

MHD発電の現状と将来

Present Status and Outlook of MHD Power Generation

石川 本 雄*・卯 本 重 郎**

Motoo Ishikawa

Juro Umoto

1. はじめに

熱機関のエネルギー変換効率はカルノー効率を上回ることにはできないため、サイクル効率を向上させるためには熱機関の最高温度を高めることが不可欠である。この点でMHD発電方式とりわけオープンサイクルMHD発電方式は3000K程度の高温を最高温度とするため総合効率を飛躍的に向上させる可能性を持っている。

MHD発電の原理は図-1に示すように、強磁界中で導電性の流体を高速度で流し、磁界及び流れに垂直な方向に電気を取り出すものである。機械的回転部分が不必要で高温を利用でき、低温部分には従来の蒸気サイクルを用いることにより、総合効率をあげることができる。MHD発電は使用する流体により表1のように分類され、それぞれ広く研究開発されている。

従来MHD発電方式は耐久性の点で問題があると考えられていたが、長年にわたる地道な努力により最近ようやく実用化の展望が見えてきた。すなわち、わが国においては、ナショナルプロジェクトとして電子技術総合研究所(ETL)により研究開発されたETL MarkV II実験装置における400時間以上の耐久試験により、石油燃焼MHD発電方式における電極の耐久性は4000~5000時間と評価された¹⁾。一方、石炭燃焼MHD発電方式においては米国AVCO社のMarkV II装置を用いた実験により1200時間の耐久試験が実行され、電極の耐久性は5000~8000時間と評価された²⁾。現在の火力発電所の定期検査は1年ごとに約1カ月実施されているので、実用化のためには11カ月連続運転すなわち8000時間連続運転が要求される。従って、オープンサイクルMHD発電方式開発の現状は、実用化に向けての開発目標が達成される目どのついたことを

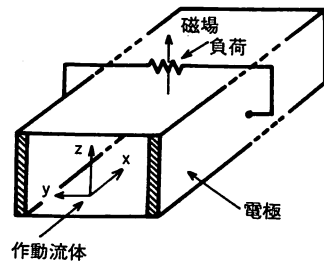


図-1 MHD発電の原理図

表1 MHD発電方式の分類

発電方式	作動流体	作動温度(K)
開放サイクル	化石燃料燃焼ガス	3000 - 2200
密閉サイクル	希ガス(Ar, He等)	2000 - 1400
液体金属MHD	熔融金属(Na, Hg等)	1200 - 800
パルスMHD	固体ロケット燃料 水素酸素燃焼ガス	3500 - 2600

但し、温度は露み点温度である

示している。また、MHD発電チャンネルのMHD発電システムに占めるコストは2~4%にすぎないと評価されているので、初期のMHD発電機の運転においては、2台の発電機を作り、定期検査毎に交換修理し、交互に使用することにより発電所利用率を高めると共に、MHD発電機の運転経験を積むことができると考えられる。現在、これらの成果を考慮するとわが国ではパイロットプラントの建設が適当と考えられるが、パイロットプラント規模のMHD発電システムについては京大グループにより、多面的に検討されている³⁾⁴⁾。

オープンサイクルMHD発電方式においては、作動ガスの導電性を高めるためカリウム化合物をシード物質として添加するので、燃料中の硫黄成分が選択的にカリウムと結合し脱硫がほぼ完全に行われ、余分な脱硫対策を必要としない。従って米国では国際問題ともなっている酸性雨対策として注目されている。ま

* 京都大学工学部電気工学科助教
〒606 京都市左京区吉田本町

** 京都大学工学部電気工学科教授

た、高硫黄分のために普通の発電所では直接燃焼して利用できない低質炭を多量に利用できる方法としても注目され、インドでMHD発電がナショナルプロジェクトとして開発されている理由の一つとなっている。また、最近話題の高温超電導材料が実用化され、ヘリウム冷却の必要がなくなると、MHD発電方式の魅力はさらに強まると思われる。

クローズドサイクルMHD発電の分野では、最近東工大のFuji-I装置において熱入力3.3 MWでディスク型発電機により電気出力150kW（エンタルピー抽出率4.6%）が達成された。また、ショックチューブによる短時間の実験ではあるが、同じく東工大のディスクⅢチャンネル装置において、エンタルピー抽出率20%以上を達成している⁵⁾。直線形チャンネルにおいてはオランダアイントホーヘン工科大学において、印加磁束密度5.2Tの条件で出力735kW、エンタルピー抽出率12.9%、出力密度78MW/m²が報告されている⁶⁾。また、将来の核融合炉を経済的にも魅力あるものとする目的で、蒸気発電サイクルをMHD発電サイクルと置き換える方式（CFAR; Compact Fusion Advanced Rankine）が提案され、日米協力で研究が開始されているのもMHD発電に関する新しい動きである⁷⁾⁸⁾。本誌では既にクローズドサイクルMHD発電に関する詳しい解説がなされているので参照されたい⁹⁾。

