メタルハライドランプにおける再点弧電圧の抑制

Suppression of Reignition Voltage in Metal Halide Lamps

Akihiro Inouye (Fellow Member)

(Toshiba Cop.)

ABSTRACT

Reignition phenomena in metal halide lamps during warm-up have been investigated. Two probes were set between two main electrodes and space potentials were measured at the moment when reignition occurred. Reignition voltage were measured using an arc tube of which electrodes gap was variable.

These experiments showed that reignition voltage grew uniformly in the electrodes gap.

Reignition voltage during warm-up can be suppressed by the following means.

- (1) To dose excess metal into arc tube.
- (2) To make raporization of mercury faster than that of metal halide.
- (3) To put the inert gas at high pressures.
- (4) To use heavy inert gas.

1. はじめに

近年効率の高い HID ランプにおいて、安定器を軽小型化し器具と一体的に組み合わせて用いることが多くなりつつある¹⁾。メタルハライドランプにおいても、小型軽量の電子化安定器を器具に組み込み、屋内照明に用いることが今後多くなるものと予想される。

しかしながら、メタルハライドランプはウォームアップ中に発生する再点弧電圧のために立ち消える現象があり、電流休止期間の存在するような点灯方式では問題になる場合がある。そこで本論文では、メタルハライドランプのウォームアップ中の再点弧現象を観察吟味し、その抑制法について述べる。

2. メタルハライドランプの再点弧現象

メタルハライドランプにおける再点弧現象は、不純ガスの混入した不良ランプの場合を 図 1 に示すように、

- (1) 始動後数サイクルないし数十サイクルまでにみられるもの
- (2) 始動後10秒程度までにみられるもの
- (3) 始動後30秒程度から1～2分までにみられるもの
- (4) 安定点灯時にみられるもの

の4種類がある。(1)の始動後数十サイクルまでにみられる再点弧電圧は、安定なカソードスポットを形成するまでの異常グロー放

* 朝東光光源開発部

(1)

(2)

(3)

(4)

図 1 メタルハライドランプの再点弧現象
300 W (Na, Tl, In 化合物, Ne-1% Ar 50 Torr
<6.67×10³ Pa>) 不良ランプの場合

- (1) 始動直後 50 V/div (2) 10秒後 50 V/div
(3) 30秒後 50 V/div (4) 5分後 100 V/div

電からアーク放電への毎サイクルの移行に伴う電圧変化であり、良、不良ランプ共にみられる。電極温度が全体的に上昇してカソードスポットが安定すると消滅する。(4)の安定時にみられる再点弧電圧は、主として電極近傍空間のガスの冷却に起因するものとされているが²⁾不良ランプでは高くなる。

本論文では、(2)および(3)の始動後数秒から1～2分までにみられる再点弧電圧をそれぞれ第1再点弧電圧、および第2再点弧電圧と呼ぶことにし、この両再点弧電圧を扱う。

一般に放電現象の再点弧電圧発生機構には2原因が挙げられている。一つはカーボンアークのような場合において、ガス圧力あるいは電極間距離を減少させていくと、再点弧電圧がグロー放電電圧に収束していく場合であり、これは電極部に起因する。今一つはアーク長が長い場合において、空間中の荷電粒子の損失に大きく影響される場合であり、この場合は空間部に起因する³⁾。

メタルハライドランプの再点弧現象に関しては、始動後ウォームアップ中に高い再点弧電圧が発生し、立ち消える可能性があること⁴⁾、この再点弧電圧は電流休止期間のあるリードピーク形安定器に高く発生することが早くから見いだされている⁵⁾。このようなランプを立ち消えることなく再点弧させるために必要な電圧(Sustain Voltage または Recovery Strength)と、電流休止直前の電流変化率の関係も求められた⁶⁾。このような再点弧電圧の原因は、封入された過剰ハロゲンと反応したハロゲン化水銀⁷⁾、あるいは H_2O など⁷⁾ によるものであり、ランプ寿命中に高くなること⁸⁾が見いだされている。この再点弧現象を電極に起因するとの立場から、ランプシミュレート回路により安定器特性を調査したものである⁹⁾。

