

世界初のストリップ温度制御機能を搭載した電磁鋼板生産用 2 スタンド HYPER UC-MILL (ストリップ厚さ 0.2 mm)

World's First 2-Stand HYPER UC-MILL with Advanced Strip Temperature Control
for Electrical Steel Production and Strip Thicknesses Down to 0.2 mm



Konrad Krimpelstaetter*1

Primetals Technologies では、高透磁率無方向性電磁鋼板及び高張力鋼板を生産する世界初の 2 スタンド HYPER UC-MILL® の据付け・試運転を成功裏に完遂した。このリバースミルは、新開発の小径ワークロールを用いる 6 段ミルの技術の特徴とし、ワークロール駆動と高トルク用 MH スピンドルを備え、卓越した圧下能力と精密な形状制御を実現している。ストリップ用インダクションヒーター、Minimum Quantity Lubrication、高度なストリップ温度予測・制御システムにより、高い歩留まりで無駄のない薄板圧延の安定運転を可能とした。HYPER UC-MILL の小径ワークロール、板エッジ荷重の低減、及び効率的なトルク伝達は、新設とコスト効率向上を目指す改造の双方のベンチマーク技術として確立され、高品位電磁鋼板及び極薄冷延製品生産の信頼性を確保する。

1. はじめに

電磁鋼板は、方向性電磁鋼板 (grain-oriented 以下、GO) と無方向性電磁鋼板 (non-grain oriented 以下、NGO) の 2 種類に分類される。GO は異方性を示すため、磁気特性が特定の方向に最適化されており、磁束を効率的に導く特性から主に変圧器に用いられる。一方、NGO は、多方向に対して磁気特性が求められるモータや発電機など回転機械に使用される。

三菱重工グループの一員であり、電磁鋼板生産プラント向けソリューションの世界的リーダーである Primetals Technologies (以下、当社) は、電磁鋼板の生産性、歩留まり、及び製品品質を大幅に向上させる先進的プロセス技術を開発している。

高品質の GO 及び NGO は、高効率の電気機器、特に自動車及びエネルギー分野の機器に対して不可欠である。

高透磁率電磁鋼板は、コア損失を大幅に低減し、機械エネルギーから電気エネルギーへのエネルギー変換効率を向上させ、風力タービンの全体的な性能と信頼性を最適化するため、風力タービンの発電機に不可欠である。

モビリティの急速な拡大により、軽量ボディ構造、最適化された衝突性能、及び車両ライフサイクル全体での温室効果ガス排出量を削減する電気自動車 (以下、EV) が求められている。これにより、硬質で薄い板厚を特徴とする新世代の先進高強度鋼 (Advanced High Strength Steels 以下、AHSS) の需要が高まっている。同時に、自動車産業では、3.2 から 3.4% のシリコンを含み、0.2mm から 0.5mm の極薄 NGO が必要とされている。これらのいわゆる NGO-EV グレードには、寸法精度、表面品質、機械的特性、結晶方位組織の発達、及び磁気性能の面で、厳しい要件が

*1 Primetals Technologies Japan 株式会社 技術開発部 主幹技師

設定されている。

電気駆動モータは、銅コイル、永久磁石、積層スチールコアを使用している。積層材は、高い透磁率と高い磁気誘導を提供するように設計された、薄いラッカーコーティングされた等方性電磁鋼板で構成される。効率的なエネルギー変換には、低コア損失と高磁化という2つの重要な特性が必要である。自動車用途における電磁鋼板の使用が増加するにつれ、鉄鋼メーカーは生産設備近代化に向け、先進的圧延設備と自動化システムに多額の投資を行っている。

図1に、EVの世界販売予測を示す。2040年までにEVの市場シェアは70%になり、年間新車EV販売台数は6000万台を超えると予測されている。現代のEVは30台から100台以上のモータを搭載することもあり、従来のエンジン車の約3倍の電磁鋼板を必要としている。これにより、優れた磁気特性を持つ電磁鋼板の開発と生産に対する需要が大幅に増加している。

