

JFE スチール 製鉄分野の動向

Recent Developments of Ironmaking Technology in JFE Steel

武田 幹治 TAKEDA Kanji JFE スチール スチール研究所 製鉄研究部長・Ph. D.
大神 正通 OOGAMI Masamichi JFE スチール 技術企画部 主任部員(副部長)

要旨

JFE スチール発足をはさんで、過去 10 年間の製鉄分野を取り巻く事業環境、主要な技術開発について概括した。高炉分野では 1990 年代でのガス多発型高炉操業から、2000 年以降は高出鉄比、低還元材比操業へとシフトし、2007 年には 490 kg/t 台まで還元材比を低下させた。また、コークス、焼結分野では、原燃料コストの低減とともに、高出鉄、低還元材比安定操業を可能にする生産性向上技術、高品位コークス、焼結鉄製造技術に主眼が置かれた。

Abstract:

Business background and recent developments of ironmaking technologies are reviewed during the last ten years, including the JFE Steel establishment in 2003. The blast furnace strategy has changed from the high reducing agent ratio, RAR, operation with high gas supply in 1990s to the high productivity and low RAR operation after 2000. The blast furnace RAR has reduced to about 490 kg/t in 2007. The research and developments in sintering and cokemaking process have focused on the improvements of productivity and quality of coke and sintered ore to support a stable blast furnace operation.

1. はじめに

2003 年に JFE スチールが発足してから 5 年経過したが、この間に中国に代表される BRICs 諸国の目覚ましい経済発展があり、製鉄分野を取り巻く事業環境、特に鉄鉱石、石炭価格は大きく変化し、粗鋼生産量も増大している。また、地球温暖化防止に向けた京都議定書の発効とともに、日本鉄鋼連盟の自主行動計画、対 1990 年エネルギー使用量 10%削減を遵守するため、鉄鋼プロセスでの最大の CO₂ 排出分野である製鉄分野では CO₂ 排出量を大幅削減することが求められている。

JFE 技報としては、初めての製鉄特集号、1997 年第 29 巻第 1 号の川崎製鉄技報以来の製鉄特集号であり、製鉄分野をめぐる過去 10 年間の環境変化と JFE スチールの製鉄分野の動向を簡単に紹介する。個々の技術開発の詳細については本製鉄特集号の各論文を参照していただきたい。

2. 製鉄分野をめぐる環境変化と技術開発

2.1 製鉄分野を取り巻く事業環境の変化

世界の粗鋼生産量、日本の粗鋼生産量の推移を図 1 に示す。1990 年代を通して世界粗鋼生産量は 7 から 8 億トン/年、日本の粗鋼生産量は 1 億トン/年弱に留まっている。原燃料品質の悪化、鋼材価格の下落などの厳しい経済環境下で、製鉄分野では高炉ガス発生量の増大によるエネルギーコストの削減、安価劣質原料の使用を目指した技術開発が行われてきた。

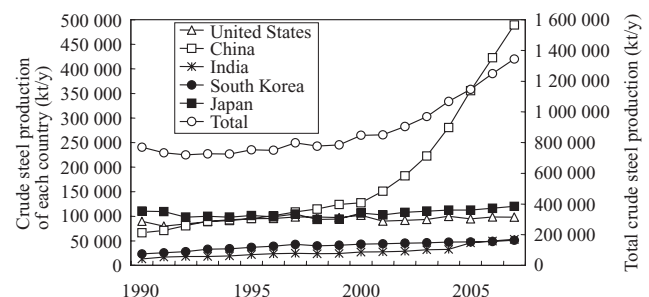


図 1 世界各國の粗鋼生産量の推移

Fig.1 Crude steel production in the world

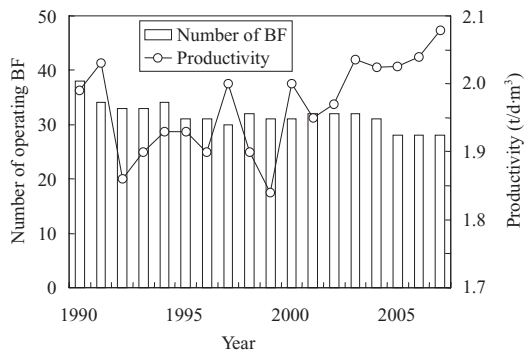


図2 日本国内の高炉稼働基数，出鉄比の推移
Fig.2 Productivity and number of operating blast furnace

2000年に入ると、中国の急激な粗鋼生産量の伸びにより世界粗鋼生産量は8億トン/年を越え、2007年度には13.4億トン/年に到達した。増大する鉄鋼需要に対応して、日本粗鋼生産量も1.2億トンに回復してきた。

