

φ450 mm 圧延丸棒の高品質，高能率プロセス開発

High-Quality and Efficient Manufacturing Process Development of φ450 mm Rolled Round Bar

小橋 幸治 KOBASHI Koji JFE スチール西日本製鉄所（倉敷地区）条鋼部 条鋼技術室 主任部員（係長）
大谷 義則 OHTANI Yoshinori JFE スチール西日本製鉄所（倉敷地区）条鋼部 条鋼技術室 主任部員（副部長）
竹久 修 TAKEHISA Osamu JFE スチール西日本製鉄所（倉敷地区）制御部 制御技術室 主任部員（副課長）

要旨

JFE スチール西日本製鉄所（倉敷地区）鋼片工場における丸棒の製造サイズレンジは、2011年に上限拡大するまでφ90～420 mmであった。生産能率の向上および、お客様からのサイズ拡大と品質保証体制の強化のご要望に応えるべく、以下の3点の改善を実施し、最大φ450 mmの圧延丸棒を高品質かつ高能率で製造する体制を確立した。

- (1) 低速圧延プロセスの導入による丸棒の内質改善とカリバー変更
- (2) 非接触式磁粉探傷機の導入による表面疵保証体制の強化
- (3) 既存超音波探傷機の高能率化改造による処理能率向上

Abstract:

Before the billet mill was modified in 2011 at JFE Steel West Japan Works (Kurashiki), the diameter range of conventional round bar was φ90 to 420 mm. In order to improve productivity and respond appropriately to customer requirements by increasing the upper limit of bar diameter and enhancing the quality assurance system, JFE Steel modernized the mill in following three areas:

- (1) Modifying roll caliber design and application of slow-pass rolling,
- (2) Introduction of non-contact type manual magnetic tester for better quality assurance, and
- (3) Modification of automatic ultrasonic tester for higher speed inspection of inner flaw.

Finally, high-quality and high-productivity production system of round bars with increased upper limit of diameter to φ450 mm has been established.

1. はじめに

太径丸棒は、主に建産機用の大型シャフトやベアリング、ピストンロッドなどに使用され、幅広いニーズがある。JFE スチール西日本製鉄所（倉敷地区）鋼片工場の丸棒製造サイズレンジはφ90～420 mmであった。さらなる太径サイズのお客様ニーズに応えるべく、最大径φ450 mmの極太径丸棒の製造開発を行った。圧延工程においては、内部品質および寸法精度を確保すべく、圧延ロールのカリバー変更および圧延パススケジュールの改善を行った。また、検査工程においては、極太径丸棒の表面および内部品質を確保しつつ、高能率な精整検査ラインの導入および改造を実施した。本稿では、これらの製造プロセスの開発および改造について概要を紹介する。

2. 太径丸棒の製造

2.1 鋼片工場のレイアウト

図1に鋼片工場の圧延レイアウトを示す。鋼片工場での素材昇熱方法は加熱炉および均熱炉があり、特に鋼塊などの大型素材や拡散焼鈍が必要な素材は、均熱炉が適用される。昇熱が完了した素材は2Hi ロール可逆式の粗ミル(Break Down mill, BD ミル)にて粗成形された後、必要に応じて、ホットスカーファァにて表面溶削、剪断機にて粗剪断を行う。丸棒圧延サイズと圧延プロセスとの関係を表1に示す。φ270 mm以上の丸棒についてはBD ホットソーにて分割鋸断後、圧延ラインより払出される。一方、φ260 mm以下の丸棒を圧延する場合は、垂直ロール圧延機2基—水平ロール圧延機2基で構成される連続式仕上ミル (Vertical-Horizontal mill, VH ミル) で最終成形される。VH ミル後のプロフィール計にて寸法を測定した後、ホットソーにて必要長さに鋸断する。その後はクーリングベッドで空冷を行った後、精整処理を実施する。

