

この間の関係を計算し実績との対比を行なつたが比較的一致している。

上述の結果から今後もこのような炉内状況の調査を継続するつもりである。

文 献

1) V. I. LOGINOV & A. N. CHECHURO: Stal (1963), July., p. 503~506

669.162.263.234:669.162.275.3

(20) 直接還元率と炉頂ガス比との関連についての考察 10.6482

(溶鉱炉操業の改良に関する研究—V)

住友金属工業, 中央技術研究所  
鹿子木立郎・工博 中谷文忠・○中村文夫

Consideration on Relations between Rate of Direct Reduction and Top Gas Ratio.

(Studies on the improvement in blast furnace practice—V)

Tatsuro KANOKOGI, Dr. Fumitada NAKATANI, and Fumio NAKAMURA.

I. 結 言

前報<sup>1)</sup>において、従来発表されたコークス比の理論を批判し、新しいコークス比の理論を体系づけた。すなわち、溶鉱炉操業におけるコークス比(カーボン比)をXとすれば、

$$X = n(1 + \gamma)(1 - D \cdot R) \dots\dots\dots (1)$$

なるマス・バランス的条件を満足しており、かつ溶鉱炉操業が可能なのは、(1)式に平衡論的条件および熱バランス的条件による制限を付す必要を明らかにした。

次の Fig. 1 は溶鉱炉操業が可能に必要な、かつ十分条件を具備したときの炭素比曲面を示すものである。

溶鉱炉操業の各操業点はこの炭素比曲面上において移動する訳であつて、もし操業諸元が変化し、直接還元率(D.R)または炉頂ガス比(\gamma)のいずれか一方、あるいは両者とも変化した場合のコークス比は操業諸元を変更しない場合に比べるとどのようなか? これについては前報<sup>1)</sup>で、一応作図的に示したが、本報では今少し具体的な数値を示して、活用上の便益を計らんとした。

II. 炉頂ガス比と直接還元率の炭素比におよぼす影響

溶鉱炉操業における平衡論的制限および熱バランス的制限内で、今直接還元率の微小変化 dD.R および炉頂ガス比の微小変化 d\gamma を受けたときの炭素比の変化量は、

$$X = n(1 + \gamma)(1 - D \cdot R) \dots\dots\dots (1) \text{ 式より}$$

n = const とすると、

$$dX = \left(\frac{\partial X}{\partial \gamma}\right)_{D.R} d\gamma + \left(\frac{\partial X}{\partial D.R}\right)_{\gamma} dD.R \dots\dots\dots (2)$$

ここで  $(\partial X / \partial \gamma)$  は直接還元率一定の場合に炉頂ガス比の変化による炭素比の変化割合を示し、 $(\partial X / \partial D.R)$  は炉頂ガス比一定の場合に直接還元率の変化による炭素比の変化する割合を示すものである。

(1) 式より、

$$\left(\frac{\partial X}{\partial \gamma}\right)_{D.R} = n(1 - D \cdot R_i) \dots\dots\dots (3)$$

$$\left(\frac{\partial X}{\partial D.R}\right)_{\gamma} = -n(1 + \gamma_i) \dots\dots\dots (4)$$

装入物が純 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> のみと仮定すれば n = 1.5 ゆえ (3)、

