

微粉炭燃焼

Pulverized Coal Combustion

加 藤 幸 三*

Kozo Kato

1 ま え が き

石油代替燃料の一つとして、石炭が重要視されているが、電気事業審議会の中間報告(昭和54年12月)によれば、石炭火力は昭和53年度末440万kW(構成比3.7%)を、昭和70年度末では3300~3600kW(構成比11.9~13.0%)に増加させることが必要とされている。石炭火力では通常微粉炭を使用しているが、微粉炭燃焼は一応確立された技術として、特に海外で広く採用されている。

しかし、わが国において石炭を燃料に使用するためには、従来の燃焼技術だけでは不十分である。すなわち、①大気汚染、等の原因となる各種の有害排出物の防止技術、②多様な炭種に対応する技術、の確立が必要であると考えられる。

①については、NO_x、SO_x、CO、未燃炭化水素、煤じん、等の有害排出物の除去技術だけでなく、それらの除去装置からの2次処理問題や、貯炭場における粉じん、等の大気、水質汚染対策が十分なされねばならない。②については、わが国で産出する石炭量は僅かであり、今後世界各産地から輸入される多様な燃料を使用することになると思われるが、石炭の性質は各地各様で極めて変化に富んでいる。①項の有害排出物対策にも大きく影響するが、伝熱面へのスラッシングや、ファウリング(4.1参照)、灰中未燃分、安全対策、等、問題が多い。

この他、給炭、燃焼、灰処理に至る全システムの自動化技術も重要であるが、ここではNO_x低減技術を中心として、微粉炭燃焼技術について述べる。

2 微粉炭燃焼

2.1 石炭の性状

表1に、国内および海外炭でボイラの微粉炭燃焼に使用されているものの例を示す¹⁾。産地によってその性状が大きく異なっていることがわかる。

これらの石炭は、C重油(N分0.2%程度)等の粗重油に比して、含有窒素分は0.8~1.5%とかなり大きい、したがってNO_x発生濃度が高く、その抑制技術として低NO_x燃焼および排煙脱硝技術が重要である。また、灰の熔融温度が1300°C程度の低い種類もあるが、このような場合炉壁のスラッシングや、伝熱管へのファウリング、等の灰の付着対策が必要になる。

燃料比(固定炭素分/揮発分)は、石炭の燃焼性を判断する目安になり、一般に燃料比が高い程、燃焼性が悪くなる。外国炭では燃料比が1.5~2.0程度の高いものが使用されているが、これらは低NO_x燃焼時に、灰中未燃分(主として炭素)が増大する恐れがあり、その対策が必要になる場合がある。

2.2 NO_x生成に関する基礎研究

(1) Fuel NO_xとThermal NO_x

NO_xとは一般にNOとNO₂の合計であるが、燃焼により発生するNO_xは、その90%以上がNOで、残りがNO₂と言われている。

微粉炭燃焼により生成するNO_xは、空気中の窒素と酸素が高温において反応し生成されるThermal NO_xと、燃料中の窒素と空気中の酸素との反応によるFuel NO_xの2種類に分類される。さらに、石炭燃焼ではFuel NO_xは石炭の揮発分に含まれる窒素に起因するVolatile NO_xとチャー(残留炭素質)に含まれる窒素に起因するChar NO_xに分けられる。石炭の燃焼により生成されるNO_xはFuel NO_xが大部分であり、全NO_xの80%以上を占めている。

以上、石炭のFuel NO_xの生成径路を図示すれば、概略図-1のようになる。

* 川崎重工(株)技術研究所熱工学研究室長
〒673 明石市川崎町1-1

表 1 瀝青灰の性状

項目 銘柄	発熱量 (kcal/kg)	表面湿分 (%)	固有水分 (%)	灰分 (%)	揮発分 (%)	固定炭素 (%)	全S分 (%)	N分 (%)	灰融溶温度 (°C)	HGI
三池炭	6,800	7.0	1.2	17.5	39.1	42.2	2.5	0.8~1.1	1,310	65
太平洋炭	6,100	7.0	5.9	14.1	42.3	37.7	0.27	〃	1,300	40
北炭	6,200	7.0	2.5	18.8	39.9	38.8	0.26	〃	1,380	50
大同炭	6,800	6.2	2.8	9.5	28.5	59.2	0.8	0.8	1,260	51
ブレアソール炭	6,800	15.2	4.7	9.6	29.4	56.3	0.5	1.5	1,520	68
ドンパートン炭	6,000 ~6,200	—	1.4	24.4	22.9	51.3	0.4	1.0~1.4	1,450以上	59