図2に丸ビレット精整レイアウトを示す。精整工程では、

ヤード内に仮置きしたビレットを給材する際にラベル読取を行い、現品情報の照合を実施する。ラインの構成は、端面取りから磁粉探傷までを連続して検査処理ができる構成としている。標準的な検査方法は、漏洩磁束探傷機(Magnetic Leakage Flux Tester, MLFT)で探傷した後、欠陥部をNo. 1~4 グラインダーにて手入れ除去し、さらに手入れ部の欠陥残存状況をNo. 1 磁粉探傷装置 (Manual Magnetic Tester, MMT) にて確認するプロセスである。手入れ部に欠陥残りがあれば、再度グラインダー手入れを実施する。

図3に外販ビレット精整レイアウトを示す。表面疵を完全に除去したビレットを超音波探傷機 (Automatic Ultrasonic Tester, AUT) で内部欠陥探傷を行う。続いてコールドソーにて最終製品長さに鋸断し、脱磁した後、刻印およびラベル貼付機で表示し、必要に応じて結束機にて結束して出荷する^{1,2)}。

2.2 太径丸棒の圧延プロセス

φ270 mm 以上の太径丸棒の圧延においては、鍛錬成形比

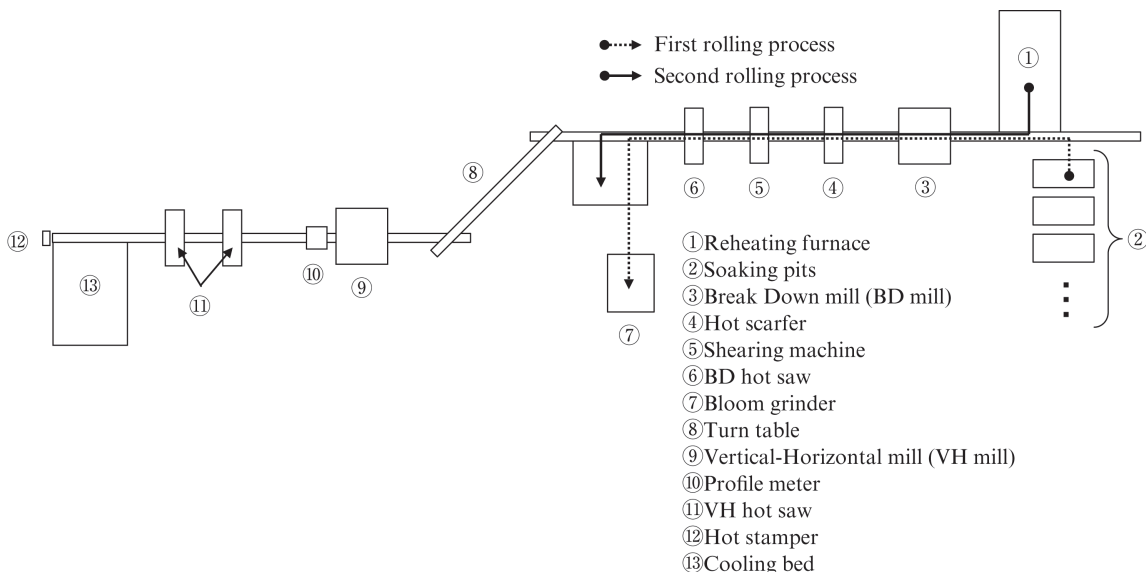


図1 圧延ラインレイアウト

Fig. 1 Layout of the billet mill line

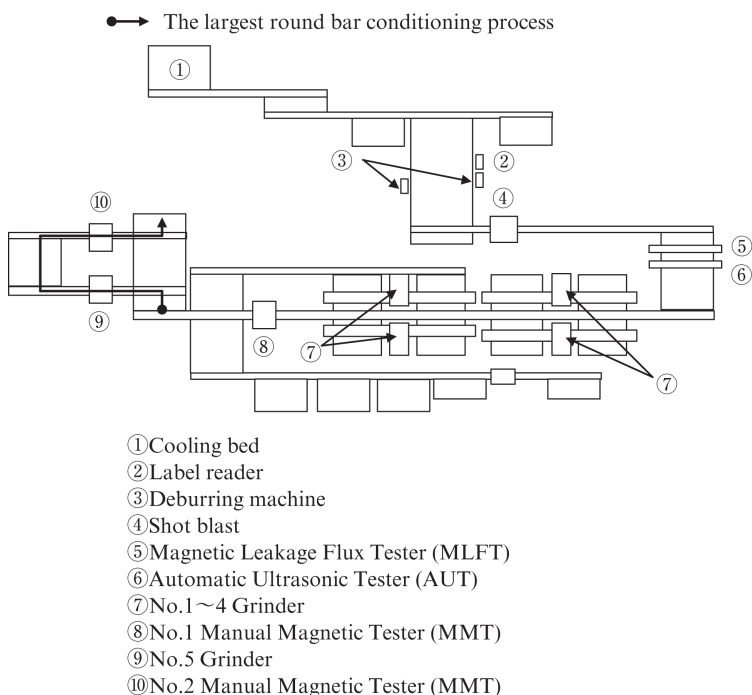


図2 丸ビレット精整ラインレイアウト

Fig. 2 Layout of conditioning line for round bar

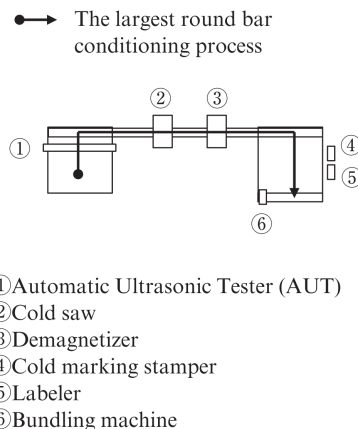


図3 外販ビレット精整ラインレイアウト

Fig. 3 Layout of conditioning line for direct sales bar

表 1 丸棒圧延サイズと圧延プロセスとの関係

Table 1 Relationship of round bar size and rolling process

Round bar size	BD Mill	VH Mill
