

© 1989 ISIJ

技術報告

フェロマンガ ン 堅 型 製 錬 炉 の 炉 内 反 応 解 析

国分 春生*・稲谷 稔宏*・野崎 努*²
 藤森 寛敏*³・増川 匡伸*⁴・大森 康明*⁴

Investigation of the Reactions in the Shaft Type Ferromanganese
 Smelting Furnace

Haruo KOKUBU, Toshihiro INATANI, Tsutomu NOZAKI,
 Hirotohi FUJIMORI, Masanobu MASUKAWA and Yasuaki OOMORI

Synopsis:

The reactions in the shaft type Ferromanganese smelting furnace operated in stream on 24 June 1985 at Mizushima Ferro Alloy Co. were investigated by use of vertical sonde and shaft gas sampler. The results obtained are as follows; 1) High coke ratio of high carbon ferromanganese operation is attributable to high direct reduction ratio, high amount of heat of MnO reduction, high heat loss and low blast temperature. 2) The Boudouard reaction is nearly in equilibrium in the temperature above 700°C. 3) Mn, K₂O and SiO₂ are enriched in fume dust and its diameter is 0.3~0.7 μm. 4) 10~30% of fume dust generated at hearth is discharged from the top of the furnace and the rest is trapped by charged materials and circulates in the furnace. 5) Fume dust trap mainly occurs when the dust is melt in the temperature above 1 200°C.

Key words: shaft furnace; ferromanganese; operation; vertical sonde; dust; gas sampler.

1. 緒 言

水島合金鉄(株)では電気炉法によるフェロマンガ ンの製造を行ってきたが、第1次および第2次石油ショックによる電力料金の高騰により製造コストの上昇を余儀なくされてきた。そこで川崎製鉄(株)水島製鉄所内に立地し、安価なコークスを安定して入手できるという利点を生かして、エネルギー源を電気からコークスに転換し大幅なコスト削減を図ることを目的として、昭和60年6月24日にフェロマンガ ン 堅 型 製 錬 炉 (SF) が稼働した。

SF は稼働以来順調な操業を継続しているが、この間鉍石、コークスの混合装入法の適用¹⁾に代表される装入物分布制御技術を確認し、またシャフト炉では初めてシリコマンガ ンの製造に成功する²⁾など、SFの操業法に関する体系的な技術基盤を築いてきた。

これら技術の蓄積により製造コストを大きく左右する

マンガ ン 歩 留 り は 電 気 炉 法 が 約 82% に 比 較 し て 約 94% と、高い水準の値を記録するに至った。その結果、高炭素フェロマンガ ン (FMn-H) の製造コストを電気炉法よりも大幅に削減することが可能となった。しかしダスト比は低熱流比炉の宿命とも考えられるが、銑鉄高炉に比べてかなり高く、マンガ ン 歩 留 り 向 上 に よ る い つ そ う の コ ス ト 削 減 を 図 る 意 味 か ら も そ の 低 減 が 求 め ら れ て い る。

一方、フェロマンガ ン 堅 型 製 錬 炉 内 の 温 度、ガ ス 組 成 等 の 分 布、還 元 機 構 な ど は 世 界 的 に も 稼 働 基 数 が 少 な い こ と か ら 調 査、解 析 例³⁾ が 少 な く、ほ と ん ど 解 明 さ れ て い な い の が 実 情 で あ る。

本報では、熱、物質バランス解析に基づくSFの操業特性解析、さらに温度、ガス組成などの炉内分布、およびダスト、中でもその約50%を占めるフェームダストの発生機構の解明を目的とした垂直ゾンデ、シャフトガスサンプラーによる炉内調査結果について述べる。

昭和63年4月本会講演大会にて発表 昭和63年8月22日受付 (Received Aug. 22, 1988)

* 川崎製鉄(株)鉄鋼研究所 (Iron & Steel Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasakidori Mizushima Kurashiki 712)

*² 川崎製鉄(株)鉄鋼研究所 理博 (Iron & Steel Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp.)

*³ 川崎製鉄(株)銑鋼技術部 (Iron and Steelmaking Technology Dept., Kawasaki Steel Corp.)

*⁴ 水島合金鉄(株)製造部 (Production Department, Mizushima Ferro-alloy Co., Ltd.)

2. SF 設備概要⁴⁾

SF は炉内容積が 398 m³, ストックライン~羽口間距離が 13.6 m の堅型炉であり, 以下の特徴を有している.

1) 炉頂装入装置として装入物分布の制御性に優れたセンターフィード型カルダン式ベルレス炉頂装入装置を採用している.

