

論 文

パルス荷電固定電極部を組合せた移動電極型電気集塵装置

三 坂 俊 明^{*,1}, 大 浦 忠^{*}, 山 崎 稔^{*}

(2006年5月19日受付; 2006年9月12日受理)

Moving Electrode Type Electrostatic Precipitator Having a Pulse Charging Fixed-Electrode Section

Toshiaki MISAKA^{*,1}, Tadashi OURAY^{*} and Minoru YAMAZAKI^{*}

(Received May 19, 2006; Accepted September 12, 2006)

The electrostatic precipitator composed of a fixed electrode section with pulse energization, followed by the moving electrode section to cope with handling an extremely high resistive dust. A pulse energization for the fix electrode section was studied for the purpose of improving the collection efficiency. The relationship between pulse waveforms and their collection efficiencies has been experimentally investigated for a cylindrical electrostatic precipitator. For handling the high resistive dust greater than $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$, the optimum pulse waveforms superimposed of DC voltage and DC current were revealed. The experimental results for a coal fired boiler application indicated that the optimum DC current, the pulse voltage, and pulse frequency exist depending on dust resistivity. Suitable choice of pulse waveform could lead to achieve a significantly higher collection efficiency than that of the conventional DC energization.

1. はじめに

電気集塵装置は集塵性能がダスト電気抵抗率の影響を受け、特に高抵抗ダストでは集塵性能が著しく低下するため、高抵抗ダストの集塵性能の向上は重要な課題となっている¹⁾。高抵抗ダストの集塵性能を向上する方法として、集塵板を短冊状に分割した集塵極エレメントをチェーンで連結して移動可能とし、集塵極エレメントに捕集したダストを回転ブラシで連続的に除去して集塵板を清浄に保つ移動電極方式の電気集塵装置を考案して実用化している。移動電極方式による電気集塵装置のダスト層の付着力と払落し効果、主要稼動部品の信頼性向上、運転実績などについては既に報告した²⁻⁴⁾。

高抵抗ダストは集塵板に捕集できるダスト層厚さに限界があり⁵⁾、移動電極方式の電気集塵装置は入口ダスト濃度を制限する必要がある。石炭燃焼ボイラで発生するフライアッシュはダスト電気抵抗率が高く、さらに電気集塵装置の入口ダ

スト濃度も高い。そこで、入口側の集塵室を従来の固定電極方式、出口側の集塵室を移動電極方式として、固定電極部と移動電極部を組合せた移動電極型電気集塵装置としている例が多い。このとき、固定電極部の高抵抗ダストによる集塵性能の低下に対しては槌打強化と集塵面積を大きく設計することで対応していた。

一方、高抵抗ダスト集塵技術としてはパルス荷電方式⁶⁾があり、最近の高電圧パルス発生技術の進歩とともに国内外で実用化が始まった⁷⁻¹⁰⁾。このパルス荷電を固定電極部に適用して移動電極部と組合せると電気集塵装置はさらに広範囲の高抵抗ダストに対応できると考えた。パルス荷電は対象となるダストの性状によって性能改善効果に差があり評価が定まっていない¹¹⁾。電気集塵装置の固定電極部をパルス荷電して集塵性能を向上するにはパルス波形やダスト電気抵抗率の適用範囲を明確にする必要がある。そこで基礎実験によってパルス荷電方式の諸条件を明確にするとともに、石炭燃焼ボイラ排ガスでパルス荷電固定電極部と移動電極部を組合せた電気集塵装置の現地実験を行った。本論文ではこれらの実験結果について報告する。

キーワード：電気集塵装置、高抵抗ダスト、移動電極方式、パルス荷電、荷電波形、集塵性能

* (株) 日立プラントテクノロジー (170-8466 東京都豊島区北大塚 1-13-2)

Hitachi Plant Technologies, Ltd. 1-13-2 Kita-Otsuka, Toshima-ku, Tokyo, 170-8466 Japan

