

2000年代の日本国内における製鉄技術動向

Trend of Ironmaking Technology in Japan from 2000

野村 誠治*
Seiji NOMURA

抄 録

21世紀の最初の20年間は、世界レベルで鉄鋼業の大きな再編が進むとともに、世界の鉄鋼需要が著しく増加して鉄鋼原料(鉄鉱石、原料炭)の価格が乱高下をはじめ、さらに全世界で地球環境対応技術がこれまでのどの時代よりも重要視されるようになり、製鉄技術部門が激動の変化を経験した時代といえる。これに対し、製鉄技術部門では、時代が要請する課題解決に向けて技術開発と実機化に取り組み、新たな時代を切り開いてきた。主に2000年代の日本国内における製鉄技術の開発・実機化概要を紹介した。

Abstract

The first two decades of the 21st century were turbulent for the steel industry. The reorganization of steel industry across borders has progressed and the increased demand for steel products has caused a rise in the price of raw materials such as iron ore and metallurgical coal. Furthermore, more emphasis has been placed on global environmental protection and carbon dioxide emission control than ever before. Ironmaking technology division in Japan has struggled to cope with these changes both at home and abroad. This report describes the trend of the development and commercial application of the ironmaking technology of Japan in the first two decades of the 21st century.

1. はじめに 2000年代の製鉄を取り巻く環境

1985年のプラザ合意による円高に伴い、鉄鋼業では設備集約などの合理化が実施されて高炉休止が相次いだ。1990年代は、バブル経済崩壊とさらなる円高進行により、鉄鋼需要が低迷して鉄鋼業は厳しい環境下での生産活動を余儀なくされるとともに、地球温暖化問題や廃棄物問題への対策といった新たな課題への対応をせまられた。

2000年代に入ると、世界レベルでの鉄鋼資源サプライヤーと鉄鋼業の再編、設備集約が進み、2000年には鉄鉱石サプライヤーがVale, Rio Tinto, BHP-Billitonの3社に再編され、世界の70%のシェアを有するまで巨大化するとともに、2002年にはArbed(Luxembourg), Aceralia(Spain), Usinor(France)の統合によりArcelorが、さらに2006年にはArcelorとMittal Steelの統合によりArcelor Mittalが発足し、巨大な鉄鋼メーカーが誕生した。日本においても、2002年に日本鋼管と川崎製鉄が統合してJFEホールディングス(株)が発足し、さらに2012年には新日本製鐵と住友金属工業が統合して新日鐵住金(株)(2019年に日本製鉄

(株)に商号変更)が発足した。

さらに、2000年代は、BRIC'sを中心とした国々の経済成長とともに世界の鉄鋼需要は急増し、世界の2017年(暦年)の粗鋼生産量は16.9億tとなり、2000年以前の2倍超にまで達している。これに伴い、鉄鋼原料としてこれまで使用されてきた良質の鉄鉱石や原料炭の供給がネックとなり、事実、近年では需給バランスにより価格が乱高下している(図1)。

その一方で、日本の銑鉄・粗鋼生産量は、リーマンショックによる大幅な急落を経験したが20年というスパンでは大きな変化はなく、国内における鋼材消費推移の低迷に伴い1990年代に比較すると鋼材輸出比率は増加している。

このような状況において、製鉄技術部門では、国際市場での競争力優位性獲得に向けたさらなるコスト削減のための高生産性技術および設備の寿命延長技術、原料価格高騰に対応するための安価劣質資源利用技術、さらに地球環境対応技術、エネルギー削減技術の開発および実機化に取り組んできた。

日本製鉄の製鉄特集号としては2006年²⁾以来13年振り、

* プロセス研究所 製鉄研究部長 Ph.D 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

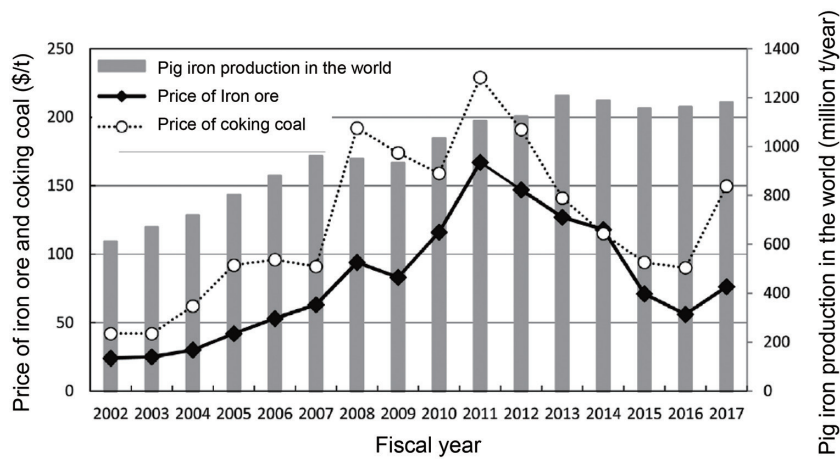


図1 世界の鉄鉄生産量と鉄鉱石・原料炭の輸入単価推移(暦年)
Trend of pig iron production in the world and price of iron ore and coking coal

製鉄技術動向の振り返りとしては2011年³⁾以来8年振りである。本稿では、前回特集号以後を中心に、主に2000年代の日本国内における製鉄技術の開発・実機化技術概要を紹介する(実機化された製鉄所は、現在の名称で記載した)。なお、日本製鉄の製鉄技術の詳細については、本特集号の各論文を参照されたい。また、日本鉄鋼協会は2015年に創立100周年を迎え、創立100周年記念事業として“鉄と鋼”第100巻記念特集号⁴⁾が企画されるとともに、“第217・218回西山記念技術講座”⁷⁾では日本の製鉄工程を大きく変えた技術の開発および導入経緯が紹介されているので、こちらも参照されたい。

2. 2000年代の主要な実機検証・実用化技術

表1、表2、表3に、高炉、原料・焼結、コークス技術の各部門において2000年前後から実機検証・実用化された主な技術例をそれぞれ示す。なお表に記載した項目は、日本鉄鋼協会講演大会要旨集“材料とプロセス(CAMP-ISIJ)”に記載された案件からの抜粋であり、記載年と箇所は同要旨集の発行年と要旨に記載されている箇所である。全ての実機検証・実用化事例を網羅しているわけではない点は、ご留意いただきたい。

高炉では、計測や計算科学技術の進展により、種々のセンシング、シミュレーション技術が実用化されている。また、高炉操業高度化を指向して種々の焼結鉱品質改善技術が開発されるとともに、含炭塊成鉱等の装入物による高炉熱保存帯温度低減効果を利用した還元材比低減技術や、鉱石層へのコークス多量混合装入、都市ガス吹き込みによる還元材比低減技術の実用化が進展している。ペレットや還元鉄などの装入原料も実機適用されている。羽口吹き込み技術としては、PC(微粉炭)多量吹き込みに対応するための技術・設備開発が推進され、転炉スラグ吹き込みも実施されている。さらに、種々の高炉長寿命化技術の開発と実用化が進展している。原料・焼結では、資源対応力および生産性向上を目的として、種々の造粒技術と装入シユート

機能強化の実用化が進んでいる。さらに、環境・省エネルギー対応技術として、焼結機への炭化水素ガス吹き込みやCaO改質粉コークスによるNO_x低減等の新技術が開発・実機化されている。コークスでは、1994年から10年間実施された国家プロジェクトの開発成果であるSCOPE炉が実機化され、コークス炉の新設・パドアップが進む一方で、コークス炉の老朽化に対応してさまざまな観察・診断・補修技術が開発・実機適用された。以下に、開発・実機化された主な技術について概説する。

