

ISIJ International, Vol. 31 (1991), No. 5
掲載記事概要

Special Issue on Recent Advances in Blast
Furnace Ironmaking

General Reviews

Recent Progress in Fundamental and Applied Researches
in Blast Furnace Ironmaking in Japan

By J. YAGI

最近、種々の観点から行われた研究により製鉄技術は急速に改善されてきた。すなわち、充填層における固体の流れ、粉体の挙動ならびにガス・粒子間の熱交換に関する基礎的研究は現象の基本的メカニズムを明確にした。これらの研究は炉内状況の正しい推定に寄与し、特に微粉炭の高吹込みに関して貢献した。酸素高炉や SC プロセス等の総合的な研究は製鉄における新プロセス開発の可能性を示した。数学的モデルや AI に関する研究は炉内状況の推定や制御法の信頼性を向上させた。斜行ゾンデの開発は羽口近傍で起こる現象を明らかにした。エクセルギー解析の研究は省エネルギーの方法を示し、エネルギー効率の面から種々の製鉄システムを比較した。

このレビューは上述のような将来の製鉄技術の進歩のため、最近、日本で報告されたすぐれた研究について概説した。

Recent Advances in Blast Furnace Ironmaking in North
America

By W-K. Lu *et al.*

A survey on blast practices in American and Canadian steel companies in 1989 was conducted and aggregate data were reported. Recent developments in raw materials which contribute to improvements in blast furnace ironmaking are reviewed. Five blast furnaces, two large and three medium size, are described in more detail as examples. Comments are made on future developments in ironmaking in North America.

Recent Advances in Blast Furnace Ironmaking in West-
ern Europe

By A. Poos

Prior to 1974, the evolution of the ironmaking sector in Western Europe was strongly marked, on one hand by the rapid growth of steel industry, and on the other hand by the replacement of lean local ores by iron-rich imports from overseas. The former evolution was abruptly stopped by the energy crisis and was followed by a period of contracting production and streamlining of the existing installations.

The few new blast furnaces built replaced a larger number of small obsolete units, and the production was concentrated on the most performing furnaces. New ecological constraints put further pressure on the ironmaking sector. The necessity to reduce or completely suppress tuyere injection of oil also had an adverse effect on furnace productivity and on the smoothness of the operation.

Today, all these difficulties have been overcome and the West European blast furnaces achieve excellent performances. The typical plant has two blast furnaces in the range 8-11 m of hearth diameter, with modern equipment for controlling and monitoring the burden distribution at the top and computerized control rooms. The mean productivity is about 50 t/m²·24 h and the average total fuel rate lies below 500 kg/tHM. Coal injection has seen a rapid expansion over the past 5 years,

and end of 1991 the total installed coal injection capacity will exceed 10 Mio t of coal/annum. High injection rates above 170 kg/tHM have been reached on several blast furnaces, reducing the coke rate below 330 kg/tHM and, in at least one case, even below 300 kg/tHM. Trials presently in progress aim at coal injection rates above 300 kg/tHM.

Recent Advances in Blast Furnace Ironmaking Techno-
logy in Australia

By J. M. BURGESS

This review presents some of the recent advances in ironmaking technology in Australia. The first part of the paper summarises blast furnace operations since 1983 in terms of productivity, fuel rate and hot metal chemistry. It is shown that in the recent past Australian furnaces have been characterised by high productivity and efficiency, and long life between relines. In the second part of the review, the main blast furnace research and development topics are presented. The first of two research streams, which is shorter term in focus, is associated with the development and implementation of computer models and associated sensors to assist present operations. Some of the developments which are reviewed in this field include burden distribution studies, models of the momentum, heat and mass transfer processes occurring in the furnace, optoelectronic and other sensor developments, and studies associated with hearth liquid drainage. The second stream, which addresses longer term strategies, is associated with studies on future blast furnace operations. In this stream, research work on the combustibility of pulverised coals in the blast furnace environment is described. The results shown indicate that Australian research has made a substantial contribution to the fund of knowledge in blast furnace ironmaking, and that the studies undertaken are of considerable benefit to Australian operations.

