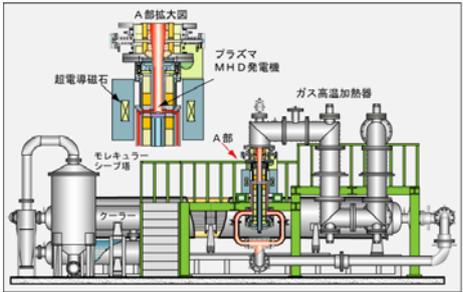


平成17年度科学研究費補助金（基盤研究（S））研究状況報告書

ふりがな（ローマ字）		YAMASAKI HIROYUKI					
①研究代表者氏名		山岬 裕之		②所属研究機関・部局・職 東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授			
③研究課題名	和文	環境適合型・超高効率プラズマ MHD 発電機の連続運転下での発電特性の解明					
	英文	Study on Performances of Ultra-high-efficiency and Environmentally Benign Plasma MHD Generator under Continuous Operation					
④研究経費		平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	平成19年度	総合計
17年度以降は内約額 金額単位：千円		16,200	17,700	15,600	10,800	7,300	67,600
⑤研究組織（研究代表者及び研究分担者）							
氏名	所属研究機関・部局・職	現在の専門	役割分担（研究実施計画に対する分担事項）				
山岬 裕之	東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授	MHD発電	研究計画の立案と総括、データ総合分析				
奥野 喜裕	東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授	MHD発電 プラズマ理工学	クローズドループの運転特性、および発電機内の流体とプラズマ挙動の数値シミュレーション				
岡村 哲至	東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授	低温工学 MHD発電	超電導磁石の運転制御と磁場の最適化				
村上 朝之	東京工業大学・大学院総合理工学研究科・助手	プラズマ理工学 MHD 発電	実験の遂行と熱的・流体的諸量の計測				
大柿 久美子	東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教務職員	分析化学	クローズドループ内の不純物濃度の計測と除去				
⑥当初の研究目的（交付申請書に記載した研究目的を簡潔に記入してください。）							
<p>本研究では、超高効率の発電が期待できるプラズマ MHD 発電を研究対象とし、その研究成果により、次世代の二酸化炭素排出削減／省エネルギー型のエネルギー高度利用化技術の構築に資することを目的としている。本研究では右の図と写真に示すような装置を用いているが、この装置は小型であるものの、実用発電プラントを模擬する各種コンポーネントを備えており、作動気体であるアルゴンが装置内を連続循環する「クローズドループ」実験装置である。この装置を用いて、最終的にはプラズマ MHD 発電機を連続運転して、この方式が発電システムとして成立し得るかどうかについて工学的に明らかにすることを目的としている。この目的のため、本研究では以下に示すような段階的な目標を掲げ、それを順次実行して最終目標を達成する。</p>							
							
							
<ol style="list-style-type: none"> 「クローズドループ」の運転特性に関する知見を得ると共に、実際にこれを運転し、長時間におよぶアルゴンの連続循環を実証する。 その際、超音速流れが存在するループ内の圧力損失や圧力変動などの流体的な挙動に対する新しい知見を得る。 また、発電機内のプラズマの電気伝導度に大きな影響を与える不純物濃度の計測を行うと共に、不純物除去手法を確立する。 アルゴンの加熱を行って同様な実験を行い、各コンポーネントの熱交換性能や冷却性能を調べ、「クローズドループ」のエネルギーバランスについての知見を得る。 最終的には、発電に必要な 1850K 以上のアルゴン温度を達成し、連続運転下での発電機の性能や耐久性を明らかにする。 							
図1 「クローズドループ」の側面図（上）と写真（下）							

⑦これまでの研究経過（研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら、具体的に記入してください。）

本研究では、プラズマ MHD 発電の連続実験に初めて挑戦しており、「クローズドループ」という世界的にも類例の無い装置を用いて実験を行っている。したがって、幾つかの困難に遭遇しながらも、それらを一つ一つ解決しつつ研究を遂行しているが、研究は正直言って当初計画と比べて遅れ気味で進行している。ここで、本研究での技術的な課題について指摘しつつ、それに対して本研究が現在どのように経過しているかについて記す。以下の説明のため、まず本実験の概略を述べる。

