

## ク リ ー ン 燃 焼 技 術

## Clean Combustion Technology

定 方 正 毅\*

Masayoshi Sadakata

## 1. はじめに

燃焼プロセスからは、数種類以上の大気汚染物質が排出され、特にこのうちNO<sub>x</sub>、N<sub>2</sub>O、SO<sub>x</sub>は酸性雨あるいは地球温暖化の原因物質となることから、これらの汚染物質の排出を低減化するためのクリーン燃焼技術は、今後ますます重要になって来ると思われる。

表1に、各種の燃焼装置に用いられる燃料の種類と、それらの燃焼によって排出される汚染物質の種類を示す。この中で、天然ガス等のガス燃料やアルコール、軽質油燃料は、汚染物質がNO<sub>x</sub>、すすなどに限られており、そのレベルも低いところからクリーン燃料と呼ばれ、これに対して重質油や石炭は、多種類の汚染物質を高濃度で排出するところからダーティ燃料と呼ばれている。重質油や石炭などは、一般に安価な燃料であり、開発途上国でも広く使われているところから、これらの燃料のクリーン燃焼技術が今後特に必要となる。

燃焼プロセスからの汚染物質の排出を低減化する技術は、燃焼の前段階で燃料中から汚染物質を除去して

しまう事前処理技術と、燃焼法の改善等燃焼炉内でその低減化を計る炉内処理技術および燃焼後の排ガス中から汚染物質を除去する排煙処理技術の3つに分類される。一般に、クリーン燃焼技術は、この中の炉内処理技術に相当する。

表2に、それぞれの処理法で低減化が可能な汚染物質の種類を示す。この表から、炉内処理すなわちクリーン燃焼技術は、フライアッシュを除いて全ての汚染物質に有効であることがわかる。以下、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、すすに関してその低減化のための代表的な処理技術を具体的に解説する。

表2 各汚染物質に有効な処理法

	NO <sub>x</sub>	N <sub>2</sub> O	SO <sub>x</sub>	CO	PAH	すす	FA
事前処理	○	○	○	×	×	×	○
炉内処理	◎	◎	○	◎	◎	◎	×
排煙処理	◎	○	◎	○	○	○	◎

◎極めて有効 ○有効 ×無効

※注 NO<sub>x</sub>: NOとNO<sub>2</sub>SO<sub>x</sub>: SO<sub>2</sub>とSO<sub>3</sub>

FA: フライアッシュ

表1 燃料種と汚染物質

燃料種	汚染物質	
気体	水素	NO <sub>x</sub>
	炭化水素	NO <sub>x</sub> 、CO
液体	メタノール	アルデヒド
	軽質油	NO <sub>x</sub> 、SO <sub>x</sub> 、CO、PAH*、すす
固体	重質油	NO <sub>x</sub> 、SO <sub>x</sub> 、CO、PAH、すす、FA**
	コークス	NO <sub>x</sub> 、SO <sub>x</sub> 、CO、すす、FA
	石炭	NO <sub>x</sub> 、SO <sub>x</sub> 、CO、PAH、すす、FA、HF
木材	NO <sub>x</sub> 、CO、PAH、すす	

\*多環芳香族炭化水素

\*\*フライアッシュ

\*群馬大学工学部教授

〒376 桐生市天神町1-5-1

2. 硫黄酸化物(SO<sub>x</sub>)の生成抑制2.1 SO<sub>3</sub>の抑制

空気中のN<sub>2</sub>からも生成するNO<sub>x</sub>と異なり、燃焼系から生成するSO<sub>x</sub>(SO<sub>2</sub>+SO<sub>3</sub>)は、全て燃料中に含まれるイオウ分に由来する。

燃料中の硫黄化合物の形態は、燃料の種類によって異なる。重油中の硫黄化合物は、一般に多環硫化物の形をとっている。一方、石炭中の硫黄化合物は、無機イオウ化合物と有機イオウ化合物に分類される。無機イオウ化合物は、硫酸塩(CaSO<sub>4</sub>、FeSO<sub>4</sub>、BaSO<sub>4</sub>等)、硫化物(PbS、ZnS、FeS、FeS<sub>2</sub>、CaS等)および遊離イオウからなるが、量的には黄鉄鉱(FeS<sub>2</sub>)の形で含まれる割合が一番高い。一方、有機イオウは、

