

新しい技術



UDC 669.162.267.4 : 669.162.263.43

# 高炉の低燃料比操業技術

栗 原 淳 作\*

## Lower Fuel Rate Operation of Blast Furnace

Junsaku KURIHARA

### 1. 結 言

鉄鋼業の消費エネルギーはわが国の総エネルギー消費量の15~16%と莫大な量であり、鉄鋼製品のコストへの影響は大きい。そのため省エネルギー、省資源は従来からの重要課題であるとともに1973年の石油危機以降はその重要度を増している。鉄鋼業のシンボルと言われる高炉を有する製鉄部門は一貫製鉄所全消費エネルギーの70~80%を占めており、その大部分は高炉燃料である。

高炉燃料比の低減は高炉操業技術における最大の目標であり、高炉技術の発展の歴史はまさに燃料比低減の歴史とも言われる。当社はこの燃料比低減をはかるにあたり新鋭設備の建設が困難な情勢下より、従来より蓄積された各種技術の結集化をはかるとともに、原料性状の改善、装入物分布制御の確立、炉況安定化システムの開発により低燃料比操業の達成に努めた。その結果千葉第6高炉において大幅な燃料比の低減を達成した。以下その概況を述べる。

### 2. 製鉄技術の進歩と燃料比の低減

1950年以降、高炉操業技術は著しい発展をとげ大幅な燃料比の低減を達成し、製鉄コストの低下をはかつて来

た<sup>1)</sup>。この進歩の過程を3つのステップに分け主な開発技術とそのねらいを表1に示す。1950年代は自溶性焼結鉱の開発に代表される原料性状の改善により炉内通気性の確保が指向された。1960年代は設備の大型化をベースとし、複合送風、高圧操業技術の確立がはかられた。また1970年代は60年代に引き続き設備の大型化が進むなかで装入物分布制御の改善によるガス利用率の向上が指向されている。

近時に至り、経済低成長化を反映して高炉設備能力の余裕より炉内の解体調査等が実施され、従来ブラックボックスと言われた炉内の状況が解明され始めた。その結果あらためて原料性状および装入物分布の重要性が認識され、原料性状の改善、装入物分布制御の確立が強く指向されるに至った。

### 3. 高炉燃料比低減

低燃料比は炉況の安定が維持されている操業下において、ガス利用率の向上、炉体熱損失の低減、出熱の減少等を実現することにより達成される。その具体的な手段は図2に示すごとく種々考えられるが、千葉第6高炉(4500m<sup>3</sup>)では特に原料性状の改善、装入物分布制御技術の向上、炉況の安定維持のための高炉操業管理(GO-

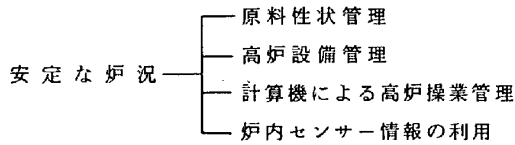
表 1 製鉄技術の進歩とそのねらい

期 間	1,950年代	1,960~1,970年代前半	1,970年代後半~現在
主 な 技 術	<ul style="list-style-type: none"> <li>① 原料の整粒強化</li> <li>② 焼結鉱の自溶性化</li> <li>③ 焼結鉱、ペレットの使用量の増加</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>① 重油の使用開始と多量使用</li> <li>② 複合送風</li> <li>③ 高温送風</li> <li>④ 設備の大型化と高圧化</li> <li>⑤ 装入物分布制御開始</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>今までの操業技術のノウハウ、装入物分布制御、設備保全技術、原料性状改善、計算機の積極的な利用など各種技術を結集</li> </ul>
技 術 の 狙 い	高炉通気性の確保	複合送風、高圧操業技術などの確立	炉内還元ガス利用率の向上

昭和56年2月9日受付 (Received Feb. 9, 1981) (依頼 新しい技術)

\* 川崎製鉄(株)千葉製鉄所 (Chiba Works, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chiba 260)

