

MHD発電の動向

Research and Development of MHD Power Generation

石川 本 雄*

Motoo Ishikawa

1. はじめに

世界のエネルギー供給を考えると、今後長期に化石燃料とりわけ石炭になお依存しなければならないが、化石燃料の燃焼は大量のSO_x、NO_x、CO₂を大気中に排出する。Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) の評価では、CO₂の大気中濃度は21世紀中ごろに倍加することを予想しており¹⁾、CO₂の排出抑制を考える必要がある。

MHD発電方式は化石燃料を高効率で利用できる可能性があり、また将来の核融合炉に応用できる可能性もあるので、かつては広く大規模研究開発が行われた。80年代の動向については本誌で解説したことがある²⁾。また90年代の動向については、詳細な調査研究が電気学会技術報告として出版されている^{3)、4)}。

MHD発電方式には化石燃料を直接燃焼するオープンサイクルMHD発電、希ガスを用いるクローズドサイクルMHD発電、液体金属を用いる液体金属MHD発電に大別される。この内、液体金属MHD発電は、小規模電力用および将来の核融合応用等に研究されているが、本報告ではこれ以上触れない。

大規模発電方式としてのオープンサイクルMHD発電方式は、旧ソ連、米国を中心に研究開発されたが、93年における米国石炭燃焼MHD発電プロジェクト(熱入力50MW)の終了以降、大規模実験は中国におけるプロジェクト(熱入力25MW^{5)、6)})及び我が国北海道大学における熱入力5 MWの装置による研究のみになっている。従って大規模開発による研究開発の進展は90年代には見られなかったが、理論・数値解析による研究は飛躍的に進展した。

クローズドサイクルMHD発電方式の研究は我が国の東京工業大学を中心に急進展しており、衝撃波管の

実験では既に、商用機に要求される効率が達成されている。なお、本年(1999年)10月にMHD発電国際会議が北京で開催される予定である。

2. オープンサイクルMHD発電方式

2.1 高効率石炭燃焼MHD発電システム及びCO₂回収システムの探求

石炭直接燃焼MHD-汽力複合発電方式に関する石川、卯本の検討では、MHD発電機からのエンタルピー抽出率が20%、25%、30%で、空気加熱器動作温度が1620K、1780K、2100Kのとき、石炭直接燃焼MHD発電システム効率は、それぞれ50%、55%、60%以上になる⁷⁾。高性能MHD発電機と高温空気加熱器の開発が、高効率石炭直接燃焼MHD発電システム実現のかぎである。なお、MHD発電機の耐久性に関して、米国AVCO社のMark VII装置における1200時間以上の耐久試験により、電極の耐久性は5000~8000時間と評価され⁸⁾、オープンサイクルMHD発電機実用化に向けての開発目標が達成される可能性を示している。オープンサイクルMHD発電方式では、燃料中のイオウ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るので、特別の脱硫対策を必要としない。また、窒素酸化物の排出量も十分減少できることが示されており、煤塵排出に関しても、30MW級の装置において電気集塵機とバグフィルターが共に高性能であることを示している⁹⁾。

図-1は高性能石炭燃焼MHD-汽力複合発電システムである。中国大同炭を燃料、予熱空気を酸化剤とし、石炭スラグの90%が燃焼器で排除できると仮定している。また、現在運転中の超々臨界圧蒸気サイクルを想定している。MHD発電機の設計およびシステム解析により、交流系統に供給されるMHD発電出力は940.5 MW、交流系統に供給される同期発電機出力は274.3 MWとなり、効率は61.0% (HHV) が得られている。現在の38%程度(石炭燃焼)の効率に比較して十分高

