

特集

パルスパワー（その制御と関連現象）

爆薬：高密度化学エネルギー

Explosives ; Chemical Energy of High Energy Density

藤原修三*

Shuzo Fujiwara

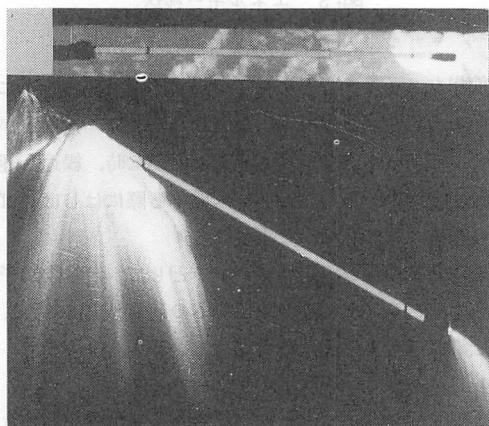
1. はじめに

自然界には各種の爆発的現象があり、人類の歴史とも深い係りを持っている。爆発の中で、最も良く調べられ、また、我々、人類が利用してきたものは“火薬類”の爆発であろう。火薬類の発見は、紀元前60年頃、中国で行われたようであるが、本格的な技術開発は18世紀以後であり、平和利用を目的とする高度な有効利用は第二次大戦後である。火薬類が化学反応を行い反応熱を放出する形態には、“定常燃焼”、“爆発的燃焼”、“爆轟”の三種類があり、爆轟を行う火薬類は“爆薬”とよばれる。高性能な爆薬のエネルギー放出速度は莫大であり、Kgあたり $10^{11} \sim 10^{12}$ W（ワット）にもおよび、現存する物質の中で核エネルギー物質を除くと最もハイパワーなパルスパワー源である。その特徴を要約すると、(1)極めてパワーが大きい、(2)エネルギー放出が容易、かつ、信頼性が高い、(3)経済的に安価である、ということであろう。パルスパワー源として爆薬を有効利用するには各種の他形態エネルギーへの変換手段が必要である。その理由は、爆発で生じたエネルギーのほぼ全量を爆発生成ガスが保有しており、ガス状では有効利用しにくいからである。本稿で、強力な爆発エネルギーの特徴と各種のエネルギー変換方法、特に電磁エネルギーへの変換に関して紹介する。

2. 爆薬の爆発

火薬類は熱力学的な“準安定状態”にある物質で、これに外部より一定強度以上の刺激を与えると活性化され、火薬類を構成する原子・分子間の再配列、すなわち、化学反応が起こり反応熱を放出する。現存する火薬類が放出する熱エネルギーは、高々、単位重量あたり ~ 10 KJ/g、単位体積あたり ~ 20 KJ/cm³程度である。火薬類の何処かの場所で反応が起こり一定量

以上のエネルギーが放出されると、外部よりのエネルギー供給が無くても自身の放出エネルギーで未反応部分の火薬類を順次活性化させ反応を火薬類全体に伝播させることができる。つまり、反応の自己維持が行われるが、この過程において反応熱（エネルギー）の伝わり方が重要である。これには、(1)熱い部分から冷い未反応部分への熱伝導、(2)反応で生成した熱いガスの拡散、(3)衝撃波の三種類があり、各々が支配的な反応伝播形態を(1)定常燃焼、(2)爆発的燃焼(3)爆轟とよぶ。定常燃焼は固体ロケット推進剤の反応が代表的なものであり、反応伝播速度は \sim cm/秒程度である。爆燃は黒色火薬の反応が代表例で、伝播速度は $\sim 10^2$ m/秒にもなるが、系の音速を超えることはない。爆轟は各種の産業爆薬や高性能爆薬の爆発であり、衝撃波を伴って2 \sim 9km/秒の超高速度で伝播する。衝撃波は媒質中を超音速度で伝播する圧縮波であり、その背後で媒質は不連続的な圧縮・加熱を受ける。衝撃波の圧縮・加熱作用は衝撃波伝播速度の二乗に概略比例



内径：10mm長さ：30cmのガラス管に硝酸メチルを入れて写真の左側より強力なブースター爆薬を用いて起爆する。上部は起爆前の静止写真。写真の下方方向が時間軸であり、極めて定常な爆轟波（爆速：6.7km/秒）の軌跡が得られている。