低燃料比のための条件



低燃料比のための手段

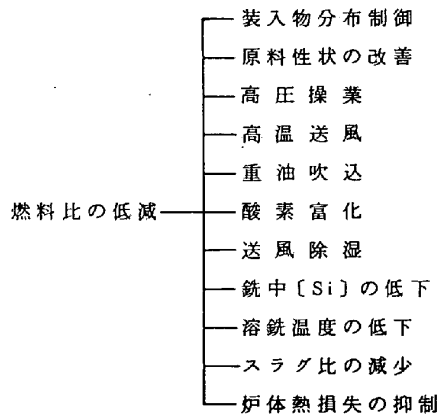


図1 安定炉況，低燃料比のための手段

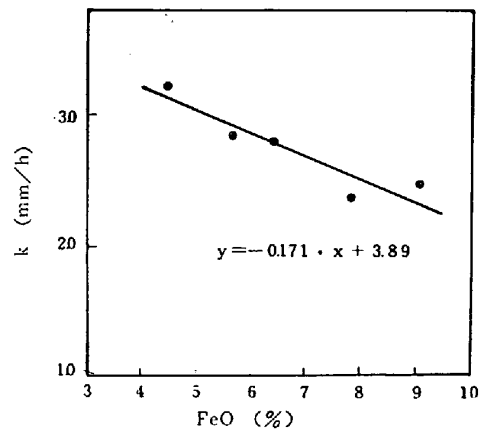


図2 焼結鉱中 FeO と還元反応速度定数 (k) の関係

STOP システム)などを積極的に実施した。

4. 原料性状の改善

原料性状の改善については一般に高炉装入鉱石の 80% 以上を占める焼結鉱の品質の改善が高炉燃料比低減に最も有効である。現在高炉燃料比低減の方策として被還元性の良好でかつスラグ分の少ない焼結鉱が望まれている。

4.1 被還元性の向上

原料の被還元性に対し影響を与える要因として、気孔構造、粒度などの物理性状と化学組成、組織などの化学的性状があげられる。一般に気孔率の増加、粒度の低下により被還元性の向上ははかれるが、気孔率の増加に伴う強度低下による焼結鉱細粒化を含めてこれらは炉内通気性を阻害する傾向にある。したがって当所では被還元性向上をはかるために低 FeO 焼結鉱を指向した。図2に焼結鉱の FeO 含有量と還元反応速度定数(k<sup>2</sup>)との関係を示す。

低 FeO 焼結鉱を製造するための基本的な考え方を図3に示す。原料面ではヘマタイト鉱石の配合比の増加をはかり、焼結原料中のヘマタイトを成品中にできるだけ多く残留させるとともに FeO 低下にとまらう RDI の悪化に対しては熔融性のよい転炉滓の使用により改善をはかった。また、操業面では高層厚、低速度操業によりコークス配合比の低下を指向し低温焼成に心掛けマグネタイトの生成防止をはかった。この結果 FeO 5% 以下

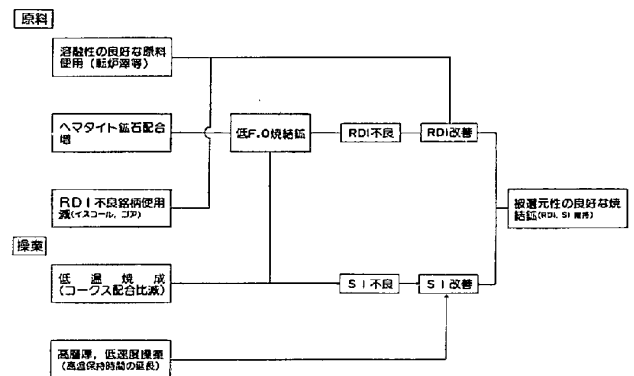


図3 低 FeO 焼結鉱製造フロー (低温型焼結鉱)

の焼結鉱の製造が可能となった。

4.2 低 SiO<sub>2</sub> 焼結鉱の製造

焼結原料中の SiO<sub>2</sub> は CaO と並び焼結鉱の強度を保つための重要な融液源であり、低 SiO<sub>2</sub> 焼結鉱の製造にさいし強度および歩留りの低下が認められた。これに対し原料装入密度の増加、原料高層厚化および低速度操業による高温保持時間の延長により対処した。この結果 SiO<sub>2</sub> 含有量は従来の 6.0% から 5.5% まで低下がはかれた。

5. 装入物分布制御

5.1 分布制御装置

装入物分布制御とは炉内半径方向における鉱石とコークスの割合 (Ore/Coke) の分布を介して炉内を上昇する還元ガスの流れの分布を調節することである。高炉における適正なガス分布とは次の項目を満足するものである。

