
寸法・材質の均質性を高めた熱延鋼板

High Quality and High Grade Hot Strips of Uniform Dimensions and Mechanical Properties

潮海 弘資 (Hiroshi Shiomi) 加地 孝行 (Takayuki Kaji) 北浜 正法 (Masanori Kitahama)

要旨：

川崎製鉄千葉製鉄所第3熱間圧延工場は、仕上げミル全スタンドへACモーター、油圧圧下装置、ペアクロスミルを採用した新鋭ミルである。また世界で初めてシートバー接合による熱延鋼板の連続圧延を実現している。さらに仕上ミルスタンド間に配置された各種センサーを活用した高精度な寸法・材質制御システムを構築し、人間の介入がない完全自動圧延を実現している。これら先進の制御機能により、本ミルでは従来ミルに比べて、寸法・材質の均質性を飛躍的に向上させた熱延鋼板の製造を可能とした。これにより需要家は、冷延鋼板の使用を一部熱延鋼板へ置き換えることによるコスト削減が可能となった。また、冷間圧延工程での消費エネルギーの削減を通じ地球環境保全にも寄与することができる。

Synopsis：

Kawasaki Steel Chiba Works No. 3 hot strip mill is one of the latest mills. At this mill, the most advanced technologies, such as AC-motor drives, hydraulic screwdown, and pair cross rolling systems, are applied to all stands of finishing train. Thickness gauges, profile meters and pyrometers are installed not only on the delivery side but also on the intermediate stands of finishing mills. By using these sensors and actuators, feedback and feedforward controls of gauges and temperatures succeeds more accurately and in higher response than those at conventional hot strip mills. By using this advanced mill, Kawasaki Steel can supply hot rolled coils of highly uniform dimensions and mechanical properties. Customers can reduce their material costs by adopting our hot rolled products to applications where cold rolled coils used to be used. And Kawasaki Steel can contribute to the saving of cold rolling energy by supplying these hot rolled products and this ultimately conduces to global environment protection.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

High Quality and High Grade Hot Strips of Uniform Dimensions and Mechanical Properties



潮海 弘資
Hiroshi Shiomi
千葉製鉄所 熱間圧延
部熱延技術室長



加地 孝行
Takayuki Kaji
千葉製鉄所 制御技術
部制御技術室 主査
(課長補)



北浜 正法
Masanori Kitahama
技術研究所 加工・制
御研究部門長

要旨

川崎製鉄千葉製鉄所第3熱間圧延工場は、仕上げミル全スタンドへACモーター、油圧圧下装置、ベアクロスミルを採用した新鋭ミルである。また世界で初めてシートバー接合による熱延鋼板の連続圧延を実現している。さらに仕上げミルスタンド間に配置された各種センサーを活用した高精度な寸法・材質制御システムを構築し、人間の介入がない完全自動圧延を実現している。これら先進の制御機能により、本ミルでは従来ミルに比べて、寸法・材質の均質性を飛躍的に向上させた熱延鋼板の製造を可能とした。これにより需要家は、冷延鋼板の使用を一部熱延鋼板へ置き換えることによるコスト削減が可能となった。また、冷間圧延工程での消費エネルギーの削減を通じ地球環境保全にも寄与することができる。

Synopsis:

Kawasaki Steel Chiba Works No. 3 hot strip mill is one of the latest mills. At this mill, the most advanced technologies, such as AC-motor drives, hydraulic screwdown, and pair cross rolling systems, are applied to all stands of finishing train. Thickness gauges, profile meters and pyrometers are installed not only on the delivery side but also on the intermediate stands of finishing mills. By using these sensors and actuators, feedback and feedforward controls of gauges and temperatures succeeds more accurately and in higher response than those at conventional hot strip mills. By using this advanced mill, Kawasaki Steel can supply hot rolled coils of highly uniform dimensions and mechanical properties. Customers can reduce their material costs by adopting our hot rolled products to applications where cold rolled coils used to be used. And Kawasaki Steel can contribute to the saving of cold rolling energy by supplying these hot rolled products and this ultimately conduces to global environment protection.

