

論文

焼結鉱およびコークス性状モデルによる 高炉炉内状態の検討

栗田興一*・岩永祐治*・元重正洋*²・網永洋一*³

Estimation of the Inner States by the Use of the Model to Evaluate the Influence of Sinter and Coke Properties at Blast Furnace

Koichi KURITA, Yuji IWANAGA, Masahiro MOTOSHIGE and Yoichi AMINAGA

Synopsis :

The effects of sinter qualities and coke qualities on the condition inside of the blast furnace are theoretically investigated by the two-dimensional mathematical model of blast furnace which was coupled with the degradation model of sinter and coke.

The following results are obtained ;

(1) Effect of sinter quality.

1) The pressure drop in the blast furnace increases with the increase of *RDI* or the decrease of the particle diameter of charged sinter.

2) The increase in *RDI* increases ore to coke ratio (O/C) and also gas utilization ratio because it increases the reduction rate of sinter. As the result, gas and solid temperature in the upper part of the blast furnace decreases.

(2) Effect of coke quality.

1) Coke degradation rate below the solution loss zone in the blast furnace decreases with the increase of *CSR*.

2) The decrease of the solution loss reaction causes the increases of the gas utilization ratio and gas and solid temperature in the blast furnace.

The simulated results agreed with the observed results of an actual blast furnace.

Key words : blast furnace ; sinter quality ; coke quality ; simulation model ; pressure drop ; solution loss.

1. 緒 言

高炉内における装入物挙動については、実炉解体調査を始めとする炉内サンプリング等により、炉内半径方向で大きく異なることが明らかになってきた^{1)~4)}。しかしながら、装入物の性状が、炉内半径方向の温度およびガス流分布などの炉内状態の変化とどのような関係にあるのかは、必ずしも明らかになっていない。

例えば、装入物主原料である焼結鉱の還元粉化性状が高炉操業に果たす役割についても、明確な回答が得られているとは言い難い。また、コークスについても1974年の原料炭供給不足に起因する、コークス性状の悪化と、それに対応する高炉炉況不調および、その後の試験高炉における劣質コークス使用操業⁵⁾および実炉の羽口部か

らのサンプリング結果⁶⁾からもコークス性状管理の重要性が指摘されたが、コークス性状が炉内状態に与える影響に関しては、断面均一高炉モデルを用いた評価が試みられたものの⁷⁾、半径方向分布を含めたより詳しい検討はまだ十分なされていない。

そこで、本論文では、すでに開発されている焼結鉱還元粉化モデル⁸⁾を高炉2次元数式モデル⁹⁾に導入することにより、高炉内における焼結鉱の還元粉化挙動をシミュレートするとともに、焼結鉱品質（冷間強度、還元粉化）の炉内状態に与える影響について若干の検討を加えた。また、高炉内におけるコークスの反応挙動を理論的に解明するため、高炉2次元数式モデルにコークス性状評価モデル⁷⁾を導入することによって、炉内でのコークスの反応挙動を、半径方向分布を含めて解析し、鹿島

昭和60年4月本会講演大会にて発表 昭和62年3月23日受付 (Received Mar. 23, 1987)

* 住友金属工業(株)総合技術研究所 工博 (Technical Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16 Oaza-Sunayama Hasaki-cho Kashima-gun Ibaraki pref. 314-02)

*² 住友金属工業(株)事業開発本部 (New Business Division, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

*³ 住友金属工業(株)鹿島製鉄所 (Kashima Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

第1高炉でのコークス性状変更テスト結果¹⁰⁾と比較した。

2. 高炉における装入物の性状変化および反応性の評価方法

高炉2次元数式モデルに導入した、装入物(焼結, コークス)の性状評価式について概説する。

2.1 焼結鉱性状の評価方法

実験室的な基礎検討結果⁷⁾をベースに、以下の方法を採用した。

2.1.1 焼結鉱冷間強度(TI)の評価

実操業においては、TIの差は、Fig. 1に示すように、成品粒度の変化として現れること、さらに、実炉層頂面での装入物サンプリング調査を参考に、高炉貯鉱槽から炉内層頂面上への落下過程で約26%の粒度低下を起こすものと仮定し、TIの変化を装入焼結鉱調平均粒度の変化として与えた。

2.1.2 焼結鉱還元粉化指数(RDI)の評価

次の粒度低下式を用いた。

$$d_s = d_{si} - b \cdot fs + a \cdot fs^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、(1)式は、実験結果を放物線近似で表したので、 $d(d_s)/d(fs) > 0$ の場合、 fs の増加に対して、粒度が増加しないよう、 $d_s = d_{si} - b^2/(4 \cdot a)$ とする制限条件を付加した。

ここで、

d_{si} : 還元前の初期粒径 (mm) $5 < d_{si} < 25$ mm

fs : 還元率 (%) $0 < fs < 20$

a, b : 焼結鉱の還元温度, 粒度, RDI によって定まる低下定数 (—)