液体金属MHD発電の研究はわが国では筑波大学のグループによりなされている。国際的には米国アルゴンヌ研究所（ANL）で大規模な研究がなされた後、現在ではイスラエルで活発に研究されている¹⁰⁾。

本解説では、オープンサイクルMHD発電方式、及び従来ほとんど解説がなされていなかったパルスMHD発電についてのみ報告し、クローズドサイクルMHD発電、液体金属MHD発電については別の機会に譲りたい。なお、文献11)、12)ではより詳しい解説がなされていると共に、より専門的には昭和61年にわが国の筑波研究学園都市に於いて開催された第9回MHD発電国際会議の論文集¹⁰⁾に詳しく報告されている。

2. 天然ガス・石油燃焼MHD発電方式

2.1 U500の建設

クリーン燃料MHD発電方式の研究開発はソ連において最も進んでおり、最初のMHD実験装置U02が1965年、パイロットプラントU25（熱入力200MW、電気出力20MW）が1971年にモスクワの高温研究所（IVTAN）に建設された。それらの研究結果に基づ

表2 U500MHD-汽力発電プラントの仕様

熱入力	1100 MW
MHD発電部出力	270 MW
汽力発電部出力	312 MW
発電所送電端出力	465 MW

いて現在天然ガス燃焼のリャザン火力発電所の一部として、世界最初の商業用MHD発電装置U500が建設中である¹³⁾。ここでは、270MWのMHD発電機と312MWの蒸気タービン発電機を組み合わせており、送電端出力465MWは500kVの送電線に供給される。最大印加磁束密度6 Tを持つ超電導マグネットが使用される。この場合MHD発電機を導入することにより、建設費は25%増加するが、燃料が21%節約でき、発電原価は7%減少すると評価されている。またMHD発電の導入により、高効率を得られるのみならず、負荷の追従が早く、通常の火力発電所より環境汚染が少なくなることが期待されている。U500の蒸気発電部分はすでにほぼ完成しており、現在超電導マグネットも含めてMHD発電機部分が作製されている。このU500は最初的大型MHD発電装置であるため、やや保守的な設計がなされており、運転経験を積んだ上でより高い性能を持つMHD発電機の建設が計画されている。将来はMHD発電機からの排出ガスの持つ熱を利用して燃料改質も予定されている。

2.2 発電性能

米国では大形MHD発電機の発電性能を確認するため短時間（10秒程度）ではあるが、熱入力300MWの実験装置HPDE（High Performance Demonstration Experiments）がテネシー州に建設され、印加磁束密度3.8Tの条件で、エンタルピー抽出率12%、出力30.5MWを達成した¹⁴⁾。一方、ソ連のU25装置では、熱入力200MW、印加磁束密度2 Tの条件で、エンタルピー抽出率10%、出力20.2MWを達成している²⁾。

中国においては、北京、上海及び南京の3研究施設において、MHD発電の研究が長く続けられてきたが、80年代に入り、石炭を燃料として大々的に開発されることが決定された。北京科学院には大型研究装置Mark IIがあり、米国テネシー大学の協力のもとに石油燃焼で熱入力60MW、印加磁束密度2 Tの条件で2 MW電気出力を得ている¹⁵⁾。

MHD発電は体積作用に依存しているため、小規模実験結果から大規模発電機の性能を推定することは困難であるため、相似則を見いだす必要がある。図-2は

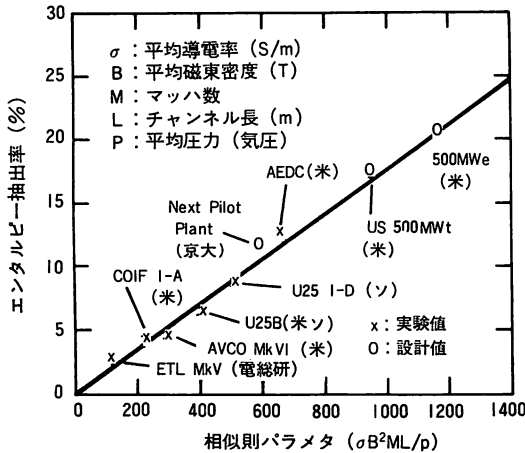


図-2 オープンサイクルMHD発電機の相似則と実験結果

エンタルピー抽出率の相似則の試みである。同図中相似則パラメータは圧力に関する相互作用から導いたものであるが、これまでの実験結果は小型の装置から大型の装置までかなりよく相似則に合致することを示している。従って今後の建設はこの相似則に則って考えることが必要である。ちなみに同図より京大グループの提案している次期パイロットプラントは適当な規模のものであることが分かる。

