

(21) ソリューション・レートに基くコークス比の考察と高炉操業への応用

八幡製鉄所, 戸畑製造所 深川 弥二郎  
 八幡製鉄本社, 生産管理部 山本 崇夫  
 八幡製鉄所, 戸畑製造所 No. 64/83  
 阿部 幸弘・○稲垣 憲利

A Study of Coke Rate Based on Solution Rate and Its Application to Blast Furnace Operation.  
 Yajiro FUKAGAWA, Takao YAMAMOTO,  
 Yukihiro ABE and Noritoshi INAGAKI.

I. 緒言

コークス比は高炉の最も重要な管理項目であるが、また解明もむづかしい。新しい操業条件が与えられると試験操業を行なうが、従来はコークス比の変化のみに着目したため他の要因の影響を分離できず、応用の狭い結論を出す場合が多かった。統計的に処理するだけでなく、高炉に関するモデルを組立てそれに基づいてコークス比の構成因子を分離し、それら個々の動きをとらえることにより新しい操業技術の効果を明確にし統一することができる。

高炉の操業は第一に熱的条件、次に酸化鉄を還元するための物的条件とから成立っている。必要とする炭素は化学量論的に求められるが、そのためには熱的条件を物的条件に変換せねばならない。その役割を果すものとしてソリューションレートを導入し、さらに日常の高炉操業への応用について考察した。

II. ソリューションレート, リダクションレートの定義と算出方法

ソリューションレートは炭素バランス, リダクションレートは酸素バランスを一分当りであり、さらに一分当り送風量で除した次式で算出する。単位は送風 1Nm<sup>3</sup> 当り kg である。

ソリューションレート:  

$$C' = A - 0.225 - D_1 - K_1 \dots\dots\dots (1)$$
 ただし,

- $A = 0.79/N_2 \cdot (CO + CO_2) 12/22 \cdot 4$   
 : 炉頂ガス中の全炭素 kg/Nm<sup>3</sup>
- $0.225 = 0.21 \times 2 \times 12/22 \cdot 4$   
 : 空気 1Nm<sup>3</sup> でもえる炭素 kg/Nm<sup>3</sup>
- $D_1 = M \cdot 12/18 \cdot 1/1000$   
 : 送風中湿分でもえる炭素 kg/Nm<sup>3</sup>
- $K_1$ : 石灰石イグニッションロス中炭素
- $N_2, CO, CO_2$ : 炉頂ガス成分%
- $M$ : 送風湿度 g/Nm<sup>3</sup>

リダクションレート:  

$$O' = B + X - 0.3 - D_2 - K_2' \dots\dots\dots (2)$$
 ただし,

- $B = 0.79/N_2 \cdot (CO + 2CO_2) 16/22 \cdot 4$   
 : 炉頂ガス中の炭素と結びついた酸素 kg/Nm<sup>3</sup>
- $0.300 = 0.21 \times 2 \times 16/22 \cdot 4$   
 : 空気 1Nm<sup>3</sup> 中の酸素 kg/Nm<sup>3</sup>
- $X$ : 炉頂ガス中の水素と結びついた還元された炭素 kg/Nm<sup>3</sup>

$D_2 = M \cdot 16/18 \cdot 1/1000$   
 : 送風湿分中の酸素 kg/Nm<sup>3</sup>  
 $K_2'$ : 石灰石イグニッションロス中の酸素

$K_1$  と  $K_2'$  の石灰石補正はやや面倒だが、(1) 式のガス化炭素バランスの他に全炭素のバランス式を連立させれば、コークス t 当り石灰石装入量から算出できるし、絶対値は小さいから近似計算も可能である。X は現在の分析方式では求められない。絶対値は小さいから仮定を設けて実績値から求めてもよい (後述)。

III. ソリューションレートとリダクションレートの関係—ガスの還元利用率の導入—

酸化鉄として装入される酸素は直接・間接および水素による還元をうける。その量を直接還元  $O'_d$ , 間接還元  $O'_i$ , 水素還元  $O'_h$  とすれば、 $O' = O'_d + O'_i + O'_h$  が成立つ。さらにこれらは次のようにならわされる。

