

Research Activities of Closed Cycle MHD Electrical Power Generation at Tokyo Institute of Technology

奥野 喜裕, 山岬裕之 (東工大・総理工)

Yoshihiro OKUNO, Hiroyuki YAMASAKI
Department of Energy Sciences, Tokyo Institute of Technology

1. はじめに

MHD (電磁流体力学) 発電機では、従来の蒸気あるいはガスタービン発電機のような回転という機械的エネルギーを介することなく、作動気体が発電機ダクト内を通過するだけで直接電気エネルギーを得ることができ、可動部分がないことから 2000~2500°C の高温作動気体を利用することができる。このことが従来の発電方式に比べて、MHD 発電システムが高い総合効率 (>60%) を可能とする要因となっている⁽¹⁾。MHD 発電は、システム構成により、希ガス (アルゴンもしくはヘリウム) を作動気体として非平衡プラズマを利用する「クローズドサイクルMHD発電」と燃焼ガスを作動気体として熱平衡プラズマを利用する「オープンサイクルMHD発電」に大別され、現在の研究・開発の主流は前者となっている。

クローズドサイクルMHD発電方式では、効率のよい熱回収を行うことで、MHD 発電「単独」のシステムにおいても 60% 程度の総合効率が期待できることが指摘されている⁽²⁾。また、固体酸化物型燃料電池とクローズドサイクルMHD発電との全く新しい方式の複合発電システムも提案され、総合効率は 67.5%(HHV 基準)に達し、現在までに提案・検討されている発電システムの中では最も高く⁽³⁾、実用化を目指した研究開発を進める価値があることが報告されている。

クローズドサイクルMHD発電は、現在、日本が主導的立場で研究開発を進めており、東京工業大学でのブローダウン発電実験装置 Fuji-1 を用いた実験^(4,5)では、エンタルピー抽出率 18.9% (室温基準) とブローダウン装置としての世界最高記録している。また、当大学の衝撃波管装置では、発電機内において極めて一様なプラズマを実現し、これまで世界各国で行われた実験の成果をはるかに上回る、世界最高の等エントロピー効率 63% と高いエンタルピー抽出率 30.8% の同時達成に成功している⁽⁶⁾。さらに、高周波予備電離という新しい手法を導入して、発電出力を飛躍的に高めることにも成功している⁽⁷⁾。これらの実績の基に文部科学省からの支援を受け、実用プラントで必要とされるコンポーネントの多くを有し、また排熱回収を行いながら長時間連続発電が可能な熱入力 0.5MW の「クローズドループMHD発電実験装置」⁽⁸⁾が建設されるに至っており、長時間運転の実績を積むことが期待されている。

本稿では、まず、すでに実験が終了しているブローダウン発電実験装置 Fuji-1 を用いた実験結果、および世界最高の等エントロピー効率を達成した衝撃波管装

置での実験結果を簡単に述べた後、現在、連続発電実証実験に向けて準備が進められている「クローズドループMHD発電実験装置」について紹介する。

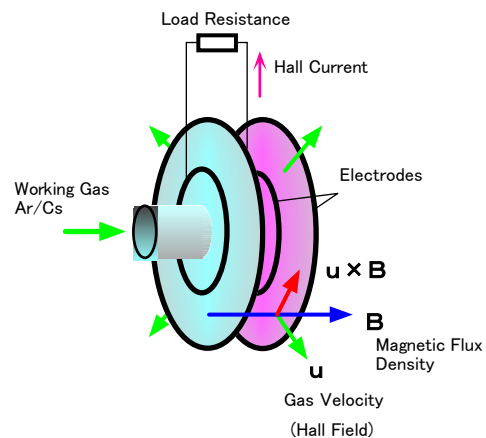


Fig.1 Disk shaped MHD generator

2. ブローダウン発電実験装置 Fuji-1 成果概要

東京工業大学では、1970年代に、図1に示すようなホール型ディスク形状 MHD 発電機を用いて、低シード率(0.01%程度)ながらそのシード物質を完全に電離させることで、プラズマの一様化を図り高い電気伝導度を得ること(シード完全電離)を目指した実験を開始している⁽⁹⁾。1970年代末期には、衝撃波管実験装置(発電時間:数ミリ秒程度)を用いて、200S/m程度の電気伝導度を、また8を超えるホールパラメータを実現し⁽¹⁰⁾、この成果を受けて、1982年に、1分程度の発電を実証することを目的として、蓄熱型熱交換器、超電導電磁石(4.7T)、ディスク形発電機等を備えた2-5MW熱入力 of ブローダウン MHD 発電実験装置 Fuji-1 が建設された(図2)⁽⁴⁾。1999年に最後の発電実験を終えているが、その間、単なる発電実証から高性能(高エンタルピー抽出率)発電実証を目指して数多くの改良がなされ、世界最高の性能を更新し続けるとともに、数多くの貴重な学術的、工学的知見を与えた⁽⁵⁾。本装置はすでに解体されているが、この実績を受けて、後述するクローズドループMHD発電実験装置が建設され、クローズドサイクル MHD 発電の実用化に向けて大きく貢献した。

