

スタンド支持焼結法による高生産性操業

High-productivity Operation in Commercial Machines by Using Stand-support Sintering

樋口 謙一^{*(1)} 川口 卓也^{*(2)} 小林 政徳^{*(3)} 戸田 欣樹^{*(4)}
Kenichi HIGUCHI Takuya KAWAGUCHI Masanori KOBAYASHI Yoshiki TODA
 坪根 洋平^{*(4)} 伊藤 洋平^{*(5)} 古庄 真吾^{*(6)}
Yohei TSUBONE Yohei ITO Shingo FURUSHO

抄 録

焼結プロセスにおいて、燃焼溶融帯にかかるシンターケーキ荷重は、溶融凝固過程での通気網形成時の気孔閉塞の原因となり、生産性や品質に悪影響を与える。その荷重を焼結パレットに設置した板によって支持、軽減することで、荷重の影響の大きい下層部の収縮を抑制して高い通気性を得る“スタンド支持焼結法”を開発し、新日本製鐵君津、大分製鐵所に導入した。その結果、焼結鉄品質を損なうことなく、大幅な増産効果を得ており、1996年の導入開始以来、高生産性操業に貢献している。スタンド支持のメカニズムと、実機における増産効果と品質への影響について報告する。

Abstract

The sinter cake load on the combustion-melting zone causes gas channel plugging during the formation of pore structure of sinter cake, resulting in low productivity and inferior quality of the sinter product in sintering process. We focused the influence of gravity and has developed a new sintering technique, called ‘stand-support sintering’, for obtaining high permeability at the lower layer as a result of reducing shrinkage due to gravity and suction by supporting the sinter cake load with plates attached to pallets. This technique has been applied to four sintering machines at Kimitsu and Oita Works, Nippon steel Corp. since 1996 and contributed to their high productivity operation without lowering quality of the sinter product. This paper provides the principle of stand -support sintering and the influence of productivity and quality of the sinter product in commercial sintering machines.

1. 緒 言

鉄鉱石資源は今後、塊鉱比率減少、粉鉱中微粉増加など、劣質化することが予測されている。そのため、鉄鉱石の事前処理工程である焼結の重要な課題のひとつに生産性向上が挙げられる。新日本製鐵は、世界ではじめてX線CTによる焼結シンターケーキの構造解析技術を開発し¹⁾、通気網形成過程が生産性へ大きな影響を及ぼすことを明らかにし²⁾、その制御手段のひとつとして、燃焼溶融帯にかかるシンターケーキ荷重の軽減の有効性を指摘した³⁾。その結果、スタンド支持焼結法⁴⁾の実用化に成功し、実機での高生産性操業に貢献している。本技術は、下方吸引方式の焼結技術の制約要因のひとつとなっている重力の悪影響を緩和し、飛躍的な生産性向上を得る技術である。本報告では、その原理と実操業における操業改善結果を中心に述べる。

2. スタンド支持焼結法の原理

通常焼結方法では、燃料である粉コークスを含んだ原料層をパレットへ装入後、表層を着火し、下方大気吸引により、層内の燃料の予熱、燃焼を下方へ伝播させて焼結鉄を得る。このとき、層内の通気抵抗が直接的に伝播速度を決定するので、通気抵抗の低減が生産性向上に繋がる。特に焼結過程で形成される燃焼溶融帯では、焼成が完了したシンターケーキ層の直下にあるため、その荷重を受けながら原料の塊成化(溶融、凝固)が進行する。故に必然的に荷重によるガス流路の閉塞が起き、これが温度上昇によるガス膨張とともにこのゾーンの高い通気抵抗の一因になると考えられる^{2,5)}。

スタンド支持焼結法は、このシンターケーキ荷重を支持することで、支持開始以降の原料の塊成化速度を改善する技術である(図1)。本技術の特徴は、熱的条件に乏しい上層部の焼成速度にはなんら影響を及ぼさず、下層部の通気性のみを選択的に改善する点

*⁽¹⁾ 環境・プロセス研究開発センター 製鉄研究開発部 主任研究員 工博
 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL: (0439)80-3057