¹ toshiaki.misaka.sn@hitachi-pt.com

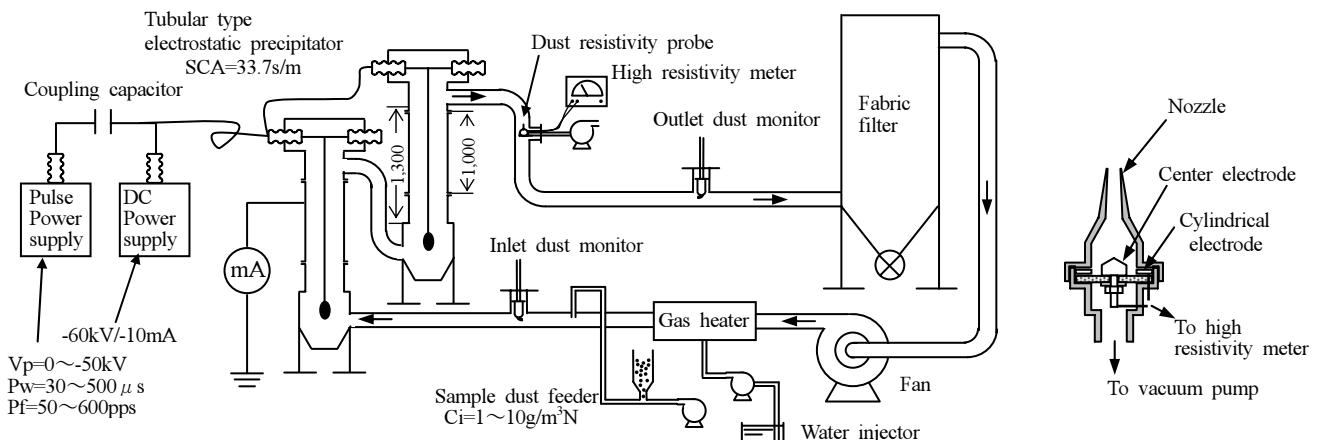


図 1 パルス荷電集塵実験装置

Fig.1 Experimental setup for the pulse-charging electrostatic precipitator.

2. パルス荷電波形と集塵性能

2.1 基礎実験装置および実験方法

パルス荷電方式における荷電波形やダスト電気抵抗率と集塵性能の関係を明らかにするために、パルス電圧、パルス幅、パルス頻度を可変できるパルス荷電装置を試作し¹²⁾、円筒型電気集塵装置を用いてダスト電気抵抗率を任意に調節しながら集塵実験を行った。図 1 に実験装置の概要を示す。

実験に用いた円筒型電気集塵装置は内径 310mm、長さ 1.3m で中央に放電線を 1 本取り付けてある。円筒電極の中央部 1m は他の部分と電気的に絶縁して、単位長さ当たりの放電電流を測定できるようにした。この円筒型電気集塵装置は 2 基を直列に接続してあり、処理ガス量が 250m³/h、集塵面積が 2.53m² である。

実験は円筒型電気集塵装置内のガス速度を 1m/s、ガス温度 120°C、入口ダスト濃度 7g/m³N として行った。ダストは石炭火力発電所の電気集塵装置で捕集したフライアッシュで、ダスト電気抵抗率の異なるもの 3 種類を使用した。ダストの物性を表 1 に示す。ガス温度は電気ヒータで調整し、湿分は注入装置で加えた水をヒータで気化させて調整した。このガスにダストを分散させた。円筒型電気集塵装置でダストを集塵した後のガスはバグフィルタで残りのダストを濾過してからプロワに戻る。ガスを循環してガス温度と湿分を安定させることによりダスト電気抵抗率を任意に調整することができる。また、図 2 に示す同心円筒型電極構造のダスト抵抗測定プローブを用い¹³⁾、静電気学会技術報告記載の標準測定方法¹³⁾を参考にサンプルダストの電気抵抗率を測定してダスト電気抵抗率と集塵率の関係を明らかにした。

荷電装置は直流荷電装置の出力にパルス荷電装置の出力を重畠するように構成した。直流荷電装置は電気集塵装置で従来から使われているサイリスタ制御全波整流方式の直流荷電装置を用いた。パルス荷電装置はパルス電圧 0~60kV、パルス幅 30~500 μs、パルス頻度 50~600pps の範囲でパル

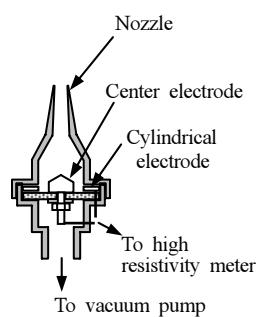


図 2 ダスト抵抗測定用プローブ

Fig.2 The probe for dust resistivity measurement.

