

論 文

UDC 669.162.224.4 : 669.162.267.4 : 662.753.3

## 酸素, 重油の多量併用吹き込みにおける適正操業 範囲について\*

樋口 正昭\*\*・飯塚 元彦\*\*・黒田 浩一\*\*・炭竈 隆志\*\*

### Appropriate Operational Range for Simultaneous Injection of Oxygen and Oil in Large Quantity in the Blast Furnace

Masaaki HIGUCHI, Motohiko IZUKA, Koichi KURODA, and Takashi SUMIGAMA

## Synopsis:

Simultaneous injection of oxygen and oil in large quantity is likely to cause slipping and other irregularities in blast furnace, if the choice of each quantity is inappropriate.

For this reason, it is necessary to treat this problem quite carefully both from theoretical and operational points of view. To solve this problem the idea of appropriate operational range is introduced, which takes into account the limitation of heat exchange of gas and burden, theoretical temperature at tuyeres and perfect combustion of oil. Fukuyama No 2 BF has been operated by applying these consideration.

The operational results of 380 kg/tHN coke ratio and 78 kg/tHM oil ratio have been obtained by the enrichment of oxygen of 2.5%.

The furnace is operated, at present, under good condition with 3.8% oxygen enrichment, which proves that the idea of appropriate operational range is very beneficial in injecting oxygen and oil in large quantity.

(Received Aug. 10, 1973)

## 1. 緒 言

高炉における酸素と重油の多量併用操業は、液体燃料吹き込み技術を導入した当初、2, 3の高炉で試みられたこともあったが、期間が短かったこと、装入原料の事前処理が必ずしも十分ではなかったなどの理由で、明確な効果が得られず放置されてきたのであるが、昭和44年中頃から昭和45年にかけて、原料炭不足をきたし、コークス比低減の技術として再認識され大きな効果をもたらした。当福山製鉄所においても、昭和45年1月より酸素富化と重油吹き込みが併用され、その後種々の検討を繰り返した結果、昭和47年3月には、第2高炉で酸素富化率2.5%、コークス比380 kg/tHM、重油比78 kg/tHMの実績をつくり、その後も好成績を持続している。

しかしながら、酸素富化率と重油吹き込み量の選択を誤ると大幅な成分変動、スリップなどがおこり、炉況不安定となりやすく理論面、実操業面で万全の対策をたてる必要がある。本報文においては、福山高炉および各社高炉の操業経緯より理論的に検討を加えて、酸素と重油

の適正操業範囲を予測し、それにより高炉を操業した経緯、問題点などについて報告する。

## 2. 酸素富化および重油吹き込みの適正操業範囲について

### 2.1 酸素富化を伴う重油吹き込み量の限界

一般に酸素富化を伴う重油吹き込み操業においては、以下の限界を考慮する必要があると言われている。

- ① ガスと固体の熱交換からみた限界
- ② 羽口先理論燃焼温度の上限および下限
- ③ 重油完全燃焼のための限界

しかしながら、従来、これらの限界は数値的に必ずしも明確ではなく、また、ガスと固体の熱交換からみた限界を知る特性値として熱流比のみを考慮している。そこで経験および理論的検討からこれらの数値を明確化するとともに、熱流比以外の必要性を述べこれらの限界に基づ

\* 昭和47年10月 本会講演会にて発表  
昭和48年8月10日受付

\*\* 日本鋼管(株)福山製鉄所

いた適正操業範囲についての考察を行なった。

## 2.2 ガスと固体の熱交換からみた限界

### 2.2.1 酸素富化によつておこる現象

送風中の酸素富化率を増加させていくと、窒素量の減少のために銑鉄トン当たりの発生ガス量が減少して、シャフト部におけるガスから固体への熱移動量が減少し、シャフト部での温度が低下する。さらに酸素富化によつて生産性が増加するため、装入物の降下速度が速くなり熱交換時間が不足することもあり、装入物は十分予熱されずに炉下部の高温領域へ入るため、炉冷、スリップ、棚吊りなどを生じ炉況不調となる。このことは、実炉では昭和39年に日本鋼管鶴見第2高炉で、酸素富化率 5.7% 以上において経験され、また試験炉では日本鋼管技術研究所の試験高炉での昭和44年の酸素富化試験において富化率を4%から10%に上昇させていく過程において実証<sup>1)</sup>されている。

