

2. MHD 発電とメタン高度利用技術

原田信弘 長岡技術科学大学メタン高度利用技術研究センター (原稿受付日:2010年10月20日)

本講座の第1回目は、低炭素社会をめざしたメタンの高度利用に対する我々の取り組みの概要を紹介した.本取り組みの主な柱は、1)エネルギー変換、2)物質転換、3)システム安全および4)エネルギー政策・ 国際連携である.第2回目以後は特に読者の関心が高いと思われるエネルギー変換部門の主要な開発項目に関し て解説を行う.エネルギー変換部門では、メタンをエネルギー資源としてとらえ、より効率高く電力に変換する ことによって低炭素社会の実現をめざす.基本的にはメタン燃焼による熱エネルギーを利用するので、熱力学的 な拘束を受けるため、できるだけ高温域から利用して、温度の低下に従ってそれぞれの温度域で最適と考えられ る発電システムをカスケードにつなぎ、プラント全体の発電効率を高くする方針である.今回は最も高温度域で 動作する MHD 発電についての解説を行う.この MHD 発電は核融合炉との組み合わせも検討されており、興味を 持っていただければ幸いである.なお、第3回、第4回はそれぞれマイクロガスタービン、メタン直接利用燃料電 池に関する解説を予定している.

Keywords:

magnetohydrodynamics, MHD power generation, high-efficiency, closed cycle, open cycle, direct conversion

2.1 はじめに

Magnetohydrodynamics(電磁流体力学)は主としてプ ラズマや液体金属などの導電性流体の運動と電磁界の相互 作用を研究する学問分野であり、核融合の分野でも磁界中 のプラズマの「MHD 平衡」とか「MHD 安定性」などでお なじみであろう.電磁流体力学を応用した発電は、そもそ もマイケル・ファラデーが電磁誘導の法則を見出した直後 にテムズ川の流れと地磁気による相互作用で発電するとい う試みから研究が始まった.

化石燃料の燃焼ガスや熱交換した希ガスプラズマを作動 流体とする MHD 発電はタービン等のように高温部に精密 な可動部分が必要なく,動作温度を高くできる.実際に燃 焼ガス利用では,3000[K]程度,希ガスプラズマの場合に は2000[K]程度が動作温度である.従来の発電方式と比べ 高温動作すなわちカルノー効率が高いという効率面で本質 的な利点を持っている.今後,高効率化,省エネルギー資 源,低コスト,低環境負荷,低CO₂放出といった要求がま すます重要になっていくことが予想され,実用化がより一 層期待される研究課題である[1,2].

2.2 MHD 発電

2.2.1 MHD 発電の原理

MHD 発電の原理を図1に示した.磁場を印加した発電 チャネルに導電性の作動流体を流すと,磁界Bと作動流体 の速度uと直交方向(図の場合は上下方向)のファラデーの起 電力 $u \times B$ が生じる.チャネル上下の壁を電極として,外 部負荷を接続することによって電力を取り出すことができる.

2. MHD Electrical Power Generation and Advanced Methane-Utilization Technology HARADA Nob.

MHD 発電機は言うまでもなく熱エネルギーを電気エネ ルギーに変換する仕組みで、それは出力電流密度 J が印加 磁界 B に直交しているため、ローレンツ力 J×B が作動流 体の速度 u と反対向きに作用する. つまり作動流体は発電 によってブレーキ力を受け自身のエンタルピーを u·J×B だけ減少させ、その減少分が出力 J·E に変換される. 効率 を下げる主な要因は作動流体の内部抵抗によるジュール散 逸と壁面からの熱損失である.

このMHD発電機の出力を見積もってみよう.MHD発電 機の等価回路は比較的単純で、図2のように起電力が*uB*, 内部抵抗が*r*,外部負荷*R*の直流電源と見なせる.ここで 簡単のために,発電チャネルの高さを1[m],電極面積を 1[m²]とする.発電出力は負荷の両端の電圧*V*_Lと負荷電流 *I*_Lの積であるからそれぞれ以下のように表すことができる.



author's e-mail: nob@nagaokaut.ac.jp



図2 MHD 発電機の等価回路.