本実験装置では、図2に示したように圧縮機により加圧されたアルゴンを再生熱交換器に導き、ここで MHD 発電機から流入する高温アルゴンの熱を回収して予熱する。予熱されたアルゴンは高温ガス加熱器に導かれ、ここで電気ヒーターにより所定の温度まで加熱される（実用プラントでは電気ヒーターではなく、天然ガス燃焼により加熱される蓄熱型の熱交換器（開発済み）を使用する）。高温に加熱されたアルゴンは、その後超伝導磁石により強力な磁場が印加された MHD 発電機に導かれ、発電が行われる。また、発電を終えたアルゴンは再び再生熱交換器に導かれ、その後クーラーにより冷却され、最終的には圧縮機に戻る。このようにして、クローズドループ内では、アルゴンの連続循環が行われる。このようなクローズドループを用いて連続発電を行うことが最終目的であるが、この目的を達成する上での課題は、以下のようにまとめることができる。

- 1) プラズマ MHD 発電では、MHD 発電機内で超音速流れを実現することが必要不可欠であり、超音速流れをクローズドループ内に含むような場合に対して、圧縮機の流量やループ内に注入するアルゴンの量を時間的にどのようにすれば良いのかという運転特性の知識が必要である。
- 2) 上で得られた知識をもとに、圧縮機を実際に運転し、クローズドループ内にアルゴンの流れを実現し、各コンポーネントでの圧力損失や圧力変動について調べ、本装置の圧力損失が少なく、安全で安定したアルゴンの循環ができることを確認する必要がある。
- 3) ループ内を循環するアルゴンに含まれる水、酸素、窒素などの不純物は、発電機内のプラズマ生成に悪影響を与えるため、極力低く抑える必要がある。水は、図3に示した高温ガス加熱器内に組み込まれているセラミックスからの放出による。また、窒素、酸素の混入は、大気圧よりも圧力の低いコンポーネントと配管における、空気のリークによる。従って、これらの不純物濃度の計測手法を確立すると共に、不純物の除去方法を確立する必要がある。
- 4) 再生熱交換器の熱交換特性、アルゴン冷却ダクトやクーラーでの冷却特性、各コンポーネントでの熱損失などのデータを取得し、それに適合する高温ガス加熱器の電流制御を行う必要がある。
- 5) 発電にはアルゴンを 1850K 以上まで加熱する必要があるが、電気ヒーターを用いてこの温度までアルゴンを加熱した前例は無く、これが本研究で最も挑戦的な課題になることが予想される。

現在までのところ、1) と 2) については、アルゴンの連続循環の手法を確立し、アルゴンの温度は低いものの 30 時間程度の連続運転を実証し、また圧力損失や圧力変動についてのデータも取得できている。また、3) の不純物の計測と除去については、酸素、窒素、水などの濃度計測も行えるようになり、不純物除去の手法についてもようやく確立できた。さらに、4) のアルゴン加熱についても、温度はまだ低いが 660K までのアルゴン加熱実験を 10 時間行うことができ、再生熱交換器の熱交換特性、アルゴン冷却ダクトとクーラーでの冷却特性などが取得でき、ループ全体のエネルギーバランスのデータも取得できるようになった。今後は、5) の本格的なアルゴン加熱を行うため、現在タングステンエレメント（図4）と電流リードとの接触抵抗を減らすことを試みている。

