

## セミストランド冷却式焼結機の高生産率操業

喜多村健治\*・三宅 貴久\*・柳沢 一好\*  
 小野 啓雄\*・正保 剛\*

## Achievement of High Productivity at a Semi-strand Cooling Type Sinter Plant

Kenji KITAMURA, Takahisa MIYAKE, Kazuyoshi YANAGISAWA,  
 Keiyu ONO and Tsuyoshi SHOUHO

## Synopsis :

A semi-strand cooling method and a high temperature boiler exhaust gas circulation method were employed at the Wakayama No. 4 sintering plant in 1985. Since then, the productivity has increased and the medium pressure steam recovery has been achieved. However the productivity of the Wakayama No. 4 sintering plant was primarily affected by the cooling speed of the sinter cake, so the following countermeasures were taken : the reduction of melting index of the sinter feed, the operation with high basicity and the usage of coarse limestone. Through these improvements, Wakayama No. 4 sintering plant has been in stable operation with high productivity ( $\approx 37 \text{ t/m}^2/\text{d}$ ).

**Key words :** sinter plant; semi-strand cooling, productivity; low energy consumption; cooling speed; iron ore properties; iron ore sinter; basicity; limestone size.

## 1. 緒 言

和歌山製鉄所では、1985年5月に焼結鉱増産を図るために第4焼結機(以下4DLと略す)の機長延長を実施した<sup>1)</sup>。その際、高効率の排熱回収を目的にして国内で唯一のセミストランドクーリング方式(旧焼結面積 $189 \text{ m}^2 \rightarrow$ 焼成 $260 \text{ m}^2 +$ 冷却 $100 \text{ m}^2 +$ 縦型簡易クーラー)と冷却排ガスの焼結機パレット上への完全循環方式を採用し、発電使用向けの中圧蒸気(2.55 MPa)の回収が可能となった。一方、焼結方式等の変更により生産性等の改善についても異なった側面からのアプローチが必要となってきた。そこで焼結ケーキの通気性改善を中心とした種々の技術開発を実施し、現在では高生産率( $37 \text{ t/m}^2/\text{d}$ )と低エネルギー消費( $1.15 \times 10^9 \text{ J/t}$ )を両立させた操業を確立し継続している。

本報では、これらの焼結ケーキの通気性改善に関する技術開発内容について報告する。

## 2. 和歌山焼結機の特徴

Fig. 1 に和歌山4DLの設備概略を示す。

4DLでは1985年5月に機長延長による能力増強を柱

とした設備リフレッシュを実施した際、製鉄所所内の回収低圧蒸気量バランスにより発電目的の中圧蒸気の回収が求められたため、焼結機ストランド上で焼成および冷却を実施するストランドクーリング方式を採用し、更に熱回収後の焼結ケーキの冷却排ガスを焼結機ベッド上に完全に循環する方式を採用した。このため、焼結機排ガスのピーク温度は大幅に上昇してウインドボックス内で約 $600^\circ\text{C}$ (従来は約 $400^\circ\text{C}$ )となっている。この様に現状の4DLは通常の焼結機に比較して焼結ケーキ内の熱レベルが非常に高い焼結機となっている。

つまり4DLにおいては、通常の焼結機で主に生産性に影響を及ぼすと考えられる焼成速度の他に高温となっている焼結ケーキの冷却速度すなわち焼結ケーキの通気性が生産性および排熱回収に大きな影響を及ぼす要因となってきたのである。

## 3. 生産性および回収エネルギー増加の考え方

先に述べた様に4DLで焼成速度の改善に加えて、冷却速度の向上も生産性を増加させる有効な手段となってくる。冷却速度の向上のためには冷却ゾーンの通気性改善、言い換えれば冷却ゾーンを構成する高温溶融部およ

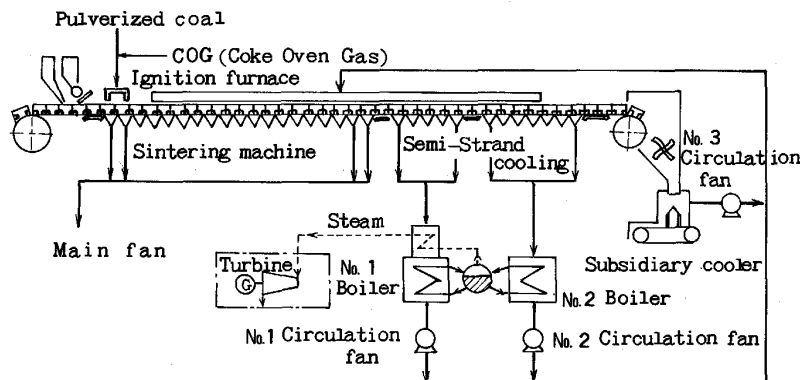
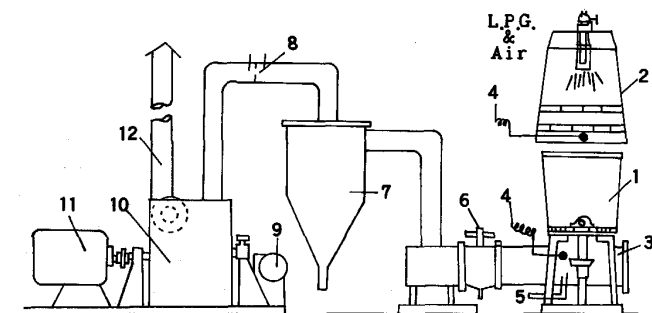


Fig. 1. Schematic diagram of Wakayama No. 4 sinter plant.



