

# 21 世紀の鉄鋼プロセスを支える製鉄技術

## Ironmaking Technologies Contributed to Steel Industry of the 21<sup>st</sup> Century

牧 章 鉄鋼技術センター 製鉄技術開発部 部長  
 有山 達郎 総合材料技術研究所 製鉄研究部 部長 工博

Akira Maki  
 Tatsuro Ariyama

20 世紀、刻々と変化する社会動向に対応し、当社の製鉄部門は常に世界に先駆けた革新的な技術を開発することでその強い競争力を保持してきた。原燃料選択幅の拡大、生産性の向上、省エネルギー、省力化の徹底推進は製鉄部門の大きな技術的成果といえる。この取り組みは今日、環境リサイクル事業にも展開され始めている。21 世紀、さらに多様化していくと思われる技術開発ニーズに対し、今後も柔軟に対応していきたい。

*The 20<sup>th</sup> century witnessed the competitive edge of NKK's ironmaking sector which took the initiative in developing innovative technologies and in fulfilling social requirements. Noteworthy are the extended utilization of various raw materials, the improved productivity and the decreased energy consumption. These technologies are now successfully applied to environmental businesses. The 21<sup>st</sup> century, in which diversified R&D needs are lying, will see the further pursuit of technological breakthrough.*

### 1. はじめに

1990 年代の当社製鉄部門における技術開発は「複合化と限界の追求」と言う言葉で表現できる。それまで各プロセスで培われた個別の技術をより大きな目的のために結合し、製鉄所を持つ技術力を最大限発揮させることに注力してきた時代でもあった。20 世紀の締めくくりにあふさわしい 10 年間ではなかったか。

たとえば高炉における微粉炭多量吹き込み操業は高炉単体での操業技術はもとより、高品質焼結鉱製造技術や高負荷操業に耐えうる設備技術との複合化により達成された。また、製鋼におけるゼロスラグプロセス<sup>1)</sup>の完成のために、高炉は原燃料の適正化を含め、低 Si 鉄製造技術を確立し貢献した。これらの取り組みは現在、環境事業分野に生かされてきている。リサイクルを軸に鉄鋼業と社会との連携に関して新たな展望を開きつつある。

21 世紀においてますます多様化が求められるであろう製鉄技術開発のニーズに対し、統合を予定している川崎製鉄(株)の製鉄技術との融合を図り、最強の JFE 製鉄技術を構築していきたいと考える。

### 2. 1990 年代の製鉄技術開発

#### 2.1 高炉

Fig.1 に当社高炉における主な諸元の推移を示す。1990 年代の技術開発は、京浜と福山おのおののローカルコンディションに合わせて推進された。福山では 1998 年の第 2 高炉立ち上げによる高炉 4 基体制への移行により 1000 万トン体制を確立するとともに、各炉の微粉炭吹き込み設備

を新設・増強し、微粉炭の多量吹き込み技術の開発を積極的に推進した。一方、京浜では都市立地条件を生かした廃プラスチックの高炉一貫使用技術<sup>2)</sup>を世界に先駆けて開発・導入した。微粉炭・廃プラ吹き込みの共通の問題点は未燃焼粉の蓄積による炉下部圧損の上昇であったが、熱風制御弁<sup>3)</sup>や NEW-CFC を駆使した新しい分布制御技術・炉下部制御技術を確立することにより克服した。

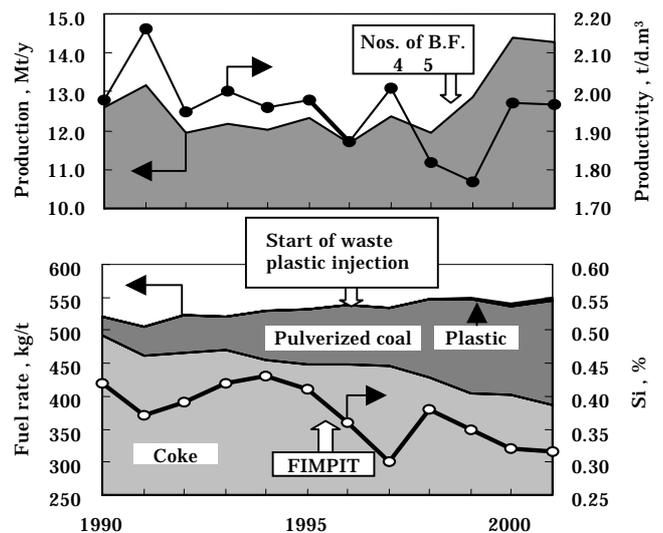


Fig.1 Transition of operating technologies in blast furnace in NKK

溶鉄の品質については、製鋼での精錬コスト削減の観点から従来より鉄中 Si の低減に取り組んできたが、1996 年に福山で世界初の出鉄口部における溶鉄温度測定装置<sup>4)</sup>

