石炭燃焼 MHD 発電機における隣接陰極間短絡の防止法

正員 高野 清 南 (電総研)

正員 加藤 健 (電総研)

正員 奥 尾 隆 保 (電総研)

1. ま え が き

石炭燃焼 MHD 発電機における隣接陰極間短絡は発電機の性能と耐久性の劣化をもたらす⁽¹⁾⁽²⁾。従って、その防止と解消は発電チャネルの開発にとって重要な課題である。

石炭燃焼 MHD 発電機は通常石炭中の灰分がシードのカリウム化合物と共に、スラグとしてチャネル壁に付着した状態で運転される。このとき、陰極に付着したスラグ層は通電により変化して、導電性が高くなり隣接陰極間を短絡する⁽¹⁾⁽³⁾。つまり、この短絡は陰極壁の付着スラグ層に起因する。従って、Koester らは電極温度をスラグが付着しない程度に高くして、短絡をなくする方法を提案している⁽⁴⁾。この方法は陰極の通電を拡散放電にする利点はあるが、石炭燃焼条件下でスラグを付着させない程度の高温で使用でき、十分な耐久性をもつ電極材料はまだ開発されていない。

隣接陰極間に短絡が生じると、異常な電流分布や隣接電極間および絶縁素子と電極間などに電圧集中が生じる。特に、ダイアゴナル発電機では陰極の異常な電圧分布が陽極間に直接伝えられ、隣接陽極間のアーク絶縁破壊を導く。隣接陽極間のアークは、隣接陰極間とは逆に、磁界との相互作用で壁の内部に侵入し発電チャネルの壊滅的な破壊を導くことがある⁽¹⁾。従って AVCO 社では、このような隣接素子間の電圧集中を緩和するために、電極電流の制御を提案している⁽⁵⁾。この方法は各陽極の電流分担を一様にすると共に、隣接

陽極間におけるアークの発生を抑制し、発電チャネルの壊滅的な焼損を防ぐ。しかし陰極短絡が解消されない限り、プラズマから陰極に流入する電流は非一様であり、局所的な陰極消耗を生じ耐久性の制限となる。

陰極短絡現象は運転条件、特にスラグ組成やその流下条件などに依存して⁽²⁾複雑であり、その短絡機構はまだ解明されていない部分が多い。そこで、著者らは別報⁽⁶⁾に報告したように陰極短絡の様相がより厳しい鉄分の少ないスラグに対し、その短絡原因を研究してきた。その結果、少なくとも鉄分の少ないスラグに対して、通電に伴い陰極表面において電気化学的な還元反応によって、カリウムやナトリウムの金属が生成され、それが隣接陰極間を短絡することを明らかにした⁽⁶⁾。金属のカリウムやナトリウムは化学的な活性に富み、常温でも酸素があれば容易に酸化され、絶縁性の酸化物となる。そこで陰極近傍に酸素を供給し、電気化学的に形成される還元雰囲気や中和し、あるいは生成された金属を酸化することによって、陰極短絡を防止または解消できるものと考えられる。

著者らはこのような考えから酸化剤を隣接陰極間ギャップから供給し、陰極短絡を防止する方法を考案した。本論文はこの陰極短絡の防止法について実験的に研究したものである。陰極間ギャップから酸化剤を供給する構造は比較的簡単であり、現在耐久性が実証段階にある金属陰極にも応用できる。微粉炭混焼条件下の陰極モジュール試験で、酸素の供給による陰極絶縁ギャップ抵抗の変化を調べると共に、COM 燃焼条件の発電機試験で酸素供給によるホール電圧の変化を調べて酸素供給の効果を実証する。

2. 陰極モジュール試験

(2.1) 実験条件 図1の陰極モジュールにおい

Prevention of Inter-Cathode Shorting in Coal-Fired MHD Generators. By Kiyonami Takano, Member, Ken Kato, Member, & Takayasu Okuo, Member (Electrotechnical Laboratory).

高野清南：正員，電子技術総合研究所
加藤 健：正員，電子技術総合研究所
奥尾隆保：正員，電子技術総合研究所

図 1 酸素吹き出し陰極モジュール

Fig. 1. Cathode module with a gap for injecting oxygen gas.

表 1 石炭灰の組成

Table 1. Composition of coal ash.

SiO ₂	56.5%	K ₂ O	2.27%
Al ₂ O ₃	23.3%	Na ₂ O	1.57%
Fe ₂ O ₃	5.10%	TiO ₂	1.08%
CaO	4.24%	SO ₃	1.78%
MgO	1.82%		

表 2 陰極モジュール実験条件

Table 2. Experimental conditions of cathode module test.