石炭マトリックスに結合したもので、その構造の詳細は明らかになっていないが、瀝青炭にはチオフェン構造(図-1)を有するものが多く含まれていると言われている。

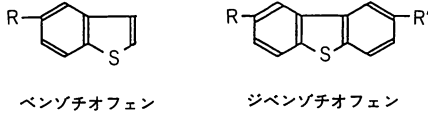


図-1 石炭中の硫黄化合物

燃焼装置から排出されるSO<sub>2</sub>は大部分SO<sub>2</sub>であるが、一部SO<sub>3</sub>の形で排出される。SO<sub>3</sub>は煙道中で水と反応して硫酸となり、熱交換器の金属伝熱面の腐食を引き起こす。また、大気中に放出されたSO<sub>3</sub>は硫酸ミストとなり、人間の呼吸器系統にSO<sub>2</sub>よりむしろ悪影響を及ぼすと言われている。またSO<sub>3</sub>は、燃焼系からの他の汚染物質(例えばフライアッシュや水銀)の排出に影響を及ぼすことも最近の研究で明らかになってきている<sup>1,2)</sup>。例えば、SO<sub>3</sub>レベルの増加はEP(電気集塵器)におけるフライアッシュの捕集率を向上させる。これは、フライアッシュ粒子表面に硫酸が凝縮付着することによって、その電気抵抗値が高捕集率が実現できる最適レベルまで低下するためとされている<sup>2)</sup>。

SO<sub>2</sub>中のSO<sub>3</sub>の割合は、燃焼条件の変更によってある程度変えることは可能である。図-2に、イオウ分5.5wt%を含む天然ガスを燃焼させた時の排出SO<sub>3</sub>濃度レベルに及ぼす空気比の影響を示す<sup>3)</sup>。空気比を低下させることによってSO<sub>3</sub>の生成を抑制できることが

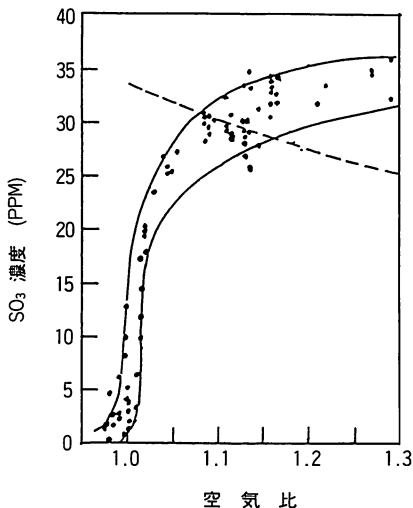


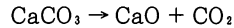
図-2 排出SO<sub>3</sub>濃度におよぼす空気化の影響<sup>3)</sup>

わかる。

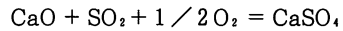
## 2.2 炉内脱硫

炉内脱硫は、燃焼炉内に石灰石(CaCO<sub>3</sub>)あるいはドロマイト(MgCO<sub>3</sub>, CaCO<sub>3</sub>)を直接吹き込んで炉内で直接SO<sub>2</sub>を除去する方法である。炉内脱硫はこれまで主として石炭流動化燃焼炉で試みられてきており、すでに実用化もされている。

CaCO<sub>3</sub>による炉内脱硫の反応スキームは、まず、CaCO<sub>3</sub>が温度750℃から1000℃の条件下で熱分解を起こしCaOを生成する。



次に、CaOはO<sub>2</sub>存在下でSO<sub>2</sub>を吸収して石膏CaSO<sub>4</sub>を生成する。



上記の反応の最適温度範囲は800から900℃である。図-3は流動層石炭燃焼における脱硫率に及ぼすCa/Sモル比の影響を示す<sup>4)</sup>。Ca/S=1の時の脱硫率は30~50%であり、この程度では脱硫率として不十分である。脱硫率95%以上を実現するためにはCa/S=4~5が必要である。Ca/S=5は、100kgの石炭を燃焼させるのに20~50kgのCaCO<sub>3</sub>を必要となり、CaCO<sub>3</sub>の供給コストあるいは排出固体粒子の再生処理に莫大なコストがかかる。このため、Ca/S比を化学量論比(Ca/S=1)に近づけるためのいくつかの試みもされている。例えば、大きな比面積を得るために直径10μ程度の微粉CaCO<sub>3</sub>を用いる<sup>5)</sup>。CaCO<sub>3</sub>の代わりにポル