(FIMPIT)を開発し、これを各炉に導入することで炉熱レベルの管理強化が図られ、安定的な低 Si 銑製造が可能となった。その結果、福山では 1997 年 10 月に製鉄所平均としては世界初となる Si 0.2 を切る記録を達成した。

高炉延命技術については、高炉改修時において煉瓦材質、冷却装置の改善を実施し、一方操業時においてはシャフト、朝顔部の補修技術の改善を行ってきた。この結果、1970 年代の火入れ高炉の寿命が 5~6 年程度であったものが、1986 年に火入れした福山第 5 高炉は現在炉齡 17 年目に達している (Fig.2)。老朽高炉においても出銑比 1.9t/d.m<sup>3</sup>、微粉炭比 170kg/t を実現しており合理化に大きく寄与している。

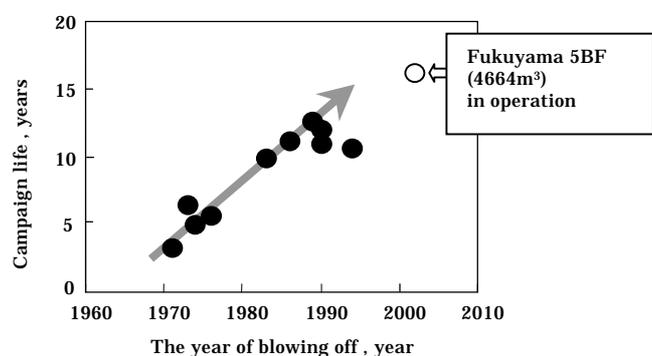


Fig.2 Trend of the blast furnace campaign life in NKK

1990 年代に開発した延命技術としては、朝顔部の CS 取り替え技術および後述する高耐久性銅 CS の開発<sup>5)</sup>が挙げられる。福山第 4 高炉では 1999 年に朝顔部 60 枚の CS をすべて鋳物製銅 CS とするとともに、87 時間の休風で交換する技術を確認した<sup>6)</sup>。本休風前後の操業実績を Fig.3 に示す。

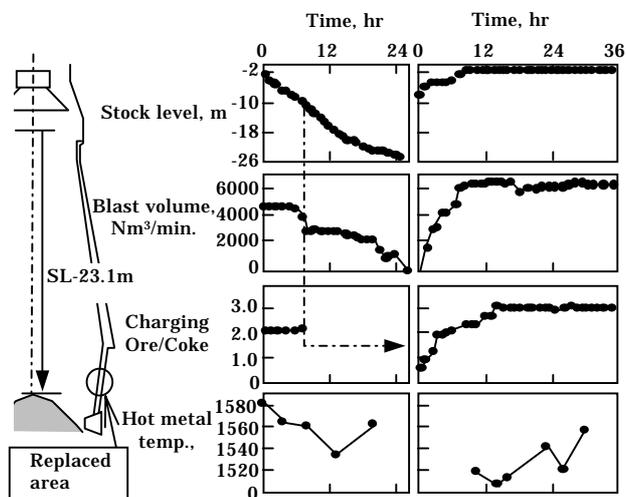


Fig.3 Results of the operation for the change of the cooling staves at the bosh of Fukuyama No.4 B.F.

## 2.2 焼結

当社の焼結に関する京浜・福山両所の特徴は、京浜が高炉 1 基体制以降焼結機の生産能力に余力があるのに対し、福山は前述の高炉の 4 基体制以降、2 基の焼結機がフル操業を強いられていること、および福山第 5 焼結が 1988 年、高品位微粉鉍石であるペレットフィードを主原料として高品位塊成鉍を製造する HPS<sup>7)</sup>に改造されている点にある。

当社ではこの両所の特徴をふまえ、微粉・高品位ヘマタイトは福山で、生産能力に大きな影響を及ぼす高結晶水鉍石は京浜でおのの傾斜使用することでトータルメリットを追及してきた。さらに至近では豪州高品位ヘマタイト鉍床の枯渇化を受け、両所において、高結晶水鉍石の多量配合への技術的取り組みを継続・拡大してきた。特に高結晶水鉍石の多配合時の課題である歩留りの低下に対応するため、装入部偏析ワイヤー<sup>8)</sup>の開発・導入を行った。Fig.4 は、当社の微粉鉍石および高結晶水鉍石の配合率と歩留りの推移であるが、これら難使用鉍柄鉍石の使用拡大と歩留りの向上を同時に達成できている。

