

構造体試験用低速火薬

田中一三* 清水武夫** 田中克巳*** 疋田 強***

高速原子炉の安全設計のために行われる模擬試験用の低速火薬を開発した。この火薬は、過塩素酸カリとアルミニウムを主成分としたもので、反応速度を遅らせるために、若干成分の異なる二層から成る粒形とし、これをクラフト紙等で作った球形カプセルに収めたものである。

火薬のエネルギー放出速度が、仮想的炉心暴走事故の解析結果と見合ったものであるかどうかは、水中爆発の圧力波形で比較した。また薬量が増加したときの仕事エネルギー等も、水中爆発実験から求めた。そしてこの火薬が、従来用いられたペントライト等の高速爆薬に比して模擬試験用としてすぐれた性能を持つことを明らかにした。

1. 緒 言

この数年来、わが国でも高速増殖型原子炉の開発が進められ、その一部として安全設計のための試験がなされてきた。すなわち原子炉構造体を模擬した容器内で、炉心の暴走反応を爆薬（主としてペントライト）の爆発でおきかえ、周囲の熱媒体の液体ナトリウムの代りに水を満たした条件で、一種の水中爆発試験を行うものである¹⁾。そしてこの際の構造体の変形、およびそれによるエネルギーの吸収などを評価して、必要な安全度を得るための設計資料とする。

この研究は諸外国でも精力的に行われており、最近では核暴走の模擬をできるだけ忠実にするため、エネルギー放出の緩慢な火薬類をわざわざ試作して、試験をする傾向にある。わが国でも前回の試験では、ペントライトのほかに爆速の低い爆薬を使つての比較を試みたが、やはり爆速によって変形に差のあることを知った²⁾。そのため実際の反応がかなりゆるやかである核暴走モデルにはそれに見合った火薬による試験が必要であるとされ、筆者等を中心とするモデル火薬開発委員会が組織された。

必要なモデル火薬の性能は、発生するエネルギー値とその放出速度で規定される。そして後者は、性能試験の方法との関連で、水中爆発の圧力波形で定めることになった。具体的には、事故モデルの 1/15 スケールの試験用火薬として、有効破壊エネルギー 30~120

kJoule、爆心から 6cm における水中圧力波のピーク値 100~500bar、圧力波の持続時間（圧力値が 20bar まで下る時間とする）1~4msec が与えられた。そして事故モデルのスケールを変えて試験するときのために、上述の性能の薬量による変化、すなわちスケール法則の検討も、あわせて要求された。

上の数値を通常の爆薬と比較すると、エネルギーとしては TNT の 15~60 ぶんに相当するが、圧力ピーク値は同量の TNT の数十分の一であり、圧力持続時間は逆に数十倍も長い。このような性質の火薬の製作には二通りの方法が考えられる。一つはそれ自体の反応は早いものを用いても、薬包に緩衝効果を用いることでエネルギー放出を遅らせる方法、もう一つはそれ自体反応速度の遅い火薬類を用いる方法である。

筆者等の行なつたのは、後者の緩衝性の火薬を使う方法である。そしてほぼ上記の仕様にかなるモデル火薬を得ることができた。この種の火薬は全く特殊用途に属するもので、また従来は基礎的研究のあまりなされていなかった分野である。その意味で、われわれの行なつた研究を以下報告の形でまとめておくことは、何らかの価値を持つてであろうと思われた。

本文では、はじめに火薬の開発過程について述べる。その後で、得られた火薬のエネルギー測定と、圧力波測定のデータを与える。後者では薬量効果を含めた性能試験が行われており、当初の目標であるモデル火薬としての性能のほかに、使用したアルミニウム剤火薬の一般的データとして有意義なものと思われる。

2. 火薬の選定

この目的のための火薬として、緩衝材を使わない系

昭和49年11月18日受理

* 東京工業試験所第7部 神奈川県平塚市新宿85

** 興亞化工株式会社埼玉工場 埼玉県入間郡日高町大字上鹿山字永谷 801-1

*** 東京大学工学部反応化学科 東京都文京区本郷 7-3-1

統では、諸外国で試みられたのは、Mg, Al 等の金属に $KClO_3$ または $KClO_4$ を配合したもの⁹⁾、および無煙火薬系のものである⁹⁾。本研究では前者の系統を選んで、まずおおよその組成をきめる予備試験を行った。

試料火薬をクラフト紙で3周ていど包んだものに、アルミニウム柱の測圧器をつけて、水中および砂中で爆発させ、発生圧力の目安を求めた。火薬はアルミニウム剤 (Al 20, $KClO_4$ 70, As_2S_3 10)、マグネシウム剤 (Mg 30, $KClO_4$ 35, $Ba(NO_3)_2$ 35) を主体とし、点火玉と8号雷管で起爆した。その結果、点火玉による発火では圧力値が低すぎることを、マグネシウム剤では雷管起爆でも所要の圧力に達しないことがわかった。従って以下の実験は、アルミニウム剤について

