

特集

燃焼と環境

# 燃焼におけるエアロゾルの生成と防除

## Aerosol Formation and Emission Control in Combustion Systems

岡崎 健\*

Ken Okazaki

### 1. はじめに

大気中の浮遊粒子状物質すなわちエアロゾル粒子の総量は、 $10^7 \sim 10^8$  tonとも言われ、その地球規模での発生量のおおよその発生源別推定値は表1<sup>1)</sup>のようである。自然発生源によるエアロゾルの方が圧倒的に多いが、人為的発生源によるものも約10~20%程度とかなり多く、エネルギー消費の増大とともに徐々に増加する傾向にある。人為的発生源の中でも、特に1次粒子としての石炭フライアッシュの割合が大きいこと、また、ガス状汚染物質である硫酸酸化物、窒素酸化物、炭化水素系化合物からの粒子転換により生成する2次

表1 全世界の粒子状物質発生量<sup>1)</sup>

	PJ	BC	RR
自然発生源			
1次粒子	780(51.0)	1330(46.3)	1207(46.3)
土壌性	250	220	200
海塩性	500	1102	1000
流星、宇宙塵	0	—	—
火山	25	4.4	4
森林火災(間欠的)	5	3.3	3
2次粒子	470(30.7)	1218(42.4)	1105(42.4)
植物性(テルペン)	75	220	200
Sサイクル(SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	335	225	204
Nサイクル(NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	60	297	269
“(NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )		476	432
人為的発生源			
1次粒子	30(2.0)	101(3.5)	92(3.5)
石炭、フライアッシュ	30	39.7	92
鉄鋼業		9.9	
石油燃焼		2.2	
非化石燃料燃焼		8.8	
セメント工業		7.7	
焼却炉		4.4	
農林業		11.0	
その他	17.6		
2次粒子	250(16.3)	225(7.8)	296(7.8)
炭化水素	15	30	27
S酸化物(SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	200	162	147
N酸化物(NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	35	33	30
計	1530	2874	2608

( $\times 10^4$  ton/year)

注) PJ: J. T. Peterson, C. E. Junge (1971) による  
 BC: S. S. Butcher, R. J. Charlson (1978) による  
 RR: E. Robinson, R. C. Robinson (1975) による  
 ( )内の数字は総量に対する%

粒子を考慮すると、燃焼に起因するものがきわめて大きいことがわかる。ただし、表1に示す各発生源の寄与割合は、環境保全状況や産業構造の違いによって、国々や地域によって大きく異なってくる。例えば、堺市におけるリセプターモデルによる発生源別寄与率推定結果<sup>2)</sup>によれば、人為的発生源が50%近くを占め、そのうちディーゼル排気によるものが18%と、化石燃料燃焼の場合の2.4%よりはるかに大きい。これは、化石燃料燃焼の大型プラントでは普通、高度の集塵システムが備えられているからであり、全体として我国では、石炭燃焼フライアッシュによる大気環境負荷は、現在のところはそれほど深刻な問題とはなっていない。

しかしながら、オイルショック以後の重油から石炭への燃料転換は、近年の石油価格の下落にもかかわらず、大型火力発電所ボイラやセメント焼成炉をはじめ着実に進んでおり、エネルギー源としての石炭の重要性は、今後ますます増大すると予想される。このような状況の中で、昭和57年5月大気汚染防止法施行規則が改正され、各種燃焼ボイラについても表2のようにばいじんの排出基準が強化された<sup>3)</sup>。なお、本改正においては、新たに標準酸素濃度(On)による補正方式が採用され、排出ガスを希釈して排出基準に適合させることを防止している。また、大型石炭燃焼ボイラに対する排出基準が値として4分の1に大幅に強化さ

表2 燃焼ボイラからのばいじんの排出基準<sup>3)</sup>

ボイラ種類	規 模 排出ガス量 (万Nm <sup>3</sup> /h)	一般排出規準 (g/Nm <sup>3</sup> )	特別排出規準 (g/Nm <sup>3</sup> )	標準酸素濃度 On (%)
ガ ス 専 焼	20 以上	0.05	0.03	5
	4~20	0.05	0.03	5
	4 未満	0.10	0.05	5
油 専 焼	20 以上	0.05	0.04	4
	4~20	0.15	0.05	4
	1~4	0.25	0.15	4
	1 未満	0.30	0.15	4
石 炭 燃 焼	20 以上	0.10	0.05	6
	4~20	0.20	0.10	6
	4 未満	0.30	0.15	6