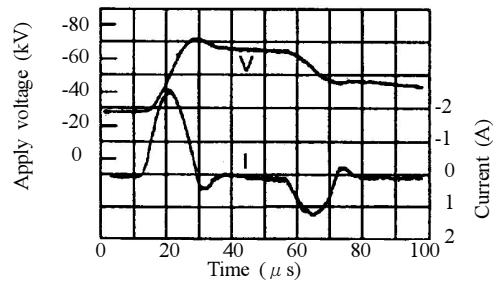


図 3 パルス電圧・電流波形

Fig.3 Pulse voltage and current waveforms.

ス波形を調整できる。このパルス荷電装置の出力波形を図 3 に示す。直流荷電装置は商用周波数の交流高電圧を全波整流した直流荷電と、この直流荷電を電源周期に同期して荷電と休止を繰返す間欠荷電¹⁴⁾に切替えることができる。

表 1 サンプルダストの物性

Table 1 Characteristics of sampled dust

Sample	Dust resistivity (Ω·cm)	Mean diameter (μm)
Fly ash	$3.8 \times 10^{10} \sim 1.2 \times 10^{11}$	16.0
A	$9.5 \times 10^{11} \sim 7.0 \times 10^{13}$	16.0
B	$9.8 \times 10^{12} \sim 1.1 \times 10^{14}$	12.3

2.2 基礎実験結果と検討

(1) 直流電流

直流荷電装置の出力である直流電圧と直流電流は相互に関係しており、直流電圧を調整すると直流電流が変化する。また、直流電圧を設定してパルス荷電装置のパルス電圧やパルス頻度を変化させると直流電流が変化する。直流電圧を一定としてパルス波形を変化させたときの直流電流の変化は大きく、直流電流を一定としたときの直流電圧の変化は小さい。そこで直流電流を定電流制御しながら、パルス荷電における直流電流と集塵率の関係を測定した。

図 4 にパルス電圧を -30kV 一定として直流電流を変化させたときの集塵率を示す。ダスト電気抵抗率が $9.8 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$

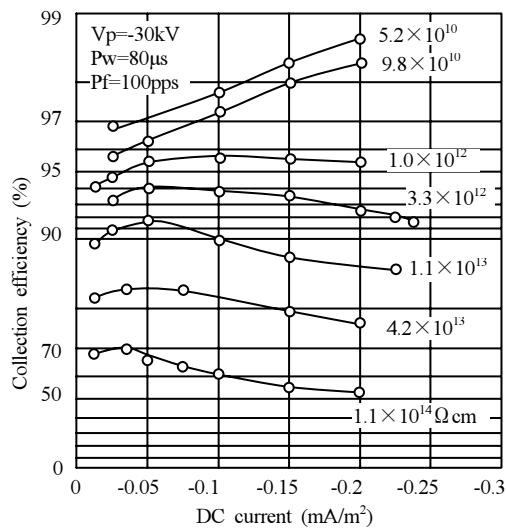


図4 直流電流と集塵率
Fig.4 DC current vs. collection efficiency.

では直流電流を増加させると集塵率は向上する。ダスト電気抵抗率が $3.3 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ のとき、直流電流が $0.05 \text{mA}/\text{m}^2$ までは集塵率が直流電流と共に向上し、それ以上の直流電流では集塵率が低下している。この抵抗領域では直流電流に最適値が存在している。ダスト電気抵抗率が $1.1 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ と高い条件では直流電流が $0.03 \text{mA}/\text{m}^2$ で集塵率は最大となり、それ以上の直流電流では大きく低下していく。

この結果から、パルス荷電の適用が考えられるダスト電気抵抗率が $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上では直流電流に最適値があり、ダスト電気抵抗率の上昇に伴って減少することが見出された。

(2) パルス電圧

パルス電圧を変化させながら測定した集塵率を図5に示す。ダスト電気抵抗率が $9.8 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ のとき、パルス電圧の上昇と共に集塵率は向上していく。ダスト電気抵抗率が $1.1 \times 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ のとき、パルス電圧と共に集塵率は向上するが、パルス電圧が-35kVで集塵率の向上は少なくなり、それ以上のパルス電圧では集塵率がやや低下した。ダスト電気抵抗率が $4.2 \times 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ ではパルス電圧-30kV以上で集塵率が低下し、 $1.1 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ では-20kV以上で集塵率は低下している。

この結果、ダスト電気抵抗率が高いときにはパルス電圧に上限があり、集塵率が最大となるパルス電圧はダスト電気抵抗率が高くなるにしたがって低下することがわかった。これはパルス電圧の上昇にともなって放電電流が増大し、ダスト層で逆コロナが激しくなったためと考えられる。

