

カーボンニュートラルに向けた JFE スチール製鉄分野の取り組み

Recent Development of Ironmaking Technology in JFE Steel toward Carbon Neutrality

佐藤 道貴 SATO Michitaka JFE スチール スチール研究所 主席研究員・博士 (工学)
深田喜代志 FUKADA Kiyoshi JFE スチール スチール研究所 製鉄研究部長 (理事)・博士 (工学)
長谷川伸二 HASEGAWA Shinji JFE スチール 製鉄技術部長 (理事)

要旨

前回の製鉄特集号 (2008 年) 以降、製鉄分野を取り巻く事業環境は大きく変化した。すなわち、中国の台頭による石炭、鉄鉱石価格の高騰と劣質化への対応に加え、2015 年のパリ協定以降は、地球温暖化問題への対応が最も重要な課題と認識されるようになった。

本論ではまず、これらを背景として JFE スチールの高炉、焼結、コークス各分野で実施してきた主要な技術開発-安価・劣質な資源の使用技術や高炉還元材比の低減技術等-について概括する。次いで将来のカーボンニュートラルの実現を見据えて当社が取り組んでいる革新的技術開発 (フェロコークスやカーボンリサイクル高炉) について展望する。

Abstract:

Since the last special issue on ironmaking (2008), the business environment surrounding the ironmaking field has dramatically changed. In other words, in addition to developing countermeasures to the soaring price of raw materials due to rise of China and deteriorating a raw materials grade, a countermeasure to the global warming becomes the most urgent issue since the Paris Agreement in 2015.

Against this background, this paper first summarizes the major technological developments; using technology of inexpensive and low grade resources and low RAR (reducing agent rate) technology at a blast furnace, that have been carried out in the fields of blast furnace, sintering, and coke-making of JFE Steel. Lastly, this paper will offer future prospects on the innovative technologies such as ferro coke and carbon recycling blast furnace that JFE steel is working on to realize the carbon neutrality in the future.

1. はじめに

2008 年に JFE 技報の製鉄特集号¹⁾ が発刊されてから 13 年が経過した。この間、製鉄分野を取り巻く事業環境は大きく変化した。この変化に対応した技術開発の特徴をいくつかのキーワードで代表させると、①資源価格高騰・劣質化への対応、②地球温暖化・カーボンニュートラルへの対応、および③デジタル化・データサイエンス技術の活用という 3 つに集約されるのではないだろうか。

本特集号においてはまず、製鉄分野をめぐる過去約 10 年間の環境変化を総括する。次いで、JFE スチールの製鉄分野で、上記キーワード (技術体系) に対応して開発されてきた様々な技術開発を紹介する。紙面の都合で①、②に関する技術を中心に述べるが、これらの技術開発内容の詳細については本特集号に掲載の各論文を、③に関しては、

データサイエンス特集号²⁾ 等を参照されたい。

2. 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³⁾。2000 年以降、日本の粗鋼生産量は 1 億トン/年弱に留まっている一方で、BRICs 諸国の著しい経済発展があり、特に中国の粗鋼生産量は、2020 年に初めて 10 億トン/年の大台を超えた。このような鉄鋼需要の増大により、2000 年以降、鉄鉱石、石炭価格は高騰し、現在も高止まりが続いている (図 2)^{4,5)}。また、品質の劣化も徐々に進展しており、劣質な資源を使いこなす技術開発が強く求められるようになってきている。

図 3 には全国平均高炉還元材比 (以下、RAR: Reducing Agent Rate) およびその内訳の推移を示す⁶⁾。1980 年以降、高炉操業は高価なコークスを比較的安価な微粉炭に置換する高微粉炭吹き込み (以下、高 PCR: Pulverized Coal Injection)

