光源の動向[†]

ケー・シュミット* (Dr. K. Schmidt)

専門会員 加納 忠男訳*

1. 緒 言

エネルギーに対する関心が高い今日、照明は最もはっきりした目に感ずるエネルギーの消費とみなされている。このことが、刺激となって、より効率の高い光源すなわち同じ電力で光量を増すか、少ない電力で同量の光を出させる光源を開発するようになってきている。

世界中のランプ研究部門では、いろいろな応用分野に数多くの種類のランプを開発してきた。もちろん使用条件により、特性や寸法が異なった要求が光源に求められているが、基本的には次の四つの一般要求に分けることができる。

- ・ 光出力-ルーメン
- ・ 効 率-ルーメンパーワット
- ・ 光色-演色性、色温度
- ・ 寸 法-発光面積、管状や曲状など

このうち、光源の開発の歴史で最も高い関心が払われたのは効率である。1875年から今日までの効率の向上を図 1 に示す。

図 1 各種光源の効率の変遷 (1)

2. 白 熱 電 球

2.1 GLS タイプ

2 万年前にさかのぼると、こけのついた砂岩からできた

[†] Trends in Light Sources

* フィリップス社

** 朝東芝

Tadao Kanō

本稿は '83 国際シンポジウム東京大会 (昭和 58 年 11 月 2 日)、大阪大会 (同 10 月 31 日) にて講演された。

オイルランプがある。そして何千年と大きな変化はなく、1820 年に、真空中で動作させた白金線を用いた最初の白熱電球がデ・ラ・ルウエにより示された。これは実用的でなかったが、1979 年にエジソンが最初の実用的なフィラメントランプを出した。白熱分野での効率の進歩は次のように概説される。

- ・ 1.4 lm/W—2100 K—炭素フィラメント
—エジソン
- ・ 3 lm/W—工程の改善
- ・ 4 lm/W—熱処理、金属方向を用いた放射率の改善
- ・ 他の材料—タンタル
- ・ 1905 年—押し出しタングステン線—8 lm/W
- ・ 1910 年—引き出しタングステン線 (クーリッジ)
—10 lm/W—2400 K
- ・ 1912 年—コイル、ガス入り—2800 K—12.5 lm/W
(ラングミュア)
- ・ 1930 年—二重コイル—13.8 lm/W (1933 年)
- ・ 1936 年—クリプトン/窒素—1 lm/W が 4 % 向上
- ・ 1973 年—クリプトン再登場—効率向上少なく失敗

図 2 白熱電球の効率改善

省エネルギー、すなわち効率向上への展開は 1973 年のエネルギー危機のあとに現われた。図 2 に示すようにバルブ壁の反射膜により、フィラメントから出た赤外放射の大部分をフィラメントへ戻すものである。この考え方は以前からあったが、実現のためには反射膜は赤外の反射および可視の透過が高く、その転移は急激で 800 nm 付近になければならない。また反射エネルギーはフィラメント線に吸収されなければならないので、反射膜の形状、フィラメント位置、吸収率など特別の条件が必要となる。吸収にはコンパクトフィラメントが最高である。ここ数年間に反射膜

の進展がみられ、 TiO_2 ; $\text{Ag}+\text{TiO}_2$ の三層からなる反射膜ができた。フィラメント位置に対する条件も対応可能となった。Al 反射鏡での実験では、Al なしの場合より60%少ない入力でフィラメント温度を同じにできた。二つの条件を満たした白熱電球は、40%の電力を節約できた画期的な成功である。しかし、残念ながらかなり高価な設備を必要とするにもかかわらず、放電ランプの効率に到達することはできていない。

2.1 ハロゲンランプ

省エネルギーの白熱電球を効率よくつくる方法として、ハロゲンあるいは、その化合物をガスに添加することが1960年以来知られている。蒸発したり管壁に付着したタングステンがハロゲンと反応し、コイルの部分で分解する気体状のタングステンハロゲンが得られる。一般白熱電球 (GLS) と違い、ハロゲンランプはタングステンが管壁に付着しないので、小さな寸法のバルブが使用でき、その結果ガス圧は高くなり、高温フィラメントにすることができる。最近では、ハロゲンランプはあらゆる低ボルト (12および 24 V)、高ワットの高ボルト (220 V) に用いられる。この制限は、細線がハロゲンランプに適さないためである ($I > 0.7 \text{ A}$)。