φ90 to 260 mm	Intermediate cross-section bloom rolling	Finishing rolling
φ270 to 420 (450) mm	Finishing rolling	—

≥4S（実体鍛錬における鍛錬前／鍛錬後の断面積比）を確保するため、素材は 24t 単重の鋼塊を適用している。プロセスは図 1 の矢印に示すように、2 ヒート圧延で製造している。1 ヒート目は点線の矢印の流れで、素材鋼塊を均熱炉にて昇熱した後、BD ミルにて 540 mm×700 mm のブルームにサイジングする。圧延後のブルームは一旦冷却され、端部クロップを切除した後にブルームグラインダーにて表面疵手入れを行い、再び加熱炉にて昇熱する。2 ヒート目は実線の矢印の流れで、BD ミル圧延にてサイジングブルームから所定の丸棒サイズに圧延成形した後、冷却・バリ取りを行い、検査工程に入る。

2.3 太径丸棒の精整検査プロセス

φ400 mm を超える太径丸棒ピレットは、設備的制約により MLFT や No. 1~4 グラインダー設備を通過、処理することができない。そこで、太径丸棒は 2007 年に稼働した No. 5 グラインダーおよび No. 2 MMT にて表面検査を行う。No. 2 MMT にて検出された表面欠陥を No. 5 グラインダーで除去した後、外販ピレット精整へ送られる。以降の外販ピレット精整処理工程は 2.1 節で述べた通りである。

3. 極太径丸棒の圧延

一般的に、大径化することにより圧下が中心部まで浸透せず、結果的にザク（凝固時に発生する微細空隙）残りなどの内質欠陥が発生する可能性が高くなる。圧延プロセスにおけるザク圧着性に関しては、空隙の体積減少率と静水圧積分値 G_m に相関性があり、静水圧積分値は Finite Element Method (FEM) 解析を用いて算出される。静水圧積分値が大きな正の値を示す場合には、ザク圧着に有効な中央部の圧縮応力が得られることが知られている³⁾。静水圧積分値の計算式を式 (1) に示す。

$$G_m = \int \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} d\varepsilon_{eq} \dots\dots\dots (1)$$