写1 硝酸メチルの爆轟伝播の流しカメラ写真

* 化学技術研究所 安全化学部高密度エネルギー課課長
〒305 茨城県つくば市東1-1

表1 主なパルスパワー源の比較

| 一次エネルギー源 | エネルギー密度 [J/cm ³] | 最大貯蔵 エネルギー [MJ] | 使用可能 エネルギー [MJ] | パルス 持続時間 (10 ⁻³ 秒) | 効 率 [%] | パワー単価 [\mukW] |
|-----------|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------------|------------|------------------------------------|
| 高性能爆薬 | ~10000 | 10000 | ~100 | ~0.1 ⁽²⁾ | ~20 | ~10 ⁻⁴ |
| キャパシターバンク | ~0.2 | ~20 | ~10 | ~0.1 | ~80 | 10 ⁻² ~10 ⁻³ |
| はずみ車 | ~200 | 30000 | ~5 | ~100 | ~30 | ~100 |
| インダクター | 10~100 | ~300 ⁽³⁾ | — | — | — | ~10 ⁻¹ |
| バッテリー(鉛) | ~500 | 360000 | ~10 | ~1000 | 1 | ~300 |

(2) (1) 1秒以下のパルスとして使用できるエネルギー, (2)爆発MHD発電では繰り返し使用が可能→10~100回/秒
(3)エネルギー放出時間が1秒以下のものを掲げた.

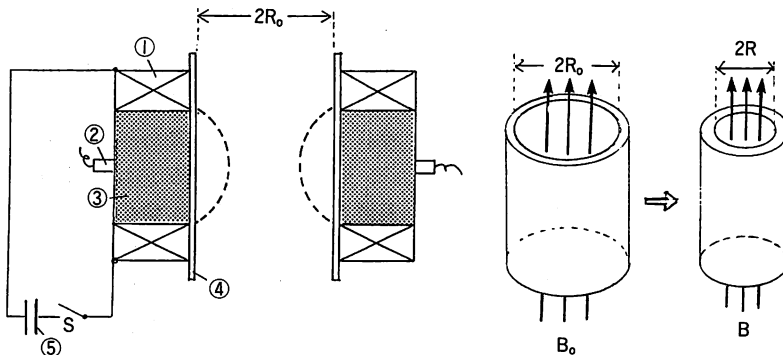
するが、衝撃波へのエネルギー供給が中断すると急速に減衰し通常の弾性波(音波)になる。したがって、一定強度の定常な衝撃波の伝播には一定量のエネルギー供給が必要であり、高速化学反応熱によって維持されるのが爆轟である。衝撃波と発熱高速化学反応が巧妙に結合したこのような流れの形態を“爆轟波”とよぶ。爆薬の中で、エネルギー放出量と爆轟波伝播速度(以下爆速と記す)が共に大きく、かつ、外部環境条件に対して物理・化学的安定性が優れ、一定強度以上の刺激に対してのみ確実に応答して爆轟を行う種類のものは“高性能爆薬”とよばれている。爆薬の爆速は、爆薬種、密度等の初期条件により決まるものであるが、写1の高速流し写真の例からわかるように、高性能爆薬の爆速は極めて定常である。写真は爆轟波面の軌跡が撮影されたものであり、高性能爆薬の爆轟波面における反応生成ガスの温度、圧力、密度は、各々、最大、 $\sim 5 \times 10^3 \text{K}$ 、 $\sim 40 \text{GPa}$ 、 $\sim 3 \text{g/cm}^3$ 程度である。第一節で述べたように、高性能爆薬の放出エネルギーは $\sim 10 \text{KJ/g}$ 、 $\sim 20 \text{KJ/cm}^3$ 程度で、これが $\sim 9 \text{km/秒}$ の伝播速度をもつ爆轟反応により解放され

るのでエネルギー解放速度、すなわち、パワーは爆薬の単位量あたり $\sim 10^{10} \text{W/cm}^2$ 、 $\sim 10^9 \text{W/g}$ 、 $\sim 10^9 \text{W/cm}^3$ という値になる。表1に文献をもとに筆者が推定した各種のパルスパワー源(電力用)の比較を示す。

3. 爆発エネルギーの他形態エネルギーへの変換

3.1 運動エネルギーへの変換

爆薬が爆轟反応で放出するエネルギー、すなわち“爆発エネルギー”は爆発ガスが保有している。ガスの状態では有効利用しにくいので、使用目的に応じて他形態のエネルギーへと変換する必要がある。爆轟のパワーが大きいゆえ、変換効率が少々悪くても、各種のハイパワーなパルスエネルギー源として有効利用することができる。運動エネルギーへの変換は高速飛翔体を得ることであり、現在までに、1~10gの飛翔体が10km/秒以上に加速されている。高速飛翔体を試料物質に衝突させると強力な衝撃波が発生し、試料を圧縮する。高性能爆薬を用いた衝撃圧縮法で5 TPa。(五千万気圧)のパルス状超高压が発生されている。



