

# 製鋼技術の進展と今後の展望

## Progress and Future Prospects of Steelmaking Technology

三木 祐司 MIKI Yuji JFE スチール スチール研究所 主席研究員・博士 (工学)  
 渡辺 圭児 WATANABE Keiji JFE スチール スチール研究所 スラグ・耐火物研究部長・博士 (工学)  
 大島 健二 OSHIMA Kenji JFE スチール 製鋼技術部長

### 要旨

JFE スチール発足から 10 年間の製鋼分野における主要な技術開発について概括した。精錬分野では、予備処理における反応効率向上によるスラグ発生量の低減、転炉・二次精錬における高純度技術ならびに熱余裕拡大による鉄源利用拡大技術の開発に主眼が置かれた。また、スラグ耐火物分野では、スラグ利材化技術の開発、製鋼スラグからの顕熱回収、鉄・りん回収技術の開発を主体に実用化が進められた。 casting 分野では、高生産性と高品質の達成に向け、高速 casting 安定化技術と表面欠陥、割れ防止、中心偏析低減などの無欠陥铸片製造技術の開発がなされた。本稿では、JFE グループにおける最近の製鋼技術の開発状況と進展について紹介する。

### Abstract:

Main research and technical development topics in the last decade since the establishment of JFE Steel are summarized. In the refining area, priority was on the reducing of slag generation by improving reaction efficiency in hot metal pretreatment processes, improving purification level in the BOF and secondary refining, and expanding iron source utilization by increasing heating margin. On slag and refractories, slag reuse techniques, sensible heat collection from hot slag, and iron and phosphorus collection techniques were developed and put to practical use. In casting area, stable high-speed casting and defect-free slab production techniques to prevent surface defects and cracks, and reduce center segregation were developed. This paper also introduces future prospects for steelmaking technologies.

## 1. はじめに

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 P や S といった不純物の低減量が増加している。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いる。さらに不純物除去のために用いる精錬剤の反応効率を向上し、製鋼スラグの発生量を低減すると共に、環境に対応した合理的な利材化技術が必要である。転炉・二次精錬においては、高生産性をベースとした高純度技術が必要である。また製鋼工程における熱ロス低減、熱余裕拡大による鉄源選択拡大技術や、鉄歩留り向上技術によって、鉄鋼製造における CO<sub>2</sub> 排出量の抑制が求められている。本報告にて紹介する精錬技術を表 1 に示す。表中の BOF は転炉 (Basic Oxygen Furnace)、( ) はスラグ中成分を示す。

連続 casting においては、グローバル化による国際競争力が高まる中で、高生産性と高品質の両立が要求されている。本報告にて紹介する casting 技術を表 2 に示す。高生産性に対しては高スループット・高 casting 速度下での安定 casting 技術が

表 1 製鋼精錬分野における開発技術

Table 1 Developed techniques in steelmaking process

|                                   |                                      |   |
|-----------------------------------|--------------------------------------|---|
| Hot metal pre-treatment           | Reduce and Reuse of steelmaking slag | Increase of Hot metal pretreatment efficiency in torpedo car and BOF            |
|                                   |                                      | (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) control in hot metal dephosphorization in BOF |
|                                   |                                      | Blasting and slag hot recycling in hot metal desulfurization                    |
| BOF                               | Increase productivity                | Tuyler layout in bottom-blowing   |
| Secondary refining                |                                      | Gas jet control in vacuum condition   |
| Increase of heat capacity         |                                      | Oxy-fuel burner with chromium ore in Smelting reduction converter               |
|                                   |                                      | Application of Insulated refractories   |
| Utilization of cheaper iron scrap |                                      | Cu removal in hot metal   |
| Utilization of steelmaking slag   |                                      | Fe and P collection from steelmaking slag                                       |

表 2 連続鋳造分野における開発技術

Table 2 Developed techniques in continuous casting process

| Target  | Technological development   |
|---|---|
| Clean steel   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Pressurization and depressurization refining</li> <li>Centrifugal flow tundish</li> </ul>  |
| High speed casting  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Breakout detection</li> <li>Intensive secondary cooling</li> <li>High-pressure water spray</li> <li>Prevention of submerged entry nozzle clogging (containing MgO and Al)</li> </ul> |
| Prevention of surface defect caused by inclusions and mold flux | <ul style="list-style-type: none"> <li>Flow control in mold by magnetic force (Flow Control Mold)</li> <li>Addition of liquid mold flux</li> <li>Non-Newtonian flux</li> </ul>  |
| Prevention of surface cracking                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Uniform cooling</li> <li>Predeformation treatment</li> </ul>   |
| Prevention of centerline segregation                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>Direct measurement of unsteady bulging</li> </ul>  |
| Control of solidification structure                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>Prediction of Equiaxed Crystal Ratio</li> </ul>  |

必要であり、ブレイクアウト (BO) 検知技術の高度化、高速鋳造用モールドパウダー開発、冷却能力向上を可能とする二次冷却開発が必要である。高品質化に対しては、新商品開発加速の観点から、高純度鋼製造技術の開発ならびに自動車用鋼をはじめとする表面厳格仕様に対応した表面欠陥防止技術、高強度高張力鋼板に対応した表面割れ防止技術、厳格耐サワー環境に対応した中心偏析低減技術が強く求められている。

