

Manufacturing Techniques of Wire Rod and Bar Steel at Kawasaki Steel Corporation



山中 栄輔
Eisuke Yamanaka
水島製鉄所 条鋼圧延部長



金堂 秀範
Hidenori Kondo
水島製鉄所 条鋼圧延部条鋼技術室 主査(課長)



西島 真也
Shinya Nishijima
水島製鉄所 製鋼技術部制御技術室 主査(掛長)



福田 実
Minoru Fukuda
水島製鉄所 設備部設備技術室 主査(掛長)



井野 清治
Kiyoji Ino
水島製鉄所 条鋼圧延部線材棒鋼課長



土井 彌彦
Masuhiko Doi
川鉄コンテイナー(株)取締役 水島工場長

1 緒 言

線材棒鋼製品は市場規模が大きく広い産業分野で使用されており、要求品質レベルもその用途に応じて多種多彩である。この中で当社は、タイヤコード、等速ジョイントなどに代表される自動車用部品などの要求品質の厳しい高級鋼分野を指向して、製造技術、品質保証技術の開発を進めてきた。各種高級鋼製造に必要な圧延工場の基本設備は、ノンツイスト圧延、無摺動搬送設備に代表される表面疵防止圧延設備、および低温圧延可能な高剛性圧延機である。この基礎設備の上に、高寸法精度を指向した張力制御技術、均一加熱技術、熱処理省略鋼製造を目的とした製品冷却速度制御技術などを構築し、さらにセンサーを主体とした品質保証体制を整えることによって、高級鋼製造体制を確立した。本報においては、これらの設備の概要と品質保証技術および高級鋼製造技術の一例について紹介する。

要旨

高生産性の高級線材棒鋼製造体制を確立するために、基盤技術の開発、自動化や省力化の推進、さらに品質保証体制の整備を図った。加熱炉はワンマンオペレーションによる完全無摺動搬送化と低温均一加熱を実現した。棒鋼圧延ミルは4スタンドコンパクトミルを設置するとともに、張力制御を導入した。線材圧延ミルは高剛性ミル、リターデッドステルモアを採用し温度制御機能の向上を図った。さらに、熱間渦流探傷機、ビレット全断面超音波探傷機を導入し、品質保証体制を確立した。この結果、精密圧延棒鋼は全長寸法精度 ± 0.08 mmと高精度であり、98%の一級合格率を得た。また、制御圧延の適用により、焼鈍工程を不要とする直接軟化線材の製造体制も確立できた。

Synopsis:

The development of basic techniques, the acceleration of automation and labor saving, and the maintenance of the quality assurance system were carried out for establishing a highly productive and high-class wire rod and bar steel manufacturing system. A fired furnace was realized by perfect non-sliding transportation and low-temperature and uniform heating through one-man operation. Four-stand compact mill and also tension control were introduced to the bar steel rolling mill. With a high-rigidity mill and a retarded Stelmor adopted to the wire rod rolling mill, its temperature-control function was greatly improved. Further, with introduction of a hot eddy current flaw detector and an all cross-sectional billet ultrasonic flaw detector, the quality assurance system was established. As a result, a high accuracy of ± 0.08 mm in the overall length was obtained in precision rolling bar steel, and the first-grade acceptance ratio of 98% was achieved. Also through control rolling, the manufacturing system of direct softening wire rod which required no annealing process was established.

