

論文の内容の要旨

論文題目

Study on novel electrostatic precipitators for fine particle removal in industry-exhaust gases and indoor air
(産業排出ガス中並びに室内空気中の微粒子除去用電気集塵装置の研究)

氏名 Hak-Joon Kim (金 學俊)

1. 序論

一般に、工場等から排出されるガスや室内空気中に含まれる粒子状汚染物質の除去には、バグフィルターや濾布などのフィルター、サイクロン、スクラバーなどの機械的な集じん機と電気集じん装置などがある。前者の3つは、粒子と壁との衝突、吸着などの機械的な粒子捕集方式であるのに対し、後者の電気集じん装置は、粒子を帯電させ静電気力によって粒子を捕集する方式である。その特徴は、圧力損失が少ないこと、広範囲の粒子径に対して優れた集塵性能を発揮することが可能である。

近年、PM10からPM2.5への規制強化、ディーゼルナノ粒子対策が検討され、半導体、LCDなどのIT関連製造業分野においても、1 μm 以下の超微細粒子の除去技術が問題となっている。ウイルス感染対策や快適な環境への要求から室内空気浄化装置の微細粒子制御技術の研究も活発に行われている。したがって、本研究では、従来利用されている電気集塵技術における微細粒子除去限界を克服し、時代の要請に適合する電気集塵装置を開発する目的で、非金属電気集塵機、微細髄膜型湿式電気集塵機、金属フィルタ併用静電ディーゼル煤煙濾過装置ならびに実内容？室内用電気集塵装置などの開発研究を行った。従来の電気集塵装置の研究では、ほぼ1 μm 以上の粒子を対象にした電界帯電モデルとドイツの集塵理論を元に展開されていたのに対し、本論文では、1 μm 以下、さらには、100nm以下の微粒子を対象としているため、拡散帯電モデル、あるいは、拡散帯電モデルと電界帯電モデルを組み合わせた帯電モデル（第2章で紹介）を用いることで電気集塵装置の微粒子捕集機構の解釈に適応できることを下記4種類の電気集塵装置で行った実験研究で実証したものである。

2. 非金属電気集塵装置の開発

最近のIT関連の製造工場、例えば半導体製造工場、LCD製造工場などでは、高性能微粒子除去装置が要求されている。一方、これらの工場においては、高腐食性ガスも含んでいることが多く、電気集塵装置においても金属露出部分を無くしたいとの要望が強い。この目的で、炭素繊維とCFRP (Carbon fiber reinforced plastic) で構成された荷電部と金属薄膜表面にプラスチックコーティングされた集塵部で構成された耐腐食性の非金属電気集塵機を試作し、その性能を調べた。まず、実験室規模で、微細粒子荷電性能を各種荷電部パラメータ（炭素繊維の数、印加電圧、材質など）のもとでコロナ放電、粒子荷電量、イオンとオゾン発生量などの電気的特性を調べ、さらに、この荷電部と集塵部を組み合わせ、流量、粒径、集塵板の長さ、間隔などをパラメータとして集塵特性を分析した。最終的には、処理能力3,000 m^3/hr 級のパイロット非金属集塵装置を半導体製造現場に設置し、腐食ガス環境下での微細粒子除去性能を評価し、0.3~1 μm 以下の数濃基準除去効率が95%以上であった。

3. 新型水膜式電気集塵装置の開発

近年、地球環境改善として炭酸ガス削減技術CCS (Carbon Capture and Storage) が、叫ばれ、また、石炭火力発電所の高効率化、石炭ガス化が注目を浴びている。これらの新技術実用化においては、超清浄ガス化技術が必要とされている。電気集塵装置においては、導電率の高いカーボン系の微粒子捕集では、微粒子再飛散などで集塵性能が低下することから、従来から水噴射や水膜利用による湿式集塵装置が開発されていたが、大量の水を消費することから維持費が高いこと、汚染水処理問題があることなどから大型での実用化には至っていない。本研究では、集塵板にナノ粒子のコーティングと、サンドブラストなどの親水性処理をして水膜形成に必要な水の使用量を最小限（水膜の厚さも最小化）に抑えた新型電気集塵装置を試作し、その性能を評価した。実験室規模の微細水膜型湿式電気集塵機を試作し、1 μm 以下の超微細粒子の集塵基礎性能評価を行った。特に、数十nmレベルの粒子の電気集塵機の効率低下をFuchsの拡散荷電理論を用いて説明した。それらの結果を基に、0.7MW級の純酸素火力発電パイロットにこの新方式水膜型電気集塵装置を組み合わせ、1L/min/ m^2 の水の使用量で、長時間の運転実験を通じて、常に微細粒子を90%以上除去し、最終段階の粒子の排出量を1 mg/m^3 のレベルに低減出来ることを示した。

