電気雷管及びコンデンサー式発破器の設計及び電気発破に就いての研究

(第三報)

(昭和 30 年 1 月 12 日 受理)

木下四郎

(日本化薬株式会社折尾作業所火工品研究課)

第Ⅷ章　コンデンサー式発破器の設計

第Ⅲ章に於いて推計学的考察を基礎として電気雷管の斉発個数が増加するとともに発火電流も次第に上昇することを述べた。従つて発破器を設計する場合も目的とする斉発個数により如何程の容量のものとすべきかは推計学的考察を基礎として行うべきである。又如何なる型式の電気雷管を発破させるかも設計の基礎に入るべきことは当然である。

G. Allsop 氏と E. M. Guenault[9)10)] 氏はその論文に於いて電気雷管の発火特性に就いて論じた後，発破器の設計に就いて述べコンデンサー型式の発破器は多数斉発用の発破器としては最良のものであると述べている。その論旨の概要はダイナモ式の大型発破器は重量大となり容積もかさむ欠点の外に操作者の個人誤差が入り出力がその都度変わる欠点がある。電池のみを直接使用する型式のものでは電池の電圧は常に電気火花を発生する機会を与えるので安全度の面から宜敷くない。コンデンサー式のものは内部抵抗の殆どない直流電源を用いられるという利点と発破が完了した時にはガス爆発の原因となるような電気火花を生ずるエネルギーが残らないように設計出来るという利点があると述べている。

コンデンサー型式の発破器の出力はその電圧とコンデンサーの容量とによつて定まるが同一の出力のものを作るにはこの電圧とコンデンサーの容量は適当に定めることが出来る。然しながらメタンガスに対する安全度を考慮に入れる時は電圧とコンデンサーの容量は定まつてくることになる。前記 G. Allsop 氏の論文にもこの点に関しては述べていないので筆者はこれらの点に就いて検討した。

8.1) 電気雷管の特性とコンデンサー式発破器の容量に就いて

発破器のコンデンサーの容量を C ファラッド，エネルギー消費回路の抵抗を R オーム，時間 0 に於ける端子電圧を V_0 ボルトとすると時間 t に於ける端子電圧 V は過渡現象論によれば次式にて表わされる。

$$V=V_0e^{-\frac{t}{RC}} \quad \cdots\cdots(8.1)$$

又

$$V_0=I_0R \quad \cdots\cdots(8.2)$$

$$V=IR \quad \cdots\cdots(8.3)$$

ここに I は時間 t に於ける電流である。従つて

$$I=I_0e^{-\frac{t}{RC}} \quad \cdots\cdots(8.4)$$

となる。

今 t 時間後に於ける放出総エネルギーを求めるために (8.4) 式を t について積分する。

$$\int_0^t I^2Rdt=I_0^2R\int_0^t e^{-\frac{2t}{RC}}\,dt$$

$$=-I_0^2R\frac{CR}{2}\left|e^{-\frac{2t}{RC}}\right|_0^t$$

$$=-I_0^2R^2\frac{C}{2}\left(e^{-\frac{2t}{RC}}-1\right)$$

(8.2) 式を代入して

$$=\frac{CV_0^2}{2}\left(1-e^{-\frac{2t}{RC}}\right) \quad \cdots\cdots(8.5)$$

を得る。

この式は Allsop 氏の述べている式と似て居るが筆者のものがエネルギー消費回路に於ける総消費エネルギーを問題としている点で異つている。又 (8.5) 式を展開して

$$E=\frac{CV_0^2}{2}\left(1-e^{-\frac{2t}{RC}}\right)$$

$$=\frac{CV_0^2}{2}\left(1-1+\frac{2t}{RC}\cdots\cdots\right)$$

$$\fallingdotseq\frac{V_0^2t}{R} \quad \cdots\cdots(8.6)$$

であるからエネルギーはコンデンサーの容量 C によらず電圧 V_0 の自乗できいてくるからマイクロフアラッドは高くしなくてもよいが電圧を上げるべきだと結論づけることは尚早である。

なんとなれば以下述べる計算例で分る通りここでかかる略算を行い結論を出さなくても電気火花発生によるガス爆発の機会をなくすためにはこの結論が導き出されるからである。

次に使用する電気雷管の特性を考慮に入れた場合の斉発個数 n と発火電流 i の関係は第Ⅲ章で述べた (3.16) 式即ち

$$i^2=3.091(\log n)^{0.7}\xi+\eta \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3.16)$$

である。ここに

$$\xi=\beta/r\tau=A\alpha/r\tau$$

$$\eta=B/r$$

従つて (3.16) 式は

$$i^2r=3.091(\log n)^{0.7}\frac{A\alpha}{\tau}+B \quad \cdots\cdots(3.16)'$$

ここに i は n 個の電気雷管を斉発せしむるに必要な最低点火電流であり r は電気雷管1個の電橋抵抗 A は電橋に保持されるエネルギー，τ は点爆時間，B は熱損失を表わすことは既述の通りである。この時の i に相当する時間 t を上式の両辺に乗ずれば直列につないだ n 個の電気雷管の1個1個の電気雷管を発火させるに要するエネルギーが求められる。この i と t の関係は既述の第1.5図より求められる。故に n 個の電気雷管を発火せしむるに要する総エネルギーは次式となる。

$$ni^2rt=\left\{3.019(\log n)^{0.7}\frac{A\alpha}{\tau}+B\right\}nt\cdots\cdots(8.7)$$

