

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 2 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2014

課題番号：22246130

研究課題名(和文) 太陽光エネルギー高度利用型クリーンMHD発電の新展開に向けた基盤形成

研究課題名(英文) Formulation of the basic grounds for the development of a clean MHD electrical power generation harnessing solar energy

研究代表者

奥野 喜裕 (Okuno, Yoshihiro)

東京工業大学・総合理工学研究科(研究院)・教授

研究者番号：10194507

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、太陽光エネルギーの高度利用を念頭においたクリーンMHD発電の実現に向けての基盤形成を目的とした。衝撃波管駆動MHD発電装置を用いて、シードを用いず純希ガスを作動気体とする高温希ガスプラズマMHD発電実証試験を行い、従前のシードプラズマ発電機と同等以上の発電性能を有することを定量的に実証するとともに、太陽光励起レーザーを模擬したCO<sub>2</sub>レーザー駆動MHD発電の原理実証試験を行い、同方式としては世界で初めて発電出力を得ることに成功した。このように、全世界で長い研究経緯をもつMHD発電研究の中で、全く類を見ない革新的・独創的成果とともに、所期の目的を達成した。

研究成果の概要(英文)：The aim of the research is to formulate the basic grounds for the development of an environmentally clean MHD electrical power generation harnessing solar energy, where high temperature inert gas plasma is used as a working fluid without any seed material. The MHD generator performance which is competitive or superior to that of the conventional seed plasma MHD generator has been obtained in a shock tunnel experimental facility. Furthermore, the electrical power generation harnessing the energy of CO<sub>2</sub> laser which is as an alternation of solar pumped laser has been experimentally demonstrated for the first time. These results obtained in the research are quite innovative and originative in the long history of MHD power generation research and development in the world, and the objective in the research has been successfully achieved.

研究分野：エネルギー学

キーワード：MHD発電 エネルギー変換 電力発生 太陽エネルギー 電磁流体力学 プラズマ工学

### 1. 研究開始当初の背景

太陽エネルギーの高度利用(特に電気エネルギーへの変換)は、地球温暖化対策のみならず、我が国のエネルギー安全保障の観点から必要不可欠な重点的推進課題の一つであり、その生産性(量や密度、コストなど)の飛躍的向上が求められている。本研究の目的は、その斬新な候補の一つとして、太陽光エネルギーの高度利用を念頭においたクリーンMHD発電(エネルギー源はもちろんのこと、作動気体を希ガスとし、従来型のアルカリ金属等のシード剤を一切不要とする)の実現可能性を格段に高め、究極にある「太陽光エネルギー高度利用型MHD発電システム」の構築に向けて研究・開発基盤を確立することにある。このシステムでは、例えばレーザー宇宙エネルギー利用システム(L-SSPS)に関連して研究開発が進められている太陽光直接励起レーザーとの組み合わせにより、無線高質エネルギー伝送とMHD発電による高効率・高密度電力発生を狙う。レーザー光を利用(介)することで、従来のMHD発電が抱えている技術的課題を一気に解消し、ブレークスルーを達成することが本研究の独創的な狙いである。真の実用化・成熟化には、更にある一定の研究期間と投資を要することは認識しているが、エネルギー分野への学術的貢献、社会に与えるインパクトは計り知れず、これまでの研究成果を展開し、適切な研究組織・環境の下、目的達成に向けて全力で取り組むこととした。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、太陽光エネルギーの高度利用を念頭においたクリーンMHD発電(エネルギー源はもちろんのこと、作動気体を希ガスとし、従来型のアルカリ金属等のシード剤を一切不要とする)の実現可能性を格段に高め、究極にある「太陽光エネルギー高度利用型MHD発電システム」の構築に向けて研究・開発基盤を確立することにある。

具体的には、

(1) 準定常作動高温希ガスMHD発電機の基礎特性を実験的に明確にした上で、最終形態となる

(2) レーザー駆動MHD発電機の発電性能の把握とその高性能化を目指すとともに、高効率発電システムの構築に向けての提案を行い、

研究・開発基盤形成に向けての展開を図る。

### 3. 研究の方法

本研究は、エネルギーキャリアであるレーザー光によって希ガスを加熱し、その高温希ガスを利用して革新的な高効率発電を行うシステムを構築することを狙いとする。真の実用化には、なおそれぞれが進化する必要があるが、その確固たる基盤を形成し、格段の新展開を図ることが本研究の目的であり、その着実な達成のために、基礎データの蓄積、

