

れ、特に、ブリキ材圧延における高速化およびエッジドロップ削減と板形状維持の両立技術などが新しい技術として注目される。

1995年に、バックアップロールのローラベアリング化とACモータ化による速度応答性アップおよび以下に述べる諸機能の組み合わせにより、2,800 m/minのブリキ材高速圧延が実現されている。板厚については、このような高速にもかかわらず上記新機能の採用により、定常部で1.0%以下、加減速部では2.0%以下の長手方向精度が確保されている。No.1スタンドの片テーパワークロールシフト化および最終スタンド出側へのプロファイルメータ設置により、エッジドロップの制御が行われている。高速化にともなうロールの冷却、摩耗削減には、最終スタンドのロール出側面に非接触水切りシールを用いた冷却装置および初期摩耗が少なく長時間の粗度維持性をもつTi添加型ワークロールが採用され、高速化実現に貢献している。

2000年には、日本で最も新しい酸洗直結コールドタンデムミルが稼動を開始した。酸洗前に圧延機式のメカニカルデスケーラを設置しデスケーリング効率を向上させ、類似プラントと比べると小径のワークロールをもった全スタンド6Hi-UCミルが採用されている。また、高応答ACモータドライブの適用により板厚・張力非干渉制御を用いて板厚精度向上を図っている。小径ワークロールの採用は形状制御能力を高め平坦な板を、加えてタンデムミル入出にプロファイルメータ、No.1-2間、No.2-3間に簡易式形状検出ロールを配置し、中間ロールシフトなどを利用して、前段において許容する形状の範囲で板プロファイルを調整してエッジドロップを制御する技術が取り入れられている。歩留まりについては、走間板厚変更 (FGC) 修正機能により、仕上板厚0.8 mmでトップ+エンドのオフゲージ長さ1.6 mの達成がなされている。

エッジドロップ削減に関しては、上記の片テーパワークロールシフト適用や小径ワークロールを採用した6Hi-UCミルにおける中間ロールシフトの有効活用以外に、ロールをクロスし圧延するベアクロスミルを前段に、形状維持のために6Hiミルを後段に配置した5スタンドタンデムミルも稼動している。

以上の際立った技術的な流れのほか、特殊鋼や0.1 mm以下の極薄材の圧延用として小径ワークロールを用いた各種の多段ミルが採用されている。

3.3.2 加熱・冷却技術

鋼材の冶金的な品質向上、操業の安定性、生産性の向上、設備の小型化、省エネルギーを実現するために、各々のプロセスにおいて最適な加熱・冷却技術が開発されてきた。近年

では、特に材料性能向上のためによりシビアな加熱・冷却速度の制御技術や環境問題にも配慮した省エネルギー、低公害の加熱・冷却技術の開発が進んだ。

(1) 加熱技術

スラブ加熱炉あるいは冷延鋼板の連続焼鈍炉において、使用エネルギーの低減を狙った蓄熱式のリジェネレーティブバーナーシステムが開発され、多くの設備への適用が進んだ。本システムは一对の交番燃焼式バーナーから構成され、各々のバーナー本体にはセラミックボールあるいはセラミックハニカムで構成された蓄熱体を内蔵しており、切り替えバルブにより空気と排ガスを交互に蓄熱体に流すことにより、排ガスの顕熱を高温の予熱空気として回収し燃焼を行わせるものである。リジェネレーティブバーナーシステムではガス流れの切り替えが10秒から30秒のサイクルで行われており、1,300℃レベルの排ガス温度に対して空気は約1,100℃まで予熱される。一方、排ガスの温度は約250℃まで低下し、排ガス熱損失が極めて低くなっている。その結果、リジェネレーティブバーナーを用いた大型連続式スラブ加熱炉では約25%の省エネルギーが達成されたとの報告がある。また、連続焼鈍炉のラジアントチューブバーナーにおいては約29%の省エネルギーが達成されたとの報告がある。

