

© 1988 ISIJ

技術報告

高炉レースウェイにおよぼす複合送風の影響

中村正和*・杉山 喬*²・鶴野建夫*³・原 行明*⁴

Effect of Blast Conditions on the Raceway of the Blast Furnace

Masakazu NAKAMURA, Takashi SUGIYAMA, Takeo UNO and Yukiaki HARA

Synopsis :

The raceway in front of tuyere of the blast furnace has been studied on an experimental furnace by means of penetration measurements, temperature measurements and gas composition survey. At the end of experiment, raceway is filled with light alumina particles carried by blast and is quenched with nitrogen gas. Then, profiles of the raceway, amounts and properties of coke in the raceway have been measured. The effects of operating variables such as amount of fuel injection, oxygen enrichment and blast temperature on the distribution of temperature and composition of gas have been studied.

As the change of reaction condition around the raceway, it results in movement of position where reaction of coke takes place. It causes change of gas volume distribution and disintegrated coke particle distribution. Then profile of raceway and path of gas in the furnace are affected.

In this way, the mechanism of shrinkage of raceway in the case of fuel injection which sometimes has been observed in the commercial furnace operation, is explained.

Key words : ironmaking ; fuel ; raceway ; blast furnace.

1. 緒 言

2. 実 験 方 法

1960年頃から石油ショックまでの約10年間、重油の高炉羽口への吹込みが大々的に行われ、これに付随して酸素富化操業、脱湿操業などのいわゆる複合送風がいろいろと試みられた。その結果は「鉄と鋼」に高炉複合送風特集号として総括されている¹⁾。

しかし、1978年の石油危機以降、高炉における重油使用はコスト的に不利となり、オールコークス操業を経て近年では羽口への微粉炭吹込みが実施されている。また、最近では複合送風が高炉操業上の話題になることも少なくなつた。しかしながら、羽口における応答性に優れた操作要因としての複合送風の重要性が失われた訳ではない。前報²⁾においてはレースウェイ形状決定の基本的要因として、常温送風条件下での送風量、羽口径およびコークス粒径の影響について報告した。本報では送風温度、燃料吹込み量および酸素富化送風などのレースウェイ形状におよぼす影響について検討する³⁾。

実験装置は Fig. 1 に示す幅 405 mm、奥行き 586 mm、高さ 670 mm の燃焼炉で高アルミナ質の耐熱磁製送風羽口を有し、羽口先端に黒鉛スリーブを装着してスラグによる侵食を回避した。実験の最終段階で送風と共に炉内に吹込みレースウェイの崩壊・変形を防ぐためのアルミ

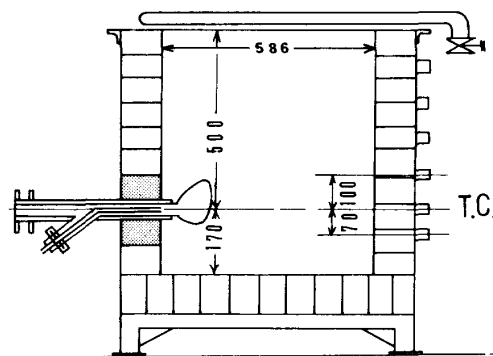


Fig. 1. Experimental apparatus.

昭和 50 年 4 月・10 月本会講演大会にて発表 昭和 62 年 11 月 30 日受付 (Received Nov. 30, 1987)

* 新日本製鉄(株)特別基礎第二研究センター (現:日鉄技術情報センター) 工博 (Fundamental Research Lab.- II, Nippon Steel Corp., Now Japan Technical Information Service, 1-6 Kojimachi Chiyoda-ku, Tokyo 102)

*² 新日本製鉄(株)製鉄研究センター 工博 (Ironmaking Technology Lab., Nippon Steel Corp.)

*³ 新日本製鉄(株)製鉄研究センター (Ironmaking Technology Lab., Nippon Steel Corp.)

*⁴ 新日本製鉄(株)エネルギー研究センター (現:日鉄化工機(株)) 工博 (Energy Technology Lab., Nippon Steel Corp., Now Nittetu Chemical Engineering Ltd.)

Table 1. Experimental conditions.