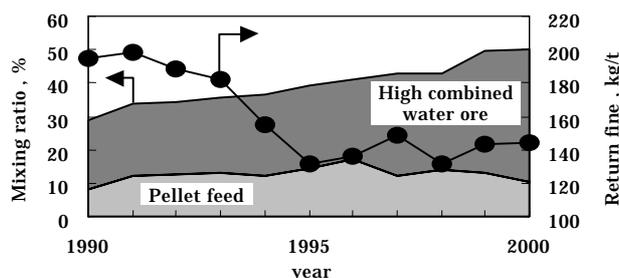


Fig.4 Trends of the material type and the return fine ratio at the NKK's sintering machine

省力化に関しては、1996 年 2 月に福山第 4 焼結の無人化を達成した<sup>9)</sup>。福山第 4 焼結では従来 3 人×4 シフトの計 12 名により操業を行っていたが、運転管理システムの開発・拡充と焼成制御システムの開発 (Fig.5) により人工作業の解消を重点的に推進し、シフト要員をゼロとしている。

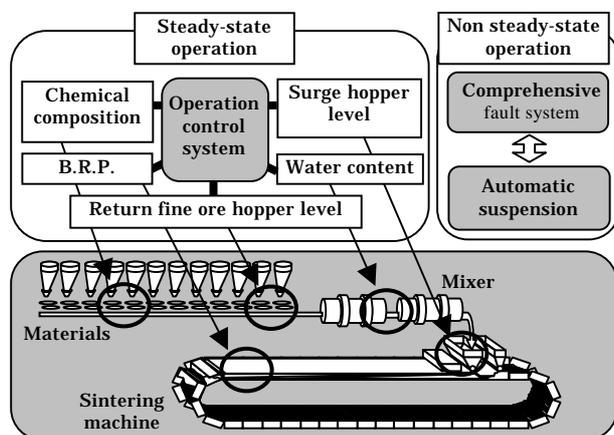


Fig.5 Operation control systems at Fukuyama No.4 D.L.

### 2.3 コークス

現在ナショナル・プロジェクトとして取り組んでいる「SCOPE21」のコンセプトである劣質原料炭使用拡大、生産性向上、無煙・無発じん、省エネルギーは、同時に現存するコークス炉につきつけられた課題でもある。これらに加え、高炉安定操業のためのコークス品質制御、炉命延長技術の開発など、これまで多岐に渡って精力的な取り組みを行ってきた。Fig.6にこの10年間の当社における非微粘結炭の使用比率の推移を示す。

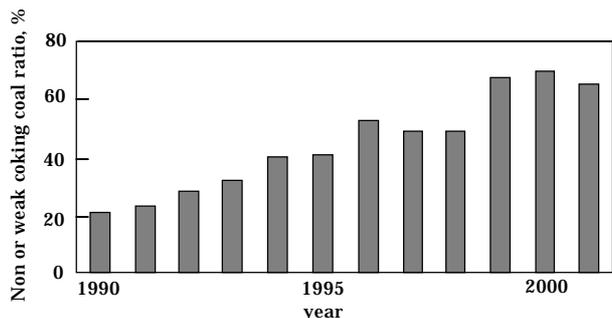


Fig.6 Trend of non or weak coking coal ratio (NKK)

この使用比率の増加は、以下の改善・技術の成果である。

- (1) 石炭粉砕方法の改善（選択粉砕技術）と成型炭効果拡大（選択成型技術）によるコークス強度改善技術。
- (2) コークス強度推定精度向上<sup>10)</sup>と強度測定の自動化による管理精度向上。

生産性向上については、移動機の無人運転化を中心に進めてきた。1996年には福山、1998年には京浜の移動機無人化（装炭車、ガイド車）が実施されたが、特に福山ではサイクルタイム（1窯当たりの所作業時間）6.5分という国内最速の無人運転システム<sup>11)</sup>を完成させた。また、Cガス精製プロセスにおいては人間に代わってコンピューターが操業判断を行うエキスパートシステム<sup>12)</sup>などの先端技術の開発・導入により操業効率化に大きく寄与している。

省エネルギーへの取り組みとしては、この10年エネルギー消費量の削減よりも、むしろエネルギー回収量の増加に力点を置いてきた。Fig.7にコークス炉から回収するCガス量とコークス顕熱からの回収蒸気量との推移を示す。

