

(54) 重油置換率についての一考察

川崎製鉄, 技術研究所 No. 642/16
佐々木健二・安藤博文・榎谷暢男

A Method of Calculation of an Oil Per
Coke Replacement in Blast Furnace
Practice.

pp 1690~1692
Kenji SASAKI, Hirobumi ANDŌ and
Nobuo TSUCHIYA.

I. 結 言

重油の置換率を理論的計算からではなく、重油吹込み前後の高炉操業の比較から求めることはすでに数多く行われてきたが、この方法には操業状態の変動、装入物の特性の変化などの点で多くの問題点があることは論じられているところである¹⁾。また最近、理論的方法として炭素精算から重油置換率を算出する方法が報告されている²⁾。

本報では炭素精算および熱精算の立場から理論的考察を行なった結果について述べるが、重油置換率は酸化鉄中酸素量、送風温度、衝風中酸素含有量、コークス中有効炭素量、重油中炭素および水素含有量、CO ガス利用率、H₂ ガス利用率に依存することが明らかとなった。

II. 理論的考察

仮想炉を設定して高炉の問題を考えることはしばしば行なわれることであるが²⁾、本報告でも仮想炉について考察し、さらに実際炉の場合についても考察する。はじめに、本報告で用いる記号の意味を列記しておく。

- O_T(kg/t-Fe): 鉄鉱石中の酸化鉄の酸素量
- V(kg/t-Fe): 羽口よりの衝風量
- C(kg/t-Fe): 装入コークス量 (装入炭素量)
- C_a(kg/t-Fe): Si, Mn, P の還元に必要な炭素量
- C_b(kg/t-Fe): ダスト中の炭素量
- C_c(kg/t-Fe): 銑鉄中に溶解する炭素量
- X(kg/t-Fe): 吹込み重油量
- x(g/kg): 衝風中湿分
- O_H(kg/t-Fe): 重油中の水素で奪われる酸化鉄中の酸素量
- O_h(kg/t-Fe): 衝風中湿分分解によつて生成した水素によつて奪われる酸化鉄中の酸素量
- α (%/100): 重油中炭素パーセント/100
- β (%/100): 重油中水素パーセント/100
- γ (%/100): コークス中炭素パーセント/100
- δ (%/100): 衝風中酸素パーセント/100
- η_{CO}: CO ガス利用率 CO₂/(CO+CO₂)
- η_{H₂}: H₂ ガス利用率 H₂O/(H₂+H₂O)
- Q₁(kcal/kg-C): CO ガス生成熱
- Q₂(kcal/kg-Fe): 酸化鉄の CO による還元熱
- Q₃(kcal/t-Fe): 銑洋生成熱
- Q₄(kcal/kg-C): ソリューション・ロス反応熱
- Q₅(kcal/kg-Fe): 酸化鉄の H₂ による還元熱
- Q₆(kcal/t-Fe): Si, Mn, P の還元熱
- Q₇(kcal/t-Fe): 溶銑頭熱
- Q₈(kcal/t-Fe): 溶滓頭熱
- Q₉(kcal/t-Fe): 衝風中湿分分解熱

- Q₁₀(kcal/t-Fe): 石灰石分解熱
- C_p(kcal/kg・°C): 衝風の比熱
- E(kcal/kg): 重油の分解熱
- H(kcal/t-Fe): 炉頂ガスの顕熱および伝熱、冷却水などによる炉全体の熱損失

a) 仮想炉における考察

仮想炉は次のように設定する。すなわち、装入物は酸化第二鉄および純炭素とし、生成する鉄は純鉄、羽口から吹込まれるものは純酸素および重油とする。仮想炉内での生成鉄トンあたりの各反応量を用いて炭素精算を行なうと次のとおりになる。

- 羽口先で衝風中酸素で燃える炭素……3/4V
- CO による間接還元に必要な炭素……(C+αX)η_{CO}
- 間接還元で奪われる酸素……4/3(C+αX)αXη_{CO}
- 水素による還元で奪われる酸素……8β・X・η_{H₂}
- 直接還元で奪われる酸素……O_T-4/3(C+αX)η_{CO}
-8β・X・η_{H₂}
- 直接還元に必要な炭素……3/4O_T-(C+αX)η_{CO}
-6β・X・η_{H₂}

