ディスク形CCMHD発電機の高性能化実験

正員 村上 朝之* 正員 奥野 喜裕*
正員 山岬 裕之*

Experiments of the Improvement in the Performance of a Disk CCMHD Generator

Tomoyuki Murakami*, Member, Yoshihiro Okuno*, Member, Hiroyuki Yamasaki*, Member

The present experimental study has aimed the improvement in the performance of a shock-tube driven disk CCMHD generator. For that purpose, an experimental set-up was arranged as follows: (1) An inlet swirl was introduced. (2) An area ratio of the disk generator was small. (3) A cesium seeded helium gas was used as working medium. Not only these factors but also a production of a homogeneous plasma contributed to outstanding performance of an isentropic efficiency of 63% and an enthalpy extraction ratio of 30.8% at a stagnation temperature of 2250 K and stagnation pressure of 0.14 MPa. Furthermore, a maximum electrical power output of 1.23 MW and a maximum power density of 297 MW/m³ were obtained.

キーワード：ディスク形 MHD 発電機，入口スワール，小断面積比，セシウムシードヘリウムガス，プラズマ構造

Keywords: disk MHD generator, inlet swirl, small area ratio, cesium seeded helium gas, plasma structure

1. はじめに

希ガスを用いたクローズドサイクル MHD (CCMHD) 発電機の高性能化に関する研究はこれまで米国，オランダ，日本等各国において行われてきた^{(1)~(4)}。東京工業大学においても発電実験が精力的に行われ，高いレベルの発電性能を達成すると同時に興味ある物理現象を明らかにしてきた。CCMHD 発電機の性能を評価する指標としてエンタルピー抽出率（電気出力の発電機への熱入力に対する比），等エントロピー効率（発電が等エントロピー的に行われる程度，いわゆる断熱効率）が用いられる⁽⁵⁾。最近では，CCMHD 単独発電システムにおいて，ディスク形 MHD 発電機の等エントロピー効率を 80~85% 程度，及びエンタルピー抽出率を 30% 程度得ることができれば，既存の発電プラント性能を大きく上回る 60% 程度の総合効率を実現できる可能性が示唆された⁽⁶⁾。

本論文では，まず従来各国で行われた主な衝撃波管駆動ディスク形 MHD 発電実験の結果を対象とし，MHD 発電機の発電性能を左右する大きな要因と考えられる，発電機断面積比・発電機入口の流れの状態・作動気体の違いに注目した考察を行う。発電チャネル出口断面積/入口スロー

ト断面積と定義される発電機の断面積比は，発電機内の流体の膨張の程度を決定付ける要素である。ディスク形発電機入口における流れの状態の違いとは，ここでは流れが単純な半径方向流であるか旋回を伴った流れであるかの違いを指す。作動気体としては，近年では主にアルカリ金属であるセシウムを少量添加したアルゴンガスあるいはヘリウムガスが用いられる。

上述の検討を踏まえ，高い発電性能を達成可能とする条件を探求し，衝撃波管駆動 MHD 発電機の高性能化実証実験を行い，従来の研究を上回る発電性能を実現した実験結果について述べる。特に過去最高の等エントロピー効率を達成した結果についての考察を行う。

2. CCMHD 発電機の発電性能向上の経緯

〈2・1〉 国際的な実験的研究成果 表 1 に 1970 年代から 1980 年代にかけて米国及びオランダで行われた主な衝撃波管駆動ディスク形 MHD 発電実験の例を挙げる^{(1)~(3)}。AVCO 社（現 Textron 社，米国）が直径 1.5 m の大型ディスク形発電機を用いて行った発電実験では，CCMHD 発電機による大電力の発生が可能であることを実証するとともに，エンタルピー抽出率 16.6%，等エントロピー効率 40%（ともに熱入力は絶対零度基準）という比較的高い発電性能を達成している⁽¹⁾。同文献(1)からは発電機の断面積比は 4~5 程度であったと推定される。ここでは半径方向流が用いられたが，これに先駆けて発電機上流における旋回流（スワール）導入の有効性が理論的に示されている⁽⁷⁾。

* 東京工業大学大学院総合理工学研究科
〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259
Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering,
Tokyo Institute of Technology
4259, Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 226-8502

表 1 米国及びオランダにおける代表的な衝撃波管駆動 MHD 発電実験

Table 1. Typical shock-tube experiments of MHD power generation in USA and Netherlands.

