

上底吹き転炉を用いた鉄鉱石の溶融還元における
二次燃焼・着熱挙動と石炭原単位の関係松尾 充高*・斎藤 力*・片山 裕之*²
平田 浩*・小川 雄司*Relation between Post-combustion, Heat Efficiency and Coal Consumption
in Smelting Reduction of Iron Ore with Top-and-Bottom Blowing
ConverterMichitaka MATSUO, Chikara SAITO, Hiroyuki KATAYAMA,
Hirosi HIRATA and Yuji OGAWA

Synopsis:

Factors affecting the coal consumption in the smelting reduction of iron ore with top-and-bottom blowing converter were investigated.

(1) According to the results of 5 t and 100 t scale experiments, coal consumption increased with the Volatile Matter (VM) content in coal and with the degree of contact of O₂ and metal. The decrease of heat loss unexpectedly resulted in the drop, not of coal consumption, but of post combustion ratio.

(2) Coal consumption did not drop monotonously with post combustion ratio, but increased again in the region of high post combustion.

(3) Experimental results were explained by introducing the concept of "the necessary amount of fixed carbon".

(4) One route for decreasing the consumption of high VM coal is to decrease the amount of fixed carbon burned directly or indirectly by O₂. The degree of combustion of fixed carbon by O₂ was defined as *J* value (kg-fixed carbon burned/Nm³-O₂). The minimum *J* value obtained in experiments was 0.25 kg-C/Nm³-O₂.

It was ascertained by fundamental experiment that transport of oxygen in slag through iron ions limits the minimum *J* value.

Therefore, in order to decrease the consumption of high VM coal, it is necessary to combine pretreatment of coal and ore with smelting reduction process.

Key words: smelting reduction; coal consumption; post-combustion; top-and-bottom converter.

1. 緒 言

前報¹⁾では、炭材としてコークスを使用した場合について、多量スラグにより酸化性雰囲気と攪拌メタル浴を遮断する方式での鉄鉱石溶融還元法の試験結果を述べ、170 t 転炉にもスケールアップできることを示した。

実用プロセスとしては、鉄溶融還元は炭材として一般炭、特に揮発分が高い石炭（以下では高 VM 炭と呼ぶ）を使用できることが要望されている。しかも、最近注目されている CO₂ 排出量規制への対応という見地から、石炭原単位を低くすることが重要な課題である。

石炭原単位を低減するために従来提唱されてきた方策

は、高二次燃焼率・高着熱効率を実現する手段を見出すことである^{2)~14)}。

そこで、本報では各種の一般炭を使用した鉄鉱石の溶融還元実験を行い、二次燃焼率を高めるための条件を明らかにした上で、石炭原単位を決定している要因について検討し、石炭原単位低減のための手段を考察した。

2. 実験方法

5 t 規模試験転炉の設備、および試験方法は前報¹⁾で示したものと同一である。

試験条件を Table 1 に、使用原料の成分を Table 2 に示す。鉱石（ペレット）、炭材および生石灰はいずれ

平成元年 4 月本会講演大会にて発表 平成 2 年 3 月 13 日受付 (Received Mar. 13, 1990)

* 新日本製鉄(株)製鋼研究センター (Steelmaking Technology Lab., Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 299-12)

*2 新日本製鉄(株)製鋼研究センター 工博 (Steelmaking Technology Lab., Nippon Steel Corp.)

Table 1. Experimental conditions.

Top blowing O ₂ (Nm ³ /min)	10~14
Bottom blowing (Nm ³ /min)	O ₂ , N ₂ 0.4~5.0
Amount of metal (t)	3~5
Amount of slag (t)	1~2
Amount of C in slag (t)	0.1~0.3
Temperature (°C)	1450~1550

Table 2. Chemical composition of raw materials (%).

(a) Coal

	Ultimate analysis (Dry)			Proximate analysis			
	C	H	O	VM	Ash	FC	Moisture
HVM coal	75.2	5.08	8.34	36.8	8.5	51.1	3.6
MVM coal	78.9	3.56	5.84	25.8	9.6	61.2	3.4
Coke	87.5	—	—	—	12.1	84.9	3.0

(b) Ore pellet

T. Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Moisture
64.95	0.2	92.56	2.30	0.48	2.56	0.04	1.5

も上方から連続的に添加した。鉬石は、メタル浴温度が 1500 ± 30°C の範囲に保たれるように投入量を調整した。炭材は、炉内の残留炭材量がほぼ一定になるように、排ガス分析値から計算した炭素収支にもとづいて投入した。

主要な変更条件は炭材の種類（高 VM 炭，中 VM 炭，および比較としてのコークス），底吹きガス条件（O₂ ガス量，N₂ ガス），および上吹き酸素条件である。

なお，この試験での炉体放散熱は約 700 Mcal/t である。

主要な特性値は次の三つである。

二次燃焼率：

$$(PC\%) = \frac{(CO_2\%) + (H_2O\%)}{(CO_2\%) + (CO\%) + (H_2O\%) + (H_2\%)} \times 100(\%) \dots\dots\dots(1)$$

