

© 1992 ISIJ

 ///////////////
 論 文
 ///////////////

高炉内半径方向粒度分布制御による細粒 焼結鉱の使用

堀 隆一*・宮谷 仁史*²・後藤 哲也*・小野 玲児*
松井 良行*・蟻塚 光弘*

Blast Furnace Operation with Small Size Sinter by the Control of Particle Size Radius Distribution

Ryuichi HORI, Hitoshi MIYATANI, Tetsuya GOTO, Reiji ONO,
Yoshiyuki MATSUI and Mitsuhiro ARIZUKA

Synopsis :

Use of small size sinter ore was investigated by the control of particle size distribution. Ore was divided in O I and O II, and particle size distribution was controlled by each movable armor position.

Pressure drop and temperature distribution in the furnace was evaluated by the mathematical model. Control of particle size distribution enables to keep good permeability as same as that of large size sinter by the calculation.

At Kakogawa works, sinter plant screen and blast furnace ore bin screen was decreased from 5.0 mm to 3.0 mm. Movable armor was used in order to control particle size distribution and Blast furnace operation was kept stable.

Key words : blast furnace ; sinter ; particle size distribution ; burden distribution ; sampling.

1. 緒 言

一般に、高炉の装入物は粒径が大きいほど高炉内のガスの通気性がよく、粒径が小さいほど還元率が高いと言われている。逆に焼成鉱製造側からは、高炉で使用する粒径が小さいほど歩留まりが上がり、製造コストが下がると言われている。特に、焼結鉱においては通気性が保たれ、コスト面からも許容できる最小粒径は 5 mm 以上であると言われていた¹⁾²⁾。

高炉の通気性を維持しながら焼結鉱の粒径を下げることは、焼結工場の製造歩留まりを上げるのみならず、高炉における焼結鉱のガス還元率を高め、燃料比を下げることになり、コスト面からの効果が大きい。

装入物の粒径を低下させながら通気性を維持する方法として焼結鉱の粒度別装入法が知られている^{3)~5)}。この方法では、焼結鉱を焼結工場および高炉庫下で 5 mm のスクリーンで篩った後、+5 mm を高炉に装入し、-5 mm は再度 3 mm のスクリーンで篩った後、+3 mm を +5 mm と別に高炉に装入する。通常、+3 mm の細粒

焼結鉱を周辺部に装入し、周辺部の通気性とガス量の調整に使用している。異なった粒度の原料を任意の位置に装入できるため、粒度別装入は制御の面から非常に有効な方法であるが、この方法では再篩と別装入のために新たな設備が必要であり、莫大な投資が必要であった。

従来の篩い方法でスクリーンを縮小し、高炉への原料装入時に粒径分布を制御すれば、粒度別装入と同様のガス分布が得られるはずであるが、積極的に細粒原料を使用するという観点から、粒度偏析を活用する研究はほとんど行われていない。装入物の粒度偏析に関して、ムーバブルアーマー（以下アーマーと称す）、バル開度、バル開速度による制御が知られている^{6)~8)}。しかし、CCOO 装入のようなバッチ装入では、アーマーノッチの変更で周辺部の粒度偏析状態の微調整が可能であるとの報告もある⁹⁾¹⁰⁾。

本論文では、2次元数式モデル¹¹⁾で焼結鉱の粒径分布の通気性と炉内温度分布に及ぼす影響を評価した。その結果をもとに、加古川製鉄所第 2 高炉（内容積 3850 m³）で、アーマー使用によって粒径分布を制御し、3~5 mm

平成 3 年 11 月 18 日受付 平成 4 年 4 月 10 日受理 (Received on Nov. 18, 1991 ; Accepted on Apr. 10, 1992)

* (株)神戸製鋼所加古川製鉄所 (Kakogawa Works, Kobe Steel Ltd., 1 Kanazawa-cho Kakogawa 675-01)

*² (株)神戸製鋼所加古川製鉄所 (現:(株)神戸製鋼所生産技術部)(Kakogawa Works, Now Technology Administration Department, Kobe Steel Ltd.)

