

# 高炉炉下部の反応伝熱・通気性に及ぼす 成形コークスの冷間強度と反応性の影響

古牧 育男\*・山口 一良\*・一田 守政\*・国友 和也\*  
山本 哲也\*<sup>2</sup>・森實 好文\*<sup>3</sup>・鶴野 建夫\*<sup>4</sup>

Influence of Strength and Reactivity of Formed Coke on Reaction, Heat Transfer and Permeability in Lower Part of Blast Furnace

*Ikuo KOMAKI, Kazuyoshi YAMAGUCHI, Morimasa ICHIDA, Kazuya KUNITOMO,  
Tetsuya YAMAMOTO, Yoshifumi MORIZANE and Takeo UNO*

**Synopsis :** The influence of formed coke properties on the phenomena in the lower part of the blast furnace has been researched with two kinds of model experiment in order to establish the formed coke using technology.

First, the influence of physical properties of formed coke on the deadman structure was investigated using a semicircular model capable of simulating the heat transfer in the furnace.

The deadman having low void fraction is generated during using formed coke due to the formed coke properties with high bulk density and low void fraction. This structure results in the increase of metal hold-up, suppresses the gas entering into the deadman and leads to the lack of heat in this area.

In order to improve the deadman structure for smooth gas entering, it is effective to charge 50mass% formed coke in the peripheral area or to mix 50mass% formed coke with normal coke previously.

Second, the influence of strength and reactivity of formed coke on the reaction and permeability was investigated using a 90° sector model capable of simulating the reaction and heat transfer in the lower part of the furnace.

The fine coke generation in the raceway can be suppressed and the permeability is kept stably by use of formed coke having higher strength at room temperature than normal coke.

High reactive formed coke is burnt rapidly in the raceway, resulting in the acceleration of pulverized coal heating and combustion. The use of high reactive formed coke leads to the improvement of reducing efficiency of the furnace due to the decrease of CO<sub>2</sub> gasification temperature and the increase of CO gas amount.

**Key words :** ironmaking ; blast furnace process ; formed coke ; pulverized coal injection ; coke degradation ; coke reactivity ; raceway ; deadman.

## 1. 緒言

成形コークス製造プロセスは、従来の室炉式冶金用コークス製造に代わる画期的なプロセスとして注目され、製造および高炉使用を含む研究がなされてきた<sup>1-3)</sup>。

成形コークスを高炉で使用した際の高炉炉下部における性状変化の研究は、新日本製鐵(株)堺2高炉において2度にわたって実施された、最大50mass%配合率の使用試験<sup>4,5)</sup>時の羽口部採取コークスの調査にみられる<sup>6-8)</sup>。成形コークスとして、冷間・熱間強度ともに通常コークスと同程度の品質のものを使用し、全量成形コークスのチャージと全量通常コークスのチャージを交互に装入する方式(配合率50mass%)から、全量成形コークスのチャージを5回に1回装

入する方式(配合率20mass%)の間で配合率を変更した。高炉通気性は若干悪化したが、燃料比上昇・装入物分布調整により操業は可能であった。休風時の羽口部採取コークス調査では、成形コークス由来の粉(-3mm)がレースウェイ奥(炉芯表層部)に堆積しているのが観察され、レースウェイ侵入前にガス化反応により劣化したコークスが、レースウェイ内での急激な燃焼・衝撃により表面から粉が剥離したものと推定された。

また、日本鉄鋼連盟の共同研究で開発された、枕型形状の成形コークスの高温領域におけるガス化反応劣化<sup>9)</sup>、レースウェイにおける燃焼粉化<sup>10)</sup>に関するモデル実験による研究もみられ、通常コークスと比較して同程度か、あるいはそれより良好な性状を示している。

平成8年7月31日受付 平成8年9月9日受理 (Received on July 31, 1996; Accepted on Sep. 9, 1996)

\* 新日本製鐵(株)プロセス技術研究所 (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 293)

\* 2 新日本製鐵(株)技術開発本部 (Technical Development Bureau, Nippon Steel Corp.)

\* 3 新日本製鐵(株)八幡製鉄所 (Yawata Works, Nippon Steel Corp.)

\* 4 (株)新日化環境エンジニアリング君津事業所 (Kimitsu Branch, Shin'nikka Environmental Engineering Co., Ltd.)

