石炭燃焼 MHD チャネルの耐久性に関する研究

正員 日下 義友 (電総研)

正員 高野 清南 (電総研)

正員 加藤 健 (電総研)

1. ま え が き

石炭燃焼 MHD 発電は微粉炭を直接燃焼して約 50% の高効率発電が可能な技術であり、石炭資源の有効利用技術の一つと考えられている⁽¹⁾。

その作動ガスパラズマは、微粉炭を二段燃焼器の初段サイクロン燃焼器で燃料過濃燃焼 (2,000°C 以下) して 70~90% のスラグを除去し、二段目で酸化剤とシードを添加し、高温燃焼して作る⁽¹⁾。このとき発電チャネルへ一部流下するスラグは、低温の発電チャネル壁に凝縮して発電特性や耐久性に影響を与える。

石炭燃焼用発電チャネルの研究は、これまで主に AVCO 社で石油燃焼ガスに鉄分の多い石炭灰を添加する模擬条件により進められてきた⁽²⁾。また、Golvanらは 50 MWt 実験機で鉄分の少ない石炭灰の添加や微粉炭直接燃焼方式で実験研究している⁽³⁾。しかし、灰組成が電気特性や材料の耐久性に影響するため、いまだ十分にデータが蓄積されていない。我が国はこれまで石油燃焼 MHD の研究開発を行い、長寿命のコールド壁形チャネルを開発してきたが⁽⁴⁾、石炭燃焼 MHD 発電の経験はいまだない。そこで、まず石炭燃焼 MHD 発電に特有な発電特性やチャネル壁の耐久性を実験的に調べて、今後検討すべき課題を明らかにすることが重要である。

このような背景から、著者らは電総研マーク VII MHD 発電機⁽⁵⁾の燃料の一部に三池炭 #68 粉を添加し、コールド壁形チャネルを用いて実験研究した。その特徴的な発電特性⁽⁶⁾、隣接陰極間短絡現象⁽⁷⁾および後流ダクトでのスラグ挙動⁽⁸⁾については既に報告し

た。

本論文はチャネル壁の消耗について、石油燃焼での結果⁽⁴⁾や灰組成の異なる条件での AVCO 社の結果⁽²⁾と比較し、その特徴を調べている。

石油燃焼の場合と異なり、陰極にアークの溝状こん跡はなくほぼ滑らかに消耗し、上流端がわずかに先行して消耗する傾向がある。陽極では、強いアークによる熔融こん跡や上流端部の深い消耗が見られる。アルミナコーティングペグ絶縁壁は陰極近くのパグでコーティング層の損傷が進む。これら陽極と絶縁壁の消耗パターンは似ているが、消耗割合は大きくなる。また、AVCO 社の結果に比べても電極材 (陰・陽極) の消耗が多く、耐久性への炭種の影響が予想される。

そこで石炭燃焼用長寿命チャネル開発には、陰・陽極の上流端消耗対策、陰極近傍用絶縁壁開発や灰組成 (炭種) の消耗への影響について系統的なデータの蓄積が必要なことを明らかにする。

2. 実験装置とチャネル

〈2・1〉 実験装置 実験には燃料を灯油、酸化剤を酸素 (N/O=0.1)、シード剤を 48% KOH 水溶液とし、高イオン含有燃料模擬用に亜硫酸ガスが添加可能な定格出力 100 kW の電総研マーク VII 機⁽⁵⁾を用いた。石炭燃焼模擬条件は石炭灰を添加する AVCO 方式より実際条件に近いと考えられる微粉炭を直接添加し、燃焼する方法で作った。その供給系などについては報告した⁽⁹⁾。

石炭は代表国内炭の三池炭 (#68 粉) を選び、200 メッシュ 85% 以上通過の微粉にして用いた。表 1 にその灰組成をアメリカの代表炭と共に示す。AVCO 社の用いた Illinois #6 炭の灰は鉄分が多く、スラグは Fe^{++} と Fe^{+++} 間の電子ホッピングで電子伝導の割合が高い⁽¹⁰⁾代表である。他方、Rosebud 炭や三池炭の灰中铁分は少なく、スラグが高イオン伝導性とな

Investigation for the Durability of the Coal-fired MHD Channel. By Yoshitomo Kusaka, Member, Kiyonami Takano, Member & Ken Kato, Member (Electrotechnical Laboratory).

