

ぶりき原板用連続焼鈍設備の技術革新

森 忠洲*

Technical Innovation of Continuous Annealing Line for Tin Mill Black Plates

Tadakuni MORI

Key words: low carbon steel; Tin Mill Black Plate; heat treatment; continuous annealing line; backling; high speed; cold rolling mill.

1. はじめに

缶詰等に用いられるぶりき（電気錫めっき）やティンフリースチール（電気クロムめっき）用の鋼板品質に対する需要家の要求は、近年ますます高度化してきている。なかでも板厚に関しては、製缶メーカーでの省コスト、ひいては省資源につながるため、精力的に薄肉化が進められている。一方、鉄鋼メーカーでは薄肉化による生産性の低下、エネルギー原単位の低下を防止すると共に、アルミ等の他素材との競争も考えて、薄肉ぶりき原板の高効率製造技術確立する必要がある。

これに対し、ぶりき原板製造工程の一部である焼鈍工程においては先の命題を克服するために、連続焼鈍設備の高速化および他ラインとの連続化が進められてきている。本報では現在までのぶりき原板用連続焼鈍設備の技術的流れと、その最先端の技術について報告する。

2. ぶりき原板製造方法の動向

2・1 ぶりき製品生産量の推移

図1に1986年度から1991年度までの国内缶詰製造数の推移を示す。製造数は年毎に順調に増加しているが、用途別にみると食料用等の一般缶詰はほぼ横ばいであるのに対し、コーヒー、ビール等に代表される飲料缶詰の増加が顕著である。次に、図2に飲料缶詰における構成比の推移を示す。飲料缶詰の種類には深絞りにより作られるDI缶（2ピース缶）と、天板、地板および胴板からなる3ピース缶の2種類がある。DI缶は、その素材により、アルミニウムによるDI缶、スチールによるDI缶に分類される。3ピース缶はスチールを素材とし、その接着方法により半田缶、溶接缶、接着缶に分類される。各種の構成比をみるとDI缶の比率が増加し、半田缶および接着缶が減少している。また、素材による比較では、1988年まではアルミの増加が目立ったがその後はスチールとアルミの比率はほぼ均衡している。

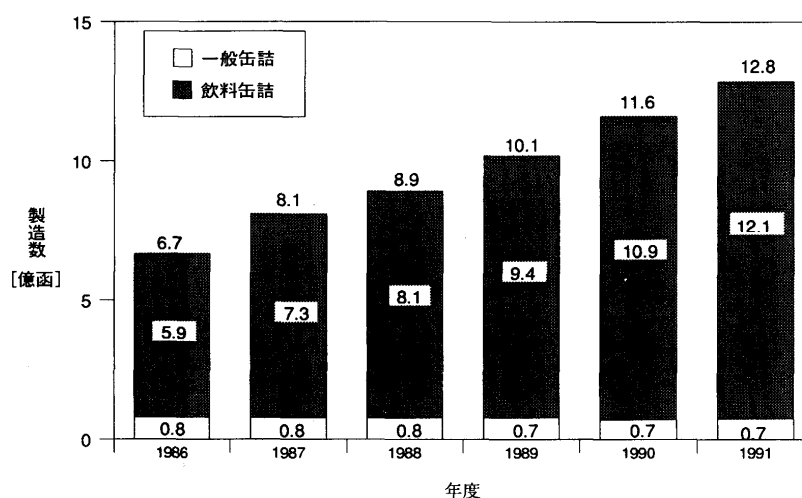


図1 国内缶詰製造数の推移(出典：東洋製罐殿資料)

平成4年9月29日受付 平成5年2月4日受理 (Received on Sep. 29, 1992; Accepted on Feb. 4, 1993)

* 川崎製鉄(株)千葉製鉄所第1冷間圧延部長 (Cold Rolling Dept.1, Chiba Works, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chuo-ku Chiba 260)

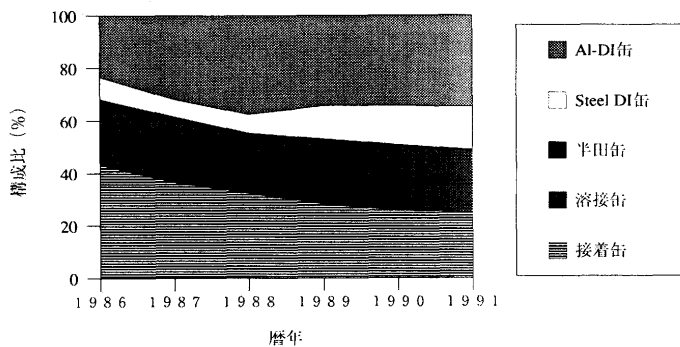


図2 飲料缶構成比の推移
(出典：東洋製罐殿資料)

図3に日本国内におけるぶりき原板生産量の推移を示す。缶詰製造数の推移と同様に年々増加傾向にある。後に述べる平均板厚の減少を考えると圧延長さとしてはさらに増加していることになる。

2・2 ぶりき原板製造プロセスの変遷

ぶりき原板は硬度により10の調質度に分類され、軟らかい方から順にT1～T6およびDR8～DR10と名称がつけられている。

図4にぶりき原板の製造プロセスを示す。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。調質度T1、T2といった軟質材はバッチ焼鈍により、T4を中心とした硬質材は連続焼鈍により、圧延で加工硬化した鋼板を再結晶させ、その後調質圧延を行っていた。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)を行っていた。しかし、従来の方式では製造プロセスが分割されていることから製造期間が長いという問題がある。また、一般に連続焼鈍材の方がバッチ焼鈍材よりも材質の均一性に優れている。

