高演色性高圧ナトリウムランプの発光現象

専門会員 渡会 吉昭* 専門会員 坪 秀三* 専門会員 水野 秀夫*

New High-Pressure Sodium Lamp with Higher Color Rendition

Yoshiaki Watarai* (Fellow Member) Hidezoh Akutsu* (Fellow Member)

Hideo Mizuno* (Fellow Member)

(Research Laboratory, Matsushita Electronics Corporation)

ABSTRACT

The typical high-pressure sodium lamp has a color temperature of about 2,100 K, a lamp efficacy of 110 lm/W, and a general color rendering index of 20 to 30. Through our experiments with increasing sodium-vapor pressure and varying ratio of mercury to sodium in the discharge tube, we have obtained design data for a new lamp with the following characteristics:

- (1) Color temperature of up to 4,000 K
- (2) General color rendering index of close to 88 at about 2,550 K
- (3) High saturation of illuminated colors, resulting in a color rendition that is preferred to that of a reference illuminant
- (4) Lamp efficacy of about 60 lm/W at 2,550 K

In the discharge tube of the new lamp, the molecules and the pseudo molecules of sodium increase with an increasing sodium-vapor pressure, and they are localized in the vicinity of the tube wall. The radiation from the arc plasma in the central portion of the tube is modulated by the sodium vapor layer containing such molecular sodium particles. The existence of a buffer gas makes the arc plasma contract thermally towards the axis of the tube, which expands the sodium vapor layer, and gives a strong modulation to the radiation.

1. ま え が き

市販の高圧ナトリウムランプは、発光管内のナトリウム蒸気圧が約 100 Torr になるように設計され、110 lm/W という最高の効率を示す。しかしながら、その色温度は 2,100 K とやや低く、平均演色評価数も約 30 であり、一般照明用としては不十分である¹⁾²⁾。

シュミットは、ナトリウム蒸気圧を 540~1,000 Torr まで高めると、発光スペクトルが可視全域へさらに広がり演色性が著しく改善されると報告している³⁾。

われわれは、市販の 400 W 定格の高圧ナトリウムランプを 1,200 W までの高負荷で点灯し、ナトリウム蒸気圧を高めたときの発光特性を測定した。表 1 に結果を示す。

この実験から次のことが明らかとなった。

(a) 色温度はランプ負荷が 600 W を越えると急激に高くなり、1,200 W では 3,000 K に達する。

(b) 平均演色評価数はランプ負荷 900 W のとき最高値 88 に達し、さらに負荷を高めると逆に低下し、1,200 W では 78 となる。

(c) 1,200 W 負荷のランプは平均演色評価数の低下にもかかわらず、物体の色を美しく見せる効果を有する。

* 松下電子工業研究所

表 1 高負荷点灯ランプの諸特性

ランプ 負 荷 (W)	400	800	1,200
管 電 圧 (V)	104	210	282
管壁 負 荷 (W/cm^2)	16	32	48
色 度 x	0.517	0.476	0.433
色 度 y	0.418	0.408	0.395
色 温 度 (K)	2,110	2,470	2,990
平均演色評価数 R_a	33	85	78
特殊演色評価数 R_9	-162	83	-19

これらはすぐれた演色効果をもつ新しいランプの可能性を示している。しかしながら発光管として用いるアルミナセラミック管は、1,200 W の高負荷（管壁負荷約 $50 \text{ W}/\text{cm}^2$ ）には耐えられない⁴⁾。われわれの実験においても高温のためにアルミナが分解し、アルミニウムあるいは低級酸化アルミニウムが外管内壁に付着して、100 時間の点灯で外管黒化が認められた。

われわれは、この問題を発光管の最冷点となる管端部に適当な熱保護層を設けることにより解決した。飽和蒸気圧型の高圧ナトリウムランプでは、ナトリウム蒸気圧は最冷点温度で規制される。したがって熱保護層により定格ランプ負荷のままで、ナトリウム蒸気圧を高めることができた。

本報告では新しいランプの設計のために、ナトリウムと水銀などの緩衝ガスの二成分系の状態を大幅に変えたときのランプの発光特性を明らかにする。ついでそれらの特性に関連した発光管内の現象について解析した二、三の結果を報告する。