燃料	幌内炭/LPG	灰分濃度	1.1 wt%
酸化剤	酸素/空気	燃焼ガス温度	約 2,500 K
シード剤	48% KOH 水溶液	燃焼ガス速度	約 330 m/s
N ₂ /O ₂	0.2	陰極表面温度	約 400 K
当量比	1.0	付着スラグ厚さ	約 3 mm
カリウム濃度	1.0 wt%	スラグ表面温度	約 1,750 K

て、陰極間ギャップに酸素を供給してギャップ抵抗の変化を調べた。この実験は別報⁽⁶⁾と同じ LPG と微粉炭を混焼して、石炭燃焼の MHD 発電チャネル条件を模擬した小形の測定流路において行われた。燃焼に用いた石炭は灰分中に鉄分が少ない幌内炭であり、石炭灰の分析結果を表 1 に示す。また、実験条件を表 2 に示す。

陰極モジュールは直径 12 mm の円形電極とその周りに設けた 33×28 mm 角の補助電極からなり、両電極間のギャップ抵抗を調べた。この両電極間は 1 mm の絶縁ギャップをもち、そこにガラス繊維をつめて、そのすきまを通してガスを供給できる。またスラグの付着を良くするために、補助電極表面に同心円状に溝を付けた。

測定流路は別報⁽⁶⁾と同じものであり、低温のペグ素子と低温電極壁からなる。陰極モジュールは測定流路内の観測窓に対向して配置し、窓枠を陽極として外部から電流を印加し発電状態を模擬した。その印加回路

図 2 陰極モジュール実験における電流印加回路

Fig. 2. Circuits for applying current in cathode module test.

を図 2 に示す。陰極ギャップの抵抗は 10 kHz の交流を重畳印加して電圧降下法⁽⁶⁾により測定した。

〈2・2〉 陰極モジュール試験結果 図 3 にギャップへのガス供給の経過とそれに伴うギャップ抵抗の経時変化を示す。流路にスラグが十分付着して定常的な状態になった後に、窓枠と陰極モジュール間に 10 A (平均電流密度 1.0 A/cm²) の一定電流を印加して測定された。なお、中央の円形電極の電流は短絡状態の変化に伴い 0.6~1.3 A の範囲で変動した。

まず、ギャップに何も供給せず電流を印加したが、ギャップ抵抗は初期の 4 Ω から約 15 分の間に 1 Ω まで低下した。これは、通電により部分的な短絡が発生したものと考えられる。次に、0.3 NL/min の酸素をギャップから供給すると、ギャップ抵抗は直ちに増加し、約 3 分で約 5 Ω まで回復した。このことは酸素の供給がギャップ抵抗を回復するために有効であることを示す。

次に 0.3 NL/min の窒素を酸素の代りに供給した。このときギャップ抵抗は約 10 分後に低下し始め、その後、約 15 分間で約 0.2 Ω まで低下した。続いて窒素を止めた。このときギャップ抵抗は若干変動するものの、平均的には窒素供給時とほとんど変わらなかった。このことは、窒素供給の陰極短絡現象に対する影響が小さいことを意味する。つまり、酸素供給によるギャップ抵抗の増加は、供給ガスによる冷却、あるいはスラグのはく離などの熱的あるいは機械的なスラグの状態の変化によるものではなく、化学的なものと考えられる。

次に、0.1 NL/min の酸素を供給するとギャップ抵抗は急しゅんに立上り、約 2 Ω まで回復した。その後、酸素を 0.3 NL/min まで増加したが、抵抗値はほとん

図3 ガス供給の経過と陰極ギャップ抵抗の経時変化
(図中の NL/m は NL/min の略)

Fig. 3. Variations of inter-cathode gap resistance with changes of gas supply.

ど一定であり、初期の値に比べファクタ 2 程度の違いが残った。しかし、のちに繰返して行われた実験ではほぼ初期の抵抗値まで回復できた。スラブ表面の観察によれば、スラッグの付着状態は必ずしも一様ではなく、しかも経時的に変化しており、その結果ギャップの抵抗値が変動するものと考えられる。

その後酸素の供給を停止したが、しばらくの間ギャップ抵抗の減少は生じなかった。これは、その間微粉炭の供給が一時的に窓からの観察によれば、このときスラッグ層の一部が流失したことに関係しているものと考えられる。スラッグ層の一部が流失し穴があけば、その穴を通して酸素を含んだ燃焼ガスが絶縁ギャップに流れ込み、酸素供給と同じ効果を生じて、短絡の進行を妨げるものと推測される。

