

大分第1高炉の微粉炭吹き込み操業

川辺 正行*・和栗真次郎*²・馬場 昌喜*²
石川 泰*³・長谷川 晟*⁴

Pulverized Coal Injection into No. 1 Blast Furnace at Oita Works

Masayuki KAWABE, Shinjiro WAKURI, Masaki BABA,
Yasushi ISHIKAWA, and Akira HASEGAWA

Synopsis :

The Oita No. 1 Blast Furnace (currently in its second campaign) was blown in August 1979 and commenced so called "all coke operation" in March 1980. Further Nippon Steel induced the Pulverized Coal Injection (PCI) technology from ARMCO which uses coal as an auxiliary fuel in place of oil. This technology has been in practice on a commercial basis for many years at ARMCO. On June 26, 1981, Oita was successful in adapting this PCI technology to a large blast furnace of 4 000 m³ inner volume involving a super high top pressure with a high blast temperature. Both the equipment and the operation have made good progress up to date.

In this report, the mechanical out line and major characteristics of the PCI system have been presented as well as developments of technologies for adaption to a large furnace, especially in respect to the combustion and raceway characteristics and control for stabilized transport as affected by scaling up under a high pressure and a high blast temperature conditions. Furthermore, the details of full scale tests are described, which were conducted by utilizing a single-tuyere test facility which was installed on the Oita No. 2 BF. Operational results have shown a satisfactory distribution uniformity throughout tuyere lines around the furnace.

As far start-up operation, the aimed injection levels, projected step up rates of injection and optimization of operational conditions are reported herein together with actual operational performance such as the replacement ratio of PC to coke, stability of hot metal quality, material and heat balance and circumferential balance.

1. 緒 言

新日本製鉄(株)においては、資源問題・エネルギー問題が極めて重要であることを認識し従来より最重点課題の一つとして取り組んできている。なかでも高炉はエネルギーの多量消費部門であり省エネルギーを目標とした操業の最適化、エネルギー資源の自由度拡大を追求してきた。すなわち重油吹き込み操業の限界をきわめると共に羽口からの種々の補助燃料の吹き込み操業を多角的に検討してきた。

これらの検討の結果、現下のエネルギー事情に対応する技術として羽口からの微粉炭吹き込みが最適であるという結論を得た。そこで10年以上の実炉吹き込みの実績を有する米国アームコ社の微粉炭吹き込み(以下PCIと称する)技術¹⁾を導入し、早急に大型・高圧・

高温高炉での適用化技術の開発に着手し、その確立をみて1981年6月大分第1高炉において操業を開始した。

その結果、今日までに省資源効果をはじめ種々の高炉操業安定効果が得られている。以下に検討経過も含めて開発内容を報告する。

2. 大型、高圧高炉での適用に関する検討

アームコ社の微粉炭吹き込み技術を導入するに当たっては、大分第1高炉とアマンダ高炉の間に、Table 1に示すように炉内容積、送風温度、炉内圧力等の差、すなわち燃焼、分配、搬送等に関する操業、設備条件の差が大きく直接採用できるか否かが問題であった。そこで基本的問題についても事前に検討を行うことが必要であった。

昭和57年3月18日受付 (Received Mar. 18, 1982)

* 新日本製鉄(株)大分製鉄所 (現:新日本製鉄(株)本社) (Oita Works, Now Head Office, Nippon Steel Corp.)

*² 新日本製鉄(株)大分製鉄所 (Oita Works, Nippon Steel Corp., 1 Nishinosu Oita 870)

*³ 新日本製鉄(株)本社 (Head Office, Nippon Steel Corp.)

*⁴ 新日本製鉄(株) (現:管組工事(株)) (Nippon Steel Corp., Now Sugagumi Kozi Company Ltd.)

Table 1. Comparison of blast furnace operational condition and equipment for Oita No. 1 BF and Amanda BF at Ashland.