3. 高炉技術の開発・実機化状況

3.1 高炉プロセスの観測・予測技術

高炉プロセスを科学的に観測・予測する技術は、近年大きく進展している。特に高炉装入物の搬送時および装入時の現象については、実高炉の1/3スケールの試験装置を用いた試験、実高炉での測定、DEM(Discrete Element Method, 離散要素法)を用いたシミュレーション⁸⁻¹⁰⁾が実施されており(例えば図2)、これらをもとにした装入物分布推定シミュレーション技術が進展している。また、実機の高炉原料搬送過程において、物流管理で利用されるRFID(Radio Frequency Identification)タグを用いた計測も実施されている¹¹⁾。

高炉内部を実際に見ることは非常に困難なため、実高炉内部の挙動を表現可能な高炉数学モデルの開発も大きく進み¹²⁾、炉内の流動・伝熱・反応を考慮した3次元非定常数学モデル、さらに高炉炉内の層構造を表現可能なモデル(図3)¹³⁾、高炉炉底・側壁煉瓦浸食予測モデル、レースウェイ評価離散要素モデル¹⁴⁾が開発され、高炉操業の高効率化および高炉長寿命化に活用されている。また、宇宙線ミュオンを利用して稼働中の高炉内部を直接観察することも試みられている^{15,16)}。

さらに、高炉操業支援のための操業データの可視化、解析技術も進展し、炉内をよく知り、見えるようにしようとする技術が実用化されている。高炉内部を実際に見ること

表1 高炉技術に関する実機検証・実用化例
Example of development and commercialization of blast furnace technology

Classification	Technology
Sensing and prediction	High temperature thermocouple (2000 Kakogawa) EMF (electromotive force) sensor (2004 Kimitsu) 3D-VENUS (3 Dimensional Visual Evaluation and Numerical analysis System of Blast Furnace Operation) (2008 Nagoya) Tracking of burden materials by using RFID (Radio Frequency Identification) (2010 Kashima) Observation of the inside of BF by cosmic-ray muon (2011 Nagoya, 2013 Kimitsu) Application of DEM simulation to blow-in operation (2014 Kimitsu) Continuous melted iron and slag temperature measurement (2013 Muroran) Tuyere camera (2015 Kimitsu) Online estimation of cohesive zone shape (2016 Kurashiki) Prediction method of gas channeling (2017, 2018 Kakogawa)
Burden materials	Utilization of large amount of small size sinter (2002 Fukuyama) High MgO (dolomite) sinter (2003 Kashima) Sinter produced by lime stone and coke breeze coating granulation (2005 Kurashiki) CaCl ₂ coating sinter for RDI improvement (2008 Kimitsu) Low C/S sinter (2009 Kokura) All pellets operation (2002 Kobe) High DRI (Direct Reduced Iron) ratio operation (2001 Nagoya) RCA (Reactive Coke Agglomerate) (2012, 2016 Oita) High DI coke and high RI sinter (2003 Yawata) High reactivity coke (2003 Muroran)
Burden distribution	Flat burden distribution (2000 Fukuyama) Mixed coke charging, FCG (Flow Control Gate) dynamic charging (2005, 2008 Chiba) Center coke charging (2006 Kakogawa) Mixed nut coke charging (2007 Kakogawa, 2015 Keihin) Supporting system for controlling burden distribution (2007 Kashima) Application of DEM simulation to burden distribution control (2014 Kimitsu)
Tuyere injection	Low VM (high CVL (Calorific Value in Lower part of BF)) coal for PCI (2004 Muroran) Higher steam coal ratio in PCI (Kakogawa 2014) High PCR at low blast temperature (2001, 2002 Fukuyama) Convergent and divergent tuyere (2007, 2014 Kakogawa, 2013, 2014 Kobe) High dispersive lance for PCI (2004 Fukuyama) Flux added waste plastics injection (2005 Fukuyama) NG (Natural Gas) injection (2006, 2013 Keihin) LD-slag injection (2015 Kobe) Adjustment of unbalance of PCI (2017 Oita)
Productivity	High productivity (2.3) operation (2000 Mizushima) High productivity (2.3) and low RAR (460) operation (2002 Kimitsu) High productivity (2.3) and low CR (323) operation (2004 Kakogawa) High productivity (2.56) operation (2013 Keihin) Low productivity (1.2) operation (2009 Kokura)
Facilities	Extension of BF campaign life (2005 Wakayama, 2018 Chiba) Whole casting repair at main runner in hot condition (2000 Wakayama) Wet type gunning to BF throat (2001 Wakayama) Carbon block with high corrosion resistance (2003 Kimitsu) Long period shutdown for stove replacement (2005 Nagoya, 2005 Kakogawa, 2006 Kure, 2016 Muroran) Design of new hot stove with mathematical model (2008 Kashima) Bosh cooling bar (2016 Kimitsu)
Relining	Relining and blow-in operation (2000 Nagoya, 2002 Kokura, 2002 Mizushima, 2004 Kimitsu, 2005 Oita, 2005 Keihin, 2005 Kashima, 2006 Fukuyama, 2007 Fukuyama, 2008 Kashima, 2009 Kobe, 2013 Fukuyama) Additional tap hole (2009 Muroran)
Others	Desiliconization in hot metal runner (2012 Kobe)

は非常に困難なため、炉体のステーブに設置した温度センサー(約500個)と、装入物の充填状況、ガスの流れを検知するシャフト圧力センサー(約20個)から得られるデータを、秒単位で3次元データ化表示できる“3D-VENUS”(図4)¹⁷⁻¹⁹⁾が2007年に日本製鉄名古屋に導入されている。近年、データ活用、人工知能(AI)やディープラーニングを

使った高度IT技術の進歩はめざましく²⁰⁾、これらの技術を活用した高炉操業技術にはさらなる進展が期待される。

3.2 還元材比低減技術

還元材比の抜本的な低減技術²¹⁾として、熱保存帯温度制御による還元材比低減技術の実用化が大きく進展した。

表2 原料・焼結技術に関する実機検証・実用化例
Example of development and commercialization of iron ore sintering technology

Classification	Technology
Granulation	Capacity enhancement of HPS (Hybrid Pelletized Sinter) (2001 Fukuyama)
	Lime stone and coke breeze coating granulation (2005 Kurashiki)
	RF-MEBIOS (Return Fine Mosaic Embedding Iron Ore Sintering) (2009 Wakayama)
	P type separate granulation process (2010 Wakayama)
	APD (Anionic Polymer Dispersing agent) (2010 Yawata)
	Semi-pellet process (with roller press and polymer dispersant) (2013 Yawata)
	Double layer magnetite mini-pellet (2017 Kakogawa)
Micro-particles binder addition (2017 Wakayama)	
Low SiO ₂ sinter	Low SiO ₂ sinter (2000 Fukuyama)
	Dolomite sinter (2003 Wakayama)
Charging, feeder	Coke upper charging (2001 Kakogawa)
	Double air segregation feeder (2001 Oita)
Capacity enhancement	Stand-support sintering (2002 Kimitsu, 2016 Nagoya)
	Capacity enhancement of sintering machine (750 mm height) (2011 Oita)
	Pallet width extension (2002 Chiba)
Environment and energy saving	Hydrocarbon gas injection (Super-SINTER) (2012 Keihin)
	Improvement of waste gas recirculation system (2010 Kakogawa)
	Two-stage combustion burner with high velocity (2018 Kurashiki)
	Recovery system of cooler waste gas (2000 Kashima)
	Circular hopper cooler (2016 Wakayama)
LCC (Lime Coating Coke) (2013, 2014 Oita)	
Other	Paper sludge addition (2002 Kakogawa)
	Visualization system of sintering machine (pallet wind leakage monitoring system etc.) (2011 Kimitsu)

