

セラミックメタルハライドランプの高効率化技術

Development of High-Efficiency Ceramic Metal Halide Lamp

野原 浩司 打保 篤志
Hiroshi Nohara Atsushi Utsubo

要 旨

高効率セラミックメタルハライドランプは、従来のセラミックメタルハライドランプが店舗用途として高演色性を特徴とするのに対し、施設・屋外照明用途として高効率を得ることを追求したランプである。このランプは、透光性セラミックを発光管に採用した従来の設計を基本に、高効率化技術の核となる細長形発光管を採用したことが特徴である。細長形発光管は、高効率発光物質PrI₃-NaI（ヨウ化プラセオジウムとヨウ化ナトリウムの混合ヨウ化物）を封入し、その性能を最大限に引き出すための設計がされている。発光管の負荷を上げることで、PrI₃-NaIの蒸気圧を確保し、発光管内径を小さくすることでNaの自己吸収を削減して最適な分光分布を確保している。これらの両立により、400 Wの水銀灯と同等の光束を150 Wで得られるという高効率メタルハライドランプを実現する。

Abstract

This high-efficiency ceramic metal halide lamp is a metal halide lamp utilizing translucent ceramic as the arc tube. This lamp has been developed to obtain higher efficiency suitable for facilities and outdoor lighting usage, and is based on the arc tube design of conventional ceramic metal halide lamps that have been commercialized for shop lighting. The long and narrow arc tube shape that is one of the most important features of this lamp encloses the high-efficiency luminescence material PrI₃-NaI (mixed iodide of praseodymium and sodium), and a design to maximize the performance is employed. Owing to these approaches, a highly efficient metal halide lamp with luminous flux equivalent to a 400 W high-pressure mercury lamp is achieved at an input of only 150 W.

1. はじめに

2005年2月16日、京都議定書が発効し、CO₂排出量の少ない燃料への転換やエネルギー使用量の削減が急務となっている。このような省エネの観点から、光源の効率向上が非常に強く求められている。

既存の高効率高輝度放電灯（High Intensity Discharge Lamp水銀灯、ナトリウム灯、メタルハライドランプの総称。以下、HIDランプ）としては、高圧ナトリウム灯が有名だが、演色性に乏しく、道路、トンネルなど特定の市場での使用に限られている。一方、安価という理由で、効率の低い水銀灯が、いまだに、工場、体育館、倉庫などの高天井光源、街路などに幅広く使用されている。2006年度、日本市場のHIDランプにおける水銀灯の構成比率は、数量ベースで35.8%と、いまだ大きな比率を占めている。

HIDランプの高効率化の研究・開発は、以前から盛んに行われていた¹⁾²⁾。従来の取り組みの中では、さまざまな発光物質が封入物として検討され、効率の高い発光物質の選定が行われていた。しかしながら、これらの発光物質を蒸発させ、発光を得るには、発光管を極めて高い温度で動作させることが求められた。結果として、点灯中に発光管である石英が、液相、気相、両方において激しく反応を起こすことが確認された。このため、発光管の

割れなどによるランプ短寿命が発生し、実用化に結びつけることができなかった。

今回、筆者らは、この水銀灯に替わる、より効率の高い白色光源を開発することで、CO₂排出量削減に貢献できるHIDランプの普及を目指す。

今回、従来には無い細長形の形状をしたセラミック製発光管を検討し、高い動作温度を保持しながら、発光管の均一な温度分布を得ることで、短寿命を解決し、封入物自身の自己吸収を防止することで、効果的な発光バランスを保つことに取り組んだ。

前述した水銀灯の中で、最も使用本数が多いのは400 Wである。開発目標としては、これと同等の光束を150 Wのメタルハライドランプで実現することとし、60%以上という大幅な省エネルギー化をもたらすことに取り組んだ。

2. HIDランプの高効率化技術

HIDランプにおける効率は、以下の式で表現される。

$$\begin{aligned} \text{効率 (lm/W)} &= \text{光束} / P_{in} \dots \dots \dots (1) \\ P_{in} &= P_c + P_r + P_{el} \dots \dots \dots (2) \\ \text{光束} &= K_m \int_{380}^{780} V(\lambda) P_r(\lambda) d\lambda \dots \dots \dots (3) \\ \text{効率} &= K_m \int_{380}^{780} V(\lambda) P_r(\lambda) d\lambda / P_{in} \dots \dots \dots (4) \end{aligned}$$