一方、リジェネレーティブバーナーでは高温空気による燃焼となるためサーマル NO_x 発生量増大が課題とされたが、高温低酸素濃度燃焼技術により熱効率の向上と NO_x 発生量の低減を同時に実現する技術への取り組みが行なわれた。従来の燃焼概念では空気中の酸素濃度が低下すると保炎性が低下し安定燃焼が維持できない、また未燃排出物が増加すると考えられていたが、空気温度が1,000℃を超えると空気中の酸素濃度が5%以下に低下しても安定して燃焼維持できることが確認された。図3.5にプロパン火炎の予熱空気温度と NO_x 発生量の関係を示す。通常の酸素濃度燃焼では空気予熱温度が上昇すると NO_x 排出量が指数関数的に増大するが、高温低酸素濃度燃焼では増加率が小さく空気温度1,150℃において、酸素濃度15%では NO_x 濃度約750ppmに対して、酸素濃度2%では40ppmと極めて低い値となっている。このとき、COおよびUHCの排出もほとんど無視できるとの報告がある。

熱間圧延の仕上げ圧延プロセスにおいて、製品品質の向上や歩留まり向上、生産性の向上等の多くの利点を持つ連続圧延 (エンドレス圧延) を実現するため、誘導加熱によるシートバーの連続オンライン接合技術が実用化された。先行材の尾端と後材の先端との間をわずかに隙間をあけた状態で厚さ方向に交番磁界を印加すると接合端面に集中した誘導電流が流れ、この電流によるジュール発熱により端面が溶融し接合

される。誘導加熱装置はシートバーの接合端面を3～5秒の短時間で接合温度まで昇温することが可能であり、非定常部を無くすことによる品質安定、歩留まり向上および生産性の向上を可能としている。また、同プロセスには、接合の加熱源としてCO₂レーザーを用いた連続接合技術も実用化され、適用された。その他の誘導加熱技術利用として、加工熱処理法TMCP (Thermo Mechanical Control Process) ラインに誘導加熱装置を組み込むことにより、従来、別プロセスで行なわれていた調質鋼の連続焼入れ・焼き戻しといった熱処理をオンラインで行うオンライン熱処理プロセスが実用化された。これにより厚板の相変態のコントロールや炭窒化物の析出制御と生産性の向上が可能となった。

連続焼鈍プロセスにおける直火加熱技術では、高温予混合ガスに対応できる還元バーナーが実用化された。直火加熱では火炎に高い還元性能を持たせるために燃料と空気をあらかじめ十分に混合させてバーナーに供給する予混合燃焼方式が原理的に優れているが、予混合燃焼特有の逆火の問題から空気予熱温度の高温化や高温炉への適用が困難であった。これらを解決すべく図3.6に示す高温予熱空気に対応できる還元バーナーが開発された。低負荷時においてもノズル内で逆火が発生しないようにノズルの断熱・冷却構造設計が行なわれており、これにより予熱空気温度400℃、炉温1,350℃まで

の予混合燃焼方式の直火加熱技術が実用化され、従来の直火加熱方式に比べて約20%の省エネルギーと加熱能力の向上による炉長の大幅な短縮が実現されている。

(2) 冷却技術

熱間圧延プロセスにおいては、水冷による組織制御で鋼材の強度、靱性、溶接性を向上させる材質制御プロセスTMCPが1980年代に世界で初めて日本で導入され、今や圧延プロセスにおける不可欠の技術として普及している。TMCPで用いられている制御冷却装置は水の沸騰現象を利用した沸騰熱伝達によるものであり、ランアウトテーブルの上下面に各種水ノズルが配置され鋼板は両面から急速に冷却が行なわれる。TMCPでは材質の均一化と平坦な形状を確保するために幅方向の均一冷却は不可欠であるが、1990年代になると幅方向の均一性確保だけでなく、製品品質としての板強度の均一性に対する要求も厳しくなり、加速冷却の冷却停止温度の精度向上が望まれるようになった。これに対応する冷却技術として遷移沸騰領域を発現させないオンライン加速冷却が実用化された。本冷却法では図3.7に示すように鋼板の温度が高い領域から低温の領域まで全面が核沸騰状態で冷却する方式を追求することにより冷却の安定性を確保している。

