

製鋼技術の進展と今後の展望

Progress and Future Prospects of Steelmaking Technology

岸本 康夫	KISHIMOTO Yasuo	JFE スチール	スチール研究所	研究技監・博士（工学）
石井 健司	ISHI Takeshi	JFE スチール	製鋼技術部長	
奥山 悟郎	OKUYAMA Goro	JFE スチール	スチール研究所	製鋼研究部長・博士（工学）
中村 善幸	NAKAMURA Yoshiyuki	JFE スチール	スチール研究所	スラグ・耐火物研究部 グループリーダー
石田 匡平	ISHIDA Kyohei	JFE スチール	スチール研究所	サイバーフィジカルシステム研究開発部長・博士（工学）

要旨

JFE グループにおける製鋼技術の開発の進展について紹介するとともに、今後の製鋼技術の課題について述べた。精錬分野では低銑配に適した転炉型予備処理技術（DRP[®]プロセス）を全地区で採用し、転炉を中心とした精錬プロセスのリアルタイム炉内推定モデルを構築した。高級鋼製造に向けて軸受け鋼等の介在物高度制御法を開発するとともに、連続鑄造において高速鑄造技術、表面欠陥防止、中心偏析低減等の無欠陥鑄造技術の開発を進めた。耐火物・スラグ利材化分野では熱裕度創出のための断熱化、耐火物の水平リサイクル技術および、製鋼スラグリサイクル拡大を進めた。

Abstract:

This paper introduces the progress of steelmaking technology development in the JFE Group and describes the problems of future steelmaking technology. In the refining field, a new converter type hot metal pretreatment process (DRPTM process) suitable for low hot metal ratio has been adopted in all districts, and a real-time in-furnace estimation model of the refining process mainly in converters was constructed. An advanced method to control the morphology of non-metallic inclusions in bearing steels has been developed to produce high-quality steels. In casting area, stable high-speed casting and defect-free slab production techniques to prevent surface defects and reduce center segregation were developed. In the field of refractories and slag utilization, the use of thermal insulation materials to create thermal margins, horizontal recycling technology for refractories, and expansion of steelmaking slag recycling were promoted.

1. はじめに

日本鉄鋼業はこれまで高生産性、高品質、省エネルギーで世界的競争力を維持してきたが、今後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の追及がますます重要になってきている。

特に 2050 年カーボンニュートラル実現に向けて GX (Green Transformation) 戦略を進めていくことが鉄鋼業界の最重要テーマである¹⁾。同時に、高生産性、高品質化をさらに究めるためには DX (Digital Transformation) が必要不可欠となってきている。

JFE スチールでは、全プロセス CPS (Cyber Physical System) 化など、DX を積極的に推進することで、革新的な生産性と安定操業の実現を目指す²⁾とともに、最終的に製鉄所一貫 CPS によるインテリジェントな製鉄所の実現を目指している。

精錬工程における反応効率向上、生産性向上および高純度化の追及、また連続鑄造における高生産性と高品質の両立の追及は前報³⁾と変わっていないものの、最近の製鋼技術はこれらの目標実現のために、GX と DX の進化を図ってきた。本稿では、JFE スチールにおける最近の製鋼技術の進展と今後の展望について報告する。

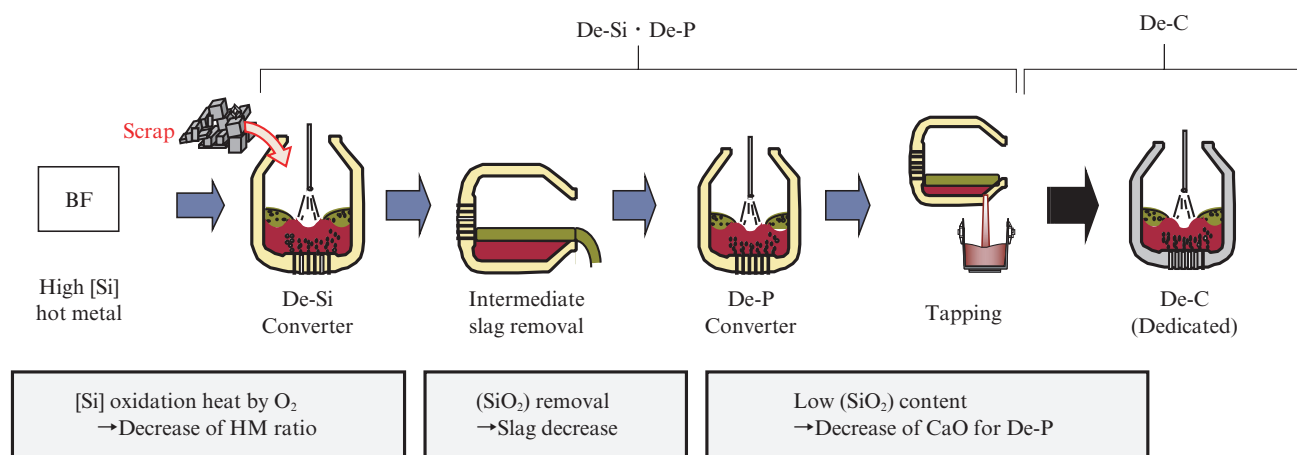
2. カーボンニュートラルに向けた精錬技術の開発

2.1 溶銑予備処理プロセス

鋼材の高純度化要求の高まりに対応し、精錬工程におけるりんや硫黄といった不純物の低減の要求は強く、JFE スチールでは溶銑予備処理によってあらかじめ、りんや硫黄を低減することで、製鋼スラグ量の低減と、鋼材の品質向上を図ってきた。

溶銑脱硫については、フッ素レス精錬下での安定的な脱硫能力確保の観点から機械式攪拌 (KR) 脱硫法を採用しており、既報³⁾のとおり、脱硫剤投射技術による石灰の凝集抑

