

5. 高炉操業技術の進歩

この数年の製鉄技術のめざましい発展の中で、本章にかかげる操業技術の進歩は大きな役割を占めている。すでに述べた装入原料の改善もさることながら、操業度（生産性）の向上と燃料原単位の低下のために幾多の努力がなされてきたのである。ことに送風処理技術、すなわち調湿送風、酸素富化送風、燃料吹込などの進歩および焼結鉱の品質の改良ならびにその増配合などが真剣に検討された。これらの技術と前後しながら、種々の操業理論と解析が進み、操業技術の進歩を促し、その結果は生産速度の上昇と大幅なコークス比の低下となつて現われている。生産速度は10年前に日産約1,000tが最高であつたものが、高炉の大型化が進んでいる現在では日産2,800t以上の出鉄をしているものもあり、この間出鉄比（高炉内容積1m³当りの1日の出鉄t数）は0.8から1.5に向上している。短期間の試験では2.0を記録したのものもあり、実際操業で月間出鉄比1.5以上の高能率のものもある。コークス比の低下の推移も図5.1に示すと

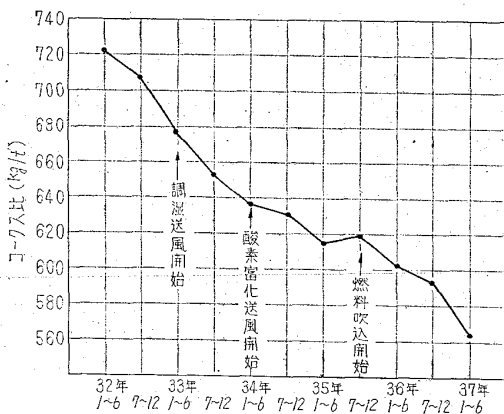


図 5.1 最近のコークス比推移 (全国平均値)

おりで、現在 300 kg 台のコークス比で操業している例もあつてこれは世界的な記録である。そしてこれらはともに銑鉄原価低減に大きく役立つ。

またコークス比低下のために高温送風の使用が常に考えられてきたが、単純な風温上昇は炉況不調をまねき、おのずから限界があつた。その後冬期夏期の気中の湿度の相違が炉況に大きく影響することが解明され、昭和33年頃より水蒸気添加操業が考えられ、さらに調湿操業に進んで高風温操業が実施されるようになった。

近年安価な酸素が得られるようになり、酸素製鋼が発展したが、製鉄技術としても、昭和34年頃より酸素富化送風が開始された。その後重油吹込みに始まつた炭化水

素系物質の吹込みは生産性の点では前記2法に幾分劣るがコークス比低下の点では非常に有効なもので昭和36年以来急速に普及し現在にいたつている。一方原料予備処理の一環として、整粒強化による発生粉の処理のため焼結鉱の大量使用が実施され、その品質の改善とあいまつて操業成績の向上に大きく貢献した。

これらは大型化してきた高炉での操業技術の進歩によるもので、本章ではこれらの各技術について述べる。

5.1 高温送風

5.1.1 高温送風の効果

過去長い間、送風温度は500~700°C程度であつたが、最近原料の予備処理が進んで、鉱石の破碎篩分の強化、焼結鉱の高配合が行なわれるようになり、一方調湿送風や種々の燃料吹込などの実施とともに高温送風が要求され、現在では900°C以上、最高約1,050°Cを使用している。

送風温度をあげることは、熱的な燃料コークスの節約のみでなく、それだけコークスから来る灰分が減り、これを滓化するための石灰石が少なくてよいことになる。これらにより一定時間における鉄鉱石の装入量を増すことができ、出鉄量を高める効果がある。

送風温度のコークス比に及ぼす影響は操業条件によつて相違し、コークス比の比較的高かつた頃には、温度100°C上昇につき30~40kgのコークス節約に相当すると考えられていた。コークス比の低下した今日でも、20~30kg前後のコークス節約が期待できる。

八幡・洞岡の高炉において、昭和35年の操業実績を解析した結果では、送風温度とコークス比の関係は図5.2のようである。

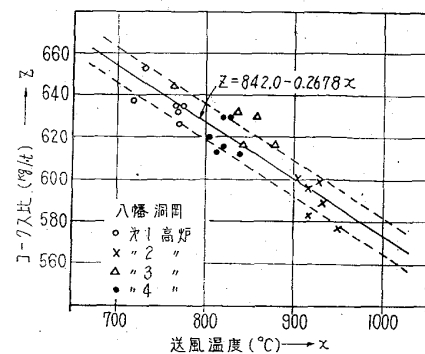


図 5.2 送風温度とコークス比の関係

表 5.1 送風温度のコークス比におよぼす影響

項目	期間	I	II	III	II-I	II-III
		自 35.10.2 至 35.10.11	自 35.11.1 至 35.11.10	自 36.1.15 至 36.1.24		
送風温度 (°C)		811	668	813	- 143	- 145
コークス比 (kg/t)		675	693	662	+ 18	+ 31
補正コークス比 (kg/t)		675	704	654	+ 29	+ 50
風温100°C当りコークス増減 (kg/t)					20	34
摘要		熱風炉3基操業	熱風炉2基操業	熱風炉3基操業		

また富士・釜石第2高炉において、熱風炉2基操業期間を利用して、その前後の状況から調べた結果は、表5.1のようである。

鋼管・川崎第4高炉の昭和32~34年の操業実績から、多重回帰分析を行なった結果では、温度100°C上昇につきコークス比21.5kg低下という値を得ている。

他方出銹量えの影響は同じく八幡・洞岡高炉の操業実績によれば、図5.3のように温度100°C上昇につき内容積1m³当り0.09t/dの出銹増となつている。

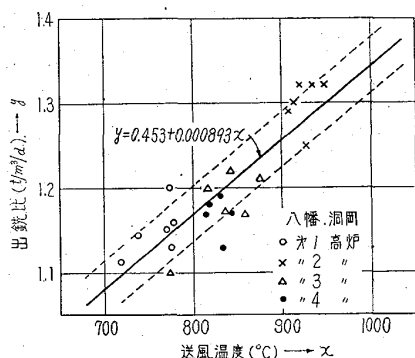


図 5.3 送風温度と出銹比の関係

5.1.2 熱風設備の改善

高温送風は高炉の能率向上、銹鉄原価低減の必要条件であるが、1,000°C以上の送風を行なうには、設備上、操業上に種々の問題があり、これらの改善が行なわれている。

特にコークス比の低下した現在、熱風炉の燃料である高炉ガスの熱量が低下し、さらにその能力増が必要である。

(1) 加熱面積の増加

風温800~900°Cでは、45~50m²(加熱面積)/m³(高炉々内容積)程度の容量であつたが、1,000°C以上の送風を行なう場合は、55~60m²/m³に増加することが必要になる。

(2) 蓄熱室煉瓦の改善

蓄熱室煉瓦は1層式から2~3層式のものに変わり、

さらに種々の異型煉瓦(ブロック煉瓦)が使用されるようになった。これは高温ガスの流速をほぼ均等化し、次第に通路径を小さくすることにより、蓄熱室煉瓦1m³中の伝熱面積を大きくとることにより熱交換量を大きくするという考えに基づいている。

またブロック煉瓦の使用は煉瓦積の強度を保持するという利点も有する。

この他に炉壁の熱損失を少なくするため、種々の耐熱保温材の使用、および施工方法が研究されている。

(3) 熱風炉ドームの改善

従来ドーム温度は煉瓦積の保守上から1,150~1,200°Cに制限していたが、熱風炉蓄熱量増大にはこれを上昇するのが有力な手段であり、最近ドームのみでなく特に高温にさらされる燃焼室上部、バーナー口周囲に使用する煉瓦の研究が進み、高アルミナ煉瓦、珪石煉瓦などが用いられるようになり、ドーム温度の上昇が可能になってきた。

(4) 熱風弁の改良

高風温の使用により熱風炉出口温度は上昇し、熱風弁ケース、リングシートなどの亀裂、漏風変形などの故障が問題となつてくる。ケースは送風時には高温にさらされるので、種々の耐熱合金鋳鋼の使用が研究され、また水冷式も考案されている。最近熱風弁の前に調節冷風を入れ弁の過熱を防ぐ方法もとられている。

(5) 羽口廻り送風支管の改善

熱風は高炉羽口に入るまでかなりの温度降下をしているようで、この温度降下を防ぐことは実質的高風温を得る有力な手段である。送風支管一ペンストックローパイプには断熱煉瓦、または耐熱耐摩耗性のキヤスタブルを30~50mm程度塗り、断熱をはかるとともに、これら金物の保護を行なっている。

5.1.3 熱風炉操業の進歩

最近熱風炉操業の進歩により熱効率は高くなり設備上の改善とあいまつて高炉の高温送風の要求を満たしている。

(1) 熱風炉切替時間の短縮

送风量および送風温度の上昇によつて熱風炉の負荷は大きくなり、燃焼末期には排気温度が上昇し熱効率は低下する。このため自動燃焼切替装置の整備とともに燃焼時間を短縮し排気温度の上昇をおさえ、ガスの有効利用をはかっている。図 5・4 に富士・広畑の熱風炉燃焼時間短縮実施例を示す。

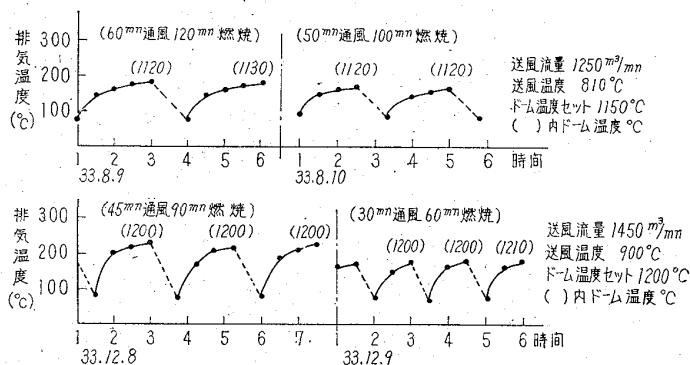


図 5・4 熱風炉切替時間短縮時の排気温度図
(富士・広畑 7 号熱風炉)

また熱風炉の 2 基並列送風も行なわれている。

(2) 燃焼ガス量の規制

送風温度、送风量を管理する場合、熱風炉の残熱を大きくすることは熱損失を大きくする。また炉体保護の意味からも過熱は避けるべきである。このため各社とも燃焼管理の標準化を進め、熱風炉操業試験、解析を行なつて負荷に応じた燃焼用ガス量を決定し、これにより操業を行なっている。

(3) 燃焼用ガスのカロリーアップ

最近高炉ガスカロリーが次第に低下し、従来 900 kcal/Nm³ のものが、特に低い場合には 700 kcal/Nm³ 程度まで下がっている。

ガスカロリーの低下は火炎温度の低下となり、ドーム温度が上昇せず、排気ガス量が増大して熱効率が下がり熱風炉の熱レベルが低下する。このため高炉ガスよりも、高カロリーのワークス炉ガス、ナウサガス、LPG などの添加により 900~1,000 kcal/Nm³ 程度に富化することが検討されている。

(4) 燃焼用ガス、空気の前熱

金属換熱器により燃焼用ガス、空気を 300~500°C に予熱する方法が考えられ、その目的で熱風炉排気ガス煙道に金属換熱器をおくことが検討されている。

(5) 燃焼用空気の前熱

高炉ガスカロリー低下対策として、熱風炉燃焼用空気前熱が試みられている。ただしこれは酸素の価格により左右されるものであろう。

(6) 自動制御

現在の熱風炉はほとんど圧縮空気または電動式の自動燃焼切替装置をもっており、その他種々の自動制御機構を設けている。そのおもなものは熱風温度自動制御、空燃比自動制御、ドーム温度制御、排ガス連続自動分析、炉替の自動制御である。

以上述べたように熱風炉設備の改善および操業法の進歩により高風温を得ると同時に熱効率が大幅に向上した。従来 70% 程度であつた熱効率は最近では 90% に達するものもあり、このため燃焼用ガス原単位 (900 kcal/Nm³ 換算) は 600 Nm³/t pig 程度で従来よりむしろ低下している。最近の熱風炉の熱精算例を表 5・2 に示す。

表 5・2 熱風炉熱精算表

(富士・広畑 8 号熱風炉
45 mn 通風 45 mn 燃焼 35.12~36.2)

		× 10 ³ kcal/cycle	%
燃持 燃込 燃ガ 燃ス	燃 焼 熱	29,719	92.7
	頭 熱	455	1.4
	計	30,174	94.3
燃 焼 用 空 気 頭 熱		145	0.4
冷持 冷込 冷風	頭 熱	1,628	5.1
	蒸 気 頭 熱	55	0.2
	計	1,683	5.3
入 熱 合 計		32,002	100.0
熱持 熱去 熱風	頭 熱	23,251	72.7
	水 分 頭 熱	1,160	3.6
	計	24,411	76.3
排持 排去 排ス	頭 熱	1,637	5.1
	水 分 頭 熱	106	0.3
	未 燃 損 失	0	0
	計	1,743	5.4
冷 却 水 持 去 熱		500	1.6
放蓄 散熱	炉 体 放 散	274	0.9
	蓄 熱 そ の 他	5,074	15.8
	計	5,348	16.7
出 熱 合 計		32,002	100.0
熱 効 率		92.5%	

$$\text{熱効率} = \frac{\text{熱風の熱量} - \text{冷風の熱量} + \text{蓄熱}}{\text{燃焼ガスの持込む熱量}}$$

近い将来高熱装入物の事前処理および種々の燃料吹込みの実施により 1,200°C 程度の高風温が実現するであろう。

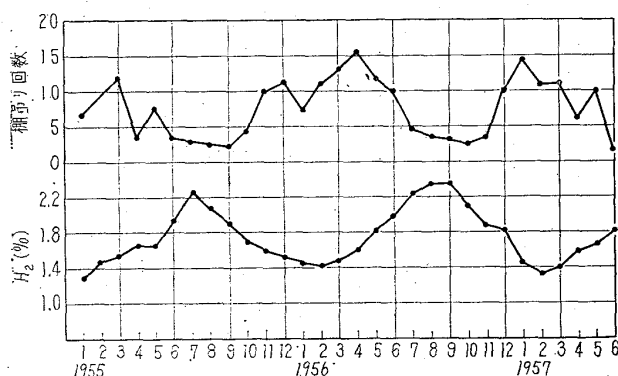
う。このため熱風炉煉瓦などの耐火物や高炉付帯設備の金属材料の研究が重要である。また次第に自動化が進んで熱風炉全自動切替が行なわれるようになり、データロガーさらにはコンピューターなどの導入によつて完全な自動制御が行なわれるようになるであろう。

5.2 調湿送風

5.2.1 調湿送風の効果

第2次大戦後、ソ連では大気に水蒸気を加えて15~20 g/Nm³ の一定値に調湿する操業が研究され、生産性の向上、コークス比の低下、送風温度の上昇などの好結果をえた。わが国においても昭和29年頃より調湿操業が取り上げられ、八幡製鉄は昭和29年より夏季は減湿、冬季は加湿を行なつて低い湿分値に調湿する試験を行なつた。

昭和30~32年において国内の代表高炉の炉頂ガス H₂ %と棚吊り回数とを調査すと図5.5に示すように大気湿



富士・広畑第1,2高炉 八幡・洞国第3,4高炉
富士・釜石第8,10高炉 富士・室蘭第1,2高炉
図5.5 毎月の高炉棚吊り回数と炉頂ガス中平均 H₂ %

分の高い夏季に棚吊りが少なく、大気湿分の低い冬季に棚吊りが多いことがわかる。

また送風空気に添加する水蒸気量を変更して、湿分の調節が炉況に与える影響を調べた結果、調湿が炉況安定上に必要であることがわかった。

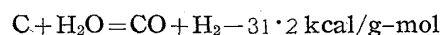
一方整粒鉱石の使用は高温送風を可能にし、かつて500~700°Cであつた送風温度は年を追うごとに上昇し、現在900~1,050°Cの送風が行なわれるようになった。この間の送風温度上昇の過程において、高温送風は棚吊りを招くので水蒸気添加により羽口前燃焼温度の調節を行なうことがなされてきた。このようにして炉況安定および高温送風を行なうために調湿送風を行なうことが一般化した。国内の製鉄所の多くは15~30 g/Nm³の湿分で操業している。さらに送風温度を最高温度に固定し、添