(1)式を単位還元率あたりに直すと、次式となる。

$$d(d_s) = (-b + 2 \cdot a \cdot fs) \cdot d(fs) \quad \dots\dots\dots (2)$$

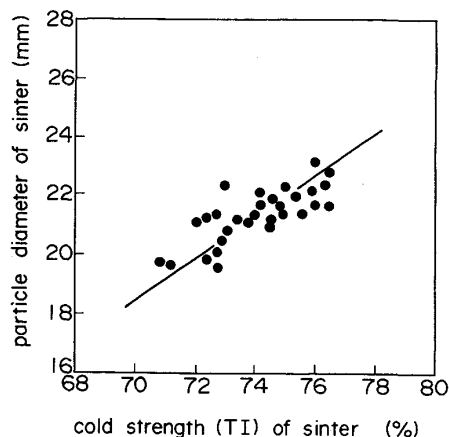


Fig. 1. Relationship between particle diameter and cold strength (TI) of sinter.

a, b の係数を、 $d_{si} = 12.75$ mm, $RDI = 25.7$ % の場合をベースに、固体温度 T_s に関して求め、 d_{si} , RDI の影響を考慮すると、次式のように整理できる。

$T_s > 798$ K

$$a = \exp(-18.76 + 12\,200/T_s) \cdot (d_{si}/12.75)^{2.31} \cdot (RDI/25.7)^{2.57} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$b = \exp(-12.60 + 10\,210/T_s) \cdot (d_{si}/12.75)^{1.89} \cdot (RDI/25.7)^{1.65} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$T_s < 798$ K

$$a = 0.031 \cdot (d_{si}/12.75)^{2.31} \cdot (RDI/25.7)^{2.57} \quad \dots\dots (5)$$

$$b = 1.110 \cdot (d_{si}/12.75)^{1.89} \cdot (RDI/25.7)^{1.65} \quad \dots\dots (6)$$

以上の粒度低下式は還元粉化試験に基づいているので、化学反応による粉化とドラム試験による機械的損耗とが総合評価されている。そこで、従来の知見に従い⁸⁾、化学反応による還元粉化が全粒度低下の約40%となるとして、粒度低下を化学反応による還元粉化と機械的損耗による粒度低下とに分離して、次式のように表した。

化学反応による還元粉化

$$\Delta(d_s)_{\text{反応}} = 0.4 \cdot (-b + a \cdot fs) \cdot \Delta fs \quad \dots\dots (7)$$

機械的損耗による粒度低下

$$\Delta(d_s)_{\text{機械}} = 0.6 \cdot (-b + a \cdot fs) \cdot \Delta fs \quad \dots\dots (8)$$

ドラム試験は、60 rpm 1 min の結果であるので、これを焼結鉱が炉内を1 m 降下する間に受ける機械的損耗による粒度低下に換算する係数として、ドラム回転換算係数 γ_s を導入した。

$$\Delta(d_s)_{\text{機械}} = 0.6 \cdot \gamma_s \cdot (-b + a \cdot fs) \cdot \Delta fs \quad \dots\dots (9)$$

小倉第2高炉の解体調査結果に合致するよう、 γ_s の値を高炉2次元数式モデルにより逆算したところ $\gamma_s = 0.1$ が得られた。

2.2 コークス性状の評価方法

高炉内におけるコークス性状の定量化手法について概説する。

2.2.1 コークス反応性の評価

コークスの反応速度式として、窒素が多量に存在する高炉を対象とした場合に一般によく用いられる Langmuir-Hinshelwood 型の式に、コークス粒径(d_c)、塊コークスの反応性(CRI)および、ガス流速(V)の影響を補正項として付加した次式を用いた⁷⁾。

$$R = (k_1 \cdot P_{CO_2}) / (1 + k_2 \cdot P_{CO} + k_3 \cdot P_{CO_2}) \cdot f(d_c) \cdot h(CRI) \cdot g(V) [g/g\text{-coke}/\text{min}] \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $f(d_c) = (d_c/20)^{-0.64}$

$$h(CRI) = \ln(1 - CRI/100) / \ln(1 - CRI_0/100)$$

$$CRI_0 = 26.3 (= \text{基準 } CRI)$$

$$g(V) = 1 + 0.273 \cdot \ln(V/0.043)$$

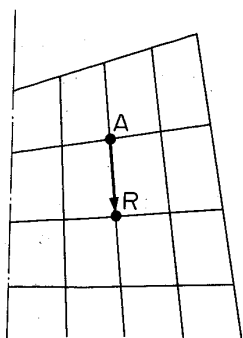


Fig. 2. Path of burden descent.

