水銀フリーメタルハライドランプ

Mercury Free Metal Halide Lamps

◀キーワード：環境，水銀，メタルハライドランプ，
自動車前照灯，誘導結合型無電極

専門会員 石 神 敏 彦 正会員 上 村 幸 三
Toshihiko Ishigami Kozo Uemura
石 塚 明 朗 正会員 中 野 勝 昭
Akio Ishiduka Katuaki Nakano

1. はじめに

従来のメタルハライドランプは、電極を備えた透光性容器（石英、アルミナセラミックスなど）に希ガス、水銀、金属ハロゲン化合物を封入したものであり、輝度が高く、高効率、高演色性の特性を持つ。メタルハライドランプは、屋外用、屋内用、店舗用などの一般照明、また液晶プロジェクタ用、自動車の前照灯などにも広く使用されている¹⁾²⁾。2001年8月に米国で開催されたLS：9（第9回光源の科学と技術に関する国際シンポジウム）では、HIDランプの開発・研究の発表が半分以上を占め、そのうちの大部分は、メタルハライドランプ関連であった³⁾。ところで、「21世紀のあかり」は、環境に優しい光源システムが条件となる。環境に優しいというためには、地球温暖化防止のための省エネルギーと有害物質の使用削減が必要となる。光源の有害物質としては、まず第1に水銀が対象となる。従来のメタルハライドランプでは、水銀は、ほぼ必須の封入物であった。われわれは、2つのタイプの水銀フリーメタルハライドランプについて研究を進めている。「21世紀のあかり」をめざすこの2つの水銀フリーメタルハライドランプについて概要を報告する。

2. 水銀フリー自動車用 HID ランプ

これまで自動車の前照灯は、ハロゲン電球が主流であったが、放電灯である HID ランプが使用されるようになってきた。このランプは、メタルハライドランプ（ $\text{ScI}_3\text{-NaI-Hg-Xe}$ 封入）であり、ハロゲン電球の2/3の消費電力でも明るさは2倍、従来50～60mであった前照灯の到達距離は、100～120mで夜間視認性が高く、寿命はハロゲン電球に比べて3～4倍である。自動車用 HID 前照灯は、明るさ、色温度、消費電力、寿命の点でハロゲン前照灯に比較して圧倒的に勝っており、急速に市場へ普及し始めている。近い将来、現在のハロゲン前照灯に置き換わっていく事が期待される⁴⁾。

近年、地球環境問題への関心の高まりから、環境負荷物質の使用規制、禁止への動きが全世界的に広がっている。欧州では1996年9月にELV（End of Vehicles）指令案として、市販される車両の鉛、水銀、六価クロム、カドミ、PVCを漸次全廃する提案がなされた。2000年2月3日開催された欧州議会の本会議でEU指示を承認

した。これにより、ランプ類の水銀は、現時点では対象外になっているものの、水銀を含む多くの種類の重金属の使用は原則禁止された。米国でもまだ一部の州ではあるが、水銀の使用規制が始まっている⁵⁾。

現在、急速に市場に普及し始めている自動車前照灯用 HID ランプには、微量ながら水銀が含まれている。今後さらに普及を加速させるためにも、水銀フリー化は必須の条件になってきている。

2.1 ランプ電圧

これまでメタルハライドランプで水銀が必須であった理由は、第一には電気特性の維持（適正なランプ電圧）とランプ効率の確保である。この内ランプ効率については、もともと自動車用 HID ランプは始動時の光束立ち上がりを良くするために数気圧のXeが封入されており、プラズマ内の熱の保持という面では、このXeが水銀の代替物となっている。水銀がなくなると自動車用 HID ランプではランプ電圧は低くなる（85V設定から20V台へ）。一般に、メタルハライドランプでランプ電圧が低くなるとランプ電流を大きくしなければならず、点灯装置や配線などで電気容量の増大、および発生熱の問題が生じる。また電極損失の割合が増加して効率が低下する。ランプ電圧（ V_L ）は電位傾度（ E ）、電極間距離（ L ）、電極降下電圧（ V_d ）と次の関係がある。