3. 石炭直接燃焼MHD発電方式

3.1 CDIFとCFFFの建設と運転

米国では石炭燃焼オープンサイクルMHD発電方式が集中的に研究開発されており、他の方式の研究はほとんどなされていない。これらMHD発電の商用化に関する研究開発はエネルギー省（DOE）の指導の元に主要2大施設で遂行されている。DOE最大のMHD施設CDIF（Component Development Integration Facility）は、1976年からモンタナ州（マンズフィールド大使の出身地）に建設されており、1983年には設計値の2.3MWの出力を達成している。またEPRIの資金でウェスティングハウス（WH）社が建設したインバータシステムを介してモンタナ州の電力網にMHD発電機からの電力が供給されている。ついで50MW熱入力の石炭燃焼器がTRW社により開発されMHD発電機に結合し、貯炭能力限度の8時間連続運転に成功している²⁾¹⁶⁾。これらの研究成果をもとに、長時間運転に向けて、石炭燃焼器、MHD発電機、ディフューザー、インバータシステムが新しく建設されることにな

った。また、現存の小規模火力発電所にMHD発電機を結合するレトロフィット方式の提案が2つのグループ（共に電力会社を含む）からDOEに提出され、決定されようとしている。

MHD-汽力発電複合サイクルのボトミング部分の研究を担当しているテネシー大学のUTSI（University of Tennessee Space Institute）にあるDOEの実験施設CFFF（Coal Fired Flow Facility）においては、熱入力28MWのトータルシステムが完成している。現在酸性雨問題として大きな議論になっているSO_x、NO_xの排出に関して、MHD発電方式の優位性が示されている。すなわちSO_xの排出は事実上ゼロであることが観測されており、またNO_xの排出は米国の環境基準値の十分の一を下回るという成果を得ている。煤塵排出に関しては、電気集塵機とバグフィルターが設置され、共に高性能が得られ特に問題のないことが示された²⁾¹⁷⁾。

ソ連においてもMHD発電の本命は石炭直接燃焼方式であり、前述のU02、U25は天然ガス燃焼装置から石炭燃焼実験装置へと転換されつつある。またグルジャンフスキーエネルギー研究所において石炭燃焼MHD発電実験装置M10（熱入力10MW）、M25（熱入力25MW）がすでに建設、運転されている。石炭燃焼MHD発電-汽力発電システムの解析によってクズネツ産石炭を用いるベースロードMHD発電プラントで約21～23%の燃料節約が可能であると予想されている¹⁸⁾。また、石炭燃焼MHD発電方式の研究は、中国、ポーランド、オーストラリア等で活発になされており、ECにおいても関心が再び高まってきている。

3.2 石炭スラグと耐久性

石炭を燃料とする場合、石炭スラグがMHDチャネル壁を覆う。このとき石炭スラグはチャネルを保護すると共に実効壁温を高めるので熱損失が減少し、発電性能が向上する。しかし石炭スラグ中の通電現象による分極化のために、陰極側で電氣的非一様性が成長し、この電氣的非一様性が何等かの原因で陽極側に伝わり隣接電極間アークが誘起されチャネルの耐久性が損なわれることが米国のAVCO社の研究者により指摘された²⁾。同様の現象が、わが国電子技術総合研究所のETL Mark V II実験装置をはじめとして、中国、ソ連においても観測されている。

従って、スラグの振舞いと壁近傍温度境界層中のアーク通電に関して研究することは非常に重要である。わが国では文部省科学研究費補助金エネルギー特別研

究（昭和55～61年）により、北海道大、豊橋技科大、京都大、京都工繊大、九州大等において、電極近傍のアーク通電の振舞い、電極を覆ったスラッグの挙動、アーク通電の理論解析、電氣的非一様性の制御、レーザーによる計測、壁材料の開発、石炭燃焼器の開発等広範囲の研究が行われ、石炭燃焼MHD発電の基礎的な現象の解明が進展した¹⁹⁾。

