

(3) 今後の展望

以上に加工・焼鈍工程において、品質向上、設備長短縮および省エネルギーに寄与してきた技術の中で、特に進歩の著しいものを中心に示した。

上流の casting 工程から下流の表面処理工程に至るまで、製鉄プロセスは今後もさまざまな改良や開発が行われ、それに伴って各プロセスに最適な加熱・冷却技術が開発されねばならない。

特に焼鈍後の後処理プロセスは、近年ますます多種多様になってきており、レーザやプラズマ、電子ビームを用いた加熱・表面改質技術が必要になるであろう。

4.3.3 操業プロセス技術

板圧延に関する最近 10 年間の操業プロセス技術の進展について述べる

板圧延技術の最近の進歩を大きく分けると三つに分類できると思う。

第 1 は、製品品質向上を目指した高精度圧延であり、製品の厚み、形状、幅などの精度向上は著しいものがある。

第 2 は、プロセスの連続化技術である。連続 casting とホットストリップミルとの連続化、冷延工程の連続化、CC スラブ利用技術の拡大など連続化技術が追求された。

第 3 は、高機能材圧延技術である。具体的には、圧延と熱処理を組み合わせた制御圧延、制御冷却、クラッド材圧延技術などが開発された。

しかし、これらの圧延技術の多くは 1980 年代の前半までに基本的技術は開発されており、最近の 10 年間は主として、計測機器の整備、制御モデル、制御ロジックの精度向上などによる技術のレベルアップ、ポリッシュアップが図られた。

以下、厚板圧延、薄板熱、冷延などの板圧延各プロセスにおける最近の技術進歩について述べる。

(1) 厚板圧延

コンピュータコントロールの導入、油圧圧下と絶対値 AGC の組み合わせによる板厚精度向上、平面形状の矩形化技術(MAS (Mizushima Automatic Plan View Pattern Control System) 圧延法、DBR (Dog Bone Rolling) 圧延法)などは 1980 年代の前半に開発されており、最近 10 年間はこれらの技術のレベルアップに加え、クラウン・形状制御、クラッド材圧延技術などが開発された。厚板圧延の技術進歩の概要を Fig. 4.26 に示す。

イ. 高精度圧延

最近の大きな技術開発は厚板圧延における形状クラウン制御である。厚板圧延機はワークロール径に比して胴長が長いので、ワークロールベンダーの効果があまりない。このため従来は、形状クラウンを目標に向けて制御すること、目標板厚実現という二つの機能をドラフトスケジュールを正確に計算し、クラウン比率一定のパススケジュールをとることにより実現してきた。しかしこの方式は目標板厚近傍では圧延

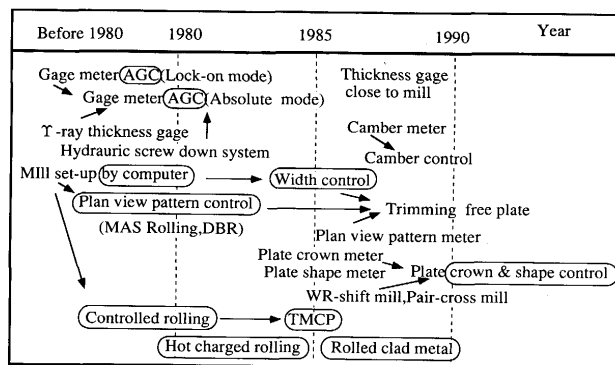


Fig. 4.26. Recent development of rolling technology in plate mill.

荷重を下げなければならないこと、モデル誤差、プロセス外乱などの取り扱いがむずかしいなどの問題があった。

昭和 60 年代に入って NKK 福山厚板工場にワークロールシフト付き圧延機が導入され、シフト量とベンダ圧力を制御することにより、クラウン制御が可能となった。形状クラウン制御機能と圧下機能を分離することにより、従来から行われてきたクラウン比率一定の荷重配分をとる必要がなくなったため、仕上げ付近での圧延荷重が大きくとれるようになり、圧延能率が向上するとともに、薄物圧延の領域が拡大した。また、絶対値 AGC などによって生じる圧延荷重変化による形状クラウン変化をダイナミックに制御することも可能となった。同時に、ワークロールシフト機能を活用した圧延時の幅制約フリー化技術が開発され、工程運用の自由度が増加した。

その後、新日本製鐵(株)君津、大分の各製鉄所にもベアクロスミルなどの形状制御機能が強化された圧延機が導入されている。今後は、厚板圧延機においても、形状クラウン制御機能は不可欠となっていくと思う。