このように欧米では、安定器の多くが電流休止期間の存在するリードピーク形であるため、早くからウォームアップ中の再点弧が問題となり対策法も立てられてきたが、メタルハライドランプの再点弧電圧の発生機構を解明したものは見当たらず、またランプ自身の対策法も少ない。

今後安定器の電子化、位相制御による電力制御などが行なわれるようになってくると再点弧電圧の抑制が必要となる。そこで次章以下では再点弧電圧の発生機構とその抑制法について述べる。

3. 再点弧現象の観察

3.1 実験方法

メタルハライドランプの再点弧電圧は前章で述べたように、不純ガスの混入した発光管ほど高く現われる。また放電電流に休止期間が長く存在するほど高くなる¹⁰⁾。したがって再点弧電圧の観察には電流休止期間の存在するリードピーク形安定器がよいが、わが国ではこの型の安定器は非常に少ない。

そこで再点弧電圧の出現を容易にし、どのタイプの発光管でも適用できる方法とするため、放電電流休止期間を挿入し再点弧電圧を強調して観察する方法を採用した。図2(a)にその回路構成を示すが、両方向性サイリスタを位相制御することによって放電灯に流れる電流に任意の時間、電流休止期間を挿入し、その直後の再点弧電圧を観察するものである。図2(b)にはランプ電圧電流波形を図2(c)には電圧波形再点弧部分の拡大図を示す。

本装置を使用して観察した例を図3、図4に示す。図3は電流休止期間と第2再点弧電圧の関係を、図4は電流休止期間1msの場合の第2再点弧電圧の起動後の時間経過を示したものである。これらは共に400Wメタルハライドランプ(Sc-Na 化合物、Ne-1%Ar 50 Torr < 6.7×10^3 Pa) 封入) についての結果で

図2 再点弧電圧測定回路
(a) 測定回路 (b) 再点弧測定例
(c) 再点弧電圧拡大図

図3 電流休止期間と第2再点弧電圧の関係
(400W 発光管、始動後30秒での値)

図4 ウォームアップ中の再点弧電圧の変化
(図3と同一発光管、電流休止期間1ms)

ある。なお本論文で実験に供した封入 1 号 化物は、すべて米国 Anderson 社のものを使用している。

3.2 再点弧電圧の発光管における発生場所

本節では、メタルハライドランプのウォームアップ中における再点弧現象が電極部分に起因するものであるのか、または放電空間に起因するものであるのかを明らかにする。

図5に示す電極間距離を変えることのできる放電管に、Ne-1%Arガス50 Torr < 6.7×10^3 Pa>を封入し、電流休止期間を0.5msとしたときの再点弧電圧と電極間距離の関係を図6に

図5 実験用放電管(電極M250用 ThO_2 塗布電極)

示す。よう化物および水銀は封入されていないので、定常点灯状態の再点弧電圧は、メタルハライドランプの第1再点弧電圧に相当することになるが、ほぼ原点を通る直線上に乗っている。したがって再点弧現象は放電空間全体にわたって作用しており、電極部分あるいはその近傍における現象ではないことがわかる。

図6 電極間距離と再点弧電圧

図7 測定用放電管(400 W)
Hg 64 mg, HgI_2 5 mg, Ar 25 Torr 封入

図7に示すようなプローブを2本挿入した400 W 発光管に Hg 64 mg, HgI_2 5 mg, Ar 25 Torr $<3.3 \times 10^3 \text{ Pa}>$ を封入し、電流休止期間1 ms にて始動75秒後の瞬間の再点弧電圧(ランプ電圧波形の肩部の電圧も含む)と、アーク放電時のランプ電圧(波形の肩の部分)および2本のプローブのそれぞれの主電極Aを基準とした電位を表1に示す。ランプ電圧およびプローブ電圧は東芝シンクロスコープ SS-5702 (入力インピーダンス10 M Ω) を用いた。したがってプローブ電流はごく微少であり、プローブ電位はほぼフローティングポテンシャル(絶縁電位)に近い。すなわち放電空間内のプローブ位置におけるプラズマポテンシャルと、プ

