

Equipment and Operation of New Ultra-High Speed Continuous Annealing Line for Tin Mill Black Plates



大野 浩伸
Hironobu Ohno

千葉製鉄所 第1冷間
圧延部冷延技術室 主
査(掛長)



八角 忠明
Tadaaki Yasumi

千葉製鉄所 第1冷間
圧延部冷間圧延課 主
任部員(掛長)



下山 雄二
Yuji Shimoyama

エンジニアリング事業
部 圧延技術部冷延技
術室 主査(課長)



大西 建男
Takeo Ohnishi

千葉製鉄所 工程部長



中村 武尚
Takehisa Nakamura

千葉製鉄所 設備技術
部機械技術室 主査(部
長補)



千野 俊彦
Toshihiko Chino

千葉製鉄所 保全部
保全技術室 主査(掛長)

1 緒 言

千葉製鉄所第1冷間圧延工場は、ぶりき・ティンフリースチール用の原板を主体とした表面処理用極薄冷延鋼板の製造工場である。ここに、近年の需要家の製品品質への要求の高度化にこたえ、かつ大幅な生産性向上を達成するために、No. 4 連続焼鈍設備 (CAL) を設置し、1990年3月に稼働を開始した。No. 4 CAL の最大の特徴は、全調質度範囲のぶりき原板の製造を1ラインで可能にしたことである。

従来、ぶりき原板の製造においては、要求される製品調質度に応じて製造プロセスが異なっていた。Fig. 1 に示すように、調質度 T1~T3 の軟質材は箱焼鈍を、調質度 T4~T6 を硬質材は連続焼鈍を行い、さらに高い硬度を要求される調質度 DR8~DR10 については、焼鈍後2回圧延 (double reducing (DR) 圧延) を行っていた。しかし、一般に連続焼鈍材の方が、箱焼鈍材よりも材質の均一性やめっき後の耐食性の点で優れている。また、従来の方式では製造ブ

要旨

近年のぶりき原板への品質要求の高度化にこたえ、かつ生産性を大幅に向上させるために、千葉製鉄所第1冷間圧延工場に No. 4 連続焼鈍設備 (CAL) を設置し、1990年3月に稼働を開始した。No. 4 CAL では、炉後部に広範囲な圧下率が得られる多目的圧延機と精整設備を連続化し、極低炭素鋼の焼鈍と組み合わせることにより、1ラインで全調質度のぶりき原板を製造することを可能とした。また、ぶりき原板のゲージダウン要求に対応するため、高精度張力制御技術、バックリング防止技術の開発を行い、板厚 0.15 mm の極薄鋼板を炉部最高速度 1000 m/min の高速で通板することを可能とした。さらに、ワークロールハンドリングをはじめとした全設備にわたる徹底した自動化を行った。

Synopsis:

At Chiba Works, newly designed No. 4 continuous annealing line (CAL) was installed in No. 1 Cold Rolling Plant and commenced its operation in March 1990. This CAL is expected to satisfy the recent demand of customers for product quality and also to contribute to the improvement of productivity. No. 4 CAL integrated the continuous annealing furnace, multipurpose cold rolling mill (which is able to gain wide range reduction), and finishing equipment. Combining the multipurpose cold rolling mill and annealing of ultra low carbon steel made it possible to produce all temper grades tin mill black plates on No. 4 CAL alone. New advanced tension control system and the technique for buckling prevention were developed to achieve a high operating speed of 1000 m/min in the furnace for ultra-thin tin mill blackplates with a thickness of 0.15 mm. Moreover, full automation was accomplished.

プロセスが複雑であり、製造期間が長いという問題があった。

これに対し、当社では素材成分と焼鈍後の圧延圧下率の組合わせで鋼板硬度を作りわけする KM-TEC (Kawasaki Steel multi-temper grade control) と呼ぶ技術を開発し、ぶりき原板製造プロセスの完全 CAL 化を進めている²⁻⁴⁾。No. 4 CAL は、この技術を実現する中核ラインとして設計され、連続焼鈍炉の後に広範囲な圧下率が得られる多目的圧延機を設置した。さらに、CAL 化による製造期間の短縮効果を最大限に発揮するために、ぶりき原板として出荷を行うための精整設備を連続化した。

No. 4 CAL のもう一つの特徴は、極薄鋼板の高速通板を可能にしたことである。現在、Al 等の他素材缶との競合や輸入缶の増大に対して、ぶりき原板のゲージダウンによるコストダウンが進められている。そして、今後この傾向はさらに増大するものと思われる。この要求にこたえ、かつ生産性を向上させていくためには、極薄鋼板を高速で安定通板する技術が必要である。No. 4 CAL は、

