

平成 21 年 5 月 20 日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560278
 研究課題名（和文）大規模集中電源としてのCO₂回収方式石炭燃焼
 MHD発電機の高性能化に関する研究
 研究課題名（英文）Study on High Performance Coal-Fired MHD Generator with CO₂
 Liquefaction Recovery as Large-Scale Central Power Station
 研究代表者
 石川 本雄（ISHIKAWA MOTOO）
 筑波大学・大学院システム情報工学研究科・教授
 研究者番号：90109067

研究成果の概要：

中国大同炭を燃料とする空気燃焼弱電離プラズマのエンタルピー、導電率、電子移動度などの熱力学的諸量の熱平衡計算を行い、1次元解析により高性能MHD発電機的设计を行った。ついで、ファラデー形MHD発電機の安定性解析を行い、設計したMHD発電機は安定であることを確かめた。さらに、CO₂回収方式MHD発電機内衝撃波と境界層の相互作用の解明に関して、側壁電極を持つダイアゴナル形MHD発電機内の圧縮波と境界層の相互作用を明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電力工学、電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：大規模電源、MHD発電、CO₂回収、石炭有効利用、地球温暖化ガス排出削減、高効率発電、分散電源バックアップ、衝撃波境界層相互作用

1. 研究開始当初の背景

化石燃料への過度の依存を軽減するため、自然エネルギー（再生可能エネルギー）などの分散電源の導入が必要であるが、太陽電池、風力発電などの自然エネルギーは変動が激しく、安定した電力供給を確保するためには、バックアップする安定した高効率で環境に適した大規模集中型電源が必要不可欠である。一方、21世紀中頃以降の我が国のエネルギー事情を考えると東アジアの大規模エネルギーシステムを考えなければならないが、東アジアでは中国を中心として石炭に依

存せざるを得ない、石炭を用いる発電において、酸素で燃焼すると、排気ガスCO₂濃度が濃くなり、CO₂を効果的に回収できる。CO₂を回収すると従来の発電方式では熱効率は30%程度になるが、我々は、CO₂液化回収式MHD発電方式を用いると酸素製造電力、CO₂液化電力を差し引いても、46%（高位発熱量基準）以上の効率が可能であり、また、CO₂を回収しないMHD発電方式では61%（高位発熱量基準）以上の高効率が可能であることを熱サイクル解析により示した。

2. 研究の目的

第一の研究目的は、CO₂回収方式高性能MHD発電機設計に必要な電磁界と流体との強い相互作用の解明である。

最近の我々の電極近傍における3次元解析結果は、大電流条件で運転すると陰極間短絡現象が発生することを世界ではじめて明らかにしたが、利用可能な計算機の演算速度が遅く、陰極間短絡現象が発電機全体に与える影響については、十分には解明できていない。従って、CO₂回収方式MHD発電機内衝撃波と境界層との相互作用を解明することが第二の研究目的である。

3. 研究の方法

高温・高圧・高速弱電離プラズマ内の電磁界、流体場の2、3次元数値解析により、高性能MHD発電機設計に必要な電磁界と流体との強い相互作用を解明する。

4. 研究成果

(1) 石炭燃焼生成弱電離プラズマの熱力学的諸量の計算と大型MHD発電機の設計

CO₂回収方式高性能MHD発電機設計に必要な電磁界と流体との強い相互作用の解明のためには、動作弱電離プラズマのエンタルピー、導電率、電子移動度などの熱力学的諸量の正確な評価がまず重要であるので、中国大同炭を燃料とする場合の熱力学的諸量の熱平衡計算を行い、熱力学的諸量の正確な評価を行った。

図1は中国大同炭燃焼ガスプラズマの電気導率の温度、圧力依存特性を図示しており、非常に強い温度依存性があり、非線形性の非常に強いMHD相互作用を予想することができる。

