

参 考 文 献

- (1) D. E. Gardner: U. S. Bur. Mines Bull. (1927) 287
- (2) G. Wunderlich: Z. Elektrochem 56 218 (1952)
- (3) S. Todd & K. R. Bonnickson: J. Am. Chem. Soc. 73 3894 (1951)
- (4) J. P. Coughlin: J. Am. Chem. Soc. 72 5445 (1950)
- (5) ここでは「化学便覧」(丸善) p557, p579 からとつた。
- (6) E. Justi "Spezifische Wärme, Enthalpie, Entropie, Dissoziation technischer Gase" Berlin (1938)
- (7) 仁田富男他: 工業火薬協会誌 14 207 (1953)
- (8) J. P. Coughlin: J. Am. Chem. Soc. 73 4184 (1951)
- (9) 鉦山保安局: 日本銃薬協会誌 69 360 (1953)
- (10) 石原, 須藤: 東北大学遊学報 8 189 (1953)
- 同上 Sci. Rep. Res. Inst. Tohoku Univ. A6 561 (1953)

爆薬近傍に於ける力の観察

(昭和 29 年 6 月 20 日 受理)

田 中 一 三

(日本油脂 武豊工場)

I 緒 言

爆薬が爆発するとき、その周辺に現れる動的、静的な力の分布を知ることが、実用的な意味ではもちろん、爆轟理論の観点からも、きわめて興味ある問題である。薬包中の爆轟波の構造⁽¹⁾⁽²⁾、噴出する衝撃波⁽³⁾、ガス流⁽⁴⁾等について、これを理論的に取扱った論文は数多く見られ、それぞれ相当な実験データを基礎として組立てられてはいるが、この領域での実験データは、まだ今のところそれがほんらんして整理に困るという段階ではなく、むしろ少きに過ぎると言つてもよからう。従つてそれに伴う理論も、今後多くの実験をまつて、更に修正発展の余地が残されているものと見なければならぬ。

爆轟のように複雑且つ短時間の現象では、これを個々の状態量に分離して測定するのは並大抵のことではなく、このことが爆轟現象の解析を非常に困難なものとしている。しかし現象を複合したままの形で取扱えば、この領域での実験もまだいろいろ方法を考えることが出来る。例えば爆発薬包の内部又はかたわらに置いた物体の挙動を調べる⁽⁵⁾ようなことは爆発によつて出来る力の場の解明上、簡単且つ有効な方法と思われる。ただその場合、これを以て現象の本質を云々しようとするためには、得られたデータが何と何との

複合因子からよつて来たものであるかという判断を、慎重にして見誤らないことが必要である。

筆者はその意味で、ここに一連の実験結果を述べるにあたり、先ず現象の本質に対する二三の仮定を立て、それをいろいろな角度から検討してゆく方法をとりたいと思う。

II 実 験 法

図1の如く、爆発薬包の後端にベアリング用の鋼球を装着し爆発時の力を利用して球を一定距離隔てた鉛

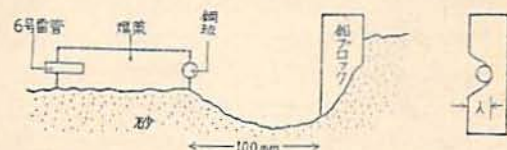


図1 侵入度の測定

図2 侵入度の定義

ブロックに打ちあてる。もちろん球はブロックの中にめり込むが、普通の工業爆薬でいどの力では、鉛ブロックに3×7×7cmのものを使えば、球のあたつたブロックの裏側にふくらみを生ずるようなことはない。従つて同じ大きさの球を用いたときには、球の飛行速度と、その鉛への侵入度(図2の定義)λとの間には、ある簡単な関係を予想し得る。すなわちこの侵入度は、

球の噴出速度を測るパラメーターとして使うことが出来る。

球からブロックまでの距離は、あまり近すぎるとガスのためにブロック表面が傷つけられるので、実験ではすべて 100mm にとつた。球の速度に減衰が無ければ、この距離は侵入度と無関係のはずである。小さい球（直径 2.2mm）では、このことは実験的にたしかめられたが、大きい球では距離による減衰が、多少認められるようであった。

鉛ブロックは、飛出した球を捕えるのにも役立つから、この実験では、侵入度と同時に球の受けた破かいの有様を見ることも出来る。筆者は、侵入度と球の破かいの二つの観点から、爆発現象の力学的性格を調べてみた。

