

第2回 石炭利用技術会議講演集

平成4年9月

主催 (財)石炭利用総合センター
後援 資源エネルギー庁石炭部

3. 燃 燒 面 か ら み た 石 炭 の 品 質 設 計

～混炭および粒径制御によるNO_x、未燃分の変化挙動～

キーワード：石炭、微粉炭燃焼、燃焼効率、NO_x、混炭、粒径

出光興産（株）新燃料部・石炭研究所 神原 信志◎
南波 清
富永 浩章

1. ま え が き

最近の発電用・産業用石炭焚きボイラでは、燃料の安定確保や燃料コストの低減等を計るために、豪州炭の他、米国炭、インドネシア炭等、様々な産炭国の石炭を使用している。

石炭は、その炭質によって、粉碎性、燃焼性、NO_x、SO_x発生性、火炉壁への灰付着性、電気集塵性等に障害を生じさせる場合もある。このような石炭は、通常2～3炭種の石炭を混合し、特に障害のある特性を改善して使用されている。しかしながら、混炭時のこれらの特性の変化挙動を調べた研究は少なく、トライ&エラーあるいは加成性を前提として、混合炭種や混合比率を決定しているのが現状である。

今後、品質の劣る石炭でさえも高効率で燃焼できる技術が必要とされていることから、混炭による品質設計について定量的な知見を得ることは、非常に重要である。

そこで本研究では、特に未燃分とNO_x発生性について、2炭種混合時の変化挙動を調べ、混炭の品質設計をする上で、留意すべき点を明らかにした。

また、最近、微粉炭粒径を小さくすることで、炭化度が高く燃焼性に劣る石炭の燃焼効率の向上を目指す試みも行なわれている¹⁾。燃焼性やNO_x発生性に及ぼす粒径の影響については、比較的多くの研究がなされているが²⁾³⁾、炭種の影響と粒径の影響の両面から検討した研究はほとんどない。本研究では、微粉炭の粒径分布を変えた時の未燃分とNO_x発生性の挙動を調べ、炭種の影響を検討した。この結果は、粒径制御による燃焼効率改善はもちろん、炭種毎の粉碎機運転条件の適切な設定に非常に有効である。

2. 実験装置および方法

燃焼性（未燃分およびNO_x発生量）の評価は、乱流燃焼実験炉（乱流炉）を用いて行なった。乱流炉の構造を図1に示す。燃焼炉は、内径φ0.3m、長さ2.8mの円筒状縦型の耐火材構造である。この実験炉は、低NO_x燃焼法として、実機で一般に採用されている二段燃焼法を用いている。実機における様々な運転条件に対応できるように、二段燃焼空気の吹込み位置や空気量を自由に変えられる特長をもつ。標準の運転条件(旋回強度、1次・2次空気量、二段燃焼空気の割合および吹込み位置等)は、産業用実機ボイラ(蒸発量140T/H)における燃焼特性ならびにNO_x排出レベルに合致するように予備実験にて設定されている。

微粉炭は、空気比一定 ($\lambda=1.20$) の条件で供給した。すなわち、炭種によって供給量は異なるが、6~7kg/hrの供給速度で搬送用1次空気(6Nm³/hr)によりシングルバーナに供給される。2次空気は、350℃に予熱した後、旋回を与え炉内に導入した。二段燃焼用空気(OFA:Over Fire Air)もまた、350℃に予熱した後に、バーナから36cm~166cmの間の9ポートのうち1ポートを選んで炉内に吹込む。