- ①還元ガスの利用効率(鉱石の還元および装入物との熱交換の面で)が高い。
- ②羽口破損などの設備トラブルを引き起こさない。
- ③炉内通気性が安定である。

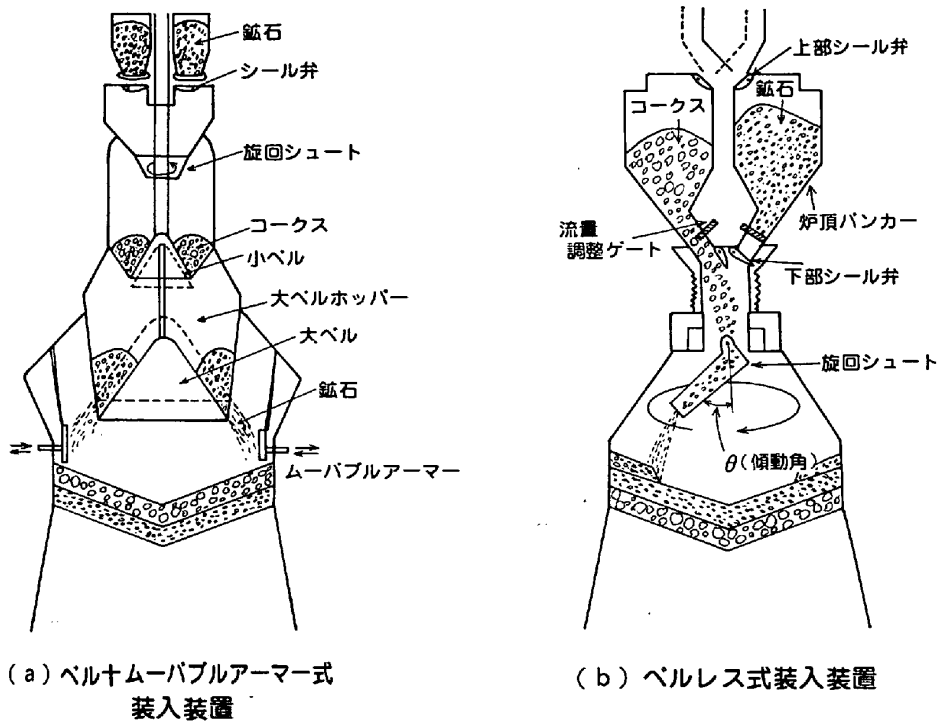


図 4 炉頂装入装置

表 2 装入物の流下経路および分布制御の方法

装入装置	(a) ベル+ムーバブルアーマー式	(b) ベルレス式
装入物流下経路	大ベルホッパー⇒ムーバブルアーマー⇒炉頂装入面	炉頂バンカー⇒旋回シュート⇒炉頂装入面
分布制御の方法	ムーバブルアーマーの位置を変更して装入物の衝突の程度を変化させ、炉内半径方向の落下位置を調節する。	各旋回毎の旋回シュートの傾動角(装入パターンと称す)を変更して、装入物の炉内半径方向の落下位置を調節する。

④炉体からの熱放散が少ない。

以上の項目を満足するための原料装入調整装置として図4に示すように(a)ベル+ムーバブルアーマー式装入装置(b)ベルレス式装入装置がある。各装入装置における装入物の流下経路および分布制御の方法を表2に示す。現在国内各社の大型高炉の主流は前者であるが、千葉第6高炉では建設費が安く、分布制御に対する自由度の高い後者を採用した。表3に千葉第6高炉の装入パターンの例を図5にその表示例を示す。装入シーケンスはC↓O↓でコークペースは33~34t/ch、O/Cは約4.0

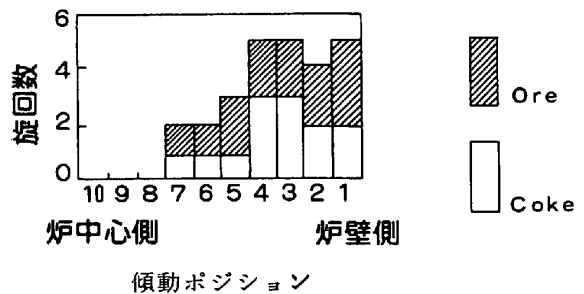


図 5 装入パターン表示例

表 3 代表的な装入パターン

傾動ポジション	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
傾動角(度)	52.0	50.5	48.5	46.5	44.0	41.5	38.5	35.5	31.5	25.5
旋回数	Coke	2	2	3	3	1	1	1	0	0
	Ore	3	2	2	2	2	1	1	0	0

である。おのおの所定の装入のパターンによりシュート13旋回(約100s)で装入を終了するようにしている。装入速度はコークス鉱石共約0.7m³/sである。

5-2 適正ガス分布の設定

千葉第6高炉ではガス分布の適正なパターンの探究のため、特に炉内半径方向におけるシャフト上部のガス分

表 4 各期の特徴比較

項目	時期	羽口曲損 (中心流過多) 時	羽口溶損 (周辺流過多) 時
操業方針		・中心流の安定確保による炉況の安定維持	羽口曲損防止 (中心流の抑制と周辺流の増加)
装入物分布		・コークスを炉中心部に多く装入し、炉中心部Ore/Cokeを小さく、炉周辺部で大きくする。	コークスを炉周辺部に多く装入し炉壁部Ore/Cokeを小さくする。
ガス分布			特にガス利用率が炉中間~炉壁部で低い分布
シャフト上部ガス分布		・ガス利用率は炉中心~炉中間部で低く、炉周辺部で高い分布	炉周辺部で温度が急上昇する分布
炉口部温度分布		・炉中心から炉壁に向って温度が減少する単調減少型	ガス利用率は51%に上昇
ガス利用率		・ガス利用率は46%程度と低い。	炉内通気性悪く送風圧力の変動があり羽口溶損が発生する。
羽口破損		・操業中突然羽口曲損が発生する。	

布、炉口部の温度分布を用いて、それらの分布とガス利用率および羽口破損の発生形態などについて調査した。その結果、火入れ後の1~2年間における操業経験を通して特に次の2つの時期にガス分布の特徴的なパターンが現れていることがわかった。各時期はその時に発生した羽口破損トラブル形態およびガス分布の特徴から次のように名付けた。

- ①羽口曲損時\* (中心流過多)
- ②羽口溶損時\*\* (周辺流過多)