なおこの実験では、爆薬はすべて紙筒薬包を用いて居り、使用した鋼球のゲージは、表 1 に示した通りである。

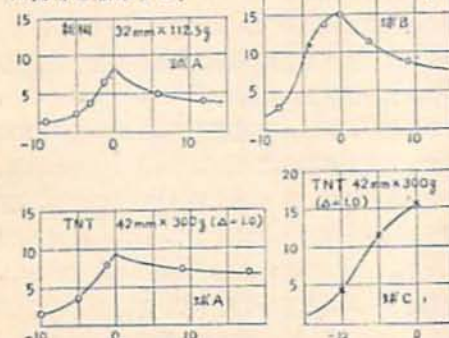
Ⅲ 球の深さと侵入度

鋼球を図 1 の如く、薬端中央に装着した場合、同一爆薬、同一寸法の球を用いても、侵入度は球の中心の爆薬表面からの深さによって変化する。これの一般的な傾向は、球の中心が薬端表面に一致するとき、侵入度すなわち球の噴出速度が最大となり、球が外部内部の何れへも、爆薬表面から遠ざかるにつれて侵入度も減少する。これを二、三の薬種と、球の大きさについ

図 3 薬端に於ける

球の深さと侵入度

（縦軸は侵入度、横軸は球の中心の爆薬表面からの距離で、プラスは爆薬の外部マイナスは内部を意味する）



て調べた結果が図 3 に示してある。

球が爆薬の内部にあるとき、その噴出速度は表面にあるときに比して減少するというのは、面白いことである。ここで筆者は、更に次のような実験を行つてみた。爆薬に新鋼を用い、球 B を薬端から内部へ 8mm の所へ装着

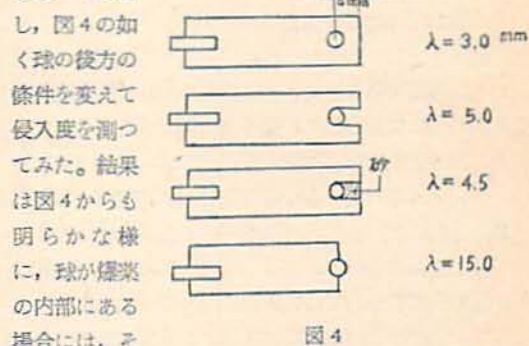


図 4

の後方の状態にはほとんどかわりなく、侵入度が著しく減少するというのである。

図 3 には、侵入度とともに球の破かいの状態がプロットしてある。この実験に現れた球の破かいには、図 5 の如き一連の系列があつて、図の左から右へ行くに従つて烈しい破かいを受けたものと考えてよい。図 3 のプロットマーク、○▲×等は、それぞれ図 5 のような段階の破かいに相当するものである。



図 5 球の破かいの系列

Ⅳ 実験結果の意義

筆者は以上の実験結果にもとづき、球の侵入度及び破かいに関して次のような意義付けを行つてみたい。

まず球の噴出（測定面では侵入度）と破かいとは、全く別な作用因子のなせる効果であるということである。力が作用したとき、物が動いてしまえばそこには破かいは起らないわけで、球が破かいを起した瞬間は少くとも球は動いていない。従つてこの実験の場合、球には先ず破かいの因子、次いで噴出の因子と、二種類の力が作用したことになる。そして筆者はそれぞれの因子として、前者に爆こう波、後者にガス膨張をあてはめたい。

つまり筆者の意義付けは、仮定の形で次の三つにわけられる。

(I) 爆薬の表面近くには、少くとも二種類の作用力が働き、この実験では鋼球の破かい及び侵入度として現れる。

(II) 球の破かいは、爆こう波の衝撃によるもので、言わば動的な作用力にもとづく。

(III) 球の噴出は、反応ガスの膨張によるもので、言わば静的な作用力にもとづく。

爆薬がそれに近接した物体に及ぼす作用力に、少くとも二種類あることは、桜井氏が鉛柱圧縮の実験⁽⁶⁾でも認められて居る通り、先ず間違いないことである。図3に示された実験結果に於ても、侵入度と破かいは、それぞれ最大となる装置位置に、若干ずれるのであることは、(I)を証拠づける一つの資料ともなる。

爆こう波の衝撃が、どうして球に破かいをひき起こすかという点については、筆者は図5の「欠け」に注目して、これがこの種の球の破かいの本質であるという見方から、Rinehartの言う scabbing⁽⁷⁾を、そのまま「欠け」にあてはめたい。すなわち「欠け」は、球内を伝はんする応力波の、端面に於ける反射が原因であるとするのである。