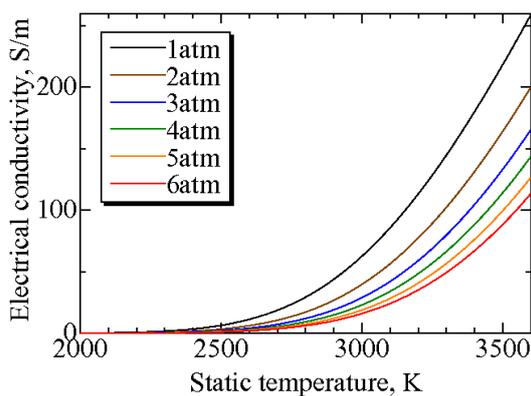


図1 中国大同炭燃焼ガスプラズマの電気導率の温度、圧力依存特性

図2は準一次元近似を用いて予備的に設計した大型ファラデー形発電機の形状を示している。

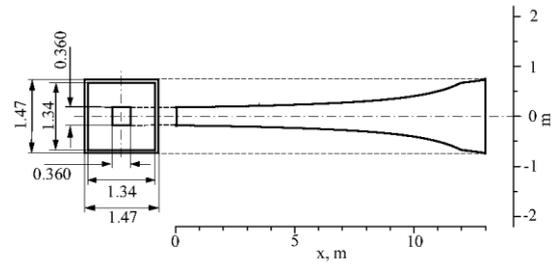


図2 予備的に設計したファラデー形MHD発電機の形状

発電機部分は1.2 mであり、発電部分の入口断面は0.36 m x 0.36 m、出口断面は1.34 m x 1.34 mである。エンタルピー抽出率は24%であり、この設計値が実現されると、廃熱再生循環型MHD単独発電サイクルでは、酸素製造電力、CO₂液化電力を考慮しても50%（高位発熱量基準）の熱効率が得られる。

(2) 設計大型MHD発電機安定性の検討

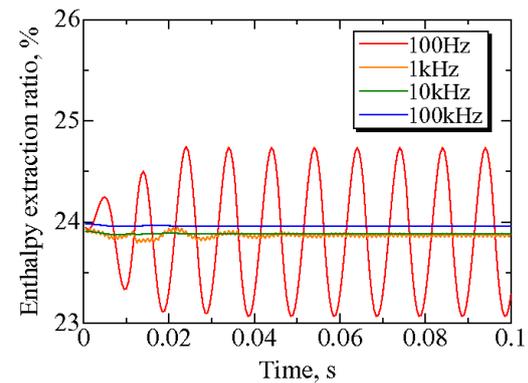


図3 設計ファラデー形MHD発電機の入口擾乱（ガス温度）に対する応答

図3は図2に示した予備的に設計した大型ファラデー形MHD発電機の入口においてガス温度に周期的な擾乱（1%）を与えた場合に対する発電機のエンタルピー抽出率の時間変化を示したものである。入口擾乱周期が低いほど発電機に対する影響は大きいですが、100 Hzの場合でもエンタルピー抽出率の変化は1%以下であり、設計したファラデー形MHD発電機は安定であることがわかる。

(3) 航空機搭載用ダイアゴナル形MHD発電機内の電磁界—流体3次元相互作用の解明

図4は航空機搭載を目的として米国で設計、製作、実験された小型ダイアゴナル形MHD発電機の動作特性を解明するため、報告

者らが行った電磁界-弱電離プラズマ流体3次元解析によって得られた、MHD発電機内の2次元圧力分布を示している。発電機入口部分において流れがy方向上側チャンネル壁において圧縮され、その圧力波が下側壁、上側壁において反射されながら下流に伝搬する様子が再現されている。

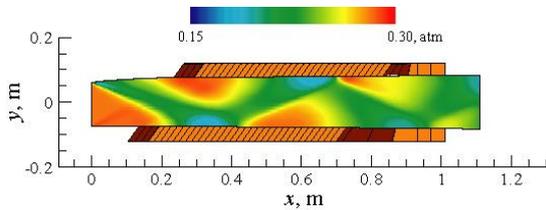


図4 航空機搭載用ダイアゴナル形MHD発電機内圧力分布

図5はMHD発電機中央部における電気伝導率の流れに沿う変化の様子を示している。図4に示した圧縮波の伝搬に対応して導電率が20%程度も大きく変動している様子が分かる。

