

低燃料比操業時の高炉内諸現象

梶川 脩二*・山本 亮二*・中島 龍一*
岸本 純幸*・福島 勤*²

Phenomena in a Blast Furnace Operated at the Low Fuel Rate

Syuji KAJIKAWA, Ryoji YAMAMOTO, Ryuichi NAKAJIMA,
Sumiyuki KISHIMOTO, and Tsutomu FUKUSHIMA

Synopsis :

In order to seize the operational problems and clarify the various phenomena in a blast furnace operated at the extremely low fuel rate, Nippon Kokan K. K. had decided to execute a trial operation in No. 3 blast furnace (inner volume : 3 223 m³, blow in; Jan. 1975) at Fukuyama works.

As a result, a monthly mean fuel rate of 396 kg/t was recorded in Nov. 1981. Comparing with the previous result of the same furnace (428 kg/t, Jan. 1979), necessary heat at the lower part of a furnace could be much reduced. Both the high reducibility of sinter and adequate burden distribution control enabled to maintain the high shaft gas efficiency of 97.5%. As the heat flux ratio increasing, temperature level at the shaft lowered and the three stages of thermal reserve zones were observed. The level of cohesive zone also lowered and its shape changed from "inverse V" to "V" via "W" shape, furthermore some of measured results indicated that melting line would be very close to the raceway. In its transition period, burden descending became a little unstable, but got well again when fuel rate reduced to around 400 kg/t.

The essential hindrances to get further low fuel rate in future are seemed to be the reducibility of ore at the short effective zone for its reduction and the fusing capacity of ore around the raceway.

1. 緒 言

高炉の低燃料比操業技術は、プロセス工学的にも、炉況管理技術的にも、重要な課題であつて、その観点から、近年いくつかの低燃料比操業試験が行われている^{1)~5)}。今回、日本鋼管(株)では、福山第3高炉(内容積 3 223 m³, 火入れ昭和50年1月)において、燃料比極限時における操業上の諸問題の把握と炉内諸現象の解明を目的とし、試験操業を実施した。その結果、昭和56年11月の月間平均燃料比で、396 kg/tを記録した。

本論文では、この低燃料比をもたらした諸要因、および試験操業中に観察された特徴的な現象について考察を加えるとともに、それらに基づいて、低燃料比操業を本質的に制約する要因について述べる。

2. 低燃料比試験操業結果

2.1 操業実績

福山第3高炉の試験操業経過を Fig. 1 に示す。昭和56年8月時点において、オールコークス操業からタール吹き込み操業へ切り替え、以後急ピッチに Ore/Coke

を上昇させた。11月の本試験操業中、炉況は極めて安定に推移し、特に下旬においては、焼結鉱のJIS還元試験による還元率(RI)が、70%前後の高水準に達した⁶⁾こともあり燃料比は380 kg/t 台に達した。Table 1 に、11月の操業実績を一括して示す。炉下部必要熱削減のため、可能な限り低熱レベルの操業を指向した結果、通常操業時の溶銑温度が1 505°C 前後であつたのに対し、11月の平均値は、1 481°C となつた。必然的にスラグの粘性は上昇し、その円滑な抽出のために出銑滓頻度の増加を余儀なくされた。シャフト部の熱流比(固相熱容量/ガス相熱容量)は0.915と厳しい水準となつたが、高RI焼結鉱の多量配合、炉径方向で一様に高いガス利用率をもたらした分布制御技術等の寄与により、RIST操業線図に基づくシャフト効率(η_{co}; 54.8%)に達した。

2.2 燃料比低下要因

Fig. 2 は、同高炉の前回低燃料比実績³⁾(昭和54年1月, 428 kg/t)と今回実績について、操業直線を比較して示したものである。図中のⓐ点の動きから、今回の場合、主として炉下部必要熱を大幅に低下し得たこと

昭和57年4月本会講演大会にて発表 昭和57年4月8日受付 (Received Apr. 8, 1982)

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

*2 日本鋼管(株)技術研究所 (Technical Research Center, Nippon Kokan K. K.)