ここで、P_{in}：ランプへの入力電力、P_c：熱伝導ロス、

特集
2

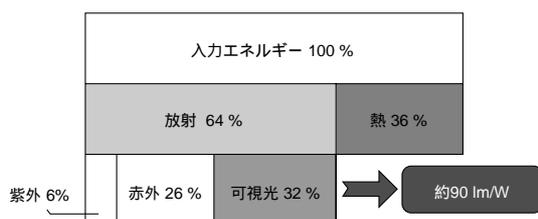
P_r : 放射強度, P_{el} : 電極ロス, $V(\lambda)$: 比視感度, K_m : 視感度曲線の最大値である。

ランプの光束は、可視光における放射強度に、比視感度 $V(\lambda)$ という波長に対する人間の目の感度分布がかけられたもので表現される。人間の目の感度は、緑色で強く、比視感度は555 nmを中心にした正規分布で表される。

上述した式よりわかるように、効率を上げるためには、いかに熱伝導ロスを少なくするかが重要である。また、ランプの放射光として、比視感度に合致した分光分布を得られるかがポイントとなる。

水銀灯などに使用されている石英に比べ、耐熱性・耐化学反応性に優れたセラミックを採用することで、アーク放電を閉じ込める発光管の容積を小さくした。上記熱ロスを削減、放射強度高めることで、高効率・高演色を両立するセラミックメタルハライドランプ「セラメタ™ 150W」を商品化してきた。

第1図に、そのエネルギー効率を示す。



第1図 従来の「セラメタ150W」のエネルギー効率

Fig. 1 Energy balance of "Cerameta 150 W".

主に店舗照明に用いられる「セラメタ150W」は、効率と照射物の色再現性を表す演色性の両方を追求した発光物質 DyI_3 - HoI_3 - TmI_3 - NaI - TiI_2 を採用しており、短波長から、長波長まで比較的均等に発光する分光分布になっている。このため、効率としては90 lm/W程度しか得ることができず、150 Wで水銀灯と同等の光束を実現することは不可能であった。

この「セラメタ150W」のセラミック発光管技術を活用し、従来とは異なる高効率な発光物質の採用に加えて、その発光特性を十分に引き出すための新規発光管設計を行うことで、より効率良い発光を得ることを可能とした。

150 Wで水銀灯400 Wと同等の光束が得られる高効率を実現するために、以下の3つのアプローチを行った。

- (1) 高効率封入物の選定
 - (2) 細長形発光管の開発
 - (3) 一体成型発光管採用による熱伝導ロス削減
- 以下、各アプローチについて詳しく述べる。

3. 高効率封入物の選定

一般に効率の高い発光物質として、 Tm (ツリウム), Ce (セリウム), Pr (プラセオジウム) などの希土類ヨウ化物が知られている¹⁾。ただし、上記希土類ヨウ化物だけではその電離電圧が高いために、発光管内のアークが収縮し、放電が不安定になる。そこで、アークを太く安定させる効果があり、それ自体が比較的効率の高い発光をもたらす NaI (ヨウ化ナトリウム) との組合せを検討した。

今回の実験では、上述した「セラメタ150W」の発光管に、さまざまな希土類ヨウ化物と NaI の混合ヨウ化物を封入し、その効率と光学特性を比較した。

第1表の実験結果に示すように、最も効率が高い組合せは CeI_3 - NaI で、次いで PrI_3 - NaI であった。ここで、 Ce の発光は視感度の高い緑色の発光が主であるため効率を高めることができる。しかし、水銀灯代替となる4000 K程度の色温度にした場合、その光色の色度座標上における点が、黒体放射ラインからのずれを表す duv 値で約20と、緑色の非常に強いランプとなる。そこで CeI_3 - NaI より効率は劣るが4000 Kでの duv 値が20以下であり、演色性のよい PrI_3 - NaI を封入物として採用した。

第1表 封入希土類金属の種類と発光特性 (100 h値)

Table 1 Lamp performance as filling rare earth metal.

	効率 [lm/W]	相関色温度 T_c [K]	duv	演色評価数 R_a
Ce	101	4369	22	79
Pr	98	4349	13	83
Tm	92	3087	-18	79
Dy	80	3679	-32	78
Ho	85	3356	-25	79