左側の図は装置の概念を示す断面図である。① 初期磁場発生用マグネット、② 起爆用雷管、③ 高性能爆薬
④ 金属管、⑤ 初期磁場発生用コンデンサー、S: スイッチ、爆発により管が収縮し、磁場(B)が増大する。

図-1 爆縮法

爆発を利用する高速飛翔体の発生方法や超高压力の発生方法に関する詳細は巻末の文献を参照されたい^{1), 2)}。

3.2 電磁エネルギーへの変換

3.2.1 超高磁場の発生 (磁気エネルギー)

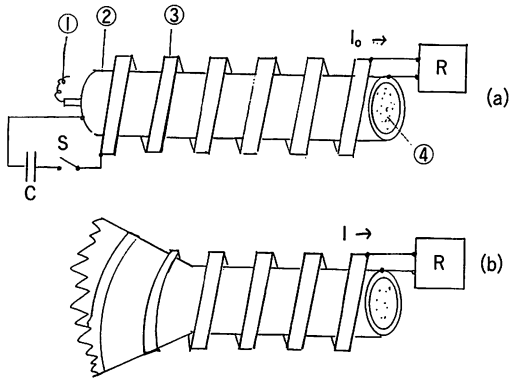
磁場 (界) の強さ: B (単位 T, テスラ, $1\text{T}=10^4$ ガウス) とし, 磁場が生じている物質 (真空も含む) の透磁率を μ とすると単位体積あたりの磁場エネルギーは $B^2/2\mu$ で表わせる。磁性体を除きほとんどの物質の透磁率は真空の透磁率とほぼ同一である。真空中の100Tの磁場は約4 KJのエネルギー密度 (cm^3) となるので, 爆薬のエネルギー密度と略, 同等である。爆薬を使用して超高磁場 ($B>100\text{T}$) を発生させることは, 爆発エネルギーの磁場エネルギーへの変換であり, 種々の方法が試みられているが, 図-1に示すような円筒型磁場濃縮法とよばれる方法が優れている。この方法は“爆縮法”ともよばれ, 1950年代にソ連の Terletskii により公表されたが³⁾, 米国では第二次大戦中から極秘に研究が行われたようである⁴⁾。図-1において, 外部に配置したマグネット (パルスマグネット) で金属管内に初期磁場: B_0 を 10^{-3} 秒程度の時間をかけて注入する。 B_0 がピークになる頃, 金属管を囲む同心円筒状の爆薬を起爆する。起爆は爆薬の外側表面を同時起爆して円形状に収束する爆轟波を発生させる必要がある。爆轟波面が金属管に到達すると金属管は高速度で収縮する。このとき, 金属管を円筒形状に保持しつつ収縮させることが高磁場を得るためのポイントである。金属のような導体板に磁場が滲透して漏れ出すには有限の時間がかかる。時間的に強さが変動する磁場が, t 時間後に導体中へ滲透する深さ: δ は式 (1) で表わせる。

$$(1) \quad \delta = \left(\frac{t}{\pi \cdot \mu \cdot \sigma} \right)^{\frac{1}{2}}$$

μ : 透磁率, σ : 電導度, t : 時間

したがって, 金属管の収縮開始から終了までの時間を t とすると, 金属管の肉厚: d が式 (1) の σ (磁気表皮層) より十分に大きい場合, 管内の磁場が漏れ出すことはない。爆薬を使用することにより容易に前記の条件を満たすことができる。磁場の漏れ出しが無視できると管内の磁束: Φ が保存され, $\Phi = B \times S$ (S : 管の断面積) の定義より管の断面積に反比例して磁場が強くなる, すなわち, 磁場が濃縮されるわけである。磁場濃縮中は, 電磁誘導により金属管の内面壁に沿って管を周回する円電流が発生し, これと磁場との相互

