高効率石炭燃焼 MHD-汽力複合発電システムの検討

正員 石川 本雄 (京大)

正員 卯本 重郎 (京大)

Cycle Analysis of High-Performance Coal-Fired
MHD-Steam Power System

Motoo Ishikawa, Member, Juro Umoto, Member (Kyoto University)

The objective of the present paper is to demonstrate availability of high performance coal-fired MHD-steam power plant. (1) Thermal efficiency of 50% can be obtained with 1,000 MW thermal input when 15 m Faraday channel designed with up-to-date low temperature walls is used together with 1,620K air heater. (2) Higher cycle efficiency of 55.5% can be obtained when the thermal input increases to 2,000 MW even when the MHD channel is designed with low temperature wall. (3) If higher temperature for air heater, 2,100K and for channel wall, 2,200K can be realized, very high cycle efficiency of 61.0% can be obtained.

キーワード：MHD-汽力複合発電，石炭燃焼，高効率，低公害，システム解析

1. はじめに

熱機関のサイクル効率向上の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。この点でオープンサイクル MHD 発電方式は、3,000 K 程度の高温を最高温度とするためサイクル効率を飛躍的に向上させる可能性をもっており、従来から幾つかのシステム解析がなされてきた^{(1)~(4)}。

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、地道な努力によりようやく実用化の展望が見えてきた。すなわち、ナショナルプロジェクトとして電子技術総合研究所により研究開発された ETL Mark VII 装置における 400 時間以上の耐久試験により、石油燃焼条件での電極の耐久性は 4,000~5,000 時間と評価された⁽⁵⁾。石炭燃焼 MHD 発電方式では、アメリカ・AVCO 社の Mark VII 装置により 1,200 時間以上の耐久試験が実行され、電極の耐久性は 5,000~8,000 時間と評価された⁽⁶⁾。火力発電所の定期検査は 1 年ごとに約 1 箇月実施されていることが多いので、実用化のためには 11 箇月、すなわち 8,000 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

目標が達成される可能性を示している。

アメリカでは大形 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 300 MW 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 3.8 T の条件で、エンタルピー抽出率 12%、出力 30.5 MW を達成した⁽⁶⁾。一方、ソ連の U 25 装置では、熱入力 200 MW、印加磁束密度 2 T の条件で、エンタルピー抽出率 10%、出力 20.2 MW を達成している⁽⁷⁾。

オープンサイクル MHD 発電方式では、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。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いる。更に、MHD 発電方式によって熱効率が向上し 50% の効率が実現できると、単位電力あたりの CO₂ 排出量が現状に比較して 80、60% の熱効率が実現できると排出量は 67% に減少できる。また、煤塵排出に関して、アメリカ・テネシー大学 (UTSI) の CFFF (Coal Fired Flow Facility) に電気集塵機とバグフィルタが設置され、とも

に高性能が得られることが示された⁽⁶⁾⁽⁸⁾。

2. 解析モデル, 解析手法, 仮定条件

〈2・1〉 基本的設定条件 本論文の目的は、石炭直接燃焼の条件において、MHD-汽力発電所のサイクル効率が50～60%を達成する可能性を示すことである。なお、従来の高性能システム設計では、高圧、高電流密度、高電界を仮定してMHD発電チャネルを設計しているが、本論文では電極の対久性を考慮して、低圧、低電流密度、低電界で設計している。また、仮定した各種定数のシステム全体の性能に与える効果を感度解析により検討する必要があるが、今後の重要な研究課題である。

(1) 燃料・燃焼器 中国の大同炭を燃料として仮定し、直接予熱空気を酸化剤とした。燃料は完全に酸化され、スラグは90%が燃焼器で排除できると仮定している。ノズルを含めた燃焼器系の熱損失、圧力損失は条件として与え、また燃焼器系の熱損失は仮定した熱交換器効率で蒸気サイクルに回収されるとしている。

