無電極ランプの現状と将来

The Present State and Future for Electrodeless Lamps

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。平成10年度照明学会論文賞、博士(工学)。

専門会員 石 神 敏 彦
Toshihiko Ishigami

◀キーワード：無電極，放電，電界結合，誘導結合，マイクロ波

1. はじめに

一般に放電ランプは、ランプに電力を注入するために電極が必要であった。高周波で放電させる高周波無電極放電は、原理的には19世紀から研究されてきたが、照明用光源として本格的に研究されだしたのは1970年代になってからである¹⁾。そして、最近10年間で誘導結合型放電やマイクロ波放電を用いた光源システムが実用化され始めてきた。従来の有電極のランプでは電極が寿命限定要因になることが多いので、無電極ランプはこれまでのレベルを大きく超える長寿命が期待される。さらに、ランプ種により効率や光束維持率の向上、水銀フリー、調光特性の向上などの品質向上も付加されている。

本稿では長寿命ランプの代名詞ともいえる無電極ランプについて、その原理、最新技術の動向、将来性などについて解説する。

2. 無電極ランプの原理

2.1 無電極ランプの種類^{2)~5)}

高周波無電極放電は表1のように大きく4つに分類される。図1～図3に放電の模式図を示す³⁾。

(1) 電界結合放電 (E放電)

発光管壁をキャパシタとして発振源より直接に静電結合で誘導放電するものである。ランプへの投入電力W (W) はコンデンサ容量をC (F)、印加電圧をV (V)、その周波数をf (Hz) とすると

$$W=f \cdot CV^2/2 \cdots \cdots (1)$$

程度となる。コンデンサ容量C (発光管の静電容量) が小さいので、比較的小電力タイプとなる。

(2) 電磁誘導結合型放電 (H放電)

発光管の内側、または外側に巻き付けたコイルに高周

図1 電界結合放電³⁾

図2 電磁誘導結合放電³⁾

図3 マイクロ波放電³⁾

表1 無電極放電ランプの種類⁴⁾

放電形式	周波数	電力	応用例 (開発中も含む)
電界結合放電	25～50kHz	数W～1 kW	自動車メータ指針 OA用蛍光ランプ エキシマランプ (光化学用)
誘導結合放電	1～100MHz	10数W～1 kW	蛍光ランプ、UVランプ イルミネーション 投光器、道路照明、高天井灯
マイクロ波放電	1～数10GHz	数10W～数 kW	光化学用 光パイプ応用照明 投光器、自動車用
表面波放電	10GHz以上	数10W	平面光源、OA機器用 表示用

波電流を流すことにより、管内のガス自身が二次コイルとして電磁結合し閉ループ放電を形成するものである。1～100MHzの周波数帯に向けた放電であり、電力も十分供給しやすい。コイルインダクタンスをL(H)、コイルに流す電流をI(A)とすると、ランプへの投入電力W(W)は

$W=f \cdot LI^2 / 2 \cdots \cdots (2)$
 程度となる。従って、コイルインダクタンスLあるいは電流Iの値によって数10～数100Wまで比較的広い電力範囲に適用できる。

(3) マイクロ波放電

1～数10GHz帯を利用するものである。一般にはマグネトロンにより励起して導波管を経てキャビティーで空洞共振させ、内部に置かれたランプを放電させる。原理的には電子レンジと同様の構成である。この放電はGHz帯であるので半導体素子が使えず発振装置が大型化する欠点がある。

(4) 表面波放電

マイクロ波放電の領域で、プラズマの表面に沿って高周波の波が伝播して、エネルギーが伝わっていく放電である。この放電の照明用光源への応用はまだ基礎研究の段階である。ランプとしては棒状、平面状が想定される。

このような種々な無電極放電を利用して、新たな光源を開発していこうとする試みが活発になってきている。有電極のランプで重要なのは低圧の蛍光灯と高圧のHIDランプであるので、無電極ランプでも無電極蛍光ランプと無電極HIDランプの開発、実用化が大きな流れである。