* 筑波大学構造工学系教授

〒305-8573 つくば市天王台1-1-1

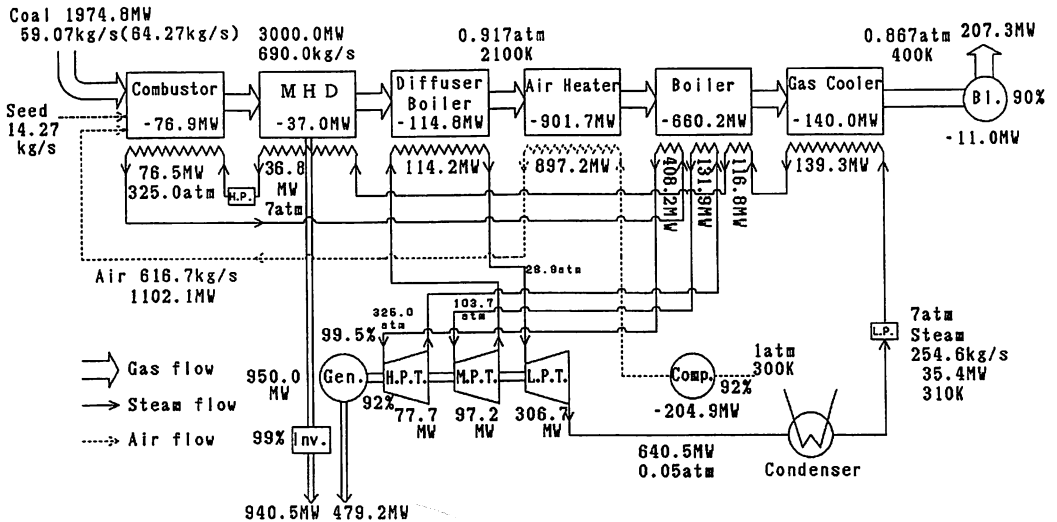


図-1 CO₂無回収石炭燃焼高性能MHD-汽力複合発電システムエネルギーバランス (高温電極フェラーデー形発電機, 高温空気燃焼)

い効率が得られた。なお、ここでは空気加熱温度2100 Kを仮定している。

火力発電所の排気ガスからCO₂を回収する場合、空気の代わりに一部循環したCO₂を含む酸素で燃焼すると、除湿した排気ガス中のCO₂の割合が空気燃焼の場合の15%程度から90%以上になり、CO₂の回収が容易になる。オープンサイクルMHD発電方式は2500K以上の高温で運転するので、酸素燃焼で得られた高温燃焼ガスのエキセルギーを有効に利用でき、MHD発電をトッピングサイクルとして結合することは、有力な選択となりうる。これまで、米国ANL、我が国京都大学、イタリアローニャ大学などにおいてCO₂回収方式MHD発電システムの検討がなされた¹⁰⁾。なかでも石川、卯本は、高性能酸素直接燃焼石炭MHD-汽力複合発電方式を提案しCO₂液化電力を考慮して46% (High Heat Value : HHV基準) 程度の効率が可能であることを示した。なお、参考のため、石炭を燃料とする各種発電所効率を表1に示す^{11, 12)}。ただし、LHVはLow Heat Value の略である。

図-2はMHD発電機を用いたCO₂回収方式MHD-

表1 CO₂回収発電システムの効率 (石炭燃焼; HHV)

O ₂ /CO ₂ 燃焼MHD	46.4%
O ₂ /CO ₂ 燃焼法	30.9%
アミン吸収法	27.8%
IGCC	約36% (39.7%on LHV)

汽力発電システムである。多くの大規模実験が行われている低温電極フェラーデー形MHD発電機を用いている。3000K程度の燃焼温度を得るためCO₂を約32mol%含む酸素を用い、酸素は純度95mol%のものを仮定している。出口におけるCO₂の濃度はH₂Oを除くと93.6mol%となっており、CO₂の液化回収が容易になっている。解析の結果、交流系統に供給されるMHD発電出力は449.7MW、交流系統に供給される同期発電機出力は732.1W、酸素製造に必要な電力は106.1MW、CO₂液化電力は80.4MWとなり、酸素製造電力、CO₂液化電力を差し引いて、発電所効率は46.4% (HHV)、CO₂液化電力を差し引かない場合には50.5%となり、石炭燃焼のシステムとしては現在の38%に比較しても、十分高い効率が得られている。このシステムでは高温空気加熱器が除外されており、また米国エネルギー省の50MW熱入力MHD発電実証試験装置の延長上で設計したMHD発電機を想定しており、現状技術の延長で実現可能なシステムである。

一方、Steinberg等はCO₂回収が困難な分散的エネルギー使用者から排出されるCO₂を削減するため、石炭、天然ガス、バイオマスなどから効率的にメタノールなどの液体燃料と炭素を生産する方法を提案しているが、石川、Steinbergは素過程であるメタンの解離は吸熱反応であり、MHD発電と結合すると、MHD発電下流の熱を利用でき、生成炭素はMHD発電の燃料となり、またメタノール合成反応発生熱の一部は蒸気サイクルに回収でき興味深いシステムの構築が可能

