

Fig. 1 Construction of plastic plug with SiC filler

関係する付加抵抗部分（以後、雷管接地抵抗と記す）を今回対象とした。

(b)爆薬包（親ダイ）の有無、爆薬包の種類

以上、(a)、(b)に関しては、わずかに高山らの野外実験の報告<sup>9)</sup>がある程度で、その影響度については明らかにされていない。

筆者らは、電気雷管の消費現場における耐静電気性能を把握するため、種々の状況を想定したモデル実験を行いいくつかの知見を得たので、SiC 複合樹脂塞栓の電気特性と併せて報告を行う。

## 2. 実験方法

### 2.1 試料

#### 2.1.1 放電方式 (SiC 複合樹脂塞栓)

ポリエチレン（以後、PE と略記）、平均粒径  $17\mu$  を有する SiC を、PE/SiC=45/55, 40/60, 35/65（重量部）の比率で熔融混練することにより SiC 複合樹脂を得た。次にこれを射出成型で塞栓とし Fig. 1 に示すような形状からなる試料を作成した。

#### 2.1.2 絶縁方式

Fig. 2 のように点火部を管体から絶縁する位置に樹

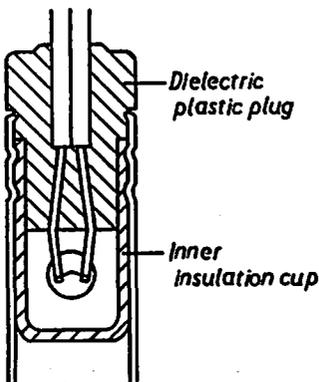


Fig. 2 Construction of insulation type antistatic electric detonator

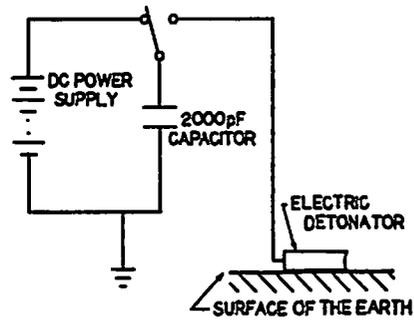


Fig. 3 Diagram of circuit for measuring sensitivity to electrostatic discharge with earth resistance

脂製カップ（肉厚 0.70mm）を塞栓小径部を嵌合面として挿入することで試料とした。なお、塞栓材質としては PE を用いた。

また、両方式の耐静電気性能のレベルを明確にするため、比較として PE を塞栓とする普通電気雷管も平行して検討を行った。

### 2.2 静電気印加方法

上記試料の静電気に対する発火感度を次の 2 種の静電気印加方法により求めた。

#### 2.2.1 コンデンサー放電法

静電容量  $C=2000\text{pF}$  を有するコンデンサーを所定の電圧まで充電した後、試料の両脚線端末と管体との間へ放電させ、充電電圧と発火率との関係を求める。なお、人体および ANFO の静電気放電を想定し、コンデンサーとして  $C=260, 560, 1150\text{pF}$  のものも用い同様な実験を行った。

#### 2.2.2 対地電位上昇法

厚さ 2mm、大きさ  $1\text{m} \times 1\text{m}$  の銅板の上に試料の脚線および管体部が密着するように絶縁用ビニル粘着テープで固定する。この場合、脚線は伸したものをうず巻き状にして銅板に配置した。銅板を接地した後、銅板から約 15cm の高さの空中にセットした両脚線端末を直流高電圧発生装置の出力ケーブルに接続し、およそ  $1\text{kV/sec}$  の速度で昇圧を行い、発火の有無等を求める。

直流高電圧発生装置：日本コンデンサー工業製  
DCG-100KIT 型  
最大定格出力電流、1mA

### 2.3 雷管接地抵抗と耐静電気性能

Fig. 3 に示す通り、管体部を地上に置いた試料の両脚線端末に  $2000\text{pF}$  のコンデンサーより放電を行わせ、雷管接地抵抗と耐静電気性能との関係を求めた。雷管接地抵抗は試料管体と同質同形状の空管体を地上に置き、これとコンデンサー回路の接地端子との間の抵抗

Table 1 SiC filler content and electrical characteristics

SiC filler content of plug (% in wt)	Wires-to-case resistance at 1000 V (OHM)	Average discharge potential (kV)
55	$10^{10-11}$	4.0
60	$10^{9-10}$	3.1
65	$10^{8-9}$	2.4

