

# 高炉低還元材比に向けての課題

宇治澤 優\*・中野 薫\*・松倉 良徳\*・砂原 公平\*・小松 周作\*・山本 高郁\*

Subjects for Achievement of Blast Furnace Operation with Low Reducing Agent Rate

Yutaka UJISAWA, Kaoru NAKANO, Yoshinori MATSUKURA, Kohei SUNAHARA, Shusaku KOMATSU and Takaiku YAMAMOTO

**Synopsis** : The technology which reduces the reducing agent rate by the improvement in the reaction efficiency of blast furnace leads to reduction of hot metal manufacturing cost, but also solution of recent CO<sub>2</sub> emission reduction. The subjects for achievement of the blast furnace operation with low reducing agent rate were described on reduction measures of the carbon consumption and problem of the measures referring to the example of reducing agent rate of the present state blast furnace concerning blast operation and reactive improvement. And, carried out concrete measures were introduced in order to aim at the low reducing agent rate operation. The following results were obtained.

- 1) Since it has reached the already high reaction efficiency in present state blast furnace, it is not easy to attempt further reduction of the reducing agent rate.
- 2) The blast furnace use of high reactivity coke or reduced iron is equal level or over it in comparison with the reduction effect by the assumed blast operation in this paper.
- 3) The promotion of coke reaction load with the gasification is worried, when it aims at the low reducing agent rate operation by the high reactivity coke use.
- 4) It is estimated that the threshold also exists for the reducibility of competing ore, when it aims at the low reducing agent rate operation using the high reactivity coke.
- 5) The use of the low SiO<sub>2</sub> sinter is effective for the improvement on the permeability in the blast furnace, when it aims at the low fuel rate operation. However, the new technology of the permeability improvement is desired, since there is some a limit for low SiO<sub>2</sub> of the sintered ore, when future raw material supply and demand is considered.

**Key words**: blast furnace; CO<sub>2</sub> emission; low reducing agent rate; reaction efficiency; high reactivity coke; low SiO<sub>2</sub> sinter; KS; permeability; reduced iron.

## 1. 緒言

高炉の反応効率を向上させ、還元材使用量を低減する技術は、銑鉄製造コスト削減、生産量確保（高出銑比達成）のみならず、地球温暖化対策のCO<sub>2</sub>ガス排出量削減の観点からも重要な課題と考えられる。国際的な温暖化防止対策が打ち出される中で、日本の鉄鋼生産においては業界を中心に2010年までに日本の鉄鋼業のエネルギー消費量11.5%削減（対1990年度）を目標に活動が推進されている。日本の鉄鋼生産のエネルギー消費は、国内消費量の12%程度を占め、その中でも高炉の使用エネルギーは全体の70%を占める。従って、反応効率を向上させて、高炉の使用エネルギーを現状値から更に低減できれば、CO<sub>2</sub>ガス排出量削減に大きく貢献すると期待される。日本鉄鋼協会においては、高炉を主体とした革新的な新たな製銑法という視点で、“エネルギー半減環境負荷ミニマムを目指した高炉における革新的製錬反応”に関する研究活動が積極的に推進された<sup>1)</sup>。

本報では、より現実的な視点に立ち、現状高炉で低還元材比操業を指向する上での課題について述べる。まず、平衡論的解析に基づき、現状高炉の反応効率（シャフト効率）の実態調査を行った上で、高炉還元材比（炭素消費原単位）に及ぼす①シャフト効率②天然ガス吹込みを含む送風操作④高反応性コークス使用⑤還元鉄使用の効果について試算した。次に、反応効率向上の有効な手段と考えられる高反応性コークスの高炉使用時の課題を速度論的に議論した。更に低還元材比を指向するために実施した具体的な取り組み（低SiO<sub>2</sub>焼結鉱使用による通気性改善、還元鉄使用による還元材比低減）について紹介する。

## 2. 現状高炉における反応効率の実態

現状、日本の高炉の還元材の平均値は、約500 kg/THM程度でその内、コークス使用量380 kg/THM、微粉炭使用量120 kg/THMである。Table 1に当社の高炉の微粉炭使用量を変更して操業した場合の還元材比の実例を示す。還元

原著論文：ISIJ Int. Vol. 45 (2005), No. 10, pp. 1379-1385

平成18年5月2日受付 平成18年6月27日受理 (Received on May, 2, 2006; Accepted on June 27, 2006; originally published in ISIJ Int. Vol. 45, 2005, No. 10, pp. 1379-1385)

\* 住友金属工業（株）総合技術研究所 (Corporate R&D Labs., Sumitomo Metal Industries Ltd., 16-1 Sunayama Kamisu Kashima 314-0255)

Table 1. Example of reducing agent rate of a present state BF.

