

.....
 論 文

UDC 669.162.267.4 : 662.753.3.094.1

高炉への還元ガス吹込みについて(FTG プロセス)*

八塚 健夫**・中山 一之**

大森 和夫**・原 義明**・井口 正昭**

Injection of Reducing Gas into Blast Furnace (FTG Process)

Takeo YATUZUKA, Kazuyuki NAKAYAMA

Kazuo OHMORI, Yoshiaki HARA, and Masaaki IGUCHI

Synopsis:

Since the lack of coking coal is a serious problem for steel industry, various studies have been carried out for saving coking coal, such as the way of decreasing coal consumption in blast furnace process, the research and development of formed coke process and of direct iron making process etc. Among them fuel injection through blast tuyere is a very effective process because coke is directly replaced by injected fuel, and recently coke rate of 360 kg/t level was obtained by several blast furnaces under fuel oil injection of approximately 100 kg/t in combination with the oxygen enrichment. However, the capacity of race way is limited as gasifying chamber to burn injected fuel from tuyere. In order to save coal moreover, it may be a good idea to produce reducing gas from fuel oil outside blast furnace and to inject it into blast furnace.

Reducing gas injection processes have long been subjects of investigation, where reducing gas is produced from fuel by cracking in an exclusive gasifying chamber and is injected into blast furnace, and recently reports of some performances with actual experimental equipment were published. On this subject authors have carried out several fundamental studies such as investigation of reducing gas production process, estimation of the effect of reducing gas injection by a mathematical model of blast furnace, examination on mixing of injected gas inside blast furnace using air-CO₂ model, and plant engineering for dealing with hot reducing gas. As for reducing gas production a joint research has been conducted with Texaco Inc. who has many experiences in this technology.

A commercial scale experiment (FTG process) has been carried out using a blast furnace of 1691m³ inner volume with which a Texaco-type generator of fuel oil gasifying capacity of 5 t/hr was installed, and the following results were obtained;

(1) Partial oxidation process was considered to be optimum in order to produce hot reducing gas of high reducing power from the available fuel oil.

(2) Cok saving was 0.9~1.0 kg per gasified fuel oil of 1.0 kg when hot reducing gas was injected into lower part of blast furnace shaft under following conditions;

Fuel oil rate injected through tuyere: <70 kg/t

Fuel oil rate gasified by FTG process: <30 kg/t

R.R. value of injected gas: 6~8

where; R.R. ≡ (CO+H₂)/(CO₂+H₂O)

(3) The fuel oil gasifying system and the hot reducing gas transfer system were kept under good conditions, and the blast furnace was operated smoothly.

1. 緒 言

鉄鋼業の直面する最大の課題の一つはコークス用原料炭の不足であり、エネルギー消費構造の再検討を迫られている。鉄鉱石から金属鉄を製造するプロセスとして現

在最も効率の高い高炉法は、その作動原理を根源的にコークスに負っている。すなわち、(1) 充填材、(2) 熱源、(3) 還元剤の三つの役割を一つの物質で果たせるのはコ

* 昭和46年10月25日受付

** 新日本製鉄(株) 広畑製鉄所

ークスしかない。しかしこの内でコークスでなければ果せない本質的機能は充填材としての役割のみで、他の二者は他のエネルギー・物質で代替できる。また充填材としてのコークスは高い強度と適当な反応性を具備する必要があるが、現在のコークス製造法では強粘結炭をベースにして高炉用コークスを製造する技術体系しかなく強粘結炭、とくに米国産強粘結炭の需要の逼迫、供給の不安定、価格の高騰に悩まされている。このため非強粘結炭による高炉用コークス製造技術、あるいは高炉によらざる製鉄法まで世界各国で研究されているが、いまだ経済的に成立するに至っており、当面は高炉の高効率化で、調湿送風、高温送風、装入物の事前処理、自溶性焼結鉱、ペレット、半還元装入物などの使用、高圧操業、酸素富化送風、燃料吹込み、さらには自動制御技術などを駆使してコークス比の引下げに努力が積み重ねられてきた。なかでも重油吹込みは熱源および還元剤としてのコークスの役割を直接重油で代替するきわめて効果的な方法で、最近では重油吹込みと酸素富化送風を組み合わせた重油多量吹込み操業により約 100 kg/t の重油吹込みを実施して、360 kg/t 台のコークス比を達成した高炉もある。

重油多量吹込みはかくして原料炭対策の主力として、調湿送風、高温送風、酸素富化送風との適切な組み合わせによる複合送風の下でその威力を発揮しているが、重油吹込み量の増加に伴って以下のような問題が生ずるため吹込み量には限界がある。

(1) 羽口先のレースウェイの温度が低下する。

羽口先のレースウェイの温度は一般には理論火焰温度で 2000~2400°C に管理されており、実際の温度は理論火焰温度より数百度低いと言われているが、重油吹込みにより理論火焰温度が著しく低下する。初期の重油吹込みでは、このために重油の燃焼状態が悪下して鉱滓羽口から未燃の重油が流出し炉況が著しく乱れた事例もある。その後複合送風という統合された概念で羽口先理論火焰温度を重油吹込み量、酸素富化率、送風温度、送风中湿分の組み合わせにより制御する技術が確立され、一般に行なわれているが、送风中湿分は地域差、季節的変動などのために必ずしも湿分レベルの選択が自由ではなく、送風温度も熱風炉能力によつておのずから制約を受けるため、最近では酸素富化率を重油多量吹込みの下での羽口先理論火焰温度の主要な制御手段として用いる傾向がある。

(2) 羽口先のレースウェイを吹込み重油のガス化室として使う上で限界があり、酸素過剰率が低下するとすすが発生する。

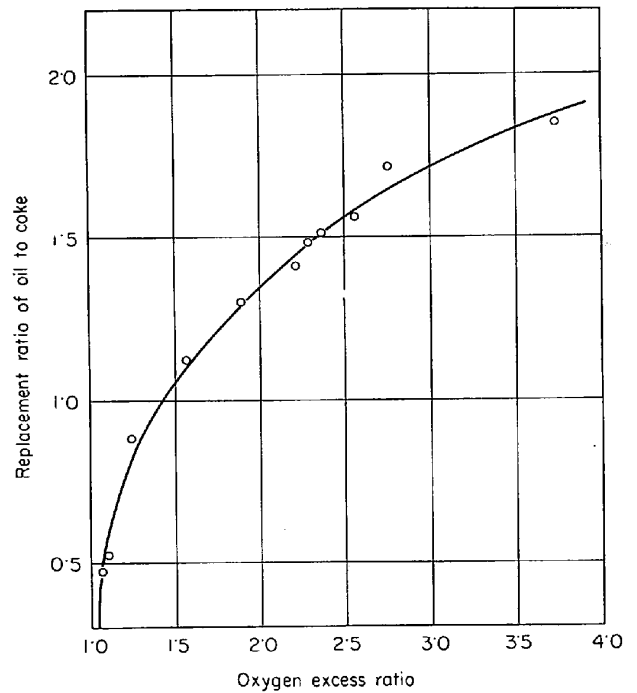


Fig. 1. Relation between oxygen excess ratio and replacement ratio of oil-to coke.

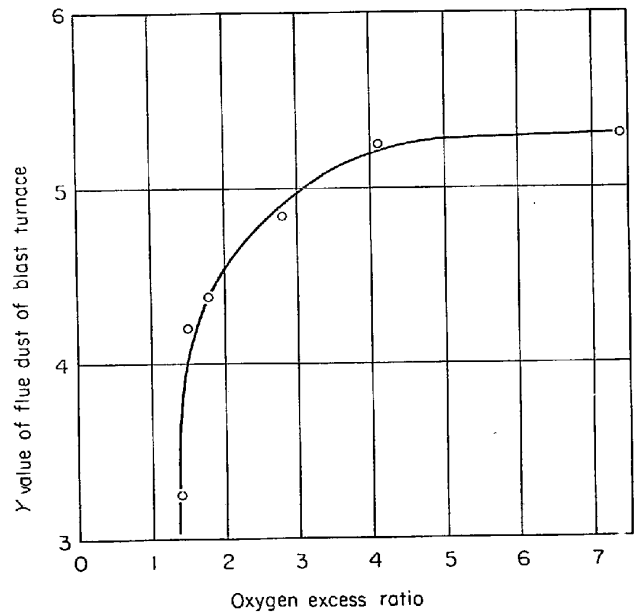


Fig. 2. Relation between oxygen excess ratio and Y value¹⁾ of flue dust of blast furnace.

