

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 年間に於いても新設の設備（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（川崎製鉄(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。

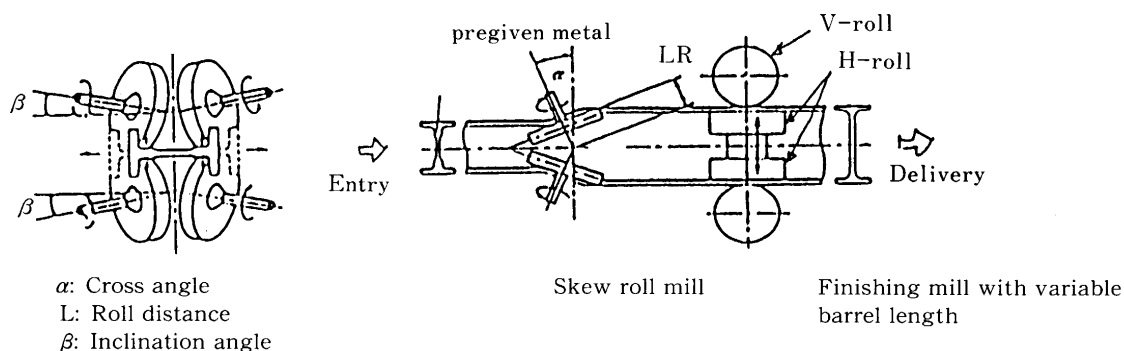
さらに近年の計算機技術の発展に伴い、3次元剛塑性有限要素法による圧延解析の研究が大いに進み、多くの学術発表がなされたのも特徴的であった。

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。

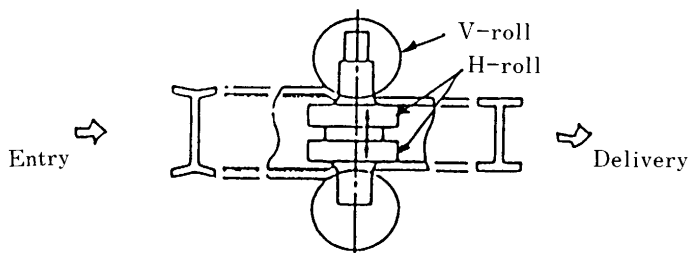
<2> 外法一定 H 形鋼製造技術

(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



(a) Inside web dimension expanding method



(b) Inside web dimension reducing method

Fig. 4.29. Methods of controlling the inside web dimension.

ウェブ内法は使用する水平ロールの胴幅により、またフランジ片幅（フランジ幅とウェブ厚みの差の1/2）は使用するエッジロールの孔型深さによって規定されるため、ウェブ内法一定かつフランジ片幅一定が一般原則であった。使用者側のニーズに合わせるべく、フランジとウェブの厚みが異なる際にウェブ外法およびフランジ幅を一定（「外法一定」）とするためには、必然的にロール交換を必要とし現実的ではないため、この場合は溶接H形鋼によるしかなかった。

一般にH形鋼は、圧延中および圧延後におけるフランジとウェブ部位で温度履歴が異なり、内部応力が発生しそれが限界を超えるとウェブ座屈に到るため、ウェブとフランジの厚みの差（一般にフランジ厚みが厚い）を一定限界に抑えるなどの制約がある。この限界を超える（「薄肉ウェブ」）部分は溶接H形鋼に主役の座を譲ることとなっていた。

外法一定H形鋼製造技術はこれら溶接H形鋼に頼っていた製品を圧延ままで製造可能とすることを狙いとしている。また本技術は外法・内法の区別なくH形鋼の断面寸法を任意に成形する「高効率自在成形技術」として特徴付けられるものである。

(b) ウェブ高さ制御技術

ウェブ外法一定化のための技術であり、Fig. 4.29にそれぞれ一例を示す「ウェブ内法拡大法」と「ウェブ内法縮小法」に大別される。いずれの方法も胴幅可変水平ロールを用いて仕上げ成形することを特徴とし、前者では、仕上げ成形の前段でスキューロールミル（Fig. 4.29の方法）またはもう一つの胴幅可変水平ロールによってウェブ内法を拡大する工程を有する。後者は、仕上げ成形を行うと同時にウェブ内法をも縮小する方法である。これらは、初期投資の大小・生産性・

寸法精度への影響とその対応設備などの面でそれぞれ得失があるが、未だ評価は定まっていないのが現状である。

(c) フランジ幅制御技術

エッジロールの役割には、フランジ幅制御の他にウェブ中心偏りの防止があり、このためエッジ圧延ではフランジ圧下とともにウェブの拘束が同時に要求される。よって一對のロール孔型では1種類のフランジ片幅の製品しか圧延できなかった。

