

考えることが可能であるものと考えられる。

4. 結 言

従来の熱割れ試験に引き続いて本報では還元雰囲気中の試験を併用して鉄鉱石の熱間性状の検討を行なった。その結果次のような諸点が明らかになった。

(1) 鉄鉱石の熱割れはその原因によつてイタビラ型およびキリブル型の2種類に分けられる。

(2) イタビラ型熱割れ鉄鉱石は組織的な面からの推定が可能であるが、キリブル型熱割れ鉄鉱石にはまだ検討の余地がある。

(3) 鉄鉱石にも焼結鉄と同様に著しい還元粉化性を起こすものがある。

(4) 還元粉化の機構は焼結鉄の場合と異なり熱割れ性が中性雰囲気の場合より明確な形を現わすことによるものと推察される。

今後はキリブル型の熱割れ機構、還元粉化性と温度条件の関係などにつき検討を行なう予定である。

文 献

- 1) 石光章利他: 鉄と鋼, 50 (1964) 3, p. 313
- 2) 富士・中研: 学振 54 委-882
- 3) 鋼管・技研: 学振 54 委-883
- 4) 製鉄部会資料・鉄 25-1-自(2)
- 5) 石光章利他: 鉄と鋼, 50 (1964) 3, p. 681

(20) 鉄鉱石還元試験の高炉操業への適用

八幡製鉄所, 技術研究所

工博 児玉惟孝・堀尾竹弘・○彼島秀雄

八幡製造所 斧 勝 也

Application of Reduction Test of Iron Ore to Blast Furnace Operation.

Dr. Koretaka KODAMA, Takehiro HORIO
Hideo KANOSHIMA and Kastuy ONO.

1. 結 言

塊鉄鉱石の還元試験法としては学振法が制定され、各種鉄鉱石の被還元性の良否の判定に使用されている。しかし学振法による還元試験結果と高炉での還元性との関係を定量的に求めた報告は少ない。これは学振式還元条件が動的な高炉内雰囲気の一部を具現するにすぎないという概念と、現状では炉内での個々の鉄鉱石の還元状況を

知る情報も少なく、また数銘柄以上の鉄鉱石を炉内に配合装入しているため、鉄鉱石自身の被還元性と高炉操業との関係を数式的に把握することが困難なためと考えられる。

本報においては両者の関係を統計的に求め、学振法による鉄鉱石の還元率と高炉での間接還元率およびコークス比との関連性について検討した。

2. 解 析 方 法

2.1 特性値および要因

特性値としては高炉での間接還元率をとつたが、これは鉄鉱石の全被還元酸素の中、 H_2 および CO ガスによつて還元される割合を炭素バランスと実績による水素利用率から計算した。

要因としては鉄鉱石の被還元性および高炉の還元率に影響をおよぼす諸因子を選んだが、各鉄鉱石の被還元性については、使用銘柄が多種にわたるので、学振式標準還元試験の還元率で層別して Table 1 に示した5要因に分類した。

還元率 50% 台と 40% 台を一括したのは、還元率 50% 台のインド、イーグルマウンテンを使用した月が少なく、これを層別することは解析データの構造上不適当と考えたからである。さらに銘柄変更の際の問題として当然鉄含有量、酸素結合量の問題が生じるが、ここでは鉄分のみを補正を行ない、鉄分 1kg/t-pig に相当する鉄鉱石変更の際の影響について解析することにした。

鉄鉱石以外の要因としては、装入回数、熱風温度、雑原料使用量、ボッシュガス濃度を選んだ。これらの要因は高炉の間接還元率に対して直接あるいは間接的に影響するものと考えられ、それを導入する形については十分研究する必要があるが、本報では被還元性の異なる鉄鉱石間の炉内還元率への差異を知る目的のため、もつとも単純な形で導入することにした。

2.2 解析結果

解析期間は主として重油の吹込まれていない期間の月平均値を使用し、当所戸畑 1, 2, 3 高炉を対象に解析した。

各要因の間接還元率に対する影響を示す相関係数、偏相関係数、重相関係数、偏回帰係数を CAB 500 電子計算機で計算し、その結果の一例を Table 2, Table 3, Fig. 1 に示した。

各要因は鉄鉄を 1t 生成する鉄鉱石中の Fe 含有量を単位としているため、層別した鉄鉱石中 Fe 含有量の総和は約 950kg となる。したがって鉄鉱石銘柄を変更した際の

Table 1. Classification of raw materials by reduction ratio.

