

討 3 垂直ゾンデによる高炉炉内状況の検討

川崎製鉄技術研究所 岡部俣児 浜田尚夫 ○渡辺昭嗣

1. 緒 言

高炉のモデル化あるいは各種の試験研究の条件設定を実際に即したものにするためには炉内の状況を十分に把握しておかねばならない。このため著者らは千葉オー高炉について垂直方向ゾンデを用いて高炉シャフト内の軸方向でのガス組成、ガス圧および温度などの変化と装入物の降下状況を調査した。十分なデータは得られていないが高炉内の軸方向における上記の諸変化について若干の検討を行なったのでその結果を報告する。

2. 装置および方法

調査対象高炉は千葉オー高炉で、この高炉は60～70%のペレットが装入されており、炉床径は7.2 m、内容積は913 m³でシャフト部の高さは13.3 mである。

垂直ゾンデは外径34 mmの電縫鋼管あるいは外径42.7 mm、肉厚6.4 mmの引抜鋼管製で全長は約20 mであり、深差挿入孔を利用して炉内に挿入された。ゾンデ先端にはガス取入孔として5 mmの孔を20～30個設け上端からガス採取場所までゴムホースでガスを導いた。温度はC-A素線のシース熱電対をゾンデ側面に設けた鞘に納めるか、あるいは本体内に納めて測定した。炉内圧は水銀を封入したU字管によって行なった。降下状況はスチールコードと可変抵抗器を用いて電圧変化として記録した。ゾンデはダストによる目詰りを防ぐためN₂ポンペを接続した。このゾンデでシャフト上端から10～11 m下までの測定が可能である。測定は懸垂状態のゾンデを装入面上に下し、位置確認、ガス採取およびガス圧測定を行なって後装入物の降下とともに自由降下させ一定時間毎にゾンデ先端位置の確認、ガス採取、炉内圧測定を行なった。降下状況と炉内温度は記録計によって連続記録した。ガス分析はヘンベル方式あるいはガスクロマトグラフによりCO、CO₂、H₂について行なった。

3. 結果および考察

千葉オー高炉に対する垂直ゾンデによる炉内調査は42年9月から43年4月まで合計17回行なったが、熱電対の切断その他の問題が生じ有効なデータは2/3にすぎなかった。高炉シャフト内におけるガス組成、炉内圧および温度の軸方向での変化の一例を図1に示した。CO₂濃度は装入物面またはその2 m下までの領域で最高値を示し、下へ行くに従い減少するが、単調な変化をするときと、途中に変化の停滞する領域の存在する場合があり、さらに全く異なった変化を示すこともあった。CO濃度はCO₂濃度とはほぼ対称的に変化する例が多かった。H₂濃度については明確な傾向が認められなかった。炉内圧は、ほぼ単調な経過でシャフト上端から10 m下の位置で約0.4～0.5 kg/cm²となった。温度プロファイルは一般に報告されている結果と似た形状を示したが、温度保存領域が狭く、その温度も700～800℃と文献値より約200℃低くなっていた。温度保存領域の長さとその温度は測定の度毎に異なった値を示した。装入物面下3 m、6 m、10 mの3位置でのガス組成、温度などの経時変化を調べるため100分間停止させた。諸変動は装入物面に近いほどわずかではあるが大きくなる傾向があつた。しかし温度は各位置とも最高と最低で約100℃の差があつた。

現在得られているデータから高炉シャフト内の状況について議論することは非常に困難であるが、伝熱、還元反応および石灰石の分解反応な

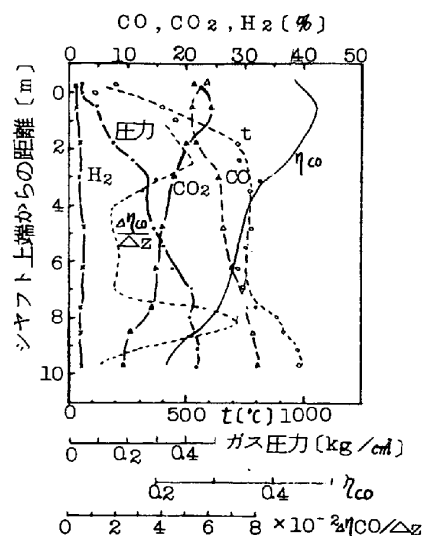


図 1 測定データの例

どについて若干の検討を行なった。

(1) 温度プロファイルについて

高炉内の軸方向での温度変化が図 1 のように逆 S 字形を示すことはすでによく知られており、これを計算するための数式モデルもいくつか提出されている。これまでの測定はシャフト内に限られているので、シャフト上部での熱伝達と温度保存領域について検討してみた。

