

技術報告

低 SiO_2 焼結鉱の製造と高炉操業への影響

明田 堯*・高見 満矩*・志垣 一郎*²
 星野 剛一*³・高橋 佐*・門口 維人*

Reduction of SiO_2 Content in Sinter Ore and Its Effect on Blast Furnace Operation

Kan AKETA, Mitsunori TAKAMI, Ichiro SHIGAKI, Koichi HOSHINO,
 Tasuku TAKAHASHI and Korehito KADOGUCHI

Synopsis :

Sintering technology with decreasing SiO_2 content from 5.6% to 4.9% at Kobe Works has been achieved based on the following concept. The desirable structure of quasi-particles for low SiO_2 sinter should consist of limonite ores as nucleus and fine ores of low SiO_2 and Al_2O_3 contents as adhering particles. In addition, basicity and MgO content of sinter should be increased.

Consequently, the *RDI* value of sinter became high and its yield slightly became low, though the reducibility and high temperature property of sinter were improved.

The use of low SiO_2 sinter at Kobe No. 3 blast furnace has increased overall permeability by increasing permeability at the lower part of the furnace in spite of lower permeability at the upper part of the furnace, which has contributed to appreciable increases in ore/coke ratio and injection rate of pulverized coal.

Key words : sinter ; SiO_2 content ; basicity ; quasi-particle ; ore/coke ; limonite ore ; pulverized coal injection.

1. 緒 言

焼結鉱の SiO_2 含有量の低減は、スラグ量の削減による高炉燃料比の低下、焼結鉱の高温性状改善による高炉炉況の安定、焼結原料の副原料コストの削減が期待できることから、低 SiO_2 焼結鉱の製造が試みられている^{1)~3)}。過去発表された低 SiO_2 化は、手段として副原料の細粒化による有効 SiO_2 量の確保を指向しているため、還元粉化性指数 (*RDI*: Reduction Degradation Index) は改善されているものの、被還元性の明確な向上にはつながらなかった。そこで、神戸製鉄所では、褐鉄鉱を核とし、低 SiO_2 ・低 Al_2O_3 微粉を付着粉とした鉱石の組合せにより、*RDI* の上昇と歩留りの低下を極力抑制した中で、低 SiO_2 化・高被還元性化を進めてきた。'86 年 12 月以降、 $\text{SiO}_2=4.9\%$ の低 SiO_2 焼結鉱の使用を継続しているので、以下これらの低 SiO_2 焼結鉱の製造並びにその第 3 高炉 (内容積 1845 m^3) での使

用状況について報告する。

2. 低 SiO_2 焼結鉱の製造

2.1 配合設計の考え方

現在焼結鉱に要求される基本的品質の常温強度、還元粉化性、被還元性について、おのおのの品質を支配する一般要因とそれに及ぼす低 SiO_2 化の影響を Table 1 に示す。常温強度はカルシウムフェライト (以下 CF)、非晶質けい酸塩 (以下 GS) の結合相の量が多いほど、また大気孔の少ないほど高い。塩基度一定で SiO_2 分が下がると、結合相の量が減少する⁴⁾。この対策としては、塩基度を上げて CF 相の量を増加させることが考えられる。

還元粉化性については、一般的に以下の要因に影響される。骸晶状というヘマタイト (以下 H) の形態⁵⁾、 Al_2O_3 や TiO_2 のような H 相中に固溶の不純物⁶⁾、結合相の破壊強度及びき裂の進展阻止の役割を果たす気孔の

昭和 62 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 62 年 3 月 20 日受付 (Received Mar. 20, 1987)

* (株)神戸製鋼所神戸製鉄所 (Kobe Works, Kobe Steel, Ltd.)

*2 (株)神戸製鋼所材料研究所 工博 (Materials Research Laboratories, Kobe Steel, Ltd.)

*3 (株)神戸製鋼所鉄鋼生産本部生産技術部 (Technology Administration Department, Iron & Steel Production Division, Kobe Steel, Ltd., 1-3-18 Wakinocho-cho Chuo-ku Kobe 651)

Table 1. Relation between mineralogical structure and properties of sinter and the effect of decrease in SiO₂ content on properties of sinter.

	Cold strength	Reduction degradation	Reducibility
Ruling factors	Amount of melt generation. Porosity.	Expansion during reduction from hematite to magnetite. • Shape of hematite (skeletal) • Impurities held in hematite (Al ₂ O ₃ , TiO ₂) • Strength of matrix • Porosity (arrest of crack propagation)	Porosity of relict ores and matrix. Amount of calcium ferrite. Decrease in an amount of melt at high temperatures.
Effect of decrease in SiO ₂	Decrease in amount of glassy silicate and calcium ferrite and so cold strength.	Increase in amount of skeletal hematite and so RDI.	Decrease in amount of calcium ferrite and so reducibility.
Means for improvement	Increase in amount of calcium ferrite by increasing basicity.	Decrease in maximum temperature of bed by increasing in basicity and lowering Al ₂ O ₃ content. Decrease in amount of hematite by using MgO.	Increase in an amount of calcium ferrite by increasing basicity. Increase in reducibility of relict ores by using limonite ores. Decrease in an amount of melt by adding MgO.
Concrete plan	Using limonite ore as nucleus. Using fine ores of low SiO ₂ and Al ₂ O ₃ contents and adding MgO content.		