	Sintered ore	Reduction ratio >70% ore	Reduction ratio 70~60% ore	Reduction ratio 60~40% ore	Reduction ratio >40% ore
Raw materials	TDL. Sinter (70.40)	Kedah (74.77)	Dungun (62.63)	Eagle Mt. (55.80)	Romeral (37.37)
		Goa (73.20)	Rompin (61.76)	Indea (52.30)	Ipoh (36.89)
		Temangan (73.28)		Africa (49.63)	Nevada (31.10)
				Santa-Fe (49.17)	Acari (29.11)
				Morcona (48.69)	
				Itabira (45.20)	
				Chile (44.35)	
				Adrianitas (42.11)	
				Algarrobo	
				Heizer	

炉内還元率に対する影響は各因子の偏回帰係数の差を考えればよい。この結果をみると、鉱石の還元率 70%, 60% 台の鉱石は焼結鉱に比較してあまり大きな差は認められないが、還元率 50% 以下となると、高炉炉内の間接還元率をかなり低下させることが明らかである。なお戸畑 3BF については、焼結鉱の炉内還元率に与える影

響が 1, 2 BF に比してかなり低く、またばらつきがかなり大きい結果がでているが、これについてはさらに検討する必要がある。

3. 考 察

以上の結果を使つて学振法還元率で層別した鉄鉱石の炉内における間接還元率について推定してみるが、その

Table 2. Mean value and standard deviation of characteristic and variables.

	T 1 B. F.		T 2 B. F.		T 3 B. F.	
	Mean value	Standard deviation	Mean value	Standard deviation	Mean value	Standard deviation
Indirect reduction %	70.44	1.71	70.63	2.18	71.21	2.22
Sinterd ore (%)	550.9 (51.4)	54.2	559.1 (59.4)	69.0	594.3 (64.0)	86.3
Reduction ratio (%)	131.8 (13.7)	53.6	81.4 (8.6)	28.9	69.9 (7.5)	30.6
>70%	44.6 (4.6)	35.6	72.6 (7.7)	32.4	43.2 (4.7)	42.4
70~60%	132.6 (13.8)	56.5	154.4 (16.4)	69.9	170.5 (18.9)	57.9
60~40%	69.7 (7.3)	56.9	51.7 (5.5)	30.8	50.1 (5.4)	44.8
<40%	29.9 (3.1)	10.7	22.5 (2.4)	11.7	0 (0)	0
Metallics (%)	959.4 (100.0)		941.4 (100.0)		928.0 (100.0)	
Fe total (%)						
Charge (/dag)	125.2	9.35	126.6	10.1	129.5	16.9
Blast temperature °C	922.4	32.73	931.1	24.88	911.2	57.8

Table 3. Correlation coefficients (In case of T₂BF)

	Indirect Reduction	Sinter	Reduction >70%	Ratio 70~60%	60~40%	<30%	Metallies	Charge	Bosh gas (H ₂ +Co%)
Indirect reduction		0.585	0.189	-0.206	-0.582	-0.313	-0.287	0.138	0.201
Sinter	0.124		-0.316	-0.380	-0.664	-0.075	-0.131	-0.153	0.020
Reduction rate >70%	0.043	-0.794		-0.230	-0.216	-0.036	-0.430	-0.265	-0.067
70~60%	-0.052	-0.587	-0.615		0.402	-0.322	0.128	0.106	-0.013
60~40%	-0.332	-0.739	-0.595	-0.348		-0.261	0.459	0.003	0.011
<30%	-0.451	-0.574	-0.557	-0.543	-0.675		-0.182	-0.064	-0.019
Metallies	-0.210	-0.238	-0.418	-0.274	-0.070	-0.363		-0.015	0.238
Charge	-0.094	-0.160	0.022	0.065	-0.140	-0.160	0.241		0.737
Bosh gas (H ₂ +Co) %	0.286	0.217	0.147	0.065	0.239	0.318	0.429	0.765	
Partial correlation coefficients								Multicorrelation coefficients 0.806	

Table 4. Notations.