	Period 1	Period 2	Period 3
<b>Shaft efficiency</b> (-)	<b>0.94</b>	<b>0.96</b>	<b>0.97</b>
Production rate (t/dm <sup>3</sup> )	2.01	2.09	2.03
<b>Pulverized coal rate</b> (kg/THM)	<b>100</b>	<b>141</b>	<b>187</b>
Coke rate (kg/THM)	411	360	321
<b>Reducing agent rate</b> (kg/THM)	<b>511</b>	<b>501</b>	<b>508</b>
Carbon from off gas (kg/THM)	394.6	382.5	382.6
Carbon in hot metal (kg/THM)	48.1	48.6	47.6
<b>Carbon consumption</b> (kg/THM)	<b>442.6</b>	<b>431.1</b>	<b>430.2</b>

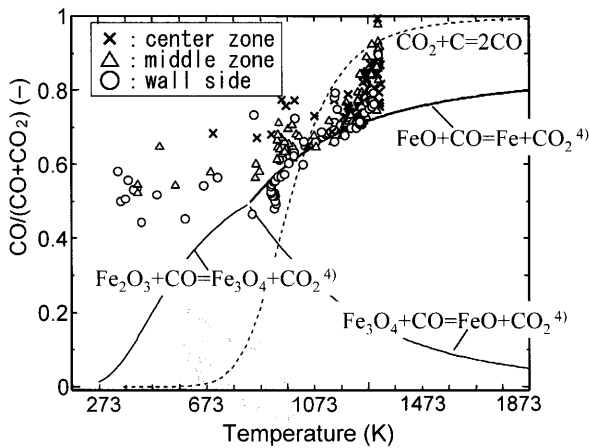


Fig. 1. Reduction condition obtained by the vertical sonde of a commercial BF.

材比は、約500 kg/ptで、炭素消費原単位に換算して430 kg/ptある。Ristモデル<sup>2)</sup>を用いた平衡論的解析によれば、反応効率を表すシャフト効率は、0.94~0.97と高い反応効率を維持している。このことは、現状高炉において還元平衡近くまで反応が進行していることを示唆している。その傍証データとして現状高炉の垂直ゾンデデータの例をFig. 1に示す。炉内の物流が集中する壁側部で明らかにFeO-Fe平衡近傍のガス組成で、還元が進行しない状態に達している。シャフト効率=1の理想的な高炉を想定した場合 (Fig. 2), 炭素消費原単位は、現状高炉の430 kg/ptから422 kg/pt, 削減率2%程度の低減は可能と試算されるが、現状操業の操作範囲で還元材比の大幅削減を指向する事は容易でないと考えられる。

### 3. 炭素消費原単位に及ぼす各種操業操作の影響

炭酸ガス排出抑制の観点から、炭素消費原単位に及ぼす各種操業操作の効果についてRistモデルにより試算した。解析は、Table 1に示した高微粉炭操業下における現状高炉の炭素消費原単位を基準に、炭化水素系燃料吹込みによる複合送風も考慮した。尚、Ristモデルの結果に基づいてシャフト部・炉下部の段階別熱精算 (高さ方向の温度分布算出) を行った結果、熱流比が0.85を超えると温度保存帯

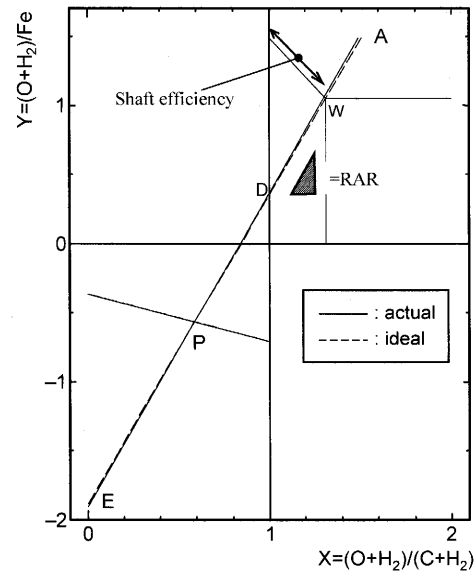


Fig. 2. Rist diagram in case of ideal operation.