2024 年 9 月 30 日受付

図1 新転炉型溶銑脱りんプロセス (DRP[®]) の概要⁶⁾Fig. 1 Concept of new dephosphorization process of hot metal with converter-type furnace (DRPTM)⁶⁾

制⁴⁾, スラグ熱間リサイクル技術によるスラグ利用効率向上⁵⁾等を行っている。

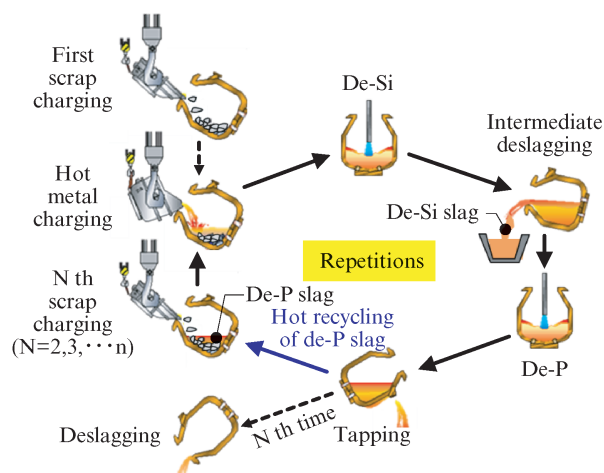
脱りんについては、従来、東日本製鉄所（千葉地区）、西日本製鉄所（倉敷地区）では、トピードカー方式の溶銑脱りんを行っており、能力向上や蛍石、ソーダ灰を用いない脱りん技術開発を進めてきた⁶⁾。

しかし、GX化を進めるうえで、製鋼工程では、溶銑配合率を下げ、スクラップ等の冷鉄源使用比率を高めることが求められる。そのためには酸素供給速度が速く、内容積の大きい転炉型脱りん法が有利であることから、全地区転炉型脱りん法に転換することにした。

東日本製鉄所（京浜地区）、西日本製鉄所（福山地区）では転炉型溶銑脱りん処理を行っており、スラグ中 Fe_2O_3 生成に応じたダイナミック吹錬制御を実現し、安定した低りん銑化技術を確立した⁷⁾。

さらに図1に示すDRP[®](Double-slag Refining Process)法を開発した⁶⁾。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、溶銑脱珪後にスラグを排出する。それにより、溶銑脱りに持込まれる SiO_2 を低減でき、石灰、製鋼スラグ量の少ない高効率溶銑脱りんが可能となる。さらに最近では、脱りん処理時の脱りんスラグへの地金ロス低減およびスラグ顕熱利用を狙いとして、脱りんスラグの全量リサイクル技術を確立した⁸⁾。図2にプロセスフローを示す。脱りんスラグの次チャージへのリサイクルには、①脱珪処理時の復りん防止、②中間排滓時のスラグ鍋内のスラグフォーミング防止が必要となるが、前者に対しては脱珪時の塩基度適正化、後者に対してはスラグ鍋への水吹付によるフォーミング鎮静技術を開発した。脱りんスラグ全量リサイクルの確立により、溶銑配合率2%、地金ロス約60%の低減を実現している。

開発したDRP法により、溶銑脱りん比率80%以上の条件で、溶銑配合率を従来（ZSP）法の90%から82%に低減可能となった⁹⁾。DRP法はJFEスチールの全製鉄所の全地区

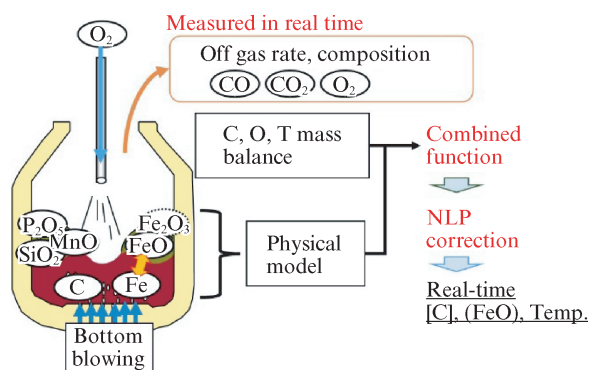
図2 脱りんスラグ全量熱間リサイクル⁸⁾Fig. 2 Hot recycling of whole dephosphorized slag⁸⁾

（京浜（ただし製鋼工場は2023年閉鎖）、千葉、倉敷、福山）で2021年度に設備化を完了し、溶銑配合率低下による CO_2 削減活動に貢献している。

一方、ステンレス鋼精錬では、 $[\text{P}] \leq 0.005\%$ といった極低りん濃度域までトピードカー脱りん予備処理で実施していたが、滓化促進のためにフッ素源（ CaF_2 ）を使用していた。今回トップスラグからの復りん防止を目的にトップスラグ組成を C_2S 共存域に制御することで復りんを防止、 CaF_2 を用いずに処理後 $[\text{P}] \leq 0.005\%$ までの脱りんが可能となった¹⁰⁾。

2.2 精錬プロセスのCPS化

高生産性、高品質化をさらに求めるためにはDXの推進が必要不可欠となってきている。特に精錬においては非平衡反応が支配すること多いため、理論的な精錬反応モデルだけでは予測が難しい。上述の Fe_2O_3 生成に基づく脱りん反応制御では、排ガス分析値から炉内の酸素バランスを求め、スラグ中の Fe_2O_3 濃度を推定、競合脱りん反応モデルとの併

図3 転炉リアルタイム推定モデル¹¹⁾Fig. 3 Real-time state estimation model during decarburization in converter¹¹⁾

用により転炉溶銑脱りん推定を行った。

転炉精錬制御では、溶湯成分と温度を目標範囲に制御するために溶湯成分、温度、スラグ成分値等の転炉内部情報をリアルタイムで推定、上底吹き条件や副原料投入の操作に反映させる試みが進められている¹¹⁾。従来の物理モデルや上述した物質収支に基づく内部推定モデルだけでは、未知外乱や計測値の誤差により精度向上が難しかったが、物理モデルと物質収支モデルの組み合わせにより誤差を補正、**図3**に示すリアルタイムかつ高精度に炉内状態を推定できるモデルを開発した。