Fundamentals

Transport Rate of Gaseous Phosphorus into Solid Iron
under Reducing Atmosphere

By M. SASABE *et al.*

高炉中で還元鉄にりんが移行する機構を検討するための基礎データを得ることを目的に、ガス状のりんが還元雰囲気下で固体鉄に移行する速度を重量法で測定した。

圧延したキルド鋼薄板と未加工の電解鉄薄板を試料とした。りんの分圧は、 P_{P_2} 、 $Ca_3(PO_4)_2$ 、 SiO_2 、 C 、 $CaSiO_3$ 、 CO の間の平衡関係を利用して制御した。りん分圧は 4×10^{-6} から 4×10^{-4} atm で一桁おきに、温度は 900 から 1050°C の間で 50°C おきに変えた。

実験結果は以下のとおりである。

(1) 移行速度は放物線則に従う。

(2) 放物線則の反応速度定数 k 、りんの分圧 P_{P_2} 、温度 T との関係は以下のとおりである。

キルド鋼の場合には

$$\log k = 0.14 \log P_{P_2} + 5.68 - 15.6 \times 10^3/T$$

電解鉄の場合には

$$\log k = 0.14 \log P_{P_2} + 4.94 - 15.6 \times 10^3/T$$

(3) 固体鉄表面の反応生成物は Fe_2P である。

Re-examination of Method of Kinetic Analysis on the
Rate of Stepwise Reduction of a Single Sinter Particle
with CO-CO₂-N₂ Gas Mixture

By T. USUI *et al.*

実機焼結鉄の初期段階における還元挙動を調べる目的で以下の研究が行われた：未還元焼結鉄の EPMA による定量分析が行われ、ヘマタイト、カルシウムフェライト (CF)、

マグネタイトおよびスラグの含有量が評価された。未還元焼結鉄と 1133 K においてマグネタイト段階まで還元された焼結鉄の EPMA による表面分析の結果から、CF は還元されるとマグネタイトとスラグに分かれるものと考えられる。マグネタイト段階への還元途中の焼結鉄物相が、上記含有量を用いて X 線内部標準法により定量分析され、還元に伴うヘマタイト、CF およびマグネタイトの量的変化が明らかにされた。CF は 1033 K と 1133 K ではマグネタイトに還元されていたが、933 K と 983 K では還元されていなかった。マグネタイト段階まで還元された試料の顕微鏡組織からも、CF は 1033 K では還元されていたが、983 K では還元されていなかった。所定の温度で、ヘマタイトからマグネタイトへの還元段階の到達還元率 F_f を求めた後、1173 K まで昇温して最終還元率 F_f' を測定した。約 1003 K より低い温度では CF は還元されず、この段階の被還元酸素がヘマタイトおよび CF に由来すると仮定した場合、 $F_f = 0.7$ となった。 F_f/F_f' の値が温度の関数として与えられている。

Pressure Loss and Hold-up Powders for Gas-Powder Two Phase Flow in Packed Beds

By K. SHIBATA *et al.*

高炉充填層内での粉体の挙動を定量的に評価するため、冷間模型実験および理論的検討により充填層内ガス-粉体二相流れの一次元流動特性を検討した。その結果以下の結論が得られた。

- (1) 固気二相流の圧力損失は、清浄ガスに比べ大きくなる。圧力損失増加の主要因は、高ガス流速域では粉体と充填粒子の相互作用力、また低ガス流速域では粉体を重力に逆らって上方へ送るための仕事である。
- (2) 充填層内における粉体とガスとの相互作用力は、ドラッグ力と Richardson-Zaki の空間率関数によって表現可能である。
- (3) 粉体の運動抵抗係数（付加圧力損失係数）は、 F_r 数により整理することができる。
- (4) 閉塞現象は充填層内の粉滞留量が増加し、粉体と充填粒子で形成される充填層の水力学等価直径が、粉径の 6 倍以下になったときに生じる。

Kinetic Analysis of Coke Gasification Based on Non-crystal/Crystal Ratio of Carbon

By Y. KASHIWAYA *et al.*

製鉄用コークスのガス化実験を 1000, 1200, 1400°C において、Ar-CO-CO₂ 混合ガスで行った。高炉中におけるコークスの反応は、1000°C から顕著になるが、同時にこの温度から、コークス中グラファイト結晶（結晶子）の成長も起こり始める。炭素材料の反応性は、その黒鉛化度とともに低下し、逆に無定形炭素に近づくほど活性となる。本研究では、コークス中炭素の結晶形態を X 線回折によって、X 線回折に寄与する結晶子、Background の強度のみに寄与する無定形炭素に大別した。それぞれ反応性の異なる二種類の炭素が同時に反応し、また反応温度で両者の存在割合が大きく異なるとしたモデルをたて速度解析を行った。

X 線回折の結果、(1) L_c は雰囲気の影響を受けず、また反応の有無にかかわらず温度の関数として成長する。(2) L_a は、Ar 雰囲気中では温度の関数として増加するが、ガス化実験後には小さくなる。ガス化反応は優先的に L_a のみを小さくする機構で進行するものとして反応機構が考察された。

ガス化実験の結果、(3) コークスの CO₂ によるガス化において、ガス化速度は CO₂ 濃度に比例せず、それが高濃度に存在する場合はかえって阻害効果がある。(4) CO には反応抑制効果が認められ、低濃度ほど明確に現れる。しかし、その効果は高温になるほど小さくなる。(5) コークス中の二種類の反応性の異なる炭素を想定し、速度解析を行い、それぞれの炭素に対する速度定数を求めた。