粗鋼生産量増大のニーズに対応しつつ、高炉の集約を進めた結果、高炉出鉄比が大幅に増大した。図2に示した、高炉稼働基数、出鉄比の推移からそのことが分かる。

このような急激な経営環境の変化に対応した高炉、焼結、コークス、環境・新製錬分野での過去10年間に開発、あるいは実用化されてきた技術について以下の章で概括する。

2.2 高炉分野

JFE スチール発足前の1990年代、各製鉄所ではエネルギーコスト低減を目的としたガス多発型の高還元材比操業が行われてきた。図3に示すように高い還元材比で操業されてきた。高還元材比操業でのコークスコスト低減を目的に微粉炭多量吹込み技術の開発が行われ、偏芯ダブルラン

スなどの吹込み技術、装入物分布制御技術などの総合的な成果として西日本製鉄所(福山地区)第3高炉で266 kg/t、同第2~5各炉で210 kg/tの多量吹込み操業を達成している¹⁾。また、表1に示すように極限での高炉安定操業をサポートするため、出鉄温度を連続的に測定する消耗型光ファイバ温度計(FIMPIT)が開発され、実用化されている²⁾。

2000年以降、前述の事業環境の変化に対応しつつ、溶鉄コストを低減する努力が行われてきた。ガス多発型操業から低還元材比操業にシフトし、2007年には従来を100とすると約10%還元材比を低下させてきている。

低還元材比操業のための炉頂ガス利用率向上に向けて、JFE スチールの独自技術である並列3バンカー(3PB)型装入装置が改修時に導入された³⁾。3PBの多バッチ装入、同時切り出し機能を活用した多量混合装入技術が東日本製鉄所(千葉地区)第6高炉で開発され、120 kg/tのコークス多量混合装入が実機化されている⁴⁾。また、炉床内の溶鉄、

表1 高炉分野での主要な開発技術

Table 1 Research and developments in blast furnace

Process	Technology
Burden charging	3 parallel bunker bell-charging system High ratio coke mixed charging
Tuyere injection	High PC injection LNG injection
Process control	FIMPIT (Fiber in metallic tube for pig iron temperature) Hearth slag level model
Revamping	Short-term revamping Cast copper stove Campaign life prolongation
Fundamentals	Solid flow model with DEM

