

ピソライト塊鉱を床敷に用いる焼結法

川口 尊三*・波多野 康彦*²・村井 達典*²・川口 善澄*²

Sintering Process Usiug Pisolite Lumpy Ore as Hearth Layer

Takazo KAWAGUCHI, Yasuhiko HADANO, Tatumori MURAI and Yoshizumi KAWAGUCHI

Synopsis : Pisolite is an important raw material for sinter ore because its deposit in Australia is rich and easy to be explored. This ore is mainly made of goethite with a oolitic structure. After produced as lumpy ore, it is crushed to be a raw material for sinter ore, however, pisolite is known to have negative effects on sintering process. For a better use of this material, we propose a process to use lumpy pisolite ore as a hearth material in sinter plants. Our pot tests showed that this process has a higher productivity and yield, compared with the conventional process that uses sinter ore as a hearth material and fine pisolite as a raw material for sinter. A 1.5-day test in our commercial sinter plant and blast furnace in Kokura also showed that this new process enables more use of cheap pisolite and reduces the energy consumption in sintering process.

Key words : sintering process ; pisolite ore ; hearth layer ; productivity ; sinter yield ; agglomeration ; lumpy ore ; return fine.

1. 緒言

良質な塊鉄鉱石の主要な供給元である西オーストラリアの赤鉄鉱床は既に枯渇問題が提起されており、その代替として褐鉄鉱質のピソライト鉱床が注目されている¹⁾。ピソライト鉱はゲーサイト鉱物を主体とした魚卵状結合構造をもつ鉄鉱石であるが、塊鉱を産出するもののその性状の悪さから粉鉱化され焼結原料にしか使用されていない。しかし、その粉鉱は焼結鉱製造においても性状が悪く、生産性および歩留を悪化せしめるので²⁾ 配合制限を行って対処している。その悪化原因については肥田ら⁴⁾ や葛西ら⁵⁾ の研究に詳しいが、要約すればピソライト鉱は結合水の分解により多孔質になるとともに亀裂が発生し、このため同化性が良好となり融体粘度が上昇し溶融帯の通気性が悪化するとともに、焼結鉱中に多孔質な部分が形成されるためとされている。さらに焼結原料として使用する前に、ピソライト鉱に加熱処理を加え結合水と亀裂を除去する事前処理法など種々の焼結操業改善技術⁶⁾ が提案されている。そこでピソラ

イト鉱の実用的かつ経済的な用法として、ピソライト塊鉱を焼結プロセスの床敷に用いる方法について基礎実験による検討を行うとともに、商業用の焼結機および高炉において短時間の試験操業を行ったので報告する。

2. 焼結鍋実験方法

2.1 実験条件

ピソライト鉱には代表的なA鉱石を選び、直径300mmの焼結鍋実験装置を用いて以下に示す3種類の実験を実施した。用いた原料鉱石の化学成分をTable 1に示す。焼成圧力は8.0kPa一定、床敷量は5.0kg一定とし、原料層高は500mmを基準とした。焼結ケーキの破碎処理は落下試験機 (JIS-M8711-1987) を用いて8回落下させた後5mmと15mm篩により成品および床敷鉱と返鉱を回収した。

まず、ピソライト鉱を焼結プロセスの床敷に用いた場合に同鉱石が受けるであろうパレット内での加熱および高炉前篩までの搬送衝撃作用の影響を検討するために、これら作用を模擬すべく⁷⁾ 手段的には一致していないがA鉱石の塊鉱と粉鉱を直径100mmのロータリーキルンを用いて1000°Cで10分間程度の焼成を行った後、焼成物をタンブラー試験機 (JIS-M8712-1987) で50回転の処理を施し粒度変化を調べた。そして同鉱石が処理作用を受け粉化して返鉱となり焼結原料として供給されることを想定して、処理鉱石と処理前の粉鉱を用いた焼結鍋試験を行い焼結生産性および冷

Table 1. Characteristics of raw materials (%).

