電極配置の最適化;照度とインバータ入力電流の関係
Fig.11 Luminous dependences of two configurations (see text for detail notation) on inverter input current. Broken line circle shows appearance of non-emission area at a tube end.

りも劣るが、低入力でもランプ端部のちらつきがなく、安定な電極配置であった。

6.2 外部電極型との比較

従来の外部電極型希ガス蛍光ランプとの比較を以下の条件で行った。ガラス管は外径が $\phi 9.8\text{mm}$ 、肉厚が 0.55mm 、蛍光体は三波長混合型の白色ランプとし、色度を $(x,y)=(0.29,0.29)$ とした。この時用いた蛍光体はRGBそれぞれ $(\text{Y,Gd,Eu})\text{BO}_3$ 、 $(\text{Ce,Tb})\text{LaPO}_4$ (LAP)、 $(\text{Ba,Mg})\text{Al}_{17}\text{O}_{10}$ (BAM)である。外部電極型の蛍光体膜厚は $80\mu\text{m}$ とした。一方、内外部電極型では蛍光体膜厚を $25\mu\text{m}$ とし、その下層にアルミナの絶縁反射膜を $110\mu\text{m}$ 形成した。また点灯には矩形波のインバータを使用した。ここで両ランプの効率を比較するために、便宜上、以下の3つの効率を定義した。

$$\text{システム効率} = \text{照度} / \text{インバータ入力電力} [\text{lx/W}] \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$\text{照度効率} = \text{照度} / \text{ランプ入力電力} [\text{lx/W}] \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$\text{インバータ効率} = \text{ランプ入力電力} / \text{インバータ入力電力} [\%] \quad \dots\dots\dots (20)$$

なお、

$$\text{システム効率} = \text{照度効率} \times \text{インバータ効率} \quad \dots\dots\dots (21)$$

の関係にあり、ランプ入力電力はリサージュ図形より求めた。

両ランプをインバータ入力電圧24V一定で、入力電流を変化させて点灯させた。その時の特性比較を図12に示す。図12(a)のシステム効率より内外部電極型の方が外部電極型に比べて、照度が7~8%上昇していることが分かった。この要因を以下のように考察した。

図12(b)より両タイプの照度効率はほぼ等しいことが分かる。また図12(c)よりインバータ効率は内外部電極型の方が6%程度高くなっていることが分かる。これらの事実から内外部電極型は外部電極型に比べて、ランプにより多くの電力が投入できていると推測され、これに伴い照度も上昇していると考えられる。

次に電気特性について比較した。矩形波は上下対称の波形であるから0-peak値で比較した。その結果ランプ電圧は図12(d)に示すように、従来型が1.3kV程度であるのに対し、内外部電極型では約1kVと約300V(23%)減少することがわかった。またランプ電流は図12(e)に示すように大きな差はみられなかった。

以上の結果から、片側の電極をガラス管の内側に配置し、発光管損失を低減させた効果はランプ単体の照度効率では見出せず、インバータと合せてシステム的に見た場合におよそ1割効率が上昇することがわかった。また、ランプ電圧は約2割減少することがわかった。これよりもう一方の外部電極をガラス管の内側に設

図12 内外部電極型希ガス蛍光ランプと従来型との比較
(a) システム効率 (b) 照度効率 (c) インバータ入力電流とランプ入力電力 (d) インバータ効率 (e) インバータ入力電力とランプ電圧 (f) インバータ入力電力とランプ電流

Fig.12 Comprehensive comparison of inverter input current dependences of several characteristics between an internal and external electrodes type and conventional external electrodes type.

(a) System efficiency (see text for detail definition) for illuminance. (b) Illuminance efficiency (see also text for detail definition). (c) Inverter efficiency defined by a ratio of lamp input power to inverter input power. (d) Lamp 0-peak voltage. (e) Lamp 0-peak current.

