

耐静電気電気雷管の機構（第3報）

木村道夫*, 井沢信之*, 佐久間信彰*

普通電気雷管に静電気が印加されると、点火薬部と管体の間の空間で火花放電が起きる。火花放電時の点火薬部抵抗 R' を測定し、 0.16Ω という小さな値を得た。普通電気雷管の火花放電時には、脚線の芯線や電橋からなる並列回路に R' はシリーズに連結しかつ R' と並列回路抵抗 R はほぼ同じ値である。この結果、印加された全静電気エネルギーの約50%が並列回路に分配され、電橋部には全体の約5%が作用することになる。従って、 $2,000\text{ pF}$ 、数 kV 以上（約 30 mJ 以上）の静電気が印加されると、電橋部に点火薬発火エネルギー 1.45 mJ 以上の静電気エネルギーが作用し、普通電気雷管が容易に点火する事が定量的に理解される。

1. 緒言

第1報¹⁾で放電型電気雷管（巻線部に電導性樹脂部分を有する耐静電気雷管を言う）に静電気が印加された場合の過程について述べた。すなわちまず点火薬部を包む空間と電導性樹脂部との空隙の充電が同時に始まるが、この樹脂部の第一の機能「優先放電機能」により、必ずこの空隙で優先的に絶縁破壊が起こることを示した。

第2報²⁾で放電型電気雷管（以後電気雷管を E/D と記す）の上記の絶縁破壊後の火花放電の過程について述べた。静電気はこの間 E/D の各抵抗部を移動し、そこで安全に熱となる。これが第二の「静電気エネルギー消費機能」であって、電橋部に分配されるエネルギーは全体の極一部であることを示した。つまり放電型 E/D は静電気に対し安全性が高い。

本報で普通 E/D の点火薬部の空間の火花放電過程について報告する。普通 E/D に例えば $2,000\text{ pF}$ 、 10 kV の静電気を印加すると、点火薬部の空間に火花放電が起こり点火する。この点火機構を明らかにすべく実験した。火花放電過程に放電型 E/D では電導性樹脂抵抗が重要であるが、普通 E/D では点火薬部の抵抗が重要であると予測し測定した。

2. 測定法

測定は間接的な方法に依った。

2.1 普通 E/D の点火薬部の発火エネルギー

高電圧パルス電橋通電による発火エネルギーを Fig. 2 の回路で測定した。これは水島氏等が点火玉着火感度測定に用いた回路³⁾、また筆者の第2報の回路とほ

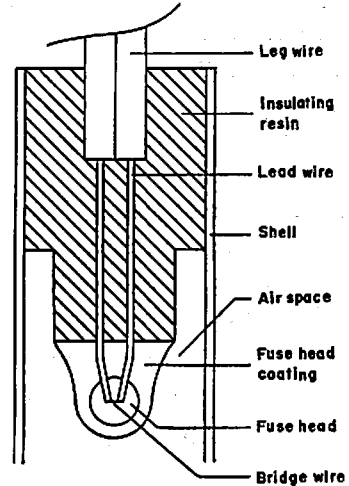


Fig. 1 A typical construction of ignition plug of conventional electric detonator

ぼ同一である。試料は Fig. 1 の普通 E/D の点火部で、芯線を Fig. 2 のターミナルに接続する。芯線は極力短く切りつめてあるので、ターミナル間は電橋抵抗 R_D と見てよい。

容量 C_A (この場合 $C_A=56,000\text{ pF}$) の充電電圧を点火玉が絶対発火しないと予想される低電圧より 200 V ずつ、発火するまで上昇させる。試料の R_D に加わった電圧 V 、電流 I の波形を2台のシンクロスコープで記録し、発火した場合の VI -時間積分値をグラフにより求めた。以後積分法で求めたエネルギーを発火エネルギーと称することにする。Fig. 2 中 $R_1=R_2=75\Omega$, $R_3=R_4=R_5=74.6\Omega$, $R_7=75\Omega$, $R_8=100\Omega$, $R_9=2.0\Omega$ である。同軸ケーブルの特性インピーダンス $Z_0=75\Omega$ との関係は、 $R_2=R_3=Z_0$, $R_3+R_4=Z_0$, $R=R_4+Z_0$

