AlI₃ を添加したメタルハライド ランプの発光特性

専門会員 菊地長四郎* 正会員 伊藤 三郎* 正会員 江崎 真伍*

Characteristics of Metal Halide Lamp with Aluminium Tri-iodide

Choshiro Kikuchi (Fellow Member), Saburo Ito (Member), Shingo Ezaki (Member)

(Research Department New Nippon Electric Co., Ltd)

This paper describes the characteristics of a new metal halide lamp with aluminium tri-iodide emitting a continuous spectrum. Many substances are metal halide lamp to give high efficiency and good color rendering. Here, aluminium tri-iodide is taken, and experiments are carried out with special discharge tube to achieve color rendering index Ra higher than 90.

With the vapor pressure of aluminium tri-iodide increased in the discharge tube, lamp voltage, light output, spectral energy distribution, CIE general color rendering index Ra, special color rendering index Ri and color temperature are measured for various values of lamp current.

The result indicates that the lamp shows a continuous spectrum at the bulb wall temperature higher than 300°C. Specially, optimum spectral energy distribution is obtained near 400°C, then CIE general color rendering index Ra of the lamp becomes 95 at color temperature of 5700°K with high efficiency. It is confirmed that these data are available for the designing of high pressure and extra high pressure mercury lamp.

1. 緒 言

1900 年当初に始められた 高圧水銀ランプの研究は、1930 年代に至って実を結び、以来改善が重ねられて現在の地位を築いてきた。その間、長寿命化のための電極改良、演色性を改善するため外管内にけい光体を塗布することなどが研究されてきた。

一方、水銀ランプの極端な青みを改善するための他の方法として、金属ハロゲン化物を発行管内に添加する方法が古くから行なわれてきた¹⁾。近年、光源の高効率化とともに、演色性についての関心が高まり、けい光ランプはもちろん、水銀ランプについてもその傾向がみられる。このような背景をもとに、金属ハロゲン化物を封入した高圧水銀ランプの研究が、1960 年代にはいって盛んに行なわれ、タリウム、ナトリウム、インジウム²⁾、スカンジウム³⁾、トリウム⁴⁾ などのよう化合物を封入したラ

ンプが発表されるに至った。

一方、国内においても、タリウム、ナトリウム、インジウム⁵⁾のよう化合物を組み合わせたランプ⁶⁾、さらにリチウム⁷⁾のよう化合物を加えたランプ⁷⁾、ナトリウム、スカンジウム、トリウム⁸⁾のよう化合物混合によるランプ⁸⁾などが発表され製品化されている。

しかしこれらの光源は、いずれも添加した元素特有の線スペクトルを主発光成分としているため、演色性の点で劣り、平均演色評価数 Ra は 60~80 で十分満足できるものではない。このような点を改善したランプとして、東ら⁹⁾はよう化錫を発光管内に封入し、分子による連続スペクトルを発光し、平均演色評価数 Ra が 92 に達するランプの開発に成功した。

筆者らは、このような連続光を発する演色性の良い光源とその材料に注目し研究を進めてきた結果、アルミニウム、ゲルマニウム、ガリウム、コバルト、ベリリウムなどのハロゲン化合物が、良好な白色連続光を発することを見出した。とくにアルミニウムのハロゲン化合物は、効

* 新日本電気株式会社研究部

率, Ra 共すぐれた特性を示し, 平均演色評価数 Ra が 95 にも達する値が得られた。

以下, アルミニウム化合物を添加したランプの基本的な電気的, 光学的諸特性について述べる。

2. AlI₃ とその特性

添加物として使用するアルミニウムのハロゲン化合物は, 1 価および 3 価が存在する。1 価のものは一般に蒸気圧が高く, 化学的にも不安定である。AlI₃ の融点は 191°C, 沸点は 382°C で蒸気圧が比較的高く, 容易に必要な管内蒸気圧が得られる。