以上述べた酸素富化によつておこるガスと固体間の熱交換からみた限界をあらわす特性値としては、一般に熱流比 (=装入物の熱容量/ガスの熱容量) が使われている。Fig. 1 に各社高炉の実績値より酸素富化率と熱流比の関係を示すがこれによると重油吹き込み量、燃料比などの操業条件によつて若干のバラツキはあるが、酸素富化率の増加に従つて、熱流比は増加し、J. C. COCHERY<sup>2)</sup>, J. MICHERD<sup>3)</sup> らが述べているようにその限界は 0.80~0.82 であることがわかる。

### 2.2.2 熱流比以外の限界についての考察

福山第3高炉は酸素富化率 3.2% 前後で、昭和46年8月に大事には到らなかったが炉冷を経験した。しかしながらこのときの熱流比は 0.77~0.78 であり一般に言われている限界値 0.80 を越えてはいなかった。そこで

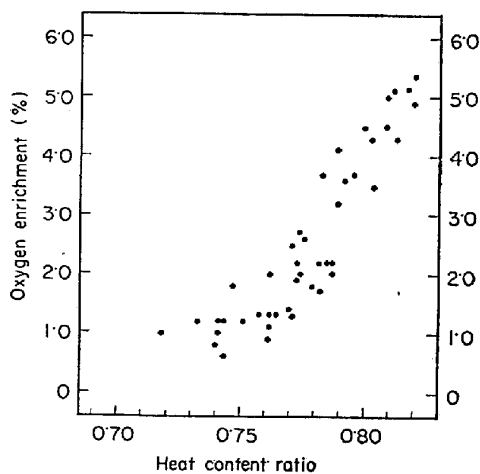


Fig. 1. Relationship between oxygen enrichment and heat content ratio.

つぎに、この経験をもとに熱流比以外の限界について検討した。

### ①操業経過

第3高炉は昭和45年1月より酸素富化を開始し、その後徐々に増加し、昭和46年7月には富化率 3.2% まで達した。ところが、8月中旬、Fig. 2 に示すように軽微な炉冷を経験した。現象としては、その時点では溶銑温度、銑中 Si% からは炉熱十分と判断されたにもかかわらず炉頂ガス成分がまず変化し始め、CO ガスが 26% → 29%、CO<sub>2</sub> ガスが 21% → 19%、炉頂ガス温度は 180 °C → 300 °C に上昇し、スリップが増加し始め、羽口先で滓湧きが始まり、3~4 時間後には通常 1500 °C の溶銑温度は 1400 °C 以下に、銑中 Si% は 0.7% 前後から 0.2% 台に低下している。

### ②酸素富化率と重油吹き込み量についての他高炉との比較

この現象を調べるために、Fig. 3 に示すように酸素富化率と重油比について他社高炉実績との比較を行なった。これによれば、第3高炉は他高炉に比較し操業度の高い割合には同一酸素富化率レベルで重油比が少ないことがわかる。重油比が少ないことは、燃料比を一定とすれば、コークスと重油の置換率 1:1 の場合、コークス中 C と重油中 C はほぼ見合い、したがつて重油中の H<sub>2</sub> 分に相当するだけ銑鉄トン当たりガス量が少なくなり、前述したようにシャフト部での熱交換が十分行なわれにく