注) 特別排出基準: 全国8都道府県9地域(高濃度汚染地域)に適用

\* 豊橋技術科学大学工学部エネルギー工学系助教授

〒441 豊橋市天伯町宇雲雀ヶ丘1-1

れたことが特徴である。従って、本稿では、まず次章で、燃焼において生成される微粒子の全体像を概観した後、大型石炭燃焼ボイラの主流である微粉炭燃焼により生成される微粒子を中心に、環境保全に重点をおいた立場から論ずることとした。

## 2. 燃焼生成微粒子の概要

燃焼により生成する微粒子<sup>4)</sup>は、①気相析出形すす、②残炭形すす（セノスフェア）、③フライアッシュ（ダスト）、さらに、燃焼系から排出後あるいは一部燃焼後期に、ガス状汚染物質であるSO<sub>x</sub>やNO<sub>x</sub>などから2次粒子として生成する、④ガス-粒子転換エアロゾル<sup>5)</sup>に大別される。

### 2.1 気相析出形すす

①の気相析出形すすは、都市ガスなどの炭化水素系ガス燃料や灯油などの軽質油が、空気不足のもとで不完全燃焼する際に生ずる炭素微粒子であり、熱分解によって生じたガス状不飽和炭化水素（エチレン、アセチレンなど）が、脱水素、縮重合をくり返して高分子化し、核発生、凝集を経て生成したものである。気相析出形すすは、直径10~30nm程度のほぼ球状の微細な粒子が集まって50~数百nmの大きさの鎖状凝集体構造を形成している。我々が一般にすすと称しているもののほとんどは、この気相析出形すすである。気相析出形すすの生成過程は、図-1<sup>6)</sup>に示すように、核生成とこれの前駆物質への成長、表面成長による球状体への成長、凝集による鎖状構造への成長から成るが、この過程がわずか数msの短時間で生ずるところにその特徴がある。この中でも特に核生成機構<sup>7)</sup>について

は未だ不明な点が多く、アセチレン説、多環芳香族炭化水素（PAH）説、炭化水素イオン説、カーボン（C<sub>2</sub>）説などが提案されている。また、環境問題の立場からは、発がん性のあるベンゾ（a）ピレンを含むPAHが、気相析出形すすの前駆物質として生成すること<sup>8)</sup>に留意し、その析出を防止する配慮が必要である。

燃焼中に発生するこのような気相析出形すすは、火焔、ボイラなどにおいてふく射伝熱促進に不可欠なものであるが、ディーゼル機関の場合は、前述のように析出される粒子状物質が特に都市部での大きな環境汚染源となっていることが問題となっている。さらに近年、ディーゼル機関において低負荷時に多く排出される青・白煙などのものとなる微粒子である可溶有機成分（SOF：Soluble Organic Fraction）<sup>9)</sup>が、環境保全上注目されているが、ここではその詳細には触れない。

### 2.2 残炭形すす

②の残炭形すすは、重質油や石炭の燃焼時に、炭素を主とする残留重質分やチャーが未燃のまま析出されるもので、未燃カーボンとも呼ばれている。残炭形すすは一般に非常に空隙率の高い多孔質粒子で、その粒径は噴霧粒径や石炭粒径、および燃焼条件により大きく異なり、10~300μm程度と気相析出形すすよりはるかに大きい。石炭燃焼における残炭形すすは、普通は、灰中未燃分（あるいは灰中未燃炭素）として次節のフライアッシュ中に残留して排出されることが多く、石炭燃焼プラントでは、灰の有効利用のために、普通、この灰中未燃分を5 wt%以下にすることが要求されている。

### 2.3 フライアッシュ

石炭や重質油を燃焼させた時に、燃料中にもともと含まれる非燃焼性の無機物である灰分に起因する粒子生成がある。このうち大粒子は、ボトムアッシュまたはスラグとして沈降、堆積するが、燃焼ガス流に十分追従する微粒子のみが排ガス中を運ばれていく。これが③のフライアッシュである。実際の石炭や重質油の燃焼プラントでは、電気集塵器をはじめとする微粒子捕集装置によりフライアッシュの大部分が捕集除去され、残りのごく一部がいわゆる排出微粒子として大気中に放出される。また、フライアッシュの一部は、ファウリング現象により、ボイラ伝熱管、ボイラ壁、灰ガス処理装置（脱硫、脱硝装置）などに付着する。このことは、熱収支や材料などに関連する別の問題を生じ、