AlI₃ の蒸気圧の温度特性を図 1 に示す。この蒸気圧曲線は, 蒸気圧の近似式

$$\log P = -A/T + B - C \log T$$

図 1 よう化アルミニウムの蒸気圧特性

より, 3 点での既知定数を代入して A, B および C を定め計算により求めた。

本実験に採用した AlI₃ 蒸気の分光透過性を図 2 に示

図 2 よう化アルミニウム蒸気の分光透過特性

す。このデータは, 後に述べるランプの発光特性に関連するため, 予備実験として求めたものである。測定は厚み 20 mm の石英製たいこ形セルに AlI₃ を封入し, 炉内で徐々に加熱して各温度での分光透過率を求めた。図では容器である石英の吸収成分を除いて表示した。図から明かなように, 通常の使用管壁温度である 400~500

°C の蒸気圧においても, 蒸気自身の可視域吸収はほとんどなく, わずかに 400 nm 付近から短波長で吸収が始まる。120°C の場合, 280 nm および 330 nm 付近で若干変動がみられるが, これはより高温ではみられないことから測定誤差であろう。

一方, 実際の点灯中の発光管内部のアーク中心付近では AlI₃ のガス温度は数千度の高温で, この高温ガスの分光透過特性は, 図 2 の各特性よりさらに長波長側にずれ, したがって短波長側の吸収は, より盛んになるものと思われる。

3. 実 験

実験に供した放電管は, 石英製超高压形で, 図 3 にその構成を示す。管内径 15 mmφ, アーク長 8 mm で, 側

図 3 実験に用いた放電管
1: ThO₂ (2%) -W 電極 2: Mo 箔真空封止
3: 枝管 4: 添加物 (Hg, AlI₃)

壁に温度をコントロールして蒸気圧を制御するため, 枝管を設けた。管内には, この実験での最高測定温度の 510°C においてもなおかつ, 飽和蒸気圧を保つために十分な量の水銀 100 mg, よう化水銀 112 mg およびアルミニウム 5 mg を封入し, 管内でアルミニウムとよう素とを反応させた。さらに起動用ガスとして, 100 mmHg のアルミニウムを封入した。

実験に採用した回路を図 4 に示す。測定に際しては枝

図 4 測定回路図
O: 電気抵抗素子, SL₁, SL₂: 招動電圧調整器,
Tr: ステップアップトランス, Ch: チョーク
コイル, TC₁, TC₂: 熱電対 (クロメルアル
メル), mV: ミリボルトメータ, S: 受光器系
(プリズム形分光器およびセレン光電池)

管部温度が常に管内の最低温度となるように, 熱電対で各点をチェックしながら枝管加熱炉で温度, したがって蒸気圧を制御した。

測定は図 4 に示す回路構成で, ランプ電流をパラメー

タとし、各枝管温度でのランプ電圧、入力、光出力、分光エネルギー分布を求めた。各測定は温度を上昇させながら連続して行なったため、測定温度は必ずしも一定ではない。測定に使用した、分光器はプリズム形で、スリット幅を0.175 mm一定とした。光源と受光器の位置ずれの影響を少なくするため、受光部前面に乳白拡散板を設けた。本分光器の光電変換は、R-136 光電子増倍管を使用した。受光器系の感度補正は2854°KのA光源で行なった。演色評価数の計算、色温度などは、分光エネルギー分布より JIS Z 8725 および 8726 に従って求めた。

4. 結 果

4.1 ランプ電圧

ランプ電流が、4～7 Aの場合のランプ電圧の変化を図5に示す。ランプ電流が8 Aの場合もほぼ同様の傾向

図5 枝管温度変化によるランプ電圧の変化

を示す。アルゴンガス圧に対する水銀の分圧の占める割合が増加するにつれて、ランプ電圧は下降するが、さらに管壁温度が上昇すると、高圧放電灯一般にみられるように増加を始める。水銀およびよう化アルミニウムの蒸気圧が急上昇する380°C近辺からランプ電圧も急上昇する。図で4～7 Aの曲線が交わる点、すなわち440°C近辺以上で電圧-電流特性は正特性となる。