σ_{eq} : Equivalent stress
 σ_m : Mean stress
 ε_{eq} : Equivalent strain

各パスにおける、応力ひずみ状態を 3 次元 FEM 解析シス

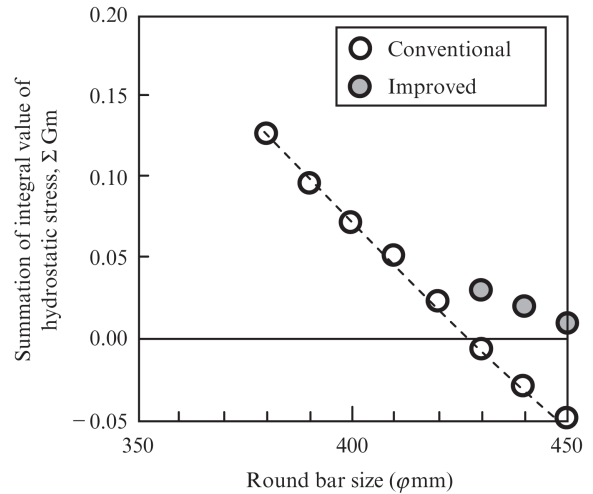


図 4 静水圧積分値の総和の計算結果

Fig. 4 Calculation result of summation of G_m

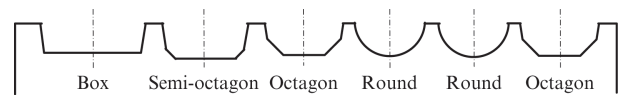


図 5 従来の BD ミルロールカリバー配列

Fig. 5 Conventional caliber alignment of BD mill roll

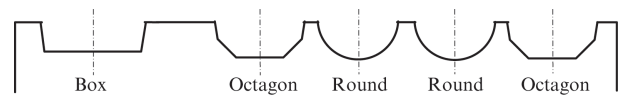


図 6 改善後の BD ミルロールカリバー配列

Fig. 6 Improved caliber alignment of BD mill roll

テム「CORMILL」を用いて解析を行い、それを基に G_m 値の総和を算出した。φ380~420 mm を φ10 mm ピッチで計算した結果を図 4 に示す。図 4 の計算結果によると、φ430 mm 以上の丸棒では G_m 値が負になり、ザク残りの発生が予測される。

φ430 mm 以上の丸棒の G_m 値を向上させるため、静水圧応力 σ_m を増大させる強圧下圧延を実現すべく、BD ロールのカリバー再編を検討した⁴⁾。従来のカリバー配列を図 5、改善後のカリバー配列を図 6 に示す。従来のカリバーにはセミオクタゴンカリバーを配置し、圧延材コーナー部の予成形のための軽圧下を行っていた。これをオクタゴンカリバーにて、強圧下を行うパススケジュールとするため、図 6 に示すように、セミオクタゴンカリバーを廃止した。そのパススケジュールを表 2 に示す。強圧下オクタゴンパスでは、従来の軽圧下セミオクタゴンパスに対して、圧下率を約 5% 程度上げる設計とした。このパススケジュールで、φ430~450 mm の G_m 値を再計算したところ、図 4 に併記したように φ450 mm においても G_m 値は正の値となった。

強圧下圧延を導入しても、図 4 に示すように φ450 mm の

表2 従来および改善後のパススケジュール
Table 2 Comparison of rolling pass schedule

Pass No.	Conventional	Improved
1	Box	Box
2	Box	Box (※1)
3	Box	Box
4	Box	Box
5	Box	Box (※1)
6	Semi-octagon	Octagon (※2)
7	Semi-octagon	Octagon (※2)
8	Semi-octagon	Box
9	Octagon	Octagon
10	Round	Round
11	(Dummy)	(Dummy)