日下義友: 正員, 電子技術総合研究所エネルギー変換研究室
高野清南: 正員, 電子技術総合研究所エネルギー変換研究室
加藤 健: 正員, 電子技術総合研究所エネルギー変換研究室

表 1 石炭灰組成 (質量%)
Table 1. Mineral analysis of coal ashes.

	三池 #68	Rosebud	Illinois #6
SiO ₂	45.2 %	47.5%	44.7 %
Al ₂ O ₃	22.1 %	21.1%	20.9 %
CaO	9.19%	14.5%	5.8 %
Fe ₂ O ₃	9.01%	7.8%	24.1 %
MgO	1.29%	4.6%	1.8 %
TiO	1.23%	0.8%	1.0 %
K ₂ O	0.89%	0.7%	2.3 %
Na ₂ O	2.34%	0.4%	0.6 %
P ₂ O ₅	0.19%	0.4%	0.12%

る代表炭に属す。

〈2・2〉 チャネルの構成 発電チャネルは金属電極とアルミナコーティングペグ絶縁壁からなるコールド壁形を用いた。その構造は既に報告した⁽⁴⁾。図1は組立て中の写真を示す。

各種電極・絶縁材料を図の注のように配置した。これらの電極材料の試験理由は以下のとおりである。

(1) 白金, SHOMAC (EB 26-1 相当) 陽極および 70 W-30 Cu 陰極 AVCO 社および著者らの石油燃焼実験で優れていた⁽⁴⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

(2) Cr, 99 Cr-1 Zr 陽極 Cr は Rossing らの基礎試験で優れた性能を示した⁽¹³⁾。Zr は耐硫化特性を良くする⁽¹⁴⁾。

(3) 70 Cr-30 Ni 陽極 粒界がなく均一な消耗が期待できる新材料である。

(4) 0.5 mm 厚 SUS-304 陽極 熱拡散性を高めて耐アーク性を上げることが可能で⁽¹⁵⁾、その効果

a: 摩損計測素子, b (黒色部): サイアロン

[Anode Material]

0.3 mm Pt (No. 1-18), 0.5 mm SUS-304 (No. 19-23), 4 mm SHOMAC (No. 24-32), 4 mm SUS-304 (No. 33-42, 59-60), 5 mm Cr (No. 43-46), 5 mm 70 Cr-30 Ni (No. 47-48), 5 mm 99 Cr-1 Zr (No. 49-50), 10 mm Cr (No. 51), 5 mm SnO₂ (No. 52-58), (): Electrode Number

[Cathode Material]

6 mm 70 W-30 Cu (No. 1-20, 30-60), 6 mm 70 W-30 Ag (No. 21-23), 6 mm 60 W-40 Ag (No. 24-26), 6 mm 40 W-70 Ag (No. 27-29)]

[a: Abrasion Monitor Piece, b: Sialon Ceramics]

図 1 組立て中のチャネル

Fig. 1. Generation channel under composition.

表 2 試験金属電極材料の組成
Table 2. Composition of tested metal electrodes (wt %).

材料名	Zr	Cr	Ni	Fe	Si	Mo	Pt	Cu	Ag	W
白金							100			
溶解クロム		残		0.32	0.026					
HIP クロム		残		0.14	0.044					
99 Cr-1 Zr	0.6	残		0.20	0.025					
70 Cr-30 Ni		残	29.8	0.20						
SHOMAC		28.8	0.16	残	<0.2	1.9				
SUS-304		8	18	残	0.4					
W-Cu								30		70
W-Ag (1)									30	70
W-Ag (2)									40	60
W-Ag (3)									60	40