(1000°C) が消滅し、シャフト部の昇温が遅れると試算された。そこで、シャフト部熱不足による還元遅れを回避するため、熱流比の上限値は0.85と仮定した。炭素消費原単位に及ぼす各種操業操作の効果試算をFig. 3に示す。天然ガス (CH<sub>4</sub>) 吹込み 50 Nm<sup>3</sup>/ptで炭素消費原単位は416 kg/pt (-14 kg/pt (-3%)), 天然ガス吹込み+送風温度上昇 (max 1623K)で407 kg/pt (-23 kg/pt (-5%)), 更に湿分低下 (min 5 g/Nm<sup>3</sup>: 脱湿送風) で396 kg/pt (-34 kg/pt (-8%))までの削減が見込まれる。また、1673Kの低温出銑化で、390 kg/pt (-40 kg/pt (-9%))までの削減となる。水素高含有燃料吹込み、高温・脱湿送風等の送風操作で炭素消費量の削減は可能と考えられるが、ランニングコストと設備能力を見直す必要性も出てくる。送風操作以外で、還元材比の低減を指向するためには、コークス、鉍石の反応性改善による高炉反応効率向上が有効な手段と考えられる。高反応性コークス使用による高炉内反応効率の向上技術に関し、内藤ら<sup>3)</sup>は、断熱型高炉内反応シミュレーターを用いてその効果を実験的に確認している。その原理をFig. 4に示す。図に示すように、高反応性コークス使用により熱保存帯温度を低下させることが出来れば、炉内の還元能力が向上し、Fig. 3に示すように、天然ガス吹込み+送風温度上昇に相当する削減効果が期待できる。

### 4. 速度論的解析による高反応性コークス使用時の課題

最近、高反応性コークスの実高炉使用評価の試み<sup>5)</sup>がなされた。それによると、通常コークスの一部 (最大8 wt%) を高反応性コークスに置換して操業を行った結果、ラボテスト<sup>3)</sup>と同様に、還元材比低減が可能であったとしている。更なる還元材比低減のためには、高反応性コークスの多量

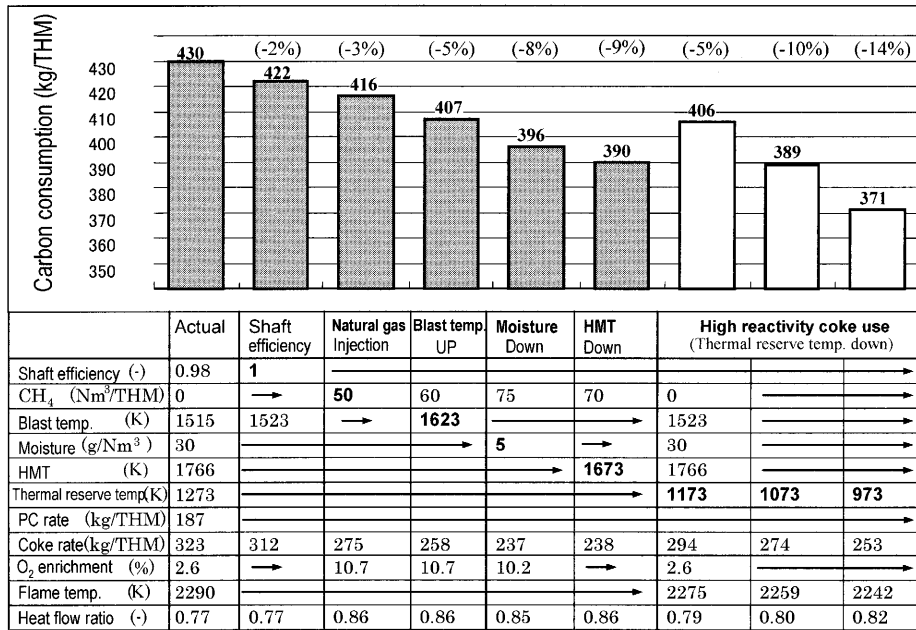


Fig. 3. Effect of operation condition on carbon consumption rate by Rist diagram.

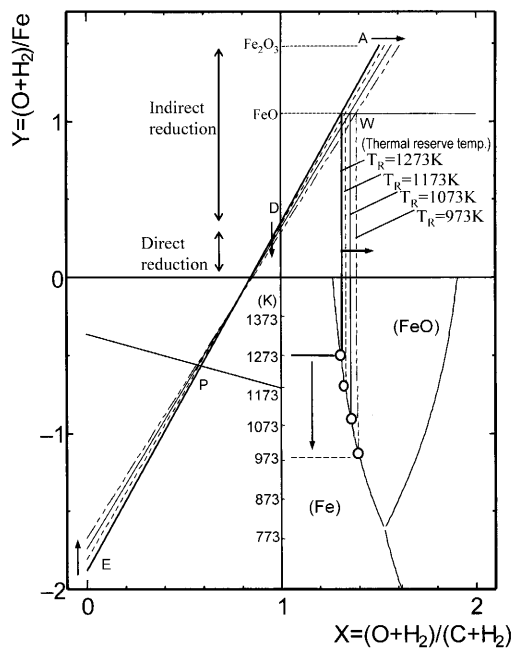


Fig. 4. Effect of reducing thermal reserve temp. on the reducing agent rate by use of high reactivity coke.