4.2 相対発光効率

枝管温度の変化に対する相対発光効率の変化を図6に示す。相対発光効率は、光源に対向して設けられた視感度補正を施したセレン光電池で光信号を電気信号に変換して読み取り、そのときの相対光出力を求め、入力で除したものである。比較測光による実測ではランプ電流6 A、枝管温度395°Cでの発光効率は、およそ42 lm/Wの値を示したが、図では便宜上465°C点での読みを100とした。パラメータとしての電流変化範囲は4～6 Aである。7および8 Aの場合も同様の傾向を示す。

電流を4～6 Aと増加させると、しだいに放射効率は上昇する。またランプ電流を一定にしたとき、温度上

図6 ランプ電流での枝管温度と相対放射効率の関係

昇、したがって管内蒸気圧の上昇とともに急激に放射効率は上昇する。しかし450°C近辺より飽和の傾向を示す。この理由は、あとに示す分光エネルギー分布からみて明らかとなるが、最大発光エネルギーが、可視域から赤外域へ移行していくためである。

4.3 分光エネルギー分布

ランプ電流6 Aの場合の、各枝管温度での分光エネルギー分布を図7～図13に示す。枝管温度が275°C以下では絶対光出力も小さく、発光の主成分は電極の赤熱による温度放射と、数本の水銀ラインスペクトルにすぎない。しかも電極赤熱による発光成分が大半を占めてい

図7 枝管温度120°Cでの分光エネルギー分布

図8 枝管温度200°Cでの分光エネルギー分布

図 9 枝管温度 275°C での分光エネルギー分布

図 10 枝管温度 345°C での分光エネルギー分布

図 11 枝管温度 395°C での分光エネルギー分布

図 12 枝管温度 465°C での分光エネルギー分布

る。345°C 以上になると AlI_3 の発光による連続スペクトルが現われ始める。しかしこの場合、アルミニウムの原子スペクトルが強く現われている。枝管温度が 400°C 近辺になると、分光エネルギー分布は AlI_3 の豊富な連続スペクトルのため、可視全域にわたってほぼ平坦とな

図 13 枝管温度 510°C での分光エネルギー分布

る。同時に電極の赤熱による放射光の成分は、その比が著しく小さくなり、水銀のラインスペクトルも抑制される。水銀スペクトルの抑制は、水銀に比して低い励起電圧をもつ AlI_3 分子に励起エネルギーを奪われるためと考えられる。他方、赤色から赤外にかけての光出力は、短波長の光成分に逆比例して増大するようになる。

4.4 色 度 座 標

図 7～図 13 に示した分光エネルギー分布の場合の各温度での色度図を図 14 に示す。発光の主成分が電極の

図 14 各温度での色度座標

赤熱による温度放射である 120～345°C の範囲では、色温度は黒体放射の軌跡に沿って上昇する。以後、345～510°C では、 AlI_3 の発光が主成分となって、色温度は低下する。400°C 付近のときが黒体軌跡にもっとも近

図 15 枝管温度と色温度の関係

く, 理想的光源といえる. 4~6 Aのランプ電流での枝管温度に対する色温度変化を図 15 に直角座標として示す. ランプ電流の差による大きな変化はみられない.

4.5 平均演色評価数 Ra および特殊演色評価数 Ri

光源の演色計算は, JIS Z 8726 に従って行なった. 図 16_aにランプ電流 4~6 A の場合についての Ra 値の変

図 16 枝管温度と Ra の関係

化を示す. ランプ電流に無関係に枝管温度が 400°C 近辺で最大値を示し, そのときの Ra 値は 95 にも達する. ランプ電流 6 A の場合の各枝管温度での Ra および Ri の変化を, x, y 座標, 色温度とあわせて表 1 にまと