加湿分量の加減によつて炉況の調節を行なうようになってきている。

5.2.2 調湿送風の理論

(1) 羽口前の燃焼帯における水蒸気の挙動

炉内に入った水蒸気は羽口前で次式の水蒸気反応をおこし



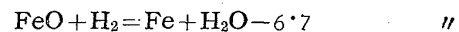
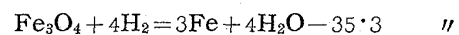
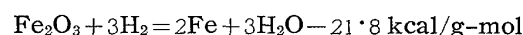
CO と H₂ に分解するので、一定送風量のもとで水蒸気添加を行なえば実質送風量が増加する。

一方、水性ガス反応は著しい吸熱反応であり、羽口前の燃焼温度を一定に保つためには送風温度を上げなければならない。所要送風温度上昇は湿分 10 g/Nm³ 増について70~80°Cである。

水蒸気添加にともなう熱補償を送風温度の上昇で行なつた場合、操業度の上昇割合は、湿分 10 g/Nm³ 増について約4.5%である。

(2) 炉内における水素の挙動

羽口前の燃焼帯に発生した H₂ は炉内を上昇しながら一部は次の反応式により鉄鉱石の還元にあずかる。



湿分の増加に従つてボッシュガス中の CO 濃度および H₂ 濃度が上昇するので、鉄鉄 t 当りの送風量およびガス量が減少する。

調湿送風時の炉内の温度分布およびガス分布を測定した結果、シャフト上層部の平均温度が上昇しており、湿分の増加とともに炉内の温度勾配は緩やかになるとの報告もなされている。

5.2.3 調湿送風の方法

送風空気への湿分の添加は、冷風管に蒸気管を挿入して行なわれるのが普通であるが、水を噴霧状に吹込む方法も一部で実施された。

調湿制御系統の一例を図5.6に示す。

5.2.4 調湿送風の実績の解析

(1) 出鉄量

送風空気を一定にしたままで送風湿分を増加させた場合の出鉄量増加率は 10 g/Nm³ 増に対し約5%であり、理論計算値4.5%とほぼ一致している。

(2) コークス比

鋼管・鶴見で行なわれた操業試験によれば図5.7図5.8

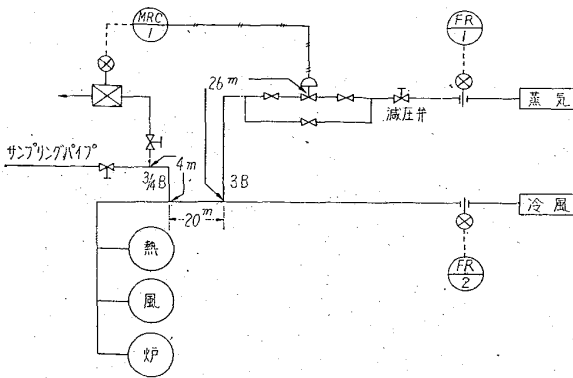


図 5.6 高炉送風湿度制御系統図(富士・釜石)

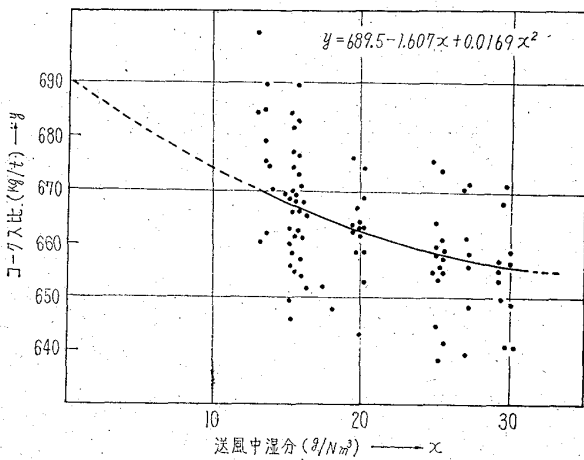


図 5.8 送風中湿分とコークス比の関係

に示すように湿分 15~25 g/Nm³ の範囲において 10 g/Nm³ 増につき 82°C の熱補償を行なつて 10kg/t の低下をみており、計算結果の 70~80°C 上昇、9.2 kg/t 低下とよく一致している。コークス比の低下は、熱補償の種類および量に左右され、熱補償量が少なればコークス比低下量も少ない。

(3) 水素利用率

八幡・東田で解析した結果によれば図 5.9 に示すように送風湿分がある程度以上 (24 g/Nm³ 以上) 高い場合の炉頂ガス中の水素は一定であり、炉内で利用される水素が増加している。したがって熱補償を行ないながら送風湿分を高めれば、その分解によつて生じた水素の少なからぬ部分が還元にあずかり、その分だけ還元用炭素が減少することがわかる。

5.3 酸素富化送風

5.3.1 酸素富化の意義

高炉で鉄鉄製造に使用する空気は不活性な窒素を79%

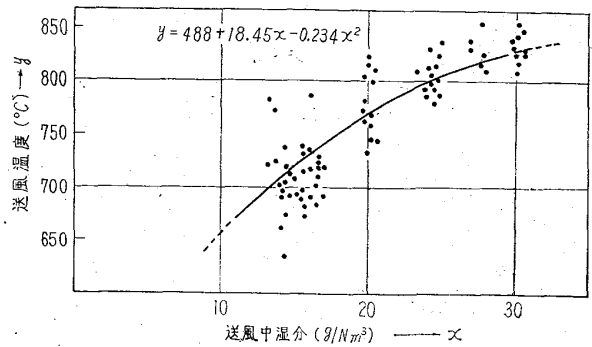
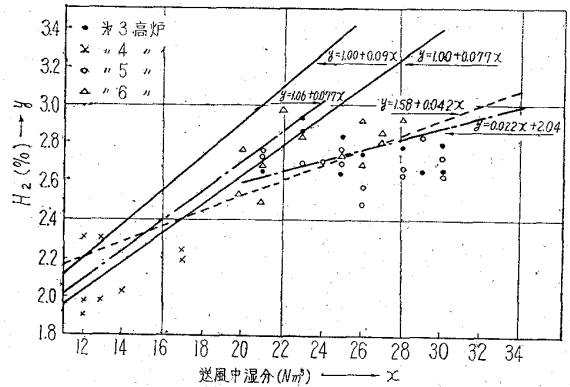


図 5.7 送風中湿分と送風温度の関係



$y = 1.00 + 0.09x$ 装入物より 1% の水素が入るとしかつ水蒸気がすべて分解して炉頂に出るとした場合の関係
 $y = 1.06 + 0.077x$ 昭和34年 2 月以降の実績 (23 g/Nm³ 以下の分)
 $y = 1.06 + 0.077x$ // 30年~32年の間の実績 (第 6 高炉, 25 g/Nm³ 以下)
 $y = 1.58 + 0.042x$ // 34年 2 月以降の実績 (全 40 点)
 $y = 2.04 + 0.022x$ (同上 24 g/Nm³ 以上の分)

図 5.9 送風中湿分と炉頂ガス中水素の関係

含み、有効な酸素は 2.1% しか含まない。今世紀初頭より高炉送風に酸素富化することが考えられてきたが、当時はもつぱら酸素富化による羽口前燃焼温度上昇という点に注意がむけられ、酸素は冷え気味の炉況の回復手段として考えられていた。

1930年代にドイツのオーバーハウゼンで初めて酸素富化送風が行なわれ、コークス比の低下、炉況の改善などが確認され、さらにソ連での試験によると生産性が向上しコークス比が低下することが確認されている。フェロアロイ吹製時は特に効果が大きであるともいわれている。

しかし最近までこの酸素富化送風が商業用高炉でかえりみられなかつたのは酸素の値段が高過ぎるという経済的理由のためであつた。戦後次第に安価な酸素が得られるようになり既存設備の生産性向上のため、大型高炉で酸素富化操業試験が開始されるようになった。

最近では燃料吹込時の熱補償および燃料の完全分解のために酸素富化を行ない顕著な効果が期待されつつある。

なお酸素吹込設備の一例を 図 5.10 に示す。酸素は送

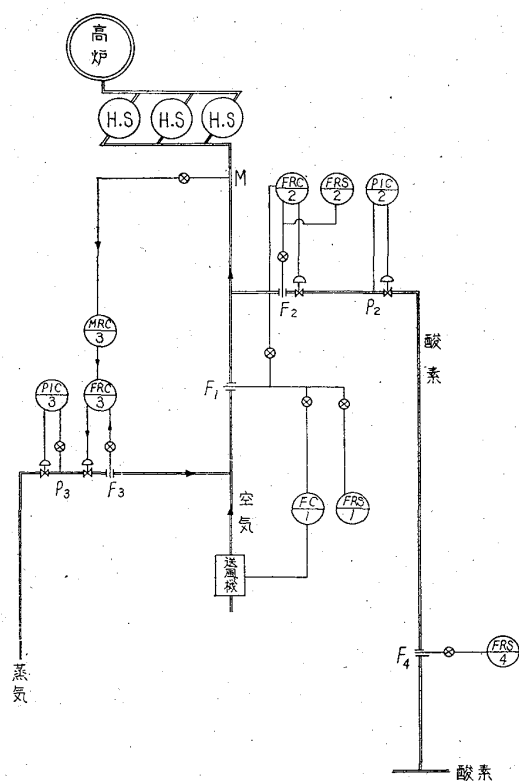


図5-10 酸素富化装置 (鋼管・鶴見)

風量に対して比率制御する。吹込位置は通常熱風炉前の送風本管とされ、酸素吹込位置以降に湿度計を設置し水蒸気添加量を制御する。

5.3.2 酸素富化の理論

酸素富化送風を行なった場合羽口前の燃焼温度およびボッシュガス量などの変化をとまなうが良好な炉況を維持するためには富化前後において、これら諸元は変化させないか、または少なくとも炉況が安定する方向に持っていかなければならない。そのために理論的推定が必要となる。

(1) 理論燃焼温度

酸素富化により羽口先燃焼帯の温度および炉床温度が上昇し冷え気味の炉況回復のための手段となることは前にも述べたが、一方酸素単独富化は必要以上に羽口先温度を高め炉内に高温熔融帯を生じ、棚吊り状態およびスリップなどを多発させ通風性を阻害する場合がある。そのため同時に水蒸気を添加し(水蒸気分解にとまなう吸熱反応)によつて羽口先燃焼温度を一定範囲内におさめることが行なわれている。

羽口先燃焼温度の計算方式として代表的なものの一つはソ連の A. N. Ramm によつて示された式である。

酸素富化率、蒸気量、送風温度等の関係を 図 5-11 に示す。

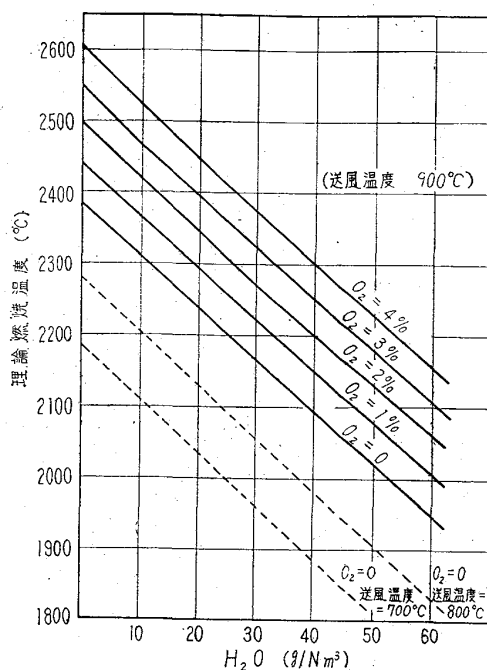


図 5-11 理論燃焼温度 (富士・広畑)

(2) ボッシュガス量

高炉操業を円滑に行なわせるためには羽口先燃焼温度の他に時間当りのボッシュガス生成量を、ある一定範囲内におさめる必要がある。これは通風性すなわち均一なガス分布を得るために炉形、装入物粒度などと関連させて考慮しなければならない。

(3) 出鉄量およびコークス比の推定

前述したように酸素富化送風は生産性を向上させるために、空気中の不活性な窒素を酸素富化により一部酸素で置換するものであるが出鉄量、コークス比の推定方法について二、三述べる。

その一つは出鉄量は装入物の物理的・化学的条件が一定ならば単位時間当りのコークス燃焼すなわち単位時間当りの酸素量に支配されるとするもので還元性の変化は考慮に入れないものである。

この関係を 図 5-12 に示す。

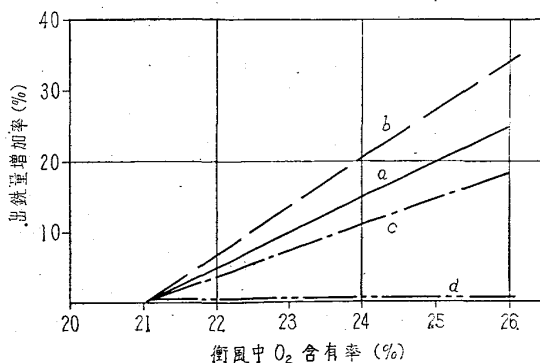


図5-12 酸素富化率と出鉄量との関係

送風と富化酸素の合計量が一定の場合酸素含有量が多くなれば単位時間当りのコークス燃焼量が増加し、したがって出鉄量を増すことが出来る (図 5.12 の a 曲線) 送風機からの風量を一定にして酸素を富化すれば b 曲線のように増加する。高炉操業がボッシュガス量によつて支配されると考え時間当りボッシュガス量一定として計算すれば c 曲線のようになる。また衝風中の時間当りの酸素量が同じならば d 曲線のように出鉄量は変化しない。

突気換算風量と出鉄量の関係について、計算値と実績値を比較した一例を図 5.13 に示す。

他の考え方は A. N. Ramm の式を前提として次の仮定のもとに出鉄量、コークス比を推定したものである。

- a. 羽口先燃焼温度を一定に維持する。
- b. 時間当りのボッシュガス生成量を一定とする。

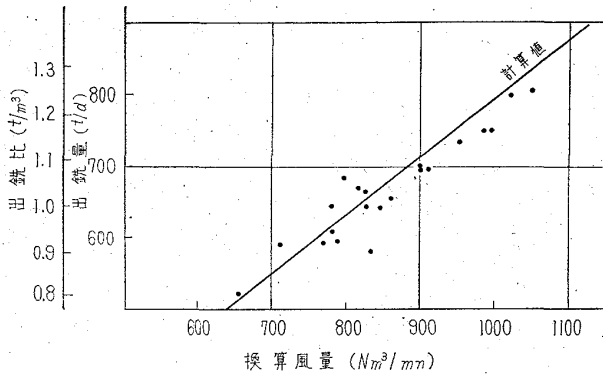


図 5.13 換算風量と出鉄量との関係 (八幡・東田第 5 高炉)

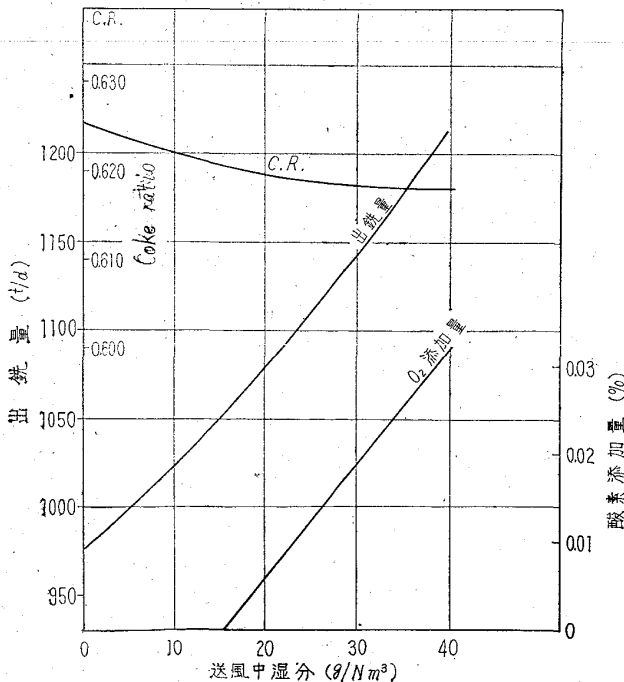


図 5.14 酸素、水蒸気添加による出鉄量コークス比変化 (鋼管・川崎)

