

平成22年5月4日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19360127
 研究課題名（和文） クローズドサイクルMHD発電機の実用高度化に向けた戦略的基盤研究
 研究課題名（英文） Strategic research for the practical application of a closed cycle MHD electrical power generator
 研究代表者
 奥野 喜裕（OKUNO YOSHIHIRO）
 東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授
 研究者番号：10194507

研究成果の概要（和文）：

本研究では、クローズドサイクルMHD発電の実用化に向けて、「MHD発電機の実用高度化」研究を戦略的に推進した。衝撃波管駆動MHD発電実験装置、および高精度電磁流体数値シミュレーションを駆使して、類似の発電システムの中では世界最高の発電出力密度を達成するとともに、発電機形状の改良による発電性能の向上を実証し、理論的裏付けとともに、更なる性能向上に向けての確度の高いロードマップを提示することができた。

研究成果の概要（英文）：

Strategic research for the practical application of a closed cycle MHD electrical power generator was attempted. A world's highest output power density was achieved by the optimization of working conditions and a significant improvement in the isentropic efficiency was successfully demonstrated by means of small modification of the generator channel shape, in the power generation experiments with a shock tunnel facility. The reliable load-map for the practical application of MHD generator was established with the support of precise numerical simulations.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2008年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2009年度	2,700,000	810,000	3,510,000
年度			
年度			
総計	13,500,000	4,050,000	17,550,000

研究分野：電気エネルギー工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電気機器工学

キーワード：MHD発電、高効率発電、環境適合、エネルギー変換、電磁流体、プラズマ応用

1. 研究開始当初の背景

クローズドサイクルMHD発電（作動気体に希ガスを用い、非平衡プラズマMHD発電とも呼ばれる）は、既存の最新鋭発電設備を

上回る二酸化炭素の排出削減と省資源化を達成し得る高効率発電技術として、また一方で多様なエネルギー源に適応可能な「革新的エネルギー高度利用・転換技術」の1つと位

置づけられ、その研究・技術開発の進展が期待されている。

東京工業大学では、長時間連続発電実証試験装置である「クローズドループMHD発電実験装置」において、高温ガスの連続循環に成功し、クローズドサイクルMHD発電の実用化に向けて重要な役割を果たすものとして国内外から注目を集めている。

しかしながら、当該試験研究では、ブラックボックス的な「クローズドループMHD発電実験装置」における課題をリアルタイムに、むしろ先取りして抽出し、そこでの課題を機動的に解明・解決し、将来展開に向けての具体的指針を提示することが不可欠とされた。

そこで、本研究では、上記連続発電実証試験とは完全に相補的であり、かつその先導的で牽引役となる発電機実用高度化に向けた革新的研究を戦略的に推し進めることとした。

2. 研究の目的

本研究では、短時間ながらも様々な運転条件に柔軟に対応可能な衝撃波管駆動MHD発電実験装置、および高精度2次元、3次元電磁流体数値シミュレーションを駆使して、

- 1) 連続発電装置における発電機部を完全に再現し、高度化のために極めて本質的であるにもかかわらず連続発電装置では詳細に捉えることが困難な重要課題に焦点を絞り、高性能化に向けての改善・改良策の具体的提言を行うこと、
- 2) その具体的提言に基づいた改良型発電機によりその有効性を実証し、将来研究に資する確度の高い指針を与えることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、衝撃波管駆動MHD発電実験装置（現有、図1、図2）に組み込む新たな 1) 基本型MHD発電機（連続発電装置の完全再現実証に主たる目的をおく）、2) 改良型MHD発電機（課題解決・提言の実証に主たる目的をおく、図3）の2種類を設計・製作した。

詳細な基礎物理現象の解明・把握が改良・提言に向けた重要基盤となることから、発電機内の多角的な計測が必要不可欠となる。プラズマ・電磁流体挙動のより詳細な把握には、より時間分解能に優れた計測システムが要求され、必要にして十分な多点高速光計測システムおよび高速圧力計測システムを構築した。