さらに、枕型形状の成形コークスを用いて、新日本製鐵(株)戸畑4高炉において実施された20mass%配合率の使用試験<sup>11,12)</sup>でも、通常コークスと比較して同程度か、あるいはそれより良好な性状を示す評価がなされている。

しかしこれらの結果は、高炉における成形コークスの安定的使用の観点からみれば配合率20%程度の技術でしかない。今後50mass%以上の成形コークスを高炉で使用していく場合、高炉炉下部における反応・伝熱および劣化挙動、さらには最近重要視されている微粉炭吹込み時の挙動に関する研究が必要と考えられる。

本論文では、高炉炉下部の反応を伴う伝熱を模擬できる実験装置および高炉全体の伝熱を模擬できる実験装置を用いて、高炉炉下部の反応・伝熱・通気性に及ぼす成形コークスの物理・化学的性状の影響を調査し、その使用方法を把握した結果について述べる。

## 2. 実験装置および実験方法

高炉炉下部における反応・伝熱・通気性に対する成形コークス性状の影響を調査するために、既報の実験装置<sup>13)</sup>(以降ホットモデルと称する)を用いた。実験条件として、オールコークス操業時は、送風量200Nm<sup>3</sup>/h、送風温度1100°C、送風湿度0.001kg/Nm<sup>3</sup>、酸素富化0%、フレーム温度2450°Cとし、微粉炭吹込み操業時は、送風量180Nm<sup>3</sup>/h、送風温度1250°C、送風湿度0.001kg/Nm<sup>3</sup>、酸素富化3%、微粉炭濃度0.2kg/Nm<sup>3</sup>、空気比0.75、フレーム温度2150°Cとした。

Table 1 にホットモデルで使用した通常コークスと成形コークスの性状を示す。本モデルで使用した成形コークスは、日本鉄鋼連盟の共同研究で開発された枕型形状の成形コークスを、破碎後冷間強度(Drum Index ; DI)測定用ドラム試験機で回転させて角取りを行って用いた。この処理により、通常コークスと比較して安息角が低く嵩密度の高いコークスとなっており、成形コークスの特徴を備えている。成形コークスの冷間強度はI<sup>600</sup><sub>3</sub>(I型ドラムで600回転させた後の+3mm重量比率)で評価したが、この強度はDI測定用ドラムの回転数を変えて調整した。また使用石炭の性状から成形コークスの反応性(JIS反応性)は高い。

ホットモデルでは通常コークスを全量成形コークスに置

換して使用した。成形コークスの嵩密度によってコークス平均層厚が変化するので、その層厚変化幅を大きく取るために、成形コークス使用時は、通常コークス使用時と1チャージ当りのコークス装入量が一定となるように、あるいは1チャージ当りの鉄鉱石とコークスの層厚の和が一定となるようにした。また反撥板(ムーバブルアーマー)により半径方向のコークス層厚を変更した。

また、高炉全体における伝熱・通気性に対する成形コークスの影響を調査するために、既報の実験装置<sup>14)</sup>(以降三次元半裁モデルと称する)を用いた。実験条件として、送風量131Nm<sup>3</sup>/h、送風温度180°C、装入速度25.9charge/h(高炉出銑比2.0t/d/m<sup>3</sup>に相当)とした。

Table 2 に三次元半裁モデルで使用した通常コークスと擬似成形コークスの性状を示す。本モデルで使用した擬似成形コークスは、石炭を3.9~4.1mmφ×8.0mmLに成形した後800°Cで30分間表面を水蒸気でガス化したものを用いた。この処理により、安息角が低く嵩密度は小さいが、空隙率が低い性状となっている。

三次元半裁モデルでは通常コークスを50mass%または全量成形コークスに置換して使用した。50mass%置換時は、通常コークスとあらかじめ混合するか、あるいは単独で装入した。成形コークス使用時は、成形コークスと通常コークスの1チャージ当りの装入体積比率が、実炉使用を想定したときの値に等しくなるように調整した。重量比率は実炉使用を想定したときの値の60%となった。

## 3. 実験結果

### 3・1 炉芯充填構造および炉芯内伝熱に及ぼす影響

Fig. 1 に、三次元半裁モデルで測定された、通常コークスを擬似成形コークスに全量置換したときの炉芯形状を示す。炉芯を停滞層と擬似停滞層に分けて表示した。炉中心より200mmまでの炉中心側では、擬似成形コークス使用時のほうが傾斜角が低く炉芯は若干小さくなっており、擬似成形コークスの安息角が低い性状に起因する。

Table 3 に、このときの炉芯充填構造の測定結果を示す。擬似成形コークス使用時のほうが、粉の量が少ないにもかかわらず空隙率が低くメタル滞留量が多くなっており、擬

Table 1. Properties of coke sample (1).