(3) パルス頻度

パルス頻度と集塵率および放電電流の関係を図6に示す。放電電流はパルス荷電装置と直流荷電装置の電流の合計である。ダスト電気抵抗率が $9.8 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ ではパルス頻度を増すと集塵率は向上する。ダスト電気抵抗率が $1.1 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ ではパルス頻度を減少したほうが集塵率は向上する。そ

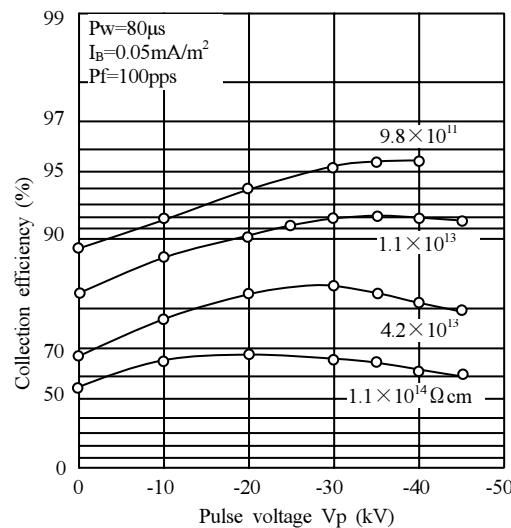


図5 パルス電圧と集塵率
Fig.5 Pulse voltage vs. collection efficiency.

の中間のダスト電気抵抗率が $2.1 \times 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ のときはパルス頻度を増すと集塵率は向上し、パルス頻度が 100pps で集塵率が最大となる。さらにパルス頻度を増加すると集塵率が低下して、最適なパルス頻度のあることがわかる。また集塵率が最大となるパルス頻度はダスト電気抵抗率が上昇すると減少している。直流荷電装置の電流を一定としてパルス頻度と放電電流の関係を求めるとき、放電電流はパルス頻度に比例して増加した。

パルス頻度と共に集塵率が高くなったのは間欠的なパルス電流によってダストの帶電量が増加したことによると考えられる。さらにパルス頻度を増加した場合は集塵極に捕集したダスト層内で逆コロナが強まり、集塵率が低くなつたと考えられる。

(4) パルス幅

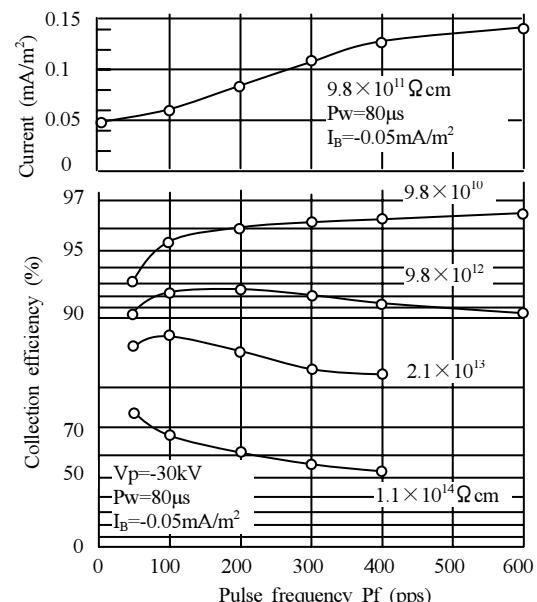


図6 パルス頻度と集塵率および放電電流
Fig.6 Pulse frequency vs. collection efficiency and current.

パルス電流はパルス幅を広げると増加し、狭めると減少する。そこでダスト電気抵抗率が高いときはパルス幅を狭め、ダスト電気抵抗率が低いときは広げることで広範囲のダスト電気抵抗率に対してパルス荷電を適用できると考えた。しかし、実験範囲でパルス幅の効果はパルス電圧、パルス頻度に比べて少なかった。パルス幅を変化させたときの集塵率を図7に示す。

ダスト電気抵抗率が $9.8 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ のとき、パルス幅を広げると集塵率はやや向上する。また $9.8 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ のとき、パルス幅にかかわらずに集塵率はほぼ同じ値を示した。しかし、ダスト電気抵抗率が $1.1 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ のときはパルス幅を狭めると集塵率が向上する傾向が見られた。そこでパルス幅をパルス荷電装置の限界の $30 \mu\text{s}$ まで狭めて集塵率を測定した。その結果、集塵率はさらに向上し、この実験範囲ではパルス幅が狭いほど集塵率が向上することが見出された。