さらに、精錬反応では、高温場で計測が難しいこともあり、多くの作業が人による判断を要していたが、赤外線画像とCNN（畳み込みニューラルネットワーク）を用いた転炉のスラグ流出判定方法自動化¹²⁾、底吹き転炉の地金（マッシュルーム）の輪郭抽出の自動化¹³⁾等、計測や画像解析の進化により人の判断のばらつきを低減できるようになっている。

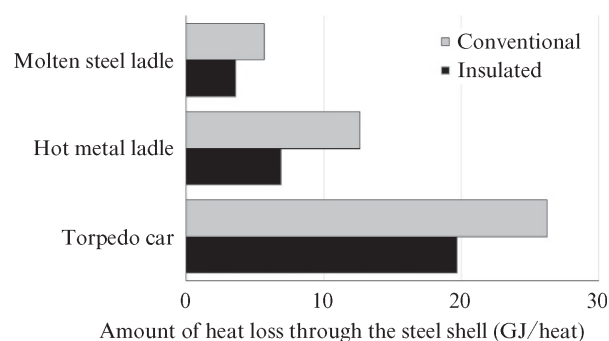
今後二次精錬制御も含めてさらに全製鋼プロセスCPS化を進めていく。

2.3 熱余裕拡大技術

高温下で処理を行う製鋼プロセスでは、搬送容器からの放熱による熱損失防止は極めて重要である。従来の断熱材利用ではウェア耐火物の耐用低下も報告されている。

マイクロポーラス断熱材を取鍋、高炉鍋、トピードカーの3容器のすべてに対し適用を図った¹⁴⁾。マイクロポーラス断熱材は、①小粒径で球体に近いシリカを主体とし個体間の熱伝導が少ない、②気孔径が小さく気体の熱伝導も抑制される、③気孔の小さいことから対流も小さい、④赤外線反射粒子を利用して輻射伝熱も阻害するという4つの効果より静止空気より低い熱伝導率を実現している。ただし、耐熱温度が高くても1000℃程度であることや耐火断熱レンガよりは強度が低いという課題もある。

マイクロポーラス断熱材の配置場所と厚みについて、あら

図4 各搬送容器における断熱材使用効果¹⁴⁾Fig. 4 Effect of heat insulator on heat loss from molten steel to outer steel shell of various transfer vessels compared with conventional one¹⁴⁾

かじめ非定常伝熱計算により断熱効果が最大になるよう検討した。三種の容器におけるマイクロポーラス断熱材適用効果を**図4**に示す。断熱化によりいずれの場合も鉄皮温度は低下し、鉄皮表面からの放熱量が取鍋、高炉鍋、トピードカーそれぞれ、36%、45%、25%低減できた。また、いずれの容器においても断熱化による寿命低下はなかった。

ステンレス鋼製造で開発した熱補償技術である純酸素粉体バーナー¹⁵⁾については、普通鋼転炉におけるスクラップ溶解促進に適用するべく、NEDO製鉄プロセスにおける水素活用プロジェクト（GREINS）において開発中である^{1,16)}。

2.4 リサイクルの拡大

カーボンニュートラルに向けては、今後エネルギー消費量低減に向けた資源循環型製鉄所の実現が必要であり、資材のリサイクルの適用拡大も重要である。耐火物については、従来から補修材等低品位耐火物への適用が図られていたが、発生元と同等の耐火物への利用、いわゆる水平リサイクルが望まれる。水平リサイクルを進める上では不純物や異材の混入が課題である。アルミナ-SiC-C系レンガの分別回収を行い、特に分球後の粒径1mm以下の不純物を1%以下に抑制したりサイクル原料とし、溶銑鍋に使用する新しいリサイクルフローを品川リファクトリーズと共同で確立した¹⁷⁾。リサイクル原料を最大70%配合したりサイクルレンガを使用し、問題なく操業できている。

製鋼スラグについて、溶銑予備処理で発生するスラグは精錬内で極力リサイクルを進めている。製鋼スラグ中には鉄とりんが含有されており、特にりんは日本のりん資源輸入に匹敵する量が存在する。製鋼スラグからの鉄、りんの回収は鉄歩留まり向上やりん資源の有効利用に資するものといえる。製鋼スラグからの高温還元の研究¹⁸⁾とりん資源化について、NEDO先導研究につづき、NEDO戦略的省エネルギー技術革新プログラム/テーマ設定型事業者連携スキームにおいて研究を継続している¹⁹⁾。

3. 高級鋼製造技術の開発

3.1 スラグ組成適正化によるスピネル系介在物生成抑制した軸受鋼製造技術

鉄鋼の精錬および鋼材中の非金属介在物（以下、介在物）は操業のみならず材料品質に悪影響を及ぼすため、その組成や形態の制御、あるいは総量の低減が望まれる。特に軸受鋼のような耐疲労特性が求められる高炭素鋼では、割れの起点部で $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ スピネル系介在物が観察されている。スピネル系介在物は、溶鋼中 $[\text{Al}]$ とスラグあるいは耐火物中 (MgO) との反応により生成した Mg が脱酸生成物の Al_2O_3 系介在物と反応して生成すると考えられ、スラグ組成がスピネル系介在物生成に対して大きく影響する²⁰⁾。

スラグ中の CaO/SiO_2 、 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、あるいは (MgO) 濃度が減少することにより、 (MgO) の活量を小さくすることがスピネル系介在物抑制に有効と報告されている。

LF のような二次精錬プロセスでは処理中にスラグへ耐火物中の MgO が溶解し、スラグの MgO 活量が増加していくため、スラグの CaO/SiO_2 や $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ を低減するだけでは、スピネル系介在物の生成を抑制することは難しい。