このフランジ片幅制約をフリー化する方法として代表的なものが、ウェブ拘束をガイドに分担させ、フランジ幅圧下にはカリバーレス鼓型ロールを適用した新エッジ圧延方式である。この方式ではまたフランジ幅やウェブ中心偏りの精度向上も同時に達成している点が注目に値する。

また、孔型深さをオンラインで変さらできる偏心スリーブ式エッジロールにおいても同様の効果を有することが報告されている。

(d) 断面温度制御技術

H形鋼断面の内部応力制御のためにはフランジ水冷法が用いられる。この技術は、計算機による温度と熱応力のシミュレーション結果に基づき水冷強度をコントロールすること、それと同時に冷却履歴の違いによる材質変化を考慮して健全な材質を確保すること、およびこれを正しく実現する設備技術より成り立っている。本技術の確立の結果、例えば、フランジ厚み/ウェブ厚みの比で示せば、従来の2.0程度のものから3.0程度までに製造範囲を拡大することが可能となった。

〈3〉 軌条インライン熱処理技術

軌条製造技術は高速化、重荷重化という使用環境面の厳格

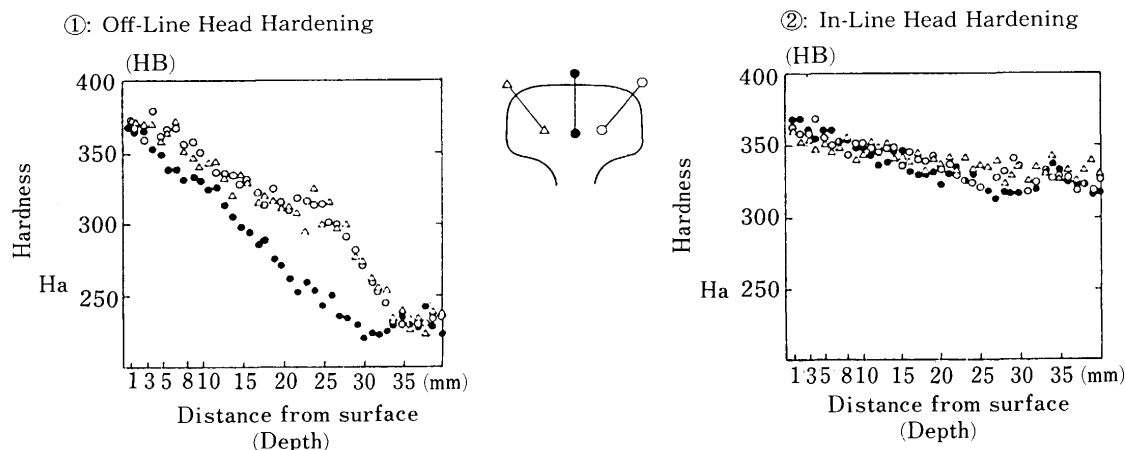


Fig. 4.30. Head hardening depth. (Kageyama, Sugino *et al.*: *Seitetsu Kenkyu*, (1988), No. 329, p. 7)

化への対応から「高強度化」をキーワードとして発展してきた。高強度化への対応としては、合金添加による方法と、熱処理による方法の両者がその過程で実用化されたが、耐摩耗性、溶接性など軌条としての総合特性面で優位な熱処理方式が主流となった。

しかしながら、熱処理方式がオフライン再加熱方式であるため、低生産性、要員過大、製造工期長期化などコスト面での問題を抱え、一方、ますます厳格化する使用環境のもと内部硬度の均一化の要求に対しても、オフライン熱処理方式では投入熱源の増大、低効率化などの問題から達成に難があった。

これら製造面および品質面の両面の要求を満足するプロセスとして、圧延工程での熱を利用したインライン熱処理技術が実用化され、現在の高強度軌条製造プロセスとして世界の主流となるに至っている。

(a) 技術の概要

インライン熱処理技術は、均一な硬化組織を得るための冷却制御技術と軌条のような上下非対称形状の製品を安定して熱処理するための曲がり制御技術の二つから構成される。

① 冷却制御技術

均一な硬化組織を得るためには断面方向硬度の均一化と長さ方向の硬度均一化の両者を確立する必要がある。

断面方向硬度の均一化に対しては、HB380程度の硬度の確保と異常組織の発生防止が課題であり、適切な冷媒の選択と冷却速度制御とが技術的なポイントである。現在、空気、水スプレー、浸漬の三つの冷却方式が実用化されている。