- c. 鉄鉄 t 当りの還元ガス量を一定値以上とする。
- d. ソリューション・ロスを出鉄量の増減によつてのみ変化する。

この結果を図 5.14 に示す。出鉄量の大幅な増加に比してコークス比は顕著な低下を示していない。

理論計算による出鉄量コークス比の変化を表 5.3 に示す。

表 5.3 理論計算による出鉄量コークス比の推定

	八 幡		日 本 鋼 管
	酸素 1% 富 化	水蒸気添加 1 g/Nm³	酸素富化 1% 水蒸気添加 1 g/m³
出 鉄 量	+4.76%	+0.3%	+5%
コークス比	—	—	-2 kg/t

表 5.4 酸素富化操業結果 (川鉄・千葉第 1 高炉)

	普通操業 I	酸素富化操業		
	33.5.21 ~ 6.9	II 6.10~ 6.18	III 6.23~ 6.30	IV 7.1~ 7.11
送 風 中 O₂ (%)	21	22.3	22.6	—
出 鉄 量 (t/d)	891	1,013	956	833
コークス比 (kg/t)	722	692	661	700
送風量 (Nm³/mn)	1,306	1,294	1,122	1,202
湿 分 (g/Nm³)	13	16.6	19	19.9
送 風 温 度 (°C)	646	655	721	670
炉頂ガス温度 (°C)	283	265	231	269

5.3.3 酸素富化操業実績

川鉄・千葉第 1 高炉における操業結果を表 5.4 に示した。全般的に酸素富化により冷え気味の炉況が好転し予期以上の効果をあげている。

八幡・東田第 5 高炉の試験では通常操業、富化操業、高増風操業と 3 つの場合を比較した。1% 酸素富化によつて出鉄量は 6.8% 増加し、コークス比は少々低下した。高増風試験では 18% 送風量増加によつて 3% 酸素添加時と同出鉄量が得られた。明らかに酸素富化が送風量増加と同じ効果にあることを示している。その結果を表 5.5 に示す。

鋼管・鶴見第 2 高炉の試験結果では、出鉄量は酸素 1% 富化について約 5.6% 増加し、コークス比については若干低下している。酸素富化時に懸念される炉況不安定については 25~27 g/Nm³ の蒸気添加で十分としている。この結果を表 5.6 に示す。

富士・広畑第 1 高炉では適正な蒸気添加のもとで酸素 1% 当り出鉄量 5.8% 増加するがコークス比については

幾分下がる傾向ある。その結果を表5.7に示す。

解析の結果羽口先燃焼温度は2,200°C以下になるように、酸素、風温、水蒸気量を調整する必要があるとしている。

以上述べたように送風に酸素富化した場合1%富化に対し約6%前後の出銑量の増加がみられ、またボッシュガス量が限界に達していない場合の酸素富化操業は酸素量が同じならば増風操業と同じ効果を示す。

コークス比については富化によつて炉況に大きな変動のない場合はほぼ変わらないと見ることが出来る。

酸素富化と同時に水蒸気を使用することが炉況安定上必要であるが、酸素量と比例して水蒸気も増しておく必

表 5.5 酸素富化操業結果(八幡・東田第5高炉)

	酸素富化	普通操業	高 増 風
送 風 中 O ₂ (%)	23.6	21	21
出 銑 量 (t/d)	696	591	695
コークス比 (kg/t)	640	652	649
送風量 (Nm ³ /mn)	716	719	850
湿 分 (g/Nm ³)	30.4	21.1	21.0
送 風 温 度 (°C)			
炉頂ガス温度 (°C)	175	200	206

表 5.6 酸素富化操業結果(鋼管・鶴見第2高炉)

	普通操業	酸 素 富 化 操 業		
	I	III	IV	VI
送 風 中 O ₂ (%)	21.1	22.2	22.4	22.7
出 銑 量 (t/d)	543	547	585	814
コークス比 (kg/t)	625	634	610	610
送風量 (Nm ³ /mn)	614	611	623	625
湿 分 (g/Nm ³)	25	26	26	27
送 風 温 度 (°C)	823	772	788	825
炉頂ガス温度 (°C)	230	213	202	207

表 5.7 酸素富化操業結果(富士・広畑第1高炉)

	普通操業	酸 素 富 化 操 業		
	34.8	34.9	34.10	34.11
酸素添加 (%)	—	0.7	2.9	3.1
出 銑 量 (t/d)	1,443	1,428	1,427	1,506
コークス比 (kg/t)	609	609	603	596
送風量 (Nm ³ /mn)	1,670	1,583	1,474	1,460
湿 分 (g/Nm ³)	22.5	26.3	31.4	33.4
送 風 温 度 (°C)	902	846	825	836
炉頂ガス温度 (°C)	188	181	152	154

要があるとする考えと、一定量の水蒸気を添加しておけば十分だという2つの考え方があるが、いずれにしても羽口先温度を極度に過熱しないような配慮が必要である。

5.4 燃料吹込み

5.4.1 燃料吹込みの意義と発展の経過

高炉の燃料および還元剤としては、従来は炉頂から装入されるコークス、あるいは木炭のみであつたが、近年主として重油等の燃料を送風羽口より吹込む技術が開発されてきた。

わが国では、昭和32年頃よりすでに一部では調査研究が進められており、昭和35年には鉄鋼技術共同研究会で理論面に関する検討が行なわれて以来、急速に実用化の実験研究が行なわれるようになった。特に注目されてきたのは、アメリカおよびヨーロッパで、実際の吹込試験に成功して、従来懸念されていた作業上、安全上の問題が大きいものではないことがわかつたためである。またわが国では製鉄用石炭資源が不足でコークスが高価であつて、銑鉄原価の約1/3を占め、重油がかえつて安価であるため急速に開発されることになつた。アメリカでは天然ガスが、ヨーロッパでは重油が主として研究されたのは資源的経済的立地条件によるもので、わが国ではヨーロッパ以上にコークスと重油の価格差があるのでさらに有利と考えられている。

わが国で実際操業に応用されたのは、重油では昭和36年4月鋼管・川崎第3高炉で、Cガスでは昭和36年6月八幡・東田第5高炉で、吹込まれたのが最初である。昭和36年度中に燃料吹込を実施した高炉は15基で、その後も各社競つて吹込設備を設置し、昭和37年7月現在では、稼動中高炉38基の内19基で重油あるいはガスを吹込んでいる。表5.8に現在(昭和37年7月)吹込んでいる高炉の燃料の種類、量、コークス比などを示す。

重油吹込みによつて種々の利点が予想されたが、特に著しいコークス比の低下が得られ、さらに操業も安定した。重油吹込設備は安価であるから、高価なコークス炉設備の節減にもなり、総じて、銑鉄原価低減に役立つている。

5.4.2 燃料吹込の理論

高炉に燃料を吹込んだ場合、炉を順調に操業するためには、物理的、熱化学的操業条件を普通操業と比較してあまり変化させないことが必要となろう。その必要条件として羽口先の燃焼温度を一定にすること、あるいはボ

表 5・8 各社の燃料吹込状況と成績 (37年 7 月分)

高 炉	内容積	吹込開始	吹込燃料	吹込羽口数	吹込燃料比	コークス比	吹込方法	アトマイズ実験	制御装置	吹込ガス釜	蒸気ページ方		
	(m ³)				(kg/t)	(kg/t)				(mm)	法		
八幡 東田	4	512	S 37. 2.13	重油	10/12	19.3	571	ブローパイプ		⑤自①手	4~5		
	5	646	37. 3.23	"	10/12	80.2	459	"		⑤自①手	4~5		
	洞岡	3	1,184	37. 1. 5	"	14/16	39.4	529	"	⑤自①手	4~5		
富士 室蘭	1	1,042	36.10.25	重油	10/16	60	562	空気噴化型ランス型	○	⑥自①手	3	全羽口同時自動 全羽口片独手動 羽口毎手動	
	2	1,042	37. 5.15	"	14/16	66	538	羽口型		⑥自①手	3		
	釜石	1	1,018	37. 1.16	"	12/14	61	562	"		⑥自①手	3	"
		2	1,610	37. 5.26	"	18/20	56	470	"		⑥自①手	3	"
	広畑	1	1,273	37. 1.15	"	16/16	61	511	空気霧化型ランス型	○	⑤手③自	3.2	蒸気ページ羽口 毎手動 空気ページ羽口 毎自動
		2	1,250	37. 1.12	"	16/16	71	474	羽口型		—③自	3	
3		1,515	37.10.12	"	20/20	* 48	* 508	ブローパイプ		⑤自①自	6		
鋼管 川崎	2	1,137	36. 9. 7	重油	14/16	55.2	455	羽口型		⑥自①手	3	羽口毎手動	
	3	965	36. 4.15	"	9/14	43.6	539	"		⑤手①手	4		
	4	881	36.10. 1	"	8/12	39.1	583	"		⑥自①手	3		
	5	903	36.11.16	ガス重油	10/14	△ 25.3	581	"		⑥自①手	3		
	鶴見	1	1,143	37. 7. 7	重油	14/16	34	501	"		⑥自①手	3	手動ページ (タイマー設置) 手動
2		516	37. 2.10	"	9/10	51	535	"		⑥自①手	3		
川鉄 千葉	4	1,689	36.12.18	重油	12/20	33.4	540	羽口型ランス型		⑤自①手	2.5~3	エヤーページ	
住金 小倉	1	527	37. 6. 3	重油	10/12	58	505	羽口型		⑥自①手	4~6		
	2	752	37. 2. 7	"	12/14	61	519	"		⑥自①手	4~6		
	和歌山	1	1,350	37. 8. 3	"	18/20	* 49.8	* 493	"	⑥自①手	4	自動 (air 使用す)	
大阪 西島	1	326	37.3	重油	12/12	12.7	395	ブローパイプ		⑤手①手	3		
中山 船町	2	678	37.	重油	/12	* 12	* 516						

注) * 印は 11 月成績, △印は単位 (Nm³/t), ① 羽口 1 本毎の燃料流量制御 ② 羽口 1 本毎の燃料衝風比率制御 ③ 羽口ブロックの燃料流量制御 ④ 羽口ブロックの燃料衝風比率制御 ⑤ 主管の燃料流量制御 ⑥ 主管の燃料衝風比率制御

ッシュガス量が一定の限度内であることなどが考えられるが、これらについては調湿、酸素富化送風の理論で記述したとおりで、羽口先の燃焼温度を一定にするためには主として送風顕熱で補償する必要がある。

実際に高炉に燃料吹込みをした場合に、従来のコークスのみの操業と比較して出銑量やコークス比に対する影響を推定するには、上記必要条件の他に種々の仮定を必要とするが、現在までに一般化された考え方はないので各社の考え方を列記する。

(1) 尼崎製鉄

- a. 炉頂ガス中 CO₂/(CO+CO₂), H₂O/(H₂+H₂O) の比は等しく、炉内ボッシュガス速度と羽口先燃焼ガス温度が一定であればその比は変化しないものと仮定した。
- b. 重油吹込はその吹込量 (h kg/Nm³) が酸素富化量 (Zm³/Nm³) あるいは送風温度上昇 (t°C) との間に

次の関係が保たれるような操業をすることによつて羽口先燃焼温度は一定に保持され、順調な操業が行なわれるものとした。

$$z=0.82 h$$

$$t=5.400 h$$

- c. 装入鉱石、原料中鉄分の中、FeO からの鉄分が 10%、Fe₂O₃ からの鉄分が 90% としその他の条件もなるべく一定であるとした。

(2) 八幡・戸畑

- a. 羽口先理論燃焼温度一定
- b. 燃料吹込時の CO, H₂ の還元利用率は通常操業時の粒度に維持される。
- c. ソリューションロスは CO, H₂ の利用率によつてきまる。
- d. 燃料吹込のいかにかわらず熱的にはバランスしている。

e. 出銑量は通常操業時のフル操業と同程度の通気抵抗を保つように操業すれば、ボッシュガスの比重および、ボッシュガス量によつて決まる。

(3) 富士・広畑

出銑量におよぼす効果の推定として

a. CO の利用率と H₂ の利用率は、ボッシュガス中の H₂ ガス濃度によつて決まる。

b. 出銑量はボッシュガス中の還元ガス濃度に比例する。

これらの条件から、送風量一定、ボッシュガス量一定、通気抵抗一定、の条件を付加して計算している。

(4) 鋼管・川崎

a. 羽口先理論燃焼温度一定。

b. 単位時間当りのボッシュガス生成量一定。

c. 銑鉄トン当りの還元ガス生成量は一定量以上必要

d. 上記3条件のもとで、ソリューションロスは銑石の炉内滞留時間によつて変化する。すなわち、出銑量の増加に比例して増加する。

e. 複合送風の実施により N₂(Nm³/t pig) 量が減じ入熱の不足することが考えられるが、シャフト上部の熱収支、温度条件に多少の余裕があり、炉頂ガスの顕熱の減少で補償されて、実際上の制約条件にならない。

f. H₂ の増加はソリューションロスを減少する傾向にあり、また、コークスとの置換により灰分が減少して、銑滓量が低下するので、効果予測値は多少割引かれたものになる。

吹込燃料としては、重油、Cガス、Rガス (Cガスから脱水素したもの)、ナフサ、タール、微粉炭、各種スラリーなどが考えられるが、それらの代表的なものの成分例を表5.9に示す。現在使用されている吹込燃料はほとんどが重油である。

5.9 表のような各種燃料を吹込む場合、羽口先の燃焼温度を一定にするための熱補償量の計算例を表5.10に示し、出銑量、コークス比の効果計算を表5.11に示す。これは表5.11にしたがって熱補償した場合の計算結果である。

表 5.9 各種燃料の成分値 (%)

	C	H(H ₂)	O(O ₂)	N(N ₂)	S(H ₂ S)	(CO)	(CH ₄)	(C ₂ H ₄)	(CmHn)	(CO ₂)	灰分
重油	86.6	10.8	1.1	0.2	1.3						
ナフサ	85.0	15.0	—	—	—						
コークス炉ガス		(52.8)	(0.1)	(2.1)	(0.3)	(5.9)	(30.3)	(3.3)	(2.8)	(2.4)	
Rガス		(0.5)	(0.2)	(10.5)	—	(14.0)	(69.0)	(2.0)	(3.7)	—	
微粉炭	79.0	5.0	6.8	1.5	0.5						7.2

注 () 内は容量%

表 5.10 燃料吹込による燃焼帯温度低下に対する熱補償

燃料種類・量	重油 10 kg/t	ナフサ 10 kg/t	Cガス 10 Nm ³ /t	Rガス 10 Nm ³ /t	微粉炭 10 kg/t
送風温度 (°C)	+40	+42	+29	+50	+28
水蒸気 (g/Nm ³)	-5	-5.2	-3.7	-6.2	-3.6
酸素富化 (%)	+0.68	+0.75	+0.51	+0.94	+0.50

表 5.11 コークス比および出銑量の変化

燃料	コークス比 (kg/t)			出銑量 (%)		
	風温	水蒸気	酸素	風温	水蒸気	酸素
重油 10 kg/t	-15.0	-12.0	-11.5	+0.77	-0.31	+2.08
ナフサ 10 kg/t	-16.9	-13.8	-13.5	+1.08	-0.24	+2.59
Cガス 10 Nm ³ /t		-6.0			-0.01	
Rガス 10 Nm ³ /t	-14.4	-11.0	-10.6	+1.41	-0.17	+3.15
微粉炭 10 kg/t	-11.8	-9.6	-9.4	+0.25	-0.76	+1.18

5.4.3 燃料吹込設備

燃料吹込設備は比較的簡単で安価であり、現有設備で大きな改造を必要としない。わが国では、重油、CガスRガスが高炉に吹込まただけであるが、外国での他の燃料の吹込み例を見てもおよそ同様の吹込設備を有している。重油の場合を例にとると、主な設備として、貯蔵タンク、ポンプ、加熱装置、ストレーナー、温度、圧力、流量などの制御装置、緊急遮断弁などの安全装置、およびそれらを結ぶ配管と吹込装置であるが、各社の設備例は次のとおりである。

