

第2号連続铸造機 (60tCC) の建設と稼動

川上 潔*1 北出真一*2 畑山俊明*3 高須一郎*4

Kiyoshi Kawakami, Shinichi Kitade, Toshiaki Hatayama and Ichiro Takasu

1. はじめに

近年、BRICSをはじめとする新興国の成長が著しく、過去、日米欧が歩んできた経済発展によるモータリゼーションの波がこれら新興国に波及すると見られている。また、再生可能エネルギー等の新産業分野の発展により、世界の特殊鋼需要は今後益々増大するものと思われる。

当社においては、需要家のニーズに応えるため、これまで粗鋼の量産工程である150t電気炉を中心とする第二製鋼工場と、特殊鋼種および太径サイズ用の製造ラインである60t電気炉を中心とする第一製鋼工場にて、それぞれの特徴を活かした生産を行ってきた。

しかし、上述の拡大する国内外の特殊鋼需要を捕捉し、需要家への供給責任を果たしていくためには、更なる生産能力の向上やコストダウンおよび環境負荷の軽減が求められるようになった。このため、第一製鋼工場に新たに連続铸造機（以下60tCC）を設置した。

本報告では、60tCCの建設と設備の概要および立ち上がり稼動について報告する。

2. 第一、第二製鋼工場の技術の変遷と60tCCの設置経緯

表1および図1に当社の各製鋼工場と製鋼技術の歴史および粗鋼量の推移を示す。

第一製鋼工場（含30t電気炉工場）では、60t電気炉2基を中心に、昭和54年（1979）にはインゴット造塊のみで、粗鋼生産量75,000t/月の生産を行っていた。

昭和57年（1982）に現在の第二製鋼工場が建設された。第二製鋼工場は、業界初導入の設備や、業界の水準を凌駕する新設計、さらには他社に例の無いレイアウトにおいて、当時、極めて画期的な新製鋼工場であった^{1) 2)}。それらの主な特徴を列挙すると、

先ず公称90t（実装入137t/ch）、トランス容量7万KVAの大型電気炉は、普通鋼電気炉を含めて当時国内最大規模

であった。しかも将来の炉底出鋼への改造を見越して、受鋼鍋が炉下に入る事を可能とした斬新で先見性の高い設計が施されていた。

2点目は、炉外スラグ精錬設備LFを当社で初採用した。このLF導入によって、第二製鋼工場の立ち上げと同時に、当社は海外特殊鋼メーカーにも輸出してきた電気炉迅速溶解技術や、業界をリードする電気炉による極低酸素鋼の精錬技術から、酸化/還元精錬を機能分化させた新しい精錬プロセス、EF-LF-RH脱ガスのいわゆる複合精錬プロセスへと技術革新の道を歩んだ。

3点目は、他社の多くが湾曲型連続铸造機を採用する中で、特殊鋼専用として、業界初となる垂直型連続铸造機の採用である。

4点目は、特殊鋼の铸造工場には、連続機と共にIC造塊設備を併設するのが通例であったが、当社は敢えて連続铸造機だけの設置とした。この事は、当初、操業上では大きな困難を強いるものであったが、逆に高精度铸造技術の獲得や、多連続技術の開発を強く後押しする結果となって成果を上げた。

5点目は、電気炉からLF、RH、CCに続き加熱炉への铸片のホットチャージ、鋼片圧延-RUST検査までの工程を連続的に配置した。当時、これは他社に例を見ない画期的なレイアウトであり、スクラップ装入から鋼片検査完了まで僅か半日という特殊鋼鋼片の製造工期で、業界最短となるものであった。

6点目には、鋼片圧延機としてドイツでのプロトタイプ開発からは第2号機、商用としては世界初号機となる遊星3傾斜ロール圧延機、いわゆるPSW圧延機（現在の他社ではHRM;ハイリダクションミル）を設置した。なお、この圧延技術の開発では、第44回（平成9年）大河内生産賞を受賞している。

さらに、7点目として、鋼片検査工場には当時最先端、新開発のオンライン全領域超音波探傷機、RUSTを設置した。

これら新機軸の数々を投入し、かつ連続的につながった第二製鋼工場および鋼片圧延/検査工場の立ち上げは、当

*1 参与 博士（工学）（元60t連続铸造設備建設本部 副本部長）

*2 製鋼部 第二製鋼課長（元60t連続铸造設備建設本部）

*3 製鋼部 第一製鋼課 第一铸造係長

*4 研究・開発センター 製鋼プロセスグループ長、PhD

表1 第一、第二製鋼工場と製鋼技術の歴史

年	1975(S50)	1980(S55)	1985(S60)	1990(H2)	1995(H7)	2000(H12)	2005(H17)	2010(H22)
第一製鋼工場	30t 1号電気炉							
	30t 2号電気炉					60t工場に生産吸収廃止		
	30tRH脱ガス炉					●超合金生産(純Ni, 50Cr等) 60t工場に生産吸収廃止		
	60t 1号電気炉		60t2号炉に生産集約廃止	LFIに改造				
	60t取銅脱ガス炉							
	60t 2号電気炉							
第二製鋼工場								