次に微粉炭の供給を再開し、短絡を起こした後に酸素を 0.01 NL/min から段階的に増加し、ギャップ抵抗の変化を調べる試験を 2 回繰返して、次の結果を得た。酸素の効果は再現され、供給量が 0.02 NL/min 以下ではギャップ抵抗の増加は比較的小さい。0.03 NL/min に増加するとギャップ抵抗は激増するが、更に供給量を増加してもギャップ抵抗の増加はほとんど認められない。つまり、この実験条件ではギャップ抵抗の回復に必要な酸素流量は 0.02~0.03 NL/min 程度と言える。

3. 発電機試験

(3.1) 実験条件 COM 燃焼 MHD 発電機において、発電モードにおける酸素吹き出しの効果を試験した。軽油と微粉炭の混合物 (COM) を純酸素で燃焼し、その燃焼ガスにシード剤として KOH の 48% 水

表 3 発電機実験の条件

Table 3. Experimental conditions of generator test.

燃 料	梶内炭/軽油 (30 : 70)	当 量 比	0.9
酸 化 剤	純酸素	シード濃度	1.4 wt%
シード剤	48% KOH 水溶液	灰分濃度	1.8 wt%
熱 入 力	1.35 MW	陰極表面温度	約 400K
燃焼ガス流量	157 g/s	付着スラッグ厚さ	約 3 mm

溶液を添加した。微粉炭はモジュール実験と同じ梶内炭である。燃焼条件を表 3 に示す。なお、陰極短絡がない場合と比較するために、微粉炭を混入しないではほぼ同じ燃焼条件下で軽油単味燃焼の実験も行った。

発電チャネルは、24 対の電極をもつ低温壁直線形チャネルであり、陰極壁に酸素吹き出しギャップをもつ。絶縁壁は SiC 磁器製のベグ構造であり、陽極はステンレス鋼 (304) キャップ電極からなる。陰極キャップ材は主に銅タングステン合金を用い、一部に導電性の SiC 磁器を用いた。各素子間には、アルミナ粉を混入したシリコンゴムをつめて気密を保った。酸素を供給する陰極絶縁ギャップの構造を図 4 に示す。

図 4 酸素吹き出し陰極ギャップの構造

Fig. 4. Configuration of an inter-cathode gap for injecting oxygen gas.

図 5 発電チャネルと測定回路の構成

Fig. 5. Configurations of generating channel and measuring circuits.

燃焼ガスに露呈する陰極の幅は 30 mm であり、酸素をそのほぼ全幅にわたって 1 mm のギャップから吹き出す。磁界は 1.8 T である。

この発電機の開放電圧は最大約 70 V であり、短絡条件でもファラデー電流密度が小さい。従って、外部電圧を重畳して約 1 A/cm² の電流を強制的に流した。図 5 は発電チャネルと測定回路を示す。9 台の電源により No. 1～No. 18 の陰陽極対に抵抗を介して電流を流した。No. 2-3, No. 4-5…No. 16-17 の各陰極ギャップを上記の酸素供給ギャップとした。ただし、No. 8-9 ギャップは、チャネル組立中に閉そくして供給不能となった。また、No. 17～No. 24 陰極は SiC 磁器製であるが、No. 18 の SiC の導電性が悪かったので、代わりに No. 19 陰極に電流を流した。各電極の電位および電流は約 10 秒周期で収録した。

〈3・2〉 実験結果と考察 微粉炭を混入しない軽油で燃焼を開始し、COM 燃焼とほぼ等しい条件で、スラグが付着しないチャネル条件におけるホール電圧の測定を行った。その後、軽油に微粉炭を混入して COM 燃焼とした。チャネル壁の熱損失と開放電圧の変化から見て、スラグの付着状態が定常的になってから電流を印加した。

図 6 に電流印加とガス供給の経過および幾つかの陰極間ホール電位差の経時変化を示す。なお、 ΔV_{17-2} などの添字 (例えば 17-2) は対応する陰極対の番号を表す。各電極に 7～9 A の電流を印加し、ほぼ一定値に保ったが、陰極間ホール電位差はかなり変動した。

図中の①～④は図 7 に対応

図 6 ガス供給と電流印加の経過と陰極間ホール電位差の経時変化

Fig. 6. Variations of Hall potential difference between cathodes with histories of supplying gases and applying current.

