

論 文

フライアッシュの電気集塵における間欠荷電

立花直治*
(1988年4月5日受理)

Intermittent Energization for Fly-ash Precipitation

N. TACHIBANA*
(Received April 5, 1988)

Intermittent energization (IE) is a new way of energization for electrostatic precipitators (ESP) aiming at mitigating a degree of back discharge by supplying current intermittently by AC cycle blocking. By doing so, the voltage across a high resistivity dust layer on collecting electrodes, which is produced as a result of accumulation of charges of collected charged particles, can be controlled underneath the electrical break-down voltage of the layer. This paper describes first an observation result of back discharge in precipitators which offered a hint on our having obtained an idea of the IE, and then a result of measurements in a pilot ESP on peak voltage, mean voltage, dust migration velocity, charge to mass ratio of fly ashes and collecting efficiency on various intermittent duties with a discussion on characteristics of IE. It was found that the more improved the collecting efficiency by IE for the fly ash of the lower precipitability by conventional DC energization, and that the change of migration velocity to a duty shows a similar tendency to that of the product of peak voltage and mean voltage which can be used as an index of indicating an optimum efficiency point.

1. まえがき

石炭フライアッシュをはじめ産業排ガスのダストの捕集には電気集塵が広く用いられるが、電気集塵装置 (electrostatic precipitator: ESP) ではよく知られているように捕集対象である粒子の性質とその周囲のガスの状態により捕集性能が大きく変化する。とくに石炭焚きボイラではフライアッシュの抵抗率がほぼ最大となる150°C 近辺が ESP の運転温度域とされることが多く、逆電離など高抵抗に起因する集塵性能低下問題に直面することが多い。

この対策として石炭焚きボイラ用 ESP ではフライアッシュの抵抗率が高温で低下し逆電離が解消する性質¹⁾を利用した高温集塵や、ガス温度を下げることでガス中の酸分や水分をフライアッシュ表面へ凝集させて抵抗を下げる低温度運転²⁾の例があるが、一般には前記の 150°C 近辺の温度域で運転されるので高抵抗関連の現象による影響を受けやすい。これに対する荷電技術上の対策としては放電極へ荷電する荷電時間幅と間隔を制御する

荷電方法がある³⁻⁵⁾が商用周波数で電流を断続する間欠荷電は比較的簡単な回路構成で実現できる⁶⁾ので各分野に広く用いられてきている。

本論文ではまず逆電離発生時の集塵空間での粒子の飛跡の変化と電気集塵装置での逆電離を特長づける電圧-電流の特性について触れ、次に、電気集塵 (ESP) 試験設備を用いて抵抗率の異なる 3 種のフライアッシュに対して行なった間欠荷電の制御因子のひとつである荷電率の変化に対する、荷電電圧ピーク値と同平均電圧の動き、ダスト比電荷と集塵性能の変化についての調査結果を報告し、間欠荷電の特性とその制御の指標について考察した。

2. 逆電離と電気集塵性能の低下

2.1 逆電離の始発条件とダスト電荷量の緩和

電気集塵装置の集塵極上に堆積したダスト層に放電極から供給されるコロナ電流が流れると層内に電位勾配が発生する。逆電離の始発条件は一般的に次式で表わすことができる⁷⁾

$$E_d = \rho_d \times i_d \geq E_{db} \quad (1)$$

すなわち逆電離はダスト層の抵抗率 ρ_d とこの部分を流れる電流 i_d との積で表わされるダスト層中の電界強度 E_d が、その部位のダスト層の絶縁破壊電界強度 E_{db}

* 三菱重工業株式会社神戸造船所 (652 神戸市兵庫区和田崎町 1-1-1)

Kobe Shipyard & Machinery Works, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., 1-1, Wadasaki-machi 1-chome, Hyogo-ku, Kobe, 652 Japan

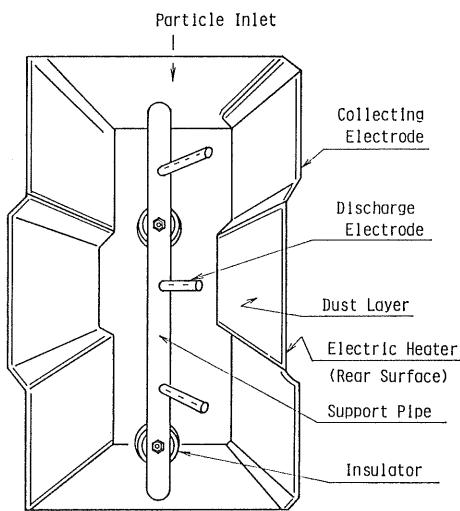


図1 集塵空間でのダスト飛跡観察装置

Fig. 1 Set-up for flying paths observation of particles in precipitating field. Electric heater is used to control resistivity of dust layer by changing temperature.

