



日本鉄鋼業における独自技術の開発と現在-13

熱間圧延におけるエンドレス圧延の誕生

Development of Endless Hot Strip Rolling

二階堂英幸
Hideyuki Nikaido

JFE スチール (株) 東日本製鉄所
(千葉地区) 設備部 設備技術室 室長

1 はじめに

1996年、川崎製鉄(株)千葉製鉄所(現JFEスチール(株)東日本製鉄所(千葉地区))第3熱間圧延工場において、世界で初めて仕上圧延の連続圧延が開始された¹⁾。従来、約2分ピッチで間欠的に行われていた仕上圧延が、20分から30分間延々と続けられるようになった。まさに“エンドレス圧延”が誕生したわけである。

過去に多くの熱延技術者がエンドレス圧延を夢の圧延と思い描いていたように、エンドレス圧延には、多くの利点がある。先行する板の尾端と後行する板の先端が接続されるため、仕上スタンド間の張力は常に維持され、非定常かつ不安定な圧延状態が排除される。従来のバッチ圧延では永遠の課題とも言われていた先端の曲がりや尾端の絞り込みが発生しなくなる。ひいては、圧延が困難であった1.2 mm以下の極薄銅板を安定的に製造することも可能となる。また、連続した圧延では、仕上出側のテーブルローラー上で板が飛び跳ねないため、先頭材を除いて通板速度を上昇・均一化させることができ、全長にわたって品質の均一化や生産性を向上させるこ

とができる。さらに、連続的に圧延されていることを利用して、潤滑圧延や仕上ミル出側での強冷却などが安定して行えるようになる。

以上のように、エンドレス圧延には従来の圧延にはない多くの利点が存在する。しかしながら、エンドレス圧延を実現するには、シートバー接合技術の開発をはじめとして非常に多くの技術開発が必要である。

本報では、エンドレス圧延を実現するにあたってJFEスチール(株)で開発してきた主要な技術を中心に紹介する。

2 エンドレス圧延における主要開発技術

図1に、エンドレス圧延を実現するために開発された主要な技術を示す。これらの技術は、およそ4つに大別される。その第1の技術は、シートバー接合技術である。シートバーの最適接合方法の決定に始まり、接合技術の開発、さらには接合装置、バリ取り装置の開発が行われた。第2の技術は、接合装置にとぎれることなくシートバーを供給するための技

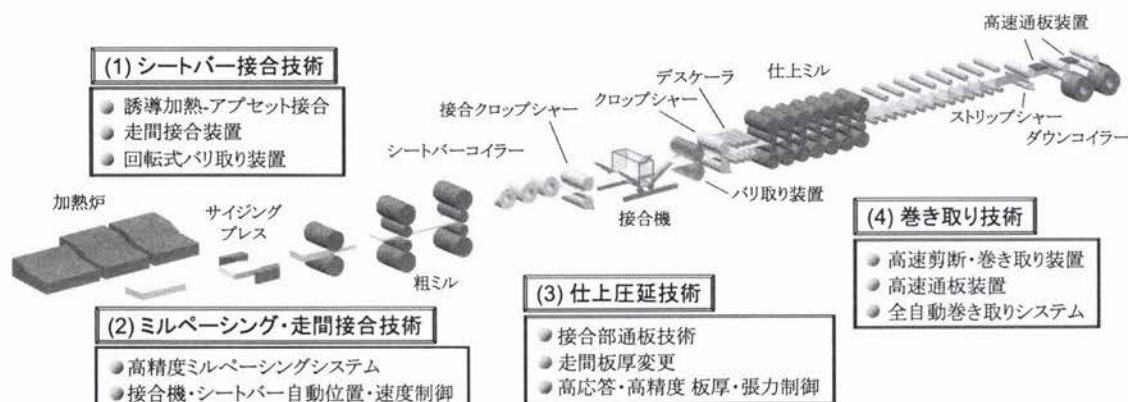


図1 熱間エンドレス圧延設備と主要技術

術である。エンドレスミルペーシング技術と、シートバーコイラーから払い出された後行材を先行材の尾端に追いつかせる追い付き制御技術などが開発された。第3の技術は、高精度仕上圧延技術である。接合部の安定通板技術と連続した板を目標通りの板厚に仕上げる走間板厚変更技術などが開発された。第4の技術は、連続かつ高速で通板している板を分割しコイラーで交互に巻き取る高速巻き取り技術である。