長さ方向の硬度均一化については、適切なノズル配置と搬送速度制御により硬度ばらつきの防止が図られている。

② 曲がり制御技術

曲がり制御技術ではFEM解析などによる非対称形状の曲がり挙動解明が実用化に大きく寄与した。

曲がり制御技術は①で述べた三つの冷却方式に各々適合する制御方法・設備が実用化されているが、いずれも熱処理されない部分の冷却により軌条の曲がりを制御することを主体としている。

(b) 製品特性

インライン熱処理の特徴である内部硬度の均一化を、Fig. 4.30 ②に示す。Fig. 4.30 ①はオフライン熱処理のそれであり、インライン熱処理の硬度均一性が確認できる。

〈4〉 今後の展望

以上、近年の形鋼分野における技術開発の代表事例につき述べてきたが、これらの例でも明らかなように、今後の技術開発の方向性は、①工程ないしは作業のさらに徹底した省略、②需要家におけるこれらを含む諸要求を充たす新機能鋼材の提供に向けられることが予想される。

①については、形鋼圧延の宿命であるシリーズごとのロール交換からの脱却を目指すロールチャンスフリー化技術の開発が最大のテーマとなつてこよう。外法一定H形鋼製造技術のさらなる発展と言ってもよい。また寸法形状のオンライン測定技術の実用化も今後本格的に進むものと思われる。

②については、本稿の事例のほか、耐火H形鋼、鋼製連壁用形鋼、コーナー鋼矢板など、近年開発され、すでに市場において定着し拡大しているものが増加しており、今後この傾向はますます強まっていくと予測される。特に、これまで需要家側の根強い要求にかかわらず、製造技術上の制約より十分な対応が果たせていなかった寸法形状の高精度化が、最近の開発成果を反映して、急速に進んでいくものと思われる。それに加え、建材分野においては、建築物の大型化・信頼性向上の要求に沿って、H形鋼へのTMCP技術の導入による溶接性・耐震性向上や、外法一定H形鋼の広幅化・大型化などが進展しよう。軌条分野でも同様に鉄道の高速度に伴う寸法形状の高精度化に加え、長寿命化、なにかんづく保線作業の軽減を図るための耐表面疲労損傷レールなどが求められ、それらの製造技術開発が大いに進むであろう。

また上記の動きの中で、三次元剛塑性有限要素法による数値実験がその有用性をますます発揮するに違いない。

形鋼は社会建設の基盤領域で大量かつ安価に使用されるものであるだけに、単に鋼材製造の効率化を目指すに留まらず、鋼材製造から利用現場までを一貫した視点で眺めての徹底した経済合理性の追求が、これからも最重要課題であり続

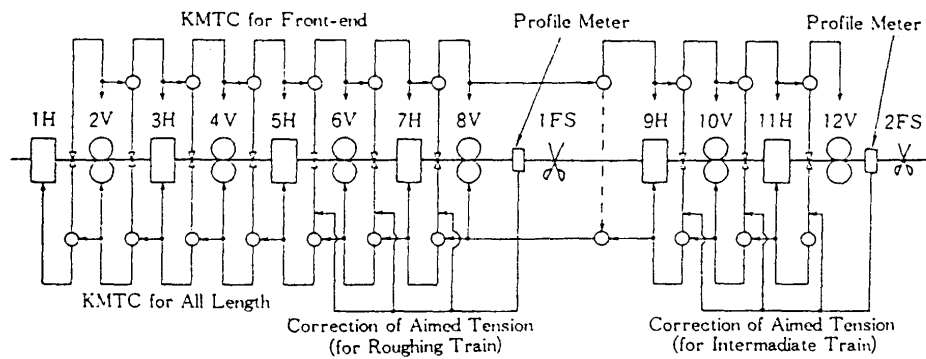


Fig. 4.31. Schematic chart of KMTTC system in new bar mill. (Kamimura *et al.*: *Kobe Steel Eng. Rep.*, 35 (1985), No. 2, p. 28)