作用により管を拡大する方向へ力が働く。この力, 磁場圧力も $B^2/2\mu$ で表わせ, $B=100\text{T}$ のとき約4 GPa. である。したがって, 理想的には, 管の収縮力と磁場圧力が均衡するまで濃縮が進行する。エネルギー的には, 管の単位長あたりの質量に与えられた初期運動エネルギーがすべて磁場エネルギーの増大に転換されることになる。このような方法で, 直径 (内径) が10 cm程度の金属管…シームレスのステンレス管が使用されることが多い…を1/10程度に収縮させ, 500~1,000Tでピークの持続時間が $\sim 10^{-6}$ 秒の超高磁場が発生されている^{5), 6), 7)}。より高い磁場を得るには, 種々の問題点を克服する必要がある。管の収縮過程は流体力学的に不安定であり収縮比の増大とともに円筒対称性が乱れやすくなる。(Rayleigh-Taylorの不安定性) また, 収縮とともに管の肉厚が増大し, 管自身の内部応力による発熱損失が起こる。最も重要なことは, 管は有限の電気抵抗 ($1/\sigma$) を持っているので管の内壁に発生している強大な円電流によるジュール熱損失が無視できなくて磁束の保存が成立しなくなることである。金属の抵抗は温度上昇とともに増大する。一方, 磁場の増大に比例して円電流も増大し, ジュール加熱のため管が融解・蒸発を起こすようになると効率的な磁場濃縮が起こらなくなる。Pavlovskiiらは^{8), 9), 10)} これらの対策として“カスケード方式”とよばれる巧妙な方法を開発している。彼らの方法では, 直径の異なる複数個の管を同心円筒状に配置する。また, 管は常温・常圧下では磁場の滲透が自由な絶縁体であるが, 衝撃圧縮を受けた瞬間に金属化 (導体化) するような性質をもつ管材が使用されている¹¹⁾。まず一番外側の管が爆轟からの衝撃圧縮を受けて金属化するとともに中心方向へ収縮し磁場濃縮を行う。収縮が進行し内壁面の温度上昇が無視できなくなる頃, 内側に配置してある第二の管に衝突し, 第二の管が金属化し収縮を始める。この場合, 第二の管の内面は, 衝突前までは円電流が流れていないので冷い状態から収縮が始まり, 以下, 第三, 第四と続く。この方法は, 円電流による熱損失を軽減できるだけでなく, 個々の管の収縮比も小さいので, 流体力学的不安定性が起こりにくいという。一石二鳥の利点を持っている。但し, 管の製作が容易でない。カスケード式磁場濃縮法で5~10mm径の空間に $1.6\sim 1.7 \times 10^3\text{T}$ の磁場が再現性良く発生されているが, Pavlovskiiらによれば, 爆薬系を工夫し管の初速を $\sim 10\text{km}/\text{秒}$ にできれば $2 \times 10^4\text{T}$ 以上の磁場発生が可能だとしている^{10), 12)}。いずれにせよ, 爆縮法は現在に



① 起爆用雷管, ② 金属管(銅製), ③ らせんコイル(銅製), ④ 爆薬, S: スイッチ, C: 初期磁場(電流: I_0) 供給用コンデンサー, R: 負荷, (a)において, スイッチ:Sを閉じCから初期電流: I_0 を供給する, ①により爆薬④を起爆すると管②が膨張し, コイル③との短絡が起こり(b)図) 電流: I が増大する.

図-2 MC型発電機(らせんコイル形式)

において, 最強の磁場発生方法であり, これを用いた物性研究も行われている^{12), 13), 14)}.

3.3 電力への変換

3.3.1 磁場濃縮型発電機

爆発エネルギーを効率良く電力に変換する装置は“爆薬発電機”とよばれ, 磁場濃縮型(Magnetic Cumulation以下MC型と記す), MHD型(Magneto-Hydro Dynamics), 圧電型の三種類があり, この順に出力エネルギーならびにパワーが大きい. MC型の作動原理は前節で述べた磁場濃縮である. 爆縮法は極力強い磁場を発生することに主眼が置かれているが, MC型発電機は爆発エネルギーを高効率で電力に変換することに目標がしぼられている. 種々のタイプのMC型発電機が考案されているが, 図-2に示すような“らせんコイル型”が一般的である. 図において, まず最初に, コンデンサーに蓄えた電荷を放電しコイルとその内側に同軸状に配置された金属管(主として銅製)に初期電流: I_0 を供給する. このとき, コイルと管は他端で負荷に接続されている. I_0 が最大になる頃, すなわち, コイルと金属管で囲まれた空間の磁場: B_0 が最大となる頃, 管内の爆薬を起爆する. 爆轟により, 管は表面を滑かに保ちつつ膨張してコイルの内面と衝突し電気的短絡が起こる. 衝突点は, 図中の右方向へ爆速とコイルの単位長あたりの巻き数で決められる速度で移動する. このとき, 前節で述べたと同様な理由により, 空間体積の減少に応じて磁場と電流が増大する. 衝突短絡が起きてから, t 時間後における発電回路の電流, インダクタンス, 抵抗を各々, $I, L,$

R とし, 回路に電磁誘導の法則とオーム則を適用すると式(2)が成立する.