の細粒焼結鉱の使用の可能性を検討したものである。

高炉の装入物の粒度偏析は、模型実験、あるいは計算モデルによる推定値があるものの、高炉内からのサンプリングによる実測値はなかった。今回、高炉内からの装入物サンプリング装置を開発し、粒度分布を実際に確認することができた。

2. 細粒焼結鉱の性状

Fig. 1 に焼結鉱粒度と JIS 還元率および粒度以外の RDI 試験に準拠した還元粉化試験との関係を示すが、細粒焼結鉱は通常の焼結鉱に比べて、比表面積が大きいので還元性が良くなっている。

高炉で使用する焼成鉱の性状評価には荷重還元テストが用いられている。Fig. 2 は焼結鉱粒度 5~8 mm, 12~16 mm, 21~25 mm の荷重還元率と圧力損失を示したものである。粒度が低下するにしたがって、還元率が上昇し、溶け落ち時の圧力損失が小さくなる。

このように焼結鉱は粒度が小さいほど還元性が向上する。

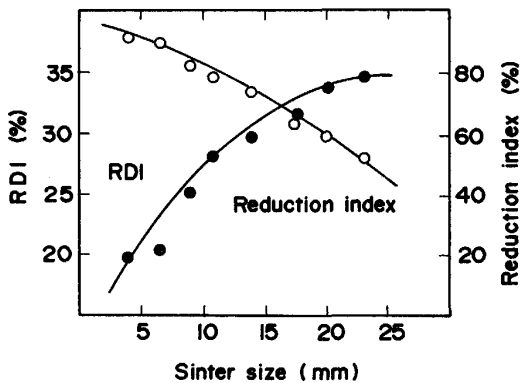


Fig. 1. Relation between sinter size and sinter quality.

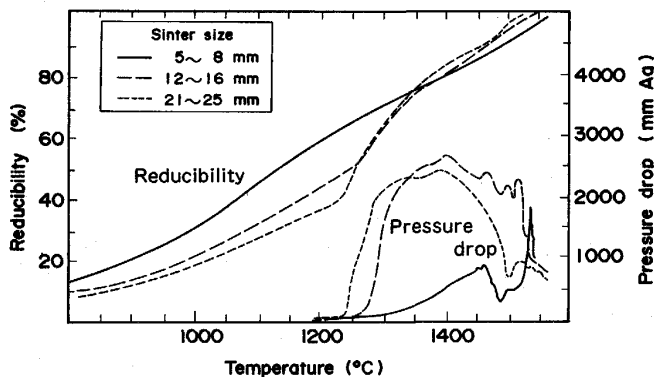


Fig. 2. Behavior on sinter reducibility with melt-down test.

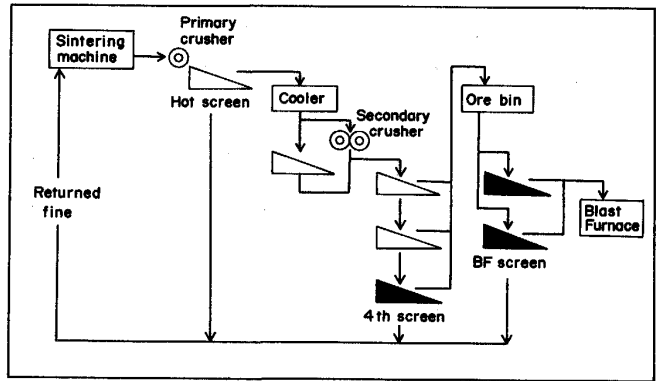


Fig. 3. Flow sheet of sintering plant.

3. 細粒焼結鉱の回収方法と使用方法

3.1 細粒焼結鉱の回収方法

加古川製鉄所の焼結鉱フローを Fig. 3 に示す。-5 mm の篩下焼結鉱（以下、細粒焼結鉱と称す）の使用方法として

- (1) 細粒焼結鉱を回収して別装入する。
- (2) 焼結工場最終スクリーンと高炉庫下スクリーンの網目を縮小して装入する。

が考えられる。

(1)の方法では、焼結工場最終スクリーンで発生する細粒焼結鉱と高炉庫下スクリーンで発生する細粒焼結鉱を 3 mm の別スクリーンで篩い、それを通常焼結鉱 (+5 mm) と別に装入する。装入方法は通常焼結鉱を装入した後、周辺部に細粒焼結鉱が堆積するように装入する。この方法では、細粒焼結鉱の回収設備が必要であり、また装入 1 チャージ当たり、細粒焼結鉱の装入が 1 回増加するため、生産能力に制約を受ける。

投資を伴わず、生産量にも影響を与えず、最大のコスト効果を得る観点から、(2)の焼結工場最終スクリーンと高炉庫下スクリーンの網目縮小を検討した。

3.2 細粒焼結鉱の高炉での使用方法

細粒焼結鉱を使用した場合、想定される炉内現象を Fig. 4 に示す。特に、以下の点に主眼を置いて細粒焼結鉱の使用を検討した。

- (1) 焼結鉱の粒径縮小に起因する炉内圧力損失の上昇を抑制する。
- (2) 鉱石の傾斜角度低下に伴うガス分布の周辺流化を抑制する。
- (3) 炉壁近傍に細粒焼結鉱が堆積することによって生ずる不活性帯の生成を防止する。