表 1 各枝管温度での諸特性

管壁最低温度 (°C)	AlI ₃ 蒸気圧 (mm Hg)	xy座標 (x/y)	色温度 (°K)	演色評価数											相当する図
Ra	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15								
120	03	.462 .423	2,700	88	84	72	96	68	91	88	93	8			図 8
200	3	.433 .399	2,950	79	91	53	71	48	83	82	90	9			図 9
275	60	.384 .377	3,800	66	37	25	49	27	65	78	71	10			図 10
345	350	.311 .310	6,700	88	88	68	91	89	88	88	90	11			図 11
395	860	.327 .338	5,700	95	93	88	95	95	95	96	95	12			図 12
465	2,200	.399 .416	3,800	84	75	59	89	83	83	87	84	13			図 13
510	3,600	.471 .452	2,800	80	68	47	89	55	77	83	80	14			図 14
キセノン ランプ	—	.328 .328	5,700	94	85	81	98	94	91	95	92	—			

めた. 395°C での Ra および R₉~R₁₅ の値は, キセノンランプのそれぞれよりも高い値を示している.

5. 考 察

AlI₃を添加したランプの発光特性を, 超高圧形ランプについての実験結果に基づいて, 現象的に説明してきた. 以下, これらの現象の特性, 発光機構などについて若干の考察を試みる.

5.1 諸特性の変化

AlI₃の蒸気圧は枝管温度の上昇とともに, 指数関数的に変化する. とくに AlI₃の蒸気圧が高くなる 300°C 以上で, ランプ電圧, 光出力ともに特徴ある変化を示す. 光出力, 分光エネルギー分布ともに良好な特性を示す範囲は 350°C 以上で, とくに好ましい分光エネルギー分布を与える点は 400°C 近辺であることは, さきにも述べた. このときの AlI₃の蒸気分圧はほぼ 1~1.2 気圧で, 水銀の分圧の約 2 分の 1 となっているものと予想される. 水銀量は放電を維持するためと, 適切なランプ電圧を与えるために必要な量によって決定されるが, AlI₃はその発光特性によって決定されなければならない. すなわち, 図 11 および 図 12 から AlI₃の蒸気圧はほぼ 1~3 気圧が適当であるといえる.

枝管温度は, 200°C 以下では 365.0 nm の水銀ラインスペクトルとともに, 394.4 nm, 396.1 nm のアルミニウムのラインスペクトルが強く現われる. これは, アークの中心付近で解離したアルミニウム原子によるスペクトルであろう. 枝管の温度上昇とともに分圧も上がり, 解離したアルミニウム原子も増加してラインスペクトルも強くなるが, さらに 400°C 近辺に達すると AlI₃分子のスペクトルが強力になるとともに, AlI₃分子による短波長光の吸収によって抑制される. この吸収は図 2 に示されるように, 340~400 nm にかけて急激な立ち上がりを見せている.

一方, 394.4 nm および 396.1 nm ラインスペクトル強度は, アルミニウムの自己吸収によって著しく低下し, 465°C ではまったく姿を消す. このような背景によって, さきに述べた分光エネルギー分布, Ra, 色温度などが特徴ある変化を示す.

5.2 発光機構について¹⁰⁾

ここで, AlI₃を添加したランプの発光原理を実験的事実から推察してみよう.

図 17 に, 回析格子型分光器で撮影した本ランプの発光分光スペクトル写真を示す. 図は 405~650 nm の波長域での分光写真を示すもので, 3 種類のスリット幅, 露出時間についての撮影結果である. 図から読み取れるように, 435.8 nm, 546.1 nm, 577.0 nm, 579.1 nm などの水銀のラインスペクトルに重畳して, 非常に多くの線スペクトルの集合よりなったバンドスペクトル構造をしていることがわかる. したがって本ランプは厳密に言えば完全な連続光とはいえない. しかし, 観測される光は実質的に連続光とみてさしつかえない.

図 17 に示す分光写真から考えられる発光機構は, 次の二つの場合が存在する.