ブローダウン発電実験装置 Fuji-1 の概略図を図3に示す。本装置では、金属セシウムをシードしたアルゴンガスを作動気体とし、1分程度の発電実験が可能で

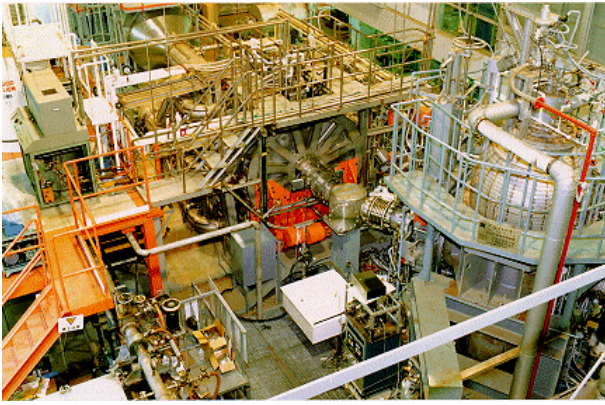


Fig.2 Fuji-1 Blow-down Facility

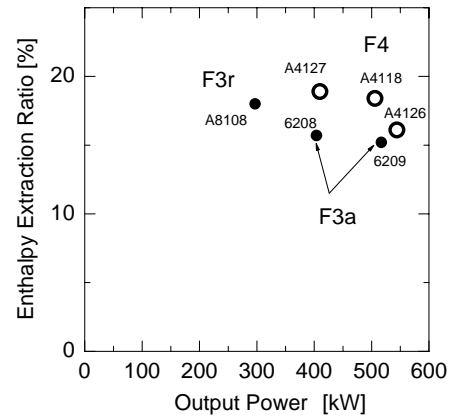


Fig.4 Typical output power and Enthalpy extraction ratio⁽⁵⁾

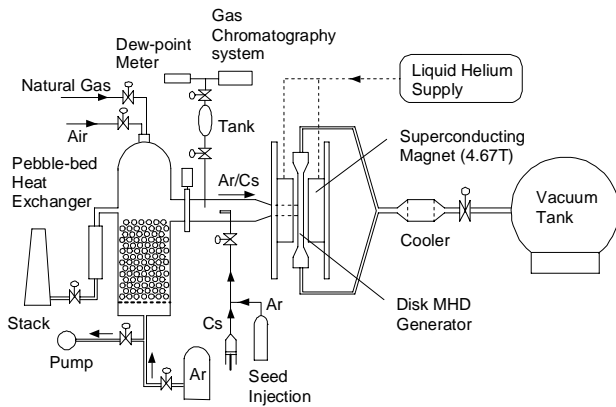


Fig.3 Schematic Diagram

ある。アルゴンガスは天然ガスを熱源とするペブル床蓄熱型高温熱交換器で 2000K 程度に加熱され、高温ダクトにおいて金属セシウムが数 100ppm 程度シードされた後に、ディスク形 MHD 発電機に導かれる。発電機には超電導磁石により中心で 4.7T の磁束密度が印加され、発電を終えた作動気体はペブルクーラで冷却された後に、真空タンクへ導かれる。

図 4 に、形状の異なるいくつかの発電機を用いた代表的な発電出力とエンタルピー抽出率（熱入力は室温 300K を基準に評価されている）の関係を示す。それぞれの実験条件の詳細は参考文献⁽⁵⁾を参照されたい。

1989 年 Disk-F3a 発電機を用いて 15.7% のエンタルピー抽出率を、さらに 1992 年には Disk-F3r 発電機を用いて 18.0% のエンタルピー抽出率を得ている。1994 年に、ピストン駆動方式のシード注入装置が導入され、また同年 Disk-F3a, Disk-F3r 発電機で得られた知見をもとに Disk-F4 発電機が製作された。Disk-F4 発電機は、それまで用いられてきた Disk-F3a, F3r 発電機と同様スワールバーンなし半径方向流発電機であり、Disk-F3a 発電機に比べて発電機入口・出口断面積比が大きく、また Disk-F3r 発電機に比べて発電機入口マッハ数が高く、発電出力の向上とその確実性を追求した発電機である。この Disk-F4 発電機を用いた実験では、1997 年に、熱入力 2.75MW の条件の下で、506kW の発電出力および 18.4% のエンタルピー抽出率を同時に達成して

いる。さらにプラズマの電気伝導度を低減する要因となる作動気体中の水分の除去等に努め、Fuji-1 装置での最終実験となった 1999 年に 3.38MW の熱入力に対し 544kW の発電出力、また 2.17MW の熱入力に対し 18.9% のエンタルピー抽出率を得ることに成功し、これまで Fuji-1 装置を用いた実験で得られた結果の中で最高の値を達成している。

Fuji-1 装置では不純物の影響についても明らかにされている。古くから知られているように、非平衡プラズマを利用するクロズドサイクル MHD 発電では、不純物、特に水分の混入が発電性能の劣化をもたらす。これは、水分が電子に対して大きな衝突断面積を有し、結果として、電子温度の低下、引いては電離不安定を引き起こし、実効的な電気伝導度、ホールパラメータの低下をもたらすことによる。

図 5 にエンタルピー抽出率と混入水分濃度との関係を示す。すべての実験が同一の条件で行われている訳ではないので、明確な結論を導くことは容易ではないが、およそエンタルピー抽出率は、水分濃度の減少に伴って、増加する傾向にあることがわかる。Fuji-1 装置では、前述のとおり、作動気体は蓄熱型熱交換器で加熱されるが、熱交換機内で最も温度が低いと考えられる底部の温度を上昇させることにより、水分濃度が減少

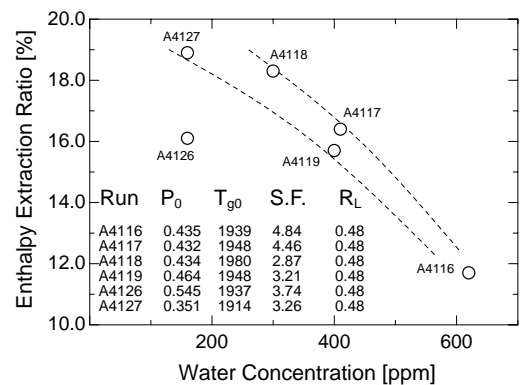


Fig.5 Influence of water vapor on enthalpy extraction ratio⁽⁵⁾

することが明らかにされた。

Fuji-1 装置は、世界最高の記録を保持しつつも、後述のクローズドループ MHD 発電実験装置の建設が決定した段階で、その役目を終えた訳ではないが、解体された。これまでの研究から、高効率なクローズドサイクル MHD 発電システムを構築するためには、30%程度のエンタルピー抽出率と 80%を越える等エントロピー効率が要求されることが知られている（後述）。Fuji-1 装置で得られた最高エンタルピー抽出率は、18.9% (0 K 基準で 16%) であり、等エントロピー効率は概算で約 24%である。これらの値は、決して高くはないが、当初の目標以上の成果が得られ、数多くの貴重な非平衡プラズマ電磁流体に関する学術的、工学的知見を与えたことは特筆に値する。

一方で装置にかかわる様々な限界（装置自身、財政的、時間的、社会情勢など）が存在したことも事実であり、非常に困難であったことは自明であるが、(1)システムの一要素として発電形状の最適化、(2)不純物（水分）の除去、(3)シード注入の空間的一様化に関する更なる詳細な検討が必要であったかとも考えられる。

衝撃波管実験装置での最近の成果（後述）によれば、小型実験機ながら 30%を越えるエンタルピー抽出率と 60%を越える等エントロピー効率がすでに実証されている。このように極めて短時間であるが、高性能化の限界を極める研究も必要であると同時に、一方で、発電時間が 1 分程度というブローダウン方式を越えた長時間運転の実績を積むことは、クローズドサイクル MHD 発電の実用化には不可欠である。Fuji-1 装置で得られた実績と経験は、次期研究世代を担うクローズドループ MHD 発電実験装置に生かされることになる。

3. 衝撃波管装置を用いた発電実験成果概要

衝撃波管実験装置は、発電時間が短時間（ミリ秒程度）ながらも比較的容易に MHD 発電に適した作動気体条件が得られることから、これまで数多くの実験が行われ、また今後も更なる性能向上を目指して研究が継続して行われる。商用規模の高効率 MHD 発電システムを構築するためには、発電機として、エンタルピー抽出率が 30%程度で、80%を越える等エントロピー効率が必要とされる（後述）ことから、近年、低磁束密度で小型の実験装置としての発電性能の達成目標値として、エンタルピー抽出率 30%、等エントロピー効率 60%が掲げられ、精力的に MHD 発電実験研究が行われた。1998 年から 2000 年にかけて、出口断面の入口断面に対する比率（断面積比）が比較的小さい発電機を用いることが高い等エントロピー効率が達成する上で有利であることが示された⁽¹¹⁾。また 2000-2001 年には小断面積比を有する発電機に対して入口旋回流を導入する試みがなされ、飛躍的に高い発電性能が得られている⁽¹²⁾。これらの実験においては高い電気伝導度を得やすいセシウムシードアルゴンガス (Ar-Cs) が作動気体として用いられている。また、以前より、断面積比が比較的大きい発電機を用いた研究からは、高い流速の実現を利点とするセシウムシードヘリウムガス (He-Cs) を作動気体とすることの有効性が明らかにされており⁽¹³⁾、

