

# eHRC: Arvedi ESP のエンドレス熱間圧延コイル

## － 圧延材のニュースタンダード －

eHRC: Endless Hot Rolled Coil from Arvedi ESP  
－ A New Standard in Rolled Materials －



Primetals Technologies Austria GmbH  
Casting and Endless Strip Production  
Scholler J, Piemonte C  
Turmstrasse 44, 4031 Linz, Austria  
<https://www.primetals.com/portfolio/endless-casting-rolling/arvedi-esp>

圧延技術の発展においては、広幅鋼帯製品は伝統的に熱間圧延コイル (HRC: hot-rolled coils) と冷間圧延コイル (CRC: cold-rolled coils) の 2 種に大別されてきた。HRC をエンドレス casting 圧延により生産することを特徴とする Arvedi Endless Strip Production (ESP) 技術の発明により、新しい種類の圧延コイル、エンドレス熱間圧延コイル (eHRC: endless hot-rolled coils) が誕生した。

熱間圧延材料としての eHRC は、従来は冷間圧延でのみ提供されていた製品用途を劇的に拡張する。また、この新しい HRC は、変換コストを大幅に削減できる。CAPEX (ESP プラントにおける前例のないレイアウトのコンパクトさによる) と OPEX (市場にあるすべての薄スラブ casting 及び圧延技術の中で最も少ない総エネルギー消費量と最高の材料歩留りによる) の両方を大幅に削減する。

化石燃料を使用することなく、溶鋼自体が保有している熱エネルギーを利用して casting スラブを直接圧延するため、Arvedi ESP プロセスは直接及び間接的に排出される温室効果ガスを削減する新しいスタンダードとなる。

casting と圧延の間で長時間高温に保たれることがないため、Arvedi ESP プロセスは熱間脆性の影響を受けにくい。従って、溶鋼中のトランプ元素 (不純物) の許容値が緩和される。この特徴により、Arvedi ESP プロセスは大量のスクラップを使用する電気アーク炉ベースの製鋼工場に最適である。また、最終製品の品質を損なうことなくスクラップベースの生産と組み合わせることができるため、循環経済の促進にもつながるものである。

Arvedi ESP を通じて、コンパクトなレイアウト、クラス最高のエネルギー効率、CO<sub>2</sub> 排出量の削減と優れたコイル品質が両立し、収益性と環境性に配慮した製鋼プロセスが実現できる。

## 1. 開発の始まり: 『薄ければ薄いほど良い』

広幅鋼帯製品の casting 及び圧延におけるエンドレスプロセスの開発を推し進めた最初の目標の 1 つは、HRC として、より薄い厚みの鋼板を製造することであった。

よく知られている通り、厚いスラブを使用する従来の熱間ミルにおいて、板厚 1.2mm 未満の鋼板を商業的に安定して生産することは困難である。このように生産を制限する主な要因は、圧延中の圧下率が非常に高く、ミルの安定性に影響を与えるためである。また、薄いストリップ先端を仕上ミルスタンドに通板させることになるため、コブル (先端噛込み不良による鋼板詰まり) 発生リスクが高く、仕上ミルの出側からダウンコイルに送ることが困難であることが挙げられる。

薄スラブの設計コンセプト (coil-to-coil 圧延モード) の導入により、必要な圧下量が少なくなり、ミル不安定性の問題は多少解消したが、ストリップ先端の上反り通板の問題は解決しなかった。

1980年代から1990年代初頭に、セミエンドレスプロセスが暫定的なソリューションとして導入された。鑄造機とミルの間のトンネル加熱炉に収容可能な、数コイル分に相当する非常に長い薄スラブをミルに供給するものである。これにより、スラブからの最初のコイルを適切な厚さで圧延して先端を安全にダウンコイラに到達させ、次のコイルの厚さを漸進的に減少させることができるようになった。これらのコイルはミルで圧延された後、最終的にせん断機により別々のコイルに分割される。この最終せん断機はダウンコイラの直前に設置された。