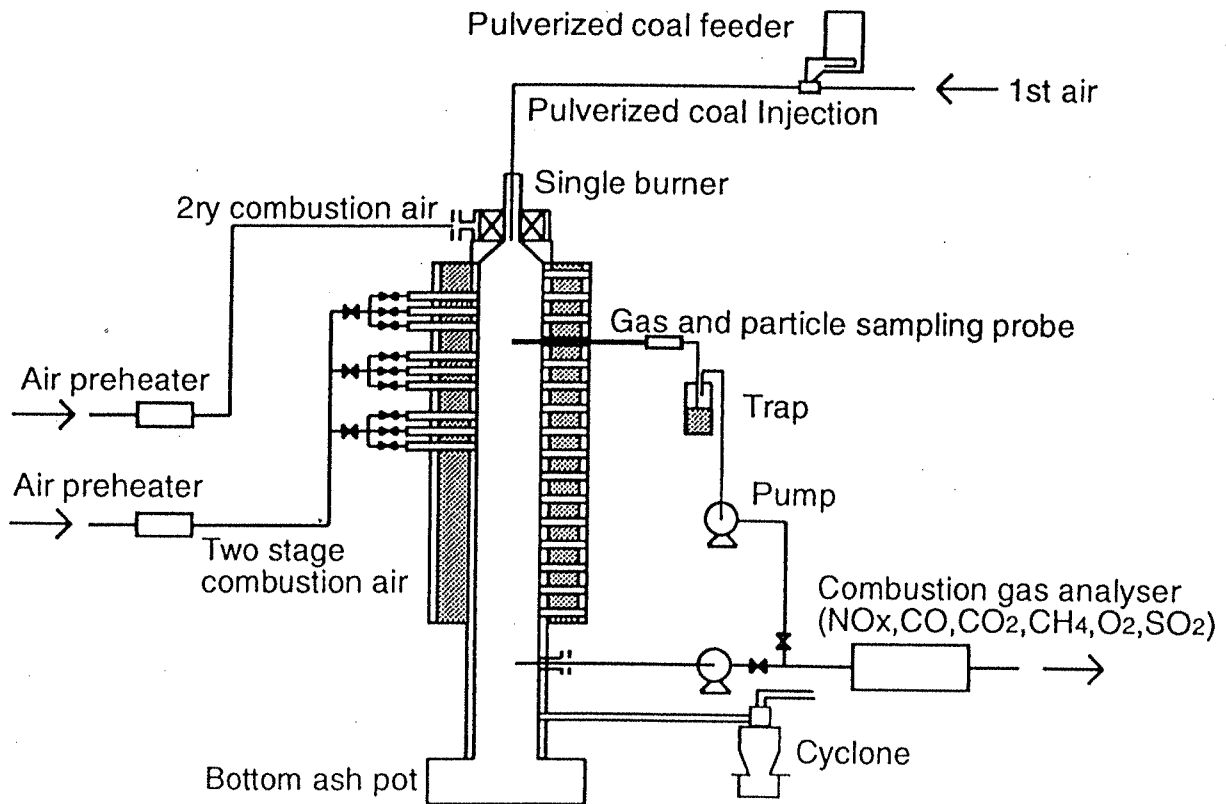


図1. 乱流炉の概略図

炉体垂直方向には、約15cm間隔で粒子およびガスのサンプリング座が取付けてある。燃焼が定常に達したことを確認した後、サンプリング座にSUS製水冷プローブを挿入し、燃焼途中の粒子およびガスを等速吸引し、採取した。円筒ろ紙で粒子を捕集した後、ガス組成を連続で分析した。捕集した粒子は、工業分析および元素分析を実施した。炉内温度分布は、先端部を開放したアルミナ保護管をもつR型熱電対により測定した。これらの測定は、いずれも炉中心軸上の位置で行なった。

表1に実験条件を示す。燃焼試験は、RUN1～RUN5の運転条件で各炭種について行った。RUN1～RUN4は二段燃焼であり、RUN5は二段燃焼を行っていない。それぞれの運転条件下で、炉底およびサイクロンに捕集されたフライアッシュより未燃分を測定した。またNO_x,SO₂等の排ガスは、煙道にて各々の運転条件下で測定した。

表1 乱流炉の運転条件

項目	単位	RUN1	RUN2	RUN3	RUN4	RUN5
1次空気流量	Nm ³ /hr	6	←	←	←	←
2次空気流量	Nm ³ /hr	36	40	30	36	52
2次空気温度	°C	350	←	←	←	←
二段燃焼空気流量	Nm ³ /hr	16	12	22	16	0
二段燃焼空気温度	°C	350	←	←	←	-
二段燃焼空気位置	cm	94	←	132	←	-
煙道入口酸素濃度	vol %	4.2	←	←	←	←
OFAファクター	-	12.3	9.3	24.3	17.7	0

表1中、二段燃焼空気位置とは二段燃焼空気の吹き込み位置のバーナからの距離を示す。また、OFAファクター(OFA_f)とは、二段燃焼の強さを定量的に表すために(1)式で定義したものである。

$$OFA_f = \frac{\text{二段燃焼用空気量}}{\text{燃焼用空気量}} \times \frac{\text{二段燃焼空気吹き込み位置}}{\text{有効炉長}} \quad \dots (1)$$