* 平成3年10月1日原稿受付

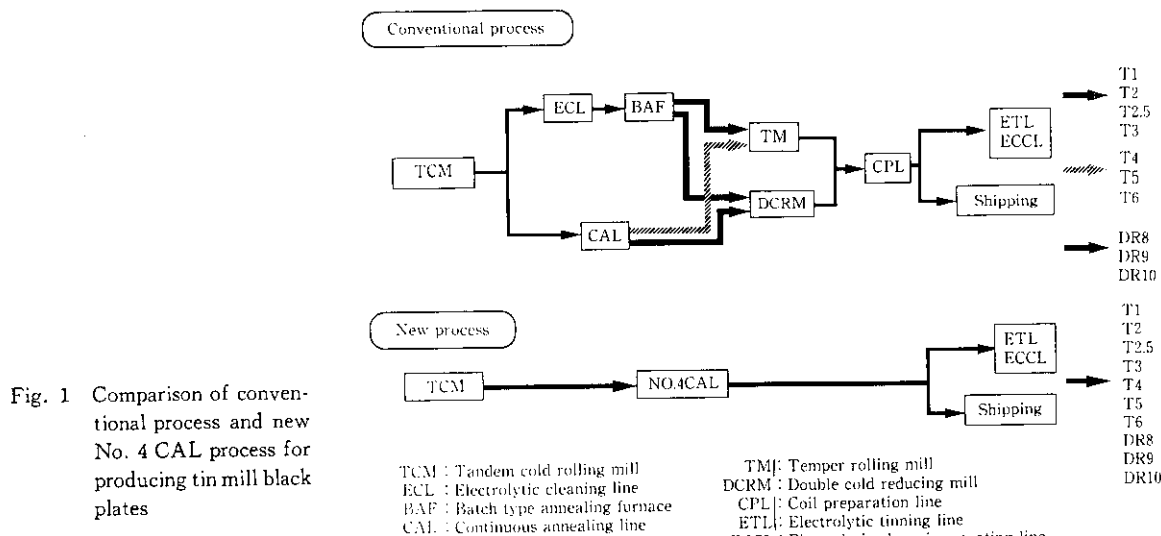


Fig. 1 Comparison of conventional process and new No. 4 CAL process for producing tin mill black plates

この面において他に例を見ない最小板厚 0.15 mm の極薄鋼板を炉部最高速度 1 000 m/min で通板することを可能にした。

本稿では、この No. 4 CAL の設備と操業状況について述べる。

2 設備概要

2.1 工場レイアウト

Fig. 2 に、第 1 冷間圧延工場における No. 4 CAL の配置を示す。連続式冷間圧延機 (No. 2 TCM) で圧延されたコイルは、シャトル方式の台車と自動コイルストレージヤードから構成される自動搬送システムにより、製造命令に応じて自動的に No. 4 CAL へ搬送される⁹⁻¹⁰⁾。No. 4 CAL で処理されたコイルのうち、輸出用ぶりき原板 (ローモ) は、そのまま梱包ラインへ搬送され、その後出荷される。また、工場内でぶりきあるいはティンフリースチールに仕上げられるものは、そのままめっきラインへと搬送される。このように、No. 4 CAL とコイル自動搬送システムの効果があいまって、従来に比べて極めて単純な製造工程を実現した。

2.2 ライン仕様

No. 4 CAL の主仕様を Table 1 に示す。本ラインは、大きく分けて、クリーニングおよびニッケルめっきを含む入側設備、炉設備、多目的圧延設備、トリマーおよびオイラーを含む出側精整設備から構成されている。ライン全体のレイアウトを Fig. 3 に、多目的圧延機と出側ルーバーの外観を Photo 1 に示す。

2.3 入側設備

ペイオフリール、コイル先端通板装置および溶接機等で構成される入側では、徹底した自動化に設計の主眼を置いた。また、クリーニング設備においては、高速通板性を確保するため、カタナリー防止用サポートロールを設置した。さらに、炉内での蛇行防止対策として、鋼板形状矯正用のテンションレベラーを設置した。

2.4 炉設備

炉設備は、加熱帯、均熱帯、第 1～第 3 冷却帯および水冷装置から構成されている。特に、極薄の極低炭素鋼を安定に通板するため、第 1～第 3 冷却帯のヘルパーロールまわりには、ラジアントチ

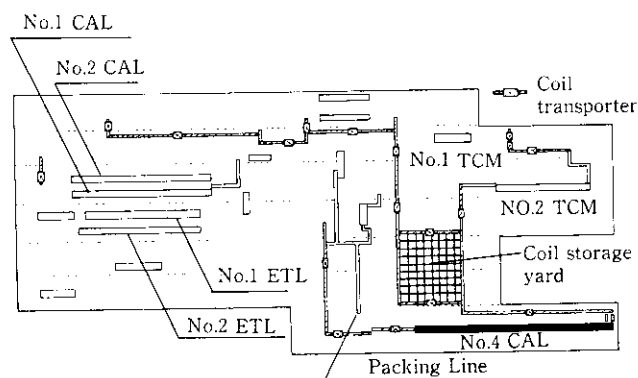


Fig. 2 Location of No. 4 CAL in No. 1 Cold Rolling Plant

Table 1 Main specifications of No. 4 CAL

Strip	Thickness (mm)		0.15~0.40
	Width (mm)		600~1 067
Coil	Max. weight (t)		22
	Inner diam-eter	Entry (mm)	419, 508
		Exit (mm)	406, 419, 508
Maximum speed	Entry (m/min)		1 200
	Furnace (m/min)		1 000
	Delivery (m/min)		1 400
Furnace capacity (t/h)			100
Annual production (t/year)			560 000

ューブタイプの電気ヒーターを集中的に配置し、サーマルクラウンを制御できるようにした。また、加熱帯前半のヘルパーロールには、ガスジェット冷却によるサーマルクラウン制御装置を設置し、特に幅狭材での蛇行防止を図った。

