

技術報告

室蘭製鐵所における特殊鋼棒線製造のための製鋼技術の進展

Technical Progress in Steelmaking and Casting for Special Bar and Wire Steel at Muroran Works

小林 雅人* 磯部 浩一 荒井 雅之
 Masato KOBAYASHI Kohichi ISOBE Masayuki ARAI

抄 録

新日本製鐵室蘭製鐵所は、主に自動車部品向け特殊鋼棒線を製造する一貫製鐵所である。製鋼工程では、これまで、鋼材の高級化、多様化ニーズに応じた技術開発を推進し、溶銑予備処理を転炉工程に集約した多機能転炉法、高潔淨鋼対応のための二次精錬および連続鑄造技術、ニアネット鑄造法など革新的技術を開発し、実機化してきた。室蘭製鐵所における特殊鋼棒線製造のための製鋼技術の進展と今後の展望について概説した。

Abstract

Muroran Works, Nippon Steel Corporation manufactures special bars and wire rods mainly for automotive parts. In steelmaking plant, many technologies have been developed to manufacture high grade special steel and to suit the users' various needs, e.g. multi-refining converter (MURC), secondary steelmaking and casting to improve steel cleanliness, and near net casting and compact high reduction process (NCR). Authors describe recent advances and prospects in steelmaking and casting technologies for manufacturing special steel in Muroran Works.

1. はじめに

新日本製鐵室蘭製鐵所（以下、室蘭）は1909年の創業以来100年余りの歴史をもつ北海道唯一の鉄鋼一貫製鐵所で、新日本製鐵における特殊鋼棒線製造基地である。製品の特殊鋼比率は約90%におよび、自動車の重要保安部品（エンジン、駆動系、足回り）や、産業機械・建設機械用部品等を製造している（図1）。また、1994年からは三菱製鋼室蘭特殊鋼（株）（以下、MSR）や二次加工需要家群とのコンビナート体制で棒線製品を製造している（図2）。本稿では、室蘭における特殊鋼棒線製造のための製鋼技術の進展を紹介する。

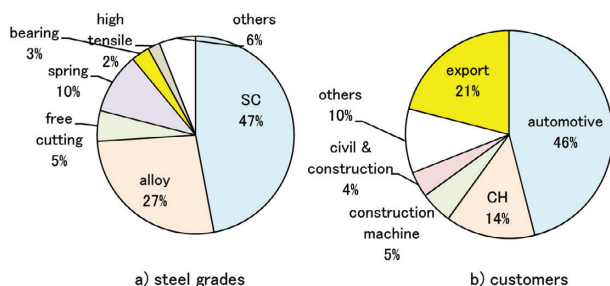


図1 室蘭製鐵所の生産構成(2011年度)
 Product mix of Muroran Works (2011.4-2012.3)

2. 室蘭製鐵所の概要

室蘭の製鐵部門は1994年に分社化され、MSRと共同出資（新日本製鐵80%出資）の北海製鐵となり、以降、溶銑は北海製鐵より転炉、電炉へ供給されている。新日本製鐵室蘭の製鋼の鉄源はヒートサイズ270t/chの転炉鋼で、取