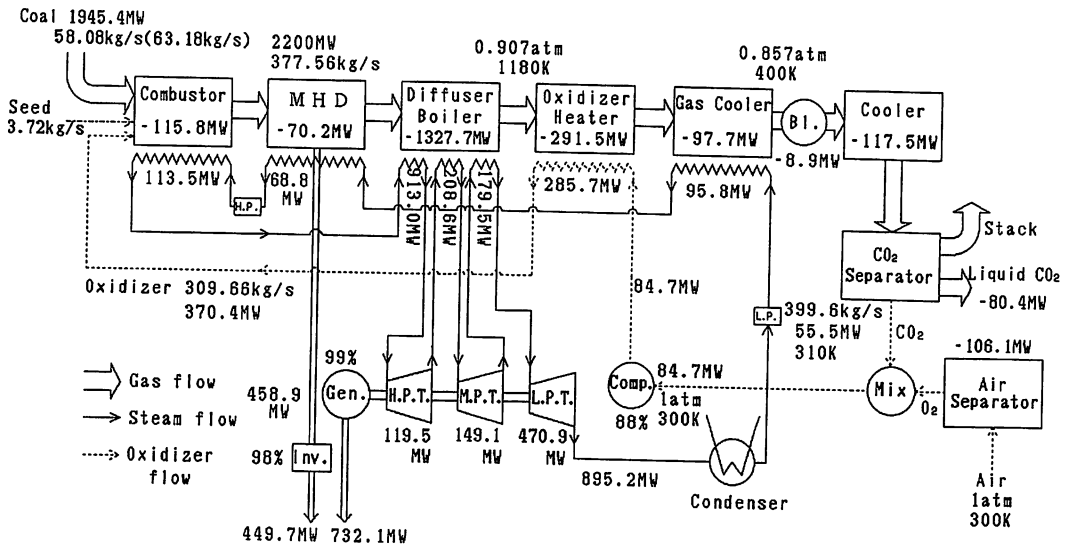


図-2 CO₂回収石炭燃焼MHD-汽力複合発電システムエネルギーバランス (低温電極ファラデー形発電機, 酸素燃焼)

であることを示した。なお生ずるCO₂は液化回収する¹³⁾。低温電極ファラデー形MHD発電機を仮定し、天然ガス原料の供給が42.19kg/sの時、交流系統へのMHD発電出力は267.2MW、交流系統への同期発電機出力は206.4MW、酸素製造に必要な電力は72.1MW、CO₂液化電力は32.0MWとなり、交流系統に供給される発電所出力が370.0MW、メタノールの生産量が56.17kg/sのシステムが得られている。また、メタノールの代わりに水素を製造するシステムも検討されている。

一方、北海道大学の研究グループにより、石炭を原料とし、気体燃料を生成するMHD発電-ガスタービン複合サイクルが提案解析されており、今後の進展が注目される¹⁴⁾。

2.2 理論・数値解析の進展

オープンサイクルMHD発電方式の研究開発における理論・数値解析的研究は90年代に顕著に進展しており、我が国の貢献が著しい。

ダイアゴナル形MHD発電機チャンネルにおいて、MHD発電機動作の非線形性に起因する発電機動作の分岐現象が発見された。負荷抵抗や出口静圧が変化すると発電機出力が突然20%程度も大きく変化する領域の存在することが示されている。また同時に負荷抵抗の変化に関して履歴（ヒステリシス）現象も示されている。この分岐現象はMHD発電機における非線形現象として非常に興味深い現象であるのみならず、工学的

にも発電出力の突然の大変動の可能性を示唆しており、運用上も重要な発見である¹⁵⁾。

大規模MHD発電機の安定性に関して、大型ダイアゴナル形チャンネルが不安定になる可能性の指摘とその安定化手法が開発された。その安定化の努力の中で、発電機を低いマッハ数で運転することが提案され、ディフューザに要求される性能を大幅に低下できるという有利点も発見された¹⁶⁾。また、オープンサイクルディスク形MHD発電機は直線状発電機（ファラデー形、ダイアゴナル形）に比較して、電極構造、外部負荷回路の設計、超電導磁石などが単純化できるなど有利な点を持つが、これまでオープンサイクルMHD発電方式大型ディスク発電機は動作が不安定であるとされ、大規模な開発研究はなされて来なかった。最近、不安定性の検討がなされ、安定な大型ディスク形発電機の設計が可能であることが示されたことも大きな進展のひとつである¹⁷⁾。

