

プラズマ電磁流体を利用した高効率エネルギー変換技術

奥野喜裕 Yoshihiro OKUNO

東京工業大学 大学院総合理工学研究科

Key Words : Magnetohydrodynamics, Energy Conversion, Electrical Power Generation, Supersonic Plasma Flow

1. はじめに

放電プラズマ中に流す電流とその電流が作る磁界、もしくは外部から印加される磁界との相互作用（ローレンツ力）を利用する宇宙機器の一つにMPDスラスタがある。ここでは、電気エネルギーをプラズマ流体の熱・運動エネルギーに変換して推力を得る。一方その逆過程となる、ここで紹介するMHD（Magnetohydrodynamics、電磁流体力学）発電¹⁻³⁾では、導電性の気体（プラズマ）を磁界に垂直に流す（マッハ数2程度）ことで、ファラデーの電磁誘導の法則に従って起電力が発生し、流れる電流と外部磁界に起因するローレンツ力に逆らって作動気体が仕事をすることで、作動気体のもつ熱・運動エネルギーが電気エネルギーに変換される。普通の発電機と原理は同じであるが、金属の導体を動かす（回転させる）代わりに、導電性気体を流す。

既存のガス（蒸気）タービンを利用した発電がジェットエンジンに対応するとすれば、MHD発電はロケットエンジンに相当し、可動部がないことからガスタービンよりも高温の気体が利用可能で、既存の最新鋭発電設備を上回る高効率発電プラントの構築が可能と期待されている。燃焼ガスを直接作動気体とするMHD発電では石炭の高度有効利用が可能で⁴⁾、また希ガスを作動気体とするMHD発電では非化石資源を含む多様な熱源に対応できる⁵⁾ことから、それぞれの特徴を踏まえた展開が着実に進んでいる。また、発電出力あたりのシステム重量が小さいとされ、宇宙での発電システムの1つの候補として検討がなされている⁶⁾。その一方で、未だ実用化に至っていない背景には、克服すべき課題も少なくないのも事実である。

本稿では、まずMHD発電システムとその研究開発の経緯を簡単に紹介した後、高効率エネルギー変換に求められるプラズマ電磁流体の形相を明確にするとともに、筆者の所属する東京工業大学において行われてきた希ガスを作動気体とするMHD発電機の高性能化に関するいくつかの代表的なアプローチを概説する。最後に、最近の国内外の研究動向を一部であるが紹介する。なお、MHD発電の基本原則や発電システムの基本構成・特徴については、多くの著書¹⁻³⁾や解説⁷⁾に詳しいので、重複を避け、ここではよ

り具体的な研究経緯や、やや萌芽的ではあるものの最近注目されている話題も紹介することとしたい。

2. MHD 発電システムと研究開発の経緯

MHD発電は、システム構成により、燃焼ガスを作動気体とする「オープンサイクルMHD発電」と希ガス（アルゴンもしくはヘリウム）を作動気体とする「クローズドサイクルMHD発電」とに大別される。前者は、作動気体である燃焼ガスが発電機を通過後、排熱が回収利用され適切に処理された後に大気に放出されることから「オープンサイクル」と呼ばれる。一方後者では、希ガスである作動気体が発電機や圧縮機、再生熱交換器等を循環して再利用されることから、「クローズドサイクル」と呼ばれる。

燃焼ガスを作動気体とするオープンサイクルMHD発電は、過去に米国、ロシアを中心に各国で巨額な投資により研究開発が進められた。この方式では、発電機内のプラズマが電子温度と気体（重粒子）温度がほぼ等しい熱平衡状態にあり、プラズマの電気伝導度を増加させるために、気体温度も増加させる必要があり（燃焼ガスの場合、シード剤を注入しても2,700 K程度が必要）、構成材料の耐久性に問題が生じやすいこと、また一方で温度が低いと電気伝導度も低く、所定の発電出力を得るために発電機が大型化し、建設コスト（特に超電導電磁石）が巨大化するとされ、現在の研究開発は非常用電源への応用などの特殊用途に向けられている。しかしながら、近年、CO₂の完全液化回収および廃熱の再生利用を特徴とする廃熱再生循環型石炭燃焼発電システムが提案され⁸⁾、廃熱の高効率回収より燃焼温度が3,000 K程度となることが想定されることから、高温・高効率のMHD発電機の採用が最適とされ、廃熱の回収効率が60%程度であれば酸素製造電力、CO₂液化電力を考慮してもシステムの総合効率は60%（HHV）を超えると試算されている。現時点で実証試験がなされているわけではないが、クリーンコールテクノロジーの切り札の1つとしてその実現が期待される。