$$V_L = E \times L + V_d$$

また、電位傾度はランプ電流（ I ）、プラズマの電気伝導度（ σ ）と次の関係にある。

$$E = I / (2\pi \int (\sigma \cdot r) dr)$$

ランプ電圧を増大させるには、電位傾度（ E ）を増大させる必要があり、そのためにはプラズマの電気伝導度（ σ ）を小さくする必要がある。

さらに、プラズマ内の物質Aについて温度Tでの電気伝導度（ σ ）は

$$\sigma = C \cdot N_E / (T^{1/2} \cdot N_A \cdot Q)$$

である⁶⁾。

ここで、 C は定数、 N_E は電子密度、 N_A は物質の密度、 Q は物質Aの電子に対する衝突断面積である。すなわち、電気伝導度（ σ ）は、電子密度 N_E が小さいほど、物質密度 N_A と衝突断面積 Q が大きいほど小さくなり、その場合ランプ電圧は増大する。すなわち、ランプ電圧の面から望ましい物質としては、イオン化しにくく、電子

との衝突断面積が大きく、プラズマ中の密度を大きくできる物質である。ランプ内の蒸気圧を上げる方法としては、金属を金属ハロゲン化物にすればよいことはよく知られている。そのため、水銀の代替物質としては、蒸気圧が高い金属ハロゲン化物で、その構成金属がイオン化電圧の高いものが候補となる。

2.2 水銀代替物質^{7)~10)}

自動車用 HID ランプの場合には、水銀代替物質として、さらに次のような条件が付け加わる。

2.2.1 水銀に代わり色度を補正する

自動車用 HID ランプでは、定常点灯時の色度範囲(白色)が決められている¹¹⁾。現在の封入物(ScI₃-NaI-Hg-Xe)から水銀を除いた場合には、水銀発光がなくなるため、図1のようにその色度範囲からはずれてしまう。図で沃化亜鉛(ZnI₂)を水銀代替物質として封入する場合には、亜鉛の発光が適切に添加され色度範囲内に入る。

2.2.2 始動後立ち上がり時の発光色が自然である⁸⁾⁹⁾

主要な封入物(ScI₃, NaI)は蒸気圧が低いので、蒸気圧の高い金属ハロゲン化物を水銀代替物質とした場合、その金属の発光が立ち上がり時には主要となる。沃化タリウム(TII)や沃化インジウム(InI)は封入量を規制すれば定常点灯時の光色は良くできるが、立ち上がり時には、それぞれ緑(TI)、青(In)の光色を帯びる欠点がある。

2.2.3 効率を落とさない

自動車用 HID ランプとしては、演色性よりも効率が重視される。沃化ガリウム(GaI₃)や沃化錫(SnI₂)の場合は、定常点灯時にも比較的発光しやすく、可視域に連続発光するので、R_a(平均演色評価数)は向上するが効率は低下してしまう。

2.2.4 ランプの構成物質(石英、電極)と化学反応しにくい

自動車用 HID ランプは、負荷が高く、また始動時に定常時の数倍の電流を流す。このため、発光管の材質である石英や電極の材質であるタングステンと反応しやすい封入物は使用できない。沃化アルミニウム(AlI₃)は、ランプ電圧、色特性などの点は、申し分ない物質であるが、石英と反応してしまい短寿命であり使用できない。沃化鉄(FeI₂)は電極を侵食してしまう。

2.3 水銀フリー自動車用 HID ランプ (35W)

以上のように、水銀代替物質として蒸気圧が高い金属ハロゲン化物を探索した結果、沃化亜鉛(ZnI₂)が水銀代替物質として最適であることが判明した。沃化亜鉛単独封入の場合の発光は図2のように468.0、472.2、481.0、636.2nmの亜鉛(Zn)の発光線と可視域の連続発光が重畳している。このため、立ち上がり時は、分圧の高いZnの発光が貢献して白色範囲に入る。定常時は、Znの発光線の励起エネルギーは大きいので、NaやScに比較して発光しにくく、470nm近辺にわずかに発光して水銀発光を補い、自動車用 HID ランプの色度範囲に入り、効率の低下は少ない。また、沃化亜鉛は石英やタングステンと反応しない。

