負極性針-平板ギャップの絶縁破壊過程

電力中央研究所 鈴木俊男

1. はじめに

雷の多くが負極性のために、負極性の絶縁破壊現象の研究は古くから比較的長い気中ギャップを対象として行なわれてきた。すなわち、Norinder 氏ら⁽¹⁾、Sax 氏ら⁽²⁾、Park 氏ら⁽³⁾のさい断法による研究、最近になって Stekolnikov 氏ら⁽⁴⁾、Uman 氏ら⁽⁵⁾、その他⁽⁶⁾イメージコンバータカメラによる研究があり、絶縁破壊はリーダと呼ばれる導電性のチャンネルがギャップ中を橋絡することによって達成されることが明らかとなっている。

これに対し比較的短いギャップを対象とした基礎研究では、破壊前の電子なだれ、ストリーマなどの前駆現象に注意が向けられ、細川氏ら^{(7)~(10)}、牛田氏らの光電子増倍管による研究⁽¹¹⁾、Nasser 氏のリヒテンベルグ像法⁽¹²⁾による研究が発表されているが、ストリーマから絶縁破壊へ至る過程は解明されていない。

本研究の目的は、負極性衝撃電圧により気中ギャップがいかなる過程を経て絶縁破壊に至るかを明らかにすることであり、定性的解析に重点が置かれている。

2. 実験方法

本実験に使用した回路は、第1図に示すとおりである。本回路で得られる電圧波形は $0.4 \times 1,800 \mu\text{s}$ である。針-平板ギャップの針電極は直径 0.3mm のタングステン、平板電極は直径 30cm のステンレス鋼で、端は 5cm の曲率で丸くしてあるものを使用した。ギャップの長さは 2~7cm に変化し、4cm と 6cm の絶縁破壊過程が重点的に観測された。通常、針電極は電流シャントを通して接地され、平板電極に正極性の電圧が印加されたが、平板側の電流を調べる場合には平板電極を接地し針電極に負極性の電圧を印加した。

第1図 実験回路

Fig. 1. Experimental circuit.

放電光は5台の光電子増倍管(以下 PM と記す)によって観測した。PM 管は東芝製 MS9SY であり、1台はトリガ用、他の4台を同時に動作させて放電光の時間的変化を調べた。本研究で使用した PM の走査空間はギャップの垂直方向(平板に直角)3mm、径方向 20cm であり、垂直方向、径方向とも移動可能である。

PM による観測のほかに、電圧さい断法と組合せてさい断時までの累積現象を静止カメラで観測した。

電圧は抵抗分圧器により、電流は接地側の抵抗の電圧降下によって測定した。これらの信号と PM の信号は Tektronix 556 を2台使用することによって各電圧印加ごとに適宜記録された。

火花チャンネル形成直前の現象を速い掃引速度で観測するために、シンクロスコープのトリガ回路とさい断球のトリガ回路に遅延回路を設置し、0.5~2,000μs の制御を可能とした。

3. 結 果

負極性針-平板電極系の絶縁破壊過程は印加電圧の大きさに従って、また同一電圧の下でも各電圧印加ごとに種々の多様性を示す。このために同一条件の下での実験でも数多くの観測を必要とする。PM による光パルス、電流、電圧、静止カメラによる時間的に累積された写真を総合して、負極性針-平板電極系の典型的な(印加電圧が 50% 絶縁破壊電圧近傍の)絶縁破壊過程は、

Breakdown Process in Negative Point-to-Plane Gap. By T. SUZUKI, Member, (Central Research Institute of Electric Power Industry).

鈴木俊男: 正員, 電力中央研究所

(1) 一次、二次、三次ストリーマが発生進展する初期段階

(2) 電子および正電荷の生成、移動が進行する“Dark Period”

(3) リターン電離波の発生とガス加熱作用が行なわれる破壊直前の過程

を経て火花が完成されることが判明した。以下、各過程について印加電圧の大きさが変わった場合の変化を含めて詳述する。

〈3・1〉 絶縁破壊過程の初期段階 負極性針-平板電極系のストリーマは針電極にきわめて近い空間では再現性があるが、ギャップ中に伸びると伸びる長さ、速度など多様な変化を示す。数多くの実験から、ストリーマの進展過程は次の二とおりに分類される。