$$k_1 = \exp(15.78 - 28600/T_s) \quad [\text{min}^{-1}]$$

$$k_2 = \exp(-10.21 + 8590/T_s) \quad [-]$$

$$k_3 = \exp(16.99 - 25800/T_s) \quad [-]$$

なお、生産現場ではコークス反応後強度 (CSR) を、強度指数として、よく用いており、(10)式のコークス反応指数 (CRI) とは区別する必要があるが、CSR と CRI とは非常によい相関があることから、CRI を次式を用いて推定した。

$$CRI = -0.746 \cdot CSR + 73.54 \quad \dots\dots\dots (11)$$

反応量から粒径を求める方法は次のとおりである。装入物が Fig. 2 のメッシュで A 点から R 点へ降下するとし、この降下に要する時間を t とする。この間の反応量と重量変化の関係は次式で与えられる。

$$W_A (\text{反応前の重量}) - W_R (\text{反応後の重量}) \\ = W_A \cdot R \cdot t \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\text{ここで, } W_A = \pi/6 \cdot d_{cA}^3 \cdot \rho_A \cdot (1 - \xi_A)$$

$$W_R = \pi/6 \cdot d_{cR}^3 \cdot \rho_R \cdot (1 - \xi_R)$$

$$t = AR/U: U = \text{装入物降下速度}$$

したがって、反応後の粒径 (R 点での粒径) d_{cR} は、反応前の粒径 (A 点での粒径) d_{cA} を用いて、次のように表せる。

$$d_{cR} = [(W_A - W_A \cdot R \cdot t) \cdot 6 / \pi / \{\rho_R \cdot (1 - \xi_R)\}]^{1/3} \quad \dots\dots\dots (13)$$

さらに、反応のみによる粒径低下を規定する変数として重要な、コークスの基質密度 (ρ) およびコークスの気孔率 (ξ) について、解体調査結果および実験結果に基づいて、次の関係を仮定した。

$$\rho_A = \rho_R = \rho_0: \rho_0 = \text{装入前のコークスの基質密度}$$

$$\xi_R = \xi_0 + 0.21 \cdot \Delta W / W_0$$

$$\xi_0, W_0 = \text{装入前のコークス粒の気孔率, 重量}$$

$$\Delta W = \text{装入してから反応による全重量減少量}$$

2.2.2 コークス強度 (DI_{15}^{30}) の評価

ドラム試験によるガス化反応量と強度低下率との関係

から、反応後のコークス強度 ($DI_{15}^{30})_R$ は装入前のコークス強度 ($DI_{15}^{30})_0$ を用いて、次の実験式⁶⁾で評価した。

$$(DI_{15}^{30})_R = (DI_{15}^{30})_0 \cdot \{1 - 0.01 \cdot \exp(2.303 \cdot c)\} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\text{ここで, } c = 1.125 - 0.0563 \cdot W_0 / \Delta W$$

2.2.3 機械的損耗によるコークス粒径変化の評価

コークス粒子が Fig. 2 上の A 点から R 点に移動するのに伴い、コークス粒径は、反応により(13)式に従って低下し、さらに機械的損耗が加わることに伴い、低下する。この距離 (ΔL) 降下する間に受ける機械的損耗による粒度低下を、ドラム試験の結果を用いて、次式のように評価した。

$$\Delta d_c / \Delta L = \gamma_c \cdot \delta \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここで、 δ はドラム 1 回転当たりの粒度低下率で、 $DI_{15}^{30} = 93.5$ の場合を基準に、次の 2 次式で与えた。

$$\delta = 0.01 \cdot \{0.00764 \cdot (DI_{15}^{30})^2 - 1.477 \cdot (DI_{15}^{30}) + 72.2\} \quad \dots\dots\dots (16)$$

γ_c はドラム試験結果をコークスが単位長さ降下する間に受ける機械的損耗量 (粒度低下量) に換算するときの係数である。実炉羽口前コークス粒度実測結果に合致するよう、 γ_c の値を求めたところ、 $\gamma_c = 0.013$ を得た。結局、炉内におけるコークス粒径の低下を、反応による粒径低下と機械的損耗による粒径低下の和として評価した。

3. 結果と考察

以上の知見をもとに、焼結鉱およびコークスが粒度変化を通じて炉内状態に与える影響について高炉 2 次元数式モデルを用いてシミュレートした。

3.1 焼結鉱性状の影響

焼結鉱の還元粉化指数 (RDI) および初期粒径が変化した場合の炉内状態変化をシミュレートした。なお、コークスおよび送風条件は一定とした。

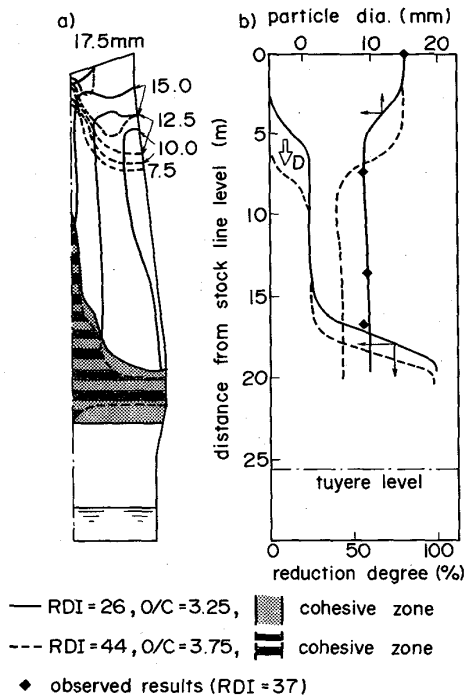
なお、これらの装入物性状を変化させ、溶銑温度を一定にすべく鉱石/コークス比でアクションをとつた場合についても検討した。

3.1.1 還元粉化指数変更時の炉内状態変化

装入前焼結鉱粒径は一定として、RDI 指数の低い場合 $RDI = 26$ と、高い場合 $RDI = 44$ 、の二つについて比較した。

(1) 炉内粒度分布

Fig. 3 a) には、焼結鉱の炉内での粒度分布を等粒度線で示し、一方、炉壁部での炉高さ方向焼結鉱粒度、還元率分布を Fig. 3 b) に示す。 $RDI = 26$ の時、焼結鉱の粒度低下は、炉頂から約 5 m 以内では完了し、5 m 以



a) Particle dia. distribution of sinter
b) Vertical distributions of particle dia. and reduction degree of sinter along furnace wall

Fig. 3. Effect of *RDI* on the degradation of sinter in the B.F. at constant pig temperature.

