
燃料および還元ガス高炉吹込みの羽口領域熱収支に対する影響

Effects of Fuels and Reformed Gas Injection on the Thermal Balance at the Tuyere Level of the Blast Furnace

平谷 達雄(Tatuo Hiratani)

要旨：

炭化水素（重油，天然ガス）および還元ガスの高炉吹込みにともなう炉内還元反応の変化を解析するため，いくつかの基本事項と吹込技術上の問題点の検討をおこなった。炉床の熱レベルを表わすパラメーター（R）をヴィスタイトの間接，直接還元率をもとめて決定し，ガス利用率，送風圧との関係をしらべた。またボッシュガス中のH₂成分の炉内圧力損失に対する影響についても検討した。還元ガスを吹込んだ時の効果を，燃料（変成しない場合）吹込みの場合と比較しつつ検討した。

Synopsis：

The purpose of this paper is to provide a basis for studies of various factors contributing to changes in reduction process of the blast furnace by hydrocarbon injections. The specific difficulties pertaining to the use of each of the fuel oil, gaseous fuel and reformed gas are examined. Of greatest significance is the additional cooling of the furnace which occurs as the fuel oil, gaseous fuel and reformed gas are injected in place of coke. The parameter which represents the thermal level of the hearth 'R' is employed for counting both indirect and direct reduction at the lower part of the furnace. The effect of H₂ content in bosh gas on the pressure loss through the furnace burden is evaluated. An effort was also made to elucidate some of uncertainties about the blast furnace performance when the reformed gas is used.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

燃料および還元ガス高炉吹込みの羽口領域 熱収支に対する影響

Effects of Fuels and Reformed Gas Injection on the Thermal Balance at the
Tuyere Level of the Blast Furnace

平 谷 達 雄

Tatuo Hiratani

Synopsis :

The purpose of this paper is to provide a basis for studies of various factors contributing to changes in reduction process of the blast furnace by hydrocarbon injections. The specific difficulties pertaining to the use of each of the fuel oil, gaseous fuel and reformed gas are examined.

Of greatest significance is the additional cooling of the furnace which occurs as the fuel oil, gaseous fuel and reformed gas are injected in place of coke. The parameter which represents the thermal level of the hearth 'R' is employed for counting both indirect and direct reduction at the lower part of the furnace. The effect of H_2 content in bosh gas on the pressure loss through the furnace burden is evaluated. An effort was also made to elucidate some of uncertainties about the blast furnace performance when the reformed gas is used.

1. 緒 言

原料炭の不足に対処するため炭化水素の多量吹込みによりコークス比の低下を図ることは、今後の高炉の重要な技術課題になると思われる。吹込み燃料の種類によって羽口領域における分解熱、部分酸化熱（あるいは融体およびコークスに対する輻射効果）が異なるので吹込み操作にあたっては、これらの相違点を十分認識しておくことが重要である。

また重油吹込みの場合送風中の酸素は、ある程度以上の重油吹込み量ではより高温のコークスと選択的に反応するのでカーボンブラックの形成はさげられない。この問題を解決するため酸素などを添加する複合送風が実施されているが、その外に燃料をあらかじめ改質して還元ガスとして高炉

に吹込むことも考えられる。

本稿では炉下部の熱レベルをあらわす特性値“R”を決定するとともに、重油、天然ガスあるいはこれらを変成して得られる還元ガスの高炉吹込みによる羽口領域の熱収支に対する影響を中心に検討した。

2. 炉下部の熱レベルを表わす特性値“R” の決定

吹込み燃料の高炉炉内反応に及ぼす影響のうちで、最も重要なものは炉内ガス中 H_2 が増加することによって還元反応がどのように変化するかである。特に H_2 はCOと異なり吸熱的に還元反応を進行させるので炉内 H_2 成分の増加にともなって水素の利用率和炉下部の熱レベルがどのように変化するかを検討しなければならない。

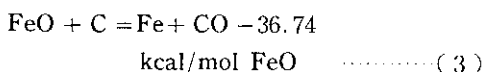
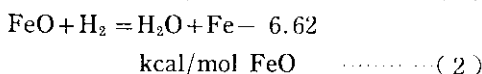
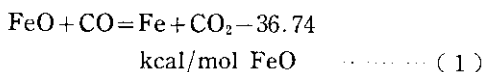
従来、炉の総合的な H_2 利用率は炉頂ガス分析と吹込み H_2 成分量から決定されていたが炉内ガス H_2 の炉下部に及ぼす影響について定量的に扱われていなかった。これは吹込燃料の量が少なかったことと、また炉下部すなわちヴィスタイト (FeO) 生成域以下のレベルで水素の利用率を定量化することが困難であったことによる。

しかし炭化水素を多量に吹込み、炉内 H_2 ガス量が増加した現在では、より合理的に炉熱を決定することが重要であり、そのために炉下部での H_2 および CO の利用率、直接 (あるいは間接) 還元率を決定し、さらに炉下部の熱レベルを表わす特性値 “R” を決定した。

