

論 文

UDC 669.162.267.4 : 662.753.3 : 669.162.263.2

高炉への重油吹込みに伴う炉内現象の変化*

清水 政治**・長井 保**・岡部 俵児***

近藤 幹夫**・稲谷 稔宏***

Investigations on the Phenomena in the Blast Furnace with Heavy Oil Injection

Masaharu SHIMIZU, Tamotsu NAGAI, Kyoji OKABE,
Mikio KONDO, and Toshihiro INATANI

Synopsis:

In order to study the phenomenological changes in the blast furnace accompanied with the injection of heavy oil at the tuyere, the reaction gas at the tip of the tuyere was sampled by the use of the horizontal probe and analysed. In the case of no oil injection, CO₂ content increased with decreasing oxygen content in the inward direction gradually, and after reaching the maximum point of CO₂ content, CO and H₂ content increased. When the injection rate of heavy oil increased, these phenomena tended to proceed rapidly and to be accomplished in shorter range. When the nozzle head of the oil burner was pulled backward in the blow pipe, the decrease of oxygen occurred even in the blow pipe. The decrease of the space of the raceway accompanied with the increase of oil rate was found also by the bar-test. The gas distribution at the top of the shaft was measured by the horizontally inserted probe installed at the stockline level and the gas efficiency was calculated.

(Received Sep. 4, 1971)

1. 緒 言

高炉技術者はコークス比を低下させるため、不断の努力を重ねてきたが、最近では世界的に良質の原料炭が不足したため、銑鉄コストは上昇し、よりいつそうコークス比を下げるための技術的な解決が急務となつてきた。

高炉への燃料吹込みは以前から行なわれてきたが、上記の要求を満足するのに有効な手段として再認識され、コークス比の大幅な引き下げを目指して、重油の多量吹込みが実施されるようになった。重油を多量に吹込むと必然的に ore/coke は上昇し、操業上、支障を招きやすいが、当千葉製鉄所では、高酸素富化、低湿分操業、処理鉄の高配合、装入物の篩分けの強化および日常操業管理の強化などの対策を適切にとることにより、操業も順調に推移し、長期にわたつて重油多量吹込みを継続できることが確かめられた。

しかし重油吹込みに伴つて起こる炉内現象の変化には不明な点が多く、重油多量吹込み技術の真の理解は得られていない。現在、重油多量吹込みが順調に継続されて

いるが、未燃焼物質（以下これを煤(すす)と略称する）の発生、ガス清浄設備での異状現象、raceway の縮小、外部操業の傾向、重油置換率の低下など問題点が多い。これらの解明に必要な基礎的なデータを得るため、おもに羽口前での重油の燃焼に焦点を合わせて、各種の実験を行ない、水冷したガスサンプラーを用いて、羽口前から炉内ガスを採取した。また重油吹込み量がraceway の深さとシャフト部における半径方向のガス組成分布におよぼす影響を調査するため、操業中の高炉で、炉芯測定と炉口部に設置したガスサンプラーによる炉頂ガスの採取を行ない、若干の知見を得たのでここに報告する。

2. 測定装置および測定方法

2-1 羽口ガスサンプラー

Fig. 1 に示すように、サンプラー本体は全長約 8 m で、羽口前の高温ガスおよび熔融物による溶損を防ぐため、

* 昭和46年9月4日受付

** 川崎製鉄(株)千葉製鉄所

*** 川崎製鉄(株)技術研究所

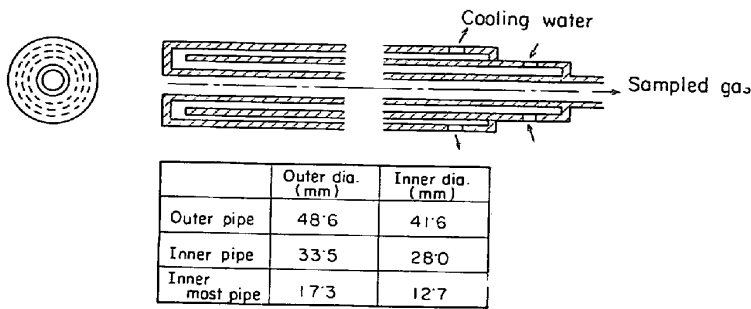


Fig. 1. Cross-sectional figure of horizontal probe at the tuyere level.

3重管にして冷却水は最初に最内管を冷却するように製作されている。管の材質はJIS-SGPで、冷却水には昇圧した海水を用い、その流速は4~5m/sec、ガス採取中の排水温度は60~70°Cであった。Fig. 2にはガスシール方式、駆動方式などを図示した。通常時にはパッキン押えをはずし、のぞき眼鏡を備えたフランジをパッキン箱にとりつけ、水冷されたボールバルブでガス遮断する。

ガス採取は次の手順に従って行なう。バルブ閉の状態ですンプラーをパッキン箱に差し込んだまま、グランドパッキンをサンプラーに巻き、パッキン押えで押し、ガス遮断を行なう。冷却水の流量とガス採取準備完了を確認した後、バルブを開いて、チャックを介してエアシリンダーでサンプラーを駆動させる。サンプラーにはあらかじめ目盛がつけてあり、パッキン押えの端でその目盛を読んでガス採取位置を知る。羽口先端までは炉内方向に進み、その後、最も内部の採取位置まで一挙に挿入してガスを採取した後、万一サンプラーが溶損してもただちに後退させられるように、チャックのかみ歯を反転し、炉外方向に後退させつつ、所定の位置でガスを採取する。実験開始と同時に、のぞき眼鏡から炉内を目視観察して、重油吹込みノズルの先端とサンプラーの相対的な位置を知り、さらにサンプラーに異状がないかを確認する。炉内ガスは、炉内圧が高いため、最内管を通って吹出すが、サンプラーの後端にとりつけたバルブでその

流量を調節し、捕集ビンに採取する。しかし炉内ガスに伴って溶融物も最内管に吸い込まれて凝固するため、その先端部を閉塞し、ガス採取を中断しなければならない場合がしばしばあつた。このようなときには、サンプラーの後端から圧縮空気を送り込んでパージするか、サンプラーを炉外に抜き取り、凝固した溶融物を除去するか、あるいは別のサンプラーに取り換えてガス採取を継続した。また重油を多量に吹込む場合に生成する煤は、捕集ビンの手前にフィルターを置いて捕集した。採取したガスはヘンメル法あるいはガスクロマトグラフ法で分析した。ヘンメル法ではO₂、CO、CO₂を、またガスクロマトグラフ法ではO₂、CO、CO₂、H₂、N₂、CH₄を分析したが、水蒸気含有量は定量しなかつたので、ガス組成は乾ガスに関するものである。また煤の分析は元素分析によつた。