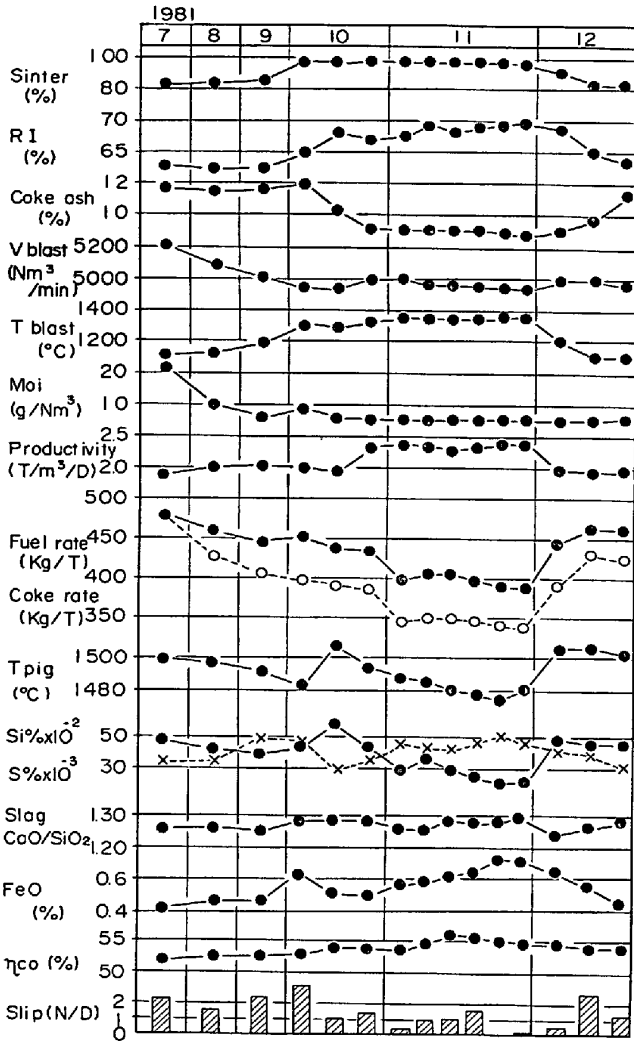


Fig. 1. Trend of Fukuyama No. 3 BF operation.

による寄与の大きいことがわかる。すなわち、Si を初め各種メタロイド還元量の低減による⑩点の上昇、および溶銑滓頭熱、炉体熱損失の低下による⑪点の上昇である。

Table 2 に、カーボンおよび熱収支を、同様に比較して示した。炉下部熱収支改善の結果として、ソリューションロスカーボン量は若干増加している。銑鉄 t 当たり入熱量は、前回に比べ、約 7% の低減となつた。出熱項で大きく減少しているものは、炉頂ガス頭熱、溶銑滓頭熱、および炉体熱損失であつた。

3. 炉内諸現象

3.1 炉内圧力分布

炉内圧損は、Fig. 3 に示すように、燃料比の低下とともに緩和された。図中の点線は、大野ら⁷⁾による、炉内温度情報を考慮したガス流れシミュレーションモデルに基づく計算結果を示すが、実測値と良く一致している。すなわち、この現象は、後述のようなシャフト部の

Table 1. Results of the low fuel rate operation.

Blast conditions		Furnace conditions	
Blast volume	4952 Nm ³ /min	Pressure diff.	1.11 Kg/cm ²
press.	3.59 Kg/cm ²	Slip	0.7 times/D
temp.	1353 °C	Dust	7.7 Kg/T
moi.	5.6 g/Nm ³	σ _{si}	0.12
O ₂ enrichment	0 %		
Top press.	2.48 Kg/cm ²		
Flame temp.	2533 °C		

Burden conditions		Hot metal & Slag	
Sinter ratio	96.6 %	Hot metal temp	1481 °C
Miscellaneous	3.4 %	Si	0.27 %
flux	1.9 Kg/T	S	0.045 %
Coke DI ³⁰ ₁₅	92.9	Mn	0.43 %
mean size	52.3 mm	P	0.098 %
ash	9.01 %	Slag CaO/SiO ₂	1.28
S	0.78 %	Al ₂ O ₃	14.0 %
Sinter TI(SI)	65.2(90.5)	MgO	7.3 %
-5m/m	4.0 %	FeO	0.64 %
SiO ₂	5.01 %	S	1.09 %
FeO	4.61 %	Desulfurization	84.9 %
MgO	1.43 %		
RDI	36.9		
RI	68.9		
Slag ratio	274 Kg/T		

Top gas	
Temperature	73 °C
CO	20.2 %
CO ₂	24.5 %
H ₂	1.7 %

Others	
Shaff gas eff.	97.5 %
η _{co}	54.8
η _{H2}	58.6
Heat flux ratio	0.915
No. of tappings	17.4 taps/D

Production & Fuel rate	
Output	7636 T/D
Productivity	2.37 T/D/m ³
Blow off time	0
Fuel rate	396.1 Kg/T
Coke rate	354.0 Kg/T
Tar rate	42.1 Kg/T

温度低下に伴うガス流速の低下に起因しており、結果的に、高 Ore/Coke での安定炉況維持に寄与したと考えられる。

3.2 炉内温度分布と還元反応の進行

3.2.1 炉内温度分布

シャフト部の熱流比が上昇する過程で、羽口先フレーム温度は高いレベルに保たれた結果、炉高さ方向の温度パターンは大きく変化した。その変化の傾向を Fig. 4 に例示した。なお、温度上昇が数段にわたって停滞する現象が認められ、その温度レベルと熱流比の関係も図中に示した。これらの特徴は以下の 4 点に要約される。

- 1) シャフト部の温度上昇は、極めて遅く、炉下部に至って急激に上昇する。
- 2) 温度上昇の停滞する現象が、通常の 1000°C 付近の熱保存帯 (第 1 停滞) に加え、600~750°C 付近の第 2 停滞、さらに 200~400°C 付近の第 3 停滞が順次現れる。このような傾向は、特に中間部から炉壁にかけて顕著である。
- 3) 高熱流比側では、第 1 および第 3 の停滞は顕著であるが、第 2 停滞は不明瞭となるか消滅している。
- 4) 熱流比が極めて高い時点で、中心部は、1000°C

Table 2. Comparison of carbon and heat balance.