2. ランプ発光特性と管内蒸気圧

実験に用いたランプの発光管は図 1 に示すように、市販の高圧ナトリウムランプに準じた仕様で製作した。

図 1 発光管 構造

1. 多結晶アルミナ管 2. アルミナエンドキャップ 3. ニオブ管 4. タングステンコイル電極 5. ナトリウムアマルガム 6. キセノンガス 7. 熱保護層

唯一の相違点は、発光管の両端部に熱保護層を設けたことである。発光管はB形の外管内にマウントし、外管内は真空中に排気した。

ナトリウムと水銀の蒸気圧をそれぞれ変えるために、ナトリウムと水銀の比率が異なるアマルガム (Na : 15 mg 一定, Hg : 0~70 mg) を封入したランプを試作した。各ランプのナトリウムと水銀の蒸気圧は、熱保護層の寸法と管入力により最冷点温度 $650 \sim 900^\circ\text{C}$ の範囲で

制御した。また水銀の代わりにカドミウムを封入したランプも準備した。

ランプは管入力 $400 \sim 500 \text{ W}$ で、チョーク安定器により点灯し、管電圧をパラメータにして分光分布および光束を測定した。各ランプの発光管内のナトリウムおよび水銀の蒸気圧は後述するように、管電圧あるいは色温度とはほぼ一義的関係をもつので、各ランプの発光特性は管電圧あるいは色温度の関数として解析した。

2.1 分光 分 布

図 2 に管入力を変えたときのランプ (Na : 15 mg, Hg : 40 mg) の管電圧と分光分布を示す。管電圧が高くなるにつれて、発光スペクトルは可視全域に広がり、D 線における自己吸収は顕著となる。540 nm より短波長側の放射強度は、市販の高圧ナトリウムランプでは非常に小さいが、この試作ランプでは管電圧が 200 V 以上になると急に大きくなり、したがって色温度も高くなる。

図 2 管電圧の異なるときのランプの分光分布

発光管内にはナトリウムのほかに緩衝ガスとして水銀を封入しているが、水銀の励起電圧はナトリウムに比べて高いので、管内アークプラズマからの放射は主としてナトリウムの発光と考えられる。しかし管外で観測されるランプの分光分布は水銀の蒸気圧により変化する。図 3 に示す水銀量の異なるアマルガムを封入したランプの同一色温度 $2,790 \text{ K}$ における分光分布の比較から、次のことが明らかである。

図 3 アマルガム組成の異なるランプの分光分布
(a) Na : Hg = 15 : 10 (b) Na : Hg = 15 : 60

(a) D線における自己吸収の割合が水銀量により変わる。とくに長波長側の吸収が水銀量の増加により大きくなる。

(b) 480~540 nm における放射は、水銀量の増加により相対的に減少する。したがってランプの発光色はピンクになる。

(c) 水銀量の増加により、670 nm 付近の放射が増す。緩衝ガスとして、水銀の代わりにカドミウムを封入したランプにおいても、(a) および (b) と同じ現象が観測された。一方 (c) に関しては、図 4 に示すように水銀封入では 670 nm 付近に認められた発光の増加が、カドミウ

図 4 緩衝ガスの異なるランプの分光分布

(a) 水銀 (b) カドミウム

ム封入では 720 nm 付近に移行している。(a) および (b) の現象は緩衝ガスの熱的効果に基づき、(c) の現象はナトリウムと個々の緩衝ガス粒子との相互作用に基づくと考えられる。

2.2 光源色

アマルガム組成の異なる各ランプについて、管電圧に対する光源色の色度軌跡を求め、図 5 の結果を得た。管電圧が高まるにつれて、各ランプの軌跡はほぼ黒体放

図 5 UCS 図 (CIE 1960) 上におけるアマルガム組成の異なるランプの色度軌跡

射軌跡に沿って移行し、色温度は高くなる。一方、各軌跡はアマルガム組成に固有のものであり、水銀量の増加につれて、黒体放射軌跡を横切って緑側からピンク側へ

図 6 ランプの色温度と管電圧の関係

と移行する。

管電圧と色温度の関係も図 6 に示すように、アマルガム組成に固有のものであり、同一色温度を示す管電圧は水銀量の増加につれて高くなる。これらの関係は発光管寸法とアマルガム組成が同じならば、ナトリウム-水銀蒸気圧が、管電圧あるいは色温度により間接的に表わされうことを示している。