	Sinter	Reduction ratio >70% Ore	Reduction ratio 70%~60% Ore	Reduction ratio 60~40% Ore	Reduction ratio <40% Ore
The rate of direct reduction in BF%	(DR) ₁	(DR) ₂	(DR) ₃	(DR) ₄	(DR) ₅
O ₂ in Iron oxide kg/kg Fe in Ore	[O] ₁ Tol 0.4087	[O] ₂ Goa 0.4274	[O] ₃ Dungun 0.4220	[O] ₄ Chile 0.4142	[O] ₅ Acari 0.3923
Ore weight (%)	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅
Fe kg/t-pig	K=950 (T ₁ , 2BF mean value)				

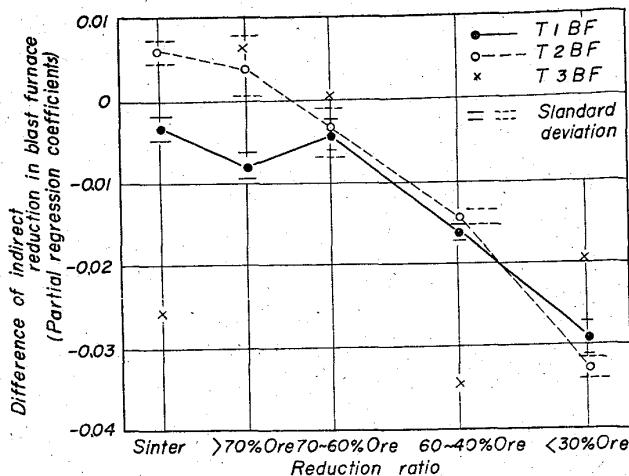


Fig. 1. Difference of the rate of indirect reduction in blast furnace, when changing ore equivalent with Fe 1 kg/t-pig.

前に使用する記号について一括して Table 4 に示した。

Table 4 の記号を使用して炉内で直接還元される被還元酸素量, 総被還元酸素量および高炉全体の直接還元率は次の次式で表示できる。

直接還元される被還元酸素量

$$[O]_{DR} = \frac{K}{10^3} \sum_{i=1}^5 W_i [O]_i (D.R.)_i \quad \dots\dots\dots (1)$$

総被還元酸素量

$$[O]_{Total} = \frac{K}{10^2} \sum_{i=1}^5 W_i [O]_i \quad \dots\dots\dots (2)$$

高炉全体の直接還元率

$$r_{DR} = [O]_{DR} / [O]_{Total} = \frac{1}{10^2} \frac{\sum_{i=1}^5 W_i [O]_i (D.R.)_i}{\sum_{i=1}^5 W_i [O]_i} \quad \dots\dots\dots (3)$$

いま $[O]_i$ = 一定とすると

$$r'_{DR} = \frac{1}{10^4} \sum_{i=1}^5 W_i [D.R.]_i \quad \dots\dots\dots (3)'$$

ここで被還元性で層別した鉄石の還元率および使用量の差によつて高炉全体の直接還元率が異なるものと考えて (3)' 式および Fig. 1 の結果から, 焼結鉄と還元率にて層別した他鉄石の炉内での還元率の差を求めると次式のごとくなる。

$$\left. \begin{aligned} (D.R.)_5 - (D.R.)_1 &= 30.91\% \\ (D.R.)_4 - (D.R.)_1 &= 15.93\% \\ (D.R.)_3 - (D.R.)_1 &= 4.95\% \\ (D.R.)_2 - (D.R.)_1 &= 3.31\% \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

次に (4) 式および Table 2 に示した高炉の原料使用割合, 還元率の平均値を (3) 式に代入して焼結鉄の直接還元率 $(D.R.)_1$ を求め, その結果を (4) 式に代入すると層別した鉄石の炉内での直接還元率が求められる。この結果を Table 5 に示した。

以上の結果をみると学振法による鉄石の還元率と炉内における間接還元率とはほぼ線型回帰を示し, 絶対値も近似していることが認められる。学振法による還元試験

Table 5. The reduction rate of classified iron ores in blast furnace.

