

高炉への燃料吹込みについて

林 敏*・鈴木 驍一**

Fuel Injection into the Blast Furnace.

Satoshi HAYASHI and Gyōichi SUZUKI

I. は し が き

18世紀中頃に英国で、初めて高炉燃料としてコークスが使用されて以来、230年の間、熱風の採用および炉の大型化など製鉄技術は相当の進歩を示したが、今から100年ほど前の最大の高炉では日産100tに過ぎず、コークスの消費量は鉄t当り3tをも要した。

わが国で古代高炉に代わる近代的な高炉の稼働は、明治13年釜石鉱山における木炭溶鉱炉であるが、実質的な製鉄業の基礎は明治34年の官営八幡製鉄所における第1高炉によるといえよう。その後需要の増大にともなう、わが国の製鉄業の規模は次第に大きくなったが、技術的には特にみるべきものはなく、第2次世界大戦前(昭和10年)のわが国の最高レベルの高炉は700t、コークス比は約1.2tであつた。

戦後日本製鉄業が再建されて以来、まず最初に製鉄技術者が努力を払つたのは、高炉原料を予備処理して、物理的、化学的な性質を改善することであつた。

この目的にそつて取られた具体的な方策は、

鉱石の破碎篩分の強化
 焼結鉱の増配合
 自溶性焼結鉱の採用

などが挙げられる。

これらはいずれも鉱石自体の被還元性を増すとともに炉内の通風性を改善して、反応を円滑に行なわせるためのものであり、この結果わが国の高炉操業は世界最低のコークス比をもたらしした。

次にとりあげられたのが、生産性、還元力および熱効率向上の対策で、それは

高炉の大型化、送風の酸素富化、送風への蒸気添加、高風熱操業、高圧操業

などであつた。ここでさらに新しい技術として、特にコークス比低下の有効な武器として登場したのが、燃料の吹込みである。

世界的にみてこの技術の台頭した背景は次のことが考えられる。まずヨーロッパにおいては、

1. 平均コークス比は世界的レベルからみて高い。
2. 次第に海外からの輸入鉄鉱石の使用割合が高くなり、鉄コストが上昇し始めた。

3. トーマス銑からの安価な鋼材がその材質上の欠陥のため次第に減少し、結果として鋼材原価が上昇して来た。

これらの対策として鉄原価の低下が叫ばれ、当時単なるアイデアとして長い間埋れていた燃料油の高炉への吹込みがふたたび脚光を浴びて研究されることになつた。すなわち1957年には欧州石炭鉄鋼共同体が高炉のコークス比低下を目標として研究を開始した。

一方米国における製鉄技術としては、高炉の大型化、焼結、ペレット設備の増強、高圧操業、直接製鉄などが研究開発されたが、近年世界的製鉄業の規模増大にともなうコークス用原料炭資源が不足し、補助燃料として大量にかつ安価に入手される天然ガスの吹込技術が1958年に開発され、さらに最近の石油精製量の増大にともなう重油の販路開拓の面から、その高炉への吹込み技術が石油、鉄鋼業の協力による研究で開発された。

コークス用原料炭の半ばを海外よりの輸入に仰いでいるわが国の製鉄業ではもとよりコークス比低減への努力は非常に強く行なわれており1957年以来、これらの燃料吹込みについての研究調査が進められていたが、1960年には鉄鋼技術共同研究会製鉄部会に研究議題として採りあげられ、急速に実用化への研究が進められた。

現在世界各国におけるこの技術の研究系列としては、次の3つに大別される。

1. 欧州グループ

1957年に欧州石炭鉄鋼協同会で研究テーマとして採り上げ、ベルギーのLiègeにある国際共同冶金研究所の低炉で研究を開始したが、その後各国はさらにグループに分かれて独自の研究を進めている。

さらに国別にその研究の現在の動向を述べると

1) フランス

IRSID研究所が中心となり、Pompey製鉄所の350t/d高炉で重油および燃料ガス吹込の研究を続けている。

2) ベルギー

Liègeの中央冶金研究所が中心になり、Cockerill-Quvrée製鉄所の350t/d高炉で重油、軽油、微粉炭

* 日本鋼管株式会社川崎製鉄所

** 日本鋼管株式会社福山建設本部

European Coal & Steel Community

- (1) IRSID → Société des Aciéries de Pompey.
(フランス 国立研究所) (フランス)
- (2) Centre National de Recherches Métallurgiques.
(ベルギー国立冶金研究所)
- (3) Deutsche Eisenhütten leute.
(ドイツ鉄鋼協会)

- { l'Air Liquid. (フランス)
- { Alpine Montan Gesellschaft. (オーストリー)
- { Shell. (International) (イギリス)
- { Uninor. (フランス)
- { Maximilianshütte A.G. (ドイツ)
- { Crucible Steel Co. (アメリカ)
- { Cornigliano S.P.A. (イタリア)
- { Cockerill-Ougrée. (ベルギー)
- { Bénélux. (3 国の製鉄会社 7~9 社)
- { Phoenix Rheinrohr. A. G.
- { Maximilianshütte. A. G.
- { Hüttenwerk Salzgitter. A. G.

の吹込みを研究するとともに Bénélux 3 国の各製鉄所を指導している。

3) ドイツ

ドイツ鉄鋼協会が中心となり、Phoenix Rheinrohr 社は重油、Salzgitter 社は C ガス、Maximilianshütte 社は軽油およびガスの吹込を分担実験し、その結果は共同で検討して最良の操業を見出そうと研究を続けている。

4) イタリア

Italsider 社の Cornigliano 製鉄所ではフランス Pompey 社との技術提携により 1961 年初めから大型高炉 (1200 t/d) に重油の吹込みを開始し好成績を収めている。

なおこの他に Piombino 製鉄所、Bagnoli 製鉄所、Tarants 製鉄所において、C ガス、天然ガスなどの吹込みの実験を行なっており、各種燃料を検討している。

5) スウェーデン

国内でコークスの生産を行なっておらず、コークス節約の面から燃料の吹込みに非常な関心をよせ、同国最大の Domnarfvet 製鉄所で近く重油吹込みの実験を開始する模様である。

6) イギリス

Shell 石油会社および Bataofsche Petroleum Mautschappy 社 (B.P.) などが開発研究をしており、数基の高炉で重油を吹込んでいる。

2. 米国グループ

各種燃料の吹込み研究を進め、1960年以来 AIME の

大会で討議し、情報の交換を行なっている。しかし欧州や日本と異なり、天然ガスが安価にかつ安易に得られるので、現在ではこの天然ガスの吹込みが最も盛んに行なわれている。

1) ESSO Engineering 社 (Standard Vacuum Oil 社)

同社の中央研究所が中心となり、1958年頃から天然ガス吹込みの研究を始め、その後同所の試験炉で基礎研究を行ない、次に鉱山局の試験高炉 (20 t/d) で実験を進めさらに 1960 年秋からはカナダの DOFASCO 社 Hamilton 工場の高炉 (1,000 t/d) で実際操業を行なつて好成績を挙げている。

ESSO 社では今後さらに軽油、天然ガスの吹込みにについても研究を進めるといことである。

2) Colorado Fuel & Iron 社

1958年末から天然ガス吹込み実験を開始していたが最近では重油、天然ガス、軽油などの吹込みを行なっており、さらに酸素を加えて、種々の組合わせて操業を行なっている。

3) その他の各社

天然ガス資源が豊富で各製鉄所とも高炉現場まで高圧で配管されているのでこのガスを吹込むことが最も一般に行なわれている。すなわち 1959 年米国鉱山局 Pittsburgh 研究所の試験炉で天然ガスの吹込みを実施し好成績を挙げて以来急速に実際高炉に普及された。

Pittsburgh Coke & Chemical 社では 1960 年以来

U.S. Bureau of Mines.
AIME

- (1) ESSO Engineering Co. Dominion Foundries & Steel Co. (カナダ) → Hamilton Works. 重油
- (2) U.S. Steel Corp. Bethlehem Steel Co. Great Lakes Steel Corp. Kaiser Steel corp. → Fairless Works. Duquesne Works. Johnstown Works. Detroit Works. Fontana Works. } 天然ガス
- (3) Colorado Fuel & Iron Corp. → Pueblo Works. 重油. 天然ガス. 軽油
- (4) Pittsburgh Cokes & Chemical Co. → Pittsburgh Works. ... C ガス
- (5) National Steel Corp. (Bethlehem Steel Co.) → Buffalo Works. 微粉炭

自社発生の余剰コークス炉ガスの吹込を実施している。

なお National Steel 社では Bethlehem Steel 社と共同で微粉炭の吹込技術を開発し、Buffalo 工場の高炉に実施している。

3. その他

1) ソ 連

天然ガス採取の急速な発展と関連して、この吹込技術の研究が進められ、1959 年以来 Ukraine 金属研究所の指導によりイリイチ製鉄所を初め同地区の高炉に実施している。

一方 1960 年頃より Urals 鉄鋼研究所の指導で重油の吹込みおよび Siberia 冶金研究所の指導で C ガスの吹込みなどが研究実施されている。

2) 日 本

1957 年よりすでに一部では調査研究が進められており同年 11 月には水谷が重油の高炉吹込み特許を取得した。その後 1960 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、重油あるいは C ガス、R ガスなどの吹込みが実施されている。

さらに 1962 年春には鉄鋼各社との技術提携により Pompey および IRSID の技術導入が決定しここ 1~2

年のうちにこの実施高炉基数は急増するものと推察される。

II. 理 論

1. 高炉操業上の一般的条件

高炉に燃料を吹込む時に、炉を順調に操業するためには物理的、熱化学的な操業条件を普通操業の時と余り変化させないことが必要となる。その必要条件として次のことが考えられる。

1) 羽口先の燃焼帯の温度

一般に高炉の送風温度を高めると当然コークス比が下がり、燃焼温度が上昇して反応が促進されるが、経験的に限度以上の高温は炉内の通気性を悪くし、円滑な操業が難しくなることが知られている。また送風に酸素を富化すると炉内ガスの還元力は増加するが、同じように燃焼温度の上昇から富化に限度がある。この場合送風中に蒸気を添加するとその分解による吸熱反応が燃焼帯の温度を調整する。

このような理由から高風熱、酸素、蒸気などの複合送風が近年広く普及して実績を挙げてきたが、ここに蒸気の代りに燃料ガスや油などを使用することが当然考えられた。それらは炭化水素が主成分であり、炭素と水素に