厚板製品の歩留り向上のためには、平面形状の矩形化が重要である。平面形状制御に関しては MAS 圧延法、DBR 圧延などの基本的な技術は 80 年代の前半に開発されたが、最近の技術としては、近接エッジを用いた幅精度向上技術がある。この方法は製品側面のまくれ込みや、バルジングによる側面形状不良によるロスを削減すると同時に、サイドクロップ、TB クロップも減少させるものである。これらの技術を総合したものとして、MAS 圧延法とエッジング技術を組み合わせて、大幅な歩留り向上を達成した川崎製鐵(株)水島厚板工場の TFP (Trimming Free Plate) 技術がある。

板厚制御に関しては、油圧圧下を利用した AGC のポリッシュアップが図られた。例えば、圧延機を中心から 2 m のところに設置された近接板厚計の活用によりゲイジメーター式精度アップ、モニター AGC 制御範囲の拡大などにより板厚精度が大幅に向上した。板厚精度として板長 30 m 以下で $\sigma = 61 \mu\text{m}$ 、板長 30 m 以上で $\sigma = 45 \mu\text{m}$ というような結果も得られている。

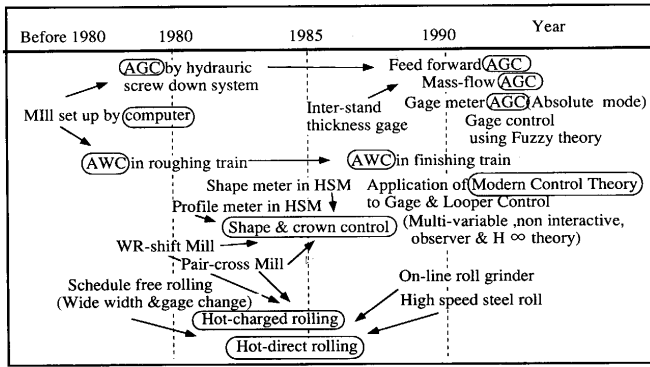


Fig. 4.27. Recent development of rolling technology in hot strip mill (HSM).

ロ. 連続化技術

厚板圧延プロセスにおいても工程の連続化が図られ連続化比率が急速に上昇し、現在では95%以上となっている。またHot Charge率も向上し、50%を越えるまでになっている。技術的には前述のワークロールシフト機能を活用した圧延時の幅制約フリー化により、工程運用の自由度が増加した。

ハ. 高機能材圧延

最近10年間の話題としては、種々の材料を組み合わせたクラッド圧延技術が開発された。

圧延法で作られるクラッド製品についてはステンレスクラッドが最も多く、その他、Cu, Cu合金, Ni, Ni合金, 純Tiなどのクラッド製品も作られている。クラッド鋼板の製造方法にはサンドイッチ方式やオープン方式があるが、製造上重要なことは、母材と合わせ材の接合強度であり、健全な接合を実現することが最大の技術ポイントである。

製造上重要なことは、

1. 材料の合わせ面の清浄化（スケール除去、酸化防止）
2. 加熱、圧延温度
3. 高圧下圧延

などである。例えばTiクラッド鋼の場合には、接合面近傍に、金属間化合物やTiCのような接合強度を下げる生成物の発生を防止するため、圧延温度の管理が重要である。これらの技術もほぼ確立し、ステンレスクラッド鋼を中心に商品としても着実に伸びている。

制御圧延、制御冷却などの材質制御に関しては冷却設備、冷却モデル、制御技術などのレベルアップ、ポリッシュアップが計られたが、残された大きな課題は冷却の不均一による熱応力の問題や出荷後ユーザーによる条切り時に発生するキャンパー防止技術である。

(2) 熱間薄板圧延

熱間板圧延の技術進歩の概要をFig. 4.27に示す。

熱延の場合にも、CCと熱延の直結化、形状クラウン制御などの技術は、80年代の前半までに技術の原形が提示されており、最近の10年間は計測機器の整備、制御モデル、アルゴリズムのレベルアップなどの技術改善が中心であった。

イ. 高精度圧延技術

コンピュータコントロールの導入や油圧圧下の採用による板厚精度向上技術は80年代の前半までに達成されているが最近の10年間は主として計測機器の整備、新しい制御技術の適用による細かなレベルアップが図られた。