Fig. 5 に 2 次元ガス流れモデルによる炉内温度分布と圧力損失のシミュレーション結果を示す。Case 2 は

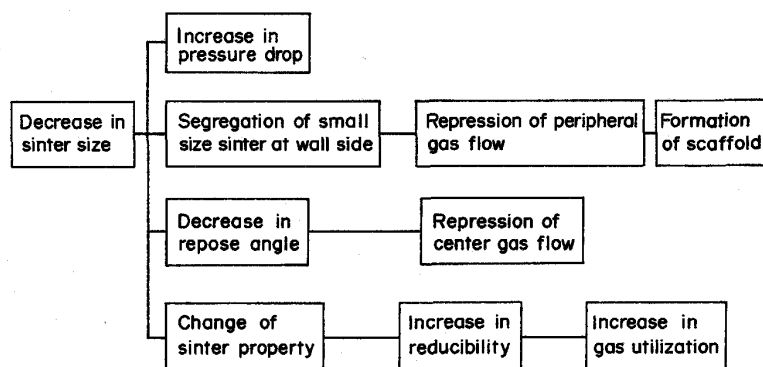


Fig. 4. Prediction of phenomena in using small size sinter.

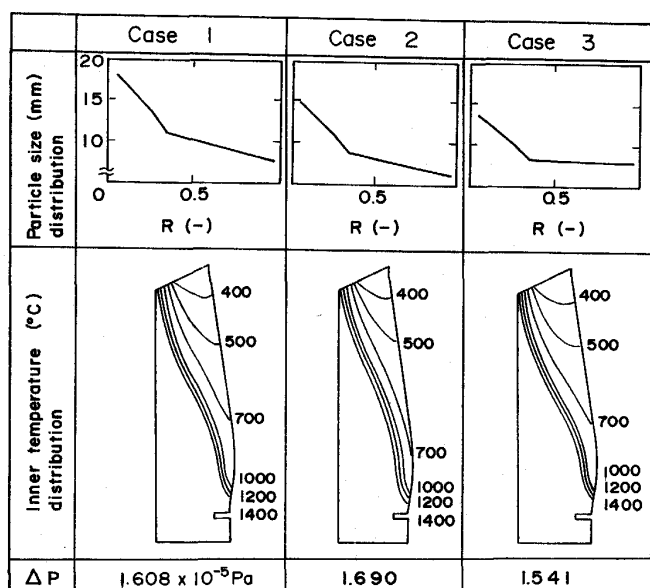


Fig. 5. Effect of particle size distribution on inner temperature distribution, pressure drop (simulation by gas flow model).

Case 1 の粒径分布を小粒径側に平行移動した場合の計算結果である。Case 1 は焼結鉱の平均粒径 11.2 mm の場合で、炉内の圧力損失は $1.608 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ であるが、平均粒径を 9.2 mm に縮小した Case 2 では、Case 1 に比べ、周辺部の粒径が低下するため、圧力損失が増大し、周辺ガス流が抑制されると同時に炉内温度分布が下方に移行する。その結果、炉内圧力損失は $1.690 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ に上昇する。

一方、平均粒径 9.2 mm で周辺から中間部にかけて粒度分布を均一にした Case 3 では、平均粒径が低下したにもかかわらず、700°C~1000°C の温度幅は Case 1 とほぼ同一になり、炉内の圧力損失は $1.541 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ に低下する。周辺ガス流が Case 2 に比較して増加した結果である。

このシミュレーション結果は、焼結鉱の網目を縮小して細粒焼結鉱を装入しても、周辺部から中間部における

焼結鉱の粒度分布を平均化するように制御することによって、炉内温度分布を変えず、通気性を低下させずに操業できる可能性を示している。

焼結鉱の粒度別装入を行わずに、Case 2 の粒度分布を Case 3 に変えるため、粒度偏析の利用を検討した。粒径分布のある粒子群を堆積させた場合、パーコレーションによって粒度偏析が起こると言われている¹²⁾。粒度偏析は装入物の供給速度、落下速度、粒度範囲、滑り距離等によって変化し、粒子の供給位置に細粒が、滑り距離が伸びるほど粗粒が偏析する。

高炉装入物ではコークスと焼結鉱が粒径分布をもっている。それぞれベルから落下し、堆積する時に粒度偏析を起こしている。粒度範囲一定の場合、ベルの開ストロークで供給速度が制御でき、ベルの開スピードで落下速度が制御でき、粒度分布が制御できる⁶⁾。しかし、いずれの場合も供給位置(周辺部)に細粒が、中心部に粗粒が偏析し、偏析の程度が変化しただけである。

