

# 小型燃焼炉によるレースウェイ再現実験 における各種炭材の燃焼温度

中村正和\*・杉山 喬\*<sup>2</sup>・鶴野建夫\*<sup>3</sup>  
原 行明\*<sup>4</sup>・向井弘一\*<sup>5</sup>

## Combustion of Carbonaceous Materials in the Raceway of Experimental Furnace

Masakazu NAKAMURA, Takashi SUGIYAMA, Takeo UNO,  
Yukiaki HARA and Kouichi MUKAI

### Synopsis :

The raceway in front of tuyere of the blast furnace has been studied on an experimental furnace by means of raceway 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 coke properties on the reaction around the raceway have been studied using various kind of carbonaceous materials such as charcoal, pitch coke, carbon brick, formed coke and so on. It was shown that temperature of raceway is ruled by reactivity of coke. The temperature in the raceway is explained by assuming competitive reaction of blast against carbonaceous materials such as coke and CO gas in the furnace. As the results of observation of coke texture which is sampled from raceway, preferential reaction seems to take place between oxidizing gas and reactive component of coke texture. Fine coke powder, which is consisted mainly of inert component, is detached from coke in use of some kind of materials such as carbon brick where inert components are bound by small amount of reactive component. Accumulation of fine coke powder around the raceway prevents normal gas flow in the furnace.

**Key words :** ironmaking ; coke ; raceway ; blast furnace.

## 1. 緒 言

高炉におけるレースウェイの主な役割は、この領域でのコークスの安定燃焼による高温還元ガスの発生と、その発生ガスの通気性確保にある。

レースウェイ内反応とコークス性状の関係についての科学的考察は PERROTT ら<sup>1)</sup>により、既に 1920 年代に行われている。彼らは水冷プローブにより、異なつた性状のコークスを使用して操業中の高炉レースウェイのガス分布を測定し、羽口前の反応を酸素によるコークスの酸化反応と CO<sub>2</sub> によるソリューション反応の二つの領域に分けることを提案している。

著者ら<sup>2)</sup>は、小型燃焼炉において木炭を始め成形コークスやピッチコークスなど広い性状範囲をもつ炭材を用いたレースウェイの再現実験を行い、レースウェイ周辺の温度がコークスの反応性に関係することを見いだした。現在レースウェイ温度は周辺の部分熱収支にもとづく理論燃焼温度を指標として管理されているが、これは送風側の条件のみを考慮したものである。従来、コークス性状とレースウェイ周辺の通気性に関する状況との関係についての報告は多いが<sup>3)-5)</sup>、温度との関係を実験的に論じたものは見当たらないようである。

レースウェイ付近は高炉炉内で最も温度が高く、銑鉄中の Si 含有量を左右する重要な役割を果たしているか

昭和 53 年 4 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)
- \*<sup>2</sup> 新日本製鉄(株)製鉄研究センター 工博 (Ironmaking Technology Lab., Nippon Steel Corp.)
- \*<sup>3</sup> 新日本製鉄(株)製鉄研究センター (Ironmaking Technology Lab., Nippon Steel Corp.)
- \*<sup>4</sup> 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.)
- \*<sup>5</sup> 新日本製鉄(株)室蘭製鉄所 (現:新日本製鉄(株)堺製鉄所) (Muroran Works, Now Sakai Works, Nippon Steel Corp.)

ら、この部分の温度を決定する要因ならびに機構を考察することは意義あることと考える。レースウェイ内反応機構は PERROTT 以後、衝風とコークスが関係する前述の二つの反応にもとづく説明がなされ、各種提案されている数学モデルにおいてもこれを踏襲している<sup>6)~8)</sup>。著者らは実験の観察から衝風と炉内ガスとの反応が競合するモデルを考え、レースウェイ温度分布の説明を試みた。

また、コークスの評価基準としていわゆる反応後強度が提案され、劣化機構の説明としてコークス組織の選択反応性が論じられているが<sup>9)</sup>、館<sup>10)</sup>が指摘するように、高炉内反応を単純化した試験で代表させるのは困難で、必ずしも評価が定着したとはいえない。シャフト部での反応履歴を欠く条件ではあるが、各種炭材のレースウェイ内での反応挙動を断面組織観察から考察した。

## 2. 実験方法

実験装置は前報<sup>11)</sup>と同様高アルミナ質の燃焼炉で、幅 290 mm、奥行き 390 mm、高さ 390 mm と内容積のみ若干異なる。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 4 個設置した。測温は Pt-Rh(20-40) 熱電対により、ガス分析はガスクロマトグラフによりおこなった。実験終了後、炉内を解体調査し終了直前に吹き込んだアルミナ粒子の存在域からレースウェイ形状を推定した。本報における一連の実験では、送風量：1.2 Nm<sup>3</sup>/min、送風温度：常温、羽口径：30 mm、装入コークス粒径：10-20 mm などを一定とし、炉内に充填する炭材の種類を変えた。また、燃焼炉におけるレースウェイ周辺でのコークス粉堆積の機構を確認するために次のような冷間模型実験を行つた。Fig. 1 は 240×