着熱効率：

$$\eta_{pc} = \left[1 - \frac{(\text{排ガススーパーヒート})}{(\text{二次燃焼発生熱量})} \right] \times 100(\%) \dots\dots\dots(2)$$

石炭原単位：

$$G_{coal} = \frac{(\text{使用石炭量}) + (\text{炉内残留炭材消費量})}{(\text{生成溶銹量})} \text{ (kg/t-HM)} \dots\dots\dots(3)$$

3. 実験結果

3.1 高二次燃焼率を得るための操業条件

底吹きガスによるメタル浴の攪拌強さが二次燃焼率と着熱効率に及ぼす影響を Fig. 1 に示す。攪拌力は，底吹き O₂ は 2 CO になるとして森らの提出した式¹⁵⁾ で計算した。攪拌が強すぎると二次燃焼率の低下が，一方，

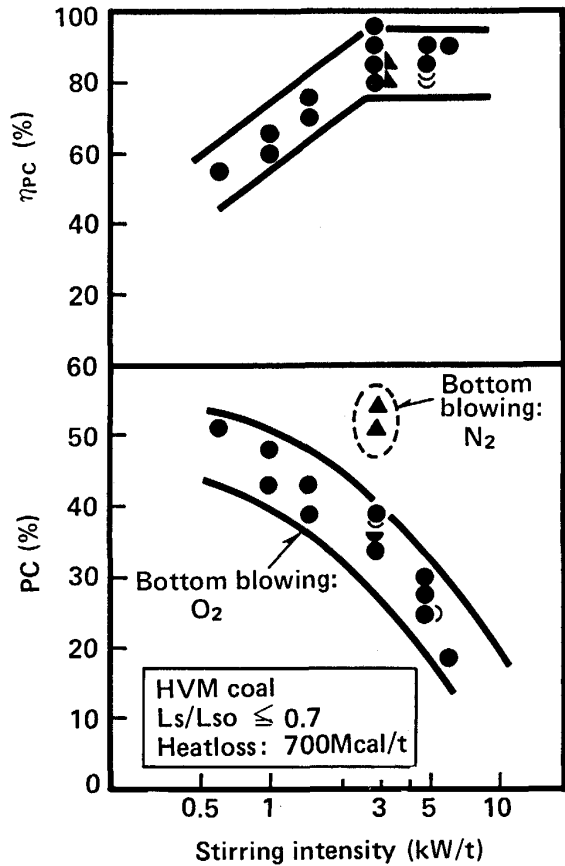


Fig. 1. Influence of stirring intensity on post-combustion ratio and heat efficiency.

攪拌が弱すぎると着熱効率の低下がおこる。したがって，最適攪拌力は 2.5~3.5 kW/t となる。この値はコークス使用の場合¹⁾ とほぼ同じである。

底吹きガスとして O₂ のかわりに N₂ を用いると，二次燃焼率が絶対値として約 15% 高くなっていることが注目される（図中のプロット▲）。

上吹き酸素条件の影響は，コークス使用の場合¹⁾ と同じで，酸素ジェットがメタル浴にあたるような条件（L_s/L_{so}; 0.7 以上）では二次燃焼率が低くなる。

ただし，使用した炭材の VM 含有量が高くなるほど二次燃焼率が低下する（Fig. 2）。

以上のように，コークスの場合に比べて石炭使用の場合には二次燃焼率が低下する傾向にあるが，O₂ ガスとメタル間の遮断を強化する方向（底吹きに O₂ を用いない，底吹きガス量をふやしすぎない，上吹き O₂ をメタルにあてないように供給するなど）で，二次燃焼率の値を高めることができる。

3.2 二次燃焼率を高めていった時の炭材原単位の変化
揮発分の異なる 3 種類の炭材を用いた場合について，二次燃焼率と炭材原単位との関係を Fig. 3 に示す。い

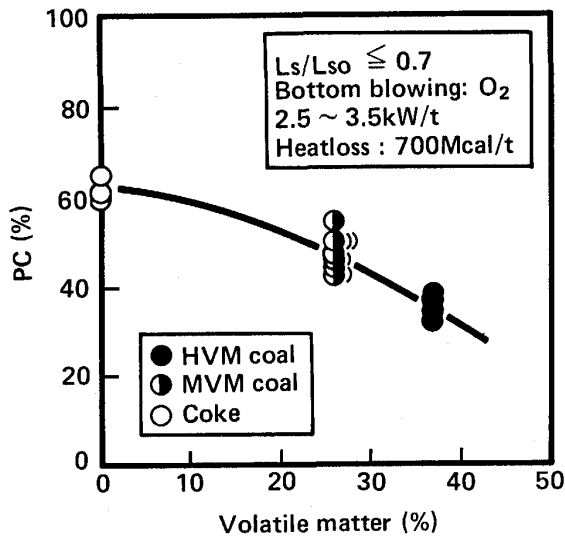


Fig. 2. Relation between volatile matter and post-combustion ratio.