をテスターで測定することにより得た。なお、地質は主に粘土層であり、雷管接地抵抗は散水することにより変化させた。また、管体配置地点とコンデンサー回路接地点との距離は約10mとし、コンデンサー回路の接地抵抗は常法による測定において8Ωであった。

2.4 爆薬包と耐静電気性能

三硝ダイナマイト、Al系含水爆薬および油中水型(W/O)エマルジョン爆薬の各々を、内径27.5mm、長さ100mmで一端が開放の鉄容器に入れ、この中に試料の管体～塞栓部までを挿入する。次に2,000pFコンデンサーより両脚線端と鉄容器との間へ放電を発生させ、発火状況を求めた。また、爆薬の抵抗を上記のように挿入した管体と鉄容器とを端子としてテスターまたは1000Vメガで測定することにより得た。

3. 結果および考察

3.1 SiC 複合樹脂塞栓の電気特性

SiC 複合樹脂塞栓の1,000V印加時における抵抗および塞栓自体を電路とする放電開始電圧をTable 1に示す。なお、この場合の放電開始電圧は、回路に1mAの電流が通じる際の電圧(以後、 $V_{1mA}$ と略記)とした。

普通電気雷管の点火部～管体間における火花放電がおよそ5kV以上の電圧印加で生じるので、PE/SiC=(45/55)～(35/65)からなる塞栓の放電開始電圧は適当な範囲にあると考える。

3.2 コンデンサー放電に対する発火感度

コンデンサー放電法において、 $C=2,000pF$ とした場合の発火感度はFig.4の通りである。これよりSiC複合樹脂塞栓ではSiC充填量が増加するに従い耐静電気性能保証電圧域は拡大され、PE/SiC=35/65組成では、25kVにおいて発火を生じていない。

今、脚線的一方のみ塞栓内で芯線を露出させた試料を用い、2000pFコンデンサーによる放電試験を行い50%発火電圧を求めた。このものの電気的等価回路は、脚線と電橋の抵抗からなるループ回路にSiC複合樹脂部の放電時における抵抗 $R_d$ が直列に接続されたものになり、発火感度は放電抵抗 $R_d$ の大小だけに依存する。

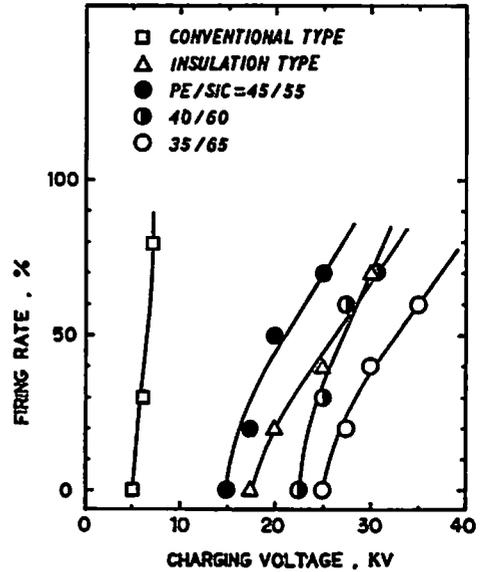


Fig.4 Electrostatic protection in discharge from a 2,000pF capacitor

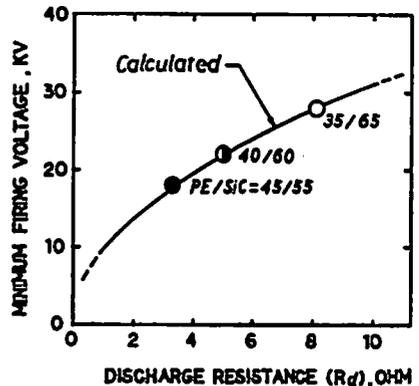


Fig.5 Relation between discharge resistance and firing voltage in discharge from a 2,000pF capacitor

次に、電橋部の発火エネルギーを仮定(1.5mJとした)し、各抵抗の大きさによってエネルギーを分配することにより放電抵抗 $R_d$ と発火電圧との関係曲線が

Table 2 Non-linear properties of plug with SiC filler

SiC filler content of plug (% in wt)	Non-linear exponent, $\alpha$
55	10.2
60	7.8
55	6.1