桜井氏は圧縮の実験⁽⁶⁾で、爆薬から鉛柱の中へ伝達される応力波を求めて居られるが、鋼球に伝達される応力波も、それに似た形を持つていとすれば、直径の小さい球では scabbing の生じないことは明らかである。図3に掲げた実験で、球A (直径2.2mm) には何らの破かきも起していないが、球に出来る「欠け」の深さが、約2mmの程度であることから、直径2mm程度の球に破かきの起らないのは当然である。逆に言えば、このことは仮定(II)を裏付ける結果にもなる。

次に仮定(III)の意味を、ここでもう少し具体的に述べてみよう。爆こう波の通過に伴って、球は直ちに高压にさらされるが、慣性その他の理由からすぐに動き出すことはない。そして球はあたかも高压の圧力だまりに浸されたような形となり、ある緩和時間を経たのち、周囲の圧力によって動き出すとするのである。従って(III)の仮定には、噴出の緩和時間が存在するという意味を、陰に含んでいるものと考えてよい。

以上(I)から(III)まで、三つの仮定をもとにして、これらを検討しつつ、これから実験結果の解釈を試みよう。

V ポテンシャルとの類推

先ず図3に得た所の、球の噴出速度は、爆薬表面に於て最大となり、その両側では減衰するという結果は、

筆者にポテンシャルによる力を思い浮かぼせる。爆破理論などでは、岩石内の応力分布を、爆薬によつて与えられるポテンシャル力的なものとして取扱うことは、応々に行われている⁽⁸⁾。この考えを爆薬内部にまで延長して、薬端に於ける爆薬表面附近のポテンシャル力を計算してみると、図6の如く、曲線の性質としては、図3と非常によく似たものが得られる。

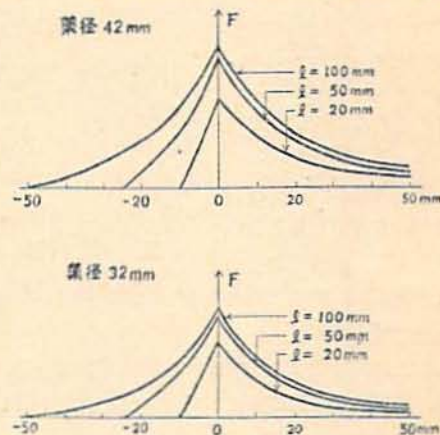


図6 円筒の軸方向に対するポテンシャル力

ここに筆者が、ポテンシャル力を持出した理由は、先の仮定(II)から次のような考え方にもとづいている。高压に於けるガス分子は、相互に反発力を及ぼしながら密集して居る。従つてこの中に浸された球は、これら反発力の総和を表面に受けて飛び出すであろう。一方例えば同符号の荷電を持った物質が密集しているときは、それら相互間には当然反発力が働いている。しかしそれらを一つの集りとして見てしまえば、周辺に及ぼす力はただ、物体の形状のみから定まる一つのポテンシャル力となる。もちろんこの二つの場合は、完全に同じものとは考えられないが、そのような類推が成り立つて、実験結果とかなりよく一致するのは、面白いことである。

図6に於て、筆者はポテンシャル力にあずかる有効薬長 l を二三変化させてみた。図からもわかるように、これによつて曲線の減衰の有様は変化する。後に述べる圧力と侵入度の関係をにらみ合せて考えると、図3の曲線は、何れも有効薬長が5cmないしは10cmのポテンシャル曲線とよく似ているように思われる。

もつとも図3で、大きい球B, Cについては、爆薬内部への減衰がなだらかではなく、途中に変曲点を持つて居る。これは小さいA球では認められないので、恐らく球が有限の大きさを持つて居ることによるものであろう。極限として、直径零の球について図3のよ

うな曲線が得られたならばそれは、純粋に爆薬の生ずる静的な力の場を表わしていることになる。

Ⅶ 球の大きさと侵入度

次に球の装着位置は、その中心が薬端の表面に来るようにし（侵入度最大の条件）、球の直径を変化させたものについて、各薬種の侵入度及び球の破かいの状況を調べてみると、図7のような結果が得られた。