500×40 mm のアクリル製レースウェイ冷間模型である。6 mm のスリット状の羽口を有し、また送風中に微粉を添加できるように羽口直前に内容積約 20 ml の容器を設けた。さらに、羽口下に粒子の排出機構を設けて充填粒子が羽口に向かって下降するようにするとともに、装置下部にも排出機構を有し充填層全体にもゆつくりした下降流が与えられるように配慮した。

## 3. 実験結果

使用した炭材の性状を Table 1 に示す。また、レースウェイ形状、炉内温度など実験結果の概要を Table 2 に示した。なお、それぞれの実験にシンボルとして A~H の記号を与えた。

送風条件が同一であるにもかかわらず、レースウェイ形状、温度分布、コークスの存在状態などに大きな差が現れた。

Fig. 2 に炉内温度分布の典型的な一例を示す。図中、

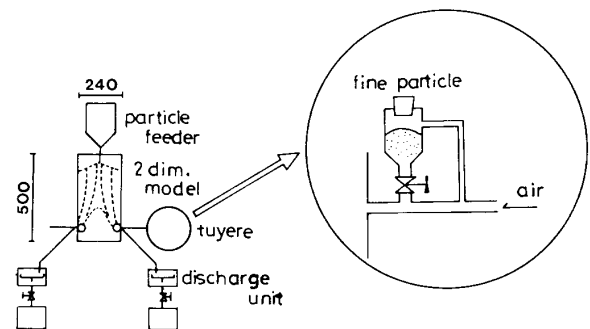


Fig. 1. Schematic profile of experimental apparatus for powder penetration.

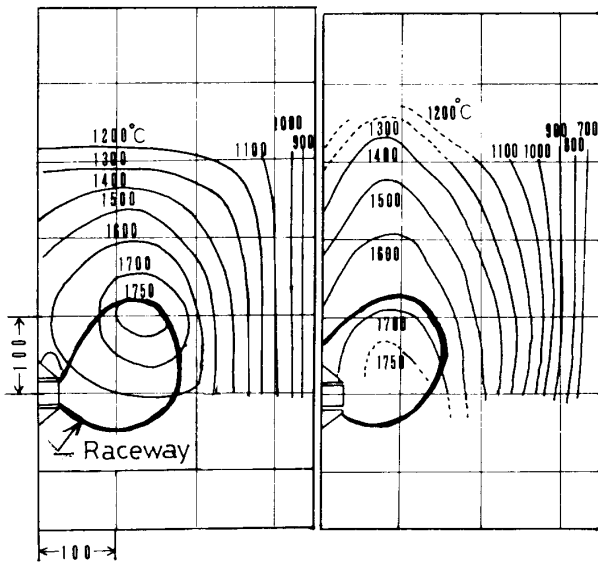
Table 1. Properties of carbonaceous materials used in this experiments.

Exp. No	11	12	13	14	15	16	19	21
Symbol Feature	A Ordinal coke (coking coal)	B Charcoal	C Carbon brick	D Pitch coke	E Non-coking-coal coke	F Formed coke	G Formed coke	H Pellet coke
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.94	1.63	1.98	2.01	1.96	1.89	1.83	1.91
Apparent density (g/cm <sup>3</sup> )	1.01	0.68	1.55	1.41	0.77	1.36	1.36	1.23
Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	0.486	0.306	0.725	0.625	0.394	0.667	0.620	0.680
Mean diameter (m)	0.0143	0.0141	0.0142	0.0133	0.0137	0.0143	0.0137	0.0158

Table 2. Experimental results.

Exp. No	11 (A)	12 (B)	13 (C)	14 (D)	15 (E)	16 (F)	19 (G)	21 (H)
Feature	Coking coal	Charcoal	Carbon brick	Pitch coke	Non-coking coal	Formed coke	Formed coke	Pellet coke
Raceway depth ( $D_R$ ) (m)	0.081	0.143	0.128	0.097	0.151	0.114	0.135	0.083
Raceway width ( $W_R$ ) (m)	0.115	0.144	0.129	0.120	0.127	0.110	0.126	0.096
Raceway height ( $H_R$ ) (m)	0.183	0.210	0.122	0.148	0.157	0.163	0.202	0.141
Raceway volume (cm <sup>3</sup> )	1394	2245	1205	1475	1851	1150	2070	895
Raceway coke (cm <sup>3</sup> )	875	852	949	791	982	621	896	590
-1 mm Powder content (%)	6.6	2.9	17.9	0.4	13.8	12.1	10.1	7.4
Max. temperature (°C)	1750	1640	1850	1940	1680	1770	1780	1800

a) は高炉用の強粘結炭コークス(A)を用いた場合の例で温度分布からみてガスの主流はレースウェイ奥の上方から滑らかにコークス充填層に侵入している。これに対して成形コークス(F)を用いた b) の場合ではガスが炉壁に近い所を流れたと推定される。Fig. 3 はそれぞれの場合でのレースウェイ内コークスの粒径分布および 1 mm 以下の微粉コークスの割合を示している。成形コークスを使用した場合では微粉の蓄積割合が多くなっている。