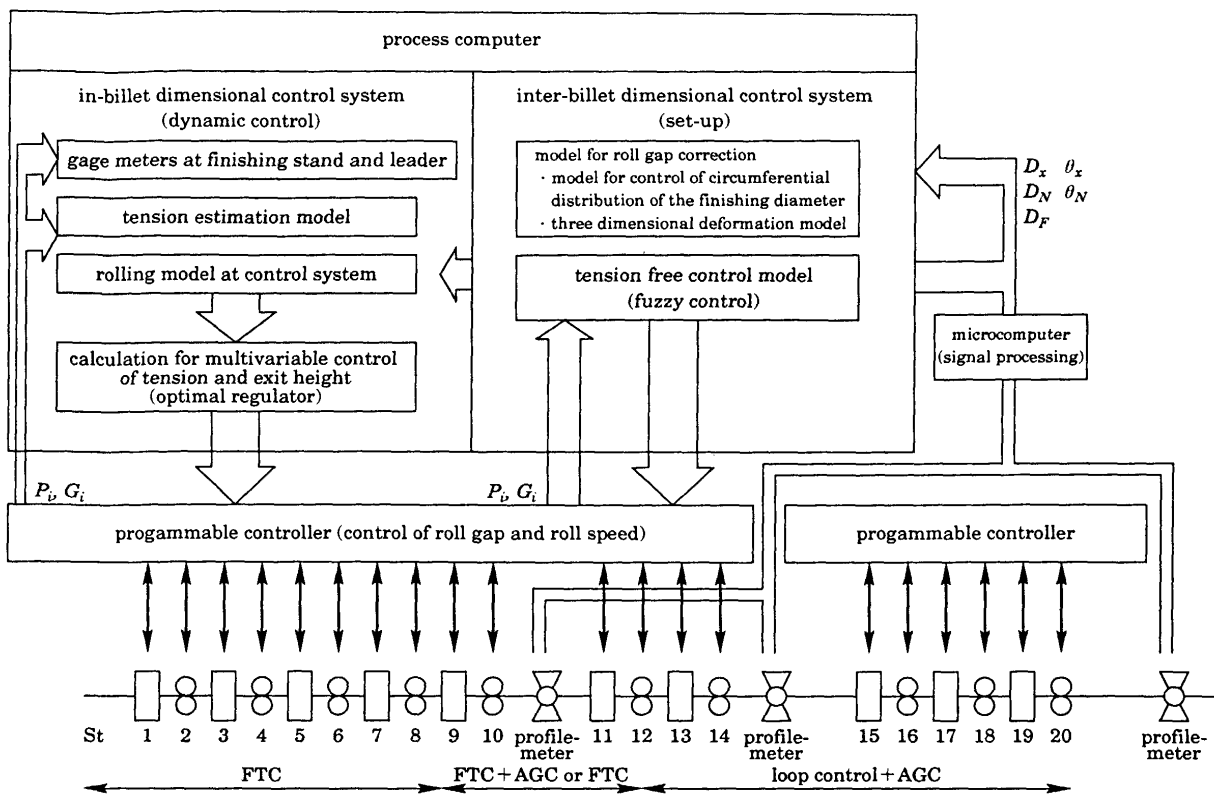


Fig. 4.32. Precision bar rolling system. (Waseda, Noguchi, Ogai *et al.*: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, 34 (1993), No. 387, p. 405)

けるものと考えられる。

(2) 棒鋼・線材圧延

〈1〉 概況

自動車や各種産業機械に用いられる棒鋼・線材に対して、近年、ユーザにおける工程省略や加工歩留の改善のため、高寸法精度・最適寸法（サイズフリー）材あるいは材質制御材を、小ロット・短納期でユーザに供給することが要求されている。

このような状況に対応するため、この10年間を特徴付ける棒鋼・線材圧延技術として、現象の定量的解明を実現した連続圧延理論の確立と三次元 FEM 解析技術の開発、連続圧延モデルを用いて多変数制御理論、Fuzzy 理論を応用した 2Hi ミル精密圧延システム、3 ロールミル、新形式 2Hi 軽圧下ミルなどのハードウェアによる精密、サイズフリー圧延技

術、およびインライン材質制御技術が挙げられる。

本稿では、それらの技術について概説する。

〈2〉 精密・サイズフリー圧延

(a) 2Hi ミル圧延制御による精密圧延システム

ビレット間制御技術により、長手方向の断面寸法精度は ± 0.15 mm まで実現可能である。しかし、ユーザにおいて引抜き省略を実現するには棒鋼の寸法精度は ± 0.1 mm、線材の寸法精度は $\pm 0.1 \sim 0.05$ mm が要求され、それを実現するにはビレット内ダイナミック制御技術が必要である。ビレット間制御とビレット内制御を組み合わせた棒鋼 2Hi ミル精密圧延システムおよび線材ブロックミル AGC の例を以下に述べる。

① 棒鋼圧延の張力制御と精密圧延システム

棒鋼・線材ミルには、通常、張力センサが設置されていない

ため、張力を推定する必要がある。このため、戻抜け時の仕上げ幅変化から張力を推定する残差張力修正法を用いた無張力セットアップ技術が開発された。ビレット内制御としては、トルクアームを一定と近似した張力推定法と非干渉制御によりビレット全長にわたる張力制御技術が開発された。