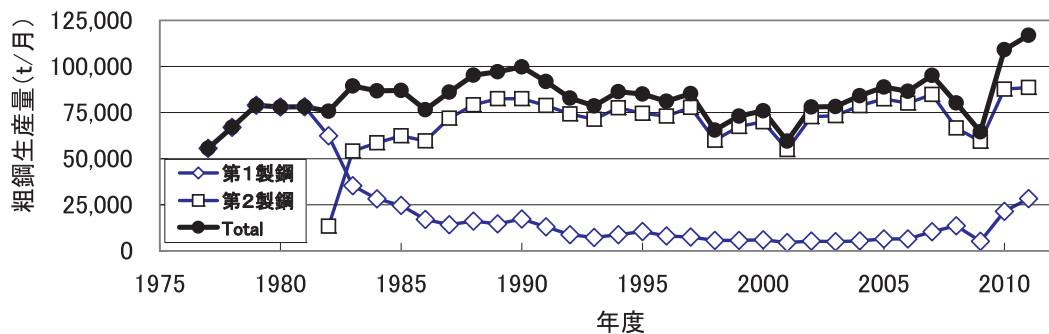


図1 当社の粗鋼生産量の推移

社製鋼史上、例の無い困難を伴うものであったが、全社を挙げての支援の下、業界の予想を上回るスピードで立ち上がり、その後の当社の製鋼技術の発展と経営基盤強化の上で多大な貢献をもたらした。

その端的な事例として、当時、AIキルド鋼の連々鋳は、ノズル閉塞対策であるCa-Si処理を施しても4,5連々鋳程度と言われた時代に、清浄度向上によりCa-Si処理なしで早期に10~20連々鋳を達成したことが挙げられる。これは今なお業界および世界水準を凌駕し、リードする多連鋳技術の開発や超高清浄度鋼、SNRP鋼の開発³⁾等に繋がっている。高AI窒化鋼の多連鋳量産化技術は、今なお、業界の追従を許さないものである。

この間、量産鋼種は、第一製鋼工場から第二製鋼工場へ

と移行して、集約生産化を図り、インゴット鋳造のみの第一製鋼工場の粗鋼生産量は、最盛期からは大幅に減少し、間欠操業へと変化した。すなわち、第一製鋼工場では、鋼種的に連続鋳造が出来ないもの、連続鋳造ブルームでは圧鍛比が不足するもの、および小ロットに限定した生産に特化して生産してきた。

この事は結果として、工具鋼や特殊ステンレス鋼等の高機能鋼は第一製鋼工場で、量産の超高清浄度鋼は第二製鋼工場で製造するという、製鋼精錬上におけるラインの棲み分けを実現していた。

2008年のリーマンショックにより生産量が一時減少するが、その後、新興国を中心に増大する特殊鋼需要に応える形で粗鋼生産量は順調に伸び、第二製鋼工場のみではそ

の需要に応えられなくなり、第一製鋼工場でのICによる増産、すなわち第一製鋼工場での量産鋼種の生産が増加するに至った。

この様な経緯から、2012年6月に第一製鋼工場に新CCが設置されることとなった。

第一製鋼工場は、1970年代に新幹線用軸受鋼の開発や高純度鋼 (MG保証鋼) の開発、特殊鋼の迅速溶解 (精錬) 技術の欧州や北米への輸出、1987年と1993年には酸素分析用の極低酸素標準サンプル (酸素3.4ppm) を日本鉄鋼連盟に提供する等、第二製鋼工場の超高浄化技術の基礎をなす精錬技術を有していた。

今回新設の60tCCには、それらの第一製鋼工場の製鋼技術の基盤上に、さらに第二製鋼工場で培われた連続鋳造技術、第二製鋼工場で進化した高純度鋼製造技術の数々が注ぎ込まれた。

3. 60tCC建設における課題と基本構想

3.1 課題

1) 鋳片のサイズと型式

表2に鋳片品質とCC型式および断面サイズとの関係を示

表2 鋳片品質とCC型式および断面サイズとの関係

連鋳型式	品質特性			サイズ	品質特性	
	介在物浮上	メニスカス安定	矯正時の割れ		介在物浮上	メニスカス安定
湾曲型	不利	同等	不利	小断面※	不利	不利
垂直曲げ型	有利		有利	中断面※	有利	有利
完全垂直型	有利			大断面※	有利	有利