シャフト上部では熱伝達が粒子と流体の間にのみ起り、この伝熱量に比較して反応熱、水分の蒸発熱、各種化合物の分解熱あるいは炉体熱損失などが相対的に無視できると仮定し、さらに断面での温度が均一であって温度保存領域の存在を仮定すると次式が導かれる。

$$\frac{t_R - t_g}{t_R - t_{g0}} = \exp(-bz) \quad (1)$$

ここで

- t_R ; 温度保存領域の温度 (℃)
- t_{g0} ; 装入物面でのガス温度 (℃)
- t_g ; 装入物面から z [m] 下でのガス温度 (℃)
- z ; 装入物面からの距離 [m]
- $b = (hpa/G_s C_s) (1 - G_s C_s / G_g C_g)$
- G_g, G_s ; ガスおよび粒子の質量速度 (kg/m².hr)
- C_g, C_s ; ガスおよび粒子の比熱 (kcal/kg.℃)
- h_p ; ガスと粒子の間の熱伝達係数 (kcal/m².hr.℃)
- a ; 充填層の比表面積 (m²/m³)

定数 b は操業条件が同じであれば、ある定まった値をとるはずであり、オー高炉は測定期間中は、ほぼ一定の条件で操業されたので $\ln(t_R - t_g) / (t_R - t_{g0})$ と z はある直線関係を示すはずである。図 2 は、この関係をプロットしたもので t_R が同程度であれば、ほぼ同一直線上にのるが、温度保存領域の温度が違えば定数 b が異なっている。これは同一条件で操業されていても炉内ではガスおよび粒子の流れに不均一性があり、ゾンデ付近のガス流量の変動が大きな影響を及ぼしていると思われ、定数 b の定義式からも容易に推測できる。結局 $t_R \div 700 \sim 710$ ℃ のとき $b \div 0.45$, $t_R \div 800 \sim 820$ ℃ のとき $b \div 0.21$ となる。上記の b に影響を及ぼしているゾンデ付近のガス流量の変動は当然、温度保存領域および炉下部の伝熱領域にも影響しているはずである。ゾンデで得られた結果はゾンデ付近に関する情報であって、炉全体の指数とはほとんど関係がないことは、D. Bülter らが指摘している(1)。ゾンデ付近のガス流量の影響を検討するため、温度が 500℃ 程度の位置でのガス組成より物質収支によって、この位置での銑鉄トンあたりのガス流量 V_g (Nm³/t-pig) を求め、これと温度保存領域の長さ H_2 の関係を図-3 に示した。ここで H_2 は温度変化が 100℃ 以内の領域で最も長い部分をとった。

図-3 によれば温度保存領域はガス流量が増すほど短くなる傾向がある。Ore/Coke を変えて操業した場合、温度保存領域の温度と CO₂ 濃度曲線が変動することは既に報告されている(2)。

ゾンデ付近のガス流量の変動はその場所での Ore/Coke の変動と関係があるはずで、上記のガス流量 V_g と保存領域の温度 t_R の関係を検討したが明確な傾向は認められなかつ

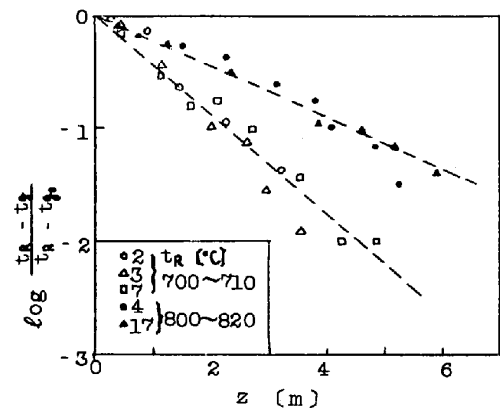


図 2 $(t_R - t_g) / (t_R - t_{g0})$ と z との関係

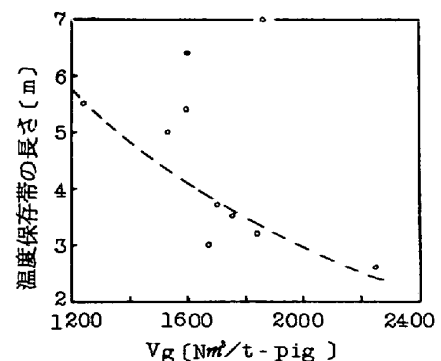


図 3 温度保存帯の長さ H_2 と V_g との関係

た。

温度保存領域の上下の伝熱帯のうち、炉頂に近い領域の広さはあまり変化しない。したがって保存領域の縮小は炉下部の伝熱帯の拡大を意味している。この点については、ガス流量 V_g が増すに従い、下部伝熱帯の長さが増すことを確認できた。これはこの領域でのソリュージョンロス反応あるいは直接還元を増加と熔融物の加熱を招くはずである。またこの場合、保存領域を過ぎて羽口面までの温度勾配はゆるくなる。なおここで考えているのはゾンデ付近に限定された領域であることに注意しなければならない。

