

## 技術報告

UDC 621.774.3 : 62-531 : 531.717

## シームレス鋼管製造における高寸法精度圧延技術

合 田 照 夫\*・中 島 浩 衛\*<sup>2</sup>

## New Seamless Pipe Rolling Technology for Higher Dimensional Accuracy

Teruo GÔDA and Koe NAKAJIMA

## Synopsis:

It is a recent tendency that higher accuracy in dimensions of seamless pipe has been more frequently requested as the application becomes more critical.

Technology which has enabled to obtain higher dimensional accuracy in a mass production line of seamless pipe is described here on each process from bloom reheating to sizing. The technologies involve the individual method for prevention of eccentricity at Mannesmann Piercer and Press Roll Piercer, reduction of eccentricity at Elongator, improvement of wall thickness accuracy at Plug Mill, Mandrel Mill and Semi-floating Mandrel Mill, improvement of outer-diameter accuracy at Sizer and prevention of hexagon at Stretch Reducer. Some of actual dimensional accuracy data achieved with the PRP-Plug Mill which has been installed recently in Japan are also shown.

## 1. 緒 言

シームレス鋼管は、各種鋼管の中でも苛酷な用途に使用される。特に、最近エネルギー資源開発が活発になり、油井管、ラインパイプの使用条件が一段と厳しさを増してきており、その結果寸法精度の高いシームレス鋼管が要求されるようになった。

シームレス鋼管の寸法は、厚さ、外径、長さで代表されるが、特にシームレス鋼管特有の現象として管周方向の厚さの不均一、すなわち偏肉が存在する。これは、鋼管の圧延が基本的には2本のロールと素材内部に位置するプラグによつて行われるためであり、またそのため単純な厚さ精度についても、他部門の製品に比べて決して優れているとは言えない。

しかるに、近年、旧来の製造プロセスに対して新しい製造プロセスが出現しており、寸法精度は着実に向上しつつある。

ここでは主として、シームレスの製造プロセスの内、大量生産を行うプロセスについて、これらを可能にした技術についてのべ、最後に最近稼動した2つの代表的なミルを紹介することにする。

## 2. 高寸法精度圧延技術

シームレス鋼管の製造プロセスには、さまざまな形態が存在する。同一サイズでも工場によつて圧延機の構成、種類がさまざまに異なっている。小径管の分野ではマンネスマン穿孔・プラグミル方式と、マンネスマン穿孔・マンドレルミル方式があるが、1966年西ドイツで稼動した大量生産型のマンネスマン穿孔・マンドレルミル方式以降は、本法が小径管製造法の主流になつている。中径管の分野では、従来マンネスマン穿孔・プラグミル方式が主流を占めていたが、最近プレスロール穿孔法を採用したミルが3基あいついで稼動を始めている。ここでは、これらの製造プロセスを(1)加熱(2)穿孔(3)主圧延(4)仕上げ圧延の4つの工程に分類し、各工程における代表的な圧延機について、高寸法精度圧延技術を中心にのべる。

## 2.1 加熱工程

加熱炉は、素材を1150~1260°Cに昇温し、均熱する機能をもつ。均熱度が不十分であると、穿孔工程での偏肉が大きくなり、製品の厚さ精度が悪化する。偏肉は、また穿孔工程以降の工程において、噛み込み不良や管端

昭和56年5月8日受付 (Received May 8, 1981)

\* 新日本製鉄(株)八幡製鉄所 (Yawata Works, Nippon Steel Corp., 1-1-1 Edamitsu Yawatahigashi-ku Kitakyushu 805)

\*<sup>2</sup> 新日本製鉄(株)生産技術研究所 (Process Technology R & D Laboratories, Nippon Steel Corp.)

