最近の光源の技術的動向

(4) ナトリウムランプ†

専門会員 坪 秀三*

1. ま え が き

ナトリウム放電による最初の光源として、1932年に低圧ナトリウムランプが実用化された。当初のランプは効率が約 50 lm/W と低く、さらに動程中に発光管ガラスが着色する、ランプが始動不良になるなどの問題点を有していた。しかしその後発光管用の新しいガラス材料の開発と発光管構造の改良がなされたことにより、ランプ効率は上昇し、また動程中の問題点もほぼ解決された¹⁾。とくに外管バルブ内面に透明な酸化インジウムの赤外線反射膜をつけることにより、150~175 lm/W という人工光源のうちで、最高の効率をもつランプが実現された²⁾。いわば、技術的にはすでに安定期にはいったランプといえる。このランプはナトリウムD線を主体とした輝線スペクトルからなる黄色の発光を示すが、その効率が高いことが生かされて、おもに道路照明用の光源として用いられている。

一方、最近、高温のアルカリ金属に浸されない半透明の多結晶体アルミナセラミック管が開発され³⁾、それを発光管に用いた高圧ナトリウムランプが、1965年に発表された⁴⁾。そして8年後の現在、このランプは欧米ではすでに普及化の段階にはいつている。このように従来光源に比べて普及化が早く進んだ理由としては、高効率および長寿命というランプ自体の特長のほかに、ランプの放電状態、および部品材料などのランプの本質にかかわる点に問題がないこと、技術がいったん確立された後では製造が比較的容易であることがあげられる。

しかしながら普及化が早いとはいえ、高圧ナトリウムランプを技術の流れからとらえてみると、現在まではおもにアルミナセラミック管と、電極部の封着などのラン

プ製作上の基本的技術を確立した段階とみなしうる。今後さらにランプ特性の改善、ランプ品種の拡充あるいは量産化のための製造技術の開発など、多くの技術的課題が残されている。いわば高圧ナトリウムは技術的には成長期のランプである。

ここでは、低圧ナトリウムランプについての説明は従来の資料に譲り¹⁾²⁾、今後技術的進展が期待できる高圧ナトリウムランプに焦点をあてて、とくにランプ特性および品質上の問題点を指摘し、その改善方法などを従来報告された文献、資料に基づきまとめた。

2. 高圧ナトリウムランプの特性の改善

2.1 ランプ効率

ランプ効率 η は可視部放射効率を η_e 、放射の視感効率を K とすれば

$$\eta = \eta_e \cdot K \quad (\text{lm/W}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、

$$\eta_e = \int_{380}^{780} P_\lambda \cdot d\lambda / W_{in}$$

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

P_λ : 分光放射パワー (W/nm), $V(\lambda)$: 比視感度

W_{in} : 管入力 (W), λ : 波長 (nm)

で表わされる。

視感効率 K は、おもにナトリウムと水銀の蒸気圧に左右される。ナトリウム蒸気圧が約 4×10^{-3} Torr で点灯される低圧ナトリウムランプでは、ナトリウムD線がおもに放射されるので、視感効率 K は約 520 lm/W という高い値を示す。しかるに、ナトリウム蒸気圧が約 100 Torr となるように設計されている高圧ナトリウムランプでは、可視全域に広がった連続スペクトルが放射され、視感効率 K は約 360 lm/W と低くなる。さらにナトリウム蒸気圧が高くなると、後述するようにランプの色温度が上昇するが、図1に示すように視感効率 K

この資料は電気学会光源・関連装置委員会（昭和48年8月21日）での講演内容に基づきまとめたものである。

† Sodium Lamps

* 松下電子工業株式会社

図 1 視感効率と色濃度の関係

は色温度の上昇につれて低下する⁵⁾。一方図 1 から明らかなように、同じ色温度を示すときの視感効率 K は色温度が約 2,700 K 以下の範囲では、ナトリウムに対する水銀の封入量が多くなるにつれて低くなる。これはナトリウムに対する水銀の蒸気圧が高くなると、比視感度が高い緑色領域の放射が減少し、逆に比視感度が低い赤色領域の放射が増加するからである。