4. 電力系統への接続と制御

誘導型液体金属MHD発電機以外のMHD発電機からの電気出力は直流であり、商用交流系統に接続するためにはインバータによる直流-交流変換が必要である。なお、大規模交流系統に更に大電力を供給する場合系統の安定性を保つため直流送電が提案されているが、MHD発電出力を直接直流で送電することも将来の検討課題である。その場合超電導トータルシステムとなることが想定される。

4.1 実系統への接続

ソ連の高温研究所ではU25装置からの出力10MWが他励式インバータシステムを介してモスクワの交流系統に供給され、特に問題は無かったとされている¹⁰⁾。米国ではCDIFのダイアゴナル形チャンネルからの出力約1MWが他励式インバータシステムを介してモンタナ電力の系統に供給されている。前述のようにインバータシステムは、高調波用フィルター、調相器を含めてEPRIの資金でWH社が納入した。当初MHD発電機-インバータシステムと電力系統との相互作用により動揺が発生したが調整され、その後ダイアゴナルモードの実験はすべて系統との結合によって運転されている²⁾。その他、米国のUTSI、AVCO社、およびポーランド、中国、オーストラリア等で実験的研究がなされ、わが国電総研のETL Mark V II装置においてもインバータ実験が成功している。

また石炭スラッグの分極化による電氣的非一様性の制御を含むMHD発電制御回路の実験的研究は主としてAVCO社によりなされており、トランスとGTOを組み合わせたMaster/Slave型統合・制御回路が開発された²⁾。その回路の詳細な解析は京大グループによってなされ、Master/Slave型電流制御回路でダイアゴナル形チャンネル内に成長する電氣的非一様性を制御できることが示された²⁰⁾。

4.2 MHD-インバータ-交流電力系統相互作用

上述のように、MHD発電用インバータの研究は広く行われ、また他励式インバータについては大規模直

流送電の経験が広く積まれており、要素技術的には問題は無い。現在の研究課題はMHD発電機を含む各システム間の相互作用の検討である。ソ連の高温研究所では、U500の解析の一部として、出力200MW級発電チャンネルの他励式インバータによる制御が検討されている。比較的小型の12のインバータが接続されており、ダイアゴナル形チャンネルのきめ細かい制御が想定されている²¹⁾。わが国では熱入力100MW級、MHD出力10MW級、総出力40MW級のパイロットプラントの検討の一部として、京大グループにより、MHD-インバータ-交流電力系統の相互作用が広く検討されている⁴⁾。

図-3は他励式インバータを用いた場合のMHD-同期機-インバータ-交流系統のブロック図である。図中、調相器、フィルターは他励式インバータからの無効電力、高調波を処理するためのものである。解析では、正常動作時のみならず各種の事故も検討されており、興味ある現象が予測されている。すなわち事故時にはMHD発電機と同期発電機の間強い相互作用が発生することも予想され、今後の検討が必要である。

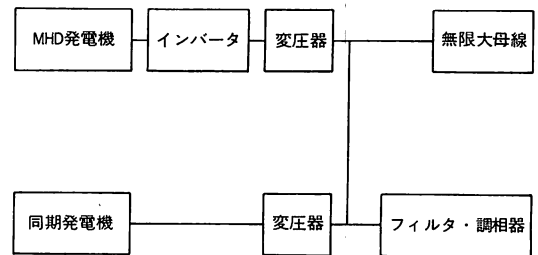


図-3 MHD-同期機-他励式インバータ-交流系統のブロック図

さらに、自励式のマクマレー回路およびPWMインバータを用いた場合の検討も行われ、自励式インバータを用いると、MHD発電機内の乱れは小さくなることが示されている。この場合素子としてGTOを想定しており、容量の点では直列接続により可能であるが、現状ではなおスイッチング速度の点で問題がある（およそ10kHzが必要）。なお、GTOの進歩は著しく、SIサイリスタの開発も期待できるので将来は自励式インバータの使用も可能になると考えられる。いずれにしても同期発電機の場合と異なり、MHD発電機は急速な立ち上げが可能であることが分かった。