すなわち、OFAファクターの数値が大きいほど二段燃焼は強い（還元雰囲気における粒子滞留時間が長い）運転条件となる。

表2に、本試験における測定項目および測定方法を示す。

尚、燃え切り性については、未燃率と灰中未燃分の両面から評価を行った。ここで、未燃率とは(2)式で定義されるもので、石炭中の可燃分（固定炭素と揮発分）のうち燃え残った割合を示すものであり、一般に用いられる灰中未燃分とは意味が異なる。

$$\text{未燃率(\%)} = \frac{\text{灰中未燃分}}{(100 - \text{原炭灰分(d.b)})} \times \frac{\text{原炭灰分(d.b)}}{(100 - \text{灰中未燃分})} \times 100 \quad \dots (2)$$

表2 測定項目および測定方法

測定項目	測定方法	備考
1. 運転データ 空気流量、圧力、温度 微粉炭供給速度	中央制御装置 ロードセル重量	一部マニュアル計測 経時変化記録
2. 排ガス組成測定 O ₂ CO CO ₂ CH ₄ SO ₂ NO _x	磁気式 赤外線式 赤外線式 赤外線式 赤外線式 常圧化学発光式	連続分析 連続分析 連続分析 連続分析 連続分析 連続分析
3. 灰中未燃分	灼熱減量法	炉内およびフライアッシュ

3. 使用石炭の性状および粒径分布

表3に、試験に用いた石炭の性状を示す。主に豪州炭であるが、混炭のベース炭としては、炭化度の比較的低い米国炭あるいはインドネシア炭を用いた。燃焼性が著しく悪い石炭の混炭による改善の可能性を探索するため、燃料比が5.1のCJ炭を選定している。

AC, AE, AD炭については、粒径分布を変化させ、燃焼性やNO_x発生性に及ぼす粒径の影響および炭種の影響を調べた。微粉炭粉砕機は、粉砕処理能力250kg/hrの縦型ローラーミルを用いた。運転条件は、粉砕量およびローラー圧力を一定にし、回転分級機のセパレータ回転数を変化させることによって微粉炭の粒径分布を変えた。

表4に、これらの石炭の粒径分布を示す。粒径分布は、平均粒径(D_p)、体面積平均径(D_{p32})、200メッシュパス重量割合(-200)として表した。各石炭略号の添字f, m, lはそれぞれ小粒径(fine)、中粒径(middle)、大粒径(large)を表す。

表3 使用石炭の性状

石炭略号	工業分析(d.b)			元素分析(d.a.f)			
	VM	Ash	F.R	C	H	N	S
AC	36.2	13.2	1.40	81.07	5.80	1.55	0.52
BL	39.9	7.3	1.15	74.15	5.30	1.00	0.08
BF	24.4	16.0	2.45	84.15	4.67	1.59	0.37
BD	20.2	14.6	3.22	86.21	4.86	1.60	0.34
AM	22.1	9.0	3.12	88.63	5.16	1.42	0.48
CJ	13.5	17.4	5.14	87.13	3.78	1.85	0.30
AI	24.3	16.2	2.44	84.29	4.86	1.75	0.32
AE	36.0	12.6	1.43	80.10	5.54	1.67	0.56
AD	26.1	14.0	2.30	84.62	5.30	1.75	0.59

表4 各炭の粒径分布

	石炭略号および粒径区分								
	ACf	ACm	ACl	AEf	AEm	AEI	ADf	ADm	ADl
Dp	40.6	45.5	53.6	31.8	38.0	42.5	24.2	29.7	36.9
Dp ₃₂	79.5	105.4	114.1	74.9	98.8	106.8	91.5	98.0	110.8
-200	80.4	69.5	61.2	86.6	76.8	70.4	86.6	81.6	71.9

4. 実験結果および考察

4. 1 混炭による未燃分・NO_xの変化特性

(1) 未燃率・NO_xの一般的な変化挙動

AC炭とBF炭を混合した場合の、未燃率とNO_x発生量の変化挙動を、OFAファクターをパラメータとして、図2および図3に示す。図中の線は、加成性（混炭割合の加重平均値）が成り立つと仮定した時の値を示す。

混炭における未燃率の変化挙動は、OFAファクターが小さいとき（二段燃焼空気が少ないか、バーナー近傍に注入されている時）、加成性が成り立ち、OFAファクターが増加するにしたがって加成性より未燃率が高くなることがわかる。一方、NO_x生成量は、OFAファクターが小さいとき、加成性よりNO_x生成量が高くなり、OFAファクターが増加するにしたがって加成性が成り立つことがわかる。