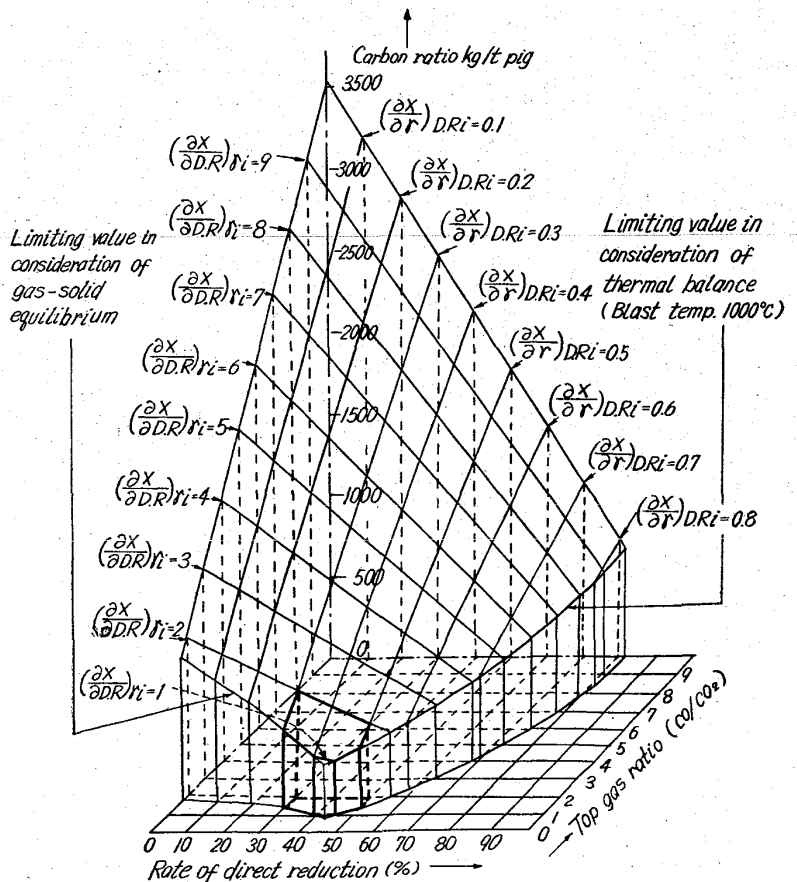
(4) 式は、

$$\left(\frac{\partial X}{\partial \gamma}\right)_{D.R} = 1.5(1 - D \cdot R_i) \dots\dots\dots (3)'$$

$$\left(\frac{\partial X}{\partial D.R}\right)_{\gamma} = -1.5(1 + \gamma_i) \dots\dots\dots (4)'$$

溶鉱炉の実際操業上、直接還元率は 0.3~0.5 (30%~50%) であるので、この範囲で直接還元率 2% 刻みに炉頂ガス比の変化量に対する炭素比の変化量  $(\partial X / \partial \gamma)_{D.R}$  を計算したのが Table 1 である。この計算値は kg atom Carbon/kg atom Fe なる単位で示されており、具体的な数字として理解し難い。そこで、銑鉄 1 t 中に鉄を 955 kg 含むものとし、炉頂ガス比が単位量 (0.01) 変化したときの炭素比の変化量を kg C/t-pig で示したものが第 3 欄である。

Table 1 から明らかに、炉頂ガス比の変化による炭



Note: A thick line in diagram shows that the area on which ordinary blast furnace operation is performed.

Fig. 1. Diagram of carbon ratio curved surface.

素比の影響は直接還元率の低い方が大きい。たとえば炉頂ガス比が 0.01 だけ悪くなると、直接還元率 50% のところで炭素比は 1.54 kg/t-pig 悪化するが、直接還元率 30% のところでは炭素比は 2.16 kg/t-pig 悪化することを示す。

次に (4)' 式において、炉頂ガス比を通常溶鉄炉操作の変化範囲で 0.1 刻みに  $(\frac{\partial X}{\partial D. R})_{r_i}$  の値を計算したのが Table 2 である。

第 3 欄は直接還元率が単位量 (1%) 変化したときの炭素比の変化量を kg C/t-pig で示したものである。

Table 2 を見て明らかなごとく、直接還元率の変化による炭素比の影響は炉頂ガス比の高い方が大きい。

たとえば直接還元率が 1% だけ向上すると、炉頂ガス比 1.0 のところで炭素比が 6.16 kg/t-pig だけ減少するのに対して、炉頂ガス比 1.8 では炭素比が 8.63 kg/t-pig だけ減少することを示している。

次に直接還元率および炉頂ガス比が同時に変化した場合につき述べることにする。この場合は (2) 式、すなわち、

$$dX = \left(\frac{\partial X}{\partial r}\right)_{D. R_i} dr + \left(\frac{\partial X}{\partial D. R}\right)_{r_i} dD. R$$

によつて計算される。

たとえば直接還元率 30%、炉頂ガス比 1.20 で操業し

ている高炉が、今操業諸元の変更により直接還元率が 1% 増加し、炉頂ガス比が 1.21 となった場合の炭素比の変化量を求めてみよう。(2) 式または Table 1, 2 より

$$\left(\frac{\partial X}{\partial r}\right)_{D. R_i=0.30} dr \times \frac{12.01 \times 955}{55.85} = 2.1563$$

(ただし  $dr=0.01$ )

$$\left(\frac{\partial X}{\partial D. R}\right)_{r_i=1.20} dD. R \times \frac{12.01 \times 955}{55.85} = -6.7769$$

(ただし  $dD. R=0.01$ )

$$\therefore dX = 2.1563 - 6.7769 = -4.6206$$

となり、4.62 kg/t-pig のカーボン節減ができることになる。結局直接還元率 1% の向上の効果のほうが、炉頂ガス比 0.01 の悪化よりも大きいことがわかる。以上例示したごとく、他の操業点においても全く同様に計算できる。

### III. 等炭素比曲線について

(2) 式に (3)', (4)' 式を代入すると、

$$dX = 1.5(1 - D. R_i) dr - 1.5(1 + r_i) dD. R \dots\dots\dots (5)$$

ここで、炭素比の変化量を 0 とおくと ( $dX=0$ )

$$(1 - D. R_i) dr = (1 + r_i) dD. R \dots\dots\dots (6)$$

$$\therefore \left(\frac{\partial r}{\partial D. R}\right)_{X_i} = \frac{1 + r_i}{1 - D. R_i} \dots\dots\dots (7)$$

Table 1. Relation between top gas ratio (CO/CO<sub>2</sub>) and carbon ratio in the constant rate of direct reduction.

