

技術報告

福山第 3 高炉におけるオールコークス操業の解析

梶川 脩二*・山本 亮二*・中島 龍一*

岸本 純幸*・脇元 一政*

Analysis of the All-Coke Operation at Fukuyama Blast Furnace No. 3

Syuji KAJIKAWA, Ryoji YAMAMOTO, Ryuichi NAKAJIMA
Sumiyuki KISHIMOTO, and Kazumasa WAKIMOTO

Synopsis :

NKK's three large-sized blast furnaces have been shifted to all-coke operation one after another since January, 1980, and operation of the blast furnaces without liquid fuel was completely achieved in April with another tar injection furnaces. Regarding to the Fukuyama Blast Furnace No. 3 (3 223 m³), NKK decided to operate it with increased blast volume and higher blast temperature and, in making efforts to solve operational problems and to achieve improved operation, obtained some important findings. Based on the above information, all the furnaces are continuing smooth operation owing to proper gas distribution control and furnace heat control. According to the calculation based on operational results hitherto obtained, a productivity coefficient of approximately 2.3 t/m³/d is expected on a monthly average value basis.

1. 緒 言

高炉におけるエネルギー消費量は、製鉄所全体の約 1/2 を占めており、従来、重油吹き込みと高温送風の複合化、装入物分布制御による炉内ガス利用率の向上などにより高炉燃料比低減に多大な努力がはらわれて来た。

しかしながら、第二次石油ショック以降、石油価格が急騰したことから、低燃料比指向からトータルエネルギーコストミニマムの考え方に転換して来ており、1980年 11 月時点で全国稼動高炉 38 基中 17 基 (45%) がオールコークス操業を実施している^{1)~3)}。日本鋼管(株)の高炉においても、1980年 1 月 17 日に福山第三高炉 (3 223 m³)、4 月 1 日に福山第四高炉 (4 288 m³)、同月 22 日に扇島第一高炉 (4 052 m³) をオールコークス操業に切り替えた⁴⁾。この時点で他炉はすでにタール吹き込みに切り替わっており、高炉部門のオイルレス化を完了した。

以下では主に、オールコークス操業の基本的考え方、操業上の問題点、および、福山第三高炉の実績に基づく操業解析、限界コークス比、限界出銑比の検討を行ったので報告する。

2. オールコークス操業の基本的考え方

2.1 オールコークス操業上の問題点

オールコークス操業移行時の炉内現象の変化を Fig. 1 に示す。本操業上の問題点は、i) 羽口先温度の上昇、ii)

Ore/Coke の大幅減少、iii) 熱流比の上昇、iv) 羽口先レスウェイへのコークス供給量の増加等により、炉内状況が液体燃料吹き込みとは大幅に異なり、炉況が不安定になりやすいこと、したがって、送風温度の低下や調湿蒸気の添加によつて羽口先温度の上昇を抑えることが肝要であり、必然的にコークス比は上昇し、その結果、銑鉄 t 当たり必要風量が増加して高炉の生産能力の低下が予想されることなどである。

そこで、長期的に安定炉況をいかに維持し、限界出銑比がどの程度かを見極めることが重要で、これらを改善するための最適操業を経済性との絡みで追求する必要がある。

2.2 分布制御

(1) ムーバブルアーマーによる装入分布制御

炉半径方向の装入物分布は、Ore/Coke の減少にともなつて変化する。そこで、オールコークス操業の開始に先立つて実物大高炉模型⁵⁾による分布測定を実施した。Fig. 2 に示すように、ムーバブルアーマーの設定を同一にして、Ore/Coke を下げると、中心部の鉱石量が相対的に減少する傾向が見られ、実操業においては炉壁ガス流の確保に配慮すべき点があることが明らかとなり、従来の中心流指向のガス分布を基本に適宜周辺流アクションを実施する方針とした。

(2) コークスペース

シャフト効率の悪化や、融着帯での圧損増加を避ける

昭和 56 年 3 月 13 日受付 (Received Mar. 13, 1981)

* 日本鋼管(株)福山製鉄所 (Fukuyama Works, Nippon Kokan K. K., 1 Kokan-cho Fukuyama 721)

