

討 4 直接還元法における燃料比の限界

東京大学 工学部

相馬 胤和

1 まえざき

現行の高炉—転炉法はその生産性の高さと燃料消費量の低いことにより、他の製鋼法を圧倒しているといえる。高炉の熱損失は非常に少なく、ほぼ断熱反応装置といえるところまで改良され、その燃料比は理論燃料比に近いところまで達し、高炉法は煉熟期にあるといえる。しかし高炉法には強度の高いコークスを必要とすることから、石炭とくに強粘結炭の動静に大きく支配されている。将来資源的に見て強粘結炭は不足する方向にあり、それにもなつて高炉によらない直接製鉄法がクローズアップされてきた。その中でもとくに石油産出地帯を中心に天然ガスによる鉄鉱石の還元を軸とする直接還元法が高炉と共存して、工業的に成立し得る状況になつてきた。

これらの直接還元法は高炉に比較すれば、まだ技術的蓄積は少なく、この数年著るしく熱消費量は低下しているが、今後さらに技術的な飛躍をするものと思われる。採用したデータは充分新しいものとはいえないが、考察を行なつてみる。

2 高炉法と直接還元法の比較

近年高炉法と直接還元法の熱バランスの比較がなされるようになつてきた。R.S. Barnes¹⁾とS. Eke-torp²⁾らは各法のエネルギーバランスを図示している。それらにおける高炉の燃料比はやや高いので、日本における高炉操業の1例として重見³⁾のデータを使用した。この場合のコークス比は推算で440 kg/tとなる。回転炉としてはSL/RN法としてU. Kalla⁴⁾のデータを利用した。なお溶融還元法は工業的規模で行なわれていないが、S. Eke-torp²⁾のデータを使用した。流動層炉法には充分比較にたえるようなデータが見当たらないので、ここでははぶいたが、考え方はシャフト炉に準ずることとができる。

これらのデータから、入熱はリサイクルを考えずに、一次の燃料発熱量をとり、出熱は利用熱として製品鉄の還元に必要な熱量をとつて、この値を基準の100%とし、他の値はこれに対する%で表示した。損失熱はいろいろ考えられるが、物理的熱損失と化学的熱損失を取上げた。物理的熱損失としては炉体からの放熱と排出ガス中の顕熱を加えた。また化学的熱損失としては排出ガス中の発熱量をとつた。この場合リサイクルにより炉内に還元されるガスの発熱量は除外した。物理的熱損失は熱交換により回収し得る熱を表わし、化学的熱損失は燃焼により他に利用し得る熱を示している。各種還元法における燃料比の比較を行なう際には、これら物理的熱損失と化学的熱損失を最小にすることが燃料比の限界を示すとの考え方の単純化を試みた。

その結果を表1に示す。各データは計算の基準が多少違つていゝので、詳細な比較をするには充分とはいえないが、大勢を示すうえには支障はないものと思う。

物理的損失は、還元炉については、溶融還元法は17%、高炉法は10%、シャフト炉法は4%内外で、その値は炉の平均温度が高い程多く、シャフト炉は炉内温度が低く、レンガを保護しなくてよいので少ない。つぎに還元炉以外の炉については、高炉の熱風炉は蓄熱式であるため少なく5%内外であるが、シャフト炉ではガス改質炉の熱損失が非常に多く80~100%を示している。これは鉄管型の流通式ガス—ガス熱交換器のため効率が高い。最近この改質炉の熱回収を改善し、燃料消費量を低くした例が報告され、3.0 Gcal/tになつたといわれるが、少ないものでは2.6 Gcal/tとされている。これから上表の例によつて逆算すると、改質炉の熱損失がそれぞれ51%と29%と推算される。