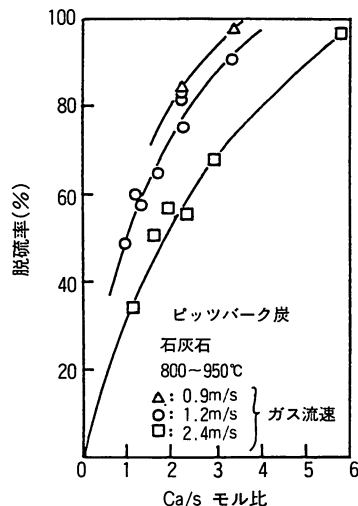


図-3 脱硫率におよぼすCa/S比の効果<sup>10)</sup>

トランドセメント粒子のような代替脱硫剤を用いる<sup>9)</sup>。あるいはNaClによって脱硫剤の前処理を行って脱硫率を上昇させる<sup>1)</sup>などであるが、未だ決定的なものはない。なお、最近の新しい炉内脱硫の試みとして非平衡炉内脱硫法がある。一般に、Ca粒子の炉内吹き込みによりSO<sub>2</sub>を除去しようとする場合、平衡論的には1400K以上では脱硫は不可能である。しかしながら、通常の微粉炭燃焼炉あるいは前述のスラグトップ炉では炉内温度は1400K以上である。この平衡論的には不可能な1400K以上の場で脱硫を実現しようとするのが非平衡炉内脱硫である。この方法の原理は、脱硫に効く温度がガス温度ではなく粒子表面温度であることに着目し非定常状態での粒子温度を利用したものである。

すなわち、1400K以上の炉内にCa粒子を吹き込んでも粒子温度が瞬時にガス温度に等しくなるわけではなく、必ずガス温度と平衡になるまでの温度上昇過程で粒子温度が脱硫に最適な1100K~1400Kの温度を通過するはずであり、この非平衡温度状態で脱硫を行わせた後、粒子温度が1400Kに達する前に炉内からSを捕捉した粒子を排出させようとするものである。この方法で高脱硫率を実現するためには、粒径、粒子吹き込み方式、粒子とガスの接触形式を種々変化させて、粒子の最適温度履歴をできるだけ長い時間実現できる条件を見出す必要がある。

図-4にAbichandaniらが行った二段燃焼スラグトップでの炉内脱硫実験を示す<sup>9)</sup>。一段目の空気過剰側(当量比<1.0)で90%の脱硫率が得られているが、二段空気吹き込み後最終段階での脱硫率は10%以下まで低下している。これは、一段目でSをCaSO<sub>4</sub>の形で捕捉したCa粒子がその後の粒子温度の上昇によりCaSO<sub>4</sub>の分解が生じ後段でSO<sub>2</sub>を再放出するためと推測される。これに対して、一段目が還元燃焼の場合は石炭中のSがSO<sub>2</sub>としてだけでなくH<sub>2</sub>Sとして放出され

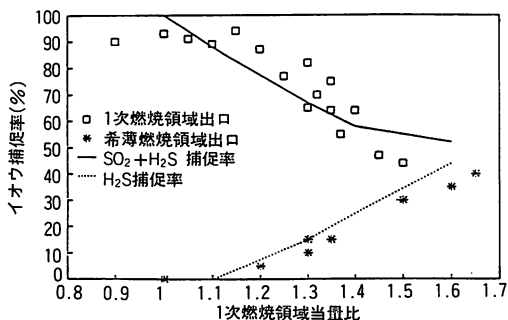
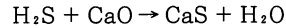


図-4 スラッキング燃焼器における炉内吹き込みによる脱硫率

るため



によりSはCaSとして捕捉される。CaSはCaSO<sub>4</sub>に比べてより高温で安定であるため初段が燃焼過剰であるほど最終的な脱硫率は上昇する。これらの実験結果では、当量比1.6で最終的な脱硫率40%が得られている。

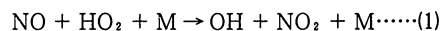
### 3. 窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) の生成抑制

#### 3.1 燃焼に伴うNO<sub>x</sub> (含N<sub>2</sub>O) 生成特性

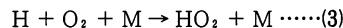
燃焼過程から生成するNO<sub>x</sub>は主にNOとNO<sub>2</sub>から成り、このうちNOは空気中のN<sub>2</sub>とO<sub>2</sub>から生成するいわゆるサーマルNOと、燃料中のN分から生成するフューエルNOの2種類がある。さらにサーマルNOは、生成機構によってZeldovich NOとプロンプトNOの2種類に分類される。それぞれの生成反応機構および生成特性を表3にまとめた。これらの詳細については類書<sup>9)</sup>に詳しいので、ここでは最近室内汚染に関心を集めているNO<sub>2</sub>、地球温暖化の原因物質の一つと考えられているN<sub>2</sub>Oについてのみ重点的に示す。

#### 1) NO<sub>2</sub>の生成

NO<sub>x</sub>のうちNO<sub>2</sub>はNOに比べて有害であり、室内汚染物質の一つとなっている。NO<sub>2</sub>は、乱流混合領域で高温燃焼ガスが同伴空気によって急速に冷却される場で以下のような機構で生成することが知られている<sup>10,11)</sup>



NO<sub>x</sub>中のNO<sub>2</sub>の割合は燃焼条件によって異なるが、最高で90%近くに達することがある。また、燃焼ガス中にCOやCH<sub>4</sub>のような未燃ガスが微量存在すると、上記(1)の反応の後、



