HID ランプの小型コンパクト化†

専門会員 三好 和彦* 専門会員 祝 郁夫*

1. はじめに

一般照明用光源の性能の主眼は、いうまでもなくランプ効率および演色性である。HID ランプにおいても年々の技術進歩により図1に示すように、高性能化つまり高効率化、高演色化が達せられつつある。このことは一般照明のそれぞれの分野に対して、ルーメンパッケージの一定必要量が存在する以上、必然的にランプの小型化に向かう要請となって現われる。

図1 HID ランプの効率と演色性

一方、屋内照明特に家庭用として多用されている白熱電球に代替できる小型高性能の新光源の探索が、最近非常に盛んである。白熱電球のように小型で使用簡便かつ高演色性であって、さらに蛍光ランプのように高効率の光源が、HID ランプとして実現可能であるか種々検討されている。

このような背景の下で、HID ランプの小型コンパクト化に関する最近の技術動向について吟味してみたい。図1に見るように最近の HID ランプの技術上の進展は、もっぱらメタルハライドランプと、高圧ナトリウムランプに集中している。水銀ランプは、特性の安定性、価格などにおいて現在も高い商品価値を有しており、40 W までの小型化、電球色ランプの実現、安定器内蔵形ランプを含めて豊

富な品数と屋内照明用光源としても魅力的な条件を備えているが、効率の点でメタルハライドランプや高圧ナトリウムランプに及ばず、技術的にも成熟したものであるので、本稿ではもっぱらこの二つのランプについて述べる。

2. HID ランプ小型コンパクト化の問題点

HID ランプを小型コンパクト化しようとするとき、さまざまな問題に直面する。その多くは中高ワットのランプと共通する問題が、小型コンパクト化することで強調されているように思われる。このような問題を解決することは困難は多いが、HID ランプが屋内照明などの分野で受け入れられるためには、ぜひ解決されなければならない。

2.1 ランプ効率および演色性

HID ランプは、高強度放電 (HID) 自体の発熱により高い発光金属蒸気圧と高いアーク温度を確保し、このことによって、高いランプ効率と優れた演色性を得ることを特徴としている。この性質のゆえに HID ランプを小型化しようとするとき、まず直面する問題が、小さい電気入力でいかにして高い蒸気圧とアーク温度を維持するかということである。ランプを低ワット化していくと、ランプ入力のうち、放電加熱に消費される部分 (熱損失) が相対的に増加し、図2に示すようにランプ効率の低下となって現われる。

熱損失の割合の増加を抑制するための有効な手段は、発

図2 HID ランプの入力電力と効率

† Some Aspects on Low-wattage HID Lamps

* 岩崎電気株式会社 Kazuhiko Miyoshi, Ikuo Iwai

光管端部への熱流出を抑えることである。このため単位アーク長当たりの入力を増し、発光管端部寸法を小さくすることが行なわれる。

メタルハライドランプの場合、典型的な管形状は、封止部分をできるだけ小さくした楕円体である。単位アーク長当たり入力を増すことにより生ずる、石英管壁の温度上昇の問題を管中央部径の増大により解決するとともに、封止プレス面からの熱損失を小さくするものである。楕円体形状には、鉛直点灯時、対流によって効果的にハロゲン化物蒸気を管上部まで運ぶことができる利点もある¹⁾。

高圧ナトリウムランプの場合、このようなランプ形状はナトリウム蒸気の光学的厚みが増すことにより、ナトリウムの吸収が大きくなるので、効率改善の手段としては効果的でない。D線の吸収を積極的に利用した高演色形高圧ナトリウムランプの場合には、端部からの熱損失を小さくする上で効果がある。その他、管壁からの熱放射損失を抑えるため、管壁のエミッシビティの調整などが検討されている²⁾³⁾。

発光物質の選択範囲の広いメタルハライドランプでは、複合分子を利用して、比較的低温で高い蒸気圧を得る方法も試みられている。たとえば NaScI_4 の蒸気圧は、 ScI_3 、 NaI それぞれ単体の蒸気圧よりも高く、 Ce や Nd などの軽希土類と Cs の複合ハロゲン化物も効果的な高蒸気圧を得る化合物として知られている⁴⁾⁵⁾。