アーマーを使用した場合、供給位置と滑り長さを制御できるため、ベルの開ストローク、ベルの開スピードに比べて粒径分布制御の自由度が大幅に増える。以上の理由によってアーマーによる粒径分布制御が細粒焼結鉱使用に効果的であると考え、アーマーの使用方法を検討することにした。

コークス、焼結鉱の粒度偏析に関して数多くの研究と解説がなされている⁹⁾¹⁰⁾¹³⁾。これらの研究成果の概念を用いると、鉱石の装入を OⅠ、OⅡ の 2 分割にする装入方法において、OⅠ と OⅡ のアーマー使用方法を変えることによって、粒径分布の制御が可能であると考えられる。Fig. 6 に粒径分布制御の考え方を示した。OⅠ でアーマーを押し出し、M 型分布を形成させる。鉱石の落下地点である M の頂点に細粒が偏析し、炉壁部と中心部に粗粒が偏析する。次に装入する OⅡ ではアーマーを炉壁側に設定し、V 型分布を形成させる。鉱石落下位置は炉壁部になり、炉壁部に細粒が、中心部に

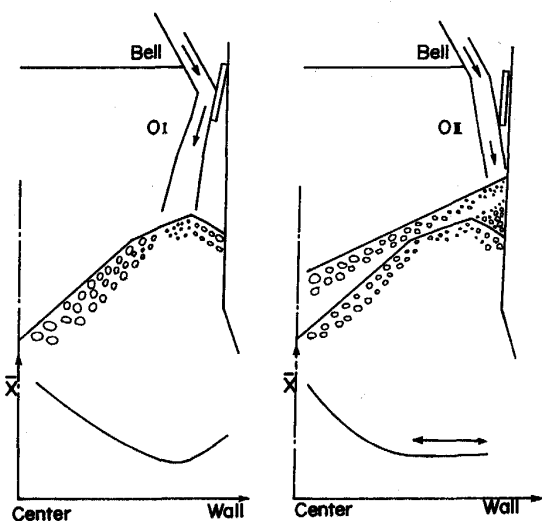
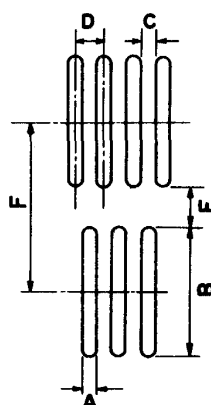


Fig. 6. Concept figure of size segregation control using movable armor.



A	B	C	D	E	F	Thickness	Open space ratio
3.0	20	4.5	7.5	6.5	26.5	4.5	21.8 %

(mm)

Fig. 8. Dimension of sinter ore screen.

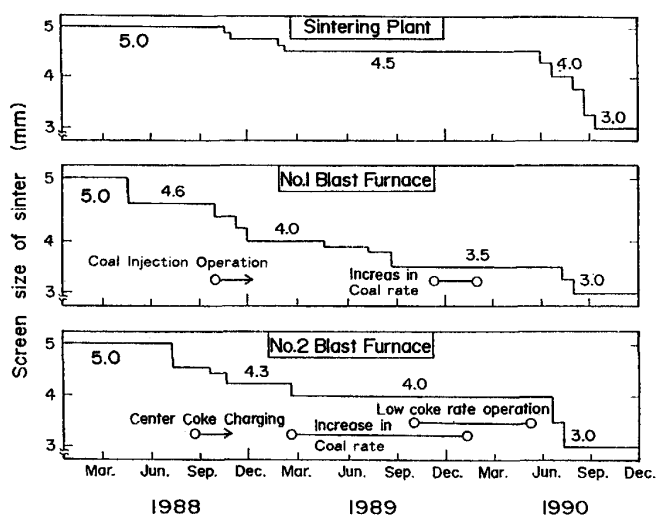


Fig. 7. Change of decrease in sinter screen size.

粗粒が偏析する。その結果、O I と O II の鉱石全体の粒径分布は、中間部から周辺部にかけて平均化されることになる。

4. 細粒焼結鉱を使用した高炉操業

4.1 焼結鉱スクリーンの網目縮小

Fig. 7 に焼結工場最終スクリーンと高炉庫下スクリーンの網目の縮小経緯を示す。'88年5月から順次縮小し、'90年9月には全スクリーンを3.0 mm に縮小した。特に、'90年6月以降、O I でアーマーを使用開始し、網目を大幅に縮小することができた。スクリーンは打ち抜き網で、Fig. 8 に3.0 mm のスクリーン形状を示す。開孔率は21.8%である。