即ち (8.7) 式のエネルギーが発破器から供給されればよいことになる。然し乍ら発破器から供給されるエネルギーは全部電気雷管の電橋部のみに供給されるわけではない。即ち発破母線及び脚線にも供給されることになる。故に消費回路の抵抗 R を母線及び脚線の抵抗の総和 R_w と電橋の抵抗の総和 R_b に分けて考える。即ち

$$R=R_w+R_b \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(8.8)$$

故に母線及び脚線に消費されるエネルギー E_w 及び電橋に消費されるエネルギー E_b は (8.8) 式よりそれぞれ次の如くなる。

$$E_w=\frac{CV_0^2}{2}\left(1-e^{-\frac{2t}{RC}}\right)\times\frac{R_w}{R}\cdots\cdots(8.8)'$$

$$E_b=\frac{CV_0^2}{2}\left(1-e^{-\frac{2t}{RC}}\right)\times\frac{R_b}{R}\quad\cdots(8.8)''$$

故に n 個の電気雷管を斉発せしむるに要するコンデンサー式発破器の設計基礎を与える式は次の如くなる。

$$\left\{3.091(\log n)^{0.7}\frac{A\alpha}{\tau}+B\right\}nt+\frac{CV_0^2}{2}\left(1-e^{-\frac{2t}{RC}}\right)\frac{R_w}{R}=\frac{CV_0^2}{2}\left(1-e^{-\frac{2t}{RC}}\right)\cdots(8.9)$$

この式には電気雷管の特性を示す A, B, α, τ が入つて居り斉発個数 n により点火電流値従つて点火時間 t が推計学的に変化する関係が入つている。

8.2) 計算例

電気雷管は先に述べた試料 No.1 のもの即ち $A=0.0029$ ジュール，$\alpha=0.075$，$\tau=0.0016$秒，$B=0.09$ ジュール/秒のもので脚線長 1.5 米のものを使用するとする。

今公称能力 50 発掛のものを設計する場合に就いて考える。安全率をみて公称能力の2倍即ち $n=100$ 個のものの計算を行う。

$n=100$ に対する点火電流は第3.4図より 0.82 アンペアである。然らば第1.5図より $t=0.0045$ 秒を得る。

故に以上の数値を用いて (8.9) 式を計算すると左辺第1項は

$$\left\{3.091(\log n)^{0.7}\frac{A\alpha}{\tau}+B\right\}nt=0.3475 \text{ ジュール}$$

となる。

次に左辺第2項及び右辺を計算するに R は (8.8) 式の通りであるがこのうち R_b は電橋の抵抗のみの総和である。さて電橋に電流が流れれば温度上昇によりその値は上昇すべきものであるから計算する場合にはこの温度上昇後の抵抗値をとつた方が実際的であろう。試料 No.1 の電気雷管に就いてこの値を計算してみる。

さて点火玉が発火する際の温度は第Ⅳ章第1節で述べた如く $T=368°C$ である。又実測値[2)]によれば抵抗の変化の温度係数は $\alpha=0.0001424$ であるから $T°C$ に於ける値を計算すると $1.2(1+\alpha T)=1.26\Omega$ となる。従つて 1.5 米脚線（抵抗 0.3 Ω）母線の抵抗 4Ω とすると (8.8) 式は

$$R=R_w+R_b$$
$$=(0.3\times100+4)+1.26\times100$$
$$=160\Omega$$

となる。

(8.5) 式より明らかな如く電圧 V_0 と容量 C はともに変数であるから同時に定めることは出来ない。そこで或る容量の発破器を使用したとき電圧は如何程とすべきかを求めることにする。

8.2.i) 200μF のコンデンサーを使用する場合

(8.9) 式の第2項第3項を計算する。

$C=200\times10^{-6}F$, $R=610\Omega$, $t=0.0045$秒, $R_w=34\Omega$

を代入して計算すれば

$$\frac{CV_0^2}{2}\left(1-e^{-\frac{2t}{RC}}\right)\frac{R_w}{R}=V_0^2\times0.2452\times10^{-4}$$

$$\times\frac{34}{160}=V_0^2\times0.0523\times10^{-4}$$

$$\frac{CV_0^2}{2}\left(1-e^{-\frac{2t}{RC}}\right)=V_0^2\times0.2452\times10^{-4}$$

となるから (8.9) 式は

$$0.3475+V_0^2\times0.0523\times10^{-4}=V_0^2\times0.2452\times10^{-4}$$

$$\therefore\ V_0=134\quad \text{ボルト}$$

を得る。

即ちコンデンサーの容量 $200\mu F$ なら電圧は 134 ボルトでよいことになる。

8.2.ii) $20\mu F$ のコンデンサーを使用する場合この場合も i) と同じ要領で計算を行えば (8.9) 式は

$$0.3475+V_0^2\times0.1997\times10^{-5}=V_0^2\times0.9399\times10^{-5}$$

$$\therefore\ V_0=216\quad \text{ボルト}$$

となる。

以上 i) ii) の計算例で明らかな如く 100 個の電気雷管を斉発させるためにはコンデンサーは $200\mu F$, 134 ボルトでもよいし $20\mu F$, 216 ボルトでもよいことになる。然し乍らメタン瓦斯に対する安全度の面から考察する時は両者の優劣が出てくることになる。