割れによる圧延上のトラブルを誘発するとともに、管端切り捨て長さが大きくなるため、歩留り低下の原因ともなる。近年、この意味で加熱炉の均熱度の向上が図られてきた。丸素材を加熱する回転炉床炉では、炉床に素材を並べて加熱するので、素材上下部に温度差を生じやすく、均熱性向上のためには、加熱時間を長くとる、または炉長を拡大するなど加熱条件を改善する、ないしは炉床構造にくふうがなされているのが通例である。

一方角素材を加熱する場合は、シームレス圧延用として初めて上下焚ウォーキングビーム方式の加熱炉が採用され、均熱度が大幅に向上した。

## 2.2 穿孔工程

穿孔法には、約100年の歴史を持つマンネスマン穿孔法と、最近初めて実用化されたプレスロール穿孔法の2つの方法がある。いずれも穿孔時に、中心に位置する穿孔プラグの偏心により偏肉が発生し、最終製品の寸法精度に影響を及ぼすため、永年にわたりその改善努力がなされてきた。

### 2.2.1 マンネスマン穿孔法

マンネスマン穿孔法は、傾斜した2本の樽型ロールの間で丸素材を回転させながら前進させ、プラグによつて軸芯部を穿孔し素管を得る方法である。前述のごとく、このプラグの存在と素材の回転という独得の圧延機構により、らせん状の偏肉が発生しやすい。

#### (1) 素材の偏熱および形状

素材の加熱が不均一な場合、穿孔中のプラグとロール間の2つの接触面の圧延圧力が不均一となり、プラグが高温側に移動することによつて偏肉が発生する。素材は、穿孔時に振られるため、穿孔後の素管の偏肉はこの振れに沿つて分布する。

このような偏肉を防止するには、素材を十分均熱するとともに、穿孔が開始されるまでの素材の冷却が周方向に均一になるようにすることが重要である。また、素材の先端にあらかじめセンターホールを付けておけば、プラグを素材の中心に正確に案内することができ、先端部の偏肉を改善することができる<sup>1)</sup>。

#### (2) プラグ形状および支持法

プラグの芯振れや偏摩耗などプラグ形状がパスセンターラインに対して軸対称でない場合、プラグが偏心し偏肉が生じる<sup>1)</sup>。また、プラグを後方より支持しているマンドレルバーの曲がりやマンドレルバーを支持するバーステディアが不完全な場合にも同様の偏肉が生じる。従つて、プラグの寸法精度の向上、耐摩耗性の向上が図られると同時に、マンドレルバーおよびバーステディアの剛性の向上が行われている。

### (3) ロールおよびガイドシュウの設定

ロール間隔が大きい場合やロール入側および出側面角が大きい場合、やはり(2)の場合と同様に偏肉が悪化する。また、穿孔中の素管を外側から拘束案内する左右のガイドシュウの間隔を大きくし拘束を弱めると偏肉が生じやすい<sup>1)</sup>。このように、これら圧延工具の設定条件は品質および操業特性に大きな影響を与えるので、これらを考慮して条件の適正化がはかられている。

### 2.2.2 プレスロール穿孔法

プレスロール穿孔法は、円形カリバーの中心にプラグを位置させ、角鋼片に押し込み力を加えながら厚肉素管に穿孔する方法であり、HOLLINGSの1897年ドイツ特許にその起源を見ることができる。HOLLINGSの方法は、鋼片にまずプラグを押し込みした後、円形カリバーで圧延する穿孔法であるため、偏肉や疵の発生、噛み込み不良などが予想された。1963年にCALMESが提案した技術は<sup>2)</sup>、角鋼片に軸線方向圧力を加え、プラグで穿孔すると同時に円形カリバーで成形する方法で、PPMとして知られている。最近、日本においてもプレスロール穿孔法の研究が進められ、各種の技術開発が行われた結果、PRPとして実用化<sup>3)4)</sup>されるに至つた(Fig. 1)。この方法においても偏肉の防止は重要な課題であり、次にその原因と対策技術について説明する。

#### (1) 入側ガイド

プレスロール穿孔法では発生する偏肉をなくすることがHOLLINGS以来の課題であつたと言える。まず、素材の均一加熱が必要であることはマンネスマン穿孔法と同様であるが、最も重要なことは素材の中心をパスラインのセンターに一致させて押し込むことであり、その意味からミル前面に設置される入側ガイドが重要な役割を果たす。