焼結工場最終スクリーンと高炉庫下スクリーンの網目

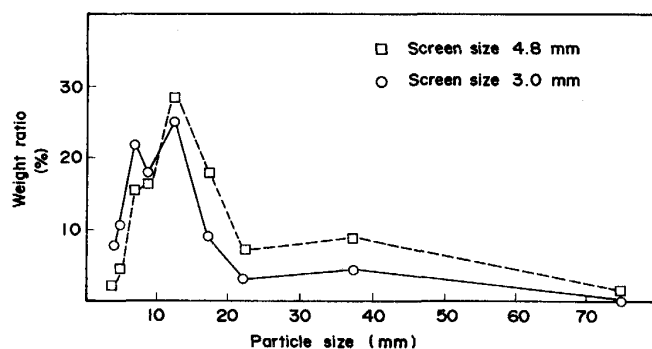


Fig. 9. Particle size distribution of sinter ore after blast furnace screen.

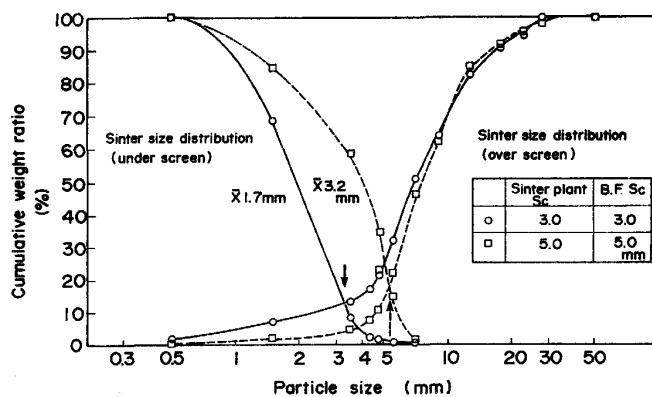


Fig. 10. Cumulative size distribution of sinter ore after blast furnace screen.

をそれぞれ5.0 mm から3.0 mm に縮小したときの高炉庫下スクリーン後の焼結鉱粒径の分布を Fig. 9, Fig. 10 に示す。高炉へ装入される焼結鉱(篩上)の平均粒径が11.2 mm から10.3 mm に、篩下の平均粒径が3.2

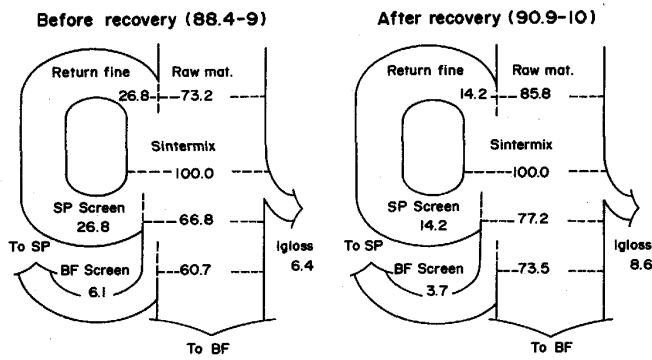


Fig. 11. Comparison of material balance in sintering plant before and after recovery of small-sized sinter.

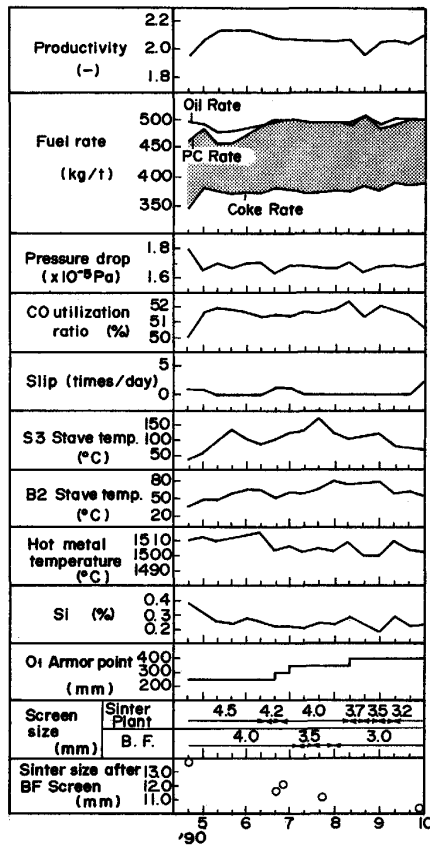


Fig. 12. Operation results of Kakogawa No. 2 Blast Furnace.

mm から 1.7 mm に縮小した。その結果、焼結工場の高炉使用までも含めた総合歩留まりは 61% から 74% まで向上した。スクリーン縮小前後の焼結工場の物質収支を Fig. 11 に示す。

