
製鉄研究 10 年の歩み

Recent Activities in Research of Ironmaking

板谷 宏(Hiroshi Itaya)

要旨：

日本の製鉄技術を概括し、製鉄研究のここ 10 年の活動を紹介した。コークス、焼結、高炉、新製錬それぞれの分野で成果を上げてきた。コークス分野では石炭配合の技術により安価炭の多量使用と押し詰まり防止に貢献し、焼結分野では X 線 CT などの新たな実験手法に基づく焼結反応の基礎研究や新規な原料装入装置の開発によりコストダウンに寄与してきた。一方、高炉分野では新炉頂装入装置、分布制御技術、操業シミュレータを開発し、安定操業、安価原料多量使用を実現してきた。新製錬分野ではステンレスダスト処理の STAR 炉を実機化し、電気炉ダスト処理への展開を図っている。

Synopsis：

Recent ironmaking technologies in Japan are briefly reviewed, and R&D activities of ironmaking laboratory in these past ten years are described. The activities are rewarded with cost reduction and stable operation in all areas of cokemaking, sintering, blast furnace and new smelting. In the area of cokemaking, the contributions to usage of a large amount of low cost semi soft coal and the decrease in the trouble of hard push were brought about through coal blending technologies. In the field of sintering, fundamental studies on sinter reaction based on new experimental methods such as X-ray CT and also a newly developed charging apparatus of raw material contributed to cost reduction. On the other hand, in the blast furnace technologies, a new charging system of the furnace top, burden distribution control technology and computer simulation system for blast furnace operation are developed. These developments have realized a stable operation and also the large amount use of low cost burden and fuel. In the area of smelting reduction, a commercial plant of STAR process for stainless steel dust recycling has started its operation and the application of this process to electric arc furnace dust recycling is under development.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

Recent Activities in Research of Ironmaking



板谷 宏
Hiroshi Itaya
技術研究所 製鉄研究
部門長・工博

要旨

日本の製鉄技術を概括し、製鉄研究のここ 10 年の活動を紹介した。コークス、焼結、高炉、新製錬それぞれの分野で成果を上げてきた。コークス分野では石炭配合の技術により安価炭の多量使用と押し詰まり防止に貢献し、焼結分野では X 線 CT などの新たな実験手法に基づく焼結反応の基礎研究や新規な原料装入装置の開発によりコストダウンに寄与してきた。一方、高炉分野では新炉頂装入装置、分布制御技術、操業シミュレータを開発し、安定操業、安価原料多量使用を実現してきた。新製錬分野ではステンレスダスト処理の STAR 炉を実機化し、電気炉ダスト処理への展開を図っている。

Synopsis:

Recent ironmaking technologies in Japan are briefly reviewed, and R&D activities of ironmaking laboratory in these past ten years are described. The activities are rewarded with cost reduction and stable operation in all areas of cokemaking, sintering, blast furnace and new smelting. In the area of cokemaking, the contributions to usage of a large amount of low cost semi soft coal and the decrease in the trouble of hard push were brought about through coal blending technologies. In the field of sintering, fundamental studies on sinter reaction based on new experimental methods such as X-ray CT and also a newly developed charging apparatus of raw material contributed to cost reduction. On the other hand, in the blast furnace technologies, a new charging system of the furnace top, burden distribution control technology and computer simulation system for blast furnace operation are developed. These developments have realized a stable operation and also the large amount use of low cost burden and fuel. In the area of smelting reduction, a commercial plant of STAR process for stainless steel dust recycling has started its operation and the application of this process to electric arc furnace dust recycling is under development.

1 緒 言

経済のグローバル化やバブル経済の崩壊など内外の経済変動の影響を強く受け、日本鉄鋼業は国際競争力維持のため積極的な構造改革を進めてきた。直近ではアジア通貨の下落に端を発した経済不況の影響により一層のリストラチャリングが進められようとしている。このような経済環境と量的な拡大が期待できない環境のもとで製鉄分野では設備集約と生産性向上が図られ、コスト削減を目指した安価原料・燃料の使用技術の開発がすすめられた。また、要員削減と作業環境の改善を目的とした FA 化が進められてきている。本稿では日本の製鉄技術の動向を概括し、製鉄研究部門の活動について述べる。

2 日本の製鉄技術の動向

最近の製鉄技術の動向については藤森の報告¹⁾や「鉄と鋼」特集

記事²⁾に詳述されているので、本章では日本の製鉄技術の動向について簡単に述べる。その特徴は設備集約、労働生産性、安価原料・燃料、老朽設備対応、環境などのキーワードで表される。Fig. 1 に日本の鉄鋼生産量、コークスが、焼結機、高炉の稼働基数の推移を示す。生産量が大きく変化しない中で設備集約による設備生産性向上が図られた様子がよく表れている。構造改革のもう一方の柱は労働生産性の向上であった。このため要員削減が積極的に進められ、その結果 10 年前に比べ製鉄部門の要員は約 27% 程度減少してきている。また、直接的なコスト削減策として安価な原料・燃料の使用技術の開発が積極的に進められ、環境改善にも多くの進歩が見られる。

2.1 コークス

コスト面では安価な低品位炭の多量使用と乾留熱量の低減に、設備面では炉命延長と環境対策に重点をおいた開発が進められた。低品位炭の使用量は直近ではコークス製造用の石炭の 35% を占めるにいたっている。低品位炭の配合はコークス強度を著しく低下させるが、窯内での装入炭嵩密度の増加が強度向上と低品位炭使用量増加に有効なことから乾留熱量低減ばかりでなく嵩密度向上にも効果のある調質炭装入法 (CMC) が急速に普及した。CMC はこの 10 年