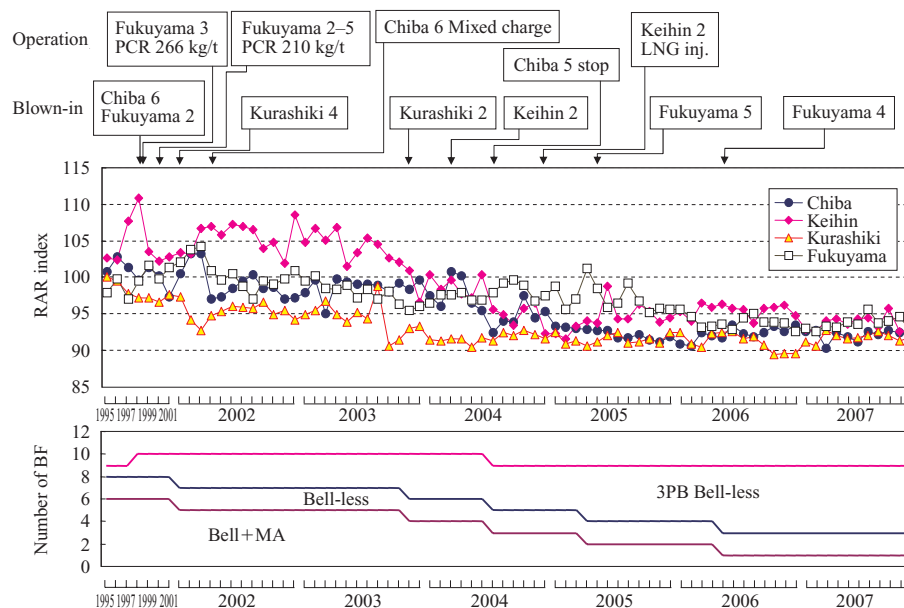


図3 JFE スチール各炉の還元材比，炉頂装入装置の推移

Fig.3 RAR index and charging system of blast furnace in JFE Steel

スラグの残留量を推定する数式モデルが開発され、安定操業に貢献している⁵⁾。

東日本製鉄所（京浜地区）第2高炉では、高水素含有吹込み材であるLNG吹込み技術が開発され、還元材比の低減、高出鉄比、CO₂排出抑制に貢献している。LNG吹込み時の羽口前温度の低下を酸素富化により補償する技術であり、2005年から実用化されている⁶⁾。

2007年現在、JFEスチールでは9基の高炉が稼働し、東日本製鉄所の千葉地区、京浜地区ではそれぞれ稼働高炉は1基のみとなっている。このため、改修期間の短縮は大きな経営課題であり、JFEスチール独自の技術として大ブロックリング工法が開発され、1998年の東日本製鉄所千葉地区の第6高炉の改修で初めて採用された。その後、西日本製鉄所（倉敷地区）第4高炉、第2高炉、福山地区の第5高炉、第4高炉の改修においても採用され、改修期間の大幅短縮に貢献してきた⁷⁾。

1998年に改修した東日本製鉄所（千葉地区）第6高炉は20年6ヶ月の長寿命記録を樹立したが、さらなる長寿命化に向けて鑄造銅製ターリングステープが開発され、その採用部位の最適化が図られつつある⁸⁾。

2.3 焼結分野

焼結原料中の劣質鉱石の割合の変化を図4に示した。輸送コストの削減の観点から南米鉱石から豪州鉱石にシフトすると同時に、豪州鉱石では良質のヘマタイト鉱石が枯渇してきたため、高結晶水鉱石などの劣質鉱石の使用割合は65%に増大している。

高結晶水鉱石は、結晶水含有量が6～10%と高いことに加えて、微粉部分が多く、多孔質であるため、焼結機の生産性が低下、強度が低下するという問題がある（図5）。

焼結機の生産性を向上する手段として、装入部でのコークス、粒度の偏析強化を狙った技術開発が行われてきた（表2）。

弧状に配置されたワイヤーで装入偏析を強化する偏析スリットワイヤー法（SSW）は西日本製鉄所（福山地区）第5焼結機で開発、実用化⁹⁾されてきた。また、装入シュート背面に永久磁石を配置し、焼結原料の落下速度を減速す

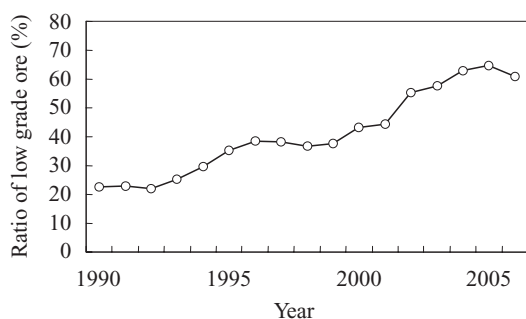


図4 焼結原料中の劣質鉱石の割合

Fig.4 Ratio of low grade ore in JFE Steel

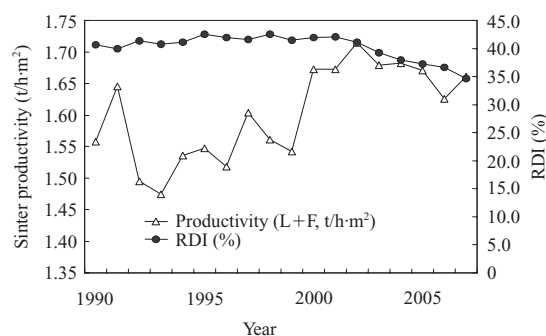


図5 焼結機生産性と焼結鉱品質の推移

Fig.5 Sinter productivity and quality, RDI

表2 焼結分野での主要な技術開発

Table 2 Research and developments in sinter process

Process	Technology
Granulation process	HPS (Hybrid pelletized sinter) Limestone and coke breeze coating granulation
Charging device	Segregating slit wire Magnetic blanking feeder
Sintering machine	Permeability slit at lower layer Pallet width extension
Off-gas treatment	Activated coke process
Sinter quality	Low SiO ₂ sinter RDI reduction
Fundamentals and others	Hot stage X-ray CT analysis Mathematical granulation model Continuous ship unloader No man operation system
Innovative process	Pre-recuded agglomerates Segregated granulation