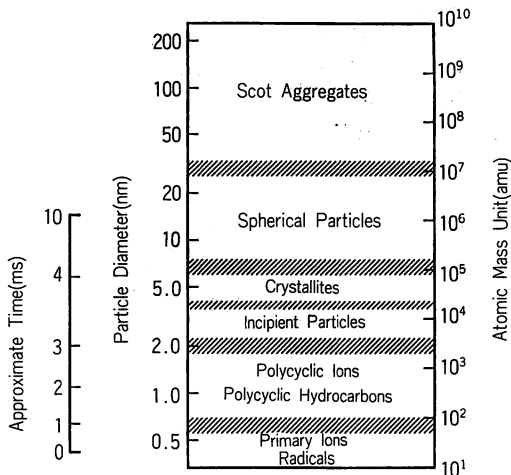


図-1 気相析出形すすの生成過程<sup>6)</sup>

これが灰粒子の組成や性状に大きく依存するため、プラント全体としての最適化には、排出粒子濃度ばかりではなく総合的な観点が必要となる。

炭種にもよるが、石炭には一般に5~30wt%程度の灰分が含まれており、重油とくらべてはるかに多い。このため灰粒子の生成は特に石炭燃焼において重要となる。石炭の代表的な燃焼方式としては、火格子燃焼、流動層燃焼、微粉炭燃焼の3種類があるが、この中でも特に、石炭を平均粒径70 μm程度にまで微粉碎して浮遊状態で燃焼させる微粉炭燃焼において、大量のフライアッシュが生成する。そのほとんどは電気集塵器にて除去され、煙突から大気中に放出される時のいわゆるばいじん濃度は普通100mg/Nm<sup>3</sup>程度に低く抑えられるが、その中には、電気集塵器での集塵効率<sup>10)</sup>の低いサブミクロン粒子が大量に含まれてくる。さらに燃焼により生成し排出されるサブミクロン粒子には、燃料中に含まれていた微量有害成分や放射性元素の濃縮<sup>11)12)</sup>が見られること、また人間の呼吸器系の最深部まで侵入しやすい微粒子の粒径範囲が0.2~0.5 μm程度であること<sup>13)</sup>を考えると、環境保全上で、燃焼生成サブミクロン粒子防除の重要性が今後ますます高まっていくものと考えられる。このような状況をふまえて、微粉炭燃焼における灰粒子の生成過程については、本章で詳しく述べる。

2.4 ガス-粒子転換エアロゾル

④のガス-粒子転換エアロゾルは、ガスから液相または固相への相変化によって新たに粒子を生成するものと、ガス状のまま既存微小粒子に凝縮するものがある。SO<sub>2</sub>の粒子転換の場合の模式図<sup>5)</sup>を図-2に示す。SO<sub>2</sub>はそれ自身が太陽紫外線を吸収して光化学的に酸化されるとともに、NO<sub>x</sub>とHC（炭化水素）の光化学反応によって生成したラジカルなどにより熱化学的に酸化されSO<sub>3</sub>となり、これが大気中のH<sub>2</sub>O分子と反応してH<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>分子となる。このH<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>分子が均一相核

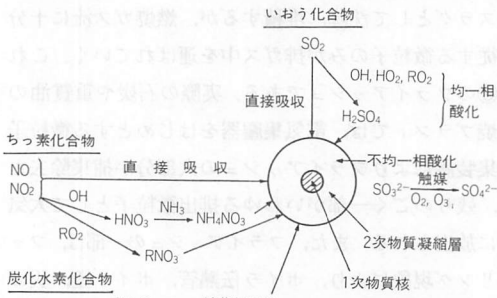


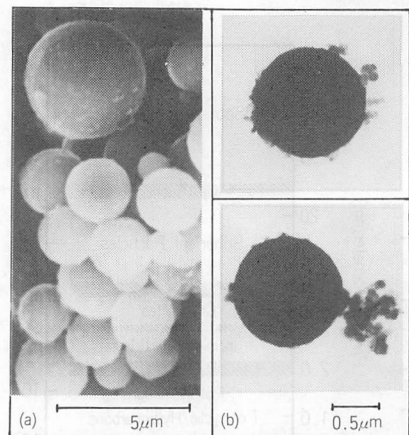
図-2 ガス-粒子転換によるSO<sub>2</sub>からの粒子生成<sup>5)</sup>