GLS と比較するとハロゲンランプは、同一寿命で効率が30%高くなり、同一効率では寿命は4倍になる。高いフィラメント温度は高い輝度につながり、映像が非常に高光度で得られるので映写用ランプに適している。欧州では自動車のヘッドランプに応用し、H-4 ランプで成功した。

以上、白熱電球の進歩について要約すると、エジソン電球 (175 W, 3 lm/W) が1890年に実用になり、今日のタングステン GLS ランプ (100 W, 14 lm/W) に発展してきた。そして小型化が進み、たとえば小型変圧器を用いた低電圧ハロゲンスポットライトがみられる。白熱電球の主な特長は、

- 使用が簡単、○低価格、○広範囲な電力と光束
  - 形や光学的な変化が多い、○快適な光色、○小型
- であり、欠点は放電ランプに比較し効率が低いことである。したがって応用分野によっては放電ランプに置き換わっていくであろう。

3. 蛍光ランプ

3.1 38, 26 mm 径の管状ランプ (TL, TLD ランプ)

蛍光ランプが導入されて以来、電極デザイン・封入ガス圧と種類・管径・蛍光体特性、ランプ製造工程などが最適化され、ランプ効率の向上が着実に進められてきた (図 3)。1939年のランプは 36 W で、28 lm/W のものが今日の TLD ランプは 36 W で 100 lm/W になっている。

蛍光体特性に焦点を合わせてみると、効率向上だけが蛍光体開発の主点でなく光色も重要になっている。図 3 にみられるように1975年から効率が急激に向上しているが、同時に演色性の著しい改善も行なわれた。以前はすぐれた演色性は連続スペクトルによって達成されるとみられ、研究

図 3 各種光源の効率の変遷 (2)

開発はハロりん酸塩蛍光体の改善に注力されていた。1970年初めに、すぐれた演色性は三つの狭帯域スペクトルだけの光で達成されることが理論的に示された。その結果、高効率・高演色で動程特性にすぐれ、高負荷に耐える所望の特性を有する蛍光体が開発された。

表 1 の混合蛍光体は、あるスペクトル色が欠けているため帯域間の発光はないが、TL/80 ランプは日常の自然色を完全に満たすことができている。これらの蛍光体を用いた電球色から 6000 K までの色温度のランプシリーズが開発された (表 2)。

表 1 混合蛍光体の組み合わせ		表 2 混合蛍光体を用いた各種ランプ	
3 帯域蛍光体のランプの放射スペクトル		"TL"/82	— 2700 K
BAM	青	"TL"/83	— 3000 K
CAT	緑	"TL"/84	— 4000 K
(Y, Eu) ₂ O ₃	赤	"TL"/86	— 6000 K

表 3 に従来の蛍光体を用いた 40 W TL ランプ (38 mm 径) との特性比較を示す。高効率でかつ高演色評価数 (CRI) であることがわかる。

表 3 各種蛍光体を用いた 40 W ランプの特性比較				
	40 W 38 mm	(1 m/W)	演色評価数	色温度(K)
冷白色デラックス	TL 34 連続	53	85	3700
冷 白 色	TL 84 狭帯	86	85	4000
冷 白 色 ハロりん酸塩	TL 33 連続	78	66	4100

表 4 TL と TLD の効率比較			
電 力 (W)	管径 (mm)	(1 m/W)	
40	37	86	
36	26	92	
65	37	85	
58	26	91	

と交換性のある 26 mm TLD ランプが可能になった。ガス封入との組み合わせの結果、従来の TL 安定器では10%入力が減るが、蛍光体による効率向上と細管化により、光束は同一に保つことができています。表 4 に TL 84 と TLD 84 の比較を示す。

