

© 1992 ISIJ

# 低脈石微粉鉱石を大量に使用する高炉用塊成鉱の商用生産

論文  
 ///////////////  
 ///////////////

丹羽 康夫\*・坂本 登\*<sup>2</sup>・小松 修\*<sup>3</sup>  
 野田 英俊\*<sup>3</sup>・熊坂 晃\*<sup>4</sup>

## Commercial Production of Agglomerates for Blast Furnace Burdens Using a Large Amount of High Grade Iron Ore Fines

Yasuo NIWA, Noboru SAKAMOTO, Osamu KOMATSU,  
 Hidetoshi NODA and Akira KUMASAKA

### Synopsis :

In order to improve present iron ore agglomeration processes drastically and correspond to the future trend of iron ore resources suitably, a new agglomeration process named the Hybrid Pelletized Sinter process was studied. On the basis of the fundamental study and the semi-commercial plant trial, a commercial plant of the HPS process with annual capacity of 6 million tons was constructed by remodeling the No. 5 Sinter Plant in Fukuyama Steel Works, NKK. Through the long term operation using a large amount of high grade fine ores, the superiority of the process was confirmed in both productivity and properties of the products. According to the evaluation of blast furnace operation charging the products, reduction of the fuel consumption was also achieved by about 12 kg/t due to their improved properties.

**Key words :** new agglomeration process; commercial HPS plant; sinter; iron ore fines; blast furnace operation; Rist model.

## 1. 緒 言

高炉の生産率の向上、燃料比の低下を目的とした場合、塊成鉱の果たす役割は大きい。特に現状の高炉操業に比較し抜本的に燃料比を低下するには塊成鉱の還元性向上が不可欠であることを Nicole ら<sup>1)</sup>が既に報告しており、最近に至り、石井ら<sup>2)</sup>もその重要性を指摘している。

著者らもこの重要性を認識し、既に焼結鉱で還元性及び還元粉化性を改善するための最適組織を明らかとし報告を行った<sup>3)4)</sup>。しかしながら、これら最適組織を焼結鉱プロセスで具現化するためには原料中のシリカ量を相対的に低下させ、拡散組織主体の組織設計を意図する必要がある<sup>5)</sup>。最近、小幡ら<sup>6)</sup>は焼結鉱プロセスの各種改善により低シリカ条件下で高生産率を達成したことを報告しているが、その場合でも、シリカ含有量の下限は 5.0% 程度であると述べている。

一方我が国における鉄鉱石の中長期需給動向によればブラジル、豪州、ベネズエラなどの新規銘柄はほぼ全量粉鉱であり、焼結鉱生産率向上のためには事前の対策の必要性が指摘されている<sup>6)</sup>。また、従来焼結プロセスでは、原料粒度のみならず化学成分の面からも高品位ゆえに使用に制限のあった低脈石、微粉のペレットフィードも原料選択の自由度を考慮すれば、積極的に使用できるプロセスが望まれる。

このように、今後の塊成鉱プロセスを考えると、品質面、製造面から、現状の焼結鉱プロセスではこれらの問題点を解決することは困難と考えられ、筆者らは従来塊成鉱と異なる新塊成鉱プロセス (Hybrid Pelletized Sinter process 以下 HPS プロセス) を提言した<sup>7)</sup>。

ここでは HPS プロセスについての基礎研究成果を踏まえ、商用プラントの建設、操業及び高炉での使用実績について報告する。

平成 3 年 12 月 6 日受付 平成 4 年 4 月 10 日受付 (Received on Dec. 6, 1991; Accepted on Apr. 10, 1992)

\* NKK 福山製鉄所 (現: NKK 製鉄技術開発部) (Fukuyama Works, Now Ironmaking Technology Development Dept., NKK Corporation)

\*<sup>2</sup> NKK 鉄鋼研究所 工博 (Steel Research Center, NKK Corporation)

\*<sup>3</sup> NKK 福山製鉄所 (Fukuyama Works, NKK Corporation, 1 Kokan-cho Fukuyama 721)

\*<sup>4</sup> NKK 鉄鋼研究所 (Steel Research Center, NKK Corporation)

## 2. HPS プロセスの開発

### 2.1 HPS プロセスの基本構成

開発にあたっては 1) 基本的には現状のグレート型焼結プラントが使用できること, 2) 鉄鉱石原料の将来動向<sup>6)</sup>を考慮し焼結プロセスでは使用に制限のある微粉原料が大量に使用できること, 3) 地球環境面から鉄鋼部門で発生するスラグ量を低減するためシリカ含有量 5% 以下の成品が高生産率下で安定して製造できること, 4) CO<sub>2</sub> 発生量抑制面から, 塊成鉱製造時の化石燃料使用量低減が, また高炉原料としては品質を一層向上することにより高炉燃料比低減がともに期待できること, などを満足させることが新プロセスに課せられた必須の条件である。これら条件を達成するために, HPS プロセスでは以下の固有技術を基礎研究を通じ明らかとした。

(1) 還元性 (RI), 還元粉化性 (RDI) の優れた塊成鉱の具備すべき組織は基本的には拡散組織が望ましく, これを構成する鉱物相は異種元素固溶量の少ない微細型ヘマタイト, 微細型カルシウムフェライト主体が望ましい<sup>3,4)</sup>。