一方、希ガスを作動気体とする「クローズドサイクルMHD発電」は、これまで日本が主導的立場で研究開発を進めており、多くの実績を積んできている。第1図に希ガスを作動気体とするクローズドサイクルMHD発電システムの一例を示す⁵⁾。このシステムでは、希ガス加熱のための熱交換器が必要となるが、非化石資源をも含む多様なエネルギー源に適応可能であることが大きな特長である。ま

た、後に詳細を述べるように、発電機内のプラズマは、燃焼ガスの場合と異なり、電子温度が気体（重粒子）温度より高い非平衡状態にあり、プラズマの電気伝導度が燃焼ガスの場合に比べ1~2桁高いことから、発電機を（超伝導電磁石も）小型化できる。

東京工業大学でのブローダウン発電実験装置 Fuji-1 を用いた実験では、エンタルピー抽出率が 16.0%（絶対温度基準）とブローダウン装置としての世界最高値を記録している⁹⁾。ここでエンタルピー抽出率とは発電機への熱入力に対する発電出力の割合である（システムの総合効率ではない）。また、同大学の衝撃波管駆動 MHD 発電実験装置では、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 31% の同時達成に成功している¹⁰⁾。

数値解析によれば、このクローズドサイクル MHD 発電方式でも、効率のよい熱回収を行うことで、MHD 発電単独のシステム（第 1 図）において 60% 程度以上の総合効率が期待できることが示されている。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% 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、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¹¹⁾。

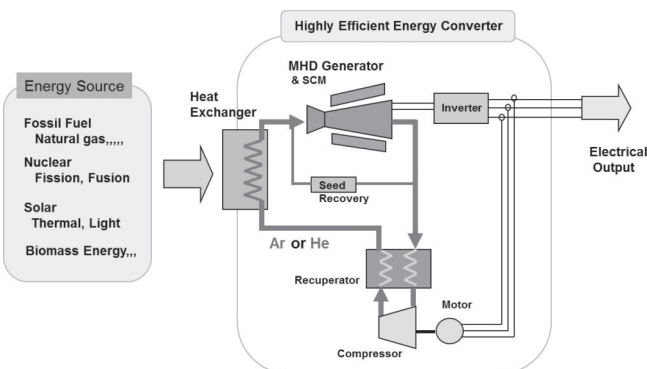
このように、MHD 発電システムが、既存のガス・蒸気タービン複合発電システムを超えて、より高効率になり得ることは、MHD 発電機に可動部がなく、より高温の作動気体が利用可能であることによるもので、熱力学の教えと何ら矛盾しない。言うまでもなく、熱機関そのものであるため、スケールメリットがあり、大型化によりその効率は向上する。逆に言えば、研究室レベルの小型実験装置での熱損失、圧力損失の相対的増加、効率の低下は不可避であり、また行える実験そのものの条件が限られているので、基礎的かつ学術的でありながら確実な実証研究と実用化に向けてのロードマップの提示が我々大学研究室の役割と考えている。

3. MHD 発電機の高性能化を目指して

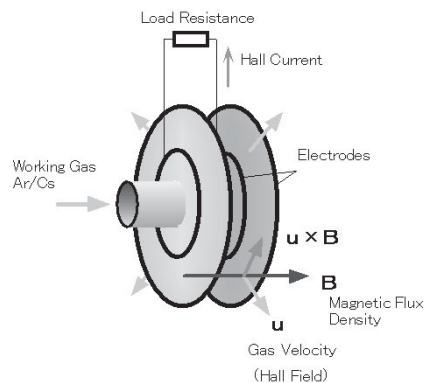
高効率 MHD 発電システムの実現化には、上記のような、プラント全体としての指針と実績の積み重ねが不可欠であるが、言うまでもなく、その要となる MHD 発電機の高性能化が最も重要となる。この章では、まず高効率エネルギー変換のために、発電機内でどのようなプラズマ電磁流体を必要とするのか、特に希ガスを作動気体とするクローズドサイクル MHD 発電方式に焦点を当てて明らかにし、それを実現するために行ってきたアプローチを述べる。