表 1 各製鉄法の熱バランスの比較

製鉄法	文献	燃料系熱量		製品鉄還元熱量		物理的損失熱量		化学的損失熱量
		Gcal/t	%	Gcal/t	%	熱風炉 改質炉 %	還元炉 %	(再利用可能) %
高炉法	1)		180.3		100.	4.6	12.1	42.8
	2)	3.75	214.3	1.75	100.		8.9	56.5
	3)	3.56	224.8	1.59	100.	6.9	9.2	54.9
シフト炉法	1)		200.		100.	96.5	3.5	0.
	2)	3.45	197.1	1.75	100.	77.1		0.
ロータリー キルン法	4)	3.42	195.2	1.75	100.			
溶融還元法	2)	3.05	174.3	1.75	100.		16.6	17.4

29%というのは少し低すぎる感がある。熱回収をこの程度にするのに水蒸気発生など、ガス—液体熱交換を使えば可能であるが、その熱を還元炉にリサイクルすることは、かなり困難なことと思われる。

化学的熱損失については、高炉は一種のガス発生機であり、ユーラス中熱量の約40%が炉頂ガスとして出てゆく。このうち一部は熱風炉を通し炉内に還元される。高炉の加熱がC→COへの燃焼に支えられ、還元の約30%がC→COによる直接還元によることゝ宿命である。これに比べ、シフト炉では天然ガス中のCH₄はH₂OまたはCO₂により改質され、COとH₂になるので、C→CO反応の寄与は高炉より少なく、また還元はすべてガスにより行なわれる。還元終了ガスの一部は燃焼により鉄石の加熱に使われるため、再利用可能なガスの発生はない。

ロータリーキルン法は燃料の多様性の点からは、将来にわたって理想的な還元法であるが、回収部分のあること、炉内でリングの形成が個々の鉄石や燃料の物性に大きく支配されること、あまり進展はみられていない。ただこの方法の大きな欠点であつた高い排出ガス温度を、グレートで鉄鉄石の予熱に利用することにより、表1に示すように、燃料消費量はかなり良い結果が得られている。

溶融還元法はまだ工業的規模では実施されていないが、FeO+C=Fe+CO反応を主体とする固体炭素による溶融鉄鉄石の還元では熱量供給の面で電力を使う以外には考えられず、一まず置くことにする。つぎに最近提案されている、鉄鉄石を溶融状態でガス還元し、FeO+CO=Fe+CO₂反応を主体とし、溶融体を高温に保つ熱供給を燃焼に頼る方法を考えてみると、この場合、同一バス中にて還元と酸化とが同時進行する技術的な裏づけが必要である。またFeOに強い耐火物の問題がある。反応はガス—液体反応で、しかもガス密度が変化しない反応であるため、反応速度のみでなく物質移動速度にも大きく依存する。反応速度については、ガス—固体反応に対して圧倒的に速い、或はガス—液体界面積を極度に大きくする必要がある。前者はまだ実験的な確証が得られていないので、目下後者に頼らざるを得ない。後者では微細な気泡を液体中に広く分散させることになるが、技術的に可能か否かという点に問題がしばしばあり、かなり困難である。

高炉法と現在一番低い燃料消費量を示す、COガス改質によるシフト炉法の燃料比の比較を行なう場合、上述の物理的、化学的熱損失をどこまで減らせるかにあつてくる。化学的熱損失は主として化学平衡と熱流比の問題に置換えられ、物理的熱損失は主に熱交換の問題に置換えられる。そこで化学

平衡と熱交換から検討を行なう。

3 鉄鉱石層のガスによる同流還元速度

充填層は古くから利用されてきた反応形式である。この特色は単位容積あたりの反応面を大きく利用していることにある。シャフト炉は鉱石を降下させることにより、ガスと同流状態で反応させることになり、鉄鉱石のガス還元はほぼ化学反応律速として取扱えるので、同流状態におけるガス-固体反応を固相の表面積に着目して無次元化する。⁵⁾