実機化技術の例として、炭材と鉄源の複合非焼成塊成物である含炭塊成鉱 RCA (Reactive Coke Agglomerate)²²⁻²⁴⁾がある(図5)。本技術では、炭材とダスト等の鉄源を皿型造粒機でペレット状に成型し、未焼成のまま原料として高炉に装入する。RCAは、酸化鉄と炭素の近接配置により炭素のガス化が低温から活発に進行し、高炉での熱保存帯温度を低減させ、高炉の還元効率が向上する。この技術は2012年に日本製鉄大分で実機化され、炭素を20%含有するRCA使用条件においてRCA由来炭素1kg-C/tHM (Hot Metal)あたり、0.36kg-C/tHMの還元材比低減効果が得られている。

また、石炭の熱可塑性を利用して熱間成形により塊成化し、RCAと同様の還元材比低減機構を有するハイブリッド結合鉱石²⁹⁾の開発も推進された。さらに、鉄源と炭材の複合新塊成物のもう一つの例として、フェロコークスの製造技術開発が進められている(本稿6.2節に記載)。

鉱石層へのコークス多量混合装入は、融着帯における鉱石の溶融収縮を抑制して空隙率を維持し、炉内の通気性改善効果が期待できる。本技術はJFEスチール(株)千葉6BFで実機適用され²⁶⁻²⁸⁾、焼結鉱と塊コークスを2つの炉頂バンカーから同時切り出しを行うとともに、偏析抑制のため炉中心から周辺に向かって装入する逆傾動装入が実施されている。また、FCG(流量調整弁)を活用し、経時的に鉱石とコークスの切り出し量を制御するダイナミック制御技術を適用してコークスの混合性を向上させ、還元材比低減効果が得られている。

さらに、水素含有量が高い還元材である天然ガス(CH₄主体)吹き込みがJFEスチール京浜2BFで実機化され^{26,27)}、

高水素濃度還元ガスによる還元促進と融着帯の空隙確保により高炉下部通気性が大きく改善する効果が確認されている。

3.3 ペレット多量使用技術

(株)神戸製鋼所加古川2BFでのペレット70%配合操業試験を経て、同神戸3BFでオールペレット操業(ペレット73%、塊鉱石27%)が実施されている²⁹⁾。ここでは、コークス中心装入による中心ガス流形成および微粉炭吹き込み操業による低熱流比操業により、還元停滞現象が改善する可能性が示されるとともに、周辺部の低塩基度ペレット配合比を30%以下にすることを目的としてペレット時系列排出制御が開発され、実用化されている。

3.4 羽口吹き込み技術

微粉炭多量吹き込みに対応するための技術開発が推進され、燃焼率制御手段としてのダブルランス方式や、羽口部圧損および圧損の変動防止とレースウェイ内燃焼の確保を目的としたラバール型新羽口(CD羽口)等が実機適用されている²⁹⁾。また、レースウェイ奥のいわゆる“鳥の巣”部のスラグ粘度を低下させ、スラグの滴下を促進して通気改善をねらうことを目的として転炉スラグ吹き込みが神戸製鋼所神戸で実施され³⁰⁾、通気改善効果によるコークス比低減が得られている。

一方で吹き込み量アップに伴う課題として、特に高炉炉芯表層へのコークス粉蓄積量の増大が指摘されており、今後さらに低還元材比操業を指向する場合には、炉芯の通

表3 コークス技術に関する実機検証・実用化例
Example of development and commercialization of cokemaking technology

Classification	Technology
Coal pre-treatment	SCOPE Pre-treatment (2008 Oita, 2013 Nagoya) CMC (Coal Moisture Control) (2017 Keihin)
Construction and pad-up	SCOPE type coke oven (2008 Oita 2013 Nagoya) Construction of new battery (2006 Fukuyama, 2010 Wakayama, 2012 Kashima, 2017 Kashima) Pad-up (2008 Muroran, 2012 Muroran, 2017 Chiba, 2017 Kurashiki) Optimum design of coke oven heating-up burner (2018 Kimitsu)
Hot banking	Hot banking operation (2013 Yawata, 2016 Nagoya)
Repair of coke oven chamber	Hot repair of the middle part of oven chamber (2001 Mizushima, 2010 Kashima) Hot repair of the end part of oven chamber (2001 Mizushima, 2007 Kimitsu) Coke oven chamber wall diagnosis and repair machine; DOC (Doctor of Coke Oven) (2002, 2006 Oita, 2009 Kimitsu) Repair of damaged hole in the center of coke oven chamber wall using DOC (2014 Kimitsu) Repair by CVD (2003 Fukuyama) Ceramic welding machine (2005 Kakogawa, 2007 Kurashiki) Repair equipment for upper end part of oven chamber (2007 Sakaide) Welding machine on the oven top (V-CRM) (2013 Kakogawa)
Observation of coke oven chamber	Mobile chamber width measuring system (2001, 2002 Kakogawa) Coke oven chamber observation device mounted on the pusher (2006 Kakogawa) Coke oven chamber width measuring device mounted on the pusher (2008, 2009 Kakogawa) Coke oven chamber wall monitoring system (2011 Kakogawa) 3D measurement of coke oven chamber wall (2018 Sakaide)
Repair and observation of combustion chamber	Observation and repair equipment of combustion chamber (2001 Yawata) Observation equipment of regenerator (2009 Kashima) Observation equipment of combustion chamber (2005 Kakogawa, 2013 Kurashiki) Repair of combustion chamber (2013 Kakogawa)
Other repairs	Repair of waste gas duct (2008 Wakayama) Repair of butterfly valves in waste gas duct (2008 Sakaide) Dry main renewal (2001 Muroran, 2008 Nagoya, 2014 Kitakyushu, 2016 Chiba) Profile determination of CDQ chamber with 3D laser scanner (2014 Kashima)
Operation and facilities	Improvement in automatic coke oven operation (2000 Oita) Coke oven operation support system (2000 Chiba) Waste gas circulation combustion system (2002 Yawata) DRG (Dilute Rich Gas) (2016 Yawata) Sliding combustive device on top of the ascension pipe (2009 Wakayama)
Carbon deposition control	Carbon deposition control by atomized water injection into oven free space (2001 Muroran) Carbon removal lance (2008 Kashima) Carbon control unit (Carbon Incineration Revolution) (2011 Nagoya, 2014 Oita, 2018 Kimitsu)
Environment	Cleaning equipment for charging hole (2003 Kashima) Detector of gas leakage from coke oven doors (2006, 2007 Kakogawa) Coke oven door monitoring system (2010 Kakogawa) Dust monitoring system by β -ray (2009 Sakaide) New coke oven door sealing system (2013 Kakogawa)
Recycling, etc.	Waste plastic recycling (2001 Nagoya, 2018 Wakayama) Genetic analysis of activated sludge (2009 Kakogawa)

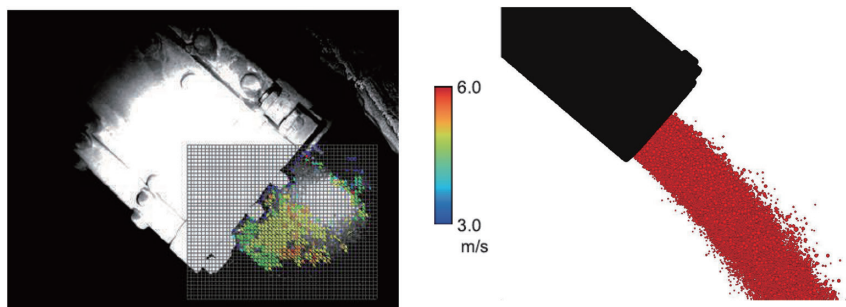


図2 実機装入シュートにおける鉱石粒子排出挙動のPIV解析とDEMシミュレーション

Sinter particle discharging velocity field analysis by PIV and snapshots of sinter particle discharging behavior simulated by DEM