を調べる。

(5) W-Ag 陰極 石油燃焼条件で W-Cu 以上の性能がある⁽¹⁶⁾ (同時に Ag 割合の効果を調査する)。

(6) SnO₂ (98 SnO₂-2 CeO₂) 陽極 セラミックス材の一例である。

これらの金属電極材料の組成を表2に示す。電極材は水冷銅ブロック上に銀ろう付けし、陽極は抵抗2分割電極⁽⁴⁾とした。無通電での電極材消耗 (以後、摩損と呼ぶ) は、陰・陽極壁の出入口に電極と同じ 70 W-30 Cu, 40 W-60 Ag やステンレス鋼素子を配置し、調べた。

絶縁壁は 23.5 mm 角銅ペグに緩衝材を 0.1 mm 厚以下に溶射し、その上にアルミナを 0.2 mm 厚以下に溶射したペグ素子で構成した。Ni と RH-73 (70 ZrO₂+20 Ni) の2種類の緩衝材で素子を作り、同じ壁 (図10の“S”絶縁壁参照) に配置して比較した。この壁は 203 時間の石油燃焼発電実験から継続して使用した。本実験前にコーティング層の局所剝離などのある素子割合は、緩衝材に無関係に約 24% で基盤銅まで損傷した素子はない⁽⁴⁾、対向壁 (“N”壁) には、5 mm 厚の SIALON (Si₄ Al₂ O₂ N₆) セラミック素子を部分的に組込んだ [(図1の (b))]. SIALON と SnO₂ 陽極素子は、ともに銀ろう付けが不可能なため蟻溝にはめ込み、熱膨張差を利用して固定した。

3. 実験運転

実験はチャネルを組替えることなく実験 5~7 の3回行った。その代表実験条件を表3に示す。

実験 5 は系の調整を兼ねて石油燃焼条件で発電特性を得た後、微粉炭を添加したが、途中冷却水系と微粉炭供給系に不具合が発生し、中止した。実験 6 は再度同手順で行い、各種電気特性を得た。実験 7 は熱入

表 3 代表的実験条件

Table 3. Representative experimental conditions.

	石油燃焼	石炭添加
熱 入 力	15.0 MWt	16.0 MWt
質 量 流 量	1.77 kg/s	1.87 kg/s
当 量 比 (F/O)	1.06	1.05
シ ー ド 率	1.26 wt %	1.20 wt %
硫 黄	0.507 wt %	0.473 wt %
灰 添 加 率	0.0 wt %	0.27 wt %
窒素/酸素 (重量)	0.098	0.100
磁 界 強 度	2.5 T	2.5 T

表 4 実験実績

Table 4. Summary of operation time.

実験 No.	5	6	7	合計
全燃焼時間 (H)	18.4	38.4	30.5	87.3
石 炭	3.0	20.4	24.0	47.4
石 油	15.4	18.0	6.5	39.9
全発電時間 (H)	12.3	20.4	14.5	47.2
石 炭	1.7	15.0	14.5	31.2
石 油	10.6	5.4	0	16.0
定格燃焼発電 (H)	9.7	20.4	14.5	44.6
石 炭	1.7	15.0	14.5	31.2
石 油	8.0	5.4	0	13.4

力 80% から微粉炭を添加し、添加量と分極現象の関係などを得た後、一定抵抗負荷で約 7 時間連続発電した。その実験実績を表 4 に示す。

実験中、微粉炭添加有無による燃焼条件や電気特性取得で電極電流を変えたため、耐久性に影響する電気的・熱的諸量は変化し、同時にスラグ挙動も変化したと推察される。また、実験前後の質量差を通電電荷量で除した電極消耗割合は発電時間が運転時間の半分程度のため、寿命予測までの議論はできにくい。しかし、実験 7 後の状況から石炭燃焼での特徴的な消耗の概要は把握可能である。

図 2 は上記実験での各電極の全通電電荷量と平均電極電流密度を示す。電流密度は $0.18 \sim 0.77 \text{ A/cm}^2$ の範囲にあり、平均的には実用機で想定されている⁽¹⁾

図 2 通電電荷量分布と平均電流密度分布

Fig. 2. The spatial distributions of electric charge and average electrode current density.