$O'_d$ : 直接還元は  $FeO + C \rightarrow Fe + CO$  で示されるが、また  $FeO + CO \rightarrow Fe + CO_2$  と  $CO_2 + C \rightarrow 2CO$  の合成反応が含まれる。いずれも高温帯の反応で熱的に同一だから後者に統一し、ソリューションロス量に比例すると考えることができる。したがって、

$$O'_d = C' 16/12 \dots\dots\dots (3)$$

$O'_i$ : 間接還元帯に入る CO ガスは羽口前燃焼およびソリューションロスにより発生したもので、炭素重量で示すと  $C' + 0.225 + D_1$  である。この内還元と与る割合を  $\eta_{CO}$  とし還元利用率とすれば間接還元量は、

$$O'_i = \eta_{CO} (C' + 0.225 + D_1) \cdot 16/12 \dots\dots\dots (4)$$

$O'_h$ : 水素による還元は明確に把握できないのが普通である。ここでは羽口より入る水素のみが還元と与ると考える。その還元利用率を  $\eta_{H_2}$  とすれば、

$$O'_h = \eta_{H_2} \cdot D_2 \dots\dots\dots (5)$$

以上から  $O'$  は次のようにソリューションレートと還元利用率とにより示すことができる。

$$O' = 4/3 \cdot C' + 4/3 \cdot \eta_{CO} (C' + 0.225 + D_1) + \eta_{H_2} D_2 \dots\dots\dots (6)$$

IV. コークス比の構成因子

以上の指標を用いれば各種の操業関数を表示できる。銑鉄生成速度 (= 還元速度) =  $O' / [O] \cdot V$  t/min

コークス装入速度  
 =  $(C' + 0.225 + D_1 + O' [C] / [O]) / C_f \cdot V$  kg/min  
 ただし V は送風量 Nm<sup>3</sup>/min

の比をとればコークス比である。すなわち、  

$$CR = \frac{[O] (C' + 0.225 + D_1) + [C] O'}{C_f \{ 4/3 (1 + \eta_{CO}) C' + \eta_{CO} (0.3 + C') + \eta_{H_2} D_2 \}} \text{ kg/t} \dots\dots\dots (7)$$

- 上式よりコークス比を決めるのは化学量論的に、
1. 銑 t 当還元さるべき酸素量 [O] kg/t (Si, Ti などから還元されるものを含む)
  2. コークス中炭素 (% × 1/100)  $C_f$
  3. 送風湿度
  4. 銑中溶解炭素 [C] kg/t
  5. CO ガス還元利用率  $\eta_{CO}$
  6. H<sub>2</sub> ガス還元利用率  $\eta_{H_2}$
  7. ソリューションレート  $C'$

V. ソリューションレートの熱的意味

これまでは物的バランスをとつたが、高炉操業では熱

バランスがもう一つの条件である。物的バランスと同様に一分当りでバランスをとり送風量で除すと、

$$q_1 + C_{p1}T + C_{p2}TM + rO' / [O] = q_2M + q_3C' + pO' / [O] + q_4K + G + L' \dots (8)$$

ただし、

- $q_1$ :  $C + 1/2O_2 \rightarrow CO$  反応熱 kcal/Nm<sup>3</sup>air
- $q_2$ :  $H_2O + C \rightarrow H_2 + CO$  反応熱 kcal/g H<sub>2</sub>O
- $q_3$ :  $C + CO_2 \rightarrow 2CO$  反応熱 kcal/kg C
- $q_4$ :  $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$  分解熱 kcal/kg CaCO<sub>3</sub>
- $C_{p1}, C_{p2}$ : 空気, 湿分の比熱
- $r$ : 間接還元熱・鉄滓生成熱 kcal/t
- $p$ : 溶銑滓の融解熱・顕熱 kcal/t
- $K$ : 石灰石量 kg/Nm<sup>3</sup>air
- $G$ : 炉頂ガスの持去る熱 kcal/Nm<sup>3</sup>air
- $L'$ : 炉体放散熱
- $T$ : 送風温度 °C (なお  $q_1 \sim q_4$  は正で表示)