(2) 上記の組織設計を行うためには高品位微粉鉄石の使用比率の向上が必要である。また, この条件下で成品の歩留, 強度の維持を図らねばならない。そのためには従来の焼結鉄プロセスの擬似粒子と異なり, 造粉を徹底することにより粒子間の接触を改善しペレットの高密度向上を図る。このためにはドラムミキサーよりディスクペレタイザーの方が望ましい<sup>7)</sup>。またこの操作により, ベッド内での通気性は焼結鉄プロセスより改善され生産率向上が期待できる。

(3) 伝熱シミュレーションモデル<sup>8)</sup>によれば, 従来, 焼結鉄プロセスとはほぼ同様の熱履歴のもとではペレットの粒径は 10 mm 以下が, また成品の歩留を考慮すると 3 mm 以上が望ましい。10 mm 以上では伝熱の遅れによりペレットの中心部組織の形成不足が予測される。

(4) プロセスシミュレーションモデル<sup>9)</sup>及び実験による検証<sup>8)</sup>の結果, 炭材の粉鉄石への添加はグリーンペレット表面に被覆することが望ましい。これは焼結鉄擬似粒子と比較しペレットの粒径を大きくすると炭材を内装した場合にはペレット内部への酸素の拡散が抑制され, 十分昇温しないうちに冷却され炭材の有効利用が図れない可能性がある。

(5) 歩留, 生産率を向上させるためには炭材を被覆したグリーンペレットをグレート上で崩壊せずに装入することが重要である。このためには, 焼結鉄プロセスで採用しているサージホッパー, ロールフィーダー方式の装

入法では対処できず, グリーンペレットをホッパー内に溜めないシャトルコンベアー, ベルトフィーダー方式が効果的である。

(6) 成品の形状は高炉内装入物分布特性を考慮すると, ペレットとは異なり基本的には, 焼結鉄と同様不規則形状が望ましい。このためにはペレット同士を複数個ブロック状に結合させ高炉内での安息角<sup>7)</sup>を焼結鉄の 34~36° に近づけることが望ましい。

### 2.2 商用プラントの建設と操業

#### 2.2.1 設備仕様

商用プラント建設にあたっては, 中長期原料需給動向及び建設コスト削減の観点から現有の焼結プラントの改造で対処することとした。その際, コストメリット最大を指向し, 当社の最大生産量を誇る福山第 5 焼結機 (有効グレート面積: 550 m<sup>2</sup>) を HPS プラントに改造することとした。設備化に際しては, 必要塊成鉱量より, 年間 600 万トン, 生産率 1.38 t/m<sup>2</sup>·h 規模<sup>10)</sup>をベースにホッパー, 造粒機 (ディスクペレタイザー), コークス被覆ミキサー, 搬送ベルト, 装入部の設計を行った。主要設備仕様を Table 1 に示す。各種設備仕様は, 基礎研究<sup>11)</sup>, パイロットプラント操業<sup>12)</sup>の知見から決定した。以下に本プラントの特徴的な設備仕様について述べる。

#### (1) ディスクペレタイザー

設備台数は建設コスト, 設備スペースの観点から極力少ないことが望ましい。従って, ディスク径は世界的に稼働実績のある最大径の 7.5 m とした。台数の決定に当たっては, HPS プロセスの使用原料を用いて実施したディスク径と処理能力の結果に基づき, スケールアップによる検討を行った<sup>13)</sup>。その結果, 7.5 m 径のペレタイザーでは 100~120 t/h の処理が可能と判断した。すなわち, 1 台当たりの処理能力を低い側の 100 t/h とみ

Table 1. Specification of main equipments of the commercial HPS plant.

Items	Specification	
Granulating equipment	Granulating hopper	80 m <sup>3</sup> ×10 units
	Disc Pelletizer	Size φ7 500 mm×h800 mm× 10 units
	Revolution Inclination	5~9 r. p. m. 45~60°
Coke breeze coating	Coke hopper Coating mixer	400 m <sup>3</sup> ×2 units (Drum type)
	Size Inclination	φ4 400 mm×l17 500 mm× 1 units 4/100
Charging system	Shuttle conveyor	w 1 600 mm, 65 m/min
	Wide conveyor	w 5 500 mm, 5~20 m/min
Sintering machine	Effective grate area	530 m <sup>2</sup> , (w 5 m×l106 m)
	Bed height	620 mm
	Grate speed	1.0~5.0 m/min

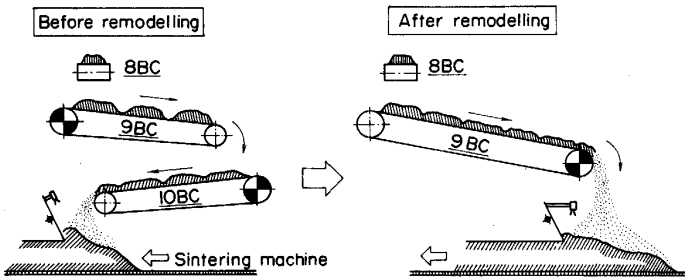


Fig. 1. Schematic diagram of charging system at HPS plant.

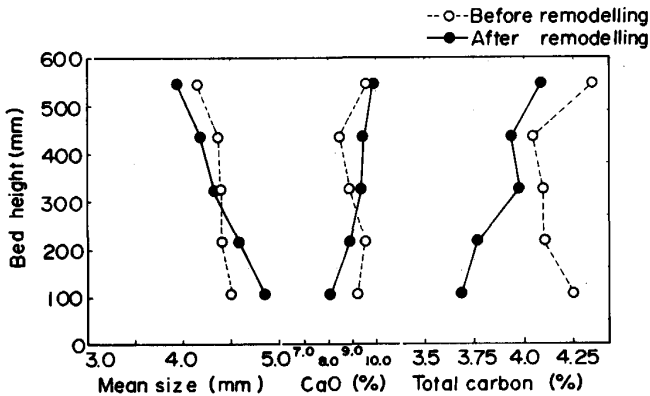


Fig. 2. Comparison of segregation in the sintering bed between before and after remodeling charging system.