2 製造品種と製造技術

当社線棒製品の要求品質を用途別にまとめたものを Table 1 に示す¹⁾。用途によって、要求される製品品質はさまざまであるが、介在物、組織、表面疵および寸法がほぼ共通して要求される品質である。これらの品質を得るために、さらにその品質保証レベルを向上させるため、当社では Table 2 に示す技術開発と設備導入を行ってきた²⁾。第3章以降ではこの中で線棒工場について詳述する。

* 平成3年2月25日原稿受付

Table 1 Use and material quality

Use	Example	Required function	Material quality											
			Center segregation	Inclusion	Structure	Machinability	Hardness, stiffness	Surface defect	Decarburization	Scale	End shape	Bar tolerance	Straightness	
Drawing	Tire-code Piano-wire	Easy-drawing Easy-descaling	○	○	○			○	○	○				
Drawing Extraction	Machine parts Accel-shaft Cold-finished bar	Close tolerance Stiffness	○		○		○					○	○	
Hot-forging	Crankshaft Connecting rod Bearing	Rolling life Wear resistance	○	○	○	○			○			○	○	
Semi-hot forging	Joint	Close tolerance		○				○	○			○		
Cold-forging	Joint High-tention bolt	Close tolerance Stiffness		○			○	○	○			○		
Machining	Drive-shaft	Close tolerance			○	○		○				○	○	○

Table 2 New equipment and technology and their purposes

	Equipment and technology	Purpose
'84/2	Reconstruction of billet mill ・ V-H mill installation	・ Reconstruction of material supplying process ・ Improvement of billet quality
'84/9	Reconstruction of bar and rod mill ・ NT mill installation ・ Computer control ・ KS burner	・ Improvement of surface quality ・ Data gathering for quality assurance ・ High productivity by automatic operation ・ Controlled reheating
'86/9	Installation of compact mill	・ Mill power up for low temperature rolling
'87/4	Development of FTC	・ Increase in dimension accuracy
'87/9	Installation of hot ECT for bar	・ Assurance of surface quality
'88/3	Development of detecting surface defect system using special pyrometer	・ Assurance of surface quality
'89/1	Reconstruction into automatic extraction system	・ Preventing of surface defects ・ Automatic control
'89/12	Installation of billet UST equipment	・ Establishment of quality assurance system for internal defect
'90	Development of continuous forging machine	・ Elimination of center segregation

Table 3 Furnace specification

Type	Walking beam type
Capacity	150 t/h
Effective width and length	13.8 m × 17 m
Gas	Mixed gas 100%
Charging	By roller table
Discharging	By roller table in the furnace and extractor
Maker	Ishikawajima-Harima Heavy Industries

送、抽出側炉内ローラー、抽出エキストラクターにより、ビレットの完全無摺動搬送を実現し、製品表面疵発生を最小限におさえる設備を実現する。

(2) 低温均一加熱

抽出温度 900~1 000°C の低温均一加熱を実現するため、(a) 加熱帯下部へのバーナー増設による加熱帯での加熱能力を増強した。さらに、(b) KS バーナー (Kawatetsu sandwich burner) の採用により、低負荷操炉時にもビレット長手方向の均一加熱が可能となった。KS バーナーは、燃焼ガスの内外周より供給される燃焼空気比を調整することにより、負荷変動に関係なく一定フレーム長が得られるという利点をもつ。またビレットのスキッド部をスキッド間部との温度差 (スキッドマーク) の低減策として均熱帯に、(c) ホットスキッドを導入している。これによりスキッドマークは従来の 60°C から 40°C 低減されている。(a)、(b) および (c) によって、低温均一加熱が可能となり、製品寸法精度向上と表層脱炭の低減が図られた。

(3) ワンマンオペレーション

加熱炉計算機制御 FCC (Furnace computer control) の導入により、ビレット装入~操炉~抽出の作業が自動化され、監視要員 1 名のみでの操業を実現している。FCC の機能としては、①加熱炉装入テーブルから抽出までのビレット自動搬送、② 3 次元伝熱差分計算によるビレット実績温度計算と炉温制御、③