2.5 圧延設備

圧延機には、4 Hi-2 スタンドタイプを採用した。主仕様を

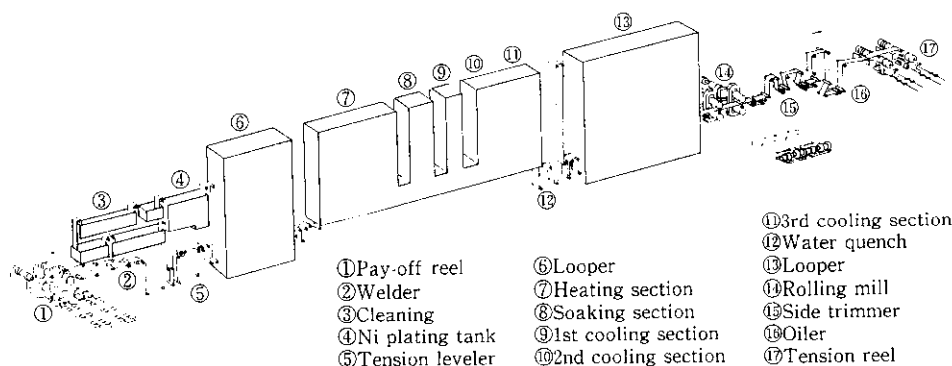


Fig. 3 Layout of No. 4 CAL

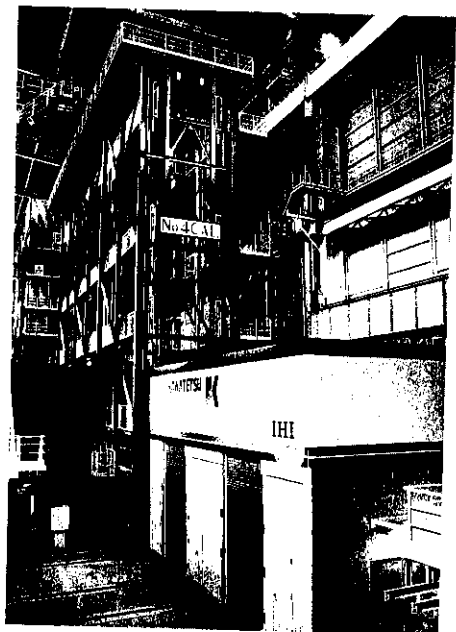


Photo 1 View of cold rolling mill and exit looper

Table 2 に示す。

2.6 出側精整設備

ローモの精整を行うために、トリマー、オイラーを備えている。品質管理用計測機器としては、板厚計、高精度板幅計、ピンホール検出器、高速用表面検査装置等が設置されている。また、ローモ特有の製品仕様を満たすために、溶接点巻込部表示用の紙片装入装置、製品スリーブの自動立体倉庫と装入装置、コイル尾端のテープ止め装置を設置したが、これらについては第5章で詳述する。

3 ぶりき原板調質度のつくり分け技術

3.1 KM-TEC 技術の概要

KM-TEC 技術の特徴は、軟質ぶりき原板を製造するに当たり、素材に極低炭素 Al キルド鋼を用いることである。Fig. 4 に KM-TEC 技術の概念図を示す。調質度 T1~T3 については、Nb を微量添加した極低炭素鋼を連続焼鈍し、その後の多目的圧延機におい

Table 2 Specifications of rolling mill

Mill type	2 stand tandem (4-Hi)	
Rolling mode	Dry skinpass	
	Wet skinpass	
	Double reducing	
Work roll diameter (mm)	500~550	
Backup roll diameter (mm)	1 200~1 300	
Motor power (kW)	No. 1 stand	2 200 (twin drive)
	No. 2 stand	1 100 (single drive)
Work roll bearing type	Tapered roller bearing	
Backup roll bearing type	Roller bearing	
Type of screw down	Hydraulic screw down	
Bending force (tf/chock)	+60 (Inc.)	
	-60 (Dec.)	
Roll crown control	Taper piston backup roll	

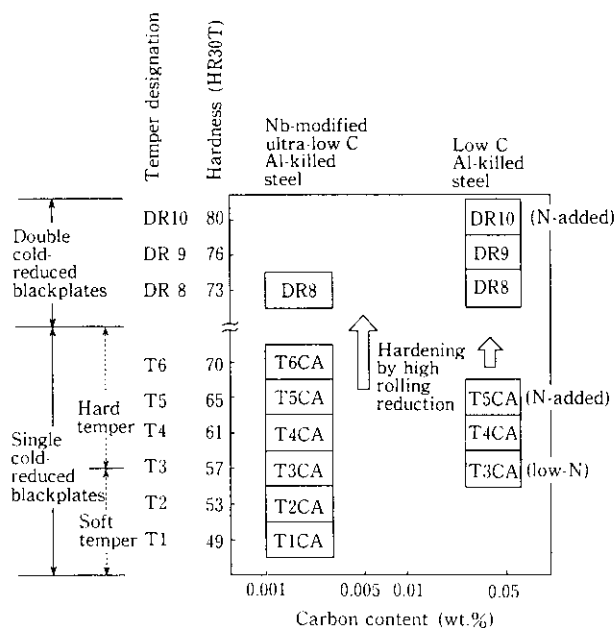


Fig. 4 Manufacturing process of tin mill black plates by KM-TEC

て圧下率を制御することにより、調質度をつくり分ける。調質度 T3 の一部は、N 量を規制した低炭素 Al キルド鋼素材を用いて、急冷・過時効サイクルで連続焼鈍することにより製造する。調質度 T4~DR10 については、低炭素 Al キルド鋼素材を用い、N 量の調整により調質度 T4 と T5 をつくり分け、さらに DR 圧延の圧下率を組み合わせることで、調質度 DR8~DR10 をつくり分ける。このように、調質度 T1~DR10 の全規格の製品を CAL で製造することができる。

3.2 極低炭素鋼のバックリング防止

焼鈍後の極低炭素鋼は、降伏強度が低く、非常に軟質である。また、Nb を微量添加した場合、再結晶温度が低炭素鋼に比べて約 100°C 高くなる。したがって、極低炭素鋼をぶりき原板のような極薄鋼板に用いると、連続焼鈍炉内でのバックリングが極めておこりやすい。さらに、バックリングは板厚が薄いほどより低い張力でもおこりやすくなるが、No. 4 CAL では、板厚 0.15 mm の極低炭素鋼板を炉内 1000 m/min という高速で通板する。このため、鋼板の蛇行を防止しつつ、バックリングを発生させないための技術開発が重要な課題であった¹¹⁾。