本報では、JFE スチールにおける製鋼技術の進展と、今後の展望について報告する。

## 2. 精錬技術の開発

### 2.1 溶銑予備処理プロセス

低りん、低硫銑化による鋼材の品質向上、製鋼スラグ低減、を目的に溶銑予備処理プロセスの再構築、新技術の導入を実施した<sup>1,2)</sup>。

図 1 に溶銑予備処理フローと開発技術を示す。東日本製鉄所千葉地区、西日本製鉄所倉敷地区においては、トピードカー方式の溶銑脱りん能力を向上するとともに、従来、トピード型フラックスインジェクションによる溶銑脱硫処理から、溶銑装入鍋による機械攪拌式溶銑脱硫を導入<sup>2,4)</sup>した。

溶銑脱りん処理については、精錬剤に螢石、ソーダ灰を用いない技術を開発した。トピード脱りんでは、スラグ塩基度設定を 2.0 から 1.6 に低下することでスラグの熔融を促進すると共に、酸化鉄を主成分とする脱りん剤の供給速度を 1.25 倍に増加した。その際問題となるスラグ噴出は、トピードカーを 5° 傾転させ、専用ピットを設置する流滓技術によって解決した。脱りん能力は処理後スラグの実塩基度 1.5 を確

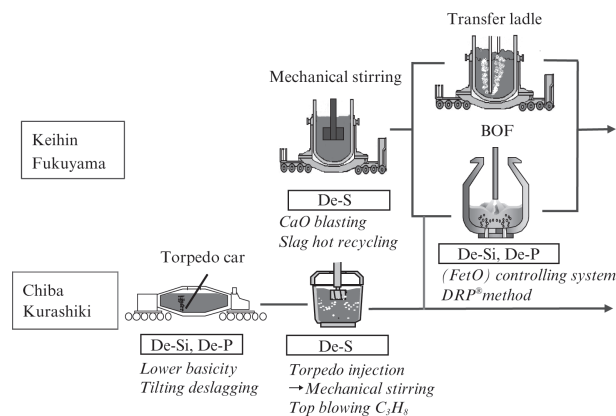


図 1 溶銑予備処理プロセスにおける開発技術

Fig. 1 Developed techniques in hot metal pretreatment process

保することで確保可能であった。

東日本製鉄所京浜地区、西日本製鉄所福山地区においては、転炉型溶銑脱りん処理を行っている。精錬剤に螢石を用いない技術として、吹錬中のスラグ中 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 生成を促進、制御する技術を適用した<sup>5)</sup>。転炉型溶銑脱りん反応速度に及ぼすスラグ中 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の影響を反応モデルによって定量化すると共に、転炉溶銑脱りん処理中のスラグ中 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 生成を推定するシステムを実機プロセスに導入した。その結果、スラグ中 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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<sup>6)</sup>。更に、転炉脱りんにおいては、事前に脱珪処理を行わずに溶銑を転炉へ装入し、脱珪吹錬後に吹錬を中断して炉内の高 SiO<sub>2</sub> 含有スラグを炉外に排出 (中間排滓) した後に、脱りん吹錬を再開する、新転炉型溶銑脱りんプロセス (Double-slag Refining Process, DRP<sup>®</sup>) を開発した。図 2 に DRP の概要を示す。図中 De-Si は脱珪、De-P は脱りんである。

東日本製鉄所千葉地区、西日本製鉄所倉敷地区では、トピード溶銑脱りん処理を先に行うため、引き続き行われる溶銑脱硫処理が低温となり不利になる課題があった。従来トピードにおける脱硫剤インジェクションによる溶銑脱硫を行っていたが、低温での脱硫反応促進技術として C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> ガス吹込みを適用した<sup>4)</sup>。その結果、溶銑中の酸素分圧が低下し、脱硫反応効率向上効果を確認した。その後、トピードインジェクション方式に替わり機械式溶銑脱硫を採用した。S 分配比は攪拌力の高い機械攪拌方式採用により向上した。更に、C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> ガス上吹き法を機械攪拌方式に適用し、同様に酸素分圧低下による効果を確認した。さらに脱硫剤投射技術<sup>7)</sup>、容器底部傾斜技術<sup>8)</sup>、スラグ熱間りサイクル技術<sup>9)</sup>を適用し、脱硫剤の反応効率向上を図った。図 3 に脱硫剤投射技術の概要を示す。従来、上添加された石灰を主成分とする脱硫剤は処理中に溶銑中に巻き込まれる過程で凝集し、凝集体の内部には未反応の石灰が多く観察される。そこで、搬送ガスによって溶銑中に脱硫剤を投射し、溶銑中への浸入を

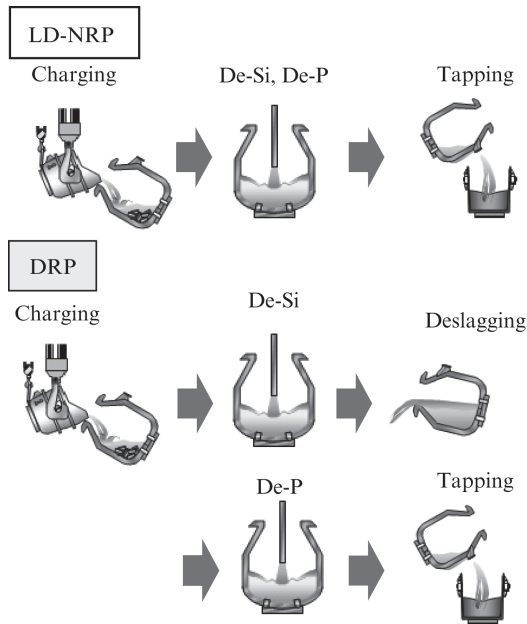


図2 新転炉型溶銑脱りんプロセス (DRP®) の概要

Fig. 2 Schematic image of new hot metal dephosphorization process using converter (DRP®)

