

東日本製鉄所（京浜地区）第 2 高炉における都市ガス吹込み操業

Blast Furnace Operation with Natural Gas Injection at No. 2 Blast Furnace at East Japan Works (Keihin)

山本 耕司 YAMAMOTO Koji JFE スチール 東日本製鉄所(京浜地区) 製鉄部製鉄技術室
柏原 佑介 KASHIHARA Yusuke JFE スチール スチール研究所 製鉄研究部 主任研究員(係長)
築地 秀明 TSUKIJI Hideaki JFE スチール 東日本製鉄所(京浜地区) 製鉄部製鉄工場長

要旨

高炉プロセスにおける生産性向上および CO₂ 排出量の削減を目的に、高炉における都市ガス吹込みを検討した。計算と実験による事前検討から、都市ガスの高分解熱に起因する高酸素富化操業、併用する固体還元材の燃焼性向上および鉍石の還元性改善による通気性の改善が生産性向上効果として、また、還元ガス中水素濃度の上昇による炭素系還元材の使用量低減が CO₂ 排出量の削減効果として期待された。東日本製鉄所（京浜地区）第 2 高炉では、2004 年 12 月より都市ガス吹込み操業を開始し、都市ガスを使用した継続的な増産を実施した結果、2008 年 3 月に内容積 5 000 m³ 以上の高炉における月間出鉄比世界記録 (2.56 t/d・m³) を更新した。

Abstract:

To improve the productivity and reduce carbon dioxide emission in blast furnace operation, JFE Steel has considered introducing the blast furnace operation with natural gas (NG) injection. It is expected that the productivity in blast furnace is improved because of highly oxygen enriched operation and improvement of permeability. Reduction of carbon dioxide emission is also expected because of increase of hydrogenous reducing agent. NG injection adopted at No. 2 Blast Furnace at East Japan Works (Keihin), and the new world record of monthly productivity of the blast furnace (for inner volume: $\geq 5\,000\text{ m}^3$) is achieved (2.56 t/d·m³).

1. はじめに

近年の鋼材需要の高まりを受け、日本の粗鋼生産量は 2000 年以降 7 年連続で年間 1 億トン以上で推移しており、2007 年には年間 1.2 億トンに達し、34 年ぶりに年間粗鋼生産量の記録を更新している。また、世界的にも中国の急激な生産量の増加に牽引され、2007 年の世界粗鋼生産量は 13.4 億トンと 10 年前から約 70% の増加を示している。このような状況下にあつて、需要に応える生産量を確保するためには、粗鋼生産量に直結する高炉プロセスにおける効率的な増産が重要である。

一方、2008 年から京都議定書の第 1 約束期間がすでに開始し、地球温暖化防止を目的とした CO₂ 排出量削減の必要性が国際的なコンセンサスを得つつある中、鉄鋼業においても CO₂ 排出量削減が求められている。特に、製鉄所からの CO₂ 排出量の大部分を占める高炉プロセスにおけるさらなる技術開発が急務となっている。

高炉における吹込み材としては、現在主流である微粉炭のほか、一部の高炉で使用されている廃プラスチックや重油、海外の高炉で採用されている天然ガスなどがあげられ、各製鉄所において経済性に見合った選択が行われていると考えられる。東日本製鉄所（京浜地区）第 2 高炉（以下、京浜第 2 高炉）では、生産性向上および CO₂ 排出量低減を目的に吹込み材として都市ガスに着目してプロセス技術の開発を行った。生産性向上効果としては、都市ガスの高分解熱により高酸素富化操業が可能であること、併用する固体還元材の燃焼性向上および鉍石の還元性改善により通気性が改善されることが期待され、CO₂ 排出量の低減効果としては、還元ガス中水素濃度の上昇による炭素系還元材の使用量低減が期待される。