セミエンドレスプロセスは、商業規模で1.0mm未満のコイルの製造を初めて可能にしたが、非連続方式で非常に少量の薄厚のコイルしか製造できないという制限があった。さらに、非常に長い母材スラブを製造するために必要なトンネル加熱炉の長さは、ミルレイアウトを非常に長くし、これらの巨大なトンネル加熱炉を高温まで再加熱するために非常に多量のガス消費を必要とした。これらの制限により、セミエンドレスモードは実用化には至らなかった。

ゲームチェンジャーイベントは、連続したシーケンスで鑄造と圧延のリンクを初めて可能にしたエンドレスプロセスの開発であった。ストリップ先端の通板は鑄造シーケンス開始時の1回で済むため、ストリップ先端の上反り通板の問題が解消された。これにより、超薄板の生産は、セミエンドレスのようなコイル数個分に留まらず、文字通り何百キロも途切れることなく続けることができるようになった。

このパラダイムシフトは、以下により可能となった。

- 非常に高いマスフローを実現する鑄造機設計の進化
- トランスファーバー製造のための再加熱を行うことなく鑄片を直接圧延
- トランスファーバー温度制御のための信頼性の高い誘導加熱ソリューションの開発
- 鑄造と圧延プロセスを同時に制御し、定常状態と過渡状態のいずれも生産を保証できる自動化アーキテクチャとモデルの導入

図1に、典型的なESPプラント構成のレイアウトを示す。

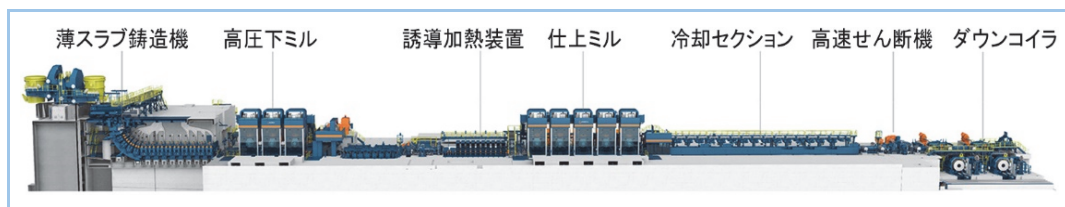


図1 ESPのレイアウト

ESP高速薄スラブ鑄造機は、必要なマスフローに対応し、エンドレスプロセスを維持する上で重要な役割を果たす。鑄造機の各コンポーネントは、Arvedi ESPの主たる特徴である安定した操業、非常に高い生産性、優れたスラブ品質を保証するために綿密に設計・最適化されている。

高圧下ミルは、鑄片が薄スラブ鑄造機から出た直後に最初の圧延工程を行う。これは、表面温度よりも中心部が高温の逆温度プロファイルを利用して、高い圧下率、省エネルギー及びトランスファーバーの幾何学的形状における厳しい公差を達成する。ESPプロセスではCO<sub>2</sub>排出を伴う再加熱炉は使用しない。

強力なフレキシブルな誘導加熱装置は仕上圧延のために正確に温度を制御する。横方向及び縦方向の磁束ソリューションと、加熱コイルとトランスファーバー間のクリアランス調整により、さまざまな製品の厚さに対して誘導加熱効率を最適化する。また、アイドル時のエネルギー消費はない。

仕上ミルはトランスファーバーを最終目標製品寸法まで圧延する。油圧AGC (Automatic Gauge Control)、ワークロールのベンディング/シフト、動的ワークロール冷却、ワークロール潤滑、高速油圧ルーパーなどの最新のアクチュエータを備えている。このミルは、最大幅の高強度鋼であっても、最小公差のストリップ製造を実現する。安定したエンドレス運転は、ワークロール寿

命をバッチ運転プロセスの2倍まで延ばし、これにより、メンテナンスコストを含む OPEX を大幅に削減する。

冷却セクションでは、ESP のエンドレスモード運転により、高速化の課題や関連する冷却の問題が解消され、均一な温度と均質なマイクロ組織のストリップが得られる。

ダウンコイラに達する直前に、ストリップは高速せん断機によって初めて切断される。先端と尾端のクロップ切断は不要であり、その結果、全体の歩留りは最も高くなった。ダウンコイラは極薄板だけでなく極厚板も同じ品質で巻き取ることができる。