(2) 炉内反応について

高炉内では種々の反応が複雑に起り、鉄鉱石の間接還元だけをとり出して考えることは困難である。ここでは CO 、 CO_2 の変化から間接還元反応と石灰石の分解反応について検討した。

シャフト内の間接還元は CO ガスの利用率 η_{CO} の変化からその概要を推定できる。図4は炉内温度と η_{CO} の関係を示したものであり、図5は温度と炉内ガスの $\text{CO}+\text{CO}_2$ の値の関係を示したものである。

$\text{Fe}-\text{C}-\text{O}$ 系平衡図を図4中に併記したのでシャフト内のガスの各温度での還元能力がわかる。図5と合わせて考えれば、400℃以下では装入物面付近のガス流路の変化、480～600℃では炭素析出反応、700～900℃では $\text{FeO}-\text{Fe}$ 平衡、800～1000℃では石灰石の熱分解、950～1000℃以上の領域ではソリュージョンロス反応の影響が認められる。

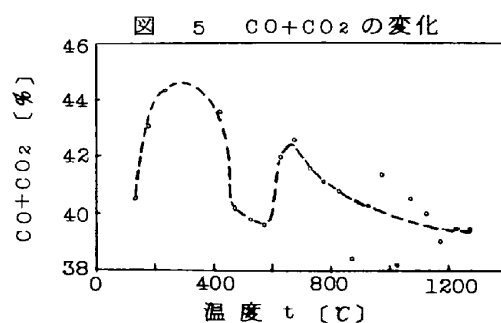
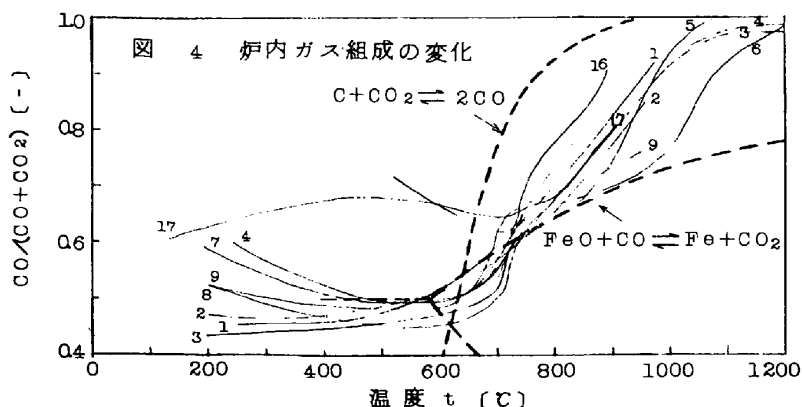
CO ガス利用率 η_{CO} の変化割合、すなわち $\Delta\eta_{\text{CO}}/\Delta z$ はみかけの間接還元反応速度と考えられる。図-1に軸方向における η_{CO} および $\Delta\eta_{\text{CO}}/\Delta z$ の変化も示してある。炉頂付近での $\Delta\eta_{\text{CO}}/\Delta z$ が大きいのは炭素析出反応によると考えられる。温度上昇とともにこの値は増し、600～700℃で極大となる。ガス組成が平衡に近づくと $\Delta\eta_{\text{CO}}/\Delta z$ は著しく減少して化学的に不活性な領域の存在を示す。この領域を過ぎると再び増加し始め、800～1000℃で最大となり、やがてソリュージョンロス反応または直接還元反応へと変る。このようなみかけの反応速度について、反応速度定数 k_R (1/m) を次のようにして求めた。

$$k_R = (\Delta\text{CO}_2/\Delta z) / (\text{CO} - \text{CO}^*) \quad (2)$$

ここで、 $\Delta\text{CO}_2/\Delta z$ はみかけの CO_2 の増加割合、 CO 、 CO^* はそれぞれある温度での CO 濃度および平衡 CO 濃度である。図6に温度と k_R の関係を示した。炭素析出反応、石灰石分解反応、ソリュージョンロス反応などと測定間隔が広い点とは相当はつくが、これらの影響領域を除くと一応間接還元反応のみと思われ活性化エネルギーは約7 kcal/molとは妥当な値になった。この結果、間接還元反応の速度定数 k_R は次のように与えられる。

$$k_R = 0.082 \exp(-7000/RT) \quad (3)$$

千葉オ-高炉は石灰石がかなり装入されている。ガス組成の変化からそのシャフト部における熱分解開始速度を知るため炉内の CO_2 分圧と石灰石の分解平衡圧の関係を調べると図7のようになり780℃前後、シャフト上端から7～8mの位置から分解の始まることわかる。



