

千葉第6高炉における低燃料比操業
 —処理鉱比100%の操業試験—
 Low Fuel Rate Operation of Blast Furnace
 — Test Operation with 100% Agglomerated Ore —

栗原 淳 作*
 Junsaku Kurihara

橋爪 繁 幸**
 Shigeyuki Hashizume

高橋 洋 光***
 Hiromitsu Takahashi

奥村 和 男****
 Kazuo Okumura

高橋 博 保*****
 Hiroyasu Takahashi

丸島 弘 也*****
 Hironari Marushima

Synopsis:

No. 6 blast furnace at Chiba Works of Kawasaki Steel Corp. started its operation as Japan's first large blast furnace equipped with Bell-less top charging facility.

The Bell-less top charging technique has been completed on the basis of fundamental experiments and operational experience with No. 2 blast furnace.

On the other hand, test operation with a 100% burden of agglomerated ore(sinter and pellets) was carried out in July 1979 for further operational stabilization. As a result, No. 6 blast furnace set a world record of 429kg/t in low fuel rate as a large blast furnace with Bell-less top.

1. 緒 言

高炉操業技術レベルの指標である高炉の燃料比は、炉内現象に対応した原料性状の確保、ムーバブルアーマ、ベルレス装入装置の採用による適正装入物分布の制御、この制御を可能にする各種センサー（炉頂ITV、測温ゾンデ、プロフィール計など）の採用、羽口破損の減少により、めざましい低下を示している。

装入原料では、処理鉱（とくに焼結鉱）の増加による高炉操業の改善効果が大きいため、高炉各社は高処理鉱比による操業指向の傾向にある。当社においてもこの効果を確認し、今後の原料計画の方向を決定する必要がある。

現状の鉱石需給バランスからは、処理鉱比は80～85%であるが、オーストラリア系鉱山のストライキによる塊鉱需給がタイトであったことおよびフィリピン焼結の備蓄があったことなどの理由から、千葉第6高炉で54年7月に、100%の処理鉱比で約1箇月間試験操業を行った。これ以前に、大型高炉でのベルレス装入装置の制御上の問題もほぼ解決しており、両者相まって、操業の安定と同時に大幅な燃料比の低下(429kg/t)を達成した。この成績はベルレス装入装置を備えた大型高炉では新記録であり、ベルレス装入装置の使用技術はほぼ確立できたといえる。本報では、この試験操業を通して得られた技術的成果について報告する。

* 千葉製鉄所製鉄部部長
 *** 千葉製鉄所製鉄部製鉄課課長
 ***** 千葉製鉄所製鉄部原料処理課掛長
 (昭和55年1月16日原稿受付)

** 千葉製鉄所製鉄部製鉄技術室主任(副部長待遇)
 **** 千葉製鉄所製鉄部製鉄課掛長
 ***** 千葉製鉄所製鉄部製鉄技術室主任(掛長待遇)

2. 試験の背景と計画

近年の高炉技術の進歩には著しいものがあるが、その基礎技術として自溶性焼結鉱、ペレットなどの処理鉱の高配合があげられる。なかんずく、自溶性焼結鉱の使用が高炉の燃料比、通気性の改善に有効である。本実験は処理鉱比の増加が高炉燃料比に与える効果を確かめることであった。この試験は当社の長期プランに基づいて実施された。

2.1 原料の需給と配合

処理鉱比は77%から(焼結比75%、ペレット比2%)、100%までを4段階に分けて実験した。焼結鉱の配合増量は主として、対応の容易なフィリピン焼結鉱(以下PSと記す)で実施した。このためPSの生産、搬送、荷上げなどの在庫管理を十分行い、塩基度は石灰石装入量が0となるように調整した。これにより高炉スラグの塩基度はやや高目となった。コークスについては、貯骸の使用量を5%以下にした。

2.2 高炉操業

通常のGO-STOPシステムの指標に基づく操業管理に加えてシャフトガスサンプラーによる、ガス成分分布の管理基準を定め、主として装入パターン変更のアクションによりシャフトの半径方向のガス成分分布のうち、中心部のCOガス利用率 η_{CO} を22~36%に、炉壁部の η_{CO} を44~58%に管理した。なお、この実験に基づいて中心部および炉壁部の η_{CO} 調整のための装入パターンを標準化した。

