

川崎製鉄 技術研究所 高田 至康 ○田口 整司
 樋谷 暢男 岡部 俠児

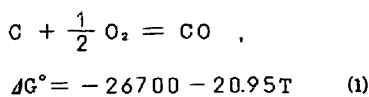
1. 緒言 高炉から排出される銑鉄中の不純元素が高炉内の各領域でどのような形態が最も安定であるかは、炉内各領域でのガス圧力、ガス組成および温度が与えられれば熱力学的計算によって判定できる。図1は各領域で安定なSiの形態を示す。この計算には垂直ゾンデによる情報を用いた。⁽¹⁾ この一例からも温度とガス組成がSiの存在形態にとっていかに大きな影響をもっているかが推察できる。炉床でのスラグ、メタルへのSiの分配比も炉床湯だまり部の温度、酸素分圧が与えられれば熱力学的には一義的に定まる。したがって、もしスラグ、メタルへの不純元素分配比が高炉内において平衡値に到達していれば、炉容、操業条件に応じた分配比をあらかじめ知る事ができ、例えば銑鉄成分調整も容易である。しかし、高炉から排出されるスラグ、メタルの化学組成の解析結果によると、Si, S, Mnなどのスラグ、メタル分配比は温度、酸素分圧、スラグ組成によって決まる一義的な値をとらず、つねに変動している。すなわち、スラグ、メタル分配比は平衡値に到達しておらず、そのときの炉の操業状態を反映して変動する。このことはスラグ、メタルへの不純元素分配比が炉の操業状態判定に使用可能であることを意味する。

本報では炉の熱的な状態と炉下部での酸化鉄の還元状態の推移を長時間スケールで判定するための指数を上記分配比から求め、この分配比と高炉操業因子とがどのような対応関係にあるかを検討する。

2. 炉熱、炉況判定指数の熱力学的な導入 炉下部でのスラグ、メタルへのSi, S, Mnの分配比は炉下部領域の温度、酸化鉄量およびCO分圧に左右される。この3つが分配比の平衡値への到達度を速度論的に決定する重要な因子となるが、最終的な平衡値も温度と酸素分圧に依存する。したがって、炉容の差、操業速度の差を考慮せず、単に分配比の変化を追跡しても意味がない。同一温度では送風圧の高い炉ほど平衡分配比は低値であり、実績分配比が同一ならば送風圧の高い炉の方がより平衡値への到達度が高いと判断すべきだからである。この観点から実績分配比の平衡分配比への到達度をもって指数とすることを考える。

2.1 平衡分配比(基準値)の設定

高炉下部での諸反応は最終的にはブドワー平衡で決まる酸素分圧に支配される。したがって、反応(1)で規定される酸素分圧が



平衡分配比を決定する酸素分圧となる。高炉下部では炭素過剰であり反応(1)の炭素活量は1と置けるので平衡分配比は温度とCO分圧の関数として表現できる。ここではSi, S, Mnの分配比を考える。

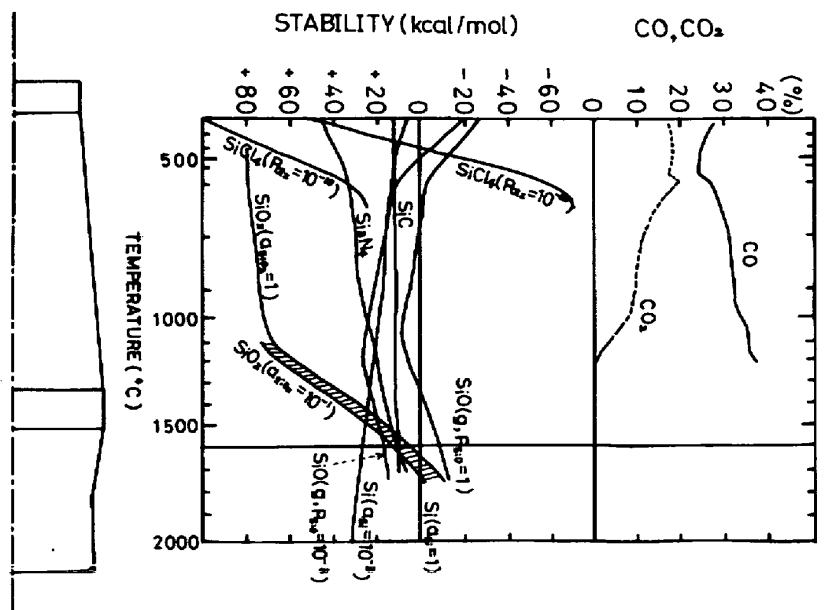


図1 高炉内でのSi化合物の形態

$$\underline{\text{Si}} + \text{O}_2 = \text{SiO}_2, \quad \Delta G^\circ = -196270 + 52.82T \quad (2)$$