2.3 演色特性

図 5 の各測定点について算出した平均演色評価数 R_a を色温度の関数として図 7 に示す。色温度が上昇するにつれて平均演色評価数は高くなり、アマルガム組成の

図 7 平均演色評価数と色温度の関係

いかにかわからず、色温度 2,550 K のときに最高値 82~88 に達する。色温度がそれ以上に上昇すると、平均演色評価数は逆に徐々に低下し、色温度 3,000 K では 60~80 になる。特殊演色評価数も図 8 に示すように、色温度の上昇につれて約 90 の最高値に達する。しかし最高値を示すときの色温度は各試験色により異なる。

最初に述べたように、色温度 3,000 K で点灯されたランプは、平均演色評価数とその最高値を過ぎて逆に低下したにもかかわらず、物体色を非常に好ましく演色する。すなわち同じ色温度の電球で照明したときより、このランプで照明したときのほうが、ほとんどすべての物体色が大多数の観測者にとってより好ましいと判断された。とくに人の皮膚と葉の色に関して、このような演色

図 8 特殊演色評価数と色温度の関係

注：図中の数字は試験色票の番号を示す

効果が著しい。これは図 9 に示すクロマチックネス (U^* , V^*) 平面における各試験色の挙動から、次のように説明できる。

図 9 8 試験色のクロマチックネス

○：基準光源

●：試験光源 (Na : Hg = 15 : 40)

(a) 図 9 (a) は低圧ナトリウムランプで照明された 8 個の試験色のクロマチックネスを示す。このランプはほとんど単色光を放射するため、すべての物体色は無彩色に見え、(U^* , V^*) 平面の原点で表示される。

(b) 図 9 (b) は高圧ナトリウムランプで照明された試験色のクロマチックネスを示す。8 個の試験色は基準光源で照明されたときの約半分の彩度に演色される。

(c) 図 9 (c) は色温度 2,550 K の試作ランプで照明さ

れた試験色のクロマチックネスを示す。8 個の試験色とも、同じ色温度の基準光源で照明したときとはほぼ同じ彩度に演色される。ランプの平均演色評価数は最高値 88 に達する。

(d) 図 9 (d) は色温度 3,000 K の、平均演色評価数が 72 に低下したランプで照明されたときのクロマチックネスを示す。ほとんどすべての色が基準光源で照明されたときよりも高い彩度に演色される。色がより好ましく見えるのはこのためである。

以上のことから、色温度 3,000 K のランプで平均演色評価数が低下するのは、高彩度方向への色ずれによることが明らかとなった。従来の放電ランプが全体としては彩度を低める方向へ演色するのに対して、この彩度を高める方向へ演色するという効果が、新しいランプの一つの特長である。ただし色温度が 4,000 K になると高彩度側への色ずれが過大となり、色は必ずしも好ましいとは判定されなくなる。

色を好ましく見せる効果は、アマルガム組成に関係している。図 10 (a) に示すように、Na : Hg = 15 : 10 と水銀の相対比率を低くしたランプでは、 U^* 軸に近い色

図 10 水銀量の異なるランプによる 8 試験色のクロマチックネス

○：基準光源 ●：試験光源

相の色 (RP-R および G-BG) だけが彩度を高められて、色のバランスがくずされる。また図 10 (b) に示すように、Na : Hg = 15 : 60 の場合は、前述に比べ G-BG の彩度を高める効果がうすれ、逆に V^* 軸に近い色相の色 (Y-GY および PB-P) の彩度が高められ、やはり色のバランスがくずされる。したがってナトリウム 15 mg に対して水銀 30~50 mg のアマルガムを封入し、色温度 2,800~3,400 K のランプが、最もすぐれた演色効果を示す。

ジャッドは、従来の各試験色と比べてより好ましく見える色を提示している⁵⁾。その“好ましい色”と図 9 (d)

で示した新しいランプによる色を比較してみると、両者はもとの試験色に対して、ほぼ同じ方向へ色ずれしている。

2.4 ランプ効率

ランプ効率 η はランプの可視部放射効率を η_e 、放射の視感効率を K とすると、

$$\eta = \eta_e \cdot K \text{ (lm/W)}$$

$$\text{ただし, } \eta_e = \frac{\int_{380}^{780} P_\lambda d\lambda}{W_{1a}}$$

$$K = 680 \frac{\int_{380}^{780} V(\lambda) \cdot P_\lambda d\lambda}{\int_{380}^{780} P_\lambda d\lambda} \text{ (lm/W)}$$