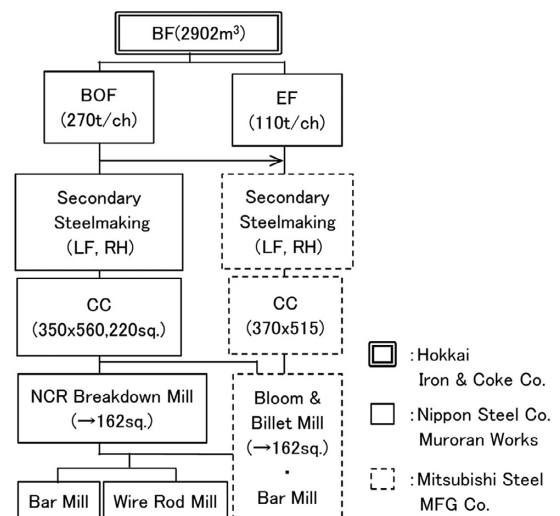


図2 室蘭コンビナートの製造フロー
 Process routes of Muroran Works

* 室蘭製鐵所 製鋼部 製鋼技術グループ グループリーダー 北海道室蘭市仲町12 〒050-8550

鍋精錬炉（以下、LF）、真空脱ガス（以下、RH）処理を経てNo.3連続铸造設備（以下、3CC）にて铸造される。年間粗鋼生産能力は約150万tである。3CCは中断面ブルーム（以下、BL）（220mm角）と大断面BL（350mm×560mm）の兼用機で、マシン半径12mの湾曲型である。铸造プロセスは、ニアネットシェイブ铸造ゆえ等方性やコストに優れた中断面BL、大断面铸造ゆえ铸型での非金属介在物（以下、介在物）浮上に優れた大断面BL、それぞれの特長を活かしながら、鋼種に応じて選択される。

中断面BLと大断面BLは別ラインで分塊圧延され、中断面BLは4パスの連続水平垂直（以下、HV）圧延（Near net casting and Compact high Reduction（以下、NCR）分塊圧延ライン）で、大断面BLは分塊・大中形ライン（往復式圧延+連続HV圧延）でそれぞれ162mm角のビレット（以下、BT）となる。BTは、検査および精整後、製品サイズに応じて、棒鋼工場で棒鋼（19～120mm径）およびバーインコイル（BIC）（19～60mm径）製品に、線材工場で線材（5.5～22mm径）製品に圧延される。

一方、MSRの鉄源はヒートサイズ110t/chで、新日本製鐵室蘭からの溶鋼輸送による転炉鋼と、スクラップと溶銑（配合比30～50%）を併用する電炉鋼で、LF、RH処理を経て、連铸にて铸造される。年間粗鋼生産能力は約70万tである。連铸はマシン半径16mの湾曲型大断面BL（370mm×515mm）で、铸片はMSR大中形ラインを経て主に太径棒鋼製品に圧延される。

3. 精錬技術の進展

3.1 多機能転炉法の開発

一次精錬では、従来、トービードカー（以下、TPC）を活用した脱Si、脱P溶銑予備処理を適用していた。しかし、TPC溶銑予備処理は反応界面積が小さく効率が悪いことから、製鋼のサイクルタイムに対して処理時間が長く、マッチングのために大幅な先行処理が必要であるという課題があった。

そこで、転炉の余力に着目し、この余力時間で脱Si、脱P後に中間排滓工程を設け、引き続き脱C吹錬を行う多機能転炉法（MURC：Multi-Refining Converter）を開発した^{1,3)}（図3）。本法により、製鋼サイクルタイム70分以内に安定して脱C後吹止 $P \leq 0.025\%$ が可能となるとともに、大幅な熱裕度の拡大と脱P後出銑を行わないことで、溶銑予備処理の課題であったスクラップの多量使用が達成できた。MURCプロセスは同一炉で脱Pおよび脱Cを行うため、中間排滓時のスラグの排滓率が出鋼Pの工程能力を左右する（図4）。従って脱Si脱P期に排滓性の高いスラグを作ることが重要であり、溶銑を流出させることなく排滓率を向上させるために、スラグ組成および上吹ランスコントロールにてフォーミング状態を確保し、安定して70%以上の排滓率を確保することが必要である。