高性能化の実証、将来への提言を相互関連の中、段階的に遂行する。すなわち、

(1) 衝撃波管駆動装置を用いた高温希ガスの生成(レーザーによる希ガス加熱を模擬)によるMHD発電実証試験(発電機、運転条件の最適化と潜在力の定量的見極め)

(2) パルス放電およびCO<sub>2</sub>パルスレーザーを用いた(太陽光励起レーザーを模擬)高温希ガスの生成による発電実証試験と性能向上に向けての指針の明確化、ならびに高効率発電システム構築に向けての具体的提案を、数値シミュレーションによる、理論的・数値的裏付け、実験結果や方針への定量的フィードバックならびに次段階に向けての具体的提言等を融合して遂行した。

### 4. 研究成果

(1) 衝撃波管駆動装置を用いた高温希ガスの生成(レーザーによる希ガス加熱を模擬)によるMHD発電実証試験(発電機、運転条件の最適化と潜在力の定量的見極め)

本研究で使用した衝撃波管駆動MHD発電実験装置を図1に示す。本装置は、主に衝撃波管本体(長さ10.8m、直径130mm)、超電導磁石(中心磁束密度4T)、MHD発電機から成り、短時間(~数ミリ秒)ではあるが、将来の中・大規模超高効率定常作動MHD発電機の基礎発電実験装置としてこれまで多くの貴重な成果を生み出してきた。発電時間が短いことから、発電機はアクリル等で構成でき、光学計測、プラズマ観測も可能である。作動気体条件は柔軟に設定でき、本研究で必要な気体条件(希ガス入口全温度~10,000K程度以下、全圧力~0.2MPa程度以下)を精度、再現性よく得ることができる。厳密な意味では、本装置を用いて発電・非発電(ON/OFF)状態を短い周期で定期的に繰り返す「準定常作動」運転は困難で、ON状態だけを模擬する単発(パルス動作)での実験となるが、研究の本質は失わない。

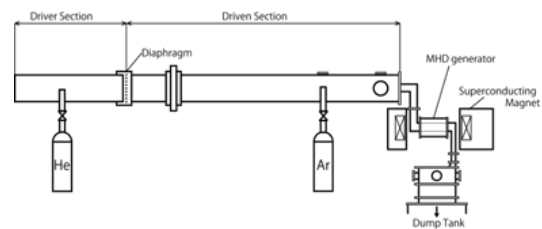


図1 衝撃波管駆動MHD発電実験装置

図2に示すようなリニア形状ファラデー型発電機を用いた衝撃波管駆動高温希ガスプラズマMHD発電実証実験において、希ガス(アルゴン)入口全温度~9,000K、全圧力~0.105MPa、磁束密度4Tの下で、MHD発電機の電圧-電流特性を明らかにし、最大発電出力16.7kW、エンタルピー抽出率12.9%、出力密度235MW/m<sup>3</sup>(4番電極領域)を達成し、先導研究で実績のあるディスク形状発電機

に匹敵し、かつ従前のシードプラズマ発電機と同等以上の発電性能を有することを世界で初めて定量的に実証した。

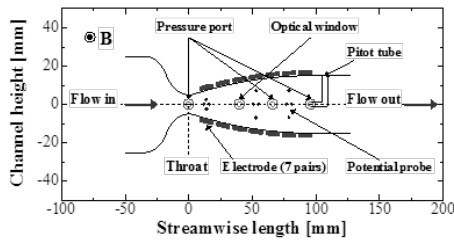


図 2 リニア形状MHD発電

図 3 に異なる入口ガス温度での発電機内のプラズマ構造を、また図 4 に発電出力（エンタルピー抽出率=発電出力/熱入力）の入口ガス温度依存性を示す。低い入口ガス温度（7500K）では発電機内プラズマは電離不安定となり不均一構造を持ち、発電出力は変動するが、入口ガス温度を 8000K 以上とすることで発電機内のプラズマは概ね一様かつ安定となり安定した発電出力が得られた。このとき、エンタルピー抽出率は入口ガス温度の増加に伴い増加すること（3.0%（7500K）、7.9%（8000K）、10.8%（8500K）、12.9%（9000K））、また印加磁束密度の増加に対しても単調に増加することが明らかとなった（0.1%（1T）、2.5%（2T）、7.5%（3T）、12.9%（4T））。一方、入口ガス圧力を変化させてもエンタルピー抽出率はほとんど変化しないこと、外部負荷抵抗の変化に対し、発電チャンネル内の電子温度は若干変化するが電子数密度はほとんど変化しないこと、流速は低負荷抵抗値でローレンツ力により低下しそれに伴い発電出力は