## 2. 2009 年から続くエンドレスストリップ生産

よく知られているように、新しいエンドレスストリップ生産時代の幕開けは、2009 年に Primetals Technologies (以下、当社)との提携により、イタリアのクレモナに Arvedi ESP 工場が設立されたことに始まる。板厚 1.0mm 未満の薄厚/極薄鋼帯の大量生産が工業規模で安定的に実現した。最初の ESP プラントの目標は板厚 0.8mm で、2010 年にマイルストーンを達成した。その後、中国の ESP のお客様は、2018 年には 0.6mm の最小板厚の生産を達成した。

この技術革新に伴い、所望の板厚に加工するために、従来は熱間圧延後に冷間圧延する必要があった製品の多くが、現在では HRC として直接製造できるようになった。最終的な板厚が非常に薄く冷間圧延を完全に省略できない場合でも、当社のお客様(及び/または他の再圧延専業メーカー)は、より薄い投入材を使用することにより、冷間圧延工場での CAPEX と OPEX を削減することができる。

図2に示すように、eHRC が代替可能な CRC の市場割合は大きい。図中左側は ESP, 冷間圧延, 熱間圧延のそれぞれが対応可能な厚さの範囲を示す。図中右側の円グラフは、世界の市場における冷間圧延の平均的な製品構成による板厚の分布を示す。板厚 0.8 mm 以上が 50% 超を占めており、これら eHRC で代替可能な部分は、オレンジ/青で表している。

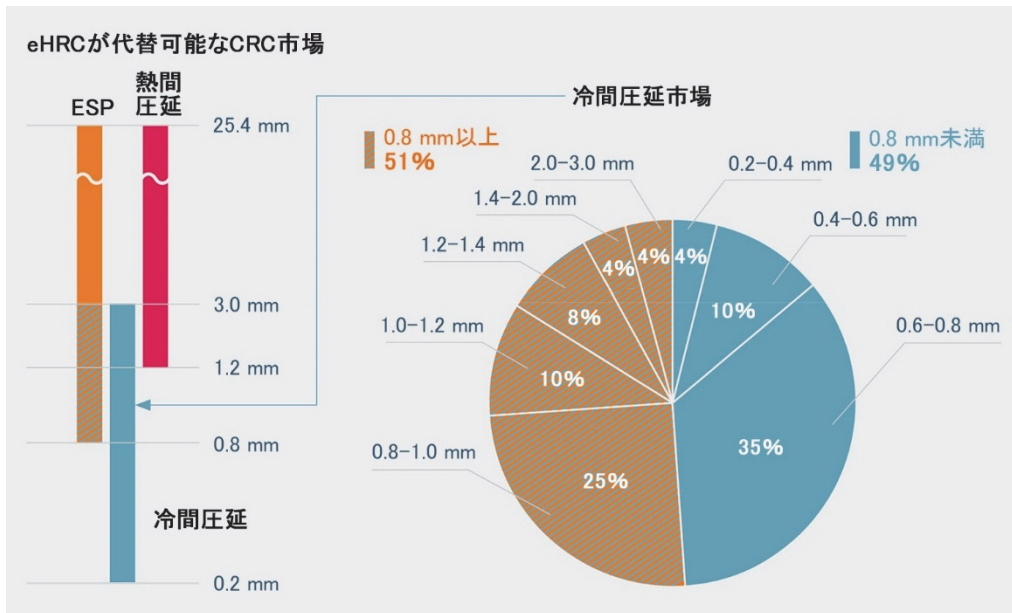


図2 冷間圧延製品市場の厚さ別シェア

冷間圧延が完全に省略されると、下流の焼鈍工程(冷間圧延における低温での塑性変形によって材料内に発生する引張残留応力を低減する)も完全に省略することができる(図3)。