(2) NO_x生成の実験例

石炭の種類は非常に多く、微粉炭燃焼研究は各国で鋭意行われているが、Pershing らの研究²⁾によると、(1)項で述べたNO_xの内訳は図-2のようになる。

使用石炭は西ケンタッキー炭で、N分1.4%、S分3.1%、揮発分36.1%、固定炭素51.2%、灰分7.8%、発熱量6917 kcal/kg (N分、S分はドライベース)である。

全NOは微粉炭を空気で燃焼させて実験計測したものであるが、Fuel NOは空気の代りにAr/CO₂/O₂の混合ガス(21%O₂/18%CO₂/61%Ar)を用い、空気中のN₂の酸化を除去して実験計測している。Char NOは計算値である。

ここに示すように、通常の燃焼ではVolatile NOが主要なものであるが、その発生濃度には空気過剰率の影響が大きい。これはNO_x発生濃度抑制のためには、揮発分が燃焼する期間は微粉炭と2次空気の混合を遅らせることが重要であることを示している。

次に、図-3にVolatile NOとChar NOが火炎温度により、どのように影響されるかを示す。火炎は乱流拡散火炎で温度分布をもっているため、断熱火炎温度を代表温度として表わしている。Volatile NO、Char NOとも、すなわち、Fuel NOは火炎温度の影響は余り受けないことを示している。

燃料中の窒素は、すべてNO_xに変換されるのではなく、その一部分がNO_xとなり、他はN₂となる。その変換率の実験例を図-4に示す³⁾。

微粉炭のFuel NO変換率は、燃料と酸素との混合状態や、燃料の種類その他燃焼条件により変化しますが、一般には重油等の液体燃料に比して小さい場合

図-1 Fuel NO_x生成経路

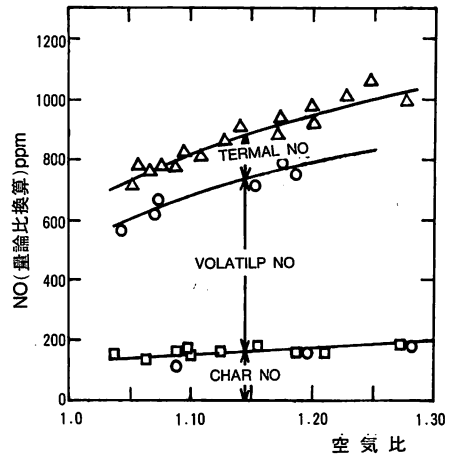


図-2 NO_xの内訳け (西ケンタッキー炭使用)