Brands	T. Fe	C. W.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	-1mm	+10mm
Ore A (L)	56.7	8.11	5.43	2.79	2	76
Ore A (SF)	56.7	8.42	5.52	2.74	38	2
Ore B (SF)	62.8	2.82	4.29	2.61	44	1
Ore C (SF)	64.2	1.10	5.28	1.19	58	2

L : Lump ore, SF : Sinter feed

平成5年7月7日受付 平成6年1月14日受理 (Received on July 7, 1993; Accepted on Jan. 14, 1994)

* 住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所 (Iron & Steel Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16-1 Oaza-Sunayama Hasakimachi Kashima-gun Ibaraki-ken 314-02)

* 2 住友金属工業(株)小倉製鉄所 (Kokura Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

間強度への影響を比較した。配合条件をTable 2 (No.1) に示す。

次にA鉱石塊鉱または5~15mmの焼結鉱を床敷に用い、同一配合原料で焼結する鍋実験を行い、その焼結生産性および歩留に及ぼす影響を比較した。この場合の配合条件をTable 2 (No.2) に示す。

さらに、Fig.1のフローにのっとりA鉱石粉鉱および10~15mmの焼結鉱床敷を使用した場合と、A鉱石塊鉱床敷を使用した場合について、原料の使用量(返鉱および粉コークスを除く)が一定の条件で発生返鉱(-5mm)および床敷焼結鉱を循環使用する手法の鍋焼結実験を行い焼結生産性、歩留および焼結鉱品質を比較した。循環繰返し数は6回とし4~6回目の結果を平均して評価を行った。こ

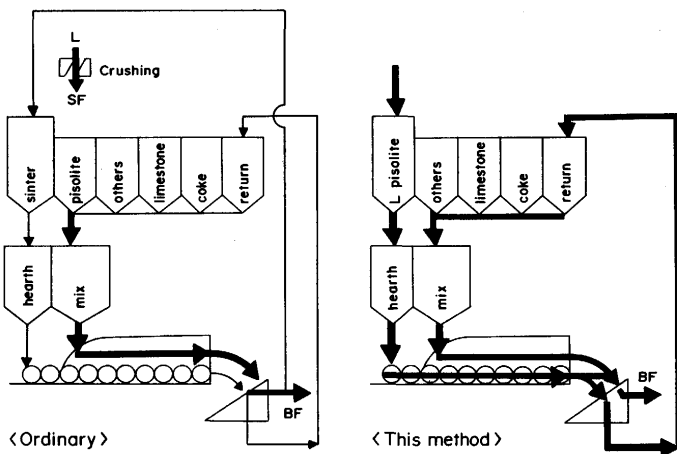


Fig. 1. Sintering process using pisolite ore as hearth layer.

Table 2. Blending ratio of sinter pot test for calcinated ore and for ore brands of hearth layer with the same sinter mixture.

Ore brands	Blending ratio (%)	
	No.1	No.2
Pisolite (Ore A)	31.1	19.5
Hematite (Ore B)	15.6	19.5
Hematite (Ore C)	15.6	19.5
Limestone	10.0	10.5
Return fine	25.0	27.2
Coke	3.8	3.8

Table 3. Raw materials condition of sinter pot test with cycling return fine (kg).

α : Amount of return fine, β : Amount of sinter mix

Case	Base	Comparison		
		15	15	
Total pisolite (L+SF)	10	15	15	
Sinter mix	Hematite Ore B and Pisolite (SF) Ore A	C 20	20	20
	Limestone	10	15	10
	Return fine (-5mm)	5.4	5.4	5.4
	Sum	35.4 + α	40.4 + α	35.4 + α
	Coke		(0.038 β)	
Hearth layer	Sinter (10-15mm) Pisolite (L) Ore A	5	5	0
		0	0	5

