

(技術資料)

ブルーム連铸2基生産体制における铸片品質向上技術 - 神戸第5連铸機建設 -

Quality Improvements of Bloom with Two Continuous Casters



酒井宏明*
Hiroaki Sakai



吉田敦彦*
Atsuhiko Yoshida



福崎良雄*
Yoshio Fukuzaki



高木 功*
Isao Takagi



中田 等**
Hitoshi Nakata

At the Kobe Works, the No.5 continuous caster went into operation on September 1st, 2006 to increase the production capacity and quality of bar and wire rod products. The No.5 continuous caster is equipped with a large tundish, a high cycle oscillation and so on, which were found to be successful improvements on the No.3 continuous caster. This report introduces the history of quality improvements in the No.3 continuous caster, and design concepts used for the No.5 continuous caster.

まえがき = 高級特殊鋼は、自動車の重要保安部品用の素材として一品一種の要求特性に対して厳格な製品供給が求められることから、高度な製造技術が必要とされている。近年、自動車の国内完成車生産、組立部品として輸出されるノックダウンセット生産の順調な伸びに支えられ高級特殊鋼への需要は堅調に推移し、今後も拡大していくと考えられる。これに対して当社神戸製鉄所では、高級特殊鋼の生産比率向上によって、既存のNo.3連続铸造機(以下、3CC)に加えて、No.5連続铸造機(以下、5CC)を新設した。本稿では、神戸製鉄所におけるブルーム連铸機の品質改善経緯と、今回建設した5CCにおける品質設計の考え方について報告する。

1. 製鋼プロセスの変遷

神戸製鉄所における製鋼プロセスの変遷を図1に示す。1次精錬工程においては、1982年に4号転炉、1983年に転炉型溶銑予備炉(H炉)を稼働させ、2次精錬工程においては1981年よりASEA-SKF方式の1LR、1987年に2LRを稼働させ、各工程の精錬機能を分担強化させて効率化を図った。また、連続铸造工程においては、1CC・2CCを経て、1981年に垂直曲げ型ブルーム連铸機の3CC、1987年には湾曲型ピレット連铸機である4CCを稼働させた。そして、2006年7月に4CCを休止し、9月より垂直曲げ型ブルーム連铸機である5CCが営業運