		Jan. '79	Nov. '81	diff.	
Carbon balance (kg/T)	Input	Coke	322.8	320.2	- 2.6
		Liquid fuel	54.0	38.6	- 15.4
		Lime stone	0.0	0.1	+ 0.1
	Output	Combustion carbon	227.9	205.0	- 22.9
		H ₂ O cracking carbon	4.1	4.0	- 0.1
		Si, Mn, P, Ti reduction C	5.8	4.3	- 1.5
		Solution-loss carbon	89.3	98.3	+ 9.0
Carbon in hot metal	44.8	44.8	± 0		
Carbon in dust	4.9	2.5	- 2.4		
Total	376.8	358.9	- 17.9		
Heat balance (x10 ³ kcal/T)	Input	Combustion heat of C	542.5	488.1	- 54.4
		Reduction heat by CO gas	40.8	42.5	+ 1.7
		Sensible heat of blast, burden	435.1	419.6	- 15.5
		Slag formation heat	39.6	34.9	- 4.7
	Output	Sensible heat of top gas	54.0	32.7	- 21.3
		Sensible heat of hot metal, slag	450.7	433.1	- 17.6
		Reduction heat of metaloid	29.4	23.2	- 6.2
		Heat of C solution-loss	295.2	330.6	+ 35.4
		Reduction heat by H ₂	18.1	14.3	- 3.8
		Decomposition heat of mol. fuel	37.2	26.6	- 10.6
		Heat loss	173.4	124.6	- 48.8
Total	1058.0	985.1	- 72.9		

前後の熱保存帯が炉芯付近まで続いている。

ここで、第1停滞は、ソリュージョンロス反応による熱流比の変化、第2停滞は、Fe₃O₄からFeOへの還元反応が吸熱であること、さらに第3停滞は、炉頂部における固相とガス相の温度差が小さく、しかも層頂部で、ガスが中心側へ偏流していくことが、それぞれ対応するものと考えられる。高熱流比側で第2停滞が消滅した点については、今後の詳細な検討が必要であるが、次項で述べる還元反応挙動との関連があると推定される。

4) の中心部の昇温挙動については、全体のガス利用率を向上させるために、この部分の鉱石量を増加させたことと対応するものであり、さらに後述するような炉下部の構造の変化に伴って、炉芯頂部付近に至るガス流れが非常に少なくなつたことが原因となつている。

3.2.2 還元反応の進行

前項で示したような、シャフト部の温度上昇の遅れは、必然的に還元反応の進行を遅滞させる。これによるソリュージョンロスカーボン量の増大、シャフト効率の低下を防ぐためには、高い被還元性を有する焼結鉱が必須の要件となる。今回使用した焼結鉱の被還元性の効果を、燃料比の低下に伴う熱流比の増大、有効な間接還元帯の体積との関係で、Fig. 5 に示した。燃料比が低下する過程すなわち熱流比が上昇する過程では、鉱石t当たりの還元ガス量の減少、および炉下部高温域が縮小されて有効間接還元域が増加したこと等により η_{co} は向

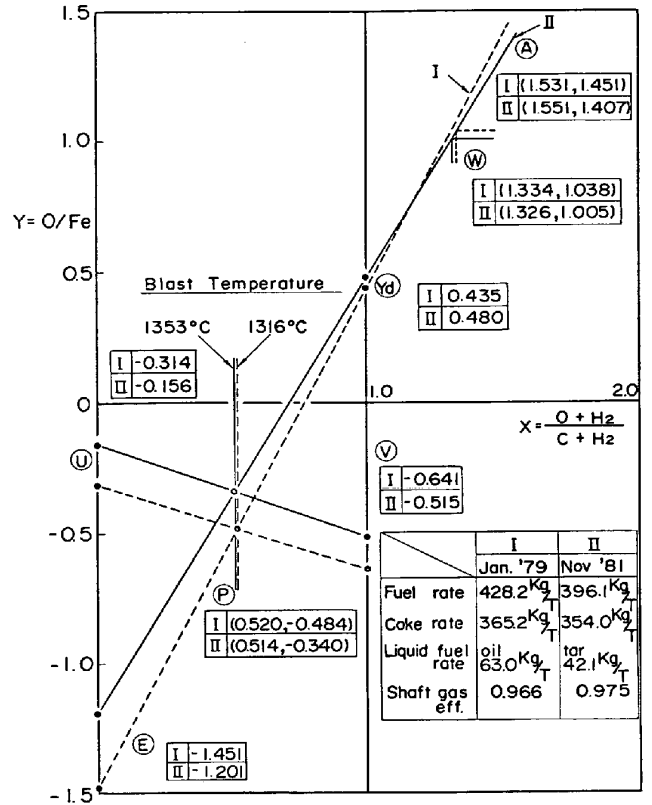


Fig. 2. Comparison of low fuel rate operation using RIST-diagram.

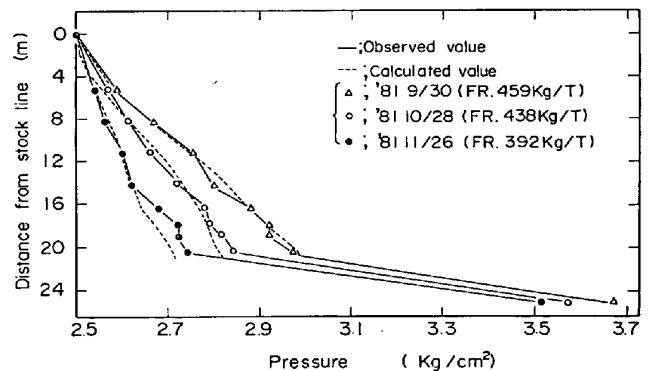


Fig. 3. Transition of the pressure distribution pattern.