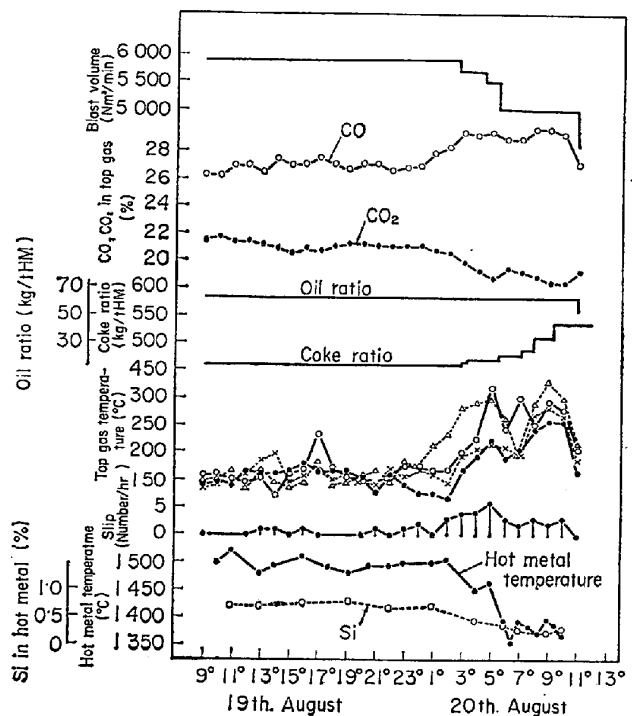


Fig. 2. Operational data of Fukuyama NO 3 BF (August 1970).

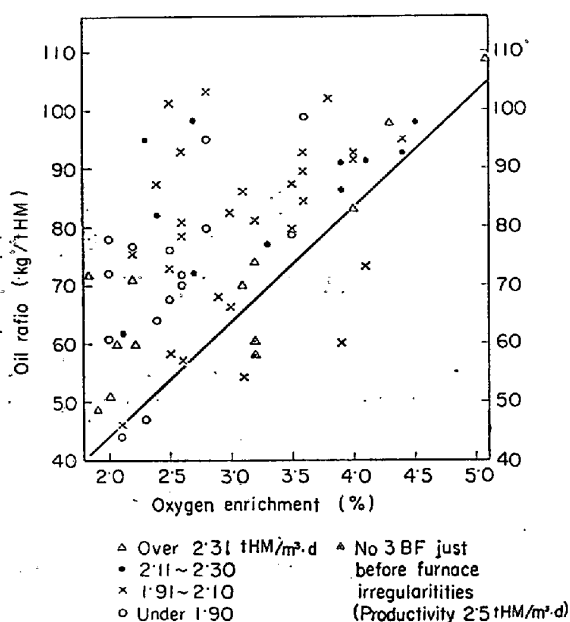


Fig. 3. Relationship between oil ratio and oxygen enrichment productivity.

くなる。さらに、重油比が少ないことは換言すれば、コークス比が高いことを意味し熱交換と関係ある装入物降下時間とコークス比の関係を調べるとつぎのことがわかった。

### ③ 装入物降下時間とコークス比の関係

装入物降下時間 ( $\theta$ ) はつぎの式によりあらわされる

$$\theta = 24 \cdot V_{ac} / \{ \alpha (OR / \rho_{ore} + CR / \rho_{coke}) \cdot V \cdot W_p \}$$

ただし、 $\theta$  : 装入物降下時間 [hr]

$V_{ac}$  : 有効炉内容積 [m<sup>3</sup>]

$\alpha$  : 圧縮比 0.9

OR : 主・副原料比 [t/tHM]

$\rho_{ore}$  : 主・副原料の平均嵩比重 [m<sup>3</sup>/t]

CR : コークス比 [t/tHM]

$\rho_{coke}$  : コークスの嵩比重 [m<sup>3</sup>/t]

V : 炉内容積 [m<sup>3</sup>]

$W_p$  : 操業度 [tHM/m<sup>3</sup>·d]

主・副原料比は一定と仮定できるから装入物降下時間は操業度によって層別されるコークス比の関数としてみなすことができ、この関係を Fig. 4 に示す。すなわち、この関係からつぎのことが言える。