4.2 高炉操業結果

Fig. 12 に加古川製鉄所第 2 高炉の操業推移を示した。原料配合率は焼結鉱 43%、ペレット 39% である。細粒焼結鉱使用前の原料装入は C I₁₅₀・C II₆₀₀・O I₂₅₀・

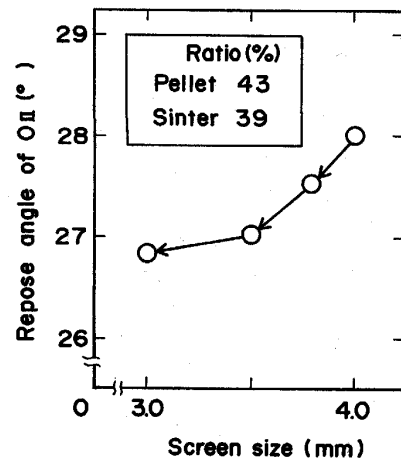


Fig. 13. Effect of screen size on repose angle of OII.

O II₁₅₀ の 4 バッチ 1 サイクルであり、コークス中心装入も併用している。C I₁₅₀ は C II でアーマーを 150 mm 押し出していることを意味している。C II でアーマーを 600 mm 押し出し、周辺部の O/C を高くし、シャープな中心流を狙った操業を行っている。さらに O I でアーマーを 250 mm 押し出し、C II でできたコークスのピークを O I で削り取り、コークスを中心に流れ込ませている。

焼結鉱スクリーンの網目縮小とともに S-3 (シャフト中部)、B-2 (炉腹) のステーブ鑄物温度上昇が認められたが、O I のアーマー押し出しを 400 mm に強めた結果、ステーブ鑄物温度は網目縮小以前のレベルに戻った。また、通気、装入物の降下状態も順調で、出鉄比 2.0 以上を継続した。この間は、微粉炭比を 120~125 kg/t 吹き込んでいるにもかかわらず、[Si] は 0.20%~0.30% で推移した。

Fig. 13 に焼結鉱スクリーン網目と O II の傾斜角度の関係を示す。焼結鉱の粒径縮小にもない、装入物表面上の鉱石傾斜角度が低下した。鉱石傾斜角度の低下にもかかわらず安定した中心流が得られたが、これはコークス中心装入と C II および O I におけるアーマー使用によって周辺部の O/C を大きく、中心部の O/C を小さくできた結果と考える。

Fig. 14 に網目変更前後の垂直水平ゾンデによる炉内温度分布実測結果を示した。焼結鉱粒径分布制御の結果、1200°C 等温線から推定される軟化融着帯形状は、いずれも逆 V 型を示し、根位置も網目変更前後で変化なく、ほぼ同一レベルで制御できた。また、Fig. 15 に網目と CO ガス利用率、炉内圧力損失、炉口中心のガス温度、B-2 (炉腹) ステーブ鑄物温度との関係を示したが、装

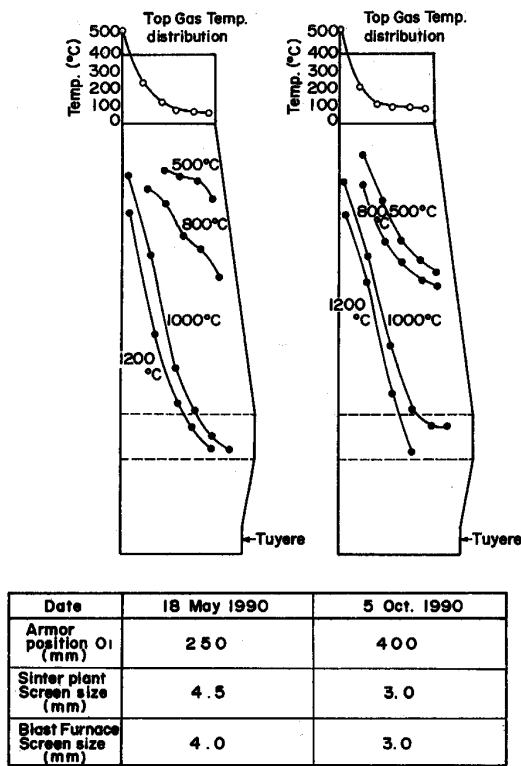


Fig. 14. Change of inner temperature distribution.