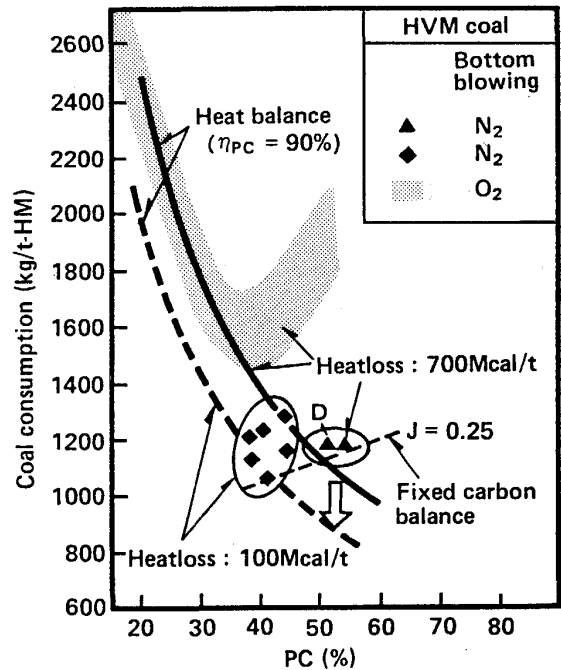


Fig. 4. Influence of heatloss on coal consumption.

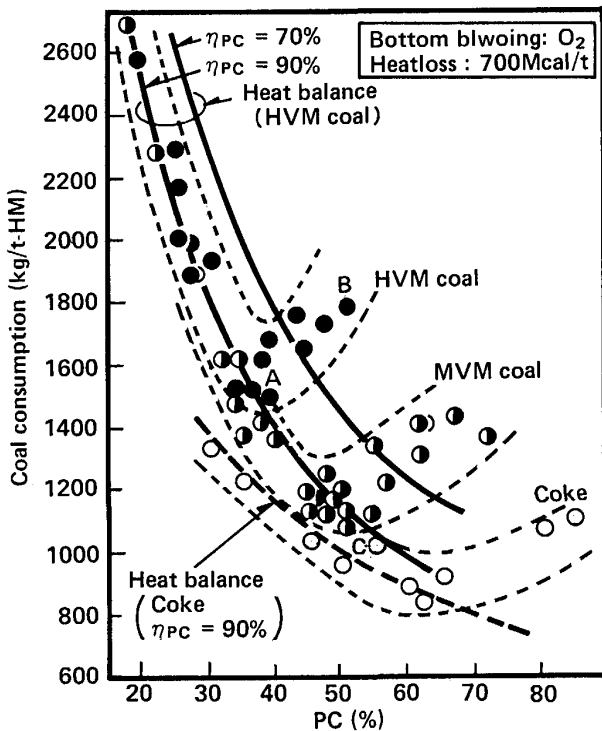


Fig. 3. Influence of volatile matter on coal consumption.

ずれの場合も低二次燃焼率の領域では、二次燃焼率の増加とともに炭材原単位は低下するが、ある二次燃焼率以上では炭材原単位が再び増加する傾向にあることが注目される。その二次燃焼率を「炭材原単位が最小となる二次燃焼率」と呼ぶことにする。

炭材の揮発分が高いほど、「炭材原単位が最小となる二次燃焼率」は低くなり、その時の炭材原単位が高くな

る。

図中の曲線は、着熱効率の値を仮定した場合の、物質・熱収支から求めた計算線である。この計算線と比べると、実績値は「炭材原単位が最小となる二次燃焼率」以下では着熱効率として約 90% が維持されているのに対し、それ以上の二次燃焼率では着熱効率の低下（すなわち排ガス温度上昇）が起きていることになる。

Fig. 3 の関係は底吹きに O₂ を用いた場合であるが、N₂ を用いた場合には、Fig. 4 に示すように、「炭材原単位が最小となる二次燃焼率」が約 15% 高くなり、石炭原単位が約 300 kg/t 低下する。

なお、図中に、比較として 170 t 転炉を改造した 100 t 大型炉を用いた時の結果¹⁶⁾ を示している。その場合には、炉体放散熱が 100 Mcal/t に低下しているが、その他の操業条件（酸素上吹き条件、底吹き攪拌強さなど）は 5 t 規模の場合とほぼ同じとなるようにした。

従来の考え方では、炉体放散熱が小さくなると、矢印で示すように「二次燃焼率と同じで石炭原単位が低下する」方向に変化することが予想されたが、実際には、石炭原単位はほとんど低下しないで、二次燃焼率が低下するという結果が得られた。

以上のように、「石炭原単位が最小となる二次燃焼率」が存在すること、その時の二次燃焼率の値は石炭の VM 含有量、底吹き条件および炉体放散熱の大きさに依存することがわかった。

4. 考 察

4.1 二次燃焼率, 石炭原単位の決定機構

石炭に含まれる炭素は, 工業分析によると固定炭素分 (FC) と揮発分 (VM) に分けられる。ただし, この比率は石炭の加熱速度に依存し, 河村ら¹⁷⁾によると, 1400°C の溶融スラグ中に石炭を投入した場合には工業分析値より揮発分が 10~20% 増加する。