2021 年 10 月 4 日受付

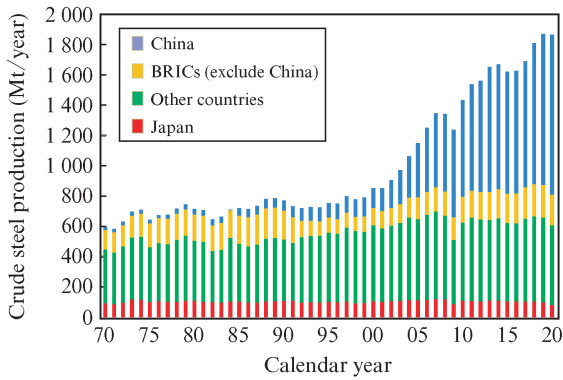


図1 世界の粗鋼生産量

Fig. 1 Trend of crude steel production in the world

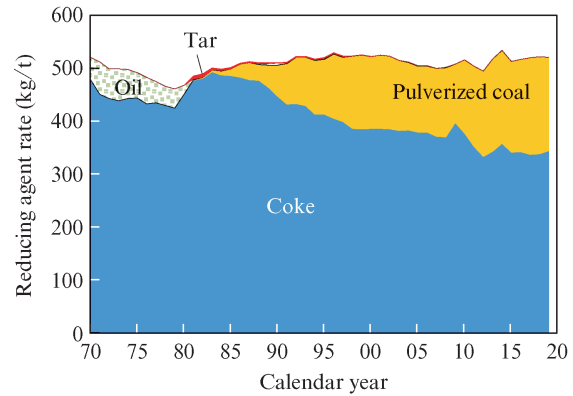


図3 我が国の還元材比推移

Fig. 3 Trend of reducing agent rate in Japan

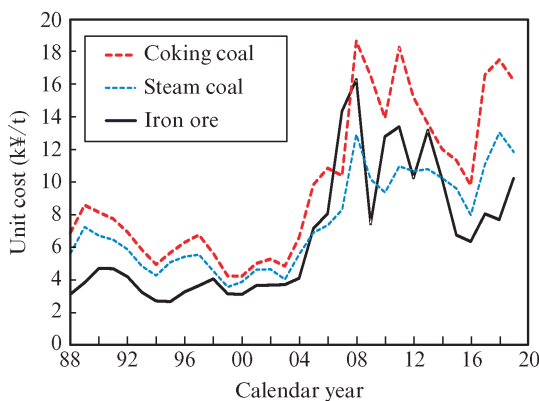


図2 我が国の原料価格推移

Fig. 2 Trend of raw materials unit cost in Japan

操業を志向してきたが、2000年代以降は鉄鋼業全体に対するCO₂削減への要請の高まりを受け、RARを削減するための技術開発へとシフトしつつある。しかし、図からも明らかのように、RARは近年、500~520 kg/tで頭打ちとなっており、ほぼ技術的限界に達していると言わざるを得ない。よって、さらなるRAR低減には従来の延長線上にないイノベーションが必須な状況となっている。

2010年代に入ると、地球温暖化防止に向けた対応は、国内外を問わず喫緊の課題と位置付けられた。2015年には地球気温の上昇を2℃以下に抑えるパリ協定が締結され、これ以降はカーボンニュートラルを実現することが世界的な潮流となった。我が国でも、政府による各種施策・計画が矢継ぎ早に打ち出され、2020年10月26日には、菅義偉総理(当時)による2050年カーボンニュートラル宣言が発表された。(一社)日本鉄鋼連盟はこれに先立つ2018年11月に“ゼロカーボン・スチールへの挑戦”を公表し、3つのエコ+革新技術(COURSE50やフェロコークス技術;4章に後述)に加え、水素還元製鉄やCCU(Carbon Capture and Utilization)を含む超革新製鉄の開発を2100年までに実現させるとしていたが⁷⁾、上記国内外の急激な動きを受け、

2021年2月には“我が国の2050年カーボンニュートラルに関する日本鉄鋼業の基本方針”を公表し、日本鉄鋼業としても2050年のゼロカーボン・スチールの実現に向け果敢に挑戦していくことを表明した⁸⁾。これらを受け、JFEホールディングスは2021年5月にJFEグループ環境経営ビジョン2050を発表し、2050年にカーボンニュートラルを実現するという野心的なビジョンと道筋を示した⁹⁾。

このような急激な経営環境の変化の中、当社の高炉、焼結、コークス各分野において、過去約10年の間に開発、あるいは実用化されてきた技術についてまず3章に概括する。そしてカーボンニュートラル実現を見据えた当社の革新技術の開発については4章で展望する。

3. 製鉄各分野における技術開発の概要

3.1 高炉分野

表1は最近約10年間の高炉分野における研究、開発事例をまとめたものである。

表1 高炉分野の主要技術開発

Table 1 Research and developments in blast furnace process

Process	Technology
Fundamentals	Solid flow, segregation and mixing behavior analysis model with DEM
Burden charging	High ratio coke mixed charging & FCG dynamic control
	Small coke mixed charging by segregation control in bunker
	Development of cohesive layer simulator
Tuyere injection	High PC injection supported by sophisticated mathematical simulation
	PC and LNG co-injection
Measurement	On-line coke fine measurement system
Data science	Blast furnace operation guidance system (Heat level in lower part, pig iron temperature, permeability)