Affiliation (country)	AVCO(USA)	MIT(USA)	EUT(N.L.)
Disk generator with	radial nozzle	swirl vanes	swirl vanes
Inlet swirl	0	1.0	0.7
Area ratio	4~5	11.5	11.5
Working gas	Ar+Cs	Ar+Cs	Ar+Cs
Magnetic field [T]	1.0	3.0	3.0
Thermal input [MW]	70.0	5.3	2.1・5.3
Stag. temperature [K]	4000	2550・3075	2100・3500
Stag. pressure [MPa]	0.40	0.86	0.42・0.80
Mass flow rate [kg/s]	35	4.6	2.1・3.0
Power output [MW]	11.5	0.5・0.9	0.38・1.0
Power density [MW/m ³]	130	260・470	76・200
Enthalpy extraction ratio [%]	16.6	9.3・17.2	18・19
Isentropic efficiency [%]	40	—	—
Reference	(1)	(2)	(3)

文献(7)に示される指針に従い、マサチューセッツ工科大学(MIT, 米国)において小型の発電機の入口領域にスワールベーンを設置した実験が行われ、澱み点温度 2550 K の条件においてエンタルピー抽出率 9.3% を、3075 K の条件においてエンタルピー抽出率 17.2% (ともに熱入力は室温基準)を得た⁽²⁾。この実験により旋回流を導入しない場合と比較して旋回流を導入した発電機の方が高いエンタルピー抽出率を達成する上で優位であることが実証された。ここでは、セシウムをシードしたアルゴンの非平衡電離を促進させ高い電気伝導度を得ることを目的として、澱み点温度を高くすることにより、エンタルピー抽出率が向上する傾向が示されている。また、アイントホーヘン工科大学(EUT, オランダ)においてもスワールを導入した発電実験が行われ、高い澱み点温度 3500 K の条件においてエンタルピー抽出率 19%, 低い澱み点温度 2100 K の条件においてもエンタルピー抽出率 18% (ともに熱入力は室温基準)が得られている⁽³⁾。ただし、後の議論の対象とするように、マサチューセッツ工科大学、アイントホーヘン工科大学の発電機の断面積比は 11.5 と比較的大きな値であった。

〈2・2〉東京工業大学における実験的研究の推移 東京工業大学においては、主に発電機の規模及び印加磁束密度の大きさを文献(2)(3)に示す実験規模と同等とする一方で、実用化を視野に入れて澱み点温度を 2200~2600 K と低くした衝撃波管駆動発電実験を行ってきた。その際、発電機断面積比の変化が発電性能に及ぼす影響を検討するため、スワールを導入しない発電機においてセシウムをシードしたヘリウムガス(He/Cs)を用いた実験が行われた⁽⁸⁾。ここでは、断面積比を 1.6 から 19 へと増加させるにつれてエンタルピー抽出率は 8% から 27% (熱入力は絶対零度基準)へと大きく向上することが示された。この結果は、断面積比が小さい場合は流体が膨張しにくく、断面積比を大きくすることでその膨張が促されることから理解される。

さらにエンタルピー抽出率を向上させるために断面積比

の大きな発電機(断面積比 24.7)上流領域にスワールを導入する試みがなされ、エンタルピー抽出率が 32.5% (熱入力は絶対零度基準)まで向上した⁽⁹⁾。

すでに述べたように、高い等エントロピー効率の達成は、高効率発電システムを構築する上で必要不可欠である。等エントロピー効率を向上させるための指針を得る実験結果を、図 1 に等エントロピー効率とエンタルピー抽出率の関係として示す。同図における理論曲線(点線)は、エンタルピー抽出率と等エントロピー効率の関係が断面積比(A.R.)と出口マッハ数(M_o)に依存することを示し、同じエンタルピー抽出率を得た場合には断面積比の小さな発電機は断面積比の大きな場合と比較してより高い等エントロピー効率を実現する可能性を持つことを示す⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。同図より、従来研究に見られるように断面積比 11.5 (マサチューセッツ工科大学⁽²⁾、アイントホーヘン工科大学⁽³⁾)あるいは断面積比 24.7 (東京工業大学⁽⁹⁾)の発電機においてスワールを導入しエンタルピー抽出率を向上させても、60% を超えるような高い等エントロピー効率の達成は極めて困難であることが示唆される。