昭和54年7月5日 受理

*旭化成工業株式会社 化成樹脂部同技術開発所 雷管開発室
〒882 宮崎県宮崎市長浜町5003-1

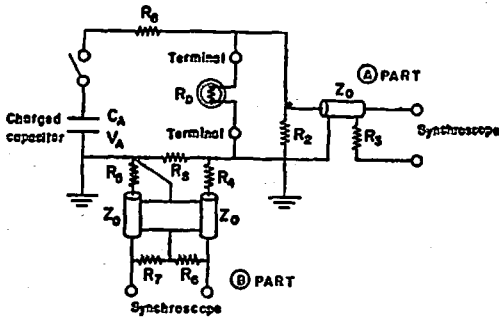


Fig. 2 Circuit for measuring ignition energy of fuse head in discharge through bridge wire resistance R_D

$R_7 \rightarrow Z_0$ である。シンクロスコープは岩崎通信機製 SS-6200 (DC~200MHz) である。

2.2 火花放電時における普通 E/D の点火エネルギー

Fig.3の回路で測定した。容量 C_A (この場合2000pF) のコンデンサーに蓄えた静電気を両芯線と管体間に低電圧より順次上昇、点火するまで印加を繰返し、最小点火電圧 V_A を求める。この時充電エネルギーは $\frac{1}{2} C_A V_A^2$ となる。Fig. 3 の R_a は放電回路の内部抵抗を代表させたものである。以後 $\frac{1}{2} CV^2$ 法で求めたエネルギーを点火エネルギーと称することにする。

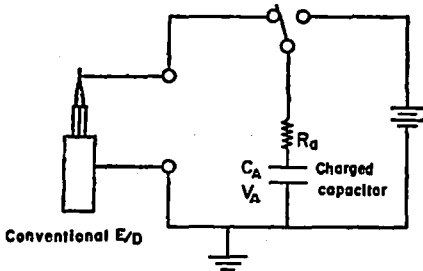


Fig. 3 Circuit for measuring firing voltage V_A of conventional electric detonator in lead wire-to-shell spark discharge

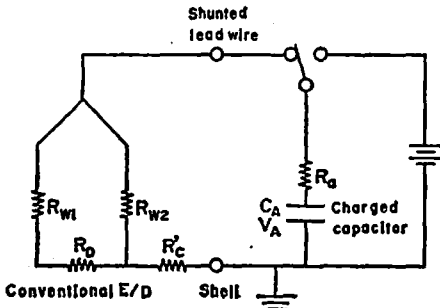


Fig. 4 Equivalent electrical circuit of Fig. 3 (during lead wire-to-shell spark discharge)

2.3 火花放電時における普通 E/D 点火部の抵抗の算出

Fig. 3 の測定回路を書きなおすと、Fig. 4 となる。 $R_{W1} = R_{W2}$ は夫々脚線芯線、 R_D は前出、 R'_C は火花放電時の点火薬部抵抗である。全抵抗 R_T は

$$R_T = R + R'_C + R_a \quad (1)$$

ここで R は $R_{W1} + R_D // R_{W2}$ の並列抵抗である。

コンデンサーの充電エネルギー $\frac{1}{2} C_A V_A^2$ の中、並列回路部に分配されるエネルギー E_R は

$$E_R = \frac{1}{2} C_A V_A^2 \frac{R}{R + R'_C + R_a} \quad (2)$$

このエネルギーの中、 R_D に分配されるエネルギー E_D は

$$E_D = E_R \frac{R_{W2}}{R_{W1} + R_D + R_{W2}} \cdot \frac{R_D}{R_{W1} + R_D} \quad (3)$$

上式中 R'_C 、 R_a 以外は 2.1, 2.2 項で知れているので R_a を別途測定すれば R'_C を算出し得る。

2.4 R_a の測定法

Fig. 5 の回路で R_a を求めた。容量 C_A (2000pF) のコンデンサーに蓄えられた静電気を印加して最小点火電圧 V_a を求める。この時充電エネルギーは $\frac{1}{2} C_A V_a^2$ となる。Fig. 5 を書き直すと Fig. 6 となる。火花放電を伴わないため、Fig. 6 は Fig. 4 から R'_C を除いたものにはほぼ等しい。

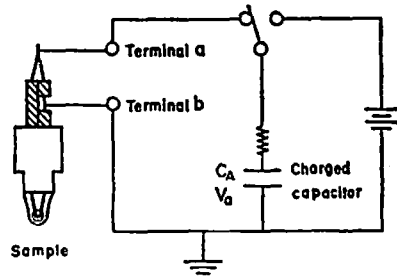


Fig. 5 Circuit for measuring voltage V_a of sample in discharge through bridge wire and lead wires

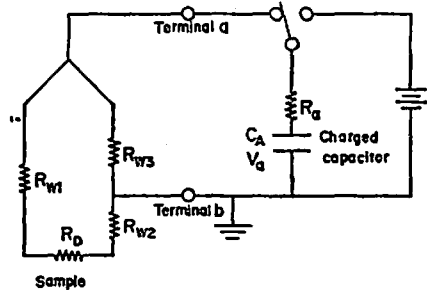


Fig. 6 Equivalent electrical circuit of Fig. 5 (during discharge through bridge wire and lead wires)