1 緒言

千葉製鉄所第3熱間圧延工場は、ますます高度化する熱延鋼板への要求、特に寸法精度の厳密化、材質の均質性の向上、製造可能領域の拡大に対処すべく建設されたミルである¹⁻³⁾。1995年5月の稼動以来、その高度な制御機能を活用し、熱延鋼板に対する抜本的な改善を行ってきた。その1つが板厚1.2mm未満の極薄熱延鋼板の供給であり⁴⁾、もう1つが熱延鋼板の寸法、材質の均質性の飛躍的向上である。本報告では、これらの開発を可能とした、熱間圧延工場の設備、制御の概要と、実現した寸法、材質精度の水準について述べる。

2 熱延鋼板に対する寸法・材質要求の高度化

Fig. 1に千葉製鉄所における熱延および冷延鋼板の製造可能範囲を示す。熱間圧延と冷間圧延の製造可能範囲はオーバーラップしている。第3熱間圧延工場の稼動により熱間圧延での製造可能範囲は

さらに薄く広い側へ拡がり、両者が共存する範囲が拡大した。このラップ域において、需要家は、熱延鋼板と冷延鋼板の両方から材料を選択することが可能である。しかし、価格の優位にある熱延鋼板が選択される可能性は必ずしも高くない。これは、表面性状から冷延鋼板が要求される場合でなくとも、熱延鋼板の寸法、材質の均質性が冷延鋼板に対し劣る場合が多く、厳格な用途では冷延材の使用が一般的となっているためである。Fig. 2にJISによる熱延鋼板と冷延鋼板の厚み公差を示す。この差のため、以下に示すような用途では熱延鋼板の供給可能な寸法範囲であっても冷延鋼板が選択される場合が多い。

- (1) 製品の重量公差が厳格なため、素材の寸法公差が厳格に管理されるもの(ドラム缶用素材など)
- (2) 製品の軽量化のために、寸法公差下限に近い目標厚が求められるもの(建材用素材など)
- (3) 積層使用のため、素材間の板厚バラツキが規制されるもの(チェーン用リンクプレート素材など)
- (4) 製品表面の平坦度要求のため、加工後機械加工がほどこされるもの(クラッチプレート用素材など)

しかし、これら用途についても、コスト低減のために熱延鋼板の適用が検討されることが多くなってきた。このような要求に応えるべ

*平成11年6月1日原稿受付

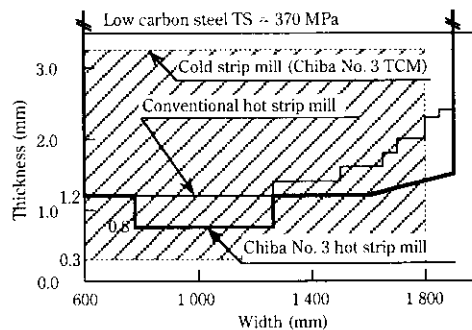


Fig. 1 Production range

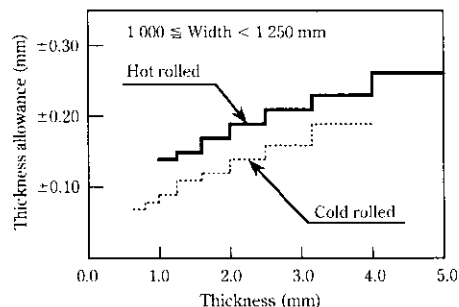


Fig. 2 Thickness allowance of hot and cold rolled coils (according to JIS)

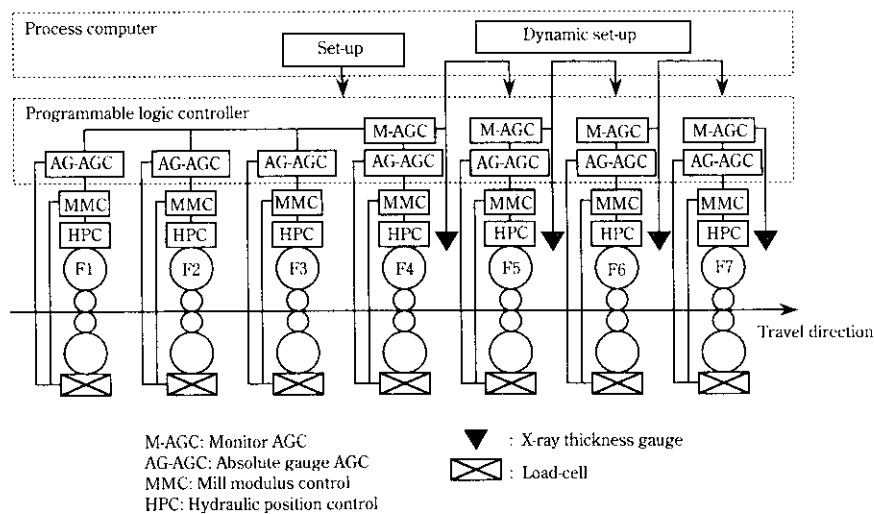


Fig. 3 Outline of automatic gauge control system in Chiba Works No. 3 hot strip mill

