大電力高圧ナトリウムランプの開発

正会員 荒木建次* 正会員 佐々木博基* 正会員 米沢昭弘*

Development of Super High Output HPS Lamp.

Kenji Araki (Member), Hiroki Sasaki (Member),

Akihiro Yonezawa (Member)

(Lamp Division, Toshiba Lighting & Technology Corp.)

ABSTRACT

A super high power HPS lamp with 50kW of input, 8000klm of output and 160lm/W of efficiency has been developed. The key to success is the reduction of sodium vapor pressure, which compensates, for the geometrical increase of absorption by a layer of cooler sodium vapor. Spectral measurements on larger diameter tubes suggest that in the condition of optimum efficiency, the characteristics are similar to those of conventional HPS lamps up to 1kW. The measurements also imply differences such as lower arc core temperature, which decreases visible efficiency, and a relative increase of molecular radiation. The effect of a longer arc tube, such as efficiency and distribution of self reversed D line width along the tube length are also examined. Further development was tried by increasing Xe pressure with decreasing starting voltage helped by a starting aid. With the increase of the Xe pressure, efficiency steadily increased and finally reached 1751 m/W. Proper positioning of the starting aid proved to reduce the starting voltage effectively. This lamp serves commercially for photosynthesis of Nylon-6.

1. まえがき

ランプから発する光の利用は照明の用途以外にも多岐にわたっており、その一つに光化学反応への応用がある。特にナイロン6のモノマーであるε-カプロラクタムの製造方法であるPNC法(Photo-Nitrosation of Cyclohexane)は大規模な工業化の例として知られている¹⁾²⁾。

一方、高圧ナトリウムランプはHIDランプの中で最も効率が高く、屋外照明や工場照明に広く使用されている。PNC法には大量の可視光を必要とするため、効率の高い大容量の高圧ナトリウムランプが好ましいが、これまでは発光管のサイズで直径13mm、長さ200mm程度、ランプ入力で1kWまでのものが実用化されているに過ぎなかった³⁾⁴⁾。

筆者らは、種々研究の結果160lm/Wに達する33kWおよび50kWの高効率高圧ナトリウムランプを開発し得たが、本文では大口径・長尺の高圧ナトリウムランプの発光特性および高効率化のポイントを主体に論ずる。

2. 大口径ランプの発光特性

大容量のランプを実現するには大口径・長尺の発光管が必要である。まず、開発に当たって発光管アルミナの管長(以下、アルミナ管の長さを指す。)320mm、Xe封入圧2.67kPa、管壁負荷20W/cm²を共通条件として、それぞれ内径12mm(ランプ入力2kW)、24mm(同4kW)、36mm(同6kW)、48mm(同8kW)のランプを試作し、発光管口径(以下、アルミナ管の内径を指す。)と発光特性の関係を調べた。その実験方法および結果については既に発表済みである⁵⁾⁶⁾ので詳細は省くが結論を述べると次の通りである。

①口径12~24mm付近で最も効率が高く、約160lm/Wの効率を得られる。

②口径24mmを越えると徐々に低下する傾向が現れるが、その低下は小さく36~48mmの口径でも150lm/W前後の効率を得られる。

ここで、上記の結果に至る「口径を変化させた場合の高効率化の要点」について考察を述べる。図1の上段に口径12mm、下段に口径48mmのそれぞれランプから得た発光スペクトルを示す。両者とも最高効率を得られる条件での発光スペクトルである。また、表1には放射パワーがどの波長域に分布しているかを分析した結果を示す。なお、表1は山内角6点測光により全光束を求め、この全光束と視感度係数から分光分布のエネルギーを0.5nm単位で割り付けて算出した。また、線スペクトル成分の比率は分光分