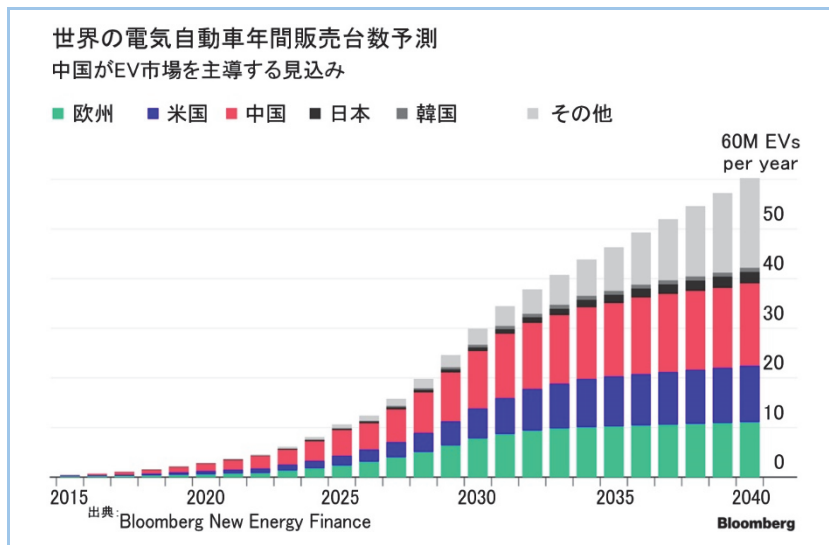


図1 世界の電気自動車年間販売台数予測

高シリコン電磁鋼板の冷間圧延には、主に一般的な冷間圧延温度における材料固有の脆性に起因する大きな課題がある。高い圧延荷重、ストリップ張力、及びロールバイトにおけるせん断応力の組合せがエッジクラックの発生と進展を招き、鋼板の破断、設備の損傷、及び生産停止につながる可能性がある。これら厳しい条件にもかかわらず、鋼板の厚さ、平坦度、表面状態に関する厳格な品質要件を満たす必要がある。納入板厚が0.2mm以下の製品では、要件はますます厳しくなる。高い歩留まりを達成するには、生産過程で消費される資材も効率的に使用する必要がある。圧延機の機械的、電氣的、プロセス設計・最適化に高度な配慮が求められる。

従来、電磁鋼板は20段のリバースミルで生産されていたが、小径6段ミルの導入により、高品質のNGOや、強度と厚さに応じた高透磁率GOの安定した生産が可能になった。最近では、6段ハイパーユニバーサルクラウンコントロールミル(Hyper Universal Crown Control Mill 以下、HYPER UC-MILL)をタンデムミル構成とすることで、高品質の電磁鋼板を大量かつ高いエネルギー効率で生産することが可能となった。

高効率冷間圧延の主要技術には、ストリップ用インダクションヒーター、ロールギャップ潤滑を最適化するMinimum Quantity Lubrication(以下、MQL)、高度なストリップ温度制御システムがある。これらの革新技術は、HYPER UC-MILLの小径ワークロール、板幅に応じた中間ロールシフト、及び高トルク駆動システムとともに、精密な板厚制御、優れた平坦性、優れたエッジプロファイルを実現し、超薄型鋼板の安定生産を可能にする。

当社は、冷間圧延ソリューションの包括的なポートフォリオと、高度な冶金学、機械、プロセスに関わる専門知識により、主要鉄鋼メーカー及び新興の鉄鋼メーカーをサポートしている。お客様との緊密な協力により、次世代の電磁鋼板の継続的な開発が可能となる。

次章以降、新たに開発した 2 スタンド HYPER UC-MILL に導入された主要技術を紹介する。

2. 2 スタンド HYPER UC-MILL

当社は、世界初の 2 スタンド HYPER UC-MILL を開発し、thyssenkrupp Steel Bochum 社に納入した。この新型冷間圧延機は、高品位電磁鋼と AHSS の生産に特化しており、年間 475000 トンの生産能力を誇る(図 2, 図 3)。