従来、混炭時における未燃分およびNO_xの変化挙動は、加成性が成り立つと考えられている。しかし本実験結果から、混炭における未燃率・NO_xの変化挙動は、OFAファクターすなわち、ボイラタイプや運転条件によって異なることが明らかとなった。このような挙動は、AC/BD混炭およびAC/AI混炭においても同様であった。

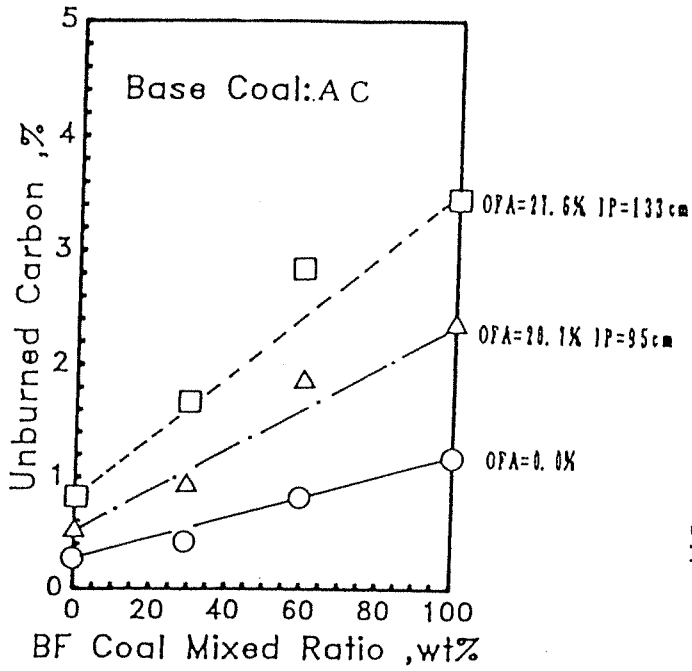


図2. AC/BF混炭の未燃率の変化

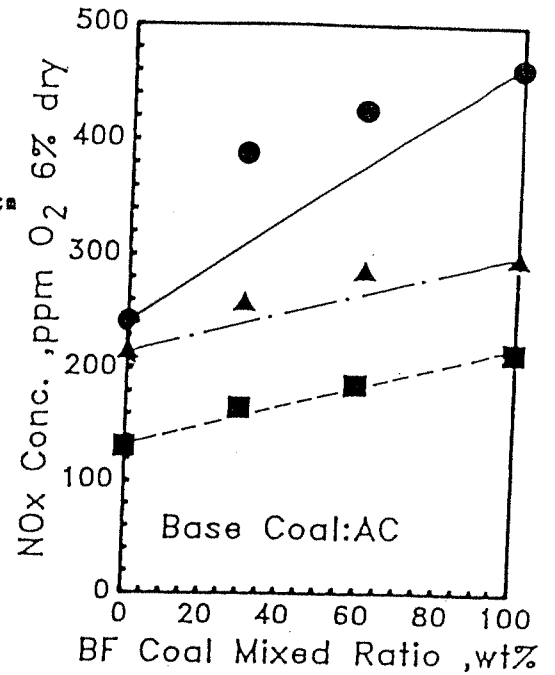


図3. AC/BF混炭のNO_x発生量の変化

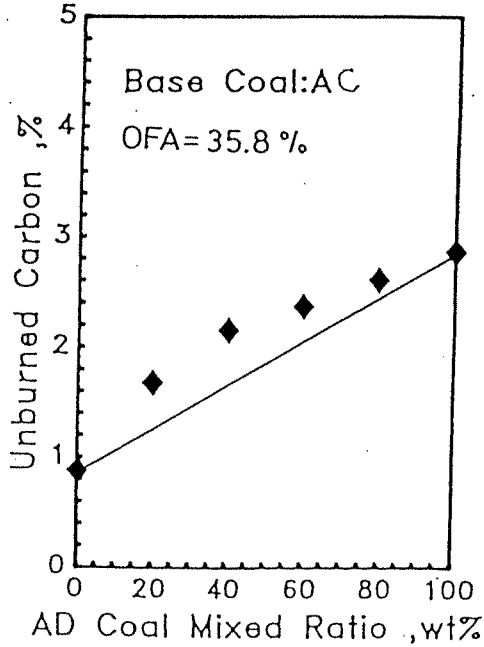


図4. 実機におけるAC/ADの未燃率変化

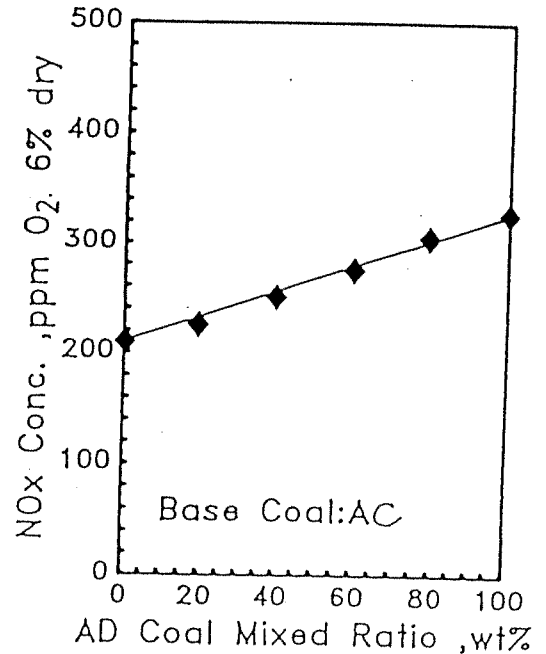


図5. 実機におけるAC/ADのNO_x変化

図4および図5は、蒸発量200t/hrの微粉炭ボイラにおける、AC/AD混炭の場合の未燃率とNO_x排出濃度の変化を示す。燃え切り性、NO_x発生性共にAC炭よりもAD炭の方が劣っているため、AD炭の混炭率を増加させるに従って未燃率、NO_x排出量は増加する。未燃率とNO_x排出濃度の変化挙動をみると、未燃率は加成性よりも高い値となり、NO_xは加成性が成立していることがわかる。このボイラは、全空気量に占める二段燃焼空気の割合が35.8%と非常に多く、OFAファクターは大きい条件にある。したがって、実験炉で得られた混炭特性が、実機でも同様に起こっていることが確認された。

以上の結果より、未燃率とNO_x排出濃度について、混炭による品質設計を行なう場合には、対象ボイラのOFAファクターを考慮し、加成性が成立する条件か否かを事前に知っておく必要がある。

(2) 混合炭種の組合わせによる未燃率・NO_xの改善効果