2.1 炉下部での H_2 および CO 利用率の決定

高炉における反応律速の段階は、反応速度論の立場から FeO (ヴィスタイト)-Fe 間に存在し、鉱石が高次の酸化物段階 (Fe_2O_3 , Fe_3O_4) で受ける還元作用は、ヴィスタイト領域で必要とする高濃度の還元ガスで逐次自動的に還元される。ヴィスタイト生成領域では FeO の CO ガスによる発熱を伴う間接還元のため、炉内ガスが一定量以上あると、原料とガスの温度が等しくなる部分 (thermal reserve zone) が形成され、高炉炉内反応領域を2分した状態を呈する。

したがって炉下部の熱レベル、炉況を決定するのは総合的な熱収支および物質収支よりむしろ炉下部について求められた部分的な収支と考えられる。ヴィスタイトの還元には、CO ガスおよび H_2 ガスによる間接還元およびカーボンによる直接還元がある。これらの還元反応は(1), (2), (3) 式で示すように発熱または吸熱反応であるため、還元割合は炉下部の熱レベルに大きな影響をおよぼすとともにコークス比にも影響する。



以下にのべる諸式は重油以外の吹込燃料についても成立するが、便宜上重油吹込時について示す。

また式の中で以下の符号を使用した。

CO^T , CO_2^T , H_2^T , N_2^T , CH_4^T

炉頂ガス組成 (%)

O_2^{EN} , N_2^b 酸素富化率, 送風中 N_2 (%)

SL ソリューションロス (kg/t_{pig})

V , V_T 送風量, 炉頂ガス量 (Nm³/t_{pig})

L 装入物中炭酸塩量 (kg/t_{pig})

M , W_0 送風湿分 (g/Nm³)
重油吹込み量 (kg/t_{pig})

$\eta^*_{H_2}$, η^*_{CO} 炉下部における H_2 , CO の利用率

K 平衡定数, $CO + H_2O \rightleftharpoons H_2 + CO_2$

H_{oil} 重油中 H_2 成分 (%)

Q_{CO} 直接還元後の CO 容積
(Nm³/t_{pig})

Q_{H_2} 炉下部に入る合計 H_2 成分
(Nm³/t_{pig})

O_{FeO} FeO から還元除去される酸素量
(Nm³/t_{pig})

銑鉄トンあたりの FeO から還元されるべき酸素量 (O_{FeO}) はほぼ一定と考えられるので, CO, H_2 および C による被還元酸素量を O_I , O_H , O_D (Nm³/t_{pig}) とし, これらの割合が重油比のレベルによってどのように変化するかを検討する。

$$O_{FeO} = O_I + O_H + O_D \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$O_D = (SL/12) (22.4/2) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで

$$SL = 0.536$$

$$\times \left(V_T \frac{CO^T + CO_2^T}{100} - 2V \frac{21 + O_2^{EN}}{100} \right) - 0.667 \times 10^{-3} M \cdot V$$

$$V_T = V (N_2^b / N_2^T)$$

$$N_2^T = 100 - (CO^T + CO_2^T + H_2^T)$$

$$N_2^b = 100 - (21 + O_2^{EN})$$

$$O_2^{EN} = 100 \left(\frac{0.21V + O_2 \text{ injected}}{V + O_2 \text{ injected}} - 0.21 \right)$$

また

$$Q_{CO} = V_T \frac{CO^T + CO_2^T}{100} - 0.224 L \quad \dots\dots\dots (6)$$

コークス中の水素成分は200°C前後で揮発物とともに炉頂に逃げるので化学反応には寄与しない。炉下部に入る H_2 ガス量は送風湿分と吹込重油中

の H_2 成分を加えて次のように求められる。

$$Q_{H_2} = 1.244 \times 10^{-3} M \cdot V + 11.2 W_O (H_{OII}/100) \quad \dots\dots\dots (7)$$

FeO の間接還元反応により発生した H_2O は CO の存在の下では $CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$ の平衡式にしたがって一部 H_2 に還元される。この仮定は化学反応が最終段階のエンタルピーにより支配されるのできわめて合理的なものと考えられる¹⁾。以上から FeO 還元反応にあずかる H_2 量は次の式で決定される。

$$K = \frac{(CO_2)(H_2)}{(H_2O)(CO)} \quad \dots\dots\dots (8)$$

CO と H_2 のガス利用率 η^*_{CO} , $\eta^*_{H_2}$ の関係は、

$$\eta^*_{H_2} = \frac{\eta^*_{CO}}{(1-K)\eta^*_{CO} + K} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで、

$$\eta^*_{CO} = CO_2 / (CO + CO_2),$$

$$\eta^*_{H_2} = H_2O / (H_2O + H_2)$$

平衡定数 K は Hahn²⁾ の式により求められる。

$$\log K = -2.226/T - 0.0003909T + 2.4506$$

ただし T : 絶対温度 ($^{\circ}K$)

FeO の形で炉下部に入る酸素は直接、間接還元反応により除去される酸素量に等しいので、

$$O_{FeO} = O_D + \frac{1}{2} (Q_{CO} \cdot \eta^*_{CO} + Q_{H_2} \cdot \eta^*_{H_2}) \quad \dots\dots\dots (10)$$

