

特別講演

□第183回春季講演大会生産技術賞(渡辺義介賞)受賞記念
特別講演(2022年3月15日)

JFE スチールにおける製鋼技術の 進歩と今後のGX、DX戦略

Progress of Steelmaking Technology and Future
GX, DX Strategies in JFE Steel



*脚注に略歴

北野嘉久 JFE スチール(株)
代表取締役社長
Yoshihisa Kitano

1 はじめに

この度は、栄誉ある渡辺義介賞を頂きまして、誠に光栄に存じます。私は、1982年に川崎製鉄(当時)に入社して以来、製鋼部門を中心に製鉄所の現場の生産技術、品質管理に携わってきました。本稿では、製鋼分野における生産性、品質向上を実現する製造技術と、今後の戦略について紹介したいと思います。

2 日本鉄鋼業界の歩み

図1¹⁾に日本鉄鋼業における粗鋼生産量の推移を示します。1901年官営八幡製鉄所の高炉火入れを始めとし、高度経済成長期において、鉄鋼需要の飛躍的な増加を背景に、各プロセスにおける技術開発の推進、近代的・大型設備の建設が進められ、1972年には粗鋼生産量年間1億トンの大量生産時代に突入しました。この大量生産時代を可能とした代表的な技術が平炉から転炉法への転換でした。一方で1973年に過去最高の粗鋼生産量記録を達成して以降、第1次オイルショックに

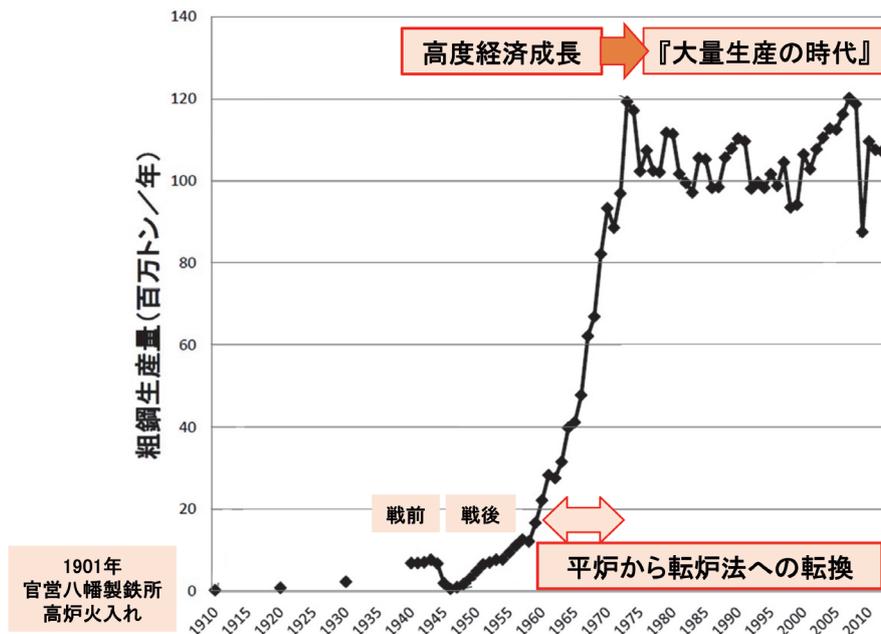


図1 国内粗鋼生産量の推移¹⁾

* 1982年3月東京工業大学院総合理工学研究科を修了後、川崎製鉄(株)に入社。製鋼部門の製造技術開発、品質管理業務に従事し、西日本製鉄所福山地区製鋼部長、東日本製鉄所工程部長、西日本製鉄所副所長、東日本製鉄所所長、代表取締役副社長を歴任、2019年4月より現職。

より、鉄鋼業の置かれる環境が一変しました。粗鋼生産量が1億トンで停滞し、省力・省エネルギー、品質向上への要求が増えました。この環境下で発展した代表的な技術は、造塊法から連続鑄造法への転換です。高度経済成長後期から、日本は世界に先駆けて連続鑄造機の導入を進め、1985年には90%の連続鑄造比率を達成¹⁾し、当時の省エネ、高品質化ニーズにいち早く対応しました。また日本の鉄鋼業は、高炉・転炉法をベースにこれまで多くの省エネルギー、生産性、品質向上技術を開発してきました。図2に示すように、現在でも日本は、鉄鋼主要国の中で、最も優れたエネルギー原単位を維持²⁾すると共に、諸外国への省エネ技術の展開により世界の鉄鋼業界を牽引²⁾しています。

表1に日本鉄鋼業が高生産性、高品質、省エネで世界ナン

バーワンの地位を確立した歩み¹⁾と、JFEスチールの技術開発の変遷を示します。1951年に操業を開始した川崎製鉄(当時)千葉製鉄所は、戦後初となる近代的な「臨海型銑鋼一貫製鉄所」の先駆けでした。その後、「大量生産→連続鑄造化→高品質・高生産性の追求」に対応し、各地区で転炉、連続鑄造機の設備建設、増強を行うと共に、技術開発を進めました。次章から、具体的に開発した技術を紹介します。