一方で、数値計算による評価と最適化への指針をえるため、乱流モデルを考慮した高精度電磁流体数値シミュレーションを実施した。

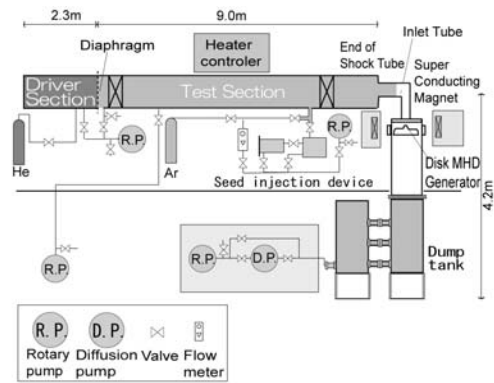


図1 衝撃波管駆動MHD発電実験装置



図2 装置全体写真

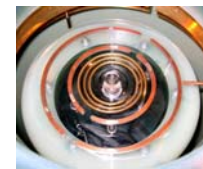


図3 MHD発電機

4. 研究成果

- (1) 運転条件の最適化による世界最高発電出力密度の達成

衝撃波管駆動MHD発電実験装置に「基本型MHD発電機」を組み込み、幅広い運転条件範囲で発電性能試験を行い、運転条件の最適化を試みた。その結果、高い発電効率（等エントロピー効率 50 %、エンタルピー抽出率 17 %）とともに、類似の発電システムの中では世界最高記録となる高い発電出力密度 $0.76\text{GW}/\text{m}^3$ を達成した。このような高い性能は、運転条件の最適化に加え、高い印加磁束密度（4T）によるところが大きい。連続発電装置に組み込まれるきわめて小さなMHD発電機においても高い潜在力を有することを実証した。

- (2) 発電機形状の改善による等エントロピー効率の向上実証

発電機の高効率化を達成するためには、発電機内におけるプラズマ電磁流体挙動の最適化が必要である。そのためには、上記のような運転条件の最適化に加え、発電流路形状の最適化が不可欠となる。

そこでまず、壁面形状に着目し、凸型形状をもつ発電機における電磁流体・発電性能に関する数値計算を行った。その結果、図4に示すように、直線形状の発電機と比較して、凸型形状発電機では、発電機上流域で境界層の急激な発達抑制され、発電性能が向上す

る（理想状態に回復する）など、凸型形状とすることの有用性が示唆された。

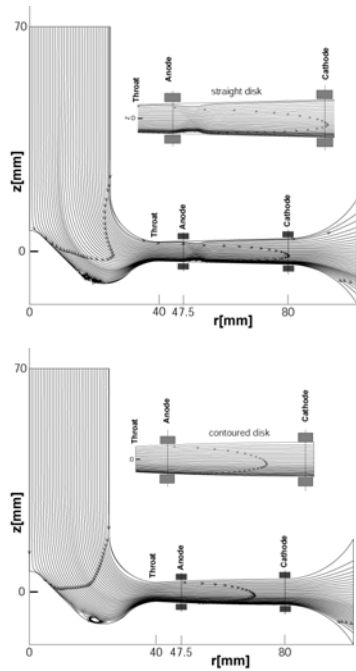


図4 MHD相互作用下の流れ
(上：直線形状 下：凸型形状)

この示唆を受けて、改良型MHD発電機（凸型形状発電機）を製作し、発電試験を行った。その結果、流路形状をわずかに凸型とすることで、直線形状の発電機と比較して、高いエンタルピー抽出率（高いシード率、強いMHD相互作用）状況下で、等エントロピー効率の向上が顕著となることを世界で初めて実証した。具体的には下記の通りである。

① シード率 10×10^{-4} 、外部負荷抵抗値 0.15Ω の条件において直線形状ではエンタルピー抽出率 10.8%、等エントロピー効率 30%、凸型形状ではエンタルピー抽出率 10.6%、等エントロピー効率 34%を得た（図5）。

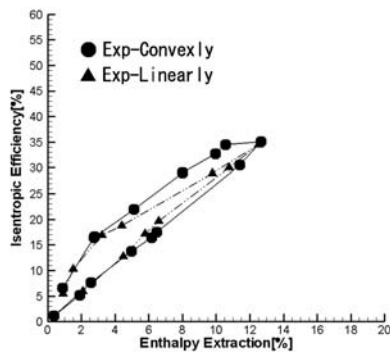


図5 等エントロピー効率-エンタルピー抽出率
(実験結果)

② シード率が 10×10^{-4} と高い場合、凸型形状発電機では発電チャネル上流域において静圧の上昇を抑えたまま電位が上昇する（図6）。このことは、チャネル上流域で、直線形状発電機で生じる境界層の発達を凸型形状発電機では抑制され、高い電気変換効率（75%）が実現することを示唆する。

