

連携記事

SMS group 薄スラブ連铸・圧延技術 における最新の開発

SMS group's Latest Development in Its Thin Slab Technology

SMS group GmbH
Flat Rolling Plants Division CSP
Head of Technical Sales CSP

Cosimo Cecere

SMS group GmbH
Flat Rolling Plants Division CSP
Head of CSP Technology

Karl Hoen

SMS group GmbH
Flat Rolling Plants Division CSP
Project Manager Technical Sales CSP

Gökhan Erarslan

SMS group GmbH
Flat Rolling Plants Division CSP
Project Manager Technical Sales CSP

Georg Padberg

SMS group GmbH
Flat Rolling Plants Division CSP
Manager CSP Technology

Michael Pander

SMS group GmbH
Flat Rolling Plants Division CSP
Manager CSP Technology

Björn Kintscher

SMS group GmbH
Flat Rolling Plants Division CSP
Manager CSP Technology

Luc Neumann

SMS group (株)
エンジニア/セールスサポート

妹尾直彦 (訳)
Naohiko Senoo

1 はじめに

近年、鉄鋼市場と鉄鋼業界は、過剰な生産能力や高級鋼・難製造寸法材料への需要増、さらに環境意識の高まりによる法規制強化などにより著しく変化している。このような状況下で成果をあげるためには、鉄鋼メーカーおよび設備メーカーは、効率的に、かつ高い柔軟性をもって、迅速に顧客要求に対応する必要がある。SMS groupは、競争力を確保するには革新的な技術が不可欠であると考え、全工程に亘り利用できる全ての技術を活用しCSP® NEXUSの開発に取り組んだ。

当社の新しいCSP® プロセスである本技術は、铸造と圧延を組み合わせたプラントであり、高度な顧客要求に対応することができる。本技術は铸造における高い生産性のみならず、熱間圧延の最新の開発技術を最大限に活かしたことで、バッチ操業とエンドレス操業が切替え可能になったという利点を備えている。これにより、他の薄スラブ連铸・圧延プラントと比較して、鋼種・寸法の点で製造可能な製品範囲が広

い、高い生産性・効率とともに操業柔軟性・製品品質・収益性についても、従来のCSP® に比べ新たな水準に達するものになろうとしている。

本論文では、本プラントの構成と使用される技術およびこれに付加可能な技術機能について、紹介する。さらに米国Steel Dynamics (SDI) 社から発注された、生産量2.7百万ton/年の本プラントの概要についても説明する。

2 本プラントの構成

CSP® NEXUSを含む当社の薄スラブ連铸・圧延技術では、高い生産性と、均一な温度分布により確保される最高水準の製品品質とともに、競争力のある操業コストを同時に実現することができる。

本プラントは、垂直曲げ型連铸機の下流に粗ミルと仕上げミルを持つ熱間圧延機が続く構成となっている(図1) 連铸機は、スラブ厚範囲100~130 mm (モールド変更により



図1 バッチ・エンドレス操業のためのCSP® NEXUSプラントレイアウト

最大150 mm) で生産可能であり、スラブ厚100 mmまたは110 mmで、6 m/min以上の铸造速度での操業が可能である。連铸機下流には、スラブ温度を適切な水準まで上昇させ、温度分布をスラブ幅・厚・長さ方向に均一化させる第一トンネル炉を配置し、その後に熱間圧延機が続く。この設備構成とすることで、特に微細合金鋼および超高張力鋼のスラブエッジ部での温度低下による圧延中のエッジ割れが回避される。

最初の圧延は、2スタンド非リバース式粗圧延機で行なわれる。オプションとして、これらのスタンドにエッジャーを装備して、生産性をさらに高めることも可能である。圧延機は、TMCP圧延に対応するため、粗圧延と仕上げ圧延を異なる温度と速度で完全に独立して操業できる設計としている。粗ミルと仕上げミルの間には第二トンネル炉を設置し、シートバー全体に亘って温度分布が均一となるようにする。これにより、仕上げミルでも非常に安定した操業が保証される。仕上げミルは、6スタンドで構成される。対象となる製品構成と必要板寸法によっては、7スタンドとすることも可能である。圧延機下流には、最新式の冷却帯と高性能ダウンコイラーが続く。