(1) 制御設備

燃料の吹込操作では、安定した操作をするために吹込口である送風羽口での単位時間当りの燃焼量が一定であることが好ましいが、そのために一般的

に考えられる流量の制御系としては次の6つの場合があり、またおのおのに自動、手動の区別がある。すなわち

① 羽口一本ごとの燃料の流量制御

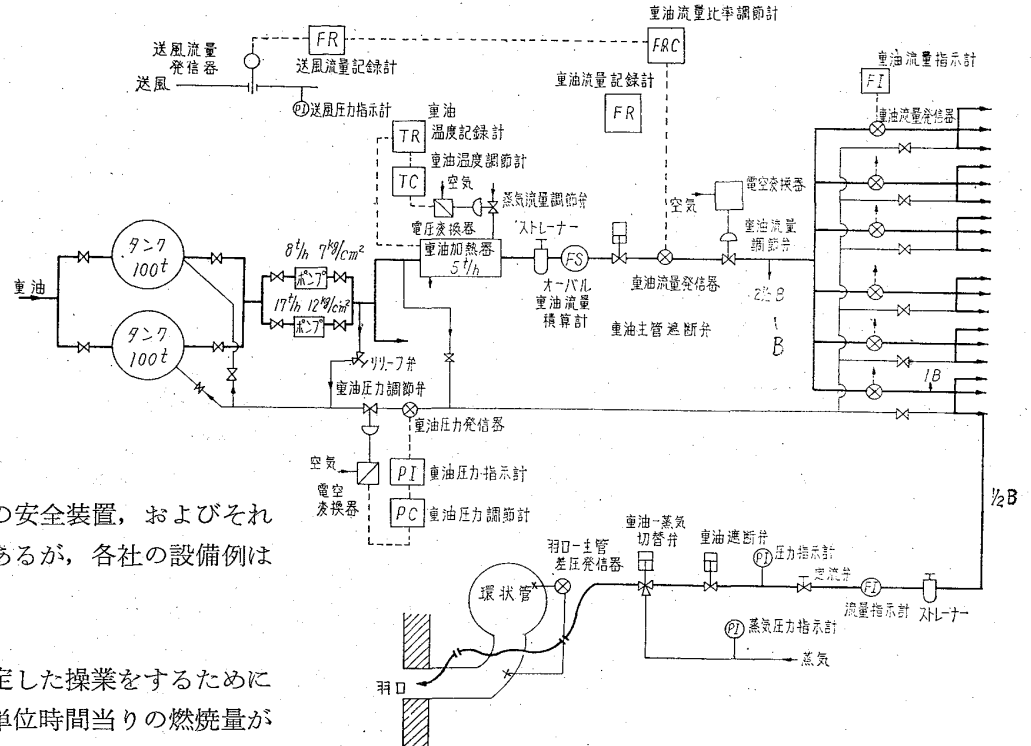


図5.15 重油吹込制御系統図(住金・和歌山第1高炉)

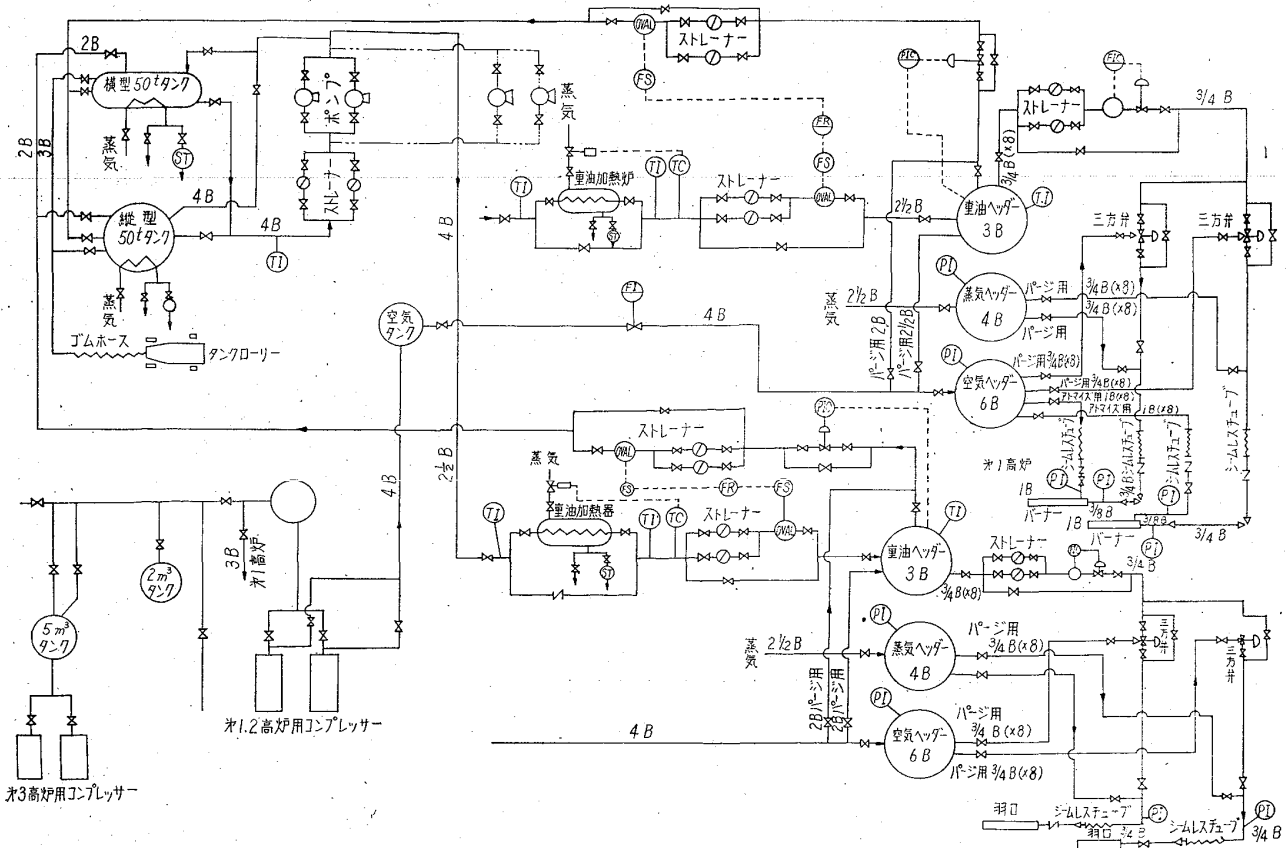


図5.16 重油吹込装置系統図(富士・広畑第1, 第2高炉)

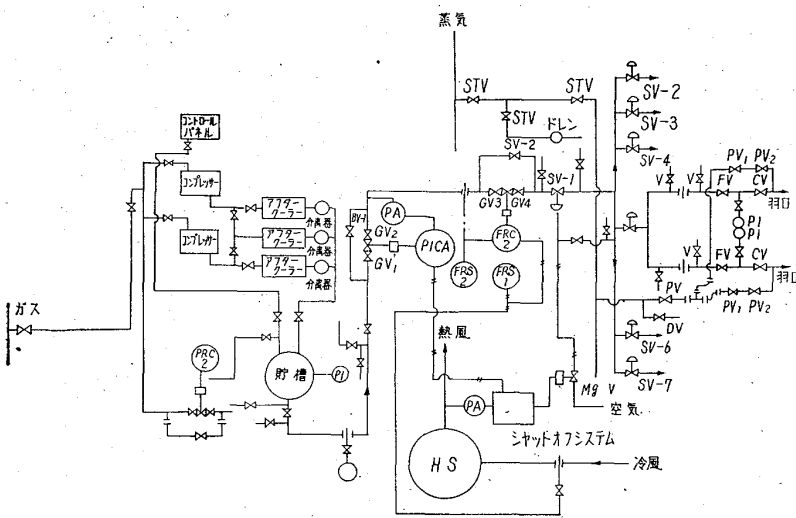


図5.17 Rガス吹込設備系統図 (鋼管・川崎第5高炉)

- ② 羽口一本ごとの燃料衝風の比率制御
- ③ ブロック (何本かの羽口) の燃料の流量制御
- ④ ブロックごとの燃料衝風の比率制御
- ⑤ 高炉への全吹込燃料の流量制御
- ⑥ 高炉への全吹込燃料衝風の比率制御

で、作業性のよいブローパイプ型が採用される傾向にある。

であるが、わが国における制御系は⑥を自動制御し、①を手動で制御する組み合わせのものが多い。その制御系は表5.8中に示す通りである。設備例として、重油の場合を住金・和歌山第1高炉 (図5.15)、富士・広畑第1、第2高炉 (図5.16) で示し、Rガスの場合を鋼管・川崎第5高炉 (図5.17) で示す。

圧力の制御については戻り管を設けて、戻り弁と自動制御するものと手動でやるものがある。

温度の制御は、加熱を蒸気で行なつて、自動制御するものが多い。

(2) 吹込装置

吹込装置は、バーナーあるいはノズルから成るが、現在の吹込位置から次の3つに区分される。

- ① 羽口を貫通させて入れる方法
- ② ブローパイプより斜めに入れる方法
- ③ 覗き孔から入れる方法

これらから吹込んだ燃料 (主として重油) を霧化する方法としては

- Ⓐ 重油を低圧のまま吹込み高速の熱風により霧化させる方法
- Ⓑ 重油を高圧で自圧により機械的に霧化させる方法
- Ⓒ 圧縮空気などの他の気体により霧化させる方法

吹込ノズル径は 3 mmφ 程度が多い

(3) 安全装置

燃料吹込設備は高温の高炉々廻りに配管する必要があるため、維持が容易である上に、十分な安全性を備えることが必要である。特にガス吹込設備ではその爆発性の

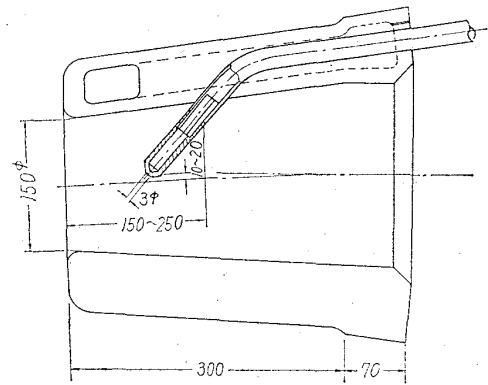


図5.18 羽口 (貫通) 型吹込装置 (富士・釜石)

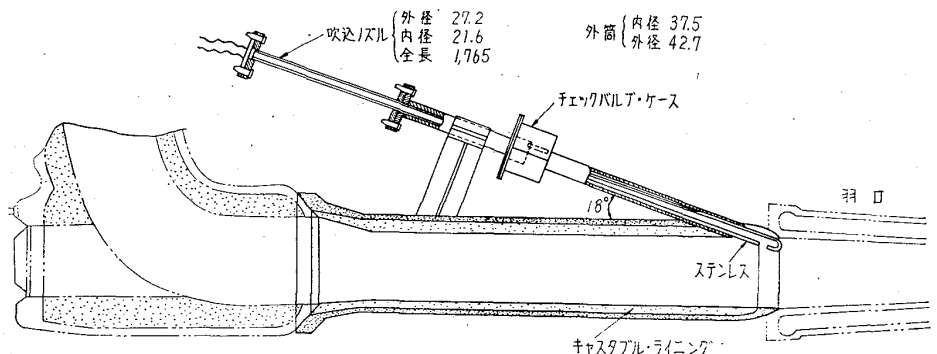


図5.19 ブローパイプ型吹込装置 (八幡・東田)

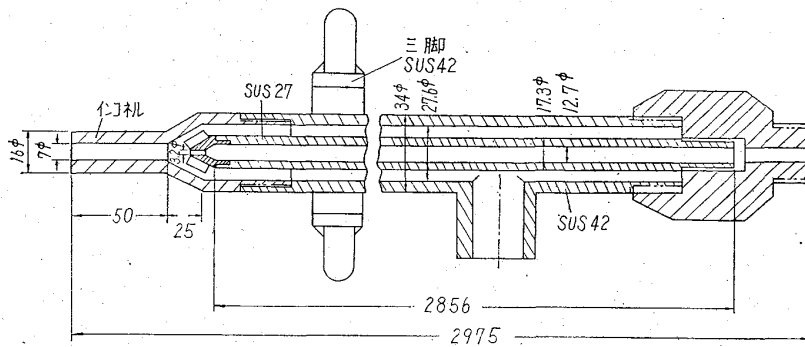


図5.20 空気霧化型吹込装置 (富士・広畑)

点からより一層の安全設備と注意が必要である。ある一つまたは幾つかの羽口で送風圧力の低下がおきた時、送風管内にガスが逆流すること、またガス管内に送風空気が逆流することがあつてはならない。そのために種々の安全装置が採られているが、最も多い例は次のように3段に安全弁を設けるものである。

- ① 本管遮断弁
- ② 支管遮断弁
- ③ 羽口前遮断弁

これらは制御系と交錯しているもので、実際例としては先の図5.15～図5.17に示すとおりである。

(4) 配管の清浄

重油を吹込んでいる高炉では吹込みを停止した時ノズル内の重油の焼きつきを防ぐために直ちに重油を除去する設備が必要で、普通は蒸気によつて行なっている。吹

込ノズルの保守上、自動制御するものもあるが、現在は手動操作のものが多い。

5.4.4 燃料吹込操業成績

(1) 操業成績

重油吹込の操業成績を表5.12～表5.16に、ガス吹込の成績を表5.17～5.18表に示す。

a. 出銑量

燃料吹込を始めた時、出銑量増大が期待されていたが、実際の出銑量の増加は操業成績表に示すとおりまちまちである。

b. コークス比

燃料吹込によるコークス比の低下の実績も操業成績表に示すとおりである。計算によればコークス比の低下は、燃料の種類、熱補償の方法によつてことなり、表12～18に示すように重油の場合、重油1kgに対してコークス 1.2～1.7 kg に置換すると考えられる。しかし実際の操業では、熱風炉の余剰能力、添加湿分の余裕などから熱補償は計算どおり行なえないものが多く、あるいは熱補償を全く行なわなくてもある程度操業は可能である。そして実際の操業でかなり良い置換率を得ているのは、還元ガス中の水素の効果、あるいは酸素の利用などによるものと考えられる。

表 5.12 重油吹込操業例 (鋼管・川崎第2高炉)

	基 準 期 間											
	36 8/27 ~9/15	9/7~10	9/11 ~15	9/16 ~20	9/21 ~25	9/26 ~30	10/1~5	10/6 ~10	10/11 ~15	10/16 ~20	10/21 ~25	10/26 ~31
出 銑 量 (t/d)	1,392	1,382	1,342	1,399	1,398	1,416	1,426	1,356	1,356	1,367	1,378	1,341
コークス比 (kg/t)	609	553	531	524	509	484	504	506	506	505	506	515
重油比 (")	—	31.4	45.7	49.2	71.5	75.7	71.0	76.0	76.0	86.0	83.2	84.4
送風量 (m ³ /mn)	1,630	1,610	1,602	1,596	1,646	1,628	1,640	1,640	1,640	1,665	1,660	1,640
送風圧 (g/cm ²)	1,090	1,200	1,160	1,130	1,120	1,110	1,120	1,200	1,200	1,190	1,230	1,230
送風温度 (°C)	873	823	812	904	894	882	930	910	910	850	900	890
送風湿分 (g/m ³)	30.1	28.3	25.2	20.0	14.0	15.0	15.0	17.2	19.4	19.6	29.2	22.2
銑 中 Si (%)	0.65	0.67	0.66	0.69	0.70	0.75	0.69	0.70	0.69	0.69	0.68	0.70
" S (%)	0.043	0.029	0.059	0.051	0.041	0.060	0.068	0.055	0.055	0.056	0.071	0.053
鉄 滓 比 (kg/t)	359	366	368	374	366	346	379	395	783	386	361	380
鉄 滓 塩 基 度	1.16	1.21	1.14	1.19	1.17	1.09	1.14	1.14	1.16	1.14	1.19	1.18
炉頂ガスCO ₂ (%)	15.6	15.2	15.6	15.8	15.1	15.3	15.5	14.9	14.6	14.9	15.6	15.3
" CO (%)	26.1	25.0	24.7	25.0	25.0	24.6	24.7	24.8	25.3	24.8	24.4	24.9
" H ₂ (%)	3.0	3.5	3.6	3.5	3.6	4.3	4.4	4.6	4.7	5.0	5.1	4.7
置 換 率	—	1.78	1.71	1.73	1.40	1.65	1.41	1.34	1.39	1.21	1.23	1.11

表5・13 重油吹込操業例 (川鉄・千葉第4高炉)