	Strength at room temperature; I <sup>600</sup> <sub>3</sub> (%)	Size range (mm)	Repose angle (deg)	Bulk density (kg/m <sup>3</sup> )	JIS reactivity (%)
Normal coke	90.1	9~13	35.5	533	28.8
Formed coke	89.5~93.7	9~13	32.3~34.5	591~685	48.2

Table 2. Properties of coke sample (2).

	Size range (mm)	Repose angle (deg)	Bulk density (kg/m <sup>3</sup> )	Void fraction (-)
Normal coke	2~4	35.3	570	0.573
Quasi-formed coke	3.9~4.1φ×8.0L	26.6	430	0.429

似成形コークスの空隙率が低い性状に起因する。実炉でも成形コークス使用時の空隙率は低くメタル滞留量が多いと想定されるため、レースウェイで発生した高温ガスの侵入が困難となり炉芯熱不足が予想される。この対策については後述する。

Fig. 1, Table 3 に示す炉芯充填構造は、擬似成形コークスの安息角と空隙率に起因し、嵩密度が低い性状の影響は小さいと思われる。

Fig. 2 に、ホットモデルで測定した、オールコークス操業時に通常コークスを全量成形コークス ( $I^{600}_3=91.4\%$ ) に置換したときの、炉芯内コークス温度推移を示す。コークス温度は、図に示す領域に羽口と反対側から挿入したゾンデに搭載した放射温度計により測定した。この図によると、成形コークス使用時のほうがコークス温度が低く、上述した高温ガスの侵入しにくさを裏付けている。

なお後述するようにこのとき粉の量は少ないことから、空隙率が低くメタル滞留量が多いことが高温ガス侵入困難の原因と推定されるが、成形コークス使用時のレースウェイ深度低下による炉芯内への伝熱不足<sup>10)</sup>も考慮すべきと考えられる。

### 3.2 レースウェイ内粉化に及ぼす影響

Table 4 に、ホットモデルで測定した、微粉炭吹込み操業時に通常コークスを成形コークス ( $I^{600}_3=91.4\%$ ) に全量置換したときの、炉芯内採取ダスト量およびダスト中未燃チャー含有量の変化を示す。炉芯内ダストは羽口中心レベルにおいて羽口先端より500mmの位置で採取し、顕微鏡観察により粉コークスと未燃チャーを識別した<sup>15)</sup>。Fig. 3 に識別結果を粒径ごとの個数割合で示す。Table 4 の未燃チャーの重

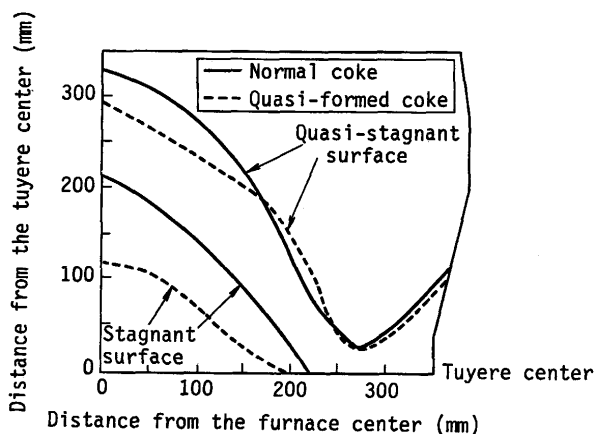


Fig. 1. Measuring results of stagnant surface and quasi-stagnant surface profiles.

Table 3. Measuring results of metal hold-up in the deadman during using normal and formed cokes.