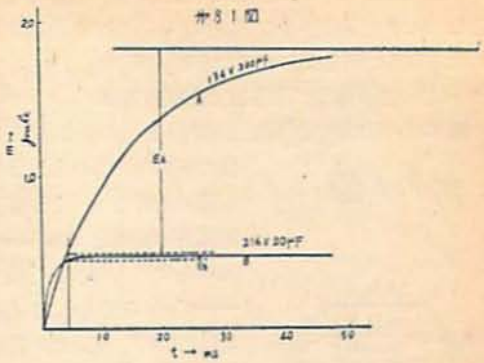
8.3) ガス爆発に対する安全度に就いて

上記計算例にて得られた2種のコンデンサー式発破器に就いてガス爆発の原因となる電気火花の発生の難易について考察を行つてみる。

それは (8.9) 式右辺の $\frac{CV_0^2}{2}\left(1-e^{-\frac{2t}{RC}}\right)=E$ に就いて t を変数とした場合の E の変化について検討すればよいことになる。その各時間に於ける値は第 8.1 表である。この値よりグラフをかくと第 8.1 図を

第 8.1 表

発破器の型式 / 時間 ms	$V=134$ V, $C=200$ μF, $R=160$ Ω の場合の E の値 Joule	$V=216$ V, $C=20$ μF, $R=160$ Ω の場合の E の値 Joule
0	0	0
2	0.236	0.353
4	0.441	0.439
8	0.777	0.465
20	1.360	0.467
40	1.690	0.467



第 8.1 図

得る。第 9.1 図 A 曲線は $200\mu F$, 134 ボルトの場合の放出エネルギーを与え B 曲線は $20\mu F$, 216 ボルトの場合の放出エネルギーを与えている。

さて今この両型式の発破器を使用して 100 個の電気雷管を斉発させた場合は前記の通り 4.5ms 後に発火が完了するから $200\mu F$, 134 ボルトの発破器のコンデンサーには E_A, $20\mu F$, 216 ボルトの発破器のコンデンサーには E_B なるエネルギーが残存することになる。

即ち $200\mu F$, 134 ボルトの発破器では発破完了後でも相当大なるエネルギーが残存していることになるので時限スイッチを用いて短絡しこの余分のエネルギーを消費せしめる装置を施さないと危険である。然し $20\mu F$, 216 ボルトの発破器では発破完了後の残存エネルギーは極めて小であるから安全度の面からは前者にまさつているわけである。従つて危険炭坑用のコンデンサー式発破器を設計する場合は容量を小にして電圧を高くしたものとすべきであろう。尤もこの最高電圧には自ら制限がある。

第XI章　各種結線法による電気発破の一般解

電気雷管を結線する場合は直列結線法が広く用いられているが多数の電気雷管を同時発火させるときは往々にして直並列結線とすることがある。又 Du Pont の Blasters' Handbook[11] によれば大切な発破の際は電源の如何に拘わらず直並列結線とすることを推奨している。

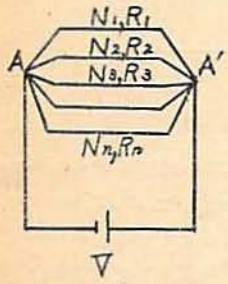
筆者は直並列結線による発破は如何なる過程を経て行われるかを直流電源の場合及びコンデンサー式発破器の場合について検討した。以下述べる直並列回路は各直列回路の電気雷管個数は N_1, N_2……N_n であり並列個数は 1, 2,……n の場合の一般解であるから $N_1=N_2=\cdots\cdots=N_n=1$ の場合は完全なる並列結線と

なり並列個数 $n=1$ の場合は完全なる直列結線の場合となるわけであるから以下述べる一般解は各種結線法による発破の解となるわけである。

(9.1)　直流電源による直並列結線発破

第 9.1 図に示す如き直並列回路を考える。即ち母線の抵抗を R_w とし並列回路の個数を n とし各直列回路の抵抗を R_1, R_2…R_n とする。今 $R_1<R_2<$……$<R_n$ とする。又 R_1 回路には N_1 個の電気雷管（1個の電気雷管の電橋抵抗は r とする），R_2 には N_2 個……R_n には N_n 個の電気雷管が結線されているとする。従つて $N_1<N_2<$……$<N_n$ である。

第9.1図



然るときはこの直並列回路の発破では抵抗の一番小さい R_1 回路に最大の電流が流れることになるからその回路の電気雷管は発火し R_1 の回路は断たれ次に R_2 その次に R_3……と発火が階段的に起り最後に R_n の回路が発火して発破は完了することになる。この過程を纏めると第9.1表を得る。

次に使用する電気雷管の発火エネルギーは $E=A+Bt$ で表わされることは既述の通りであるから N_1 個を発火させるにはこの N_1 倍のエネルギーが必要になる。又 N_2 個については N_2 倍……N_n 個については N_n 倍のエネルギーを必要とするわけである。この関係と前述の第9.1表との関係を図示すれば第 9.2 図を得る。

さてこの図にて $I_1^2N_1rt$ 直線と $N_1\times E$ 直線の交点は N_1 個が発火する時間を示すわけであるが無條件にこの関係は成立するものでない。即ち N_1 の回路が発火する條件は第9.2図より得られた t_1 の値が第Ⅲ章に述べた推計学的考察を基礎にして求めた斉発個数 N_1 に対する限界点火電流値 t に相当する点火時間の値に等しいか又はそれより小なることが必要である。N_2……N_n についても同様な條件を満さねばならない。