一方、社会的には省資源、省エネルギーが時代の流れであり、製缶メーカーでは缶の薄肉化という手段で対応してきている。さらには、製缶工程の自動化・高速化に対する要求も年々高まっている。これらのニーズにこたえるための鉄鋼メーカーでの課題は、下記に要約できる(図5)。

- (1) 全長・全幅の品質の均一化
- (2) 薄肉材の安定生産
- (3) 薄肉化によるエネルギー原単位増加の防止
- (4) 薄肉化による生産性低下の防止

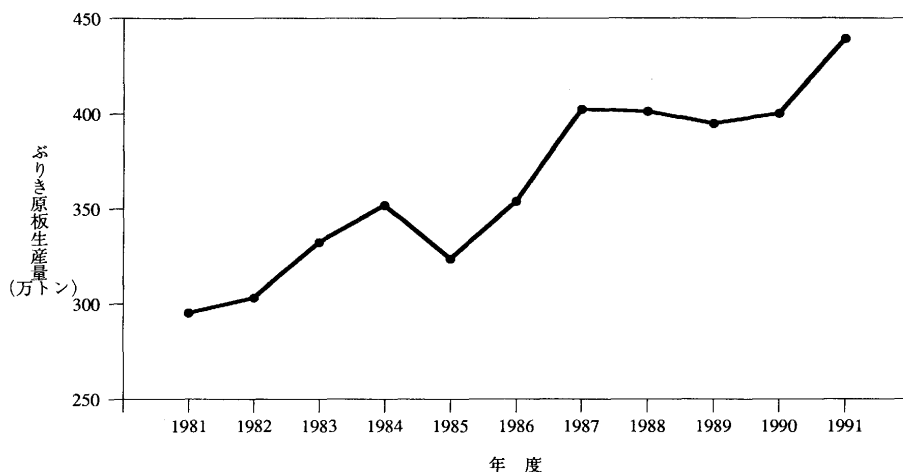


図3 日本国内におけるぶりき原板生産量の推移

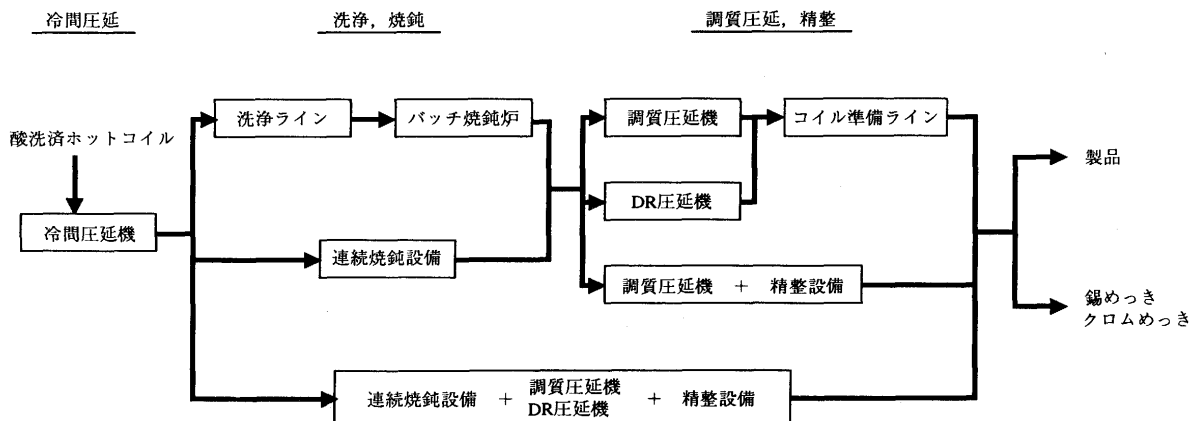


図4 ぶりき原板の製造プロセス

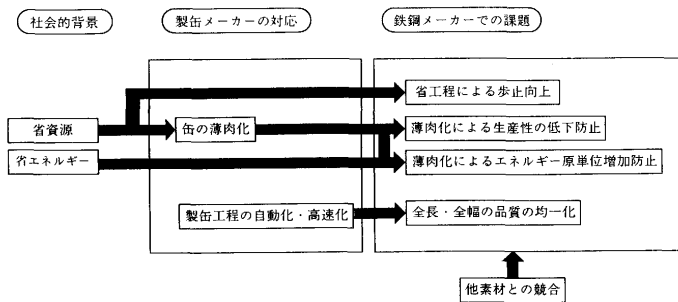


図5 薄肉ぶりき原板製造における課題

この課題に対して、全連続焼鈍法の開発と製造速度の高速化が考えられた。

図6にぶりき原板用連続焼鈍設備の流れを示す。炉内通板速度は設備製造年にはほぼ比例して向上しており、1990年には1000m/minを達成している¹⁾。従来バッチ焼鈍でしか作れなかった軟質材の連続焼鈍化へ向けては、1980年には低炭素鋼を素材として急冷・過時効によりT3規格を製造する設備が、また、1990年には最も軟質なT1規格を作るため極低炭素鋼素材の通板を考慮した設備が作られている。省工程を目的とした連続化に対しては、1982年に調質圧延・精整設備の連続化、1984年に溶接缶用極薄錫めっき鋼板の事前処理である焼鈍前Niめっき設備の連続化、1990年にDR圧延機の連続化がなされるに至っている。