2) 熱風炉に代えて, 熱風最高温度が 900°C のレキュペレーターを採用している.

3) 高ダスト比対応のため, 乾式集塵機としてダストキャッチャーとサイクロンを, さらに湿式集塵機としてベンチュリスクラバーと電気集塵機を採用している.

3. 高炭素フェロマンガン製造時の操業特性解析

SF における高炭素フェロマンガン製造時の代表的な操業諸元を Table 1 に示す. 銑鉄高炉に比べてコークス比が 1472 kg/t と高く, 結果として炉頂温度が 470°C と高い操業となること大きな特徴である.

なお実際には, 設備保護のために炉頂ガス温度を炉頂散水により 370°C 以下に制御しているが, Table 1 に示した炉頂ガス温度は散水後の炉頂ガス温度に炉頂散水によるガス温度低下分を加算した計算値で示した.

高炭素フェロマンガン中の Mn/(Mn+Fe) のモル比は約 0.8 と, Fe に比べて Mn が高い割合を占めることから, マンガン酸化物の還元特性が SF の操業特性を支配すると考えられる.

Fig. 1 にマンガン酸化物に関する反応の標準自由エネルギー変化⁵⁾を示す. MnO₂, Mn₂O₃ から Mn₃O₄ への還元はシャフト上部の比較的低温域で熱解離により進行し, また Mn₃O₄ から MnO への還元は基本的には間接還元により進行すると考えられるが, その割合は鉍石

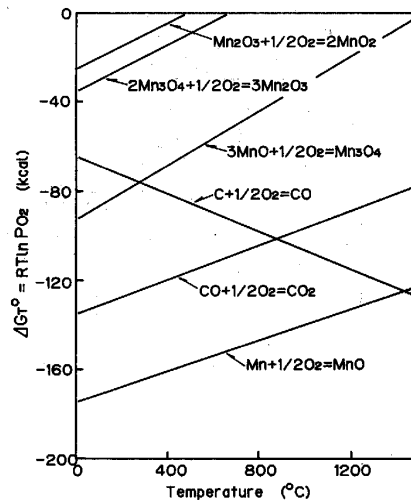


Fig. 1. Standard free energies reaction related to Mn oxides.

の被還元性に依りて変化すると推察される. さらに MnO から Mn への還元は 1400°C 以上の高温を必要とし, 直接還元でのみ進行可能であることがわかる.

このことから直接還元率は銑鉄高炉に比べてかなり高くなることが予想される.

高炭素フェロマンガン操業時の C-O バランスを X, Y 軸にそれぞれ O/C, O/(Mn+Fe) のモル比をとることにより Rist 線図⁶⁾上に表し, X=1 における Y の値 (Y_d), つまり直接還元酸素比を求めると, 操業条件により変化するがほぼ 1.1~1.2 の値が得られる. このことは MnO から Mn への還元反応だけでなく Mn₃O₄ から MnO への還元反応も一部ソリューションロス反応を伴うことを示唆している. ちなみに直接還元率は Y_d を (1)式により換算することにより 75~80% と得られる.

$$R_d = 100 \times \frac{Y_d \cdot (Mn+Fe)_p}{O_c - (O_s + O_d)} \dots\dots\dots (1)$$

ここで

R_d: 直接還元率 (%)

(Mn+Fe)_p: FMn-H 中の (Mn+Fe) 量 (kmol/t)

O_c, O_s, O_d: それぞれ装入鉍石, スラグ, ダスト中の Mn, Fe に付属する酸素量 (kmol/t)

Fig. 2 に FMn-H 操業時の熱バランスを示す. コークスの CO までの燃焼熱と送風顕熱との和を総入熱量として表し, 総入熱量の中に送風中湿分との反応熱を含めた. 総出熱量 3068 Mcal/t のうち, ソリューションロス反応熱が 23.5% と最も大きな割合を占め, 熱損失の割合も 14.5% と高い. またマンガン, 鉄酸化物の CO還元熱が 5.5% と小さいが, これは(2)~(5)式に

Table 1. Typical operational data for FMn-H and SiMn production.