一般の工業規模の装置で 1000°C 以上の予熱空気をを用いて重油を燃焼させる例はあまりなく、その点で羽口からの重油吹込みは非常に恵まれた燃焼条件を与えられているが、一方重油噴射バーナーから吹込まれた重油は、1/100 sec のオーダーで燃焼を完了しないと強還元性雰囲気中の灼熱コークス層に入ってしまうと不完全燃焼状態となり、すすが発生して重油の燃焼効率が著しく低下し、吹込み重油のコークスに対する置換率の低下をきたすの

みならず、棚吊り、スリップ、炉熱変動などの炉況不調に陥る。

Fig. 1 は高炉における酸素過剰率と重油置換率との関係を示すが、酸素過剰率 1.5 以下で重油置換率が急激に低下している。また重油からのすすのガス灰への混入度を Y 値という特性値で表わすことができるが、Fig. 2 は高炉における酸素過剰率とガス清浄機排水中のガス灰の Y 値との関係を示す。図によれば酸素過剰率 1.5 以下で急激にガス灰の Y 値が低下しており、すすのガス灰への混入が増加していることを示している。このように酸素過剰率 1.5 を限界として重油の燃焼状態の劣化が顕著となり、さらに 1.2 以下では重油の置換率も急激に低下して経済性が損われてくる。したがって t 当たりの送風量のレベルにもよるが、通常 $1300 \text{ Nm}^3/t$ の銑鉄 t 当たり送風量の下では重油吹込み量 $75 \text{ kg}/t$ での発生が増加し始め、 $95 \text{ kg}/t$ で置換率の低下が著しくなるので、このあたりが羽口からの重油吹込み量の限界と思われる。また焼結鉱およびペレットの配合増、送風温度の上昇、送風中湿分の低下などにより燃料比が低下して銑鉄 t 当たりの送風量が低下すれば、この限界は一層引き下げられることが予想される。

(3) 高負荷操業の高炉では炉内ガス量が増加するため、スラグ、溶銑の流下が順調でなくなる。

コークス、重油ともに炭素含有量は約 86~89% と同程度であるが、残りはコークスではおもに灰分、重油では水素であり、ガス化した場合に重油のほうが 70% 程

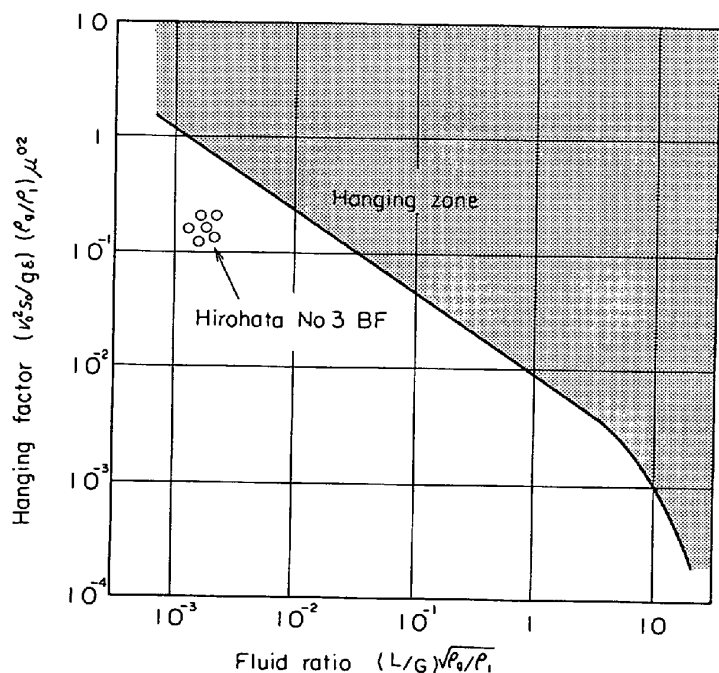


Fig. 3. Hanging condition of packed bed and calculating results of Hirohata No 3 blast furnace.

度コークスより多量のガスを生成する。したがって重油吹込みにより炉内ガス量は一般には増加する傾向にあり、これは Fig. 3 に示すようにフラッキング限界に近い領域で操業している実用高炉にとって好ましくない方向である。実際には羽口先理論火焰温度制御のために重油吹込み量の増加に伴って酸素過剰率を高め、それによつて炉内ガス量の著しい増加なくして出銑量を大幅に増加できるので、実用上余り問題になつていないが、重油吹込みによるコークス比の低下に伴う炉内空隙率の低下が、とくに炉腹から朝顔にかけての軟化・熔融帯の通気性に及ぼす影響はやはり問題点の一つとして残るであろう。

結局重油吹込み量の増加にとつて最大の問題は、羽口先のレースウェイの重油ガス化室としての能力、換言すれば酸素過剰率であり、この解決策の一つとして高炉とは別の専用の重油ガス化室を設け、そこで十分なガス化条件の下で製造された還元ガスを高炉へ吹込む方法がある。

このことについては、古くは Pompey における工業炉による試験²⁾、U.S. Bureau of Mine³⁾ の試験高炉での試験、日本鋼管の試験高炉による試験⁴⁾などが発表されているが、いずれも長期的かつ大型炉による試験ではない。

筆者らは、前記(1)、(3)の問題点をも同時に解消し、高温の還元ガスを高炉のシャフト下部より吹込んで羽口重油の上積みとして、さらにコークス比を引き下げる方法の必要性を痛感し、還元ガス製造方法の検討、高炉の数学モデルによる還元ガス吹込効果の検討、空気と炭酸ガスを用いたモデル実験による吹込みガスの高炉炉内での混合拡散の検討、高温の還元ガスを取り扱う上での設備面の問題の検討、予備実験、設計などの基礎的研究を経て、部分酸化法による重油ガス化に実績を有する米国 Texaco Development Corporation と協同体制をとり、当社広畑第3高炉(内容積 1691m^3)において重油ガス化能力 5 t/hr の TEXACO 式分解炉を用いて高温還元ガスを高炉へ吹込む工業化試験 (F.T.G Process) を実施してきた。

2. 高炉に有効な還元ガスの製造

還元ガス発生は工業的に確立された技術である(メタノール、化学肥料工業など)。炭化水素から CO および H_2 を工業的に製造する方法を技術的に大別すると、(1) 部分酸化法(テキサコ法、シェル法)、(2) 水蒸気接触分解法(I.C.I.法、トプソ法、

ケミコ法), (3) 両者の混合法 (G.P. 法, ルルギー法, トプソー SBA 法) があり, その原理ならびに特徴は次のようになる.

(1) 部分酸化法: 原料を空気または酸素で一部燃焼させ, 1000~1600°C の高温を得て, その熱で分解する方法. この方法は, 原料の制約がない, 装置が簡単でよい, すすの発生が欠点, 高純度のガスを得るために多くの酸素が必要などの特徴を有し, 実績が多い.

(2) 水蒸気接触分解法: 原料を 800~1000°C に予熱し, 水蒸気を加えて触媒層を通して接触分解させる方法. 原料中に S がないことが条件 (触媒毒) で, さらに原油・重油・タールなどアスファルト分を含むものはカーボン析出により触媒層を詰めるので使用できないが, 酸素を使用しない点が有利となる. H₂ の収率もよい.

(3) 両者の混合法: 原料を 300~500°C に予熱し, 水蒸気を添加したのち, 酸素バーナーで分解し, さらに触媒層を通して完全分解する. この方法で, 原料中の S およびアスファルト分がないことについては水蒸気接触分解法と同じだが, 酸素の所要量が比較的少なくてよい.

ガス化方式を決定するうえで考慮すべき点は, 発生ガスの還元能, すなわち R 値 = $(CO + H_2) / (CO_2 + H_2O)$ と原料の選択である. Fig. 4 に縦方向での高炉炉内ガスの R 値を調べた結果を示す. 吹込み還元ガスの R 値が高炉炉内ガスの R 値よりも低い場合, 還元作用が低下する

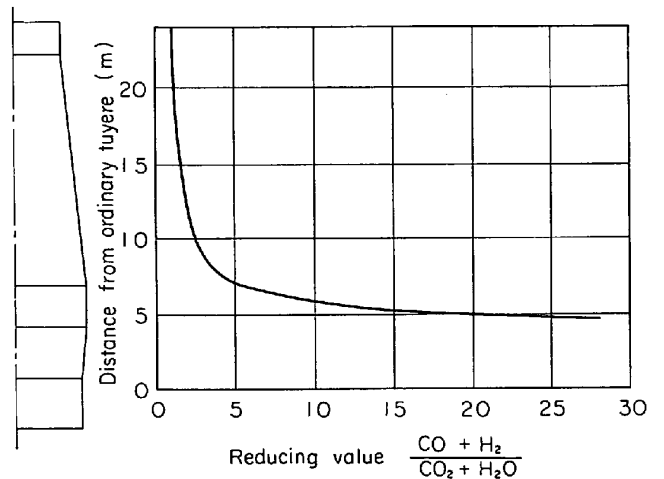


Fig. 4. Reducing value of gas inside blast furnace.