まず第一は、第2図に示すように、一次ストリーマ (the primary streamer), 二次ストリーマ (the secondary streamer), 三次ストリーマ (the tertiary streamer) が順次針電極から発生進展していく形態である。第2図はそれぞれ異なった点を狙った4台のPMを同時に記録した放電光のオシログラフであり、 l はギャップの長さ、 V_p は印加電圧の波高値、 k は50% 絶縁破壊電圧値に対する印加電圧波高値の比 $V_p/V_{50\%}$ 、 x はギャップの仮想中心軸上針電極先端からの距離、

第2図 一次、二次、三次ストリーマの光パルス

Fig. 2. Light pulses showing the primary, the secondary, the tertiary streamer.

v はシンクロスコープの入力電圧感度、 I は PM 測定系の相対感度、 S はシンクロスコープの掃引速度である。以下の図でも同じ記号を使う。第2図では $x=0\sim1.5$ cm, $x=2\sim3$ cm, $x=4\sim5.7$ cm がそれぞれ同一の電圧印加に対して同時に記録されたものであり、全体として3回の電圧印加の結果を合成したものである。スケールのずれは4台のPM系の掃引開始時を校正したために生じたものである。図中に一次、二次、三次ストリーマ、電離波をそれぞれ p, s, t, w で示した。

第二の形態は第3図に示すように、針電極に発生した一次ストリーマがそのまま高速で平板まで到達する形態である。第3図ではこの光パルスが $x\geq 4$ cm で見られ、 $x\leq 3.5$ cm では見にくい、これは感度が低いためである(第6図参照)。この後、二次、三次ストリーマが進展するのは第一の形態と同様であるが、その進展機構が異なることは後述する。なお、第3図は2台のPMを使用し、1台は $x=0$ に固定し、他の1台の位置 (x) を変化させて得られたものである。

以上、いずれの形態をとるにしても負極性針-平板

第3図 一次、二次、三次ストリーマの光パルス

Fig. 3. Light pulses showing the primary, the secondary, the tertiary streamer.

の絶縁破壊は一次、二次、三次ストリーマが針電極から平板に向かって伸びていくこと、並びに後続のストリーマほど長く伸展する。2cm 程度の正極性針-平板と異なる点は三次ストリーマが現われることであるが、これは負極性針-平板で常に現われるだけではなく、ギャップの長さが長いほど、印加電圧波高値が高いほど現われやすく、($l=4\text{cm}$ で $k \geq 1.0$, $l=6\text{cm}$ で $k \geq 0.7$) それ以下の条件の場合には二次ストリーマまでで三次ストリーマは現われない。

以下、各ストリーマについて検討する。

(1) 一次ストリーマ 第4図は第2図と同一の実験条件で PM の感度を上げ、掃引速度を速くして得られた第一の形態の一次ストリーマの進展を示すオシログラムである。(4台の PM は同時に動作) 各点におけるパルスで最初に現われている小さなパルスが一次ストリーマであり、電極からの距離 x が大きくなると減衰が激しいことがわかる。 $x=1$ と $x=1.5\text{cm}$ の一次ストリーマ発生時点で、すでに $x=0.3\text{cm}$ では大きな光パルス(二次ストリーマの開始)が現われている。これは一次ストリーマがその後方(針電極側)のチャンネルの電離の上昇を待ってさらに伸展することを示すものであり、第一の形態の特徴である。

この一次ストリーマのピークの時間と針電極からの距離 x との関係を $x=0$ における一次ストリーマ発生時点を原点とし、 V_p をパラメータとして示したのが第5図である。図中の矢印は5回の測定の際の幅を示す。同一ギャップの長さに対しては V_p の高いほど一次ストリーマは長く伸び、同一の V_p に対してはギャップの長さの短い $l=4\text{cm}$ のほうが $l=6\text{cm}$

第4図 低速一次ストリーマと二次ストリーマの光パルス

Fig. 4. Light pulses showing the slow primary streamer and the secondary streamer.