なお、いずれの技術にも共通していることであるが、エンドレス圧延は加熱炉からコイラーまで完全に自動化された環境の元に成り立っている。熱間圧延ラインの完全自動化技術は、エンドレス圧延を実現させるための基盤技術としてその根底に存在している。

3 シートバー接合技術の開発

3.1 最適接合方法の決定

エンドレス圧延を実現するためにシートバー接合に要求される条件は、まず第1に、厚さ20 mmから40 mm、幅1900 mmにもおよぶ断面のシートバーを、短時間で接合することである。熱間圧延では、目標とする材質を得るため圧延材の温度低下はほとんど許されず、仕上圧延の入側で接合するために許容される時間は十数秒程度の非常に限られたものとなる。第2の条件は、たとえ短時間で接合できたとしても、張力を付加された状態の仕上圧延において破断しないだけの接合強度が要求される。

シートバーの接合方法については、重ね圧延圧接法²⁾、突き合わせ圧接法³⁾、テルミット溶接法⁴⁾、レーザー溶接法⁵⁾、ジグソーによる機械的接合法⁶⁾、還元炎処理接合法⁷⁾、誘導加熱接合法⁸⁾、直接通電接合法⁹⁾など種々の方法が提案されている。圧延圧接法は、仕上圧延の変形を積極的に利用して接合するものであり、接合に要するエネルギーが圧倒的に少ないという利点がある。しかしながら、JFEスチール(株)の実験では、接合界面にスケールなどの酸化物がわずかに残存すると十分な接合ができないという結果が得られており、信頼性の高い接合強度を確保するには問題がある。テルミット溶接などの溶接法は、技術的には可能であるが接合時間を十分短くできないという基本的な問題があり、実現性には乏しい。電流による加熱を利用した方法に、誘導加熱法がある。誘導加熱法は、材料に接触することなく大電流を板に誘起することが可能であり、短時間での接合を可能とする。また、電流を板に供給するための接触部が無いいため、スパーク等により板に疵が発生することもない。さらに、電縫管製造での接合実績もあり、接合強度が不足するという観点からの問題もほとんどない。

いずれの接合方法を採用したとしても、現有の技術をその

まま適用することはできず、非常に難しい技術開発が必要と推定されたが、短時間接合や接合強度の信頼性の観点からみて、シートバーの接合方法としては、誘導加熱による方法が最適と判断された。なお、新日本製鐵(株)大分製鐵所では、世界最大級の45KWのレーザー溶接機を2台導入してシートバー接合技術の開発に成功している¹⁰⁾。

3.2 誘導加熱接合の特性

誘導加熱接合の原理を図2に示す。先行材の尾端と後行材の先端との間にわずかの隙間をあけておき、この状態で板厚方向に交番磁界を印加すると、誘導加熱装置の磁束を打ち消す方向でかつ接合端面に集中した誘導電流が流れる。シートバーの端面は、この誘導電流によるジュール熱により発熱し昇温する。引き続いて、加熱面がアップセットされると接合が完了する。

この誘導加熱の原理を接合プロセスに適用するために、インダクタ容量の決定やインダクタ鉄心寸法の最適化、コイル電流やコイル電圧と接合部の昇温速度との関係の把握、幅方向の昇温特性の把握と均一化などが重要な課題であった。また、実用性の観点から、接合面の設定精度のばらつき、すなわち、インダクタ中心に対する板端面の位置合わせ精度、あるいは板間隙間の精度に対する昇温速度の変化の把握も重要である。

図3に、実機の加熱試験により得られた昇温特性を示す。実験点は最高昇温速度に対する板幅方向各点の昇温速度比率を示している。幅方向に均一に昇温しており、ほぼ全幅にわたって接合可能なことがわかる。同時に、1例として、接合面の位置が圧延方向に40 mmずれた場合の昇温速度の変化を示す。値は、位置がずれなかった場合を基準として示している。昇温速度はほとんど変化しておらず、設定誤差に影響されにくい安定な加熱方法と言える。