従来の溶融還元システム検討¹⁴⁾においては, 固定炭素と揮発分の炭素の形態の差は考慮されず, T. C として取り扱われてきた。

溶融還元炉内で炭素が果たす役割としては

- ①スラグ中酸化鉄と反応し還元すること
- ②還元によって生成したメタルに加炭すること
- ③燃焼して発熱すること
- ④スラグに残留しフォーミングを抑制すること¹⁸⁾¹⁹⁾

などがあげられる。

このうち, ③の燃焼・発熱以外の三つの機能については炭素の形態の差を考慮する必要があると思われる。固定炭素は溶融還元炉内では固体としてスラグ中に残留すると考えられるのに対して, 揮発分の中の炭素は溶融還元炉内ではガスあるいはすすになるので, 酸化鉄の還元, メタルへの加炭, およびフォーミング抑制については, 固定炭素と同様の機能をするとは考えにくいからである。

そこで, まず第一近似として, 上記の機能のうち①, ②に消費される炭素はすべて固定炭素であると仮定し, Fig. 3, 4 中に示した代表的な点: A, B, C, D について溶銑生成量 1 t あたりの固定炭素のバランスを取って

みた (Fig. 5)。ただし, 溶融還元炉内での石炭の固定炭素含有量は, 急速加熱の影響を考慮して(4)式で計算した。

$$\langle FC\% \rangle = \{FC\% \} - \{VM\% \} \times 0.1 \dots\dots\dots(4)$$

この固定炭素バランス図の白地の部分は, 上吹き O₂ によって燃焼したものを表している。ただし, これは, 炭材の「直接燃焼分」と, メタルが脱炭されてそれを補うために加炭するのに消費される「間接燃焼分」を含んでいる。

この燃焼分は上吹き O₂ 量に比例すると考えられるので(5)式により, 単位上吹き O₂ ガス量あたりの固定炭素燃焼量として J 値を定義する。

$$J = \frac{\text{(上吹き O}_2 \text{ によって燃焼した固定炭素量)}}{\text{(上吹き O}_2 \text{ 量)}} \text{ (kg-C/Nm}^3\text{-O}_2\text{)} \dots\dots\dots(5)$$

A~D のいずれの場合とも J 値がほぼ一定 (0.26~0.29 kg-C/Nm³-O₂) となっていることが注目される。

スラグ中の残留炭材量 (固定炭素量) が減少すると, 最終的にはスラグフォーミングを起こして操業できなくなる¹⁸⁾。従って, 定常的には, 還元, 加炭および上底吹き O₂ による燃焼に相当する固定炭素を石炭で供給する必要がある。すなわち, 定常操業のための必要固定炭素量から石炭原単位が(6)式で表されることになる。

$$G_{\text{coat}} = [(\text{溶銑 1 t 生成のための還元・加炭に必要な C 量}) + (\text{上吹き O}_2 \text{ 原単位}) \times J + (\text{底吹き O}_2 \text{ による脱炭量})] / (\langle FC\% \rangle / 100) \dots\dots(6)$$

この石炭原単位は, 石炭の固定炭素含有量が低いほど, また, J 値が高くなるほど増加する。

Fig. 6 の破線は, J を 0.25 および 0.30 kg-C/Nm³-O₂

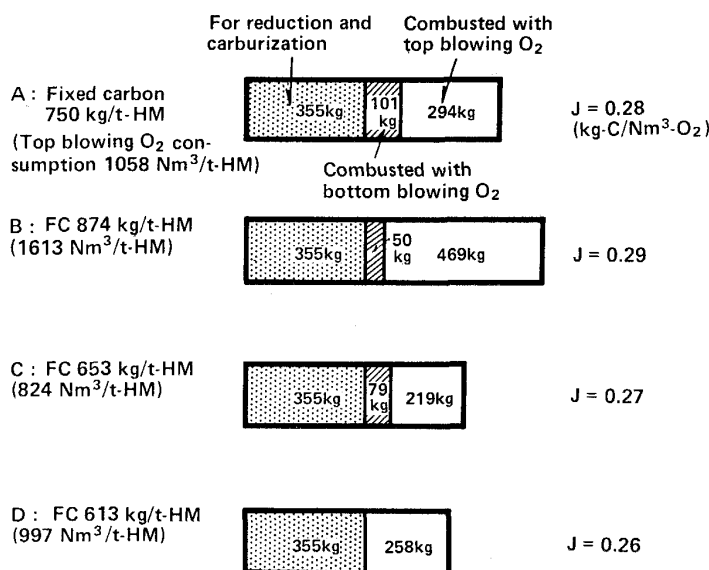


Fig. 5. Fixed carbon balance.