$$(2) \quad d\Phi / dt + R \cdot I = 0, \quad \Phi = L \cdot I \quad (\text{磁束})$$

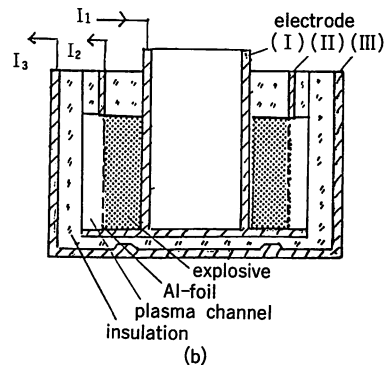
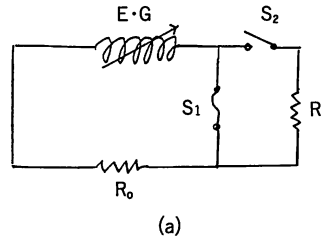
$d\Phi / dt$ は誘導起電力(電圧)であり, 式(2)を解いて式(3)を得る.

$$(3) \quad (L \cdot I) / (L_0 \cdot I_0) = \exp \left\{ \int_0^t (R/L) dt \right\} = \lambda(t)$$

式(3)中の L_0, I_0 は初期値($t=0$)であり, $\lambda(t)$ は磁束: Φ の保存係数である. 抵抗: R でのジュール熱損失が無いとき, すなわち, 理想的な場合は $\lambda(t) = 1$ であり磁束が保存される. 回路の L に貯えられる電磁エネルギー: E は, $E = \frac{1}{2} \cdot L \times I^2$ で表わされるので, 式(3)から式(4)を得る.

$$(4) \quad E / E_0 = (L_0 / L) \cdot \lambda(t)^2$$

ここで, $dE / dt > 0$, すなわち, E が増大する条件は式(2)~(4)より, $|dL / dt| \geq 2R$ となる. この条件は, $R \times I^2$ で表わされるジュール熱損失速度にりも, 電磁エネルギーの増大速度がきいことも等価であり, ($dE / dt > I^2 R$), この条件を満たす設計を行うこと



(a)図において爆薬発電機($E \cdot G$)の出力電流がピークになる頃, S_1 を開き, 同時に S_2 を閉じて負荷: R へ転流する. (b)図はPavlovskiiら²⁰⁾の開・閉を同時に行なうスイッチの概念図である. 最初, 電極(I), (II)間に流れていた電流は, 爆薬の爆発によりプラズマ化しているアルミニウムフォイルを圧縮して, この抵抗を著しく増大するとともに, 衝撃圧縮により電極(II), (III)を短絡させる. こうして, (I), (II)間が遮断され, (I), (III)間に転流される.

図-3 爆発スイッチによる大電流の転流

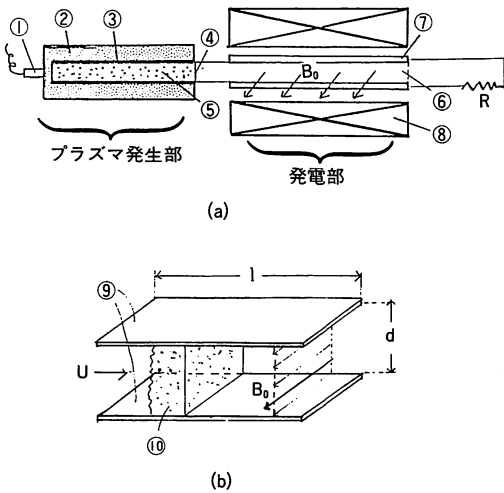
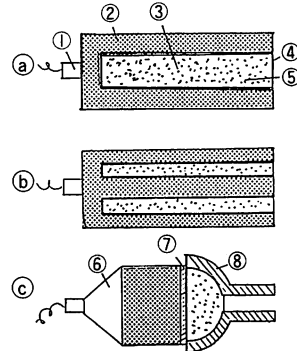


図-4 爆発MHD発電の概念図

(a)はシステム全体の概念を、(b)は電極内のプラズマの流れを示す。① 起爆用雷管、② 爆薬、③ 金属管（アルミ製）、④ ダイアフラム、⑤ 不活性ガス（アルゴン）、⑥ 真空チャンネル、⑦、⑨ 電極（銅製）、⑧ マグネット、⑩ プラズマ流

