トリガatronギャップの破壊と負性気体の影響

正 員 林 洋 司 (中 部 大)
 正 員 細 川 辰 三 (名古屋工大)
 正 員 池 田 義 一 (中 部 大)

1. ま え が き

補助電極 (第三電極, 本論文ではトリガ電極と記す) 付き放電ギャップは, 主ギャップの破壊特性からトリガatron形と電界ひずみ形に大別される。

トリガatronギャップの放電破壊は, トリガ電極と主電極間にプラズマを発生させ, このプラズマをトリガとして主電極間に絶縁破壊を誘発する現象で, そのトリガ機構については古くから多くの研究がなされている⁽¹⁾⁻⁽⁹⁾。また著者らの一人細川⁽⁸⁾⁽⁹⁾は, 空気中平行平板形トリガギャップの破壊機構について調べ,

(1) トリガatronギャップの破壊は, トリガによって発生したプラズマが主ギャップに突出することによって主ギャップの電界分布をゆがめ, かつ等価的に主ギャップのギャップの長さを短縮することによって過電圧率の小さなインパルス破壊と類似な特性を示す。

(2) トリガatronギャップの破壊は, トリガ方式が陰極側トリガでは負イオンによって, 陽極側トリガではストリーマ形成条件によって規制された破壊を示す。

ことなどを明らかにし, 既に報告した。

またトリガ電極付き放電ギャップは, 古くから高電圧回路制御用のギャップスイッチとして用いられており, 更に近年, 核融合開発のための大電流パルス制御

の手段の一つとして利用されている。

他方, 負性気体中あるいはそれを含有した混合気体中の絶縁破壊では, 負イオンの役割が重要であることが指摘されているが⁽¹⁰⁾, トリガatronギャップについてはあまり検討されていない。

著者らは, 平行平板形トリガatronギャップの破壊特性を調べ, その破壊特性からトリガ効果に及ぼす負性気体の影響と破壊過程における負性気体の役割について検討した。その結果, 窒素 (以後 N_2 と記す), 水素 (以後 H_2 と記す) のように負イオンを形成しにくい気体中のトリガ効果と, 酸素 (以後 O_2 と記す) あるいはその混合気体中のように負イオンを形成しやすい気体中のトリガ効果には顕著な差異がみられ, トリガatronギャップにおける放電破壊においても負性気体が重要な役割を演じていることが明らかになった。

本論文はこれらの結果をまとめたもので, ギャップの長さが $0.5 \sim 2 \text{ cm}$, 気圧が $0.25 \sim 2 \text{ atm}$ ($190 \sim 1,520 \text{ Torr}$) のギャップ条件で空気, N_2 , O_2 および H_2 中におけるトリガ効果, N_2 と O_2 の混合気体の混合比を変えた場合のトリガ効果などについて述べ, 更にトリガatronギャップのトリガ機構に及ぼす負性気体の影響について検討している。

2. 実験装置および実験方法

実験装置は図1のようである。電極構造は直径 8 cm のステンレス鋼製 ロゴウスキー 形電極 2 個を対向させ, その一方 (接地極側) の中心に直径 3 mm の穴があり, そこにトリガ電極が挿入されている。また, これらの電極は内径 18 cm , 高さ 23 cm のステンレス鋼製円筒形真空容器内に入れ, これを $5 \times 10^{-5} \text{ Torr}$ に排気した後, 各種気体を所定の圧力および混合比となるように充てんした。また空気およびその他の気体の

The Breakdown Characteristics of a Trigatron Gap and the Influence of the Electronegative Gas. By Yoji Hayashi, Member (Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chubu University), Tatsuzo Hosokawa, Member (Department of Electrical Engineering, Nagoya Institute of Technology) & Giichi Ikeda, Member (Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chubu University).

林 洋司: 正員, 中部大学工学部電気工学科

細川辰三: 正員, 名古屋工業大学工学部電気工学科

池田義一: 正員, 中部大学工学部電気工学科

図 1 実験装置

Fig. 1. Experimental apparatus.