る磁気ブレーキ式装入法（MBF）は、西日本製鉄所（倉敷地区）第3焼結機で開発、実用化¹⁰⁾され、その後、同第2、第4焼結、東日本製鉄所（京浜地区）第1焼結機でも採用されている。原料中の高結晶水配合率により最適な層内偏析があることが見出され、そのための装入装置が採用¹¹⁾されている。

革新的な造粒技術であるHPS (hybrid pelletized sinter) プロセスは、微粉であるペレット用粉鉱石を活用するため、西日本製鉄所（福山地区）第5焼結機で実用化されたが、ブラジルのBelgo Mineira製鉄所にも採用¹²⁾された。石灰石・コークス外装造粒法は、既存のドラムミキサーの後端部から石灰石粉、粉コークスを投射する造粒技術¹³⁾である。擬似粒子の外周部に石灰石粉、粉コークスが存在することにより、ヘマタイト各粒子の残留とカルシウムフェライトの生成を促進するものである。比較的小規模の設備改造で対応できる技術であり、西日本製鉄所倉敷地区の第2、3、4焼結機、福山地区の第4焼結機で採用され、東日本製鉄所（千葉地区）第4焼結機にも導入が予定されている。

焼結生産量を抜本的に増大させる手段として、焼結機パ

レットの拡幅、機長の延長も行われてきた。

焼結プロセスの基盤技術強化として、熱間での X 線 - CT スキャンによる熔融、焼結反応解析¹⁴⁾、造粒プロセスに関する数式モデルの構築も行われている。

将来の CO₂ 削減への革新的なプロセス開発として、焼結プロセスでの部分還元焼結鉱 (PRA) 製造に挑戦、ブリケット塊成物の添加により還元率 60% を達成できることを見出している¹⁵⁾。

良質のヘマタイト鉱石の枯渇にともなう高結晶水鉱石割合の増大、原料の微粉化・多孔質化、微粉部の Al₂O₃ 含有量の増大は今後も続くと考えられ、生産性向上、還元粉化指数 (RDI) 低下などの品質向上技術の努力を続けていく必要がある。

2.4 コークス分野

1990 年代には、コークス製造コスト低減に向けて、コークス強度をある程度犠牲にしてでも強粘結炭の削減に努めてきた。図 6 に非微粘結炭などの安価な劣質石炭配合率、コークス強度のトレンドを示した。劣質炭配合率を増大した際ののコークス強度の低下を抑止するため、高度粉碎制御¹⁶⁾、高度配合モデルの開発¹⁷⁾、粒径拡大のためのイナータ添加の高度化¹⁸⁾ などに取り組んできた。一方、図 6 に示したように、2000 年以降は高炉の高出銑比操業に対応して、コークス強度の向上が重視されてきた。

コークス炉の寿命延長、老朽炉での押し出し性の悪化に対応するため、大型溶射装置の導入、レンガ微細貫通亀裂の CVD (Chemical vapor deposition) による補修¹⁹⁾、熱間レンガ積み替え技術、コークスケーキ炉壁間のクリヤランス管理技術が開発されてきた (表 3)。

コークスの反応性を向上することにより、高炉の還元材比が低下することは広く認知されるようになってきた。鉄の触媒効果に期待した高反応性コークスとしてフェロコークスプロセス (CIC)²⁰⁾ の開発に着手した。非微粘炭を中心