計算上得られる。Fig. 5 は、この曲線上に上記50%発火電圧をプロットしたものである。これより SiC 複合樹脂塞栓は、SiC 充填量の多いものほど Table 1 のように放電開始電圧は低いが、高電圧域における放電抵抗は逆に大きいという興味ある傾向が認められる。このことを電圧非直線抵抗として表わせば、非直線指数  $\alpha$  が SiC 充填量の増加に従い減少することに同義となる。

Table 1 の放電開始電圧 ( $V_{1mA}$ ) と Fig. 5 の結果より  $\alpha$  を試算し、Table 2 の値を得た。SiC 充填量が最大の65%の  $\alpha$  は 6.1 であり、これは本来の製法による SiC 電圧非直線抵抗素子の  $\alpha$  値 (3-7)<sup>6)</sup> にほぼ匹敵する。SiC 粒子が球形であり、かつ分散媒 PE 中で立体格子状に分散していると仮定すれば<sup>7)</sup>、SiC 65% における粒子間隔は  $1.8\mu$  となる。但し、今回用いた SiC はくさび形等種々の形状のものからなり、粒子の形状効果および部分的な迎撃の存在により、実際に電路となる部分の粒子間隔は更に接近し、SiC 電圧非直線抵抗素子に固有の  $\alpha$  値にほぼ等しい特性が PE-SiC 系においても認められたものと推定できる。

一方、絶縁方式で、絶縁材として用いた樹脂製 (PE) カップは 0.7mm の肉厚であり、計算上 140kV 程度の絶縁耐圧 (ASTM, D-149) を有する<sup>8)</sup>。絶縁方式試料の発火の原因である絶縁破壊は、カップ部分ではなく塞栓内芯線~管体上端の外側火花放電 (Fig. 6) という経路で発生することが認められ、この現象は試料塞栓の射出成型条件の調整では防止できなかった。Fig. 2 のように絶縁方式試料は、塞栓とカップとの嵌合部における沿面放電を防止するため、該当管体部を 2ヶ所にわたって締めつけており、管体内部の絶縁破壊対策が十分である関係上、相対に耐圧の低い部分が外側火花放電として生じる。この点が、絶縁方式の一つの技術上の問題と思われる。

コンデンサーの静電容量と各試料の50%発火電圧との関係を Fig. 7 に示す。なお、以下の項目については SiC 複合樹脂の組成は、PE/SiC=35/65のみを記述した。

また Fig. 7 を  $CV^2/2$  で与えられる50%発火エネルギーとして示せば Fig. 8 の結果となる。

SiC 複合樹脂塞栓においては、コンデンサーの静電

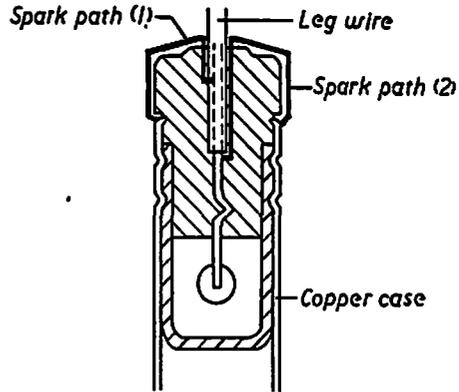


Fig. 6 Schematic illustration of spark path in insulation type

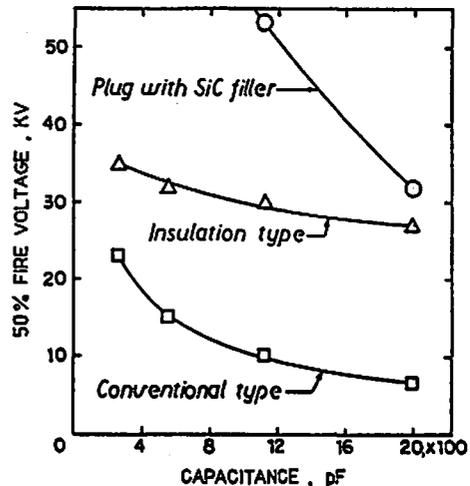


Fig. 7 Variation of fire voltage with capacitance

容量が 2000pF から 1150pF へ変化することにより、耐静電気性能は発火電圧で 21kV、エネルギーで 591mJ と大きく向上することが知れる。

SiC 複合樹脂塞栓の電圧  $V$  と電流  $I$  との関係は、非直線式に従えば次のように表わすことができる。

$$I = KV^\alpha \quad (1)$$

Rothenal らによれば<sup>9)</sup>、コンデンサー放電における  $V$  の時間変化は  $\frac{dV}{dt} = -K \frac{V_0^\alpha}{C}$  (2)