ガイドと素材のクリアランスは、極力小さい方が望ましいが、小さすぎると押し込み力によつて素材が膨張す

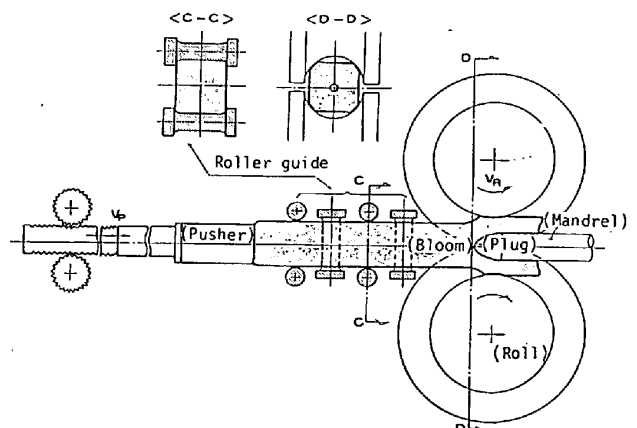


Fig. 1. PRP method by NSC.

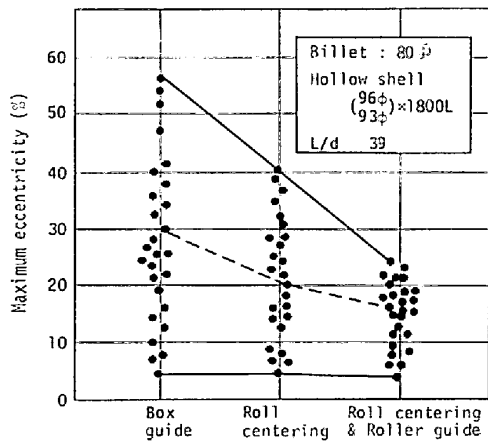


Fig. 2. Effect of the guide-method on eccentricity.

るためその進行が妨げられる。従つて、素材の膨張が著しく大きくなるように、制御するとともに、クリアランスを適正な大きさにしておくことが必要となる。従来用いられていたボックスタイプのガイドの代わりにローラーガイドを採用することにより、クリアランスを零にしても摩擦力が著しく軽減されるため素材はスムーズに進行し、穿孔による偏肉は大幅に改善された。

### (2) 押し込み穿孔条件

素材の断面寸法・ロール径、カリパーの寸法、プラグの形状寸法、プラグ位置などの穿孔条件の適否は、偏肉に対して大きな影響を及ぼす。

角鋼片のコーナ部をまずロールで圧延し、素材の中心がカリパーの中心と一致するようにした後穿孔する、いわゆるロールセンタリング方式は偏肉にとって最も有効な技術の1つである。このロールセンタリング方式とローラーガイド方式を併用することにより偏肉はさらに改善され、これによつて素管長さ素管内径の比  $L/d$  が 40 までの長尺素管の穿孔が可能となつた。(Fig. 2)

### (3) プラグ支持法

マンネスマン穿孔の場合と同様に、プラグを支持するマンドレルバーの曲がりや芯ずれが生じると、プラグがパスラインセンターに対して偏心し偏肉が発生する。

従つて、出側装置にはマンドレルバーをパスラインセンターに強固に保持させ、かつ圧延が進行し素管が前進してきた時には素管を介してマンドレルバーを支持する機能を持たせ、偏肉の発生を防止している。

## 2.3 主圧延工程

穿孔工程に続く主圧延工程としては、エロンゲータ、プラグミル、マンドレルミル、セミフローティングマンドレルミルなどがあり、これらによつて最終製品の厚さ精度がほぼ決まる。

### 2.3.1 エロンゲータ圧延法

エロンゲータは、2本の傾斜したロールとプラグの間で素管を回転させながら圧延する。最近、穿孔工程で生じる偏肉を、エロンゲータで大幅に改善する技術が開発され実用化<sup>4)</sup>された。その主要技術は、以下のとおりである。

#### (1) 素管厚さと外径の比の影響

エロンゲータ圧延は、ロールの入側から出側に向かつてプラグなし圧延部、プラグ圧延部、送り出し部の3つの領域に分けられる (Fig. 3)。

プラグなし圧延部では、素管厚さと外径の比  $t/D$  が大きいと偏肉が改善され (Fig. 4)、特に  $t/D$  が 20% 以上の極厚素管ではさらにその効果が大きくなる。これはプラグなし圧延部において薄肉部が優先的に増肉され、厚肉部が減肉されるからである。