5. パルスMHD発電機

5.1 固体燃料パルスMHD発電機

固体燃料ロケットをMHD発電用の燃焼器に改造し

たパルスMHD発電機がソ連や米国で開発されている²²⁾²³⁾。地質構造や地球物理の研究において電磁探査は有力な手段であるが、ソ連クルチャフ研究所ではパミール (Pamir) シリーズ、ウラル (Ural)、ヒビヌイ (Khibiny)、等のパルス発電機が建設され、出力60MW、出力密度500MW/m²の性能が実現されている。動作時間は2~10秒に過ぎないが、発電出力5~100MWの規模において対出力比装置重量が0.5kg/kW程度と他の発電方式に比較して10分の1程度であり、全装置がトラックで運搬可能である。これらは、中央アジアでの地震予知、カスピ海沿岸での石油、ガス探査、また、ウラルとフィンランド近傍のコラ半島の地殻構造の研究に大規模に使用されている。今後、立ち上げ時間の短縮、発電時間の延長などを目標としてZond- I 実験装置や、超電導マグネット (4.5T) を用いた可搬式の発電機 (25MW, 2kV) の開発が予定されている²⁴⁾。

米国では、STD社とカルフォルニア大学が電磁探査の電流源としてMHD発電機を応用して実験を行った。MHD発電機は予備実験で4.8MWを発電している自動式ダイアゴナル形チャネルで、3~4秒のパルス運転ができ、3台のトレーラーで運搬できる。実験では、図-4に示す回路で、大きさが200×250m、抵抗が70mΩ、インダクタンスが800μHである送信ループ

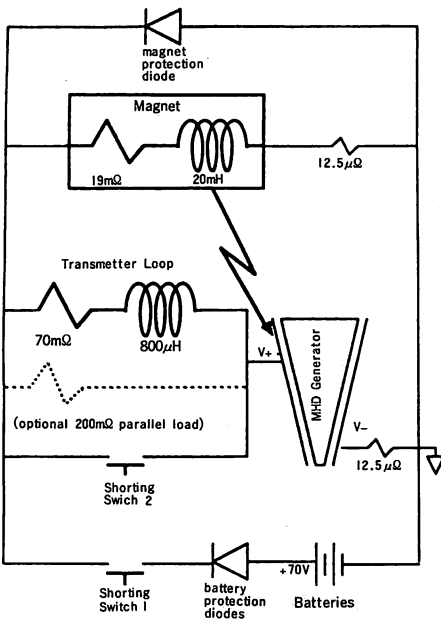


図-4 地下電磁探査用パルスMHD発電の模式図 (文献23より引用)

にピーク値約7kAの電流を供給し、最大磁気モーメント $3.6 \times 10^8 \text{ A m}^2$ の発生に成功した。磁気計測にはSQUIDが用いられ、サナンドレアス断層の位置を指示することができた²⁵⁾。

これらのように固体燃料を用いた可搬式パルスMHD発電は、他の発電方式では得られない大電力を供給することができ、地球内部の構造の研究、とりわけ石油などの地下資源の探査や地震予知に使用できる。

5.2 水素酸素燃焼パルスMHD発電機

次期トカマク型核融合実験装置の検討において、磁界発生コイルとりわけポロイダルコイルを駆動するための巨大な直流電源に対してJT-60等で開発された電源以外に、新発電方式の開発をも含めた新たな検討を必要とすることが示された²⁶⁾。

MHD発電機は比較的小型の装置でコイルの励磁に必要な電流 (数10kA) を発生することができ、しかも時定数が20ms程度であるので制御性が非常に良い。また、次期大型装置のポロイダルコイルに蓄えられる磁気エネルギーは5~8GJと想定されるが、必要な700MW級MHD発電機用マグネットの蓄積エネルギーは0.5GJ以下と評価できる。そこで、MHD発電機の核融合用電源への応用の第一段階として、超電導ポロイダルコイルの励磁試験が提案され²⁶⁾、予備的検討結果も報告された²⁵⁾。その場合のポロイダルコイル蓄積エネルギーは30MJ、励磁電流は20~30kAである。第二段階の応用は現在のトカマク電源のオルターナティブとして確立することを目的とし、そのポロイダルコイル蓄積エネルギーは600MJ、励磁電流は60~90kAである。第三段階の応用は次期トカマク装置のポロイダルコイル用電源として確立することを目的とし、ポロイダルコイル蓄積エネルギーは5~8GJ、励磁電流は100kA以上である。図-5は提案された構成図

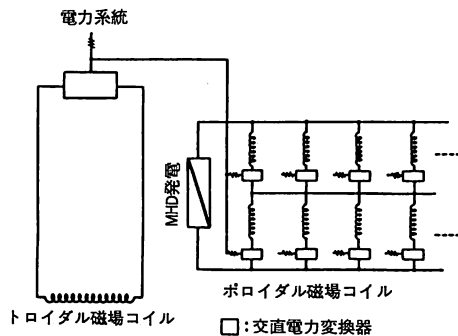


図-5 トカマクポロイダルコイル駆動用水素パルスMHD発電の模式図 (文献24より引用)