1. Sintering pot 2. Hot gas generator 3. Wind box 4. Thermo-couple 5. Pressure gauge 6. Through valve 7. Dust catcher 8. Orifice 9. Damper controller 10. Suction fan 11. Motor 12. Stack

Fig. 2. Apparatus for sintering test.

び焼結ケーキの通気性改善が重要な課題の一つとなる。また、冷却ゾーンの通気性改善は、4DLでは冷却ゾーンが排熱回収ゾーンでもあるため回収エネルギー量の増加にもつながってくる。そのため高温溶融部および焼結ケーキの通気性改善に着目して種々の対策を実施してきた。まず、高温溶融部の通気性を支配すると考えられる融液の流動性改善を実施し、高温溶融部となる原料層下層部への強制的通気孔作成等を実施した。次に焼結ケーキは一般的に通気性が良好であるとされているにもかかわらずその通気性を阻害していると考えられる4DL特有の高い焼結ケーキ温度の影響を調査して明らかにした。

以下にそれぞれの通気性改善対策について報告する。

#### 4. 通気性改善対策

##### 4.1 高温溶融部通気性改善対策

###### 4.1.1 鍋試験方法

鍋試験において4DLの操業をシミュレートするためFig. 2に示す試験設備を用いて実験を行った。高温のボイラー排ガスのパレット上への循環をシミュレートするためにブロー吸引空気をガスバーナーで昇温して鍋上に導き、ストランドクーリング方式の操業をシミュレ

Table 1. Pot test condition, and composition and melting of iron ores used.

Test Condition	Sinter cake		Sinter cake			Circulation gas temp.		Melting Index(calc.)
	CaO/SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C.W.*	-1mm	Pore <sup>2)</sup>	
	1.90	5.35%				200°C		85.8~89.2%
Ore	T. Fe (%)	FeO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	C.W.* (%)	-1mm (%)	Pore <sup>2)</sup> (%)	Melting Index(calc.)
A	62.7	0.1	4.3	2.6	3.0	48.7	8.4	89.1
B	63.2	0.2	4.8	2.5	2.0	51.1	10.9	87.4
C	57.3	0.2	5.7	2.7	8.4	41.3	23.6	95.3
D	64.6	0.1	4.9	1.2	1.2	57.9	6.0	82.7
E	65.9	9.1	4.4	0.1	0.1	97.8	12.7	97.0
F	68.0	0.2	0.8	0.7	0.6	100.0	5.5	96.9

\* C.W. : Combined water

トするために焼結ケーキの冷却が完了する時点として鍋下の排ガス温度が30°C以下に低下するまでブローでの吸引を実施し、排ガス温度変化、焼結ケーキの通気性変化を測定した。

###### 4.1.2 原料鉄鉱石の溶融同化性による制御

焼結ケーキ構造形成において原料鉄鉱石の溶融同化性は重要な要因であるので、原料鉄鉱石の溶融同化性を変化させた鍋試験を実施した。試験条件をTable 1に示す。ここで各鉄鉱石の溶融性指数(Melting index)は各鉄鉱石の焼結反応における溶融同化性を示すものであり、佐藤ら<sup>2)</sup>によって提示された溶融モデルを用い、評価鉄鉱石66 mass%、石灰石13 mass%、返鉄16.5 mass%、コークス4.5 mass%の配合で各鉄鉱石性状および実操業の平均焼結温度パターンを入力条件として求めた溶融率である。これを配合比率に応じて平均したものを原料鉄鉱石の平均溶融性指数と定義する。

鍋試験では鉄鉱石A~Fの配合比率調整により平均溶融性指数を85.8~89.2 vol%に変化させた。この鍋試験で得られる排ガス温度の経時変化の略図をFig. 3に示す。ここでは温度上昇開始点をFlame Front Pointと定義したFlame Front Speed (FFS)、冷却後30°Cにお

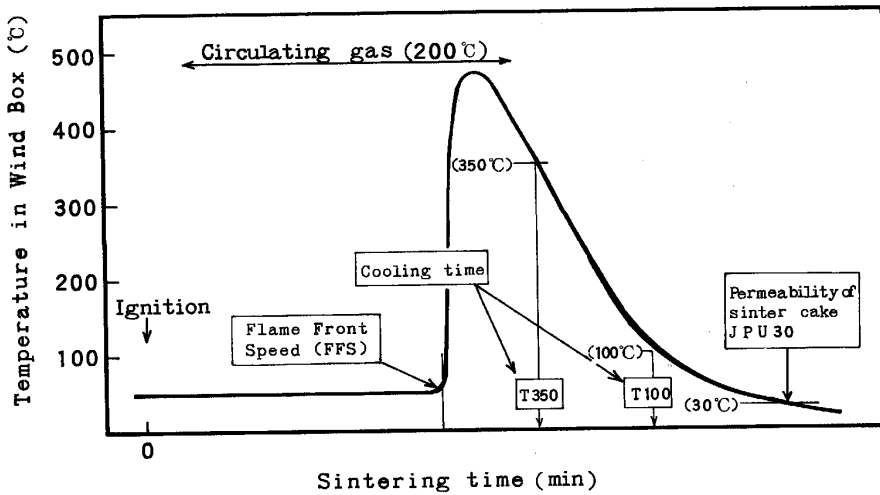


Fig. 3. Exhaust gas temperature pattern at strand cooling in pot test.