型式/サイズ	小断面※	中断面※	大断面※
湾曲型	▲	△	○
垂直曲げ型	▲	○	○
完全垂直型	△	○	◎

記号：◎>○>△>▲
品質良 ← → 品質劣

※小断面：□200～300mm、中断面：□300～400mm、大断面：□400mm以上
(□200mm未満はピレットと呼称し、ブルームとは区別される)

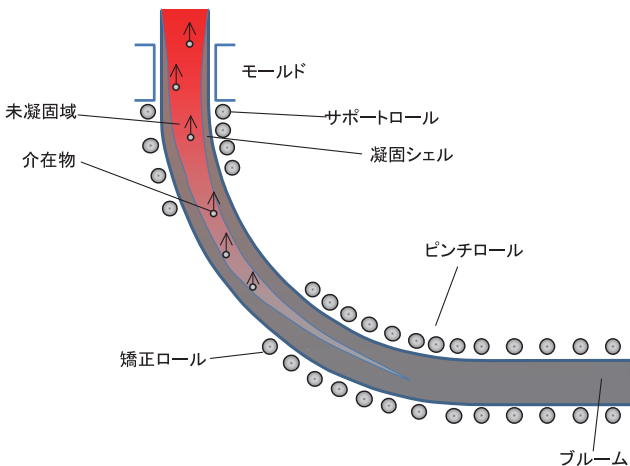


図2 非金属介在物の集積帯イメージ図

す。湾曲型のCCで製造したブルームには、凝固過程で比重差により浮上途中の非金属介在物が湾曲部の上方側凝固シェルにトラップされ、いわゆる非金属介在物の集積帯を生じる (図2参照)。近年、湾曲Rを大きくした大湾曲型、あるいは垂直部を大きくとった垂直曲げ型など、より完全垂直型に近い型式の連鋳機⁴⁾が登場しているが、完全垂直型の優位性は変わらない。また、断面が小さくなるとメニスカスでの湯面変動が大きくなり表面性状が悪化する他、非金属介在物の浮上分離の面からも凝固時間が短く不利である。しかし一方では、完全垂直型は地下にガスカッターを配置する関係で、地面の掘削が必要であり、初期投資額が大きくなること、また、大断面化は設備や圧延等の下工程の生産性を考慮すると、大きければ良いということではない。さらに当社においては、150tCC鋳片サイズとの関係も考慮する必要がある。

以上のように、鋳片サイズおよび型式の選定には様々な要因を考慮して、如何に最適の設計をするかという課題があった。

2) 製鋼、精錬能力と鋳片サイズ、ストランド (以下str) 数との関係

図3に60t製鋼工場における溶解および精錬工程の生産性を考慮して、断面サイズと鋳造速度 (以下Vc) が60tCCではどのようなかを整理した。図中に150tCCの範囲をIで示す。60tCCの場合は図中の点線で示すように、仮に150tCCと同一断面サイズの鋳片とした場合は、2strでは150tCCよりも少し低速で、1strでは150tCCよりもかなり高速で鋳造することになる。あるいは、150tCCでのVc範囲と全く同じ条件で鋳造しようとする、2strで150tCCより少し小さい鋳片に、1strではかなり大きい鋳片にする必要がある。この内、150tCCと同一サイズ

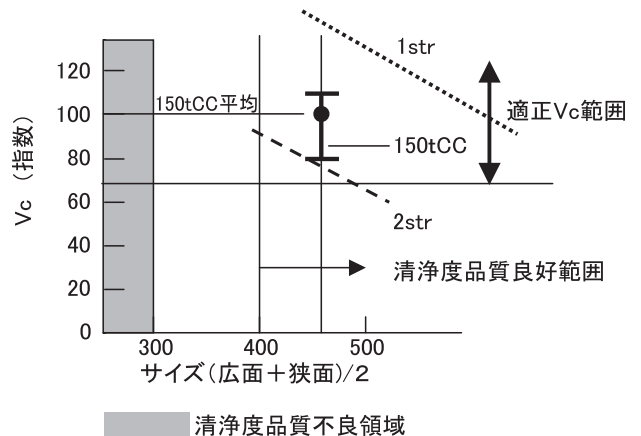


図3 鋳片サイズとstr数および品質と鋳片生産性 (Vc) の関係

で1strの場合は、機長（メニスカス～ピンチロール上段）を大幅に大きくする必要があり、特に垂直型ではコスト的にも非常に不利である。

また、Vcはモールド内での介在物浮上分離や浸漬ノズルからの溶鋼吐出流によるモールドパウダーの巻き込みの観点から低速鑄造が望ましいが、ある一定以下のVcではデツケル（メニスカス近傍で溶鋼表面が凝固すること）が発生するため、Vcはある一定以上にすることが必要である（図3、図4⁵⁾ 参照）。以上のように、150tCCと同等以上の鑄片品質を確保するために、鑄片サイズ、str数、Vcをどのように設計するかという課題があった。