本プラントでは、その設備構成と制御システムにより、バッチ操業とエンドレス操業の切替えが可能である。セミエンドレスモードでの操業には適しておらず、その用法に対応するようには設計されていない。エンドレス操業では、材料が連铸機からダウンコイラーまでひと続きに繋がった状態で操業され、コイルは設定重量に応じて、ダウンコイラー前のフライングシャーにて分割される。エンドレス操業は、連铸機で十分なマスフローを確保できる、高速铸造可能な鋼種に限られる。そこで、エンドレス操業とバッチ操業の中間に位置する操業モードとして、いわゆるショートエンドレス操業を使用する。このモードでは、連铸機と粗ミル間ではエンドレス操業を行なうが、粗ミル出側で設定コイル重量に応じてシートバーを切断し、仕上げミルではバッチ操業を行なう。ショートエンドレス操業では、仕上げミル入側での先尾端クロップカットが不要になり、最終圧延温度を柔軟に調整でき

る独立仕上げ圧延が可能になる。本技術では、生産を中断することなく自由に操業モードを切替えることが可能であるため、エンドレス操業のみの場合に発生するような制約は無く、ほぼ全範囲に亘る高品質鋼種の生産が可能となる。

3 本プラントの連铸機

3.1 高い生産性を実現する設計

本技術の連铸機は、垂直非凝固曲げ式 (VLB) の垂直部、曲げ半径5 mの湾曲部、そして水平部で構成される (図2)。油圧によりセグメント圧下を行なう溶鋼コア圧下 (LCR) 法により、スラブ厚は100~130 mmの範囲で調整可能である。

そして連铸機の高い生産性を確保するためには、モールドレベルや溶鋼流動を安定させることと、パルジングを抑制することが重要である。

3.1.1 モールドレベルと溶鋼流動の安定化

モールドレベルの安定化には、モールド以外の設計も大きく影響する。高速铸造速度約7 m/minで稼働する既存のCSP® 連铸機でモールドレベルを安定させた経験に基づき、オシレーション装置や第一・第二セグメント、EMBR (電磁ブレーキ) は、それぞれ完全に独立した基礎の上に配置される。

さらに、モールド内の溶鋼流動速度を一定の範囲内に保つことも重要である。そのため、SEN (浸漬ノズル)、モールド、EMBR設計に当たっては特に留意した。そして当社の現場経験およびモールド内溶鋼流動挙動の数値解析物理モデルを用いた研究結果に基づいて、本技術の連铸機のために新しいSENを開発した (図3)。このSENでは、各操業条件において均整で安定した流れが得られることが確認された。通常、