3. 高炉操業結果

3.1 処理鉱比変更に伴う操業結果

処理鉱比は昭和54年5月の77.1%より徐々に上昇させ7月には100%とした。8月より処理鉱比を減じ通常レベルの80%とした。データの解析は各処理鉱比レベルに応じて七つの期間に分けた。Table 1に各期間ごとの処理鉱比と処理鉱の配合割合を示した。処理鉱の増加は主として、PSおよびアルガロポペレットで行った。Table 2に使用した処理鉱の代表的な品質を示した。焼結鉱の塩基度は、処理鉱比の増加とともに低下させた(第4焼結1.62→1.42, PS 1.55→1.47)。塩基度の低下に伴う焼結鉱強度の低下を防止するために、生産率を下げ、焼結時間を延長させる操業を行った。この結果、焼結鉱のシャッタ強度の低下は抑えられた。さらに、第4焼結では、高炉のスラグ比の

Table 2 Qualities of sinter and pellets

	No. 4 Sinter	PS	Algarrobo pellets
T.Fe %	56.9	58.03	66.04
SiO ₂ %	5.66	5.85	1.81
CaO %	8.07	8.80	2.62
Basicity	1.42	1.50	1.45
MgO	2.24	0.60	0.36
FeO	5.78	5.17	0.66
SI %	90.3	93.0	—
RDI %	38.1	34.7	—
grain size (mm)	12.1	10.9	12.4

Table 1 Agglomerated ore ratio of burden

Period	I		II	III	IV	V	VI	VII
	May 25 ~ 1	June 2 ~ 8	June 9 ~ 24	July 25 ~ 2	July 3 ~ 31	Aug. 25 ~ 30	Sept. 4 ~ 10	
Sinter + Pellets (%)	77.1	86.1	92.6	97.4	100.0	84.6	89.9	
Philippine sinter (%)	26.7	38.3	47.9	48.9	54.6	43.4	50.9	
No. 4 sinter (%)	48.1	43.8	38.0	40.8	37.7	40.1	37.9	
Algarrobo pellets (%)	2.3	4.0	6.7	7.7	7.7	1.1	1.1	

低下を図るために、焼結鉱中の SiO_2 を 6.0% から 5.5% に減少させた。これにより RDI (還元崩壊指数) は 42% 程度まで上昇したが、高炉操業上大きな支障はなかった。この間の RDI への焼結スラグ成分の影響は $\text{CaO} + \text{SiO}_2$ の $\pm 1\%$ に対して RDI は $\pm 2.1\%$ であった。Table 3 に各期間の主な操業因子を示し、Fig. 1 に実験期間中の旬間平均値の推移を示した。実験期間中の炉況は非常に安定し生産量は 10 000t/d 以上を保った。処理鉱比の増加と併行して、送風温度の上昇、Si の低下などの対策を実施し、燃料比の低下を図った。送風温度については混合冷風弁を全閉にすることおよび燃料比低下による風量原単位の低下により同一の熱風がドーム温度 (1 430°C) で、1 335°C を達成した。

操業の安定に伴い、出鉄口間の成分、温度の差が減少し、低 Si、低 S、および低い溶銑温度での操業が可能になった。

3-2 装入物分布制御

衆知のように¹⁻³⁾、ベルレス装入装置は装入物分布の制御手段としての自由度が大きいいため、その合理的な活用方法を確立するのにかなりの期間を要した。ベルレス装入装置の設備、制御の概要については千葉第2高炉について、本技報で述べた⁴⁾。第6高炉の場合、炉頂バンカー容量を 85m³ と大きくとり、一つのバンカー分で1チャージのコークスあるいは鉱石を構成する点が第2高炉と異なっている。1チャージ分の鉱石、コークスはおのお