最近の研究所報告によれば、特性のすぐれた五つの帯域の混合蛍光体が開発され、TLD デザインで高演色で動程特性のすぐれたデラックスランプをつくることができた。図 4 に各種蛍光体の分光分布、図 5 にそれらを組み合わせた場合の分光分布、表 5 に従来のランプとの特性比較を

図 4 各種蛍光体の分光分布

図 5 5帯域混合蛍光体の分光分布

表 5 デラックスランプの新旧特性比較

	電力 (W)	色温度 (K)	平均演色評価数 Ra	光束 (lm)	効率 (lm/W)	光束維持率 (1,000時間) (%)
TL /32	40	3000	85	1950	49	97
TLD /93	36	3000	93	2350	65	

示す。TLD 93の9はCRI>90, 3は色温度3000 Kを表わす。

3.2 高周波点灯

かなり最近まで高周波点灯は、特別な用途のランプに主に用いられ、安定器の改善は通常の銅・鉄タイプの価格を低減することに注力されていた。今日ではエネルギーに対する意識の高まりとともに電子化の可能性も増大し、高価でない通常の安定器も、電子回路に置き換えるようになってきた。この場合、省エネルギーは放電効率を高めることと安定器損失を低減させることで達成される。放電効率は陽極降下を低くすることと、陽光柱効率（ランプのパワーファクタを1に近づける）ことにより10%向上できる。表6に通常の50 Hzと28 kHzの電子安定器についての特性比較を示す。表7には高周波点灯に最適設計されたランプシリーズを示す。

高周波点灯のその他の特長は次のとおり。

- 瞬時点灯, ○少ないちらつき, ○少ない安定器損
- 電源に無関係な万能ランプ, ○省エネルギー
- 低温で安定点灯

表 6 従来と高周波点灯の特性比較

	50 Hz	28 kHz
ランプタイプ (W)	58	50
ランプ電力 (W)	116	100
安定器損 (W)	28	11
回路電力 (W)	144	111
ランプ光束 (lm)	10,800	10,400
システム効率 (lm/W)	75	94

表 7 高周波点灯ランプの光束と効率

電力 (W)	光束 (lm)	効率 (lm/W)
16	1,450	91
32	3,200	100
50	5,200	104

3.3 白熱電球との置換形蛍光ランプ

上記のとおり、狭帯域発光の新蛍光体により高負荷で動程特性のよい細形蛍光ランプの開発が可能になった。これをさらに展開すると効率を減少させることなく、蛍光ランプをもっと小型化にできないかという関心がでてくる。そして寸法の面から、白熱電球に置き換えられる光源を得ることができる。

ランプの長さを縮めると放電管の単位長さ当たりの負荷が高くなる。W/cm の値を高くするには、電流を増やすか電位傾度を高くすることで達成できる。前者は好ましくなく、ランプと安定器のシステム効率が減少する。特に電流の増加により通常の安定器よりも大きさ、重量が増え、結果として、ランプが小型になってもシステムとしては大型化になる。後者のほうはもっと魅力的である。電位傾度を高めるには、放電管の径を細くするか Hg-Ar 放電に He か Ne を加えることにより達成される。開発は管径に焦点を当て実験結果に基づき 10 mm とした。この径では電位傾度は 2 V/cm になり、ランプ長さは 30~60 cm になる。この長さでは屋内照明には一般的に大き過ぎ、最大長さは約 20 cm と考えられる。したがって放電管は折り曲げる必要がでてくる。

3.3.1 SL ランプ

SL ランプは、折り曲げた放電管、スタータ、安定器を一体化したものである。安定器は一般形である。一体化することにより、既存の器具の白熱電球に置き換えられる利点がある。一体化を最適にするために安定器の大型化を避ける必要があり、ランプ電流をできるだけ小さくするためランプ電圧を高くしなければならない。結果として放電管が長くなるので、通常の技術を用いて二重折りの放電管にする必要がある。安定器は放電管の脚部分に設置し、放電管は乳白またはプリズム状の外管で囲った。表8に220 V

表 8 SL ランプの特性

ランプ電力 (W)	9	13	18	25
光束 (lm)	425	600	900	1,200
対応する白熱電球の電力 (W)	40	60	75	100
省エネルギー率 (%)	80	78	76	75