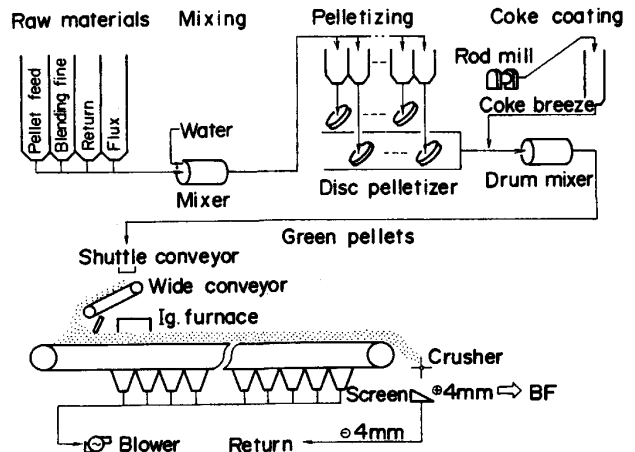


Fig. 3. Process flow of the commercial HPS plant with capacity of 6 million tons/year.

なし、前述の生産前提より必要台数を 10 台とした。その他、ディスク深さ ( $H$ ) と径 ( $D$ ) については過去の実績及び滞留時間を考慮し  $H/D=0.1$  を基準とした。また、ディスク深さは  $0.5\sim 0.8$  m、回転数は  $5\sim 9$  rpm、角度は  $45\sim 60^\circ$  可変とした。

(2) コークス被覆用ミキサー

コークス被覆は処理能力、制御性の観点からドラムタイプを採用した。本プラントではドラム内でのペレットの占積率、滞留時間などを考慮し、Table 1 に示すように処理能力  $1200$  t/h 規模とした。

(3) 装入設備

HPS プラントでは、製造した粉コークス被覆グリーンペレットの崩壊を抑制するため、2.1 で述べたようにベルト装入方式を採用した。当初は上部往復動コンベアの下に  $5200$  mm 幅の幅広ベルトを 2 段設けた。その後、ベルトの保守性向上、グレート巾方向における原料の分布制御性向上を図るため、Fig. 1 に示すようにベルトの 1 本化、幅広化 ( $5200\rightarrow 5500$  mm) を実施した。この結果、装入部の偏析状態は Fig. 2 に示すように弱偏析傾向となった。なお、装入部の新設に伴い、点火炉を排鉍部側へ  $4$  m 移設したため、焼結機有効面積は  $550$  m<sup>2</sup> から  $530$  m<sup>2</sup> に減少した。Fig. 3 に福山第 5 焼結機を改造して建設した商用 HPS プラントのプロセスフローを示す。

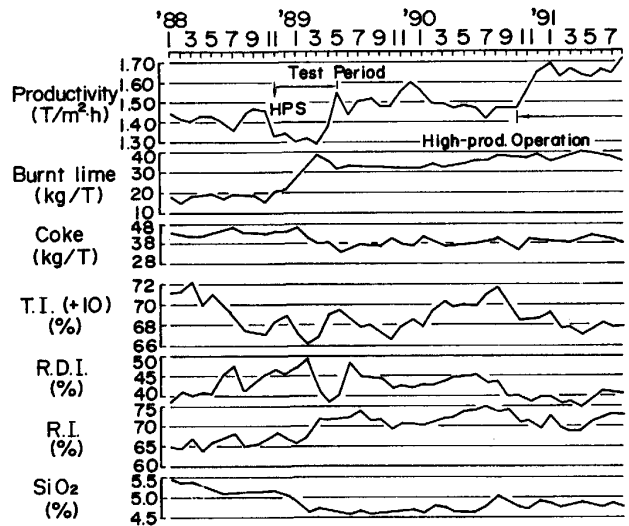


Fig. 4. Trend of HPS operation and qualities of the products.

2.2.2 HPS プロセスの操業概要

1988 年 11 月より HPS プラントによる商用生産を開始した。Fig. 4 に操業推移を示す。立上げ当初、初期トラブルはあったものの、その後の設備改善でこれらはほぼ解消した。1989 年 4 月までの 5 ヶ月間の試験操業期間中にペレットフィードを含む微粉原料配合を  $20\rightarrow 40\rightarrow$