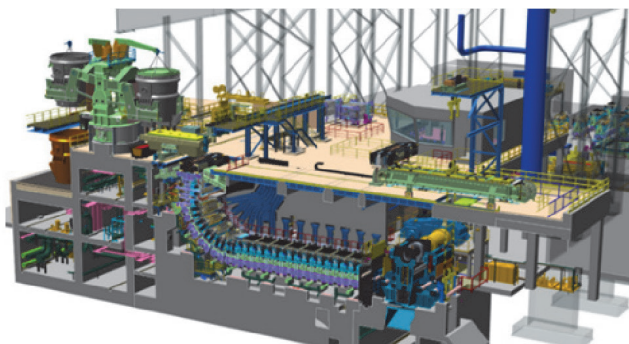


図2 新しいCSP® NEXUS連铸機のレイアウト

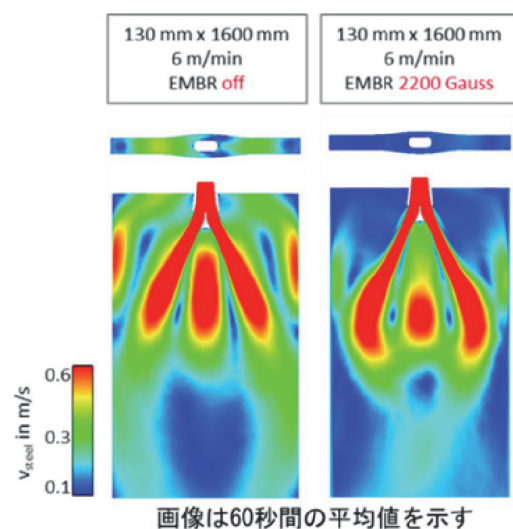


図3 SEN (浸漬ノズル) とEMBR (電磁ブレーキ) の性能を示す鋼流挙動

モールド厚みを増せば、それだけでモールド内溶鋼流動は減少する。しかし、高い生産性で操業する際には、モールド厚みを増しても、モールド内で溶鋼流速の不均一が発生しやすい。そのため、高い生産性と、望ましい溶鋼流動を両立させるためにはEMBRを用いて直接的に流動を制御することが必須である(図3)。EMBRには、コイル、コア、およびヨークが連铸機支持構造に収まり、モールド交換時に干渉しないように引き込み構造が採用されている。

3.1.2 バルジングの最小化

バルジングを最小化するために、ローラーピッチを狭めたり不規則にしたり、スラブパスラインに位置する軸受け箱幅を極めて小さくした上で互い違いに配置したりすることで、バルジング現象を回避しストランド幅方向の歪みを低減できるよう工夫している。矯正セグメントに至るまで、非駆動ロールには貫通軸を持つアクスルローラーを採用することで、ローラーピッチを狭めることができ、ストランドシェルを確実に支持する。湾曲部の駆動ロール及び矯正セグメント以降の全セグメントローラーには、極めて狭い軸受け箱幅と極小ローラー径を特徴とする特許取得済みSTEC-Roll®を使用する。ローラー胴部は機械的に相互に連結され、狭いスラブ幅でも全ローラー胴部が安全に回転する構造となっている。セグメント3以降の全ローラーには、内部冷却機構を備えている(図4)。

3.2 製品範囲の拡大

薄スラブ技術導入黎明期における技術的ブレークスルーは、SMS groupが50 mmスラブの鑄造に成功したことであった。そしてこれを可能にした中心技術は、漏斗形モールドであった。しかしながら漏斗形モールドは、特に包晶鋼のような割れを生じやすい鋼種を鑄造する場合には、縦・横方向に窪みや亀裂が発生し、表面品質が低下しやすいという問題点がある。さらに、不均一凝固性ブレイクアウトを発生さ

せてしまうリスクが高いという問題点もある。

そこで、本連铸機では、スラブ厚100~130 mm操業に適した漏斗形モールドの他に、モールド厚み150 mmの平行モールドを用意している。このモールドを使用することで、ストランドシェル内の引張応力が低減し、割れの減少、表面品質の向上が期待出来る。さらに、割れを生じやすい鋼種で求められる2 m/min未満の低鑄造速度でも、後続のトンネル炉で十分に加熱・均熱されるのに十分な鑄造出側スラブ温度を達成出来る。

平行モールドを使用しスラブ厚を増すことのもう一つのメリットとして、SENの設計余地を広げ、鑄造中のSENの交換も可能になることが挙げられる。これによりSEN交換のためのライン停止が不要となり、生産性の向上も期待出来る。

