CO₂回収方式石炭燃焼MHD発電機

ディスク型チャネルの安定性

正員 石川本雄、正員 松尾哲司、正員 卯本重郎 (京大)

Stability Analysis of MHD Disk Generators Designed
for Coal-Fired Power System with CO₂ Recovery

Motoo Ishikawa, Member, Tetsuji Matsuo, Member and Juro Umoto, Member (Kyoto University)

Design and stability analyses of MHD disk type generators are carried out, which are applied for coal-fired electrical power generation system with CO₂ recovery. Channels designed with subsonic flow show rather poor performance compared with supersonic flow channels. Inflow channels show better performance than outflow channels. The inflow channel gives enthalpy extraction ratios of 20.21% and 21.12% for the thermal input of 1100MW and 2000MW, respectively, while the outflow channel operated with supersonic flow yields the enthalpy extraction ratio of 17.92% and 18.12%, when the magnetic flux density is 8T. The open-cycle disk channels tend to become unstable at the exit region. It seems possible to stabilize the disk channels when operated with 8T but seems difficult to stabilize them when operated with 10T.

キーワード：CO₂回収方式、石炭燃焼MHD発電、ディスク型チャネル、安定性線形解析、時間依存解析

1. はじめに

火力発電所の排気ガス中のCO₂を回収する場合、空気の代わりに一部循環したCO₂を含む酸素で燃焼すると、除湿した排気ガス中のCO₂の割合が空気燃焼の場合の15%程度から90%以上になり、CO₂の回収が容易になる。石炭を燃料とする場合、従来の発電方式では高位発熱量基準において31%程度の総合効率が報告されている[1]。酸素燃焼の場合、MHD発電方式は本質的に高温ガスを有効に利用でき、効率は大幅に向上できる可能性があり、直線状のファラデー形チャネルを用いた検討では、CO₂液化回収電力を考慮して40~46%の高効率が可能であることを示した[2]。

直線状MHD発電チャネルに関しては多くの実験的研究が行われ、豊富な経験が蓄積されているが、電流統合制御回路が複雑になり、超電導磁石が巨大になる傾向を持っている。一方、ディスク型発電機では電力制御回路が単純化され、超電導磁石がコンパクトにできるという利点を持っているが、オープンサイクルMHD発電分野ではほとんど実験的研究がなされておらず、さらに発電機そのものが不安定になる可能性が指摘されている[3、4]。

石炭直接燃焼MHD発電システムの高効率化に関する検討において、MHD発電機からのエンタルピー抽出率が20%、25%、30%で、空気加熱器動作温度が1620K、1780K、2100Kのとき、MHD発電システムの総合熱効率は、それぞれ約50%、55%、60%になることを示した[5]。高効率石炭直接燃焼MHD発電システムに必須の高温空気加熱器に関して、カリウムシードと石炭スラグが存在するという条件では早期の実用化が困難であるが、CO₂回収式石炭燃焼MHD発電方式は高温空気加熱器を必要としないという利点を持っている。

環境問題に関しては、導電性を高めるためカリウム化合物をシード物質として添加するので、燃料中のイオウ成分が選択的にカリウムと結合し脱硫がほぼ完全に行われ、特別の脱硫対策を必要としない。また、窒素酸化物の排出量も十分減少できることが示されている[6、7]。

本論文の目的は、一部循環したCO₂を含む酸素で石炭を直接燃焼し、排気ガスからCO₂を回収・液化するMHD-汽力複合発電所システムにディスク型チャネルを適用する可能性を検討するために、エンタルピー抽出率が20%程度のディスク型チャネルを設計するとともに、設計した発電機の安定性を検討することである。