3 高品質、高生産性のための連続鑄造技術

連続鑄造工程では、成分・温度が調整された溶鋼がモールド内において連続的に外側から冷却され、表層から凝固し

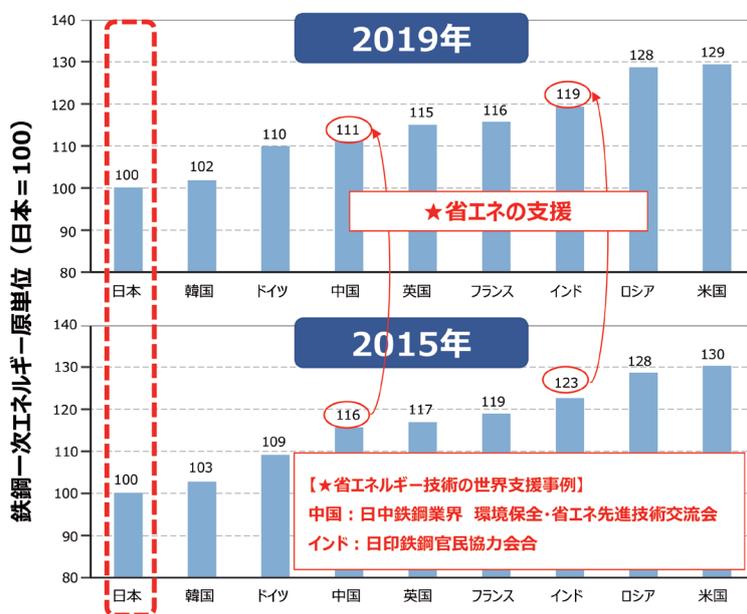


図2 転炉鋼エネルギー原単位の国際比較²⁾

表1 JFEスチールにおける製鋼技術の歩み

	1900年代	'50年代	'60年代	1970年代	1980年代	1990年代	2000年代	2010年代	2020年代
日本鉄鋼業 (製鋼関連)		● 1901年: 官営八幡製鉄所の高炉火入れ			● 1955年: 純酸素上吹転炉の導入 ● 1963年: 転炉鋼の生産量が平炉鋼を上回る ● 1973年: 過去最大粗鋼生産量1億t突破 ● 1978年: 複合転炉吹錬導入	● 1985年: 連続比率9割超			
旧川崎製鉄		● 1950年: 川崎製鉄設立 ● 1951年: 千葉製鉄所開設	● 1961年: 水島製鉄所開設	● 1977年: 純酸素底吹転炉導入	● 1981年: 千葉3CC稼働	● 1993年: 倉敷4CC稼働 ● 1995年: モールド溶鋼流動制御開発 (FCモールド)	● 1992年: モールド内容鋼流動制御開発進む	● 2003年: JFEスチール設立	● 2010年: 福山7CC稼働
旧NKK (日本鋼管)	● 1912年: NKK(日本鋼管)設立 ● 1936年: 初高炉火入れ 銑鋼一貫体制確立	● 1965年: 福山製鉄所開設 ● 1968年: 京浜製鉄所開設		● 1984年: 福山5CC稼働	● 1993年: 福山6CC稼働	● 1998年: 福山ゼネラルプロセス確立	● 2012年: DRP®法開発 ● 2014年: 福山3製鋼3号転炉稼働	● 2021年: 倉敷7CC稼働	

ながら、ロールで引き抜かれます。溶鋼中に含まれる脱酸生成物等の介在物は、モールドにおける初期凝固過程で鍍片表層や内部に補足された場合、圧延製品での欠陥の要因となります。図3に連続铸造モールドにおける溶鋼流動の模式図を示します。溶鋼は耐火物製浸漬ノズルの左右の穴からモールド内へ供給されます。その過程で不純物である介在物は浮上し、溶鋼表面のモールドパウダーに吸収されます。ここで、铸造中の溶鋼湯面の変動が大きいと、モールドパウダーや、そこに吸収された介在物が再度溶鋼中に巻き込まれ、溶鋼が汚染されます。またノズルからの溶鋼の流れがモールド短片に衝突し、下方に向かう流れが強いと、溶鋼中への介在物の潜り込みが助長されます。従い、モールド内の溶鋼流動制御として、図3に示す溶鋼表面の湯面変動抑制と、下降流の抑制が重要です。特に生産性向上のため、铸造速度が増加する