Items	Operation	
	FMn-H	SiMn
Blast volume (Nm ³ /min)	520	470
Oxygen enrichment (%)	4.6	9.5
Blast temperature (°C)	830	790
Blast moisture (g/Nm ³)	13.0	10.0
Theoretical flame temperature (°C)	2440	2700
Coke rate (kg/t)	1472	2288
Slag rate (kg/t)	610	690
Top gas temperature (°C)		
Calculated	470	690
Measured	<370	<370
Production (t/d)	240	140
Metal composition (%)		
[Mn]	74.5	65~70
[Si]	0.3	16~20
[C]	7.0	<2.0

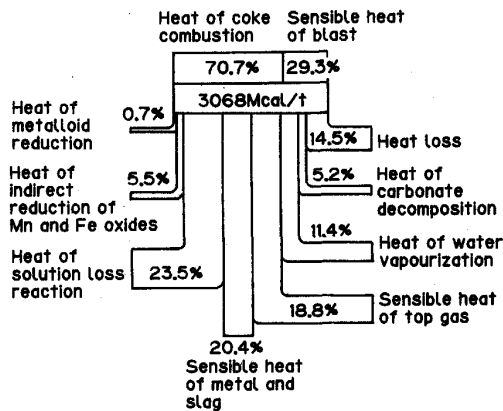
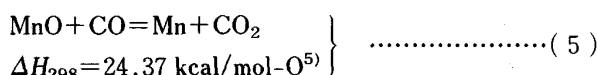
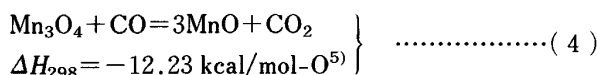
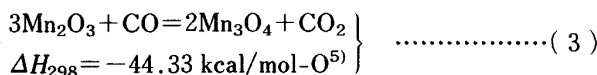
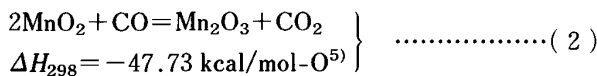


Fig. 2. Heat balance of SF.

示すように高次のマンガン酸化物から MnO への CO 還元反応が発熱反応であることが大きく寄与しているためであり、コークス比を決定付けると考えられる炉下部での反応熱、特に MnO から Mn への CO 還元熱は総出熱量の 10.8% を占める。なお水の蒸発潜熱と炉頂ガス顕熱の和は総出熱量の 30.2% を占めるが、これは炉下部の熱バランスで決定される高コークス比の結果と考えられる。



以上の検討結果より、SF の操業特性、つまり高コークス比を決定付ける主な要因として以下の 4 点を挙げる事ができる。

1) MnO から Mn への還元が直接還元でのみ進行可能であることから直接還元率が高くなり、結果として大きなソリューションロス反応熱を伴う。

2) MnO から Mn への CO 還元反応が $24.37 \text{ kcal/mol-O}^{5)}$ の吸熱反応である。

3) 炉内容積が 398 m^3 と小さく、かつ出銑比が $0.6 \sim 0.7 \text{ tm}^{-3}\text{d}^{-1}$ と低いために熱損失が大きい。

4) レキュベレーターを採用しているために送風温度が約 800°C と低い。

4. 垂直ゾンデによる炉内調査

温度、ガス組成、圧力などの炉内分布および全発生ダストの約 50% を占めるフェームダストの発生機構の解

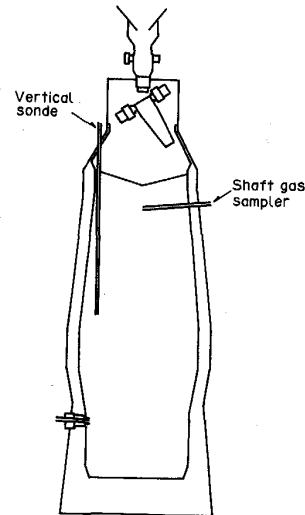


Fig. 3. Allocation of vertical sonde and shaft gas sampler.

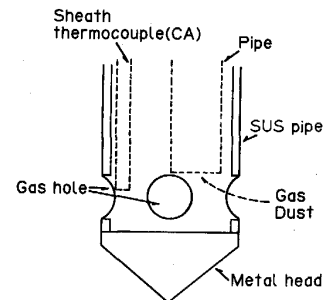


Fig. 4. Schematic view of the head side of vertical sonde.

明を目的として垂直ゾンデによる炉内調査を実施した。

なお既設のシャフトガスサンプラーによる炉内ダスト採取も併せて実施した。

4.1 垂直ゾンデの設備仕様と実験方法

垂直ゾンデおよびシャフトガスサンプラーの設置状況を Fig. 3 に、また垂直ゾンデの先端構造を Fig. 4 に示す。垂直ゾンデは耐熱用の SUS パイプにガス、ダスト採取および圧力測定用のパイプと测温用の CA シース熱伝対を内装しており、ゾンデ先端のサイド部にガス吸引口を 4 箇所設けた構造となっている。垂直ゾンデの全長は 11.4 m で、ストックライン (SL) 下実質挿入可能長は 7.6 m である。

