

■ 特 集 ■ 新燃焼技術

COM燃焼

COM Combustion

田村 節夫*
Setsuo Tamura

成田 貴一**
Kiichi Narita

前川 昌大***
Masao Maekawa

出口 幹郎****
Mikio Deguchi

阿部 亨*****
Toru Abe

鈴木 富雄*****
Tomio Suzuki

1 緒 言

1973年末の第1次石油危機以来、石油価格の高騰と入手難が憂慮され石油系燃料の削減対策ならびに、それにかわる新燃料の利用技術の開発が進められている。エネルギー源としては、世界的に埋蔵量が豊富で、かつ石油ほど偏在していない石炭が再び注目されているが、微粉炭単味の燃焼には粉炭の輸送・貯蔵時における発塵防止、防爆対策あるいは灰の処理等に特別な配慮を必要とする。

そのほか石炭のガス化、液化による流体化技術の開発も推進されているが、比較的短時間に開発できる新燃料として、COM (Coal Oil Mixture) が注目されるようになった。

石油危機前にもCOMの開発は国内外で行なわれたが¹⁾、安価で大量入手できる石油系燃料に対抗できず、また技術的な問題もあり実用化までには至らなかった。しかしながら1974年以後、電力用大型ボイラー、産業用小型ボイラー、製鉄用高炉などへの利用を目的として日本および欧米諸国で研究開発が進められ、1978年と1979年にアメリカで開催された国際シンポジウムでその成果の一部が発表されている^{2) 3)}。

日本でも電源開発庁を中心とした共同開発や鉄鋼各社での研究開発が進められ、種々の学協会でその成果が発表されている^{4) 10)}。

当社では、1974年にエネルギー源の多様化という観点からCOMの利用技術の開発に着手した。各種工業炉でCOMを使用する場合、とくに配管内での石炭の沈降が問題となる。この問題を解決するためには、石

炭を非常に細かく粉砕するか或いは沈降防止剤を添加することが考えられる。しかし、粉砕費の上昇や沈降防止剤の選択とその添加法の検討ならびにCOMの製造費の上昇という不利な面が表われてくる。そこで、当社はできる限り微粉砕せずに、しかも沈降防止剤を添加しないCOMの利用技術の開発をめざした。まず、COMの輸送性を把握するための基礎性状調査を行い、続いてCOMの燃焼性を把握するための燃焼実験、そして実炉への適用技術を開発するために高炉へのCOM吹込み実験を行った。本論文では、以上の研究開発の経過を主に燃焼という面から報告する。

2 COMの基礎性状調査

COMの炭材としては、石炭以外にチャー、オイルコークス、コークスブリーズを用いたが、本節では石炭に関する結果について述べる。

2.1 石炭と重油の性状

石炭としては一般炭 (F.C = 56.4%, V.M = 36.1%, Ash = 7.5%) を用い、粗粒 (-1.0 mm) と細粒 (-0.15 mm) に篩い分けた。重油としては中近東産のC重油 (C = 86.0%, H = 12.0%, S = 2.0%) を用いた。

2.2 沈降性

COM中の石炭の沈降性は、浮秤法によってCOMの比重の経時変化を測定し、その値からCOMの濃度を計算して、その経時変化によって評価した。

石炭の沈降性におよぼす石炭の粒度、COMの温度と濃度の影響を図-1に示す。この図より石炭の沈降は、粒度が粗いほど、温度が高いほど、濃度が低いほど助長されることがわかる。