\*羽口曲損；羽口が下方に引き込まれる羽口破損トラブル

\*\*羽口溶損；羽口胴上部が溶銃のアタックで溶損する羽口破損トラブル

図6、図7、に各時期のシャフト上部ガス分布、炉口部温度分布を後述する低燃料比を達成した時期と合わせて示した。各時期の装入物分布、ガス分布、ガス利用率、羽口破損などの特徴を表4に示す。また図8に炉内固体温度の高温域(1250~1400°Cを融着帯と考える)の分布の推定結果を示す。推定は各期のシャフト上部ガス分布、炉口部温度分布データより当社で開発した多重同心

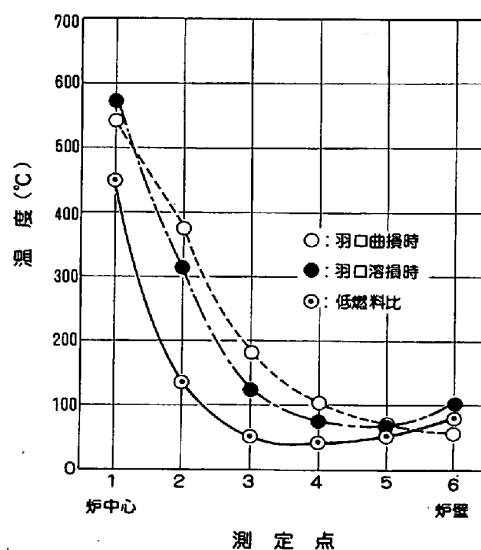


図 7 炉口部温度分布

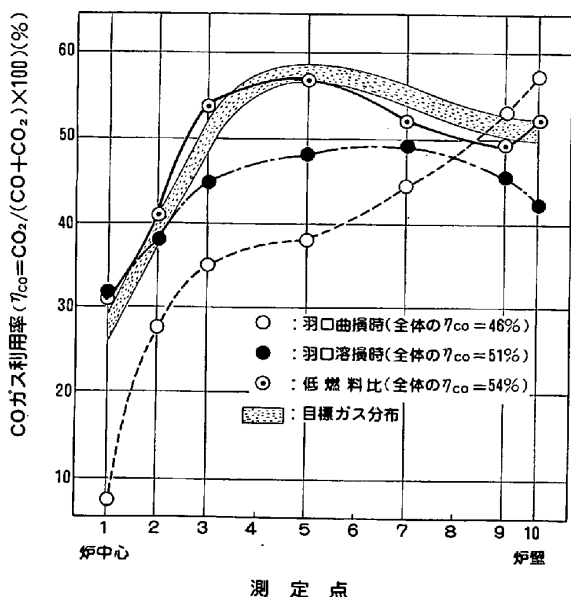


図 6 シャフト上部ガス分布

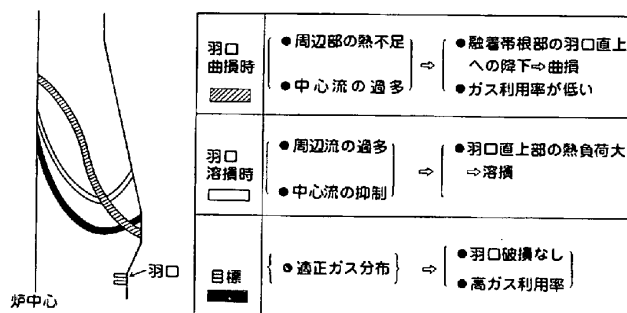


図 8 炉内固体温度分布 (1250~1400°Cのゾーン)

表 5 操業結果

項目	時期	1978年1月 中心流過多時	1978年10月 周辺流過多時	1980年3月 低燃料比
出鉄量 (t/日)		7925	9396	10310
ore/coke		3.74	3.98	4.20
燃料比 (kg/t)		485.1	461.2	418.4
コークス比 (kg/t)		441.9	416.0	381.0
重油比 (kg/t)		43.2	45.2	37.4
ガス利用率 (%)		46.1	50.6	54.3
鉄中Si平均 (%)		0.53	0.45	0.23
σ (%)		0.20	0.12	0.08
炉体熱損失 (×10 <sup>3</sup> kcal/t)		65	158	43
羽口破損 (本/月)		3	5	0

円モデル† によつた。

各時期の融着帯形状より羽口曲損時が中心流過多，羽口溶損時が周辺流過多の操業であつたことがわかる。操業経験およびこれらの調査結果等から高いガス利用率が得られ，羽口破損の発生しない操業を維持するための目

標ガス分布と目標炉内固体温度分布を設定した。(図6，図8)