炉内ガスの組成はプロセスガスクロマトグラフにより測定し、ダストは $2 \mu\text{m}$ のダストフィルターを用いて採取した。吸引ガス量は約 100 NI/min で、吸引時間は 1 回のサンプリングにつき $10 \sim 15 \text{ min}$ である。

なおシャフトガスサンプラーは SL 下 1.9 m の位置に設置されており炉半径方向 5 箇所での测温、ガスサン

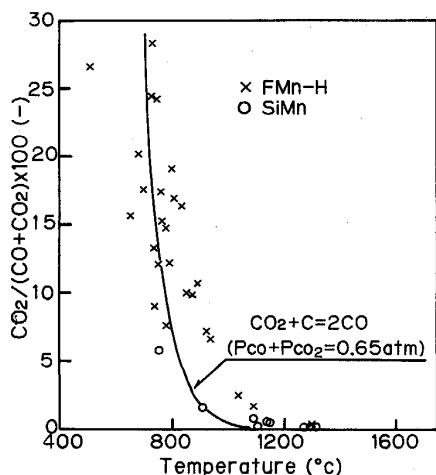


Fig. 5. Change of CO gas utilization ratio with temperature.

プリングが可能である。

4.2 結果と考察

垂直ゾンデによる炉内調査は高炭素フェロマンガ (FMn-H) および実験操業であるシリコマンガ (SiMn) の両操業について実施した。

SiMn 操業の代表的操業諸元を Table 1 に示す。SiMn 操業の場合、難還元性の SiO₂ を還元する必要上 FMn-H 操業に比べて高コークス比、高理論燃焼温度の操業となっている。

4.2.1 ガス組成分布

FMn-H および SiMn 両操業時の CO ガス利用率と温度との関係をまとめて Fig. 5 に示す。図中の実線は測定領域の平均的圧力と考えられる P_{CO}+P_{CO₂}=0.65 atm の場合のブドア平衡を示したものである。

銑鉄高炉の場合には化学保存帯と称されるように、FeO_{1.05}-Fe-CO-CO₂ 平衡により塊状帯でのガス組成が支配される。またこの平衡が RIST⁶⁾ あるいは STAIB⁷⁾ らの高炉バランスモデルの基礎となっている。最近の実炉内測定例としては、中島ら⁸⁾ の送り込み式垂直プローブによる測定結果に化学保存帯の形成が認められる。

一方、SF の場合には図示したように 700°C 以上の温度域でブドア平衡に近い状態が形成されている。

4.2.2 温度分布

FMn-H, SiMn 両操業時の温度分布測定結果を Fig. 6 に示す。FMn-H 操業時に 750°C 近傍の比較的低温の領域が SL 下 1~2 m からシャフトの中~下段まで広がっているケースが多く認められる。このように比較的低温の領域が広く形成される理由として、ブドア平衡に近い状態が形成されていることから、主に高次のマンガ ン酸化物から MnO への CO 還元による発熱とソリュ

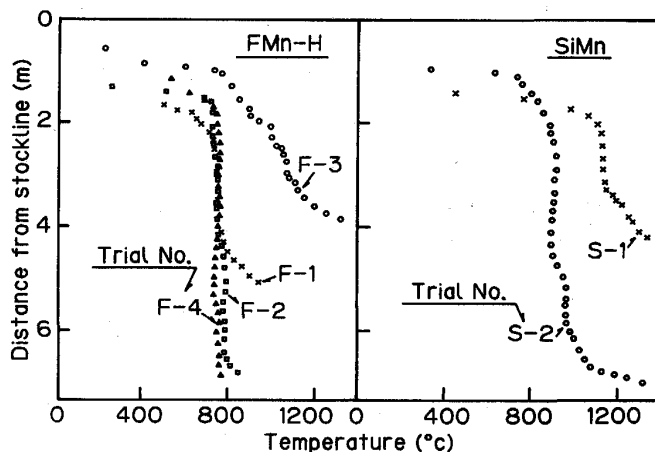


Fig. 6. Temperature profile in SF.

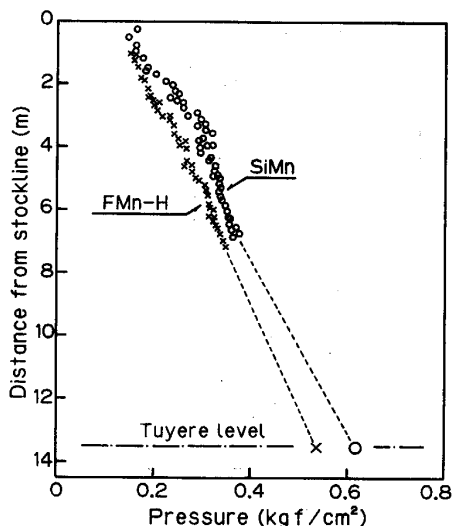


Fig. 7. Pressure distribution in SF.