そこでこれらを検証するため、まず理論計算により水素系吹込み材の使用による高炉操業の変化を検討し、各種水素系吹込み材の特性を明らかにする。次いで、水素系吹込み材が固体還元材の燃焼性に与える影響、および、還元ガス中水素濃度が鉍石の還元・溶け落ち挙動に与える影響について調査するため、実験室および実炉による試験を行った。

2. 水素系吹込み材使用時の高炉操業予測¹⁾

表1に、各種吹込み材（微粉炭、廃プラスチック、重油、天然ガス）の代表的な組成、発熱量を示す。水素含有量が高くなるほど低位発熱量は高くなるのが特徴としてあげられる。しかしながら、高炉内での有効発熱量（CO + H₂までの発熱量）で見ると、必ずしもこの関係は成立せず、分解熱が大きい天然ガスが最も低位となるのが分かる。

各種吹込み材の高炉操業への影響を検討するため、送風条件（送風温度、送風湿分、酸素富化率）、およびヒートロス一定で各種吹込み材を50 kg/t吹込んだ場合について、リストモデルをベースとした熱物質収支モデルにより計算を行った。重油および天然ガス吹込みの場合、シャフト効率一定前提での計算ではコークス置換率が両者とも1.0前後となるが、実績の置換率は1.1~1.27²⁾と報告されている。この差を水素投入量増による還元促進効果によるものと考え、本検討では計算値と実測値が一致するようにシャフト効率を向上させる操作を行っている。

図1に投入水素量と代表的な操業諸元との関係を示す。投入水素量が多くなるほど送風酸素原単位は増加し、羽口先理論燃焼温度（TFT：theoretical flame temperature）は低下する。ボッシュガス量を介した通気性、および、TFTを適正に維持するためには、酸素富化率を上げることが必要である。

図2に、各種吹込み材50 kg/tの吹込み条件下において、TFT上限を2400℃、炉頂ガス温度（TGT：top gas temperature）下限を120℃とし、いずれかの条件に達するまで酸素富化率を増加した場合の出銑比の変化を示す。限界出銑比はフラッキングで決まると仮定し、ベース条件と同じフラッキング指数³⁾となる出銑比を上限値とした。その結果、天然ガスを使用した場合が最も増産可能であると推定された。これは上述したように、天然ガスは分解熱が高いために、TFTを適正に維持しつつ高酸素富化が可能であるためと考えられる。また水素含有量が高いために、

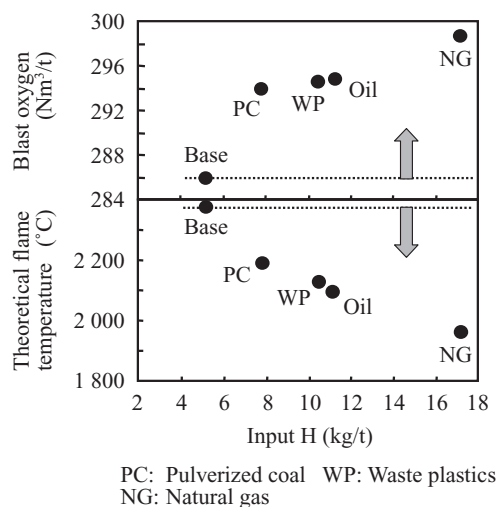


図1 操業諸元に及ぼす投入水素量の影響
Fig. 1 Effect of input H on operational conditions

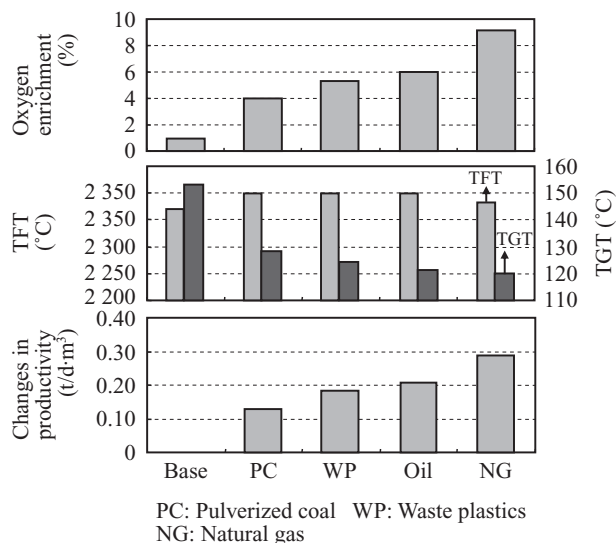


図2 各種吹込み材使用による操業の変化
Fig. 2 Changes in operational conditions by various injectants