ガス採取は万一サンプラーが溶損した場合を考えて、事後の処置が容易な出銃止め前後10minを選んで行なつたが、サンプラーの溶損は全く起こらなかつた。

対象とした羽口は、千葉第1高炉の11番羽口と第2高炉の6番羽口で、その位置をFig. 3に示す。なお重油流量は電動バルブの開度を押しボタンで変えて調節し、ガス採取を行なう10~20min前から所定の値に保持した。

対象とした羽口は、千葉第1高炉の11番羽口と第2高炉の6番羽口で、その位置をFig. 3に示す。なお重油流量は電動バルブの開度を押しボタンで変えて調節し、ガス採取を行なう10~20min前から所定の値に保持した。

2.2 炉口部ガスサンプラー

第2高炉には第3次改修(昭和45年8月26日火入れ)で、Fig. 4に示す位置にガスサンプラーを設置し、高炉の半径方向に生ずるガス組成の分布を測定し、操業に活用している。全長約7m、外径60.5mmのサンプラー本体は、モーターの動力を、サイクロ減速機を通して、直接チェーンで受けて駆動するが、0.5m間隔に設けられたリミットスイッチにより所定の位置に停止する。サンプラー本体は2重管をなし、冷却水が上部の間隙から下部の間隙へと流れるように仕切りを入れてあるが、冷

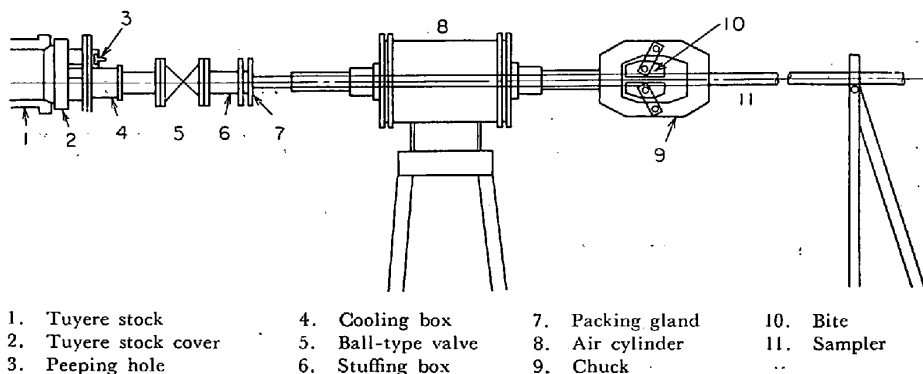


Fig. 2. Schematic figure of horizontal probe at the tuyere level.

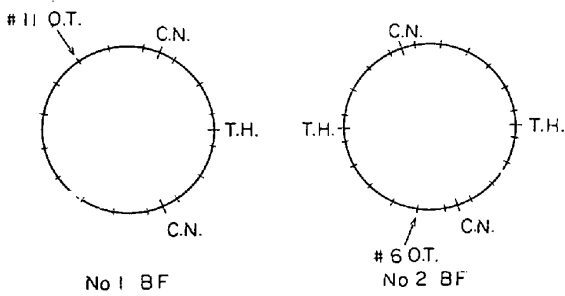


Fig. 3. Tuyere location of gas sampling.

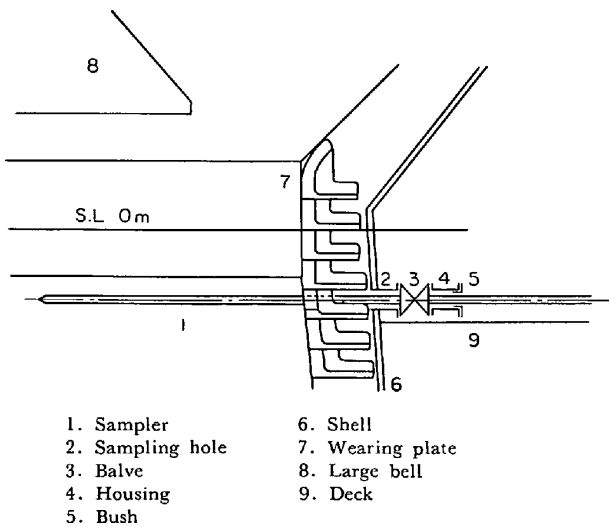


Fig. 4. Schematic figure of horizontal probe at the throat.

却水の流量はとくに監視していない。先端部の円錐形ヘッドには、ガス採取用の小孔が6個あり、この部分はねじ込み式で本体に結合し、ダストによる閉塞に対処できる。材質はともに JIS-SUS 27 である。ガスシールについては、通常時はバルブで行ない、ガス採取中はメタルシール部 4, 5 にて行なう。サンプラーは装入面より上の高さに挿入されるので、ガス採取中は一時、装入を停止する。採取ガスはガスクロマトグラフ法で分析した。

3. 測定結果および考察

3.1 羽口前ガスの採取実験

燃料吹込み時の羽口前におけるガス組成分布を調査した報告は、天然ガス吹込みの場合について数多くある^{1)~6)}が、重油吹込みの場合はきわめて少なく⁷⁾、重油多量吹込みによる炉内現象の変化を理解する上で出発点となる羽口前での重油の燃焼状態には不明の部分が多い。調査を行なうにあたり、次の3点について検討した。

- (1) 重油吹込みに伴う羽口前でのガス組成変化
- (2) 重油吹込み量が重油の燃焼状況に及ぼす影響

(3) 羽口先端までの重油燃焼

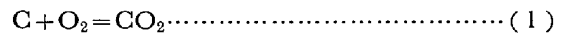
Table 1 に実験条件を一括して示した。実験 1 は第 1 高炉 11 番羽口で、また実験 2, 3, 4 は第 2 高炉 6 番羽口で行ない、実験 1, 2 は重油吹込み量を変化させた場合、実験 3 は重油吹込みノズルの先端位置を変更した場合、実験 4 はたまたま サンプラーが重油噴霧流の真中に挿入された例である。実験 1, 2, 4 で得られた送風方向でのガス組成分布はそれぞれ Fig. 5 (a)~(d), Fig. 6 (a)~(d), Fig. 7 (a)~(b) に示した。

3.2 羽口前でのガス組成分布

3.2.1 重油吹込み量のガス組成分布に及ぼす影響

実験 2 について検討してみよう。重油吹込みによる羽口前でのガス組成分布の変化を考えると、重油無添加の場合が基準となる。この場合、送風中の O₂ は (i) コークスの燃焼、(ii) raceway に巻き込まれた炉内ガスの CO および H₂ の酸化、(iii) 溶銑成分の再酸化などによつて、raceway 内で消費されると思われる。

Fig. 6 (a) によれば、炉芯に向かつて raceway の奥に進むにつれ、O₂% はしだいに低下し、逆に CO₂% は対照的に上昇して、CO と H₂ が生成し始める +0.4m* の位置までは O₂ の消費量と CO₂ の生成量がおおよそ等しい。したがつて、0~+0.4m の位置では、O₂ の消費量よりも CO₂ の生成量のほうが大きくなる (ii) の現象は起こらず、主として (i) の現象がコークス中 C の完全燃焼反応