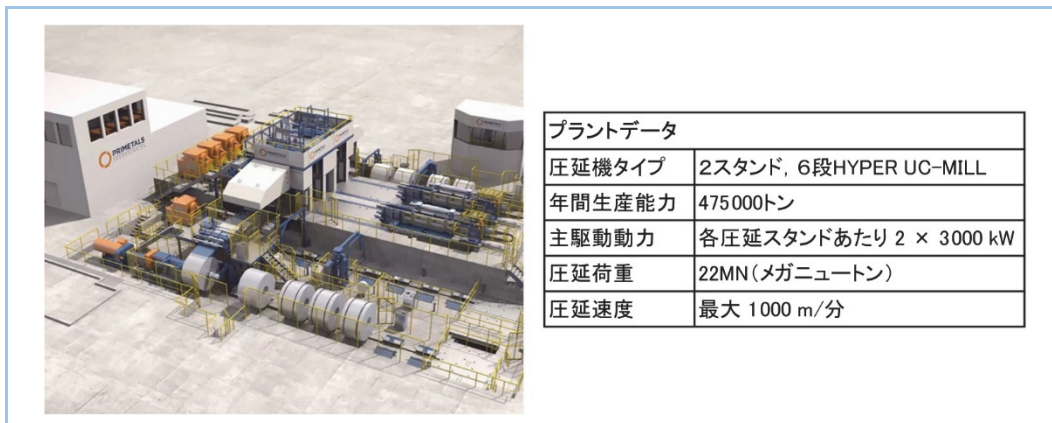


図2 thyssenkrupp Steel Bochum 社の新型リバーズミルのプラントデータ



図3 thyssenkrupp Steel Bochum 社の新型 2 スタンドリバーズミル

この圧延機は、リバーズ圧延にて最終製品の厚さが 0.2mm までの非常に薄い鋼板を圧延することができる。高度で多機能な設備を備えているため、この圧延機は、一方で、より厚い板厚, すなわち、最高レベルの強度要求を満たす製品にも対応することが可能である。

高度な自動化ソリューションに支えられた熟練したオペレータが、これらの鋼板寸法の達成を支えている。この製品を通じて、thyssenkrupp Steel Bochum 社は EV に必要とされる非常に高品質のより薄く、より軽い鋼板を供給することができる。

thyssenkrupp Steel Bochum 社が当社製品を採用した要因はいくつかあるが、そのうちの 1 つに豊富な実績が挙げられる。当社は、20 段ミル, 6 段リバーズミル, 及び 6 段タンデムミルを網羅する、電磁鋼板生産向け冷間圧延ソリューションにおける世界のマーケットリーダーであり、世界で 90% の市場シェアを保有している。もう一つの重要な要素は、HYPER UC-MILL 技術のユニークな特徴である。このソリューションにより、オペレータは、一般的に最もクラックが発生しやすいとされる鋼板端部に対して柔軟な対応ができるようになった。

2 スタンド HYPER UC-MILL を採用することで、お客様は、設置面積の縮小、生産の柔軟性の向上など、連続タンデムミルに勝るいくつかの利点を享受できる。

6 段 UC-MILL(図 4)は、電磁鋼板の生産に広く適用されている。このミル構成は、駆動ワークロールと、実際の鋼板幅に応じて軸方向にシフト可能な中間ロールを備えている。専用のワークロールと中間ロールのベンディングシステムを組み合わせることで、UC-MILL は正確で柔軟な形

状制御を可能とする。ストレートワークロールの採用により、安定した鋼板形状が確保され、非常に厳しい平坦性要件にも対応できる。

図4は、UC-MILL コンセプトの主要構成と利点を示している。テーパ形状を有する中間ロールを軸方向に動かせるようにしたことにより、補強ロールとワークロールの不要な接触が避けられ、鋼板の平坦度を高精度に制御できる。

高強度材や高シリコン材の冷間圧延では、鋼板の厚みが端部で極端に薄くなる“エッジドロップ”と呼ばれる現象が発生することがある。この現象は、主にワークロールのたわみが長手方向に変化することによって生ずる。電磁鋼板の生産においては、エッジドロップを低減することが重要である。エッジドロップの低減は積層係数を改善し、コア損失の低減に直接寄与するからである。

確立された UC-MILL 技術をさらに発展させた HYPER UC-MILL は、高品位の AHSS 及び NGO 生産に関わる最も有益な技術である。

UC-MILL は、低グレードの AHSS や電磁鋼板の生産に適用できるが、高シリコン含有量のより硬い AHSS 及びより薄い電磁鋼板の需要の増大が、HYPER UC-MILL の開発につながった。小径ワークロールを適用するにあたり、ワークロール径が形状制御能力、ロール間のヘルツ応力及び鋼板の圧下率に及ぼす影響について包括的な検討がなされた。小径のワークロールを適用することで、圧延荷重を低減し、より高い圧下率を得ることができる。この検討から、ワークロール径が、標準の UC-MILL に比べて 20～30% 小さいときに最も高い圧下比が得られることがわかった。

