

適用が広がる薄スラブ連続铸造技術

世界の経済が著しく変化するなかで、市場の変化に柔軟に対応できると注目されているのが薄スラブ連続铸造技術である。薄スラブ連続铸造機を利用したミニミルプロセスはCO₂排出量やエネルギー消費量を大幅に低減でき、この技術を活かして、新たな鋼種の開発に積極的に取り組むことができる。近年、先進国の電炉メーカーや新興国の高炉・電炉メーカーでの適用が広がっている。

世界にインパクトを与えた効率的なプロセス

通常、薄鋼板の製造には、連続铸造と熱間圧延の2つの工程を経る必要がある。まず連続铸造工程で連続铸造機を用いて200 mm以上の厚い鑄型に溶鋼を注ぎ込み、厚いスラブを鑄造し、厚いスラブは一旦スラブヤードに保管される。その後熱間圧延工程で、再度加熱し、粗圧延機で圧延した後、仕上圧延機で圧延して薄くする。これを連続铸造工程で、最初から薄いスラブを作ることができれば、1つのコンパクトな工程で、もっと効率的に製造できるのではないか。このような考えから、1980年代、戦後の鉄鋼産業危機のなかで薄スラブ連続铸造技術は生まれ、世界中で活発な技術開発が行われた。

なかでもいち早く、ドイツのSMS社が画期的な漏斗状の鑄型を開発した。鑄型は上方に向かって広がった形状となっており、浸漬ノズルを最適化し鑄型の広がった部分に溶鋼を注ぐことで困難な溶鋼の供給を可能にし、鑄型下部は薄い長方形とすることで、鑄型内で凝固シェルを变形させて厚さ50 mmの薄スラブの鑄造に成功した。厚さ50 mmの薄いスラブによって、粗圧延機を省略し、仕上圧延機のための圧延が実現した。このプロセスは連続铸造機、トンネル炉、仕上圧延機で構成され、CSP (Compact Strip Production) と呼ばれた (図1)。連続铸造機は操業しやすい垂直部で完全凝固させる垂直曲げ式が採用された。また長いトンネル炉が設けられたことが特徴的で、これによりスラブの加熱および均熱を行い鉄鋼組織の均質化を図る。トンネル炉によって仕上圧延機前のスラブは幅・厚み・長さ方向にほぼ一定の温度分布を

保ち、エッジ部が冷えて起こる圧延中の割れ等を回避している。また圧延機のロール交換時間を確保するバフファの役割も兼ねている。

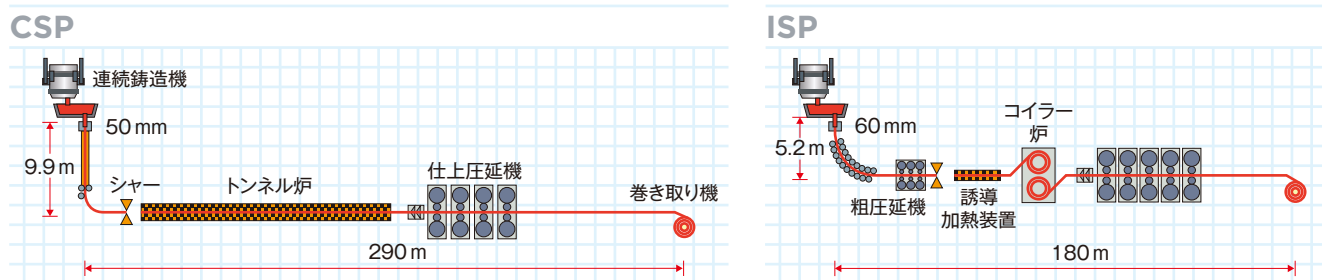
同社は実機での試験を重ねることで、機械やシステムの操業ノウハウを蓄積し、実用化にこぎつけた。1989年には米国Nucor社Crawfordsville工場に世界初の商用1号機が設置された (図2)。当時、米国の電炉メーカーは薄板製造への参入を狙っていたため、設備投資額を抑制することができる薄スラブ連続铸造技術は魅力的であった。薄スラブ連続铸造技術を導入することで汎用鋼材を従来よりはるかに低いコストで生産できるようになり、さらに冷延材の一部を薄熱延鋼板に置き換えることができた。薄スラブ連続铸造技術を導入することで始まった電気炉製鋼による薄板製造は、世界に大きなインパクトを与えた。