多くの混炭組合わせにおいては、前項で述べた特性を示す。しかし、様々な混炭を組合せて実験を重ねた結果、特定の混炭組合せにおいて、未燃率やNO_x濃度が改善されるという結果が得られた。

図6および図7は、BL/AM炭の混炭における未燃率とNO_x発生量の変化を示したものである。BL炭は米国西部炭で、燃焼性に非常に優れた特性を持つ。この混炭組合せにおいては、OFAファクターが大きいほど未燃率が、またOFAファクターが小さいほどNO_x濃度が加成性よりも低くなる。このように、未燃率、NO_xを改善する混炭組合せを事前に予測できれば、非常に有益である。そこで、燃焼途中のガス・粒子を採取し、これらの現象を詳細に検討した。

図8は、AC/AI混炭（NO_xは加成性より高くなる組合わせ）とBL/AM混炭（NO_xは加成性より低くなる組合わせ）について、燃焼中の窒素放出速度の変化を、各々の混炭率に対して示したものである。ここで、窒素放出速度は、各々の位置で燃焼中の粒子をサンプリングし（図1）、粒子に残留した窒素の重量変化から求めた。図中の線は、加成性の値を示しているが、AC/AI混炭の組合わせでは、混炭時に窒素放出速度が減少していることがわかる。一方、BL/AM混炭の組合わせでは、混炭時に窒素放出速度が増加していることがわかる。

微粉炭燃焼におけるNO_x生成は、流体力学的な影響に加え、Fuel N（石炭中の窒素）の分解挙動に大きく影響される⁴⁵⁾。Fuel Nの分解速度が速いほど、最終的なNO_x濃度は低くなる傾向にある⁶⁷⁾。このことより、BL/AM混炭の組合わせの場合、混炭時に窒素放出速度が増加したため、NO_x生成濃度が加成性より低減したと解釈できる。また、窒素放出速度は、温度によって大きく変化する⁶⁹⁾。したがって、BL/AM混炭の時、温度分布が高温側に変化したことが考えられる。弊社では、炉内温度分布や未燃率を的確に予測できる微粉炭燃焼シミュレーターを開発してきており¹⁰⁾、これを用いて混炭時の炉内温度分布を推定することにより、NO_xや未燃率を改善する