各国の代表的な研究例

	研究開始時期	研究方法	実験炉
Pompey	1950年研究開始 1960年1月実験開始	IRSID で理論研究および指導	Pompey 製鉄所 # 3 B. F. (350 t/d)
CNRM	1957年研究開始 1959年5月 Liege 国際共同試験炉およびオランダの国際火焰研究所で実験開始	CNRMで理論研究および現場指導 Ijmuiden 研究所にてバーナーの研究	Liège 国際共同試験炉 Cockerill-Qugrée 製鉄所 # 3 B. F. (350 t/d)
ESSO	1958年天然ガスの吹込研究開始 1960年 DOFASCO と協力し、高炉実験開始	ESSO 社研究所で理論研究 U.S. Bureau of Mines の試験高炉で実験 DOFASCO と協同研究	ESSO 社中央研究所 Pilot Plant. 米国鉱山局試験高炉 (20 t/d) DOFASCO 社 Hamilton 工場 # 3B. F. (1,000 t/d)
CFI	1958年11月天然ガスの吹込研究開始 1959年6月、2基の高炉で実施	自社内で理論研究、その後高炉で、天然ガス、重油に O ₂ を併用研究	CFI 社 Pueblo 工場 A.D.E.F. 炉 (800 t/d)
USSR	1955年微粉炭の吹込研究開始	ジェルジエンスキー製鉄所にて研究実施	ジェルジエンスキー製鉄所 高炉 (600 t/d)
	1957年 C ガスの吹込研究開始	Siberia 冶金研究所で、基礎研究を行い、その後高炉に実施	グズネック製鉄所の高炉
	1959年5月、天然ガスの吹込研究開始、その後一般高炉に実施	Ukraine 金属研究所の指導により、高炉に実施	Ilych製鉄所、大型高炉、その後ウクライナ地区高炉
	1960年重油吹込研究開始	Urals 製鉄所研究所の指導で高炉に実施	

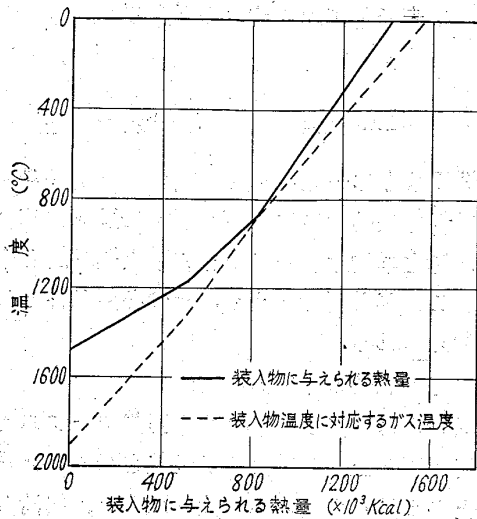


図 1. ライヒャルトの図

分解する時の吸熱は、蒸気の分解と同じように羽口先の燃焼温度を低下させる効果がある。

一方高炉の各部分にわたって熱交換と反応を円滑に行なわせるためには、装入物と炉内ガスに適当な温度差を保つ必要がある。REICHARDTによれば図1に示すように装入物は炉を降下するにしたがって熱量を増し温度が上昇するが、それに対応してガス温度が徐々に大きくなければ熱交換が行なわれず炉の操業は不可能になる。順調に操業している炉では図のように900°C付近に温度差の最小になる点があり、その温度差を維持し装入物を必要十分な溶解温度に加熱するためには、羽口先において燃焼生成するガス量と温度とが適当なバランスに保たれている必要がある。もし燃焼帯温度が低下すればコークス比を増加して生成ガス量を増す必要があり、ついには操業不可能な限界に達するであろう。

この下限温度および炉内の通気性を妨げない上限温度の範囲は日常の高炉操業から経験的に知られている。

羽口先燃焼帯温度は、その範囲で出来るだけ高温に安定させればもつとも効率よい操業が出来るであろう。

2) ボッシュガス量

装入物の通気抵抗はガス流速のほぼ2乗に比例して増大するので、均一なガス分布と円滑な装入物降下を維持するためには、時間当り羽口先で生成するガス量を炉の大きさあるいは装入物の条件などに応じた一定の限界内に維持する必要がある。

3) 還元ガス量

ガスによる間接還元は炭素による直接還元よりも熱的に有利であるから、これをできるだけ多く行なわせるために銑鉄t当り一定量の還元ガスを確保することが必要である。

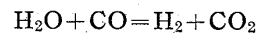
2. 燃料吹込みにより考えられる効果

以上のような条件を満足させながら、高炉へ燃料を吹込むとき次のような効果が考えられる。

1) 水素の効果

吹込み燃料としての油あるいはガスは、水素または酸化水素の形で水素含有量が多く羽口先で生成するガス中の水素%および還元ガス(CO+H₂)%を上昇させる。

酸化鉄の水素による還元反応において水蒸気になる水素量は、この反応速度と次式の反応速度の比に左右される。



上式の反応平衡恒数は表1に示す通りで、酸化鉄がこの反応の触媒になるので高炉の条件では平衡状態に近くなると考えられる。表によれば高炉の間接還元帯の大部分の温度範囲では、平衡恒数は1より小さいので反応は右へ進み平衡条件では水素の利用率は一酸化炭素のそれに比較して小さくなる。しかし高炉炉内においては必ずしも平衡状態ではなく水素の利用率の方が高い場合もあり経験的にH₂とCOの利用率は等しいとみて大きな誤りはないであろう。

表 1 各温度における反応の平衡恒数

温度 °C	500	600	700	800	900	1000
K	0.205	0.392	0.645	0.960	1.324	1.726

一方ボッシュガス中の水素濃度が高くなれば、ガスの粘性、密度を低下せしめ炉内の通気性は改善される。また水素ガスは拡散係数が大きいので微小な気孔を通じてすみやかに銑石の中心部まで達し還元を進行する。さらに水素ガスは熱伝導率が他のガスより7~10倍も大きいのでガスと固体との熱交換を早め、その温度差を小さくし炉頂温度を低下させる。

以上のことから燃料吹込みによつてガス還元が促進され直接還元が減少してコークス比の低下が期待できる。

2) Ore/Coke の増加

装入コークスの一部を羽口からの吹込み燃料に置き換えることができるので、それだけ多くの銑石を装入することができ銑石の炉内滞留時間が増加し還元を促進する。これによつてもコークス比の低下、生産増が期待できる。

3) 風熱上昇の可能性

先に述べたように羽口先から燃料を吹込むことにより、燃焼温度が低下するので送風温度をより高めることができ、燃料の分解熱を差引いても炉内で有効な熱量を増すことができる。

4) 炉頂ガス損失の低下

ガス還元促進により炉頂ガスの CO_2/CO の比は大きくなり、一方熱交換が活発となり炉頂ガス温度を低下させるので、炉頂ガス損失は潜熱、顕熱ともに少なくなる。

5) 造滓量の低下

特に気体および液体燃料では灰分がないので、造滓に必要な熱量が不要になる。

6) 固体燃料の吹込み効果

例えば、前記の条件で羽口から微粉コークスを吹込めば、少なくとも同量のコークスと置き換えることができ、装入物の Ore/Coke の増加および送風温度上昇の効果さらにコークス比の低下、生産性の向上が期待できる。微粉炭の場合その揮発分中の水素の有効性が付加される。

3. 問題点

以上のように、装入コークスの一部を油、燃料ガスあるいは微粉炭などに置換えて、羽口から高炉に吹込むことにより、いずれも出銑増とコークス消費量の減少が期待できるが、一方次のような問題点がある。

1) 羽口先の熱補償

送風とともに吹き込まれた燃料は、羽口先で燃焼しすべて一酸化炭素と水素になると仮定して各炭素 1kg 当りの燃焼熱を比較すれば表2のようになる。

このように、メタンおよび他の炭化水素が燃焼するときの炭素 1kg 当りの発熱量は、コークスのそれに比較していちじるしく小さく、これは炭化水素の分解にかなりの熱が消費されることを示している。

一方水蒸気と炭素との反応は、水蒸気の分解が大きな吸熱反応であるため、結局熱の消費となり、羽口先の燃焼温度を維持するためには、炭素 1kg 当りの消費熱は水蒸気より炭化水素系物質の方が少なくてすむ。

しかし、いずれにしても送風温度の上昇あるいは酸素富化送風により、燃焼帯の熱補償をする必要があり大量の燃料吹込みを行なう場合には問題である。

2) コークスの最低必要量

高炉の炉床部や朝顔部は、高温下で良い通気性を維持するような良質のコークスで満たされていなければならない。

表 2 炭素 kg 当り反応熱

C	+0.5O ₂	→	CO	+2340kcal
CH ₄	+0.5O ₂	→	CO+2H ₂	+740
C ₂ H ₆	+O ₂	→	2CO+3H ₂	+1350
C ₃ H ₈	+1.5O ₂	→	3CO+4H ₂	+1500
C	+H ₂ O	→	CO+H ₂	-2480

表 3 高炉の概略熱精算項目

入熱項目	出熱項目
① 燃焼発生熱	① 溶銑所要熱(還元熱と顕熱)
② 熱風の顕熱(含燃料)	② 溶滓所要熱(顕熱から生成熱を差引いた量)
③ 装入物の顕熱	③ 吹込み燃料などの分解熱
	④ 炉頂ガスの顕熱
	⑤ 石灰石などの分解熱
	⑥ 冷却水、炉壁損失熱

コークスは装入物をささえ、かつガスの良好な分布を維持し、鉍石などが熔融するときの柱の役目をするものであるから例え燃料吹込みによる炉内ガスの粘性、密度の変化により通気性が改善されても、ある限度以下にコークス比を下げることはできない。

また、銑鉄の含有炭素および直接還元に必要な炭素の供給源として一定量のコークスは必要である。

3) 微粉炭素の析出

燃料の不完全ガス化により煤煙を生成し、また水素の増加が炭素析出反応を促進する。生成する微粉炭素は、通気性を阻害し、滓の粘性を増しまたダスト損失を増加するので問題になる。

4. 計算の概要

高炉の概略の熱精算は表3のようになる。

ここで原料条件が一定であれば、燃料吹込みを実施しても、入熱項目③と出熱項目①②③⑥は余り変化しないと考えてよいので、入熱項目の燃焼発生熱と送風顕熱に対する出熱項目の燃料などの分解熱と炉頂ガスの顕熱とのバランスが問題になる。

先に述べた高炉操業上の問題点を考慮して、燃料吹込みによる炉の生産性およびコークス比の変化を計算する方法は非常に複雑で、仮定も多く入るので完成されたものはない。

しかし、基本的な高炉操業上の条件を満足させ、かつ燃料吹込みによつて羽口先に生成するガスの量、組成を計算し熱のバランスを考慮してガスの還元利用率、ソリューション・ロス反応にあずかる炭素量が推定できれば出銑量、コークス比の変化は計算で求めることができる。

1) 羽口先の熱バランスの計算

羽口先の燃焼温度は、燃焼コークス中の炭素 kg 当り生成するボッシュガスの顕熱と生成熱量および羽口先に降下するコークスの熱量などのバランスから、次式によつて計算できる。

$$T = \frac{2340 + Q + B_t + Q_c}{C_g \cdot V_{total}}$$

ただし

Q.....コークス中の炭素以外の反応熱 (燃料, 水分などの分解, 燃焼)

Q_c.....羽口先に降下するコークスの持込む熱量
0.75 t × 0.4 = 0.3 t (Rammの式引用)

B_t.....送風の顕熱

$$B_t = t_b(C_b + 22 \cdot 4G/18000 \cdot C_{H_2O} + Q_o/Q_a \cdot C_{O_2}) V_b$$