MHD 発電機は、発電出力の取り出し方および作動気体を流す流路形状により、主にファラデー型直線形状発電機、ホール型ディスク形状発電機および対角型発電機に大別される。クローズドサイクル MHD 発電では、ディスク形発電機が採用され、そこでは第 2 図に示すように、2 枚の円盤状の流路内を作動気体が中心から外側へ放射状に流れ、円周方向にファラデー電流が誘起される。その際ホール効果により半径方向（流れ方向）にも起電力（ホール起電力）が発生し、発電流路上流側（小半径）と下流側（大半径）に設けられたリング状の電極対から出力電流（ホール電流）を取り出す。ディスク形発電機の性能は、ホール効果（ホール係数）に大きく依存するが、非平衡プラズマではホール係数が大きくなり得るので、クローズドサイクル MHD 発電では、一般にディスク形発電機が用いられる。

代表的な運転条件は、アルゴンを母ガスとし、プラズマの電気伝導性を高めるためにシード剤としてセシウムを微量混入したアルゴン/セシウムを作動気体とする場合、発電機入り口での作動気体の全圧、全温度は、~0.6 MPa、~2,200 K、印加磁束密度~6 T、発電機入り口マッハ数~2.0、出口マッハ数~1.0（ローレンツ力により減速）であり、プラズマの電気伝導度は数 10 S/m、ホール係数<10、電子温度~5,000 K である。すなわち、超音速流れの中に電気伝導性の高い非平衡プラズマが生成され、磁界印加による、起電力の発生、ローレンツ力やジュール加熱による流体との相互作用など極めて複雑な現象が入り交じった状況になる。さらに、条件により、プラズマは不安定



第 1 図 クローズドサイクル MHD 発電システム



第 2 図 ディスク形 MHD 発電機

になり、不均一な構造を自己組織化し、極めて非線形な系を対象とすることになる。ちなみに、発電システム全体としては、概して超音速連続風洞のようなものとなるので、発電機上流に設置される超音速ノズルや下流のディフューザの性能は（特に後者）、システム全体の効率を検討する上で重要な一要因となる。

3.1 プラズマ電磁流体に求められること クローズドサイクル MHD 発電機内で生成・維持される非平衡プラズマでは、電子温度 T_e が気体温度、厳密には重粒子（希ガス中性粒子、希ガスイオン、シード中性粒子、シードイオン）温度よりも高く、重粒子の温度が T_g で代表されるような場合は、プラズマ流体をこれら 2 つの温度で代表させる 2 温度モデルが採用される。代表的な条件では、磁気レイノルズ数は 1 に比べて小さく誘導磁界の影響が無視できる（高効率な発電機ほどその傾向は強い）。また極めて高周波の現象を取り扱わず変位電流が無視できることなどから、局所的な電界ベクトル \mathbf{E} や電流密度ベクトル \mathbf{j} は、一般化されたオームの式

$$\mathbf{j} = \sigma(\mathbf{u} \times \mathbf{B} + \mathbf{E}) - \frac{\beta}{B}(\mathbf{j} \times \mathbf{B})$$

で関連づけられる。ここで、 \mathbf{u} は流速ベクトル、 \mathbf{B} は磁束密度ベクトル、 σ は電気伝導度、 β はホール係数（厳密には電子のホール係数）である。上式に電流密度ベクトルを内積して整理すると

$$-\mathbf{u} \cdot (\mathbf{j} \times \mathbf{B}) = -\mathbf{j} \cdot \mathbf{E} + \frac{j^2}{\sigma}$$

となり、作動気体がローレンツ力に抗してなした仕事 $-\mathbf{u} \cdot (\mathbf{j} \times \mathbf{B})$ が電気出力 $-\mathbf{j} \cdot \mathbf{E}$ とジュール加熱 j^2/σ に費やされることがわかる。作動気体がなした仕事に対する電気出力の割合

$$\eta_e = |-\mathbf{j} \cdot \mathbf{E}| / |-\mathbf{u} \cdot (\mathbf{j} \times \mathbf{B})|$$

は、電気変換効率と呼ばれ、MHD 発電機の性能を決める重要な指標の 1 つである。ジュール加熱はプラズマの生成・維持に利用されるのですぐさま損失とはならないが、熱力学的可逆性からの逸脱すなわちエントロピー生成を招き、発電機の熱力学的効率（等エントロピー効率）の減少をもたらす。すなわち、高性能発電機を実現するためには高い電気変換効率が要求される。