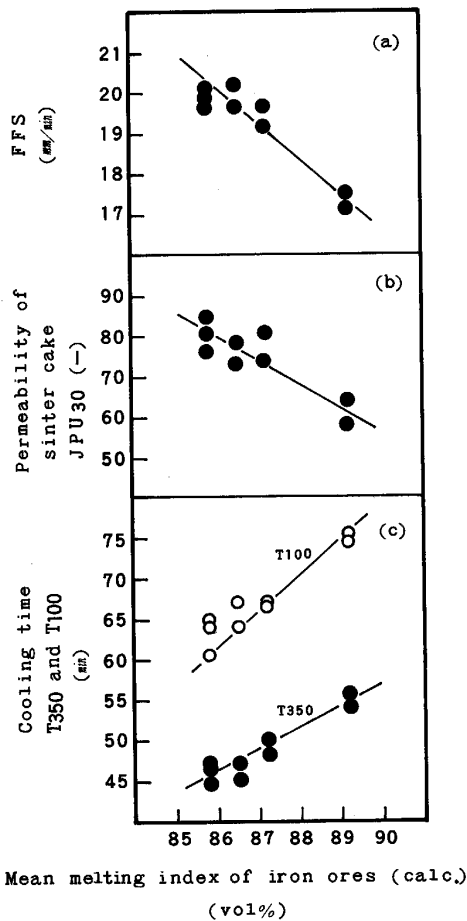


Fig. 4. Effect of mean melting index of iron ores on frame front speed (FFS) permeability of sinter cake and cooling time.

ける焼結ケーキの通気性を表す指数 (JPU30), 焼成と冷却を合わせた速度の尺度として点火から焼成完了後 350°C までの冷却に要する時間 (T350), 100°C までの冷却に要する時間 (T100) を用いて実験結果を整理した。

Fig. 4 (a), (b), (c), にそれぞれ平均溶解性指数を

変化させた場合の FFS, JPU30, T350 と T100 の変化を示す。平均溶解性指数の低下に伴い焼成速度は増加し, (Fig. 4(a)), T350 と T100 も短縮された (Fig. 4(c)). この時, JPU30 も向上しており (Fig. 4(b)), T350 の変化の勾配より T100 の変化の勾配が大きくなっていることから冷却に要する時間も短縮されていることが認められた (Fig. 4(c)).

以上の鍋試験結果に基づき 4DL においても試験を実施した。鉱石の平均溶解性指数を変化させた際の生産性および回収蒸気量, 焼結鉱品質におよぼす影響を Fig. 5 に示す。鍋試験と同様に鉱石の平均溶解性指数の低下に伴い焼成および冷却速度が向上して生産性が上昇することが確認された。この時回収エネルギー量は排熱回収ゾーンすなわち冷却ゾーンの通気性改善により生産量比例で増加しており, 焼結鉱品質についても特に変化は認められなかった。

よって, 4DL と通常の焼結機である 5DL の 2 基の焼結機が稼動していることをいかして, 4DL にはできる限り低溶解性指数の鉱石を傾斜配合している。

#### 4.1.3 高塩基度操業

次に, 焼結原料が高温熔融部で融液を発生する場合, 融液性状に影響を及ぼすと考えられる焼結鉱塩基度に着目して鍋試験を実施した<sup>3)4)</sup>。

鍋試験では鉱石の配合によって焼結ケーキ中 CaO mass% で 9.0%~13.0%, SiO<sub>2</sub> mass% で 4.0%~6.0% の変化をさせてその組み合わせで塩基度を 1.50~3.25 と変化させた。

塩基度と CaO% の FFS (焼成速度) におよぼす影響を Fig. 6 に, 製鉄部会法還元粉化指数 (RDI) におよぼす影響を Fig. 7 に, JIS 法還元率 (RI) におよぼす影響を Fig. 8 に示す。FFS は CaO% 一定の下では塩基

