クローズドサイクル MHD 高効率発電システムの研究開発*

吉 川 邦 夫^{*1}, 塩 田 進^{*1}

R & D on Closed Cycle MHD High Efficiency Power Generation System

Kunio YOSHIKAWA and Susumu SHIODA

Key Words: MHD Power Generation, Combined Cycle, Plasma, Magnetohydrodynamics, Supersonic Flow, High Temperature Heat Exchanger, Disk MHD Generator

1. は じ め に

化石燃料を燃焼させたときの断熱火炎温度は2 200～2 400 K 程度あるのに対して、将来的にもガスタービンの最高動作温度は1 700～1 800 K 程度が限界と考えられ、火力発電の技術分野では、まだ広い高温領域が残されている。この高温熱エネルギーを直接電力に変換できる新たな発電方式が、クローズドサイクル MHD 発電 (CCMHD) である。燃焼ガスのもつ最高温度域の熱は CCMHD により、また中低温域の熱はガスタービンや蒸気タービンによって、それぞれ電力に変換することにより、従来考えられなかった高効率の火力発電システムを構成することが可能となる。

CCMHD では、燃焼ガスによって希ガス（アルゴンまたはヘリウム）を2 000～2 300 K 程度に加熱する。加熱された希ガスには、電気伝導性を与えるため、10～100 ppm 程度の微量の金属カリウムあるいは金属セシウムをシードとして添加し、図1に示すようなディスク形 MHD 発電機へと導く。超電導磁石が作る強い磁界中に置かれた MHD 発電機内では、希ガスがプラズマ化して高い電気伝導度を持ち、ローレンツ力に抗して希ガスを流すことによって、その熱エネルギーが直接電力に変換される。

この CCMHD を効果的に組み込むことによって、50% を大幅に超える発電効率をもつ火力発電システムが実現される可能性があることが示されたこと、また、東工大で実施している CCMHD の実験によって、18% というこれまでの MHD 発電研究では世界最高

値のエンタルピー抽出率（発電機からの電気出力を発電機への熱入力で割った値）が実証されたことから、最近、電力会社をはじめとする産業界に、CCMHD に関する関心が高まっている。

本報では、CCMHD を用いた、高効率の火力発電システムの構成例について説明し、かかるシステムを実現するうえで、最も重要な開発要素である、高温希ガス加熱器とディスク形 MHD 発電機の研究開発の現状を紹介し、CCMHD の研究開発の今後の展望について述べる。

2. クローズドサイクル MHD 発電を用いた高効率火力発電システム

図2に、CCMHD とガスタービンを組合せた、LNG だき商用火力発電所（電気出力500 000 kW 級）システム例を示す。ここでは、CCMHD の作動流体はヘリウムとしている。

図1 ディスク形 MHD 発電機の動作原理

* 原稿受付 平成5年3月30日。

^{*1} 正員、東京工業大学総合理工学研究科(☎227 横浜市緑区長津田町4259)。

図2 CCMHD 発電商用プラントのシステム例

本システムにおいてはまず、高温ヘリウム加熱器（後述する蓄熱形高温熱交換器）内の主燃焼器中で、天然ガスが加圧された空気により燃料過濃状態で燃焼される。これは、排出 NO_x 濃度を抑制するための方策で、燃焼ガスは、高温ヘリウム加熱器を出たあとで、二次燃焼器で完全燃焼される。高温ヘリウム加熱器内では、燃焼ガスのもつ高温部分の熱がヘリウムへと伝えられ、加熱されたヘリウムには、シード材である金属カリウム蒸気が添加され、MHD 発電機に流入して発電が行われる。MHD 発電機から流出する高温のヘリウムは、再生熱交換器に流入して、ヘリウム圧縮機で加圧された低温のヘリウムを加熱する。その過程で、ヘリウムに添加された金属カリウムは、凝縮・抽出され、再生熱交換器で冷却されたヘリウムは、さらに冷却器に流入して、最終的に室温まで冷却され、同時に含有する金属カリウムが完全に除去されて、ヘリウム圧縮機で昇圧される。昇圧されたヘリウムは、再生熱交換器で加熱され、ヘリウムタービンを駆動して、再び高温ヘリウム加熱器へと戻り、ヘリウムの閉ループが形成される。ヘリウム中のカリウムは、上記のように冷却過程で完全に除去されるため、ヘリウム圧縮機、ヘリウムタービンならびに高温ヘリウム加熱器には流入しない。