Table 2. Chemical composition of raw materials.

	Base	Experiments Step 1	Step 2	Step 3	T.Fe	FeO	Chemical composition (wt%)			MgO	C.W.
							SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃		
Ore A	30.3	34.5	39.0	38.1	67.73	0.14	2.92	0.02	1.09	0.01	0.26
Ore B	10.0	18.8	18.8	18.8	56.91	0.12	5.73	0.07	2.82	0.04	9.36
Ore C	24.2	—	—	—	62.12	0.28	5.53	0.07	2.61	0.01	1.81
Ore D	—	7.3	—	—	62.30	0.07	7.39	0.05	1.54	0.05	1.28
Ore E	2.0	3.6	4.8	4.8	64.50	0.14	2.76	0.12	2.90	0.06	5.25
Ore F	—	4.3	5.7	5.7	68.43	14.44	2.14	0.04	0.37	0.01	0.55
Ore G	—	1.8	12.6	12.6	67.71	0.14	1.96	0.12	2.08	0.07	4.77
Limestone	14.1	11.5	11.9	11.8	—	—	0.21	54.83	—	0.91	—
Serpentine	0.3	0.3	0.3	2.2	5.06	—	37.91	1.28	1.12	37.59	—
Other materials	2.4	1.2	1.6	0.8	—	—	—	—	—	—	—
Return	16.7	16.7	16.7	16.7	54.84	—	6.19	10.59	2.08	1.72	—

Table 3. Chemical composition, mineral amounts and qualities of sinter.

	T.Fe	FeO	Chemical composition (wt%)			CaO/SiO ₂	H	Mineral amount (wt%)			S	Quality (%)		
			CaO	SiO ₂	MgO			M	CF			SI	RDI	RI
Base	57.10	6.28	8.96	5.60	0.56	1.60	49.1	16.3	22.4	12.2		86	33	68
Step 1	59.04	6.76	9.18	5.31	0.47	1.73	48.2	18.5	21.5	11.8		87	42	69
Step 2	58.88	5.61	9.70	5.13	0.50	1.89	45.2	15.2	28.8	10.8		87	50	72
Step 3	58.49	6.79	9.85	4.90	1.21	2.01	38.7	20.7	30.4	10.2		87	46	68

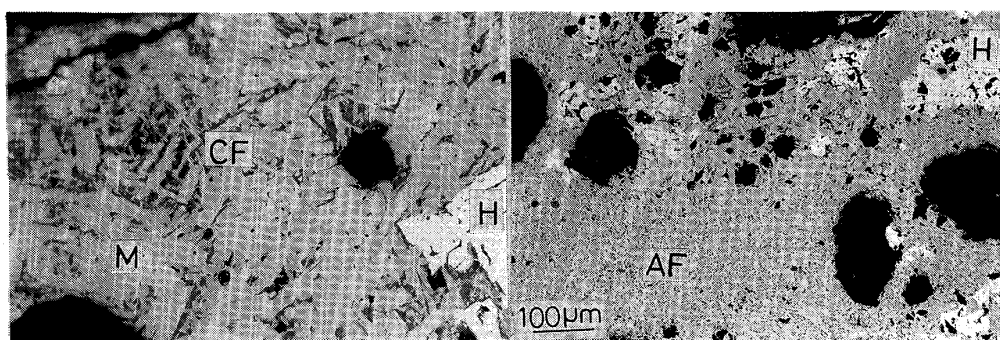
割合などである⁷⁾。低 SiO₂ 化により、擬似粒子微粉中の鉄分の相対割合が増加し、焼結層到達温度が上昇し⁸⁾⁹⁾、骸晶状 H 相の量増加が懸念される。この対策としては、高塩基度・低 Al₂O₃ 化及び MgO 分添加による H 相の量の抑制で 550°C 還元減少量 $\Delta H^{10)}$ を抑えることにした。

最後に被還元性は、低温では残留元鉄の銘柄¹¹⁾、気孔率、CF 相の量に左右される¹²⁾。塩基度一定の下での低 SiO₂ 化では CF 相の量が減少し、元鉄の被還元性の影響が大きくなる。また、高温の被還元性は、焼結鉄の気孔を閉塞する融液量が大きな影響を及ぼす。この融液量を減少させるには、MgO が有効であることが知られている¹³⁾。したがって対策としては、焼結鉄に残留しても高気孔率の褐鉄鉱を核とし、CF 相の増加と高温での融液生成を抑制するために付着粉組成を含 MgO・高塩基度とした擬似粒子構造が考えられる。

以上のように、低 SiO₂ 化により各品質は変化するが、これらに共通の対策として以下の手段をとった。褐鉄鉱を核とし、低 SiO₂、低 Al₂O₃ 鉄石の微粉に蛇紋岩を加えた付着粉の擬似粒子構造を造り込み、高塩基度化を図った。

2・2 焼結鍋実験による低 SiO₂ 焼結鉄の製造

上記の考えに基づき、Table 2 の配合での鍋実験を行った。水分添加量は 6.0% に調整し、焼成は 300 mmφ の試験鍋で、層高 550 mm、負圧 1 600 mm H₂O で実施した。Step 1, Step 2 と順に低 SiO₂、低 Al₂O₃ 鉄石を増配し高塩基度化を図った。Step 3 では蛇紋岩を増配し、MgO の効果を検討した。成品焼結鉄の化学組成、X線内部標準法¹⁴⁾ による鉄物相と品質を Table 3 に示す。Base から Step 2 まで低 SiO₂ 化することで H 相の量が減少し CF 相の量が増加している。それにともないマグネタイト (以下 M) とスラグ (S) も減少して



(a) High SiO_2 ($\text{SiO}_2=5.6\%$) (b) Low SiO_2 ($\text{SiO}_2=4.9\%$)
 H: Hematite M: Magnetite CF: Columnar calcium ferrite AF: Acicular calcium ferrite
 Photo. 1. Microstructure of sinter (Pot test).