使用が有効と考えられる。本章では、コークスの反応性改善により、低還元材比を実現するための課題について速度論的解析により考察した。高反応性コークスを多量使用して反応効率を向上させるためには、熱保存帯温度の低下に応じて、鉱石側の還元速度もその低下に追従する事が必要条件である。(Fig. 4で熱保存帯温度低下時、シャフト効率が維持されることに相当する。) また、熱保存帯温度の低温化に伴って炉内の反応状態も大きく変化することが予想される。そこで、断面均一条件で、高炉総合モデル<sup>6)</sup>を用

いて高反応性コークスの全量使用時の炉内状態を推定した結果を Fig. 5 に示す。平衡論に基づく前記試算結果と同様、速度論に基づく計算結果でも、高反応性コークスを使用することにより、高炉反応効率の向上が期待できると試算された。(Fig. 5(a) 但し、高反応性コークス使用により、直接還元の反応形態が変化し、トータルの直接還元量は低下するが、反応割合で見ればソリューションロス反応が上がり、逆に溶融還元反応は低下すると推定された。(Fig. 5(b) この予測が正しければ、高反応性コークス使用によって低還元材を指向する場合、ガス化に伴うコークス反応負荷の増幅が懸念される。従って、高反応性コークス使用時の高炉反応効率評価とともに、高炉内での反応後強度評価技術の確立も重要である。更に Fig. 6 には、高反応性コークスを使用する場合の還元材比に及ぼす鉱石側の還元反応速度(ここでは、鉱石の還元反応性を JIS-RI で表現)の影響について推定した。ここで、計算上の JIS-RI は、JIS-RI 反応実験をシミュレートする 3 界面未反応核モデル<sup>7)</sup>を組み込んだ反応速度解析で、所定の JIS-RI 値になるように文献値のウスタイトの反応速度定数を予め調整して求めた後、高炉内解析の反応速度に反映させた。図に示すように、高炉内の反応効率は、コークスと鉱石の競合反応の帰結として成立しているため、コークスの反応性を変更して還元材比低減を図るためには、競合する鉱石の被還元性にも閾値が存在すると推定される。Fig. 7 には、その際の CO/(CO+CO<sub>2</sub>) および反応速度に及ぼす JIS-RI の影響を示す。コークスの反応性と鉱石の被還元性に応じて、高炉内の還元状態が大きく変化する。前記記載の Fig. 4 のリスト線図で説明すると、焼結鉱とコークスの反応速度の比が変わると、リスト線図のシャフト効率と W 点(ウスタイ

ト-鉄還元平衡点)の位置の両方が変化することを意味する。以上のように、速度論的解析によれば、高反応性コークス使用時には、高炉内の反応形態が大きく変化するとともに、鉱石側の反応性もその効果に大きな影響を及ぼすことが示唆された。

### 5. 低還元材比操業を指向するために実施した具体的な取り組み

#### 5.1 低SiO<sub>2</sub>焼結鉱(低KS値)使用による高炉通気性改善効果

現状の高PCI操業下でのO/C値は5程度(PC rate=190 kg/pt時)である。低還元材比を追求するに従い、その値は益々増加するため(前記試算ではO/C=5.9~6.8)、炉内の通気抵抗は、現状レベルよりも更に増加すると予想され、通常の高炉操業の範囲を超えることになる。このよう