Exp. No.	41	42	43	44	45	46	47	48	51	52	53	54
Blast vol. (Nm ³ /min)	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
Blast temp. (°C)	R. T.	R. T.	R. T.	R. T.	R. T.	R. T.	R. T.	R. T.	R. T.	200	420	580
Fuel (C ₃ H ₈) vol. (l/min)	0	16	33	48	33	33	33	0	0	0	0	0
O ₂ vol. (l/min)	0	0	0	0	31.2	73.6	98.4	31.2	0	0	0	0
Cal. flame temp. (°C)	1455	1336	1226	1138	1350	1505	1594	1583	1455	1595	1755	1905

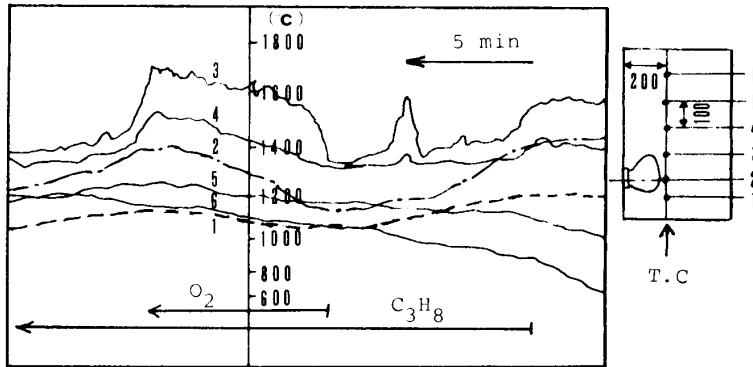


Fig. 2. Temperature correspondence to the O₂ injection.

ナ粒子の容器が羽口手前の送風管に付けられている。実験炉の背面には炉内の温度分布、ガス組成分布を測定するための測定孔を7個もっている。また、炉頂部に都市ガスによるフレームカーテンを作り、炉内で発生したCOガスを完全燃焼させて大気放散した。送風温度の上昇は30kW×3の電気炉により行つた。测温は1900°C以下はPt-Rh(20-40)熱電対で、それ以上の温度域では水冷銅製プローブの先端に取り付けた黒鉛ブロックの温度をファイバースコープを介して放射温度計(IRCON社)で測定した。

本報における一連の実験では、送風量：1.2 Nm³/min、羽口径(D_T):30 mm、装入コークス粒径:10-20 mmなどは一定とし燃料吹込み量、酸素富化率および送風温度などを変化させた。Table 1に実験条件を示す。実高炉においては吹込み燃料として重油が用いられているが、微小な重油吹込みノズル製作が困難であつたこと、また実験装置が反応に関しては必ずしも縮尺の条件になつておらず、難燃性の重油ではレースウェイ空間で燃焼が完結しないおそれがあることなどからプロパンガスを吹込み燃料として使用した。また酸素はボンベから流量制御装置を経由して高温空気の送風管中に供給した。

3. 実験結果

Fig. 2に燃料吹込みおよび酸素富化に伴う炉内温度の推移の一例を示す。炉内温度は燃料のプロパンガス吹込みにともない低下し、酸素富化とともに上昇する。特にレースウェイ直上部の温度変化が著しい。ビデオカメ

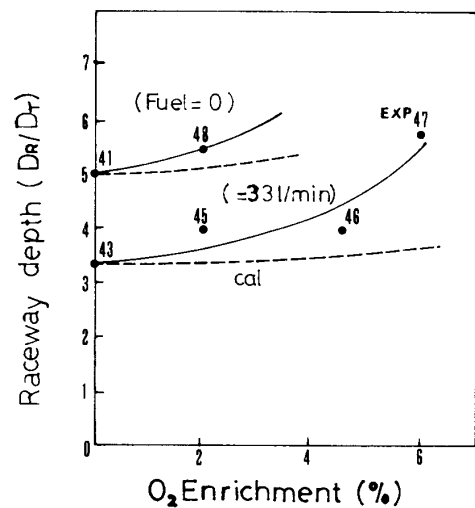


Fig. 3. Effect of O₂ injection on the raceway depth.

ラによる観察によれば、コークス旋回が酸素富化とともに活発化し輝度も上昇する。一方、燃料吹込み量を増加すると炉内温度は低下しコークス旋回は停滞する。燃料吹込み量が多い場合にはレースウェイ最奥部に直径10 μm程度、長さ20~30 mmのよじれた形をした炭素質繊維の生成が認められた。

レースウェイ奥行き(D_R)に対する燃料吹込み量(V_F)および酸素富化率の複合効果をFig. 3に示す。燃料吹込みによつてレースウェイが縮小すること、また、酸素富化率の上昇によりレースウェイが拡大することが分かる。WAGSTAFF以来、レースウェイ深さは羽口先送風線速度により整理されてきた。図中点線は、著者らが