3) 60tCC建設場所および製鋼・精錬工場との接続

60t製鋼工場の溶解・精錬設備は、南側が鋼塊鑄込み場、北側が鋼塊の徐冷場、さらに建屋東側は当社敷地外となり、西側はダスト処理場および道路が位置し、スペース的に非常に厳しい状況にあった。その中で、溶解・精錬設備の西側しか60tCCの建設地の可能性が残されておらず、その限られたスペースの中に如何に物流を効率よく行ない、スムーズな操業を行えるように建設するのが課題であった。

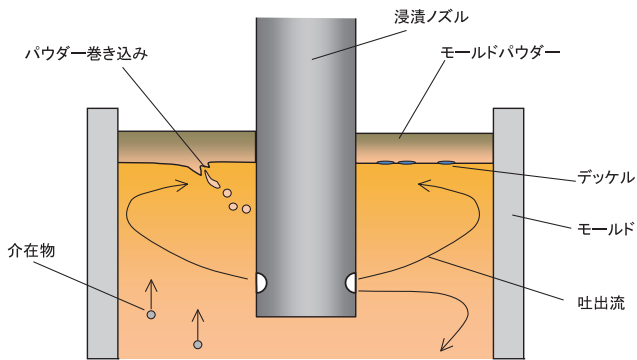


図4 モールド内の溶鋼の流れと諸現象

3.2 基本構想

1) 60tCC鑄片サイズの決定

図3に示したとおり、150tCCと同じVc範囲での操業を考えると、1strでは鑄片サイズを相当に大きくする必要があり、2strでは鑄片サイズを少し小さくする方向となる。しかし、60tCCの鑄片サイズについては、以下の5点の理由によって、150tCCと同一の380mm×530mmとすることをまず最初に決定した。

- ①150tCCにて長期間実績があり、鑄片サイズに起因する品質的な問題の心配が全く無いこと。
- ②150tCCのノウハウと経験を容易に反映できること。
- ③同一鑄片サイズであれば、60tCC用にVc領域を拡大する技術開発は容易であると考えられたこと。
- ④次工程である圧延/鍛造工場の生産メリットが最大になること。

⑤150tCC鑄片との品質互換性が生じること。

2) 型式の選定とstr数

連鑄機の型式とstr数については、「大湾曲型-1str」と「完全垂直型-1str or 2str」に絞り込まれた。大湾曲型の2strを排除したのは、Vcから想定される温度域での曲げ戻し矯正に伴う品質上の問題を排除できないと考えたからである。大湾曲型は図2で述べたように介在物浮上分離の面で完全垂直型に劣るが、擬似垂直部を大きくすることでその影響を最小化することができるので有力であった。しかし、150tCC導入から30年を経てなお、完全垂直型CCの「清浄度優位性」、「表面品質優位性」や多品種対応性等のフレキシビリティの観点から、また、ニューマチックケーソン工法（4-1にて述べる）を採用すれば、比較的安価に垂直型の土木建設が可能であると判明したことから、最終的には150tCCと同じ完全垂直型を選定した。

最後にstr数については、表3に示すような第一製鋼工場の製鋼能力の改善と低速鑄造領域を拡大するための技術開発（例：取鋼内溶鋼の保温性改善、タンディッシュ内溶鋼温度低下の防止等）の目処をつけ、さらには上方弾力性をも考慮して2strとすることに決定した。

表3 第一製鋼工場の生産性改善

設備	改良項目
EF	コヒーレントバーナー設置
	カーボンインジェクション増設
	電極アーム更新(電極ピッチサークル縮小化)
	マスト昇降装置改造(速度アップ)
	EF受鋼台車改造更新
	出鋼脱酸材添加装置設置
	リフティングマグネット容量アップ
LF	直引集塵機増強(バーナー対応)
LF	操作機能増強
RH	受鋼台車更新(速度アップ)