の実験の配合条件をTable 3に示す。なお、この実験では発生返鉱の全量を循環させ原料層高は変動させるものとした。

2.2 床敷ピソライト鉱の成品化率解析および成品タイプ分類

このプロセスでの歩留改善要因を明確にするために次の(1)式~(5)式に示される物質バランス式を用いて解析した。

$$W_1 \cdot m_1 \cdot X_1 + W_2 \cdot m_2 \cdot X_2 = Sp \dots\dots\dots (1)$$

$$W_1 \cdot m_1 + W_2 \cdot m_2 = Sp + Sr \dots\dots\dots (2)$$

$$W_1' \cdot m_1' \cdot X_1' + W_2' \cdot m_2' \cdot X_2' = Sp' \dots\dots\dots (3)$$

$$W_1' \cdot m_1' + W_2' \cdot m_2' = Sp' + Sr' \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 W_1, W_1' : 配合原料質量, W_2, W_2' : 床敷質量, m_1, m_1' : 配合原料の焼成による質量変化率, m_2, m_2' : 床敷鉱の焼成による質量変化率, X_1, X_1' : 配合原料部の破碎ケーキ+5mm比率, X_2, X_2' : 床敷部の破碎ケーキ+5mm比率, Sp, Sp' : 破碎ケーキ(+5mm)質量, Sr, Sr' : 破碎ケーキ(-5mm)質量で、'符合のあるものは焼結鉱床敷の実験値で、ないものは塊A鉱石床敷の実験値である。

さらに、塊A鉱石床敷の場合においては床敷鉱中にはCaOは含まれないのでCaOのマスバランスより(5)式が成立する。

$$X_1 / (Sp \cdot Cp) = (1 - X_1) / (Sr \cdot Cr) \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 Cp, Cr : 成品中のCaO濃度, 返鉱中のCaO濃度である。

なお、ここではFig.1のフローに従い、ピソライト塊鉱床敷の場合は成品量を Sp 、歩留(成品歩留)を $Sp/W_1 \cdot m_1$ とし、焼結鉱床敷の場合の成品量は $(Sp' - W_2' \cdot m_2')$ 、歩留を $(Sp' - W_2' \cdot m_2') / W_1' \cdot m_1'$ と定義した。

そして、 $W_1, W_2, W_1', W_2', Sp, Sr, Sp', Sr', Cp, Cr$ は実測値を代入し、床敷部の焼成による質量変化率を、 $m_2 = 0.90$ (A鉱石のL.O.I.=10.0%)、 $m_2' = 1.00$ 、さらに、焼結鉱床敷の破碎ケーキ+5mm比率を $X_2' = 0.90$ と仮定⁸⁾して、(1)式~(5)式より $m_1, m_1', X_1, X_2, X_1'$ を求め歩留を算出した。

次に、成品を目視観察によりFig.2に示す分類に従って、

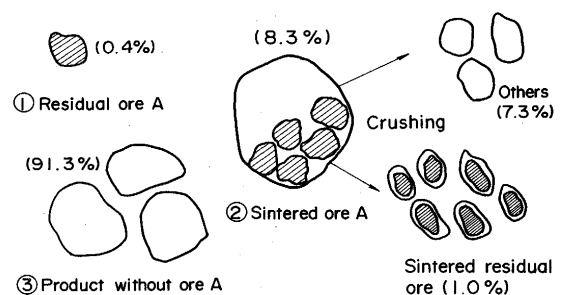


Fig. 2. Classification of sinter product from pisolite hearth layer.
(): Ratio to whole sinter product

A鉱石塊鉱単体のもの、成品中の一部にA鉱石塊鉱を含有するもの、成品中にA鉱石塊鉱は全く含有しないものに分類し、その存在比率を求めた。

3. 焼結鋼実験結果および考察

3.1 事前の加熱と衝撃処理の影響

ロータリーキルンで加熱処理したンプラー試験機で衝撃処理を加えた鉱石の粒度変化をFig. 3に示す。この結果より塊鉱に加熱と衝撃処理を加えると粉鉱の粒度となり、粉鉱に加熱と衝撃処理を加えると5mm以上の粗粒が低下し細粒化することがわかる。そしてこれら事前処理鉱を用いた鍋試験結果をFig. 4に示す。事前処理により冷間強度が改善する。また、塊鉱を事前処理した鉱石では未処理粉鉱に対し生産性が改善され、粉鉱を事前処理した鉱石では未処理粉鉱と同等の生産性となった。すなわち塊鉱を事前処理した塊石の場合は冷間強度改善効果から歩留が向上したため生産性が改善し、粉鉱を事前処理した鉱石の場合は同様に歩留は向上したが、原料粒度の細粒化により通気性が悪化したため、ほぼ同等の生産性となった。以上より塊ピソライト鉱を1000°C以上で加熱と衝撃処理を施し、これを焼結原料とする方法は、焼結生産性および冷間強度改善に有効な方法と評価される。すなわち、ピソライト塊鉱を床敷に用いる場合、同鉱石の大部分が粉化し返鉱となっても焼結生産性や冷間強度に関する性状は単純破碎した粉鉱よりも良好と言える。