重点的に行われた。

アルミニウム剤の代表的組成について流し写真で爆速測定を行なった結果を、Table 1 に示す。試料火薬は内径 3.4cm, 長さ 69.5cm, 厚さ 0.2~0.25cm のクラフト紙筒に充填し、8号雷管で起爆した (一部は点火玉を用いた)。薬包の側面には、10cm おきに横穴を設けて火炎の位置を見やすくした。

爆速試験は3種類の組成で行なったが、薬種Bが最も高い爆速を示し、Cが最も低かった。配合組成からみて、硫黄の混入が爆速を高めていることがわかる。この種類の火薬の爆速は、雷管起爆で 1200~1400m/sec であり、比重を高めると、爆薬の場合とは逆に、爆速が低下することが見られる。

Table 1 Detonation Velocity of Metal-perchlorate Explosives

Explosive	Composition (Weight %)	Initiation	Density (g/cc)	Detonation velocity (m/sec)	
				Measured	Mean
A	Al (flake)* 27 $KClO_4$ 70 S 5	No. 8 Detonator	0.62	1418	1363
			0.65	1371	
			0.66	1299	
			0.85	1128	
		Fusehead	0.85	1438	1285
			0.62	689	867
			0.62	1045	
			B	Al (flake)* 23 $KClO_4$ 64 S 13	Fusehead Detonator
0.64	1391				
C	Al (flake)* 28 $KClO_4$ 72	No. 8 Detonator			0.63
			0.64	1282	

* 5~1 μ

3. 火薬仕様の決定

火薬の仕様を最終的に定めるためには、水中爆発における衝撃圧の測定が必要である。このために内径95cm, 深さ130cm, 肉厚1.9cmの鉄製水槽を用意した。この水槽を、以下小型水槽と呼ぶ。測圧には Kistler 607A 型測圧器を、504D 型チャージアンプと共に使用した。火薬は水槽の中央で爆発させ、測圧器はリード線を内部に通したパイプ (1インチ径) の先端に受圧面を水中に露出させた形で水槽の壁にネジ止めし、火薬の側方6cm, 12cm, および下方6cmの位置に固定した。圧力波形の記録には、理研電子 TCD-1000S 型トランジエントレコーダー (2チャンネル)

を使用した。

本研究の対象になっている火薬では、被包 (以下カプセルと呼ぶ) の強度が、爆発時の圧力特性に影響する。カプセルは弱い紙製の二つの半球を合わせ、その上にクラフト紙を貼り合わせて作った球形とし、試験のためのカプセルの厚さの基準を、クラフト紙層について Table 2 のように定めた (例えば F のカプセルは、外径 5cm では 1mm, 10cm では 2mm となる)。そしてカプセルの外側は、厚さ 0.05mm の塩化ビニールシートで包み、端末を接着剤で密封防水した。

基準のカプセルに収めた火薬 (粉状) について、水中衝撃波の圧力測定を行なった結果は、Table 3 の

Table 2 Capsule of Explosive

Signification	Ratio of thickness of outer capsule* to diameter	Breaking internal pressure (bar)
F	1/50	about 30
2F	2/50	" 60
4F	4/50	" 120

* See Fig. 1

Table 3 Pressure Wave in Water Generated by Capsulated Explosive in Powder State*

Initiation	Density (g/cc)	Downward direction**		Lateral direction**	
		Max Pressure (bar)	Wave width (msec)	Max. Pressure (bar)	Wave width (msec)
No. 8 Detonator	0.65	620	0.45	340	0.65
	0.65	300	0.30	410	0.45
	0.82	1080	0.42	840	0.28
Fusehead	0.65	305	0.65	—	—
	0.65	420	0.35	370	0.65
	0.82	—	—	230	0.82
	0.82	420	0.72	385	0.80

* Capsule and charging weight are kept constant, F and 23g, respectively.

** 6cm distant from the center of charge.

空隙を設ける方法、成分中に黒色火薬を混ぜる方法を試みたが、所期の結果は得られなかった。そこで今まで、粉状の火薬を用いていた代りに、火薬を造粒して個々の粒子の燃焼時間を長くすることを試みた。

こうして得られた火薬粒の最終仕様は、Table 4 のようになった。そして点火には、コンクリート破砕器用の点火管（旭化成 CCR 用）が最適であった。

装薬の構造は Fig. 1、外見は Fig. 2 のようなものである。この仕様の薬量 30g の試料について、水中

ようになった。圧力波の持続時間は、圧力の立ち上がりから、圧力値が 20bar に下るまでの時間をとったものである。これからピーク圧の値は当初の目標に近いが、持続時間がやや短いことがわかった。点火玉による点火では、圧力値は低いが、持続時間は長い。しかしこの場合は爆発後の水面にアルミニウム粉が浮くことから、やはり完爆していないことが予想された。

圧力波の持続時間を伸ばすためにカプセルの周囲に

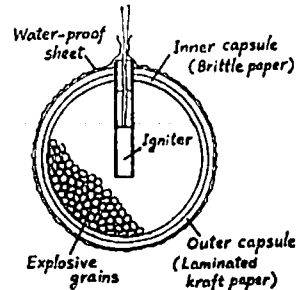


Fig. 1 Capsulated explosive charge.