く、川崎製鉄では、千葉製鉄所第3熱間圧延工場の高度な制御機能を用い、寸法および材質の均質性が飛躍的に向上した熱延鋼板の開発を完了した。これにより、需要家は、冷延鋼板の使用を一部熱延鋼板に置き換えることによるコスト低減、あるいは寸法精度が向上した鋼板を用いることによる製品の軽量化が可能となった。さらに、冷間圧延での消費エネルギーを削減することにより地球環境保全へも寄与している。

3 熱延工場における寸法・材質制御の高度化

3.1 高精度板厚制御技術^{8~10)}

第3熱間圧延工場では、仕上ミル全スタンドに高応答性の油圧圧下装置、AC モーター、低慣性ルーバーを採用するとともに、後段4スタンドに設けたX線板厚計を用いた高精度制御システムを構築することにより、大幅な板厚精度の向上を達成した。Fig. 3に本制御システムの構成を示す。板厚制御は、圧延前に圧延荷重を予測してロール圧下位置を決定するセットアップ制御と、圧延開始後に目標とする板厚との誤差を修正するAGC制御からなっている。セットアップ制御については、従来の予測制御に加え、最先端の制御誤差を各スタンド出側のX線板厚計で検出しこれを用い下流スタンドのセットアップに補正を加えるダイナミックセットアップ制御を付加することにより改善を行った。AGC制御は、セットアップ時の誤差を速やかに修正し板厚を目標値に収束させ、さらにその後

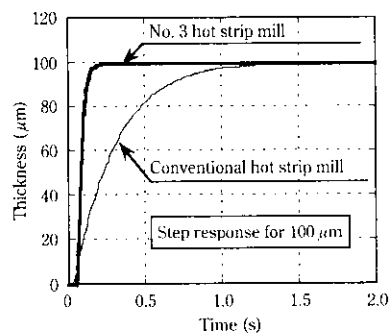


Fig. 4 Comparison of AGC response

発生する外乱に対し圧下位置を調整して板厚変動を発生させないために用いられる。AGC制御の性能は板厚外乱に対する修正速度で評価できる。しかしながら従来のミルでは、圧下の応答を単独で上げるとマスフローのバランスが崩れ通板トラブルが発生するため、これを一定値以下に抑える必要があった。これに対し本ミルでは、主機のACモーター化によるマスフロー制御系の応答速度の向上および新張力制御の適用により、板厚修正速度をFig. 4に示すようにステップ応答で従来ミルの5倍以上に改善することができた。これら制御の適用により第3熱間圧延工場ではFig. 5に示すようにストリップの最先端からの精度の高い板厚制御を行うことが可能となっている。実圧延での効果をFig. 6に示す。Fig. 6は仕上ミルへ進入するシートバーの先端部に約20℃の温度変動が存在した場合