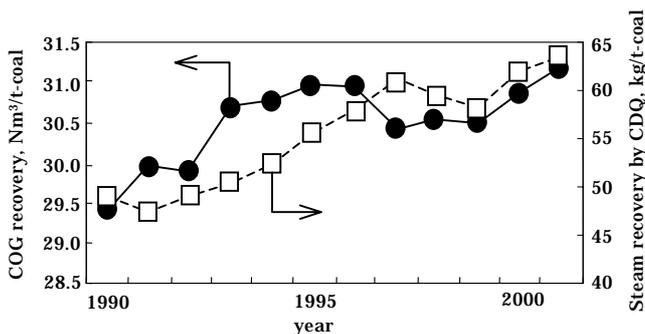


Fig.7 Trend of COG and steam recovery (Keihin)

Cガス増回収については炭化室へのカーボン付着対策を施した上で配合炭の高揮発分を逐次進めてきた。また、CDQにおける蒸気回収については三次元数値解析によるCDQへの空気吹き込みの最適化、リアルタイムモデルの導入<sup>13)</sup>を図った。

建設費が莫大なコークス炉にとって、炉寿命延長は最大の課題である。そのため補修技術の開発と炉寿命診断技術の開発という2つの柱で取り組んできた。補修技術については以下が代表的である。

- (1) コークス炉の一部分のレンガを積み替える「熱間積替え技術」の開発。
- (2) レンガ面の劣化による凹凸の平滑化、微小貫通孔の閉塞のための大型溶射の開発（他社と共同開発）。

炉寿命診断技術に関しても、各種センサーの開発、データベースの構築を行ってきた（Fig.8）。これを基に補修方法の最適化につなげて行く予定である。

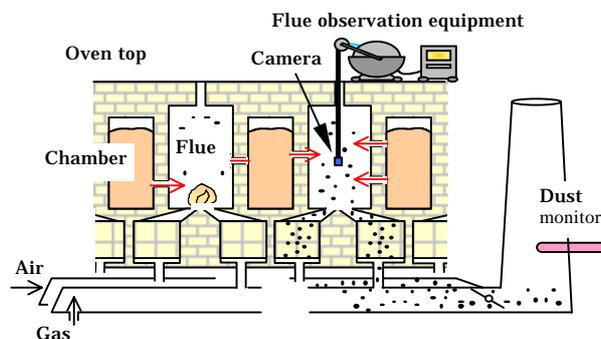


Fig.8 Installed sensors for maintenance

### 3. 高炉における微粉炭の多量吹き込み技術

Fig.9に1985年以降の当社の高炉における微粉炭吹き込み設備の導入時期と吹き込み量の推移を示す。微粉炭多量吹き込み時の高炉操業上の主な問題は以下である。

- (1) Ore/Cokeの増加に伴う炉上部通気性の悪化。
- (2) コークス粉の蓄積による炉下部通気性の悪化。
- (3) 微粉炭燃焼性の悪化。

当社ではこれら安定操業の阻害要因を克服するため、NEW-CFCを用いた適正な分布制御技術を確立、多量吹き込みに適した焼結鉱の品質設計、高燃焼率型微粉炭バーナーの開発などを強力に推進してきた。

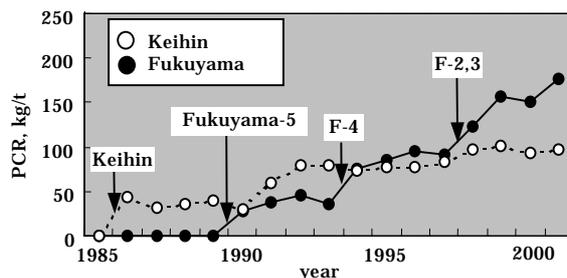


Fig.9 PCI equipment construction year and PCR trends

### 3.1 高燃焼性微粉炭バーナーの開発<sup>14)</sup>

微粉炭を炉内で熱源・還元剤として有効利用し、炉頂からダストとして排出させないためには、羽口先での微粉炭の燃焼性向上が極めて重要である。

Fig.10 にはブローパイプ内での微粉炭の燃焼挙動に及ぼすランス配置の影響を数式モデルにより評価した結果を示す。微粉炭流同士を衝突させないように 2 本のランスを非対象に配置した偏芯ダブルランス (C) は、燃焼の進行が速くなっていることがわかる。また、本ランス使用時のレースウェイ出口における燃焼率は、通常のシングルランスに比べ 15%以上高いと推定された。本ランスは 1994 年 4 月の福山第 4 高炉での実機化を皮切りに現在では当社の全高炉に採用され微粉炭多量吹き込み操業に大きく貢献している。