本システムは山登り法を用いた仕上げ寸法セットアップと無張力セットアップからなるビレット間制御とトルクレバメモリと非干渉制御による無張力制御のビレット内制御から構成される (KMTC システム (Fig. 4.31))。

② 棒鋼圧延の多変数制御と精密圧延システム

ビレット内で材料温度変動が大きい場合、張力制御のみでは仕上げ高さ・幅が変動する。また、一般に仕上げ寸法は目標値からずれる。そこで、より精密圧延を実現するには、張力と寸法の多変数を制御する必要がある。

張力制御が可能な独立駆動で仕上げ圧延速度が 10 m/s 以下と比較的低速の棒鋼ミル、線材粗・中間ミルを対象として、連続圧延モデルと最適レギュレータ理論により、ロール回転数とロール間隙を制御入力とし、各スタンド出側材料高さ・幅を制御して、仕上げ高さ・幅を制御する多変数制御

技術が開発された。

本システム (Fig. 4.32) は仕上げ高さ、幅の各部位を判別するプロフィールメータの新信号処理技術を用いた仕上げ寸法セットアップと材料戻抜け時の負荷変化率、影響係数および Fuzzy ルールを用いた無張力セットアップから構成されるビレット間寸法制御、および前述の多変数制御によるビレット内寸法制御から構成される。

③ 線材ブロックミル AGC

張力制御が不可能なコモンドライブで仕上げ圧延速度が 60~100 m/s と高速の線材仕上げブロックミルの寸法制御方法として、フィードフォワード制御を付加することにより拡張された最適レギュレータ理論による線材ブロックミルの仕上げ高さ・幅の多変数制御と自動圧下装置からなる線材 NT ブロックミル AGC システム (Fig. 4.33) が開発された。

(b) ミルハードウェアによる精密、サイズフリー圧延

幅広がり少ない 3 ロールミルを軽圧下で用いるサイジングミル、幅広がりが大きい 2Hi ミルを軽圧下で用いて幅広がりを小さくしたミルなど、ハードウェアによる精密、サイズフリー圧延の代表例について述べる。

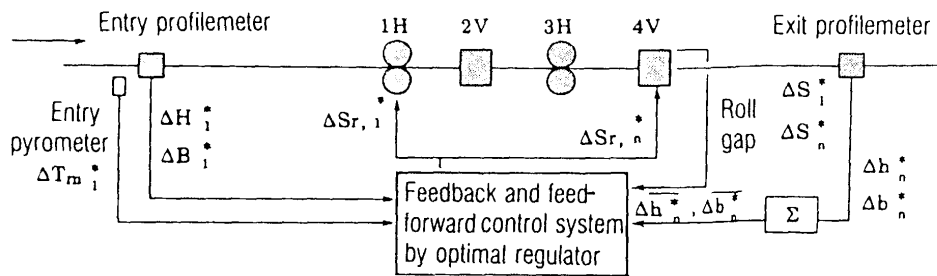


Fig. 4.33. Block mill AGC control system by optimal regulator (feedback and feedforward control). (Noguchi, Okamura, Ogai: Proc. 1987 Spring Conf. of Jpn. Soc. Technol. Plast., (1987), p. 143); (Noguchi, Ogai, Okamura: J. Jpn. Soc. Tehnol. Plast., 34 (1993), No. 384, p. 25)