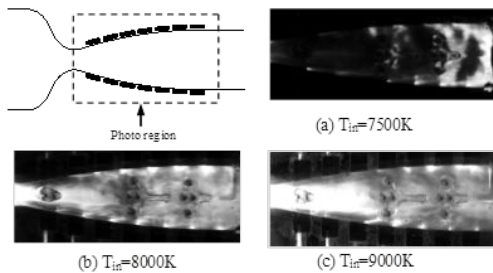


図 3 MHD発電機内のプラズマ構造

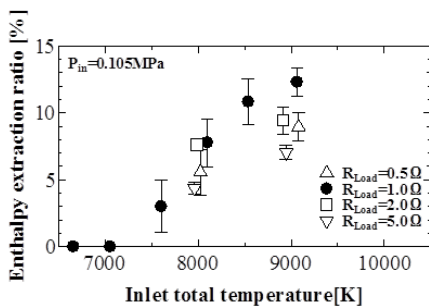


図 4 発電出力のガス温度依存性

低下することなどが実験的に明らかとなった。

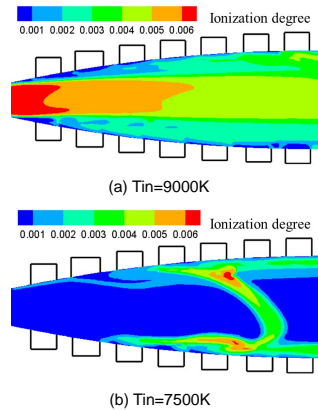


図 5 プラズマ構造の数値計算

図 5 に非定常 2 次元数値シミュレーションによるプラズマ構造（電離度の 2 次元分布）を示す。本数値シミュレーションでは、ホール効果により電極端への電流集中が発生し、電流集中点ではプラズマは電離過程となり、一方で流路中央では電子温度は 6000K 程度で、再結合過程が支配的なプラズマとなること、また電極近傍では境界層の剥離発達により再結合が進行し、これに起因して電極近傍で電圧降下が発生することがわかった。さらに、実験で確認されたように入口ガス温度 7500K ではプラズマは筋状の構造が周期的に発生する不安定な状態となるが、入口ガス温度を 8000K 以上とすることでプラズマは安定となることが示され、プラズマがサハ平衡状態からずれていることに加えて、電子がクーロン衝突を支配的とすることで、電気伝導度の電子数密度に対する依存性が弱くなり、電離不安定の発生を抑制することが明らかとなった。

ここで得られた結論は、定性的には、シード完全電離状態で安定したプラズマ状態にあるシードプラズマ方式 MHD 発電機での特性と類似しているが、これまで電離不安定が生じプラズマが不安定、不均一になるとされてきたシードを用いない希ガスプラズマにおいても、運転条件により（本研究では、発電機入口全温度 9000K の高温アルゴンガスを作動流体とした）比較的安定で均一なプラズマを発電機内で実現でき、シードプラズマ方式に匹敵する発電性能が得られること、また同様の結論は、近年ディスク形状発電機を用いた高温希ガスプラズマ MHD 発電実験においても明らかにされているが、分割電極等の影響で不均一プラズマとなりやすいリニア形状発電機で実証した意義は大きい。

(2) パルス放電および CO<sub>2</sub> パルスレーザーを用いた（太陽光励起レーザーを模擬）高温希ガスの生成による発電実証試験と性能向上に向けての指針の明確化ならびに高効率発電システム構築に向けての具体的提案

