

# 討 1 試験高炉の操業解析

東京大学生産技術研究所 館 充 ○中根十富

東京大学生産技術研究所の試験高炉は、内容積  $0.48 \text{ m}^3$ 、鋼製水冷羽口(25mmφ)4本、1.回装入コークス量15kg、鉱石は自溶性焼結鉱100%、目標塩基度1.3、1回1スキップ混合装入であって、最近の3回の試験は送風限界に関する試験であった。以下これについてのべる。(図1参照)

## 1. 第16次、第17次操業

送風限界の判定は「出鉄成分ならびに荷の降下状態に極端な悪影響を及ぼすことなしに最大出鉄量を保証するような送風量」によることとし、鉄鉄成分の目標を  $\text{Si} \approx 0.7\%$ 、 $\text{S} \leq 0.06\%$  とした。

第16次操業は、送風温度約  $600^\circ\text{C}$ 、水分  $4 \sim 8 \text{ g/m}^3$  (自然湿分) で、送風量を  $3.5 \sim 6.0 \text{ Nm}^3/\text{min}$  の範囲で階段状にかえた。

第17次操業は、送風温度約  $570^\circ\text{C}$ 、水分  $17 \sim 25 \text{ g/m}^3$  (自然湿分) で、送風量を  $4.0 \sim 7.5 \text{ Nm}^3/\text{min}$  の範囲でかえた。

使用原料は表1に示すが、第16次操業の途中で鉱石を変えねばならなかった。

図2に操業の諸指数を示す。結果はいずれの場合もコークス比最小の点を確認したが、出鉄量最大の点は実現できなかった。

第16次操業では増風につれて炉頂ガス組成に異常変動が現われ(図3a, 3b参照)低珪高硫の出鉄がこれに伴った。これは突然出現して、次には回復するというもので、はじめは1日1回程度であったが、 $6.0 \text{ Nm}^3/\text{min}$  段階では1日数回出現した。この途中で焼結鉱の銘柄をIよりIIへ変更したが炉頂ガス組成の異常変動も不良出鉄も見られなくなった。

第17次操業においても、高送風段階で炉頂ガスの異常変動は現われたが、不良出鉄が突然出現することにはなかった。

図3に示すように、異常変動は正常時と比較すると、COの変動周波数が多くなり、振幅も大きい。またCO<sub>2</sub>の装入ごとに現われる短周期の振動の波形がみだれる。異常変動のときは、一般にCO+CO<sub>2</sub>の水準が高く、CO+CO<sub>2</sub>の変動が大きい。送風量を一定に保てば還元される酸素量の変動とみるべきであり、このことは秤量誤差であるか、何らかの条件で鉱石が多量に還元をうけたり、うけなかったりするにめと考えられる。秤量誤差ならば、程度の差はあっても低送風段階にもあるはずであり、これは認められなかった。よって後者である公算が大きいし、CO<sub>2</sub>よりもCOのほうが変化の程度が大きい、などのことから直接還元帯に、より関係するものと思われるが、その変動の正確な要因は把握できなかった。

表1 各操業時に用いる使用原料

|     | コークス  |        |          |          | 焼結 鉱   |                      |          |          |
|-----|-------|--------|----------|----------|--------|----------------------|----------|----------|
|     | FC(%) | Ash(%) | 粒度範囲(mm) | 平均粒度(mm) | TFE(%) | CaO/SiO <sub>2</sub> | 粒度範囲(mm) | 平均粒度(mm) |
| 16次 | 89.3  | 9.7    | 10~20    | 12.3     | I      | 59.14                | 3~10     | 6.2      |
|     |       |        |          |          | II     | 56.69                | 3~10     | 6.5      |
| 17次 | 89.0  | 10.0   | 10~20    | 12.2     |        | 50.9                 | 3~10     | 5.2      |
| 18次 | 85.9  | 12.1   | 6~10     | 6.1      |        | 58.5                 | 3~6      | 3.9      |

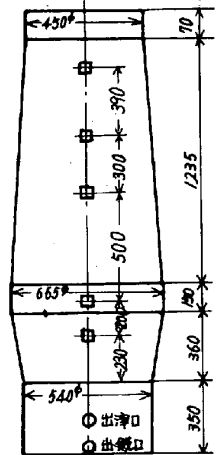


図1 試験高炉のプロファイル

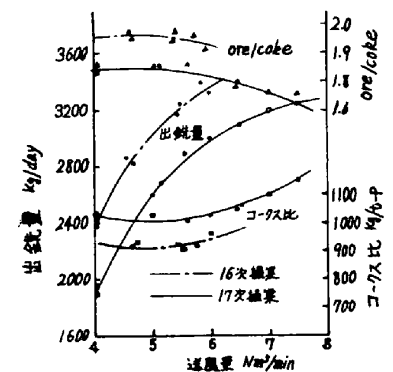


図2 出鉄量と操業諸指数との関係 (第16, 17次)