として進行していると考えられる。

さらに raceway の内部で、CO₂% はいつたん最高点

* 羽口先端を±0 とし、炉内方向を正とする。

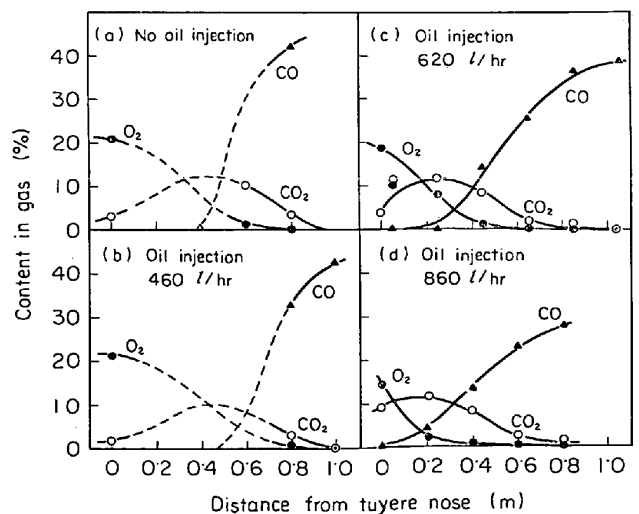


Fig. 5. Distributions of gas composition to the direction of blast flow in experiment No. 1.

Table 1. Experimental conditions at the tuyere where gas samplings were carried out.

Experiment number	Injection rate of heavy oil (l/hr)	Blast volume* (Nm ³ /min)	Oxygen enrichment (%)	Blast temperature (°C)	Blast humidity (g/Nm ³)	Oil/Oxygen (l/Nm ³)	Position of nozzle tip** (mm)
1-1	0	93.8	4.26	1020	12	0	-300
1-2	460	93.8	4.26	1020	12	0.327	-300
1-3	620	93.8	4.26	1020	12	0.440	-300
1-4	860	93.8	4.26	1020	12	0.611	-300
2-1	0	132.2	4.15	1090	16	0	-250
2-2	490	132.2	4.15	1090	16	0.246	-250
2-3	760	131.1	4.18	1090	16	0.384	-250
2-4	900	131.1	4.18	1090	16	0.454	-250
2-5	1020	131.1	4.18	1090	16	0.515	-250
3-1	900	125.0	4.65	1080	18	0.473	-445
3-2	900	122.0	4.76	1080	18	0.481	-104
3-3	780	111.1	4.16	1080	18	0.469	-250
3-4	600	111.1	3.08	1080	18	0.376	-250
3-5	390	111.1	3.08	1080	18	0.244	-250
4-1	880	120.6	3.49	1100	20	0.500	-250
4-2	890	120.6	3.49	1100	20	0.506	-250
4-3	900	120.6	3.49	1100	20	0.511	-250

* Calculated on the assumption that total blast volume is equally distributed to all tuyeres.

** Distance from tuyere nose. The sign is positive to the inward-direction.

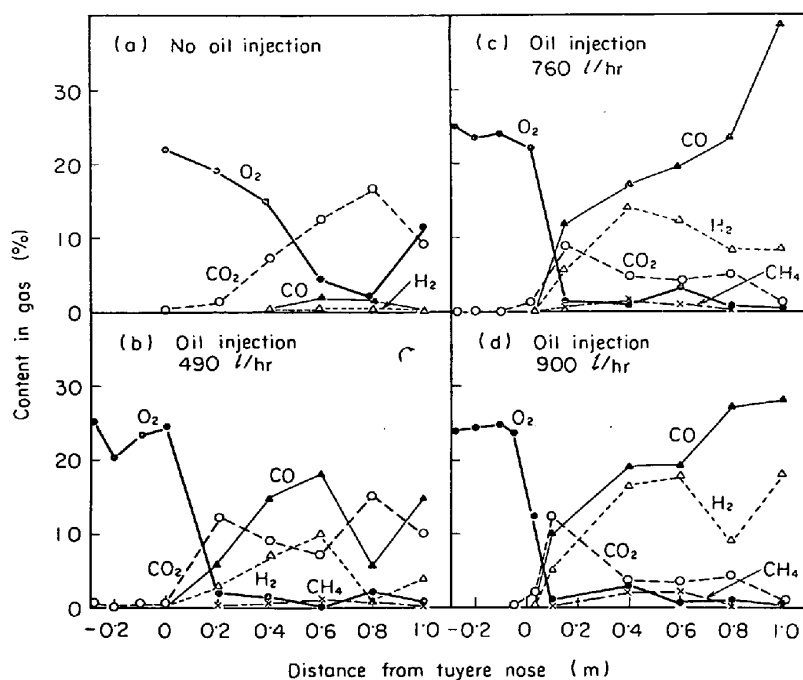
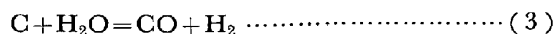
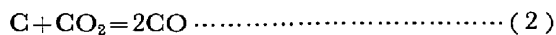


Fig. 6. Distributions of gas composition to the direction of blast flow in experiment No. 2.

に達し、O₂% がほとんど零になる位置からCのガス化反応



により、CO₂% の低下と同時に、CO% の急増とH₂の生成が起こる例を、著者ら³⁾はすでに得ているが、本実

験では、O₂が消費されないばかりか、+0.8mの位置より逆に増加して、COとH₂の生成がおさえられている。この現象については後にふれる。

Fig. 6(b)は490 l/hrの場合で、重油比に換算すると約60 l/tに相当するが、重油吹込みを行わない場合と比較してガス組成分布は明らかに異なっている。おもな相異点は次の4点である。

- (1) 送風が raceway に入るとただちに O₂% は低下する。
- (2) O₂% の低下により、CO₂%, CO% および H₂% の分布は羽口寄りに変位する。
- (3) CO₂ のピークは低くなる。
- (4) CO, H₂ の増加につれ、CH₄ が生成する。

さらに重油吹込み量を増していくと、O₂の消費速度(%/m)には大きな差は生じ

ないが、O₂の分布は羽口寄りに移動して、O₂の消費がより速く開始する。それとともにCO₂, CO およびH₂が羽口先端から同時に生成するという点は、最初にCO₂が生成した後に solution-loss 反応でCO およびH₂が生成するコークスの燃焼およびガス化の現象とは異なるが、O₂% がある程度低下しないとCO, H₂が生成しな