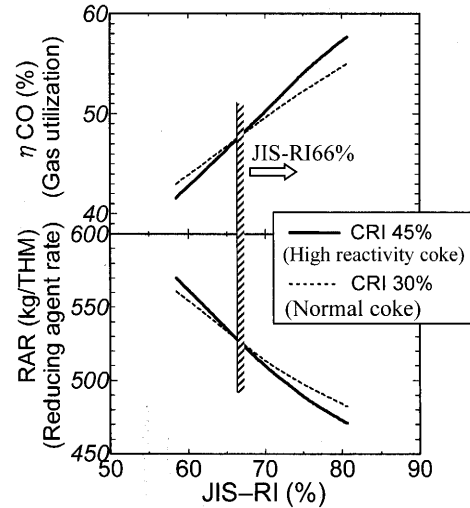
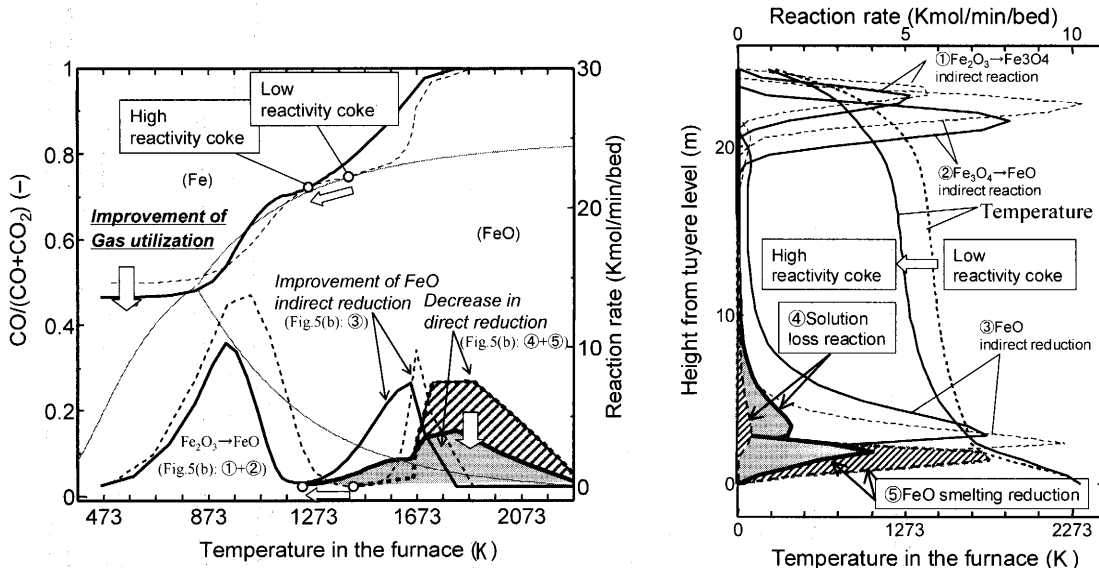


Fig. 6. Effect of sinter reactivity (JIS-RI) on the operation results in case of using high reactivity coke calculated by a blast furnace simulator.



(a) Effect of high reactivity coke on gas utilization (b) Vertical distribution of process variables

Fig. 5. Results of reactions behavior in case of using high reactivity coke calculated by a blast furnace simulator.

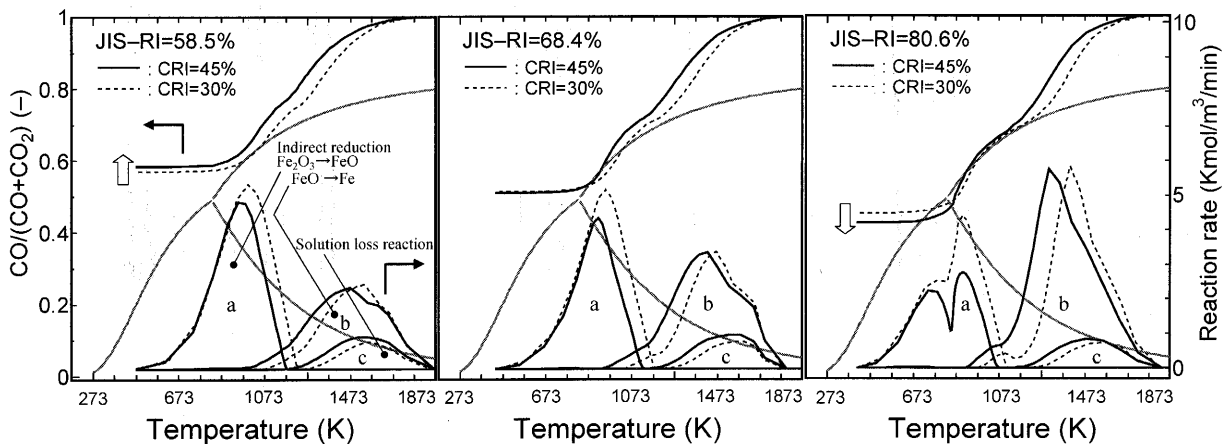


Fig. 7. Effects of sinter reactivity (JIS-RI) on changes of CO/(CO+CO<sub>2</sub>) and reaction rates calculated by a blast furnace simulator.