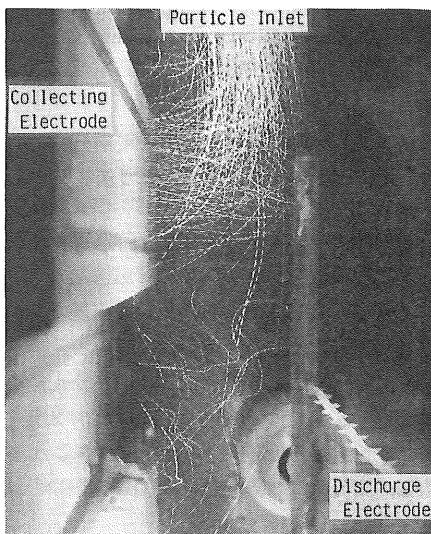


図2 逆電離のないときの粒子の飛跡

Fig. 2 Flying paths of particles in a precipitation field without back discharge.

を超えたとき生ずる。逆電離が発生すると発生点より放電極に向かって放出される正のイオン^{7,8)}により、ダスト粒子はその保有する負電荷を緩和されたり逆に正に帯電されたりするので集塵性能は低下する。すなわちダスト粒子の集塵極への移動速度Wは次下記の式⁹⁾

$$W = q \cdot E / 6\pi \cdot \mu \cdot a \quad (2)$$

で表わされるため、ダスト粒子の負の電荷qの減少に比例して移動速度Wは減少することになる。ここに、a：

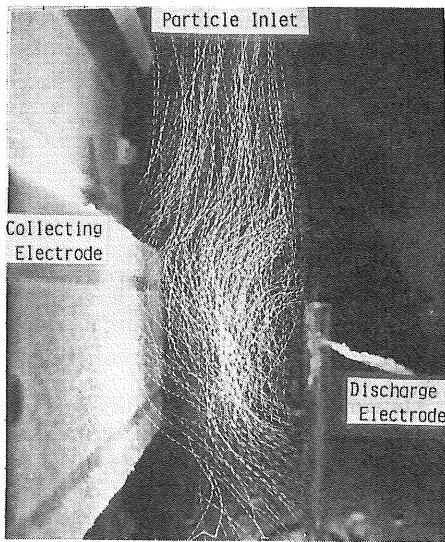


図3 逆電離のあるときの粒子の飛跡

Fig. 3 Flying path of particles in a precipitating field with back discharge.

粒子半径、 μ ：ガスの粘性係数、E：集塵空間の電界強度、である。

2.2 逆電離条件下でのダストの飛跡

飛来ダスト粒子の挙動に及ぼす逆電離の影響は粒子の飛跡の観察などを通じて知ることができる。図1に示すように、電気集塵装置のガス通路すなわち左右に集塵極を配し放電極をその中央に設置した部分を垂直に設けた装置を用い、模擬ダスト粒子（約100 μm のパーライト粒子）をガス通路内を重力落下させて断続光源によって写真撮影した結果を図2、3に示す。図2は集塵極にダスト層のない場合、図3は集塵極に模擬高抵抗層を設けて意図的に逆電離を発生させたときのダスト粒子の飛跡を示す。

粒子は図上方より集塵部に流入するが、正常時には放電極のかなり上流ですでに負に帯電し集塵極へ向かい捕集されるのに対し、逆電離発生条件下では粒子はいったん正極である集塵極へ向かうが、集塵極の近傍で逆電離により発生する正イオンの射突を受け正に帯電しクロロソ斥力で集塵極より遠ざかり、放電極の近傍で再び負に帯電され集塵極のほうへ転進することを繰り返しながら集塵空間を去る。

この挙動は、集塵極側から逆電離により発生する正のイオンがダスト粒子の集塵極上への捕集を阻害することを如実に示すものである。

このように逆電離は電気集塵作用を大きく損ねるので、とくに高抵抗ダスト捕集用ESPではその発生を極力抑えることが性能維持のために必要不可欠であるが、

間欠荷電はまさにこの逆電離の緩和、抑制を目的として開発されたものである。

3. 逆電離時の電圧-電流特性と間欠荷電の原理

3.1 電圧-電流特性

電気集塵装置の実機の電圧-電流特性は逆電離の有無で大別して図4に示す2通りの形態を示す。ダストの抵抗率 ρ_d が $10^{12} \sim 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ の程度を超えるとわずかの電流でダスト層の絶縁破壊が始まる。普通のESPではコロナ開始電圧を若干超えた電圧付近で逆電離が発生する。