小径ワークロールを採用しつつ優れた形状制御性能を維持するため、中間ロール径を大きくし、ミルの横剛性と運転安定性を確保した。並行して、小径ワークロールへの伝達トルクを大幅に向上させた新しいギアタイプの駆動スピンドルを開発した。この新型 MH スピンドルは、従来のユニバーサルジョイント(UJ)スピンドルに比べて最大 2.7 倍のトルク容量を実現した(図5)。

これらの進化により、小径ワークロールと高強度スピンドルを組み合わせ、高強度材料や高級電磁鋼板の確実な圧延を実現する次世代型ミル“HYPER UC-MILL”を開発した。

図6に標準 UC-MILL と HYPER UC-MILL のロール配置の比較を示す。HYPER UC-MILL では小径ワークロールを使用しても高い形状制御性能を維持するため、中間ロール径が大きくなっている。

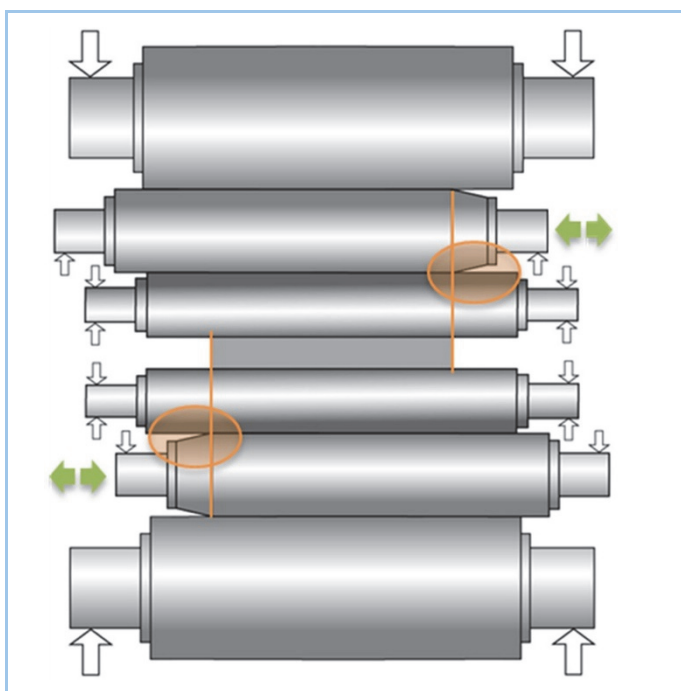


図4 6段 HYPER UC-MILL の主要構成

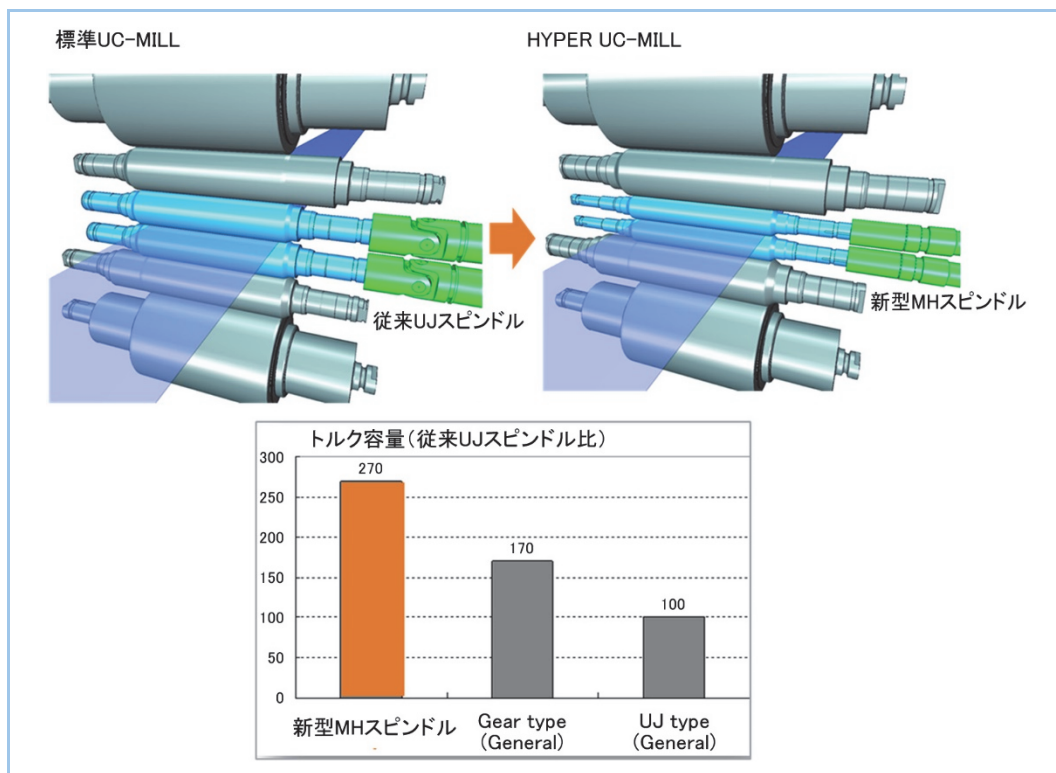


図5 トルク容量が大幅に増加した新型 MH スピンドル

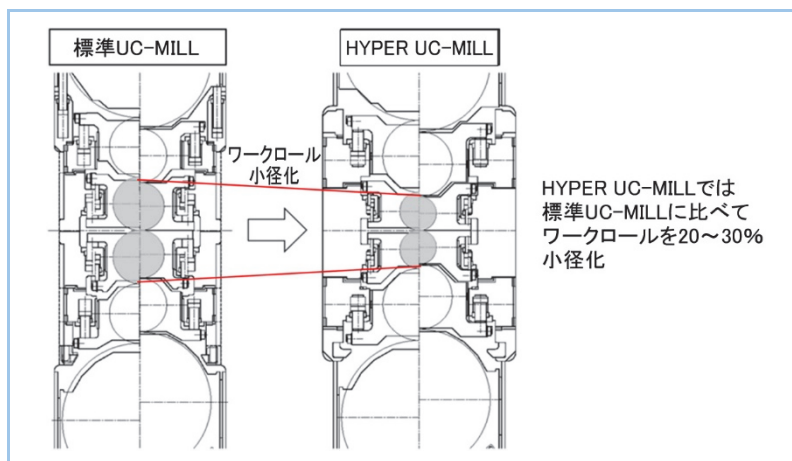


図6 標準 UC-MILL 及び HYPER UC-MILL のロール配置

3. 冷間圧延前のストリップ加熱

高シリコン電磁鋼板(Si \geq 2.5%)の冷間圧延では、ストリップの破断リスクが高まるという特徴がある。これは、主に、冷間圧延時の一般的な温度領域において、高シリコン電磁鋼板の脆性が高いことに起因する。冷間圧延中の高い圧延負荷(ロールバイトのストリップ張力、接触圧力、ロールバイト部のせん断応力)が高脆性の材料に作用すると、生産停止や遅延につながるエッジクラック発生やその進展につながる可能性がある。