冷間圧延代替品の利点は、エンドユーザの要求材料・最終板厚に対して、酸洗処理及び塗油処理された状態で販売される eHRC と焼鈍処理を伴う CRC とを比較することで理解される。世界中の Arvedi ESP 工場での実績を踏まえると、ほとんどの場合、スキンパス圧延は不要である。このような処理が要求されるのは、最終的な使用において酸洗によるコイル表面粗さの平滑化が要求

される場合のみである。

そのような場合でも、eHRC は、エンドユーザの要望に応じて対応可能であり、場合によっては、さらに亜鉛メッキ/カラーコーティング処理も可能である。

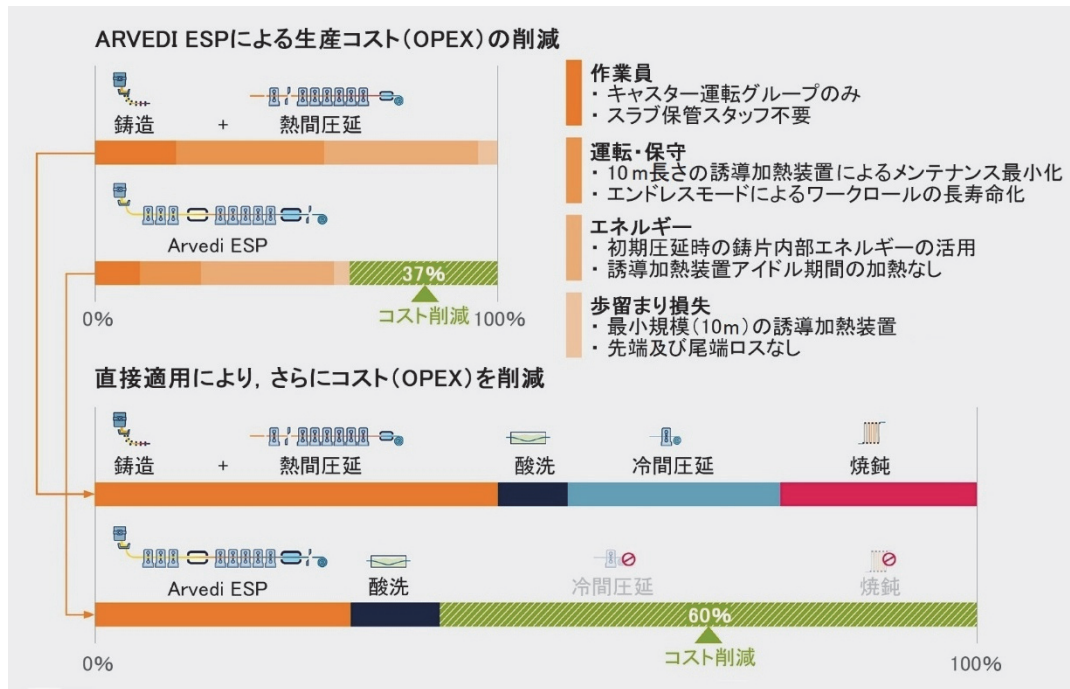


図3 従来のプロセスと比較した Arvedi ESP のコスト(OPEX)削減

薄/極薄板厚の実現はエンドレスモードの成功の一因にすぎない。安定したプロセス条件により、コイル全体及び全シーケンスを通じて、最も厳しい幾何公差及び均一な機械的特性を実現する製造が可能となった。この点は、対象の要求仕様が厳しい場合、特に重要である。

ESP 製造者は eHRC の利点を十分に認識しており、単にコスト削減できるコイル製造法ではないと考えている。そのユニークな特性から eHRC は独自の個性を持つ優れた製品と見なされ、付加価値を強調するために専用のブランド名が付けられている。

代表的な例は、Acciaieria Arvedi 社の Arvtech™ブランドである。多くの用途で冷間圧延製品からの代替が可能な冶金的特性と幾何学的精度を提供でき、冷間圧延サイクルに比べて大幅な納期短縮が可能である。表1に Arvtech™ブランドの鋼種別ラインナップを示す。