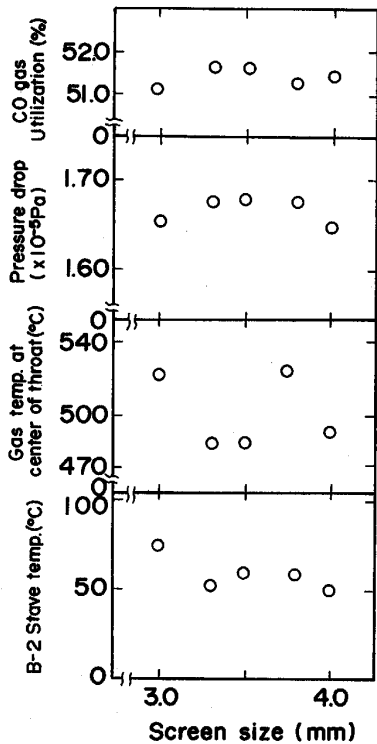


Fig. 15. Effect of screen size on pressure drop, gas temp. at center of throat, B-2 stave temp. and CO gas utilization.

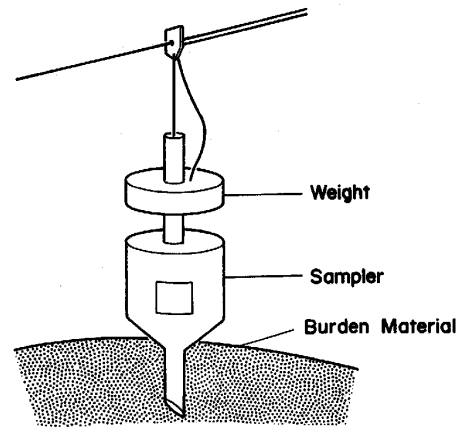


Fig. 16. Schematic diagram of sampling instrument.

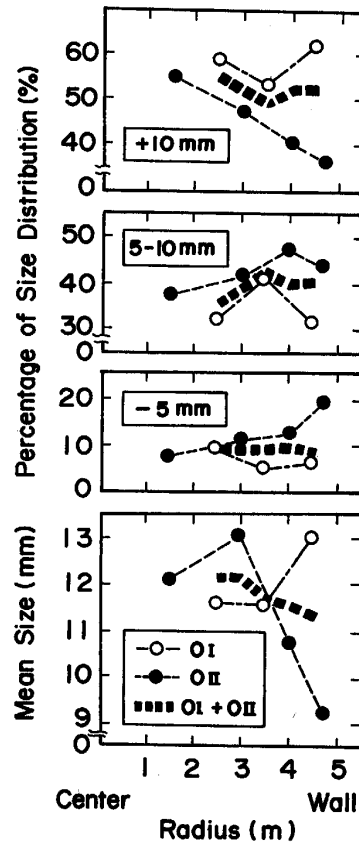


Fig. 17. Radius distribution of sinter size at surface of burden material.

入原料の粒径低下があったにもかかわらず、ガス流れはほとんど変化していない。

Fig. 14 の炉内温度分布実測結果と Fig. 15 の操業結果は Fig. 4 のシミュレーションとよく一致しており、粒径分布制御の有効性を確認した。

粒径分布制御を利用した細粒焼結鉱使用においては、実際の粒径分布を調査する必要がある。Fig. 16 にサンプリング装置の概要を示した¹⁴⁾。高炉の休風時に炉外

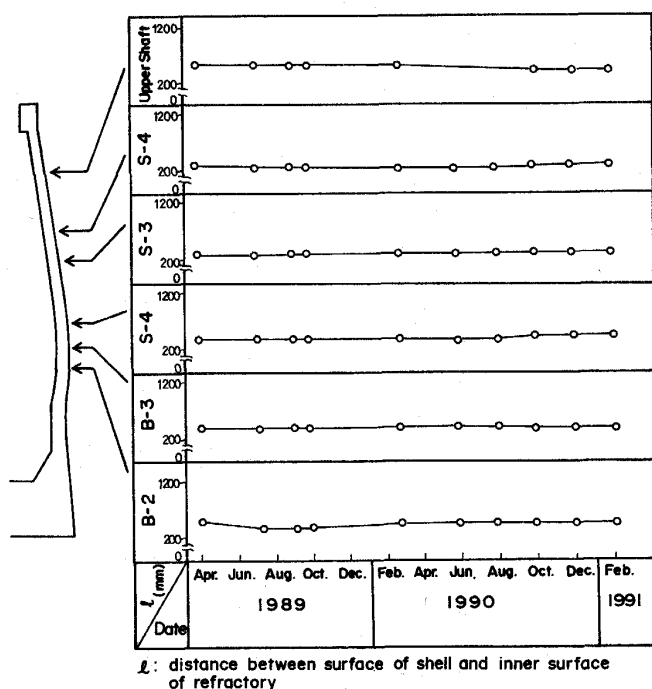


Fig. 18. Trend of wall thickness.