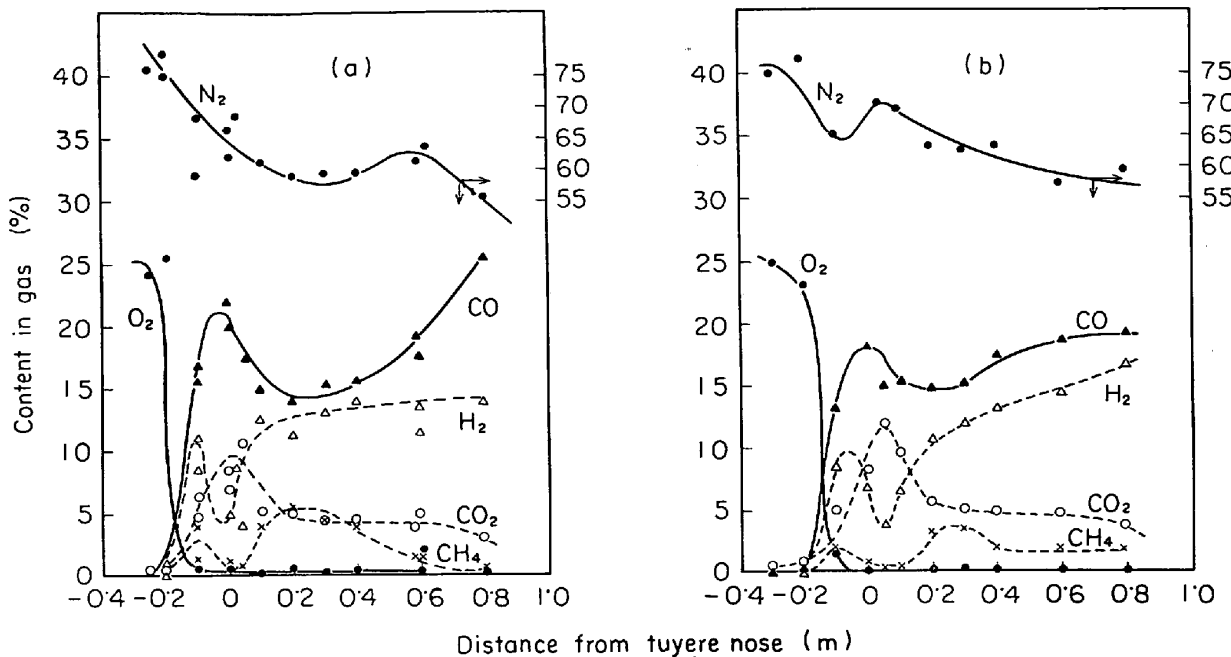


Fig. 7. Distributions of gas composition to the direction of blast flow in experiment No. 4.

いという点では一致している。raceway 入口で急速に消費した O_2 は Fig. 6 (a) と対比すれば、重油の燃焼に費されたことは明らかで、重油吹込み時の特筆すべき現象であり、羽口前での諸現象を支配していると考えられる。

また重油吹込み量を増していくと、 CO_2 のピークは低くなり、逆に CO の生成量は増加する。 $H_2\%$ は重油吹込み量に比例して増加し、 H_2 の生成にわずかに遅れて CH_4 が現われ、 $+0.2\sim 0.8m$ の範囲で炭化水素の熱分解が起こっていると考えられる。 $CH_4\%$ は重油吹込み量にほぼ linear であるが正比例はしていない。

以上の結果にもとづいて、重油噴霧滴の燃焼過程を追跡すると次のように考えられる。ノズル先端で微粒化された噴霧滴は熱風からの対流伝熱および炉内からの輻射伝熱により短時間で加熱され、当初の吹込み温度(約 $100^\circ C$) からただちに蒸発開始温度に達する。滴の表面からは蒸気が発生し、この燃料蒸気と空気との可燃混合気層が滴表面近くに形成され、外部から O_2 が拡散して着火が起こる。このような一連の現象は羽口先端までいくらか起こっていることが、Fig. 6(d) にみるように、羽口先端で $O_2\%$ が低下していることから裏付けられる。

さて raceway に入ると赤熱したコークスが旋回しており、 O_2 の一部はコークスの燃焼に消費されるであろうが、重油とコークスとでは O_2 との接触の機会にかなり差があると考えてよい。すなわち重油は噴霧滴となつ

て送風中に分散相を成し、2 相流として raceway に噴出される。一方、コークスは 2 相流に対する分散相と考えられ、重油が優先的に O_2 と結合する条件ができ上っている。

raceway に入ると、ただちに滴からの燃料蒸気の蒸発、可燃混合気層の形成および燃焼反応などの一連の過程が進行して多くの O_2 が急速に消費され、滴は燃焼熱を受けて、さらに温度上昇する。このため CO_2 の生成はおさえられて、 CO がより多く生成する。またこの状態は炭化水素の熱分解を促し、 H_2 および CH_4 が生成するとともに、コークス状の煤 (cenospheres) を残すこととなる。

重油吹込み量を増すと、送風条件が一定に保たれている場合には、重油量/酸素量の値は上昇し、重油を全量燃焼させるには不利になる。さらに棚沢、抜山¹⁰⁾によれば、重油量/送風量が増加するにつれて噴霧滴の平均径が増大すると推定され、その燃焼性が若干低下すると考えられるが、その濃度は重油吹込み量に比例するので、より多くの O_2 が重油と結合し、ガス組成分布に変化を与えたと考えられる。

3.2.2 ブローパイプおよび羽口の中心軸を中心とする半径方向のガス組成分布

重油はブローパイプの側壁を貫通して挿入されたノズルから吹込まれており、このノズルは送風の方向に対して 13° の角度をなし、その先端は羽口中心軸より数 cm はなれた位置にある。羽口内部を目視観察すると、ノズ

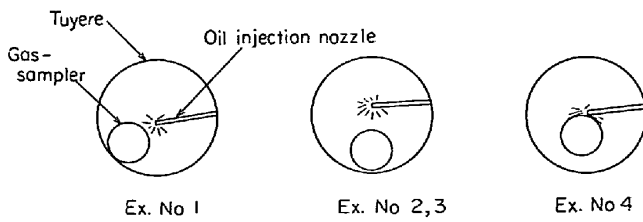


Fig. 8. Schematic correlations between radial positions of oil injection nozzle and gas sampler observed with visual inspection through the peeping hole.

ル先端より黒いかさ状の噴霧流が形成されているのが認められ、噴霧滴はただちに送風中に分散することができず、噴霧流の拡大とともに空気との混合が進行すると考えられる。したがって噴霧滴が多い中心部と O_2 が十分にある周辺部とでは燃焼する重油量に差が生じ、ノズルとガスサンプラーの相対的な位置関係によって、得られるガス組成分布は大きく変化する。Fig. 8 は各実験でのノズルとガスサンプラーの半径方向位置を示している。この位置関係を任意に変更するための工夫は施していないので、休風時に、羽口・羽口接続管あるいは冷却函などを取り換えると、従前のものとは異なってしまう。

実験 2 ではガスサンプラーはノズルから離れており、この領域は噴霧滴の濃度が低く、羽口先端までには O_2 の消失は少ない。一方実験 4 ではガスサンプラーは噴霧流の内部に入つて重油はそれを包み込むように吹込まれている。Fig. 7 (a), (b) に示すように、 O_2 は $-0.1m$ の位置でその大部分が消費され、同時に CO, H_2, CO_2 その上に CH_4 までが生成し、実験 2 の分布で $+0.8m$ までの変化が羽口先端までに圧縮され、明らかにこの領域では重油量/酸素量の値が大きく、噴霧滴の濃度の高いことがわかる。