2. 数値解析モデルと作動ガス

電氣的諸量に関する基礎方程式は、準1次元近似した電界に関するマクスウェル方程式、電流保存則、一般化されたオームの法則である。流体力学的諸量に関する基礎方程式は1次元近似した質量保存則、運動量保存則、エネルギー保存則であり、発電性能を評価する際には定常方程式を用い、発電機の安定性の検討には時間依存方程式も併せて用いた[4, 8]。圧力損失・熱損失に関しては、平板乱流に対する評価式を用い、チャネル壁の粗さの効果を1mmの等価砂粒径で考慮し、また放射損も考慮している。上述の定常、準1次元近似した方程式はルンゲクッタ法により、時間依存方程式はマコーマック法により解析している[8, 9]。またエンタルピー、導電率などの熱力学的諸量は、化学的熱平衡計算を別に行い、温度と圧力の関数として取り扱っている。

図1にディスク型MHD発電チャネルの模式図および用いる座標系を示している。外向き流を用いるチャネルと内向き流を用いるチャネルではアノードとカソードが入れ替わることに注意されたい。

本発電システムは3000K程度の燃焼温度を得るため、石炭燃焼の酸化剤として、CO₂を約32mol%含む酸素を用いる。酸素は空気から分離した純度95mol%のものを仮定している。燃焼温度は現在の技術で耐久性が十分あると考えられる3000K程度を仮定したが、将来は32

図1 ディスク型MHD発電機の概要と座標系

(①、②は外向き流では陽極と陰極、
内向き流では陰極と陽極を示す)

Fig. 1. Schematic of disk type MHD generator and Coordinates. (① and ② indicate anode and cathode for inflow whereas they do cathode and anode for outflow)

00K程度の燃焼温度も可能であると考えられる。燃焼により生成される窒素酸化物(NO_x)は熱平衡値が1700Kで7ppmと十分低い値になっている[2]。

なお、燃焼ガス中に分子量の小さい窒素の代わりに分子量の大きいCO₂を多く含むので、従来の燃焼ガスに比較して音速と電導率が小さくなり、MHD発電機自身の性能は従来方式の場合に比較して低下する。後述する亜音速機の性能が向上しない主な理由になっていると考えられる。

3. ディスク型発電機の定常動作解析

ディスク型MHD発電チャネルとしては通常の外向き流を持つ発電機と内向き流を持つ発電機が提案されており[10]、また流れが亜音速の場合と超音速の場合とは発電機の性質が異なるので、ここでは(1)外向き亜音速流れ、(2)外向き超音速流れ、(3)内向き亜音速流れ、(4)内向き超音速流れ、の4つの発電機の動作を検討した。

磁束密度はチャネル内で一定として与え、8Tと10Tを仮定した。入口総温は3000Kとし、出口総圧は、亜音速機の場合には約1.0気圧としたが、超音速機の場合には低圧では発電機が不安定になる傾向を考慮し、また超音速ディフューザ内衝撃波の圧損が大きくなる傾向も考慮して、約1.1気圧となるようにr方向速度分布、負荷電流を与えた。マッハ数に関しては、r方向成分が1を横切ると非線形効果が著しく強くなり、不安定動作の原因の一つとなるため、亜音速機の場合にはr方向成分が0.9以下、超音速機の場合には1.2以上となるように動作条件を定めた。内半径は熱入力1100MWの場合には1m、2000MWの場合には2mとしている。

<3.1> 外向き亜音速流れ 熱入力1100MW、質量流量187.6kg/s、単一負荷、8Tの条件で、入口総圧を6気圧から12気圧、チャネル長を1.5mから3mまで種々に変化させて発電機の出力を検討したが、いずれも良好な発電性能は得られず、検討した範囲内ではチャネル長2m、入口総圧8気圧、負荷電流8560Aで出力82.8MW、エンタルピー抽出率7.52%が最高の発電性能であり、そのときのチャネル内諸量を下に示す。

	r 方向 マッハ数	スウォール 比	導電率	ホールパラ メータ
入口	0.48	1.60	10.8	0.91
出口	0.84	-0.42	11.8	6.35

<3.2> 外向き超音速流れ 単一負荷、8Tの条件で、入口総圧を8気圧から15気圧、チャネル長を1.5mから4mまで種々に変化させて発電機の出力を検討し、チャネル長2m、入口総圧12気圧、負荷電流10900Aで出力169.8MW、エンタルピー抽出率15.44%を得た。このときのチャネル内諸量は次の通りである。

r 方向 マッハ数	スウォール 比	導電率	ホール パラメータ
入口 1.22	1.30	6.59	2.45
出口 1.20	-0.22	6.98	7.74

比較的良好な発電性能が得られたので、2 負荷、4 負荷の場合について検討し、下流部分で負荷電流を大きくする 2 負荷発電機では 16.64%、上流から下流へと負荷電流を大きくした 4 負荷発電機では 17.92% が得られた。