$$V_{\rm L} = uB \frac{R}{R+r} = uBK$$
, when $K \equiv \frac{R}{R+r}$ (1)

$$I_{\rm L} = \frac{uB}{R+r} = \frac{1}{r} uB \frac{r}{R+r} = \frac{1}{r} uB(1-K)$$
(2)

$$P_{\rm d} = \frac{1}{r} u^2 B^2 K (1 - K) = \sigma u^2 B^2 K (1 - K)$$
(3)

$$P_{\rm dMAX} = \frac{1}{4} \sigma u^2 B^2$$
, when $K = \frac{1}{2}$ (4)

ここで K は内部抵抗と外部負荷で決まる負荷率である. 発電チャネル高さと電極面積をそれぞれ 1[m], 1[m²] としたので,出力はそのまま単位体積あたりの電気出力す なわち出力密度[W/m³]となる.また,ここで 1/r はプラズ マの導電率 σ [S/m]と表すことができる.式(3)からわか るように,負荷率に対しては K = 1/2 つまり内部抵抗と外 部負荷が等しい場合に最大の出力が得られ,この時の出力 密度は式(4)のようになる.

一般的に速度は入口マッハ数2程度,磁場強度は超電導 磁石を用いて5[T]程度で設計することが多い.キーポイ ントはプラズマの導電率をいかに高くするかであり,通常 「シード」と呼ばれるアルカリ金属あるいはその化合物等 の電離ポテンシャルの低い物質を少量添加することで比較 的低温度でも導電率を高くすることが可能となる.

2.2.2 オープンサイクルとクローズドサイクル

MHD 発電には、作動流体として化石燃料の燃焼ガスプ ラズマを直接用いる「オープンサイクル」と高温熱源との 熱交換による高温希ガスプラズマを用いる「クローズドサ イクル」の2種類に大別できる.それぞれの主な特徴を比 較して**表1**に示した.

オープンサイクル MHD 発電システムは図3に示すよう に,化石燃料の燃焼ガスにアルカリ金属化合物をシードし た作動流体を直接 MHD チャネルに導入して発電する方式 で,高効率化のために発電チャネルを出た燃焼ガスは,中 温度域あるいは低温度域で動作する発電システムを駆動し て熱エネルギーを有効利用する複合発電システムにする必 要がある.

オープンサイクル MHD 発電のプラズマは弱電離で熱的 に平衡であり、電子は重粒子(イオンと中性粒子)との衝 突頻度が高いため電子温度はガス温度と等しく、導電率は 比較的低い.このために高い導電率を実現するためには予 熱空気燃焼や酸素富化あるいは純酸素燃焼を採用して、ガ

表1	オーフ	プンサイ	クルと	クロース	ヾドサイ	クルの比較.
----	-----	------	-----	------	------	--------

	Open Cycle	Closed Cycle
Working Gas	combustion gas	inert gas (He, Ar)
Seed	K compounds	K, Cs, Xe
Gas temp.	~3000 [K]	~2000 [K]
Plasma Conductivity	equilibrium (Tg∼Te) 1~10 [S/m]	non-eq. (Tg< <te) ~100 [S/m]</te)
Remarks	•efficient Coal utilization	•high efficiency even smaller scale
	·low emission	·various heat source



図3 オープンサイクルの MHD 発電システム.

ス温度をクローズドサイクルの場合と比べて高くする必要 がある.比較的資源が豊富な石炭を純酸素燃焼して高温燃 焼プラズマを利用することが提案されていて,排出ガスに 窒素及び窒素化合物を含まず主としてH2OとCO2であるた め,比較的容易にCO2を分離回収できることが特徴である [3].逆に通常のガスタービンや蒸気タービンのシステム では,CO2を分離回収を容易にするために純酸素燃焼して 燃焼ガス温度を上げても,サイクルの利用最高温度はター ビン等のシステムの耐熱性で決まっているために温度上昇 が直接高効率化にはつながらない.

オープンサイクルの最大の問題点は、本質的に化石燃料 の燃焼ガスを使う必要があるために、化石燃料資源が枯渇 するとシステムを運転できないことである.

クローズドサイクルの発電システムの一例を図4に示 す.このシステムは他のシステムと組み合わせず MHD 発 電機単独で発電するシステムである[4].図からわかるよ うに,MHD 発電機は熱交換された高温の希ガスで駆動さ れ,作動流体は再生熱交換器で熱回収されて冷却器,圧縮 機を経て熱交換器に戻るクローズドループを構成する.