そこで、No. 4 CAL の建設に当たっては、有限要素法を用いたバックリングシミュレーションモデルを新たに開発した。これは、3次元で、かつ鋼板とロールの摩擦およびロールの回転を考慮したモデルである。Fig. 5 に本モデルによる解析結果の一例を示す。実現象と同様な、ロールへの巻付部での縦じわが再現されている。この縦じわによる幅方向の変位量に着目し、バックリングが発生したときの限界変位量を求めることにより、発生の有無を定量化した。Fig. 6 は、実ラインでのバックリング発生の有無を、本モデルから導出した限界張力算出式により評価したものである。バックリングの発生を精度良く予測できていることがわかる。このモデルを用いて、板厚 0.15 mm の極低炭素鋼でもバックリングが発生しないロール形状を設計した¹²⁾。

3.3 多目的圧延機

KM-TEC 技術の達成手段として、炉後部に多目的圧延機を設置した。この圧延機は、ドライスキンプラス、ウェットスキンプラスおよび DR 圧延機能を有し、1~30% という広範囲な圧下率を制御することにより、調質度をつくり分ける。Fig. 7 に圧延機の構成と制御システムを示す。制御システムは、伸び率制御系と板厚制御系に大別され、付与する圧下率と圧延モードに応じて、以下の3つの制御方法が可能である。

- (1) 伸び率制御1: 伸び率をスタンド間張力により制御
- (2) 伸び率制御2: 伸び率をミル入側ブライドル/No. 1 スタンド速度比により制御
- (3) 板厚制御: 板厚をミル入側ブライドル/No. 1 スタンド速度比により制御

また、極低炭素鋼と低炭素鋼の各圧延モードで要求される広範囲な圧延荷重下でも良好な鋼板形状を得るために、形状制御はベンダー、圧下レベリングおよび可変クラウンバックアップロール (TP ロール) により行われる。さらに、形状制御の外乱となるヒートクラウン軽減対策として、ドライスキンプラス時にはワークロールのチョック冷却、DR 圧延時には No. 2 スタンド出側のゾーンクーラントを採用し、形状制御システムに組込んだ。圧延モードの切替については、洗剤と温水によるミル洗浄装置と、熱風吹付けによるミル乾燥装置を設置して、時間短縮および全自動化を可能にした。

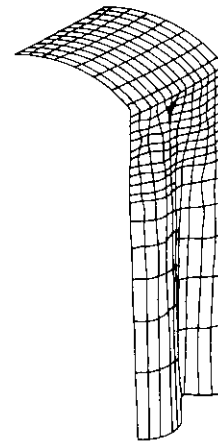


Fig. 5 An example of deforming shape of strip calculated by FEM simulation

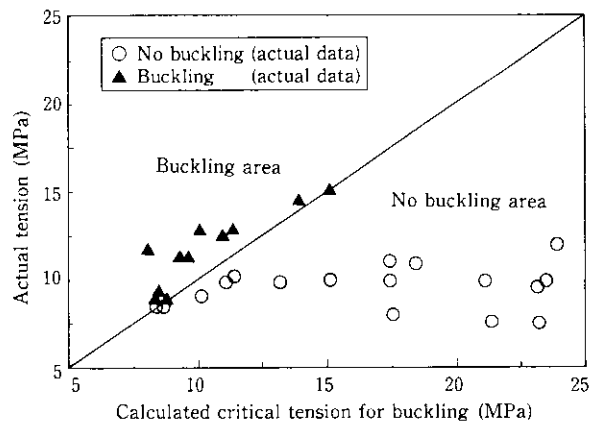
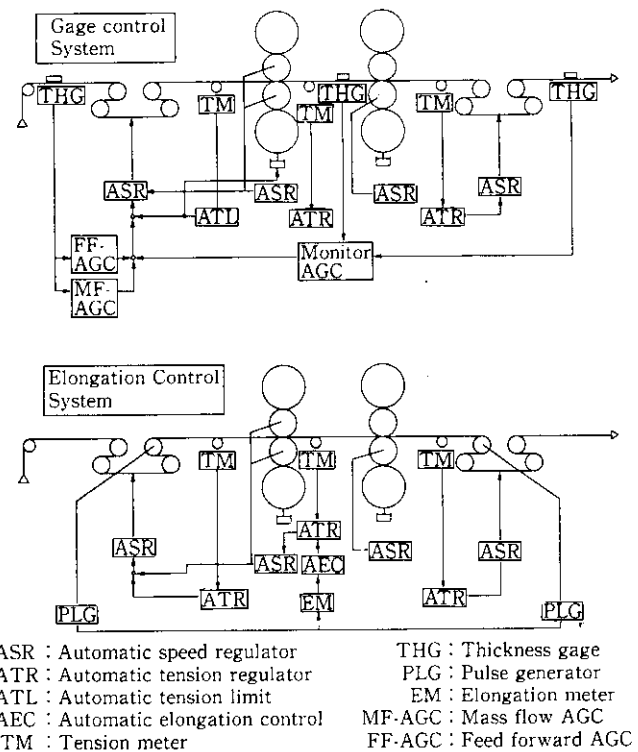


Fig. 6 Relation between actual tension and calculated critical tension for buckling



ASR : Automatic speed regulator
 ATR : Automatic tension regulator
 ATL : Automatic tension limit
 AEC : Automatic elongation control
 TM : Tension meter
 THG : Thickness gage
 PLG : Pulse generator
 EM : Elongation meter
 MF-AGC : Mass flow AGC
 FF-AGC : Feed forward AGC

Fig. 7 Rolling mill control system of No. 4 CAL

4 高速化技術

4.1 張力制御の高精度化

1000 m/min という高速での炉内安定通板を達成するには、従来にも増した高精度での張力制御が要求される。そのために、No. 4 CAL では、高機能ベクトルインバーターと低慣性高応答テンションデバイスを新たに開発した。これらにより、炉内における変動が $\pm 98 \text{ N} (\pm 10 \text{ kgf})$ 以内という、極めて高精度の張力制御を可能にした¹³⁾。