混炭組合せおよびその運転条件を、事前に探索することが可能である。

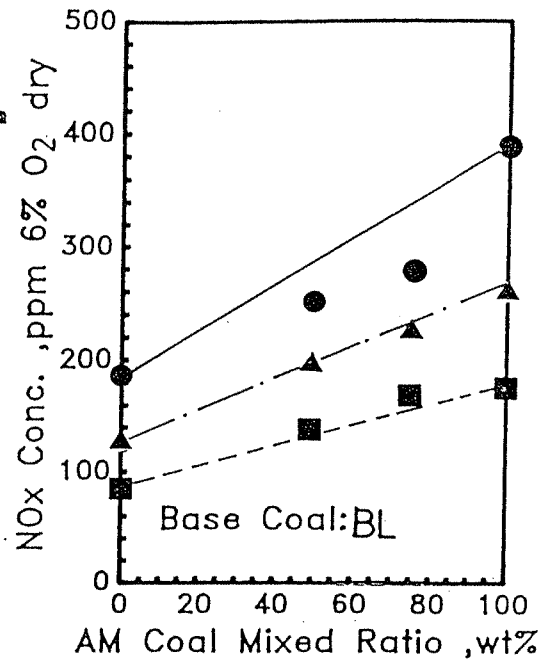
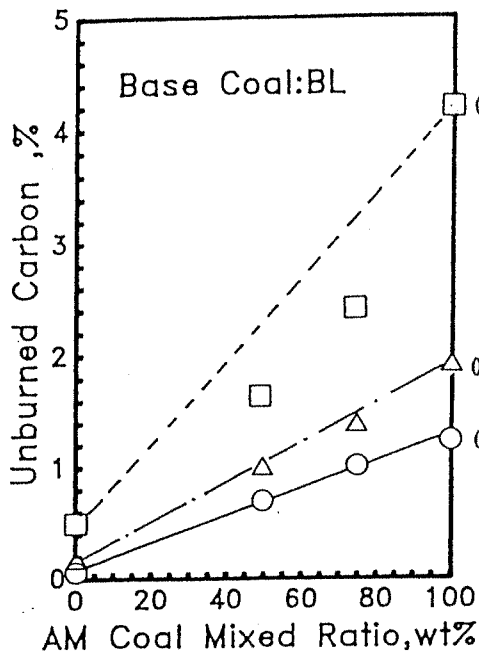


図6. BL/AM混炭の未燃率の変化

図7. BL/AM混炭のNO_x発生量の変化

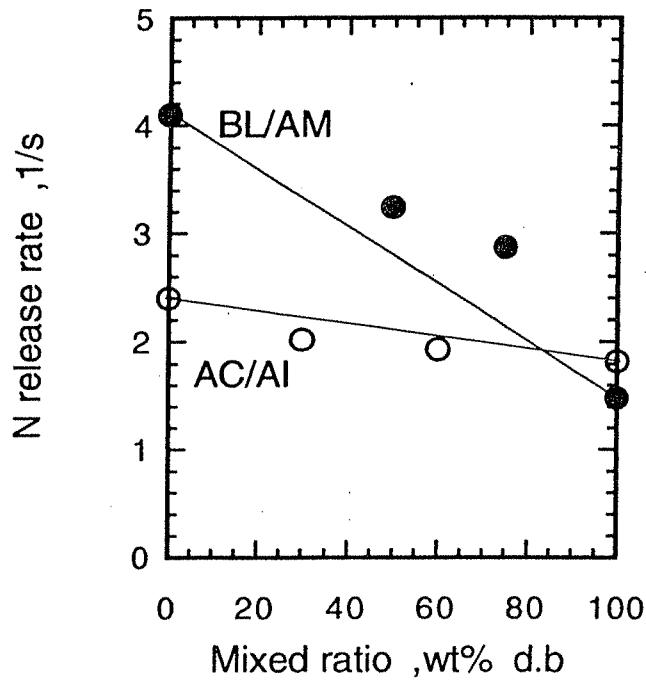


図8. 混炭率と窒素放出速度の相関

4. 2 粒径変化における未燃率・NOxの挙動

燃焼率に及ぼす粒径の影響を定量的に把握し、比較的安価な石炭を選択したり適切な粒径に制御することは、エネルギーコストの低減やミル電力コストの低減に役立つ。したがって、粒径制御は、石炭の品質設計において重要な項目の一つである。燃焼率に及ぼす粒径の影響は、Essenhighの研究¹¹⁾を代表にいくつかあるが²⁾、炭種の影響をも考慮に入れた報告はみあたらない。