図 3 複合分子と単体の蒸気圧

2.2 始動、立ち消え

ランプを小型化すると、容積に比し管壁面積が大きくなり、また管壁が接近するので、イオンの消滅速度が増すことになる。その結果、交流点灯したときの再点弧電圧が上昇し立ち消えしやすくなる。また始動電圧も高くなりやすい。このことは、メタルハライドランプにおいて特に顕著である。管径を大きくしたり、始動特性を左右する不純物の混入に特に意を用いるなど、ランプ側からのアプローチのほか点灯回路の検討も活発に行なわれている⁶⁾。

再点弧電圧の上昇をさけるために、直流点灯や高周波点灯によって消弧時間を無くするか短くして、消弧中の急速

なインピーダンス増を最小にすることが行なわれる。高周波点灯の場合、周波数によっては音響的共鳴現象のためにアークがゆれたり、立ち消えを起こしたりすることがあり、解決案が種々検討されている⁷⁾⁸⁾。

小型ランプは、屋内照明に使用される機会が多いので、ランプの立ち上がり特性（始動時間）が早いこと、瞬時再点灯が可能なること、100 V 電源で簡単に点灯できることなどへの要望が強い。しかし、高圧の金属蒸気放電灯である HID ランプはこの点不利であり、これらの要求をカバーするために、点灯回路側からのアプローチが積極的になされている⁹⁾。

2.3 ちらつき

屋内照明を考慮すると、アークのゆらぎやちらつきは極力低減しなければならない。HID ランプを商用周波数 (50 Hz, 60 Hz) で点灯すると、電源半サイクルごとの発光量に不ぞろいが生じたときちらつきを感ずることがある。ちらつきを感ずる程度は周波数と輝度に依存するが、通常のランプでは、周波数は電源周波数、輝度は照明条件によって決まるので、電源半サイクルごとの発光波形のピーク値を比較することでランプの評価ができる¹⁰⁾¹¹⁾。

図 4 ちらつきのあるランプ発光波形

ちらつきは、電極の設計と密接にかかわると推定され、寿命特性や始動特性を損うことなく、ちらつきを低減する電極設計が必要である¹²⁾¹³⁾。また高周波数点灯や直流点灯では、ちらつきが問題とならないので点灯回路の検討も必要である。

2.4 寿命

光束減退のほか、始動電圧や再点弧電圧の上昇、ランプ電圧の上昇、リーク、色変化など中高ワットと共通の寿命要因が、小型コンパクトランプではより強調される傾向にある。白熱電球代替光源として HID ランプを考えると、コスト面から見て、5,000~6,000時間以上の寿命が要求されると思われるが、小型コンパクト HID ランプが普及する上で、寿命の安定化は必須の条件である。

アーク長が短くなると、電極物質の蒸発による端部黒化の光束減退に及ぼす影響が大きくなるので、電極の設計や不純物の混入防止が重要である。また管壁負荷が増し、管壁温度や封止部温度が高くなると、封入物質と管壁材料あるいは封止材料や電極との反応が重要な要因となる。このランプ内の化学反応については、十分解明されているとはいえず、寿命を長くするためさらに研究を要する。

3. メタルハライドランプ小型コンパクト化の傾向

3.1 低ワットメタルハライドランプ

一般照明用としては、国内では高効率、低始動電圧形の100 Wと高演色形の125 Wが市販されている。表 1 にこれらの特性を示す。

表 1 低ワットメタルハライドランプの特性

ランプ形式	全光束 (lm)	発光効率 (lm/W)	色温度 (K)	平均演色 評価数	平均寿命 (Hr)
M100・L	7,000	70	3500	60	6,000
D125	4,700	38	5000	92	6,000

図 5 小型メタルハライドランプの発光管
(a) 深い封止形状, (b) 楕円体形,
(c) 小さい封止部(下側だけ)