下シャフト中段では、粒度、還元率ともほぼ一定となる。このときの還元率は約 25% である。この傾向は実炉での炉壁部コアサンプリング結果とも一致した。

また、*RDI*=44 の場合、*RDI*=26 の場合に比して、焼結鉱還元粉化開始位置および還元開始位置 (Fig. 3 b) 上の位置 D) は、Fig. 4 に示す温度分布に対応して、炉の下方位置に移動する。

(2) 炉内温度分布

粉化後の粒径が小さい *RDI*=44 の場合、焼結鉱粒径低下による被還元性向上のため炉下部においても間接還元が進行し ($\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$)、直接還元反応量が減少するため、炉下部滴下帯温度はむしろ上昇する。この結果、融着帯は上昇し、滴下溶銑温度も上昇するが、これに対し、滴下溶銑温度を一定とすべく鉱石/コークス比を 3.25 → 3.75 と増加させた場合には熱流比が増加するため、Fig. 4 に示すようにシャフト上部の温度が低下する。一方、融着帯下端より下部の温度は、*RDI* 上昇による温度上昇効果と、鉱石/コークス比の上昇による温度低下効果とが相殺し、ほぼ一定となる。このため、融着帯位置およびガス流線は、*RDI* 変更前後ではほぼ一定となる。送風圧は、*RDI* 上昇と、鉱石/コークス比の上昇により、本検討例では約 0.22 kg/cm^2 上昇した。

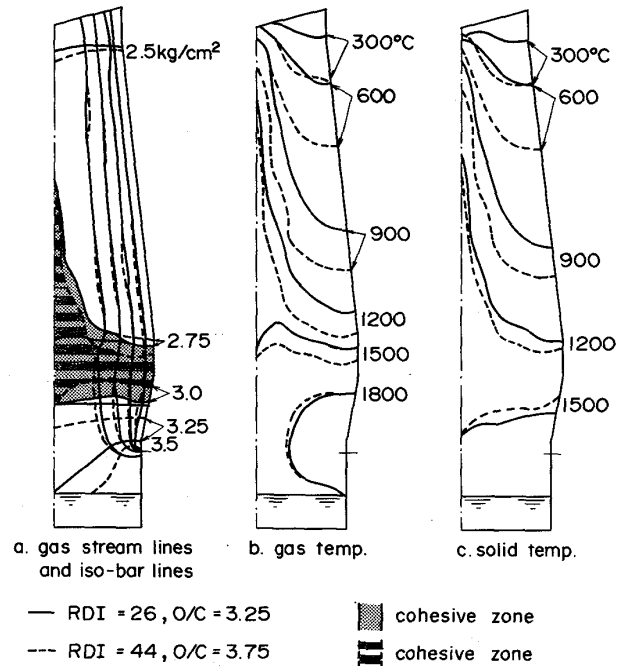


Fig. 4. Effect of *RDI* on the inner states in the B.F. at constant pig temperature.

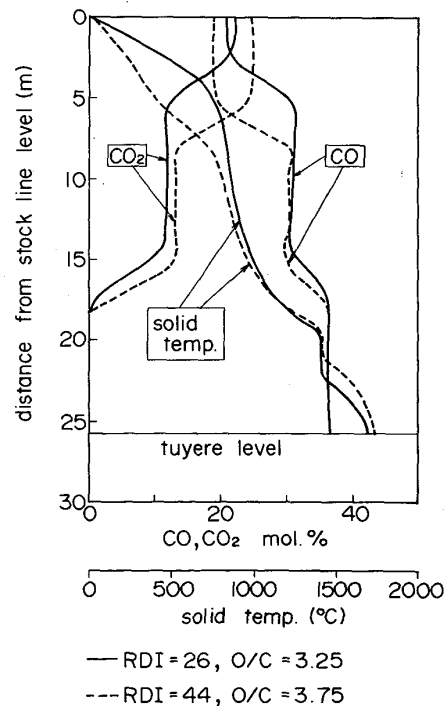
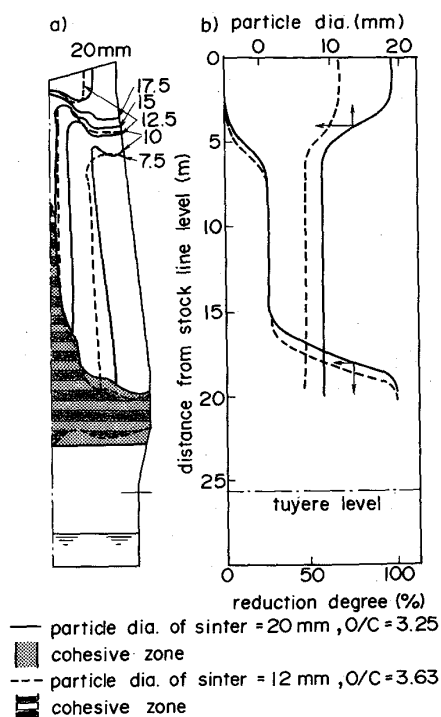