いったん、逆電離が発生すると電圧の上昇を試みてもダスト層は次々と逆電離発生部位を拡大してゆき集塵極側からの正イオンによる電流の増加が生ずるのみで安定したグロー モードの逆電離¹⁰⁾に入る。

このように抵抗率の高いダストでは逆電離によるグロー発生部がダスト層全面へ伝播するに伴い電極間の電流が、加速的に異常増加するため、より低い電圧で大電流が流れ実機ESPでは電源の電流容量の限度(定格電流)に容易に達することとなる。

今この電流急上昇の開始点付近で荷電電圧を上下させて荷電電圧と電流の動きを詳細にみてみると、電圧の上昇が緩慢な場合は電圧-電流値は図4の実線のようになるが、電圧の上昇が早い場合には緩慢な電圧上昇時に迫る最高電圧を超えて点線に示すように一時的に電流電圧とも若干増えた後、いっきに電流が増加し電圧は低下して実線へ戻り電源の電流容量限度に達する。

3.2 間欠荷電の動作原理

このようにESP外部からも電圧-電流特性によって逆

電離がいっきに集塵電極上に進展する様子を推察しうるが、この逆電離発生の時間遅れについては集塵極上のダスト層間の電荷の蓄積を誘電体に関するものとした式¹¹⁾で説明することができよう(図5)。

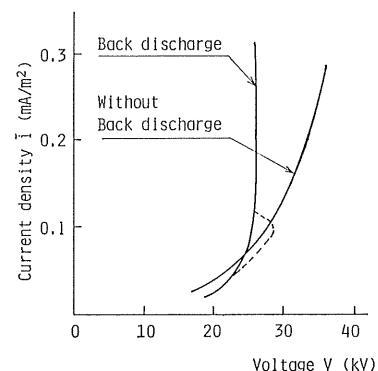
$$V_d = V_0 \times (1 - \exp(-t/\tau_0)) \quad (3)$$

ここに、 V_d : 時刻 t のダスト層間電位差、 V_0 : 直流によるダスト層間飽和電位差、 τ_0 : 時定数、である。

いま、 ε_d : ダスト層の比誘電率、 ρ_d : ダスト層の抵抗率、とすれば時定数 τ_0 は

$$\tau_0 = 8.85 \times \varepsilon_d \times \rho_d \times 10^{-14} \quad (\text{s}) \quad (4)$$

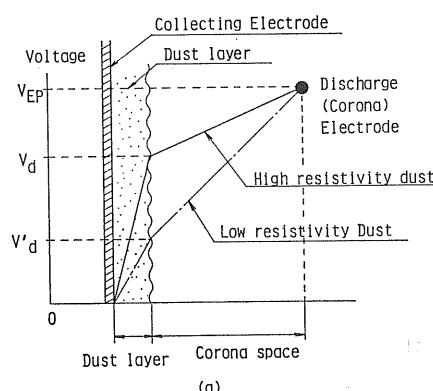
となり、フライアッシュの場合 $\varepsilon_d = 3$ 、 $\rho_d = 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ とすると $\tau_0 = 0.27 \text{ s}$ が得られ、ダスト層の電位差 V_d は



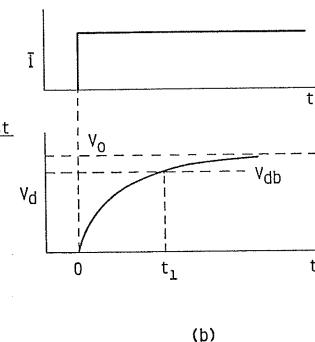
Dotted line shows the voltage when it is risen rapidly.

図4 逆電離のある場合とない場合の実機ESPのV-I特性

Fig. 4 V-I characteristics of an ESP with/without back discharge.



(a)



(b)

V_{EP} : Supply voltage, V_d : Voltage drop across high resistivity dust layer, V'_d : Voltage drop across low resistivity dust layer, V_0 : Voltage with continuous divert current, V_{db} : Breakdown voltage of dust layer.

図5 電極間の電圧分担(a)とダスト層間電位差の上昇状況(b)

Fig. 5 Voltage allotment between electrodes (a) and voltage across dust layer at step current flow (b).