上している。しかし、熱流比が過度に高くなると、シャフト上部の低温域が下方へ拡がり、有効間接還元域は、逆に狭まってくるため、η_{co} は悪化の方向に向かう。

一方、η_{co} は、焼結鉱の RI と明瞭に対応している。すなわち、図中に示す 11 月の旬間実績の推移からも明らかのように、今回の操業は、焼結鉱の被還元性の向上によつて、シャフト効率の低下なくかろうじて行われたことがわかる。

シャフト部の還元反応挙動を実測された炉内温度パターンに基づいて、3 界面未反応核モデル⁸⁾により検討した。計算にあたっては、JIS 法還元試験および多くの炉

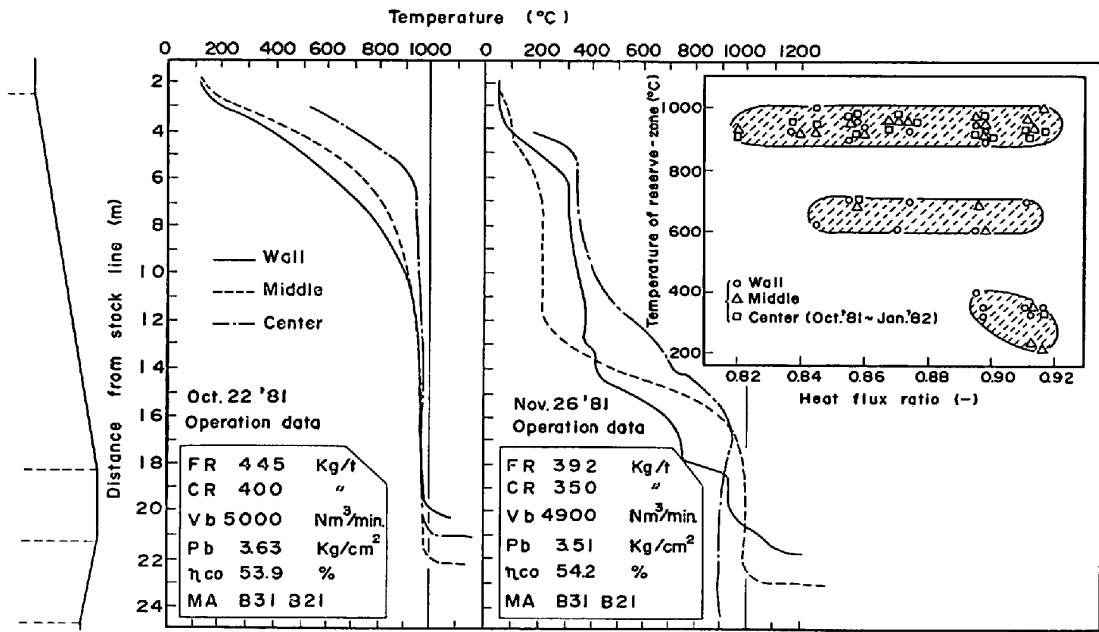


Fig. 4. Transition of the temperature distribution pattern.

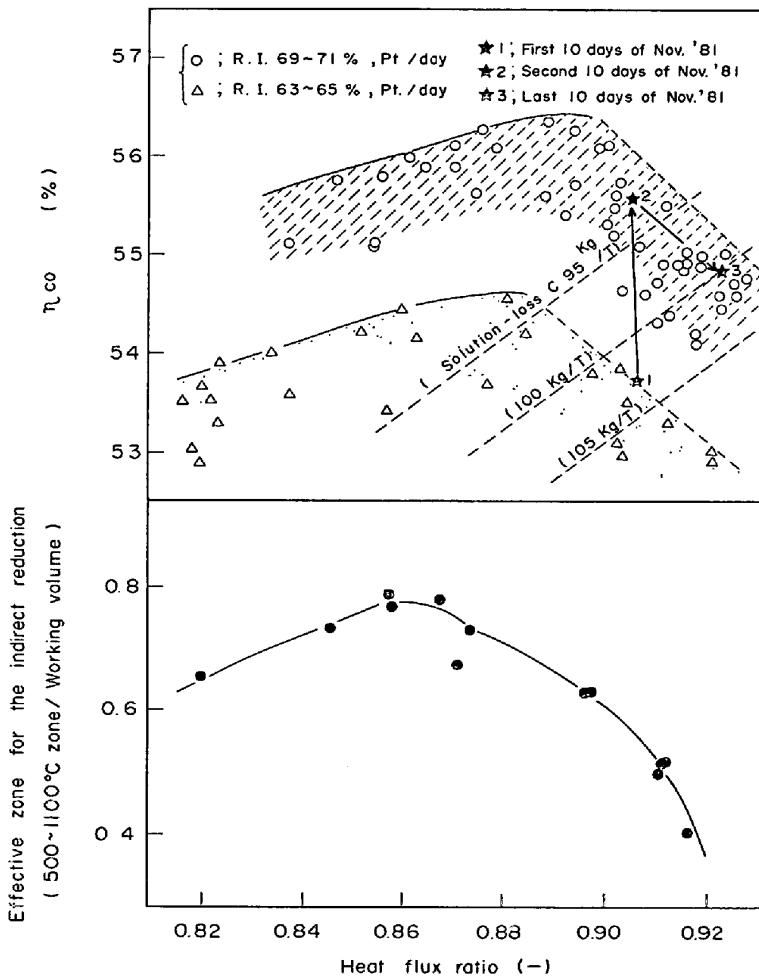


Fig. 5. Relation between η_{CO} , effective indirect reduction zone and heat flux ratio.