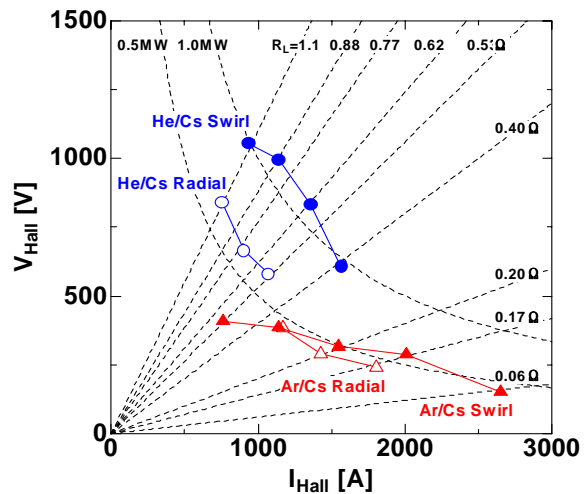
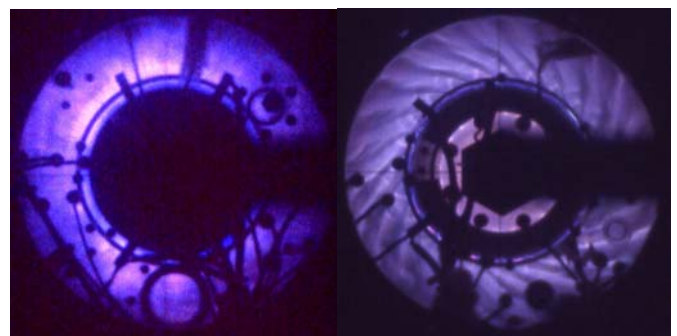


Fig.6 V-I characteristics⁽⁶⁾

これらの研究成果を鑑み、2001-2002 年には小断面積比を有する発電機において He-Cs を利用した高流速化が図られ、さらに 2002-2003 年には旋回流の導入が行われた⁽⁶⁾。

図 6 に He-Cs を作動気体とした半径方向流発電機 (He-Cs Radial)、旋回流発電機 (He-Cs Swirl) の実験により得られたホール電圧—ホール電流特性を示す。尚、従来 Ar-Cs を用いて得られてきた代表的な実験結果も合わせて示している。同図において He-Cs を作動気体とした旋回流発電機を用いて 1.0 MW を上回る高い電気出力が得られていることは注目し得る。ここでの最高出力 1.13 MW (出力密度 278 MW/m³) は実験室規模の MHD 発電機における値として著しく高いものといえる。

図 7 に典型的な MHD 発電プラズマの放電構造を示す。同図 (左) は半径方向流発電機、(右) は旋回流発電機内プラズマを示す。半径方向流発電機内の放電構造はディスク円周方向に非常に一様であることがわかる。また、旋回流発電機においてはスワールベーン設置に起因した旋回状の明暗差が見られるがそれらに顕著な不連続性はなく、空間的均一性の高い構造が得られていることがわかる。従来スワールベーンの設置は流体力学的損失を招き、これがプラズマの不均一性につながる懸念があった。しかしながら、ここではベーン自体の設計が良好であったこと、生成したプラズマの安定性が比較的高いとされる He-Cs を作動気体としたこ



Radial flow Swirl flow
Fig.7 Typical plasma structures⁽⁶⁾

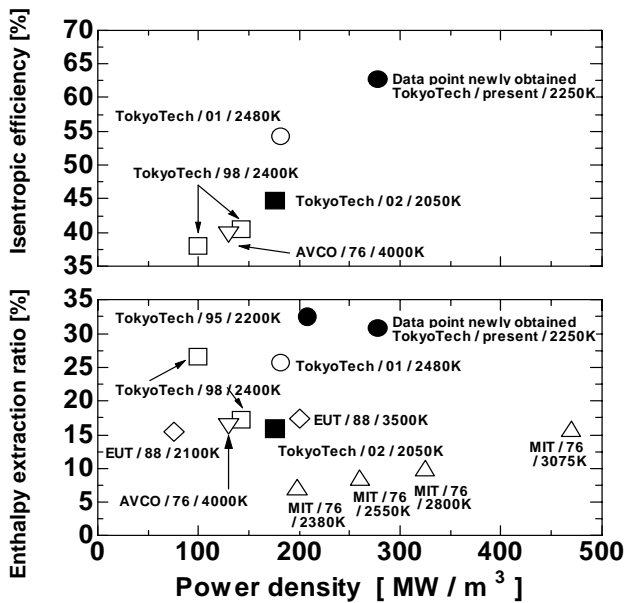


Fig.8 Generator performance⁽⁶⁾

とが有利に作用したといえる。すなわち同図に示すような一様性の高いプラズマ放電構造を実現したことが高い発電性能の達成に大きく貢献したと判断できる。

図8に国内外で行われてきた代表的な衝撃波管駆動発電実験における等エントロピー効率及びエンタルピー抽出率を出力密度に対して示す。同図の表記は研究機関略称/発表年/激み点温度とし、黒塗りプロット及び白抜きプロットはそれぞれ作動気体をHe-Cs及びAr-Csとした場合を示す。●印 ○印は東京工業大学におけるスワール発電機を用いた実験結果、■印 □印は東京工業大学における半径方向流発電機を用いた実験結果、▽印はAVCO社における半径方向流発電機を用いた実験結果、△印 ◇印はそれぞれマサチューセッツ工科大学およびアイントホーヘン工科大学におけるスワール発電機を用いた実験結果を示す。同図より、本実験では、1970年代以降行われたCCMHD発電実験として最も高い等エントロピー効率63%を達成し

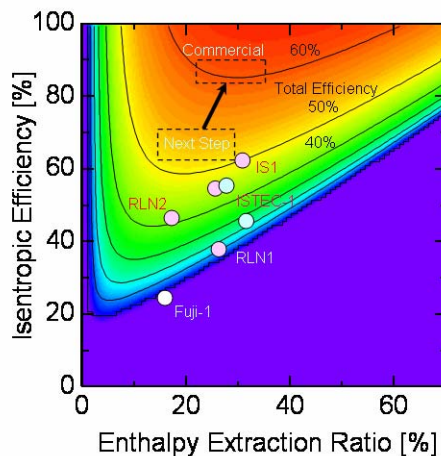


Fig.9 Current status

たことがわかる。このとき得たエンタルピー抽出率30.8%及び出力密度278 MW/m³に関しても、2250 K程度の実用的な激み点温度を用いた発電実験としては非常に高い水準にあることがわかる。