気・通液性を確保するための通気改善技術が不可欠であり、装入物分布改善や原燃料使用技術がより重要になると

考えられる。

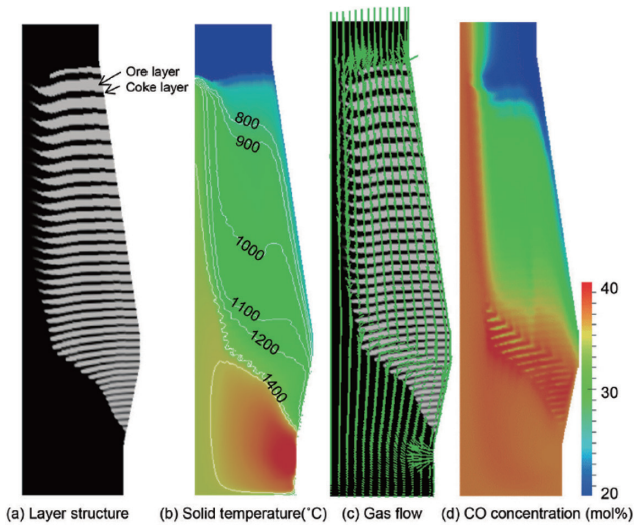


図3 高炉内層構造，温度分布等の計算結果
In-furnace states calculated by mathematical blast furnace model

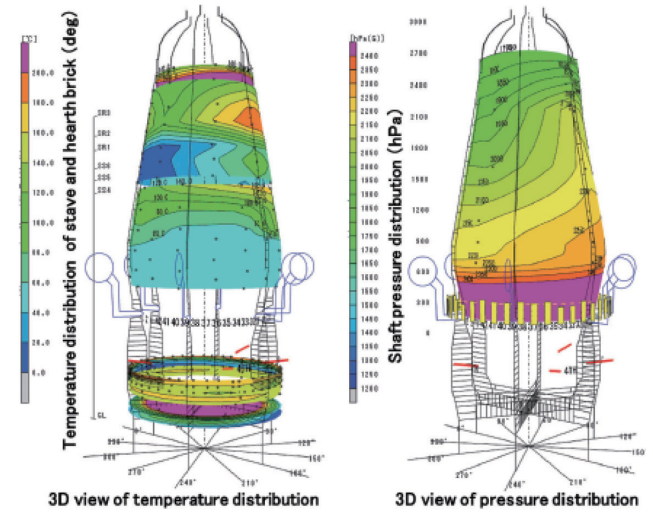


図4 3D-VENUSの表示例
Example of 3D-VENUS

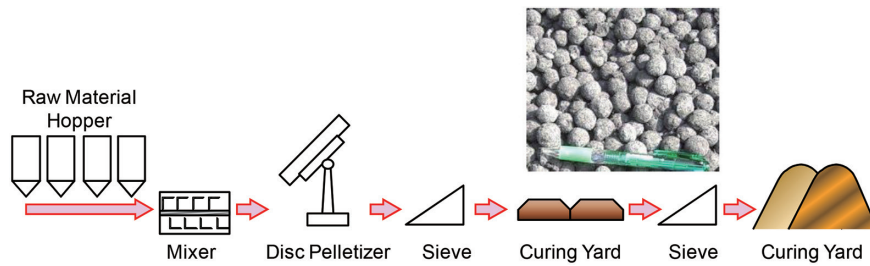


図5 RCAの外観とプロセスフロー
Appearance of RCA and process flow of RCA production

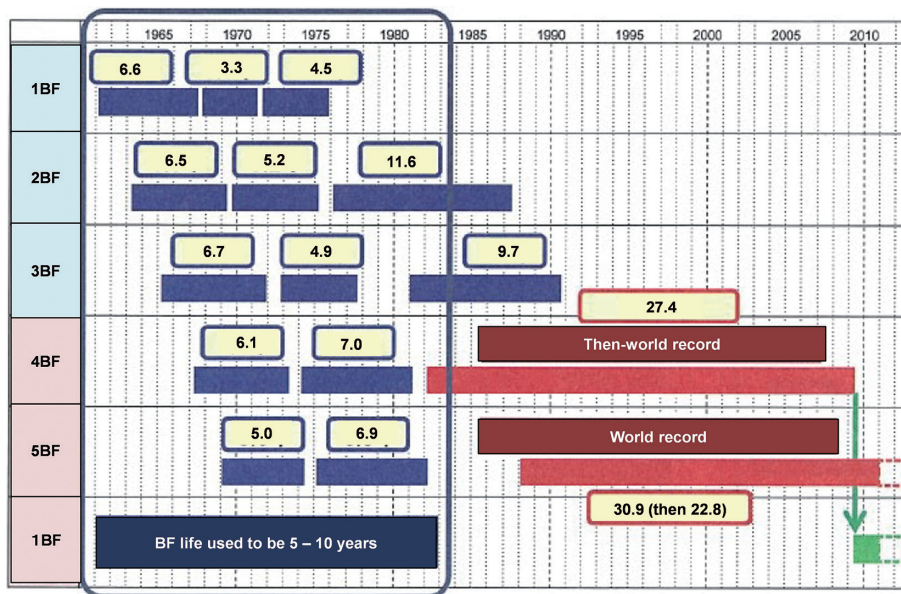


図6 和歌山製鉄所高炉稼働実績
Lives of the blast furnaces at Wakayama Works

3.5 高炉長寿命化技術

種々の高炉長寿命化技術の開発と実用化が進展した。特に日本製鉄和歌山4BFは、2009年7月の操業停止まで10001日(約27年4か月)という連続稼働日世界一の記録を達成した(図6)³¹⁾。さらに同和歌山5BFは、1988

年2月22日の火入れから2019年1月18日の吹き止めまで、11289日(30年11か月)という長期に渡って稼働を続け、高炉稼働日数の世界最長記録を更新した³²⁾。この長寿命化は、①ステーブ取り換え技術の開発、②炉底煉瓦浸食抑制技術の開発(図7)³³⁾、③シミュレーション技術の開発等の

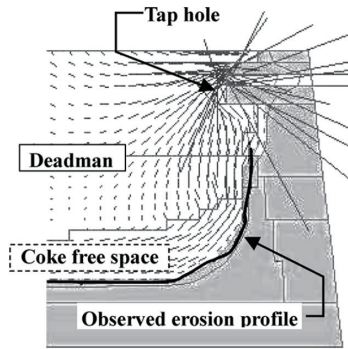


図7 炉底煉瓦浸食推定モデルによる推定と実績の比較
Estimated and observed erosion profile

組み合わせにより支えられており、今後実機適用のさらなる普及が期待される。

4. 原料・焼結技術の開発・実機化状況

4.1 資源対応力および生産性向上技術

世界で採掘される鉄鉱石資源は大きく変化している。鉄鉱石の性状変化に関してはさまざまなとらえ方があるが、まず微粉比率上昇をとりあげたい。焼結配合原料における微粉比率の上昇は、擬似粒子径の低下を招き、焼結層の通気性が阻害され、その結果として焼結生産性が低下する。焼結層の通気改善技術には多種多様なものがあるが、ここでは主に、種々の造粒技術の実用化例について述べる。