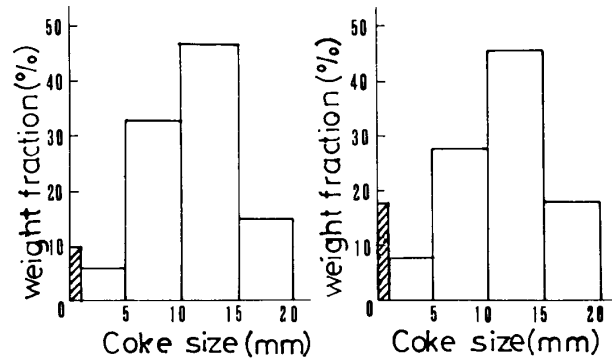


a) Ordinal coke                      b) Formed coke

Fig. 2. Temperature distribution in the furnace.

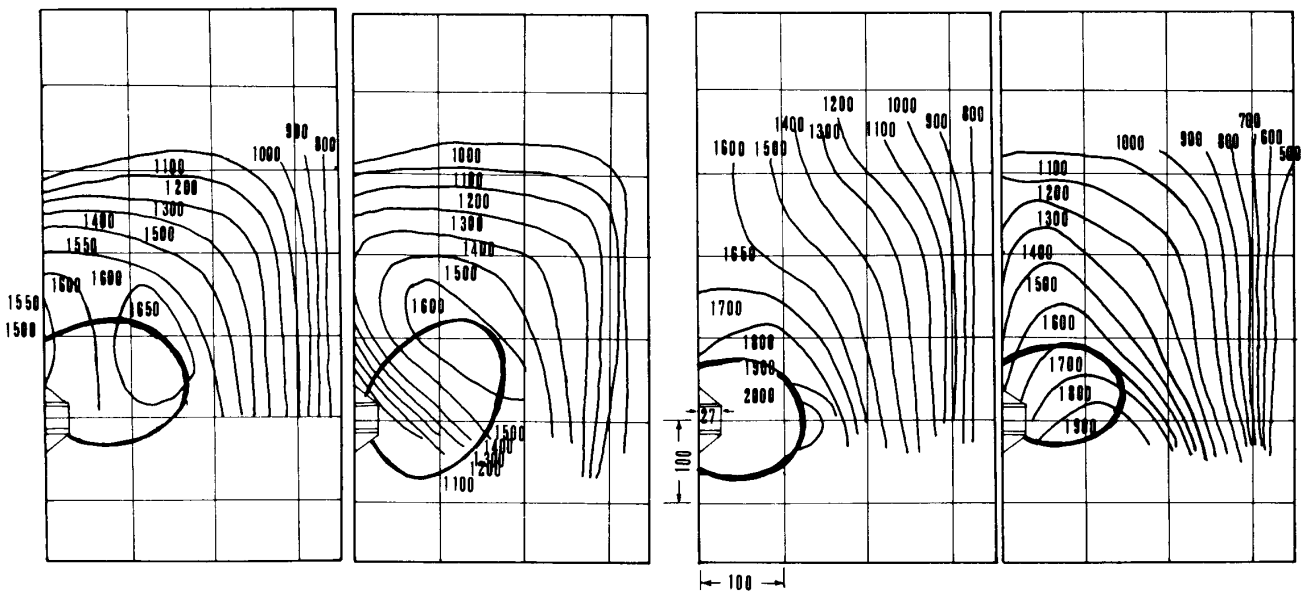
Fig. 4 a)~d) に後述する各種炭材を使用した場合のレースウェイ空間の境界線および炉内温度分布を例として示す。

a) レースウェイ周辺における最高温度は木炭の場合の 1640°C から、ピッチコークスの 1940°C まで、送風条件が等しいにもかかわらず 300°C の差がある。b) 一般に軽量の炭材ではレースウェイ容積は大きく、奥行きが深い傾向がある。c) 成形コークス、カーボンレンが、弱粘結炭コークスなど微粉の堆積の多くなる炭材の場合、レースウェイ上面が羽口から離れ上方に発達し、レースウェイ容積も大きい。またこれは、温度分布から推定されるガスの炉壁寄り流れに対応する。東京大学試験高炉における劣質コークス使用操業中観測されたレースウェイ上部におけるコークスの流動現象に似た現象が



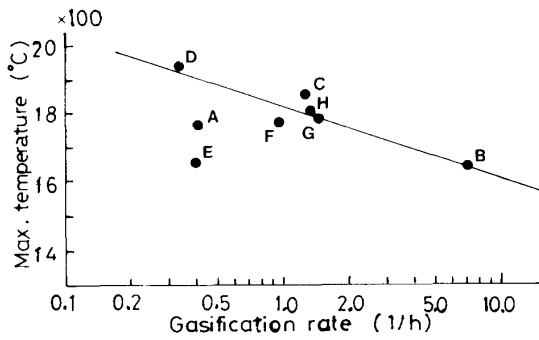
a) Ordinal coke                      b) Formed coke

Fig. 3. Size distribution of coke in the raceway.