実験の場合には、 N_2 あるいは O_2 のボンベをそれぞれの気体のボンベと取換えた。なお、圧力測定はイオンゲージ IG および圧力計 PG (データメトリック社製エレクトロニックマノメータモデル 1173, 測定範囲 0.01~1,000 Torr を測定誤差 $\pm 0.3\%$ 以内で測定可能) を用い、IG は容器の到達真空度を、PG は各種気体の充てん圧力をそれぞれ測定した。更に、ギャップの破壊は容器の中央部にある直径 5 cm のガラス製窓 W を通して確認した。

主ギャップには静的破壊電圧より低い直流電圧を印加しておく。次に、トリガ電極にインパルス電圧を印加してトリガギャップに火花放電を起こさせると、この放電は主ギャップの全路破壊を誘発する。この場合、トリガギャップに印加するインパルス電圧は、別の三針ギャップで発生した立上り時間 10 ns, 減衰時定数 40 μ s の CR 減衰波を用いた。このトリガ電圧の波高値は 0~ ± 10 kV で種々の値が得られたが、 $\pm 3 \sim \pm 10$ kV の実験結果から、本研究のトリガ電圧はトリガ効果および放電波形観測に及ぼす雑音特性などを考慮して ± 6 kV で行なった。なお、放電の立上りを速くするためには主放電の放電抵抗 R_0 は小さいことが望ましいが、これをあまり小さくすると電極の消耗が激しく、また放電電流が振動してオシロスコープによる破壊の波形観測が困難となった。これらのことを考慮して、本研究では内部インダクタンスが比較的小さいエレマ抵抗を選び $R_0 = 1.2$ k Ω , 電流波形観測用抵抗 $R_f = 1$ Ω とした。また、ギャップの電気的極性を変える場合は、電極配置はそのまま主あるいはトリガ電極の電気的極性を変えた。

供試気体は市販品 (日本酸素製) で、それぞれの規格は次のようである。

- (a) 空気: $CO < 1.0$ ppm, $CO_2 < 1.00$ ppm
 $CH_4 < 0.5$ ppm, $NO_x < 0.05$ ppm
 $SO_2 < 0.1$ ppm, 水分 (露点) $< -70^\circ C$
- (b) N_2 : 純度 $> 99.995\%$, $O_2 < 0.5$ ppm

$CO < 1.0$ ppm, $CO_2 < 1.0$ ppm
 $CH_4 < 0.5$ ppm, $NO_x < 0.1$ ppm
 $SO_2 < 0.1$ ppm, 水分 (露点) $< -70^\circ C$

- (c) O_2 : 純度 $> 99.99\%$, $N_2 < 20$ ppm
 $Ar < 50$ ppm, $CH_4 < 30$ ppm
水分 (露点) $< -70^\circ C$

- (d) H_2 : 純度 $> 99.99999\%$, $O_2 < 0.05$ ppm
 N_2, CO, CO_2 検出せず
水分 (露点) $< -70^\circ C$

3. 実験結果

〈3・1〉 トリガ効果 トリガトロンギャップにおいては、トリガ電極にインパルス電圧を印加してトリガギャップにプラズマを発生させると、このプラズマは主ギャップの破壊を誘発し、破壊電圧を静的破壊電圧より下げることができる^{(1)~(9)}。この場合、その最低破壊電圧付近では、破壊が統計的要素を含むことに起因して破壊電圧に不整が現われる。

図2はその一例で、主電極の極性が負でトリガ電極の極性が正の場合における 20 回の放電頻度分布を示し、(a)図は N_2 中、(b)図は空気中で、いずれもギャップの長さ $l = 0.5$ cm, 気圧 $p = 2$ atm (1,520 Torr) の場合をそれぞれ示している。静的 (直流) 破壊電圧 V_s は、後述するように (図3) 空気中と N_2 中ではほぼ等しかったが、トリガによる最低破壊電圧 V_L は

(a) N_2 中

(b) 空気中

図 2 トリガ破壊電圧の分布

Fig. 2. Distribution of triggered breakdown voltage.

図3 空気中および窒素中におけるトリガ効果とギャップの長さの関係

Fig. 3. Relation between the trigger effect and gap length in air and nitrogen.