表1 再点弧時およびアーク放電時の各部の電位
(主電極Aを基準とし、主電極Bが陰極の半サイクルでの値)

	主電極	プローブ	プローブ	主電極	プローブ1, 2間電位差から算出した主電極A B間距離に相当する放電空間降下電圧
	A	1	2	B	
再点弧時(再点弧電圧) (V)	0	-90	-220	-290	294 V
アーク放電時 (ランプ電圧波形肩部)	0	-9.2	-11.4	約-30	5 V
主電極Aからの距離 (mm)	0	10	29	43	

ローブの示す電位との差は、両プローブではほぼ等しいとみなし得る。したがって再点弧時、両プローブ間の電位差は130 V であるから電極間空間では294 V の電位差となる。一方両電極間の電位差は290 V であり、第2再点弧の場合も放電空間内ではほぼ一様に作用しているといえる。なお再点弧後は表1のアーク放電時のランプ電圧から、陽光柱部5 V, 陽陰極降下電圧約25 V となる。

3.3 再点弧電圧の挙動

第1および第2再点弧電圧が、他の放電特性とどのような関係にあるかを知ることは再点弧電圧の原因解明に重要である。本節では不純ガスの程度、封入物の取り扱い方とどのような関係にあるかその挙動について述べる。

図8 高周波放電開始電圧と第1, 第2再点弧電圧の関係
○印: 工場製作品 △印: 技術課排気品

まずメタルハライドランプ発光管(電極間距離80 mm, 発光管内径25 mm, Sc-Na よう化物, Ne-1% Ar 50 Torr $<6.7 \times 10^3 \text{ Pa}>$ の不純ガス混入程度を示す高周波放電開始電圧¹⁰⁾と、再点弧電圧の関係を図8に示す。(a)は第1再点弧電圧を、(b)は第2再点弧電圧を示す。本図の場合は再点弧電圧のパルス状の部分だけの高さを示しており、再点弧した後のランプ電圧を差し引いている。これらの発光管は製作後15分程度の枯化点灯を行なった後のものであり、第1再点弧電圧は始動後10秒の、第2再点弧電圧は始動後30秒での値であり電流休止期間は1 ms である。このように製作直後の段階では、高周波放電破壊電圧で示される不純ガス濃度と第1および第2再点弧電圧は対応している。

高周波放電破壊電圧の高い発光管のグロー放電発光スペクトルを観察すると、HgH, OH, I などの不純ガススペクトルがみられる。このような発光管を十数時間枯化点灯すると高周波放電破壊電圧、第1再点弧電圧および商用周波電源での始動電圧が低下し、図8の△印程度のレベルに改善される。そしてグロースペクトル中の HgH, OH 強度も減少し、観測できない程度に改善される。しかしながら第2再点弧電圧はほとんど改善されず、グロースペクトル中の I ラインも減少しない。

このように、第1再点弧電圧は不純ガスとしての H_2 , H_2O などに強く左右されるものであり、高周波放電破壊電圧および商用周波電源での始動電圧ともよく対応している。

実際 Sc-Na よう化物 20 mg を半日大気中に放置した後、400 W メタルハライドランプ発光管に封入し、排気管内に80 mg の Ti

板を挿入し、発光管を30分間ずつ500℃に加熱し、商用周波電源による始動電圧、および第2再点弧電圧を測定した結果が表2である。始動電圧を押し上げる不純ガスはTiゲッタによって吸着されるが、第2再点弧電圧を押し上げる要因は改善されていない。

表 2 始動電圧、再点弧電圧のゲッタ動作時間による変化

ゲッタ動作時間 (分)	商用周波始動電圧 (V)	第2再点弧電圧	備 考
0	300以上	—	
30	260	250V以上30秒立ち消え	HgI ₂ 赤色結晶
60	195	〃	〃
90	175	〃	〃