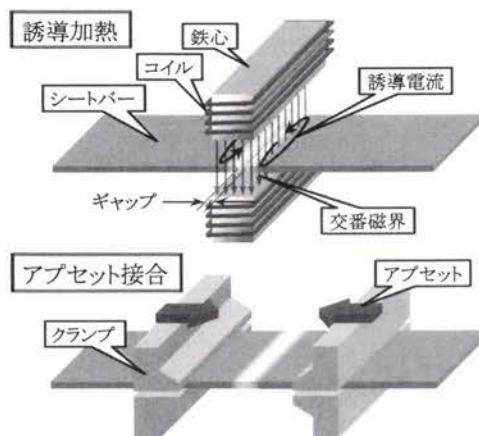


図2 誘導加熱接合の原理

3.3 接合装置の開発

先行するシートバーに後続するシートバーを追い付かせて接続する方法には、冷延工場のプロセスラインのようにルーパーを用いて接合点を停止させた状態で接合する方法と、通常の圧延速度で圧延しながら接合する走間での接合方法とがある。前者は設備的には実現可能と推定されるが、熱間圧延ラインにおけるルーパーでは、ロールとの伝熱によりシートバーの温度が低下したりシートバーの曲げ変形において発生するスケールが散乱して板に噛み込んだりするなど、品質上解決しなければならない問題が多い。これに対して、走間での接合では、シートバーの移動速度が速くなるため、先行材に対する接合装置の位置合わせや後行材の追い付きが難しくなるが、品質上の問題はない。したがって、接続方法としては、走間方式の方が適していると考えられる。

図4に走行状態の接合機の外観を示す。走間式の接合を実現するために接合装置の前後には、昇降可能なテーブルを設置しており、シートバーは、接合装置と順次下降と昇降を繰

返す昇降テーブルとで支持されている。

接合装置の内部には、接合端面を加熱する誘導加熱装置、板をクランプするクランプ装置、クランプした板をアップセットするアップセット装置が設置されている。また、先行材の端面と後行材の端面が幅方向にずれないようにセンタリングガイドを設置している。誘導加熱装置は今回のシートバー接合のために開発されたものであり、厚さ20～40 mm、幅800 mm～1900 mmのシートバーの接合端面を3～5 sという短時間で接合温度まで昇温することが可能な、非常に高性能な誘導加熱装置である。

3.4 バリ取り装置

アップセット後の接合部に生じた盛り上がりの部分、いわゆるバリをそのまま圧延すると圧延により押し込まれて折れ込みが発生する。また、仕上ミルのロール表面に疵をつける原因ともなる。したがって、仕上ミルに入る前にこれらを除去しなければならない。

しかしながら、1000℃を越える熱間鋼を切削した実績はほとんど無いため、切削方法や切削条件の把握あるいは工具の開発など、ごく基礎的なところから技術開発に取り組んだ。種々の方式による切削実験を繰り返した結果、特殊な工具を用いた切削法を開発し、実機化した。実機は、回転する工具と、上下の工具の圧下を行う油圧圧下で構成されており、シートバーの上下面のバリを全幅同時に切削している。

4 高精度ミルペーシング技術と走間接合技術

4.1 エンドレスミルペーシング技術

エンドレス圧延におけるミルペーシングの最も重要な役割は、後行材が接合装置の走行開始位置で圧延中の先行材に追いつくように加熱炉からの抽出ピッチを決定することである。加熱炉からの抽出が早すぎると、材料は待機することになりシートバーが冷えるという問題が発生する。一方、遅いと当然のことながら接合できなくなる。まさに、予測的の中することが要求される。

このため、各ミルの圧延時間の予測やミルの開度あるいはサイドガイドの開度といった設定替え時間の予測、さらにはシートバーコイラーでのコイルの巻き取りや払い出し動作時間の予測などを高精度化している。同時に、シートバーが連続して接合できるように、接合ユニット内の材料1本毎の抽出ピッチをユニット抽出前の事前の計算により予測し、最適抽出タイミングの調整を行っている。圧延が実行されると、予測時間と実績時間との差を以降の抽出材に反映し、より精度向上を行うフィードバック制御機能も備えている。図5に、