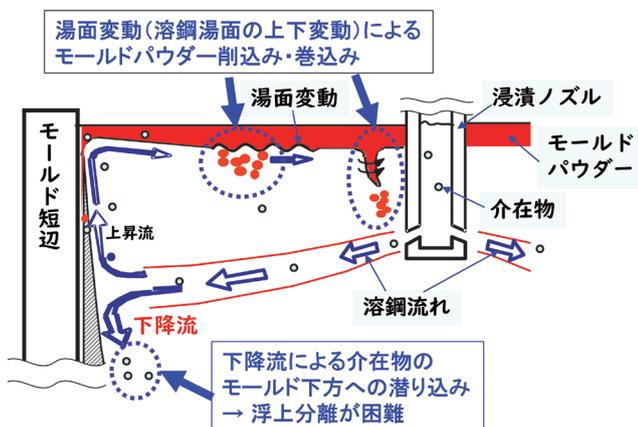


図3 連続铸造におけるモールド内溶鋼流動

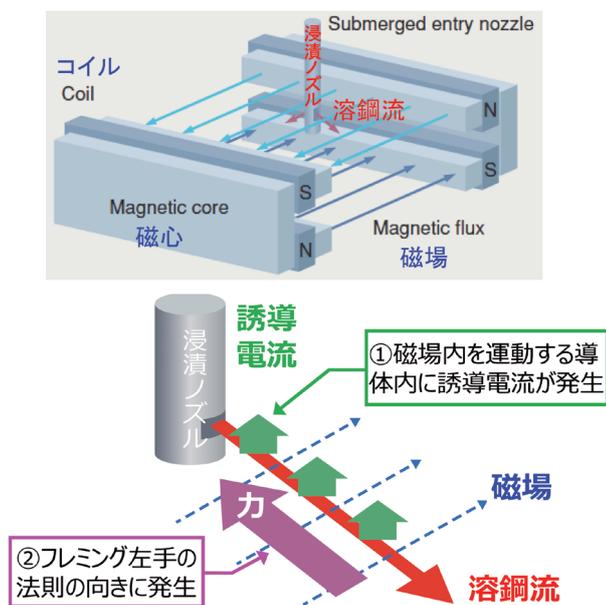


図4 FCモールド構成と電磁力(ブレーキ効果)の原理³⁾

と、湯面変動によるパウダー巻き込みや、下降流による介在物のモールド内下方への潜り込みが助長され、介在物量が増加することが報告されています^{3,4)}。すなわち、高生産性と高品質化を同時に達成するためのブレークスルーとなる溶鋼流動制御技術が求められていました。

そこで電磁力を用いたモールド内溶鋼流動制御技術を開発しました³⁾。種々の事前検討を経て、制御効果を十分に発揮させるために、上下二段、モールド全幅に静磁場を印加する方式であるFCモールド (Flow Control Mold) を千葉地区に導入しました。図4にFCモールド装置の模式図³⁾を示します。モールドにおいて磁場を印加することで、磁場内を運動する導体内に誘導電流が発生し、フレミング左手の法則の向き、すなわち溶鋼流にブレーキを掛ける向きに力が作用します。FCモールドの目的は、1) 湯面変動の要因となるメニスカス部溶鋼流速の低減・安定化、2) モールド下部における局所下降流速の低減による介在物の潜り込み抑制です。図5に数値シミュレーション⁵⁾による結果を示します。(a)は高速铸造(2.0m/min.)、電磁ブレーキ無し条件ですが、モールド短辺への溶鋼衝突流が上下に広がり、下方への流速も大き