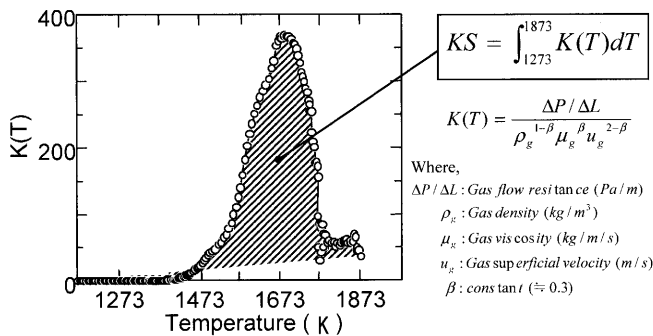


Fig. 8. Definition of KS value based on the softening-melting test.

Table 2. Effect of properties of sinter on KS.

Properties of sinter	Effect on KS
SiO <sub>2</sub> +1 (wt.%)	+630 × 10 <sup>5</sup>
MgO +1 (wt.%)	-328 × 10 <sup>5</sup>
Material C.W. +1 (wt.%)	-135 × 10 <sup>5</sup>
JIS -RI +1 (%)	-40 × 10 <sup>5</sup>

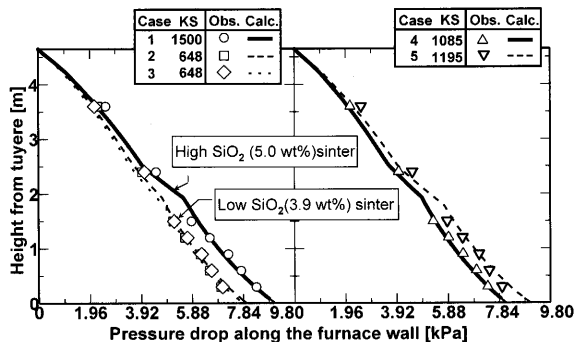


Fig. 9. Distribution of static pressure in the experimental blast furnace.

な高O/Cで通気性を良好に維持できるかどうかは、低還元材比操業を指向する上で大きな課題と考えられる。特に高炉の通気抵抗を支配する融着帯での通気抵抗を低減することが重要となる。当社では、融着帯の通気性改善には低SiO<sub>2</sub>焼結鉱の使用が有効であることを試験高炉操業ならびに実高炉の通気性評価により立証した<sup>8)</sup>。その際、焼結鉱の融着帯での通気抵抗の大きさを定量的に表すため、Fig. 8に示すように荷重軟化試験で求められる高温通気抵抗指数KS値<sup>9)</sup>を評価関数として用いた。Table 2に示すようにKS値低減には、焼結鉱SiO<sub>2</sub>成分低減、MgO成分増加、原料中結晶水の増加（気孔率増加）、そしてJIS-RI向上が有効である<sup>10)</sup>。試験高炉操業では、実機焼結機で製造したSiO<sub>2</sub>成分値の異なる焼結鉱（KS値の異なる焼結鉱）を用いて通気性評価試験を行った。また、KS値の通気性への影響を定量的に把握するために、KS値の試験方法および結果をモデル化して高炉モデルに組み込んだ。その結果をFig. 9に示すが、高SiO<sub>2</sub>焼結鉱から低SiO<sub>2</sub>焼結鉱変更した

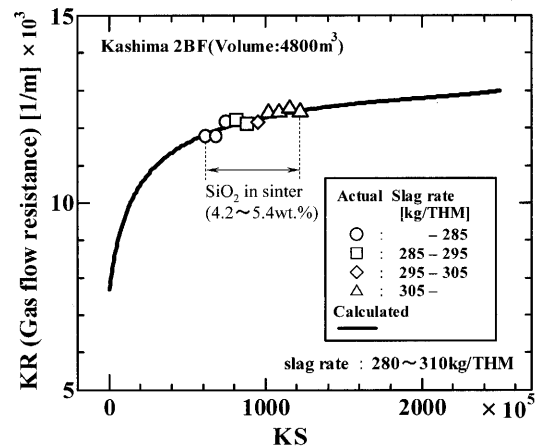


Fig. 10. Effect of KS on gas flow resistance in the actual blast furnace.

際の通気性改善効果を試験および計算により確認した。次に、この通気性評価モデルを用いて実高炉の通気性解析を実施した結果、Fig.10に示すように実高炉においても低SiO<sub>2</sub>焼結鉱使用による通気性改善効果を確認できた。このように低還元材操業を指向する際、低SiO<sub>2</sub>焼結鉱の高炉使用は通気改善面で有効である。但し、焼結鉱の更なる低SiO<sub>2</sub>化は、強度面と原料面で限界に近づいており、気孔等の物理性状に着目した新たな焼結鉱の高温性状改善が望まれる。