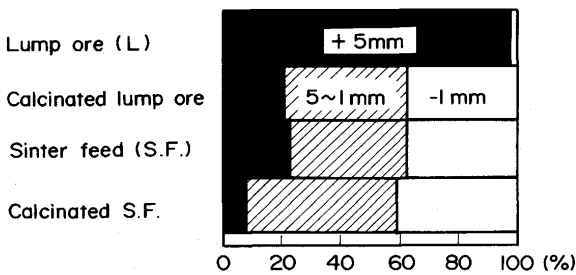


Fig. 3. Size of pisolite ore A after calcination and tumble.

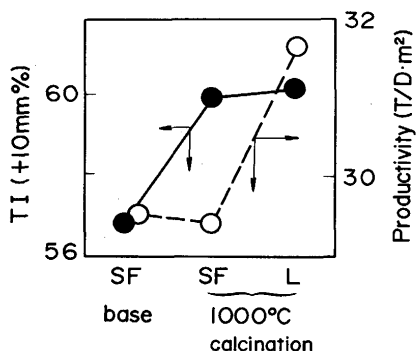


Fig. 4. Effects of calcination and tumble for pisolite ore A on sinter productivity and TI.

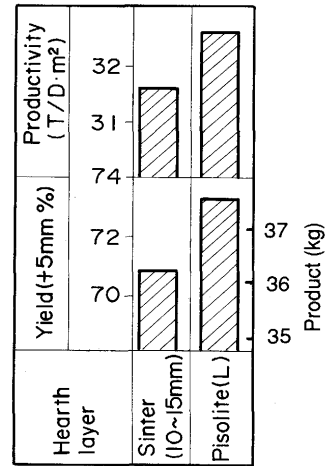


Fig. 5. Comparison of sinter productivity and yield under the condition of same sinter mixture between pisolite hearth layer and sinter one.

3.2 同一配合原料を用いた条件でのピソライト塊鉱床敷と焼結鉱床敷の比較

Fig. 5に実験結果を示す。塊A鉱石床敷は焼結鉱床敷に比べて成品量で1.3kg多く、歩留で2.4%高い。同一配合原料なので、この差は床敷層部の成品量差、すなわち塊A鉱石床敷が5mm以上の成品として残存した量と焼結鉱床敷が5mm以下に粉化した量の合計と読み取ることができる。また焼成速度に差がなく成品量の差分だけ塊A鉱石床敷の場合が高い生産率を示した。以上のように塊ピソライト鉱を床敷に使用すると、床敷が成品化して歩留および生産率が改善される。

3.3 返鉱を循環させた条件での塊ピソライト鉱床敷と焼結鉱床敷との比較

Fig. 6に実験結果を示す。ここで実施した返鉱循環の鍋試験法においては、返鉱量が変動するので配合原料量すなわち原料層厚は一定とならない。返鉱量が増加すると原料層厚が上昇し強度が上昇するので、次の焼成では返鉱量が低下し原料層厚が低下する特徴がある。このため強度および歩留は比較の変動しないが、焼成速度すなわち生産性は逆に大きな変動があらわれる。また、成品CaO濃度および石灰石量は一定であるが返鉱の量および組成(A鉱石塊鉱床敷はCaOを含まない)が変動するので、配合原料中のCaO成分が変動する。

試験結果ではピソライト鉱床敷の方が焼結鉱床敷よりも生産性が高く、歩留が改善されている。この生産性や歩留の改善効果はFig. 5の効果を上回っており、ピソライト床敷の成品化効果だけでなく、Fig. 4に示される加熱と衝撃処理を受けた返鉱の改善効果も含まれるものと考えられる。被還元性や還元粉化性に大差はないが、冷間強度はやや低下する傾向となった。