$$\log L_{\text{Si}}^\circ = -\log P_{\text{CO}} - \frac{31221}{T} + 20.699 \quad (3)$$

$$\underline{\text{S}} = \frac{1}{2}\text{S}_2, \quad \Delta G^\circ = 31520 - 5.27T \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \log L_{\text{S}}^\circ &= \log C_{\text{S}} - \frac{1}{2} \log P_{\text{O}_2} - \frac{6888}{T} + 1.152 \\ &= 1.35 \frac{1.79(\% \text{CaO}) + 1.24(\% \text{MgO})}{1.66(\% \text{SiO}_2) + 0.33(\% \text{Al}_2\text{O}_3)} - \log P_{\text{CO}} - \frac{7964}{T} + 4.081 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\log C_{\text{S}} = 1.35 \frac{1.79(\% \text{CaO}) + 1.24(\% \text{MgO})}{1.66(\% \text{SiO}_2) + 0.33(\% \text{Al}_2\text{O}_3)} - \frac{6911}{T} - 1.649^{(2)} \quad (6)$$

$$\underline{\text{Mn}} + \frac{1}{2}\text{O}_2 = \text{MnO}, \quad \Delta G^\circ = -96376 + 28.82T \quad (7)$$

$$\log L_{\text{Mn}}^\circ = -\log P_{\text{CO}} - \frac{15226}{T} + 10.876 \quad (8)$$

(3), (5)および(8)式で L_{Si}° , L_{S}° , L_{Mn}° はそれぞれ Si, S, Mnの平衡分配比を示す。

2.2 実績分配比 実績分配比は高炉から排出されたスラグ, メタルの化学分析値から以下の式により計算する。

$$L_{\text{Si}} = f_{\text{Si}} (\% \text{Si}) / a_{\text{SiO}_2} \quad (9)$$

$$\log f_{\text{Si}} = 0.18 [\% \text{C}] + 0.11 [\% \text{Si}] \quad (10)$$

a_{SiO_2} : Taylor の測定値を用いる

$$L_{\text{S}} = (\% \text{S}) / f_{\text{S}} (\% \text{S}) \quad (11)$$

$$\log f_{\text{S}} = 0.11 [\% \text{C}] - 0.026 [\% \text{Mn}] + 0.063 [\% \text{Si}] \quad (12)$$

$$L_{\text{Mn}} = f_{\text{Mn}} (\% \text{Mn}) / a_{\text{MnO}} \quad (13)$$

$$\log f_{\text{Mn}} = -0.07 [\% \text{C}] + (0.964 - \frac{1838}{T}) [\% \text{Si}] \quad (14)$$

$$a_{\text{MnO}} = 10^3 (\% \text{MnO}) \left\{ 5.9 \frac{(\% \text{CaO}) + 1.4 (\% \text{MgO})}{(\% \text{SiO}_2)} + 1.6 \right\}^{(4),(5)} \quad (15)$$

2.3 平衡分配比計算のための温度とCO分圧 (3), (5)および(8)式により L_{Si}° , L_{S}° および L_{Mn}° を計算するには温度とCO分圧が必要である。しかし, 炉床でのスラグ, メタル反応平衡を考える上に必要な温度とCO分圧は不明である。したがって, 便宜的な考え方を採用せざるを得ない。表1, 表2に千葉製鉄所第3, 第4, 第5高炉の最近6ヶ月の月間平均操業データと実績分配比を示す。この実績分配比によると, Si, Mnの場合は温度として溶銑温度, CO分圧として送風圧+スラグ層静圧を用いて計算した平衡分配比に近く, Sの場合には温度としてスラグ温度 (=溶銑温度 + 50℃), CO分圧として送風圧を用いて計算した平衡分配比に近いことがわかった。したがって, 平衡分配比(基準値)計算に用いる温度とCO分圧は便宜的に以下の値を用いる。