3 圧延設備

3.1 加熱炉

主仕様を Table 3 に、改造設備の特徴を次に示す。

(1) ビレット無摺動搬送

加熱炉装入側ローラーテーブル、炉内ウォーキングビーム搬

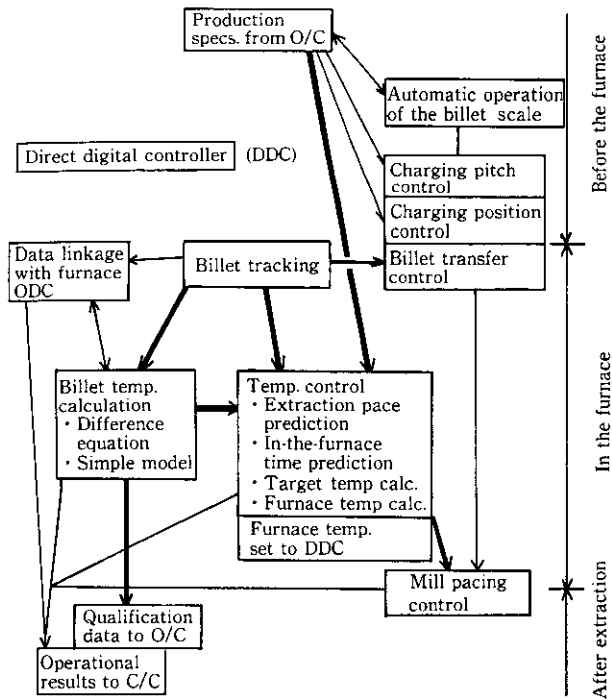


Fig. 1 Relations among the FCC functions

加熱条件およびミル稼働状況を考慮したビレット抽出制御がある³⁾。詳細には Fig. 1 に示す機能で構成されている。以上の機能により正確な温度コントロール、リアルタイム加熱実績の収集およびオンラインでの出荷可否判定が可能となり、製造条件が保証され製品の品質保証にも大きく寄与している。

3.2 棒鋼圧延設備

1972年の建設当初より、全連続HV配列によるノンツイスト圧延を実現し、高級鋼製造を指向した圧延機を導入した。その後、熱処理省略鋼などのさらなる高級鋼製造のため、ハイパワーミル、張力制御の充実などの要求が高まり、ハイパワーコンパクトミルの設置をはじめとして種々の改造を実施している。ここではコンパクトミル、張力制御について紹介する。

3.2.1 コンパクトミル

従来の #1 および #2 の2スタンドを撤去し、4スタンドのコンパクトミル⁴⁾を導入した。Table 4 に主仕様を示すが、特徴は以下のとおりである。

- (1) 低温加熱材料の強圧下を150中ビレットから行うためスタンド数の増加と電動機増強を行った。また、ミルスプリングの寸法精度への影響を排除するため高剛性ミルとしている。
- (2) 電動圧下装置を設置し、プロセスコンピュータによる圧下APC機能と、セットアップ精度の向上を図った。
- (3) オンラインロール交換が自動化され、4スタンドで7minの短時間組替を可能とした。

またコンパクトミル導入は、高級鋼への対応のみでなく、定常的に低温圧延が可能となり、スケールによる歩留損の減少、燃料原単位削減など、当工場のコスト削減にも大きく寄与している。

3.2.2 張力制御

製品寸法精度を向上させるためには、加熱温度の変化、素材寸法の変動、インパクトドロップなどに起因するスタンド間張力変動を

Table 4 Main specification of compact mill

Type	Compact mill locked flame			
Arrangement of stand	H-V-H-V stand			
	Stand AH	BV	1H	2V
Roll barrel length (mm)	320	320	320	320
Roll diameter (mm)	630	540	540	540
Motor (kW-DC)	450	800	1 100	900

低減し、無張力圧延が必須条件となる。材料断面寸法の小さい仕上ミル列では、ルーバーによる無張力化が最も有効な方法であり、建設当初よりルーバー制御を導入している。粗ミルおよび中間ミルの場合の大断面材料に対しては、スタンド間距離の短い場所では材料の曲げ剛性の影響を受けるため、ルーバーの導入は困難である。このため当社では、スタンド間距離の長い #6 および #7 スタンド間にダウンルーバー、その他の粗ミル列と中間ミル列のスタンド間にはトルクアームメモリー方式の張力制御を導入した。