前報で示したレースウェイ深度と送風線速度の関係式にもとづいて計算した、酸素添加をともなう羽口先衝風速度の上昇分に対応するレースウェイ拡大の推定値である。実測値がこれを越えているところから、単なる羽口先ガス速度変化以外の効果が現れていることになる。Fig. 4 に酸素富化率 (R_O) で層別した燃料吹込み量の効果、および送風温度の影響を示した。実高炉における燃料吹込み操業で、レースウェイが縮小することが清水

ら⁴⁾、羽田野ら⁵⁾により報告されている。本実験でもプロパンの吹込みによつてレースウェイ奥行きが減少するが、さらに吹込み量を増やすと再び増加してくる。なお、送風温度 (T_B) の影響が少ない。レースウェイ幅に関してはほとんど有意な規則性が得られなかつた。また、高さや送風条件の関係を Fig. 5 に示す。燃料吹込み量の増加に伴い高さが減少し、酸素富化に伴い増加している。送風温度の上昇はほとんど影響がない。前報における送風量・羽口先ガス速度のみ変化するような奥行きと高さの単調な反比例的関係と異なり、その挙動は複雑である。

レースウェイ容積 (V_R) は、Fig. 6 に示すように酸素富化によつて著しく増加し、燃料吹込みにより減少す

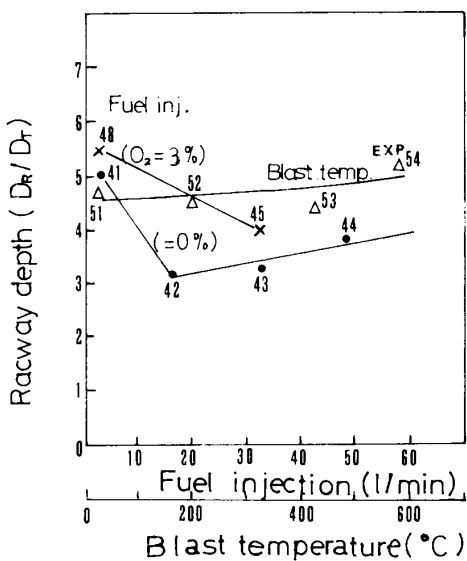


Fig. 4. Effect of fuel injection and blast temperature on the raceway depth.

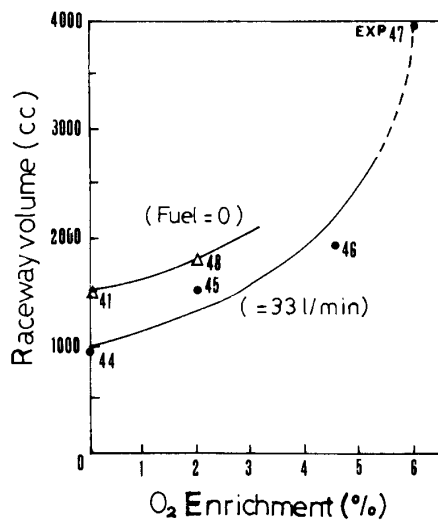


Fig. 6. Effect of O_2 enrichment and fuel injection on the raceway volume.

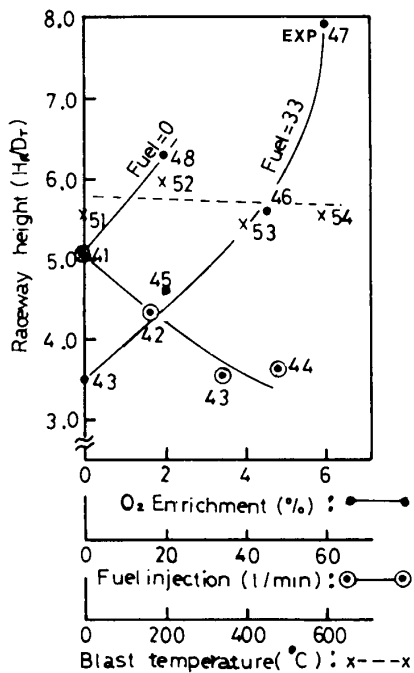


Fig. 5. Effect of blast condition on the raceway height.