2340.....炭素 kg 当り一酸化炭素までの燃焼熱量

V_{total}.....羽口先燃焼コークス中炭素 kg 当り生成ガス量

C_g.....ボッシュガスの平均比熱

G.....乾送風中水蒸気量

V_b.....羽口先燃焼コークス中炭素 kg 当り所要乾送風量

Q_o/Q_a.....乾送風 m³ 当り富化酸素量

t_b.....送風温度

C_b·C_{H₂O}·C_{O₂}.....それぞれ空気, 蒸気, 酸素の平均比熱

この式は A. N. RAMM によつて与えられたもので, 羽口先に降下するコークスの温度を燃焼帯の温度の75%と仮定しているところに若干問題があるが大きな誤りはないであろう。

表4のような成分の各種燃料を高炉に吹込む場合, 羽口先の燃焼温度を一定にするための補償熱量を計算すると表5のようになる。また文献などの報告によれば国内外を問わず同じような計算により同程度の値を出している。

2) ボッシュガス量, 還元ガス量および所要乾送風量の計算

羽口先燃焼温度の計算と同じように, ボッシュガス量は次のように計算できる。

$$V_{CO} = 22 \cdot 4/12 + Q_R/Q_a \cdot Q_{R-C} \cdot 22 \cdot 4/12 \cdot V_b$$

$$V_{H_2} = 22 \cdot 4G/18000 + Q_R/Q_a \cdot Q_{R-H} \cdot 22 \cdot 4/2$$

$$V_{N_2} = (0 \cdot 79 + Q_R/Q_a \cdot Q_{R-N} \cdot 22 \cdot 4/18)$$

$$V_b + (1 + Q_{O-o}) \cdot Q_o/Q_a \cdot V_b$$

$$V_{total} = V_{CO} + V_{H_2} + V_{N_2}$$

同じように還元ガス量は

$$V_{red} = V_{CO} + V_{H_2}$$

ただし

Q_R/Q_a.....乾送風量 m³ 当り吹込み燃料量

Q_{R-C}.....吹込燃料中の炭素の割合

Q_{R-H}..... " 水素の割合

Q_{R-N}..... " 窒素の割合

V_{CO}, V_{H₂}, V_{N₂}.....ボッシュガス中の一酸化炭素, 水素および窒素の量

Q_{O-o}.....富化酸素の純度

V_{red}.....羽口先燃焼コークス中炭素 kg 当り生成還元ガス量

同じく所要乾送風量は次式で計算できる。

$$V_b =$$

$$\frac{22 \cdot 4/2 \cdot 12}{0 \cdot 21 + 0 \cdot 5 \cdot 22 \cdot 4G/18000 + Q_{O-o} \cdot Q_o/Q_a \cdot w \cdot Q_R/Q_a}$$

ただし

w 吹込燃料の羽口先での燃焼に必要な酸素

5. 出鉄量およびコークス比の計算

わが国および海外において, 高炉に各種燃料を吹込むときの理論計算を公表しているがいずれも計算が複雑である。われわれは, 条件をできるだけ単純化し, 現場的に許容されそうな大胆な仮定を入れて, 燃料吹込み時の予想計算を行ない, 実績と対比させながら標準値を推定しようとした。

1) 前提条件

表4 各種燃料の成分例

	C	H ₂	O ₂	N ₂	S	CO	CH ₄	C ₂ H ₄	C _m H _n	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		52.8	0.1	2.1	H ₂ S						
Rガス		0.5	0.2	10.5	0.3	5.9	30.3	3.3	2.8	2.4	
微粉炭	79.0	5.0	6.8	1.5	0.5	14.0	69.0	2.0	3.7	—	7.2

表5 燃料吹込による燃焼帯温度低下に対する熱補償

補償種類	燃料種類, 量	重油	ナフサ	Cガス	Rガス	微粉炭
		10 kg / t	10 kg / t	10Nm ³ / t	10Nm ³ / t	10 kg / t
送風温度	°C	+40	+42	+29	+50	+28
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

- (1) 羽口先燃焼温度を一定の標準値に維持する。
この条件下で炉の必要な温度勾配が維持される。
- (2) ボッシュガスの時間当り発生量を一定とする。
この条件下で通気性に変化なく、炉況は一定に保たれる。
- (3) 鉄鉄 t 当りの還元ガス量を一定とする。
この条件下でソリューション・ロスすなわち直接還元
に消費される炭素量は鉱石の滞留時間、すなわち出鉄量
の増減によつてのみ増減する。
- (4) 燃料吹込みにより、(1)(2)(3)の条件から鉄
鉄 t 当り窒素量が減少し、入熱の不足することが考えら
れるが、高炉シャフト部の熱収支、温度条件には多少余
裕があつて炉頂ガス顕熱、冷却損失の変化などで補償さ
れ実際上の制約にはならない。

実際には炉内ガス中の水素濃度の上昇は、ソリューション・ロスを減少させる傾向があり、またコークスと重油などとの置換で灰分が減少し高滓比を低下させる。したがつてこの効果予想は多少割引された控え目なものになるであろう。

2) 計 算

吹込み燃料の種類、量により、表5のように、補償熱量が計算できる。

次に前提条件にしたがつて、次の連立方程式が立てられる。

$$V_{total} \cdot C \cdot P = \alpha \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$V_{red} \cdot C \geq \beta \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$C_d = C_{do} + \gamma (P - P_0) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし

- P 出鉄量
- C 鉄鉄 t 当り羽口先燃焼コークス中の炭素量
- C_d 直接還元で消費される炭素量
- P₀, C_{do} 標準状態における P, C_d の値
- α, β, γ 定数

(1)(2)式より P と C が求められ、(3)式より C_d が標準状態からの P の変化により、計算できるので、鉄鉄中に入る炭素、不純物還元やダストロスに消費される炭

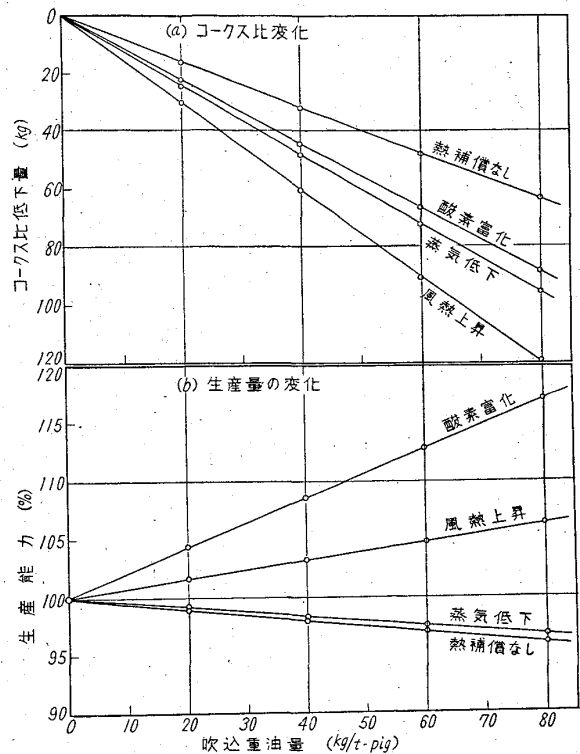


図 2 電油吹込によるコークス比および生産量の変化

素とともに加算して、コークス比が求められる。

この計算により求めた値を表6およびその一例を図2に示した。

これによれば、コークス比は燃料吹込みによる燃焼帯温度の低下を風熱で補償した時が、もつとも大きく低下し、出鉄量は、酸素で熱補償した時が、もつとも大きく上昇している。しかも蒸気量低下による熱補償、あるいはまったく熱補償なしではコークス比はある程度低下するが、出鉄量の上昇は期待できないことを示している。

3) その他の計算例

文献により、報告されている外国の例を簡単に説明すると次の通りである。

(1) A. N. RAMM (ソ連)

前提条件

(a) 羽口先理論燃焼温度を一定に維持する。

表 6 コークス比および出鉄量の変化

燃 料	補 償	コークス比 kg/t			出 鉄 量 %		
		風 熱	蒸 気	酸 素	風 熱	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

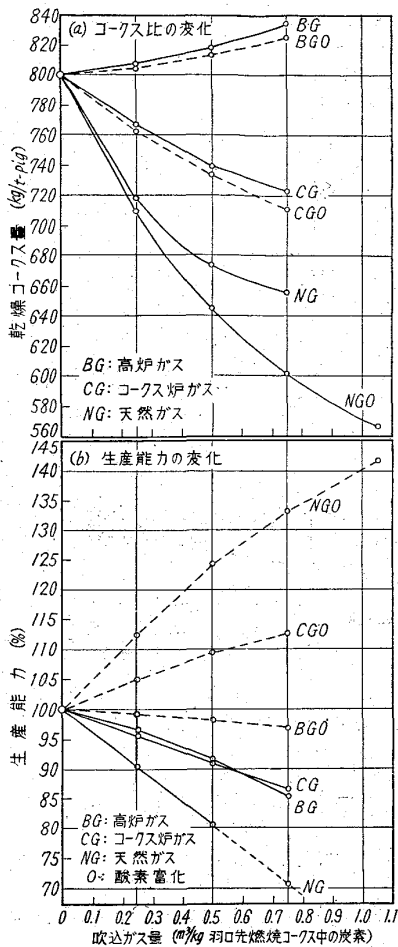


図 3 コークス比および生産能力の変化

バランスからコークス比を計算し、コークス比の低下しただけ出鉄量を増加することができるとし、計算結果を図3に示した

(2) A. L. HODGE (米国) 前提条件

(a) 還元ガス中水素の還元利用率は 40% で一定である。

(b) 直接還元消費される炭素は鉍石の炉内の滞留時間とボッシュガス中の有効水素量によつて左右される。

として、燃料吹込みの際のコークス比、出鉄量を想定して、炉を3つの部分に分けて、熱量計算し、全熱量バランスがとれるまで計算を繰返して予想計算することを報告している。

(3) A. M. DECKER (ベルギー) 前提条件

(a) 水素の還元利用率は 37%、一定である。

(b) 時間当たり羽口先生成ガス量が一定であれば、一酸化炭素による間接還元の割合は変わらない。

(b) 羽口先燃焼コークスの炭素 kg 当りのボッシュガス量を一定に維持する。

(c) 直接還元率は試験高炉などの経験から還元ガスの一酸化炭素および水素濃度によつて変化する。

(d) 一酸化炭素と水素との還元利用率の比は等しい。

(e)(b)の条件下で時間当りのコークス燃焼量を一定にすることができ、また炉頂ガス温度も一定に維持することができ時間当りの熱損失も変わらない。

として、全熱バ

(c)(b)の条件下で直接還元消費される炭素は、水素の有効利用量だけ減少する。

としてボッシュガス温度、炉の各部分ごとの熱量バランスを考慮して、燃料吹込みの際のコークス比を予想している。なお、燃料吹込みは高炉に、高風熱、酸素富化を使用できるよい方法であり、この高風熱と酸素富化が与えられた原料条件およびボッシュガス量に対して、生産量の増加をもたらす2要因であると報告している。