(8) 式の中で左辺第 3, 4 項, 右辺第 3, 4, 5 項は戸畑のように原料条件が安定し、吹製銑種が一定している場合その変化量は極めて小さい。戸畑 No. 1, 2, 3 高炉の火入れ以来のデータを解析した結果、70%以上の寄与率で次式が得られた。

$$q_2M + q_3C' = 0.874C_{p1}T + 20 \dots \dots \dots (9)$$

炉体放散熱は定数項と有意でなかつた。(9) 式は高炉の熱的条件が送風温度・送風湿度・ソリューションレートの三つで代表されることを示しており、また操業は(8)式を満足するように行なわれる。送風温度・湿度は設定しうる因子であるが、ソリューションレートはどのように考えたらよいただろうか。 $C'$  は O/C と同じとみることができる。すなわち炉下部より上昇する還元ガス量が一定でその還元利用率も一定のとき、シャフト部で間接還元される酸素量は一定となる。その状態で鉄石の装入速度を O/C の変更により増せば還元さるべき酸素の装入速度が増えることになり、その増加分は炉下部高温帯に降下してソリューションロス反応  $C'$  を増すことになる。送風温度など熱的に高炉に影響を与える要因は全て(8)または(9)式にしたがつて  $C'$  とバランスをとり、それはすなわち O/C の変化と結びついてコークス比の変化となる。熱的条件は(8), (9)式が満足されるように  $C'$  を変え物的条件に変換される。このように  $C'$  は熱的条件を物的条件に変える媒介の役割をもっている。

VI. 各操業要因のコークス比への影響

(7), (9) 式に戸畑の条件を入れてコークス比の変化を検討してみると次のようになる。

1. 送風温度

下表は 100°C によるコークス比の変化量であるが、 $\eta_{CO}$  および送風温度の高いほど変化量は小さく、次第に効果の落ちることがわかる。表の値はこれまで発表され

Blast temperature °C	700	800	900	1000	1100
$\eta_{CO}$	0.35	25*	22	20	17
	0.40	22	19	16	15
	0.45	19	16	14	14

\* Decrease of coke rate by increase of blast temperature of 100°C (kg/t)

ている実績解析値よりやや低目であるが、O/C の上昇で  $\eta_{CO}$  が変わる効果があると考えられる。

2. 送風湿度

10g/m<sup>3</sup> で 6~8kg/t のコークス比変化となる。

3. ガスの還元利用率

炉内における還元は、鉄石自身の被還元性と、炉内のガスとの接触状況によつて左右されるであろう。 $\eta_{CO}$  のコークス比への影響は送風温度や  $\eta_{CO}$  のレベルで異なるが、0.01 に対し 7~9kg/t の変化となる。 $\eta_{CO}$  は炉頂ガスの分析 ( $CO_2 / (CO + CO_2)$ ) に相当) から計算しうる。一般の高炉では 0.35~0.45 の範囲にあり、これはコークス比にして 70~90kg/t である。また戸畑の解析では焼結使用割合 10% により  $\eta_{CO}$  は 0.01~0.015 動くが、バラツキが極めて大きく現在の高炉操業では  $\eta_{CO}$  はほとんど管理されていない。 $\eta_{CO}$  のコークス比への影響は極めて大きく、この改善に力を注がねばならない。

$\eta_{H_2}$  については明確な解析手段がなく日常の管理がむづかしい。戸畑における羽口より入る H<sub>2</sub> と炉頂から出る H<sub>2</sub> との回帰直線の勾配から 0.425 程度と推定されている。