内測定結果の解析に基づき、Table 3に示す速度パラメータを用い、燃料比 452 kg/t, 445 kg/t には従来焼結

鉄の値を、392 kg/t には高被還元性焼結鉄の値を適用した。

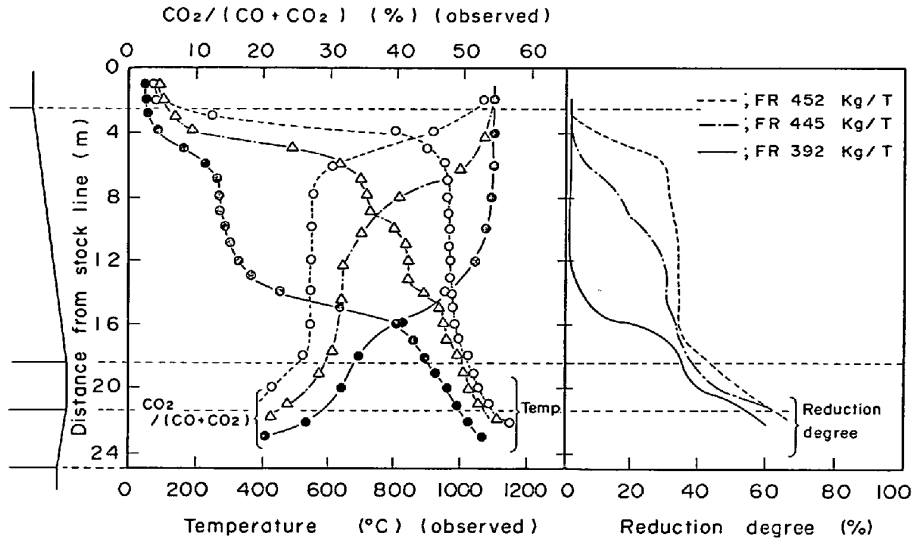


Fig. 6. Transition of observed temperature, gas composition and calculated reduction degree.

Table 3. Reduction rate parameter for calculation of reduction behavior

		For normal sinter	For high reducibility sinter
Chemical reaction rate constant	$k_{Fe_3O_4}^{CO}$ → FeO	$1.36 \times 10^5 \exp(-27400/RT)$	$1.86 \times 10^5 \exp(-27400/RT)$
	k_{FeO}^{CO} → Fe	$2.549 \times 10^4 \exp(-29910/RT)$	$3.536 \times 10^4 \exp(-29910/RT)$
Rabilins factor	ξ_{FeO}	0.17	0.17
	ξ_{Fe}	0.07	0.12

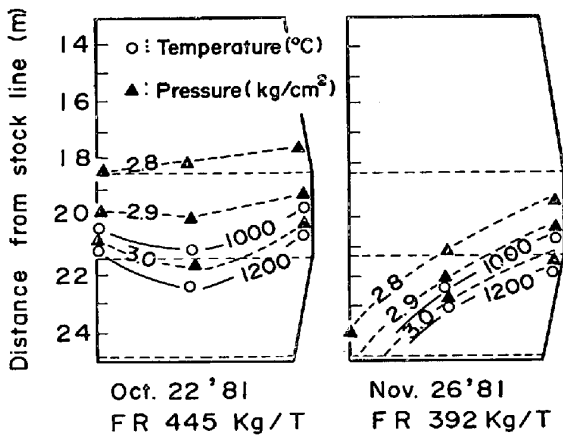


Fig. 7. Observed temperature and pressure distribution at lower part of the furnace.

計算結果を、実測のガス組成とともに Fig. 6 に示した。392 kg/t の低燃料比の場合、温度が第1 停滞から急激に上昇する範囲で、 Fe_2O_3 から Fe_3O_4 , FeO へと連続的に還元が進行し、さらに FeO/Fe の平衡ガス組成変化に従って還元が進み、1000°C で、60% 以上の還元率に達しているのが特徴的である。すなわち、低燃料比操業における鉱石の被還元特性としては、低温域において、 Fe_2O_3 から Fe_3O_4 , Fe_3O_4 から FeO の各還元が並行して進む性質と、 FeO から Fe への還元速度の双方が、重要な意味を持つと考えられる。

3.3 融着帯の形状と装入物降下の安定性

3.3.1 融着帯の形状

融着帯の位置、形状について、送り込み式垂直ゾンデ⁹⁾および TDR を用いた計測装置¹⁰⁾による実測を行った。その結果の一部を、Fig. 7, Fig. 8 に示す。