(4) L. V. BOGDANDY, W. SCHAEFERS (ドイツ) 前提条件

(a) 時間当たり羽口先生成ガス量は一定である。

(b) 生成ガスの温度および顕熱は燃料吹込み後も一定である。

(c) 還元ガス中一酸化炭素の利用率は一定でありまた水素の利用率は一酸化炭素の利用率の函数である。

(d) 炉内の熱収支の変化に影響をおよぼす要因は、直接還元量、装入S量、熱損失、炉頂ガス顕熱である。として全熱バランスから予想計算を行なっている。

III. 設 備

1. 吹込設備

吹込設備例として英国の Wales 社、Margam 製鉄所第1高炉の重油吹込設備を図4に示す。重油は多段遠心ポンプで加圧されたのち制御部に入り、圧力調整弁により一定圧力に制御されながら各羽口ごとの流量調整ポンプに送られ、ここで各羽口ごとの流量制御がなされる。重油の吹込みは図5に示すステンレス製羽口貫通型インジェクターによつて行なわれ、吹込羽口は出鉄口両脇を除いた全羽口である。吹込み設備はこの例にみられるように、貯蔵タンクまたはホルダー、加圧加熱装置、

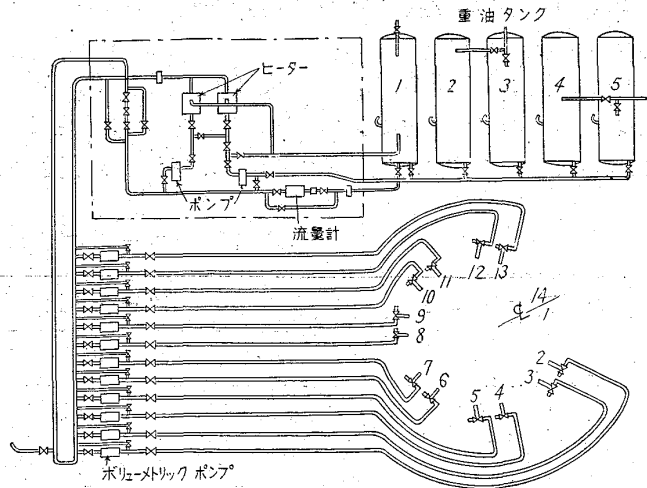


図 4 マーガム製鉄所第1高炉重油吹込設備系統図

配管、制御および安全設備、インジェクターの系統よりなるが、特に注意を払う点として次の4項目が挙げられる。

1) 制御設備

重油ないしガスを各羽口から吹込む場合、各羽口の吹込量はその羽口の送風流量に比例するよう制御することは当然考えられることで、吹込みを実施している製鉄所の多くはそのような制御設備を採用している。

しかし実際に操業を行なった結果炉況が安定している場合には個々の羽口で流量に比例させて燃料の吹込みを行なう必要は少なく、全送風流量に対する燃料比率の制御で十分であるとの結論を得ている場合が多いようである。

圧力制御は吹込み羽口の圧力が常に一定値を維持するように行なわれ、圧力が異常値を示した場合に遮断弁が自動的に作動するようにするのが普通である。

重油吹込みを行なっている Dofasco 第3高炉では図6に示すような制御により各羽口から吹込まれる重油流量を送風流量に比例させている。すなわち各羽口の送風流量は各羽口支管のオリフィス・プレートで測定され比率制御器に電送され、一方各羽口に吹き込まれる重油流量も支管において回転計によつて測定され比率設定器に電送される。比率設定器で送風流量と重油流量のバランスがとられ流量調節弁が重油流量を加減し、各羽口ごとに送風流量に比例した重油が吹込まれる。Dofasco第3高炉では当初の試験操業で重油と羽口ごとの風量との比率制御は重要でないとの結論を得たので、後に追加した

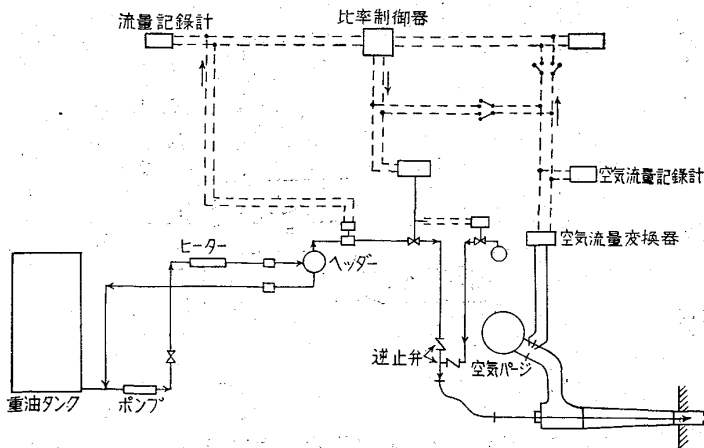


図6 ドファスコ第3高炉重油吹込設備系統図

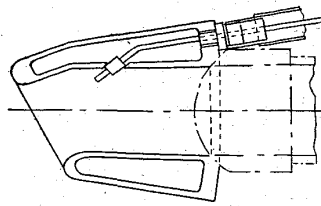


図5 マーガム製鉄所羽口貫通型インジェクター

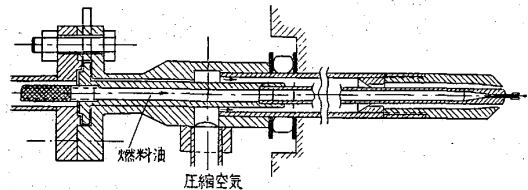
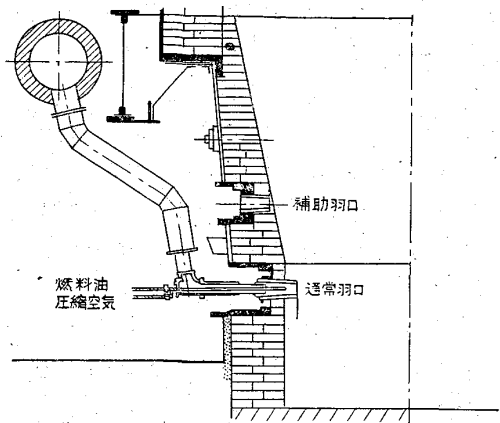


図7 重油吹込み用インジェクター例

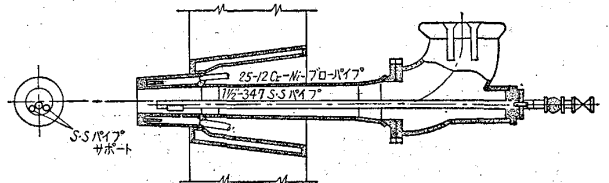


図8 ガス吹込み用インジェクター例-1

設備で各羽口の重油流量を等しくするような設備をし、送風流量があらかじめ設定された値以下に低下した羽口は自動的に送油が停止するようにしている。

圧力制御、流量制御以外にインジェクターに入る重油の温度を一定にする温度制御が必要である。

2) インジェクター

重油吹込みの場合でも、ガス吹込みの場合でもインジェクターは、バーナー型インジェクターと羽口貫通型インジェクターとに大別される。また吹込み方法としては機械的に霧化する方法、圧縮空気で霧化する方法、自噴させ熱風で霧化する方法があり、最近では圧縮空気の代りに還元ガスないしは酸素で霧化する方法も考えられている。いずれのタイプでも油滴ないしはガス流が羽口先の酸化帯を離れる前に完全燃焼を行なうような霧化が必要であり、これが不完全であるとすすが生成し種々の問題が生ずる。

(1) バーナー型インジェクター

図7に重油用インジェクター、図8にガス用インジェクターの例を示す。

図7に示す例では、各羽口ごとのオイルフィル

ターを通過してきた重油は 18-8 ステンレス製ノズル内に加圧されて導かれ、一方圧縮空気は重油ノズルを包んでいる同じ 18-8 ステンレス製導管を流れ、重油の霧化およびインジェクターの冷却を行なう。

Pittsburgh Coke & Chemical 社では図 8 に示すステンレスパイプをガス吹込みに使用しているが、羽口先端近くにインジェクターのサポートを取りつけている。同社の当初の実験はインジェクターの先端を羽口の先端から 240mm のところにセットして行なわれたが、3週間の試験によりガスによる羽口の溶損が見られたので 120mm のところにセットしている。この例に見られるようにインジェクターの先端の位置が問題である。

(2) 羽口貫通型インジェクター

図 5 は Margam 製鉄所第 1 高炉において使用されている重油羽口の断面図で、ノズルは 4.7mm φ のステンレス製であり同社の報告によればノズルの位置は羽口先端から 175mm にセットした場合が最も良かったとのことである。

同様な方法によるガス吹込み例を図 9 に示す。

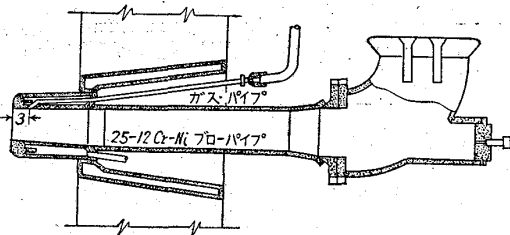


図 9 ガス吹込み用インジェクター例-2

(3) 安全性

燃料吹込み設備は必要な調整機能を有しかつ維持が容易でなければならないが、同時に十分な安全性を持つていなければならない。特にガス吹込み設備ではその爆発性の点から、より一層の安全設備と注意とが必要である。ある 1 つ、またはいくつかの羽口で送風圧力の降下が起こった時送風管内にガスが逆流すること、また反対に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では次のようなタイプで安全弁を 3 段に設置している。

(a) 本管自動遮断弁 重油またはガス本管に設置される遮断弁で緊急時に自動的に遮断を行なう。

(b) 支管自動遮断弁 各吹込羽口への重油またはガス支管に設置される遮断弁で緊急時に自動的な遮断を行なう。

(c) 逆止弁 重油またはガス本管、および吹込み支管に設置される弁で、熱風が重油またはガス管内に逆

流することを防ぐ。

本管および支管の自動遮断弁は次のような場合に自動的に作動し吹込みは完全に遮断される。

- (a) 重油圧力またはガス圧力が下限設定値より低下した場合。
- (b) 送風圧力が上限設定値を越えた場合
- (c) 送風圧力が下限設定値より低下した場合。
- (d) 重油加圧ポンプまたはガスコンプレッサーが突発的に停止した場合。

たとえば天然ガスの吹込みを行なっている Colorado Fuel & Iron 社の Pueblo 製鉄所では、ガス圧力と送風圧力との差が 0.35 kg/cm^2 になるまで送風圧力が高くなつてきた時にガスの遮断を行なう設備と一旦停止されたガスの供給を送風圧力の低下時点ですたたび吹込みを行なう設備が設置されている。同製鉄所では計装上の安全装置以外にブローパイプの温度測定による安全装置を設備しており、この方法は炉況不調時に、吹込み羽口の一部または全部が塞がることを考えて設けられたもので、ブローパイプの温度を測定し指定上限温度を越えると、吹込みが自動的に停止するようにしている。