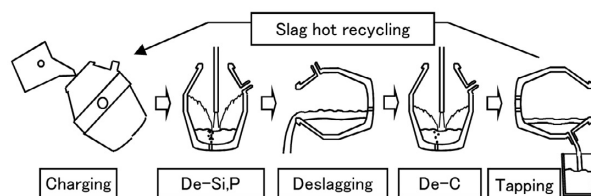


図3 MURC法
MURC process

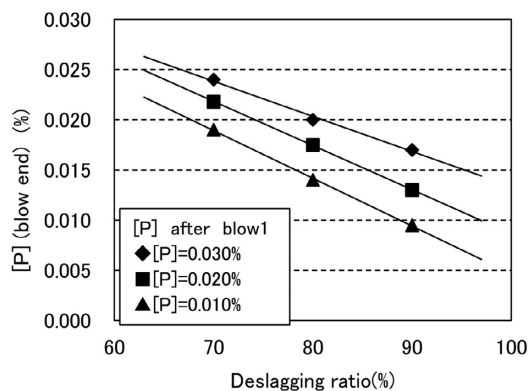


図4 排滓率と脱炭後到達Pの関係¹⁾
Relationship between deslagging ratio and P at blow end

3.2 F-MURC法の開発

しかし、特殊鋼の要求Pレベルの低減、介在物厳格化に伴う吹止Cの下制限により、脱P工程能力不足が顕在化し、MURC法単独ではTPC予備処理の完全省略には至らなかった。そこで、残留スラグからの復P影響を最小化する出銑排滓法を適宜取り入れるF-MURC（Flexible-MURC）法を開発した（図5）^{1,4)}。MURC法では中間排滓率は約70%であるが、出銑排滓法では、脱Si脱P後の溶銑を全量出銑後、炉内残留スラグを完全に排滓し、脱P溶銑を再装入することでスラグと脱P溶銑の分離を徹底し、脱C期の装入Pレベルを低減した。

本法により、脱P工程能力が飛躍的に向上し、 $C > 0.50\%$ の吹止Cでも脱C後の吹止 $P \leq 0.010\%$ が可能となり、その結果、TPCでの溶銑予備処理の完全省略が達成できた。このF-MURC法は、MURC法、同一炉出銑排滓法（転炉

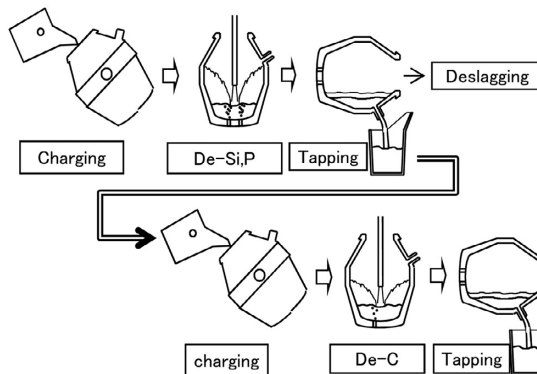


図5 F-MURC法（出銑排滓法）
F-MURC process

1基稼働), 転炉2基稼働専用炉出銑排滓法の3つの処理パターンから構成されている。MURC法は同一炉で処理することから熱裕度面で最も優位であり, スクラップ溶解能が最も高い。一方, 転炉2基稼働専用炉方式では脱P工程能力は最も優位であるが, スクラップ溶解の面では課題があり, スクラップ増配合が困難である。生産量レベル, 鋼種, 炉修タイミングなどに応じて, 効果が最大限に享受できるよう柔軟に処理パターンを選択できることがF-MURC法の特長である。

3.3 全量LF化によるF-MURC効果の最大化

特殊鋼棒線の品質要求は厳格化の一途をたどっており, 特に介在物厳格材の増大および肌焼鋼, 強靱鋼, 非調質鋼比率向上に伴う高合金化の進展が顕著である。これらに対応するため, 2008年に更なる溶鋼の高清浄化, 精錬工程の熱負荷分担の見直しと物流整流化を目的にLFを1基増設し, 二次精錬全量LF化を行った(図6)⁵⁾。