一方、高温ヘリウム加熱器から流出する燃焼ガスは、

二次燃焼器で加圧空気によって完全燃焼され、同時にガスタービンの駆動に必要な温度まで再昇温される。再昇温された燃焼ガスは、ガスタービンを駆動し、燃焼空気を予熱した後に、煙突から大気へと排出される。

以上のプロセスにおいて、MHD 発電機、ヘリウムタービンならびにガスタービンからそれぞれ電気出力が取り出され、それからヘリウム圧縮機や空気圧縮機などの所要動力を引いたものが正味の電気出力となる。なお、天然ガスは、加圧された LNG を気化させるため、その昇圧動力は無視できる。

CCMHD の実現の可能性を評価するため、上記のシステムの概念設計が実施され⁽¹⁾、発電効率、発電原価、必要面積、運用性などが検討された。その結果、送電端効率（高位発熱量基準）で 54% の発電効率が期待できること、発電単価については、現行のガスタービン複合発電相当になり、燃料費の上昇があれば、経済的に優れた発電所となることが示された。

以上をまとめると、CCMHD は、ガスタービンのトッピングサイクルとして位置付けられ、燃焼ガスのもつ最高温度の熱エネルギーを電力に直接変換することによって、熱エネルギーのカスケード的利用による高効率化が可能となる。また、ガスタービンの性能向上が、そのままシステム全体の性能向上につながるため、

現在精力的に実施されているガスタービンに関する研究開発の成果を取り入れながら、CCMHD の研究開発を進めることができる。

3. クローズドサイクル MHD 発電の研究開発の現状

CCMHD は、世界的にも東工大が中心となってその研究開発を実施している。主たる開発要素は、高温希ガス加熱器とディスク形 MHD 発電機であり、東工大には、熱入力 5 MW 級の、天然ガスを熱源とするブローダウン実験装置 FUJI-1 が設置され、そこで、これら両コンポーネントの研究開発が行われている。

図 3 に、FUJI-1 装置の全体システムを示す。FUJI-1 装置には、後述するペブル床の蓄熱形高温希ガス加熱器が 1 台設置されており、天然ガスの燃焼ガスの熱を一度ペブル床に蓄え、そのペブル床によって希ガスを加熱するというのが、その動作原理である。加熱された希ガスには、金属セシウムが 100 ppm (モル比) 程度シードされ、最高 2 100 K の温度でディスク形発電機に流入する。発電機は、2 個の超電導磁石に挟まれ、発電機中心で、4.7 T の磁界強度が得られる。発電機を出た希ガスは、室温のペブルが充てんされたペブル冷却器で冷却された後、最後は容積 750 m³ の真空タンクに吹き込まれる。以上の実験時間は、約 2 min である。

3・1 高温希ガス加熱器 FUJI-1 装置の高温希ガス加熱器は、これまで、耐火レンガおよび蓄熱体であるペブルともに高純度アルミナ製であったため、その融点の制約から、その最高加熱温度が 2 100 K に制限されていた。しかし、2 章で述べた CCMHD 発電システムのサイクル解析の結果、MHD 発電機に流入する希ガスの温度が上昇するほど高い発電効率を得られることが示され、それと同時に、発電実験の結果、発電機内で安定したプラズマを得るためには、より高い

希ガス温度が望ましいことが明らかとなった。

そこで、高温希ガス加熱器の最高温部の材料をアルミナからジルコニアに切替えることによって、最近、最高加熱温度を 2 350 K まで引き上げることに成功した。詳細は文献(2)に記されているが、ここではその概要を紹介する。

この改造工事のために、2 300 K 以上の融点をもつ耐火レンガ材とペブル材として、6 mol イットリア安定化ジルコニア製のものが、それぞれ東芝セラミックスとニッカトーの両社によって新たに開発された。

図 4 に、改造後の希ガス加熱器の全体断面図を示す。改造にあたっては、2 300 K レベルをめざすため、耐火壁は、従来の 3 層構造に 1 層追加した、厚さ 240 mm の 4 層構造として断熱性を上げた。さらに、加熱器内の垂直方向の温度分布を考慮し、蓄熱床高さの中間位置 (高さ 1.5 m) を境にして、上部はペブル、耐火壁ともにジルコニア質で構成し、下部は従来と同じアルミナ質で構成した。