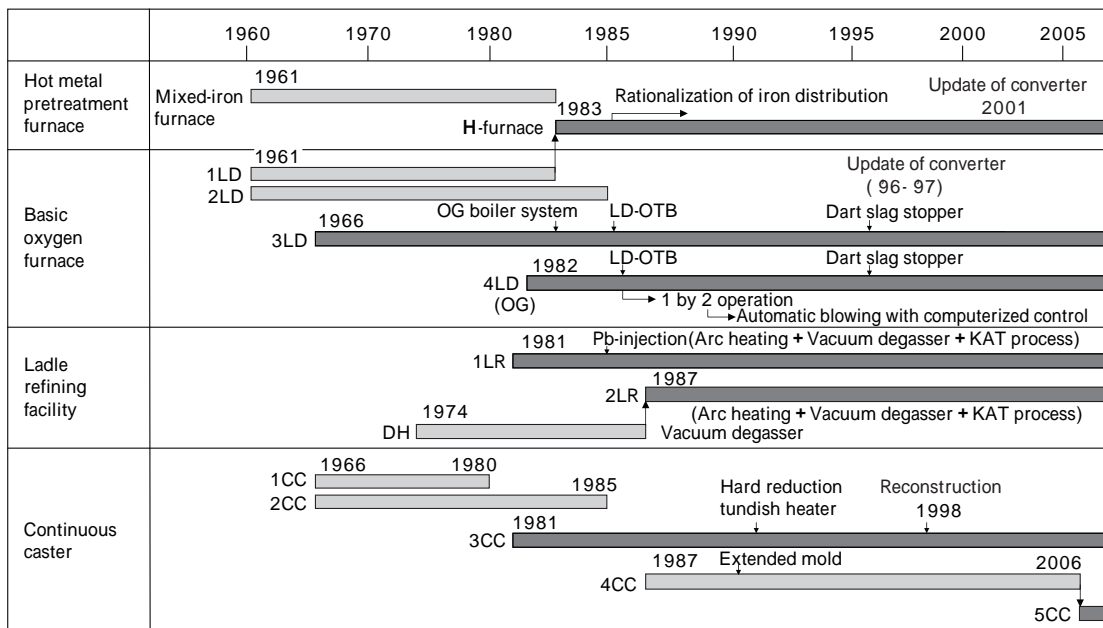


図1 神戸製鉄所における製鋼プロセスの変遷
Fig. 1 History of steelmaking process in Kobe Works

* 鉄鋼部門 神戸製鉄所 製鋼部 ** 鉄鋼部門 加古川製鉄所 技術研究センター

転に入り、更なる高品質化に対応する体制を整えた。

2. 神戸製鉄所における製鋼プロセス

神戸製鉄所製鋼工場のレイアウトを図2に示す。転炉より出鋼された溶鋼は、鋼種に応じ3CC向けの溶鋼処理設備である1LRと、5CC、IC向けの溶鋼処理設備である2LRへ各々搬送した後、3CC、5CC、ICにて鑄造される。

3. ブルーム連鑄における品質改善の経緯

高級特殊鋼の連鑄化を推進するにあたり、3CCでは特殊鋼製造技術の開発、設備や品質保証技術の改善に努めてきた¹⁾。まず、ブloom連鑄機の品質改善の歴史として歩んできた3CCの設備改善経緯を以下に説明する。

3.1 3CC設備の概要

3CC設備概要と設備仕様を図3に示す。3CCは鑄片サ

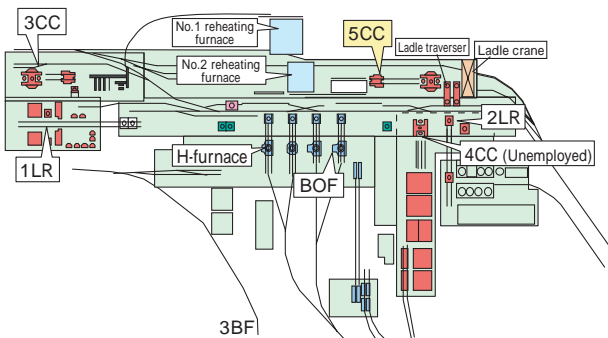


図2 神戸製鉄所における製鋼工場のレイアウト
Fig. 2 Layout of steelmaking plant in Kobe Works

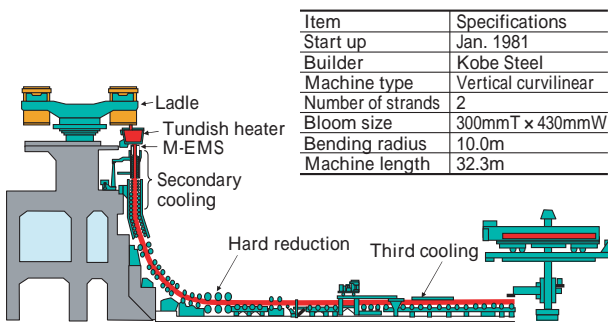


図3 3CCの設備仕様
Fig. 3 Outline of No.3 continuous caster

イズが300×430mmのブloom連鑄機であり、タンディッシュ誘導加熱、鑄片表面を均一冷却するための2次冷却帯、偏析改善のための強圧下設備を設置している。

3.2 3CC品質向上のための設備改善の経緯

高級条用特殊鋼の連鑄化を推進するにあたり、3CCでは表1に示す種々の設備改造を実施して、介在物欠陥の防止、表面疵の低減や中心偏析の低減などの品質改善を図ってきた。1980年代には、2次冷却のミス化による鑄片の均一冷却化を図り、タンディッシュ形状をT型に改造し介在物の浮上を促進した。1991年には高速鑄型振動と精密湯面制御による初期凝固段階の均一化、ロールピッチ短縮による鑄片バルジングの低減と高速鑄造による鑄片表面品質の改善を行うとともに、タンディッシュ誘導加熱装置と強圧下設備の導入による中心偏析の改善を図ってきた。