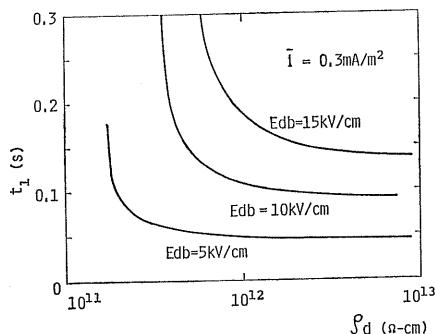
 E_{db} : Breakdown field strength of dust layer.

図6 逆電離に至るまでの荷電時間

Fig. 6 Time until dust layer comes to electrical breakdown at current density of $0.3 \text{ mA}/\text{m}^2$.

この時定数でもって図5に示すように電圧印加時点より t_1 の時間遅れで逆電離開始電圧 V_{db} に達することとなる。この t_1 は式(1), (3), (4)より次のように表わされる。

$$t_1 = \tau_0 \ln [1 / \{1 - E_{db} / (i_d \times \rho_d)\}] \quad (5)$$

式(5)において $\tau_0 = 0.27 \text{ s}$, $\rho_d = 10^{12} \Omega\text{-cm}$, $E_{db} = 10 \text{ kV/cm}$, $i_d = 0.3 \text{ mA}/\text{m}^2$ のとき $t_1 = 0.11 \text{ s}$ となり $\rho_d = 10^{13} \Omega\text{-cm}$ のときには $t_1 = 0.09 \text{ s}$ となる(図6)。

この時間遅れは実機電源の電気的制御という観点からは十分に長いもので、逆電離始発の時点 t_1 に達する以前に荷電を中断し、ダスト層表面電位が初期値付近まで低下したとき、再荷電することを行なえばダスト表面電位を絶縁破壊電位以下に保つことができ、逆電離を緩和しない抑止することが可能となる。

間欠荷電はこのような制御を高圧電源変圧器の一次側電流(商用周波)をサイリスタで断続することにより行なうものである。

4. 間欠荷電時の電圧の変化とダスト粒子の比電荷

間欠荷電によりダスト層の表面電位を逆電離の始発条件以下に抑制することで、高抵抗ダストに対しては連続荷電の場合に比べ集塵性能が著しく向上することが実機ESPで確認されている^{12,13}。間欠荷電では逆電離の生ずる部位が大幅に抑制されるので、荷電電圧のピーク値は上昇するが、一方平均電圧は電流の間欠供給のぶんだけ減少する。

いま、ダストへの作用力をクーロン力のみと仮定すると作用力はダストの電荷 q とダスト粒子近傍の集塵空間の電界強度 E の積に比例することとなる。しかし間欠荷電では平均電界強度が従来の直流荷電に比べて大きくなっているにもかかわらず集塵効率が向上していること

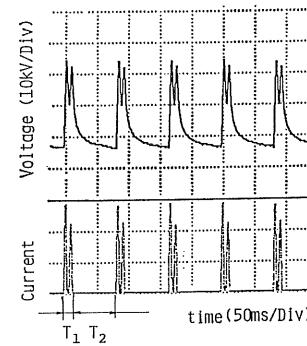


図7 間欠荷電の波形例

Fig. 7 Wave form of IE (for reference).

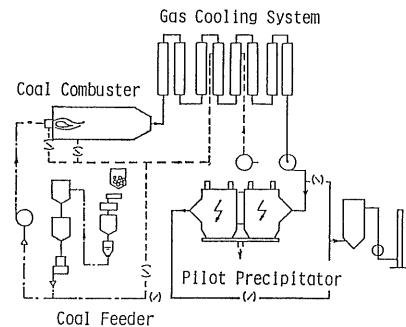


図8 フライアッシュ集塵性試験用 ESP 設備

Fig. 8 Fly ash precipitability testing rig.

からダスト粒子の帶電量の増加がこれに寄与していることが考えられる。

この確認のために間欠荷電の荷電率に対するこれらの値の変化特性を、電気集塵試験装置を用いて調査した。

ここで、荷電率 γ_e は T_1 : 荷電時間, T_2 : 荷電断の時間として次式のように定義する。

$$\gamma_e = T_1 / (T_1 + T_2) \quad (6)$$

また参考として実機電圧電流波形の例を図7に示す。

4.1 試験方法および供試炭

4.1.1 パイロットESP

ESP試験装置はそれぞれ 1.5 m^2 の集塵面積をもつ2フィールド型で集塵電極の間隔は実機相当の300mmピッチとなっている。フライアッシュは燃焼炉で供試炭を燃焼させて作られ実缶条件を模擬した排ガス冷却系を経て実機相当ガス温度(約150°C)に調整された後、パイロットESPへ導入される。図8に設備の概要を示す。