※1 : Slow-pass rolling
※2 : High-draft rolling

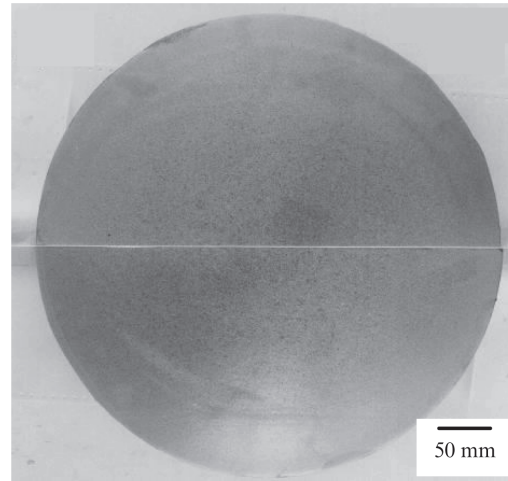


写真1 φ450 mm 丸棒のマクロ写真

Photo1 Macrography of φ450 mm round bar

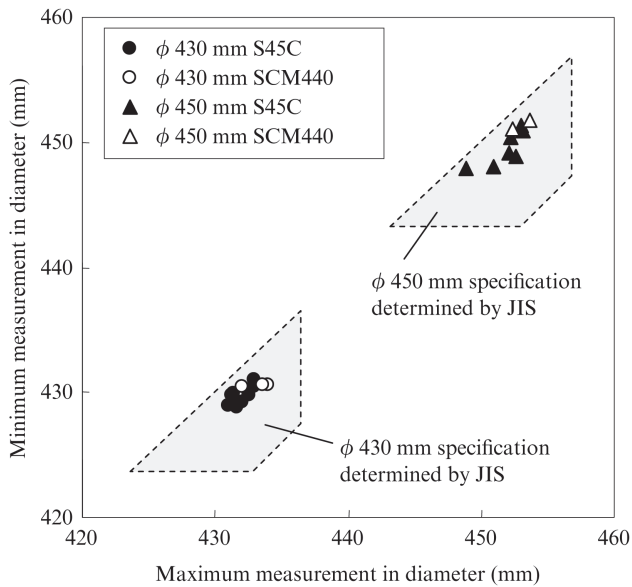


図7 実機圧延テストでの寸法測定結果

Fig. 7 Measurement at production line of rolling test

G_m 値はゼロ近傍であり、更なる G_m 値の向上が必要と判断した。 G_m 値を大きくするためには、さらに圧下率を大きくすればよいが、圧延荷重律速となる。ザク圧着は圧縮応力のみならず、圧延温度および圧下時間の確保により促進されることが知られている⁵⁾。圧延温度の確保は、加熱炉の操業制約や圧延チャンス制約がある。そこで、表2に示すように、ロール噛込速度を通常の20%程度とした低速パスを計2パス取入れ、圧下時間を増加させたパススケジュールにて実機圧延テストを実施した。

圧延機への過加重や圧延中の捻れ発生もなく、カリバー充満度はほぼ狙い通り(98%)で、圧延安定性は非常に良好であった。圧延後の寸法結果を図7に示す。いずれの圧延サイズおよび鋼種においてもJIS公差(公称径の±1.5%, 偏径差はその70%以下)を十分に満足しており、圧延可能

であることが確認できた。

従来のカリバー配列のままでは、極太径ラウンドカリバー配置により1サイズ/1ロールとなり、大幅な生産性ダウンにつながっていた。今回のカリバー配置の最適化により、従来の2サイズ/1ロールのカリバー配置のままとなり、高い圧延生産性の維持が確保できた。

強圧下を適用したが、 G_m 値が最も低いφ450 mm(鋼種:S45C)のマクロ写真を写真1に示す。写真1より中心部の性状はザク残りなく良好な内部性状を確認できた。

4. 極太径丸棒の検査

4.1 表面欠陥検査における非接触式 MMT

2.3節で述べたように、φ400 mmを超える太径丸棒ビレットはNo. 2 MMTおよびNo. 5 グライnderにて表面検査および保証される。鋼片工場のNo. 1 MMTおよびNo. 2 MMTの比較を表3に示す。大きな相違点として、No. 2 MMTは走間非接触式ヨーク法を採用しているところである。ヨーク法の利点は、材径変化による設定変更、即ち操業停止時間

表3 No. 1 MMT および No. 2 MMT の比較
Table 3 Comparison of No. 1 MMT and No. 2 MMT

	No. 1 MMT	No. 2 MMT
Adaptative size	φ90-400 mm	φ90-450 mm
Detection capability	Detect to test sample of JIS A1-30/100	Detect to test sample of JIS A1-30/100
Method	Prod method (Contact type)	Yoke method (Non-contact type)
Required current	2000A	80A