Cokemaking Process

Preheating Techniques to Manufacture Metallurgical Coke

By M. A. DIEZ *et al.*

Recently, reserves of good coking coals have become less available and comparatively more expensive. Resources are being extended by the use of coal blends with different coking properties and/or selectives. Coal preheating technology emerged as a technique to overcome some of these problems. It has several advantages including: increases in coke oven productivity, improvements in quality of metallurgical coke, greater uniformity of charge, less air pollution by using a closed charging system, levelling of the charge, a saving in energy because dry coal is more efficient in the preheater than in a coke oven and the possibility of using poorer and cheaper coking coals. The disadvantages of the technique are the handling of fine and hot coal, the carry-over and the preheater fines.

Currently, the preheating process is being re-considered in combination with dry-cooling of coke in a European Research Project called "Jumbo Coking Reactor", which is based on past and current experience of development of modern cokemaking technology.

This study reviews preheating technology as a means to widen the range of coking coals including not only the high-volatile coals which are more abundant, but also semi-anthracite and petroleum coke. A 6t Experimental Coke Oven and a 2t/h Preheating Pilot Plant (Precarbon Process) were used.

Analysis of Steam Flow in Coke Oven Chamber by Test Coke Ovens and a Two-dimensional Mathematical Model

By K. MIURA *et al.*

炭化室内の乾留偏差に及ぼす水蒸気流れの影響について実験および二次元数式モデルにより検討した。

250 kg 試験炉での湿度と乾燥炭での乾留状況の比較より、湿炭装入では局所的な乾留遅れが不特定の位置に多数存在するものの、乾燥炭装入では乾留が均一化し、水分の乾留偏差に及ぼす影響が大きいことを確認した。

乾留中に発生する水蒸気と熱分解ガスの流れ挙動とその伝熱へ及ぼす影響を論理立てて解析できる二次元数式ガス流れモデルを開発した。本モデルはガスと固体相における物質収支式と対流項を含むエネルギー収支式およびガス流れの運動方程式より構成されており、上面加熱炉での温度変化、ガス圧力変化および水蒸気流れ挙動を大略予測できることを確認した。数式モデル計算より、コークスキ裂の進展と局所的な装入密度偏差が水蒸気の流れ挙動に影響を及ぼし、局所的な乾留遅れ現象の原因になることを確認した。

Agglomeration

Fundamental Mechanisms of Pore Formation in Iron Ore Sinter and Pellets

By Y. H. YANG *et al.*

The fundamental pore formation mechanism in iron ore sinter and pellets was investigated, using iron ore/limestone tablets with and without addition of coke. The results showed that pores were formed at the sites of limestone and coke particles, and that the particle size and amount of limestone and coke particle size all had strong effect on the pore structure. Different types of pores in sinter and pellets were classified in terms of their origins. These results are useful in understanding the sintering and pelletizing process.

High Productivity Operation at Chiba No. 4 Sinter Plant
By T. OBATA *et al.*

川崎製鉄(株)千葉製鉄所焼結工場では、従来より安価原料の多配合、低 SiO₂ 焼結鉱の製造等原料コストの削減、新型点火装置の開発、排熱回収設備の導入、焼成管理のシステム化等による焼成エネルギー、製造コストの低減に努力してきた。

円高不況の際の設備集約に伴う第 3 焼結工場の休止(1987 年 7 月)以降、増産基調に対応するため、第 4 焼結工場では以下の点に配慮し、焼結鉱の製造コストの上昇を防止し、高生産率操業を達成した。

- 1) 焼結層内の通気性の確保と安定化による高層厚操業の維持
- 2) 焼結鉱の歩留り向上による生産性の上昇とコストアップの防止
- 3) 高生産率操業下での低 SiO₂ 操業の維持

これらの方針に基づき、おのおの対策を実施した。その結果、品質を悪化させることなく、バインダ無添加下での高生産率操業(生産率 1.8 t/hm²)を可能にした。

さらに焼結製造コストについてもコストミニウム点が高生産側へ移行するという好結果をもたらした。

Blast Furnace Process

Blast Furnace Operation for Low Silicon Content at Fukuyama No. 5 Blast Furnace
By Y. NIWA *et al.*