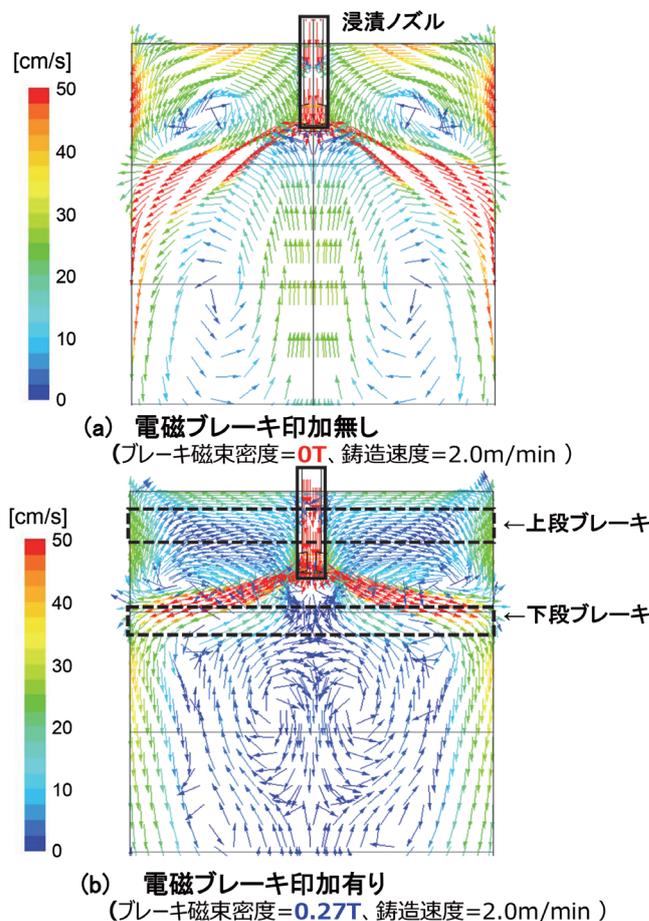


図5 数値シミュレーションによる電磁ブレーキの溶鋼流動制御効果

く、介在物の潜り込みが助長される流れが確認できます。また、溶鋼の初期凝固領域である上部表面近傍の流速も高位であることが分かります。それに対して、(b) 高速鋳造、電磁ブレーキ有りの場合は、モールド短辺への衝突流にブレーキが作用し、最大下降流速が約30%低減しました。その結果、モールド下方への介在物の潜り込みが抑制されることが示唆されます。加えて初期凝固領域である上部表面近傍の最大流速が約40%低減することが分かりました。これらの計算結果を基に、実機での適用パターンを考案して、実機実験を実施しました。図6に結果³⁾を示します。冷延鋼板の表面欠陥に関して、高速鋳造条件でもFCモールドを適用することで表面欠陥の少ない製品を得ることが可能となりました。これは、上段ブレーキによる表面流速低減と湯面レベル変動の減少の効果と考えられます。また冷延鋼板の内部介在物の評価の結果、鋳造速度1.8~2.0m/分の高速鋳造条件において、FCモールドの適用により、50~150 μmの内部欠陥が約1/3に低減しました⁶⁾。これは、下段ブレーキによる介在物の侵入深さの低減効果と考えられます。本技術により、高速鋳造

と高品質の両立が可能となり、JFEスチール内の全ての高生産性連続鋳機へFCモールドを導入し、効果を発揮しています。

また2010年にはJFEスチールで最大規模の福山地区において高品質・高生産性を究めた第7号連続鋳造機を新設しました。主な設備仕様を表2に示します。単ストランドで生産能力20万t/月を超える高生産性、および前述のFCモールド設置による高品質薄板製造を実現しました。図7は国内連続鋳造機の生産性を比較したものです。福山7CCは国内主要連続鋳造機の中でも、最高のストランド当たりの生産性を有しております。

4 環境調和型精錬技術の開発

1980年代、国内では溶銑予備処理(脱P)が導入されました⁷⁾。溶銑予備処理の目的は、製鋼スラグの低減、Fe歩留まりの向上、鋼材の品質向上であり、転炉で脱炭精錬を行う前、すなわち溶銑段階でSi、Pといった不純物元素を除去する工程です。国内ではトピードカー型、溶銑鍋型、転炉型といっ

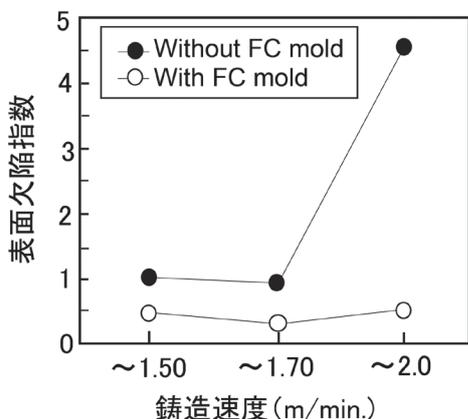


図6 鋳造速度と表面欠陥指数の関係³⁾

表2 福山7CCの主な仕様

項目	仕様
型式	垂直曲げ型×単ストランド*
鋳造鋼種	高品質薄板・一般薄板
スラブ厚(mm)	235、260 短辺迅速交換方式
スラブ幅(mm)	750~2100
溶鋼流動制御	FCモールド 高品質薄板材対応
機長	44.7m
要員	4名