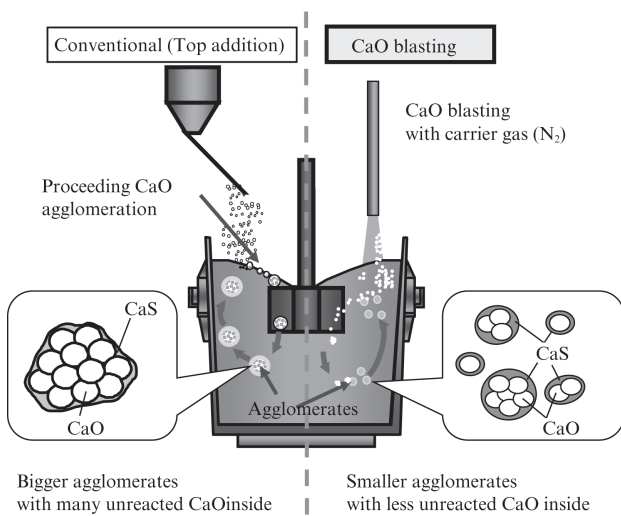


図3 機械攪拌式溶銑脱硫における従来・開発法の比較

Fig. 3 Comparison of conventional and developed method in hot metal desulfurization with mechanical stirring

促進する事で、脱硫剤の凝集が抑制され、脱硫反応への利用効率が向上した。更に反応容器の底部を傾斜させることにより、攪拌中に偏心渦を形成させ、脱硫剤の巻込みを促進する技術、スラグ熱間りサイクル技術を適用した。その結果、脱硫剤の反応効率が約1.5倍に増加し、脱硫スラグ量が30%低減した。

## 2.2 転炉・二次精錬

東日本製鉄所・千葉地区の純酸素底吹き転炉 (Q-BOP) において、底吹き羽口配列の適正化を行った。1/15 サイズ

の水モデル実験により、浴振動に及ぼす羽口配列の影響を調査し、振動解析に基づいた配列を提案した。図4に羽口配列 ( $L_2/L_1$ ) の異なる浴内流動観察の結果を示す。スプラッシュ発生が少ない  $L_2/L_1=0.227$  の配列を実機 Q-BOP に適用し、吹錬中の溶鉄飛散防止により、溶鋼歩留りが0.2%向上した<sup>10)</sup>。

2次精錬工程である真空脱ガス (RH) 処理において上吹き送酸脱炭技術を開発した。予め1/10モデル実験と、3次元数値解析により、真空下での上吹き送酸ジェットの挙動を調査した<sup>11, 12)</sup>。得られた結果に基づき、実機 RH にて新上吹き送酸ランスを適用し、その結果、 $[\text{mass}\%C] \geq 0.015$  において脱炭速度7.5%向上と2次燃焼増加により処理中の温度降下が約4℃低下した。また高真空下の  $[\text{mass}\%C] < 0.015$  において、溶鉄飛散が減少し、真空槽内の地金付着が半減した。

## 2.3 熱余裕拡大, 安価鉄源利用技術

製鋼工程における熱余裕拡大を目的に、処理・搬送容器の耐火物の開発を行った<sup>13)</sup>。直接熔融金属部に接するウエア耐火物とマイクロポーラス断熱材の特性を考慮して配置を最適化し、断熱性能を最大限発揮するとともに耐用への悪影響を回避した。

混銑車では鉄皮と永久耐火物間にマイクロポーラス断熱材を3mm厚で施工したところ、鉄皮温度が約50℃低減し放熱が25%抑制されることを確認した。高炉鍋ではウエア耐火物を低熱伝導率化するとともに鉄皮と永久耐火物間にマイクロポーラス断熱材を5mm厚で施工することにより、鉄皮温度が96℃低減し放熱が45%低減した。水で混練する不定形耐火物を用いる取鍋では、マイクロポーラス断熱材

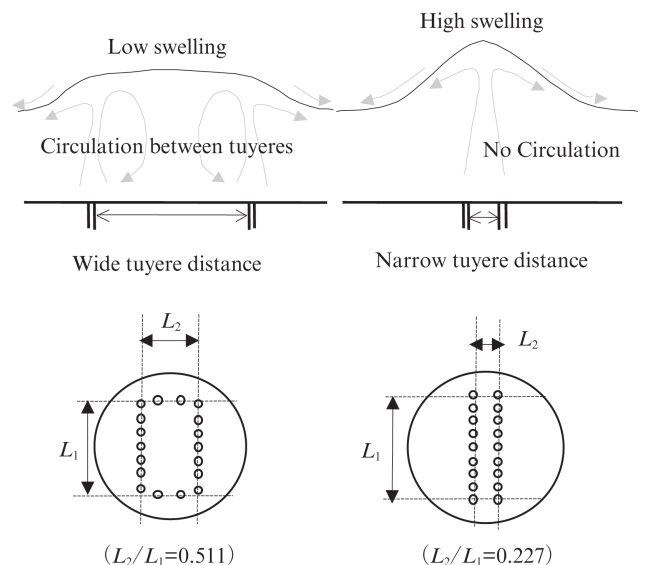


図4 浴内の流動パターン観察結果

Fig. 4 Observation results of bath flow patterns with different tuyere array distances



をウェア耐火物の水分と接しない鉄皮と永久耐火物間に施工することにより、ウェア耐火物と断熱材の耐用を確保しつつ、**図5**に示すように鉄皮温度が70℃低減し放熱が36%低減することを確認した。