2.2 “無電極”の効果

無電極ランプは電極が無いため、次のような効果が期待できる。

- (1) 電極自身による寿命の制限がなく、また封入物と電極との反応がないので、ランプが長寿命となる。そのため、ランプ交換の頻度が非常に少なくて済み、メンテナンスの困難な場所に適する。
- (2) 電極材質であるタングステンの発光管壁への飛散がなく、光束維持率が向上する。特に現在多くの分野に実用化されているメタルハライドランプで顕著な効果が見られる。
- (3) 封入物の選択幅が広がり、光色、効率の点で新しい光源が期待される。封入物として硫黄(S)を使用した高圧ランプがその例である。
- (4) 電極によるエネルギーロスが無く、また電極収容空間が不要で発光管がコンパクトになるので高効率が得られる。
- (5) 無電極メタルハライドランプでは、環境負荷物質である水銀が必要でなくなる。メタルハライドランプでは今後環境問題から水銀フリーのランプの開発が必須

となると考えられるが、無電極メタルハライドランプはそれに適合する。

3. 無電極蛍光ランプ⁵⁾⁶⁾

現在、照明用として実用化されている無電極蛍光ランプはすべて誘導結合型である。

典型的にはアルゴン、クリプトンなどの希ガスと水銀蒸気の混合気体を放電させ、水銀から放射される紫外線を発光管の内面に塗布した蛍光体により可視光に変換する。すなわち放電を形成する手段が異なるだけで、発光の原理は通常の有電極の蛍光ランプと同じである。有電極の蛍光ランプは長期点灯中に電極物質が消耗し、やがて不点に至るが、無電極蛍光ランプではそのようなことがないので原理的に長寿命が期待される。また、電極の予熱など必要ないので瞬時点灯が可能である。有電極の蛍光ランプでは電極降下電圧による電極でのエネルギー損失があるため、効率を高めるには細くて長い発光管形状が必要となる。ところが、無電極ランプでは電極のエネルギー損失がないので小型の発光管に大電流を流すことで、小型で高出力でも比較的高効率が維持できる。しかし、電気ノイズ対策、点灯回路の大きさ、コストなど課題もある。

現在、実用化されている無電極蛍光ランプは4種類あり、その代表的な特性を表2に示す。

図4は1990年に最初に実用化された無電極蛍光ランプであり⁷⁾、φ35～45mmの略球状の発光管の外周に3ターンのコイルが巻かれており、13.56MHzの高周波電流が流される。高周波を発生する点灯回路はランプと一体に配置され、発光管とコイルは電磁遮蔽のため金属網

表2 無電極蛍光ランプの特性

ランプ	周波数	入力電力(W)	全光束(lm)	寿命(時間)
外巻きコイル型(図4)	13.56MHz	22.5	830	40000
内巻きコイル型(図5)	2.65MHz	85	6000	60000
反射型(図6)	2.5MHz	23	1100	10000
リング型(図7)	250kHz	150	12000	60000

図4 誘導結合型無電極蛍光ランプ(外巻きコイル)⁷⁾

に包まれている。ビル壁面、橋梁のイルミネーションなどに使用されている。このランプは現在50Wタイプ（寿命6万時間）が実用化されている。

図5はそれに続いて実用化された無電極蛍光ランプである⁸⁾。ランプの外観は $\phi 110\text{mm}$ 程度の略球状であるが、中央に円筒状の凹みを設け、そこに棒状のフェライトコアに巻かれたコイルを収納している。点灯回路はランプとは別に金属の箱に収められ、約40cmのケーブルでランプ部分と接続されている。

