

爆薬駆動MHD-MFC複合型発電機に関する実験

角館洋三*, 薄葉 州*, 吉田正典*, 藤原修三*
 亀山龍一郎**, 宮本昌広***, 田 実****

爆薬駆動MHD型発電機をMFC型発電機の一次電源として結合した複合型発電機の実験を行った。コンデンサバンクで発生した2.0Tの磁場を利用して、MHD型発電機で100kAの電流を発生し、またMFC型発電機単独の増幅率で7.6倍を得ることができた。最終的に複合型発電機の電流出力として480kAを得ることができた。

1. はじめに

爆薬は、それが持つ化学エネルギーの解放速度が非常に速く、これを電磁エネルギーなどに変換することにより、パルス・パワー源として利用できる。以前に著者らのグループは、爆薬駆動円筒爆縮法で希ガスを衝撃圧縮して生成したプラズマの挙動について報告した¹⁾。この様な衝撃波プラズマは、磁気レイノルズ数が大きく、パルス電磁流体力学(MHD)型発電に利用することができる²⁻⁵⁾。MHD発電は、磁場に垂直な方向にプラズマ流を通過させて起電力を得るものであり、例えば永久磁石による磁場を利用すれば良いように、衝撃波プラズマによるMHD発電は、本質的に爆薬以外には外部のエネルギー源を必要としないのが大きな特長である。起電力はあまり大きくできない(通常0.1~1kV程度)が、電源としての内部インピーダンスが小さいので、負荷インピーダンスが小さいときには比較的大きな電流を取り出すことができる。一方、磁束濃縮(Magnetic Flux Compression, MFC)型の爆

薬発電機⁶⁻⁹⁾は、起電力が大きく(通常10~1000kV程度)、また電流波形もかなり制御できるのが特長である。しかし、MFC型は電流増幅器であるので初期電流を供給する一次電源を必要とする。そこで、MHD型爆薬発電機をMFC型発電機の一次電源として接続し、爆薬以外の外部エネルギー源を必要としない発電システムの可能性を探る実験を行った。このような発電システムは、宇宙空間や他の惑星あるいは深海など、適当な電源が得られにくい環境で大電流用のパルス電源として利用されることが期待される。

2. 実験装置

2.1 MHD型爆薬発電機

Fig. 1 (a)に衝撃プラズマ発生器と発電チャンネルからなるMHD型爆薬発電機を示す。プラズマ発生器の構造は以前に報告^{1,5)}したものとほぼ同じであるが、爆薬には硝酸ヒドラジン：抱水ヒドラジン=75：25の液体爆薬の代わりに、ナイロンバインダーのHMXを使用した。発電実験では磁場コイルが爆薬のすぐ近くにあるので、導電性のある液体爆薬が使用できないためである。なお、プラズマ発生器に装填した状態で測定した爆速は8.70km/sであった。アルミニウム製ライナー(外径22mm, 内径20mm)内に1気圧のアルゴンガスを充填し、ライナー外側の爆薬の爆発で左側から順次衝撃圧縮することにより高温高圧のプラズマを発生する。このプラズマは発電チャンネル入口のダイヤフラム(100 μ m厚ステンレス鋼箔)を破って真空(約 10^{-3} Torr)にした発電チャンネルを通過する。発電チャンネルにはコンデンサバンクに接続されたコイルにより紙面に垂直方向に磁場が印加されているので、上下の電極間(平均距離18mm)に起電力を生じる。発電チャンネルは、Fig. 1 (b)に示すように中心にプラズマが通過する穴があいており、穴の上下に電極、左