が引き続いて生じHO<sub>2</sub>が再生成する結果、NOからNO<sub>2</sub>への変換が更に促進されることになる。また、このことは、冷水のサンプリングプローブ内でも急速冷却によりNO→NO<sub>2</sub>への変換が生じることが示されており、NO分析のサンプリングに際してエラーが生じる可能性を示している<sup>11)</sup>。

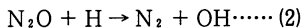
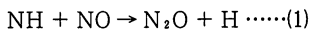
次にN<sub>2</sub>Oは、最近大気環境化学において重要な役割を果たすこと、また、CO<sub>2</sub>やメタンと並んで地球温暖化の重要原因物質になることが明らかになり注目さ

表3 NOの生成機構と生成特性

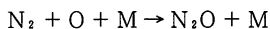
名称	反応機構	生成特性
Zeldovich NO	$O_2 \rightleftharpoons O + O \dots (1)$ $N_2 + O \rightleftharpoons NO + N \dots (2)$ $N + O_2 \rightleftharpoons NO + O \dots (3)$	1) 温度依存性が極めて高い。 2) 酸素濃度が増大するほどNOの生成速度増大。 3) 燃焼主反応速度に比べてNOの生成速度は遅い。
プロンプト NO	$CH + N_2 \rightleftharpoons HCN + N$ $C_2 + N_2 \rightleftharpoons 2CN$ $HCN + O_2 \rightleftharpoons NO$ $CN + O_2 \rightleftharpoons CO$	1) 炭化水素系火炎で生成する。 2) 燃料過剰側で生成する。
フューエル NO	$F-N \xrightarrow{+OX} NO$ $F-N \xrightarrow{+NO} N_2$ F-N: フューエル (NH <sub>3</sub> , ピリジン, メチルアミン等) I: 中間生成物 (CN, HCN, NH, NH <sub>2</sub> 等) OX: 含酸素物質 (O, O <sub>2</sub> , OH)	1) 燃料過剰燃焼条件下ではFuel NOの生成は抑制される。 2) Fuel NOの生成速度に対する温度の影響は、小さい。 3) Fuel NOの生成速度は極めて早く燃焼反応速度に近い。 4) 燃料と空気の混合形式により、NOの発生量は大きく変化する。拡散火災から予混合火災に近づくほどフューエルNからNOへの転換率は上昇する

れてきている。燃焼系からのN<sub>2</sub>Oの排出割合は、通常の石炭及び重油燃焼の場合NOの1/3程度であり、また、低NO<sub>x</sub>化の為に二段燃焼を施した場合、N<sub>2</sub>Oの生成は抑制されるとされている。

N<sub>2</sub>Oは、主として還元性燃焼雰囲気下で生成すること、および、N<sub>2</sub>Oの生成時にNH<sub>3</sub>が共存する機会が多いことからN<sub>2</sub>Oの生成および消滅機構としては、以下のようなNHラジカルによる反応機構が考えられている<sup>12)</sup>。



しかしながら、燃焼希薄のCO-空気火炎からも以下のような反応機構



でN<sub>2</sub>Oが生成する可能性があるとするシュミレーション結果があり<sup>13)</sup>、必ずしも還元性条件下でのみN<sub>2</sub>Oが生成するわけではない。

N<sub>2</sub>Oの生成レベルは、一般にNOにくらべてわずかであり、アルゴン希釈の酸素-水素層流予混合火炎で10ppm程度の値<sup>12)</sup>、また、微粉炭燃焼系で40~50ppm程度の値が報告されている<sup>14)</sup>。

3.2 炉内脱硝 (含低NO<sub>x</sub>燃焼, 無触媒NH<sub>3</sub>脱硝)

低NO<sub>x</sub>燃焼法に関しては、数多くの方法が提案されている。それらを一括して表4にまとめる。本項では、この中で、サーマルNO<sub>x</sub>およびフューエルNO<sub>x</sub>の双方に有効で、いまだ改善の余地の残されている二段燃焼法および燃料二段燃焼法についてやや詳しく述べ

る。また、NH<sub>3</sub>を用いた無触媒脱硝法についても触れる。

i) 二段燃焼法

二段燃焼の原理は、図-5に示すように、一段目では空気流量を絞って燃料過剰燃焼を行わせ、二段目では燃焼用空気を新たに吹き込んで燃料希薄燃焼を行わせる方式である。このような燃焼を行わせると、温度分布がフラットになり、ピーク温度が低く抑えられるために、サーマルNOの生成が抑制される。さらに、一段目の燃料過剰燃焼条件下でフューエルNが大部分N<sub>2</sub>に転換するため、フューエルNOも抑制される。