数値解析による実験結果の検討も進展しており、中国電工研石炭燃焼ファラデー形MHD発電チャンネル¹⁸⁾、ロシアパルスMHD発電チャンネル^{19, 20)}、非一様流れの解析²¹⁾など、MHD発電機チャンネル内の物理現象の把握が進んできた。

中国電工研石炭燃焼ファラデー形MHD発電機に関して、93年10月に行われた発電実験では熱入力22.89MWであり、発電出力は98.2kWが得られた。数値解析では発電出力は98.3kWとなり、発電機全体の性能

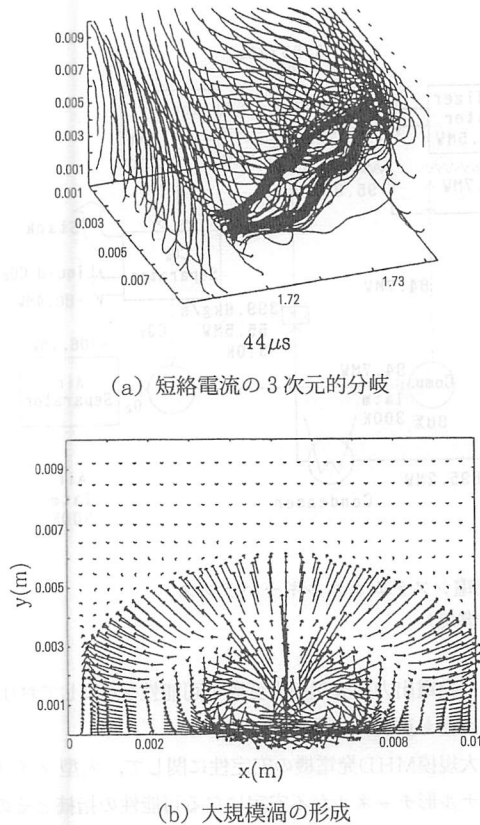


図-3 出力10MWファラデー形MHD発電機隣接陰極間短絡現象の解析

は良く一致した。実験結果は大きな揺らぎを示しているが、計算結果とおおむね一致している。さらに、石炭燃焼等が改良された場合の評価が行われ、理論値の導電率が実現されると400kW以上の発電出力が可能であることを示し、発電設備の潜在能力は大きいことが明らかにされた。

ロシアで開発されたパルスMHD発電機では、固体燃料を用い、磁場は自動する。非常に強いMHD相互作用が表現されており、予想される衝撃波、境界層剥離などを検討するため、非定常2次元解析がロシアのIvanovにより先駆的に行われ、単純化されたモデルにもかかわらず、MHD相互作用が強まるとともに衝撃波と境界層剥離の生じることが示された。さらに、筑波・京都大学グループにより、最大15MWの電気出力(負荷出力)を実現している可搬形自動式パルスMHD発電機Pamir-3Uの詳細な非定常2次元解析が行われた。数値解析では、衝撃波を効果的に計算できるように流体部分は陰解法TVD法を用い、乱流モデル

には $k-\omega$ モデル、電気部分はガラキ有限要素法を用いている。陽陰極間の大きな非対称という特徴を持つ大規模な境界層剥離が生じており、主流部分では複雑な衝撃波が誘起されていることが示され、実験的に見いだされている発電出力の飽和現象は、衝撃波と境界層剥離によってもたらされたことが明らかにされた。

また計算機と解析手法の進展により、時間依存3次元解析も開始されている²²⁾。図-3は、電気出力10MW級ファラデー形MHD発電機隣接陰極間短絡現象の解析結果である。電磁場と流体場の強い3次元MHD相互作用の結果、(a)図のように、電流分布は複雑な3次元構造を持ち、短絡電流の分岐現象が発見された。(b)図は絶縁壁上方における運動量ベクトルの分布である。短絡電流により誘起されたプラズマの渦との相互作用により短絡電流の分岐現象が生じることが明らかにされ、またこのような現象は非常に早い時間依存現象あり、隣接電極間短絡は発生、成長、消滅を繰り返していることが明らかになった。