したがって次式が成立する

$$C + \alpha X = 3/4V + 3/4O_T - (C + \alpha X)\eta_{CO} - 6\beta \cdot X \cdot \eta_{H_2} \quad (1)$$

(1)式をCについて解くと、

$$C = \{3/4(V + O_T)/(1 + \eta_{CO})\} - [\alpha(1 + \eta_{CO}) + 6\beta \cdot \eta_{H_2}]X/(1 + \eta_{CO}) \quad (2)$$

ここで重油を吹込まない場合の装入炭素量は吹込前後において η_{CO} 一定とすると、3/4(V+O_T)/(1+η_{CO})となり、したがって吹込前後の衝風量を一定とすれば炭素精算から得られる重油置換率の式は、α + {6βη_{H₂}/(1+η_{CO})} となる。

以上は炭素精算から置換率を検討したわけであるが、重油吹込みにより炉内反応が変化しそれに伴ない熱収支も変化し、また衝風量Vも当然変化するものと考えられる。

したがって、これは熱精算から考察する必要がある。熱精算においては直接還元をソリューション・ロスとして計算し、また衝風温度を t°C とする。熱量はすべて生成鉄トンあたりの値である。

[入熱]

- 羽口先で衝風中酸素で燃える炭素の発熱量……Q₁3/4V
- 酸化鉄の間接還元熱……1000Q₂(1-O_H/O_T)
- 衝風頭熱……V・t・C_p
- 装入物頭熱および重油頭熱は小さいので省略する。
- 入熱計 = 3/4・Q₁・V + 1000Q₂(1-O_H/O_T) + V・t・C_p ……(3)

[出熱]

- ソリューション・ロス反応熱……Q₄{3/4O_T-(C+αX)η_{CO}-6β・X・η_{H₂}}
- 水素による直接還元熱……1000Q₅・O_H/O_T
- 溶鉄の顕熱……Q₇
- 重油分解熱……E・X
- 炉頂ガス顕熱および伝熱、冷却水などによる炉全体の熱損失…H(重油吹込み前後において変化はないとする。)
- 出熱計 = Q₄{3/4O_T-(C+αX)η_{CO}-6β・X・η_{H₂}} + 1000Q₅・O_H/O_T + Q₇ + EX + H ……(4)

(3)=(4)から

$$V = [3/4Q_4 \cdot O_T - Q_4 \cdot C \cdot \eta_{CO} - Q_4 \cdot \alpha \cdot X \cdot \eta_{CO} - 6Q_4 \cdot \beta \cdot X \cdot \eta_{H_2} + \{1000 \cdot O_H(Q_2 + Q_5)/O_T\} + Q_7 - 1000Q_2 + EX + H] / (3/4Q_1 + t \cdot C_P) \dots (5)$$

(5)を(1)に代入して変形すると、

$$C = \{ [9/4O_T(Q_1 + Q_4) + 3(Q_7 - 1000Q_2 + O_T \cdot t \cdot C_P + H)] - \{ (3Q_1 + 4t \cdot C_P) + (3Q_4 + 3Q_1 + 4t \cdot C_P) \cdot \eta_{CO} \} \alpha \cdot X - 6 \{ 3(Q_1 + Q_4) + 4(t \cdot C_P - 1000(Q_2 + Q_5)/O_T) \} \beta \cdot X \eta_{H_2} + 3EX] / \{ (3Q_1 + 4t \cdot C_P) + (3Q_1 + 3Q_4 + 4t \cdot C_P) \eta_{CO} \} \dots (6)$$

重油を吹込まぬ場合も同様に

$$C' = \{ 9/4O_T(Q_1 + Q_4) + 3(Q_7 - 1000Q_2 + O_T \cdot t \cdot C_P + H) \} / \{ (3Q_1 + 4t \cdot C_P) + (3Q_1 + 3Q_4 + 4t \cdot C_P) \eta_{CO} \} \dots (7)$$

を得る。したがって、重油置換率はEを含む項は小さいの省略すると、

$$\alpha + \frac{6\beta \cdot \eta_{H_2} + [\{ 3Q_4 - (4000(Q_2 + Q_5)/O_T) \} / (3Q_1 + 4t \cdot C_P)] 6\beta \cdot \eta_{H_2}}{1 + \eta_{CO} + \{ 3Q_4 / (3Q_1 + 4t \cdot C_P) \} \eta_{CO}} \dots (8)$$