(5) パルス荷電と直流荷電、間欠荷電の集塵性能比較

パルス荷電、直流荷電と間欠荷電と荷電方式を切替えながら集塵率の測定を行った。ダスト電気抵抗率を横軸にして整理した測定結果を図8に示す。パルス荷電は各ダスト電気抵抗率で集塵率が最良となる波形条件における測定値を示している。直流荷電と間欠荷電は放電電流が $0.2 \text{mA}/\text{m}^2$ における集塵率を示した。

ダスト電気抵抗率と集塵率の関係を見ると直流荷電ではダスト電気抵抗率が大きくなると集塵率が大幅に低下している。間欠荷電の集塵率は直流荷電に比べて低下がやや少なく、パルス荷電の集塵率の低下はさらに少ない。特に $10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上の高抵抗ダストでパルス荷電が電気集塵に有効なことがわかる。ダスト電気抵抗率 $1 \times 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ において、各荷電方式で同一集塵率となる集塵面積の比率を Deutsch の式¹⁴⁾

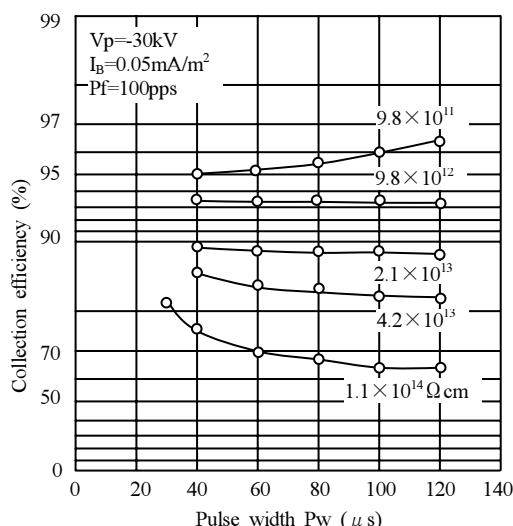


Fig.7 Pulse width vs. collection efficiency.

と図8の集塵率測定結果を用いて計算した。直流荷電に比べて間欠荷電における集塵面積は90%，パルス荷電は70%程度と小型化できることがわかった。なお間欠荷電の集塵性能向上効果は立花らの実験結果¹³⁾とほぼ一致している。

3. パルス荷電方式固定電極部と移動電極部の組合せ集塵性能

パルス荷電による高抵抗ダスト集塵を行うにはダスト電気抵抗率に合わせて、パルス電圧、パルス頻度、パルス幅などのパルス波形、直流荷電装置の放電電流などの調整が必要となる。またパルス波形の最適条件と直流荷電装置の荷電電圧、放電電流は相互に関連している。このダスト電気抵抗率とパルス波形の自動制御ができれば、パルス荷電装置の費用を考慮してもパルス荷電方式の経済性はあると考えられる。このパルス荷電を固定電極部に適用して移動電極部と組合せれば、電気集塵装置の高抵抗ダストの集塵性能をさらに向上できると考え、現地実験をおこなった。

3.1 現地実験装置および実験方法

固定電極部にパルス荷電を適用して移動電極部と組合せた実験を多種類の輸入炭を燃焼している石炭燃焼ボイラ用の移動電極型電気集塵装置で現地実験した。石炭燃焼ボイラの排ガス処理系統を図9に示す。ボイラ蒸発量は530t/hで、ボイラ燃焼排ガスはエアーヒータを経由して移動電極型電気集塵装置でダストを除去した後、湿式脱硫装置を経て煙突から排出される。第1区は集塵板間隔300mmの線対平板電極構成になっている。この固定電極部にパルス荷電装置を設置して直流荷電装置の出力にパルス電圧を重畠できるようにした。