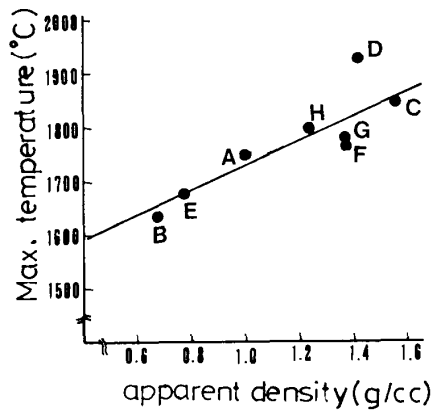
a) Non-coking coal coke                      b) Charcoal                      c) Pitch coke                      d) Carbon brick

Fig. 4. Temperature distribution in the furnace on various carbonaceous materials.



Symbol : A : Ordinal coke (Coking-coal coke) B : Charcoal C : Carbon brick D : Pitch coke E : Non-coking-coal coke F : Formed coke A G : Formed coke B H : Pellet coke

Fig. 5. Relationship between coke gasification and maximum temperature in the raceway.



Symbol : A : Ordinal coke (Coking-coal coke) B : Charcoal C : Carbon brick D : Pitch coke E : Non-coking-coal coke F : Formed coke A G : Formed coke B H : Pellet coke

Fig. 6. Relationship between coke apparent density and maximum temperature in the raceway.

起こっていると推定されるが、羽口からの観察では特に異常は認められなかつた<sup>3)</sup>。

### 3.1 レースウェイ周辺温度

各種炭材の 1100°C における CO<sub>2</sub> に対する反応速度を測定し、これとレースウェイ周辺における最高温度との関係を Fig. 5 に示す。Fig. 6 は同様に炭材密度とレースウェイ温度との関係を示している。レースウェイ温度が炭材の反応性に対して逆相関、密度に対しては正相関の傾向にあることが分かる。レースウェイ温度が、ミクロまたはマクロな反応性に依存していることが推定される。

### 3.2 微粉発生とレースウェイ

各種炭材を用いた一連の実験において、レースウェイ内に蓄積した微粉コークスの存在比率が炭材によって異なることを Table 2 に -1 mm 粉率として示した。

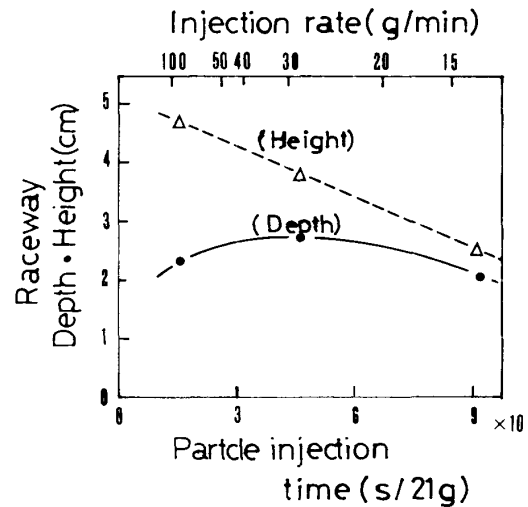


Fig. 7. Effect of particle injection on the raceway depth and height.

### 3.3 レースウェイ周辺における微粉堆積

Fig. 1 に示したコールドモデルに直径 3 mm の球形アルミナ粒子を充填し、これに 500 ml/min の空気を送ってレースウェイを形成し、さらに送風中に 1 mm のアルミナ粒子を添加しレースウェイに吹き込んだ。その結果微粒子の堆積はレースウェイ内において、羽口から吹き込まれた空気が充填層に衝突する部分で断続的に移動している粗粒子の 1 ないし 2 個分充填層内にはいつた所から始まっていることが認められた。

Fig. 7 は、21 g の 1 mm アルミナ粒子の吹込み時間を変えることによつて微粉の吹込み速度を変化させた場合のレースウェイ形状に及ぼす影響を示している。微粉の吹込みによつてレースウェイはいつたん拡大するが、さらに吹込み速度が増大すると微粉が羽口前面に堆積し、レースウェイ奥行きが縮小するとともにレースウェイ上部が流動化し、上方にレースウェイが成長しガスはいわゆる周辺流となる。