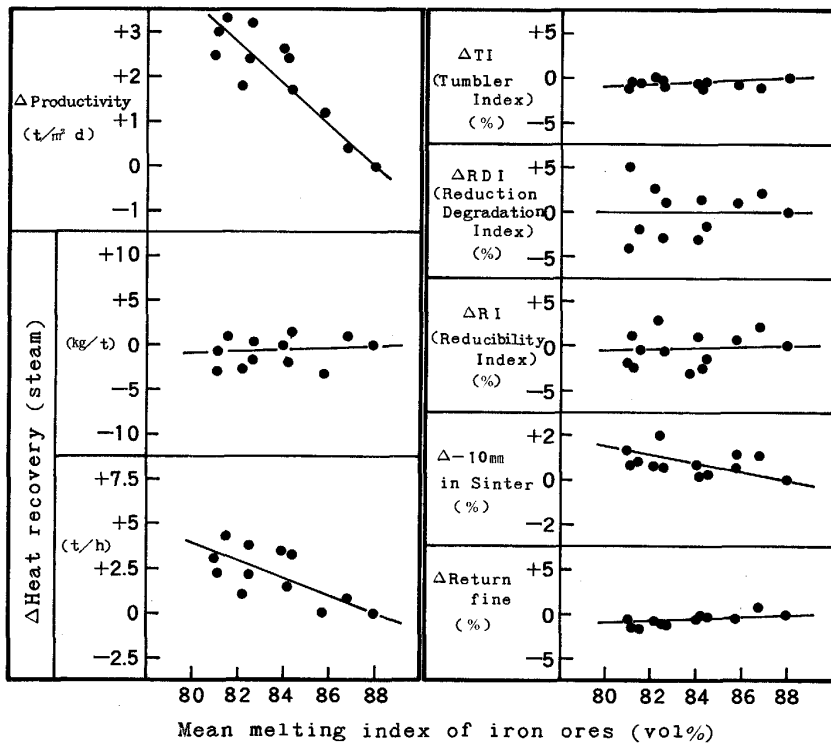


Fig. 5. Effect of mean melting index of iron ores on sintering operation (W. 4DL). (Standard: melting index = 88.0 vol%)

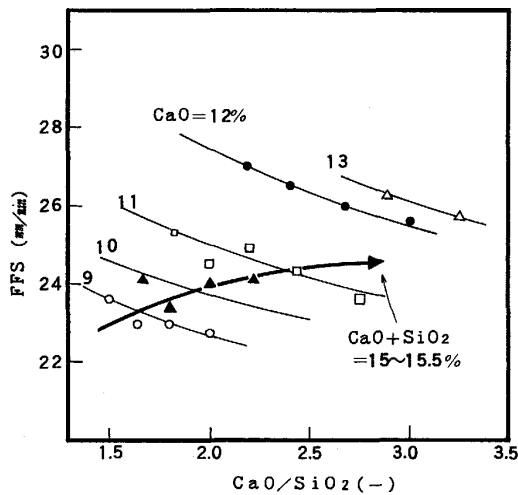


Fig. 6. Effect of CaO/SiO<sub>2</sub> and CaO content of sinter cake on FFS in sinter bed (Pot test).

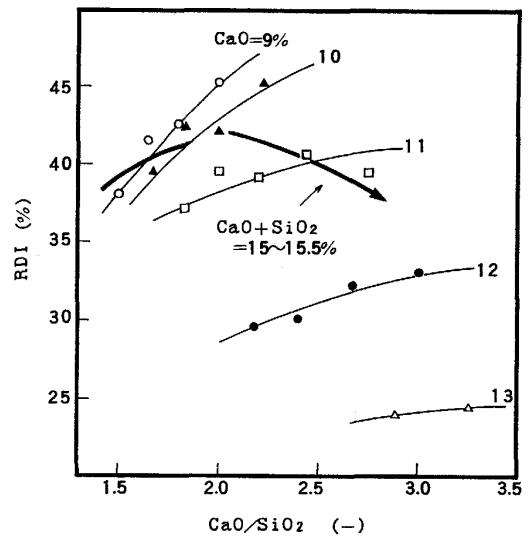


Fig. 7. Effect of CaO/SiO<sub>2</sub> and CaO content of sinter cake on RDI of sinter (Pot test).

度上昇つまり SiO<sub>2</sub>%の低下に伴うスラグ量の低減と共に若干悪化するが、CaO%上昇により大幅に向上する。また、Fig. 6 の中に矢印で変化を示す様に CaO+SiO<sub>2</sub>=15.0~15.5%では塩基度の上昇により FFS が向上することが認められた。また、RDI も CaO%一定の下では塩基度上昇 (SiO<sub>2</sub>%低下) に伴い悪化するが、CaO% 上昇により大幅に改善されることが認められた。Fig. 7 中に矢印で変化を示す様に CaO+SiO<sub>2</sub>=15.0~15.5%では塩基度 2.0 付近で RDI が最も悪化し、その前後では好転することが認められた。RI は CaO%の上昇によ

り改善される傾向が認められ CaO+SiO<sub>2</sub>=15.0~15.5%の条件の下でも同様に CaO%の増加つまり塩基度の上昇によって向上することが認められた。この様に塩基度を上昇させる際に CaO+SiO<sub>2</sub>をほぼ一定とした場合、塩基度 2.0 以上であれば RDI を悪化させることなく生産性と RI の改善が同時に得られるものと考えられた。

実機においても CaO+SiO<sub>2</sub>=15.0~15.5%でほぼ一定として、塩基度変更テストを比較のために 4,5DL で

実施した。塩基度を上昇させた場合の生産性、回収蒸気量、焼結鉱品質の変化を Fig. 9 に示す。

生産性は鍋試験と同様 4,5DL とも塩基度 4.4 程度までは焼成速度の上昇により向上するが、それ以上では向上効果は小さい。また回収蒸気量は 5DL では塩基度上昇に伴いほとんど増加が見られないのに対して、4DL では塩基度 2.1 程度までは生産性の上昇以上の増加が見られた。