ダスト濃度は円筒濾紙法と光散乱式連続ダスト濃度計

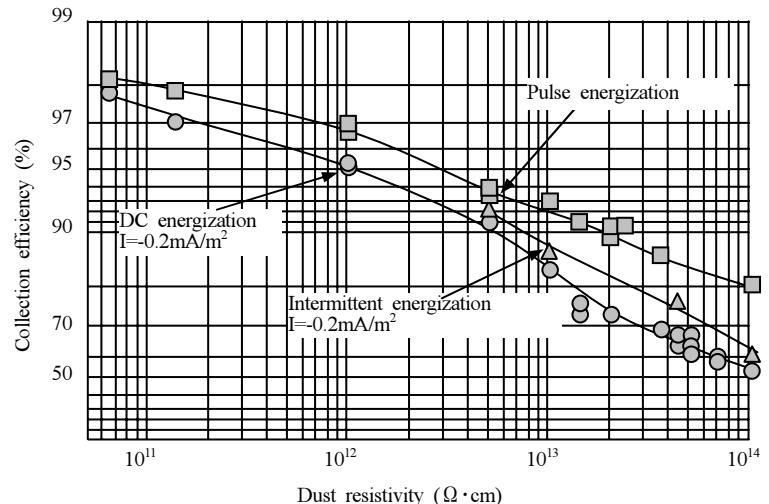
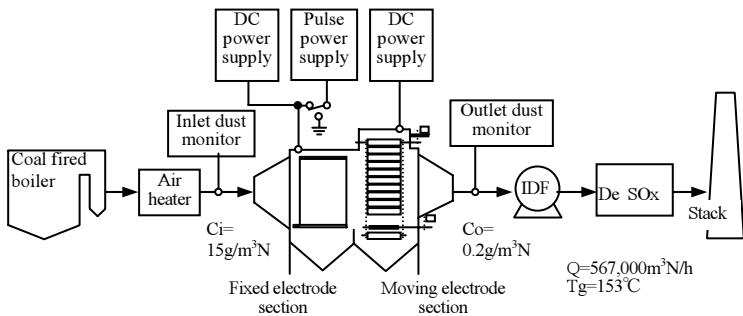


Fig.8 Comparison of collection efficiency on charging methods



測定した。連続式ダスト濃度計は電気集塵装置の出口に設置して荷電条件による出口ダスト濃度の変化を短時間で測定するのに使用した。この測定でパルス荷電の最適条件を求めて、集塵率は精度の高い円筒濾紙法で測定した。ダスト電気抵抗率は図2の同心円筒型電極構造のダスト抵抗測定プローブを用いて、電気集塵装置入口煙道にて測定した。

3.2 実験結果と検討

(1) パルス荷電波形と集塵性能

パルス荷電は集塵性能への影響因子が多く、ダスト電気抵抗率によってパルス波形の最適値が変化することは円筒型電気集塵装置を用いた基礎実験ですでに明らかにした。実機でこの現象を確認するために、パルス荷電時の直流電流、パルス電圧などを変化させながら電気集塵装置の出口ダスト濃度を計測した。図10にパルス電圧を一定として直流電流を変化させたときの出口ダスト濃度を示す。このとき電気集塵装置の第2区である移動電極部は一定電流の直流荷電とした。ダスト電気抵抗率が $5 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ と $3 \times 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ のとき、固定電極部の直流電流が $-0.027 \text{mA}/\text{m}^2$ において出口ダスト濃度は最小値を示した。そこで以降のパルス荷電実験は固定電極部の直流荷電装置の電流を $-0.027 \text{mA}/\text{m}^2$ として実施し

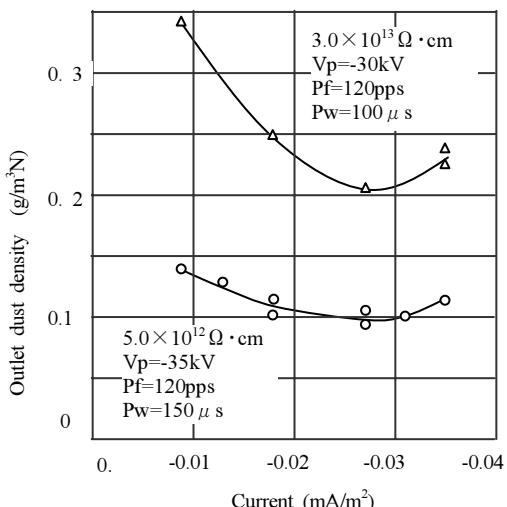


図10 直流電流と出口ダスト濃度
Fig.10 DC current vs. outlet dust loading.