1998年7月にはリフレッシュ工を実施し、介在物欠陥に対しては取鍋終点判定のばらつき低減を目的としたスラグ検知システムの導入、鑄片表面欠陥に対しては徹底した2次冷却の緩冷却化、および緩冷却化により助長される内部割れを防止するためにロール冷却の強化によるロール摩耗低減策を実施した。

2004年4月には3次冷却設備の改造工を行い、3次冷却による粒界割れ起因の欠陥を低減してきた。3CC材は割れ感受性の高い鋼種が多く、粒界割れや面縦割れ欠陥が発生しやすい。図4に、設備改善に伴い低減してきた表面欠陥発生指数の推移を示す。1998年以前の表面欠陥の発生指数と比較すると、近年までの品質改善によ

表1 3CC鑄片品質改善のための設備改善経緯

Table 1 Construction history of equipment for quality improvement in No.3 continuous caster

Year	Improvement
'81	Start up
'82	Secondary mist cooling
'83	Modification of tundish (T type)
'84	High prediction system of break-out
'85	Precise level control in mold
'86	High cycle oscillation
'87	High tundish
'88	Hard reduction
'89	Hard reduction
'90	Hard reduction
'91	Hard reduction
'92	Hard reduction
'93	Hard reduction
'94	Hard reduction
'95	Hard reduction
'96	Hard reduction
'97	Hard reduction
'98	Hard reduction
'99	Hard reduction
'00	Automatic detecting system
'01	Automatic control of inserting gas flow rate
'02	Reconstruction of secondary cooling zone
'03	Roll cooling
'04	Improved control of third-cooling
'05	Improved control of third-cooling
'06	Improved control of third-cooling

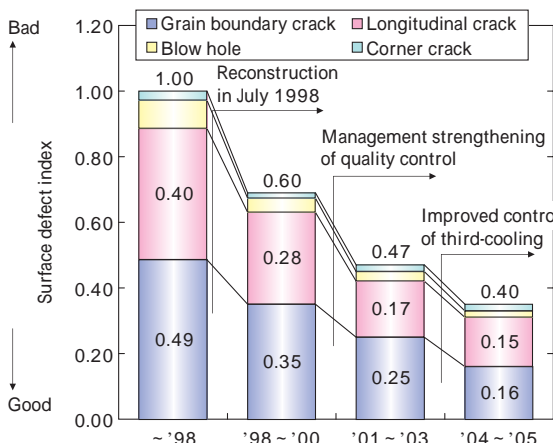
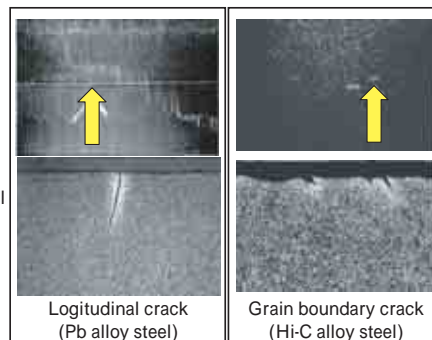
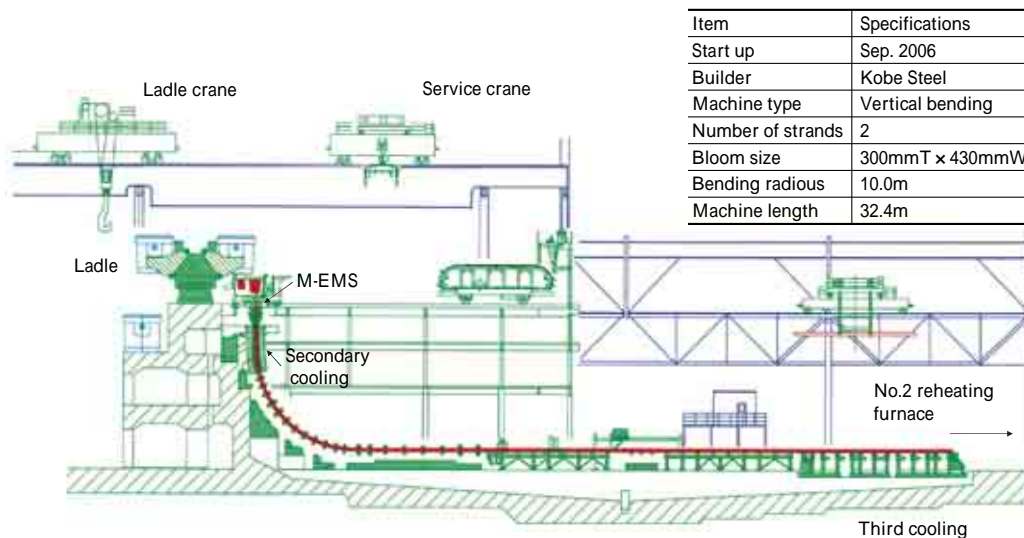