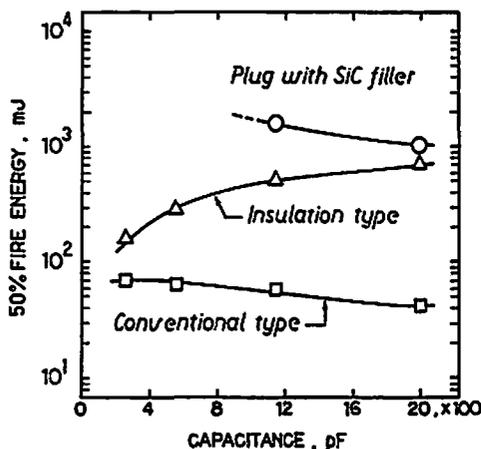


Fig. 8 Relation between capacitance and fire energy

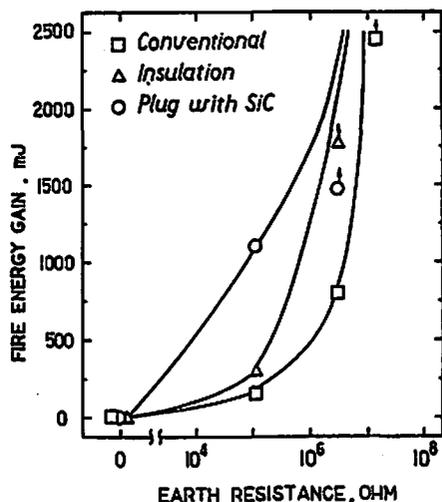


Fig. 10 Fire energy gain by earth resistance

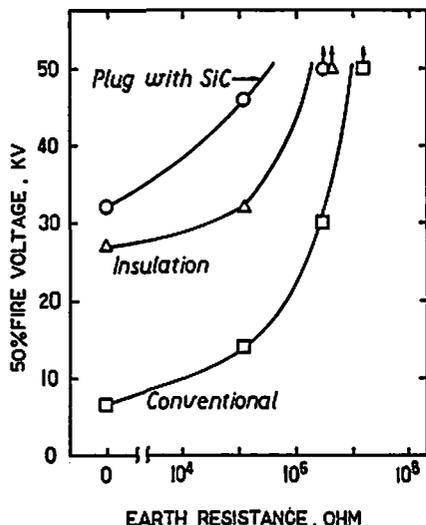


Fig. 9 Effect of earth resistance on fire voltage in discharge from a 2,000 pF capacitor

となる。これより

$$V = -K \frac{V_0^\alpha}{C} t + A \quad (3)$$

$t=0$  における  $V = V_0$  の関係および(3)式より、 $I$  は

$$I = K \left( -K \frac{V_0^\alpha}{C} t + V_0 \right)^\alpha \quad (4)$$

となる。

但し、 $C$ : コンデンサーの静電容量

$V_0$ : 充電電圧  $K, A$ : 定数

次に、(4)式において、放電時定数  $\tau$  を求めれば、

$$\tau = \frac{CV_0^{1-\alpha}}{K} \left( 1 - \frac{1}{e^{1/\alpha}} \right) \quad (5)$$

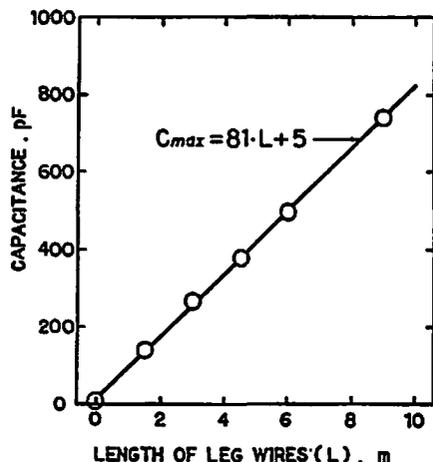


Fig. 11 Variation of capacitance with length of leg wires

となり、 $\alpha, K$  が一定の場合には、通常の  $RC$  放電と同様に  $\alpha$  は  $C$  と比例関係にある。以上(4)、(5)式より、電圧非直線抵抗において、放電電流  $I$  および時定数  $\tau$  は、コンデンサーの静電容量の低下に伴わない  $\alpha, K$  を変数として低下することがわかる。