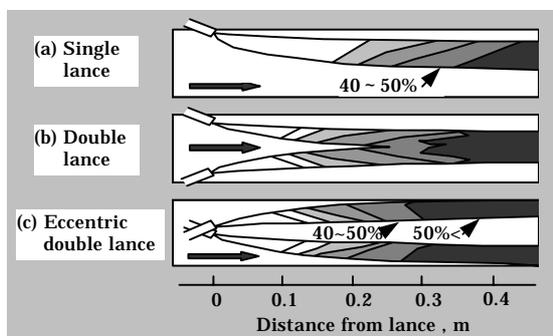


Fig.10 Effect of lance arrangement on flow and combustion efficiency

### 3.2 高微粉炭操業に応じた焼結品質の最適設計

高微粉炭操業下では熱流比が低下するため、高炉上部では還元粉化温度に対応する低温領域が縮小する。このことは焼結鉱の還元粉化を抑制できる可能性を示唆している。福山では高微粉炭多量吹き込みに適した焼結鉱品質を得るため、HPS 鉱の低 SiO<sub>2</sub> 化を追求し、焼結鉱の RI のさらなる向上を図ると同時に、RDI のスペックの緩和に努めてきた。

Fig.11 に福山第 4 高炉において焼結鉱中の SiO<sub>2</sub> 含有量が高炉内通気性に及ぼす影響を調査した結果を示す。SiO<sub>2</sub> の低い焼結鉱 (高 RI, 高 RDI) の使用は、炉上部の通気性を維持しつつ、炉下部の通気性を大きく改善できることがわかる。この理由として、RDI が高くても前述の効果により炉上部での還元粉化が抑制されたこと、RI の向上によって融着帯部での還元・溶け落ち特性が大幅に改善されたことなどが挙げられる<sup>15)</sup>。

これらの技術開発の結果、1994 年 10 月には福山第 4 高炉で微粉炭原単位 218kg/t の国内記録 (当時) 記録を達成し、さらに 1998 年 6 月には第 3 高炉において 266kg/t の世界記録を樹立した<sup>16)</sup>。最近では福山製鉄所において、大型高炉 4 基を有する製鉄所では世界初となる全炉平均 210kg/t を達成している。

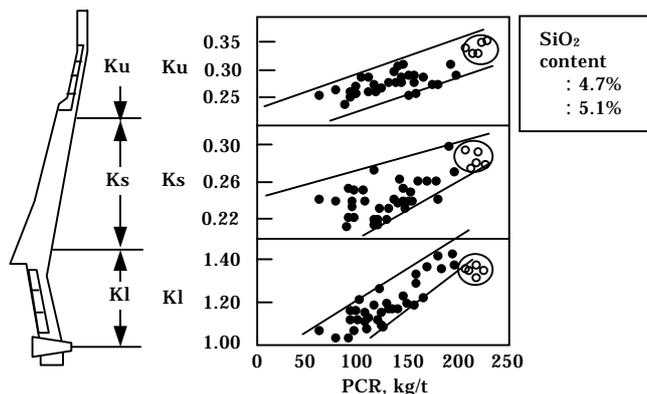


Fig.11 Effect of SiO<sub>2</sub> content in sinter on permeability of blast furnace

### 3.3 高耐久性炉体冷却装置の開発

当社のホットモデル試験および実炉測定結果によると、微粉炭多量吹き込み時には燃焼焦点 (レースウェイ内の最高温度部) が羽口先に接近し、かつレースウェイ端に微粉炭灰分由来のスラグが多量に蓄積した通気不良層が生成されることが確認されている。これら現象の変化は炉下部ガス流れの周辺流化を介して朝顔部への熱負荷を著しく増大させる可能性がある<sup>17)</sup>。

当社ではこの対策として高熱伝導率型の鋳物性銅 CS を開発・導入してきた。鋳物製銅 CS はその高い冷却能から、熱変形を防止できるばかりか、朝顔部前面にスラグがセルフコーティングされた層が形成されるため、CS 本体の物理的な損耗を回避できる。よって、耐熱負荷の観点から本銅 CS は極めて有効と考えられる<sup>5)</sup>。