溶鋼への Al の添加時期を遅くすることで、スラグ中 (MgO) との反応を短時間化し、 (MgO) の $[\text{Al}]$ による還元を抑制する方法を検討した。ラボスケールにおける溶鋼－スラグ反応実験の結果、① Al 添加前はスピネル系介在物がほとんど見られず、② Al 添加後に介在物中の MgO 平均濃度が急激に増加し、スピネル系介在物が生成されること、および③最終スラグ組成制御により、介在物中 MgO 平均濃度を低位にできることを見出した²¹⁾。

実操業プロセスで、LF 操業時のスラグ組成および Al 添加タイミングを変更した結果、処理終了時における鋼中 $[\text{T.Mg}]$ 濃度およびスピネル系介在物の減少が確認された。

以上の研究結果にもとづき、鋼中 $[\text{Mg}]$ 濃度を低減、軸

受鋼の転動寿命を改善した。

3.2 高速鑄造技術

高速鑄造を安定して実現するために、前報³⁾ に記したとおり、①鑄型内での凝固シェル拘束や破断によるブレイクアウト（以下、BO）防止技術、②高速鑄造時潤滑と巻込み等欠陥防止を可能とするモールドパウダーの開発、③連鑄曲げ・矯正位置での脆化温度による表面割れ発生防止技術、④凝固界面歪増大による内部割れの発生防止ならびに冷却能力向上技術などの技術開発が引き続き進められている。

鑄型鋼板内に埋設された多数の熱電対温度より凝固シェル破断時の温度挙動に基づく BO 予知判定が用いられているが、閾値が多く属人的な調整であることや巾変更や測温異常による誤検知が課題であった。図 5 に示すように、鑄型多点温度データについて主成分解析を行うことにより正常操業時の特徴的な温度パターンを推定、各位置の温度実測値と推定パターンの推定誤差の二乗を全点で足し合わせた Q 統計量により操業異常度を指標化、BO 予知する手法を考案した²²⁾。また凝固殻再溶解による BO や異物噛みこみによる BO 等の検知に向けて、多点熱電対を用いて鑄型下端における凝固シェル厚のリアルタイムな監視する技術を目指して引き続き開発が進められている²³⁾。

3.3 鑄型内溶鋼流動制御技術

連続鑄造時に初期凝固殻に捕捉された介在物や気泡は最終製品に残留して表面欠陥や内部欠陥の原因となることがある。

介在物・気泡の凝固殻への捕捉についてのラボスケール実験と数値計算を用いた溶鋼流速の影響の定量的評価とともに、実機での連鑄スラブにおける介在物や気泡分布の調査と溶鋼流速の評価を行い、溶鋼流速 0.05 m/s が介在物や気泡の捕捉の有無を決定する臨界流速であることが解明さ

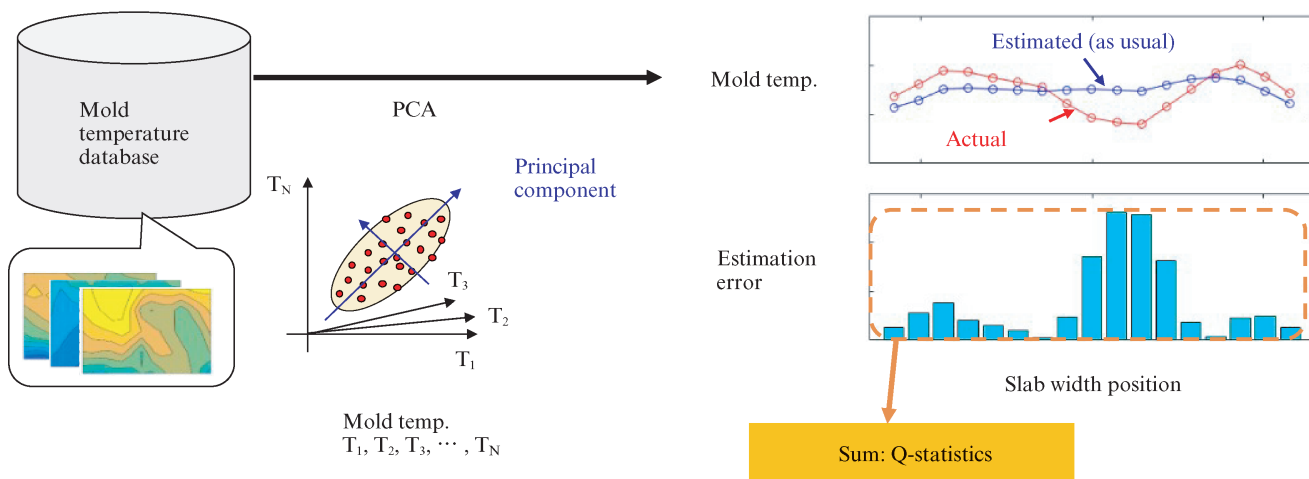


図 5 鑄型温度における Q 統計量計算²²⁾

Fig. 5 Calculation method using mold temperature database during continuous casting²²⁾

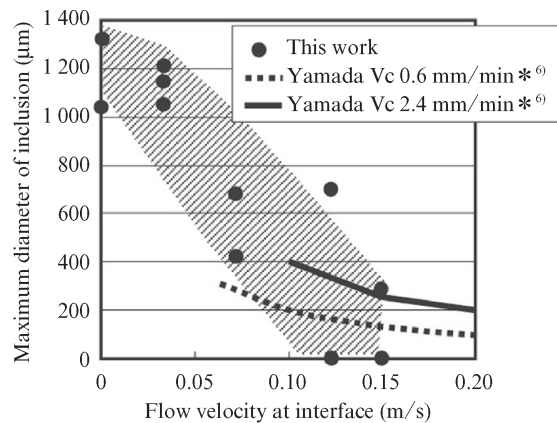


図6 溶鋼流速と捕捉介在物量比率および介在物の最大粒径との関係²⁴⁾

Fig. 6 Relationship between steel flow velocity at interface and entrapped inclusion ratio or max diameter of inclusions²⁴⁾