また、Fig. 6には通常の焼結鉱床敷使用の場合で粉A鉱石(ピソライト鉱)を粉BおよびC鉱石(赤鉄鉱)に置換した結

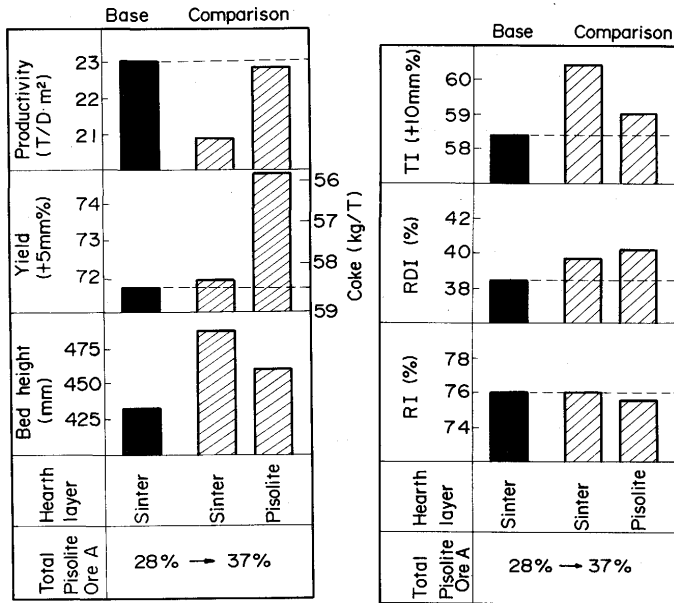


Fig. 6. Comparison of sintering pot tests with cyclining return fine between pisolite hearth layer and sinter one.

果 (Base) も並べて示した。A鉄石塊鉄を床敷に使用する方法はA鉄石粉鉄の多配合により起こる大幅な生産性低下を回復させるとともに歩留や冷間強度を改善できる。

一方、Fig. 7には塊A鉄石床敷層の焼成後の垂直断面を示す。床敷に用いた塊A鉄石は床敷層上部では滴下融液と同化したケーキを形成するが、中下層部では若干の割れは認められるものの大部分は元の塊鉄単体の状態を保っている。また成品中に残存するA鉄石塊鉄単体の外観写真をFig. 8-①に示す。Fig. 2には塊A鉄石を含有する成品の存在比率の調査結果を分類別に数字で示した。A鉄石塊鉄単体の存在比率は全成品の0.4%と少なく、むしろ存在比率の高いのはFig. 8-②に見られる滴下融液によって塊成化したもので、

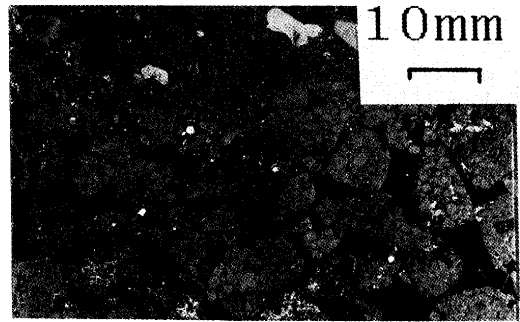


Fig. 7. Cross section of pisolite hearth layer.

最下部の焼結層と結合している。そしてFig. 8-③の断面写真に見られるように、内部は十分に緻密化しており強度的にも高い。この融着塊成化した成品は全成品の8.3%にも及ぶが、破碎してA鉄石塊鉄の残留元鉄だけを定量すると全成品の1.0%であった。従って、床敷に用いた塊A鉄石が残留元鉄として成品中に占める割合は合計1.4%と低く、たとえ高炉において通常の焼結鉄と異なる高温性状を有したとしてもその影響度はきわめて小さいものと考えられる。

次にピソライト鉄床敷部における成品化率 (X₂) の解析結果をTable 4に示す。この解析結果によれば床敷部のA鉄石塊鉄の成品化率 (X₂) は22%で、Fig. 7の融着層の厚みと対応している。