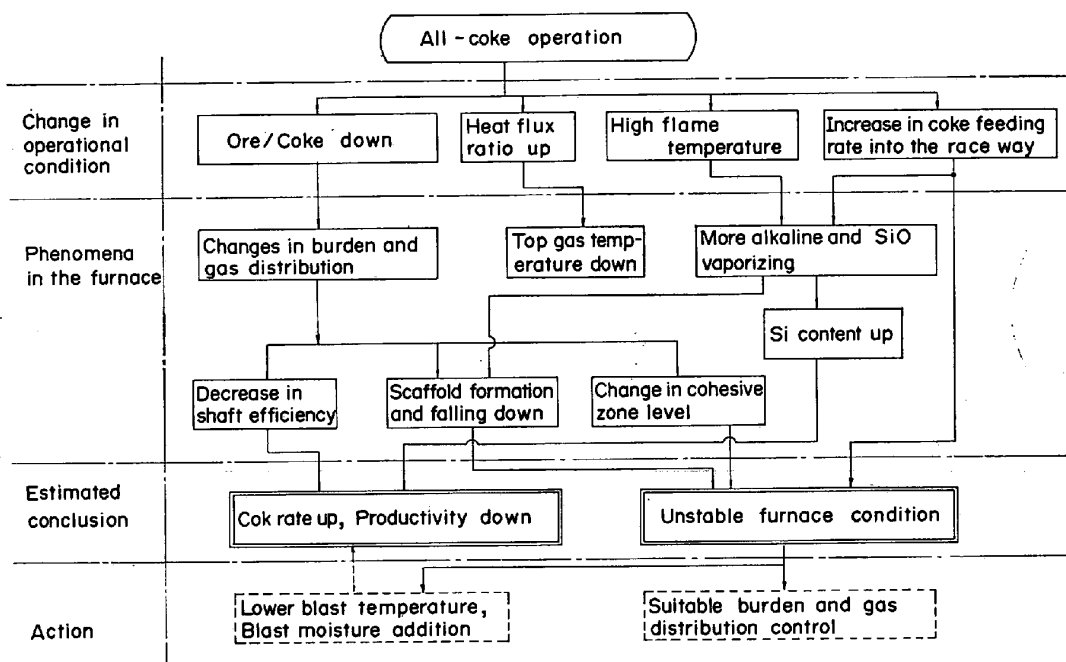


Fig. 1. Phenomena in the furnace caused by the all-coke operation.

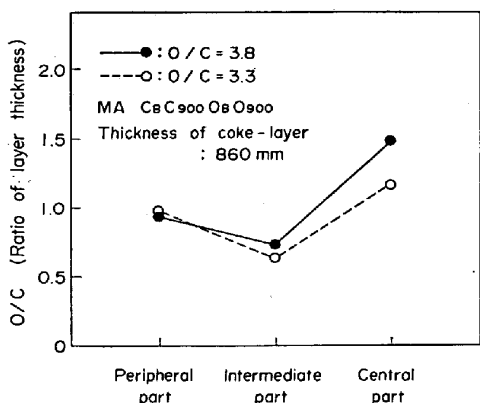


Fig. 2. Change in burden distribution at different ore/coke ratio (Result of model experiment).

ため、コークスペースを増加させて、極力鉱石層厚を維持させることにした。

(3) 羽口先衝風速度

オールコークス操業では、羽口先へのコークス供給量が増加する。したがって、その供給を円滑にするため、羽口先衝風速度を増してレースウェイ深度を確保することが有効と思われるが、一方、それは炉下部の炉壁附着物生成を促進する傾向がある。よって、炉口部での分布制御を併用しながら、段階的に羽口径を縮小することにし、適宜炉頂圧操作を併用することにした。

2.3 炉熱調整

液体燃料吹き込み操業においては、通常まず、その吹き込み量によつて炉熱調整が行われる。オールコークス操業では、その手段として、送風温度、送風湿分の二者

があるが、熱風炉効率の面から、前者を頻繁に操作することは好ましくない。したがって、通常は湿分によるアクションとし、羽口先温度の大幅なふれを避けるため、その管理幅を ±10 g/Nm³ とし、上下限において Ore/Coke を変更することにした。