$0.11 \sim 0.77 \text{ A/cm}^2$ を良く模擬しているが、実験 7 の最後の低負荷抵抗での定常運転では、 $0.32 \sim 0.99 \text{ A/cm}^2$ の高電流密度であった。ところで、石炭燃焼での通電電荷量は全体の 65~68% である。

電極温度も実験条件で変わるが、陽極はステンレス系 $< 500^\circ\text{C}$ 、Cr 系 $< 250^\circ\text{C}$ 、白金および $0.5 \text{ mm SUS} < 100^\circ\text{C}$ 、 $\text{SnO}_2 < 1,000^\circ\text{C}$ で、陰極は 100°C 程度である。

4. 実験結果と考察

〈4・1〉 陰極の耐久性 図 3 はチャンネルに沿った消耗割合分布を示す。ところで、摩損計測素子の消耗は入口と出口部で各々 $0.526 \text{ mg/h}\cdot\text{cm}^2$ と $1.363 \text{ mg/h}\cdot\text{cm}^2$ であった。これが流れに沿って直線的に増加すると仮定し、それを差し引いた値 (通電に伴う消耗に相当: Δ 印) と石油燃焼の 227 時間発電後の結果 ($\circ$ 印) もともに示す。石油燃焼での摩損は No. 1 と No. 60 電極近辺で各々約 1.14 と約 $0.57 \text{ mg/h}\cdot\text{cm}^2$ と推算され⁽¹⁷⁾、下流で低いが全損失に占めるその割合は、各々約 73% と約 80% でほぼ同じである。

同図から、W-Cu 材の消耗は石油燃焼時に比べて No. 10 電極近辺で約 1.33 倍、No. 35~50 電極間で約 2 倍になり全域で増加するのがわかる。摩損は上述のように、石油燃焼時に比べて上流部で減り下流で増加し、その全損失に占める割合は各々約 28% と 60~80% 程度である。下流域では、摩損の寄与が大きく低電流密度にもかかわらず消耗の絶対値が大きい。これは壁を覆うスラグで摩損が抑制されるとの期待に反し、今後系統的に調査して摩損の電極消耗への寄与程度を把握しておくことが重要である。

W-Ag の消耗は W-Cu より多く、Ag 含有量が多いほど多い。また、40 W-60 Ag の入口での摩損も $1.840 \text{ mg/h}\cdot\text{cm}^2$ と大きく、W-Cu 陰極のほうが優れている。

図 3 陰極の損失割合分布

Fig. 3. The spatial distribution of cathode mass loss rate.

図 4 代表陰極表面の消耗マップ

Fig. 4. The corrosion map at the surface of representative cathodes.

図 5 代表陰極の中央断面図

Fig. 5. Sectional view at the center of representative cathodes.

次に代表陰極の表面状況を調べたのが図 4 である。石油燃焼で見られたアークによる流れ方向の多数の溝状こん跡⁽⁴⁾はなく、表面はほぼ滑らかである。しかし、電極上流端部とチャンネル角部領域の消耗が先行する傾向がある。この上流端の消耗は Hruby らの結果⁽¹²⁾と同じであり、その様子を図 5 に中央部断面を拡大して示す。W-Cu ではわずかであるが、W-Ag では Ag 含有量が多いほど深く、ガス流方向に広がる傾向がある。従って、これからも W-Cu のほうが優れていると言える。

スラグで覆われる陰極壁には、数～十数個の陰極が短絡する特徴的な現象が起こる⁽⁷⁾⁽¹⁸⁾。そのとき、途中の開放ギャップは短絡電極の合計ファラデー電流でスラグが溶断して発生し、高電位側の下流電極の上流端が陽極的作用で消耗するとの報告がある⁽¹⁸⁾⁽¹²⁾。本実験での開放ギャップは、図 5 に示した電極番号付近でも観測されたが⁽⁷⁾、消耗との相関関係は確認できていない。そこで、上流端消耗部を微視的観測したのが図 6 である。

石油燃焼後の W-Cu や WC-Ag 表面で W や WC がアーク熱で飛散し、Cu や Ag が偏析した⁽¹⁷⁾のと逆に、表面スケール層に W と O の偏析が認められる。また、W-Cu 陰極上スラグ分析からも電極との接触面

図 6 40 W-60 Ag 陰極消耗部の Ag, W, O の特性 X線像

Fig. 6. EPMA maps of Ag, W and O at the corroded region on 40 W-60 Ag cathode.