ランプ電力としては現在165Wまで実用化されている。

この2つの無電極蛍光ランプはいずれも専用の照明器具に組み込まれて使用される。しかし、図6のランプは $\phi 80\text{mm}$ の反射形電球に似た形状でエジソン口金を持ち、そのまま反射形電球と差し替えて使用することができる⁹⁾。このため、単独でノイズ対策と小型の点灯回路が必要であり、反射板の部分にノイズ対策がなされている。寿命は1万時間と一般の蛍光ランプ並みである。

最近、実用化されたのは図7のランプであり¹⁰⁾、発光管がリング状の四角形で2個のフェライトコイルを設けた構造である。このランプは100, 150Wと入力が大きく、また250kHzと比較的低周波数で励起するシステムであり、寿命が6万時間である。

一般照明用でない紫外線応用ランプ（蛍光体を利用し

- A Lamp
- B Power couples
- C HF generator
- D Screened cable ($L=0.4\text{m}$)

図5 誘導結合型無電極蛍光ランプ（内巻きコイル）⁸⁾

図6 誘導結合型無電極蛍光ランプ（反射型）⁹⁾

ない）として高ワットのUVランプが実用化されている。図8に点灯中のランプ外観を示すが¹¹⁾、構造としては直径8cm程度、長さ50cm程度の石英製放電管の外面にコイルを巻きつけ、13.56MHzの高周波で500W前後を投入して水銀の253nmを放射させて下水などの殺菌に用いる。ランプ寿命は5万時間である。

4. 無電極 HID ランプ

4.1 誘導結合型メタルハライドランプ

3節で述べたように低圧ランプでは誘導結合型の各種のランプが実用化されて品種も拡大されている。これに対して高圧タイプの誘導結合型ランプ（誘導結合型メタルハライドランプ）はまだ実用化されていないが、開発は進められておりランプ特性の大幅な向上が報告されている^{12)~14)}。

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と $\text{NdI}_3\text{-NaI-SnI}_2$ （高効率タイプ）、または $\text{ScI}_3\text{-NaI-SnI}_2$ （長寿命タイプ）が封入されている。図9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回りに設けられた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

図7 誘導結合型無電極蛍光ランプ（リング型）¹⁰⁾

図8 紫外線応用ランプ（誘導結合型低圧ランプ）¹¹⁾

図9 誘導結合型無電極メタルハライドランプ¹²⁾

図10 誘導結合型無電極メタルハライドランプの寿命特性¹²⁾

より発光管内のガスが発光する。高効率タイプでは400 W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180 lm/W (R_a : 74) が得られている。これは電極ロスが無いことに加えて、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10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、電極が無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無い。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。

このランプで問題になる課題は寿命中に遊離沃素が発生してアークの揺れ、立ち消え、始動不良を起こすことであるが、 SnI_2 の添加で遊離沃素発生が抑制されることがわかった¹²⁾¹³⁾。 SnI_2 の効果は2つあり、第1の効果は発光管の管壁での金属と石英の反応抑制であり、第2の効果は発生した沃素の吸収であり、この2つの効果の結果、少量の SnI_2 の添加で長時間遊離沃素の発生を抑制できる。このランプは水銀を封入していない。水銀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す回路が追従できないこと、有電極と異なり電極ロスがないので水銀で電気特性を維持する必要

図11 誘導結合型無電極メタルハライドランプの調光特性¹⁴⁾

が無いことにより水銀を封入しない。環境問題から水銀フリーのランプが今後必要となるが、このランプはそのような要請に答えるランプと考えられる。水銀フリーであるため調光特性が良いことが報告されている¹⁴⁾。図11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 R_a （平均演色評価数）の変化を示すが、無電極タイプ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。

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く回路設計が非常に難しいなどの大きな課題が回路にあり、まだ実用化に至っていない。