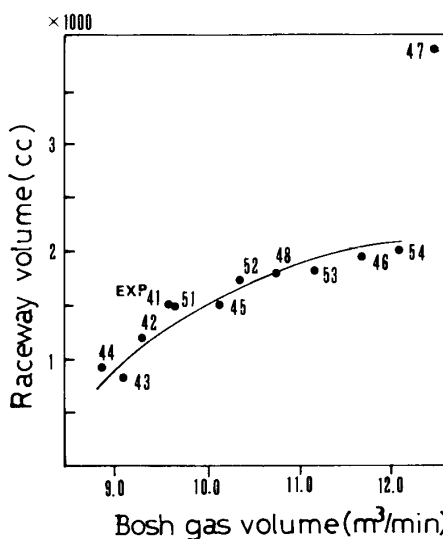


Fig. 7. Relationship between bosh gas volume and raceway volume.

る。また、送風温度上昇とともにわずかに増加する。羽口におけるテレビ観察により酸素富化とともにコークス旋回が活発化し、反対に燃料吹込みにより不活発化することが認められていて、これはレースウェイ容積の増減と一致する。レースウェイ容積の大小に注目すると、ボッシュガス量 (V_{Bosh}) が多いとき、あるいは理論燃焼温度 (T_f) が高い場合にレースウェイが拡大することに気がつく。Fig. 7 に理論燃焼温度で温度補正を行つたボッシュガス量 (V_{Tf}) に対してレースウェイ容積 (V_R) をプロットした。酸素富化率を大きくした実験 (Exp. 47) が特異点として外れるが、その他の点は1本の曲線上に良く乗つていてレースウェイ容積がレースウェイ内で発生するガスの容積に関係していることを示唆している。なお実験 47 においては、理由は明確でないがレース

Table 2. CO₂ concentration at highest temperature zone.

Exp. No.	Fuel (l/min)	O ₂ enrich. (%)	CO ₂ /(CO + CO ₂)
41	0	0	0.080
42	16	0	0.150
43	33	0	0.180
44	48	0	0.170
45	33	2	0.045
46	33	4.5	0.035
47	33	6	0.025
48	0	2	0.010

ウェイ周辺の含スラグコークス殻が異常に発達していたところから、コークスのレースウェイへの円滑な供給が妨げられ、これがレースウェイ容積異常の原因となっている可能性がある。

一連の実験でのレースウェイ形状および炉内の温度分布の例を、Fig. 8 a) から d) に示す。Fig. 8 a) は基準送風条件の場合、b) は燃料吹込みの場合、c) は酸素富化の場合、d) は送風温度を高めた場合である。これらの温度分布から明らかになったことは以下のとおりである。燃料吹込み時には、燃料の分解による吸熱の影響で、羽口前に低温部分ができ、次いで燃料の燃焼とともに温度が急上昇する。したがって、羽口先端部から、その直上に位置する燃焼焦点に向かつて急激な温度勾配が生じる。酸素富化により最高温度が上昇するとともに高温域が拡大する。送風温度の上昇により燃焼焦点の位置が下がり、同時に羽口先端に近づく。最高温度位置は、いずれの送風条件下においてもほぼレースウェイ頂部に位置している。つまり、レースウェイ内ガスの主流がコークス充填層へ侵入すると思われる位置付近が最高温度点となつている。レースウェイからコークス充填層へ若干入った位置でガス組成の定点測定を行つた。ガス吸引時の空気混入 (低温部) のため CO₂ 濃度を (CO+CO₂) との比で表す。結果を Table 2 に示す。酸素富化の無い時には燃料吹込み量と CO₂ 比との間に明瞭な関係が認められないが、特徴的なのは酸素富化時に CO₂ 比が著しく小さいことである。理論燃焼温度はレースウェイに吹き込まれた酸素が CO になる場合のローカル熱収支であるが、炉内ガスに CO₂ が存在することからも推測できるように、炉内最高温度は理論燃焼温度より高くなる。Fig. 9 に両者を示したがレースウェイ最高温度が 2000°C に接近すると理論燃焼温度に一致してくる。炉内最高温度付近のガスを直接吸引して分析することはサンプラー先端の溶融にともなう詰まりのために不可能であつた。したがって、その温度におけるガス組成は不明である。しかし、測定が可能であつた点については Fig. 10 に示すように温度と CO₂ 濃度の間に相関が認められる。Fig. 8 d) における炉内温度をみると高温送