表1 Arvtech™ブランドの鋼種別ラインナップ

鋼種	Arvtech™名称	標準名称	厚さ (mm)		最大幅 [mm]
			最小	最大	
軟鋼 UNI EN 0111	Arvtech™ DD11	DD11	1.0	3.5	1520
	Arvtech™ DD12	DD12	1.0	3.5	1520
	Arvtech™ DD13	DD13	1.5	3.5	1300
構造用鋼 UNI EN 10025-2 納入条件: “圧延まま” (+AR)	Arvtech™ S235JR/J0/J2	S235JR/J0/J2	1.0	3.5	1520
	Arvtech™ S275JR/J0/J2	S275JR/J0/J2	1.25	3.5	1520
	Arvtech™ S355JR/J0/J2	S355JR/J0/J2	1.8	3.5	1520
耐候性構造用鋼 UNI EN 10025-5 納入条件: “圧延まま” (+AR)	Arvtech™ S235J2W/J0W	S235J2W/J0W	1.45	3.5	1520
	Arvtech™ S355J2WP/J0WP	S355J2WP/J0WP	2.0	3.5	1520
マイクロアロイド鋼 UNI EN 10149-2	Arvtech™ S315MC	S315MC	1.25	3.5	1520
	Arvtech™ S355MC	S355MC	1.25	3.5	1520
	Arvtech™ S420MC	S420MC	1.38	3.5	1520
	Arvtech™ S460MC	S460MC	1.5	3.5	1520
	Arvtech™ S500MC	S500MC	1.5	3.5	1520
	Arvtech™ S550MC	S550MC	1.5	3.5	1520
	Arvtech™ S600MC	S600MC	2.0 (**)	3.5	1520
	Arvtech™ S650MC	S650MC	2.5	3.5	1300
	Arvtech™ S700MC	S700MC	2.5	3.5	1300
多相鋼 UNI EN 10338	Arvtech™ DP600	DP600	1.5	2.5	1520
	Arvtech™ FB590	FB590	1.8	3.5	1520
	Arvtech™ CP800	CP800 (**)	2.5	3.5	1520

厚さ範囲 (mm)	公差 (mm) (*)
0.80<t≤1.20	±0.04
1.21<t≤1.60	±0.04
1.61<t≤2.00	±0.05
2.01<t≤2.50	±0.06
2.51<t≤3.50	±0.06

(\*) エッジがトリムされていないコイルの場合、エッジから 25mm までの公差は保証されない

(\*\*) 厚さ 2mm の S600MC とグレード CP800 を開発中

Acciaieria Arvedi 社の Arvtech™ 製品カタログより

上記の品質結果は、エンドレスプロセスの直接的な結果である。連続的、安定的かつ中断されないプロセスであるため、コイルの機械的特性がストリップ全域にわたって均一になる。コイルの先端部、センター部、尾端部の差異はなくなり、エンドレスモードでは本質的にコイル全域がセンター部となる。

この均一性は、コイルのエンドユーザにとって非常に有益であり、幾何公差及び機械的特性の両面から潜在的に許容範囲外となる先尾端のクロップ切断除去量を低減できる。各コイルの先尾端は常に直線状にせん断され、ESP ラインの歩留まりのさらなる向上につながる。

図4に、これらの eHRC の品質特性を示す。図には、温度均一性及び機械的特性の他に、厚さ、平坦度、形状公差値などの幾何公差も示している。なお、図中、IU (I-Unit) は、ストリップの長手方向に繰り返される波打ち形状の高さ及びピークからピークまでの長さを組み込んだ無次元数、C<sub>40</sub> は、ストリップの両端から 40 mm を除いたストリップ幅に沿った形状公差値を表す。