3. 操業実績

3.1 オールコークス操業実績

Fig. 3 に福山第三高炉におけるオールコークス操業への切り替え前後の推移図を示す。切り替え時、安定炉況を維持するため、送風温度の低下と調湿蒸気の添加により羽口先温度を低下させた。その後徐々に送風量、送風温度を上昇させ、低コークス比操業試験を行い、1980年6月度実績では、減産移行期ではあつたが、コークス比 459 kg/t, 出銑比 2.16 t/m³・d を記録した。そして、それ以降、後述(5章)の理由から送風温度を下げることによりコークス比を上昇させ、コスト低減をねらつた操業を行つている。

切り替え前後の炉況の変化については、スリップの増加、炉頂ガス利用率(CO/CO₂)の悪化、銑中 Si の上昇が見られた。

3.2 操業管理

Fig. 4 に示すように、スリップ頻度は羽口先温度と明瞭な対応が認められる。福山第三高炉の場合、6月下旬に送風温度を 1300°C まで上昇させ、高羽口先温度操業を行つた。しかし、この段階でも、スリップは 3~4 回/日程度で、操業上の大きな障害とはならず、短期的に

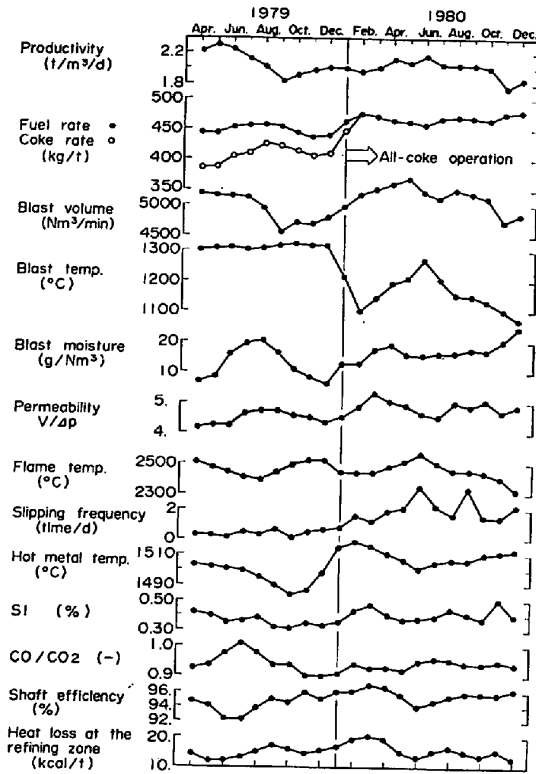


Fig. 3. Transitional changes before and after the all-coke operation (Fukuyama No. 3BF).

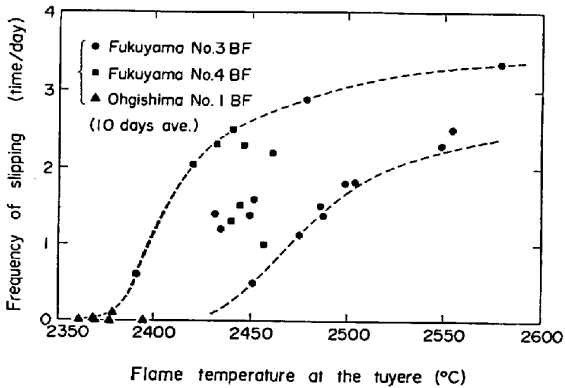


Fig. 4. Relation between frequency of slipping and flame temperature.

は、液燃吹き込み時とほぼ同等の羽口先温度で操業しうることを確認した。ただし、長期的には、炉体付着物形成等を考慮し、水蒸気添加による羽口先温度の制御および、適正な上限値の設定が必要となろう。

一方、シャフト下段温度とスリップ頻度の間にも Fig. 5 に示すような関係があり、シャフト下段温度の低下とともに、スリップ回数が増加し、とくに、オールコークス操業時は顕著であることがわかる。これは、前述したように、オールコークス操業時は炉壁流が抑えられる傾向にあることなどから、炉壁への付着物形成が起りやすいためと考えられる。

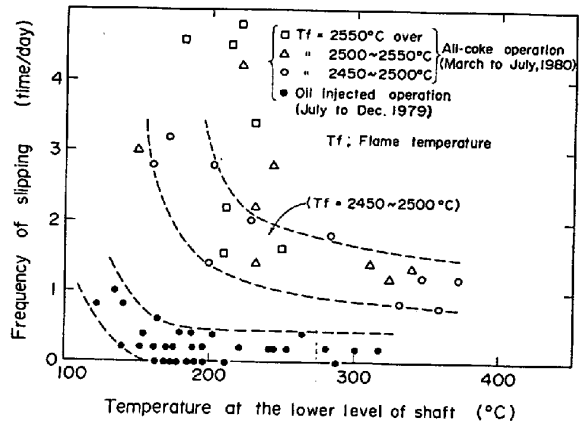


Fig. 5. Relation between shaft temperature and frequency of slipping.