	Direct reduction (%)	Indirect reduction (%)
Sinter	24.33	75.67
Reduction ratio >70% Ore	27.64	72.36
60~70% Ore	29.28	70.72
60~40% Ore	40.26	59.74
<40% Ore	55.24	44.76

は限られた還元条件であるにもかかわらず, 動的な高炉内での鉄石還元に関する情報を提供しており, 操業指針ならびに適正鉄石配合法の参考に十分利用することができる。

次に高炉におけるガス還元率とコークス比との関係について考えてみる。コークス比は一般に種々の要因の影響をうけるが, コークス比は化学量論的には次の関係がある。

$$C_f \cdot C = C_{OT} + C_s + C_w + C_{DR} + C_i + C_d \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで, C : コークス比 (kg/t-pig) C_{OT} : 乾送風量で羽口前で燃焼する炭素 (kg/t-pig), C_s : ソリューションロス反応で消費する炭素 (kg/t-pig), C_i : 鉄鉄中に溶解する炭素 (kg/t-pig), C_f : コークス中炭素 (%), C_w : H_2O で羽口前で燃焼する炭素 (kg/t-pig), C_{DR} : Si, Mn, P 酸化物を直接還元する炭素 (kg/t-pig), C_d : ダストロス炭素 (kg/t-pig)。

しかし C_f , C_{DR} , C_P , C_D は同一鉄種吹精の場合あまり変化せず, 操業解析上問題になるのは C_{OT} , C_s , C_w である。 C_{OT} , C_s , C_w は熱レベル, 還元性, 通気性, 炉況によつて変動するので種々の面から検討しコークス比に対する影響を考察せねばならない。高炉下部の熱レベルの維持は操業を律する重要な条件であり, この熱的条件に転換する式として当所戸畑技術部では転炉鉄吹精の範囲で次式を提出している¹⁾。

$$q_2 M + q_3 C' = 0.87 C_P T_b + 20 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで q_2 : 水分の分解熱 1550kcal/kg H_2O ,

C_P : 熱風比熱 kcal/°C Nm^3

q_3 : $FeO + C \rightarrow CO + Fe$ 反応熱 3140kcal/kgC

C' : Solution Rate, T_b : 風温 °C

M : 風湿 kg/ Nm^3 dry air

ここで (6) 式は送風量 1 Nm^3 あたりの式であるので鉄鉄 t あたりに換算すると次式に示すごとく C_s と C_{OT} の関係が得られる。

$$C_{OT} = \frac{706477(C_s + C_{DR})}{(0.874 C_P T_b - 1550M + 20)} \quad \dots\dots\dots (8)$$

また C_s とガス還元率との関係として次式が得られる。

$$C_s = \frac{12}{16} [O]_{Total} (1 - Y) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで $[O]_{Total}$ は鉄鉄 t あたりの Fe に結合した酸素量 (kg/t-pig) である。以上の諸式から, コークス比は当然ガス還元率のみで一律に決まらず, 還元率単位%の変動のコークス比への影響は他の条件, 特に熱レベルを支配する送風温度, 送風湿度レベルおよびその変化量によつて異なることは明らかである。実際操業においては炉況に影響がない限りソリューションロス増加に対しては

Table 6. Coke rate replacement when changing sinter to each other ore by 10%

Change of raw material	Cokerate replacement
Sinter→Reduction ratio. >70% Ore	6.1 kg/t-pig
" → 70~60% Ore	7.9
" → 60~40% Ore	22.1
" → <40% Ore	38.4

燃料原単位低下に対する可及的努力が払われる結果、熱レベルを風温、風湿で補償し、コークス比に対する影響を緩和する傾向が操業実績値から認められるが、操業解析には送風温度、送風湿度などを一定とし、すなわち熱レベル補正のコークス比を考えるのが普通であり、この際には(7)式を使用するのが妥当である。

ソリューションロスの変化のコークス比におよぼす影響は、風温、風湿レベルによつて異なり、例えば風温 930°C、風湿 0.040 kg/Nm³ の場合、(7)式より $C_{OT} = 3.09 C_s$ となり、コークス中炭素を89%とすると、ソリューションロス 1 kg/t-pig の変化は 4.60 kg/t-pig のコークス比の変化に相当する。

最後に還元率で層別した銘柄を装入変更させた場合のソリューションロスおよびコークス比に与える影響について、焼結鉱を基準にして検討した。上述の熱レベル補正を加えた場合について計算し、Table 6 に示した。これから還元率の異なる鉱石のコークス比に与える影響はかなり大きいことが認められた。したがって焼結鉱使用試験等においては、その代替鉱石の選択の際この点について十分考慮する必要がある。