が多い。

3 微粉炭燃焼装置

3.1 低NO_x燃焼技術

ボイラにおける微粉炭燃焼方式としては、バーナ配置によってフロントファイアリング(前面燃焼)、コーナーファイアリング、U型ファイアリング、等に大別

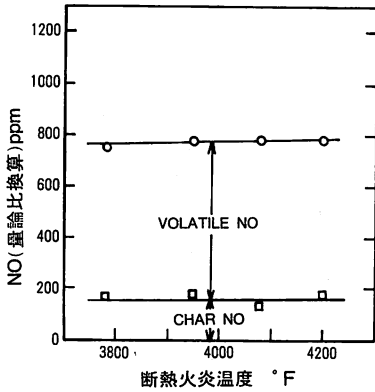


図-3 Volatile NOとCharNOに及ぼす火炎温度の影響

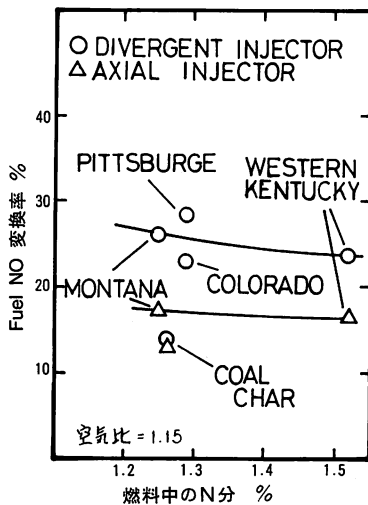


図-4 Fuel NのNOへの変換率

できる。これらの燃焼方式ごとに、最適なNO_x低減技術が適用されているが、その主要な方法としては、①2段燃焼法、②排ガス再循環法、③低NO_xバーナ、等がある。

以下に、その概要を述べる。

(1) 低NO_x燃焼の基礎実験

① 2段燃焼法

1段目燃焼を空気不足にして、NO_x生成を抑え、2段目空気吹込みにより、未燃分を完全に燃焼させる方法を2段燃焼法と称している。この方法は、Thermal NO_x、Fuel NO_xの何れの低減にも有効である。

図-5にNO_x低減に及ぼす2段燃焼用空気の吹込み位置の影響を示す⁴⁾。炉は内径0.6m×長さ4.15

mの横置円筒炉で、炉壁は耐火断熱材でライニングされている。燃料は国内炭Aで、N分1.29%、S分0.30%、揮発分29.3%、固定炭素32.0%、灰分38.7%、発熱量4990 kcal/kg(高位(乾炭))、燃焼量は25 kg/hである。

通常燃焼(2段燃焼割合TSC=0%)では、揮発分が燃焼するバーナ近傍で、NO_xは局所的に高濃度になるが、次第に拡散混合が進み、かなり高い濃度そのまま排出される。

一方、2段燃焼では、2段目空気吹込みまでは、還元雰囲気下でNO_xの分解が進み、2段目空気との混合によりNO_xが再発生するが、その量は僅かであり、排ガスは通常燃焼に比べて、遙かに低いNO_x濃度になっている。また、2段目空気吹込み位置が下流になる程、NO_x分解量は多く、再発生量は少ない。

② 排ガス再循環法

排ガス再循環法は、温度の低い排ガスを燃焼用空気に混入して、火炎温度を低く抑えて、NO_x発生濃度を低減する方法である。

前述(2.2(2))のように、微粉炭燃焼ではFuel NO_xの火炎温度の影響は大きくない。一方、温度の影響の大きいThermal NO_xの全NO_xに占める割合は小さいので、排ガス再循環を30%程度行っても、NO_x低減率は20%程度で、大きな効果は得