4.1.2 ダスト粒子の帶電量

ダスト粒子の帶電量はESP出口に飛来するフライアッシュを図9に示す吸引型ファラデーケージにより等速吸引して得られる電流と捕集ダスト量から比電荷 q/m (C/g) として求めた。

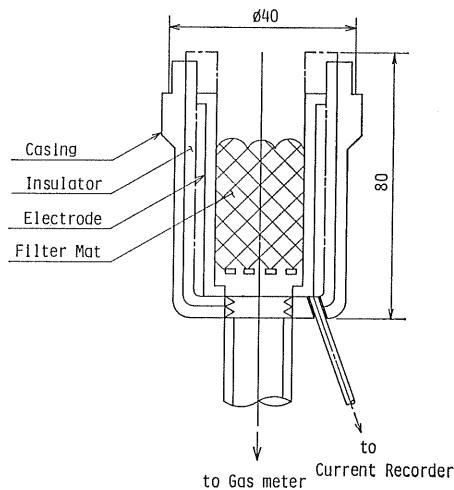


図9 ダスト吸引形ファラデーケージ

Fig. 9 Faraday cage for collecting charged particles.

4.1.3 比電荷の測定条件

比電荷の測定にあたっては、ESP の第1フィールドは帶電粒子のサンプリング部であるESP(第2フィールド)出口のダスト濃度を約 50 mg/m^3 に保つよう荷電を調整し、第2フィールドを試験集塵部として荷電条件を変化させた。

荷電条件は連続荷電および間欠荷電($\gamma_c=1/1, 1/2, 1/3, 1/5$)とし、電流波高値はいずれの場合も連続荷電時に平均電流 $i=0.3\text{ mA/m}^2$ を流したときの波高値と同一になるように設定した。

4.1.4 供試炭

供試炭として試験条件下で抵抗率 ρ_d の異なるフライアッシュを生ずる下記3炭を選んだ。

A炭(カナダ) : $\rho_d=4\times 10^{13}\Omega\cdot\text{cm}$

B炭(南アフリカ共和国) : $\rho_d=4\times 10^{12}\Omega\cdot\text{cm}$

C炭(オーストラリア) : $\rho_d=8\times 10^{11}\Omega\cdot\text{cm}$

4.2 試験結果

(1) 比電荷 q/m 、荷電電圧ピーク値 V_p ならびに平均電圧 V_m と荷電率 γ_c の関係を図10(a)~(c)に示す。 q/m の値は3炭種とも荷電電圧ピーク値 V_p に似た動きを示した。 q/m は炭種によって差があり連続荷電(すなわち $\gamma_c=1/1$)のとき、A炭では $2.9\times 10^{-5}\text{ C/g}$ 、B炭では $5.0\times 10^{-5}\text{ C/g}$ 、C炭では $1.9\times 10^{-5}\text{ C/g}$ と異なる値を示した。

(2) ピーク電圧と平均電圧の積 $V_p \times V_m$ と、荷電率 γ_c の関係を図11に示す。高抵抗率のA炭では荷電率 $\gamma_c=1/3$ 付近に $V_p \times V_m$ の最大値があるのに対し、抵抗率が低く逆電離がないと考えられるC炭では γ_c の減少

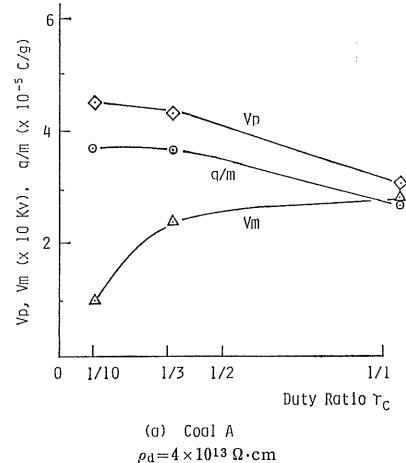
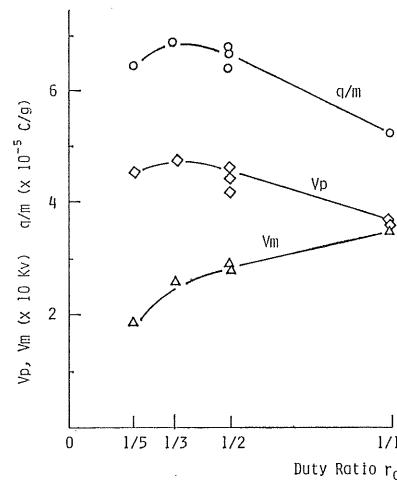
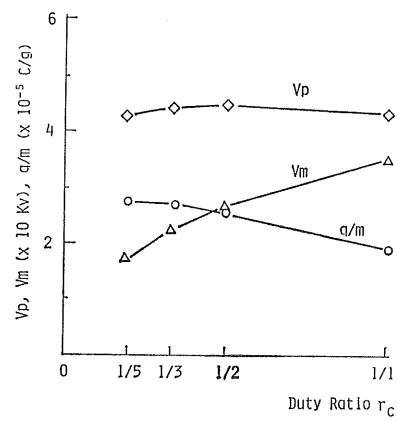
(a) Coal A
 $\rho_d=4\times 10^{13}\Omega\cdot\text{cm}$ (b) Coal B
 $\rho_d=4\times 10^{12}\Omega\cdot\text{cm}$ (c) Coal C
 $\rho_d=8\times 10^{11}\Omega\cdot\text{cm}$