低 RAR 操業のための炉頂ガス利用率向上に向けて、当社の独自技術である並列 3 バンカー (3PB) 型装入装置の多バッチ装入、同時切り出し機能を活用した塊コークス多量混合装入技術が 2006 年に東日本製鉄所 (千葉地区) 第 6 高炉 (以下、千葉 6 高炉。他の設備も同様に表記する) で実用化されていたが¹⁰⁾、さらに FCG (Flow Control Gate) ダイナミック制御技術が開発され、RAR の低減に寄与した¹¹⁾。一方、3PB や垂直バンカー等の形式によらず、小中塊コークスの適正使用による RAR 低減を目的に、バンカー内の偏析挙動を精細に制御する分布制御方法も開発された¹²⁾。また、炉上部での混合状態が融着帯部での還元や通気性にどのような影響を与えるかを実験的に解明することを目的に、融着層シミュレーターが新規に開発され¹³⁾、炉下部現象の解明に貢献している。混合装入を対象とした数値解析技術も大きく進展し、DEM 法 (Discrete Element Method) を用いた個々の粒子の炉内装入・偏析挙動や粒子間の反応挙動 (ガス化や還元挙動) を同時にかつ精緻に解析する技術が開発されている¹⁴⁾。

吹き込み技術に関しては、全高炉とも微粉炭多量吹き込みが指向されており、当社は実操業において偏芯ダブルランスを高燃焼率ランスと位置付けてきた¹⁾。近年は LES と拡張 CPD モデルを基盤とした高度な微粉炭燃焼モデル¹⁵⁾が提案されるなど、燃焼挙動の理解に資する数値解析技術が大きく進展した。一方、東日本製鉄所では高水素含有吹き込み材である LNG と微粉炭の同時吹き込み技術が開発され、出鉄比の増加や CO₂ 削減に効果を発揮してきた¹⁾。さらなる PCR 増加や CO₂ 削減を目的に LNG と微粉炭ランスの適正配置条件や微粉炭/LNG 多重管ランスなどが提案され、実験炉および数値シミュレーションによりその効果が検証されている¹⁶⁾。

高炉の計測関連では、リアルタイム計測技術が進展した。装入原料であるコークスの粉率をベルトコンベア上でカメラ画像の輝度解析を行うことにより、オンラインで計測する技術が実用化され¹⁷⁾、装入原料性状の把握に大いに役立っている。また高炉の各種検出炭情報 (Physical) から仮想的なサイバー (Cyber) 空間上へとモデル化を行う CPS (Cyber physical system) 化が飛躍的に進展し、炉熱・溶銑温度や通気性をガイドするシステムが実装された¹⁷⁾。今後はさらに自動操業を実現させるためのツールとしての発展が期待される。

図 4 には高炉内容積の変遷、および高炉操業の代表諸元として PCR の推移を 2003 年の平均値に対する相対値で示す。高炉内容積は概ね 40 000 m³ と一定であり、2010 年以降、設備を増強しながら徐々に PCR を増加させている。コロナ禍の影響で、2019~2020 年にかけて福山 4 高炉の一時的なバンキングや倉敷 4 高炉の改修に向けた吹き止めを実施したため、多少の変動はあるものの、過去 10 年の間に約 50 % 吹き込み量を増加してきた経緯が理解されよう。

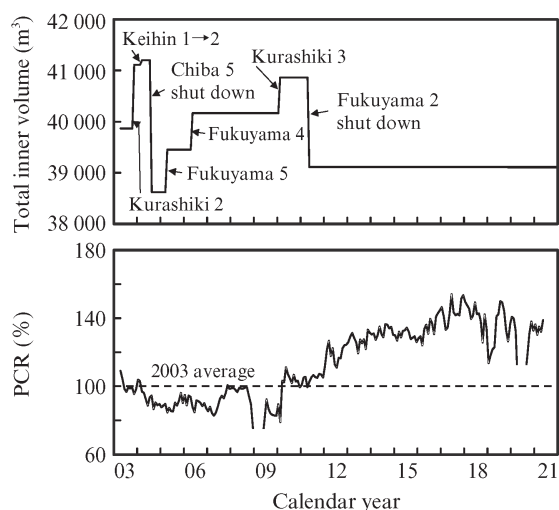


図 4 高炉内容積と PCR の推移

Fig. 4 Trend of inner volume of blast furnace and PCR

3.2 焼結分野

焼結原料は、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の枯渇に伴う高結晶水鉱石の増加、さらには脈石成分 (特に SiO₂, Al₂O₃) の増加による原料品質の劣化が進んだ。これら原料の変化は、焼結機の生産性低下や凝結材原単位の上昇を招くとともに、強度を低下させるといった問題を引き起こす。表 2 はこれら課題に対して過去約 10 年の間に焼結分野において研究、開発された事例をまとめたものである。

表 2 焼結分野の主要技術開発

Table 2 Research and developments in sintering process

Process	Technology
Fundamentals	Intra-particle water migration dynamics
	Dephosphorization technique
Granulation process	Limestone and coke breeze coating granulation
	Agitating, mixing and granulation model
New agglomerate	Carbon core pellet
	Return fine agglomerate
Carbonaceous bonding agent reduction	Sintering with combined usage of coke breeze and gaseous fuel (Super-SINTER TM)
	Super-SINTER TM with oxygen enrichment
	Utilizing oxidation heat of magnetite ore
	Biomass usage as bonding agent
Sinter quality	RDI reduction
Sintering machine	Two-stage combustion burner at ignition furnace
	Pallet length extension (Keihin 2 sintering machine)
	Restart operation (Fukuyama 3 sintering machine)