4 CSP® NEXUSのトンネル炉と熱延ミル

4.1 合理的な選択としてのガス燃焼トンネル炉

本プラントでは、連铸機出側に第一炉、粗ミル出側に第二炉を有し、それらの炉を介してスラブを熱間圧延機に直接高温装入出来る。これが、従来の熱間圧延機と比較してエネルギー消費を削減出来る主な理由である。同時に、トンネル炉はスラブの幅・厚・長さ方向に温度分布を均一化させる役割を果たす。これにより、圧延性が改善され、特に炭素当量が高い微細合金鋼および超高張力鋼のエッジ部での温度低下による割れを防止する。

既に述べたように、粗ミルと仕上げミルの間に設置される第二炉は、次のような機能を果たす。

- 粗ミルと仕上げミルの独立操業を可能にする
- シートバー温度分布の均一化
- シートバー温度を、エンドレス操業を実行するのに十分な水準に上げる

特にTMCP圧延の際、粗ミルと仕上げミルの独立操業を可能にするためには、炉をセグメント式に設計する必要がある。セグメント化することでその一部をライン外に移動し、ローラーテーブルに置き換えることが可能となる。それにより、シートバーは大気中で、仕上げミルでの非再結晶圧延に必要な温度まで冷却される。一般に第二炉は、板厚・幅・プロフィール・平坦度の点で厳しい公差が求められる仕上げ圧延のために、適した圧延条件を作り出す役割を果たす。これにより、バッチ・ショートエンドレス操業における仕上げ圧延プロセスが安定化され、定常的に最小板厚1.0 mmの製品生産が可能になる。

さらに、SMS groupトンネル炉は、エネルギー消費が最小に抑えられるように設計されている。また、環境に配慮した

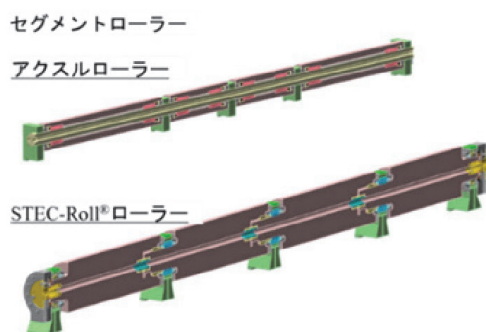


図4 アクスルローラーとSTEC-Roll®ローラー

超低NOxバーナーを装備しており、Big River Steel社の炉（図5）では、測定平均NOx排出量85 mg/Nm³を誇っている。

スラブおよびシートバーは、特殊な断熱材を備えた水冷ローラーにて炉内搬送される。これらのローラーは、従来型断熱ローラーに比べ、エネルギー損失を30%以上削減できる。

加熱および均熱の役割に加え、両炉とも、圧延ロール交換時のバッファーとしての役割も果たす。

CO₂排出削減の観点から、ガス燃焼炉の代わりに誘導加熱装置（IH）を使用することも可能である。IHは、ガス燃焼炉に追加して炉入出側に配置するか、もしくはガス燃焼炉と置き換える形で使用可能である。ガス燃焼炉に加えてIHを使用する理由は多種多様であるが、次に例を示す。

- 炉内滞留時間が確保出来ない場合にも、スラブ内温度分布を均一化するため
- 全体炉長を短縮するため

ガス燃焼炉に比べIHシステムは、必要なときに簡単に運転でき、かつエネルギー効率が高いという特長を持つ。しかし、再生可能資源から生み出されない限り、トータルで見ると、電気は天然ガスよりもCO₂負荷が大きい。さらに、同じエネルギーを得ようとした際、天然ガスは、電力よりも安価に手に入る。これらのことから、経済的・環境的には、ガス燃焼炉の方がIHよりも合理的である場合もある。

4.2 高い製品品質を実現する設計

高品質な製品を製造するため、本技術の圧延機には様々な技術を採用している。以下に、例を挙げる。

- 材料を圧延機に直接供給するための先進的ガイドシステム。これにより、手動介入を減少させ、プロセス安定性および巻取り品質が向上する
- 高度なダイナミック板厚制御と圧延温度制御
- CVC[®] plus: 高度なロール形状とロールシフトによる、優れたプロファイル・平坦度制御システム
- 製品の微細結晶構造を考慮に入れ、特性を確保する最