Name of BF	Inner volume (m ³)	Blast temp. (°C)	Blast pressure (ata)	Tuyere vel. (m/s)	Tuyere numbers	Hearth dia. (m)
Oita No. 1 BF	4158	1300	5.5	260	38	14.2
Amanda BF	2040	900	3.0	190	24	10.2

2.1 微粉炭の燃焼性

まず、既存文献を要約すれば下記のことが明らかにされている。

- (1) 送風温度上昇は指数関数的な燃焼促進効果があるが、1150°C以上ではその効果は微増にすぎない²⁾。
- (2) 送風圧力上昇は3~4 ata までは燃焼促進効果があるが、それ以上では効果が無い³⁾。
- (3) 羽口先風速及び炉内滞留時間差が燃焼効率に与える影響は小さい²⁾。
- (4) 微粉炭の物性としては、一般に粒子径が-100 μ ならびに揮発分が25%以上であれば燃焼性は良好である⁴⁾。

2.2 レースウェイ内における燃焼性の検討

実炉レースウェイ内における燃焼性については、大分第2高炉において実際に一本の羽口から吹き込む試験を行って検討した。送風温度1230°C~1300°C、送風圧力3.3 kg/cm²で石炭は一般炭 (VM=32.5%, ASH=7.5%) を使用し、吹き込み量は80 kg/t-pig 相当まで試験した。

高速度撮影したフィルムを画像解析した結果では、微粉炭の大部分は数ミリ秒 (ms) すなわちレースウェイ深度1 m 以内で燃焼していることが確認された。

一方、微粉炭吹き込みがレースウェイの燃焼状況と構造に与える影響については吹き込み時にガス分析及び深度測定を行って調査した。ガス分析の結果を Fig. 1 に示すが、微粉炭吹き込み量増加に伴い O₂ 残存量は減少し CO 濃度が増加する。この燃焼状況を定量的に検討するため次の4項目の条件を仮定し、物質バランス、熱バランス、反応速度の連立微分方程式を解いてレースウェイ状況の推定を行った。

- (1) 微粉炭燃焼は熱分解によつて生成したガスと残存チャーの両形態で行われる。
- (2) 上記熱分解速度は昇温が律速であり、分解後直ちにガス-ガス反応が進行する。
- (3) 燃焼後レースウェイ内の最終生成物は CO, H₂ である。

Fig. 2 にオイル吹き込み時も含めてレースウェイ内の O₂ 及び温度分布を示す。微粉炭吹き込みにより最高温度の位置が羽口側に移動するとともに最高温度も高く

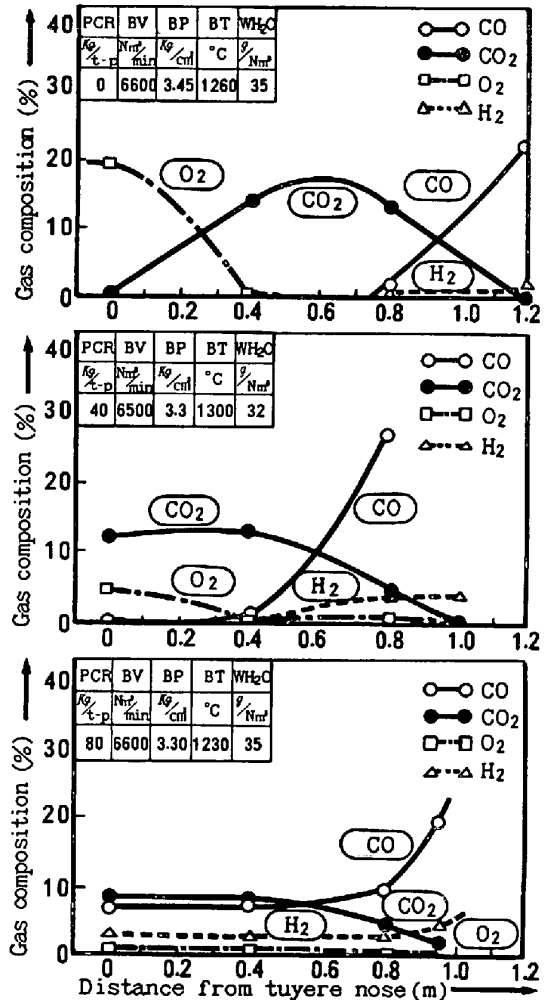


Fig. 1. Gas composition profile in the axial direction of tuyere zone.

