

雷管による爆薬起爆の研究

〔第4報：管体破片による起爆（その2）〕

井田 一夫*

雷管による爆薬の起爆作用の中、第1報第2報に於ては衝撃作用について述べ、第3報に於ては管体破片による起爆作用が非常に効果的であること及び管体破片の基礎的性質として破片の飛散方向、貫通能力、破片速度、重量、運動エネルギー、形状等について述べた。第4報に於ては各種の雷管破片による爆薬の起爆現象を調べ、破片の投射による爆薬の起爆機構を考察する。

Ⅵ 雷管破片による爆薬起爆試験

雷管体の破片の如き固体投射物がどの程度の起爆力を有するかについて管体の材質を変えて検討する。破片による起爆力の試験法としては爆発した雷管の破片により爆薬を起爆させ、爆薬と雷管との殉爆距離を測定する方法を採用する。

Paymann 氏等の報告¹⁾によれば雷管と爆薬との殉爆距離は図1の如く雷管の方向によつて異り、底方向が最も大きく、側面方向がこれに次ぎ、斜前方では爆薬を起爆させ得ないと云われる。このことは第3報Ⅲで述べた管体破片の飛散方向から当然予想されることである。又 Paymann 氏等の報告では爆薬として Polar Samsonite No. 3 (NG ゲル 56%を含む炭坑爆薬) を使用した場合、銅雷管の6号雷管で底方向15cm、側面方向3.8cm となり、Al/窒化鉛の6号雷管では底方向15cm、側面方向5.1cm となつて非常に小さい値である。

又雷管破片による殉爆領域が図1のような形となることは坂巻氏²⁾、江上氏³⁾等の報告によつても認められている。

6.1 雷管と爆薬との殉爆距離の測定

管体の破片は上述の如く底方向が起爆力が大きいので、以下の試験ではすべて底方向のみについて実施した。

試験方法は鋼板の上に爆薬を置き、一定距離を隔てて雷管を吊し、雷管底方向の破片によつて爆薬が起爆するかどうかを見るのであるが、この試験法の要点は管底破片を必ず爆薬に命中させることであつて、特に

距離Dが50cm 以上の場合には注意を要する。

爆薬試料としては新桐ダイナマイト、硝安ダイナマイト、新D硝安爆薬の三種類を使用した。何れも薬径は32mmで製造後3カ月以内のものである。

雷管試料としては管体が銅、厚肉アルミ、薄肉アルミ、硬質PVCの4種類のものを使用した。装薬はテトリールC.45g、雷承爆粉0.4gである。管体その他の諸元は第3報表3と同様である。

試験結果は表1の如くであるが、この結果より次のことがいえる。

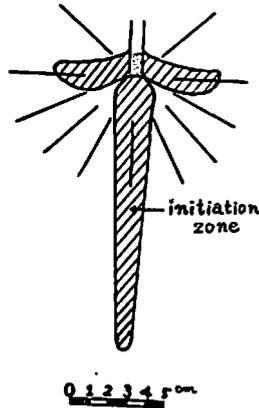


Fig. 1. Initiation distance between detonator and explosive. (by Paymann)

①当然のことではあるが、破片による起爆感度は新桐ダイナマイトが最も鋭敏であり、次で硝安ダイナマイト、硝安爆薬の順となる。これは衝撃感度の順位と同様である。

②管体破片の起爆能力は次の順位となり、これは第3報Ⅲで述べた破片による新聞紙貫通能力と一致した傾向を示す。

Cu≒厚肉Al>薄肉Al>PVC

③底上管体と平底管体とで破片による起爆力は余り変わらないが、硝安爆薬に対して平底管体の方が近距離の場合却つて確実な起爆能力を示す場合がある。

④新桐や硝ダイの様にニトログリセリンを含む爆薬は破片による殉爆限界が明瞭であるが、新D硝爆のよ

昭和35年10月5日受理

* 日本化薬株式会社折尾作業所, 若松市

Table 1. Initiation of industrial explosives by fragments of a detonator.