転炉での脱P工程能力向上には吹止温度の低減が有効であるが(図7), LF増強で転炉と二次精錬の熱負荷分担を見直し, 転炉低温吹止操作とした結果(図8), F-MURC法において, 出銑排滓法から, 熱裕度, 歩留で有利なMURC法の適用拡大が達成できた(一部高C極低P鋼を除く)(図9)。また, 全量LF操作では, 転炉吹止温度低減

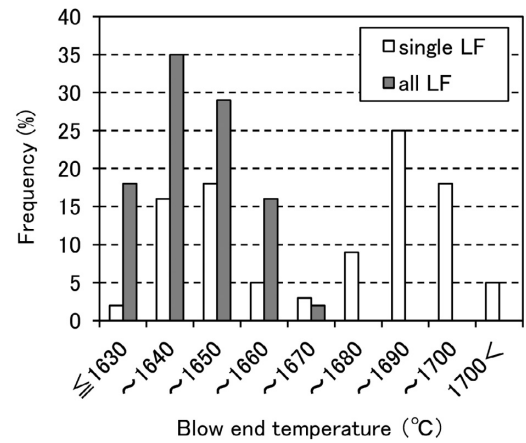


図8 LF増強前後の転炉吹止温度分布⁵⁾
Distribution of blow end temperature

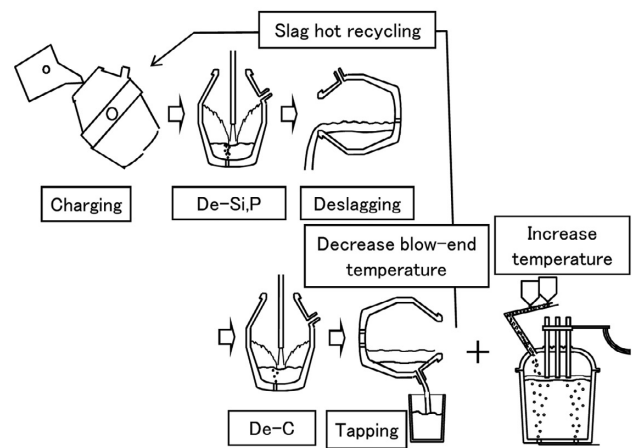


図9 全量LFによる低温MURC法
MURC process combined with LF

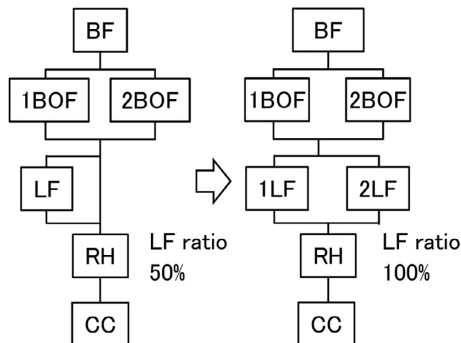


図6 LF増強前後の製造フロー
Steelmaking process before/after investment in No.2 LF

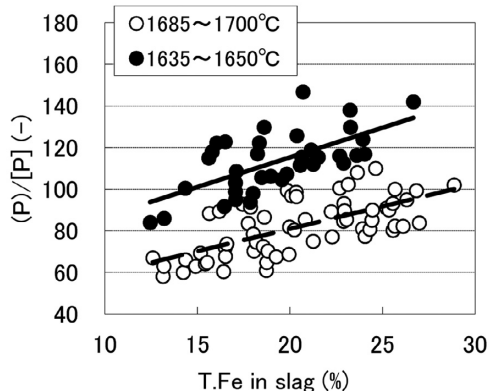


図7 転炉スラグT.FeとP分配比の関係⁵⁾
Relationship between T.Fe in slag and distribution ratio of P

効果のほか, RH工程でのAl昇熱の回避によるアルミナ系介在物生成抑制など品質改善も可能となった。更に, 基本工程を転炉-LF-RHと一本化することで, 各処理ステーションを同期化でき, 物流整流化がはかられることで, LF処理材とRH直送材の混在に起因する①逆転処理(LF処理中の鋼を転炉後チャージのRH直送材が逆転), ②先行出鋼(連铸でのマッチング調整のためにRH処理前に転炉出鋼材が待機), ③铸造延長(精錬処理待ちのために連铸が铸造時間を延長)が解消され, 温度ロス, 能力ロスを大幅に低減できた。