MHD発電機の実用化のためにはどうしても必要なMHD発電機と交流電力系統との接続の研究に関して、最近10年ほどの研究はほとんど筑波・京都大学グループによってなされている。石炭を燃料とする大規模ダイアゴナル形発電機と大規模ディスク形発電機を他励式インバータシステムを介して交流電力系統に接続する場合の検討がなされ、送電線事故解析の結果、送電線の事故時においても他励式インバータの制御角を一時的に短絡方向に制御し、その後定格制御角に戻すことにより、1秒以内に速やかに復旧できることが示された^{23, 24)}。また、MHD発電機が系統安定化のために利用可能であることも示唆され、この点で、より高性能な制御能力を持つ自動式インバータの大規模MHD発電機への適用の検討が望まれる。

3. クローズドサイクルMHD発電方式

3.1 研究の進展

クローズドサイクルMHD発電では希ガス(アルゴンもしくはヘリウム)を作動気体とし、プラズマの非平衡電離現象を利用するので、オープンサイクルMHD発電に比べて低い作動気体温度(1800~2100°C程度)においても導電率が燃焼ガスの場合より1~2桁程度高くなるので出力密度が大きく、発電機の小型化が可能である。また、化石燃料、高温ガス炉、核融合炉など多様な熱源を利用できる可能性も持つ。

最近、我が国の東工大のMHD発電研究グループに

よりめざましい実験結果が報告されていると共に、従来から提案されているクローズドサイクルMHD発電と蒸気・ガスタービン発電とを組み合わせたMHDコンバインドサイクルとともに、蒸気・ガスタービンなどの下流発電機器を全く利用しない「MHD単独発電システム」が新たに提案された。

また、本報告では記述できないが、理論・数値解析面でも我が国の東工大、京大・筑波大、長岡技科大等の研究グループの貢献により、著しい進展を見せており、理論数値解析によってもMHD発電機の動作をある程度予測できるようになってきている²⁵⁾。

3.2 クローズドサイクルMHD発電実験の進展

東工大では、1分程度の発電時間を有するブローダウン実験装置「Fuji-1」および数ミリ秒の発電時間を有する衝撃波管装置を用いた発電実験が行われている²⁶⁾。Fuji-1実験装置では、ペブル床蓄熱型熱交換器で2000℃程度に加熱されたアルゴンにシード物質としてセシウムを数100ppm添加したものを作動気体とし、超電導電磁石により磁界が印加されたディスク形発電機に作動気体を流すことで電気出力を得る。この装置では、現在Disk-F4と呼ばれる発電機が用いられ、506 kWの発電出力（負荷抵抗値0.48Ω，シード率 2.9×10^{-4} ）と、18.4%のエンタルピー抽出率（世界最高記録）が得られており、高い発電出力と高いエンタルピー抽出率が同時に達成されている。作動気体に混入する水分等の不純物を低減し、シード率や負荷抵抗といった運転条件を最適化することで、さらなる高性能化が期待されている。一方、衝撃波管実験装置では、HeにCsをシードしたプラズマを作動気体とし入口スワールベーンを備えたISTEC-1発電機、ならびにArとCsを作動気体とした入口スワールのないRLN発電機（いずれもディスク形発電機）を用いて、更なる高エンタルピー抽出率・高断熱効率の実証を目的とした研究が進められている。現在得られている最大エンタルピー抽出率は、ISTEC-1発電機で31.6%、RLN発電機で26.5%と高く、いずれの発電機においても商用規模発電機で想定される値（30%程度）にはほぼ達している。また、高効率発電システムを構築する上で重要な指標である断熱効率もそれぞれ55.0%、46.2%と小型発電機としては、非常によい値が実証されており、商用機で要求される値（75%以上）が大型機で実現される可能性が高い。数値計算によれば、より高い磁束密度を利用することで断熱効率は向上することが指摘されている。