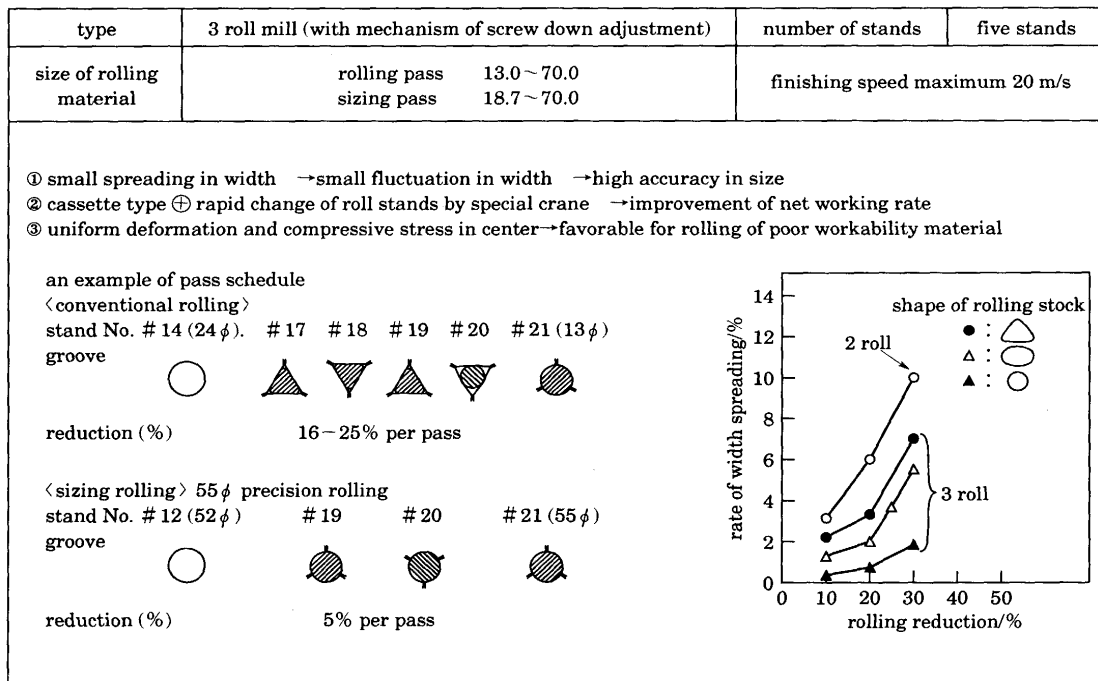


Fig. 4.34. Precision bar rolling by 3 roll mill. (Oiwa, Kawakami: Proc. Jpn. Soc. Technol. Plast. Symp., (1991), No. 139, p. 23)

① 棒鋼仕上げ3ロール軽圧下サイジングミルによる精密・サイズフリー圧延

既設2Hiミル出側に5スタンド3ロールミルを設置し、1) 通常圧延の場合は、減面率16~25%/パスの通常圧下圧延、2) 精密圧延の場合は、最終3パスで減面率 $\leq 5\%$ /パスの軽圧下圧延を実施している (Super Finishing Mill (Fig. 4.34))。これにより、1) 軽圧下による寸法公差 ± 0.1 mmの精密圧延、2) 圧下調整機構による寸法公差 ± 0.2 mmのサイズフリー圧延が実現された。なお、既設2Hiミル出側に設置した3ロールミル2パスによる減面率20%以下のサイズフリー圧延も開発された。

② 棒鋼2Hi軽圧下サイジングミルによる精密・サイズフリー圧延

既設2Hiミル出側に設置するH-V-Hの3スタンド2Hi軽圧下サイジングミル (てきすんミル) (Fig. 4.35) が開発された。

これにより、1) 軽圧下による寸法公差 ± 0.1 mmの精密

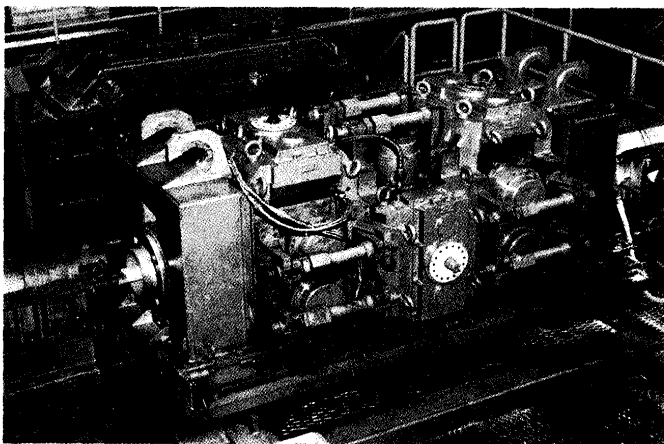


Fig. 4.35. Sizing mill. (Sasaki, Yamaguchi *et al.*: *Tetsu-to-Hagané*, 79 (1993), No. 3, p. 417)

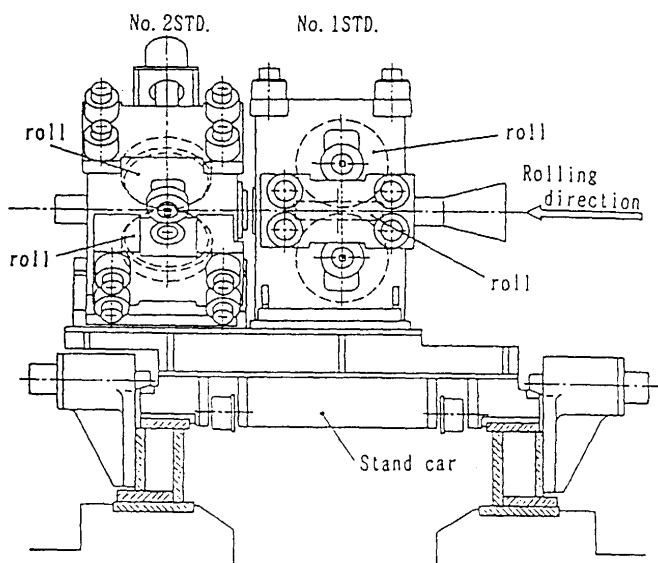


Fig. 4.36. Experimental 4-roll mill unit. (CAMP-ISIJ, 6 (1993), p. 1455)