また圧延トルクを正確に求める機能としてロストルク補償、加減速制御などを、さらに特殊制御機能として非干渉制御、先端端張力積極付加制御などを兼備させ、製品寸法変動を最小限におさえる張力制御を実現している。

3.3 線材圧延設備

当社の線材圧延設備は、高級線材の製造⁵⁾を目指し、1965年に建設された旧線材工場のツイストタイプ圧延方式、40 m/s ミルに替わり、1984年10月に工程生産を開始した最新鋭ミルである⁶⁾。Table 5 に主仕様を示す。当設備の特徴は次のとおりである。

(1) 高生産ノンツイストミル

1 スtrandにもかわらず、5.5 mmφ で 103 m/s、9 mmφ 超で 130 t/h の高速圧延を実現し、通常型圧延機の2ストランド分に相当する能力をもつ。

(2) 温度制御機能

ブロックミル前後水冷帯およびブロックミル内でのミル間水冷設備をもち、圧延温度の厳格な調整が可能である。ブロックミル前水冷帯に関しては #12 スタンド出側温度によるフィードフォワード制御、温度予測モデルを用いた初期水量セットアップ制御が導入されている。またミル後水冷帯に関しては、巻取温度からのフィードバック制御が導入されており精度の高い冷却制御が可能となっている。

(3) 油圧圧下装置

ブロックミルとしては初めて油圧圧下装置が導入されている。これは遠隔ロール圧下とロール隙制御機能をもつため、サイズ替時間の短縮と省力化に大きく寄与している。

(4) リターデッドステルモア

ブロウとリターデッドカバーを併設することによって、幅広い冷却速度を得ることができる。徐冷時には最大 10 min の徐冷時間がオンラインで得られるため、直接軟化処理が可能である。またコンベア幅方向の冷却に関しては、エアチャンバーを3分割し独立制御し、ローラー搬送方式の採用により均一冷却化を達成している⁷⁾。

(5) 巻取、集積

建設当初は、基本リング径 1 170 mm で自然落下集積であったが、コイル荷姿の改善を目的にリフォーミングタブ内外径より基本リング径を 1 120 mm に変更のうえ、集積部に花巻き装

Table 5 Block mill line facilities

Water spray box ahead of block mill Type: Cooling nozzle type (2 zones) Capacity: 200 m ³ /h max Maker: SHI-Morgan
Block mill Type: 10 stands non-twist mill Roll size: #19~#20 stand 210 mmφ #21~#28 stand 158 mmφ Maker: SHI-Morgan
Main motor of block mill Capacity: AC 6 000 kW (700/1 400 rpm) × 1 Control: AC-VVVF, Digital ASR control Maker: Toshiba
Water spray box after block mill Type: Cooling nozzle type × 4 zones Capacity: 600 m ³ /h max Maker: SHI-Morgan
Laying head Type: Inclined type (10°) Ring diameter: 1 120 mm Pipe: 1 piece pipe Motor: DC 185 kW (1 350 rpm) Maker: SHI-Morgan
Stelmor conveyor Type: Roller conveyor × 8 zones (with retarded cover) Blower: 250 mm Aq × 1 100 m ³ /min × 11 Control: AC-VVVF Maker: SHI-Morgan

置の導入改造を加えた。この結果、搬送中のコイル荷姿が安定化するとともにコイル解束性も飛躍的に向上している。

4 品質保証

高級鋼の需要分野は加工の自動化、省力化、および在庫を保有しない操業が進んでおり、素材欠陥は存在しないことが前提条件で、表面欠陥、内部欠陥などの品質保証レベルは高度なものが要求される。さらに工程省略鋼などの導入が進み、素材に最終製品の品質が必要となり、当然の結果として品質保証レベルはますます高度化すると考えられる。当社では、これらのニーズに応えるべく品質保証機器の充実を推進してきた。