異なって N_2 中で低く現われた。また放電率はいずれも正規累積分布に近い分布を示したが、分布の電圧幅は N_2 中が大であった。このように、破壊電圧の決定には放電率の分布を考慮しなければならないが、本研究では便宜上 20 回の実験による放電率 100% の最低値を V_L とした。なお、 V_L の添字記号 +、- は次のことを意味している。例えば、 V_{L+} は主電極高電圧側の極性が負で、トリガ電極の極性が正の場合を示し、一般に上側の添字記号が主電極高電圧側の極性を、下値の添字記号がトリガ電極の極性をそれぞれ示している。

図3は空気中および N_2 中 $p=1 \text{ atm}$ (760 Torr)、トリガ電極の極性が正の場合における V_s, V_L と l との関係の主電極の極性をパラメータとして示したものである。図より明らかなように、供試範囲内では V_s, V_L はともにほぼ l に比例して上昇したが、 V_L には気体の種類の影響が現われた。すなわち、空気中では主電極の極性による差異がほとんど認められないのに対し、 N_2 中では顕著な差異が現われ、陰極側トリガ (V_{L-}) で最も低下した。

このようにトリガトロンギャップにおいては、気体が異なると V_s は等しくても V_L は異なることが明らかになった。これらの特性を解明するために、次に純粋気体および混合気体について更に検討を加えた。

〈3・2〉 空気中のトリガ効果 図4 ($l=0.5 \text{ cm}$)、図5 ($l=1.0 \text{ cm}$) は空気中におけるトリガ効果と気圧の関係の主およびトリガ電極の極性 (トリガ電極が (+) の場合 (+) トリガ, (-) の場合 (-) トリガと記す) をパラメータとして表わしたもので、図4 (a) は

(a) 静的破壊電圧および最低トリガ破壊電圧 (b) 破壊電圧の低下率

図4 空気中におけるトリガ効果と気圧の関係
Fig. 4. Relation between the trigger effect and pressure in air.

図5 空気中における破壊電圧の低下率と気圧の関係

Fig. 5. Relation between the decrease rate of the breakdown voltage by trigger and pressure in air.

V_s, V_L と p との関係、図4 (b) および図5は電圧低下率 $k [(V_s - V_L)/V_s \times 100\%]$ と p との関係をそれぞれ示している。なお、図中 V_{s+}, V_{s-} は静的破壊電圧で高電圧側が陽極の場合に V_{s+} 、陰極の場合に V_{s-} で示している。これらの図から、空気中におけるトリガ効果は、陽極側トリガで (+) トリガの場合を除いていずれも類似の特性を示し、 k は p の上昇に対してはほぼ直線的に減少したが、(+) トリガの場合には 1 atm 以上で飽和の傾向を示し、この傾向は $l=1 \text{ cm}$ の場合に顕著に現われた。

〈3・3〉 N_2 中のトリガ効果 図6～図8は N_2 中におけるトリガ効果と気圧との関係を、主およびトリガ電極の極性をパラメータとして表わしたもので、図6 (a) は V_s, V_L と p との関係、図6 (b) および図7、図8は k と p との関係をそれぞれ示している。

図6 ($l=0.5 \text{ cm}$) において、陰極側トリガではトリ

が効果はトリガ電極の極性にはほとんど無関係で、 κ は p の上昇に対して直線的に低下している。他方、陽極側トリガでは $p < 0.5$ atm (380 Torr) でいずれも p の上昇に対して減少しているが、 $p \geq 0.5$ atm (380 Torr) ではトリガ電極の極性によって顕著な相違を示した。すなわち、(+)トリガでは $p \approx 0.5$ atm (380 Torr) で最小値を示した後上昇し始め、 $p = 2$ atm (1,520 Torr) では κ が 70% にも達して V_L は陰極側トリガよりも低下した。また、(-)トリガでは $p > 0.5$ atm (380 Torr) で斜線の範囲で不整が現われ実験ごとに異なった特性を示した。すなわち、(b)図において κ が最高の場合には破線のように $p > 1$ atm (760 Torr) で上昇して V 形特性を示したが、最低の場合には実線のように単調な減少特性を示し、 $p > 1.5$ atm では

図 6 窒素中におけるトリガ効果と気圧の関係
Fig. 6. Relation between the trigger effect and pressure in nitrogen.