Table 4 Specification of Explosive Grain.

The grain shall be composed by three zones; core, intermediate and crust zones. Diameters of the core and the crust zones are 1.5 to 2.4mm and 2.9 to 3.5mm, respectively.

Compositions are as follows. Intermediate zone is composed by core and crust zones.

	Core	Crust
KClO ₄	72%	72%
Al (fine flake, 5~1μ)	28	28
Al (atomized, passed 300mesh)	6*	5*
Soluble glutinous rice starch	0.5*	0.5*
Oil suit		

* Additional percent.

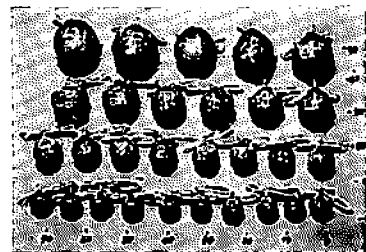


Fig. 2 Appearance of the explosive charges.

圧力波形を測定した結果は Fig. 3 のようになった。ここではカプセルの厚さを 3 種類に変えているが、それによって波形の変化する様子が見られる。最終的に

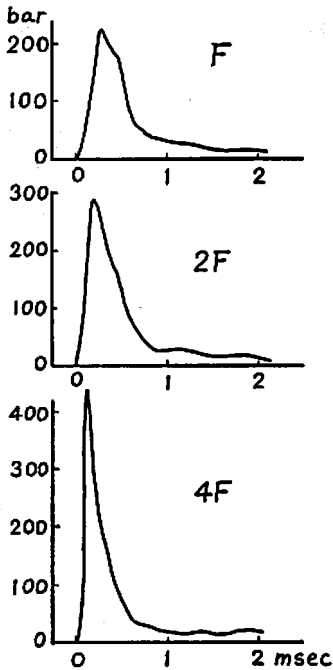


Fig. 3 Pressure wave profiles, showing the effect of capsule, measured at 6cm distant from the center of 30g charges.

はカプセルの厚さはFおよび2Fの2種類とし、これにもとづいて性能試験用の試料を作成した。

Fig. 3 から見て、ここに得られた火薬が、圧力波形に関しては当初の目標値を満たしていることがわかる。もう一つの目標であるエネルギー値についても、ほぼ規定範囲にあることは予想されたが、正確な測定は後の性能試験にゆだねられた。

なお上記のほか、予備試験の段階で次のような実験がなされた。

小型水槽中でこの火薬を爆発させたときの流し写真を撮り、水中での火炎膨張速度を測定した。これは後

に述べる電導度プローブによるガス膨張のデータと比較するためである。プローブによるガス膨張の測定は、予備試験でも行われたが、結果は後の性能試験のデータと一緒に述べる。流し写真との比較も、後に Fig. 10 で示される。

試料火薬をカプセルを用いなくて、一端を密閉した内径 2.5cm のチューブの底に入れ、火薬の上面にはクラフト紙を介して水を滴した条件で、直接薬室内の圧力をピエゾ測圧器で測定した。これはカプセル内のときと必ずしも同じ密閉強度とはみなされないが、得られた圧力値は 200~4000bar であった。この場合の発火も点火管によった。しかし爆発の瞬間には多少のガス洩れがあり、上記の圧力値は厳密なものではない。

また造粒した火薬を点火管で発火したとき、内径 2.5cm の鉄管内ではデトネーションとはならず、表面伝火速度は 300~450m/sec であった。

4. 性能試験

前記のようにして得られた標準仕様の火薬について、その性能をくわしく知るために、大型水槽を使った試験が行われた。そこでは水中圧力波の性状、爆発ガス球の膨張、発生エネルギーの圧力波とガスへの配合比などを求め、さらに薬量を変えたときのスケール法則の適否が検討された。

4.1 実験条件

無限水中での理想的な爆発に近い条件を得るため、試験用の水槽はできるだけ大きい方がよい。ここでは Fig. 4 のような、直径 8m 深さ 4m のものを用いた。

火薬と測定器の距離を正しく保って水中に沈めるために、Fig. 4 に示した枠組を使用した。枠組には測圧器を前面につけてリード線を通したパイプと、ガス球検知のためのプローブを取付ける支持板が固定された。そして火薬の水深は 2m とした。

圧力波の測定は、予備試験と同様、Kistler 社607A

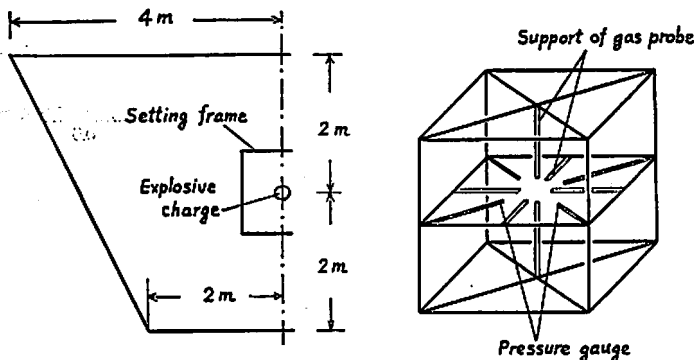


Fig. 4 Water pit and setting frame.