放射効率 η_e は、発光管の定常状態におけるエネルギー平衡、

$$P_{in} = P_r + P_{th} \quad \dots\dots\dots (2)$$

の関係から決定される。ただし P_{in} , P_r および P_{th} はそれぞれ発光管単位長あたりの管入力、放射パワーおよび熱損失である。(2)式において放射パワー P_r に直接かわるものとして、まずアルミナセラミック管の光透過率があげられる。

図 2 ランプ効率の上昇経過

図 2 は GE 社が 1965 年に高圧ナトリウムランプを発表して以来のランプ効率の上昇経過を示しているが、1965 年の 105 lm/W から、1973 年では 125 lm/W と約 20% 上昇している。これはおもにアルミナセラミック管の品質の改良と、その肉厚を薄くすることによって、発光管の光透過率が高くなったからと考えられる。

さらに最近、コーニング社が透明な単結晶アルミナ管(サファイア管)の工業化に成功したことが伝えられ、これを用いたランプでは約 130 lm/W の効率が期待でき

る。単結晶アルミナ管によるランプの検討が待たれる。

放射効率 η_e は、ナトリウム蒸気圧が通常の高圧ナトリウムランプの動作領域(約 100 Torr)に達するまでは、ナトリウム蒸気圧とともに上昇する⁶⁾。しかるに、ナトリウム蒸気圧がそれ以上になると放射効率 η_e は、ナトリウムと水銀の蒸気圧によってあまり左右されなくなる。

図 3 放射効率と色温度の関係

たとえば、渡会ら⁷⁾によると 図 3 に示すように、発光管内のナトリウムと、水銀の蒸気圧が高くなると色温度が上昇するが、この場合、放射効率 η_e は管入力 P_{in} を一定に保つ限り、色温度 2,100~2,700 K に相当するナトリウム-水銀の蒸気圧範囲ではほぼ一定である。またこの関係は、ナトリウムアマルガム組成のいかんにかかわらずほぼ成り立つ。これは(2)式において熱損失 P_{th} の主たる部分を占める熱伝導損失が、ナトリウムと水銀の蒸気圧によりあまり変わらないためと考えられる。

すなわち、ナトリウムと水銀の熱伝導率は互いにほぼ等しく⁸⁾⁹⁾、また粘性流領域では蒸気圧にほとんど依存しない¹⁰⁾。

通常の高圧蒸気放電ランプでは、(2)式の管入力 P_{in} の増加により、相対的に P_{th}/P_{in} が減少し、 P_r/P_{in} が増加する。

図 4 ランプ効率の管電流による変化
(ナトリウムアマルガム中のナトリウムは 83 mol %)

高圧ナトリウムランプでも K. Schmidt⁶⁾, J. J. Lowke⁸⁾, N. Ozaki¹¹⁾ らは、ランプ効率 η が図4に示すように、管電流の増加につれて上昇することを報告しているが、これは放射効率 η_e が管入力が増加につれて上昇することを示しているのにはかならない。坪ら¹²⁾はさらに発光管の内径を7.6~11.5 mmの範囲で変えたランプについて、放射効率と管入力との関係を調べたところ、放射効率 η_e は管入力が増加して10 W/cm²増加すると約0.04上昇し、さらに管壁負荷を一定にする限り、内径が変わっても放射効率 η_e はほぼ等しくなることが明らかとなった。

通常の高圧ナトリウムランプでは、最高の効率を得るために始動補助用希ガスとしてキセノンが封入されている。しかるに後述するようにキセノンに代わってネオン—アルゴンベニングガスを封入して、始動装置を必要としないランプが検討されている。この場合、ネオン—アルゴンガスを封入すると熱伝導損失が増加して、ランプ効率はキセノン封入に比べて約15~20%低下する。しかしながらこのランプ効率の低下は、ナトリウムか水銀の蒸気圧を高めて、希ガスの熱伝導プロセスに及ぼす効果を押えることにより軽減することができる¹²⁾。