#### (2) ロール・ガイドシュウの影響

偏肉はロールのドラフト ( $(D-d)/D \times 100\%$ ) が大きいほど、ロール傾斜角および入側面角が小さいほど良くなる (Fig. 5)。またガイドシュウの間隔を小さくし、外径の拘束を強くするとマンネスマン穿孔と同じく偏肉が改善される。

#### (3) 圧減比の影響

エロンゲータにおける圧減比は、2~3程度が偏肉改善に対して最適であり、これより大きくしても小さくし

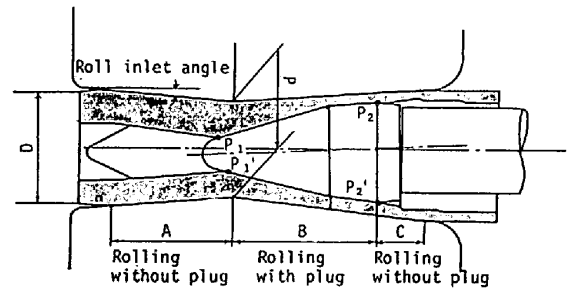


Fig. 3. Longitudinal section in elongator.

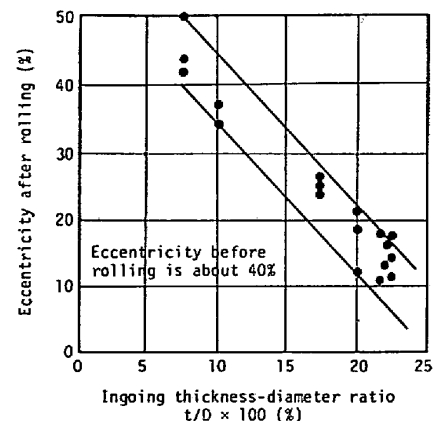


Fig. 4. Effect of  $t/D$  (without plug).

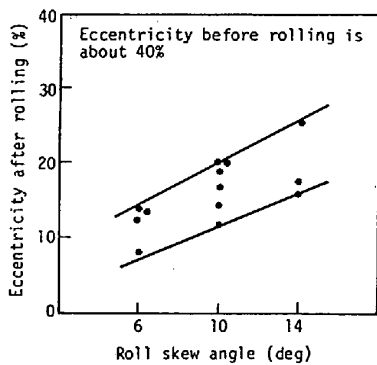


Fig. 5. Effect of roll skew angle (without plug).

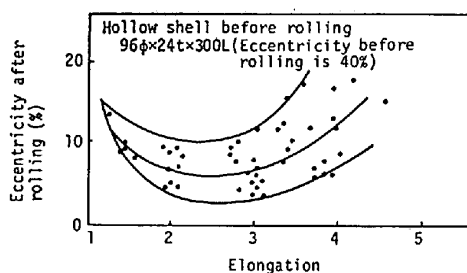


Fig. 6. Effect of elongation.

ても改善効果は低下する (Fig. 6).

以上, (1) (2) (3) の事実より, 穿孔からエロンゲータへのパススケジュールの適正化, すなわち厚肉穿孔及び引き続くエロンゲータの圧減比, ロールドラフト等の圧延条件を適正值に保てば, エロンゲータにおいて偏肉は十分改善できる。

### 2.3.2 プラグミル圧延法

プラグミルは円形のカリバーと, その中心に位置する後方から支持されたプラグによつて, 素管を製品に対応した目標厚さまで減少させる。

従来のプラグミルは, 一対のロールに多数の孔形を配置したマルチカリバータイプであり, そのミル剛性は比較的小さかつた。最近のプラグミルは, シングルカリバーに改められ, またロール軸受も改善された結果ミル剛性は飛躍的に大きくなり, 長さ方向の厚さ精度および厚さ設定精度が向上した。

なお, 近年厚さ精度向上のため自動制御が導入されはじめている。シームレス圧延の場合, 素材が管状であるため熱間オンラインで厚さを精度よく測定することがむずかしいので, 長さの測定, 管理によつて目標厚さを管理する方法がとられている。すなわち, 長さを検出し, 厚さが目標値になるようにロール間隙が自動的に制御される。