Table 3 Operating results of Chiba No.6 blast furnace

Item	Unit	I		II	III	IV	V	VI	VII
		May 25 ~ 1	June 2 ~ 8	June 9 ~ 24	July 25 ~ 2	July 3 ~ 31	Aug. 25 ~ 30	Sept. 4 ~ 10	
Period	d	8	7	16	9	29	6	7	
Output	t/d	9 940	10 090	9 888	10 114	10 345	10 022	10 087	
Agglomerated ore ratio	%	77.1	86.1	92.6	97.4	100.0	84.6	89.9	
No. 4 Sinter	%	48.1	43.9	38.0	40.8	37.7	40.1	37.9	
Philippine sinter	%	26.7	38.3	47.9	48.9	54.6	43.4	50.9	
Pellets	%	2.3	4.0	6.7	7.7	7.7	1.1	1.1	
Coke rate	kg/t·p	397.5	393.2	394.8	392.3	381.4	404.1	401.2	
Oil rate	kg/t·p	47.2	49.6	49.6	48.5	46.0	39.2	39.6	
Fuel rate	kg/t·p	444.7	442.8	444.4	440.8	427.4	443.3	440.8	
Slag rate	kg/t·p	297	311	309	313	312	313	317	
Blast vol. unit	Nm ³ /t·p	998	992	987	974	956	976	976	
Blast vol.	Nm ³ /min	6 908	6 954	6 824	6 842	6 873	6 792	6 834	
Blast temp.	°C	1 290	1 295	1 307	1 322	1 325	1 314	1 328	
Top gas CO	%	20.9	20.9	20.7	20.8	20.4	20.7	20.6	
CO ₂	%	22.3	22.2	22.8	22.7	23.2	23.2	23.3	
η_{CO}	%	51.7	51.5	52.2	52.1	53.2	52.8	53.1	
Hot metal temp.	°C	1 515	1 513	1 511	1 509	1 506	1 507	1 500	
[Si]	%	0.36	0.33	0.30	0.29	0.30	0.35	0.32	
σ_{Si}	%	0.08	0.09	0.08	0.09	0.09	0.10	0.10	
O/C		4.06	4.12	4.13	4.15	4.19	4.01	4.10	
Stoppage	—	0	0	2 ^H 47 ^M	0	0	0	0	

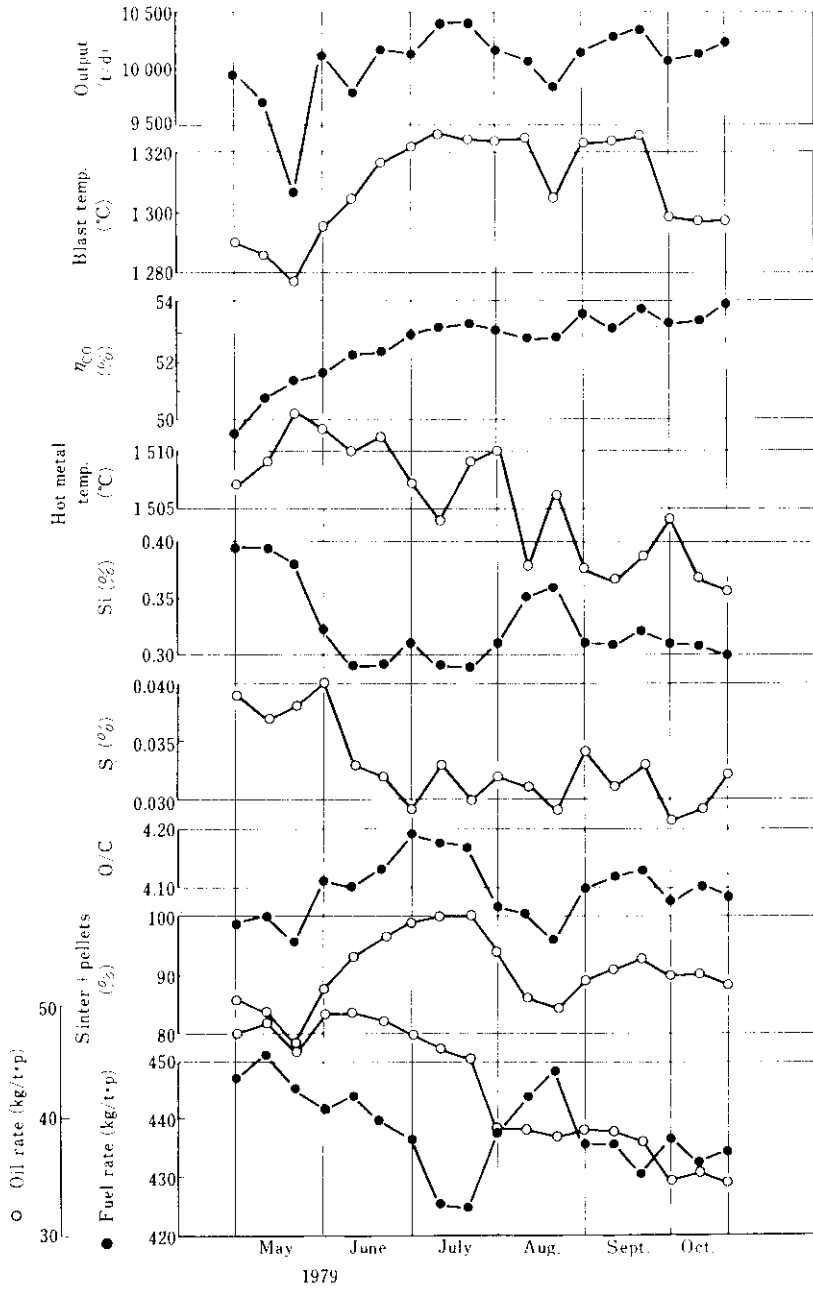


Fig. 1 Operational data of No. 6 blast furnace

の旋回シュート 13 旋回で投入するよう制御している。装入物分布制御は、各旋回ごとのシュートの傾動角を設定する装入パターンの変更により行われる。この装入パターンは、過去 2 年間の操業経験、各種のモデルテストおよび実機テストなどから標準原料に対しての最適パターンを選択している。日常の管理は装入原料性状の変化に対してシャフ