図 5 に、アルゴンを用いた発電実験時の、バーナ点火後のペブル床頂上部温度の経時変化例を示す。2 回目のアルゴンブロー実験時に、加熱終了時の温度としては最高の 2 358 K をマークし、約 5 min の真空排気中にその温度が 100 K 以上低下した結果、アルゴンブロー時には、ペブル床頂上部で 2 223 K、ディスク形発電機入口で 2 073 K のアルゴン温度が得られた。ヘリウムを用いた同様な実験では、発電機入口で最高 2 106 K のヘリウム温度が得られており、上述の改造で、高温希ガス加熱器の動作温度を約 200 K 引き上げ

図 3 FUJI-1 装置の全体システム

図 4 FUJI-1 高温希ガス加熱器の断面図

ることに成功した。

3・2 ディスク形 MHD 発電機 ディスク形発電機の発電性能を左右する主要な実験パラメータには、発電流路形状、作動流体の種類(アルゴンかヘリウム)、発電流路入口における作動流体の温度と圧力ならびにマッハ数、シード材の種類(カリウムかセシウム)、シード率(作動流体中のシード材のモル分率)、外部負荷抵抗値、などがある。一方、発電性能を低下させるおもな要因としては、発電流路入口部での不完全なシード材の電離に起因する電位損失(プラズマの電気伝導度の低下)と、発電流路内での作動流体の流速の低下がある。実験パラメータをどのように設定すれば、上記の二つの問題を克服して、高い発電性能が得られるかは、理論計算でもある程度予測可能である。しかし、発電流路入口部でのシード材の電離過程や、衝撃波と境

界層の干渉による流速の低下などの重要な物理プロセスの完全なモデル化は困難であり、最終的には、種々のパラメータを変えた実験を積み重ねて、最適な実験条件を見いだす必要がある。

ここでは、これまで得られた FUJI-1 装置での発電実験の結果の中から、発電流路形状の影響について略述する。図 6 に、ブローダウン実験で使用した、DISK-F3a 発電機の断面図を示す。発電機は、超音速ノズルと発電流路ならびにディフューザの各部によって構成されている。発電流路には、上流から第 1 アノード(A1)、第 2 アノード(A2)、第 1 カソード(C1)、第 2 カソード(C2)の 4 対の電極が取付けられており、負荷抵抗を第 2 アノードと第 2 カソードの間に接続して、電気出力を取り出している。第 2 アノードと第 1 アノードの間には、厚さ約 10 mm の窒化ほう素(BN)の電気絶縁板が、また、第 1 カソードと第 2 カソードの間には、同じ厚さの窒化けい素(Si_3N_4)の電気絶縁板が設けられて、この電気絶縁板によって、ホール起電力が保持されている。

図 7 に、発電実験に使用した、2 種類の発電流路形状を示す。発電流路入口と出口の断面積比は、DISK-F3a で 4.1, DISK-F3r で 6.9 となっており、DISK-F3r のほうがローレンツ力の作用による作動流体の減速を抑える設計となっている。両者の発電流路を用いた実験の条件を表 1 に示す。

図 8 には、両者の流路形状について、負荷抵抗値とシード率(S.F.)を変えたときに、エンタルピー抽出率がどのように変化するかを示す。図 8 から、DISK-F3r のほうが、18.0% という、より高いエンタルピー抽出率が得られていることがわかり、それと同時に、エンタルピー抽出率が最大となるシード率は、DISK-F3r のほうが大きいことがわかる。一般に、シード率を大きくすると、発電流路入口部でのシード材の電離が促進されて、より高い電気伝導度をもったプラズマ

図 5 バーナ点火後のペブル床頂上部の温度変化

図 6 FUJI-1 ディスク形発電機の断面図

図 7 実験に使用した 2 種類の発電流路形状

表 1 おもな実験条件

MHD channel	DISK-F3a	DISK-F3r
Working gas	Ar + Cs	Ar + Cs
Stagnation gas temperature (K)	1850	1950
Stagnation gas pressure (MPa)	0.46	0.41
Thermal input (MW)	2.60	1.65
Seed fraction	$2.0 \sim 3.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \sim 5.0 \times 10^{-4}$
Load resistance (Ω)	0.051~2.5	0.31, 0.51, 0.82
Magnetic flux density (T)	4.4 (inlet) ~ 2.7 (exit)