2.3 粘 度

COMの粘度は、回転式粘度計を用いて測定した。図-2にはCOMの比粘度におよぼすCOMの温度、濃度ならびに石炭の粒度の影響を示す。ここで比粘度とは、

* (株) 神戸製鋼所鉄鋼生産本部生産技術部開発担当部長

〒651 神戸市中央区脇浜町1-3-18

、*、****、(株) 神戸製鋼所技術開発本部中央研究所

*****、*****、(株) 神戸製鋼所技術開発本部機械研究所

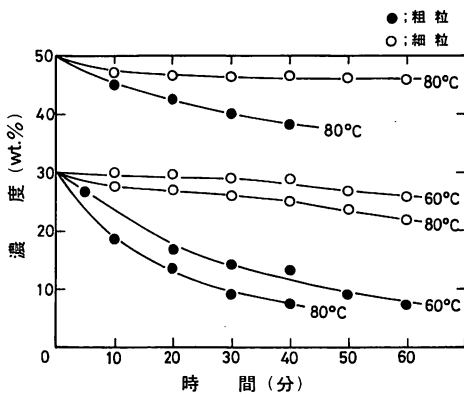


図-1 COM中の石炭の沈降性

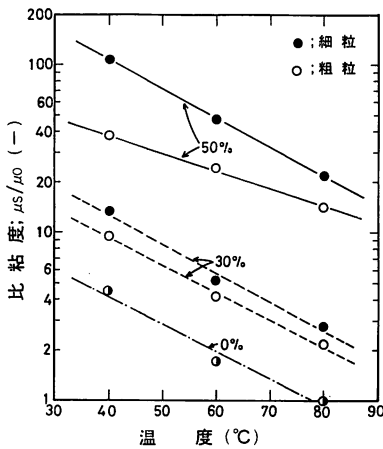


図-2 COMの比粘度

80°Cにおける重油の粘度 ($\mu_0 = 0.26$ poise) に対するCOMの粘度 (μ_s) の比である。この図より、COMの粘度は、粒度よりも濃度と温度の影響を強く受けることがわかる。

以上の結果より、沈降性と粘度におよぼす石炭の粒度、COMの温度、濃度の影響は互いに相反する関係にあることがわかる。したがって、実炉でCOMを使用する場合には、タンク内と配管内での沈降を防止し、しかも配管内での圧力損失を低減するために適切な運転条件に設定しなければならない。

3 燃焼特性¹¹⁾

COMの燃焼特性に関する研究開発は、ボイラを対象としたNO_x生成に関するもの^{2) 3)}、高炉吹き込みにおける燃焼性についてのもの^{5) 10)}、更にはMHD発電での使用を目的とした基礎的研究¹²⁾、単一液滴の燃焼^{13) 14)}などが活発に行なわれている。ここでは、実際の工業炉でCOMを使用する場合に検討すべき排ガス

特性、火炎放射特性、炉内温度分布などの燃焼特性を調査し、C重油の燃焼特性と比較検討した結果について述べる。

3.1 実験装置および方法

実験装置を図-3に示す。燃焼試験炉は、内径1 m長さ4 mの水平円筒型耐火物壁炉であり、燃焼状態を観察するための覗窓や測定孔が多数設けられている。石炭およびC重油は、混合タンク内で十分攪伴混合され、供給ポンプで昇圧されてバーナへ供給される。COMの定量供給は、バーナ前圧を一定に保つように自動圧力指示調節計、リターンバルブ、供給バルブにて制御した。燃焼空気は、熱風炉で予熱された後に風箱へ供給される。使用したバーナは、内部混合型空気霧化バーナであり、当社が技術開発したものである。

ガス分析は、試験炉出口より3 m下流の煙道または炉内より水冷プローブを使用してサンプリングした燃焼ガスを、化学発光式NO_x計、磁気式O₂計、NDIR式CO計を用いて行なった。

温度測定には、φ 0.5 PR再結晶アルミナ保護管シース熱電対を使用し、放射等の温度補正は行なっていない。

放射量の測定は、視角7°、感度波長0.3~6.5 μのThin Foil Type (薄板型) のものを使用した。

火炎長さは、目視観察で測定した。

実験は、以下の標準燃焼条件で実施した。

燃焼量：40 × 10⁴ kcal/hr, 燃焼空気予熱温度：450°C, 炉温：1300°C, 空気比：1.4 (排ガスO₂：6.4%), COM予熱温度：100°C, COM濃度：0~57 wt.%, COMの種類：微粉COM, 添加剤：無
使用炭材は、一般炭4種類および石油コークス2種

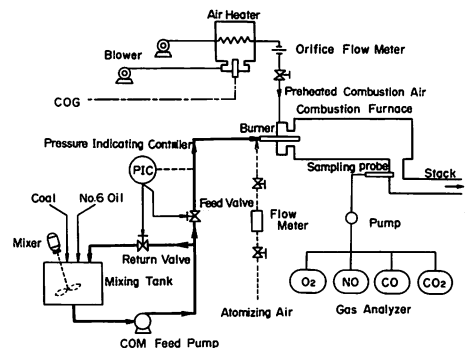


図-3 COM燃焼実験装置図

類であり、図-4に微粉炭の粒度分布を示す。また、使用炭材およびC重油の分析結果を次に示す。

一般炭	C : 81.9~83.6 % , N : 1.7~1.9 % , V.M : 26.3~29.7 % , Q _l : 6,558~7,044 cal / g
石油コークス	C : 89.7~92.7 % , N : 1.4~1.6 % , V.M : 4.9~11.8 % , Q _l : 7,739~8,680 cal / g
C重油	C : 86.0 % , H : 12.4 % , N : 0.13 % , Q _l : 10,615 cal / g