1996年4月3日受理

*物質工学工業技術研究所

〒305 茨城県つくば市東1-1

TEL 0298-54-4788

FAX 0298-54-4783

**旭化成工業(株)

〒870-03 大分県大分市大字里2620

TEL 0975-92-2145

FAX 0975-92-2263

*** (株)富士電機総合研究所

〒290 千葉県市原市八幡海岸通7

TEL 0436-41-6577

FAX 0436-43-8922

****ニチコン(株)

〒525 滋賀県草津市矢倉2-3-1

TEL 0775-63-1181

FAX 0775-63-1208

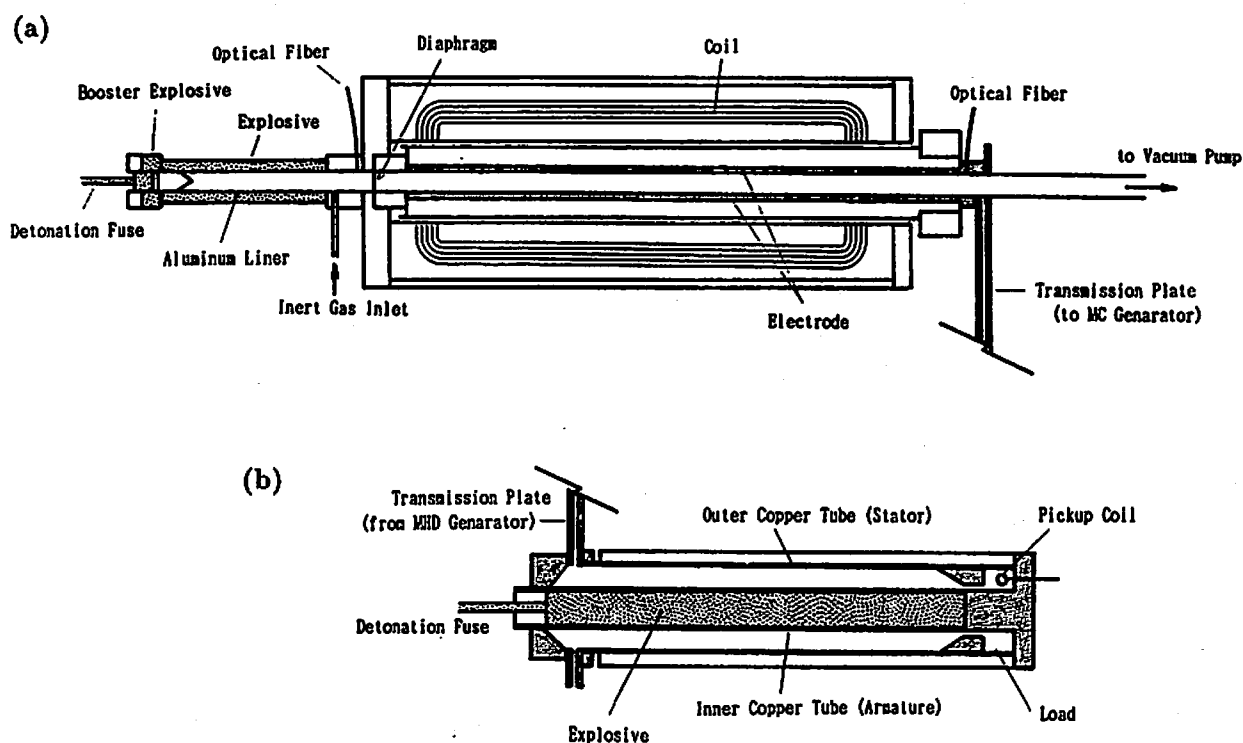


Fig. 1 Longitudinal cut views of an explosive-driven magnetohydrodynamics (MHD) generator (a) and an explosive-driven magnetic flux compression (MFC) generator (b). The MHD generator consists of an explosive-driven plasma source (left part) and a generating channel with a pulsed magnet (right part). The MFC generator was combined with the MHD generator by a parallel plate transmission line.

右に絶縁用のFRP(繊維強化プラスチック)を置き、プラズマの圧力で変形、破壊されないように全体をステンレス鋼管(外径76.3mm, 肉厚3.0mm)に入れ、エポキシ樹脂で含浸して補強した。磁場コイルは、中心で最大5 T、長さ380mmの範囲で±5%の均一な磁場を発生可能である。容量1.5mFのコンデンサバンクを使用した場合、磁場の立上がり時間(1/4周期)は1.4 msであり、起電力の持続時間(40 μ s)より充分長いので、この間は磁場は一定値と見なすことができる。発電チャンネル内のプラズマの速度を測定するために、発電チャンネルの入口および出口近くに光ファイバーを挿入し、プラズマの発光を検出して、その間を通過する時間を測定し、プラズマの流速を求めた。

2.2 MFC型発電機

MHD型発電機の起電力の持続時間は、実験結果で述べるように約40 μ sしかないのでMFC型発電機のようなインダクタンス性の負荷にエネルギーを効率よく移行するには、時定数(全回路のインダクタンス/全回路の抵抗)を小さくする必要がある。そのため、MFC型発電機はFig. 1 (b)に示すような同軸型とした。この装置は、以前に開発された発電機⁹⁾の最終段とはほぼ同じ構造をしており、アマチュアとして外径38.1mm、肉厚2.0mm、長さ600mmの銅管、ステータと