*⁽²⁾ 君津製鐵所 製鉄部 原料工場長

*⁽³⁾ 環境・プロセス研究開発センター
 プラントエンジニアリング部 マネジャー

*⁽⁴⁾ 君津製鐵所 製鉄部 マネジャー

*⁽⁵⁾ 大分製鐵所 製鉄工場 マネジャー

*⁽⁶⁾ 大分製鐵所 製鉄工場

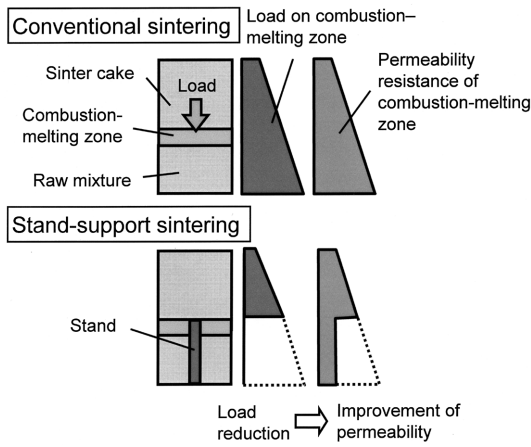


図1 スタンド支持焼結法の基本原理

Schematic diagram showing the principle of stand-support sintering

にある。その結果、実機においては、ストランド上の風量分布の“自己最適化機能”を發揮し、原料層に通気孔を設けて通気性を改善する増産技術⁶⁾と根本的に異なり、強度や歩留を維持した増産がしやすい。

図2に鍋試験におけるスタンドによるシンターケーキ支持過程の解析結果を示す。表層点火直後から負圧による荷重の若干の上昇が見られた。スタンド付近の温度が急上昇し、1200℃まで降下した時

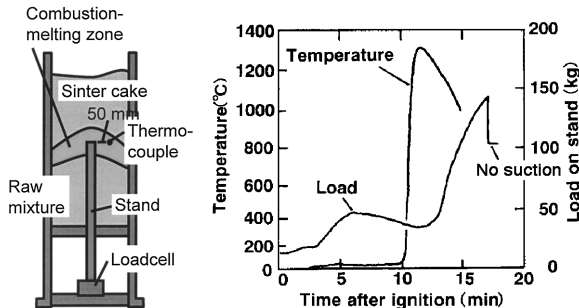


図2 スタンドによるシンターケーキ荷重の支持過程

Supporting behavior of load on combustion-melting zone by stand during sintering

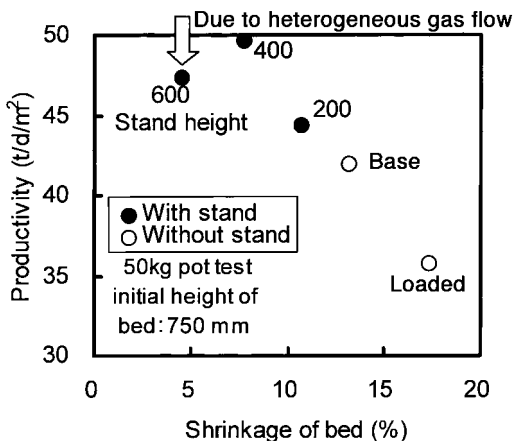


図3 スタンド支持による生産率向上

Improvement of productivity by stand-support

点から焼結完了までスタンドにかかる荷重が上昇した。このことからスタンドは、頂部付近の原料層が燃焼熔融帯を経て、半溶融状態から凝固しはじめる時点から焼結完了まで、直上のシンターケーキを支持することが分かった。

図3に鍋試験(内径300 mm, 負圧19.6 kPa, 層厚750 mm)によるスタンド支持効果の検討結果を示す。図2と同様にグレート面に角柱を垂直に立てて、スタンドによる支持を模擬した。荷重の影響を比較するため、逆に0.15 MPaの圧力を表層にかけた場合も測定した。スタンド支持により、充填層の収縮が抑制され、生産率が20%向上することが分かった。従来、充填層の収縮挙動に及ぼす因子として、燃焼熔融帯の液相量と流動性が挙げられていたが^{7,8)}、本試験で逆に荷重をかけた場合に、収縮が大きくなるとともに生産率も低下したことから、荷重も充填層の収縮挙動を介して、生産率に大きな影響を与えていることが明らかとなった。