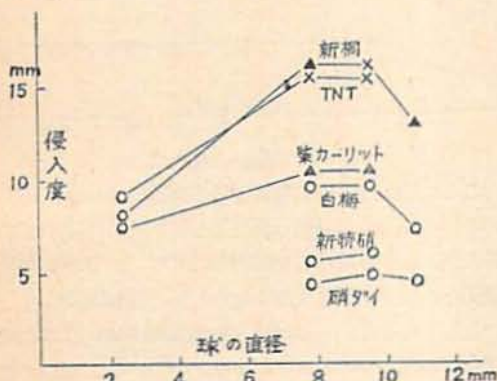


図7 球の大きさと侵入度

ここに記した工業爆薬は、何れも普通サイズ (32mm) のもので、TNTのみは 42mm×300g ($\lambda=1.0$) である。図7は、実験データとしてはまだ不十分であるが、それでも図から、直径 d と侵入度 λ の間に一般的な傾向を見つけ出すことは出来る。

この場合には、言うまでもなく、侵入度がそのまま球の噴出速度を表わしているという見方は成り立たない。すなわち球の直径が違えば、噴出速度は同じであっても、侵入度に差が生ずることは当然考えられるからである。

ここで又仮定(Ⅲ)にもとづいて、直径 d と侵入度 λ の関係を、次のように結びつけてみる。球は高压の中に、ある緩和時間で浸って飛び出すわけであり、今の場合高压にさらされたのは球の半面である。そこで球の断面積を A 、圧力を P 、球の質量を M 、噴出速度を V とすれば、

$$MV = A \int_0^{\lambda} P dt$$

と書ける。今 $\int_0^{\lambda} P dt = I = \text{const.}$ と置けば、 $A \propto d^2$ 、 $M \propto d^3$ によって

$$V \propto d^{-1}$$

を得る。そこで通常用いられる侵徹式⁽¹⁶⁾を使って、上式を d 対 λ の関係に引き直してみると

$$\lambda \propto d^{2/3}$$

なる形の式が得られ、ここに λ は用いた侵徹式によつて若干変化するが、大体-1.0 から-1.8 の間にくる。ところが λ がマイナスになるということは、直径の小さいものほど、侵入度が大きいという意味で、図7の d 対 λ の性質が、右半分はとも角、左半分の直径が小さい部分の説明は、このままでは出来ないことになる。

上式を導くにあたっては、 $\int_0^{\lambda} P dt = I = \text{const.}$ とし

たが、 I が球の直径によつて若干変化すると考えてみる。もちろん P そのものは、球の大小にかかわりないので、 I の変化は緩和時間 τ の変化を意味する。今例えば $I \propto d$ と置いてみると、得られた $\lambda \propto d^{2/3}$ の指数はプラス1でいどになり、今度は逆に直径の小さいほど侵入度は小さいという結果になる。従つて球の直径が大きいたまには、噴出の緩和時間は一定であるが、直径が小さくなると、緩和時間もそれにつれて短くなる領域があるという風に考えれば、仮定(Ⅲ)にもとづいて図7はうまく説明出来る。もつともこの辺のくわしい議論をしようと思えば、もつともいろいろな大きさの球について、多くのデータを得て置くことが必要であろう。

Ⅶ 側面への噴出

以上述べて来たことによつて、筆者の前に挙げた仮定(Ⅰ)~(Ⅲ)は、ほぼ事実を描いているものと見てよいが、これを更にはつりさせるには、次のような実験を行えばよい。

すなわち今までと違つて、球を爆薬の側面に装着する。このときも、侵入度及び球の破かいの、装着深さによる変化は、図3の結果と全く同じで、ただその値が全般的にやや小さくなるだけである。ここで球に「欠け」を生ずる場合、

その方向性に注目してみると、図8の如く、球の噴出方向とはかかわりなく、あくまで爆着の進行方向を向いている。これについて筆者は、あるいは球が飛行中に回転するのではないかと考えて、表面に刻印のあるバチンコ玉でも実験してみたが、そのような事実は認められなかつた。図8の結果は、明らかに球の

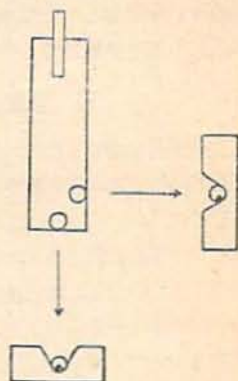


図8 「欠け」の方向性

噴出と破かいとが、全く別な作用因子にもとづくことを示し、「欠け」やそれに伴う破かいが、爆こう波と密接に結び付いていることを示す以外の、何ものでもないように思われる。