冷間圧延前のストリップ温度を上昇させることで、材料の脆性が著しく低下することはよく知られている⁽¹⁾。リバースマルの最初のパスでは、ストリップは通常、室温(約 20~30℃)で処理される。室温における脆性は鋼のシリコンとアルミニウムの含有量に強く依存し、より高いシリコンレベル(\geq 2.5%)とアルミニウムレベル(\geq 0.5%)は脆性を著しく増加させ、その結果、冷間圧延中の延性と成形性を低下させる。エッジクラックは主に転位滑りの制限によって引き起こされ、高い圧延荷重と相まって、変形双晶と早期の破断を促進する。

図 7 は、サーボ油圧高速試験機を用いて、様々な歪速度で 3.4%のシリコンを含有する

NGO について測定した延性-脆性遷移温度 (ductile-to-brittle transition temperature 以下, DBTT) 曲線を示す⁽¹⁾。一般的な冷間圧延の歪速度(青色の曲線, 100 s^{-1})では, DBTT は室温付近(約 22°C)に位置する。

これは, 室温での冷間圧延が, 材料の低い破壊伸びと高い脆性のためにストリップ破断の重大なリスクをもたらすことを意味する。変形速度を低下させる, すなわち, ストリップ速度及び/またははパスあたりの圧下量を減少させること, またはより現実的にストリップ温度を上昇させることで, 延性と成形性を向上させることができる。その結果, エッジクラックの伝播とストリップ破断の可能性が大幅に減少する。