Dy: ジスプロシウム Ho: ホルミウム

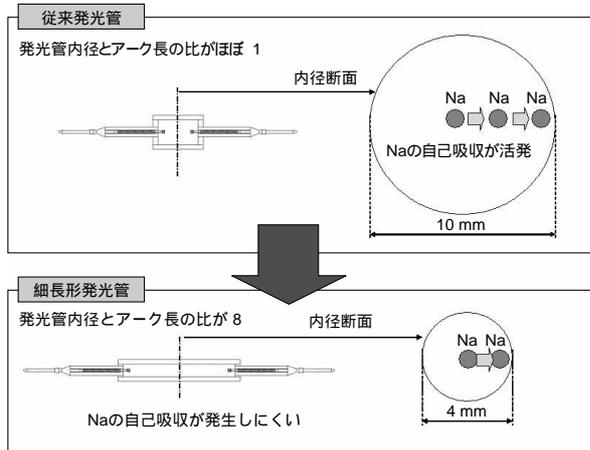
4. 細長形発光管の開発

前節で記述したように、 PrI_3 - NaI の混合ヨウ化物を封入物として選定した。Pr, Naともに比視感度に対して、効果的な発光が得られる効率の高い封入物であるが、 NaI に比較して PrI_3 の蒸気圧が低く、Prの高い発光を得るためには、 PrI_3 の蒸気圧を得られるだけの高い動作温度にする必要がある。その場合、従来の石英を発光管材料として用いたメタルハライドランプでは、発光管材質である石英と、封入物である PrI_3 との反応が促進され、ランプが短時間で不点灯となる問題があり、実用化されることはなかった。

先の開発において採用した透光性アルミナを今回も活用することで、発光管動作温度を高く保つことができた。これにより、 PrI_3 の蒸気圧を十分に確保する設計が可能に

なった。今回の検討では、発光管の動作温度を高く設定するため、「セラメタ150W」における管壁負荷を 27 W/cm^2 から 33 W/cm^2 に設定した。ただし、採用した $\text{PrI}_3\text{-NaI}$ の混合ヨウ化物は、発光管の動作温度が低い場合は、Na主体の発光となり効率のよいPrの発光が得られない。逆に動作温度が高すぎるとNaの自己吸収幅が大きくなり効率が低下するという問題があり、両者の組合せは、トレードオフの関係にある。そこで、 PrI_3 の蒸気圧を増加させながら、Naの自己吸収を抑える発光管設計が必要となる。

この対策としては、高圧ナトリウム灯で、よく知られたアプローチであるが、第2図に示すように発光管の管径を細くし、Naの放射光が別のNa原子に出会う距離を短くすることが上げられる。これによりNaの自己吸収を低減できる。



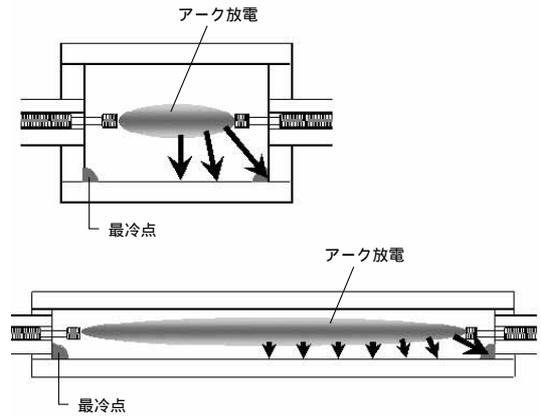
第2図 Naの自己吸収メカニズム
Fig. 2 Mechanism of Na self absorption width.

上記のアプローチをベースに、「セラメタ150W」の設計に対し、管径を極めて細く、アーク長の長い細長型の発光管形状を検討した。

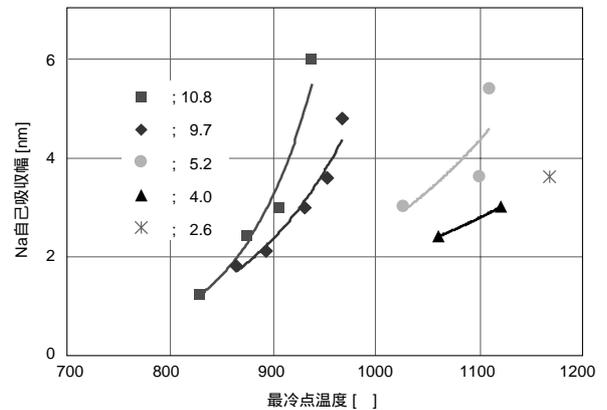
第3図に示すように、動作温度を上昇させながら同温度でのNaの自己吸収を大幅に抑制することを狙った。「セラメタ150W」の発光管は、アーク長 L が10 mm、内径 D も10 mmとその比(L/D)が1の設計になっている。これに対し、今回検討した細長形発光管では、内径を極力小さく設計することで、高温のアークと発光管の距離を狭めた。

第4図に、発光管の内径をパラメータに、発光管の動作温度とNaの自己吸収幅の関係を示す。

内径が 10 mm近辺においては、発光管の動作温度の上昇とともに、Naの自己吸収幅が著しく増加するのがわかる。これに対し、内径 4 mmの発光管においては、発



第3図 点灯時の発光管内の様子
Fig. 3 Heat conduction from arc sheath inside A/T.