して内径70.2mmの銅管を使用し、一方の端でフランジで互いに電氣的に接続した。フランジとステータ内側に取り付けられた銅リングの間の空間がインダクタンスの小さな負荷を形成している。アマチュア内に充填される爆薬には、PETNにバインダーとしてシリコンゴム(30wt.%)を混合して重合・固化したもの(密度1.43 g/cm³、爆速6.7km/s)を使用した。

MHD型発電機の出力をMFC型発電機の入力とするために、Fig. 1に示すように、両者をインダクタンスが小さい銅板製の平行伝送板で接続した。MHD型発電機とMFC型発電機の起爆は、互いの電磁的な干渉を極力さけるために導線で行い、一端を雷管で同時に起爆し、導線の長さの差によりあらかじめ設定されたタイミングで両発電機の爆薬を起爆した。

MFC型発電機の負荷を流れる電流は、負荷内部に挿入されたピックアップコイルの信号を積分回路により積分することにより測定した。

3. 実験結果および考察

Fig. 2は、MHD型発電機で、電極間を開放にした無負荷時の電極間電圧と、発電チャンネルの両端に置かれた光ファイバーで導いたプラズマからの発光強度の時間変化である。時間は雷管起爆用のトリガ信号を原点にとった。このときの磁場の強さは2.0Tである。

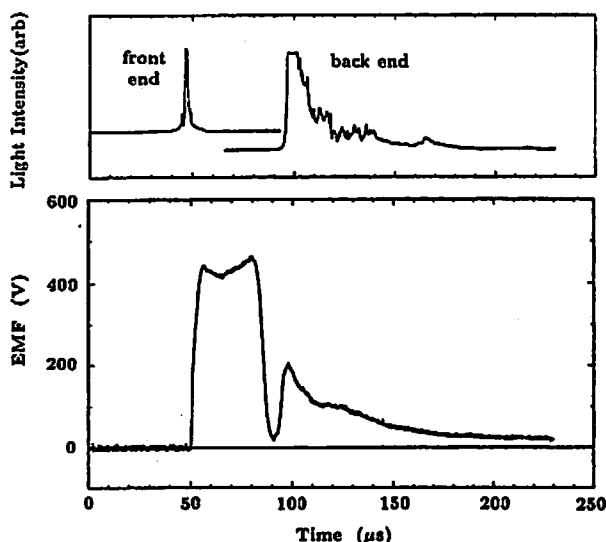


Fig. 2 Light intensities of the plasma emission through optical fibers placed at front and back ends of the MHD generating channel (top) and electric motive force between electrodes in the channel when an applied field is 2.0T (bottom).

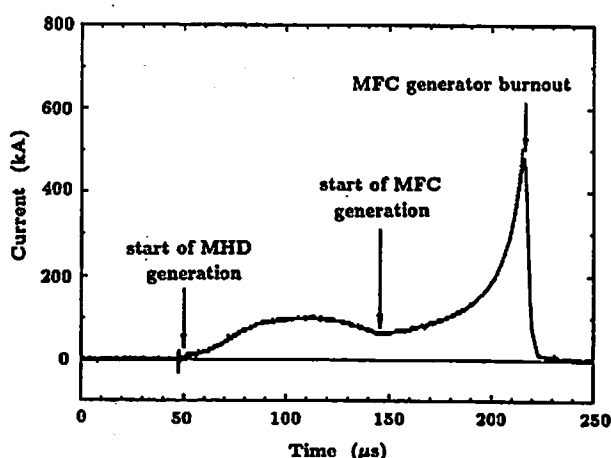


Fig. 3 A load current profile of the MFC generator. A magnetic field applied to the MHD generating channel is 2.0T. A dotted line shows a calculated current profile for the MFC generator. It agreed well with the experimental result except for the vicinity of the burnout of the generator.

起電力の波形は矩形パルス状で、 $\pm 5\%$ ではほぼ一定起電力 ($V=420-470V$) が得られた。発光強度の上上がりから時間から測定したプラズマの平均流速は 15.1 km/s であった。磁場 (B)、流速 (v)、電極間距離 (d) から計算される起電力 $V=vBd$ は $540V$ であるが、実測された起電力波形の平坦部の電圧はやや小さい。その理由として、プラズマ発生器のライナーの収縮過程で中心軸状に生じたジェッティング¹⁰⁾の影響が考えられる。この場合、MHDチャンネル内に流れ込んだプラズマの中心軸上の速度が周辺部よりも速くなり、流速が動径方向で一様ではなくなる。電極間の起電力はプラズマの流速を電極の間の距離で平均した値に対応するが、発光の上がり時間から求めた速度はプラズマの先端の最も速度の大きい部分に対応することになる。また、プラズマ発生器と発電チャンネルの間のダイヤフラムが破裂する過程でプラズマに非一様な速度分布が生じ、同様の効果をもたらしている可能性もある。発電チャンネル出口で測定されたプラズマ発光の持続時間は、入口におけるよりも長くなっている。光ファイバーを通して測定された光強度は、プラズマの通過中あるいは通過後、高温や圧力による光ファイバーの変形や失透により大きく減衰していることが考えられるので、発光の持続時間から直ちにプラズマの長さを求めることはできないが、プラズマは発電チャンネルを通過後、速度分布によりその長さが広がっているのは確かであろう。また、起電力波形は、主要なプラズマが通過後に寄生的なプラズマが通過している