表 3 封入よう化水銀量と再点弧電圧の関係

ランプ No.	Hg 量 (mg)	HgI ₂ 量 (mg)	ガ ス 量	始動電圧 (V)	第2再点弧	
					最大値 (V)	その時間 (秒)
1	65	1	Ar 25 Torr	180	52	90
2	65	5	〃	200	立ち消え	80
3	70	0	Ne-1% Ar 50 Torr	150	40	55

Waymouth は、第2再点弧電圧の原因をHgI₂であるとしているが¹¹⁾、実際表3に示すように400W発光管にHgI₂とHgをAr 25 Torr<3.3×10³Pa>とともに封入することにより、第2再点弧電圧が上昇する。また表2に示した大気中放置よう化物封入発光管をいちど加熱すると、HgI₂のものとみられるやや赤みを帯びた結晶が管壁に析出してくる。

これらの現象はよう化物の持ち込む水分が分解、解離し、O₂はScI₃と反応しSc₂O₃と遊離I₂を形成し、この遊離したI₂がHgと結合してHgI₂になるものとみられる。したがって発光管製造直後は図8に示したように第1再点弧電圧あるいは、始動電圧そして第2再点弧電圧とは、一義的に高周波放電破壊電圧と結びついている。しかしながら数時間の枯化点灯によりH₂などが吸着されて、始動電圧あるいは第1再点弧電圧が低下するのに対して、HgI₂は残留し、第2再点弧電圧は改善されないままとなるのである。

4. 再点弧電圧に対する理論的アプローチ

再点弧電圧を抑制するためには、その発生機構を知ることが必要である。本章では再点弧電圧発生機構に対し一つの理論的アプローチを試みる。

電源電圧波形F(t)に対して、チョーク安定器のインダクタンスをL、抵抗をR、電流をi、ランプ電圧をV_lとすると次式が成立する。

$$L \frac{di}{dt} + Ri + V_l = F(t) \quad \cdots \cdots (1)$$

発光管電極間距離をd、陽陰極降下電圧をV_c、発光管断面積をS、軸方向電界強度をE、電子密度をn_e、電子移動度をμとすると

$$V_l = V_c + E \cdot d \quad \cdots \cdots (2)$$

$$i = neeS\mu E \quad \cdots \cdots (3)$$

である。ν_i、ν_{loss}、D_a、λをそれぞれ電離周波数、拡散以外の電子損失、両極性拡散係数、拡散特性長として次式が成立する。

$$\frac{1}{n_e} \frac{dn_e}{dt} = \nu_i - \left(\frac{D_a}{\lambda^2} + \nu_{loss} \right) \quad \cdots \cdots (4)$$

以上四つの式によって、再点弧時のランプ特性を求めることができる。

式(3)を微分し整理すると次式を得る。

$$\frac{1}{n_e} \frac{dn_e}{dt} = \frac{1}{i} \frac{di}{dt} - \frac{1}{E} \frac{dE}{dt} \quad \cdots \cdots (5)$$

電流休止期間t_{off}の間は発光管に電圧は加わらないから、(4)式のν_iはゼロとなり、n_{e0}を電流休止期間直前の電子密度とすると再点弧時の電子密度は次式となる。

$$n_e = n_{e0} \exp \left[- \left(\frac{D_a}{\lambda^2} + \nu_{loss} \right) t_{off} \right] \quad \cdots \cdots (6)$$

ここで再点弧現象を、電子密度増加率がある値C以上になり、そのときdE/dt=0となって再点弧するものであると仮定すると(5)式から

$$\frac{1}{n_e} \frac{dn_e}{dt} = \frac{1}{i} \frac{di}{dt} = C \quad \cdots \cdots (7)$$