図10 ピークおよび平均電圧と比電荷測定結果

Fig. 10 Peak and mean voltage and charge to mass ratio at IE measured.

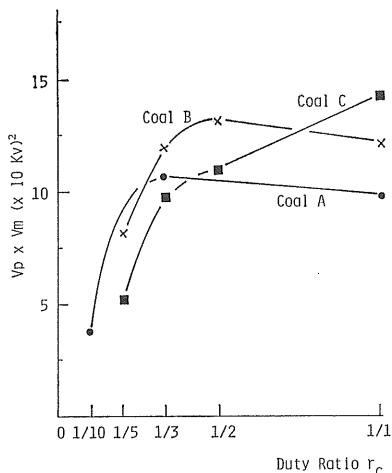


図 11 ピーク電圧と平均電圧の積と荷電率

Fig. 11 Relation between V_{peak} and V_{mean} to duty ratio.

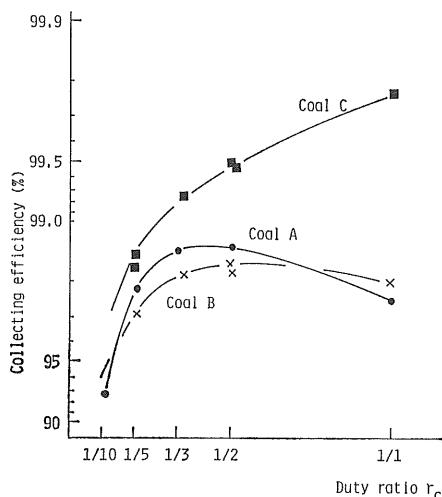


図 12 ESP 集塵性能と荷電率

Fig. 12 ESP performance and duty ratio.

とともに $V_p \times V_m$ はほぼ一様に減少する。

(3) 集塵効率 η と荷電率 γ_c の計測結果を図 12 に示す。また図 12 より算出した荷電率 $\gamma_c=1/1$ のときのダスト移動速度 w_1 と各荷電率でのダスト移動速度 w_2 の比 (H : 移動速度改善率 : enhancement factor) を図 13 に示す。

$$H = w_2/w_1 \quad (7)$$

(4) 図 14 に連続荷電時の第 1 フィールド (1F) および第 2 フィールド (2F) の荷電特性を示す。図 14において A, B, C 炭の順に、電圧最大値が上昇しつつ電圧上昇時と下降時の描くヒステリシスループの面積が減少していることから抵抗率は A, B, C 炭の順位で低くなっ

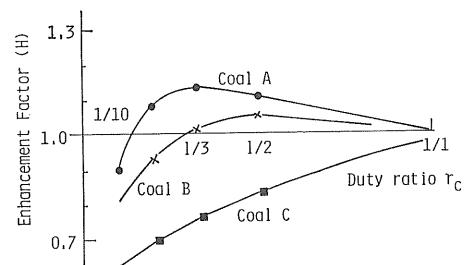


図 13 ダスト移動速度改善率と荷電率

Fig. 13 Enhancement factor of migration velocity and duty ratio.

表1 供試フライアッシュの粒度測定結果

Table 1 Particle size of sample flyashes.

Fly ash	ESP inlet		ESP outlet	
	MMD (μm)	MMD (μm)	% (under 1 μm)	
Coal A	10	(2.3)	(25)	
Coal B	9.8	1.7-1.8	26-40	
Coal C	7.9	2.2-3.1	15-20	

() Reference figure.