* 平成10年11月13日原稿受付

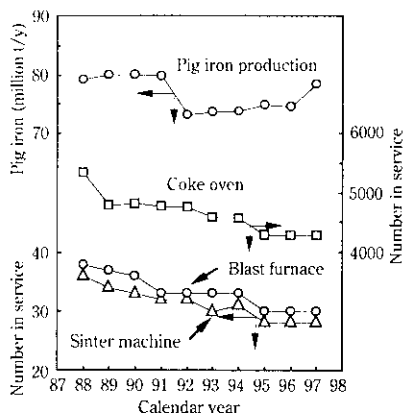


Fig. 1 Change in the number of ironmaking plants and pig iron production

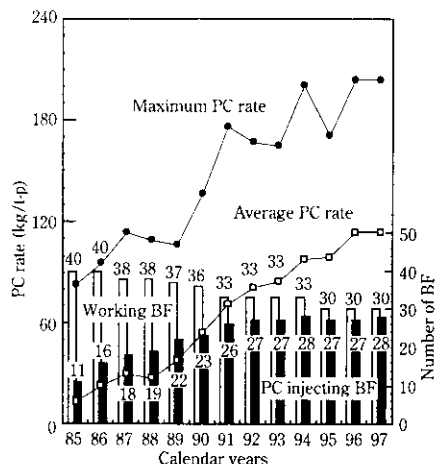


Fig. 2 Trend of PC rate and number of BF's with PC injection

間で 10 基が稼働し、その処理率は 50% 近くに達しており、非微粉炭の多量使用に大きく貢献している。新日本製鐵（株）では水分を約 2% まで低下させ嵩密度向上と低品位炭使用量増大を可能とする微粉塊成炭配合法（DAPS）⁹⁾を開発している。省エネルギー技術として普及した CDQ も亀裂抑制やスタビライズ効果などにより強度向上が図られ低品位炭の増配に寄与している。ソフトウェアの面では石炭の軟化・溶融温度を考慮した流動性予測技術⁹⁾や銘柄の異なる石炭の相互作用を考慮した配合技術⁹⁾も開発され低品位炭の多量使用に活用されている。

乾留熱量低減は原料炭コストとならぶコストダウンの柱である。コークス炉の自動燃焼管理システム⁹⁾は現在では標準装備化され、炉団単位の制御に加え窯ごとの燃焼管理を行うシステム⁹⁾や乾留の初期と末期で熱伝導率や必要熱量が異なることを考慮した乾留過程で供給熱量を調整するプログラムヒーティング⁹⁾なども開発されている。諸技術の開発により乾留熱量は 550 Mcal/t-coal まで低減してきている。

コークス炉の稼働年数は平均でも 27 年以上に達しており、設備的には溶射補修装置は標準装備となってきた。ITV を用いた炉壁診断システム、種々のカーボン除去装置や大規模な熱間積み替え技術も開発され、現在では各社とも 40 年以上の炉寿命を視野に入れている。また、石炭配合に反映するソフトウェアの面でも種々の開発がなされた。炉幅方向の移動現象の解析、ケーキの亀裂生成、膨張と収縮の研究⁹⁾、炉壁にかかる膨張圧やクリアランス推定技術⁹⁾も大きく進歩した。炉内乾留モデルに基づいた膨張・収縮による押し出し抵抗管理⁹⁾も行われ炉体損傷防止に貢献している。また、環境技術としては集塵設備が増強されると同時にシール性に優れた炉蓋、高圧水クリーナー、端フリューバーナー、炉内圧制御システムなどが開発されている。

2.2 焼結分野

コスト削減と将来の資源変化を視野に入れ安価原料の多量使用技術の開発が重点的に進められた。安価原料には高結晶水鉱石と高品位だが微粉のペレットフィードの 2 つがある。前者は焼結原料の 30% 以上を占めるまでになってきており、後者でも 10% 程度を占めている。これらの安価原料の多量使用の問題は通気と歩留まり悪化による生産性低下であり、その対策として粒度偏析と装入嵩密度を制御する原料装入技術と予備造粒などの造粒技術の開発が進められた。焼結ベッドの通気性は原料装入時の充填状態により大きく影響され、シュート方式での粒度偏析形成には限界があること¹⁰⁾から

種々の装入装置が開発された。新日本製鐵（株）が開発した整流分散式装入装置（ISF）¹²⁾は焼結原料を安息角以下に分散して堆積させて雪崩現象を解消することと落下点に沿って連続的にふるい目を変化させて粒度偏析を強化する機能を有している。日本鋼管（株）が開発した湾曲型偏析スリットワイヤ装入装置（SSW）¹³⁾はドラムフィーダーで切り出した原料を下方に向かって間隙を大きくしたスリットワイヤ上に流して粒度偏析を強化し、嵩密度の低下を目指すものである。当社開発の磁気ブレイキ式装入装置（MBF）¹⁴⁾はスローピングシュートの背面に永久磁石を設置し、微粒の方が磁場の影響を受けやすいことを利用して偏析を強化すると同時に磁場の力を利用してシュート上での落下速度を減少させ嵩密度の低下を達成している。これらの装置はいずれも安価鉱石の多量使用に大きく貢献している。

造粒技術では高結晶水鉱石を蛇紋岩、石灰石、炭材で予備造粒し、融液生成温度を上昇させる自己緻密化焼結法¹⁵⁾や融液の流動性を改善するミルスケール添加などが実用化されている。微粉鉱石の多量使用では新塊成鉱プロセス（HPS）¹⁶⁾が大きな成果を上げている。生石灰をバインダーとして 5 mm 以上の造粒物を作りその周囲をコークスで被覆させブドウ状の焼結鉱を製造する方法で高品位微粉鉱石 50～55% の配合下でも高生産率を達成している。