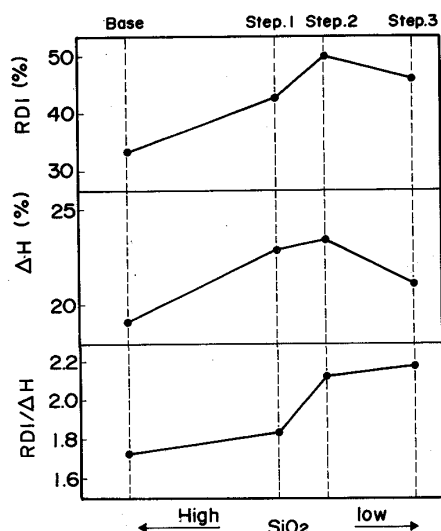


Fig. 1. Change in RDI and ΔH with SiO_2 content (Pot test).

いる。Step 3 では MgO 分の影響で H 相の量が減少し M 相の量が増加しているものの、高塩基化の効果で CF 相の量は多い。Photo. 1 に Base と Step 3 の焼結鉱の代表的な顕微鏡組織を示す。Base の焼結部は柱状 CF が多く観察されたが、Step 3 では針状 CF 主体の結合組織である。

常温強度が維持できたのは、上記の CF 組織増加の効果と考えられる。 RDI は Step 2 で 50% まで上昇したが、Step 3 では 46 に抑制することができた。550°C での還元減少量 ΔH とバインダー強度 $RDI/\Delta H^{10)}$ を Fig. 1 に示す。低 SiO_2 化にともない ΔH が増加しているが、Step 3 ではヘマタイト量が少ないため ΔH が減少し RDI が改善されている。一方、 $RDI/\Delta H$ は上昇し、バインダー強度は下がっている。針状 CF 主体の組織は、耐還元粉化特性が優れているとの説¹⁵⁾がある

Table 4. Mixing ratio of raw materials for decreasing SiO_2 content and chemical composition of sinter.

Period	Mixing ratio (wt%)		Chemical composition (wt%)		
	Ore A	Ore B*	SiO_2	FeO	MgO
I	20	10	5.60	5.70	1.0
II	20→32	10→22	5.60→5.35	5.70→5.40	1.0→0.5
III	32→35	22	5.35→5.25	5.40	0.5
IV	35→40	22→25	5.25→4.90	5.40→5.70	0.5→1.5

* The same symbols are used as those in Table 2.

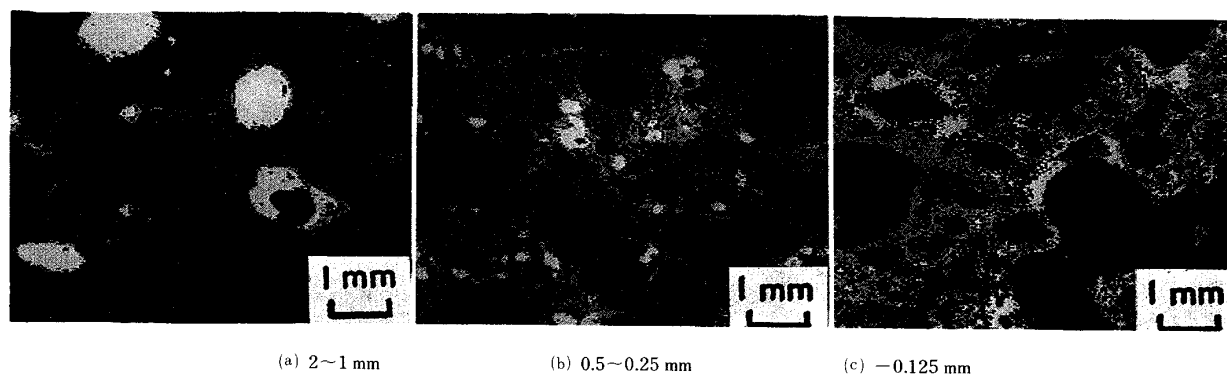
が、この結果からは逆に劣ることも考えられる。被還元性 (RI) は低 SiO_2 化とともに上昇しているが、Step 3 では H 相の量が減少しているため Base の水準まで低下している。

このように、 MgO 分を添加して高塩基化することで従来のシリケート系融液増加¹⁾とは全く異なる低 SiO_2 焼結鉱の製造が可能であることが判明した。

2.3 実機操業結果

焼結機 (ストランド有効面積 162 m^2) での低 SiO_2 焼結鉱製造は、高炉操業を見ながら 3 年にわたって実施してきた。鉱石配合条件を 4 期間に分けて Table 4 に、また焼結工場の操業推移を Fig. 2 に示す。期間 [I] での焼結鉱性状は、被還元性よりも耐還元粉化性を重視したため (RDI 管理値 37) SiO_2 分の高い南米産ヘマタイト鉱石主体の配合であつた。