60% と逐次増加させた。3 月には最終微粉配合目標である 60% での操業を行った。この際の原料中の  $-125 \mu\text{m}$  含有量は 50% に達した。この間、HPS 鉱中のシリカ量は原料需給上の変動を考慮し、4.7% まで低下させた。その結果、RI 70~75%, RDI 35~40% の塊成鉱が得られ、コークス比も 43 kg/t から 37 kg/t へと大幅に削減された。また、実機成品の安息角については  $34\sim 35^\circ$  と焼結鉱とほぼ同一な値であった。これより、HPS プロセスは商用プラント操業においても、基礎研究の知見<sup>3)</sup>と同様の優位性が確認された。その結果、従来の焼結プロセスでは生産率、歩留の観点から使用に制限のあった微粉、低シリカ原料を大量に使用することができ、かつ従来焼結鉱の品質を上回る HPS 鉱が得られることが明らかとなった。その後、出銑量増の要求があり 1990 年 11 月以降、当初計画の 120% に当たる年間 720 万トン、 $1.65 \text{ t/m}^2\cdot\text{h}$  の高生産操業を行っているが、品質を損なうことなく順調な操業を継続している。ただし、基礎研究段階<sup>7)</sup>では歩留 90% 台が期待されていたが、現時点では原料中に安定造粒に必要な微粉含有量が十分確保されていない。それゆえ成品の完全なペレットブロック化が達成されていないため、返鉱比率は 150~200 kg/t で推移している。つぎに、その波及効果として、微粉原料の HPS プロセスへの傾斜配合が可能となったため、福山第 4 焼結機 (有効グレート面積  $400 \text{ m}^2$ ) では原料中の  $-125 \mu\text{m}$  量を 25% から 15% に低下させることができた。この結果、Fig. 5 に示すように生産率は  $1.60 \text{ t/m}^2\cdot\text{h}$  から  $1.70 \text{ t/m}^2\cdot\text{h}$  へ上昇し、微粉原料配合

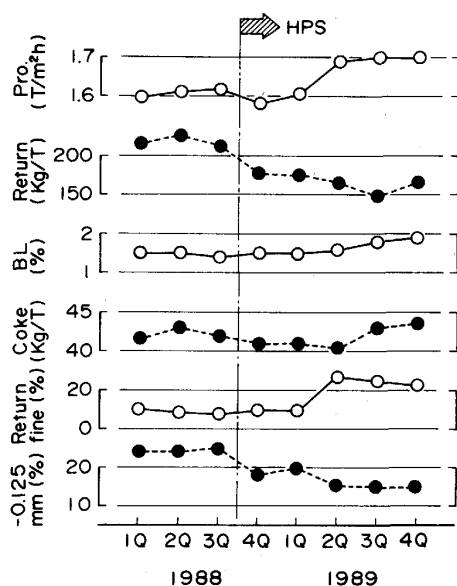


Fig. 5. Operational results of Fukuyama No. 4 sintering plant before and after starting HPS operation.

量と相関がある返鉱原単位<sup>14)</sup>は  $220 \text{ kg/t}$  から  $160 \text{ kg/t}$  に低減した。

### 2.2.3 高炉操業に及ぼす HPS 鉱の効果

高炉での HPS 鉱の使用に関しては、HPS 鉱を焼結鉱とは別の塊成鉱銘柄として扱い、HPS プラントの稼働直後、高炉での原料配合に大きな変化が起きないように考慮した。高炉への配分は各炉、HPS 鉱/焼結鉱 = 50/50 となるよう生産量を案分してスタートした。その後、HPS 鉱の品質の優位性 (高 RI, 低 RDI, 低  $\text{SiO}_2$ ) が確認され、高炉への安定供給が確立されたのち、内容積の大きい福山第 4,5 高炉での HPS 鉱の傾斜配合を実施した。

HPS 鉱使用時の高炉操業への効果を HPS 使用前との比較で Table 2 に示す。HPS 鉱使用前でスラグ比で約  $20 \text{ kg/t}$ 、コークス比で約  $12 \text{ kg/t}$  の低減効果が得られている。さらにオールコークス操業下の福山第 5 高炉 (1990 年 8 月度) では  $9700 \text{ t/d}$  (出銑比  $2.08 \text{ t/m}^3\cdot\text{d}$ ) から  $10300 \text{ t/d}$  (出銑比  $2.21 \text{ t/m}^3\cdot\text{d}$ ) への操業度上昇が可能となった。

## 3. 考 察

### 3.1 HPS プロセスにおけるベッド内ガス流れ

グレート方式による塊成鉱製造プラントにおいてベッド内を通過するガス流は生産率、歩留に直接影響を与えるため、その制御は極めて重要である。最近の焼結鉱プロセスに関する研究成果<sup>15)</sup>によれば、原料装入部で擬似粒子特有の安息角と、粘性によりグレート進行方向に周期的ななだれが発生し、焼結過程での歩留は低下すると報告されている。これはなだれによりベッド内の通気性が局所的に変化し、焼結過程で偏流が引き起こされることに起因するもので、その抑制のために各種の装入装置が検討されている<sup>15)16)</sup>。これに対し HPS プロセスでは焼結鉱プロセスと比較し、1) グリーンペレットの形状がより球に近いこと、2) グリーンペレット表面に粉コークスが被覆されているためペレット同士の付着が少

Table 2. Operational results of Fukuyama No. 5 BF.

Items	Before use of HPS	After use of HPS
Mixing ratio (%)		
Lumpy ore	20	20
Pellet	2	2
Sinter	78	23
HPS	—	55
Hot metal (t/d)	9700	10300
Productivity ( $\text{t/m}^3\cdot\text{d}$ )	2.08	2.21
Coke rate (kg/t)	517.5	505.0
Blast temp. ( $^\circ\text{C}$ )	1050	1050
Moisture ( $\text{g/Nm}^3$ )	55	55
Slag ratio (kg/t)	327	309