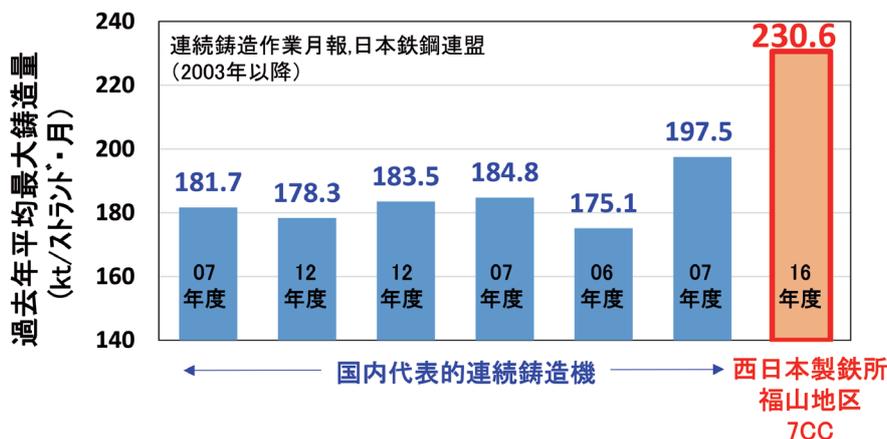


図7 連続鋳造機の実産性比較

た形式が採用されていきましたが、NKK（当時）では溶銑鍋での脱Siと転炉型溶銑脱Pを組み合わせたゼロスラグプロセス（以降、ZSPと略記）を1998年に確立しました⁸⁾。ZSPのポイントは、転炉溶銑脱Pを行う前に、徹底的にSiを除去することで、溶銑脱Pにおける石灰量を極小化することです。その結果、製鋼スラグ発生量の低減、Fe歩留まり向上が実現されました。一方、近年では鉄鋼生産プロセスにおけるCO₂発生量低減など、環境に配慮した精錬プロセスが求められています。製鋼工程では、溶銑配合率（高炉溶銑、スクラップ等の冷鉄源で決まるトータルの鉄源量に占める高炉溶銑の割合）を下げ、スクラップ等の冷鉄源使用比率を高める事でCO₂排出量が低下します。スクラップ等の冷鉄源の溶解は、内容積の大きい転炉で行われることが一般的です。しかし前述のZSPにおいては、転炉への溶銑装入前に徹底脱Siを行うため、冷鉄源を溶解するための熱量としてSiの酸化反応熱を利用することが困難です。Siの酸化反応熱を冷鉄源溶解に利用するために事前脱Si処理を省略すると、溶銑脱Pにおけるスラグ量が増加し、溶銑予備処理の効果が小さくなります。したがってZSPでは、溶銑配合率低減と溶銑脱Pを両立することが困難でした。そこで、図8に示すDRP[®]（Double-slag

Refining Process）法⁹⁾を開発しました。DRP[®]法では、転炉内で溶銑Siの酸化反応熱により、冷鉄源を溶解し、溶銑脱Si後にスラグを排出します。それにより、溶銑脱Pに持込まれるSiO₂を低減可能であり、石灰、製鋼スラグ量の少ない高効率溶銑脱Pが可能です。DRP法により、溶銑脱P比率80%以上の条件で、溶銑配合率を従来（ZSP）法の90%から82%に低減可能となりました⁹⁾。DRP[®]法はJFEスチールの全製鉄所に昨年設備化を完了し、CO₂削減活動を展開しています。

5 今後のGX（グリーントランスフォーメーション）、DX（デジタルトランスフォーメーション）戦略

日本鉄鋼業は高生産性、高品質、省エネで世界的競争力を維持してきました。今後JFEスチールでは、世界最高水準のエネルギー効率を実現するエコプロセス、低炭素社会実現に貢献する高機能鋼材であるエコプロダクト、そして、世界最高の省エネ技術を発展途上国などに普及し、地球規模でのCO₂排出削減に貢献するエコソリューションの3つのエコ（3E）で競争力を維持していきます（図9）。特に2050年カー

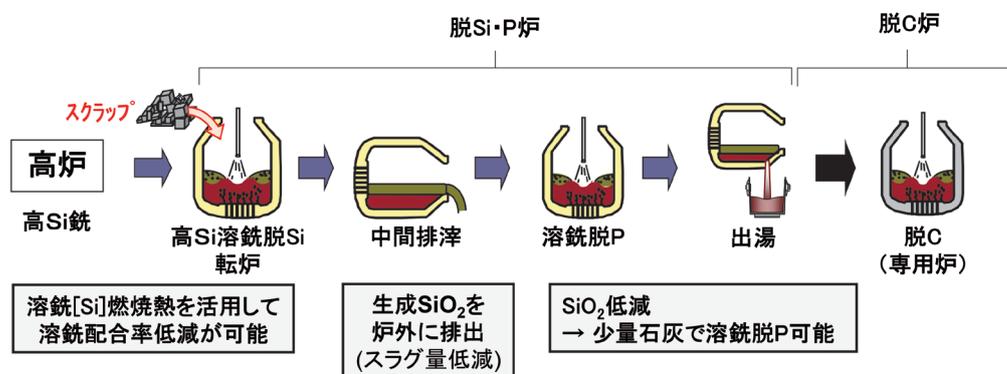


図8 新規開発法（DRP[®]：Double-slag Refining Process）のフロー図



図9 カーボンニュートラルに向けた今後の展望

ボンニュートラル実現が鉄鋼業界の最重要テーマであり、超革新技術開発に取り組みます。図10にJFEスチールのカーボンニュートラルに向けたロードマップを示します。2030年に向け、DRP®法の実装等による転炉スクラップ利用拡大、COURSE50やフェロコークスの実機化、業界トップクラスの電気炉技術の最大活用等を進めます。2013年実績に対して2030年には30%以上のCO₂削減を目指します。さらに2050年のカーボンニュートラルに向けて、外部水素を用いたカーボンリサイクル高炉とCCU技術や、鉄鉱石の直接水素還元技術等の超革新技術開発を世界に先駆けて複線的に開発していきます。

図11にカーボンリサイクル高炉、CCU技術の模式図を示します。カーボンリサイクル高炉とは、高炉プロセスで発生

したCO₂をグリーン水素によりメタンに変換し、高炉で還元材としてリサイクルする技術であります。リサイクルメタンを吹込むと共に、送風を空気から酸素にすることでCO₂排出量を最大30%以上削減できる可能性があることを理論検討により確認しています¹⁰⁾。

カーボンリサイクル高炉は炉内ガスの量と組成が従来高炉と大きく異なります。今後ラボ試験による検証や小型高炉での実証などを通して、酸素とメタンの多量吹込みが可能な羽口構造、炉体形状の最適化といった設備技術の開発、不純物が含まれる高炉ガスからカーボンニュートラルメタンを製造するカーボンリサイクル技術の開発、および、操業予測技術の向上を進めていく所存です。なお本技術開発は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「グリー