図4 3CCにおける表面欠陥指数の推移
Fig. 4 History of improvement in surface defects





Item	Specifications
Start up	Sep. 2006
Builder	Kobe Steel
Machine type	Vertical bending
Number of strands	2
Bloom size	300mmT x 430mmW
Bending radius	10.0m
Machine length	32.4m

図 5 5CC の概要と設備仕様

Fig. 5 Outline and specifications of No.5 continuous caster

り60%低減することが可能となった。

3.3 3CC における現状の課題と今後の進め方

近年発生している表面欠陥の起源としては、非定常部、特に小ロット化により増加している異鋼種連々鑄実施時の2次冷却帯または3次冷却帯の不均一冷却によるものが大半を占める。そのため、今後は無欠陥鑄片製造技術の実現に向けて、鑄造時の局所的なばらつきまで管理できるオンラインの品質評価システムを構築していく予定である。

4. 5CC における品質改善

4.1 5CC 設備の概要

5CC の設備概要と設備仕様を図5に示す。5CC は鑄片サイズが3CC と同じ300×430mm の大断面ブルーム連鑄機である。設計は当社機械エンジニアリングカンパニーと鉄鋼部門によって行い、垂直曲げ型の2ストランドマシンを採用し、機長は32.4m を有する。加熱炉とは搬送テーブルを介して直結した構造となっている。生産能力は月産60,000トン（設備単体能力）である。また、5CC は低合金鋼などの割れ感受性の高い特殊鋼を主体に、品質要求厳格材を主に製造する連鑄機である。

4.2 設計コンセプト

5CC における設計コンセプトを表2に示す。

外来系の介在物低減を目的に、レードルターレットヘロードセル導入を図るとともに、大型タンディッシュ化とスライドバルブと油圧シリンダの直結制御化を図った。

また表面欠陥防止として、鑄型内均一流動（電磁攪拌の3相化）をはじめとして、ショートストローク・ハイサイクル鑄型振動装置の導入と均一で緩やかなミストスプレー冷却を採用した。凝固界面で発生する内部割れ²⁾に関しては、バルジング対策として鑄型の短尺化とロールピッチ短縮を図った。

以下に5CC の主要設備について概説する。

4.3 主要設備

新連鑄機の設計にあたっては、これまで品質面でお客

表 2 5CC の設計概要

Table 2 Design concept for No.5 continuous caster

Improvement item	Purpose	Equipment
Non-metallic inclusions	Prevention from the mixing of ladle slag	Load cell on ladle turret
	Promotion to float inclusions	Large tundish controlling flow velocity
	Mold level control	Three layer cassette directly jointed with oil pressure cylinder
Surface defect	Prevention from solidification delay	Mold EMS (3 phase)
	Decrease of oscillation mark	Mold with short stroke and high cycle oscillation
Internal crack	Decrease of heat amplitude	6 zone mist spray using wide-angle nozzle
	Prevention from solidification delay	900mm length mold
	Prevention from bending strain	Short roll pitch
	Prevention from straightening strain	Short roll pitch