* 東芝ライテック株式会社 管球事業部

本論文の一部は、平成3年度照明学会全国大会で発表済みである。

布の連続部分からなるバックラインを直線で補間し、このバックラインより突出した部分を線スペクトル成分と見なして算出した。

図1と表1で特記すべきことは口径48mmのランプでも発光スペクトルは12mmのものと同大差なく、両者とも約8割のエネルギーが540～700nmのD線周辺に集中しており、特にD線の形がよく似ていることである。また図2は電位傾度と効率およびD線自己反転幅との関係をプロットしたものであるが、最適電位傾度は口径が増大するにつれ低い側に移り、D線自己反転幅については口径の大小に拘らずほぼ8nm付近で最高効率を得られている。これらのことは、口径を増大した場合であってもD線の放射条件を口径の小さいものと同様に設定することによって、大口径のランプでも効率の高い発光ができることを意味している。

図1 口径12mm, 48mm 高圧ナトリウムランプの発光スペクトル

Fig.1 Spectral Energy Distribution of the HPS Lamp with 12mm and 48mm Arc Tube Diameter

表1 放射パワー
Table 1 Devision of Radiant Power

	口径 12mm	口径 48mm
Na 466.5/466.9nm	0.9%	1.2%
Na 497.8/498.3nm	3.4%	3.2%
Na 514.9/515.3nm	0.6%	0.6%
他の線及び連続成分 400—540nm	6.4%	6.6%
Na 568.3/568.8nm	8.9%	5.7%
Na D線 (540—700nm)	77.7%	81.6%
Na 615.4/616.1nm	1.9%	1.3%
放射パワー総計 (400—700nm)	100.0%	100.0%
視感効率	61.5%	59.0%

図2 最適D線反転巾

Fig.2 Optimum Self-reversal Width of Sodium D-line

一般に、ナトリウム蒸気圧を上げるとD線自己反転幅が増加し、演色性は改善されるものの効率は低下する。口径を増大することは、ナトリウム蒸気層の光学的厚みが増大することになるので、あたかも蒸気圧を上げたことと類似の特性が現れる。従って大口径ランプにおいて高効率を維持するためには、吸収層の光学的厚みの増大を抑制するようにナトリウム蒸気圧を低下させ、外部から観察されるD線自己反転幅が小口径サイズのランプと同大さなものにすることが必要である。

因みに本ランプにおけるナトリウム蒸気圧制御は、封入Naアマルガム組成 (Na/Hg比) の選定と最冷部温度の調節によるものである。最冷部温度調節については発光管最下部に設けたニオブウム (Nb) 管の長さを調整する方法を採った。つまり、Nb管の長さを長くすると管内に滞留しているNaアマルガムの液面高さが低く最冷部温度が下がるのでナトリウム蒸気圧が低まることになり、Nb管の長さを短くするとその逆になる。なお、単灯のランプで種々蒸気圧を変化させる場合は、上述のNb管付近外管外壁に設けた金属保温筒の位置を調整することでもできる。

以上、大口径発光管における高効率維持の条件を述べたが、図1、2および表1を細かく観察すると両者は完全には一致せず、次のような大口径発光管独特の現象が見られる。

- (1) 568.3/568.8nmの線スペクトル成分の比率が低くなる。
- (2) D線周辺 (540～700nm) のエネルギー比率が高くなる。
- (3) 効率は低くなる。
- (4) 最高効率となるD線自己反転幅は口径の増大につれて僅かずつ小さくなる。

以下、これらの現象について考察を述べる。

(1)と(3)は同じ理由と考えられ、効率の低下は568.3/568.8nmの線スペクトル強度の低下が影響している。線スペクトル強度の低下は、ナトリウム蒸気圧を低下させてはいるものの口径の増大により放射および吸収による熱交換が増大し、温度分布がブロードになったため、中心部のアーク温度が低下し⁷⁾、D線に比べてエネルギー準位の高い $4^2D_{3/2}$ 、 $4^2D_{5/2}$ などから放射される線スペクトルの発光が弱まったものであると推定できる。

(2)のD線周辺のエネルギー比率の上昇についてはアーク温度分布がブロードになったことによって中心部の温度が低下し、 Na_2 をはじめとする分子発光種の相対密度が増し、分子発光によるD線両翼の発光が増したためと推定される⁸⁾。