ディスク形状発電機では、 $K_h = -E_r / (\beta u_r B)$ で定義される負荷率を用いれば（流速などのベクトルの半径方向成分を添え字 r で示す）、単位体積あたりの電気出力（出力密度） P 、および電気変換効率 η_e は、

$$P = -j_r E_r = \frac{\beta^2}{1 + \beta^2 K_h} (1 - K_h) \sigma u_r^2 B^2,$$

$$\eta_e = \frac{\beta^2}{1 + \beta^2 K_h} K_h (1 - K_h)$$

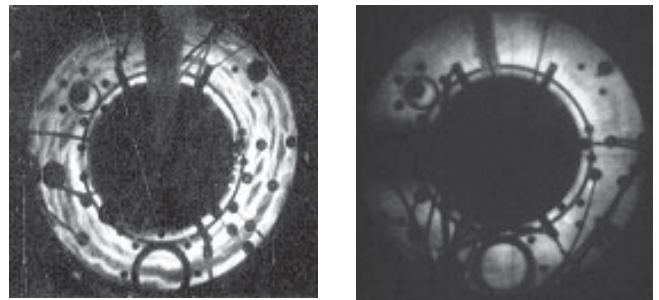
となり、高い出力密度、高い電気変換効率を得るためには、高い電気伝導度、高いホール係数をもつ非平衡プラズマを生成する必要があることを示している。

しかしながら、MHD 発電機内の非平衡プラズマでは、「電離不安定」と呼ばれるプラズマの不安定状態が存在し、

結果としてプラズマの構造が不均一となり、実効的に電気伝導度やホール係数が低下し、発電性能が劣化することが知られている。すなわち、プラズマの観点からは、MHD 発電機内全域において均一で安定なプラズマを実現することが求められる。一方で、MHD 発電機ではローレンツ力を介してエネルギー変換が行われるので、発電機内の流速や圧力、温度といった流体諸量が流れとともに大きく変化し、このようなプラズマと流体との相互作用を MHD 相互作用と呼ぶが、これまでの議論から、非平衡プラズマ電磁流体に要求される事項を一言でまとめれば、「MHD 相互作用下において流体諸量が流れとともに大きく変化しても均一で安定な非平衡プラズマをより少ないジュール加熱で生成・維持すること」であり、これを実現するために、これまで様々なアプローチがなされてきた。

3.2 電離不安定の抑制（プラズマの安定・均一化） 電離不安定は、線形摂動解析から、ホール係数がある臨界値を超えると生じることが知られている。ただし、電離エネルギーの低いシード剤はほぼ完全に電離するが希ガスの電離は無視できるほど小さいようなプラズマ状態（シード完全電離プラズマ、電子温度が概ね 4,000~6,000 K）では、その臨界値は大きくなり、不安定が抑制され、プラズマは安定・均一化し、電気伝導度やホール係数が理想値にまで回復することが実証されている¹²⁾。

第 3 図にディスク形 MHD 発電機における典型的なプラズマ構造を示す。いずれも第 2 図に示したディスク形 MHD 発電機の作動気体流入ダクトの反対側から高速度撮影された写真である。電離不安定が発生すると発電機内のプラズマは不均一になる（スパイラル構造をもつ）（第 3 図(a)）こと、一方で、適切な運転条件では、発電機内にシード完全電離プラズマが実現し、均一で安定な構造をもつ（第 3 図(b)）ことがわかる。不均一構造に見られる発光の強い領域では電流密度が高く、作動気体に作用するローレンツ力も強い。これらの不均一構造は非定常な挙動を呈することから、発電機内には、時間・空間的に強さの異なるローレンツ力が作用し、作動気体に変動をもたらすだけでなく、発電出力の変動や劣化を引き起こす。均一で安定な構造をもつシード完全電離プラズマでは、電磁流体や発電出力の変動が抑制されるだけでなく、高性能な発電が可能となる。このシード完全電離プラズマの実現が本発



(a) 電離不安定プラズマ (b) シード完全電離プラズマ

第 3 図 ディスク形 MHD 発電機内のプラズマ構造

電方式のその後の発展のブレークスルーとなった。

3.3 高周波電磁界印加によるプラズマ制御 作動気体は発電機に入る前から電気伝導度の高いプラズマ状態にあるわけではなく、発電機内(超音速まで加速するためのノズル領域を含む)でのジュール加熱を受けてはじめて電離が促進される。電離には有限の時間が必要で、発電機では作動気体が流れていることから、その時間に対応する長さで、特に発電機入り口近傍に電気伝導度の低い領域が生じることがある。この領域では内部抵抗が高く発電した電気出力がそこで消費されることになり、直接的な損失となるだけでなく、電子温度が低いことから電離不安定を引き起こしやすく、その解消が大きな課題となっていた。発電機内のジュール加熱量は、シード剤の混入量(シード率)により制御できるが、その影響は発電機内全域に及び、確実な効果はあるものの、万能な解決方法でない。また発電機を流れ方向に電氣的に分割し、それぞれの領域の負荷率を調整する方法もあり、一定の効果はあるが、発電出力との整合性から調整範囲がそれほど広くない。