CO₂ 排出量の削減も期待されることから、水素系吹込み材として天然ガスに着目して検討を行った。

3. 水素系吹込み材が固体還元材の燃焼性に及ぼす影響⁴⁾

3.1 試験装置および試験方法

水素系吹込み材として着目する天然ガスは、固体還元材と比較して燃焼が速いことから、同時吹込みの場合には固体還元材の燃焼性を低下させることが懸念される。そこで燃焼実験により、天然ガス吹込みが固体還元材の燃焼性に与える影響について調査した。

図3に本実験に用いたコークス充填層型小型燃焼炉（ホットモデル）の模式図を示す。所定の温度および組成に

表1 各種吹込み材の特徴

Table 1 Properties of various injectants

	Ash (mass%)	Ultimate analysis (daf, mass%)			Calorific value (daf) (kcal/kg)	Partial combustion heat (daf) (kcal/kg)	Decomposition heat (daf) (kcal/kg)
		C	H	O			
PC	7.42	82.4	5.5	9.8	7 244	1 489	205
WP	5.65	77.8	10.4	11.7	8 323	1 332	302
Oil	0.00	85.1	11.5	0.3	9 801	1 681	192
NG	0.00	76.6	23.4	0.0	11 781	698	988

PC: Pulverized coal WP: Waste plastics NG: Natural gas

表2 ホットモデル実験条件
Table 2 Experimental conditions

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
PCR (kg/t)	100	100	130	130	70	100	130	160	190
WPR (kg/t)	30	30	30	30	30	—	—	—	—
CH ₄ R (kg/t)	—	30	—	30	30	30	—	30	—
O ₂ enr. (%)	1.0	4.0	2.0	6.0	3.0	3.0	3.0	6.0	3.0
Blast Temperature (°C)	1 200								
V _{tuy} (m/s)	150								
Ex. O ₂	0.91	0.75	0.77	0.70	0.87	0.88	0.94	0.70	0.66

Theoretical flame temperature (TFT): Constant

PCR: Pulverized coal rate WPR: Waste plastics rate CH₄ R: Methane rate O₂ enr.: Enrichment Ex. O₂: Excess O₂ ratio

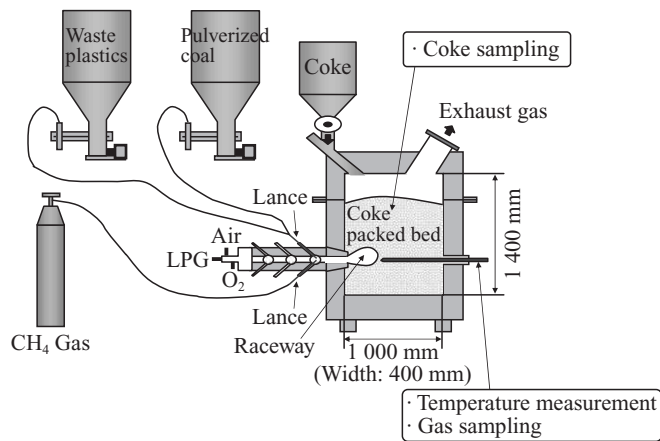


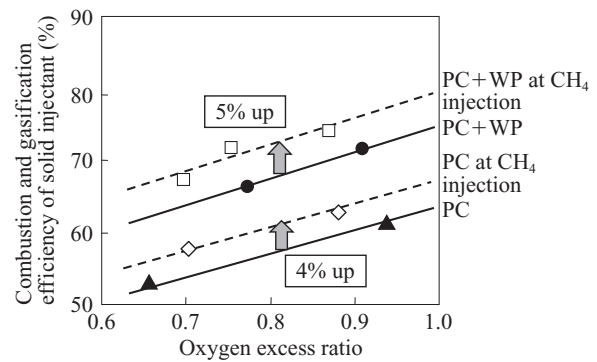
図3 ホットモデル実験装置
Fig.3 Experimental apparatus