測圧器と 504D チャージポンプによった。

ガス球膨張の測定は、プローブの電導度変化を検出する方法によった⁵⁾。プローブの形状、測定回路等は、著者の一人が爆薬について行なったものと全く同じである⁶⁾。

一回の爆発につき、圧力波の測定は3点、ガス膨張の検出は6点の測定を記録した。測圧器取付け用のパイプは、火薬の中心から受圧面まで6, 12, 24 および 48cm の4種類を用意し、条件に応じて適当な距離を選んで火薬の側面方向に配置した。ガス球検出のためのプローブは、側面方向に6, 9, 12 および15cm

と、上下方向に各12cmの位置に配置した(これらの距離は、枠組設計上の値で、実験時にはそのたびごとに実測した)。

このほか、爆発の瞬間を知るために水槽のヘリに光電装置を置き、爆発光を記録した。各測定器からの電気信号は、発破電流を含めて、すべて Ampex FR 1300 型データレコーダー(14チャンネル)に記録した。記録方式はFMである。(周波数 DC~20kHz)。

試験に用いた火薬粒の仕様組成は、先の Table 4 に示した通りで、これを Table 5 のようにカプセルを変えて6種類の試料を用意した。左欄の記号は、試

Table 5 Indication of Tested Explosives

Notation	Explosive weight (g)	Thickness of capsule*	Outer diameter (mm)	Inner diameter (mm)	Volume (cc)	Charging density (g/cc)	Total weight (g)
F3	30	6	50	41	34.5	0.87	4g
F9	90	9	67	59	105.3	0.85	131
2F9	90	18	71	59	105.3	0.85	151
F24	240	12	90	78	245.7	0.98	330
2F24	240	24	95	78	245.7	0.98	380
F48	480	15	112	98	489.5	0.98	640

* Indicates number of layers of kraft paper, which has a thickness of 0.09mm.

料の種類を区別するためのもので、最初の F または 2F はカプセルの強さ (Table 2 参照) を示し、あとの数字は薬量 (グラム数の末尾の 0 を除いたもの) を示している。

実験は、薬量 480g の場合を除いて、同一薬量で5回宛行い、薬量 90g および 240g では、カプセルの強さの効果を見る試験をあわせ行なった。

4.2 試験結果

測圧器に得られた代表的な圧力波形を Fig. 5 に示した。図は薬量 90g で、カプセル強度 F (実線) と 2F (点線) の2回の試験結果を、測定距離ごとに描いたものである。波の立上りおよび持続時間は、いずれも爆薬にくらべてはるかに長い。Fig. 6 は、比較のために示したテトリル 10g の衝撃波形である。

爆心からの距離 R ごとに、得られた圧力波のピーク値 P および時間幅 t_p を整理すると、Table 6 のようになった。この結果から、圧力ピーク値 P の距離 R による減衰を、薬量別に対数グラフにプロットすると、Fig. 7 が得られた。なおこの図の薬量 30g のデータには、Table 6 の結果のほかに、小型水槽による予備実験の結果も含まれている。図で横線をつけたプロットは、カプセル 2F のもの、他はカプセル F である。

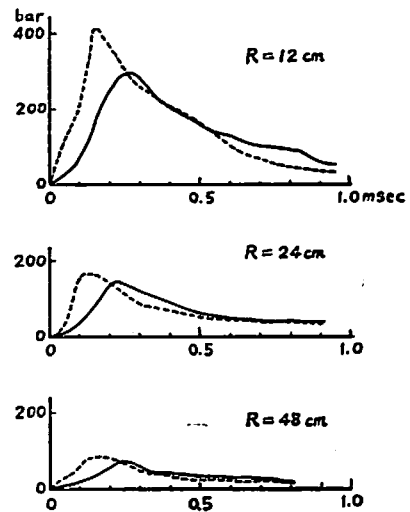


Fig. 5 Pressure wave profiles of 90g shots. Capsule F (solid curves) and 2F (dotted curves) R is the distance from the center of charge.