か, あるいはカーボンソリューション反応を起こしてコークスが消費されることになるため, 吹込み位置での炉内ガスの R 値よりも高い R 値の還元ガスを吹込むことが好ましい. 図から高炉シャフト下部での炉内ガスの R 値は 5 以下であり, したがって還元ガスの R 値は少なくとも 5 以上が必要である. 脱硫ナフサあるいは天然ガスの原料が容易に入手できる場合は, 水蒸気接触分解法, 混合法が採用されているが, 触媒の寿命が短いとか, 高水蒸気比のため R 値が低いなどの問題があり, 高炉には適当ではない. 一方, 部分酸化法は酸素プラントを必要とし若干建設費が高いこと, すすの発生が避けられないな

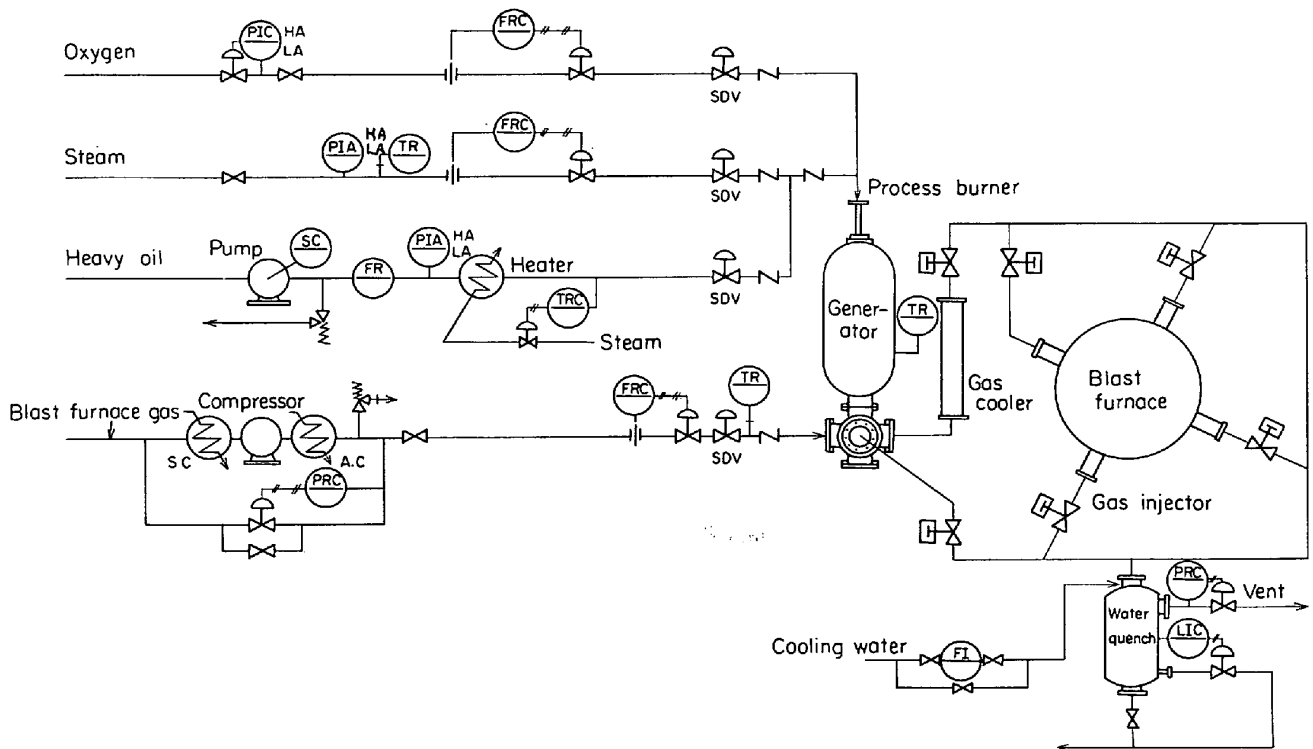


Fig. 5. Flow sheet of F.T.G process.

どの欠点があるものの、重油を使えること、 R 値の高い還元ガスを作りえる点でわが国の現状に適している。

部分酸化法の分解装置は世界で 100 近いプラント（化学肥料用）が稼動しているが、その約 90% は TEXACO 法であり、その点きわめて安定したプロセスといえる。本試験においてもこの安定したプロセスである部分酸化法の TEXACO 法を採用した。

Fig. 5 に広畑 FTG 試験装置のフローシートを示す。還元ガス発生炉に取り付けられた分解バーナーには予熱された重油、酸素および水蒸気が一定の割合で装入され約 1500°C の温度でガス化する。高炉に有効な還元ガスの条件は R 値が高く、すすの発生が少ないことであるが、還元ガスの組成は酸素、重油の予熱温度ならびに分解炉壁からの熱損失に若干影響されるが、ほとんど重油、酸素および水蒸気の比によつて決定づけられる。一方 LPG, LNG などの部分酸化ではほとんどすすは発生しないが、重油ではある程度のすすの発生は避けられない。

一般に還元ガスの R 値をあげるには酸素および水蒸気を不足気味にすべきであるが、一方すすがふえてくるのでこれらを考慮して経済的なガス発生ができる最適な操業条件を見い出さねばならない。一定酸素比ですすがふえると CO_2 がふえ、 R 値が低下し、炉温が異常に高くなるが、実用範囲でのすすの発生は次式で示される。

$$\log S = K_1 \cdot (\text{O}/\text{C}) + K_2$$

S : soot [wt% for carbon in oil]

O : 酸素量 [Nm³/hr]

C : 重油中の carbon 量 [kg-C in oil/hr]

O/C : 酸素比 [Nm³-O₂/ kg-C in oil]

K_1 および K_2 はバーナー構造、炉のプロフィール、炉内容積、炉内圧力などにより変わるものでありスケールアップのむずかしい係数である。

3. 還元ガス吹込み効果の理論推定

還元ガス吹込み効果を理論的に以下の順序で推定した。

- (1) 高炉の炉内反応の数学モデルを確立する。
- (2) そのモデルを用いて還元ガスを吹込んだ場合の

コークス比の低下、出銑増を計算する。

(3) 実際の高炉内での還元ガスの混合を実験的に補正した。

3.1 高炉の数学モデルおよび還元ガス吹込み効果計算

高炉の数学モデルは数多く発表されているが、筆者らは高炉への還元ガス吹込み効果を理論的に解明するためにまず複雑な高炉炉内反応のうち Table 1 に示す 8 つの主要な反応に着目し、これらに関する反応速度式と伝熱式、熱収支、物質収支からなる 11 元連立微分方程式を用いて通常の高炉について数式解析（鞭モデル）した⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。このモデルでは広畑第 2 高炉のデータを使用した⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾が炉内ガスおよび粒子の温度、成分、流速、圧力などが断面方向に均一であること、直接還元がコークスと FeO のみで起こることなどを仮定している。広畑第 2 高炉の通常操業の場合の計算結果を Fig. 6 に、高炉高さ方向の温度プロフィールに関する計算結果と広畑第 3 高炉の実測値ならびに文献データとの比較を Fig. 7 に示し、その他既報の解析結果⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾とも比較したが文献に報告されている高さ方向の温度プロフィール、ガス組成プロフィールとは比較的よい一致が認められた。

この鞭モデルを用いて送風量一定で上乗せで還元ガスを吹込んだときの還元ガスの吹込み量、温度ならびに吹込み位置のコークス比の低下および出銑増に及ぼす影響を算出した。計算は、吹込み還元ガスが吹込み位置で高炉炉内断面方向にただちに均一混合すると仮定して鞭モデルにより計算し（完全混合）、後述のガス混合効率による補正を施した。その結果をまとめたのが Fig. 8 である。すなわち、

(1) 重油 1 kg をガス化して吹込めばコークス約 1.1 kg が節約できる。しかしながら還元ガス吹込み量の増大とともに置換率は漸次低下する。

(2) 還元ガス吹込み温度が 1000~1200°C の範囲では、吹込み温度によるコークス比への影響はほとんどない。

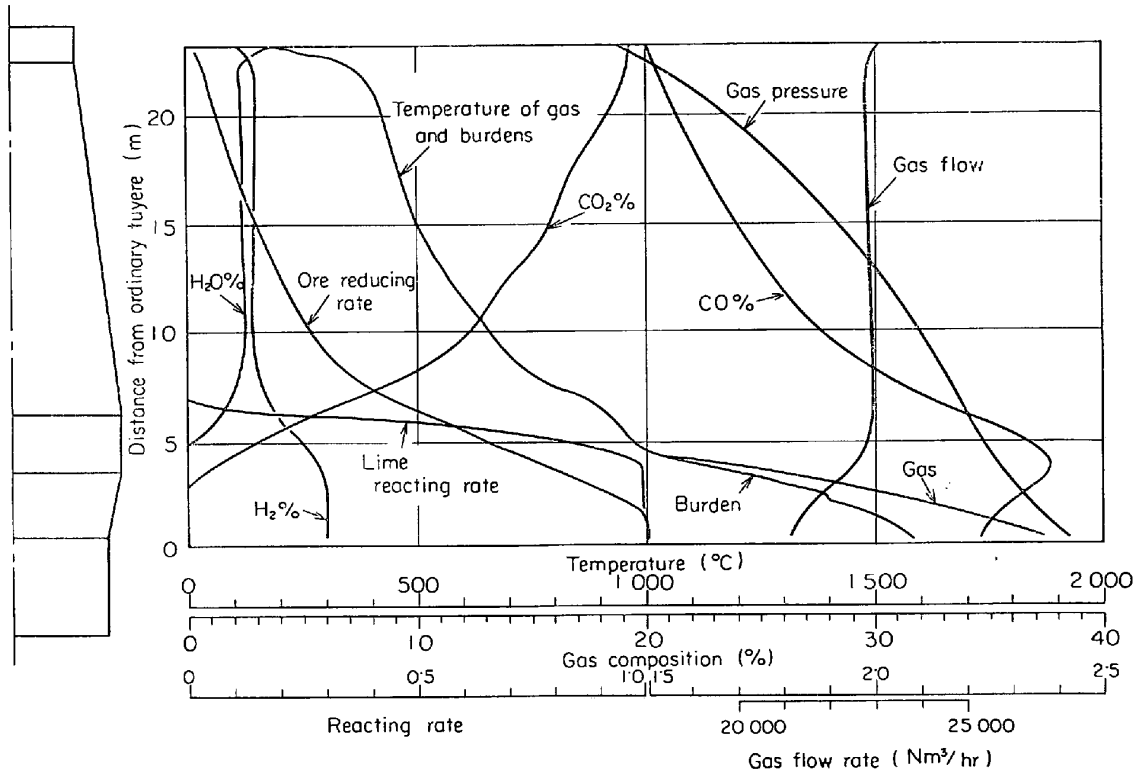
ことがわかった。

3.2 高炉内でのガス混合による補正

前述の数式解析においてはガスは吹込み位置でただち

Table 1. Chemical reaction considered in mathematical model of blast furnace.