5.3 適正ガス分布の調整

目標ガス分布を達成するためには，炉中心部の狭い領域で安定した中心流を維持しつつ中間～炉壁部にかけて

表 6 各時期における熱バランスの比較

項目	中心流過多時		周辺流過多時		低燃料比時		
	熱量 ( $\times 10^4$ kcal/t-p)	割合 (%)	熱量 ( $\times 10^4$ kcal/t-p)	割合 (%)	熱量 ( $\times 10^4$ kcal/t-p)	割合 (%)	
入 熱	羽口前カーボン燃焼熱	599	54.0	586	52.1	490	51.3
	(コークス)	(520)	(46.9)	(497)	(44.2)	(419)	(43.9)
	(重油)	(79)	(7.1)	(89)	(7.9)	(71)	(7.4)
	送風顕熱	451	40.7	479	42.6	408	42.7
	装入物顕熱	13	1.2	12	1.1	12	1.3
鉄鉱石還元熱	45	4.1	47	4.2	45	4.7	
合 計	1,108	100.0	1,124	100.0	955	100.0	
出 熱	ソリューションロス反応熱	346	31.2	316	28.1	336	35.2
	溶鉄・溶滓顕熱	446	40.2	441	39.2	451	47.2
	不純物還元熱	41	3.8	38	3.4	23	2.5
	送風中湿分・重油分解熱	42	3.8	50	4.5	26	2.7
	水素還元熱	21	1.9	21	1.9	16	1.7
	炉頂ガス顕熱	131	11.8	89	7.9	49	5.1
	装入物中水分蒸発熱	16	1.4	11	1.0	11	1.1
	損失熱	65	5.9	158	14.0	43	4.5
	合 計	1,108	100.0	1,124	100.0	955	100.0