第5図 一次ストリーマの進展図

Fig. 5. Development of the primary streamer. の一次ストリーマよりも長く伸びる。平均点を結ぶ曲線のこう配から一次ストリーマの速度 v_p が得られるが、 $x=0.5 \sim 0.7\text{cm}$ までは $v_p=5 \sim 7 \times 10^7\text{cm/s}$ で伸び、その後は $2 \times 10^7\text{cm/s}$ まで低下して停止する。

第6図は第3図に対応する第二形態の一次ストリーマ進展図である。PM 測定系の感度を上げ、掃引時間を速くすると、針電極に一次ストリーマが発生すると同時にギャップ中を高速で小さな光パルスが横切り、平板まで到達するのが見える。(第3図参照) このパルスの速度は $l=6\text{cm}$ で $V_p=88 \sim 101\text{kV}$ に対し $v_p=2 \sim 12 \times 10^8\text{cm/s}$ と非常に速い。Nasser 氏がリヒテンベルグ像法によって観測した“feather”と呼んだものの速度は $2.2 \sim 14 \times 10^8\text{cm/s}$ であり⁽¹²⁾、この第二の形態の一次ストリーマであると推察する。この高速ストリーマは自力でギャップを進展する点が第一の形態と異

第6図 高速一次ストリーマと電離電圧波

Fig. 6. Light pulses showing the fast primary streamer and the potential ionizing waves.

なる特徴である。速度の相違から、第一の形態の一次ストリーマを低速ストリーマ、第二の形態を高速一次ストリーマと呼ぶことにする。

(2) 二次および三次ストリーマ 二次および三次ストリーマは一次ストリーマによって電離されたチャンネルを進展し、その電離度を高めるストリーマであり、針電極近傍の PM には持続性の光パルスとして記録される。

低速一次ストリーマに続く二次ストリーマは、第4図からわかるように、一次ストリーマが平板電極に到達する以前に発生し、この場合、針電極から1.5~2.0 cm ほど伸びて減衰する。第7図は第4図よりも x の大きい点を PM の感度を上げて測定した結果であるが、二次ストリーマが減衰した後でもその先端と平板との間に光パルスの往復運動が見られる。これは一次ストリーマによって形成されたチャンネル中を伝搬する電離波 (Ionizing Wave)⁽¹³⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾ であろう。これを図中 (代表的な光パルスのみ) w で示すことにする。第7図は三次ストリーマの発生状態を示しているが、三次ストリーマの開始直前に鋭いパルスが見え、電離波がその発生に寄与していることがわかる。(図中の矢印)

気体放電中を高速度で伝搬する光の波の普遍性に着目し、これに電離電圧波 (ionizing wave of potential gradient) の名称を与えたのは Loeb 氏である。⁽¹⁶⁾ 彼の定義に従えば、ストリーマも電離電圧波に含まれることになるが、筆者は絶縁破壊過程で、電荷の存在する空間を $10^8 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上の速度で伝搬する光パルスを電離波と呼ぶことにしている。

第7図 三次ストリーマの形成過程

Fig. 7. Light pulses showing the formation of the tertiary streamer.

高速ストリーマに続く二次ストリーマの発生の様子は第3図および第6図に示されている。一次ストリーマが高速で平板に到達した後、二次ストリーマが発生する前に小さな光パルスが数回現われている (第6図の矢印)。これも電離波の伝搬を示すものであり、一次ストリーマによって形成されたチャンネル中の電離度を高めることにより二次ストリーマの進展を促進させていることが推察できる。三次ストリーマも電離波の助けを借りて発生進展していく。

低速一次ストリーマの場合にも高速一次ストリーマの場合にも一次ストリーマがギャップを橋絡した後ではストリーマチャンネルが形成され、後続の二次ストリーマおよび三次ストリーマの先端と平板の間には電離波の伝搬がある。

第8図と第9図に二次および三次ストリーマの伸びと時間との関係を V_p をパラメータとして示す。時間の原点は、一次ストリーマが針電極に現われる時点である。図より、二次ストリーマよりも三次ストリーマのほうが長く伸びること、 V_p が大きくなるほど速度が速くなる傾向があることがわかる。

これらの曲線のこう配から各ストリーマの速度が得られる。二次、三次ストリーマとも針電極近傍では高

第8図 二次、三次ストリーマの進展図

Fig. 8. Development of the secondary, the tertiary streamer.