図8で更に注意すべきことは、球の噴出方向が、薬包とほとんど直角をなしていることである。筆者はこの実験を、各薬種の場合につき、また比較的慣性の小さい球Aを選んで行つてみたが、薬の表面から10cm程度の距離では、噴出方向に角度があるとしてもせいぜい10°内外で、大部分は直角方向に飛ぶとみなしても良いことがわかった。これは球の噴出が、爆こう波においては爆こう進行方向などに無関係な、静圧的な効果にもとづくという立場をとらない限り、説明に苦しむ所であろうと思う。

それでは球が爆こう波による衝撃を一度受けてから、ガス圧によって飛び出すまでの緩和時間は、果して如何程であろうか。筆者の簡単な実験では、残念ながらこれに答えるものを、何も持っていない。しかしそれに関する手がかりを与えるものとして前にポテンシャルの所で述べた有効薬長なるものがある。すなわち有効薬長が長いということは、球がそれだけの長さから受ける力の効果を待つて飛び出すという意味にもとれるから、有効薬長の長いものは、緩和時間も長いと考えて良い様な気がする。しかし有効薬長は本来の性質から爆薬固有のものと考えられるのに反し、緩和時間の方は、球の大小に係る因子も含まれているように思われる。しかしこの点について筆者は、緩和時間が球の大小によるのは前項にも述べた如く、球があるていど小さいもののみであるという立場から、これを例外的なものとはしない。すなわちここに言う緩和時間とは、爆薬の動的因子が働いてから、次に静的因子が作用するまでの時間遅れという風にとれば、本質的な性格を帯びてくる。

VIII 薬長と侵入度

有効薬長を求めるには、爆薬の長さをいろいろ変えたものについて、侵入度を求め、その飽和に達する薬長をとればよい。筆者はこれを42mm紙筒のTNTについて、薬端に於ける侵入度から図9を得た。図からこの条件でのTNTの有効薬長は、7cm附近にあることがわかる(一方このとき、爆速が定常になるのは、ほぼ25cmであるから、破かいに関するプロットマークは、ここでも球の破かいが直接爆こう波と結び付いていることを示す)。

球の噴出の如き、爆薬の静的効果を表すものにあ

る一定の有効薬長が存在することは、板井氏の実験⁽¹⁾で同じTNTについて、Hess 硬度試験の鉛柱圧縮量が、薬長5cmで飽和に達することとくらべて興味ある問題である。

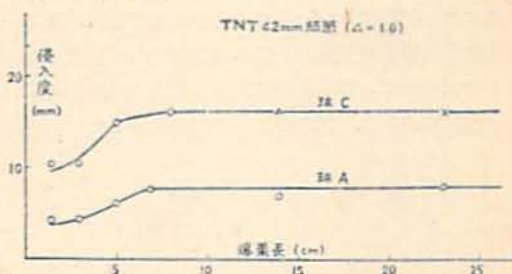


図9 爆薬長と侵入度

ここで例えば、球の噴出速度が測定出来れば、更にいろいろ突込んだ議論も出来ようが、それに関する二三の試みは、今のところ成功していない。しかし有効薬長を、仮りに爆速で割つたものが、緩和時間に等しいとしてみると、 $l=7\text{cm}$, $D=4,000\text{m/sec}$ (TNT紙筒)の場合、 $\tau=1.75 \times 10^{-5}\text{sec}$ となる。そこで先に噴出速度に関して挙げた式

$$MV=AI$$

で、 $I=\int_0^{\tau} P dt \approx P \cdot \tau$ と置き、 $P=60,000\text{atm}$ としてみると、球Cの場合 $V \approx 2,000\text{m/sec}$ なる値が得られる。これには P の時間による変化を考慮していないので、実際の V ではもっと小さな値になるはずであろうから、その意味でこの V は、さして不自然な値ではない。従つて

$$\tau=l/D$$

という仮定が、あるいは成り立つのかも知れない。

XI 総 括

いささか筆の運びが散漫になつた嫌いはあるが、以上を要約すると次のようなことになる。

(1) 爆薬の爆発が物体に与える力学的効果には、動的な因子と静的な因子との二種類がある。動的因子は爆こう波が物体中へ強い応力波を送り込むことによるもので、著しい破かいを伴い、一方静的因子は、反応ガスの膨張によつて、物体を押しやるような作用を起す。