東日本製鉄所千葉地区ではステンレス鋼製造を行っている。ステンレス製造プロセスの特徴は強攪拌上底吹き転炉によるクロム鉱石溶融還元、脱炭精錬である。クロム鉱石の溶融還元は吸熱反応であり、高生産性を維持し、安価なクロム源であるクロム鉱石を多量に還元するためには熱補償技術が重要である。従来は炭素源添加と送酸による1次、2次脱炭反応による熱補償を行っていた。JFE スチールでは、クロム鉱石を添加する専用ランスを純酸素バーナー化し、高い熱効率を実現する技術（**図6**）を開発した<sup>14)</sup>。バーナー燃焼熱に対するクロム鉱石の割合を増加することにより、クロム鉱石がバーナー燃焼熱の伝熱媒体として作用し、80%という高い着熱バーナー燃焼熱が得られることを確認した。クロム鉱石バーナーの導入により同一鉱石量あたりの供給エネルギー量は17%低減し、水素系燃料中の炭素分を考慮した炭素燃焼由来のエネルギー量は従来法と比較して26%減少した。

製鋼工程におけるCO<sub>2</sub>発生低減のためには、熱余裕拡大による冷鉄源溶解が有効である。冷鉄源は年々純度が低下する傾向にあり、トランプエレメントを含む冷鉄源が増加する。そこで、代表的なトランプエレメントであるCu<sup>15)</sup>、Sn<sup>16)</sup>を溶銑段階で除去する技術を開発した。ここでは溶銑の脱銅について示す。将来増加が予想される老廃屑と高炉溶銑との混合を想定し、溶銑中の脱銅目標を[mass%Cu]=0.25→0.15（脱銅率40%）とした。10kg規模の小型溶銑炉を用い、1250℃にてNaCO<sub>3</sub>（25 kg/t）+FeS（52 kg/t）のフラックス添加、機械攪拌により、脱銅率57%が得られた。また3t規模の機械攪拌式溶銑脱銅実験を行い、1250～1400℃、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>（33 kg/t）+FeS（56 kg/t）のフラックス添加、機械攪拌により、12分間の攪拌で脱銅率46%が得られた<sup>17)</sup>。スラグ/メタル間の銅分配比は18が得られた。こ

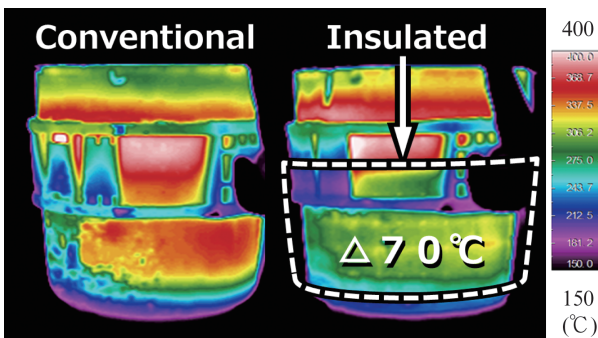


図5 断熱材有無による取鍋温度分布比較

Fig. 5 Comparison of temperature distributions in steel ladles with and without heat insulation

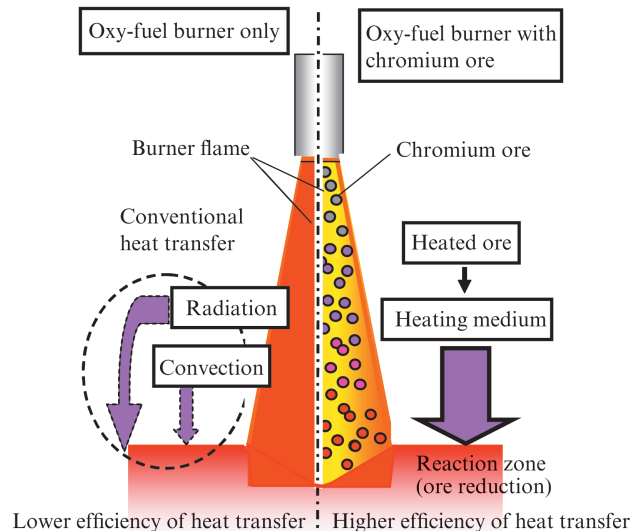


図6 従来・開発法における伝熱挙動比較

Fig. 6 Comparison of conventional and developed heat transfer

の結果は、これまで報告されているNaSO<sub>5</sub>系フラックスでの銅分配比の平衡値<sup>18)</sup>24に近い値である。以上のように工業的に使用されているソーダ灰、硫化鉄といったフラックスにより、溶銑脱銅が可能であることを明らかにした。

製鋼スラグに関しては、水和固化体<sup>19-21)</sup>、海域利用<sup>22-24)</sup>等の利材化技術の開発、実用化を行っている。また製鋼スラグからの顕熱回収と利材化を目的とした連続凝固プロセス<sup>25-27)</sup>、製鋼スラグからのFe・P回収技術の研究開発に取り組んでいる<sup>26)</sup>。日本における資源としてのPは輸入に依存しており、日本の鉄鋼業界で発生する製鋼スラグ中に含有するPは、日本のりん資源としての年間輸入量である約11万tに匹敵する。また酸化鉄としてスラグ中にロスするFe分は日本鉄鋼生産量の約3～4%に相当する。したがって、鉄鋼プロセスの副産物である製鋼スラグからのFe・P回収は鉄歩留り向上、りん資源の有効利用に寄与するものである。製鋼スラグ中に酸化物として存在するFe、Pを1400℃にて炭素還元し、回収する試験を小型溶解炉にて行った。その結果、Feは90%以上金属鉄として回収され、処理後スラグ中りん濃度が0.3%以下まで低減した。その結果、スラグ中のPは還元銑鉄中に2～3%程度まで濃縮される。得られた高りん銑については脱りん処理により、スラグ中にりん濃縮し、りん酸肥料としての利用することを想定している。現在は本プロセスの工業化を目指し、スケールアップ実験を実施中である。