また単一負荷、10 T の条件では、入り口総圧 12 気圧、チャンネル長 1.5 m、負荷電流 11480 A でエンタルピー抽出率 17.79% を得た。

8 T、4 負荷発電機の諸量は次の通りである。

r 方向 マッハ数	スウォール 比	導電率	ホール パラメータ
入口 1.22	1.30	6.59	2.45
出口 1.19	-0.25	6.51	7.69

質量流量	187.6 kg/s	熱入力	1100 MW
電気出力	197.1 MW	熱損失	44.3 MW
エンタルピー抽出率	17.92 %		
r 方向最大電界	-13.1 kV/m		
r 方向最大電流密度	18.2 kA/m ²		
θ 方向最大電流密度	-21.0 kA/m ²		

負荷電流[kA]	端子電圧[kV]	無負荷起電力[kV]
第一負荷 10.0	5.67	13.6
第二負荷 10.7	5.31	18.0
第三負荷 11.7	4.38	26.6
第四負荷 12.0	2.69	28.0

<3.3> 内向き亜音速流れ 単一負荷、8 T の条件で、入口総圧を 6 気圧から 12 気圧、チャンネル長を 2 m から 5 m まで種々に変化させて発電機の出力を検討したが、いずれも良好な発電性能は得られず、検討した範囲内ではチャンネル長 3 m、入り口総圧 8 気圧、負荷電流 6985 A で出力 137.4 MW、エンタルピー抽出率 12.51% が最高の発電性能であった。

r 方向 マッハ数	スウォール 比	導電率	ホール パラメータ
入口 0.304	2.80	10.8	0.91
出口 0.885	0.14	5.6	5.97

以上のように、外向き流、内向き流を問わず、亜音速流れで運転するディスク型発電機では諸拘束条件により、速度の r 方向成分が 300 m/s 程度まで低下せざるをえず、無負荷誘導起電力が超音速機と比較して大幅に低下しており、良好な発電性能は得られなかった。これは、燃焼ガス中に分子量の小さい窒素の代わりに分子量の大きい CO₂

を多く含むので、従来の燃焼ガスより音速と電導率が小さくなるのが主な理由であると考えられる。

<3.4> 内向き超音速流れ 単一負荷、8 T の条件で、入口総圧を 6 気圧から 15 気圧、チャンネル長（陰極半径と陽極半径の差）を 2 m から 4.5 m まで種々に変化させて発電機の出力を検討し、チャンネル長 2.5 m、入口総圧 12 気圧、負荷電流 9230 A で出力 215.4 MW、エンタルピー抽出率 19.58% を得た。諸量は次の通りである。

r 方向 マッハ数	スウォール 比	導電率	ホール パラメータ
入口 1.57	0.80	6.59	2.45
出口 1.20	0.62	4.36	9.40

良好な発電性能が得られたので、2 負荷、4 負荷の場合について検討し、下流部分で負荷電流を小さくする 2 負荷では 20.17% が得られ、上流から下流へと負荷電流を小さくした 4 負荷発電機では 20.21% が得られた。

また単一負荷、10 T の条件では、入口総圧 15 気圧、チャンネル長 2 m、負荷電流 9590 A でエンタルピー抽出率 21.76% を得た。2 負荷、10 T の条件では、入口総圧 15 気圧、チャンネル長 2 m、負荷電流 9900 A、8645 A でエンタルピー抽出率 22.38% を得、8 T、10 T いずれの条件においてもエンタルピー抽出率 20% 以上の目標を達成できた。