a) 酸素を富化していくとき、重油比を一定に保てば装入物降下時間は減少する。

b) 酸素富化にしたがい、重油比を増加（コークス比は減少）させれば、装入物降下時間を減少させることなく操業度を増すことが可能である。

ところが、第3高炉では前述したように酸素富化率の

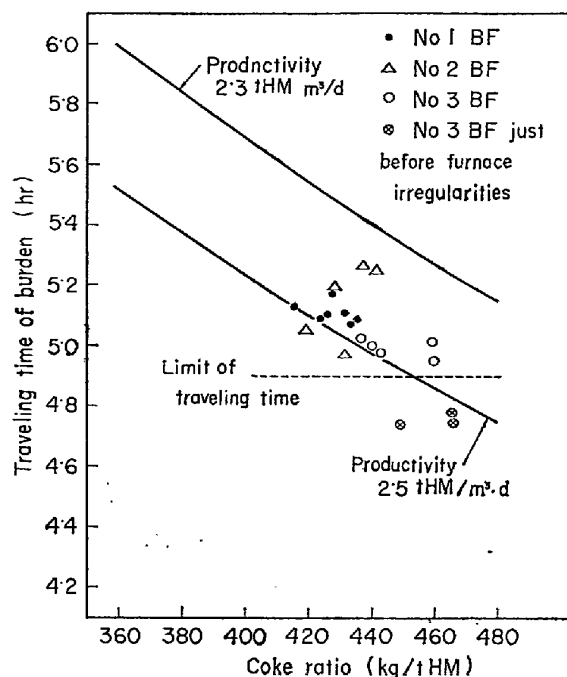


Fig. 4. Relationship between travelling time of burden and coke ratio for Fukuyama blast furnaces.

増加に比較して、重油量を増さなかつたために装入物降下時間の限界（炉頂圧 1.5 kg/cm<sup>2</sup> の第3高炉の操業条件の場合、4.9 hr）を越えて熱交換が不十分となり、炉冷現象を起こしたと思われる。

以上述べてきたように、第3高炉の炉冷の解析結果から、ガスと固体の熱交換からみた限界をあらわす数値として、熱流比以外に装入物降下時間の限界を考慮しなければならないことがわかる。

### 2.3 羽口先理論燃焼温度の上限および下限

酸素、重油の多量併用吹き込み操業において、羽口先端での燃焼温度は非常に重要であつて、低すぎると反応が進まず冷えてくるし、高すぎると melting zone の拡大、あるいは装入物中のアルカリ、SiO などの気化によつて通気性悪化の原因<sup>4)</sup>となるので、順調に操業するためには羽口先での燃焼温度を管理することが必要である。

羽口先理論燃焼温度 ( $T_t$ ) は以下に示す RAMM の式によつた。

$$T_t = \{ (0.340 + 0.000498W_{H_2O} + 0.356V_{O_2}) \cdot T_b + 551 + 2625V_{O_2} - 1.576W_{H_2O} - 4.69W_{O_{II}} \} / (0.367 + 0.397V_{O_2} + 0.000693W_{H_2O} + 0.740W_{O_{II}})$$

ただし、 $T_t$  : 羽口先理論燃焼温度 [°C]

$W_{H_2O}$  : 送風湿分 [g/Nm<sup>3</sup>-Blast]

$V_{O_2}$  : 酸素添加率 [Nm<sup>3</sup>-O<sub>2</sub>/Nm<sup>3</sup>-Blast]

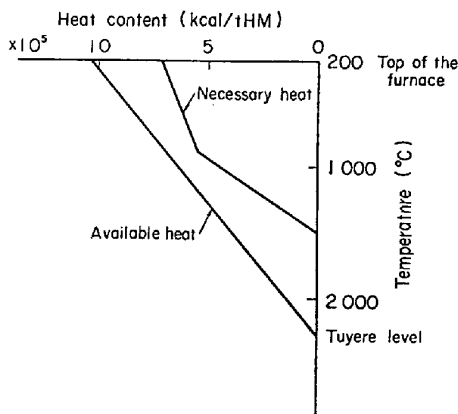


Fig. 5. Staged heat balance.