図5 Big River Steelの新しいトンネル炉

新の板冷却技術

良好な板面品質を確保するための熱間圧延機における重要な機能は、スケール除去と圧延にある。

本プラントでは、スケール除去に対するアプローチは連鑄機から既に始まっており、ライン全体でスケール成長が最適となるよう考慮している。その中で連鑄機の後面には、スラブ表面からスケールおよび鑄造補助剤を除去するための低压スラブリナー、およびスラブ表面調節装置を配置している。スラブリナーにより、炉加熱帯での熱伝達が改善され、また鑄造補助剤と炉断熱材の反応による断熱材劣化を軽減させる。スラブ表面調節装置は、スラブ表面を平坦化する強力なピンチロールユニットである。トンネル炉内ロールによりスケールがスラブ表面へ埋め込まれスケール除去が難しくならないよう、考慮している。さらに、炉雰囲気中の酸素量は製造材料に応じて適宜調整し、除去しやすいスケールを形成させる。

高压デスケラーは、粗・仕上げミル前にそれぞれ設置する。これらには、2組のスプレーヘッダーを備えた従来のデスケラーか、SMS Piroscale[®]システムのいずれかを採用する。図6に示すシステムでは、ノズルを回転させることでスプレーエネルギー分布を均等化し、スケール除去性能を改善させる。同時に、水消費量が従来の半分に抑えられ、デスケラーのエネルギー効率を向上させる。仕上げミル直前に設置すれば、特に低速でも高い材料温度を維持したいエンドレス操業時に効果を発揮する。

デスケラーと圧延スタンドの間には、いわゆるX-Roll[®]ウォーターシールドを設置する。これにより、材料表面に水膜を形成させ、スケール成長と温度損失を最小限に抑える。

板面品質は、圧延においてはアンチピーリング装置（材料表面とワークロール表面間の温度差に起因する熱衝撃でワークロール表面が剥離するのを防止する装置）、熱間潤滑、およびワークロール冷却（次項の対流ワークロール冷却参照）の組み合わせにより保証する。ワークロール冷却とアンチピー

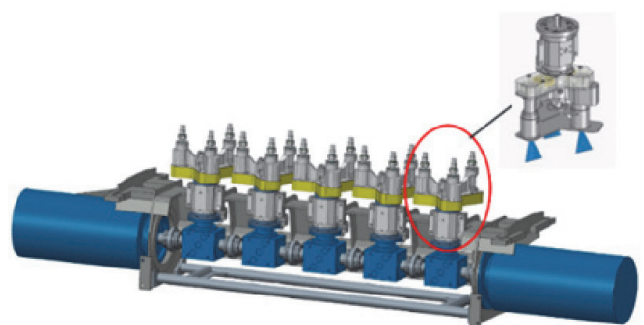


図6 Piroscale[®]の下部配置

リング装置により確実にワークロール表面が良好な状態となるようにし、潤滑により圧延中の摩擦係数を制御する。これらにより、板面品質改善、ワークロール寿命延長、圧延エネルギー効率向上といった効果が得られる。

これらの技術を活用することで、本プラントでは、寸法や成分の許容公差が厳格で、製造が難しい高品質鋼種のほぼ全てを、安価に生産可能となる。

4.3 効率的で経済的な操業

本プラントにおける省エネ操業の例として、対流ワークロール冷却・最終スタンド出側直接コンパクト冷却が挙げられる。

4.3.1 対流ワークロール冷却

従来のワークロール冷却システムはスプレー冷却であり、SMS熱延ミルにおける標準的なスプレー冷却では、ポンプ最大圧力1.2MPa、圧延スタンド当たり水量約10,000 l/minである。他社では、最大1.5MPaかそれ以上のポンプ圧力を使用しているところもある。しかし、ノズルで圧力1.0MPaを超えるほど水压を上げて、冷却効果は僅かしか増加しない。