4. 結 言

学振塊状鉄鉱石標準還元法による鉱石還元率を高炉操業に適用する試みとして、戸畑高炉で使用している鉱石の学振法による被還元性と高炉での間接還元率およびコークス比との関係を統計的に解析して次の結果を得た。

1) 標準還元法による鉱石還元率と高炉炉内での間接還元率との間には高度の線型回帰が認められ、学振法は限られた還元雰囲気であるにもかかわらず、動的な高炉内での鉱石還元に関する情報を提供しており、操業指針の参考に十分利用できることが認められた。

2) コークス比に対する影響は鉱石の還元性のみで一律に決まらず熱的条件の影響を受けるが、還元率の異なる鉱石のコークス比に与える影響はかなり大きく、還元率 30% 程度の鉱石を焼結鉱に 1% 装入変更する際には、補正コークス比は 3.8 kg 減少し、還元率 70% 程度の鉱石の場合には 0.6 kg コークス比は減少する結果が得られた。

文 献

- 1) 深川・山本, 他: 鉄と鋼, 50 (1964) 11, p.1607

(21) 鉄鉱石の還元速度がコークス比におよぼす影響

八幡製鉄所, 戸畑製造所

研野 雄二・○阿部 幸弘

On the Effect of Reduction Rate of Iron Ore on Coke Rate.

Yūji TOGINO and Yukihiro ABE.

先に鉄鉱石の還元速度式の高炉モデルへの適用りと題して、高炉内の還元速度の推定を行なつたが、この考え方をひろめて、部分熱精算を採用し温度分布を推定し、コークス比との関係を明らかにした。

1. 高炉内の温度分布と還元速度の推定

1.1 シャフト内の各区分における heat balance 式

温度分布を推定する場合最も問題となるのは、ガス—固体の伝熱速度であるが、化学工学便覧に示された充填層の伝熱計算などによれば、固体がガス体より受ける伝熱速度は、高炉の場合ガス速度が極めて早いことにより、かなり大きな値をとり、heat balance により求める値と大きな差はないと考えられる。ただしこの考察は結論に大きく影響するので、今後とも検討を続けたい。

[24-22-20-18]* の部分熱精算 (*[]内数字は羽口からの高さを示す)の

$$\text{入熱項 (kcal/hr)} = (t_{18}^{\circ}\text{Cにて持込むガスの顕熱}) + (\text{大気温度にて装入される装入物の顕熱}) + ([24-18] \text{の間で行なわれる間接還元熱})$$

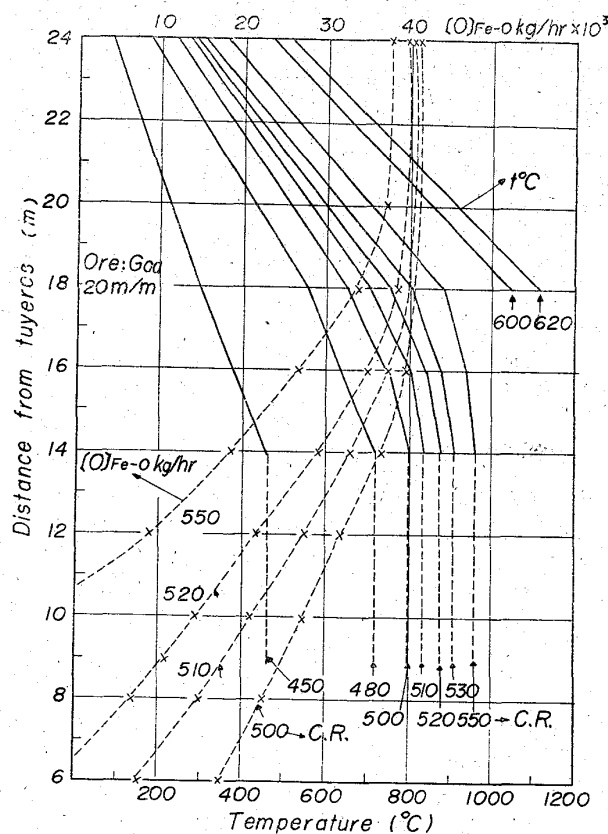


Fig. 1. Change of temperature and [O]_{Fe-O} in shaft.