小型化に伴い、相対的に大きくなる端部からの熱損失を小さくし、ハロゲン化物が蒸発するに十分な温度を保つため発光管形状に種々の工夫がなされている¹³⁾¹⁴⁾(図 5)。発光物質としては、高効率形は Ti-Na-In 系や Sc-Na 系が、高演色形は Sn 系が選ばれているが、最近、高効率と高演色性を兼ね備えたものとして、欧州を中心に Sn-Na 系¹⁵⁾ や Tm-Na-Tl 系¹⁶⁾などが研究されている。

水銀灯安定器だけで始動させるために、 Ne-Ar などのペニングガスが利用されるが、効率の点から熱伝導率の大きな Ne ガスを使用しないで、ランプ内にグロースタータを組み込む方式も行なわれている(図 6)。

図 6 100 W低始動電圧形メタルハライドランプ(グロースタータ内蔵)

最近欧州のメーカから 70 W のランプが発表され¹⁷⁾、メタルハライドランプも、水銀ランプや高圧ナトリウムランプ同様、100 W 未満の低ワットランプがシリーズ化されるものと予想される。

3.2 安定器内蔵形コンパクトメタルハライドランプ

1979 年米国で、安定器を内蔵し電球ソケットに適合可能なコンパクトメタルハライドランプが発表され、白熱電球代替光源としての HID ランプが、にわかにクローズアップされてきた。

Davenport ら⁹⁾の報告によると、発光管は楕円体形で、内容積は 30 W 設計で 0.11 cm^3 と非常に小さい。端部を極端に小さくして、端部損失を最小にした設計となっている。楕円体のため、単位アーク長当たり入力が大きいわりに管壁負荷は大きくないが、石英温度は $1,000^\circ\text{C}$ にも達している。通常このような高い温度で使用して、長寿命は得られないとされていたが、長時間の点灯でも失透などは見られなかったと報告している。

図 7 安定器内蔵形コンパクトメタルハライドランプの発光管
(a) 楕円体両側封止形
(b) モノシール形

一方、Keeffe ら¹⁸⁾によって報告されたモノシールと呼ばれる発光管は、片側だけに封止部が存在するので、両側封止の場合よりも大きい封止部になる。したがって強度や製造面でのメリットがある(図 7(b))。

光束維持に影響する要因として電極は重要であるが、Davenport らは、アーク端と電極間のエネルギーバランスから最適設計をすることによって、電極に起因する光束減退をほとんどなくすることができたと報告している。

図 8 安定器内蔵形コンパクトメタルハライドランプ(GE 社)

Davenport らのランプは、図 8 に示すように電子安定器と一体にして、白熱電球ソケットにそのまま適用できる構造になっている。点灯方式はトランジスタインバータ駆動による高周波点灯であり、再点弧電圧の低減、軽量化などの狙いがある。高周波点灯に伴う音響的共鳴現象をさけるために共鳴を起こさない周波数帯を選んでいる。白熱電球代替のためには点灯の即時性が要求されるので、ランプ内にタングステンフィラメントを配置し、始動時や再始動時、発光管から十分光量が得られない間、フィラメントを発光させるようになっている。

安定器部分を含んだランプの詳細な特性が公表されていないが、入力 40~50 W で、効率約 50 lm/W 、寿命 5,000~

図 9 安定器内蔵形コンパクトメタルハライドランプ (35 W)

7,500時間である。

国内でも同種のランプの研究が活発に行なわれており、最近発表されたランプは、安定器も含んで入力電力 35 W と HID ランプとしては最も小さく、効率 50 lm/W、寿命 5,000 時間と優れた特性となっている。発光管の加工にレーザを用いるなど、製造面でも新しい試みがなされている¹⁹⁾。

今後、電球代替用の安定器内蔵形ランプの製品化が進むと思われるが、白熱電球の持つ使用の簡便さ、優れた演色性などをあまり損うことなく、HID ランプの高効率性を生かした経済性のあるランプにすることが望まれる。白熱電球に比べると初期コストが高くなるので、それをどの程度まで低減できるかが普及のキーポイントとなろう。