一方、球形の微粒子として 0.05 から 0.8 mm のガラス粒子を吹き込んだ実験では 0.2 mm 以下の粒子では全量が充填層を通過して炉頂へ吹き抜けたのにたいして、0.4 mm 粒子の場合ではレースウェイから炉頂までの充填層に広く分布した。0.6 mm の場合ではガラス粒子はレースウェイから 50 mm の付近に堆積し、吹込み量の増加に伴つてレースウェイはいつたん拡大した後縮小した。さらに 0.8 mm ではガラス粒子のすべてはレースウェイ内に堆積しレースウェイは初めから縮小した。

### 4. 考 察

#### 4.1 レースウェイ形状

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

(1)式は前報<sup>11)</sup>に述べたレースウェイ形状推定式であるが、これに Table 1 に示す炭材の性状値を代入して計算したレースウェイ推定値を実測値に対してプロットし、Fig. 8 に示した。両者の対応関係は良好で、推定式を導出する際に用いたガスの動圧とコークスの重力が釣り合うという仮説が炭材の種類を変えた本実験でも基本的にはなお成立していることが分かる。

#### 4.2 レースウェイにおよぼす微粉堆積の影響

Fig. 2 において成型コークスを使用した場合、通常コークスの場合に比較してレースウェイ奥行きが縮小し、ガスの流れが周辺流化することを示した。先に 4.1 において述べたように、Fig. 8 において炭材の種類を変えた実験値がレースウェイ奥行きに関して特に異常を示さないことから、レースウェイ奥行きが縮小はコークスの性状、特に比重が大きいことに起因すると思われる。

一方ガス流れの周辺流化の機構を、3.3 項に示した冷間実験により推定した。レースウェイ内の微粉が周辺に拡散してゆく状況は、充填層の空隙と吹き込まれた粒子の径との相対的な関係により変化する。空隙に対して粒子の径が十分小さく、かつガス速度が粒子の終端速度以上であれば粒子は捕捉されることなく充填層を通過する。これに対して、粒径が大きくなり空隙を通過することが困難となり、いつたん目詰まりを起こすと、これに

ともなうガス流量の減少により粒子の終端速度を確保できなくなつて細粒の蓄積を招き、これがガス流れ周辺流化の原因と思われる。

前報<sup>11)</sup>でのレースウェイに対する燃料吹込みの影響調査に際し、レースウェイ容積が理論燃焼温度で体積補正したボッシュガス量に依存することを示した。また、送風中湿分を変化させた実験において、湿分の増加にともなつてレースウェイが拡大し、特に酸素富化と組み合わせた場合に注目すべき挙動を示すことを報告した<sup>12)</sup>。湿分の増加により燃焼生成ガスのモル数は増えるが、燃焼温度が低下するため補正したボッシュガス量はあまり変化しないので、レースウェイ拡大の説明は困難である。

前報で述べたように酸素富化によつてレースウェイ内粉率が上昇し、これとともにレースウェイが上方に発達する。これは酸素富化による反応の高速化にともない、酸化反応域が羽口直前に接近し局在化する結果、レースウェイ奥の充填域におけるコークス消費がなくなるためと思われる。

Fig. 9 は酸素富化がゼロおよび 2.3% の場合の送風中湿分の変化が、レースウェイ周辺の充填層におけるコークスの -1 mm 粉率に及ぼす影響を示したものである<sup>12)</sup>。湿分単味では効果は顕著でないが、酸素富化時には送風中湿分の増加とともにコークス粉率の低下が認められる。これは送風中湿分の増加により、酸化反応領域が拡大し、堆積したコークス粉が消失したと推定される。このように、細粒コークスの堆積にともなうガスの周辺流化に対する対策として送風中湿分の増加が有効であると思われる。

#### 4.3 レースウェイ内温度

緒言において述べたように、レースウェイ内に吹き込まれた熱風中の O<sub>2</sub> と炉内コークスの反応は、従来次式

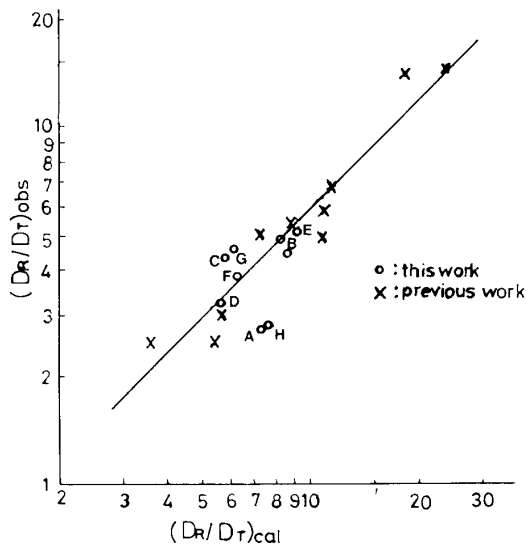


Fig. 8. Relationship between observed raceway depth ( $D_R/D_T$ ) and that of calculated.