Table 6 および Fig. 7 から、薬量の小さいところでは、カプセルの強度が明らかに圧力波形に影響を及ぼしていることがわかる。しかし薬量の増加に従つ

Table 6 Result on Pressure Wave

No.	Peak pressure $P(\text{bar})$				Width of wave $t_p(\text{msec})$			
	$R: 6\text{cm}$	12cm	24cm	48cm	$R: 6\text{cm}$	12cm	24cm	48cm
F 3-01	242	131	60	—	0.87	0.95	4.60	—
-04	240	148	62	—	>1.28	0.97	1.11	—
-05	168	135	57	—	1.54	1.03	0.80	—
F 9-06	—	310	154	—	—	1.60	1.17	—
-07	—	300	160	70	—	1.43	1.00	—
-08	—	319	154	82	—	1.44	1.08	0.88
2F 9-09	—	455	177	99	—	1.25	1.39	0.46
-10	—	333	151	87	—	1.26	1.73	0.63
F 24-11	—	683	413	170	—	0.89	1.73	—
-12	—	—	332	203	—	—	1.48	—
-13	—	—	358	194	—	—	1.37	—
F 24-14	—	—	360	200	—	—	1.56	1.37
-15	—	—	393	171	—	—	1.46	—
F 48-16	—	—	509	286	—	—	1.25	—

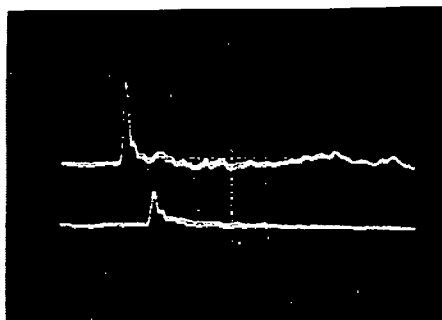


Fig. 6 Shock wave profiles of Tetryl 10g. Upper: 24cm, lower: 48cm distant from the charge. Pressure: 150bar/div. Time: 0.2msec/div.

て、カプセルの差はそれほど目立たなくなってくる。

ガス検知プローブで得られる信号は、Fig. 8 下のようのものであった。すなわち通常の爆薬では、最初の衝撃波による瞬間的な電導度増加のあと、ガス層の到達で電導度はすぐ低下するのに対し、この火薬では、ガス層の到達でふたたび電導度が増加し、しばらくたって減少しはじめる。これは火薬の性質上、ガスが膨張した後も反応が持続していて、ガスの電導度が高いためと思われる。そのため、衝撃波通過後の、電導度増加の点をガス層の到達とみなした。

こうして得られたガス層の初期膨張過程は、グラフに示すと Fig. 9 のようになった。この現象にはスケール法則が成り立つように思われたので、図には換算

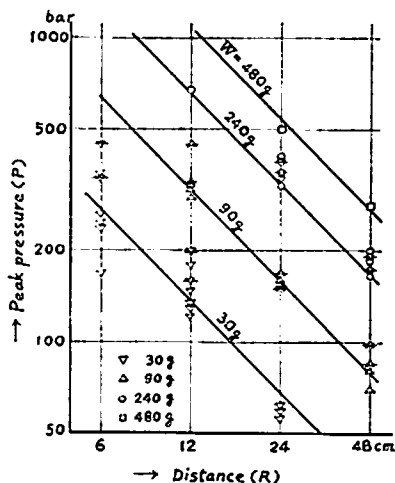


Fig. 7 Attenuation of pressure wave. Symbols with small bar are concerned with 2F, others with F. Straight lines represent Eq. (4)

距離 R/λ および換算時間 t/λ を使って、全部の結果をまとめてプロットしてある。ただし縮尺比 λ は、薬量 30g のデータが基準になるように (すなわち $\lambda = (W/30)^{1/3}$) とった。

図に見られるように、結果にはかなりばらつきがあった。この場合カプセル F と 2F の有意差は認められなかった、図には区別をしていない。また試料の側面方向と上下方向にも差は認められなかった。

次に測定結果から、試験火薬のエネルギ-を、圧力

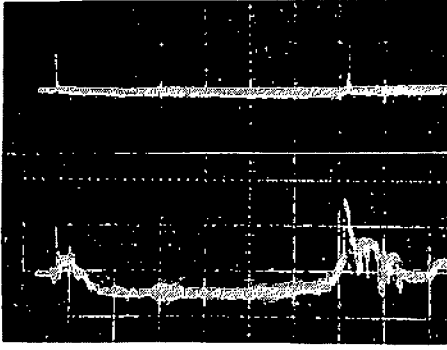


Fig. 8 Example of recorded signals at 90g shot, showing pressure signal by piezo gauge (upper) and gas probe signal (lower). Time scale : 20msec/div.