一般に、粒径を変化させたときの未燃率とNOx発生量の変化は、平均粒径が大きくなるにつれて、未燃率・NOx発生量共に増加する傾向にある。図9は、OFAファクター=12.34の運転条件の時、対面積平均粒径 $D_{p_{32}}$ に対する未燃率とNOx濃度の変化を示したものである。NOx濃度は、炭種によらず $D_{p_{32}}$ の増加に比例して増加するが、未燃率はどの炭種についても、ある粒径から急激に未燃率が増加することがわかる。この未燃率が急激に増加する粒径を $D_{p_{32}max}$ とし、図中および表5に示した。

表5 各炭種の $D_{p_{32}max}$

	$D_{p_{32}max}$ μm	サンプルの -200# (wt%)
AC	109	68
AE	106	71
AD	94	83

AC炭では $D_{p_{32}}=109\mu m$ (200メッシュパス68%) 以下であれば、未燃率の変化はさほど大きくない。一方、AD炭では $D_{p_{32}}=94\mu m$ (200メッシュパス83%) 以上で未燃率は急激に増加する。この結果から、実ボイラにおいては、AC炭は200メッシュパス68%以下に、AD炭は200メッシュパス83%以下に粒径を管理することが重要であることがわかる。また $D_{p_{32}max}$ 以下にしても、未燃率は顕著には低減せず、ミル消費電力との兼ね合いが重要になることがわかる。

図9からわかるように、燃え切り性は、AC>AE>ADの序列で優れている。これより、 $D_{p_{32}max}$ は、燃え切り性の優れる石炭ほど大きくなることが考えられる。

図10は、各炭の燃焼速度と $D_{p_{32}max}$ の関係を示したものである。両者は、比例関係にあり、燃焼速度を測定することで、 $D_{p_{32}max}$ を容易に予測できる。

