

# 連続鋳造技術の進展と今後の展望

## Change and Development of Continuous Casting Technology

山口 純\*      中 島 隆 雄      澤 井 隆  
Jun YAMAGUCHI      Takao NAKASHIMA      Takashi SAWAI

### 抄 録

わが国の連続鋳造法の歴史は約60年に及ぶ。1955年に日本で最初の連続鋳造機が営業運転を開始してから、1970年代には連続鋳造法の基本的な設備・操業技術が確立され、40年余経った現在、国内の連続鋳造比率は98%余に達している。極厚製品や大単重製品の一部をインゴットキャスティングしていた新日本製鐵では2007年にその役割を終え、連続鋳造比率は100%を実現した。その間にも、鋼材ニーズの多様化、品質の厳格化が進み、より良い品質の鋼材を安定的に供給するために、いわゆる“高品位高速鋳造”を中心として、連続鋳造技術はあらゆる進歩を遂げてきた。連続鋳造機導入以降の技術的背景の変遷と最近の技術動向、今後の展望について述べた。

### Abstract

**It is about 60 years that history of continuous casting process in our country. From the start of commercial operation of the first continuous casting machine in Japan in 1955, the basic technology equipment and operation of continuous casting process has been established in the 1970's. Today continuous casting ratio of our country has reached over 98%. In Nippon Steel Corporation, the ratio has reached 100% in 2007. Continuous casting technology has been developed in order to supply more stable and higher quality steel products. In this paper, we describe recent technology developments and changes since the introduction of the continuous casting machine.**

## 1. はじめに（連続鋳造法の変遷）

以前、新日鉄技報第351号（1994）<sup>1)</sup>では、1960年代～1990年代の連続鋳造（以下、連鋳またはCCと記す）法の変遷について述べている。そこでは、第一期（1960年代）工業的連鋳法の確立期、第二期（1970年代）大型化、発展期、第三期（1980年代）技術成熟期、第四期（1990年代）新連鋳法の揺籃期に大別しており、ここまで近代連鋳法の確立はなされてきた。

現在、わが国の連鋳比率は98%を超え、成熟期を迎えつつあるが、1990年代以降を見ると、15基余の連鋳機が新規に建設され、また30基弱の連鋳機が改造されている。特にこの20年間は、これら新規および既設連鋳機の生産性向上、操業安定化操業、さらに品質対応力をより深化させるための造りこみ技術が発展を遂げてきた。

## 2. 世界粗鋼生産の推移

世界の粗鋼生産量は1973年のオイルショック後から

2000年までは約7～8億t/年を推移した。その後、中国をはじめとする新興国の台頭が著しく、世界粗鋼生産量は、2010年に14億t/年を超えた。図1に世界と主要国の粗鋼生産推移を示す。日本は、旧ソビエト連邦解体直後の1992年～1995年の4年間、粗鋼生産量世界一となったが、中国の急伸により1996年以降は中国が世界一の粗鋼生産量となり、2010年では実に全世界の約半分を中国で生産するに至っている。

ここ10年間の中国粗鋼生産量は、年平均で約5000万t以上増加し続けている。これは、新日本製鐵で言うと、君津製鐵所クラスが毎年5～6箇所建設されている計算になる。現在、日本の粗鋼生産量は世界第2位（2010年時点）であるが、中国以外の新興国も追い上げている。今や、わが国は量的に世界一になることは難しいが、これら新興国の製鉄所に対して優位性を維持するためには、製鋼各工程の品質造り込み要素技術開発と一貫品質管理技術開発を継続していく必要がある。

\* 製鋼技術部 製鋼技術グループ マネジャー 東京都千代田区丸の内2-6-1 〒100-8071

### 3. 技術的背景の変遷

ここ20年を振り返ると、先に述べたように世界的には、新興国の発展を背景に鋼材需要は伸び続けている一方で、国内の粗鋼生産量および鋼材需要は、ほぼ横這いとなっている。鋼材に対するニーズは、後述する省エネルギーや品質の高度化にとまない、日本の鉄鋼業界では高効率高品質に特化してきた20年であった。

2005年より新日本製鐵の製鋼技術部門では、全社の製

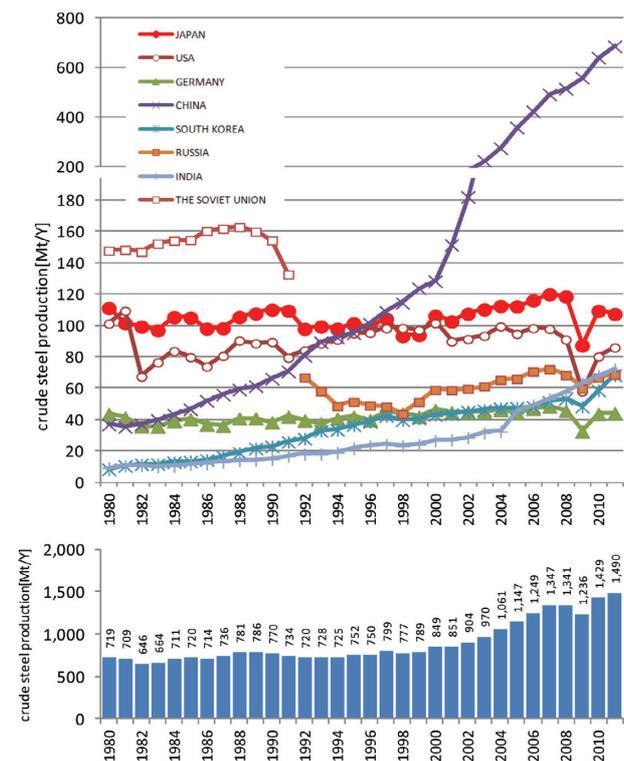


図1 世界と主要国の粗鋼生産推移(世界鉄鋼協会ホームページより)  
Trends in crude steel production in major countries (after World Steel Association)