圧延、2) 圧下調整機構による製品サイズ範囲約1 mmで、寸法公差 ± 0.2 mmのサイズフリー圧延、3) 太丸/細丸のダブルアウトレット化による交互圧延の実施とサイズフリー圧延により毎月各寸法を2~4回圧延する2~4サイクル圧延が実現され、短納期でユーザに供給されるようになった。さらに線材用サイジングミルも1993年に実用化された。

③ 棒鋼仕上げ4ロールミルによるサイズフリー・精密圧延

既設2Hiミル出側に2スタンド4ロールミル (Fig. 4.36) を設置したサイズフリー・精密圧延が実用化されつつある。これにより、1) 2パス合計の減面率 $\leq 10\%$ の軽圧下で、寸法公差 ± 0.1 mmの精密圧延、2) 直径変さの自由度約10%のサイズフリー圧延が可能になった。

<3> 材質制御技術 (制御圧延・制御冷却)

(a) 急冷プロセス

棒鋼中間・仕上げミル間および仕上げミル出側に設置した高冷却能の浸漬冷却管または、棒鋼仕上げミル出側に設置した高冷却能で円周方向の冷却均一度が高い高性能クーリングトラフにより、直接焼入れが可能になった (Fig. 4.37)。

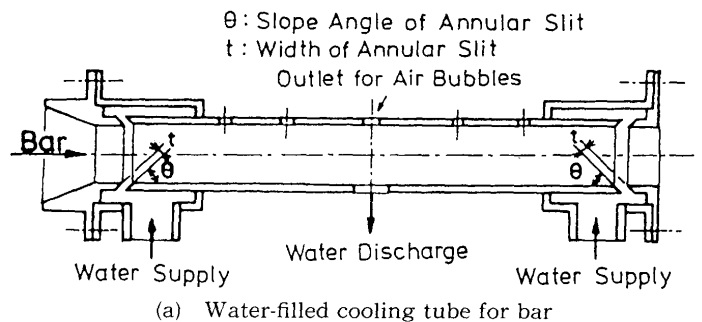
(b) 徐冷プロセス

棒鋼・バーインコイルの中間・仕上げミル内冷却帯と仕上げミル出側の冷却床徐冷カバーあるいはコイル徐冷設備 (Fig. 4.38) による制御圧延・制御冷却により軟質低合金鋼などの熱処理簡略・省略型新商品が開発された。

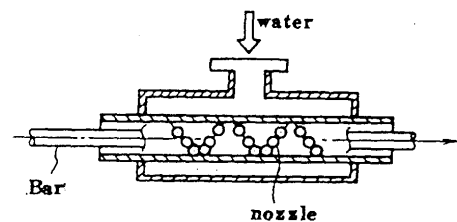
<4> 今後の展望

以上、棒鋼・線材の圧延制御、ミルハードウェアによる精密、サイズフリー圧延、および材質制御技術について概説した。

高寸法精度化、自動化を推進するには、実機ミル用張力センサーなどの開発による計測データの充実、AI・Fuzzy 理論



(a) Water-filled cooling tube for bar



(b) Cooling device

Fig. 4.37. Cooling trough for bar mill.