希ガスプラズマでは、電子と重粒子との衝突断面積が小 さく衝突頻度が低いために、電子温度はジュール加熱に よって重粒子温度(ガス温度)よりはるかに高くなり、容 易に非平衡プラズマ状態となる.通常の化石燃料の燃焼で 駆動する場合には、空気燃焼でも十分で断熱火炎温度程度 (2000~2200[K])でも効率よい発電が可能である.酸素富 化あるいは純酸素燃焼は必ずしも必要ではない.

クローズドサイクルの場合でもシードは有効であり,数 1000[K]から10000[K]程度と核融合プラズマと比べて低 い電子温度でも100[S/m]以上の導電率を得ることが可能 となる.通常は不純物を嫌うために金属カリウムやセシウ ムをシード剤として用いるが,冷却器や圧縮機など下流機 器への腐食をなくすために同じ希ガスであるキセノンを用 Lecture Note



図4 クローズドサイクルの MHD 発電システム.

いることも提案されている[5]. アルカリ金属では 5000 [K]程度,キセノンでは電離ポテンシャルの違いから 8~ 9000[K]程度の電子温度が必要とされる. He/Xe 混合希ガ スは,冷却特性が良いので核分裂炉との組み合わせが有望 で[5],核分裂炉からのエネルギー回収にも期待できる.

クローズドサイクルの特徴を要約すると、電子温度を高 くすることによって導電率を高めることができるので、比 較的低いガス温度でも高い効率が得られることで、小型の システムでも高い性能が期待できること.またオープンサ イクルとの大きな違いは、作動流体が直接燃焼ガスを使う 方法ではないので、熱源さえ確保できれば熱源を選ばない ことである.つまりクローズドサイクルの作動流体に熱エ ネルギーを与えることができれば、核分裂炉(高温ガス冷 却炉)、核融合炉(ブランケットからの熱回収)、あるいは 太陽熱など将来の多様な熱源に対応できることである.

2.2.3 クローズドサイクル MHD 発電の応用

我々の研究室では,前述の特徴を踏まえて,将来的にも 利用が可能な高効率発電システムの確立をめざして,主に クローズドサイクル MHD 発電の研究を続けているが,核 分裂炉(高温ガス冷却炉)との組み合わせによる宇宙用発 電システムと慣性核融合炉と組み合わせる高ペレットゲイ ンをめざした発電システムへの応用例を紹介する.

図5はクローズドサイクル MHD 発電単独システムを核 分裂炉と組み合わせた宇宙用発電システムであり[6],現 在米国の NASA Marshall Space Flight Center で MHD In-Space Power Experiments (MIPX)として実験が検討され ているものである.この発電システムは、ガス冷却の核分 裂炉を熱源とし、作動流体を直接加熱するため、高温の熱 交換器が必要なく、非常に簡単なシステムとなっている. 核分裂炉の熱出力は5[MW]に設定し、火星あるいは木星 への電気推進ミッションを想定して、電気出力は2.76 [MW]とした.プラント効率は55[%]以上が期待できる. 火星以遠の比較的大型ミッションでは、太陽光の強度が低 下するために太陽電池では必要な電力を得るための面積す なわち質量が大きくなりすぎて、もはや利用が困難である と予想されている.

この発電システムで重要なのは、システムの質量がどの 程度になるかによって実現可能性が決まることである.最 適なシステムにするには、圧縮機段数、再生器効率、冷却 器温度の設定が必要であるが、MW 級の電気出力で比質量 (システム質量[kg]/電気出力[kW])が2程度以下にでき ることが報告されている[6]. ラジオアイソトープ/熱電 変換素子の変換効率 6~7[%]、比質量~200[kg/kW]、あ るいは核分裂炉/ターボブレイトンシステムの変換効率 20~40[%]、比質量 30[kg/kW]などの評価と比べて、十分 に小さく実現可能な数値であると考えられている.小型で シンプル、高効率発電システムとしても活躍が期待されて いる.

わが国には大型の宇宙探査プロジェクトがなく,宇宙用 の発電システムの研究開発もほとんどないのは残念であ る.ジェミニに搭載された燃料電池システムが性能と信頼 性を備えたものであると認識され,一般の民生用にも大々 的に利用され始めた経緯を考え,宇宙用高性能 MHD 発電 システムの実現が,将来の商用発電システムの実現に向け て大きな第一歩となるよう期待したい.