3. 実機におけるスタンド支持焼結法の導入

3.1 材質, 形状, 配置の決定

焼結充填層内は、約1時間毎に1300℃近くまで昇温、冷却が繰り返される熱的に過酷な条件であり、パレットに設置したスタンドの頂部も700℃以上に到達する⁴⁾。また、排鉱時には次パレットから排鉱されたシンターケーキの落下衝撃も受ける。そこで、設置するスタンドは、この条件に耐えうる材質、形状を選択する必要があった。耐久性試験の結果、繰り返し加熱後の亀裂進展が少なく、高温強度も高いフェライト・パーライト系の材質を選択した。形状は支持効果を高めるため板状とし、FEM解析から最大応力が最小であった上辺の長い台形を選択した。また、スタンドの高さは効果と耐久性を考慮し、層厚の50%に相当する300 mmとした。なお、実機において過度に高いスタンドを使用すると、表層の脆弱層を突き抜けるため逆効果となるうえ、耐久性も十分ではないため好ましくなかった⁹⁾。以上の検討の結果、通常の焼結操業条件において、2年以上の耐久性を持つスタンドの開発に成功した。

スタンドのパレットへの配置は、コストの面から最小枚数で設置することが望ましい一方、シンターケーキは多孔質なために、過度に設置間隔をあけるとシンターケーキがたわむ現象が見られた。そこで、幅方向、機長方向でほぼ均一なスタンド支持が得られるよう、充填層収縮率とベッド表層のガス流速の測定結果をもとに幅方向と機長方向の間隔を決定した。この配置の最適化により、充填層の収縮差が10 mm以内という、ほぼ均一なシンターケーキ支持が得られた⁴⁾。図4に新日本製鐵君津製鐵所第三焼結機(君津3焼結, 他も同様に略す)におけるスタンドのパレットへの設置状況を示す。

3.2 スタンド支持による生産率向上効果

スタンド支持焼結法は、君津1焼結(1996. 6, 183m²)、君津3焼結(1997. 3, 500m²)、君津2焼結(1997. 12, 280m²)、新日本製鐵大分製鐵所第二焼結機(大分2焼結) (2004. 11, 660m²)に順次導入された。以下に本技術の生産率向上効果について述べる。

君津3焼結におけるスタンド支持焼結法の導入による操業変化を図5、表1に示す¹⁰⁾。スタンドは3回の定修に分けて順次パレットに設置していった。スタンド設置後は装入密度が高く、生石灰原単位が低いにもかかわらず、通気性が改善されており、この結果、フレームフロント速度(FFS)が向上した。また、FFSが向上したにもかかわらず、成品歩留はむしろ向上し、強度も維持された。この要因として、1)スタンドによって生じた通気余裕分を、パレット速度



図4 実機でのスタンド設置状況

An appearance of stands attached to a pallet in Kimitsu No. 3 sintering machine

表1 君津3焼結におけるスタンド支持法による増産効果
Operation results at Kimitsu No. 3 sintering machine

		Base 1997/12/30 -1998/1/27	With stand 1998/3/22 -1998/7/31
Period			
Productivity	t/d/m ²	37.3	40.8
Bulk density of bed	t/m ³	1.61	1.66
FFS	mm/min	24.2	25.9
Product yield	%	78.4	79.4
Shatter index	%	89.3	89.5
Burnt-lime	kg/t-sinter	18.3	15.8
JPU	-	24.3	26.3
Bed height	mm	562	608