2.3 高炉分野

ここ 10 年間の高炉技術の進歩の大きな特徴は微粉炭吹き込み（PCI）の普及と吹き込み量の増加である。Fig. 2 に PC 吹き込み量、PCI 設置高炉数、稼働高炉数の推移を示す。PCI は炉熱制御ばかりでなく、コークス炉の負荷を下げコークス炉の寿命延長にも有効で購入コークス削減によるコストメリットも大きいことから急速に普及し、1998 年にはすべての稼働高炉に PCI 設備が設置された。この間、吹き込み量増大のための装入物分布制御技術¹⁷⁾やバーナー開発¹⁸⁾が行われた。微粉炭の吹き込み量はコークス購入の有無、下工程でのエネルギー需給などのローカルコンディションにより最適吹き込み量は異なるが、1997 年には全国平均で 114 kg/t に達し、1998 年には 254 kg/t、266 kg/t の最高月間吹き込み記録が相次いで達成されている。また、装入物分布制御にも進歩が見られる。高炉装入システムは制御性と分布制御の自由度の大きさからベルからベルレス方式への転換が進み 30 基中 17 基がベルレス方式である。炉頂バンカーに関しては円周方向均一性に特徴のある垂直 2 段型と多様な原料の多パッチ装入に有利な 3 パラレルバンカーが新たに実機化された¹⁹⁾。特に後者は分布制御技術とあわせて細粒原料の多量使

用に効果を発揮している。

一方、高炉寿命でも大きな進歩があった。従来、大型高炉の寿命は 10 年程度であったが最近では平均でも 12 年を越え、当社千葉製鉄所第 6 高炉は 20 年 9 ヶ月の長寿命を達成した。寿命延長には炉体冷却装置や、炉底レンガ材質、レンガ積みなどのハード面での技術とともに稼働後の分布制御や熱負荷制御も大きな役割を果たしている²⁰⁾。

3 当社製鉄研究部門の主要研究開発

当社の製鉄分野における技術開発に関しては鈴木²⁰⁾らの報告があるので、ここでは製鉄研究部門を中心とした研究開発の一端を紹介する。

3.1 コークス分野

コークス分野での最重要課題はコークス製造コストの削減に直接結びつく安価な非微粘結炭の多量使用である。これには装入炭の高密度の増加が効果的なため CMC が導入され、装入炭水分制御技術²¹⁾、炭化室内嵩密度分布制御モデル²²⁾、2 段装入法^{24, 25)}などを開発した。非微粘結炭の多量配合はコークス強度を著しく低下させるためコークス強度を高精度に予測し、石炭の配合設計に反映させる必要がある。そこで、気孔構造因子を取り込むことによって大幅な精度向上を可能としたコークス強度推定モデル²⁶⁾、コークス強度に大きな影響をおよぼす配合炭の最大流動度 MF を高精度に推定するモデル⁴⁾を開発してきた。前者は気孔率、気孔壁摩擦強度指数などの気孔構造因子、装入炭の嵩密度、乾留速度、さらには石炭の特性である最大流動度 MF、平均反射率 $\overline{Ro}$ によりコークス強度を推定するモデルである。石炭の流動性はコークス強度を制御する重要な因子であり、単味炭の流動度曲線の重ね合わせによる配合炭の MF 推定法もあるが非微粘炭は粘結炭とは炭化度の範囲、すなわち軟化溶融温度域が大幅に異なるため推定精度に問題があった。後者のモデルは配合炭の炭化度の分布が広い場合、単味炭の軟化溶融温度範囲が広く軟化溶融している炭の中に未溶融の石炭粒子やセミコークスが懸濁状態にあると見なし、懸濁液の粘度推定の考え方を導入して配合炭の流動度推定精度を向上させたものである。これらのモデ

ルは石炭配合に活用されている²⁷⁾。

さらに、最近では炭種間の相互作用を考慮したコークス強度推定モデルを開発し劣質炭の多量使用に貢献している²⁸⁾。以下に本モデルを紹介する。このモデルでは多銘柄配合の石炭を 2 炭種の組み合わせの集合としてとらえ、多銘柄配合コークスの強度 S を第 3 炭種の影響を受けない 2 炭種の組み合わせ強度の荷重平均と仮定し、さらに Fig. 3 に示すように 2 炭種 i, j 間の組み合わせ強度 $S(i, j)$ と両炭の平均強度 $\bar{S}$ からのずれを表す指標として相互作用係数 $a(i, j) = (S(i, j) - \bar{S}) / \bar{S}$ を導入したことが大きな特徴である。また、配合炭が相互に影響を及ぼし強度に加算性が成立しない理由を Fig. 4 のように、単味炭の炭化度 Ro と流動性 MF の違いが、コークス強度を決定づける粒子間融合、気孔生成、亀裂生成などの因子を支配する乾留時の「膨張と収縮」の仕方に相互に影響を及ぼし合うと考えた。すなわち、膨張と収縮への相互作用を Fig. 3 と同じと考え、これらの相互作用係数が Ro と MF で表されるものとした。

以上の考え方をもとに、単味炭強度や 54 種類の組み合わせの配合炭強度を測定し、また膨張、収縮実験も行ない、これらの相互作用係数 $a(i, j)$ が Ro と MF で表されることを明らかにした。さらに、 $a(i, j)$ に関しては Fig. 5 に示すように炭化度については適正領域の組み合わせが存在し、流動度については流動度の差が大きい組み合わせの方が相互作用が大きくなるなどのことが明らかになった。さらに強度の相互作用係数 $a(i, j)$ も膨張と収縮の作用係数で表されるこ