れた²⁴⁾ (図6)。

これらの知見をもとにJFEスチールは図7に示す上下2段の静磁場を有する電磁流動制御装置(FCモールド)を用いた、高スループット条件下でも欠陥低減を可能とする技術の開発を進めている。欠陥発生位置と铸造条件、铸型内溶鋼流動条件との関係に関する調査より、磁場条件としては外力項と慣性力項の比を表すStuart数が3.5以上になるように電磁ブレーキ力を印加することで気泡捕捉抑制できることを確認し²⁵⁾、当社のすべての高速連铸機にFCモールドを導入、効果を発揮している。

3.4 中心偏析低減技術

厚板、鋼管などの機械的特性や低温靱性、耐水素誘起割れ(HIC)性などを改善するためには連続铸造铸片の中心偏析の改善が必要である²⁶⁾。铸片の中心偏析は、凝固収縮やバルジングに伴って凝固末期にりんや硫黄が濃化した溶鋼が流動することによって発生する。溶銑、溶鋼の脱りん、脱

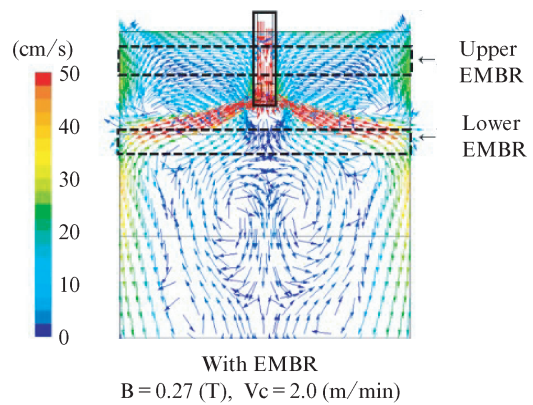


図7 FCモールドでの铸型内溶鋼流動

Fig. 7 Typical molten steel flow in FC mold

硫技術により濃度を低下して偏析を低減する技術、および凝固末期の溶鋼流動を抑止する铸片軽圧下技術²⁷⁾が開発されている。

JFEスチールでは厳格仕様耐サワーラインパイプ等を対象に福山地区第6連続铸造機における中心偏析低減に取り組んだ。中心偏析低減には最終凝固位置付近での凝固収縮量と熱収縮量に合わせて適正な軽圧下を加えることが重要である。表1に示す内容で凝固末軽圧下技術を最適化し、厚み中心部のHIC起点となる中心偏析の低減を図った。

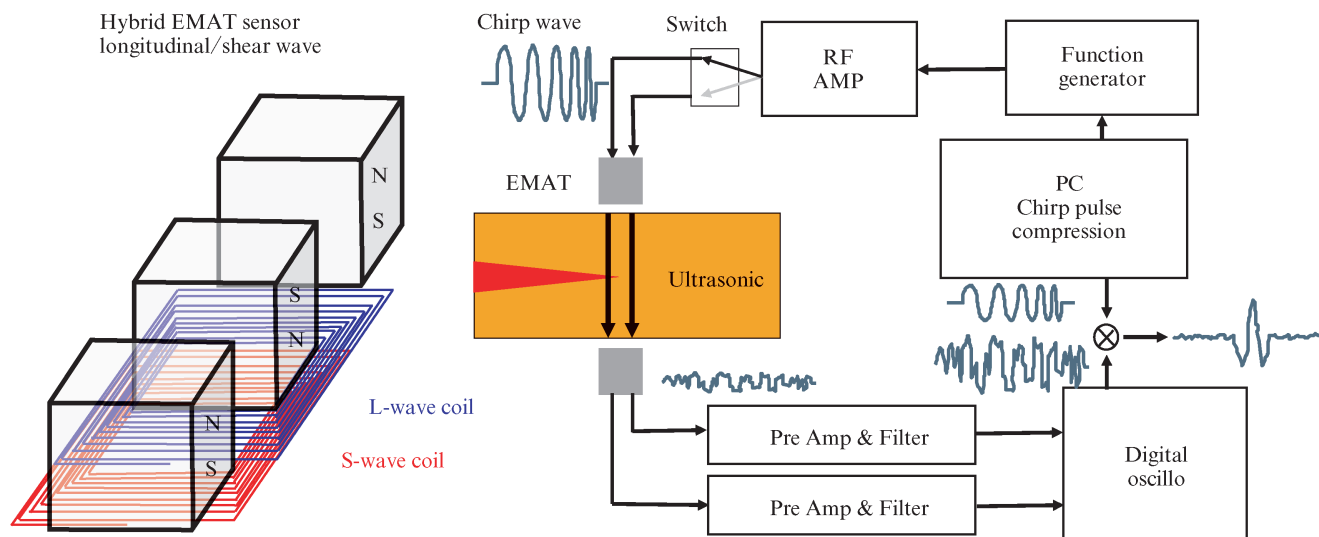
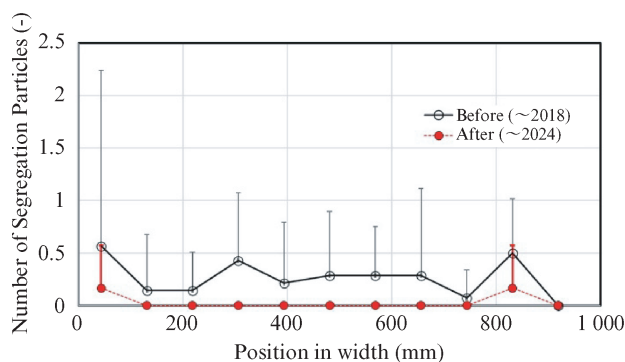
特に凝固位置の正確な測定にむけて開発したクレーターエンド計は、電磁超音波法を用いて铸造中の铸片に対して完全非接触で超音波を励起・受信し、凝固完了位置(クレーターエンド)を自動計測する世界初の技術である^{28, 29)}。図8にクレーターエンド計の構成を示す。クレーターエンドの幅方向と位置を正確に把握すると同時に、効率的な軽圧下付与のために短片非圧下(IBSR)と軽圧下ロールの分割化³⁰⁾と凸化を進めた。また、軽圧下時のセグメントの変位量の測定に基づき、幅方向の圧下速度のばらつきを低減するため軽圧下セグメントの強靱化改造も実施した。