鋼関係の迅速な課題解決と製鋼技術レベルの向上を目的に、精錬系ワーキンググループ、連続系ワーキンググループを設置して、機動的に取り組んできた。現在は製鋼研究開発部、各製鐵所技術研究部の製鋼研究グループも加わり、全社での技術研鑽を深める体制が確立した。

### 4. 生産性向上

既設連続の生産性向上への取り組みは、言うまでもなく、スループット (t/h) 向上と、稼働率向上である。この各々について各製鐵所の事情に応じた取り組みを進めてきた。特に、製鋼工程一貫能力のネック工程が連続能力である製鐵所においては改善が著しい。

ここ20年間で、新設したスラブ連続機は君津製鐵所No.6CCのみであり、その他の連続機の多くは能力増強、品質向上を狙って改造された(表1参照)。

#### 4.1 スループット向上

##### 4.1.1 高速鋳造化

連続機を機長延長することによって平均鋳造速度を向上させる手法がある。名古屋製鐵所No.1CCでは、2000年に従来の湾曲型CCから垂直曲げ型に改造すると共に、水平部の機長を2セグメント分延長し、機長を26.9mから32.0mにした。

この改造によって、生産性向上に加えて、加工度が大きく非金属介在物(介在物)を嫌う食缶ブリキ用鋼材や、自動車用外板に多く用いるInterstitial Free (IF) 鋼などのブローホール系欠陥の感受性の高い鋼材、高強度鋼への品質対応力が向上し、同時に製鋼工場内に設置しているNo.2CCとの機能分担を明確化した。更に2007年に、転炉の増強に合わせて、機長を35.8mに再延長した。名古屋製鐵所No.1CCはダミーバー下方装入方式であるため、ダミーバー短縮、収納装置の方式変更を行った(図2)。

表1 主要連続機の主仕様一覧  
Main specifications of the main continuous caster

	Yawata 2st	Yawata 3st	Nagoya No.1CC	Nagoya No.2CC	Kimitsu No.2CC	Kimitsu No.3CC	Kimitsu No.6CC	Oita No.4CC	Oita No.5CC
Type	VB	VB	VB	VB	VB	VB	VB	VB	VB
Strand	1	1	2	2	2	2	1	2	2
Machine radius (m)	7.55	7.73	7.7	9.5	9	9	10	7.5	7.5
Metallurgical length (m)	38.7	31.7	35.8	48.4	34.26	42.96	41.2	44.5	44.5
Start-up	1979.04	1982.12	1970.11	1980.11	1980.03	1982.01	2006.11	1976.03	1976.08
Revamping [VB]	2005.08	1991.12	2000.03	1990.09	-	-	-	1995.07	1998.04
Revamping [metallurgical length extension]	-	-	2007.04	-	-	1996.03	-	-	-
Tundish shape	Boat	Triangle	H-shape	H-shape	Boat	Boat	Boat	Boat	Boat
Tundish capacity (t)	30	23	45	60	60	60	60	70	70
Casting thickness (mm)	250	250	250	250	240(300)	240	240,300	282	282
Width range (mm)	650-1900	960-1650	900-2150	900-1630	980-2300	700-2050	980-2300	1100-2150	1100-2150
Vertical length (m)	2.5	2.5	2.16	2.26	2.5	2.5	2.7	2.5	2.5

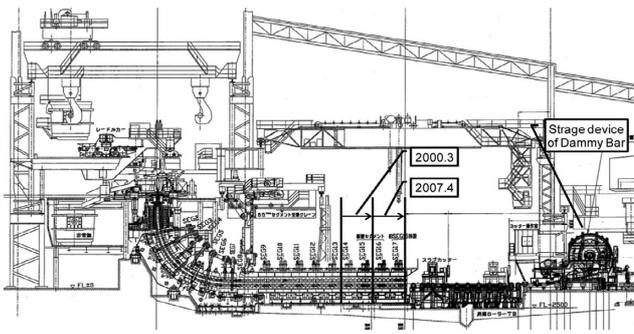


図2 名古屋製鐵所No.1CCの改造  
Outline of No.1CC revamping in Nagoya Works

#### 4.1.2 鋳造断面サイズアップ

大分製鐵所製鋼工場の厚板、熱間圧延薄板向けの量産鋼は主に2グループと呼ばれるNo.4CC, No.5CCで鋳造している。これらの連鋳機は、従来は湾曲型連鋳機であったが、介在物厳格材の品質向上と生産タイミング調整の容易化に考慮して、1991年にNo.5CC, 更に1995年にNo.4CCが垂直曲げ型のツイン連鋳機に改造された。大分製鐵所2グループ連鋳機は、後段にサイジングミルという分塊圧延機を有しており、断面サイズの変更(幅の縮小, 厚みの縮小)が可能である。このプロセスは1980年に確立された直結プロセスVをベースにしている。この特徴を生かして、大分製鐵所では数回にわたり平均鋳造幅の拡大や、鋳造厚みの拡大を図ってきた。