Table 1. Substitution ratio of oil to coke (Fukuyama No. 3BF).

	Conventional operation	All-coke operation		
	Oct.~Dec. '79	June. '80	difference(ACR)	
Fuel rate(kg/t)	441.8	459.3	17.5	
Coke rate(kg/t)	411.8	459.3	47.5	
Oil rate(kg/t)	30.0	0	-30.0	
Apparent substitution ratio *1	—	1.58		
Corrected amount to coke rate	Blast temp. (°C)	1319	1269	-50(5.0)
	Blast MoI (g/Nm³)	8.8	15.8	7.0(49)
	Si (%)	0.34	0.38	0.04(2.0)
	Sinter (%)	78.4	82.0	3.6(3.6)
	Pellet (%)	4.7	1.6	-3.1(1.6)
	Coke ash(%)	10.65	10.95	0.30(2.1)
	Slag ratio (kg/t)	320	324	4(0.8)
Hot metal temp. (°C)	1490	1501	11(1.1)	
Total	—	—	(139)	
Corrected substitution ratio *2	—	1.12		

*1 Apparent substitution ratio : Increment of coke rate/Decrement of oil rate

*2 Corrected substitution ratio : Increment of corrected coke rate/Decrement of oil rate

したがって、日常の操業管理では、羽口先温度同様に、炉壁温度、とくに、シャフト下段温度、朝顔部ステープ埋め込み温度を重視し、常にそれが管理幅に入ろう、ムーバブルアーマー、羽口先衝風速度で調整した。

4. 操業解析

4.1 重油とコークスの置換率

Table 1 に福山第三高炉の 1979 年 10~12 月 (重油節減期) をベースにしたときの、重油からコークスへの置換率を示す。見掛け置換率、補正置換率 (Table 1 *1*2) は、低コークス比操業を行つた 6 月度で、1.58, 1.12 となっている。この場合、補正置換率の +12% はコークスと重油の場合のボッシュガス中の還元ガス (CO+H₂) 量の差、および、オールコークス操業時の炉況変動の増

Table 2. Changes in carbon and heat balance by all-coke operation (Fukuyama No. 3BF).

		Oil injection	All-coke operation	
		Oct~Dec, 1979	Feb., 1980	June, 1980
Carbon balance (kcal/t)	Input			
	Coke	363.2	426.8 (+63.6)	402.3 (+39.1)
	Oil, Tar	27.8	0. (-27.8)	0. (-27.8)
	Lime stone	0.4	0.6 (+ 0.2)	1.0 (+ 0.6)
	Gasification	342.7	376.6 (+33.9)	353.8 (+11.1)
Output	In hot metal	44.8	44.7 (+ 0.1)	44.7 (+ 0.1)
	In dust	3.9	6.1 (+ 2.2)	4.8 (+ 0.9)
	Total	391.4	427.4 (+36.0)	403.3 (+11.9)
Heat balance x10 ³ (kcal/t)	Input			
	Combustion C	546.7	615.4 (+68.7)	548.0 (+ 1.3)
	CO reduction	56.8	59.8 (+ 3.0)	58.6 (+ 1.8)
	Sensible heat	459.7	433.7 (-26.0)	449.6 (-10.1)
	Slag formation	44.9	45.4 (+ 0.5)	45.5 (+ 0.4)
	Output			
	Top gas	45.4	68.4 (+23.0)	43.9 (+ 1.5)
	Metal, Slag	480.7	493.5 (+ 12.8)	488.7 (+ 8.0)
	Metalloid red.	28.6	31.8 (+ 3.2)	30.3 (+ 2.1)
	Solution loss	329.7	328.1 (- 1.6)	344.9 (+15.2)
	H ₂ reduction	14.0	9.7 (- 4.3)	10.9 (- 3.1)
	Decomposition	28.5	28.4 (- 0.1)	28.6 (+ 0.1)
	Heat loss	181.2	194.4 (+13.2)	153.9 (-27.3)
Total	1108.1	1154.3 (+46.2)	1101.6 (- 6.5)	