D (cm)	E T	"Shinkiri-dynamite" (Ammonia gelatine dynamite)				"Shōan-dynamite" (Permitted semi-gelatine)				"Shōan-bakuyaku" (Permitted ammonium nitrate explosive)				
		Cu		Al(thick)	Al(thin)	Cu		Al(thick)	Al(thin)	Cu		Al(thick)	Al(thin)	PVC
		c	f	c	f	c	f	c	f	c	f	c	f	f
0		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3		○	○							○	×	○	×	○
5		○	○	○	○					○	×	○	×	○
10		○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	×	○
15		○	○								×			
20		○	○	○	○			○	○	○	○	○	×	○
25		○	○							×	○			
30		○	○	○	○	○	○	○	○		○	○	×	○
40		○	○					○	×		○	×		○
50		○	○	○	○	○	○	×	×		○	×	○	
100		○	○	○	○	○	○	×	×	○	○	×	×	

Note, E: Explosives, T: Type of detonator, D: Distance between detonator and explosives, c: concave bottom shell, f: flat bottom shell. ○: Explosive is detonated, ×: Explosive is not detonated.

うにニトログリセリンを含まない爆薬の場合には、銅管体及び厚肉アルミ管体のときは殉爆距離が明瞭でない。

⑥然し何れにせよ我国で一般に使用されている銅管体6号雷管は、新桐、硝ダイは勿論のこと新D硝爆をも1mの距離から破片によつて起爆することが出来る。これは爆薬相互間の殉爆距離よりも数倍乃至数十倍も大きく、破片による起爆が非常に有効なものであることを示している。

以上の結果は、雷管の破片によつて3mの距離までは爆薬を起爆出来ると述べた大原氏等の報告⁹⁾と一致し、Paymann氏等の報告¹⁰⁾より遙かに大きい値となつている。Paymann氏等の使用した爆薬はその組成が明瞭でないが、非常に鈍感な爆薬を使用したか或は破片の命中精度が悪くて小さい値となつたと推定される。我国の報告にも底上6号雷管と桜ダイナマイトの殉爆限界が50cmであると云う記述があるが¹¹⁾これは破片の命中精度が悪くて小さい値となつたと思われる。

又底上管体と平底管体とについて比較して見ると、新D硝爆の場合に銅管体アルミ管体共に底上管体より平底管体の方がむしろ近距離に於て起爆率がよくなつ

ている。又新D硝爆の場合40cm以上の遠距離に於ては起爆作用の全然ない薄肉アルミ雷管が、20cm以下の近距離では確實な起爆力を有するのに対し、100cm以上の遠距離でも起爆能力を有する銅雷管、厚肉アルミ雷管が、近距離に於て却つて起爆出来ない場合があるという一見奇妙な現象が見られるのでこの理由を考えて見る。

これら各種雷管の底方向の最大破片の重量を測定すると、表2の如く薄肉アルミ雷管及びPVC雷管は銅雷管及び厚肉アルミ雷管に比べて著しく破片の重量が小さい。又底上管体と平底管体とを比べると、銅雷管厚肉アルミ雷管の場合には必ず底上管体の方が重量が大きいものが含まれていて、且つその形状は第3報のV項で述べた如く、底上管体の方が表面の凹凸が少なくなめらかである。従つてこれら破片の物理的特性と上記破片による爆薬起爆試験結果とを考へ合せると次のことがいえる。

管体破片は一般的には重量が小さくて貫通能力の小さいものは運動エネルギーが小さいので起爆作用も小さいが、銅管体の底上げ、平底の比較の場合に示されているように、貫通能力の大きい底上管体が（即ち破

Table 2. Weight of the fragments from the bottom of a detonator shell [unit: mg]

Type of detonator shell	Cu		Al (thick)		Al (thin)		PVC flat
	concave	flat	concave	flat	concave	flat	
1st. test	32, 16, 10	14, 11, 11	26, 4, 3	9, 8, 7	0.7, 0.5, 0.3	1.0, 0.8, 0.5	<0.5
2nd test	58, 30, 11	10, 5, 4	22, 21, 2	16, 14, 6	—	—	—

Note: Only the largest three fragments are weighed.