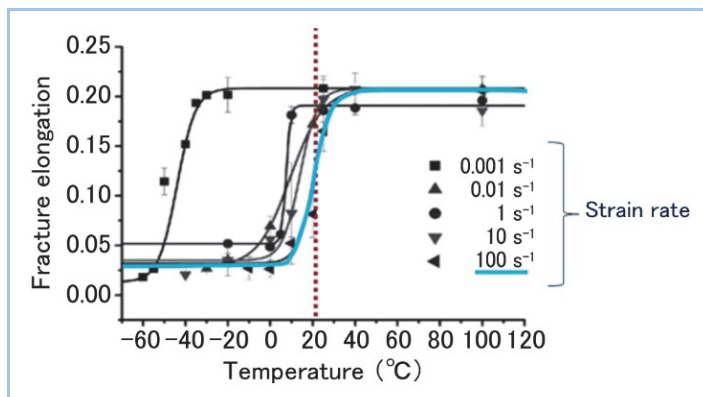


図7 3.4%シリコン鋼の延性-脆性遷移温度⁽¹⁾

4. ストリップ温度の予測とガイダンス

前述のとおり, ストリップ温度は, 特に通板及び最初の圧延パス中に, 高透磁率電磁鋼板の安定した信頼性の高い生産を確保する上で重要な役割を果たす。ストリップ温度が高いことは後続のパスにおいても有益になり得る。ただし, その温度が最適な生産条件範囲内に保たれていることが前提である。

これは, リバースミルのパススケジュール全体にわたってストリップ温度管理が必要であることを示す。ストリップ温度が低すぎると, 材料の脆性が増加し, 加えられた圧延荷重と相まって, エッジクラック及びストリップ破断のリスクが大幅に増加する。逆に, 過度に高いストリップ温度は, ワークロール表面温度を上昇させ, ロール表面硬度の低下を引き起こし, ヒートストリークまたは他の表面欠陥を生じる可能性がある。

したがって, 製品ごとに適したストリップ温度の指針づくりが不可欠である。

ストリップ温度の制御には, ストリップ冷却, ワークロール冷却, ストリップ速度調整, パススケジュール最適化, 及びストリップ用インダクションヒーターが含まれる。

高度なストリップ温度モデルは, セットアップ計算と温度変化の動的制御の両方を大幅に改善し, 高シリコン電磁鋼板の複雑な変形挙動を考慮する。図8は, 事前に誘導加熱したストリップの, 2 スタンドリバースミルの最初のパス中の温度プロファイルの例を示す。図に示すように, 最初のスタンドの入側での従来のエマルジョン潤滑を使用した場合は, 予め加熱されたストリップを冷却してしまい, 不要なエネルギー損失と処理コスト増加を引き起こす。

これに対してMQLは, 入側で噴霧化された圧延油の原液をワークロール表面に直接噴霧するため, 望ましくない温度低下を防ぐことができる。この原油潤滑方式は, 循環式エマルジョンシステムの典型的なストリップの冷却作用を回避でき, その結果として, 最初のパスに入るときのストリップ温度を所望の値に維持することができる。

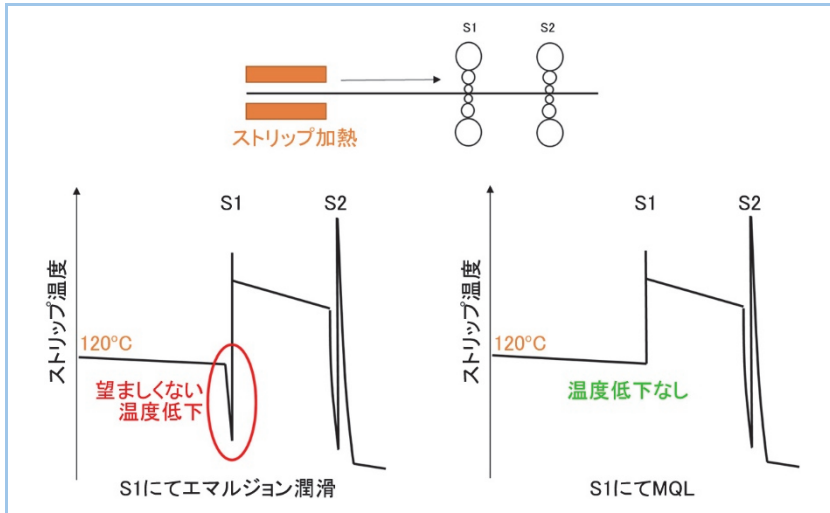


図8 2 スタンドリバースミルにおけるストリップ温度変化の例(エマルジョン潤滑とMQLの比較)