8 T、4 負荷発電機の諸量は次の通りである。

r 方向 マッハ数	スウォール 比	導電率	ホール パラメータ
入口 1.57	0.80	6.59	2.45
出口 1.23	0.737	3.72	10.8

電気出力	222.3 MW	熱損失	58.5 MW
エンタルピー抽出率	20.21 %		
r 方向最大電界	17.8 kV/m		
r 方向最大電流密度	-19.5 kA/m ²		
θ 方向最大電流密度	18.4 kA/m ²		

負荷電流[kA]	端子電圧[kV]	無負荷起電力[kV]
第一負荷 9.7	7.66	26.7
第二負荷 9.2	5.66	45.0
第三負荷 7.5	5.88	55.7
第四負荷 7.15	7.25	51.5

内向き流超音速チャンネルに関しては熱入力 2000 MW についても解析を行ったが、熱入力 1100 MW の場合とほとんど同じ結果を得た。これはいずれの場合もチャンネル長が 3 m 程度と短くなり、壁での摩擦損、熱損が相対的に小さいためである。ただし、出力密度は熱入力 1100 MW では 54.2 MW/m³、2000 MW では 71.1 MW/m³ となるので、超電導磁石は相対的にかなりコンパクトにできる。

熱入力 2000 MW、10 T、単一負荷発電機の諸量は次の通りである。

	r 方向 マッハ数	スウォール 比	導電率	ホール パラメータ
入口	1.23	1.30	6.59	2.53
出口	1.20	0.01	5.34	9.19
電気出力	440.7 MW		熱損失	52.7 MW
エンタルピー抽出率	22.04		%	
r 方向最大電界、	15.5		kV/m	
r 方向最大電流密度	-21.1		kA/m ²	
θ 方向最大電流密度	15.5		kA/m ²	

図2は、熱入力1100 MW、8 T、4 負荷内向超音速流ディスク型発電機内圧力とマッハ数の分布である。流速

(a) 圧力分布

(b) マッハ数分布

図2 内向超音速流ディスク型発電機内諸量の分布
(熱入力1100 MW、8 T、4 負荷)

Fig. 2. Distribution of quantities along the inflow disk channel with supersonic flow. (thermal input of 1100 MW, magnetic flux density of 8 T and four loads)

の r 方向成分の分布を同一負荷領域内で線形変化するように与えているため、マッハ数分布の変化は一様ではない。入口 (r: 大) 付近では、圧力変化が大きく、マッハ数の変化は小さく、出口 (r: 小) 付近では逆にマッハ数の変化が大きく、圧力変化は小さい。図示してはいないが、電流密度の分布に関しても、入口付近では電流密度の絶対値が大きく、一方出口付近では電流密度の絶対値が小さくなっている。以上のように設計したチャンネルの前半部では主として内部エネルギー、後半部では主として運動エネルギーが電気エネルギーに変換されていることが分かる。

4. ディスク型 MHD 発電機の安定性解析

<4.1> 安定性解析 本節の安定性解析に関する数学的記述は文献 [11] を参照されたい。

熱入力1100 MW、8 T、4 負荷内向超音速流ディスク型発電機に関して、発電機入口において与えた諸量の擾乱が出口においてどのように成長・減衰するのかを感度解析法を用いて検討する。入口諸量を U_0 、出口諸量を U_1 とし、時間依存項 $\partial/\partial t$ を $j\omega$ と置いて $\omega=0$ の場合の $\partial U_0/\partial U_1$ の4つの固有値を次に示す。

負荷電流固定	1601	0.619	0.092	0.164
負荷電圧固定	0.751	0.336	0.336	0.164
負荷抵抗固定	0.681	0.503	0.503	0.164

$\omega \neq 0$ の場合には固有値の最大値は増大するが、傾向は同じであり、負荷電流固定の場合には、入口における乱れが流れに乗って増大するが、負荷電圧固定、負荷抵抗固定

図3 内向超音速流ディスク型発電機動的インピーダンス解析結果 (#1～#4は第1から第4負荷領域に対応；熱入力1100 MW、8 T、4 負荷； ω は250おきに0から5000まで変化)