従来の板厚制御は仕上最終スタンド出口の板厚計からの計測値をもとにしたフィードバック制御が主体であったが、最近の動向としては、仕上圧延機内のすべての材料情報（スタンド間板厚、温度、変形抵抗、etc.）に基づく総合的な板厚制御の考え方に移行しつつある。これを実現するため仕上スタンド中間板厚計などが整備されてきた。これらの計測値をもとにしたフィードフォワード制御やゲイジメーター式の精度向上による絶対値AGCレベルアップなどが行われた。

AGC機能を強化した時の問題点は、圧下位置を変更した時に生じる張力変動である。これを防止するため、 i スタンドの出側ストリップ速度と $(i+1)$ スタンドの入側速度が常に一致するように、ダイナミック制御を行う最適マスフロー制御が開発された。また精密な板厚制御を行うためにはスタンド間張力を精密に制御することが必要であるという認識から低慣性ルーパー、油圧ルーパーといったハードの開発に加えて、ルーパーレス制御などのソフト技術も開発された。最近では現代制御理論の適用も試みられており、ルーパ機構におけるスタンド間張力とルーパー角度の相互干渉を緩和するため、角速度オブザーバを用いる制御法、ルーパー角と張力の非干渉制御などが開発されている。これらの技術によりスタンド間張力の変動が減少し板厚のばらつきが減少したとの報告もなされている。また仕上げスタンド間板厚計からの情報を用いたフィードフォワードAGCやファジー推論を用いた板厚制御も試行されている。

板幅精度向上に関しては、熱延の場合、仕上スタンドでは板厚が薄く、エッジでの幅圧下効率が悪くなるので、粗圧延段階でのエッジングロールを用いたAWC (Automatic Width Control) による粗制御と、仕上圧延機内でのスタンド間張力によるファイン制御の組み合わせによる板幅制御技術が開発されつつある。粗圧延幅制御は、ほぼ完成した感があるが仕上張力による幅制御については開発途上の技術である。一部、実用化されたとの報告もなされているが、スタンド間張力と板幅の精密な関係式の構築、また前述したようなスタンド間張力の精密な制御が開発されることにより、高精度の板幅制御が完成すると思う。

クラウン形状に関しては、HCミル、ベアクロスミルなどの高機能圧延機が導入され精度向上が図られた。クラウン、形状制御に関しては(1)圧延機ロール変形モデル(2)ロールバイト中の材料変形挙動が重要である。

厳密には、これらの理論式を連成して解く必要があるが、オンライン制御のためにはある程度の簡略化が必要であり各社独自のモデル式が開発され実用的な制御が実現している。モデルと合わせてクラウンメーター、形状計が設置され高精

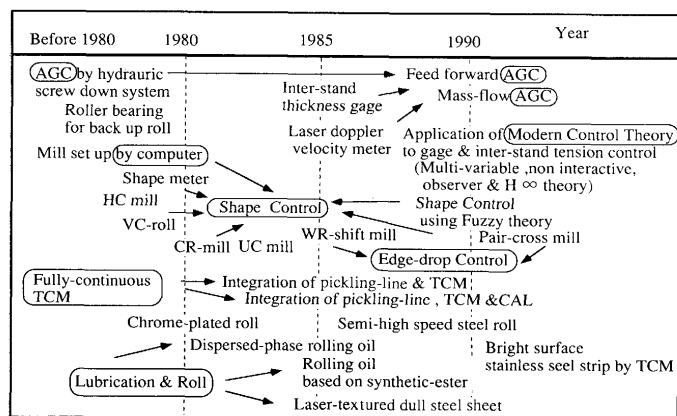


Fig. 4.28. Recent development of rolling technology in cold strip mill.

度のクラウン形状制御が実現している。

板端部のエッジドロップについては、ワークロールをテーパー状の逃げ部をもつ形状に研削し、ワークロールシフト機能と組み合わせ材料端部を仕上最終スタンド以前に予変形することにより、エッジドロップ量を軽減する方式が実用化されており、板幅端部のプロフィール改善が図られてきている。

ロ. 連続化技術

連続化比率の向上、省エネルギー、省力化ニーズなどに対応して、連続化と熱延の連続化が推進された。連続化の形式としては、連続スラブを再加熱することなく直接熱延ラインで圧延する直接圧延 (HDR) と熱延工場の加熱炉へ温片を装入する (HCR) の形式があり、大幅な省エネルギーが実現した。

CC-HOT 連続化を支える技術としては、CC スラブの大幅圧下技術、熱間圧延の幅制約、板厚変更制約などの工程制約条件を緩和するスケジューリングフリー技術、材料の温度降下を低減する加熱装置、保温装置などが開発された。

