U.D.C. 628.53:621.359.4:662.964

電気集塵装置と工業煤塵の性状についての 技術的諸問題

Some Technical Problems for Electrostatic Precipitator and Properties of Industrial Dust



要 旨

石炭および重油の諸性状とその燃焼により生成されるフライ・アッシュおよび Soot の粒径分布, 煤塵(ばいじん) 濃度およびダスト層の見掛固有抵抗などとの定量的関係を明らかにし, これを電気集塵(しゅうじん) 処理する場合の問題点について検討した。この結果, 出口煤塵濃度を約0.5 g/Nm³以下に抑制するためには, 約3 μ 以下の微粒子を高能率で集塵する必要があり, とくにダスト層の見掛固有抵抗が約10¹¹Ω-cm 以上の場合には, 適正な荷電時間を与えるべきことが明らかになった。また, フライ・アッシュ・ダスト層の見掛固有抵抗は石炭の硫黄分が約1.5%以下になると急激に高くなり, 集塵率は低下し, 電気集塵器は火花ひん発領域で運転されることになり, この場合には, 火花ひん度が数1,000回/分において最高集塵率の得られることが明らかになった。また, ダスト層の見掛固有抵抗の測定法としては平板電極法がまさり, 現地測定と実験室測定とで両者はよく一致することが確認できた。

電気集塵法はバグ・フイルタ、サイクロン、スクラッバなどのほ かの集塵方式に比べ適用範囲が非常に広く,多くの工業分野で実用 されていることは周知のとおりである。そして、将来もこれにかわ る全く新しい原理の集塵方式が生まれる可能性は今のところ考えら れない。このように電気集塵法は現在に限らず将来もほかの集塵方 式に比べ,多くの工業分野において重要な役割を果たすことが約束 されている。しかし,現状では,装置コストが高く,保守に高度の 熟練を要し、また、煤塵の性状により集塵性能が大きく左右され、 これがほかの集塵方式にみられない致命的な欠点であるかのように いわれている。しかし,これらをもう少し具体的に検討してみると, 必ずしも、電気集塵法にとって固有の問題ではなく、ほかの集塵方 式にとっても一般的な共通問題であったり,あるいは明らかに技術 的には解決可能でありながら,経済的制約のために未処理のまま放 置されていることが多い。またプラントの操業条件や原料などが計 画当初に比べ変化し, それにともなって煤塵の性状も大幅に変化し ている場合もある。たとえば、電気抵抗, 粒度などの変化のために 集塵率の低下を惹起していることもある。そこで、以下、これらの 諸問題について概説し、今後の電気集塵技術の健全な発展のための 一助としたい。

言

1. 緒

2. 微粉炭および重油燃焼における煤塵の生成と その粒径分布および濃度⁽¹⁾

煤塵の粒径分布および濃度は燃料の性質, ミル形式, バーナ形式 あるいは過剰酸素量の影響を受けて大幅に変化する。

図1は燃料粒子1個に着目して,その燃焼過程をモデル化して示したものであるが,石炭燃焼の場合には、ミルで粉砕された微粉炭粒子(球形とみなす)が、斜線を施した部分に相当し、同様に重油燃



図2 微粉炭の粒径分布とその燃焼により生成される フライ・アッシュの粒径分布との関係(計算).

炭の灰分% Pash とによって、次式により概算することができる。

ここで、 ρ_{coal}, ρ_{ash} : それぞれの比重 また、一般に粉砕によって生成される粒子の粒径分布は、対数正

焼の場合には,バーナで霧化された油滴(表面張力で球形となる)が それに相当する。まず,燃料粒子は高温ガス中において,その周囲 のAB領域に気化層を形成し,さらに,この気化ガスがBC領域に おいて酸化燃焼するものである。したがって,微粉炭燃焼によって 生成されるフライ・アッシュの粒径 dash は,微粉炭の粒径 dcoal と石

* 日立製作所日立研究所 工学博士** 日立製作所日立研究所

規分布を示すので、これを対数確率紙にプロットするとそのひん度 累積はほぼ直線で表わせる。この粒径分布はひん度累積値50%およ び84%に対応する粒径から求められる幾何平均粒子径 \bar{d} および幾 何標準偏差 σ の二つのパラメータによって規定できる。図2はこの ようにして微粉炭粒度とフライ・アッシュ粒度との関係を計算した 結果を示したものである。これから明らかなように、たとえば \bar{d} =60 μ , d_{σ} =104 μ あるいは \bar{d} =30 μ , d_{σ} =64 μ の粒度を有する微粉炭が 電気集塵装置と工業煤塵の性状についての技術的諸問題