W_{1a} : 管入力 (W), $V(\lambda)$: 比視感度

P_λ : 分光放射束 (W/nm)

で表わされる。市販の高圧ナトリウムランプは、110 lm/W の η を示し、このとき η_e は約 0.3、 K は約 360 lm/W である。

ナトリウムの蒸気圧を高くした試作ランプでは演色性は改善されるが、ランプ効率 η は低下する。この現象を η_e と K に分けて調べた。 η_e は図 11 に示すように色温度 2,100~2,900 K の領域ではほぼ 0.3 と一定であり、2,900 K より高くなるとやや低下する。 K は図 12 に示すように色温度の上昇につれて大きく低下し、その低下の傾向はアマルガム組成により異なる。ランプ効率 η の低下が主として視感効率 K の低下、すなわち発光ス

図 11 放射効率と色温度の関係

図 12 放射の視感効率と色温度の関係

ペクトルの分布の変化によることは明らかである。

3. 発光現象の検討および考察

従来、高圧ナトリウムランプの発光が、可視全域に広がる連続スペクトルであるのは、気体圧力が高く、粒子間の衝突が多いときに生じる圧力広がり (Pressure broadening)、とくにそのうちでもナトリウム原子相互の共鳴広がり (Resonance broadening) によるとされている。そして共鳴広がりによるナトリウム D 線の発光プロファイルは、D 線両翼で対称なローレンツ形 (Lorentzian) になるとして解析されている^{6)~8)}。

しかしながら、ナトリウムの蒸気圧を高めたランプの発光特性は、そのような共鳴広がりだけでは説明できない。とくに説明上の難点として次の三つがあげられる。

(a) ナトリウム D 線両翼の発光プロファイルは、まだ自己吸収の少ない比較的ナトリウム蒸気圧の低いときから非対称性を示し、とくに長波長側へすそを引いている。またナトリウム蒸気圧を高めたときも、長波長側の放射は増加するが、短波長側ではとくに 540 nm 以下から放射はなかなか増加しない (図 2)。

(b) ナトリウム D 線の吸収プロファイルも非対称であり、ナトリウム蒸気圧の上昇につれて長波長側の吸収が大きくなる (図 2)。従来説からすれば吸収も対称なローレンツ形になるはずである。

(c) 緩衝ガスの蒸気圧が高くなると、D 線の長波長側の吸収が大きくなるなど、その非対称性が顕著となる。また、480~540 nm の発光強度が相対的に減少する (図 3)。

従来説でいう圧力広がりによりスペクトルがローレンツ形のプロファイルを示すときは、粒子間衝突において衝突から衝突までの時間が、衝突している時間に比べて長く、いわゆる衝突減衰 (Collision damping) の過程が支配的な場合である⁹⁾。しかるに圧力広がりの中でも、衝突している時間が長くなり、粒子間の相互作用が準定常的な場合には、粒子のエネルギー準位が摂動を受けて変化し^{*}、スペクトルが広がりをもってくる。すなわち、粒子は孤立した原子状態よりもむしろ分子状態に近いいわゆる擬分子 (Pseudo molecule) か、あるいは 2 原子が極端に接近した分子状態として存在している。そして、このような分子状のナトリウム粒子が存在するものとすれば、上述した不明の現象がある程度説明できる。

たとえば、分子状粒子から放射されるスペクトルのプロファイルはローレンツ形の対称でなく、一般に長波長

* 摂動子が荷電粒子の場合がいわゆるスタルク効果であるが、ここでは中性粒子の分極に基づく摂動が主体と考えられるので、スタルク効果は無視できる。ただし、広義には中性粒子による摂動も二次のスタルク効果とみなし得る。

側へすそを引いた非対称となる⁹⁾。またナトリウム分子のスペクトル放射についても、すでに多くの報告があり¹⁰⁾¹¹⁾、とくに内田らはナトリウム分子はナトリウム原子からのナトリウムD線を吸収し、さらに光子を再放出する過程において、D線両翼にナトリウム分子のスペクトルを放射すると述べている¹²⁾¹³⁾。これによれば、D線より短波長側の放射は、ナトリウム分子からのアンチーストークス線 (Anti-Stokes lines) によるものであり、したがって、D線両翼の発光プロファイルは対称とならない。