$W_{Oil}$ : 重油添加量 [kg/Nm<sup>3</sup>-Blast]

$T_b$ : 送風温度 [°C]

2.3.1 羽口先理論燃焼温度の下限について

REICHARDT の段階別熱精算<sup>5)</sup>によれば, Fig. 5 に示すように装入物は炉内を降下するにしたがい熱量を増し温度が上昇するが, それに対して常にガス温度がある程度高くなければ熱交換は不十分であり, 炉熱不足となつて反応が進まず炉冷または操業不可能になる. 順調に操業している高炉では, 900°C 付近に固体とガスとの温度差が最小になる点があり, その熱量差(熱余裕)を維持し装入物に必要なかつ十分な溶解温度に加熱するための熱量を与えるためには, 生成する鉄鉄トン当たりガス量と, 羽口先理論燃焼温度とを適当にバランスさせる必要がある. そこで, 各社高炉の実績より羽口先理論燃焼温度と鉄鉄トン当たりガス量の関係を調べてみると, Fig. 6 に示すようにまさしくどの高炉も適当にバランスさせて最適熱余裕をもたせて操業していることを示している. この図から, 福山第3高炉の羽口先理論燃焼温度の下限を推定してみると, 操業度 2.4~2.5tHM/m<sup>3</sup>・d の場合,

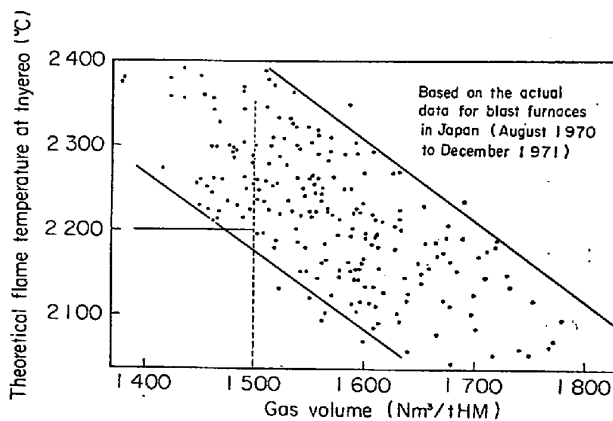


Fig. 6. Relationship between theoretical flame temperature at tuyeres and gas volume.

鉄鉄トン当たりガス量は 1470~1500Nm<sup>3</sup>/tHM であるので, 図に示してあるようにほぼ 2200°C であることが言える. しかしながら, 酸素富化を増すことによりさらに操業度を上昇させる場合は, 鉄鉄トン当たりガス量が減少するので羽口先理論燃焼温度の下限を 2200°C より上昇させる必要がある.

2.3.2 羽口先理論燃焼温度の上限について

羽口先理論燃焼温度を高めると melting zone の増加あるいは装入物中のアルカリ, SiO などの気化によつて通気性し阻害され, 棚吊り, スリップの原因になると言われており<sup>4)</sup>, 経験的に上限をもうけている. 福山高炉では今まで上限温度 2400°C を目標として操業し, 最高は 2420°C を経験しているが通気性の悪化, スリップなどは経験していない. これは福山において, 装入物中の粉コークス, 粉鉱, さらにはアルカリ類を極力除去したことによるものと思われる. 羽口先理論燃焼温度を高くすると, 熱流比の限界値 0.8 に近づき, 理論上の限界値は求められる. ここでは従来の操業経験から, 上限は 2400°C とするが, 羽口先燃焼理論を上げれば, 燃料比を低下させることが可能となるので今後検討の必要がある.

2.4 重油完全燃焼のための限界

コークスの代替燃料として重油を羽口から吹き込む場合, 羽口先において完全に燃焼して有効なエネルギー源とならなければコークスとの置換率は低下し, 重油吹き込みの効果は少なくなるばかりか, ススが発生し通気性を阻害し操業にも悪影響を及ぼす. いかにも羽口先で多量の重油を完全燃焼させるかは重油の最大吹き込み量の上限を決めるものであり, その方法については今後検討しなければならない重要な問題である. ここでは羽口よりサイドブロー方式によつて重油を吹き込む場合の最大吹き込み量について検討を行なつた.