図3 微粉炭の粒径分布とその燃焼により生成される フライ・アッシュの粒径分布との関係(実測例)





図4 フライ・アッシュの溶融付着状態を示す光学顕微鏡写真



燃焼すれば、その結果、 $\overline{d}=30 \mu$ 、 $d_{\sigma}=52 \mu$ あるいは $\overline{d}=15 \mu$ 、 $d_{\sigma}=32 \mu$ の粒度のフライ・アッシュが生成する。

図3は前述の計算結果と同様な関係を実測してみた一例を示した ものである。一般に微粉炭粒度は200メッシュ(74µ)通過率が70% 程度になるように、ミルの管理が行なわれることになっているが、 実際には、ボイラ1ユニットにつき、数台以上のミルが並列稼動さ れており、それらのミルごとにより微粉炭粒度は、大幅に相違して いる。また同一ミルにおいても時間的に大きく変動していることが 認められる。すなわち、本実測例では200メッシュ通過率が70~95 %の範囲で変動している。そこで、この微粉炭粒度の実測値から図 2と同様にして、フライ・アッシュの粒度分布を概算して、その実 測値と比較してみた結果が図3に示されている。両者はほぼ一致し ているが、実測値のほうが計算値に比べややあらくなっている。こ れはボイラ炉内における微粉炭の燃焼過程で、溶融アッシュ粒子相 互の衝突凝集がある程度、行なわれるためと考えられる。図4はこ 80%以上の高い集塵率で集塵する必要のあることがこの図3の実測 結果からもわかる。図5は微粉炭の灰分量とその燃焼によって生成 されるフライ・アッシュ煤塵濃度との関係を計算した結果である。 一般に,空気予熱器出口煙道における煤塵濃度の実測値は,逸出率 80%程度となっている。すなわち,微粉炭の灰分の約20%がクリ ンカとしてボイラ内に残留し,残りの約80%がフライ・アッシュと なって排ガスとともに排出されることになる。しかし,サイクロン 炉の場合には,これが50%以下に低下する。

次に重油燃焼の場合について,同様な考察を進めてみる。図6は バーナで霧化された油滴径とその燃焼によって生成される Soot の 粒径との関係を前述の燃焼モデルに従って計算した結果を示したも のである。たとえば,約200µの油滴が燃焼すると10数µの Soot が生成されることがわかる。

油滴の場合も,前述の微粉炭と同様に,その粒径分布はほぼ対数 正規分布に従う。図7は重油燃焼 Soot の粒径分布の実測値を対数

れを裏付ける顕微鏡写真の一例である。 このフライ・アッシュ粒度の実測結果から明らかにされた重要な ことがらは、約 3 μ 以下の微細なフライ・アッシュが約 10% 前後 (重量)も含まれているということである。そこで、たとえ、3 μ 以上 の粒子がほとんど 100% 集塵できたとしても、その集塵率は約 90% に達するに過ぎない。最近、公害問題から、98% 以上の集塵性能が 望まれるようになってきたが、このためには、3 μ 以下の微粒子も $確率紙にプロットしたものであるが、この実例では <math>\bar{d} \simeq 15 \mu, d_a \simeq 25$ $\mu (\sigma = 25/15 \simeq 1.67)$ となっている。そこで、この実測値から、元の 油滴の粒径分布を図 6 に従って推算してみると、図7 に示されてい るように、 $\bar{d} \simeq 220 \mu$ となり、これは油圧式バーナにおける油滴の平 均粒径の実測値とよく一致している。また、蒸気あるいは空気霧化 の二流体バーナでは、油滴の平均粒径は 100 μ 以下になるので、こ れの燃焼によって生成する Soot の平均粒径は 10 μ 以下の微細なも



