

Rist 操業線図 (II)

小野 陽一*

Yoichi ONO

Rist Operating Diagram(II)

目次

Rist操業線図(I)「鉄と鋼」Vol.79 No.9に掲載

1. はじめに
2. 操業線図の構成
3. 酸化鉄の還元平衡を考慮に入れた操業線図
4. 熱収支を考慮に入れた操業線図

Rist操業線図(II)

5. 湿送風と羽口吹き込みを伴う高炉の操業線図
6. 操業線図による高炉の操業解析
 - 6・1 送風温度の影響
 - 6・2 鉱石予備還元の影響
 - 6・3 天然ガス吹き込みの影響
7. おわりに

文献

5 湿送風と羽口吹き込みを伴う高炉の操業線図

前章までは、理解を容易にするために、羽口からは乾燥空気のみを吹き込むという最も単純な高炉操業を対象にした。しかし、実際の高炉では、送風中には湿分が含まれているし、現在では積極的に一定量の水分を添加している。また、送風とともに微粉炭や重油が吹き込まれている。空気への酸素富化が行われる場合もある。これらは一括して複合送風と呼ばれているが、羽口添加物の中には水素を含んだものがあり、これによって物質収支、平衡関係、熱収支が変化する。これに応じて操業線に修正を加えなくてはならない。

第2章で述べた高炉の4つの仮定のうち(3)を次のように変える。

(3)羽口からは空気とともに添加物 $(H_2)_a$ $(O)_b$ $(C)_c$ を y_j (mol/molFe) の割合で吹き込む。また、送風中には e_y (molH₂O/molFe) の湿分が含まれている。

このように、羽口添加物を形式的に $(H_2)_a$ $(O)_b$ $(C)_c$

のような量論式で表し、装入Fe分1molあたり y_j mol添加するものとする。送風湿分も上式に含めて、 $a=1$, $b=1$, $c=0$ としてもよいが、送風湿分は通常 Wg/Nm^3 dry air のように単位送風量あたりで表現されているので、上述のように送風1molあたり H_2O e molを添加するとした。なお、 W と e の間には $e = (W/18) / (0.21 \times 2 / 0.0224)$ の関係がある。

酸化鉄の組成は前と同様に $Y=O/Fe$ で表す。ガスは CO - CO_2 系と H_2 - H_2O 系にわけて、組成はそれぞれ (22), (23) のように X_1 , X_2 で表す。

$$CO-CO_2 : X_1 = 1 + (\%CO_2) / [(\%CO) + (\%CO_2)] \quad \cdots \cdots (22)$$

$$H_2-H_2O : X_2 = 1 + (\%H_2O) / [(\%H_2) + (\%H_2O)] \quad \cdots \cdots (23)$$

で表す。

まず、間接還元帯における酸素の物質収支をとる。炉頂より酸化鉄 (組成: $Y=Y_A$) が鉄分に換算して $\dot{n}_{Fe} \text{ mol} \cdot \text{s}^{-1}$ の速度で装入され、間接還元帯下端より CO (組成: $X_1 = X_{1B} = 1$) と H_2 (組成: $X_2 = X_{2B} = 1$) がそれぞれ $\dot{n}_{g1}$, $\dot{n}_{g2} \text{ mol} \cdot \text{s}^{-1}$ の速度で送り込まれる。なお、

$$\dot{n}_g = \dot{n}_{g1} + \dot{n}_{g2} \quad \cdots \cdots (24)$$

$$h = \dot{n}_{g2} / \dot{n}_g = \frac{[(\%H_2) + (\%H_2O)]}{[(\%CO) + (\%CO_2) + (\%H_2) + (\%H_2O)]} \quad \cdots \cdots (25)$$

とおく。

間接還元帯内の任意の断面で酸素に関する物質収支をとると、

$$\begin{aligned} \dot{n}_{Fe} \cdot (Y + dY) + \dot{n}_{g1} \cdot X_1 + \dot{n}_{g2} \cdot (X_2 - 1) \\ = \dot{n}_{Fe} \cdot Y + \dot{n}_{g1} \cdot (X_1 + dX_1) + \dot{n}_{g2} \cdot (X_2 - 1 + dX_2) \end{aligned}$$

これより

$$\dot{n}_{Fe} \cdot dY = \dot{n}_{g1} \cdot dX_1 + \dot{n}_{g2} \cdot dX_2 \quad \cdots \cdots (26)$$

(26)に(24), (25)を代入すると

平成4年10月23日受付 平成5年4月9日受理 (Received on Oct. 23, 1992; Accepted on Apr. 9, 1993) (依頼講義)
 *九州大学工学部教授 (Faculty of Engineering, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki Higashi-ku Fukuoka 812)
 Key words: Rist model; operating diagram; blast furnace; coke rate; blast rate; tuyere injectant; blast moisture.