(1)	Indirect reduction by CO	$\text{CO} + \text{FeO}_x = \text{CO}_2 + \text{FeO}_{x-1}$
(2)	Indirect reduction by H ₂	$\text{H}_2 + \text{FeO}_x = \text{H}_2\text{O} + \text{FeO}_{x-1}$
(3)	Carbon solution by CO ₂	$\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$
(4)	Carbon solution by H ₂ O	$\text{H}_2\text{O} + \text{C} = \text{H}_2 + \text{CO}$
(5)	Direct reduction by C	$\text{C} + \text{FeO} = \text{CO} + \text{Fe}$
(6)	Decomposition of lime	$\text{CaCO}_3 = \text{CO}_2 + \text{CaO}$
(7)	Evaporation of absorbed water	$\text{H}_2\text{O}(l) = \text{H}_2\text{O}(g)$
(8)	Water gas reaction	$\text{CO}_2 + \text{H}_2 = \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$



Iron production : 2960 t/day Blast volume : 2650 Nm³/min Blast temperature : 1020°C
 Fig. 6. Analytical results on blast furnace reaction at normal operation.

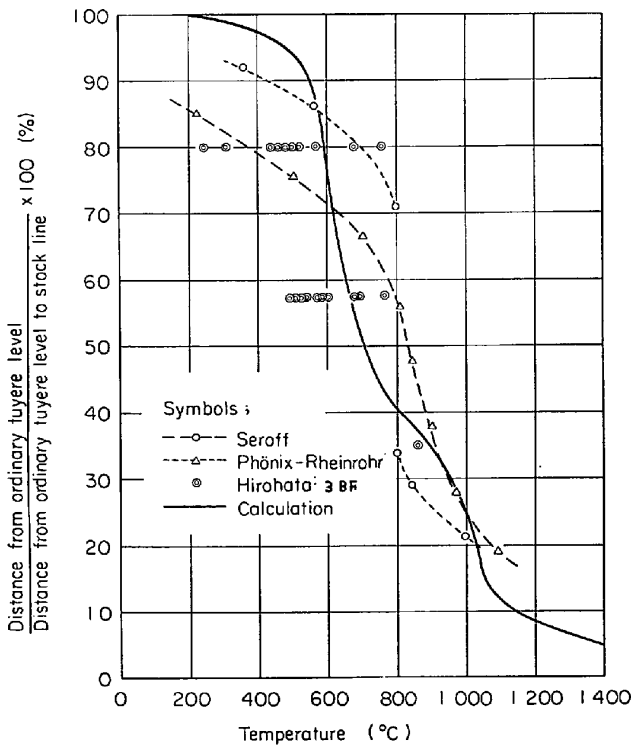


Fig. 7. Longitudinal distributions of temperature inside blast furnace.

に炉内ガスと均一混合すると仮定しているが、実際の還元ガス吹込み効果は吹込み還元ガスの炉内の混合拡散に

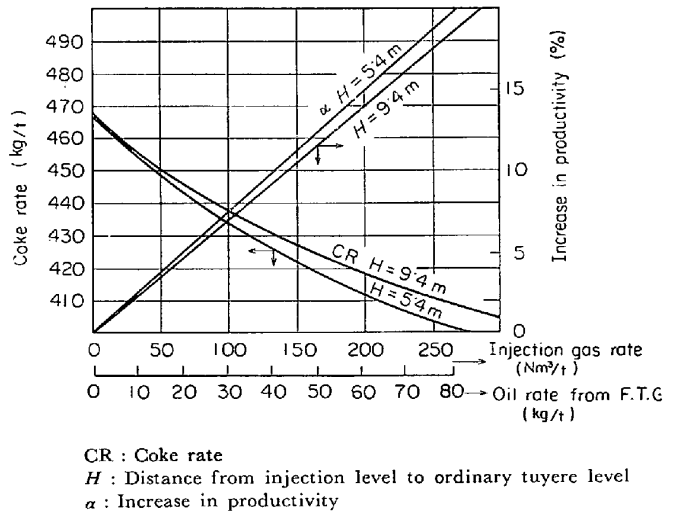
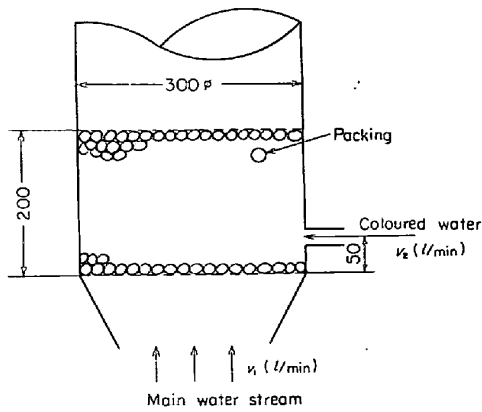


Fig. 8. Calculation results on the effect of FTG injection.

左右されるのでどの程度混合するものか調査した。

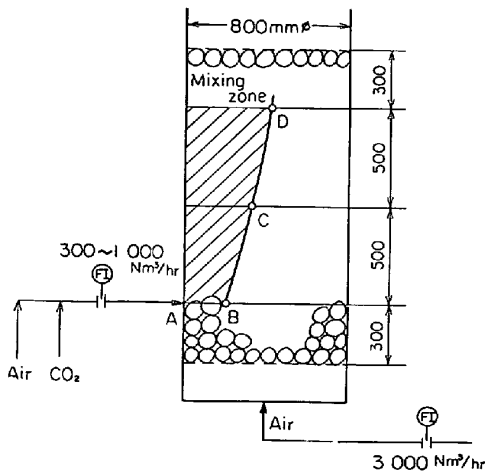
3.2.1 水による予備テスト

Fig. 9 に示すように、ガラス球を充填した容器の底から水を流し、側壁から着色水を添加した。この結果吹込み部での着色水の拡がり底部からの水量と側壁からの着色水量の割合に支配され、側壁からの吹込み流速ならびにガラス球の大きさには無関係であった。このことは吹込み流速の速度頭は充填物でただちに消されてしまう



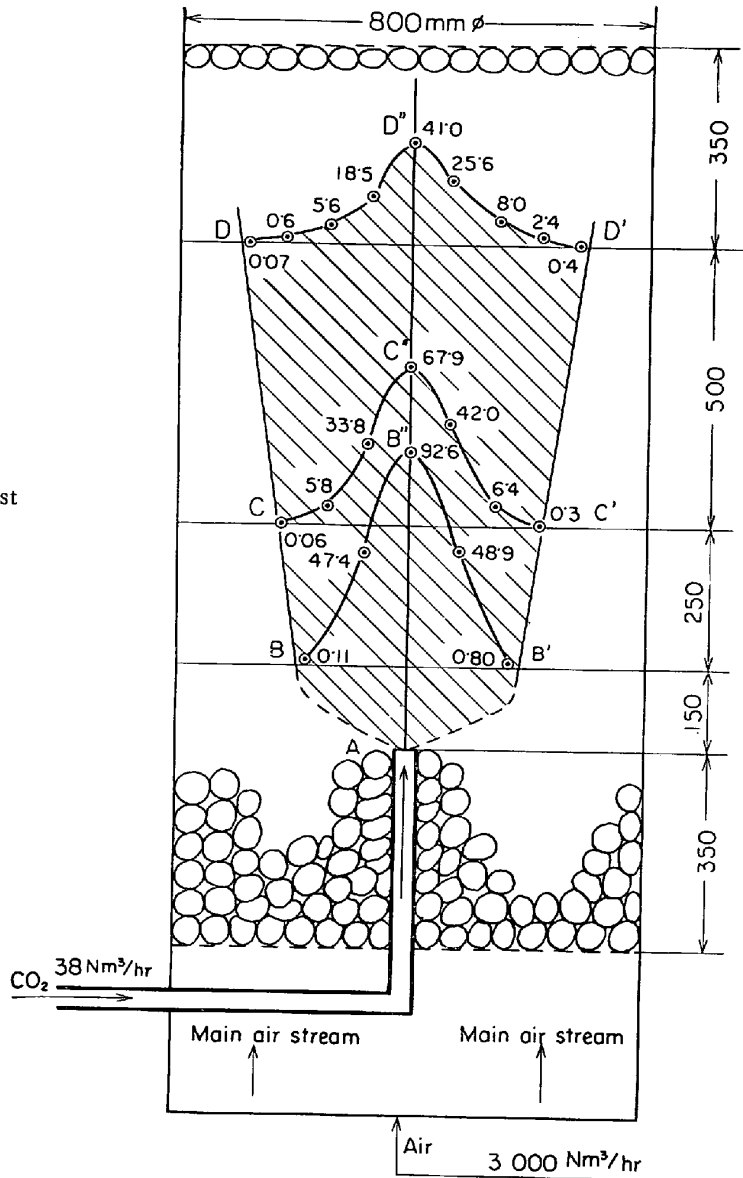
Packing : 3.5 or 6.0mm ϕ glass sphere
 Fractional void volume : 0.33 (random packing)

Fig. 9. Experimental equipment for mixing test with water.