コンデンサの充電エネルギー $\frac{1}{2}C_A V_a^2$ の中、 R_D に分配されるエネルギー E_D は

$$E_D = \frac{1}{2} C_A V_a^2 \frac{r}{r+R_a} \frac{R_{W_2}}{R_{W_1}+R_D+R_{W_2}+R_{W_3}} \frac{R_D}{R_{W_1}+R_D+R_{W_3}} \quad (4)$$

ここで r は $R_{W_1}+R_D+R_{W_3} // R_{W_2}$ の並列抵抗である。上式中 R_a 以外は知れているので、 R_a を算出し得る。ここで $R_{W_1}=0.15\Omega$, $R_{W_3}=0.0025\Omega$, $R_{W_2}=0.1475\Omega$ である。

3. 実験結果

3.1 点火薬の発火エネルギー

Fig. 2の回路で測定した結果を Table 1 に示す。測定結果は10個の測定値の平均である。点火薬の発火エネルギーは1.45mJになる。なお点火薬の最小発火電圧は2.4~2.6KVであり、通電中の電橋抵抗 R_D (V/I) の平均値は0.87 Ω であった。

Table 1 Ignition energy of fuse head (n=10)

Time	μS						Remark
	0	2.5	5	10	15	20	
V (volt)	17.66	13.88	9.48	3.78	1.48	0.62	jVIdt =1.45mJ
I (Amp)	23.80	16.70	10.48	4.23	1.86	0.97	
VI (Watt)	420.3	231.7	99.3	15.9	2.7	0.6	
R_D (Ω)	0.74	0.83	0.91	0.89	0.80	0.64	A_V 0.87 Ω

3.2 普通 E/D の点火エネルギー

Fig. 3の回路で測定した普通 E/D の最小点火電圧 V_A を Table 2 に示す。10個の測定値の平均は5.75kVである。従って、普通 E/D の点火エネルギーは次のようになる。

$$\frac{1}{2} C_A V_A^2 = \frac{1}{2} (2000)(10)^{-12} \{ (5.75)(10)^3 \}^2 J = 33.1mJ$$

Table 2 Minimum firing voltage V_A

No. of test	KV										A_V KV
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
V_A (KV)	5.7	5.4	5.4	6.0	6.4	6.4	5.4	5.4	6.0	5.4	5.75

普通 E/D の火花放電開始電圧は、第1報で報告した如く平均5.2kVである。従って一般的に最小点火電圧は火花放電開始電圧より高く、火花放電開始電圧即最小点火電圧でないことを付記する。

3.3 R_a の測定

Fig. 5の回路で測定した試料の最小点火電圧 V_a を Table 3 に示す。10個の測定値の平均は4.14kVである。従って試料の点火エネルギー $\frac{1}{2}C_A V_a^2 = 17.1mJ$ が

得られる。

Table 3 Minimum firing voltage V_a

No. of test	KV										AV. KV
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
V_a (KV)	4.3	3.9	4.2	4.0	4.0	4.0	4.2	4.0	3.8	4.8	4.14

上記点火エネルギー ($\frac{1}{2}C_A V_a^2 = 17.1mJ$)、3.1項で求めた点火薬の発火エネルギー ($E_D = 1.45mJ$) 及び電橋抵抗 ($R_D = 0.87\Omega$) 更には R_W , R_{W_3} , R_{W_2} の夫々の値を式に代入して、 R_a の値

$$R_a = 0.03\Omega$$

を得る。

3.4 火花放電時における普通 E/D 点火薬部の抵抗 R'

3.1~3.3項で求めた次の値

$$\frac{1}{2} C_A V_A^2 = 33.1mJ, E_D = 1.45mJ$$

$R_{W_1} = R_{W_3} = 0.15\Omega$, $R_D = 0.87\Omega$, $R = 0.13\Omega$ を (2), (3)式に代入して、 $R'c$ の値

$$R'c = 0.16\Omega$$

を得る。

火花放電時の点火薬部抵抗 $R'c$ は値が0.16 Ω であり、電導性樹脂部の抵抗約50 Ω と比べて、極めて小さい。

4. 考察

4.1 火花放電による普通 E/D の点火

普通 E/D に静電気が印加されると、点火薬部と管体の間の空間で火花放電を生じ普通 E/D は点火する。点火の直接原因は二つあり、第一は火花放電に伴う電橋通電のケースであり、第二は点火薬と火花の接触によるケースである。第一の点火(電橋通電)は、吉富、児玉両氏による定量的検討⁴⁾があり、第二の点火(火花接触)は坂本氏の報告⁵⁾がある。Litchfield 等は第一の点火では約30mJ、第二の点火では約0.5mJの静電気エネルギー放電でE/Dが点火するとしている。