(10)式に(9)式を代入し、 η^*_{CO} を2次式として解くと、

$$\eta^*_{CO} = \frac{-b + (b^2 + 4ac)^{1/2}}{2a}$$

ただし

$$a = Q_{CO} (1 - K)$$

$$b = KQ_{CO} + Q_{H_2} - 2(1 - K)(O_{FeO} - O_D)$$

$$c = 2K(O_{FeO} - O_D)$$

2.2 “R” 値の決定

炉内ガスの利用率は、反応領域の熱レベルによって大きく影響を受けまた変化するので、いわゆる炉熱を定量的に把握して、燃料吹込時の炉況を管理することが必要になる。そのため H_2 , CO ガスによる FeO の還元反応熱および直接還元反応熱を銑鉄トン当りについて決定し、これら還元反応熱と送風顕熱を加えて“R”値を次のように決定した。

$$R = (\Delta H_{H_2 \rightarrow H_2O} Q_{H_2} \eta^*_{H_2} + \Delta H_{CO \rightarrow CO_2} \cdot Q_{CO} \eta^*_{CO} + \Delta H_{C \rightarrow CO} (2O_D) + \text{送風顕熱}) / O_{FeO} \text{ (kcal/Nm}^3 \text{ of } O_2 \text{ in FeO)}$$

$$= (2580 Q_{H_2} \eta^*_{H_2} + 4254 Q_{CO} \eta^*_{CO} + 1254 (2O_D) + 0.43N_2^b T_b) / O_{FeO}$$

ここで、 ΔH は生成熱を示し、FeO の銑鉄トンあたり生成熱を一定とすれば、(1)~(3)式の還元反応熱と同様の意味をもっている。

3. 燃料吹込み

3.1 重油吹込み

重油吹込み量の増加に伴う炉内還元反応の変化を検討する。Table 1 に千葉第1高炉の重油吹込

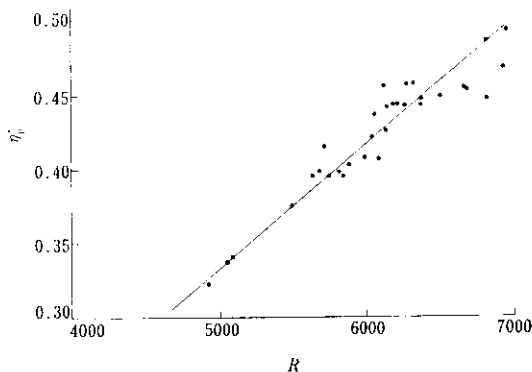


Fig. 1 The effect of thermal level of hearth R on degree of H_2 gas utilization $\eta^*_{H_2}$

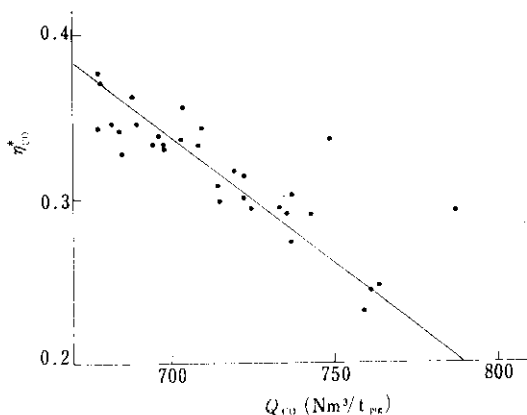


Fig. 2 The relation between CO gas utilization, η^*_{CO} , and volume of CO gas, Q_{CO}

み実験（1971年1月）の結果にもとづいて計算された各パラメータを示す。なお操業方針は以下のとおりである。

- (1) 出鉄量を一定とし、重油比増大によりワークス比低減を目標とする。
- (2) 酸素吹込量の設定は羽口前理論燃焼温度を

一定とし、ボッシュガス量は低下させる。

Fig. 1~3 に、それぞれ“ R ”と $\eta^*_{H_2}$ 、 Q_{CO} と η^*_{CO} および $Q_{H_2}+Q_{CO}$ と $\eta^*_{H_2+CO}$ の関係を示した。Fig. 1 より、炉下部の H_2 ガスの利用率と炉下部の熱レベル“ R ”には明白な相関が認められ、炉の熱レベルに比例して $\eta^*_{H_2}$ は変化してい