3.2 実験結果および考察

(1) 火炎形状

火炎長さは、図-5に示すように、COM濃度が高くなるほど伸長する。その伸長率は、COM濃度が10%高くなると約5%長くなる。火炎状況は、石炭COM30wt.%の場合はC重油専焼と類似している。しかし、石炭COM濃度が50wt.%以上または石油コークスCOMの場合には、燃焼初期はC重油と炭材中の揮発分が燃焼して輝炎を形成し、その下流では固体炭素の燃焼が起きている。

(2) NO_x 生成特性

NO_x 濃度は、図-6に示すように、最高火炎温度と

COM濃度ではば整理できる。COM濃度を高めると、Fuel N分が高くなりFuel NO_xは増加するが、最高火炎温度が低下してThermalNO_xは逆に減少する。COM燃料のNO_xは、炭材中の揮発分/炭素分比が大きい燃料ほど燃焼性が良いので火炎温度が高くなり、NO_xの生成量は多くなる。NO_x生成レベルは、高温炉においては、石炭COM、C重油、石油コークスCOMの順に低くなる。

ここで、Fuel NO_x 転換率を求めると、COM濃度30 wt.%の場合に28~46%、50 wt.%の場合に25~48%にそれぞれなる。石炭COMの転換率は、上記範囲の高い側に、オイルコークスCOMの転換率は低い側に寄る。これは、Fuel N分が固体炭素(チャー)中と揮発分中に含まれており、転換率は揮発分中のNのほうが高いから、揮発分/炭素分の比が大きい

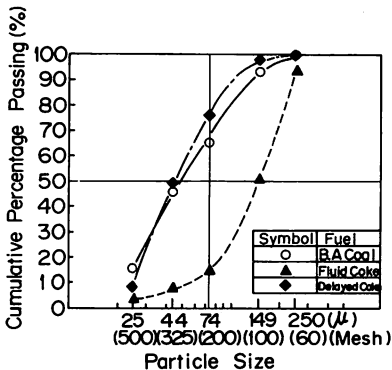
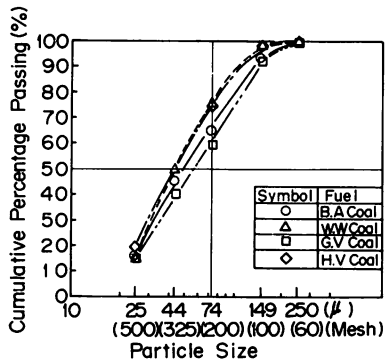


図-4 石炭とコークスの粒径分布

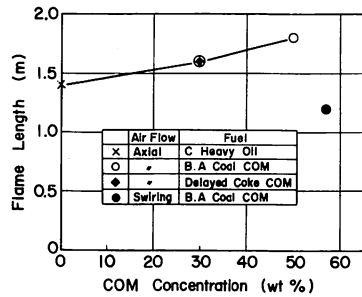


図-5 COM濃度と火炎長さとの関係

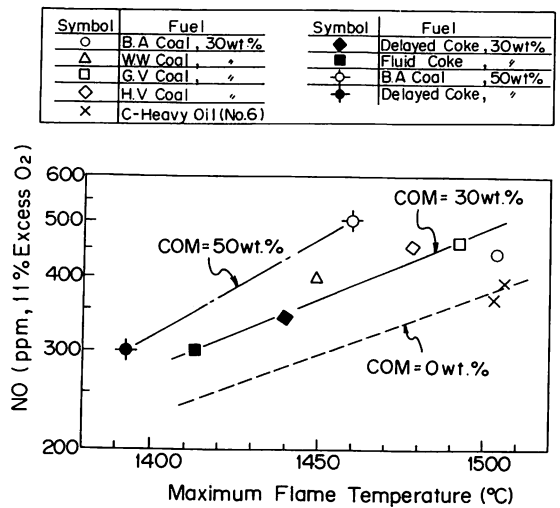


図-6 火炎長さ と NO 発生量との関係

石炭 COM のほうが転換率が高くなったと考えられる。

(3) 炉内排ガス分布

燃焼性の評価法としては、CO₂、CO、O₂のガス組成分布から判定する方法とダストサンプリングによる未燃石炭と灰分の割合から求める方法とがある。ここでは、測定の簡便さから前者を採用した。