3) 立地および鑄床の改造

立地については、現有の溶解・精錬設備の西側に位置するダスト処理場を移設し、道路部分を北側に大きく迂回させることで必要な面積を確保した。製鋼工場との接続は、レイアウト上およびクレーンの取り合い上、IC造塊時の鑄込場にCC行き取鋼搬送台車を設置する必要があった。そこでCC台車設置と造塊作業を両立させる設計を工夫した。すなわち、造塊フロアの一部を可動デッキとすることにより、造塊時はフラットなフロアとして使用し、CC時にはフロアの一部を折りたたむことにより取鋼搬送台車が進入できるように改造を行なった。図5に造塊時とCC時の鑄込場フロアの写真を示す。折りたたみ式の機力による可動デッキと旋回安全柵および種々の安全装置を具備し、造塊

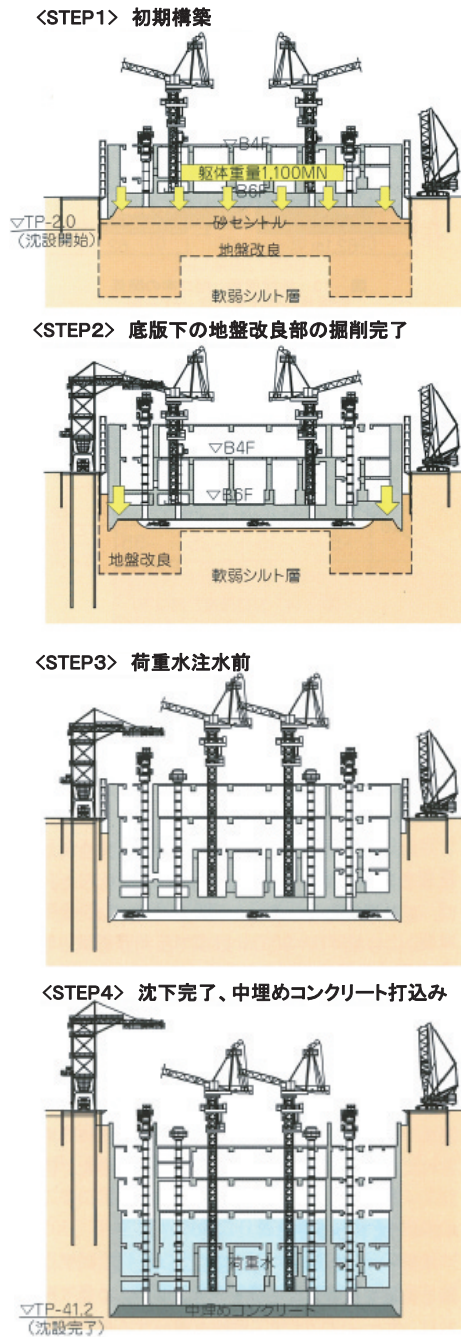


図7 ケーソン沈設の概要



図8 地下作業室内での掘削状況

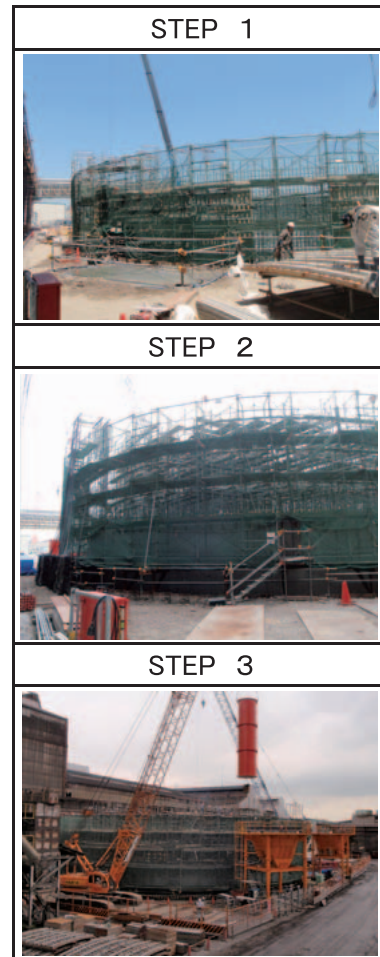


図9 ケーソン施工状況

5. 60t連鋳設備の概要

5.1 60tCCの設備仕様

表5に60tCCの主な設備仕様を150tCCと比較して示す。先に述べたようにタンディッシュ（以下TD）容量およびストランド数を除き、基本仕様は実績がある150tCCと同一とした。さらに、30年にわたって150tCCで培ってきた操業技術やノウハウ、設備改善および技術の進歩を取り入れ、さらに環境への配慮を行って設計した。また、三次冷却設備については、操業開始時点として技術的に必要が無いことを確認して設置を見送ったが、将来設置する可能性が見込まれるため、その設置スペースや設置に伴う水処理への対応が可能となるように配慮して設計した。