ト、炉頂の半径方向のガス分布（成分、温度）、炉頂ガスの利用率、炉壁冷却のステープへの熱負荷などを目標値になるように微調整を行っている。この期間での代表的な装入パターンの例を Fig. 2 に示す。図は各ポジションにおける、コークスと鉄石の旋回数を示す。これらのパターンからわかるように炉壁側のコークス、鉄石の装入パターン

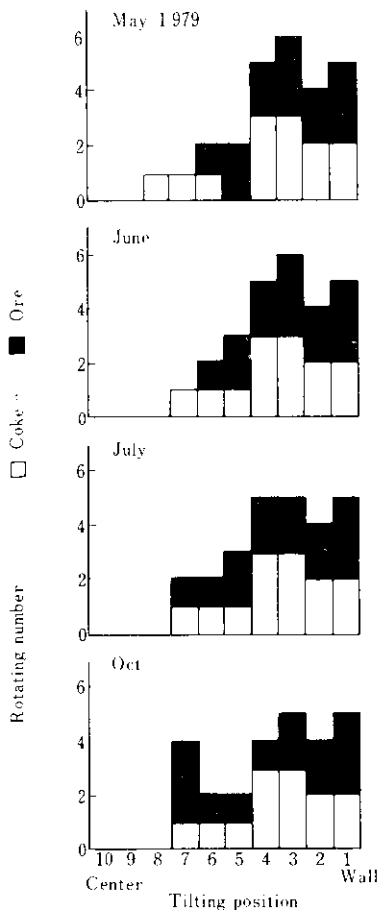


Fig. 2 Bell less charging pattern

はほとんど変化がなく、中間から中心部にかけての変更が行われた。この結果は Fig. 3 に示したように、中間部から中心部へかけてのガス利用率が向上している。装入物分布の基本的な考え方は、中心部での通気を確保し、中心のごく狭い部分以

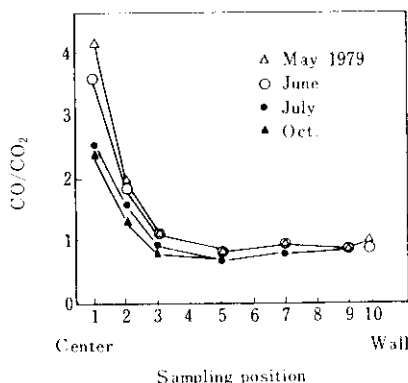


Fig. 3 Gas distribution in the shaft

外では、ガス利用率をできるだけ上げる分布とすることである。とくに周辺部は適度にガス流を押え、炉体熱損失を減少させるとともに羽口破損を防止する。また周辺の Ore/Coke を調整し、融着帯根部の肥大、熱不足を防止し、溶銑成分の安定と羽口座屈の防止を図る。分布の管理は上記の考え方にに基づき、シャフトガス分析値の指数に制限値を設けて、この管理値内に入る様ベルレス装入パターンを変更している。この結果火入れ初期に経験した羽口胴部の破損や、羽口の座屈現象は皆無になった。

火入れ以来問題となっている炉頂のバンカーの振替に伴うガス利用率の変動については、休風時に原因調査を行った結果、炉頂バンカー内の原料堆積状態の差によることをつかんだ。現在モデルテストで対策の検討を行っている。この現象の是正にバンカーの振替スケジュールの変更およびバンカー内ストーンボックスの改造を行った。分布制御の標準化に際しては、主として鉱石の装入パターンを変更する方式とし、周辺流志向、中心流志向のいくつかの装入パターンを設定し、シャフトガス分布の指数の変化に応じてこれら用意されたいくつかの装入パターンのうち最適のものを選択している。この方式の完成には、今後の試行が必要である。