### 3.3 雷管接地抵抗と発火感度

試料の管体部を地上に置いた場合の試験結果を Fig. 9 に示す。予想される通り雷管接地抵抗の大きさに従い発火電圧は上昇するが、特に  $10^5 \Omega$  以下の雷管接地抵抗域において試料間で曲線の勾配が異なる。ここで、Fig. 9 より、雷管接地抵抗による発火エネルギーの増加分を求めれば Fig. 10 のようになり、SiC 複合樹脂塞栓品に極めて顕著な発火エネルギーの増大が認めら

Table 3 Electrostatic protection of electric detonator inserted into explosives

Type of electric detonator	50%- Fire voltage (KV)			
	W/O Emulsion* explosives	NO.3 Kiri** dynamite	Al-slurry***	Without explosives
Conventional type	21	20	11	6.5
Plug with SiC	52	47	39	32
Insulation type	29	24	22	27

\* Resistance : 150 MΩ/1000V

\*\* Resistance : 1500kΩ

\*\*\* Resistance : 700kΩ

Table 4 Sensitivity to building up potential

Item		Length of leg wires (m)					
		1.5		4.5		9.0	
Conventional type	Breakdown potential (KV)	5	5	4	5	5	5
	Result*	N	N	N	N	F	N
Plug with SiC	Discharge potential (KV)	2	2	3	3	2	3
	Result	N	N	N	N	N	N
Insulation type	Breakdown potential (KV)	32**	33	30	37**	29**	32**
	Result	N	N	F	F	F	F

\* N: No-fire, F: Fire

\*\* Breakdown at a point of leg wires insulated with polyvinyl chloride

れる。

SiC 複合樹脂塞栓については、雷管接地抵抗が加算されることにより、放電中における塞栓部の電圧は減少し、その分電圧非直線性に従い塞栓部の抵抗は増加する。つまり SiC 複合樹脂塞栓では、放電回路中に雷管接地抵抗等の付加抵抗が直列に挿入された場合には、付加抵抗部分によるエネルギー消費の他、塞栓自体の抵抗増が生じるため静電気発火に対する防護機能は大きく向上するものと推定される。

一方、絶縁方式においては雷管接地抵抗の効果が小さいが、これは一つには、絶縁材の絶縁耐圧により発火レベルが高位にあるため、雷管接地抵抗のエネルギー消費効果が実効値として表われにくいと思われる。

消費現場における雷管接地抵抗は、大地との接触面積、岩石および鉱物等の体積抵抗率、水分量で微妙に変化する<sup>10) 11)</sup>。今後、これらの因子を考慮し、消費現場での接地抵抗の大きさを把握する必要がある。

### 3.4 爆薬包と発火感度との関係

Table 3 に管体および塞栓部を爆薬包に挿入した場合の発火感度を記した。

普通電気雷管および SiC 複合樹脂塞栓品においては、爆薬包部分の抵抗が付加されることにより、前記雷管接地抵抗の場合と同様な関係で耐静電気性能は向上する。絶縁方式に関しては、逆に発火電圧の低下も認められるが、これは爆薬包の抵抗としての耐静電気性能への寄与を否定するものではなく、3.2 で記述したように今回の試料の絶縁破壊経路に相当する空気部分が爆薬に一部置換されるためである。爆薬の種類との関係では、W/O エマルジョン爆薬における耐静電気性能の向上が顕著である。