を得る。これを(1)式に代入し次式を得る。

$$C = - \frac{R}{L} + \frac{1}{L} \frac{F(t) - V_l}{i} \quad \cdots \cdots (8)$$

任意の再点弧電圧値V_lに対して、上式Cがある固定値をとるためにはC=0が必要である。すなわちCが0でない場合には(1)式から、あるいは(8)式から理解されるように異なるV_lに対して異なるC値をとり、再点弧現象はある固定値Cで起きるとした仮定に反する。C=0の場合には(1)式は図2(a)の回路において静的、すなわち、直流的電流電圧条件として任意のV_lに対して成立する。このC=0が再点弧条件であることは(4)式からも容易に理解できる。

$$\frac{1}{n_e} \frac{dn_e}{dt} = \frac{1}{i} \frac{di}{dt} = \frac{1}{E} \frac{dE}{dt} = 0 \quad \cdots \cdots (9)$$

が再点弧時の条件となる。

式(1)に(2)、(3)、(6)、(9)式を代入し次式を得る。

$$\begin{aligned} & I_n \left\{ \frac{F(t) - V_l}{V_l - V_c} \right\} \\ &= - \left(\frac{D_a}{\lambda^2} + \nu_{loss} \right) t_{off} + I_n \left\{ n_{e0} e S \mu R d \right\} \quad \cdots \cdots (10) \end{aligned}$$

上式右辺第1項は、電流休止期間中の電子密度の減少程度を表すものであるから、右辺第1項のn_{e0}μが一定とみなし得る場合には左辺は電流休止期間t_{off}だけの関数となる。回路的手段によって電流休止直前のn_{e0}μ、すなわち(3)式におけるi/Eを一定とすることは可能であるから、横軸にt_{off}、縦軸にI_n[(F(t)-V_l)/(V_l-V_c)]をとれば直線的関係が得られ、その傾きが電子の損失係数を与えることになる。

表3のHgI₂封入ランプ、および実際のメタルハライドランプ(Sc-Naよう化物30mg、Hg55mg封入)の電流休止期間と、第2再点弧電圧最大値の関係を図9に示し、これから電流休止期間t_{off}とI_n[(F(t)-V_l)/(V_l-V_c)]との関係を図10に示す。図9から図10への変換に際し、V_lは各t_{off}に対応した再点弧電圧を用い、V_cとしてt_{off}=0のときのランプ電圧を用い、F(t)は電源電圧の再点弧位相での値を用いている。この場合

$$D_a/\lambda^2 + \nu_{loss} = 3.4 \times 10^3 (s^{-1})$$

を得る。ここでは(10)式で与えられるn_{e0}μを一定に保つことは行っていないが、図10で示されているようによく直線に乗っており、(10)式の成立を裏付けるものと考えられる。

このように再点弧時に(9)式の成立を仮定することにより、再点

 図 9 電流休止期間と第 2 再点弧電圧の関係
400 W 発光管

 図 10 電流休止期間と $\ln[(F(t)-V_1)/(V_1-V_c)]$ の関係

弧現象と電子損失の関係を予想することができる。電離過程が電子との直接衝突電離であれ、あるいは累積電離などの間接電離過程であれ、電子損失を補うために必要な電子エネルギー供給が、電子加速のための再点弧電圧として出現してくることになる。

前章で述べたように、発光管ウォームアップ中の再点弧現象は放電空間に起因している。このような現象が起きる機構としては、電子・イオンの拡散・付着などに基づく損失による場合のほかには累積電離脱励起過程による場合がある。すなわち励起 Hg 分子の累積電離を不純ガスが妨げるとき、微小電流域で高い電圧が発生することが報告されている¹²⁾¹³⁾。水銀の存在する場合には再点弧時の累積電離脱励起現象が起きていると推定される。

式(10)では電子損失と再点弧電圧との関係を扱っており、累積電離脱励起などによる再点弧電圧変化分をも、電子損失として表示している。純粋な電子損失による作用分と累積電離脱励起などによる作用分の分離評価は今後の課題である。

本章の展開において(9)式の成立が仮定されているが、(9)式が成立しない場合、すなわち再点弧時(8)式において時々刻々個々の C の値をとる場合には今までの考察は適用できない。再点弧時、電