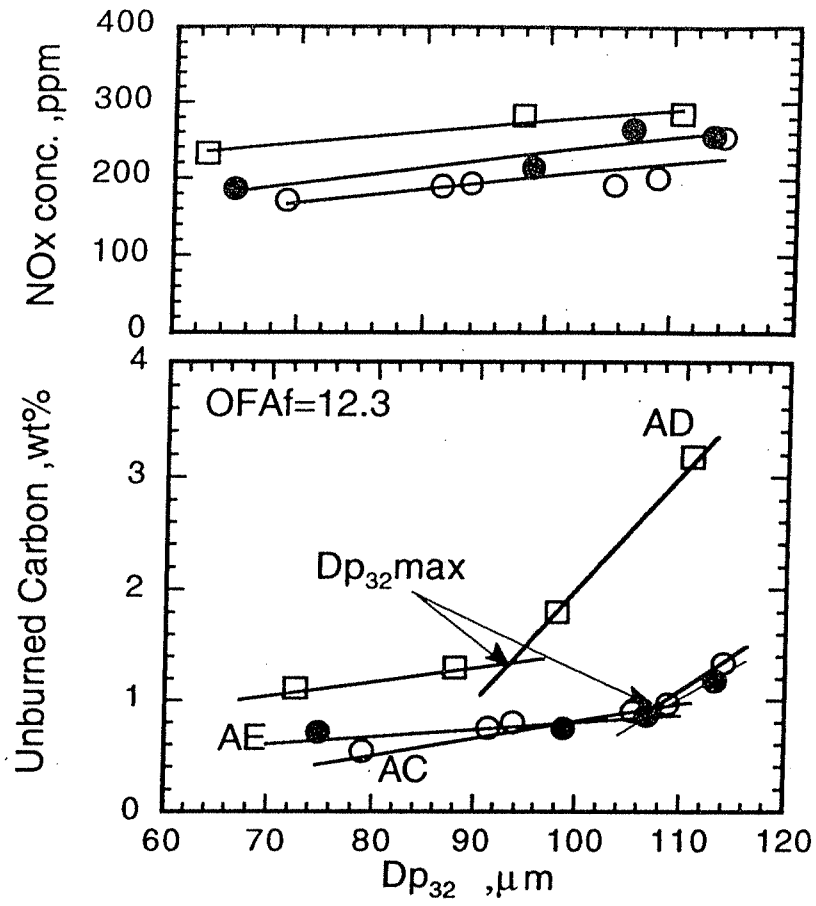


図9. 体面積平均径と未燃率、NO_x発生量の関係

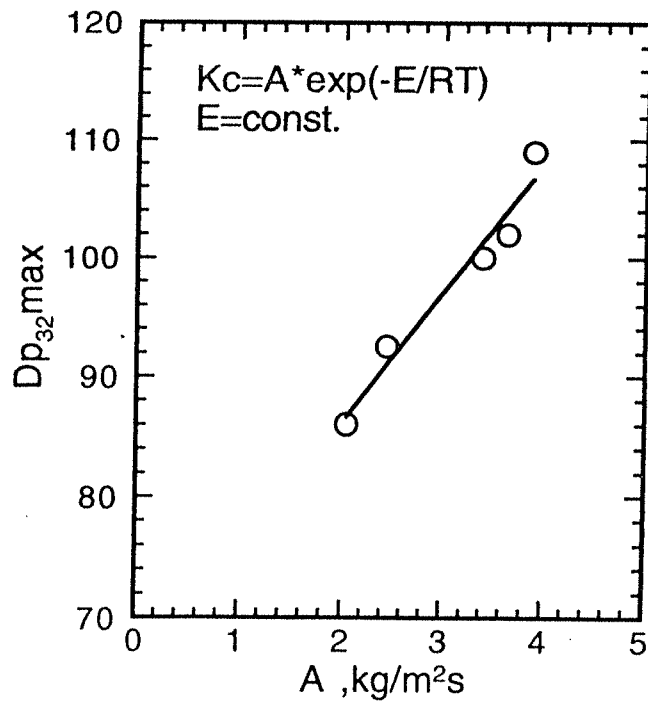


図10. 燃焼速度と $D_{p_{32} \text{ max}}$ の相関

5. まとめ

乱流炉を用いて、様々な混炭組み合わせにて未燃率およびNO_xの変化挙動を調べた結果、以下の知見が得られた。

- 1)ボイラの運転条件によって、混炭時の未燃率・NO_xの変化挙動は異なる。一般的には、二段燃焼が強い運転条件の時、未燃率は加成性が成立しNO_xは加成性よりも高くなる。
- 2)N放出速度が速くなるような混炭組み合わせでは、未燃率あるいはNO_x濃度は加成性よりも低くなる。

さらに、未燃率・NO_xに及ぼす粒径の影響を調べた結果、以下の知見が得られた。

- 3)炭種に依らず、ある粒径(D_{p32}max)より急激に未燃率が増加する。高効率燃焼のためには、D_{p32}max付近に粒径を管理することが重要である。
- 4)D_{p32}maxは、燃焼速度から推定できる。

参考文献

- 1) 気駕、宮前、牧野、青木、鈴木：石川島播磨技報 29, 360 (1989)
- 2) Midkiff, K.C. and R.A.Altenkirch : 21th Symp. (Int.) on Combust., 1189 (1986)
- 3) 岡崎、武士：日本伝熱シンポジウム講演論文集 25, 352 (1988)
- 4) Pohl, J.H. and A.F.Sarofim : 16th Symp. (Int.) on Combust., 491 (1976)
- 5) Wendt, J.O.L : Prog. Energy Combust. Sci., 6, 201 (1980)
- 6) Chen, S.L., M.P.Heap, D.W.Pershing, and G.B. Martin : 19th Symp. (Int.) on Combust., 1271 (1982)
- 7) Kambara, S., T.Takarada, N.Nakagawa and K.Kato : Kagaku Kogaku Rombunshu, to be published
- 8) Blair, D.W., J.O.L. Wendt, and W.Bartok : 16th Symp. (Int.) on Combust., 475 (1976)
- 9) Kambara, S., T.Takarada, N.Nakagawa and K.Kato : Kagaku Kogaku Rombunshu, to be published
- 10) Sato, M., H.Tominaga, S.Kambara and T.Yamada : ASME/JSME Thermal Eng. Joint Conf. proc., 5, 233 (1991)
- 11) Essenhigh, R. H. : 16th Symp. (Int.) on Combust., 353 (1976)