- (1) 原子の線スペクトル……394.4, 396.1 nm (Al)
435.8, 546.1, 577.0, 579.1 nm (Hg)

図 17 AlI_3 ランプの分光スペクトル写真

(2) 分子 (AlI_3) のもつ電子のエネルギーに分子の振動、回転のエネルギーが重なったスペクトル……バンド(帯)スペクトル可視～赤外

(1)は、従来からみられる原子スペクトルを利用したランプと同様の機構で、水銀原子とかアークの中心付近で解離したアルミニウムなどが線スペクトルを発生し、それらが観測される。

(2)項は図 17 の分光写真から、 AlI_3 分子の多数の基底および励起レベル間の転位、もしくは励起レベル間の転位による発光が考えられる。さらにこれら転位によって生ずる主波長に、4,000～6,000°K の高温にあるアーク中での分子の振動のエネルギー (0.01～0.1 eV)、あるいは回転のエネルギー (0.0001～0.001 eV) が重畳して、バンドスペクトルを構成しているものと考えられる。これら振動および回転のエネルギーは量子化されており、スペクトルはいずれもラインとなる。分子の振動のエネルギーは、可視波長 400 nm 近辺で 1.4～12 nm, 700 nm 近辺で 4～37 nm のバンド幅に相当し、十分観測される。他方、分子の回転エネルギーは 0.5 nm 以下のバンド幅となり、図 17 の分光写真では、はっきりと区別することは不可能である。

分子の各励起準位相互間、あるいは基底準位と励起準位の間の転移のエネルギー計算、すなわち波長位置の決定は、さらに分子のもつ電子のポテンシャル構造を解明しなければならない。

AlI_3 の蒸気は、短波長側に強い吸収特性を示すために図 12 あるいは図 13 に示されるような、著しく青みの不足した光源となる。これは Selfreversal もしくは Self absorption と呼ばれている現象によるものと見られる。ある AlI_3 分子がそれ自身、もしくはまわりの分子あるいは原子の発した短波長側の光を吸収し、長波長側の光を放射するために、このような特徴ある分光エネルギーの推移が現われるものと考えられる。

すなわち、この吸収された短波長光が、さきに述べた(2)項の電子に対するエネルギーの供給源となっているも

のと考えられる。それは、枝管温度を上昇させることによって、短波長側の光が著しく吸収され、逆に赤～赤外域に強力な連続光が観測されることから理づけることもできる。いずれにしても、さらに実験的あるいは理論的に解明していく必要がある。

6. 結 論

新しいメタルハライドランプ研究の一実験として、よう化アルミニウムを添加した超高圧形ランプについて、電気的、光学的諸特性をランプ電流をパラメータとし、管内蒸気圧を変化させて求めた。

その結果、枝管温度すなわち管内蒸気圧の上昇とともに分光エネルギー分布は著しい変化を示し、300°C (130 mmHg) 以上の枝管温度での蒸気圧で、平坦な連続光が得られた。とくに 400°C 近辺できわめて好ましい白色連続光となり、枝管温度が 395°C (約 860 mmHg) では、測定点のうちで、最高の演色性を示し、Ra が 95 となった。そのときの色温度は 5,700°K であった。

これらの値は、従来白色光源として採用されているキセノンランプの Ra 94, 効率 20～25 lm/W をしのぎ、Ra 95, 効率 40 lm/W 以上のランプの設計が可能である見とおしがついた。また、これら一連の実験結果を用いて、高効率で高演色性の高圧、ならびに超高圧メタルハライドランプの設計が可能であることがわかった。

参 考 文 献

- (1) C. P. Steinmetz : US pat. 1,088,740 (1914)
- (2) G. H. Reiling : J. Opt. Soc. Amer. 54 (1964) 532
- (3) A. Bauer : Lichttechnik 16 (1964) 118
- (4) J. F. Waymouth, W. C. Gungle, J. M. Haris : Illum. Engng 60 (1965) 85
- (5) 小西, 祇園 : Nat. Tech. Rept. 11 (1965) 420
- (6) 谷林, 加納ほか : 東芝レビュー 21 (1966) 401
- (7) 森, 東ほか : 東芝レビュー 21 (1966) 904
- (8) 伊藤, 青木 : 新日本電気技報 2 (1967) 89
- (9) 東, 森ほか : 昭 42 電気四学会連合大会 No. 840
- (10) G. Herzberg : Spectra of Diatomic Molecules. (1950)

(受付 1969 年 1 月 4 日, 再受付 1969 年 3 月 6 日)