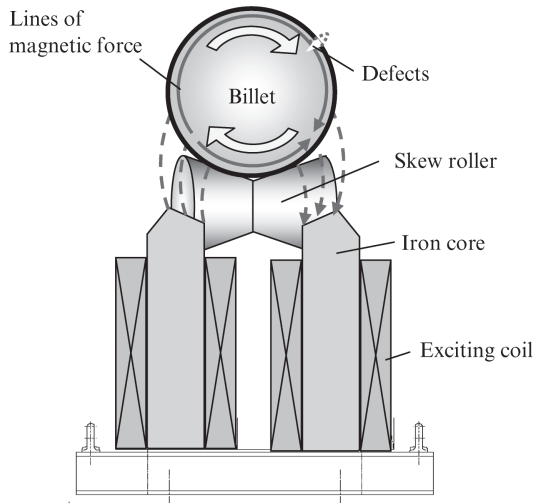


図8 ヨーク法原理の概要

Fig. 8 Schematic of yoke method principle

が不要であり、所要電流がプロッド法に比べ少なく省エネルギー効果もある。ヨーク法の探傷原理について図8に示す。回転する丸棒ビレット表皮下を磁力線が流れることによって均一磁化し、欠陥部で漏洩した磁力線により磁粉液が付着、欠陥模様が浮き上がる原理である。