ことを示しており、光信号にも同様な弱い発光が見られる。この起源ははっきりしないが、プラズマ発生器の破壊過程で、爆ごうガスを含んだ比較的低温で低速のプラズマが発電チャンネル内に流れ込んだものと思われる。なお実験後、発電チャンネルは、補強のステンレス鋼管が約 1 mm 直径が広がり、内部の銅電極が完全にはずれるなどの損傷を受けており、再使用は不可能であった。

MFC型発電機をMHD型発電機の負荷として接続し、複合型の発電実験を行った時の電流波形をFig. 3に示す。MHD発電は時間 $t=50\mu\text{s}$ から始まり、MFC型発電機は、起爆タイミングのずれにより、MHD発電による電流のピーク時ではなく $t=145\mu\text{s}$ から動作が開始している。電流波形には $t=90\mu\text{s}$ で折曲がりが見られ、無負荷時の起電力波形との対応から、このときにプラズマの主要部による発電は終了しているものと思われる。MHD型発電機から見た負荷をLR回路とみなすと、この間の起電力が一定であれば、電流値 I は t とともに直線的に上昇する ($dI/dt=V/L$, L は回路の全インダクタンス) か、あるいは抵抗による減衰のため上に凸の曲線になるはずであるが、 $t=50-90\mu\text{s}$ の電流波形はわずかに下に凸であるので、この範囲で電圧が上昇していることを示している。発電により電極を軸方向に流れる電流は、プラズマ前方の電極間に外部磁場と同じ方向に磁場を作るので、全磁場は増大する。その増加分は電極を流れる電流の分布に依存するが、全電流がMHD発電でのピーク値である 100kA のときには 1 T のオーダーになり、外部磁場に

対して無視できない大きさとなって、起電力の増加をもたらしているものと思われる。プラズマの圧力により電極間の距離が広がって起電力が増加した可能性もあるが、補強用のステンレス鋼管の径の増加が1mm程度であるので、これが電極間距離の増加を反映しているとしてもその寄与はわずかである。

MFC型発電機は $t=145\mu\text{s}$ から動作し始めているので、このときの電流値63kAに対し、最大電流480kAに達し、増幅率7.6が得られた。MFC型発電機が動作し始めた時間からの電流増幅の過程を数値計算⁹⁾により求めた結果をFig. 3に点線で示した。発電の最終段階を除いて実験との一致は非常に良く、電流が小さいので、電磁応力による変形や破壊、大きな起電力による絶縁破壊、ジュール損失による銅のプラズマ化は起こらず、理想的に電流増幅が行われていることがわかる。

ここで報告したMHD-MFC複合型発電の最大の特徴は、MHD発電用の磁場を永久磁石で与えれば、爆薬以外には補助的なエネルギー源が全く不要なことである。永久磁石のみで大きな空間に1T以上の磁場をつくることは難しいが、上記の考察で述べたように、発電電流の一部を励磁用に利用することも考えられ、実用的な爆薬発電システムの実現の可能性は高いと思われる。

4. まとめ

コンデンサバンクを励磁電源とした爆薬駆動MHD-MFC複合型発電機の動作実験を行った。外部磁場2.0Tを印加し、MHD型発電機の電流出力として100kA、またMFC型発電機単独の増幅率として7.6倍を得、複合型発電機の最終電流出力として480kAを得ることができた。この結果は、外部エネルギー源を必要としない爆薬発電システムの実現の可能性を示すものである。