で CuO が検出された。これらは、スラグが電気分解して発生する O^{2-} や SO_4^{2-} イオンが陽極へ移動するため、陰極側は強い還元雰囲気になるとの一般的認識に反し、陰極が部分的に陽極的に機能する可能性を示唆している。そこで、硫化物は検出できていないが、イオウに弱い $Ag^{(19)}$ や $Cu^{(20)}$ が先行して腐食した可能性がある。特にギャップの開放部でも部分的にスラグの残りやすい図 4 のチャンネル角部の先行する消耗がそれを裏付けている。

第 3 章で述べたように、実験条件を変えたので図 3 の値から W-Cu 陰極の寿命を予測するには無理があるが、それは Hruby らの言う 5,000～8,000 時間⁽¹²⁾の半分程度になる。陰極は化学的や電気化学的に消耗する可能性が高く、スラグの流動性や電子伝導性に関係するスラグ中铁分の多少が消耗へ影響すると考えられ、炭種の影響に関する系統的なデータ蓄積が必要である。また、W-Cu でも上流端消耗は時間経過と共に進むと推察され、陰極の長寿命化には局所消耗防止の観点からの対策が必要である。

〈4・2〉陽極の耐久性 各陽極材の消耗割合を表 5 に示す。比較のため、石油燃焼 (203 時間運転、イオウ分: 0.227 wt%) での結果⁽⁴⁾ならびに燃焼ガス中のイオウ含有割合の似た Hruby らの値⁽²¹⁾も示す。

消耗割合の絶対値は大きい材料間の相対的優劣は石油燃焼と変わらない。新材料の 70Cr-30Ni は相対的に有望と言えるが、99Cr-1Zr と Cr の消耗割合は大きく不適である。SHOMAC と SUS-304 の摩損

表 5 陽極の消耗割合
Table 5. Corrosion rate of anodes.

材 料	平均消耗割合 (μg/C)			
	Oil (4)	Coal (5~7)	Coal/Oil S: 0.45 wt%(²¹)	
白 金	0.107	0.70	6.54	~0.38
SUS-304	1.228	7.16	5.83	
SHOMAC 上流	1.970			~1.8
下流	1.057	5.37	5.08	(EB 26-1)
Cr	7.882	10.3	1.31	
70 Cr-30 Ni		5.84		
99 Cr-1 Zr		10.45		
SnO ₂	12.548	*		

注: Oil (4): 石油燃焼実験 203 時間, *: SnO₂ 消耗大, 計測なし, 摩損: 入口: SHOMAC 0.388 mg/h·cm², SUS-304 1.61 mg/h·cm², 出口 SHOMAC 0 mg/h·cm²

は石油燃焼時⁽¹⁷⁾と同じく、入口で大きく出口でほとんど皆無であった。Hruby らの白金と EB26-1 (SHMAC 相当) の値はともに著者らの 1/2 程度かそれ以下である。この大きな差は両実験のイオウ含有量の差からは説明できない⁽²¹⁾。また、摩損の寄与も SHOMAC の入口の値を適用しても、高々全消耗の 5% 以下程度であり他に原因がある。

図 7 は SHOMAC 陽極の表面状況を示す。石油燃焼では表面に小さなアークが走ったと推察される無数の細くて浅い線状こん跡がある⁽¹⁷⁾。上流端には、ホール効果による電流集中でスケール層が溶融・蒸発したと推察される金属露出部もある。他方、石炭燃焼後の表面は溶けたように比較的丸味をもち、滑らかで全体がスケールで覆われている。図 8 の消耗マップからは上流部が非常に深く消耗するのがわかる。この様子はステンレス鋼および Cr 系陽極に共通し、石油燃焼時(偏りの程度は少ない)⁽⁴⁾も同じ傾向である。図 9 の白金は極端な形状変化に至らないが、通電のこん跡も観測されない石油燃焼の場合⁽⁴⁾と違い、多数の凹状こん跡や上流端の溶融状消耗が明確に認められる。しかし、これらの消耗の様子は Petty ら⁽²²⁾や Hruby ら⁽²³⁾の結果と同じであり、消耗の主原因や過程は灰種によらないと言える。そこで、Petty らが発電実験中に観測した“陽極表面に比較的大きなアークが起こ