### 2.3.3 マンドレミル圧延法

マンドレミルは小径管を製造する生産性の高い設備

である。このミルはコンパクトに構成した連続スタンドにおいて, 素管の中にマンドレルを挿入したまま噛み込ませ, 孔形ロールとマンドレルの間で厚さを減少させる。おのおののスタンドは2個のロールを有し, 相隣るスタンドのロール軸は互いに圧延軸に垂直な平面で90°交差している。

スタンド台数は通常8台で構成しており, その圧減比は3~5程度である。従つて, 圧減比がたかだか2程度しか得られないプラグミルに比べれば格段に能率的な圧延法である。またそれだけ素管の厚さが大きくとれるので, 前工程のマンネスマン穿孔において厚肉穿孔が可能となり, 能率及び品質上有利となる。

しかしながら, マンドレミルは素管内部にマンドレルを挿入した連続圧延のために, 次のような問題点も存在する。

- (1) 圧延中にマンドレル速度が変化するため, ロール速度バランスの調整がむずかしい。
- (2) 先端から後端の間で速度のアンバランスが生じ, 長手方向及び円周方向に形状変化が生じる。
- (3) マンドレル挿入のため, 素管温度が低下しやすい。

このような従来のマンドレミルでは, マンドレルが存在しかつその速度が変化するため, 他の分野の連続圧延とは異なり, 負荷変化を利用した張力制御が困難である。従つて, 圧延理論によりいかに精度よくロール回転数の設定および修正を行うかが, 製品寸法精度を左右することになる。

NEUHOFF ら<sup>5)</sup>は, これらの重要性を指摘し, 岡本ら<sup>6)</sup>は解析的に

- (1) オーバフィル, アンダフィルの発生しない孔形条件

- (2) 回転数の設定理論

を求め, 計算機を利用した圧延が試みられている。

### 2.3.4 セミフローティングマンドレミル

近年, マンドレミルの欠点を解決する技術として, マンドレル速度を一定に保つ圧延法が実用化されつつあり, セミフローティングマンドレミルと呼ばれ, 小径管及び中径管において, 欧州で稼働は始めている。セミフローティングマンドレミルの利点は次のとおりである。

- (1) マンドレル速度一定のため, 自動制御が容易である。
- (2) 全長にわたり速度バランスが不変のため, 長手方向の寸法精度が良好である。
- (3) 真円に近い孔形が使えることにより, 大きな圧

下が可能である。

(4) マンドレル長さが短くてすむ。

この方法は更に、第1スタンドロール速度  $V_R$  を基準にマンドレル速度  $V_M$  のとり方によつて、各種の圧延法が考えられ、この相対速度比 ( $V_M/V_R$ ) によつてマンドレル長さ、マンドレルの使用条件の苛酷さ、圧延の厳しさがおのおの異なってくる。一般的には相対速度比が小さいほどマンドレルは短くてすむが、圧延工具はより厳しい条件となる。

また、マンドレルを拘束する結果として生じるマンドレルの後退時間を省略するため、マンドレルを圧延途中から解放するタイプ、あるいは素管からマンドレルを引き抜く作業を、ライン中でエキストラクタを用いる方法、ライン外でストリッパを用いる方法など、さまざまなタイプが提案されており、生産量、サイズ、品質等を考慮した最適圧延法の選択が必要である。

これらは現在実用化中の技術であるが、今後寸法精度的に大きな飛躍が望める技術と考える。

## 2.4 仕上げ圧延工程

シームレス圧延プロセスの最終工程は、一般に中径管ミルではサイザ、小径管ミルではストレッチレデューサが受け持ち、2ないし3個のロールで孔形を構成し、最大20数台のスタンドを直列に配置し連続圧延を行う。サイザでは外径の縮小、ストレッチレデューサでは外径の縮小と同時に各スタンドの回転数制御により素管に張力を付加し、厚さの調整を行う。いずれも圧延工程の最終に位置するため、製品の寸法精度を決定する重要な圧延機となる。