文 献

- 1) 角館洋三, 吉田正典, 薄葉 州, 中山良男, 田中克己, 青木勝敏, 藤原修三, 宮本昌広, 久保田彰, 田 実, 工業火薬, 50, 124 (1989)
- 2) D. W. Baum and W. L. Shimmin, "Megagauss Physics and Technology", ed. P. J. Turchi, P. 77, Plenum Press, New York and London (1979)
- 3) S. P. Gill, D. W. Baum, W. L. Shimmin and D. Mukherjee, Artech Associates Inc. Final Report FR-119 (1977)
- 4) S. P. Gill, W. L. Shimmin and J. D. Watson, Artech Associates Inc. Final Report FR-190 (1984)
- 5) 角館洋三, 薄葉 州, 中山良男, 吉田正典, 田中克己, 藤原修三, 久保田彰, 田 実, 宮本昌広, 森田 公, 電気学会新省エネルギー研究会資料, ESC-88-17, 39 (1988)
- 6) A. D. Sakharov, Sov. Phys. Uspek., 9, 294 (1966)
- 7) J. W. Shearer, F. F. Abraham, C. M. Aplin, B. P. Benham, J. E. Faulkner, F. C. Ford, M. M. Hill, C. A. McDonald, W. H. Stephens, D. J. Steinberg and J. R. Wilson, J. Appl. Phys. 39, 2102 (1968)
- 8) Y. Kakudate, S. Usuba, M. Yoshida, K. Aoki, K. Tanaka, and S. Fujiwara, "Shock Compression Technology and Material Science", ed. A. B. Sawaoka, P. 67, KTK Sci./Terra Sci., Tokyo (1992)
- 9) 角館洋三, 薄葉 州, 横井裕之, 吉田正典, 藤原修三, 亀山龍一郎, 宮本昌広, 火薬学会誌, 57, 123 (1996)
- 10) O. V. Fat'yanov, M. Yoshida, Y. Kakudate, S. Usuba, H. Yokoi, S. Fujiwara, 火薬学会誌, 投稿中

Experiments of the explosive-driven MHD and magnetic flux compression hybrid generator

by Yozo KAKUDATE*, Shu USUBA*, Masatake YOSHIDA*, Shuzo FUJIWARA*
Ryuichiro KAMEYAMA**, Masahiro MIYAMOTO*** and Minoru DEN****

An explosive-driven magnetohydrodynamics (MHD) generator has been combined with an explosive-driven magnetic flux compression (MFC) generator as a primary power source for the MFC generator. A capacitor bank was employed to produce a magnetic field of 2.0T for the MHD generator. The MHD generator produced an output current of 100kA to the MFC generator which amplified the current by a factor of 7.6. We finally obtained an current of 480kA as the output of the hybrid generator system.

(*National Institute of Materials and Chemical Research, 1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305

**Asahi Chemical Industry Co., Ltd., 2620 Oaza-Sato, Oita, Oita 870-03

***Fuji Electric Corporate Research and Development, Ltd., 7 Yawata-Kaigandori, Ichihara, Chiba 290

****Nichicon Co., Ltd., 2-3-1 Yakura, Kusatsu, Shiga 525)

新 発破 工業火薬協会 編集 ハンドブック

A5判/500頁
定価10,000円

発行元 (株)山海堂 〒113 東京都文京区本郷5-5-18 TEL (03) 3816-1611 (代)

◆ご購入の際は、火薬学会宛お申し込み下さい。

社団法人 火薬学会

〒103 東京都中央区日本橋2-3-21
群馬ビル日本火薬工業会内
TEL 03-3271-6715 (代表)
FAX 03-3271-7592

火薬学会誌
第57巻 第3冊 通巻 289号

1996年6月25日印刷 (隔月刊)

1996年6月30日発行

定価：国内 1,500円

海外 2,000円 (送料込み)

発行所 社団法人 火薬学会
会長 長田英世

〒103 東京都中央区日本橋2-3-21

(群馬ビル) 日本火薬工業会内

電話 03 (3271) 6715~7

FAX 03 (3271) 7592

振替00180-0-146724

西部支部

〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1
九州工業大学工学部物質工学科
応用化学コース内

電話 093 (884) 代表 3308, 3319

FAX 093 (881) 3418

編集兼発行人 長田英世
編集部 東京大学大学院工学系研究科
化学システム工学専攻

〒113 東京都文京区本郷7-3-1

電話 03(3812)2111 内線7291, 7292, 7383

FAX 03(5800)6871

印刷所 (有)石川印刷

〒162 東京都新宿区榎町35番地 三四郎ビル2F

電話 03 (3268) 5005 (代)

FAX 03 (3268) 2010

Japan Explosives Society

President : Hideyo Osada

c/o Japan Explosives Industry Association
2-3-21 Nihonbashi, Chuo-ku, Tokyo 103, Japan

Phone : +81-3-3271-6715~6717

FAX : +81-3-3271-7592