混合・造粒技術に関しては、2000年代前半に石灰・コークス外装法が開発され、生産性向上や被還元性 (RI) 改善が実証されたため、2011年までに当社7焼結機中、6焼結機に展開してきた¹⁸⁾。

焼結鉱品質を抜本的に改善する新塊成鉱として、2層ペレット製造技術が新たに開発された。この方法は炭材を核粒子として、微粉鉱石をペレタイジングにより被覆させて2層構造のグリーンペレットを得、これを焼結機で焼成することで、内部に炭材が残された塊成鉱を得るもので、RIが従来焼結鉱よりも著しく高いことが確認されている¹⁹⁾。

焼結機へのLNG吹き込み (Super-SINTER[®]) は、少量のLNGを焼結ベッド上部から吹き込むことで、高強度・高反応性のカルシウムフェライト相の生成に適した1200~1400℃の温度域を拡大できる画期的な方法である。2009年に京浜1焼結機で世界で初めて実機化され、焼結鉱品質 (強度TI、還元粉化指数RDI) の改善と凝結材の削減が検証された。比較的小規模の設備付与 (LNG吹き込みフード設置) で済むため、その後、当社の全7焼結機に実機展開された²⁰⁾。さらに、LNGと酸素を同時に吹き込み、生産性を向上する技術が千葉4焼結機で実機化された²¹⁾。これらの技術開発の結果、当社のRDIは継続的に減少してきており (図5)、高PCR、低RAR操業に寄与している。

一方、昨今のCO₂削減要請を鑑みると、焼結工程における炭材系の凝結材削減は大きな課題となっている。対策の一つとして、マグネタイト鉱石を原料として用い、その酸化熱を利用することで凝結材を低下させる技術が検討されている²²⁾。当社独自技術である磁気ブレイキ式装入装置と組み合わせることで、装入時の偏析が制御できる。また、産学連携による共同研究の一環として、カーボンニュートラル炭材であるバイオマスを利用するプロセスも実用化を目指して検討されている²³⁾。

焼結プロセスの基盤技術強化に関し、造粒や混合現象に関わる理解が大きく深化した。造粒時の水分浸透挙動と鉄鉱石性状との関係評価²⁴⁾、攪拌操作による微粉原料の混合・造粒過程の解明²⁵⁾など、今後進展する劣質化 (高結晶水鉱石増加、脈石成分増加、微粉化) を見据えた基礎研究が継続実施されている。また将来想定されるP (リン) の上昇に対しては、脱リン技術の開発が国プロにおいてオールジャパンで取り組まれている²⁶⁾。

なお、焼結生産量を抜本的に増大させる手段として、福山3焼結機の再稼働 (2019年12月)、京浜1焼結機の機長延長 (2020年3月) が実施され、この結果、図5に示すとおり焼結面積が約17%拡大している。また2015年に、倉敷2焼結点火炉で2段燃焼式高流速バーナーが開発、設置され、約30%の省エネを達成している²⁷⁾。大きなCO₂削減効果が期待できる技術として、全社展開中である。

3.3 コークス分野

図2に示したとおり、2000年以降、原料炭価格高騰を受け、コークス製造における強粘結炭の削減、非微粘結炭などの安価な劣質石炭配合率上昇が急務となった。また高炉側からはPCRの上昇を具現化する技術としてコークス強度上昇への要求が高まった。さらに2000年代以降、1970年代の高度成長期時代に建設したコークス炉が軒並み老朽化し、生産性悪化が顕在化した。これらを背景に、コークス分野では、老朽コークス炉の更新 (パドアップ) を計画的に推進するとともに²⁸⁾、安価劣質石炭使用とコークス強度向上を両立させる技術、ならびに老朽炉の診断・補修技術に取り組んできた (表3)。

石炭の評価指数について新たな切り口からの提案があり、高強度コークス製造に向けた配合指針として活用されている。浸透距離やセミコークス表面張力はその代表例であり、石炭同士の相互作用や相性といった性状評価の定量化を可能にしている^{29,30)}。ラマン分光法による石炭表面性状測定技術も新しい評価技術と位置づけられる³¹⁾。また、芳香族アミンを添加して石炭を直接改質する手法も提案され³²⁾、コークスの強度向上への貢献が期待される。コークス強度の数値解析手法としてはDEM法に基づく手法が開発された³³⁾。本法は破壊挙動のみならず強度のばらつきを評価できる手法として注目される。