福山第 5 高炉では、1988 年 1 月より 1989 年 4 月に至るまで、16 か月間 0.10% 台の低 Si 操業を継続することができた(1988 年平均 0.17%)。これは、出鉄滓作業管理の強化、装入物分布制御の改善を行うことにより、炉床部およびシャフト部のヒートロスを抑制し、羽口先温度もしくはコークス比を低下させて達成したものである。羽口先温度を低下した場合、SiO ガス発生反応が抑制され、コークス比を低下した場合、融着帯レベルが低下して Si 移行反応が抑制され、出鉄 Si 濃度が低下した。また、シャフト上部に設置した各種センサーに管理基準値を設け、基準値からはずれた場合随時ムーブブル・アーマのノッチを変更するという、きめ細かな装入物分布制御を実施することにより、炉芯、炉壁部の不活性化を防ぎ、低 Si 操業の長期安定化が図られた。さらに、炉熱制御に AI を導入し、炉熱変動を抑え、安定操業のベースとした。

Investigation on Behavior of Unburnt Pulverized Coal in Blast Furnace
By Y. IWANAGA *et al.*

高炉羽口に PC を吹き込んだ場合の燃焼反応および発生した未燃焼 PC の炉内反応におよぼす影響について主として基礎実験により調査し、以下の点が明らかとなった。

(1) 未燃焼 PC のガス化反応速度は、コークスのそれに比べて約 7 倍程度大きい。また、H₂ の存在により反応は促進され、CO の存在により抑制される。

(2) 未燃焼 PC のガス化優先消費により塊コークスの反応率が低下し、レースウェイ部の劣化は抑制される可能性がある。

このように完全燃焼せずに炉内に入った PC は、有効に消費されることが明らかとなった。

Gasification Rate Analysis of Unburnt Pulverized Coal in Blast Furnace
By Y. IWANAGA *et al.*

PC の高炉内挙動解明の一環として、高炉羽口に PC を吹き込んだ場合の燃焼反応および発生した未燃焼 PC の炉内反応におよぼす影響について基礎実験により調査した。主な結果は以下のとおりである。

(1) 羽口から吹き込まれた PC は主としてレースウェイ内で急速に燃焼が進行する。

(2) 未燃焼 PC は軟化融着した鉱石層に付着しやすい。

(3) また、付着した未燃焼 PC は、FeO の直接還元消費されて鉱石の高温性状を改善する効果がある。

このように完全燃焼せずに炉内に入った PC は、有効に消費される。

Influence of Ore/Coke Distribution on Descending and Melting Behavior of Burdens in Blast Furnace
By M. ICHIDA *et al.*

高炉内の物理現象とできるだけ相似の条件を設定した高炉三次元半裁の温間模型を用いて、装入物の降下と溶融の挙動に及ぼす Ore/Coke 分布の影響を解析した。装入物の降下速度やガス流れに及ぼす Ore/Coke の影響は大きく、朝顔部での周辺部の熱流比の +0.1 の増加に伴い、レースウェイ内傍の温度および朝顔部の炉壁温度は、いずれも約 5°C (Stanton 数基準の実炉換算値約 80°C) 低下することを推定した。戸畑第 1 高炉において、周辺部の Ore/Coke の増加に伴い周辺部の降下速度が増加すること、および周辺部の Ore/Coke や降下速度が炉下部温度を低下させる主要因のひとつであることを検証した。オールコークス操業では、炉下部の炉壁温度が低下しやすいので、鉱石内振りにより炉壁近傍の Ore/Coke を減少することが望ましく、微粉炭多量吹込み操業では、炉壁近傍の溶融能力が大きいので、鉱石外振りにより炉壁近傍の Ore/Coke を増加し、中心部の Ore/Coke を減少することが望ましい。

Influence of Inner Wall Profile on Descending and Melting Behavior of Burden in Blast Furnace
By M. ICHIDA *et al.*

高炉内の物理現象とできるだけ相似の条件を設定した高炉三次元半裁の温間模型を用いて、装入物の降下と溶融の挙動に及ぼす炉体内壁面形状の影響を解析した。水平応力が最大になる炉腹部の炉壁に突起物が存在するプロフィールの場合には、突起物直上の炉壁近傍に、突起物の突出し長さの 2-5 倍の厚みの停滞層が形成する。停滞層の厚みは、炉壁突起物の突出し長さの増加および突起物の設置間隔の短縮に伴い増加し、炉壁近傍の Ore/Coke の増加に伴い縮小する。炉芯の高さは、炉壁突起物による炉壁停滞層の形成および中心部の Ore/Coke の増加に伴い低下し、炉芯部の温度が低下する。炉下部の炉壁近傍の停滞層を縮小させるためには、熱流比の許容できる範囲内で炉壁近傍の Ore/Coke を増加することが望ましい。この分布は溶融能力の大きい微粉炭吹込み操業時には、有効な装入物分布である。

会員には「鉄と鋼」あるいは「ISIJ International」のいずれかを毎号無料で配布いたします。「鉄と鋼」と「ISIJ International」の両誌希望の会員には、特別料金 5 000 円の追加で両誌が配布されます。