3.3 セラミック・メタルハライドランプ

1981年のハノーヴァ・メッセにセラミック製の発光管を使ったメタルハライドランプが出展され²⁰⁾、注目を集めた。透光性アルミナ管は、高圧ナトリウムランプで実績のあるとおり優れた耐熱性と化学安定性を持っており、メタルハライドランプに適用して、より広範囲のハロゲン化物の利用の可能性と高効率、長寿命のランプが期待される。すなわち、アルミナ管は高温での安定性が優れており、蒸気圧の比較的低いハロゲン化物の使用が容易になるほか、石英から遊離した Si による電極変形などが無いと予想される。

それだけに、ハロゲン化物と反応しない材料で構成されなければならない。従来の高圧ナトリウムランプに使用されている Nb などの金属や、アルカリ土類酸化物を含む封着材を使用することができない²¹⁾。Brown ら²²⁾は、図 10 のように、タングステンとアルミナのサーメット²¹⁾と耐ハライド封着材を使用し、発光物質として SnNaX_3 ($X=\text{Cl}, \text{I}$) を封入し、150 W で 90 lm/W、色温度 3800 K、 R_a 70 以上を得たと報告している。

図 10 セラミックメタルハライドランプ発光管

セラミック管の利用は緒についたばかりで、まだメタルハライドランプの方向を左右するほどには至っていない。

が、セラミックの特性を生かした新しいランプの出現が期待される。

4. 高圧ナトリウムランプ小型コンパクト化の動向

4.1 高効率形高圧ナトリウムランプ

欧米ではすでに、表 2 に示すような低ワット高効率形高圧ナトリウムランプが市販されている。ランプ電圧 50 V 級と 90 V 級の 2 種に大別できるが、これは各々、米国の 120 V 電源、欧州の 220 V 電源において、チョーク形安定器のコストミニマムを狙って設定されたものである。

表 2 低ワット高効率高圧ナトリウムランプの仕様、特性

大 き さ (W)	35	50	70	100	50	70	100
ランプ電圧 (V)	52	52	52	55	85	90	100
ランプ電流 (A)	0.83	1.18	1.6	2.1	0.75	0.98	
ランプ光束 (lm)	2,250	4,000	5,800	9,500	3,500	6,100	9,500
ランプ効率 (lm/W)	64	80	83	95	70	87	95
色 温 度 (K)	1900	1900	1900	2100	1850	1900	1925
始 動 方 式	イグナイター	イグナイター	イグナイター	イグナイター	イグナイターまたはロー	イグナイターまたはロー	イグナイター
ランプ全長 (mm)	140	140	140	140	156	156	186
口 金	E27	E27	E27	E27	E27	E27	E40

現在、市販ランプで最も低入力なのは 35 W であるが、これの全光束は、150 W 白熱電球と同程度の 2,250 lm である。これ以上入力の低いランプは、用途面から必要とされないのではないかと推定する。

色特性は、一般形高圧ナトリウムランプとほぼ同様である。色温度が低過ぎる、赤の演色性が良くないといった理由で、一般家庭などの屋内照明には不適と思われる。欧米では、玄関灯、保安灯など建物周りで多用されている。白熱電球の 4.5 倍、水銀ランプの 2.5 倍のランプ効率のゆえに、省エネルギーを目的として、これらのランプに代わって用いることが多いようである。わが国でも 70 W 以上の 50 V 級、90 V 級の高圧ナトリウムランプがすでに市販されている。35 W、50 W 発売の動きもあるが、高い初期コストが障害となってまだ普及するに至っていない。