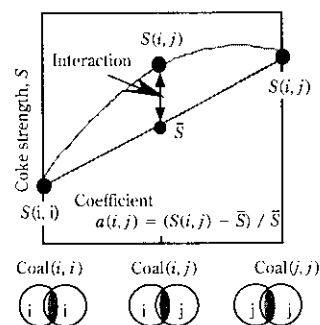


Fig. 3 Definition of interaction of coal on coke strength

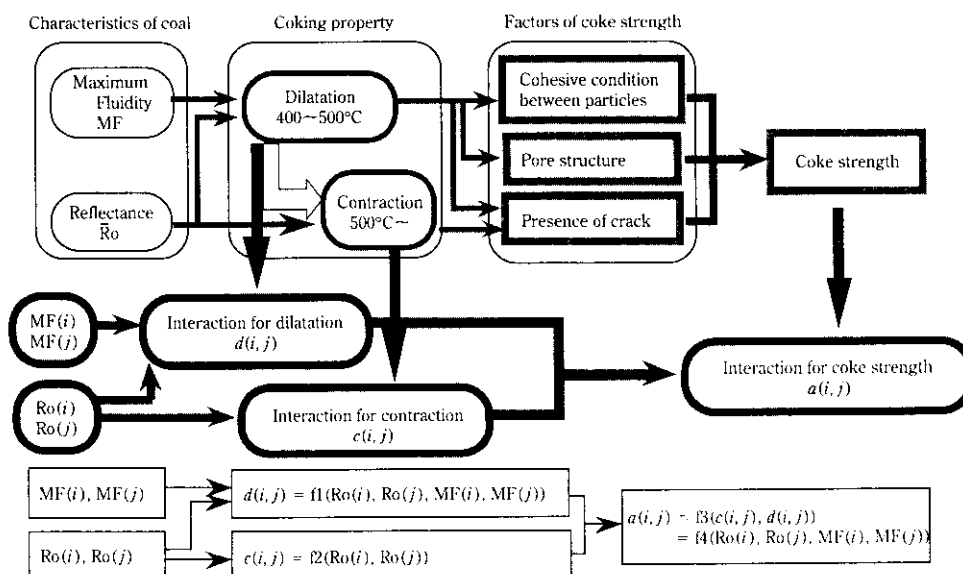


Fig. 4 Estimation flow of coal interaction on coke strength

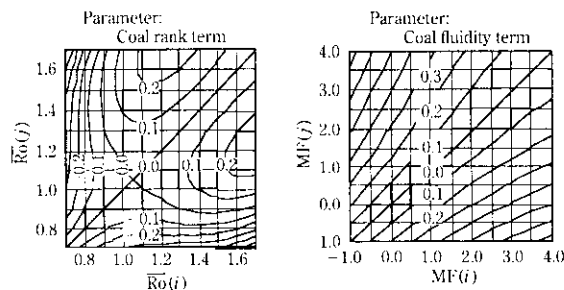


Fig. 5 Contour lines of $a(i, j)$ dependent on coal rank (Ro) and maximum fluidity (MF)

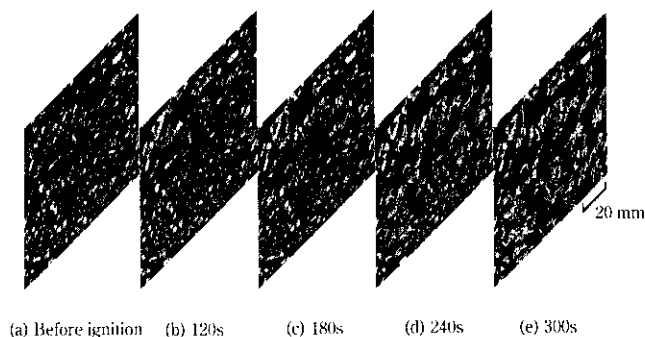


Fig. 6 Change in CT image of sinter cake during sintering

とも明らかとなり、この結果は強度への配合効果が炭種間の膨張、収縮の差に強く影響受けるとする Fig. 4 の考え方を支持するものである。この強度推定法は石炭配合に利用され安価炭多量使用に貢献している。

コークス部門のもう一つの重要課題は炉寿命の延長であり、カーボン除去、ガラスコーティング、ITV による炉壁診断、吹付け補修などの設備技術が開発されてきている。コークス炉の押詰まり防止は炉寿命の延長にも関連し、微粘炭の多量配合には不可欠な技術である。このため、炉壁とコークス層間のクリアランスを推定する気固液 3 相の存在状態での石炭の膨張と収縮を考慮した数式モデル⁽¹⁰⁾を開発し、石炭配合に活用している。一方、基礎実験をもとに操業管理面から押詰まりを防止する技術の開発も行っている。可動壁を設置した試験炉で各種配合炭の乾留実験を行ない、コークス層の押し出し挙動、亀裂発生機構、側壁への荷重伝搬機構などを詳細に検討し⁽¹¹⁾、押し出し時の電流値管理と配合設計に反映している。

以上述べたように各種技術開発や操業管理技術の向上により非微粘炭の使用量を増大し、最近では配合炭の 50% 以上を占めるにいたっている。

一方、新しいコークス製造技術の開発にも取り組み、成形コークスでは多量使用の障害となっていた内部亀裂起因の破壊が起りにくい形状⁽²⁰⁾やバインダーの開発⁽²⁰⁾を行ってきた。さらに最近では国家プロジェクトで開発が進められている次世代コークス製造技術の開発 (SCOPE21) にも参画し、熱間成形の検討を行っている。

3.2 焼結分野

資源、コストいずれの面においても焼結分野の最重要課題はピソライト鉱石やリモナイト鉱石などの高結晶水鉱石の多量使用である。高結晶水鉱石は単純に多量配合すると強度、通気性が低下し、歩留りや生産性が大幅に悪化する。この原因としては鉱石そのもの

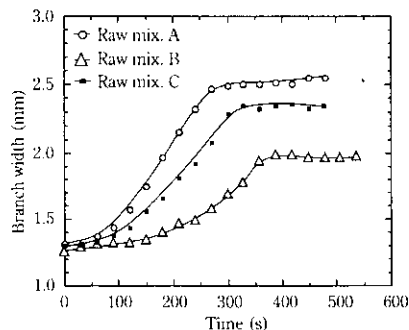


Fig. 7 Changes of branch width of sinter cake with blending of pisolitic ore and mill scale during sintering

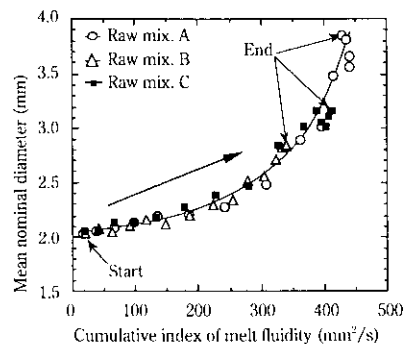


Fig. 8 Relationship between cumulative index of melt fluidity and mean nominal diameter of grain through sintering