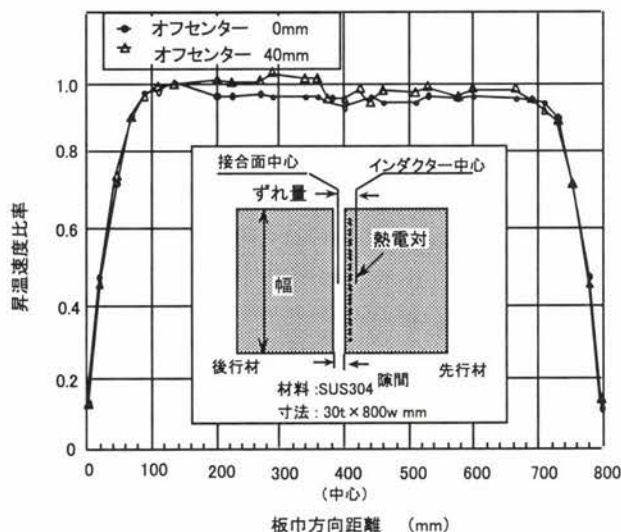


図3 実機の誘導加熱装置における昇温特性

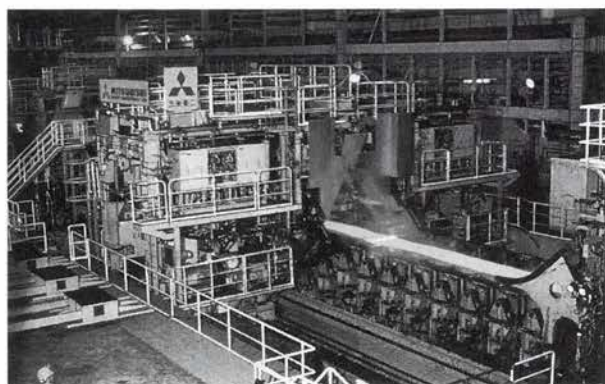


図4 走間接合中の接合機

搬送スケジュールの計算例を示す。先行材の尾端と後行材の先端は、接合装置の位置で重なっており、問題なく接続されている。現状の実績では、シートバーコイラーの待機時間のばらつきは、±3秒以内に収まっており、安定なエンドレス圧延の実現に寄与している¹¹⁾。

4.2 後行材の追い付き制御

シートバーコイラーで巻き取られたコイルは、先行材の尾端に追いつくように巻出される。この後行材の追い付き制御は、シートバーコイラーから払い出すタイミングの決定と、巻出し以降の速度を制御する2つの制御から成っている。払い出しのタイミングは、先行するシートバーの速度が仕上圧延における走間板厚変更や加速あるいは減速圧延により変動することを考慮して決定されている。シートバーが払い出されてからクロップシャーに到達するまで、後行材は先行材に連続してクロップカットされるように間隔を保って搬送され、クロップシャーカットが完了すると、先行材の尾端に突き合わせる接近搬送制御が行われる。

4.3 接合装置の追い付き制御

走間で接合するために、接合装置は先行材の尾端位置に追いつく、いわゆる追い付き制御を行っている。この制御では、先行材の尾端を接合装置が自動的に認識して、最適なタイミングで走行を開始するとともに、尾端が接合装置内のインダクタの中心に一致するように接合装置の速度制御を行う。通

常、接合装置内に先行材の後端が入ってから3秒以内に位置決めを完了している。この位置決めと上記の接近搬送制御とはほぼ同時に完了し、誘導加熱のための準備が整えられる。

これらの追い付き制御システムの開発により、走間での接合が安定的に行われている。

5 仕上圧延技術の開発

5.1 接合部通板技術

シートバーを加熱・アップセット接合したことによる接合部分は、母材部分よりも温度が高い。このため圧延荷重の急激な低下や、これに伴うスタンド間張力の変動が発生する。また、材料強度も高温部分は母材よりも低い。従って、エンドレス圧延には、通常の圧延にはない破断の危険性が潜んでいる。