	Void fraction in the deadman (-)	Fine content (-1mm) (mass%)	Metal hold-up in the deadman (mass%)
Normal coke charge	0.573	2.0	3.8
Quasi-formed coke charge	0.429	0.5	45.2

量比率は既報<sup>15)</sup>と同じ方法で算出したものである。またダスト量は、通常コークスを使用した微粉炭吹込み操業時の値からの変化量で示した。

この表、図によると、成形コークス使用時のほうがダスト量が少なく、かつ未燃チャー発生量が少ない。レースウェイ内粉化量が少ない理由は、既報のモデル実験結果<sup>10)</sup>、実炉採取コークス調査結果<sup>12)</sup>と同じように、日本鉄鋼連盟の共同研究で開発された枕型形状の成形コークスの性状が良好であったことである。本モデルで使用した成形コークスの冷間強度 ( $I^{600}_3=91.4\%$ ) は、通常コークス ( $I^{600}_3=90.1\%$ ) より高かったことも理由の一つと考えられる。

また微粉炭燃焼性が向上した理由は、武田らが指摘しているように<sup>10)</sup>、反応性の高い成形コークスのレースウェイ内燃焼速度が向上し、レースウェイ内昇温、その結果として微粉炭の昇温・燃焼が促進される結果と推定される。本モデルではレースウェイ内温度測定を実施していないが、Fig. 2 に示す羽口間200mm位置 (レースウェイにもっとも近い位置) のコークス温度で比較すると、微粉炭吹込み操業において、通常コークス使用時が1190°Cに対して、成形コークス使用時は1520°Cと高く、この推定を裏付けている。

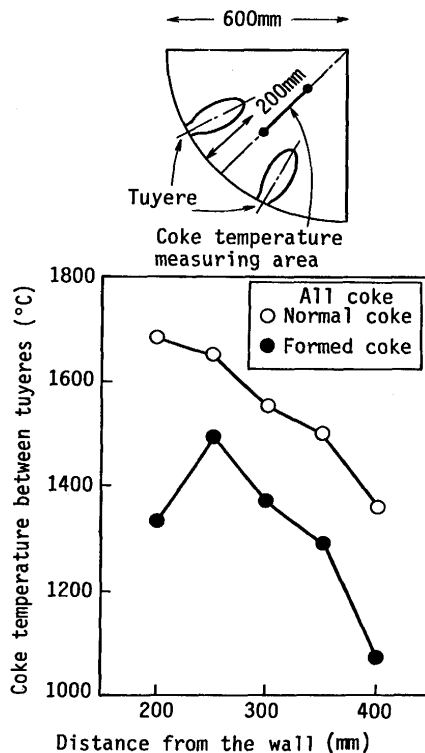


Fig. 2. Distributions of coke temperature in the deadman.

Table 4. Changes of dust concentration and char content in the deadman during using normal and formed cokes.

	Dust concentration increase (kg/Nm <sup>3</sup> )	Char content in the dust (mass%)
Normal coke charge	0.0	75.0
Formed coke charge	-0.033	21.5

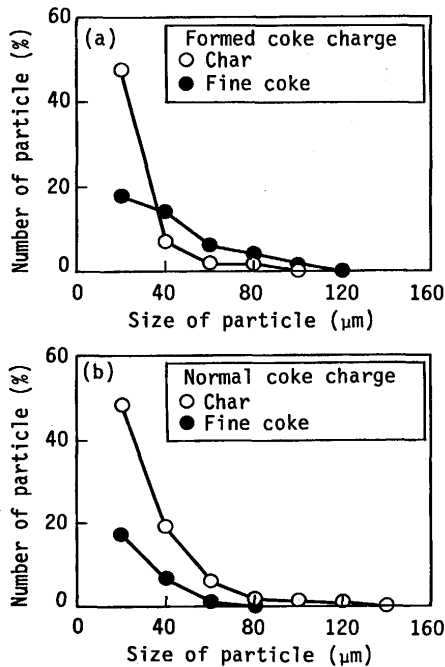


Fig. 3. Measuring results of fine material population in the deadman dust during PC injection.