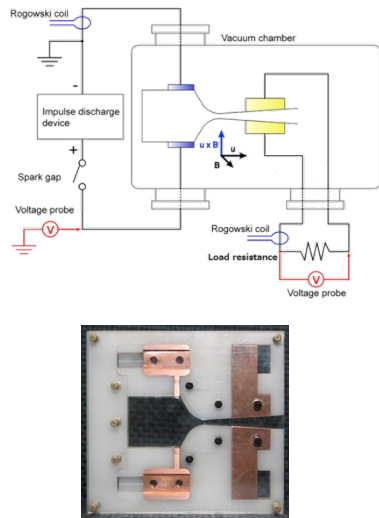


図6 パルス放電加熱MHD発電実験装置

図6に示すようなパルス放電加熱MHD発電実験装置を開発し、パルス放電による高温希ガスプラズマMHD発電実証試験と非定常2次元数値計算から以下のことを明らかにし、続くレーザー駆動MHD発電実験に向けての見通しを確立した。その詳細は以下の通りである。

- 1) 開放電圧の最大値は、代表的な実験条件下で、アルゴンを作動気体とする場合約5.0V、ヘリウムの場合約11.3V（アルゴンの場合の約2.3倍）で、電圧発生の継続時間は、それぞれ約900 $\mu$ s、400 $\mu$ s（アルゴンの場合の約0.4倍）であった。
- 2) 実験において開放電圧の最大値が入力エネルギーの増加、充填圧力の減少とともに増加することが観測された。それは数値計算から入力エネルギーの増加、充填圧力の減少とともにガス温度が増加し、流速の増加をもたらしていることに起因することが示唆された。
- 3) 放電電極への電気入力約18%がガスの加熱に消費されると仮定すると、上記の開放電圧の最大値や経時変化が数値計算により説明できるだけでなく、高速カメラにより観測されたプラズマ流動の様子（磁界非印加時）も計算結果とよく一致する。
- 4) 整合負荷での発電実験において、アルゴンを用いた場合は最大出力0.07W、ヘリウムの場合は最大出力0.19Wが得られた。数値計算においてもヘリウムの方が性能が高いが、実験結果と数値計算結果とに差異がありその要因を明らかにする必要がある。

さらに、図7に示すようなレーザー駆動MHD発電実験装置を開発し、CO<sub>2</sub>パルスレーザー駆動高温希ガスプラズマMHD発電実証試験とその高性能化を試み、最終形態となるレーザー駆動MHD発電方式の原理実証試験を行うとともに、数値計算によりその性能評価と性能向上に向けての方針を明確にし

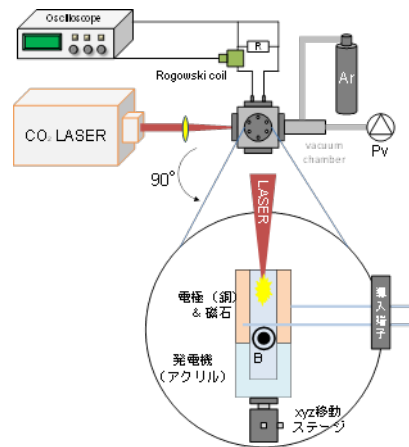


図7 レーザー駆動MHD発電実験装置

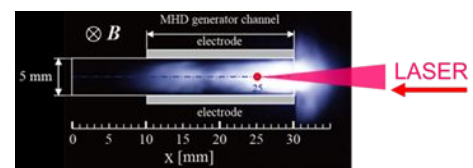


図8 レーザー生成MHDプラズマ

た。レーザー駆動MHD発電の原理実証試験では、図8に示すようにレーザー生成MHDプラズマの発生が確認でき、出力の絶対値そのものは低いものの、同方式としては世界で初めて発電出力が得られることを実証した。実験に則した非定常2次元数値計算との比較も含めた結果の詳細は以下の通りである。

- 1) 初期圧力10 kPa、負荷30 $\Omega$ の条件下における実験で、最大36 mWの発電出力を得た。約1 $\mu$ s間のレーザー入力に対して、約15 $\mu$ sの間発電が持続し、出力電力は2つのピークを持ち、電流、電圧の正から負への反転現象が見られる。
- 2) 実験を模擬した数値計算においては、100 $\mu$ s程度発電が継続した。この際、出力電力のピークは3つ見られ、出力電流・電圧の正、負、正への反転現象を確認した。
- 3) 数値計算では、実験で得られた出力電力および出力電流・電圧の特性を、発電の初期段階（およそ10 $\mu$ sまで）において概ね模擬できる。
- 4) 数値計算で見られた発電出力の第3ピークは、実験では観測されていない。これは、計算は2次元である（z方向を一様と仮定している）のに対し、実験では3次的にプラズマが広がること（プラズマのすり抜け）が大きな要因の一つと考えられる。
- 5) 連続電極発電機では電極間で正負の異なる $u|u|$ （ $\sigma$ ：電気伝導度、 $u$ ：流速）が同時に存在する場合、電流を打ち消しあうため、電流の打消しを回避できる分割電極の利用が有用である。