第4図 最冷点温度とNaの自己吸収幅の関係
Fig. 4 Relationship between cold spot temp. and Na self absorption width.

光管の動作温度を非常に高い1100 程度にしながも、Naの自己吸収幅を3 nm（従来発光管 10 mmでは、920 に相当）に抑制することができた。

$\text{PrI}_3\text{-NaI}$ を採用した場合の、もう1つの課題は、水平点灯時にアークが湾曲しやすく、発光管の温度分布が不均一になり、最悪の場合は、熱応力によって発光管にクラックが発生してしまうというものであった。

今回の細長形発光管は、アークから、発光管内壁の距離を均一に近づけることができるため、水平点灯時にも、発光管の温度分布が均一化することができる。この効果によって、点灯中および消灯直後の冷却時に発生する熱応力が低減され、発光管クラックが発生することはなかった。

前述したように、今回は、内径 4 mmになる発光管を採用し、その管壁負荷を 33 W/cm^2 に設定した結果、発光管のアーク長は従来の「セラメタ150W」のアーク長の3倍以上の32 mm、そのアスペクト比 L/D は8となった。

アーク長を長くすることで、電極間での電子の衝突回数を多くできるため、インピーダンスを高くできる。このことにより、ランプ電圧を確保するのに必要な水銀量を通常より低減できるというメリットが得られる。水銀量を削減できることは環境面において非常に大きな貢献であるが、ランプの発光効率の面でも、NaHg（ナトリウム・水銀）分子による長波長発光成分が低減され、より比視感度に近い分光分布を得ることができるという大きなメリットがある。

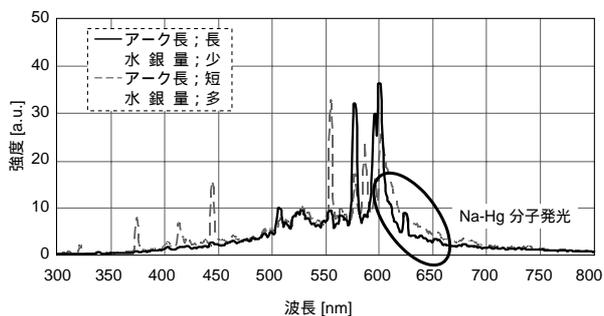
アーク長を32 mmに設計した結果、封入する水銀量は1 mg以下（水銀灯400 Wの約1%）でよく、これで適正なランプ電圧が得られた。これにより、NaHgの分子発光を低減することができた。

第5図に、それぞれ、従来の「セラメタ150W」の発光管、新規開発した細長型発光管にPrI₃-NaIを封入した場合の分光分布を示す。従来の発光管に比べ、細長型発光管では、600 nm～650 nm付近のNaHgの分子発光が低減されているのがわかる。これにより、より比視感度に近い分光分布が得られた。

要約すると、今回検討した細長型発光管の採用により、以下3つの効果が得られた。

- (1) 動作温度の上昇
- (2) Naの自己吸収幅の抑制
- (3) NaHg分子発光の抑制

これらの効果により、従来の「セラメタ150W」の発光管にPrI₃-NaIを封入した場合に比較し、20 l m/Wの効率向上が実現でき、その結果、発光効率118 lm/Wを得ることができた。



第5図 それぞれの発光管におけるPrI₃-NaIの分光分布

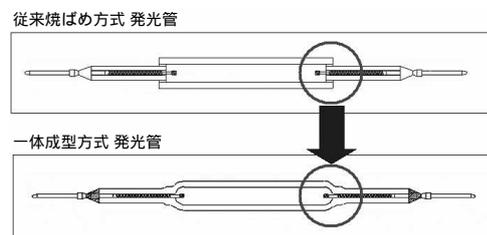
Fig. 5 Photometry of long and narrow A/T design.