国内の市販普通 E/D の点火装置部構造は主として Fig. 1の通りである。電脚部は最も管体に接近しており、火花放電は電脚と管体の間で発生する。火花は点火薬被膜とは良く接触するが、点火薬とは非常に接触し難い位置で発生する。即ち、普通 E/D の静電気点火では第一の点火が支配的要因であり、第二の点火は極めて特殊な条件下で発生すると考えられる。

なお、国内の標準 E/D (白金電橋径28 μ , 脚線長1.2m) の3.2項で測定した点火エネルギー 33mJが、Litchfield 等の値(30mJ)に近いことは興味深い。

4.2 火花放電時における普通 E/D の電氣的等価回路

第1報で火花放電が必ず二本の電脚の中の何れか一

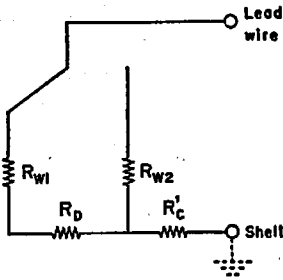


Fig. 7a Equivalent electrical circuit of conventional electric detonator for single lead wire impression during lead wire-to-shell spark discharge

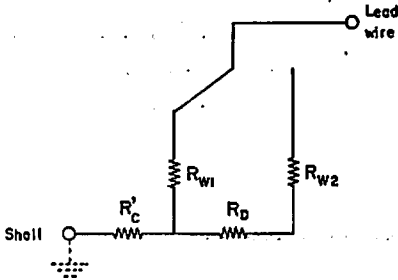


Fig. 7b Equivalent electrical circuit of conventional electric detonator for single lead wire impression during lead wire-to-shell spark discharge

方と管体との間に発生することを報告した。更に吉富兎玉両氏の報告⁴⁾から、火花放電時における普通 E/D の電気的等価回路は Fig. 4 のように考えられる。Fig. 4 の回路が正しいとすると、芯線の短絡を外して、一方の芯線管体間に静電気を印加した場合（片線印加の場合）の等価回路は、Fig. 7a 又は Fig. 7b のようになり、各々が 1/2 の確率で起きる管である。Fig. 7a では、静電気は $R_{w1} \rightarrow R_D \rightarrow R'_c \rightarrow$ 管体（アース）へ移動し、静電気は必ず電橋抵抗 (R_D) を通過する。他方、Fig. 7b では静電気は $R_{w1} \rightarrow R'_c \rightarrow$ 管体（アース）へ移動し、 R_D を通過しない。従って Fig. 7a では、静電気エネルギーがある限界以上になれば E/D は必ず点火するが、Fig. 7b では E/D 点火の可能性は全くない。吉富・兎玉両氏は、上記二種類の現象を確認しており、Fig. 4 の等価回路の正しさを裏づけている。

4.3 火花放電時における点火薬部抵抗 R' 。

第 1 報で、充電過程の点火薬部抵抗 R_c (50~280K Ω) は、電導性樹脂部抵抗 R_B (2~9K Ω) に比較し非常に大きいことを示した。しかしながら火花放電時では点火薬部抵抗 R'_c はわずか 0.16 Ω で、第 2 報で報告した電導性樹脂部抵抗 R'_B (約 50 Ω) に比較し極めて小さく、両者の相対的關係は逆転する。Fig. 4 の如く、

R_{w1} , R_{w2} 及び R_D からなる並列回路に対し、 R'_c はシリーズに連結しており、並列回路抵抗 R (脚線長 1.2m の時 0.13 Ω) と R'_c はほぼ同等の大きさである。2000pF, 10kV (100mJ) の静電気を普通 E/D に印加した場合に、各抵抗部に分配される静電気エネルギーの大きさ及び割合の計算結果を Table 4 に示す。各抵抗部に分配される静電気エネルギーを以下の記号で表わす。

- E_T 全静電気エネルギー
- E_C 抵抗 R'_c に分配される静電気エネルギー
- E_{W_1} // R_{W_1} //
- E_{W_2} // R_{W_2} //
- E_D // R_D //
- E_a // R_a //

Table 4 Distribution of electrostatic energy to various resistive parts of conventional electric detonator