上昇ではなく、層厚上昇と圧密装入(装入密度上昇)に置き換えた、2)スタンドにより、下層部の焼成が均一化した、が考えられる。以上の結果、生産率が9%向上した。

図6に充填層の収縮過程の変化と表層通過風速の変化を示す。スタンド支持により、焼成後半の収縮が抑制され、通気が改善されていることが確認された。

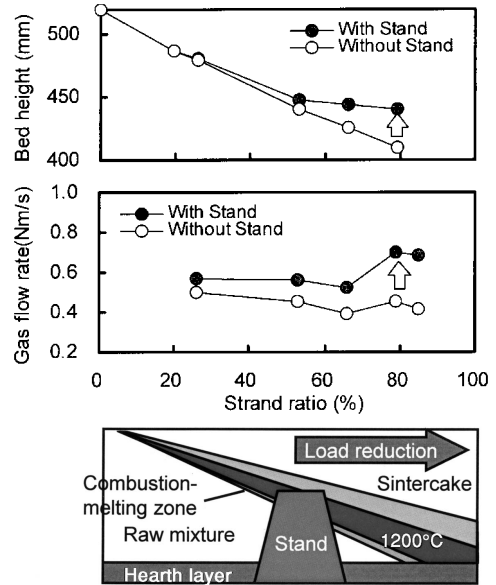


図6 スタンド支持による充填層収縮挙動と風速分布の変化(君津1焼結)
Changes in shrinkage behavior of bed and gas flow distribution at Kimitsu No. 1 sintering machine

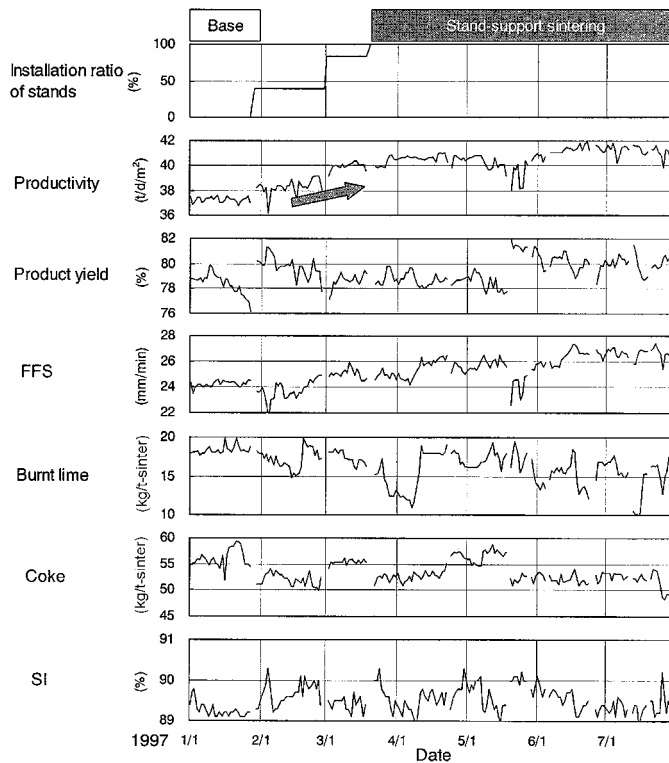


図5 君津3焼結におけるスタンド支持法導入による操業変化
Changes in operation by installing stand-support sintering at Kimitsu No. 3 sintering machine

式(1)に示す生産構造式から、この増産要因(+9.4%)を解析した結果、主要因は通気性改善によるFFS上昇(+6.9%)であった。その他、パレット容積が0.9%減少したにもかかわらず、装入密度は3.2%上昇していた。成品歩留もFFS向上にもかかわらず、下層部の焼成の均一化により1.3%上昇していた。これらの結果として、生産率が9%向上したとの結論を得た。

$$\text{Prod.} = 60 \cdot 24 / 1000 \cdot \text{FFS} \cdot \rho \cdot \frac{1}{100} \cdot \frac{2}{100} \quad (1)$$

Prod : 生産率 (t/d/m²)

FFS : フレームフロント速度 (mm/min)

ρ : 装入密度 (t/m³)

1 : 焼成歩留 (%)

2 : 成品歩留 (%)