Fig. 5. Effect of *RDI* on the CO, CO₂ mol% and solid temperature at the intermediate zone in the B.F. at constant pig temperature.

(3) ガス組成分布

炉体プロフィールに沿った炉中間部の炉高さ方向でのガス組成、温度分布を Fig. 5 に示す。 *RDI*=44 の場合



a) Particle dia. distribution of sinter
b) Vertical distributions of particle dia. and reduction degree of sinter along furnace wall

Fig. 6. Effect of sinter size on the degradation of sinter in B.F. at constant pig temperature.

FeO→Fe への間接還元反応が進行するため、熱保存帯での CO% が低下し、CO₂% は上昇する。

また、シャフト部では、鉱石/コークス比の上昇により、RDI=44 の場合の方が、固体温度の上昇が遅れるものと推定される。

3.1.2 装入焼結鉱粒度変更時の炉内状態変化

RDI を一定とし、焼結鉱冷間強度 (TI) の変動に対応するものとして、装入焼結鉱粒度を 20 mm→12 mm に変更し、粒度低下による滴下溶銑温度の上昇分を、鉱石/コークス比で補償 (3.25→3.63) した場合の炉内状態変化について検討した。

(1) 炉内粒度分布

Fig. 6 左側に焼結鉱の炉内粒度分布を等粒度線で示し、一方、炉壁側の炉高さ方向焼結鉱の粒度、還元率分布を Fig. 6 右側に示す。

装入焼結鉱粒度の低下により還元粉化後の粒径も小さくなるため、FeO→Fe への間接還元反応が進み、炉下部滴下帯温度は上昇する。この結果、鉱石/コークス比の上昇が可能となる。

また、還元粉化開始位置は炉内温度変化に対応して炉上部でわずかに低下する。

(2) 炉内温度分布

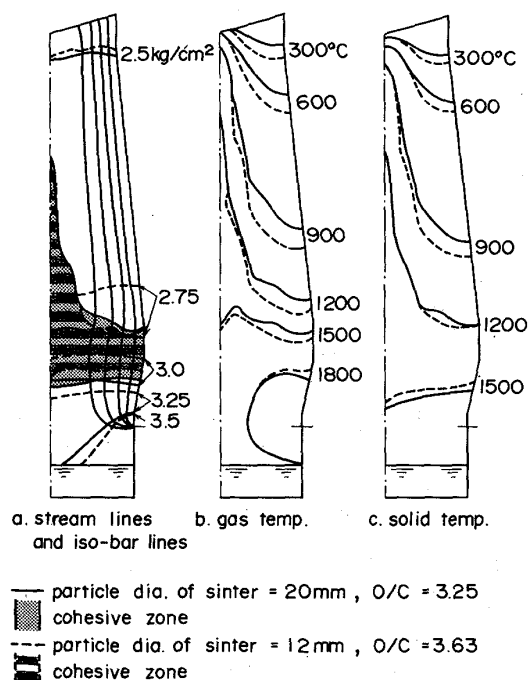


Fig. 7. Effect of sinter size on the inner states in the B.F. at constant pig temperature.

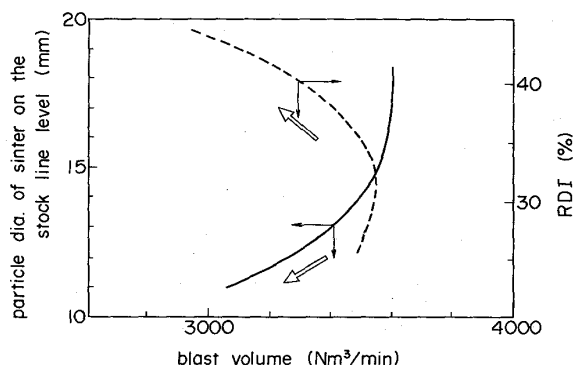


Fig. 8. Relationship between blast volume, particle dia. of sinter and RDI at constant pressure drop (0.945 kgf/cm²) in the B.F..