図 7 SHOMAC (28Cr-2Mo) 陽極表面写真
Fig. 7. The photograph of SHOMAC (28Cr-2Mo) anode surfaces (a: non-slagging, b: slagging).

図 8 Cr と SHOMAC 陽極表面の消耗マップ
Fig. 8. The corrosion maps on the surfaces of chromium and SHOMAC steel anode elements.

図 9 白金陽極表面写真
Fig. 9. The photograph of platinum anode surface.

り、それがローレンツ力で上流へ運ばれ、その端にしばらく停留した後消滅する”アークの挙動⁽²²⁾は本実験でも同じと考えてよからう。

石油燃焼での陽極電流はほとんどが電子電流と考えられるが、石炭燃焼では電極とプラズマ間にスラグが存在し、その中の通電機構が重要な役目をする。電圧印加での実験から、スラグ中の鉄分を増加すると発生するアークは比較的小さくて弱くなるのが観測されている⁽²⁴⁾。鉄分の増加は電子電流の割合を相対的に高め、O²⁻やSO₄²⁻負イオンが陽極に電子を渡して作る高抵抗のO₂やSO₂ガスの発生も少なく陽極降下電圧も低くなる。イオン電流割合が高いと高い抵抗層の抵抗と陽極降下電圧を高め、大きくて強いアーク(高電流アーク)を誘発すると推察される。強いアークは電極材の溶融・蒸発を強め、化学的や電気化学的腐食も増大させ、大きな消耗割合と不均一消耗をもたらす原因となる。そこで、本実験と AVCO 社の陽極消耗割合の大きな差は、主に灰の電子伝導性の大小に影響する灰中鉄分の違いによると推察される。このように、陽極消耗への灰種(炭種)の影響は顕著と考えられ、その影響の程度に関するデータの蓄積が重要である。

ところで、0.5 mm 厚 SUS-304 陽極は裏面の銅まで損傷し、SnO₂ は Cadoff らの指摘⁽²⁵⁾と同様にスラグ成分の侵入・粒界分離・溶解の過程で消耗するの

でいずれも材料自身に問題がある。

以上から白金, SHOMAC と 70Cr-30Ni は有望材料であるが長寿命化には, 上流部の局所消耗対策を検討して消耗の均一化を図り, また炭種と消耗の関係のデータを系統的に蓄積し, それに基づく新たな材料の開発も重要である。

〈4・3〉 絶縁壁の耐久性 図 10 は側壁のアルミナコーティングペグの損傷素子分布を示す。

損傷素子は石油燃焼時と同様に⁽⁴⁾明らかに陰極側へ偏った。基盤銅に達する損傷のある素子数は石油燃焼の 203 時間運転後の“N”壁での 1 素子⁽⁴⁾から, この約 47 時間実験後には SIALON 素子近辺を除いても“N”壁で 49 素子, “S”壁で 35 素子になり, 陰極に接する素子に集中している。緩衝材の違いの効果はなく, “S”壁の全損傷素子割合は実験前の約 24% から約 40% に増加した。

図 11 は素子の損傷例である。基盤銅の損傷 (c 部) は主に目地部の素子角部から進む。ところで, “N”壁の SIALON 素子近辺のペグ損傷は SIALON の激しい消耗に起因し, 本来のペグの特性ではない。これらのコーティング層の損傷過程は是永らの石油燃焼 MHD 発電チャネル内でのアルミナセラミックス素

図 10 損傷アルミナコーティングペグピースの分布

Fig. 10. The distribution of deteriorated alumina coated peg pieces on the side walls.