10mm程度の強固な粗大粒子を原料層に部分的に配置して焼結層通気空隙を確保する MEBIOS (Mosaic Embedding Iron Ore Sintering, 複合造粒装入焼結) 法が提案され、この方法の具現化として、乾燥した返鉄を焼結原料中に配合する方法 (RF-MEBIOS: Return Fine MEBIOS) が日本製鉄鹿島 3DL, 和歌山 5DL, 小倉 3DL で実機化された^{34,35)}。このプロセスでは、ダンパーで簡易分級された返鉄の粗粒部を造粒せずに造粒機から排出された造粒後の焼結原料へバイパス添加する (図 8)。この結果、乾燥返鉄を除く焼結原

料の水分アップによる造粒強化と、乾燥粒子添加に伴う粒子間摩擦力増加による空隙確保の両方の効果で、通気が改善し、4%の焼結生産性向上効果が得られている。

さらに、造粒性が悪い特性を持つ微粉増に対する造粒改善対策として、微粒子を造粒バインダーとして活用する造粒技術³⁶⁻³⁸⁾が開発、実機化されている。

一つ目は、乾式ローラープレス粉碎工程と高分子分散剤 (有機バインダー)³⁶⁾による微粒子分散工程等からなる SPExII ラインで造粒する方法 (高強度粗粒造粒物 (セミペレット) 製造設備) である (図 9)。この方法では、微粉鉄石間の空隙に高分子分散剤で分散させた 10 μ m 以下の超微粒子が、乾燥過程で再配列して強固な結合力を生じる効果を活用しており、2008 年から日本製鉄八幡で稼働開始して原料劣質化に対応している^{3,39)}。

二つ目は、縦型湿式ボールミルで製造した微粒子バインダーを活用して造粒する方法である^{37,38)}。この方法では、水中で鉄鉱石を微粉碎して懸濁させ、微粒子バインダーをスラリーで添加することで微粉鉄石間に効率的に分散させることが可能であり、高価な分散剤を使用せずに強固な造粒物を形成することが可能となっている (図 10, 図 11)。本技術は日本製鉄和歌山に導入され、微粉鉄石 13.3% 使用下において 2.4% の焼結生産性向上効果が得られている^{30,40)}。

また、石灰石・粉コークス外装造粒技術が JFE スチールで実機導入されている²⁷⁾。この技術は、粉コークスと石灰石をドラムミキサーの後端から装入して、鉄鉱石主体疑似粒子の外側に付着させることを特徴としている⁴¹⁾。本技術では、石灰石を疑似粒子表面に付着させることで、高被還元性一次ヘマタイトを多く残留させて焼結鉄被還元性向上を図るとともに、一次ヘマタイト間をカルシウムフェライトの高強度ボンドで結合することで歩留りを維持し、焼結過程での融液流動性を改善して熔融帯での通気性を向上させ、焼結生産性を向上することを指向している。さらに、

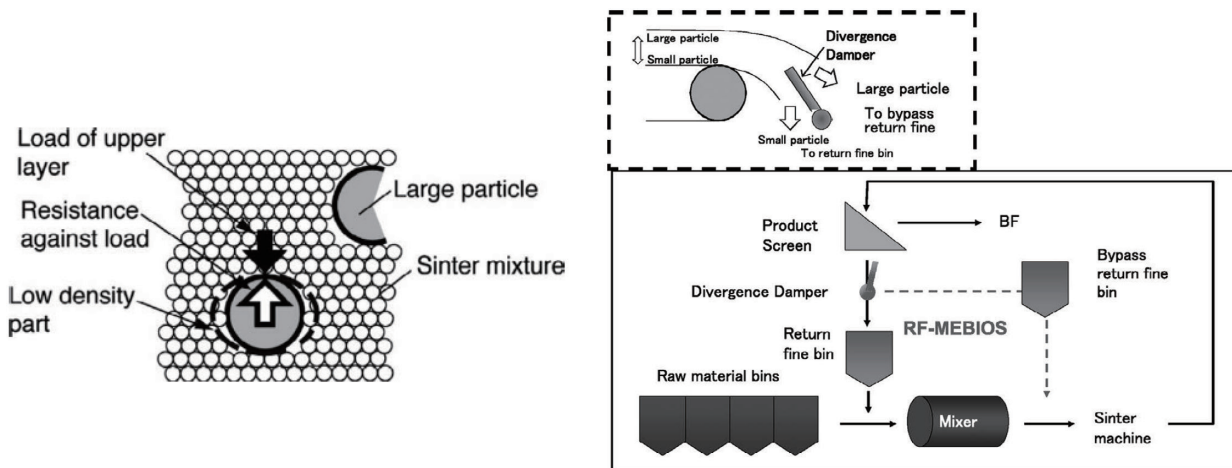


図8 MEBIOS 法の原理と RF-MEBIOS のプロセスフロー
Concept of MEBIOS and process flow of RF-MEBIOS

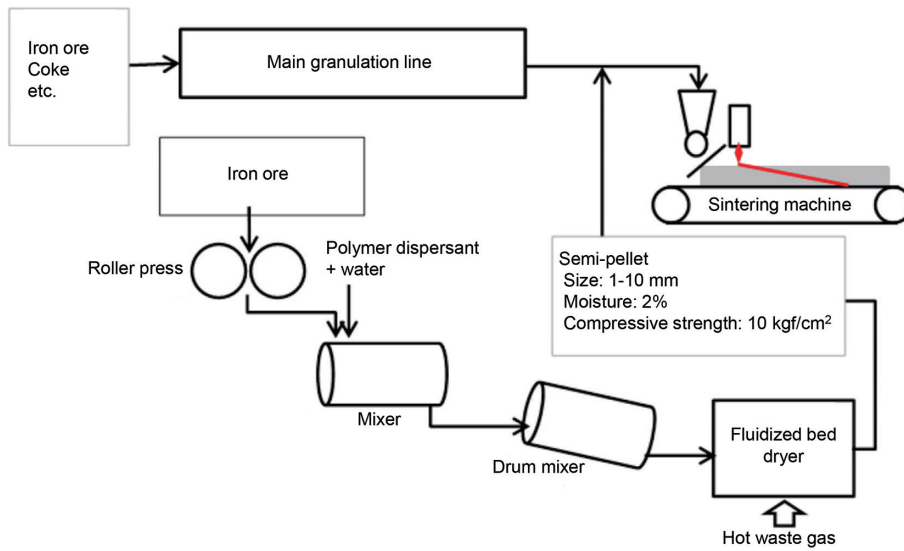


図9 高強度粗粒造粒物(セミペレット)製造設備のプロセスフロー
Granulation process flow by using roller press and polymer dispersant