図9は、衝撃波管実験装置を用いて得られた代表的な実験結果(Fuji-1装置の結果を含む)である。横軸はエンタルピー抽出率を、縦軸は等エントロピー効率を示し、また曲線は発電システムの効率をそれらの関数として示している。商用規模発電システムにおいて、総合効率が60%を越えるためには、MHD発電機の性能として、30%程度のエンタルピー抽出率と80%を越える等エントロピー効率が要求されることがわかる(図中の”Commercial”)が、発電機開発のロードマップとしては、実験室規模の実験において、20~25%のエンタルピー抽出率で60~70%の等エントロピー効率を達成することが要求される(図中の”Target”)。図に示されているように、これまで行われてきた研究は、「高エンタルピー抽出率(高出力)指向の発電機」であり、その水準は世界最高を維持しているが、高効率化ロードマップからは多少逸脱している。すなわち将来を見据えた当該技術の着実な進展には、比較的低いエンタルピー抽出率での等エントロピー効率の向上の実証が必要であり、そのためには、発電機内のプラズマ電磁流体における電氣的、流体力学的な損失を低減することが不可欠となっている。このことを受け、現在、発電機形状の最適化を図るとともに、超電導電磁石による高磁束密度印加と高周波電磁界印加によるプラズマの安定化を試み、比較的低いエンタルピー抽出率での等エントロピー効率の向上(具体的には、エンタルピー抽出率に対する等エントロピー効率の割合(図9での傾き)を従来の2程度から3程度に引き上げた上での等エントロピー効率の向上)に向けた実験を進めている。

4. クローズドサイクル MHD 発電実験装置を用いた研究

4-1 背景と目的

これまで述べたように、東京工業大学では、ディスク形MHD発電機が組み込まれたFuji-1ブローダウン発電実験装置および衝撃波管実験装置を用いて、クローズドサイクルMHD発電に関する実験的研究を活発に行い、高い発電性能を実証するとともに、MHD発電機の高性能化に関する極めて有用な指針を明示している。しかしながら、両実験装置においては発電時間が短いことから、クローズドサイクルMHD発電プラント実現へ向けての次なる段階として、長時間におよぶ発電実証試験が望まれていた。

このような背景の下、現在東京工業大学において、クローズドサイクルMHD発電の長時間運転の実績を積むことを目的とし、図10に示すようなクローズドサイクルMHD発電実験装置が設置されている⁽⁸⁾。後で詳しく述べるように、本実験装置はガスタービンや蒸気タービンを持たないクローズドサイクルMHD単独サイクルであり、実験の主な目的は、

- 1) 熱回収を伴う高温希ガス循環の実証試験、
- 2) ディスク形発電機を用いた長時間発電実験、
- 3) 各構成要素の耐久試験

であり、今後クローズドサイクルMHD発電の実用化

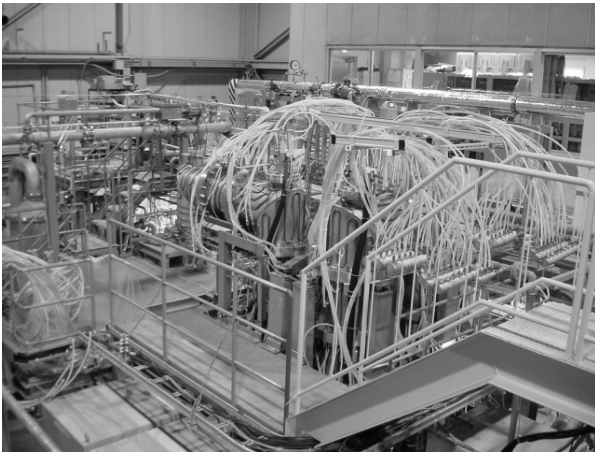


Fig.10 Closed loop experimental facility for CCMHD power generation

研究を進める上で、極めて重要な役割を果たすことが期待されている。

4-2 装置の概要と各構成要素

クローズドループ MHD 発電実験装置の概要ならびに各構成要素を説明する。図 11 に本実験装置の平面図および立面図をそれぞれ示す。本装置は主に、(1)電気ヒータによる高温ガス加熱器(最大投入電力 300kW)、(2)超電導磁石(中心磁束密度 4.0T)を用いたホール型ディスク形状 MHD 発電機(その断面図を図 12 に示す)、(3)再生熱交換器、(4)希ガスクーラ、(5)不純物除去装置、および(6)圧縮機の 6 つの要素から構成されている。圧縮機によって加圧されたアルゴンガスは、再生熱交換器において、発電を終えた比較的高温のガスと熱交換することにより予熱される。その後、高温ガス加熱器において 1900K 程度まで加熱され、ホットダクトにおいてシード物質であるセシウムが注入された後に発電機に導かれる。発電を終えた比較的高温のアルゴンガスはディフューザ部および冷却ダクトにより 1000K 以下に冷却され、再生熱交換器において熱回収に利用される。再生熱交換器を出たアルゴンガスは、希ガスクーラにおいて室温程度まで冷却され、サイクロンおよびモレキュラーシーブトラップにおいてダストや水分などの不純物が除去された後、圧縮機に戻り、再び加圧される。

表 1 に諸量の Fuji-1 装置との比較を示す。本クローズドループ MHD 発電実験装置については、あくまでも設計値、予測値である。本装置は、Fuji-1 装置と比較して、熱入力が小さく、大

きな発電出力は期待できないが、長時間発電の実証を行うことにその主眼がある。ただし、発電時間はシード注入時間で決まり、第 1 段階として 10 分程度の発電実験を目標とする。

(1) 高温ガス加熱器 3 台の電気ヒータ方式の高温ガス加熱器(以下、加熱器と呼ぶ)によりアルゴンガスは段階的に加熱される。それぞれの加熱器は同形状・同構造であり、独立した電力供給系を有している。加熱器には合計で最大 300kW の電力を供給することが可能である。

それぞれの加熱器はヒータエレメント、断熱壁および水冷のステンレス容器から成る。ヒータエレメントは、18 枚のシート状のタングステン板(長さ 1500mm、幅 46mm、厚さ 0.5mm)が放射状に配列されたものである。断熱壁は、3 層のセラミックス(第 1, 2, 3 層)およびセラミックファイバーボード(第 4 層)からなる多層壁構造となっている。最内層の断熱材は、他の断熱材と比較して熱伝導率が大いため断熱性には劣るが、耐熱性に優れており、その融点は 2300K 程度である。最