インジェクターの閉塞する場合のことを考慮して設置される他の安全装置として Pompey 第 4 高炉では、各羽口のインジェクター前の重油圧力計に警報計を設けておき異常圧力時に警報が鳴るようにしている。

(4) 配管の清浄

重油吹込みを行なっている高炉では吹込みが停止した時ノズル内の重油の焼き付きを防ぐため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。たとえば Margem 製鉄所では図 10 に示すような三方コックにより重油吹込み時に蒸気パージを行なっている。

2. 吹込み実施例

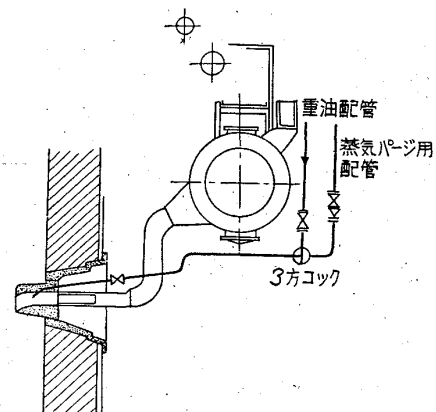
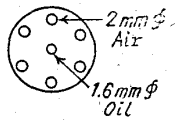
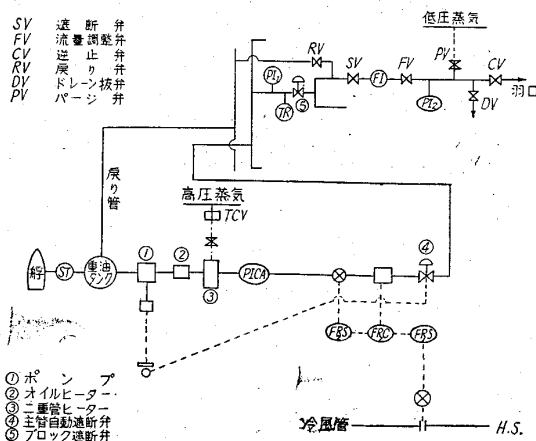


図 10 Margam 製鉄所重油吹込設備の蒸気パージ配管系統

表7 燃料吹込み実施例

工場名	ポンペイ製鉄所	コックリル・ウーグレ製鉄所	コルニリアーノ製鉄所	ドファスコ	日本鋼管	日本鋼管
高炉	#3B.F. (H.D. 5.5m)	#4B.F. (H.D. 3.8m)	#3B.F. (H.D. 6.1m)	#3B.F. (H.D. 6.2m)	#2B.F. (H.D. 7.2m)	#5B.F. (H.D. 6.9m)
吹込み羽口	12本中9本より	8本中7本より	10本中9本より		16本中14本より	14本中12本より
吹込み燃料	重油	重油	重油	重油	重油	Rガス
制御設備	○羽口毎に風量に比例して吹込む。 ○単独に重油量の加減。	○手動コックのみ	○手動コックのみ	○各羽口毎に風量に比例して吹込む設備はあるが、むしろ各羽口に均等に分配させている。	○各羽口に手動の流量調整弁 ○全送風流量に比率制御させる。	左に同じ
インジェクター	○圧縮空気による霧化を18-8 Cr, Ni製ノズルで行う。 ○ノズルの先端は羽口の先端と同じ位置	霧化せず	○圧縮空気による霧化。 	霧化せず	霧化せず ノズル直径 2.46mm φ	霧化せず
燃料圧			5~6 kg/cm ²	5.4~7.0 kg/cm ² (主管)	2.0 kg/cm ² (吹込口)	2.0 kg/cm ² (吹込口)
アトマイズ空気圧		10~15 kg/cm ²	4 kg/cm ²			
備考	○各羽口にオイルフィルター		○各羽口の流量測定は行わない。 ○重油、空気圧力低下時に警報が鳴る。 ○4ヶ月間にノズル10本を取り替えた		○緊急遮断弁を主管および支管に設ける。	左に同じ。



11図 日本鋼管第2高炉重油吹込設備系統図

燃料吹込みを行なっている具体的な大略を表7に示す。

1) 重油吹込み例

(1) 日本鋼管川崎製鉄所第2高炉

川崎製鉄所では第3高炉で重油吹込みを実施し、引き続き設備を拡充して全高炉に重油あるいはガスの吹込み

を行なっている。第2高炉の吹込み設備は図11に示す通りで、重油タンク2基(300t/基)およびギャーポンプを使用し、配管途中の密閉型オイルヒーター、および2重管蒸気ヒーターにより110±5°C(C重油)まで高めて吹込みを行なっている。制御は自動制御にして制御盤を管理室に設置し、主要な自動制御は次の通りである。

- (a) 重油温度調節
- (b) 重油圧力調節
- (c) 重油流量調節: 重油総流量と送風流量との比率制御を行なう。
- (d) 自動緊急遮断: 重油圧力低下、風圧上限、下限および停電時に本管と各支管に設けた遮断弁が自動的に作動して二重に遮断する。

各羽口の流量制御については、指示計を設置して手動操作にしたが、調整弁の開度を決めておけばかなり均一に流量が保持できるのでほとんど調整することはなく、1本の羽口に対する重油吹込量は種々検討の結果最大10

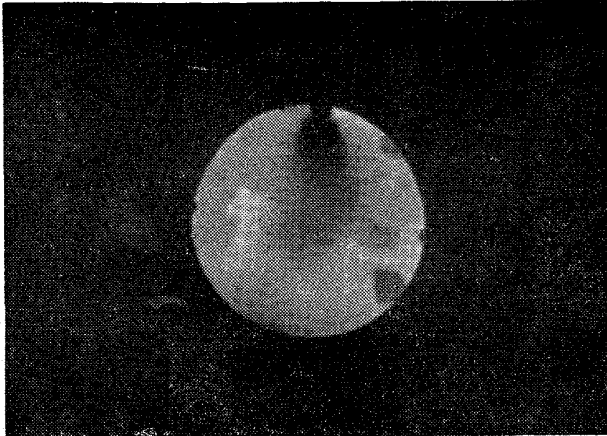


写真 1. 羽口における重油燃焼状況

1/mnにしている。吹込み方式は羽口貫通型インジェクターを採用し、ノズルはステンレスパイプで先端径を当初 6mm、現在は 4mm にして使用しており、その燃焼状況を写真 1 に示す。

その他の例として Pompey 社第 4 高炉の配管図を図 12 に示す。

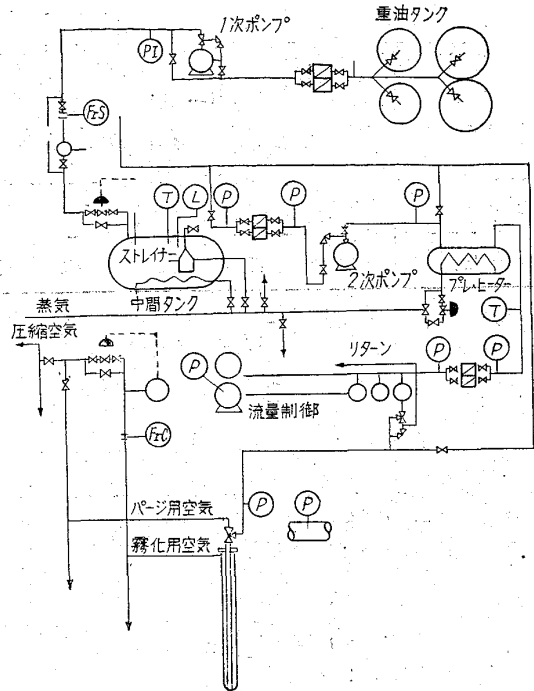


図 12 ポンペイ 第 4 高炉重油吹込設備系統図

以上の吹込み方法のほかに燃焼室内で重油を燃焼分解後吹込む方法があり、一部で試験中である。

2) ガス吹込み例

(1) 某社 B 高炉

その配管系統図を図 13 に示す。吹込みガスは本管において流量測定がなされ、送風流量との比率制御を流量調整弁によつて行なつていいる。各吹込み支管には流量測定用のタップバルブがあるが、実際には流量測定は行なつていない。安全装置としては遮断弁が設置されており、

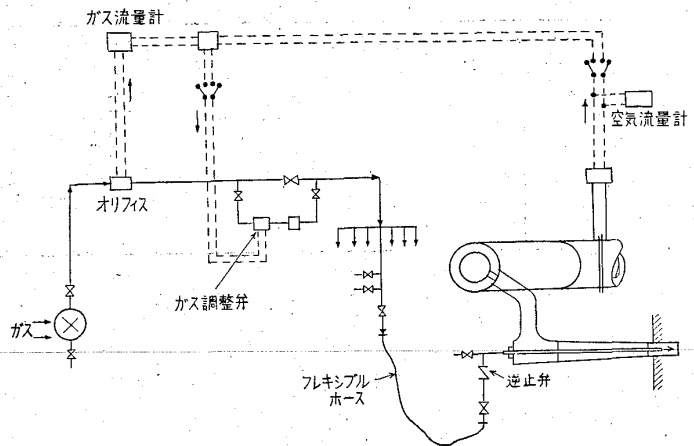


図 13 ガス吹込み設備系統図

(a) 送風圧力が 350 g/cm^2 以下になると閉。

(b) ガス圧力が $2,380 \text{ g/cm}^2$ 以下になると閉。 $2,520 \text{ g/cm}^2$ 以上になると開。

(c) ガス圧力と送風圧力との差が 350 g/cm^2 以内になると閉の操作を行なつて系の安全を確保している。

(2) 日本鋼管川崎製鉄所第 5 高炉

同高炉では 1961 年 11 月以来 R ガスの吹込みを行なつており、その系統図を図 14 に示す。コンプレッサーにより昇圧されたガスはアフタークーラーおよび水分分離器を経てガスホルダーに貯えられた後高炉に送られ、高炉前ガス本管において圧力制御ならびに流

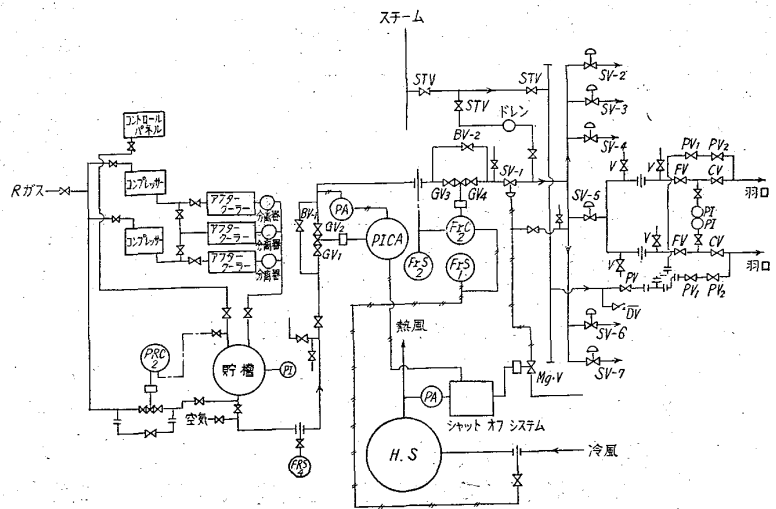


図 14 R ガス吹込設備系統図

量制御がなされた後、リング管、支管を経て炉内に吹込まれる。流量調節は送風流量とガス総流量との比率制御を行なっており、各羽口の吹込みガス流量の比率制御は行なっていないが、流量調整弁によつて流量の変更はなしうようになっている。安全設備は重油の場合と同じくガス圧力異常上昇、異常低下、送風圧力異常低下およびコンプレッサー停止時に本管および支管の遮断弁が自動的に作動して2重に遮断を行なうようにしたほか、各吹込み口前に逆止弁を設けて熱風の逆流を防止している。吹込み方式は羽口貫通型インジェクターを採用し、ノズルは径 21mm のステンレスパイプを使用している。