3. 全連続焼鈍法

3・1 全連続焼鈍法の概要

ぶりき原板用連続焼鈍設備の流れにおいて、当社では素材成分と焼鈍後の圧延圧下率の組み合わせで鋼板硬度を作り

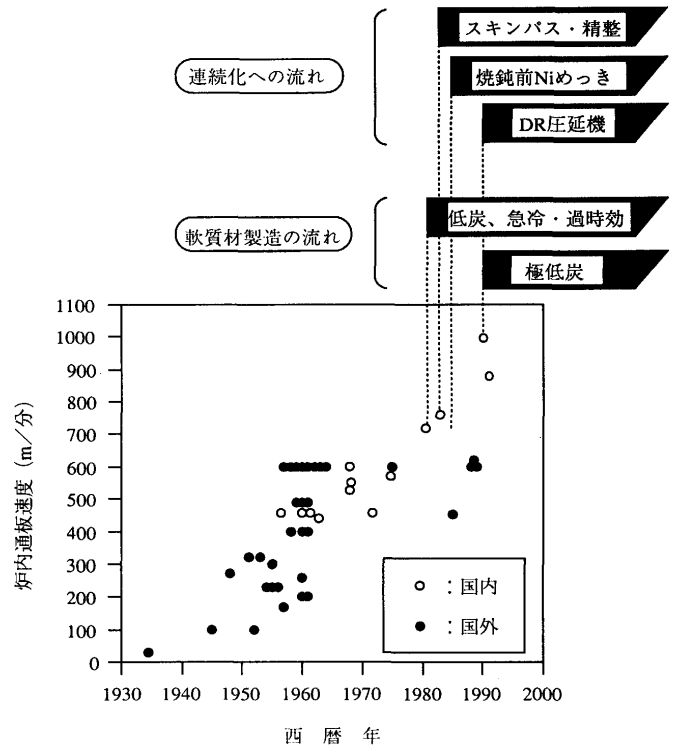


図6 ぶりき原板用連続焼鈍設備の流れ

分ける技術を開発し、ぶりき原板製造プロセスの全連続焼鈍化を推進している^{2)~6)}。この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にある。図7に全連続焼鈍法の概要を示す。Nbを微量添加した極低炭素鋼を連続焼鈍し、その後の乾式調質圧延とDR圧延機能を有する多目的圧延機において圧下率を制御することにより、T1からDR8までの調質度を作り分ける。一方、調質度T3については、N量を規制した低炭素Alキルド

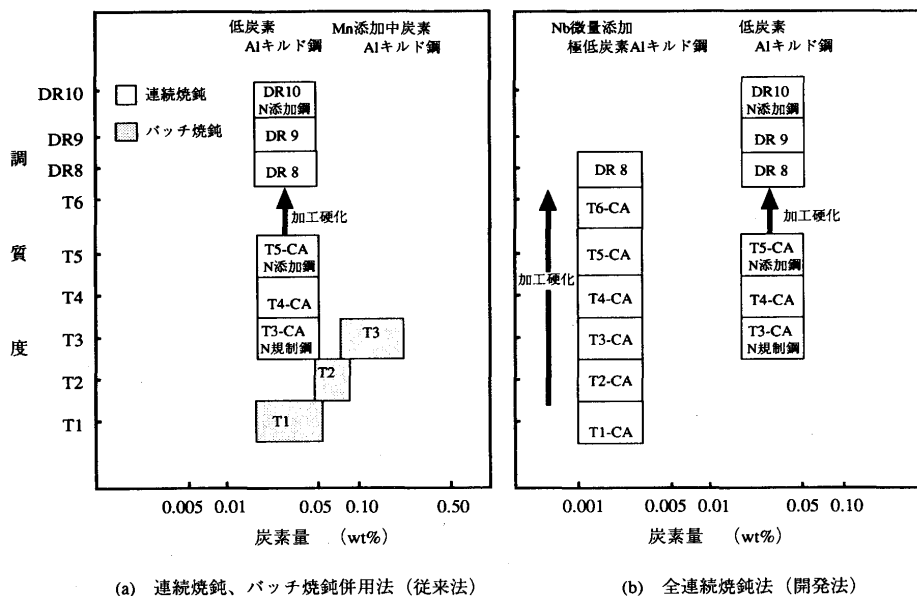


図7 全連続焼鈍法の概要

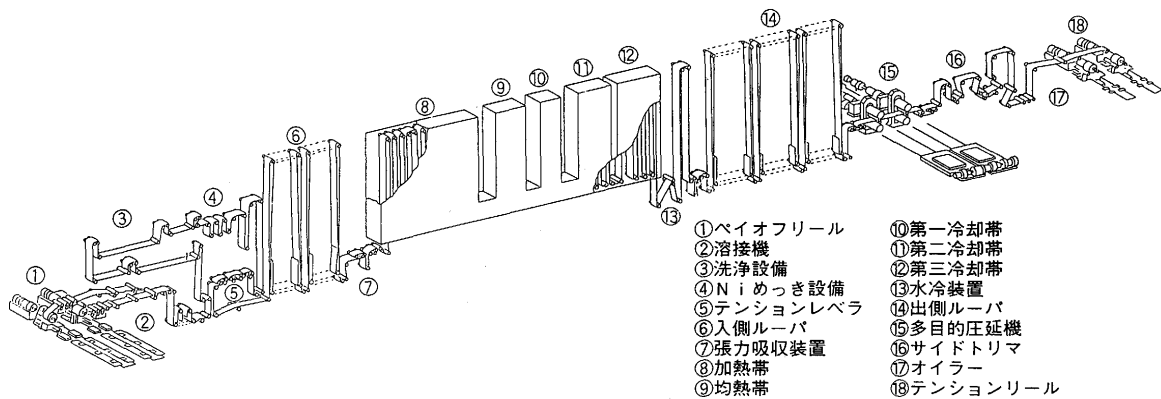


図8 No. 4 CAL全体図

表1 No.4CAL主仕様

生産量	(t/年)	560,000
炉能力	(t/h)	100
製造可能寸法	板厚 (mm)	0.15~0.40
	板幅 (mm)	600~1067
通板速度	入側 (m/min)	1200
	炉部 (m/min)	1000
	出側 (m/min)	1400
コイル寸法	最大重量 (t)	22
	外径 (mm)	2,134