装入焼結鉱の粒度を低下させた場合、融着帯以下での直接還元による吸熱量が減る結果、炉内固体温度分布は、Fig. 7 に示すごとく、融着帯下端より下の部分で上昇し、融着帯下端位置も上がる。しかし、RDI を上昇させた時に見られた、シャフト上部での温度低下 (Fig. 4) は、焼結鉱粒度低下により熱交換が改善された結果、減少したものと予想される。

(3) ガス流れ分布

炉内圧力損失の上昇は、RDI 変更の場合に比較し、より炉の上部から起こる傾向が認められる。

以上まとめると、RDI の上昇または装入焼結鉱粒径

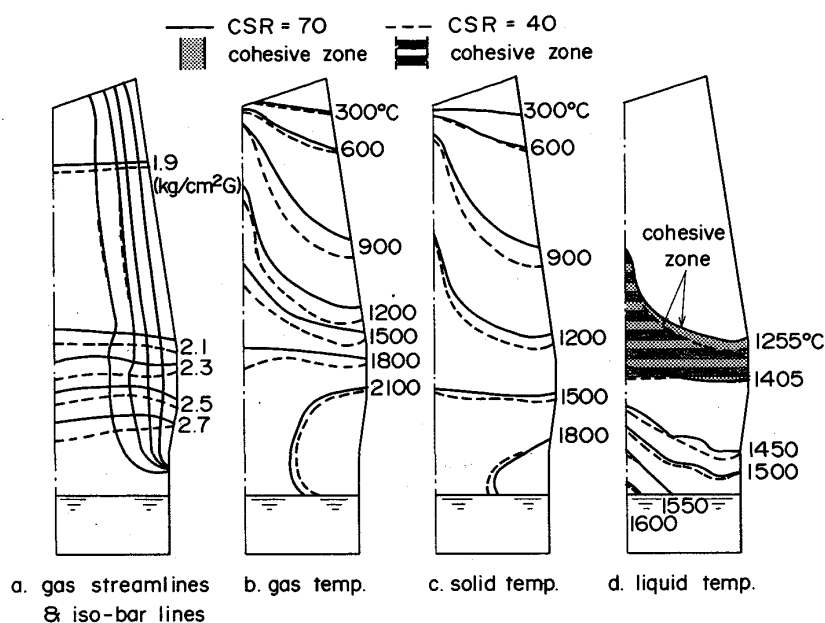


Fig. 9. Gas streamlines, iso-bar lines and temperature distribution of B.F. at constant pig temperature.

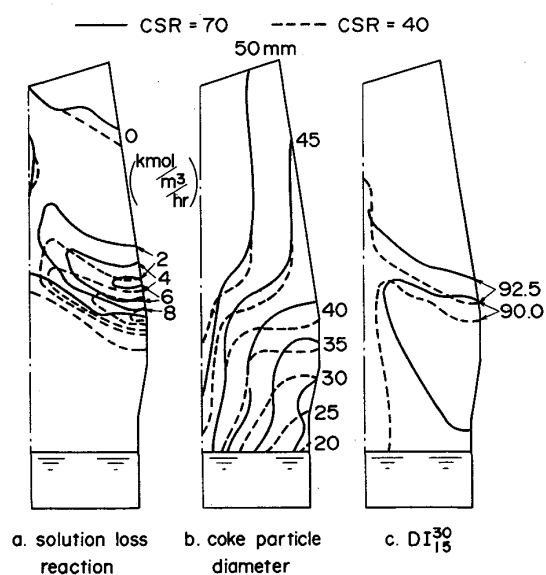


Fig. 10. Coke behavior in the B.F. (O/C=3.65).

の低下により、 η_{CO} の向上が見られるが、一方、炉内圧力損失が上昇する。見方を変えれば、減産操業下においては、送風量減少による炉内圧力損失の減少の分だけ、焼結鉱粒径の減少、 RDI の上昇が可能になるといえる。Fig. 8にその一例を示す。すなわち、送風量を低下させた場合(3500→3100 Nm³/min)、炉内圧力損失を一定に確保しながら装入焼結鉱粒径を14→11 mmに低下させることが可能となる。また、装入焼結鉱粒径低下のかわりに RDI を35→42に上昇させることが可能であることが予想できる。

3.2 コークス性状の影響

溶銑温度を一定にして、コークス反応後強度(CSR)を変化させた場合の炉内状態変化を検討した。

(1) 炉内温度分布(ガス、固体、液体)およびガス流線 CSR の低下により、ソリューションロス反応が顕著となり、その吸熱のため炉内温度が低下する。この炉内温度の低下に伴い、融着帯位置が下がるので、滴下液温度も低下する。 CSR 低下によるソリューションロス反応増加分を鉱石/コークス比の減少で補償すると、ソリューションロス反応量が減少し、溶銑温度が回復するものの、Fig. 9に示したように炉内各部の温度は低下する傾向にある。

(2) コークス粒度、強度の分布

ソリューションロス反応開始とともに、(14)式から求めた強度(DI_{15}^{30})および粒度の著しい低下が始まる。そして、これらの開始位置は、 CSR が低下すると、炉下部の方へ移動した。この時、コークスの強度および粒度が低下するとソリューションロス反応量自体が、増加するため、それらはますます低下し、羽口前でのコークス粒度が小さくなった(Fig. 10)。

(3) CO , CO_2 分布

炉中間部の炉高さ方向 CO , CO_2 分布の変化は、Fig. 11に示すごとく、シャフト中段には、明瞭な化学保存帯が現れるが、この化学保存帯における CO/CO_2 比は CSR の低い場合の方が上昇した。