3) 粉炭吹込み例

微粉炭の吹込みは米国、ソ連などで試験的に操業されており National Steel 社では 1/3 吋以下の粉炭を真空方式でタンクに吸い上げ、圧縮空気で攪拌して流動状態にした後ステンレス製ランスにより炉内に吹込んでいるが、このような粉炭単味の吹込みばかりでなく、重油中に固体燃料を懸濁させて吹込む方法も検討されている。

(1) ソ連ジェルジェンスキー製鉄所

ジェルジェンスキー製鉄所では、内容積 427m³ の高炉で粉炭吹込み試験を 1955 年 5 月より行なっている。粉炭は特殊タンク車によつて炉の近くまで運ばれ、タンクからの粉炭の吐き出しは圧縮空気で作動するエジェクターによつて行なわれる。粉炭吹込み設備は図15に示す通りで、タンク内の粉炭は圧縮空気によつてサイクロンまたは直接に高炉に送られ、これに必要な空気量は10~20Nm³/t 粉炭である。吹込みバーナーは図16に示す通りで羽口の覗きカバーから挿入され、バーナーの位置は

- a サイクロン
- b タンク
- c バーナー
- d_I 粉炭輸送管
- d_{II} サイクロンへ
- d_{III} サイクロンから環状輸送管へ
- d_{IV} タンクから
- e 冷風管
- f 圧縮空気本管
- g 吹きだし管
- h マノメーター
- i オリフィス
- j 差圧マノメーター
- k 環状輸送管
- l ゴムホース(バーナー)
- m 三方コック
- n ゴムホース
- o ッ
- p 配管
- q ッ
- r₁ ストップバルブ
- r₂ ストップバルブ
- r₃ ストップバルブ
- s₁ 滑り弁
- s₂ 滑り弁
- s₃ 滑り弁

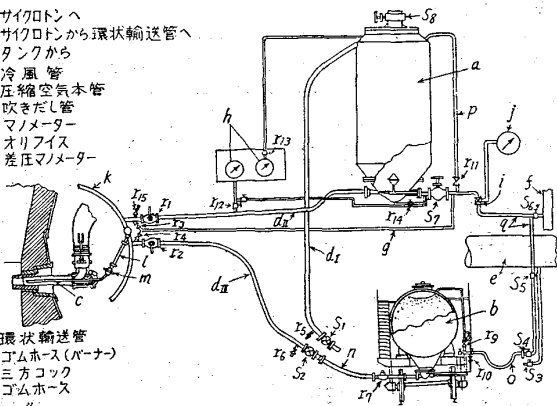


図15 粉炭吹込装置系統図

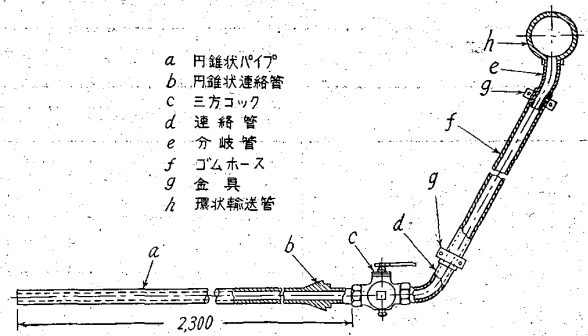


図16 粉炭吹込用バーナー

その先端が羽口先から 300mm 手前でノズル径は10~20 mm である。

IV. 操業結果

高炉への燃料吹込みは最終的には、銑鉄原価の低下が目的であるが、それに関する種々の利益および問題点が検討されてきた。実際の操業結果は次の通りである。

1. 出銑量の増加

各種燃料の吹込みによる出銑量の増加は、12の実施例(表8~表19)に示す通りである。われわれの計算結果と実施例(表8~表9)を対比して図17に示す。この図中の斜線部分はおおよそわれわれの操業条件、すなわち重油吹込量 10kg/t までは風熱上昇、30kg/t までは蒸気低下で補償し以上は補償を行なわない場合の推定変動範囲でありその下限は理論計算線である。

また米国鉱山局の試験炉での重油吹込みの試験結果を図18に示す。この操業結果にわれわれの計算線を入れると図中の点線となり、実績と比較的よく合っている。

このように燃料吹込みによる出銑量の増加は、熱補償の程度により大きく支配され、操業実績もバラツキが大きくなっていると考えられる。

2. コークス比の低下

燃料吹込みによつてコークス以外のより安い燃料が使用可能になったが、コークスに代わる燃料のうちでも、重油が有利か、あるいはどの種のガスが有利かなどはそれぞれの地域的条件によるもので、重油が主としてヨーロッパで、天然ガスが主として米国で研究されたのはそのためである。わが国においては、高炉用コークスが高価なのでこれらの技術は相当伸びることが予想される。

1) 燃料油

重油吹込みによるコークス比低下の実績は同じく(表8~表13)に示す通りである。計算によればコークス比の低下は油の種類、熱補償の種類に応じて異なり、先の表6に示すように油 1 kg 当りおおよそ 1.2~1.7 kg の

表8 川崎 #2B.F. 操業データ (重油吹込み)

	基準期間	試験期間											
		61-8/27 ~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
生産量	t/d	1392	1382	1342	1399	1398	1416	1426	1356	1389	1367	1378	1341
コークス比	kg/t	609	553	531	524	509	484	504	506	503	505	506	515
重油比	kg/t	—	30.4	45.7	49.2	71.5	75.7	71.0	76.0	76.0	86.0	83.2	84.4
送風量	Nm ³ /mn	1630	1610	1602	1596	1646	1628	1640	1640	1650	1650	1660	1640
送風圧	g/cm ²	1080	1200	1160	1130	1120	1110	1120	1200	1200	1190	1230	1230
送風熱	°C	873	823	812	904	894	882	930	910	910	250	900	890
衝風中湿分	g/Nm 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
鉄中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
鉄中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
高滓比	kg/t	359	366	368	374	366	346	379	395	387	386	361	380
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
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
(コークス kg/重油 kg)		—	1.78	1.71	1.73	1.40	1.65	1.41	1.34	1.39	1.21	1.23	1.11
吹込み羽口数		—	6	8	10	14	14	14	14	14	14	14	14

炉床径 7,200mm, 実効内容積 1137m³

表9 川崎 #3B.F. 操業データ (重油吹込み)

	基準期間	試験期間						
		61-9/11 ~30	10/1~5	10/6~10	10/11~15	10/16~20	10/21~25	10/26~31
出鉄量	t/d	1383	1387	1382	1371	1422	1434	1432
コークス比	kg/t	604	597	577	574	581	565	574
重油比	kg/t	0	19.7	30.9	28.8	31.6	31.1	31.2
送風量	Nm ³ /mn	1545	1571	1569	1550	1644	1643	1647
送風圧	g/cm ²	935	935	910	890	940	945	945
送風熱	°C	930	930	940	890	900	890	900
衝風中湿分	g/Nm ³	31.7	25.8	25.4	22.4	21.0	20.9	20.8
鉄中Si	%	0.70	0.75	0.70	0.69	0.75	0.66	0.71
鉄中S	%	0.044	0.040	0.044	0.043	0.036	0.049	0.048
高滓比	kg/t	349	385	373	393	379	384	348
塩基度		1.16	1.19	1.14	1.12	1.19	1.17	1.20
置換率		—	0.96	1.17	1.46	1.27	1.29	0.96
(コークス kg/重油 kg)		—	0.96	1.17	1.46	1.27	1.29	0.96

炉床径 7150mm, 吹込み羽口数 4, 実効内容積 965m³

表10 コルニリアーノ #3 高炉操業データ (重油吹込み)

	1960(平均)	1961(1月)	月				
			2	3	4	5	
出鉄量	t/d	1052	1199	1141	1239	1217	1244
コークス比	kg/t	693	603	620	605	601	592
重油比	kg/t	0	39.3	32.5	38.6	38.0	39.9
送風量	Nm ³ /mn	1420	1460	1430	1500	1470	1460
送風圧	g/cm ²	—	—	—	—	—	—
送風熱	°C	785	904	856	899	917	920
衝風中湿分	g/Nm ³	—	—	—	—	—	—
鉄中Si	%	—	—	—	—	—	—
鉄中S	%	0.029	0.029	0.029	0.029	0.032	0.030
高滓比	kg/t	355	266	287	279	300	252
塩基度		1.24	1.25	1.22	1.23	1.26	1.27
置換率(コークス kg/重油 kg)		—	2.30	2.25	2.28	2.42	2.54

炉床径 6095mm

表 11 ドファスコ #3B.F. 試験データ (重油吹込み)

		基準期間	試験期間		基準期間	試験期間	
		1960 11/3~12	1960 12/3~14		1960 11/3~12	1990 12/3~14	
出 銑 量	t/d	1057	1101	銑 鉄 中 Si	%	1.15	1.26
コークス比	kg/t	682	602	" S	%	0.026	0.029
重 油 比	kg/t	0	60.3	高 滓 比	kg/t	283	318
送 風 量	Nm ³ /mn	1740	1768	塩 基 度*		0.965	0.953
送 風 圧	g/cm ²	1364	1483	置 換 率		—	1.33
風 熱	°C	781	849	(コークス kg/重油 kg)			
衝風中湿分	g/Nm ³	24.7	27.0				

炉床径 6780mm, (* ただし CaO+MgO/SiO₂+Al₂O₃)

表 12 コックリルウーグレ 4 高炉操業データ (重油吹込み)

		基準期間	試験期間						
		60-4/27~5/6	5/9 ~5/25	6/19~7/2	7/3~16	7/24 ~8/6	8/14~27	9/4~17	10/30~11/21
出 銑 量	t/d	203	225	201	222	231	229	240	225
コークス比	kg/t	789	836	718	741	723	737	794	754
重 油 比	kg/t	0	0	61	65	63	58	64	63
送 風 量	Nm ³ /mn								
送 風 圧	g/cm ²	381	465	378	446	434	460	461	401
風 熱	°C	710	697	810	816	821	807	809	754
衝風中湿分	g/Nm ³								
銑 鉄 中 Si	%	0.33	0.38	0.35	0.30	0.35	0.37	0.44	0.37
" S	%	0.071	0.064	0.065	0.080	0.043	0.055	0.070	0.075
高 滓 比	kg/t	1.50	1.50	1.42	1.45	1.37	1.43	1.40	1.41
塩 基 度**		—	—	1.55	1.10	1.42	1.30	0.29	0.93
置 換 率									
(コークス kg/重油 kg)									