3.3 ガス利用率に及ぼす効果

一般に処理鉱の被還元性は塊鉱石に比べ良好で、溶融滴下開始温度も高い⁵⁾。Fig. 4 は処理鉱比と CO ガス利用率の関係を示す。処理鉱の増加とともにガス利用率は向上している。これは装入物の被還元性の向上および溶け落ち温度の上昇により融着帯レベルが低下して塊状帯の体積が増加したものといえる。この結果から、高炉装入物の性状が操業改善に及ぼす効果の大きいことがわかる。

3.4 通気性に及ぼす効果

Fig. 5 に処理鉱比と通気抵抗指数 F_2 の関係を示した。通気抵抗は処理鉱比の増加とともに減少している。図からわかるように VI, VII 期は他の期と傾向を異にしている。シャフト圧力測定の結果では、とくに炉下部での通気性の改善が著しい。これらは装入物分布改善の効果によるものと考えられる。

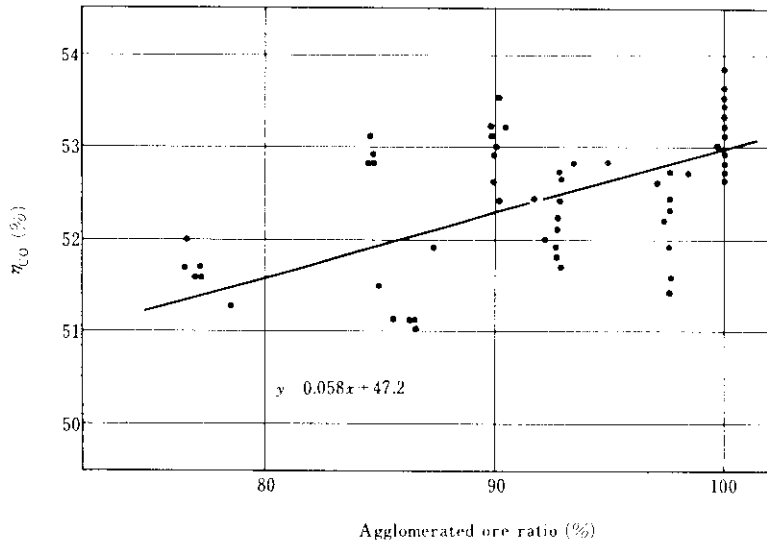


Fig. 4 Relation between agglomerated ore ratio and η_{CO}

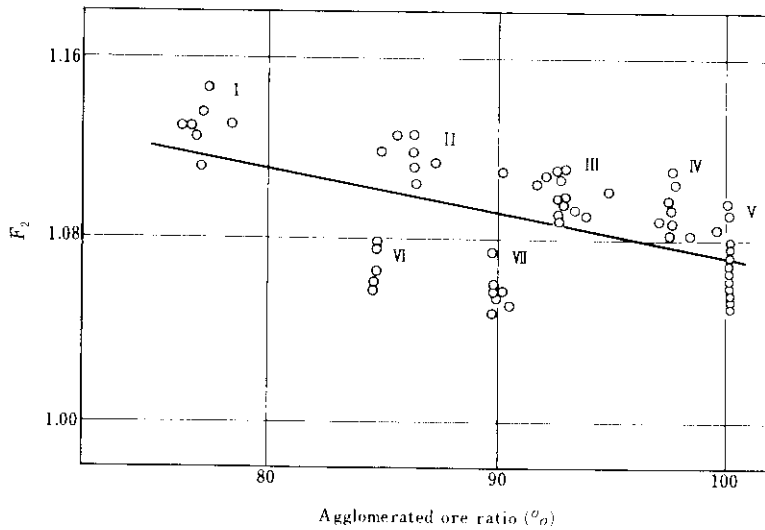


Fig. 5 Relation between agglomerated ore ratio and permeability resistance index F_2

処理鉱の多量使用に伴い、通気抵抗が減少することにより、高炉操業のいっそうの安定が得られる。

4. 考 察

4.1 炉内状況の推定

処理鉱比の変更に伴う炉内状況の変化を、高炉を多重同心円に分割して、物質、エネルギー balan

スに基づくモデルを作成し推定した⁶⁾。このモデルにより炉内の温度分布(軟化融着帯形状)、半径方向のO/C、風量分布が求められる。Fig. 6はこの解析の代表例である。軟化融着帯を1250~1400°Cとすれば、処理鉱比の増加により、このレベルが大幅に低下していることがわかる。融着帯の頂層のレベルは変わっていないが、炉中間部の塊状帯の体積が大幅に増加している。この結果がガス利用率の上昇の大きな原因である。また、圧損の減少、