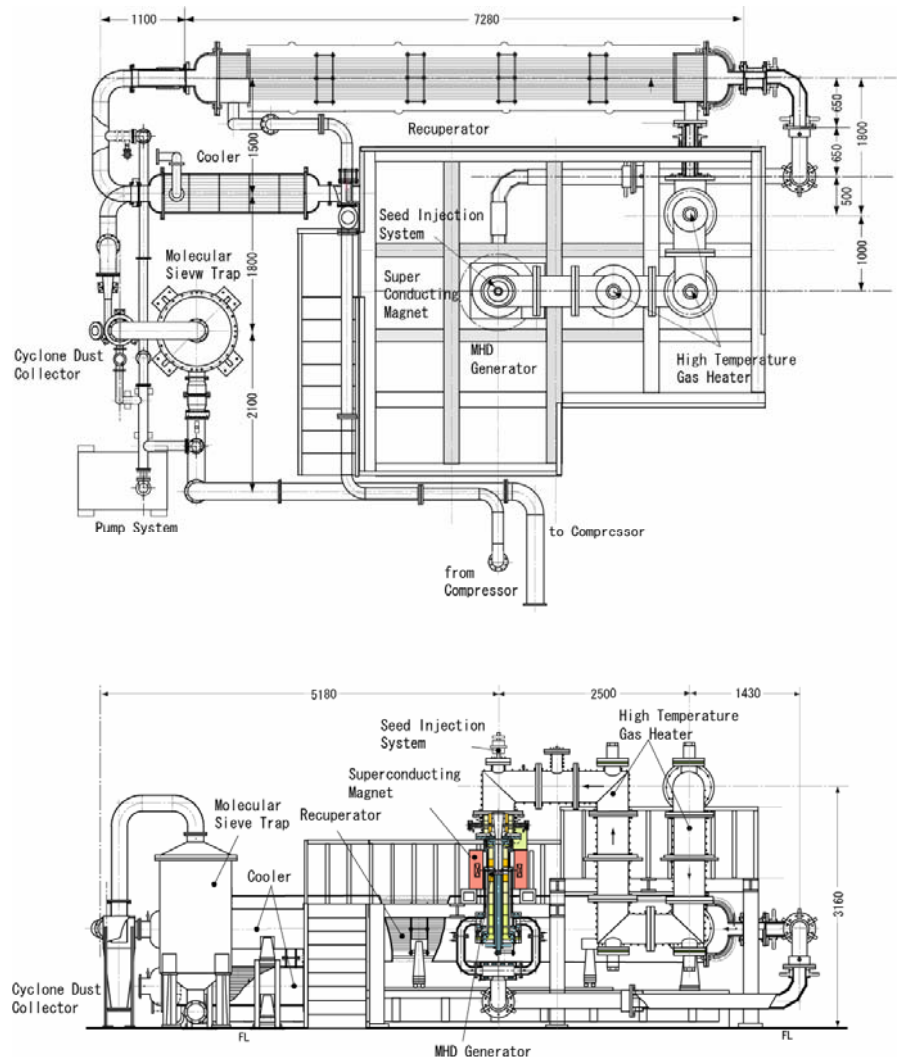


Fig.11 Layout of closed loop facility for CCMHD power generation.

内層以外の断熱材に関しては、いずれも耐熱性には劣るものの、より外側を構成する断熱材ほど熱伝導率の小さなもの、すなわち断熱性に優れたものが使用されている。

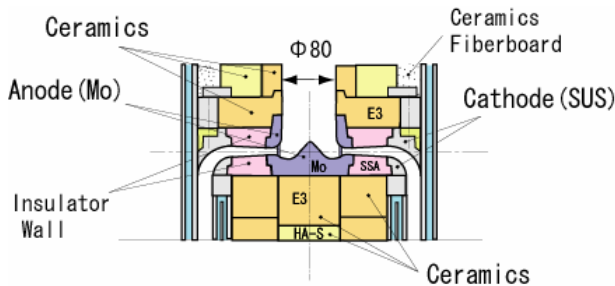


Fig.12 Cross-sectional view of disk shaped MHD generator. (axisymmetric structure)

(2) ホール型ディスク形状 MHD 発電機 (図 12) 加熱器で定格温度まで加熱されたアルゴンガスは、ホットダクトを通り、ディスク形状 MHD 発電機へと流入する。MHD 発電機部は、発電機入口導入ダクト、MHD チャネル部、円筒形状の下流ダクトおよび 6 本の水冷ダクトからなる。発電機入口導入ダクトは、3 層のセラミックス製断熱壁と水冷のステンレス壁から構成されている。MHD チャネルの上下のディスクには、モリブデン製のアノード電極とステンレス製のカソード電極がそれぞれ設けられており、これらの電極間には電気絶縁材としてセラミックスが用いられている。

(3) 再生熱交換器 再生熱交換器は、ステンレス製の二重管型熱交換器である。MHD 発電機部および冷却ダクトを通過した比較的高温の作動気体は、再生熱交換器の内管を通り、一方、圧縮機からの低温気体は、内管と外管との間を高温気体とは逆向きに流れることで熱交換(熱回収)を行う。

(4) 希ガスクーラ 再生熱交換器において熱交換を終えたアルゴンガスは、同形状を持つ 2 台の希ガスクーラにより室温程度まで冷却される。クーラはステンレス製のバッフル付シェル&チューブ型の熱交換器であり、クーラの管(チューブ)内をアルゴンガスが流れ、伝熱管群の周りのシェル内を冷却水が流れことで熱交換が行われる。

(5) 不純物除去装置 クーラで冷却されたアルゴンガスは、サイクロン集じん器(以下サイクロンと呼ぶ)およびモレキュラーシーブトラップ(以下 MS トラップと呼ぶ)により構成される不純物除去装置を通り、圧縮機に戻る。数 10 μm の粒径を持つダストはサイクロンにより取り除かれ、アルゴンガス中の水分は MS トラップによって取り除かれる。MS トラップの内部には球径 2.4~4.7mm のゼオライト製の吸着剤が詰められている。

(6) 圧縮機 本装置における圧縮機は、オイル注入式のスクルー型であり、圧縮機は、設計風量 1000Nm³/hour のもとで圧縮比 8 までの運転が可能である。また、スライド弁の開度を調節することにより、

定格風量の 15%から 100%までの範囲で吐出風量を制御することが可能である。4 段の油分離部において圧縮時に混入されたオイルは分離され、圧縮機出口におけるその混入量を 1wt. ppm 以下に抑えることができる。

Table 1. Specification of closed loop experimental facility (CLEF) and typical experimental results with Fuji-1 Blow-down facility.

	CLEF (Designed)	Fuji-1 (Exp.)
Stagnation Pressure [MPa]	0.4	0.43
Stagnation Temperature [K]	1850-1900	1980
Magnetic Flux Density [T]	4.0	4.6
Thermal Input [MW]	0.5	3.2
Seed Fraction [$\times 10^{-4}$]	1-5	2.9
Load Resistance [Ω]	0-5	0.48
Pressure Ratio	<8 (Comp.)	- 10 (Tank)
Max. Enthalpy Extraction [%]	5-10	15.6
Max. Power Output [kW]	25-50	506
Duration of Power Generation	>10 min., 1hour, 1day, ?	- 1 min.