老朽コークス炉の操業技術に関しては、押し出し時の炉壁変形³⁴⁾ やコークスケーキの押し出し性に関わる数値シミュレーションモデル³⁵⁾ が開発され、押し出し挙動に対する理解が深まった。同時に、炉壁損傷モニタリング技術や診断補修技術 (LS診断)³⁶⁾ との連携により老朽コークス炉の安定操業維持や寿命延長が図られている。最近ではデータサイエンスを活用した押し出し力低減ガイダンスシステム³⁷⁾ や分散型適応制御モデル³⁸⁾ などが開発・適用され、安定操業に大きく寄与している。

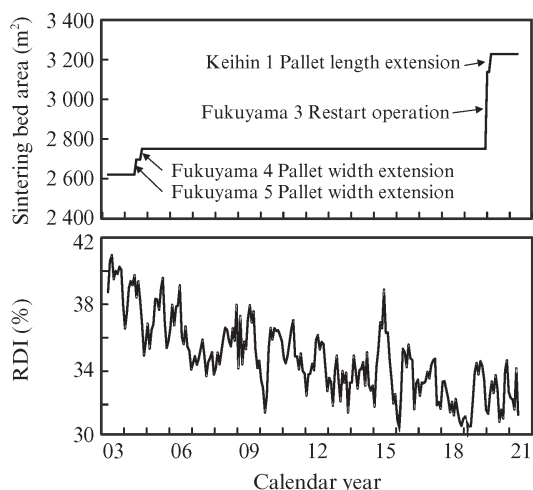


図5 焼結面積とRDIの推移

Fig. 5 Trend of sintering bed surface area and RDI

表3 コークス分野の主要技術開発

Table 3 Research and developments in coke making process

Process	Technology
Fundamentals	Coal surface characterization by Raman spectroscopy
	Coke particle breakage model by DEM
Novel measurement method for coal	Permeation distance as new index
	Surface tension of coal and semi-coke
Coal pretreatment	Addition of aromatic amines
Coal blending	Advanced blending based on permeation distance and surface tension of coal
Coke discharging from coke ovens	Deformation of damaged coke oven wall by DEM model
	Coke cake discharging behavior based on clearance model
Life prolongation of coke ovens	Monitoring refractory wear
	Hot repair technique of coke oven brick work
Data science	Operation guidance system to reduce pushing load of coke ovens
	Decentralized adaptive control of coke oven batteries

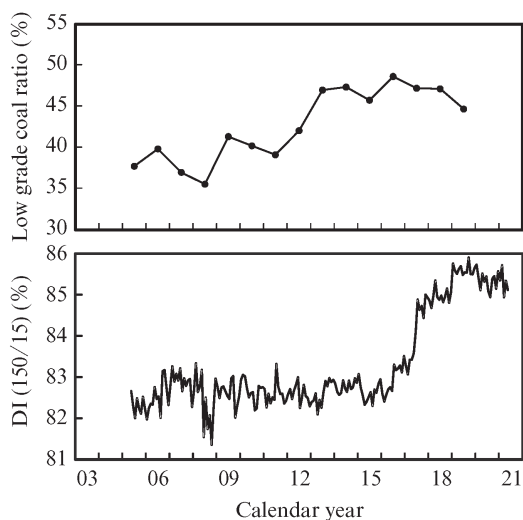


図6 非微粘炭使用比率（全国平均）とDIの推移
Fig. 6 Trend of low grade coal ratio and drum index (DI)

図6には全国平均の非微粘炭使用比率⁶⁾、当社のコークスドラム強度指数 (DI (150/15)) の推移を示す。前者は全国平均であるが、概ね当社も同調していると思われる。上述の研究開発により、2005年以降は非微粘炭使用比率を徐々に上げつつ、DI向上を果たしてきた経緯が分かるであろう。このDIの向上は図4に示したPCRの上昇にも大きく貢献しているものと思われる。

4. カーボンニュートラルを目指した革新プロセスの開発

本章では、国プロとして取り組んでいる革新プロセスとしてフェロコークスと COURSE50 を取り上げ、開発状況を概説する。また、当社が将来技術として独自に取り組んできた酸素高炉プロセスの特徴について述べ、その発展形である酸素高炉型カーボンリサイクル高炉の概念について述べる。

4.1 フェロコークス

フェロコークスは金属鉄を約30%含むコークス主体の塊成物であり、金属鉄の触媒作用によりCO₂との反応性を著しく高めた高炉用新原料である。高炉の熱保存帯温度を低下させることにより、原理的に高炉の還元材比を大きく低減できると期待されている。2009～2012年には新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 助成事業として“資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発”を実施し、この中でJFEスチール東日本製鉄所 (京浜地区) に30t/d規模のフェロコークス製造設備を建設し、30t/dの製造能力の実証と大型高炉での還元材比低下効果 (5日間試験) を確認してきた³⁹⁾。