レーザー駆動MHD発電システムはいくつか提案されているが、本研究のようなパルスレーザーを利用する発電システムとしては図9のようなクロズドサイクルが適しており、本研究での成果は、この発電システムの実現化に向けて、確実な基盤を構築したといえる。このシステムでは、レーザー支援ドネーションによる高温・高圧ガス生成を利用することで、従来のMHD発電システムで必要不可欠であった希ガス加熱器（熱交換器）や圧縮機を一切不要とし、本研究での純希ガス利用（シードフリー）も加えてシステムの抜本的かつ究極的な簡素化・軽量化（信頼性の向上）が可能となる。本研究では、基本的には地上でのクリーンMHD発電を指向しているが、このような利点は、レーザー光やマイクロ波を外部からのエネルギー供給キャリアとして利用することで、推進剤（あるいは燃料）を搭載することなく航空宇宙機の推進を行い、ペイロード比の向上とコストの削減を狙う「ビーム推進技術」と趣旨を同じくするもので、革新的な航空宇宙機搭載用高出力密度電力発生システムへの新たな展開へも視野に入れることが可能となり、エネルギー分野だけでなく航空宇宙分野への学術的貢献も大いに期待できる。

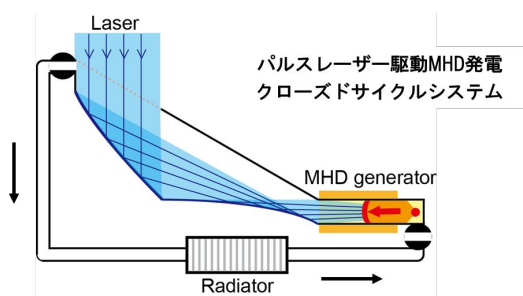


図9 パルスレーザー駆動MHD発電システム

< 引用文献 >

本研究の目的は、クリーンMHD発電の実現可能性を格段に高め、究極にある「太陽光エネルギー高度利用型MHD発電システム」の構築に向けて研究・開発基盤を確立することであるが、上記の通り、全世界で長い研究経緯をもつMHD発電研究の中で、全く類を見ない革新的・独創的成果が得られており、全体を通して「おおむね順調に進展した」と自己評価しているとともに、本研究分野の更なる新展開に資する斬新な学術的研究成果を数多く残した。

< 引用文献 >

C. D. Maxwell, and L. N. Myrabo, "Feasibility of Laser-Driven Repetitively Pulsed MHD Generators", Proc. AIAA 18th Thermophysics Conference, AIAA-83-1442, 1983, Montreal (Canada)

## 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17件)

M.Tanaka, T.Murakami, Y.Okuno, "Plasma Characteristics and Performance of Magnetohydrodynamic Generator with High-Temperature Inert Gas Plasma", IEEE Trans. Plasma Science, 査読有, Vol.42, 2014, 4020-4025  
DOI:10.1109/TPS.2014.2365591

松本正晴, 高木成郎, 奥野喜裕「数値計算によるパルスレーザー駆動MHD発電の基礎的検討」日本航空宇宙学会論文誌, 査読有, Vol.62, 2014, 170-176  
DOI:10.2322/jjsass.62.170

小松文彦, 田中 学, 村上朝之, 奥野喜裕「ホール接続およびダイアゴナル接続における高温希ガスプラズマMHD発電実験」電気学会論文誌B, 査読有, 134巻, 2014, 620-625  
DOI:10.1541/ieejpes.134.620

田中 学, 村上朝之, 奥野喜裕「ファラデー形発電機を用いた高温希ガスプラズマMHD発電実験」電気学会論文誌B, 査読有, 134巻, 2014, 614-619  
DOI:10.1541/ieejpes.134.614

田中 学, 村上朝之, 奥野喜裕「高温希ガスプラズマファラデー形MHD発電機におけるプラズマ電磁流体挙動と発電特性」電気学会論文誌B, 査読有, 134巻, 2014, 464-469  
DOI:10.1541/ieejpes.134.464