なり、従来のオイル吹き込みとほぼ同じ状態になることができる。

Fig. 3 にレースウェイ深度の実測値を示すが、従来報告^{5)~7)}されているように慣性力できまると考えてよい。

また、微粉炭吹き込み時のレースウェイ深度はオイル吹き込み時とほぼ同じであることが判明した。

2.3 微粉炭輸送上の問題

問題点の主なものは次の2項目である。

- (1) 安全で均質な微粉炭の搬送
 - (2) 搬送微粉炭の羽口部位での円周均一分配
- 高炉羽口への微粉炭搬送については、安全で脈動の少ない均質流の確保が極めて重要である。そこで、第2高

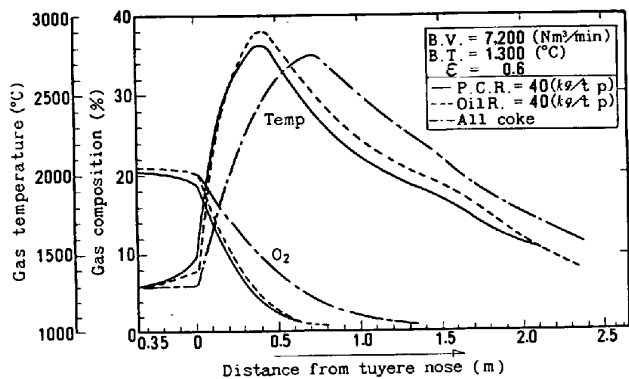


Fig. 2. Gas temperature profile and O₂ composition profile in the axial direction of tuyere zone. (Oil injection, all coke, PCI)

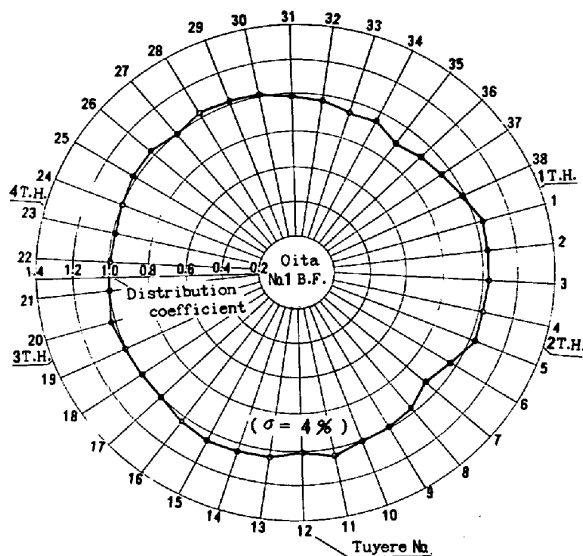


Fig. 4. Palverized coal distribution throughout tuyere lines around the furnace.

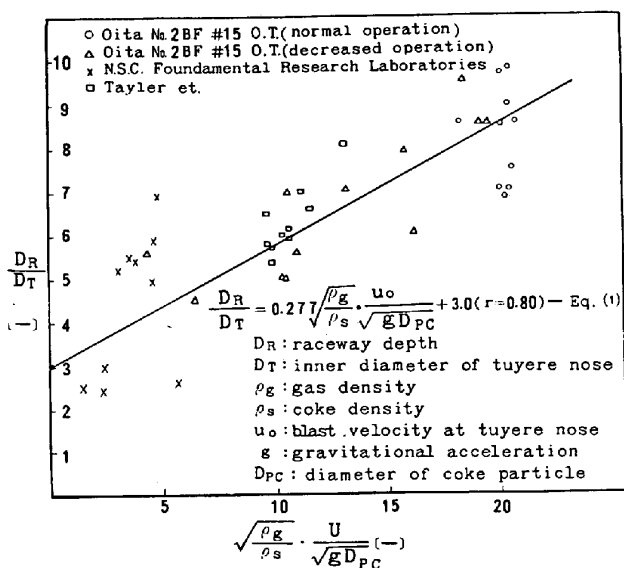


Fig. 3. Relationship between raceway depth and Froude Number.