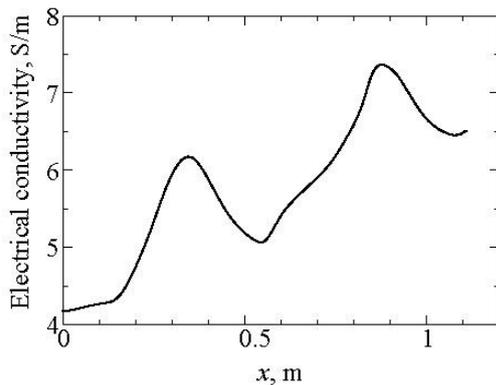


図5 MHD発電機中央部における導電率の流れ方向変化

(4) ダイアゴナル形MHD発電機電力取り出し部改善の提案

図6は航空機搭載用10MW級ダイアゴナルMHD発電機出口部電力取り出し電極近傍の電流密度分布を示している。黒点は、出口近傍のダイアゴナル電極フレームを設計ダイアゴナル角のままにしておく従来の設計方法による発電チャンネルに対する3次元解析結果であり、青点は今回提案した、出口近傍ダイアゴナルフレームの設置角度を徐々に流れに対して直角に変更するという改良型チャンネルに対する結果である。図から分かるように、電流密度の最大値が25%程度に減少しており、エネルギー密度は電流密

度の2乗に比例するため、電極面上の加熱は1/16程度に減少するので、MHD発電機の耐久性の改善に大きく役立つことが予想される。

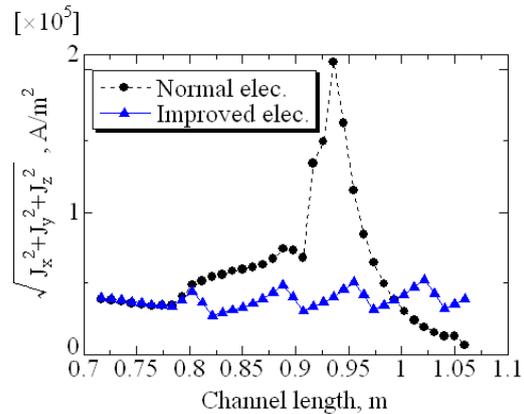


図6 航空機搭載用ダイアゴナルMHD発電機出口部電力取り出し電極近傍の電流密度分布

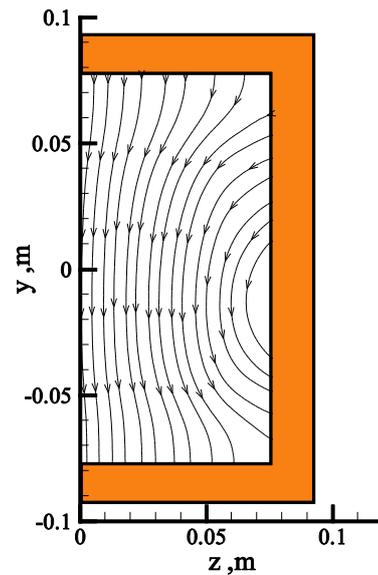


図7 導体壁を持つダイアゴナル形MHD発電機内y-z平面内の電流分布

図7は、MHD相互作用が比較的弱い導体壁を持つダイアゴナル形MHD発電機内y-z平面内の電流分布を示している。なお、磁場はz方向に印加されており、主な流れはy-z平面に直交している。図から分かるように、電流はy方向の主電極からだけでなく、側壁からも出入りしており、導体壁を持つダイアゴナル形MHD発電機の場合には、MHD相互作用が比較的小さい場合においても、その形状の特徴から3次元解析が必要であることが分かる。

- (5) 大型パルスMHD発電機内弱電離プラズマの電磁界—流体場強いMHD相互作用の解明

図7はロシアで設計、製作、実験され、電気出力500MW以上が記録された大型パルスMHD発電機の電磁界—弱電離プラズマ流体3次元解析によってえられた、MHD発電機内の磁場に垂直方向の2次元圧力分布である。図から分かるように、入口部発電電極から斜め衝撃波が誘起されている。