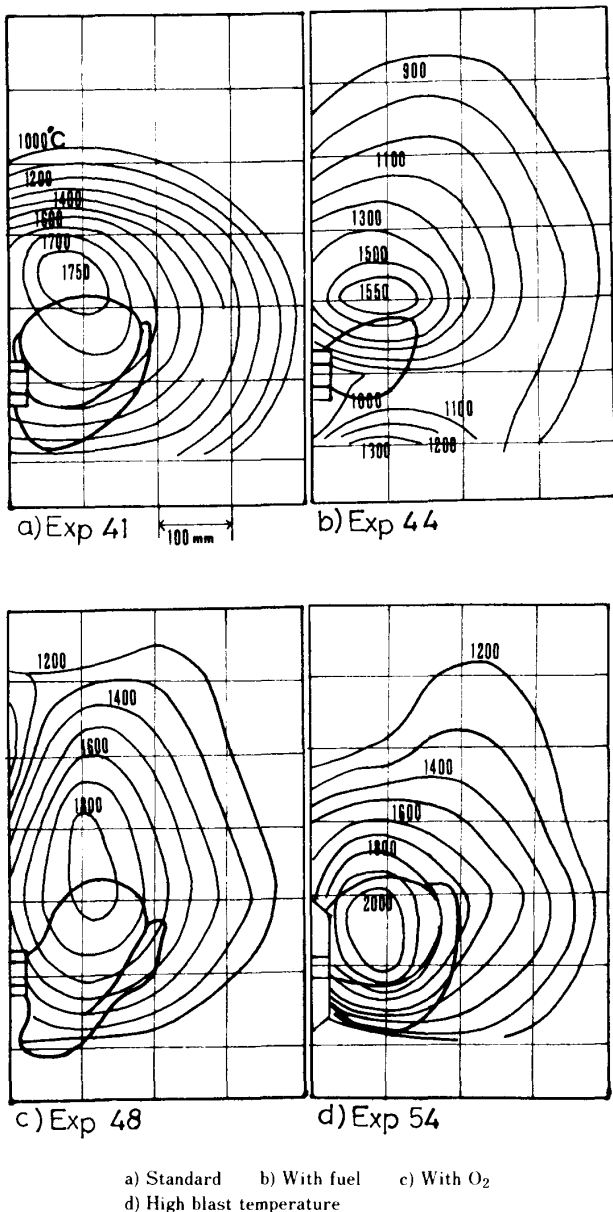


Fig. 8. Temperature distribution in the furnace.

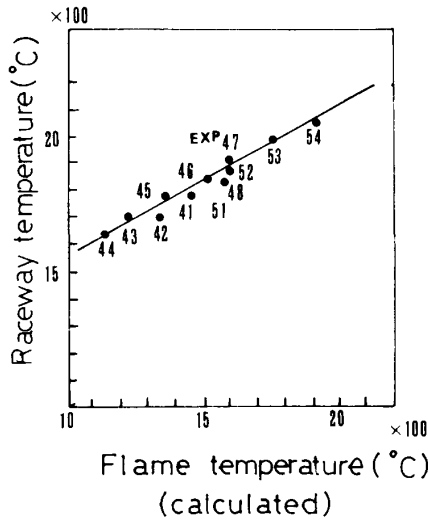


Fig. 9. Relationship between calculated flame temperature and observed maximum temperature.

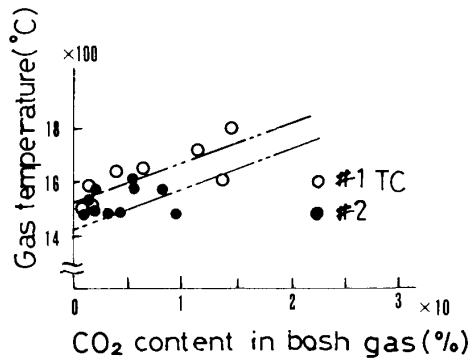


Fig. 10. Relationship between CO₂ contents and gas temperature in bosh gas.

風によりレースウェイ最高温度が 200°C 上昇すると同時に、その温度を示す領域が羽口に接近してくる。児玉ら⁶⁾は小型試験高炉においてレースウェイ付近の温度分布と CO₂ 濃度分布を求め、レースウェイ温度の上昇が酸化領域の縮小をもたらすことを報告しているが、本実験もこれを追認している。

4. 考 察

幾何学的形状からみたレースウェイを、概念的にコークスの旋回しているゾーンで、流体の圧力あるいは浮力とコークス充填層の押出し力、落下力、摩擦力とが釣り合っている面を境界とする空間と考えてみる。

まず送風条件だけからレースウェイ奥行きを考えると、単純に送风量、羽口径、コークス粒径などについて実験した前報のケース、および木炭などを含む充填コークス性状を変えた実験(投稿中)では羽口先ガス速度やコークス性状の大きな差異にもかかわらず、レース