この成果として、2010年には大分製鐵所製鋼工場 (No.1CC + No.4CC + No.5CC) で901千t/monthの生産新記録、また2011年7月にはNo.4CC生産新記録421.8千t/month, 8月にはNo.5CC生産新記録425.1千t/monthを達成した。

スラブの内部欠陥に至る介在物低減対策や表面疵対策で鋳造速度の制限を行い、機長を余して鋳造するケースでは、むしろ鋳造厚のアップは、生産能力向上に有効である。この手法は、名古屋製鐵所, 大分製鐵所で実機化した。

#### 4.2 稼働率向上対策

連鋳の生産能力に効果のあるもう一つの要素は連鋳の稼働率と鋳造時間率である。ここで連鋳関係の言葉の定義は

$$\text{暦時間} = \text{稼働時間} + \text{休止時間}$$

$$\text{稼働時間} = \text{鋳造時間} + \text{準備時間}$$

として使っており、能力向上には、いかに休止時間を減らして、暦時間に対する時間比率(=稼働率)を上げるか、準備時間を短縮して鋳造時間率を上げるかが重要である。

##### 4.2.1 初期凝固安定化技術

連鋳工程で最も生産を阻害するトラブルの一つはブレイクアウト(以下BOと記す)である。BOとはモールド内の初期凝固過程において、何らかの原因で凝固シェルが正

常に形成されず、その部位がモールド下端を通過した後、シェル外部に溶鋼が流出するトラブルである。BOトラブルが発生すると生産障害に加えて、膨大な修繕費がかかる。従ってBOを低減させるにはモールド内の凝固シェル形成をいかに安定させるか、つまり初期凝固安定化技術がポイントとなる。

モールド内の初期凝固に関わる主な因子は、溶鋼温度、モールドパウダー、モールド銅板、一次冷却水である。

モールドパウダーは高速鋳造でも安定的に銅板と凝固シェルとの間に均一流入し、均一抜熱および十分な潤滑機能を果たせるものが様々な改善を経て開発され、現在に至っている。例えば、従来水素起因のBOについては過去にいくつかの報告例<sup>2)</sup>はあるものの、シリコンキルド鋼において不明であったメカニズム<sup>3)</sup>を解明し、高塩基度パウダーを用いることで、BO発生抑制効果を発揮している。

モールド銅板はその背面に冷却水を流し、凝固シェルからの熱を奪い凝固を促進するものであるが、通常モールド内の凝固シェルは凝固収縮するため、特にスラブ側面と接する短辺銅板は一定の傾き(テーパー)を付与して、接触面積を確保する。しかし凝固収縮は線形的では無いため、平坦な銅板では凝固シェルとの間に大きなギャップが生成し、抜熱不良となり凝固不均一を助長しBO発生の原因になり易い。この問題を解決するために、銅板短辺を凝固シェルの収縮に合わせた多段テーパーを用いたモールド(マルチテーパーモールド)が提案<sup>4)</sup>され、適用してきた。これにより、凝固不均一が解消され、凝固不均一によるBOは低減した。また、後述する鋳型間電磁攪拌(M-EMS: in-mold Electromagnetic Stirrer)によりモールド内流動を制御することで、メニスカス温度を均一化し、凝固シェル厚みのばらつきを低減する技術も適用されている<sup>5,6)</sup>。

これら初期凝固安定化対策の結果、全社の主要連鋳機のBO発生件数は、図3のように大幅に低減してきた。

##### 4.2.2 溶鋼温度 - 鋳造速度の最適化

前述の初期凝固安定化を図った上で、高生産を実現するためにはモールド内の溶鋼温度、抜熱、鋳造速度のバランスを適正にすることが重要である。高温のまま高速鋳造す

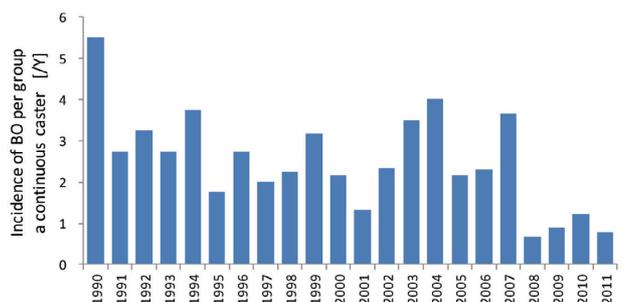


図3 全社の主要連鋳機のBO件数推移  
Trend in the number of break out

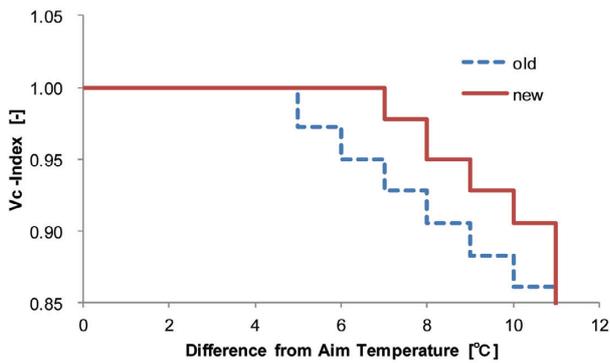


図4 温度速度テーブルの見直し例  
Example casting speed reference review

ると、凝固シェルが発達不良でモールド直下で溶鋼漏れ(穴あきBO)に至るケースがある。従って、BOを発生させず、生産能力を向上させるためには、溶鋼温度管理と適切な鋳造速度設定が必要である。