酸素富化と重油吹き込みを併用すると酸素富化によつて送風中の酸素濃度が高まることによつて重油と酸素の反応性がよくなり, それによつて重油の燃焼性が増す. 重油が酸素富化によつてどの程度まで完全燃焼されるかを表わす数値として酸素過剰係数 ( $E_{XO}$ ) があるが, これは次式によつて表わされる.

$$E_{XO} = (1.440 \times 0.21 \times V / W_P + O_{XP}) / 2.192 \times OR$$

ただし,  $E_{XO}$ : 酸素過剰係数

$V$ : 送风量 [Nm<sup>3</sup>/min]

$W_P$ : 出鉄量 [tHM/d]

$O_{XP}$ : 酸素添加量 [Nm<sup>3</sup>/tHM]

$OR$ : 重油比 [kg/tHM]

2.192: 1 kg の重油を完全燃焼させるために必要

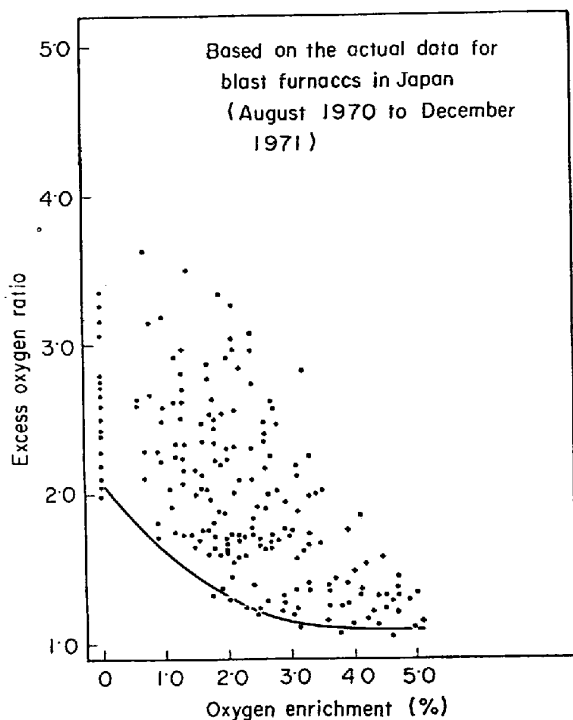


Fig. 7. Relationship between excess oxygen ratio and oxygen enrichment.

な酸素量 [Nm<sup>3</sup>/kg-oil]

ここで、Fig. 7 に他社高炉の実績から酸素過剰係数と酸素富化率の関係を示す。これから酸素過剰係数の限界を求めると、その限界は図に示す曲線で表わされる。これによれば、酸素過剰係数は重油完全燃焼のとき、理論的には1.0であるが、酸素富化率の増加にもかかわらず酸素富化率4.0%ではほぼ1.1で横ばい状態となり、これを重油完全燃焼の限界曲線とするとつぎの式で近似される。

$$O_x \leq 4.0 \text{ の場合 } E_{xO} = 0.0594(O_x - 4.0)^2 + 1.1$$

$$O_x \geq 4.0 \text{ の場合 } E_{xO} = 1.1$$

ただし、 $O_x$  : 酸素富化率 [%]

$E_{xO}$  : 酸素過剰係数

### 2.5 酸素富化および重油吹き込みの適正操作範囲の予測

以上述べてきた固体-ガスの熱交換からみた限界(熱流比の限界と装入物降下時間の限界)、羽口先理論燃焼温度の限界および重油完全燃焼のための限界を考慮して酸素富化および重油吹き込みの適正操作範囲を予測計算によつて推定した。Fig. 8 に第3高炉におけるシャフト反応効率を、0.864、送風流量 5900Nm<sup>3</sup>/min、送風温度 1170°C、送風湿分 5g/Nm<sup>3</sup> とした場合の適正操作範囲を示す。これによれば第3高炉の炉冷解析の項で述べたように、この条件の場合には操業度が 2.5tHM/m<sup>3</sup>・d と高

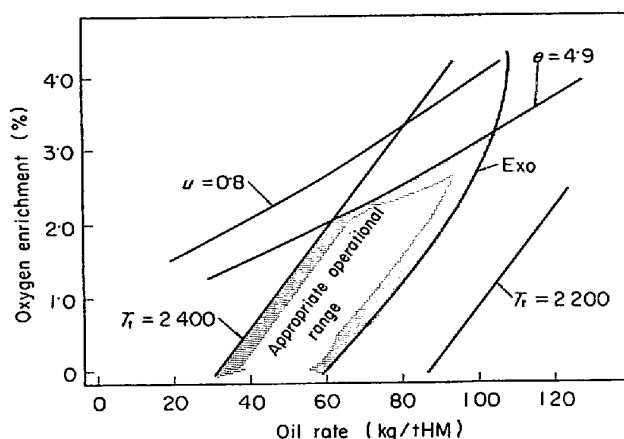


Fig. 8. Appropriate operational range for Fukuyama No 3 BF.