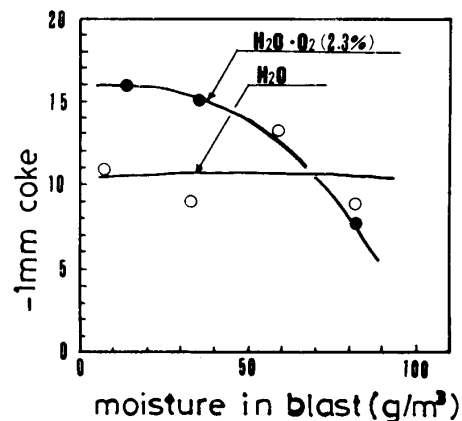
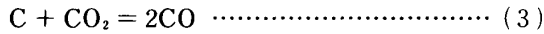
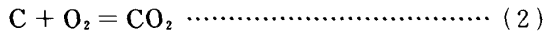


Fig. 9. Effect of moisture on the fine coke around the raceway.

のように分解して理解されていた。



しかし、本研究を進めている過程で、このような機構では理解できないことが生じた。その問題点とは、

i) テレビカメラによる連続観測によれば、レースウェイでは時としてコークスが旋回していない状態が存在し、このような場合にはむしろ炉内温度が上昇し、(2)式以外のなんらかの発熱反応が起こっていると思われること。

ii) 反応性の低いコークスの場合にレースウェイ温度が高い。温度が上昇するためには高発熱反応である(2)式の反応が起こらねばならないが、酸化だけに対して高反応性というのは考えにくい。また炭材の低反応性由来し、反応の遅れにより酸化領域が拡がって温度が上昇する可能性も考えられるが、実際にはたとえば高反応性の木炭のケースに比べて、低反応性のカーボンレンガでは最高温度点はむしろ羽口先端に接近してきていて、この仮定は承認し難いこと。

以上の疑問に対する解答として、羽口前面においては熱風とコークスの反応だけでなく、熱風と炉内ガスの反応も並行して起こっていると推定した<sup>13)</sup>。

この仮説によれば、送風中の O<sub>2</sub> はコークスの存在とは無関係に炉内ガスと反応し、この CO<sub>2</sub> 濃度の高い酸化性ガスが、レースウェイ内の奥の方のコークス存在確率の高い領域においてソリュージョン反応を起こし CO ガスになることになる。また、コークスと CO<sub>2</sub> ガスの反応は、コークスの存在確率が高くなる所で急激に進行し始め、コークスの反応性の高低に従って温度低下幅に大小を生ずるとする。このように考えればコークスの反

応性が高いとレースウェイ内最高温度が低くなる現象も理解できる。ただし、羽口先端に落下したコークス分に関しては前述の(2)および(3)式の反応が進行するから、結局両者は並行していると思われる。すなわち、コークスおよび炉内 CO ガスの酸素による燃焼反応が活発化し、同時に CO<sub>2</sub> によるソリュージョンロス反応が抑制されるような条件において、CO<sub>2</sub> 濃度のピークが羽口に接近し、温度が高くなることを意味する。

酸素富化、送風温度上昇などは、このような効果をもたらす要因と思われる。また、コークス反応性の低下は炉内 CO ガス燃焼の寄与率を高め、同様な結果となると思われる。反対に、送風中湿分の増加はソリュージョンロス反応を促進することから CO<sub>2</sub> 存在領域の拡大につながる事がわかる。

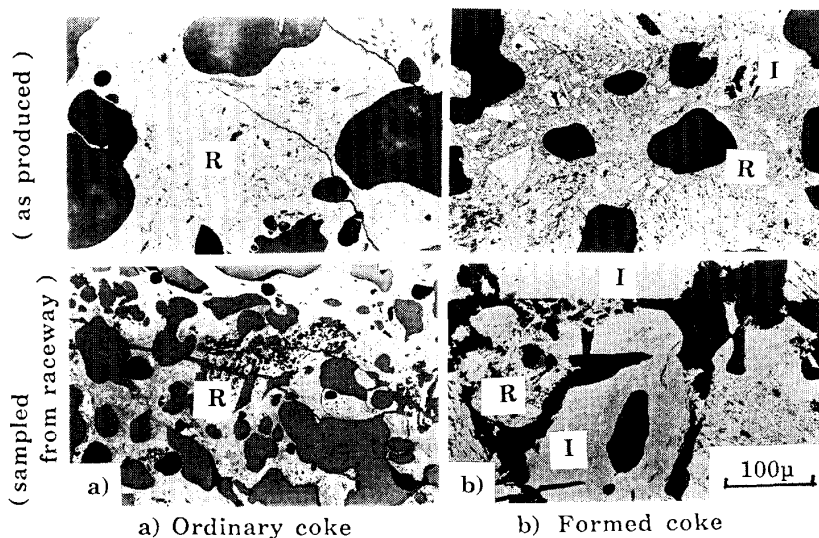
木炭を用いた場合にレースウェイ温度が低いのはソリュージョンロス反応が促進された結果と解釈される。