また(4)の最高効率になるD線自己反転幅が僅かに縮小する現象も同様に解釈できる。すなわち、一般にD線自己反転幅が増大し過ぎるとD線両翼の発光が増して効率は低下するが、大口径の発

光管では上述のようにすでにD線両翼の発光が増しているため、小口径の発光管よりも幾分小さいD線自己反転幅で最高効率になるものと推定できる。

3. 長尺発光管の特性

次に、発光管の長尺化に伴うランプ特性への影響について述べる。大口径でも高効率を得られることを確認できたので、大容量化に有利な口径36mmと48mmについて長尺ランプを試作した。口径36mm×管長1500mmの33kWと口径48mm×管長1750mmの50kWである。これらのランプの設計要点は前章で述べた短尺発光管を基本形として発光長比例の設計にしていることであって、それによって軸方向に相似形のランプが得られると考えた。つまり、Xe封入圧2.67kPa、管壁負荷20W/cm²、は変わりはなく、33kWの発光長は6kWの約5.5倍とし、50kWの発光長は8kWの約6.3倍にした。また、それぞれ短尺発光管と同一組成のNaアマルガムを封入し、電位傾度についても短尺発光管の最適値と同じ値を目標とした。ただし、電極降下電圧は9Vとして計算した。

表2に試作ランプの特性概要を示す。基本的には短尺発光管と相似形の特性が得られているが、長尺発光管の特徴として次の3点が挙げられる。

表2 長尺ランプの特性
Table 2 Characteristics of Long Arc HPS Lamps

口径 (mm)	長さ (mm)	ランプ電力 (kW)	効率 (lm/W)	電位傾度 (V/cm)
36	320	6	154	4.2
	1500	33	160	4.5
48	320	8	146	3.4
	1750	50	160	3.6

- (1) 最高効率は、前述の実験に用いた管長320mmの短尺発光管の場合に比べ約10%上昇する。この上昇幅は長尺化によりランプ電圧が増加し、アーク損失中の電極損失が占める割合が低下する率にほぼ一致しており、効率向上は主として電極損失の相対的低下によるものである。
- (2) 最高効率を得るための最適電位傾度は僅かではあるが、高くなる。この原因としては管内温度分布の違いにより蒸気相の組成が異なること、または次に述べる発光むらの影響によるものと推定される。
- (3) 発光管の長手方向に発光むらが発生し易い。適正な条件では1500mmおよび1750mmの管長でも長手方向にほぼ均一な発光が得られるが、条件によっては図3のb、cに示すような発光むらが生ずる。この発光むらが起こる臨界値は封入Xeガス圧やアマルガム組成比によっても変わり、一概に言えないが、Xe封入圧を増すほど、またアマルガムのNa比を高めるほど発生しにくい傾向にある。

図3はランプ電力を50kW一定で測定したときのデータである。つまり、図のb、a、cの順でランプ電圧が低くランプ電流が多い状態になっている。この条件下で発光むらの原因については次のように推定できる。すなわち、図のbのようにナトリウム蒸気圧が低い状態で大電流の放電を行うと、特にアーク中心部で

図3 D線自己反転巾の長手方向分布
Fig.3 Distribution of Self-reversal Width of Sodium D-line

の放射損失が減少し、アーク温度が上昇する¹⁰⁾。一方、ナトリウム蒸気密度はアーク温度上昇に伴い低下するので、ナトリウム原子の不足はアーク温度の高い中央部で発生しやすく、一度発生するとさらにアーク温度の上昇を招き、拡散作用と拮抗するところまで進行する。

また、図のcのようにナトリウム蒸気圧が高い状態では放射損失はほぼ飽和するのでアーク温度に影響を与えることは少ない。むしろ、電極温度の影響で両端電極付近の管壁温度が高まり、アーク外縁部の吸収層が減少するので、これが中央部との差異として現れている可能性がある。