高機能ベクトルインバーターの構成を、従来タイプのものと比較して Fig. 8 に示す。ライン速度変更時に張力変動を発生させないためには、負荷状態でのロールの揃速性を徹底的に上げなければならない。揃速性を乱す要因には、ASR (automatic speed regulator) に付属させたドルーピングによる速度の低下、鋼板の慣性モーメントによる ASR 応答の低下および負荷トルクによる ASR 応答変化等がある。これらの変化分を補償するために、今回新たに次の3つの機能を追加した。

- (1) ドルーピングの影響を全く受けずに加減速を可能とする
FF (feed forward) 加減速電流補償機能
- (2) 鋼板の慣性モーメントに関係なく ASR 応答を常に一定にするための ASR ゲイン自動補償機能
- (3) 負荷トルク、機械損失トルク等に必要な電流を直接入力し、
速度と電流を同時に制御するダブルリファレンス機能

Fig. 9 に、炉速 1000 m/min を達成した時の張力を示す。炉速の変更時やストリップサイズの変更時にも、張力変動は $\pm 98 \text{ N} (\pm 10 \text{ kgf})$ 内である¹⁴⁻¹⁷⁾。

他方、炉外で発生した張力変動を炉内へ伝えないために、低慣性高応答テンションデバイスを炉入側に設置した。これは、Fig. 10 に示すように、トルクモーターによるアームスイング式ダンサーロールであり、従来方式に比べてメカニカルロスが 1/20 以内になっている。また、カウンターウェイトを併用しており、トルクモーターの容量を軽減するとともに、慣性モーメントを従来の 1/2 に低減している。

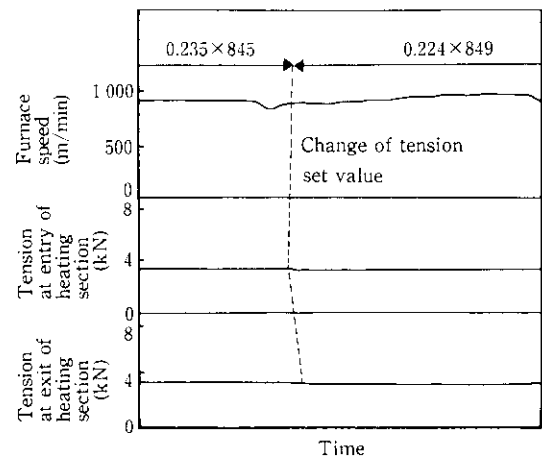


Fig. 9 Tension value chart at maximum line speed

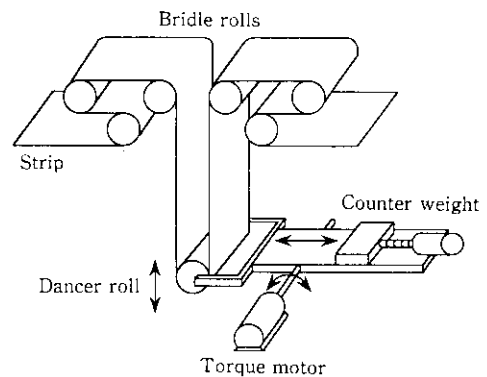


Fig. 10 Newly developed tension device

Fig. 11 に、本テンションデバイスを使用した時の効果を示す。入側の加減速が炉内張力へ及ぼす影響が、 $\pm 147 \text{ N} (\pm 15 \text{ kgf})$ から $\pm 49 \text{ N} (\pm 5 \text{ kgf})$ 以下に軽減されている¹⁸⁾。

4.2 ロール上での鋼板の浮上防止

通板速度が速くなると、鋼板とロールの間に巻き込まれる流体層

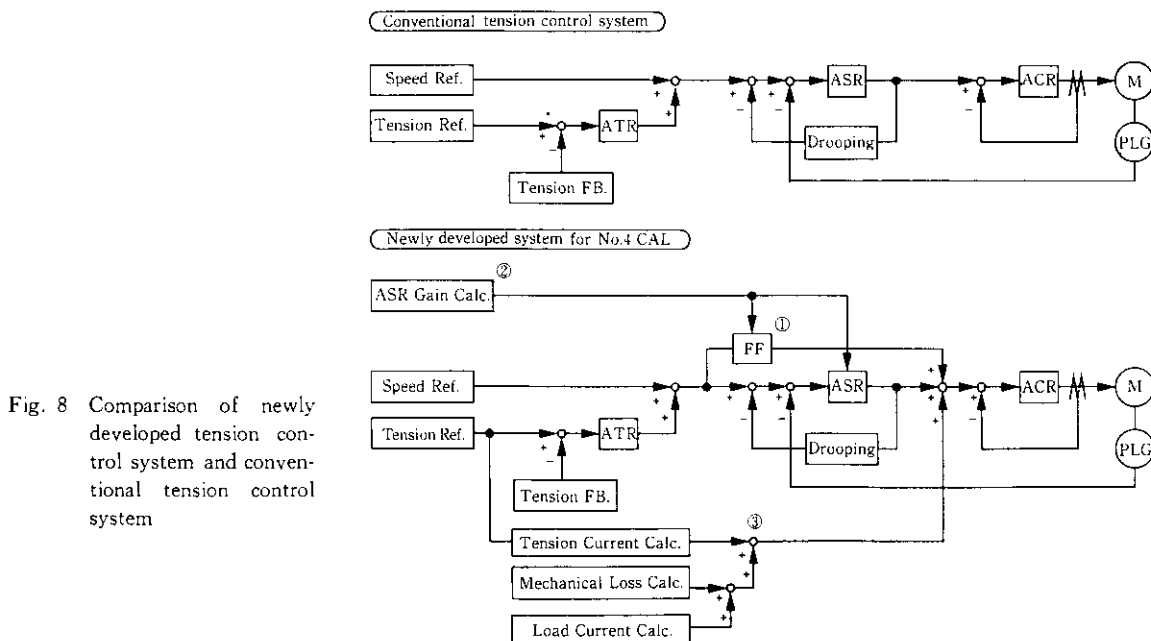


Fig. 8 Comparison of newly developed tension control system and conventional tension control system