Table 1 Parameters to represent the reduction process in blast furnace

Oil (kg/t _{pig})	Coke rate C (kg/t _{pig})	O _D (Nm ³ /t _{pig})	Q _{CO} (Nm ³ /t _{pig})	Q _{H₂} (Nm ³ /t _{pig})	$\eta^*_{H_2}$	η^*_{CO}	R (kcal/t _{pig})	(P/V)/(O/C) (g/cm ²)/ (m ³ /min) kg/kg	Treated ore ratio %
22.5 41.0	515 460	70.11 80.97	749.11 737.41	51.04 74.53	0.4464 .4075	0.3351 .3006	6818 5998	0.2089 .2031	72.2 73.2
51.6 59.8	446 439	90.25 96.47	736.85 764.05	87.56 98.79	.3746 .3419	.2724 .2451	5494 5080	.1977 .1970	74.0 74.6
63.1 64.5	423 414	80.31 79.70	724.84 714.97	102.68 104.18	.3988 .4036	.2931 .2973	5815 5883	.1988 .2059	75.0 76.2
69.8 68.1	425 420	96.08 102.17	761.46 759.13	111.78 108.62	.3378 .3233	.2417 .2299	5051 4922	.2064 .1967	76.4 76.4
68.7 66.5	430 408	77.05 66.89	722.49 684.47	107.02 103.56	.4062 .4528	.2995 .3409	6093 6686	.1978 .2089	76.4 76.4
66.9 76.6	419 424	57.46 54.48	688.97 703.90	104.65 118.04	.4757 .4681	.3618 .3548	7163 6925	.2065 .1994	78.8 79.1
77.3 75.3	419 408	57.86 62.11	701.74 703.50	120.60 120.21	.4550 .4469	.3429 .3355	6666 6396	.1992 .2057	79.2 80.6
78.0 83.1	417 412	67.48 72.98	722.80 733.53	125.08 131.95	.4217 .3993	.3131 .2935	6050 5683	.2056 .2074	80.7 78.9
77.4 78.1	421 422	75.70 74.59	735.85 743.20	124.17 125.47	.3954 .3948	.2901 .2896	5634 5741	.2015 .2027	79.0 75.4
80.8 81.1	411 408	65.92 60.53	719.45 696.55	128.88 128.32	.4251 .4493	.3160 .3378	6139 6511	.2068 .2083	75.5 75.8
84.7 82.9	404 395	62.02 67.38	698.28 685.50	130.47 125.35	.4434 .4377	.3324 .3273	6270 6070	.2033 .1974	79.4 79.5
87.7 88.1	406 407	62.15 58.36	695.02 682.32	131.54 134.60	.4438 .4577	.3328 .3454	6193 6333	.1855 .1940	87.8 88.0
87.9 90.9	403 387	69.53 59.71	714.40 675.60	134.59 137.77	.4145 .4553	.3067 .3432	5709 6126	.2020 .2032	88.0 89.8
86.9 91.9	419 400	66.35 41.75	787.54 677.63	132.51 137.67	.3959 .4858	.2906 .3713	5848 6812	.1958 .2020	88.1 85.7
91.8 88.0	397 400	56.18 46.59	690.21 674.93	139.46 134.45	.4570 .4922	.3447 .3773	6280 6949	.2045 .2213	85.3 87.0
95.3 94.3	402 386	57.24 60.95	708.78 698.62	145.00 140.48	.4429 .4402	.3320 .3296	6215 6142	.2002 .1995	78.3 78.3
96.6	403	57.71	708.76	143.71	.4424	.3315	6386	.2021	76.6

O_D: O₂ removed by direct reduction, Q_{CO}: CO in bosh gas, Q_{H₂}: H₂ in bosh gas,
 $\eta^*_{H_2}$: H₂ gas utilization, η^*_{CO} : CO gas utilization, R: thermal parameter

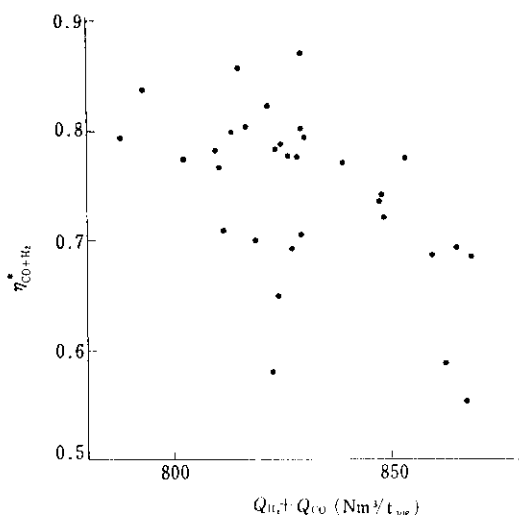


Fig. 3 The relation between degree of reducing gas utilization, $\eta_{CO+H_2}^*$, and volume of reducing gas, $Q_{H_2} + Q_{CO}$ in the furnace

る。 η_{CO}^* はCO量の増加につれて減少し(Fig. 2), また $\eta_{H_2+CO}^*$ も炉下部における還元ガス量 $Q_{H_2} + Q_{CO}$ に反比例して変化している (Fig. 3)。この重油吹込実験中、吹込量の増加につれて、(鉾石/コークス)比は増加し、酸素富化によってボッシュガス中の $CO + H_2$ 濃度は増大した。Table 1より重油吹込量の増加につれて直接還元酸素量 (O_D)は減少し、 O_H が増加していることがわかる。

一般にガス利用率 $\eta_{H_2+CO}^*$ が増加するときは、重油吹込量(または H_2 成分)の増加につれてコークス比は低下し同時にボッシュガス量が減少するときである¹⁾。

コークス比を低下させる目的から考えると、重油吹込量の増加につれて、ガスの利用率($\eta_{H_2+CO}^*$)が減少しコークス置換率が低下するので、装入物の被還元性を高めるなどして積極的にガス利用率の向上を図らねばならない。還元性のよい高塩基度の焼結鉾やペレットを使用するのは効果的である。