以上の改善により理論値に近い圧下速度で軽圧下を実施

表1 凝固末期軽圧下による中心偏析改善技術

Table 1 Developed technologies for center-line segregation in slabs by soft reduction at the end of solidification

Purpose	Technology	Content
Optimization of soft reduction	Solidification completion position measuring device (Crater end measurement system)	• Optimization of soft reduction by grasping solidification completion position
	IBSR, Intentional Bulging Soft Reduction	• Reduction of reaction force under soft reduction by prevention of reduction in narrow face • Improvement of soft reduction efficiency at the center of width
	Conversion of convex roll in soft reduction	• Prevention of narrow face reduction and reaction reduction by roll taper
	Toughening of soft reduction rolled segments	• Increase in soft reduction speed by increase in load capacity • Decrease in center deflection of segment

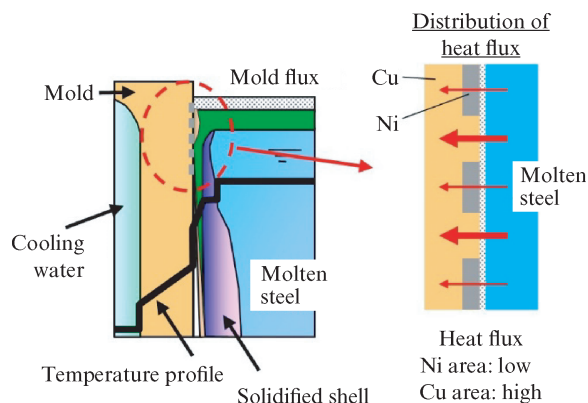
図8 クレーターエンド計測定構成²⁸⁾Fig. 8 Schematic diagram of the crater end detection system²⁸⁾図9 スラブ軽圧下最適化前後のMnの中心偏析²⁹⁾Fig. 9 Center-line segregation behavior of manganese before and after optimization of soft reduction method of slabs during casting²⁹⁾

できるようになり、図9に示すように、鑄片幅方向のマンガ
ン偏析は大幅に低減した。

3.5 亜包晶鋼の不均一凝固抑制

自動車用の高張力鋼板や厚板造船材などを中心に、亜包
晶鋼（炭素を0.08～0.18質量%含有する鋼）の連続鑄造が
増加している。亜包晶鋼の鑄造時は凝固時の結晶構造変化
に伴う体積変化等により生じる鑄型内の不均一凝固に起因
するスラブ表面割れが発生しやすく、鑄造後のスラブの手
入れ等が必要となる。従来は、亜包晶鋼を厚板造船材やハ
イテンなどに適用するために、合金添加による割れ回避の対
策が取られてきたが、新たに鑄型に丸溝部を加工し、そこに
Niを充填することにより、意図的に初期凝固部を緩冷却状
態にすることで、鑄型出側の凝固シェル厚を均一に成長さ
せる技術（図10）に取り組み、工業化した³¹⁾。鑄型寿命も
問題なく、品質向上と合理化を両立している。

自動車向けハイテン鋼種のスラブ表面割れ防止について

図10 不均一凝固抑制のための新鑄型³¹⁾Fig. 10 Mild cooling at meniscus in mold using nickel
embedding copper plate³¹⁾

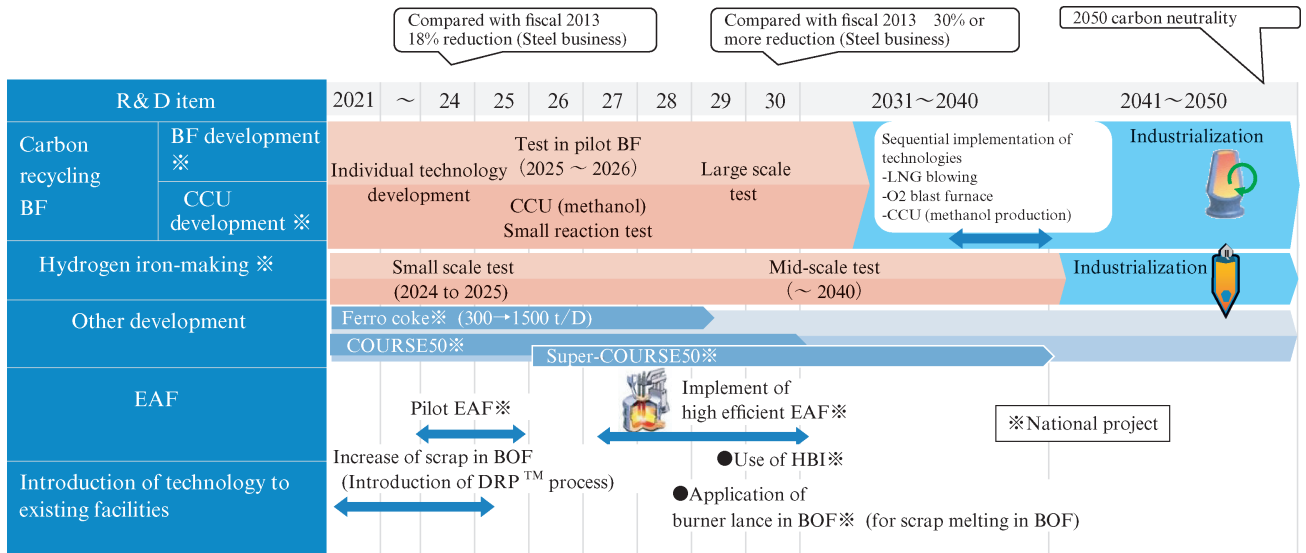
は、亜包晶成分のラボ予測手法とパウダー適正の判定手法
等、多角的に取り組み、鑄型内での溶融フラックス均一流
入と緩冷却を実現する低粘度-高結晶性パウダーの適用、
チャンファー付き鑄型の採用を行い、コーナー横割れの起点
となる鑄型内での微細割れの抑止、二次冷却パターンによ
る割れの進展を防止する製造技術を確立した³²⁾。