ションロス反応による吸熱が熱的にバランスするためと考えられる。

ちなみに Mn₃O₄ から MnO への CO 還元熱、-12.23 kcal/mol-O⁵⁾ とソリュションロス反応熱、41.21 kcal/mol-O⁵⁾ のみのバランスを考えれば、CO 還元で生成される CO₂ の 29.7% がソリュションロス反応に与えられることにより熱的にバランスすることになる。

なお、SiMn 操業時の温度分布は測定数が少なく傾向が見出せないが、FMn-H 操業時に比べると熱レベルは明らかに高い。

4.2.3 圧力分布

FMn-H, SiMn 両操業時の炉内圧力分布測定結果を Fig. 7 に示す。羽口先圧力は圧力測定用パイプを羽口先端より 100 mm の位置まで挿入し実測したもので、送風圧力より約 0.3 kgf/cm² 低い。

炉内圧力は炉頂から羽口先まではほぼ直線的に変化して

おり、圧力のレベル差を除けば両操業間に顕著な差は認められない。

4.2.4 荷下り速度

FMn-H、SiMn 両操業時の垂直ゾンデの降下速度の測定結果を Fig. 8 に示す。また同図中にサウンジングにより測定された装入物表面での荷下り速度を用いて(6)式により推定した荷下り速度分布も併せて示した。

$$V_L = \left(\frac{R_o}{R_o + (l_{SL} - l_o)\tan\theta} \right)^2 \cdot V_s \dots\dots\dots (6)$$

ここで

V_L : 荷下り速度 (m/h)

R_o : 炉口半径 (m)

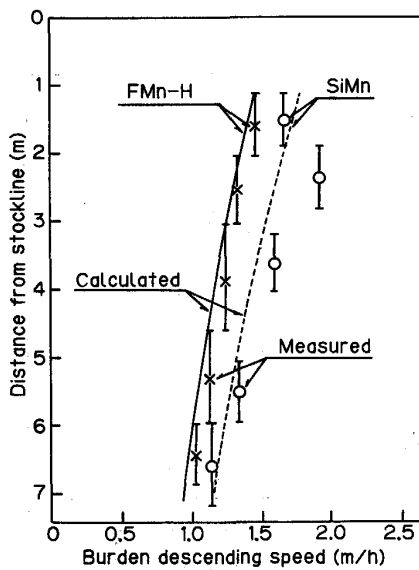


Fig. 8. Comparison between measured and calculated burden descending speed.

l_{SL} : SL からの距離 (m)

l_o : SL からシャフト上端までの距離 (m)

θ : 炉高方向に対するシャフトの傾き (deg)

V_s : サウンジングにより測定された荷下り速度 (m/h)

実測および計算の荷下り速度分布はほぼ一致しており、荷下り速度がシャフトの拡大に伴って遅くなることを示している。

装入物表面での荷下り速度と原料装入速度から、塊状帯での嵩密度と空隙率を(7)、(8)式により推定した結果を Table 2 に示す。

$$\rho_K = (\sum_i G_i) / (V_s \cdot S) \dots\dots\dots (7)$$

$$\epsilon = 1 - (\sum_i (G_i / \rho_i)) / (V_s \cdot S) \dots\dots\dots (8)$$

ここで

ρ_K : 塊状帯の嵩密度 (t/m^3)

G_i : 原料 i の装入速度 (t/h)

S : 炉口断面積 (m^2)

ϵ : 塊状帯の空隙率 (-)

ρ_i : 原料 i の見掛け密度 (t/m^3)

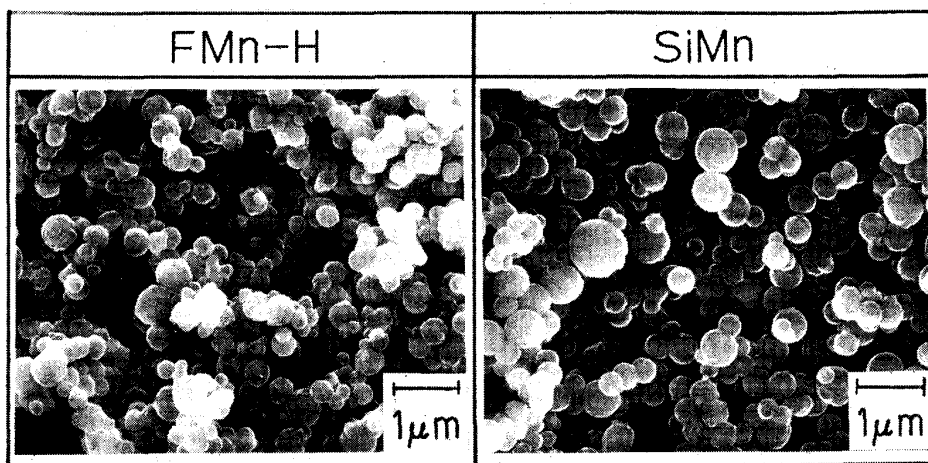
SiMn 操業時の方が FMn-H 操業時に比べて嵩密度は小さく、空隙率は大きい。これはコークス比が FMn-H 操業の約 1.5 倍と高いためと考えられる。