鉱石の無次元化滞留時間 O_t は次式で表わせる。

$$O_t = k_r X_r P t / r_s \quad (1)$$

ガスの無次元化接触時間 G_c は次式で表わせる。

$$G_c = 4.2 k_r P X_o W / Q r_s \quad (2)$$

下降鉱石と上昇ガスの酸素バランス B_o は

$$B_o = G_c / 3 O_t \quad (3)$$

となる。

ここで、 k_r : 化学反応速度係数 [$\text{kg}/\text{m}^2 \text{h atm}$]、 X_r : 還元ガス分率 [-]、 P : ガス全圧 [atm]、 r_s : 鉱石の見掛け密度 [kg/m^3]、 t : 鉱石滞在時間 [s]、 r : 鉱石半径 [m]、 X_o : 還元すべき酸素分率 [-]、 W : 層中鉱石全重量 [kg]、である。

三界面未反応核モデルを使い、化学反応速度律速で計算を行ない、移動層における最終還元率とガス利用率を O_t と G_c をパラメータ

として、温度 900°C 、 CO による還元同流状態の計算を行なった結果を図1に示す。

高炉における間接還元率を70%とすると、図1より平衡ガス利用率は55.6%である。実績ではガス利用率は50%を越え、とくに高炉下の現在では54%に達したとの報告があり、ガス利用率はほぼ平衡に達しているといえる。

シャフト炉においては、 O_t 、 G_c の計算で鉱石を高炉と同サイズとすると、高炉ボツシュガスは N_2 を50%含み、シャフト炉用還元ガスは N_2 がほとんどないので、 X_r は同じ高炉の2倍となり、高炉内にはコークスが容積の半分を占めるので、 W は同じ高炉の2倍となる。これだけで同一炉内容積あたり G_c 、 O_t は共に4倍となり（同一生産速度に對しても倍となるため）、4倍の生産速度に同じ還元率、ガス利用率が得られるといえる。圧力が高炉のものがシャフト炉の2倍であれば2倍に、同圧であれば4倍である。たゞシャフト炉では還元率を95%まで上げねばならず、高炉の間接還元率は70%なので、そのところでシャフト炉のガス利用率は高炉に比べ低下するが、ガス利用率を上げるためには生産速度を抑えてやる必要はない。

4 熱交換特性

高炉では、料口前で約 2000°C になったボツシュガスは降下する固体と熱交換を行なって、炉頂ガスとして約 100°C まで出て行く。したがって温度効率95%に達する。この熱交換効率の良さ、高炉の熱経済にとり重要な要素を占めている。

このガス-固体の熱交換は固体の表面を通して行なわれるので、表面伝熱抵抗律速として扱い、前節同様固体表面について無次元化する。

固体の無次元化滞留時間 O_t' は次式で表わせる。

$$O_t' = k_t t / s c r \quad (4)$$

ガスの無次元化接触時間 G_c' は次式で表はせる。

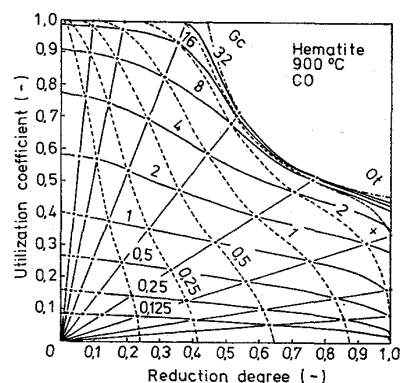


図1 同流還元における無次元化ダイヤグラム

$$Gc' = hA / C_p Q = 3hW / C_p r \rho \quad (5)$$

熱流比を Bo' とすると、次式に表はせる。

$$Bo' = Gc' / 3Ot' \quad (6)$$

ここで、 $A = 3W / (r \rho)$ 球体表示の固体の総表面積 $[m^2]$ 、 h : 固体表面の熱伝達係数 $[kcal/m^2h^\circ C]$ 、 C_p : ガス流量 $[Nm^3/h]$ 、 W : 層中固体全重量 $[kg]$ 、 Q : ガス流量 $[Nm^3/h]$ 、 r : 固体平均粒径 $[m]$ 、 ρ : 固体平均見掛密度 $[kg/m^3]$ 、 C : 固体の平均比熱 $[kcal/m^3]$ 、 t : 固体滞在時間 $[h]$ である。