4.4 コークス性状とレースウェイ

コークス性状がレースウェイ反応に及ぼす効果は、以上述べたように二つの因子に要約される。第一はマクロな意味での反応性であり、第二は細粒化特性である。

これらは相互に関連しつつレースウェイ内の温度や周辺のガス流れ分布に影響する。

Photo. 1 a) は強粘結炭を用いた通常高炉用コークス(A)の燃焼前後の組織を示している。また、Photo. 1 b) は成型コークス(F)の場合である。燃焼前のコークスと比較すると、前者では概してコークス中の気孔が大きく、また炭材マトリックスが厚く比較的大きなクラックが存在する。一方、成型コークスでは気孔が少なく、コークスを構成するイナート成分は石炭の溶融成分により囲まれて比較的連続した相をなしている。レースウェイから



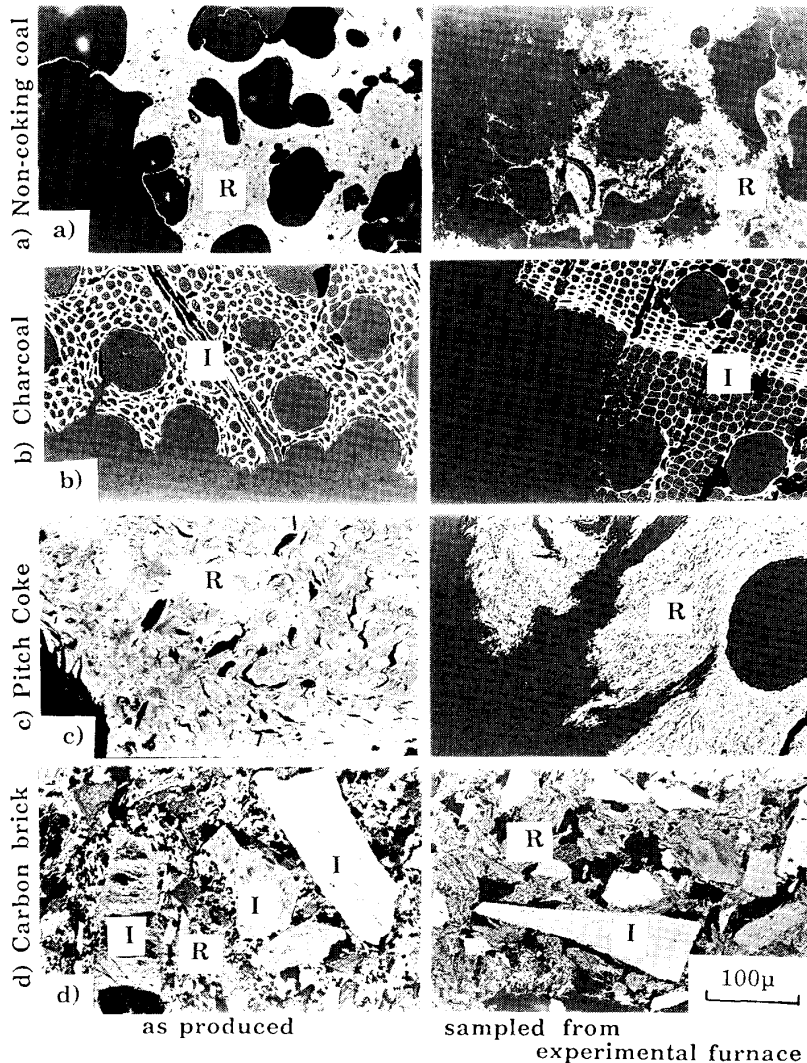
R : Reactive component I : Inert component  
Photo. 1. Texture of coke for blast furnace.

採取した燃焼後のコークスにおいては強粘結炭コークスではマトリックス内のクラック周辺に侵食がみとめられるのに対し、成型コークスではイナート成分を結合していた溶融成分が選択的に消失しているのが特徴的である。Photo. 2 a) は弱粘炭のみを配合して製造したコークス(E), Photo. 2 b) は木炭(B)を, Photo. 2 c) はピッチコークス(D)をそれぞれ用いた場合における実験前後の炭材試料の組織写真である。弱粘炭コークスでは強粘炭コークスに比べて反応以前から薄かつた炭素質のマトリックスがさらに薄くなるとともにマトリックス内部にも侵食を受けた形跡が認められる。一方、木炭やピッチコークスの場合では、変化はコークス表面に限られ内部の組織にほとんど変化が認められない。Photo. 2 d) はカーボンレンガを用いた実験(C)における組織写真である。先に述べた成型コークスの場合と同様、イナート成分を主体とする炭材を流動性の高いピッチで結合したこれらの場合では、イナート組織がレースウェイにおける