溶鋼温度管理は、鋳込む鋼材の凝固点温度計算から遡り、二次精錬の終了温度、ひいては転炉吹止め温度に至る最重要指標である。従来より連鋳では、タンディッシュ(TD)誘導加熱やプラズマ加熱などの昇温設備を設置して温度調節機能を持たせた。

一方、鍋注入中期など溶鋼温度が高い時の過剰な低速鋳造設定は生産性の低下に繋がる。各連鋳機ごとにタンディッシュ内の測温場所やスルーブットが異なるため、従来は各連鋳機ごとに、独自の計算と過去の経験に基づいた“温度-速度テーブル”すなわち、溶鋼温度と最大鋳造速度の基準を設定していた。

連鋳ワーキンググループでは、設備保全技術センター(PFC)で開発した凝固シミュレーションモデルに基づいたモールド内凝固の再計算を行い、全社の温度-速度テーブルを最適化した。この成果として、凝固シェル発達不良による穴あきBOを発生させることなく、平均鋳造速度をアップすることができた(図4参照)。

#### 4.2.3 BO 予知技術

最後にBOの歯止めとなる予知技術であるが、従来からモールドの中に熱電対を埋め込んで銅板表面の温度変化を連続的に把握し、初期凝固異常すなわち、モールド内でBOが発生したことを早期に検知し、鋳造速度を急減速させることでBO部位を鋳型に留めて、溶鋼洩れを未然に防止する技術は開発されていた。

しかし、昨今の生産性向上を狙った高速鋳造化による減速対応可能時間余裕の減少や、鋳込む鋼種の変化によるモールド初期凝固条件の変化により、初期凝固制御およびBO予知技術のレベルアップが必要になってきた。

また、BO発生回数の減少と、鋳込みオペレーターの世代交代に伴い、BOに遭遇した経験の無い鋳込みオペレーターが、咄嗟の対応を習熟する機会が無いため、処置が遅

れ、BO被害を拡大させるなどの課題もある。

最近の計算機の進歩は目覚しく、大量のモールド熱電対の情報を高度に解析してオペレーターに判りやすくVisual化して鋳込み作業場の近くに表示することが可能になった。また、熱電対情報と凝固計算を連動させて、BOに至る前に凝固初期のシェルの状況が異常であることを知らせる仕組みも開発中である。これらの技術については後述する。

また、高速鋳造中に幅可変を多用する連鋳機においては、モールド短辺の、移動制御、テーパ値の精度管理が重要である。併せて、モールド直下の短辺ロールの部位での冷却など、連鋳機の鋳造条件の特性に合わせた管理レベルを上げる努力を重ねてきた。更なるテーパ値の測定技術向上や、ステッピングシリンダーに変わる精度の高い短辺駆動技術も探索中である。

これらによって、連鋳の永遠の課題の一つであるBO撲滅を目指して引き続き取り組む。

#### 4.3 定修周期延長、突発故障防止(稼働率向上)

新日本製鐵の連鋳機は、概ね3週間から4週間に一度、12~24h程度の定修(SD: Shut Down)によるセグメントの計画的交換を組み込み、突発ロール異常(ロール折損、軸受破損)などの設備故障を未然に防いでいる。従来1990年代当時には、生産量の多い連鋳機では2週間に一度程度の短周期の定修を組み込んできたが、機内のロール表面のロール肉盛技術のレベルアップや、軸受け冷却水漏れ防止技術の進歩、オイルエアーを用い連続的に潤滑剤を供給するベアリング潤滑技術の総合的な進歩により、セグメント交換寿命が大幅に延長できた。

しかし、連鋳機長の延長は多くのセグメントを持つことになり、交換回数も物理的に増えるが、前述の寿命向上とともに、エクストラクターなどの迅速セグメント交換装置を設置するなどの設備対策も一部導入することで定修回数を大幅に減らすことができた。さらに、ロール間隔計の進歩により、ロールアライメントの測定精度向上が図られ、ロール、ベアリングの異常を早期に発見し品質異常スラブの発生を抑制することができた。

また、従来、モールド寿命は600~1000ch程度であり、定修-定修間隔よりも短い交換周期であったため、単独でモールド交換のため2~3h程度の休止時間を取る必要があった。最近のモールドめっき技術は大幅に進歩し、Co-Ni合金めっきや、溶射技術の向上およびフトロールの改善によって、モールドの交換周期は2500~3000chに延長することが可能となった。このため、最近ではモールド交換も定修内に多く組み込むことが可能となった。

#### 4.4 多連々鋳化(鋳造時間率向上)

従来、一回のダミーバー装入当りの連続連続鋳造(連々

鋳)チャージ数は同一成分ロットの大きさ、浸漬ノズルの寿命、注入系のノズル詰りなど、連鋳機ごとに上限の制約がある。従来から、ロットの小さいものは、鋳造する鋼種成分が異なっても、異鋼種連々鋳で成分混合部の屑による歩留落ちを許容しながら鋳造していた。また、浸漬ノズルの溶損ネックの場合は、鋳造中のタンディッシュ交換を実施して、多連々鋳を志向した連鋳機もあった。