が発電の必要条件である。銅製のコイルと爆速から推定される $|dL/dt|$ の値は $0.1 \sim 1 \Omega$ （オーム）程度ゆえ、低負荷の場合は容易である。負荷の抵抗が大きい場合には、実負荷と発電機をトランス結合させて出力電圧を高くすることにより負荷へ発電エネルギーを投入することができる^{15),16)}。このような例として、MC型発電機が高出力のパルスX線発生用の電源 ($V > 10^6$ ボルト) として利用されている^{17),18)}。MC型は、らせんコイル型式の他に、同軸型、平面型、これらの複合型等があり、負荷が要求する条件に応じて最適な設計が行われている。また、大出力化と高効率化を図るため、複数の発電機を同時に駆動させたり¹⁹⁾、小、中、大規模の発電機を各々トランス結合させて、小型機の出力を中型機に与え、次に大型機に与え、順次大出力化する“カスケード式”のものも試みられている¹⁰⁾。

MC型爆薬発電機は現存のパルス電源としては最大級のものと思われる。筆者の研究室では、 $1 \sim 2 \text{ kg}$ の高性能爆薬を使用し、出力エネルギーとパワーが $0.1 \sim 1 \text{ MJ}$ （メガジュール）、 $10^{10} \sim 10^{11} \text{ W}$ のものが得られているが²⁰⁾、米、ソ、特に旧ソ連では、百～千kgの爆薬を使用した $\sim 10^2 \text{ MJ}$ 、 $\sim 10^{13} \text{ W}$ 級の巨大な発電機が報告されている²¹⁾。各種タイプの発電機の組み合わせや、形状等の工夫により、電流等の出力波形をある程度は制御することができるが、極めて立ち上がり時間の短い矩形の大電流を得るため、図-3に示す



- ① 起爆用雷管、② 爆薬、③ 金属管（アルミ製）、④ ダイアフラム、⑤ 不活性ガス ($P_0 = 1 \sim 10$ 気圧)
- ⑥ 平面状爆轟波発生器、⑦ 金属飛翔板
- ⑧ 不活性ガス圧縮チャンバー

(a)は同軸型とよばれ、最もシンプルなものであり、(b)は二重同軸型、(c)はVoitenko型とよばれる。(b)は高効率、(c)は最大級のプラズマ速度 ($\sim 50 \text{ km/sec}$) が得られる。

図-5 爆薬を使用した超高密度プラズマ流発生器

ような、高速スイッチ（短絡・遮断）を使用して負荷へ転流する技術が研究されている²²⁾。サブマイクロ秒の短時間に 10^6 A （アンペア）以上の大電流を転流することが可能であり、スイッチの駆動にも高性能爆薬が使用されている²³⁾。

3.3.2 MHD型発電機

図-4に示すように、磁場中をプラズマのような導電性物質が運動するとき、電磁誘導によって、磁場と流体の運動方向に対して垂直な方向へ電圧が誘起される。この出力電圧を利用するのがMHD発電である。荷電流体であるプラズマが磁場との相互作用により運動を妨げられ減速する。プラズマが失う運動エネルギーに見合ったエネルギーが電力として電極より取り出すことができる。したがって、磁場とプラズマの相互作用が強いほど効率的なエネルギー変換が期待できる。磁場と導電性流体との相互作用の程度は式(5)で表わされる“磁気レイノルズ数：Rem”により見積もることができる。式中の μ 、 σ 、 u は流体の透磁率、電導度、

$$(5) \text{ Rem} = \mu \cdot \sigma \cdot u \cdot d$$

流速であり、 d は電極間の距離である。Rem > 1 が望ましいが、これを満たす設計は容易でない。爆薬を利用したMHD型発電も、初期の頃は（1960年代）は作業流体として、爆轟生成ガスそのものを用いたり、金属ジェット流等を使用していたので変換効率は極めて低かったようである^{24),25)}。しかしながら、図-5に示すよ

うに、金属管内に封入された不活性ガス（封入圧力1～10気圧）を爆薬の爆轟により圧縮して超高密度の不活性ガスプラズマを発生させ、これを 10^{-3} トル以下に減圧した電極チャンネルに噴出させる方法により、 $Rem=10\sim 50$ 程度のプラズマ流が得られるようになって、効率が著しく上昇している²⁶⁾。不活性ガスとしては、通常、アルゴンが使用され、図のような方法で $\sigma \approx 10^3 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$ 、 $u=15\sim 25\text{km/秒}$ のプラズマ流が得られる。負荷が解放の場合、電極に誘起される電圧は式(6)で表わせるので、電極間距離を一定とする