このような接合部破断の危険性を回避するために、接合部の温度外乱等による張力変動を低減する制御を実施している(図6参照)。張力変動の低減には、仕上ミルの全スタンドに高速周期のAGCを適用し、まず温度変動による板厚変動をできるだけ低減させる。さらにルーパーに多変数制御を導入して張力変動を小さくする方法をとっている。

5.2 連続仕上圧延技術

エンドレス圧延では、通常6～10本、最大15本の連続圧延を実施している。このため、自在な板厚接続に対応する走間板厚変更技術と、エンドレス圧延の最終材まで目標板厚を継続して得るための高精度板厚制御が重要である。

走間板厚変更を安定的に実施するため、圧下等の目標位置を正確に予測する高精度セットアップ技術、各スタンドの圧下タイミングを材料の走間板厚変更位置に一致させる高精度トラッキング技術、また歩留りの低下を防止するために可能な限り短時間でロール開度を変更する全スタンド高速油圧圧下装置、走間板厚変更に伴うスタンド間の体積速度の変化に対して張力変動をなくすマスフロー制御および多変数のルーパー制御技術を開発している。

また、極薄材など連続して圧延する場合に、板厚精度を維持するためには、各スタンドの板厚を従来以上に精度よく制御する必要がある。このため、変形抵抗等の予測精度の向上はもとより、ミル定数可変制御、絶対値AGC等を組み合わせた高応答の板厚制御を実施し、また、F4ミル以降の各スタンド出側にはX線板厚計を設置して、AGCで修正しきれないわずかな板厚誤差を修正している¹²⁾。

図7に、0.9mmを含むエンドレス圧延の板厚チャートを示す。良好な形状を保ったまま板厚精度は、最終材まで±30μmを継続して達成している。走間板厚変更部での変動

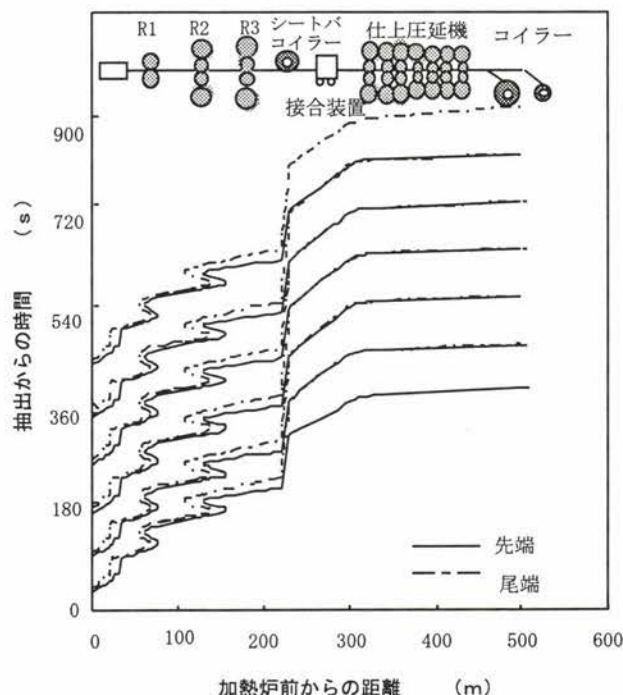


図5 エンドレス圧延におけるミルベージングの1例

もほとんどない。

⑥ 高速巻き取りコイラー

連続圧延がすでに実施されている冷間圧延における板の切断は、板速を400 mpm程度まで減速してから行われる。また、板先端の巻き付き速度についても、熱延のバッチ圧延ですら、せいぜい800 mpm以下である。このような実績に対して、エンドレス圧延では、仕上圧延の速度を維持しつつ巻き取ることを目標として、最高1200 mpmの高速で通板する板を切断すること、最少板厚0.8 mmの板を飛び跳ねさせることなく通板することに主眼をおいて開発に取り組んだ。