これは 4DL における冷却ゾーンの通気性が塩基度上昇により改善された結果と考えられ、塩基度上昇による生産性改善効果においても焼成速度上昇以外に冷却速度上昇が寄与しているものと考えられる。塩基度 2.1 以

上では冷却ゾーンの通気性向上と石灰石の分解熱の増加がほぼバランスするためか回収蒸気量の変化は小さくなった。

また焼成鉱の品質では冷間強度 (TI) においてほとんど変化が認められず、RDI は  $\text{SiO}_2\%$  を大幅に低下させているにもかかわらず塩基度上昇に伴い 4DL で改善が認められた。RI は塩基度上昇に伴い改善されることが認められた。

塩基度の上昇により高温溶融部で発生する融体の内、流動性の良いカルシウムフェライト系融体の量が増加するため高温溶融部の通気性も改善されたと考えられる。これにより焼成および冷却速度が向上し、生産性、回収蒸気量も改善された。更にカルシウムフェライト系融体量の増加によるカルシウムフェライト相の増加により TI と RI が改善され、冷却速度の向上による高温保持時間の短縮により RDI の改善が可能となったと考えられる。

また実機試験によって製造された焼結鉱の高温特性試験結果を Fig. 10 に示す。塩基度の上昇に伴い圧損上昇開始温度が高温側に移行し、最大圧損値も低下するなど改善傾向を示した。

現状では以上の結果をふまえて 2.2 程度の高塩基度で操業を実施している。

#### 4.1.4 石灰石の粗粒化

従来より焼結鉱用原料に用いる石灰石は粗粒化すると原料帯での通気性が改善されて焼成速度が上昇するという一般的な知見はあった<sup>5)6)</sup>。また、焼結鉱用の石灰石粒度の適正範囲は 1~3 mm であるとされていた<sup>7)</sup>。一方、石灰成分を造粒し原料層内で偏在化させると焼結鉱品質

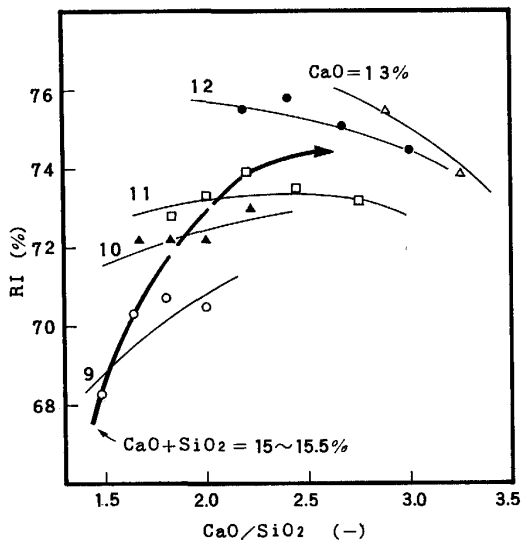


Fig. 8. Effect of  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  and CaO content of sinter cake on JIS reducibility of sinter (Pot test).

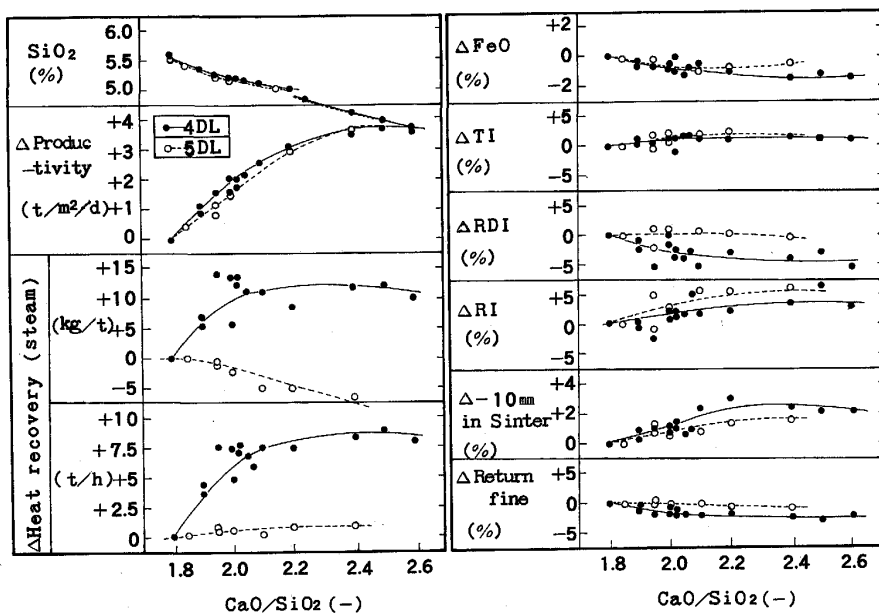


Fig. 9. Effect of sinter cake basicity on sintering operation. (4DL, 5DL) (Standard :  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1.80$ )

Table 2. Limestone grain size distribution.

Limestone	-1 mm	1~2	2~5	5~7	7~10	10~13	+2 mm
A	65.6%	21.3	13.1	0	0	0	13.9
B	40.8	33.0	26.2	0	0	0	26.2
C	28.8	40.8	30.4	0	0	0	30.4

Table 3. Limestone grain size distribution at sinter plant (4,5 DL).