1992年には、商用2号機をドイツのMDH社が開発しイタリアのArvedi社に設置された。このプロセスは凝固した薄スラブの全長にわたって、厚みを減ずる未凝固圧下技術を採用したのが特徴的で、連続铸造機、凝固後未切断スラブの圧延、コイラー炉、仕上圧延機で構成され、ISP (Inline Strip Production) と呼ばれた (図1)。ISPで始まった未凝固圧下技術はその後、多くのプロセスに取り入れられるようになった。以降、欧州を中心にさまざまなメーカーによるプロセスが開発されるが、大きくは上記の二つのプロセスが原型となり発展していった。

効率的なプロセスで多くのメリットを発揮

薄スラブ連続铸造技術の導入によって、製造現場には多くのメリット

● 開発初期のころ(1990年前後)のプロセス構成例(図1)



がもたらされる。日本でも1980年代に通常のスラブ厚みで直送圧延技術(Hot Direct Rolling)という技術が新日鉄堺、日本鋼管福山で開発され、スラブは高温(オーステナイト温度域内)のまま次工程に入るため、スラブを圧延温度まで再加熱するための必要エネルギーが抑えられる技術があった。薄スラブ連続は、この技術を応用して、連続機の出側に設置したトンネル炉と呼ばれる加熱炉に直接装入する技術を開発した。通常スラブと違い薄スラブは、スラブ表面においてもオーステナイト温度以上を保ったままトンネル炉に入り、また熱間圧延工程の粗圧延の省略ができるため、エネルギー消費量や製造コストを大幅に低減できる。少ない設備投資で導入できるため、新規参入企業にとっては導入へのハードルが低い。また基本の構成がシンプルであるため製鉄所それぞれの環境にあわせて柔軟に対応することができ、製鉄所の再編や合理化、環境負荷低減を目指したプロセスの移行に役立つ。

このようなメリットを持つ薄スラブ連続製造技術は、主に電炉メーカーを中心に北米から欧州、そしてアジアへと広がり、その後、従来のプロセスに薄スラブ連続製造技術を組み合わせる一貫製鉄メーカーが増えた。近年、中国では、小型・中型の高炉に薄スラブ連続製造技術を組み合わせる例が目立っている。

一方、日本においては高炉をはじめとした既存設備により生産性が高く、品質が優れたスラブを製造できる技術を確立しているため、鉄鋼生産プロセスを再構築する必要はなく、導入はなされていない。しかし最近では、日本からプラントメーカーへの問い合わせ等も増えている。

主に関心が集まっているのは、その品質である。薄スラブ連続製造技術で得られる薄板の品質が従来プロセスのものと同様またはそれを超えるものになるかどうか。高品質な鋼材の安定的な生産が可能であるかどうかが今後の普及拡大の鍵となっている。

薄スラブ連続製造はスラブが薄い分、生産量を確保するため高速製造で行われるが、開発当初は、高速凝固や、スクラップの使用によって混入の可能性がある有害元素の影響によって、凝固中にスラブ表面で高温脆性割れを生じやすくなり、対策を講じる必要があった。またモールドパウダーの巻き込み防止や、鋳型／鋳片間の潤滑不足による操業トラブルであるブレイクアウトの発生防止も求められた。そのため鋳型内の溶鋼流動、湯面変動、熱流束の制御等が行われた。様々な初期