加によるものと思われる。

4.2 物質収支と熱収支

オールコークスへの移行にともなうカーボン収支および、熱収支の変化を Table 2 に示す。オールコークスで低コークス比操業を行うため高温送風を行つたとき、ソリューションロスカーボンが増加していることがわかる。また、熱収支のうち、炉体熱損失の増減は主として、出銑比の増減によるものであり、総熱量は2月度は約4%増となっているが、6月はほぼ従来なみに戻っている。

4.3 炉況解析

オールコークス操業移行にともなう、酸化鉄の還元割合の変化を Fig. 6 に示す。重油カットによる投入水素量の減少により、水素還元率が直線的に減少する一方、間接還元率の増加、直接還元率の減少が見られた。しかし、送風温度を上昇させてコークス比の低下をはかる過

程で直接還元率は顕著に増加した。これらの経緯を操作線図に表すと Fig. 7 のようになる。2月度の場合、主として、送風温度減により、P点が右方へずれているが、シャフト効率は比較的良好であつた。しかし、6月度の場合、スリップの増加により炉況が若干不安定化したこと、炉壁温度コントロールを重視した分布制御を行つたことなどにより、シャフト効率が悪化したものと考えられる。しかしながら、それ以外の期間は、Fig. 3 に示したように、シャフト効率、精錬帯熱損失ともほぼオールコークス操業前に戻っている。

Fig. 8 は福山第四高炉における、送り込み式垂直プローブ⁶⁾⁷⁾による炉内温度プロファイル測定結果の比較を示す。同図より、液燃吹き込み操業時と比べて、オールコークス操業時の方が、平均的熔融帯レベルは上昇しており、その形状は逆V型からW型に移行していることがわかる。これは、後者の方が、燃料比、炉熱レベルとも高い状態で操業しており、かつ、炉壁流を確保するような分布制御を行つているためと考えられる。

5. エネルギー評価

高炉系として捕えた場合の銑鉄t当たりエネルギー消費量の変化を Table 3 に示す。重油節減期をベースとしたとき、全体で概略2~3%のエネルギー増となつている。

コークス比増による投入エネルギー増分の約1/2は高炉ガス(Bガス)として回収され、Bガスは重油と置き換えて使用できるのでコスト的には重油とほぼ等価とみなせる。また、コークス比増は、コークス炉稼働率上昇によるコークス炉ガス(Cガス)発生増につながり、Bガス発生量増と合わせて所内エネルギー需給バランスの改善に寄与している。

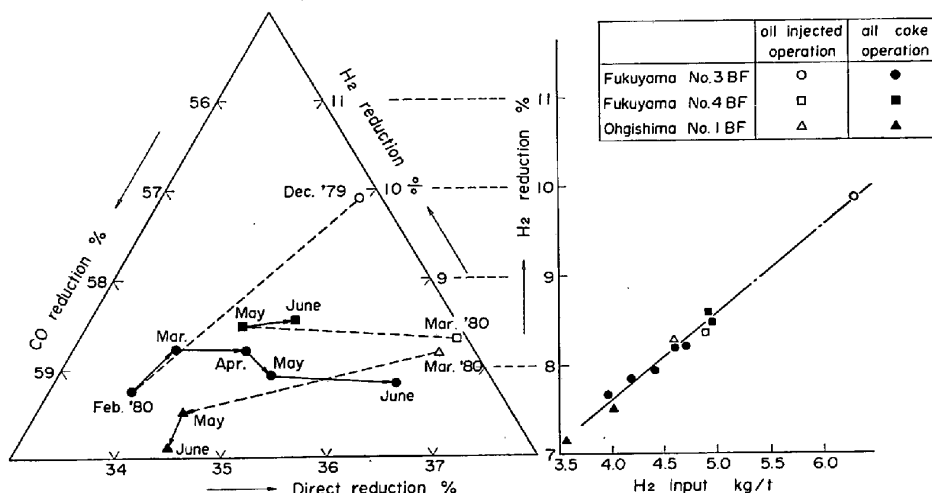


Fig. 6. Change in the direct-indirect reduction ratio.