ランプ構造は、図 11 のように中高ワット高圧ナトリウム

図 11 35 W 高圧ナトリウムランプの構造特性

ムランプとおおむね相似形である。低入力高圧ナトリウムランプ発光管の設計に際しては、Na 蒸気、温度（アーク温度、管壁温度、最冷部温度など）をそのまま維持した上で、ランプ入力、ランプ電流（または電圧）、発光管寸法、Na 封入量などの設計要素をスケールダウンしていく必要がある。しかし電極、封止構造、導電リードなどの発光管端部の縮小化には限界があり、このため端部損失増大によってランプ効率が低下する。発熱量不足によって Na 蒸気圧の維持が困難となる、あるいは電極動作不安定によって、ランプ特性のばらつきが増大するなどの問題を生ずる。Nb 細線による封止²³⁾、発光管端部への保温板の付設²⁴⁾、含有エミッタ量が多く、寸法、熱特性再現の良い焼結形電極の採用²⁵⁾など、種々の工夫が提案され実施されている。

点灯方式は、90 V 級ではランプに内蔵したグロースタータ、50 V 級では独立したイグナイタが一般的である。いずれもパルス電圧を 3 kV 程度に抑えているが、これは低入力高圧ナトリウムランプが、E26 という小さく耐電圧の低い口金を用いるためである。

4.2 高演色性形高圧ナトリウムランプ

高圧ナトリウムランプにおいて、Na 蒸気圧を増すと Na の D 線が広がって来る。

図 12 高圧ナトリウムランプの分光エネルギー分布

図 12 のように、可視光波長域の全域に放射されるようになり、色温度が高くなり演色性が向上する。現在、中高ワットでは Ra 60 のものが演色改善形として²⁸⁾、Ra 80 のものが高演色形として²⁹⁾市販されている。

これらのランプの色特性こそ屋内照明にふさわしく、当然に低ワット化が検討されている。特に高演色形高圧ナトリウムランプの光源色、演色性は、白熱電球に良く近似しており、屋内照明用省エネルギーランプとして大いに期待される。このランプの 590 nm の自己吸収の谷を持つ発光スペクトル分布は、被照明色の彩度を上げるといって 3 波長蛍光ランプと同様の効果を発揮する。

高圧ナトリウムランプにおいても、演色性とランプ効率の相克は避けがたい。しかし、最近発光管管壁負荷を通常

の 2 倍以上の 35 W/cm² とすれば、40 lm/W、2,000 lm の 50 W 高演色形高圧ナトリウムランプを実現できるという注目すべき報告があった³⁰⁾。低ワットにおいては、発光管端部への熱伝導率増大に伴って、管壁温度の相対的低下のあることに着目したもので、図 13 のような発光管形状による Na 蒸気圧増大方法の併用により、長寿命の実用ランプが得られるとしている。

図 13 50 W 高演色形高圧ナトリウムランプの構造特性

演色改善形でも 85 W が発表されている⁶⁾。発光管端部に設けた金属保温板で Na 蒸気圧を増大させており、66 lm/W、Ra 60 の特性を得ている。このランプの点灯には小型 HID ランプの用途分野に適した、小型軽量で 100 V 電源用の毎サイクル点灯方式のハイブリッド電子安定器を採用している。

5. む す び

以上、HID ランプ小型コンパクト化の現状について概観した。白熱電球代替光源としては、安定器内蔵形の蛍光ランプが急速に普及しつつあるが、HID ランプはこれよりもやや大きなルーメンパッケージの必要な分野に進出すると思われる。ランプおよび点灯装置に関する技術的な問題点については次々に解決しつつあるが、最終的には初期コストをどの程度引き下げ得るかが、普及のかぎをにぎっていると思われる。

最後に、本稿の執筆に当たり快く資料をご提供下さった東京芝浦電気㈱の井上昭浩氏と、日立照明㈱小山敦夫氏に感謝します。

参 考 文 献

- (1) 中村 昇ほか：100 W メタルハライドランプ、昭54照学全国大会（昭54）18
- (2) Waymouth, J. F. et al: Analysis of factors affecting efficacy of high pressure sodium lamps. J. Illum. Engng. Soc. 10-4 (1981) 237
- (3) Van Vliet, J. A. J. M. et al: The influence of the wall temperature on the luminous efficacy of high pressure sodium lamps. 3rd International Symposium on the Science and Technology of Light Sources (1983) 60
- (4) Hirayama, C. et al: Complex halide vapors in metal halide type HID lamps. J. Illum. Engng. Soc. 6-4 (1977) 209