4. ディーゼルスーツ捕集用金属フィルター併用電気集塵装置の開発

自動車用ディーゼルエンジン排出スート（煤）に対し、ヨーロッパでは一段と厳しい規制が準備され、また、船舶用ディーゼルについても国際海事機関の規制などディーゼルスート（PM）排出規制は継続的に厳しくなっている。これらの厳しい規制に対処するため、新型電気集塵方式として、従来型電気集塵装置の後段に、金属フィルターを併用した装置を提案し、優れた集塵性能を有することを実証することが出来た。電気集塵装置で一端集められたカーボンスートは、凝集して大きくなり、機械集塵が容易になる効果を利用したものである。現在のところ、閉鎖構造のセラミックDPFのみがディーゼル車の排ガス処理装置として実用化されている。ただし、400度以上の高温で使用することから熱による機械的破壊の可能性が大きいこと、圧力損失が大きくエネルギー損失が大きいことから、大型ディーゼル自動車、建設機械、船舶、陸上の発電機などの大型ディーゼルエンジン用黒煙濾過装置として適用するにはいくつかの困難が生じている。一方、電気集塵装置は、圧力損失が低く、微細な粒子の集塵効率が高い特徴を有する反面、高速、高温ガスの処理時には絶縁破壊が発生する危険が大きいこと、ならびに、一端捕集された粒子が電荷を失い再飛散する問題が従来から知られていた。本研究では、これらの問題点を克服する目的で、後者の対策として、電気集塵器の後段に開放構造の金属フィルターを組み合わせ、高速排気ガス流入時の電気集塵装置内部での粒子再飛散問題を解決しようとした。また、前者、絶縁破壊対策としては、高温、高濃度排気ガス条件下でも絶縁の維持が可能になるようエアカーテン方法を適用して、400度以上の高速、高負荷運転中でも、絶縁を維持することに成功した。最終的に排気量4Lクラスのディーゼルエンジンの排気ガス用スートフィルターとして性能評価し、ヨーロッパのディーゼルエンジンの排出規制モード運転評価規制、EURO VIの規制値である0.01 g/kw-hの性能を満足し、粒子個数基準で95%以上の集塵性能とDPF比30%以上の低圧力損失性能であることを実験的に確認できた。

5. 大型室内空気清浄用電気集塵装置の開発

最近の大型コンビニエントストア、デパートなどの商業施設やオフィスビルなどの大規模な室内環境において、経済的に空気環境を改善するためには、圧力損失の少ない構造の大型空気清浄装置の開発が要請されている。一方、その圧力損失の少ない電気集塵方式では、オゾンのような二次汚染物質の排出問題があることから、居室環境の利用には制限が大きく、機械式フィルタ方式が主流となっているのが現状である。特に、米国AHAMと韓国KACA認証モデル中クリーンエア供給率が12 m³/minを超える空気清浄機は5%で、すべて機械式フィルター方式である。本研究では、空気清浄機の大容量化のために陽極電圧を使用すると共に、従来の金属放電極の代わりに炭素繊維を用いる炭素繊維荷電方式と、放電部の後段に平板型集塵部を設ける2段式集塵方式を適用した空気清浄機を製作し、極性、印加電圧別クリーンエア供給率性能を評価し、12時間連続運転時におけるオゾン排出基準値10 ppb以下を満たしながら、12 m³/minのクリーンエア供給率性能を確保しただけでなく、同一仕様のフィルター方式の空気清浄機（1 Pa/m³/min）と比較してクリーンエア供給率比圧力損失値が0.4 Pa/m³/minと提言出来ることを示した。また、陽極の炭素繊維荷電方式の低オゾン排出特性の原因分析を行い、炭素は、酸素の化学吸着エネルギーが小さく、直径が数mmと非常に小さいことからオゾン生成が少ないことを説明できた。

6. まとめ

以上、サブミクロン粒子（ナノサイズ粒子）捕集を目的とした4種類の電気集塵装置、すなわち非金属電気集塵装置、水膜式電気集塵装置、ディーゼルスーツ用金属フィルター併用電気集塵装置、大型室内用電気集塵装置の開発を通じて微粒子除去に適した新たな高性能電気集塵装置が可能であることを示し、また、これらの性能評価が、拡散帯電モデルを有効に利用することである程度説明できることを実証し、今後、微粒子捕集電気集塵装置の新たな応用を可能にしたものが本研究の成果である。