なるように調整した熱風中に、固体還元材（微粉炭、廃プラスチック）、および、水素系吹込み材の同時吹込み試験を行った。水素系吹込み材として、ここでは天然ガスの主成分であるCH₄ガスを使用した。

試験条件を表2に示す。送風温度は1200°C、羽口先流速は150 m/sの一定条件とし、酸素富化率を調整することによりTFTを一定に制御した。試験中に羽口の反対側からゾンデを挿入し、レースウェイ内部のガス組成測定、および消耗型光ファイバーによる温度測定を行った。燃焼時間は各水準とも60分で一定とし、試験終了後はN₂で炉体を冷却した後、炉体を解体して炉内のコークスを採取し、粉率を測定した。

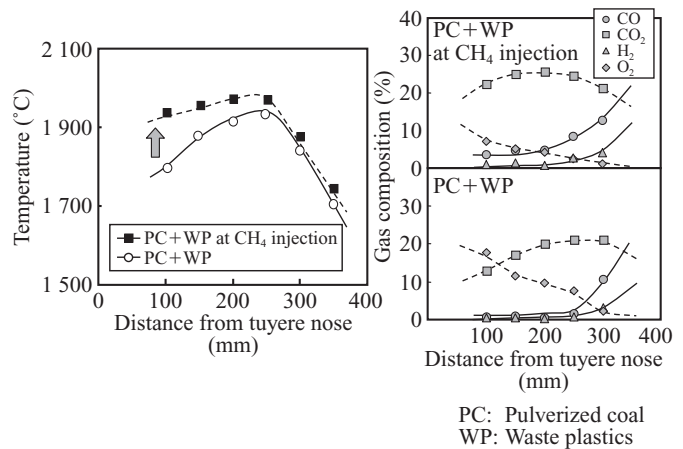
3.2 試験結果

図4に酸素過剰率と固体還元材の燃焼ガス化率との関係を示す。CH₄ガスとの混焼時における固体還元材の燃焼率について、固体還元材単独燃焼時における固体還元材の燃焼率とを比較した場合、固体還元材とCH₄ガスの混合燃焼により、同一の酸素過剰率において微粉炭の燃焼率が4%、微粉炭と廃プラスチック混合時の燃焼率が5%上昇した。図5にCH₄ガス吹込み有無による、レースウェイ内の羽口



PC: Pulverized coal WP: Waste plastics

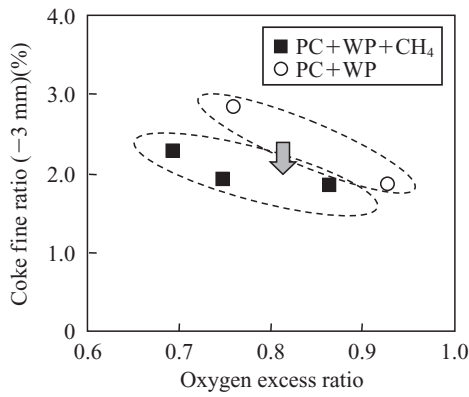
図4 固体還元材の燃焼性に及ぼすCH₄ガス吹込みの影響
Fig.4 Effect of methane gas injection on combustion and gasification efficiency of solid injectants



PC: Pulverized coal WP: Waste plastics

図5 レースウェイ内温度およびガス組成に及ぼすCH₄ガス吹込みの影響
Fig.5 Effect of methane gas injection on temperature and gas composition in raceway