流休止期間の長さに応じて(8)式 C の値が変わり得るかどうか、変わる場合には、再点弧現象をどう定量的に扱うべきかについても今後の課題である。

5. 再点弧電圧の抑制

第 1 再点弧電圧は室温で気体状の不純物、たとえば H_2 などによって発生するものであることは、図 8 の結果および 3.3 節で述べた事柄から明らかである。この不純ガスの除去は発光管排気時の十分な加熱脱ガス処理あるいは、排気管中に Ti などのゲッターを封入し加熱動作させることなどにより容易に行ない得る。

第 2 再点弧電圧の抑制については、 HgI_2 の生成を防止するために過剰金属を封入する方法がある¹¹⁾。実際 400 W 用発光管に HgI_2 と Sc メタルを封入した場合は、約 30 分の点灯で ScI_3 の形成によって HgI_2 が消失し第 2 再点弧電圧が減少する。

再点弧時には(4)式で

$$v_i - \left(\frac{D_a}{A^2} + v_{loss} \right) = 0$$

であるとした。ごく短時間の間ではあるが電子の生成と消滅とがバランスしているとみなした。この場合には電子エネルギー損失増加率 $(E^2 - E_0^2)/E_0^2$ が、不純ガス相対濃度に比例することから¹⁴⁾¹⁵⁾、不純ガス相対濃度を低下させるべくガス圧（この場合は水銀蒸気圧）を増加させればよいことになる。すなわち不純ガスよりも早く水銀を蒸発させればよいことになる。また電子損失を少なくすればよいことから封入希ガス圧を高くすること、封入希ガスのうち原子量の大きいものを用いれば、再点弧電圧を抑制することができると予想される。

図 11 に始動用希ガスとしての Xe 圧を変えた場合の 400 W 発光管の第 2 再点弧電圧、および Ar 25 Torr $<3.3 \times 10^3 \text{ Pa}>$ の場合のそれを示す。電流休止期間は 1 ms および 2 ms である。ガス圧が高いほど、またガスが重いほうが第 2 再点弧電圧が低くなっており理論的予測に合致する。

図 11 封入ガス圧による第 2 再点弧電圧の変化

図 12 に示すような 3 層コイル電極を、1 kW メタルハライドランプに採用した結果、第 2 再点弧電圧は平均 93 V と従来の 2 層コイル電極の場合の平均 262 V に対して相当抑制されている。

図 12 電極構造による第2再点弧電圧の変化

この電極を用いた発光管を垂直点灯し管壁温度を測定した結果、下方電極近傍の管壁温度が、従来電極を用いたものより約 50 K 上昇していた。このことはランプ消灯後の発光管冷却中による化物の電極近傍への凝縮が少なくなり、ランプ始動時よう化物の蒸発よりも水銀の蒸発が早く行なわれ、結果的に第2再点弧電圧が低下するものと推定される。これに類した例として発光管径を太くすることにより第2再点弧電圧が低下する現象がある。1 kW 発光管の例では発光管径を 25 mm から 30 mm とし、電極間距離を 80 mm から 70 mm に変更することにより、やはり電極近傍の管壁温度が約 50 K 程度上昇し、変更前平均 262 V の第2再点弧電圧が平均 117 V と半減している。電極間距離が短縮した効果、管径が太くなったことによる効果で、直接第2再点弧電圧が低下することのほかに、水銀とよう化物の蒸気速度の差の効果があるものと推定される。

同一発光管においても、水平点灯した場合と垂直点灯した場合とでは一般に水平点灯の場合の第2再点弧電圧が低い。このように水銀のよう化物の蒸発する早さの制御により、第2再点弧電圧を抑制できる。

6. 結 論

メタルハライドランプのウォームアップ中に発生する再点弧現象が不純ガスに起因するものであることを確認するとともに、その抑制法について述べた。

本実験で得られた事柄をまとめると次のとおりである。

(1) 製作直後の発光管においては、第1および第2再点弧電圧は初期持ち込み不純ガス濃度と対応する。しかしながら数十時間の枯化点灯によって第1再点弧電圧は減少するのに対して、第2再点弧電圧は不変である。