凝固制御技術の進展によって鋳片の割れ問題は克服しつつある。

薄スラブ連続製造技術によって製造された鋼板は、微細な組織を持つことがわかっていく。これは薄スラブ連続製造工程が一般的な連続製造工程とは異なり、溶鋼が薄スラブとしてすばやく凝固するため、厚いスラブに比べて中心偏析が少なく、析出物が細かく分散される結晶粒を有するためである。

また最近では安定した機械特性や高い寸法精度を持つ製品が製造されており、これは圧延工程における材質制御技術の向上によるものである。粗圧延工程を削減できるのが薄スラブ連続製造のメリットであるが、これは、仕上圧延機に入る材料に、長さ・幅全体にわたって均一な温度を保持できるようになったため可能となった。用途に合わせた強度に製造するには、仕上圧延を理想的な温度で行わなければならない。まず目標とする最終板厚に向けて適切なスラブ加熱・均熱条件を設定し、次いで、仕上げ圧延前の温度を制御した上で適切な圧延速度を選択することで、最適な仕上げ温度となり品質の安定した製品が得られる。さらに、冷却帯の冷却パターンと巻き取り温度を、板材料の冶金学的制約に基づいて適切に制御することも重要である。薄スラブ連続製造技術の導入時には、製造される品種は汎用鋼種に限定されていたが、近年、自動車用高強度鋼板、電磁鋼板、パイプライン用鋼、包晶鋼等のより高度な鋼種を製造するための技術開発が進んでいる。薄スラブ連続製造技術による高級鋼の製造は、コストを抑えながらエンドユーザーからの厳しい品質要求に対応できるというメリットがある。

最近では多品種の製造に合わせて、さまざまな設備構成が提案されており、以降に主要メーカーの最新のプロセスについて詳しく説明する。

● 1989年に設置された商用1号機(米国NucorのCrawfordsville工場)(図2)



資料提供：SMS group K.K

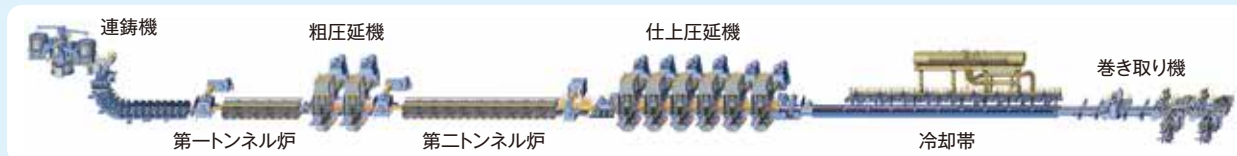
CSPの概要(図3)



2016年12月に稼働した米国BIG RIVER STEEL社の設備では、現在、世界最大となる板幅1,930mmが製造可能となっている。

●最新のプロセスの構成例

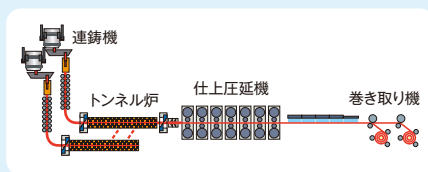
米国Steel Dynamics社に設置予定のプロセス(最大板幅2,134mm、生産量270万t/年)



資料提供：SMS group K.K

●現在多く採用されている設備の構成例

26のプラントで採用されている2ストランドの構成



最新設備ではパイプライン用鋼や高張力鋼などの高級鋼も製造されている。

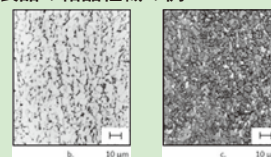
●一貫製鉄メーカー、ThyssenKrupp社による品質の評価

亜鉛めっき鋼板の品質の比較

	CSP 冷間圧延材としての 機能を備えた熱間圧延材	従来プロセス 冷間圧延材
表面品質	++	+
機械特性の均一さ	++	+
厚みの均一性	++	+
厚さの範囲	+	++