Packing : 15.5mm ϕ Al-sphere
 Fractional void volume : 0.37 (random packing)
 Injection flow rate : 450Nm³/hr
 Injection velocity : 92m/sec
 Main flow rate : 3030Nm³/hr
 Nozzle diameter : 41.6mm ϕ

Fig. 10. Experimental equipment for mixing test with air and CO₂ and test results.



Packing : 15.5mm ϕ Al-sphere
 Gas velocity : 4m/sec

Fig. 11. Experimental equipment for mixing test with air and CO₂ and test results.

ことを示している。さらにガラス球充填塔で縦方向に吹抜け部を作り同様のテストを行なったが、吹抜け部を貫いて反対側に着色水が拡がることはなかった。このことは、炉の周辺に通気性のよい場所があれば吹込みガスは炉の中心まで浸透しないことを意味しよう。

3.2.2 空気-CO₂系でのパイロットテスト

充填層の内部での気体の混合についての研究発表は少ない¹¹⁾。そこで Fig. 10 に示す装置を用いて空気-CO₂系のモデル試験を行なった。充填層に 15.5 ϕ のアルミ球を充填し、充填塔の底部から高炉炉内ガス空塔速度に合わせて 1.5~2.0m/secの空塔速度で空気を送り込み、側壁より空気+CO₂の混合ガスの吹込流速を種々変えて吹込み充填層内の各点からガスサンプリングし、ガス

クロマトグラフで CO₂ の濃度を測定して混合状況を調査した。さらに拡がり領域内でのガスの濃度を詳細に調べるために Fig. 11 に示す装置にて同様のテストを行なった。これらの結果の一部を Fig. 10, Fig. 11 中に示す。Fig. 10 で A は空気-炭酸ガスの混合ガス吹込み位置を、B C D は CO₂ 濃度が trace となる境界線を示し、A より吹込まれたガスは斜線の領域にのみ拡がる。Fig. 11 で A は空気-炭酸ガスの混合ガスの吹込み位置を、曲線 A B C D および A B' C' D' は CO₂ 濃度が trace となる境界線を、曲線 B B'' B', C C'' C' および D D'' D' は各水平面での CO₂ 濃度分布を示し、A より吹込まれたガスは斜線の領域に拡がる。なお図中の数字たとえば D''

点における 41.0 はその上での CO_2 濃度を示す。吹込みガスは吹込流速の速度頭をただちに失い（吹込みガス量/塔内全ガス量）の比で急激に円状または半円状に近い形で拡がるという水による予備テストと同じ現象を確認した。また吹込みガスの塔内上昇過程での断面方向の混合拡散はほぼ一定の割合で起こり、鉛直軸に対して約 15° の角度を示すことがわかった。

以上のモデルテストでは充填粒が静止しているが、実高炉ではわずかの速度 ($2\sim 3 \text{ mm/sec}$) にはあるが降下していること、炉内ガスの上昇も断面方向に不均一であることなどモデルとは異なる条件がある。このために実高炉においても吹込みガスの拡散がどうなるかを R I トレーサーで確認したが、モデルテストとほとんど同じ結果を得た。このような結果から完全混合の数式解析の計算を補正する必要があり、この数式モデルの場合ガス混合効率による補正係数は約 0.9 と考えるべきである。

4. 設備および操業技術

還元ガス吹込み装置のフローシートをすでに Fig. 5 に示したが、この設備は高温の還元ガスを取り扱うことおよび高炉操業と密着していることから、設備ならびに操業上特別の配慮をしなければならない。

耐火物は H_2 および CO が多量に含まれた高温ガスを取り扱うため高純度アルミナレンガおよびキャストブルを使用した。この際不純物はできるだけ少量におさえ、とくに耐火物に含まれる SiO_2 は高温では H_2 により還元されて、 $\text{SiO}_2(\text{s}) + \text{H}_2(\text{g}) = \text{SiO}(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g})$ の反応により損耗しかつ強度も弱くなるので¹²⁾、 SiO_2 含有量を 0.1% 以下とした。高温ガスの遮断弁、吹込口、ガスクーラーなどの金属材料に頼らざるをえない所は、水冷または蒸発冷却とした。いずれもすすを含んだガスで輻射伝熱係数が大きく、また H_2S 、 H_2O 、 H_2 などによる腐食を起こすことが考えられ、材質の選択、構造などの設計上の注意がはらわれた。また高炉炉内圧力の変動があつても分解バーナーからの重油、酸素の割合が変動しないような配慮、あるいは高炉の操業を含めた全システムの異常時に際する自動安全システムも考慮した。

つぎに高炉操業上還元ガス吹込みによる炉況の乱れ、とくに炉上部でのガス中 H_2 の増加によるカーボン析出に起因する炉内通気性の阻害がないかについても、学振法による鉍石還元試験装置を利用し、 CO 、 H_2 、 N_2 、 CO_2 、 H_2O を実高炉で想定される種々の割合に混合したガスで還元テストを行ない、ガスの通気抵抗を測定した。この測定結果から還元ガス吹込みを行なつても H_2O または CO_2 が若干含まれれば、カーボン析出、粉化あるい

は鉍石の熱割れなどの心配はなく、還元ガス吹込みによつて炉況上この種の問題は生じないと考えられた。

5. 高炉での工業化試験結果

還元ガス吹込み試験にあたり、還元ガスの製造技術は TEXACO 社との協同研究体制により、また高炉との関連については事前のパイロットプラント試験で実現性の確信を得た。そこで筆者らは還元ガス吹込み効果を確認するために、広畑第 3 高炉に重油ガス化能力 5 t/hr の工業化試験装置を取付けコークス比低下 30 kg/t を目標に実高炉での試験を実施した。

本試験は方法もさることながら装置自体が開発的な要素を含んでおり、前述した各種基礎実験および調査の成果を実績で一步一步段階的に確認しながら進めた。その経過は 2 段階に大別される。

第 1 段階は実高炉での還元ガス吹込みの予備試験的性格をもち、以下の 3 項目を主体に試験を実施した。(1969年 8 月～10月)

- (1) 工業的規模での還元ガス発生技術の確認。
- (2) 高炉への還元ガス吹込み方法の確認および開発……炉況変動に対しての安定吹込みの確認。高炉操業に合わせた吹込み方法の確立。
- (3) 設備性能の確認。

第 1 段階試験は大綱的には所期の成果を収めたが、ガス発生、とくにすすにいく分問題を残したので、ガス発生技術の改良を進め、第 2 段階で以下の 3 項目の調査を行なつた。(1970年 1 月～1971年 3 月)

- (1) 還元ガス吹込み効果の確認。
- (2) 炉況への影響の確認。
- (3) 設備全体の長期運転での性能確認。

5.1 還元ガス発生試験結果

還元ガス発生時の操業条件を Table 2 に示す。高炉に有効な還元ガスの条件は R 値が高く、すすの発生が少ないことであるが、現状では R 値 6～8 程度の還元ガスで

Table 2. Operation data of reducing gas generation.

Feed rate of heavy oil	kg/hr	5 000
Product gas rate	Nm^3/hr	16 000
Charge rate of oxygen	Nm^3/hr	4 100
Charge rate of steam	kg/hr	800
Gas temperature in generator	$^\circ\text{C}$	1 500
Gas pressure in generator	$\text{kg/cm}^2\text{-G}$	2.1
Reducing ratio		8.0
Product gas composition		
CO	%	43.5
H_2	%	45.5
CO_2	%	3.5
H_2O	%	7.5

一応のレベルと評価されよう。

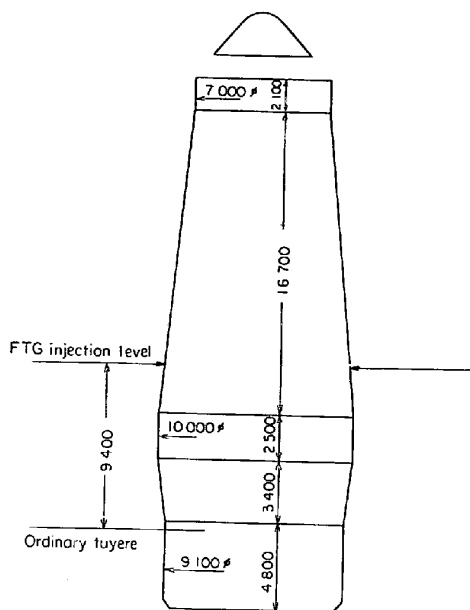


Fig. 12. Profile of Hirohata No 3 blast furnace and level of reducing gas injection.