片重量が大きく表面の凹凸が少ない、平底管体より必ずしも起爆作用が大きいとはいえない。即ち破片は凹凸がはげしく、爆薬中に侵入した場合に速度の減衰即ち摩擦が起り易い様なものが、貫通能力は小さくなるが却つて起爆作用が確実になる。薄肉アルミ雷管が近距離に於て、銅雷管、厚肉アルミ雷管よりも起爆作用が確実であるのもこの一例と考えられる。

換言すれば、一般的には破片の運動エネルギーが大きい方が起爆能力も大きいと云えるけれども、運動エネルギーのみで論ずることは出来ず、爆薬侵入後の速度の減衰（即ち表面摩擦）が大きい場合には運動エネルギーが小さくても摩擦エネルギーが大きいので起爆作用が大きい場合が起り得る。即ち、Zippermayr氏が金属球を液体爆薬の中に投射して得られた実験結果とほぼ同様の結果が雷管破片を固体爆薬に投射した場合にも得られたわけである。

6.2 破片により起爆された爆薬の爆速

上述の如く雷管破片による起爆作用は非常に有効なものであることが判明したが、破片によつて起爆された爆薬が完爆しているかどうかを確認するために、爆薬中に雷管を挿入した普通の第一薬包と雷管破片の投射によつて起爆された薬包との爆速を比較する。

大原氏等⁹⁾は殉爆試験に於る第一薬包を雷管挿入によつて起爆した場合と雷管底破片によつて起爆した場合とを比較し、両者の殉爆距離に全く差異がないこと従つて第一薬包は雷管破片の投射によつて起爆しても雷管を挿入して起爆したときと同様に完爆するものであることを述べている。又 K. E. Spells 氏等は爆薬中に小さい鉄の円盤（直径 5mm、高さ 3mm）を 1,750cm/sec の速度で投射し、それによつて爆薬が起爆したときの状況を廻転カメラによつて観察した（第 3 報 1 項参照）そして円盤投射によつて起爆された爆薬は最初から 7,200m/sec の高い安定した爆速を有

することを認めている。

筆者は図 2 の如く、(a) 爆薬中に雷管を挿入した場合、(b) 雷管と薬包とを接触させた場合、(c) 雷管と薬包とを 10cm 離し管底破片の投射によつて薬包を起爆した場合、以上三つの場合についてイオン探針法によつて薬包の爆速を比した。爆薬としては新桐ダイナマイト及び新 D 硝爆を使用し、雷管としては銅管体底上 6 号雷管を使用した。

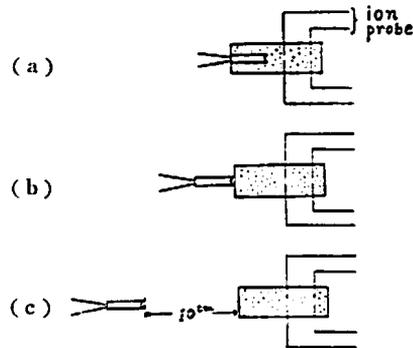


Fig. 2. Measurement of the detonation velocity of explosives initiated by the detonator, the situation of which was varied.

試験結果は表 3 の如くである。即ち、新桐ダイナマイトでも新 D 硝爆でも、雷管を挿入した場合よりも破片の投射によつて起爆した方が安定爆速への立上り位置が早いだけ薬包内で早く安定爆速に達すると思われ、その結果破片の投射によつて起爆した方が却つて第一薬包内の平均爆速は大きくなっている（但し薬包末端の爆速は殆んど差異がないであろう）。

即ちこれによつて、破片投射による起爆作用は、雷

Table 3. Detonation velocity of industrial explosives initiated by the detonator, the situation of which was varied. [unit: m/sec]

Explosives	"Shinkiri-dynamite" (Ammonia gelatine dynamite)	"Shin-D shōan-bakuyaku" (Permitted ammonium nitrate explosive)
Fig. 2 (a)	5770, 4720 ($\bar{x}=5245$)	3170, 2940 ($\bar{x}=3055$)
Fig. 2 (b)	5770, 5820 ($\bar{x}=5795$)	3190, 3060 ($\bar{x}=3125$)
Fig. 2 (c)	5940, 6060 ($\bar{x}=6000$)	3150, 3290 ($\bar{x}=3220$)