以上の結果から、ランプ効率 η を高めるには視感効率 K と放射効率 η_e をともに増加させるのが最も望ましい。しかしながら、これは通常の高圧ナトリウムランプの発光管仕様準拠の範囲ではむずかしい。たとえば視感効率 K を上げるために、水銀封入量を少なくすると管電圧が低くなり、さらに安定器の設計面から管電流が制限されているので管入力も低下する。その結果、放射効率 η_e が逆に低くなり、ランプ効率 η は上昇しない。したがって、アルミナ管の光透過率を高める以外にランプ効率 η を上げるには、実際上、管入力を増加して放射効率 η_e を高めるのが唯一の方法と考えられる。

しかしながら、発光管として多結晶アルミナセラミック管を用いる限りでは、現行の発光管設計に基づく管壁負荷を高めることは、ランプの動程における光束劣化が大きくなることからむずかしい¹³⁾。この点に関しても新しい単結晶アルミナ管の検討が待たれる。

2.2 ランプの演色性

通常の高圧ナトリウムランプは110 lm/W以上の高い効率を示すが、色温度が約2,100 K、平均演色評価数が約30とともに低く、一般照明用ランプとしては不十分である。しかるに前述したように色温度および演色性は、ともにナトリウム蒸気圧を高めることにより改善できる¹⁴⁾。渡会ら³⁾は通常の高圧ナトリウムランプの発光管(管内径7.6 mm、電極間距離82 mm)を用い、異なった組成のナトリウムアマルガムを封入したランプについて、管内蒸気圧を大幅に変えたときのランプ特性を測

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

定した。次のことが明らかとなった。

(a) 図5に示すように、ランプの光源色の色度軌跡は、ナトリウム蒸気圧の上昇につれてほぼ黒体放射軌跡に沿って移動し、色温度は最高約4,000 Kまで達した。一方、水銀封入量が増加するにつれて、ランプの色度軌跡は黒体放射軌跡を横切って、緑色領域から赤色領域へ移動する。この場合、色温度とともに管電圧が上昇するが、図6に示すように水銀封入量が増加すると、同じ色温度を示す管電圧が高くなる。

図6 色温度と管電圧の関係

図7 平均演色評価数と色温度の関係

(b) 平均演色評価数 R_a は図7に示すように、色温度が上昇するにつれて高くなり、ナトリウムアマルガム組成のいかんにかかわらず、色温度約2,550 Kで最高値(82~88)に達する。さらに色温度が上昇すると、平

均演色評価数 R_a は除々に下がり、色温度 3,000 K では 60~80 まで下がる。

(c) 色温度 2,550 K 以上において、平均演色評価数が低下するにもかかわらず、このときのランプはほとんどすべての物体色の彩度を一様に高める方向へ演色するという、従来光源にないユニークな演色効果を示す¹⁵⁾。

以上のようにナトリウム蒸気圧を高めることにより、比較的容易に演色性を改善できる。しかしながらこの方法では、通常の高圧ナトリウムランプの発光管仕様に準じる限り、図 6 から明らかなように管電圧が高くなり、ランプは実用性に乏しくなる。

広瀬¹⁶⁾は、管内径が大きい発光管を用いることにより管壁負荷を極度に増大することなしに、平均演色評価数が改善されることを報告している。この場合、管壁負荷とは厳密にはナトリウム蒸気圧を意味している。

すなわち、坏¹²⁾の検討結果では、管内径が異なる発光管を同じ管入力で点灯したとき、管内径が大きくなるにつれて同じナトリウム蒸気圧における管電圧は、わずかに高くなるにもかかわらず、同じ色温度を示す管電圧は低くなる。

一方、平均演色評価数と色温度の関係は、管内径が変わっても図 7 の特性とはほぼ同じである。したがって管内径が大きい発光管を用いるならば、ナトリウム蒸気圧を高めたのと同じ効果が得られるので、低い管電圧で色温度と演色性が改善されたランプを実現できる。高圧ナトリウムランプの発光管内では、中心部の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偏在する、管壁近傍のナトリウム蒸気層により特有な吸収を受けて、結果的に可視全域に広がった発光となって管外へ放射されている。管内径が大きい発光管では、管壁近傍のナトリウム蒸気層が厚くなり、ナトリウム蒸気圧が低くても、発光スペクトルの広がりが大きくなるものと考えられる¹⁷⁾。