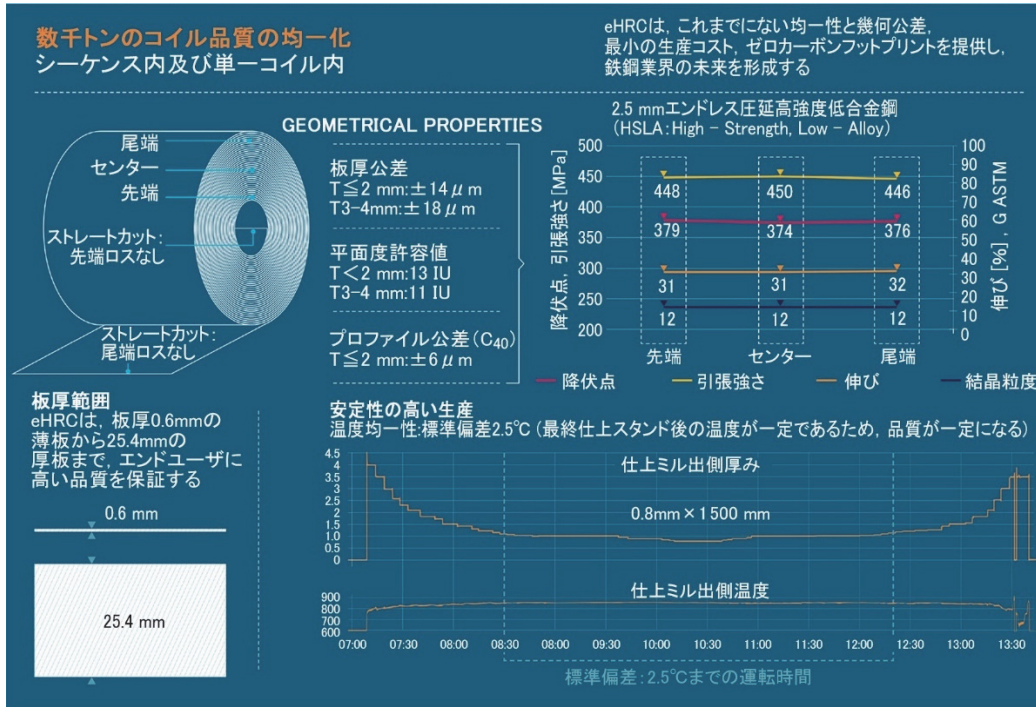


図4 eHRCの優れた品質特性

### 3. エンドレスプロセスのメリットは板厚の薄さにとどまらない

エンドレスプロセスがコイル品質の面でも有効であることが明白となった結果、高い付加価値を持つ比較的厚板の鋼種に対するエンドレスモードの適用が、収益性の高いターゲットとして新たに浮上した。ESP 機器の強化により、現在では、板厚の薄さだけでなく様々な機械的特性を有する製品をターゲットにすることができる。

薄板と極薄板をターゲットとしていた初期の ESP プラントでは、エンドレスモードで製造される最大板厚は約 4mm であり、より厚い板厚のものは coil-to-coil 圧延モードで製造されていた。しかし、ESP 技術の最新の発展により、高強度鋼(例えば、API に規定されるラインパイプ鋼)でも 1 インチ (25.4mm) までの板厚の完全エンドレスモードでの生産が可能となった。

この進化は、次の要因による。

- スラブ厚さの増加と、より厚いストリップに対応するための高圧下率
- 3~4 台の粗ミルスタンドによる粗ミル構成の最適化
- トランスファーバーの厚さによらず熱伝達を効率的に制御でき、より厚い板厚に対してもエネルギー的に有効なエンドレス運転を可能にするマルチモード誘導加熱装置の導入
- 板厚と鋼種に合わせてカスタマイズ可能な冷却・パワー冷却機能(特許取得済)
- 仕上ミルスタンド数の最適化手法の適用
- より厚いストリップをエンドレスモードで切断するための強力なせん断機の開発

### 4. eHRC の新しい市場

・自動車産業向け

近年、自動車構造の軽量化と堅牢化を実現する HSLA (High Strength Low Alloy) 部品の開発が目覚ましい。一般的な厚さが 1.0mm から 2.0mm の eHRC は、700MPa までの強度を有し、このような用途に理想的な材料である。

参考までに、これらの自動車用途は、イタリアの Acciaieria Arvedi 社の ESP によって供給される板厚 1.0mm から 8.0mm の市場のほぼ 30%を占めており、全 HSLA 製品のうち 42%に相当する。