(2) 圧縮器・ディフューザボイラ・空気加熱器など 空気圧縮器は蒸気タービンにより駆動されるものとし、現状の技術およびその延長上で開発可能な等エントロピー効率を仮定している。ディフューザはMHD発電機出口における静圧を回復し、同時に蒸気発生・加熱装置として働く。圧力回復係数および熱交換効率を与えている。空気加熱器の熱交換率は他の熱交換機と同じ値を仮定し、熱交換温度差は約80 Kとした。なお、空気加熱器最高温度の実現が最も困難な技術開発の一つである。また、煙突の直前に排気ガス吸引機を仮定したが、それは低圧で運転したほうがMHD発電機からの出力が大きくなり、結果としてシステムの効率が上昇するためである。

(3) 蒸気サイクル 中部電力・川越火力発電所で実現された超々臨界圧蒸気サイクルで用いられている、蒸気圧力316 kg/cm²g、蒸気温度566°C、2段再熱を仮定し、蒸気のもリエ線図を用いて出力を計算している。

〈2・2〉 MHD 発電機の解析

(1) モデル化⁽⁹⁾ MHD 発電機の動作は電磁界と流体との相互作用によって決まる。電気的諸量に関する基礎方程式は、準一次元近似した電界に関するマクスウェル方程式、電流保存則、一般化されたオームの法則である。流体力学的諸量に関する基礎方程式は定常で一次元近似した質量保存則、運動量保存則、エネルギー保存則である。プラズマの乱れの効果はG因子を用いて考慮し、電極電圧降下は(1)、(2)式に

より評価する。圧力損失・熱損失は、平板乱流に対する評価式を用い、壁の粗さの効果を1 mmの等価砂粒径で考慮し、また放射損も考慮している。

(2) 計算方法・発電機形式 上述の定常、準一次元近似した方程式をルンゲ-クッタ-ジル法により解析している。研究目的が高性能システムの可能性を示すこともあるので、最も標準的なファラデー形発電機を仮定して解析しているが、ダイアゴナル形発電機の使用を除外しているのではなく、具体的な発電機形式は今後の検討課題である。

3. MHD-汽力発電システムの解析

〈3・1〉 1,000 MW 熱入力低温電極システム

(1) 諸仮定 MHD 発電チャネルは現在の技術の延長上で設計する。すなわち、低温壁で壁表面はスラグ層でおおわれ、漏れ電流が大きい。

MHD 発電機への熱入力	: 1,300 MW
質量流量	: 336.8 kg/s
燃焼器系の熱損	: 5%
燃焼器系の圧損	: 5%
コンプレッサ効率	: 88%
排気ブローワ効率	: 80%
タービン効率	: 90%
同期発電機効率	: 99%
インバータ効率	: 98%
熱交換器効率	: 98%
ディフューザ圧力回復係数	: 0.7
MHD 発電機以降の圧損	: 5%
MHD 発電機入口総温	: 2,700 K
MHD 発電機入口総圧	: 4.5 気圧
チャネル長	: 15 m
最大磁束密度	: 6.5 T
入口マッハ数	: 0.95
プラズマ側等価壁温度	: 1,800 K
G 因子	: 1.1
MHD 発電機壁漏れ抵抗	: 50 Ω/m

電極電圧降下 [$\Delta V(V)$] を与える式は低温電極の条件で評価された次の相似則で与えた⁽¹⁰⁾。

$$\Delta V = 70.0 + 292.0 (|J_y| \sqrt{1 + \beta^2} / J^*)$$
$$(J^* = q_t \sigma / \delta)$$

..... (1)

ここで、 J_y はファラデー (y) 方向電流密度、 β : ホールパラメータ、 q_t : 壁における熱流束、 σ : 流体の導電率、 δ : 平板乱流を仮定したときの境界層厚さ

MHD 発電機入口総温は空気加熱器の最高温度を決める重要なパラメータであるが、サイクル効率 50% が得られる最低温度として 2,700 K を選んだ。また、MHD 発電機入口総圧に関しては、チャンネル長 15 m の条件で種々の圧力で MHD 発電出力の計算を行い 4.5 気圧と決定した。図 1 は MHD 発電機出口総圧が 1.0~1.05 気圧になるように負荷率を選定し、得られた電気出力を描いたものである。発電機入口総圧 5.5 気圧で最大出力を得るが、システム設計では、サイクル効率が最も高くなった 4.5 気圧を選んだ。

また、MHD 発電機チャンネル長 15 m は、与えた条件においてサイクル効率 50% が得られる最短長として与えた。

(2) MHD 発電チャンネル 上記の条件において

図 1 MHD 発電機入口総圧と発電出力の関係

Fig. 1. Relation between stagnation pressure at entrance of MHD generator and output power.