$Y < 0$ の部分CEは送風、送風湿分、羽口添加物及び不純物酸化物とともに炉内に持ち込まれてガス化したOと H_2 (mol/molFe)を表す。したがって、Y軸は $Y > 0$ の部分はO/Fe、 $Y < 0$ の部分は $Y = (O + H_2)/Fe$ であり、全体として $Y = (O + H_2)/Fe$ ととればよい。

次に、プロセス帯の熱収支を考える。(13)に示した各項の外に送風湿分と羽口添加物に関連した項を考慮しなければならない。送風湿分はCと反応してCOと H_2 を生成し、羽口添加物はいったんC、 O_2 、 H_2 に分解し、 O_2 はCと反応してCOになる。生成したCOと H_2 の一部は間接還元帯で酸化鉄の還元で使用されて、それぞれ CO_2 と H_2O になる。ここで、 H_2 によるFeOの還元については、次のように考える。FeOはすべていったんCOによって還元され、生成した CO_2 の一部が水性ガスシフト反応によって H_2O に変わる。すなわち、 $FeO + CO = Fe + CO_2$ 、 $CO_2 + H_2 = CO + H_2O$ 。プロセス帯において H_2 が H_2O へ変化する割合はW点で与えられる($X_{2W} - 1$)である。

送風中湿分と羽口添加物によるこれらの反応によって吸収される熱量(kJ/molFe)は、表1に示すように、それぞれ $ey_b q_e$ 、 $y_j q_j$ で表される。これらを(13)の右辺に加えると

$$y_b (q_b + q_c) + Y_w q_i \\ = y_{si} q_{si} + y_f q_f + \gamma q_\gamma + f + \ell + p + ey_b q_e + y_j q_j \quad \dots\dots\dots (39)$$

これを書き直すと

$$y_b (q_b + q_c - eq_e) = y_{si} q_{si} + Q + y_j q_j \quad \dots\dots\dots (40)$$

ここで、Qは(14)と同じで

$$Q = f + \ell + p + y_f q_f + \gamma q_\gamma - Y_w q_i \quad \dots\dots\dots (41)$$

(40)がプロセス帯の修正された熱収支式である。操業線の式(38)と(40)より y_{si} を消去すると

$$y_b \left[\frac{q_b + q_c + (1 + 2e) q_{si} - eq_e}{q_{si}} X - (1 + 2e) \right] \\ - [Y - \{y_f + (a + b) y_j\} (X - 1) + \frac{Q + y_j q_j}{q_{si}} X] = 0 \quad \dots\dots\dots (42)$$

を得る。これがこの場合の熱収支を満足する操業線の式である。この式が常に成立するためには、操業線は2本の直線 Δ_1 、 Δ_2

$$\Delta_1 : X = \frac{(1 + 2e) q_{si}}{q_b + q_c + (1 + 2e) q_{si} - eq_e} \quad \dots\dots\dots (43)$$

$$\Delta_2 : Y = [y_f + (a + b) y_j] (X - 1) - \frac{Q + y_j q_j}{q_{si}} X \quad \dots\dots\dots (44)$$

の交点Pを通らなければならない。(43)よりわかるように直線 Δ_1 はX軸に垂直な直線で、送風温度及び送風湿分に依存す

るが、羽口添加物には無関係である。(44)において、 $X = 0$ とおくと、 $Y = -[y_f + (a + b) y_j]$ 、 $X = 1$ とおくと、 $Y = -(Q + y_j q_j)/q_{si}$ 。したがって、直線 Δ_2 は点U(0, $-[y_f + (a + b) y_j]$)と点V(1, $-(Q + y_j q_j)/q_{si}$)を通る。P点の座標は次式で与えられる。

$$X_p = \frac{(1 + 2e) q_{si}}{q_b + q_c + (1 + 2e) q_{si} - eq_e} \quad \dots\dots\dots (45)$$

$$Y_p = -[y_f + (a + b) y_j] \\ - \frac{(1 + 2e) [Q + y_j q_j - \{y_f + (a + b) y_j\} q_{si}]}{q_b + q_c + (1 + 2e) q_{si} - eq_e} \quad \dots\dots\dots (46)$$