S 670

で近似した。

$$P = -36V_B^2 + 686V_B + 256$$

これから最大出鉄量に対応する送風量を  
を  $9.5 \text{ Nm}^3/\text{min}$  と推定した。

## 2. 第18次操業

この推定を確かめるために、再び試験を行なったが、 $9.5 \text{ Nm}^3/\text{min}$  という送風量およびそれに相当する送風圧は、既設送風機および送風量制御系の能力をこえてい  
るので、約  $8.0 \text{ Nm}^3/\text{min}$  以下の送風量で限界に達するような操業条件を採用せねばならなかった。したがって第17次操業の原料条件で、 $9.5 \text{ Nm}^3/\text{min}$  の送風量のときのシャフト部圧損に等しい圧損を、 $6 \sim 7 \text{ Nm}^3/\text{min}$  の送風量で実現するような原料条件を採用した。(表1参照)

図5に操業諸指数を示すが、前2回と同様の傾向がみられた。また、今回は  $P-V_B$  曲線に明瞭な max. が認められ、前回と同様に ore/coke と装入回数の直線近似より求めた  $P-V_B$  の関係式は次のようになった。

$$P = -51.5V_B^2 + 761.8V_B + 241.4$$

これより求めた最大出鉄量に対応する送風量  $7.4 \text{ Nm}^3/\text{min}$  は、実績とかなりよく一致している。

しかし炉況は前2回とはなほ大きく異なり、低送風段階から棚吊り、荷下り停滞が頻発し、ある送風段階から次の段階へ増風した直後にくに顕著に現われた。  $6.0 \text{ Nm}^3/\text{min}$  段階からは下ベルの降下不良、炉頂金物へ吹上げられた原料の衝突によると思われる音の発生があり、 $7.5 \text{ Nm}^3/\text{min}$  段階では強固な棚吊りと2本の up-take の一方の肉塞と他方の赤熱が再三にわたって発生し、 $8.5 \text{ Nm}^3/\text{min}$  にいたっては、これらの現象がさらに激化し、遂に2本の up-take の完全な肉塞という操業不能の状態に陥った。この間低送風段階から出鉄成分の調整も困難をきわめた。

高送風段階における装入物の降下障害が常に炉の最上部でおこることは、棚吊り時の休風のときの炉内観察、ガス圧測定などによって確認された。また一般に試験高炉にあつては、炉の下部の圧力損失が小さく、flooding による降下障害はみとめられなかった。図6は比較的low送風段階のデータであるが、棚吊り時の炉内圧の変化を示している。

以上のことから最大出鉄量に対応する送風限界  $7.5 \text{ Nm}^3/\text{min}$  は、荷下り障害と炉熱低下とが相関連しあつて規定したものと考えられる。

## 3. 送風限界を規定する要因

図7にシャフト部の圧損と送風量との関係および充填層の圧損に関する Ergun の式によって算出した空間率を示した。第17次操業の場合と同じく、増風につれて圧損の増大はにほひ、空間率は増大する。すなわち層が疎充填状態に移行することがわかる。これから第18次操業の送風限界付近の荷下り障害はシャフト最上部原料層の膨張と関連あるものと推測される。そこでこれを確かめるために行なった実験についてのべる。

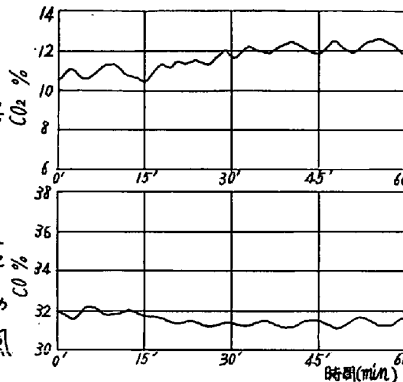


図3a 炉頂ガス組成の正常変動 ( $6.0 \text{ Nm}^3/\text{min}$ )

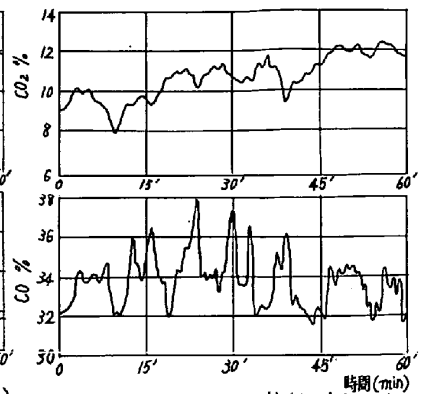


図3b 炉頂ガス組成の異常変動 ( $6.0 \text{ Nm}^3/\text{min}$ )