管を爆薬中に挿入した場合の起爆作用と全く同様に爆薬を完爆せしめ得る程すぐれたものであることが確認された。

6.3 薬包中に挿入された雷管の破片による起爆作用の考察

以上雷管破片の起爆作用に関する種々の実験を行ったのであるが、之等の実験結果を雷管による爆薬起爆という本来の問題に関連させて考えて見る。

先ず第一に雷管の破片による起爆効果が著しく大きいことに注目しなければならない。最も鈍感な爆薬に属する硝安爆薬でさえも、僅か0.05gの銅管体の破片で1mの距離から起爆させることが出来るということは、硝爆を第二薬包とした場合の爆薬相互間の殉爆距離が10cm以下であることを考えると、破片による起爆が衝撃波による起爆よりも遙かに効果的であることを示している。膠質ダイナマイトならば破片により恐らく数mの距離から起爆出来るであろう。

次に雷管破片の分布を考えて見ると、その大きさは微粉状のものから数mm平方に及ぶものまで広く分布して居り(第3報Ⅶ項参照)、又速度についても底方向と横方向とでは相当異なっていて、個々の破片速度も広い範囲に分布していると思われる(第3報Ⅳ項参照)。

即ち雷管を爆薬の中に挿入し爆発させた場合には、起爆条件に適した大きさと速度を有する破片は非常に多数生ずると思われる。而も前述の如くこれら破片の一個一個が爆薬を完爆させるだけの能力を持つている。換言すれば、雷管一本が爆発すれば起爆条件を具えた非常に多くの破片が周囲に飛散するのであるから薬包中に挿入した雷管による薬包の起爆は確実であり、その起爆源も雷管の横方向底方向何れにも多数あると考えられる。第1報写真4の)によつても雷管を挿入した薬包の起爆が雷管装薬のすぐ周辺部分から生じていることが認められる。

第1報第2報に於ては、雷管の衝撃力は膠質ダイナマイトに限つて起爆させることが出来ても硝ダイヤ硝爆は起爆させることが出来ないことを述べたが、上述の試験によつて雷管の破片による起爆作用は衝撃による起爆作用より遙かにすぐれており、すべての工業爆薬に対して充分な起爆能力を有するものであることが判明した。

Ⅶ 固体投射による起爆機構

雷管破片は非常にすぐれた起爆作用を有することが認められたが、破片(固体投射)による爆薬の起爆機構について若干考察する。

固体投射による起爆作用の本質は、第3報で述べた如く Roux 氏, Fripiat 氏, Spells 氏等は固体投射物の

運動エネルギーによると考えたのであるが、必ずしもそうでないことは Zippermayr 氏の実験や筆者の実験によつて認められた。Zippermayr 氏は爆薬中での投射物の速度の減衰を起爆条件としたのであるが、投射物による摩擦熱のことを考慮に入れなかつた。筆者は次の理由によつて、固体投射による起爆作用の本質は摩擦熱による温度上昇であると考えた。

Bowden 氏等は摩擦された固体の表面温度の上昇($T-T_0$)は近似的に次式で示されるとした)。

$$T-T_0 = \frac{\mu WV}{4 a J} \frac{1}{k_1+k_2} \dots\dots (1)$$

茲に μ は摩擦係数、 W は摩擦表面間の荷重、 V は滑り速度、 a は接触円形部の半径、 J は熱の仕事当量、 k_1 、 k_2 は摩擦されている両固体の熱伝導度である。

これを雷管の破片による爆薬の起爆の場合に適用すれば、 μ は破片表面の凹凸の程度、 W は破片の重量、 V は破片速度、 a は破片の大きさ、 k_1 、 k_2 は管体と爆薬の熱伝導度と考えることが出来る。即ち雷管破片による爆薬の起爆が摩擦熱によるものであれば、雷管破片の表面凹凸がはげしい程、重量が大きい程、速度が速い程、同じ重量なら直径の小さい程、熱伝導度の小さい程、温度上昇が大きく起爆に有効だと考えられる。

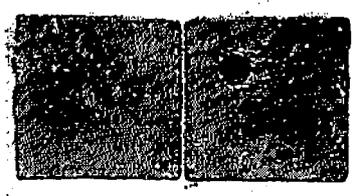


Photo. 1. Fragments of detonator shell and the hole of lead plate produced by the fragments. The diameter of hole is much larger than the diameter of fragments.