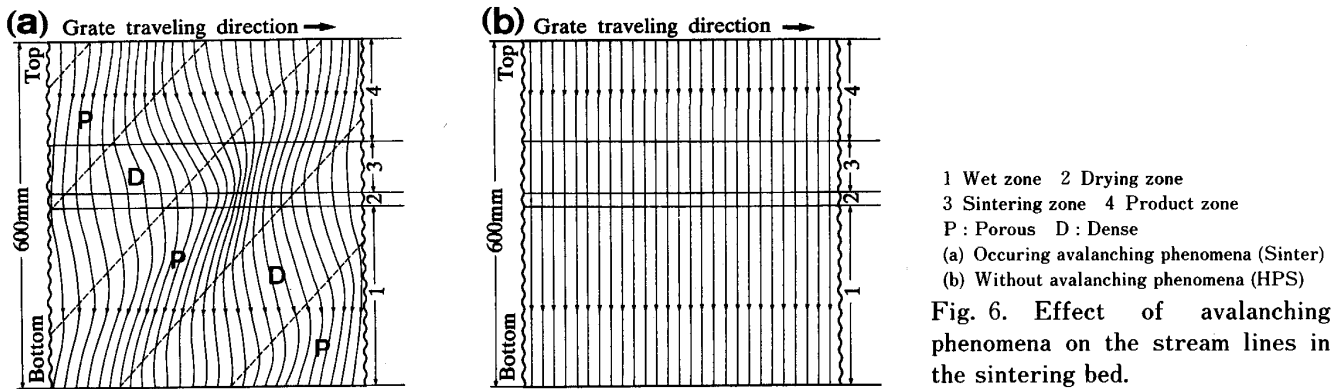


Fig. 6. Effect of avalanching phenomena on the stream lines in the sintering bed.

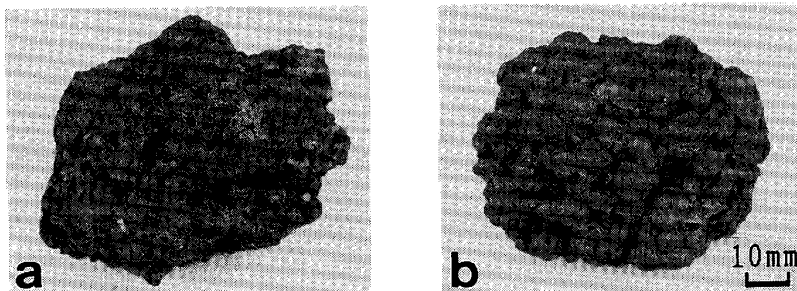


Photo. 1. Appearance of HPS and sinter produced by commercial plant.

ないこと、3)Fig. 3 に示すようにサージホッパーを有しないためペレットの崩壊が少ないこと、などが特徴としてあげられる。そのため安息角、粘着性両面からなだれ現象は抑制されている。Fig. 6 は 2 次元に拡張した Ergun の式<sup>17)</sup>と連続の式とを組合せたガス流れモデル<sup>8)</sup>によりベッド内のガス流れを解析した結果である。解析にあたって用いた物性値は既報値<sup>8)</sup>と同様であるが、なだれによって発生する緻密層の空間率は既報値の 80% と設定している。Fig. 6 により焼結鉍プロセスでなだれ現象が発生すると流線はなだれ層で大きく曲げられることが確認出来る。この結果は、バンスルーポイントが不安定になり焼結操作が不安定になることを示唆している。一方 HPS プロセスでは、Fig. 2 に示すように、上下方向には粒度偏析があるもののグレート移動方向では前述の理由でなだれ現象は生じない。それ故、Fig. 6 (b) に示す流線よりベッド内の偏流は抑制されており、焼結完了点も安定し Fig. 4 に示すように低シリカ原料条件下にもかかわらず、生産率、歩留向上に寄与するものと推察された。今後は微粉原料の確保及び造粒技術の最適化により、造粒をさらに徹底することにより一層の歩留向上が期待できるものと考えられる。

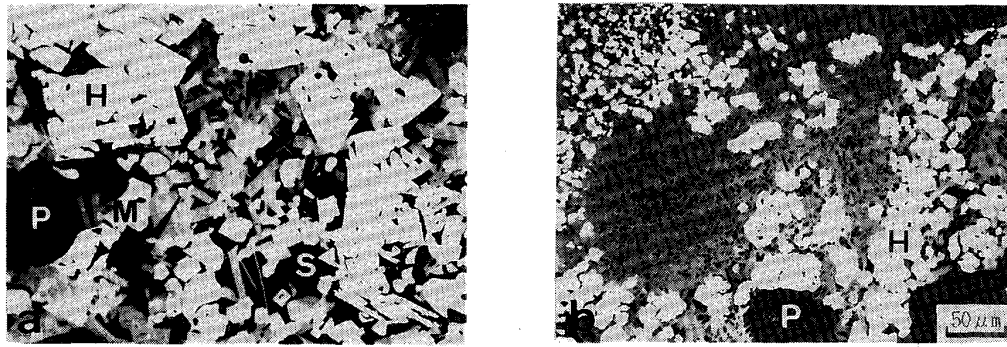
3.2 鉍物組織及び品質面から見た HPS 鉍

HPS 鉍のシリカ含有量は通常焼結鉍に比べ 5.2% から 4.7% と低減が可能となった。HPS プラント稼働前後の福山第 5 焼結機より得られた焼結鉍及び HPS 鉍中