5. 運用上のハイライト

5.1 新製品の迅速な立上げ

この圧延設備の高い柔軟性と、使いやすい操作コンセプトのおかげで、新製品を素早く、しかも確実に立ち上げることができる。

特筆すべき点として、この設備では、通常のように一般鋼や軟質鋼から試運転を始める必要がなく、稼働初日からいきなり**電磁鋼板の圧延に成功した**。

その結果、より薄い板厚や、より高いシリコン含有量の鋼種を、生産安定化のための長い試行期間を必要とせず、短期間でかつ適切な圧延速度で立ち上げることができた。

図9は、設備が“運転開始可能 (ready for operation)”という初期マイルストーンを達成してから最初の一週間で実現した製品マトリックスを示しており、**シリコン含有量が3%超の電磁鋼板や、最終板厚が0.3mm未達の電磁鋼板**も含まれている。

形状制御については、ストリップ幅に応じて中間ロールをシフトするというHYPER UC-MILLのシンプルな原理によって容易に行える。

さらに柔軟で高精度なプロセスモデルにより、幅広い鋼種や寸法に対して信頼できる設定値を提供でき、これまで一度も圧延したことのない製品であっても適切に対応できる。

Steel grade	Percentage of coils	Percentage of production				
		Strip width (mm)	1000-1099	1100-1199	1200-1299 1300-1399	
D13	9.5%	0.2-0.3	0.53%		1.05%	
D16	12.2%	0.3-0.4	7.89%	6.84%	11.58%	
D24	24.9%	0.4-0.5			1.58%	
D27	43.4%	0.5-0.6	2.63%		43.16%	
D31AL	7.7%	0.6-0.7			8.95%	
D32AX	1.4%	0.8-0.9	1.05%		1.58%	0.53%
DP800	0.9%	0.9-1	0.53%		2.11%	
		1-1.1			8.42%	
		1.2-1.3				0.53%
		1.4-1.5			0.53%	
		1.5-1.6			0.53%	

図9 運用開始後1か月以内の製品構成

5.2 潤滑と冷却

ミルには、ロールバイト内の摩擦、ロールとストリップの温度、及び全体的な圧延条件を制御するように設計された、高い柔軟性を有する一連のアクチュエータが備えられている。これらアクチュエータは、製品のグレード、圧延方向、パス回数、及びパススケジュールによって作動する(図10)。従来のロール冷却及びロールギャップ潤滑システムは、潤滑と温度制御の両方の機能

を果たし、安定したストリップ平坦度の制御に大きく貢献する。

そして、MQL やストリップ冷却などの新規導入のアクチュエータは、必要な潤滑及び冷却方案に応じて選択的に起動できる。この構成により、ロールギャップ潤滑とストリップ温度管理が効果的に分離され、摩擦挙動と熱条件の双方を独立して最適化することが可能になる。極薄ゲージを生産するには低摩擦を維持することが不可欠であり、一方で、電磁鋼板生産における重要な要件である脆性を防止し、安定した圧延性能と最終製品品質を確保するには、正確なストリップ温度制御が不可欠である。

プラント全体に複数の温度計測装置が設置され、ストリップ温度を継続的に追跡し、4章で述べたとおり、望ましいプロセス温度範囲内に制御する。そして、MQL とストリップ用インダクションヒーターの組合せにより、最初のパスにおいて適切なストリップ初期温度が確保されるため、低い温度によって引き起こされるストリップ破断を防止できる。入口セクションと出口セクションの両方で、熱光学システムがリアルタイムの 2 次元温度分布を検出し、ストリップの長さ方向と幅方向にわたって正確な温度評価を可能にする。