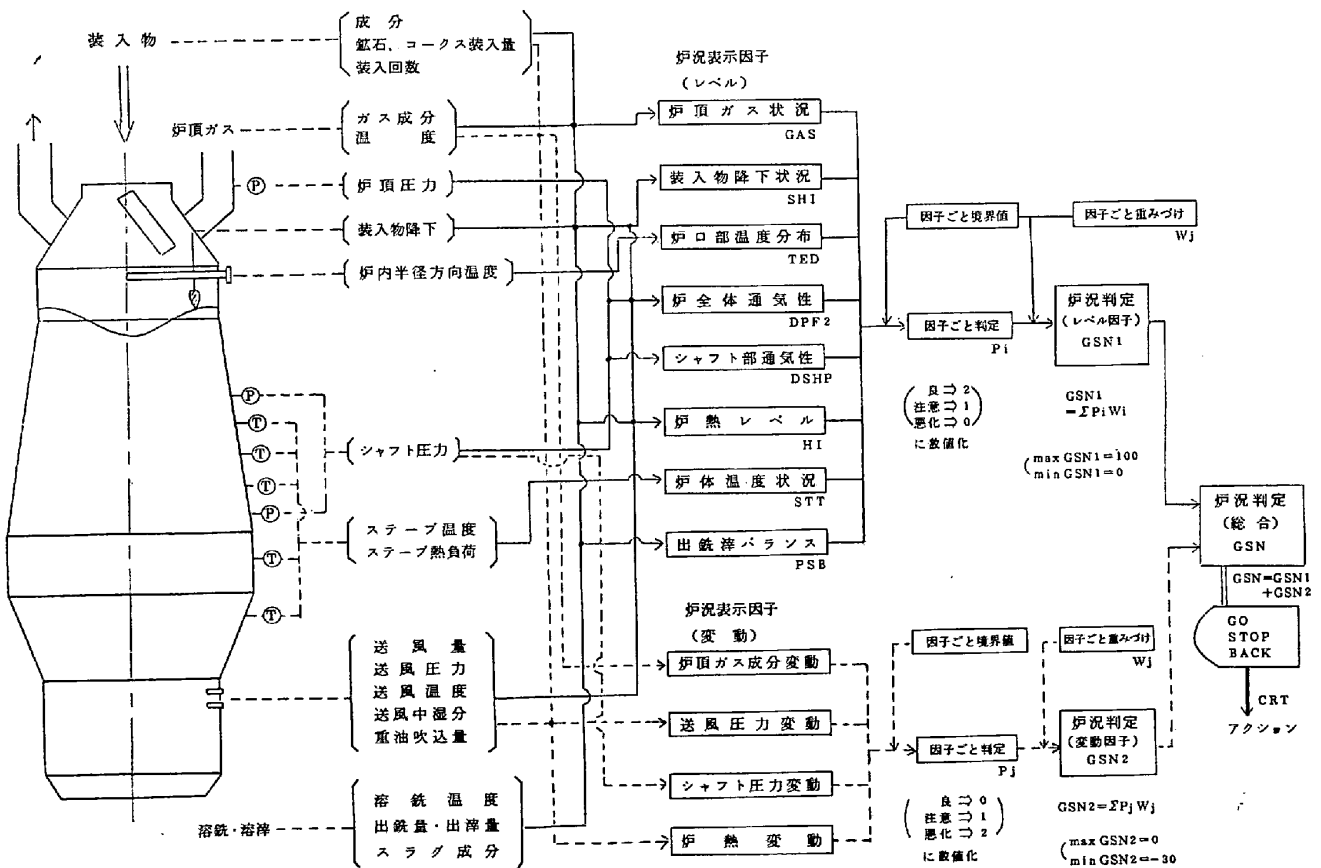


図 9 データの利用と炉況判定フローの概略

† 多重同心円モデル：高炉を多重同心円状に6分割し各分割部における熱，物質収支から炉内固体温度などを推定するモデル。

のガス利用率を向上させる必要がある。そのためには炉壁部の Ore/Coke はもちろん、炉中心部のごく近傍を除く炉内半径方向の広い範囲にわたって Ore/Coke の高い分布を達成する必要がある。千葉第6高炉では前述の適正ガス分布を達成するため特に炉壁部での Ore/Coke に注目し装入パターンを調整することにより図6に示す目標ガス分布に近い分布を達成した。表5に1980年3月における主な操業結果を前述の中心流過多時と周辺流過多時と比較して示す。また表6に各時期における熱バランスの比較を示す。原料性状の改善および後述の計算機による高炉操業管理とあいまって羽口破損はなく、安定炉況を維持し、高ガス利用率、炉体熱損失の減少、低 [Si] 溶銑の吹製が可能となった。以上の結果、高処理鉱比のもとで1979年7月の平均燃料比 429.0 kg/t-p に続き1980年3月には 418.4 kg/t-p を達成した。

6. 高炉操業管理 (GO-STOP システム)

高炉炉況を安定維持するためには、炉況の異常を早期に発見し早期回復をはかる必要がある。当所では炉況の安定維持をはかるため炉況の変化を計算機により定量的に判定し、早期に操業者に知らせる高炉操業管理システム (GO-STOP システム) を開発した。

6.1 GO-STOP システム

図9に GO-STOP システムで使用している操業データと炉況判定の概略フローを示す。操業データは一部指数化されて8種の絶対値のレベルによる炉況判定用の炉況表示因子と4種の変動の大小による炉況判定用の炉況表示因子に集約される。炉況の判定は次のように行う。

① レベル判定…各因子の値をあらかじめ定められた2つの境界値と比較し3段階の判定を行う。つまり良の場合2点、注意は1点、悪化は0点と数値化 ( $P_i$ ) とす

る。次に因子の重みづけ点数 ( $W_i$ ) を加味して次式でレベルの総合点数 (GNS 1) を求める。

$$GNS\ 1 = \sum_i P_i W_i$$

最後に GNS 1 を定められた2つの境界値と比較し、炉況の良否を良好 (GO), 注意 (STOP), 悪化 (BACK) の3段階の判定を行う。

② 変動判定…各因子の変動大小によりレベル判定と同様に炉況判定を行う。つまり変動因子の数値 ( $P_i$ ) と因子ごとの重みづけ点数 ( $W_i$ ) の積の和 (GNS 2) により炉況の良否判定を行う。

③ 総合判定…GNS 1 と GNS 2 の和を GO-STOP 数 (GNS) として最終的に炉況の良否を良好 (GO), 注意 (STOP), 悪化 (BACK) の3段階で判定する。

レベル判定因子の判定結果はくもの巣状の3段階で表示される (図10)。くもの巣は大きな多角形に近いほどよい操業状況を示す。変動判定因子の判定結果はそのレベル判定因子と関係の深い因子のところに O, Δ, × (O→良好, Δ→注意, ×→悪化) で示される。

6.2 高炉操業への適用

操業者は GO-STOP システムによる炉況の良否の判定結果より、あらかじめ定められた対策の基準に基づいてアクションを取り炉況を安定させる。主な基準は次のとおりである。

- GO : 炉況良好, 現状維持, 送風量のもどしを行つてもよい。
- STOP ; 炉況注意 注意原因を調査し操業条件の変更をせよ
- BACK ; 炉況悪化 ただちに2~5%減風し、炉熱レベルの判定が0 (悪化) なら Ore/Coke を減少せよ。銑滓バランスの判定が0 (悪化) なら出銑強化せよ。