ウェイ奥行き (D_R) を羽口径 D_T との比で無次元化した値 (D_R/D_T) がレースウェイ内のガスと粒子間の力学的バランスから導いた理論値とよい一致を示す。

すなわち次の関係式が成立している。

$$\frac{D_R}{D_T} = k \cdot \sqrt{\frac{1}{\epsilon_b^3} \cdot \frac{\rho_g}{\rho_p}} \cdot \frac{U_0}{\sqrt{g \cdot \phi_c \cdot D_{PC}}} \dots\dots\dots (1)$$

(1)式の羽口先ガス線速度を、複合送風の添加酸素量とプロパン流量で補正してみると、レースウェイ奥行きの実験値と理論値の関係は全体として、従来の実験に対応する点のばらつきの中に入るものの、詳細にみると傾向が逆転している部分があり対応関係は必ずしも良好とは言えない。

たとえば燃料吹込みによるガス容積の増加は単純には羽口線速度を上昇させると思われるが、先に述べたようにレースウェイの奥行きはいつたん縮少した後、さらに燃料吹込み量を増加すると漸増し、羽口先ガス線速度と単調には対応しない。

この実験では送风量が一定であるために羽口部の条件によつて表現されている(1)式の右辺は変化幅が少なく、逆に複合送風による反応が羽口直前で起こつてガスの容積変化や温度変化がその組合せによつて複雑に生ずるため、送風条件によつてレースウェイ奥行きを推定することはかなり困難であると予想される。

まずレースウェイ奥行き (D_R) に関して個々の要因の影響を検討してみる。酸素富化率を上昇させた場合、Fig. 3 に示すように D_R/D_T は燃料吹込みの有無にかかわらず増加する傾向がある。しかし図中点線で示したように、酸素富化による羽口風速の上昇に見合う以上の奥行きが拡張が起こっている。一方、燃料(プロパン)吹込みの場合には Fig. 4 に示すように、燃料吹込み量の増加に従つてレースウェイ奥行きがいつたん縮少した後拡大することが注目される。

さらに高温送風がレースウェイ奥行き (D_R) に及ぼす影響は、送風の質量速度一定の本実験条件下においては Fig. 4 に示したように少なく Froud 数依存とするこれまでの推論を裏付けている。

以上述べたように複合送風下のレースウェイ奥行き of 規則性を求めることは困難なことではあるが、以下に若干の考察を試みる。

1) 力学的釣合いについて

前報において報告したことはレースウェイにおけるコークスとガスの力学的釣合いの基盤として、粒子の空間部分への流れ込みの力とこれを押し戻そうとする風力とのバランスを考え、これによつてモデルおよび実高炉のレースウェイ奥行きが、Froud 数でよく整理される

ことであつた。

(D_R/D_T) がコークス粒子とガスの力のバランスに関係するとして、これに関係しそうな因子をホッパー理論及び粒子のガスに対する抵抗などの式により選出し、 π 定理を適用して次元解析を行うと次式が得られる。

$$\frac{D_R}{D_T} = k \cdot \left(\frac{u}{g \cdot D_p} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_p} \right)^\beta \cdot \left(\frac{\rho_g u D}{\mu} \right)^\gamma \dots\dots\dots (2)$$

複合送風条件以外の実験において第1項、第2項のみで整理可能であつたのは、ポッシュガス組成などがほぼ一定であつたため粘性項に関する Reynolds 数である第3項が定数として組み込まれていたためと思われる。

また、第1項が Froud 数で表現できることは、レースウェイ奥行きが重力に関する要因で律せられていることを暗示している。

2) 羽口先風速について

レースウェイ奥行きを決定する機構についての前項の仮定からレースウェイ内ガスの流速分布が重要であることがわかる。しかし羽口から吹き込まれた熱風が反応し体積変化をしながら上方に向きを変えて充填層へ突入する過程を厳密にトレースすることは困難であるので、通常は羽口先端におけるガス線速度との比例関係を暗黙のうちに仮定し、議論には羽口先ガス線速度で代表させることが多い。しかし、閉じた流通経路の場合と異なり、半ば自由空間への噴流であるレースウェイの場合は前報で述べたように通気性の良好な部分を捜して自由に通路が変わり得るため、必ずしも羽口先風速で代表できない事態が生じてくると思われる。すなわち、燃料は羽口から吹き込まれた後、反応しレースウェイ内で体積変化がおこるが、体積の膨張は3次的に起こるため羽口中心軸延長上のガス速度は体積変化から予想されるほどには、速くならないと思われる。