3.1 クローズドサイクルMHD発電システムの探求

(1) MHDコンバインド発電システム

MHD発電機は2000℃程度の高温熱エネルギーを電気エネルギーに変換するが、MHD発電機・希ガス再生熱交換器を出た後の希ガスが従来の蒸気タービンを駆動するのに十分高温な温度を持ち得ること、また希ガス加熱器から排出される燃焼ガスが従来のガスタービンを駆動させるのに十分な温度を持ち得ることなどから、MHD/蒸気タービンコンバインドサイクル、MHD/ガスタービンコンバインドサイクル、MHD/ガスタービン/蒸気タービントリプルコンバインドサイクル、の複合発電システムを構成することができる。これらの方式はMHD発電を従来の発電システムのトッパーとして組み合わせたもので、「熱のカスケード利用」を念頭に置いたシステムである。図-4にMHD/ガスタービン/蒸気タービントリプルコンバインド発電システムの例を示す。これまでの詳細な計算から、MHD/ガスタービン/蒸気タービントリプルコンバインドサイクルにおいて1300℃級のガスタービンを用いることで57%程度の総合効率、また1500℃級のガスタービンを用いることで58%程度の総合効率が期待できることが示されている²⁷⁾。その際、MHD発電機のエンタルピー抽出率、断熱効率をそれぞれ36%、90%、発電機入口の希ガス温度を2300Kに設定している。2000℃程度の高温熱エネルギーをうまくカスケード的に利用することで60%程度の総合効率が期待できるが、ガスタービン発電系、蒸気タービン発電系が既存技術で対応可能としても、MHD発電系を含めたトリプルコンバインド発電システムはいささか複雑であ