図 6 白熱電球と SL ランプの点灯時間に対する照明コスト

ライン用 SL ランプの特性を示す。このランプの価格は白熱電球に比べると数倍にもなるが、エネルギー消費が少ないので照明コストが決定的要因になる。図 6 に示すように 18 W の SL ランプの総照明コストは、電気料を 0.087 \$/kWh として、5,000 時間点灯で 5 個の白熱電球の場合と比較して相当安くなる。

3.3.2 PL ランプ

折り曲げた他の蛍光ランプに、放電管とスタータをいっしょにした PL ランプがある。この場合の折り曲げ方は通常のものと異なり、ブリッジで接続された二つの蛍光管が並行に構成されている（図 7）。

図 7 PL ランプの構造

PL ランプの重要な点はトップにある。小型ランプでは水銀蒸気圧の制御が重要で、その圧力は水銀がたまる管壁の最冷却の温度で決まる。最適水銀温度は光束が最大になる温度で、10 mm 管の場合には 47C° である。この温度は直管形ランプの場合よりかなり高く、特に密閉器具の場合に顕著である。トップは放電管のへそのようなもので最冷部となっている。トップ部の長さは半開放や下面開放の器具で水平点灯する場合に最適になるように設計されている。PL 7, 9, 11 W シリーズは一般形安定器であるが、13 W は専用安定器で、寿命末期の温度に対する安全性が考慮されている。

4. 高圧放電ランプ

高圧ランプは蛍光ランプよりもっとコンパクトで、通常 800~1,500°C のかなり高い管壁温度で動作されている。一般にアーク自身の高温プラズマから発光され、気体および蒸気成分自身が発光のスペクトルを決めている。

4.1 水銀ランプ

水銀蒸気放電ランプはすでに成熟したもので、種々のタイプが完成されている。蛍光体を用いて青・緑・白の高圧水銀放電の色改善がなされている。これらのタイプは今後きわ立った進歩は期待されていない。

4.2 高圧ナトリウムランプ

高圧ナトリウムランプは、真空バルブ中のアルミナ放電管からなる。放電管は両端に電極を付けたニオブ筒で封止されている。放電管にはナトリウムと水銀のほか始動ガスとして希ガスが封入されている。比較的細い管径の放電

図 8 高圧ナトリウムランプの点灯回路

管のため 2~4 kV のパルスピークをもつスタータが、ランプの外部あるいは内蔵されている（図 8）。水銀は所望のアーク電圧を得るための電界強度を増すために封入されていて、短いアーク長で損失を少なくし効率を高める働きをしている。熱伝導率が小さく伝導損を少なくできるので始動ガスにはキセノンが選ばれる。放電が始動すると放電管が暖まり、ナトリウム蒸気圧が上昇してナトリウム共鳴線の広がりや自己反転が起こる（図 9）。現在の高圧ナトリウムランプの最大効率は約 0.1 気圧のナトリウム蒸気、1 気圧の水銀蒸気、0.03 気圧のキセノンによって達成される。

以上のような種々の方向への興味ある開発が現在進められており、技術的な諸問題が解決されれば高圧ナトリウムランプは、道路から家庭用まで広い分野で使用されることになると考えられる。

4.3 メタルハライドランプ

メタルハライドランプの原理は、1911年にスタインメツによって見いだされた。彼は水銀だめ陰極の放電管を用い、種々の金属よう化物を添加することにより、金属に対応したスペクトルを出させた。よう化物は放電中に蒸発し、アーク中で分解し、自由金属原子が電子と衝突で励起発光するものである。その後この原理は1950年末から1960年初めにかけて商品化された。