自動車用途の例を図5に示す。

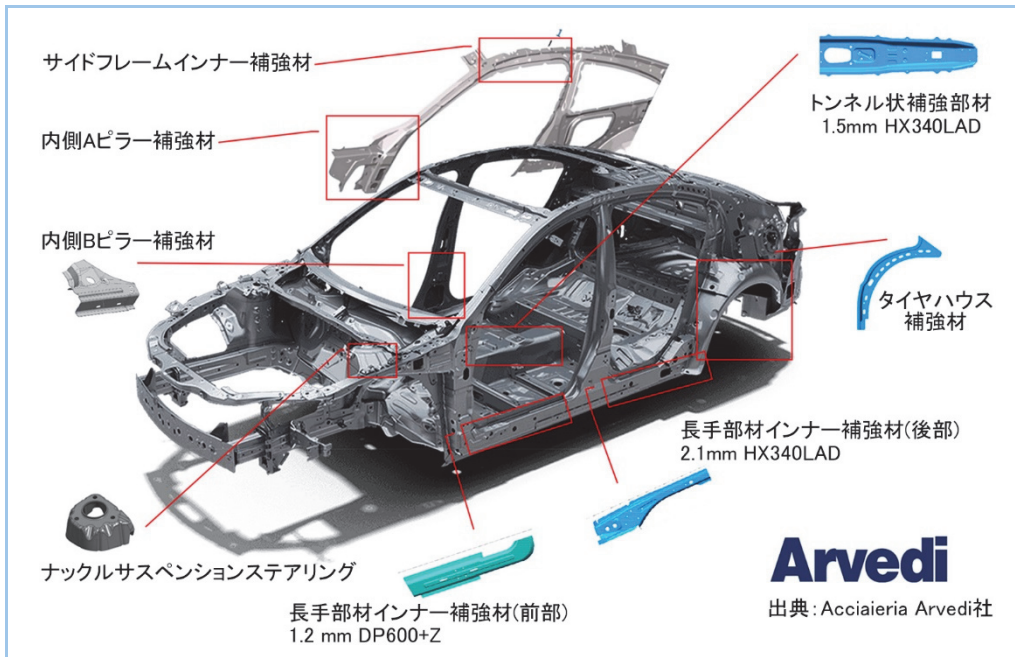


図5 Acciaieria Arvedi 社 ESP コイルの自動車用途

これらの材料は、車体などの構造部品だけでなく、高精度のチューブ形状であるディストリビューションシャフトなどの機械部品にも利用されている。

- ・ API ラインパイプ鋼への適用

ESP の 2 段階圧延は、温度プロファイルの完全な制御を可能にし、熱加工制御圧延によるパンケーキ状組織形成を経て所望の最終微細結晶粒組織を達成することを目指す。この製造ルートは、結晶粒微細化に必要な析出プロセスを制御するために必要な合金元素含有量(ニオブ)を大幅に低減する。最新の開発により、25.4mm までのエンドレスモードでの API X70 グレードの生産が可能になった。

- ・ AHSS(先進高強度鋼:Advanced High Strength Steels)

エンドレス運転中の優れた温度プロファイル制御により、DP(Dual Phase: 二相)鋼や TRIP (TRansformation Induced Plasticity: 変態誘起塑性)鋼のような AHSS グレードは、ESP ラインから直接、必要な多相構造で製造することができる。このような鋼種ではエンドレスモードで 12.7mm まで製造できる。

- ・ 耐候性鋼

耐候性鋼製造への直接適用の代表例は、日照鋼鉄(中国)の 5 つの ESP ラインによる CORTEN グレードの大量生産である。得られた eHRC は、コンテナの製造に直接使用することができる。典型的な板厚は 1.4mm である。

## 5. グリーン体験を中心に

これまで当社は、革新的なプロセスを具現化するための機器技術の開発に継続して取り組んできた。また、15 年以上にわたってパートナーと緊密に協力し、ESP ラインで 1 億トン以上のコイルを生産し操業ノウハウを蓄積してきた。