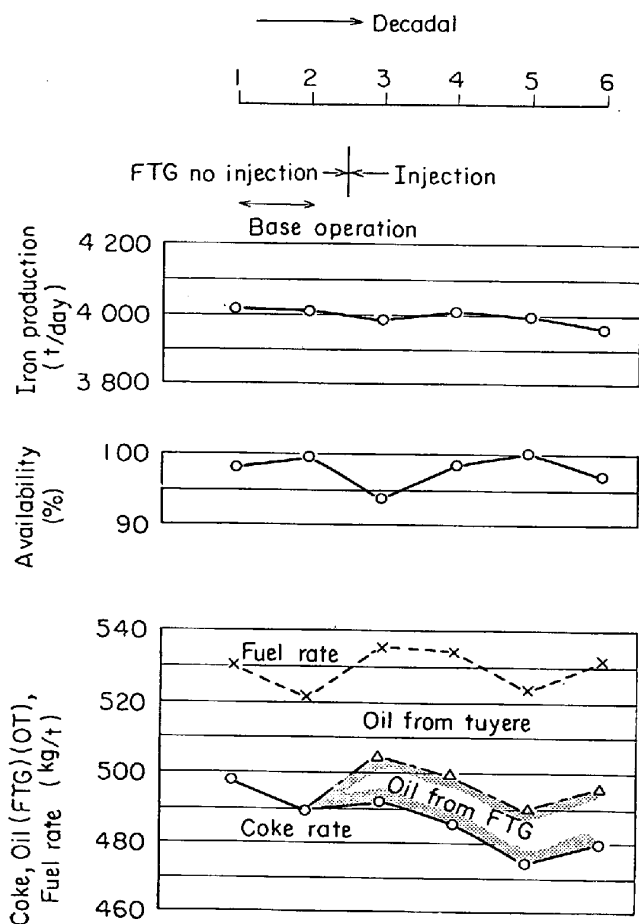
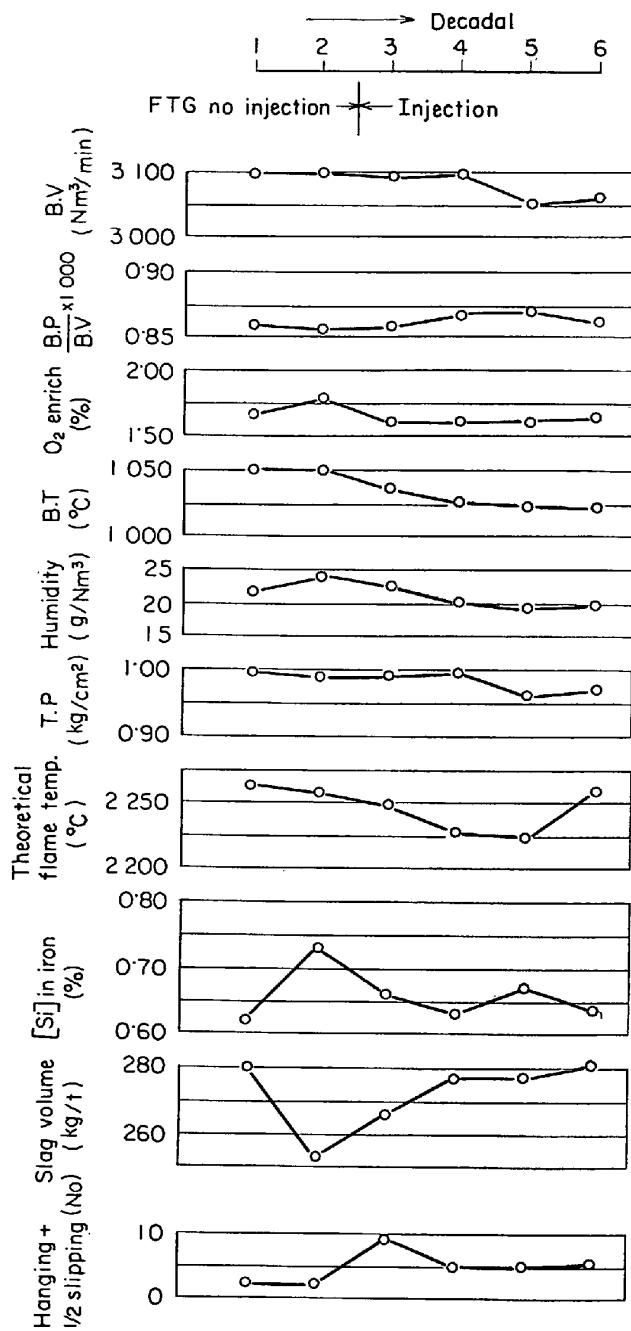


Fig. 13. Results of the blast furnace operation in test I. (data : decadal)



B.P : Blast pressure (kg/cm²)
 B.V : Blast volume (Nm³/min)
 B.T : Blast temperature (°C)
 T.P : Top pressure (kg/cm²-G)

Fig. 14. Conditions of the blast furnace operation in test I (data : decadal)

5.2 高炉への還元ガス吹込み試験結果

5.2.1 高炉への還元ガス吹込み試験経過の概要

還元ガス吹込み位置は数式解析モデル検討結果によれば、効果を上げるためには、高炉のできるだけ下部のほうがよいが、あまり下方に吹込んで高炉内容物の軟化・溶融帯に達すると還元ガス吹込みの安定した吹込みが困難となる。このために作業環境、炉体設備の配置などを

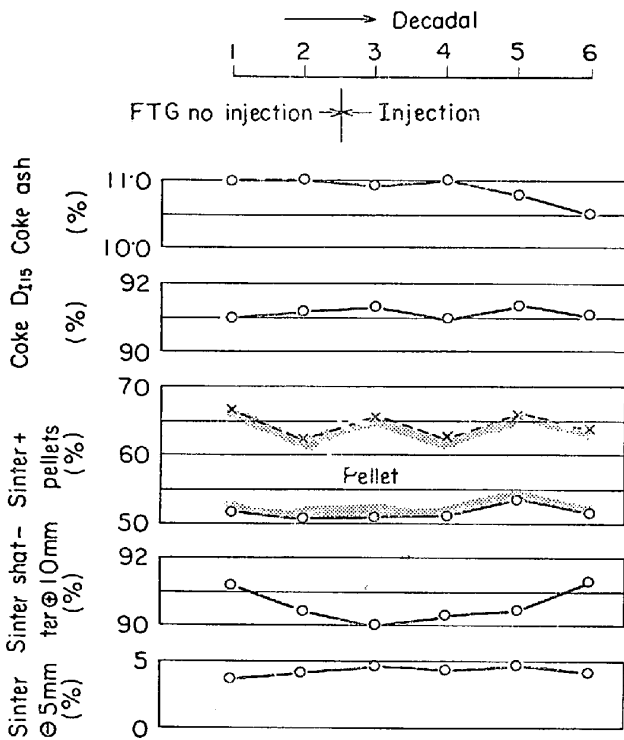


Fig. 15. Conditions of the burden in test 1 (data : decadal).

も考慮して、理論的検討で効果があると予想される羽口上方約 9.4m のシャフト下部の 4 カ所から還元ガスを吹込んだ。Fig. 12 に広畑第 3 高炉のプロフィールならびに還元ガス吹込み位置を示した。

1970年 1月～8月においては還元ガス発生能力の約 50% の運転で運転の習熟と高炉炉況の観察を行なった (Test 1)。1970年 12月～1971年 3月の間の Test 2 においては発生炉能力の 90% 以上、すなわち鉄鉄 t 当りに換算して 30 kg/t の重油を分解した還元ガス吹込みによる操業試験を実施した。

5.2.2 羽口からの重油吹込み量 30 kg/t, FTG 法による重油吹込み量 15 kg/t での操業試験結果 (Test 1)

還元ガス吹込み後の高炉への影響は炉内通気性阻害に関する基礎実験、あるいは数式解析を用いた効果推定によつてある程度予測をつけていたものの実操業の高炉において予期せぬ急激な炉熱変化および炉況変動を避けるため、慎重を期してまずガス化能力の約 50% で 2 カ所の吹込口からの還元ガス吹込みを行なった。

還元ガス吹込み前後の操業結果について、Fig. 13 に高炉操業結果を、Fig. 14 に高炉操業条件、Fig. 15 に原料条件をそれぞれ旬ごとに、また Fig. 16 に高炉操業結果の日ごとの推移を示した。

この操業試験期間は送風量 3 100～3 050Nm³/min (出

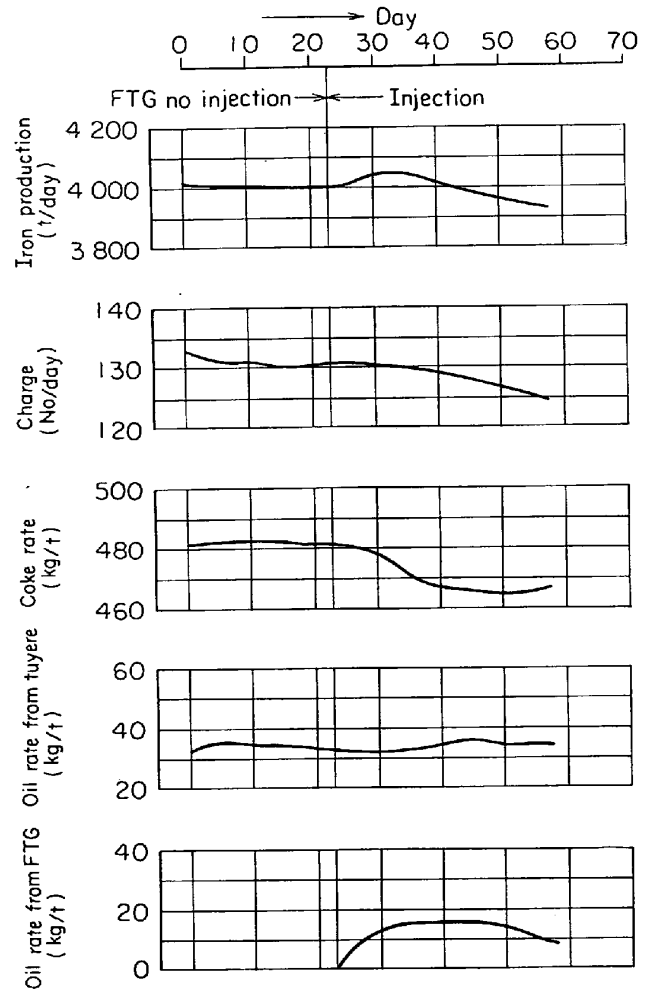


Fig. 16. Results of the blast furnace operation in test 1 (data : daily).