設計した MHD 発電チャンネルの諸量は次のとおりである。

入口静圧, 静温	: 2.63 気圧, 2,532 K
入口速度, 導電率	: 865 m/s, 6.27 S/m
出口ホールパラメータ	: 4.75
入口, 出口断面積	: 1.03, 4.11 m ²
負荷率	: 0.834 (一定)
最大電極電圧降下	: 781V (起電力の 9.8%)
流れ方向 (x 方向) 最大電界	: 2.47 kV/m
最大電流密度	: 4.62 kA/m ²
MHD 発電出力	: 265 MW
エンタルピー抽出率	: 20.4%

計算値からわかるように、本発電機は現在実験中の石炭燃焼 MHD 発電機の延長上にあり、長さをおよそ 4 倍にしただけである。

(3) MHD-汽力発電システム 図 2 は上記 MHD 発電機を用いた MHD-汽力発電システムのエネルギーバランス図である。

空気加熱器最高温度	: 1,620 K
交流系統に供給される MHD 発電出力	: 259.7 MW
高圧タービン出力	: 48.0 MW
中圧タービン出力	: 60.0 MW
低圧タービン出力	: 189.3 MW
圧縮機動力	: 55.0 MW
交流系統に供給される同期発電機出力	: 239.3 MW
排気ブローワ動力	: 7.1 MW

図 2 MHD-汽力発電所エネルギーバランス (1,000 MW, ファラデー形発電機)
Fig. 2. Energy balance in MHD-steam power plant (1,000 MW, Faraday channel).

交流系統に供給される発電機所出力

: 491.1 MW

発電所への熱入力 : 978.0 MW

発電所の熱効率 : 50.3% (HHV)

熱入力 1,000 MW 程度の比較的小さいシステムにおいても、発電所サイクル効率は 50.3% (高位発熱量基準 HHV) となり、現在の 40% 程度 (石炭燃焼) のサイクル効率に比較して十分高い効率が得られた。

〈3・2〉 熱入力 2,000 MW 低温電極システム

(1) 諸仮定 MHD 発電システムの熱入力が多いほど性能が向上するので、システムへの熱入力が 2,000 MW 程度のシステムを検討する。まず、〈3・1〉節で述べた現在の技術の延長上で設計した MHD 発電機を仮定するが、空気加熱器の最高温度を上げると共に、燃焼器系の熱損の減少を仮定している。

MHD 発電機への熱入力 : 3,000 MW

質量流量 : 793.5 kg/s

燃焼器系の熱損 : 2.5%

コンプレッサ効率 : 90%

排気ブロー効率 : 85%

タービン効率 : 92%

熱交換器効率 : 99%

MHD 発電機入口総温 : 2,800 K

MHD 発電機入口総圧 : 7.5 気圧

チャンネル長 : 20 m

最大磁束密度 : 7 T

MHD 発電機入口総温は空気加熱器の最高温度を決める重要なパラメータであるが、システム効率 55% が得られる最低温度として 2,800 K を選んだ。また、

MHD 発電機入口総圧に関しては、MHD 発電機チャンネル長 20 m の条件で種々の圧力で MHD 発電出力の計算を行い 7.5 気圧と決定した。また、MHD 発電機チャンネル長 20 m は、熱入力 1,000 MW のシステムの場合より少し長い長さとして与えた。

(2) MHD 発電チャンネル 上記の条件において設計した MHD 発電チャンネルの諸量は次のとおりである。

入口静圧、静温 : 4.37 気圧, 2,629 K

入口速度、導電率 : 885 m/s, 6.74 S/m

出口ホールパラメータ : 4.60

MHD 発電出力 : 793 MW

エンタルピー抽出率 : 26.5%

計算値からわかるように、本発電機は現在実験中の石炭燃焼 MHD 発電機の延長上にあり、長さをおおよそ 5 倍にしただけである。また、1,000 MW のシステムと比較すると MHD 発電機長を 15 m から 20 m にしただけで、出力は約 3 倍になっている。