しかし、供給ガスの変化に応じたホール電圧の変化が見られ、その変化は数分以内に応答している。まずガス供給を止めた状態で電流を印加し始めたが、電流を調整している段階で電流印加後数分以内に多くの陰極ギャップの電圧が大幅に減少した。その 10 分後に 0.11 NL/min の窒素を供給し、約 40 分間様子を見たが、ガス供給停止時と大差なく、かなり大きく変動するものの、概ね定常的な状態が達成された。そこで、各ギャップに窒素の代りに 0.1 NL/min の酸素を供

図 7 供給ガスの変化に伴う陰極電位分布の変化

Fig. 7. Variations of cathode potential distribution with flow rates of supplied gases.

給した。このとき陰極ギャップ電圧は直ちに増加し約 10 分間で定常になった。従って、以後 10~20 分周期で供給ガスの種類と流量を変えて、陰極電位分布に与える影響を調べた。図 7 に各供給ガス条件に対する代表的な陰極電位分布 (約 1 分間の平均) を示す。なお、図 7 の (A)~(H) の各測定時刻に対応する点を図 8 中にも示した。

何も供給しないとき図 7 (A)に見られるように、すべての陰極はほぼ同じ電位をもち、ほぼすべての陰極ギャップが短絡またはそれに近い状態にあるものと考えられる。同図 (A)~(E) は酸素を供給したギャップで、供給量の増加に伴い陰極ギャップ電圧が増えることを示す。つまり、酸素供給によって隣接陰極間の絶縁が回復でき、ホール電圧が回復される。このことはモジュール試験と同様にして測定した図 8 に示す No. 6-7 陰極のギャップ抵抗の経時変化から裏付けられる。酸素供給に伴うギャップ抵抗の変化とギャップ電圧の変化が良く対応し、そのことを裏付けている。しかし、酸素を供給したギャップでも、電圧を回復しないものがあり、逆にそれに隣接する酸素を供給しないギャップに電圧を回復するものもある。供給酸素が短絡している部分に流れて行かず、スラグ層の割れ目や壁とのすきまから漏れいし、時には隣のギャップまで流れて行くものと考えられる。

図 7 (F) は、酸素の代りに窒素を供給して測定されたものである。この場合、ホール電圧は後で測定した

図 8 No. 6-7 陰極におけるギャップ電位差とギャップ抵抗の経時変化

Fig. 8. Variations of potential difference and gap resistance between No. 7 and No. 6 cathodes.

何も供給しない場合に比べて幾分大きい。このことから、窒素吹き出しによる何らかのギャップ絶縁の回復効果があるものと考えられるが、その程度は小さい。また図 8 に見られるように、窒素供給時にも酸素と違って短絡が進行することは確かであり、このことはモジュール実験でも既に示した。図 7 (G), (H) は酸化剤として空気を供給した場合である。空気の場合、同量のガス供給に対してホール電圧の回復は窒素の場合よりも大きく、酸素の場合に比べて小さい。

4. 考 察

(4.1) 必要酸素量 電荷のすべてがイオンで運ばれると仮定すると、理想的には通過電気当量の酸素を供給すれば、陰極における還元作用を中和できると考えられる。しかし、一部の電気が電子伝導により運ばれるとすれば、中和に必要な酸素量はその分だけ少なくて済む。陰極短絡を防ぐためには、陰極絶縁ギャップ近傍にある還元されたスラグだけを酸化すればよいので、必要酸素量は更に少なくて済むはずである。一方、実際は供給された酸素の一部は反応せず流失すると考えられる。従って、陰極短絡を防止するために必要な酸素ガス流量 Q (mol/s) はファラデーの法則に基づいて次式で求められる。

$$Q = (\alpha/\eta) \cdot I / (4F) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 α : 1 以下の定数, η : 反応効率, I : 電流, F : ファラデー定数

(4.2) 実験との比較と検討 第 2 章で述べたモジュール試験では、ギャップ抵抗の回復に必要な酸素流量は実験的には 0.02~0.03 NL/min 程度であった。この実験において、中央の円形電極の平均電流は約 1A であり、また補助電極を含めた全印加電流は 10A

図9 ガス供給量とホール電圧の関係

Fig. 9. Relation between Hall voltage and supplied gas amount.