### 3. 鑄造技術の開発

#### 3.1 高潔淨鋼製造技術

真空脱ガス（RH）処理～タンディッシュプロセスでは高級鋼の清浄性厳格化に対して溶鋼中から非金属介在物の除

去を推進する技術開発を行った。軸受鋼においては微小介在物の除去が要求されるが、真空脱ガス（RH）処理時の減圧により窒素ガス等の可溶性ガスが微細気泡となり介在物浮上除去を促進させることを利用するRH加減圧精錬法<sup>28)</sup>の開発が進められた。またフェライト系ステンレス鋼においては回転磁界攪拌による介在物分離能力の大幅な向上を利用する遠心分離タンディッシュ<sup>29)</sup>により酸素値を低減でき、品質向上に寄与している。

### 3.2 高速鋳造技術

高速鋳造を安定して達成するためには①鋳型内での凝固シェル拘束や破断によるブレイクアウト（BO）防止技術、②高速鋳造時の鋳型/鋳片間潤滑と巻込み等の欠陥防止を可能とするモールドパウダーの開発、③連鋳曲げ・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操業上、品質上の問題を解決する技術開発が望まれる。

JFE スチールでは、各種 BO の検知技術として鋳型銅板内に埋設された多数の熱電対温度より凝固シェル厚を算出するシステムを構築した<sup>30)</sup>。本システムの利用により鋳型下端における凝固シェル厚のリアルタイムな監視が可能となり、高速鋳造時の異常検知に対する有効性が確認されている。

また高速鋳造のパウダー巻込み低減を目的に、パウダー中に窒素を含有させることにより溶融パウダー粘度が剪断応力により変化する非ニュートン流体特性を有する非ニュートンパウダー開発<sup>31,32)</sup>が進められ、ラボ実験でのパウダー巻込み低減効果が確認された。さらには鋳型/鋳片間摩擦力について鋳型振動条件、モールド物性などの影響に関して測定・解析も進められ、図7に示すように液体摩擦

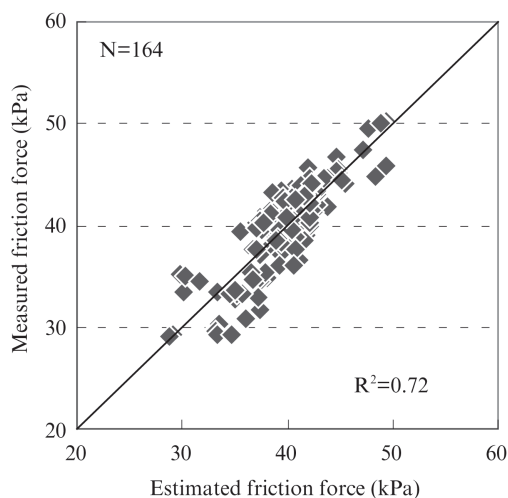


図7 鋳型鋳片間摩擦力の推算式  
Fig. 7 Estimation of friction force

が支配的であることを仮定した摩擦力推定式<sup>33)</sup>が提案されており、モールドパウダーの影響について操業、品質への指標化が進められつつある。

高速鋳造時の表面割れ、内部割れ防止ならびに冷却能力の向上に対しては二次冷却技術の開発を進めてきた。スプレー冷却能に及ぼす水量密度、圧力などの各因子の評価<sup>34,35)</sup>ならびに二次冷却デバイスの開発<sup>35)</sup>を行った。

### 3.3 鋳型内溶鋼流動制御技術

連続鋳造時に捕捉された気泡や介在物は、熱間もしくは冷間圧延時の疵発生の一因となる場合があり、高生産性と高品質化の両立の要求から、高スループット鋳造時も捕捉される欠陥を低減可能な技術開発が望まれている。JFE スチールでは図8に示す上下2段の静磁場を有するFlow control（FC）モールドと呼ぶ電磁流動制御装置<sup>36)</sup>により、高スループット条件下においても欠陥低減を可能とする技術の開発を進めてきた。また鋳片サンプル中の欠陥径約0.6 mm以上、表皮下2-10 mmの欠陥分布を迅速に測定可能とする超音波探傷法を新規開発し、欠陥発生位置と鋳造条件、鋳型内溶鋼流動条件との関係を広く調査した。

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溶鋼運動量を50%以上低減可能なことが確認された<sup>37)</sup>。また電磁ブレーキ条件や鋳造条件を適正化するため、鋳片評価の実績値と数値計算による計算値の対応が進められており、図9に凝固界面（固相率 $f_s=0.2$ ）における0.5 mm径の捕捉された気泡分布の数値計算の例を示す<sup>38)</sup>。電磁ブレーキ強度アップによる気泡捕捉抑制効果が確認でき、本結果は前述した超音波探傷法による鋳片実測値と良い対応がみられることが確認された。

### 3.4 表面割れ防止技術

自動車鋼材の高強度化、軽量化に伴い高張力鋼板の新商品開発が進められており、Nb、Vなどの合金を含有する亜包晶中炭素鋼成分では割れ感受性が高く連続鋳造時の表面割れ発生が課題となる。基礎実験段階ではあるが、曲げ・矯正相応の歪を加える以前に予歪付与することで高温延性