(3) 炉内通気抵抗について

炉内圧測定結果から炉内圧力損失を推定できる。炉内の圧力勾配 $\Delta P / \Delta z$ (cmH₂O/cm層厚) はばらつきが大きい、装入物面を基準として 0~5 m は 0.40~0.50, 5~10 m は 0.30~0.45, 10~15 m で 0.59 となり、シャフト内の平均は 0.44 であつた。いずれも吹き抜け限界値 1.1 よりかなり低い場合によつては吹き抜け限界にかなり近づくこともあつた。またこの結果から熔融帯の圧力勾配は 0.9 でシャフト部の約 2 倍になつた。

装入物粒度構成および充填状態で決まる通気抵抗指数 α を求めた。

$$\alpha = (\Delta P / \Delta z) / \mu^{0.3} \rho^{0.7} u^{1.7} \quad (4)$$

ここで μ , ρ , u はそれぞれ、ガスの粘度、密度、線速度を表わす。 α は非常なばらつきを示し荷下りの不規則性が大きな影響を及ぼしていると思われる。また炉下部ほど α が大きくなり、みかけ粒度あるいは空隙率の低下を意味している。装入物面から 0~5 m と 5~10 m の領域間で $\Delta P / \Delta z$ と α の関係が逆転したが、これは温度保存領域の存在が関係している。

4 結 び

千葉オー高炉において、垂直方向ゾンデによりシャフト部のガス組成、炉内圧、温度、荷下り状況などの変化を調べ次のような結果を得た。

(1) 高炉シャフト部におけるガス組成、ガス圧力、温度などの軸方向の変化について、これまでに発表されている例と似た結果が得られたが、温度保存領域が狭く、その温度も低かつた。

(2) シャフト上部の温度プロファイルを決定する式として次式が得られた。

$$(t_R - t_g) / (t_R - t_{g0}) = \exp(-bz)$$

定数 b は $t_R = 700 \sim 710^\circ\text{C}$ のとき約 0.45, $t_R = 800 \sim 820^\circ\text{C}$ のとき約 0.21 となつた。

(3) 温度保存領域の長さはゾンデ付近を通過する銑鉄トン当りのガス量が多いほど短くなる傾向があつた。

(4) CO ガスの利用率の勾配をみかけの間接還元反応速度と考え速度定数を求めた。活性化エネルギーは約 7 kcal/mol で速度定数は次のように与えられた。

$$k_R = 0.082 \exp(-7000/RT)$$

(5) 石灰石の熱分解は炉内の CO₂ 分圧と分解平衡圧を比較し約 780°C より開始されると推定できた。

(6) 炉内圧測定結果より、シャフト部の圧力勾配は平均 0.44 であつたが、これから熔融帯のそれは約 0.9 程度と推定された。

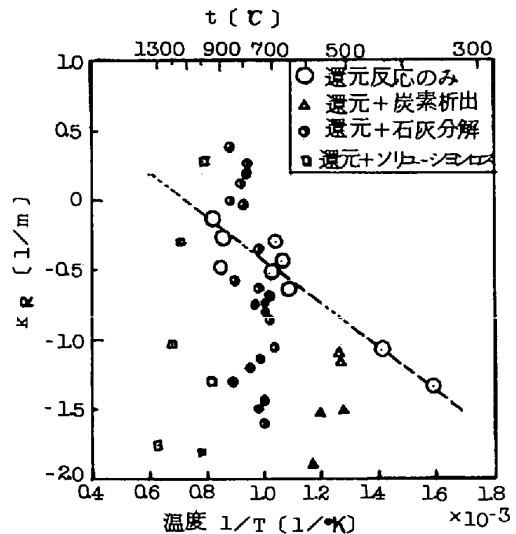


図 6 k_R と T との関係

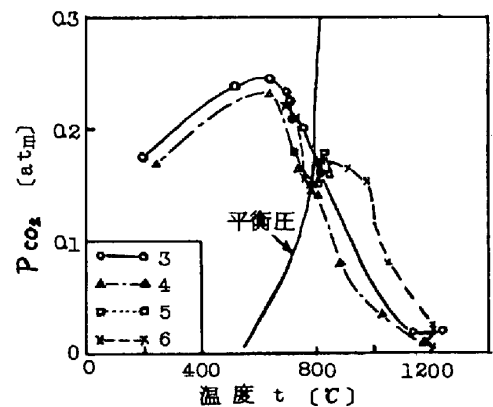


図 7 石灰石の分解反応

文 献

(1) D. Bülter und A. Klitzing; Stahl u. Eisen, 88 (1968) 3, P. 108 ~ 119

(2) 和田, 他; 鉄と鋼, 47 (1961) 11, P. 1617 ~ 1630

〔付記〕 御指導いただいた名古屋大学工学部教授に謝意を表します。