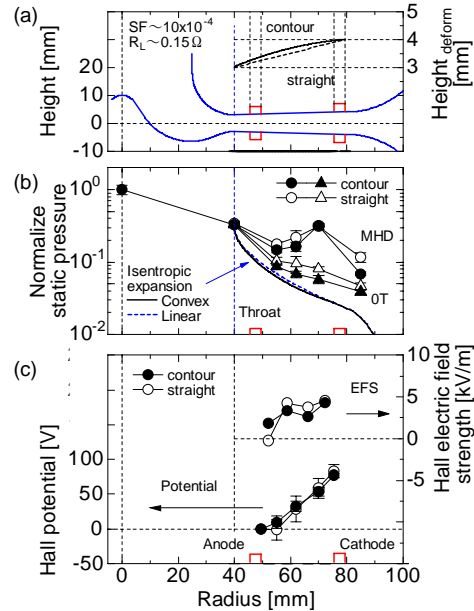


図6 発電機内の静圧、電位分布

③ シード率が低く、強いMHD相互作用が生じない場合は凸型形状および直線形状における発電性能に有意な差は見られない。すなわち凸型形状を用いる有用性は高出力（強いMHD相互作用）条件下で顕著になる。

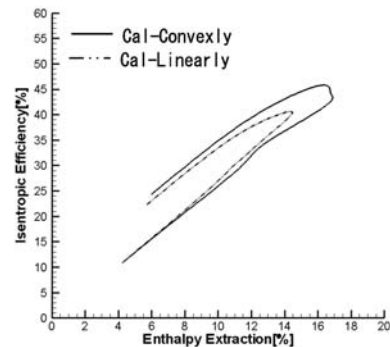


図7 等エントロピー効率-エンタルピー抽出率
(数値シミュレーション結果)

(3) 数値シミュレーションによる裏付けと確度の高いロードマップの提示

このような実証試験結果を踏まえ、乱流モデルを考慮した2次元数値シミュレーション

ンを行い、実験結果との比較から、得られた実験結果が妥当であり、運転条件の最適化により更なる高性能化が可能であることを定量的に示し(図7)、更なる性能向上に向けての確度の高いロードマップを提示することができた(図8)。

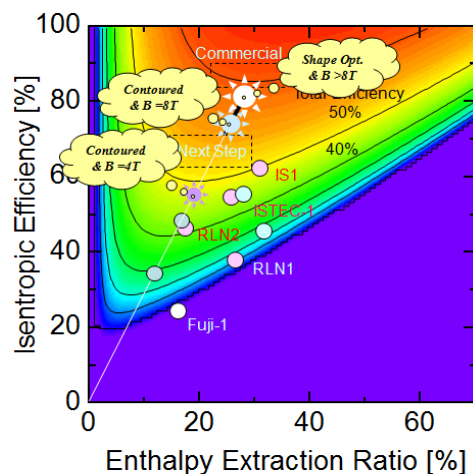


図8 発電機開発のロードマップ

以上要するに、本研究では、クローズドサイクルMHD発電の実用化に向けて、「MHD発電機の実用高度化」研究を戦略的に推進し、類似の発電システムの中では世界最高の発電出力密度を達成するとともに、発電機形状の改良による発電性能の向上を実証し、理論的裏付けとともに、更なる性能向上に向けての確度の高いロードマップを提示することができた。

本研究は3年間の研究期間を通して計画通りに遂行され、研究目的を達成することができたものと自己評価している。

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 15 件)

① A. Liberati, Y. Okuno, Numerical simulation of plasma-fluid flow and performance in a disk MHD generator with contoured walls, Journal of Physics D: Applied Physics, 43, 025203-1 - 025203-16, 2010, 査読有り

② T. Murakami, Y. Okuno, Magnetohydrodynamic energy conversion by using convexly divergent channel, Applied Physics Letters, 95, 251502-1 - 251502-3, 2009, 査読有り

③ A. Liberati, T. Murakami, Y. Okuno,

H. Yamasaki, Flow behavior and performance of the disk MHD generator in the closed loop experimental facility, Magnetohydrodynamics, 45, 213-224, 2009, 査読有り

④ T. Murakami, Y. Okuno, Simulation and demonstration of magnetohydrodynamic energy conversion in a high-temperature inert gas, Physics of Plasmas, 16, 033501-1 - 033501-9, 2009, 査読有り