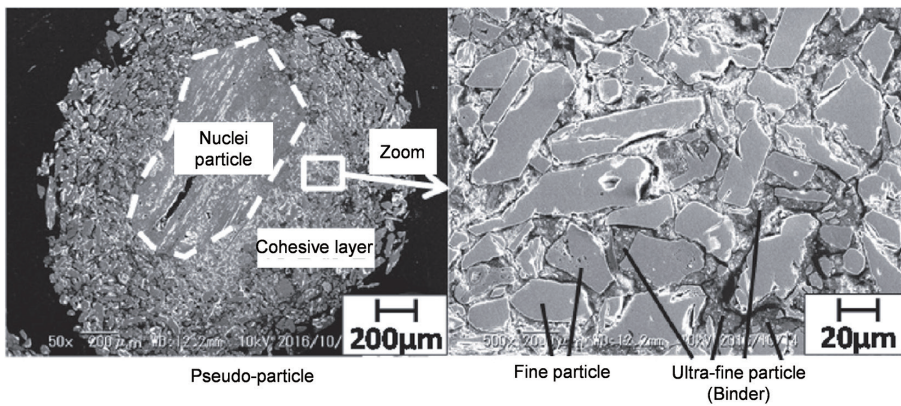


図10 微粒子バインダー添加による付着粉層内構造変化
Cohesive layer structure of pseudo-particle

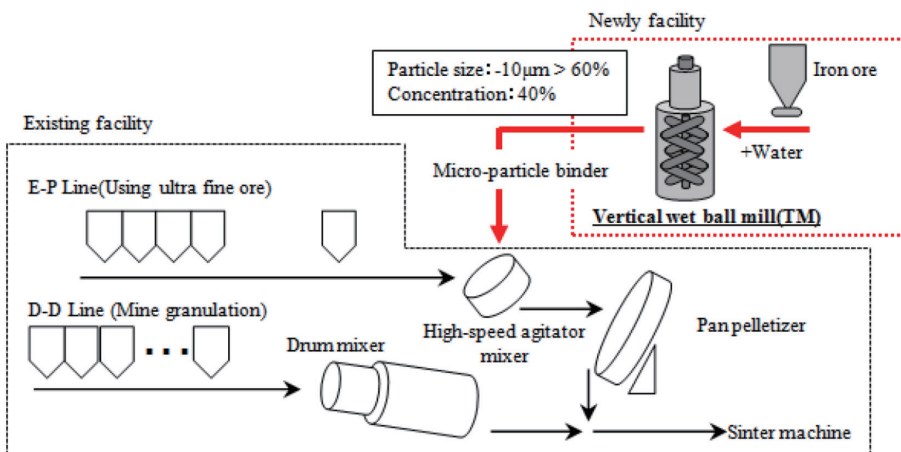


図11 縦型湿式ボールミルを活用した造粒プロセスのプロセスフロー
Granulation process flow by using vertical wet ball mill

粉コークスを被覆造粒することで、粉コークスの燃焼性を改善して低熱量焼結化により焼結鉱の被還元性向上を図るものである。

以上のように、2000年代には種々の画期的な造粒技術が開発された。併せて、スタンド支持焼結技術や高速攪拌ミ

キサー活用技術等の1990年代に開発された技術が多くの製鉄所へ普及した。中国の旺盛な鋼材需要を追風に、焼結機機長延長やパレット幅等設備増強が多くの製鉄所で実施されたが、開発・実機化された種々の通気改善技術により高層厚操業が可能となったことでサイドウォール高さ

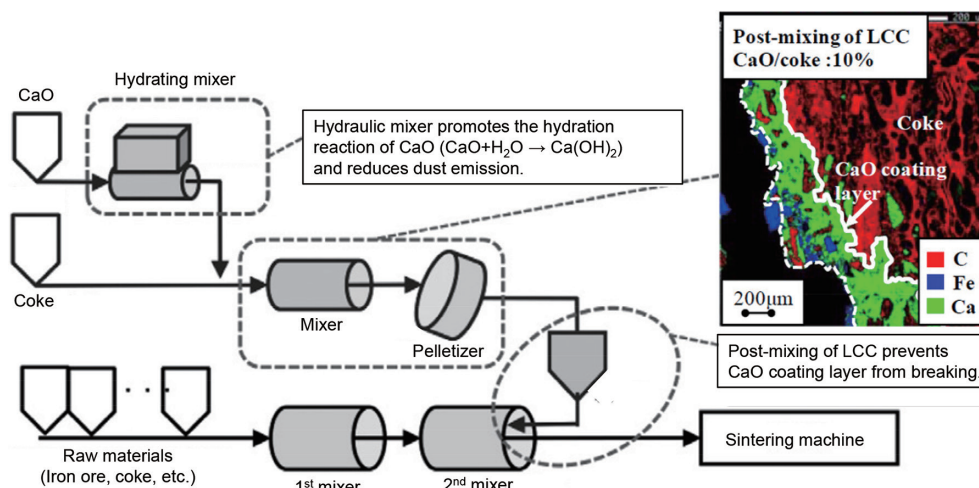


図12 LCCのプロセスフロー
Process flow of LCC

上昇等の高層厚化も図られ、焼結生産性向上に寄与している。

4.2 環境対応技術

ここでは、焼結排出 NO_x 低減技術と、焼結鉱品質（被還元性）改善による高炉還元材比低減（ CO_2 低減）技術を取りあげる。

焼結鉱製造工程における環境対応技術として、排出 NO_x 低減技術は極めて重要である。 NO_x 低減技術としては、排出 NO_x を焼結機外で脱硝設備により処理する方法が普及しているが、設備費と変動費が高額であるという課題があった。この課題を解決する技術として、 NO_x 発生源である粉コークスを改質し、焼結ベッド内で、粉コークスが燃焼する過程で発生する NO_x を低減する技術（LCC：Lime Coating Coke）が開発されている^{42,43}。本技術では、図12に示すように、粉コークスと生石灰を水和反応させた消石灰（ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ）を混練後に造粒し、粉コークス表面を $\text{Ca}(\text{OH})_2$ で被覆した改質コークスを製造し、焼結プロセスに用いる。この技術は2013年に日本製鉄大分に導入され、 NO_x 排出量を15%低減するとともに、粉コークス造粒により焼結歩留り1.1%改善、 0.6t/d/m^2 の生産率向上効果が確認されている。

また、炭化水素ガスの焼結層吹き込み技術が実用化されている^{26,27}。この技術では、熱不足となる焼結ベッド上層部への熱補てんを目的として、焼結ベッド表層より炭化水素ガスを供給する。これにより、焼結ベッド内において、最高温度を上昇させずに温度域 $1200\sim 1400^\circ\text{C}$ の保持時間が延長され、液層焼結を進行させつつ、強度と被還元性に優れたカルシウムフェライトを残留させること、および $1\mu\text{m}$ 以下の微細気孔を残存させることで、高強度高被還元性の焼結鉱製造が可能となっている。実機では、炭化水素ガスとして都市ガスが使用され、焼結機上に点火炉に隣接して機長方向1/3の範囲で都市ガス添加用フードを設置し、

下方吸引している大気に所定量の都市ガスを混合している。

5. コークス技術の開発・実機化状況

5.1 資源対応力および生産性向上技術

資源に乏しい日本では、世界に先んじて石炭調湿・乾燥（CMC、DAPS）や成型（BBCP）等のコークス用事前処理技術を開発・実機化し、安価劣質原料である非微粘結炭の多量使用を実現してきた⁴⁴。そして、さらなる石炭資源対応力向上（良質原料炭（強粘結炭）高騰・枯渇リスクへの対応力向上）、コークス生産性向上、環境対応力向上、省エネルギーを目指し、新コークス製造プロセス（SCOPE21：Super Coke Oven for Productivity and Environment Enhancement toward the 21st century）の開発が国家プロジェクトで推進された。調査研究は1994年にスタートし、2002年から2003年にかけて、日本製鉄名古屋に建設されたパイロットプラントで操業試験が実施された。

その後SCOPE21プロセスは、2008年に日本製鉄大分No.5コークス炉^{45,46}、2013年に同名古屋No.5コークス炉（図13）^{47,48}で実機化された。これはコークス技術部門においてこの20年で特筆すべき成功事例といえる。SCOPE21は、粉碎した石炭を乾燥と同時に粗粒炭と微粉炭に分級した後、急速加熱処理を行い、約 250°C の高温でコーク