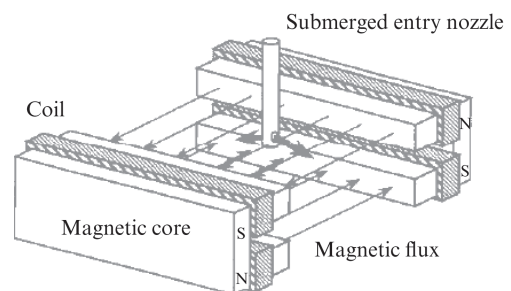


図8 FCモールドの模式図  
Fig. 8 Schematic drawing of Flow Control Mold

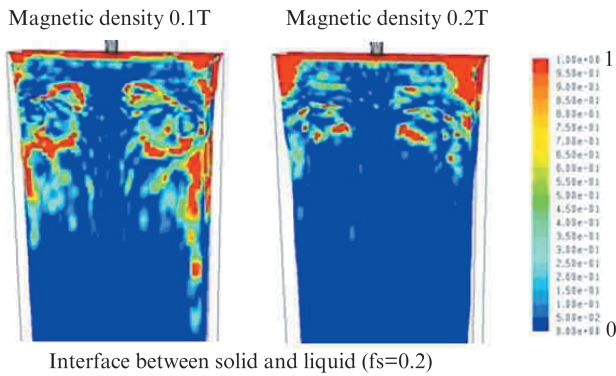


図9 数値計算による凝固シェルに捕捉される気泡結果  
Fig. 9 Calculated results of entrapped bubble concentration

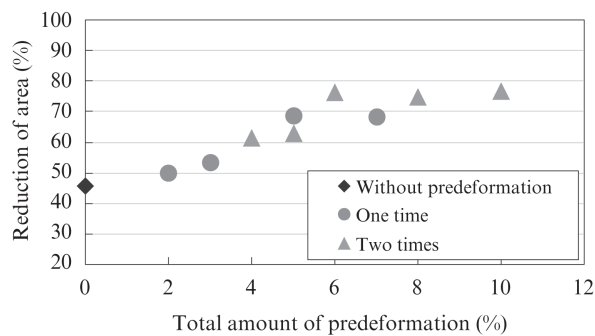


図10 予歪付与による延性向上効果  
Fig. 10 Improvement of hot ductility by predeformation treatment

改善効果を発現させる新たな技術が開発されつつある<sup>39)</sup>。2~5%の歪を2回付与した場合に積算歪と同等の高温延性改善効果があること明らかとなった(図10)。

### 3.5 非定常バルジング防止技術

連続 casting 時に周期的な湯面変動やセグメント変動を引き起こす非定常バルジング現象は、 casting 速度低下などの操業阻害を引き起こすばかりでなく、中心偏析要求の厳格な鋼種においては、連铸機セグメント内でのロール間バルジン

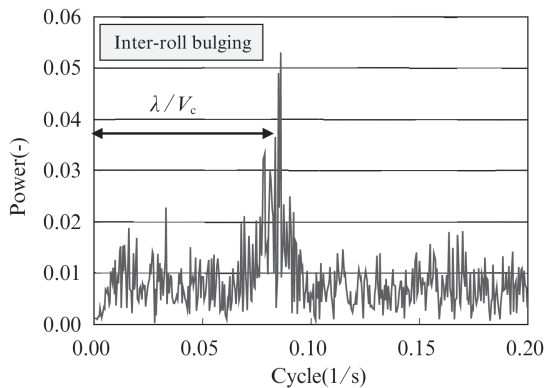


図11 ロール間バルジング変動のFFT解析  
Fig. 11 FFT analysis of inter-roll bulging fluctuation

グによる濃化溶鋼の吸い込みを誘発するため無視できない非常に重要な因子といえる。JFE スチールでは casting 中のロール間バルジングの変動量を水柱式の超音波探距離センサーを用いて分解能 0.01 mm の精度で直接測定する技術を開発した。図11に示すように直接測定されたロール間バルジング変動の周期は、ロールピッチλに対応した周期となり<sup>40)</sup>、弾塑性解析による液相変動量の数値シミュレーション(図12)より算出した図13に示したバルジング周期と一致した<sup>41)</sup>。

### 3.6 その他の技術

東日本製鉄所におけるステンレス鋼のスラブ品質においては、 casting スタート時の熱供給不足に起因するパウダー性欠陥の発生が課題であった。対策として予め溶融させたモールドパウダーを casting 初期にモールド内に添加する溶融添加法<sup>42)</sup>が開発され、パウダー性欠陥が大幅に低減可能となることを確認した。またフェライト系ステンレス鋼においてはスラブ凝固組織が製品特性に大きく影響するため、柱状晶/等軸晶比率などの制御が必要となる。等軸晶生成に及ぼす casting 条件、ストランド電磁攪拌などの影響を考慮した等軸

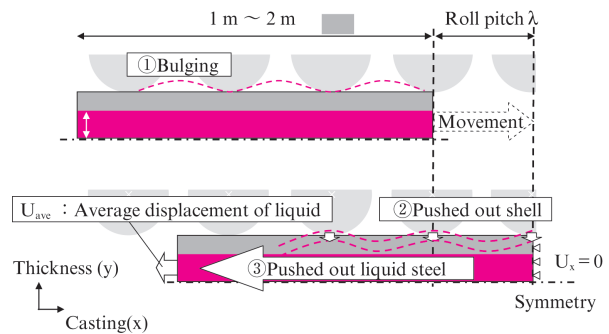


図12 弾塑性解析による液相の変動量の模式図  
Fig. 12 Schematic drawing of displacement of liquid in elastoplastic analysis