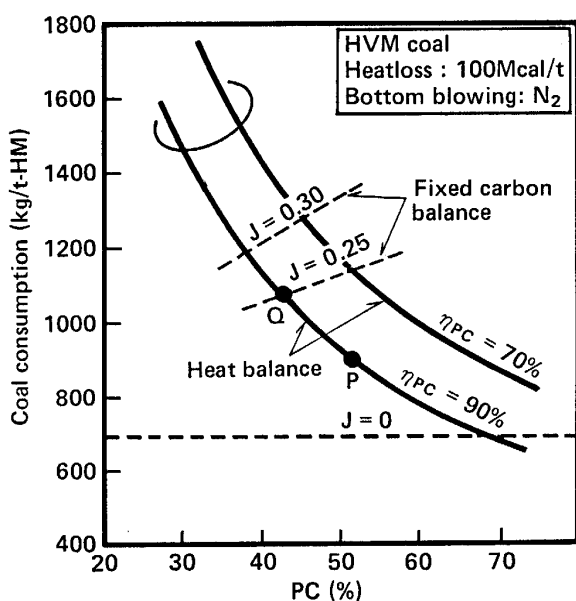


Fig. 6. Relation between J and coal consumption.

として、使用石炭の VM が 37%，予備還元なし， N_2 底吹きの場合に、(6)式にもとづいて計算される石炭原単位と二次燃焼率の関係を示している（以降、固定炭素バランス線と呼ぶ）。一方、図中の実線は、着熱効率を 90%，70% の一定条件とし、熱・物質収支から計算される石炭原単位と二次燃焼率の関係を示している（以降、熱バランス線と呼ぶ）。実際の操業点は、熱バランス線と固定炭素バランス線の交点となる。例えば、 J 値が $0.25 \text{ kg-C/Nm}^3\text{-O}_2$ で着熱効率が 90% の場合は、操業点は Q 点となり、その時の二次燃焼率、石炭原単位はそれぞれ 42%，1 150 kg/t-HM となる。

もし、 J 値が $0.25 \text{ kg-C/Nm}^3\text{-O}_2$ の時に点 P で操業することは、一時的には可能であるが、供給される固定炭素が消費されるものより少ないので、炉内炭材量が減少して最終的にはフォーミングを起こすことになる。したがって、定常的に安定操業できないことになる。

本実験におけるそれぞれの条件での固定炭素バランス線を Fig. 4 および、Fig. 7 中に破線で示す。これらの関係から、試験結果は次のように説明することができる。

<Fig. 1>底吹き攪拌が強すぎると、スラグ内の粒鉄が増加し、それと上吹き酸素との反応で J 値が増加し、交点（すなわち安定操業点）の二次燃焼率が低下する。底吹きガスを O_2 から N_2 に変えると、(6)式において底吹き O_2 による脱炭量が減るだけ必要固定炭素量が減少して固定炭素バランス線が低下し、交点の二次燃焼率の値が上昇する。

<Fig. 2>石炭の揮発分含有量が高くなると、必要固定炭素量を得るための石炭量がふえ、固定炭素バランス線

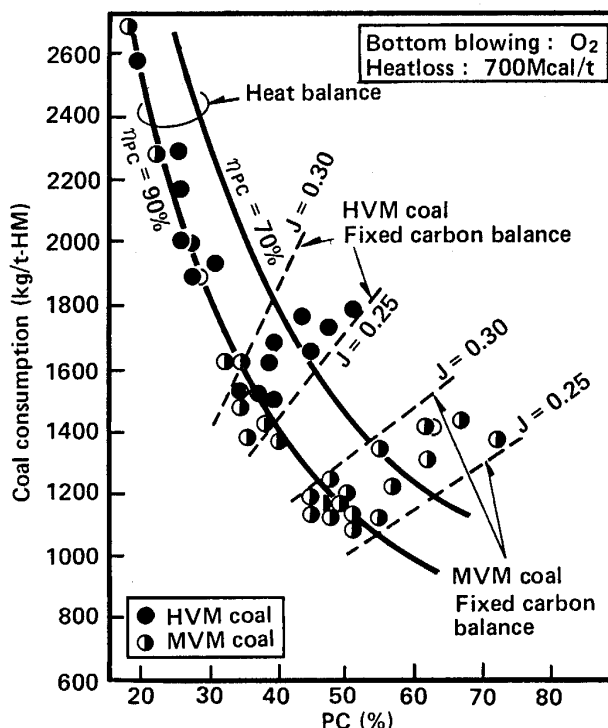


Fig. 7. Influence of volatile matter on coal consumption.