	基 準 期 間				
	36 12/19~1/9	37 1/10~1/31	2/1~2/14	2/15~3/10	3/11~3/20
出 銑 量 (t/d)	1,740	1,760	1,830	1,950	2,034
コークス比(kg/t)	616	588	569	546	538
重油比(kg/t)	9・84	25・6	35・8	44・0	50・9
送風量(m ³ /mn)	2,028	2,033	2,072	2,139	2,265
送風圧(g/cm ²)					
送風温度(°C)	805	820	836	841	901
送風湿分(g/m ³)	18	15	10	10	10
銑中Si(%)	0・98	0・88	0・87	0・87	0・84
“ S(%)	0・038	0・038	0・035	0・038	0・035
鉍滓比(kg/t)	314	333	325	329	335
鉍滓塩基度	1・06	1・07	1・07	1・08	1・08
炉頂ガスCO ₂ (%)	15・9	15・9	15・2	15・5	16・1
“ CO(%)	24・8	24・1	25・4	25・5	24・4
“ H ₂ (%)	2・4	2・1	2・3	2・5	2・6

表5・14 重油吹込操業例 (富士・釜石第1高炉)

	基 準 期 間						
	37 1/11~1/20	2/1~2/10	2/11~2/20	2/21~2/28	3/1~3/10	3/11~3/20	3/21~3/31
出 銑 量 (t/d)	1,342	1,393	1,408	1,363	1,324	1,390	1,352
コークス比(kg/t)	560	515	494	479	476	456	462
重油比(kg/t)	—	31・2	45・4	69・7	71・4	64・9	60・7
送風量(m ³ /mn)	1,596	1,637	1,595	1,639	1,587	1,600	1,512
送風圧(g/cm ²)	988	1,043	1,031	1,147	1,103	1,067	1,055
送風温度(°C)	854	824	854	884	873	891	968
送風湿分(g/m ³)	13	13	12	11	12	10	11
銑中Si(%)	0・65	0・64	0・56	0・56	0・49	0・47	0・56
“ S(%)	0・033	0・036	0・031	0・035	0・034	0・033	0・039
鉍滓比(kg/t)	383	389	349	379	414	349	349
鉍滓塩基度	1・28	1・29	1・32	1・32	1・31	1・36	1・31
炉頂ガスCO ₂ (%)							
“ CO(%)							
“ H ₂ (%)	2・6	3・4	3・7	4・9	5・4	4・9	4・4
置 換 率	—	1・44	1・50	1・16	1・19	1・60	1・61
CO/CO ₂	1・30	1・30	1・30	1・34	1・29	1・36	1・34

表5・15 重油吹込操業例 (住金・小倉第2高炉)

	基 準 期 間				
	37 2/1~2/6	3/18~3/31	4/3~4/15	4/16~4/23	4/24~4/30
出 銑 量 (t/d)	1,060	1,124	1,091	1,098	1,109
コークス比(kg/t)	575	533	535	537	526
重油比 (〃)	0	29.5	29.1	31.9	33.5
送風量(m ³ /mn)	1,164	1,187	1,144	1,150	1,150
送風圧(g/cm ²)	1,000	1,043	1,019	1,007	1,027
送風温度 (°C)	903	929	934	932	935
送風湿分 (g/m ³)	20	26	28	26	27
銑中 Si (%)	0.57	0.57	0.61	0.59	0.49
〃 S (%)	0.046	0.058	0.057	0.059	0.058
鉍滓比(kg/t)	343	358	393	380	387
鉍滓塩基度	1.27	1.20	1.22	1.24	1.22
炉頂ガス CO ₂ (%)	16.4	16.5	16.3	16.1	16.2
〃 CO (%)	24.4	24.5	24.8	24.9	24.9
〃 H ₂ (%)	2.0	2.5	2.7	2.8	2.9
ガス灰(kg/t)	59	83	91	88	76
置 換 率		1.42	1.37	1.19	1.46

表5・16 重油吹込操業例 (大阪・西島第1高炉)

	基 準 期 間									
	5/6~11	13~26	28~6/7	10~18	20~29	7/7~20	22~29	8/1~6	12~17	20~31
出 銑 量 (t/d)	542	540	531	519	520	447	443	429	450	467
コークス比(kg/t)	550	506	442	420	391	378	367	391	405	475
重油比 (〃)	40	52	86	117	107	131	153	135	128	112
送風量(m ³ /mn)	489	477	451	451	432	362	357	362	399	401
送風圧(g/cm ²)	716	612	582	671	600	592	701	727	820	738
送風温度 (°C)	906	963	1,004	1,012	1,024	1,042	1,048	1,045	1,048	1,031
送風湿分 (g/m ³)	71	61	40	38	16	22	24	22	23	22
銑中 Si (%)	0.80	0.58	0.54	0.63	0.53	0.59	0.70	0.76	0.77	0.61
〃 S (%)	0.034	0.043	0.037	0.027	0.033	0.029	0.022	0.027	0.021	0.027
鉍滓比(kg/t)										
鉍滓塩基度	1.22	1.19	1.20	1.23	1.23	1.19	1.19	1.13	1.15	1.16
炉頂ガス CO ₂ (%)	17.0	17.4	17.6	18.1	19.2	19.6	19.3	19.2	18.7	17.8
〃 CO (%)	27.6	26.4	24.7	24.1	22.6	23.6	24.5	23.8	24.1	
〃 H ₂ (%)	3.6	4.3	4.8	5.7	5.1	5.1	5.7	5.3	4.6	3.9
O ₂ 富化率	4.3	3.7	3.8	4.3	4.5	5.5	6.4	6.1	5.0	3.9

なお一部では重油に助燃剤を入れて、燃焼効率の向上を狙ったものもあるが、未だはつきりした結果は得られていない。

(2) 効果の判定方法

表5-17 Cガス吹込操業例(八幡・東田第5高炉)

	基準期間	
	35 6/1~14	6/17~27
出鉄量 (t/d)	806	864
コークス比 (kg/t)	612	572
Cガス比 (m ³ /t)	—	55.4
送風量 (m ³ /mn)	909	926
送風圧 (g/cm ²)	749	816
送風温度 (°C)	771	879
送風湿分 (g/m ³)	25	20
鉄中 鉄 Si (%)	0.66	0.63
" S (%)	0.033	0.029
鉄滓比 (kg/t)	404	387
鉄滓塩基度	1.31	1.36
炉頂ガス CO ₂ (%)	15.6	16.0
" CO (%)	25.6	24.8
" H ₂ (%)	3.1	4.2
ガス灰 (kg/t)		
置換率 (kg/m ³)		0.72

表5-18 Rガス吹込操業例(鋼管・川崎第5高炉)

	基準期間			
	3/11~15	4/1~10	4/11~20	4/21~30
出鉄量 (t/d)	1,342	1,349	1,349	1,277
コークス比 (kg/t)	607	565	572	570
Rガス比 (m ³ /t)	0	40.9	40.5	24.8
送風量 (m ³ /mn)	1,420	1,410	1,420	1,410
送風圧 (g/cm ²)	960	1,010	990	1,050
送風温度 (°C)	910	890	890	880
送風湿分 (g/m ³)	20.5	27.0	22.8	88.7
鉄中 Si (%)	0.63	0.65	0.60	0.59
" S (%)	0.046	0.041	0.049	0.027
鉄滓比 (kg/t)	315	340	321	321
鉄滓塩基度	1.20	1.20	1.20	1.25
炉頂ガス CO ₂ (%)	16.5	16.6	16.5	17.0
" CO (%)	26.6	25.2	25.6	25.0
" H ₂ (%)	2.6	3.8	3.6	3.7
ガス灰 (kg/t)	31.1	43.3	35.5	46.6
置換率 (kg/m ³)		1.03	0.86	1.49

燃料吹込の実質的効果はコークスとの置換率であり、可能な限り多量のコークスと置換したい。しかし、実際には重油吹込に伴って炉頂ガス中に未燃分の“すす”が発生するので、これを測定して重油の炉内での利用率を判定する方法も研究されている。八幡や鋼管では分光電計、あるいは色差色度計により、炉頂ガス中すすの濃淡を測定したり、あるいは炉頂ダスト中の油分の測定をしたりしている。

(3) ガス利用率

燃料吹込にともなつて、ボッシュガスが変化し CO、H₂ ガス濃度が実際には変化して、その利用率が向上するであろうと期待され、その解析、検討が進められているが、現在までの解析ではガス利用率はあまり変わらない。

(4) 操業推移と問題点

一般には燃料吹込によつて炉況は安定するといわれおり各社の経験でもある吹込量まではコークス比が低下し炉況が安定している。現状では重油 50 kg/t 程度の吹込量が最も多く、100 kg/t 以上の吹込操業をしているものもある。しかし、吹込量を増大していくと順次コークスとの置換率も低下し (一例を 図 5.21 に示す)、また吹込量を増大し過ぎると、かえつて炉況は不安定となり、“すす”を生成しその影響がガス清浄系統に顕著に現われ、清浄作業に支障をきたすこともある。図 5.22 に羽口型での重油の燃焼状況を示す。

ガス清浄系統は乾式、湿式いずれにも問題を生じている。殊に乾式コットレルの場合に碍子破損を生じたり、湿式ベンチュリーの場合にその帯電装置のプリアイオナイザーが種々の故障を起こしたり、湿式タイゼンでその分離塔が詰まつたりしている。

操業面では、コークス比の低下にともなつて通気性が害され、棚吊り、スリップの原因となり、また重油の場合は S 含有量が高いと鉄鉄 S が上昇して鉄鉄成分に影響がみられる。

作業面では、ノズルの詰まりが問題になり、ノズルの構造と同時にノズル径を検討している。

以上高炉への燃料吹込みについて述べたが燃料吹込技術は装入原料の予備処理とともに、高炉内の反応を改善し、炉況を安定し、コークス比を低下させ、安価燃料の使用によつて鉄鉄原価の低下に大きく役立つ。

現在、燃料吹込の実施および計画のあるものは22基あるが、やがて全高炉で実施され、また一方では、幾多の問題点を解決しながら、その吹込量も漸増していくものと考えられる。

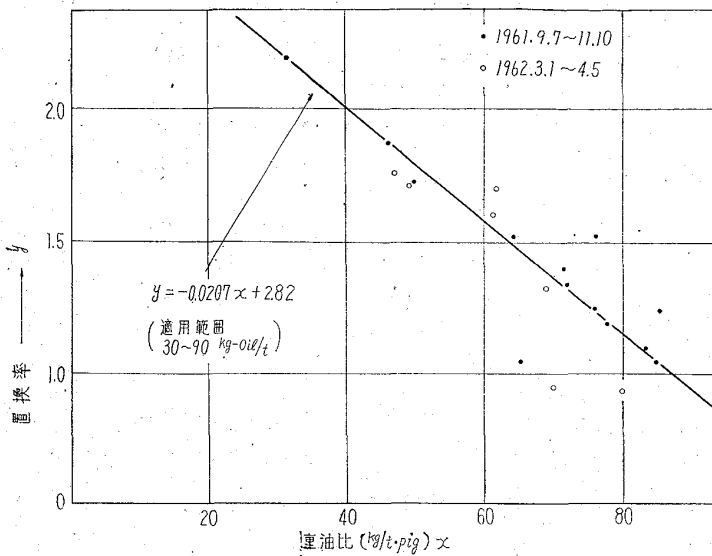


図5.21 重油比と置換率の関係

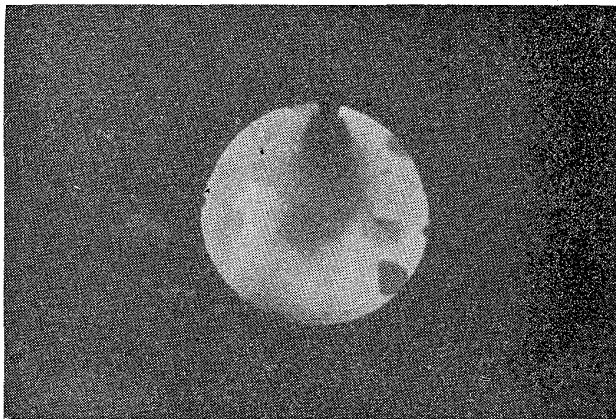


図5.22 羽口型による重油の燃焼状況

わが国の現状では、重油が経済上、作業上最も有利に操業できるので、今後、さらに熱補償量や吹込方法の検討が進んでその効果を上げていくものと考えられるが、また一方、タール、ナフサ、微粉炭などのさらに有利な吹込燃料を見出すために研究が進められるであろう。

また、昭和37年にはフランスのポンペイ社と国内製鉄12社が燃料吹込に関して技術提携を結び、B.F.I 委員会(Blast Furnace Fuel Injection Committee)を設けて技術の受入、および情報の交換を行なつて、燃料吹込技術の進歩を計っている。

5.5 焼結鉄の配合の増加

5.5.1 焼結法の高炉操業におよぼす効果

粉鉄石処理の観点から出発した焼結法は鉄鉱石の整粒強化にとまらぬ粉鉄石発生量の増大により設備を拡張し、焼結鉄の高炉原料として占める比率は年とともに増大した。

この結果、焼結鉄性状の高炉操業成績におよぼす影響も重視され、多数の研究がなされた。

昭和30年頃には石灰石を原料中に配合した自溶性焼結鉄の基礎研究が発表され始め、昭和33年、34年には自溶性焼結鉄を多量に使用した操業試験が各社であい次いで実施され、自溶性焼結鉄が他の鉄鉱石に比し高炉操業上極めて有利なことが確認された。これは焼結鉄、特に自溶性焼結鉄が他の鉄鉱石に比較して還元性が良好なためである。

すなわち自溶性焼結鉄の使用はコークス比の低下出鉄量の増大に画期的な役割をはたし、コスト面でも、高炉の能力面でも、これまでの常識を大きく変化させるにいたつた。その後、調湿操業、酸素富化操業の効果増大にも欠くことのできない高炉原料となつたが、最近では燃料吹込み、高圧操業等の新技術の効果増大にも、その使用の有利性が確認されつつある。まさに自溶性焼結鉄は、原料処理技術上の一つの頂点といつても過言ではあるまい。

昭和35年4月に火入れした大阪・西島第1高炉などは現在稼働中の高炉としては小型であるが、100%自溶性焼結鉄使用、酸素富化操業を本旨として操業を始め、世界で初めてコークス比500 kg/t-pig 台の壁を破つて400 kg/t-pig 前後、出鉄比1.4~1.5 t/m³d という成績を誇るにいたつた。

ちなみに最近における全国の焼結鉄使用状況を表5.19 および図5.23に示す。この図において昭和34年から35年上期にかけて焼結鉄使用割合が低下しているのは出鉄量の増大に比し焼結設備の増強が遅れたためである。