今回開発した高速ストリップシヤーは、あらかじめ板と同期速度で上下ドラムを回転させておき、板の切断位置で上下のドラムギャップを閉じて切断する方式をとっている。すなわち、ドラムの回転とドラムの開閉を分離することで高速切断を可能としている。また、板の切断位置で上下ドラムの刃が切断可能な位置となるように回転数を微調整する機能と、

刃の切断位置でドラムを時間ずれなく閉させる機能を備えており、切断精度の高いコンパクトな装置となっている。

一方、高速通板装置は、図8に示すように、テーブルローラーの上面に取り付けた、いわば上面ガイドのようなものであり、切断後の後行材の先端が飛び跳ねるのを防止する装置

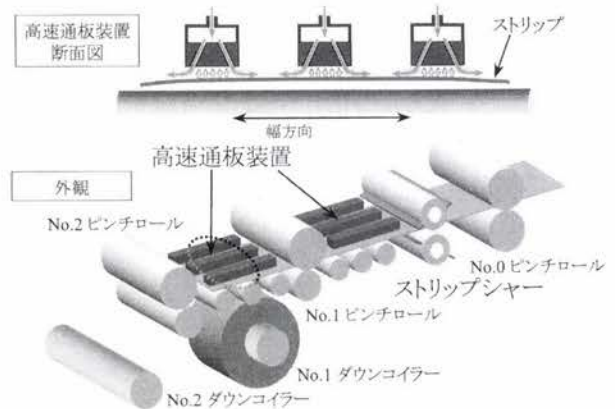


図8 高速通板装置

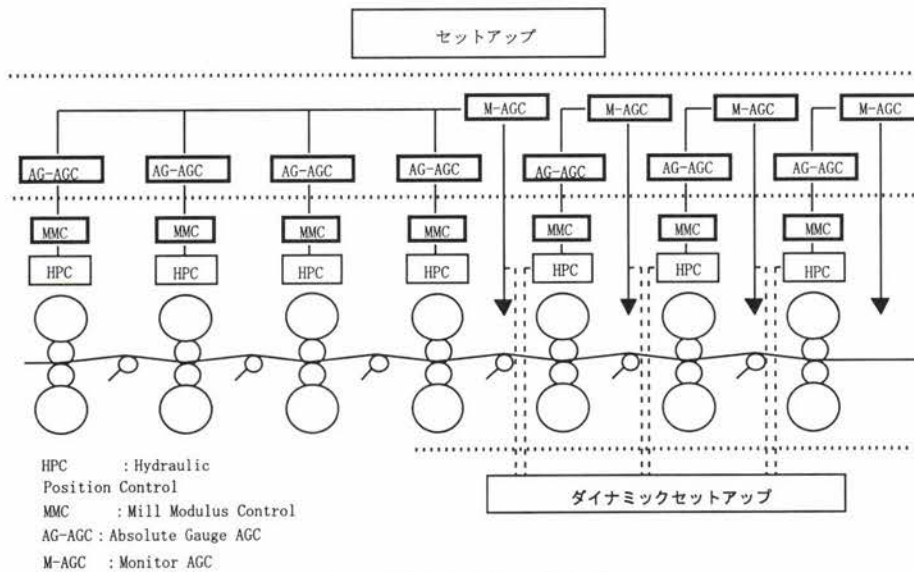


図6 仕上圧延の板厚制御機能

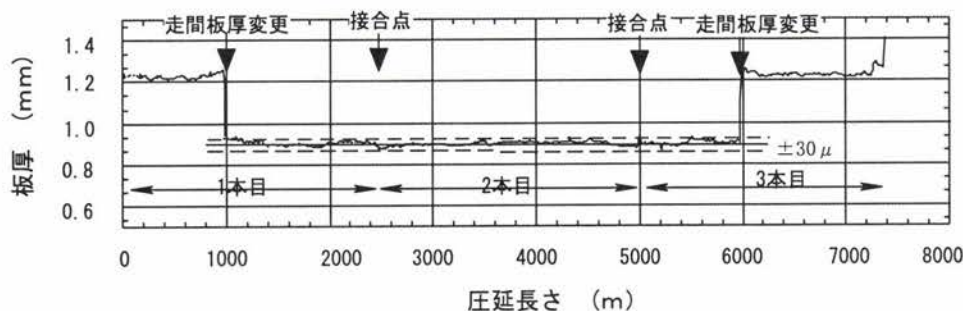


図7 厚さ0.9mmエンドレス圧延材の板厚
(板厚：1.2→0.9→0.9→1.2mm、板幅：1026mm)