Fig. 3. Trace of $\partial V_{gen}/\partial I$ of inflow disk channel with supersonic flow (thermal input of 1100 MW, 8 T and 4 loads)

の場合には入口における乱れが流れに乗って大幅に増大する傾向はないことを示している。

次に同じディスク型発電機に対して動的インピーダンス解析を行い、その結果を図3に示している。図中#1～#4は第1から第4負荷領域に対応している。図は ω が実軸上を動いた場合の $\partial V_{MHD} / \partial I$ の軌跡であり、実軸上から始まり、 $\omega = 0$ から $\omega = 5000$ まで250おきの値がプロットされている。負荷インピーダンスが図3の渦巻の外にあれば発電機は安定であり、内側にあれば不安定になる。図から発電機下流の第4負荷では定電圧、定負荷抵抗運転においても不安定になり易いことが分かる。

<4.2> 時間依存解析 準1次元近似した時間依存方程式をマコーマック法により解析する。熱入力1100 MW、8 Tの条件で発電性能が比較的良好であった4負荷内向き超音速流発電機を、各種負荷条件で時間依存計算を行った結果を以下に示す。4.1節の安定性解析における固有値解析結果は、定電流負荷運転では発電機は不安定になり易く、定電圧負荷および定抵抗負荷運転では、発電機は比較的安定に運転できることを予測しており、動的インピーダンス解析結果は定電圧負荷、定抵抗負荷運転においても、

(a) r方向流速分布

(b) 温度分布

図4 内向超音速流ディスク型発電機内諸量分布の時間変化（負荷電流固定，1100 MW，8 T）
Fig. 4. Time-dependent distributions of radial velocity and temperature along inflow disk channel with supersonic flow.

発電機下流で不安定になり易いことを予測していた。

図4は4負荷発電機を負荷電流固定で運転した場合の発電機内諸量分布の時間変化である。発電機下流部分から乱れが成長し、動作が不安定になることを示している。

同様の条件で負荷電圧を固定して運転した場合、および負荷抵抗を固定して運転した場合の検討結果も、負荷電流固定の場合に比較するとかなり安定ではあるが、やはり下流部分で乱れが成長することを示した。

そこで磁束密度8 T、熱入力1100 MWおよび2000 MWの条件で、4負荷で設計した発電機を12負荷で運転することを試みた。

図5は熱入力2000 MWの条件で、負荷電圧固定で運転した場合のマッハ数分布の時間変化を示している。チャネル出口部（ $r = 2$ m近傍）で乱れが生じることもあるが減衰していることが分かる。同じ発電機を負荷電流固定、負荷抵抗固定で運転しても、いずれの場合にも乱れは成長せず発電機は安定に動作し、負荷分割の効果の大きいことが分った。

図5 内向超音速流ディスク型発電機内マッハ数分布の時間変化（負荷電圧固定，2000 MW，8 T）
Fig. 5. Time-dependent distribution of Mach number along inflow disk channel with supersonic flow.

図6 内向超音速流ディスク型発電機内r方向速度分布の時間変化（負荷電圧固定，2000 MW，10 T）
Fig. 6. Time-dependent distribution of radial velocity along inflow disk channel with supersonic flow.

次に高性能発電機を実現するために、磁束密度を 10 T に高くして設計した。

図 6 は熱入力 2000 MW、磁束密度 10 T の条件で、4 負荷で設計した発電機を 12 負荷、負荷電圧固定で運転した場合の r 方向速度分布の時間変化を示している。チャネル出口部で生じた乱れが成長し衝撃波となって、上流へ移動し発電機は安定に動作しないことが分かる。同じ発電機を負荷電流固定、負荷抵抗固定で運転しても、いずれの負荷条件においても乱れが発電機下流部分で成長することが示された。磁束密度を大きくすると、発電性能は向上するが、発電機は不安定になりやすくなる。