3.6 新連続鑄造機

各製鉄所の生産能力向上と高品質化を目的に2010年に福
山地区第7連続鑄造機、2021年に倉敷地区第7連続鑄造機
が建設された。

福山地区第7連続鑄造機は、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、国内主要連続鑄造機の中
でも最高のストランド当たりの生産性を有する¹⁾。

倉敷地区第7連続鑄造機は大断面スラブが鑄造可能であ

図 11 2050 年カーボンニュートラルに向けたロードマップ¹⁾Fig. 11 Roadmap to carbon neutrality by 2050¹⁾

ると同時に大単重スラブの安定鑄造を実現できる新品質制御技術を導入している³³⁾。

4. 製鋼技術の将来展望

4.1 電気炉溶解・精錬技術

当社のカーボンニュートラルに向けたロードマップを図 11 に示す¹⁾。2050 年にむけては NEDO の「グリーンイノベーション基金事業」¹⁵⁾ を通してカーボンリサイクル高炉や鉄鉱石の直接水素還元等の革新技術に取り組むと同時に、2030 年に向けて高効率大型電気炉の導入を検討している。

製鉄所に電炉を導入するに際しては、高級鋼溶製にむけて不純物を低減するために、還元鉄利用の拡大や不純物の低減が必要となり、電気炉精錬の高度化が必要となる。仙台製造所で培った電気炉技術³⁴⁾ も活用すると同時に、「グリーンイノベーション基金事業」においても試験電気炉を導入し、電気炉溶解・精錬技術開発に取り組んでいく。

4.2 製鋼技術の DX

高生産性、高品質化をさらに究めるためには初めに述べたように、DX が必要不可欠であり、全プロセス CPS 化によるリモート化、自動化を推進する。

精錬については、今回述べた転炉に加え RH でも炉内状態推定モデルを確立しており、今後他の精錬プロセスのモデル化も進め、全精錬プロセスの一貫温度管理や操業最適化を実現、エネルギーと合金および副原料の最小化を目指していく。

鑄造については、すでに述べた品質課題に対応できるオンライン制御が求められる。例えば、鑄型熱電対測定結果と 3D 過渡モデルに基づく連続鑄造鑄型内溶鋼流動推定モデ

ルが開発されている³⁵⁾。本モデルと鑄型温度情報によりノズル詰まり等の乱れによる非対称流れも推定できる。今後鑄型内溶鋼流れのリアルタイム推定・制御への活用が期待される。

5. おわりに

本稿で紹介した技術等により、生産性向上、鋼材の高純度化、および品質向上を実現した。今後さらに納期短縮等のお客様満足度の向上や、鋼材の高品質化、地球環境保全への貢献を図っていくと同時に、2050 年のカーボンニュートラルに向けて、製鋼分野において GX と DX の融合を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 北野嘉久. JFE スチールにおける製鋼技術の進歩と今後の GX, DX 戦略. ふえらむ. 2022, vol. 27, no. 7, p. 467-474.
- 2) 風間彰, 川村和朗, 津田和呂, 杉岡真吾, 宮田淳. JFE スチールにおけるデータサイエンス活用の展開. JFE 技報. 2020, no. 45, p. 1-7.
- 3) 三木祐司, 渡辺圭児, 大島健二. 製鋼技術の進展と今後の展望. JFE 技報. 2016, no. 38, p. 1-7.
- 4) Nakai, Y.; Sumi, I.; Kikuchi, N.; Kishimoto, Y.; Miki, Y. Aggregation Behavior of Desulfurization Flux in Hot Metal Desulfurization with Mechanical Stirring. ISIJ Int. 2013, vol. 53, no. 8, p. 1411-1419.
- 5) Nakai, Y.; Kikuchi, N.; Iwasa, M.; Nabeshima, S.; Kishimoto, Y. Development of Slag Recycling Process in Hot Metal Desulfurization with Mechanical Stirring. Steel Research International. 2009, vol. 80, no. 10, p. 727-732.
- 6) 菊池直樹, 内田祐一, 三木祐司. トピード・転炉型溶銑脱りん能力向上. JFE 技報. 2016, no. 38, p. 8-13.
- 7) 菊池直樹, 松井章敏. 転炉 FetO ダイナミック制御による高効率転炉溶銑脱りん技術. 材料とプロセス. 2020, vol. 33, p. 119.
- 8) 根岸秀光, 内田祐一, 川畑涼. DRP®における脱りんスラグ全量熱間リサイクル操業. JFE 技報. 2025, no. 55, p. 9-14.
- 9) 渡久地祐輝. JFE スチール西日本製鉄所(福山地区)における精錬プロセス再構築による溶銑配合率低減の取り組み. JFE 技報. 2025, no.