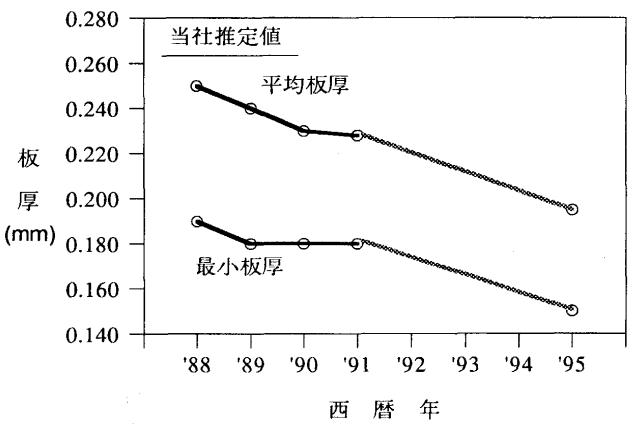


図9 ぶりき原板における板厚の推移

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こともできる。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を作り分け、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を作り分ける。このように、調質度T1～DR10の全規格の製品を1つの連続焼鈍設備で製造することが特徴である。

3・2 No.4連続焼鈍設備の建設

初めての全連続焼鈍設備として千葉製鉄所第1冷間圧延工場にNo.4連続焼鈍設備 (No.4 CAL) を設置し、1990年3月に稼動を開始した。No.4 CALの主仕様を表1に、ライン全体のレイアウトを図8に示す。No.4 CALにおいて開発した主たる技術として、次のものがある。

- (1) 炉内通板速度の高速化
 - (2) 全調質度範囲のぶりき原板の製造を1ラインで可能にするための、焼鈍炉出側への圧延機の連続化
- 以下の章では、これらの技術について述べる。

4. 炉内通板速度の高速化

4・1 高速化技術の概要

No.4 CALにおける特徴の一つは極薄鋼板の高速通板を可能にしたことである。図9にぶりき原板の平均板厚および

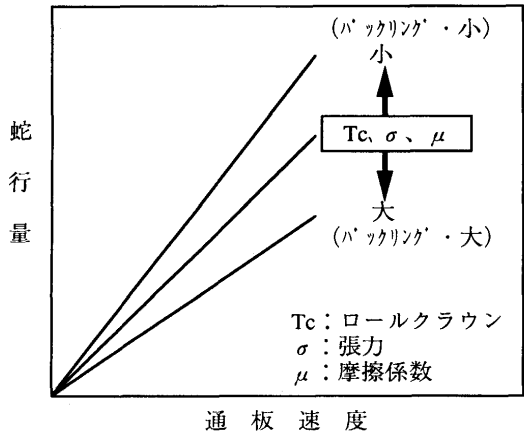
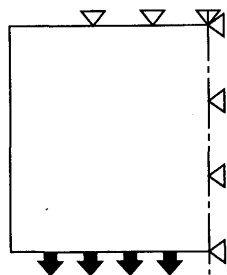


図10 高速化技術の概念

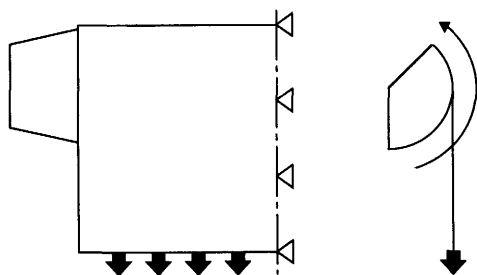
最小板厚の推移と予測を示す。Al等の他素材告との競合や輸入缶の増大に対してぶりき原板の薄肉化が進められており、この傾向は今後さらに増大するものと思われる。この要求にこたえ、かつ生産性を向上させて行くためには極薄鋼板を高速で安定通板する技術が必要である。No.4 CALはこの面において他に例をみない最小板厚0.15mmの極薄鋼板を炉部最高速度1000m/minで通板することを可能とした。図10に高速化技術の概念を示す。通板速度が速くなると

蛇行量は大きくなり高速通板性が低下する。高速通板性にかかわる因子としては炉内ロールのテーパ角およびフラット長により決定されるロールクラウンや炉内張力、およびロールと鋼板の摩擦係数がある。これらの因子を大きくすることにより、蛇行量を小さくすることが可能であるが、逆に炉内でのバックリング現象が起りやすくなる。特に、焼鈍中の極低炭素鋼は降伏強度が低く極めて軟質である。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約100℃高くなるため、炉内でのバックリングが極めて起りやすい。鋼板の蛇行とバックリングは本質的には二律背反するものであり、これらを両立させるために以下の技術を開発した⁷⁾。

①バックリング限界内でのロールクラウン、張力の最大化



(a) 従来の応力解析で用いられた境界条件（2次元）



(b) 今回の応力解析で用いられた境界条件（3次元）

図11 バックリングシミュレーションにおける応力状態

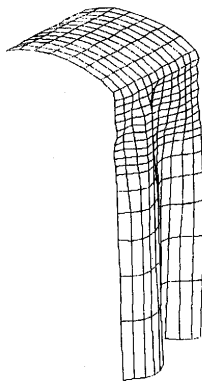


図12 シミュレーションによる解析結果の1例

②張力変動の最小化

③ロールと鋼板の摩擦係数向上

4・2 バックリング防止技術

バックリングの限界を見極めるため、No. 4 CALの建設に当たって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。従来までも同様の試みはあったが、鋼板の板厚、板幅、物性およびロール形状、張力を要素とした2次元での応力状態しか考慮してなく、現象の断片的な解析にとどまっていた。今回のモデルは3次元で構築しロールと鋼板の摩擦およびロールの回転までも考慮したものである。図11に本モデルを、図12に本モデルによる解析結果の一例を示す。解析結果例では実現象と同様な、ロール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バックリング発生の境界を定量化した。図13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。このモデルを用いることにより、板厚0.15mmの極低炭素鋼でもバックリングが発生せず、かつセンタリング力が最も大きいロール形状を設計することが可能となった⁸⁾。