二段燃焼においては、二段目の空気吹き込み位置が最も重要な因子の一つである。NO<sub>x</sub>の最終レベルに及ぼす二段目空気吹き込み位置の影響を、図-6<sup>15)</sup>に示す。吹き込み位置が下流に移動するにしたがって、最終的なNO<sub>x</sub>のレベルは急激に低下していることがわかる。この場合には、空気吹き込み位置をバーナー口から1200mm以上下流に設置する必要があることが示唆される。なお、石炭燃焼に関して同様な結果が得られて

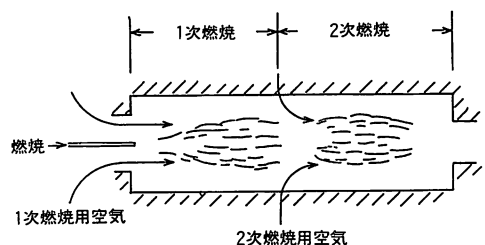


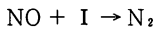
図-5 二段燃焼の原理

表4 燃焼法の改善によるNO<sub>x</sub>の抑制技術

技術名	原理	低減されるNOの種類	燃料の種類	平均NO <sub>x</sub> 低減率
燃料改善 1) 低N分燃料 2) エマルジョン燃料	N分の低下 温度およびO <sub>2</sub> の低下	フューエルNO サーマルNO	液体燃料および石炭 液体燃料	* 30~50%
運転法改善 3) 低空気比燃料	O <sub>2</sub> 低下	フューエルNO サーマルNO	全ての燃料	10~20%
4) 低負荷燃料	温度低下	サーマルNO	全ての燃料	10~30%
5) 低温空気予熱	温度低下	サーマルNO	全ての燃料	10~30%
低NO <sub>x</sub> バーナー 6) 自己再循環	温度およびO <sub>2</sub> の低下	サーマルNO	液体燃料	20~40%
7) 高速混合バーナー	温度低下	サーマルNO	ガス及び液体燃料	20~40%
8) 脱化学量論比燃料バーナー	温度およびO <sub>2</sub> の低下	フューエルNO サーマルNO	全ての燃料	30~40%
炉改善 9) 二段燃焼	温度およびO <sub>2</sub> の低下	フューエルNO	全ての燃料	30~50%
10) 排ガス再循環	温度低下	サーマルNO	全ての燃料	30~50%
11) 水またはスチーム噴射	温度低下	サーマルNO	ガス状及び液体燃料	30~50%
12) 燃料二段吹き込み	還元	フューエルNO	全ての燃料	30~50%

いる<sup>16)</sup>。

さらに、二段燃焼によるNO<sub>x</sub>の低減に関しては、最適な一段目の空気比が存在する<sup>17)</sup>。例えば都市ガス二段燃焼では、一段目空気比0.8が低NO<sub>x</sub>化のための最適条件であることが実験的に示されている。これは、一段目で発生するNOとNH<sub>3</sub>、HCN等の中間生成物Iがほぼ当量生成するような空気比条件下では、



の反応が生じて、NOおよび二段目でNOに変換する可能性があるIが共に消滅して無害なN<sub>2</sub>に変化するためであると考えられている。

二段燃焼法はガスや重油だきボイラーやガラス溶融炉のような高温炉にも広く用いられている。また、石炭燃焼ボイラーや小型の石炭燃焼炉にも用いられてい

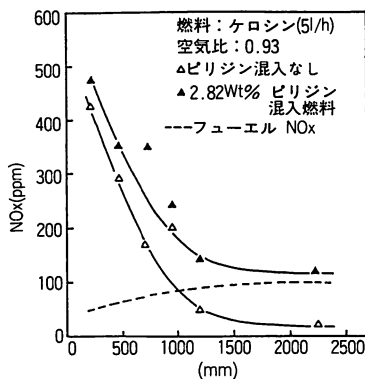


図-6 空気吹き込み位置<sup>23)</sup>

る。

二段燃焼法の欠点は、火炎温度が低下するため熱効率が低下する点であったが、これは排ガスのエンタルピーを用いて燃焼用空気を予熱することによってある程度解消される。なお、二段燃焼法において空気予熱は、最終的なNOレベルに大きく影響が生じないことが実験的にも理論的にも示されている<sup>17)</sup>。

ii) 燃料二段吹き込み法

一方、燃料二段吹き込み法 (SFIM) の原理は、燃焼炉内に炭化水素を吹き込み、炭化水素ラジカルによってNOを還元する方法である。例えば、CH<sub>3</sub>によって次のような還元反応が生じると考えられる。



燃料二段吹き込みの例を図-7<sup>18)</sup>に示す。この方法では、二次燃料が一段目の燃料希薄燃焼が完了した位置に吹き込まれる。そこで、上記の反応によって一段目で生成したNOは炭化水素ラジカルによって迅速に還元される。この時、未燃炭化水素やCO、HCNが残留