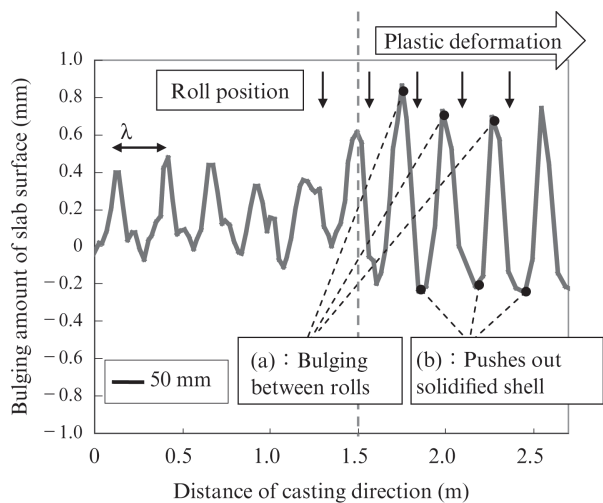


図13 铸片表面のバルジング量(シェル厚50mm)  
Fig. 13 Bulging amount of slab surface (shell thickness 50 mm)



晶率予測モデルを作成し<sup>43)</sup>、安定した等軸晶率のスラブ製造が達成できることを明らかにした。

#### 4. 製鋼技術の将来展望

今後、更なる鋼材の品質要求向上や、鉄鉱石や冷鉄源といった主原料の品質低下、価格変動が予想される。精錬分野では精錬剤の反応効率を更に高め、高効率で不純物濃度を低減する高純度化技術の開発が重要となる。製鋼スラグは精錬効率向上による発生量低減のみならず、熱エネルギーや含まれる成分の回収、リサイクル技術、新機能材料が今後更に重要となるであろう。また製鋼プロセスにおける熱ロス削減、排熱利用技術等による製鋼プロセスのエネルギー効率向上が重要となる。鑄造技術に関しては安定した高速鑄造技術と、割れ、表面欠陥、中心偏析低減による無欠陥鑄造技術の両立が課題になるであろう。

#### 5. おわりに

本報で紹介した技術により、生産性向上、製鋼発生スラグ量低減を実現すると共に、鋼材の高純度化、品質向上を実現した。その結果、納期短縮等のお客様満足度の向上や、高純度鋼製造技術、表面欠陥防止技術、表面割れ防止技術、中心偏析低減技術といった鋼材の高品質化、地球環境保全への貢献を図っていく。

#### 参考文献

- 1) Tanaka, T.; Yahata, T.; Hashimoto, M.; Suda, M.; Kikuchi, N. CAMP-ISIJ. 2003, vol. 16, no. 4, p. 1016.
- 2) Yamauchi, T.; Kitano, Y.; Kamiyama, T.; Ogura, S.; Kikuchi, N. CAMP-ISIJ. 2002, vol. 15, no. 4, p. 875.
- 3) Hino, Y.; Kikuchi, N.; Nabeshima, S.; Takeuchi, S. ISIJ Int. 2005, vol. 45, no. 6, p. 827.
- 4) Kikuchi, N.; Nabeshima, S.; Kishimoto, Y. ISIJ Int. 2012, vol. 52, no. 10, p. 1809.
- 5) Matsui, A.; Nabeshima, S.; Matsuno, H.; Kikuchi, N.; Kishimoto, Y. Tetsu-to-Hagané. 2009, vol. 95, no. 3, p. 207.
- 6) Ogasawara, Y.; Kikuchi, N.; Matsui, A.; Kishimoto, Y. Iron & Steel Technology. 2012, vol. 9, no. 1, p. 220.
- 7) Nakai, Y.; Hino, Y.; Sumi, I.; Kikuchi, N.; Uchida, Y.; Miki, Y. ISIJ Int. 2015, vol. 55, no. 7, p. 1398.
- 8) Matsui, A.; Nakai, Y.; Kikuchi, N.; Miki, Y.; Sato, S.; Kawabata, R.; Ichikawa, A. Tetsu-to-Hagané. 2013, vol. 99, no. 7, p. 458.
- 9) Nakai, Y.; Kikuchi, N.; Iwasa, M.; Nabeshima, S.; Kishimoto, Y. Steel Research International. 2009, vol. 80, no. 10, p. 727.
- 10) Ogasawara, F.; Okuyama, G.; Uchida, Y.; Kishimoto, Y.; Nakatani, K.; Yamauchi, T. CAMP-ISIJ. 2011, vol. 24, no. 1, p. 58.
- 11) Sumi, I.; Kishimoto, Y.; Kikuchi, Y.; Igarashi, H. ISIJ Int. 2006, vol. 46, no. 9, p. 1312.
- 12) Sumi, I.; Okuyama, G.; Nabeshima, S.; Matsuno, H.; Kishimoto, Y. ISIJ Int. 2007, vol. 47, no. 1, p. 73.
- 13) 井上明彦, 細原聖司, 清田禎公. JFE 技報. 2016, no. 38, p. 69.
- 14) Okuyama, G.; Ogasawara, F.; Uchida, Y.; Kishimoto, Y.; Miki, Y. Tetsu-to-Hagané. 2013, vol. 99, no. 7, p. 458.
- 15) Uchida, Y.; Matsui, A.; Kishimoto, Y.; Miki, Y. ISIJ Int. 2015, vol. 55, no. 8, p. 1549.
- 16) Sasaki, N.; Uchida, Y.; Miki, Y.; Matsuno, H. Tetsu-to-Hagané. 2016, vol.