一般に自由空間に噴射されたジェットは運動量保存則に支配される。レースウェイは厳密な意味での自由空間ではないが傾向としては成立すると仮定する。

G を () 内に示した物質の質量速度、 u をそれぞれの速度とすれば次の式が成立する。

$$G_T(\text{衝風} + \text{富化酸素}) \cdot u_T + G_F(\text{吹込み燃料}) \cdot u_F + G_C(\text{コークス}) \cdot u_C = G_R(\text{レースウェイガス}) \cdot u_R \dots\dots (3)$$

吹込み燃料や旋回コークスの速度は衝風のそれにくらべて小さいと考えられるから、これらが反応して生じたレースウェイガスの速度は、(3)式の質量保存式が成り立つ限り、吹き込まれた燃料の量が多いほど小さくなるのがこの式からわかる。

従来、羽口への燃料吹込みによりレースウェイが縮小することが報告されているのは⁴⁾⁵⁾、このように羽口中

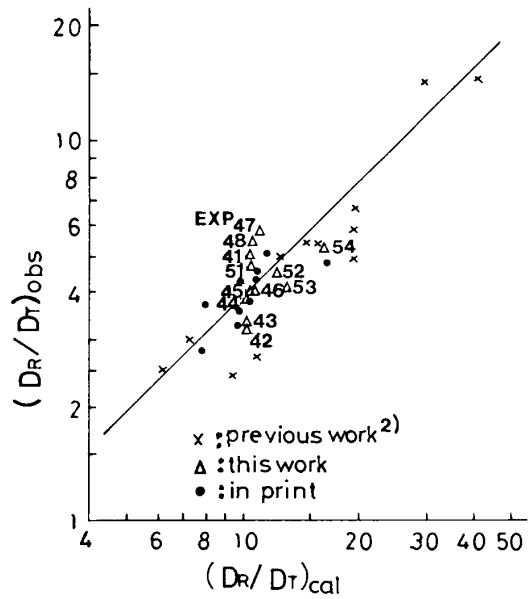


Fig. 11. Relationship between calculated and observed raceway depth.

心軸延長上のガス速度が低下すると考えれば理解できる。

本実験では、吹込み燃料にプロパンを使用しているため、吹込み量が大きくなると羽口へ持ち込む運動量が増加し衝風の運動量と同程度になる。この場合には Fig. 4 に示したごとくレースウェイ奥行きはいつたん減少した後、増加する。吹込み燃料の運動量補正を行つたレースウェイ奥行きの実験値に対してプロットしたものを Fig. 11 に示した。

コークス性状や送風温度など比較的純物理的な条件変更に対応する実験結果は回帰直線の近傍に分布するのに対して、燃料吹込みや酸素富化の場合、さらには送風湿分変化の場合には偏差が大きく、運動量補正のみでは説明が不完全であることがわかる。

一方、Fig. 7 に示したようにレースウェイ容積は理論燃焼温度補正を行つたポッシュガス量に依存することが分かっている。

レースウェイを球状とおき、実測したレースウェイ容積から表面積を求め、反応および温度上昇による体積変化を考慮したレースウェイを通過するガスの体積をこのレースウェイ表面積で割つた値、すなわちレースウェイ壁部通過時の平均ガス流速（以後壁通過速度： U_s と呼ぶ）を計算すると、これらの値がいずれも 2~3 m/s 程度になることがわかる。ただし、ガス体積の計算は簡単のため温度 (1700°C)、ガス組成 ($N_2 + CO$) 一定として計算されている。レースウェイ体積の実測値から壁の面積を球として逆算し、 $U_s = 2.5$ を掛けたものを $Q \cdot V_{Tf}'$

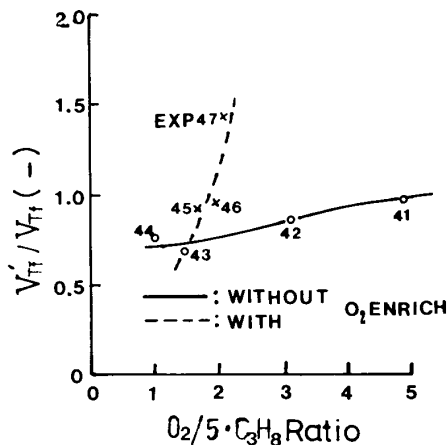


Fig. 12. Effect of oxygen/fuel ratio on the estimated bosh gas volume.