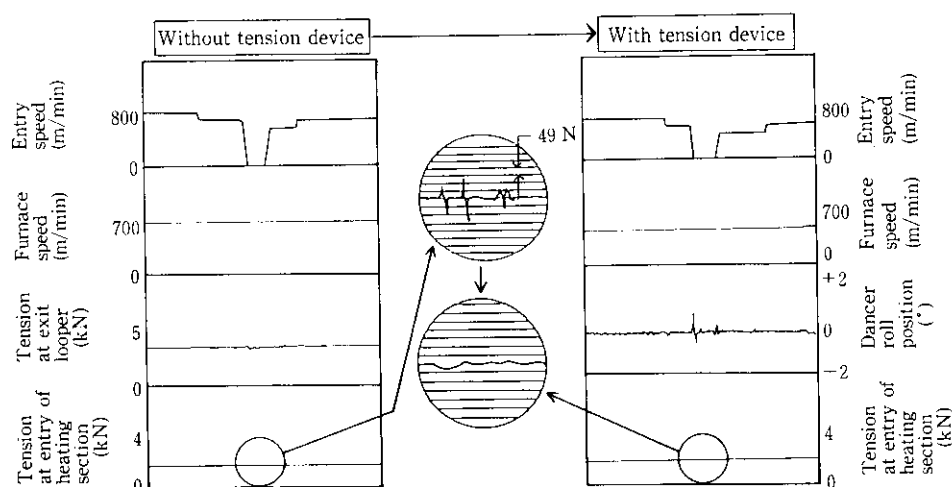


Fig. 11 Change in tension value chart with tension device

による鋼板の浮上現象が無視できなくなり、スリップが生じやすくなる。フォイル軸受の理論解析により得られている流体層の膜厚計算式を、式(1)に示す¹⁹⁾。

$$h = R \left(\frac{V\mu}{T - \rho\omega^2 R^2} \times \frac{3\pi\sqrt{2}}{8} \right)^{2/3} \quad (1)$$

h : 流体層厚さ

R : ロール半径

V : 通板速度

μ : 流体の粘性係数

T : 鋼板張力

P : 鋼板密度

ω : ロール角速度

これからわかるように、張力が低いほど鋼板の浮上がおこりやすい。極薄の極低炭素鋼を通板するためには、炉内張力を低くする必要があり、スリップ発生が懸念された。そこで、1000 m/minの通板速度における炉内雰囲気ガス流体層の厚みを計算し、その影響を十分小さくできるようなロール表面粗度を付与することにより、炉内でのスリップ発生を防止した。

5 自動化技術

5.1 自動化設備の概要

No. 4 CALのようなクリーニングから精整までを連続化した多機能ラインを、少数のオペレーターで操業するためには、徹底的な自動化が必要であった。特に、従来不十分になりがちであったコイルハンドリングや付帯業務についても、自動化を進めた点に特色がある。主な自動化項目をTable 3に示す。ラインの操業に必要な条件はすべてプロセスコンピューターやDDCを通じて設定される。Fig. 12はNo. 4 CALのシステム構成図である。多数の自動化機器を制御するために、プロセスコンピューターを中心に電気DDC、計装DDCおよび形状制御DDCをはじめとする各機器のCPUが有機的に結びつけられている。また、予防保全を可能にするために設備診断システムを組込んだ。

5.2 圧延機用ワークロールハンドリングの自動化

ぶき原板の場合、圧延機のワークロール替えの頻度が高い。これに対応するため、ワークロール搬送システムを設置した。Fig.

Table 3 Main automated items

Section	Item	Contents
Entry	Coil handling	Band cutting Coil insertion in reel Inner diameter change of reel Top/end reject and threading
Furnace	Sleeve handling	Drawing out and removal
	Scrap handling	Conveying to outdoor scrap bag
	Strip temperature control	Furnace temperature calculation Cooling condition calculation
Mill	Rolling condition control	Rolling force and tension calculation Flatness control
	Work roll handling	Shuttle transporter Automatic crane Work roll changer
Delivery	Side trimmer	Flying width change Reject of width changing portion
	Oiler	Change of kinds of oil
	Products finishing	Coil dividing Quality assurance Coil tail end stopping Weld marker insertion Sleeve handling and insertion in reel Inner diameter change of reel Drawing out of coil ID marking Coil insertion at inspection line
	Scrap handling	Conveying to outdoor scrap bag

13にその構成図を示す。ロールショップにおいて研磨またはダル仕上げされたワークロールは、ロール台車と自動クレーンにより、圧延機の横に設置されたロールストレージヤードに搬送される。その後、ロール交換命令によりロールチェンジャーへ移載される。使用後のロールも同様にロールショップへ搬送される。これらの動作はすべてプロセスコンピューターによって管理されている。