メタルハライドランプは、外観上水銀ランプと同じであり、二つの主極と始動極をそなえた石英放電管が、水銀ランプと対応するワットと類似の形状と寸法の外管に入れたものである。放電管自体には始動用の希ガスと水銀、それに一種または、それ以上の金属ハライド（通常よう化物）が封入されている。点灯中は数気圧程度の水銀が蒸発すると同時によう化物も蒸発し、高温アーク中で分解して金属に対応した発光をする。金属原子は管壁に戻るとよう素原子と再結合し、よう化物になる。アーク中心の金属蒸気の分圧は、管壁での金属よう化物の分圧と同レベルで10～100 Torr である。金属の平均励起ポテンシャルは、水銀の7.8 eVと比較して4 eV程度なので、水銀圧は金属圧より100倍も高くても、放射パワーは金属スペクトルが水銀スペクトルより強くなる。

利点をまとめると次のようになる。

- (1) メタルハライド添加により、蒸気圧の低い金属でも放電中に持ち込める。
- (2) 石英と反応する金属（たとえばナトリウム）でも、ハライドにより反応を弱くすることができる。
- (3) 種々のメタルハライドにより、所要のスペクトルが得られる。
- (4) すぐれた光色が達成できる。
- (5) 可視域の放射効率がかかなり高くなる（35～40％）ので高効率を得られる。

以上により、高圧ナトリウムランプより10～20％効率が低いが、白色で高演色のランプが得られる。初期には400 Wと2,000 W定格のものが主につくられていたが、最近ではCRI 85、色温度3800 Kの150 Wランプも開発されている。

5. 低圧ナトリウムランプ

低圧ナトリウムランプは50年以上も前に導入されて以来、最も効率の高い光源として用いられてきた。初期には約38 lm/Wの効率が180 lm/W以上に改善がなされてきた。最近ではさらにエネルギーバランスの検討がなされ、効率の向上がはかられている。最適効率を得られるナトリウム蒸気圧は約0.4 Paであり、放電管は全体にわたり260℃に暖める必要がある。真空ジャケットとすすを添加し

た酸化インジウムの赤外反射膜を用い、180 Wランプで放電管に消費される全エネルギーの配分を、電極損13％、管壁への熱損失45％、放射42％（このうち近赤外3％、反射膜およびジャケットによる吸収4％）にできた。さらに放電管の熱絶縁を改善し、電流を減らすことによって効率を向上することができる。電流の変化に対する効率の様子を図10に示す。

図 10 低圧ナトリウムランプのランプ電流と効率の関係

表 10 低圧ナトリウムランプの新旧特性比較

SOX-180 W 形			
	現 在	新ランプ	既存安定器での新ランプ
ランプ 電力 (W)	185	130	142
システム 電力 (W)	221	150	177
光 束 (lm)	32,000	26,000	265,000
効 率 (lm/W)	172	200	187
システム 効率 (lm/W)	144	173	149

現在のランプでは約900 mAの所に効率の最大があるが、新しい最適酸化インジウム膜で熱絶縁したものは約600 mAの所にある。特性の比較を表10に示す。現在の180 Wタイプは185 Wで動作するのに対し130 Wになり、30％のエネルギー消費を減らすことができる。

安定器損失もランプ電流を減らすことで達成され、全エネルギー消費は150 Wで現在のものより32％低くなる。このランプの効率は200 lm/W、システム効率は173 lm/Wで、以前のものより20％向上している。600 mA用安定器で点灯するよりも大きな利得はないが、既存の安定器でも現在のランプよりすぐれた特性が得られる。図11に新旧

図 11 低圧ナトリウムのエネルギーバランス (%)

図 12 低圧ナトリウムランプの効率の変遷

システムのエネルギーバランスを示す。

図 12 には過去30年間における効率の変遷を示す。1960年以來、放電管の熱絶縁の改善により大きな利得が得られている。これらの改良は、1965年の酸化チタンの熱反射膜の導入、1969年の酸化インジウム膜への置き換え、さらに昨年にはこの膜の最適化が行なわれ、効率 200 lm/W のランプが可能になった。

6. 結 論

エネルギー危機は、多くの種類のランプに対する研究開発の刺激となった。蛍光ランプは少なくとも欧州市場では 38 mm から 26 mm に変わり、ハロリン酸塩蛍光体から狭帯域発光蛍光体になるものと考えられる。省エネルギーランプの他の分野では高圧ナトリウムランプである。水銀ランプより約50%も省エネルギーになり、多くの新しいタイプが開発された。