図9が熱保存帯と化学保存帯を持つ理想高炉の複合送風時の操業線図で、図8に修正を加えたものである。

6 操業線図による高炉の操業解析

ガスと装入物との間の熱および酸素の交換が理想的に行われる高炉、すなわち、熱保存帯と化学保存帯を有し、操業線がW点とP点を通る場合を想定して、コークス比などの操業指標に及ぼす若干の因子の影響を調べてみよう。

6・1 送風温度の影響

送風温度を上昇すると、送風の顕熱を与える係数 q_b が増加するので、(20)からわかるように、P点の横座標 X_p が減少する。この際、コークス比を適当に調節して溶銑とスラグの温度と組成、スラグ比などが変化しないようにしたとする。そうすると、U点とV点は動かなくて、P点は図10に示すように直線UV上を左方にP'点まで移動し、操業線AEはW点の周りに回転してA'E'となる。その結果、(1)操業線の勾配が減少し、コークス比が低下する、(2)炉頂ガスの利用率がAA'だけ増加する、(3)E点がE'点に移動し、それに応じて送風量原単位が減少する。なお、送風量原単位の減少の効果として、次の2つの場合が考えられる。出銑量、送風量及び送風量原単位の間には(47)の関係があるので、(1)送風量原単位の減少割合に比例して送風量を減少すると、出銑量が一定に保たれ、(2)送風量を一定に保つと、送風量原単位の減少割合に逆比例して出銑量が増加する。

$$\text{出銑量 (t/day)} = \frac{\text{送風量 (Nm}^3/\text{min)} \times 60 \times 24}{\text{送風量原単位 (Nm}^3/\text{THM)}} \quad \dots\dots\dots (47)$$

ここで、[例題]の操業条件を基準にして、送風温度を 1000°C から 1300°C に 300°C だけ上昇した場合の効果をも具体的に計算してみよう。計算の結果、 $X_p = 0.546$ 、 $Y_p = -0.179$ 、 $\mu = 1.641 \text{ molC/molFe}$ で、コークス比は 431 kg/THM となり、基準操業時と比較すると、 31 kg/THM (6.7%) 減少する。また、ガス利用率 η_{co} は52.1%から53.9%に増加し、送風量原単位は $948 \text{ Nm}^3/\text{THM}$ で基準操業の14.1%減となる。なお、