(2) この二つの効果は、筆者の実験では、爆薬に装着した鋼球の、破かい及び噴出速度(鉛ブロックへの侵入度)として現れる。

(3) 爆薬の動的効果は、爆速が最高値に達しない内は充分と言えないが、静的因子にもそれと同じく、

ある薬長以下では充分な効果を示さないことが云え、その有効薬長は42mm紙筒の TNT の場合、ほぼ7cmである。

(4) 動的因子と静的因子の作用時間には、若干の遅れがあり、それを緩和時間と呼べば、緩和時間は有効薬長を爆速で割つたものに等しいと置いても良いように思われる。

(5) 爆薬の力にポテンシャル的な見方をすることは、力の静的因子のみに限つて言えば、これを爆薬周辺から内部にまで適用し得る可能性を含んでいる。

終りにこの研究に関して、終始物心両面の援助を賜つた桜井武尙氏、並びに村田博士の厚意に感謝する。

文 献

(1) Eyring, H. 等: Chem. Rev. 45, 69 (1949)

(2) Oppenheim, A. K.: J. Appl. Mech. 19, 63 (1952)

(3) Brinkley, S. R. & Kirkwood, J. G.: Phys. Rev. 72, 1107 (1947)

(4) 村田勉: 火協誌 10, 68 (1949)

(5) 山本祐徳: 火協誌 12, 152 (1951)

(6) 桜井武尙: 火協誌 14, 212 (1953)

(7) Rinehart, J. S.: J. Appl. Phys. 22, 555 (1951)

(8) 桜井武尙: 火協誌 14, 220 (1953)

(9) 山家信次: 火協誌 10, 110 (1949); 12, 75 (1951)

(10) Régnault, M. P.: 火兵誌 33, 381 (1940)

(11) 桜井武尙: 工火協講演会 (1954年5月25日)

ハイドロックスについて

(昭和 29 年 7 月 5 日 受理)

山本祐徳・沢田継男・鈴木輝彦

(東大工学部火薬学教室)

1. 緒 言

緩かなガス圧を展開する黒色火薬の機能は採炭用爆破薬としてきわめて魅力的である。若し爆発温度が低く火災が小さかつたら申分がない。そこで先ず考えられるのは、硝安を基剤とする酸性爆破薬である。しかし硝安の爆発分解では $(\text{NH}_4\text{NO}_3 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{N}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2)$ 過剰の酸素が遊離される。これは酸素結合が正であるという限度を越えているから、メタン等に触れて直接燃焼を起す恐れがある。さりとて可燃物の混入により炭酸ガスや水蒸気に変えることも、発熱や温度上昇のために面白くない。そこで硝安と重炭酸アンモニウムとの混合物を黒色火薬で分解させる考案が生れた。



この反応は分解温度が低く、ガス発生量が多いから有望ではあるが、重炭酸アンモニウムそのものは 35°C 辺から分解を起し、又貯蔵中に昇華消散する欠点があるから商品的に価値に乏しい。

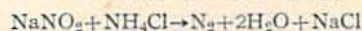
又硝安より酸素の少ない亜硝酸アンモニウムは低温度でたやすく水と窒素とに分解し、酸素を遊離しないが、不安定な物質であるから、このままでは火薬的の実用

に適しない。そこで間接にこのものを形成する方法として亜硝酸ナトリウムと塩化アンモニウムの混合体が着目され、これが Hydrox として世に出たのである。この混合物は本質的に安定ではないから、その貯蔵には乾燥状態に在らしめるか然らざれば適当な安定剤の添加を必要とする。

かくして英国 ICI 会社の名において多数の特許が確定しているが、爆力或は爆破効果については詳細が不明である。よつて 2~3 の実験を試みて爆破薬としての特性のあらましを窺知することを得た。

2. ハイドロックス反応

ハイドロックスの原理は次の方程式に基づく。



式の左右物質の常温定圧生成熱 (kcal/mol) を

$[\text{NaNO}_2]$	$[\text{NH}_4\text{Cl}]$	(H_2O)	$[\text{NaCl}]$
86.5	76.8	57.8	98.4

とすると、上式の反応における定積反応熱は

$$Q_r(\text{NaNO}_2 + \text{NH}_4\text{Cl}) = 2 \times 57.8 + 98.4 - 86.5 - 76.8 + 0.5724 \times 3 = 52.4 \text{ kcal}$$

$$Q_{\text{br}} = 52.4 \times 1000 / 122.5 = 428 \text{ kcal/kg}$$