5. ま と め

CO₂ 液化・回収方式石炭直接燃焼 MHD - 汽力複合発電システム用ディスク型チャネルの動作解析を行い、次の結果を得た。

(1) 外向き流、内向き流を問わず、亜音速流で運転するディスク型発電機では無負荷誘導起電力が超音速機と比較して大幅に低下しており、良好な発電性能は得られない。

(2) 外向き流を持つ発電機と内向き流を持つ発電機を比較すると、亜音速流、超音速流を問わず、内向き流で運転するディスク型発電機の方が良好な発電性能を持つ。

(3) 超音速流で運転する外向き流ディスク型発電機は比較的良好な発電性能を示し、熱入力 1100 MW、2000 MW、磁束密度 8 T、4 負荷で、エンタルピー抽出率 17.92%、18.12% を得た。

(4) 超音速流で運転する内向き流ディスク型発電機は良好な発電性能を示し、熱入力 1100 MW、2000 MW、磁束密度 8 T、4 負荷で、エンタルピー抽出率 20.21%、21.12% を得た。

(5) ディスク型発電機は出口部で不安定となり易いが、8 T の条件では 12 負荷運転すると負荷運転状態にかかわらず安定になるが、10 T の条件では不安定になることが分かった。

(平成 7 年 9 月 29 日受付、同 8 年 2 月 26 日再受付)

文 献

- [1] 中山、他：「O₂/CO₂ 燃焼による CO₂ 回収型発電システム」、エネルギー・資源学会第 11 回研究発表会講演論文集、259-264 頁、1992。
- [2] 石川、卯本：「CO₂ 液化回収石炭直接燃焼 MHD - 汽力複合発電」、電気学会論文誌 B、113-B 巻、7 号、811-816 頁、1993。
- [3] S. M. Marty et al.; "Stability of Open-Cycle Disk Generators", Proc. 26th Symp. Engng. Aspects MHD, pp. 7.4.1-7.4.11, 1988.
- [4] 早ノ瀬、他：「オープンサイクル・インフローディスク形 MHD 発電機の動作特性」、電気学会新・省エネルギー研究会資料、41-50 頁、1992。
- [5] 石川、卯本：「高効率石炭燃焼 MHD - 汽力複合発電システムの検討」、電気学会論文誌 D、112-D 巻、3 号、215-220 頁、1992。
- [6] M. Petrik and B. Ya. Shumyatsky; Open-Cycle MHD Electrical Power Generation, A Joint USA/USSR Publication, 1978.
- [7] R. Attig et al.; "CFFF Status Report: Western Coal and Proof-Of-Concept Testing", Proc. 25th Symp. Engng. Aspects MHD, 5.2, 1987.
- [8] M. Ishikawa, "Unsteady Phenomena in High-Interaction MHD Generators", Tech. Reports Inst. Atomic Energy, Kyoto Univ., No. 192, 1982.
- [9] R. W. MacCormack, "The Effect of Viscosity in Hypervelocity Impact Cratering", AIAA Hypervelocity Impact Conference, AIAA Paper No. 69-354, 1969.
- [10] T. Nakamura et al., "Feasibility Study of The Inflow Disk Generator", Proc. 19th Symp. Engng. Aspects MHD, 3.1, 1981.
- [11] T. Matsuo et al.; "Stability of Open-Cycle Supersonic Disk MHD Generator", Proc. 32nd Symp. Engng. Aspects MHD, Session 11, 1994.

石川 本雄

(正員) 1949 年 1 月 12 日生。1976 年 3 月 京都大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。1984 年 2 月同大学工学部電気工学科助教授。工学博士。この間、エネルギー変換、とりわけ MHD 発電の研究に従事。

松尾 哲司

(正員) 1964 年 3 月 11 日生。1991 年 3 月 京都大学大学院工学研究科電気工学第 2 専攻博士課程修了。同年 4 月同大学工学部電気工学科助手。工学博士。この間、非線形振動、MHD 発電の研究に従事。

卯本 重郎

(正員) 1930 年 4 月 19 日生。1958 年 3 月 京都大学大学院(旧制)修了。1967 年 1 月同大学工学部教授。工学博士。1994 年 4 月 京都大学名誉教授。この間、電力系統における進行波、過渡安定度、MHD 発電、電気器機に関する研究に従事。