### 2.4.1 ストレッチレデューサ

ストレッチレデューサの寸法精度の点では主に2つの問題があり、1つは内面の角張り現象、他は長手方向の厚さ変動である。外径および絶対値としての厚さ精度もちろん重要な問題であるが、張力を付加した場合、先端および後端は十分な張力が加わらず、一般に長手方向に大きな厚さ変化が生じる。従つて、先端および後端の厚さ変化を最小にしてクロップを減少させ、歩留りを向上させることが、ストレッチレデューサの大きな問題となる。

#### (1) 角張り発生メカニズムと対策

角張り発生メカニズムは定性的には既にいくつかの報告がある<sup>7)8)</sup>。孔形を用いる圧延において外径を減少する限り、ロール逃し部が必ず存在するため円周方向の応力状態は均一にならず、ロール開口部とロール直下部の変形状態が異なることによつて、円周方向に厚さ変化が生じる。3ロール圧延の場合、120°Cの狭角に位置す

るロール開口部とロール直下部が交互に繰り返されることによつて、製品の内面形状が六角状になり、厚さが大きくなるほど、外径縮小が大きいほど顕著となる。この角張りは製品品質として大きな問題である。これを防止するには次の2つの考え方がある。

① 孔形状を適切にとり<sup>9)</sup>、ロールと素管の円周方向の圧力分布を均一化させる。

② 張力付加がロール開口部の厚さを減少させる作用のあることに着目し、製品厚さを維持できる範囲内で張力を制御する<sup>10)</sup>。

角張りが特に問題となる厚肉管においては、ロールと素管の投影接触形状の改善が特に効果的である。しかしながら、これだけでは限界があり、基準以上の角張りが発生するものは母管寸法で調整し、外径縮小率を小さくするのが現状である。

この角張りを抜本的に防止する方法の1つとして、ツイストストレッチレデューサなる考え方が提案されている<sup>11)</sup>。

#### (2) クロップの最小化

スタンド間で張力を加えながら、一定長さのものを圧延する以上、張力が十分加わらない先端、後端部の厚さ増加が必ず発生し、クロップとして切り捨てられる。クロップを減少させる方法に抜本的な方策はなく、従来ロール径を小さく、スタンドをコンパクト化し、極限までスタンド間長を短くすることで対処してきた。

最近クロップの減少を目的としたいくつかの考え方が提案されている。

① 張力が、より管端部まで加わるように、過渡状態でロール速度制御を行う<sup>12)</sup>。

② 端部の厚さ増加がいくらかでも軽減できるように前工程であらかじめ管端部の厚さを減少させる<sup>13)</sup>。

クロップの問題を抜本的に解決するには、素管長さを増加させることであるが、この実現のために他の多くの技術的課題を解決しなければならない。

#### (3) 厚さの制御

ストレッチレデューサの厚さ制御はプラグミルと同様長さ管理で行われている。目標長さが得られないときは、厚さが目標厚さを満足していないものと判断し、ロールの回転数の調整により張力を変えて、長さ管理する。最近長さ計を設置して、これを自動制御しているミルが多く、厚さ精度は向上している。

### 2.4.2 サイザ

サイザの寸法精度の点では主に2つの問題がある。すなわち外径精度と角張りである。サイザでは張力を加えないので管端クロップ問題はない。

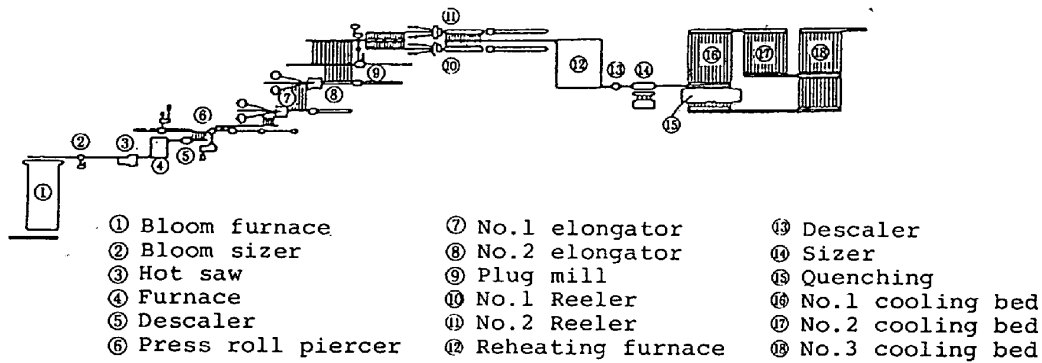


Fig. 7. PRP plug mill process.