⑤ 酒井喬成、松本正晴、村上朝之、奥野喜裕、高温希ガスプラズマを利用するディスク形 MHD 発電機の発電特性に関する数値計算、電気学会論文誌 B、129、553-558、2009、査読有り

⑥ T. Murakami, Y. Okuno, Improvement of Isentropic Efficiency a Magnetohydrodynamic Power Generator by Radio-Frequency Preionization, Journal of Applied Physics, 105, 023301-1 - 023301-8, 2009, 査読有り

⑦ 山岬裕之、村上朝之、奥野喜裕、ディスク型 CCMHD 発電機を組込んだ超音速クローズドループの特性、電気学会論文誌 B、128、1543-1552、2008、査読有り

⑧ 大野 純、A. Liberati、村上朝之、奥野喜裕、クローズドループ MHD 発電機における電磁流体挙動と発電特性の数値計算、電気学会論文誌 B、128、1401-1406、2008、査読有り

⑨ T. Murakami, Y. Okuno, Experiments and numerical simulations on high-density magnetohydrodynamic electrical power generation, Journal of Applied Physics, 104, 063307 1-11, 2008, 査読有り

⑩ T. Murakami, Y. Okuno, Radio-frequency power assistance on a compact magnetohydrodynamic electrical power generator under high-density magnetic flux, Applied Physics Letters, 93, 051503 1-3, 2008, 査読有り

⑪ T. Murakami, Y. Okuno, High-performance nonequilibrium-plasma magnetohydrodynamic electrical power generator with slightly divergent channel configuration I. Calculations, Journal of Physics D: Applied Physics, 41, 125211 1-12, 2008, 査読有り

⑫ T. Murakami, Y. Okuno, High-performance

nonequilibrium-plasma magnetohydrodynamic electrical power generator with slightly divergent channel configuration II. Experiments, Journal of Physics D: Applied Physics, 41, 125212 1-12, 2008, 査読有り

⑬ A.Liberati, Y.Okuno, Improvement of Plasma-Flow Behavior and Performance of a Disk MHD Generator under High Magnetic Flux Densities, IEEJ Transactions on Power and Energy, 128, 493-498, 2008, 査読有り

⑭ T.Murakami, Y.Okuno, High-Density Energy Conversion with a Compact Magnetohydrodynamic Electrical Power Generator, Applied Physics Letters, 91, 161506-1 - 161506-3, 2007, 査読有り

⑮ A.Liberati, Y.Okuno, Influence of Anode Region Boundary Layer Separation on Disk MHD Generator Performance, IEEE Trans. Plasma Science, 35, 1588-1597, 2007, 査読有り

[学会発表] (計 25 件)

① Y.Okuno, Recent Research Activity on MHD Electrical Power Generation at Tokyo Tech, 17th International Conference on MHD Energy Conversion, 2009.9.16, Kanagawa, Japan

② T.Murakami, Y.Okuno, Experiment and Simulation of Magnetohydrodynamic Energy Conversion in a High-Temperature Argon Plasma, 17th International Conference on MHD Energy Conversion, 2009.9.14, Kanagawa, Japan

③ A.Liberati, Y.Okuno, Numerical Simulation of Improvement in the Performance of a Contoured Disk MHD Generator, 17th International Conference on MHD Energy Conversion, 2009.9.16, Kanagawa, Japan

④ M.Matsumoto, Y.Okuno, Numerical Study on the Plasma-Fluid Flow and Performance in a Pulsed-Laser-Driven MHD Generator, 17th International Conference on MHD Energy Conversion, 2009.9.14, Kanagawa, Japan

⑤ K.Watanabe, T.Murakami, A.Liberati, Y.Okuno, Magnetohydrodynamic and Power Generation Characteristics of a Disk MHD

Generator with Contoured Walls, 17th International Conference on MHD Energy Conversion, 2009.9.16, Kanagawa, Japan

⑥ K.Watanabe, T.Murakami, A.Liberati, Y.Okuno, Improvement in the Performance of an MHD Electrical Power Generator with Contoured Channel Walls, The International Conference on Electrical Engineering 2009, 2009.7.7, Shenyang, China

⑦ 渡邊和仁、小林拓哉、村上朝之、奥野喜裕、凸型壁面をもつディスク形 MHD 発電機の発電性能、電気学会 新エネルギー・環境研究会、2010.3.10、つくば

⑧ 小林拓哉、村上朝之、奥野喜裕、凸型壁面をもつディスク形 MHD 発電機の性能に関する数値計算、電気学会 新エネルギー・環境研究会、2009.12.2、長岡

⑨ A.Liberati, T.Murakami, Y.Okuno, H.Yamasaki, Numerical simulation of MHD flow and Heat transfer in the disk MHD generator of the closed loop experimental facility at Tokyo Tech, 7th PAMIR International Conference on Fundamental and Applied MHD, 2008.9.8, Presqu'île de Giens, France