ここでは高圧ナトリウムランプの発光現象に関して、従来、触れられていない分子状のナトリウム粒子の寄与が、いかなるものであるかを明らかにするため、発光管内のナトリウム粒子、とくに分子の挙動について検討した。

3.1 ナトリウム分子の密度分布

発光管 (Na: 15 mg だけ封入) の管軸方向における中央部と端部からの発光の分光分布は、図 13 に示すように多少異なる。端部ではD線の吸収が大きく、480~540

図 13 発光管の中央部と端部からの放射の分光分布

nm の放射強度が減少しており、これは図 3 に示した水銀量の増加による分光分布の変化に類似している。管中央部の管壁温度は約 1,100°C であり、端部の約 800°C に比べて高く、中央部におけるナトリウムの粒子密度は端部に比べて低い。したがって図 13 は分光分布がナトリウム粒子の密度分布に左右されることを暗示している。

次いで、発光管の管径方向におけるナトリウム粒子の分布状態をおおよそ知るための近似計算を行なった。管内でのナトリウム分子と原子の平衡定数 K_p は、ナトリウム蒸気全圧を P 、解離定数を α とすれば、

$$K_p = 4\alpha^2 P / (1 - \alpha^2) \quad \dots\dots\dots(1)$$

となる。一方 K_p は熱力学上から、

$$\log K_p = -3.9802 \times 10^3 / T + 4.0272 \quad \dots\dots(2)$$

ただし、 T : ナトリウムのガス温度 (K)

で与えられる。いま P は管内一様 (最冷点温度により規制) であり、管内が局所熱平衡状態にあるとするならば、式 (1)、(2) から温度 T の各微小部分における解離度、すなわちナトリウム分子および原子の各分圧が計算され、さらに各分圧から各密度が求まる。計算例として図 14 に管径方向 (r) の温度分布 $T(r)$ を、

$$T(r) = 3,000 - 1,600 (r/R)^2$$

ただし、 R : 発光管の半径

の放物線と仮定したときの、ナトリウム分子および原子の管径方向の密度分布を示す。図 14 から管中心の温度の高いアークプラズマ領域では、ナトリウム分子はほとんどナトリウム原子に解離しており、比較的溫度の低い管壁近傍に、ナトリウム分子が偏在していることがわかる。

図 14 ナトリウム原子および分子の管径方向の密度分布

図 13 と図 14 の結果を合わせると、管外で観測される分光分布は、アークプラズマの状態だけでなく直接には発光にあまり寄与しない低温領域のナトリウム粒子の密度分布によっても左右されるといえる。つまりアークプラズマから放射された発光スペクトルは、分子状のナトリウム粒子が多く偏在する、管壁近傍の蒸気層を通過する際に変化を受けると考えられる。

3.2 ナトリウム蒸気層によるスペクトル変化

ナトリウム蒸気層による分光分布の変化を知るため、図 15 に示すように、ハロゲン電球からの光をチョップを介して、発光管 (Na: 15 mg だけ封入) の一点に投射し、反対側からの透過光を分光器を通じて測定した。

図 15 ナトリウム蒸気層の分光透過率の測定系

測定は、一定値の管電圧に安定させたランプを消灯すると同時に、分光器のシャッタを開けて開始した。図 16 にランプ消灯 2 秒後と、発光管が冷却した後の透過光の比

図 16 ナトリウム蒸気層の分光透過率

率、つまり管内ナトリウム蒸気層の分光透過率を示す。図において 490 nm と 590 nm 付近に顕著な吸収があり、両者の吸収とも消灯前の管電圧、すなわちナトリウム蒸気圧の上昇にしたがい大きくなる。他方、400~440 nm の波長域では、消灯前の管電圧のいかにかわらず、あまり吸収が見られない。

次いで 図 17 (a) に示すように、発光管内にさらに内径 4 mm で小孔 H をもつ円筒状の透光性アルミナセラミック片をそう入したランプ (Na: 15 mg だけ封入) について、A 方向および B 方向からの分光分布を測定し、これから B に対する A の発光強度の比率 A/B (ただし 400 nm で 1 に規格化) を求めた。結果を図 17 (b) に示す。この A/B の値は B からの発光スペクトルが、小孔 H におけるナトリウム蒸気層を通過するときの透過率にほぼ相等しいと考えられる。したがって図 17 (b) は、実際のアークプラズマから放射される発光スペクトルが、管壁近傍のナトリウム蒸気によりとくに 490 nm および 590 nm 付近で大きい吸収を受けることを示している。