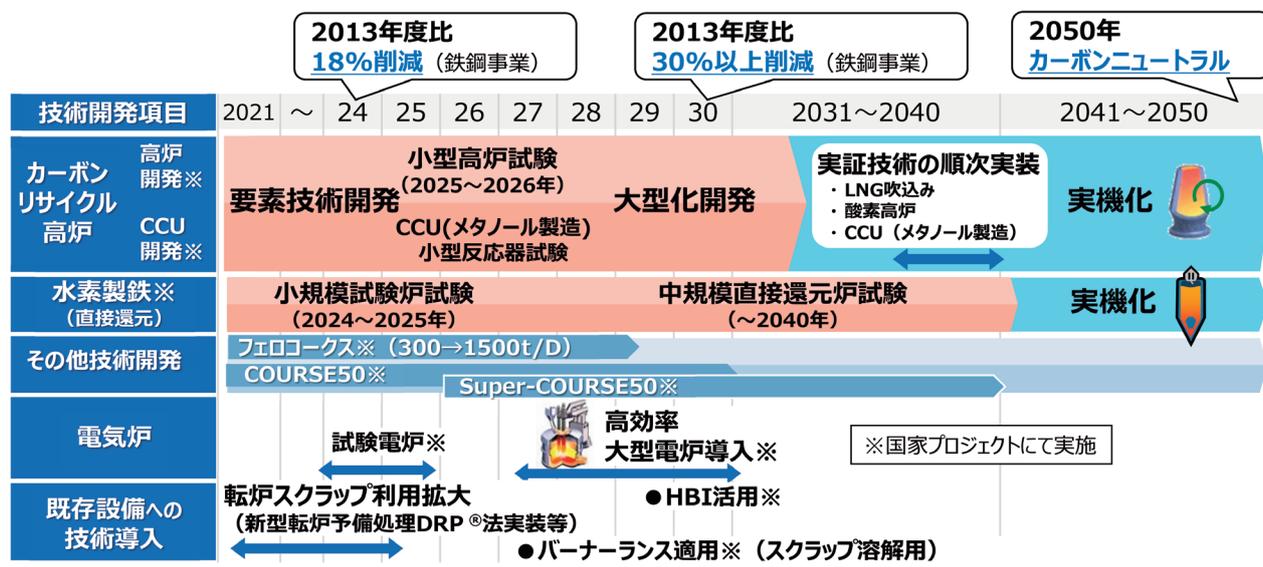


図10 2050年カーボンニュートラルに向けたロードマップ

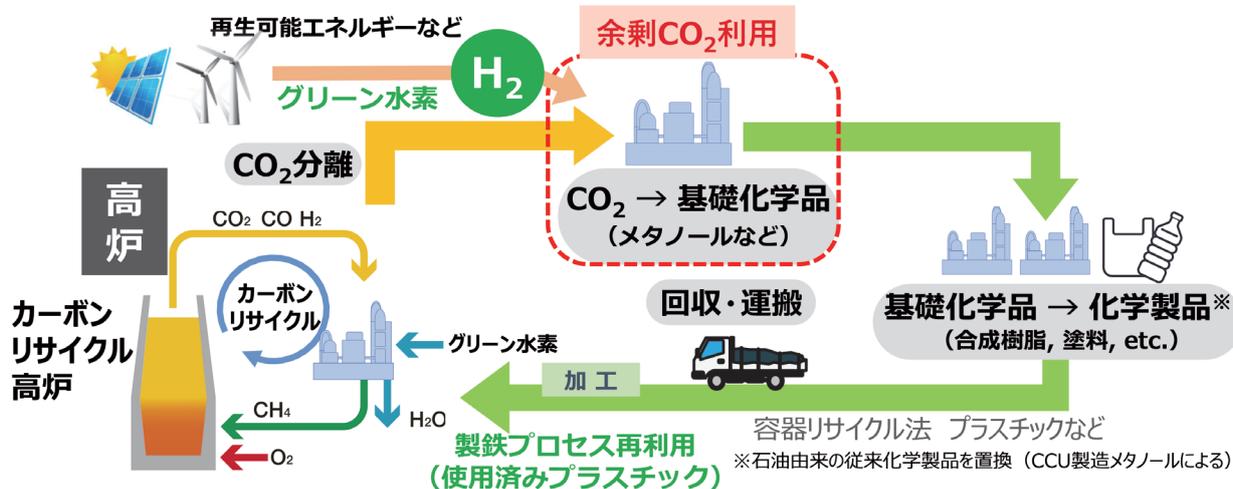


図11 カーボンリサイクル高炉とCO₂有効利用 (CCU)

「イン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」に採択された実証事業「外部水素や高炉排ガスに含まれるCO₂を活用した低炭素化技術等の開発」における研究開発項目のうちの一つとして進めてまいります¹¹⁾。

なお、CO₂と水素からメタンを製造する、メタネーション技術は、脱炭素社会実現の柱に挙げられている有望なCCU技術の一つであり、経済産業省によりメタネーション推進協議会が設置され、官民が一体となってその活用拡大が図られております¹²⁾。