※日本語によると、+は○、++は◎の意味。

製品の結晶組織の例



DP鋼

TRIP鋼

高級鋼も高い品質で製造することが可能になっている。

出典：ThyssenKrupp社パンフレットより

CASE 1

バッチ操業とエンドレス操業の切り替えで
より柔軟な操業が可能に

世界初の実用化に成功したSMS社のCSP(図3)は、これまでに30近くのプラントに導入され、世界最多の実績を誇る。近年では、中国や東ヨーロッパ、CIS諸国、インド、米国等で導入が積極的に進められている。

導入された多くのプラントでは、立ち上げ当初は1ストランド(連続 casting機が1機、トンネル炉が1機)で操業開始し、その後2ストランド(二列目の連続 casting機とトンネル炉を増設)とし、圧延機はそのままで生産量約300万t/年まで向上させている。インドで導入されたプラントでは3ストランドで生産量350万t/年となっている。

注目される品質については、例えば既存設備を持ちながらCSPを導入したドイツのThyssenkrupp社は、約20年の操業を経て、従来プロセスと比較して、薄スラブ連続 casting技術によって製造した鋼板は優れた品質を持つことを評価し、また良好な結晶組織を持つことを確認している。

近年では多様な鋼種や寸法に対応できるように、バッチ操業とエンドレス操業の切り替えを可能にするプロセスが開発され、注目を集めている。エンドレス操業のメリットは、材料が連続 casting機から巻き取り機まで連続で操業されるため、特に極薄板製造時に、より効率的で安定した操業が可能となることである。しかしエンドレス操業では、

材料が繋がっているため、 casting速度と圧延速度を同調させて操業する必要があり、バッチ操業に比べて圧延速度が制約される。また必要な仕上温度を達成するために仕上圧延前温度を十分高めるため、粗圧延後に再加熱する必要がある。目標仕上圧延温度を達成する上でバッチ操業では圧延速度により調整され、エンドレス操業では加熱の必要がある。

このような観点に立つと、バッチ操業にも多くの利点がある。 casting速度を上げていく過程での先端部の損失は、エンドレスと比較してほとんど無視できるほど少ない。また、冶金学的理由により casting速度を下げる必要がある鋼種の製造が可能である。圧下率が低く、圧延時に十分な加工発熱を得にくい極厚材料の製造も可能である。加工発熱の不足は、圧延速度によって補われる。バッチ操業により、より柔軟な生産が可能になり、小ロットオーダーへの対応も容易である。このようにエンドレス・バッチ両プロセスには強み・弱みがあるため、両方を実行できるとメリットが大きい。

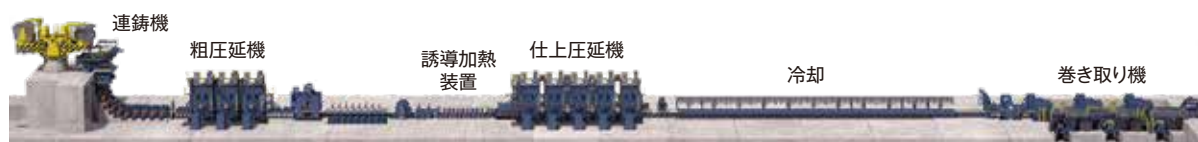
その他、通常CSPのプロセスは全長が少なくとも300m程度を必要とするが、用地が限られているプラント向けに、工程を短縮したプロセスも開発が進行している。また特長であるトンネル炉は品質確保のために重要であるが、ニーズに合わせてトンネル炉の一部または全部を誘導加熱装置に置き換えることで、プロセス全長を短くすることも可能となっている。

Arvedi ESPの概要 (図4)



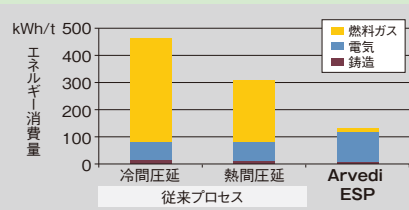
2018年10月、中国の日照鋼鉄において、世界記録となる最終板厚0.6mmの製造を達成している。