3・4 ピソライト鉄床敷の焼結操業に及ぼす影響

Table 5に返鉄循環試験での焼結鉄床敷とA鉄石塊鉄床敷の場合の焼結層通気性、排ガス温度、含塵ダスト濃度および風箱への落鉄量の結果比較を示す。排ガス最高温度はA鉄石塊鉄床敷の方が低下しており、床敷部での高い吸熱反応の影響と考えられる。しかし、使用したA鉄石塊鉄および粉鉄の量は等しいのでピソライト鉄による吸熱反応量はトータルでは等しいから、焼結層内での吸熱反応は減少し焼結ケ

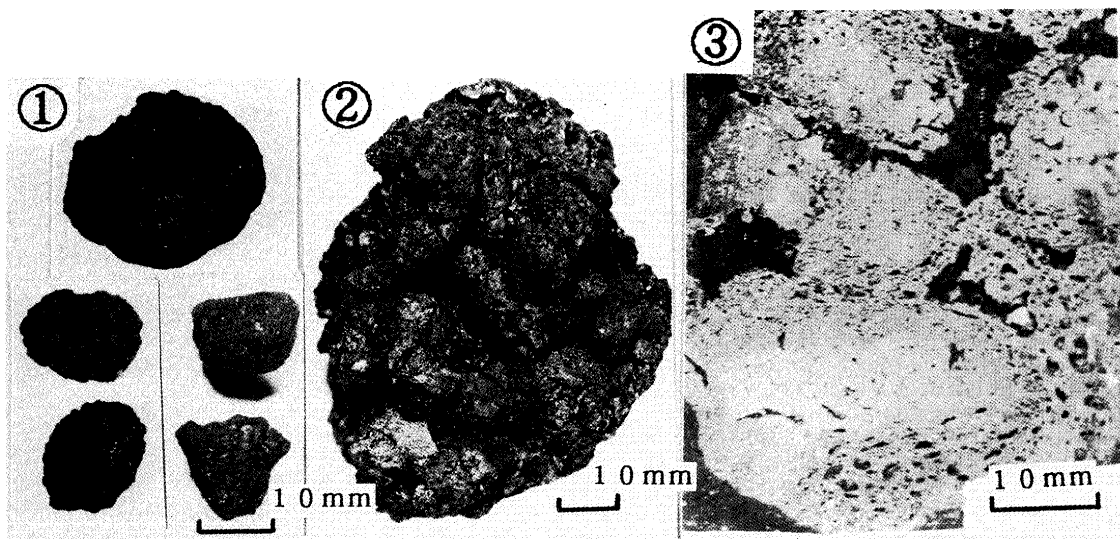


Fig. 8. Appearance of sinter product from pisolite hearth layer.

①Residual ore A, ②Pisolite hearth layer, ③Cross section of pisolite hearth layer

Table 4. Analysis of mass balance on sinter fine cycling test.

Hearth layer brand			Sinter	Ore A
Sinter mix	W ₁	kg	56.4	54.0
	m ₁	—	0.888	0.894
	X ₁	%	73.1	72.7
Hearth layer	W ₂	kg	5.0	5.0
	m ₂	—	1.00	0.90
	X ₂	%	0.90	0.22
+5mm mass	Sp	kg	41.1	36.1
-5mm mass	Sr	kg	14.0	16.7
+5mm CaO	Cp	%	8.42	8.39
-5mm CaO	Cr	%	8.40	6.82
Product		kg	36.1	36.1
Yield		%	72.1	74.7

Table 5. Comparison of test results at the change of hearth layer material from sinter to pisolite ore.

Hearth layer	Sinter	Pisolite
Max. temp. of exhaust gas °C	438	418
Gas rate (FFP-BTP) Nm ³ /m ² . min	38.8	41.2
Dust in exhaust gas mg/Nm ³	44.2	66.9
Drop ore from 8mm slit grate %	0.0	0.3

FFP : time of 80°C of exhaust gas
BTP : time of max. temp. of exhaust gas

一キ温度は上昇するものと思われる。従って、ピソライト鉱床敷では主排ガス温度は低下するが、クーラーガス温度は上昇するものと思われる。また床敷層の温度が上昇する排ガス温度が80°C以上の区間での通気性はA鉱石塊鉱床敷の方が高い。これはグレート上では床敷塊A鉱石の熱割れがほとんど無く、また床敷塊A鉱石の方が床敷焼結鉱よりも粗粒であることに起因していると思われる。