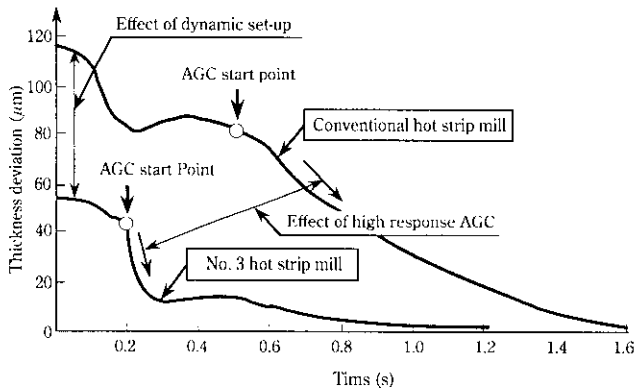


Fig. 5 Outline of thickness control at leading end of strip

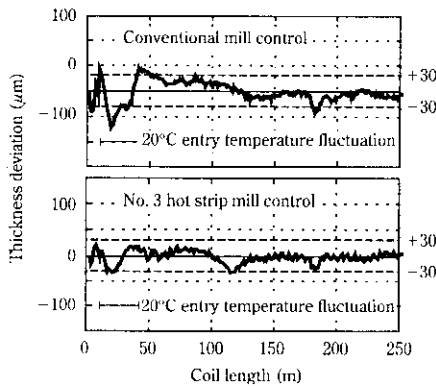


Fig. 6 Comparison of thickness accuracy

の厚みへの影響を示したものである。本ミルにおける新制御の適用により温度変動部でも $\pm 30 \mu\text{m}$ の範囲に変動を抑制できている。この結果、従来の第2熱間圧延工場では最先端部の板厚のバラツキが $\sigma = 35 \mu\text{m}$ 以上であったものが、本ミルでは約 1/2 の $17 \mu\text{m}$ に低減され、コイル先端から均一な板厚を実現することができた。

3.2 クラウン低減技術

板厚の均質性を議論する上では、板幅方向の板厚偏差であるクラウン（中心板厚－エッジ部板厚）をいかに低減するかがもう一つの課題である。Fig. 7 にクラウン制御の概要を示す。本ミルでは全スタンドにクラウン制御能力の高いペアクロスミルと強力なワークロールベンダーを採用し、クラウンを広範囲に制御することが可能である。また、従来ミルでは最終スタンド出側にしか設置されていなかったプロフィール計を F4, F5, F7 スタンドの出側に設置し、これをクラウン予測モデルの学習に用いることで制御精度の向上を図っている。さらに全スタンドでワークロールベンディング力の荷重連動制御を実施し、コイル長手方向のクラウンの均質性を確保している。Fig. 8 にこれら制御による改善効果を示す。エッジ 25mm 位置でのクラウン値で $25 \mu\text{m}$ という低クラウンを目標とした材料においても従来ミルの 1/2 のバラツキで安定的に制御できている。

3.3 材質バラツキの低減技術^{11, 12)}

熱間圧延においては、仕上ミル出側温度 (FDT) とコイル巻取り温度 (CT) がコイルの機械的性質を決定する重要な因子である。しかしながら、これら温度制御は自動化が遅れ、オペレータ介入に起因するバラツキが材質均質化の1つの障害となっていた。これに對

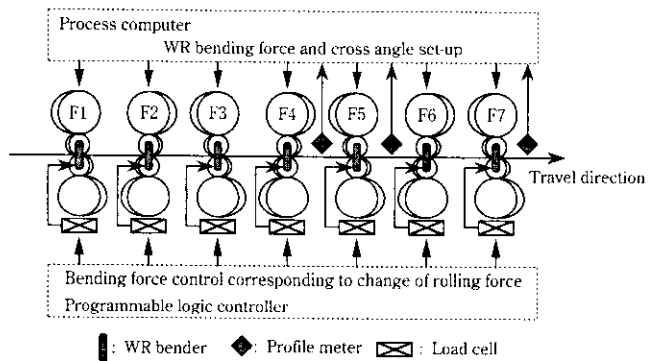


Fig. 7 Outline of crown control system in No. 3 hot strip mill

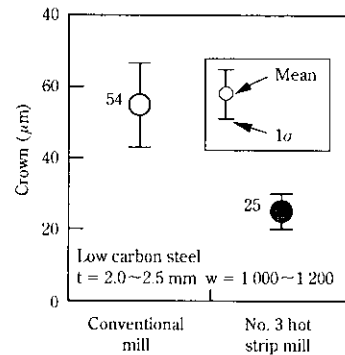


Fig. 8 Crown accuracy

し本ミルでは、

(1) ランアウト冷却装置への大型ヘッドタンク導入による冷却水量の安定化

(2) ON-OFF 応答のよい冷却ヘッダーの開発

などのハードウェアの改善とともに、Fig. 9, 10 に示すフィードフォワード制御とフィードバック制御を組み合わせた制御系の構築を行い、FDT, CT とともに完全自動の高精度制御を実現している。Fig. 11, 12 に FDT, CT の制御結果を示す。これら制御はコイル全長にわたり適用されており先尾端のごく一部をのぞき温度変動を $\pm 20^\circ\text{C}$ 以内に抑制することが可能となった。また完全自動化することにより人的要因による変動を取り除くことができ、材質の再現性を向上させることができた。