(8)式から仮想炉での重油置換率は酸化鉄中の酸素量、衝風温度、重油中炭素および水素含有量、 η_{CO} 、 η_{H_2} に依存することがわかった。置換率は衝風温度にも左右されることが明らかとなったので重油吹込み前の温度を T_0 、吹込み後は $T_0 + T_n$ に上昇したとして(6)、(7)式を基礎にして置換率を検討してみると、

$$\begin{aligned} & \text{装入炭素減少量} = \\ & \frac{9/4O_T(Q_1 + Q_4) + 3(Q_7 - 1000Q_2 + O_T \cdot T_0 \cdot C_P + H)}{(3Q_1 + 4T_0 \cdot C_P) + \{ 3(Q_1 + Q_4) + 4T_0 \cdot C_P \} \eta_{CO}} \\ & - \frac{9/4O_T(Q_1 + Q_4) + 3 \{ Q_7 - 1000Q_2 + O_T(T_0 + T_n) C_P + H \}}{\{ 3Q_1 + 4(T_0 + T_n) C_P \} + \{ 3(Q_1 + Q_4) + 4(T_0 + T_n) C_P \} \eta_{CO}} \\ & + \alpha X + \frac{6\beta \eta_{H_2} [\{ 3(Q_1 + Q_4) + 4 \{ T_0 + T_n \} C_P - 1000(Q_2 + Q_5)/O_T \}] X}{\{ 3Q_1 + 4(T_0 + T_n) C_P \} + \{ 3(Q_1 + Q_4) + 4(T_0 + T_n) C_P \} \eta_{CO}} \dots (9) \end{aligned}$$

(9)式の右辺の1、2、3および4項について考察すると、1、2項は温度上昇のみによる装入炭素減少量を表わし、3、4項は温度上昇を伴った重油吹込みによる装入炭素減少量を表わす。したがって重油吹込みによる装入炭素減少量は3、4項をもつて示すべきであるが、重油吹込み前後の実操業データを用いての比較による置換率の検討では、重油吹込み後に衝風温度を上昇させた場合の装入炭素減少量には1、2項および3、4項が交絡して現われてくる。この理由から理論値を実操業値と比較する場合には(9)式全体をXで割った値を重油置換率としたほうがよい。ところで重油吹込み前後において衝風温度に変化はないが、衝風温度の異なった条件下での置換率の相違を検討してみると次のようになる。ただし $\eta_{CO} = 40\%$ 、 $\eta_{H_2} = 40\%$ と仮定して計算する。

送風温度(°C)	500	900	1000	1100
置換率	1.152	1.149	1.148	1.148

したがって、衝風温度の相違による置換率にはほとんど変化は認められない。この結果から重油吹込み後に衝風

温度を上昇させた場合のコークス比の減少は衝風温度上昇による効果が大部分であると結論される。ただし、これはあくまでも η_{CO} 、 η_{H_2} が一定という仮定のもとに比較した際の結論である。

b) 実際高炉における考察

仮想炉の場合と同様に考察をする。炉内における各反応量を用いて炭素精算を行なうと次の通りである。

- 羽口先で衝風中の酸素で燃える炭素…… $3/4\delta V$
- 間接還元に要する炭素…… $(\gamma C + \alpha X) \eta_{CO}$
- 間接還元で奪われる酸素…… $4/3(\gamma C + \alpha X) \eta_{CO}$
- 水素による還元で奪われる酸素…… $(8\beta \cdot X + 8xV/9000) \eta_{H_2}$

直接還元で奪われる酸素……

$$O_T - 4/3(\gamma C + \alpha X) \eta_{CO} - (8\beta \cdot X + 8x \cdot X + 8xV/9000) \eta_{H_2}$$

直接還元に要する炭素……

$$3/4O_T - (\gamma C + \alpha X) \eta_{CO} - 6(\beta \cdot X + xV/9000) \eta_{H_2}$$

したがって

$$C = [3/4O_T + C_a + C_b + C_c + \{ 3/4\delta - (x \cdot \eta_{H_2} / 1500) \} V] / \{ \gamma(1 + \eta_{CO}) \} - \{ (1 + \eta_{CO}) \alpha X + 6\beta \cdot \eta_{H_2} \cdot X \} / \{ \gamma(1 + \eta_{CO}) \} \dots (10)$$