第9図 二次、三次ストリーマの進展図 ($l=6 \text{ cm}$)

Fig. 9. Development of the secondary, the tertiary streamer. ($l=6 \text{ cm}$)

速でギャップ中に伸び出し、それ以上伸展する場合には伸びるに従って速度が低下する。二次ストリーマの速度 v_s は $l=4\text{cm}$ の場合、 $V_p=51\sim 88\text{kV}$ に対し $v_s=2\sim 5\times 10^7\text{cm/s}$ であり、 $V_p=92\text{kV}$ になると $v_p=3\times 10^8\text{cm/s}$ で $x=1.5\text{cm}$ まで伸び、それから約 $2\times 10^7\text{cm/s}$ の速度で $x=2\text{cm}$ まで伸びる。 $l=6\text{cm}$ の場合には $V_p=91.5\sim 128\text{kV}$ に対し $v_s=3\sim 4\times 10^7\text{cm/s}$ で $x=1\sim 2\text{cm}$ 程度伸びる。

三次ストリーマは、ギャップの途中まで $v_t=1.1\sim 1.3\times 10^8\text{cm/s}$ の高速度で伸び出し、以後 $v_t=1\sim 4\times 10^7\text{cm/s}$ とゆっくりと進展する。また、この速度の変化は急激に起こる。このことは二次ストリーマによってある程度まで電離度の高められたチャンネルがさらに(恐らく電離波によって)電離されることを暗示するものであり、電離度の低い領域では三次ストリーマの速度が低下するのであろう。

(3) 一次ストリーマの発生電圧 第10図に $x=0$ に設定したPM、針電極で測定した電流および電圧を同時に測定した例を示す。

同図から一次ストリーマは比較的低い電圧で発生し、二次、三次ストリーマとも電圧の上昇時に発生しているのがわかる。一次ストリーマの発生電圧を V_p を変えて測定したが、印加電圧の波高値には関係なく、 $l=4\text{cm}$ で 8kV 、 $l=6\text{cm}$ で 15kV であった。

この一次ストリーマの発生電圧と印加電圧波形を対応させると、三次ストリーマまでの初期段階は電圧が上昇している時期に相当することがわかる。したがって、二次、三次ストリーマのような後続ストリーマの発生進展に、電圧の上昇分が寄与している可能性があることに注意すべきである。

(4) 初期段階の電流 電流の波形は印加電圧の

第10図 電圧、電流、PM出力のオシログラム

Fig. 10. Oscillogram of potential, current and PM output.

大きさによって種々に変化する。その例を $l=4\text{cm}$ にとって第11図に示す。対応する光パルスは $x=0$ のものである。

電圧が十分低いと〔第11図(a)〕、電流波形は一次ストリーマに対応して鋭い一次パルスが発生し、その後単調に低下し平坦部を経て減衰する。電圧が $k=0.9$ 程度になると〔同図(b)〕二次ストリーマの発生に対応して二次電流パルスが現われやがて減衰する。電圧が十分高くなると〔第11図(c)〕二次電流パルスの後に三次ストリーマに対応して三次電流パルスが現われる。

第一、第二、第三の電流パルスのピーク値と印加電圧との関係を第12図に示す。各点は30~50回の測定結果の平均値を示し、各点に付いた矢印はばらつき、最大、最小を示す。また、一次ストリーマに対応する一次電流に2種類の直線が引かれているのは測定分布が二つに分かれるためであり、恐らく高速一次ストリーマと低速一次ストリーマに分かれるためであろう。

この図から、一次電流パルスの大きさは V_p に関して変化せず、二次電流パルスは V_p に比例し、三次電流パルスは V_p の指数関数で増加することが読める。

(5) 電荷密度の推定 正極性針電極の場合と異なり、電子は陽極平板のほうへ移動するから、進展中のストリーマは(少々モデル化して)陰極からストリーマ先端まで主として正イオンが残留し、先端に電子群が集中しているような構造となる。いま、時間 t において一次ストリーマが陰極から x_1 まで伸びている

第11図 種々の印加電圧に対する電流と光パルス

Fig. 11. Current and light pulses for potential with different peak.

第 12 図 一次、二次、三次ストリーマの電流

Fig. 12. Current corresponding to the primary, the secondary and the tertiary streamer.