図 7 窒素中における破壊電圧の低下率と気圧の関係

Fig. 7. Relation between the decrease rate of the breakdown voltage by trigger and pressure in nitrogen.

飽和して V_L は V_s の 20% しか低下しなかった。

このように、 N_2 中ではトリガ効果は主およびトリガ電極の極性によって異なった特性を示すことが明らかになった。図 7, 図 8 はこれらの特性を κ をパラメータとして示したもので、両図から明らかなように陽極側トリガにおける V 形特性は κ を増すと徐々に消滅し、トリガ効果は主電極の極性のみに関係した二つの特性に大別された。

〈3・4〉 O_2 中のトリガ効果 図 9 は負性気体としての O_2 中のトリガ効果を示す。 O_2 中のトリガ効果は図より明らかなように、空気の特徴に類似して κ はいずれの場合も p の増加に対して単調に減少したが、 $p > 1$ atm (760 Torr) では飽和の傾向を示した。特に陰極トリガで (+) トリガの場合に最も小さく、 $p = 2$ atm (1,520 Torr) の V_L は V_s の 10% しか低下

図 8 窒素中における破壊電圧の低下率と気圧の関係

Fig. 8. Relation between the decrease rate of the breakdown voltage by trigger and pressure in nitrogen.

図 9 酸素中における破壊電圧の低下率と気圧の関係

Fig. 9. Relation between the decrease rate of the breakdown voltage by trigger and pressure in oxygen.

しなかった。また O_2 中では、 l を変えても特性の傾向に変化は認められなかった。

〈3・5〉 N_2+O_2 の混合気体中のトリガ効果

前節においては、空气中、 N_2 中および O_2 中のトリガ効果を比較し、空气中のトリガ効果は O_2 中のトリガ効果に類似していることを述べた。これらのことから、次に N_2 に O_2 を混合して、その混合比によるトリガ効果の変化について述べる。

図 10、図 11 は $l=0.5$ cm 一定で、 O_2 の混合比 ε ($=O_2/(N_2+O_2) \times 100\%$) に対するトリガ効果の関係を示したもので、(a) 図は V_s , V_L と ε の関係、(b) 図は κ と ε の関係をそれぞれ示している。図 10 は $p=1$ atm (760 Torr) における結果で、 V_s は O_2 を混合すると ε の増加に対して低下した。他方、 V_L は主電極の極性によって特性を異にし、陰極側トリガでは ε の増加に対して単調な増加 (κ は単調な減少) を示

した。しかし、陽極側トリガでは、 $\varepsilon < 1.25\%$ で最小値 (κ は最大値) を示した後増加 (κ は減少) した。なお参考のため、 $\varepsilon=100\%$ (O_2 中) における値も付記した。図 11 は、 $p=2$ atm (1,520 Torr) における結果を示す。なお、 N_2 と O_2 の混合気体中のトリガ効果には、図 10 から明らかなようにトリガ電極の極性効果はあまり認められないので、図 11 では主電極の極性を変えた場合についてのみ記した。図から、この気圧においても図 10 ($p=1$ atm (760 Torr)) とほぼ同様な傾向を示した。またこれらの図から、空気に対応する $\varepsilon=20\%$ における κ の値は図 3 の空気中の値にほぼ等しく、トリガトロンギャップにおける空気の特性は O_2 の特性に支配されていることがわかる。

(a) 静的破壊電圧および最低トリガ破壊電圧

(b) 破壊電圧の低下率

図 10 窒素と酸素の混合気体中におけるトリガ効果と酸素混合比の関係

Fig. 10. Relation between the trigger effect in nitrogen and oxygen gas mixture and proportion of oxygen.

(a) 静的破壊電圧および最低トリガ破壊電圧

(b) 破壊電圧の低下率

図 11 窒素と酸素の混合気体中におけるトリガ効果と酸素混合比の関係

Fig. 11. Relation between the trigger effect in nitrogen and oxygen gas mixture and proportion of oxygen.