いために熱流比 0.8 の限界より装入物降下時間の限界 4.9 hr の方が、酸素富化率の低い範囲にあることがわかり、酸素富化率 3.0% では第3高炉の操業条件においては理論的に重油吹き込み量を 95~100 kg/tHM としなければならないことを示している。

### 3. 福山第2高炉の操業について

福山第2高炉は、昭和47年1月より酸素富化を重油吹き込みの併用操業を開始し、3月にはコークス比 381 kg/tHM を記録し、その後もコークス比 380~390 kg/tHM 台で安定した操業を行なっており、第3高炉の操業を解析して得た適正操作範囲の予測は操業に非常に役だつた。

#### 3.1 第2高炉の適正操作範囲

酸素富化操業の開始に先立ち適正操作範囲の予測を行ないこの結果を Fig. 9 に示す。第2高炉の操業条件は、送風温度 1200°C、送風湿分 5g/Nm<sup>3</sup>、操業度 2.0tHM/

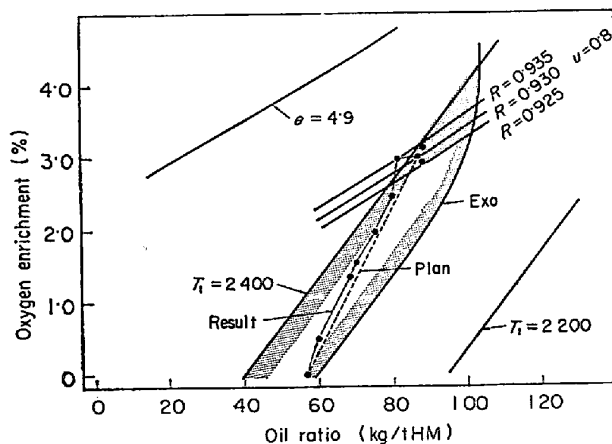


Fig. 9. Appropriate operational range and operational results for Fukuyama No 2 BF.

m<sup>3</sup>・dで行なつた。第3高炉の場合と違つて第2高炉は、酸素富化の増加にしたがつて送風量を減じ、操業度はほぼ2.0tHM/m<sup>3</sup>・d一定と低いために、酸素富化率の限界は装入物降下時間ではなく熱流比の限界0.8となつている。

Fig. 9に、操業計画および実績を示すがほぼ計画にしたがつて酸素1%につき重油10 kg/tHMの割合で増加した。重油比70~75 kg/tHMの時点でコークス比は400 kg/tHM以下となり、熱流比の限界0.8に近い重油比80 kg/tHM付近では一時的に炉熱の大幅な変動もあつたが意識的に重油を5~7 kg/tHM増加し、熱流比0.8の限界線から若干遠ざけたこと、炉頂圧を1.1→1.3 kg/cm<sup>2</sup>に上げることなどによつて対処し安定した操業を行なうことができた。

さらに、Fig. 10に第2高炉における最近の適正操業範囲を示す。操業条件は、シャフト反応効率0.93、送風流量5150Nm<sup>3</sup>/min、送風温度1180°C、送風湿分10g/Nm<sup>3</sup>でありこのときの操業度は2.6~2.7tHM/m<sup>3</sup>・dである。Fig. 10に示されるように高炉のそれぞれの操業条件によつて相違はあるが、現在の操業は第3高炉の装入物降下時間の限界4.9 hrを越え、熱流比の限界0.8に近づいている。今のところ順調な操業を続けているが、何か異常があれば重油を増すかあるいは若干操業度を下げるなどの対処が必要であることを示している。