とし、印加電圧を $V(t)$ 、陰極を流れる電流を $i(t)$ 、正イオンおよび電子の単位長さあたりの数を $\rho_p(x)$ 、 $\rho_e(x)$ 、その移動速度を $v_p(x)$ 、 $v_e(x)$ 、電荷を e 、電界を $E(x)$ とすると次式が成立する。

$$V(t)i(t) = \int_0^{x_1} e \rho_p(x) v_p(x) E(x) dx + \int_0^{x_1} e \rho_e(x) v_e(x) E(x) dx \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、一次ストリーマが陰極から出発する時点 ($t=t_0$) を考える。 $v_p \ll v_e$ であり、かつ $\rho_p \approx \rho_e$ で $E(x)$ は共通と考えられるから、(1) 式の第 1 項は第 2 項に対して無視できる。さらに、この時点ではストリーマは空間に伸びた距離が小さいので、第 2 項の積分を電子群の中心点で代表させることができるので、

$$i(t_0) = e \rho_e(x_0) v_e(x_0) E(x_0) / V(x_0) \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。電子計算機の結果より $l=6$ cm の場合、陰極先端における E/V の値 ($=30$) が得られているので、 v_e に一次ストリーマの速度、 i に一次ストリーマ電流の実測値を代入して ρ_e を求めることができる。低速一次ストリーマの場合、 $v_e=7 \times 10^7$ cm/s、 $i=0.35$ A として $\rho_e=3 \times 10^8$ cm $^{-1}$ 、高速一次ストリーマの場合 $v_e=4 \times 10^8$ cm/s、 $i=0.6$ A として $\rho_e=4 \times 10^8$ cm $^{-1}$ が得られる。これらの値は正極性針-平板ギャップの値⁽¹³⁾ $5.7 \sim 32 \times 10^8$ cm $^{-1}$ とほぼ等しい。電子密度、

イオン密度については負極性ストリーマの枝分れ数とその断面積が不明のため推定できない。今後の課題としたい。

〈3.2〉 Dark Period 中の現象

(1) Dark Period 中の光パルス 印加電圧が十分低い場合 ($k < 0.95$) には、二次ストリーマがギャップの途中で停止し、その後微弱な光パルスが現われることがあっても、そのまま減衰して火花チャネルの完成には至らない。また印加電圧が十分高い場合 ($k > 1.2$) には、三次ストリーマが平板ギャップのごく近くに到達し、強い電離波を誘発して火花チャネルが形成される。

印加電圧が $k \approx 0.95 \sim 1.2$ 程度の場合には、三次ストリーマがギャップの途中で停止した後、数 μ s ～ 十数 μ s 後で突然絶縁破壊が生じる。第 13 図は通常の感度の 4 台の PM で放電光を観測した結果であるが、三次ストリーマ停止後 2.5 μ s 後に改めて強い光パルス (τ) が現われ絶縁破壊 (a で示す) へ至ることがわかる。

$l=6$ cm, $V_p=119$ kV, $k=1.12$, $S=500$ ns/div
 w : リターン電離波, a : 火花形成

第 13 図 “Dark Period” の絶縁破壊

Fig. 13. Light pulses showing the occurrence of the breakdown after “Dark Period”.

$l=6$ cm, $V_p=112$ kV, $k=1.15$, $S=500$ ns/div

第 14 図 “Dark Period” 中の光パルス

Fig. 14. Light pulses in “Dark Period”.

この三次ストリーマ停止後再び光パルスが現われるまでの期間を、一見何の光パルスを見えないことから、正極性の場合⁽¹³⁾と同様に“Dark Period”と呼ぶことにした。

第 14 図は Dark Period 中の光パルスを PM の感度を上げて測定したものである。この図からわかるように、三次ストリーマ (図中の t) が減衰した後、その先端と平板との間にゆるやかに変化する大きな光パルスを基調として、それに高周波の小さい光パルスが重畳した光パルスが発生する。やや掃引を速くしたオシロから、この高周波の光パルスは三次ストリーマ先端と平板間に形成されているチャンネル中を伝搬する電離波であることが判明した。

また、PM の位置 x を変化してゆるやかに変化する低周波成分の光パルスの位置の変化を観測すると、 $l=6\text{cm}$ の場合 $k=0.95\sim 1.2$ に対し、このような光パルスを発生する電荷群は $x=3\sim 4.5\text{cm}$ の空間に発生し針電極と平板間にそれぞれ $v_s=1\sim 3\times 10^6\text{cm/s}$ の速度で移動することが判明した。