〈3・6〉 H_2 中のトリガ効果 N_2 と O_2 およびその混合気体中とではトリガ効果に顕著な差異が現われ、その原因は負性気体の影響であることが明かになった。従って、 N_2 と同じく負イオンを形成しにくい気体中では N_2 中と類似した特性を示すことが期待される。

図 12 はその一例で、 H_2 中におけるトリガ効果を示

図 12 水素中における破壊電圧の低下率と気圧の関係

Fig. 12. Relation between the decrease rate of the breakdown voltage by trigger and pressure in hydrogen.

図 13 空気中におけるトリガ破壊時の電流波形
Fig. 13. Typical oscillograms of the current at triggered breakdown in air.

している。図から明らかなように、 H_2 中においても N_2 中と類似な傾向がみられ、陽極側トリガで (+) トリガでは k - p 特性は V 形を示した。

このようにトリガトロンギャップでは、負性気体あるいは負性気体を混合した混合気体中では、陽極トリガで (+) トリガの V_L は p に対して単調に上昇するが、 N_2 , H_2 のように負イオンを形成しにくい気体中では上に凸形 (k は V 形) の特性を示すことが明らかになった。これは、図 4 の空気中と図 6 の N_2 中での結果を比較するとわかるように、負性気体の存在により高気圧での V_L が上昇するためであり、負性気体により放電の進展が抑制されることを示唆している。

これらのことを検証するために、更に炭酸ガス (CO_2), SF_6 などについて調べた結果、これらの気体中においても O_2 中と類似な特性が得られた。

〈3・7〉 電流波形 図 13, 図 14 は接地側電極と接地の間に 1Ω の抵抗を挿入して測定したトリガから主ギャップの破壊までの電流波形の一例を示す。

図 13 は空気中で $V \approx V_L$ における特性を示す。陰極側トリガの場合、トリガ放電から主放電までの時間遅れ T はトリガ極の極性に関係なく $T \geq 10\mu s$ であっ

図 14 窒素中におけるトリガ破壊時の電流波形
Fig. 14. Typical oscillograms of the current at triggered breakdown in nitrogen.

た。また陽極側トリガの場合はトリガ極の極性によって特性が異なり、(+)トリガの場合 $T \approx 1 \mu\text{s}$, (-)トリガの場合 $T \approx 6 \mu\text{s}$ であった。

図 14 は N_2 中における特性を示す。陰極側トリガの場合は空気中の特性と類似して比較的 T が大きかったが、幾分トリガ極の極性による差異が現われた。すなわち、(+)トリガの場合 $T \approx 7 \mu\text{s}$, (-)トリガの場合 $T \approx 2.5 \mu\text{s}$ であった。また、陽極側トリガの場合(+)トリガでは空気中の場合と類似して $T \leq 1.5 \mu\text{s}$ であったが、(-)トリガでは $T \approx 0.5 \mu\text{s}$ で遅れは小さかった。

4. 考 察

前章までに空気、 N_2 , O_2 , H_2 および N_2 と O_2 の混合気体中のトリガ効果について述べた。その結果、トリガ効果は O_2 を含む気体中では一般に低下し、かつ陰極側トリガの場合に大であった。他方、陽極側トリガの場合には、トリガ効果はギャップ条件、気体の種類などによって変化するが、その最大は N_2 中(+)トリガの場合に現われた。これらの結果から、トリガatronギャップのトリガ機構は次のように考えられる。

(1) 陰極側トリガ トリガ電極にインパルス電圧を印加して発生したトリガ放電の効果は、プラズマの発生による荷電粒子の供給、プラズマからの紫外線の照射、高温気体の発生〔プラズマは発生後数 μs 後には高温気体(Hat gas)と変わる〕⁽³⁾⁽⁸⁾⁽¹¹⁾ による E/N (E : 電界, N : 気体分子数密度)の増大などが考えられる。ここで、イオンと電子のドリフト速度⁽¹²⁾ からイオンと電子のギャップ走行時間を求めると、例えば N_2 中, $p=1 \text{ atm}$, $l=0.5 \text{ cm}$, $V=11 \text{ kV}$ で N_2^+ が約 $10 \mu\text{s}$, 電子が約 50 ns である。