図 8 エンタルピー抽出率とシード率ならびに負荷抵抗値との関係

が形成されるが、それだけ、ローレンツ力の作用も大きくなり、作動流体が大きく減速される。しかし、発電流路の開きを大きくすれば、こうした減速が抑制されるため、DISK-F3r では、高めのシード率にすることによって、プラズマの高い電気伝導度と作動流体の高流速とを両立させることができ、DISK-F3a よりも高いエンタルピー抽出率が得られたと考えられる。

図 9 に、オープンサイクル MHD (OCMHD) を含めて、世界中で得られた MHD 発電のエンタルピー抽出率を発電機への熱入力関数として示す。3000 K の燃焼ガスを作動流体とする OCMHD では、発電機での大きな熱損失を反映して、熱入力が 100 MW 以上になって、やっと 10% を超えるエンタルピー抽出率が得られているのに対して、CCMHD では、2 けた小さい熱入力で、18% という世界最高値が得られている点が注目される。また、OCMHD では、発電機の電極の長寿命化が最大の課題の一つであるが、CCMHD のディスク発電機では、構造上、電極上でのアーク電流の集中が生じにくく、短時間の実験の繰返しではあるも

図 9 これまで実証された MHD 発電のエンタルピー抽出率と発電機への熱入力の関係

(白丸は CCMHD, 黒丸は OCMHD)

TIT: 東工大, EUT: アイントハーヘン工大)

図 10 CCMHD の研究開発のステップ

の、現在までのところ、水冷された銅製の電極に損傷は一切見られていない。

4. 今後の研究開発の方向

今後 CCMHD を実用化までもっていくには、多くの開発課題がある。図 10 に、CCMHD の実用化に至る研究開発の流れの例を示す。図 10 には、横軸に発電時間を、縦軸に発電機への熱入力をとって、それぞれの開発ステップのスケールが示されている。小規模、短時間の基礎研究から、大規模、長時間の商用プラントへと右上に向かう開発の流れがわかる。

現状の FUJI-1 装置に続く、次のステップは、「FUJI-2 装置」であり、これは、熱入力 100 MW 級の大形ブローダウン装置と熱入力 10 MW 級の閉ループ装置によって構成される。FUJI-2 ブローダウン装置は、ディスク発電機での、高いエンタルピー抽出率 (30% 以上) と高い断熱効率 (60% 以上) の実証を目

的とし、特に、高い断熱効率を実証するために、十分大きな磁場と熱入力とが不可欠となる。一方、FUJI-2 閉ループ装置は、長時間の連続運転による発電システムとしての工学的実証を目的とし、超電導磁石や高温希ガス加熱器など、主要なコンポーネントが共用できることから、ブローダウン装置と併設することが望ましい。

FUJI-2 閉ループ装置については、現状の FUJI-1 ブローダウン装置だけでは、その設計に必要なデータベースが不足していることから、当面は、FUJI-1 装置に 2 台めの高温希ガス加熱器と希ガス圧縮機とを追加して、これを閉ループ化し、数年かけて、閉ループ連続運転の経験を積むことを計画している。

5. ま と め

火力発電の大幅な高効率化を可能とする CCMHD

は、FUJI-1 装置で得られた画期的なデータによって、科学的実証から、工学的実証へと進むべき段階に達したといえる。CCMHD にかかわる技術には、高温工学、超電導工学、高速気体力学、プラズマ工学など、さまざまな最先端の工学分野が網羅されており、CCMHD の研究開発が、新たな技術進歩のけん引役となることが期待される。こうした開発を推進するには、産・官・学の有機的な協力が不可欠であり、従来の枠組にとられない、新たな研究開発体制を考えていく必要がある。

文 献

- (1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 平成 2 年度調査報告書, NEDO-P-9011, 「高効率環境調和型コミュニティ・エネルギーシステムの調査研究」, (1991), 78.
- (2) 阿部・ほか 8 名, 機論, 58-553, B(1992), 2898.