冷間圧延プロセスでは冷間圧延による鋼板の加工硬化を除去するため、現在では連続焼鈍炉による焼鈍が多く行なわれている。連続焼鈍炉における冷却方法としては炉内の還元性雰囲気ガスをノズルから噴出させて鋼板に衝突させるガスジェット冷却があり、その冷却性能については、すでにノズルピッチ、ノズル径、ガス衝突速度等を考慮した無次元数による定式化整理が行なわれているが、幅方向の冷却性能均一性を向上させるため、幅方向のガス流量密度分布の適正化について検討が進められた。またロール冷却では、1990年代初めに鋼板とロールを均一に接触させるためのサクシオン式冷

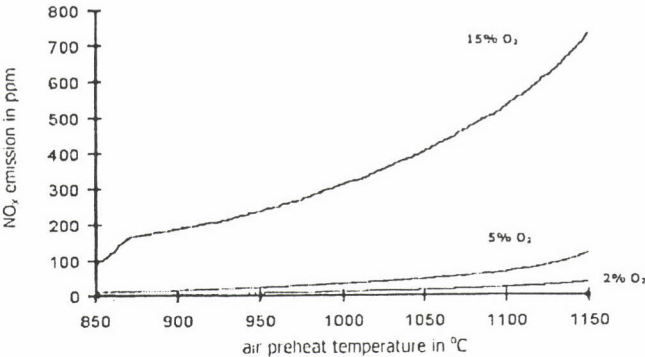


図3.5 空気予熱温度とNOx発生量の関係 (工業加熱, 4 (2004), 55.)

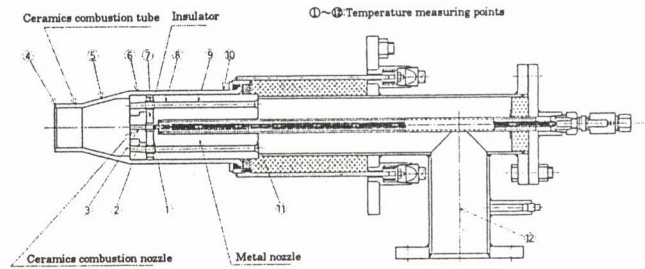


図3.6 高温予混合ガス用還元バーナーの構造 (三菱重工技報, 6 (1999), 317.)

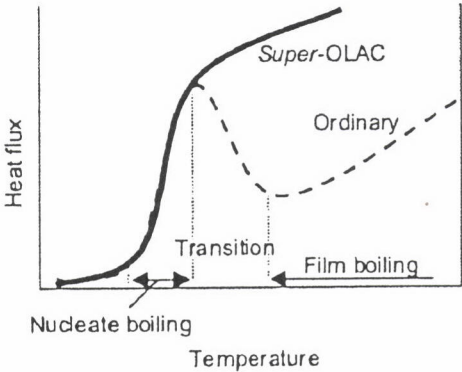


図3.7 スーパーオラックの沸騰曲線 (NKK技報, 179 (2002), 58.)

却ロールが実用化されたが、水路構造の改善による冷却性能向上や製造コストの低減が進められた。

高張力鋼板の製造プロセスでは再結晶温度から $150^{\circ}\text{C}/\text{s}$ を越える速度で急速に冷却させることにより高張力鋼を製造するニーズがある。この場合、非常に大きい冷却能力が必要となり、例えば厚さ 0.5 mm の鋼板を 700°C から 300°C まで $150^{\circ}\text{C}/\text{s}$ で冷却させるためには約 $500\text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ の熱伝達率が必要とされる。このような熱伝達率は従来の窒素ガスを主成分とする HN ガスによるガスジェット冷却では達成不可能であり、ミスト冷却あるいは浸漬冷却等の水の沸騰を利用した冷却方式が採用されることになるが、板変形や表面酸化といったデメリットがある。これに対して還元雰囲気を持続したまま急速冷却を実現するための手段として冷却媒体に水素ガスを使用したガスジェット冷却が検討された。水素ガスは、窒素を主成分とする HN ガスに比べ非常に大きい熱伝達率を持つため同一噴流条件において約2倍の高い冷却性能を得ることができ、ノズル配置や噴出速度を適正化することにより $500\text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ を越える熱伝達率を得られる可能性がある。一方、水素ガスジェット冷却における課題は、加熱ゾーンと冷却ゾーンの水素ガス混合を防止するためのガスシール技術、水素ガス循環系の安全性確保等があり、今後の実用化研究の進展が期待される。