波エネルギー E_W と、ガスエネルギー E_G にかけて、下記の方法で計算した。

水中衝撃波に伴うエネルギー E_W は、距離 R の点で測定した圧力波形が $p(t)$ であるとき、

$$E_W = \frac{4\pi R^2}{\rho_0} \int \frac{[p(t)]^2}{U_s - u} dt$$

で求められる⁷⁾。ここに ρ_0 は水の密度、 U_s および u は、衝撃波の伝播速度および物質速度である。圧力波が弱くてほとんど弾性波とみなされるときは、上式

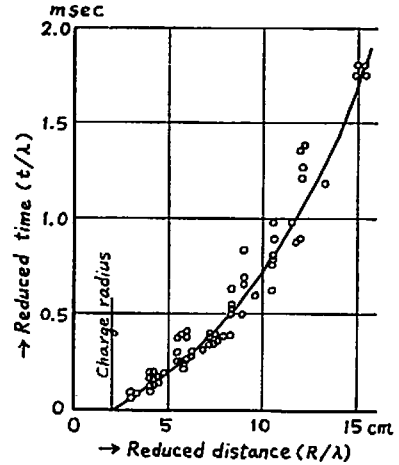


Fig. 9 Expansion of gas bubble. $\lambda = (W/30)^{1/3}$, with explosive weight W .

は、

$$E_W = \frac{4\pi R^2}{\rho_0 C_0} \int [p(t)]^2 dt \quad (1)$$

となる。ここに C_0 は水中の音速である。本実験の結果には、(1) 式を用いた。

ガスエネルギー E_G の計算は、ガス球の脈動周期 T_B から、

Table 7 Result on Energies

No.	Energy of pressure wave				E_W (10^3 joule)	Energy of gas bubble	
	Calculated at each point					T_B (msec)	E_G (10^3 joule)
	$R : 6cm$	12cm	24cm	48cm			
F3-01	3.0	5.5	4.3	—	4.3	96.0	95.5
-04	3.5	6.8	6.6	—	5.6	96.0	95.5
-05	2.6	5.0	2.5	—	3.4	94.3	90.5
F9-06	—	32.4	29.5	—	31.0	143.1	316.2
-07	—	27.7	34.0	—	30.9	138.1	284.2
-08	—	32.3	33.8	29.3	31.8	142.8	314.3
2F-09	—	46.6	34.4	—	40.5	143.7	320.2
-10	—	33.3	30.4	20.8	28.4	140.6	300.0
F24-11	—	106	104	97	102	197.8	835
-12	—	—	138	152	145	197.8	835
-13	—	—	103	140	122	197.2	828
2F-14	—	—	143	127	135	198.0	838
-15	—	—	138	151	144	194.6	795
F48-16	—	—	273	307	290	240.9	1509
Tetryl			6.6	9.6	8.1	57.7	20.7
10 g			8.6	9.2	8.9	57.6	20.6

$$E_0 = 6.84 \times 10^7 T_B^2 p_0^{5/2} \quad (2)$$

によった。脈動周期 T_B は、圧力波信号の第1波と第2波の時間間隔をとり、 p_0 は水深 2m での値、1.2 bar を用いた。

ガス球の脈動周期に圧力波信号を用いることができるのは、圧力波の第2波が、ガス球再収縮の時に発生するものであることによる。ガスプローブ信号の例を、先に Fig. 8 に示したが、その図には圧力波信号を並べて示してある。そしてガス収縮によるプローブの電導度増加が、圧力波の第2波と時間的に一致していることがわかる。

Table 7 には、こうして得られたエネルギー値をまとめてある。表には比較のため、同一条件で実験したテトリル 10g の測定結果を併記した。

5. 考 察

5.1 圧 力 波

爆薬の爆発による水中衝撃波のピーク圧 P は、一般に

$$P = K \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^\alpha \quad (3)$$

に従って減衰する。ここに W は薬量、 R は距離、 K および α は、爆薬によってきまる定数である。

α は波が衝撃波である場合には1より大きい、音波であれば1に等しくなるはずである。本実験に用いた火薬では、測定結果の圧力波形の立上りがゆるやかなことから、衝撃波には至っていないことがわかる。事実得られた伝播速度も、ほとんど水中音速に等しかった。

$\alpha = 1$ であれば、 P は距離に逆比例して減衰する。先の Fig. 7 の結果は、ほぼこの関係を満足している。

しかし爆薬と違って、(3) 式の形で表わしたときの K は一定とならず、通常のスケール法則からのずれが認められた。

Fig. 7 の結果から、薬量 30g の場合には、カプセル強度 F と $2F$ による有意差が見られるが、その違いは薬量の増加とともに目立たなくなることがわかる。図中にプロットされた点から、 P [bar] を W [kg] と R [m] で表わす実験式を作ると、

$$P = 230 \frac{W^{3/4}}{R} \quad (4)$$

が得られた。図に描いた直線は、上式によるものである。(3) 式と比較したとき、 K が薬量とともに大きくなることに相当している。

圧力波の時間幅 t_p は、薬量 30g で約 1msec である。そして薬量の増加とともに伸びる傾向にはあるが、やはり通常のスケール法則とは合致しなかった。この

原因は、一つには薬量によって装填比重が一定にならなかったこと、および火薬粒の大きさが薬量にかかわらず同じであったこと、等によると思われる。

5.2 ガス球の膨張

Fig. 9 に得られたガス球の膨張過程は、かなりばらつきがあるが、その平均を図中の曲線のようにとって膨張速度を計算すると、Table 8 のようになる。表には参考のためにテトリルのデータ⁹⁾を掲げた。両者は直接比較ができるように、距離を装薬半径で割った換算距離を使って表わしてある。この結果から、試験火薬のガス膨張速度は、テトリルより小さいことがわかる。