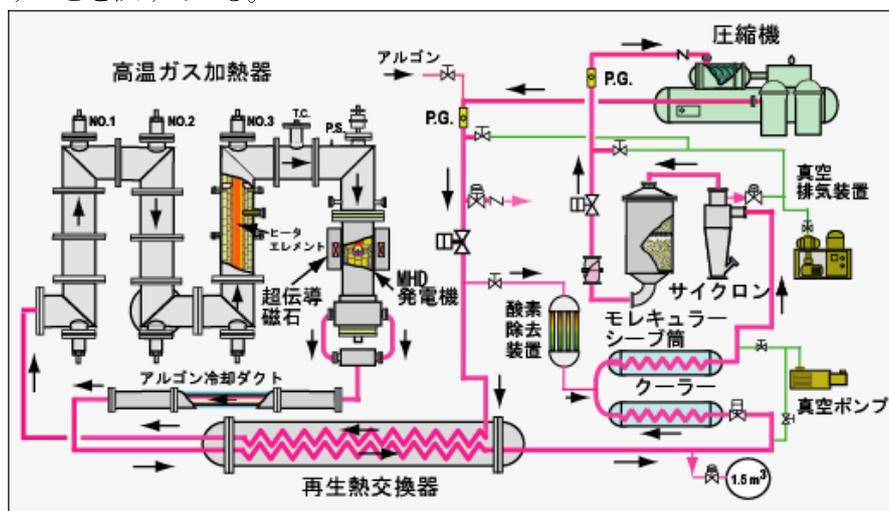


図2 「クローズドループ」のシステム図



図3 高温ガス加熱器内のセラミックス

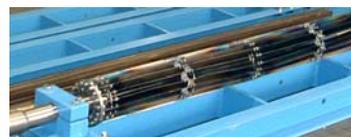


図4 高温ガス加熱器内のヒーターエレメント

⑧特記事項 (これまでの研究において得られた、獨創性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見、学問的・学術的なインパクト等特記すべき事項があれば記入してください。)

1) 超音速「クローズドループ」の運転始動特性に関する新たな知見

本装置では、発電プラントと同じように運転停止から運転開始、そして定常運転に至るまでの過程、すなわち始動特性が重要になる。特にループ内に超音速流れが実現するようなループは極めて稀であり、その運転方法については未知であった。そこで本研究では、非定常準一次元計算により運転特性の数値シミュレーションを行った。その結果、アルゴンの充填、圧縮機の始動、高温ガス加熱器の運転、圧縮機の流量の設定などの一連のシーケンスについての有益な情報が得られ、これらのシーケンスを実施すれば、発電に適したアルゴン圧力と温度が得られることが分かった。このように、数値シミュレーションにより、これまで未知であった超音速クローズドループの運転始動方法について初めて提案できた。

2) アルゴンの定常循環の実証と流体挙動についての新たな知見

上で提案された運転始動方法の正当性を確かめるため、短時間および長時間の実験を何回か試みた。その結果、予想通りのアルゴン流量や圧力を得ることができ、数値シミュレーションで提案された方法が実験的に妥当であることが分かり、またループ全体にわたる圧力分布を知ることができた (図 5)。さらに、ディスク型流路でのスロートの存在により、アルゴン流量とアルゴン量が圧縮機の出口/入口での圧力比に大きな影響を与えるという、クローズドループ特有の現象について新しい知見が得られた。さらに、ディスク型流路内の超音速流れで比較的大きな圧力変動が誘起されるものの、下流ではそれが減衰し、圧力変動が小さく抑えられることが明らかになり、クローズドループが長時間安定して運転できることが示唆された。事実、発電実験には至っていないものの、660Kまでアルゴンを加熱した実験では、10時間の連続実験を行うことができた。このように安定な長時間の連続循環を実証するとともに、クローズドループ内の流体挙動についての新たな知見を得ることができた。

3) 不純物除去手法の確立

不純物除去は、高性能の発電を実現する上で、最も重要な課題の一つである。本装置での不純物の原因としては、図 3 に示した高温ガス加熱器内に組み込まれているセラミックスからの水分の混入を挙げることができる。また、ループには大気圧よりも圧力の低いコンポーネントや配管があり、大気がこれらを通して進入することにより、窒素、酸素がもたらされることもアルゴンが汚染される原因となる。そこで、ループ内の 6 箇所での不純物の濃度測定を試みるとともに、不純物除去実験を行った。その結果、ゼオライトが本装置においても水分除去に対して非常に効果的であること、また、汚染されたアルゴンの一部を CuOx と MnOx を組合わせたカラムに通すことにより、酸素が有効に除去されることが確認できた。さらに、汚染されたアルゴンを純アルゴンに置き換える注入/排気の操作が非常に有効であることが分かった。同時に、大流量が流れるクローズドループにもかかわらず、水分約 20ppm、酸素 10ppm、窒素 50ppm と発電に十分な程度まで不純物濃度を下げることができた。

4) クローズドループのエネルギーバランスに関する知見

クローズドループのエネルギーバランスは、発電効率を議論する上で最も重要である。これまで概念設計により提案されてきたプラズマ発電システムでは、これに関しては多くの仮定がなされており、実験的なデータの取得が望まれていた。本研究では、この点に関して初めて実験データを取得できた。実験では、アルゴンを 660K 程度まで加熱し、再生熱交換器の熱交換の性能について調べ、その結果熱交換の温度効率が 85-90% であることが分かり、また種々のコンポーネントでの熱損失についても計測できた。現段階ではアルゴンの加熱温度も十分ではなく、最終加熱温度の 1850K 以上には至っていないが、クローズドループのエネルギーバランスについて初めて有意義なデータが取得できた (図 6 の各枠の中の数値)。