5.2 60tCCの特徴⁷⁾

1) 誘導加熱方式タンディッシュヒーター（以下TDIH）

60tCCでは、前述の通り低速鋳造領域を拡大するための技術開発（例：取鍋内溶鋼の保温、TD内溶鋼温度低下の防止等）を行ない、鋳片品質を150tCCと同等以上とすることに目処をつけたが、より鋳造温度を安定させ、鋳片品

表5 60tCCの主な設備仕様 (150tCC比較)

	60tCC	150tCC
稼動年月日	H24.6.1	S57.11.1
メーカー	神戸製鋼所	
型式	完全垂直型	
機長	25.3m (メンスカス～ピンチロール上段)	
ヒートサイズ	90t	165t
TD容量	10t	20t
ストランド数	2	3
鋳片サイズ	380×530mm	
鋳型振動	4mm (±2mm)	
電磁攪拌	モールド内 EMS	
鋳造速度	max 0.60m/min	
湯面レベル制御方式	渦流式レベルセンサー	
二次冷却方式	ミスト	
三次冷却方式	—	水スプレー



図11 鋳造中のスウィングタワー

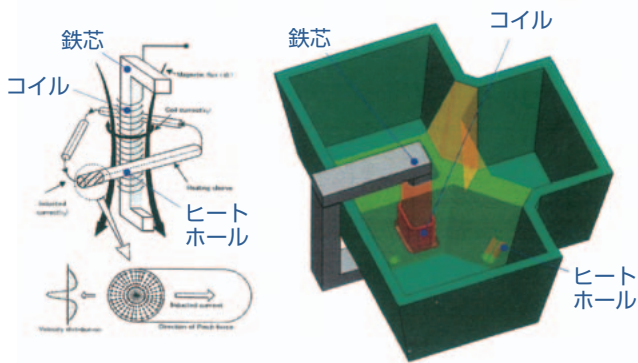


図10 誘導加熱方式タンディッシュヒーターの原理図



図12 全電動TDカー

質および操業の安定化を図るためTDIHを採用した。

TDヒーターは大別すると、プラズマ加熱方式と誘導加熱方式の2つがあり、誘導加熱方式の中には、TDの外から加熱するTD容器加熱式とスリーブ加熱式がある。当社では、TD内での溶鋼汚染の可能性を極力排除することを考慮し、スリーブ加熱式の誘導加熱方式を採用した。図10にTDIHの原理図を示す。鉄芯 (Iron Core) にコイル (Coil) を巻き、交流電流を印加することにより、加熱孔 (Heating Hole) を通過する溶鋼に誘導電流が発生し、ジュール熱で加熱を行なうものであり、溶鋼温度のコントロールが比較的容易であるという特長を持っている。

2) 小回転半径スウィングタワー (以下 S/T)

図11に鋳造中のS/T全景を示す。回転半径を小さくし、TD上に昇降フレームが張り出さないため、TD上での作業スペースが大きく、作業性の改善が図られた。また、S/Tの側面にはTD注入孔近傍からの発煙・発塵を吸収する集塵口を設け、作業環境の向上を図っている。

3) 全電動TDカー

図12にTDカーを示す。走行および昇降動作を電動としたことにより、位置制御および停止精度が向上し、品質および操業の安定性向上が図られた。また、モールドパウダー自動散布装置をTDカーに搭載し、鋳込み作業側のスペースを大きくとり作業性を向上させたほか、モールド外へ散逸したモールドパウダーを吸引するためのダクトを搭載し、作業環境の改善を図った。

4) 完全垂直鋳型振動装置

図13に鋳型振動装置の模式図を示す。

鋳型振動装置はモールドパウダーの均一流入 (結果として鋳片表面性状の向上、鋳造安定性に寄与)、およびメンスカスでの湯面レベルの安定化に重要な役割を果たしている。そのために求められる特性として、横振れや振動波形に乱れが無いことが挙げられる。60tCCでは、4枚の接続プレートで振動テーブルを支持し、偏芯軸の上下運動成分のみ鋳型に伝達する構造を採用し、揺動支点を廃止することにより高精度の振動を実現した。