4. 連铸・鋼片技術の変遷

4.1 NCRプロセスの開発

3CCは, 1981年にスラブ(以下, SL)/BL(350mm×560mm)兼用機として操業を開始したが, 室蘭が棒線に特化したことに伴い, BT(162mm角)/BL兼用機に改造し, 操業を続けてきた。BL铸造は, 大断面ゆえ, 高い生産性と高清浄度鋼製造に適しているという長所がある一方, 分塊工程が必要で, 加熱炉燃料などコスト的には不利

であった。一方、ニアネットシェイプ casting である BT は、分塊コストが不要であるという長所があるものの、断面サイズが小さいため、圧減比制約から最終製品のサイズが制約されることや生産性が低いといった課題があった。そこで、室蘭では、1998年にニアネットシェイプの長所（等方性、低コスト）と大断面の長所（生産性、介在物浮上分離効果）を合わせた、NCR プロセスを開発した⁶⁻⁸⁾。これは、220mm角中断面BLと直結分塊工程を組み合わせたもので、図10、表1、表2に主仕様を示す。

NCR は正方形中断面 casting 効果により、断面内の材質ばらつきが小さいという特長を持つ。図11は、NCR (220mm角)、BL (350mm × 560mm)、BT (162mm角、BT casting

時の材料)をそれぞれ棒鋼圧延 (26mm径)したものの表層1/4部の硬さ測定 (円周方向に16点硬さ測定)をしたものであるが、正方形断面材 (220mm角、162mm角)の硬さばらつきは大断面BL材より小さいことが分かる。また、NCRは大径ロールによる大圧下圧延効果で変形が断面中心部まで浸透し、センターポロシティの圧着、中心偏析改善に効果がある。