そこで、強制対流の原理に基づく新たな冷却の方法として、図7に示すX-Roll® CRC (対流ロール冷却) を開発した。成形ガイドプレートにより、冷却水の流れが回転ロール表面に直接的に作用する。それにより、熱伝達係数を大幅に増加させ、板面品質とワークロール寿命をさらに改善することが出来る。

ポンプ圧力0.2 MPaで、インジェクターノズル水压は0.08～0.15 MPaの範囲で動作する。これにより、ポンプに掛かる電力が大幅に削減され、運転コストが低減される。実際に、当社の開発した対流ロール冷却は、従来のワークロール冷却と比較して、ワークロール冷却に掛かる年間エネルギーコストを最大90%削減する。

それに加え、本装置はその巧みな設計によりほぼ磨耗がなく、耐久性に優れていることが証明されている(図8)。圧延スタンド内で使用される水量はごく少量で済むうえ、圧延ス

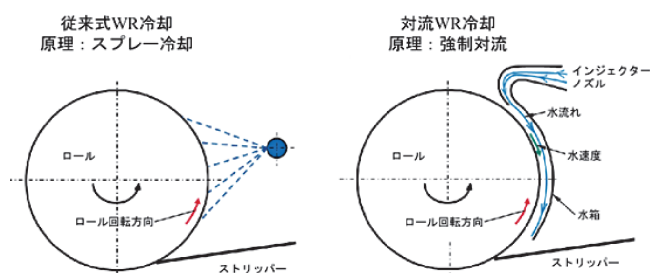


図7 従来のスプレーロール冷却(左)と対流ロール冷却(右)の原理の比較

タンドからの冷却水が板上に落ちないように配慮されている。結果として、圧延板に掛かる水量を抑えて板温低下を防ぐことが出来るので、エンドレスモード操業時に特に有用に働く。

4.3.2 直接コンパクト冷却

板冷却は、高張力鋼を低コストで製造する上で重要な工程である。冷却速度を高めることで製品の機械的特性を担保するだけでなく、例えばHSLA、API、C-Mn中炭素鋼といった鋼種において、合金添加量低減によるコスト削減を可能にする。

そこで、必要な冷却速度を達成し低コスト製造を可能にするため、標準的な冷却帯に加えて、強化ラミナー冷却帯を確立した。これらを使用することで、比水量を最大120 m³/ (m²h)まで調整できる。いわゆるX-Roll® コンパクトクーリングを使用すれば、比水量を増やし、例えば板厚2.5 mmの場合で400 K/sまで冷却速度を上げることができる。この冷却システムでは、ラミナー冷却かスプレー冷却を任意に選択出来る。

また、結晶粒微細化により鋼種の強度をさらに高めるためには、最後段ミルスタンドでの圧延から板冷却までの時間を最短にする必要がある。これは、最後段ミルスタンドのロー

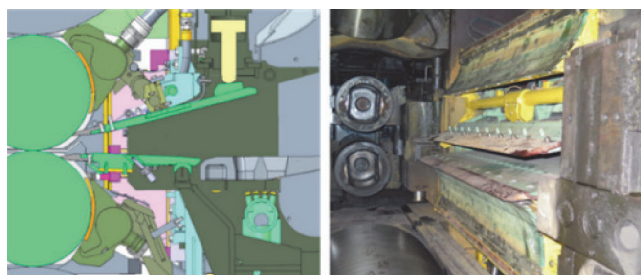


図8 左-作業位置にある当社開発の対流ロール冷却のイラスト
右-ワークロール交換中の当社開発の対流ロール冷却の写真(Salzgitter Stahl社)