⑩ A.Liberati, Y.Okuno, Numerical Simulation of High Mach Number - Low Static Pressure Plasma in a Highly Efficient Disk MHD Generator, 39th Plasmadynamics and Laser Conference, 2008.6.24, Seattle, USA

⑪ T.Murakami, Y.Okuno, High-Density Magnetohydrodynamic Energy Conversion, 35th IEEE International Conference on Plasma Science, 2008.6.19, Karlsruhe, Germany

⑫ 渡邊和仁、品川裕貴、村上朝之、奥野喜裕凸型壁面をもつディスク形 MHD 発電機の電磁流体および発電特性、電気学会全国大会、2009.3.17、札幌

⑬ 品川裕貴、渡邊和仁、村上朝之、奥野喜裕、凸型壁面をもつディスク形 MHD 発電機の電磁流体特性、電気学会 新エネルギー・環境研究会、2008.9.30、長岡

⑭ T.Murakami, Y.Okuno, H.Yamasaki, Progress Toward High Performance CCMHD Electrical Power Generators at Tokyo Tech, 16th International Conference on MHD

Energy Conversion, 2007.6.25, Miami, USA

⑮ T. Murakami, Y. Okuno, H. Yamasaki, Closed Loop Experimental Facility for CCMHD Electrical Power, 16th International Conference on MHD Energy Conversion, 2007.6.25, Miami, USA

⑯ T. Enomoto, T. Ando, T. Murakami, Y. Okuno, H. Yamasaki, Experimental Study on the Improvement in the Performance of a Less Divergent Disk MHD Generator, 16th International Conference on MHD Energy Conversion, 2007.6.25, Miami, USA

⑰ A. Liberati, T. Murakami, Y. Okuno, H. Yamasaki, Numerical Simulation on Fluid Flow and Heat Transfer in the Disk MHD Generator of the Closed Loop Experimental Facility, 16th International Conference on MHD Energy Conversion, 2007.6.27, Miami, USA

⑱ A. Liberati, Y. Okuno, Numerical Simulation of a Highly Efficient Disk MHD Electrical Power Generator, International Conference on Electrical Engineering 2007, 2007.7.10, Hongkong, China

⑲ T. Murakami, Y. Okuno, H. Yamasaki, Non-equilibrium Plasma MHD Electrical Power Generation at Tokyo Tech, Fourth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2007), 2007.9.27, Sendai, Japan

⑳ 村上朝之、奥野喜裕、高出力密度 MHD 発電実験、第3回新エネルギー技術シンポジウム、2008.3.13、つくば

21) 大野 純、A. Liberati、村上朝之、奥野喜裕、クローズドループ MHD 発電機における電磁流体挙動と発電特性の数値計算、第3回新エネルギー技術シンポジウム、2008.3.14、つくば

22) 村上朝之、奥野喜裕、山岬裕之 クローズドループ MHD 発電実験装置における発電実験の現状
電気学会 新エネルギー・環境研究会、2007.9.20、長岡

23) 入江晋平、村上朝之、奥野喜裕、山岬裕之、クローズドループ MHD 発電実験装置における発電実験の数値シミュレーション、電気学会 新エネルギー・環境研究会、2007.9.21、長岡

24) 大野 純、A. Liberati、村上朝之、奥野喜裕、山岬裕之、クローズドループ MHD 発電実験装置における発電流路内の電磁流体挙動と発電特性の数値シミュレーション、電気学会 新エネルギー・環境研究会、2007.9.21、長岡

25) A. Liberati、Y. Okuno、Improvement of Disk MHD Generator Performance by Avoiding the Boundary Layer Separation near the Anode Region、電気学会 新エネルギー・環境研究会、2007.9.20、長岡

[その他]

ホームページ等

<http://www.es.titech.ac.jp/okuno/index-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

奥野 喜裕 (OKUNO YOSHIHIRO)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授

研究者番号：10194507

(2) 研究分担者

村上 朝之 (MURAKAMI TOMOYUKI)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・助教

研究者番号：20323818

(3) 連携研究者

なし