図13 名古屋SCOPE炉の外観
Overview of Nagoya No.5 SCOPE21 type coke oven battery

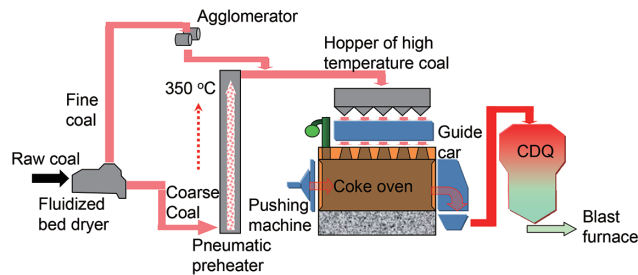


図 14 SCOPE21 のプロセスフロー
Process flow of SCOPE21

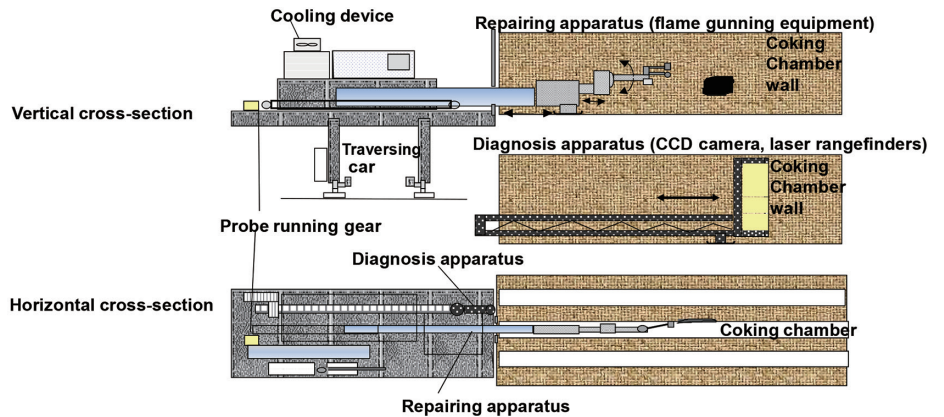


図 15 炭化室診断・補修装置 (DOC) 全景と概要
Overview of coking-chamber wall diagnosis and repair equipment and its schematic diagram

ス炉に装入するプロセスである (図 14)。本技術では、石炭軟化開始温度前である $350 \sim 400^\circ\text{C}$ まで石炭を急速昇温処理することによる改質効果を活用しているが、この改質原理は、急速加熱により分子間相互作用低下による構造緩和がおり、易動性成分 (mobile 成分) が増加した効果である⁴⁹⁾。本プロセスは、低品位原料使用比率を従来より大幅に高い 50% まで拡大できるだけでなく、既設コークス炉に対して、1.7 倍の生産性向上、原油換算で約数万 kl/ 年の省エネルギー、 $10 \sim 20$ 万 t/ 年の CO_2 削減効果を発揮している。

5.2 コークス炉長寿命化技術

日本のコークス炉の平均炉齡は現状で約 40 年にも到達しており、SCOPE21 のような新コークス製造プロセスの導入と並行して、休止炉の再稼働や既設炉のパドアップ、積み替え補修が進められるとともに、コークス炉長寿命化技術の開発・実機化も継続して進められている。長寿命化には、炉壁損傷部の早期発見および定量的診断による計画的な補修が必要であるが、従来の炭化室の補修は、オペレーターが目視観察を行い、その情報に基づいて人力で補修を実施するものが主であった。これらの課題を解決するため、熱間で高精度に炉壁を診断、補修する装置 (DOC: Doctor of Coke Oven, 図 15)⁵⁰⁾ の開発が進められ、2003 年に日本製鉄大分で実機導入された。

DOC はその後日本製鉄で順次実機導入され³⁾、近年では

さらに高機能化が進み、炉壁下部のみならず炉壁破孔も補修可能となっている⁵¹⁾。また、コークス炉炉壁観察画像から求めた炉壁凹凸情報からコークス押し出し負荷を推定する技術も開発されている⁵²⁾。さらに、コークス炉煉瓦構造に不連続体構造解析手法が適用され、コークス炉煉瓦構造タイプ別に剛性と強度が評価され、老朽化による縦貫通亀裂および炉壁破孔発生メカニズムが科学的に解明されている⁵³⁾。

その他国内では、常設型の炭化室内観察装置や炉幅測定装置、炉壁溶射装置、燃焼室観察装置などさまざまな観察・補修技術が実機導入され、コークス炉老朽化の進行とともに炉寿命延長対策技術は大きく進展している。

コークス炉操業面では、炉壁の損傷や肌荒れが進行している老朽コークス炉においては、押し出し負荷に影響を及ぼす炭化室炉壁付着カーボンを従来以上に適切に管理することが重要である。日本製鉄名古屋では、排ガス中の O_2 濃度をもとに、カーボン焼却時間を調整して押し出し負荷をコントロールするカーボン制御装置 (図 16) が導入されている⁵⁴⁾。この技術では、排ガス中の CO_2 濃度 (O_2 濃度より換算) が炉壁付着カーボン状況の指標になると考え、押し出し負荷が適正となるように設定した CO_2 濃度となるようカーボン焼却時間を調整している。また、稼働中の実機コークス炉において、石炭装入時から押し出しまでの炉壁変位と炭化室内発生ガス圧力の経時変化が測定され、装入時の炉壁変位が最も大きく、ガス圧力が高いと炉壁変位も大きくなること

○ Technology development timetable

FY	2008	2013	2018	2023
Phase I -STEP1	[Progress bar from 2008 to 2013]			
Phase I -STEP2	[Progress bar from 2013 to 2018]			
Phase II -STEP1	[Progress bar from 2018 to 2023]			
Phase II -STEP2	[Progress bar from 2023 to 2028]			

① Development of reduction technology for CO₂ emissions from blast furnaces ② Development of CO₂ capture technology

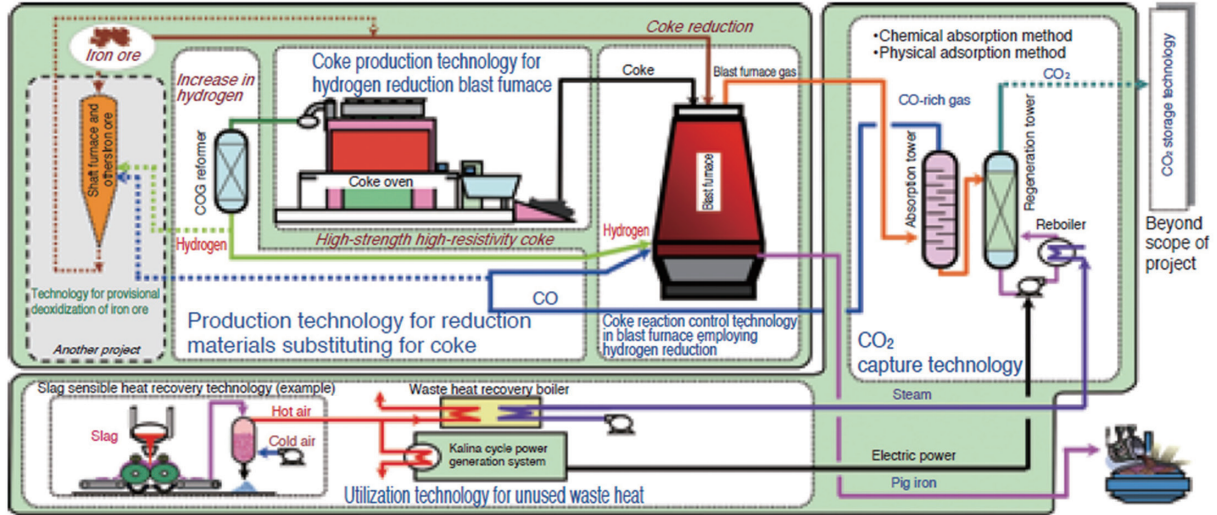


図 17 環境調和型プロセス技術開発 (COURSE50) の概要

Outline of the development of COURSE50 (CO₂ Ultimate Reduction System by innovative technology for cool Earth 50) project