このように、沃化亜鉛を水銀代替物質として使用した場合、ランプ電圧は40V台(規格提案⁵⁾は42±9V)である。しかし、水銀フリーの場合、電極降下電圧は、一般メタルハライドランプの場合の15V程度よりもっとずっと小さいと推定される。この推定は、従来水銀封入ランプから水銀を抜いた場合に、ランプ電圧は20V台であるにもかかわらず、35Wで70 lm/W以上の効率が得られることに基づいている。このため、水銀フリー自動車用 HID ランプの目標特性としては、ランプ電圧設定が85Vから42Vになるほかは変更がない。水銀封入ランプにおいて、プラズマ中の熱の保持能力は水銀の方が、Xeよりも大きく効率的に有利であり、また、立ち上がり時には、水銀は急速に蒸発して光束を稼ぐことができる。

図1 水銀代替物質の色度補正効果

図2 ZnI₂ランプの分光分布

そのため、水銀フリーランプでは水銀封入ランプと同光束（センター値は3200lm）を得ること、光束立ち上がりを同一（4秒後80%）にすることが開発の課題となる。

3. 誘導結合型無電極メタルハライドランプ^{12)~15)}

典型的な無電極メタルハライドランプは、定格300Wで、内径30mm程度の球状石英製の発光管に希ガス（Xe33kPa）とNdI₃-NaI-SnI₂（高効率タイプ）、またはScI₃-NaI-SnI₂（長寿命タイプ）が封入されている。図3にランプシステムを示す¹²⁾。高周波電源から整合回路を通じて、発光管の周りに設けられた2回巻きのアルミ製コイルに13.56MHzの高周波電流を流すことにより、その電磁誘導により、発光管内のガスが発光する。高効率タイプ（外管あり）では400W入力でランプ単体として、これまでの白色光源では最高の180lm/W（R_a:74）が得られている。これは電極損失がないことに加えて、管壁近辺が最高アーク温度になるリング状の放電状態のため、アークからの熱損失が小さいことによると考えられている。長寿命タイプ（外管なし）では加速寿命試験で定格6万時間相当の試験データが得られている。図4で注目する点は、6万時間後の光束維持率がほぼ100%であることであり、電極がない効果が良く現れている¹²⁾。色特性、電気特性（Q値）も大きな変化傾向がない。有電極のメタルハライドランプは、光束維持率が非常に悪

図3 誘導結合型無電極ランプシステム¹²⁾

図4 誘導結合型無電極ランプの寿命特性¹²⁾

いことが知られているが、無電極では光束維持率の大幅な改善が実証された。光束維持率がよい事は、省エネルギーに大きく貢献すると考えられる。

このランプは、水銀を封入していない。水銀を封入した場合は、始動時に急激に蒸発して発光管内ガスのインピーダンスの急激な変動をもたらし、回路の追従を困難にする。また、有電極の場合と異なり電極損失がないので、水銀で電気特性を維持する必要がない。このような理由により、誘導結合型無電極メタルハライドランプでは水銀フリーにすることができる。水銀はプラズマ中に熱を保持する作用がある。水銀を抜いた場合には、プラズマ中に熱を保持するために、希ガスを比較的高圧封入する必要がある。ランプ効率を高めるためには、熱伝導率の小さいXeガスが好適であり、KrやArガスを封入する場合よりもランプ効率が高い。Xe封入圧力が高すぎると始動不能になる。このため、始動とランプ効率の兼ね合いからXeガスは33kPa程度封入される。このランプで問題になるのは、寿命中に遊離沃素が発生してアークの揺れ、立ち消え、始動不良を起こす事である。水銀を封入している場合は、遊離沃素は水銀と結合して沃化水銀（HgI₂）となるので、大きな問題にならない。しかし、水銀を封入していない誘導結合型無電極メタルハライドランプでは、もともと始動が困難であることもあり、遊離沃素の発生は大きな問題となる。この改善には沃化錫（SnI₂）の添加が大きな改善効果があることがわかった¹³⁾。