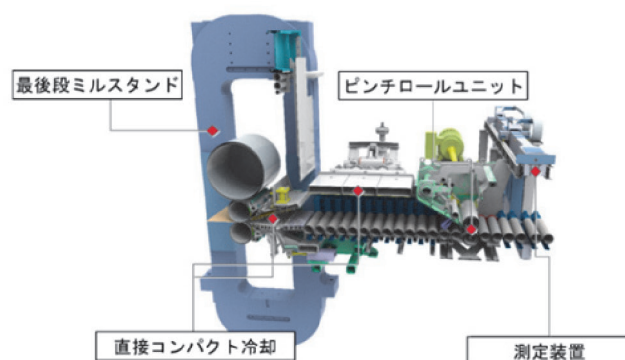


図9 最後段ミルスタンド出側の当社開発の直接コンパクト冷却のレイアウト

ルギャップ近くまで届くコンパクト冷却であるX-Roll® DCC (直接コンパクト冷却) によって実現され従来の板冷却と比較して、結晶粒径を20%以上小さくできる。これにより引張強度は最大75 MPaまで向上する。合金添加量低減の観点で言えば、Nb, V, Ti, Mnなどの合金化元素添加量をtonあたり最大7 USドル分節約できる。製造品種構成によっては、直接コンパクト冷却により年間数百万USドルの節約が期待できるとともに、本プラントの効率と収益性を大幅に向上させる。

5 SDI社向けの本プラント

現在、最初のCSP® NEXUSプラントが米国最大級鉄鋼メーカー兼金属リサイクル業者であるSteel Dynamics Inc. (SDI社) 向けに建設されている。本プラントは、テキサス州シントンにあるSDI社の新しい製鉄所へ導入される。この製鉄所は、製鋼・鑄造・圧延から、亜鉛メッキ・スキンプラスまでの全工程をカバーする。SDI社が新しい製鉄所から製品を供給する米国南西部の市場は、急成長している高強度鋼管およびラインパイプ、自動車産業向け多相鋼、多様な用途向け構造鋼などを扱う。

SDI社とSMS groupの関係は長年にわたるものであり、今回この製鉄所建設の主要パートナーとして、当社は溶解工場、本プラント、酸洗ライン、タンデム冷間ミル、亜鉛メッキライン、およびオフラインスキンプラスミルを供給する。これら全工場に対し、当社はプロセス機器だけでなく、電気自動制御システム、デジタル化製品も供給する。

本製鉄所の試運転は2021年下期を予定している。

溶解工場では、2基のDC電気炉で最大毎時450tonを生産する。精錬は、2基のツインステーション型炉外精錬設備、2基の真空脱ガス装置で行なわれ、高品質の鋼を連鑄機に供給する。本プラントの生産能力は2.7百万ton/年であるが、これには連鑄機の高い生産性が必要となる。SDI社は、本連鑄機で最大140 mm厚のスラブを製造する。最高鑄造速度は6.0 m/minである。

最大板幅は2,134 mmであり、これまでに建設された中でも世界最大幅のCSP®プラントとなる。粗ミルと仕上げミ

ルとを持つ熱間圧延機により、板厚1.2 mmから25.4 mmの熱延板を製造する。ラインパイプ市場で競争力を得るため、SDI社の本プラントは、API X70で最大板厚19 mmの鋼板を生産可能とする。これに対応するため、粗ミル出側にはシートバー冷却装置、ライン出側にはX-Roll® UniPlusコイラーを配置している。ラミナー冷却帯には、強化冷却帯とエッジマスキシステムを備え、圧延板平坦度を向上させる。

本プラントの次には、連続式酸洗-5スタンド6段タンデム冷延ミルが続く。タンデム冷延ミルの公称生産能力は800千ton/年で、最小板厚0.20 mmの冷延板を圧延する。また、亜鉛メッキラインは、熱・冷延板処理に対応する。熱・冷延板を仕上げるためのオフラインスキンプラスミルの生産能力は、400千ton/年である。