T.Murakami, Y.Zhuang, Y.Okuno, "High-temperature inert gas plasma magnetohydrodynamic energy conversion by using linear-shaped Faraday-type channel", Journal of Applied Physics, 査読有, Vol.113, 2013, 063303-1 - 063303-6  
DOI:10.1063/1.4792056

H.Kobayashi, H.Shionoya, Y.Okuno, "Turbulent duct flows in a liquid metal magnetohydrodynamic power generator", Journal of Fluid Mechanics, 査読有, Vol.713, 2012, 243-270  
DOI:10.1017/jfm.2012.456

T.Murakami, Y.Okuno, "Magnetohydrodynamic electrical power generation using convexly divergent channel II. Numerical simulation", Journal of Physics D: Applied Physics, 査読有, Vol.44, 2011, 185202-1 - 185202-10  
DOI:10.1088/0022-3727/44/18/185202

T.Murakami, Y.Okuno, "Magnetohydrodynamic electrical power generation using convexly divergent channel I. Experimental demonstration", Journal of Physics D: Applied Physics, 査読有, Vol.44, 2011, 185201-1 - 185201-8  
DOI:10.1088/0022-3727/44/18/185201

M.Matsumoto, T.Murakami, Y.Okuno, "Two-dimensional Numerical Simulation on the MHD Flow Behavior in a Pulse-Detonation-Driven MHD Electrical Power Generator", IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 査読有, Vol.5, 2010, 422-427  
DOI:10.1002/tee.20555

〔学会発表〕(計89件)

田中学, 奥野喜裕「高温希ガスプラズマディスク形MHD発電機のプラズマ安定性」電気学会 新エネルギー・環境研究会, FTE-14-38, 2014.11.26, 福島再生可能エネルギー研究所(郡山)

M.Tanaka, T.Murakami, Y.Okuno, "Numerical Simulation of Performance of a High Temperature Inert Gas Plasma Faraday-type MHD Generator with Segmented Electrodes", 12th International Energy Conversion Engineering Conference, AIAA-2014-3557, 2014.7.28, クリーブランド(米国)

M.Matsumoto, S.Takagi, Y.Okuno, "Feasibility Study of a Laser Beamed Magnetohydrodynamic Energy Conversion", The Asian Joint Conference on Propulsion and Power, AJCPP2014-059, 2014.3.7, 済州(韓国)

T.Murakami, M.Tanaka, F.Komatsu, Y.Okuno, "Magnetohydrodynamic energy conversion using high-temperature inert-gas plasma", The XXXI International Conference on Phenomena in Ionized Gases, PS4-110, 2013.7.18, グラナダ(スペイン)

M.Tanaka, Y.Zhuang, F.Komatsu, T.Murakami, Y.Okuno, "Experiments of High Temperature Inert Gas Plasma MHD Power Generation with a Faraday Type Generator", 43rd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, AIAA-2013-2889, 2013.6.25, サンディエゴ(米国)

何棟輝, 村上朝之, 奥野喜裕「インパルス放電希ガス加熱を用いたMHD発電機内プラズマ流体挙動」電気学会 新エネルギー・環境研究会, FTE-13-037, 2012.9.27, 長岡技術科学大学(長岡)

L.Wang, Y.Zhuang, T.Murakami, Y.Okuno, "Magnetohydrodynamic Energy Conversion with Supersonic Argon Plasma Flow", Proc. of the Asian Joint Conference on Propulsion and Power, AJCPP2012-007, 2012.3.2, 西安(中国)

Y.Okuno, K.Watanabe, A.Kawasaki, T.Murakami, "Experimental Studies of Seed-Free Pure-Inert-Gas Working MHD Power Generation", 42nd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference in conjunction with the 18th International Conference on MHD Energy Conversion (ICMHD), AIAA-2011-3286, 2011.6.27, ハワイ(米国)

T.Murakami, Y.Okuno, "Experiment and simulation of MHD power generation using convexly divergent channel", 42nd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference in conjunction with the 18th International Conference on MHD Energy Conversion (ICMHD), AIAA-2011-3287, 2011.6.27, ハワイ(米国)

A.Kawasaki, L.Wang, K.Watanabe, T.Murakami, Y.Okuno, "MHD Electrical Power Generation with Seed-Free Pure-Inert-Gas Plasma", Proceedings of The International Conference on Electrical Engineering 2011, ICEE-A053, 2011.7.12, 香港(中国)

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://www2.es.titech.ac.jp/okuno/>

## 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