外径精度はサイザロールカリバーの切削・組み立て精度、カリバーの摩耗及び素管の温度ばらつきなどによつてきまる。従来サイザは2ロールタイプであつたが最近ストレッチレデュサと同様3ロールタイプが採用されだしている。3ロールタイプは3ロールをハウジングに組み込んだまま、ロール切削するのでカリバーの精度は高く、ロール摩耗も少ないので、外径精度は改善される。主圧延工程より送られてくる素管は前端から後端にかけて温度が不均一であり、素管間の温度ばらつきも大きく、外径精度を悪化させていたが、最近サイザ前に再熱炉を設置したミルが多くなつており、外径精度を向上させている。2ロールサイザにおいてロール圧下制御をプリセットで行うミルもあらわれている<sup>14)</sup>。

角張りは厚肉管にて生じやすく、2ロールの場合4角状であつた。3ロールにすると6角状となり、角張り率は改善されている。

### 3. 高寸法精度を指向した新シームレス鋼管圧延プロセス

シームレス鋼管の製造法には種々のものがあり、また歴史的にも、より能率的に、より高品質の製品を得るために製造プロセスの変革が行われている。

従来マンネスマン穿孔・プラグミルまたはマンネスマン穿孔・マンドレルミルが主流を占めていたが、最近プレスロール穿孔法を採用したミルが稼動をはじめている。このような趨勢は、大量生産、低コストを目的とするだけでなく高寸法精度の鋼管を得ることを指向した結果と考えられ、以下2つの例について開発技術、製品の寸法精度を紹介する。

#### 3.1 プレスロール穿孔・プラグミル方式

素材コストの安い連続鑄造角鋼片を直接穿孔し、かつ寸法精度を飛躍的に向上させるため、プレスロール穿孔機の後に2基のエロンゲータ、プラグミルを配置した、16インチのPRP・プラグミル方式が1977年に日本で

稼動した。Fig. 7にそのミルレイアウトを示す。

加熱工程は、素材として角鋼片を使用するため、均熱が短時間でできる上下焚きウォーキングビーム炉が初めて設置された。

穿孔工程は角鋼片を直接穿孔できるプレスロール穿孔機が世界で初めて実用化された。この穿孔機は、前節で述べた3つの主要な開発技術すなわち、(1)ローラガイド法、(2)ロールセンタリング法、(3)プッシュとロールの速度制御法で構成されており、長尺材(長さ/素管内径=40)でも偏肉率は平均18%以下(最大25%以下)に維持されている。主圧延工程には、穿孔で生じた偏肉を完全に消去する目的を兼ねた2基のエロンゲータ、さらにシングルカリバーを持つミル剛性の高いプラグミルを配置し、製品の厚さ精度を向上させた。また、仕上げ圧延工程には、材料の温度を均一化するための再熱炉と3ロールタイプのサイザを配置し外径精度の向上を図っている。

以上の製造プロセスにより製造されたシームレス鋼管の偏肉率の一例をFig. 8に示した。従来法では最大10~15%、平均5~8%であるのに対して、本法では最大10%以下、平均3~4%であり、偏肉は大幅に改善されている。

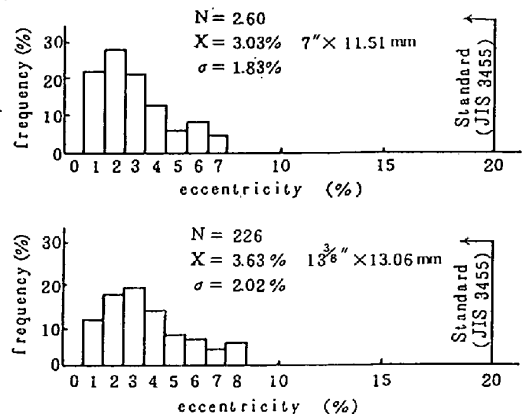
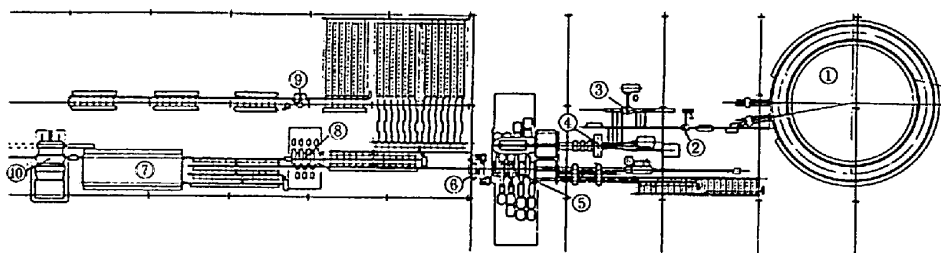