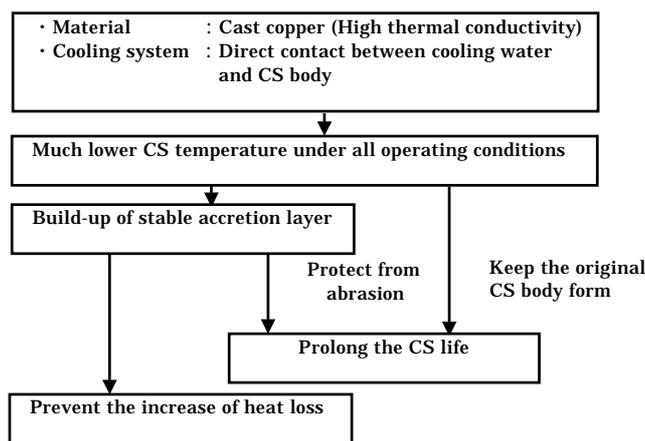


Fig.12 Concept of cast copper cooling staves

## 4. 低 Si 鋳製造技術

近年製鋼工程では、媒溶材、合金鉄使用量の削減およびスラグ発生量のさらなる低減が求められ、転炉におけるゼロスラグ吹錬のニーズが高まりつつあった。これに対応するため、高炉では製鋼到着 Si の低減すなわち、出鉄および脱珪処理後 Si の低減へ取り組んだ。

#### 4.1 FIMPIT の開発<sup>4)</sup>と出鉄 Si の低減

出鉄 Si を低減させる上で、高炉の炉熱レベルをリアルタイムかつ正確に把握することが重要である。そのために出鉄口から抽出された直後の溶銑温度を直接測定することが望ましい。しかしながら出鉄口部は、高温で溶銑が噴出する過酷な条件のため、直接的な測定は極めて困難であった。

本技術は出鉄口から抽出された溶銑を、光ファイバーを利用し、直接測定を可能とするものであり、従来法に比べ樋への抜熱や大気中への熱放散などの外乱が少ない。

Fig.13 に本技術による測定システムを示す。

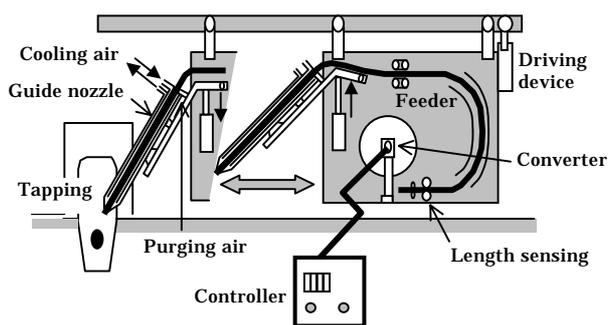


Fig.13 Schematic structural diagram of FIMPIT

Fig.14 は福山における溶銑温度および Si の推移である。本技術の適用により、溶銑温度は 20 の低減が可能となり、銑中 Si は従来より 0.1%以上低減された。

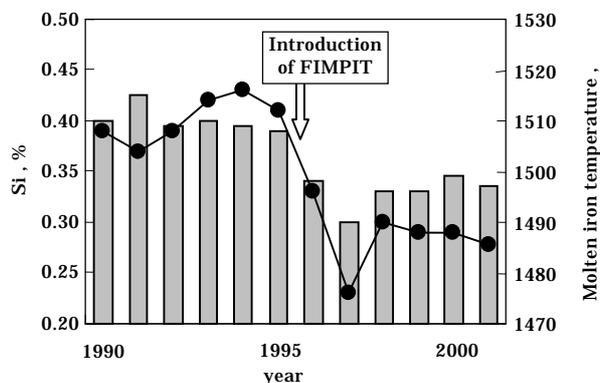


Fig.14 Operation transition before and after the introduction of FIMPIT (Fukuyama)

#### 4.2 鑄床脱珪処理のレベルアップ

鑄床脱珪処理は、現在では反応効率が良い傾注樋での投射法が主流となっているが、先に述べた理由により脱珪処理後 Si のさらなる低下が要求された。

Si を低減する上で脱珪材の投射量の増加が不可欠であるが、溶銑鍋内でフォーミングが発生し、鍋の受銑量が確保できないなどの弊害を誘発する。これを防止するために、従来は抑制材をフォーミング発生時に、鍋内にオペレーターが手投入していた。

しかし、この方法による抑制効果は、作業者の経験に頼る部分が強く、かつ連続的な投入が困難であった。そこで、より適正なフォーミング抑制効果を確認するため、脱珪材とは独立に、鍋内に抑制材を投射する方法に改善した。Fig.15 に設備フローを示す。