即ち以上の條件を全回路について満足した場合のみ完爆されるわけである。

一般に発破電源として電池又は発電機型発破器を使用する場合はこれら電源には相当大なる内部抵抗を持

第　9.1　表

	合成抵抗	各回路の電流及び各直列回路の電橋部に供給されるエネルギーの総和/秒					
		母線回路	N_1 回路	N_2 回路	N_3 回路	……	N_n 回路
全回路 発火前	$[R]=R_w+R$ $=R_w+\dfrac{1}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}+\cdots+\frac{1}{R_n}}$	$I=\dfrac{V}{[R]}$	$I_1=I\dfrac{R}{R_1}$ $E_1=I_1^2N_1r$	$I_2=I\dfrac{R}{R_2}$ $E_2=I_2^2N_2r$	$I_3=I\dfrac{R}{R_3}$ $E_3=I_3^2N_3r$	…… ……	$I_n=I\dfrac{R}{R_n}$ $E_n=I_n^2N_nr$
N_1 回路 発火後	$[R^{1)}]=R_w+R^{1)}$ $=R_w+\dfrac{1}{\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}+\cdots+\frac{1}{R_n}}$	$I^{1)}=\dfrac{V}{[R^{1)}]}$		$I_2^{1)}=I^{1)}\dfrac{R^{1)}}{R_2}$ $E_2^{1)}=I_2^{1)2}N_2r$	$I_3^{1)}=I^{1)}\dfrac{R^{1)}}{R_3}$ $E_3^{1)}=I_3^{1)2}N_3r$	…… ……	$I_n^{1)}=I^{1)}\dfrac{R^{1)}}{R_n}$ $E_n^{1)}=I_n^{1)2}N_nr$
N_2 回路 発火後	$[R^{2)}]=R_w+R^{2)}$ $=R_w+\dfrac{1}{\frac{1}{R_3}+\cdots+\frac{1}{R_n}}$	$I^{2)}=\dfrac{V}{[R^{2)}]}$			$I_3^{2)}=I^{2)}\dfrac{R^{2)}}{R_3}$ $E_3^{2)}=I_3^{2)2}N_3r$	…… ……	$I_n^{2)}=I^{2)}\dfrac{R^{2)}}{R_n}$ $E_n^{2)}=I_n^{2)2}N_nr$
……	……	……				…… ……	…… ……
N_{n-1} 回路 発火後 (*)	$[R^{n-1)}]=R_w+R^{n-1)}$ $=R_w+R_n$	$I^{n-1)}$ $=\dfrac{V}{R^{n-1)}}$					$I_n^{n-1)}=I^{n-1)}$ $R^{n-1)}/R_n$ $=I^{n-1)}$ $E_n^{n-1)}=I_n^{n-1)2}\cdot$ $N_n\cdot r$

註（*）即ち N_n 回路発火前

第 9.2 表

	合成抵抗	各回路の電流及び (Amp) 各直列回路の電橋部に供給されるエネルギの総和/秒 (Joule/s)				
		母線回路	8 個回路	16 個回路	24 個回路	32 個回路
全回路 発火前	$[R]=3+3.84^{a)}$ $=6.84$	$I=\frac{100}{6.84}$ $=14.60$	$I_1=14.60\times\frac{3.84}{8}$ $=7.01$ $E_1=7.01^2\times8\times0.7$ $=275$	$I_2=14.60\times\frac{3.84}{16}$ $=3.50$ $E_2=3.50^2\times16\times0.7$ $=137$	$I_3=14.60\times\frac{3.84}{24}$ $=2.33$ $E_3=2.33^2\times24\times0.7$ $=91$	$I_4=14.60\times\frac{3.84}{32}$ $=1.75$ $E_4=1.75^2\times32\times0.7$ $=68$
8個回路 発火後	$[R^{1)}]=3+7.39^{b)}$ $=10.39$	$I^{1)}=\frac{100}{10.39}$ $=9.60$		$I_2^{1)}=9.60\times\frac{7.39}{16}$ $=4.41$ $E_2^{1)}=4.41^2\times16\times0.7$ $=217$	$I_3^{1)}=9.60\times\frac{7.39}{24}$ $=2.94$ $E_3^{1)}=2.94^2\times24\times0.7$ $=144$	$I_4^{1)}=9.60\times\frac{7.39}{32}$ $=2.20$ $E_4^{1)}=2.20^2\times32\times0.7$ $=108$
16個回路 発火後	$[R^{2)}]=3+13.7^{c)}$ $=16.7$	$I^{2)}=\frac{100}{16.6}$ $=5.98$			$I_3^{2)}=5.98\times\frac{13.7}{24}$ $=3.40$ $E_3^{2)}=3.40^2\times24\times0.7$ $=194$	$I_4^{2)}=5.98\times\frac{13.7}{32}$ $=2.57$ $E_4^{2)}=2.57^2\times32\times0.7$ $=148$
24個回路 (*) 発火後	$[R^{3)}]=3+32^{d)}$ $=35$	$I^{3)}=\frac{100}{35}$ $=2.85$				$I_4^{3)}=2.85\times\frac{32}{32}$ $=2.85$ $E_4^{3)}=2.85^2\times32\times0.7$ $=182$