中心軸上における温度分布測定結果およびガス組成測定結果を示す。固体還元材とCH₄ガスの混合吹込みの場合には、固体還元材単独吹込みの場合と比較して、羽口近傍の温度が上昇している。このことから、固体還元材とCH₄ガスとの混焼時に燃焼速度が速い気体還元材であるCH₄ガスが吹



PC: Pulverized coal WP: Waste plastics

図6 レースウェイ内粉率に及ぼすCH₄ガス吹込みの影響

Fig.6 Effect of methane gas injection on coke fine ratio in raceway

込み直後に燃焼し雰囲気温度を上昇させ、微粉炭および廃プラスチックの昇温、揮発化が促進されたことによりガス化消失する重量が増加すると推定される。またCH₄ガスの燃焼により酸素は速く消失するものの、高温まで昇温された未燃チャーとCO₂とのガス化反応速度が大きくなった効果により、固体還元材の燃焼ガス化率は低下しなかったものと考えられる。

図6にレースウェイ内における-3mm粉率の測定結果を示す。CH₄ガスとの混合燃焼時には粉率が低下した。これは燃焼率の向上がレースウェイ内のコークス粉化量の低減に寄与した⁵⁾こと、および、水素含有量が高いことに起因してレースウェイ内におけるH₂Oの生成量が増加し、ガス化反応によるコークス粉の消費を促進したことによるものと推定される。これらのことから、水素系吹込み材の使用時には炉芯、炉下部への粉の蓄積低下により、炉下部通気性の改善が期待される。

4. 鉍石の還元挙動に及ぼす水素の影響⁶⁾

4.1 試験装置および試験方法

水素系吹込み材を高炉で使用した場合、高炉内の還元ガス中水素濃度が上昇する。その結果、鉍石の還元挙動が変化し、鉍石の高温性状に影響を与えたと考えられる。そこで荷重軟化試験により、還元ガス中水素濃度が高炉内における鉍石の還元挙動に及ぼす影響について調査した。

図7に実験装置の模式図を示す。内径50mmφの黒鉛るつぽに、9~11mmのコークスを10g填充した後、4.75~6.7mmの焼結鉍を135g填充した。この黒鉛るつぽを加熱炉内に設置し、高炉内を模擬させた温度、ガス組成、荷重下において昇温還元試験を行った。試験中は、試料層厚の変位量、排ガス組成、および差圧を連続的に測定した。