Limestone	-1 mm	1~7	7~9	+9 mm
D	38.5%	61.5	0	0
E	30.3	64.9	4.8	0
F	29.0	53.8	14.5	2.7

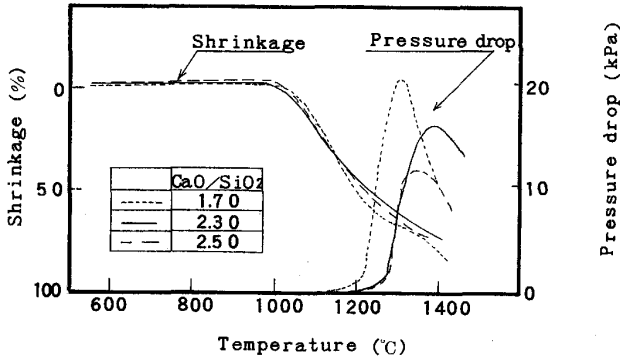


Fig. 10. Effect of sinter cake basicity on high temperature properties of sinter.

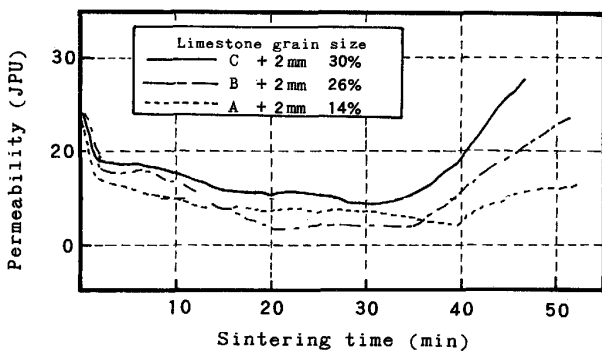


Fig. 11. Effect of limestone grain size on sinter bed permeability (Pot test).

が改善されるという報告<sup>8)</sup>があり、焼結機パレット上の原料をミクロ的にみれば石灰石の粗粒化は石灰成分を偏在化させることでもありと考えられるので、石灰成分の偏在化による焼結鉱品質の改善と石灰石の粗粒化による焼成速度の向上に着目して、石灰石粒度を従来の適正粒度範囲よりも広い範囲で変化させて鍋試験を実施した<sup>9)</sup>。

鍋試験に用いた石灰石の粒度分布を Table 2 に示す。B は従来から使用していた石灰石であり、更に細粒の A と粗粒の C、2 種類の石灰石を調製して使用した。石灰石粒度を変化させた鍋試験の通気性の経時変化の比較を Fig. 11 に、生産性および焼結鉱品質等の変化の比較を Fig. 12 に示す。石灰石の粗粒化により焼成初期から通気性の改善が見られ、焼成末期においても更に通気性が改善されていることが認められる。これは石灰石の粗粒化により原料帯のみならず焼成末期の通気性を左右すると考えられる高温溶融帯の通気性が改善されたと考え

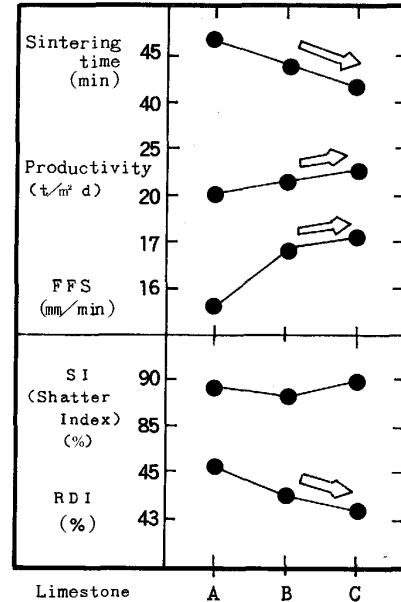


Fig. 12. Effect of limestone grain size change (Pot test).

Limestone	D	E	F
Production (t/d)	9700	9600	
Coke Breeze (kg/t)	43.5	43.0	
Pulverized Coal for Ignition Furnace (kg/t)	1.15	1.10	
Bed Height (mm)	490	480	
Return Fine (%)	15.0	14.5	
Steam Recovery (kg/t)	110	105	
TI (%)	72	70	
RDI (%)	36	35	

Fig. 13. Effect of limestone grain size change (4DL).

られる。また石灰石粗粒化による焼成速度および冷却速度の増大により生産性および RDI が改善されることが明らかになった。

鍋試験結果より実機でも石灰石の粗粒化試験を実施した。実機試験に用いた石灰石の粗粒分布の比較を Table 3 に示す。D は従来から使用している石灰石であり、実

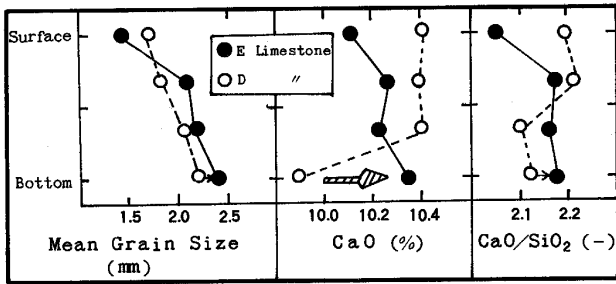


Fig. 14. Chemical composition distribution of raw mix in bed height direction (4DL).