Si, Mnの平衡分配比計算の場合:

$$T = \text{溶銑温度 (}^\circ\text{C)} + 273 \quad (16)$$

$$\begin{aligned} P_{\text{CO}} &= \{ 1 + 0.967 \times \text{送風ゲージ圧 (}^\circ\text{)} \} + \\ &\quad 0.192 \{ \text{羽口, 出銑口間距離 (m)} - 0.75 \}^{(6)} \end{aligned} \quad (17)$$

Sの平衡分配比計算の場合:

$$T = \text{溶銑温度 (}^\circ\text{C)} + 50 + 273 \quad (18)$$

$$P_{\text{CO}} = 1 + 0.967 \times \text{送風ゲージ圧 (}^\circ\text{)} \quad (19)$$

上記のようなCO分圧決定法を用いれば炉容の差、あるいは操業速度の差による効果を相対的に検討することができる。

2.4 炉熱、炉況判定指数 指数としては“炉床熱強度指数”，“炉熱指数”，“炉況指数”の3指数を導入する。

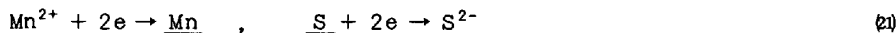
2.4.1 “炉床熱強度指数” 溶銑温度を用いる。直接還元の増加，熱容量流量比の増加などによりシャフト部およびそれ以下の領域での装入物温度が低下しても羽口前燃焼温度，すなわち炉床熱でその低下を補償できれば一定温度の溶銑製造維持が可能である。したがって溶銑温度は装入温度降下が炉床熱で補償されているか否かの判定指数となる。

2.4.2 “炉熱指数” 一定溶銑温度維持の状態ではシャフト部およびそれ以下の領域の温度変動は溶銑温度では監視不可能である。Siの溶銑中への還元はスラグ，メタル反応，ガス，メタル反応を問わず，ベリー，ポッシュ部の温度に左右されることは疑いない。さらに，溶銑中Si濃度の炉床スラグ層内滴下中での変動は小さいことがわかっている。⁽⁶⁾ したがって，スラグ，メタルへのSi分配比はスラグ層より上部の領域の温度プロファイルの情報をもたらししていると考え，実績分配比の平衡分配比に対する比，

$$R_{Si} = (L_{Si} / L_{Si}^0) \times 100 \quad (4)$$

を“炉熱指数”とする。

2.4.3 “炉況指数” SとMnのスラグ，メタルへの分配反応はスラグ層内でもかなり進行していることが知られている。⁽⁶⁾ したがって，炉下部での酸化鉄還元が不十分でスラグ層中FeO濃度が増加した場合には反応，



の進行が阻害される。以上から炉下部でFeO還元が遅れや乱れが生じた場合にはS，Mnの分配比は，溶銑温度が一定の状態でも低下するはずである。この考え方から

表1 高炉操業データの月間平均値 (休風日を除外した数値)