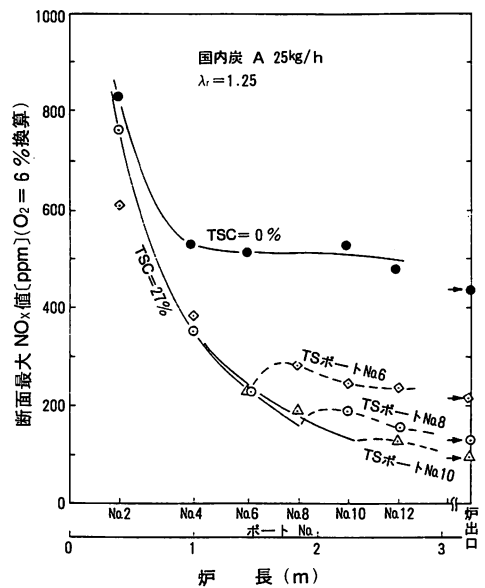


図-5 2段燃焼用空気の吹込み位置の影響

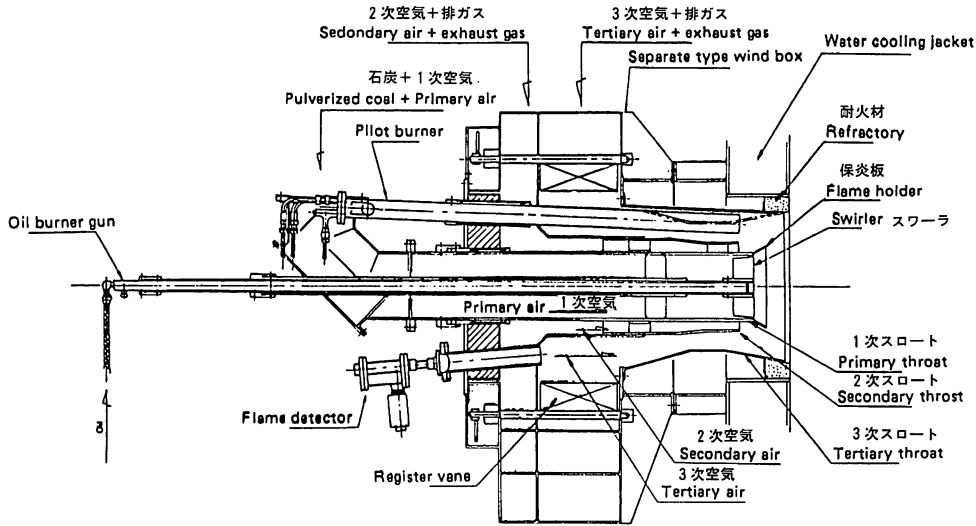


図-6 低NO_x微粉炭バーナ(フロントファイリング用)

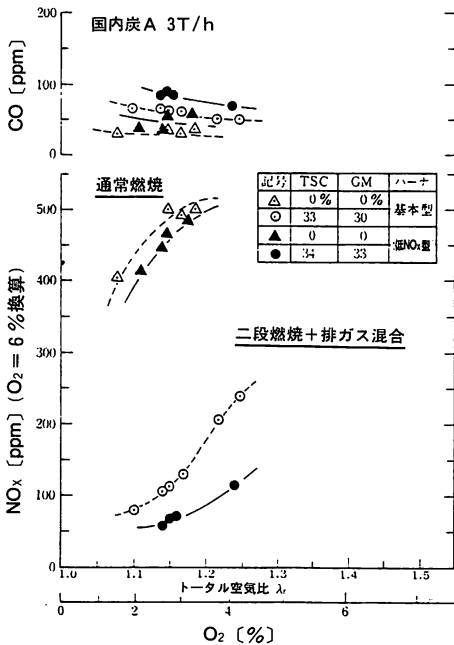


図-7 微粉炭バーナ NO_x 特性

られない。

(2) 低NO_xバーナ

現在、微粉炭燃焼用低NO_xバーナの開発・実用化が、各社で進められているが、事例により、それらの構造および特性について述べる。

図-6は、フロントファイリング用微粉炭低NO_xバーナである⁴⁾。そのNO_x特性を図-7に示す。通常燃焼では500 ppm程度の高いNO_x値になっている

が、2段燃焼と排ガス混合を同時に行った場合には、100 ppm以下の低い値を得ている。

図-8に微粉炭燃焼モデルを示す。微粉炭は搬送用1次空気によって炉内に吹込まれるが、(I)の領域では空気不足状態で、保炎と揮発分の発生・燃焼を行い、NO_xの急激な発生を抑え、(II)、(III)の領域で2次、3次空気と残りの揮発分やチャーと混合し、徐々に燃焼させることによって全体として低NO_x濃度を達成している。

このような考え方は、最近の低NO_xバーナに共通のもので、これらの結果は、前記の基礎研究で述べたNO_x特性と、ほぼ同様の傾向を示している。

図-9に、コーナーファイリング用微粉炭バーナを示す⁵⁾。不活性ガス(SGR)によって、1次燃焼領域をシールドし、局所の高濃度のNO_x発生を抑制し、炉全体の燃焼ガスの施回力を利用して、未燃分と空気の混合を良好にして、未燃損失を少なくしている。

2段燃焼時には、煤じん等の未燃分が増える傾向にあるが、石炭燃焼では、特に燃料比の大きい場合、灰中未燃分の低減が問題になる場合がある。図-10に、リグナイト(低品位炭)について、燃焼室温度をパラメータとして、滞留時間と重量損失との関係の実験結果が示されている⁶⁾。燃焼室温度によって石炭粒子の重量減少が大きく異なることがわかる。これは灰中未燃割合は、燃焼室温度と密接な関係があることを示しており、特に低NO_x対策として2段燃焼を行う場合には、2段目空気吹込み点のガス温