燃料比の低下に伴い、融着帯の位置は降下した。燃料比 420~430 kg/t 付近から、炉壁部の融着帯レベルの降下は止まったが、中心部は継続して降下し、ついには、検出端が炉芯上部に達しても、温度は 1000°C 付近で停滞した。また、Fig. 8 の測定例(燃料比 404 kg/t 時点)に示すように、TDR ケーブルは炉芯上端に達しても熔融波形(熔融に伴う連続的な短小化)は示さず、間欠的な断線のみが起こった。すなわち、炉芯内部の状況は不明であるが、燃料比が 400 kg/t 前後に達した時点では、融着帯は炉芯レベルまで降下し、炉芯上面に沿った径方向の中間付近から炉壁付近にかけて V 形の形状に変化した。Fig. 9 は、羽口に設置した輝度計のチャートを示すが、低燃料比時には、炉頂からの装入周期にほぼ一致するサイクリックな動きが認められ、鉱石の溶解位置が相当羽口に近づいていることを示唆している。さらに、次に述べる装入物の降下挙動も考えあわせると、この状態は、Fig. 10 のように、模式的に示されるものとする。

3.3.2 装入物降下の安定性

燃料比が 440~430 kg/t に低下した時点で、装入物の降下が、やや不安定となる現象が認められた。しかし、さらに燃料比が低下すると、スリップはほとんどなくなり、安定炉況が得られた。この経過を、融着帯レベルと炉芯上面との最短距離を指数として整理すると Fig. 11 が得られる。最もスリップの多い時期は、融着帯形状が、逆V形からW形を経てV形に移行する過渡期にあたる。この時の融着帯レベルの経時変化は、前述の Fig. 8 の燃料比 447 kg/t 時点の例に示すように、ケーブルの断線を伴う小さな変動が多く、低燃料比時に比べて不安定であった。すなわち、Fig. 10 に示すW形融着帯形

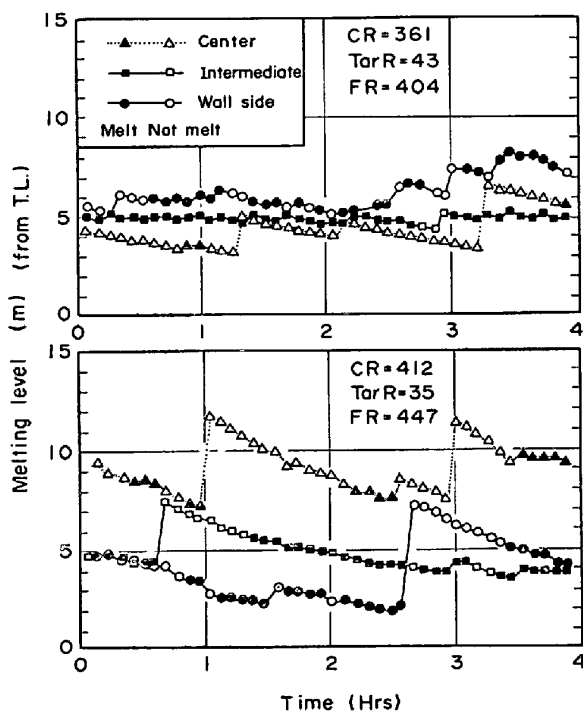


Fig. 8. Behavior of melting level measured by T.D.R. cohesive zone sensor.

状の場合、羽口燃焼帯からのガスが、中心と炉壁側の両方に流れる状態にあり、ガスの分配が変化しやすいが、V形となつた場合は、炉壁側からコークス層を通して順次中心方向へガスが流れることになり、変動は起こりにくいと考えられる。また、中心付近の鉱石類は、融着していないので、炉芯の上面をすべつて降下する過程でコークスとの混合も生じ、大きな融着ブロックを形成せずに燃焼帯直上で溶融するものと考えられ、この結果、安定な炉況につながつたものと推察される。

3.4 溶銑成分

燃料比の低下に際し、溶銑温度を低下させたこともあつて、溶銑中 Si および Mn 濃度は低下し、S濃度は上昇した。また、スラグ中 FeO 濃度が顕著に上昇した。この結果を、榎谷ら¹¹⁾の提案した実績分配比と平衡分配比の比 (L_x/L_x^0) とスラグ中 FeO 濃度の関係で Fig. 12 に示した。

スラグ中 FeO 濃度の上昇に伴つて、 L_S/L_S^0 、 L_{MN}/L_{MN}^0 は小さくなり、炉床での酸素分圧上昇の影響を強く受けていることがわかる。一方、 L_{Si}/L_{Si}^0 については、FeO 濃度と明瞭な対応を示さず、スラグ-メタル反応以外の反応、すなわち、ポッシュ部における SiO ガスを介しての溶銑への Si 移行が、溶融滴下領域の極端な縮小によつて抑制されたものと考えられる。

4. 低燃料比操業を制約する要因

試験操業からの知見に基づき、将来、さらに低い燃料比を得るために、あるいは長期的に安定な低燃料比操業を可能とするために注目すべき点について述べる。

今回、燃料比を低下させる上で実質的に制約となつた要因は、溶銑温度の低下および脱硫率の悪化に伴う製鋼作業上の問題である。このほか、低炉頂ガス温度時の水分凝縮に起因する設備トラブル、炉前作業負荷の増大等