核融合反応エネルギーからの発電では、慣性核融合炉との組み合わせの提案があり、図6に慣性核融合炉の第1壁 とブランケットからの熱回収の提案、図7に全体の発電シ ステムを示した[7].熱回収は2段に分け、ブランケットの 温度制限(~1800[K])からブランケットで1700[K]程度 まで予熱されたヘリウムは第1壁でさらに2000[K]まで追 加熱され、MHD発電機に導かれる.最適な運転条件では、 発電機単独の効率(エンタルピー抽出率=発電出力/熱入 力)は1503[MW]/4486[MW]=33.5[%]、プラント効率は







図6 慣性核融合炉第1壁・ブランケットからの熱回収.



図7 慣性核融合炉からのクローズドサイクルMHD発電システム.

正味の核融合反応熱に対する正味の電気出力で1000[MW] /1637[MW]~60[%]を超える可能性が示されている[7]. 正味の核融合反応熱が1637[MW]に対して MHD 発電機へ の熱入力が4486[MW]とはるかに高いのは,発電機出口の 排出ガスからの熱回収によるものである.

2.3 MHD 発電とメタン高度利用技術

メタン高度利用技術の取り組みの中でエネルギー変換領 域の研究内容を図8に再掲する.ここでは、メタン燃焼に よる熱エネルギーを MHD 発電、マイクロガスタービン、 メタン直接利用新型燃料電池等を用いて高効率に発電する システムを構築することが最終的な課題である.各研究分 野でそれぞれの課題に向けて鋭意推進中であるが、全体の システムの最適化、あるいはどのようなシステムを構築す るかが我々のシステム解析の当面の課題となる.

2.3.1 オープンサイクル MHD 発電を利用したシステム

メタン燃焼ガスを直接 MHD 発電機に導入して,発電を 終えた作動流体を順次マイクロガスタービン,新型燃料電 池に導いて,カスケード発電システムを描いてみた(図9). 図中の数字はエネルギーの流れを示していて,MHD 発電 機用の燃焼器に1,マイクロガスタービン用の燃焼器に0.5 を入力して,熱エネルギーのバランスを取ることを考えて いる.MHD 発電機単独で30[%],マイクロガスタービンが 26[%],新型燃料電池の効率が37[%]あれば全体のプラン ト効率として60[%]が期待できる.個々のシステムの効率 の温度や圧力への依存性や個々の動作温度,動作圧力など の詳細がわかればシステム全体を最適化することができる.

MHD 発電機を高効率で運転するためには, 2.2.1でも示 したように十分なプラズマの導電率が確保できるかどうか が最も重要であり,通常の空気燃焼では発電に十分なガス 温度が得られないため:

- 1) 燃焼空気を予熱するかどうか
- 2)酸素富化燃焼または純酸素燃焼を行うかどうか
- 3) シードを用いるかどうか

などが重要な検討課題である.下流の機器に作動流体が直 接導入されるので,マイクロガスタービンや新型燃料電池 へのアルカリ金属化合物の流入は致命的であろう.

プラズマから見ると、平衡プラズマのまま、酸素富化あ るいは純酸素燃焼でガス温度を上げて導電率を確保する方 法と、発電機上流において何らかの方法で予備電離を行 い、非平衡状態を作り高い導電率を確保する方法がある。 前者では、酸素製造のためのコストとエネルギー的な損失



図8 メタンエネルギー変換領域の研究内容.



図9 オープンサイクル MHD 発電機を利用した発電システム.

をどのように回収できるか,あるいは CO₂分離回収と組み 合わせる方法など新たな展開を視野に入れる必要がある.

一方,後者では発電機入口でプラズマの電離度や導電率 を制御できるために,発電性能もリアルタイムで制御でき る可能性があり,比較的小規模のいわゆるマイクログリッ ドでの運用も可能となる.MHD発電の特徴である可動部 分がないために出力が高速で制御できる利点がある.例え ば,MHD発電機における運転条件の変化に対するプラズ マの応答は電離/再結合過程を考慮しても10[µs]程度で あり,流体的な応答も音速程度すなわち1[ms]程度である から,太陽光発電や風力発電の出力変動さらには負荷変動 と比べて十分に短い応答時間である.このように高速に出 力が制御できれば,スマートグリッドの概念にそって, ソーラーパネルや風力発電の出力変動補償の可能性もある.