生成を経て硫酸ミストへと成長する。一方、SO<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>分子が既存粒子表面へ付着、凝縮し硫酸塩相を形成する。これを不均一相粒子生成と呼ぶ。このような機構による粒子成長は、表1からもわかるように、「燃焼と環境」という立場から見れば、直接生体に有害であるばかりではなく酸性雨の問題とも関連し、①、②、③の微粒子より重要な意味を持つてくるかも知れない。一般に、燃焼によって燃料中の窒素分から転化されて生成されるNO<sub>x</sub>については、低NO<sub>x</sub>燃焼技術によって相当低減することが可能であるが、燃料中の硫黄分についてはその90%以上がSO<sub>2</sub>となってガス相に移行する<sup>14)</sup>。我が国における大型燃焼装置では、普通、高性能の脱硫設備を備えており大気中へのSO<sub>2</sub>排出濃度は低く抑えられているが、脱硫設備は高価なため、開発途上国ではほとんど無処理のまま排出している場合が多い。従って、ここで述べたガス-粒子転換エアロゾルは、粒径がきわめて小さなサブミクロン粒子で大気中での滞留時間が長いこともあって、他国間あるいは大陸間の相互環境問題として、今後ますます大きな注目を集めていくものと思われる。

3. 微粉炭燃焼における微粒子生成

3.1 粒子の性状

微粉炭燃焼により生成される微粒子の大部分は、石炭中にもともと含有されていた非燃焼性の灰分に起因するフライアッシュ（第2章③）であり、燃焼条件や炭種にもよるが、普通は図-3(a)の写真に示すようなきれいな球状粒子から成っている。灰粒子の主成分は、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>であるが、石炭中灰成分の融融点は炭種によって大きく異なり1200~1500℃程度であり、燃



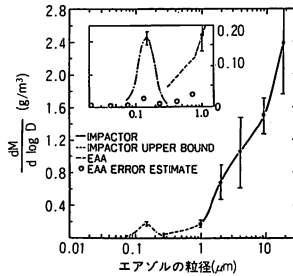
(a)サイクロン捕集灰のSEM写真  
(b)バグフィルター捕集灰のTEM写真  
図-3 微粉炭燃焼生成フライアッシュ<sup>15)</sup>

焼中のチャー中灰分や気中に分散された灰粒子の温度が燃焼火炎中の高温度場（一般のボイラでは1400～1500℃）で溶融液化し、後流での温度低下とともに再固化して球形粒子となるのである。従って、溶融点の高い灰分を含む石炭の燃焼や火炎温度が低い場合には、フライアッシュ中に非球形粒子も多数含まれてくる。また、灰粒子生成途中での粒子内ガス発生などにより、空洞粒子や子持ち粒子（粒子中の空洞内にさらに細かい球形微粒子がつまったもの）が生成されることもある<sup>15)</sup>。空洞粒子は非常に軽く、処理上いろいろな問題を起こし、また、子持ち粒子は、集塵プロセスで親粒子が捕集された後子粒子が再飛散して集塵効率を下げようような問題を生ずる。

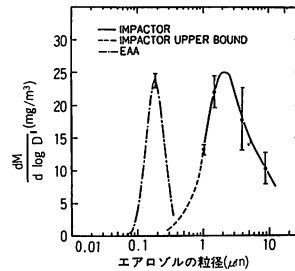
このほか、微粉炭燃焼生成微粒子中には、一部残留未燃炭素分（第2章②）が含まれるし、揮発分燃焼時に粒子から放出された炭化水素から、局所酸素不足条件下で生成する気相析出形すす（第2章②）も存在する。後者の気相析出形すすは比表面積がきわめて大きく（～100m<sup>2</sup>/g）しかも反応活性が高いことから、これが既存灰粒子の表面に図-3(b)の写真のように付着すると、燃焼帯高温部で気中に揮散した比較的低沸点の有害成分や硫黄分が、後流の低温部で灰粒子に再凝縮あるいは吸着するのを促進する<sup>14)17)</sup>。このことは、環境保全の立場からは、有害成分の微小灰粒子側への濃縮や灰粒子の電気抵抗値の変化による電気集塵効率への影響とも関連し、きわめて重要な現象である。