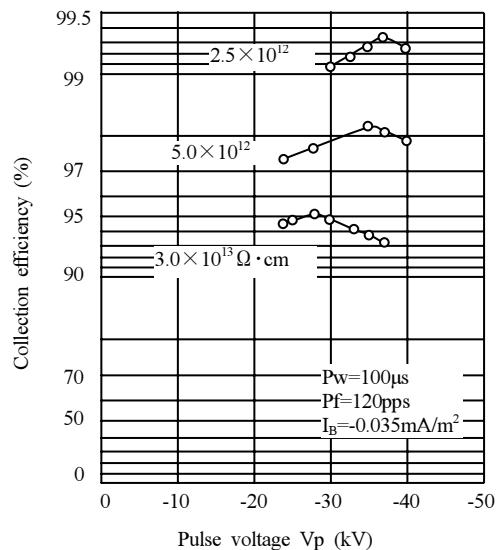


図11 パルス電圧と集塵率
Fig.11 Pulse voltage vs. collection efficiency.

た。

図11はパルス電圧と集塵率の関係を示している。ダスト電気抵抗率が $5.0 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ のときのパルス電圧と集塵率の関係を見ると、パルス電圧を上昇すると集塵率は向上するが、 -35kV 以上になると集塵率が低下する。 $3.0 \times 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ のときに集塵率が最高となるパルス電圧は -28kV であった。パルス電圧はダスト電気抵抗率によって異なる最適値がみられ、ダスト電気抵抗率が高いほど最適なパルス電圧は低くなり、基礎実験の結果と同様の傾向を示した。

(2) 各種荷電方式と集塵性能

パルス荷電の有効性を確認するために、固定電極部の荷電をパルス荷電、間欠荷電、直流荷電と変化させて荷電方式による集塵性能の比較を行った。このとき移動電極部は直流荷電である。円筒型ダスト抵抗測定プローブで測定したダスト電気抵抗率は燃料炭の種類によって $5.0 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ から $3.0 \times 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ まで変化している。図12に測定結果を示す。第1区の固定電極部をパルス荷電としたときは、間欠荷電や直流荷電に比べて高い集塵率を示している。ダスト電気抵抗率が $1.0 \times 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ における集塵率は固定電極部を直流荷電したときの91.0%に比べて間欠荷電で94.2%，パルス荷電で97.5%と向上している。この結果、出口ダスト濃度は間欠荷電で直流荷電の64.4%，パルス荷電で27.7%に減少する。ダスト電気抵抗率が高いほどパルス荷電と間欠荷電、直流荷電の集塵率の差は顕著となる。

(3) 固定電極部と移動電極部の部分集塵率

荷電方式の違いによる固定電極部と移動電極部の各々の集塵率を検討するため、第2区の移動電極部を無荷電として出口ダスト濃度を測定して集塵率を求めた。第1区の部分集塵率を図13に黒塗記号で示した。黒丸印の直流荷電に比べ

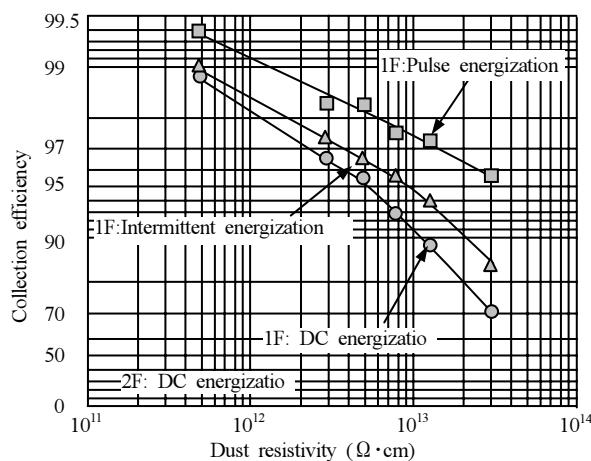


図 12 荷電方式による集塵率の比較

Fig.12 Comparison of collection efficiency by charging methods.

て黒角印のパルス荷電の集塵率は高く、ダスト電気抵抗率が高くなるに従って、パルス荷電と直流荷電の差は大きくなり、直流荷電の集塵率の低下に比べてパルス荷電の集塵率低下が小さい結果を示している。また間欠荷電は直流荷電に比べてやや集塵率が高い結果となっている。

第1区の部分集塵率測定値と固定電極部と移動電極部を組合せたときの集塵率測定値とを用いて第2区の部分集塵率を算出し、図13に白抜き記号で示した。第2区の移動電極部はすべて直流荷電であるが、集塵率は第1区の固定電極部をパルス荷電すると直流荷電に比べて、移動電極部の集塵率が数%向上している。この移動電極部の集塵率が向上した理由として、(1) パルス荷電の第1区を槌打したときの飛散ダストの粒径が大きく、移動電極部で集塵しやすい、(2) パルス荷電で第1区の集塵率が向上し、移動電極部のダスト濃度が低下したことが考えられる。