4-3 運転特性シミュレーション

実験において本装置を安全に運転するためには、その定常運転特性および過渡特性を明らかにすることが重要である。また、本装置では多くの制御パラメーターが存在するため、約 1900K の定格ガス温度を得るためには、システム全体を対象として数値計算を行い、それら制御変数の値をあらかじめ予測することが必要である。

ここでは、(1)クローズドループ MHD 発電実験装置の非発電時および発電時の定常運転特性を明らかにすること、(2)本実験装置の始動・停止時の運転手順を検討することを目的として行われた非定常準一次元計算の結果⁽¹⁴⁾について述べる。なお、使用した基礎方程式、圧力損失および熱交換量のモデル、計算手法等については、参考文献⁽¹⁴⁾を参照されたい。さらに、(3)発電機内流体の振る舞いと発電性能を把握するために行われている 2 次元数値シミュレーションの一例⁽¹⁵⁾を示す。

(1) 定常運転特性 ここでは、クローズドループ

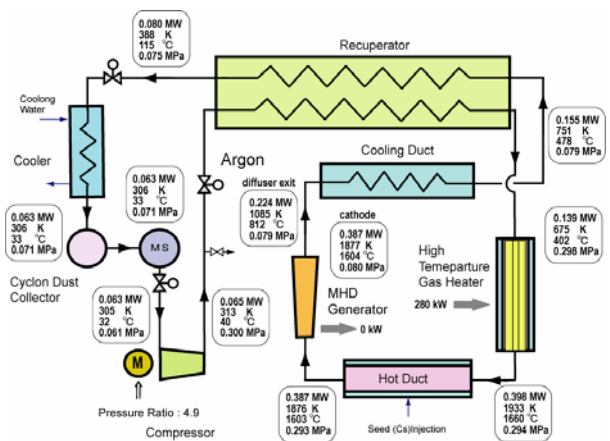


Fig.13 Energy and pressure balance (No power generation)⁽¹⁴⁾

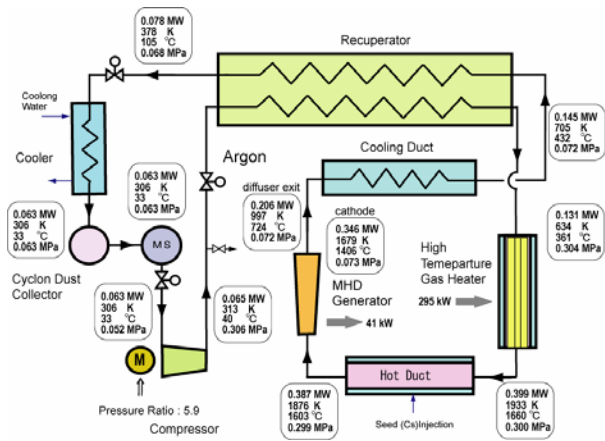


Fig.14 Energy and pressure balance (Power generation)⁽¹⁴⁾

MHD 発電実験装置の定格運転時(非発電時および発電時)における作動条件および動作特性を明らかにする。

・非発電時の定常運転特性 図 13 は、定格運転時(非発電時)における本実験装置のエネルギーおよび圧力バランスを示したものである。アルゴンガスは、ループ入口において圧縮機により 0.3MPa まで加圧され、再生熱交換器へと導かれる。再生熱交換器により 675K まで予熱された後、さらに高温ガス加熱器により 1933K まで加熱される。なお、このときの加熱器への投入電力は 280kW である。本条件の下では、発電機入口条件は熱入力 0.387MW、よどみ点温度 1876K、よどみ点圧力 0.293MPa となる。発電機では、主に衝撃波により全圧損失が生じ、その値は $\Delta p=0.214\text{MPa}$ となっている。発電機を出た作動気体は、冷却ダクトにより 751K に冷却され、再生熱交換器において熱回収される。再生熱交換器での熱交換量は 0.075MW で、そのときの温度効率 は 82.9% である。その後、クーラにより 388K から 306K に冷却され、サイクロンおよび MS トラップを通り、圧縮機へと戻るが、MS トラップにおける圧力損失は大きく、その値は 0.01MPa である。なお、このとき圧縮機吸入側の圧力は 0.061MPa であり、圧縮比は 4.9 となる。

・発電時の定常運転特性 図 14 は MHD 発電実験時における本装置のエネルギーおよび圧力バランスを示したものである。ここでは、一様な電気変換効率 80% の下で、適当な相互作用係数(慣性力に対するローレンツ力の割合)を与えることで MHD 発電状態を模擬し、エンタルピー抽出率は 10.6%(発電出力 41kW)となっている。発電機においてエンタルピーを抽出するため、非発電時に比べて発電機出口における作動気体の温度は 1085K から 997K に低下し、再生熱交換器における熱交換量は 75kW から 67kW に低下する。したがって、高温ガス加熱器入口における作動気体の温度が低下するため、所定の温度を得るためには加熱器投入電力を増加させる必要がある。ここでは発電時および非発電時における運転特性の比較を行うため、発電機入口における熱入力 が等しくなるよう加熱器投入電力を調整した。その結果、加熱器投入電力は 295kW となり、非

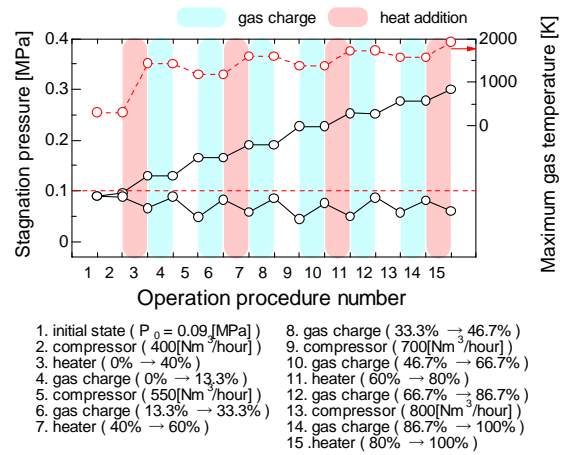


Fig.15 Startup operation⁽¹⁴⁾

発電時の投入電力よりも 15kW 増加している。41kW の発電出力に対し、加熱器投入電力の増加量が 15kW に抑えられるのは、主に発電による発電チャネル出口温度の低下に伴い、ディフューザおよび冷却ダクトにおける冷却量が減少することによる。