重油を吹込まない場合のコークス比は(10)式の石辺第1項で表わされるから、重油吹込み前後でVが一定かつ η_{CO} も一定とすると、重油置換率は、 $(\alpha/\gamma) + \{ 6\beta \cdot \eta_{H_2} / \gamma(1 + \eta_{CO}) \}$ となる。 $\gamma = 0.88$ 、 $\alpha = 0.86$ 、 $\beta = 0.12$ としておのおのの η_{CO} 、 η_{H_2} に対する置換率をTable 1に示す。

実際炉においても仮想炉と同様、重油吹込みによつて衝風量Vは変化するので熱精算によつてVを決定しなければならない。ここでも直接還元をソリューション・ロスとして計算する。ただし、重油吹込み前後における鉄滓量の変化、石灰石量の変化および衝風中湿分の変化量は無視する。衝風湿度はt°Cとする。

[入熱]

$$\text{羽口先で衝風中酸素で燃える炭素の発熱量} \dots \dots \dots 3/4\delta \cdot V \cdot Q_1$$

酸化鉄の間接還元熱……

$$1000[1 - \{ 8(\beta X + xV/9000) \eta_{H_2} / O_T \}] Q_2$$

衝風頭熱…… $V \cdot t \cdot C_P$

鉄滓生成熱…… Q_3

装入物頭熱および重油頭熱は省略する。

[出熱]

ソリューション・ロス反応熱……

$$\{ 3/4O_T - (\gamma C + \alpha X) \eta_{CO} - 6(\beta X + xV/9000) \eta_{H_2} \} Q_4$$

水素による酸化鉄の還元熱……

$$1000(8\beta X + 8xV/9000) \eta_{H_2} \cdot Q_5 / O_T$$

Si, Mn, Pの還元熱…… Q_6

Table 1. Replacement coefficient.

η_{CO}	η_{H_2}	35%	40%	45%	50%
		35%	1.19	1.22	1.25
40%		1.18	1.20	1.24	1.27
45%		1.17	1.20	1.23	1.26
50%		1.17	1.19	1.23	1.25

溶銑頭熱…… Q_7
 溶滓頭熱…… Q_8
 衝風中湿分分解熱…… Q_9
 石灰石分解熱…… Q_{10}
 重油分解熱…… $E \cdot X$
 炉頂ガス頭熱および伝熱、冷却水などによる炉全体の熱損失…… H (重油吹込み前後において変化なしとする.)

入熱計=出熱計と置いて V についてまとめると、

$$V = [3/4 Q_4 \cdot O_T - Q_4 (\gamma C + \alpha X) \eta_{CO} + \{ (8000(Q_2 + Q_5) / O_T) - 6Q_4 \} \beta \cdot X \cdot \eta_{H_2} + (Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10} - Q_3) - 1000Q_2 + EX + H] / [L] \dots\dots\dots (11)$$

 ただし、 $L = 3/4 \delta Q_1 + t \cdot C_P + [(Q_4 / 1500) - \{ 8(Q_2 + Q_5) / 9O_T \}] x \cdot \eta_{H_2}$ である。

(11) 式を (10) 式に代入してまとめると、

$$\begin{aligned} & \gamma C \left[[L] + \left\{ [L] + \left(\frac{3}{4} \delta - \frac{x}{1500} \eta_{H_2} \right) Q_4 \right\} \eta_{CO} \right] \\ & = \left[\left(\frac{3}{4} \delta - \frac{x}{1500} \eta_{H_2} \right) \left\{ \frac{3}{4} Q_4 \cdot O_T + (Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10} - Q_3) - 1000Q_2 + H \right\} \right. \\ & \quad \left. + \frac{3}{4} O_T [L] + (C_a + C_b + C_c) [L] \right] - [[L] + \{ [L] + \left(\frac{3}{4} \delta - \frac{x}{1500} \eta_{H_2} \right) Q_4 \} \eta_{CO}] \alpha X - 6\beta \\ & \quad \cdot \eta_{H_2} \left[[L] - \left(\frac{3}{4} \delta - \frac{x}{1500} \eta_{H_2} \right) \left\{ \frac{4000}{30T} (Q_2 + Q_5) + Q_4 \right\} \right] X + \left(\frac{3}{4} \delta - \frac{x}{1500} \eta_{H_2} \right) EX \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