この場合、ランプ効率¹⁸⁾は 2.1 節で述べた過程にしたがって求められる。図 1 および図 3 から、色温度 2,500 K、平均演色評価数約 85 のランプ効率は、約 65~75 lm/W となる。

ランプの演色性を改善するその他の方法として、ナトリウム以外に発光物質としてカドミウム、タリウムなどを付加することにより、演色性が改善されるとの報告がある¹⁹⁾。しかしその効果の程度は明らかでない。

2.3 ランプ寿命

図 8 に GE 社から 1965 年に高圧ナトリウムランプが発表されてから、1973 年までのランプ寿命の上昇経過を示す。当初の 6,000 Hr から約 3.5 倍の 20,000 Hr に達し、既存のランプのうちで最も長いランプ寿命が達成された。これはアルミナセラミック管および電極エミ

図 8 ランプ寿命の上昇経過

ッタなどの材料の品質改良、発光管構造の改善およびランプ製造工程の改善などから達成されたが¹³⁾、本質的にはアルミナセラミック材料が、従来の高圧放電ランプに用いられている石英に比べて、動程を通じて化学的に安定していることに基因している。

いまのところ、ランプが寿命終了に至るランプ側の原因としては、発光管リーク、電極物質の飛散による管電圧上昇などのほかに、管内のナトリウムがアルミナセラミック管と反応して消失することがあげられる。前者はエミッタ材料あるいは、製造工程の改善により多少とも解決できる見とおしがあるが、後者のナトリウムの消失はアルミナセラミック管を用いる限り、本質的問題と考えられる。しかしながら坏¹²⁾の検討結果によれば、反応したナトリウムは、多結晶体アルミナセラミックの結晶粒界に沿って動程中に成長した β -アルミナ (針状結晶の形をしている) に局在していることから、単結晶アルミナでは、ナトリウム消失が極度に抑制されることが期待できる。

3. 高圧ナトリウムランプの点灯特性

3.1 始動特性

通常の高圧ナトリウムランプには、始動補助用希ガスとして 10~20 Torr のキセノンが封入されている。このときランプ効率は高くなるが、ランプの始動特性が悪くなり、始動には 2,000~2,500 V (波高値) の電圧が必要である。したがって通常は安定器に高圧パルスを発生する始動装置が内蔵されている¹⁹⁾。しかし一方では水銀ランプと同じように、電源電圧 (実効値 200~240 V) で始動するランプが検討されている。次のような始動方法が考えられている。

(1) バイメタル法

ランプの外管バルブ内に、発光管と並列にバイメタルスイッチを接続し、スイッチが切れるときに発生するインダクタンス安定器のキック電圧により、ランプを始動させる。

(2) フィラメント加熱法

ナトリウム蒸気圧が、定常時より低い特定の範囲内で始動電圧が最小になる現象を利用している²⁰⁾。すなわち、フィラメントで発光管を加熱し、ナトリウム蒸気圧を始動が容易となる範囲まで高めて、ランプを始動させる。

(3) 始動用補助極の付設²¹⁾

発光管端部に主電極のほかに始動用補助極を封着し、さらに希ガスとして、ネオン-アルゴンペニングガスを封入したとき、図 9 に示すように希ガス封入圧が 10～50 Torr において、ランプは 120～140 V (実効値) で始動する。

図 9 始動電圧と (Ne+0.1%Ar) 封入圧の関係

(4) 外部補助導体の付設

図 10 に示すように、アルミナ発光管の外壁面上に外部導体を付着し、管内にネオン-アルゴンペニングガス

図 10 始動用の外部補助導体

を封入したとき、外部導体の付着位置を適当に選ぶことにより、ランプは 110～140 V (実効値) で始動する²²⁾²³⁾。また、リング状の外部導体を発光管端部に浮かせて付設する方法も報告されているが²⁴⁾、これは図 10 の外部導体を付着する方法に比べて、始動電圧が約 30～60 V 高くなる。