レースウェイ内燃焼速度が向上したときのコークス粉化に関しては、反応性の高いコークス粒子の反応形態が変化し粉化は抑制されるという研究<sup>17)</sup>があるが、実炉では冷間強度の影響を考慮した検討が必要である。

### 3・3 炉下部通気性に及ぼす影響

#### 3・3・1 冷間強度の影響

Fig. 4に、ホットモデルで測定された、通常コークスおよび成形コークスをそれぞれ全量使用時の、コークス冷間強度と炉下部通気性との関係を示す。本モデルにおける炉下部通気性の指標として、羽口中心レベルの炉内圧力( $P_1$ , MPa abs.), 羽口中心レベル+500mmの炉内圧力( $P_2$ , MPa abs.), およびボッシュガス量( $VB$ , Nm<sup>3</sup>/min)を用い、 $(P_1^2 - P_2^2) / VB$ <sup>17)</sup>で算出した通気抵抗指数を、通常コークスを全量使用したオールコークス操業時の値で除して無次元化した値を採用した。

この図によると、オールコークス・微粉炭吹込みにかかわらず、冷間強度が通常コークスの値( $I_3^{600} = 90.1\%$ )より低いときは炉下部通気性が悪化しており、冷間強度の通気性に及ぼす影響は大きい。このとき炉芯内ダスト量で比較すると、微粉炭吹込み操業において通常コークス( $I_3^{600} = 90.1\%$ )使用時に対して、成形コークス( $I_3^{600} = 89.5\%$ )使用時は

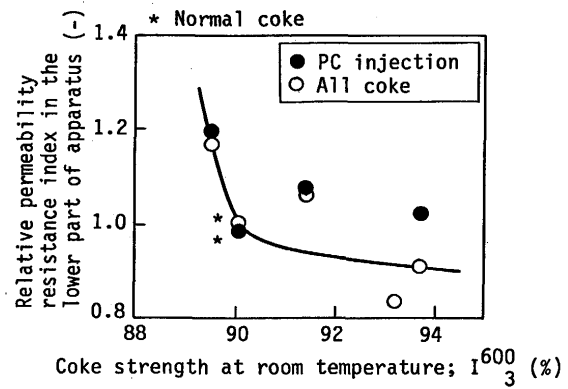


Fig. 4. Relation between coke strength and permeability.

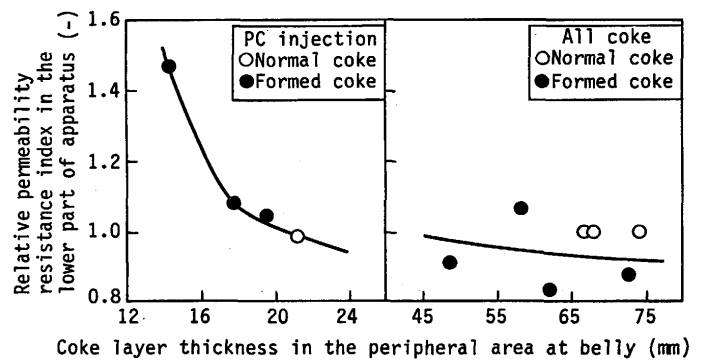


Fig. 5. Relation between coke layer thickness and permeability.

+0.0031kg/Nm<sup>3</sup>増加しており、既報で述べたように<sup>6-8)</sup>レースウェイ内での粉化を裏付けている。

Fig. 4によると、通常コークスと同じ冷間強度をもつ成形コークス使用時のデータはないが、通常コークスより冷間強度の高い(91.4%)成形コークス使用時の通気性は通常コークスよりも若干悪く、成形コークス使用時は、通常コークスよりも冷間強度を高くする必要があると思われる。

#### 3・3・2 コークス層厚の影響

Fig. 5に、ホットモデルで測定された、通常コークス( $I_3^{600} = 90.1\%$ )および通常コークスよりも冷間強度の高い( $\geq 91.4\%$ )成形コークス全量使用時の、炉腹部における周辺部コークス層厚と炉下部通気性との関係を示す。炉腹部における周辺部として半径660mmの周辺部100mmを採用した。

この図によると、オールコークス操業時はコークス層厚が45~75mmと厚く通気性悪化はみられないが、微粉炭吹込み操業時は層厚が18mmより薄くなると通気性は急激に悪化する。この通気性が急激に悪化する層厚は、コークス平均粒径(10mm)の約1.8倍であり極めて薄い。

この現象を確認するために別途実験装置<sup>18)</sup>による実験を実施した。Fig. 6に示すように、70mmの焼結鉞層の上半分に通常コークス(10~15mm)を使用したスリットを設置し、荷重下における加熱・還元を実施した。上半分にコークスス