●主な設備の構成例



資料提供: Primetals Technologies, Limited

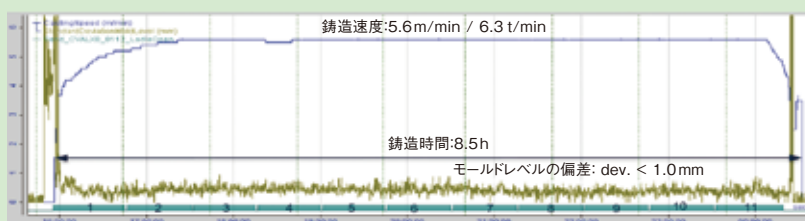
●エネルギー消費量の比較



2018年に達成された最終板厚0.6mmの製造

●低炭素鋼の典型的な生産過程における casting 速度とモールドレベル偏差の記録

8.5時間もの連続操業で、モールドレベルの偏差が1mm以下という安定した casting 条件で、速い casting 速度が維持された。



安定した大量のマスフロー

CASE 2

エンドレス圧延によって
低コストで高効率なプロセスを実現

より効率的で低コストなプロセスとして注目されているのが「Arvedi ESP (Endless Strip Production)」である(図4)。このプロセスはイタリアのAcciaieria Arvedi社が開発し、Primetals Technologies社が設計、製造及び販売を行っている。

新たに開発されたArvedi ESPのプロセスは、完全に一貫したマスフローを特徴としており、工程がコンパクトである。また材料特性の均一性、エネルギー効率の点で大きな効果を発揮する。その主な構成は連続 casting 機、粗圧延機、誘導加熱装置、仕上圧延機となっている。

casting 機の直後に3台の高圧下ミルを設置、連 casting 時の熱エネルギーを保ったまま粗バー(鋼板)に圧延が可能で、大幅なエネルギーコストの削減ができる。工程の全長は180 mと、従来の工程より大幅に短く、用地や設備等に関するコストを抑えることができる。またエンドレス圧延によって、圧延ロールの摩耗が少なく寿命が延長できたり、 casting 機の故障率が低下したり、安定した操業ができることもメリットとなっている。

全ての工程にわたって生産干渉や設定変更が少ないため、プロセスを高度に制御でき、優れた形状品質や平坦度、鋼板の先端から後端まで鋼板全長にわたって品質と材料特性の均質性が認められている。

高度に制御されたエンドレスプロセスによって、特に薄板製造では

長時間にわたって安定して操業を行う必要があるが、現在、0.8 mm 厚の鋼板の製造が可能になっている。さらに2018年には中国のプラントで、世界記録となる最終板厚0.6 mmの製造を達成している。

現在、生産量のさらなる向上が求められており、エンドレスプロセスは1ストランドでスラブを送り出すため、生産量は連続 casting 機的能力にかかっている。そのため casting 厚や casting 速度の向上が図られており、これによって生産量も増加している。現在稼働中のプラントでは板幅1,600 mmで250万t/年の生産能力を持つ。2022年稼働予定の米国の最新設備では最大板幅1,956 mmで250万t/年の生産能力を備える予定になっている。

そもそも薄スラブ連続 casting 技術は鉄鋼産業が低迷するなかで開発が始まった技術である。そのため、鉄鋼需要が旺盛な時期は逆に開発の必要性を失い、技術の進展が失速してしまう宿命にあった。近年の中国による旺盛な鉄鋼需要によって、進んでいた薄スラブ連続 casting 技術による薄板製造の開発は勢いを失ってしまっていたが、しかし世界経済が大きく変化する今、技術開発は活発化している。現在の状況をみて「今こそ導入のチャンスがある。厳しい競争のなかで、薄スラブ連続 casting 技術を採用した企業は生き残ってきたのだから」とプラントメーカーは意気込む。市場の変化に柔軟に対応できる薄スラブ連続 casting 技術は、低迷期にこそ力を発揮してきた技術である。活発な技術開発によって、今後薄スラブ連続 casting 技術は大きな進展をみせるのかもしれない。