4.2 鋳片品質改善の考え方

次に、特殊鋼棒線向け鋳片において特に重要な品質である、介在物、偏析、表面疵に対する室蘭の改善の考え方を紹介する。

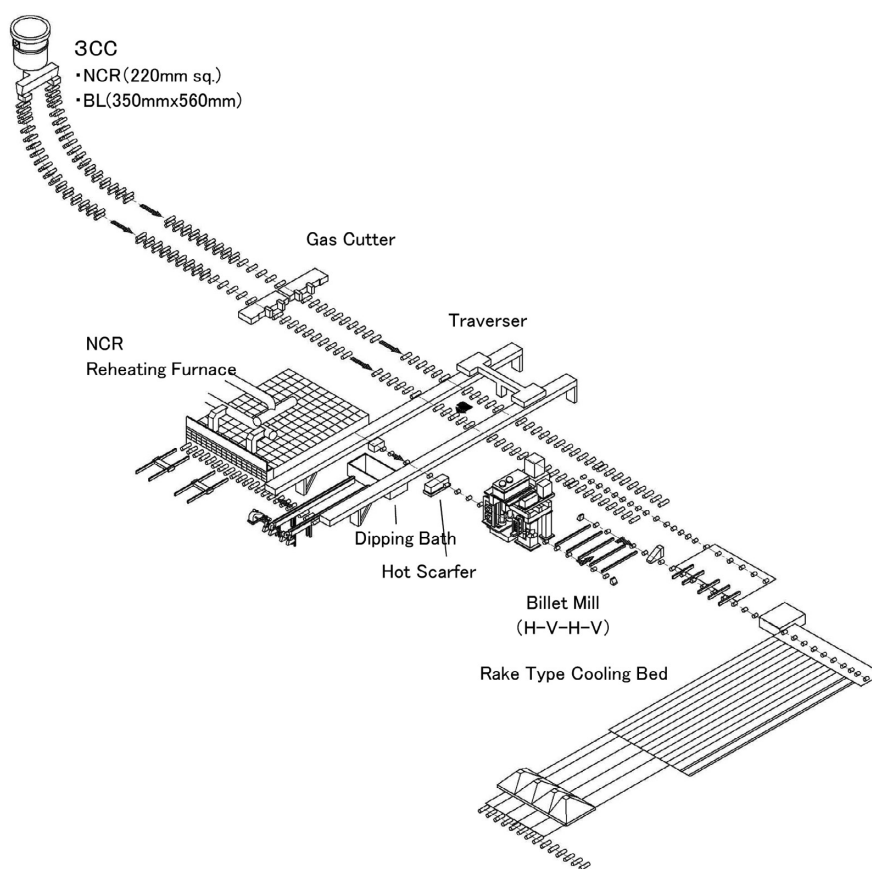


図10 連铸～NCR圧延設備レイアウト
Layout of continuous caster and NCR

表1 連铸主仕様
Main specifications of continuous caster

	Main specifications
Machine type	Curved (R = 12m, unbending points = 4)
Tundish	T-type 40t Induction heating
Section sizes	220mm sq. Triple × 2strands = 6 350 × 560mm Twin × 2strands = 4
Level control	Eddy current sensor
EMS	Mold, strand
Secondary cooling	Mist
Soft reduction	Mechanical

表2 NCR圧延設備主仕様
Main specifications of NCR

	Main specifications
Reheating furnace	① Walking beam type 4-zone continuous furnace
	② Length 19.2m, width 14.2m
	③ Energy-saving burner
	④ Fuel : Mixture gas (BFG+LDG+COG)
Rolling mill	① Housing type compact mill
	② Size reduction : 220mm sq. → 162mm sq.
	③ Finishing speed : 45m/min

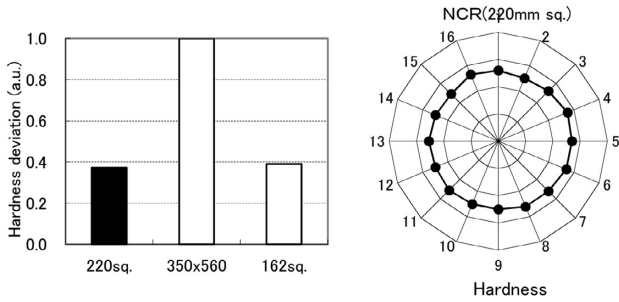


図11 棒鋼圧延材(26mm径)断面内の硬さ分布⁸⁾
Hardness deviation of bar (26mm φ)

4.2.1 介在物

室蘭の特殊鋼棒線は主に自動車用の重要保安部品に使用されるため、部品破壊の起点となる介在物を低減することは重要で、鋼材清浄度の要求レベルは高い。

室蘭では、転炉から二次精錬、連铸までの一貫工程で清浄度向上技術を適用しており、前述した全量LF化はそのひとつである。3CCでは、TDでの再酸化防止対策として、Ar, N₂によるシールを、TDでの介在物浮上促進対策として、TDの大型化(容量40t)、フラックス精錬を、鋳型内での巻き込み防止として、渦流レベルセンサーと応答性の高い注湯量制御の組み合わせによる高精度湯面レベル制御、鋳型内電磁攪拌(以下、M-EMS)を適用している。また、介在物品質はTD溶鋼温度に大きく影響を受けるが、室蘭では1986年にTD誘導加熱を開発し⁹⁾、溶鋼温度を制御している(図12)。