(1) コークス比への効果

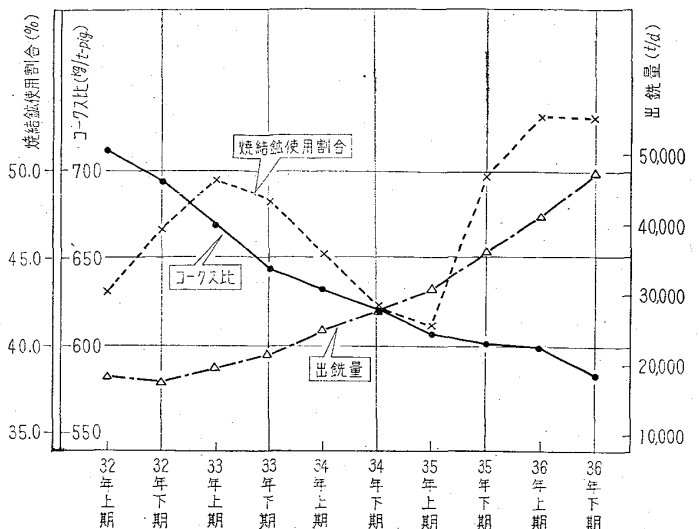


図5.22 わが国における出鉄量、コークス比および焼結鉄使用割合の推移

表 5.19 最近の各社の焼結鉄使用状況

			昭和32年	33年	34年	35年	36年
八幡	東田	出鉄量(t/d)	1,997	2,133	2,541	2,560	2,778
		コークス比(kg)	695	650	634	637	612
		焼結鉄使用割合(%)	43.8	47.5	40.7	42.8	46.5
幡	洞岡	出鉄量	3,760	4,107	4,786	4,947	4,727
		コークス比	684	629	617	614	596
		焼結鉄使用割合	41.8	46.9	42.4	44.8	51.6
幡	戸畑	出鉄量			1,303	2,764	4,750
		コークス比			596	587	566
		焼結鉄使用割合			37.1	50.8	58.7
住	小倉	出鉄量	651	1,013	1,412	1,632	1,692
		コークス比	689	638	621	591	590
		焼結鉄使用割合	51.3	61.1	54.8	49.6	47.7
金	和歌山	出鉄量					1,453
		コークス比					553
		焼結鉄使用割合					63.9
富	室蘭	出鉄量	2,023	2,067	2,763	3,230	4,902
		コークス比	719	678	645	625	612
		焼結鉄使用割合	44.9	68.9	91.6	51.4	62.9
士	釜石	出鉄量	1,584	1,664	2,084	2,189	2,515
		コークス比	690	652	607	627	613
		焼結鉄使用割合	51.5	56.6	48.1	49.0	67.0
士	広畑	出鉄量	2,016	2,295	2,861	3,645	4,955
		コークス比	674	616	614	608	576
		焼結鉄使用割合	50.8	51.8	49.0	59.5	66.2
尼崎		出鉄量	912	956	1,140	1,658	1,892
		コークス比	760	701	637	576	547
		焼結鉄使用割合	58.3	54.7	52.2	74.3	81.4
中山		出鉄量	1,049	1,018	1,059	1,337	1,353
		コークス比	778	753	642	647	643
		焼結鉄使用割合	49.0	54.2	50.3	40.5	42.1
鋼管		出鉄量	2,828	2,792	3,686	4,724	6,973
		コークス比	709	664	634	615	588
		焼結鉄使用割合	47.7	53.4	41.2	39.2	47.4
川鉄		出鉄量	941	1,851	1,943	2,947	3,964
		コークス比	698	664	663	670	626
		ベレット使用割合	40.9	35.3	44.5	32.4	40.9 (焼結1.6)
神鋼		出鉄量		580	877	1,062	1,547
		コークス比		692	568	520	559
		焼結鉄使用割合		56.8	52.7	56.2	56.5
大阪		出鉄量				425	517
		コークス比				506	525
		焼結鉄使用割合				99.3	96.9

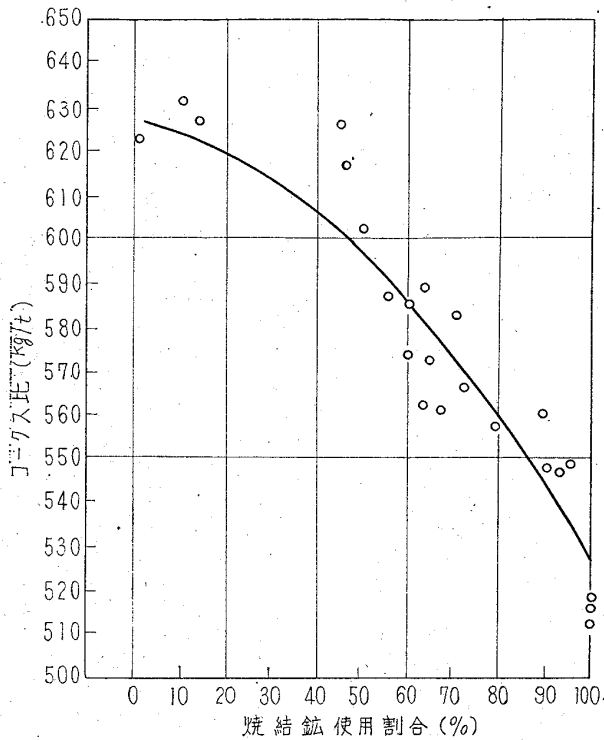


図5-24 焼結鉄使用割合とコークス比との関係 (昭和36年4月～昭和37年1月, 富士・広畑)

焼結鉄の使用割合が増すと、コークス比が低下することはすでに述べたとおりで、その効果の大きいことは他に例を見ない。

その効果を最近の富士・広畑の例で示すと(1)式、図5-24のようである。この場合、焼結鉄使用割合1%の変動に対するコークス比の変動量は、焼結鉄使用割合によって変わり(2)式で示される。

$$CR = 627 \cdot 1 - 0 \cdot 20 x - 0 \cdot 008 x^2 \dots (1)$$

$$d(CR)/dx = -0 \cdot 20 - 0 \cdot 016 x \dots (2)$$

CR : コークス比 (kg/t-pig)

x : 焼結鉄使用割合 (%)

出鉄量範囲 1,420～1,880 (t/d)

もちろん(1)式は一例であつて、操業条件、原料条件、その他各種の条件によつて焼結鉄のコークス比への効果は違つてくる。

表 5-21 焼結鉄使用試験実績 (昭和33年6月～昭和34年3月, 八幡・洞岡)

期 間	3・4・5月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月
焼結鉄中灰石 (%)	0	5	10	10	10	10	10	10	5	5	0
焼結鉄使用割合 (%)	48	40	40	60	80	80	100	100	100	100	100
出 鉄 量 (t/d)	861	840	853	925	901	912	1,003	1,256	1,023	1,241	1,102
コークス比 (kg/t-pig)	632	645	650	628	624	593	518	548	571	563	591
送 風 温 度 (°C)	786	825	819	835	795	825	880	806	869	888	853

表5-20 焼結鉄使用試験実績 (昭和33年9～10月富士・釜石)

期 間	I	II	III	IV
焼結鉄中石灰石 (%)	5	5	0	0
焼結鉄使用割合 (%)	100	85	100	85
出 鉄 量 (t/d)	996	982	990	962
コークス比 (kg/t-pig)	619	633	637	651
送 風 温 度 (°C)	743	784	768	807

たとえば、操業方針をコークス比低下のみを主眼とした場合は、さらに大きな低下が期待されるし、出鉄量増大のみを主眼とすればコークス比の低下は得られないこともありうる。

たとば住金・小倉では焼結鉄使用割合1%増によるコークス比の低下量は使用割合0～85%の時は0.82kg/t-pig、85～100%の時は4.00kg/t-pigとしており、富士・釜石、八幡・洞岡では表5-20, 21のようになっている。

また焼結鉄使用増に対応して減らされる生鉄石の性状コークスの性状、さらには焼結鉄そのものの性状によつても焼結鉄のコークス比への効果が違つてくることは当然であろう。

ちなみに焼結鉄性状のコークス比におよぼす影響の1例として中山製鋼では(3)式を示している。

$$CR = 0.00394 \cdot s \cdot FeO - 0.00165 \cdot s \cdot SI + 635 \dots (3)$$

CR : コークス比 (kg/t-pig)

s : 焼結鉄使用原単位 (kg/t-pig)

FeO : 焼結鉄中 FeO (%)

SI : 焼結鉄強度 (%)

焼結鉄使用割合範囲 40～80 (%)

推定誤差 10.1 kg/t-pig

(2) 出鉄量への効果

焼結鉄の使用割合が増せば出鉄量は増大する。その量は、前項で述べたように操業方針に左右されるが、図5-24のコークス比に対応する出鉄量を焼結鉄使用割合との関係においてプロットすると(4)式図5-25のとおりで

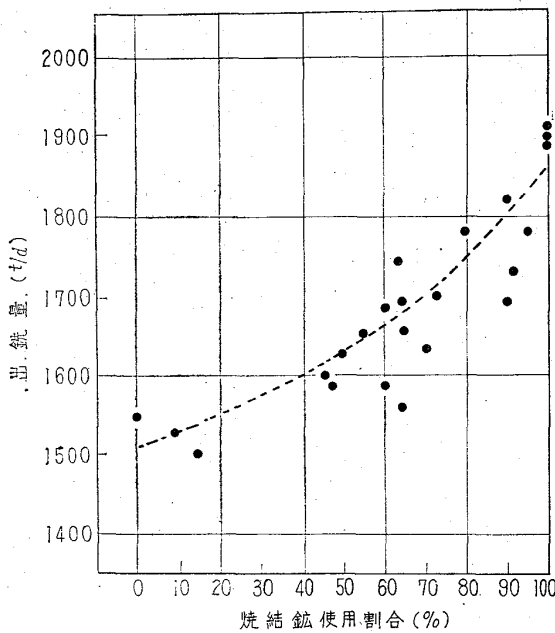


図5-25 焼結鉄使用割合と出鉄量との関係 (昭和36年4月～昭和37年1月, 富士・広畑)

ある。

$$P = 1,514 + 1.23x + 0.022x^2 \dots (4)$$

P : 出鉄量 (t/d)

x : 焼結鉄使用割合 (%)

さらに興味ある解析として住金・小倉では、焼結鉄使用割合と ore/coke 関係式(5)式, (6)式で表わしている。

第1高炉 ore/coke = 0.00512x + C₁ (5)

第2高炉 ore/coke = 0.0059x + C₂ (6)

x : 焼結鉄使用割合 (%)

C₁, C₂ : 定数

(3). 自溶性焼結鉄の特性

焼結鉄のコークス比および出鉄量への効果の原因については、各社で研究されているが、現在までに知られているものを要約すれば次のとおりである。

a. 化学的特性

焼結鉄は生鉄石に比較して、一般に被還元性が大きく特に自溶性焼結鉄は石灰石添加にともない難還元性のファイヤライト (2FeO · SiO₂) の分解と還元性の良好なカルシウムフェライト (nCaO · Fe₂O₃) の生成により被還元性が增大する事が確められている。

b. 物理的特性

生鉄石に比較して多孔質であり、同一粒度分布のものでも空隙率が高く、したがって炉内ガスとの接触が良好である。

c. 操業上の特性

一般に焼結鉄使用割合の増加により炉内の通気性が良好となる。焼結鉄使用割合が低い場合、通常炉内の還元ガスの分布は不均一であるが、焼結鉄使用割合の増加にともない、均一化してくる。この状況を図5-26 および図5-27 に示す。

このことは、還元ガスの利用率が高まるとともに、還元利用される炉内容積が増すことを意味する。

さらに焼結鉄使用割合の増加は高炉炉況を安定させ、高温、低湿、重装入操業が容易となり、出鉄量増加、コークス比低下に大きく寄与する。この炉況安定の原因は鉄滓および鉄鉄の生成機構が変ることによると考えられている。

このことは八幡製鉄の試験高炉によつて検討されており、次のような結果が得られている。図5-28, 図5-29, 図5-30は試験高炉のシャフト下部, 炉腹, 朝顔の各箇所から試料を取り、鉄滓塩基度, 粒鉄の生成状況を調査し

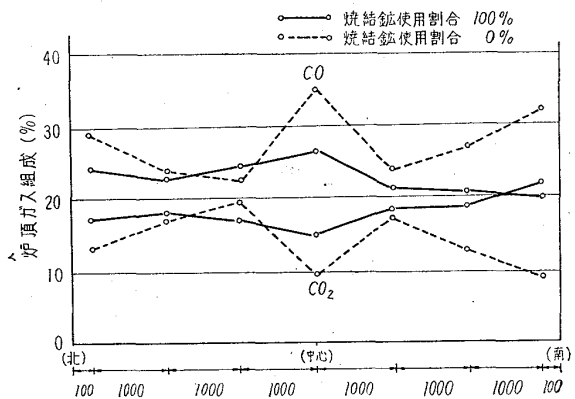
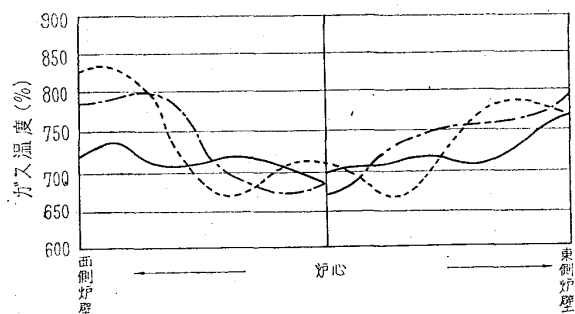


図5-26 焼結鉄使用割合と炉頂ガス組成との関係 (昭和36年, 富士・広畑)



図中の記号	——	- - -
標準コークス比 (kg/t-pig)	550	630	710
焼結鉄使用割合 (%)	100	50	0

図5-27 焼結鉄使用割合と炉内ガス温度との関係 (昭和33年, 住金・小倉)

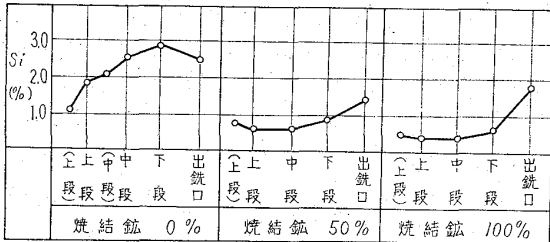
た結果である。

図5・28より、焼結鉍使用割合の増加とともに生成粒鉄の Si 含有量は低くなり、したがって図 5・29 に示されるように炉内での鉍滓塩基度も安定し、ポッシュスラグの塩基度が異常に高くなる危険が減少し、粘性の急上昇による棚吊が避けられると考えられる。

図5・30は焼結鉍使用割合増加とともに粒鉄の生成量が各段ともに増加していることを示し、焼結鉍の被還元性が大きいことを意味する。

5.5.2 焼結鉍の効果的使用方法について

住金・小倉の解析によると、普通操業時、設備諸元および操業特性のことなる 2 基の高炉において 100% 焼結



注：(上段)および(中段)はそれぞれ上段のスポンジ鉄の分析値を示す。

図5・28 試験高炉各箇所における粒鉄中の Si %

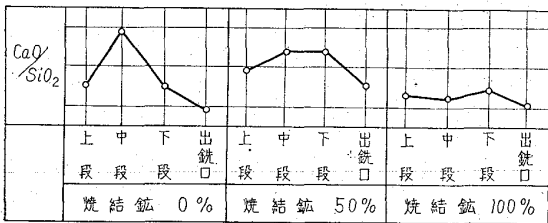


図5・29 試験高炉各箇所における鉍滓の塩基度

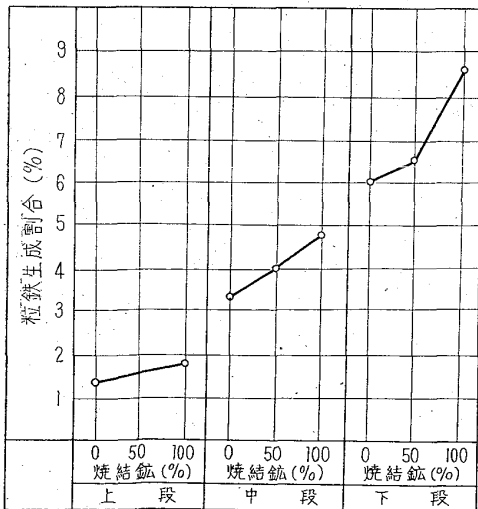


図5・30 試験高炉各箇所における粒鉄生成割合

鉍操業を行なつたところ、きわめて高い普遍性を有することを確認した。このことは 100% 焼結鉍操業が原料要因を除く他の操業要因に対して強い抵抗性をもっているためと考えられる。

一定量の焼結鉍を 2 基以上の高炉で使用する場合、特定の高炉に集中的に使用した時と、全高炉で均等に使用した時といずれが工場の能率を高めるかについては明確な結論は出されていない。しかし八幡・洞岡、富士・広畑で行なつた推定によれば、特定の高炉への集中使用の方が出鉄量、コークス比ともわずかながら有利とされている。ただし、他方の高炉で焼結鉍使用割合が極端に低下した場合トラブルを生ずる危険性も考えられる。

5.5.3 焼結鉍多量使用時の問題点

第 3 章に述べられているように焼結鉍の製造は国内資源活用に大いに役立つている。しかし、国内資源中砂鉄は TiO₂、硫酸滓は Cu, Zn などを多量に含有しているので、焼結鉍使用割合を上げた場合種々の問題が生ずる。

装入 TiO₂ の上昇は、出滓口からの銑鉄流出の原因とされ、焼結鉍多量使用の場合は砂鉄使用量に制約を設けている会社が多い。一方、硫酸滓からの Cu 装入量の上昇は、銑鉄品質を劣化させ、その鋼材にまでおよぼす影響は大きい。また Zn は炉内での沈積により、高炉の炉体保持および操業面に不利益をもたらすとされている。