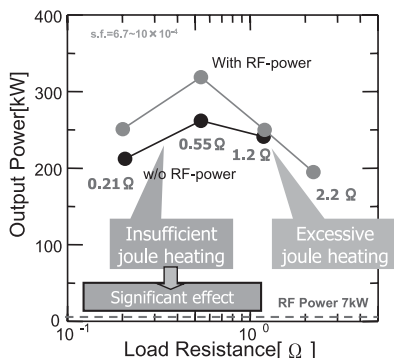
一方で、近年、高周波電磁界を外部から印加してMHD発電機入口でのプラズマの均一・安定化を図り、発電機の高性能化と運転条件の拡大が試みられている¹³⁾。このような、いわゆる、予備電離には様々な手法があるが、発電機がディスク形状で円周方向に均一な予備電離が必要で、かつ電気伝導度が高く周波数によっては表皮効果が無視できなくなることから、発電機入り口に沿ってリング状の誘導コイルを配置して高周波電磁界(13.56 MHz)を印加している。この手法では、外部電力を使用することになるが、プラズマの制御性は高い。第4図は高周波電力の印加が発電出力に与える効果を示したもので、自己ジュール加熱が小さくなる低負荷抵抗値(最適負荷抵抗値を含む)において、高周波電磁界印加による大幅な性能向上が確認でき(高周波電力7kWに対して出力の増加44kW)、本方法の有用性が実証されている。

3.4 入り口旋回流の導入 上述のように、プラズマをシード完全電離状態とすることで安定化と均一化を図り、高周波電磁界の印加により更なる性能の向上が実証されているが、これらのアプローチは、概して電気伝導度の実効的な向上を意図している。先述のとおり、発電機の高性能化には、特にディスク形発電機では、ホール係数の向上が

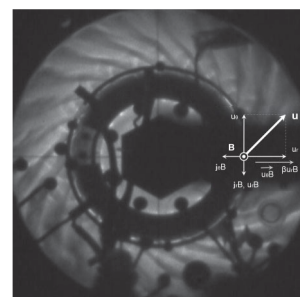
効率の観点から重要となる。ホール係数は、おおざっぱには、印加磁束密度に比例し、作動気体圧力に反比例するので、基本的にはより高い磁束密度を使用することが要求される。一方で、与えられた磁束密度の下で、高いホール係数を維持するには、基本的には、発電機内の静圧を低く保つ必要がある。しかし、ディスク形発電機では、ローレンツ力(ブレーキ力)の増加→流速の低下(境界層の発達・剝離)→静圧の上昇→ホール係数の低下→ファラデー電流の増加→ローレンツ力の増加というフィードバックがかかりやすく、これらは一連の現象として観測される。

この現象を軽減するための1つの方策は、発電機入り口にガイドベーンを設置して、旋回流(円周方向の速度成分)を導入することである。これは元々、発電機内の作動気体がホール電流(半径方向電流)と印加磁界によるローレンツ力で円周方向の力を受け、徐々に速度の円周方向成分が増加するが、それを打ち消すためにあらかじめ逆向きの円周方向成分を入り口で与えておくものである。一方で、この旋回流の導入は、見かけ上ホール係数の増加と同等の効果があり、先のフィードバックを抑制する役割を果たす。この効果は確実で、はじめに述べた、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31%を同時達成した発電機では、この入り口旋回流方式が採用されている¹⁰⁾。第5図に入り口旋回流を導入した発電機内のプラズマの様子を示す。