様から高い評価を頂いている3CC の設備仕様をベースとして設計を行い³⁾⁴⁾、鑄造条件などの操業ノウハウについても、その多くを3CC より取入れた。

4.3.1 ロールプロフィール

鑄型寸法については、分塊工程を共通化していることから鑄片サイズは3CC と同じ300×430mm とした。また鑄型長さについては、鑄型内バルジング防止の観点より900mm とした。

垂直長さについては、一般的には2.5~3.0m を超えると介在物や気泡の浮上効果が確認されないと報告されている⁵⁾。鑄型内流動シミュレーションによる解析の結果、3.0m を超えると介在物浮上に対する効果は飽和することから、垂直長さは3.0m とした。ロールピッチについては、凝固界面歪の最大値を抑える考え方から設定した。一般的に、内部割れは凝固開始以降のZST から凝固完了前のZDT部に掛けて発生することが知られており、C,Sなどの偏析係数が大きい元素の含有率が高いほどデンドライト間の溶鋼の融点を下げ、内部割れを発生させやすいとされている⁶⁾。そこで、3CC における内部割れ実績をもとに、鑄片内部歪が限界歪を超えないよう

に、ロールプロフィールの設計を行った。鑄片凝固界面歪は以下の式で与えられる。

鑄片凝固界面歪(%)

$$= \text{バルジング歪} + \text{曲げ / 矯正歪} + \text{熱応力歪} + \text{ロール不整歪}$$

$$\cdot \text{バルジング歪} (\delta_B) = P/A \times (L/D)^2 \times 100$$

$$\cdot \text{曲げ / 矯正歪} (\delta_S) = (W/2 - D) \times (1/R_i - 1/R_{i-1})^2 \times 100$$

ここで、 P ：溶鋼静圧(kgf/mm²)、 W ：鑄片厚さ(mm)、 A ：定数(kgf/mm²)、 D ：凝固シェル厚さ(mm)、 L ：ロールピッチ(mm)、 R_i ： i 番目ロールの曲率半径(mm)

ただし、ロール不整歪については、ロール冷却を十分にすることによりロール摩耗が少量に抑えられることから計算より除外した。熱応力歪についても、同様に計算より除外した。この結果をもとにして、10m-Rのロールプロフィールの決定を行った。

4.3.2 タンディッシュ

タンディッシュ構造については、中央部にスリーブを有するT型タンディッシュを採用した。スリーブについては、従来用いられている多孔状の堰と異なり、2孔で長い流路を確保した。このことから、注入室にて発生した乱流がストランド室に入る間において整流化され、溶鋼流動制御しやすくなる。更に、溶鋼の高清浄化を図るため、スリーブ煉瓦を通過した溶鋼に上昇流が得られるよう、スリーブの向きを最適化を図った。

シミュレーションによる流動解析結果を図6に示す。スリーブ径が細く、注入室からの吐出流速が速い場合、壁面に衝突する速度ベクトルが強くなることから、旋回流が乱れるとともに抜熱が大きくなる。このことから、スリーブ径を大きくするとともにその吐出方向をセンタ寄りとした。この結果、ストランド室内において大きな旋回流を得ることができ、介在物浮上促進を図ることができた。このことにより、タンディッシュ内における清浄度向上が確認された。

4.3.3 鑄型

コーナ割れおよび横割れについては、オシレーションマークを起点にして発生することから、オシレーションマーク深さを浅くすることが必要である。このためには、振動数を増やしネガティブストリップ時間を短くす