現在の状況は、ロットサイズに応じて、ロットの大きな量産鋼種は10～15チャージの連々鋳(3000～5000t)によるまとめ製造を行っている。このために、各製鋼工場では注入系ノズル詰り対策技術のレベルアップ、名古屋製鐵所では鋳造中の浸漬ノズル交換技術が確立された。

一方、ロットサイズの小さい鋼種での多連々鋳化は、シーケンスブロックや、鉄板装入などの溶鋼混合防止板を用いる方式を継続しているが、極力、継目部および近傍鋳片の屑化回避により有効活用するため、キャスト編成時に鋳造順番を最適化したり、継目部鋳片の活用技術をレベルアップさせて継目ロスを最小化している。これらの対策により、1990年頃に比べて鋳造歩留が2～3%向上した。

#### 4.5 キャスト間準備時間短縮(準備時間短縮)

キャスト間時間の主な支配因子は最終鋳片引き抜きやダミーバー装入、タンディッシュ準備作業、モールドシール作業などが挙げられる。最終鋳片の引き抜きは最トップ部の凝固不足などにより、トップ部からのスラグまたは溶鋼が漏れる、ブリードと呼ばれるトラブルを防止するために、慎重に引き抜かれる。この引き抜き速度をいかに速くするかがポイントの一つであり、現場を中心に試行錯誤をしながら、最適な引き抜きパターンを確立した。

また、ダミーバー装入に関しては、最終鋳片引き抜き中でもダミーバーが装入できる、上方装入が主流となっている。下方装入は最終鋳片が完全に抜けるまで待つ必要があり、余分に10～20分程度延びてしまう。以前、下方装入だった連鋳機も、リバンピングのタイミングで上方装入化に変更してきた。現在では、上方装入が主流である。

### 5. 品質高度化への対応

製鋼工程に求められる品質レベルは、顧客の鋼材要求機能の多様化(軽量化、高加工性、高強度化など)の高機能化、表面疵管理強化、無欠陥化)や製造効率の高度化に伴い、厳格化が進んだ。一方、その厳格化を背景に、鉄鋼メーカーの技術は世界トップレベルとして進歩し続けてきたことも事実である。

最近では省エネルギー、環境対策の観点から鋼材の軽量化が図られてきている。例えば、自動車などは軽量化を図ることで、燃費を伸ばし消費燃料を下げるだけでなく、排出ガスを減らせるため、省エネルギーや環境にやさしい。ただし、軽量化を図るためには、鋼材の強度、靱性を担保し

た上で、より薄くしなくてはならず、さらに加工が厳しいため、鋼材中の介在物や偏析を低減させる必要がある。また一方で、厚板などは使用環境の過酷化から、逆に製品板厚の極厚化も進み、圧下比(鋳造厚み÷製品厚み)が確保できないことから、中心偏析やポロシティのさらなる低減が求められるようになった。

ここでは連鋳工程における、これら品質高度化への対応について述べる。

#### 5.1 介在物低減対策

連鋳工程における最も重要な品質課題の一つは、鋳片内の介在物低減である。鋼材にとって介在物は、引張り、曲げ、穴抜け、プレスなど様々な加工を施す際に機械特性を低下させる起点となるだけでなく、表面疵の原因にもなるため、連鋳工程において、溶鋼を汚染せず、いかに介在物を除去するかが重要なポイントとなる。ここでは、鋳片表面と内部に捕捉される介在物の低減技術を述べる。

##### 5.1.1 表層介在物低減技術

自動車用外板などは、ボディなどに使用される“よく目に触れる鋼材”であるため、特に表面の疵は皆無が求められる。製鋼起因の代表的な表面疵はアルミナ系介在物およびパウダー系介在物であり、これら非金属介在物が初期凝固殻(シェル)に捕捉され、圧延や冷間圧延で薄く延ばされる際、スリバー・へげと呼ばれる筋状の疵が表面に現出する。スラブ段階のスカフティング(溶削)などにより除去する事もできるが、増工程となり歩留落ちに繋がる事から、連鋳のモールド内初期凝固で制御して介在物を低減する必要がある。そこで連鋳の初期凝固の段階で、鋳型内電磁攪拌<sup>5)</sup>(M-EMS)(図5)を導入することで、凝固シェル前面に一定流速以上の溶鋼流動を発生させ、介在物の捕捉抑制技術を確立した。

また、モールドパウダーの巻き込みを抑制するために、パウダー高粘度化、モールド湯面制御精度向上、オシレーションの最適化、湯流れの安定化を図った結果、パウダーを起因とした介在物系の表面疵は大幅に改善した。

さらに、モールド内に介在物を持ち込ませないために、タンディッシュ段階で介在物を極力低減する取り組みもい

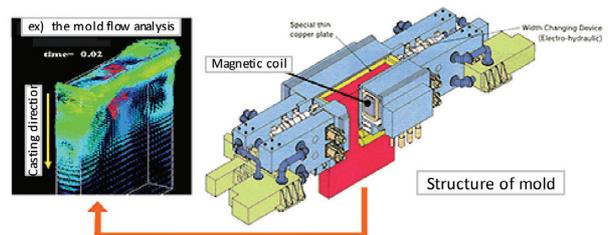


図5 モールド設備と鋳型内流動解析例  
Schematic drawing of mold and the example of mold flow analysis