このことを鑑み、最近では高い等エントロピー効率を得る上で有利である断面積比の小さなディスク形発電機を用いた実験が行われた。図 1 に、断面積比 4.2 のスワールを持たない半径方向流発電機(radial flow 発電機)において作動気体をセシウムをシードしたアルゴン(Ar/Cs)とした結果⁽¹⁰⁾、及び He/Cs とした結果⁽¹²⁾を、それぞれ○印と●印で示す。表 2 に各実験条件を示す。また比較対象として断面積比 14.4 の発電機において Ar/Cs を用いて得た結果も示した(□印)⁽¹⁰⁾。図 1 における結果は熱入力を絶対零度基準としている。断面積比 4.2 の発電機を用いた実験結果は、断面積比を小さくしたことで高いエンタルピー抽出率を得ることは容易でなくなるものの、比較的高い等エントロピー効率が達成されることを示す。特に作動気体を He/Cs とした場合の等エントロピー効率がエンタルピー抽出率に対して大きい比率で得られていることが注目される。ただし、実用化目標と考えられる等エントロピー効率 80%, エンタルピー抽出率 30% は、断面積比 4.2 の場合には出口マッハ数が 2 程度とならないと得られないことが予測され、これらの実用化目標値の達成には発電機形状のさらなる最適化が必要であることが示唆される。

さらに断面積比の小さな発電機においてもスワールを導入する試みがなされた。なお、スワール導入の効果については文献(13)に述べられている。図 1 において△印で示された結果は断面積比 4.2 を持つ発電機に対してスワールベーンを設置し(swirl flow 発電機)、作動気体 Ar/Cs を用いた実験結果である⁽¹³⁾。スワール導入により実効的なスロート断面積(スロートにおける流線に垂直な断面積)が減少するため、実効的な断面積比は 4.2 から 5.9 へとやや増加するが、エンタルピー抽出率が 27% へと向上し、同時に当時としては最高の等エントロピー効率 54% が実現された。

○印：作動気体 Ar/Cs, 半径方向流発電機 (断面積比 4.2)
□印：作動気体 Ar/Cs, 半径方向流発電機 (断面積比 14.4)
●印：作動気体 He/Cs, 半径方向流発電機 (断面積比 4.2)
△印：作動気体 Ar/Cs, スワール発電機 (断面積比 5.9)

図 1 等エントロピー効率とエンタルピー抽出率の関係及びその断面積比・出口マッハ数依存性
Fig. 1. Relation between isentropic efficiency and enthalpy extraction ratio, and its area ratio (A.R.) and exit Mach number (M_e) dependences.

ここでエンタルピー抽出率 ($E.E.$), 等エントロピー効率 ($I.E.$), 熱入力 ($T.I.$) の評価に関して付記する。発電機への熱入力は, 室温基準として $T.I. = \dot{m}C_p(T_0 - T_{room})$, 絶対零度基準として $T.I. = \dot{m}C_p T_0$ と表される。ここで $\dot{m}$ は質量流量, T_0 は入口澱み点温度, T_{room} は室温, C_p は理想気体の定圧比熱である。実験的に等エントロピー効率を求める上では, 等エントロピー変化における関係式 $T_0/(p_0)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \text{constant}$ を使い, 発電機入口澱み点温度・入口及び出口澱み点圧力の計測値から $I.E. = [E.E.]/[1 - (\frac{1}{p_r})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}]$ を求めることができる。ここで p_0 は澱み点圧力, p_r は入口/出口の澱み点圧力比, γ は理想気体の比熱比である⁽¹⁾⁽⁵⁾。上記近似式に従い実験的に等エントロピー効率を求める上では熱入力を絶対零度基準とする必要があるため, 等エントロピー効率に注目する研究ではエンタルピー抽出率に対して絶対零度基準の表記を行うことも多い。