のになるということも推論できる。

次に図8は重油中の未燃分とその燃焼により生成する煤塵濃度と の関係について計算した結果を示したもので、一般に、C 重油では、 未燃分は0.03~0.05%程度であるので、これが完全燃焼しても煤塵 濃度は最低 0.03~0.05 g/Nm³ of gas 程度, 生成されることになる。 重油専焼ボイラでは、最近、排ガス中の SO3 による低温部腐食の防 止と熱効率の向上のために、いわゆる低 O2 運転が実施されている。 この場合には,前述の油滴燃焼モデルの BC 領域において,酸素不 足のために油蒸気の熱分解(Thermal Cracking)によって、Free Carbon が生成し、煤塵量が急激に増加する。図9は、過剰酸素量 O2%と煤塵濃度との関係を実測した結果を示したものである。す なわち、 O_2 % が約2% 以上になると、熱分解による Free Carbon の生成はなくなるので、煤塵濃度は図8の計算値に漸近する。 一 方, O₂% が約1.5% 以下のいわゆる低O₂ 運転領域になると, 酸素 不足により、急激な Free Carbon の生成による煤塵濃度の急増が みられるようになる。

スト層の厚さtaおよびその見掛固有抵抗 Paと粒子偏向速度 ωとの 関係を,粒径 3µ と 15µ とについて比較したものである。すなわち、 15μ程度の粒子では Pa が5×10¹¹Ω-cm 程度の高抵抗であっても、 集塵は比較的容易であるが、これが3µ程度の微粒子になると、Pa が5×10¹⁰Ω-cm 程度に低下していても集塵は著しく困難になり, とくに 5×10¹¹Ω-cm 程度になると, 0.5 mm 程度のごく薄いダス ト層が形成されただけでも、集塵が著しく困難になる。そこで、 この対策としては、 Pd の低減と荷電時間あるいは集塵極の有効表面 積の増大が最も適切な手段となる。Paの低減には後述のように、微 粉炭の硫黄分が約1.5%以上のものを使用するか,低硫黄炭の場合 には、30%以上の重油混焼か SO3の注入が効果的である。しかし、 SO3注入は腐食や経済性の点で必ずしも適切な対策とはいえない。 今後,このSO3にかわる経済的な Pa低減剤を開発する必要がある。 結局、現段階では、荷電時間あるいは有効集塵極面積の増大が最も 有効, 適切な手段と考えられる。 かって,80%程度の高い集塵率のマルチサイクロンを前置し、そ のかわりに,集塵容積を極度に縮小した電気集塵器を後置した方式 が輸入技術として導入されたことがあり,これを契機として電気集 塵器の極端な小形化によるコスト・ダウン競争が始まり,結局は, いずれも集塵性能の保証に支障をきたすというような醜態を演じた ことがあった。このように煤塵の粒径分布や Pa を無視した単なる コスト・ダウンはその後反省されて現在では、国際的にみても荷電 時間は約4秒以上とる(煤塵の粒径分布, Pa により異なるが)こと が常識になってきており, 電気集塵技術の健全な発展のために喜ば しいことである。このように、煤塵の性状により、荷電時間を単に 適切に選定,設計することだけでなく,さらに積極的な対策として は,有効集塵面積の増大,出口側シュート・バッフル方式による再 飛散ダストの回収,静電凝集効果を利用した後置サイクロンの開発 などの研究が重点的に行なわれる必要があろう。

見掛固有抵抗の影響

3. 微粉炭採取とその粒径分布測定についての問題点

前述のように、フライ・アッシュの粒度は微粉炭のそれと密接な 関連をもっているので、これの正しいデータをは握しておくことは 重要である。ところが従来行なわれている方法では真の粒度に比べ あらく測定される傾向にあり,二,三の改善すべき問題点がその採取 と粒度測定法とにある。まず,前者については、ミルの分配管から 微粉炭を採取する際,非等速抽気で行なわれており,真の粒度に比 べあらい微粉炭が採取されていること、さらにサイクロンで回収さ れているためにその中の微粉分がサイクロンから逸出してしまうこ とである。そこで等速抽気が行なえるような分配管構造を考慮する ことと、バグ・フィルタの利用により約5μぐらいまでの微粒子を 捕集できるように改善する必要がある。また、後者の粒度測定につ いては、ふるい分けにより325メッシュ(43µ)までが測定されてい る。しかし、われわれの経験によると、試料微粉炭が吸湿しないよ うに予熱しながらふるい分けしても、200メッシュ以上(74µ以下) の粒子は相互凝集しやすく、200メッシュ以下では通過しにくくな ることがある。この結果として真の粒度に比べあらい測定データが