しかし羽口先端では、 $CO\%$ 、 $H_2\%$ および $CH_4\%$ はともに一度減少し、raceway に入ってから再び増加している。このことは raceway 入口の前後でガス組成分布に異状を起こす原因となるなんらかの混合現象のあることを示唆している。

これらの結果は不十分なものであるが、噴霧流内での重油の燃焼を考えると、噴霧滴と空気との混合は非常に重要な問題であるといえる。

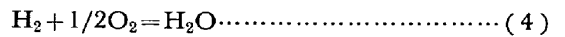
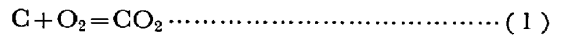
3.3 ノズル先端—羽口先端間における重油の燃焼

3.3.1 重油吹込み量の影響

実験 1 ではノズルとガスサンプラーの相対的な位置が実験 2 と実験 4 との中間にあり、羽口先端での $O_2\%$ は断面平均値により近い値を示していると考えられる。この実験では重油吹込み量の増加につれ、羽口先端での

$O_2\%$ は次第に低下している。ここで、実測値を断面平均値と仮定し、 O_2 の物質収支により、燃焼した重油量を計算する。

この区間にはコークスは存在しないので(1)、(4)式によつて、重油のみが燃焼する。このとき O_2 は重油に含まれる C と H の比率に従つて、C と H の燃焼に分配され、(1)、(4)式以外の反応は起こらないと仮定する。



前述のように、炉内ガスの分析値は乾ガスの組成を示しており、水蒸気を含まない羽口先端部での炉内ガスの O_2 容積分率 $X'_{O_2}(-)$ は、単位時間当たりの平均容積分率に等しいと考えると、(5)式が得られる。

$$X'_{O_2} = \frac{60V_B(0.21 + X_{O_2}) - 22.4 \cdot \rho_O \cdot N_O \cdot (C_O/12 + H_O/4)}{60V_B - 5.6 \cdot \rho_O \cdot N_O \cdot H_O} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 N_O : 燃焼した重油の容積流量 (l/hr), ρ_O : 重油密度 (kg/l), C_O : 重油中 C の重量分率 (-), H_O : 重油中 H の重量分率 (-), V_B : 羽口 1 本当たりの富化酸素を含んだ乾送風量 (Nm³/min), X_{O_2} : 酸素富化率 (%/100)。

X'_{O_2} は実測値であるから、 N_O は(5)式を変形して求められる。Fig. 9 に X'_{O_2} と N_O を重油吹込み量 V_O (l/hr) に対して示した。図によれば、 $V_O = 460 \sim 860$, 重油量/酸素量 = $0.3 \sim 0.65$ で、 N_O/V_O は $0.25 \sim 0.4$ の

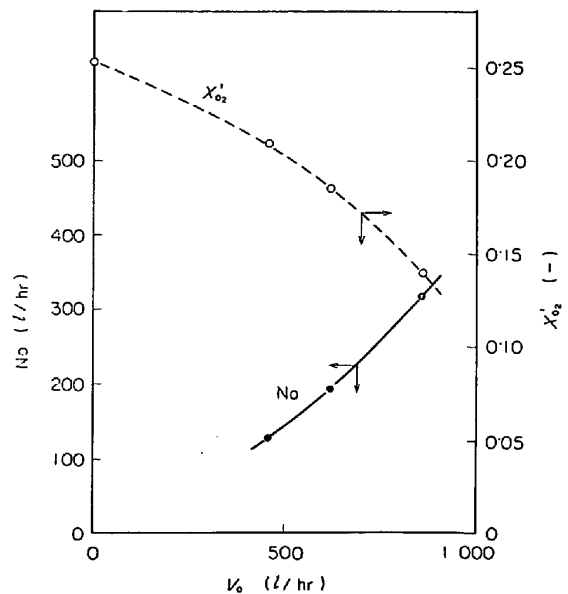


Fig. 9. Dependence of the burning rate inside the tuyere N_O and oxygen content in sampled gas at the tuyere nose X'_{O_2} on the injection rate V_O .

値をとつている。しかし、重油は多くの成分を含んでいるので、沸点の低いものから順次蒸発して滴の成分はしだいに沸点の高い炭素数の大きなものが多くなつていくといわれ、燃焼初期に(4)式の反応がより多く起こるならば、 N_0/V_0 はもつと低くなる。この値をより厳密に求めるためには、燃焼生成物である H_2O を定量し、可燃混合気の化学組成を知る必要がある。

また N_0/V_0 の計算値は V_0 とともに増加しているが、重油噴霧滴の濃度が増すと、滴間の相互作用が強くなつて、互いに着火を誘発し、燃焼速度が速められるためである。

3.3.2 ノズル先端位置の影響

前節で、吹込まれた重油の一部が羽口先端までに燃焼することが明らかになったが、ノズル先端を炉外方向へ移動させるならば、この区間で燃焼する重油の量は増加すると容易に想像できる。実験3はこれを確認するためのものである。

第2高炉で通常使用している重油吹込みノズルの全長(ユニオンからチップ先端まで)は1.95mで、その先端は-250mmの位置にある。このノズルに加えて、200mm短いものと、150mm長いものを使用し、実験は重油吹込み量900l/hrで一定、あるいは重油量/酸素量を一定として行なつた。

ガスサンプラーの位置は噴霧滴が少ないと思われる領域にあり、ノズルの先端位置はほぼ水平方向に変化したので、羽口部での半径方向分布の影響を強く受けていない。Fig. 10は O_2 および CO_2 の分布を示しているが、ノズル先端が後退するにつれ、それらはいずれも炉外方向に移動し、重油の燃焼が早められている。羽口先端での O_2 % は実験 3-1, 3-3, 3-2 でそれぞれ 17.5%, 22.0%, 22.5% であり、実験 3-1 の場合、しだいに O_2 % が低下していくのが認められる。また O_2 および CO_2 の分布曲線の移動幅は必ずしもノズル先端の移動幅と一致せず、前者は後者からいくらか割り引かれるようである。これらの結果をもたらす原因として考えられるのは、噴霧滴の滞留時間が長くなることと、噴霧流が大して滴の分散が進むことであろう。結局ノズルを炉外方向に後退させることは、ガス組成分布に関して、重油吹込み量を増加させることと類似した傾向をもたらすが、重油の燃焼に、より多くの O_2 を活用できるという利点がある。

3.4 raceway 内部での送風の流れ

BARDIN ら¹⁰⁾は羽口前からガスを採取し、送風量がある値以上の循環燃焼状態では、 CO_2 分布に2個のピークが出るのが普通であるとしているが、GOTLIB¹¹⁾がザ