さらに2017年度からは6年間の予定で、“環境調和型プロセス技術の開発 (フェロコークス技術の開発)”として、NEDOの助成を受け、パイロットの10倍規模 (300t/d) となる中規模設備によるプロセス実証と高炉での長期使用時の効果確認を目的とする開発が実施されている。現在、中規模設備がJFEスチール西日本製鉄所 (福山地区) に設置され、2020年10月より試験操業を開始している。本設備を用い製造技術を実証後、2023年頃までに製鉄工程のエネルギー消費量を約10%削減する技術の確立を目指している (シミュレーション含む)³⁹⁾。

4.2 COURSE50

COURSE50 (CO₂ Ultimate Reduction System for Cool Earth 50) は、①高炉法における炭素系還元材であるコークスの一部を水素で代替すること、および②高炉から発生するCO₂を分離・回収することにより、製鉄所からのCO₂排出量を30%削減 (①により10%、②により20%削減) することを目指す国プロである。本プロジェクトはNEDO 100%助成事業として2008年度に開始され、要素技術開発 (フェーズI STEP1)、試験高炉を用いた水素還元とCO₂分離回収を統合した総合技術開発 (フェーズI STEP2) を経て、現在、実用化開発のフェーズII STEP1に入っている³⁹⁾。

当社は、羽口先における微粉炭/水素系還元ガス (COG など) の燃焼挙動の把握やシャフト上部への予熱ガス吹き込みによる焼結鉱の還元粉化抑制技術の開発、物理吸着法によるCO₂分離技術の開発等を分担し、COURSE50プロセス構築に貢献している。今後、外部H₂ (C-free) を利用す

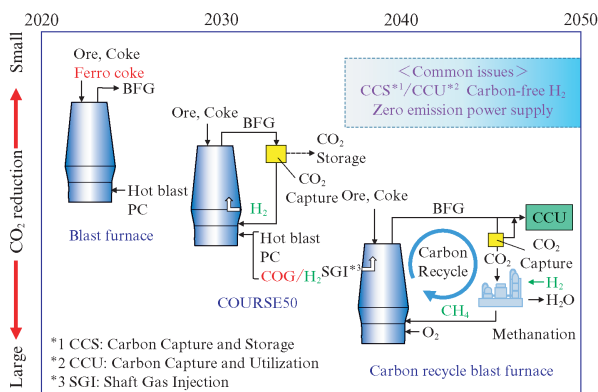


図7 カーボンニュートラル製鉄開発の道筋

Fig. 7 Way to carbon neutral ironmaking technology

る Super COURSE50 へと移行する予定であり⁷⁾、NEDO のグリーンイノベーション基金 (GI 基金) を活用して開発を進める構想が示されている⁴⁰⁾。

4.3 酸素高炉型カーボンリサイクル高炉

熱風 (酸素濃度 21~27 % 程度) の代わりに、冷酸素 (室温, 酸素濃度 100 %) を羽口から吹き込む酸素高炉法が 1980 年~1990 年代にかけて種々提案された。N₂-free であることから還元速度を本質的に速くできることが特徴であるが、反対にシャフト部を通過するガス量減少によってシャフト部の装入物の昇温が不良となるため、シャフト上部または下部からのガス吹き込みが必須なプロセスである。2000 年代以降は CO₂ 削減の観点からプロセスの見直しが行われ、当社の先進酸素高炉⁴¹⁾ などが提案された。先進酸素高炉は羽口から水素を多く含む還元材 (LNG) を多量に吹き込むことを特徴としており、水素還元が増加により CO₂ 削減を狙ったものである。

この酸素高炉プロセスは炉頂ガス中に N₂ を含まないことから CO₂ 分離、ならびに CCU との連携が容易である。分離した CO₂ を外部 H₂ (C-free) を用いて還元してメタンに変換した後 (メタネーション反応; CO₂+4H₂=CH₄+2H₂O), 高炉で循環使用する、いわゆるカーボンリサイクル高炉が当社から提案されている⁹⁾。C-free と見なせるメタンの多量のリサイクルが可能のため、高炉からの CO₂ 発生量は従来の高炉法に比し約 30 % の削減が期待できる。本法も GI 基金を活用しての開発構想が示されており⁴⁰⁾、今後のカーボンニュートラルの実現に貢献していくことが期待されている。

5. おわりに

前回の製鉄特集号以降、中国ミルの著しい台頭、これによる石炭、鉄鉱石価格の高騰に加え、世界規模の地球温暖化防止への要求の高まり、これを受けた鉄鋼業のカーボンニュートラル化への舵切りなど、製鉄分野を取り巻く事業