期間 [II] は Ore A, Ore B を徐々に多配合して行った結果、 RDI は 41 まで上昇した。この期間嵩密度の低い Ore B 多配合のため装入密度の上昇を図つたが、不均一焼成が目立つたため焼成制御モデルによる熱管理¹⁶⁾を強化した。その結果、焼結鉱の低 SiO_2 化とともに低 FeO 化にも成功した。期間 [III] では Ore A をさらに増配した結果、 RI は 70 まで顕著に上昇したが、 RDI は緩和してきた管理値 40 をも超えるようにな



Level MgO(%)	Blue 0-0.2	Green 0.2-0.7	Yellow 0.7-1.2	Red 1.2-1.7	Magenta 1.7-2.2	White >2.2
-----------------	---------------	------------------	-------------------	----------------	--------------------	---------------

Photo. 2. Effect of size of serpentine particles on the dissolution in melt of sinter.

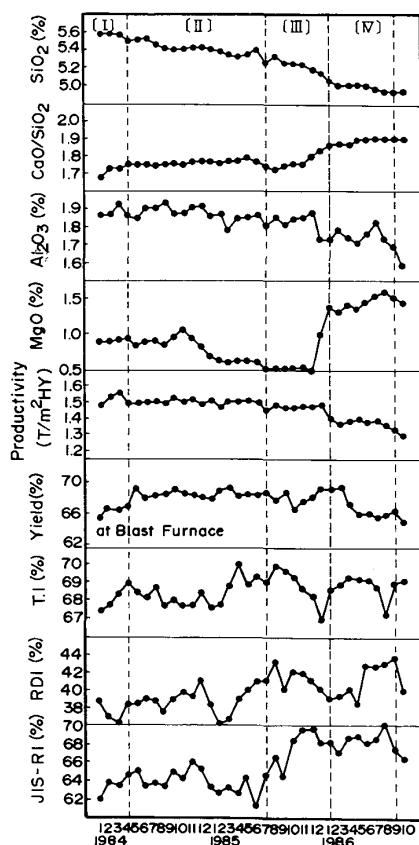


Fig. 2. Operational results of Kobe sintering plant.

つた。そこで、期間〔Ⅳ〕では、蛇紋岩配合により RDI 抑制を図りながら Ore A の配合率を 40% まで上げた。同時に歩留向上策として FeO を 5.70% まで上げた。以上の結果、高塩基度 (1.9) 高 MgO (1.5%) の低 SiO₂ (4.9%) 焼結鉍の製造が可能となつた。なお期間中、RDI 管理値は 46 まで上げた。

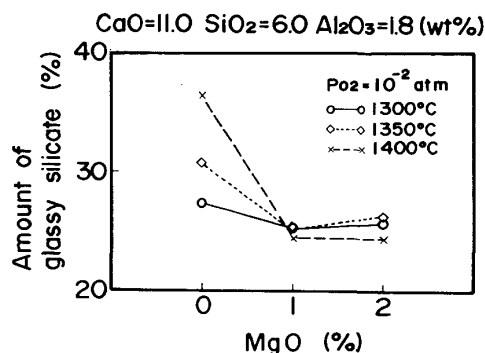


Fig. 3. Relation between MgO and amount of glassy silicate.

2.4 蛇紋岩添加の効果

上述のように、蛇紋岩添加は焼結鉍の RDI 抑制に有効であつたが、当初粗粒使用時にはその効果は小さいものであつた。蛇紋岩の滓化性を調べるため粒度を調整し配合原料中割合を 2% として試験鍋焼成した。等しい熱履歴を示した熱電対の近傍から採取した焼結鉍の Mapping analyzer による MgO 成分の分析結果を Photo. 2 に示す。含 MgO 物質が滓化しにくいことは古くからいわれているが¹³⁾¹⁹⁾、Photo. 2 に示すように 125 μm 以下の場合だけが比較的滓化が進んでいる。細粒蛇紋岩の使用はすでに実施されており、生産率、歩留りに変化が現れないとの報告¹⁸⁾がある。しかし、Fig. 3 に示すように、CO-CO₂ 混合ガス中で加熱した試薬合成系の物質収支による鉍物相定量¹³⁾によると MgO 分は M 相を安定させ GS の量を低下させる。したがって、実操業においても MgO 分をよく滓化させることは、RDI の抑制に対しては有効であるが、歩留向上にはつながらなかつた。

3. 品質評価

焼結鉱の低 SiO_2 化を推進する中で、 SiO_2 の低減と併せて、成分面では塩基度、 MgO のアップを図ってきた。その間の焼結鉱性状について、特に高温還元性状を中心に調査した。

3.1 高温荷重還元試験

測定は試料 500 g を黒鉛るつばに充填し、試料上部に

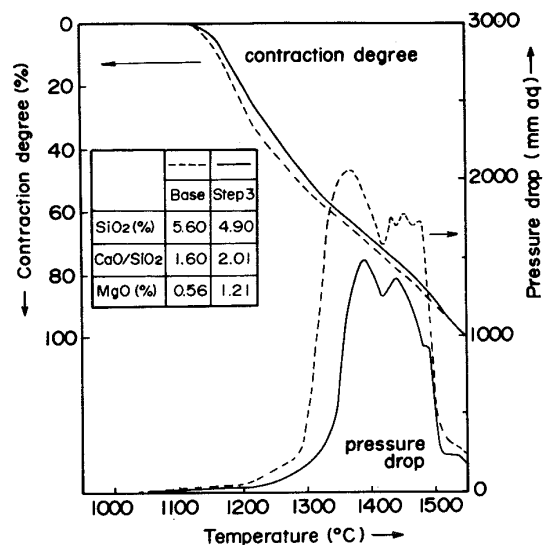


Fig. 4. High temperature properties of sinter (Pot sinter).