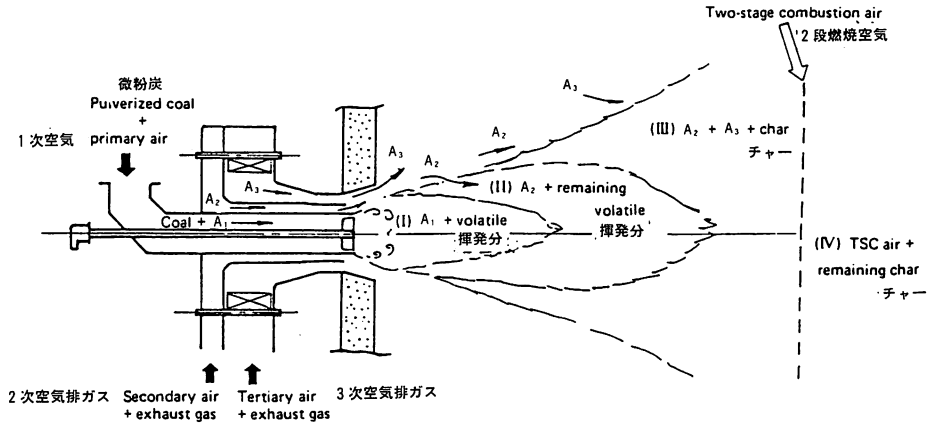


図-8 低 NO_x 微粉炭燃焼モデル

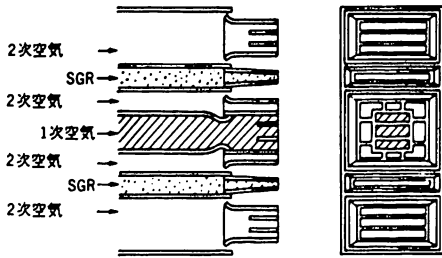


図-9 低 NO_x 微粉炭バーナ
(コーナファイリング用)

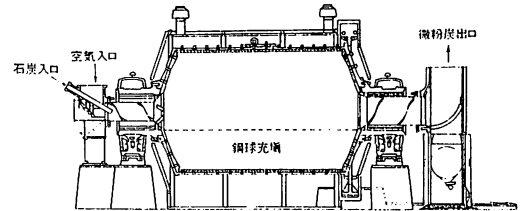


図-11 横型微粉炭機

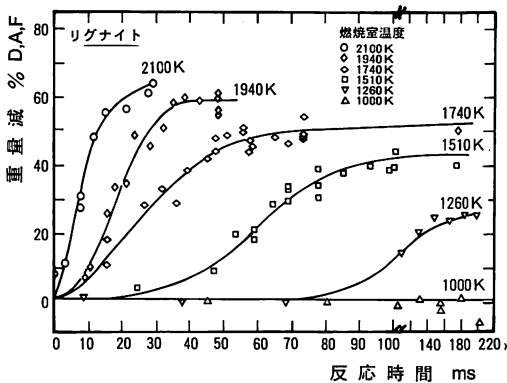


図-10 各種燃焼温度における重量減少

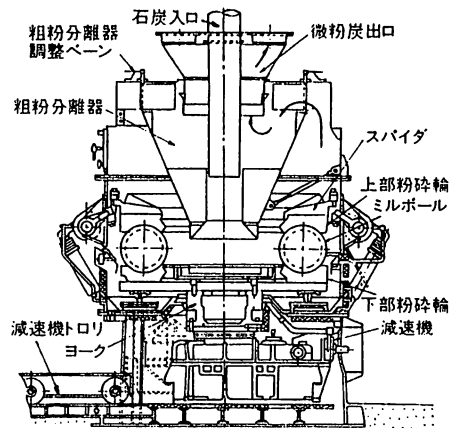


図-12 縦型微粉炭機

度に留意する必要がある。

3.2 微粉炭製造装置⁷⁾

微粉炭機(ミル)の型式には、横型、縦型、ピーターミル、等がある。

図-11に、横型ミルの例を示す。水平軸のまわりに回転するドラムの内部に鋼製の球が充填され、球の衝撃力で石炭を粉砕する方式である。構造簡単であるが、

所要スペースや動力が大きい。

図-12に、縦型ミルの例を示す。数個の鋼球をリングではさみ、一方のリングを垂直軸のまわりに回転し、石炭を粉砕する。鋼球の摩耗は大きい、据付面積が小さく、動力費も低い。