けて、完全内部電極型の希ガス蛍光ランプでは約2割の照度向上が見込まれると予想される。

さらに、今回検討したエネルギーバランスの見積もりを適用し、外部電極型を基準に比較した結果、 W_{out} 、 Q_{rad} 、 Q_{conv} はいずれも7%から14%範囲で増加していた。これよりランプ入力電力が増加した分、照度は明るくなるが、一方で発熱も増加していることが分かった。

7. 結言

情報読み取り用光源に使用されている希ガス蛍光ランプにおいて、ランプの効率改善を目指し、高圧側の電極をガラス管内表面に設けた内外部電極型希ガス蛍光ランプの開発を行った。さらに効率を把握するために、ランプに投入された電力の行方（エネルギーバランス）を見積もった。

その結果、ランプに投入された電力の9割以上が熱に変換され

ていることが明らかになった。従って実用上は排熱対策が重要である。そこでランプの管壁温度を下げる一案として、放射による伝熱量に基づいた検討を行い、ランプ外表面の面積・放射率を上げることで改善できることを示した。

内外部電極型を従来の外部電極型と比較した結果、照度が約1割向上し、ランプ電圧が約2割減少することがわかった。また照度向上の要因は、同じインバータ条件では、ランプに投入する電力が従来型より高くできるためであることがわかった。

さらに今回検討したエネルギーバランスでは、内外部電極型は従来型と変わらず、ランプに投入する電力が増加できた分、照度も熱量も増加していることがわかった。

なお、一対の電極ともガラス管内面に配置して、発光管損失をなくしたランプ構造のものは、本結果の延長線上の特性が予想され、さらなる高輝度化が期待される。またこのような希ガス蛍光ランプは今後、一般照明用への応用も期待される場所である。

参考文献

- (1) 藤岡誠一郎, 他: 外面電極形希ガス蛍光ランプの諸特性, 第24回照学全大, p.80 (1991).
- (2) 溝尻貴文, 他: 希ガス蛍光ランプのエネルギーバランスの見積もり, 第35回照学全大, p.62 (2002).
- (3) B.Eliasson,et.al.:UV Excimer Radiation from Dielectric-Barrier Discharge, Appl. Phys., B46, p.299 (1988).
- (4) 吉岡正樹, 他: 希ガス蛍光ランプにおける VUV 光の変換効率の見積もり, 第11回環瀬戸内海光源研究会資料(1999).
- (5) Rhodes Ch.K.Ed.:Excimer Lasers, Springer, New York (1984).
- (6) R P Mildren,et.al.:Enhanced performance of a dielectric barrier discharge lamp using short-pulsed excitation, J.Phys.D:Apply.Phys. 34, L1-L6 (2001).
- (7) 成田: 種々のランプ用蛍光体の相対量子効率, 照学誌, 69-2, p.15 (1985).
- (8) 飲崎, 他: ファクシミリ用照明光源の検討, 画像電子学会誌, 5-2, p.59 (1976).
- (9) 甲藤好郎: 伝熱概論, pp.160-162, 養賢堂 (1967).
- (10) アルバック: 新版 真空ハンドブック, pp.134-143, オーム社 (2002).
- (11) 照明学会: 大学課程照明工学, p.33, オーム社 (1983).
- (12) 大久保, 他: 蛍光体の量子効率測定, 第267回蛍光体同学会, p.5 (1997).
- (13) 蛍光体同学会: 蛍光体ハンドブック, p.409, オーム社 (1987).

(受付日2003年8月8日/採録日2004年2月27日)

溝尻 貴文 (正会員)

ウシオ電機株式会社ランプカンパニー技術研究所
〒671-0224 兵庫県姫路市別所町佐土1194
昭和46年生まれ.平成8年3月豊橋技術科学大学電気電子工学専攻修士課程修了, 同年4月ウシオ電機(株)に入社, 希ガス蛍光ランプ等の光源開発に従事.電気学会会員.

園田 良太 (非会員)

ウシオ電機株式会社ランプカンパニー環境マネジメント推進室
〒671-0224 兵庫県姫路市別所町佐土1194
昭和40年生まれ.平成3年3月西日本工業大学電気工学科卒,平成10年10月にウシオ電機(株)に入社,希ガス蛍光ランプの開発に従事.

岡本 哲 (非会員)

ウシオ電機株式会社ランプカンパニーランプ技術部門第4部
〒671-0224 兵庫県姫路市別所町佐土1194
昭和47年生まれ.平成10年3月東海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月ウシオ電機(株)に入社,希ガス蛍光ランプ等の光源開発に従事.

吉岡 正樹 (正会員)

ウシオ電機株式会社ランプカンパニー技術研究所
〒671-0224 兵庫県姫路市別所町佐土1194
昭和34年生まれ.昭和60年3月大阪府立大学大学院 総合科学研究科修了,同年4月ウシオ電機(株)に入社,非平衡プラズマの研究とその応用製品開発に従事.応用物理学会会員.