が上昇して、熱バランス線との交点の二次燃焼率が低下する。

<Fig. 4>炉体放散熱が小さくなると、必要熱量が減少し、熱バランス線が低下して、固定炭素バランス線との交点の二次燃焼率が低下する。

なお、二次燃焼率および石炭原単位の求め方を数式で示すと次のようになる。

まず、固定炭素バランスは(7)式であらわされる（記号の内容は末尾の記号リスト参照）。

$$G_{coal} = \left\{ \frac{3.22[Fe\%][100-(PR\%)]+1000[C\%]}{1.12(1-r)\cdot J+1.2r} - 833[C\%] \left[1 + \frac{(PC\%)}{100} \right] - 2.69[Fe\%][100-(PR\%)] \right\} / \left\{ \frac{\langle FC\% \rangle}{1.12(1-r)\cdot J+1.2r} + 0.625\langle O\% \rangle - 0.833\langle C\% \rangle \left[1 + \frac{(PC\%)}{100} \right] - 0.05\langle H\% \rangle(PC\%) \right\} \dots\dots\dots(7)$$

一方、熱・物質収支の式は、原料（鉱石、炭材、副材）の組成、炉体放散熱、操業温度などによって定められる¹⁾。この二つの式を連立して解くことによって、安定操業点の二次燃焼率、石炭原単位が求められる。

なお、上記の議論では固定炭素だけが酸化鉄還元およびメタルへの加炭の機能をすると仮定してきた。揮発分の一部が酸化鉄の還元に使われる可能性があるため、その影響を見積もってみる。

揮発分中の炭素の10%が酸化鉄の還元に寄与していたとすれば、上記の議論で J 値が $0.02 \text{ kg-C/Nm}^3\text{-O}_2$ 大きくなる(相対誤差約8%)。また、COの内、10%が酸化鉄の還元反応に寄与していたとすれば、 J 値は約 $0.03 \text{ kg-C/Nm}^3\text{-O}_2$ 大きくなる。

ただし、溶融還元炉での揮発分量は工業分析値の10%増加すると仮定したが、もし20%増加するとすれば、 J 値は約 $0.05 \text{ kg-C/Nm}^3\text{-O}_2$ 小さくなる。

すなわち、石炭のVMの挙動についての仮定が異なっても J 値への影響は小さく、かつ相殺しあうので、結果的には上記の議論に本質的な影響は及ぼさないと考えられる。

4.2 石炭原単位低減の可能性

(7)式より、底吹きガスを N_2 とし高VM炭を用いて、石炭原単位を低下しようとするならば、考えられる手段は次の三つである。

(a) J 値を小さくする(上吹き O_2 による固定炭素の燃焼抑制)。

(b) 鉱石の予備還元率を高める(還元に必要な固定炭素量の低減)。

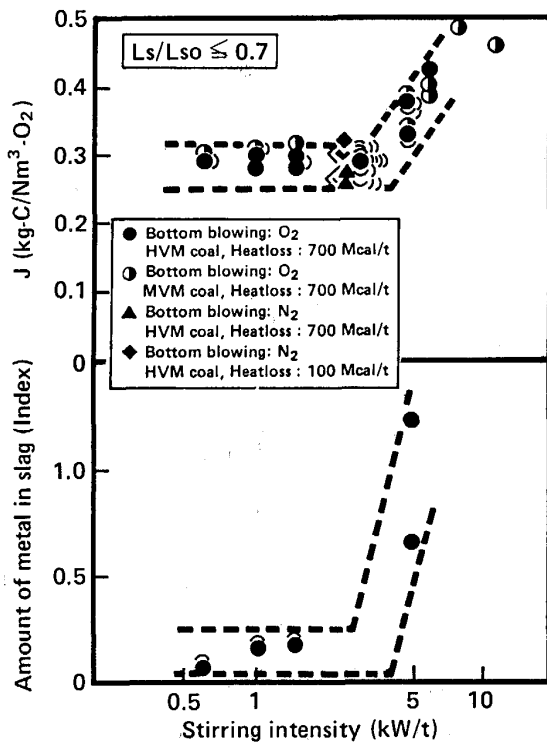


Fig. 8. Influence of stirring intensity and the amount of metal in slag on J .

(c) 溶融還元炉に装入する時点での炭材の固定炭素含有率を高める。

まず、(a)の可能性を検討してみる。

J 値は Fig. 8 に示すように、底吹き攪拌力を下げてスラグ内に存在する粒鉄量を減少することによって、あるレベルまで低下できる。しかし、本実験の範囲内では、実績下限値は約 $0.25 \text{ kg-C/Nm}^3\text{-O}_2$ であった。

スラグ中の粒鉄が減少した状態で、固定炭素の燃焼の機構として考えられるものとしては、炭材の直接燃焼と溶融スラグを通しての酸素の移動がある。前者については、スラグフォーミング抑制のための炉内炭材条件を満足できる範囲内で¹⁸⁾、極力、炉内炭材量を減らすことが手段となる。一方、後者については、雀部ら²⁰⁾の報告でその可能性が示されているが、確認のために溶融還元条件を想定した次のような実験を行った。

実験方法

$1400 \pm 10^\circ\text{C}$ に保たれた 70 g の溶融スラグ ($40\% \text{ CaO}-40\% \text{ SiO}_2-15\% \text{ Al}_2\text{O}_3-5\% \text{ MgO}$) に FeO を加え、(T. Fe) を約5%とした場合と、 FeO 添加なしの場合のそれぞれについて、 40 g の塊状電解鉄を沈め、Arバブリングをしながら、上からスラグに O_2 を吹き付けてスラグ成分の変化を調べた。