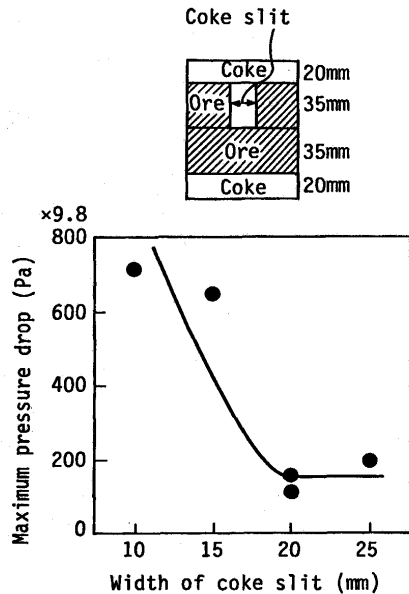


Fig. 6. Relation between coke slit width and maximum pressure drop.

リットを設置した理由は、焼結鉱層の収縮率が50%付近より層の圧損が上昇し始める<sup>18)</sup>ことによる。スリット厚みが厚いときは層の最大圧損はあまり大きくないが、厚みが20mmより薄くなると最大圧損は急上昇する。この圧損が急上昇する厚みは、コークス平均粒径(12.5mm)の約1.6倍であり、上述した値とほぼ同じでやはり極めて薄い。

この通気性悪化の原因は、粉化によるコークス層の目詰まりではなく、鉄鉱石軟化溶融によるコークス層への侵透による層の空隙率低下と考えられる。

通常実炉におけるコークス層厚の下限は260mm{コークス平均粒径(50mm)の約5.2倍}と大きく、この厚い理由は、半径方向の鉄鉱石とコークスの層厚比( $L_o/L_c$ )分布不均一に起因する鉄鉱石層厚の厚い領域の生成である<sup>19)</sup>が、理想的な充填構造では、コークススリットの厚みはかなり薄くできる。したがって嵩密度の高い成形コークス使用時はコークス層厚を薄くせざるをえないが、安息角が低い(内部摩擦角が小さい)ことによりコークス堆積層は安定し、半径方向の $L_o/L_c$ 分布は均一になると考えられるので、装入物分布調整により上記5.2倍の下限を低減させることは可能と思われ、成形コークス使用時の障害とはならないと考える。

### 3・4 高炉内還元効率に及ぼす影響

コークスの反応性が向上すると、 $CO_2$ ガス化開始温度が低下しCOガス再生量が増加するため、鉄鉱石のCO還元率が増大し、結果として炉頂COガス利用率( $\eta_{CO}$ )が向上し、ソリューションロス量低減となることが報告されている<sup>20)</sup>。使用石炭の性状から成形コークスの反応性(JIS反応性)は高いから、成形コークス使用時にこの効果が期待できる。

Fig. 7に、ホットモデルで測定された、通常コークスを成形コークスに全量置換したときの $\eta_{CO}$ の推移を示す。炉頂から通常コークスに代えて成形コークスを装入開始し、この

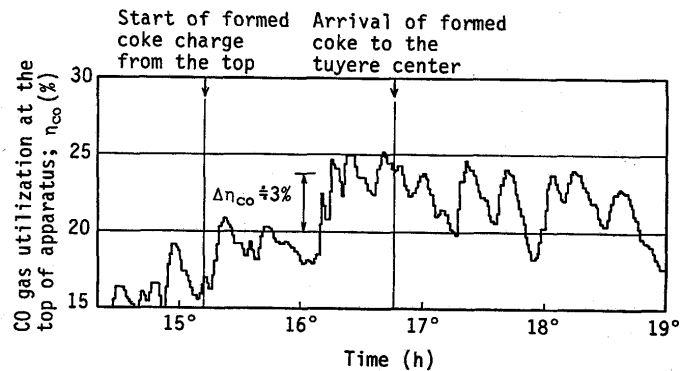


Fig. 7. Transition of CO gas utilization with time.