4.2 マイクロ波放電 HID ランプ

従来からのランプとしては、直径3 cm前後の球状発光管を反射鏡と金網で作られた空洞共振器内に納め、鉄のハライドを放電させて、UV光源として印刷乾燥やウエハの表面処理などの半導体の製造プロセスに使用するタイプが知られていた¹⁵⁾。このタイプのランプとしては硫黄を10気圧程度の高圧状態で放電させると可視域全域に連続スペクトルを放射することが発見され、実用化されている¹⁶⁾。これは周波数2.45GHz、1~4 kWの入力電力で光効率としては150 lm/W近い値を持つ。また、色温度は6000K近辺で、平均演色評価数(R_a)も85と色も良い。硫黄は石英と化学反応しないので寿命も4万時間以上と長い。このように、電極がないと従来では発光物として考えられなかった封入物（硫黄）を採用することが可能となる。システムとしては、この放射光を図12のように4光パイプで誘導して広い面積の照明に用いるなどの一般照明用途、あるいは太陽スペクトルに近似しているので植物育成用光源として用いられている。

また、封入物をInBrとして50Wまでの低電力で発光部径を3 mmとしてベイン型の共振器を用いて、色温度6500K、平均演色評価数(R_a)95以上で寿命4万~6万時間のランプが発表されている¹⁷⁾。

図12 硫黄封入マイクロ波放電 HID ランプの応用例⁴⁾

このように、HID ランプでは回路の課題がマイクロ波誘導型の方が誘導結合型よりもずっとやさしいので、マイクロ波放電ランプの方が先に実用化されている。しかし、マイクロ波放電は変換効率が低く、またマグネトロンも寿命が短いことが今後の課題である。

5. おわりに

無電極ランプは、フィラメントを用いた電球、電極を利用した有電極放電ランプ（蛍光灯、HID ランプ）に続く第3の原理に基づく新しいタイプの光源である。

現在のところ、低圧ランプはその商品性が受け入れられ始めており品種の拡大、需要の伸びが認められる。高圧ランプについては実用化は足踏みしており、開発の促進には環境問題の要請など無電極ランプの必要性が切実になることが必要である。しかし長い目で見れば、無電極ランプはランプ技術、回路技術の進歩、新しい回路素

子の採用などにより高性能化、低コスト化され、一般照明用、産業用の光源として21世紀には飛躍的に用途・数量が拡大し、普及していくものと考えられる。

参考文献

- (1) H.V.ECKERT : High Temperature Science, 6, pp. 99-133 (1974).
- (2) Babat,C.I. : J of A.I.E.E, 94, pp.27-37 (1942).
- (3) 東方眞, 四宮雅樹 : 照学誌, 77-5, pp.238-243 (1993).
- (4) 井上昭浩 : 照学誌, 81-7, pp.554-557 (1997).
- (5) 四宮雅樹 : 照学誌, 79-12, pp.744-747 (1995).
- (6) 四宮雅樹 : 電球工業会報, 431, pp.20-22 (2000).
- (7) 四宮雅樹, 岡本太志 : 松下電工技報, 47, pp.3-7 (1994).
- (8) Schlejen,J. : 6th Int. Sym. on Sci. & Tech. of Light Sources, 76 : I (1992).
- (9) Wharmby,D.O. and Hamamsy,S.A. : 7th Int. Sym. on Sci. & Tech. of Light Sources, 2 : I (1995).
- (10) Godyk,V. et al. : 8th Int. Sym. on Sci. & Tech. of Light Sources, IL02 (1998).
- (11) ハリソン東芝ライティング (株) カタログ.
- (12) 上村ほか : 照学誌, 84-5, pp.312-321 (2000).
- (13) 伊藤ほか : 照学誌, 84-8A, pp.514-521 (2000).
- (14) 上村幸三, 石神敏彦 : 照学誌, 85-8A, pp.563-570 (2001).
- (15) 児玉仁史 : 三菱電機技報, 57-2, pp.23-26 (1983).
- (16) Dolan,J.T. et al. : 6th Int. Sym. on Sci. & Tech. of Light Sources, 74 : L (1992).
- (17) 保知昌, 竹田守 : 平成10年度照明学会全国大会, p.20 (1998).