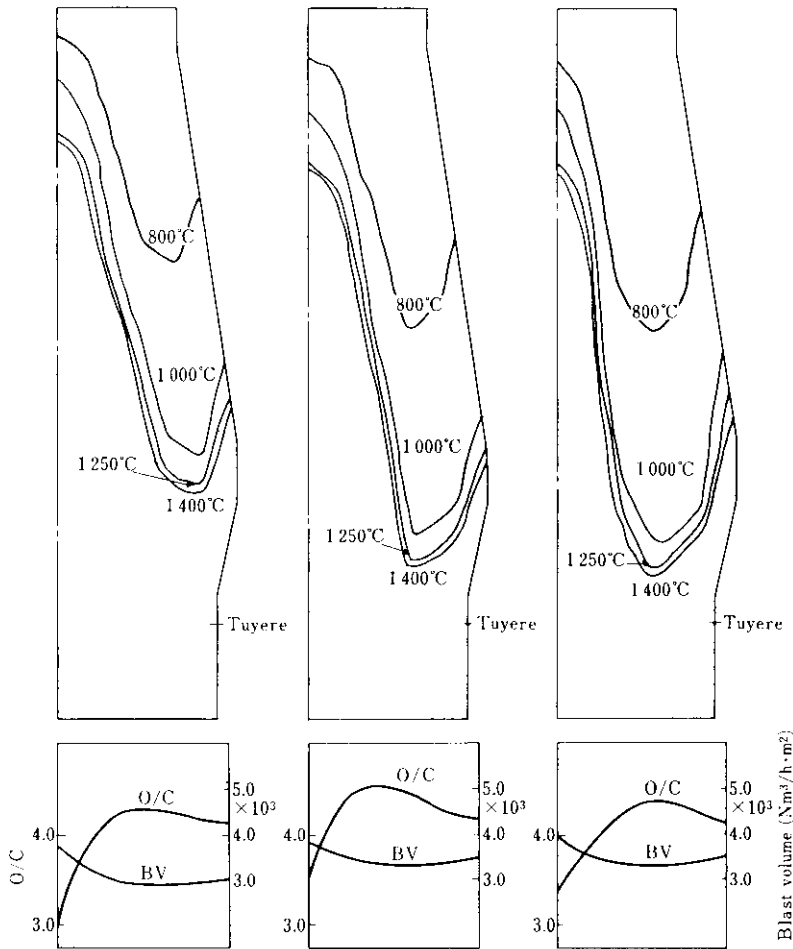


Fig. 6 Distribution of blast volume, ore/coke and temperature in the shaft

低 Si 化などの現象も説明できる。

この傾向は処理鉱比を減じたVI, VII期も同様であり、装入物分布制御により処理鉱 100% 時と同じ炉内温度プロフィールを達成できた。Fig. 7 は RIST 線図による解析結果を模式的に示したものである。ガス利用率の向上、熱損失の減少、銑鉄成分還元所要熱量の減少、送風原単位の減少など顕著である。直接還元率はやや増加している。

4.2 燃料比低減効果

Fig. 8 に処理鉱比と補正燃料比の関係を示す。このテスト期間中、処理鉱比のみでなく、送風温度などの他の因子の変更も行っているのので、これらを補正した。ガス利用率の向上に対しては、処理鉱比増による装入物被還元性向上の効果と、装

入物分布制御による効果が重ね合っているが、これらの効果の分離は困難である。回帰分析では、処理鉱比 1% 増加により、約 0.54kg/t の燃料比の低下となった。また 1977 年 8 月から 1979 年 9 月のデータから、燃料比と送風原単位の間には (1) 式の関係がある。

$$\begin{aligned} \text{送風原単位 [Nm}^3\text{/t]} &= 3.264 \\ &\times \text{燃料比 [kg/t]} - 451.6 \quad \dots\dots (1) \end{aligned}$$

炉頂から発生する B ガス原単位とは (2) 式の関係が得られた。

$$\begin{aligned} \text{B ガス原単位 [kcal/t]} \\ &= (4.835 \times \text{燃料比} - 1120) \times 10^3 \quad \dots\dots (2) \end{aligned}$$

熱風炉の熱量原単位は

$$\begin{aligned} \text{熱風炉熱量原単位 [kcal/t]} \\ &= (1.355 \times \text{燃料比} - 151.7) \times 10^3 \quad \dots\dots (3) \end{aligned}$$