3. He/Cs を作動気体とした断面積比の小さいスワール発電機での発電性能向上実験

〈3・1〉高性能化への指針 前節までの議論からスワールを導入した断面積比の小さい発電機を用いることで高い等エントロピー効率が達成できる可能性が示された。ここで, すでに図 1 に示した作動気体を He/Cs とした半径方向流発電機の発電特性 (●印) に注目する。この場合には出口における高いマッハ数 ($M_e \sim 2$) を維持することにより, 若干低いエンタルピー抽出率にもかかわらず 45% 程度の等エントロピー効率を得た。出口マッハ数 1 を大きく上回るような条件は, ディフューザーでの圧力損失が大きく

表 2 東京工業大学における従来の代表的衝撃波管駆動発電実験条件並びに本実験条件

Table 2. Operating conditions of typical shock-tube driven MHD power generation experiments and the present experiment in Tokyo Institute of Technology.

Experiment	previous	previous	previous	present
Flow type	radial	radial	swirl	swirl
Swirl factor (inlet)	0	0	1.0	1.0
Designed area ratio	4.2	4.2	5.9	5.9
Working gas	Ar+Cs	He+Cs	Ar+Cs	He+Cs
Magnetic field (max) [T]	3.0	3.0	3.0	3.0
Thermal input [MW]	2.5	5.5	2.2	2.7~4.3
Stag. temperature [K]	2550	2050	2480	~2250
Stag. pressure [MPa]	0.21	0.15	0.24	0.10~0.16
Mass flow rate [kg/s]	1.9	0.4	1.7	0.24~0.35
Seed fraction [$\times 10^{-4}$]	< 8	< 7	< 17	< 8
R_{nozzle} [Ω]	9.0	0.85	10.0	5.0
$R_{channel}$ [Ω]	0.13	0.55	0.17	0.2~2.0
Reference	(10)	(12)	(13)	—

なるため最高発電性能を達成する最適な運転条件ではないが, 比較的高い流速を得やすいという作動気体 He/Cs の特長を生かすことは, より高い等エントロピー効率を達成する上で有利となることが示唆される。このため本実験においては作動気体として He/Cs を選択する。

〈3・2〉発電実験結果 衝撃波管駆動装置及びディスク形発電機断面積比については詳細が文献 (10)~(13) に述べられているため, その記述を省略する。表 2 に本実験条件並びに後の議論のため従来研究の実験条件を記す。

図 2 にホール電圧・ホール電流特性を示す。同図 2(a) は本実験結果 (He/Cs スワール発電機) を示す。ここでは入口澱み点圧力 (以下, 澱み点圧力) を 0.10 MPa から 0.16 MPa の範囲で変化させた。澱み点圧力の上昇に伴い熱入力が増加するため, 電気出力が上昇する。本実験における最高電気出力 1.23 MW は, 澱み点圧力 0.16 MPa, チャネル負荷抵抗値 (R_L) 0.77 Ω の運転条件下で実現された。ここで得られたホール電圧は 970 V, ホール電流は 1270 A である。また出力密度 (電気出力/発電チャネル体積) は 297 MW/m³ に達する。

澱み点圧力 0.14 MPa, チャネル負荷抵抗値 0.62 Ω の条件においては出力 1.13 MW (出力密度 278 MW/m³) 並びに等エントロピー効率及びエンタルピー抽出率の最高値 (後述) を達成している。また, 澱み点圧力を変化させた場合にも, 電圧・電流特性曲線の傾きは大きく変化しないことがわかる。これは, 本実験で設定した澱み点圧力の範囲内では, プラズマ流体の内部抵抗値が大きく変化していないことを示唆する。

図 2(b) の電圧・電流特性には, 本実験における最高等エントロピー効率を得た結果 (図 2(a) ●印, 澱み点圧力 0.14 MPa) との比較検討のため, 同じスワール発電機を用いて作動気体を Ar/Cs とした場合 (■印), 半径方向流発電機において He/Cs または Ar/Cs を用いた場合 (それぞれ○印, □印) に得られた結果を示す。各実験結果はそれ

図2 ホール電圧 - ホール電流特性曲線: (a) 作動気体を He/Cs としたスワール発電機における各澱み点圧力毎の V-I 特性曲線, (b) 4 つの異なる発電実験における V-I 特性曲線

Fig. 2. Hall voltage - Hall current characteristic curves: (a) The V-I curves for typical stagnation pressures in the swirl flow generator using He/Cs, (b) The V-I curves for 4 different experiments.