図8に試験条件を示す。炉内温度、ガス組成および荷重は、実炉操業を模擬したパターン設定をした。水素系吹込

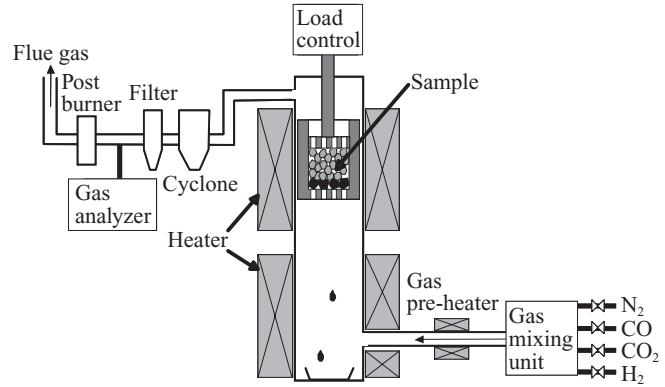


図7 荷重軟化試験実験装置

Fig.7 Experimental apparatus

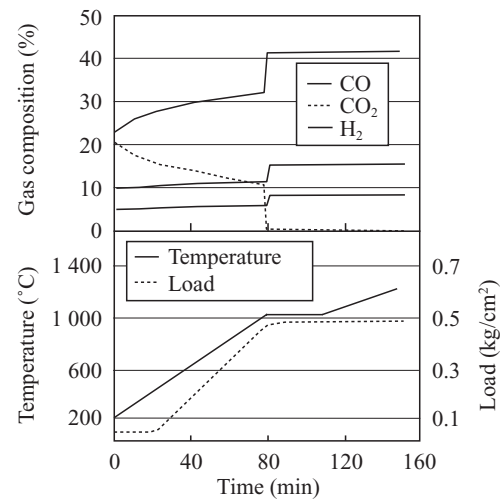


図8 荷重軟化試験実験条件

Fig.8 Experimental conditions

み材の使用により水素ガス濃度が増加することを考慮して、水素濃度0, 5, 10%の条件で実験を行い、水素が鉍石の還元挙動に及ぼす影響について調査した。

4.2 試験結果

図9に昇温にともなう収縮率および還元率の変化を示す。水素濃度が増加するほど還元率が向上、収縮率が低下する傾向が見られた。この結果から水素濃度が高い条件においては、鉍石の還元が促進されたことによって軟化が抑制され⁷⁾、層内の空隙が確保されるものと考えられる。

図10に昇温にともなう差圧の変化を示す。水素濃度が増加するにつれて、差圧のピークが低下する傾向が見られた。これは上述したように層内の空隙が確保されたこと、および、水素濃度の増加によりガス密度、粘性が低下したことによるものと考えられる。

したがって、実炉における都市ガス吹込みの効果として、鉍石の還元・溶け落ち性が改善し、融着帯近傍における通気性が改善されることが期待される。

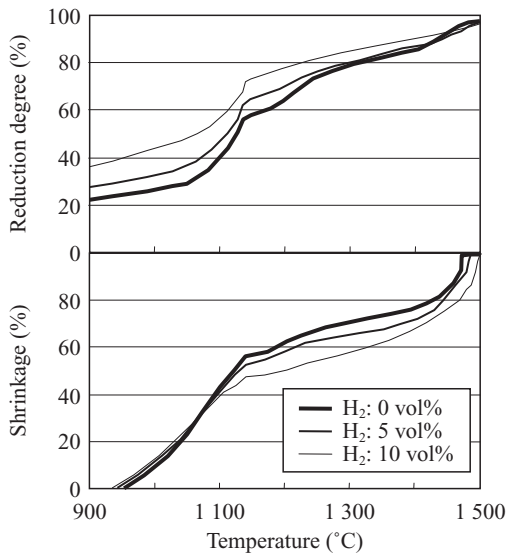


図9 収縮率および還元率に及ぼすガス組成の影響
Fig.9 Effect of gas composition on shrinkage and reduction degree

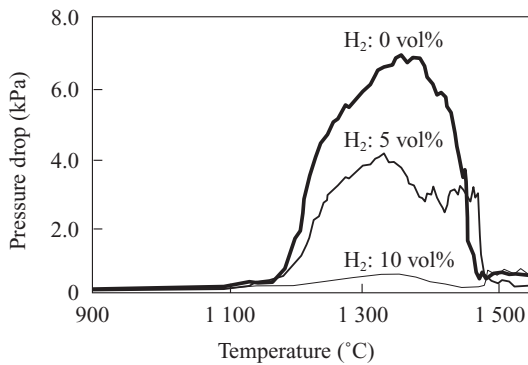


図10 差圧に及ぼすガス組成の影響
Fig.10 Effect of gas composition on pressure drop

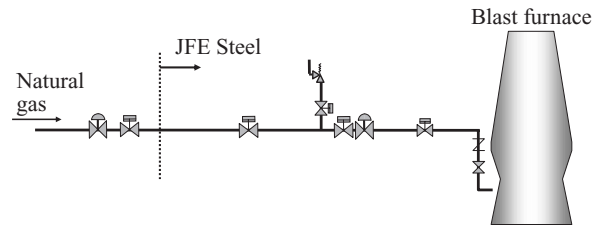


図11 都市ガス設備フロー
Fig.11 Flow diagram of natural gas injection plant

市ガス供給のため、京浜地区近隣のガス供給会社より配管を敷設した。また、安全対策として下記の3点を実施した。

- (1) 都市ガス逆火防止対策として、逆止弁を設置および緊急遮断シーケンスを導入
- (2) ガス漏洩防止対策として、配管内窒素ガス置換機構を導入およびガス漏洩検知機を設置
- (3) ガス圧変動防止対策として、安全弁を設置