置いた黒鉛ロストルを介して一定荷重 (1 kgf/cm^2) をかけて行つた。昇温速度は、第 3 高炉のヒートパターン測温結果を基に、またガス組成は、ガスサンプラー分析結果を基に高炉半径方向中間部の値に設定した。

3.2 高温荷重還元試験結果

Fig. 4, Table 5 に高温荷重還元試験結果を示す。低 SiO_2 、高塩基度、高 MgO 化に伴い、軟化開始温度、熔融開始温度 ($\Delta P=100 \text{ mmAq}$ 温度) は高温側へ移行すると共に、最大圧損値も低減している。

これら高温性状の改善は、(1)低 SiO_2 化による高温域での熔融スラグ量の減少、(2)高塩基度化による熔融スラグ量の減少²⁰⁾、(3)高 MgO 化によるウスタイトの融点の上昇²¹⁾ によるものと考えられる。

Table 5. High temperature properties of sinter (Pot sinter).

	Base	Step 1	Step 2	Step 3
SiO_2 (%)	5.60	5.31	5.13	4.90
CaO/SiO_2	1.60	1.73	1.89	2.01
MgO (%)	0.56	0.47	0.50	1.21
Temperature at pressure drop of 100 mmAq ($^{\circ}\text{C}$)	1 230	1 250	1 257	1 265
Pressure drop at 1 300 $^{\circ}\text{C}$ (mmAq)	500	270	220	160
Degree of contraction at 1 300 $^{\circ}\text{C}$ (%)	52.9	50.4	48.0	49.0
Temperature at beginning of softening ($^{\circ}\text{C}$)	1 135	1 145	1 160	1 155
Other properties				
SI (%)	86.0	87.4	86.9	86.9
RDI (%)	33.1	42.1	50.0	46.2
JIS-RI (%)	67.8	69.1	72.0	67.9

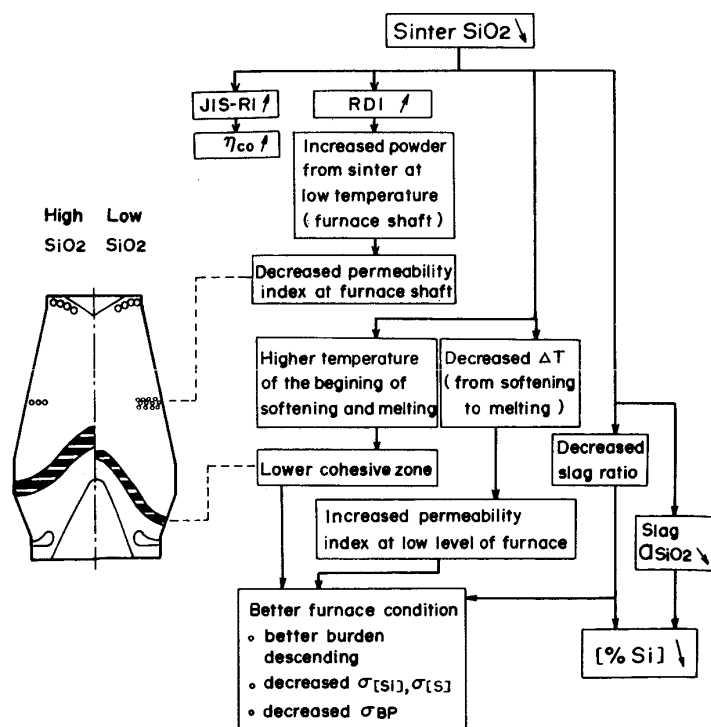


Fig. 5. Basic concept for decreasing SiO_2 content in sinter.

4. 低 SiO₂ 焼結鉱の高炉使用

4.1 高炉操業の考え方

前項の品質評価に基づく、低 SiO₂ 焼結鉱使用時の高炉炉況変化推定フローを Fig. 5 に示す。RDI の悪化からは、炉内発生粉量の増加による塊状帯部の通気性低下が予想される。一方、高温性状の改善により、高炉全圧損の約 70% を占める炉下部圧損の低減が想定された。しかし、実炉での両者の定量的推定は困難であつたので、炉況との対応を確認しながら進めることとした。

4.2 低 SiO₂ 焼結鉱の高炉使用結果

Fig. 6 に低 SiO₂ 焼結鉱使用に伴う高炉操業推移を示す。焼結鉱の低 SiO₂ 化により、炉下部圧損 (K_L)、及

び送風圧力変動 (σ_{BP}) の低減で示されるように高炉の通気、荷下がり安定した結果、炉況が改善され、微粉炭吹込み量のアップ、Ore/Coke の増加が可能となつた。焼結鉱 SiO₂ レベルと炉内圧損の関係を、Fig. 7 に示す。4.1 項で想定したように、低 SiO₂ 化に伴い高炉中部 (シャフト下部) 塊状帯の通気抵抗は増大しているが、その影響は SiO₂ 1% 当たり 0.4 (K_M) に過ぎない。一方、炉下部の通気抵抗の低下は、SiO₂ 1% 当たり 1.2 (K_L) と大きいため、塊状帯部の通気抵抗の上昇を差し引いても全通気抵抗 (K) は、低 SiO₂ 化により低下する結果となつた。