4・3 張力制御の高精度化

炉内の蛇行、バックリングを発生させる因子の一つに張力がある。1000m/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では低慣性高応答テンションデバイスと高機能ベクトルインバーターを新たに開発した⁹⁾¹⁰⁾。

まず、加減速時等に発生した炉外での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、図14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

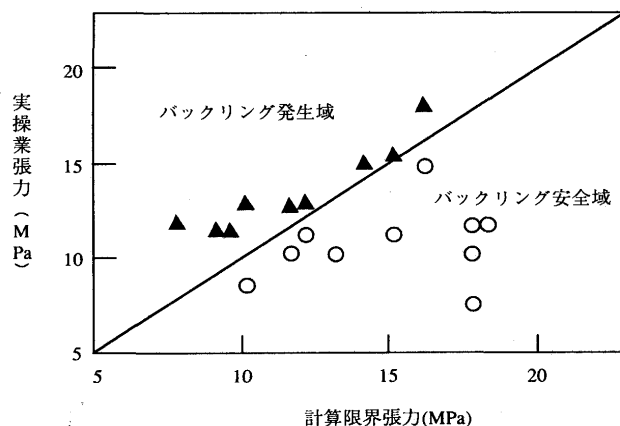


図13 バックリング発生に対する実操業張力と計算限界張力の関係

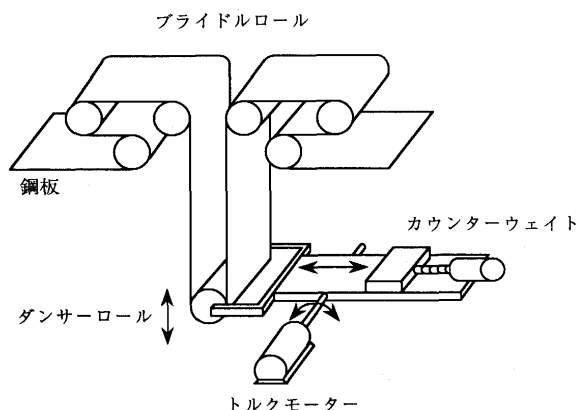


図14 低慣性高応答テンションデバイス

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。これにより、入側の張力変動が炉内張力へおよぼす影響は、 $\pm 147\text{N}$ ($\pm 15\text{kgf}$) から $\pm 49\text{N}$ ($\pm 5\text{kgf}$) 以下に減少させることができた。

他方、炉部の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変動、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

以上により、加減速時の張力変動を $\pm 490\text{N}$ ($\pm 50\text{kgf}$) から、 $\pm 98\text{N}$ ($\pm 10\text{kgf}$) 以内に押えることが可能となった。図15に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示す。

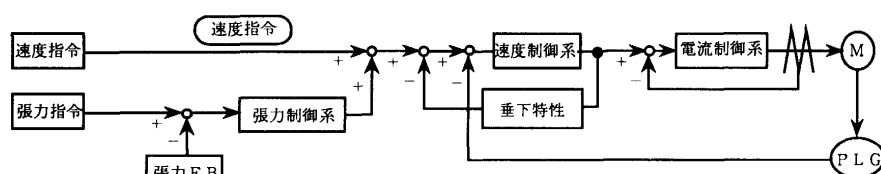
4・4 サーマルクラウンの防止

炉内での鋼板の蛇行、バックリングを防止するためには、炉内ヘルパーロールのサーマルクラウン制御も重要な課題の一つとなる。加熱帯のサーマルクラウンについては、ヘルパーロールエッジ部への放射熱を低減するための遮蔽板とロールエッジ部を冷却するためのプレナムチャンバーおよびその循環系を設け、サーマルクラウンを制御している。また、冷却帯についてはヘルパーロール廻りに電気ヒーターを配置し、ロール端部を放射加熱することによりサーマルクラウンの制御を可能とした。

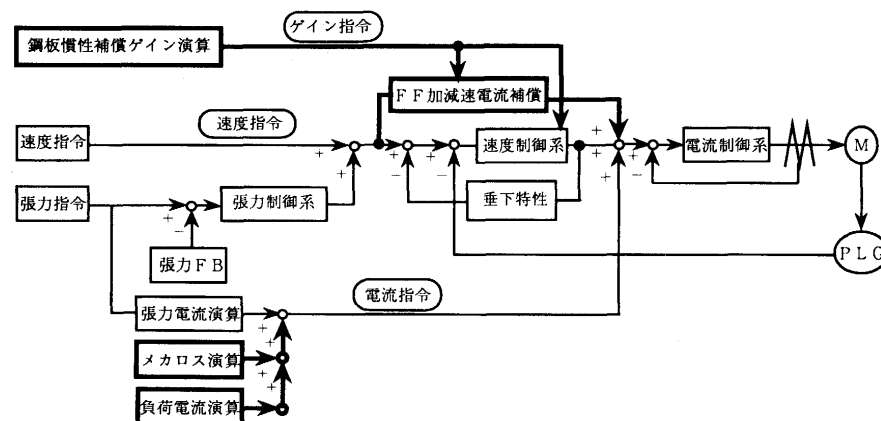
5. 焼鈍炉出側への圧延機の連続化

5・1 圧延機連続化のための課題

先に述べたように、No. 4 CALの特徴の一つに低炭素鋼と極低炭素鋼素材に所定の圧下率を付与することによる全調質度ぶりき原板の作り分けがあり、このために必要な圧下