ESP のコンセプトは当初から大きく進化し、現在では元の商品市場をはるかに超えた市場に製品・サービスを提供しており、すべての広幅鋼帯製品を生産するための標準ツールになることを目指している。

鉄鋼業を環境的に持続可能な産業分野に転換する必要性について、過去 10 年間の環境意識の高まりを認識せずに本報を締めくくることができない。

我々のお客様、特に最も要求の厳しい自動車市場に鉄鋼製品を提供しているお客様は、エンドユーザからの要求に直面しており、高品質鋼であるのみならず、グリーンスチールの供給が求

められている。

カーボンフットプリントの観点から見ると、ESP eHRCは、広幅鋼帯製品を製造する他の casting・圧延技術と比較して飛躍的な進歩を遂げている。

ESP が化石燃料を全く使用せず(トンネル加熱炉を使用せず)、鋳片自体が保有している熱エネルギーの完全な利用に基づいていることを考えると、全体的なエネルギー消費量及び温室効果ガス排出量は、従来型及び薄スラブ型のいずれの他のプロセスと比較しても、絶対的な優位性を有する。

鋳造機からダウンコイルまでの間で測定された eHRC 1トン当たりの CO<sub>2</sub> 排出量が 1.0kg 未満(温室効果ガスプロトコルに基づくスコープ 1 排出量)という他に類を見ない数値であること、また、板厚 2.0mm×板幅 1500mm の低炭素鋼におけるエンドレスモードでの総電力消費量が約 120 kWh/t(温室効果ガスプロトコルに基づくスコープ 2 排出量)であることから、効率の高さが証明されている。

長いトンネル加熱炉がないため、Arvedi ESP プラントは循環経済の中で有利に働く。多くのプラントが EAF(電気アーク炉)ベースの製鋼工場で操業するように設計されており、そこでは多くの金属スクラップが利用される。しかし、Cu, Sn, Sb, Pb, P などの残留元素及び微量元素が製品の品質に有害であるため、スクラップの最大配合量は、これらの元素の許容量によって制限される。

特に、銅は、鋳造スラブの表面及び最終コイル上の高温亀裂の形成(熱間脆性現象)の原因となる。このような品質欠陥はトンネル加熱炉内のスラブの温度範囲で十分に起こり得る。トンネル加熱炉ベースのプラントでは、スラブは 10~20 分(鋳造機の出側から最初の圧延スタンドの入側までの移動時間に相当)脆化温度域に曝される。しかし、Arvedi ESP プラントでは、脆化温度域に曝される時間は基本的にわずか 1 分に短縮される。このため、Arvedi ESP は、従来プラントにおける許容量の 2 倍の Cu 含有量であっても、コイル品質を維持することが可能である。

## 6. 今後の展開

今日、Arvedi ESP は世界最先端の薄スラブ鋳造及び圧延技術である。2009 年以来、Arvedi ESP の技術改良を継続し、エンドレスプロセスの最新化を実施してきた。Arvedi ESP による鋼帯製造は、グリーンスチールへの移行とスクラップのより多くの利用につなげるための鍵となる技術である。2009 年から稼働している 8 つの ESP ラインで既に 1 億トン以上のグリーンスチールが生産されている。

スクラップを電気炉で溶解した溶鋼の利用拡大は、グリーンスチールへの移行に不可欠である。Arvedi ESP ラインは非常にコンパクトな設計であるため、鋳片の酸化も最小化され、スクラップ中の銅含有量が多い場合でも鋼板品質を確保できる特徴がある。

薄スラブ鋳造と圧延の連続ラインが市場に受け入れられるためには、経済性と運転性能の向上がさらに重要になってくる。2017 年には 1 スtrand で年間 250 万トンの鋼板生産量が実証され、2020 年には、年間 300 万トン超に相当する 7.1 トン/分の鋼板生産速度を新たに達成した。

(翻訳:プライメタルズ テクノロジーズ ジャパン株式会社 銭谷哲, 黒原裕美子)