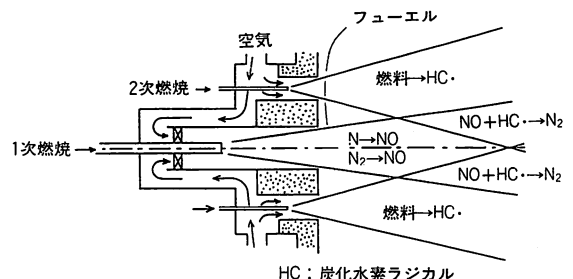


図-7 燃料二段吹き込みの原理<sup>26)</sup>

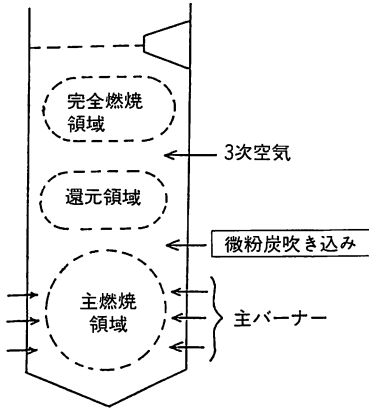


図-8 微粉炭炉内脱硝<sup>27)</sup>

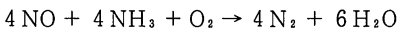
するが、下流でさらに三次空気を吹き込むことによって燃焼除去される。

燃料二段吹き込みを微粉炭燃焼系に適用した例を図-8<sup>29)</sup>に示す。このプロセスの特徴は、吹き込みHCとして安価な微粉炭を用いる点である。この方法でさらに低NO<sub>x</sub>バーナーを併用すると、最終的なNOは50ppm程度まで低下すると報告されている<sup>20)</sup>。

燃料二段吹き込み法の欠点は、HCによる還元ゾーンとそれによって生成した未燃分を除去するための燃焼ゾーンが必要のため、炉容積が大きくなる点である。その結果、この方法は、低NO<sub>x</sub>バーナーや二段燃焼に比べてコスト高となる。

iii) 無触媒脱硝法

ExxonのLyonは、温度800～900℃のO<sub>2</sub>存在下でNH<sub>3</sub>がNOを選択的に還元することを見出している<sup>20)</sup>。厳密な反応機構は明かでないが、見かけの反応式として、



が考えられる。

上式から明らかなように、O<sub>2</sub>の存在がこの反応には必要である。

無触媒脱硝法は、この反応を応用したものである。まず、NH<sub>3</sub>が炉内あるいは煙道の800～1000℃、O<sub>2</sub>存在下の領域に吹き込まれる。すると上記の反応が進んでNOの90%が反応時間0.5秒程度で還元される。しかしながら、この方法を実際の炉に適用すると、NO低減率は40%まで低下してしまう。これは、炉寸法が実機スケールに増大すると乱流混合速度が低下するため、NH<sub>3</sub>とNOの混合が充分行われないためと推測される。

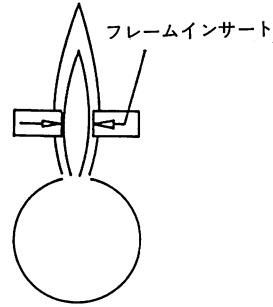


図-9 フレイムインサート概念図

したがって、NOの低減率はNH<sub>3</sub>の吹き込み方法を改善することによって上昇されると予想される。

この方法の最大の利点は、触媒を必要としないため低コストであり、且つ、重質油や石炭燃焼ガスのようなダーク排ガスにも適用できる点である。一方、問題点としては、NOに比べて過剰に吹き込まれたNH<sub>3</sub>が熱交換器を腐食したり、SO<sub>3</sub>と反応して酸性硫酸アンモニウム塩を生成してボイラーの空気予熱器を腐食する点である。これを避けるためには、NH<sub>3</sub>の吹き込み量をできるだけ化学量論比に近づけることである。

3.3 小型燃焼器のクリーン化

工業用大型燃焼装置と異なり、家庭用、小型業務用に用いられる燃焼器では、不完全燃焼に対する余裕度とともにコスト、機器寸法、使用条件等の制約が厳しく対象となる技術は限られている。家庭用燃焼器向きの低NO<sub>x</sub>燃焼の工夫の一例として、現在、アメリカのガス技術研究機関 (GRI) において開発中のフレイムインサート法がある。これは図-9に示すようにベンゼン火炎の外炎部分にフレイムインサートと呼ぶ耐熱固体を設置し炎の熱の一部を放射により除いて火炎温度を下げる方法である。この方法によるとNO<sub>x</sub>を50～70ppmまで低下できるとされている。