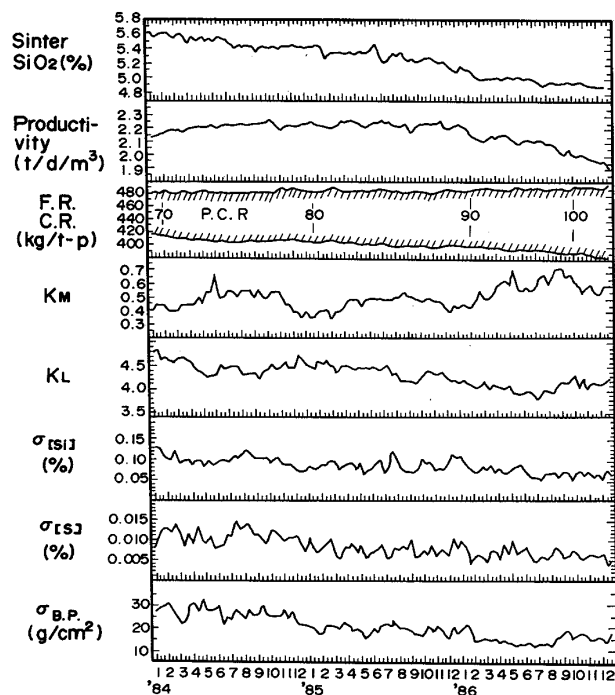


Fig. 6. Operation results at Kobe No. 3 B.F..

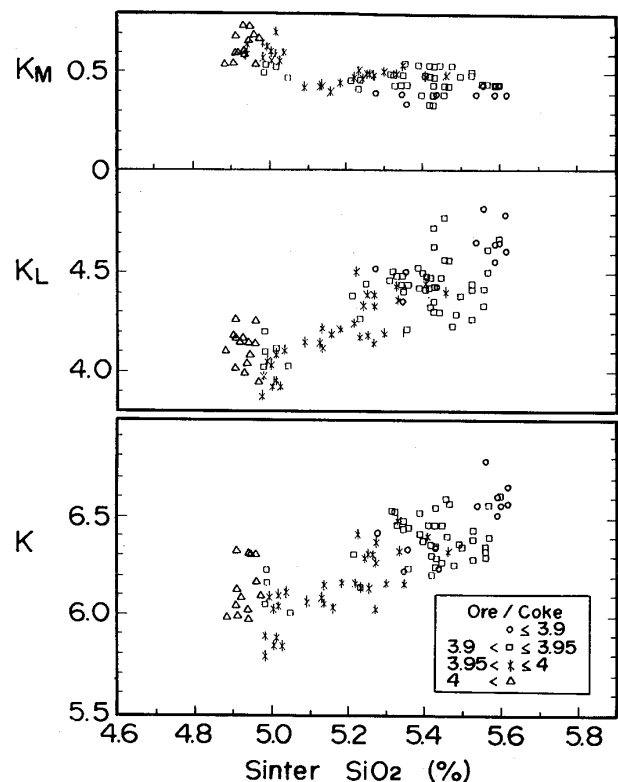


Fig. 7. Relation between SiO₂ content in sinter and K-value.

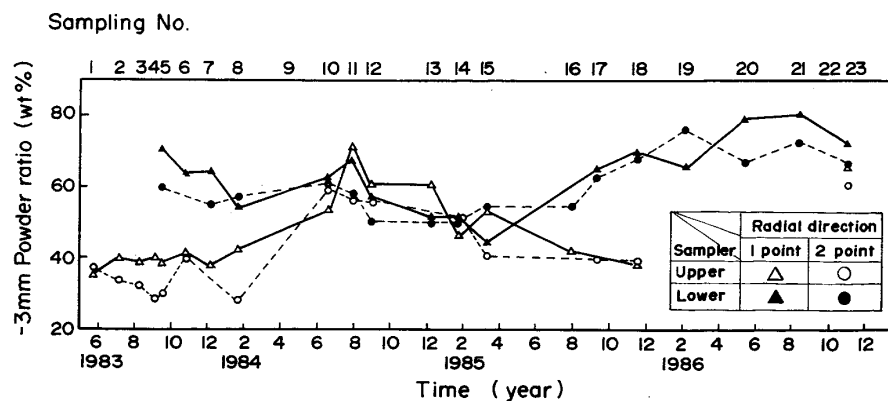


Fig. 8. Transition of powder ratio in furnace.