反応にもかかわらず鋭角の形をとどめており、ほとんど変化していないと判断されるのに対し、これらを結合している部分が消失している。

実験結果をまとめると、一般にマトリックスが均質で「壁」の厚いコークスは反応性が低く、反応による侵食もクラックに沿って起こるため細粒化は「割れ」の形をとる。この場合、レースウェイ内の温度は高く周辺のガス流れも良好である。いわゆる強粘炭配合コークスやピッチコークスはこの分類であろう。マトリックスが均質でも「壁」の薄いコークスは反応性が高く、反応は塊の表面から進行するためいわゆる細粒化特性は良好であるが、レースウェイ温度は低い。木炭高炉において「熱がつかない」とされるのはこのためであろう。弱粘炭配合コークスは壁が薄い上に反応がマトリックス内部でも起こるため非常に崩壊しやすい。

一方、成型コークスやカーボンレンガのようにイナート成分を流動性の高いリアクティブ成分で結合したもの



R : Reactive component I : Inert component  
Photo. 2. Texture of carbonaceous materials.

ではマトリックスが不均質で、反応はその結合部分で選択的に起こり結果としてイナー成分が微粉として表面から剥離飛散する。コークス塊そのものの反応性は高くないが、発生した微粉の比表面積が大きいのでレースウェイ温度が低くなるのが成型コークスを使用した高炉現場実験で確認されている<sup>14)</sup>。ただし、本実験のように小型のレースウェイでは微粉が反応に寄与する時間的余裕がないためか、炉内最高温度は Fig. 4 に示したように強粘炭配合コークスと同レベルとなつている。ただし、Fig. 2 に示したようにレースウェイ周辺の通気性におよぼす悪い影響は著しい。

## 5. 結 言

小型燃焼炉によるレースウェイ再現実験により、コークス性状がレースウェイに及ぼす影響を検討した。その結果、従来レースウェイの状態を決定する要因として主として送風側の条件が考慮されていたのに対し、炉内のコークス性状も影響していることが明らかとなつた。

すなわち、密度が高く反応性が低いコークスはレースウェイ温度を高める。また反応性の高い結合組織をもたず、均一な組織構造をもつコークスは細粒化しにくく、レースウェイ付近の通気性確保の点で有利である。

また、実験の観察から衝風に対してコークスと炉内ガスが競合する反応モデルを考え、レースウェイ温度に及ぼすコークス反応性の影響について考察を試みた。

## 記 号

$D_{PC}$ : 装入コークス粒子径 (m)

$D_T$ : 羽口径 (m)

$D_R$ : レースウェイ奥行き (m)

$H_R$ : レースウェイ高さ (m)

$W_R$ : レースウェイ幅 (m)

$g$ : 重力加速度 ( $m/s^2$ )

$U_0$ : 羽口先ガス線速度 (m/s)

$\epsilon_b$ : 空間率 (—)

$\rho_g$ : ガス密度 ( $kg/m^3$ )

$\rho_P$ : 粒子密度 ( $kg/m^3$ )

$\phi_C$ : コークス形状係数 (—)

## 文 献

- 1) G. St. J. PERROTT and S. P. KINNEY: Trans. AIME, 59 (1923), p. 543
- 2) 近藤真一, 中村正和, 杉山 喬, 鶴野建夫: 鉄と鋼, 61 (1975), A5
- 3) 館 充, 桑野芳一, 鈴木吉哉, 張 東植, 呉 平男, 松崎幹康: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 495
- 4) 清水英男, 佐藤憲一, 小島正光, 網永洋一, 中村文夫, 岩永祐治: 鉄と鋼, 72 (1986), p. 195
- 5) 原口 博, 西 徹, 美浦義明, 牛窪美義, 野田多美夫: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 2216
- 6) 桑原 守, 謝 祐生, 鞭 巖: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 1918
- 7) 羽田野道春, 栗田興一, 田中 努: 鉄と鋼, 66 (1980), S641
- 8) 羽田野道春, 栗田興一, 田中 努: 鉄と鋼, 67 (1981), S756
- 9) 角南好彦, 西岡邦彦, 小川真資, 桐谷利信, 露口亭夫, 山田健彦: 鉄と鋼, 64 (1978), A9
- 10) 館 充: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 2307
- 11) 中村正和, 杉山 喬, 鶴野建夫, 原 行明: 鉄と鋼, 74 (1988), p. 1562
- 12) 中村正和, 杉山 喬, 鶴野建夫, 原 行明: 鉄と鋼, 63 (1977), S449
- 13) 中村正和, 杉山 喬, 鶴野建夫, 原 行明: 鉄と鋼, 62 (1976), S36
- 14) M. NAKAMURA, K. KOJIMA, Y. HARA and M. KASE: Ironmaking Proc., Iron & Steel Soc. AIME, 38 (1979), p. 18