その他、小型ボイラー等と同様の対策である過剰空気比バーナーおよび触媒燃焼法が有効である。このうち、前者では高空気比燃焼での炎の安定化、後者では安価な触媒の探索がポイントとなる。なお、小型燃焼器のクリーン化の詳細な解説に関しては大阪ガス豊永氏の優れたレビュー<sup>21)</sup>あるのでこれを参照されたい。

4. すずの生成抑制

燃焼系からのすす排出は、すすがベンゾピレンなど多環芳香族系の発ガン性物質を含むため健康に重大な影響を及ぼすことが知られている。すすは天然ガスなどの気体燃料、重油などの液体燃料および石炭等の固

表5 気体燃料からのすす発生条件<sup>20)</sup>

炭化水素	すす発生抑止限界空気比
エタン	0.60
プロパン	0.64
アセチレン	0.48
エチレン	0.55
ベンゼン	0.70

体燃料の燃焼のいずれからも排出されるが、その低減化のための有効な方法は、燃料の種類によって若干異なる。

ガス燃焼では、プレゼンバーナのように燃料と空気とをあらかじめ混合させて燃焼させる形式である予混合バーナを用いれば、表5に示すように、燃料の種類によって空気比=0.6~0.8の範囲まで、すすの発生を抑えることができる。また、予混合に近い旋回乱流火炎も、これとほぼ同様な傾向を示すと考えられる。一方、灯油、重油など、液体燃料の燃焼火炎からのすすの制御は、ガス燃焼に比べて難しい。

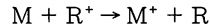
これまでの基礎的な研究結果に基づいて、液体燃料の噴霧燃焼系からのすすの制御法に関し以下の方法が考えられる。

- (1) 排ガス再循環などによって、燃焼用空気のO<sub>2</sub>レベルを低下させる。
- (2) 粗い粒径の噴霧液滴を生成しない噴霧器を用いる。
- (3) 周囲の空気流速を増大して、液滴との相対速度がある遷移点速度を越えるようにする。

特に、(1)の排ガス再循環の効果に関して、実際の噴霧燃焼系を対象として排ガス再循環の代わりにN<sub>2</sub>の希釈によってO<sub>2</sub>濃度を変化させ、すす抑止効果を調べた実験でO<sub>2</sub>濃度が17%まで低下すれば、空気比が1.0に近い低空気比ですすの発生がほとんど抑制されることが示された。

すすの発生抑止には以上の混合の改良、排ガス再循環のほかに、アルカリ土類金属等微量金属の添加が有効であることが知られている。Bulewicsら<sup>20)</sup>はアセチレン-O<sub>2</sub>拡散火炎およびプロパン-O<sub>2</sub>拡散火炎に5×10<sup>-5</sup>mol分率程度の種々の金属添加物を加えて、すす抑止効果を調べている。アセチレン火炎に関してはセシウム(Cs)プロパン火炎に関してはバリウム(Ba)が特に効果的であることがわかる。また、Li, Mgの場合には、金属添加によって逆にすすの発生が促進されることが示されている。金属添加が、すすの発生を抑止するのは、容易にイオン化しやすい金属

(M)が以下のイオン交換反応



によって、すすの発生の核となる高分子量の炭化水素イオン(R<sup>+</sup>)が減少するためと考えられている。

このほか、すす抑制に効果のある新しい燃焼技術として、燃料油と水をエマルジョン状態にして燃焼させる、いわゆるエマルジョン燃焼法がある<sup>20)</sup>。すなわち、エマルジョン燃料が高温域に噴射されると、沸点の低い燃料中の水分が突沸を起こし、その爆発力により、燃料液滴が瞬時のうちに無数の小さな破片になって飛び散るいわゆる二次微粒化現象が生じると考えられる。その結果、小さな液滴が高速で飛びながら燃焼するため、予混合火炎型に近づきすすの発生が抑制される。

実用ボイラーを用いた実験によれば、C重油及びB重油の燃焼において通常の燃焼法に比べて、エマルジョン燃焼法により、60~70%のすす抑止効果が得られている。

## 5. まとめ

以上見てきたように単独の汚染物質の低減化だけを考えても、クリーン燃焼技術だけでは限界があることがわかる。したがって、複数個の汚染物質の低減化処理を行うためには、これらの燃焼技術と事前脱硫技術及び排煙処理技術を組み合わせたクリーン燃焼システムが必要となる。どのような要素技術から構成されるシステムを選択するのは、最終的にはコストの問題になる。以下、システム選択に際して留意すべき点をまとめると、