D. Ri	$\left(\frac{\partial X}{\partial r}\right)_{D. Ri} = 1.5(1 - D. Ri)$ kg atom C/kg atom Fe	$\left(\frac{\partial X}{\partial r}\right)_{D. Ri} \times 12.01 \times \frac{955}{55.85} \times \frac{1}{100}$ kg C/t-pig
0.50	1.5 × 0.50 = 0.750	1.5402
0.48	1.5 × 0.52 = 0.780	1.6018
0.46	1.5 × 0.54 = 0.810	1.6634
0.44	1.5 × 0.56 = 0.840	1.7250
0.42	1.5 × 0.58 = 0.870	1.7866
0.40	1.5 × 0.60 = 0.900	1.8482
0.38	1.5 × 0.62 = 0.930	1.9098
0.36	1.5 × 0.64 = 0.960	1.9715
0.34	1.5 × 0.66 = 0.990	2.0331
0.32	1.5 × 0.68 = 1.020	2.0947
0.30	1.5 × 0.70 = 1.050	2.1563

Table 2. Relation between rate of direct reduction and carbon ratio in the constant top gas ratio.

r <sub>i</sub>	$\left(\frac{\partial X}{\partial D. R}\right)_{r_i} = -1.5(1 + r_i)$ kg atom C/kg atom Fe	$\left(\frac{\partial X}{\partial D. R}\right)_{r_i} \times 12.01 \times \frac{955}{55.85} \times \frac{1}{100}$ kg C/t-pig
0.9	-1.5 × 1.9 = -2.85	-5.8528
1.0	-1.5 × 2.0 = -3.00	-6.1608
1.1	-1.5 × 2.1 = -3.15	-6.4688
1.2	-1.5 × 2.2 = -3.30	-6.7769
1.3	-1.5 × 2.3 = -3.45	-7.0849
1.4	-1.5 × 2.4 = -3.60	-7.3930
1.5	-1.5 × 2.5 = -3.75	-7.7010
1.6	-1.5 × 2.6 = -3.90	-8.0090
1.7	-1.5 × 2.7 = -4.05	-8.3171
1.8	-1.5 × 2.8 = -4.20	-8.6253
1.9	-1.5 × 2.9 = -4.35	-8.9333

Table 3. Relation between top gas ratio and rate of direct reduction on equal carbon ratio curve.

Carbon ratio kg C/t-pig	$X_i = (\text{Carbon ratio} - 45) \times \frac{55 \cdot 85}{955} \times \frac{1}{12 \cdot 01}$ kg atom C/kg atom Fe	$\gamma = f(D. R) = \frac{X_i}{1 \cdot 5(1 - D. R)} - 1$	$\left(\frac{\partial \gamma}{\partial D. R}\right) X_i = \frac{X_i}{1 \cdot 5} \times \frac{1}{(1 - D. R_i)^2}$				
			D. R. <sub>i</sub> = 0.30	D. R. <sub>i</sub> = 0.35	D. R. <sub>i</sub> = 0.40	D. R. <sub>i</sub> = 0.45	D. R. <sub>i</sub> = 0.50
450	1.9721	$1.3148/(1 - D. R) - 1$	2.693	3.112	3.652	4.346	5.259
460	2.0208	$1.3473/(1 - D. R) - 1$	2.759	3.189	3.743	4.454	5.389
480	2.1182	$1.4122/(1 - D. R) - 1$	2.892	3.343	3.923	4.668	5.649
500	2.2156	$1.4771/(1 - D. R) - 1$	3.025	3.496	4.103	4.883	5.908
520	2.3130	$1.5421/(1 - D. R) - 1$	3.158	3.650	4.284	5.098	6.168
540	2.4104	$1.6070/(1 - D. R) - 1$	3.291	3.804	4.464	5.312	6.428
550	2.4590	$1.6394/(1 - D. R) - 1$	3.358	3.880	4.554	5.420	6.558
560	2.5077	$1.6719/(1 - D. R) - 1$	3.424	3.957	4.644	5.527	6.688
580	2.6051	$1.7368/(1 - D. R) - 1$	3.557	4.111	4.824	5.742	6.947
600	2.7025	$1.8018/(1 - D. R) - 1$	3.690	4.265	5.005	5.956	7.207