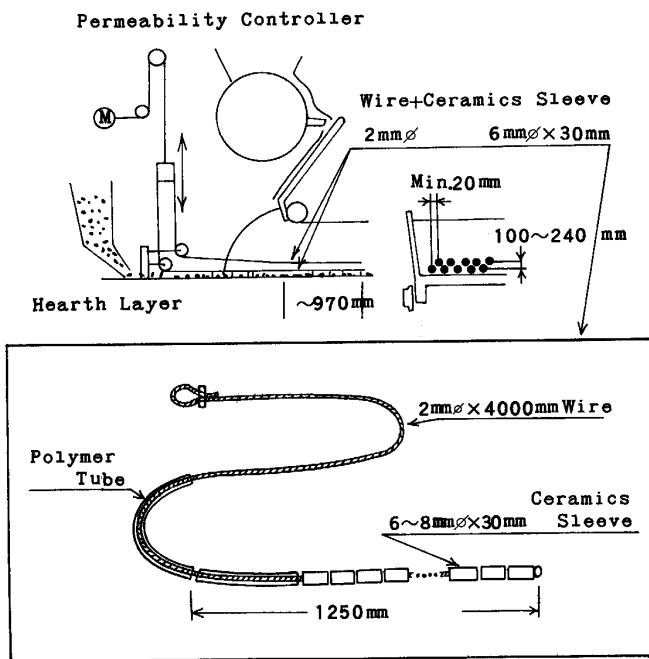


Fig. 15. Schematic diagram of permeability controller (No. 4DL).

機では粗粒の粒度分布を持つ E と F を加えて 3 種類の石灰石で試験を行った。石灰石粒度を変化させた場合の生産性および焼結鉱品質の変化を Fig. 13 に、パレット上原料層内の成分分布の比較を Fig. 14 に示す。

実機においても石灰石の粗粒化に伴い焼成速度と冷却速度の上昇により生産性および回収蒸気量の増加が認められ、焼結鉱品質についても RDI の改善が認められた。しかし、E と F の結果を比較すると石灰石の粗粒化により焼成速度、冷却速度の向上以上に歩留りの低下が大きくなり生産性が低下してしまうことが明らかとなった。つまり、石灰石の粗粒化にも限界が存在すると思われる現状では E が粗粒化の上限であると判断し、実機での使用石灰石を D から E へと粗粒化して使用している。また、実機においてはパレット上に原料を装入する際、原料層内の上下で粒度偏析により Fig. 14 に示す様

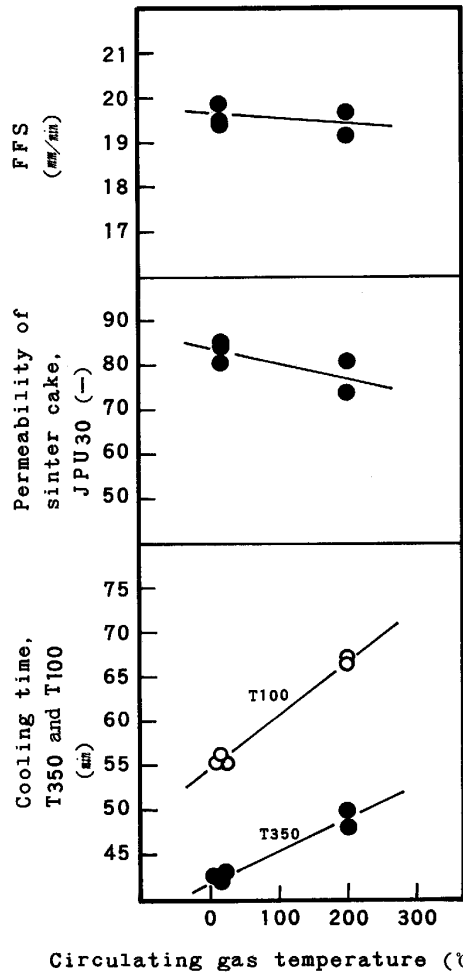


Fig. 16. Effect of circulating gas temperature on FFS, permeability of sinter cake and cooling time.

に粗粒石灰石の下層部への偏析で下層部の塩基度が上昇し、比較的に高温熔融部が広くなり、悪化しやすい下層部の通気性を更に改善しているものと考えられる。

#### 4.1.5 通気孔作成

通気性改善の手段として高温熔融部となる原料層下層部へ機械的に通気孔を作成することで通気性の改善を図っている<sup>10)</sup>。Fig. 15 に通気孔を作成するための通気性制御装置と通気棒の概略図を示す。通気棒は耐摩耗性向上のためワイヤーに短寸のセラミックチューブを数十個、数珠状に通したものであり、通気性制御装置の滑車を介して原料層内に挿入できる様になっている。通気性制御装置は通気棒の挿入レベルを 2 段有しており、それぞれの高さ方向での挿入レベルやパレット幅方向での挿入位置調整あるいは個々の通気棒の交換や挿入深度の調整も操業中に実施できる機構となっている。