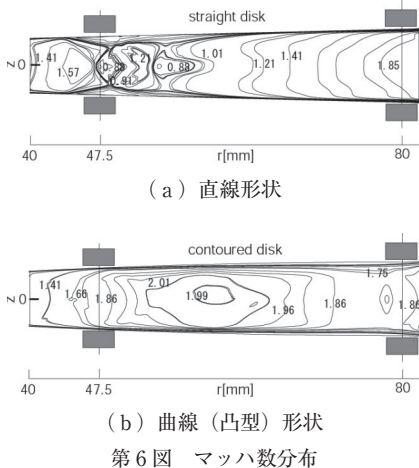
3.5 発電機形状と電磁流体の最適化 超音速流れを利用するMHD発電機では、ローレンツ力によるマッハ数の低下を抑え、超音速流れを維持するために、発電回路は末広がり形状とするのが一般的である。形状を決定する上で、1) 発電機入口(厳密にはスロート)と出口の断面積比の値をいくつに設定し、2) その間をどのような形状で繋ぐかがポイントとなる。前者は、比較的簡単な熱力学の関係式から、出口/入口(スロート)断面積比が小さいほど、同じエンタルピー抽出率に対して得られる等エントロピー効率が高いことがわかっており、最近の実験研究は専ら断面積比が小さい発電機を用いて、等エントロピー効率の向上実証が行われている¹⁴⁾。後者は、発電機内のプラズマ電磁流体の諸量に直接影響を与えることから、その最適化は長年にわたり研究の対象となっていた。最近このことに関する意義深いシミュレーションによる示唆と実験による実証がなされている。



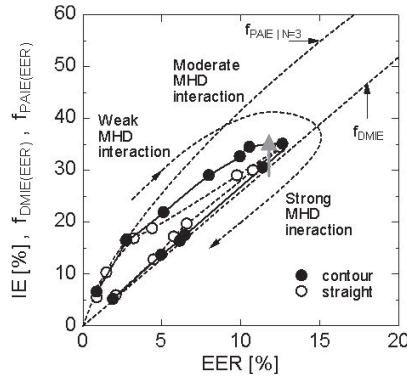
第4図 高周波プラズマ制御による高性能化



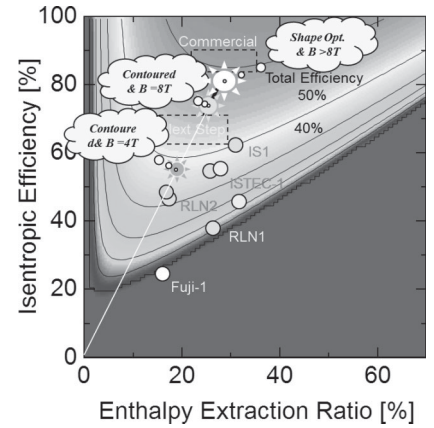
第5図 入り口旋回流を導入した発電機



第6図 マッハ数分布



第7図 等エントロピー効率IEとエンタルピー抽出率EER



第8図 発電機開発のロードマップ

第6図に流路形状の異なる発電機での同一運転条件下でのマッハ数分布を示す。同図(a)はスロートから発電機出口(カソード)までの流路壁を直線で構成した形状、また同図(b)はスロートおよび発電機出口(カソード)の流路高さを(a)と同一にしつつも、発電機上流での拡がりを大きくした(曲率をもつ、凸型の)形状となっている。形状の差異は極めて小さいので、MHD相互作用のない流れでは、そのマッハ数分布や静圧分布における違いはわずかである。しかし、発電状態ではそれらの分布は大きく異なる。すなわち、直線ディスク形状では、発電機上流域で急激なMHD相互作用により境界層の剝離が生じ、マッハ数は大きく低下する。すなわち先述のフィードバックが作用し、発電性能は劣化する。一方で、凸型形状では、そのフィードバックが抑えられ、高いホール係数が維持されることから、性能の向上(正確には理想値への回復)が期待できる¹⁵⁾。

第7図に、上記2種類の発電機における実験結果を示す。シミュレーションからの示唆のとおり、曲率を有する発電機(●)では、等エントロピー効率が増加し、特にエンタルピー抽出率が高い(最適負荷)条件近傍でその向上が著しい(小型の実験機であるので、値そのものはそれほど高くない)。実験結果においても、静圧が低く抑えられていることが確認され、強いMHD相互作用下においても理想的なプラズマ電磁流体が実現することが実証されている¹⁶⁾。

わずかな形状の差異がこれほどの大きな効果をもたらすのは、MHD発電機内プラズマ電磁流体ならではの先のフィードバック機構によるものである。形状を凸型とすることは、入り口で旋回流を導入することと同様の効果をもたらす。ガイドベーンを取り除いた代償として形状を凸型としたともいえる。これらの結果は、より高磁束密度で動作する高性能MHD発電機の実現に向けて有用な指針を与え、実用化に向けたロードマップを確かなものにした。