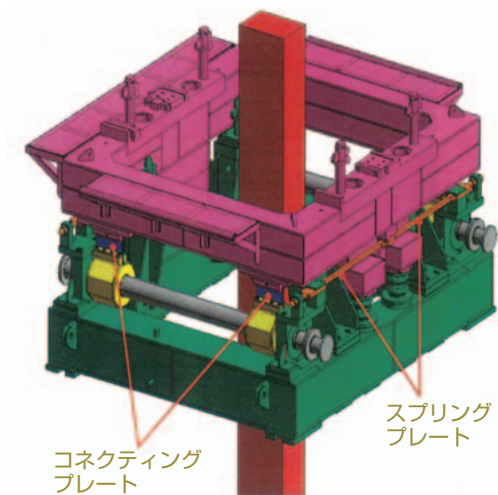


図13 鑄型振動装置模式図

5) 稠密ピッチロールセクションおよびミスト冷却

鑄造中の鑄片は、ガスカッターで切断されるまでの間に徐々に凝固が進む。凝固が完了するまでは鑄片内部には未凝固部が存在し、未凝固部にかかる溶鋼の静水圧と凝固シェルとの強度の関係で、鑄片が膨らむ現象（バルジング）が発生する。バルジングが大きくなるとサポートロールあるいはピンチロールを通過する際にバルジング部が押えられ、鑄片内部に歪が生じ、いわゆる内部割れが発生することがある。60tCCでは、150tCCの鑄片拡幅時に取り入れた稠密ピッチロールセクションを採用してバルジング歪を低減するとともに、二次冷却帯での均一緩冷却ミストノズルの採用とあわせ、バルジング量の適正制御による内部品質の向上・安定化を図っている。

6) ドライブロールの完全独立駆動

連鑄機のドライブロールの駆動は従来1台の電動機で複数のロールを駆動するコモン駆動方式が一般的であったが、この方式は各ロールの径差に起因する周速差による鑄片-ロール間のスリップ現象が発生し、メニスカスの溶鋼湯面レベルの安定性、鑄片品質に影響する恐れがあった。そこで、60tCCでは、全ドライブロールを独立駆動方式とし、電動機（VVVF制御）で負荷バランスを制御することにより、スリップ現象発生の可能性を全廃し、より安定した湯面レベル安定性を実現している。

7) 広速度域対応軽圧下システム

鑄片の内部品質を改善するため、鑄片の圧下が広く採用されている。60tCCにおいては低速鑄造領域を拡大するための技術開発を行ない、低速から中高速にいたる幅広い速度域での操業を可能としたが、それに対応する圧下技術の構築が必要となった。適正圧下位置は、鑄造速度が大きくなるに従い下方にシフトし、鑄造速度の変動可能幅が大き

くなるとその分だけ圧下帯の長さも大きくとる必要がある。

しかし、単に圧下帯の長さを大きくとるのみでは適正圧下位置以外でも圧下することになり、ピンチロールへの負荷増大、油圧装置への負荷増大、鑄片表面品質の悪化等の問題が発生する。このため、60tCCでは圧下帯に複数のロールを配置し圧下帯長さを大きくするとともに、使用する圧下ロールを操業中でも任意に選択・変更でき、圧下幅も変更することが可能なシステムとした。これにより、幅広い速度域で、鑄片内部品質を最適とする圧下操業を構築することが可能となった。当圧下システムを使用して鑄造した鑄片内部性状については6章で紹介する。

8) 各種集塵装置

60tCCでは、前述のスウィングタワーやTDカーに搭載した局所集塵ダクトの他、業界でも稀なCC建屋集塵機を設置するとともに、湿式ガスカッター集塵装置、TD整備場集塵装置等の各種集塵装置を設置して環境への最大限の配慮を行った。

6. 操業と品質

6.1 立ち上げ状況

60tCCは平成24年6月1日にホットラン、同6月中に7,788tの生産を行い、順調に完全垂直立上げを達成できた。

図14に60tCCの鑄造トレンドチャート例を示す。8連々を通して溶鋼湯面レベル、スライディングノズル（SN）開度ともに安定し、また、鑄造温度も安定的に制御できた。

6.2 品質確認結果

1) 鋼片マクロ組織

図15に60tCCで製造した鑄片の鋼片圧延材（φ167）の断面マクロ写真を示す。いずれの鋼種においても良好なマクロ組織となっており、良好な製品が製造されていることが確認された。また、事前検討により確立した種々の対策の妥当性も実証された。