6. 限界コークス比と限界出鉄比の推定

6-1 限界コークス比

オールコークス操業時のコークス比の限界を RIST モデルにより、福山第三高炉 1980 年 6 月度 (コークス比 459 kg/t) をベースに検討した。Table 4 にその計算前提を、Fig. 9 に計算結果として、シャフト効率をパラメータに送風温度とコークス比、羽口先温度、熱流比の関係を示す。実操業上、低コークス比下での安定操業を制

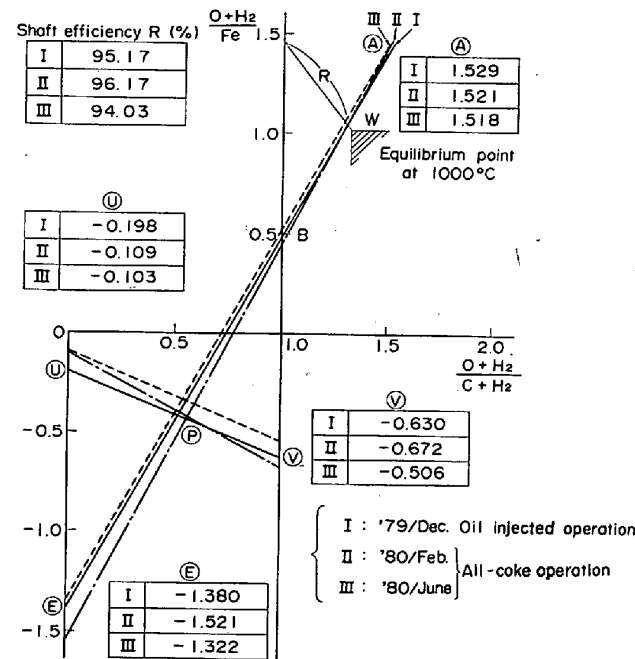


Fig. 7. Operation diagrams with oil injected and with all-coke operation (Fukuyama No. 3BF).

限するのは、経験的に熱流比 0.85 程度、羽口先温度 2550°C 前後と考えられ、また、将来的にはシャフト効率 98% まで可能とすると、コークス比約 448 kg/t 前後がある程度長期的な操業限界と考えられる。なお、Table 4 の条件下で、シャフト効率 100% の理想状態のとき、約 444 kg/t となる。

6-2 限界出鉄比

出鉄量の上限は、安定炉況を維持する上での炉内通過ガス量の限界と考えられるので、過去の実績のある最大実ボッシュガス量 (V_{bosh}^o , m³/min) を基準限界とした。そして、前述の RIST モデルにより求めたコークス比、ボッシュガス量原単位 (Nm³/t)、羽口先温度を用いて、次式より出鉄比とボッシュガス量の関係求めた。

$$\frac{W_p}{W_p^o} = \gamma \cdot \left(\frac{v_{bosh}^o}{v_{bosh}} \right) \cdot \left(\frac{273 + 1000 + T_f/2}{273 + 1000 + T_f} \right) \cdot \left(\frac{P_{bosh} + 1.033}{P_{bosh} + 1.033} \right) \dots (3)$$

ただし、 $\gamma = V_{bosh}/V_{bosh}^o$ (実ボッシュガス流量比)

ここで、 V_{bosh} ; 実ボッシュガス量 (m³/min)

v_{bosh} ; ボッシュガス量原単位 (Nm³/t)

T_f ; 羽口先温度 (°C)

P_{bosh} ; ボッシュガス圧力 (kgf/cm²)

W_p^o ; 出鉄量 (t/d)

suffix の ° は基準時を表す。

コークス比とボッシュガス量原単位の間には正の相関関係があるので、Fig. 10 に(3)式をコークス比と出鉄比の関係で、 γ をパラメータに示した。この図より明らかなように、コークス比 470 kg/t 前後の操業では、出