4 寸法・材質の均質性を高めた熱延鋼板の製造実績

Fig. 13 にメッキ素材として製造された、板厚 1.4 mm, TS 440 MPa 級の板厚バラツキの実績を示す。板厚の長手方向バラツキは先尾端の最大値で $\pm 45 \mu\text{m}$ であり、さらにクラウンのバラツキを考慮しても冷延鋼板の JIS 規格値である $\pm 110 \mu\text{m}$ 以内を十分に満足している。Fig. 14 は同材の TS および伸び値 (EI) のバラツキを従来ミルの熱延鋼板と比較したものである。材質のバラツキも温度制御の高精度化と出鋼成分の適正管理により、従来の約 2/3 から 1/2 に低減することができている。

5 エンドレス圧延による均質性の向上¹³⁾

これまで述べたように、第3熱間圧延工場では、高精度・高応答の設備・制御の適用により寸法および材質の均質性が飛躍的に向上

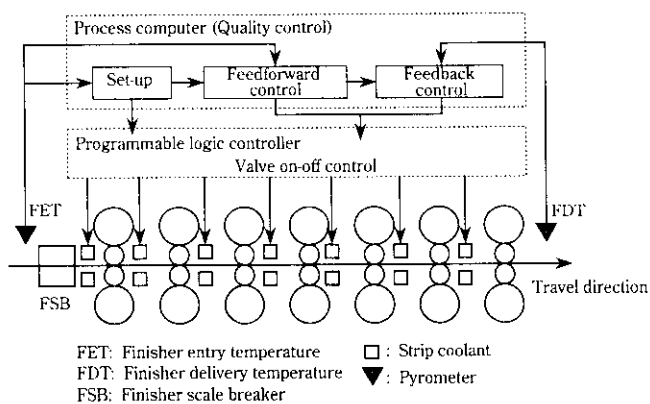


Fig. 9 Outline of FDT control system in No. 3 hot strip mill

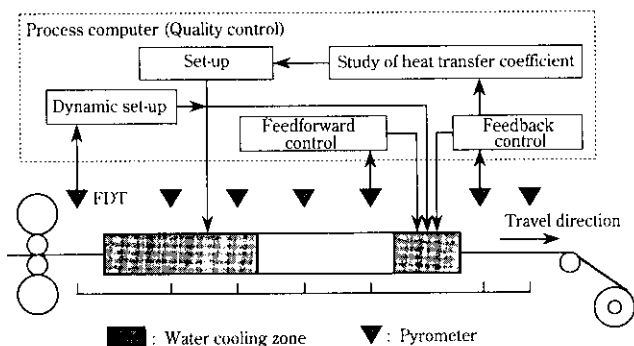


Fig. 10 Outline of coiling temperature (CT) control system in No. 3 hot strip mill

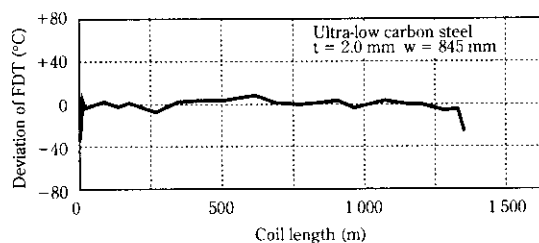


Fig. 11 Example of finisher delivery temperature

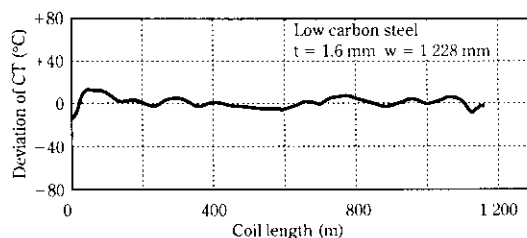


Fig. 12 Example of coiling temperature (CT)