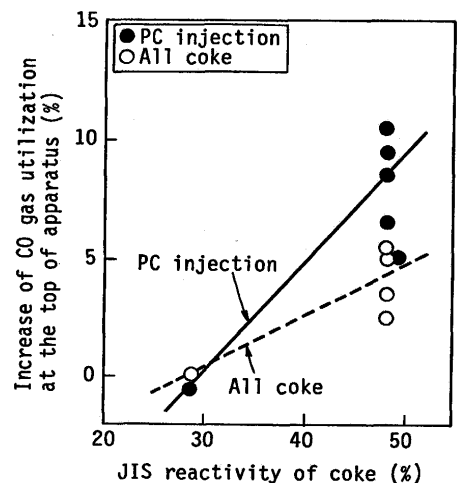


Fig. 8. Relation between coke reactivity and CO gas utilization.

チャージが羽口中心レベルに到達する以前の炉腹部付近に到達する頃より $\eta_{CO}$ が上昇している。この付近の温度は測定により900~1000°C程度であり、既報<sup>20)</sup>の結果を裏付けている。

通常コークスを使用したオールコークス操業時の値に対する $\eta_{CO}$ の上昇量をプロットするとFig. 8が得られるが、通常コークス(JIS反応性=28.8%)使用時に対して、成形コークス(JIS反応性=48.2%)使用時は、オールコークス・微粉炭吹込みによらず $\eta_{CO}$ は向上しており、O/Cの高い微粉炭吹込みのほうが向上量が大きい。

成形コークス使用時はこの効果を期待することができるが、実炉使用試験<sup>4,5,11,12)</sup>では配合率が50~20mass%と低く、通気性悪化に対処するために燃料比を上昇させているので、効果が明確に現われていない。これに関しては今後実炉で検証していく必要がある。

### 3・5 炉芯内伝熱を改善する方策の検討

前節までに述べてきた成形コークスの高炉操業に及ぼす影響の中で、空隙率の低いことに起因する炉芯内伝熱不足を改善することが必要である。

Fig. 9に、三次元半裁モデルで測定された、通常コークス

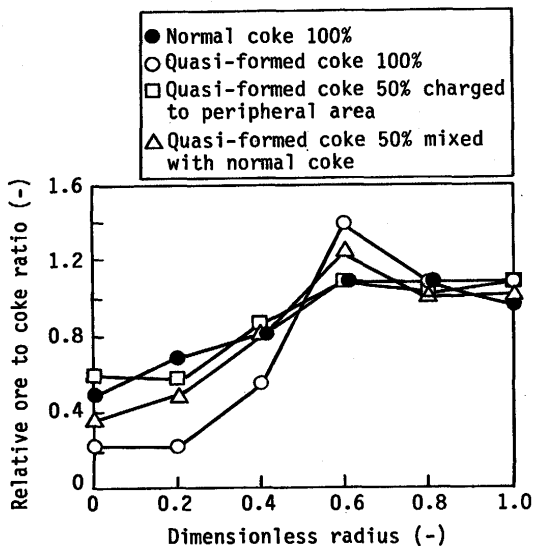


Fig. 9. Ore to coke ratio distributions during using formed coke by 50 and 100mass%.

を擬似成形コークスに置換したときの炉頂におけるO/C分布を示す。通常コークス全量使用時に対して、成形コークス全量使用時は安息角の低いことに起因してコークスが中心部に流れ込み、このコークスが炉芯部に降下して空隙率の低い充填構造を形成する。

したがって成形コークス全量使用は困難と考えられるが、50mass%使用時は、周辺部に集中的に装入することにより中心部への成形コークスの流れ込みを防止する(図中□印)か、あるいは50mass%の成形コークスをあらかじめ通常コークスと混合して装入することにより中心部へのコークスの流れ込みを防止する(図中△印)が考えられ、図によると、□、△印ともに通常コークス全量使用時(●印)とほぼ同じ鉱石とコークスの重量比率(O/C)の分布を示している。

成形コークスの50mass%を超える配合率を達成するためには、既報<sup>21)</sup>で述べたように、空隙率が高くかつ粒径の大きな、異形化した新型形状の成形コークスを使用する必要がある。

#### 4. 結言

成形コークスの高炉使用技術を確立するために、成形コークスの物理・化学的性状が高炉操業、とくに高炉下部の反応・伝熱・通気性に及ぼす影響をモデル実験により調査した結果、次の結論を得た。