それぞれの最高発電性能を得た場合を含み、運転条件は表 2 に示される。

同図 2(b) より、作動気体を He/Cs とした場合は、より高いホール電圧を得やすく（より大きな負荷抵抗値に対して整合する）、Ar/Cs とした場合にはより高いホール電流を得やすい傾向が確認できる。この傾向はスワールを導入するか否かの条件には大きく依存しない。さらに、スワール導入により熱入力が低下する（表 2 参照）にもかかわらず最高発電出力が向上していることがわかる。この結果より、スワール導入によるエンタルピー抽出率向上の効果が示される。特に He/Cs を作動気体とした場合のスワール導入による発電出力向上の度合いは大きい。また、このときスワール導入の有無による電圧 - 電流特性の勾配の変化は顕著ではないが、比較的高いホール電圧が得られていることからホール起電力上昇の効果が現れたことが示唆される。

図3 等エントロピー効率とエンタルピー抽出率の関係

Fig. 3. Relationship between isentropic efficiency and enthalpy extraction ratio.

図 3 にエンタルピー抽出率と等エントロピー効率の関係を示す（熱入力は絶対零度基準）。ここで記号と発電機・作動気体の対応関係は図 2(b) に準ずる。作動気体を Ar/Cs とした結果では、スワールの導入によってエンタルピー抽出率が 17.2% から 25.7%, 等エントロピー効率が 40% から 54% へと向上している。また、本実験において作動気体を He/Cs とした結果に注目すると、スワールを導入することによりエンタルピー抽出率が 15.9% から 30.8% へと大きく向上していることがわかる。特に等エントロピー効率は 63% と著しく高い値が得られており、半径方向流発電機を用いて得た等エントロピー効率 45% から大幅な向上を遂げている。このように極めて高い等エントロピー効率が達成された理由の一つは、高いエンタルピー抽出率 30.8% が得られたことである。さらに、出口マッハ数が 1.3 と比較的高いことも高い等エントロピー効率の達成に寄与したと考えられる。

次に発電プラズマの状態に関する検討を行う。図 4(a), (b) に作動気体を He/Cs としたスワール発電機における典型的な発電プラズマの放電構造の例を示す。図 4(a) の放電構造はシード率 4.5×10^{-4} , (b) の構造はシード率 5.5×10^{-4} の条件で得られた（他の運転条件は図 3 と等しく澱み点圧力 0.14 MPa, チャンネル負荷抵抗値 0.62 Ω ）。後述のように、同図 (a) は放電構造が比較的一様であり、図 (b) は非一様であることを示す。同図はディスク中心からチャンネル中流域（半径 170 mm）までの領域を撮影している。ディスク上流部分におけるリング状暗部は第 1 アノード（半径位置 64~95 mm）及び第 2 アノード（半径位置 105~110 mm）であり、ディスク中心から右手水平方向への暗部はディス

図4 作動気体を He/Cs としたスワール発電機を用いた本実験における典型的な放電構造写真：
(a) 一様な構造、及び (b) 非一様な構造

Fig.4. Photographs of typical discharge structures in the present experiment using the swirl flow generator with He/Cs: (a) Homogeneous structure and (b) inhomogeneous structure.

ク支持梁部である。各計測用ポートやケーブル等も暗部として認識される。スワールペーン（厚さ 0.8 mm）は半径 64~100 mm 位置に円周方向均等に 24 枚設置した。また、外部磁束密度印加方向は紙面から手前向きである。したがって、半径方向流速成分と外部磁束密度との相互作用に起因するファラデー電流は紙面上時計回りに誘起され、入口スワールは反時計回りの旋回流を与える。

図 4(a) に注目すると、スワールペーン数に対応した 24 組の弱い明暗差が確認できる。このような構造は、スワールペーンを設置したことにより形成されたものと考えられる。各構造の明度は円周方向に関して周期的に変化しており、旋回流方向（流体が下流へと流れる方向）にも顕著な不連続性は見られない。以上より、本実験においては、比較的空間的一様性の高いプラズマ構造を実現できたことが示唆される。また図 4(a) に代表される比較的一様な放電構造を実現する場合には高い等エントロピー効率が得られた。