環境は過去に例を見ない激変の最中にある。

そのような環境の中、JFE スチールは、今後も各分野の総合力結集により、劣質原料使用を前提とした焼結鉱やコークス品質の改善を図るとともに、高炉の RAR 削減を通して合理化と CO₂ 削減技術を追求していく。さらに将来の抜本的な CO₂ 削減に関しては、図 7 に示すとおり、フェロコークス技術や COURSE50、カーボンリサイクル高炉の着実な開発と実機化に挑戦し、カーボンニュートラル製鉄の実現に向け鋭意取り組んでいく所存である。

参考文献

- 1) JFE 技報 No. 22, 2008 年 11 月号
- 2) JFE 技報 No. 45, 2020 年 2 月号
- 3) World Steel Statistical reports
<https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-statistical-yearbook.html>
- 4) 世界のネタ帳：鉄鉱石価格の推移
http://ecodb.net/pcp/imf_usd_piorecr.html
- 5) 新電力ネット：石炭価格の推移
<https://pps-net.org/statistics/coal3>
- 6) 鉄鋼統計要覧, (一社) 日本鉄鋼連盟, (1990-2020).
- 7) 日本鉄鋼連盟長期温暖化対策ビジョンの策定について
<https://www.jisf.or.jp/news/topics/181119.html>
- 8) 2050 年カーボンニュートラルに関する日本鉄鋼業の基本方針
https://www.jisf.or.jp/business/ondanka/zerocarbonsteel/documents/2050CN_20210215.pdf
- 9) JFE グループ 環境経営ビジョン 2050
<https://www.jfe-holdings.co.jp/investor/zaimu/g-data/jfe/2020/2020-environmental-management-vision210525-01.pdf>
- 10) Watakabe, S.; Takeda, K.; Nishimura, H.; Goto, S.; Nishimura, N.; Uchida, T.; Kiguchi, M. Development of High Ratio Coke Mixed Charging Technique to the Blast Furnace. ISIJ Int. 2006, vol. 46, no. 4, p. 513-522.
- 11) Murao, A.; Kashihara, Y.; Watakabe, S.; Sato, M. Development of FCG Dynamic Control Technique at Mixed Charging of Massive Coke into Ore Layer. ISIJ Int. 2011, vol. 51, no. 8, p. 1360-1367.
- 12) Murao, A.; Kashihara, Y.; Oyama, N.; Sato, M.; Watakabe, S.; Yamamoto, K.; Fukumoto, Y. Development of Control Techniques for Mixing Small Coke at Bell-less Top Blast Furnace. ISIJ Int. 2015, vol. 55, no. 6, p. 1172-1180.
- 13) 市川和平, 柏原佑介, 大山伸幸, 廣澤寿幸, 石井純, 佐藤道貴, 松野英寿. 融着帯圧力損失推定モデルによる通気性に及ぼすコークス層厚の影響の評価. 鉄と鋼. 2016, vol. 102, no. 1, p. 1-8.
- 14) 照井光輝, 市川和平, 柏原佑介. 篩層モデルを用いた鉱石-コークス混合層内の粒子偏析挙動の推定. 鉄と鋼. 2019, vol. 105, no. 9, p. 864-870.
- 15) 川島知之, 村尾明紀, 山本尚貴, 安藤誠, 岡田淳, 渡邊裕章. LES と拡張 CPD モデルを用いた高炉羽口部の微粉炭燃焼挙動の予測. 鉄と鋼. 2018, vol. 104, no. 12, p. 766-775.
- 16) 村尾明紀, 深田喜代志, 松野英寿, 佐藤道貴, 赤尾津翔大, 齋藤泰洋, 松下洋介, 青木秀之. 微粉炭の燃焼ガス化特性に及ぼす都市ガス吹き込み位置の影響. 鉄と鋼. 2018, vol. 104, no. 5, 243-252.
- 17) 伊藤友彦, 橋本佳也, 島本拓幸. データサイエンスによる高炉操業ガイドライン技術. JFE 技報. 2020, no. 45, p. 19-25.
- 18) 佐藤道貴, 武田幹治, 櫻井雅昭. CO₂ 削減を目指した製鉄プロセスの進展. 金属. 2012, vol. 82, no. 11, p. 12.
- 19) 岩瀬一洋, 樋口隆英, 山本哲也, 村上一. 焼結機での複合焼成を目指した炭材核ベレットの設計. 鉄と鋼. 2021, vol. 107, no. 6, p. 483-493.
- 20) 山本哲也, 岩見友司, 大山伸幸, 佐藤道貴. 炭化水素系気体燃料を活用した鉄鉱石焼結プロセスの開発. ふえらむ. 2017, vol. 22, no. 6, p. 301-304.
- 21) 岩見友司, 山本哲也, 樋口隆英, 主代晃一, 佐藤道貴, 大山伸幸. 粉