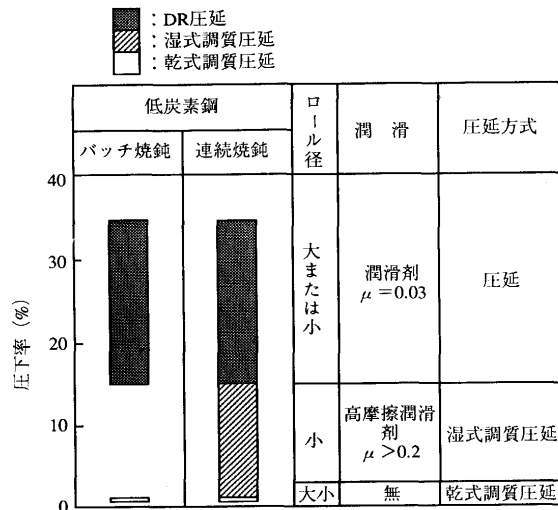


(a) 従来制御装置

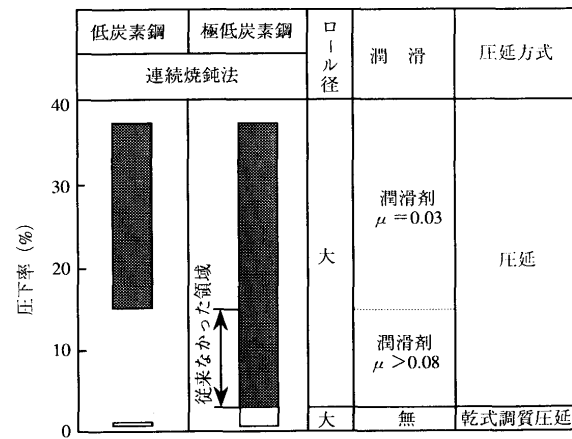


(b) 新開発制御装置

図15 新開発張力制御装置と従来張力制御装置の比較

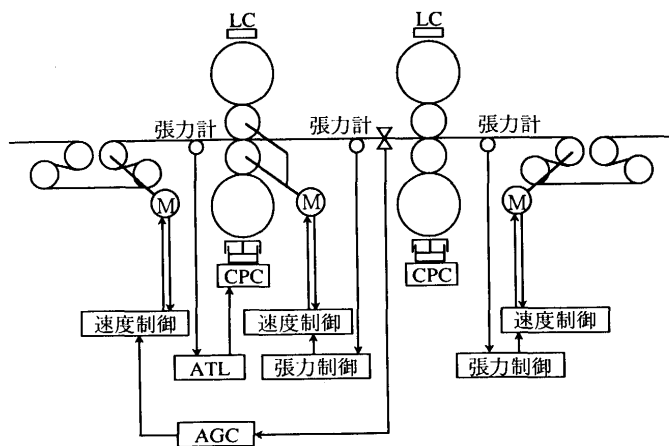


(a) バッチ焼鈍法と連続焼鈍法を併用した調質度作り分け



(b) 全連続焼鈍法による調質度作り分け

図16 調質度作り分けにおける操業条件



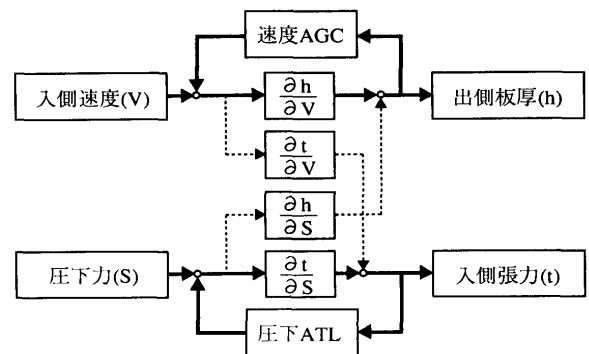
LC: ロードセル M: モーター CPC: 圧下定位置制御
ATL: 張力リミット制御 AGC: 板厚制御

図17 DR圧延機における圧延機制御システム

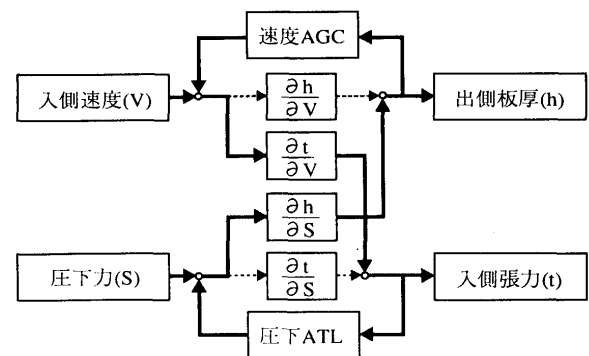
率範囲は1~35%となる。

一方、従来のバッチ焼鈍法と連続焼鈍法を利用した調質度の作り分けにおいては、図16(a)に示すように、多種のロール径、潤滑条件の組み合わせによる製造方法がとられていた。特に、压下率が約3~15%の範囲においては、小径ロールと高摩擦潤滑剤を用いた湿式調質圧延が一般的であった。しかし、連続焼鈍法により最も軟質のT1を作るためには極低炭素鋼を用い、かつ伸率を低く押える必要がある。低伸率を得るためには小径ロールは不適であり、大径ロールの使用が必須となる。大径ロールの使用を前提としたときの全連続焼鈍法による調質度作り分け方法を図16(b)に示す。すなわち、単一ラインで全調質度を作り分けるためには、