一方、図 4(b) においては、図 4(a) にみられたような弱い明暗差とは異なり、非常に明るい筋状の構造が現れている。また、この顕著な明暗の構造には、図 4(a) のようにほぼ単調に旋回流方向へ伸びるだけでなく、半径方向に対して不連続性を持つ領域がある。図 4(b) からはプラズマの構造が非一様であることが示唆される。このような構造が得られる場合には等エントロピー効率は比較的低い値にとどまる。

最後に本実験で得られた発電性能の国際的・歴史的な位置付けを示す。図 5 に本実験及び従来行われた代表的な衝撃波管駆動発電実験（表 1, 2 参照）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

図5 本実験及び従来実験における等エントロピー効率、エンタルピー抽出率、及び出力密度
Fig.5. Isentropic efficiency, enthalpy extraction ratio, and power density obtained in the present and previous experiments.

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、△印はマサチューセッツ工科大学におけるスワール発電機を用いた実験結果、◇印は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である。同図における結果はすべて熱入力を絶対零度基準とした場合を示す。また、文献に等エントロピー効率の計測値が記されていない場合は図 5 にその記載を行っていない。

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。

4. まとめ

非平衡プラズマを用いたディスク形 CCMHD 発電の高性能化を目的として衝撃波管駆動発電実験を行った。本目的を達成するために、従来の研究結果を鑑み、入口スワールの導入によるエンタルピー抽出率の向上、断面積比の小さい発電機を用いることによる等エントロピー効率の向上、作動気体 He/Cs を用いることによるプラズマ流体の高流速化を狙いとした実験を行った。上述の効果が顕著に表れ、また、発電機内において比較的一様なプラズマ構造を実現

したことが高性能化に大きく寄与した結果、国際的に行われた多くの従来実験結果を大きく上回る極めて高い等エントロピー効率 63% を達成した。また、高い水準のエンタルピー抽出率 30.8%, 出力密度 297 MW/m^3 を達成した。これまで実験室規模の小型装置における目標値とされてきたような高い発電性能を達成できた本実験結果は、CCMHD 発電の高性能化実証研究を推進していく上での大きなマイルストーンになるといえる。

今後さらなる高性能化（等エントロピー効率 80% 程度）を達成するためには、印加磁束密度の増加と並んで、より断面積比が小さく（断面積比 3 程度）またチャネル高さが大きい（流体力学的損失を低減する）発電機を用いることが有効な手段であると考えられる。また、高性能発電機設計の観点からは、本実験結果並びに今後の実験結果における物理的側面のより詳細な検討が必要であり、数値計算的研究との密な関連の中での研究推進が重要である。

（平成 15 年 3 月 18 日受付、平成 15 年 6 月 16 日再受付）

文 献

- (1) J. Klepeis and V. Hruby: "MHD power generation experiments with a large disk channel", *Proc. 15th SEAM*, VI, pp.3.1-3.6 (1976)
- (2) W.J. Loubsky, V.J. Hruby, and J.F. Louis: "Detailed studies in a disk generator with inlet swirl driven by argon", *Proc. 15th SEAM*, VI, pp.4.1-4.5 (1976)
- (3) A. Veeffkind, P. Karavasiliev, and W. Dalun: "Performance experiments with a shock-tunnel-driven argon-caesium MHD disk generator", *J. Prop. & Power*, Vol.4, No.4, pp.363-369 (1988)
- (4) S. Kabashima: "Developments of MHD power generation", *J. Plasma & Fusion Research*, Vol.73, No.1, pp.9-18 (1997-1) (in Japanese)
梶島成治:「MHD 発電の進展」, プラズマ・核融合学誌, **73**, 1, pp.9-18 (1997-1)
- (5) R.J. Rosa: *Magnetohydrodynamic Energy Conversion*, McGraw-Hill, New York (1968)
- (6) Y. Okuno, K. Yoshikawa, T. Okamura, H. Yamasaki, S. Kabashima, and S. Shioda: "Proposal of a highly efficient CCMHD single power generation system", *T. IEE Japan*, Vol.118, No.12, pp.1457-1462 (1998-12) (in Japanese)
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, pp.1457-1462 (1998-12)
- (7) J.K. Klepeis and J.F. Louis: "The disk MHD generator applied to open cycle power generation", *Proc. 5th ICMHD*, I, pp.648-662 (1971)
- (8) N. Harada, T. Ishikawa, N. Kizuka, K. Nakamichi, T. Okamura, and S. Shioda: "Effect of channel shape on the performance of closed cycle MHD generator", *Proc. 11th ICMHD*, IV, pp.1161-1166 (1992)
- (9) N. Harada, N. Kizuka, T. Okamura, H. Yamasaki, and S. Shioda: "Improvement of enthalpy extraction over 30% using a disk MHD generator with inlet swirl", *Energy Conv. Mgmt.*, Vol.36, No.5, pp.355-364 (1995)