4.2.5 フェームダストの発生機構

FMn-H、SiMn 両操業時に、炉内 1200~1300°C の

Table 2. Estimated bulk density and void fraction of lumpy zone.

Operation	Bulk density (t/m^3)	Void fraction (-)
FMn-H	1.165	0.337
SiMn	0.877	0.463



3.9 m from SL 1300°C
(SL: Stock line)

3.6 m from SL 1230°C

Photo. 1. Scanning electron micrographs of fume dust sampled by vertical sonde.

Table 3. Chemical composition of dust sampled by vertical sonde.

Operation	Sampling temp. (°C)	Chemical composition (wt%)								
		T. Mn	T. Fe	T. C	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
FMn-H	1300	22.5	1.3	0.6	13.5	24.2	6.6	10.7	1.3	5.3
SiMn	1230	8.3	0.2	0.7	20.3	33.0	13.6	5.0	1.4	8.7

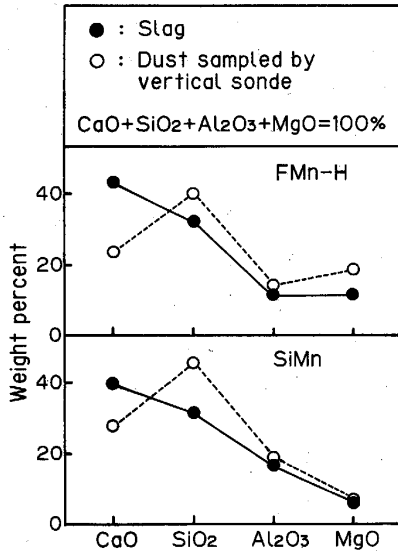


Fig. 9. Comparison between gangue composition of dust sampled by vertical sonde and slag.

温度域から垂直ゾンデにより採取されたダスト（-44 μm が約 95 % を占める）のうち-44 μm 粒子の走査型電子顕微鏡写真を Photo. 1 に示す。ダストは球形を呈し、フェームダストであることを示している。また粒子径は 0.3~0.7 μm で羽口先温度の高い SiMn 操業時のダストの方が大きく、羽口先での蒸気圧が高いほどフェームダストは粗粒化すると考えられる。

化学組成を Table 3 に示すが、蒸気圧の高い Mn および K₂O の濃縮が認められ、かつ Fig. 9 に示すように、いずれのダストもスラグ組成と比較して CaO が少なく、SiO₂ が濃縮している。

炉内でフェームダストのトラップが無いと仮定した場合、炉外に排出されたフェームダスト中 Mn 量から推定した炉下部の Mn 蒸気圧 P_{Mn}^E (mmHg) は (9)、(10)式で与えられる。なお (10)式はフェームダスト中に Fe が存在しないと仮定して得られる式であるが、例えば炉下部温度として 1600°C での純 Mn と純 Fe の蒸気圧を比較すると、純 Fe の蒸気圧は純 Mn の蒸気圧の約 1/1000 であり上記仮定は妥当と考えられる。

$$P_{Mn}^E = W_{Mn} \frac{1000 \times 24}{24 \times 60 \times 54.94} \times \frac{1.03 + P_B - 0.3}{V_B} \times \frac{760}{1.03} \dots \dots \dots (9)$$

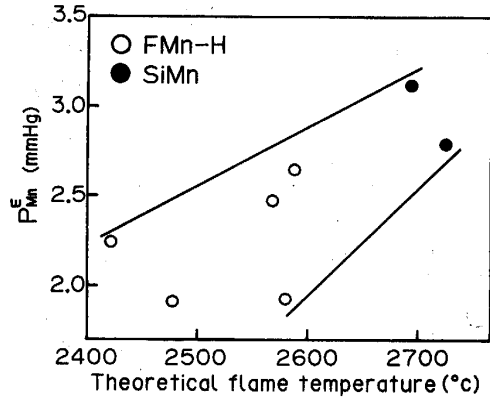


Fig. 10. Relation between theoretical flame temperature and estimated Mn vapor pressure at hearth.