- 102, no. 1, p. 17.
- 17) Takahashi, Y.; Nakase, K.; Kikuchi, N.; Uchida, Y.; Miki, Y. CAMP-ISIJ. 2012, vol. 25, no. 2, p. 971.
- 18) Wang, C.; Nagasaka, T.; Hino, M.; Ban-ya, S. ISIJ Int. 1991, vol. 31, no. 11, p. 1309.
- 19) Matsunaga, H.; Takagi, M.; Kogiku, F. Tetsu-to-Hagané. 2003, vol. 89, no. 4, p. 74.
- 20) 松永久宏, 谷敷多穂, 藤井隆史, 綾野克紀. 土木学会論文集 B2. 2009, vol. B2-65, no. 1, p. 1196.
- 21) Inoue, Y.; Takahashi, K.; Matsunaga, H.; Watanabe, K.; Kuwayama, M. Proceedings Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. 2013, Kyoto, Japan, e166.
- 22) 宮田康人, 沼田哲始, 高木正人, 高橋達人, 小山田久美, 小田俊司. 海洋開発論文集. 2004, vol. 20, p. 887.
- 23) 宮田康人, 本田秀樹, 藪田和哉, 林昭夫, 山本民次. 土木学会論文集 B3. 2011, vol. 67, no. 2, p. I\_394.
- 24) Miyata, Y.; Hayashi, A.; Kuwayama, M.; Yamamoto, T.; Urabe, N. Tetsu-to-Hagané. 2014, vol. 100, no. 3, p. 421.
- 25) Tobo, H.; Miyamoto, Y.; Watanabe, K.; Kuwayama, M.; Ozawa, T.; Tanaka, T. Tetsu-to-Hagané. 2013, vol. 99, no. 8, p. 532.
- 26) Tobo, H.; Ta, Y.; Kuwayama, M.; Hagio, Y.; Yabuta, K.; Tozawa, H.; Tanaka, T.; Morita, K.; Matsuura, H.; Tsukihashi, F. ISIJ Int. 2015, vol. 55, p. 894.
- 27) Matsui, A.; Nakase, K.; Kikuchi, N.; Kishimoto, Y.; Takahashi, K.; Ishida, K. Tetsu-to-Hagané. 2011, vol. 97, no. 8, p. 416.
- 28) Murai, T.; Nabeshima, S.; Miki, Y.; Kubota, J.; Nishiguchi, N.; Takeda, T. CAMP-ISIJ. 2007, vol. 20, no. 4, p. 859.
- 29) Miki, Y.; Shibata, H.; Bessho, N.; Kishimoto, Y.; Sorimachi, K.; Hirota, T. Tetsu-to-Hagané. 2000, vol. 86, no. 4, p. 239.
- 30) Watanabe, K.; Tsutsumi, K.; Suzuki, M.; Nakata, M.; Hatori, S.; Suzuki, T.; Omoto, T. CAMP-ISIJ. 2006, vol. 19, no. 1, p. 94.
- 31) Tsutsumi, K.; Watanabe, K.; Kubota, J.; Hatori, S.; Suzuki, M.; Nakata, M.; Suzuki, T.; Omoto, T. CAMP-ISIJ. 2008, vol. 21, no. 2, p. 32.
- 32) Odagaki, T.; Aramaki, N.; Miki, Y. CAMP-ISIJ. 2014, vol. 27, no. 2, p. 725.
- 33) Murai, T.; Ito, Y.; Miki, Y.; Abe, M. CAMP-ISIJ. 2005, vol. 18, no. 4, p. 1009.
- 34) Tsutsumi, K.; Kubota, J.; Ueoka, S.; Miki, Y.; Hosokawa, A. CAMP-ISIJ. 2015, vol. 28, no. 1, p. 166.
- 35) Ito, Y.; Murai, T.; Miki, Y.; Mitsuzono, M.; Goto, T. ISIJ Int. 2011, vol. 51, no. 9, p. 1454.
- 36) Idogawa, A.; Kitano, Y.; Tozawa, H. Kawasaki Steel Giho. 1996, vol. 28, no. 1, p. 46.
- 37) Furumai, K.; Matsui, Y.; Murai, T.; Miki, Y. ISIJ Int. 2015, vol. 55, no. 10, p. 2135.
- 38) Miki, Y.; Ohno, H.; Kishimoto, Y.; Tanaka, S. Tetsu-to-Hagané. 2011, vol. 97, no. 8, p. 423.
- 39) Awajiyama, Y.; Miki, Y.; Kishimoto, Y. CAMP-ISIJ. 2013, vol. 26, no. 2, p. 807.
- 40) Ohno, H.; Miki, Y.; Nishizawa, Y. Tetsu-to-Hagané. 2015, vol. 101, no. 12, p. 661.
- 41) Toishi, K.; Miki, Y. Tetsu-to-Hagané. 2015, vol. 101, no. 12, p. 667.
- 42) Watanabe, S.; Morioka, H.; Terabatake, T.; Kariya, K.; Kameyama, K.; Nimura, Y. CAMP-ISIJ. 2004, vol. 17, no. 4, p. 853.
- 43) Shibata, H.; Itoyama, S.; Kishimoto, Y.; Takeuchi, S.; Sekiguchi, H. ISIJ Int. 2006, vol. 46, no. 6, p. 921.



三木 祐司



渡辺 圭児



大島 健二