- (10) R. Hanaoka, M. Takada, M. Suzuki, K. Wada, K. Chikamura, N. Yamaguchi, J. Masuda, M. Okubo, and H. Yamasaki: "Effects of area ratio on performance of disk MHD generator with Ar/Cs", *T. IEE Japan*, Vol.118, No.7/8, pp.866-873 (1998-7/8) (in Japanese)
花岡 亮・高田雅章・鈴木将文・和田耕太郎・近村憲司・山口尚子・増田淳二・大久保雅章・山岬裕之:「アルゴンを用いたディスク形 MHD 発電機の性能に対する断面積比の影響」, 電学論 B, **118**, 7/8, pp.866-873 (1998-7/8)
- (11) T. Murakami, Y. Nakata, Y. Okuno, and H. Yamasaki: "An analytical study of the plasma condition and the performance of an MHD generator", *T. IEE Japan*, Vol.122, No.8, pp.917-922 (2002-8) (in Japanese)
村上朝之・中田佳孝・奥野喜裕・山岬裕之:「非平衡 MHD 発電プラズマの状態と発電性能に関する解析的検討」, 電学論 B, **122**, 8, pp.917-922 (2002-8)
- (12) T. Murakami, Y. Okuno, and H. Yamasaki: "Performance of a nonequilibrium supersonic disk MHD generator with helium", *Proc. 14th ICMHD*, AIAA-2002-2114 (2002)
- (13) S. Torii, M. Tsutsumi, Y. Okuno, and H. Yamasaki: "Improvement on performance of disk MHD generator with argon by introduction of swirl", *T. IEE Japan*, Vol.121, No.9, pp.1228-1235 (2001-9) (in Japanese)
鳥居俊介・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, pp.1228-1235 (2001-9)

村上朝之 (正員) 1970 年 1 月 28 日生。1993 年 3 月東京理科大学理工学部電気工学科卒業。1998 年 3 月東京工業大学創造エネルギー専攻博士課程修了。同年 4 月同大学原子炉工学研究所, 1999 年 4 月東北大学大学院工学研究科を経て, 2000 年 4 月東京工業大学大学院総合理工学研究科助手, 現在に至る。博士 (工学)。電気学会, プラズマ・核融合学会, 低温工学協会, IEEE 会員。

奥野喜裕 (正員) 1959 年 5 月 4 日生。1982 年 3 月九州工業大学電気工学科卒業。1987 年 3 月東京工業大学エネルギー科学専攻博士課程修了。同年 6 月長崎大学助手。1988 年 4 月佐賀大学講師。1989 年 4 月同助教。1994 年 4 月東京工業大学大学院総合理工学研究科助教授, 2000 年 4 月同教授, 現在に至る。電磁流体力学, プラズマ工学に関する研究に従事。工学博士。

山岬裕之 (正員) 1944 年 4 月 2 日生。1967 年 3 月新潟大学工学部機械工学科卒業。1969 年 3 月東京工業大学機械工学専攻修士課程修了。1990 年同大学原子炉工学研究所教授。1996 年同大学大学院総合理工学研究科教授, 現在に至る。MHD 発電, 高速気体力学, エネルギーシステムに関する研究に従事。工学博士。