	Distributed energy (mJ)	% of distributed energy
E_C	51.6	51.6
E_{W_2}	36.5	36.5
E_{W_1}	0.8	0.8
E_D	4.6	4.6
E_a	6.5	6.5
E_T	100.0	100.0

Table 4 の如く、 E_C は 51.6mJ (51.6%)、 E_D は 4.6mJ (4.6%) である。即ち点火薬部の点火薬被膜等で消費される静電気エネルギー E_C は全体の 50% 強であり、残り 50% 近くの静電気エネルギーが R_{w1} , R_{w2} , R_D から成る並列回路に分配され、電橋抵抗 R_D には全体の約 5% のエネルギーが分配される。従って 2000pF 数 kV 以上 (約 30mJ 以上) の静電気的作用で普通 E/D が点火するのは当然である。

第 2 報で放電型 E/D は普通 E/D と同様に、電導性樹脂部抵抗 R_{B1} , R_{B2} は R_{w1} , R_{w2} , R_D から成る並列回路にシリーズに連結していることを示した。しかし放電型 E/D では、 R_{w1} , R_{w2} , R_D から成る回路抵抗に対し、 R_{B1}' , R_{B2}' が各々約 100 Ω の桁違いに大きな値を有するため、ブリッジ回路効果と相まって、静電気エネルギーの大部分 (99.8% 以上) が R_{B1}' , R_{B2}' に分配され、安全に熱エネルギーとして消費される。この結果、 R_D には全体の極めて一部分 (0.001% 以下) の静電気エネルギーしか分配されない。

要するに、普通 E/D が静電気により点火しやすい

のは、火花放電時の点火薬部抵抗 $R'c$ が著しく小さい為であり、 $R'c$ が著しく小さい理由は、点火薬被膜の構造強度が弱く、火花放電に伴う熱的あるいは電気的破壊作用により点火薬被膜が容易に破壊されるためと考えられる。従って点火薬被膜の厚さを増したり、構造強度の高い被膜材料を用いることは、 $R'c$ を増大せしめるものであり、 E/D 普通の耐静電気性改善策として理にかなっている。

5. 結論

- (1) 火花放電時における普通 E/D の点火薬部抵抗を、間接的方法で測定した。その結果、充電過程と異なり、火花放電時の点火薬部抵抗は僅か 0.16Ω であることが明らかとなった。
- (2) このため、普通 E/D の火花放電時には、印加された全静電気エネルギーの約50%が点火薬部の点火薬被膜等で消費されるにとどまり、電橋部には全エネルギーの約5%が作用する。
- (3) 従って、 2000pF 、数 kV 以上 (約 30mJ 以上) の

静電気が普通 E/D に印加されると、点火薬の発火エネルギー 1.45mJ を上回る静電気エネルギーが電橋部に作用し、普通 E/D は容易に点火する。

文 献

- 1) 木村道夫, 井沢信之, 佐久間信彰, 工火誌, 40, 43 (1979)
- 2) 木村道夫, 井沢信之, 佐久間信彰, 工火誌, 40, 356 (1979)
- 3) 中野義信, 田中幸雄, 水島容二郎, 工火誌, 26, 265 (1965)
- 4) 吉富宏彦, 児玉多朗, 工業火薬協会昭和48年度年会講演要旨集, 18 (1973)
- 5) 坂本勝一, 工火誌, 36, 95 (1975)
- 6) E. L. Litchfield, M. H. Hay, J. S. Monroe, BuMinés Rept. of Inv. 7139, 1968
- 7) 水島容二郎, 中野義信, 田中幸雄, 工火誌, 29, 159 (1968)

Mechanism of spark discharge type static-resistant electric detonators (III)

by Michio KIMURA*, Nobuyuki IZAWA* and Nobuaki SAKUMA*

There is an air space between a fuse-head coating and a shell in conventional electric detonators. When static electricity greater than 2000pF and 6KV is impressed between the shorted lead wires and the shell, spark discharge occurs from the fuse-head coating through the air space to the shell and the fuse-head catches fire easily.

This third report describes why the fuse-head catches fire easily when such spark discharge occurs. We measured the resistance $R'c$ through the fuse-head coating part during spark discharge to be a very small value of 0.16 ohm . The fuse-head coating part is connected in series with the parallel circuit containing the lead wires and the bridge wire. The resistance of parallel circuit is nearly equal to $R'c$. Therefore about half of energy of impressed static electricity is applied to the parallel circuit and the energy of static electricity greater than the ignition energy of the fuse-head is easily applied to the bridge wire.

(*Research Division of Detonator Plant, Asahi Chemical Industry Co., Ltd. 4-5003 Nagahama-cho, Nobeoka, Miyazaki Pref., Japan)