同時に製鉄所等の排ガスに含まれるCO₂から基礎化学品であるメタノールを合成するCO₂有効利用プロセスについて、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) が公募した委託事業「カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発/CO₂排出削減・有効利用実用化技術開発」の課題として、公益財団法人地球環境産業技術研究

機構 (「RITE」) と共同で開発を進めてまいります (図12)¹³⁾。製鉄所の高炉ガスはCO₂濃度が比較的高く、副次成分としてCOやH₂を含むという特徴があり、これらを最大限利用することで、メタノール合成の低コスト化・高効率化を図っていきます。これらCCUで製造されたメタンおよびメタノールは、高炉での使用以外にも近隣化学工場のエネルギー源および基礎化学品として提供するとともに、回収された使用済みプラスチックを高炉でさらに還元剤として再利用してまいります。これらより製鉄所を核とした資源循環型ゼロエミコンビナートを実現し、社会全体のカーボンニュートラル実現に貢献していただけるものと考えております。

これらの技術開発や、高生産性、高品質化を更に究めるためにはDX技術が必要不可欠です。JFEスチールでは、全ラインCPS (Cyber Physical System) 化によるリモート化、自動化を推進する¹⁴⁾とともに、最終的に製鉄所一貫CPSによる

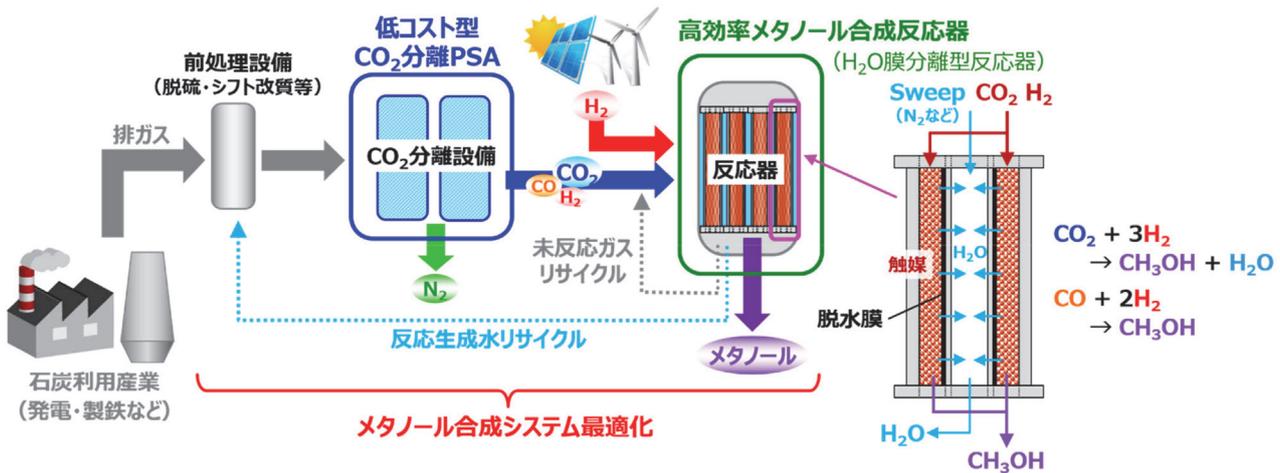


図12 CO₂を用いたメタノール合成における最適システム開発

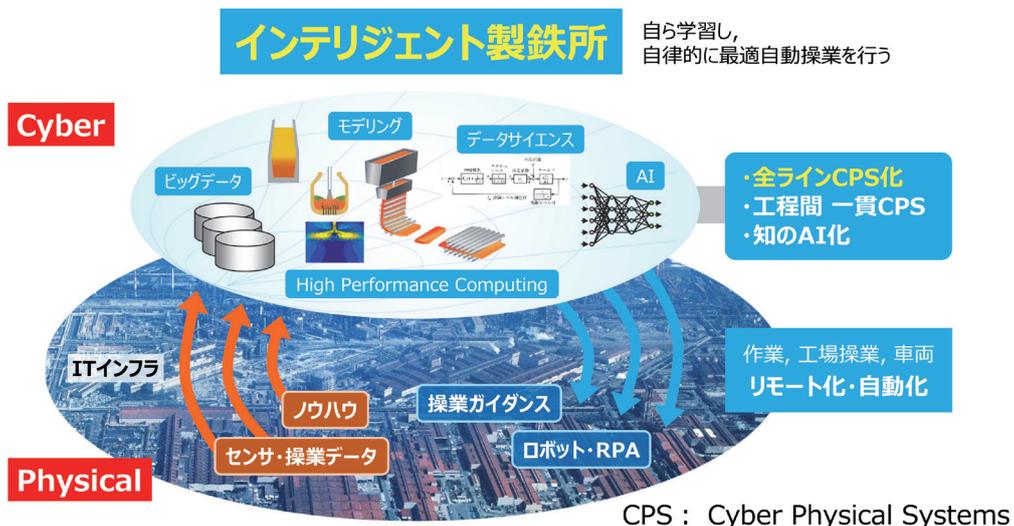


図13 CPS化、リモート化、自動化によるインテリジェント製鉄所

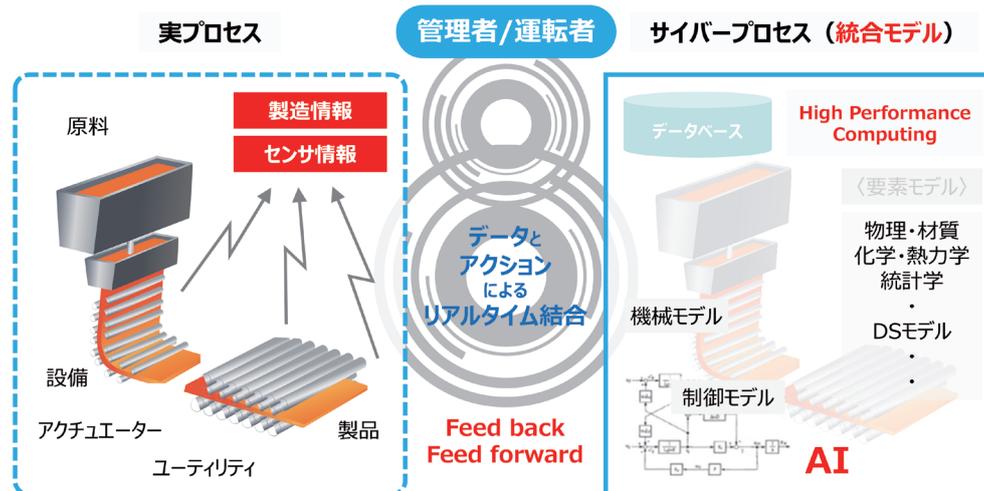


図14 プロセスのCyber Physical System 概念図

インテリジェントな製鉄所の実現を目指しています(図13)。CPSとは、計算機上に構築した仮想(Cyber)プロセスを、現実のプロセスの状態を映すセンサ情報や製造情報を基にリアルタイムに動かす技術です。CPSにより、プロセスのリアルタイムでの可視化が可能となり、未来予測を操業ガイダンスや自動制御などの実アクションに繋げ、安定稼働、高効率化、低コスト化等の最適化を同時に実現させることが可能となります(図14)。全てのラインのCPS化により、高品質・高生産性・省エネルギーを目指すとともに、蓄積された技術をソリューションとして海外に展開し、世界に貢献していきます。

6 結び