5.3 都市ガス吹込み時の操業解析⁶⁾

都市ガスは吹込み開始から徐々に増加させ、吹込み開始5日後から20~50 kg/tの吹込みを継続して実施した。また、酸素富化率に関しては、送风量、TFTをほぼ一定に保ち増加させた(4.7→5.6%)。この結果、通気性に関しては、上部通気抵抗指数(K_U)が実施前後で同程度であったのに対し、下部通気抵抗指数(K_L)は改善される傾向を示した。出銑量に関しては、都市ガス吹込み実施前の出銑比2.34 t/d・m³に対して、都市ガス吹込み実施後の出銑比2.52 t/d・m³と大幅な増産を達成した。

図12に、都市ガス吹込み実施前後における上部通気抵抗指数および下部通気抵抗指数をそれぞれ示す。都市ガス吹込み前後で、上部通気抵抗指数は同程度であるのに対し、

5. 実炉における都市ガス吹込み操業

5.1 期待効果

事前検討の結果より、実炉における都市ガス吹込みの期待効果として、下記の3点があげられる。

- (1) 都市ガスの高分解熱に起因する羽口先温度の低下が、酸素富化率増加を可能にする。
- (2) 都市ガスと併用する固体還元材の燃焼性が向上し、炉下部通気性が改善する。
- (3) 還元ガス中水素濃度の増加にともない還元速度が向上し、炉下部通気性が改善する。

これらの効果を実証するため、2004年12月より京浜第2高炉において都市ガス吹込み操業を実施した。

5.2 都市ガス吹込み設備の導入

図11に、2004年12月に稼働開始した京浜第2高炉における都市ガス吹込み設備の概略フローを示す。高炉への都

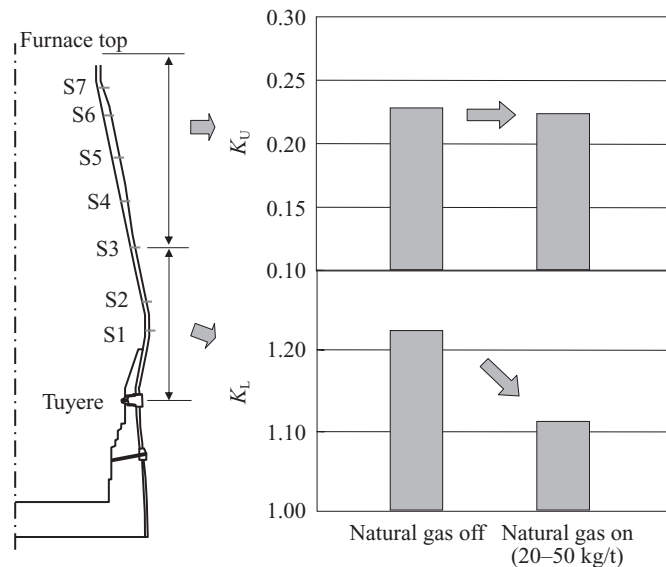


図12 炉内通気性に及ぼす都市ガス吹込みの影響
Fig.12 Effect of natural gas injection on permeability

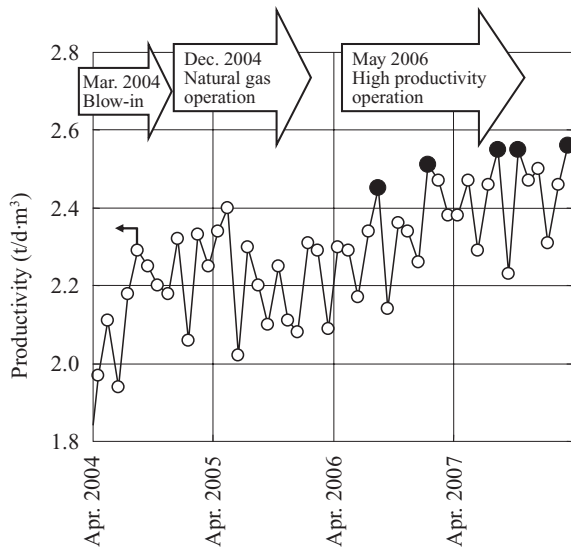


図13 東日本製鉄所（京浜地区）第2高炉の操業推移
Fig. 13 Operation trends of No. 2 Blast Furnace at East Japan Works (Keihin)