Table 8 Velocity of Expansion of Gas Bubble

Ratio of distance to change radius R/a	Velocity of expansion (m/sec)	
	Slow explosive	Tetryl
2	168	(370)*
3	125	(233)*
4	83	(160)*
5	66	188
6	55	92
7	44	73
8	37	61
9	32	51
10	28	43

* Estimated

なおこの場合に、ガスプローブで得られた膨張曲線が、流しカメラによる結果と一致しているかどうかを Fig. 10 に示した。流し写真は、試験火薬 30g の水中爆薬における火炎の膨張を、スリットをかけて撮ったもので、数回の測定結果は、図中の実線のものであった。図中のプロットは、Fig. 9 のガスプローブによる結果をそのまま引き写したものである。これから流し写真による場合にもばらつきがあり、ガスプローブの測定とよく合致していることがわかる。高速度写真の例を見ても⁹⁾、爆発初期のガス球にはかなりの凹凸があり、従って測定値のばらつきはやむを得ないと思われる。

5.3 エネルギー

Table 7 に得られた圧力波エネルギーとガスエネルギーを薬量との関係でプロットすると Fig. 11 が得られた。これから試験火薬のエネルギーは、ガスエネルギーについては勾配1の直線となり、薬量に比例していることがわかる。ただ薬量 480g の値だけはやや小さく出ている。このときは小薬量の試験と違って、異

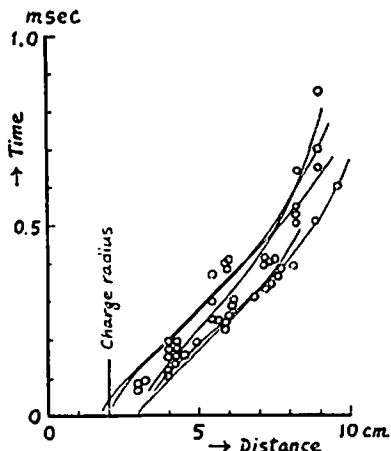


Fig. 10 Expansion of gas bubble. Comparison between gas detecting probe method (small circles) and streak camera (solid curves).

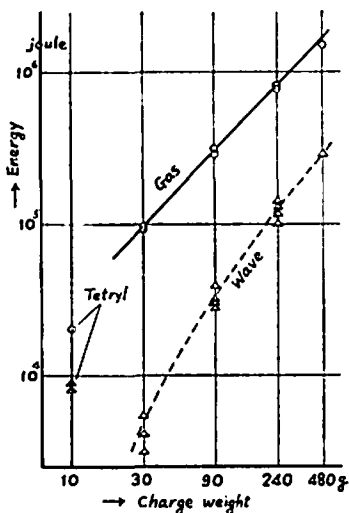


Fig. 11 Calculated energy of tested explosives.

常に大きな水柱が現われたことから、ガスの膨張半径が水面近くまで及び、エネルギーの一部が空中に逃げ去ったものと思われる。

一方圧力波エネルギーに関しては、図から見られるように薬量依存の傾向がある。これは前述の圧力ピーク値のデータからも予想されたことである。この曲線は、薬量の増加とともに勾配1に近づいているので、極限的にはガスエネルギーと同様、スケール法則を満足するようになるのであろう。

図中で薬量10gの位置にあるプロットは、爆薬テトリルによる結果である。爆薬に関してはスケール法

則が成り立つので、これを試験火薬と比較した場合、ガスエネルギーに関しては、試験火薬の方が1.6倍ほど大きく、圧力波エネルギーに関しては、薬量30gにおいては試験火薬はテトリルの約1/10、薬量480gにおいても約1/2程度であることがわかる。ここでは同一条件で試験を行なったテトリルと比較したが、TNTについて得られているデータも、図中のテトリルのそれとほとんど同じである。

Fig. 11 から、試験火薬のガスエネルギーは、1kgあたり3.4Mjouleであるとみなされる。これはTN T、テトリル、ペンスリット等のそれがいずれも2Mjoule前後であることにくらべてかなり大きい。しかしこの火薬の発熱量を計算してみると、1kgあたり2,100kcal (8.8Mjoule) となり、TNT等の約2倍となる。従って試験火薬のガスエネルギーが、この程度の大きさに得られたことは妥当である。

圧力波のエネルギーが小さいことは、火薬の反応形式が燃焼であることから予想される通りである。そのガスエネルギーに対する比率は、薬量の増加につれて大きくなっている。これは燃焼速度（エネルギー発生速度）が薬量とともに増加したためと解釈される。