3.2 灰粒子の生成過程

実際の微粉炭燃焼火力発電所からの排気系から捕集されたフライアッシュの粒径分布について、その代表的な測定例<sup>18)</sup>を図-4に示す。図-4の(a)は電気集塵器入口で部で、(b)は出口部で捕集された粒子の粒径分布である。ボイラ出口でのフライアッシュの粒径分布は、燃焼条件や炭種によっても異なるが、大体、数μm～数十μmの範囲に、質量割合の大部分が存在する。(a)図ではこの状況を示しているが、サブミクロンの微小粒子側で0.1～0.2μm付近にもう1つのピークが存在する。この割合は集塵器入口ではほとんど無視できる程度であるが、(b)図に示すように、集塵器出口では無視できない量になっていることが注目される。これは、電気集塵器での集塵効率がサブミクロン粒子に対して低くなること<sup>10)</sup>によるものであり、先に述べた有害成分の微小粒子側への濃縮を考えると、サブミクロン粒子の全生成フライアッシュ中での質量割合はきわめて小さいにもかかわらず、その環境へのインパクトはよ



(a) 電気集塵器入口



(b) 電気集塵器出口

図-4 微粉炭燃焼ボイラより排出される灰粒子の粒径分布<sup>18)</sup>

り大きくなることを示している。

サブミクロン粒子も含めた微粉炭燃焼生成灰粒子の生成機構はきわめて複雑であるが、その環境問題との関連での重要性から、ここ10年来、米国やオーストラリアを中心に精力的な研究が行われてきており、いろいろなモデルが提案されている。フライアッシュ生成機構の代表的模式図を図-5<sup>19)</sup>に示す。数μmから数十μmの灰粒子には、燃焼途中のチャー粒子内の溶融灰が凝集固化して生成されるもの（10～30μm）と、燃焼中に粒子分裂を起こした後同様な過程により生成されるもの（0.5～30μm）とがある。図に示すように、

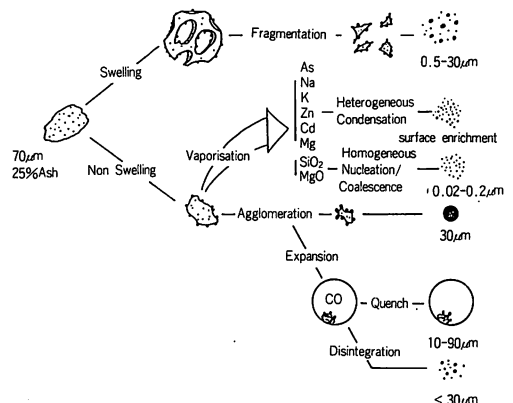


図-5 微粉炭燃焼におけるフライアッシュの生成機構（模式図）<sup>19)</sup>

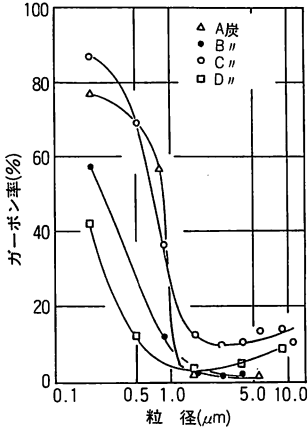


図-6 微粉炭燃焼生成微粒子の粒度別未燃カーボン率<sup>1)</sup>

後者の機構によるものの方が小粒径の粒子を多く含む。また、同図中下部には、3.1節で述べたような空洞粒子や子持ち粒子も示されている。一方、同図にはサブミクロン粒子の生成過程として、燃焼中の高温場で灰分中のSiO<sub>2</sub>やMgOが溶融後、粒子表面近傍での酸素不足の状況下でCOにより、沸点が低く蒸気圧の高いSiO、Mgに還元され粒子表面から蒸発、拡散し、これが周囲酸素により酸化され再びSiO<sub>2</sub>、MgOに戻るときに、均一核生成により粒径0.2 μm以下の微粒子を生成するパス<sup>20)</sup>が示されている。この機構により、図-4に示すサブミクロン領域でのピークが形成されるという説であり、かなり広く支持されている。