いま、平板電極へ移動する電荷群を電子と想定し、電界 E を $E=V/l$ とし、圧力 $p=760\text{mmHg}$ とし $l=6\text{cm}$, $V=117\text{kV}$ を代入すると $E/p=26\text{V/cm}\cdot\text{mmHg}$ となり、電子群の速度は $v_e=10^7\text{cm/s}$ ⁽¹⁴⁾ となり、実測値よりも 3 倍ほど速くなる。また針電極のほうに移動する正イオンの速度 v_i を移動度 $\mu_p=1.32\text{cm}^2/\text{s}\cdot\text{V}$ とし⁽¹⁵⁾ 計算すると $V_p=1.5\times 10^4\text{cm/s}$ となり、実測値より 2 けたほど低い。しかし、この誤差は電界の見積り方を考えると当然生ずるものである。三次ストリーマ先端の電界がこの値より高く、平板側は低くなることは、その空間的位置から見て当然考えられることであり、平板電極へ電子群、針電極へ正イオンが移動すると考えてよさそうである。

以上の検討から、Dark Period では次の過程が進行することが推定できる。すなわち、恐らく三次ストリーマ先端からの光による光電離によってであろうが、三次ストリーマと平板の間に電子と正イオンが生成され、電子群は平板電極へ、正イオン群は針電極へ $1\sim 3\times 10^6\text{cm/s}$ の速度で移動する。この間、電離波が三次ストリーマと平板間を伝搬する。したがって、電荷の配置は第 15 図のようになっていると推定される。

なお、正極性針-平板小ギャップでは、数百 μs 程度の間隔で Dark Period がくり返し発生する現象が見られたが、⁽¹³⁾ 負極性では見られなかった。

(2) Dark Period 中の電流と電荷密度の推定

この期間に針電極に現われる電流 i は、Dark Period 中に生成された正イオンと電子の全電荷をそれぞれ

第 15 図 “Dark Period” 中の空間電荷想定図

Fig. 15. Assumed distribution of the positive and negative charges in “Dark Period”

Q_p, Q_e , それらの針電極からの距離を x_2, x_3 , 移動速度を $V_p(x_2), V_e(x_3)$ とし、三次ストリーマが伸びた距離を x_1 , その針電極から x の正イオンの単位長さあたりの電荷密度を $\rho_{ip}(x)$, 移動速度を $v_p(x)$ とすると、

$$i_d = \frac{1}{V} \int_0^{x_1-v_p(x)} \rho_{ip}(x) e E(x) v_p(x) dx + \frac{1}{V} Q_p e E(x_2) v_p(x_2) + \frac{1}{V} V Q_e e E(x_3) v_e(x_3) \dots \dots \dots (3)$$

となる。ここで $V, E(x)$ はそれぞれ印加電圧および x 点の電界である。

いま、三次ストリーマまでにストリーマチャンネルがギャップ間に形成されることを唯一の根拠として、少々大胆に $E(x)=V/l$ と仮定すると (3) 式は

$$i_d = \rho_{ip} e v_p (x_1 - v_p l) / l + Q_p e v_p / l + Q_e e v_e / l \dots \dots \dots (4)$$

となる。

三次ストリーマが停止した直後、Dark Period 中の電荷の生成の前の電流は (4) 式より

$$i = \rho_{ip} e v_p x_1 / l \dots \dots \dots (5)$$

となる。この式に前節の結果 $i=30\text{mA}$, $V_p=2\times 10^6\text{cm/s}$, $x_1/l=0.7$ を代入すると

$$\rho_{ip}=1.3\times 10^{11}/\text{cm}$$

が得られる。この値は〈3・1〉節 (5) 項で計算した一次ストリーマの電荷密度よりも 2 けたほど大きい。このことは二次、三次ストリーマによってチャンネルの電離度が上がったために残留正イオン数が増加したことを示すものである。

〈3・3〉 絶縁破壊直前の現象 第 14 図から、印加電圧が 50% 破壊電圧に近い場合 ($k=0.95\sim 1.2$), 三

第 16 図 絶縁破壊直前の電流と光パルス
Fig. 16. Current and light pulses just before breakdown.