ており¹⁴⁾試験時にも抵抗率は事前の計測値の順であるものと判断される。

表1に供試フライアッシュの粒度測定結果を示す。

4.3 試験結果の考察

(1) 比電荷 q/m の値は、荷電率 γ_c を変化させると荷電圧ピーク値 V_p と似た傾向の動きを示すが、抵抗率の高い A, B 炭では q/m と V_p はともに荷電率 $\gamma_c = 1/2 \sim 1/3$ で連続荷電率より上昇する。

A, B炭では図14のV-I特性よりみて連続荷電時には逆電離が発生しているが、荷電率 $\gamma_c=1/2\sim 1/3$ では集塵性能が一度上昇することから逆電離は抑制されたと考えられる。このとき、電圧ピーク値 V_p も上昇するがこれは逆電離で電流の異常増加を生ずるダスト層の部分が縮小され、その結果として電圧電流特性が電圧の高くなる側へ移行しなためと考えられる。

したがって V_p は逆電離で生ずる正イオンの増減と反対の増減傾向をもって変化すると推察でき、これらからも V_p と q/m は似通った動きをするものと考えられ

通常抵抗のC炭では電圧ピーク値 V_p は荷電率によってほとんど変化しない。この場合の q/m に荷電率 γ_e の減少によってわずかの増加がみられているが、これは測定位置である第2フィールド出口での粒度分布が細かい側に変化したためかと著者らはされる。

(2) B歳の比電荷が全般的に大きな値を示したことに

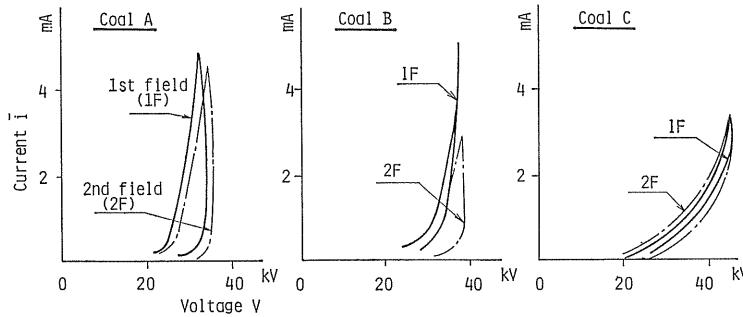


図 14 連続荷電時の電流-電圧特性

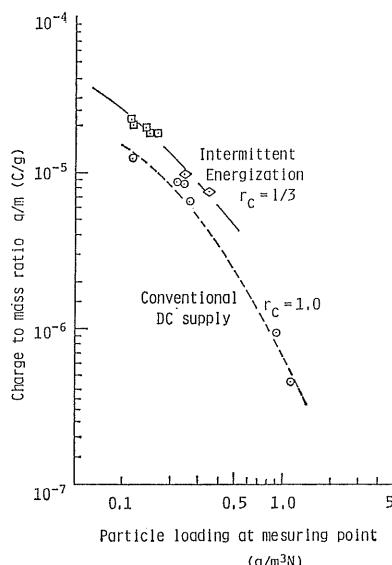
Fig. 14 *V-I* characteristics of pilot ESP with coals A, B and C.

図 15 比電荷と測定部位の粒子重量濃度

Fig. 15 Charge to mass ratio to various dust loadings on a same fly ash.

ついてはB炭ではフライアッシュ中に占める微粒子の割合の多さが考えられる。Pauthenier の式によれば最大電荷 q_{\max} は、 a : 粒子の半径、 E_0 : 荷電部の電界強度として次式で表わされる¹⁴⁾が

$$q_{\max} \propto a^2 \times E_0 \quad (8)$$

表1にみられるようにB炭では $1 \mu\text{m}$ 以下の比率が大きく単位重量当りの比表面積が他の炭より大きいためこのような結果が得られたものと考えられる。

これについて同一フライアッシュで第1フィールド出口のダスト濃度を変化させることによって測定部のダスト濃度を変えて q/m を測定した例を図15に参考に示す。これからダスト濃度の減少とともに粒径分布が変化し平均粒径が減少するにつれて q/m が増加することが

わかる。

(3) 間欠荷電による集塵性能の改善効果は、通常荷電 $\gamma_e = 1/1$ のダスト移動速度 w_1 と間欠荷電時のダスト移動速度 w_2 の比である移動速度改善率 H (図13) から知ることができる。

いま図13の改善率を算出したダスト移動速度 w がクロソノ力のみに依るものとするとすれば、 E_0 : 荷電電界強度、 E_p : 集塵部の電界強度として

$$w \propto E_0 \times E_p \quad (9)$$

と表わされる。 E_0 は V_p と、 E_p は V_m とほぼ比例して増減する¹⁵⁾ものと考えられるので、図11に $V_p \times V_m$ と γ_e の関係を整理してみた。図11、13を比較すると H と $V_p \times V_m$ は同じ傾向の動きを示し、高抵抗のA、B炭では、 H の最大値を示す荷電率 γ_e と $V_p \times V_m$ の最大値を示す γ_e がほぼ等しいところにある。