鉄比 2.2～2.3) とほぼ能力一杯の操業であつたが、とくに高炉操業面では送風量、炉頂圧、富化酸素量、原料配合割合などできるだけ一定になるように配慮して操業を行なった。

(1) 還元ガス吹込み後の炉況は棚吊り、スリップが若干ふえたが、銑中 Si の変動は少なく比較的順調な炉況で推移した。

(2) FTG 法による重油吹込み量が 15 kg/t と少ないガス吹込みであつたが、ガス吹込み原単位にほぼ見合ったコークス比の低下を計ることができた。操業条件 (送風温度、送風湿分、コークス灰分、スラグ比、銑中 Si、焼結+ペレットの配合率) を補正して基準操業と比較すると、置換率は約 1.0 の結果を得た。

(3) ガス化能力の約 50% のガス発生のため対向の 2 カ所からの還元ガス吹込みを行なった。対向 2 カ所からのガス吹込みはシャフト断面均一吹込みからみて十分とはいえないが、高炉炉況に悪影響を及ぼすようなガス流れの乱れは生じなかつた。

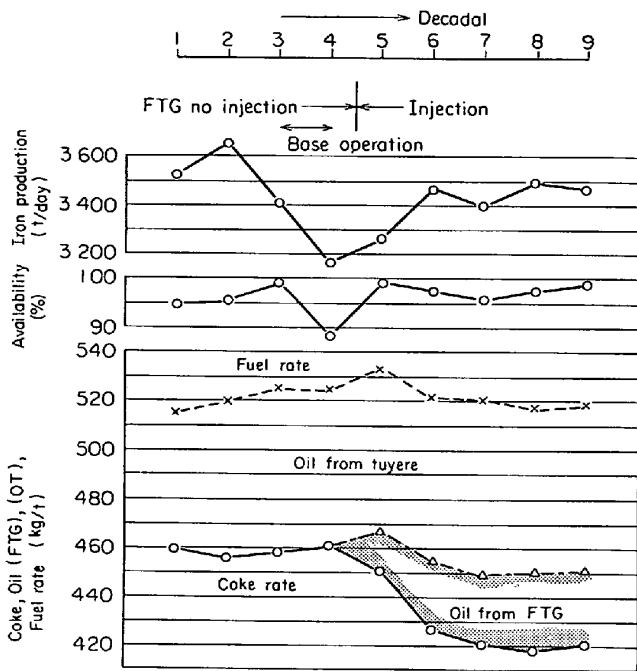


Fig. 17. Results of the blast furnace operation in test 2 (data : decadal).

5.2.3 羽口からの重油吹込み量 70 kg/t, FTG 法による重油吹込み量 30 kg/t での操業試験結果 (Test 2)

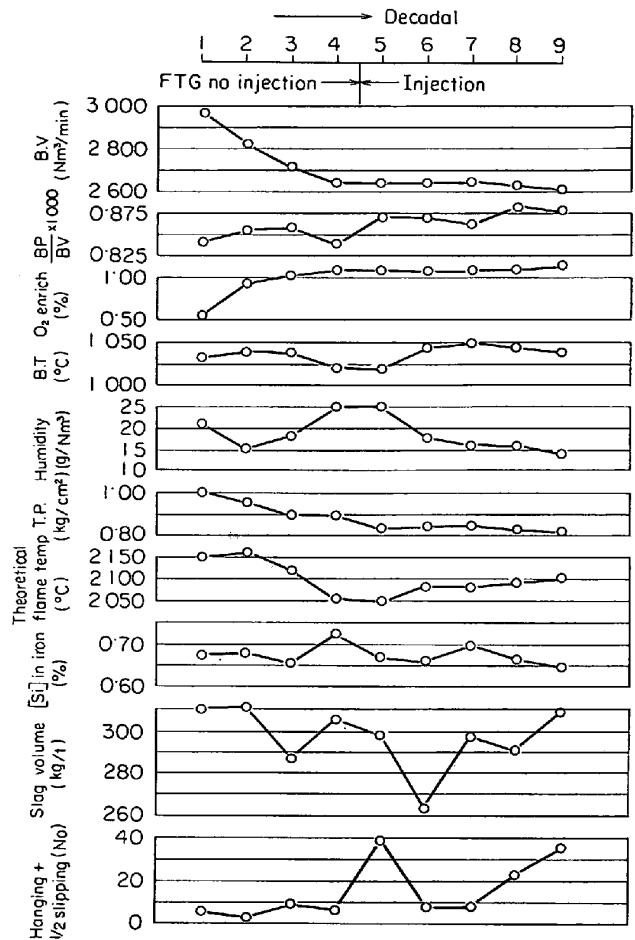
Test 2 としては、羽口からの重油吹込みが限界に近い状態でその上乘せとして吹込んだ還元ガスの効果を確認するため、羽口からの重油吹込み量 70 kg/t, そして還元ガス発生もガス化能力の約 90% の高負荷操業での操業試験を行なった。今回は還元ガス吹込口を 4 カ所としたが、Test 1 段階と同様高炉操業、原料面でできるだけ一定にするよう計画した。

還元ガス吹込み前後の操業結果について、Fig. 17 に高炉操業結果を、Fig. 18 に高炉操業条件、Fig. 19 に原料条件をそれぞれ匂ごとに、また Fig. 20 に高炉操業結果の日ごとの推移を示した。

(1) 試験期間中溶銑に対する需要の変動のため、送風量、原料配合の変更があり、短期間な棚吊り、スリップがあつたが、大勢としては順調な炉況であつた。

(2) 還元ガス吹込み効果については FTG 法による重油吹込量 30 kg/t の試験を行ない、これにほぼ見合つたコークス比の低下を計ることができ、コークス比は約 420 kg/t 前後となり FTG 法による重油の置換率は約 0.9 であつた。

(3) シャフトからの還元ガスと高炉炉内ガスとの混合を調査するため、RI トレーサーでテストしたが、水、空気と CO₂ による混合拡散のモデルテストと同じよう



B. P : Blast pressure B. T : Blast temperature
B. V : Blast volume T. P : Top pressure

Fig. 18. Conditions of the blast furnace operation in test 2 (data : decadal).

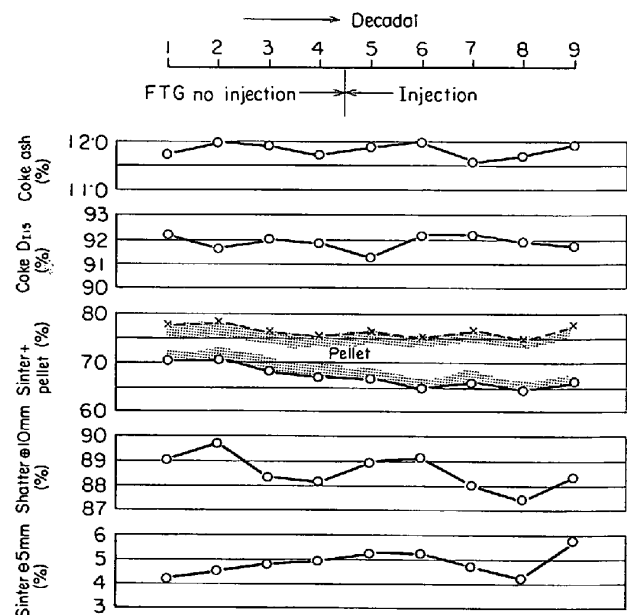


Fig. 19. Conditions of the burden in test 2 (data : decadal).

Table 3. Operation data of blast furnace.