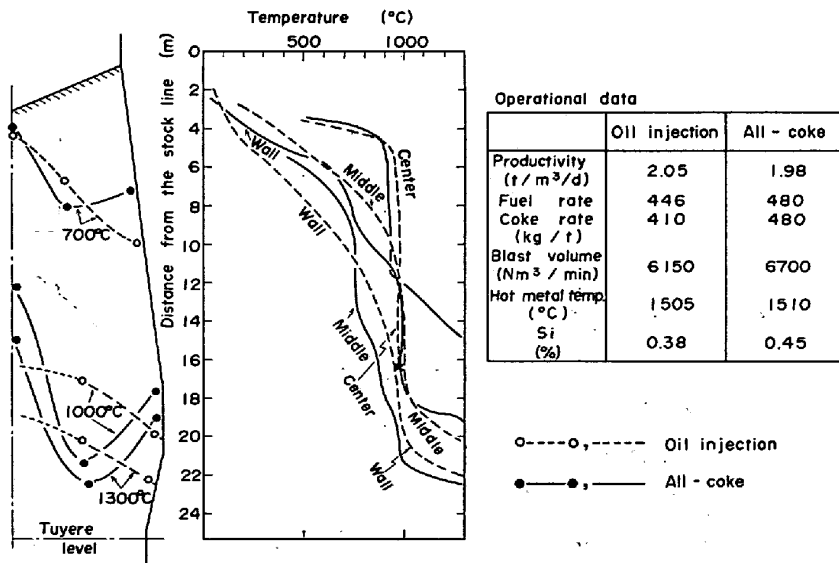


Fig. 8. Temperature profiles in the furnace measured by the feeding type vertical probes (Fukuyama No. 4BF).

Table 3. Changes in the blast furnace energy consumption.

(Fukuyama No. 3BF)

		Operation results				Energy ($\times 10^3$ kcal/t)				
		Oil injection Oct.~Dec. '79	All-coke operation		kcal per unit	Oil injection Oct.~Dec. '79	All-coke operation			
			Feb. '80	Jun. '80			Feb. '80	difference	Jun. '80	
Coke	(kg/t)	411.8	477.7	459.3	7200	2965	3 439	+478	3 307	+342
Oil	(kg/t)	25.6	0	0	9947	255	0	-255	0	-255
Tar	(kg/t)	4.4	0	0	8700	38	0	-38	0	-38
Gas consumption at H.S.	$\times 10^3$ (kcal/t)	526	455	512	—	526	455	-71	512	-14
Moisture in jection	(kg/t)	0	10.0	4.0	800	0	8	+8	3	+3
Power consumption at Dehumidifier	(kwh/t)	0	0	1.9	2450	0	0	0	5	+5
Power consumption at Blower	(kwh/t)	69.2	75.4	80.7	2450	170	185	+15	198	+28
Total energy	$\times 10^3$ (kcal/t)	—	—	—	—	3 954	4 087	+133	4 025	+71
Gas generation	(Nm ³ /t)	1 256	1 330	1 285	800	-1 005	-1 064	-59	-1 028	-3
Total	$\times 10^3$ (kcal/t)	—	—	—	—	2 949	3 023	+74	2 997	+48

Table 4. The condition of calculation in estimating marginale coke rate.

	Fukuyama No. 3BF June, 1980	Calculation of critical coke rate
Coke rate (kg/t)	459	—
Coke ash (%)	11	11
Moisture (g/Nm ³)	16	16
Blast temp (°C)	1 270	Variable
Hot metal temp(°C)	1 500	1 500
Si (%)	0.38	0.38
Shaft efficiency(-)	0.94	0.98, 1.0
Heat loss (kcal/t)	14.0×10^4	14.0×10^4
Flame temp. (°C)	2 555	2 550(Max.)
Heat flux ratio(-)	0.83	0.85(Max.)

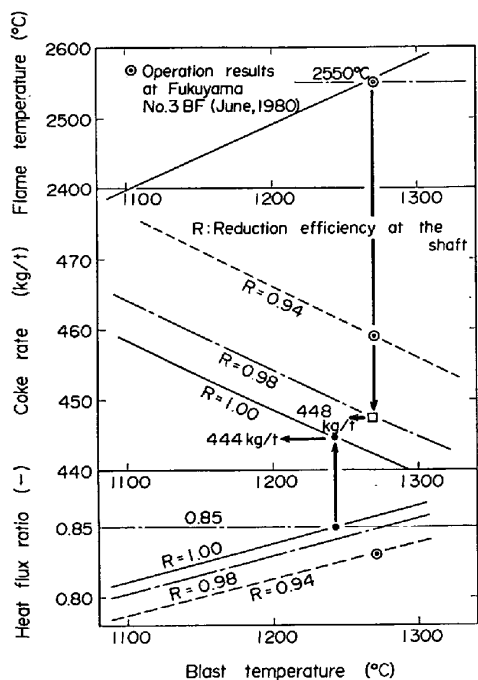


Fig. 9. Estimation of the marginal coke in the all-coke operation.