- コークスと気体燃料の併用焼結技術における酸素富化の影響。鉄と鋼。2014, vol. 100, no. 2, p. 189-197.
- 22) 岩見友司, 山本哲也, 大山伸幸, 松野英寿, 齊藤敬高, 中島邦彦. 焼結層内におけるマグネタイトの偏析制御による焼結鉄の生産性改善。鉄と鋼。2017, vol. 103, no. 6, p. 325-334.
- 23) 松村勝, 山口泰英, 山本啓司, 弘中諭, 樋口隆英, 宮川一也, 村上太一, 前田敬之. バイオマス炭, 粉コークス併用による焼結層高温帯伸延効果。CAMP-ISIJ. 2020, vol. 33, no. 1, p. 20.
- 24) 樋口隆英, L. LU, 葛西栄輝. 鉄鉱石の造粒過程における鉄石粒子内部への水分移動挙動。鉄と鋼。2019, vol. 105, no. 11, p. 1033-1041.
- 25) 竹原健太, 樋口隆英, 廣澤寿幸, 山本哲也. 鉄鉱石の造粒速度に及ぼす粒子水分の影響。鉄と鋼。2021, vol. 107, no. 6, p. 403-411.
- 26) NEDO web ページ
https://www.nedo.go.jp/koubo/CA3_100161.html
- 27) 岩田好司, 堀川透理, 松村賢司. 焼結点火炉 2 段燃焼式高流速バーナの開発。CAMP-ISIJ. 2018, vol. 31, no. 2, p. 666.
- 28) 鉄鋼年鑑 令和 2 年度版 (株)鉄鋼新聞社 令和 2 年 12 月
- 29) Dohi, Y.; Fukada, K.; Yamamoto, T.; Matsui, T.; Sumi, H.; Shimoyama, I. A Novel Measurement Method for Coal Thermoplasticity: Permeation Distance. ISIJ Int.. 2014, vol. 54, no. 11, p. 2484-2492.
- 30) 永山幹也, 深田喜代志, 松井貴, 藤本英和, 土肥勇介, 角広行, 下山泉. セミコークス表面張力を用いたコークス強度への石炭相性影響の評価。鉄と鋼。2018, vol. 104, no. 9, p. 472-479.
- 31) 野間洋人, 土肥勇介, 松井貴, 山本哲也, 花田一利. ラマン分光法による石炭表面性状測定。CAMP-ISIJ. 2020, vol. 33, no. 1, p. 103.
- 32) Otsuka, H.; Dohi, Y.; Matsui, T.; Hanada, K. Addition Effect of Aromatic Amines on Coal Fluidity and Coke Strength. ISIJ Int.. 2019, vol. 59, no. 8, p. 1413-1418.
- 33) 高橋功一, 吉野絢, 野内泰平, 加納純也, 石原真吾, 有山達郎. 気孔構造を考慮した離散要素法による高炉内コークス破壊現象のモデル化。鉄と鋼。2019, vol. 105, no. 12, p. 1108-1117.
- 34) Shimoyama, I.; Yamamoto, T.; Fukada, K. Tolerable Limit of Localized Force on Damaged Coke Oven Wall Analyzed by Discrete Element Method. ISIJ Int.. 2010, vol. 50, no. 7, p. 1048-1053.
- 35) 照井光輝, 松井貴, 深田喜代志, 土肥勇介. コークスケーキの押出し性に及ぼす燃焼室温度分布の影響。鉄と鋼。2017, vol. 103, no. 10, p. 555-563.
- 36) 亀崎俊一. 老朽化したコークス炉の診断・補修技術。JFE 技報。2022, no. 49, p. 61-67.
- 37) Hashimoto, Y.; Tsuda, K.; Akiyama, S.; Honma, M. Development of an Operation Guidance System to Reduce Pushing Load of Coke Ovens Based on Probabilistic Optimization. ISIJ Int.. 2014, vol. 54, no. 11, p. 2623-2626.
- 38) Tsumura, K.; Tsuda, K.; Fujisaki, Y. Decentralized adaptive control of coke oven batteries. Proc. of IFAC workshop on automation in the mining, mineral and metal industries. 2012, p. 266-267.
- 39) 野村誠治, 佐藤道貴. 鉄鋼業における CO₂ 削減の取り組み—環境調和型プロセス技術の開発 (COURSE50, フェロコークス)—. 化学工学。2021, vol. 85, no. 6, p. 34.
- 40) グリーンイノベーション基金事業「製鉄プロセスにおける水素活用」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画
<https://www.meti.go.jp/press/2021/09/20210914002/20210914002-2.pdf>
- 41) Sato, M.; Takahashi, K.; Nouchi, T.; Ariyama, T. Prediction of Next-Generation Ironmaking Process Based on Oxygen Blast Furnace Suitable for CO₂ Mitigation and Energy Flexibility. ISIJ Int.. 2015, vol. 55, no. 10, p. 2105-2114.



佐藤 道貴



深田喜代志



長谷川伸二