Item	Unit	Test 1		Test 2	
		Base	Gas injection	Base	Gas injection
Iron production	t/day	3 970	4 045	3 272	3 442
Coke rate	kg/t	486.3	477.0	460.4	419.3
Oil rate from tuyere	kg/t	34.7	32.1	60.0	67.5
Fuel rate	kg/t	521.0	509.1	520.4	486.8
Oil rate from FTG	kg/t	0	13.5	0	29.6
Total fuel rate	kg/t	521.0	522.6	520.4	516.8
Blast volume	Nm ³ /min	3 100	3 076	2 676	2 638
Oxygen enrichment	Nm ³ /min	67.8	64.1	36.2	36.7
Blast temperature	°C	1 046	1 024	1 034	1 046
Humidity	g/Nm ³	20.0	17.9	22.3	16.0
Slag volume	kg/t	268	272	279	282
[Si] content in iron	%	0.65	0.65	0.70	0.68
Sinter+pellets	%	64.5	65.9	69.9	70.1
Coke ash	%	10.7	10.7	11.8	11.6

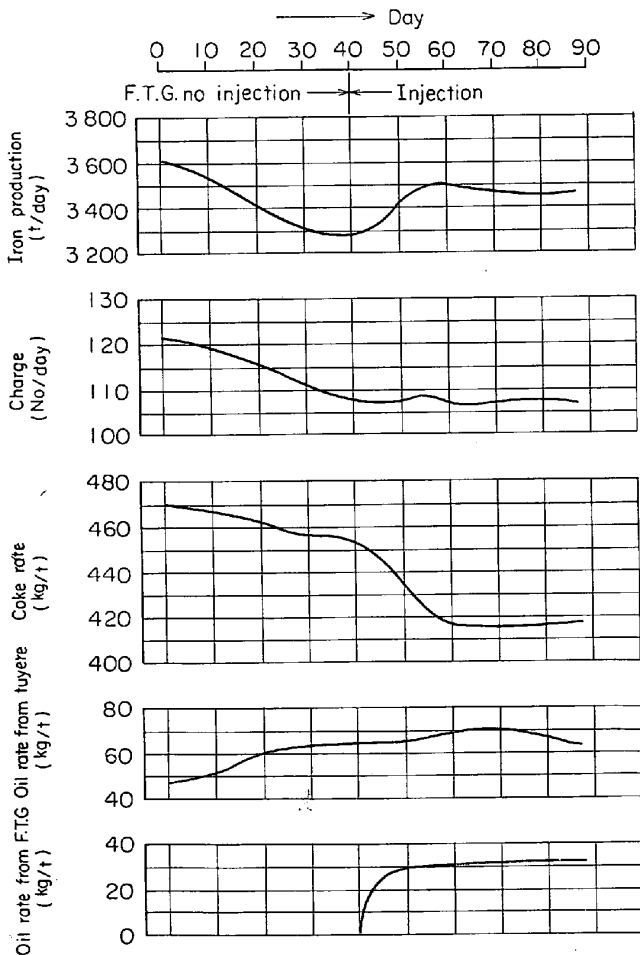


Fig. 20. Results of the blast furnace operation in test 2 (data : daily).

な分散状況であつた。このときの還元ガス中の H₂ の利用率は 40~60% の範囲であつた。

(4) 重油ガス化能力の約 90% の還元ガスを対向の 4カ所の吹込口より一度に吹込むことを試みたが、炉熱

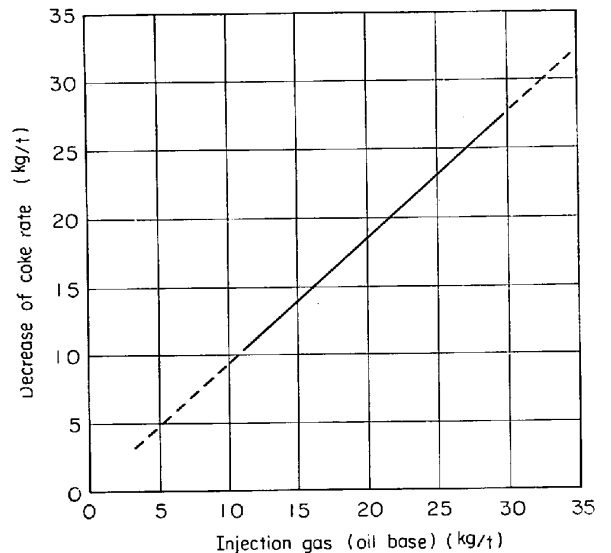


Fig. 21. Effects of reducing gas injection on coke rate.

調整は予想以上に良好に行なうことができ、鉄中 Si などの変動も通常の操業とあまり変わらなかつた。

5.2.4 考察

(1) 置換率・出鉄量

FTG 法による重油吹込み量 15 kg/t, 30 kg/t の 2水準での試験結果の操業データを Table 3 に示した。これらの操業条件を補正して還元ガス吹込み量とコークス比低下の関係を Fig. 21 に示した。この結果、羽口からの重油吹込み量 70 kg/t まで、FTG 法による重油吹込み量 30 kg/t までの範囲で重油 1 kg に対してコークス節約量は、0.9~1.0 kg であつた。これは数式解析とガス混合の補正を行なつた理論解析結果とよく一致した。一方出鉄量についてはソリューションロスカーボンの減少のためか装入回数が減少したためコークス比低下

ほどには出鉄量は伸びず、出鉄量の伸び率はコークス比低下率の約 1/2~1/3 程度である。

(2) 応答性

還元ガス吹込みによる炉熱への影響の時系列的現われ方(応答性)は、還元ガス吹込み後最終的に目標の ore/coke (鉍石装入量とコークス装入量の比)になるのに約 1 週間要し、増鉍・減鉍(コークス装入量一定量に対しての装入鉍石の増減)の応答性よりも遅いようであった。このため鉄中 Si は緩やかな変化を示し操業調整は容易であった。

還元ガス吹込みによる効果の応答性をコークス比で見ると、Fig. 16, Fig. 20 のように約 1 週間後にその効果が現われ始め、最終的には約 15 日以後に平衡状態に達していることがわかる。この応答性の遅い原因については理論的な裏付けを検討中であるが、還元ガス吹込み後の炉内の装入物・ガス分布の再編成、あるいは炉内での還元ガス通過帯の温度上昇待ちといったようなことが考えられる。

(3) 吹込口

還元ガス吹込口はシャフト 4 カ所からガス吹込みを行なったが、最初に還元ガスを吹込む前に付着物の生成などにより閉塞していることがあり、開孔を要する場合があった。しかしながらいつたん高炉へ還元ガスを吹込み始めると安定して吹込むことができた。今後さらにシャフト下方での還元ガス吹込みを試みる場合は当然操業中における開孔機が必要と考えられる。

6. 結 言

コークス用原料炭不足対策の新たな方法として高炉への還元ガス吹込みを試みたが、おおむね所期の効果を確認した。今回はとくに還元ガス製造方法、数学モデルを用いた理論解析による還元ガス吹込みの効果推定、還元ガス吹込み試験の現象面などについて述べてきたが、現在までの試験結果をまとめると、

(1) 還元ガスの製造は供給の多い重油から R 値の高い高温ガスを得るために、部分酸化法を採用した。

(2) 重油分解ではすすの発生は避けられず、一定酸素比ですすがふえると CO₂ がふえ R 値が低下する。すすの発生は一般に次式で示される。

$$\log S = K_1 \cdot (O/C) + K_2$$

(3) 高炉の数式解析による還元ガス吹込みによる効果計算では、以下のことがわかった。

(i) 重油 1 kg に対してコークス約 1.1 kg の節約ができるが、吹込み量増加とともに置換率は漸次低下する。

(ii) 吹込み位置は羽口から約 9.4m 以下が望ましい。

(iii) 吹込み温度が 1000~1200°C の範囲では、吹込み温度によるコークス比への影響はほとんどない。

(4) 吹込みガスは約 15° の角度で拡散するため、ガス効率は理論値の 0.9 と推定される。

(5) 高温の還元ガスを取り扱うこと、および高炉操業と密着していることから、設備上・操業上特別の配慮を行なったが、大きな問題はなかった。

(6) 実高炉への還元ガス吹込み効果については

(i) 重油 1 kg に対してコークス約 0.9~1.0 kg 節約でき、これは理論解析結果と比較的よく一致した。

(ii) 還元ガス吹込みによる炉況への悪影響はほとんどなく、比較的順調な炉況を維持した。

(iii) 還元ガス吹込み効果の応答性は非常に遅く、定常状態に達するのは約 10~15 日後である。この原因については理論的な裏付けを検討中である。

最後にこの研究にたえず直接指導下さった当社製品技術研究所所長渡辺省三博士、元副所長久田清明博士、技術開発部若林敬一氏、および Texaco Development Corporation, PAULL 社長, MARION 博士はじめ多くの方々に厚く感謝の意を捧げる。

文 献

- 1) 児玉, 大坪, 重見, 緒方: 鉄と鋼, 48(1962), p. 1221
- 2) R. LAURENT: O.P.D. Report No 196/63M, June 1963, p. 27
- 3) N. B. MELCHER, R. B. SCHULTER, T. L. JOSEPH and R. J. LEARY: Ironmaking proceeding, AIME, 27(1968), p. 151
- 4) 宮下, 西尾, 下間, 山田, 大槻: 鉄と鋼, 58(1972) 5,
- 5) 鞭, 八木, 田村, 森山: 日本金属学会誌, 30(1966), p. 826
- 6) 鞭, 田村, 八木, 森山: 日本金属学会誌, 30(1966), p. 1109
- 7) 鞭, 田村, 八木, 森山: 日本金属学会誌, 30(1966), p. 1115
- 8) C. J. FIELDEN and B. I. WOOD: JISI, (1968), p. 653
- 9) G. V. KORSHIKOV: Izvestiya Akademii Nauk SSSP, 4 (1965), p. 8
- 10) E. SCHÜRMAN and W. ZISCHKALE: Stahl u. Eisen, 80(1962), p. 854
- 11) 鈴木: 化学工学, 29 (1965) 4, p. 41
- 12) M. S. CROWLEY: Ceramic Bulletin, 46(1967), p. 7