4. Xe 圧増加による影響

一般に、高圧ナトリウムランプはXe封入圧を増すと発光効率が上昇することが知られている¹²⁾。これはXeガスの熱伝導率がナトリウム蒸気に比べて低く、アーク中心軸から管壁への伝導損失が減少し、アーク温度が上昇することによって放射量を増すことができるためと考えられている¹²⁾。また、Xe封入圧を増加させると電極の蒸発を抑え、光束維持率改善に効果があるとされている¹²⁾。本ランプについてもXe封入圧増加を検討した。

実験に用いたランプは口径48mm、管長1750mmの発光管で造られた50kWである。Xe封入圧は2.67kPaを基準に、9.98kPaまでの範囲で少しずつ変化させた。一般照明用の始動器内蔵型の高圧ナトリウムランプの封入圧よりも低く設定した理由は、Xe封入圧増加にともなう始動電圧の上昇を実用レベルの範囲に抑制する必要があったことによる。

図4にXe封入圧に対する効率の関係を示す。2.67kPaを封入したランプの効率が160lm/Wであるのに対して、封入圧増加とともに効率が向上し、9.98kPaでは、約175lm/Wに達した。

一方、Xe封入圧を増加させると始動電圧が上昇する傾向にあるが、本ランプのように電極間距離が大きいランプでは、より顕著に現れる。図5に封入ガス圧とランプ始動電圧の関係を示す。2.67kPaを封入したランプが3kV以下の電圧で始動するのに対して、始動電圧は封入圧の増加にほぼ比例して上昇する。始動電圧の大幅な増大は点灯装置や機器の耐圧設計を根本的に見直す必要が生じ実用性に欠けるため、始動電圧を3kW以下に抑える

図4 Xe 高压封入ランプの効率
Fig.4 Efficacy with high Xe pressure

図5 Xe 高压封入ランプの始動電圧
Fig.5 Starting voltage with high Xe pressure

図6 始動補助導体位置の影響
Fig.6 Effect of Starting Aid

図7 始動補助導体位置の影響
Fig.7 Effect of Starting Aid

ことを目標に、始動補助導体付設による始動電圧低下を試みた。
始動補助導体を発光管外壁から 5 mm 離れた状態で長さを変化させ、先端の位置と始動電圧の関係を調べた実験結果を図 6 に示す。始動補助導体の先端が対抗電極先端に相当する位置のとき

に始動電圧が最小となる。また、始動補助導体先端を対抗電極先端相当位置に設定し、発光管外壁との距離を変化させた場合に始動電圧がどのように変わるかを調べた実験結果を図 7 に示す。始動補助導体を発光管外壁に近付けるにつれて始動電圧が低下し、

発光管に沿って密着させたときに最小になる。この時の始動電圧は Xe 封入圧6.65kPa でも 3 kV 以下であり、実用的なレベルの範囲にある。

5. 応用

以上に述べた50kW および33kW の高圧ナトリウムランプは、東レ株式会社でナイロンー6の原料である ε-カプロラクタムの光化学反应用光源として用いられている。表3に実際の反応槽に

表3 光化学用大電力高圧ナトリウムランプの仕様
Table 3 Ratings and Characteristics of Super High Power HPS Lamps

ランプ入力 (kW)	33	50
ランプ電圧 (V)	640	600
ランプ電流 (A)	56	91
発光管口径 (mm)	36	48
発光管管長 (mm)	1500	1750
外 管 径 (mm)	120	130
全 長 (mm)	2600	3000
全 光 束 (klm)	5280	8000
効 率 (lm/w)	160	160
光束維持率 (12,000時間) (%)	95	90

装着しているランプの仕様を示す。50kW の全光束は800万ルーメンで、従来この目的に使用されてきた60kW のメタルハライドランプよりも光量が大幅に増大している。図8に光束維持率曲線を示す。これも従来のメタルハライドランプに比べて大幅に向上しており、Xe 封入圧2.67kPa の50kW ランプでは12000時間で90％、同じく33kW ランプでは95％と優れた光束維持率を示しており、さらにはXe 封入圧を4.66～6.65kPa に増加した50kW ランプでは10000時間点灯した状態でも効率の低下がほとんど認められない。