- (5) Liu, C.S. et al: Spectrophotometric study of alkali-rare earth iodide vapor complexes and their application to HID arc lamps. *J. Illum. Engng. Soc.* **8-3** (1979) 147
- (6) 井山博之ほか：小出力高圧ナトリウムランプの毎サイクル点弧形電子安定器による点灯，*照学誌* **67-6** (昭58) 266
- (7) 越村安信ほか：HID ランプの高周波点灯における放電安定化方法，*照学誌* **67-2** (昭58) 55
- (8) 越村安信ほか：小型メタルハライドランプ用電子安定器の開発，昭58照学全国大会 (昭58) 47
- (9) Davenport, J. M. et al: Low wattage metal halide lamps. *J. Illum. Engng Soc.* **11-2** (1982) 66
- (10) 腰原正彦ほか：HID 光源のちらつき現象の一考察，昭55照学全国大会 (昭55) 31
- (11) 清水智恵子ほか：放電ランプのちらつき不快感の定量評価，昭57照学東京支部大会 (昭57) 12
- (12) 村瀬隆幸ほか：メタルハライドランプの電極構造とランプ特性の検討，*National Tech. Rep.* **27-3** (昭56) 62
- (13) 島谷俊彦ほか：100 W メタルハライドランプの新電極，昭58照学全国大会 (昭58) 37
- (14) 神谷明宏ほか：小ワット・高効率 HID ランプ，*東芝レビュー* **37-2** (昭57) 101
- (15) Whittaker, F. L.: Properties of sodium tin halide-mercury discharges. *Light. Res. Technol.* **13-1** (1981) 11
- (16) Tielemans, P. et al: Spectral properties of metal halide lamps with rare earth and Sc additives, 3rd Intern. Symp. on the Sci. Tech. Light Sources (1983) 121
- (17) Progress '82, *Light. Des. Appl.* **12-12** (1982) 19
- (18) Keefe, W. M. et al: Factors in the design of scandium sodium iodide arc discharge lamps. IES Conference, Preprint (1980)
- (19) 持丸真次ほか：小型メタルハライドランプのレーザ加工による水素の減少，昭58照学全国大会 (昭58) 37
- (20) Odell, E. C. et al: Light sources. *J. Chart. Inst. Build. Serv.* **3-6** (1981) 32
- (21) Hing, P.: Interaction of alkali metal and halide vapors with ceramic materials. *J. Illum. Engng. Soc.* **10-4** (1981) 194
- (22) Brown, K. E. et al: Tin sodium halide lamps in ceramic envelopes. *J. Illum. Engng Soc.* **11-2** (1982) 106
- (23) McVey, C. I.: High pressure sodium lamp seals and recent improvements. *J. Illum. Engng. Soc.* **8-2** (1979) 72
- (24) 広瀬吉夫ほか：新しい高圧ナトリウムランプ・ネオルックスー 70 W と低始動形一，*東芝レビュー* **32-9** (昭52) 731
- (25) 下垣光太郎ほか：高圧ナトリウムランプ用電極，昭58照学全国大会 (昭58) 57
- (26) Mizuno, H. et al: New high-pressure sodium lamp with high color rendition. CIE XVII Cession, Barcelona (1971) 14
- (27) Van Vliet, J. A. J. M. et al: High-pressure sodium discharge lamps. *IEE Proc.* **128 A-6** (1981) 415
- (28) Otani, K. et al: A high pressure sodium lamp with improved color rendition. *J. Illum. Engng. Soc.* **11-4** (1982) 231
- (29) 斉藤直樹ほか：屋内照明用 HID ランプー演色本位形高圧ナトリウムランプー *照学誌* **63-5** (昭54) 272
- (30) 尾形芳郎ほか：50 W 高演色性高圧ナトリウムランプ，昭58照学全国大会 (昭58) 61

(受付1983年7月18日)