最新の電気自動制御システムとは別に、全工場はデジタル化に備えた設計となっている。これには、大量のデータを中央保管し、高速でデータにアクセスするための基本デジタルパッケージや、工場全体を状態監視するSMSスマートアラームシステムが含まれる。さらに将来、データ分析や、操業・品質管理・メンテナンス・サービスの運用・最適化のためのパッケージを追加で導入すれば、SDI社はいつでも工場機能を拡張できる。

6 まとめ

本プラントは、薄スラブ連鑄・圧延技術の分野におけるSMS groupの新たなベンチマークであり、今日著しく変化する市場と増大する環境意識に対応するために開発された。このプラントは、鑄造における高生産性と熱間圧延における最新の開発技術を最大限に活かしており、本論文で主要な特徴について紹介した。

本プラントでは効率的に、バッチ圧延とエンドレス圧延を切り替えることができる。これらの特徴により、環境負荷を低減した上で、高効率かつ高収益な操業、ほぼ全ての高品質鋼種、多様な寸法の製品製造が可能になる。

7 略語解説

CSP : Compact Strip Production

TMCP : Thermo-Mechanical Control Process

VLB : Vertical Liquid Bending

LCR : Liquid Core Reduction

EMBR : Electric Magnetic BRake

SEN : Submerged Entry Nozzle

CRC : Convection Roll Cooling

DCC : Direct Compact Cooling

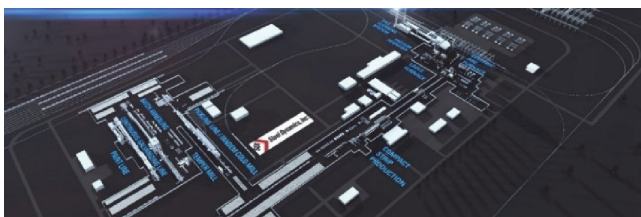


図10 SDI社テキサス州シントン製鉄所 (米国) のイラストレイアウト

参考文献

- 1) Ch.Klein, S.Krämer, J.Müller, Ch.Geerkens and D.Rosenthal : Stahl & Eisen., 129 (2009), 12, S73.
- 2) S.Kraemer, K.Hoen, CH.Klein and D.Rosenthal : International Symposium on "Thin Slab Casting and Direct Rolling. (Wuhan), Metallurgical Industry Press, Beijing, (2018), 70.
- 3) N.Vogl, H-J.Odenthal and M.Reifferscheid : 6th International Congress on Science and Technology of Steelmaking. Metallurgical Industry Press, Beijing, (2015), 399.
- 4) St.Six, O.Hofmann and A.Stavenow : 9th European Continuous Casting Conference. The Austrian Society of Metallurgy and Metals, Vienna : s.n., (2017), 325.
- 5) S.Krämer, W.Fuchs, H.Reichel, Ch.Klein, A.Ante and M.Degner : BHM, Berg-und Hüttenmännische Monatsheft., 153 (2018), 7.
- 6) A.Ante, P.Brücher, J.Kiessling-Romanus, J.Wentzel, L.Piezanowski, D.Dubios and A.Iosif : Chemie Ingenieur Technik., 91 (2019), 10.
- 7) Private communication.
- 8) T.Tomida, N.Imai, K.Miyata, S.Fukushima, M.Yoshida, M.Wakita, M.Etou, T.Sasaki, Y.Haraguchi and Y.Okada : ISIJ Int., 48 (2008), 8, 1148.
- 9) Ch.Hassel, A.Sprock and S.Krämer : AISTech 2016 Proceedings. (Pittsburgh (PA)), Association for Iron & Steel Technology, Warrendale (PA), (2016), 1759.
- 10) Steel Dynamics, Inc. : Sinton, Texas Steel Mill Update, <https://www.steeldynamics.com/SintonUpdate.aspx>, (accessed 2020-05-27)

(2020年4月27日受付)