- 55, p. 15-19.
- 10) 根岸秀光, 日野雄太, 横井湧士. フッ素を用いないトービードカー型脱リン技術. JFE 技報. 2025, no. 55, p. 24-28.
- 11) 加瀬寛人, 富山伸司. 転炉内部状態リアルタイム推定モデルの開発. 材料とプロセス. 2023, vol. 36, p. 528.
- 12) 木村祐貴, 佐藤新吾, 石上貴大. 転炉でのスラグ流出判定方法の開発. 材料とプロセス. 2023, vol. 36, p. 147.
- 13) 伊藤友彦, 山平尚史, 島倉涼輔, 高橋岳彦, 中村春香, 横山英樹. 転炉炉底羽口の地金面積測定手法の開発. 材料とプロセス. 2020, vol. 33, p. 540.
- 14) 中村善幸, 細原聖司, 日野雄太, 井上明彦, 高橋克則. 製鋼容器の断熱施工効果. 耐火物. 2020, vol. 72, no. 6, p. 258-263.
- 15) 岸本康夫, 菊池直樹, 奥山悟郎, 内田祐一, 小笠原太. 環境調和型高品質ステンレス鋼溶製プロセスの開発. ふえらむ. 2021, vol. 26, no. 9, p. 583-589.
- 16) [https://www.greins.jp/technology/\(2024.8.30 アクセス\)](https://www.greins.jp/technology/(2024.8.30%20アクセス))
- 17) 吉田圭佑, 細原聖司, 高橋克則, 濱洋一郎, 下平賢一, 藤吉亮磨, 富谷尚士, 飯田敦久. Al₂O₃-SiC-C 系れんがのリサイクル技術の開発. 耐火物. 2021, vol. 73, no. 10, p. 447-453.
- 18) 中瀬憲治, 松井章敏, 菊池直樹, 三木祐司. 還元処理による製鋼スラグからのりん分離挙動に及ぼすスラグ組成の影響. 鉄と鋼. 2016, vol. 102, no. 9, p. 485-491.
- 19) 松尾充高, 齋藤公児, 岸本康夫. 「鉄鉱石の劣質化に向けた高級鋼材料創製のための革新的省エネプロセスの開発」(2018~2019 年度実施)の成果概要. JRCM NEWS. 2019, no. 395, p. 2-4.
- 20) Harada, A.; Matsui, A.; Nabeshima, S.; Kikuchi, N.; Miki, Y. Effect of Slag Composition on MgO-Al₂O₃ Spinel-Type Inclusions in Molten Steel. ISIJ Int. 2017, vol. 57, no. 9, p. 1546-1552.
- 21) 原田晃史, 中山日菜子, 渡邊佑介. 軸受鋼長寿命化のための介在物組成制御技術. JFE 技報. 2025, no. 55, p. 36-41.
- 22) 益田稜介, 西村隆, 橋本佳也, 平田丈英. Q 統計量を用いた連铸ブレークアウト予知システム. 材料とプロセス. 2023, vol. 36, p. 145.
- 23) 伊藤陽一, 鍋島誠司, 三木裕司, 久保田淳, 松岡克影. 鋳型熱電対による凝固シェル厚の推定. 鉄と鋼. 2018, vol. 104, no. 8, p. 436-443.
- 24) 三木祐司, 大野浩之, 岸本康夫, 田中進也. モデル実験および DC 磁場をもつ実機連铸機における初期凝固シェルへの気泡・介在物捕捉シミュレーション. 鉄と鋼. 2011, vol. 97, no. 8, p. 423-432.
- 25) 古米孝平, 三木祐司, 松井稜, 村井剛. 鋼板の表面欠陥発生機構解明のための再現ラボ実験と超音波探傷法による連铸スラブ欠陥分布評価. 材料とプロセス. 2017, vol. 30, p. 43.
- 26) 育成委員会連铸技術史分科会編. 我が国における鋼の連続铸造技術史. 日本鉄鋼協会. 1996, 772p. (p. 515-524.)
- 27) 梶昌久, 石黒守幸, 小森重喜, 村上勝彦, 福田有. 扇島 1 号連続铸造機の特徴と製品品質. 日本鋼管技報. 1978, no. 79, p. 313-324.
- 28) 西澤裕司, 飯塚幸理. 高感度電磁超音波による縦波横波ハイブリッド式連続铸造クレータエンド検知. 材料とプロセス. 2023, vol. 36, p. 149.
- 29) 西澤佑司, 外石圭吾, 田中智紘, 飯塚幸理. 高感度電磁超音波法による連続铸造の凝固完了位置(クレーターエンド)検知. JFE 技報. 2025, no. 55, p. 42-48.
- 30) 小林日登志, 栗山伸二, 政岡俊雄, 鈴木幹雄, 宮原忍. 新軽圧下法による連続铸造スラブの中心偏析制御. 材料とプロセス. 1989, vol. 2, no. 4, p. 1158-1161.
- 31) 古米孝平, 岩田直道, 鍋島誠司, 荒牧則親, 三木祐司, 糸山誓司. 熱流束制御鋳型による亜包晶鋼の凝固不均一抑制(その 2 連続铸造評価). 材料とプロセス. 2023, vol. 36, p. 462.
- 32) 鼓健二, 櫻井友太, 外石圭吾. 自動車向けハイテン鋼種のスラブ表面割れを防止する铸造技術. JFE 技報. 2025, no. 55, p. 29-35.
- 33) 鎌田航平, 原田洋平, 西村隆. JFE スチール西日本製鉄所(倉敷地区)第 7 連铸機における大断面スラブ製造技術およびデータ活用によるトラブル予兆監視. JFE 技報. 2025, no. 55, p. 49-54.
- 34) 松田樹人, 形部文規, 三輪善広. 仙台電気炉の通電パターン改善によるスクラップ溶解効率向上. JFE 技報. 2025, no. 55, p. 20-23.
- 35) Hashimoto, Y.; Matsui, A.; Hayase, T.; Kano, M. Real-Time Estimation of Molten Steel Flow in Continuous Casting Mold. Metallurgical and Materials Transactions B. 2020, vol. 51, no. 2, p. 581-588.