図 16 において 490 nm および 590 nm 付近の吸収のブ

図 17 ナトリウム蒸気層による発光スペクトルの変化

ロファイルはともに中心波長に対して非対称であり、とくにナトリウム蒸気圧の上昇につれて、長波長側の吸収が大きくなり、その非対称性が顕著になる。図 16 の結果を図 18 に示すナトリウム分子のエネルギー準位と照合すると¹⁴⁾、490 nm および 590 nm 付近の吸収はエ

図 18 ナトリウム分子のエネルギー準位

ネルギー的には、ナトリウム分子の基底準位 $X'\Sigma_g$ からそれぞれ励起準位 $B'\Pi_u$ および $A'\Sigma_u$ への吸収遷移に対応している。

図 17 (a) に示した同じランプについて、A 方向および C 方向からの発光の分光分布を測定した。結果を図 19 に示す。この図と水銀蒸気圧の効果を示した図 3 を比較したとき、A の C に対する分布の変化は水銀量を増加したときの分布の変化に類似している。すなわち、A では D 線の吸収域が長波長側へ移行し、480~540 nm の

図19 アークが絞られた部分(A)と絞られていない部分(C)からの放射の分光分布

放射が減少している。

いま、Aからの発光スペクトルは、Cに比べてアークプラズマ領域が、管中心軸へと収縮したときの発光スペクトルとみなすことができる。したがって水銀あるいはカドミウムなどの緩衝ガスの蒸気圧が上昇するときランプの分光分布が変わるのは、アークプラズマ領域が管中心軸へと収縮され、アークプラズマからの放射が管壁に至るまでの行路が長くなって、ナトリウム蒸気層により強く吸収されるからと考えられる。図16から行路が長くなれば、D線より長波長側の吸収が大きくなり、480～540 nmの放射が減少することがわかる。

以上、前節をも含めた結果から、アークプラズマからの放射は、管壁に至るまでにナトリウム蒸気層により特有の吸収を受け、そのスペクトル変化に分子状のナトリウム粒子が関連していることが明らかとなった。しかし内田らが指摘しているように、分子状のナトリウム粒子により放射が吸収されると、再放射の過程も当然存在し、その際、アンチストークス線をも含めた他の波長域への再放射も考えられる*。

一方、アークプラズマからの発光スペクトル自体の広がりに対しても、ナトリウム蒸気圧が高くなると、管内には分子状のナトリウム粒子が存在し、発光および吸収のプロファイルが非対称となることからして、従来説の衝突減衰に基づく共鳴広がりに加えて、分子状のナトリウム粒子による圧力広がりも寄与してくると思われる。しかしこれらについてわれわれは確証をつかめなかった。さらに長波長域において緩衝ガスに固有なスペクトルの増加が生じる理由も明らかでない。これらはいずれも今後の研究に待たなければならない。

4. 結 言

高演色性高圧ナトリウムランプについての検討結果から、次のことが明らかとなった。

(1) ランプの発光スペクトルは、ナトリウム蒸気圧の

上昇につれ可視全域への広がりを増し、他方水銀などの緩衝ガスの蒸気圧が上昇すると480～540 nmの放射が減少し、発光はピンク味を帯びる。

(2) ナトリウムに対する水銀の比率を2～3としたアマルガムを封入することにより、色度座標が黒体放射軌跡に十分近く、色温度が高圧ナトリウムランプの2,100 Kに対して4,000 Kまでのランプの設計が可能である。

(3) 平均演色評価数 R_a は、高圧ナトリウムランプの約30に対して色温度2,550 Kで約88の最高値に至り、色温度がそれより高くなると逆に低下する。

(4) 色温度2,800～3,400 Kのランプは、基準光源に比べて物体色の彩度を一様に高める方向へ演色し、物を好ましく見せるという特徴ある効果を示す。 R_a の低下はこの高彩度側への色ずれによるものである。