ところで陰極側トリガの場合、図 13, 図 14 に示すように T は数 μs 以上であったことから、トリガによって発生したプラズマは消滅して、陰極前面に噴出した高温気体が破壊に重要な役割を演ずるものと思われる。すなわち、このトリガ放電は陰極での初期電子供給の役割を演ずると共に、陰極近傍での E/N の増大を促す⁽⁸⁾。従って、なだれ頭部の電子数

$$n_0 \exp \left\{ \int_0^x (\alpha - \eta) dx \right\}$$

n_0 : 初期電子数, α : 電離係数, η : 附着係数, x : 陰極から $\alpha = \eta$ となる点までの距離

が増加して陰極からのなだれの成長を助ける。これらことから、 H_2 , N_2 のような負イオンを形成しにくい気体中では、なだれの進展に伴って陰極および陽極

側の電界が強まり、更に後続なだれの進展を促進して低い印加電圧でも破壊が完成する。他方、 O_2 のような負性気体中では、陰極を出発した電子がトリガ作用でなだれを形成してもギャップの静電界が静的破壊電界より低いことから、途中で負イオンを形成して陽極までは進展できない。この負イオン群はギャップ中で負の空間電荷を形成し、この空間電荷による電界は陰極付近の静電界を更に弱めて後続なだれの進展を抑制する。従って、ギャップの破壊には更に高い印加電圧が必要となって、トリガ効果は減少するものと考えられる。これは、負針不平等電界ギャップにおいて、 N_2 中に O_2 のような負性気体を混合すると負の空間電荷効果によってコロナが定在し、火花電圧が上昇することと等価的な機構で説明できると解釈される。

(2) 陽極側トリガ H_2 , N_2 のように負イオンを形成しにくい気体中では、気圧が低いとトリガ放電に起因した紫外線が陰極を照射し、その γ_p 作用(光子による陰極からの電子放出作用)でなだれが発生する。なだれの進展に伴って陰極および陽極側の電界が強まり、更に後続なだれの進展を促進すれば、低い印加電圧で破壊が完成する。しかし、この γ_p 作用によるトリガ効果は、気圧が上昇すると紫外線が気体に吸収されて急速に低下することから、図 6 における $p \leq 1 \text{ atm}$ での κ の低下はこのためと考えられる。

他方、気圧が上昇すると、トリガ放電に起因した紫外線が陽極近傍で気体分子に吸収されて気体の光電離が可能となる。更に、高温気体による E/N の増大も加わりストリーマが発生しやすくなる。このストリーマが陰極へ進展して破壊が完成する。図 6 において、 $p > 1 \text{ atm}$ で κ が上昇したのはこのためと解釈される。

なお、 l を増すとトリガ効果が減少したのは次のように考えられる。すなわち、トリガ放電に起因した高温気体のギャップ中への伸展は、トリガ電極付近に限られることから⁽⁸⁾, l が増すと高温気体の伸展がギャップの長さに対し相対的に低下し、従ってトリガ効果が l に対して減少するものと解釈される。

他方、一般に O_2 を含む負性気体中で、トリガ効果が小さく、かつトリガ極性によって特性に顕著な差異が現われないのは、ギャップの電界が静的破壊電界より低いため電子附着によってストリーマの進展が抑制されるためと考えられる。

(3) N_2 と O_2 の混合気体の特性 図 10, 図 11 に示した N_2 に対する O_2 の混合比 ε を変えた場合の特性は、Miller 氏ら⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾の不平等電界でのコロナ開始に対する結果と類似しており、次のように解釈さ

れる。すなわち、陰極側トリガの場合、トリガに起因した高温気体が主ギャップの陰極側から進展して破壊に重要な役割を演ずるが、この場合 O_2 を混合すると O_2 は光吸収係数が N_2 に比べて大であるから⁽¹⁵⁾、陰極における二次機構としての γ 作用を減少させる。また ε が大になると付着が増加してなだれの進展を抑制する。従って、図 10 および図 11 において ε の増加に伴って V_L (κ) が上昇 (低下) するのはこのためと考えられる。