3.2 ガス燃料の吹込み

(1) H_2 ガス量増加の意義

ここでガス燃料吹込み時にとくに顕著になる H_2

ガス量の増加の意義を考えてみる。水素の多い燃料を羽口より吹込むと分解して約 2000°C の羽口先燃焼温度で、 H , O , OH などの遊離基を形成し、再びより低温度の装入物表面で再結合する際、分子結合熱を与える。Fig. 4に重油を種々の酸素比で燃焼した時のガス組成を計算して示す。この過程は H_2 の熱伝導率が他のガスのそれに比較して7倍近いことと合わせて、装入物—ガス間の熱交換を促進する H_2 特有の機能である。製鋼工程でスクラップ予熱などに酸素オイルバーナを使用する際得られる60%以上の高い熱効率も同様な反応によって説明されている。一方遊離基形成時の吸熱反応は、必要とする羽口先理論燃焼温度以上になるように送風温度を上げた場合でも、過剰顕熱分を吸収できるので炉況を安定に保つ点で有利である。このような H_2 の効果は羽口レベルから上方への温度勾配を減少させ、局部的な羽口領域の過熱、とくに 1600°C 以上の Si などの還元領域を狭くするであろう。

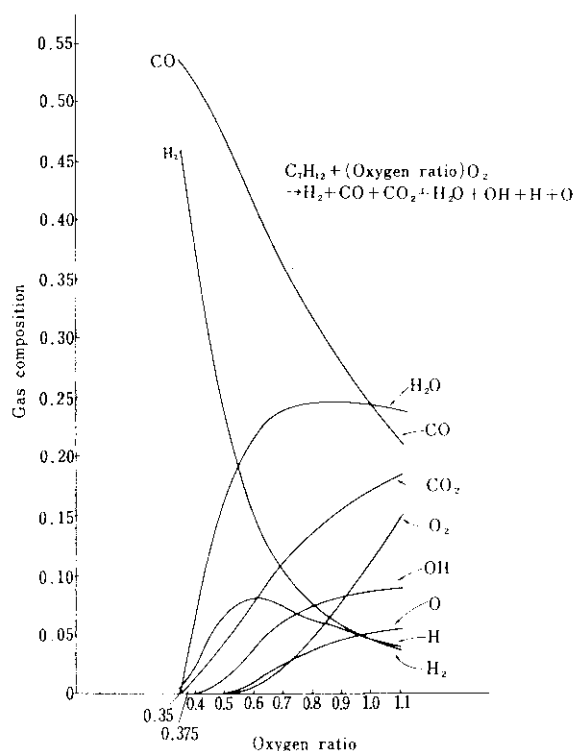
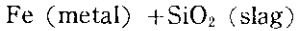
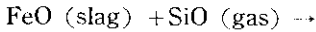


Fig. 4 Formation of H , O and OH radicals in O_2 -fuel oil flame

一定の鉄中 Si を確保することは必要であるが、気化した SiO の大部分は一般に FeO などと反応して下式のごとく SiO₂ スラグを形成する。



この SiO₂ スラグは羽口上部からポッシュ部で蓄積されアーチを形成する。過度の酸素吹込、風熱の上昇により羽口前の SiO の形成が盛んになると、再酸化により形成された SiO₂ スラグはしばしば棚吊の原因になったり、 P/V (P : 送風圧, V : 送風量) の増加を招く。遊離基の形成による高温域の縮小は SiO の発生を抑制する。したがって燃料吹込み時の熱補償を酸素富化でおこなう場合に炉内 CO 分圧の上昇が SiO 中 Si の鉄中移行に対する抑制効果を持っていることと合わせて鉄中 Si の減少の原因になっていると考えられる。

(2) 羽口先燃焼温度の低下

天然ガスなどガス燃料の吹込みに伴う高炉炉内反応の変化のうち、特に重油吹込みと異なる点を考察してみる。まず相違点の 1 つは炉内で CO および H₂ に分解するとき、吸熱量が大きいことが考えられる。羽口先理論燃焼温度に対する影響を調べるため各種の炭化水素の部分燃焼温度を計算して Fig. 5 に示した。炭化水素の部分燃焼温度は H₂ 成分の増加につれて低下していることがわ

かる。コークスおよび重油に比較して天然ガスなどは部分酸化熱が著しく低下し、1000°C の予熱空気で燃焼した場合でも生成ガスの温度はコークスの 1700°C に比して 600°C まで低下している。なおコークスの部分燃焼温度はコークス水分を 2.5% また灰分を 11% として計算した。コークスとの置換率はカロリー基準で計算すると 50kg の重油に対して天然ガス 75Nm³ が等価である。なおこの場合重油の燃焼熱を 9700kcal/kg、天然ガスおよびコークスの燃焼熱をそれぞれ 8500kcal/Nm³、8000kcal/kg とし、置換比は操業条件によって変化するのでカロリーベースで計算した。また送風温度の補償は 150°C とした。しかし羽口先燃焼温度はこの天然ガス吹込みで約 100°C 低下する。したがって熱補償を送風の酸素富化と温度上昇によって補う必要がある。

(3) 通気性

H₂ 成分の粘度は CO にくらべて小さいので、炉内ガス中の H₂ 成分増加につれて炉内圧力損失が低下するとの考え方がある。特にこの点を検討してみる。また炉内通気抵抗と炉の熱レベルについても考察してみる。