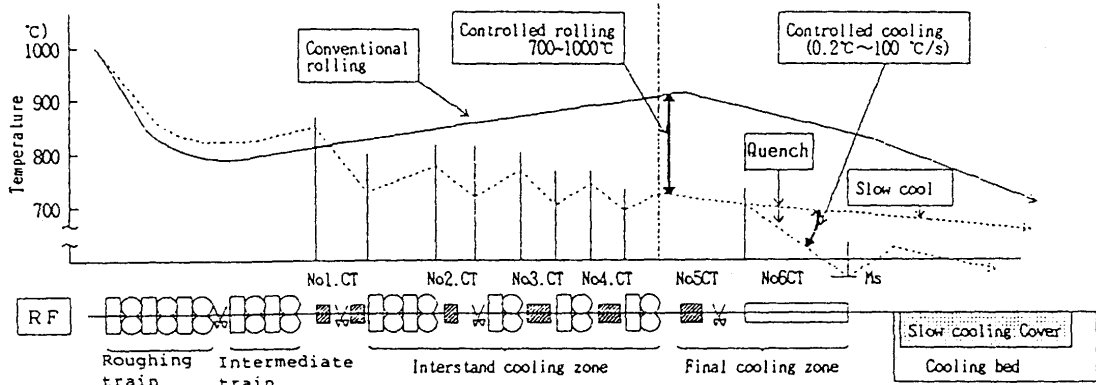


Fig. 4.38. Layout of cooling trough and slow cooling cover and temperature pattern. (Oba, Yatsuka, Tanabe et al.: CAMP-ISIJ, 1 (1988), p. 837)

などの応用による圧延制御のインテリジェント化，スキルフリー化が必要である。

さらに，次世代ミルとして，以下の技術が重要と考えられる。

- ① パーツ製造までの一貫工程コストダウンに寄与する材質を造り込むためのプロセス (TMCP など)
- ② ニヤネットシェイプ化に対応した形状の鋼材製造のためのプロセス (中間サイズ，異形断面)
- ③ 寸法精度，表面性状のレベルアップと品質保証技術
- ④ スケジュールフリー，小ロット対応を含めた圧延稼働率向上のためのプロセス
- ⑤ レーイングヘッドでの巻き取り形状，通材性の改良などによる圧延の高速化 (現状実績 100 m/s → 150 m/s)

4.4.2 継目無鋼管製造法

(1) はじめに

1975年から1985年にかけては第2次オイルショックを契機とした油井管ブームもあって，設備投資意欲も旺盛で国内外で十数基の熱間継目無鋼管製造設備が建設されたが，本稿で対象とするその後の10年間は需要の低迷期にあたり恒常的設備過剰に悩まされることとなった。国内においては円高により輸出競争力に陰りがでてきたこと，慢性赤字体質により投資意欲は減少し，技術開発も全体的には活発とは言えなかった。新規の設備投資は主に中進国を中心に行われ，安価なエネルギー，労働コストを背景に輸出市場に参入する企業が出現した。また製品の面からは使用環境の過酷化に伴って高合金化が進んだ。このような環境下で材質の高合金化，製品の高精度，高品質化に応じた技術開発がなされた。以下にいくつかのトピックスを取り上げ解説を行う。また本稿は継目無鋼管製造法のなかで熱間圧延技術を取り上げることとし，比較的技術変化の少なかった押し出し法や冷間加工技術については割愛させていただく。

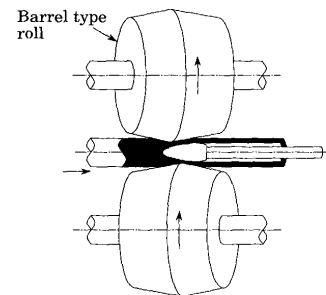


Fig. 4.39. Mannesmann piercer.

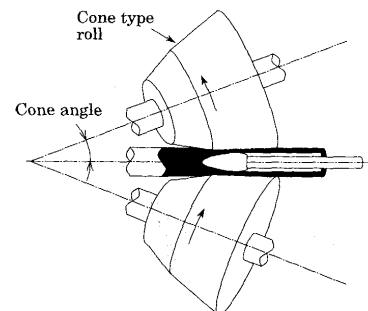


Fig. 4.40. Cone piercer.

(2) 穿孔圧延

(a) 交叉穿孔機

継目無鋼管の大量生産ラインに用いられる傾斜ロール穿孔機には特筆すべき進歩があった。Fig. 4.39は従来から広く使用されているマンネスマンピアサの模式図で，向かい合って傾斜して配置された樽型 (バレル型) のロールにより丸鋼をプラグに対して押し込んで中空素管を成形する。これに対して Fig. 4.40に示すコーン型のロールを用いる交叉穿孔機またはコーンピアサと呼ばれる穿孔法がある。このタイプの近代的な圧延機は約10年ほど前から用いられるようになっているが，その後しだいにその技術的優位性についての理解が進んでいる。交叉穿孔機ではコーン型のロールを用いるためロール径が圧延方向にしだいに大きくなるので，管が進行方向にブレーキされず，ピアサの宿命と考えられていた回転鍛造効果を抑制する効果があること，また円周方向の剪断歪が小さいことが示されている。回転鍛造効果，円周方向の剪断歪の抑制により従来のマンネスマンピアサでは内面疵発生