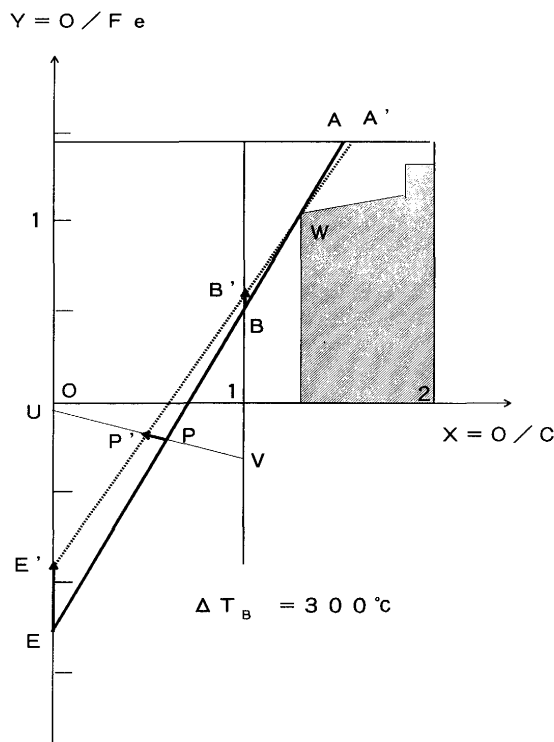


図10 送風温度上昇の影響

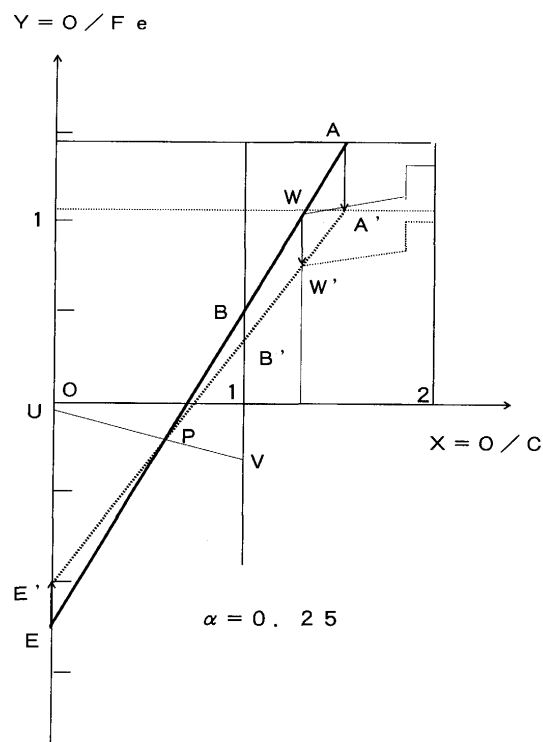


図11 鉱石予備還元の影響

送風量を基準操業時の6890Nm³/minに保つと、出鉄量は9000t/dayから10470t/dayに16.3%増加する。

6・2 鉱石予備還元の影響

鉄鉱石とともに還元鉄を装入する場合を考える。装入全鉄分に対する金属鉄の割合を α とし、予熱帯において金属鉄の再酸化が起こらないとすると、W点の縦座標は

$$Y_w' = Y_w (1 - \alpha) = 1.05 (1 - \alpha) \quad \dots\dots\dots (48)$$

になる。横座標は X_w はFeO/Fe/CO/CO₂の平衡組成であり、これは変化しない。したがって、金属鉄の装入によってW点は下方に平行移動する。この場合、P点は実際上ほとんど変化しないので、操業線AEは、図11に示すように、P点の周りを回転してA'E'となる。その結果、(1)操業線の勾配が減少し、コークス比が低下する、(2)E点がE'点に移動し、それに応じて送風量原単位が減少し、送風量が一定のときは出鉄量が増加する。

[例題] の基準操業に対して10% ($\alpha = 0.1$) の金属鉄を装入した場合のコークス比の変化を計算してみよう。 $Y_w' = 0.945$ で、W点は $W' = (1.295, 0.945)$ に移動する。(14)によると、 Y_w の変化にともなうQも変化し、それに応じてP点が移動する。これを計算してみると、 $P' = (0.594, -0.199)$ となり、基準操業の $P = (0.594, -0.193)$ とほとんど変わらない。したがって、P点は実際上変化しないと考えてよい。 $\mu = (Y_w' - Y_p') / (X_w' - X_p') = 1.632 \text{ molC/molFe}$ で、コークス比は429kg/THMとなり、基準操業に比

べて33kg/THM (7.1%) の減少となる。送風量原単位は1032 Nm³/THMで、基準操業の6.4%減となる。いま、還元鉄装入時にも送風量は基準操業時 (6890Nm³/min) のままで変化しなかったとすると、出鉄量は9610t/dayとなり、基準操業の6.8%増となる。

上の説明からもわかるように、鉱石予備還元の効果はW点の下方への移動によるものであるから、金属鉄を装入しなければならず、たとえば、Fe₂O₃をFe₃O₄やFeOまで予備還元したものを装入してもコークス比の減少や出鉄量の増加には効果がない。

6・3 天然ガス吹き込みの影響

羽口添加物の最も単純な例として、天然ガス(CH₄)を羽口より $y_j \text{ mol/molFe}$ の割合で吹き込む場合を考える。送風温度など他の操業要因は変化しないものとする。

図12に示すように、U点は吹き込まれたCH₄からのH₂のmol数に比例する $UU' = ay_j$ だけ移動してU'点になる。V点はV'点に移動するが、線分 $VV' = y_j q_{j1} / q_{s1}$ はCH₄の分解と分解生成物の熱保存帯温度までの加熱に要する熱量に相当する量で、プロセス帯の熱需要量がそれだけ増加する。図12に示すように、直線UVとU'V'はJ点で交わるが、(19), (44)によると、 $X_j = a / (a - q_{j1} / q_{s1})$ で羽口添加物に固有の値(CH₄: 2.03)である。したがって、直線UVは定点Jの周りを回転する。この関係を利用して、図上にV'点をとることができる。送風温度は一定であるので、(20), (45)からわかるように、 $X_p' = X_p$ で、P点は直線U'V'上のP'点まで垂