3.6 実用化に向けてのロードマップ 第8図中の○は、これまでの様々な発電実験で得られたエンタルピー抽出率とそのときの等エントロピー効率を示したものであ

る。背景にある等高線は、MHD発電プラント(第2図)の総合効率であり、たとえば、60%程度の総合効率を得ようとする、MHD発電機に30%程度のエンタルピー抽出率と概ね80%を超える等エントロピー効率が要求されることを示している。エンタルピー抽出率については、すでに実用レベルまで実証されているが、等エントロピー効率の向上が課題となっている。上述の数値シミュレーションでは、実験結果との比較から、かなりの確度で性能が予測できており、これに基づけば、同図のように、磁束密度の増加と発電機形状の最適化により、実用化レベルまでのロードマップを示すことができ、今後の研究開発の方向性は確立している。一方で、真の実用化には、実験室レベルを超えた然るべき規模の発電システムの構築とその長時間連続運転の実証試験が必要となる。

4. 最近の国内外の研究動向

これまで述べてきたように、MHD発電は、歴史的には化石燃料資源の高度有効利用(火力発電所の高度化)を指向してきており、その方向性に筆者は否定的な意見は持っていない。その一方で、非化石燃料(太陽、水素、再生可能エネルギーなど)利用型のクリーンMHD発電の可能性が検討されている。やや萌芽的な要素も強いが、元来MHD発電機は電気へのエネルギー変換機器であるので、多種多様なエネルギー源それぞれにいかに対応でき、そのときどのようなシステムが構築できるのかはチャレンジングなテーマである。たとえば、太陽熱利用クローズドサイクルMHD発電システムが提案されている¹⁷⁾。太陽エネルギー受光システムの効率とMHD発電システムの効率との兼ね合いにより、作動気体(希ガス)の最適温度が2,000K程度であることが示され、その温度が従来から検討されているクローズドサイクルMHD発電システムでの温度にほぼ合致していることは興味深い。太陽エネルギー利用の高温化は克服すべき点も少なくないが、進むべき1つの方向であると考えられるので、萌芽的ではあるが本システムの更なる展開が期待される。

発電の媒介としてのプラズマに着目すると、これまで述

べてきたように、従来型の発電機では作動気体の電気伝導性を高めるためにシード剤(アルカリ金属)を微量添加するが、最近では、シード剤を用いず高温の希ガスだけで高い発電出力(密度)が得られることが実証されている¹⁸⁾。高温であるので連続発電には不適である(現時点では9,000 K程度であるが予備電離の併用による低温下を目指している)が、均一で安定なプラズマが維持されるなど、従来にない新しい学術的知見が多く得られており、今後の展開が期待されている。また、ロシア・高温研究所では、アルミニウム粉末・水蒸気混合燃焼を利用した高効率MHD発電システムや非常用電源としてのMHD発電装置の提案が¹⁹⁾、また中国・電工研究所では、波力を利用した液体金属MHD発電システムが提案され、すでに発電試験に着手し、出力5 kW級の発電を実証後、100 kW級装置の開発まで視野に入れた計画を進めている²⁰⁾。

日本を含め、米国、ロシア、イタリアを中心に、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・宇宙分野におけるMHD発電技術の応用に注目が集まっている。読者の方々のご興味はそちらにあるかと思われるが、本特集の中でご専門の方から解説があると思うので、そちらを期待したい。

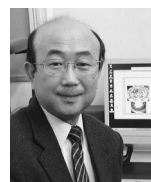
5. おわりに

MHD発電機内で生成・維持される非平衡プラズマは、外部から供給される電気エネルギーを消費して生成される一般の放電プラズマとは異なり、自己の誘導起電力を利用する自励的なプラズマであり、かつプラズマの不安定に起因する自己組織化構造を有し得る性質をもつ。このようなプラズマが超音速流れ中に生成され、それらの相互作用を通して流体の速度や圧力に影響を与え、かつその影響がプラズマの諸量に変化をもたらすという極めてダイナミックな系を構成する。このような系にあって、いかに効率よくエネルギー変換(電力発生)を行うかは、学術的にも工学的にも意義深い重要な課題であり、またチャレンジングなテーマであると考えている。MHD発電の真の実用化・成熟化には、まだ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、電気工学や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決して小さくないと確信している。本日本航空宇宙学会には、超音速流れやプラズマ現象に明るい先生方が多くいらっしゃるの、是非ご指導いただければ幸いです。最後に、本稿で紹介した内容は、東京工業大学の諸先生方、またこれまで研究室に所属された方々の成果であることを付記しておきたい。