しかしながら、最近、定方ら<sup>21)</sup>により、燃焼前の微粉炭粒子と捕集灰粒子の粒径分布、および両者の元素組成の比較をも含めた詳細な研究の結果、サブミクロンフライアッシュのかなりの割合(～50%)が、微粉炭中にもともと存在する灰分含有率の大きい微小石炭フラグメントに起因していることが明らかにされている。また、微粉炭燃焼により生成されるサブミクロン粒子中には、いわゆる灰粒子以外に、気相析出形すすが多量に含まれていることも、粒径別未燃炭素率分析(図-6<sup>22)</sup>)と粒子の電顕観察により明らかにされ<sup>1)</sup>、このすす粒子がサブミクロンフライアッシュの凝集を促進することが指摘されている。図-5に上記2つのサブミクロン粒子生成スキームを加えたものが現在の所、最も実際の現象を正しく表現したモデルであると考えられる。

3.3 灰粒子への元素濃縮挙動

石炭中には、Pb、Cd、Hg、Asをはじめとする有害元素が微量ながら含まれており、これらが、電気集

塵器での捕集効率の低いサブミクロンの微小粒子側に濃縮され<sup>1)</sup>大気の一部が放出される可能性がある。このため、最近、微粉炭燃焼における微量元素挙動や、フライアッシュ中あるいはその表面における粒径別微量元素濃度に関する研究が、環境保全の立場から盛んに行われているようになっている。

微量元素の灰粒子への濃縮度を表す指標としては、次に示す濃縮係数EF(Enrichment Factor)が用いられている。

$$EF = [C_i / C_o]_{ash} / [C_i / C_o]_{coal} \quad (1)$$

ここで、C<sub>i</sub>はi成分濃度、C<sub>o</sub>は基準成分濃度であり、基準成分としては普通、燃焼場でほとんど蒸発揮散しないと考えられるAlやTiが用いられる。EF<sub>i</sub>>1のとき、i成分が灰粒子へ濃縮していることを示す。図-7は、昭和55年から4年間、化学工学協会(当時、現化学工学会)が環境庁からの委託で行った「石炭種別大気汚染負荷評価」プロジェクト研究の一環として、豊橋技術科学大学の層流式一次元微粉炭燃焼炉と群馬大学の乱流式燃焼炉による実験で得られた結果の一例<sup>23)</sup>である。同図は、サブミクロン粒子が大部分を占めるバグフィルター捕集灰に対する分析結果であるが、

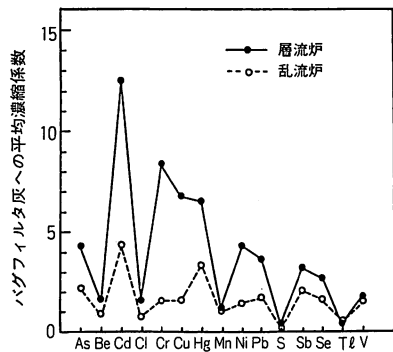


図-7 層流炉と乱流炉のバグフィルター灰の平均元素濃縮係数<sup>23)</sup>

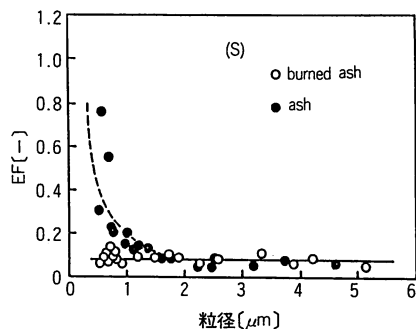


図-8 サブミクロン粒子への硫黄の濃縮挙動と付着すすの影響<sup>17)</sup>

Cd, Hg, などが顕著な濃縮傾向を示し、続いて、As, Pb, Sb, Se, Vなどにも濃縮傾向があることがわかる。もちろん、炭種、分析方法、燃焼方式や規模によって、微量元素挙動に差異が生ずるが、図-7の結果は、上記プロジェクトにおいて調査された各種スケールの実機でのデータとも傾向がよく一致している。なお、S分のEFは0.1程度の低い値となっているが、これは、石炭中のS分の大部分がSO<sub>2</sub>として気相側に移行するためであり、一部灰粒子側に移行するS分に関しては、やはりサブミクロン粒子に対するEFが大きくなることが確認されている。