しかるに (1) 式より,

$$1 + \gamma_i = \frac{X_i}{n(1 - D. R_i)} = \frac{X_i}{1.5(1 - D. R_i)}$$

なるゆえ,

$$\left(\frac{\partial \gamma}{\partial D. R}\right) X_i = \frac{X_i}{1.5} \times \frac{1}{(1 - D. R_i)^2} \dots\dots (8)$$

(8) 式は  $X = X_i$  なる一定値のとき  $d\gamma_i$  と  $dD. R_i$  との関係を示す式で、ある操業点から直接還元率を変化させたとき元の炭素比に保つために許容される  $d\gamma$  の値を与えるもので、等炭素比曲線上のある点における接線の勾配といえる。Table 3 に現在の操業における炭素比の範囲内で計算した値を示した。第 2 欄は第 1 欄の炭素比 kg C/t-pig を kg atom C/kg atom Fe に換算したもので、(炭素比-45) は銑鉄中 4.5% C を含むものと仮定したためである。第 3 欄  $\gamma = X_i/1.5(1 - D. R) - 1$  はそれぞれの等炭素比曲線を表わすときの炉頂ガス比と直接還元率の関係式である。また第 4 欄は (8) 式にしたがつて計算された等炭素比を維持すべき炉頂ガス比の変化量を示す critical value である。たとえば、炭素比 450 kg/t-p のとき、直接還元率 1% が増加すれば炉頂ガス比を 0.02693 だけ悪化させても炭素比は変化しないことを示し、炉頂ガス比の悪化量がこの値以下であれば直接還元率 1% の増加によつて炭素比は 450 kg/t-p より低下することを意味する。逆に炉頂ガス比の悪化量がこの値以上であれば直接還元率 1% の増加は炭素比の増大を招来する。この等炭素比を維持すべき critical value は第 4 欄に示すように直接還元率の高いところほど、かつ炭素比の高いところほど大きくなる傾向を示している。Table 3 の結果を図示したものが Fig. 2 であり、以上述べたことを明りように理解する。

IV. 結 言

前報<sup>1)</sup>におけるコークス比の理論の活用上の便益を計るべく、 $n = 1.5$ 、銑鉄中の鉄分 = 955 kg/t-p と仮定し、溶銑炉操業の各操業点が操業諸元の変化により、炭素比曲面上を移動し、カーボン比が操業諸元を変更しない場合に比較してどのように変化するかを次の 3 組につき具体的な数値で示した。

(1) 直接還元率一定の場合、炉頂ガス比の変化による炭素比の変化

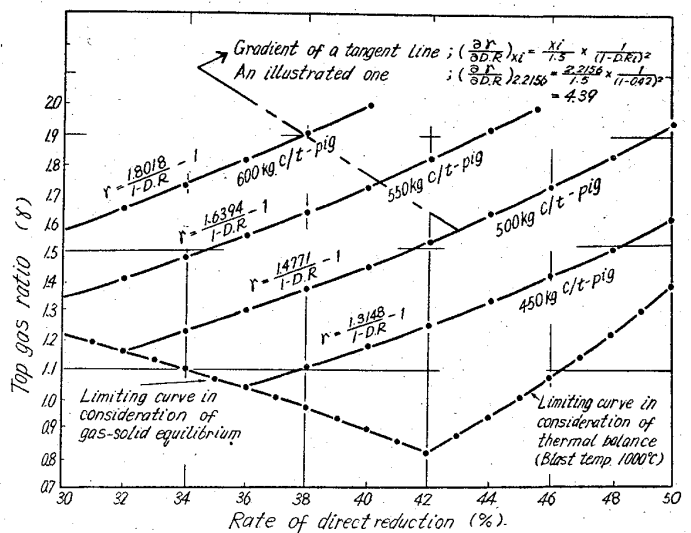


Fig. 2. Equal carbon ratio curve.

(ロ) 炉頂ガス比一定の場合、直接還元率の変化による炭素比の変化

(ハ) 直接還元率および炉頂ガス比が同時に変化した場合の炭素比の変化

さらに、等炭素比曲線上における直接還元率と炉頂ガス比との関係を明らかにした。

文 献

- 1) 中谷, 他: 鉄と鋼, 49 (1963) 3, p. 316~319
- 2) 中谷, 他: 鉄と鋼, 49 (1963) 3, p. 319~322
- 3) 中谷, 他: 鉄と鋼, 50 (1964) 3, p. 373~376
- 4) 中谷, 他: 鉄と鋼, 50 (1964) 3, p. 376~379