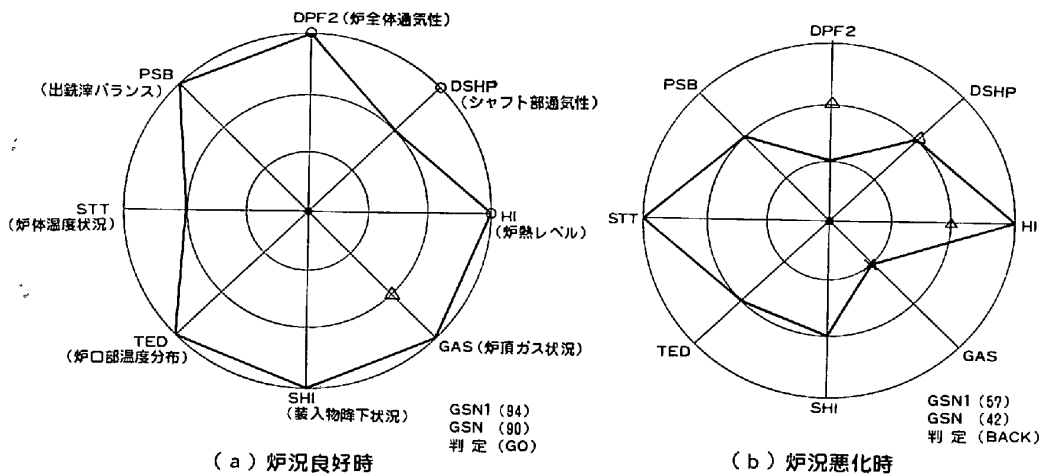


図10 GO-STOP システム表示例

表 7 炉内センサーの特徴

センサー名	内 容
(1) 固定温度センサー	高炉炉口部半径方向の温度分布及び各測定点の温度変化状況の情報が得られる。これにより炉内ガス流分布(中心流、周辺流の程度)、装入物分布の安定性(流れ込みの有無)の判断を行う情報としている。
(2) シャフトガスサンプラー	高炉シャフト上部の装入物内の炉内半径方向のガス分布(CO, CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> )及び温度分布の情報が得られる。各測定点でのCO、CO <sub>2</sub> の割合から中心流、周辺流の程度を判断し、ベルレス装入パターンの変更を行なっている。
(3) プロフィールメーター	炉頂における装入物の形状をμ波で測定するものである。炉頂の装入物は炉芯や炉壁側にスリップダウンすることなく装入物の表面が一樣に垂直に下方に向かって降下しないと、風圧変動、スリップ等を生じ炉の安定操業が困難になる。そして、これらの一様な安定した荷下りは装入物の表面の堆積角度や鉱石とコークスの炉内半径方向での割合によって制御することが可能であることから、装入物表面の形状を測定するプロフィールメーターは高炉操業上極めて有益な装置である。
(4) 炉頂暗視装置	炉頂における装入物の挙動を監視する白黒カメラである。これにより炉芯部への装入物の流れ込み、炉芯部の流動化状況及び中心領域の広がりなどの情報が得られる。
(5) 炉頂赤外線カメラ	炉頂における装入物表面の温度分布が得られ、各温度範囲ごとにカラーパターン化される。これから炉芯部での高温領域の広がりが判定できる。
(6) シャフト圧力	高炉シャフト部に2段(円周方向に4点)設けており、シャフト部の通気性及び円周方向でのガス流分布の不均一性の把握に使用する。

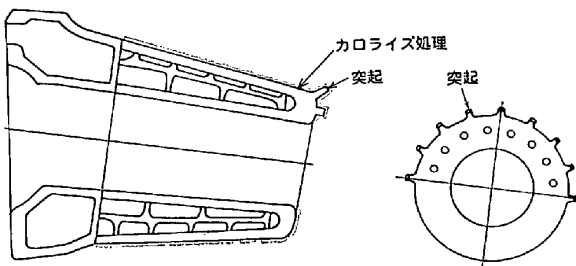


図 11 突起付偏芯水路カロライズ羽口

7. 低燃料比達成に寄与したその他主な周辺技術

7.1 羽口構造の改善

羽口破損の形態には①先端摩耗②胴部溶損などあるが、羽口の寿命延長をはかるため突起付偏芯水路カロライズ羽口(図 11)を開発した。羽口先のコークスの運動による羽口先端摩耗防止対策として、羽口先端に突起を付けた。また羽口胴部の溶鉄の攻撃に対する対策として胴上部の流速の増加をはかつた偏心水路羽口を開発するとともに、羽口表面にカロライズ処理を施した。その結果 1979 年度は炉況の安定もあり 6 BF 羽口破損は皆無であつた。

7.2 炉内センサーの開発

炉内センサーは装入物分布制御と表裏一体をなすもので、所期の分布調整が実際に炉内でなされているか否か精度よく把握することは装入物分布制御上重要である。表 7 に千葉第 6 高炉に使用している主なセンサーの特徴を示す。これらのセンサーの開発により装入物分布制御が適確に実施された高炉燃料比低減に大いに寄与した。

7.3 燃料比の低減

図 12 に千葉第 6 高炉の燃料比月別の推移を示す。

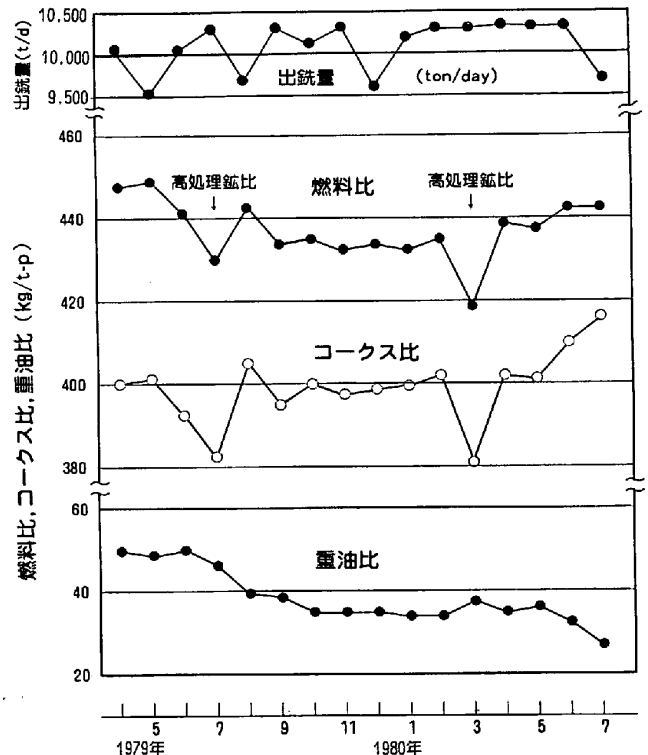


図 12 千葉第 6 高炉の燃料比 (kg/t-p)