### 5.2 還元鉄使用による還元材比削減と増産効果

スクラップや還元鉄は酸化鉄の還元を必要としない分、高炉使用すれば大幅な還元材比低減が見込める。高炉におけるスクラップ（市中屑）利用では、トランプエレメント（Cu, Sn）による溶銑品質の汚染問題があるため、社会的に徹底したリサイクルシステムの構築が望まれる。還元鉄利用については、価格や輸送の問題はあるが、スクラップのようなトランプエレメント問題はない。従って、還元鉄は、生産弾力性と低還元材の両面の要請に対応できる鉄源として、炭材内装ブリケット<sup>11)</sup>等の新鉄源とともに注目を浴びる可能性が高い。Fig.11には、Ristモデルにより、鉄鉱石とともに金属鉄（Fe=100%）を高炉に装入した場合の還元材比の低減効果を示す。金属鉄10%装入で、先に示した基準操業（現状炉、シャフト効率1、炭素消費原単位422 kg/pt）に比べて29 kg/pt（7%）の減少となり、天然ガス吹込み以上の削減効果がある。送風原単位は945 Nm<sup>3</sup>/ptで基準操業の6.6%減で、出銑比は2.2 t/d/m<sup>3</sup>と基準操業に比べ6.6%の増産と試算された。鉄源として還元鉄を鉱石の代替として部分装入すれば、炭素消費量は大幅に削減できることを示す。当社では、還元鉄の高炉増産および還元材比低減効果を定量的に把握するため、還元鉄の溶解挙動を含む通気特性の基礎実験、および試験高炉を用いて鉱石に対する還元鉄装入量を段階的に100%使用まで増加させる試験を実施した<sup>12)</sup>。試験では、Table 3に示す成分の粒径

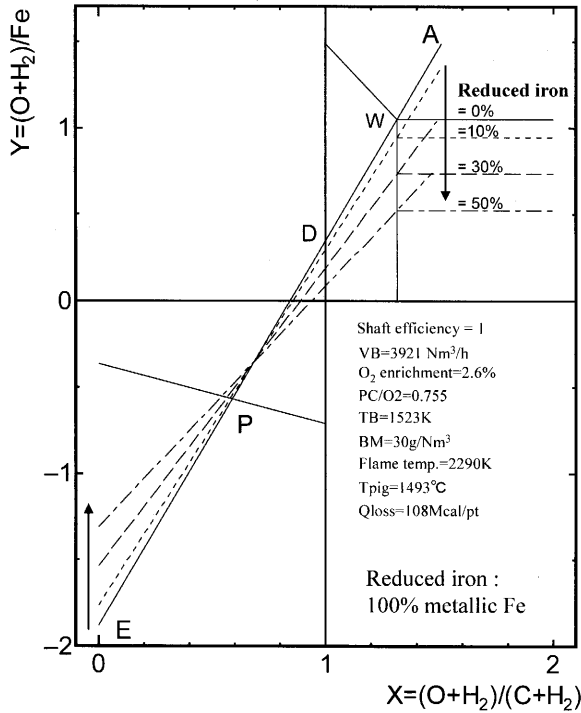


Fig. 11. Effect of the metallic iron charge ratio on the operation diagram.

Table 3. Chemical compositions used in the experiments. (wt%)

	TFe	FeO	MFe	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	C
HBI	91.4	15.9	79.0	2.0	0.9	0.8	0.3	0.88
Sinter	58.4	6.9	0.0	4.5	9.2	1.7	1.1	—

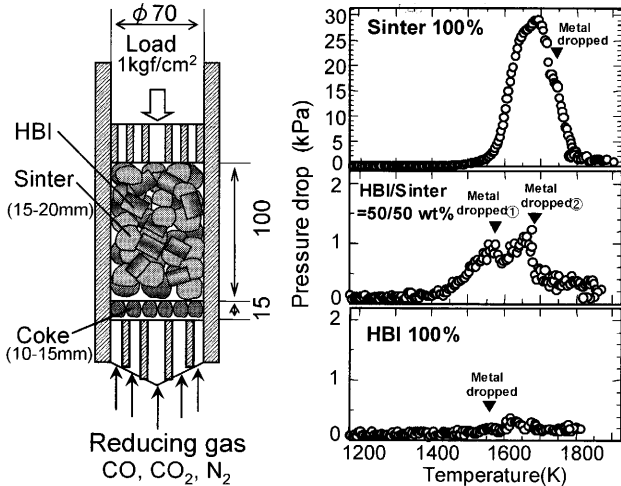


Fig. 12. Observed pressure drop through the softening-melting test.