4.まとめ

固定電極部と移動電極部を組合せた移動電極型電気集塵装置の固定電極部をパルス荷電して高抵抗ダストの集塵性能を向上することを目的に、基礎実験によってパルス荷電装置のパルス波形および直流荷電装置の放電電流とダスト電気抵抗率の関係を実験的に明らかにした。

円筒型電気集塵装置を用いた基礎実験の結果、パルス荷電方式の適用が考えられる $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上の高抵抗ダストでパルス波形と直流電流に最適値があり、ダスト電気抵抗率によってその最適値が異なっていることが明らかになった。

また石炭燃焼ボイラ排ガスでパルス荷電などの各種荷電方式を固定電極部に適用して移動電極部と組合せた移動電極型電気集塵装置の現地実験を行った。その結果は、基礎実験結果と同様に、ダスト電気抵抗率によって異なるパルス荷

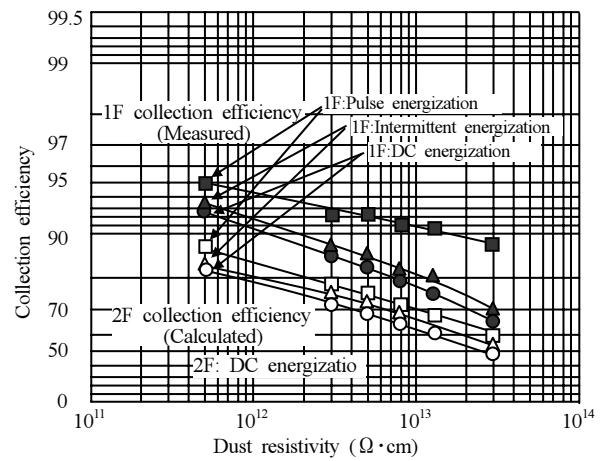


図 13 荷電方式による集塵率の比較

Fig.13 Comparison of collection efficiency by charging methods.

電波形と直流電流に最適値があり、固定電極部の直流電流は -0.027 mA/m^2 であった。最適なパルス電圧は $-28 \sim -35 \text{ kV}$ でダスト電気抵抗率が高いほど低下していた。第1区の固定電極部を直流荷電、間欠荷電、パルス荷電としたとき、ダスト電気抵抗率が高くなったときの集塵率の低下は直流荷電に比べてパルス荷電の方が少なく、パルス荷電が有効なことがわかった。

パルス荷電方式が高抵抗ダストの電気集塵に有効であるがまだ汎用化されていない。これはパルス荷電装置の性能やコスト、ダスト電気抵抗率とパルス波形の制御方式の確立など、工業的に解決しなければならない課題が残っているためと考えられる。本研究がパルス荷電方式の実用化の一助となることを期待したい。

参考文献

- 静電気学会編：静電気ハンドブック, p. 507, オーム社 (1981)
- 三坂俊明, 大浦忠, 有光武雄: 静電気学会誌, **30** (2006) 128
- 三坂俊明, 大浦忠, 白丸信彦, 有光武雄: 静電気学会誌, **30** (2006) 185
- 三坂俊明, 大浦忠, 山崎稔: 静電気学会誌, **30** (2006) 223
- 増田閃一, 水野彰: 静電気学会誌, **2** (1978) 59
- H.J. White : Trans. AIEE, 71, pt1, p.326 (1952)
- K.S.Kumar, P.L.Feldman, H.I.Milde, C.Schbert : Proc. IEEE-IAS 79:6G, p.1333 (1979)
- P.Lausen, H.Henriksen, H.Hoegh Petersen : Proc. IEEE-IAS 79:6B, p.163 (1979)
- 渡部輝雄, 亀島忠, 寺井寛: 火力原子力発電, **40** (1988) 155
- 柳井誠, 上島賢郎: 電気学会研究会資料 ES-82, p.99, 電気学会 (1982)
- 松本陽一, 中山豊: 静電気学会誌, **9** (1985) 315
- 三坂俊明, 赤坂章男, 大浦忠: 静電気学会講演論文集'69, p7 (1996)
- 静電気学会: 静電気学会技術報告第1号, 静電気学会 (1986)
- 立花: 静電気学会誌, **12** (1988) 433
- W. Deutsch : Ann. d. Phys., **68** (1922) 335