である。(1)式において $\alpha=\eta=1$ を仮定すると、短絡防止に必要な酸素量は、中央電極電流に対し 0.0035 NL/min, また全印加電流に対し 0.035 NL/min と計算され、実験値は両計算値の間にある。

第3章で述べた発電機試験の電極電流は約 8 A であり、 $\alpha=\eta=1$ を仮定すると、この電流に対する理論的な1極あたりの必要酸素量は 0.028 NL/min となる。図7の実験結果から、No. 17 と No. 2 陰極間のホール電圧 ΔV_{17-2} と酸素供給量の関係を図9に示す。陰極ギャップ電圧の回復は上記の必要酸素流量の約 10 倍の 0.3 NL/min まで続く。このことは、スラグ層の割れ目や壁とのすきまから漏えいする酸素が多く、一部の酸素しか短絡している部分に流れて行かず、酸素を供給するギャップの電圧が回復しにくいと考えられる。また、陰極表面近傍ばかりでなく、陰極表面から離れたスラグ層内や、絶縁壁に付着したスラグ層にまで金属カリウムなどの高導電性媒体が広がって行って短絡回路を形成したとき、供給酸素が短絡部まで拡散して行きにくいことも考えられる。

図9には、窒素および空気を供給した場合もプロットしてあるが、いずれのホール電圧も同量の酸素を供給した場合のホール電圧に比べてかなり小さい。しかし、酸素量に換算(▲, ■印)すれば、ホール電圧の回復は等量の純酸素を供給した場合と同程度の大きさである。このことは、ホール電圧の回復が主に酸素の供給によることを裏付けている。

図10に軽油単味燃焼時に測定された陰極電位分布を示す。No. 17-2 陰極間のホール電圧は約 210 V である。一方、COM 燃焼で陰極ギャップに 0.3 NL/min/GAP の酸素を供給したとき、同平均電圧はその約 31% の 65 V である。この違いは酸素を供給しても絶縁を回復しないギャップであることや、全数の約 44% のギャップしか酸素を供給していないことのほかに、絶縁壁に付着したスラグ層を流れる漏えい電流

図10 軽油単味燃焼時の陰極電位分布

Fig. 10. Cathode potential distribution at a pure diesel oil combustion.

の影響も大きいものと考えられる。

第2章および第3章の両実験とも短絡解消に必要な酸素量は、 $\alpha=\eta=1$ を仮定した(1)式よりかなり大きい。この酸素量はギャップ構造や酸素の供給の仕方を工夫すればもう少し減少できよう。また仮に $\alpha/\eta=10$ としても、代表的な実用規模(出力 660 MW)の発電チャンネルでは全ファラデー電流が 10^5 A 程度であり⁽⁷⁾、必要酸素の総流量は 60 NL/s (300 kg/h) と見積られる。この流量は全作業ガス流量のわずかに 0.01% 程度の大きさで極めて小さい。

5. む す び

著者らは石炭燃焼 MHD 発電機における隣接陰極間短絡を防止するために、陰極絶縁ギャップに酸化剤を供給する方法を考案し、その原理的な有効性の検証を試みた。その結果、少なくとも鉄分の少ないスラグに対して、陰極ギャップからの微量の酸素または空気の吹き出しは、絶縁ギャップ抵抗とホール電圧の回復に有効であることが実証できた。理論的に必要な酸化剤の供給量は極めて少なく、この防止法は現在耐久性が実証段階にある金属陰極にも応用できる。

今後、実用的に見て酸化剤の供給量の低減と確実な絶縁回復のために、陰極と絶縁壁の接合部への供給を含め絶縁ギャップに一様な酸化剤の供給が可能で、しかも大形機でも製作が容易な絶縁ギャップとチャンネルの構造の研究が必要である。

本研究の遂行にあたって、有益な御意見と御協力をいただいた当所エネルギー変換研究室の方々に謝意を表します。
(昭和 62 年 9 月 16 日受付)

文 献

- (1) S.W. Petty: "Effects of Cathode Slag Polarization on MHD Generator Performance", 21st Symposium on Engineering Aspects of MHD, p. 4.5.1 (1983)
 - (2) 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」, 電学論 B, **105**, 835 (昭 60-10)
 - (3) J.K. Koester & R.M. Nelson: "Discharge Characteristics of Slagging Metal Electrodes", 17th Symposium on Engineering Aspects of MHD, p. C. 3.1 (1978)
 - (4) R.M. Nelson & J.K. Koester: "Diffuse Mode Current Transport in A Slagging MHD Generator", 7th International Conference on MHD Electrical Power Generation, Cambridge, p. 711, June 16-20 (1980)
 - (5) R. Kessler: "MHD Generator Channel Design", Specialists Meeting on Coal Fired MHD Power Generation 1981, p. 6.1.1, Sydney, 4-6 November (1981)
 - (6) 高野・加藤:「石炭燃焼 MHD 発電機における隣接陰極間短絡の原因」, 電学論 B, **108**, 89 (昭 63-2)
 - (7) MHD発電システム専門委員会: 委託研究成果報告書「MHD 発電システムの研究」, 電気協同研究会 (昭 56-3)
-