これまでの日本鉄鋼業の歩みは、高炉-転炉法をベースに高度経済成長期に大量生産時代を迎え、その後、高品質・高生産性・省エネルギーで世界的競争力を維持してきました。鉄は安定的に大量生産が可能であり、用途に応じた優れた品質を実現でき、優れたリサイクル性を有し、今後も豊かな地球の未来のために不可欠な素材であるとともに、環境負荷から考えても優れた素材です。2050年のカーボンニュートラルに向けて、JFEスチールは3E(エコプロセス、エコプロダクト、エコソリューション)をベースに、GXとDX技術の開発を通じて世界に貢献してゆくことが使命と考えています。最後に2050年のカーボンニュートラルに向けた超革新技術開発において、日本鉄鋼協会の貢献を期待しております。

参考文献

1) 鉄鋼生産技術年表, ふえらむ, 19 (2014), 1, 66.
 2) RITE: 2019年時点のエネルギー原単位の推計(鉄鋼部門

-転炉鋼), 2022年1月, https://www.rite.or.jp/system/global-warming-ouyou/download-data/Comparison_EnergyEfficiency2019steel.pdf.

3) 井戸川聡, 北野嘉久, 戸澤宏一: 川鉄技報, 28 (1996), 47.
 4) 小坂周一郎, 横谷真一郎, 岩田勝吉, 塚口友一, 吉原光夫, 林浩史: 材料とプロセス, 16 (2003), 949.
 5) 古米孝平, 松井穰, 村井剛, 三木祐司: 鉄と鋼, 100 (2014) 4, 563.
 6) K. Kariya, Y. Kitano, M. Kuga, A. Idogawa and K. Sorimachi: Steelmaking Conf. Proc. Chicago, USA, (1994), 53.
 7) 小川雄司, 丸岡伸洋: 鉄と鋼, 100 (2014) 4, 434.
 8) 川畑涼, 小平悟史, 渡辺敦, 川嶋一斗士, 井澤智生, 松野英寿, 菊地良輝: NKK技報, 128 (2002), 1.
 9) 前田孝彦, 田野学, 奥山悟郎: JFE技報, 38 (2016), 84.
 10) 川尻雄基, 野内泰平, 柏原佑介: JFE技報, 49 (2022), 8.
 11) NEDO, https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101503.html, (accessed 2022-1-7).
 12) 経済産業省: 第1回メタネーション推進官民協議会, https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methanation_suishin/index.html, (accessed 2021-6-28).
 13) JFE Steel, <https://www.jfe-steel.co.jp/release/2021/10/211015.html>, (accessed 2021-10-15).
 14) 風間彰, 河村和朗, 津田和呂, 杉岡真吾, 宮田淳: JFE技報, 45 (2020), 1.

(2022年3月31日受付)