5. 一体成型発光管採用による熱伝導ロス削減

前述の取り組みに加え、さらなる高効率化のために熱伝導ロスを低減し、動作温度を高めることを目指して発光管形状を最適化した。第6図に示すように、従来の焼きバメ式円柱型から一体成形楕円型にすることで、本管部端部の熱伝導ロスを低下させることを試みた。発光管本管部と細管部の接合部分の熱容量を削減することで、アーク放電の熱をよりスムーズに中央部から端部へ伝導させることができる。この結果、発光管端部の温度を引き上げ、より均一な発光管温度分布を得ることができた。

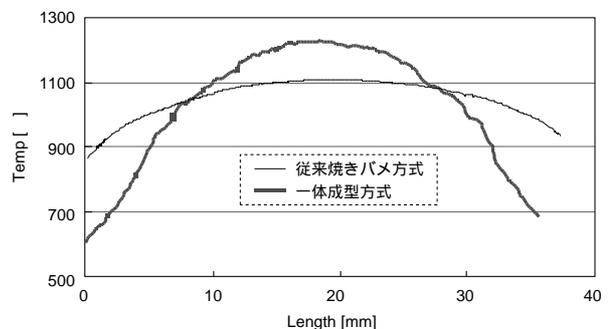
第7図に示すように、円柱形発光管の温度分布に比べ、一体成型発光管の温度分布は、より均一になり、また動作温度も高く設定できるようになった。この検討により、白色である4200 Kで効率125 lm/Wが実現された。

以下に、今回の検討により得られた特性を、第2表に示す。また、開発した高効率セラミックメタルハライドランプの写真を、第8図示す。発光管は内径4 mm、アーク長32 mmで、L/D=8の設計のものを採用した。ランプ外管は硬質ガラスを使用し、口金には取り扱いやすいEベースを使用した。



第6図 円柱形発光管と楕円型一体成型発光管の断面図

Fig. 6 Cross-section of A/T.



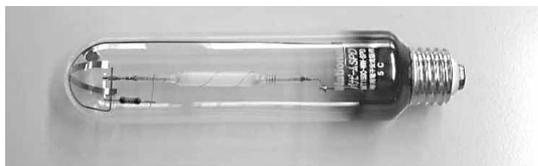
第7図 円柱形と一体成型発光管の温度分布比較

Fig. 7 Comparison with temperature distribution of A/T shape.

第2表 開発品のスペック

Table 2 Specification of developed lamp 150 W.

品番		MT150C-LW-SPD	MT150C-WW-SPD
寸法 [mm]	外管径	40	
	全長	177	
	光中心距離	110	
口金		E26	
定格ランプ電力 [W]		150	
全光束 [lm]		18000	18800
ランプ効率 [lm/W]		120	125
定格寿命 [h]		15000	
相関色温度 [K]		2800	3800
平均演色評価数 [Ra]		50	65



第8図 「セラメタプレミアSPD150W」のランプ写真

Fig. 8 Lamp structure of "SPD150W".

6. まとめ

本開発の150 Wランプでは、高効率な発光物質の組合せであるPrI₃-NaIの選択と、その発光特性を十分に引き出す細長発光管設計および最適温度設計により、極めて高い効率125 lm/Wの白色光源を実現した。これにより、同等の光束である水銀灯400 Wに比べ、60%以上の省エネルギー化を達成するとともに、水銀の使用量を約99%削減することができた。

今回開発した「セラメタプレミアSPD150W」は、第一種指定工場での基本照明や道路、トンネルなど経済性が要求されるさまざまな照明アプリケーションでの使用が可能であり、照明業界におけるCO₂削減に対し、大きな役割を担うことが期待される。

当社が出荷している400 W水銀灯18万本すべてを、開発した150 Wランプに置きかえた場合、CO₂排出の削減量、またその量を吸収できる杉の木の本数に換算した場合の試算を行った。結果、60%以上のCO₂削減、年間51400tの排出量の削減ができ、これは杉の木の吸収量に換算して、367万本に相当する。

「セラメタプレミアSPD150W」は、従来の「セラメタ150W」と比較して、アーク長が3倍以上あるため、始動時、安定点灯時の両方において、放電維持が困難になる。このため、安価な銅鉄安定器での点灯ができず、安定点灯時にランプ電圧波形を矩形波に保てる電子安定器での駆動が必要となっている。その結果、システムとして高価になるという課題がある。今後、ランプ製造プロセスの見直しなどを含め、より低コストなシステムとして提供することで、普及が進むものと考えられる。

参考文献

- 1) R. Zollweg, et al. : An ultra high efficacy HID lamp. J. Illum. Engng. Soc. JULY, pp.249-253(1975).
- 2) P. Tielemans, et al. : Spectral properties of metal halide lamps with rare earth-iodide or Sc-iodide and sodium iodide. Lighting Research & Technology 17, No.2,pp.79-83(1985).

著者紹介



野原浩司 Hiroshi Nohara
照明社 産業光源SBU
Industrial Lighting SBU, Lighting Company



打保篤志 Atsushi Utsubo
照明社 産業光源SBU
Industrial Lighting SBU, Lighting Company