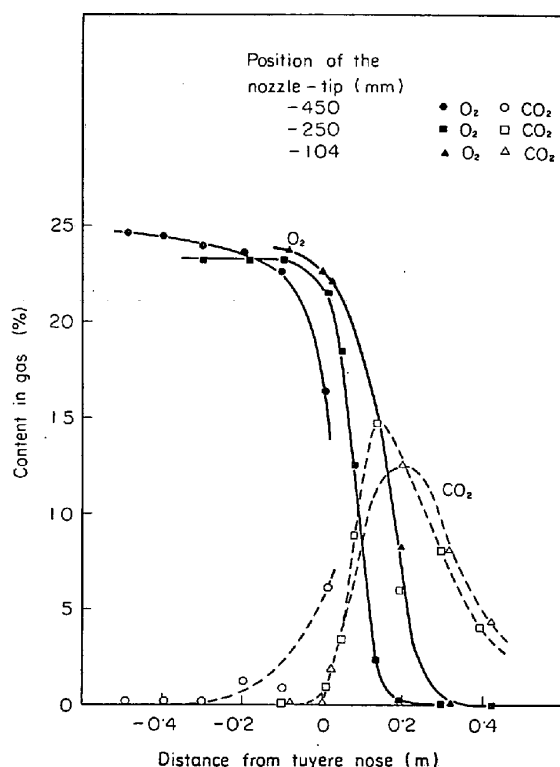


Fig. 10. Relation between the positions of nozzle-tip and the distributions of gas composition.

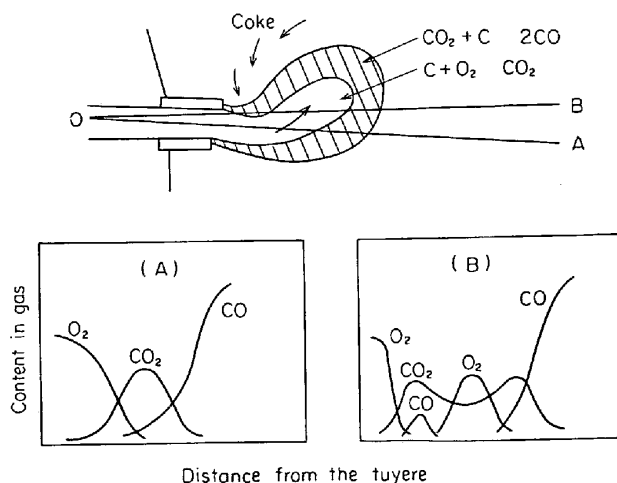


Fig. 11. Schematic figures of the gas flow and the distributions of gas composition in the raceway.

ボロジスターリ第3高炉で調査した結果によれば、 CO_2 分布に1個のピークしか現われていない。これはどちらか一方が真実だというのではなく、どちらも raceway 内の分布を示していると考えるのが妥当である¹²⁾。その理由は送風が羽口中心軸の延長線上でコークスの壁にぶつかり、上方に曲げられると考えれば説明できる。すなわち、Fig. 11に示すように、ガス採取をO-A方向(羽口中心軸方向)で行なえば、A型の分布を示し、O-A方

向より上向きの O-B 方向ならば、B 型となる。

本実験でも両方の型がみられる。すなわち実験 1 は A 型であり、実験 2 は B 型に近い。実験 2 についてガス組成分布を検討すると、Fig. 6 に見られるように重油を吹込まない場合は B 型の好例で、+1 m の位置で O₂% が再び高くなり、CO₂% は対称的に低下している。重油が吹込まれるとガス組成分布は複雑になつてくるが、CO₂ 分布には 2 個のピークがはつきりと現われる。重油吹込み量が 490 l/hr の場合には、+0.6~0.8 m に O₂ のピークが現われ、CO、H₂% は急激に低下する。一方 CO₂ 分布は鞍部をなす。760 l/hr の場合には、O₂ のピークが +0.6 m にあつて、鞍部をなす CO₂ 分布と対応しているが、CO、H₂% の著しい低下は起こっていない。900 l/hr の場合には、ガス組成分布の不均一性はさらに複雑になり、O₂ 分布にも +0.4 m と +0.8 m の位置にピークがある。+0.4 m では CO₂ 分布は鞍部をなし、一方 +0.8 m では H₂% が低下している。

これらの結果から、O₂ 分布に現われるピークは燃焼反応に消費されずに残った送風中の O₂ に起因し、この現象が定常的に継続するものならば、酸化帯のわん曲をその原因とすることができるが、ここで問題となるのは、CO および H₂ は気相中で O₂ と均一反応で結合し、その反応速度はきわめて速いとされているにもかかわらず数%の O₂ と 10% 以上の CO および H₂ が共存していることである。実験上の問題点として、ガス採取配管系統のガスパーシと捕集ビンの気密性があるが、十分な注意を払つており、他にその原因を求めねばならない。

VOLKOV ら⁹⁾および GORSHIKOV ら¹⁰⁾は天然ガスを吹込んで高炉で羽口前のガス組成分布を調査しているが、本実験と同様に CO および H₂ が O₂ と共存している部分のあることが認められる。また GORSHIKOV らの実験では CO および H₂ の分布に 3 個のピークがあらわれる場合もあり、この種の不均一な分布は天然ガスと送風空気との不十分な混合に起因するとし、両者の圧力差が小さく天然ガスの噴出にむらが生ずること、送風量が天然ガス流量よりはるかに大きいこと、および混合しうる区間が短いことをその理由に挙げている。

重油吹込みの場合には、滴を包む可燃混合気層で燃焼が起こるから、局所的な濃度分布の不均一性は気体燃料の燃焼に比較して著しいものがある。そして多成分の混合ガスが水冷サンプラーに採取されるときに急冷されて、あたかも CO および H₂ が O₂ と共存しているような結果を与えるのではないかと考えられる。

また、1 回のガス採取中に raceway 内でガスの流れが変化すれば、ガス組成にその影響が現われるであろう

Table 2. Chemical compositions of soots and heavy oil.