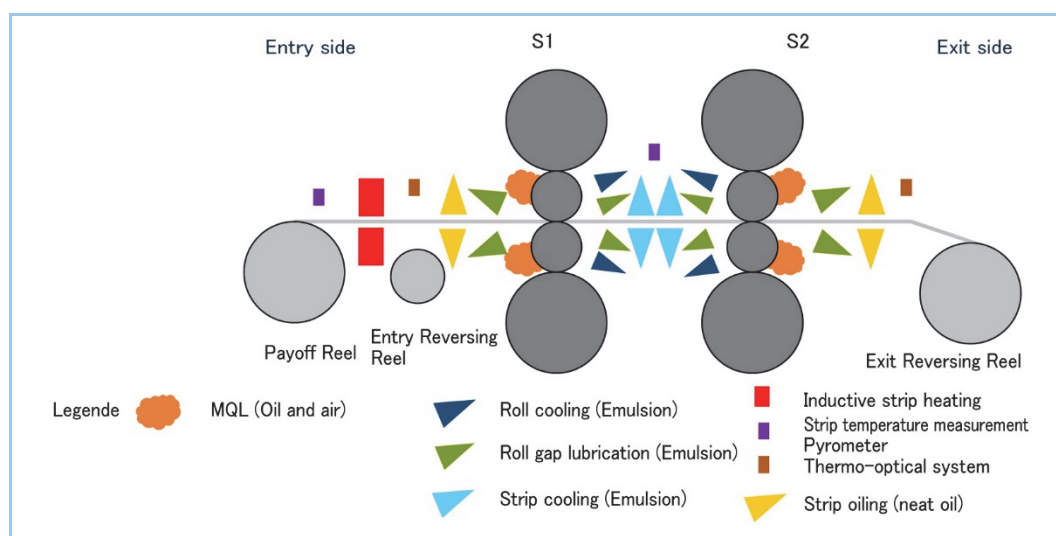


図 10 潤滑及び冷却アクチュエータの概略図
(表示されている機器のうち、各パスで選択された機器のみが稼働する)

5.3 形状制御

電磁鋼板の圧延における最も重要な要素の 1 つである板エッジ荷重は、中間ロールのチャンファーを正確にセットすることによって制御される。これにより、エッジ領域における圧延圧力とストリップ張力の最適なバランスが確保される。この最適化方案は、各パスに個別に適用でき、圧延スケジュール全体にわたって板エッジ荷重をきめ細かく管理することができる。

ストリップ形状制御では、高度な平坦度モデルにより、パスごとにワークロールと中間ロールベンダー、中間ロールシフト、マルチゾーン冷却などの平坦度アクチュエータの最適な組合せが決定される。すべてのアクチュエータは、制御方案に完全に統合されている。理想的なセットアップが算出されると、クローズドループフィードバック制御によって、入側材料の特性のばらつきやミル条件の変化が引き起こす偏差が補正され、一貫して高いストリップ平坦度と製品品質が保証される。

6. 結論

本報では、thyssenkrupp Steel Bochum 社へ納入した 2 スタンド HYPER UC-MILL に導入され成功した最新のミルスタンド技術とイノベーションについて紹介した。HYPER UC-MILL は、ワークロールの小径化、ワークロールの直接駆動、及び非常に高いトルク伝達能力を備えたスピンドルを特徴とする新世代の 6 段冷間圧延機であり、これに導入された技術は、現代のタンデム及び

リバーミルに望まれる基準性能を確立しているだけでなく、既存の設備を改造するための費用対効果の高いソリューションを提供する。その卓越した圧下性能、優れた形状制御能力、最小に抑えられたエッジ荷重、及び標準化されたロール在庫により、HYPER UC-MILL は高強度鋼及び薄板冷間圧延製品を生産するための最適なプラットフォームとなっている。

ストリップ用インダクションヒーターの適用は、室温での高シリコン電磁鋼板生産に特有の脆性に関連する課題に効果的に対処する。精密な温度制御を可能にすることで、板のエッジクラックや板破断のリスクを大幅に低減し、より安定した効率的な生産プロセスをもたらす。ストリップ用インダクションヒーターとMQLを組み合わせることで、高効率のロールバイト潤滑を確保しながら所望のストリップ温度レベルを維持することができ、圧延条件がさらに向上する。この相乗効果は、優れた表面品質の達成、圧延荷重の低減、及び全体的なプロセスのロバスト性の向上に不可欠である。

HYPER UC-MILL®は、Primetals Technologies Japan 株式会社の日本における登録商標です。

参考文献

- (1) J. Kwon, H. Huh, and J. Kim (2017), "Evaluation of the Ductile-to-Brittle Transition Temperature of a Silicon Steel Under Various Strain Rate Conditions With a Servo-Hydraulic High Speed Testing Machine", Met. Mater. Int., vol. 23, no. 4, pp. 736-744