炉の試験装置を使用してフィードタンクから羽口までの搬送ライン全域で搬送用空気量、圧力、配管形状等を変更した試験を行い、その結果を実機設計に反映した。

また、各羽口の微粉炭吹き込み量を均一にすることは、高炉操業上最も重要な管理項目の一つであるが、本アームコ技術の特長である分配器を用いることにより、試験装置、実稼動炉共に良好な分配精度を確認できた。その一例として、定期休風時にバグフィルター捕集方式により測定した実炉の分配率を Fig. 4 に示した。

以上述べたように、微粉炭の燃焼性、レースウェイ内の現象の検討、さらに実高炉における実験設備による技術的確認を行い、大型、高圧高炉に適用できる微粉炭吹き込みシステムを完成した。

3. 設備概要

Fig. 5 に大分第1高炉に設置した微粉炭吹き込み設

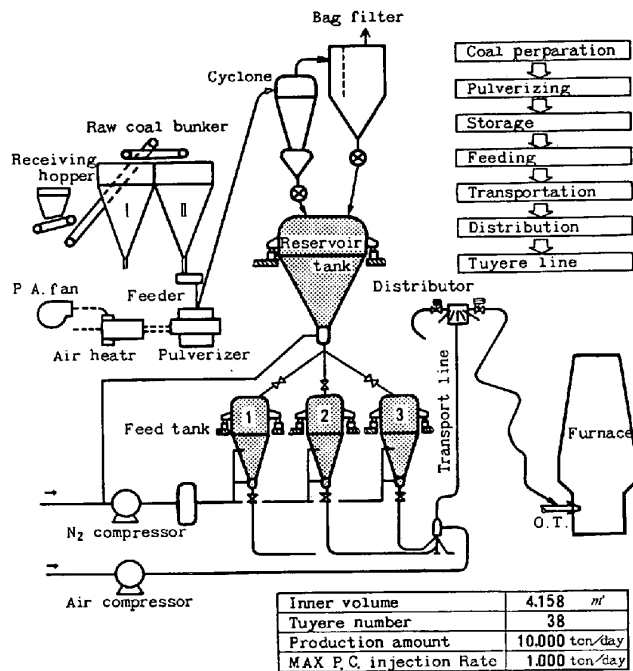


Fig. 5. Flow diagram of PCI system for Oita No. 1 BF.

備のフローを示す。主な特長は下記の点である。

- (1) 粉砕系統は2系統であり、機器の点検、整備時及び故障時でも同時に両系停止となるのを防止する。
- (2) 貯蔵タンク及びフィードタンクは、吹き込み量最高での粉砕系統片側故障時でも、高炉の減鉄または休風準備等諸対応策を実施まで吹き込みが継続できる容量とした。
- (3) フィードタンクは3基あり、切り出し中のタンク、次に切り出しとなる待機中のタンク、切り出し終了後排圧、充填、加圧の操作を行っている準備中のタンク

から成る。万一の故障発生時には、2基でも連続吹き込みが可能である。

(4) 搬送ラインはPC濃度の濃いデンスフェイズライン(フィードタンク～ディスペーサー間)と、PC濃度の薄いダイリュートフェイズライン(ディスペーサー～羽口間)から成り、均質な搬送と低圧損輸送を実現している。また、分配器はダイリュートフェイズラインの高炉側に近い部分に設けてあり、円周方向での分配性向上を配慮した。

(5) 貯蔵タンク～羽口間の高圧ラインには庶断弁以外の可動部分がなく、設備の高稼働率と管理の容易さを可能とした。

(6) 粉碎、貯蔵工程に爆発抑制装置、消火装置等を設置し安全で確実な防爆システムとした。

4. 立ち上げ操業計画及び実績

4.1 計画と実績

大型高炉のPCI設備技術、操業技術の早期確立を図るため、次の考え方で操業設計を行った。

(1) 立ち上げ速度、吹き込み量の目標について3ステップを踏む。

・第1段階 30～40 kg/t-p 吹き込み：微粉炭安定搬送体制の確立およびオイル吹き込み時と同様の高炉操業条件(Ore/Coke, Tf, BT, WH₂O等)に近づけるため、できるだけ早期にこの吹き込みレベルを実施する。