(3) MHD-汽力発電システム 図 3 は上記の MHD 発電機を用いた MHD-汽力発電システムである。

入口、出口断面積 : 1.34, 8.98 m²

負荷率 : 0.811 (一定)

最大電極電圧降下 : 858 V (起電力の 6.8%)

流れ方向最大電界 : 3.02 kV/m

最大電流密度 : 6.74 kA/m²

空気加熱器最高温度 : 1,780 K

交流系統に供給される MHD 発電出力

: 777.6 MW

図 3 MHD-汽力発電所エネルギーバランス (2,000 MW, 低温ファラデー形発電機)

Fig. 3. Energy balance in MHD-steam power plant (2,000 MW, Faraday channel with low-temperature wall).

高圧タービン出力	: 96.8 MW
中圧タービン出力	: 120.9 MW
低圧タービン出力	: 381.8 MW
圧縮機動力	: 182.1 MW
交流系統に供給される同期発電機出力	: 411.4 MW
排気ブロー動力	: 14.9 MW
交流系統に供給される発電所出力	: 1,174.1 MW
発電所への熱入力	: 2,116.1 MW
発電所の熱効率	: 55.5% (HHV)

熱入力を 2,000 MW 程度に増大すると現在の延長上の発電機においても、発電所サイクル効率は 55.5% となり、現在の 40% 程度（石炭燃焼）のサイクル効率に比較して十分高い効率が得られた。

〈3・3〉 熱入力 2,000 MW 高温電極システム

(1) 諸仮定 本節では、将来の MHD 発電システムがサイクル効率 60% を達成するのに必要な条件を求めている。MHD 発電機に関しては高温電極 (2,200 K) を仮定し、電極電圧降下を低温電極の場合に比較して小さくしている。

MHD 発電機への熱入力	: 3,000 MW
質量流量	: 705.4 kg/s
コンプレッサ効率	: 92%
排気ブロー効率	: 90%
タービン効率	: 92%
同期発電機効率	: 99.5%
インバータ効率	: 99%
熱交換器効率	: 99.5%

ディフューザ圧力回復係数	: 0.75
MHD 発電機入口総温	: 2,870 K
MHD 発電機入口総圧	: 10 気圧
チャンネル長	: 25 m
最大磁束密度	: 8 T
MHD 発電機壁漏れ抵抗	: 200 Ω/m
G 因子	: 1.0

電極電圧降下 [$\Delta V(V)$] を与える式は低温電極の条件で評価された相似則の変動項を 1/3 にして評価した。

$$\Delta V = 70.0 + 292.0/3(|J_y|/\sqrt{1+\beta^2}/J^*) \dots\dots\dots (2)$$

MHD 発電機入口総温はシステムのサイクル効率 60% が得られる最低温度として 2,870 K を選んだ。また、MHD 発電機入口総圧に関しては、MHD 発電機チャンネル長 25 m の条件で種々の圧力で MHD 発電出力の計算を行い 10 気圧と決定した。

(2) MHD 発電チャンネル 上記の条件において設計した MHD 発電チャンネルの諸量は次のとおりである。

入口静圧、静温	: 5.85 気圧, 2,712 K
入口速度、導電率	: 895 m/s, 8.11 S/m
出口ホールパラメータ	: 4.65
入口、出口断面積	: 1.01, 8.64 m ²
入口、出口チャンネル幅	: 1.01, 2.94 m
負荷率	: 0.867 (一定)
最大電極電圧降下	: 1,382V (起電力の 10%)
流れ方向最大電界	: 3.17 kV/m

図 4 MHD-汽力発電所エネルギーバランス (2,000 MW, 高温ファラデー形発電機)

Fig. 4. Energy balance in MHD-steam power plant (2,000MW, Faraday channel with high-temperature wall).