5. 煤塵の見掛固有抵抗と火花せん絡ひん度および集塵率

図11は、硫黄含有量の異なる銘柄炭を使用して、その集塵率に及

得られる傾向がある。そこで、われわれは200メッシュまではふる い分けで測定し、それを通過したふるい下粒子はアンドレアゼン・ ピペット法で測定するように改善した。

4. 煤塵の粒径および見掛電気固有抵抗とその集塵易度 前述のように 3µ 程度の微粒子も高能率で集塵する必要が生じて きたが,図10は運転電圧一定とした場合,集塵極にたい積されたダ

ぼす影響を調査した結果を示したものである。すなわち、硫黄分が 約1.5%以上になると集塵率は著しく向上する。これは、SO3生 成量の増加により Paが約5×10¹¹Ω-cm以下に低減するためであ る。一方,約0.5%程度の低硫黄炭の場合には、出口煤塵濃度は倍 増し,集塵率は低下する。これは Pa が約5×10¹¹Ω-cm を上まわる ようになるためである。また、このように、Paが高い領域では、図 11にも示してあるように、火花ひん発領域で運転されることにな

電気集塵装置と工業煤塵の性状についての技術的諸問題



— 75 —

1155

る。図12はこのような領域において,集塵率と火花せん絡ひん度との関係がどのようになるかを示したものである。すなわち,火花ひん度が数1,000回/分において,出口煤塵濃度が最低,集塵率が最高になることが明らかにできた。これは、われわれの基礎研究⁽²⁾によると次の理由による。

図13は、このような高 Pa、火花ひん発領域で運転されているとき の集塵電圧と放電電流の波形オシログラムである。すなわち、火花 せん絡時には集塵電圧は約15kV以下(コロナ開始電圧以下)に低 下し、そのときの充放電電流には、電気集塵に有効なコロナ電流は ほとんど含まれていないから、この期間を電気集塵作用がほぼ停止 していることになる。この死時間 ta は充電電流パルス幅 w にほぼ 等しい。すなわち、

 $t_a = kw$ (k < 1)(2) このwは直流高圧電源や電気集塵器本体の電気的回路定数で決まり ほぼ一定である。一方、コロナ有効電流 I_a と火花ひん度n とは、実 験的に次のような関係式で与えられる。

と与えられる。 たとえば, $kw=5\times10^{-3}$ s, b=3 の場合には, $n_p=3,000$ cpm (回/分) と求められ, このときに集塵率は最大となる。以上の結果から, H. J. Hall 氏が火花ひん度 50 cpm 程度で集塵率が最高になるという実験結果⁽³⁾を報告しているが, これは修正されるべきである。また, これは火花放電と電弧短絡とが混同されたためであると推察された。

なお、電気集塵における火花せん絡の原因は、放電極の異常振動 や電極ひずみなどがない正常な場合には、前述のように高 ρa が主因 となるが、これに関連したほかの因子として排ガス中の水分量があ る。図 14 は、排ガス温度と露点温度との差 4t と火花電圧との関係 を示したものであるが、水分の増加により火花電圧が著しく向上す ることがわかる。したがって、水分増加して、露点ガス温度の近く

$$S = \left(\frac{n}{a}\right)^{1/b} (1 - n k w) \dots (4)$$

まで処理ガス温度を低下できれば、集塵率は著しく向上する。

6. 集塵極ダスト層の見掛固有抵抗 pa の測定法 前述のように、pa は電気集塵の難易を示す一つの目安を示す因子 となるが、この測定法には、現場で採取したダストを実験室に持ち 帰ってから測定する場合と、現場の煙道で直接、測定する場合とが ある。図15は、われわれが現在、使用している種々の測定器の構造

1156	昭和49年11日	
1100	$P_{11} \uparrow P_{11} \downarrow P_{12} \downarrow P_{11} \downarrow P$	

の概要を示したものである。(A),(B)は前者の実験室測定用であ り,また,(C),(D)は後者の現地測定用である。(C)は日立製作 所日立研究所で開発した静電集塵式であり,電極が常に偏心回転運 動して一様な厚さにダスト層の静電たい積が行なわれるようにくふ うされている。この静電式では,H.J.White氏の考案したものが あり⁽⁴⁾,これは針対平板の固定電極を煙道に直接,そう入する方式 であるが,煙道内ガス速度(6~10 m/s)は電気集塵器内ガス速度(2 m/s以下)に比べ著しく速く,また,電極にダストが一様の厚さに 付着せず,結局,実際の集塵極に静電たい積するダスト層とは粒径 や ρ_d が異なったものになるので,(C)のように外部抽気方式をとっ た。(D)は,H.G.Trevor Busby 氏らが考案したサイクロン式で ある⁽⁵⁾が,これを電極部にガード電極を設けるなどの改善を行なっ