・第2段階 50～55 kg/t-p 吹き込み：オイル比30～40 kg/t-p 相当であり、高炉操業におけるPC吹き込み効果の第一次確認を行う。

・第3段階 80～100 kg/t-p 吹き込み：設備上限吹き込みレベル

いずれの段階においても、高炉操業最適化のために微粉炭吹き込み量保持期間は2ヶ月間以上とする。

(2) 微粉炭吹き込み量の増加に伴い、送風温度は設備能力を最大限使用し全水素入量[†]をほぼ一定に維持しながら送風湿分を低減する。

(3) 炉熱調整の基準としての微粉炭の対コークス置換率は、下記のような発熱量、還元量、物質・熱バランス計算により、安全率も含んで1.0と設定した。

・羽口先でのCOまでの発熱量当量 : 0.83

・シャフト部での炭素、水素還元剤当量 : 1.14

・炉内物質収支、熱収支 : 1.05

昭和56年6月26日営業運転開始後、設備、機能面の大きなトラブルもなく、順調な操業を継続している。

これまでの主要な操業推移をFig. 6に示す。微粉炭

[†] 微粉炭の含有水素の利用が可能。

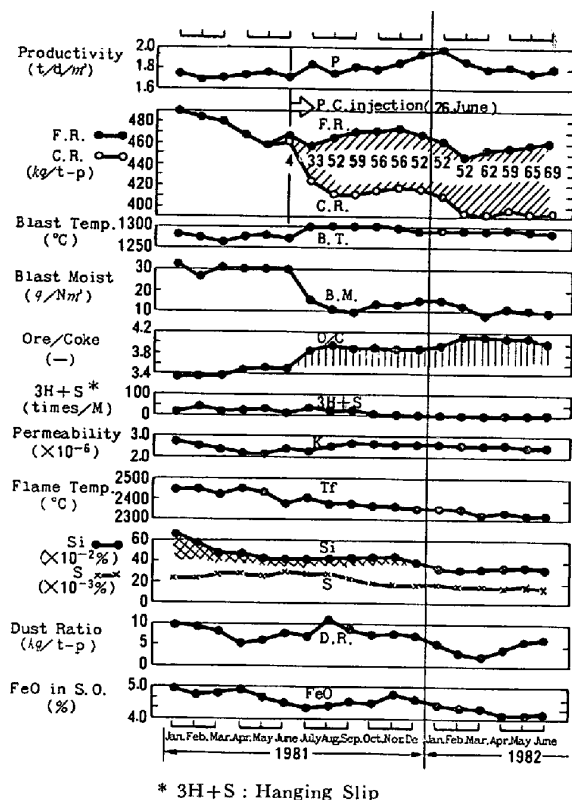


Fig. 6. Transitional changes before and after Oita No. 1 BF PCI operation.

吹き込みに伴い出銑比の上昇、送風温度約1300°C一定、送風湿分の低減(30 g/Nm³→10 g/Nm³)、Ore/Cokeの上昇(3.5→4.25)、棚つり：スリップの消滅などが特徴的である。

現在までの操業は、大きく次の3期間に分けられる。

第1期 設備立ち上げ調整期(56年6月～9月)

第2期 55 kg/t-p レベルでの高炉操業調整期(56年9月～12月)

第3期 55 kg/t-p レベルでの低燃料比高炉操業期(57年1月～3月)

4.2 高炉操業成績

基本的には、オイル吹き込み時の高炉操業、すなわち高Ore/Coke・低燃料比操業へ早期に近づけるために、主として次に述べる3つの装入物分布制御アクションを行い、良好な操業成績を得ている。装入モードはC↓C↓O↓O↓であり、各バッチで使用するムーパブルアーマーノッチを(αβγδ)で表せば、(OβγO)タイプから(OβOO)、(αβOO)タイプへ移行し、コークスペースは32tより26tへと低減させ、ストックラインは0.9m～1.3m間で微調整している。

微粉炭がオイルとほぼ同等の炉熱制御手段として有効に利用できること(炉熱応答時間=4h)により、日常操業の炉熱の安定及び長時間休風後の立ち上げ操業の安定

も併せ、下記に示すような操業安定効果等が得られている。

(1) 微粉炭とコークスとの置換率

オールコークス操業の平均的月次成績(昭和55年8月)との対比で算出した置換率をTable 2に示す。昭和57年2月度の総合置換率は1.43である。なお、送風温度、送風湿分、原料と条件等を除いたPCIの効果のみの補正置換率は1.21である。これは、計画時の設定値1.0上廻る実績となつている。