他方、陽極側トリガにおいては、 N_2 に微量の O_2 を混合するとストリーマが発生しやすくなって⁽¹⁶⁾ 火花電圧は低下するが、更に ε を増すと付着が増加してストリーマの進展を抑制し、 V_L は上昇するものと考えられる。従って、陽極側トリガにおいて O_2 の混合によって V_L に V 形特性 (κ では最大値をもつ) が現われるのは、このためと解釈される。

5. ま と め

トリガトロンギャップの破壊特性を種々の気体について調べ、その破壊機構と負イオンの影響について検討した。得られた結果を要約すると次のようである。

(1) トリガ効果は O_2 を含有する気体中では一般に低下し、また同一気体では主電極とトリガ電極の極性が互いに相異なる場合が大であった。

(2) 供試気体中では N_2 のトリガ効果が大きく、かつその最大は陽極側トリガの場合に現われた。

(3) 陽極側トリガでは気体によってトリガ機構を異にし、(i) 負イオンを形成しやすい気体中では負イオン形成による電子の減少が重要な役割を演じ、(ii) 負イオンを形成しにくい気体中では、低気圧では陰極照射による陰極からの初期電子供給となだれの発生

が、高気圧では陽極側からのストリーマの発生が重要な役割を演じている。

(4) 陰極側トリガでは陰極側の E/N の増加によるなだれの発生が重要な役割を演じ、比較的大きなトリガ効果が得られる。

(昭和59年1月26日受付、同59年11月2日再受付)

文 献

- (1) T.E. Broadbent & J.K. Wood: "A thermally triggered spark gap", *Brit. J. Appl. Phys.*, **6**, 368 (1955)
- (2) A.M. Sletten & T.T. Lewis: "Characteristics of the trigatron spark-gap", *Proc. Instn. Elect. Engrs.*, **104**, 54 (1956)
- (3) T.E. Broadbent: "The breakdown mechanism of certain triggered spark gap", *Brit. J. Appl. Phys.*, **8**, 37 (1957)
- (4) T.E. Broadbent & A.H.A. Shlash: "The development of the discharge in the trigatron spark gap at very high voltage", *ibid.*, **14**, 687 (1963)
- (5) T. Ishikawa: "Effect of the plasma-jet in a double electrode spark-gap", *J. Phys. Soc. Japan*, **19**, 367 (1964)
- (6) E. Kuffel & M.A. Bera: "Breakdown in triggered spark gaps in air", *IEEE Trans. Power Apparatus, Syst.*, **PAS-87**, 1628 (1968)
- (7) Y. Yoshida: "The observation and the simulation on a transient glow discharge in a trigatron gap", *J. Phys. Soc. Japan*, **42**, 1404 (1977)
- (8) 栗本・細川・三好: 「補助放電による気中ギャップの放電破壊」, 電学論A, **93**, 199 (昭 48-5)
- (9) 栗本・細川・三好: 「補助放電による気中ギャップの放電破壊(II)」, 同上A, **94**, 25 (昭 49-1)
- (10) G.W. Trichel: "The mechanism of the negative point to plane corona near onset", *Phys. Rev.*, **154**, 1078 (1938)
- (11) 河田・細川・三好: 「レーザトリガによる不平等電界ギャップの絶縁破壊(II)」, 電学論A, **99**, 39 (昭 51-1)
- (12) H. Raether: "Electron avalanches and Breakdown in gases", p. 62 (1964) Butter Worth
- (13) G. Miller & L.B. Loeb: *J. Appl. Phys.*, **22**, 494 (1951)
- (14) G. Miller & L.B. Loeb: *ibid.*, **22**, 614 (1951)
- (15) H. Raether: "Electron avalanches and Breakdown in gases", p. 130 (1964) Butter Worth
- (16) L.B. Loeb: "Electrical coronas", p. 222 (1965) University of California Press