CSR が炉内温度、 CO , CO_2 ガス組成によぼす、このような影響は、試験高炉における、通常コークスとオイルコークスとの使用比較テスト結果¹¹⁾でもすでに観

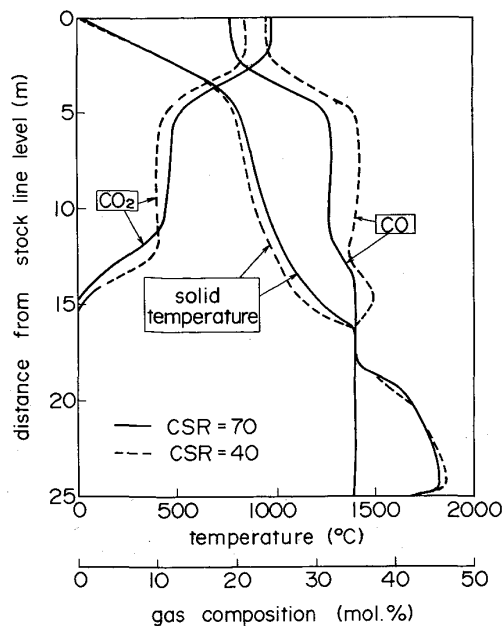


Fig. 11. Longitudinal distribution of gas composition and temperature at the intermediate zone of B.F. at constant pig temperature.

測されている。すなわち、オイルコークスの低反応性および無灰分という特長により、排ガスの η_{CO} の向上、炉内温度の上昇および炉内ガス比 (CO/CO_2) の低下が見られており、本シミュレーション結果と傾向として一致している。

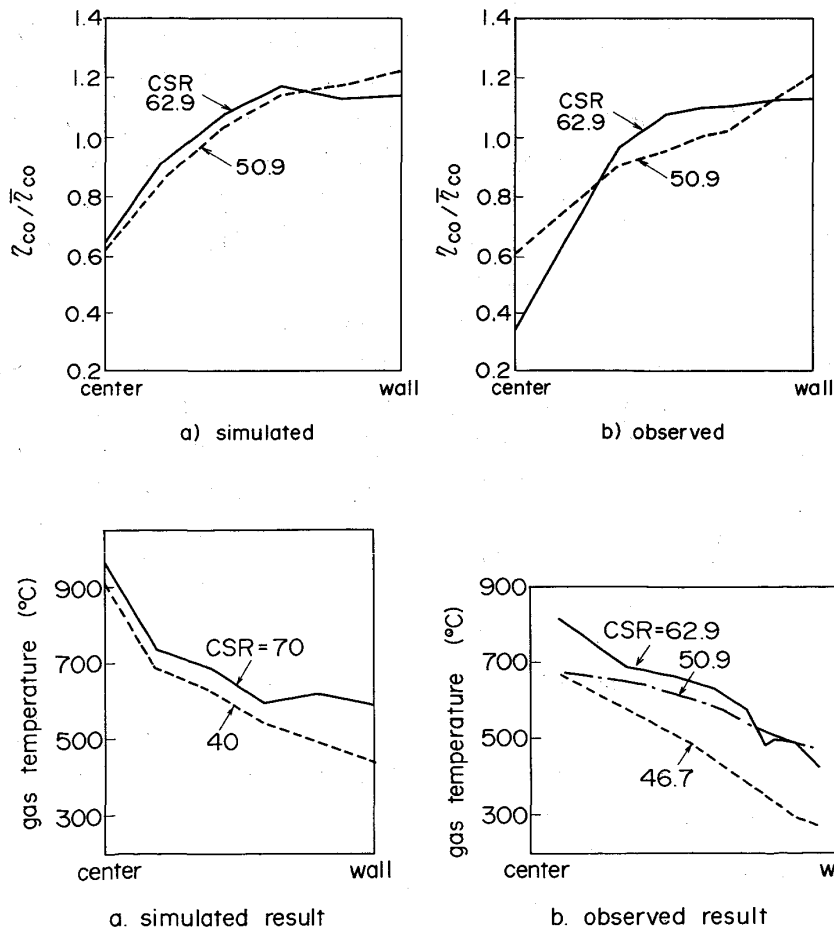
(4) 実炉との対比

鹿島第1高炉において、コークス反応後強度 (CSR) を45.6→62.9に変化させるテストを実施した。この時の炉内状態変化を高炉2次元数式モデルを用いてシミュレートし、比較した。

a. シャフト上段ガス組成とガス温度の半径方向分布

CSR 変更期間中における、鹿島第1高炉シャフト上段層内プローブによる、半径方向のガス組成分布の実測結果と、シミュレーション結果とを Fig. 12 に示す。CSR の上昇により、鉱石/コークス比の高い炉中間部でガス利用率 ($\eta_{CO} = CO_2 \text{ モル\%} / (CO \text{ モル\%} + CO_2 \text{ モル\%})$) が向上したため、 $\eta_{CO}/\bar{\eta}_{CO}$ ($\bar{\eta}_{CO}$: η_{CO} の半径方向平均値) のパターンで見ると、炉中間部から炉壁側にかけてフラット化する傾向を示した。

一方、半径方向のガス温度分布は、Fig. 13 に示すごとく、CSR の上昇と共に、炉内熱レベルが上昇するため、



$\bar{\eta}_{CO}$: Average value of CO in radial direction
Fig. 12. Effect of coke strength after reaction (CSR) on the radial distribution of gas utilization ratio ($\eta_{CO}/\bar{\eta}_{CO}$).