(2) 溶銑品質の安定

溶銑品質の代表成分である銑中Siレベルが、オールコークス操業に比べて低位に安定している。基準のオールコークス操業時と昭和57年2月度の銑中Siの分布を対比してFig. 7に示した。なお、羽口先で燃焼するコークス及び微粉炭のSiO₂分が低下したことが上記Siレベル低下に当然寄与している。

(3) レースウェイ深度の円周均一性向上

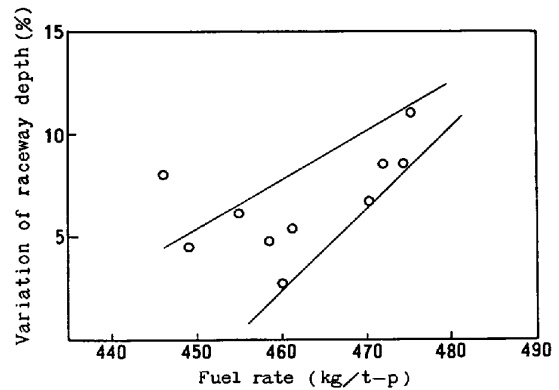


Fig. 8. Improvement of circumferential balance of raceway depth measured at 1 kg/cm² G blast pressure (21, July, 1981—25, Feb. 1982).

4本の羽口について、減圧時、ロッドによるレースウェイ深度の測定結果をFig. 8に示す。PCI操業により、燃料比低下と共にレースウェイ深度の円周均一性が顕著に改善されている。

4.3 PCI高炉操業の特徴的現象

Table 4に今回のPCI操業とオイル吹き込み操業、オールコークス操業の炭素及び熱収支を示した。ここに見られるように、PCI操業ではオイル吹き込みと同様の操業が可能である。すなわち、送風温度を設備能力の最大限使用できることと低送風湿分操業が可能なことである。その結果、送風量原単位的大幅低減、炭素入量低減、すなわち入熱量低減が達成できる。

出熱量の低減は主に炉頂ガス出熱、ソリューションロス反応熱、炉体放散熱等の低減によつて達成されている。

還元反応面では、水素入量を一定に確保することによつて還元速度の早い水素還元が確保できていることと、高い間接還元率が維持されていることが特徴である。後者に関してはFig. 6に示すように焼結鉱中のFeOの低減も寄与している。

総合的には、補助燃料の性状(発熱量、酸素含有の有無、分解熱)に差異はあるが、PCIはほぼオイル吹き込みと同等の操業安定効果があると言える。

5. 結言及び今後の方向

(1) 長期の実績をもつアームコ方式のPCI技術を導入し、4000m³級の大型、超高压高炉での高温送風への適用技術を開発し、大分第1高炉において本格的な微粉炭吹き込み設備の開発、操業を行つた。

(2) 特に、高压、高温の送風条件について大分第2高炉において羽口1本吹き込み実炉試験を行い、大型高炉への適用技術を確立した。

Table 2. Replacement ratios of PC to coke achieved in practice.

Item	Operation period		
	1980 Aug. (Base)	1982 Jan.	1982 Feb.
Fuel rate (kg/t-p)	469.3	461.7	446.7
Pulverized coal rate (kg/t-p)	0	51.3	52.3
Coal rate (kg/t-p)	469.3	410.4	394.4
Apparent replacement rate	—	1.15	1.43
Sinter R (%)	86.6	84.8	85.1
Pellet A (%)	1.2	6.3	8.3
Pellet B (%)	7.9	4.2	2.3
Coke Ash (%)	11.30	11.09	10.73
FeO in sinter ore (%)	4.97	4.74	4.59
Slag R (kg/t-p)	313	314	317
B. T. (°C)	1281	1292	1290
W _{H₂O} (g/Nm ³)	22.0	15.4	12.6
Corrected F. R. (kg/t-p)	—	468.0	458.2
Corrected replacement ratio	—	1.025	1.21

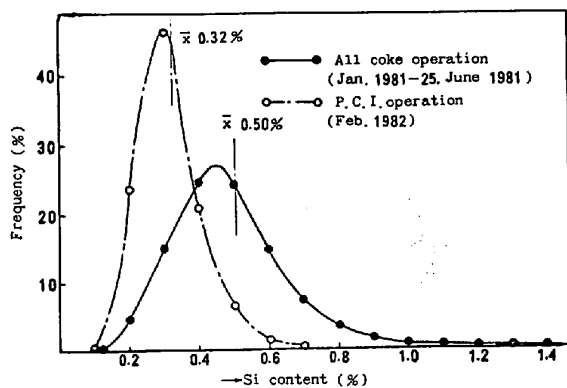


Fig. 7. Stabilization of Si content of pig iron.