4.1 ビレット検査設備

4.1.1 ビレット AUT

当社ビレット AUT (automatic ultrasonic tester) は、コイル材全長の内部および表皮下欠陥の保証を目的として 1989 年 12 月より工程使用している。Table 6 に主仕様を示す。主な特徴を次に示す。

- (1) ビレット AUT 前に端面ばり (切断時のかえりなど) 除去装置を設け、ホットソー切断時のばりを完全除去した後探傷を行っているため、先尾端不感帯が短い。そして不感帯 50 mm は圧延時のクロップ範囲であり、全長保証が可能である。
- (2) 垂直、斜角プローブの最適組み合わせにより、角ビレットで断面の探傷率 100% を達成している。
- (3) 表皮下介在物については、検出位置にマーキングを行い、後工程のマグナー付グラインダーで除去保証している。

Table 6 Main specification of billet UST

Purpose of installation	- Perfect assurance of coil internal quality - Assurance of quality of hot scarfing
Accuracy	1 mmφ × 10 mmL
Probe	6 ch × 4 = 24 ch
Cover ratio in the section	100%
Scope of detecting	Except 50 mm from top and bottom ends
Capacity	150 t/h
Maker	Mitsubishi Electric Corp.

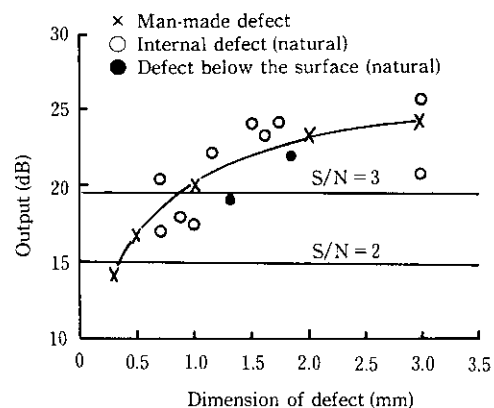


Fig. 2 Relationship between dimensions of defect and output at billet AUT

Fig. 2 に人工欠陥および自然欠陥の探傷結果を示す。自然欠陥 1 mmφ 相当においても S/N=2 以上で検出しており良好なレベルである。

4.1.2 マグナー付ビレットグラインダー

マグナーで 0.3 mm 以上の深さの疵を検出して除去している。近年では、グラインダー砥石の研削跡が圧延後の製品に模様状に残留したのも高級鋼では疵と評価し、圧下比による砥石粒度の変更、砥石の構成砥石粒度の狭バンド化などの対応により製造保証している。

4.2 圧延ライン

4.2.1 センサー配置

Fig. 3 に示すように多数の温度計やロードセルを設置している。これらのセンサーの測定値は、ビレット 1 本ごとに常時自動収集され、品質解析に活用している。また、管理範囲が定められているものに関しては、オンラインコンピュータにて自動合否判定される。

4.2.2 熱間表面探傷

熱間渦流探傷機⁹⁾の線材ラインへの導入を 1984 年 9 月に、また棒鋼ラインへの導入を 1987 年 9 月に行った。棒鋼ラインについては、検査ラインに冷間漏えい磁束探傷機をもつため、工程保証の作業支援として使用している。線材については、検査ラインでの全長検査は困難であるため、熱間での探傷はきわめて重要であり、検出精度の向上が直接品質保証精度の向上につながる。従来、自己比較型渦流探傷機による疵検出精度は 0.1 mmφ 程度⁹⁾が限界⁹⁾とされ、有害な欠陥を検出しないケースもみられた。この対策として、プロ