改質炉のような鉄管式のガス-ガス熱交換にノロくは、 h は熱伝達係数を用い、 $Ot' = Gc'$ の前式のような総表面積 A を使った式で計算し、鉄管の総表面積を使えば同様に取扱える。

向流熱交換器における温度効率を次式に計算する。⁶⁾

$$\eta_h = \frac{t_{h1} - t_{h2}}{t_{h1} - t_{c1}} = \frac{1 - E}{1 - \beta E} \quad (7)$$

$$\eta_c = \frac{t_{c2} - t_{c1}}{t_{h1} - t_{c1}} = \frac{1 - E}{1 - \beta E} \cdot \beta \quad (8)$$

平行流熱交換器では

$$\eta_h = \frac{1 - E}{1 + \beta} \quad (9) \quad \eta_c = \frac{1 - E}{1 + \beta} \cdot \beta \quad (10)$$

ただし $\beta = \frac{C_p Q}{CW/t} = \frac{1}{Bo'}$ (11) $E = \exp(-\gamma h A)$ (12)

γ は向流では $\gamma = \frac{1}{C_p Q} - \frac{1}{CW/t}$ (13)

平行流では $\gamma = \frac{1}{C_p Q} + \frac{1}{CW/t}$ (14)

ここで、 t_{h1} : 高温ガス入口温度、 t_{h2} : 高温ガス出口温度、 t_{c1} : 低温固体入口温度、 t_{c2} : 低温固体出口温度、である。

(4)~(14) 式を使って計算をし、 Gc' 、 Ot' をパラメーターとして、 η_h 、 η_c を計算してダイヤグラムを使うと、図2図3のようになる。向流熱交換は平行流熱交換に比べて有利であるのがわかる。高炉における熱交換特性は図2の右上隅の点のあたりにあり、非常に良いといえる。シヤフト炉の改質炉の管径を260 mm中とすると、⁷⁾ 表面積は高炉内の固体表面に比べ、数十分の1となり、温度効率は30%位の所に来ると思われる。

直接還元法における燃料比を高炉と同じ程度にするためには、熱交換方式を根本的に変更しなければならないと思う。

文献

- 1) R.S. Barnes Stahl u. Eisen 94 (1974) P23, 2) S. Ekeberg Scand. J of Met. 3 (1974) P200
3) 重見 製鉄ハンドブック P188 地人書館 4) U. Kalla Stahl u. Eisen 87 (1967) P. 534, 5) 相馬, 鉄と鋼 61 (1975) P909, 6) 内田 伝熱工学 P262 裳華房 7) 西田 鉄と鋼 62 (1972) P 705

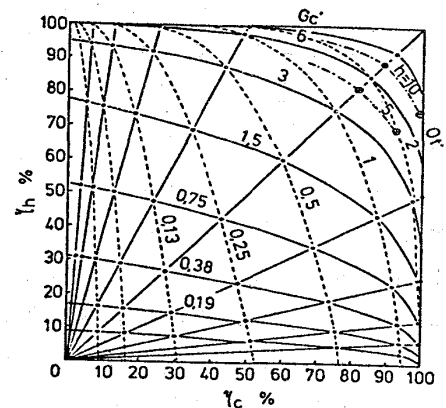


図2 向流熱交換器における無次元化ダイヤグラム

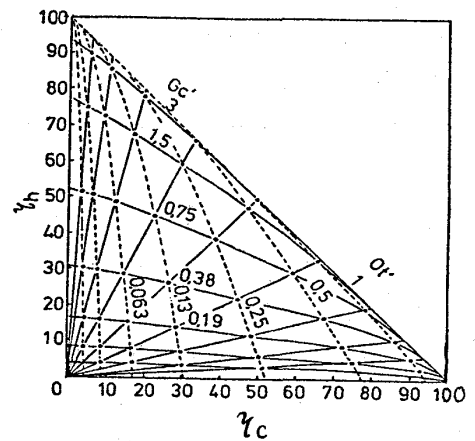


図3 平行流熱交換器における無次元化ダイヤグラム