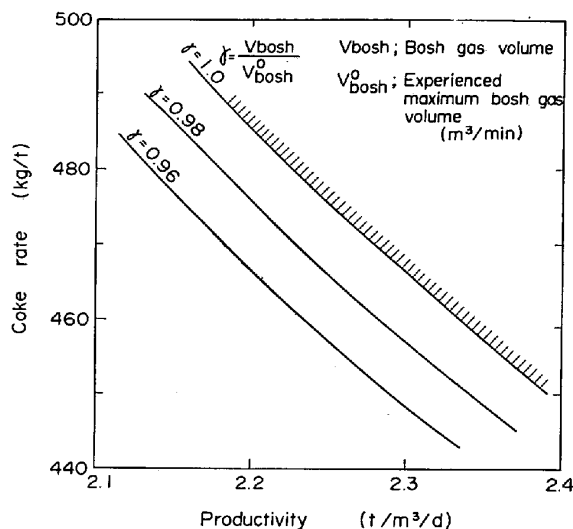


Fig. 10. Relation between critical productivity and coke rate in the all-coke operation.

鉄比 2.3 t/m³·d 弱が限界と考えられる。ただし、実際面では、ガス分布制御性の問題や、装入物降下速度の増加などの影響が考えられ、今後試験操業による確認が必要である。

7. 結 言

現状のエネルギーコスト情勢のもとでは、経済的にはオールコークス操業が優位であることは明らかである。しかしながら、オールコークス操業を実施する上で、大きく分けて二つの問題点がある。一つは炉況の不安定化と、他の一つはそれによる燃料比の上昇と出鉄比の低下である。著者らは、それらの問題点を踏まえて、福山第三高炉の実績を中心に操業解析、および、限界コークス比、限界出鉄比の検討を行い、次のような結果を得た。

1) 炉況の安定性を表すスリップ頻度は羽口先温度、シャフト下段温度と関係があり、羽口先温度が高いほど、また、シャフト下段温度が低下するほど増加する。したがって、低コークス比操業を指向すると羽口先温度が上昇するので炉況は不安定化しやすい。これらを解決するためには、原料性状の改善、溶融帯の最適制御、炉体プロフィールの適正維持などが必要と思われる。

2) ガス分布は中心流が強まる傾向にあり、炉壁への付着物生成が起り易くなる。したがって、ある程度炉壁流を確保するような分布制御が必要である。

3) オールコークス操業により高炉発生ガス量、コークス炉発生ガス量が増加するので、所内の石油系エネルギー使用量を低減することができる。

4) 羽口先温度上限 2550°C 、熱流比上限 0.85、シャフト効率 98%、精錬帯熱損失 $14 \times 10^4 \text{ kcal/t}$ とすると、

限界コークス比約 448 kg/t となつた。また、コークス比 470 kg/t 前後では限界出銑比は約 $2.3 \text{ t/m}^3 \cdot \text{d}$ となつた。

文 献

- 1) 重盛富士夫, 河合 晟, 細井信彦, 佐藤勝美, 元重正洋, 沖 宏治: 鉄と鋼, 65(1979), S 553
- 2) 川辺正行, 和栗真次郎, 小管暲一, 三沢順治, 井上義弘, 徳永正昭: 鉄と鋼, 66(1980), S 648
- 3) 稲垣憲利, 青野照彦, 浅井謙一, 島野和好: 鉄と鋼, 66(1980), S 649
- 4) 梶川脩二, 中島龍一, 岸本純幸, 酒井 敦, 齊藤正紀, 鴨志田友男: 鉄と鋼, 66(1980), S 647
- 5) 樋口正昭, 齊藤 汎, 下間照男, 西尾浩明, 有山達郎: 鉄と鋼, 65(1979), S 600
- 6) 梶川脩二, 脇元一政, 新谷一憲, 石井孝治: 鉄と鋼, 66(1980), S 38
- 7) 山本亮二, 脇元一政, 新谷一憲, 石井孝治: 鉄と鋼, 66(1980), S 684