3.2 調光特性

高圧ナトリウムランプでは、通常点灯用安定器に直列リアクトルを挿入することによって調光を行なっている。この場合、問題点として高塚ら²⁵⁾は図 11 に示すように、リアクトル挿入時に管電流が低下するために管電圧が上昇して、ランプが立ち消えしやすいことを報告している。

図 11 調光時における管電圧の上昇

いま、リアクトル挿入前後の管電圧と安定器二次電圧の波形を観察してみると、図 12 に示すようにリアクトル挿入直後に再点弧電圧 V_r が上昇し、 $V_{r0} \geq V_{s0}$ のときにランプが立ち消えることがわかった。したがってランプの調光幅を広げてしかも立ち消えを防ぐためには、再点弧電圧を低いレベルに保つことが必要である。再点弧電圧を左右するものとして次の三つがあげられる。

図 12 リアクトル挿入後の管電圧波形

図 13 再点弧電圧とナトリウム比率の関係

(a) ナトリウムアマルガム中のナトリウム比率を低くすることにより、再点弧電圧は図 13 に示すように低下する²⁶⁾。さらにリアクトル挿入直後のその上昇率も小さくなる。

図 14 再点弧電圧と管内径の関係

(b) 再点弧電圧は 図 14 に示すように、管内径が大きくなるにつれて低下する。

(c) 再点弧電圧は始動補助用希ガスにより異なり、ネオン、アルゴン、キセノンの順序で低くなる。ただしその差は、ナトリウムアマルガム中のナトリウム比率を下げると小さくなる。

以上の 3 点を考慮することにより、安定器の二次電圧をあまり高めずに、ランプの調光幅を広げることができる。

参 考 文 献

- (1) W. Elenbass, H. J. J. vanBoort and R. Spiesens: IES Conference Preprint No. 19 (1968)
- (2) H. J. J. vanBoort and R. Groth: Philips Tech. Rev. 29 (1968) 17
- (3) R. L. Gabbe: Transparent alumina and methde of preparation, USP 3, 026, 210
- (4) W. C. Loudon: IES Conference Preprint No. 13 (1965)
- (5) 渡会吉昭, 坪 秀三, 水野秀夫: 光源・関連装置委員会資料 LS-71-5 (1971)
- (6) K. Schmidt: "High Pressure Sodium Vapour

Lamp", USP 3, 248, 590

- (7) 渡会吉昭, 坪 秀三, 水野秀夫: 照学誌投稿中
- (8) J. J. Lowke: J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer 9 (1969) 839
- (9) W. Elenbass: "The High Pressure Mercury Vapour Discharge", North Holland Pub. Co. (1951) Amsterdam
- (10) J. Q. Hirshfelder, C. F. Curtiss and R. B. Bird: "Molecular Theory of Gases and Liquids", John Wiley & Sons, Inc. New York (1954)
- (11) N. Ozaki: J. Appl. Phys. 42 (1971) 3171
- (12) 坪ほか: 照学誌投稿予定
- (13) R. E. Hanneman, W. C. Loudon and C. Y. McVey: IES Conference Preprint No. 18 (1968)
- (14) K. Schmidt: Proc. 6th Int. Conf. Ion. Phen. in Gases, Paris, 1963
- (15) 阪口忠雄, 渡辺耕造: 照学誌 57 (昭 48) 332
- (16) 広瀬吉夫, 中沢 伸: 昭 48 照学全国大会 No. 9 (昭 48)
- (17) 坪 秀三, 渡会吉昭, 西山英夫: 昭 48 連大 No. 254
- (18) たとえば USP 3, 521, 108 (1970)
- (19) C. E. Williams: J. Science & Technology 37 (1970) 35
- (20) 水野秀夫: 照学誌 52 (昭 43) 649
- (21) 早川孝之: 昭 47 照学全国大会 No. 9
- (22) 特開昭 47-45079
- (23) 特開昭 47-45082
- (24) 特開昭 47-3086
- (25) 高塚賢次, 竹治弥三郎, 古川 実, 古久保晴夫: 光源・関連装置委員会資料 LS-71-6 (1971)
- (26) 川澄建一: 昭 47 照学全国大会 No. 10

(受付 1973 年 8 月 10 日)

×

×

×

×

×

×