①大径ロールを用いた極低炭素鋼の低圧下率圧延という従来行なわれていなかった領域の圧延技術の開発



(a) 低炭素鋼DR圧延時の圧延現象



(b) 極低炭素鋼DR圧延時の圧延現象

図18 速度系板厚制御システムを用いた場合の圧延現象

②低炭素鋼の高圧下率圧延と極低炭素鋼の低圧下率圧延の両立

を達成する必要がある¹¹⁾。

5・2 極低炭素鋼の圧延特性

図17に一般的なDR圧延での圧延機制御システムを示す。No.1 スタンドで所定の压下率を付与し、No.2 スタンドは

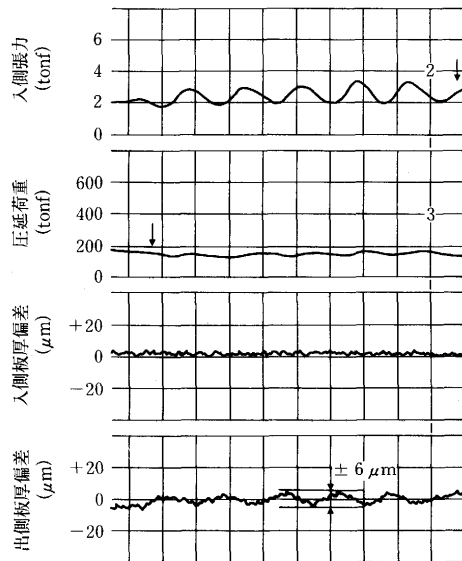
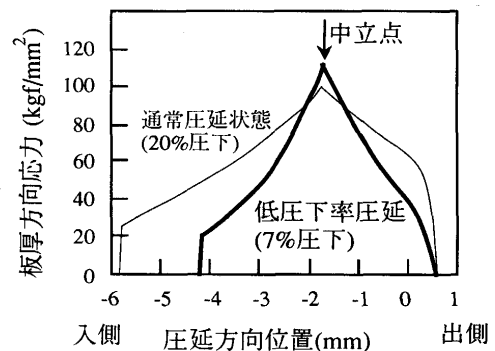


図19 速度系板厚制御時の極低炭素鋼低下率圧延結果

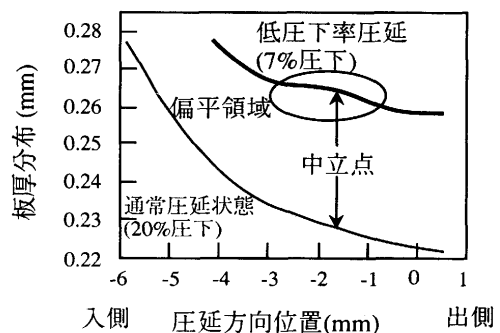
表面粗度を付与するためにほぼドライスキンプラスに近い役割を与えている。この場合、板厚への影響は圧下位置（圧延荷重）の変更よりも入側板速（入側張力）の変更が大きく、速度系の板厚制御システム（速度AGC:automatic gauge control）が用いられる。また、入側張力を一定範囲内に収めるため圧下位置変更による張力制御（圧下ATL:automatic tension limit）が一般に併用される。このことを図18（a）に図式化して示す。ここで、実線は入側速度、圧下力を変更したときに影響係数の大きいことを表し、点線は影響係数が小さくほとんど効果のないことを表す。しかし、図19に極低炭素鋼の低下率圧延に同様の制御方式を適用した結果を示すが、出側板厚および入側張力が大きくハンチングしていることがわかる。極低炭素鋼の低下率圧延における各影響係数を測定したところ、低炭素鋼の場合とは逆に、板厚変動に対しては入側張力よりも圧延荷重の寄与が高いことがわかった。つまり、図18（b）に示すように、入側速度を変更しても出側板厚の変化として直接的には現れず、入側張力の変化が起こり、次に圧下ATLにより圧延荷重が変化し、その結果、出側板厚が変化するという、相互の制御系が干渉し合う現象が生じていると考えられる¹²⁾。

この現象は入出側の弾性域を考慮したBland & Fordの式¹³⁾では説明ができず、極めて大きいロール偏平が生じているものと思われる。そこで、ロール偏平を圧延圧力分布から直接計算するモデルを構築した。本モデルによる解析結果を図20に示す。低下率圧延では潤滑条件を調整し、摩擦係数を高くしているため、高圧下率圧延に比べ中立点における応力が高く、その結果、ロール偏平が大きくなっている。このため、先進率が大きく、前方張力の板厚に対する影響係数が小さくなったものと考えられる。