高炉の操業度を一定に保たない限り、炭化水素の吹込み量の増加につれて(鉱石/コークス)比は増加し、ポッシュガス量もふえるので、炉内の通気性は悪くなるはずである。S. Ergun,³⁾ P. C. Carman⁴⁾ などによれば、充填層内の圧力損失は次式で与えられる。

$$\Delta P/L = \Phi \mu^n \rho^{1-n} u^{2-n}$$

ここで、

Φ は通気抵抗指数、 L は充填層長、 μ , ρ , u はそれぞれ流体粘度、密度、空塔準拠のガスの線速度を表わす。上式中、高炉の通気性に影響を及ぼす要因としては、ポッシュガス量、ポッシュガスの密度および粘性、通気抵抗指数に影響するコークス強度、粒度、塊成鉱比がある。これらの各要素の寄与率は、操業の形式によって変化するので炭化水素のコークス置換率と同じく、具体的に操業内容を詳述しない限り技術的な意味をもたない。

ここでは炭化水素量 (H₂ 成分) の増加に伴う、ポッシュガスの粘度の低下、圧力損失を検討して

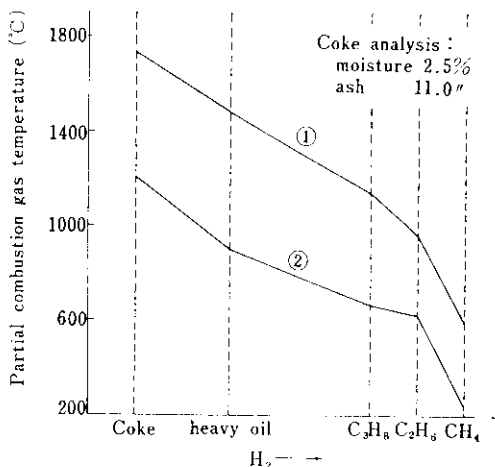


Fig. 5 Temperature of partial combustion gas of various hydrocarbons (air ② at room temperature ① preheated at 1000°C)

みる。

混合ガスの粘度は、各成分ガスの粘度の加算性は成立しない。Wilke⁵⁾によれば混合ガスの粘度の推定には下の式が有効である。

$$\mu = \sum_{i=1}^Z \mu_i / \left(1 + \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^Z n_j \varphi_{ij} \right)$$

ここで、

$$\varphi_{ij} = \left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{1/4} \right]^2 / \left[4 / \sqrt{2} \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{1/2} \right]$$

n , M は各成分の体積分率, 分子量を示す。CO, H₂, および N₂ の混合ガスの種々の温度における粘度を計算して Fig. 6 に示した。混合ガスの粘度は混合ガス中の H₂ 成分の増加に伴って低下するが, 30% 以下ではほとんど変化しない。したがって通常の高炉操作では, 炭化水素量 (H₂ 量) を増加させることによりボッシュガスの粘度を低下させ, 炉内圧力損失を減少させることは期待できない。一方混合ガスの粘度に及ぼす温度の影響は大きいことがわかる。炉下部の熱レベルと炉内圧力損失の関係を検討するため, P/V と炉下部の熱レベルを表わすパラメーター “ R ” と比較して Fig. 7 に示す。 P/V は鉱石/コークス比によって変化するので補正をおこなった。Fig. 7 から送風圧はほぼ R 値に比例していることがわかる。したがって炉内通気性の問題も炉内の熱レベルの変化 (特に炉内ガス中 H₂ 成分の多い場合) と密接な関係があることがわかる。

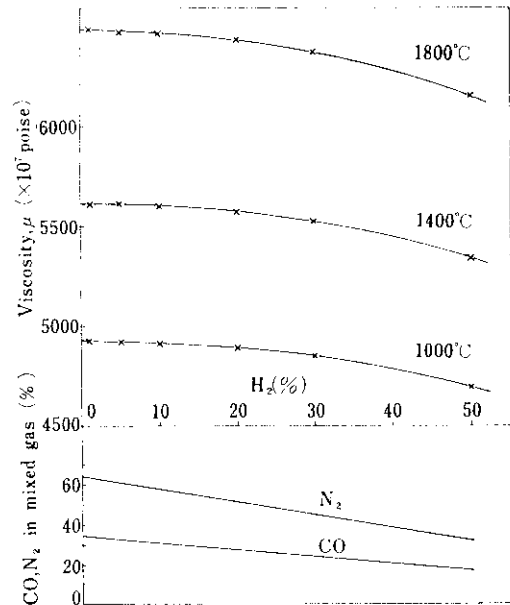


Fig. 6 Viscosity of CO-N₂-H₂ gas mixtures at various temperatures

4. 還元ガスの吹込み

還元剤をコークス以外のものに置きかえるためには, 前述のように重油および天然ガスの吹込み, あるいは複合送風が実施されているが, さらにこれらをあらかじめ変成して高炉に吹込む方法が注目されている⁶⁾⁷⁾⁸⁾。