の低嵩密度、ベッド下層への凝縮水分の増大、生成融液の流動性低下などが挙げられている。当研究部門では鍋試験、タブレット試験⁽²⁰⁾、X 線 CT 観察⁽²¹⁾ などにより歩留りや通気悪化の原因を基礎的に究明するとともに、ベッド下層の通気を改善する通気スリット技術⁽²²⁾、磁力ブレーキ装入技術の開発⁽¹⁴⁾ を行ってきた。本節では X 線 CT 観察による融液流動の解析と磁力ブレーキ装入技術について紹介する。

融液の流動による気孔構造の変化は焼結強度を決定づける重要因子であるが、測定の困難さのため高結晶水鉱石の融液流動と気孔構造変化は明らかにされていなかった。そこで、熱間で焼結過程を観察できる Hot-X 線 CT 焼結実験装置を開発し、融液の流動と気孔構造変化の解明を行った。Fig. 6 は高結晶水鉱石を含まない原料 (原料 A) の焼結過程の CT 画像の変化を示す。焼結の進行にともなう気孔 (黒色部) の成長・合体と焼成部の塊状化の様子を知ることができる。この画像を画像解析し、塊状化、気孔分岐形態、液流動などを定量的に評価した。Fig. 7 は 3 種類の配合原料を焼結したときの気孔の平均的太さを示すブランチ巾が焼結進行とともに気孔の合体により増大する様子を示す。高結晶水鉱石を 40% 配合した原料 B では気孔の合体が抑制されること、ミルスケール添加 (原料 C) により合体抑制が緩和されることなどが分かる。この原因が高結晶水鉱石配合により液流動が低下するためであることを明らかにしている。Fig. 8 は焼結開始から終了までの固相部分の平均粒径と液の流動性指数の積算値の関係を示すが、この関係は原料条件によらず同一曲線上にあり、液流動と塊状化が同時進行し、原料条件の差は焼結完了時までの積算の液流動の差による塊状化進行の差として表れることが分かる。これらの結果は融液の流動性改善が効果的なことを示唆し、ミルスケール配合や予備造粒技術の開発へと進んでいる。

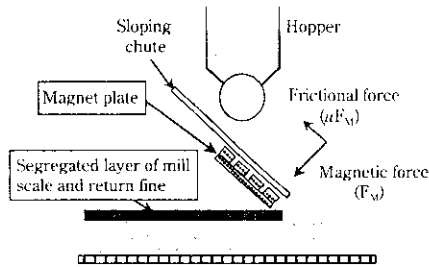


Fig. 9 Schematic diagram of magnetic braking feeder

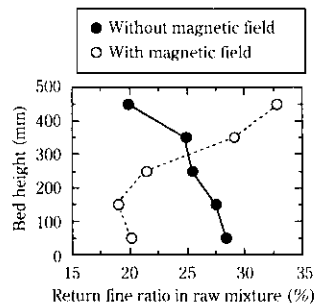


Fig. 10 Effect of magnetic field on segregation of return fine

また、通気改善のため磁力を利用した偏析装入装置 MBF も開発した。Fig. 9 に装入装置の概略を示す。基本的な構造はスローピングシュートの背面にエネルギー供給不要と保守の容易性を目指し永久磁石を配置したシンプルなものである。目的は、焼結原料中にはミルスケール、返鉱などの磁着性原料が多量に存在し、シュート上を落下する原料に磁場を印加してブレーキをかけ、ソフトランディングさせることによりベッドの空隙率を上げ通気を改善することにある。シュート下端での粒子の落下速度は磁場の影響を受け下式で表され、レーザー Doppler 流速計測定により式の妥当性と磁場の減速効果は検証されている。

$(1/2) mV^2 = (1/2) mV_0^2 + mgh - \mu \cdot (F_g \cdot \cos \theta \cdot L + \Sigma F_M \cdot L_M)$
 ここで、 m ：粒子の質量、 V, V_0 ：粒子のシュート下端速度と初期速度、 μ ：粒子の摩擦係数、 F_g ：重力、 F_M ：磁力、 L_M ：磁石の長さ、 g ：重力加速度、 h ：粒子の落下距離、 θ ：シュート角度

さらにもう一点はミルスケール、返鉱などの易溶融性原料を磁力をかけることにより上層部に偏析させて上部の歩留りを改善することである。実験室の装入装置を用いて条件の最適化を行った後、水島製鉄所 3DL に本装置を設置した。原料の偏析と操業結果を Fig. 10, 11 に示す。易溶融性の返鉱が上層側に偏析し、通気が改善された結果、バインダーの生石灰が 1.5 kg/t-s 減少し、歩留りも 1.2% 向上した。設備コスト、メンテナンス性に優れ、経済効果も大きいことから水島製鉄所全焼結機に同装入装置が設備化された。引き続き、ドラムシュートを採用している千葉製鉄所 4 焼結機にもドラムシュート用磁気装入装置を開発・設置し、同様な効果を上げている。

3.3 高炉、新製錬部門

「安定操業を基盤としたコストダウン」が高炉の最重要課題である。ここでは、安定操業、安価原燃料の多量使用のキーとなる炉頂装入装置の開発および装入物分布モデルの開発、また、安定操業に不可欠な高炉操業シミュレータの開発、高炉下部現象の解明など、最近の高炉研究の動向を説明する。

当社は高炉の装入物分布制御技術を安定操業、細粒原料の多量

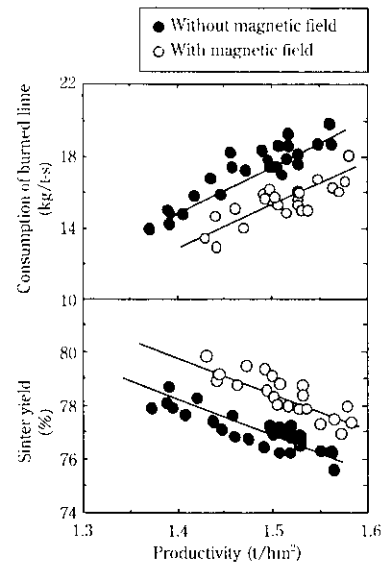


Fig. 11 Effect of magnetic brake feeding on sinter operation

使用、高出鉄比操業を可能にする最重要技術と位置づけ、新装入装置の開発と装入物分布モデルによる分布制御技術の確立を行ってきた。

細粒原料の多量使用には、異なった粒度、品質の装入物を別々に炉頂に装入する多バッチ装入が必要であると考え、高出鉄比操業での多バッチ装入を可能にする 3 パラレルバンカー (PB) 型ベルレス装入装置を開発³⁰⁾、1990 年に水島製鉄所第 3 高炉に設置した。C₂C₂O₃O₁ の粒度別分割装入により、細粒焼結鉄配合比 17% の多量使用技術を確立している³⁰⁾。同時に、従来の PB 型ベルレス装入装置の課題とされてきた円周方向の不均一性を垂直シュートの形状、径の最適化、装入物排出開始位置制御で克服している。