この様にパレット上原料層内に機械的に通気孔を作成することで原料層内の通気性を改善する装置を開発し、使用することで生産性の改善を図っている。

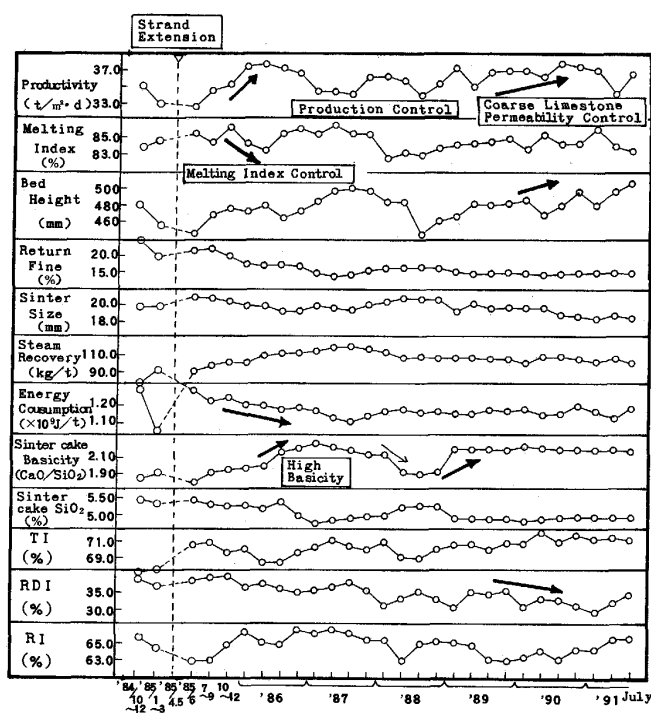


Fig. 17. Recent Wakayama 4DL operation data.

## 4.2 焼結ケーキ通気性改善対策

### 4.2.1 循環ガス温度の低減

焼結ケーキは一般的に高温熔融部等に比較して通気性が非常に良好な構造を有しているが、4DLでは循環ガス温度が高いため通気性が阻害されていると考えられる。そこで循環ガス温度の焼成速度および冷却速度におよぼす影響を鍋試験によって調査した。循環ガス温度を20°C、200°C、と2段階に変化させた際のFFS, JPU30, T350, T100の変化をFig. 16に示す。

循環ガス温度の低下に伴い焼成速度は若干改善され、焼結ケーキの通気性も改善されていることが認められる。また、冷却速度はT350よりT100の変化の勾配が大きいことから循環ガス温度の低下により改善されていることが認められる。この様に循環ガス温度の低減は生産性改善に対して有効であると考えられ、実機においてもボイラー排ガスから更に排熱を回収する低圧蒸気回収設備を増設して排熱回収増強と生産性改善を試行中である。

## 4.3 実機操業結果

Fig. 17に4DLの機長延長実施後の操業推移を示す。生産率は多少の変動はあるものの約37 t/m<sup>2</sup>/d、消費エネルギーは約1.15×10<sup>9</sup> J/tで操業を継続している。

## 5. 結 言

和歌山4DLでは1985年にセミストランドクーリング方式とボイラー排ガスの完全循環方式を採用し、生産性向上と中圧蒸気回収を達成した。しかしながら、当初4DLの生産性は焼結ケーキの冷却速度に影響された。そこで4DLの特性を調査するため種々のシミュレーション鍋試験を実施し、以下の事実が明らかになった。

- 1) 原料鉄鉱石の平均溶融性指数低下により焼成速度、焼結ケーキの通気性および冷却速度が改善される。
- 2) 焼結鉱塩基度上昇により焼成速度および焼結鉱品質が改善される。
- 3) 石灰石の粗粒化(≤7 mm)により焼成速度および焼結鉱品質が改善される。

これにより原料鉄鉱石の平均溶融性指数の低下、高塩基度操業、粗粒石灰石の使用等を実施した結果、4DLでは高生産率(37 t/m<sup>2</sup>/d)の操業を安定的に継続している。

## 文 献

- 1) T. Shouho, K. Yanagisawa, T. Miyake, K. Kitamura and M. Kawasaki: The 6th IISC Proc., Vol. 2 (1990), p. 171
- 2) 佐藤 駿, 川口尊三, 伊達 稔, 吉永真弓: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 657
- 3) 永見晋太郎, 花木幸男, 西澤庄蔵, 中村 勝, 三宅貴久, 山下道彦: 鉄と鋼, 73 (1987), S108
- 4) 重盛富士夫, 川崎正洋, 花木幸男, 喜多村健治, 千賀喜昭, 三宅貴久: 鉄と鋼, 73 (1987), S854
- 5) 河西健一: 第8回西山記念技術講座(日本鉄鋼協会編) (1970), p. 35
- 6) 志垣一郎, 沢田峰男, 吉岡邦宏, 高橋 佐: 鉄と鋼, 71 (1985), p. 1880
- 7) 稲角忠弘, 木原研司, 富井良和, 古宅英雄: 鉄と鋼, 67 (1981), S 662
- 8) 川口正洋, 栗山利益, 佐藤 駿, 高田耕三: 鉄と鋼, 15 (1987), p. 1924
- 9) 川崎正洋, 喜多村健治, 柳沢一好, 小野啓雄, 正保 剛: 材料とプロセス, 2 (1989), p. 975
- 10) 川崎正洋, 喜多村健治, 柳沢一好, 小野啓雄, 正保 剛: 材料とプロセス, 3 (1990), p. 1059