図-8は、筆者ら<sup>19)</sup>が灰粒子へのS分の濃縮挙動を調べた結果であり、図-3(b)に示すような粒子まわりに付着したすす粒子を焼いて除去した灰粒子（白丸）と、すす付着のままの灰粒子（黒丸）のそれぞれに対する濃縮係数EFの粒径依存性の比較である。灰粒子に付着した気相析出すす粒子が、特にサブミクロン領域において、S分の灰粒子上への濃縮を促進していることが明瞭に示されている。さらに詳細な検討により、SばかりでなくHg, Sb, Seなども、すす粒子による濃縮が顕著に現れることが確かめられている<sup>4)</sup>。

#### 3.4 微粉炭燃焼生成微粒子に伴う環境問題

微粉炭燃焼によって大量のフライアッシュが生成されるが、電気集塵器によってその大部分が捕集除去され、質量割合にしてほんの一部のサブミクロン粒子が、その集塵効率が低いこともあって大気中に放出される。我国では、表2に示す排出基準を満足するための集塵技術は、コストの問題を除けば既に確立している。しかし、排ガス単位体積当りのばいじん濃度 (mg/Nm<sup>3</sup>) が低く抑えられても、その中のほとんどはサブミクロン粒子であり、本章で述べてきたように、これに有害微量元素が濃縮されている。従って、微粉炭燃焼における微粒子による環境問題は、サブミクロン粒子の発生抑制や、サブミクロン粒子に対しても高効率な高性能集塵の技術開発に集約されているといっても過言ではない。現在のところ我国では、この問題がそれほどシリアスな状況とはなっていないが、海外炭を中心とする石炭消費の増大に伴って、燃焼性ばかりではなく重金属含有率まで考慮した燃料炭の選択や、粒径分布をも考慮した粒子排出規制が、将来必要になってくるかも知れない。

#### 4. 燃焼生成微粒子の排出抑制

燃焼装置からの微粒子排出抑制を、燃焼と環境とい

う立場から見れば、燃焼場での微粒子生成自体を抑制する方法と、生成された微粒子の大気環境中への排出を極力抑制する方法の両者を合わせふまえるとともに、他の環境汚染物質である例えばNO<sub>x</sub>などの生成制御技術との対応を含めて、トータルで考えなければならない。また、生成しても容易に除去あるいは捕集できる粒子とそうでないもの、環境へのインパクトのより大きいものとそうでないものを正しく把握した上で最善の対応策を構ることが重要である。

燃焼により生成する生成機構の異なる各種微粒子(第2章)について、それぞれの生成抑制方法を考えてみよう。気相析出形すすは、局所還元領域(空気不足領域)にて火炎温度が高いほど発生量が増加する。従って、燃焼器内での空気比配分の均一適正化や火炎の温度制御により、気相析出すすの発生を抑えることができる。そのためには、燃料と空気との混合促進や、いわゆるサーマルNO<sub>x</sub>(空気中N分起源のNO<sub>x</sub>)の低減燃焼技術である排ガス再循環や水・蒸気噴射による火炎温度低下などが有効である<sup>20)</sup>。しかし、これらの方法では、残炭形すすの生成抑制には逆効果である。残炭形すすの低減には、火炎の高温化や燃焼炉内の滞留時間の増大、および燃料噴霧や微粉炭の微細化などが有効である。これは、燃料粒子の燃焼完結時間が、温度が高いほど、滞留時間が長いほど、粒子径が小さいほど短くなるからである。ただし、微粉炭の微細化は、サブミクロンフライアッシュの生成割合を増大させることに留意しなくてはならない。

フライアッシュについては、燃料中に含まれる未燃灰分に起因するため、灰分を熔融除去する高温サイクロン炉などの特殊な場合を除いて、灰分含有率に相当する灰粒子生成は避けられないが、3.4節で詳しく述べたように、環境保全の立場から最も重要なのは、いかにしてサブミクロン粒子の生成を抑制するかということである。また、たとえ燃焼場でサブミクロン粒子が生成されたとしても、いかにしてこれを、集塵器で捕集されやすい粗大粒子に凝集成長させるかということである。定方ら<sup>19)</sup>は、微粉炭燃焼試験炉において、一次空気流速を変化させることにより、サブミクロンフライアッシュとNO<sub>x</sub>の同時抑制が可能であることを示し、これがフェュエルNO<sub>x</sub>(燃料中N分起源NO<sub>x</sub>)低減に有効な局所還元領域において生成する気相析出すすが、サブミクロンフライアッシュの凝集成長を促進したためであるとしている。また、下原ら<sup>21)</sup>は、溶媒処理により石炭中のイオン交換性金属イオンを除去