Fig. 12 Outline of No. 4 CAL control system

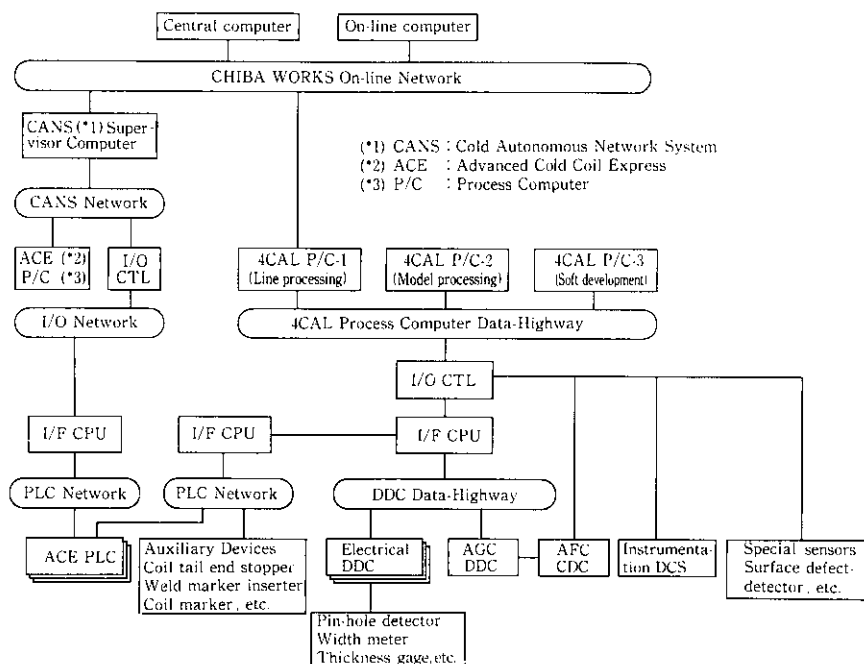
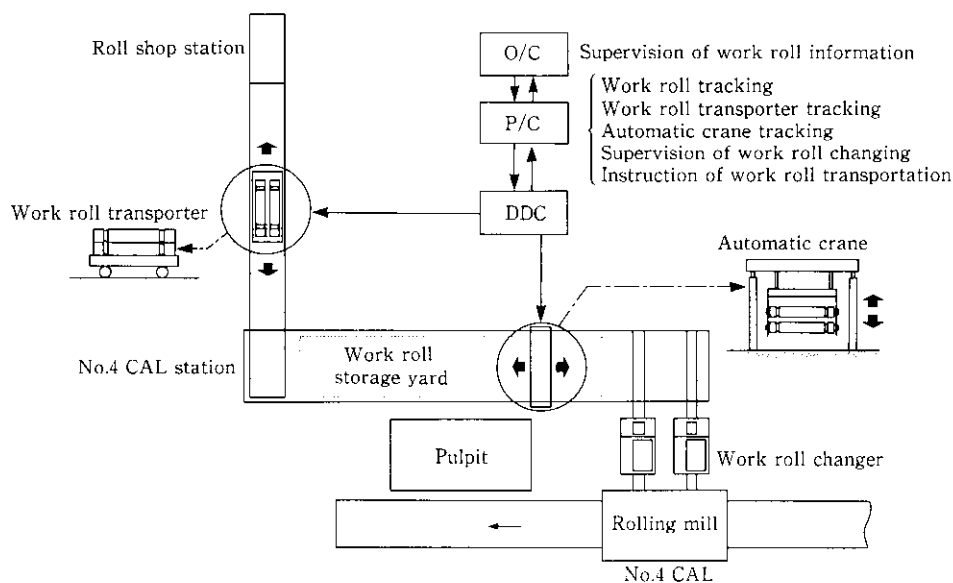


Fig. 13 Automation of work roll handling

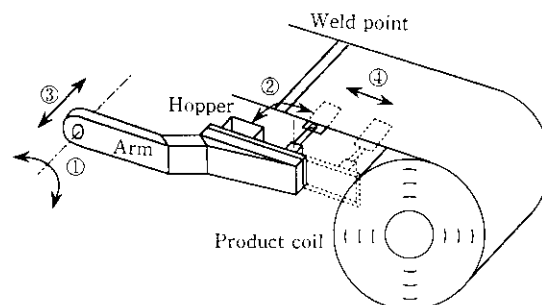


5.3 溶接点表示用紙片装入の自動化

ローモでは、溶接点をコイルに巻込んで出荷する場合がある。この時、溶接点の位置をコイル端部から確認できるように、目印となる紙片を装入しなければならない。そこで、出側コイルの外径および幅に応じて位置制御されるアームとその先端に取付けられた紙片の装入機構により、溶接点トラッキング信号にもとづいて、紙片を自動装入する装置を実用化した、動作状態を Fig. 14 に模式的に示す。

5.4 製品スリーブ装入の自動化

ローモの場合、需要家の要求により製品コイルの内側にスリーブを入れなければならないことがある。このスリーブのサイズは製品コイルの内径や幅によって異なっており、従来は管理が煩雑であった。No. 4 CAL では、このスリーブ専用の自動立体倉庫と倉庫か



- ① Controlling the position to match the coil diameter
- ② Picking up a piece of paper from hopper and turning the direction
- ③ Controlling the position to match the strip width
- ④ Inserting paper on orders from DDC

Fig. 14 Operation of weld marker inserter

らテンションリールへの搬送設備を設置した。これにより、スリーブはトラックから連続的に受入れられた後、内径、長さおよび真円度がチェックされ、保管される。この時、不良品は自動的にリジェクトされる。その後、プロセスコンピューターからの指示により、必要なスリーブがテンションリールへ搬送・装入される。