Table 3. Carbon balance and heat balance (N. S. C Oita 1 BF, 2nd campaign).

	Item		Operation period			
			Oil injection Nov. 1979	All coke Aug. 1980	PCI Feb. 1982	
Operational condition	Fuel rate	(kg/t-p)	456.6	469.3	446.7	
	Oil or PC ratio	(kg/t-p)	34.6	—	52.3	
	Humidity	(g/Nm ³)	2.2	23.2	12.6	
	Blast temp.	(°C)	1281	1281	1290	
	Blast volume	(Nm ³ /t-p)	1011	1094	972	
	Slag rate	(kg/t-p)	340	313	317	
	FeO	(%)	6.52	4.97	4.60	
Carbon balance	Input	Coke	(kg/t-p)	371.9	412.8	348.7
		Oil, PC	(")	29.6	0	42.0
		Others	(")	0.6	1.12	0.7
	Output	Gasification C	(")	349.9	361.5	339.9
		Hot metal	(")	50.1	48.7	49.5
		Dust	(")	2.1	3.7	1.8
		Total	(")	402.1	413.9	391.4
Heat balance	Input	Combustion C	($\frac{\times 10^3 \text{ kcal}}{\text{t-p}}$)	559.7	564.9	520.4
		CO reduction	(")	31.6	32.9	33.1
		Sensible heat	(")	449.9	478.6	439.8
		Slag formation	(")	47.0	43.8	44.3
	Output	Top gas	(")	75.5	93.5	64.5
		Pig slag sensible heat	(")	478.9	471.5	468.5
		Metalloid red	(")	31.9	37.0	28.4
		Soln. loss	(")	357.2	356.2	323.4
		H ₂ reduction	(")	15.0	11.3	14.1
		H ₂ O decomposition	(")	3.9	38.7	21.4
		Others	(")	125.8	112.0	117.3
Total	(")	1088.2	1120.2	1037.6		

(3) 微粉炭の羽口部位における円周均一分配性については、アームコ方式の分配器を用いることにより良好な分配精度が得られた($\sigma=4\%$).

(4) 順調な立ち上げ操作を行い、昭和57年2月には大きな操業安定効果が得られた。

第1に、微粉炭のコークスとの実績置換率1.43、高炉操業条件と原料条件を補正しても、置換率1.21という好成績を達成できた。

第2に、銑中 Si レベル及び変動の低位安定

$$\bar{Si}=0.32\%, \sigma(Si)=0.052\%$$

第3に、レースウェイ深度の円周均一性向上

(5) 炉内反動的にも、PCI 操業はオイル吹き込み操業と近似の高炉操業が可能と考えられる。

(6) 今後は、80 kg/t-p レベルへの吹き込み量増加及び吹き込み炭種の拡大を図り、更に大きな PCI の効

果を追求していく考えである。

文 献

- 1) S. A. BELL, J. L. PUGH, and B. J. SNYDER: J. Metals, Apr. (1968), p. 85
- 2) P. H. G. and R. H. ESSENHIGH: "Coal Combustion in a Jet Mix Stirred Reactor", 17th 燃焼シンポジウム, 1978
- 3) C. NEAGA: "微粉炭の燃焼ダイナミックスに及ぼす圧力の影響" Rev. Roum. Sci. Tech-Electrotech et Energ 20, 3 (1975) p. 439, Bucarest
- 4) R. H. ESSENHIGH: "Combustion & Flame Propagation in Coal Systems", 16th 燃焼シンポジウム
- 5) 稲谷稔宏, 岡部俠児, 西山哲司, 芹沢保文, 高橋洋充, 才野光男: 鉄と鋼, 62 (1976) 5, p. 514
- 6) 中村正和, 杉山 喬, 鶴野建夫, 原 行明, 近藤真一: 鉄と鋼, 63 (1977) 1, p. 28
- 7) J. TAYLOR, G. LONIE, and R. HAY: JISI (1957), p. 330