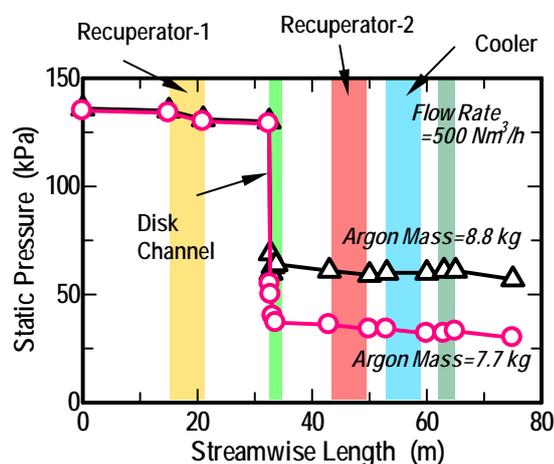


図 5 ループ内の圧力分布

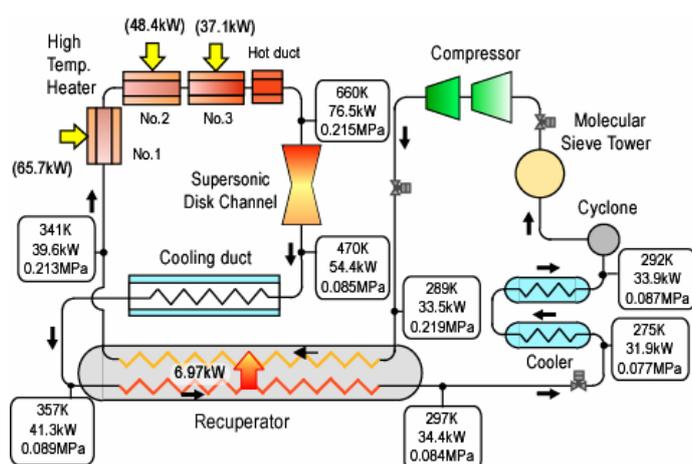


図 6 エネルギーバランス

⑨研究成果の発表状況 (この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文(掲載が確定しているものを含む。)の全著者名、論文名、学協会誌名、巻(号)、最初と最後のページ、発表年(西暦)、及び国際会議、学会等における発表状況について記入してください。なお、代表的な論文3件に○を、また研究代表者に下線を付してください。)

学術雑誌投稿論文

1. 高奈 秀匡, 奥野 喜裕, 山岬 裕之 「クローズドループMHD発電装置の過渡応答特性」
電気学会論文誌B, 124巻, 11号, pp.1343-1348, (2004)
- ② 高奈 秀匡, 奥野喜裕, 山岬裕之 「クローズドループMHD発電装置の運転特性シミュレーション」
電気学会論文誌B, 124巻, 5号, pp.785-790 (2004)

国際会議投稿論文

- ① Y. Okuno, T. Murakami, and H. Yamasaki, "Closed Loop Experimental Facility for CCMHD Electrical Power Generation, 1-System and Operation", Proc. of 15th International Conference on MHD Energy Conversion, May, pp. 1-7, (2005)
- ② T. Murakami, Y. Okuno, and H. Yamasaki, "Closed Loop Facility for CCMHD Electrical Power Generation, 2-Experimental Results of Fluid-dynamical Behavior and Thermal Performance", Proc. of 15th International Conference on MHD Energy Conversion, pp. 1-7, May, (2005)
3. K. Aizawa, T. Murakami, Y. Okuno, and H. Yamasaki, "Study on Fluid-dynamical Performance of Supersonic Closed Loop Experimental Facility", AIAA Paper 2004-2266, 35th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, June-July, Portland, pp. 1-5, (2004)
4. T. Kuraoka, K. Ohgaki, T. Murakami, Y. Okuno, and H. Yamasaki, "Impurities in Supersonic Closed Loop Experimental Facility", AIAA Paper 2004-2437, 35th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, June-July, Portland, pp. 1-5, (2004)
5. H. Takana, S. Izumi, Y. Okuno, and H. Yamasaki, "Numerical Simulation on Transient Characteristics of Closed Loop MHD Experimental Facility", AIAA Paper 2004-2556, 35th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, June-July, Portland, pp. 1-7, (2004)
6. T. Sonogashira, T. Murakami, Y. Okuno, and H. Yamasaki, "Characteristics of Argon Heater in Supersonic Closed Loop Experimental Facility for CCMHD Power Generation", AIAA Paper 2004-2438, 35th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, June-July, Portland, pp. 1-6, (2004)
7. H. Takana, Y. Okuno, and H. Yamasaki, "Numerical Simulation of Fluid Flow in Closed Loop MHD Power Generation Facility", AIAA Paper 2003-3486, 34th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, June, Orland, pp. 1-6, (2003)
8. Y. Okuno, T. Okamura, T. Murakami, K. Ohgaki, H. Takahashi, and H. Yamasaki, "Construction of Closed Loop Facility for CCMHD Power Generation", AIAA Paper 2003-4280, 34th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, June, Orland, pp. 1-6, (2003)