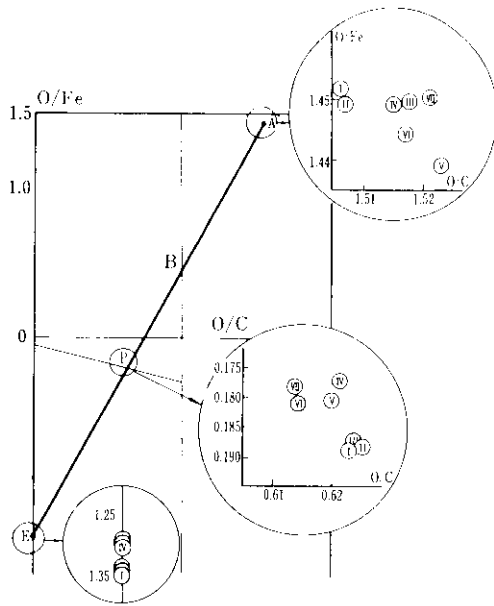


Fig. 7 Change of operating conditions of the periods on Rist diagram

となる。これらの関係を用いて、処理鋳比増加時のエネルギー比較を行った。この結果エネルギー消費ではほとんど差がないことがわかった。

4.3 高炉操業の安定効果

装入物の品質の安定、出鉄作業の安定などの複

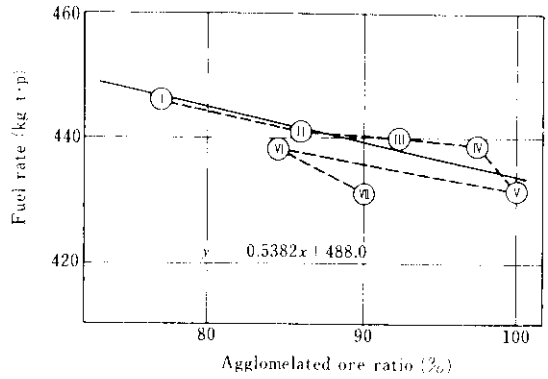


Fig. 8 Relation between agglomerated ore ratio and fuel rate

合効果により、テスト期間中のか況は好調であった。前述したように、装入物分布制御による羽口の保護および羽口の構造改善の複合効果により、この間の羽口破損による休風は皆無であった。この間の装入物降下、風圧の状況を Fig. 9 に示した。スリップ、棚の発生はなく、風圧も非常に安定している。この結果、溶銑成分のバラツキの減少、[Si] レベルの低下が得られた。第6高炉は第3製鋼の底吹き転炉と直結しているが、溶銑成分の安定は製鋼操業にも多大な効果をもたらした。