$$W_{Mn} = \sum_i \frac{W_i}{100} \{ (Mn)_i - K (Fe)_i \} \dots \dots \dots (10)$$

ここで

P_B : 送風圧力 (kgf/cm²)

V_B : ボッシュガス量 (Nm³/min)

W_{Mn} : 炉外に排出されたフェームダスト中 Mn 量 (t/d)

W_i : 集塵機 i の捕集ダスト量 (t/d)

$(Mn)_i, (Fe)_i$: 集塵機 i で捕集されたダストの Mn, Fe 含有量 (%)

K : 全装入物の平均 Mn/Fe 重量比 (-)

P_{Mn}^E と理論燃焼温度との関係を Fig. 10 に示す。 P_{Mn}^E 、換言すると炉外に排出されるフェームダスト中 Mn 量は理論燃焼温度の上昇とともに増加する。またこの図から FMn-H 操業時に Mn 蒸気圧で 2~2.5 mmHg 相当の Mn がフェームダストとして炉外に排出されていることがわかる。

一方、炉下部での溶鉄温度に近いと考えられる 1500, 1600°C での FMn-H と平衡する Mn 蒸気圧を (11)、(12)式より計算するとそれぞれ 10.2, 23.7 mmHg と得られ、フェームダストとして炉外に排出された Mn 量 (2~2.5 mmHg 相当) よりも高い値が得られる。

$$P_{Mn} = a_{Mn} \cdot P_{Mn}^0 = N_{Mn} \cdot \exp\left(\frac{\Delta H_{Mn}^M}{RT}\right) \cdot P_{Mn}^0 \dots (11)$$

$$\log P_{Mn}^0 = -14520/T - 3.02 \log T + 19.24^5 \dots (12)$$

ここで

P_{Mn} , P_{Mn}^0 : FMn-H および純 Mn の蒸気圧 (mmHg)
 N_{Mn} : FMn-H 中 Mn のモル分率 (-)
 ΔH_{Mn}^M : Mn の混合の部分モルエンタルピー⁹⁾ (cal/mol)
 R : 気体定数 (cal·mol⁻¹·K⁻¹)
 T : 絶対温度 (K)

この Mn バランスから炉下部で発生した全フェームダストのうち、10~30% が炉外に排出され残り 70~90% は炉内を上昇する過程で装入物にトラップされて炉

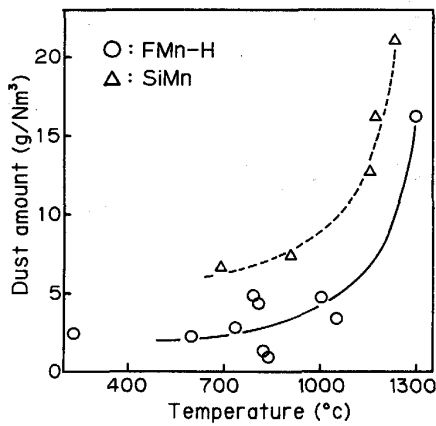


Fig. 11. Relation between temperature and dust amount sampled by vertical sonde.

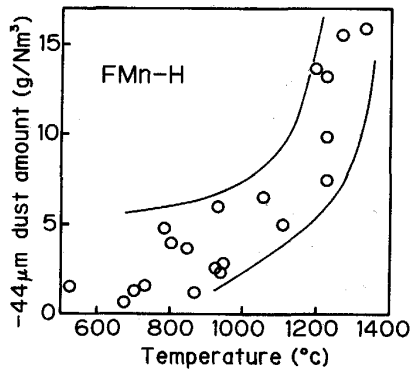


Fig. 12. Relation between temperature and -44 µm dust amount sampled by shaft gas sampler.

内を循環すると推察された。

Fig. 11 に垂直ゾンデで採取したダスト (-44 µm ≒ 90~95%) 量と採取温度との関係を示す。FMn-H, SiMn 両操業とも低温域ほどダスト量が少なく、フェームダストが炉内を上昇する過程で装入物にトラップされることを示している。またこの結果は Mn バランスから推定した炉内フェームダスト挙動と符号する。

Fig. 12 にシャフトガスサンプラーにより採取されたダストのうち、フェームダストがその大半を占めると考えられる -44 µm のダスト量と採取温度との関係を示す。この関係は垂直ゾンデにより得られた関係と類似しており、フェームダスト濃度が炉内の位置よりも温度に強く依存することを示している。