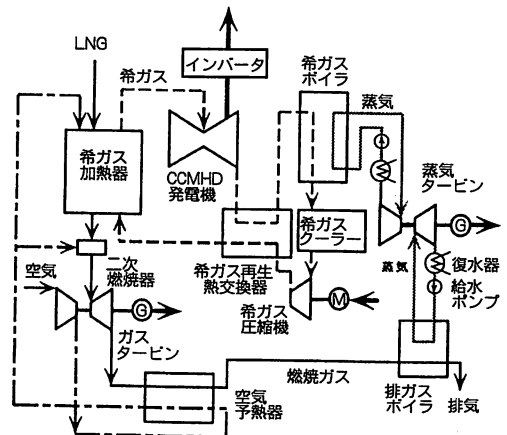


図-4 クローズドサイクルMHD/ガスタービン/蒸気タービントリプルコンバインド発電システム

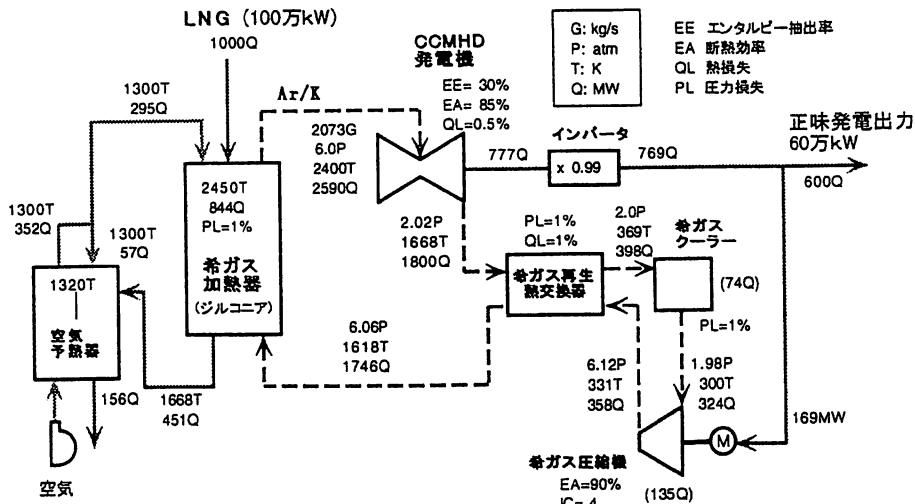


図-5 クローズドサイクルMHD単独発電システム

ること、また建設コストや立地面積の面において多少検討の余地が残されている。

(2) MHD単独発電システム

次世代大容量発電技術の開発において、高効率であること（ガスタービン複合発電より）、環境適合性に優れていること、負荷追従性など運用性に優れていること、多種燃料に対応できることに加えて、最近では、建設コストや立地面積など経済性に優れていることが強く要求されている。そこで、蒸気・ガスタービンなどの下流発電機器を全く利用しない「MHD単独発電システム」が提案された。下流発電機器を排除することで、極めてシンプルなシステム構成となり、設置スペースファクターの向上が期待できる。このMHD単独発電システムの構成図を図-5に示す²⁹⁾。作動気体である希ガスは、希ガス加熱器で2400Kに加熱されMHD発電機に導かれた後、希ガス再生熱交換器、希ガス冷却器、希ガス圧縮機、そして再び希ガス再生熱交換器を経て、希ガス加熱器に戻り循環する。MHD発電機の出力は、インバータを介して交流に変換され、その一部は希ガス圧縮機の動力に使用される。希ガス加熱器、希ガス再生熱交換器はいずれも蓄熱型熱交換器であり、希ガス加熱器では、LNGを燃料とした高温空気燃焼を利用する。

解析結果によれば、100万kWのシステム熱入力に対して、MHD発電機交流出力76.9万kW、希ガス圧縮機への入力16.9万kW、正味の発電出力として60万kWが得られ、発電システムの総合効率は60%に達することが示されている。このように、蒸気・ガスター

ビンなどの下流発電機器を全く利用しないMHD発電単独のシステムにおいても、先に述べたようなMHDトリプルコンバインド発電システムに匹敵する高効率な発電システムを構築できる可能性が示された。このシステムの特徴は、希ガス再生熱交換器における回収エネルギーが極めて多いことである。すなわち、先に述べたMHDトリプルコンバインド発電システムが熱のカスケード利用型であるのに対し、MHD単独発電システムは回収エネルギー利用型となっている。

総合効率はMHD発電機のエンタルピー抽出率には大きく依存しないが、MHD発電機の断熱効率や発電機入口ガス温度に強く依存する。MHD発電機断熱効率の増加は、希ガス圧縮機に必要な動力を低減させ、結果として総合効率の増加をもたらす。総合効率はガス温度とともに増加する。

設計されたMHD発電機は、アルゴンにカリウムをシードしたものを作動気体とし、中心磁束密度7Tの超電導磁石（蓄積エネルギー2490MJ）を用いることで、エンタルピー抽出率30%、断熱効率85%を実現している。ホットダクトの直径は約2m、発電機出口に相当するカソードの直径は約4m程度である。

最近、ハニカム型の比較的軽量の蓄熱体が開発されているが²⁹⁾、その場合比較的短時間で希ガス加熱器を切り替え運転することが要求される。MHD単独発電システムは回収エネルギー利用型であるだけに、MHDトリプルコンバインド発電システムに比べてより高温域で動作可能なコンパクトな高性能高温希ガス加熱器・希ガス再生熱交換器の開発が必要である。