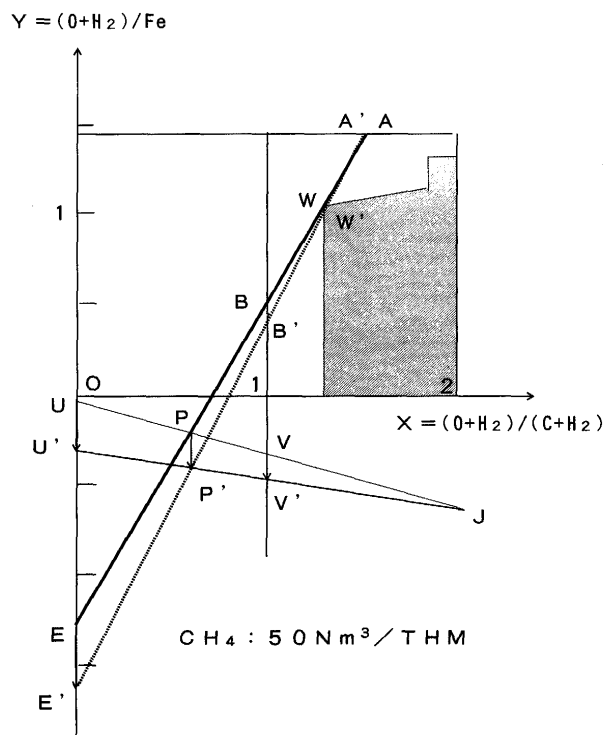


図12 天然ガス吹き込みの影響

直に移動する。W点は前述のようにH₂の導入により多少右に移動してW'点になる。このようにして、操業線AEはP'点とW'点を結んだA'E'に変わる。

[例題]の基準操業に対してCH₄ (a = 2, b = 0, c = 1) を50Nm³/THM (y₃=0.1320mol/molFe) の割合で羽口より吹き込む場合を考える。U点はUU'=2y₃=0.264だけ下方に移動してU'=(0, -0.289)となる。直線UVを延長して、直線X_j=2.03との交点Jを求め、U'点とJ点を結び、直線U'V'を得る。U'V'にP点より垂線を下ろしてP'点を求める。P'点の座標はもちろん(45), (46)から求めてもよく、P'=(0.594, -0.380)となる。次に、W'点を求めなければならない。そのためには炉内生成ガス中のH₂の割合hを知らなければならないが、これを前もって知ることができない。そこで、最初はW'=Wとし、すなわちh=0とおいて繰り返し法でW'点を求める。その結果、W'=(1.308, 1.05)を得る。よってP'点とW'点を通る操業線の勾配μ'はμ'=(Y_w-Y_p)/(X_w-X_p)=2.002mol/molFe。一方、μ'_{H2}=2y₃=0.264であるので、μ'_{CO}=μ'-μ'_{H2}=1.738mol/molFe。生成したCOにはCH₄のCからのCO (y₃=0.132mol/molFe) を

含むので、コークスからのCOは1.606mol/molFeになる。これをコークス比になおすと、423kg/THMで、基準操業と比べると39kg/THM (8.4%) の減少となる。CH₄50Nm³/THMは35.8kg/THMであるので、置換率は重量基準でほぼ1になる。また、送風量原単位はy_b=1.280mol/molFe, すなわち1155Nm³/THMとなり、基準操業に比べると52Nm³/THM (4.7%) の増加になる。このように、CH₄添加の場合、コークス比は減少するが、出鉄量の増加は期待できず、むしろ送風量一定の場合は基準操業と比べて410t/day (4.5%) だけ減少する。

以上、単独の要因の変化の影響の数例を示したが、実操業では幾つかの要因を変化させて、最適の効果をもたらす条件を追求する。取り扱い方としては上述の方法を組合せればよい。

7 おわりに

総括物質収支と炉下部高温域の部分熱収支に基づく操業線図、いわゆるRist線図について、その原理と若干の応用例を述べた。シャフト効率100%という理想的な操業の場合に限られるが、これによって各種操業要因の変更に伴うコークス比などの操業指標の変化をかなりの的確に予測することができる。また、実操業のデータをこのモデルで解析してシャフト効率を求めることによって理想操業からのずれを知り、操業改善の目標とすることができる。しかし、シャフト効率を高め理想操業に近づける方策や操業要因変更の限界は熱力学的モデルであるこの理論から得ることはできない。それは反応速度論、移動速度論を導入した微分収支モデルによらなければならないが、この方面の研究も近年著しい進歩をみせている。

文 献

- 1) A.Rist *et al.* : Rev.Met., **60** (1963), p.23 ; **61** (1964), p.121, p.623 ; **62** (1965), p.995, p.1161 ; **63** (1966), p.197, p.296
- 2) A.Rist and N.Meysson : J.Metals, (1967), p.50
- 3) E.Schürmann : Die physikalische Chemie der Eisen und Stahlerzeugung, ed.by L.von Bogdandy *et al.*, (1964), p.100 [Verlag Stahleisen]
- 4) P.Reichardt : Arch.Eisenhüttenwes., **1** (1927/28), p.77
- 5) J.G.Peacey and W.G.Davenport : THE IRON BLAST FURNACE, Theory and Practice, (1979), [Pergamon Press]
- 6) D.M.Kundrat, T.Miwa and A.Rist : Metall. Trans., **22B** (1991), p.363