高炉	年月	鉄成分 (%)				スラグ成分 (%)						溶銑温度 (°C)	燃料比 (kg/t)	スラグ比 (kg/t)	ore cooke	送風圧 (kg/cm ²)
		C	Si	Mn	S	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	S					
3BF	50.10	4.66	0.58	0.87	0.040	3.98	6.4	14.8	34.0	1.15	1.21	1507	461	353	3.85	2.64
	11	4.63	0.57	0.73	3.6	4.02	6.4	14.8	34.3	0.93	1.19	1511	463	352	3.90	2.69
	12	4.65	0.54	0.73	3.4	4.03	6.2	14.7	33.9	1.02	1.14	1512	460	348	3.90	2.54
	51.1	4.53	0.45	0.80	3.8	3.97	6.4	15.1	33.6	1.18	1.07	1509	457	363	4.03	2.50
	2	4.60	0.46	0.83	3.4	4.02	6.9	14.7	33.2	1.17	1.16	1508	460	361	4.06	2.56
	3	4.62	0.47	0.82	3.5	4.04	6.6	14.8	33.4	1.09	1.19	1510	461	348	4.06	2.59
4BF	50.10	4.60	0.60	0.85	4.2	4.01	6.1	15.0	33.9	1.13	1.21	1500	476	338	3.82	2.39
	11	4.63	0.52	0.84	4.5	4.00	6.2	14.9	34.3	1.22	1.11	1495	468	345	3.87	2.24
	12	4.59	0.50	0.74	3.8	4.06	6.0	15.0	33.7	1.02	1.13	1505	466	346	3.92	2.27
	51.1	4.53	0.50	0.56	3.7	4.05	6.1	15.7	33.2	0.94	1.10	1511	464	344	3.99	2.34
	2	4.61	0.49	0.47	3.4	4.08	6.2	15.1	33.1	0.77	1.20	1509	468	338	4.05	2.38
	3	4.43	0.47	0.59	3.4	4.08	6.3	15.1	33.3	0.84	1.18	1505	469	339	4.05	2.38
5BF	50.10	4.82	0.60	0.92	4.1	4.03	6.1	15.3	33.4	1.32	1.17	1508	481	364	3.67	2.75
	11	4.76	0.57	0.89	4.0	4.01	6.3	15.2	33.8	1.26	1.13	1503	480	362	3.58	2.64
	12	4.58	0.48	0.87	4.5	4.02	6.0	15.3	33.3	1.40	1.06	1505	476	372	3.62	2.60
	51.1	4.43	0.45	0.81	4.3	3.98	6.3	15.7	33.0	1.38	1.01	1506	474	380	3.69	2.67
	2	4.56	0.42	0.81	4.1	4.03	6.4	15.0	33.1	1.34	1.06	1508	468	382	3.72	2.77
	3	4.48	0.45	0.79	4.1	4.01	6.5	15.0	33.5	1.26	1.06	1508	470	367	3.65	2.84

表2 各判定指数の月間平均値

高炉	月日	L _{Si} ⁰	L _{Si}	R _{Si}	L _S ⁰	L _S	R _S	L _{Mn} ⁰	L _{Mn}	R _{Mn}	ω ₁	ω ₂
3BF	50.10	8.97	6.42	72	8.31	9.00	108	5.22	3.34	64	150	89
	11	9.12	6.30	69	8.14	9.84	121	5.26	3.42	65	175	94
	12	10.56	6.24	59	9.34	9.98	107	5.66	3.12	55	181	93
	51.1	10.03	4.84	48	8.99	8.77	98	5.52	3.00	54	204	113
	2	9.15	5.45	59	10.0	10.5	104	5.29	3.01	57	175	96
	3	9.47	5.62	59	9.9	10.4	105	5.37	3.20	60	177	101
4BF	50.10	8.70	6.70	77	8.84	8.65	98	5.16	3.13	61	127	79
	11	8.33	5.53	66	8.41	7.45	89	5.05	2.96	59	135	89
	12	10.41	5.75	55	10.03	9.04	90	5.63	3.13	56	164	102
	51.1	11.47	6.07	53	10.46	9.06	87	5.90	2.60	44	164	83
	2	10.23	6.22	61	10.8	10.5	98	5.59	2.58	46	161	76
	3	9.34	5.36	57	10.4	10.9	105	5.35	3.07	57	183	100
5BF	50.10	8.32	8.03	96	8.89	8.15	92	5.03	2.86	57	96	59
	11	7.80	6.95	89	8.36	8.21	98	4.88	2.92	60	110	67
	12	8.32	6.22	75	9.98	7.25	73	5.04	2.60	52	97	69
	51.1	8.27	5.01	61	8.99	7.35	82	5.02	2.62	52	134	85
	2	8.30	4.94	60	9.3	8.0	86	5.03	2.62	52	145	87
	3	8.06	4.89	61	8.7	8.2	94	4.96	2.76	56	155	92

$$R_S = (L_S / L_S^0) \times 100, \quad R_{Mn} = (L_{Mn} / L_{Mn}^0) \times 100 \quad (2)$$

を“炉況指数”として導入する。

2.4.4 補助指数 かりに炉熱低下により R_{Si} 低下があっても炉下部での FeO 還元が十分進行し、かつ羽口前燃焼温度により溶銑温度が一定値に維持されれば R_S, R_{Mn} に低下があつたとしても R_{Si} の低下よりも小さいであろう。R 相互の低下の割合を判定する指数としてつぎの ω_1, ω_2 指数を導入する。

$$\omega_1 = (R_S / R_{Si}) \times 100, \quad \omega_2 = (R_{Mn} / R_{Si}) \times 100 \quad (2)$$