Sample	No	C	H	S	Ash
Soot	1	84.2%	3.74%	2.26%	1.0%
	2	84.7	3.60	—	—
Heavy oil		86.0	12.1	1.20	—

し、噴霧滴の分散が不均一になり、そのため O₂ の消費にむらが生ずることも十分可能性がある。このほかにもガス組成分布を乱す要因は多くあり、raceway 内部に数%の O₂ が残留することだけから、送風の流れが上方に曲げられていると断定することはできない。

今後この点の検討を行なうためには、ガス採取の方法を改善し、raceway 内での流れあるいは火炎の安定性について調査する必要がある。

3.5 煤について

実験 4-3 は煤の採取のみを目的とした実験で、+0.2 m の位置で行なつた。Fig. 7 のガス組成分布によれば、CH₄ がピークをなす位置であり、煤は最も多く発生していた。化学組成を Table 2 に示したが、試料 1 はフィルターの手前に設けた塩化ビニールの容器に捕集した比較的粒の大きい煤、一方試料 2 はフィルターで捕集した煤で微細な粒である。両者には明らかな有意差は認められないが、ともに H が 3.6~3.8% に低下し、重油から約 2/3 の H が離脱している。一方 C% の低下は数%にとどまつている。

3.6 炉芯測定で得た raceway の深さ (L_d[m])

oil ratio の増加につれ、外部操業の傾向になると経験的にいわれているが、外部操業を招く最大の原因は、装入物の分布に変化がない場合には、raceway の縮小であろう。

重油吹込み量を増す場合、重油とコークスの置換率に見合う ore/coke の上昇が必然的に起こり通気性が悪化するので、これを避けるため酸素富化率を増し、富化酸素の増加分に相当する送風空気を減らすのが一般的である。したがって、送風量を減らすと送風温度をいくらか上げられるので、この上昇分だけ送風の運動エネルギーが高まるが、全体としては送風量の影響が大きく、送風の運動エネルギーが低下することは避けられない。

raceway の拡がりについての解析には、諸家の報告^{18)~19)}があるが、著者らは重油吹込み量との関係を求めるため、羽口カバーの孔から直径 19 mm の金棒を入るところまで差し込んで行なういわゆる炉芯測定を採用した。第 2 高炉を対象に、重油多量吹込み操業を含む 5 カ月間

にわたつて、重油吹込み量が変更されるごとに測定した。足場がなく炉芯測定を実施できない羽口があり、 L_d は全羽口の約 7 割に対する平均値とした。また送風の運動エネルギー E_k (Kg·m/sec) は(6)式で計算したが、これは BARDIN ら¹³⁾、BYALYI¹⁴⁾ らが用いた値に、酸素富化率と送風湿分を考慮したものである。

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \frac{\{4(0.21 + X_{O_2}) + 28\} / 22.4 + \varphi_B \cdot 10^{-3}}{9.8} \cdot \frac{(V_B/60)^3}{n^3 (\pi D^2/4)^2} \cdot \left(1 + \frac{22.4 \varphi_B}{18000}\right)^2 \cdot \left(\frac{P_0}{P_B} \cdot \frac{T_B}{T_0}\right)^2$$

..... (6)

ここに、 φ_B : 送風湿分 (g/Nm³)、 n : 羽口数 (個)、 D : 羽口径 (m)、 P_B : 送風圧力 (atm)、 P_0 : 1 (atm)、 T_B : 送風温度 (°K)、 T_0 : 273 (°K)

L_d は E_k に強く依存し、 E_k の増加とともに L_d は大きくなるが、 L_d に及ぼす重油吹込み量の影響も無視できないと考え、 L_d を特性値に、 E_k および V_O を要因とした重回帰分析を行なつた結果、(7) 式が得られた。

$$L_d = 0.88 + 0.92 \times 10^{-4} E_k - 0.37 \times 10^{-3} V_O \dots (7)$$

あるいは

$$L_d = 0.88 + 0.92 \times 10^{-4} E_k (1 - 4.0 V_O / E_k) \dots (7)'$$

Fig. 12 には (7)' 式と実測値をともに示したが、± 0.1m の誤差で一致している。

3.7 炉口部におけるガス組成分布

第 2 高炉において、重油増量期に装入物面直上レベルの半径方向ガス組成分布を調査するために、炉口部のガスサンプラーで炉内ガスを採取した。

Table 3 にガス採取時の操業条件を示した。重油吹込み量を 13 800 l/hr から 15 600 l/hr に増す際にコークスペースを 0.5 t 下げたが、コークスペースを下げることは中心部への鉍石の流れ込みを抑える効果があり、炉芯測定で重油増量につれ ore/coke を上げれば、中心部の通気抵抗が増加して外部操業の傾向が強まることを心配したためである。

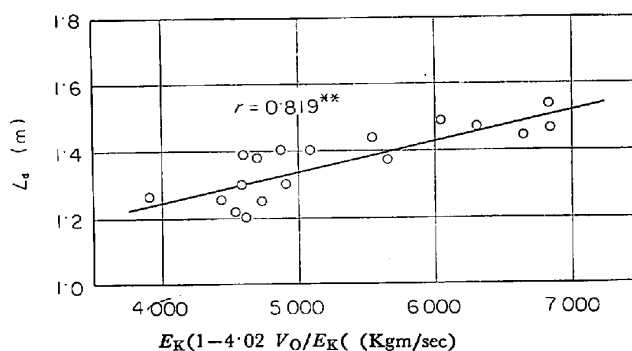


Fig. 12. Relation between the blowing condition at the tuyere and the depth of raceway.

Fig. 13 および Fig. 14 にはそれぞれガス組成分布と CO ガス利用率の分布を示した。重油吹込み量がガス組成分布に及ぼす影響を定量的にとらえることは非常に困難であるが、重油吹込み量の増加につれ、中心部の CO ガス利用率が向上していることは明らかである。ガス利用率が向上するための条件として鉍石層厚の増大とガス流速の低下が考えられるが、後者は前者の結果でもありうるので、両方の影響がガス利用率の向上につながつたと考えられる。一方、周辺部でのガス利用率には明確な傾向が認められず、中心部のガス利用率向上の反映はない。H₂% は重油吹込み量とともに全体的に上昇しているが分布の推移には明らかな傾向はない。

結局、炉口部でのガス組成分布からは外部操業の傾向を明らかにすることはできなかつたが、これらの結果は重油吹込み量の増加にもかかわらず、半径方向のガス組成分布は悪化せず、順調な炉況を維持できた裏付けとも考えられる。

4. 結 言

羽口ガスサンプラーおよび炉口部ガスサンプラーを用いた炉内ガス採取、炉芯測定により、重油吹込みに伴う炉内現象の変化を調査して以下の結果を得た。

(1) 羽口に重油を吹込むと、下記の現象がみられる。

Table 3. Operational conditions during the sampling of top gas.

No	Blast volume (Nm ³ /min)	Blast pressure (Kg/cm ²)	Top pressure (Kg/cm ²)	Oil injection rate (l/hr)	Enriched oxygen (Nm ³ /hr)	Composition of top gas (%)			Ore/Coke (-)	Coke base (t/ch.)
						CO	CO ₂	H ₂		
I	2 540	2.20	0.75	9 800	5 000	26.0	20.5	3.6	3.53	8
II*	2 450	2.14	0.75	10 100	5 500	26.0	20.5	3.6	3.57	8
III	2 430	2.06	0.75	13 500	6 000	23.9	21.3	4.6	3.90	8
IV	2 390	2.13	0.75	13 800	6 500	23.0	22.0	4.9	3.96	8
V	2 360	2.02	0.75	15 600	7 000	22.8	21.3	5.1	4.24	7.5
VI	2 360	2.14	0.75	16 000	8 000	23.7	21.8	5.4	4.23	7.5

* This test was carried out three hours after the repairs of rotating hopper from the trouble.