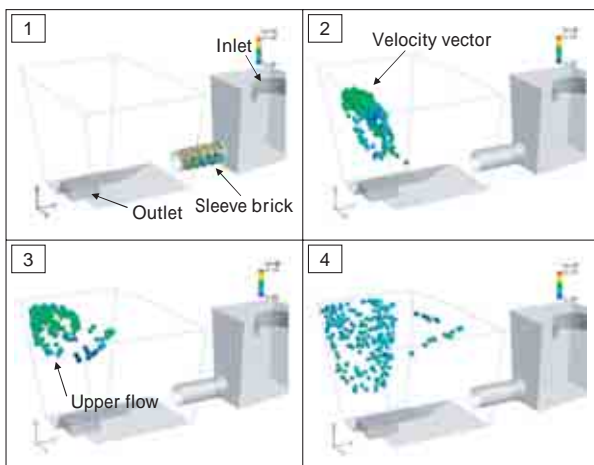


図6 タンディッシュ内流動解析結果
Fig. 6 Schematic steel flow in tundish

ることが必要であり、5CCでは表3に示すように、ショートストローク・ハイサイクル化を図った。このことにより、オシレーションマーク深さが約20%低減し、平滑性の高い鑄片を得ることができるようになった。

4.3.4 鑄型内電磁攪拌装置

従来の2相型の鑄型内電磁攪拌装置(以下、M-EMS)においては、隣接するコイルにおいて磁束の短絡が発生することから、コーナ近傍においてローレンツ力の分布が歪み、図7に示すような湯面上昇が発生する。コーナ近傍に湯面上昇が発生した場合、モールドパウダーの流入が不均一となりやすく、凝固不均一起因による皮下欠陥が発生しやすくなる。それに対し、3相型のM-EMSにおいては、コーナ部の上昇流が少なく、パウダーの流入が均一となる。このことから、5CCにおいては3相のM-EMSを採用した。

4.3.5 2次冷却

2次冷却については、均一緩冷却化を図るためにゾーンを長く取るとともに、垂直部/曲げ部/円弧部にかけてゾーンを細分化し流量制御を多様化した。また、熱振幅を低減させるため図8に示すミストスプレーを採用し、鑄片厚さ方向の広がりを確保するとともにロールによるデッドゾーンを低減させるため、衝突型ノズルとした。従来型の2次冷却ノズルの場合、ノズル先端はロールセンタより後方にあることから、ミスト冷却が当たらないデッドゾーンが発生し、鑄片表面の復熱を発生させる。これに対し、衝突型ノズルを採用した場合、デッドゾーンが少なくなり、復熱部を少なくし、熱振幅を最小限とすることができた。

4.3.6 3次冷却

鑄片を切断してから加熱炉に装入する間において、鑄

表3 鑄型振動条件
Table 3 Mold oscillation condition

	3CC	5CC
Amplitude	4mm (±2mm)	3mm (±1.5mm)
Oscillation frequency (max)	240cpm	300cpm