4.1 羽口前熱収支

まず羽口に還元ガスを吹込む時の羽口先理論熱

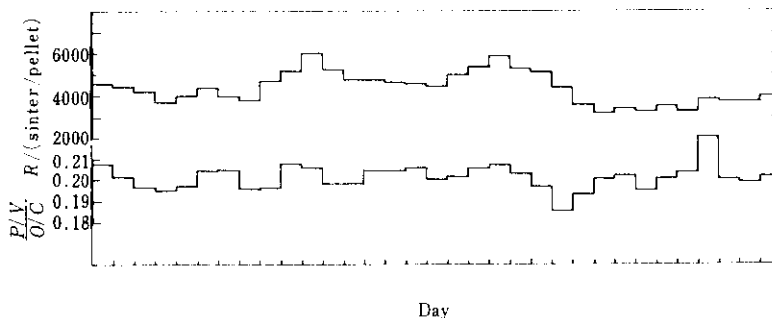


Fig. 7 The effect of thermal state of the hearth on P/V (data show daily averages)
(P : blast pressure, V : blast volume, O : ore ratio, C : coke rate)

焼温度の低下について考えてみる。

羽口前レースウェイ領域において熱収支を求める際、入熱の項となるのは

- 1) 羽口先に降下してくるコークスの持込み顕熱
- 2) 送風顕熱
- 3) コークスおよび吹込み添加燃料の H_2 , CO までの部分酸化熱

である。さて還元ガスを吹込むことは、羽口先ガス組成である H_2 と CO を部分酸化熱を伴わずに吹込むことである。またこの場合ガス化するコークスの持込み顕熱も省かれる。送風量の10%の CO (100%) を吹込む場合送風温度および送

風中湿分を一定に保つと約100°Cの温度低下に相当することが羽口領域の熱計算よりわかる。この冷却効果は、重油、天然ガスなどを吹込む際これらが部分酸化熱をもっていることに比較して、還元ガス吹込みの制約条件の一つとなる。一方還元ガス発生設備内で媒 (soot) を除去することができるので他方有利な点もある。したがって還元ガスの吹込みは、羽口部を対象にする場合、ガスの純度と温度にはおのずから臨界点がでてくることになるが、まず酸素源として、純酸素と空気を用いて、部分酸化法により種々の炭化水素を變成して得られる生成ガスの温度を計算すると **Table 2** のようになる。

天然ガスの部分酸化燃焼生成ガスの温度は空気を酸化剤として用いた場合250°Cで、純酸素を用いた場合は400°Cになる。実際の生成ガスは数パーセントの H_2O および CO_2 を含んでいるのでこれらの温度は多少高くなる。**Fig. 8**に天然ガスを部分燃焼して得られる生成ガスの顕熱と、生成ガスの H_2O および CO_2 の種々の濃度におけるエンタルピーを示す。 CO_2/H_2O 比は計算の便宜上一定に選んだ。 CO_2 3%, H_2O 3.56%を含む還元ガスを1000—1200°Cの温度で使用しても、ガスの顕熱がこれら酸化物の分解に消費されて、高炉に吹込んだ場合カロリー上のプラス効果はないことがわかる。還元ガスは還元剤としてコークスの代替をする機能は残るが、天然ガスを變成しないで吹込んだでも、等量の還元ガスモル数を得るので、高炉吹込ガスの還元ガス($CO+H_2$)の純度が低い場合は、天然ガスを前もって變成する技術的な意義は失われてくる。**Fig. 9**に CO_2 2%, H_2O 3.7%を有する還元ガスのエンタルピーを吹込み温度の函数として示した。また天然ガスをこの還

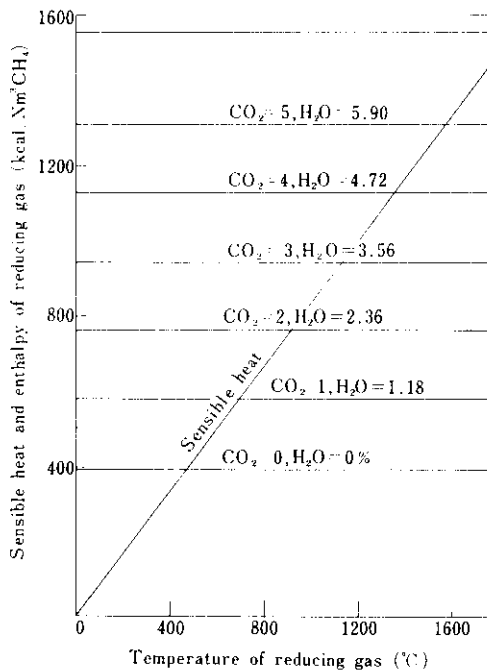


Fig. 8 Sensible heat of reducing gas and enthalpy of reducing gas at various CO_2 and H_2O concentrations

Table 2 The temperature of gas formed by partial oxidation of various hydrocarbons

Oxidant	Reaction	Temperature of formed gas (°C)		
		CH_4	C_2H_6	C_3H_8
O_2	$C_nH_m + O_2 \rightarrow CO + H_2$	405 (380)	880 (1454)	1055 (2430)
air	$C_nH_m + O_2 + N_2 \rightarrow CO + H_2 + N_2$	250	525	655

(): reaction heat (kcal/Nm³)