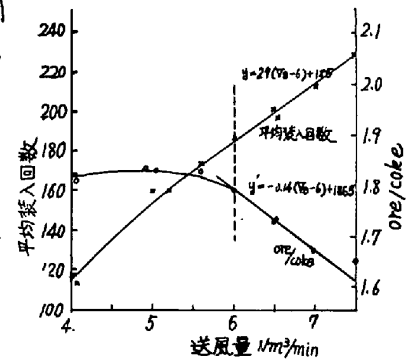


図4 送風量と ore/coke および平均装入回数の関係

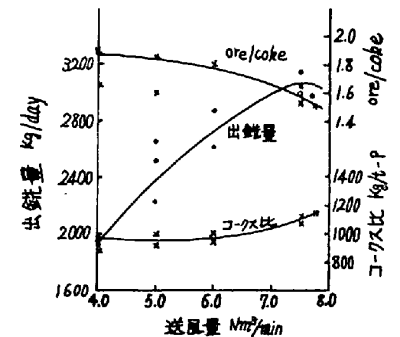


図5 送風量と操業諸指数との関係 (18次)

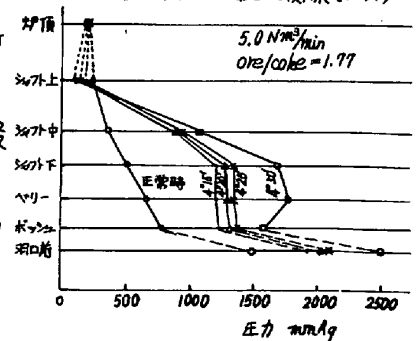


図6 棚吊発生時炉内圧分布

### 3.1 モデル実験

図8に空気流速と圧損の関係を示した。コークスおよび焼結鉄の単味充填層はそれぞれ非移動充填層の典型的動向を示している。図に記入した数字はそれぞれの層の状態を示している。1. channeling開始、2. channelingの全断面への拡がり、3. bubblingの断面の半分への拡がり、4. 安定なfluidization、5. 平均粒度以下の粒子が層外へ飛び出しはじめる。

これに対し混合粒子層は流動開始時の圧損の急降下部をもたないという特徴のほか、2～4で単味充填層と同様なbubblingとともにコークス粒子と焼結鉄粒子の分離、すなわち分級効果が始まり、漸次それが強まって、上層部に集まってコークス粒子が流動する。5では粒子が層外へ飛び出し、上層部にboilingを生じ、層高は急激に高くなり、やがて下層部にあって焼結鉄が流動しはじめる。分離していった粒子の再混合が起こる。6、7ではこの再混合と全粒子の流動が始まると単味層（とくにコークス）と異なる微圧振動が出現し、その振幅が流速の増大につれて次第に大きくなる。（図9a, 9b, 10参照）このことは微圧振動が混合粒子層の流動状態の判定の基準となることを示している。

他方、単味層については、固定層から完全流動層までの状態を終端速度に対する実ガス速度の比 $U^* = U/U_t$ で一義的に表わすことができ、これが $Re-p$ と $U^* = k(Re-p)^n$ なる関係をもつことが知られているが、図11に示すように、この関係 $U^* = k(Re-p)^n$ は混合粒子層についても成立する。

### 3.2 第18次操業における微圧振動と流動

第18次操業中、シャフト上、中、下各段の微圧をモデル実験で用いたものと同じ装置で測定した。それによると6 Nm<sup>3</sup>/min段階で中段と上段にモデル（図10）と同様な振動がみられ、7.5 Nm<sup>3</sup>/min段階には図12のように下段にいたるまで明瞭な振動が観察されている。

これらの事実と前述の $\Delta P$ 、 $\varepsilon$ - $V_B$ 関係図や操業中の種々の知見からみて、高送風段階におけるシャフト最上部原料層はsluggingないしfluidizingの状態であることは疑う余地がなく、送風限界を規定する要因となつたものと断定してよい。

### 3.3 結果の一般化

送風限界が装入物上層の流動化によって規定されるとすれば、その値は $U^*$ のある一定値を与える $U$ によって決定し、 $U^*$ は $Re-p$ によって一義的に与えられる。図13に第17次、第18次操業における $U^*-Re-p$ の関係を示した。