実験結果

吹酸開始後の (T. Fe) 経時変化を Fig. 9 に示す。 FeO をあらかじめ投入した場合には (T. Fe) は時間とともに上昇しており、電解鉄の酸化・スラグへの溶解が進行していることがわかる。一方、 FeO 投入の無い場合には、(T. Fe) の上昇は小さかった。

スラグ中電解鉄は固体状態であり、スラグ中には粒鉄

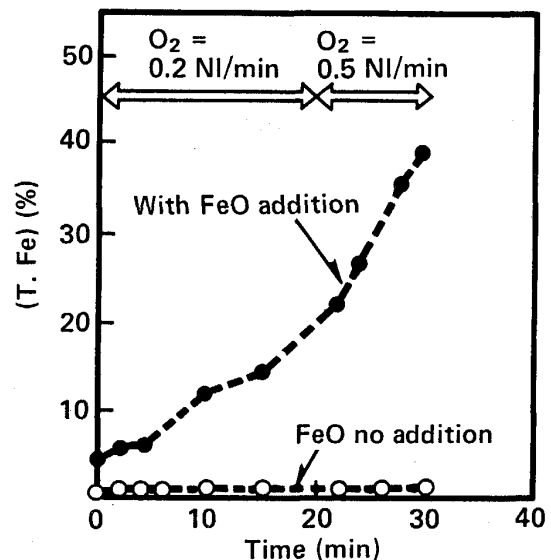
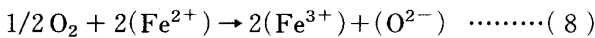


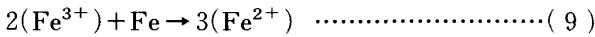
Fig. 9. Behavior of (T. Fe).

は存在しない (0.1% 以下) ので, (T.Fe) が増加した原因として以下の反応が考えられる.

スラグ-雰囲気界面:



スラグ-電解鉄界面:



溶融還元炉では, (T.Fe) をゼロにできないこと, また, スラグを攪拌せざるを得ないことから, 酸化性雰囲気からスラグに入った酸素イオンがスラグ内を移動して固定炭素やメタル中炭素と反応することを完全には抑制することができないことになる.

鉄浴式溶融還元法の特徴は, 攪拌状態の多量スラグによる酸化性雰囲気とメタルの遮断により, 高二次燃焼とスラグ浴の還元を, 反応, 伝熱の進行に有利な条件で両立させていることにある. この方式は使用炭材の揮発分が低い場合には大型炉でも成立していることが確認されている¹⁾.

しかし, 今回のように高 VM 炭を使用して, しかも石炭原単位も下げるために固定炭素の燃焼量を極限まで抑制しようとした場合は, スラグ中の酸素の移動が制約条件として浮かび上がってきた.

これは溶融スラグで隔てられた酸化性の発熱帯と還元性の吸熱帯の間で, 伝熱は促進しつつ酸素イオンの移動をどこまで抑制できるかという本質的な問題に関連している.

今後, 有効炭素燃焼抑制のために操業上の工夫が重ねられ J 値が漸次低下するにしても, その場合には反応や伝熱の速度に悪影響が現れてくることが予想される.

したがって, 高 VM 炭を使用して石炭原単位を低減するためには, 溶融還元炉での操業改善による J 値の低減に期待するだけでなく, 前記の(b), (c)のような原料前処理工程を導入する必要があると思われる.

石炭前処理については, 溶融還元法が本来コークス工程を省略することを大きな開発目的にしていることから, その導入の是非については議論はあると思われる. しかし, 溶融還元工程の効率向上の視点から, 必要十分な石炭前処理法が検討されるべきであろう.

たとえば, (b)と(c)を同一工程で行う方法, すなわち, 石炭の VM 分を鉱石の予備還元を利用しようとする方法が提案されている²⁾. その方法と本報告で述べた溶融還元工程を組み合わせると, 高 VM 一般炭を原料として, 石炭原単位を低下できるトータルシステムを作れる可能性がある.

5. 結 言

上底吹き転炉を用いて, VM 含有量が異なる炭材を用いた鉄溶融還元試験を行って, 安定操業条件における二次燃焼率と石炭原単位の関係について検討した.

(1) 二次燃焼率は炭材の VM 含有量が高いほど, 炉放散熱が小さいほど, 低下する傾向にあるが, O_2 とメタルの接触を遮断する方策をとることによって高めることができる.

(2) 石炭原単位は, ある二次燃焼率で最小値を示す. その時の二次燃焼率は, 使用炭材の VM 含有量, 炉体放散熱, および酸素ガスとメタルの接触状況などに依存する.

(3) 炉体規模が大幅に異なる試験を行って二次燃焼率, 石炭原単位に及ぼす炉体放散熱の影響を調べた. 高 VM 炭を使用した場合には, 炉体放散熱が小さくなると, 二次燃焼率が下がって, 石炭原単位はわずかしこ低下しないという挙動を示すことがわかった.