焼結鉱性状の改善、高炉装入物分布制御、GO-STOP システムの導入などにより燃料比は大幅に低下し、1980 年 3 月には月間平均燃料比 418.4 kg/t-p、を達成するとともに年間平均燃料比(1979 年 4 月~1980 年 3 月)においても 436.1 kg/t-p の記録を樹立した。

8. 結 言

川崎製鉄千葉製鉄所第 6 高炉は日本において最初のベルレス装入装置を採用した大型高炉であり 1977 年 6 月

操業を開始した。火入れ以来コークス、鉱石の装入物分布制御に主眼を置いた改善を重ねるとともに、コンピュータ導入による炉況安定化システムの開発、その他原料性状の改善、炉内センサーの開発を行い以下の効果を得るに至った。

(1) 炉頂ガス利用率 54% 達成

(2) 1979 年度羽口破損なし

(3) 1979 年度平均燃料比 436.1 kg/t-p

文 献

1) 鈴木 駿一：鉄と鋼，62 (1976) 3, p. 435

2) 早瀬 敏一，大島 位至，藤森 寛敏，佐々木 晃：鉄と鋼，67 (1981) 2, A17

統 計

1970年代に民間企業で行われた主要な研究開発

科学技術庁が、資本金 10 億円以上の民間企業を対象に 1979 年 12 月に実施した「民間企業の研究活動に関する調査」の結果は下表のとおりである。合計44種類(2業種に出てくる家庭用 VTR は1種類とする)の内訳を見ると、「乗用車の排出ガス対策」,「イオン交

業 種	製 品・技 術 名
鉄 鋼 業	地震探鉱等油田の探鉱技術 原油の三次回収
建 設 業	地盤改良工法 泥水シールド等シールド工法の 発達 連続地下壁工法等地下建設技術 石油, LNG等の備蓄施設建設 技術 省エネルギー建築
食 品 工 業	カップ入り即席めん ブドウ糖の異性化技術
織 維 工 業	シルクライク等合繊加工糸の 差別化
パルプ・紙工業	感熱記録紙等情報産業用紙 無公害パルプ化法 (HOPE S法等)
総合化学繊維工業	新人工皮革製造技術 イオン交換膜法食塩電解技術 ポリエステル直接連続重合法 炭素繊維製造法
医薬品工業	セファゾリン(セファロsporin 系抗生物質) スルペニシリン(合成ペニシリン) ユビデカレノン(代謝性強心剤)
石油製品・石炭製品 工業	重質油の脱硫技術 排煙脱硫技術 重質油分解技術
ゴム製品工業	シーラントタイプのタイヤ
窯 業	NSPキルン

換膜法食塩電解技術」,「無公害パルプ化法」,などの環境保全技術,「低燃費技術」などのエネルギー関連の技術も多いが,エレクトロニクス関連の技術が最も多く,また多業種にわたっている。

業 種	製 品・技 術 名
鉄 鋼 業	連続鑄造法の普及 連続焼鈍による深絞り用冷延鋼 板製造技術
非鉄金属工業	光ファイバケーブル 連続銅製錬法
機 械 工 業	都市廃棄物処理システム 高速精紡機
電気機械器具工業	500K V 送変電用機器 家庭用VTR
通信・電子・電気計 測器工業	IC, LSI 家庭用VTR 電子交換機 超LSI 表示デバイス Mシリーズ等超大型電子計算機 光通信システム
自 動 車 工 業	乗用車の排出ガス対策 低燃費技術 パワーステアリング関連技術 安全化技術 自動車部品の電子化
精密機械工業	水晶式電子腕時計

- 注) 1. 同一技術に対する有効回答企業数が4以上,かつ,その業種の有効回答企業数の1割以上である技術または製品を選んだ。  
2. 調査対象は総理府統計局「科学技術研究調査」の対象となっている民間企業で資本金10億円以上のものであり,本項目の有効回答企業数は延べ517社である。  
3. 総合化学繊維工業とは総理府統計局「科学技術研究調査」で用いられている用語で,化学肥料・無機化学・有機化学・化学繊維工業を指す。

資料: 科学技術庁計画局「民間企業の研究活動に関する調査(昭和54年度)」

(科学技術庁編: 昭和55年版科学技術白書(昭和55年8月) p. 96)