3. 実操業データに基づく解析例 表1に示した操業データを用い $L_{Si}^0, L_S^0, L_{Mn}^0, R_{Si}, R_S, R_{Mn}, \omega_1$ および ω_2 を計算した結果を表2と図2に示した。図2から以下の結論が得られる。

(1) 各高とも ore/coke を増加させ、低燃料比操業を 50年10月から51年1月にかけて継続している。この場合、炉熱は低下しているが、炉床熱強度は十分である。すなわち、 R_{Si} は低下傾向にあるが、溶銑温度に低下傾向は認められずほぼ一定値を維持している。また、 ω_1, ω_2 がほぼ上昇しているため炉況も特に悪化していない。3基の高炉中、第3高炉が炉熱は最低燃料比にもかかわらず特に他高炉に比較して低下しておらず炉況は極めて良い。第5高炉は炉熱に余裕があるが炉況は良好とは云えない。なお、単純化モデル計算の結果、各炉ともこの期間において溶融帯高さが低下傾向にあることがわかった。

(2) 51年2月以降では各高炉とも燃料比を上昇させて炉熱の回復をはかったため R_{Si} は上昇傾向になった。この場合溶銑温度は一定水準に維持されている。すなわち、炉床熱強度も十分である。 ω_1, ω_2 は2月度において一時低下が認められるが、これは R_{Si} の回復に起因している。3月度に入ると ω_1, ω_2 は再び上昇しており、この状態から低燃料比操業に再度移行することが可能である。

文献

- (1) 岡部, 浜田, 渡辺: 鉄と鋼, 55(1969), 764
- (2) A.S. Venkatrati & H.B. Bell: J I S I, 207(1969), 1110
- (3) J. Taylor: J I S I, 202(1964), 420
- (4) K.P. Abraham, M.W. Davies & F.D. Richardson: J I S I, 196(1960), 80
- (5) The Making, Shaping and Treating of Steel, chap. 13 (1971)
- (6) 岡部, 榎谷, 福武, 高田: 学振第54委員会提出資料, 54委-1322(1974)

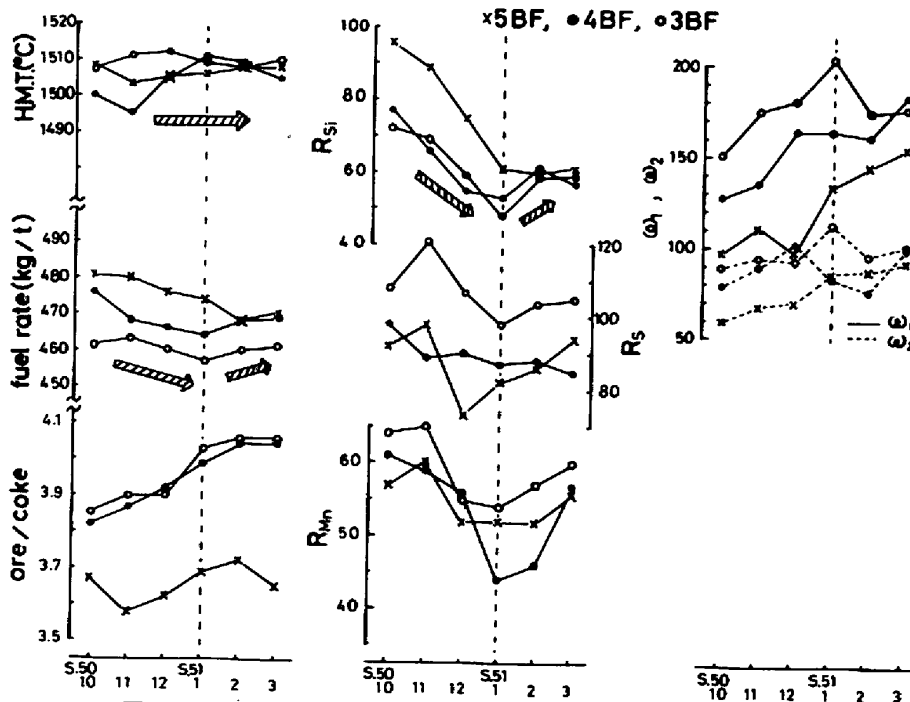


図2 各判定指数と操業因子との関係