$$(6) V = u \cdot B \cdot d,$$

V：電圧，u：流速，d：電極間距離

場合、流速および初期磁場が大きいことが望ましい。また、出力の持続時間は主として、注入されたプラズマの量と速度、電極長に依存する。筆者の研究所では、200g程度の爆薬を使用するアルゴンプラズマ発生器、銅製の発電用電極（ $d=2\text{cm}$ 、 $\ell=60\text{cm}$ ）、初期磁場発生用パルスマグネット（ $B \approx 5\text{T}$ ）を組み合わせ、出力が $\sim 0.1\text{KJ}$ 、 $\sim 10^9\text{W}$ 程度のMHD発電システムを完成している²⁸⁾。現在のところ、爆発エネルギーの電力への変換効率は1%以下であるが、種々の改良を行うことにより5～10%に高めることが可能と思われる。米国のBaumらは^{26), 27)}、1～10kgの爆薬を用いる大型のMHD発電機により $\sim 100\text{KJ}$ 、 $\sim 10^{10}\text{W}$ の出力を得ている（効率 $\approx 1\%$ ）。

MHD型はMC型に比較して出力は小さいが、プラズマ発生部と発電部が隔離できるので繰り返し使用ができるという利点をもつ。プラズマ発生器をカートリッジ化するならば、バルカン砲のように一秒間に多数回の爆発を連続して行なうことも可能となり、サイクル的ではあるが出力時間の持続をコントロールすることも可能であろう。また、高性能な永久磁石や超電導マグネットを使用するならば、初期磁場発生用のパルス電源は不要となり、純粋に爆薬だけを用いる発電システムが可能になる。さらに、MHD型をMC型の初期磁場用電源として使用することも可能であり、筆者の研究所ではこのようなMHD-MC複合型電機の研究開発も行なっている²⁹⁾。

3.3.3 圧電効果型発電機

圧電効果型には、誘電体を衝撃圧縮し衝撃誘起分極させるタイプと、逆に、強誘電体を衝撃圧縮することにより分極破壊を起こさせるタイプの二つがある。発電機の構造は極めて簡単であり、二枚の電極板の間にサンドイッチ状に誘電体を配置し、これを爆轟ガスで

圧縮すると起電力が生じる。電気的分極のエネルギー密度は、爆薬よりも非常に小さいので（ $\sim 10\text{J/cm}^3$ ）、MC型やMHD型のような大出力は期待できない。実例として、セラミックス強誘電体を爆発圧縮（1～10GPa）することにより、誘電体の単位体積あたり1～2J/cm³の出力が報告されている。出力は負荷の特性、誘電体の種類・形状ならびに圧縮方法に依存するが、直径10cm、厚さ1cmの大きさの強誘電体を厚さ方向に衝撃圧縮する場合、 $\sim 10^2\text{J}$ 、 $\sim 10^7\text{W}$ 級の発電出力が可能であろう。圧電型は、爆薬と誘電体だけで発電できるので、シンプルな小型・小出力パルス発電機としての利用が考えられる。

3.4 光エネルギーへの変換

爆発エネルギーを光エネルギーへ変換する研究も行われている。その一つは、MHD発電に使われるプラズマ発生器を改良して超高温のプラズマを発生し、これからの放射を利用する方法である。不活性ガスを爆発衝撃圧縮することにより、 $\sim 10^5\text{K}$ 、 $\sim 1\text{GPa}$ 、程度の超高温、高圧力のプラズマが得られるが、温度が 10^5K のプラズマが黒体放射を行うとすれば、中心波長域は $2.9 \times 10^{-8}\text{m}$ で、パワーはプラズマの単位表面積あたり $\sim 10^9\text{W/cm}^2$ になる。筆者の研究室では、化学反応の強力な真空紫外光源として利用する目的で、爆薬を使用した衝撃波プラズマ放射システムの研究を行なっているが³⁰⁾、光エネルギーへの変換効率はかなり小さい。一方、MC型爆薬発電機を電源とする重水アークプラズマ発生システムの研究がCowan³¹⁾らにより報告されているが、それによると、プラズマ温度： $\sim 2 \times 10^5\text{K}$ 、放射エネルギー及びパワーが $\sim 10^6\text{J}$ 、 $\sim 10^{12}\text{W}$ のものが得られている。

光エネルギー変換の他の有力な方法は爆轟生成ガス自身をレーザー発振体として利用する“爆薬レーザー”である。これは、ガスダイナミック・ケミカルレーザーとよばれるものの一種である。高性能爆薬を構成する元素はC、H、N、O等であり、爆轟生成ガスの主要成分はCO₂、N₂、H₂O等でその温度は $2\sim 5 \times 10^3\text{K}$ の範囲にある。したがって、CO₂が存在する場合にはレーザー発振が可能な状態、すなわち、CO₂の分子内振動モードが熱的非平衡状態になっているものと考えられる。これを最初に実証したのはDshidzhoevらで³²⁾、ロスアラモス研究所では、爆轟生成ガスを真空チャンバーに自由膨張させ、これから利得として $\sim 3\%/cm$ （CO₂の 10.6μ ）を得ている³³⁾。爆薬を構成する元素として、ハロゲンや金属類を含ませること