これらの連続化技術の基本的考え方は 80 年代の前半までに開発されたが、最近の動きは、スケジューリングフリーの範囲拡大などの地道な技術開発であり、板厚制約に関しては、パススケジューリングの精度アップなどにより、先行コイル板厚の 3 倍～1/3 程度の板厚変更は自由に行われるようになってきている。幅変更制約についてもハイスロールなどの磨耗の少ないロールの採用や圧延中にロール表面を研磨するオンラインロールグラインダーなどの開発により、制約が大幅に緩和されてきた。

連続化については今後、薄スラブ連続機やストリップキャスティングなどとの連続化や熱間圧延ライン全体の完全連続化が指向されるであろう。

熱延の残された最大の問題点は、安定通板技術である。特に薄物圧延時や板クラウンを小さくしたときの通板性の確保は非常に重要な技術課題である。これらの問題を根本的に解決する手段として熱延の完全連続化は魅力的な技術であり種々の困難が予測されるがぜひ近い将来実現されることを期待する。

(3) 冷間薄板圧延

冷延に関する技術進歩の概要を Fig. 4.28 に示す。この分野においてもタンデム圧延機の完全連続化、酸洗ラインとの直結化、形状制御板厚制御などの主要技術の原形は、1980 年代前半までに提示されており、最近 10 年間は計測機器の整備、制御方法の改善など地道な努力が継続された。

イ. 高精度圧延

板厚制御に関しては、No. 1 スタンド、No. 5 スタンド後面に設置された板厚計によるフィードバック制御により、板厚制御は向上したが、冷延の場合は板厚精度を μm オーダーで管理する必要があり、単一のフィードバック制御だけでは、精度向上に限界がある。そのため、圧延時に生じる外乱そのものを減少させる対策として、油膜軸受の加減速中の油膜厚変化をなくすためのローラベアリング採用やロール偏み除去装置などが導入された。その他、制御特性を上げるために主電動機の交流化、油圧圧下の導入などが図られた。冷延の場合も熱延と同様、単一の板厚制御から、スタンド間板厚計、板速計などを用いて圧延機内でのすべての圧延変数をリアルタイムに把握し、板厚に大きな影響を与えるスタンド間張力制御と合わせて総合的な制御システムへと移行してきており、板厚精度もより一段と向上した。最近の報告では板厚が 0.8 mm の圧延において板厚精度として 0.45% を達成したデータもある。板厚制御と張力制御の干渉問題は冷延の板厚制御の大きな問題であるが、干渉する度合いをファジー推論を用いて評価し、制御系のゲイン配分などを最適化する板厚張力非干渉制御なども開発されている。

形状、クラウン制御に関しては、ハードウェア、ソフトウェアの両面にわたっての技術改善が行われた。HC ミル、UC ミル、VC ロール、ベアクロスミル、FFC ミルなどの形状制御性の優れた圧延機を用いて、形状、クラウンの制御の精度向上が図られた。冷延の場合、張力フィードバックの影響が大きく、圧延自体にクラウン比率を常に一定にしようとする自己修正機能があるが、熱延板クラウンと圧延条件に大きなアンマッチがあるとクラウン比率が乱れ、形状不良が顕在化するので、先に述べた種々の圧延機の形状制御手段を用いて熱延板クラウン比率に一致させる必要がある。

形状制御の動向としては、中伸び、耳伸び、クォーター部形状不良、といった特定の部位の形状不良だけでなく、板面全体を評価関数とする方式も開発された。また、ファジー制御などの新しい AI 技術も適用されてきた。

一方板端部のエッジドロップは主として板端部の自由変形とロール偏平によって発生するものであり、冷延工程で大きくもなり、また逆に適当な制御手段があれば、改善される。最近ではワークロールシフトミルにより、エッジ部をテーパー状に逃すことにより制御する方法やベアクロスミル、小径ワークロールを用いたエッジドロップの低減が考えられている。

ロ. 連続化

冷延工程の連続化は、1971年 NKK 福山 NO2TCM において完全連続式冷間圧延機の完成以降、酸性工程、焼鈍工程、調圧工程へと連続化が拡大した。最近 10 年間においても新設の設備（新日本製鐵(株)八幡、住友金属工業(株)鹿島、NKK 福山など）はもちろん、古い設備のリフレッシュ時（川崎製鐵(株)千葉・水島、新日本製鐵(株)君津など）に完全連続化設備に改造するプロジェクトが相次いだ。連続化の形態としては、圧延機単体の完全連続化、酸洗ラインとの複合化が多かった。連続化により、歩留りの向上、能率の向上、省力化、製造日数の低減が図られコスト削減に大いに寄与した。今後連続化はますます拡大すると思うが連続化に当たっては、(1) 連続化ラインの全体の信頼性の確保 (2) 連続化されるラインの各工程の能率、能力のマッチングが重要である。