このことは本報の実験結果より妥当と思われる。即ち新D硝爆に対する底上銅管体と平底銅管体の場合に μ (破片表面の凹凸) が大きい平底の方が起爆が確実であつたし、 W (破片重量) の効果は銅管体や厚肉アルミ管体の方が薄肉アルミ管体や PVC 管体より起爆力が大きいことで認められた。又 V (破片速度) の効果は速度の減衰が大きいと推定される薄肉アルミ管体や PVC 管体の場合に雷管から離れた点に於ける起爆能力が小さくなることによつて認められる。更に a

(破片の大きさ)が小さい方が有効であることは、固体投射による臨界起爆エネルギーが固体の直径 8mm の場合には 30[kg. m] 以上であるのに固体の直径が 2~3mm の場合には約 1.0~1.1[kg. m] であることから知る事が出来る (第3報1項参照)。

即ち固体投射による起爆の理論としては W と V のみしか考えない運動エネルギー説よりも、 μ , a , W , V , k_1 , k_2 等を総合的に考えている摩擦説の方が妥当であると思われる。

又雷管の破片が物体に侵入して行く際に著しい発熱を生ずることは写真1によつても推定することが出来る。写真1は雷管底方向の破片の大きさと、その破片によつて雷管から 1m 離れた鉛板に生じた孔の大きさとを比較したものであるが、これにより管体破片は自己の大きさより数10倍大きい孔を鉛板に生ずることがわかる。この現象は鉛板に管体破片が侵入する際著しい摩擦熱を生じ、鉛を熔融すると考えなければ説明することが出来ない。

更に次の実験もまた簡単な摩擦でも非常に高温が得られることを示して居り、摩擦説が合理的であることを

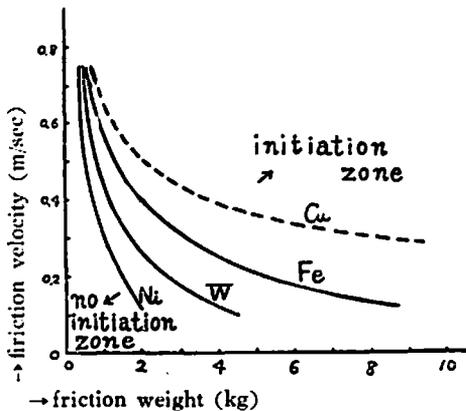


Fig. 3. Initiation limit of nitroglycerine relating to friction weight and friction velocity.

裏付けるものとする。即ち Bowden 氏等の実験⁷⁾では、荷重 500g で接触している鋼鉄とコンスタンタンの間の摩擦で、滑り速度が僅か 3m/sec でも 1,000°C に近い温度が得られることを観察して居り、ガラス板の上に拵げたニトログリセリンの薄層中を種々の金属片を滑らせると、金属の熱伝導度によつて異つてはいるが、摩擦速度と摩擦荷重を変えた場合の起爆限界は筆者がプロットしたところによると図3の如くなり、摩擦荷重が 500g 以上であれば 1m/sec 以下の摩擦速度で既にニトログリセリンは起爆している。図中点線は金属が銅の場合であるがこれは Bowden 氏等の実測ではなくその熱伝導度より筆者が推定したものであ

る。雷管破片による起爆の場合には摩擦速度はこの実験より遙かに大きい、荷重(即ち破片重量)は遙かに小さいので、この実験で直ちに雷管破片による摩擦の場合を推定することは出来ないが、摩擦によつて容易に高温が得られること、即ち摩擦による起爆が有効であることを示していると思はれる。

以上の如き理由によつて、筆者は固体投射による爆薬の起爆機構としては摩擦説が妥当であると考え

要 約

第3報では雷管破片の基礎的性質を調べたので第4報に於ては雷管破片による爆薬起爆試験を実施し、その起爆機構を考察した。

(1) 雷管底方向の破片の投射により、各種工業爆薬の起爆試験を行つたところ、銅雷管の破片が最も起爆力が大きく、次でアルミ雷管、PVC 雷管の順であつた。又平底管体と底上管体とでは破片による起爆能力は変わらず、近距離に於ては平底管体の方が却つて起爆力に確実性があつた。これらの現象は何れも破片の速度、重量、形状等、固体投射物の性状によつて合理的に説明することが出来た。

破片投射によつて起爆された爆薬の爆速は、雷管を挿入して起爆した爆薬の爆速に比べて勝るとも劣らなかつた。このことは破片による起爆が確実であり、雷管による工業爆薬の起爆は主として管体破片によつて行われていることを示すものである。