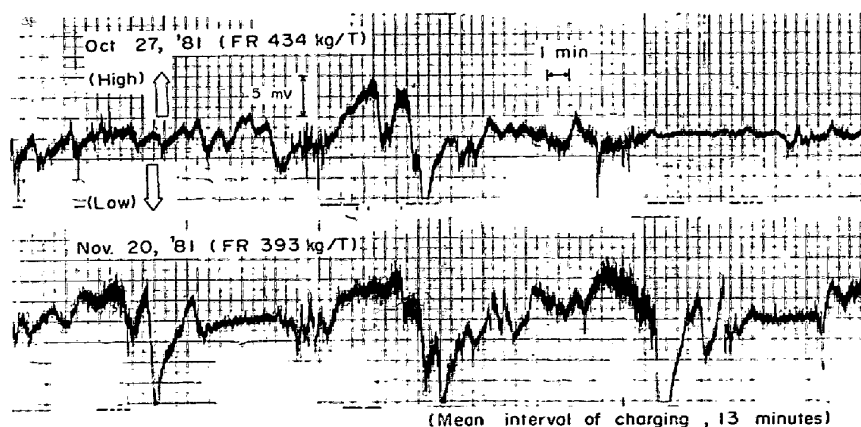


Fig. 9. Comparison of the results measured by the luminous meter at the tuyere.

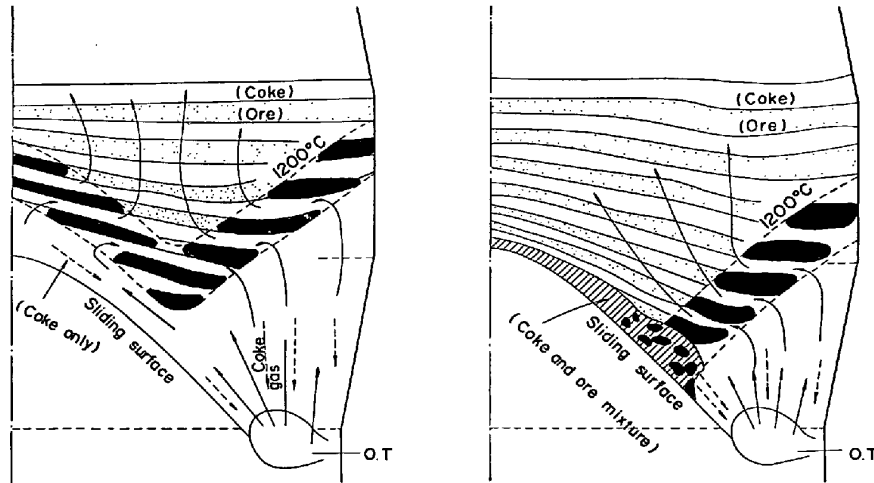


Fig. 10. Estimated structure in the furnace.

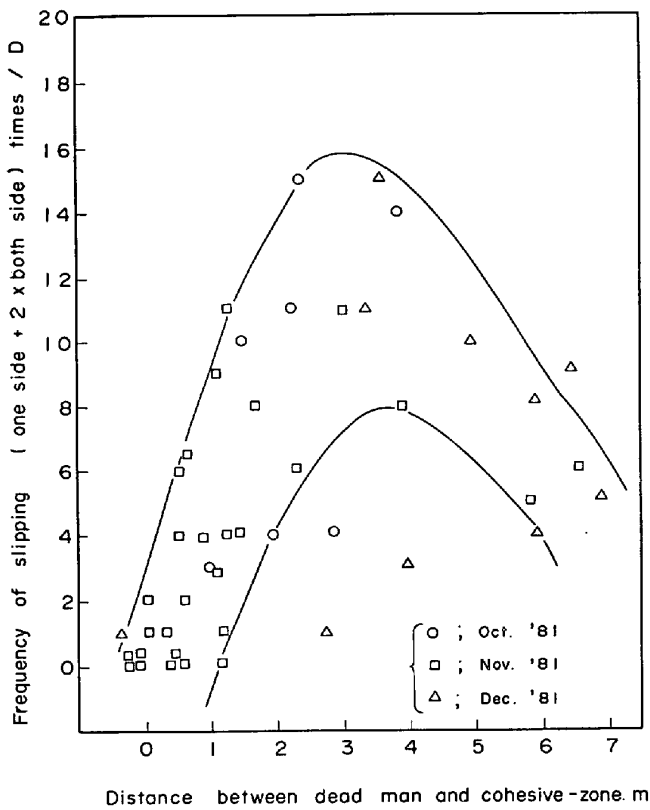


Fig. 11. Relation between frequency of slippings and melting-level.

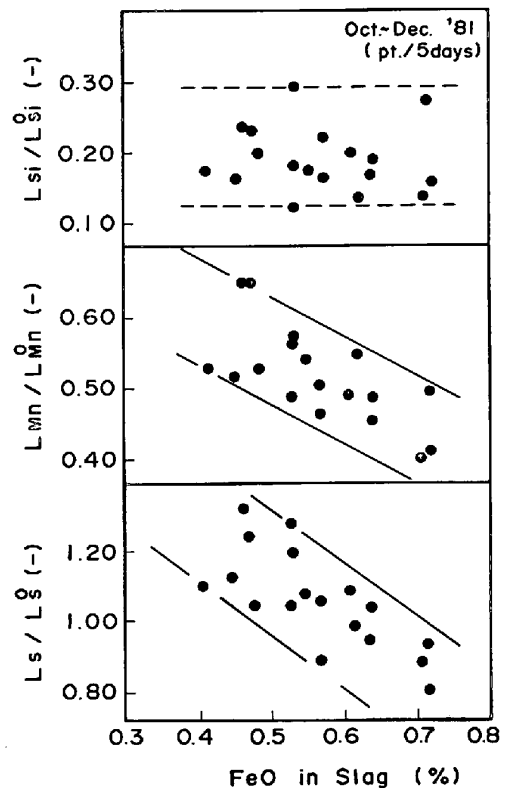


Fig. 12. Relation between the actual distribution ratio to the equilibrium of Si, Mn, S and FeO in slag.