各温度域での発電システムとの組み合わせや温度, 圧力 等の設定や調整は今後のシステム全体としてまとめ上げる 際の課題である.例えば MHD 発電機を出た作動流体をマ イクロガスタービンに入れる際に, MHD 発電機の動作点 や発電特性が変わったり,出力を要求電力に合わせるよう に調整した場合には,出口ガス温度や圧力が変化するた め,マイクロガスタービン側でどの程度までそれらの変化 を許容できるか,負荷変動に対してどのように対応するか などは興味深い課題である.

2.3.2 クローズドサイクルMHD発電を利用したシステム クローズドサイクル MHD 発電システムをメタン高度利

Lecture Note

用に応用した場合のシステムを図10に示す.熱エネルギー の各システムへの配分および各システムの発電効率は, オープンサイクル MHD 発電システムを採用した場合と同 じに仮定したため,全体のプラント効率も同様の60[%]と なった. MHD 発電機は熱交換された希ガスで駆動され, メタンの燃焼ガスの経路とは別の独立したループとなって いることがわかる.これがクローズドサイクルの利点の一 つで,熱交換器(図10の例ではメタンの燃焼器)を設置す ることによって多様な熱源に対応できる.温度と圧力,流 量を合わせることで,このMHD 発電システムのループは, 図5,図7に示した宇宙用のガス冷却炉を熱源とするシス テムや慣性核融合炉を熱源とするシステムと本質的には同 じシステムであり,発電性能も同様となる.

独立したループなので、アルカリ金属シードを利用して 高い導電率を実現できるが、信頼性やメンテナンスの容易 さを考慮してHe/Xe混合希ガスを作動流体として、システ ム解析を行い、その結果を図11に示す.解析手法は参考文 献[6,7]を参照されたい.

MHD 発電システムへの熱入力は1[MW]とした. 冷却器 温度は 300[K], 圧縮機段数は3で中間冷却器を設けてい る. He/Xe 混合希ガスを作動流体とするために,比較的高 い電子温度を実現する必要があり,高周波やマイクロ波等 による電気的な予備電離を導入する.この予備電離用の電 気入力はシステムへの熱入力の1.6[%],MHD 発電機への 熱入力の0.6[%]程度であるが,出力からは差し引かれ,効 率の低下となる.しかしながら最終的には作動流体の温度 として回収できるので,エントロピー的には損失となるも のの,実質的なエネルギーとしての損失にはならないこと に注意が必要である.

図中で Q, T, P はそれぞれエネルギー,温度, 圧力を表 している.この MHD 発電システムに投入される正味の熱 エネルギーは1[MW]で,正味の電気出力は0.55[MW]であ るから,この MHD 発電システムの発電効率は55[%]とな ることがわかる.この MHD 単独発電システムで55[%]の 効率ということは、図10で提案した複合発電システムの効 率 60[%]を若干下回ることに注意が必要で、もし MHD 単独の発電システムで 60[%]に到達すれば、ほかの発電シ ステムと組み合わせて複雑にする必要がなく、最初から MHD 発電機のみのシステムを確立すればよいことにな



図10 クローズドサイクル MHD 発電機を利用した発電システム.

る. 実際には複合サイクルを構築することによって,どれ だけこの MHD 発電単独発電システムに対して効率を上昇 できるかを明らかにすることが重要である.

クローズドサイクル MHD 発電機を用いる複合発電シス テムの優位性をまとめると,

- MHD 発電システムには熱エネルギーのみを供給すれ ばいいので燃焼器の温度や圧力を MHD 発電機と独立 して選択できる
- マイクロガスタービンや新型燃料電池など中低温度域の発電システムとの組み合わせが容易
- 3)運転条件の設定がフレキシブルで MHD 発電機なしで も下流の機器のみで発電可能

以上に加えて、本システムの確立によって、将来的な核エ ネルギーや太陽エネルギーとの組み合わせなど、非常に幅 広い高効率発電システムの確立が期待できることである.

2.4 メタン燃焼 MHD 発電実験に向けて

ここまで述べてきたように、メタン高度利用システムへ の MHD 発電機の適用では、クローズドサイクルの方がシ ステム的な対応や設計、動作点、制御性などで優位性があ ると考えられる.ただし、これまでこの分野で研究されて きた内容を熱源のみメタン燃焼と組み合わせるのは研究と しての新規性に乏しい.解決すべき問題点の多いオープン サイクル MHD 発電システムをいかにしてメタン高度利用 技術に取り込むかは大いに興味がある.