第 17 図 過電圧の場合の一次、二次、三次ストリーマと電離電圧波、ならびに火花チャネルの形成の過程を示す光パルス

Fig. 17. Light pulses showing the primary, the secondary, the tertiary streamer, potential ionizing wave and the formation of spark channel in the case of high overvoltage.

次ストリーマと平板間に発生した電子群が平板電極に到達すると強い光(同図ではスケールオーバーしている)が現われ火花チャネルに至ることがわかる。この火花チャネル形成直前の現象をさらに詳しく調べるためにトリガ時間を遅らせ掃引時間を速くして測定した。

第 16 図は針電極で測定した電流と PM の光パルスであり、1 回の電離波によって 150 ns のガス加熱時間を経て火花チャネル(a)が形成されている。電離波が発生すると同時に大きな電流パルスが現われ、その後徐々に電流が増加すること、すなわちチャネル中の電離度が高くなって火花チャネルが完成される様子がわかる。

以上は印加電圧が $k=0.95\sim 1.2$ の場合の絶縁破壊直前の過程であるが、電圧が $k>1.3$ になると Dark Period を経ないで火花チャネルに移行する。第 17 図はこのような場合の例である。(x=3.0 と 3.6 の位置に注意) 一次、二次、三次ストリーマが順次針電極から発生伸展し、三次ストリーマが $x=3\text{ cm}$ を過ぎると平板電極から電離波が発生し、ギャップを伝搬して火花チャネル(a)を完成させる。

以上のように、火花チャネルは電離波によってストリーマチャネル中が改めて電離され、ガス加熱作用(電子とイオンによる中性分子の電離)によって形成されるものである。

4. 終わりに

ギャップの長さ 7 cm までの針-平板ギャップに $0.4\times 1,800\mu\text{s}$ の衝撃電圧を針電極が負極性になるように印加した場合の絶縁破壊過程を 5 台の光電子増倍管による放電光と電圧、電流、さい断法による写真とを対応させて測定した結果を述べた。各過程の詳細、特に定量的解析は今後に残された研究課題である。

終わりに、終始ご支援いただいた、電力中央研究所の有働龍大電力第一部当任、大和玄一系統絶縁研究室長、実験にご協力いただいた系統絶縁研究室の岸嶋勇氏、三宅久仁彦氏、多田 隼氏、九州電力(株)坂口稔氏の諸氏に感謝いたします。また、終始有益など助言と激励の手紙を下されたカリフォルニア大学の L. B. Loeb 名誉教授に感謝いたします。

(昭和 48 年 2 月 1 日受付, 同 48 年 8 月 1 日再受付)

文 献

- (1) H. Norinder & Osalka: Arkiv. Fysik 5, 24, 493 (1951)
- (2) J. H. Sax & J. M. Meek: Proc. Instn Elect. Engrs 102, C, 221 (1955)
- (3) J. H. Park & H. N. Cones: J. Res. Nat. Bur. Stand. 56, 201 (1956)
- (4) I. S. Stekolnikov & A. V. Shkilev: Soviet Phys. Dokl. 8, 827 (1964)
- (5) M. A. Uman, et al.: J. Appl. Phys. 39, 5162 (1968)
- (6) 鈴木: 電中研技研総合報告 16 (昭 46)
- (7) 酒井・細川・三好: 電学誌 78, 1413 (昭 33)
- (8) 細川・近藤・三好: 電学誌 89, 1823 (昭 44-9)
- (9) 細川・近藤・三好: 電学誌 90, 1123 (昭 45-6)
- (10) 細川・悠崎・三好: 電学誌 89, 519 (昭 44-3)
- (11) 牛田・生田・八東: 電学誌 88, 137 (昭 43-1)
- (12) E. Nasser: J. Appl. Phys. 42, 3839 (1971)
- (13) T. Suzuki: J. Appl. Phys. 42, 3766 (1971)
- (14) H. Reather: "Electron Avalanches and Breakdown in Gases", Butterworth 14 (1964)
- (15) 電気学会: 放電ハンドブック 46 (昭 42)
- (16) L. B. Loeb: Science 148, No. 3676, 1417 (1965)
- (17) W. P. Winn: J. Appl. Phys. 38, 783 (1967)