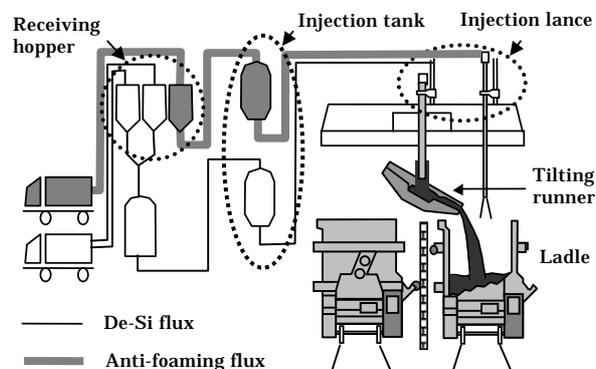


Fig.15 Flow of desiliconization equipment

フォーミング抑制材を溶銑鍋内に直接投射することにより、抑制材を鍋内で効率よく反応させ、フォーミングの原因となる CO ガスの生成を抑制し、脱珪材の安定かつ多量に投射することが可能となり、脱珪作業の効率化が図られている。本開発により製鋼到着 Si を低減でき、ゼロスラグ吹錬 100%達成へ寄与している。

### 5. 製鉄における環境事業への取り組み

1990 年代後半において、製鉄技術を新たに環境事業に応用する取り組みが行われている。現在当社製鉄部門で行っている環境事業について以下に述べる。

#### 5.1 高炉廃プラスチック吹き込み

京浜第 1 高炉では廃プラスチック原料化設備の稼働に際し、事前にプラスチック吹き込みの高炉に与える影響について実炉における調査を行った<sup>18)</sup>。

Fig.16 にプラスチック吹き込み時の羽口を高速度カメラ (13500 こま / 秒) で撮影した結果を示す。粒径の異なる 2 水準のプラスチック、および比較のため微粉炭吹き込み時の状況を示すが、微粉炭では吹き込み直後から燃焼火炎が観察されたのに対し、粒径の大きいプラスチックの場合は着火に至らなかった。

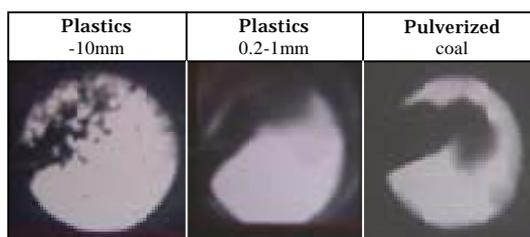


Fig.16 Photograph of the inner-tuyler during plastic injection

ただし, Fig.17 に示すように, プラスチック吹き込み時の炉頂ガス中の水素濃度は, 通常操業に比べて高くなり, その傾向は中心部ほど強いことから, プラスチックはレースウェイ内を巡回しながら一定時間滞留し, かつレースウェイ奥でガス化しているものと推測された。したがって, プラスチックの粒径を適正に制御することにより燃焼ガス化率を高められる可能性があることがわかった。

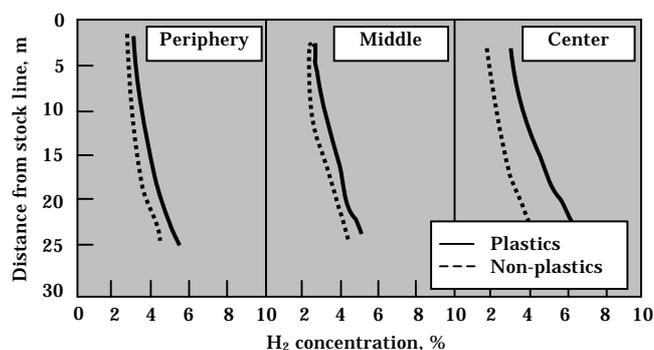


Fig.17 H<sub>2</sub> concentration in in-furnace during plastic injection

また炉頂ガス・ダスト中に排出されるタール量は通常操業と同レベルであり, 操業上の支障がないことを確認した。これらの結果を基に, 1996 年, 京浜第 1 高炉において国内初の廃プラスチック高炉吹き込みを開始し, 現在では福山第 3 高炉と合わせ, 8 万 t/y の吹き込みを行っている。

## 5.2. 焼結プロセスにおける廃棄物の有効利用

京浜焼結機では, 事務機器メーカーより排出される廃トナーを焼結原料化するプラントを 2000 年より稼働させている<sup>19)</sup>。トナー粉は鉄分と樹脂分となり, 鉄鉱石と粉コークスの代替として有効である。しかしながらトナー粉は数ミクロンという超微粉のためハンドリングが難しく, 従来固化埋め立てされていたのが実情であった。当社では, 防じん・防爆措置を施した廃トナー供給ラインを設置し, 多量使用を可能とした (Fig.18)。