SnI₂添加の効果は2つあり、第1の効果は、発光管の管壁での金属ガス分圧を減少させることによる金属と石英の反応抑制であり、第2の効果は、発生した遊離沃素の吸収である。この2つの効果の結果、少量のSnI₂添加で長時間遊離沃素の発生を抑制できる。誘導結合型無電極メタルハライドランプでは、ランプについては大きく改善が進んだが、このシステムでは誘導コイル部の共振鋭さ（Q）が大きく、ランプの特性バラツキや寿命中の特性変化により、共振状態の変化が大きくなりやすい。このため、回路設計が非常に難しいという大きな課題があり、まだ実用化に至っていない。

4. 水銀フリーのランプ特性への効果

水銀は有害物であるので、水銀フリーランプは、環境に優しいランプであるが、水銀フリーではシステムの特性上でも次のような利点がある。

4.1 始動時の色特性が良い

水銀封入の自動車用HIDランプの場合には、立ち上がり時には蒸気圧の高い水銀が急速に蒸発して、しばらくは水銀発光が主要となる。水銀発光は色特性が悪い。そのため、自動車用HIDランプの白色範囲に入るまで10秒前後の時間が必要である。水銀フリーランプの場合

図5 自動車用 HID ランプの始動時の発光変化

図6 自動車用 HID ランプの始動時の色度変化⁹⁾

は、始動時水銀の発光はなく、代わりに蒸気圧の高い ZnI_2 の蒸発による Zn 発光の貢献により、始動時から白色範囲に入っている。図5に両ランプの分光分布の変化を、図6には両ランプの始動時の色度変化を示す。

4.2 調光特性が良い

従来のメタルハライドランプでは調光（入力電力を定格より下げて光束を調整する）は、ほとんど行われていない。水銀が封入されている場合、調光すると最冷部温度が低下するため、金属ハロゲン化物の分圧が低下して金属発光の割合が減少する。その間、水銀は完全蒸発しており蒸気密度は変化しない。このため、水銀発光比率が増し、光色が大きく変化する。水銀フリーの場合は、そのような色特性（色温度、 R_a ）の変化は原理的に少な

図7 無電極ランプの調光時の色温度変化¹⁴⁾

くなる。実際に図7で封入物が ScI_3 - NaI の場合の無電極 MH（メタルハライドランプ）と有電極 MH（外管クリアタイプ、外管蛍光体塗布タイプ）の調光率に対する色温度変化を示すが¹⁴⁾、水銀フリーである無電極 MH では調光しても色特性の変化が少なく、また効率の低下も小さい。一般にメタルハライドランプでは、定格点灯時に電極が最適温度になるよう設計されている。このため、調光時には最適温度から外れて電極の損耗が増す。しかし、無電極ランプは電極がないのでそのような弊害は生じない。

水銀フリー自動車用 HID ランプの場合も封入物が ScI_3 - NaI であるので、同様に調光時の色特性の変化は小さい。自動車用 HID ランプでは今後、調光の要求が強くなると思われるが、水銀フリーランプはその要求に対応しやすいランプである。課題は始動時、定格点灯時、調光時に適した電極設計である。

水銀フリーランプでは同じ原理から、長期点灯中の色変化が少なくなる。すなわち、水銀封入ランプでは、金属ハロゲン化物が石英などと反応して失われていくが、その場合、水銀発光が強くなり、色温度が上昇してくる。水銀フリーランプでは、そのような寿命中の色変化は改善される。また同様の原理から、水銀フリーでは寸法ばらつきなどから生じるランプ間の色特性のばらつきも小さくなる。

4.3 点灯回路の小型化

誘導結合型無電極メタルハライドランプでは、水銀が封入されていると始動時に急激にプラズマのインピーダンスが変化してしまい、それに対応した回路の設計は難しくなる。この場合、回路からみても水銀フリーの方がシステムの良いといえる。