図8 光束維持率
Fig.8 Lumen Maintenance

図9にランプ装着状態を、図10にランプ外形写真を示す。ランプは図9のように反応槽に多数設置され、水冷管内で強制冷却しながら鉛直点灯されている。

6. まとめ

新たに開発された大口径・長尺の高圧ナトリウムランプの発光特性をランプの試作・実測によって明確にし、大電力高圧ナトリ

図9 ランプ点灯装置
Fig.9 Fixture

図10 50kW 大出力高圧ナトリウムランプ
Fig.10 50kW Super High Output HPS Lamp

ウムランプの設計基準を得た。そして、内径36mm、48mm の発光管を用いることによって33kW および50kW の高圧ナトリウムランプを開発した。これらは高出力、高効率、長寿命という特長を生かし、PNC 法によるナイロンー6の原料の製造に寄与している。

7. 謝辞

本ランプは東レ株式会社および東芝セラミックス株式会社と共同開発したもので、本論文をまとめるに際して東レ株式会社生産

本部ケミカル技術部鈴木克彦氏、東芝セラミックス株式会社FC事業推進部技術部島井駿蔵氏をはじめとして多くの関係者にご支援をいただいたことをここに付記し、感謝申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 1) Kanoh, T. & Shinjoh, K.: SUPER HIGH OUTPUT LAMP AND ITS APPLICATION, CIE Session in Kyoto, SG-F (1979)
- 2) Kanoh, T. & Shinjoh, K.: SUPER HIGH OUTPUT HID LAMP AND THEIR APPLICATION, J. Illum. Engng. Soc. (1980)
- 3) Akutsu, H.: HIGH PRESSURE SODIUM LAMP, International Symposium on the Science and Technology on the Light Source, (1983)
- 4) Loudon, W. C. & Matz, W. C.: HIGH-INTENSITY SODIUM LAMP DESIGN DATA FOR VARIOUS SIZES, J. Illum. Engng. Soc. (1966)
- 5) 池 他, : 高圧ナトリウムランプ大電力化の検討, 照明学会全国大会 (昭61)
- 6) Yonezawa, A. Araki, K. Ike, Y. & Suzuki, K.: SUPER HIGH POWER HIGH PRESSURE SODIUM LAMP, J. Illum. Engng. Soc. (1991)
- 7) ~10)
de Groot, J. J. & van Vliet, J. M.: THE HIGH PRESSURE SODIUM LAMP, Kluwer Technical Books, (1986) p.114, p.62~83, p.141, p.122
- 11) Reiser, P. A. & Wyner, E. F.: USE OF THE PERK SHIFTS OF THE 3S-3P SODIUM RESONANCE LINES FOR THE ANALYSIS OF HIGH PRESSURE SODIUM LAMP, J. Appl. Phys. 57(5), (1985)
- 12) 上掲書 (7)他

(受付 1992年3月31日)

荒木 建次君 (正会員)

昭和35年4月8日生まれ、昭和59年3月京都大学電子工学科卒業。同年同月(株)東芝へ入社。平成元年4月東芝ライテック(株)に出向。平成4年4月同社に移籍。この間高圧放電灯の研究開発に従事。現在同社研究所第2担当。

佐々木博基君 (正会員)

昭和30年7月17日生まれ、昭和49年3月釜石工業高校電気科卒業。同年同月東京芝浦電気(株)(現(株)東芝)へ入社。平成元年4月東芝ライテック(株)に出向。平成4年4月同社に移籍。この間高圧放電灯の研究開発に従事。現在同社管球事業部 HID 技術担当。

米沢 昭弘君 (正会員)

昭和20年4月30日生まれ、昭和39年3月弘前工業高校電気科卒業。同年同月東京芝浦電気(株)(現(株)東芝)へ入社。平成元年4月東芝ライテック(株)に出向。平成4年4月同社に移籍。この間特殊放電灯の研究開発に従事。現在同社管球事業部 HID 技術担当課長。