Fig. 13. Radial distribution of temperature distribution on the level of upper shaft.

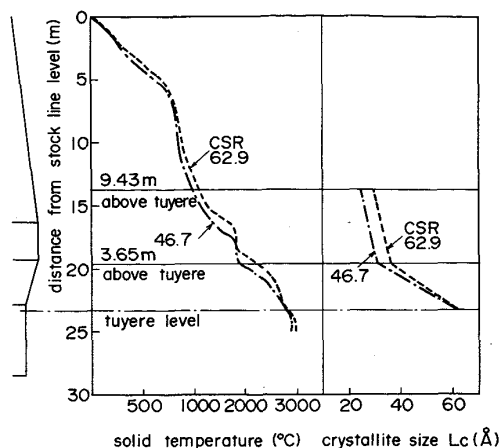


Fig. 14. Distribution of solid temperature and L_c along furnace wall.

ガス温度も上昇した。

b. 炉壁側炉高さ方向温度分布

コークス性状変更テスト中、シャフト下段およびベリ下段における炉壁側装入物のコアサンプリングならびに羽口前でのコークスサンプリングを実施した。このサンプリングコークスから求めた黒鉛化度の炉高さ方向分布を Fig. 14 に示す。CSR を上昇させた場合、黒鉛化度 (L_c) は上昇し、炉内の熱レベルが高めになったことを示している。

以上の傾向はいずれもシミュレーション結果とよい一致を示した。

4. 結 言

焼結鉱の還元粉化モデルを高炉 2 次元数式モデルに導入することにより、次の結果を得た。

(1) 還元粉化指数の上昇により、次の炉内現象が現れる。

a. 融着帯より上部では間接還元が進行し、炉頂でのガス利用率 (η_{CO}) が向上する。溶銑温度を一定とすべく、鉱石/コークス比を 3.25→3.75 と増加させた場合、炉上部の温度が低下する。

b. シャフト上部での還元開始位置は炉下部の方に移動する。

(2) 装入焼結鉱粒径の低下により、被還元性向上効果

および固-気熱交換向上効果が現れる。

(3) 還元粉化指数の上昇、装入焼結鉱粒径の低下により、炉内圧力損失が増加する半面、被還元性が向上し、その結果、炉頂でのガス利用率 (η_{CO}) の向上が期待できるため、減産下では、有利な操業形態となる可能性がある。

高炉内におけるコークスの挙動を高炉 2 次元数式モデルに導入することにより、次の結果を得た。

(1) コークス粒度および強度 (DI_{30}^{30}) は、ソリューションロス帯以下で、急激に低下する。このみかけの強度低下により、羽口前に向かってさらに粒度低下が著しくなる。

(2) CSR 上昇により、ソリューションロス反応が抑制され、炉内温度が上昇する。

(3) CSR が上昇すると、炉内温度の上昇効果により、シャフト上部での間接還元反応速度 ($Fe_2O_3 \rightarrow FeO$) が大きくなり、その結果、炉頂でのガス利用率 (η_{CO}) が向上する。

以上の知見が得られたが、高炉内におけるコークス性状を総合的に評価するためには、レースウェイ燃焼帯高温部を中心とした劣化挙動の解明が残されている。

文 献

- 1) 下村泰人, 西川 潔, 有野俊介, 片山 力, 肥田行博, 磯山 正: 鉄と鋼, **62** (1976), p. 547
- 2) 佐々木寛太郎, 羽田野道春, 渡辺雅男, 下田輝久, 横谷勝弘, 伊藤孝夫, 横井 毅: 鉄と鋼, **62** (1976), p. 580
- 3) 高田 司, 相馬英明, 入田俊幸, 神坂栄治, 木村春夫, 磯山 正, 須沢昭和: 鉄と鋼, **72** (1986), p. 203
- 4) 林 洋一, 須賀田正泰, 斧 勝也, 西 徹, 山口一良, 中込倫路: 鉄と鋼, **69** (1983), A157
- 5) 東京大学生産技術研究所: 試験溶鉱炉 第 26 次操業報告 (1975)
- 6) 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
- 7) 羽田野道春, 宮崎富夫, 岩永祐治: 鉄と鋼, **65** (1979), p. 1365
- 8) 岩永祐治: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 740
- 9) 羽田野道春, 栗田興一: 鉄と鋼, **66** (1980), p. 1898
- 10) 倉重一郎, 中村文夫, 羽田野道春, 岩永祐治, 野見山寛, 小島正光, 網永洋一: 学振 54 委-No. 1689 (昭和 59 年 7 月)
- 11) 鈴木吉哉, 張 東植, 本田 一, 桑野芳一, 呉 平男, 松崎幹康, 館 充: 鉄と鋼, **60** (1974), p. 2098