(a: 角部コーティング層損傷, b: 表面コーティング層損傷, c: 基盤材までの損傷)

図 11 実験後の絶縁壁の様子

Fig. 11. The photograph of the side wall after the experiments.

子の損傷⁽²⁶⁾と同じと推察される。壁面の凝縮シードを介して電流が流れ, アルミナはカリウムと反応して α から β へ変質する。 β 化により電気伝導性を持ち, 体積も増加するので損傷域は拡大し, はく離損傷が起こる。

MHD 発電では, カリウムをシードとして入れるので運転中, 低温壁にその化合物が凝縮する。それが溶融すると電気分解し, K^+ の正イオンが陰極側に集まるので陰極近傍のペグのアルミナコーティング層の損傷は避けられないと推察される。しかし, 陰極近辺外での損傷は軽微で緩衝材による差もないので, 安価なニッケルを用いた素子が利用できよう。

その後の検討から陰極近傍絶縁壁に, SiC セラミックスが利用できる可能性が明らかになっている⁽²⁷⁾。しかし, 高価であるため安価な材料を見出すことが今後の課題である。ところで, SIALON は SnO_2 陽極と同様にスラグと反応して損傷し, 石灰燃焼条件には不適である。

5. む す び

金属電極とアルミナコーティングペグ絶縁壁からなるチャネルの石灰燃焼 MHD での耐久性を調べ, 長寿命チャネルの開発に必要な課題を明らかにするための実験研究をした。電総研マーク VII MHD 発電機の燃料の一部に, その灰中の鉄分が少ない代表炭である三池炭 (#68 粉) を添加して模擬した。チャネル壁の消耗の様子を石油燃焼の結果や鉄分の多い灰を添加した AVCO 社の結果と比較した結果, 次の特徴があった。

(1) 石油燃焼との比較 陰・陽極材の消耗割合はともに増加する。陰極にアークの溝状こん跡はなく, 表面は滑らかであるが上流端に先行する消耗がある。これはスラグの電気分解による陽極的作用によると推察された。W-Cu は W-Ag より耐久性に優れている。陽極材の優劣順位は変わらず, 白金, SHOMAC, 70Cr-30Ni が比較的有望である。しかし, 強いアークに起因すると推察される表面の溶融や上流部の顕著な消耗が見られる。ペグ絶縁壁では, 陰極近傍素子のアルミナコーティング層が急速に損傷する。他の領域では損傷も少なく, 緩衝材による差もなく, 安価な Ni を緩衝材にした素子が利用できる。

(2) AVCO 社の結果との比較 陰・陽極消耗パターンは同じで, 消耗主要原因や過程は炭種によらないと推察された。また, 消耗割合が大きくなったのは灰中含有鉄分の少ないイオン伝導性の強い三池炭を利用したため, 発生するアークや酸化・硫化腐食が相対

的に強くなったためと推察された。

以上から石炭燃焼用長寿命チャネル開発には、陰・陽極上流部の局所消耗対策や安価で陰極近傍へ適用可能な絶縁壁の開発が必要である。そのためには、消耗原因の詳細な調査と共に、特に消耗への炭種の影響に関するデータの蓄積が必要であると結論される。

終りに、本研究の機会を与えていただいた、元 MHD プロジェクトリーダーの相山義道前電総研エネルギーシステム部長を初め、実験を担当された三菱重工業(株)の方々、Cr 系電極の試作をしていただいた東洋ソーダ(株)の植田氏、 SnO_2 とサイアロンの試料試作および分析検討に御協力いただいた品川白煉瓦(株)藤井氏に感謝いたします。

(昭和 62 年 11 月 21 日受付)