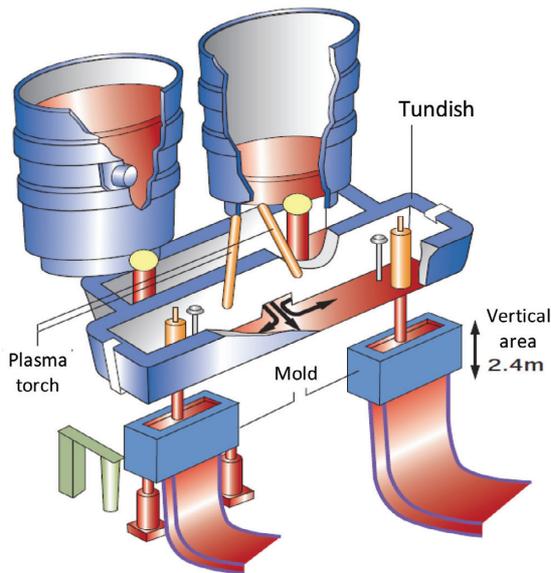


図6 名古屋製鐵所No. 2CCの設備構成  
Configuration of No. 2CC in Nagoya Works

くつか行われてきた。その一つが大分製鐵所、広畑製鐵所などでのタンディッシュの大型化である。タンディッシュは溶鋼鍋からモールドへ安定的に溶鋼を注入するために、中間容器としての注入量の調節、各ストランドへの溶鋼分配機能を担っている。また、ここで介在物の浮上分離を積極的に行なうため、タンディッシュの大型化を進めてきた。タンディッシュ大型化により、介在物の浮上時間確保や、溶鋼鍋からの注入点での溶鋼の懸濁抑制が可能となった。また、タンディッシュの形状も一般的なT型、舟形だけでなく、名古屋製鐵所のH型タンディッシュにみられるトンネル堰で仕切られた完全二槽構造タンディッシュ(図6参照)や、室蘭製鐵所ではタンディッシュを完全に仕切りその中央に誘導加熱を設置したタイプも少しずつ改良を加えてきた。

加えて、溶鋼温度を適正範囲に保ち介在物の浮上を促進する目的で、タンディッシュ内の溶鋼加熱技術を導入した。加熱装置にはプラズマ加熱方式と誘導加熱方式の二形式を採用し、タンディッシュ内の溶鋼温度を制御することで品質高度化へ対応している。

### 5.1.2 内部欠陥対策

ブリキ材などは製缶する際、鋼材の厚みが0.1mm以下まで深絞りされるため、介在物の内部欠陥は厳格に管理しなくてはならない。連鋳工程ではタンディッシュはもちろんのこと、モールド内からも介在物を除去する必要がある。その対策の一つとして、垂直曲げ(以下VB)化が主流である。モールドから垂直部を約2~3m確保することで、モールド内に侵入した介在物を浮かせて系外に排出させる。

また、モールド内では、介在物が下向きの溶鋼流動に

沿って内部に侵入しないように、下降流を抑える溶鋼流動制御が必要である。そこで、一部の連鋳機では、均一静磁場電磁ブレーキ(LMF: Level Magnetic Field)を導入している。LMFはモールド内に静磁場を印加することで、導電体である溶鋼の進行方向と逆向きの力が掛かる原理を利用して下降流速を弱め、介在物浮上を促進させる。また、湾曲連鋳機で電磁ブレーキを有していない連鋳機の中では、ストランド内電磁攪拌(S-EMS: Strand Electromagnetic Stirrer)<sup>7,8)</sup>を用いて、上昇流を形成させることで、介在物の下方侵入を抑制し、介在物系の内部欠陥を防止する技術も適用されている。

### 5.1.3 オキサイドメタラジー

欠陥の原因となる非金属介在物を除去する一方で、脱酸条件を制御し、微細酸化物を鋼中に分散させることで、製品の特性を向上させるオキサイドメタラジー<sup>9,10)</sup>を開発した。

これは微細酸化物を析出物や $\gamma/\alpha$ 変態の核生成サイト等として活用するもので、例えば厚板の溶接熱影響部の靱性を向上させる目的に適用されており、海洋構造物等に広く用いられている。また、最近では数10nmの酸化物を分散させ、結晶粒成長を抑制する粒子として活用する超大入熱溶接用鋼(H-TUFF鋼)も開発された。本技術により鋼材の付加価値を大きく高めている。

## 5.2 中心偏析軽減対策

前述したように、海洋構造物に使用する厚板材やラインパイプなどに使用する鋼管材、穴抜き加工を必要とする自動車の構造部材などは、時代と共にその使用環境がより一層過酷となっており、鋼材に求められる特性(高加工性、高強度化、軽量化、低圧下比)を満足するためには、特に中心偏析やポロシティ(空孔)をいかに低減するかが重要となっている。また、棒線材でも、中心偏析の軽減は、冷間加工性向上や均熱拡散処理の簡略化、省略にも寄与する。

過去に新日本製鐵においては、連鋳機端の最終凝固部軽圧下を狙って、CORD(CO<sub>2</sub> Optimum Reduction by Divided roll)等の稠密分割ロールの実機化やSEFT(Segregation Free Technology)などの面圧下での軽圧下技術による偏析改善技術<sup>11)</sup>を経て、最近では君津製鐵所No.6CCにそれらの技術を結集させた偏析に非常に優れた連鋳機を実機化し、中心偏析厳格材の量産製造に寄与している。また、ブルーム連鋳機においても室蘭、君津、八幡各製鐵所で実機化されている。