重油吹込みを行なわない場合も同じようにして、

$$\begin{aligned} & \gamma C' \left[[L] + \left\{ [L] + \left(\frac{3}{4} \delta - \frac{x}{1500} \eta_{H_2} \right) Q_4 \right\} \eta_{CO} \right] \\ & = \left(\frac{3}{4} \delta - \frac{x}{1500} \eta_{H_2} \right) \left\{ \frac{3}{4} Q_4 O_T + (Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10} - Q_3) - 1000Q_2 + H \right\} + \frac{3}{4} O_T [L] \\ & \quad + (C_a + C_b + C_c) [L] \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

(11), (12) および (13) 式において E を含んだ項および x を含んだ項は他の項に対して無視し得るので、それらの項を除いて重油置換率を求めると

$$\frac{\alpha}{\gamma} + \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{6\beta \cdot \eta_{H_2} + [3\delta Q_4 - \delta \{ 4000(Q_2 + Q_5) / O_T \}] / [3\delta \cdot Q_1 + 4t \cdot C_P]}{1 + \eta_{CO} + \{ 3\delta Q_4 / (3\delta Q_1 + 4t \cdot C_P) \} \eta_{CO}}$$

(14) 式から重油置換率はコークス中有効炭素量、重油中炭素および水素含有量、衝風温度、衝風中酸素含有量、酸化鉄中の酸素量、 η_{CO} 、 η_{H_2} に依存することがわかる。(14) 式中 $Q_1 = 2430$, $Q_4 = 3240$, $C_P = 0.258 (900^\circ C)$, $\alpha = 0.86$, $\beta = 0.12$, $\gamma = 0.88$, $\delta = 0.23$ とし、 Q_2 ,

Table 2. Replacement coefficient.

η_{CO} \ η_{H_2}	35%	40%	45%	50%
35%	1.263	1.304	1.345	1.386
40%	1.248	1.287	1.325	1.364
45%	1.234	1.271	1.308	1.344
50%	1.222	1.257	1.292	1.327

Q_5 および O_T については実績値として千葉第 3 高炉 38 年 2 月~4 月の値を用いて各 η_{CO} , η_{H_2} についての置換率を求めると Table 2 のようになる。

Table 2 より送風温度 $900^\circ C$ 一定における重油置換率は $1.2 \sim 1.4$ ということになる。なお、千葉第 3 高炉において 38 年 4 月に重油吹込みを行ない、物質精算、熱精算および重回帰分析によつて置換率を求めたところ約 1.24 であった。

この時の η_{CO} , η_{H_2} はそれぞれ 41.7% および 40.4% であり、送風温度は $830^\circ C$ であった。この点を考慮する理論計算による結果と実操業値とは近似的に一致しているといえる。さらに Table 2 から置換率は η_{H_2} が大きいほど、また η_{CO} が小さいほど良好になるという結論が得られた。

III. 結 言

- 1) 重油置換率を計算する場合には炭素精算と同時に、熱精算も考察する必要がある。
- 2) 重油置換率は酸化鉄中酸素量、衝風温度、コークス中有効炭素量、重油中炭素および水素含有量、衝風中酸素含有量、 η_{CO} , η_{H_2} に依存する。
- 3) 重油吹込みを行なう際に、送風温度上昇を行なった場合には、コークス比の低下が送風温度上昇の効果と重油吹込みによる効果とが交絡したものと現われることに注意をばらう必要がある。
- 4) 重油吹込み前後での送風温度には変化はないが、送風温度を変えた操業条件下での重油置換率には η_{CO} , η_{H_2} が一定という仮定においては、変化がほとんど認められない。
- 5) 送風温度 $900^\circ C$ という一定条件下での重油置換率は $1.2 \sim 1.4$ である。
- 6) 重油置換率は、 η_{H_2} が大きいほど、また η_{CO} が小さいほど良好になる。

文 献

- 1) 中谷文忠, 他: 鉄と鋼, 50 (1964) 3, p. 373
- 2) 第 14 回製鉄部会神戸製鋼所資料 鉄 14-11-4b
- 3) B F I 委員会第 2 回技術研究会資料 B F I 研一 2-17-1