最大電流密度 : 6.87 kA/m²
MHD 発電出力 : 932 MW
エンタルピー抽出率 : 31.1%

本発電機は現在実験中の石炭燃焼 MHD 発電機の延長上ではなく、ソ連において天然ガス用に開発されてきた高温電極の使用を仮定している。

(3) MHD-汽力発電システム 図4は上記の MHD 発電機を用いた MHD-汽力発電システムである。

空気加熱器最高温度 : 2,100 K
交流系統に供給される MHD 発電出力

: 940.5 MW

高圧タービン出力 : 77.7 MW

中圧タービン出力 : 97.2 MW

低圧タービン出力 : 306.7 MW

圧縮機動力 : 204.9 MW

交流系統に供給される同期発電機出力

: 274.3 MW

排気ブローワ動力 : 11.0 MW

交流系統に供給される発電所出力

: 1,203.8 MW

発電所の熱入力 : 1,974.8 MW

発電所の熱効率 : 61.0% (HHV)

2,000 MW 程度の熱入力で、空気加熱器最高温度 2,100 K および高温電極 (2,200 K) が実現できると、発電所サイクル効率は 61.0% (高位発熱量基準 HHV) となり、石炭燃焼のシステムとしては 60% 以上の十分高いサイクル効率が得られた。

4. ま と め

石炭を燃料とする高性能 MHD-汽力発電システムの可能性を示すことを目的として、システム解析を行い、次の結果を得た。

(1) 1,000 MW 程度の熱入力と比較的小さいシステムにおいても、現在技術の延長上で設計した 15 m ファラデー形発電機および 1,620 K で運転できる直接空気加熱器を用いると、50.3% (高位発熱量基準) の発電所サイクル効率が得られる。

(2) 熱入力を 2,000 MW 程度に増大すると、現在の延長上の 20 m ファラデー形 MHD 発電機を仮定しても、発電所サイクル効率は 55.5% と十分高い効率が得られる。

(3) 最高温度 2,100 K の直接空気加熱器と、2,200 K の高温電極を用いる 25 m ファラデー形 MHD

発電機が実現できると、発電所サイクル効率は 61.0% となり、石炭燃焼システムとしては非常に高い効率が得られる。

以上のように、MHD 発電方式は石炭の有効利用に威力を発揮できる潜在力を有していると結論できる。

石炭空気燃焼ガスの物性値は、電子技術総合研究所高野氏が開発されたコードを用いて計算した。ここに深謝します。

(平成 3 年 7 月 19 日受付, 同 3 年 10 月 24 日再受付)

文 献

- (1) K. Takano, et al.: Proc. 13th Symp. Engng. Aspects MHD, Vol. 6 (1973)
- (2) J. N. Chapman: Proc. 22nd IECEC, p. 1497 (1987)
- (3) S. L. Chang, et al.: Proc. 23rd IECEC, p. 455 (1988)
- (4) R. E. Weinstein & R. B. Boulay: Proc. 26th Symp. Engng. Aspects MHD, 8.5 (1988)
- (5) Y. Kusaka, et al.: Proc. 21st Symp. Engng. Aspects MHD, 2.8 (1983)
- (6) M. Petrik et al.: Current Status of MHD Technology, US DOE ANL Report, ANL/FEP-1025 (1984)
- (7) M. Petrik & B. Ya. Shumyatsky: "Open-Cycle MHD Electrical Power Generation", A Joint USA/USSR Publication (1978)
- (8) R. C. Attig, et al.: Proc. 25th Symp. Engng. Aspects MHD, 5.2 (1987)
- (9) M. Ishikawa: Tech. Rept. of Inst. of Atomic Energy, Kyoto Univ., No. 192 (1982)
- (10) S. W. Petty: Proc. 9th Int. Conf. on MHD, Vol. 2, 7.8 (1986)

石川 本 雄 (正員)

昭和 24 年 1 月 12 日生。51 年 3 月京都大学工学研究科電気工学専攻博士課程修了。同年 6 月京都大学原子エネルギー研究所助手, 59 年 1 月同工学部電気工学科助教授。工学博士。この間主として、エネルギー変換、とりわけ MHD 発電の研究に従事。

卯 本 重 郎 (正員)

昭和 5 年 4 月 19 日生。33 年 3 月京都大学大学院 (旧制) 修了。同年 4 月京都大学工学部電気工学教室助手, 34 年 4 月同助教授, 42 年 1 月同教授となり、現在に至る。電気磁気学講座担当。工学博士。この間、電力系統における進行波、過渡安定度、MHD 発電、電気機器などに関する研究に従事。49 年電気学会論文賞受賞。エネルギー・資源学会会員。