プロッド法では、有害疵ではないが、電極接触に伴うらせん状の微小凹みが発生する場合がある。これに対し、ヨー

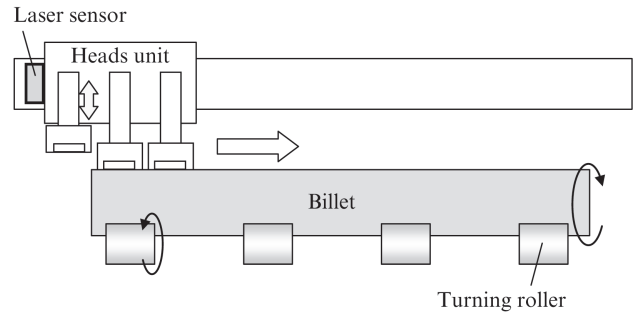


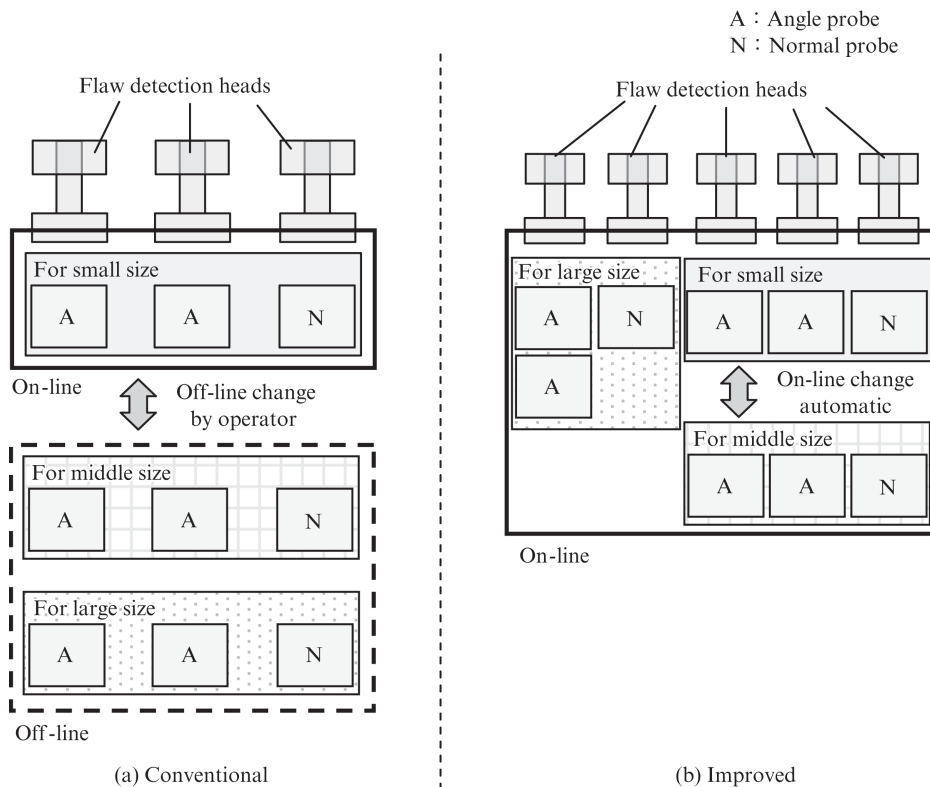
図9 AUTの概略図

Fig. 9 Schematic of AUT

ク法では非接触磁化のため微小凹みは発生しない。また、丸棒ビレット長手方向に磁化ヨークユニットを4ヶ所配置することで、最長13mの丸棒ビレットの全長・全周磁化を可能とすることができた。

4.2 AUT 処理の能率向上

内部探傷は、外販ビレット精整ラインのAUTにて探傷している。外販ビレット精整の工程の中での律速はAUT工程である。AUTは材径が大きいほど、すなわち、探傷走査表面積が大きいほど探傷時間が長い。また、AUT工程では材料径区分による探傷ヘッドの型替え停止時間の比率が高い。さらに、校正動作や探傷動作のサイクルタイムにも時間を要



(a) Conventional

(b) Improved

図10 (a) 従来および (b) 改造後のAUT探傷ヘッドの構造

Fig. 10 AUT heads unit construction of (a) conventional and (b) improved

している。これらの時間を短縮するため、AUT 設備のレベルアップ改造を行った。

4.2.1 探傷ヘッド台数増設化による型替え省略

図 9 に AUT の概略図、図 10 に従来および改造後の AUT 探傷ヘッドの設備構成を示す。従来は 3 つの材料径区分ごとに、探傷ヘッドの型替えを作業者の手作業で実施していた。型替え省略を行うためには探傷ヘッドを増設すればよいが、探傷ヘッドユニットが大きくなるため、周辺設備の機械的制約により増設不可能であった。そこで、太径専用ヘッドを 2 ヘッドのみ追加し、中径と細径を遠隔スライドシフトでオンライン交換できる方式を採用し、探傷ヘッドユニットのコンパクト化を図った。この構造を採用することにより、周辺設備と干渉することなく、型替えを完全省略した操業が可能となり、従来に対して作業率が 7% 向上した。

4.2.2 校正時間および探傷時間の短縮

校正時間を短縮するために、校正位置までの移動速度を高速にすることで、校正位置への移動時間を短縮させた。これにより、一連の校正動作時間を 24% 短縮させることに成功した。

探傷時間を短縮するために、材料端部検出用にレーザーセンサーを図 9 のように設置した。従来、探傷ヘッドを着材して材端部検出していたが、探傷ヘッドを着材させずレーザーセンサーを用いて材端部検出させることで、移動時間を短縮させ、1 本当たりの探傷時間を 18% 短縮させることに成功した。

5. おわりに

JFE スチール西日本製鉄所（倉敷地区）鋼片工場では、最大 φ450 mm の極太径丸棒の製造に成功した。極太径丸棒の製造にあたって、大径化による種々の課題を解決すべく、これまで述べた設備改造および操業改善を実施し、高品質かつ高能率製造プロセスを確立した。今後も様々なニーズに応えるべく、設備および操業レベルアップを継続的に行い、お客様に満足していただける製品を製造していく所存である。

参考文献

- 1) JFE 技報. 2009, no. 23, p. 67-68.
- 2) 大谷義則, 福高善己, 中島力. 川鉄技報. 2002, vol. 34, no. 1, p. 17-20.
- 3) 小野信市, 南克之, 村井悦夫, 岩館忠雄. 塑性と加工, 春講論. 1993, p693-696.
- 4) 田川寿俊, 岩崎宣博, 武重賢治, 山田真, 田中淳一, 山口哲夫. 日本鋼管技報. 1980, no. 86, p. 265.
- 5) 津山青史, 升田貞和, 田川寿俊, 平沢猛志, 鈴木治雄. 鉄と鋼. 1985, vol. 71, p. 86-92.



小橋 幸治



大谷 義則



竹久 修