炉中心軸上における CO 濃度分布を図-7に示す。火炎中の CO 濃度は、C 重油が最も高くなり、石炭 COM、石油コークス COM の順に低下し、最高火炎温度の順位と一致している。

火炎内の半径方向 O₂ 濃度分布を図-8に示す。O₂ 濃度は、煙道中の O₂ 濃度に対する火炎中の O₂ 濃度の比で示してある。COM 濃度が高くなるほど、O₂ 濃度は高くなり、燃焼遅れが起きている。また、石炭 COM より石油コークス COM のほうが全域にわたって高い O₂ 濃度を示している。

中心軸上における O₂ 濃度分布を図-9に示す。O₂ 濃度比が 1.0 に飽和する距離が、ほぼ燃焼完結距離である。目視観察による火炎長さと比較すると、重油の燃焼完結距離は火炎の長さとも一致しているが、COM の場合は燃焼完結距離のほうが長くなっている。特に揮発分の少ない石油コークス COM では、燃焼炉外でも反応が行なわれている。

以上より、燃焼性は、COM 濃度が高くなるほど、また炭材中の揮発分/炭素分比が小さくなるほど悪くなることが明らかである。

(4) 炉内温度分布

高温域は図-10に示すように、C 重油が最も広く、次に石炭 COM、石油コークス COM の順に狭くなり、燃焼性の順位と一致している。最高温度域は、C 重油より COM のほうがバーナ側へ寄り、バーナ近傍で比較的に温度勾配の大きい領域が発生している。

COM 濃度が高いほど、また揮発分/炭素分比が小さいほど燃焼性が悪くなるので、燃焼帯は広がり、火炎熱負荷率が低下して火炎温度は低下する。

火炎状況、排ガス分布および温度分布から、COM 燃焼では、まず C 重油、石炭中の揮発分が燃焼し、ついで石炭中の固体炭素が燃焼して燃え尽きると推察される。

(5) 火炎放射量

キルン、加熱炉で COM を使用する場合には加熱性を、高炉吹き込みではブローパイプの熱負荷などを検討する必要があり、火炎放射量を測定した。その火炎放射分布の一例を図-11に示す。

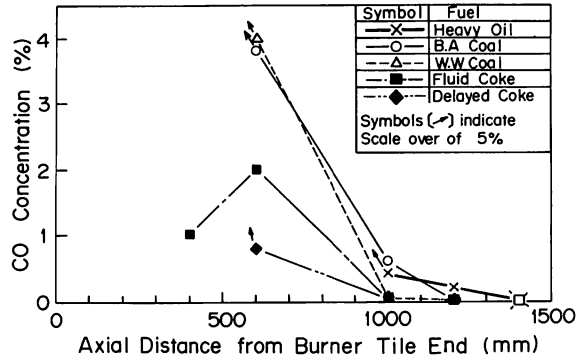
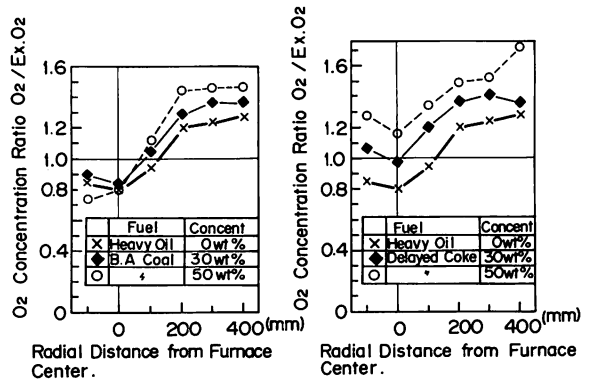


図-7 炉軸方向での O₂ 濃度分布の比較 (COM 濃度：30% wt.%)



(ii) Axial Distance from Burner Tile End = 1000mm

図-8 半径方向 O₂ 濃度分布に及ぼす COM 濃度の影響

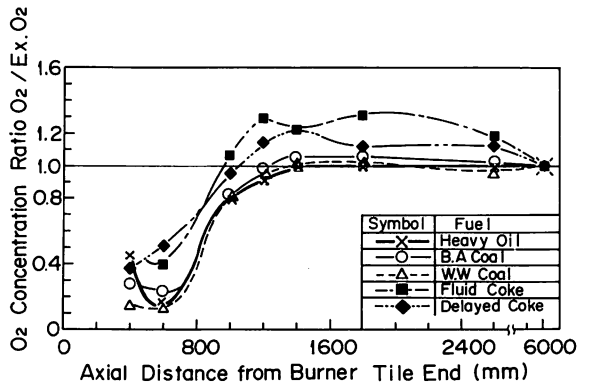


図-9 炉軸方向での O₂ 濃度分布の比較 (COM 濃度 30 wt.%)