排ガス中の含塵ダスト濃度は44から67mg/Nm³に上昇し

た。しかしダスト濃度測定の絶対値は実焼結機の200~300 mg/Nm³に比べて小さく本実験で十分に評価できるかについては疑問があり、実焼結機においてもピソライト鉱床敷によってダスト濃度が増加するかどうかは、今後の検討課題である。また8mm間隙をもつグレートからの風箱中への落鉱量は0.0から0.3%に上昇した。これは床敷に用いるピソライト塊鉱には混入粉や付着微粉が存在し、またわずかな熱割れによっても破片粉が発生したためと考えられる。しかし風箱への落鉱量の増加は大きな値ではなく、増加したとしても実用上対処が可能と考える。

4. 実焼結機におけるピソライト塊鉱床敷使用試験および高炉への影響

4.1 試験方法および条件

小倉製鉄所の焼結機(有効面積222m²)において、本プロセスの実用化試験を行うとともに、製造した焼結鉱を小倉No.2高炉(内容積1850m³)にて使用しその影響を調査した。焼結床敷ホッパーへ鉄鉱石を供給できるラインを仮説し、A鉱石塊鉱を床敷に使用する試験操作を実施し、成品循環の焼結鉱を床敷として使用する通常法と比較した。試験は返鉱循環の影響も考え33時間実施した。操作条件としては

- (1) 床敷量, 原料層厚, 成品CaO%, 焼結送風機圧力(回転数制御), 生産率(パレット速度制御)が一定。
- (2) A鉱石塊鉱(ピソライト鉱)とB鉱石粉鉱(赤鉄鉱)を置換(他原料の配合量を一定)した。

そして製造した焼結鉱の50%を高炉に直送し, 残る50%を貯鉱ホッパーに貯え, 33時間の焼結試験終了後に貯えた焼結鉱を高炉に送り, 継続して高炉操業への影響を調査した。すなわち高炉側からみると50%がA鉱石塊鉱床敷法の焼

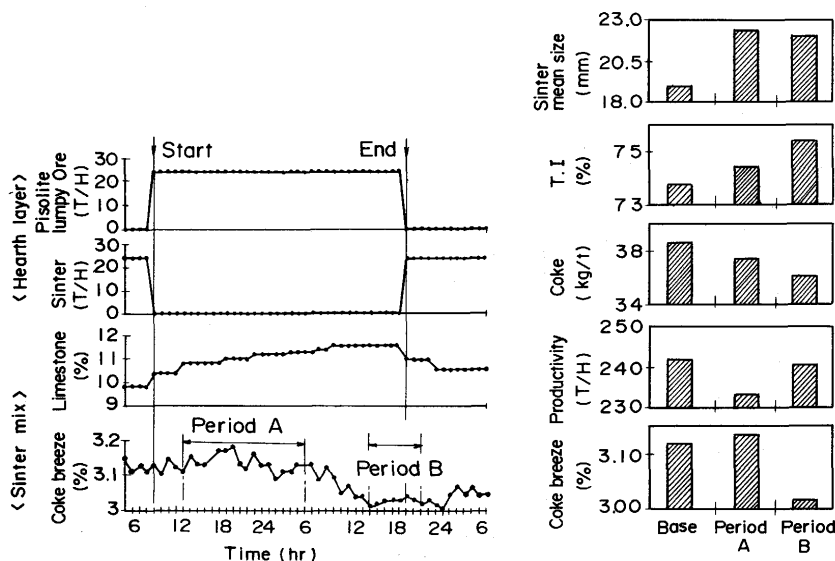


Fig. 9. Test results of "pisolite hearth layer process" at Kokura Sinter Plant.