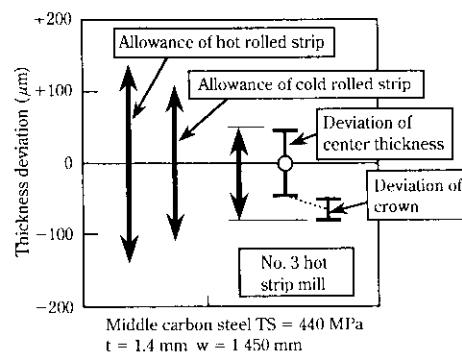


Fig. 13 Thickness deviation of 1.4 mm thickness product

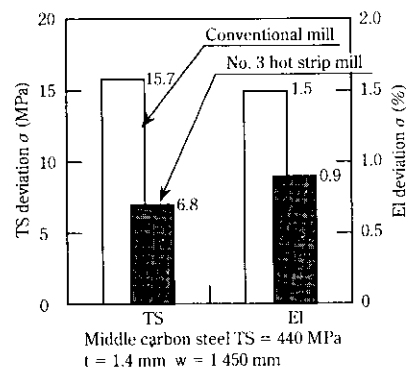


Fig. 14 Deviation of mechanical property

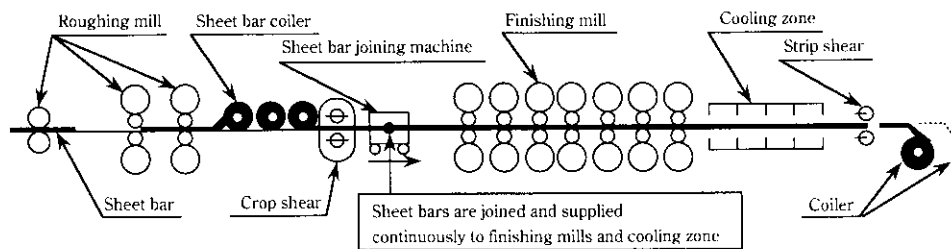


Fig. 15 General composition of "Endless rolling"

した熱延鋼板の製造が可能となった。しかしながら、15～30tのスラブをバッチ的に圧延する従来の熱間圧延プロセスでは、このスラブ単位ごとに先尾端に数%の非定常領域が存在する。この部分は圧延時張力が作用しないため、定常部に比べ厚み、クラウンの変動が大きくなっていた。また圧延時の形状も乱れやすく、温度の均一性

を乱す要因となっていた。これに対し、第3熱間圧延工場において世界に先駆け実現したエンドレス圧延プロセスは、複数のスラブを仕上圧延機入側で接合し、これを連続的に仕上圧延機へ供給することによりこの問題を回避することができた。Fig. 15にエンドレス圧延の概念を示す。Fig. 16, 17はエンドレス圧延により製造され