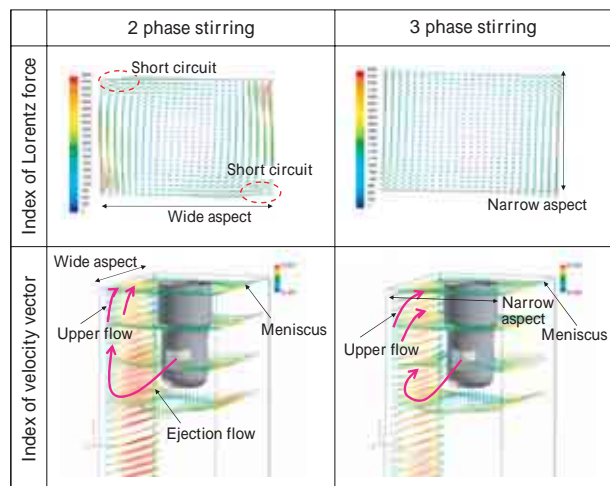


図7 鑄型内溶鋼流動解析結果
Fig. 7 Schematic steel flow in mold

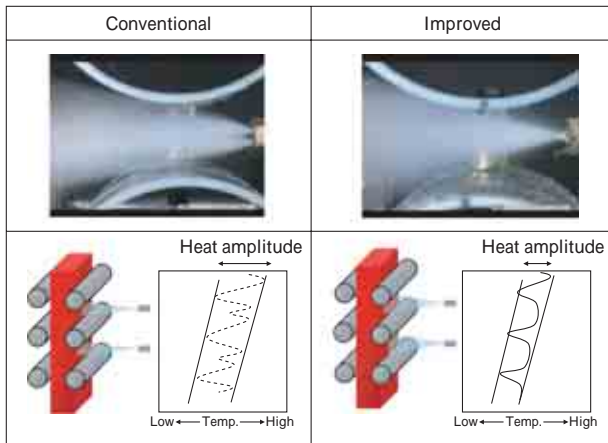


図8 2次冷却ノズルの改善

Fig. 8 Improvement of secondary cooling nozzle

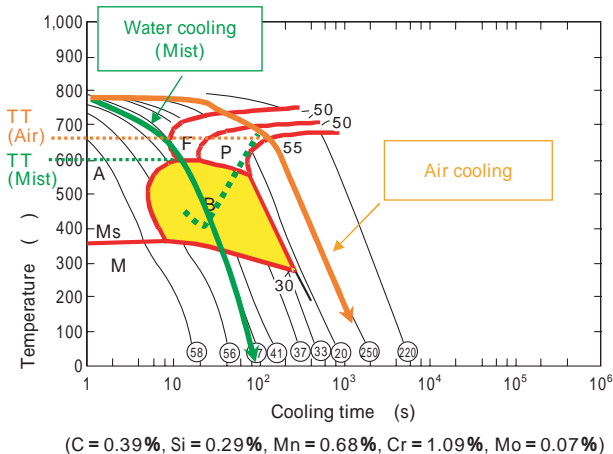


図9 低合金鋼における CCT 図

Fig. 9 CCT diagram of low alloy steel

片表面温度を変態温度以下に下げることによって、F + P に変態させ、結晶粒微細化による割れの進展防止を図ることが一般的に用いられている。

一方で、鑄片冷却をミストによって行う場合、冷却速度が速いことから、図9に示すようにベイナイト変態開始温度が低くなり、鑄片表面温度を一層下げる必要がある。これに対して空気冷却を行った場合、冷却速度が遅いことから、変態完了温度が高くなるとともに、温度ばらつきが少なくなることから、鑄片表面の組織ばらつきが少なくなり、品質の安定化と鑄片の曲がり低減による操業の安定性を高めることができる。

5CC 冷却床において空気冷却を行った鑄片の加熱炉装入前温度を評価した結果、温度ばらつきが少なくなることが確認された。

むすび= 当社神戸製鉄所における高級特殊鋼の生産能力を強化するため、2006年9月より新鋭ブルーム連続機である5CCの営業運転に入った。立上げ後順調に稼働し、ブルーム連続2基体制下で、小ロット対応と品質向上に効果を上げている。今後、高級特殊鋼の製造において、神戸-加古川両製鉄所を含めた供給体制を強化するため、技術レベルの共有化を図り、より良い製品を供給していく所存である。

参考文献

- 1) 福崎良雄ほか:R&D 神戸製鋼技報, Vol.50, No.1 (2000) p.17.
- 2) W. Kurz : Met TransB 12B (1981) p.852.
- 3) 森下雅史ほか:鉄と鋼, Vol.87, No.4 (2004) p.167.
- 4) 中岡威博ほか:鉄と鋼, Vol.86, No.4 (2004) p.231.
- 5) H. TANAKA et al. : ISIJ International, Vol.34, No.6(1994) p.498.
- 6) Y. M. Won et al. : Met TransB 31B (2000) p.779.