もできるので、各種波長のポータブルな大出力パルスレーザー装置が期待される。

4. おわりに

本稿で紹介したように、爆薬は広範な可能性をもつ有力なパルスパワー源である。しかしながら、爆薬を高度有効利用するには、使用目的に適合した爆薬・火工品を開発することと、爆発の高度な制御技術ならびにエネルギー変換技術を確立することが重要である。また、安全が保障されることにより真に価値ある技術となるわけで、火薬類を含めたシステム全体の保安技術が最重要であることを強調したい。

なお、筆者の研究室での爆薬発電に関する研究は、主として、昭和60～65年にわたって、民間企業（旭化成、ニチコン、富士電機）との連帯共同研究として実施されたものである。

参考文献

- 1) 藤原修三, 工業火薬協会誌, 48巻, 4号 (1987), 202～208
- 2) 藤原修三, 動的超高圧の発生, 圧力技術の現状と将来, 圧力技術25周年記念号 (1989) 15～28
- 3) I. A. Pavlovskii, Soviet Phys. JETP, Vol 32, No. 5 (1957), 301～302
- 4) C. M. Fowler et al, in Conference on Megagauss Magnetic Field Generation by Explosives & Related Experimento. (1965) Euratom. P. 1～20
- 5) H. Knoepfel, Pulsed High Magnetic Fields (1970) North-Holland
- 6) R. S. Hawke et al. J. Appl. Phys. Vol. 43, No. 6 (1972), 2734～2741
- 7) A. I. Pavlovskii et al. in Megagauss Phys. & Technology (1980), Plenum Press, P. 627～639.
- 8) A. I. Pavlovskii et al. in Ultra High Magnetic Fields, NAUKA (1984). P. 19～22.
- 9) A. I. Pavlovskii et al. in Megagauss Technology & Pulsed Power Applications, Plenum Press (1987), P. 159～166
- 10) A. I. Pavlovskii et al. in Megagauss Fields & Pulsed Power Technology, Nova Science Publisher (1990). P. 22～29
- 11) A. I. Pavlovskii et al, Instrum. Exp. Tech., (1979) Vol. 22, No. 5, 1401～1404
- 12) A. I. Pavlovskii, in(10). P. 1～13
- 13) R. S. Hawke et al, Phys. Rev. Lett. (1978) Vol. 41, No. 14. 994～997
- 14) R. S. Carid et al, J. Appl. Phys. (1964) Vol. 35, No. 3. 781～784
- 15) A. S. Kravchenko et al, J. Appl. Mech. & Tech. Phys. (1982), 691～695
- 16) A. I. Pavlovskii et al in(7). P. 611～626
- 17) D. J. Erickson et al in(8). P. 333～340
- 18) A. I. Pavlovskii et al in(10). P. 449～464
- 19) A. I. Pavlovskii et al in(9). P. 595～610
- 20) 角館洋三他. 工業火薬協会春季年会, 予稿集 (1992) P. 33～34
- 21) 文献(7), (8), (9), (10)の各本に詳しい。
- 22) 文献(9), (10)の本に多くの報告がある。
- 23) A. I. Pavlovskii et al, Soviet. Tech. Phys. Lett. (1977), Vol. 3, No. 8, 320～321
- 24) M. S. Jones et al in(4), P. 349～366
- 25) M. W. Burnham & S. J. Marshall in(4). P. 367～386
- 26) D. W. Baum et al. Proc. 2nd Symp. on Electromagnetic Launcher. Tech. (1983), Boston. P. 31～34
- 27) D. W. Baum et al. in(7). P. 77～88
- 28) 角館洋三他, 工業火薬協会春季年会予稿集 (1991) P. 64～65
- 29) 角館洋三他, 日本電気学会全国大会予稿集 (1991) P. 12～155
- 30) F. Bauer et al. Fevro Electrics, (1976), Vol. 10, 61～64
- 31) M. Cowan & J. R. Freeman, J. Appl. Phys. (1973), Vol. 44, 1595～1603
- 32) 吉田正典他, 工業火薬協会春季学会予稿集 (1990), P. 93～94
- 33) M. S. Dzidzhoev et al, Soviet Phys. JETP Lett. (1971) 47～49
- 34) P. Roinson et al, U. S. Patent, 3, 904, 985 (1975)