4.3 高炉内容物サンプリング結果

RDI の悪化による炉内発生粉の増加が予想されたため、第3高炉中部（シャフト下部）に設置されている SM (Solid Material) サンプラー²²⁾ の採取ポイント、頻度を増加し、焼結鉱の炉内粉化挙動を調査した。

炉壁から 100 mm, 600 mm の各位置（以下、おのこの 1 ポイント、2 ポイントと称す）で採取した焼結鉱の粉率（ -3 mm ）推移を、Fig. 8 に示す。上部・下部サンプラーの粉率共、'85 年秋以降 10~20% 増加し、最近では 70%~80% のレベルに達している。Fig. 9, 10 にそれぞれ焼結鉱 SiO_2 と炉内粉率、炉内粉率と高炉中部（シャフト下部）通気抵抗の関係を示す。焼結鉱の低 SiO_2 化に伴う RDI の悪化により、炉内粉率は増加している。更に、炉内粉率の増加により、高炉中部（シャフト下部）の通気抵抗は増大するが、その影響は -3 mm 粉の 10% 増加当たり、 $0.1(K_M)$ と極めて小さいことがわかった。

4.4 炉内粉化挙動と RDI 管理

Fig. 12 中の上部・下部サンプラーの粉率を、高炉高さ方向で整理すると、Fig. 11 が得られる。上部サンプラーレベルでは、粉率は 30%~60% と大きくばらついているが、下部サンプラーレベルでは、約 60% と差が

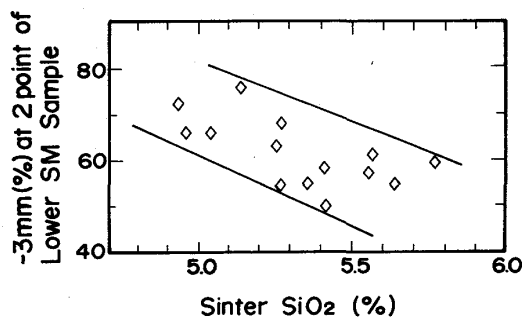


Fig. 9. Relation between SiO_2 content in sinter and -3 mm at 2 point of lower SM sample.

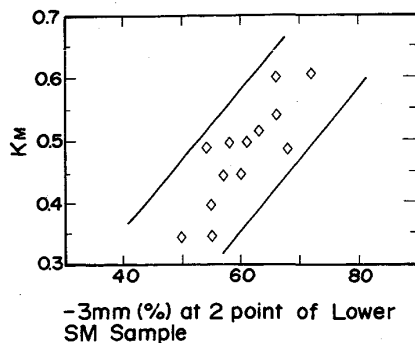


Fig. 10. Relation between -3 mm at 2 point of lower SM sample and K_M .

なくなっている。従来、焼結鉱の粉化は、シャフト上部から中部にかけて進行し、それ以降では粉化が終了して粒度、還元率共ほぼ一定となるとの報告^{23)~25)}があるが、本調査でも同様の傾向が見られた。更に、上部・下部サンプラー間の粉率差で粉化挙動を層別した結果、差の大きい A type、差の小さい B type に分類できた。Type A, B に対応する炉内ヒートパターンを、Fig. 12 に示す。Type A 時のヒートパターンは、Type B に比して SM サンプラー近傍までの昇温スピードが大きいことがわかった。また、昇温スピードの大小による炉内粉率変化は約 30% 程度と推定された。

次に、 RDI と炉内粉率の関係を Type A, B 別に Fig. 13 に示す。上部・下部サンプラー粉率は、 RDI の悪化に対して Type A, B 共増加している。 RDI のアップによる炉内粉率増加は、前述のヒートパターン差に起因する粉率増加に比し極めて小さい。以上により、炉内粉化挙動への RDI の寄与は小さく、ヒートパターンの影響

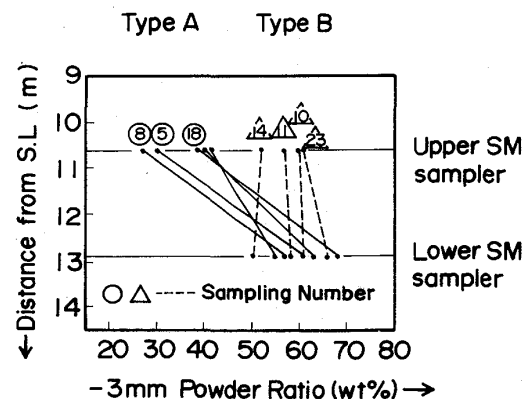


Fig. 11. Transition of -3 mm at 2 point (Near the furnace wall).

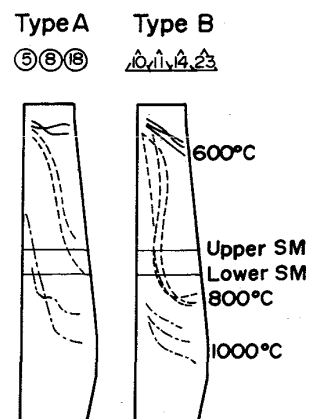


Fig. 12. Classification according to furnace temperature profile.

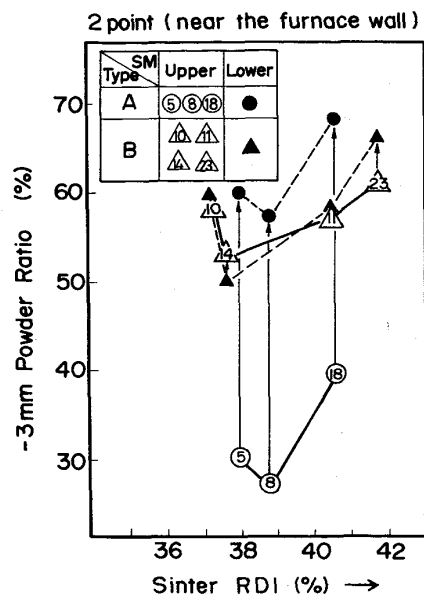


Fig. 13. Effect of sinter RDI on the - 3 mm% near the furnace wall.