4. 重油吹込み

この場合(7), (9) 式は次のように変えねばならない。

$$CR = \frac{[O](C' + 0.225 + D_1 - \textcircled{C}) + [C]O'}{C_f \{4/3 \cdot (1 + \eta_{CO})C' + \eta_{CO} \times (0.3 + D_2) + \eta_{H_2}(D_2 + 8\textcircled{H})\}} \dots \dots \dots (10)$$

$$q_2M + q_3C' + q_5F = 0.874C_{p1}T + 20 \dots \dots \dots (11)$$

ただし、

- $F$ : 重油濃度 kg/Nm<sup>3</sup>air
- $\textcircled{C}$ : 重油中 C %  $\times 1/100$
- $\textcircled{H}$ : 重油中 H %  $\times 1/100$
- $q_5$ :  $C_nH_m \rightarrow nC + m/2 \cdot H_2$  の分解熱 kcal/kg

重油分解熱  $q_5$  は実験によつて求めることは難しい。300~500 kcal/kg の値を用いているところが多いようである。(11) 式を逆に利用して戸畑 No. 3 高炉の重油吹込操業より  $q_5$  を推定した結果、約 800 kcal/kg となりかなり大きいようである。

(10) 式によりコークス比を計算すると代替率は  $\eta_{CO}$  により異なるが約 1.2~1.3 になる。従来の操業実績では 1.0 以下から 1.8 以上の広い範囲の代替率が報告されているが、これは送風温度、湿度、 $\eta_{CO}$  などの効果が含まれているため、化学量論的に考えて重油そのものの代替率はほぼ一定と考えるのが妥当である。

5. 酸素富化

以上にあげた等式は全て空気中 O<sub>2</sub>=21% として求めたものである。酸素富化の場合には羽口に入る O<sub>2</sub> Nm<sup>3</sup> 当りでバランスをとる必要がある。コークス比への影響に関しては酸素富化によつて熱的条件(炉頂ガス顕熱)の変化が多少考えられる程度であり、むしろ  $\eta_{CO}$  の変化による間接的な効果が試験操業で確認さるべきである。

VII. 日常操業への応用

(9) 式は一定の熱的条件(以下熱レベルという)すなわち [Si] を 0.5% 程度に還元するような状態のもとに得られた式である。Si の還元は炉内の熱の状態を示す。すなわち熱レベルによつて Si の還元は大きな影響を受

けるであろう。(9) 式のバランスがくずれたとき、(9) 式が成立するようにアクションをとらないと熱レベルが変り、[Si] の値は変化するのである。今、

$$\Delta = mC_p T - q_2 M - q_3 C' \dots\dots\dots (12)$$

であらわす  $\Delta$  は熱レベルを示す意味をもつであろう。戸畑の場合  $m = 0.874$  (注、理論的には 1 となるべきであると考えられるが、熱伝達などの要素を入れて検討する必要がある) であり、 $\Delta = -20$  で転炉鉄吹製に適した熱レベルとなつていゝと考えられる。(12) 式の中で  $M$  および  $T$  は操業において指定しうる値であるから  $\Delta$  の変化は  $C'$  によつて起る。 $C'$  は炉頂ガス分析から直接計算することもできるが、その意味を考へてみると、炉頂より装入された還元されるべき酸素の内間接還元および水素還元された分を除いて、炉下部高温帯にいたつて還元される酸素量と同等であり次式で示すことができる。

$$\begin{aligned} C' &= 12/16 \cdot O_D' \\ &= 12/16 \cdot (O^* - O_i' - O_h') \\ &= 3/4 \cdot O^* - \eta_{CO}(A - K_1) - \eta_{H_2} D_1 \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

ただし  $O^*$ : 還元さるべき酸素の装入速度  
 $O^*$  は鉱石中の還元すべき酸素の割合がわかれば、 $O/C$  とコークス装入速度より求められる。(13) 式の中で高炉にとり最も重要でありながら管理されていないのが、 $\eta_{CO}$  である。 $\eta_{CO}$  の変動によつて  $C'$  が変動し、高炉の熱レベルは刻々と変化しているのである。