Fig. 8. Examples of eccentricity in product.



- |                              |                                |                             |
|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| 1. Rotary hearth furnace     | 5. MPM (retained mandrel mill) | 9. Roller tube straightener |
| 2. Billet sizer              | 6. Extracting mill             | 10. Stretch reducing mill   |
| 3. PPM (press-piercing mill) | 7. Walking beam furnace        |                             |
| 4. Elongator                 | 8. Sizing mill                 |                             |

Fig. 9. PPM·MPM process.

### 3.2 プレスロール穿孔・セミフローティングマンドレル方式

連続铸造角鋼片の使用と寸法精度の向上を目的として、1979年13 $\frac{3}{8}$ インチのPPM·MPM圧延プロセスが欧州で稼動を始めた<sup>15)</sup>。Fig. 9にそのミルレイアウトを示す。

穿孔工程は、プレスロール穿孔機としてPPMを採用し、主圧延工程は、1台のエロンゲータの後にセミフローティングマンドレルミルとしてMPMを配置して連続圧延を行い、圧延能率と寸法精度の向上をはかっている。

## 4. 結 言

シームレス鋼管製造法における高寸法精度圧延技術は、近年急速に発展しつつある。これは、最近の油井管の需要増大の中でより厳しい寸法精度の要求に対応し、シームレス鋼管圧延技術の向上に努めた結果である。特にシームレス鋼管工場の新設、増設に際しては、これらの技術が最大限に生かされ、機械・電気計装などの技術進歩と相まって、高品質、高生産性、低コストのシームレス鋼管の製造が可能となっている。

なお、現在計画中のシームレス鋼管工場も数多くあり、いずれの場合も寸法精度の向上に意欲的に取り組んでおり、今後ますますシームレス鋼管の寸法精度は向上

するものと期待される。

## 文 献

- 1) 安藤次雄, 上杉 齊, 田口芳男, 野沢健吾, 間口龍郎: 川崎製鉄技報, 11 (1979) 2, p. 61
- 2) アルベルト・ヘンリ・カルムス: 特許, 504527
- 3) 合田照夫: 鉄と鋼, 67 (1981) 7, p. 1021
- 4) 柳本左門, 中島浩衛, 河原田実, 神田光雄, 上野正勝, 甲谷知勝, 尾形昌彦, 伊藤亀太郎: 製鉄研究, 297 (1979), p. 1208
- 5) K. NEUHOFF, and G. PFEIFFER: Stahl u. Eisen, 8 (1970-4) 90, p. 405
- 6) 岡本豊彦: 住友金属, 23 (1971) 4, p. 441
- 7) 三瀬真作, 高井岩男, 松木則夫: 住友金属, 17 (1965) 4, p. 59
- 8) F. W. NEUMANN D. HANCKE: Stahl u. Eisen, 75 (1955-11) 22, p. 1452
- 9) K. NEUHOFF and H. BILLER: Arch. Eisenhüttenw., 41 (1970-11), p. 1047
- 10) H. BILLER: Tech. Mitt. 10 (1967-10), p. 418
- 11) 市川 保, 中川 孚, 中島浩衛, 菊間敏夫, 野田勝利, 吉沢光男: 特開昭 50-16653
- 12) 上村治男, 鶴岡寛治: 特開昭 41-72638
- 13) 林 千博: 特公昭 51-43825
- 14) 増田敏一, 間口龍郎, 桜田和之, 佐山泰弘, 阿部英夫: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 404
- 15) G. BALZI: BTF-Gennaio-Febbraio (1978), p. 3