4.2.2 偏析

連铸材の中心偏析やV偏析は冷間押しや冷間伸線時の加工性の低下を招き、シェブロンクラックの発生やカッパイ断線の原因となるばかりでなく、高炭素軸受鋼では中

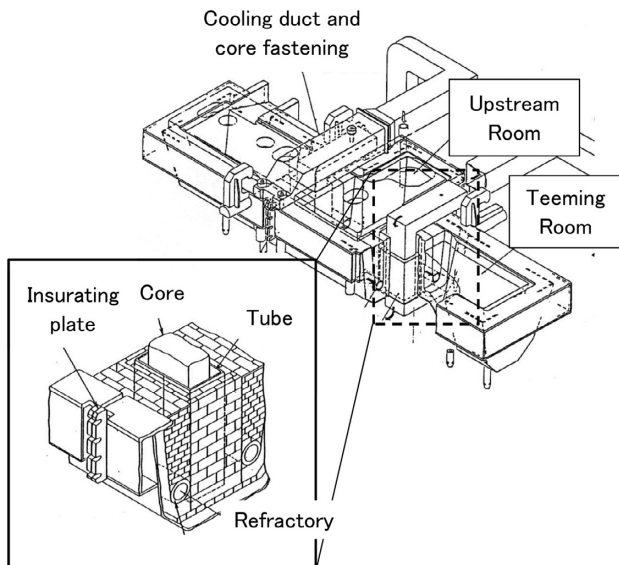


図12 TD誘導加熱装置
Tundish induction heating equipment

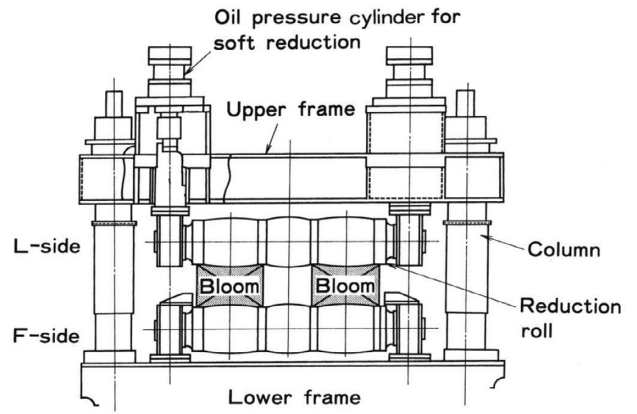


図13 軽圧下設備¹⁰⁾
Mechanical soft reduction

心偏析部に生成する粗大な炭化物が疲労強度の低下原因となる。

連铸材の中心偏析やV偏析の生成を防止するには、凝固末期部分の凝固収縮に伴う流動を止めることが重要で、3CCでは鋳片の凝固収縮量に見合った変形を凝固末期に加え、上記溶鋼流動を抑制して中心偏析やV偏析の生成防止を図る凝固末期軽圧下技術を適用している(図13)¹⁰⁾。

大断面BL-CCでの凝固末期軽圧下は、SL-CCでの凝固末期軽圧下に比べ短辺部の凝固シェルの変形抵抗が大きく、圧下反力に耐えるために、設備強度を十分に確保する必要があり、結果、設備投資の増大を招く。これを回避するため、中心偏析が生成する幅中央部を選択的に圧下し、効率的に偏析の生成防止を図るクラウンロール軽圧下技術も開発した¹⁰⁾。

凝固末期軽圧下技術は、当初大断面BLで開発したが、小断面BT¹¹⁾や中断面BLでの铸造にも適用を拡大した。更に3CCでは、TD誘導加熱を活用した低温铸造、M-EMS¹²⁾で凝固組織の等軸晶化を図った上で凝固末期軽圧下を適用することで、より良好な偏析レベルを安定して確保している¹⁰⁾。等軸晶化促進は、中心偏析やV偏析の改善だけでなく、凝固収縮で生成するザクやセンターポロシティといった内部欠陥の防止にも有効で、鋳片の内部品質向上に貢献している。

4.2.3 表面疵

特殊鋼棒線には、高強度化や高負荷化、冷間加工化等のニーズがあり、それらを満たすため、表面品質向上は重要な課題である。3CCでは以下のような表面疵防止技術を適用している。