このように適正操業範囲は、高炉ごとの原料状況、炉頂圧、送風温度などによつて若干異なるが操業していく過程において限界に近づいたときに前もつて注意を払うことができること、また炉況が不安定になつた場合はすぐ対処できる安定領域を前もつて知つて操業できること、すなわち操業者が現在の操業点を知つて操業できる

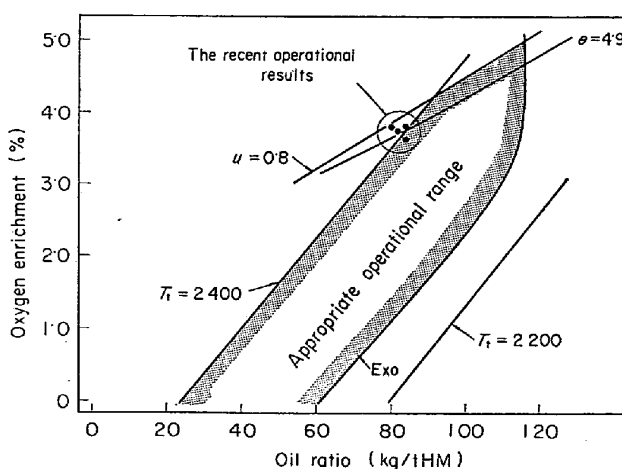


Fig. 10. Recent appropriate operational range and operational results for Fukuyana No 2 BF.

という利点があり、酸素富化を併用する重油吹き込み操業にとつて非常に有効である。

#### 4. 結 言

(1) 酸素富化を伴う重油吹き込み操業においては、a. ガスと固体の熱交換からみた限界、b. 羽口先理論燃焼温度の上限および下限、c. 重油完全燃焼のための限界について考慮しなければならないことが言われていた。しかしながら、これらの限界は必ずしも明確でなかつたので操業解析および理論から、これらの数値を明確化するとともに、第3高炉の操業解析結果から、ガスと固体間の熱交換からみた限界として熱流比のほかに装入物降下時間の限界も考慮しなければならないことを得た。

(2) 第2高炉で酸素富化を伴う重油吹き込み操業を開始する前に、前述の限界を考慮した適正操業範囲を予測計算によつて作成し、適正操業範囲にしたがつて操業を行なつたところ、昭和47年3月に酸素富化率2.5%でコークス比381 kg/tHM、重油比78 kg/tHMの好成績を得ることができた。さらにその後は操業度を上げて、昭和48年2月~4月には第1高炉改修のため、Siベースを上げたことによつて燃料比は上がつているが、酸素富化率3.8%、重油比80~85 kg/tHM、コークス比400~410 kg/tHM、操業度2.6~2.7tHM/m<sup>3</sup>・dの成績を得、適正操業範囲の考え方は非常に有効であることが立証された。

(3) 羽口先理論燃焼温度の上限は操業経験上2400°Cとしているが、羽口先燃焼温度を上げることができれば、燃料比低減は可能であり、上限温度をどの程度上げられるか検討の必要がある。

(4) 適正操業範囲は、高炉ごとの原料状況、装入分布、炉頂圧、送風温度などの操業条件によつて異なり一定したものではないので、高炉ごとの限界値をみつけ、さらにその限界値を越えるために原料の粒度および強度、装入分布あるいはガス分布などに意を払うことが必要である。

(5) 本報文では主に重油多量吹き込み操業について述べたが、今後は重油の値上がりにかんがみ低重油比、低燃料比、高酸素富化操業について検討する必要がある。

#### 文 献

- 1) 宮下, 大槻: 鉄と鋼, 57 (1971) 14, p. 2194
- 2) J. C. COCHERY: Rev. Metall., 21 (1967) 11, p. 945
- 3) J. MICHARD and Y. BOUDIER: Rev. Metall., 17 (1963) p. 513
- 4) A. D. GOTLIB (館訳): 高炉製鉄法の理論, p. 314
- 5) P. REICHARDT: Arch. Eisenhüttenw., 1 (1927) p. 96