本研究と同様な目的で、弱いマグネシウム剤に少量のダイナマイトをブースターに使った火薬の例がある³⁾。そこでも水中爆発のガスエネルギーを測定しているが、薬量1.6kgの実験では $E_0=0.46$ Mjouleとなり、本研究の火薬に比してかなり小さい。また薬量1kgあたりのガスエネルギーは、本研究では薬量に無関係に一定に出ているが、その実験では薬量とともに増加している。これは周囲の火薬に比して、強過ぎるブースターを使ったことによるのかもしれない。この点で見ると、本研究で開発された火薬の方が、性能的には好ましいと思われる。

6. 結 論

通常の高性能爆薬にくらべて緩慢なエネルギー発生を必要とする試験用火薬が、アルミニウム剤を造粒してカプセルに収める方法で作られた。この火薬を水中で爆発させたときの性能を、ピエゾ測圧器およびガス検知プローブを用いて測定し、薬量30gから480gの範囲で、次のような結果を得た。（薬量を変えるとき、カプセルの厚さ等も一次元的な比例関係を保つように変えたものを使用している。装填比重は0.85~0.98の範囲にあった）。

- (1) 爆発による水中圧力波は、爆薬のそれにくらべて低く、持続時間も長い。爆心から6~48cmでの測定結果では、圧力波の持続時間は1~1.5 msec、またピーク圧は距離に反比例して減衰した。

ピーク圧 P [bar] を, 薬量 W [kg], 距離 R [m] で表わす実験式として,

$$P=230\frac{W^{3/4}}{R}$$

が得られた。

- (2) 爆発生成ガスはカプセルの存在にもかかわらず、ほぼ球状に拡がること認められた。しかし水中でのガス球膨張速度は、爆薬にくらべてやはり低く、例えば薬径の2倍の点での値は、約 170 m/sec であった。
- (3) 火薬の発熱量は、熱力学的計算によれば 2,100 kcal/kg (8.8Mjoule/kg) であった。これに対して水中爆発によって得られるエネルギー値を、圧力波エネルギーと、ガスエネルギーにおいて求めた。
- (4) 圧力波エネルギーについては、薬量に比例しない関係が得られた。すなわち薬量 30g では 0.13 Mjoule/kg であったが、薬量の増加とともに増え、薬量 480g で 0.60Mjoule/kg に達した。
- (5) ガスエネルギーは薬量に比例し、3.4Mjoule/kg が得られた。これは TNT, テトリル等の約 1.7 倍である。

これらの結果から、ここに得られた火薬が、当初の目標である緩慢なエネルギー発生源としての特性を満足していることが明らかにされ、また発生エネルギー量に関してかなり詳細な知見が得られた。

あとがき

本研究は動力炉核燃料開発事業団の委託により行わ

れたものである。ここに内容の発表を許可された同事業団に厚く御礼申し上げる。

研究の実施にあたっては、東京大学工学部原子力工学科の近藤助教授、動燃事業団高速増殖炉開発本部の川口、加納両博士などから有益な示唆を受けることができた。

また試験用の大型水槽は、日本油脂株式会社武豊工場のものをお借りすることができた。このほか、興亜化工株式会社、東京工業試験所、および原子安全研究協会らの御協力を得たことを報告し、関係者各位に深謝する。

文 献

- 1) 構造機器耐衝撃専門委員会, 「高速実験炉 耐衝撃構造試験研究 (I, II)」, 原子力安全研究協会 (1972)
- 2) 構造機器耐衝撃専門委員会, 「高速実験炉 耐衝撃構造試験研究」, 原子力安全研究協会 (1973)
- 3) International Conference on Engineering of Fast Reactors for Safe and Reliable Operation, 1972, Karlsruhe で発表された Belgonucleaire および Euratom の研究
- 4) 同上, 英国の研究
- 5) National Marine Consultants, NMC—OR—62 (1963)
- 6) 田中一三, 工火誌, 36, 11 (1975)
- 7) R. H. Cole, Underwater Explosions, Princeton University Press (1948)
- 8) E. Swift 他, NAVORD Report 95—46 (1946)

A special slow explosive as an energy source for structure test

Kazumi Tanaka,* Takeo Shimizu,**
Katsumi Tanaka ***and Tsutomu Hikita***

A special slow explosive, as an energy source for structure test of the fast reactor, is developed.

The explosive is composed by potassium perchlorate and aluminum flakes, and formed into double layered grains to get slower burning, and finally enclosed in the spherical capsule made of laminated kraft papers.

Its energy release rate is estimated from pressure wave profile generated in underwater explosion, and compared with that required from the hypothetical core disruptive accidents of the reactor. Dependence of released energy on the charging weight is also measured. The results reveal that the obtained slow explosive has preferable characteristics for proposed purpose.

(*National Chemical Laboratory for Industry, 7th Division, 85 Shinshuku, Hiratsuka-shi.**Koa-kako Co. Ltd., Hitaka-cho, Saiatma-ken. ***University of Tokyo, Faculty of Engineering, Department of Reaction Chemistry, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo.)