今後も社会のこうしたシーズを発掘し, 焼結機の有効利用を図っていきたいと考えている。

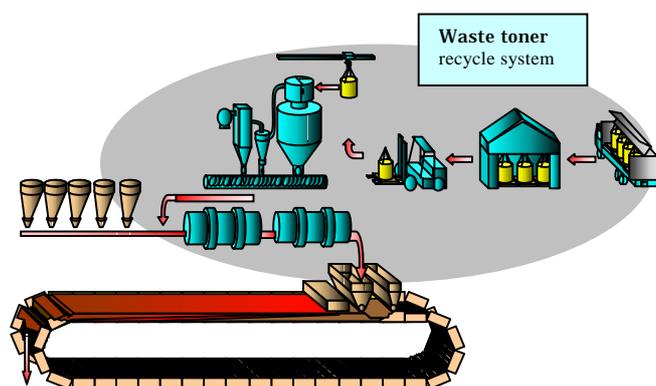


Fig.18 Waste toner recycle system at Keihin No.1 D.L.

## 6. おわりに

1990 年代以降の当社における製鉄技術開発について総括した。冒頭でも述べたとおり, 製鉄分野における技術開発は近年環境事業を中心にますます多様化している。20 世紀の社会的ニーズに対し, 高効率・省エネルギー技術で貢献したように, 21 世紀においても時代のニーズを先取りし, 製鉄部門として社会的使命を全うしていきたい。

### 参考文献

- 1) 田中秀栄ほか. “ゼロスラグ新製鋼プロセスの確立”. NKK 技報. No.169, pp.6-10(2000).
- 2) 大垣陽二ほか. “容器包装プラスチックの高炉原料化”. NKK 技報. No.169, pp.1-5(2000).
- 3) 脇元一政ほか. “熱風制御弁を用いた新高炉操業”. NKK 技報. No.153, pp.1-5(1996).
- 4) 若井造ほか. “消耗型光ファイバー放射温度計による高炉炉熱迅速測定方法の開発”. CAMP-ISIJ. Vol.8, pp.1093(1995).
- 5) 牛腸誠ほか. “朝顔鋼ステープの開発”. 第 90 回製鉄部会自由議題資料. 15p.(2000).
- 6) 長田勝意ほか. “福山 4 高炉朝顔 CS 交換大減尺休風”. CAMP-ISIJ. Vol.12, p.707(1999).
- 7) 丹羽康夫ほか. “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”. 鉄と鋼. Vol.78, p.1029(1992).
- 8) 高井力ほか. “福山 4 焼結における装入部改造”. CAMP-ISIJ. Vol.6, p.916(1993).
- 9) 渡辺隆志ほか. “福山 4 焼結における無人操業”. CAMP-ISIJ. Vol.6, p.916(1993).
- 10) 杉岡真吾ほか. “コークス品質予測システムの開発”. CAMP-ISIJ. Vol.9, p.138(1996).
- 11) 三宅達朗ほか. “コークス炉移動機の無人操業”. CAMP-ISIJ. Vol.9, p.650(1996).
- 12) 小川貢ほか. “化工エキスパートシステムの開発”. CAMP-ISIJ. Vol.8, p.966(1995).
- 13) 石黒宏樹ほか. “CDQ 蒸気回収最適モデルの開発”. CAMP-ISIJ. Vol.8, p.969(1995).
- 14) 佐藤道貴ほか. “福山 4 高炉における微粉炭多量吹き込みランスの開発”. CAMP-ISIJ. Vol.8, p.318(1995).
- 15) 市川孝一ほか. “高微粉炭吹き込み高炉操業に適した低 SiO<sub>2</sub> 焼結鉱の製造技術”. CAMP-ISIJ. Vol.13, p.702(2000).
- 16) 丸山太一ほか. “福山 3 高炉における微粉炭多量吹き込み操業”. CAMP-ISIJ. Vol.11, p.834(1998).
- 17) 有山達郎ほか. “試験燃焼炉における微粉炭多量吹き込み時のレースウェイ内...”. 鉄と鋼. Vol.81, pp.1114-1119(1995).
- 18) 浅沼稔ほか. “レースウェイ内における廃プラスチック燃焼・ガス化挙動”. 鉄と鋼. Vol.83, p.617(1997).
- 19) 築地秀明ほか. “京浜製鉄所製鉄部門におけるリサイクル事業...”. 第 92 回製鉄部会自由議題資料. 15p.(2002).