である。水素-酸素MHD発電機に対して次の予備的検討結果が得られている。(1)大型チャンネルは12mとなり、最高磁束密度は5 Tで、MHDコイルの磁気エネルギーは0.5GJ以下となる。(2)デモポロイダルコイル励磁用チャンネルは5 mとなり、最高磁束密度は3 Tで、MHDチャンネルには液体窒素冷却自励式MHDマグネットを用いることができる。

6. まとめ

MHD発電、とりわけオープンサイクルMHD発電は長期間の研究開発の努力の末ようやく商用化の展望が見えてきた。効率の向上だけでなく公害防止にも威力を発揮することが確実であり、わが国ではパイロットプラントの建設が必要な段階になっている。またパルスMHD発電は地下構造の研究や地震の予知、地下マグマの様子を知るために利用が可能であるだけでなく、トカマク核融合実験の電源として提案もされている。さらに将来のコンパクトな核融合炉をめざすMHD発電機も提案されている。以上のようにMHD発電に関する研究課題は多く、今後さらに息の長い努力が望まれる。

参 考 文 献

- 1) Y.Kusaka et al. ; Proc. 21st Symp. Engng. Aspects MHD, 2.8, (1983)
- 2) M.Petrik et al. ; Current Status of MHD Technology, US DOE ANL Report, ANL/FEP-1025 (1984)
- 3) M.Ishikawa and J.Umoto ; Proc. 25th Symp. Engng. Aspects MHD, 7.3, (1987)
- 4) N.Hayanose, M.Ishikawa et al.; AIAA 19th Fluid Dynamics, Plasma Dynamics and Lasers Conference, AIAA-87-1215, (1987)
- 5) 皆川俊一他 ; 第8回エネルギー利用と直接発電シンポジウム, (1986) 238~244
- 6) W.J.M.Balemans and L.H.Th. Rietjens ; Proc. 9th Int. Conf. MHD, (1986) 330~340
- 7) B.G.Logan, K.Yoshikawa et al. ; Proc. IEEE 12th Symp. on Fusion Engng., (1986) 12~16
- 8) Y.Inui, M.Ishikawa and J.Umoto ; AIAA 19th Fluid Dynamics, Plasma Dynamics and Laser Conf., AIAA-87-1274, (1987)
- 9) 塩田進 ; 高温熱エネルギーによる直接発電, エネルギー・資源, 6巻, 1号, (1985) 92~97
- 10) Proceedings of 9th Int. Conf. MHD, (1986)
- 11) 塩田進, 石川本雄, 卯本重郎 ; MHD発電の現状, 日本原子力学会誌, 27巻, 6号, (1985), 490~496
- 12) MHD発電システム調査専門委員会 ; MHD発電システムの研究開発の現状, 電気学会技術報告, (II部) 第250号 (1987)
- 13) V.K.Kirillin et al. ; Thermal Engineering, 33, No.2, (1986) 59~67
- 14) Petrik, M. and Shumyatsky, B.Ya.; Open-Cycle MHD Electrical Power Generation, A Joint USA /USSR Publication (1978)
- 15) Lineberry, J.T. et al.; Proc. 25th Symp. Engng. Aspects MHD, 2.4, (1987)
- 16) W.E.Lowry ; ibid., 5.1, (1987)
- 17) R.C.Attig et al. ; ibid., 5.2, (1987)
- 18) A.E.Sheindlin and Yu.N.Sokolov ; Proc. 24th Symp. Engng. Aspects MHD, Late Paper, (1986)
- 19) 文部省科学研究費補助金エネルギー特別研究「電気エネルギーの有効利用に関する研究」昭和61年度研究成果報告書, (1987) 99~140
- 20) M.Ishikawa et al. ; 9th Int. Conf. MHD, (1986) 1314~1323
- 21) K.S.Demirtchian et al. ; ibid., (1986) 1292~1303
- 22) A.E.P.Velikhov ; ibid., (1986) 57~64
- 23) H.F.Morrison et al. ; Proc. 25th Symp. Engng. Aspects MHD, 4.2 (1987)
- 24) 嶋田隆一 ; 第9回エネルギー利用と直接発電シンポジウム, (1987) 236~245
- 25) 石川, 卯本 ; 電気学会新・省エネルギー研究会資料, ESC-87-14, (1987)