とすると、これは実験中にレースウェイ壁を通過したボッシュガス量に相当する値である。 $Q \cdot V_{Tf}$ は送風条件で決まる理論ボッシュガス量であるから、その比 V_{Tf}' / V_{Tf} は反応がレースウェイ内で理想的に完結したかどうかの目安となるであろう。これを吹き込み燃料が完全燃焼するに必要な酸素と送風中酸素の比に対してプロットし Fig. 12 に示す。この図から、酸素添加なしに燃料吹き込みを行うとボッシュガス量が理論値に達しないことがわかる。逆に酸素富化の場合は温度上昇が大きく、見掛け上理論値を越える。

先に酸素富化なしの燃料吹き込みがコークス旋回の停滞およびすすの発生をもたらすことを述べたが、Fig. 12における下方偏移はレースウェイ内の燃焼反応が不完全であることに起因すると思われる。逆に酸素を添加した場合は温度上昇によりガス量が増えレースウェイが拡大するものと思われる。

Fig. 7 においてレースウェイ容積がボッシュガス量で説明できるとしたが、実験全体の中に位置付けてみると擬似相関であり、反応の完結度や理論燃焼温度ではない実際のレースウェイ内温度を考慮したボッシュガス量で整理することが必要であることがわかる。コールド実験と異なり反応をとまなう系の幾何学的縮小の困難さを考慮したプロパンの使用であったが、反応速度が不十分であると思われる。

5. 結 言

小型燃焼炉によるレースウェイ再現実験により、燃料吹き込み、酸素富化など、いわゆる複合送風条件のレース

ウェイ形状・容積におよぼす影響を検討し、以下の結論を得た。

1) レースウェイ奥行き(の衝風の Froud 数)に対する依存性は、吹き込まれる燃料などの運動量授受を考慮すると定性的には成立する。

2) レースウェイ容積は炉内温度で補正したボッシュガス量に依存する。

しかし反応をとまなう系の幾何学的縮小の困難さから、炉内反応がレースウェイ内で完結しないと推定される場合があり、実験結果のすべての定量的説明は困難で、従来高炉現場において知られていた各要因の影響を定性的に説明するにとどまった。

記 号

- D_{PC} : 装入コークス粒子径 (cm)
- D_{PR} : レースウェイ内コークス粒子径 (cm)
- D_T : 羽口径 (cm)
- D_R : レースウェイ奥行き (cm)
- H_R : レースウェイ高さ (cm)
- W_R : レースウェイ幅 (cm)
- g : 重力加速度 (cm/s^2)
- Q : 送風量 (Nm^3/min)
- R_O : 酸素富化率 (%)
- T_b : 送風温度 ($^{\circ}\text{C}$)
- T_f : 理論燃焼温度 ($^{\circ}\text{C}$)
- U_0 : 羽口先ガス線速度 (cm/s)
- u : ガス線速度 (cm/s)
- V_{Bosh} : ボッシュガス量 (Nm^3/min)
- V_{O_2} : 酸素吹き込み量 (l/min)
- V_{PR} : プロパン吹き込み量 (l/min)
- V_{Tf} : 理論燃焼温度で補正したボッシュガス量 (Nm^3/min)
- V_R : レースウェイ容積 (cm^3)
- ϵ_b : 空間率
- μ : ガス粘度 ($\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}$)
- ρ_b : 充填密度 (kg/m^3)
- ρ_f : レースウェイ内ガス密度 (kg/m^3)
- ρ_g : ガス密度 (kg/m^3)
- ρ_P : 粒子密度 (kg/m^3)
- ϕ_C : コークス形状係数

文 献

- 1) 「複合送風特集号」: 鉄と鋼, 58 (1972) 5
- 2) 中村正和, 杉山 喬, 鶴野建夫, 原 行明, 近藤真一: 鉄と鋼, 63 (1977), p. 28
- 3) 中村正和, 杉山 喬, 鶴野建夫, 原 行明: 鉄と鋼, 61 (1975), S383
- 4) 清水政治, 長井 保, 岡部俠見, 近藤幹夫, 稲谷稔宏: 鉄と鋼, 58 (1972), p. 589
- 5) 羽田野道春, 平岡文章, 福田充一郎, 増池 保: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 505
- 6) 児玉惟孝, 重見彰利, 緒方年満, 堀尾竹弘: 鉄と鋼, 48 (1962), p. 1551