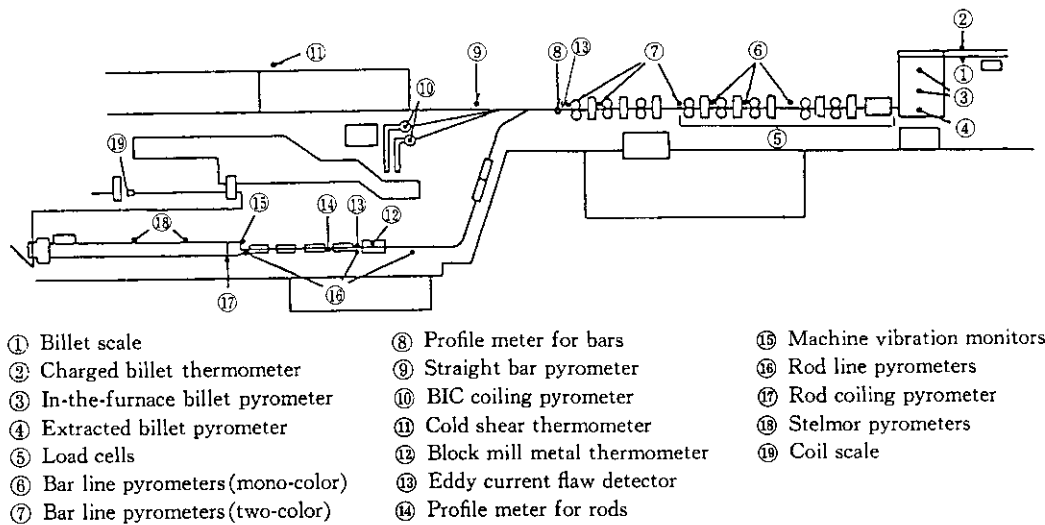


Fig. 3 Locations of the sensors

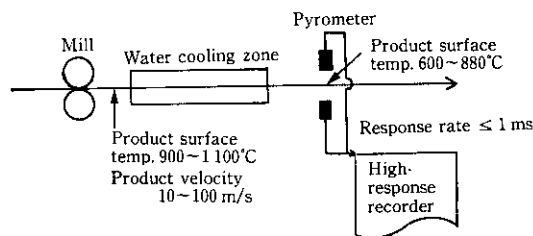


Fig. 4 Defect detector system by high-response pyrometer

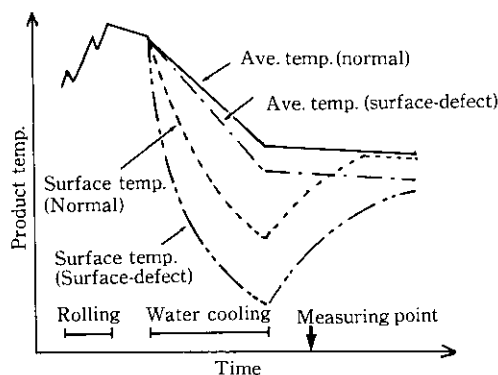


Fig. 5 Principle of detecting surface defect by high-response pyrometer

ックミル後水冷帯の後面に高速応答放射温度計を設置し、表面温度の微小変化検出による探傷技術を開発した。装置の構成を Fig. 4 に、検出原理を Fig. 5 に示す。線材の急速冷却過程では、表面形状の差により熱伝達率の差が大きくなり、これによる温度差を捕えるものである。ただし、低温部は非常に短いため、高速応答 (1 mm sec 以下) が必要となる。またこの温度検出法は、線材内部に熱容量の大きい介在物が存在したときに温度が低下せず、定常部より高温になることを利用することにより介在物の検出が可能で、品質保証に大きく寄与している。表面疵については、熱間渦流探傷機との併用により検出精度を大幅に向上することができた。