6 操業実績

Fig. 15 に、調質度 T1 と、圧下率制御によりつくり分けられた調質度 T3 の硬度分布を示す。硬度のばらつきは従来材と同等か、それよりも小さい。

Fig. 16 は、稼働以来の生産量および精整量を示したものであり、順調に生産量を伸ばしている。

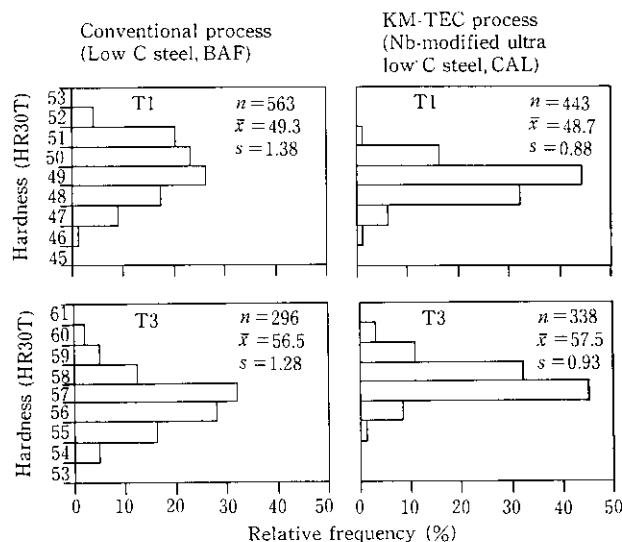


Fig. 15 Hardness distribution of grade T1 and T3 tinplate produced by KM-TEC process in comparison with conventional (low carbon-BAF) process

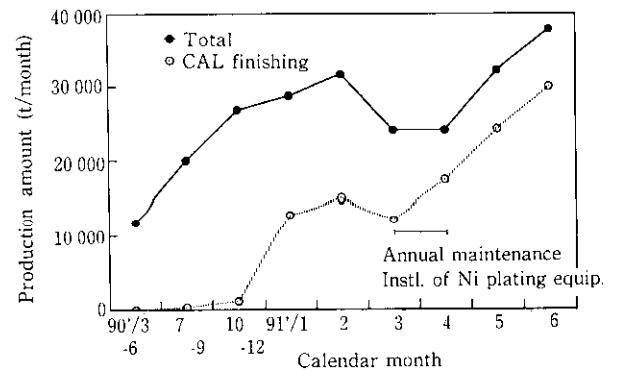


Fig. 16 Production record of No. 4 CAL

また、極薄鋼板の通板については、板厚 0.15 mm の極低炭素鋼を炉部速度 1000 m/min で安定に通板することができた。

7 結 言

千葉製鉄所におけるぶりき原板用の高速連続焼鈍設備の概要を紹介した。本設備の特徴をまとめると以下のとおりである。

- (1) ドライスキンパス、ウェットスキンパスおよび DR 圧延が可能で、広範囲な圧下率が得られる多目的圧延機を世界で初めて、連続焼鈍炉と連続化した。
- (2) 最小板厚 0.15 mm の極薄極低炭素鋼を、炉内速度 1000 m/min という世界最高速で通板することを可能にした。
- (3) クリーニングから精整までを連続化したラインを、少数のオペレーターで操業するために、徹底した自動化を行った。

全調質度のぶりき原板を、1 ラインで製造できる本設備は、高度化する需要家の品質要求に応え、かつ高い生産性を達成できる最新鋭プロセスである。この建設、稼働にあたっては、数多くの新技術を開発し、それによる順調な立ち上がりを達成することができた。

参 考 文 献

- 1) 下山勇二, 八角忠明, 吉田峰夫, 大野浩伸, 中村武尚, 池田三郎, 増野彦彦, 佐久田 満: 材料とプロセス, 4 (1991) 2, 597
- 2) 川崎製鉄(株): 特公平 1-52450
- 3) 川崎製鉄(株): 特公平 1-52451 (登録番号 1569910)
- 4) 川崎製鉄(株): 特公平 1-52452
- 5) 小原隆史, 坂田 敬, 西田 稔, 久々湊英雄, 秋山知彦, 太田範男: 鉄と鋼, 69 (1983) 5, S409
- 6) 久々湊英雄, 秋山知彦, 浮穴俊通, 太田範男: 鉄と鋼, 69 (1983) 5, S410
- 7) T. Obara, K. Sakata, K. Osawa, M. Nishida, and T. Irie: Proceedings of the Symposium on "Technology of Continuously Annealed Cold-Rolled Sheet Steel" ed. R. Pradhan, TMS-AIME, (1984), 363
- 8) 久々湊英雄, 加藤寿勝, 西川 廣, 白石昌司, 下山雄二, 藤長千香子: 川崎製鉄技報, 23 (1992) 4, 308
- 9) 高橋遼男, 中村武尚, 市井康雄, 下山雄二, 吉田峰夫, 吉永茂樹: 材料とプロセス, 4 (1991) 2, 342
- 10) 吉永茂樹, 崎村 博, 市井康雄, 高橋遼男, 吉田峰夫, 下山雄二: 材料とプロセス, 4 (1991) 2, 343
- 11) 佐々木 徹, 比良隆明, 阿部英夫, 柳島章也, 下山雄二, 田原絃一: 川崎製鉄技報, 16 (1984) 1, 37
- 12) 川原仁志, 大野浩伸, 小川博之, 江原 真, 中島康久, 比良隆明: 材料とプロセス, 4 (1991) 2, 599
- 13) 池田三郎, 市井康雄, 千野俊彦, 中村武尚, 下山雄二, 大野浩伸: 材料とプロセス, 4 (1991) 2, 598
- 14) 川崎製鉄(株), 日立製作所(株): 特願平 02-235523
- 15) 川崎製鉄(株): 特開平 02-307381
- 16) 川崎製鉄(株): 特開平 03-155380
- 17) 川崎製鉄(株): 特開平 03-178585
- 18) 川崎製鉄(株): 特願平 03-208543
- 19) J. A. Walowitz, J. N. Anno: "Modern Developments in Lubrication Mechanics", [Applied Science Publishers Ltd. (London)]