30-100 mmのHBIと10-25 mmの実炉使用焼結鉱を用いた。その結果、基礎実験 (Fig.12)と同様に、通気性を良好に維持しつつ (Fig.13), 事前の予測通り、還元鉄装入量の増加に伴い、還元材比低減および増産効果を確認した (Fig.14)。

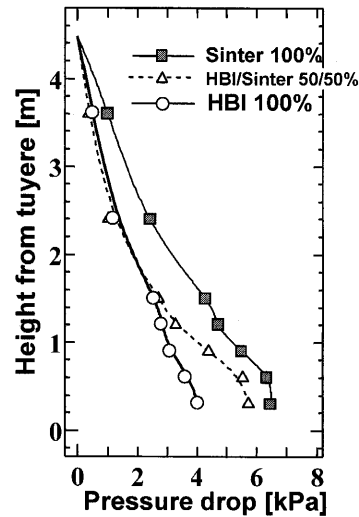


Fig. 13. Observed pressure drop through the experimental BF.

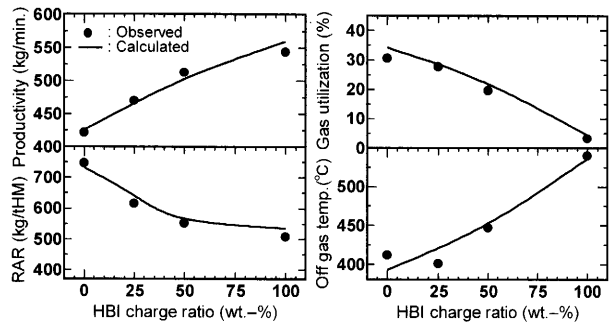


Fig. 14. Effect of HBI charging on the operation results of the experimental BF.

## 6. 結言

高炉還元材比低減に向けての課題と題し、送風操作及び反応性操作の面から、現状高炉における還元材比の低減策とその対策を実行する際の課題について解析した。また、低還元材比操業を指向するために実施した具体的な取り組みを紹介した。平行論的解析によれば、水素高含有燃料吹込み、高温・脱湿送風等の送風操作で還元材比は現状値に対し、削減率8%程度までは可能と考えられる。送風操作以外の還元材比低減策としては、高反応性コークス使用と還元鉄使用が有効であり、送風操作と比べて同等以上の削減率が見込める。速度論的解析によれば、コークス反応性操作の場合、高反応性コークス使用時には、高炉内の反応形態が大きく変化するとともに、鉱石側の反応性もその効果に大きな影響を及ぼすことが示唆された。低還元材比操業を実現するためには、安定操業の面で、低SiO<sub>2</sub>焼結鉱の高炉利用による通気性改善や、ここでは、触れなかったが、装入物分布制御に基づく気固接触効率の向上も重要である。加えて、還元材比削減策を適正設計する上で、鉱石・コークスの反応性、強度、粒径が実炉内の反応効率、

通気に対して与える影響を精度よく予測できる解析手法も必要である。

## 文 献

- 1) Special Issue on "Innovative Ironmaking Reactions in New BF to Aim at Halving Energy Needs and Minimizing Environmental Load": *ISIJ Int.*, **44** (2004), No. 12, 1969–2178.
- 2) A. Rist and G. Bonnard: *Rev. Met.*, **60** (1963), 23.
- 3) M.Naito, A.Okamoto, K.Yamaguchi, T.Yamaguchi and Y.Inoue: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 357.
- 4) T.Usui, M.Ohmi, S.Hirashima and N.Kitagawa: *Tetsu-to-Hagané*, **73** (1987), 1957.
- 5) H.Ayukawa, T.Nakayama, T.Abe, S.Matsuzaki, S.Nomura, M.Naito and Y.Suzuki: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 1040.
- 6) K.Takatani, T.Inada and Y.Ujisawa: *ISIJ Int.*, **39** (1999), 15.
- 7) R.H.Spitzer, F.Manning and W.O.Philbrok: *Trans. Metall. Soc. AIME*, **236** (1966), 1715.
- 8) Y.Matsukura, K.Nakano, K.Sunahara, Y.Ujisawa and T.Yamamoto: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), p. 146
- 9) K.Mochizuki, T.Murai, Y.Kawaguchi and Y.Iwanaga: *Tetsu-to-Hagané*, **72** (1986), 1855.
- 10) Y.Hatano, T.Umezaki, S.Matsumura, T.Kawaguchi and M.Hoshi: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 631.
- 11) A.Kasai, M.Naito, Y.Matsui and Y.Yamagata: *Tetsu-to-Hagané*, **89** (2003), 1212.
- 12) K.Sunahara, Y.Ujisawa, Y.Matsukura, K.Nakano and T.Yamamoto: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 123.