5.6 高 圧 操 業

5.6.1 高圧操業の意義

高圧操業は戦時中米国において既存高炉の生産を高める方法として始められた。戦後米国およびソ連において逐次行なわれてきたが、わが国での実績はほとんどない。製鉄部会では研究テーマとして高圧操業が取上げられたが、当時国内には実例がなく、研究内容もほとんど文献調査のみに終始していた。わが国初の高圧高炉は昭和37年8月1日火入れされた八幡・東田第1高炉で、引続き同年11月16日には鋼管・水江第1高炉が高圧用として火入れされた。同年末現在で国内には2基の高圧高炉が稼動中で、他に2基(富士・室蘭第3高炉、東海第1高炉)が建設中である。

高圧操業は、原理的には、炉頂ガス管に絞機構を設けて、炉頂におけるガス圧力を高めて行なう操業法で、米国の例では最高炉頂圧力 0.7 kg/cm² (10 lb/cm²) 程度が設備能力の標準となつている。炉頂ガスの圧力を上げると炉内におけるガス圧力も上昇し、炉内ガスの体積が

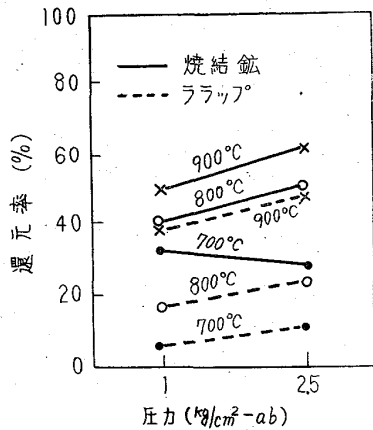


図5-31 圧力と還元率の関係

減少するので送風量を一定に保つて操業する場合には炉内ガスの流速が低下する。理論的には炉内ガス圧力が上昇すれば還元反応が促進されるはずであるが、八幡製鉄所技術研究所でも還元試験によりこの点の実験的裏付けを行なつた。

図5-31に実験結果を示す。試験は 20 ± 1 mmに整粒した試料300 gをCO 30%, N_2 70%からなる還元ガス(流量 0.015 l/mn)の中に入れ、還元した後の還元率を調査した。図より明らかなように、圧力を 1 kg/cm^2_{ab} から 2.5 kg/cm^2_{ab} に上昇させたところ還元率は約10%上昇した。ガスの圧力が大きくなり流速が小さくなると装入物と炉内ガスとの熱交換はよりよく行なわれるようになり、ガス灰発生量は減少し、また炉内における圧力勾配は一般的に小さくなる。

送風量を一定にしたまま高圧操業を行なう場合このように炉況が改善されるから、炉況を変化させずに送風量を増加できることは容易に理解できよう。このように送風量を増加すればそれだけ多量のコークスを燃焼させることができ、コークス量にほぼ比例して出鉄量を増加させることができる。

高圧操業の効果についてはわが国には実績がないので主として米国におけるデータを基礎にしてまとめると下記のとおりである。①炉頂圧力 0.7 kg/cm^2 までの範囲で炉頂圧力 0.07 kg/cm^2 当り約1%の割合で出鉄量を増加させることができる。②コークス比は大幅には変化しないが、炉況安定の二次的効果として若干低下する傾向になる。③ガス灰発生量の大きな場合(米国の初期の例のように $50 \sim 100$ kg/t あるいはそれ以上)はガス灰発生量が大幅に減少する。④炉頂圧力を上昇させた場合は一般的に送風圧力も上昇するが送風圧力の上昇割合は炉頂圧力の上昇量の約80%程度である。

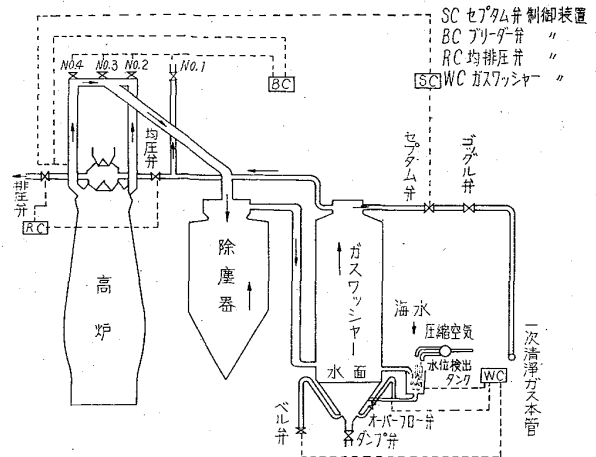


図5-32 高圧操業設備配管および制御系統図

5-6-2 高圧操業の設備

高圧操業設備の一例として八幡・東田第1高炉の設備について普通圧高炉と異なる点について説明する。なおこの高炉は米国マッキー社との技術提携により設計されたものであるが、他社の設計も本質的には差がない。

図5-32に配管および制御系統図を示す。ガスワッシャーは除塵器の直後に設け、炉頂ガス絞り機構すなわちセプタム弁上流でガスを清浄し、ガス灰によるセプタム弁の急激な摩耗を防ぐことを目的としている。セプタム弁のところで要求されるガスの清浄度はほぼ 0.5 g/Nm^3 程度であり、ガスワッシャーの内部は煉瓦の格子を積み、上からスプレーで注水する。図5-33にセプタム弁の構造を示す。この弁は3コのパタフライ弁と3コの小さい通気管よりなり、パタフライ弁の開度を自動調節し、炉頂圧力を常に一定に保つ。

均圧管および排圧管は上下ベルの間の圧力を、下ベル開放前には炉頂圧力にまで高め、上ベル開放前には大気圧力にまで下げるための配管で、各ベルを上下させるために必要不可欠なものである。均圧弁、排圧弁の構造を図5-34に示す。

ブリーダ弁としては外開き型ブリーダー2つに内開

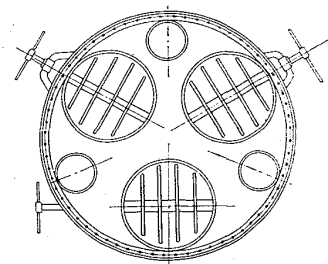


図5-33 セプタム弁

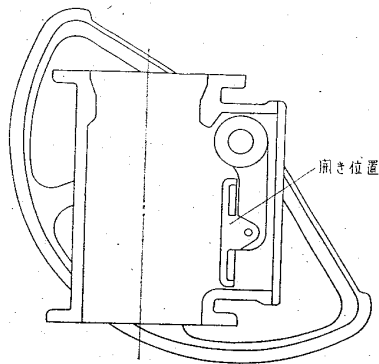


図5.34 均圧弁および排圧弁

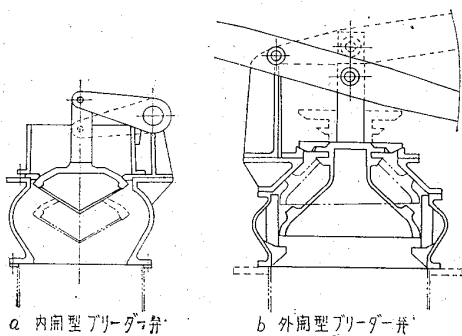


図5.35 高圧操業用ブリーダ弁

き型ブリーダ弁をも用いる。図5.35には高圧操業用の内開き型および外開き型ブリーダ弁の構造を示す。八幡・東田第1高炉の例では図5.32に示した4本のブリーダの内、No. 1, No. 2, No. 4の3カ所には内開き型を用い、No. 3のみに外開き型を用いた。

高圧高炉では炉頂および除塵器などには高圧に耐える構造のマンホールを設けるが、爆発口は設けないことが多い。また、ベルおよびカップの間にわずかなすき間があつても炉頂圧力が高い場合には急激なガス漏れが起こり局部的に摩耗が進行するので、シール部に特殊な加工をする必要がある。東田第1高炉の例では大ベルおよびカップのシール部にニッケルベースの硬質合金を肉盛りして冷間機械加工により表面硬化を行なつた。その他の高炉本体構造については特別な変更を必要としないというのが米国における定説であるが、わが国では今後の経験を基礎に改善を進める必要があると思われる。

高圧操業に必要な制御装置は大別して4系統に分かれる。炉頂圧力を一定に保つための制御装置は図5.32に示したセプタム弁制御装置で、上昇管で検出した炉頂ガス圧力により、セプタム弁開度を自動調節し炉頂圧力を常に設定点に保つようになっている。ブリーダ弁制御装置は炉頂圧力が異常に上昇した場合 No. 1, No. 2, No. 4の順で各ブリーダ弁を開放する系統で、炉頂圧力は上

昇管から検出する。均圧弁排圧弁制御装置は捲揚のタイムスケジュールから指令を受けて上下ベルの開閉に合わせて均圧弁、排圧弁を開閉する。ガスワッシャー制御装置はワッシャー内の水位を常に一定に保ち、炉頂圧力が変動した場合、ワッシャー内の水が流出して水封を切り、あるいは逆に排水管がつまつた場合水位が異常に上昇するのを防ぐ制御系統である。この制御系統は水位検出タンク内の水位を圧縮空気の差圧として検出し、これをもとにオーバフロー弁開度を制御し、また、異常な高水位になつたときはベル弁を開放することができる。

高圧操業炉の設備的特徴は上述のとおりであるが、これらの設備は未だ経験も浅く、保守上の問題から米国においてさえもいまだ十分に稼動していないものが多いとのことで、今後解決すべき問題も多い。

5.6.3 高圧高炉の操業

すでに述べたように、わが国にはいまだ高圧操業の経験がとぼしく、すでに火入れした2基の高圧高炉も本文執筆時すなわち昭和37年12月現在いまだに火入れ後の立上り期間を脱していない状況である。高圧操業は、最高生産を行なっている高炉の出銹量を、さらに高めるための操業法であることから考えると、現段階で高圧操業の成績を論ずるのは不可能である。したがつて高圧操業時の操業成績、作業上の問題点などについては今後実績をつみ上げた上で発表の機会をえたい。

5.7 操業解析

5.7.1 操業解析の意義

高炉の操業技術が、最近にいたつて急速に進歩していることは、だれしも認めるところであろう。操業技術の進歩、すなわち生産性あるいは経済性の向上は、焼結鉍製造を含む広い意味での原料予備処理、送風組成に関する考察とそれにともなう高温送風、調湿送風ならびに燃料吹込み操業、さらに築炉技術の進歩などの実現によつて代表されている。

最近にいたつて関連する工学分野の発展にともなつて、高炉内の状態を検知する方法が徐々に開発されつつあることはよろこばしいが、元来高炉は高温工学および流体力学上の諸要素を多分に含んでおり、われわれが高炉内の状態を知り、さらにアクションをとるために必要な資料はまだ非常に少ない現状である。

限られた資料によつて判断し、さらに正しい発展方向をとらえなければならぬのであるから、資料の解析、換言すれば操業の解析は誠に重要な意義をもっている。

高炉の操業解析はあらゆる面から、また種々な方法で行なわれているが、本節では全体的な推移を記述し、問題とされるべき点についてふれる。

5.7.2 装入物予備処理について

日本の製鉄工場が戦後いち早く、また最も力を注いだのが高炉装入物の予備処理であり、この結果コークス比は今日世界最低となるとともに出鉄量の増大に成功した。

予備処理の方法としては、現在鉱石整粒と自溶性焼結鉱の2つが用いられる。要求されることは被還元性の良いことに集約されるが、単一鉱石の被還元性だけでなく、充填物としての集合鉱石の被還元性が高炉の場合重要であり、したがって通気性の良いことも不可欠の条件である。単一鉱石の被還元性は粒度を小さくして表面積を大きくすれば向上するが、通気性に関してはガスの接触抵抗の点から細粒に限度があり、また空隙の保持の面から粒度構成が重要となる。また鉱石は銘柄によつて化学的性状がことなり被還元性もことなるため、機械的操作によつて同等にすることも整粒の目的である。

整粒においてはいかなる粒度構成にするかが問題となる。粉鉱については充填塔の通気抵抗を考えると5~10mm以下では著しく抵抗が増大することがわかつており、実際の高炉操業解析でも-5mmあるいは-10mmの%のインデックスが有効であることがわかつている。したがって-5mmまたは-10mmを粉として除外している。塊鉱に関しては還元実験の結果から被還元性を求め、銘柄間の相対値をきめ、最大粒度の目標を25~50mmに定め、整粒をしている。粒度あるいは銘柄の混合した鉱石の被還元性は、いずれも混合比率の加重平均によつて求まることが還元実験で確かめられているが、実際高炉では単に平均粒度の小さいことよりも、粒度構成のよいことが大事であり、粒度構成を考慮し上で銘柄別に塊の上限をいかにきめるかが、今後整粒効果をより良くするための問題点であろう。

また装入物予備処理として重要なものに自溶性焼結鉱がある。自溶性焼結鉱は粉を塊成しただけのものでなく、化学的にも処理された被還元性の極めて良い、また所要熱量の少ない新銘柄とみてよいものである。従来の焼結鉱に石灰石を添加することにより気孔率高く、単体として被還元性が良いだけでなく、高炉内の通気性、さらには溶解・造滓過程をも改善するのが特徴である。この詳細は前節までに述べたとおりであり、整粒の最も完成された姿ということが出来る。住金・小倉における装

入物分布調査によれば、自溶性焼結鉱と整粒鉱石とはほぼ同等のポイドを示す。

焼結鉱のメリットは配合割合とコークス比との関係により評価されるが、いろいろなデータが報告されており、代替する鉱石の種類と性状、焼結鉱自身の性状、操業条件（操業速度、最高送風温度など）によつて変化し同一の結果を示さない。たとえば自溶性焼結鉱といえども粉率の高い場合には効果を十分発揮しない実績があり、強度の低い場合にも同様のことがいえる。被還元性や鉱石の所要還元熱量（表5.22）を焼結鉱および各鉱石について比較した住金・小倉の実験によれば、焼結鉱の優れていることは明らかではあるが、鉱石との差は大きいものでなく、鉱石の整粒が重要であることがわかる。自溶性焼結鉱によるコークス比低下は、2次曲線的なものと同様のものが報告されているが、この解析にあたっては十分な考察を加えないと、焼結鉱の真の評価を誤るお

表5.22 銘柄別の所要熱量と還元率の比較
(住金・小倉)

銘柄	還元率 %	銘柄	生成鉄100kg 当り所要熱量
テマンガ ンゴ ア(L)	87.2	ブラジル	91.9 × 10 ³ kcal
ペレ ット	78.9	クダロー	93.2
焼 結	78.0	アーキー	94.4
ケ ポ ン	71.0	サリ	95.3
ゴ ア(Mn)	70.0	タンブン	95.5
ゴ ア(H)	68.4	カッチーノ	95.9
ゴ ア(M)	68.0	焼結	96.0
イ ン ド	66.5	インド	96.9
ス リ メ ダ ン	62.8	ゴア(H)	97.6
ク ダ ロ ー	62.0	ロメラル	97.7
サ リ ー	60.0	アフリカ	97.8
W.O.ズ ング ン	58.2	ゴア(L)	98.2
イ ポ ー	57.5	W.O.ズングン	99.2
ア ー キ ー	54.7	ゴア(M)	99.4
ブ ラ ジ ル	53.8	イポー	100.2
ラ ラ ッ プ	51.8	ハイザー	103.2
タ ン ブ ン	50.0	テマンガ ン	104.3
ロ メ ラ ル	49.9	ネバダ	104.9
ネ バ ダ	48.2	ララップ	106.3
ア フ リ カ	43.0	ゴア(Mn)	110.9
ハ イ ザ ー	42.8	ペレ ット	111.2
カ ッ チ ー ノ	36.5	ケ ポ ン	111.5
	32.5	ス リ メ タ ン	114.1

(a) 学振法による還流実験結果
(塊状鉱石還元試験法)

(b) 炭素精算による所要熱量

それもある。たとえば複数の高炉に焼結鉄をどう配分して使うかは、焼結鉄のメリットを最大限に引出すために重要であるが、コークス比の低下要因を十分見極わめてから決めねばならない。また整粒鉄と焼結鉄とのバランスは、粉鉄、塊鉄のバランスおよび各原料の価格、あるいは整粒と焼結の正しいメリットなどを考慮した上で決めなければならない。

後述する高温送風、酸素富化、燃料吹込みなどの送風予備処理の効果は装入物の性状と密接な関係を持ち、フルに発揮させるためには整粒装入物は不可欠である。高炉内の装入物分布状況も重要な要素であり、整粒によって改善することができる。このように整粒は操業技術の基礎となるものであるが、粉、塊鉄石バランスや焼結鉄・鉄石バランスを考えて適正な破碎篩分けを行なう必要がある。