謝辞 クローズドサイクルMHD発電方式の記述において、東工大奥野氏の協力を得ました。

文 献

- 1) T. Houghton, J. T. (Editor) et al. ; Climate Change 1995 (1996), Cambridge.
- 2) 石川, 卯本 ; MHD発電の現状と将来, エネルギー・資源, 9巻, 4号(1988), 36~41.
- 3) MHD発電技術開発の動向, 電気学会技術報告(II), 445号(1992), 電気学会.
- 4) プラズマMHD発電, 電気学会技術報告, 621号(1997), 電気学会.
- 5) Yan Luguang, Ju Zixiang and Sha Ciwen ; Progress and National Program of MHD Generation in China, Proc. 32nd Symp. Eng. Aspects MHD (1994), Ses.1.
- 6) Ni, Q. et al. ; A Study on Electrical Nonuniformity of an Experimental Coal-Fired MHD Generator, Proc. 12th Int. Conf. on MHD (1996), Vol.1, 142~147.
- 7) 石川, 卯本 ; 高効率石炭燃焼MHD-汽力複合発電システムの検討, 電気学会論文誌D, 112巻, 3号(1992), 215~220.
- 8) Petrik, M. et al. ; Current Status of MHD Technology, US DOE ANL Report, ANL/FEP-1025 (1984).
- 9) Attig, R. et al. ; CFFF Status Report : Western Coal and Proof-Of-Concept Testing, Proc. 25th Symp. Engng. Aspects MHD (1987), 5.2.
- 10) 石川, 卯本 ; CO₂液化回収石炭直接燃焼MHD-汽力複合発電, 電気学会論文誌B, 113巻, 7号(1993), 811~816.
- 11) 中山, 他 ; O₂/CO₂燃焼によるCO₂回収型発電システム, エネルギー・資源学会第11回研究発表会論文集(1992), 259~264.
- 12) Pruschek, R. et al. ; Combined Cycle Power Plant with Integrated Coal Gasification, CO Shift and CO₂ Washing, Energy Conversion and Management, Vol.36, No. 6-9 (1995), 797~800.
- 13) Ishikawa, M. and Steinberg, M. ; An Analysis of MHD Power Systems for Reduction of CO₂ Emission, Proc. 12th Int. Conf. on MHD, Vol.1 (1996), 282~291.
- 14) Kayukawa, N., Aoki, Y., Okinaka, N. and Ohishi, S. ; Mass and Energy Balance Studies on MHD/Gas/Steam Triple Combined Cycle with Thermochemical MHD Heat Recovery, Proc. 12th Int. Conf. on MHD, Vol.1 (1996), 314~321.
- 15) 松尾, 石川, 卯本 ; 超音速ダイアゴナル形MHD発電機における分岐現象の数値解析, 電気学会論文誌B, 113巻, 7号(1993), 823~831.
- 16) 岩下, 松尾, 石川, 卯本 ; 商用規模石炭燃焼超音速ダイアゴナル形MHD発電機の安定性解析, 電気学会論文誌B, 117巻, 6号(1997), 864~871.
- 17) 松尾, 石川, 卯本 ; オープンサイクル超音速ディスク形MHD発電機の安定性解析, 電気学会論文誌B, 116巻, 3号(1996), 360~366.
- 18) Ishikawa, M., Iwashita, T. and Tong, T. ; Analysis of Faraday and Diagonal Modes of Coal-Fired MHD Generator at IEE, China, 12th Int. Conf. on MHD, Vol.1 (1996), 116~125.
- 19) Ivanov, V. A. ; A Method for Calculating an MHD Flow with Boundary-Layer Separation, High Temperature, Vol.32, No.1 (1994), 849~859.
- 20) Matsuo, T., Sugita, H., Ishikawa, M. and Zeigarnik, V. A. ; Numerical Analysis of Asymmetric Strong Shock in Pulsed MHD Generator, Proc. 34th Symp. Eng. Aspects MHD (1997), 3.1.1~3.1.10.
- 21) Bityurin, V. A., Ivanov, V. A. and Veefkind, A. ; The Analysis of The Current Clot Propagation in An Experimental MHD Channel, Proc. 33rd Symp. Eng. Aspects MHD (1995), VI.5.1~VI.5.9.
- 22) 石川, 立石, 松尾 ; 高磁場高温高速条件における弱電離プラズマの3次元電流ストリーマの形成について, 第10回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム(1998), B1, 183~188.
- 23) Iwashita, T., Inui, Y., Matsuo, T., Ishikawa, M. and Umoto, J. ; Effects of Faults of Interconnecting System on Subsonic Diagonal Type MHD Generator, Proc. 1998 Int. Symp. on Advanced Energy Technology (1998), 531~538.
- 24) 早ノ瀬, タンアイリ, 乾, 松尾, 石川, 卯本 ; 2負荷オープンサイクルディスク形MHD発電機の送電系統連系時の動作特性, 電気学会論文誌B, 17巻, 7号(1997), 1061~1068.
- 25) Kabashima, S. and Yamasaki, H. ; Recent Progress in Colosed Cycle Nonequilibrium MHD Power Generation, Proc. 12th Int. Conf. on MHD, Vol.1 (1996), 1~15.
- 26) Okuno, Y. et al. ; Recent Power Generation Experiment with Fuji-I CCMHD Blow-Down Facility, Proc. 1998 Int. Symp. on Advanced Energy Technology (1998), 277~284.
- 27) 吉川, 塩田 ; クローズドサイクルMHDをトッパとするガスタービンコンバインドサイクル発電システム, 日本機械学会論文集, 第513号, B編(1989), 1477~1484.
- 28) 奥野, 吉川, 岡村, 山岬, 梶島, 塩田 ; 高効率CCMHD単独発電システムの提案, 電気学会論文誌B, 118巻, 12号(1998), 1457~1462.
- 29) 田中, 他 ; 特集「高温空気燃焼」月刊「省エネルギー」, Vol.48, No.10 (1996), 2~31.