C炭では逆電離が発生しないので両者は γ_e の減少とともに同じ傾向で一様に減少する。

(4) この試験では q/m をダスト重量濃度をほぼ一定として計測したが、 q/m は炭種で異なった。 q はもともと表面積の関数でありダストの粒度分布が変わり比表面積が変化すると q/m は変化するので、荷電条件と q/m の関連の微粒子発生条件の異なる炭種間での直接比較は有意義な指標となりがたい結果を示した。

5. む　す　び

間欠荷電についての試験および検討の結果まとめると次のようになる。

(1) 集塵極上のフライアッシュなどのダスト層は数十～百数十秒の時定数をもった誘電体とみなせるので、間欠荷電により高抵抗ダストにみられる逆電離を緩和ないし抑制することができる。

(2) 間欠荷電で荷電電圧のピーク値は上昇するが平均電圧は低下する。電圧のピーク値の上昇の度合は逆電離

の抑制の度合いを知る指標の一つと考えられる。

(3) 間欠荷電による集塵性能の向上の程度は、フライアッシュの場合、高抵抗のために通常荷電時に集塵性の低いダストほど大きい。

高抵抗フライアッシュでは荷電率を減少させてゆくとあるところまで集塵性能は向上し、その後低下する特性を示す。普通抵抗のフライアッシュにあっては集塵性能は荷電率の減少とともに低下する。

(4) 荷電率に対する集塵性能の改善率の動きとピーク電圧と平均電圧の積の動きとは似た傾向を示す。したがって(ピーク電圧)×(平均電圧)は電気集塵装置の集塵性能の最良点を外部より探る際の指標となりうる。

(5) ダスト粒子の比電荷は荷電率の変化に対し電圧のピーク値に近い動きを示すが、比電荷の絶対値そのものはダストの粒度分布に大きく影響を受ける。したがって間欠荷電の制御のための指標としては使いにくい。

電気集塵における最重要課題である逆電離の現象解明とその対策にあたり常に貴重なご指導とご意見を賜った増田閃一先生、間欠荷電制御の構想を出された安藤喬氏ほかこの技術の開発にたずさわられた三菱重工の同僚各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) N. Tachibana, Y. Matsumoto and N. Sakamoto: *Proc. of CSIRO Conf. on Electrostatic Precipitator*, pp. 4-1-14, Leura NSW, Australia,

Aug. (1978)

- 2) S. Oglby and G. Nichols: *Electrostatic Precipitation*, p. 132, Marcel Deckker, Inc., New York (1978)
- 3) T. Ando, N. Tachibana and Y. Matsumoto: *Proc. of the 4th Symposium on the Transfer and Utilization of Particulate Control Technology*, p. 474, Houston, Texas, Oct. (1982)
- 4) S. Masuda: Research on Electrostatic Precipitation and Applied Electrostatics, pp. 28-83, Masuda-Laboratory Report, University of Tokyo (1981)
- 5) 藤島英勝, 柳生隆志, 富松一隆, 中山 豊, 松本陽一: 三菱重工技報, 24 (1987) 589
- 6) T. Ando: US Patent 4410849 OCT 18 1983
- 7) 静電気学会編: 電気学会誌, 8 (1960) 1482
- 8) 増田閃一, 小野 彰, 阿久津顯右: 静電気学会誌, 2 (1978) 188
- 9) H.J. White: *Industrial Electrostatic Precipitation*, p. 157, Addison-Wesley Publishing Co., New York (1967)
- 10) 静電気学会編: 静電気ハンドブック, p. 508, オーム社 (1981)
- 11) H.J. White: *Industrial Electrostatic Precipitation*, pp. 325-326, Addison-Wesley Publishing Co., New York (1967)
- 12) J.D. Riley and F.B. Neulinger: *Proc. of the Jt. ASME/IEEE Power Generation Conference*, 86-JPGC-EC-1, Portland, Oregon, Oct. (1986)
- 13) W. Piulle and E.C. Landham, Jr.: *Proc. of the Jt. ASME/IEEE Power Generation Conference*, 86-JPGC-EC-5, Portland, Oregon, Oct. (1986)
- 14) H.J. White: *Industrial Electrostatic Precipitation*, p. 137, Addison Wesley Publishing Co., New York (1967)
- 15) H.J. White: *ibid.*, p. 201