(2) 始動・停止操作 ここでは、定格運転状態(非発電時)を実現するための操作を「始動操作」と呼ぶこととし、本節では、その手順を提案する。本実験装置には、(1)加熱器セラミックス壁の温度制約(約 2150K 以下)、(2)低压側構成要素の耐圧(0.1MPa 以下)、(3)圧縮機の運転制約などの制約条件があり、それらの制約を常に満足しながら始動操作を行わなければならない。ここで提案する始動操作は 15 の操作からなっており、図 15 は各操作における圧縮機の吐出圧力、吸入圧力および高温ガス加熱器での最高ガス温度を示したものである。図中に示した値は、各操作で得られた定常状態での値であることに注意されたい。はじめに、ループ内に温度 300K、初期圧力 0.09MPa のアルゴンガスを充填し(操作 1)、その後圧縮機を始動する(操作 2)。圧縮機の吐出風量は、吐出圧力が 0.09MPa で f 値(吐出流速のその設計値に対する比)が ~2 となるように、400Nm³/hour に設定した。このとき、吐出圧力が低く、かつガスの温度が低い流れはチョークせず、ループ内全域で亜音速となる。そのため圧力損失は小さく、圧縮比は非常に小さい。次に、吐出風量を増加させるために吐出圧力を高くする必要があり、加熱を行う(操作 3)。このときの加熱器投入電力は、定格運転時における加熱器投入電力の 40% とした。その結果、高温ガス加熱器でのガスの最高温度は 1443K となり、吐出圧力は 0.13MPa に上昇する。この条件で、流れはチョークするため、MHD 発電機内の衝撃波による圧力損失により、低压側の圧力は低下し、圧縮比は大きくなる。すなわち吸入圧力の低下によりガスの充填が可能となり、操作 4 では、必要な全充填量の 13.3% のガスをループ内に供給する。ガス充填後の質量流量は操作 3 のときと等しいので、最高温度は変化しない。また、ガス充填後も流れは与えられた質量流量およびそれにより決定されるよどみ点温度の下でチョークしているため、吐出圧力も変化しない。しかしガス充填によりループ

内の全ガス量は増加するため、吸入圧力は上昇し、その結果、圧縮比および圧縮機のロード率（吸入流速のその設計値に対する比）は小さくなる。ロード率の低下により吐出風量の増加が可能となり、操作 5 では、設定吐出風量を 550Nm³/hour に増加して圧縮機を運転する。このとき、加熱器投入電力は操作 3 のままであるので、最高ガス温度は 1443K から 1182K に減少するが、流れはチョークしているため、吐出圧力は上昇する。一方、ループ内のガスの量は操作 4 のままであるので、吸入圧力は低下し、圧縮比およびロード率は大きくなる。以降、数回にわたりガス充填および加熱器投入電力の増加を行い、段階的に圧縮機吐出風量を増加させることにより、図 15 に示したように、定格運転状態を得ることができるとわかる。

本装置の停止操作では、上記で示した始動操作とは逆の手順に従って運転することにより、常に本装置の運転制約条件を満足しつつ装置を停止することができる。また、やむを得ず実験を緊急停止する(高温ガス加熱器への電力供給を停止)際には、まず所定の圧縮機吐出風量の下で圧縮機吸入側からアルゴンガスを排出し、その後、圧縮機吐出風量を下げることにより、装置を停止することが可能である。ただし、このときのセラミックスの最大温度降下率は 2850K/hour であり、推奨される温度変化率である 25K/hour よりかなり高くなる。

(3)発電流路内電磁流体の挙動

図 12 に示したように、発電機はディスク形状であるが、発電機への入口ダクト、発電機からの出口ダクトを含めた形状はやや複雑で、流体は円筒状の入口ダクトを下向きに流れ、その後方向を 90 度曲げられ発電機内を半径方向に（外向きに）流れる。発電機を出た後再び 90 度曲げられ、二重管の間を下向きに流れる。従って、発電流路内電磁流体の挙動の把握には、MHD 相互作用が生じる発電時だけでなく、その初期状態となる非発電時における流体挙動にも注意が必要となる。

図 16 は、r-z 2 次元での数値計算の一例で、発電時の電磁流体のマッハ数分布を示したものである。当然のことながら、マッハ数分布は運転条件（特に下流背圧

条件)、発電状態に強く依存するが、同図に示すように、条件によっては、発電機の下流流域で境界層の剥離等が生じることも明らかにされており、発電性能も含めて今後更なる詳細な検討が必要となっている。さらにこの r-z 2 次元数値シミュレーションに、流体だけでなくまわりの構造物の熱解析も取り入れ温度分布を把握することで、耐熱性等の観点からの構成要素の最適化を図ることも課題の 1 つである。

4-4 発電実験に向けて

現在、発電実験に向けて、各構成要素の試験、調整運転を含め、作動気体（アルゴン）の昇温試験を進めている。定格温度(1850~1900K)に対し、昇温ステップは大きく分けて以下の 4 ステップである。

- I 室温(~300K)でのガス循環試験
- II 低温(~700K)でのガス循環試験
- III 中温(~1300K)でのガス循環試験
- IV 高温(定格)(1850~1900K)でのガス循環試験

現時点(2005年)で、ステップ「III 中温(~1300K)でのガス循環試験」まで完了しているが、ステップ IV に向けて克服すべき課題も少なくない。

まずステップ I は、高温ガス加熱器への入力を 0 とするので、主に圧縮機の運転操作とともに、超音速連続風洞としての動作確認が行われ、系内の圧力バランス等から、本装置が「超音速連続風洞」として機能していることを確認した。続くステップ II では、高温ガス加熱器への入力を行い基礎的なガス加熱特性が明らかにされた。図 17 は実験装置ループ内の全圧、全温の流れ方向（圧縮機出口から圧縮機入口まで）の分布を示したものである。○印は実験データを、実線は準一次元数値シミュレーションの結果である。同図(a)に示されているように、圧縮機で得られた圧力比は、発電機上流及び下流でのダクトで大きく損失することなく、発電流路で消費されていることがわかる。この段階では、発電はしていないので、その損失は衝撃波によるものであるが、発電時にはそれがローレンツ力によるものに替わることになる。また同図(b)で示されているように、ガス温度の分布はほぼ実験結果と計算結果が一致しているように見えるが、実際には、より精度良く評価するためには、冷却水の流量、温度のきめ細かな計測・制御が必要であることが示唆されている。

ステップ III では、さらなる高温化に向けた高温ガス加熱器の操作方法を確認するとともに、再生熱交換器の性能評価を行い、ステップ IV での操作を念頭に置きながらシステム全体の動作確認が行われた。その際、上述の始動・停止操作の妥当性を確認するとともに、ループ内の熱流体特性の把握、不純物（水分、酸素等）の除去に焦点が絞られた。特に、発電に向けて、先に述べた Fuji-1 装置での教訓を生かす意味でも、水分の除去は必要不可欠であり、最終ステップ「IV 高温(定格)(1850~1900K)でのガス循環試験」に向けての最大関心事項の 1 つである。水分は、希ガス加熱器、発電流路でのセラミックス内に吸着しており、その除去は、加熱によるセラミックスからの放出とゼオライトによる吸着により行うことになるが、地道な作業が必要となる。今後、最終ステップ「IV 高温(定格)(1850~1900K)でのガス循環試験」に向けて、温度管理に細心