(1) 成形コークスはその嵩密度が高く空隙率の低い性状に起因して、炉芯にガスが侵入しにくい充填構造を形成するため、炉芯熱不足を招く可能性がある。

(2) 通常コークスよりも高い冷間強度確保により、成形

コークスのレースウェイ内粉化を抑制でき、炉下部通気性悪化を招かない。また炉壁部のコークス層厚はかなり薄くすることが可能で、理想的な充填構造ではコークス平均粒径の約1.8倍が通気性悪化を招かない下限である。

(3) 反応性の高い成形コークスはレースウェイ内燃焼速度を向上させ、レースウェイ内昇温、その結果として微粉炭の昇温・燃焼が促進される。

(4) 反応性の高い成形コークス使用により、CO<sub>2</sub>ガス化開始温度が低下しCOガス再生量が増加するため、高炉内還元効率向上をもたらす。

(5) 炉芯にガスが侵入しにくい充填構造を改善するためには、50mass%配合率で成形コークスを周辺部に装入するか、50mass%の成形コークスをあらかじめ通常コークスと混合して装入する方が効果的である。50mass%を超える配合率を達成するためには、空隙率が高くかつ粒径の大きな、異形化した新型形状の成形コークスを使用する必要がある。

#### 文 献

- 1) E.Teichert, V.N.Gupta and W.Hermann: Stahl u. Eisen, **94** (1974), 1330.
- 2) J.A.Cordier and R.Rochas: Proc. 2nd Int. Symp. on Agglomeration, Atlanta, (1977), 996.
- 3) P.K.Strangway and M.O.Holowaty: Proc. 2nd Int. Symp. on Agglomeration, Atlanta, (1977), 1012.
- 4) 加瀬正司, 林 洋一, 柴田 崇, 彼島秀雄, 田村健二, 松井正昭, 中村正和: 鉄と鋼, **64** (1978), S115.
- 5) 加瀬正司, 林 洋一, 柴田 崇, 彼島秀雄, 松井正昭, 中村正和: 鉄と鋼, **65** (1979), S78.
- 6) 中村正和, 小島鴻次郎, 原 行明: 鉄と鋼, **64** (1978), A5.
- 7) 原口 博, 西 徹, 美浦義明, 桜井 哲, 松井正昭: 鉄と鋼, **65** (1979), S79.
- 8) 西 徹, 原口 博, 美浦義明, 桜井 哲: 鉄と鋼, **65** (1979), S80.
- 9) 原口 博, 西 徹, 奥原捷晃: 鉄と鋼, **71** (1985), S90.
- 10) 原口 博, 西 徹, 奥原捷晃: 鉄と鋼, **71** (1985), S91.
- 11) S.Kubo, H.Ono, K.Inokuchi, T.Nishi and H.Haraguchi: Proc. 49th Ironmaking Conf., AIME, Detroit, (1990), 405.
- 12) 久保 進, 小野 創, 井ノ口和好, 西 徹, 原口 博: 材料とプロセス, **3** (1990), 18.
- 13) 山口一良, 上野浩光, 内藤誠章, 田村健二: 鉄と鋼, **77** (1991), 1609.
- 14) 一田守政, 西原一浩, 田村健二, 須賀田正泰, 小野 創: 鉄と鋼, **77** (1991), 1617.
- 15) 山口一良, 上野浩光, 田村健二: 鉄と鋼, **78** (1992), 1214.
- 16) 武田幹治, 石渡夏生, 内山 武, 板谷 宏, F.C.Lockwood: 材料とプロセス, **9** (1996), 2.
- 17) 山口一良, 鶴野建夫, 山本哲也, 上野浩光, 今野乃光, 松崎眞六: 鉄と鋼, **82** (1996), 641.
- 18) 細谷陽三, 山口一良, 折本 隆, 樋口謙一, 川口卓也, 後藤秀明: 鉄と鋼, **83** (1997), 297.
- 19) K.Yamaguchi, H.Ueno, S.Matsunaga, K.Kakiuchi and S.Amano: ISIJ Int., **35** (1995), 148.
- 20) 内藤誠章, 山口一良, 上野浩光, 岡本 晃: 材料とプロセス, **4** (1991), 1036.
- 21) 一田守政, 山本哲也, 古牧育男, 織田博史, 松永伸一, 出野 正, 今野乃光: 鉄と鋼, **82** (1996), 987.