4.2.3 寸法計測

光学式回転型の一般的な太さ計であるが、測定精度向上のために

下記を実施している。

- (1) #12 スタンド出側温度計の測定値から太さ計通過時の温度を温度モデルによって予測し、常温寸法換算に使用する初期温度を設定する。その際、前回予測値と前回実績値の差を学習した結果を反映させる。これによって、ビレット最先端から正確な温度を用いて冷寸換算することができる。
- (2) 収縮率に化学組成を考慮した回帰式を用い、広範囲の鋼種に対して正確な冷寸換算を可能とした。

4.3 棒鋼検査設備

冷間での棒鋼検査機器の仕様を Table 7 に示す。記載のとおり次々と検査設備の充実を図っている。表面疵保証に関しては、現在設備仕様上は磁粉探傷機による 0.1 mm 径の疵検出が最高レベルであるが、精密圧延棒鋼等の高級鋼に対しては、探傷前処理として脱スケール、粗度調整により検出精度を 0.05 mm 径まで向上させている。内部欠陥に対しては、1985 年の全断面超音波探傷機 (RUT)¹⁰⁾ の導入により、表皮下まで含めた全断面の保証が可能となった。しかしながら、表面疵に関しては、人手を要する磁粉探傷機 (MMT) に替わる高精度自動探傷機 (AMT) の開発が今後の重要な課題といえる。

Table 7 Inspection equipment for bars

Equipment	Specification	Installation
RUT		
Method	Probe rotary type	
Frequency	5 MHz	'85/9
Number of probes	Normal 2, angle 4	
Inspection velocity	Max 75 m/min	
AMT		
Method	Probe rotary type	
Accuracy	0.3 mmφ	'76/7
Inspection velocity	Max 90 m/min	
MMT		
Number	2	'73/4
Method	AC	
Accuracy	0.1 mm in diameter	

Table 8 Factors to accuracy of dimension

	Factor	Dimension deviation	Countermeasure	Dimension deviation after countermeasure*1
Accuracy at rolling	In the section	• Caliber design • Caliber machining accuracy • Caliber wear • Roll thrust $\pm 0.13 \text{ mm}$	• Development of FTC • Limitation of number of billets for one caliber • Development of accuracy of setting parting and roll location	$\pm 0.03 \text{ mm}$
	Longitudinal direction	• Deviation of tension • Deviation of temperature • Roll eccentricity $\pm 0.16 \text{ mm}$	• Development of FTC • Controlled reheating • Reconstruction to new NC turning machine • Standard	$\pm 0.05 \text{ mm}$
Influence of off-line treatment	Straightening machine	-0.06 mm	• Establishment of rolling dimension aim considering decrease of dimension	-0.06 mm
	Shot blasting	-0.05 mm		-0.05 mm

*1 Deviation at 55 mm ϕ rod

5 高級鋼製造技術

本項では、高級鋼（工程省略鋼）製造技術の一例として、精密圧延棒鋼、直接軟化線材の製造方法、製造実績について紹介する。

5.1 精密圧延棒鋼

圧延時の寸法精度に影響を及ぼす因子は非常に多い。その中で主なものを Table 8 に示す。基本となる孔型設計については、従来張力制御導入前には、張力変動をカリバーの逃しによって吸収する必要があったため、真円度の高いカリバーを採用することは困難であった。張力制御の導入によりオーバル部分の寸法変動が少なくなったことによって、カリバーの機能から張力変動すなわちオーバル寸法変動吸収の機能を除外することが可能となり、カリバー真円度は大幅に向上した。

その他、表中に示すように前述の均一加熱技術の開発、カリバー摩耗評価に基づく使用ピレット本数規制、UC 旋盤の更新によるカリバー切削精度向上など種々の対策を実施し、圧延時の全長寸法精度は $\pm 0.08 \text{ mm}$ と非常に良好なものを得ている。

精密圧延棒鋼製造時のもう一つの注目点として表面疵減少が挙げられる。寸法許容範囲が狭いため、製品表面疵も公差内が要求され、疵を発生させないために圧延が条件となる。前述のように加熱炉以降すべての設備において無摺動を実現することによって表面疵の大幅減少を達成し、一般合格率は 98% を維持している。