することにより、図-5における揮発凝縮型サブミクロン粒子の生成を抑制できることを報告している。このような、燃焼によるサブミクロン粒子の生成を、その生成機構をふまえた上で積極的に抑制するための基礎研究は、最近始まったばかりで世界的にも例が少ない。

また一方で、サブミクロン粒子の捕集効率そのものを高めることを目的として、粒子荷電制御法、ペブルあるいはペレット充てん層の応用、および、これに高電圧を印加することによって生ずる部分放電で集塵効率を飛躍的に向上させる研究<sup>26)</sup>なども進められている。

## 5. まとめ

燃焼による各種微粒子の生成挙動とその排出抑制方法について、燃焼と環境という立場に重点をおいてまとめてみた。特に、今後世界的に使用量の増大が予想される石炭の燃焼における微粒子生成に関しては、現象がきわめて複雑で未解明の点が非常に多いが、できるだけ最近の研究成果も含めて詳しく紹介したつもりである。環境保全の上できわめて重要な分野であるにもかかわらずその研究には、多くの費用とそして何よりも多大な労力を要し、さらにクリアな結果が出にくいこともあって、特に我国の大学におけるこの種の研究例は数少ないのが現状である。今後の研究の発展を期待したい。

## 参 考 文 献

- 1) 高橋幹二(編); 応用エアロゾル工学 (1984), 養賢堂.
- 2) 溝畑 朗; 都市大気エアロゾル粒子の性状と発生源の同定に関する基礎的研究, 京都大学博士論文 (1981).
- 3) 柳下正治; 公害と対策, 18巻, 3号 (1982), 14.
- 4) 定方正毅; エアロゾル研究, 1巻, 4号 (1986), 233-244.
- 5) 笠原三紀夫; ガス状物質の粒子転換と粒子の変質, 文献1)の2.3節.

- 6) Calcote, H.F.; Combust. Flame, Vol.42 (1981), 215-242. を一部修正.
- 7) 池上 詢; すず生成における核生成と成長, 昭和62年度科研総合研究(B), 高温下での超微粒子の生成と制御, 報告書 (1988), 21-26.
- 8) 登坂 茂ほか; 機論 (B編), 55巻, 516号 (1989), 2915-2918.
- 9) 池上 詢ほか; 機論 (B編), 55巻, 515号 (1989), 2059-2066.
- 10) 井伊谷綱一; 集塵工学 (1980), 日刊工業新聞社.
- 11) Coles, D.G.ら; Environ. Sci. Tech., Vol.13, No.4 (1979), 455-459.
- 12) Coles, D.G.ら; Environ. Sci. Tech., Vol.12, No.4 (1978), 442-446.
- 13) Hinds, W., The Lung and the Environment, Seminars in Respiratory Medicine, Vol.1 (1980), 197-210.
- 14) 定方正毅, 岡崎 健; 化学工学, 51巻, 11号 (1987), 822-827.
- 15) 神保元二; 化学工場, 25巻, 5号 (1981), 62-67.
- 16) Okazaki, K.ら; Proc. 2nd Int. Conf. ESP (1984), 792-799.
- 17) 岡崎 健ほか; 化学工学論文集, 10巻, 6号 (1984), 751-757.
- 18) Markowski, G.R.ら; Environ. Sci. Tech. Vol.14, No.11 (1980), 1400-1402.
- 19) Wibberley, L.J., Wall, T.F.; Combust. Flame., Vol.48 (1986), 177-190.
- 20) Flagan, R.C.; Proc. 17th Symp. (Int.) on Combust. (1979), 97-104.
- 21) Sadakata, M.ら; Combust. Flame., Vol.74, No.1 (1988), 71-80.
- 22) Sadakata, M.ら; Combust. Flame, Vol.56 (1984), 245.
- 23) 石炭種別大気汚染負荷評価調査報告書 (1984), 化学工学協会, 159.
- 24) 永田勝也; 公害と対策, 18巻, 9号 (1982), 43-48.
- 25) 下原孝章ら; 燃料協会誌, 66巻, 12号 (1987), 1020-1030.
- 26) Mizuno, A.ら; Proc. IEEE/IAS Annual Meeting (1989), 2148-2153.