からサンプラーを炉内に挿入し、ワイヤーリングで所定位置に設置する。ワイヤーリングでウェイトを上下させ、サンプラーを装入物内に打ち込み、サンプリング口から装入物を採取するものである。Fig. 17 に炉内装入物表面上、半径方向の焼結鉱の粒度分布を示した。OⅠ装入時には、アーマー押し出しによって炉壁部に粗粒焼結鉱が堆積し、アーマーを炉外側に設置した OⅡ 装入では炉壁部に粗粒焼結鉱が堆積することを確認した。その結果、鉱石全体では OⅠ、OⅡ の組み合わせによって、中間部から炉壁部にかけての焼結鉱の粒径が平均化されており、アーマーを使った粒径分布制御の仮説の妥当性を検証した。

細粒焼結鉱を使用した場合、炉壁に不活性帯の形成が懸念されると言われているが¹⁵⁾、休風時のコアボーリングによる付着物測定の結果、Fig. 18 に示すように炉体プロフィールに変化なく、付着物の生成は全く認められなかった。

5. 結 言

細粒焼結鉱の高炉使用を検討し、高炉庫下スクリーンを 5.0 mm から 3.0 mm に縮小して加古川製鉄所第 2 高炉で細粒焼結鉱を使用した結果、以下の結論を得た。

(1) 粒径分布を制御手段として利用すれば、高炉炉内

の圧力損失を増加させることなく細粒焼結鉱が使用できる。

(2) 粒径分布制御手段としてアーマーが有効である。鉱石装入を OⅠ、OⅡ に 2 分割し、OⅠでアーマーを押し出し、OⅡで炉壁部にアーマーを設定することによって中間部から周辺部にかけて、粒径分布が平均化される。

(3) 加古川製鉄所第 2 高炉においてアーマーを制御手段として細粒焼結鉱を使用した結果、事前シミュレーションと同一の結果が得られた。

(4) 焼結鉱の高炉への装入平均粒径が 11.2 mm から 10.3 mm に低下したにもかかわらず、出鉄比は 2.0 以上を維持し、微粉炭比も 120 kg/t 以上であった。

(5) 焼結工場の歩留まりは 61% から 74% に向上した。

加古川製鉄所では以上の結果から、焼結鉱のスクリーン網目を 3.0 mm に変更し、全高炉で細粒焼結鉱を使用している。しかし、3.0 mm が高炉で使用可能な最小粒径であるとの確認は行っていない。今後さらに焼結鉱スクリーンの網目縮小を行い、焼結鉱歩留まりの向上に努めたい。

文 献

- 1) 古賀 強, 井上慶次郎, 野見山寛: 鉄と鋼, **49** (1963), p. 1300
- 2) 鈴木曉一: 第 33・34 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1975), p. 7
- 3) 奥野嘉雄, 入田俊幸, 磯山 正, 今井 徹, 原 義明, 須沢昭和: 鉄と鋼, **69** (1983), p. 1578
- 4) 小幡晃志, 駒村 聖, 中村 勝, 夏見敏彦, 片山忠雄, 皆川俊則: 材料とプロセス, **1** (1988), p. 1063
- 5) 加藤友則, 岸本純幸, 山口 篤, 沢田輝俊, 根本健一, 利光亮一: 材料とプロセス, **1** (1988), p. 110
- 6) 稲垣憲利, 馬場政光, 浅井謙一, 日下部信夫, 末広武臣: 鉄と鋼, **69** (1983), S56
- 7) T. Haru, M. Saino, M. Yasuno, K. Okumura, K. Kaneko, Y. Konisi and T. Sawada: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., **24** (1984), p. 482
- 8) 芹沢保文, 田中和精, 沢田寿郎, 福武 剛, 田口整司, 小西行雄: 鉄と鋼, **71** (1985), A13
- 9) 桜井昭二: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 2319
- 10) 下村泰人, 須賀田正泰: 高炉内現象とその解析—高炉反応部会中間報告— (1979), p. 60 [日本鉄鋼協会]
- 11) 大塚喜久, 田村繁彦, 小西正躬, 小野玲児, 堀 隆一: 神戸製鋼所技報, **37** (1987), p. 3
- 12) 三輪茂雄: 粉粒体工学 (1972), p. 225 [朝倉書店]
- 13) 山田孝雄, 佐藤政明, 宮崎伸吉, 嶋村 郎, 田口整司: 川鉄技報, **6** (1974), p. 16
- 14) 特許出願中
- 15) 中島龍一, 岸本純幸, 山口 篤, 沢田輝俊, 根本健一, 利光亮一: NKK 技報 No. 126 (1989), p. 9