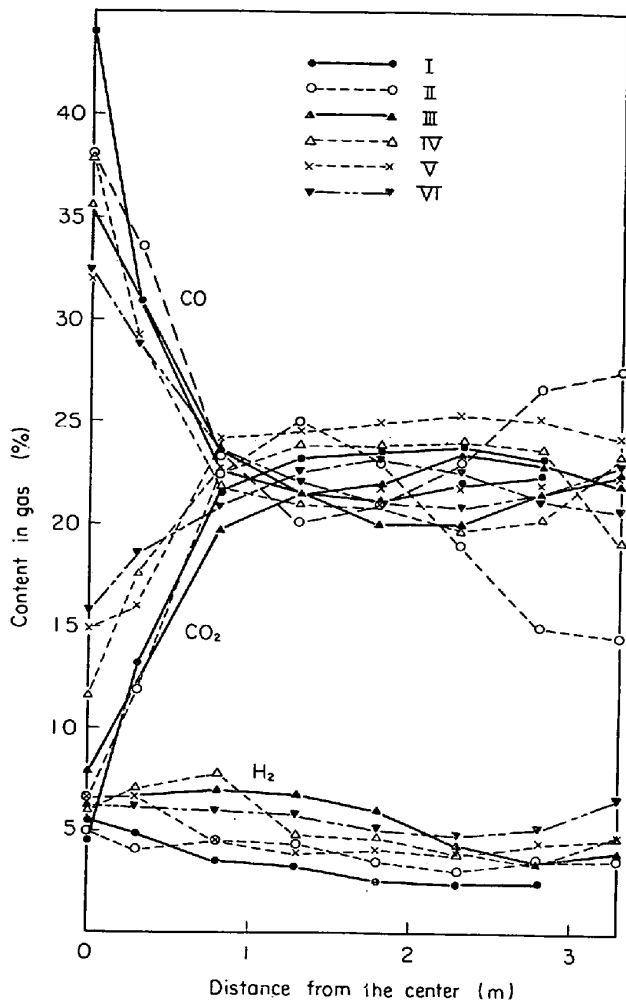


Fig. 13. Radial distributions of gas composition at the top of the shaft.

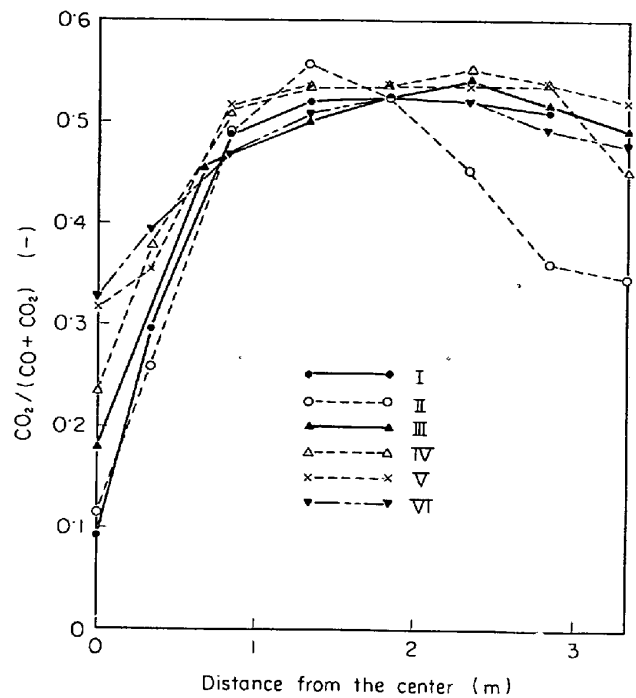


Fig. 14. Radial distributions of $CO_2/(CO+CO_2)$ at the top of the shaft.

$$L_d = 0.88 + 0.92 \times 10^{-4} E_k - 0.37 \times 10^{-3} V_o$$

..... (7)

(5) 炉口部でのガス組成分布によれば、重油吹込み量の増加につれ、中心部のCOガス利用率は向上しているが、周辺部のCOガス利用率およびH₂ガスの分布には明らかな傾向が認められなかった。

文 献

- 1) Z. I. NEKRASOV, et al.: *Stal in Eng.*, (1962), p. 169
- 2) K. I. KOTOV, et al.: *ibid.*, (1965), p. 85
- 3) G. V. GORSHIKOV, et al.: *ibid.*, (1965), p. 687
- 4) G. A. PANEV, et al.: *ibid.*, (1966), p. 171
- 5) Y. P. VOLKOV, et al.: *ibid.*, (1966), p. 337
- 6) Y. M. BORTS, et al.: *Metallurg*, (1967), No 3 p. 3
- 7) Y. S. BORISOV, et al.: *Stal in Eng.*, (1965), p. 438
- 8) 岡部, 稲谷: *鉄と鋼*, 56(1970)4, S 45
- 9) 抜山, 棚沢: *日本機械学会誌*, 5(1938), p. 136
- 10) I. P. BARDIN, et al.: *Izv. VUZov, Cher. Met.*, (1955), p. 80
- 11) A. D. GOTLIB: “高炉製鉄法の理論” (1958), p. 291
- 12) 下村: *学振*, 54委, 1059 (1967)
- 13) I. P. BARDIN, et al.: *Freiberger Forsh.*, B25 (1955), p. 80
- 14) L. A. BYALYI, et al.: *Izv. VUZov, Cher, Met.*, (1963), p. 27
- 15) J. TAYLOR, et al.: *JISI*, 187(1957), p. 330

(i) 送風が raceway に入るとただちに O₂% は低下する。

(ii) CO₂%, CO% および H₂% の分布は羽口寄りに変位する。

(iii) CO₂ 分布に現われるピークは低くなる。

(iv) CO, H₂ の増加とともに CH₄ および煤が生成する。

(2) 羽口部の半径方向にはガス組成に著しい分布が生ずる。噴霧流の中央部では、重油がノズルから出た直後に O₂ はその大半が消費されるが、周辺部では噴霧滴の分散が十分でなく、羽口部で重油の燃焼に費される O₂ の割合は少ない。

(3) ノズル先端—羽口先端間で O₂ の物質収支をとることにより、この区間でかなりの重油が燃焼していることを確認した。またノズルの先端位置を炉外方向に移動させると、この区間で燃焼する重油量は増す。

(4) 長期にわたつて、操業中の高炉で炉芯測定を行なつたところ、(7)式に示す回帰式が得られた。

-
- 16) *J. F. ELLIOT, et al.*: *J. Metals*, 4(1952), p.709
17) *H. WYSOCKI, et al.*: *Stahl u. Eisen*, 86 (1966),
p. 761
18) *J. B. WAGSTAFF and W. H. HOLMAN*: *Blast*
Furn. Coke Oven & Raw Mat. Comm. Proc.,
15(1956), p. 95
19) *C. C. GARDNER*: *Trans. AIME*, 218(1960),
p. 423
-