(2) 固体投射による起爆の理論としては Roux 氏 Fripiat 氏等の運動エネルギー説及び Zippermayr 氏の速度減衰説があつたが、筆者は投射物の摩擦による爆薬の温度上昇が固体投射による起爆の本質であるとする所謂摩擦説が妥当であると考え。又摩擦による温度上昇を示す Bowden 氏等の実験並に近似式は雷管破片による爆薬起爆試験の結果を合理的に説明する。

文 献

- 1) W. Paymann, D. W. Woodhead & H. Tit: Proc. Roy. Soc. 148, 604 (1935).
- 2) 坂巻喬: 日化厚研 F 第 231 号 (1949).
- 3) 江上良雄: 工火協講演会 (1951年10月).
- 4) 大原正・坂本勝一: 工火協, 13, 101 (1952).
- 5) 須藤秀治, 福山郁生: 工火協, 12, 169 (1951).
- 6) 井田一夫: 工火協, 21, 164 (1960).
- 7) F. P. Bowden & A. D. Yoffe: "The Initiation and Growth of Explosion in Liquid and Solid" p. 13 (1952).
- 8) F. P. Bowden, M. A. Stone & G. K. Tuber: Proc. Roy. Soc. A 188, 327 (1947).

Studies on the Initiation of Explosives by the Detonator.

Part IV The effect of fragments produced from a detonator shell (2).

Kazuo Ida

A few kinds of explosives were initiated by the fragments from a detonator shell which was apart from a explosive.

The results obtained were as follows :

1. The fragments of a Cu shell have the most effective initiation force, Al shell is less effective and PVC shell has the weakest initiation force.
2. The initiation force of concave bottom type detonator, however, is the same as that of flat bottom type detonator.
3. These results can be explained reasonably by the properties of the fragments such as the penetrating ability, the velocity, the weight and the shape of the fragments.

The detonation velocity of industrial explosives initiated by a detonator, which was apart from the explosive, was the same as that by a detonator, which was inserted into the explosive.

As the initiation theory by the solid fragments, several ones have been known. (refer this paper part III). The present author, however, believes that the initiation of explosives by the fragments from a detonator shell is due to the temperature rise of explosives by friction between the flying solids (fragments) and the explosives.

By applying the Bowden's equation for friction, this view can be explained reasonably.

炭 礫 爆 薬 の 爆 轟 中 断 現 象

福 田 寛 雄*

1. 緒 言

比較的低爆速の爆薬。たとえば硝安爆薬の如き炭礫爆薬を、鉄管内に連続して装薬し、一端より起爆すると、この長装薬は無制限に伝爆せず、孔径と薬径間に隙間があると、条件によつてはほぼ一定の長さだけ伝爆し、ここで爆轟の中断現象が発生する。

この事実については「炭礫爆薬の孔内殉爆」と題し先年本誌に報告¹⁾したが、本報告は薬包外周と管の内壁との間に隙間がある場合の、その後の試験結果について述べたものである。

即ち bore-hole に相当する外套管は鉄管に限らずブリキ管あるいはボール紙のごとき軟質軽量な材質のものでも爆轟中断を起す原因となり得ること、薬包周囲に僅かな水の層があるときは中断現象の起らぬこと、圧縮固化した残留薬包を容易に回収し得ること等の興味ある 2~3 の知見に関するものである。

2. 前回報告の概要

爆薬自体としては正常な状態、即ち吸湿、固化等の異状のないものを用いても多数の薬包を、その薬径より内径の大きい管中に連続装填した際、薬包と管壁との間に大きな隙間があると爆轟中断現象が発生する。これに関し、諸実験成績を整理する意味で前回の報告に述べた事項を要約すれば次の如くである。

- (1) 爆轟中断現象発生の際易は薬種により異なるが、比較的低爆速の爆薬に起り易い。
- (2) 中断現象を起したとき、雷管底より中断現象が発生するまでに爆轟した薬長を爆轟長と名づければ、装薬長のみが異なり他はすべて同一条件であるにかかわらず中断現象を起さないときの最大装薬長と、この爆轟長と異なるが、これは管底の影響ではない。
- (3) 薬包端末の薬包紙の重なり、雷管の位置およびその起爆力等は中断現象発生の主原因ではないが、隙間の大きさと爆轟長とは何らかの関係が

昭和36年1月7日受理

* 日本カーリット株式会社保土谷工場 保土谷区保土谷区弘向町