(3) 今後の展望

圧延プロセス、熱処理プロセスにおいて、品質向上、生産性向上、省エネルギーに寄与する技術の中で、特に進展の著しいものあるいは進展が期待されるものについて述べた。

製鉄プロセスにおける加熱・冷却技術は、今後は、特に材質均一化や強度特性向上といった製品品質向上のための、よりシビアな加熱・冷却の制御技術への要求や環境問題にも配慮した省エネルギー、低公害の加熱・冷却技術への要求が高まってくることが予想される。これに対しては、現象のより深い探求による既存技術のブラシアップと電磁気や熱化学の領域にまで踏み込んだ新しい発想による加熱・冷却技術との融合により、今後とも様々なプロセスの要求や改善に応じていくことが必要となるであろう。

3.3.3 操業プロセス技術

鉄鋼生産は量的には大幅な拡大の望めない時代となったが、図3.8に示すように特にこの数年は輸出の増大によって熱延鋼板の生産が大きく増加し、粗鋼生産においても1億トンを超えた生産量になっている。国内での新しい圧延ラインの建設はリフレッシュも含めて熱延で2件、冷延で1件であり、熱延では1980年以来的建設で、これらの圧延機には新しい技術が盛り込まれた。自動車、家電製造などのユーザで

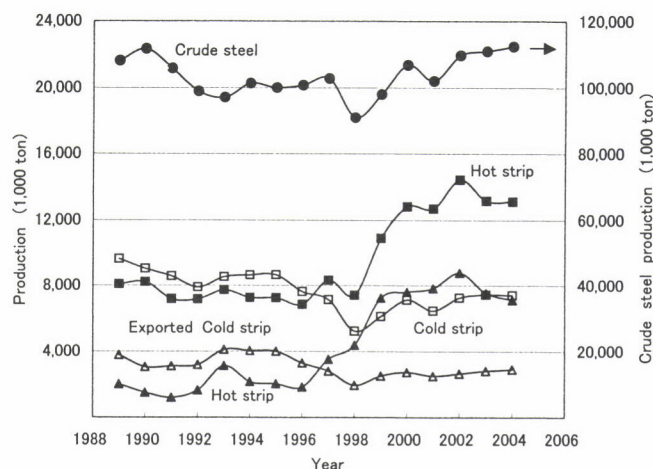


図3.8 国内粗鋼生産量および熱・冷延薄鋼板の生産・輸出量の年変化 (日本鉄鋼連盟資料より)

のより効率的な生産や、省エネルギーのために、寸法・平坦度精度の高い薄板製品や、高張力鋼板のニーズが高まり、これらに対応するために既存設備を最大活用する技術として、種々の現代制御理論が実操業に採用されてきている。

(1) 熱延薄板圧延の操業プロセス技術

この10年の熱間圧延の特筆すべき技術は長年の夢であったエンドレス熱延が実現し、従来 1.2 mm が限界とされていた最小薄板をより薄く、 0.9 mm 程度までの熱延鋼板が製造されるようになったことである。さらに、コイル先後端の非定常圧延状態が少なくなることによる歩留まりの向上や、薄物圧延時に頻発する通板トラブルの解消などの効率化が達成された。このためには、粗バー接続技術がキーとなる技術であるが、誘導加熱やレーザーによる溶接で実現されている。実操業に適用されていないが、剪断接合技術なども開発されている。また、極薄圧延において寸法の精度を確保するためには、スタンド間のルーパーによる張力制御が重要になってくるが、油圧駆動によるルーパーや、外乱を予測するオブザーバー張力制御、 H_{∞} 制御などが実用化している。

熱延での板厚制御技術のこの10年の主な課題は、圧延開始時の非定常圧延状態における板厚精度の向上であった。これは定常部の板厚精度はモータのAC化による速度制御の高応答化や、ゲインの最適化を図るロバスト制御、スミス補償による計測の遅れの補償などによってほぼ目標に達しているのに対して、圧延開始時の板厚精度は、セットアップの精度に大きく左右され、圧延荷重、変形抵抗、温度、先進率などの理論モデルの誤差や、圧延機のミル剛性、ロールギャップ設定の誤差が重なり合っている複雑な現象であるからである。このような各理論モデルの精度を向上させることはもとより、ファジー推論によってダイナミックにセットアップを