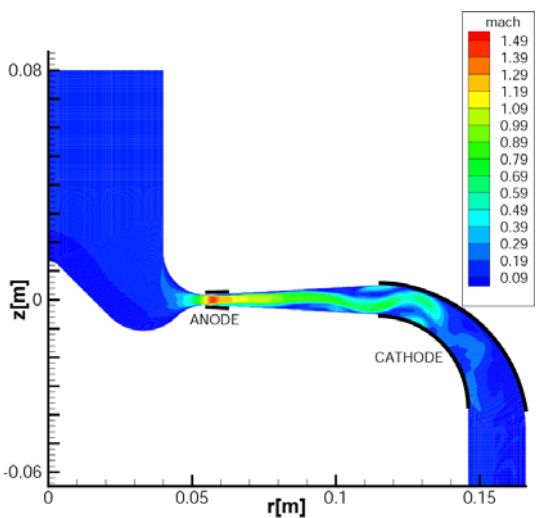


Fig. 16 Typical Mach number distribution of MHD Flow⁽¹⁵⁾

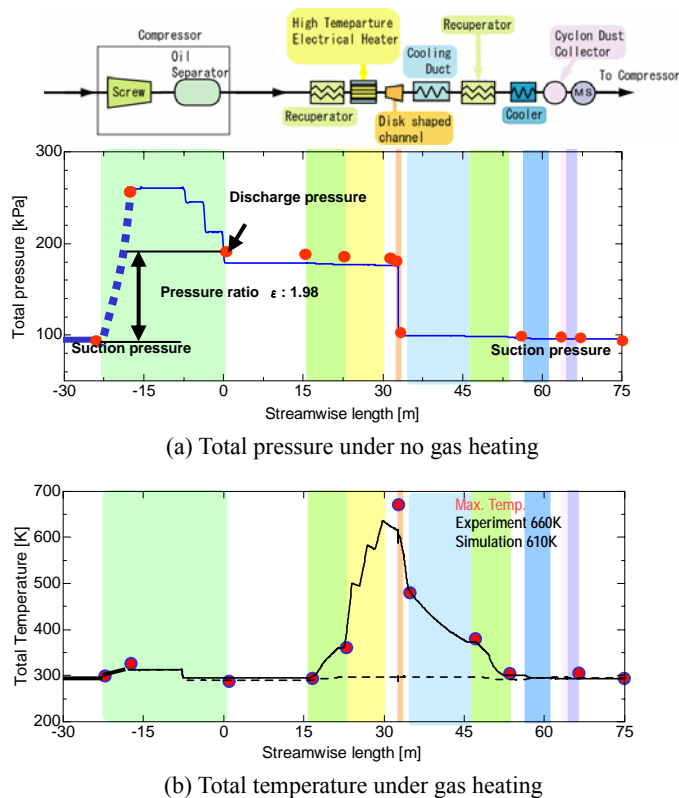


Fig.17 Typical distributions of gas properties along the loop. (solid circle: experiment, solid line: simulation)

の注意を払いながら進めることになるが、定格温度の高温ガス循環が達成できれば、連続 MHD 発電の実証はほぼ確実なものとなる。

4. おわりに

本稿では、東京工業大学におけるクローズドサイクル MHD 発電に関する研究に関連して、まず、すでに実験が終了しているブローダウン発電実験装置 Fuji-1 を用いた実験結果、および世界最高の等エントロピー効率を達成した衝撃波管装置での実験結果を簡単に述べた後、現在、連続発電実証実験に向けて準備が進められている「クローズドループMHD発電実験装置」について紹介した。

一方で、紙面の関係で触れなかったが、海外では、MHD発電についての国家プロジェクトは終了しているものの、米国、ロシアを中心に宇宙用MHD発電およびMHD技術の航空・宇宙応用として、太陽熱、原子力を利用した宇宙用MHD発電、MHD効果を利用した極超音速流れ場の制御、MHDバイパススクラムジェットエンジンの可能性など航空・宇宙へのMHD発電技術の応用が精力的に進められている。

本稿で述べた内容は、現在、東京工業大学山岬裕之教授を中心として、東京工業大学 MHD 研究グループが精力的に行っている内容を、過去の経緯を交えながらまとめたものである。読者・ご関係の方々からの更なるご指導・ご鞭撻をお願い申し上げる次第である。

参考文献

- (1) R.J.Rosa, Magneto hydrodynamic Energy Conversion, Hemisphere Publishing Corp., 1987
- (2) 奥野喜裕, 吉川邦夫, 岡村哲至, 山岬裕之, 梶島成治, 塩田 進, 高効率 CCMHD 単独発電システムの提案, 電学論 B, 118-12 (1998), 1457-1462.
- (3) 乾 義尚, 石田太一, 松前友広, 加圧燃料空気作動固体酸化物形燃料電池を用いた炭酸ガス回収式高効率複合発電システム, 電学論 B, 123-9 (2003), 1097-1104.
- (4) S.Shioda, et al., The Fuji-1 Facility for Closed Cycle MHD Power Generation Experiment, Proceedings of 20th Symposium on Engineering Aspects of MHD, (1982) 6.5.1-6.5.6.
- (5) Y.Okuno, T.Okamura, T.Suekane, H.Yamasaki, S.Kabashima, and S.Shioda, Magneto hydrodynamic Power Generation Experiment with Fuji-1 Blow-Down Facility, Journal of Propulsion and Power, 19-5 (2003), 894-900.
- (6) 村上朝之, 奥野喜裕, 山岬裕之, ディスク形 CCMHD 発電機の高性能化実験, 電学論 B, 123-11 (2003), 1394-1399.
- (7) T.Fujino, T.Murakami, Y.Okuno, and H.Yamasaki, Experimental studies on Performance of a Non-equilibrium Disk MHD Generator with Radio-frequency Pre-ionization, IEEE Trans. Plasma Science, 31-1 (2003), 166-173.
- (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, 34th Plasmadynamics and Laser Conference, AIAA-2003-4280 (2003).
- (9) H.Yamasaki and S.Shioda, MHD Power Generation with Fully Ionized Seed, Journal of Energy, 1-5 (1977), 301-305.
- (10) S.Shioda, H.Yamasaki, et al., Power Generation Experiments and Prospects of Closed Cycle MHD with Fully Ionized Seed, Proceedings of 7th International Conference on MHD Power Generation, 2 (1980), 685-695.
- (11) H.Yamasaki, et al., Achievement of Highest Performance in Disk MHD Generator with Ar/Cs, Proceedings of the International Conference on MHD Power Generation and High Temperature Technologies, Vol.1 (1999), 233-241.
- (12) 鳥井俊介, 堤 正志, 奥野喜裕, 山岬裕之, スワール導入によるアルゴンを用いたディスク形 MHD 発電機の性能改善, 電学論 B, 121-9 (2001), 1228-1235.
- (13) 原田信弘, 岡村哲至, 木塚宣明, 山岬裕之, 塩田進, 入口スワールを有するディスク型 CCMHD 発電機の発電特性—30%を超えるエンタルピー抽出率の実証, 電学論 B, 114-6 (2004), 626-632.
- (14) 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, 電学論 B, 124-5 (2004), 785-790.
- (15) A.Liberati, T.Murakami, Y.Okuno, H.Yamasaki, Numerical Simulation of MHD Flow Behavior and Performance in the Disk MHD Generator of Closed Loop Experimental Facility, 電研資, FTE-05-18 (2005).