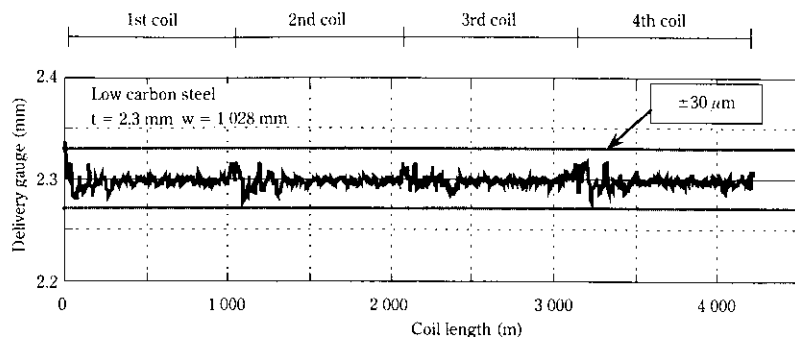


Fig. 16 Deviation of thickness by endless rolling

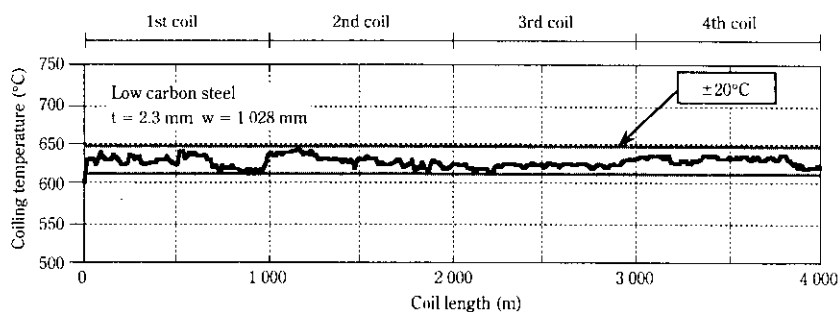


Fig. 17 Deviation of coiling temperature by endless rolling

Table 1 Comparison of on-gauge ratio

		Thickness deviation $\pm 30 \mu\text{m}$	FDT $\pm 20^\circ\text{C}$	CT $\pm 20^\circ\text{C}$
Conventional mill	Batch rolling	96.0%	83.5%	85.2%
No. 3 hot strip mill	Batch rolling	97.9%	99.3%	96.3%
	Endless rolling	99.6%	99.8%	99.0%

Low carbon steel: $t = 2.0 \sim 2.5 \text{ mm}$, $w = 1000 \sim 1200 \text{ mm}$

たコイルの厚み実績と巻取り温度 (CT) の実績を示す。シートバーの接合点においても定常的な圧延が継続されており、製品全長にわたる均質性が確保されていることがわかる。本プロセスの適用による板厚、温度のオンゲージ率向上の効果を Table 1 にまとめる。板厚、温度ともにオンゲージ率 99% 以上を達成しており、全長にわ

たり均質性をさらに向上させたコイルの供給が可能となった。

6 結 言

千葉製鉄所に新設された第 3 熱間圧延工場の高度な制御機能を用いることにより以下の成果が得られた。

- (1) スタンド間板厚計と高応答 AGC システムの適用により先端板厚偏差を半減した。また、ベアクロス圧延機の適用により $20 \sim 30 \mu\text{m}$ の低クラウン圧延を安定して実現した。この結果冷延鋼板の板厚公差を満足する熱延鋼板の製造が可能となった。
- (2) 高精度の冷却制御システムを開発し、温度変動を $\pm 20^\circ\text{C}$ 以内に抑制することが可能となった。この結果、材質のバラツキを従来の約 $2/3 \sim 1/2$ に低減した鋼板の製造が可能となった。
- (3) エンドレス圧延を適用することにより、これら均質性を鋼板全長にわたり安定的に達成することが可能となった。

参 考 文 献

- 1) 小川靖夫, 中村武尚, 北尾齊治: 川崎製鉄技報, **27**(1995)3, 131
- 2) 武智敏貞, 古田邦雄, 中塚伸治, 竹嶋力男, 新田純三, 前田 一郎: 材料とプロセス, **9**(1996)2, 333
- 3) 及川良介, 竹川英夫, 石川 孝, 弓手崇生, 長田雅史: 材料とプロセス, **9**(1996)2, 334
- 4) 福井義光, 竹川英夫, 野村信彰, 古村宏之, 川瀬隆志, 三吉貞行: 材料とプロセス, **9**(1996)2, 335
- 5) 伊藤伸宏, 竹川英夫, 音田聡 一郎, 市井康雄, 藤沢昭雄, 今関敏夫: 材料とプロセス, **9**(1996)2, 336
- 6) 北尾齊治, 新田純三, 市井康雄, 三吉貞行, 湯沢秀行, 金田欣亮: 材料とプロセス, **9**(1996)2, 265
- 7) T. Kukizaki, H. Shiom, H. Nikaido, and I. Hishinuma: SEAI 1999 Taiwan Conf., (1999)2, Paper 17/1
- 8) 山本和宏, 加地孝行, 浅野一哉, 川瀬隆志, 新田純三, 野村信彰: 材料とプロセス, **9**(1996)5, 936
- 9) 加地孝行, 三吉貞行, 内山貴夫, 竹林克浩, 野村信彰: 材料とプロセス, **10**(1997)2, 389
- 10) 井上正敏, 藤本隆史, 潮海弘資, 上村正樹, 上原 淳, 村山 薫, 古田 博, 小関智史: 鉄と鋼, **79**(1993)6, 177
- 11) 橋本高男, 中田直樹, 前田 一郎, 八尋和広: 材料とプロセス, **9**(1996)5, 999
- 12) 中田直樹, 前田 一郎, 内牧信三, 伊藤伸宏: 材料とプロセス, **9**(1996)5, 1000
- 13) 二階堂英幸, 磯山 茂, 野村信彰, 林 寛治, 森本和夫, 坂本秀夫: 川崎製鉄技報, **28**(1996)4, 26