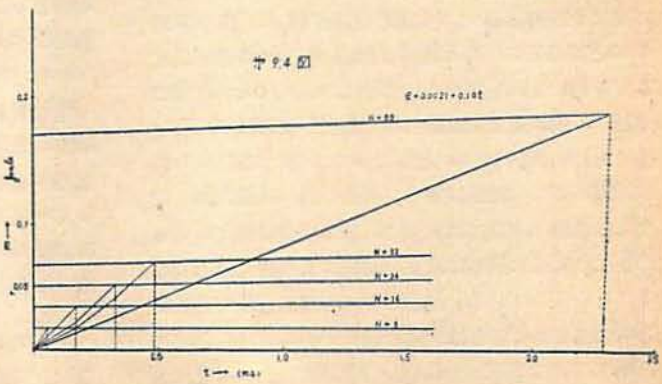
*) 即ち 32 個回路発火前 a) $\frac{1}{\frac{1}{8}+\frac{1}{16}+\frac{1}{24}+\frac{1}{32}}=3.84$　b) $\frac{1}{\frac{1}{16}+\frac{1}{24}+\frac{1}{32}}=7.39$　c) $\frac{1}{\frac{1}{24}+\frac{1}{32}}=13.7$

d) $\frac{1}{\frac{1}{32}}=32$

全数直列の場合

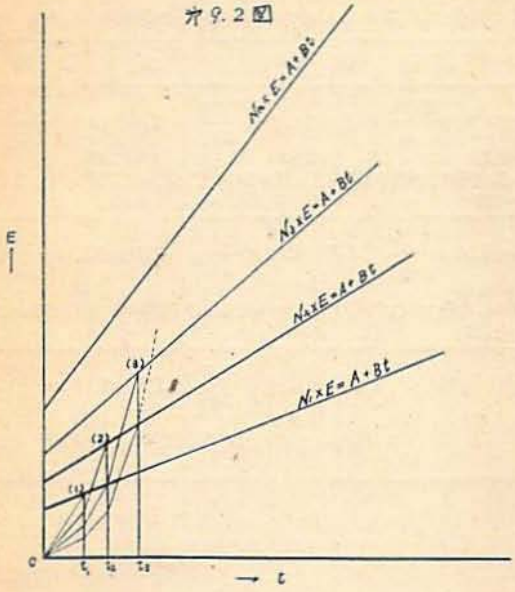
	抵抗	電流	電橋部に供給せらるるエネルギーの総和/秒
80個直列	$R=3+80$ $=83$	$I=\frac{100}{83}$ $=1.20$	$E=1.20^2\times80\times0.7$ $=80.6$

つているので（例えば桜印10発掛発破器は内部抵抗 12Ω，記銘電圧 35V）母線に流れ得べき電流には最大値 (I_m) が存在するわけである。即ち桜印10発掛においてはこの値は 2.91Amp となる。今直並列結線（或は単に並列結線）とすれば母線に流れる電流は第 9.1 表に示す割合にて各回路に分かれて流れるわけである。従つてもしもこの分流電流が発火電流値に達していない場合は不発となる。一般に発電機型の発破器は直列結線を建



前として作られているのでこの I_m の値は余り大でない。従つて並列結線には不適当である。

第9.2図

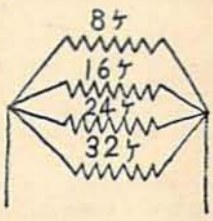


1) $= E_1 t_1$

2) $= E_2 t_1 + E_2^{1)}(t_2 - t_1)$

3) $= E_3 t_1 + E_3^{1)}(t_2 - t_1) + E_3^{2)}(t_3 - t_2)$

又発破器にはメタン瓦斯及び炭塵爆発に対する保安上の考慮より時限スイッチがある。直並列結線（又は単に並列結線）としたために全電気雷管の発火時間即ち t_n 以内にこのスイッチが切れてしまえば（この時間を t_m とする）t_m 以上の発火時間を要する回路はすべて残留となるわけである。



第9.3図

9.2）計算例

次に計算例として点火部の構造が第1.1表の試料No.2と同じもの（即ち電橋の抵抗 0.7Ω を標準とする）を用いこれを第9.3図の如く 8, 16, 24, 32 個の合計 80 個の直並列結線とし電源として直流 100V を用い母線の抵抗を 3Ω としたものについて第9.1表の計算を行つた結果は第9.2表及び第9.4図の如くなつた。尚第9.4図には直列 80 個の場合の発火時間も示した。即ち大発破は直並列結線により行えば有利なることを示している。勿論この場合電源として発破器は不適当であることは前述の通りである。なんとなれば第9.2表にある全回路発火前母線に流れる電流値 14.60Amp が流通することは内部抵抗大なる発破器では不可能であるからである。Du Pont Blasters' Handbook[11] によれば 480volts A. C. を用いて 12,040 個の電気雷管による大発破に成功している。