石炭燃料としては、将来、多量の水を含む亜瀝青炭、褐炭、等の低品位の海外炭を使用する場合が多く

なると考えられるが、このような場合には微粉炭で粉砕する前に、予め水分除去が必要になり、各国で脱水技術の開発が進められている。

石炭の粉砕の難易を表す値として、ハードグループ指数 (HGI) がある。この指数が大きいものは粉砕し易く、逆に小さいものは粉砕し難いことを示している。微粉炭機の容量は、ハードグループ指数50を基準としている。各種石炭のハードグループ指数の例を表1に示す。

4 微粉炭燃焼における障害

4.1 灰のスラッキングとファウリング

石炭燃料の需要増大に伴い、低品位の石炭の使用も試みられるようになってきている。微粉炭燃焼における特有な問題として、灰関連を挙げることができる。そのうち、炉壁のスラッキングと伝熱管のファウリングが、特に問題である。

これらは、伝熱面への熱吸収を阻害し、ボイラ等の熱効率の減少や、各部伝熱面への熱バランスを崩し、スラッグの落下による火炉ホッパー部の破壊、各伝熱面の腐食、等、多くの障害をもたらすもので、どのような条件で、障害が発生するか、その究明と対策が必要である。

(1) スラッキング

スラッキングは、石炭灰が燃焼ガス中で軟化・溶融し、伝熱面に接触し冷却されて、固化付着する現象である。特に、液状の灰と固体の灰の混合物は、プラスチックスラッグといわれ、大きな堆積物になる恐れがある。

灰中のNa₂O、K₂OやFe₂O₃は、スラッグに大きな影響を与える。次式で示すスラッキングファクターは、スラッキング性の目安になる⁸⁾。

$$R_s = \frac{\text{塩基性分}}{\text{酸性分}} \times (\text{S分})$$

$$= \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2} \times (\text{S分})$$

R_sが2.0以上は、スラッキング性が高いと言われている。

図-13に、灰の初期軟化温度と鉄分との関係を示す⁸⁾。酸化雰囲気と還元雰囲気では、軟化温度にかなりの差があるが、鉄分の影響が大きいことがわかる。

図-14に、3種の灰の粘度と温度との関係を示す⁹⁾。図中、IIは典型的なスラッグで、温度が下ると、ガ

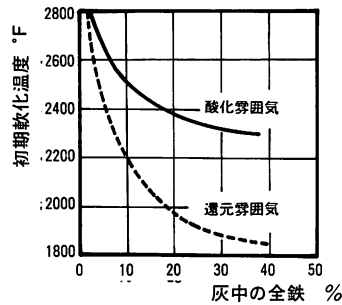
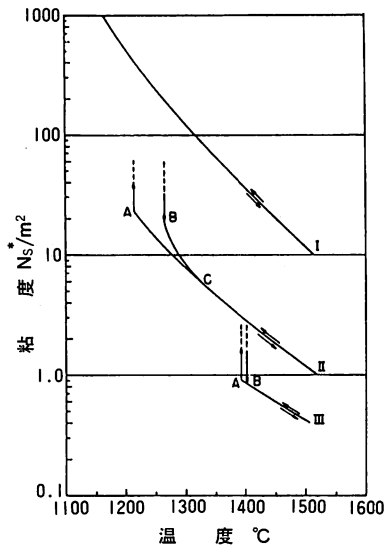


図-13 鉄分による灰の軟化温度



スラッグ成分	I	II	III
SiO ₂	56.9	43.9	40.6
Al ₂ O ₃	18.8	23.8	13.4
Fe ₂ O ₃	12.9	12.1	34.1
CaO	8.9	20.2	9.2
MgO	1.2		1.2
Alkali	1.3	—	1.5