火炎存在域である L/D < 1.6 (D = 1 m) での火炎放射量は、C 重油が最も高くなり、石炭 COM、石油コークス COM の順に低下し、火炎温度レベルの順位と一致している。また、COM 濃度が高くなるほど、火炎放射量は低下する。

IFRFの結果では、COGと油またはピッチを混焼させると、火炎放射量は局部的に5~7倍増加している。

本実験によると、もともと火炎放射率の高いC重油に固体炭素を混合して燃焼させても火炎放射率は

大幅に増加せず、むしろ火炎温度によって火炎放射量は決まると考えられる。すなわち、固体燃料よりも液体燃料のほうが、固体燃料では揮発分の高いほうがそれぞれ燃焼性が良いので、火炎温度は高くなり、火炎放射量も高くなると考えられる。

(6) 最適燃焼法

COMは、C重油に比較して燃焼性が悪いことが明らかになったので、バーナの噴霧特性を改善すると共に、燃料と燃焼空気との混合を良好にした最適燃焼法を技術開発した。図-12は、その温度分布の一例であり、燃焼空気は旋回流としている。このように急速燃焼させると、高温域はバーナ側へ寄り、最高温度は高くなる。また、火炎長さは、図-5に示したように、COM 57 wt.%でもC重油(軸流空気)より短かくでき、NO_xは高温域での滞留時間が短縮されて20~40%低減した。

4 高炉へのCOM吹込み実験

前節までの結果を踏まえて、1977年と1978年に神戸製鉄所第3高炉(炉容: 1,845 m³, 炉床径: 9.5 m, 羽口数: 25本の羽口2本へのCOM吹込み実験を行った。本節では1978年における実験結果について述べる。