9.3）コンデンサー式発破器による直並列結線発破

前節で述べたと同じ場合についてコンデンサーの容量 C マイクロファラッド，電圧 V ボルトのコンデンサー式発破器を使用した場合について発破が完了する迄の過程を纏めると第9.3表を得る。この表で特に意味のあることは全放出エネルギーを基礎として各回路の電橋部に供給される総エネルギーを出した点である。一般に直並列結線とすれば全放出エネルギー曲線は直列の場合より立つてくるので直並列結線発破は有利であろうという推測を下している報告もあるがこの様に単純に論ずるのは誤りでこれが各回路の電橋部に如何に配分されて供給されこれが電気雷管を発火させるに必要なエネルギーになつているかどうかを論ぜねば問題を解決することは出来ないわけである。

電気雷管の発火エネルギーは $E=A+Bt$ で表わされることは既述の通りであるから N_1 個を発火させるにはこの N_1 倍のエネルギーが必要になる。又 N_2 個については N_2 倍……N_n 個については N_n 個のエネルギーを必要とするわけで図上にてこれらの直線と第9.3表より得られた各回路の電橋部に供給される総エネルギーを表わす曲線との交点は発火時間を示すものである。これらの関係は 9.1）節に述べたと全く同じである。従つて推計学的考察に基づく発火條件も前節と同様である。

さて Du Pont Blasters' Handbook には 50 個以上の発破では電源の如何に拘わらず直並列結線を推奨しているが果してこれが真実であるかどうか，又我国某鉱山に於ける坑道掘進において或るコンデンサー式発破器を使用して約 50 個の発破を行う場合直列結線よりも25個直列を2並列とした直並列結果の方が残留率が著しく少なかつたという実績があるがこれは何と説明すべきかを以下計算例について検討した。

9.4）計算例

電気雷管は既述の試料 No.1 即ち $E=0.0029+0.09t$ 電橋抵抗 1.2Ω，脚線抵抗 0.3Ω のものを 100 個宛各種結線法にて発火させる。母線の抵抗は 4Ω にしてコンデンサー式発破器は 200μF, 134V のものと 20μF, 216V の2種を使用する。このものについて第9.3表の計算を行う。但し

$$\left.\begin{array}{l} N_1=N_2=N_3=\cdots\cdots\cdots=N_n \\ \text{又}\ N_1+N_2+\cdots\cdots+N_n=100 \end{array}\right\}$$ の場合の計算である。

この計算の結果は第9.4表である。

第 9.3 表

	合成抵抗	全放出エネルギー	母線に消費されるエネルギー	並列回路部に消費されるエネルギー	各回路の電橋部に供給される総エネルギー			
					N_1 回路	N_2 回路	……	N_n 回路
全回路発火前	$[R]=R_w+R=R_w+\dfrac{1}{\dfrac{1}{R_1}+\dfrac{1}{R_2}+\cdots+\dfrac{1}{R_n}}$	$E_0=\dfrac{CV^2}{2}\left(1-e^{-\frac{2t}{[R]C}}\right)$	$E_0\dfrac{R_w}{[R]}$	$E_0\dfrac{R}{[R]}$	$E_1=E_0\dfrac{R}{[R]}\times\dfrac{R}{R_1}\times\dfrac{N_1r}{R_1}$	$E_2=E_0\dfrac{R}{[R]}\times\dfrac{R}{R_2}\times\dfrac{N_2r}{R_2}$	……	$E_n=E_0\dfrac{R}{[R]}\times\dfrac{R}{R_n}\times\dfrac{N_nr}{R_n}$
N_1 回路発火後	$[R^{1)}]=R_w+R^{1)}=R_w+\dfrac{1}{\dfrac{1}{R_2}+\cdots+\dfrac{1}{R_n}}$	$E_0^{1)}=\dfrac{CV^2}{2}\left(1-e^{-\frac{2t}{[R^{1)}]C}}\right)$	$E_0^{1)}\dfrac{R_w}{[R^{1)}]}$	$E_0^{1)}\dfrac{R^{1)}}{[R^{1)}]}$		$E_2^{1)}=E_0^{1)}\dfrac{R^{1)}}{[R^{1)}]}\times\dfrac{R^{1)}}{R_2}\times\dfrac{N_2r}{R_2}$	……	$E_n^{1)}=E_0^{1)}\dfrac{R^{1)}}{[R^{1)}]}\times\dfrac{R^{1)}}{R_n}\times\dfrac{N_nr}{R_n}$
……	……						……	……
N_{n-1}回路(*)発火後	$[R^{n-1)}]=R_w+R^{n-1)}=R_w+\dfrac{1}{\dfrac{1}{R_n}}$ $\therefore R^{n-1)}=R_n$	$E_0^{n-1)}=\dfrac{CV^2}{2}\left(1-e^{-\frac{2t}{[R^{n-1)}]C}}\right)$	$E_0^{n-1}\times\dfrac{R_w}{[R^{n-1)}]}$	$E_0^{n-1}\times\dfrac{R^{n-1)}}{[R^{n-1)}]}$				$E_n^{n-1)}=E_0^{n-1)}\dfrac{R^{n-1)}}{[R^{n-1)}]}\times\dfrac{R^{n-1)}}{R_n}\times\dfrac{N_nr}{R_n}=E_0^{n-1)}\dfrac{R^{n-1)}}{[R^{n-1)}]}\times\dfrac{N^{n}r}{R_n}$