また、本試験に関しては、爆薬包装材の影響については省略しており、この面で検討の余地がある。

### 3.5 電気雷管の対地電位上昇に伴う発火感度

対地電位上昇法における発火は、普通電気雷管と絶縁方式品に発生した。試験結果を Table 4 に記載した。

種々の脚線長の普通電気雷管を用い、対地電位上昇法における両脚線端末と銅板とを端子として、LCRメータで求めた電気雷管の対地容量をFig. 11に示す。なお、試料と銅板との距離の関係より、ここで扱う対地容量は、各脚線長における最大対地容量  $C_{max}$  に相当する。Fig. 11 から、脚線長 ( $L_m$ ) と  $C_{max}$  との関係は、

$$C_{max} = 81 \cdot L + 5 \quad (\text{pF}) \quad (6)$$

で与えられる

普通電気雷管の発火の頻度が低い点については、(6)式より得られる各対地容量に対して、管体内部における火花放電電圧が4-5kVでありエネルギー的に十分でないためと推察される。但し、石灰粉を5kg/cm<sup>2</sup>の圧力で送入した実験<sup>13)</sup>では、およそ100回/secの火花放電の発生が報告されており、累積エネルギーという点からも今後検討する必要がある。

一方、絶縁方式とSiC複合樹脂塞栓との発火の有無の差異は、両者の機構上の違いとして説明されうる。つまり、SiC複合樹脂塞栓においては、その放電機能により対地電位の上昇が、ある一定の限度内にとどまるため、静電気の蓄積によるエネルギーの巨大化が防止される。

また絶縁方式では、脚線の絶縁被覆の耐圧にも耐静電気性能が関係するため、電気雷管全体を1つの系としてその絶縁耐圧の管理<sup>14)</sup>が必要である。

## 5. 結論

### 5.1 SiC 複合樹脂塞栓の電気特性

電気雷管塞栓部にSiCを分散質とした複合樹脂を適用したものは、その電圧非直線抵抗特性により、発破器、動力電源等に不感であり、かつ静電気に対して十分なる放電性能を有していることが確認された。また、分散質としてのSiCの効果は、電圧非直線抵抗における非直線指数 $\alpha$ を小さくし、エネルギー消費量を増すことにある。

### 5.2 放電方式

雷管接地抵抗、爆薬包の抵抗等の放電回路における付加抵抗分を考慮した場合、耐静電気性能は向上する。特にSiC複合樹脂塞栓においては、付加抵抗の接続により塞栓部の電圧が低下し、塞栓部のエネルギー消費量が増加するため耐静電気性能の向上は顕著なものがある。

くり粉、吹雷等浮遊静電気による電気雷管自体の帯電について安全性が高いことが判明した。

### 5.2 絶縁方式

耐静電気性能が電気雷管全体での絶縁上のweak-pointに支配されるため、脚線の絶縁被覆等を加味した絶縁耐圧の向上が必要である。

## 文 献

- 1) V. J. Menichelli, 8th Symposium on Explosives and Pyrotechnics, 30 (1974)
- 2) USP. 4061088 (1977)
- 3) F. A. Schwerts, J. J. Mazenko, J. Appl. Phys., 24, 1015 (1953)
- 4) 秋山剛二, 太田弘英, 石灰石, 187, 30 (1980)
- 5) 高山英利, 石山舎人, 早川哲夫, 工火協誌, 40, 53 (1979)
- 6) 例えば、一ノ瀬昇, 「セラミック半導体」, p. 119 (1979), 学敵社
- 7) 丹羽利夫, 一色節也, 日本ゴム協会誌, 48, 413 (1975)
- 8) 山形京, 岡敷太郎, 「ポリエチレン樹脂」, p. 221 (1980), 日刊工業新聞社
- 9) L. A. Rosenthal, H. S. Leopold, IEEE Transactions on Industry Applications, IA-14, 454-455 (1978)
- 10) 川瀬太郎, 高橋健彦, 安全工学, 20, 330 (1981)
- 11) 川原良哉, 採光と保安, 19, 18 (1973)
- 12) 石山舎人, 工火協誌, 26, 169 (1965)

## **Performance of Antistatic Electric Detonators in Several Situations**

by Masato NAGANO\* and Michiaki SAKAGUCHI\*

Two types of electric detonators, discharge by-pass type and insulation type, have been developed to protect them against electrostatic discharge. Both types will not fire by high voltage discharge when it occurs between legwires and case from a certain capacitor. But their protecting mechanisms are quite different.

As for discharge by-pass type, many techniques and inventions have been reported. Plastic plug with silicon carbide filler was treated in this paper.

We investigated differences between the two types in several situations such as in case of connecting earth resistance.

(\*Nippon Oil and Fats Co., Ltd., Bibai Plant; Koushunai 549 Bibai City, Hokkaido, Japan )

---