である。このガイドは、板幅中央部を浮上させる機能を備えており、板の走行抵抗を減少させつつ板の剛性を上昇させており、薄板の通板性を飛躍的に向上させている。

もう1つの重要な技術として、巻き取りの全自動化を達成している。エンドレス圧延では、従来オペレーターが介入せざるを得なかったピンチロールギャップの調整等を行う時間的余裕はもはやなく、全自動化は必須の技術である。このため、第3熱間圧延工場の建設における自動化の推進とも同調して、ピンチロールの圧下に油圧サーボ圧下装置を導入し、ピンチロールの微妙な押し力の調整を可能とした。また、種々のパターンのピンチロール押し力や張力制御による自動巻き取り制御システムを開発することにより、完全自動化を完成させ、安定的な高速巻き取りを実現している¹¹⁾。

おわりに

エンドレス圧延を実現するための根幹の技術、すなわち接合技術、高精度ミルペーシング技術、仕上圧延技術、高速巻き取り技術の概要を示した。このエンドレス圧延の開発により、さらに極薄圧延技術の詳細な検討が行われており、張力制御やルーパー制御などの高精度化がさらに進められた¹³⁾。廉価な極薄鋼板の製造はもとより、エンドレス圧延を活用した新技術や新製品の開発が、今後も期待される。一方、エンドレス圧延技術として開発されたコイラー切断技術のみを使い、走間で分割するいわゆるセミエンドレス圧延も実用化している。ヨーロッパでは、薄スラブ連铸機とコイラー切断機とを組み合わせたセミエンドレス圧延も登場しており、連続化への挑戦が継続して行われている¹⁴⁾。

以上に示したエンドレス圧延技術は、1999年に三菱重工業(株)と共同で市村賞を受賞し、2000年には、新日本製鐵(株)、三菱重工業(株)、石川島播磨重工業(株)と共同で大河内賞を受賞した。

熱間圧延において連続化という新しい第1歩を踏み出してから既に8年が経過した。夢の圧延を目標に開発されたが、それが現実となった今、多くの経験や実績のもとに、得失も明らかとなってきている。今後、熱間圧延におけるエンドレス圧延ならびにそこで開発された技術がさらに広い分野で発展することを期待する。

参考文献

- 1) 二階堂英幸, 磯山茂, 野村信彰, 林寛治, 森本和夫, 坂本秀夫: 川崎製鉄技報, 28 (1996), 4, 224.
- 2) 新日本製鐵(株), 特開昭 51-112458
- 3) 石川島播磨重工業(株), 特開昭 60-240305
- 4) 石川島播磨重工業(株), 特開昭 60-191681
- 5) 新日本製鐵(株), 特開平 6-516875
- 6) 石川島播磨重工業(株), 特開昭 60-148685
- 7) 住友金属工業(株), 特開平 4-200907
- 8) (株)日立製作所, 特開昭 60-244401
- 9) 川崎製鉄(株), 特開昭 61-159285
- 10) 城戸基, 田中宏幸, 杉橋敦史, 平山隆, 南田勝弘, 前田勝宏, 西林茂: 第39回計測自動制御学会学術講演会, (2000), 204, A-5.
- 11) 吉村宏之, 川瀬隆志, 前田一郎: 川崎製鉄技報, 28 (1996) 4, 231.
- 12) 今江敏夫, 野村信彰, 三吉貞行: 川崎製鉄技報, 28 (1996) 4, 219.
- 13) 後藤太, 二階堂英幸, 菱沼至, 北浜正法: 材料とプロセス, 15 (2002), 289.
- 14) 清水孝宣, 山崎育邦, 岩谷浄, 武口達, 亀谷敦: 三菱重工技報, 36 (1999) 6, 288.

(2005年9月6日受付)