炉床径 3800

表 13 アメリカ鉱山局における操業データ (重油吹込み)

		基準期間	試験期間							
		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9
出 銑 量	t/d	28.6	32.4	34.0	33.7	29.1	28.9	29.5	29.7	28.5
コークス比	kg/t	576	480	479	464	438	445	445	416	393
重 油 比	kg/t	0	41.4	35.6	40.6	119.3	119.8	115.2	139.3	174.2
送 風 量	Nm ³ /mn	37.2	38.2	38.4	37.6	38.7	39.7	40.0	40.3	39.4
送 風 圧	g/cm ²									
風 熱	°C	(780)*	(950)	(970)	(1040)	(875)	(835)	(825)	(880)	(925)
衝風中湿分	g/m ³	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	25.2
銑 鉄 中 Si	%	0.99	1.10	0.88	0.99	0.97	1.10	1.02	1.07	1.05
" S	%	0.020	0.020	0.020	0.024	0.020	0.032	0.038	0.039	0.053
高 滓 比	kg/t	316	297	315	296	300	293	300	293	291
塩 基 度**		0.97	0.98	0.95	0.96	1.07	1.00	1.04	0.98	0.98
置 換 率		—	1.83	2.18	2.22	1.09	1.06	1.10	1.08	0.96
(コークス kg/重油 kg)										

炉床径 1220mm, 実効内容積 86.4m³

* 括弧内は工業炉での比較のための推定値

** (ただし CaO+MgO/SiO₂+Al₂O₃)

表 14 ジョーンズタウン “H” 高炉の操業データ (天然ガス吹込み)

	基準期間				試験期間				
	1960-6	1960-9	1960-10	1960-11	1960-6	1960-9	1960-10	1960-11	
出 銑 量 t/d	1581	1736	1858	1888	銑 鉄 中 Si %	0.95	1.03	0.94	0.99
コークス比 kg/t	636	533	502	490	〃 S %	0.034	0.035	0.037	0.036
ガス比 m ³ /t	0	50.3	57.8	56.4	高 滓 比 kg/t	405	376	355	368
送風量 Nm ³ /mn	2510	2540	2490	2490	塩 基 度				
送風圧 g/cm ²	1519	1476	1476	1476	置 換 率		2.05	2.32	2.59
風 熱 °C	721	810	846	874	(コークス/ガスm ³)				
衝風中湿分 g/Nm ³	25.0	14.2	11.0	11.2					

炉床径 7925mm, 実効内容積 1291m³

表 15 ラカワナ “J” 高炉操業データ (天然ガス吹込み)

	基準期間				試験期間				
	59-12 ~60-1	60-8 ~60-9	60-9~10	60~11	59-12 ~60-1	60-8 ~60-9	60-9~10	60~11	
出 銑 量 t/d	1760	1712	1834	1820	銑 鉄 中 Si %	1.11	0.97	1.04	1.01
コークス比 kg/t	624	648	552	523	〃 S %	0.032	0.035	0.029	0.034
ガス比 m ³ /t	0	0	58.3	57.1	高 滓 比 kg/t	405	376	355	368
送風量 Nm ³ /mn	2900	2890	2900	2770	塩 基 度				
送風圧 g/cm ²	1652	1498	1462	1476	置 換 率			1.44	1.80
風 熱 °C	721	699	785	818	(コークス kg/ ガスm ³)	—	—		
衝風中湿分 g/Nm ³	19.5	28.2	17.0	10.8					

炉床径 9118mm, 実効内容積 1573m³

表 16 ピッツバーグ・コーク アンド ケミカル高炉 (Cガスおよび天然ガス吹込み)

	基準期間			試験期間		
	766	707	678	766	702	678
出 銑 量 t/d	766	707	678	766	702	678
コークス比 kg/t	775	702	726	775	702	726
ガス比 m ³ /t	—	68.8	63.7	—	68.8	63.7
送風量 Nm ³ /mn	1450	1335	1310	(但しCG)	(但しNG)	(但しNG)
送風圧 g/cm ²	757	752	815			
風 熱 °C						
衝風中湿分 g/m ³	22.0	18.1	16.3	衝風中湿分 g/m ³	22.0	18.1
銑 鉄 中 Si %	1.85	2.09	1.97	銑 鉄 中 Si %	1.85	2.09
〃 S %	0.022	0.020	0.030	〃 S %	0.022	0.020
高 滓 比 kg/t	1.05	1.03	0.97	高 滓 比 kg/t	1.05	1.03
塩 基 度	—	1.06	0.77	塩 基 度	—	1.06
置 換 率				置 換 率		
(コークス kg/ガスm ³)				(コークス kg/ガスm ³)		

炉床径 5500mm, 実効内容積 850m³

表 17 東田 5 高炉操業データ (Cガス吹込み)

	基準期間		試験期間	
	60-6/1~14	61-6/17~27	60-6/1~14	61-6/17~27
出 量 銑 t/d	806	864	806	864
コークス比 kg/t	612	572	612	572
ガス比 m ³ /t	—	55.4	—	55.4
送風量 Nm ³ /mn	909	926	909	926
送風圧 g/cm ²	749	816	749	816
風 熱 °C	771	879	771	879
衝風中湿分 g/Nm ³	25	20	25	20
銑 鉄 中 Si %	0.66	0.63	銑 鉄 中 Si %	0.66
〃 S %	0.033	0.029	〃 S %	0.033
高 滓 比 kg/t	404	387	高 滓 比 kg/t	404
塩 基 度	1.31	1.36	塩 基 度	1.31
置 換 率	—	0.72	置 換 率	—
(コークス kg/ガスm ³)			(コークス kg/ガスm ³)	

炉床径 6200mm, 実効内容積 646m³

表 18 操業データ アメリカ鉱山局試験高炉 (メタン吹込み)

		基準期間		試験期間									
		No. 1 ~No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10	No. 11	No. 12	No. 13	No. 14	No. 15	
出 銑 量	t/d	14.9	18.0	16.6	18.9	18.0	18.9	16.8	16.9	15.9	15.6	16.8	
コークス比	kg/t	631	511	485	536	503	498	503	483	567	572	574	
ガス比	m ³ /t	0	98.3	91.8	45.1	70.7	73.3	81.9	95.0	23.4	26.6	25.1	
送風量	Nm ³ /mn	21.6	21.9	22.1	22.2	22.1	22.2	22.2	22.1	22.3	21.7	22.2	
送風圧	g/cm ²	(910)*	(1095)	(1095)	(1095)	(1095)	(1095)	(1095)	(1150)	(915)	(915)	(915)	
風熱	°C	1145	1357	1357	1357	1357	1357	1357	1427	1149	1149	1149	
衝風中湿分	g/Nm ³		16.0	16.0	16.0	16.0	14.2	12.6	7.3	10.5	7.6	7.8	
銑鉄中Si	%	0.95	0.85	0.75	0.76	0.66	0.83	0.79	0.82	0.82	0.83	0.68	
〃 S	%	0.038	0.055	0.042	0.070	0.050	0.036	0.037	0.036	0.046	0.044	0.069	
高滓比	kg/t	461	423	463	453	445	445	430	434	450	437	448	
塩基度		1.04	1.00	1.01	1.06	1.01	1.02	1.02	1.02	1.05	1.02	1.00	
置換率 (コークス kg/ガス m ³)		—	1.22	1.70	2.10	1.81	1.82	1.57	1.66	2.74	2.22	2.27	
							2.44%					0.68%	
							O ₂ 富化					O ₂ 富化	

炉床径 1220mm, 実効内容積 86.4m³

* 括弧内は工業炉での比較のための推定値

表 19 操業データ アメリカ鉱山局試験高炉 (無煙炭吹込み)

		基準期間		試験期間					
		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8
出 銑 量	t/d	14.12	14.47	15.31	14.33	15.55	16.68	13.97	17.98
コークス比	kg/t	676	635	575	510	614	505	542	549
無煙炭比	kg/t	—	57.2	108.4	173.7	66.2	130.6	156.0	78.9
送風量	Nm ³ /mn	23.9	23.4	23.8	23.4	23.4	23.5	23.5	23.5
送風圧	g/cm ²	(640)*	(650)	(740)	(795)	(850)	(860)	(850)	(1075)
風熱	°C	830	840	949	1007	1074	1085	1066	1335
衝風中湿分	g/Nm ³								
銑鉄中Si	%	0.83	0.94	0.95	1.04	1.17	1.03	0.60	0.26
〃 S	%	0.103	0.065	0.067	0.059	0.056	0.062	0.061	0.162
高滓比	kg/t	330	329	334	308	296	322	311	295
塩基度		0.98	0.94	0.99	1.04	1.01	1.00	1.00	0.99
置換率 (コークス kg/ 無煙炭 kg)		—	0.72	0.93	0.96	0.94	1.31	0.86	1.61

炉床径 1220mm, 実効内容積 86.4m³

* 括弧内は工業炉での比較のための推定値

コークスに置換するものと考えられる。しかし実際の操業実績にこれを上廻るものが多いのは、還元ガス中の水素の効果、および計算以上の高風熱あるいは酸素の利用によるものであろう。またコークス比の高い高炉程その効果がいちじるしい傾向にあるのは、ガス還元率が大中に上昇したものと考えられる。また羽口からの吹込み燃料のうち C/H の比によつて分解熱および水素含有率が異なり、したがつてコークスとの置換率が変わる。水素の効果としては、先の理論に記述した通りであるが、DECKER によると C/H と置換率の関係は図 19のごとくであつて C/H=5~7 が最高の値を示している。これらから重油類が吹込み燃料として優れていると考えられる。

2) ガス

天然ガス、Cガス、Rスガなどはそれぞれ発熱量、水素含有量およびその結合状態が異なるが、一般には先の表 6 に示す通り 1m³ のガスに対して、おおよそ 0.9~1.4kg のコークスに置換するものと考えられる。しかし表 14~表 18 の操業あるいは試験例に示すごとくその結果はまちまちである。これも油の場合と同じ理由によるものであろう。

3) 固体燃料

固体燃料のうち微粉炭吹込みによるコークスとの置換は理論計算上では、先の表 6 に示す通り 0.9~1.2kg になる。米国鉱山局の試験例では表 19 のように 1kg の微粉炭が約 1kg のコークスに置換している。