1) 事前および排煙処理は一般にコストがかかるから、第一段階では、最も低コストの炉内処理法だけで汚染物質を目標レベルまで低減化できるように努める。

2) ある特定の汚染物質を低減化するための炉内処理の要素技術を選択する際には、他の汚染物質の排出への影響を考慮して選択する。例えば、低NO<sub>x</sub>化のための低空気比燃焼は、しばしばCOやすすの排出量の増大を引き起こす。また、同一の低減効率が得られる場合は、燃焼効率、伝熱効率を低下させない炉内処理法を選ぶ。

3) 炉内処理と排煙処理の組合せの場合には、排煙処理を充分考慮した炉内処理法を選択する。例えば、排煙処理で電気集塵器が用いられる場合、集塵効率を上昇させるために燃焼の段階でサブミクロン粒子の生成を抑制する。また、SO<sub>x</sub>中のSO<sub>3</sub>の割合を増大させ

る。

最後に本拙文が今後の地球環境問題解決の技術的側面からの対策を進めていく上で僅かながらでも役に立つならば望外の幸せである。

### 参 考 文 献

- 1) 岡崎健, 西川隆, 大竹一友: 化学工学論文集, 10, 751 (1984)
- 2) 定方正毅, 岡崎健: 化学工学, 51, 822 (1987)
- 3) Hedley, A. B.: J. Inst. Fuel, Apr., 142 (1967)
- 4) Highly, J., Institute of Fuel, Sympo. Series, NO. 1, PAP/D (1975)
- 5) 架谷昌信, 湯沢恩, 荒井紀男: 化学工学論文集, 8, 45 (1982)
- 6) Albanase, et al: Proc. 6th Int. Conf. on FBC Vol. III. p.1060 (1980)
- 7) Shearer, J. A.: Environ. Sci. Technol, 13, 113 (1979)
- 8) Abichandani, J.S., P.J.Loftus, R.C.Diehl and J.A. Woodroffe, Proceedings of 6th Annual International Pittsburgh Coal Conference, p. 2, 76, Sept 25-29 (1989)
- 9) 例えば, 「技術資料: 燃焼に伴う環境汚染物質の生成機構と抑制法」, 日本機械学会 (1980)
- 10) Hori, M.: Twenty-First Symposium (International) on Combustion, p1181, The Combustion Institute (1986)
- 11) Hori, M.: Twenty-Second Symposium (International) on Combustion, p1175, The Combustion Institute (1988)
- 12) Roby, R. J. and C. T. Bowman: Comb. Flame, 70, 119 (1987)
- 13) Malte, P. C. and D. T. Pratt: Comb. Sci. Technol. 9, 221 (1974)
- 14) Kramlich, J. C., R. K. Nihart, S. L. Chen, D. W. Pershing and M. P. Heap: Comb. Flame, 48, 101 (1982)
- 15) 定方正毅, 縄田誠, 国井大蔵: 化学工学論文集, 5, 111 (1979)
- 16) Wendt, J. O. L. and D. W. Pershing: Seventeenth Symposium (International) on Combustion, p77, The Combustion Institute (1978)
- 17) Sadakata, M., Y. Fujioka and K. Kunii: Eighteenth Symposium (International) on Combustion, p77, The Combustion Institute (1978)
- 18) 冲上昇ら: 第14回燃焼シンポジウム前刷集, p21 (1976)
- 19) 高橋恭郎ら: 三菱重工技報, 17, 929 (1980)
- 20) Lyon, R. K.: Int. J. Chem. Kin., 8, 315 (1976)
- 21) 豊永肇: '89化学プラント技術会議テキスト, 9-1-1, 1989年11月
- 22) Sjögren, A., Fourteenth Symposium (International) on Combustion, p.919, The Combustion Institute (1972)
- 23) Bulewicks, E. M., D. G. Evas and P. J. Padley, Fifteenth Symposium (International) on Combustion, p.1461, The Combustion Institute (1974)
- 24) 岩間彬ら: 燃料協会誌, 58, p.432 (1979)

## お知らせ

## 第4回石炭化学コロキウムのご案内

事務局に下記の案内状が届きましたのでお知らせいたします。

主催 日本化学会東北支部

日時 平成2年7月16, 17日

会場 ホテルサンルート蔵王 (宮城県刈田郡蔵王町遠刈田温泉)

参加費 一般 12,000円 学生 10,000円

(宿泊, 食事, 懇親会費を含む。当日, 会場で集めます)

趣旨 石炭化学の基礎的な諸問題および各種の応用技術の展開について勉強, 討論し, 研究者間の交流をはかる。

参加申し込み

方法: 氏名, 所属 (学生の場合は学年も), 連絡先, 電話番号を明記し, 下記へ葉書でお申し込み下さい。

締切: 6月30日 (定員 80名, 受付順)

申し込み・問い合わせ先 〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉東北大学工学部

生物化学工学科 新井 邦夫

TEL 022-222-1800 内4394

FAX 022-268-2948