千葉製鉄所第 6 高炉 (1 次) は 20 年 9 ヶ月の長期操業を達成し 1998 年 3 月に吹卸された。千葉製鉄所第 6 高炉の改修に向けて、水島製鉄所第 3 高炉での 3 パラレルバンカー型ベルレス装入装置の実績をふまえつつ、将来予想される低コークス比、高出鉄比操業での劣質原料多量使用を可能にするための新装入装置の開発に注力してきた。装入物分布に関して堆積層の安定性、層の通気性という観点から膨大な模型実験と理論的な評価を行い^{35, 36)}、新装入装置の機能として以下の 3 点が必要であることを明らかにした³⁷⁾。

- (1) 半径方向の粒径、鉱石層厚比 $Lo/Lo + Lc$ を制御するための多バッチ装入
 - (2) 垂直に近い装入物落下軌跡、適正な装入物落下幅
 - (3) 平坦な装入物表面を形成するフラット装入
- このような新機能を発揮できる装入装置として Fig. 12 に示す新炉頂装入装置を開発した。多バッチ装入を可能にする 3 パラレルバンカー、逆傾動装入、落下軌跡の垂直化、安定化を可能にする新型旋回シュートから構成されている。

新ベルレス装入装置は分布の制御性、自由度が大きい反面、装入パターンの設定が難しいという特徴がある。このため、目的の装入物分布に対する装入パターンを設定するための装入物分布モデルを開発した³⁸⁾。1998 年 5 月火入れ前の填充調査によりモデルを検証し、モデルベースの装入物分布制御により早期安定立ち上げを成功させた。今後は新機能を十分に活用したコストダウンと安定操業が期待されている。

劣質原料を多量に使用しつつ安定操業を達成するには、原料品質

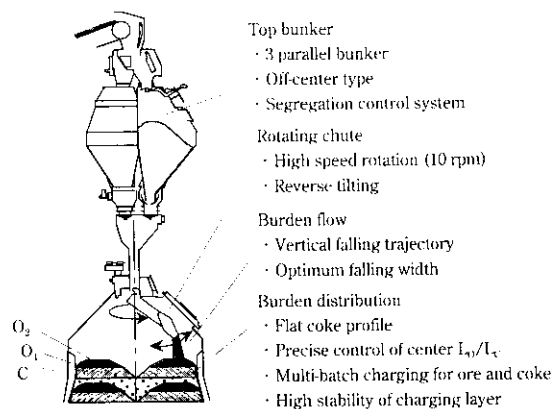


Fig. 12 New top charging system equipped to Chiba Works No. 6 BF

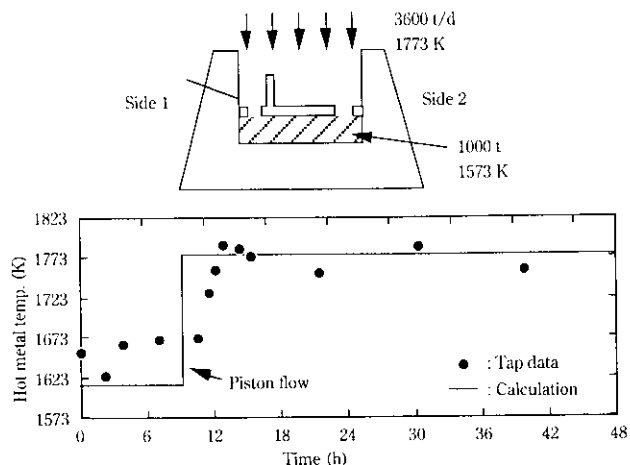


Fig. 14 Comparison of calculated hot metal temperature with measured one

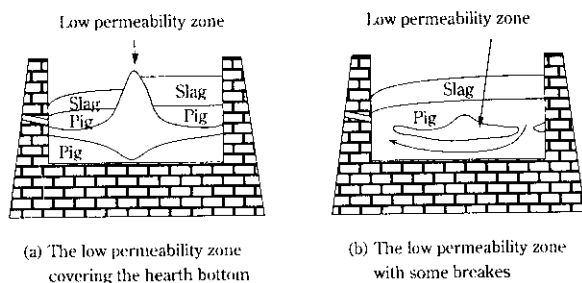


Fig. 13 Image of low permeability zone in the hearth

と高炉操業状況との関係を定量的に評価することが必要になる。装入物降下異常現象の発生機構を検討し、高炉上部ではガスの抗力と垂直荷重の比、高炉下部ではガス抗力と装入物自重の比が異常現象発生限界を表す指数であることを見いだした³⁹⁾。また、高炉内の原・燃料の粉化を考慮した高炉操業シミュレータを開発、上記指数を組み込むことにより異常現象発生限界を定量的に評価する技術を確立している⁴⁰⁾。また、これらの高炉操業シミュレータは分布制御による溶鉄シリコン低減へも適用されている⁴¹⁾。