参考文献

- 1) Rosa, R. J.: Magnetohydrodynamic Energy Conversion, Hemisphere Publishing Corp., Washington, 1987, pp. 1-113.
- 2) Mitchner, M. and Kruger, C. H.: Partially Ionized Gases, John Wiley and Sons, New York, 1973, pp. 163-241.
- 3) Sutton, G. W. and Sherman, A.: Engineering Magnetohydro-

- dynamics, McGraw-Hill, New York, 1965, pp. 471-528.
- 4) 石川本雄, 卯本重郎: CO₂ 液化回収石炭燃焼 MHD-汽力複合発電, 電気学会論文誌 B, **113** (1993), pp. 811-816.
- 5) 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, 電気学会論文誌 B, **118** (1998), pp. 1457-1462.
- 6) Litchford, R. J., Bitteker, L. and Jones, J.: Prospects for Nuclear Electric Propulsion Using Closed-Cycle Magnetohydrodynamic Energy Conversion, 39th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, AIAA 2001-0961, 2001, pp. 1-16.
- 7) 原田信弘: 2. MHD 発電とメタン高度利用技術, プラズマ・核融合学会誌, **86** (2010), pp. 655-660.
- 8) Kayukawa, N. and Wang, Y. M.: Advanced Coal Power Cycle with Stand-Alone Magnetohydrodynamic Generator, J. Propul. Power, **20** (2004), pp. 566-571.
- 9) Okuno, Y., Okamura, T., Suekane, T., Yamasaki, H., Kabashima, K. and Shioda, S.: Magnetohydrodynamic Power Generation Experiment with Fuji-1 Blow-Down Facility, J. Propul. Power, **19** (2003), pp. 894-900.
- 10) Murakami, T., Okuno, Y. and Yamasaki, H.: Achievement of the Highest Performance of a CCMHD Generator: An Isentropic Efficiency of 63% and an Enthalpy Extraction Ratio of 31%, IEEE Trans. Plasma Sci., **32** (2004), pp. 1886-1892.
- 11) 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, 電気学会論文誌 B, **123** (2003), pp. 1097-1104.
- 12) Yamasaki, H. and Shioda, S.: MHD Power Generation with Fully Ionized Seed, J. Energy, **1** (1977), pp. 301-305.
- 13) Murakami, T., Okuno, Y. and Yamasaki, H.: Radio-Frequency Power-Assisted Performance Improvement of a Magnetohydrodynamic Power Generator, J. Appl. Phys., **98** (2005), pp. 113306-1-113306-7.
- 14) Murakami, T. and Okuno, Y.: Experiments and Numerical Simulations on High-Density Magnetohydrodynamic Electrical Power Generation, J. Appl. Phys., **104** (2008), pp. 063307-1-063307-11.
- 15) Liberati, A. and Okuno, Y.: Improvement of Plasma-Flow Behavior and Performance of a Disk MHD Generator under High Magnetic Flux Densities, IEEJ Trans. Power Energy, **128** (2008), pp. 493-498.
- 16) Murakami, T. and Okuno, Y.: Characteristics of a Magnetohydrodynamic Electrical Power Generator Using Convex Divergent Channel, J. Appl. Phys., **107** (2010), pp. 053304-1-053304-6.
- 17) 大谷尚史, 藤野貴康, 石川本雄: クローズドサイクル MHD 発電を利用した太陽熱発電システムの検討, 平成 21 年度電気学会全国大会, 7-035, 2009.
- 18) Murakami, T. and Okuno, Y.: Simulation and Demonstration of Magnetohydrodynamic Energy Conversion in a High-Temperature Inert Gas, Phys. Plasmas, **16** (2009), pp. 033501-1-033501-9.
- 19) Bityurin, V. A.: New Trends in MHD Energy Conversion, Proc. of 17th International Conference on MHD Energy Conversion, K3-1, 2009.
- 20) Sha, C. W.: Recent Research Activity on MHD Technology in China & Conception on Gun-Type Liquid Metal MHD Pulsing Power Generator, Proc. of 17th International Conference on MHD Energy Conversion, OV-3, 2009.



奥野 喜裕 (正会員)

1959 年生まれ。1987 年、東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了。同年、長崎大学助手。1988 年、佐賀大学講師。1989 年、同助教授。1994 年、東京工業大学助教授、2000 年、同教授、現在に至る。主に、MHD 発電、電磁流体エネルギー変換、プラズマ理工学に関する研究に従事。