現在のタンデム圧延機は高生産性を目指して開発されたものであり、今後は圧延機も従来のタンデム形式にとらわれず、他のラインとの生産性の整合性を重視したものに变革していく必要がある。

ハ. 潤滑技術

冷延潤滑については冷延製品表面に対する要求が高度になってきたことから、最近関心が高まってきている。この分野については、次のような開発が行われてきた。

1. 潤滑メカニズムおよび試験法
2. 潤滑油および分散、乳化方式の改善
3. 表面造り込み技術

潤滑試験については従来からいろいろ試行されてきているが、最近ではトライボロジーの条件（油膜厚み、摩擦表面温度など）を一致させる試験法や試験条件の選定が重要との認識が一般的になりつつある。

潤滑油については、スカムの堆積による労働環境の悪化、火災などの防災の観点から低温流動性のある潤滑油が従来から渴望されていた。また経年劣化の少ない潤滑油として、耐熱変質性の高いものが望まれてきた。これらのニーズに対して、従来の天然油脂に替えて合成エステル化が一部始まっているが新しい動きとして注目していく必要がある。

製品表面造り込に関しては、自動車の外観をより鮮映化させるために、従来のショットダル加工を施したロールの代わりに、赤外線レーザーを利用し、規則的な凹凸をロール表面に与える鮮映性鋼板製造技術が開発された。

また生産性の低い小径ミルによるステンレス圧延に替えて、既存のタンデム圧延を利用する方向の研究が行われている。この場合、表面光沢を確保するためには圧延油を低粘度にする必要があるが、ロールへの流入油量が減少するので潤滑性が悪くなり、焼付きなどの欠陥が出やすくなる。表面光沢確保と焼付きの二つの相反する問題を同時に解決することは困難な課題であり、現在開発が進行中である。

(4) 結言

最近 10 年間の板圧延の技術進歩を鳥瞰すると、今までの技術を 180 度転換するといった刮目すべき新技術は少なかったと思う。しかし計測機器の開発整備、制御モデルアルゴリズムの改善など地道な努力が継続されており実際の操業現場においては本当の意味において成果を着実に上げた 10 年間であったと言うこともできる。

今後 21 世紀を目指して、日本の鉄鋼業が技術の面で世界のイニシアティブを確保し続けるためには、地道な改善の継続とともに新しい発想が必要である。その意味においても、若い頭脳の活躍が望まれる。

4.4 条鋼圧延と鋼管製造技術の進歩

4.4.1 条鋼圧延

(1) 形鋼圧延

〈1〉 概況

形鋼は断面形状やその大小、あるいは用途などさまざまに非常に広い範囲に及ぶが、本稿では建設用鋼材の代表である H 形鋼と我が国の形鋼の歴史の象徴とも言える軌条について、この 10 年ほどの特徴的な技術状況について眺めてみる。

H 形鋼分野においてこの 10 年間は、新規な圧延機や製造能力の拡大への投資が積極的に行われる一方、既存ミルの集約を始めとする生産の効率化、徹底したコストダウンの追求に明け暮れた期間であった。このような状況下で、より効率的な生産技術を目指して開発された「高効率自在成形技術」、あるいはその成果たる「外法一定 H 形鋼製造技術」こそが、この 10 年間を特徴付ける最大の技術開発であったと言えるよ

う。

また軌条においては、「インライン熱処理技術」がこの時代を画する新技術であった。本技術はオフラインの熱処理工程の省略というプロセス改善効果だけでなく、熱処理硬化深度の深さおよび組織の均一性という品質的な卓越性において、むしろ新商品製造技術としてより大きな評価を得ている。

さらに近年の計算機技術の発展に伴い、3次元剛塑性有限要素法による圧延解析の研究が大いに進み、多くの学術発表がなされたのも特徴的であった。

以下本稿においては、H 形鋼・軌条に関する上述の二つの技術について、概要を述べることにする。

〈2〉 外法一定 H 形鋼製造技術

(a) 製品特性と製造技術の意義

H 形鋼は、ユニバーサルミルでフランジとウェブの厚みが、エッジミルでフランジ幅が成形される。したがって