たものである。

図 16 はこれらの比較測定結果を示したものである。 すなわち, (A),(B),(C)の三者はよく一致した結果が得られることが確認で きた。また,このことは前述の図 11 にも示されている。しかし,サ イクロン式はこれらに比べ約 1 けたも高い測定結果を示している。 これは、サイクロン式を考案した H.G. Trevor Busby 氏らの測定 結果⁽⁵⁾をみても 10¹³~10¹⁴ Ω -cm というようにきわめて高い値を報 告しており、とくに、SO₃ を 15 ppm 注入した場合でも、なお、10¹³ Ω -cm という測定結果を示していることとも傾向的に一致してい る。SO₃ 注入により逆電離が抑制され集塵率は向上しているのであ るから、実際には 10¹¹ Ω -cm 程度に低下しているはずである。した がって、サイクロン式の固有の測定誤差により異常に高い測定結果 が得られるものと考えられるが、その原因については十分に明らか にされていない。



図16 各種測定法によるダスト層見掛固有抵抗の 測定結果の比較

塵濃度を半減することができる。

評

論

17.

日

(5) 集塵極ダスト層の高抵抗に基因する火花ひん発領域では,

7. 結 言

以上,大容量火力発電ボイラ排ガス浄化用の電気集塵装置の実例 を主体にして,その諸問題について検討を試みたが,これをさらに 一般的問題として要約すると,

(1) 燃焼排ガス中のフライ・アッシュおよび Soot の粒径分布 および煤塵濃度は,燃料の性質(粒度,灰分など)と燃焼条件によって決まり,これらの定量的関係が明らかにされた。

(2) 石炭専焼の場合には, 微粉炭の粒度を管理することが重要 になるが, 従来の微粉炭採取および粒度測定法では, 真の値に比 べ, あらい測定結果が得られることを明らかにし, その改善すべ き問題点を指摘した。

(3) 最近,公害防止の見地から,排出煤塵濃度を約 0.5 g/Nm³ 以下に低減させる必要が生じているが,この場合には,約 3µ以 下の微粒子を高集塵率で集塵せねばならず,SO₃の ρ_d 低減剤を 注入するのも効果的であるが,同時に,煤塵の粒径や ρ_d に見合 った適正な荷電時間(一般には,4秒以上)を与えるべきである。 (4) 微粉炭の硫黄分が約 1.5%以上になれば,集塵率は著しく改 善される。たとえば,0.5%程度の低硫黄炭の場合に比べ,出口煤 火花ひん度が数1,000回/分において集塵率が最高になる。

(6) 排ガス中に水分を添加するか,あるいはガス温度を低下させて,露点温度に近づけると,火花電圧は上昇し,集塵性能が向上できる。

(7) ダスト層の見掛固有抵抗については,サイクロン式は著し く高い測定値を与えるので不適である。平板式電極によれば,現 地測定値と実験室測定値とは温度および湿度を合わせればよく一 致する(ただし,化学反応を伴うダストの場合には一致しないこ ともある)。

今後の課題としては,集塵電極の改善による有効面積の増大,出 ロ・シュート・バッフルの改善による再飛散ダストの回収,静電凝 集を利用した低圧力損失後置サイクロン,SO₃よりも経済的な *Pa* 低 減剤などの開発研究が重点的に行なわれるべきであると考える。

参考文献

- (1) 諌早: 火力発電, Vol. 17, No. 10., 1966, p. 841~847
- (2) 諌早: 電気学会東京支部大会予講集, No. 322 (昭和 35 年 11 月)
- (3) H. J. Hall: A. I. E. E., Communication and Electronics, May 1954, p. 124
- (4) H. J. White: Chem. Eng. Progress, Vol. 52, No. 6, 1956,
 p. 244
- H.G. Trevor Busby, K. Darby: J'l of the Inst. of Fuel, May 1963, p. 184~197