4.1 実験設備

COM吹込み実験設備の配管系統図を図-13に示す。COMは、あらかじめ所定の粒度に調整されて内容積7 m³のホッパー内に貯蔵された石炭を供給能力0.6 m³/

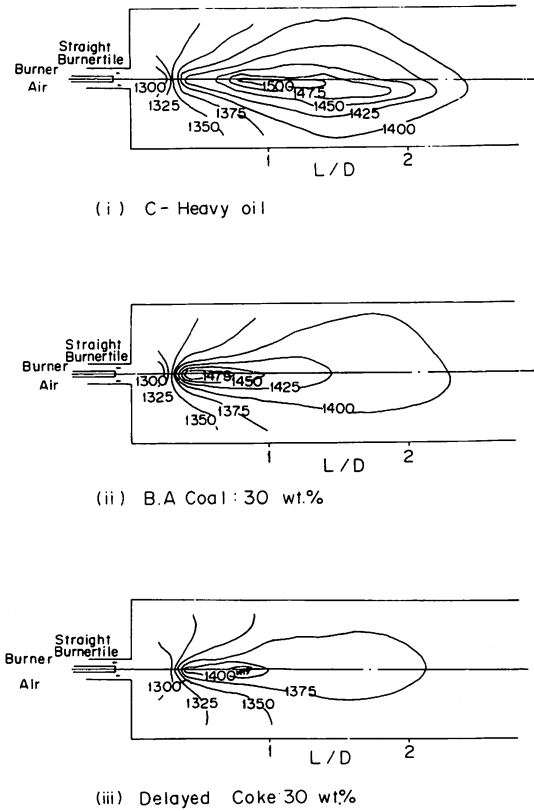


図-10 COM燃焼時の温度分布

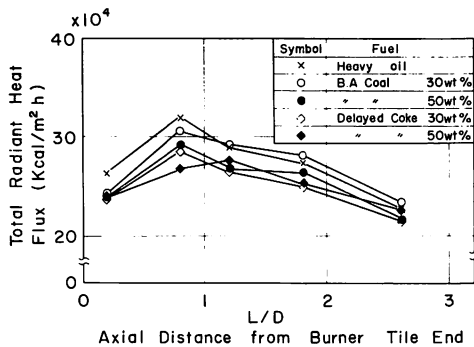


図-11 火炎放射性に及ぼすCOM濃度の影響

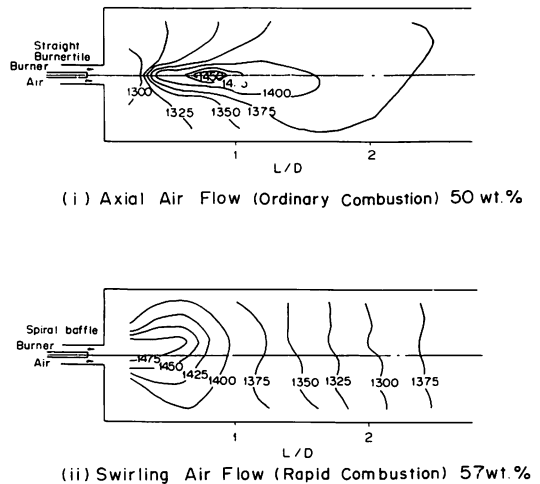


図-12 燃焼炉における温度分布に及ぼす燃焼法の影響 (B. A炭 O₂: 6.4%)

hr のフィーダーで切り出しながら、製造能力 $1.0 \text{ m}^3/\text{hr}$ のミキサーで重油と混合して製造される。所定濃度に調整された COM は、攪拌機、液面計、温度計を内蔵したタンクに供給され、吐出量 $1.0 \text{ m}^3/\text{hr}$ のポンプによって高炉側に流送される。羽口への吹込み量は、差圧式流量計と回転式流量計によって測定されると同時に、流量調節弁によって制御される。

一方、高炉羽口前における COM の燃焼性を調査するために、図-14 と写 1 に示すようなガス採取用ゾンデとその駆動装置を製作した。ゾンデは、水冷式のステンレス製三重管構造のもの（外径：48.6 mm、長さ：約 7 m）である。このゾンデを駆動装置上にセットし、ゾンデの先端を羽口カバー部のグランドパッキン内に挿入して、水冷されているボールバルブを開ける。その後、目的の位置までゾンデを挿入してガスを採取する。

4.2 実験条件

石炭としては弱粘結炭 (F.C = 54.2%, V.M = 29.3%, Ash = 13.6%) を用い、 -0.3 mm (平均粒径 = 103μ) と -1.0 mm (平均粒径 = 337μ) に篩い分けた。重油としては中近東産の C 重油を用いた。

COM 吹込み実験期間中の主な高炉操業データを表 1 に示す。COM の吹込み羽口数は 1 本か或いは 2 本であり、その吹込み量は $150 \sim 400 \text{ kg/hr}$ 、羽口であった。COM を吹込んでいない羽口には C 重油を 220 kg/hr 、羽口吹込んでいた。

COM 吹込み用バーナーは、通常高炉で使用している重油吹込み用の油圧噴霧式バーナーであり、その先端は常に羽口先より 60 cm ブローパイプ側に寄った位置に設定した。

4.3 実験結果とその考察

4.3.1 吹込み実績

1977 年に行った実験では、ポンプやバルブが摩耗し、バーナーでの閉塞が多発したため、 $40 \sim 50 \text{ wt.}\%$ の COM を吹込むことができなかったが、種々の対策を講じて 1978 年に再度 3 ヶ月間の COM 吹込み実験を行った。その結果、前回のようなトラブルは無くなり、表 2 に示すように 50% の COM を吹込むことができた。しかしながら、ポンプの能力の制限上、 50% COM の

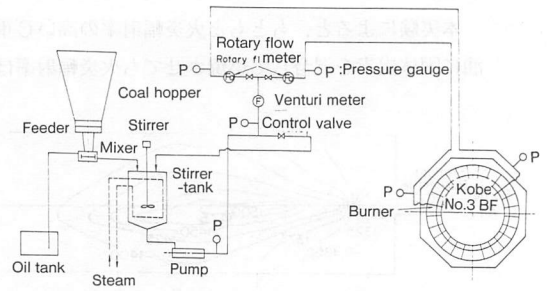


図-13 COM 吹込み設備の配管系統図

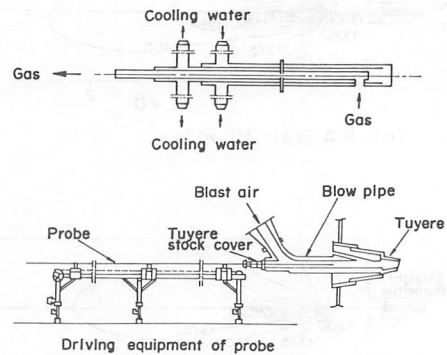
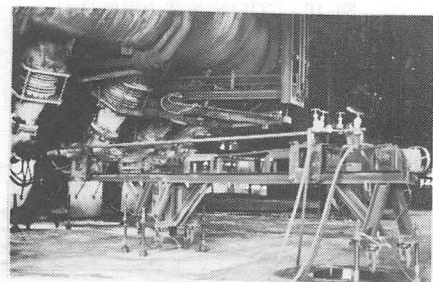