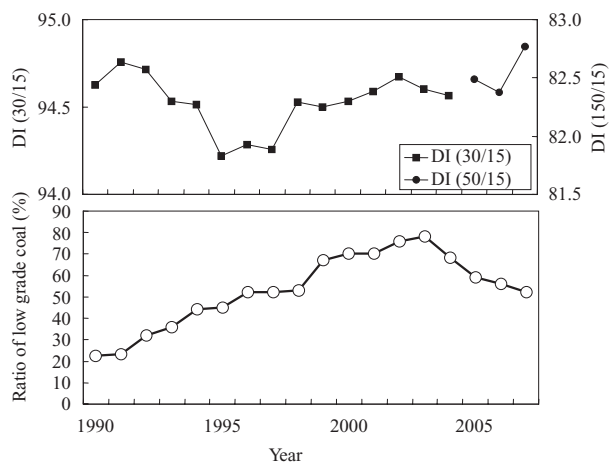


図 6 非微粘炭比、コークス強度の推移
Fig.6 Ratio of low grade coal and strength

表 3 コークス分野での主要な技術開発

Table 3 Research and developments in cokemaking

Process	Technology
Coal pretreatment	Advanced curshing control
Coal blending	Advanced blending model Inert additions for coke size control
Life prolongation	Large-scale flame gunning machine Hot repair technique of coke oven brick work Oven wall repair by the CVD method Clearance management system
Automation	High-speed automatic operation of coke oven machines Online measuring of coal blend grain size
Enviromental protection	Coke oven with low NO _x emission flue
Fundamentals and innovative process	Coal characterization with high-temperature NMR Caking coal fine coating Carbon iron composite process

とする石炭と鉄鉱石を混合、成型、乾留することにより、金属鉄を含む高反応性炭材を製造するプロセスである。

日本の高度成長期に建設された老朽コークス炉の更新、高騰する石炭価格、高炉の高出銑比安定操業を可能にする高強度コークス製造などが今後もコークス分野の重要課題になると考えられる。

2.5 新製錬・環境分野

製鉄所での廃プラスチックの使用は、自主行動計画の中で 1.5% の追加的対策として位置づけられ、2000 年の容器リサイクル法の施行後、急激に使用量が増大した。JFE スチールでは、1996 年以来、東日本製鉄所 (京浜地区) 第 1 高炉 (現在は第 2 高炉)、西日本製鉄所 (福山地区) 第 3 高炉、第 4 高炉で高炉への廃プラスチック吹込みを実施してきた²¹⁾。廃プラスチック吹込み時の高炉の通気性の悪化を抑止するため、造粒粒子の強度、灰分組成制御に関する研究が行われている。また、微粉炭と同等の燃焼性を得るため廃プラスチックを微粉碎する先進廃プラリサイクル技術 (APR)²²⁾ が開発され、2007 年東日本製鉄所 (京浜地区) で実機化された (表 4)。

自動車シュレッダーダストのリサイクル技術、廃木材から活性コークス製造、廃木材の高炉への吹込み、フロンの誘導加熱分解の各リサイクル技術の開発にも取り組んでいるが、いずれもパイロット規模段階に留まっている。ロータリーキルンを用いた塩化ビニールからの脱塩素技術は小規模ながら京浜地区で実用化された。

ステンレス鋼製造過程の転炉での Cr 鉱石熔融還元時に発生するダストは、Cr を約 9% 含み、2 次資源としての価値が高い。千葉地区では、ステンレスダストを再資源化する STAR 炉が 1994 年に稼働、約 200 t/d の Cr を含む溶銑を製造、再資源化している²³⁾。

表 4 新製錬・環境分野での主要な技術開発

Table 4 Research and development in recycling and alternative ironmaking

Process	Technology
Waste plastic recycling	Waste plastic injection at blast furnace Advanced waste plastic recycling
Recycling	STAR process for stainless steel dust STAR process for EAF dust Automobile shredder residue recycling Chlorofluorocarbons decomposition Activated coke production from organic wastes Waste wood recycling PVC dechlorination
Alternative ironmaking	Hi-QIP (high quality iron pebble) process

高価な強粘結炭を使用せず、粉鉱石から高純度の金属鉄を直接製造する新鉄源プロセスを開発するため、2001年度に独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の基盤技術研究促進事業としてHi-QIP (high quality iron pebble) パイロットプラントの建設、開発を行ってきた²⁴⁾。回転する炉床上に粉状の炭材を敷き詰め、その上に粉鉱石を装入、加熱、還元、熔融することで、スラグを含まない高純度の金属鉄を製造するプロセスである。2005年度で委託研究を終了後、継続研究を行い、大型化、実機化の可能性について検討中である。