君津製鐵所ではその後も、スタンド支持焼結を活用して、ピソライト鉱石の高配合条件下での品質を維持した高生産性操業を継続中である^{11,12)}。図7にスタンド設置前後の層厚と負圧の関係の変化を

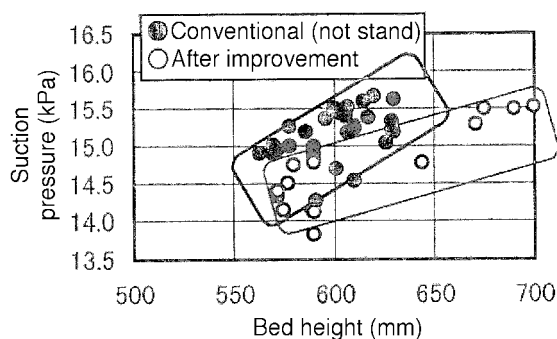


図7 君津3焼結における層厚と負圧の関係の変化
Changes in relationship between bed height and suction pressure in Kimitsu No. 3 sintering machine.

表2 大分2焼結におけるスタンド支持法導入による操業変化
Operation results at Oita No. 2 sintering machine

		Base 2004/10/1 -2004/12/31	With stand 2005/11/17 -2005/11/30
Sintering area	m ²	600	660
Productivity	t/h	713	840*
	t/d/m ²	28.5	30.5
FFS	mm/min	21.4	22.0
Product yield	%	77.4	78.6
Burnt-lime	kg/t-sinter	7.1	8.4
Bed height	mm	578	670
MB	kwh/t-sinter	18.4	16.7
O ₂ in exhaust gas	%	14.9	13.5
Air consumption	Nm ³ /t-sinter	1721	1323
CO	%	86.0	86.3
Tumbler index	%	77.1	78.9
- 5mm	%	5.0	4.2
RDI	%	37.7	35.1
JIS-RI	%	66.5	65.9

* Inclusive of effect of width extension

示す。スタンド支持による通気改善効果により、700 mm以上の層厚上昇が可能となった結果、シャッター強度(SI)を92.5%以上に維持した高生産性操業を実現した¹²⁾。

表2に大分2焼結(VVVF)におけるスタンド支持焼結法の導入結果を示す¹³⁾。本焼結機では、拡幅と同調してスタンドを導入し、18%という大幅な増産を達成した。このうち、スタンド導入により、7%の生産率の上昇が増産に寄与している。さらに、通気改善効果としてメインブローア(MB)電力原単位の低下が認められた。図8に大分2焼結におけるタンブラー強度(TI)とFFSの関係を示す。スタンド導入と同時に高層厚化を図った結果、FFS向上にもかかわらずTIは改善された。

3.3 シンターケーキ構造の変化

図9に君津1焼結にて採取したシンターケーキのCT画像を示す。スタンドにより下層部のシンターケーキに貫通気孔が良く発達し、

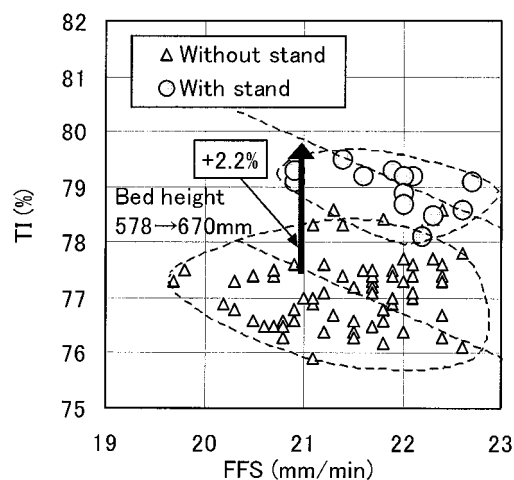


図8 大分2焼結におけるスタンドと拡幅による品質改善
Improvement of TI by installing stand-support and width extension at Oita No. 2 sintering machine