図-14 羽口前ガス採取用ゾンデとその駆動装置



写 1 羽口前ガス採取装置

表 1 高炉操業データ

出 銑 量 (ton/day)	コークス比 (kg/ton)	重 油 比 (kg/ton)	送 風 量 (Nm ³ /min)	送 風 圧 (g/cm ²)	送 風 温 度 (°C)	送 風 湿 分 (g/Nm ³)	酸素富化率 (%)
3,300	444	35	2,700	1,740	1,017	7	0.7

吹込みを長時間行うことができなかった。

4.3.2 配管内の圧力損失

本実験で使用した石炭の最大粒径は0.3mmと1.0mmであったが、配管内の圧力損失、沈降、閉塞などにおよぼす石炭の最大粒径の影響は明らかでなかったため、最大粒径が0.3mmの場合の結果について述べる。

配管内におけるCOMの圧力損失とCOMの濃度との関係を図-15に示す。ただし、COMの流量は250~300kg/hr、配管長は28m、配管径は12.7mmである。この図で50% COMの圧力損失は100°Cのときで4.2kg/cm²であり、重油の約8倍となっている。この値は、COMの比粘度と温度の関係を示した図-2において100°Cに外挿した値にほぼ等しい。このような結果は、実験条件が異なっているが、桜谷¹⁵⁾も報告している。

一方、配管内での沈降によるトラブルは全く生じることなく、COMを吹込むことができた。これは森永¹⁶⁾も指摘しているように、COMの流速を(1)式のSmoldirevの式から求められる限界流速： v_c (m/sec)の1.3倍(0.22m/sec)以上に保っていたためであると考えられる。

$$v_c = K \sqrt{\left(\frac{\rho_c}{\rho_0} - 1\right) \cdot D} \quad (1)$$

ここで、 ρ_c と ρ_0 はそれぞれ石炭と重油の比重、Dは配管径(m)、Kは定数(K=2)である。

4.3.3 羽口前におけるCOMの燃焼性

高炉羽口前に形成されるレースウェイの内部は、操業状態によって異なるが、最高温度が約2,500°Cで、熔融物が流下し、さらに赤熱コークスが高速旋回して

表2 COM吹込み日数

最大粒径 (mm)	COM濃度				
	20%	30%	40%	45%	50%
0.3	3	10	20	5	1
1.0	3	7	10	4	1

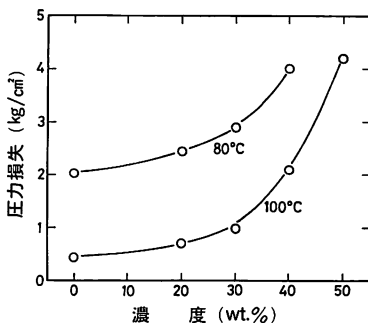


図-15 配管内の圧力損失

いるという非常に苛酷な状態にあるため、羽口前におけるCOMの燃焼性をガス分布や温度分布や未燃物の量によって評価するのはかなり困難なことである。

本実験では、前述したゾンデを用いて羽口前のガスと未燃物の採取を試みたが、ガスとともにスラグを吸引してしまい、未燃物は採取することができなかった。

図-16には、羽口前におけるガス分布の測定結果を示す。羽口先からの距離は、羽口先を原点とし炉内側を正として表わしたものである。ガスの採取は羽口先から25cm毎に行い、図には4個の測定値の平均値を示した。図-16-Aは何も吹込んでいないとき、図-16-Bは重油を320kg/hr吹込んでいるとき、図-16-Cは最大粒径が0.3mmの石炭を40%含んだCOM(以後、COM-1という)を320kg/hr吹込んでいるとき、図-16-Dは最大粒径が1.0mmの石炭を40%含んだCOM(以後、COM-2という)を320kg/hr吹込んでいるときの結果である。

この結果を用いてCOMの燃焼性を次のような仮定を設けて検討した。

- (1) ブローパイプおよび羽口前レースウェイ内の、羽口中心軸に垂直な断面では、ガスの組成は均一である。
- (2) レースウェイ外へ流出したガスは再びレースウェイ内に流入することはない。
- (3) レースウェイ内におけるコークスの燃焼速度の分布は、燃料吹込みの影響を受けない。