メタン高度利用技術研究センターのプログラムの一環と して、クローズドサイクル MHD 発電のメタン燃焼との組 み合わせは、他の発電システムとの整合性、運転、制御方 法の確立のために主として数値解析によって検証していく こととし、オープンサイクル MHD 発電機の導入では、 シードを投入せず、電気的な予備電離によってプラズマの 生成と導電率の確保を行って MHD 発電が可能かどうかの 実証試験を計画している.

実験装置としては、メタン高度利用技術研究センターに 設置されているメタン燃焼器の下流に、予備電離部を設け た MHD 発電機を設置して行う.メタン燃焼器の概略を 図12に示す.CAN 型燃焼器で天然ガス(13 A)を空気燃焼 させて、最高 1800[K]の燃焼ガス温度を達成できる.最大



図11 クローズドサイクル MHD 発電機部分のシステム解析結果.

圧力は0.98[MPa],空気流量は10~15[g/s]である.この写 真ではマイクロガスタービン用の材料試験に用いるテスト セクションが取り付けられている.また計画している予備 電離部と MHD 発電部を図13に示す.

燃焼器からの燃焼ガスをラバルノズルで超音速に加速す る.その後高周波電源から誘導結合で燃焼ガスにエネル ギーを与えて、プラズマの生成と導電率の確保を行う.既 設の常伝導電磁石(1.4[T])で磁界を印加した MHD 発電 機に導いて発電実験を行う.

また,図14には予備電離の予備実験として点灯した誘導 結合プラズマの様子である.ヘリウムプラズマで高周波電 力(周波数13.56[MHz])は最大5[kW]の入力が可能であ る.引き続いてメタン燃焼ガスの超音速流れの予備電離を 行う予定である.当初は,プラズマの生成,プラズマパラ メータや電離過程の分光学的測定,非平衡性の検証,また 非平衡状態の寿命(持続時間)など作動流体としてのプラ ズマの性質を把握しながら,発電の実証を行うことを計画 している.

2.5 まとめ

メタン高度利用技術研究センターのエネルギー変換領域 の取り組みの中で,最も高い温度域で動作する MHD 発電 について,その原理や種類,特徴を簡単に解説した.MHD 発電は高温動作が可能であり,現在の最高効率のガスター ビン/蒸気タービン複合発電システムを超える発電効率の 実現のためには不可欠な発電システムであり,熱力学的に も妥当性を持っている.

核エネルギーとの組み合わせも検討されており,これま で提案されている核分裂炉(高温ガス冷却炉)との組み合 わせによる宇宙用高効率発電システムおよび慣性核融合炉 と組み合わせによる核融合発電システムを紹介した.

この MHD 発電システムとメタン燃焼による熱源と組み 合わせでは、オープンサイクル MHD 発電システムの利用 とクローズドサイクル MHD 発電システムの利用が考えら れそれぞれのシステム構成と特徴を述べた.

最後に我々のメタン高度利用技術研究センターでの実施 を計画しているメタン燃焼器からの燃焼ガスを用いて,ノ ズルによる作動流体の加速,予備電離,および MHD 発電 部の概略と計画を簡単に示した.

MHD 発電システムの確立は,次世代の発電システムと して期待されて久しいが,我々のプロジェクトの研究が発 電システムの確立,また実用化への道しるべとなれば,こ れに勝る喜びはない.

謝 辞

MHD 発電に関して長岡技術科学大学プラズマ力学研究 室のこれまでの研究成果や現在進行中のメタン高度利用技 術に対応した研究の紹介では, 菊池准教授, 佐々木助教を はじめ研究室の学生諸氏の成果によるところが大きく, 心 から感謝の意を表します.



図12 メタン燃焼器の概要.



図13 メタン燃焼器と組み合わせる MHD 発電実験装置.



図14 予備電離の予備実験として誘導結合プラズマの生成.

参 考 文 献

- [1] 原田信弘:電学論 B127, 3 (2007).
- [2] 電気学会:技術報告書,エネルギー高度利用 MHD 発電 技術, 1138 (2007).
- [3] N. Kayukawa and Y. Wang, J. Propulsion Power 20, 3 (2004).
- [4] 奥野喜裕ほか:電学論 B 118, 12 (1998).
- [5] Nob. Harada, N. Sakamoto and H. Endo, AIAA Paper 97 -2372 (1997).
- [6] Nob. Harada, Proc. Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2006, C3-3 (2006).
- [7] L.C. Kien and Nob. Harada, J. Japan Institute of Energy 84, 3 (2005).