ランプの研究開発は白熱電球の使用分野へ注力された。その幾つかは蛍光ランプの分野であり、他は高圧放電ランプで、超高圧ナトリウムランプとメタルハライドランプである。白熱電球に置き換える高圧放電ランプの欠点として、最適特性を得るために 30 W 以下にランプを減らすことが現在ではできず、1 灯当たりの光束が大きくなっていることである。白熱電球への置き換え形ランプの特性を表 11 に示す。

表 11 白熱電球への置換形ランプの特性

ランプタイプ	光 (lm)	安定器込み電力 (W)	省エネルギー率 (%)
白熱電球	385	40	—
SL 9 ランプ	425	9	80
SL 7 ランプ	410	12	73
メタルハライドランプ	2,000	37	75

放電ランプは安定器を必要とするが、それぞれのランプのエネルギー消費を比較する場合には、ランプと安定器のシステムで考えなければならない。したがって省エネルギーはランプ効率の改善とともに、安定器の電力損も減らすことによって達成される。電子装置の分野の最近の進歩により、従来の銅・鉄のチョークより損失の少ない電子安定器が開発されるだろう。また電子回路によるもっと効率的なランプ電流波形を選べる可能性がある。たとえば周波数を高くすることで、4 ft および 5 ft 蛍光ランプシステムでは、従来の安定器システムと比較して20~25%の省エネルギーになるであろう。

《討 論》

質 問 (パネラー 坪 秀三, 同 太田垣芳男): ヨーロッパで市販されている3波長形蛍光ランプは、色温度の異なる4タイプがあるが、どれが主として使用されている

か。また各々の用途は?

回 答: 4000 K が主流であり主に商業用、事務所用として従来の白色タイプの代わりに使用されている。2700 K はレストラン、3000 K は商業用、6000 K はカラーマッチング用である。

質 問 (パネラー 坪, 同 太田垣): 蛍光ランプの高周波点灯時の電波障害が問題になっていると思うが、ヨーロッパではどのようにしているか。

回 答: ヨーロッパでは 28 kHz の周波数を使い、30~40 kHz の赤外線リモコンテレビの誤動作を避けている。今後さらにメーカー間で検討し、IEC で決めていく必要がある。

質 問 (パネラー 太田垣): SL タイプのランプ-電球形蛍光ランプはイニシャルコストが高く、家庭に持ち込むには問題があるように思う。この点をどう考えておられるか。

回 答: 家庭の主婦にトータルの経済性を納得させるのはむずかしい。当面は商業用が中心になるであろう。

質 問 (パネラー 太田垣): 電子バラストを組み込んだ SL タイプのランプが日本では開発されている。この種のランプの市場性についてご意見を伺いたい。

回 答: ヨーロッパでも商業用としては関心が高い。経済性が成り立てば普及するだろう。

質 問: (パネラー 太田垣): 高圧ナトリウムランプの3種類のタイプのうち、標準タイプと演色改善タイプは市場が重なり使いわけがむずかしい。ヨーロッパではどうか。

回 答: 演色改善タイプは英国で普及している。super high pressure タイプはヨーロッパでは、まだ商品化されていないが商業用が主な市場である。

質 問 (田中千秋): メタルハライドランプの光束維持率は今後大幅に改善できると思うか。またその際、技術的に重要な点は何か。

回 答: 光束維持性の問題は、カラーシフトにも関係している。放電現象の解明と製造技術の改善により光束維持率の改善ができると信じている。

質 問 (森 礼於): 6000 K の3波長形蛍光ランプはカラーマッチングの特性が悪く、その目的では使用者に勧めるべきでないと思う。ご意見を伺いたい。また高圧ナトリウムランプとメタルハライドランプは、最後に勝つのはどちらであるか。

回 答: 確かに 6000 K の3波長形蛍光ランプの応用は限られている。しかしカラープリントの評価については自然昼光と同様によく評価できた例を知っている。後の質問は私には答えにくいですが、高圧ナトリウムランプもメタルハライドランプもそれぞれに特徴があり生き残ると思う。

(受付1984年2月7日)