4.4 処理鋳比増加の評価

Fig. 10 に処理鋳比増加の効果をフロー図で示した。

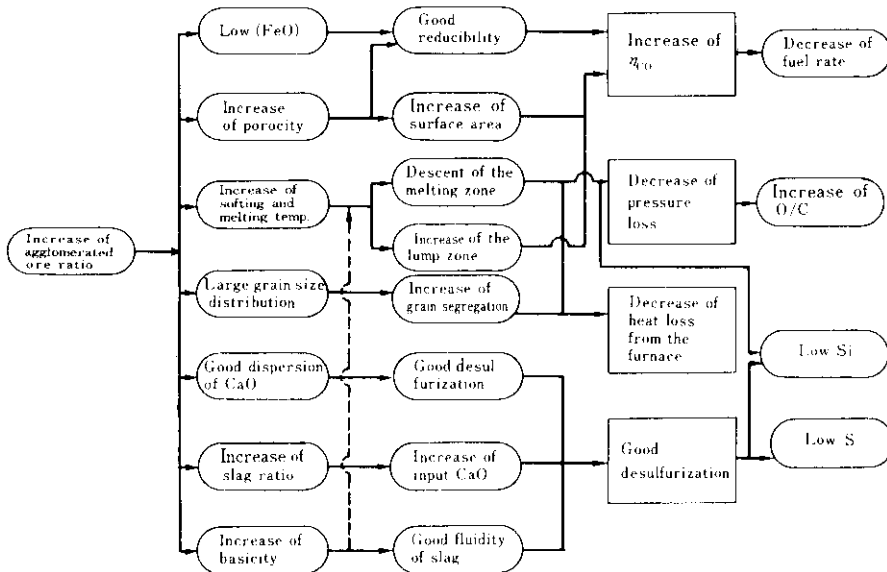


Fig. 10 Effect of increase of agglomerated ore ratio

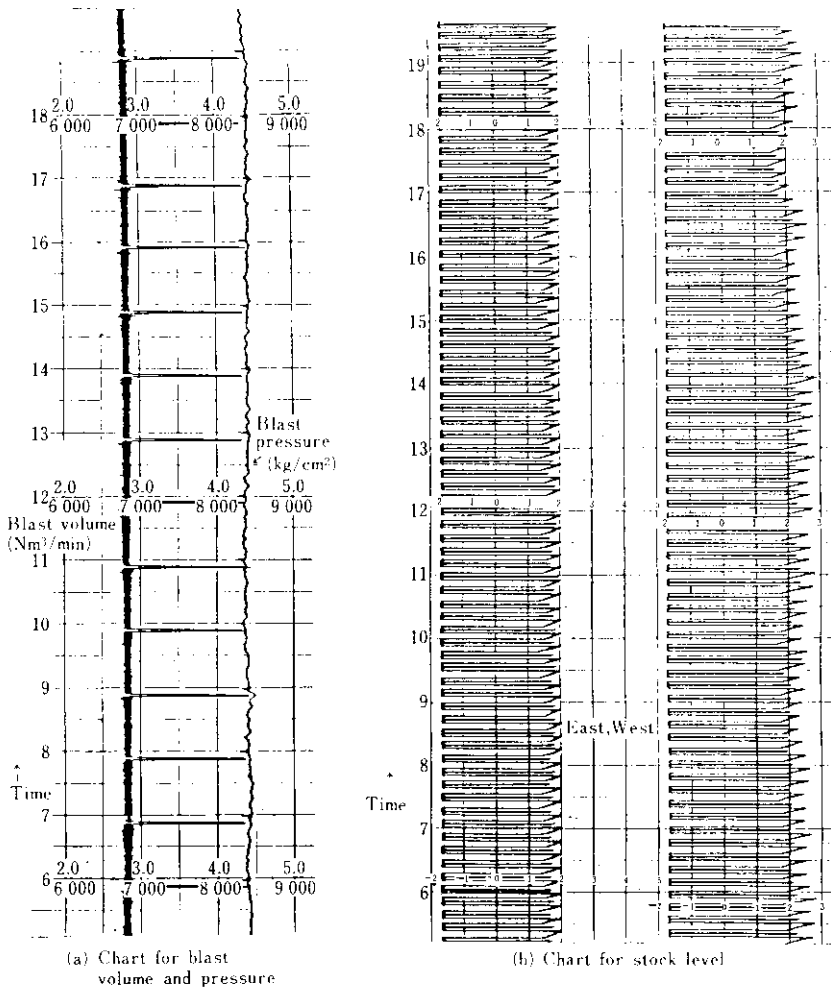


Fig. 9 Blast furnace operating condition

焼結鉱の各性状の改善はいずれも操業改善につながっており、操業者にとっては有効な手段である。この中には示されていないが、装入物の均質化、変動の防止も安定操業の大きな一因である。一方処理鉱比増加の経済的評価については、石油価格の高騰により高炉発生ガスの評価が高くなり、この結果、高炉の燃料比低減、すなわち銑鉄コストの低減となるとは言い難い。とくに塊鉱石を積極的に破碎して粉鉱とし、焼結鉱を製造する場合の効果を見出すのは困難である。

5. 結 言

国内初の大型のベルレス装入装置を備えた高炉

として稼動した千葉第6高炉は、稼動以来2年余の操業を通じて、制御方法の改善を重ねベルレス装入装置の使用技術を確立した。今回、高炉装入物中に占める処理鉱比の効果を明らかにするため、処理鉱比100%の操業を昭和54年7月に実施した。この結果ベルレス装入装置を備えた大型高炉で、燃料比429kg/tの新記録を達成した。処理鉱比増加の効果は、1%あたり燃料比の低下0.54kg/tとなった。

参 考 文 献

- 1) J. B. Orr and E. Legille: Consisting Iron proceedings of a Technical Meeting, (1975), 52~57
〔The Metals Soc.〕
- 2) G. Heynert and E. Legille: "Developments in Ironmaking Practice", (1973), 109~130, London,
〔The Iron and Steel Institute〕
- 3) G. Heynert, K. H. Peters and G. Ringkloff: Stahl und Eisen, 93 (1973) 12, 505
- 4) 栗原、高橋ほか：千葉製鉄所第2高炉におけるヘルレス装入装置を活用した操業方法、川崎製鉄技報, 11
(1979) 3, 103
- 5) 谷、山口：高炉装入物の熔融滴下について、鉄と鋼, 65 (1979) 5, 29~38
- 6) 板谷ほか：高炉内の温度、装入物降下速度およびO/C分布の推定、鉄と鋼, 65 (1979) 11, 50