下部通気抵抗指数は1.22から1.11に低下した。これは、事前検討において確認された、固体還元材の燃焼性改善による炉下部の粉発生量の低減、および、還元ガス中水素濃度の上昇による鉱石の還元性・溶け落ち性の改善に起因すると推察される。

5.4 都市ガス吹込みによる高出鉄比操業

図13に京浜第2高炉の生産実績の推移を示す。2006年5月より都市ガスを使用した継続的な増産を実施している。その中で2006年8月には月間暦日出鉄比新記録(2.45 t/d·m³)を達成し⁸⁾、現在もその記録を更新中である。2008年3月に達成した月間暦日出鉄比記録(2.56 t/d·m³)は、内容積5000 m³以上の大型高炉における世界記録である。

6. おわりに

京浜第2高炉における都市ガス吹込み操業に関して、リストモデルをベースとした熱物質収支モデルによる理論計算、ホットモデルによる固体還元材の燃焼性評価、荷重軟化試験による鉱石の還元挙動調査、および実炉における操業実績から、下記の知見を得た。

(1) 事前検討

都市ガス吹込みにより、高分解熱に起因する羽口先温度の低下による同一羽口先温度下での酸素富化の増加、都市ガスと併用する固体還元材の燃焼性向上、および還元ガス中の水素濃度上昇に起因する鉱石の還元性・溶け落ち性の改善による下部通気性の改善が可能となり、増産が期待される。また、水素含有量が高いために、CO₂排出量削減も期待される。

(2) 操業実績

京浜第2高炉では、2004年12月に都市ガス吹込みを導入し、酸素富化率の増加(4.7→5.6%)、および、炉下部通気性の改善(下部通気抵抗指数1.22→1.11)により増産(2.34→2.52 t/d·m³)を達成した。さらに都市ガスを使用した継続的な増産を実施した結果、2008年3月には、月間暦日出鉄比新記録(2.56 t/d·m³)を達成し、この記録は内容積5000 m³以上の大型高炉における世界記録である。

参考文献

- 1) 佐藤健, 柏原佑介, 佐藤道貴, 有山達郎, 武田幹治. CAMP-ISIJ. 2005, vol. 18, p. 984.
- 2) たとえば, Oscar Lingiardi et. al. Proc. Ironmaking Conf. 1999, p. 135.
- 3) 有山達郎, 佐藤道貴, 佐藤健, 渡壁史朗, 村井亮太. CAMP-ISIJ. 2004, vol. 17, p. 610.
- 4) 柏原佑介, 佐藤健, 佐藤道貴, 有山達郎, 武田幹治. CAMP-ISIJ. 2006, vol. 19, p. 135.
- 5) 佐藤道貴, 村井亮太, 有山達郎, 牧章, 下村昭夫, 森侯寿. 鉄と鋼. 1999, vol. 85, p. 717.
- 6) 永喜正人, 長谷川伸二, 築地秀明, 下村昭夫, 西村博文, 柏原佑介. CAMP-ISIJ. 2006, vol. 19, p. 136.
- 7) 羽田野道春, 宮崎富夫, 下田輝久, 岩永祐治, 桐野輝雄. 鉄と鋼. 1980, vol. 66, s699.
- 8) 山本耕司, 長谷川伸二, 石井邦彦, 桑原稔, 築地秀明, 西村博文. CAMP-ISIJ. 2007, vol. 20, p. 101.



山本 耕司



柏原 佑介



築地 秀明