* 1 Ns/m² = 10P (poise)

図-14 スラッグの温度と粘性

ラス状の熔融状態から、A点で準プラスチック性固体に急変する。

火炉は、炭種に応じて、スラッキングをできるだけ少くするよう、火炉の大きさや形状、水冷壁の面積や配置、等を考慮する必要がある。また、伝熱面に接するガスを酸化雰囲気に保つ工夫が必要な場合もある。

(2) ファウリング

ファウリングは、灰中の揮発分が燃焼ガス温度の低下とともに凝縮し、それが凝集剤となって灰が後部伝熱面に付着成長する現象である。その付着力は、灰の組成や高温ガス中での保持時間によって異なり、保持時間が長い程、付着力は大きい。

ファウリングファクターの一例として、次式が使われている。

$$R_F = \frac{\text{塩基性分}}{\text{酸性分}} \times \text{Na}_2\text{O}$$

R_F が大きい方が、汚れが大きい傾向があり、0.5 以上はファウリングが多いと言われている。

4.2 微粉炭燃焼における排出物

化石燃料の燃焼によって、多種の有害物質が排出されるが、そのうち石炭は一般に最も発生量が大きい。有害成分としては、 SO_x 、 NO_x 、フライアッシュ、 CO 、未燃炭化水素、その他重金属、POM(多環芳香族物質)、等が考えられる。 SO_x 、 NO_x 、フライアッシュについては、従来から、その生成と低減技術について研究されているが、他は、今後研究が進められることになろう。

SO_x 濃度は灰中に一部残留するが、燃料成分から、ほぼ推測できる。 NO_x については、前述のように燃焼により発生濃度が大きく異なり、現在、その低減技術の研究開発が鋭意行われている。一方、 SO_x 、 NO_x 、フライアッシュに対しては、排煙脱硫・脱硝、集じん技術を組合せて、総合排煙処理技術として、最も効果的な方法も開発されつつある。

5 あとがき

石油代替燃料として、石炭に大きな期待がかけられ、多くの利用技術が開発されつつあるが、当面は微粉炭燃焼が最も広く用いられるであろう。

微粉炭燃焼に対する NO_x 、ばいじん、などの大気汚染防止技術は、着実に進展向上しているが、なお、研究開発すべき課題も多く、今後さらに、それらに対する技術開発が広く、かつ、強力に行われ、石炭の有効利用が促進されることと思う。

参 考 文 献

- 1) 鈴木博幸：石炭，火力原子力発電，Vol. 27, No.10, p. 98, 1976
- 2) D. W. Pershing J. O. L. Wendt : Relative Contribution of Volatile Nitrogen and Char Nitrogen to NO_x Emissions from Pulverized Coal Flames, Ind. Eng. Chem. Process Dev., Vol. 18, No. 1, p. 60, 1979

- 3) D. W. Pershing, J. O. L. Wendt : Pulverized Coal Combustion : The Influence of Flame Temperature and Coal Composition on Thermal and Fuel NO_x , 16th Symp. (Int.) on Comb. p. 389, 1976
- 4) 信濃, 芝山, 久世, 蔵田, 藤井 : 低 NO_x 微粉炭燃焼技術の開発, 川崎重工技報, 76号, p. 80, 1980
- 5) 佐藤, 国本 : 松島火力発電所 1, 2号 500 MW 微粉炭燃焼ボイラの設計, 火力原子力発電, Vol. 30, No.11, p. 33, 1979
- 6) H. Kobayashi, J. B. Howard, A. F. Sarofin : Coal Devolatilization at High Temperature, 16th Symp. (Int.) on Comb. p. 411, 1976
- 7) エネルギーセンター編 : エネルギー管理技術, 昭和55年
- 8) 月井 : 最近の石炭焚きボイラ設計の要点, 火力原子力発電, Vol. 31, No. 9, p. 965, 1980
- 9) H. B. Palmer, J. M. Beer : Combustion Technology, 1974