このように炉頂ガス分析値により炉内の状況はかなり把握できる。羽口前で発生したガスは 2~4 秒で炉内を通過するので情報の伝達速度が早く、今後の高炉操業、特に自動制御のループに利用できるだろうと考えている。現在熱レベル  $\Delta$  と [Si] との関係を確認すべく努力しているが、実際面の問題として炉頂ガスの適確なサンプリングと連続分析の技術が必要であり、また [Si] は出鉄ごとの分析という避けられないオクレやムダ時間があることが解析を困難にしている。

VIII. 結 言

1. ソリューションレートの導入により熱的条件を物的条件に変換しうるようになり、コークス比の解明が容易となつた。
2. 戸畑の実績からソリューションレートに基づき各種操業要因のコークス比への影響を算出した。
3. ソリューションレートを含む熱レベル式を想定し、炉頂ガス分析に基づく日常操業管理の方針を示した。

669, 162, 275, 124, 2, 669, 162, 26  
 (22) 鑄物用鉄吹製時の成分管理につ  
 いて No. 64184

富士製鉄, 釜石製鉄所  
 理博 青木 猪三雄・沢 村 惇  
 星出 雄二・○泉 碩 純

The Control of Chemical Compositions on Smelting of Foundry Pig Iron in Blast Furnace.

Dr. Isao AOKI, Jun SAWAMURA  
 Yuji HOSHIIDE and Sekijun IZUMI.

I. 結 言 77/609~611

高炉において鑄物用鉄吹製の場合、最も重要なのは、その含有化学成分の管理である。鉄鉄中の化学成分の管理の方法は各成分についてことなつており、一概に結論づけられない。すなわち、つぎの 3 つのグループにわけて考える必要があると思う。

- (1) 高炉ではほとんど管理不可能のもの……C
- (2) 装入物によりおのずから規制されるもの(全量鉄鉄中に入ると思われるもの……P, Cu その他微量元素)
- (3) 高炉操業技術により管理されるもの……Si, S, Mn, Ti その他

高炉操業技術としてはこのうち(3)がもつとも問題となる。さらに S, Mn, Ti は高炉装入量と鉄鉄中への歩留りによつてある程度の規制を受けるので、操業による規制はさほど困難な点は認められないのであるが、Si% の管理は、これが鉄種を決定するうえでの主要元素でもあり、もつとも苦労している点である。釜石製鉄所において鑄物用鉄吹製時に問題となる鉄中 Si% の変動およびその管理方法について、実績をもとに各種の要因解析を行なつたので報告する。なおデータは最近継続して鑄物用鉄を吹製している第 1 高炉のものを使用した。

釜石第 1 高炉: 火入れ S 33 年 11 月 18 日  
 内容積 1018m<sup>3</sup>  
 総出鉄量 230万 t

II. 各種操業要因の鉄中 Si% に与える影響

1. 各種操業要因が変化しない炉況安定時  
 炉況が安定して、送風量の変更、棚吊り、休風、その他大巾な操業要因の変動が介入しないときは、送風温度  $\pm 30^\circ C$  位動かすことによつて鉄中 Si% は管理限界内にあることが認められる。(Fig. 1)

当所における過去の実績でみると鉄中 Si% とコークス比の関係は Fig. 2 のようになつていゝ。すなわち、鉄中 Si 1.00% の変化によりコークス比は約 70kg 変化することになる。

2. 各種要因の鉄中 Si% に与える影響について  
 鑄物用鉄において鉄中 Si% の管理を行なう場合、これに影響する各種の要因があるが、ここではこれらの要因が特に顕著に表われて、鉄中 Si% が大きく変動したのものについて考察を行なつてみる。ここでとりあげた要因は下記のものであるが、これらの要因は単独でなく、相互に若干交絡しあつていゝことは当然である。

- (a) 送風量の変化 (b) 休風の影響