製鉄プロセスでのCO₂削減には、カーボンフリーの木材などのバイオマス原料の増大、廃プラの使用量増大が必須となる。また、高騰するCr, Ni, Znなどの金属資源の有効活用には、製鉄所、あるいは社会の2次資源からの金属資源の回収技術へのニーズはますます高くなると考えられる。

3. おわりに

過去10年間に製鉄分野を取り巻く事業環境は激変し、高炉の操業形態は大きく変化した。ブラジル、中国、インドの製鉄業の発展による石炭、鉄鉱石資源制約、気候変動に関する国際連合枠組条約の京都議定書に対応する自主行動計画とその後に予想されるさらなるCO₂排出抑制要求に

対応した革新技術の開発が今後とも求められていく。

参考文献

- 1) 牧章, 酒井敦, 下村昭夫ほか. NKK 技報. 1999, vol. 166, p. 60.
- 2) 早坂祥和, 酒井敦, 櫻井雅昭ほか. NKK 技報. 2002, vol. 178, p. 32.
- 3) 小川直孝, 渡辺隆志, 早坂祥和ほか. CAMP-ISIJ. 2007, vol. 20, p. 99.
- 4) 渡壁史朗, 武田幹治, 西村博文ほか. 鉄と鋼. 2006, vol. 92, p. 901.
- 5) 野内泰平, 佐藤道貴, 武田幹治. 鉄と鋼. 2006, vol. 92, p. 961.
- 6) 永喜正人, 長谷川伸二, 築地秀明ほか. CAMP-ISIJ. 2006, vol. 19, p. 136.
- 7) 藤田昌男, 徳田慶一郎, 小島啓孝. JFE 技報. 2006, vol. 11, p. 1.
- 8) 村井亮太, 有山達郎, 木村康一ほか. 鉄と鋼. 2002, vol. 88, p. 487.
- 9) 市川孝一, 町田智, 野田英俊ほか. CAMP-ISIJ. 2002, vol. 15, p. 710.
- 10) 大山伸幸, 主代晃一, 武田幹治ほか. CAMP-ISIJ. 2002, vol. 15, p. 694.
- 11) 町田智, 大山伸幸, 佐藤秀明ほか. CAMP-ISIJ. 2006, vol. 21, p. 58.
- 12) Borgers, W.; Melo, C.; Braga, R. et al. Rev. Metall. 2004, vol. 101, p. 189.
- 13) Oyama, N.; Sato, H.; Takeda, K.; et al. ISIJ Int. 2005, vol. 45, p. 817.
- 14) Oyama, N.; Nushiro, K.; Igawa, K. et al. 57th Ironmaking Conference Proceedings, Toronto, 1998, vol. 57, p. 109.
- 15) Machida, S.; Sato, H.; Sato, M. et al. ICSTI '06 Proceedings, Osaka. 2006, vol. 4, p. 291.
- 16) 深田喜代志, 下山泉, 庵屋敷孝思ほか. 第44回石炭科学会議. 2007, p. 128.
- 17) 角広行, 下山泉, 庵屋敷孝思ほか. CAMP-ISIJ. 2008, vol. 22, 掲載予定.
- 18) 深田喜代志, 山本哲也, 下山泉, 庵屋敷孝思, 藤本英和, 角広行. 鉄と鋼. 2007, vol. 93, p. 438.
- 19) 丸岡政章, 酒井敦, 谷義雄ほか. CAMP-ISIJ. 2003, vol. 16, p. 129.
- 20) 深田喜代志, 下山泉, 浅沼稔ほか. CAMP-ISIJ. vol. 17, 2004, p. 842.
- 21) 浅沼稔, 有山達郎, 佐藤道貴ほか. 鉄と鋼. vol. 83, 1997, p. 617.
- 22) Sato, M.; Asanuma, M.; Takeda, K. Proc. of 3rd International Conference on Process Development in Iron and Steelmaking. 2008, Lulea, Sweden, 2008, p. 379.
- 23) 松井貴, 内山武, 原義明ほか. CAMP-ISIJ. 2002, vol. 15, p. 110.
- 24) Sawa, Y.; Yamamoto, T.; Takeda, K. et al. ISIJ Int. 2001, vol. 41, Supplement, S17.



武田 幹治



大神 正通