鋳片均一冷却対策として、二次冷却のミスト冷却、粒界脆化防止対策として、浸漬冷却等を活用した鋳片表面結晶組織微細化対策、亜包晶鋼(C≒0.10%鋼)のディプレッション(凹み状疵、以下、DP)対策として、鋳型緩冷却パウダーの適用やM-EMSの適正化¹³⁾を行っている。M-

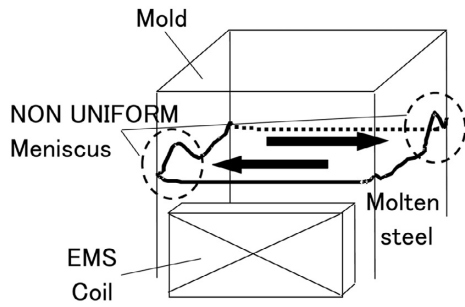


図14 凝固初期の模式図¹³⁾
Schematic illustration of initial solidification

EMSは、溶鋼から凝固シェルの熱供給を増大し、凝固シェルの緩冷却化で不均一凝固を改善する。一方、攪拌強度が過大であると攪拌流の鋳型短辺への衝突による湯面盛り上がりが大きくなり、その影響で不均一凝固が助長される（図14）。そのため、室蘭では、鋼種に応じて、パウダー巻込みに防止加え、初期凝固安定化の視点でもM-EMSの強度の適正化を図っている。

5. まとめ

室蘭では、1969年の線材工場稼働から棒線製造を開始し、以降、特殊鋼棒線、特にばね鋼、軸受鋼、肌焼鋼、冷間鍛造品といった高級製品を安定的に製造できるよう、操業・設備技術を進展させてきた。今後は、需要家や市場の様々なニーズに的確に対応するため、室蘭コンビナートの各プロセスの特長を活かした最適生産を目指していき

い。例えば、製鋼分野では、室蘭の270t/ch大ロットとMSRの110t/ch小ロットの使い分け、転炉鋼と電炉鋼の使い分け、鋳造ライン（NCR、室蘭BL、MSR BL）選択の最適化といった視点がある。更に、2012年10月に発足する新日鐵住金(株)体制では、住友金属工業(株)の特殊鋼棒線製品群と製造ラインも含め、シナジー効果を最大限に発揮していきたい。

参考文献

- 1) 野又宏之：日本鉄鋼協会第125回製鋼部会．鋼125-自-5，福山，2001-10，私信
- 2) 小川雄司 ほか：鉄と鋼．87，21（2001）
- 3) 林 浩明 ほか：CAMP-ISIJ．15，139（2002）
- 4) 鈴木正伸 ほか：CAMP-ISIJ．15，140（2002）
- 5) 青野通匡：日本鉄鋼協会第124回特殊鋼部会．特124-共-1，倉敷，2008-6，私信
- 6) 島影肇 ほか：CAMP-ISIJ．12，836（1999）
- 7) 平林 圭 ほか：CAMP-ISIJ．12，837（1999）
- 8) 吉岡隆史 ほか：CAMP-ISIJ．13，180（2000）
- 9) 高島 靖 ほか：鉄と鋼．73，S252（1987）
- 10) 磯部浩一 ほか：鉄と鋼．80，42（1994）
- 11) 磯部浩一 ほか：CAMP-ISIJ．4，1280（1991）
- 12) 松永 久 ほか：CAMP-ISIJ．1，1214（1988）
- 13) 木ノ本靖雄：日本鉄鋼協会第116回特殊鋼部会．特116-共-4，神戸，2004-6，私信



小林雅人 Masato KOBAYASHI
室蘭製鐵所 製鋼部 製鋼技術グループ
グループリーダー
北海道室蘭市仲町 12 〒050-8550



荒井雅之 Masayuki ARAI
室蘭製鐵所 製鋼部長



磯部浩一 Kohichi ISOBE
室蘭技術研究部 主幹研究員
博士（工学）