高炉炉芯、炉床部でのガス、融体の挙動は、高炉の通気性、出鉄滓にとって重要な因子であるにもかかわらず、直接測定困難から解明が進んでいない。当社では、高炉炉底温度分布および出鉄滓挙動の実機データを詳細に解析することにより、高炉炉床内には溶鉄、滓の通液性が低い Fig. 13 に示すような「低透過層」の存在を仮定した炉床構造モデルを提案した⁴²⁾。Fig. 14 は低透過層を仮定した炉床液流れにより出鉄口切り替え時の大きな温度偏差の発生を説明した例である。炉底レンガ温度解析、羽口からのトレーサ吹き込みによる炉床構造の解明、高炉炉床低透過層モデルによる出鉄口間偏差の解析により低透過層仮説の検証^{43, 44)}は進みつつあるが、その制御方法についてはまだ未解明な部分が多く、さらなる研究を進めていく予定である。

コークス炉の老朽化により 21 世紀初頭には微粉炭多量吹き込みが必須の技術となる。微粉炭燃焼性におよぼす石灰性炭の影響については実験が、数式モデルでの検討が行われ、高揮発分炭、低流動性の一般炭が最も燃焼性が高いことが明かにされている⁴⁵⁾。また、ブローパイプ、羽口、レースウェイ内での微粉炭の流動、燃焼を評価できる 2 次元数値モデルを開発した⁴⁶⁻⁴⁸⁾。モデルによる解析により、微粉炭の燃焼性はランス下流に生成する乱流により支配されることを見だし、高乱流バーナを開発した^{49, 50)}。コークスの反応性、

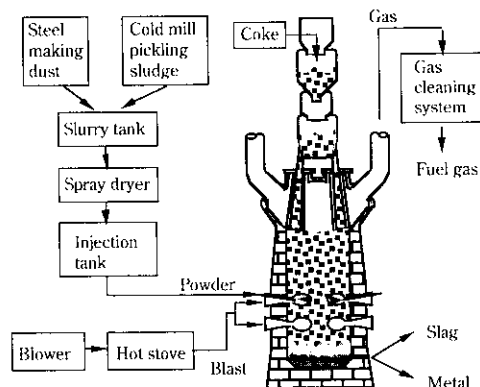


Fig. 15 Process flow of commercial plant of STAR process

Table 1 Composition of dust (mass%)

T.Fe	T.Cr	CaO	SiO ₂	C
61	7.3	2.3	1.0	4.0

Table 2 Composition of produced metal (mass%)

Cr	Ni	C
7.7~8.5	1.0~1.6	3.9~4.2

送風条件を変更したコークス粉化実験が行われ、高微粉炭吹き込み時の粉化機構の解明とコークス品質設計に関する研究も行っている^{51, 52)}。

「安定操業を基盤としたコストダウン」が高炉の最重要課題であることは今後ともかわらないが、原・燃料の資源動向、地球温暖化などの環境問題、コークス炉老朽化に応じた炭材供給、鉄源供給問題を考慮したうえでのコストダウンのための研究開発が今後さらに求められていくと思われる。

一方、新製鉄の分野では Fig. 15 に示す 2 段羽口式コークス充填層型溶還元法 (STAR 法) がステンレス製鉄ダストの再資源化処理炉として 1994 年に世界で初めて実機稼働した³⁹⁾。本技術は粉状の鉬石を塊状化せずに製鉄して合金鉄を製造することを目的に開発が進められたが、転炉によるステンレス製鉄のダスト処理炉として実機化されたものである。Table 1, 2 は原料となるダストと回収され

た金属の組成の例である。建設計画の 140 t/d の金属生産量に対して現状では 150~160 t/d の生産を達成しており、200 t/d 生産に向けた設備改造が進められている。また、このプロセスの特徴を生かして数年後の実機化を目標に電気炉ダストから亜鉛と鉄を回収するプロセスの開発を進めている⁵⁴⁾。本プロセスは製鉄研究部門が長年にわたり開発を続けた独自技術の大きな成果の一つであり、さらに発展させていく積もりである。

また、国家プロジェクトとして開発が進められていた高炉代替の溶融還元法の開発 (DIOS プロジェクト) にも参画し、流動層予備

還元技術の開発も行ってきた。

4 結 言

ここ 10 年の製鉄研究部門の活動を紹介した。コークス、焼結、高炉、新製錬とそれぞれの分野で成果を挙げてきた。今後は資源の変化、コークス炉の老朽化、CO₂、エネルギー消費、廃棄物削減、環境問題などにも十分配慮した技術開発を進めていく予定である。