水銀フリー自動車用 HID ランプの場合、現在交流矩形波点灯しているが、直流点灯にできる可能性を持っている。現在は12V 直流電源を使用して、最終的に交流に変換しているの、直流点灯できれば回路の小型化が可能となる。水銀封入ランプを直流で点灯した場合、封入物の内、 Na や Sc は正にイオン化され、陰極に引き寄せられる。水銀は多量に存在するので、電極間の分圧変化は少ない。このため、陰極では Hg , Na , Sc が発光して色温度は比較的に低いが、陽極側では Na , Sc の発光は弱く水銀の発光が強くて色温度は高くなる。このように、水銀封入ランプでは、電極間で色変化が起こり配光に大きな問題が生じる。水銀フリーランプでは、水銀がないため電極間の色変化はずっと少なくなる。しかし、自動車用 HID ランプでは NaI を封入しているため、直流点灯では、 Na と石英の反応が起きやすく、その対策が課題となる。

5. おわりに

メタルハライドランプは、高性能を持ち広い範囲に使用されている。水銀フリーメタルハライドランプとして、水銀フリー自動車用 HID ランプと誘導結合型無電極メタルハライドランプの研究が進められている。本稿ではこの2つのランプについて、特に水銀フリーが光源システムの特性に与える効果に力点を置いて記述した。

「21世紀のあかり」は環境に優しい光源システムが条件であり、このような水銀フリーメタルハライドランプの実用化が望まれる。

参考文献

- (1) 照学誌, 77-12, 「メタルハライドランプとその応用」特集 pp. 726-757 (1993).
- (2) 太田垣芳男: HID ランプと器具, 照学誌, 85-1, pp.40-45 (2001).
- (3) Symposium Proceedings of LS: 9 (2001).
- (4) 大森信哉: 自動車用 HID ランプの最新動向, 電球工業会報, No. 437, pp.15-18 (2001).
- (5) 仁枝康弘: 水銀フリー自動車前照灯用 HID ランプについて, 電球工業会報, No.445, pp.30-32 (2002).
- (6) J. C. Morris, J. H. Walker: Electron-neutral transport cross

section of mercury, J. Appl. Phys., Vol.44, No.10, pp.4558-4561 (1973).

- (7) 特開平11-238488.
- (8) T. Ishigami, K. Uemura, A. Ishiduka and K. Nakano: Mercury free HID lamps for automotive use, Proceedings of the 9th International Symposium on the Science & Technology of Light Sources, 12: P, pp.63-64 (2001).
- (9) 上村, 石神, 石塚, 中野: 水銀フリー自動車用 HID ランプの検討, H13照学全大, p.87 (2001).
- (10) S. Omori et al.: Mercury-free 35W HID lamps for automobiles, Proceedings of the 9th International Symposium on the Science & Technology of Light Sources, 11: P, pp.61-62 (2001).
- (11) 日本電球工業会規格 JEL215-1998 (1998).
- (12) 上村, 石神, 伊藤, 横関, 清水, 井上: 誘導結合型無電極メタルハライドランプの特性向上, 照学誌, 84-5, pp.312-321 (2000).
- (13) 伊藤, 上村, 石神, 井上, 関根: 誘導結合型無電極メタルハライドランプの寿命特性に関する考察, 照学誌, 84-8A, pp.514-521 (2000).
- (14) 上村幸三, 石神敏彦: 誘導結合型無電極メタルハライドランプの調光特性解析, 照学誌, 85-8A, pp.563-570 (2001).
- (15) 上村幸三, 石神敏彦: 誘導結合型無電極メタルハライドランプにおける発光管の白濁現象の解析, 照学誌, 85-11, pp.888-894 (2001).

著者紹介

石 神 敏 彦

1947年生。1973年東京大学工学系大学院修士課程修了。現在、東芝ライテック㈱技術統括部研究所勤務。平成10年度照明学会論文賞。博士(工学)。

上 村 幸 三

1968年生。1991年芝浦工業大学工学部電気工学科卒。現在、東芝ライテック㈱技術統括部研究所勤務。HID ランプの研究開発に従事。

石 塚 明 朗

1962年生。1987年東京電機大学工学部卒。現在、ハリソン東芝ライティング㈱勤務。HID ランプ用パラスト開発に従事。

中 野 勝 昭

1950年生。1974年青山学院大学工学部電気電子工学科卒。現在、ハリソン東芝ライティング㈱勤務。