(4) 上記の諸結果は, 「必要固定炭素量」という考え方を導入することによって説明できる. すなわち, 安定操業点の二次燃焼率, 石炭原単位は, 固定炭素の必要量を示す線と, 従来から用いられている熱・物質収支からきまる線の交点として求められる.

(5) 「必要固定炭素量」には J 値 (上吹き O_2 による固定炭素の直接およびメタル脱炭を経由する間接燃焼の程度を示す指標) が影響する.

石炭原単位低減の一方策として J 値低減追及していったところ, 鉄イオンを介するスラグ内の酸素の移動という現象が関係していることがわかった. したがって, 溶融還元の条件では J 値の低減には限界があることが推定される.

(6) 高 VM 炭を使用した溶融還元で石炭原単位を低下するために, 石炭, 鉱石の前処理を組み合わせることが必要である.

記 号

- <FC%> : 溶融還元炉における石炭中固定炭素濃度 (Dry base) (wt%)
- {FC%} : 工業分析による石炭中固定炭素濃度 (Dry base) (wt%)
- G_{coal} : 石炭原単位 (Dry base) (kg/t-HM)
- G_{O_2} : O_2 原単位 ($Nm^3/t-HM$)
- G_Q : 排ガス原単位 ($Nm^3/t-HM$)
- J : 上吹き O_2 による固定炭素燃焼量 ($kg-C/Nm^3-O_2$)
- L_s : 上吹き O_2 ジェットのスラグへの侵入深さ (mm)
- L_{so} : スラグ厚み (mm)
- (PC%) : 二次燃焼率 (%)

(PR%) : 鉱石予備還元率 (%)

r : 底吹き比率 (—)

{VM%} : 工業分析による石炭中揮発分濃度 (Dry base) (wt%)

<X%> : 石炭中 X 成分の濃度 (Dry base) (wt%)

[X%] : 生成溶鉄中 X 成分の濃度 (wt%)

(X%) : 炉内ガス中 X 成分の濃度 (%)

η_{pc} : 着熱効率 (%)

その他の記号は前報¹⁾と同じ

文 献

- 1) 松尾充高, 斎藤 力, 片山裕之, 平田 浩, 金本通隆, 茨城哲治: 鉄と鋼, **76** (1990), p. 1871
- 2) H. I. ELVANDER, I. A. EDENWALL and S. C.-J. JELLESTMANN: *Ironmaking Steelmaking*, **5** (1975), p. 235
- 3) A. JOSEFSSON, E. BENGTESSON and K. ALMGVIST: *AIME Ironmaking Proc.*, **23** (1964), p. 275
- 4) 徳田昌則: 鉄と鋼, **71** (1985), S918
- 5) H. ISHIKAWA, C. SAITO, M. NISHIMURA, K. UMEZAWA, H. MATSUNAGA and H. KAJIOKA: *Proc. the 4th Japan-Nordic Countries Joint Symposium on Science and Technology of Process Metallurgy*, Tokyo (1986), p. 255
- 6) S. EKETORP: *Proc. International Symposium on Smelting Reduction*, Shenyang (1986), p. 16
- 7) 浜田尚夫: 鉄と鋼, **72** (1986), p. 1991
- 8) 石川 稔, 加藤木健, 島村耕市, 平田武行, 城田良康, 鈴木 豊: 鉄と鋼, **72** (1986), S181
- 9) 中村英夫, 高橋謙次, 河井良彦, 杉山峻一, 阿部正広, 尾関昭矢: 鉄と鋼, **72** (1986), S182
- 10) 西田礼次郎: 第 116・117 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1987), p. 281
- 11) J. P. MOODIE, M. P. DAVIS and M. CROSS: *Process Technology Conference Proceedings* (1988), p. 55
- 12) R. B. INNES, J. P. MOORIE, I. D. WEBB and K. BROTZMANN: *Abstracts of 7th PDT Conference of AIME* (1988), p. 19
- 13) 川田 仁, 田辺治良, 川上正弘, 近藤国弘, 西 正明, 金谷弦治: 材料とプロセス, **1** (1988), p. 1084
- 14) 高本 泰, 林 洋一: 材料とプロセス, **2** (1989), p. 166
- 15) 森 一美, 佐野正道: 鉄と鋼, **67** (1981), p. 672
- 16) 茨城哲治, 山内雅夫, 金本通隆, 平田 浩, 松尾充高, 片山裕之: 材料とプロセス, **3** (1990), p. 1076
- 17) 河村隆文, 佐藤健朗, 遠藤幸平, 石川英毅: 材料とプロセス, **2** (1989), p. 162
- 18) 平田 浩, 松尾充高, 片山裕之, 石川英毅, 梶岡博幸: 材料とプロセス, **2** (1989), p. 172
- 19) 小川雄司, 徳光直樹, 石川英毅: 材料とプロセス, **2** (1989), p. 173
- 20) 雀部 実, 木下 豊: 鉄と鋼, **64** (1978), p. 1313
- 21) 桑原正年, 斎藤 力: 材料とプロセス, **2** (1989), p. 120