整粒鉄石による操業データは以下のものが報告されている。

(1) 八幡・東田第3高炉の整粒による増産試験

装入物粒度を次のように整粒して増風した。

コークス 10~75 mm, 焼結鉄 10~75 mm, 塊鉄 10~25 mm, 石灰石・平炉滓 10~25 mm

この結果、出鉄作業などにより制限されたが、最大出鉄比 $1.98 \text{ t/m}^3/\text{d}$, コークス燃焼速度 $22.8 \text{ t/m}^2/\text{d}$ トラベリングタイム 6~6.5 h の操業を行なった。

(2) 住金・小倉の整粒前後の操業成績の比較

サイジング設備の合理化により+50 mm は 10% 前後よりほとんど0となり、-10 mm は 15~20% あつたものが 10% 前後に減少し、10~35 mm は 50% から 80% に上昇した。その前後の操業結果を比較すると出鉄量は 17.6% 上昇し、コークス比は 6.5% 低下した。

(3) 中山製鋼の鉄鉄石焼結鉄性状のコークス比におよぼす影響

装入物の性状を次のように表示した。

$$\text{粉率 } F = \sum m_i f_i \quad m_i : \text{銘柄毎の原単位 (kg/t)}$$

$$f_i : \text{銘柄毎の } -6 \text{ mm } (\% \times 1/100)$$

$$\text{被還元性 } D = \sum m_i d_i \quad d_i : \text{銘柄毎の被還元性 (粒度を加味)}$$

コークス比と粉率、被還元性との関係を調べたところ次式が得られ粉率の占める役割の大きいことがわかった。

$$\text{コークス比} = 0.50 F + 0.034 D + 570$$

また焼結鉄の性状としては落下強度と FeO の二つがコークス比に影響を与える。

(4) 神鋼・灘浜の高炉装入物の被還元性と高炉操業との関係

装入物の被還元性を還元実験より求め、銘柄と粒度の割合によつて加重平均して装入物全体の被還元性を出し操業データとの関係を調べた。それによると、CO/CO₂ とは強い関係があり、被還元性の表示が妥当なことがわかつた。また、後の操業解析によつて CO/(CO₂+CO₂) がコークス比を規定する大きな要因であることがわかつたので、装入物の被還元性の把握によりコークス比を推定することができると思われる。

(5) 大阪・西島の増産試験

焼結鉄 100% 使用、酸素害化 (約25%) の操業により出鉄比 $2.01 \text{ t/m}^3/\text{d}$ トラベリングタイム 5~5.5 h を記録したが、このとき焼結鉄の -5 mm は数%に抑える必要があつた。

なおコークスは重要な装入物であるが、近年灰分、強度ともに安定し日常操業においてほとんど問題となつていない。しかし燃料吹込などによるきわめて低いコークス比の実現、および出鉄量の増大による通気性やコークスの炉内滞留時間の変化など、今後送風予備処理と関連してコークスの研究はぜひ必要である。

5.7.3 送風予備処理について

最近高温送風、調湿、酸素富化、燃料吹込みなど送風の性状の改善が盛んに行なわれている。これらについての個々の操業データおよびその解析は前節までに記したが、その中でもわかるとおり、これらいくつかの手段は組合わされて用いられ、効果を発揮する。ここではこれらを送風予備処理として一括し全般的な問題について簡単に触れる。送風予備処理の目的は、強還元力を有し、炉熱分布を最適な状態に維持し、装入物に迅速に熱を与え、通気抵抗の少ないガスを得ることであり、結果としてコークス比の低下と出鉄量の増大をもたらすことである。

送風の予備処理に当つてまず考えねばならないことは、溶解帯の温度を維持することである。これに関して定量的な考え方の基準として羽口先フレイムの理論燃焼温度がしばしば用いられる。実際の高炉について調べると、1,900~2,000 °C の間にあるのが普通である。これが低下した場合には湯溜部の温度を維持できず炉況を保てず、またある限度以上になると棚の発生等により炉況が異常となることが判明している。したがつて各種の送風予備処理を行なう場合には羽口前ボッシュガスの熱バランスをとり、理論燃焼温度を一定に保たねばならな

い。しかし理論燃焼温度は各高炉によつてことなり、また酸素富化時には計算値を一定に保つても炉況への影響は計算以上にあり、燃料吹込時に必ずしも熱補償を行なわなくとも、コークスとの代替率は変るが炉況は維持されることが経験されている。これらのことから炉況に与える理論燃焼温度の効果は送風の性状によつて変わるか、あるいは現在の計算方法以外の要因であると思われる。すなわち羽口前発生ガスの組成による熱放射が変化したり、燃焼帯の構造が変わつて炉内温度分布が変化すること、あるいは装入物の炉内滞留時間が変わつて湯溜部にどう影響をおよぼすかなど今後検討すべき問題である。

出鉄量に与える送風の影響を考える場合には、操業度を律するものとして炉内ガスの量と質に着目せねばならない。これは化学量論的に計算することができ、ボッシュガス量と風圧との関係などが調べられているが、定量的な限界操業度との関係を知ることは装入物の影響があるのでむづかしい。また上昇するガスを抵抗なく受入れられるべき空隙の保持が必要であり、その面から考えれば装入物中のコークスの性状は重要になる。質的な面では H_2 の役割が目目されねばならない。 H_2 は低質量、低粘性かつ熱伝導性が良いといわれており、燃料吹込み時にはとくに意味をもつと考えられ、生産速度を左右する要因として検討する必要がある。

コークス比に与える影響については、現在までは熱化学的バランスと化学量論的な計算によつて推測してきたが、今後はさらに厳密な考察が必要である。すなわち鉄石、コークスの状態を含む反応速度論的な面から還元反応やカーボンソリュージョン反応あるいは H_2 の反応を考えて、送風予備処理に適用すべきである。たとえば送風温度 $100^\circ C$ の上昇によるコークス比低下は約 30 kg/t とされているが、この中には CO/CO_2 の低下が結びついており、ガス利用率の変化が認められ、装入物との関係が付随していると考えられる。このような面から解析的な把握を行なうことにより種々な送風予備処理の組合わせによる効果や、装入物や操業度の変化に応じた効果の相違などについて適確な予測ができるであろう。

5.7.4 日常操業と関連した解析

(1) 装入物分布調査

装入物予備処理とともに炉内の装入物分布状況は、炉内の通気状況、降下状況に影響を与え、炉況を左右する。したがつて古くからこれに関する調査は数多く行なわれてきたが、操業中の高炉について行なうことはむづ

かしく、模型によつて推測したり、火入前充填時に簡単な調査を行なつて推測せざるをえない。また装入装置や炉頂部構造などの設備的差異が大きく影響し、普遍的な結論を出すよりも個々の高炉のための資料とすることを目的とする場合が多い。

この観点から最近においても種々の試験が行なわれたが、大筋の傾向は従来知られているとうりであつた。ただ整粒や焼結鉄の使用増の傾向から、装入物のポイドが目目され、整粒鉄石と焼結鉄とはほぼ同等のポイドであることや、焼結鉄を増せば装入物ポイドの上昇することが認められた。

操業中の高炉での装入面の測定結果では、模型実験で認められる一般的な事項の他、炉壁部の降下が早く、装入面の形はV型からM型に移行することが認められた。

(2) 炉芯と炉況との関係

炉芯測定は燃焼帯の性状を知る一方法として古くから実施され、炉況との関係が追求されてきたが、連続的な測定が不可能なこと、測定方法によりバラツクことなどのため明確なデータ採取が行なわれず、炉況との因果関係をはつきりつかむのはむづかしい。最近行なわれた調査によれば次のようである。

炉芯の大きさは炉内の装入物およびガスの分布状況により変動するもので、ストックライン上のガス成分と対応させると、炉芯の大きいときは炉壁側の CO_2 は低く、炉壁にガスが多く流れていると推定される。

炉況の面よりみると、炉芯の大きいときは棚が多く発生する。これについて羽口前ボッシュガス顕熱と関連してみると、ガス顕熱の大きい時は炉芯の大きくなることが認められ、棚を発生せしめないにはボッシュガス顕熱をある限度以下に保たねばならない。ボッシュガス顕熱は理論燃焼温度とほぼ同じ意味をもつており、送風予備処理を行なう場合の一つの考え方を示す。理論的にボッシュガス顕熱を一定に保つには、風温 $+100^\circ C$ 、湿度 -15 g/Nm^3 、 $O_2+2\%$ が同等の効果をもつと計算される。しかし酸素富化操業の実績によれば、 O_2 の炉芯におよぼす影響は計算以上に強いようである。

炉芯を測定して炉況と結びつけるには、コークスを含む装入物の性状との関係や、あるいは燃料吹込み等の場合にはガス組成変化、燃焼帯の変化を含めた解析が必要であると考えられる。

(3) 炉頂ガス分析値の操業への応用

炉頂ガス組成の挙動を知ることが日常操業にとつてきわめて有効であるが、測定、試料採取方法などに問題があり、2~4hに1回程度分析し、経験的に炉況判断に

用いるに止まつている。炉頂ガス組成を考察すると酸素バランスと炭素バランスにより鉄石・石灰石よりの O_2 やガス化炭素量が算出できる。この両者の比は装入物一定の場合には一定であると考えた。熱バランスがくずれるのは、ソリューションロスの変化に対し羽口先燃焼コークスが熱的にバランスを保つて変化しないためと考えられる。そこで、鋼管・川崎では装入物一定の場合のガス組成の変化を $CO-CO_2-(N_2+H_2+CH_4)$ の 3 元状態図に記し、またソリューションロスと羽口先燃焼コークスが熱的に平衡するときの炉頂ガス組成を書き入れ、実績より 0 点を定めた。0 点よりガス組成がずれた幅を + の数値で計数化 (ガス係数と呼ぶ) し、これが + であれば熱目、- であれば冷目と判断する。実際の操業についてこのガス係数と風温との関係を調べると高度の負相関があり、日常操業管理に有効なことがわかつたとしている。このように炉頂ガス分析値を定量的に炉況管理と結びつけるには、装入物との対応づけが問題となるが、さらに実績の検討と解析が必要であろう。

炉頂ガスの連続分析には計器自身にも大きな問題が残っているが、ガス導入部分にもタイムラグや故障の有無などに問題がある。連続 CO_2 メーターを使用した結果では、スリップ、棚、冷え込みなどの炉況異常の判断にかなり有力な指針となることがわかつた。しかしタイムラグを含めて未解決の点が多いので、そのみに頼ることはむづかしい。

炉頂部よりサンプラーを挿入し、ストックライン上やシャフト上部のガス分布を調査することも試みられている。これらの調査に共通としていえることは、炉頂ガス組成の時間的な変化はきわめてはげしく、炉内の通気状況はたえず変化していると推定される。炉況変動とガス分布の変化とは定性的に対応できるが、さらにそれから対策をたてるためには、原因の把握が必要であり、装入物や装入方法を含め操業条件との関係をはつきり知らねばならない。

5.7.5 炉体管理と関連した操業解析

炉体保全は設備的な面と操業的な面の両面から強力に行なう必要がある。ここでは日常操業に係るものとして、シャフト部付着物と炉底部浸食の問題をとりあげる。

(1) シャフト部付着物

シャフト部は Boudouard 反応による炉内ガスからのカーボン析出、装入 Zn や M・Fe やスラグなどの沈積の併合作用により付着物がきわめて生成しやすい雰囲気

であるが、炉体設備あるいは操業条件によつては強大な付着物が形成され、炉の有効内容積をせばめ高炉の作業成績を著しく低下せしめる。高炉操業者は操業状況を管理して未然にこの形成を防ぐとともに、装入物の降下状況、シャフト部温度計の動き、装入 Zn の挙動などを常に監視し、その形成を知つた場合はいち早く取除くようにせねばならない。

吹卸された高炉について付着物の状況を調べると、それを形成している主なものは析出炭素層、Zn 析出層、M・Fe に富む強固な層およびこれらの混合層である。最初の生成個所や生成・成長過程ははつきりしていないが、一度生成した場合次第にそれが成長してゆくものと考えられる。生成原因については、炉体設備自体の欠陥あるいは損傷にとまなうデッドスペース、冷却方法、炉況の大幅な変動 (棚)、吹製銑種の変更などを含む操業要因の急激な変更、装入方法の欠陥や装入物性状不良による降下異常などの総合した結果とみられるが、注意せねばならないものに Zn の挙動がある。

Zn は沸点 $907^\circ C$ (1 atm) で、高炉に装入された場合還元されて高温帯にいたると容易にガスとなり上昇し、上部で再び酸化されて ZnO となり一部はダストとして炉外に出るが、再び炉内を下降するものも少なくなく、Zn の循環が生じる。最近焼結鉄の使用が増大しているが、焼結鉄の主原料である硫酸滓中には Zn がかなり含まれており装入 Zn の増大を招くことになる。

最近神鋼で 4 カ月にわたつて調べた Zn バランスの例によれば、次のことがわかつた。

- (a) 装入 Zn の 89% は焼結鉄からである。
- (b) 排出 Zn はダストキャッチャーに 62~65% タイゼン排水中に 30~34%、銑鉄・鉄滓に 5% である。
- (c) Zn 残留期と排出期とがあるが、排出期中にはダストキャッチャーの Zn は減り、タイゼン排水中 Zn が増す。
- (d) 排出周期と操業データとの関係ははつきりしないが、シャフト下部温度上昇にとまない排出 Zn は多くなる傾向がある。
- (e) 残留 Zn の最高は 6585.5 kg 、最低は -1947.3 kg であつた。
- (f) 排出期と残留期とは 1 カ月で平衡を保つ。

付着物は一旦形成されるとその除去はなかなかむづかしい。特に大きなものについては、川鉄・千葉ではダイナマイトによる発破が試みられた。慎重な予備実験と万全の用意のもとに行ない成功したが、高炉の特殊性から困難かつ危険な作業であり、日常操業にあつては炉体

の監視を十分行ない、装入物性状や Zn の管理を行なつて炉況の安定を維持し未然に防ぐようにせねばならない。

(2) 炉底の浸食

高炉の大型化とともに炉底部の浸食は看過できない問題であるが、近年はカーボンレンガの採用によりほぼ解決されたようである。しかし炉底破損は直接高炉の寿命を左右するものであるだけに、種々な方法で監視するとともに操業においても考慮して行なうべきである。

最近においては川鉄・千葉第 1 高炉の炉底破損、および鋼管・川崎第 2 高炉の炉底異常が報告されており、1 つは周壁部外側をカーボン煉瓦でまいてはいるが、両者ともシャモットタイプの煉瓦を使用したものである。炉底破損した川鉄・千葉第 1 高炉は火入後 8 年経過しており破損直後に吹止められたが、破損原因についてはコンクリート基礎部にも問題があつたようである。

鋼管・川崎第 2 高炉の炉底異常は火入後 6 カ月余の事故であるが、その後順調に操業を継続している。その発見までの経緯は次のとおりである。

- (a) 炉底温度 (炉底面より 2,759 mm 下) が異常に上昇し、約 1,100°C 付近で温度計が溶断した。
- (b) CaO/SiO_2 , Al_2O_3 バランスが計算値と大幅に喰違つた。

(c) 炉底コンクリート排水孔よりガスおよび蒸気が噴出して引火した。またコンクリートに亀裂が入つた。

(d) 温度計保護管より銑鉄が発見された。

このため直ちに次の対策をとつた。

- (a) 出銑量を 1,250 t/d から 800 t/d におさえた。
- (b) 出銑回数を増加した。
- (c) 砂鉄を多量に装入し、装入砂鉄を 200~370 kg/t にふやした。
- (d) 塩基度を 1.40~1.30 に上げ、Si を高くし (1.1~1.0%)、グラファイトコーティングをねらつた。
- (e) 炉底給水量を増加した。

この態勢のもとに次のような方法で炉底の回復状況を監視した。

- (a) 炉底部温度測定の強化。
- (b) 出銑口より金棒を入れて深度測定。
- (c) 炉内残留銑の分析。
- (d) ^{60}Co による炉内残留溶銑量の推定。

これら諸対策の結果、深度、温度、残留銑鉄量などは次第に安定、良好な方向に向い炉底破損を生ぜしめずにつき、3 年を経過するも異常なく 1,450 t/d 以上の出銑をしている。