採取ダスト量は Fig. 11, 12 に示したように 1200°C 近傍を境として大きく変化しており、その境界温度は Fig. 11 に示すように SiMn ダストの方が低温側にシフトしている。

垂直ゾンデで採取したフェームダストをブリケット状に成型しアルゴン雰囲気、昇温速度 10°C/min の条件下で軟化溶解挙動を調べた。結果を Photo. 2 に示す。融点は FMn-H ダストが約 1250°C, SiMn ダストが約 1200°C と炉内でダスト濃度が大きく変化する温度域に近い。このことから装入物によるフェームダストのトラップはダストが粘着性を有する溶解あるいは半溶解状態の時に急速に進行すると推察される。

5. 結 言

フェロマンガンの縦型製錬炉の熱、物質バランス解析に基づく操業特性解析、さらに温度、ガス組成などの炉内分布およびフェームダストの発生機構の解明を目的とした垂直ゾンデ、シャフトガスサンプラーによる炉内調査、解析から以下の結果を得た。

1) 高炭素フェロマンガンの操業時の高コークス比 (約 1500 kg/t) を決定付ける主要な要因として、高直接還元率、MnO から Mn への CO 還元反応熱、高熱損失、低送風温度が挙げられる。

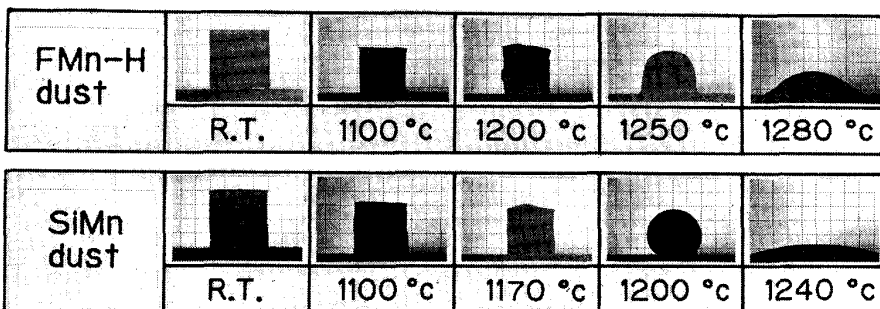


Photo. 2. Softening and melting behavior of fume dust sampled by vertical sonde.

2) 700°C以上の温度域でブーア平衡に近い状態が形成されている。

3) 高炭素フェロマンガン操業時に、750°C近傍の比較的低温の領域がストックライン下1~2mからシャフトの中~下段まで広がっているケースが多く認められた。

4) 荷下り速度はシャフトの拡大に伴って遅くなる。

5) フェームダストは直径が0.3~0.7 μmの球形を呈し、Mn, K₂O, SiO₂が濃縮している。

6) 炉外に排出されるフェームダスト中Mn量は理論燃焼温度の上昇とともに増加する。

7) 炉下部で発生した全フェームダストのうち、10~30%が炉外に排出され、残り70~90%は炉内を上昇する過程で装入物にトラップされて炉内を循環すると推定された。

8) 装入物によるフェームダストのトラップは約

1200°C以上の温度域で、ダストが溶融あるいは半溶融状態の時に急速に進行すると推察された。

文 献

- 1) 吉田和彦, 桜井昭二, 芦沢保文, 鈴木重康, 増川匡伸, 大森康明: 鉄と鋼, 73 (1987), S859
- 2) 吉田和彦, 芦沢保文, 国分春生, 鈴木重康, 増川匡伸, 板谷 宏: 川崎製鉄技報, 19 (1987), p. 73
- 3) E. SCHÜRMAN, H. T. BRANDI, E. FLÄCHSENHAAR and W. ALTPETER: Stahl Eisen, 88 (1968), p. 665
- 4) 森本照明, 吉本正明, 高橋洋行, 浜田尚夫, 福島演雄, 桜井昭二: 川崎製鉄技報, 19 (1987), p. 24
- 5) O. KUBASCHEWSKI and C. B. ALCOCK: Metallurgical Thermochemistry International Series on Material Science and Technology, 5th ed., 24 (1983), p. 294
- 6) A. RIST and N. MEYSSON: J. Met., 19(1967) 4, p. 50
- 7) C. STAIB and J. MICHARD: J. Met., 17 (1965) 1, p. 33
- 8) 中島龍一, 炭竈隆志, 牧 章, 酒井 敬, 桜井雅昭: 材料とプロセス, 1 (1988), p. 109
- 9) 溶鉄・溶滓の物性値便覧 (日本鉄鋼協会) (1972), p. 186