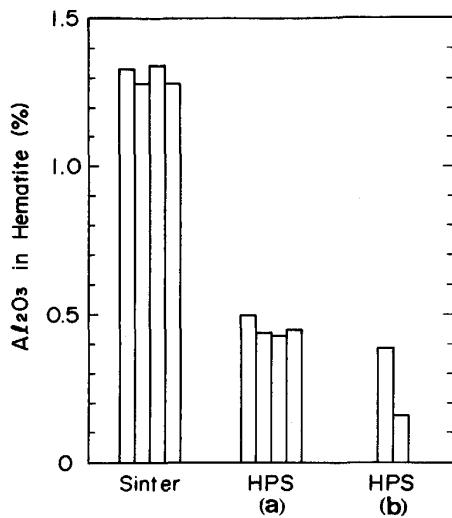
のシリカ、アリミナ含有量とタンブラー強度との関係を調査した<sup>18)</sup>。その結果、焼結鉍の場合シリカの増加あるいはアルミナの増加によりタンブラー強度が低下することが認められた。一方、HPS 鉍では両者ともタンブラー強度とは明確な相関は見られなかった。これは、HPS 鉍は、1) ディスクペレタイザーによる造粒強化により焼結鉍の擬似粒子と比較し嵩密度が向上したこと、2) コークスの外装により、焼結鉍に比べマクロ的には Photo. 1 に示すようにペレットブロック状の塊成化がなされていること、3) ミクロ的には Photo. 2 に示すように微細型ヘマタイト、微細型カルシウムフェライトを主体とする拡散結合組織の形成が進行し衝撃破壊性に弱いガラス質スラグ比率が低下したためと考えられる。

EPMA を用いて HPS 鉍、焼結鉍のヘマタイト、カルシウムフェライト組織中のシリカ、アルミナ固溶量について調査した結果を Fig. 7 及び Fig. 8 に示す。これより焼結鉍中のヘマタイトには、アルミナが 1.3% 程度固溶するのに対し、HPS 鉍では 0.2~0.4% と著しく少ない。これは HPS 鉍の原料そのものが高品位であることに加え、融体を介した晶出型ヘマタイト（いわゆる 2 次ヘマタイト）の比率が少なく、アルミナ固溶量が必然的に減少することによるものと推定される。

Fig. 8 はカルシウムフェライトの組成を CaO-SiO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系で示したものである。基本的には両塊成鉍ともその組成は CaO·SiO<sub>2</sub>~CaO·2(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)



a : Sinter  
 H : Hematite M : Magnetite CF : Calcium ferrite S : Slag P : Pore  
 b : HPS  
 Photo. 2. Comparison of microstructures between HPS and sinter.



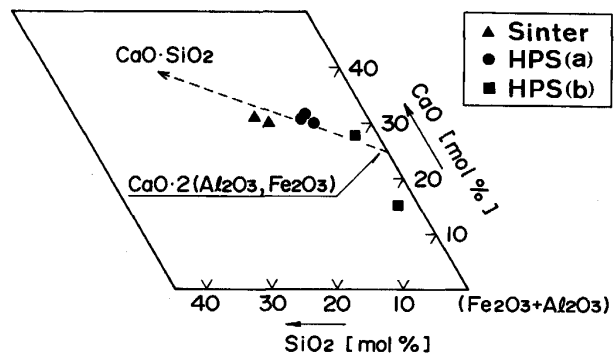
(a) Productivity. 1.65 t/m<sup>2</sup>·h (b) Productivity. 1.38 t/m<sup>2</sup>·h

Fig. 7. Comparison of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content in hematite phase between HPS and sinter by EPMA analysis.

EPMA analysis for calcium ferrite (Ave.).

	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Sinter	65.5	8.9	15.7	2.8	7.5
HPS (a)	77.4	4.9	14.7	0.9	3.6
HPS (b)	82.3	1.4	9.0	5.5	2.3

(wt%)



(a) Productivity. 1.65 t/m<sup>2</sup>·h (b) Productivity. 1.38 t/m<sup>2</sup>·h

Fig. 8. Mineral compositions of calcium ferrite in agglomerates plotted on the phase diagram of CaO-SiO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> quaternary system.

Table 3. Chemical composition and properties of HPS and sinter produced by commercial plant.

	T. Fe%	FeO	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	RI%	RDI%
HPS	57.8	4.4	9.2	4.7	1.6	1.8	71.0	43.0
Sinter	56.3	6.1	10.1	5.2	1.8	1.8	67.0	44.9

上にあるが、焼結鉱に比べ、HPS 鉱中のカルシウムフェライト中のシリカ及びアルミナ固溶量は少なく、半分以下となっている。

以上の組織調査により、ヘマタイト系組織については従来より還元粉化性には悪いとされていたアルミナ固溶ヘマタイト<sup>19)</sup>の比率が低く、シリカ含有量を低下させても RDI は従来通り維持されることが判明した。またカルシウムフェライト系組織ではシリカ、アルミナを固溶する溶融型が少ないため高 RI 達成が可能となったものと推定される。しかしながら、基礎研究で得られた成果<sup>7)</sup>と比較した場合、品質面では Fig. 4 に示すように目標値である RI > 80%, RDI < 30% には到達していない。これは現状の原料需給バランスから(1)化学成分ではシリカ含有量を 4.7% 以下にできないため、HPS 組織内に一部高 RI になりにくい溶融組織が残ること、(2)原料粒度面からは -44 μm 含有量が 30% 程度まで確保されていないため、一部造粒が不完全になり、物理的に

RDI 悪化を抑制する手段であるペレットの高密度向上が未だ十分でないことなどによるものと判断される。

### 3.3 HPS 鉱の高炉操業に及ぼす影響

3.2 で述べたように商用プラントで得られる HPS 鉱は基礎研究で提言した拡散組織に合致するものであり、その結果、RI は Fig. 4 に示すように焼結鉱生産時と比較し 7~8% の向上が図られている。また、Table 3 及び Fig. 9 に示す高温荷重軟化性の比較においても、