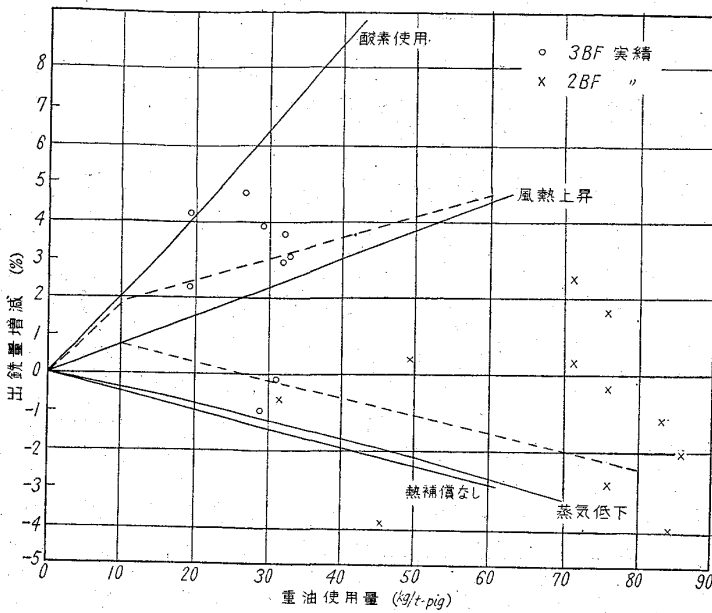


図17 重油使用による出銑量変化

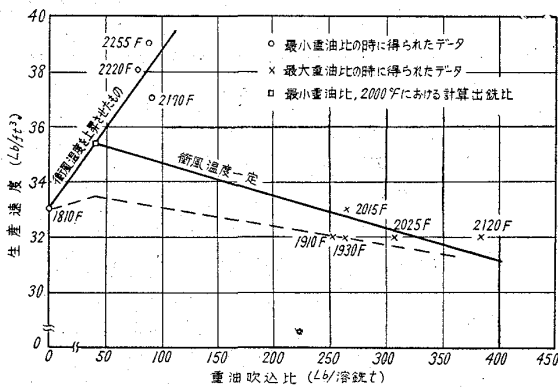


図18 羽口先における還元ガス量と衝風温度の関係

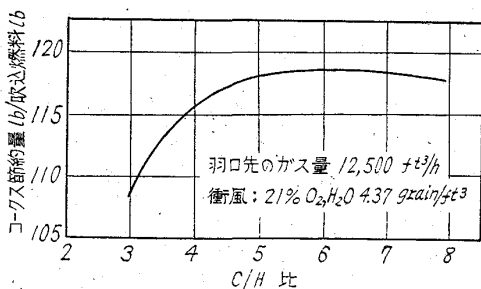


図19 C/H と置換率の関係

3. 操 業 推 移

一般には、燃料吹込みによつて炉況が安定するといわれており、われわれの経験でも燃料吹込みにより、コークス比が低下し炉況が安定した。Pueblo 工場でも、そのために Si を下げて操業できたと報告している。また各炉とも高風熱操業が可能になつている。さらに進んで

送風温度、送風湿分とともに炉熱調整の手段として利用することは興味ある問題であろう。

経験によれば、羽口先で重油を燃焼させると炎は黒く羽口先は輝かない。ガスはやや青味がかつて見えたり、全く見えなかつたりする。いずれの場合にも過剰に吹込むと羽口先に溶滓やカーボン質のものが垂れ下がる。これは数分間燃料吹込みを止めると元の輝かしい羽口に戻る。しかし、重油を多量に吹込み続けると、“すす”を生成し溶滓に混入して流動性を害し、あるいは炉頂から排出されてガス清浄系統の汚水にも顕著に現われ、清浄作業に支障をきたすこともある。その限界について CODIER は 67 kg/t と報告している。これはインジェクターの性能にも関連して今後の問題であろう。

平常操業時には、重油、ガスの吹込みの危険性は経験から余りないといわれているが、ブローパイプへの逆流や、安全上の種々の置換作業が必要となり、また設備的にも炉廻り作業が幾分複雑化するのはやむを得ない。

4. 羽口および冷却函の問題

重油、ガスの吹込上インジェクターの先端の保護と羽口溶損が問題となる。

重油吹込みの場合インジェクターの先端の溶滓あるいは熱による損傷、羽口の溶損、有害ガス(SO₂など)の腐食作用などが考えられる。ガス吹込みの場合は、ガスの燃焼点が近いので高熱により羽口およびインジェクターが危険になるので先端位置には十分注意する必要がある。また一方冷却函の破損が増加する例もあるので、特に操業上の対策も考慮すべきである。

5. S の 問 題

重油吹込みでの第一の問題点は、増加する装入 S の炉内での挙動である。

燃料吹込みの操業例によると実際に重油を吹込んでも銑鉄中 S は上昇しないものが多く、文献あるいは昨年渡欧したわが国の重油視察団の報告によつても、懸念されるほど問題になつていない。たとえば Dofasco では 2.25% S の重油を 59 kg/t 吹込んでも、銑鉄中 S は 0.023%、高滓中 S 1.4% の実績があり欧州某工場では S/[S] の分配系数が 23 から 40 になつたと報告している。しかし、日本鋼管第 2 高炉の実績では、3.2% の高硫黄重油を使用をして銑鉄中 S が装入 S に比例して上昇した。これらの差異は操業条件の差によるもので、現在

程度の吹込み量であれば、高滓塩基度などの撰択により調整可能であるが、今後重油吹込み量が増加すれば当然重油中のS含有量が問題とならう。

ガスの場合にはCガスで普通 H_2S 0.3% 程度含まれているが、天然ガス、Rガスでは極微量で問題にならない。

6. 効果の限界

重油、ガスなどの吹込み量の限界は、燃焼効率（インジェクターの効率）、熱補償、通気性、などにより制限される。現在までに実用されている吹込み量は、重油85 kg/t、ガス 70m³/tであるが、Dofasco では、重油を 53 kg/t 以上吹込むと送風圧力が急速に上がり円滑な操業ができなかつたと報告し、米国鉱山局での微粉炭吹込みの試験例では、28%のークスを吹込み燃料におき換えると棚吊りにより操業不能になつたと報告している。

今後、燃料吹込み量とその効果を大にするためには、燃焼方法の改善、高風熱の使用、原料予備処理の強化などが緊急の問題とならう。

V. むすび

この新技術はやつとその緒についたばかりであり、その将来には各種の障害のあることが予想されるが、とにかく製鉄史に一新紀元をかくするものであり、今後急速に普及され鉄鉄コストの引下げに大きな役割りを果すものであろう。とくにわが国のようにークス原価の高いところではこの技術が強力に推進普及されることは疑う余地はないと思われる。

一方海外諸国でも鉄鋼需要の増大にともなう原料炭不足の傾向は今後益々いちじるしくなり、各国ともその節約のためにこの技術の推進に努力を続けるであろう。

次にこの新技術の将来の見透しについて述べよう。

1. 重油の吹込みについては吹込み量 60 kg/t 程度までは各社ともすぐに実施するであろうし、吹込量も逐次増加されようが、前に述べた技術的な問題点や、重油タンクなどの貯蔵設備について検討を要する点が多い。

2. 製鉄所の立地条件によつて、重油、各種ガス、微粉炭など吹込み燃料の撰択が行なわれる。すなわちガスバランス上余裕があれば、Cガス、Rガス、地方によつては微粉炭の高炉への吹込みが実施されることにならう。天然ガスについては、わが国ではその資源がとぼしく、かつ地域的な制限を受けるので余り期待出来ない。

しかし、米国、ソ連などでは今後ともこの吹込みが一般に実施されるであろう。

3. 将来過剰になるであろうナフサ類の吹込みも考えられる。これは価格、安全吹込装置など未解決の問題を多く抱えているが、吹込み燃料としては適している。

4. 一方わが国で純酸素転炉が全製鋼能力の半ばを占める時期も間近く、もしこの炉の廃ガス ($CO=65\sim68\%$, $CO_2=10\sim25\%$, $N_2=5\sim15\%$) が経済的にかつ安全に回収される技術が完成すれば、これもまた高炉に吹込む燃料として考えられる。

5. さらに従来の燃料吹込み技術の発展と併行して、高炉炉外で重油などの部分酸化により事前に高温の還元ガスに変性して、高炉の適当な場所（朝顔部）に吹込む技術、および低級原料炭を吹込む技術が開発されるものと思われる。

今後現在の高炉は、吹込み技術の進歩とともに燃料の吹込量が次第に増大し、大巾にークス比は低下することが予想される。そうなれば高炉は次第にその型を変え非常に高能率なものへと変化して行くであろう。

(昭和37年6月寄稿)

文 献

- 1) J. M. NEGOMIR: The Use of Natural Gas in Blast Furnace.
- 2) A. M. DECKER: Theoretical Consideration on the Injection of Auxiliary Fuel into the Blast Furnace.
- 3) A. M. Decker: J. Metals, (1961) 1
- 4) W. R. ROMBOUGH: Proc. Blast Furn., 1961, April
- 5) H. C. TAYLOR, W. R. ROMBOUGH: Blast Furn. & Steel Plant, 50 (1962) 1, p. 35~39
- 6) A. GRIEVE: J. Iron & Steel Inst. (U.K.), 198 (1960) 1, p. 37~43
- 7) L. V. BOGDANDY, W. SCHAEFERS: Stahl u. Eisen, 82 (1962) 1, p. 1~18
- 8) H. B. BELL, J. TAYLOR: J. Iron & Steel Inst. (U.K.), 199 (1961) 3, p. 272~285
- 9) K. C. SHARP: J. Iron & Steel Inst. (U.K.), 199 (1961) 9, p. 69~75
- 10) P. HAZARD: J. Iron & Steel Inst. (U.K.), 9 (1961) 10, p. 127~133
- 11) E. R. DEAN: Blast Furn. & Steel Plant, 49 (1961) 5, p. 417~423
- 12) J. MOLDEREZ, A. POOS: Fuel oil injection tests on the B. F. 4 at the Cockerill Ougrée Works in Liège-Belgium
- 13) J. M. NEGOMER, E. F. PEARSON A.I.S.E. Sep. 30, 1960
- 14) E. J. OSTROWSKI, G. KESLER, N. B. MERCHER: AIMF Proceeding, 19 (1960) p. 279~300
- 15) W. M. KREGLOW: Proc. Blast Furn., (1961) April
- 16) J. RAMIREZ: Proc. Blast Furn., (1961)

- 17) W. A. KNEPPER, P. L. WOOLF, H. R.
SANDERS: Blast Furn. & Steel Plant, 49
(1961) 12
- 18) 東大生産研鉄鋼研究室訳:
E. J. OSTROWSKI, M. B. ROYER, L. J.
ROPELEUSKI: 試験高炉の燃焼帯への固体燃料の
吹込み
A. N. RAMM: 高炉精錬への高炉複合送風の適用
E. BURTRAM: 高炉溶解帯への原料および燃料の
吹込み
- 19) 林, 小林, 鈴木: 鉄と鋼, 48 (1962) 4, p. 332
~335
- 20) 加藤, 橋本, 守, 阿由葉: 鉄と鋼, 48 (1962) 4,
p. 335~336
- 21) 中村, 都留, 山本: 鉄と鋼, 48 (1962) 4, p. 350
~352
- 22) 林, 小林, 鈴木: 日本鋼管技報, 22, p. 1~9
- 23) : 学振54委, 第53回資料
- 24) : 製鉄部会, 第14回 //
第16回 //
第17回 //