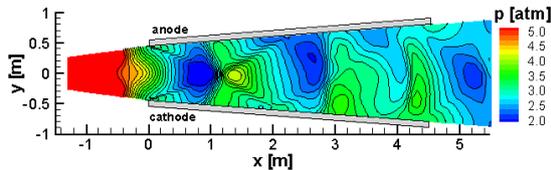


図7 大型MHD発電機の磁場垂直方向2次元圧力分布

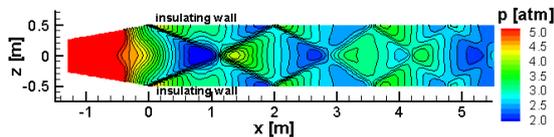


図8 大型MHD発電機の磁場平行方向2次元圧力分布

図8は上記大型MHD発電機の磁場平行方向2次元圧力分布を示しており、発電機入口部分の加速ノズルと発電部分の接続部分から強い斜め衝撃波が発生している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計5件)

- ① T. Fujino, T. Yoshino, and M. Ishikawa, Numerical Analysis of Reentry Trajectory Coupled with Magnetohydrodynamics Flow Control, Journal of Spacecraft and Rocket, 45, 911-920, 2008, 査読有
- ② T. Fujino, S. Kominami, M. Ishikawa, and Y. Okuno, Two-dimensional Numerical Simulation of Commercial Scale Nonequilibrium MHD Power Generator Coupled with Radio-Frequency Electromagnetic Field, Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 696-702, 2008, 査読有
- ③ T. Fujino, Y. Matsumoto, J. Kasahara, and M. Ishikawa, Numerical Studies of Magnetohydrodynamic Flow Control Considering Real Wall Electrical Conductivity, Journal of Spacecraft and Rocket, 44, 625-632, 2007, 査読有

- ④ 後藤太樹、藤野貴康、石川本雄、自己励起磁場・固定磁場条件下での大型大電力パルスMHD発電の動作特性に関する二次元数値解析、電気学会論文誌B, 127, 1199-1204, 2007、査読有
- ⑤ M. Ishikawa, M. Yuhara and T. Fujino, Three-dimensional computation of magnetohydrodynamics in a weakly ionized plasma with strong MHD interaction, Journal of Materials Processing Technology, 181, 254-259, 2007、査読有。

[学会発表](計5件)

- ① T. Takahashi, T. Fujino, M. Ishikawa and J. Lineberry, Numerical Studies of Electrical Behavior of Experimental-Scale Scramjet Driven MHD Generator, ICEE, July 8th, 2008, Okinawa, Japan
- ② H. Ohkuma, T. Takahashi, T. Fujino, M. Ishikawa, and J. Lineberry, Performance Prediction of Scramjet Driven DCW MHD Generator with Three-Dimensional Analysis, 39th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, June 23rd, 2008, Seattle, USA
- ③ R. Mizukoshi, Y. Matsumoto, T. Fujino and M. Ishikawa, "Design and Performance Analysis of Large Scale Nonequilibrium Disk MHD Generator, 16th International Conference on MHD Energy Conversion, June 24th, 2007, Miami, USA
- ④ I. Inoue, T. Iwashita, Y. Inui, and M. Ishikawa, A Study on Transient Stability Control of Diagonal Type MHD Generator Connected to Power Network, 16th International Conference on MHD Energy Conversion, June 24th, 2007, Miami, USA
- ⑤ 榎本悠、藤野貴康、石川本雄：“H₂-CO混合燃料を用いた商用規模MHD発電機の二次元解析,” 第2回新エネルギー技術シンポジウム, 2007年3月10日, P-II-7, つくば市。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石川 本雄 (ISHIKAWA MOTOO)
筑波大学・大学院システム情報工学研究科・教授
研究者番号：90109067

(2) 研究分担者

藤野 貴康 (FUJINO TAKAYASU)
筑波大学・大学院システム情報工学研究科・講師
研究者番号：80375427

(3) 連携研究者

無し