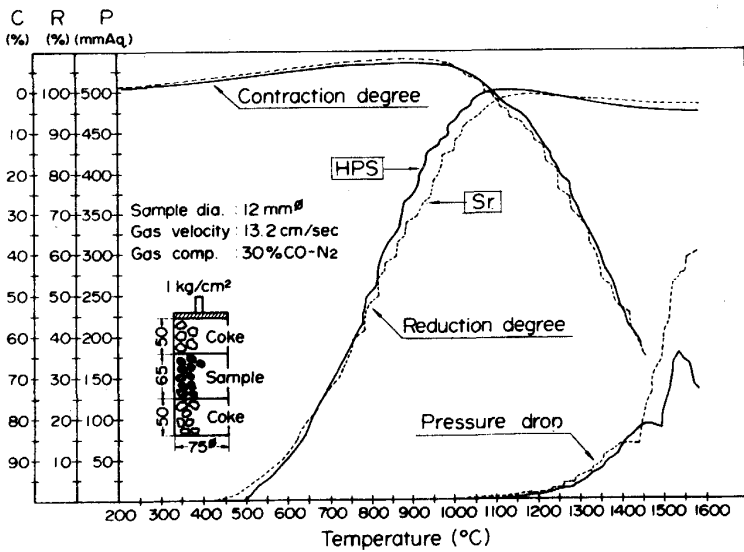
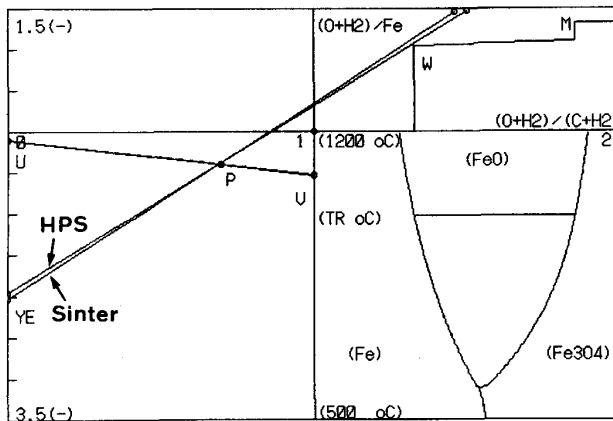


Fig. 9. Comparison of the softening, melting and reduction behavior under load between HPS and sinter.



〈Fukuyama No. 5 blast furnace〉

Items	Before use of HPS	After use of HPS
Mixing ratio (%)		
Lump ore	20	20
Pellet	2	2
Sinter	78	23
HPS	—	55
Product (T/D)	9700	10300
Productivity (T/m³·D)	2.08	2.21
CR (kg/T)	517.5	505.0
B. T. (°C)	1050	1050
Moi. (g/Nm³)	55	55
S. R. (kg/T)	327	309

Fig. 10. Analysis of blast furnace operation using with or without HPS evaluated by Rist model.

HPS 鉱は高温被還元性、溶け落ちまでの通気性で焼結鉱より優れていることが明らかである。これは、1) HPS 鉱の特徴である適正組織設計及び低シリカ化により低温～高温域までの還元により粒子内への還元ガス拡散を阻害するメタリックシェル生成が抑制されること、2) スラグ生成量が相対的に少ないこと、などに起因している。従来の還元反応速度の解析によれば<sup>3)</sup>拡散組織主体の塊成鉱は高い有効拡散係数を有することが知られてい

る。それゆえ還元の後半に律速段階となる粒子内拡散過程で起る還元の停滞を抑制することが明らかとなっており、Fig. 9 の結果も同様に解釈できる。

このような HPS 鉱を福山第 5 高炉(内容積 4664 m³)で使用した実績を Rist モデル<sup>20)</sup>により解析した結果を Fig. 10 に示す。Fig. 10 より処理鉱配合率一定下で、焼結鉱主体の操業から HPS 鉱主体の操業に切替えることによりコークス比は約 12 kg/t 低下し、出鉄量は 600 t/d 増加している。この現象を Rist 線図により解析すると、1) HPS 鉱の使用によりスラグ比の低下に伴うスラグの持出し顕熱の低下、2) 出鉄増に伴う炉下部熱損失の低下があげられる。その結果、Fig. 10 の熱収支を律する U 点及び P 点の上昇により操作線の勾配は小さくなる。しかし、勾配に影響を及ぼす一番の要因はシャフト効率の向上である。今回の解析によれば、HPS 鉱の使用によりシャフト効率は 0.95 から 0.99 まで改善されており、Fig. 10 に示すように熱保存帯温度を 1000°C と仮定すると、ほぼ FeO～Fe の還元平衡に近い点で操業していることが明らかとなった。このように HPS 鉱のもつ高被還元性、低スラグ性により高炉操業は与えられた操業条件下では極限近くまで改善できるものと推察された。

石井ら<sup>2)</sup>は Nicole<sup>1)</sup>らの報告をもとに被還元性の向上により高炉シャフト部での還元平衡の限界は W 点 (FeO～Fe 平衡点) から M 点 (Fe₃O₄～FeO 平衡点) に移行することを示している。この場合の平衡温度は 670°C としているが、現実の高炉操業でここまで還元平衡を保ちながら平衡温度を低下させることが可能か否かは今後の課題である。ただし、HPS 鉱のように被還元性の高い塊成鉱とソリューションロス反応の高いコークス