Table 4. Essential hindrance and countermeasures for the futher low fuel rate.

Countermeasures	Essential hindrance	
	1. Reduction degree attained before the fusion	2. Melting ability for the cohesive-layer
Reducibility of ore Reactivity of coke Slag amount Flame temperature	1000 1000 1000 1000	1100 1100 1100 1100

が、長期的には問題化すると思われ、今後の改善が必要であろう。

一方、高炉内すなわち高炉プロセスの本質的な面を目を向けると、当初懸念された通気性については、原料の物理性状が今回並みに維持されるならば、炉内ガス流速の低下や、融着帯形状が安定なV形に保たれたことを考えると、重大な障害とはならないものと推定される。

しかし、熱流比の過度の上昇に伴って生ずる、Table

4 に示す要因は、将来、最も大きな制約となることが予想される。すなわち、第一に、鉱石の還元が遅滞し、炉床に未還元鉱石が持ちこされることであり、第二に、溶け落ちレベルが極端に低下して、羽口近傍での鉱石の溶解能力が限界を越えることである。これらは、いずれも高炉の安定操業を危うくするという点で重要な問題である。対策としては、特に、炉下部の短い高温領域において還元速度の大きな焼結鉄を製造する技術が必要であり、同時に、この部分を上昇するガスの還元ポテンシャルを上げるために、より低温で CO_2 と反応し、かつ十分な強度を有するコークスの製造が望まれる。

羽口近傍での溶解能力を改善するためには、スラグ量の低下、および熱交換の強度因子としての羽口先フレーム温度を何らかの手段によつて極力上昇させ、放射伝熱の効果を期待することにならう。

5. 結 言

高炉の燃料比極限時における操業上の諸問題、および炉内諸現象の解明を目的として、日本鋼管(株)福山第3高炉(内容積; 3 223 m^3 , 火入れ; 昭和 50 年 1 月)において試験操業を実施し、以下の結果を得た。

1) 昭和 56 年 11 月の平均燃料比として、396 kg/t を得た。その燃料比低下要因は、主として炉下部熱収支の改善によるものであつた。

2) 垂直プローブによる測定結果から、燃料比の低下とともに 1000°C 前後の高温サーマルリザーブゾーンが消滅し、低温域でのリザーブゾーンが出現する傾向、およびシャフト部での還元遅滞現象が認められた。

3) 垂直プローブ、TDR システムおよび羽口輝度計による測定結果から、軟化融着帯の形状は、燃料比の低下とともに、W形からV形へ移行し、その位置は羽口レースウェイ方向へ近づいていくことがわかつた。

4) 高 Ore/Coke で、かつフラット型のガス流分布

であつたにもかかわらず、炉内圧損は緩和され荷下りは安定化した。これは、炉内温度の低下によるガス流速の低下、および融着帯形状が安定なV形に維持されたことで、上昇ガス流の安定化がはかられたためと推察された。

5) 溶鉄中 Si の低下は、主として、溶け落ちレベルの低下にともなう移行時間の短縮の効果であると推定された。また、Mn の低下および S の上昇は、スラグ中 FeO の増加に対応するものであり、スラグ-メタル反応の平衡に支配されている徴候が認められた。

6) 将来、さらに低い燃料比を追求する上で、本質的に問題となる点は、炉下部での短い高温帯における鉱石の還元特性、および羽口近傍における鉱石の溶解であろうと考えられる。

文 献

- 1) 奥村和男, 河合隆成, 丸島弘也, 高橋洋光, 栗原淳作: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 1956
- 2) 研野雄二, 楯岡正毅, 須賀田正泰, 山口一成, 久米正一, 山口一良, 安倍 勲: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 1553
- 3) 飯塚元彦, 岸本純幸, 渋谷悌二, 福島 勤: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 1966
- 4) 加瀬正司, 須賀田正泰, 奥田康介, 梅津善徳, 天野繁, 小野 創, 水内千明: 鉄と鋼, 67 (1981), S 82
- 5) 須沢昭和, 奥野嘉雄, 今井 徹, 出野 正, 鈴木清策, 近松栄二: 鉄と鋼, 67 (1981), S 84
- 6) 梶川脩二, 堤 一夫, 田中邦男, 小松 修, 浜屋正司, 北島一嗣, 川田 仁: 鉄と鋼, 68 (1982), S 57
- 7) 大野陽太郎, 山田 裕, 近藤国弘, 丹羽康夫, 炭竈隆志, 木村康一: 鉄と鋼, 67 (1981), S 71
- 8) 村山武昭, 小野陽一, 川合保治: 鉄と鋼, 63 (1977), p. 1227
- 9) 梶川脩二, 脇元一政, 新谷一憲, 石井考治: 鉄と鋼, 66 (1980), S 38
- 10) 福島 勤, 斎藤信一, 小林 隆, 渋谷悌二, 古川武, 山口 篤: 鉄と鋼, 69 (1981), S 69
- 11) 槌谷暢男, 田口整司, 高田至康, 岡部俠児: 鉄と鋼, 63 (1977), p. 1791