これから第17次操業についてもほぼ $U^* = k(Re-p)^n$ の関係が成立することがわかる。

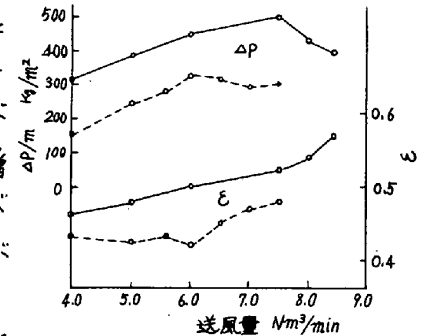


図7 送風量と $\Delta P$ および $\varepsilon$ の関係

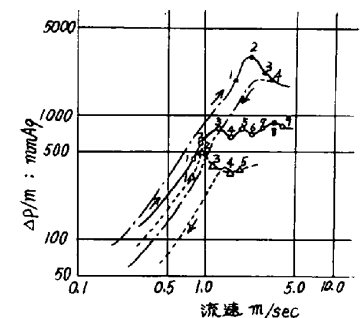


図8 モデル実験における流速と圧損の関係

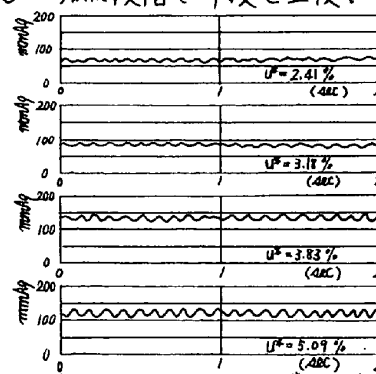


図9a 単味層における微圧変動と $U^*$ との関係  
(モデル実験上段・コークス)

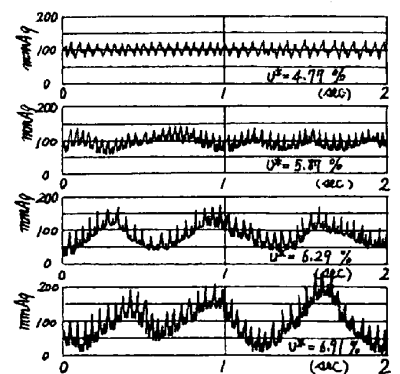


図9b 単味層における微圧変動と $U^*$ との関係  
(モデル実験上段・焼結鉄)

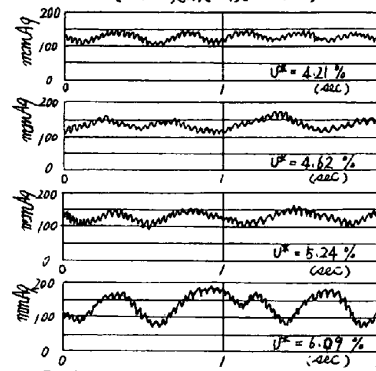


図10 混合層における微圧変動と $U^*$ との関係  
(モデル実験中段・ $Ore/cake=1.5$ )

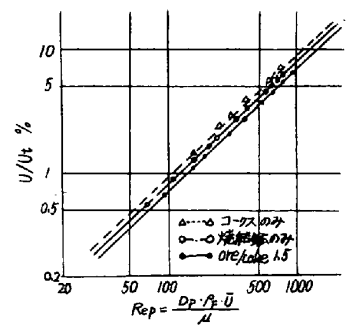


図11  $Rep$ と $U/U_t$ の関係 (MODEL)

そこで第18次操業の条件で、最初に顕著な流動の確かめられた $7.5 \text{ Nm}^3/\text{min}$ が限界送風量であったとして、これに対応する $U^*=7.6\%$ は、第17次操業においては $9.5 \text{ Nm}^3/\text{min}$ の送風量に相当し、前述の2次式によって推定した送風量と非常によく一致する。図に示した第17次操業の実績がbubblingないしboiling領域にあって、同じ送風量の第18次のより低位の流動状態であったとみられることも事実とよく一致する。

こうして試験高炉における送風限界は装入物層の運動状態によって規定され、 $U^*$ のある値に対応する送風量が限界を決定するとみえよいであろう。しかし第18次操業では、増風によって一時的に装入物降下障害が起こっても、やがるともかく操業できる状態になり、結局おと $5 \text{ Nm}^3/\text{min}$ 近くまで操業できたという事実から、送風限界にも幅があると考えられる。

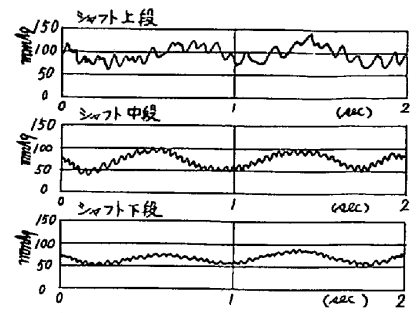


図12  $7.56 \text{ Nm}^3/\text{min}$  段階のシフト部における微圧変動

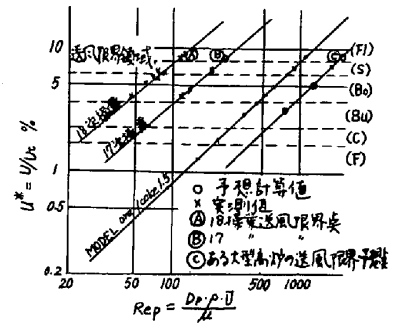


図13  $Rep$  と  $U^*$  の関係