上述した極低炭素鋼の低下率圧延は、逆にいえば入側板速による張力変化時の板厚変化および圧下位置による板



(a) 通常圧延状態と低下率圧延状態における板厚方向応力分布の比較



(b) ロールバイトにおける板厚分布の比較

図20 通常圧延状態と極低炭素鋼低下率圧延における圧延特性の比較

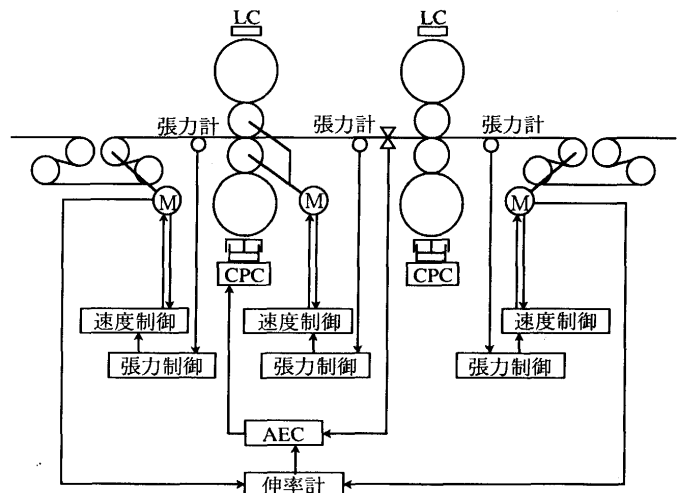


図21 圧下系圧延機制御システム

厚変更時の後方張力の変化が小さいことを示している。圧下の変更による板厚制御（AGC）と、入側板速の変更による張力制御（ATR:automatic tension regulator）により板厚、張力を各々制御する方法を極低炭素鋼の低下率圧延には適用した。低下率圧延時のミル制御系を図21に、圧延現象の図式化を図22に示す。また、実機での圧延状況

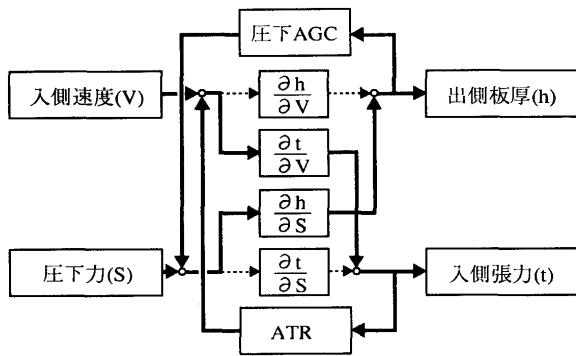


図22 圧下系板厚制御システムを用いた場合の圧延現象

を図23に示す。圧下系の板厚制御を用いることで、加減速時の外乱をNo.1スタンドの圧延荷重変化で吸収することになり、伸率一定の制御を行なえる。結果として安定な圧延操業を行なうことが可能である。

なお、低炭素鋼の高圧下率圧延においては、圧延油濃度等により潤滑状態を調整し図17に示した張力系のAGCを用いており、乾式調質圧延時には、スタンド間の張力による伸率制御を用いている。そして、これらの制御系は任意に切替が可能にようにした。

6. 今後の展望

最後に、ぶりき原板用連続焼鈍設備の今後の展望を述べて結論とする。まず、省工程、製造期間短縮のために、従来からの延長である他プロセスとの連続化が、さらに進められるであろう。連続化の対象として、上流には冷間圧延機、さらには酸洗設備が挙げられる。下流に対しては、鋳めっき、クロムめっきとの連続化が考えられる。さらなる高速化については、連続化とも絡んでくるが冷間圧延機と同程度までを考えたい。また、缶用鋼板のさらなる薄肉化を考えると、新製品として高張力極薄鋼板の製造等も合わせて進めていく必要が生じるであろう。

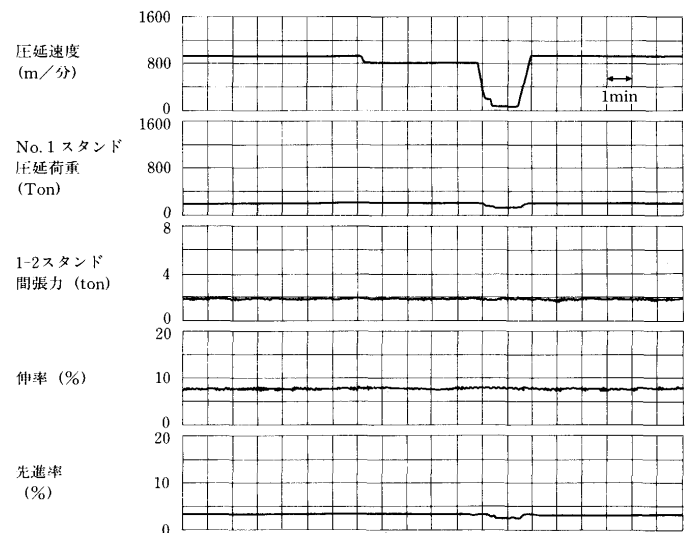


図23 圧下系AGCを用いた極低炭素鋼の軽圧下DR圧延状況

文 献

- 1) 下山雄二, 八角忠明, 吉田峰夫, 大野浩伸, 中村武尚, 池田三郎, 増野豊彦, 佐久田満: 材料とプロセス, 4 (1991), p.597
- 2) 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), S409
- 3) 久々湊英雄, 秋山知彦, 浮穴俊通, 太田範男: 鉄と鋼, 69 (1983), S410
- 4) 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. by R. Pradhan, (1984), p.363 [TMS-AIME]
- 5) 久々湊英雄, 加藤寿勝, 白石昌司, 亀山恭一, 下山雄二, 藤長千香子: 材料とプロセス, 4 (1991), p.1614
- 6) 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), p.308
- 7) 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), p.37
- 8) 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), p.599
- 9) 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), p.598
- 10) 中村武尚, 高橋憲男, 鳴海 宏, 大野浩伸, 笠井 聡: 材料とプロセス, 5 (1992), p.518
- 11) 八角忠明, 小林 真, 大野浩伸, 植田憲治, 古角文雄, 久々湊英雄, 中村武尚, 下山雄二: 材料とプロセス, 5 (1992), p.516
- 12) 福田昌人, 三吉貞行, 増野豊彦, 江原 真, 小林 真, 八角忠明, 山下道雄, 鏑田征雄: 材料とプロセス, 5 (1992), p.517
- 13) H. Ford, F. Ellis and D.A. Bland: J. Iron and Steel Inst., 171 (1952), p.239