ギー構造の変化から還元鉄生産の復活が見込まれつつある。

石炭を還元材として用いるプロセスとしては、先述した RHF に加えて、粉鉱石と粉石炭からスラグ分を分離した“粒鉄”を直接製造するプロセスである ITmk3 法⁶⁾が開発され、アメリカ、ミネソタ州に年産 50 万 t の実機 1 号機が建設された。FINEX 法も石炭ベースで粉鉱石を還元し、溶銑を製造するプロセスとして商業機が立ち上がっている。2 号機の能力は 150 万 t/y (4300t/d) で、2007 年より商用生産を開始し、2008 年の還元材比は 720kg/t (石炭ブリケット 510kg/t, 微粉炭 150kg/t, コークス 60kg/t) となっている。

7. おわりに

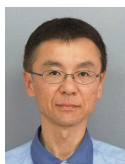
本稿では、主に 2000 年代の日本国内における製鉄技術の開発・実機化概要の事例について述べた。21 世紀の最初の 20 年間は製鉄技術部門が激動の変化を経験した時代であったが、製鉄を取り巻く環境は今後さらに厳しくなると考えられる。エネルギー・環境問題、労働人口減少、設備老朽化、グローバル競争激化、原料価格高騰・劣質化等、種々の制約条件の中で、高効率安定操業を実現することが国内製鉄プロセス存続の必須条件になると考えられる。本特集号の各論文に記載されているような、究極を目指した新技術の開発と実用化により、新しい時代が切り開かれる

ことを確信している。

参考文献

- 1) 日本鉄鋼協会生産技術部門：ふえらむ. 23, 204 (2018)
- 2) 内藤誠章：新日鉄技報. (384), 2 (2006)
- 3) 高松信彦 ほか：新日鉄技報. (391), 79 (2011)
- 4) 内藤誠章 ほか：鉄と鋼. 100, 2 (2014)
- 5) 有馬孝 ほか：鉄と鋼. 100, 110 (2014)
- 6) 川口尊三 ほか：鉄と鋼. 100, 140 (2014)
- 7) 武田幹治, 有山達郎, 肥田行博・野坂庸二, 野村誠治 ほか：日本の鉄鋼の発展を支えてきた製鉄・製鋼技術. 第 217・218 回西山記念技術講座. 日本鉄鋼協会, 2014
- 8) 三尾浩 ほか：新日鉄住金技報. (410), 80 (2018)
- 9) Mio, H. et al.: ISIJ Int. 57, 272 (2017)
- 10) Narita, Y. et al.: ISIJ Int. 57, 429 (2017)
- 11) 夏井琢哉 ほか：材料とプロセス. 23, 1003 (2010)
- 12) 西岡浩樹 ほか：新日鉄住金技報. (410), 73 (2018)
- 13) 西岡浩樹 ほか：材料とプロセス. 25, 957 (2012)
- 14) 中野薫 ほか：鉄と鋼. 92, 939 (2006)
- 15) Nippon Steel Monthly. (183), 1 (2008.11)
- 16) 篠竹昭彦 ほか：鉄と鋼. 95, 665 (2009)
- 17) 伊藤雅浩 ほか：材料とプロセス. 19, 302 (2006)
- 18) 松崎真六 ほか：材料とプロセス. 21, 42 (2008)

- 19) Nippon Steel Monthly. (176), 13 (2008.3)
- 20) 吉沢一郎 ほか：新日鉄住金技報. (411), 2 (2018)
- 21) Ujisawa, U. et al.: ISIJ Int. 45, 1379 (2005)
- 22) Yokoyama, H. et al.: ISIJ Int. 52, 2000 (2012)
- 23) 樋口謙一 ほか：材料とプロセス. 26, 17 (2013)
- 24) Higuchi, K. et al.: ISIJ Int. 57, 55 (2017)
- 25) 笠井昭人 ほか：材料とプロセス. 23, 564 (2010)
- 26) 佐藤道貴 ほか：JFE 技報. (32), 18 (2013.8)
- 27) 佐藤道貴 ほか：金属. 82, 950 (2012)
- 28) 渡壁史朗 ほか：JFE 技報. (22), 49 (2008.11)
- 29) 松井良行 ほか：神戸製鋼技報. 55 (2), 9 (2005)
- 30) 日本鉄鋼協会生産技術部門：ふえらむ. 23, 215 (2018)
- 31) 大河内記念生産賞受賞業績報告書「高炉長寿命化技術の開発」
- 32) 日刊鉄鋼新聞 (2019.2.20)
- 33) Inada, T. et al.: ISIJ Int. 49, 470 (2009)
- 34) Matsumura, M. et al.: ISIJ Int. 53, 34 (2013)
- 35) Yamaguchi, Y. et al.: ISIJ Int. 53, 1538 (2013)
- 36) 岡田務 ほか：鉄と鋼. 92, 735 (2006)
- 37) 河内慎治 ほか：鉄と鋼. 94, 475 (2008)
- 38) 上城親司 ほか：材料とプロセス. 25, 858 (2012)
- 39) 櫻村茂 ほか：材料とプロセス. 26, 741 (2013)
- 40) 原応樹 ほか：材料とプロセス. 30, 727 (2017)
- 41) 大山伸行 ほか：JFE 技報. (22), 32 (2008.11)
- 42) 日本鉄鋼協会生産技術部門：ふえらむ. 20, 189 (2015)
- 43) 片山一昭 ほか：鉄と鋼. 101, 11 (2015)
- 44) Nomura, S., ed. Suárez-Ruiz, I. et al.: New Trends in Coal Conversion–Combustion, Gasification, Emissions, and Coking. Duxford. U.K. Elsevier, 2019, 335p
- 45) 土井一秀 ほか：材料とプロセス. 22, 779 (2009)
- 46) Nippon Steel Monthly. (220), 8 (2012.7)
- 47) 岩橋秀起 ほか：材料とプロセス. 26, 774 (2013)
- 48) 新日鐵住金アニュアルレポート 2014. 39 (2014)
- 49) 齋藤公児 ほか：新日鉄技報. (384), 48 (2006)
- 50) 境田道隆 ほか：新日鉄技報. (384), 63 (2006)
- 51) 小林信太郎 ほか：新日鉄住金技報. (402), 45 (2015)
- 52) Sugiura, M. et al.: ISIJ Int. 53, 583(2013)
- 53) 山村和人 ほか：新日鉄住金技報. (410), 86 (2018)
- 54) 新納隆 ほか：材料とプロセス. 24, 147 (2011)
- 55) 上坊和弥 ほか：日本エネルギー学会誌. 90, 846 (2011)
- 56) 小島克利 ほか：材料とプロセス. 29, 645 (2016)
- 57) 加藤健次 ほか：新日鉄技報. (384), 69 (2006)
- 58) 日本製鉄, https://www.nipponsteel.com/news/20181126_100.html (Last access 2019.5.7)
- 59) 芳我徹三 ほか：新日鉄技報. (391), 194 (2011)
- 60) 井口雅夫 ほか：新日鉄技報. (394), 98 (2012)
- 61) 岡崎照夫 ほか：新日鉄技報. (391), 187 (2011)
- 62) NEDO, https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100050.html (Last access 2019.5.7)
- 63) NEDO: NEDO's Environmental Technology Activities in 2018
- 64) 武田幹治：JRCM NEWS. (323), 2 (2013.9)
- 65) 田中英年：金属. 82, 970 (2012)
- 66) World Steel Association: World Steel in Figures. 2018, 18p
- 67) 原田孝夫 ほか：神戸製鋼技報. 55 (2), 128 (2005)



野村誠治 Seiji NOMURA
プロセス研究所 製鉄研究部長 Ph.D
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511