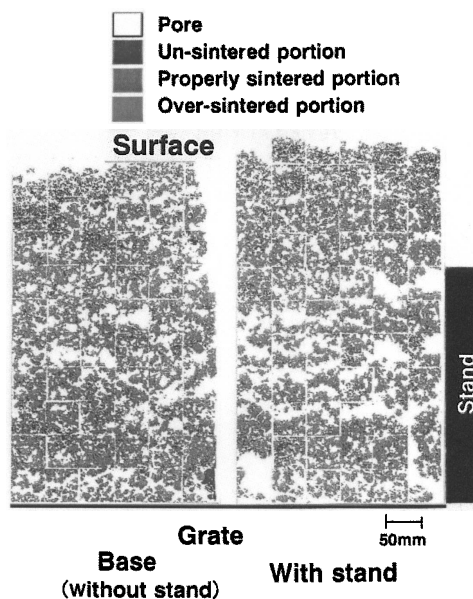


図9 シンターケーキ構造の変化(パレット幅方向のCT像)
Changes in sinter cake structure with stand-support measured by X-ray CT in the width direction

層の収縮が抑制されていた。スタンド周辺部でも未焼成部は認められず、実機のように熱容量の大きな条件では、充填層への鋼材装入による抜熱の悪影響は無視できることが確認された。

4. 結 言

今後の資源動向に対応するために、焼結過程におけるシンターケーキ荷重を支持軽減する“スタンド支持焼結法”を君津，大分製鐵所の焼結機に導入し，以下の結論を得た。

- (1) 燃焼溶融帯にかかるシンターケーキ荷重が充填層の収縮(緻密化)挙動を介して通気性に大きな影響を及ぼす。
- (2) パレット内に設置したスタンドは，頂部付近の原料層が昇温，溶融を経て凝固を開始する時点から，直上のシンターケーキ荷重を支持し始める。それ以降の原料層は，荷重の影響が抑制された条件で焼結されるので，通気網が良く発達し，通気性が改善される。
- (3) 君津，大分製鐵所への導入の結果，生産率が大幅に向上した。本技術は，導入以来安定して稼働しており，新日本製鐵焼結の高生産性操業に寄与している。

参照文献

- 1) Inazumi, T., Kasama, S., Sato, K., Sasaki, M., Tanaka, N.: Proc. 5th Int. Symp. Agglomeration. ICHEME, Rugby, 1989, p.559
- 2) Kasama, S., Inazumi, T., Nakayasu, T.: ISIJ Int. 34(7), 562(1994)
- 3) Inazumi, T., Fujimoto, M., Sato, S., Sato, K.: ISIJ Int. 35(4), 372(1995)
- 4) Higuchi, K., Kawaguchi, T., Kobayashi, M., Hosotani, Y., Nakamura, K., Iwamoto, K., Fujimoto, M.: ISIJ Int. 40(12), 1188(2000)
- 5) Kasai, E., Rankin, W. J., Lovel, R. R., Omori, Y.: ISIJ Int. 29(8), 635(1989)
- 6) 主代晃一, 小西行雄, 井川勝利, 滝平憲治, 藤井紀文: 鉄と鋼 83(7) 413(1997)
- 7) 佐藤駿, 川口尊三, 一伊達稔, 吉永真弓: 鉄と鋼 73(7) 804(1987)
- 8) Cumming, M. J., Thurlby, J. A.: Ironmaking and Steelmaking. 17(4), 245(1990)
- 9) 中安勤, 小林政徳, 天野繁, 中山正章, 野崎健郎, 寺田高志, 藤本政美, 稲角忠弘: CAMP-ISIJ 5 137(1992)
- 10) 戸田欣樹, 川口卓也, 下澤栄一, 中村圭一, 樋口謙一, 藤原豊: CAMP-ISIJ 11 230(1998)
- 11) 坪根洋平, 戸田欣樹, 川口卓也, 松岡裕直: CAMP-ISIJ 15 854(2002)
- 12) 高橋政治, 松岡裕直, 川口卓也, 戸田欣樹: CAMP-ISIJ 16 922(2003)
- 13) 古荘真吾, 伊藤洋平, 小林政徳: CAMP-ISIJ 18 179(2005)