(5) ランプ効率は、ナトリウム蒸気圧の上昇につれ減少し、高圧ナトリウムランプの110 lm/Wに対して、2,500 Kでは60～70 lm/Wとなる。これは主として放射の視感効率の低下に基づく。

(6) ナトリウム蒸気圧が高くなると、管内には分子状のナトリウム粒子が存在し、それは管壁近傍で多くなる。

(7) 分子状のナトリウム粒子が存在するナトリウム蒸気層により、アークプラズマ領域からの発光スペクトルは管壁に至るまでに特有な変化を受ける。

(8) 緩衝ガスによる分光分布の変化は、緩衝ガスによってアークが管中心軸へ収縮され、発光スペクトルの受ける吸収が強くなるからである。

終わりに、本研究を進めるにあたって絶えず理解あるご配慮とご指導をいただいた松下電器産業株式会社照明研究所、当社照明事業部ならびに、研究所の各位に深く感謝いたします。また実験の一部をご担当いただいた照明研究所西山技師、試験ランプの試作および測定を担当された当研究所山崎社員ならびに、岡本社員に謝意を表します。

5. 参 考 文 献

- (1) W. C. Loudon and K. Schmidt: Illum. Engng 60 (1965) 696
- (2) E. H. Nelson: G. E. C. Journal 31 (1964) 92
- (3) K. Schmidt: "Radiation Characteristics of High Pressure Alkali Metal Discharges", Proceedings 6th International Conference on Ionization Phenomena in Gases, Paris (1963)
- (4) R. E. Hanneman, W. C. Loudon and C. L. McVey: "Thermodynamic and Experimental Studies of the High-Pressure Sodium Lamp", IES Preprint No. 18 (1968)

* この意味では図16および図17(b)は厳密なナトリウム蒸気層の分光透過率でない。

- (5) D. B. Judd : Illum. Engng 62 (1967) 593
- (6) J. J. Lowke : J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer 9 (1969) 839
- (7) Teh-Sen Jen, M. F. Hoyaux and L. S. Frost : J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer 9 (1969) 487
- (8) N. Ozaki : J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer 11 (1971) 1111, 1463
- (9) たとえば, G. V. Marr : Plasma Spectroscopy (1968) 253~254, Elsevier Publishing Company, Amsterdam-London-New York, H. E. White : Introduction to Atomic Spectra (1934) 418~

- 436, McGraw-Hill, New York
- (10) W. R. Fredrickson : Phys. Rev. 31 (1928) 1130 and 34 (1929) 207
- (11) F. W. Loomis and R. W. Wood : Phys. Rev. 32 (1928) 223
- (12) M. Kimura and Y. Uchida : Sci. Pap Inst. Phys. Chem. Res. 18 (1932) 119
- (13) Y. Uchida : Jap. J. Phys. 8 (1932) 25
- (14) R. B. Singh and D. K. Rai : Indian J. Pure Appl. Phys. 3 (1965) 475

(受付 1973 年 4 月 4 日)

新製品紹介

ホワイタイプ的一般電球 “ソフトシリカ” 発売

このたび日立製作所では、新しい塗装技術の開発によって光の拡散度を上げ、まぶしさを従来のフロスト電球の 5 分の 1 程度におさえたホワイタイプ的一般電球、“ソフトシリカ” を発売した。

現在の一般電球はまぶしさをやわらげるために、ガラスバルブ内面をふっ酸処理（フロスト）にして、光を拡散させていた。

これに対し“ソフトシリカ”は、光拡散物質をバルブ内面に塗装することにより光の拡散性を上げ、まぶしさをやわらげたものである。この方法はボール形電球など一部に利用されていたが、湿式塗装のため作業効率が低いという難点があった。日立では作業効率向上のため光拡散物質のシリカ粒をガラスバルブ内面に静電塗装する技術を開発、これによってホワイタイプ的一般電球の量産に成功した。

特 長

1. バルブ内面に静電塗装されたシリカ粒子が光を十

(右) ソフトシリカ
(左) フロスト電球

分拡散させ、ソフトですっきりした光が得られる。

2. フロスト電球は、バルブ中央部が光るが“ソフトシリカ”はバルブ全面が光るので、輝度がフロスト電球の 5 分の 1 以下である。
3. 点灯するとソフトな明るさが得られ、消灯時でもランプ表面が白く見え装飾性が強調される。

(提供 ㈱日立製作所)