吹込み燃料の燃焼量は、次のような方法によって求めた。

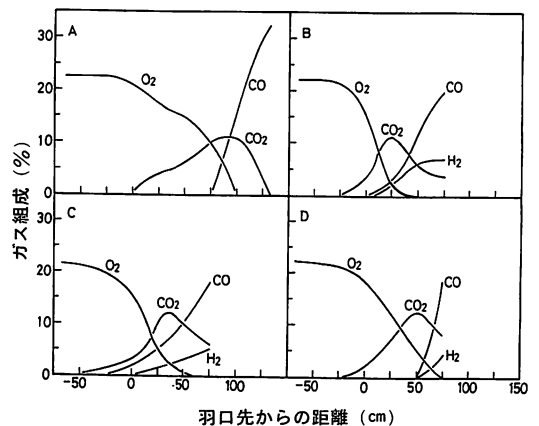


図-16 羽口前レースウェイ内のガス分布 (ただし、バーナーの先端は-60cmの位置にある。)

- (1) ブローパイプ内の吹込み位置から羽口先までの燃焼量は、炭素に関する物質収支から求める。
- (2) レースウェイ内における吹込み燃料の燃焼量は、燃料を吹込んでいないときの酸素の減少速度と燃料を吹込んでいるときの酸素の減少速度との差から求める。
- (3) (1), (2)において、乾ガス量は窒素に関する物質収支から求める。

その計算結果を表3に示す。ガス分布の測定誤差と計算上の仮定に問題が残るが、COM-1の燃焼性は重油とほぼ同一であり、COM-2の燃焼性は他のものより劣ることが推定でき、石炭の粒度の影響が表われている。今後さらに、COMの燃焼機構に関する基礎的研究¹³⁾¹⁴⁾により、羽口前の燃焼性を確認してゆく予定である。

表3 COMの燃焼率

燃料名	羽口先からの距離 (cm)	燃 焼 量 (kg/hr)	燃 焼 率 (%)
重 油	0	155	48
	17	320	100
COM-1	0	200	62
	13	320	100
COM-2	0	63	20
	55	320	100

5 結 言

以上、当社におけるCOMに関する研究開発の経過を概説した。その結果、濃度が約60%のCOMを良好に燃焼させることならびに濃度が50%のCOMを高

炉羽口に吹込みうることを確認した。

今後は、エネルギー情勢の変化に対処するために、残された技術的検討課題を解決し、高炉全羽口への吹込み技術ならびに他の高温炉への適用技術を確立することによって、早急にエネルギー源の多様化を図りたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 城本; 燃料協会誌, 56 (1977) (607) P. 909
- 2) 1st International Symposium on Coal Oil Mixture Combustion, Florida (1978)
- 3) 2nd International Symposium on Coal Oil Mixture Combustion, Massachusetts (1979)
- 4) 石炭利用技術研究発表会講演集 (1980)
- 5) 成田, 前川, 出口, 八谷, 吉岡, 田村, 松原, 布施; 鉄と鋼, 65 (1979) (4) S. 46
- 6) 成田, 前川, 出口, 森, 永井, 八谷, 加藤, 田村; 鉄と鋼, 65 (1979) (4) S. 47
- 7) K. Narita, M. Maekawa, M. Deguchi, C. Nagai, S. Tamura; International Blast Furnace Hearth and Raceway Symposium, Newcastle (1981) P. 8-1
- 8) 荒谷, 田中, 木光; 鉄と鋼, 66 (1980) (11) S. 645
- 9) 一宮, 木村, 大森, 相馬, 荒谷; 鉄と鋼, 66 (1980) (11) S. 646
- 10) 田部, 宮崎, 東海林, 亀井, 倉重, 小島, 射場; 鉄と鋼, 67 (1981) (4) S. 3
- 11) 鈴木; 第18回燃焼シンポジウム前刷集 (1980-12) P. 37
- 12) 池崎, 大竹; 第18回燃焼シンポジウム前刷集, (1980-12) P. 43
- 13) 佐賀井, 斎藤; 燃料協会誌, 59 (1980) (642) P. 822
- 14) 佐賀井, 斎藤; 燃料協会誌, 60 (1981) (647) P. 183
- 15) 桜谷; 第49回化学機械談話会資料 (1980-10) P. 6
- 16) 森永, 田島, 楠野, 城本, 金山, 松岡; 鉄と鋼, 52 (1966) (2) P. 107