結鉱で、残る50%が通常法の焼結鉱を使用する条件となった。ちなみに高炉装入原料の焼結比は95%であった。

4・2 試験操業結果および評価

試験操業の推移および操業結果の比較をFig. 9にまとめる。試験区間は通常操業とは別に2区間に大別され、A区間は通常操業と同じコークス比で操業した場合で、溶融過剰となり通気性が悪化し生産性が低下した。床敷部から発生する返鉱量の増加の影響を考え燃料比を低下させるべきと判断し¹⁾、B区間では低コークス比操業による操業改善はなかった。その結果、A鉱石の多配合による通気性や焼成速度の低下を抑制し、ほぼベースレベルの生産性を確保できた。また歩留改善およびコークス比低減により、コークス原単位を大幅に改善できた。

冷間強度 (TI) 及び成品粒度は改善傾向が認められた。この原因として、1つは配合原料中のCaO濃度の増加によるものと思われ、もう1つは床敷A鉱石が返鉱となり改質された効果と思われる。さらに成品の荷重軟化試験では差は認められなかった²⁾。また、排ガス中の含塵ダスト濃度の上昇は認められなかった²⁾。

A鉱石塊鉱を床敷に用い製造した成品を高炉で使用した時の高炉通気抵抗の推移をFig.10に示す。高炉通気抵抗の低下が認められ、少なくとも操業状況は悪くなかったと判断される。これは成品平均粒度の上昇や冷間強度の改善によるところが大きいと思われる。

以上より塊ピソライト鉱を焼結床敷に用いた実機試験の

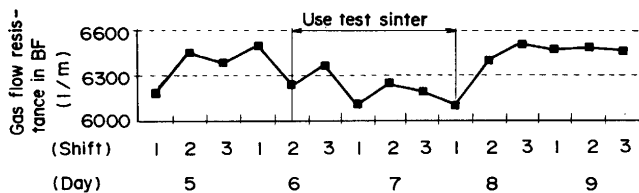


Fig. 10. Change of gas flow resistance in Kokura Blast Furnace at using test sinter shown in Fig.9.

効果をまとめると、焼結生産性や成品品質に悪影響を及ぼすことなく、ピソライト鉱 (A鉱石) の7.4% (対成品) 増配が可能となり、またコークス原単位を2.5kg/T低減できた。この成品を使用しても、高炉において特に悪影響は認められなかった。このように本プロセスはピソライト鉱多配合の有効な手段であるばかりでなく、歩留改善によるエネルギー原単位低減にも有効な方法である。

5. 結言

(1) ピソライト塊鉱に加熱と衝撃処理を加えるとピソライト粉鉱粒度となり、これを用いて焼結すると、ピソライト粉鉱の焼結よりも生産性および冷間強度が改善する。

(2) 返鉱を循環させる焼結鍋試験により、ピソライト塊鉱を焼結床敷に用いる方法が従来のピソライト粉鉱と焼結鉱床敷を用いる方法に比べ、生産性ならびに歩留改善に有効であると評価した。

(3) 焼結鉱にかえてピソライト塊鉱を焼結床敷に用いる方法について、小倉焼結機および高炉において短時間の試験操業を行い、この方法がピソライト鉱の増配および焼結エネルギー低減に有効であることを確認した。

文 献

- 1) 肥田行博, 野坂庸二: 鉄と鋼, 78(1992), p.960
- 2) 川口尊三, 村井達典, 川口善澄, 波多野康彦: 学振54委-No.1973 (平成4年7月)
- 3) 松尾匡, 矢場田武, 大鈴克二, 星野剛一, 河本紀一郎, 野田 俊: 材料とプロセス, 6(1993), p.64
- 4) 肥田行博, 岡崎 潤, 伊藤 薫, 平川俊一: 鉄と鋼, 78(1992), p.1013
- 5) 葛西栄輝, 呉 勝利, 大森康男: 鉄と鋼, 77 (1991), p.56
- 6) 肥田行博, 岡崎 潤, 中村圭一, 上川清太, 葛西直樹: 鉄と鋼, 78(1992), p.1021
- 7) 栗山和益, 佐藤 駿, 川口尊三: 鉄と鋼, 73(1987), S853
- 8) 川口尊三, 佐藤 駿, 栗山和益, 山本高郁, 東風平玄俊: 材料とプロセス, 1(1988), p.1047
- 9) 重盛富士夫, 川崎正洋, 喜多村健治, 吉永真弓, 佐藤 駿, 川口尊三: 学振54委-No.1761 (昭和61年2月)