文 献

- (1) 電気共同研究会, MHD 発電システム専門委員会: "MHD 発電システムの研究", 委託研究成果報告書 (昭 57-3)
- (2) S. Petty, et al.: "Progress on the Mark VI Long-Duration MHD Generator", Proc. 15th SEAM, p. IV. 5.1 (1976) 以後の AVCO 社の報告
- (3) R. J. Giovan, et al.: "Status Report of 1A Test Train Hardware Performance and development", Proc. 25th SEAM, pp. 5.5.1 (1987)
- (4) Y. Kusaka, K. Takano & K. Kato: "The Development of MHD Cold Wall Channels in the Oil-Fired Condition", *Energy Conversion and Management*, 25, 4, 491 (1985)
- (5) 日下, 他: "ETL マーク VII MHD 発電機の建設", 電総研彙報, 45, 32-2 (昭 56-2)
- (6) 高野・日下・加藤・恩田: "石炭燃焼 MHD 発電機の発電特性", 電学論 B, 106, 957 (昭 61-11)
- (7) 高野・日下・加藤: "石炭燃焼 MHD 発電機における隣接陰極間短絡現象", 同上 B, 105, 835 (昭 60-10)
- (8) I. Osada, et al.: "Seed/Slag Behavior Along the Downstream Ducts of ETL Mark VII", Proc. 9th Int. Conf. on MHD, Vol. IV, p. 1466 (1986)
- (9) Y. Iwafuji, et al.: "Experimental Results of ETL Mark VII Cyclone Combustor", Proc. 9th Int. Conf. on MHD, Vol. III, p. 1068 (1986)
- (10) W. R. Hosler, et al.: "Electrical Conductivity Mechanisms in Iron Containing Slags", Proc. 7th Int. Conf. on MHD, Vol. I, p. 220 (1980)
- (11) V. J. Hruby, et al.: "1,000 Hours MHD Anode Test", Proc. 20th SEAM, p. 4.3.1 (1982)
- (12) A. Demirjian, et al.: "Long Duration Channel Development and Testing", Proc. 18th SEAM, p. A. 3.1 (1979)
- (13) B. R. Rossing, et al.: "Evaluation of Cold Wall Anode Materials", Proc. 20th SEAM, p. II. 5.1 (1982)
- (14) 霜島, 他: "種々の高 Cr-N. 基耐熱合金の 1,100°C における V_2O_5 - Na_2SO_4 合成灰による腐食について" 金属学誌, 57 715 (昭 48)
- (15) J. B. Heywood & G. J. Womack (Eds) Open-Cycle MHD Power Generation, p. 519 (1969) Pergamon Press
- (16) 政井・石橋: "MHD 発電機電極材料に関する研究", 日本機械学会講演論文集, No. 217, 77 (昭 44-8)
- (17) Y. Kusaka & T. Masuda: "The Compatibility of Metal Electrode in the Oil Fired MHD Environment", *J. M. E. S.*, 8, 58 (1986)
- (18) S. W. Petty: "Effects of Cathode Slag Polarization on MHD Generator Performance", Proc. 21st SEAM, p. 4. 5.1 (1983)
- (19) A. Demirjian, et al.: "Electrode Development for Coal Fired MHD Generators", Proc. 17th SEAM, p. D.1.1 (1978)
- (20) V. J. Hruby, et al.: "Electrode Development at AVCO Research Laboratory, Inc.", Proc. 7th Int. Conf. on MHD, Vol. I, p. 262 (1980)
- (21) V. J. Hruby, et al.: "Effects of Plasma Sulfur Content on The Lifetime of Anodes", Proc. 19th SEAM, p. 8.1.1 (1981)
- (22) S. Petty, et al.: "Electrode Phenomena in Slagging MHD Channels", Proc. 16th SEAM, p. VIII. 1.1 (1987)
- (23) V. J. Hruby, et al.: "Platinum-Clad Electrodes for MHD", *Platinum Metals Rev.*, 30, 2 (1986)
- (24) 奥尾氏私信
- (25) L. H. Cadoff, et al.: "The Evaluation of Electrode Materials for Slag Coated MHD Channels", Proc. 16th SEAM, p. IV. 8.47 (1977)
- (26) 是永, 他: "MHD 発電機絶縁壁の損傷", 窯業協会誌, 84, 470 (昭 51-10)
- (27) 奥尾・日下・相山: "石炭燃焼 MHD 発電機用 SiC 絶縁壁の開発", 高温学会誌, 11, 186 (昭 60-5)