5.2 直接軟化線材

低合金鋼線材の直接軟化をリターデッドステルモアを利用して行っている。通常の空冷状態においてはベイナイト組織となるが、徐冷を行うことによって、フェライト・パーライト組織をオンラインで得るものである。SCM435 級では、変態開始から終了までを適正な冷却速度とすることが条件となるが、巻き取りおよびコンベア速度の最適化を図ることによって、この条件を満たしている。現在 SCM435 級では 11 mm ϕ 以上のサイズで直接軟化が可能となっている。

6 結 言

高級鋼の安定生産を指向した線棒工場の新鋭化改造を行った。その概要は以下のとおりである。

- (1) 加熱炉は完全無摺動搬送、低温均一加熱バーナー、燃焼制御の開発導入により、表面疵、表層脱炭、寸法精度の品質向上に寄与した。
- (2) 圧延設備は全連続 HU ノーツイスト圧延機を基本とした高級線材、棒鋼コンバインドミルとし、粗ミルにハイパワーコンパクトミル、全スタンド全長張力制御の導入により、制御圧延の実現、寸法精度の向上など高級鋼製造に効果を発揮している。
- (3) 品質保証設備として、ピレット AUT、熱間表面探傷機などの開発導入により、全断面、全長保証が可能となり、高度化する市場ニーズに答えている。
- (4) 上記設備は計算機により全ライン自動設定制御され、ワンマンオペレーションとオンライン合否判定を可能とした。
- (5) 高級鋼の例として、精密圧延棒鋼、直接軟化合金鋼は安定に製造が可能で、生産量も着実に増加している。

市場のニーズは、デリバリーサービスの充実も含め、今後ますます多様化、高度化を増すと考えられ、個々の要求へのフレキシブルな対応が可能で、生産性の高い圧延工場とすることが必要である。このような観点からさらなる技術開発を進め、高級鋼特化圧延工場を指向する所存である。

参 考 文 献

- 1) 人見 潔：「コンパクトミルによる“無脱炭棒鋼、精密圧延棒鋼、熱処理省略鋼”」, 特殊鋼, 36 (1987) 11, 37-39
- 2) 長岡安央：「総合オンライン・サポート・システムの開発と利用」, Facom EDP 論文集, 17 (1984), 192-215
- 3) 福井雅康, 西島真也, 本田信之, 野田昭雄：「水島線棒工場における加熱炉計算機制御」, 鉄と鋼, 72 (1986) 12, S1184
- 4) 人見 潔, 笹田幹雄, 小西幸一, 奥村 寛, 小松重之, 瀬戸恒雄：「線棒工場コンパクトミルの建設と操業」, 鉄と鋼, 73 (1987) 12, S1113
- 5) 石井英成：「特殊鋼線材圧延設備の進歩動向」, 特殊鋼, 34 (1985) 11, 14-17
- 6) 野田昭雄, 金堂秀範, 小西幸一, 小松重之, 福田 実：「線材棒鋼工場新ブロックミルの建設と操業」, 川崎製鉄技報, 18 (1986) 1, 38-46
- 7) 花田義幸, 上野清博, 野田昭雄, 金堂秀範, 坂本俊夫：「線材棒鋼工場の新ステルモア装置」, 川崎製鉄技報, 18 (1986) 1, 62-68
- 8) 坂本俊夫, 野田昭雄, 井野清治, 川原真博：「線材熱間流探傷装置の適用」, 鉄と鋼, 72 (1986) 12, S1178
- 9) 上村真彦：「特殊鋼線材製造技術の進歩」, 特殊鋼, 34 (1985) 11, 8-13
- 10) 石井浩介, 福島善己, 井野清治, 人見 潔, 宇野義雄：「丸棒全断面超音波探傷設備の実用化」, 鉄と鋼, 72 (1986) 12, S1174