## 6. 高品位高速鋳造を支える周辺技術

製鋼工程は高温溶融物を取り扱っているため、例えば連鋳工程における溶鋼の挙動や鋳片表面性状の詳細を把握す

ることは容易ではない。しかしながら、さらなる高品質高速鋳造を実現するために、目で見ることのできない溶鋼内部におけるバルクの流動や介在物の挙動、鋳片性状などを的確に把握し、それを基に品質改善および操業安定化に反映させなければならない。そのために、直接的に測定することで把握するための測定技術と、モデル計算によって把握する解析技術の向上に努めてきた。

## 6.1 解析技術

連鋳工程では、そのプロセスのスケールと取り扱う介在物や、溶鋼とスラグとガスの混相流など非常に複雑で、全てを把握することは困難ではあるが、各種の現象を連成させて捉える事を可能<sup>9)</sup>にしてきた。

例えば連成モデルを使って、タンディッシュ形状による大小様々な介在物の挙動を解析し、タンディッシュ形状の適正化を図っている。

また、モールド内では4.2.2でも述べたように、凝固シミュレーションモデルを用いて適正なモールド銅板形状の改善や温度に対する速度設定の適正化を進めてきた。さらに、モールド内での連成モデル計算により、ガス気泡および介在物の凝固シェルへの捕捉防止を図るために、理想の操業条件を提言し、それを実行に移し成果を上げている。

更に、中心偏析挙動を把握するために、ロール間バルジングや凝固末期のデンドライト先端での溶鋼流動による中心偏析生成のシミュレーションモデルにより、中心偏析の生成機構がより明確になり、中心偏析におよぼす各要因の影響が定量的に予測できるようになった。その知見を基に、適正な設備、操業条件の設計指針に活用され、中心偏析は大幅に改善された。

最近では、連鋳機内の鋳片冷却に使用される二次冷却水の挙動に注目して、セグメントロールの分割箇所である軸受け間で垂れ水が集中して過冷却となり、幅方向不均一冷却を助長することをモデルでも明らかにした<sup>12)</sup>。

また、新日本製鐵ではこれまで熱力学平衡計算(SOLGASMIX)が活用されており、脱酸生成物の組成予測、オキサイドメタラジー等に幅広く適用されている<sup>13)</sup>。

## 6.2 計測技術

連鋳工程では溶鋼を固める工程であることから、温度の把握は非常に大切である。今では一般的になっているタンディッシュでの連続測温計は操業安定化と品質保証には欠かせない。また鋳片が幅方向に均一に冷却されているかを常時監視するために、セグメントの間から放射温度計を用いて測定している。鋳片の品質保証としては、連鋳機末端の搬送において、鋳片疵検査装置を設置し、人の目に加えて熱間で発見しにくい微小な疵を検出することで、後工程への欠陥鋳片流出防止に貢献している。

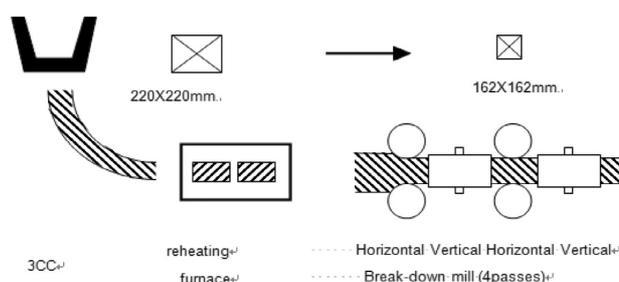


図7 室蘭製鐵所NCRプロセスイメージ  
Schematic illustration of NCR process

## 7. 連鋳十分塊の組み合わせによる生産効率化

### 7.1 CC-分塊の直結化(室蘭製鐵所NCRプロセス<sup>14,15)</sup>)

室蘭製鐵所では従来350mm×560mmの大断面ブルーム鋳造と162mm角の小断面ビレット鋳造を併用した操業をしていたが、これに代わる効率的な棒鋼・線材用鋼片製造プロセスとして1998年に新しくCCとコンパクトな分塊プロセスを直結させたNCR(Nearnet-casting and Compact high Reduction)製造プロセスを確立した。

このNCRでは、従来小断面ビレット鋳造で製造していた鋼材の全てと大断面ブルーム鋳造+分塊で製造していた鋼材の一部を、220mm角の中断面ブルームで鋳造し、熱片のまま連鋳機後段に近接して設置した加熱炉へ装入、加熱し、その後内質改善効果の大きい、大圧下可能な分塊圧延機を用いて鋼片に加工する(図7)。

このNCRプロセスでは、正方形中断面鋳型効果による材質の均質性、等方性を活かしながら、従来の分塊プロセスの簡略化によるコスト低減、小断面ビレット鋳造に起因する圧減比制約や生産性の低下を解消した。

### 7.2 直結プロセスVへのサイジングプレス導入(大分製鐵所)

大分製鐵所では、従来より“直結プロセスV”と呼ぶ大断面鋳造+サイジングミルによるスラブサイズ造り分けを行ってきた。このプロセスは、連鋳機の能力を最大限に活かすことが可能な量産に向けたものであるが、サイジング時に発生するスラブ端部のフィッシュテール切り落としによる歩留ロスの問題が有った。そこで、2009年に、加熱炉とサイジングミルの間に、サイジングプレスを導入し、サイジング前に、スラブのTop, Bottom部のみを予め幅圧下して、フィッシュテールの発生を大幅に抑制する技術を実用化した(図8)。これにより、精整歩留が向上した<sup>16)</sup>。