が極めて支配的であることがわかった。そこで、品位制約を順次見直し、RDIを緩和し、低 SiO₂ 化を推進してきた。

現在の焼結鉱品質規格は、以下のとおりである。

SiO₂=4.9%, SI>86.5%

RDI<46.0%, FeO=5.8%

今後のいつその低 SiO₂ 化にあたっては、これまでと同様に炉下部の改善効果が得られるのか、もしくは炉内粉化の増加によるシャフト下部ガス流れの乱れが顕在化するのか、十分見極めつつ進める必要がある。従って、今後は従来にも増して炉内のガス流れ管理を強化すると共に、'86年12月に設置した炉腹サンプラー情報の活用により融着、溶落ち挙動まで含めた低 SiO₂ 焼結鉱の炉内総合評価技術確立し、焼結鉱品質規格そのものの見直しを図っていかなければならないと考える。

5. 結 言

スラグ量の削減、高温性状の改善による高炉炉況の安定化を目的として、焼結鉱の低 SiO₂ 化を進め、'86年12月以降 SiO₂=4.9% の低 SiO₂ 焼結鉱の製造及びその高炉使用を実施している。その結果得られた知見を以下に示す。(1)褐鉄鉱を核、低 SiO₂・低 Al₂O₃ 微粉を付着粉とした擬似粒子構造で高塩基度、高 MgO 化によ

り低 SiO₂ 焼結鉱の製造が可能となった。(2)上記焼結鉱の高炉使用により、特に高炉下部圧損が低減し、Ore/Coke の増加、微粉炭吹込み量の増大が可能となった。

文 献

- 1) 相馬英明, 和島正己, 細谷陽三, 田代 清: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 2200
- 2) 石川 泰, 佐々本盛治, 粉 康則, 中山秀實, 藤本 渉: 鉄と鋼, 67 (1981), S 701
- 3) 西村博文, 後藤隆茂, 田中 周, 奥山雅義, 福田明正, 栗原淳作: 鉄と鋼, 68 (1982), S 807
- 4) 井上勝彦, 林 秀高, 吉岡邦宏, 高橋 佐: 神戸製鋼技報, 34 (1984) 4, p. 22
- 5) 志垣一郎, 沢田峰男, 前田昌大, 成田貴一: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 1513
- 6) I. SHIGAKI, M. SAWADA and N. GENNAI: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 26 (1986), p. 503
- 7) 志垣一郎, 沢田峰男, 吉岡邦宏, 高橋 佐: 鉄と鋼, 71 (1985), p. 1880
- 8) 葛西栄輝, 許彦文武, 小林三郎, 大森康男: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 520
- 9) 志垣一郎, 沢田峰男, 洪田勝彦, 星野剛一: 鉄と鋼, 73 (1987), S 69
- 10) 井上勝彦, 林 秀高, 西田 功, 吉岡邦宏: 鉄と鋼, 69 (1983), A 17
- 11) 肥田行博, 伊藤 薫, 岡崎 潤, 佐々木稔, 梅津善徳: 鉄と鋼, 69 (1982), p. 2166
- 12) 佐藤勝彦, 鈴木 悟, 沢村靖昌, 斧 勝也: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 2215
- 13) 志垣一郎, 沢田峰男, 前川昌大, 成田貴一: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 1612
- 14) I. SHIGAKI, M. SAWADA and K. YOSHIOKA: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 27 (1987), p. 539
- 15) 高田 司, 相馬英明, 入田俊幸, 神坂栄治, 木村春男, 磯山 正, 須沢昭和: 鉄と鋼, 72 (1986), p. 203
- 16) 田村直樹, 田村繁彦, 小西正躬, 北山修二, 大鈴克二, 星野剛一: 鉄と鋼, 71 (1985), S 862
田村直樹, 小西正躬, 高橋 佐, 吉岡邦宏: 鉄と鋼, 71 (1985), S 863
- 17) 佐々木稔, 中沢孝夫, 近藤眞一: 鉄と鋼, 54 (1968), p. 1225
- 18) 阿部幸弘, 梅津善徳, 田中紀之, 飯田孝司, 望月通晴, 斎藤元治, 三苫 功, 式田耕三, 堀 篤則: 鉄と鋼, 68 (1982), S 799
- 19) (株)神戸製鋼所 (私信) 1987年5月
- 20) 池田 孜, 井上勝彦, 上仲俊行, 金本 勝: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 726
- 21) 成田貴一, 前川昌大, 志垣一郎, 関 義和: 鉄と鋼, 63 (1977), p. 1623
- 22) 山口英俊, 森 利治, 金山宏志, 前川昌大, 吉田康夫, 上原輝久: 鉄と鋼, 70 (1984), S 96
- 23) 九島行正, 内藤文雄, 有野俊介, 佐藤勝彦, 金森 健: 鉄と鋼, 69 (1983), A 1
- 24) 城本義光, 金山有治, 奥山嘉雄, 磯山 正: 鉄と鋼, 57 (1971), p. 1606
- 25) 栗田興一, 岩永祐治, 川口善澄, 海老沢幸弘: 鉄と鋼, 72 (1986), A 13