2) 鋼片表面疵および中心欠陥

表6に鋼片表面疵評価結果を150tCC材と併記して示す。鋼片表面疵レベルは150tCC材と同等であり、全断面超音波探傷においても中心欠陥は確認されなかった。

表6 鋼片表面疵および中心欠陥評価結果

指 標	表面疵	中心欠陥
	鋼片実疵取率 (150tCC材を100とした指数)	UT不良率 (%)
60tCC材	99.4	0
150tCC材	100.0	0

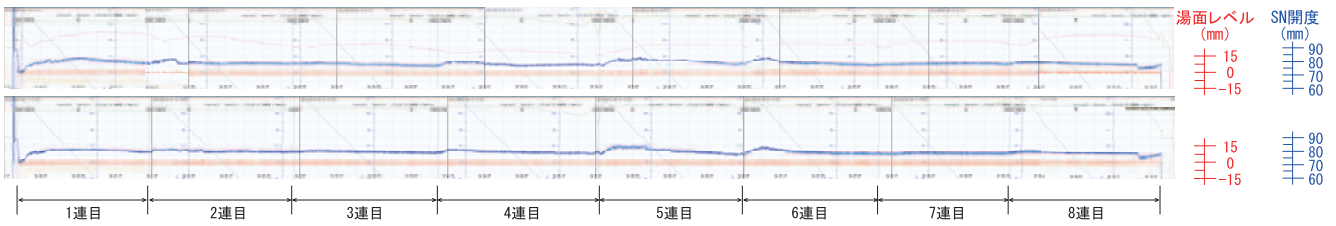


図14 鑄造トレンドチャート例 (鋼種 : SCM415×8チャージ、平均Vc : 0.40m/min)

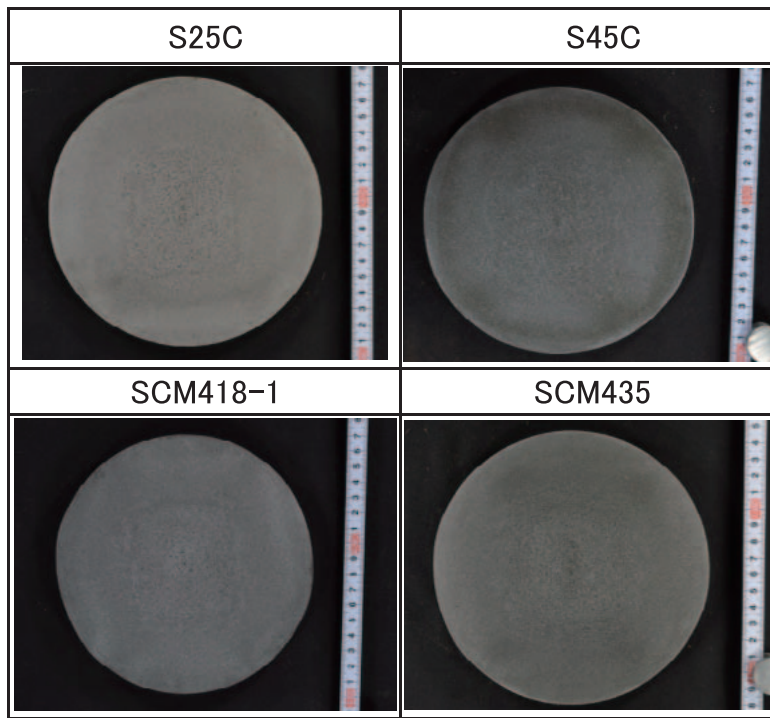


図15 鋼片マクロ組織例

7. むすび

150tCCで培った技術と経験をベースに建設した60tCCは、当初の計画通りの建設、ホットランを経て、初鑄造から出荷可能なレベルの高品質を示し、順調に生産を続けている。新60tCC工程のユーザーの品質認証もほぼ終了し、生産工程として確立したものとなった。

今回の約30年振りの製鋼への大きな設備投資は、立上げ前後の諸課題に数多くの人々が携わり、その解決に向けた活動を通して人材の育成面でも大きなインパクトがあった。今後、本CCマシンの生産拡大、操業技術の開発過程や社の発展に伴って、さらに多くの人材が育つてゆくものと確信している。

参考文献

- 1) 上杉年一：鉄と鋼, 71 (1985) , 1631.
- 2) 上杉年一：鉄と鋼, 74 (1988) , 1889.
- 3) 西森博, 増田孜, 川上潔, 古村恭三郎, 橋爪一弘：日本金属学会報, 32 (1993) ,141.
- 4) 例えば、H.Tanaka, R.Tsujino, A.Imamura, R. Nishihara, J.Kohishi：ISIJ Int., 34 (1994) , No.6, 498-506.
- 5) 例えば、吉田仁、井口学編：鑄型内容鋼流動と介在物の動的挙動, 日本鉄鋼協会, (2002) , 153, 155-239.
- 6) 清水建設：土木クォーターリー, 172 (2011) , 2.
- 7) 川上潔、玉城雅勝、北出真一、広常真也：山陽特殊製鋼 60T連続鑄造設備建設本部内部資料, (2010) .