参 考 文 献

- 1) H. Fujimori: "Evolution of Ironmaking Practice in Japan", 1998 ICSII/Ironmaking Conf. Proc., Toronto, 57(1998), 41
- 2) 「製鉄技術最近 10 年の進歩」鉄と鋼 80 周年記念特集号: 鉄と鋼, **81**(1995), 254
- 3) Y. Nakashima: 2nd Inter. Cokemaking Congress, **2**(1992), 518
- 4) 松井 貴, 井川勝利, 反町健一: 鉄と鋼, **82**(1996), 480
- 5) 板谷 宏, 井川勝利, 坂本誠司: 「炭種間の相互作用を考慮したコークス強度推定法の開発」, 日本学術振興会 製鉄第 54 委員会 151 回研究会資料 54 委-2102, (1998)2
- 6) 樋口正昭, 松下太郎, 小泉哲人, 長谷部新次: コークスサーキュラー, **25**(1976), 191
- 7) 丹羽康夫, 渡辺嘉明, 栗田富喜男, 松本和俊, 稲葉 護, 川口泰弘: 材料とプロセス, **1**(1988), 1011
- 8) 柴原康孝, 中川洋治, 古牧育男, 西本慶二, 山本保典, 長沼洋一, 田中啓八郎, 荒木誠之: 材料とプロセス, **4**(1991), 1113
- 9) 渡壁史郎, 武田幹治, 杉辺英孝, 板谷 宏: 鉄と鋼, **84**(1998), 165
- 10) 主代晃一, 松井 貴, 花岡浩二, 井川勝利, 反町健一: 鉄と鋼, **81**(1995), 625
- 11) 稲角忠弘, 藤本政美, 笠間俊次, 佐藤勝彦: 鉄と鋼, **77**(1991), 63
- 12) 稲角忠弘, 藤本政美, 笠間俊次, 佐藤勝彦, 下沢栄一, 貝島 昭: 材料とプロセス, **1**(1988), 970
- 13) 高井 力, 岸本純幸, 酒井 敦, 佐藤秀明, 小松 修, 野田英俊: 材料とプロセス, **6**(1993), 916
- 14) 板谷 宏, 井川勝利, 反町健一, 大山伸幸, 主代晃一: 「磁力を用いた焼結機の偏析装入技術の開発」日本学術振興会 製鉄第 54 委員会資料, (1998)7
- 15) 肥田行博, 岡崎 潤, 中村圭一, 上川清太, 葛西直樹: 鉄と鋼, **78**(1992), 1021
- 16) 丹羽康夫, 坂本 登, 小松 修, 野田英俊, 熊坂 晃: 鉄と鋼, **78**(1992), 1029
- 17) 清水正賢, 木村古雄, 稲葉豊一, 堀 隆一, 桑野恵二, 野間文雄: 神戸製鉄技報, **41**(1991), 11
- 18) 有山達郎, 佐藤道貴, 山川祐一, 山田善郎, 鈴木 実: 鉄と鋼, **80**(1994), 288
- 19) 廣瀬茂行, 菅原英世, 谷吉修一: 川崎製鉄技報, **25**(1993), 253
- 20) 小林敬司, 松本敏行, 柳沢克彦: 川崎製鉄技報, **25**(1993), 258
- 21) 鈴木孝久, 藤森寛敏: 川崎製鉄技報, **29**(1997), 1
- 22) 坂本誠司, 井川勝利, 反町健一: 材料とプロセス, **9**(1996), 40
- 23) 井川勝利: 鉄と鋼, **71**(1985), S843
- 24) 花岡浩二, 井川勝利, 藤井徹也, 多久和浩, 寺園清己, 笠岡玄樹: CAMP ISIJ, **4**(1991), 1101
- 25) 花岡浩二, 井川勝利, 藤井徹也, 多久和浩, 寺園清己, 笠岡玄樹: CAMP ISIJ, **4**(1991), 1102
- 26) 井川勝利, 笠岡玄樹, 太島弘信: 鉄と鋼, **78**(1992), 1093
- 27) K. Hashimoto, M. Honma, K. Hanaoka, K. Igawa, and K. Sorimachi: "Coal Blending Design Practice Using a New Mathematical Fluidity Prediction Model", 3rd Int. Cokemaking Congress Proc., Gent (Belgium), Sept. 16th-18th, (1996)
- 28) 渡壁史郎, 原 義明, 武田幹治, 板谷 宏: 鉄と鋼, **82**(1996), 805
- 29) 花岡浩二, 井川勝利, 田口整司: 鉄と鋼, **82**(1996), 453
- 30) 大山伸幸, 主代晃一, 井川勝利, 反町健一: 鉄と鋼, **83**(1997), 287
- 31) 主代晃一, 大山伸幸, 井川勝利, 反町健一, 植竹徹司: 鉄と鋼, **83**(1997), 473
- 32) 主代晃一, 小西行雄, 井川勝利, 滝平滋治, 藤井紀文: 鉄と鋼, **83**(1997), 413
- 33) 宮川昌治, 武田幹治, 田口整司, 森本照明, 藤田昌男, 藤森寛敏: 川崎製鉄技報, **23**(1991), 1305
- 34) 沢田寿郎, 上谷年男, 谷吉修一, 宮川昌治, 菅原英世, 山崎 信: 鉄と鋼, **78**(1992), 1337
- 35) 野内泰平, 佐藤 健, 宮川昌治, 武田幹治, 板谷 宏: 材料とプロセス, **7**(1994), 1004
- 36) 野内泰平, 武田幹治, 板谷 宏: 材料とプロセス, **8**(1995), 1066
- 37) 野内泰平, 佐藤 健, 武田幹治, 河合隆成: 材料とプロセス, **11**(1998), 895
- 38) 佐藤 健, 野内泰平, 武田幹治: 材料とプロセス, **11**(1998), 897
- 39) 佐藤 健, 武田幹治, 板谷 宏: 材料とプロセス, **9**(1996), 750
- 40) 佐藤 健, 松原弘直, 武田幹治, 板谷 宏, 西村博文: 材料とプロセス, **8**(1995), 140
- 41) 佐藤 健, 野内泰平, 木口 満: 川崎製鉄技報, **29**(1997), 30
- 42) 澤 義孝, 武田幹治, 田口整司, 松本敏行, 渡辺洋一, 鎌野秀行: 鉄と鋼, **78**(1992), 1171
- 43) 澤 義孝, 原 義明, 板谷 宏, 江渡卓穂: 材料とプロセス, **9**(1996), 187
- 44) 佐藤 健, 野内泰平, 渡壁史郎, 武田幹治: 材料とプロセス, **10**(1997), 793
- 45) K. Takeda, S. Miyagawa, and S. Taguchi: "Effect of Coal Properties on Combustibility of Coal Injected to Blast Furnace", Ironmaking Conf. Proc., (1990), 455
- 46) 武田幹治, F. C. Lockwood: 鉄と鋼, **82**(1996), 486
- 47) 武田幹治, F. C. Lockwood: 鉄と鋼, **82**(1996), 492
- 48) K. Takeda and F. C. Lockwood: ISIJ Int., **37**(1997), 432
- 49) T. Uchiyama, N. Ishiwata, K. Takeda, and H. Itaya: Iron and Steelmaker, (1996), 61
- 50) 石渡夏生, 内山 武, 武田幹治: 川崎製鉄技報, **29**(1997), 37
- 51) 武田幹治, 石渡夏生: 材料とプロセス, **10**(1997), 123
- 52) 武田幹治: 材料とプロセス, **10**(1997), 793
- 53) 長谷川伸二, 国分春生, 原 義明: 川崎製鉄技報, **29**(1997), 51
- 54) 原 義明, 石渡夏生, 宮川昌治, 板谷 宏, 野村 真, 松本敏行: 材料とプロセス, **10**(1997), 18