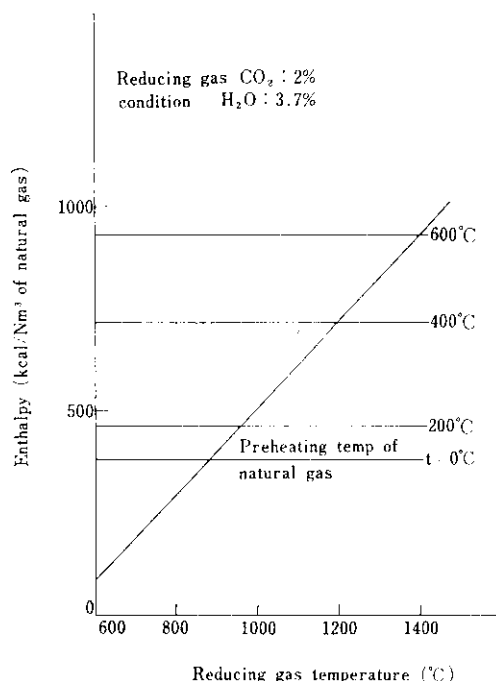


Fig. 9 Effect of preheating of natural gas injected to blast furnace

元ガス純度に部分燃焼する場合の発生熱を予熱温度をパラメータに選んで示した。この図から、天然ガスを予熱しないで高炉に吹込むことは、還元ガスを850°Cに加熱して吹込むことに熱的には等しいことがわかる。また天然ガスを200°Cから600°Cに予熱して高炉に吹込むことは、熱的には還元ガスを1000°Cから1400°Cまでに加熱して吹込むのに等しい。

4.2 ソリューションロス反応

還元ガスをシャフト部に吹込みコークス比の低下を図る操作の効果については、一般に高炉シャフト部1000°C以上の領域で進行するカーボンソリューション反応への抑制効果との関連において説明されている。COの分圧を高めればソリューションロス反応は減少する。他方シャフト部への還元ガスの吹込みは、ヴィスタイト(FeO)の間接還元を増大を目的としているので、還元反応の結果発生した CO_2 ガスがカーボンと反応してソリューションロス反応を進行させる事実とは同じ意義をもっていると考えられる。ヴィスタイトの

生成領域をはずれた約1000°C以下の温度領域で、すなわちシャフト上部に還元ガスを吹込んでも、単に炉頂ガスの熱量を増加させる結果になってコークス比の大幅な低下は望めない。羽口以外のところに吹込む場合吹込み還元ガスの純度に対する制限は羽口部吹込みの場合に比較して緩和される。しかしガスの炉の半径方向への拡散および分布に関係した利用効率の問題は残る。アゾフスター⁹⁾で1965年に実施した例によれば、羽口と垂直方向一平面で羽口から距離660mmをおいて設けられた吹込みポートより天然ガスの水蒸気改質ガスを吹込んだ結果、吹込みガスは炉内ガスと十分混合せず炉壁に沿って環状で炉頂に上昇することを報告している。天然ガスを吹込んだ場合炉頂断面方向の H_2 濃度は5.5~7.5%の範囲でほぼ均一な分布を示したが、還元ガス吹込の場合は H_2 濃度は炉壁周辺で13%炉芯部では4%以下でコークス比の低下が見られなかった。

今後の還元ガス吹込み技術は上記のガス分布と純度の問題を中心に理論的に、また実験的に十分究明され確立されていくものと思われる。

5. まとめ

- (1) 炉下部の熱レベルを直接的に反映するものとして、ヴィスタイト(FeO)のCOおよび H_2 ガスによる間接還元、カーボンによる直接還元率を決定し、さらに、炉下部の熱レベルをあらわす特性値“R”を決定した。
- (2) COガス利用率はボッシュガス中CO成分の増加に伴って減少し、 H_2 ガス利用率は炉床の熱レベルによって決まり、熱レベルを表わす特性値Rと正相関にある。
- (3) 炭化水素吹込みによりボッシュガス中 H_2 の増加によってガスの粘性は低下し、炉内圧力損失が減少すると考えられるが、ガスの粘性低下による影響はほとんど無視できることが明らかとなった。ガスの粘性の低下はむしろ炉床の熱レベルによって支配される。
- (4) 還元ガスの吹込みは羽口領域を対象にした場合、 CO_2 および H_2O を5~6%含むものでは1000~1200°Cに加熱して吹込んでも熱

量の面で利点はない。 CO_2 2%, H_2O 3.7% を含む還元ガスを 850°C で羽口部に吹込むことは天然ガスを予熱しないで吹込むことに熱量的には等価である。

本稿の内容作成について技術開発部技術情報室

満岡氏、千葉システム課南部氏の協力を得た。

総括的な助言をいただいた技術研究所製鉄研究室岡部氏製鉄関係の方々と合せて感謝の意を表わします。

参 考 文 献

- 1) K. I. KOTOB: Сталь, (1967)4, 300
- 2) Hahn: Z. F. Phys. Chem., 44(1902)516, 48(1904), 735
- 3) S. Ergun: Chem. Engineering progress, 48(1952), 89
- 4) P. C. Carman: Transaction Inst. Chem. Eng., London, 15(1937), 150
- 5) Bromley and Wilke: Ind. Eng. Chem., 43(1951)
- 6) Anon: New Scientist, (1969) Feb., 291
- 7) Shell International Gas Limited: Natural Gas Circular Letter, 2(1970)6
- 8) B. H. КОЗУБ et al: Сталь, (1971)1, 12
- 9) R. W. Kear: Changing Role of Petroleum Fuels in Present and Future Iron and Steelmaking, World Power Conference, Moscow, (1968)