(高 CRI) を同時に高炉で使用した場合、熱保存帯の温度は平衡を保ちながら低下させることは可能である。例えば山口ら<sup>21)</sup>が提案したような小塊コークスと HPS 鋳を同時に使用し、Fig. 10 の HPS 鋳使用操業条件下で熱保存帯温度が 1000°C から 950°C まで低下したと仮定すると、コークス比は 503 kg/t から 487 kg/t まで低下することが Rist モデルにより確認される。このように本 HPS 鋳は現状はもとより将来の高炉操業についても、その技術的発展性を示唆している。

#### 4. 結 言

鉄鋳石の中長期需給動向から鉄鋳石の微粉化傾向を考慮し、かつ焼結鋳プロセスの品質面、製造面での抜本的な改善を図るため新塊成鋳プロセス (HPS プロセス) の可能性を明らかとした。その成果を踏まえ、NKK 福山第 5 焼結機を 600 万トン/年規模を有する HPS プラントに改造し、既に 3 年にわたって順調な操業を行ってきた。その結果、以下のことが明らかになった。

(1) 製造プロセス面では、基本的には焼結鋳プロセスと同様グレート方式を採用するものの、造粒、炭材の添加及び原料装入方式では従来とは異なった新方式を採用した。これにより炭材被覆グリーンペレットの崩壊抑制、グレート内での偏流抑制が達成され、成品のペレットブロック化が可能となり、HPS 鋳を構成する鋳物組織の最適設計が可能となった。

(2) 商用プラントによる操業において、シリカ含有量 4.7%、ペレットフィードを含む微粉鋳配合量 60% で操業ができ、還元性、還元粉化性にすぐれた HPS 鋳が安定かつ高生産できることが確認された。これらの結果は基礎研究の成果と比較した場合、品質面、歩留で目標値をやや下回るものであった。この主たる原因は現時点での原料条件が基礎研究段階のそれに達していないことによるものと判断された。

(3) HPS 鋳を多量使用した高炉操業では、HPS 鋳の

もつ低脈石含有量、高被還元性によりスラグ比の低下、燃料比の低下及び出銑比の向上が確認された。Rist モデルによる操業解析により、HPS 鋳の多量使用によってシャフト効率がほぼ限界近くまで向上することが確認され、HPS 鋳の焼結鋳に対する優位性が証明された。

#### 文 献

- 1) R. Nicole, R. Capelani, J. B. Guillot and A. Rist: Symp. on Blast Furnace (1980) Arles, III-2-1
- 2) 石井邦宜, 柏谷悦章: 材料とプロセス, 4 (1991), p. 1004
- 3) 坂本 登, 福与 寛, 岩田嘉人, 宮下恒雄: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 504
- 4) 坂本 登, 福与 寛, 岩田嘉人, 宮下恒雄: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 512
- 5) 小幡昊志, 高橋博保, 中村 勝, 夏見敏彦, 駒村 聖: 鉄と鋼, 76 (1990), p. 667
- 6) 野坂庸二, 細谷陽三: 鉄と鋼, 75 (1989), p. 1957
- 7) 坂本 登, 野田英俊, 岩田嘉人, 斎藤 汎, 宮下恒雄: 鉄と鋼, 73 (1987), p. 1504
- 8) 坂本 登, 野田英俊, 熊坂 晃, 谷中秀臣: 鉄と鋼, 75 (1989), p. 50
- 9) 坂本 登, 宮下恒雄, 福与 寛: 鉄と鋼, 68 (1992), p. 2238
- 10) 丹羽康夫, 炭竈隆志, 小松 修, 長野誠規, 清水正安, 野田英俊: 材料とプロセス, 2 (1989), p. 77
- 11) 中島龍一, 小松 修, 清水正安, 井上英明, 長野誠規, 牛腸 誠: 材料とプロセス, 1 (1988), p. 34
- 12) 坂本 登, 野田英俊, 岩田嘉人: 材料とプロセス, 1 (1988), p. 33
- 13) Y. Niwa, O. Komatsu, H. Noda, N. Sakamoto and S. Ogawa: Ironmaking Conf. Proc. of AIME, 49 (1990), p. 683
- 14) 小松 修, 長野誠規, 野田英俊, 牛腸 誠, 黒沢信一, 福与 寛: 材料とプロセス, 3 (1990), p. 952
- 15) 稲角忠弘, 藤本政美, 笠間俊次, 佐藤勝彦: 鉄と鋼, 77 (1991), p. 63
- 16) 中島龍一, 服部道紀, 福与 寛, 原田敏敬, 飯野文吾, 松永吉史, 和田 隆: 材料とプロセス, 4 (1991), p. 116
- 17) S. Ergun: Chem. Eng. Prog., 48 (1952), p. 89
- 18) 若井 造, 丹羽康夫, 山口 篤, 野田英俊, 炭竈隆志, 小松 修: 材料とプロセス, 4 (1991), p. 1135
- 19) 稲角忠弘: 鋳物工学 (今井秀喜, 竹内寿久弥, 藤木良規編) (1976), p. 213 [朝倉書店]
- 20) A. Rist and N. Meysson: Rev. Metall., 18 (1965), p. 995
- 21) 山口一良, 内藤誠章, 上野浩光, 寺田雄一, 川鍋正雄: 材料とプロセス, 4 (1991), p. 1016