(2) メタルハライドランプのウォームアップ中における再点弧現象は電極近傍での現象ではなく放電空間での現象であり、放電空間全体にわたって一様な現象である。

(3) 放電電流を短時間休止させ、再点弧現象を誇張して観察した結果、電流休止期間 t_{off} と $I_n[F(t) - V_L]/(V_L - V_c)$ とは直線的関係にあり、この傾きは電子損失係数を与える。

(4) ウォームアップ中の再点弧電圧を抑制することは、

(i) 過剰金属の封入によりハロゲン化水銀の分解消失を図る。

(ii) 電極近傍管壁温度を上昇させる。

(iii) 封入希ガス圧を高くする。

(iv) 封入希ガス原子量を増大させる。

などによって達成することができる。

これらの技術は電子安定器などの将来の点灯方式に対して、ウォームアップ中の立ち消えに対するランプサイドからの有力な防

止手段を与え得るものである。

終わりに、本研究に対して有益なる助言をいただいた京都大学電子工学教室板谷良平教授に深謝の意を表する。また実験の遂行に際して東芝光源開発研究部持丸真次氏、佐々木博基氏にはご援助いただいた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) 井山博之, 小山敦夫, 赤塚美律雄, 小松春樹: 小出力高圧ナトリウムランプの毎サイクル点弧形電子安定器による点灯, 照学誌 67-7 (昭58) 266
- (2) Kern, J.: Deutung der elektrischen Eigenschaften der mit Wechselstrom betriebenen Hochdruckentladung aus den Vorgängen an den Elektroden, Technisch Wissenschaftliche Abhandlungen der Osram Gesellschaft 5 (1943)
- (3) Cobine, J.: Gaseous Conductors, Dover Publications, Inc. New York (1958)
- (4) Cohen, S.: Ballasting the New Metallic-Additive Discharge Lamps, IES Tech. Conf. Preprint (1965) No. 28, 同 Illum. Engng. 11 (1965) 660
- (5) Franke, A., Gungl, W. C., Ring, J. F. and Waymouth, J. F.: Reignition Characteristics of Metal Halide Lamps and their Effect on Ballast Design, IES Tech. Conf. Preprint (1966) No. 11
- (6) Lake, W. H. and Kramel, L. F.: Capability Criteria between Metal Iodide Lamps and Ballasts, IES Tech. Conf. Preprint (1967)
- (7) 伊藤三郎, 青木 昭: メタルハライドランプの再点弧ピークに関する考察, 照学全大 (昭45) 19
- (8) Partlow, W. D.: The Interaction of Metal Halide Lamps and Ballasts during Reignition, IES Tech. Conf. Preprint (1979) No. 28, 同 J. Illum. Engng. Soc. 10-2 (1981) 114
- (9) Martt, E. C., Smialek, L. J. and Green, A. C.: Iodides in Mercury Arcs-For Improved Color and Efficacy, IES Tech. Conf. Preprint (1963) 同 Illum. Engng. 19-1 (1964) 34
- (10) Terashima, Y., Inoue, A. and Ogawa, K.: Effects of quenching reactions on the breakdown voltage in Ar-Hg Penning mixture, J. Light Vis. Environ. 2-1 (1978) 2
- (11) Waymouth, J. F.: Electric Discharge Lamps, Cambridge MIT Press (1971)
- (12) Yamane, M., Suenaga, M. and Miyashita, T.: Breakdown mechanism of metal halide lamps, J. Light Vis. Environ. 2-1 (1978) 9
- (13) 井上昭浩: メタルハライドランプの始動に及ぼす不純ガスの影響, 電気学会放電光応用視覚合同研究会資料 ED-80-26, LAV-80-2 (昭55)
- (14) 井上昭浩: 放電ランプの始動に及ぼす不純ガスの影響, 照学誌 62-11 (昭53) 588
- (15) Inouye A.: Effects of impurity gases on lamp starting mechanism, J. Light Vis. Environ. 2-2 (1978) 6

(受付1983年12月27日)