国内シンポジウムおよび学会発表

1. R. Tanaka, T. Sonogashira, T. Murakami, Y. Okuno, and H. Yamasaki, "Thermal Characteristics of Closed Loop Experimental Facility for Continuous MHD Power Generation", Proc. of 2005 Symposium on Material and Systems for Energy Conversion, Hokkaido University, 156-165, (2005)
2. R. Hombo, K. Aizawa, T. Murakami, Y. Okuno, and H. Yamasaki, "Fluid-Dynamical Behavior in Closed Loop Experimental Facility for Continuous MHD Power Generation", Proc. of 2005 Symposium on Material and Systems for Energy Conversion, Hokkaido University, 166-172, (2005)
3. D. Hoya, K. Kuraoka, T. Murakami, Y. Okuno, and H. Yamasaki, "Behavior of Impurities in Closed Loop Experimental Facility for Continuous MHD Power Generation", Proc. of 2005 Symposium on Material and Systems for Energy Conversion, Hokkaido University, 173-178, (2005)
4. T. Murakami, Y. Okuno, and H. Yamasaki, "Experiments of Closed Loop Facility for Continuous MHD Power Generation at Tokyo Tech.", Proc. of 2005 Symposium on Material and Systems for Energy Conversion, Hokkaido University, 13-19, (2005)
5. 高奈 秀匡, 奥野 喜裕, 山岬 裕之 「クローズドループ実験装置の亜音速発電運転シミュレーション」
新エネルギー・環境研究会, 電気学会, FTE-04-7-23, pp.9-14, (2004)
6. 相澤 康介, 村上 朝之, 奥野 喜裕, 山岬 裕之 「超音速クローズドループ装置の流体力学的性能」
新エネルギー・環境研究会, 電気学会, FTE-04-7-23, pp.15-18, (2004)

7. K. Ohgaki, T. Murakami, Y. Okuno, T. Okamura, and H. Yamasaki, "Impurity Measurement of Argon in Closed Loop Experimental Facility", Proc. of Symposium on Advanced Research of Energy Technology, Hokkaido, A1-3, pp.1-6 (2004)
8. T. Murakami, Y. Okuno, T. Okamura, K. Ohgaki, H. Takahashi, and H. Yamasaki, "The first Results from a Closed Loop Experimental Facility at Tokyo Tech.", Proc. of Symposium on Advanced Research of Energy, Hokkaido University, A1-1, pp.1-5 (2004)
9. 菌頭 武輝, 村上 朝之, 奥野 喜裕, 山岬 裕之「熱回収型クローズドループ実験装置における熱流体シミュレーション」新エネルギー・環境研究会, 電気学会, FTE-04-7-23, pp.31-36, (2004)
10. 泉 丞, 村上 朝之, 奥野 喜裕, 山岬 裕之「クローズドループMHD発電実験装置の運転シミュレーションとその評価」新エネルギー・環境研究会, 電気学会, FTE-04-7-23, pp.25-30, (2004)
11. Liberati, T. Murakami, Y. Okuno, and H. Yamasaki, "Numerical Simulation of Flow Behavior in Disk Channel of Closed Loop Experimental Facility", 新エネルギー・環境研究会, 電気学会, FTE-04-7-23, pp.15-18, (2004)
12. 奥野 喜裕, 村上 朝之, 岡村 哲至, 大柿 久美子, 高橋 浩, 山岬 裕之「クローズドループMHD発電実験装置の概要と現状」新エネルギー・環境研究会, 電気学会, FTE-03-32, pp.1-6, (2003)

特別講演

H. Yamasaki, and Y. Okuno, "High Efficiency CCMHD Power Generation with Nonequilibrium Plasma",

Invited Lecture at Ohio State University, October, pp.1-4, (2004)