註　*）即ち N_n 回路発火前

第 9.4 表には計算の手順を記してあるから他の例題についても同様なる手順を踏めば計算出来るわけである。

さて第 9.4 表において「100 個の電気雷管を発火させるに要するエネルギー」の項と「各回路の電橋部に供給されるエネルギーの総和」の項の大小を比較すればその発破は完爆するか或は不発残留を生ずるかが判明するわけである。即ち＊印をつけたものは不発となることを示している。猶「全放出エネルギー」の項を見れば並列回路数が増加する程この値は大となつているが実際に電橋部に供給されるエネルギー即ち電気雷管を発火させるために用いられる有効エネルギーは全放出エネルギーと比例した関係にないわけである。即ち全放出エネルギーのみを計算して直並列結線の方が有利であるという結論を出している報告は誤りであることが明瞭となつた。これらの関係をグラフに纏めたものは第 9.5 図である。この図において曲線（1）′と（1）の差、（2）′と（2）との差は母線及び脚線に消費されるエネルギーを表わしていることになる。

さてこの図において直線（3）は各結線法による場合 100 個の電気雷管を発火せしむるに要する所要エネルギーを表わしているから発破器より電橋に供給される総エネルギー曲線（1）又は（2）がこの直線より上にある場合のみ発破が成功するわけである。即ち第 9.4 表の＊印のものは（3）直線の下にある点ということになる。

第 9.4 表及び第 9.5 図から明らかなる如く 200μF, 134V のコンデンサー式発破器を使用して 100 個の電気雷管を発火させる場合は直列結線よりも 50 個直列 2 並列又は20個直列 5 並列の方が有利であることが分る。然し乍らそれ以上に並列数を増加することはかえつて悪いこともよく分る。次に 20μF, 216V のコンデンサー式発破器を用いた場合は如何なる直並列結線も直列結線より悪條件になることを示している。

又直並列結線の場合第 9.3 表又は（8.8）′式より明かな如く発破母線の抵抗が大となる程母線に消費されるエネルギーの割合が大となるので（即ち電橋部に供給さるエネルギーが小となるので）かかる場合は直並列結線は不利となるわけである。

一般にコンデンサー式発破器を使用して発破を行う場合は上述の如く直並列結線が有利な場合もあるがこれは計算例に示した如き繁雑なる計算を行つてはじめて分ることである。然し第Ⅷ章（3）節に述べた如くメタン瓦斯に対して安全なる発破器はマイクロフアラ

第 9.4 表

結線法		限界斉発電流 (1)	限界斉発点火時間 (2)	100個の電気雷管を発させるに要するエネルギー (3)	合成抵抗 $[R]=R_w+R=R_w+\frac{1}{\frac{1}{R_1}+\cdots+\frac{1}{R_n}}$	使用するコンデンサー式発破器			
						200μF 134V のコンデンサーより t 時間に放出されるエネルギー		20μF 216V のコンデンサーより t 時間に放出されるエネルギー	
N	説明					全放出エネルギー $E_0=\frac{CV^2}{2}\left(1-e^{-\frac{2t}{[R]C}}\right)$	各回路の電橋部に供給されるエネルギーの総和	全放出エネルギー $E_0=\frac{CV^2}{2}\left(1-e^{-\frac{2t}{[R]C}}\right)$	各回路の電橋部に供給されるエネルギーの総和
個		A	ms	Joule	Ω	Joule	Joule	Joule	Joule
$N_1=100$	100個直列	0.82	4.5	0.330	$4+150=154$	0.456	$0.456\times\frac{150}{154}\times\frac{120}{150}=0.355$	0.442	$0.442\times\frac{150}{154}\times\frac{120}{150}=0.344$
$N_1=N_2=50$	50個直列2並列	0.78	5	0.335	$4+\frac{1}{\frac{2}{75}}=4+37.5=41.5$	1.260	$1.260\times\frac{37.5}{41.5}\times\frac{37.5}{75}\times\frac{1.2\times50}{75}\times2=0.911$	0.467	$0.467\times\frac{37.5}{41.5}\times\frac{37.5}{75}\times\frac{1.2\times50}{75}\times2=0.337$
$N_1=N_2=\cdots\cdots=N_5=20$	20個直列5並列	0.72	5.7	0.340	$4+\frac{1}{\frac{5}{30}}=4+6=10$	1.790	$1.790\times\frac{6}{10}\times\frac{6}{30}\times\frac{1.2\times20}{30}\times5=0.859$	0.467	$0.467\times\frac{6}{10}\times\frac{6}{30}\times\frac{1.2\times20}{30}\times5=0.224$ *
*$N_1=N_2=\cdots\cdots=N_{25}=4$	4個直列25並列	0.56	10	0,380	$4+\frac{1}{\frac{25}{6}}=4+0,24=4.24$	1.800	$1.800\times\frac{0.24}{4.24}\times\frac{0.24}{6}\times\frac{1.2\times4}{6}\times25=0.081$ *	0.467	$0.467\times\frac{0.24}{4.24}\times\frac{0.24}{6}\times\frac{1.2\times4}{6}\times25=0.023$ *
$N_1=N_2=\cdots\cdots=N_{50}=2$	2個直列50並列	0.46	17	0.440	$4+\frac{1}{\frac{50}{3}}=4+0.06=4.06$	1.800	$1.800\times\frac{0.06}{4.06}\times\frac{0.06}{3}\times\frac{1.2\times2}{3}\times50=0.040$ *	0.467	$0.467\times\frac{0.06}{4.06}\times\frac{0.06}{3}\times\frac{1.2\times2}{3}\times50=0.010$ *