## 8. 鋼片精整

製鋼工程で製造する鋳片の表面手入れは、主としてマシンカーファーによる全面溶剤と部分手入れを組み合わせられており、ここ数年大きな進歩を遂げた。熱間鋼片でのマシンカーフと熱間でのグラインダー設備を組み合わせるこ

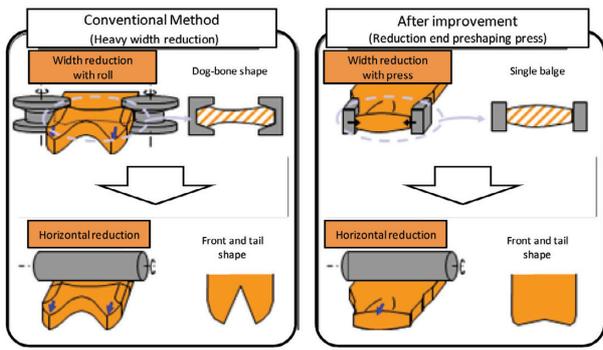


図8 大分製鐵所におけるサイジングプレス概要  
Overview of the sizing press in Oita Works

とで、多量の熱間手入れを可能とし、表面品位向上と高Hot Charge Rolling (HCR) 率を実現している。鋼片精整は表面品位を維持する上で重要な役割を担っているが、同時に歩留を低下させるため、IF鋼や割れ感受性の高いハイエンド材のスラブ表面品位を向上させ、無手入れ化を図るべく、連続鋳造工程での造り込み技術改善が今後の課題である。

## 9. 余材削減対策

連続鋳造工程では、顧客注文を基に作成されたキャスト命令に従い鋳片を製造していく。その際に要求された鋳片サイズや品質を満たさなければ、注文に紐付かない余材が発生する。余材になると一旦冷間鋼片となるため、再び加熱炉で昇熱するためのコストが余分に掛かるだけでなく、在庫として積み上がり物流も乱れる。この余材を低減するために我々は発生抑制と消化の促進を進めてきた。特に発生抑制では技術的な改善に加えて、手持ちの鋳造命令に対して鋳造中に適材適所の鋳片振当てを可能とするシステムを導入し、余材発生を抑制する効率的な鋳造を確立した。

## 10. まとめ

ここまで連続鋳造工程における高品位高速鋳造技術および高効率化について述べてきた。先に述べたように、新興国の

継続的な成長の中にあって、国内需要の閉塞感と、さらなるコスト競争激化が進む中、日本の鉄鋼業がさらなる発展を遂げるために、これまで培ってきた技術先進性を深化させることが重要である。

この後の技術論文でも述べるように、連続鋳造工程においては、高品質高速鋳造を確立するための様々な技術開発が行われてきた。さらに解析技術の発展により、現象の解明と改善の糸口を掴んだ結果、不純物である介在物の生成抑制と徹底除去、また凝固過程でできる中心偏析や割れの無い、いわゆる完全無欠陥鋳片の製造に着実に近づいている。今後もこの飽くなき挑戦を続けていく。

最後に、日本鉄鋼業界の強みは、その高い“技術力”に加えて“現場力”とも言われる。まだ人の手に頼る部分が残る連続鋳造工程では、技能とそれを支える周辺技術の相乗効果で高品質な製品を安定的に供給できる。足元、グローバル化が叫ばれる中、礎となる“技術力”と“現場力”を高め、今後のさらなる発展に期待したい。

## 参考文献

- 1) 奥村裕彦:新日鉄技報. (351), 10 (1994)
- 2) Mizukami, H. et al.: ISIJ Int. 44, 1747 (2004)
- 3) 加藤雄一郎 ほか:材料とプロセス. 20 (1), 193 (2007)
- 4) 山村和人 ほか:新日鉄技報. (391), 143 (2011)
- 5) 中島潤二 ほか:新日鉄技報. (376), 57 (2002)
- 6) 橋高節生 ほか:新日鉄技報. (376), 63 (2002)
- 7) 原田 寛 ほか:材料とプロセス. 18 (1), 217 (2005)
- 8) Sawai, T. et.al.: Proceedings of 4th ECCC. 2002, p. 454
- 9) 荻林成章 ほか:新日鉄技報. (351), 64 (1994)
- 10) 児島明彦 ほか:新日鉄技報. (380), 33 (2004)
- 11) 松崎孝文 ほか:CAMP-ISIJ. 2, 1150 (1989)
- 12) 山崎伯公 ほか:材料とプロセス. 25 (1), 264 (2012)
- 13) 山田 亘 ほか:新日鉄技報. (342), 38 (1991)
- 14) 鳥影肇 ほか:CAMP-ISIJ. 12, 836 (1999)
- 15) 平林 圭 ほか:CAMP-ISIJ. 12, 837 (1999)
- 16) 新日本製鐵大分製鐵所:141回製鋼部会提出資料. 2009, 私信



山口 純 Jun YAMAGUCHI  
製鋼技術部 製鋼技術グループ マネジャー  
東京都千代田区丸の内 2-6-1 〒100-8071



澤井 隆 Takashi SAWAI  
製鋼技術部 部長



中島隆雄 Takao NAKASHIMA  
君津製鐵所 製鋼部 製鋼企画グループ  
マネジャー