註 (1) 第3.2表又は第3.2図より
(2) 第1.5図より
(3) 第1.9図に於て (2) の t より求めた E の値の100倍で t 時間内に少くともこれだけのエネルギーが供給されねば不発となるわけである。

ッドを低くしてあるべきであるから各種結線法にによる発破の場合は第9.5図に示す (2) 曲線の如き型をとるので直列結線が最良の結線法ということになる。

以上の諸点を考慮に入れた場合はコンデンサー式発破器を使用して発破を行う場合はやはり直列結線を原則とすることと指導したが無難であろう。

第X章　結　　論

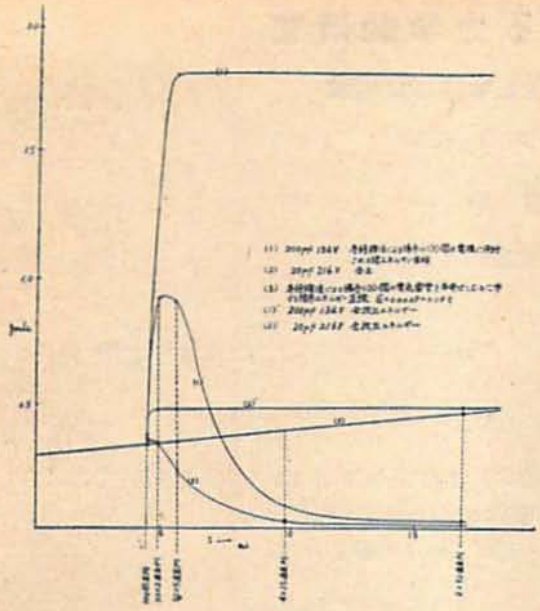
1) 電気雷管を点火するに要するエネルギー (E) と点火時間 (t) の間には Jones 氏の発表した $E=A+Bt$ なる式が成立することを確めた。又平均点火時間と点火時間の標準偏差 (σ_e) との間には $\sigma_e=\alpha t$ なる関係あることも確認した。

2) 点爆時間 (τ) と点火電流の間には $\tau=f(i)$ なる関係あり電流値が大となる程 τ は小となるが点火電流が2アンペア位迄なら大体一定と考えて差支ない。

3) 電気雷管の斉発個数が大となるに従い点火に要する限界電流値も次第に上昇することを推計学的考察により図式的に導いた。この値は Jones 氏の導いた値とよく一致する結果を得た。

4) 推計学で云う範囲の中心値を標準偏差で割った値と試料数 n との関係を略近式で表わし Jones 氏が図式的に導いた斉発個数と限界電流値の関係を数式的に導いた。

5) この数式を基礎として或る電源を使用した時最



第 9.5 図

大何個の電気雷管を斉発させうるかを数式的に導いた。この式には電気雷管の特性を表わす要因 A, B, α, τ 及び抵抗値 r が入つているのでこれらの要因につき検討を行えば電気雷管の設計基準が得られることが分つた。

6) その結果電気雷管の斉発性を向上させるためには電橋の比抵抗，比重，比熱，断面積，熱伝導率及び点火玉の層の厚さを一定とすると点火薬の発火点が低くその熱伝導率の小さなもの，点火時間のバラッキの小なるもの，点爆時間の大なるもの，電橋の長さの短いものとすべきことが数式的に導かれた。これは我々が経験的に考えていた結論と一致した結果である。

7) 然し電気雷管の設計を行う場合その斉発性のみに注目して行うのは誤りで単発発火感度も適当でなければいけないがこれも数式的に結論が得られ上記の（6）の條件の場合は電橋の長さに最小値があることが明らかになつた。

8) 又単発発火感度を良くしすぎると迷走電流に対する安全性で問題となるがこの関係も数式的に導いた。

9) 電気発破器の設計を行う場合は上記の如き電気雷管の各種の特性を考慮に入れて如何なる電気雷管を発火させるかに応じて設計すべきであるという結論を得た。

10) 以上の結論よりコンデンサー式発破器設計の基礎式を数式的に導いた。この式には電気雷管の特性を表わす A, B, α, τ が入つて居り斉発個数により点火電流値が推計学的に変化する関係が入っている。

11) メタン瓦斯爆発に対する安全度が問題となる炭鉱用コンデンサー式発破器はコンデンサーの容量を大にして電圧を小にしたものよりコンデンサーの容量を小にして電圧を大にした方が有利であることが判明した。尤もこの最高電圧には自ら制限がある。

12) 直列，並列，直並列結線電気発破に対する一般解を導いた。その結果大容量の電源を使用して大発破を行う場合は直並列結線が有利であること，ダイナモ式又は電池式の発破器を使用する場合は直列結線を原則とすべきことコンデンサー式発破器を使用する場合はコンデンサーの容量によつては直並列結線が有利な場合もあるが原則としては直列結線で使用すべきであるという結論を得た。

本研究を行うにあたり，終始御教示御指導を賜つた日本化薬株式会社日野熊雄博士並びに本稿を閲読して頂き種々御教示を賜つた東京大学疋田強博士及び実験を担当して戴き又常に論議に応ぜられた折尾作薬所火工品研究課石川正治氏加藤清視氏に厚く御礼申し上げる。

文　献

第Ⅰ報及び第Ⅱ報参照され度し。