

展望

21世紀の継目無鋼管の製造法を展望する

Perspectives on Seamless Tube Making Processes in the 21st Century

林 千博
Chihiro Hayashi

住友金属工業（株） 社友

1 はじめに

21世紀、近未来の継目無鋼管の製造法は20世紀最後の四半世紀における製管技術の延長として捉えることが出来る。

一般に継目無鋼管は穿孔機で中実ビレットに孔を穿けて中空厚肉のホローピースとなし、これを延伸圧延機で主として肉厚を減じて薄肉のシェルに延伸圧延し、最後に定径圧延機あるいは絞り圧延機で主として外径を絞って所定の寸法に仕上げられる。穿孔法としては傾斜圧延機による穿孔法とプレスによる穿孔法があり、延伸圧延法としてはロータリエロンゲータ、プラグミル、マンドレルミル、アッセルミルあるいはブッシュベンチミルなどがある。そして継目無鋼管の製造プロセスは主として穿孔法と延伸圧延法の組み合わせによって分類される。

以下、傾斜圧延穿孔法、延伸圧延法そしてプレス製管法の順に最近四半世紀の製管技術の動向から21世紀、近未来の継目無鋼管の製造法を展望してみたい。

2 傾斜圧延穿孔法の現在と将来

マンネスマン穿孔は1886年、ドイツのマンネスマン兄弟によって発明された。マンネスマン兄弟の発明は互いにある角度をもって傾斜し、同一方向に回転する一対のバレル型ロールの間に丸鋼ビレットを装入すれば、ロール軸芯はパスラインに対して傾斜角を有するので、ロールによって回転と前進を与えられ、回りながら前進する。この場合、丸鋼の中心部はいわゆる回転鍛造効果によって脆化するの、そこにプラグを置いて穿孔しようとした。マンネスマン穿孔法の穿孔原理を著者なりに解釈すれば、マンネスマンピアサのロールはバレル型であるので、ロール周速はロールの入側と出側でほとんど変わらない。一方、ビレット材料は穿孔に際してその断面積を減ずるので、入側から出側に向かって確実に速度

を増加する。管材料にフィードを与えるのはロール周速の軸方向成分であるから、管材料の速度が増加しているのにロール周速がほとんど変化しないことは一見スムーズな穿孔が行われているように見えても実はロール自体が管材料の進行をブレーキし、管材料はただ回るだけでなかなか前へ進めない事情にある。従って、マンネスマン穿孔法では回転鍛造効果が顕著に現れ、同時に附加剪断変形も顕著に現れることになる。マンネスマン穿孔法の穿孔原理を図1に示した。

1967年頃より著者らは両端支持構造のコーン型穿孔機の研究開発を開始した。いわゆる交叉穿孔機の開発である。著者らはマンネスマンピアサでステンレス鋼、高合金鋼などの難加工性材料を穿孔する時、介在物や偏析を起点として内面

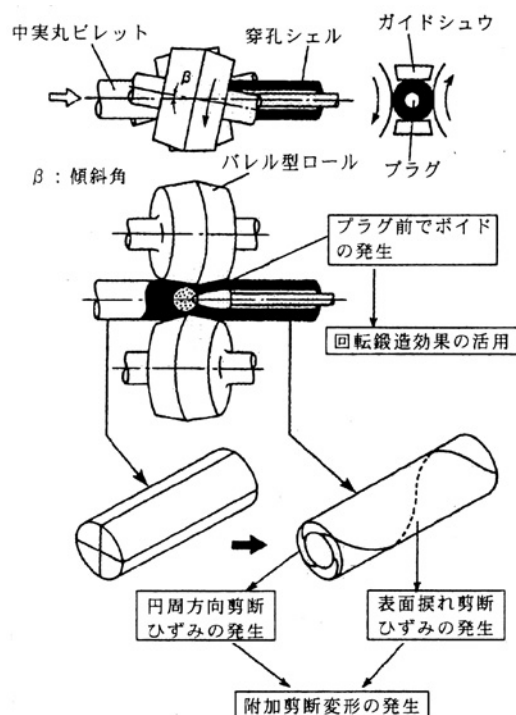


図1 マンネスマン穿孔法の穿孔原理

疵を発生するのは、皮肉にも回転鍛造効果が内面疵発生の主たる原因であり、附加剪断変形が内面疵伝播の主たる原因となっていることを突きとめ、その因果関係を追求して難加工性材料の疵なし穿孔を可能とする交叉穿孔機を開発した。この問題を解決するための穿孔圧延機は両端支持構造のコーン型主ロールの軸芯を傾斜させると同時に交叉せしめ、高傾斜角、高交叉角穿孔を可能とする構造であり、その性能を最大限に発揮せしめるため、ガイドシュウを廃してディスクロールを駆動する。その結果、回転鍛造効果は顕著に抑制され、ビレット材料はプラグ前で脆化するどころか逆に母材より延性化され、むしろ孔の穿きにくい状態が作り出される。また、附加剪断変形の応力場も極限まで解放される。その結果、ステンレス鋼や高合金鋼など熱間加工性の劣悪な材料でも内面疵など欠陥のない内面品質を保証することが出来る。

交叉穿孔機は1982年に建設され、翌1983年に営業運転を開始した住友金属(海南)の5-1/2インチ・マンドレルミルラインの穿孔圧延機として採用され、期待通りの操業が続いている。その後、1985年、同所の7インチ・マンドレルミルラインのマンネスマンピアサも交叉穿孔機に改造された。奇しくも時を同じくして、マンネスマン・デマーグ・メーア社でも両端支持構造の交叉穿孔機の開発を進めており、1982年、マンネスマン・レーレン(ラート)の14インチ・プラグミルラインのマンネスマンピアサとロータリエロンゲータを撤去して1基の交叉穿孔機にリプレースし、従来のダブルピアシングをシングルピアシングに置き換えることに成功した。交叉穿孔機によれば拡張穿孔が出来るので高加工度薄肉穿孔が可能であり、また、プラグを替えるだけでサイズフリーの穿孔が出来る。

マンネスマン・デマーグ・メーアはこの形式の穿孔圧延機をスーパーピアサと称して世界中にPRしたので、以後新設あるいは更新される穿孔圧延機には交叉穿孔機の採用が相次ぐことになる。すなわち、1989年には南アフリカのトーザ、現イスコルチューブ(ヨハネスバーク近郊)のマンドレルミルラインおよび中国(ダライエ)のアッセルミルライン、1991年にはインドのカルヤニスチール(パラマチ)のアッセルミルライン、1994年には中国(衡陽)のマンドレルミルライン、1996年には中国(包頭)のマンドレルミルライン、1997年にはスウェーデンのオバコスチール(ハフオルス)のアッセルミルライン、1998年にはルーマニアのペトロチューブ(ルマン)のプラグミルラインの穿孔圧延機として相次いで導入された。

さて、交叉穿孔法に関する研究開発は最終的にステンレスおよび高合金鋼など難加工性材料の高加工度薄肉穿孔を可能とする拡張穿孔法の開発、実操業化に発展する。

一般にマンネスマン穿孔法はもちろん、交叉穿孔機におい

ても、肉厚/外径比5%以下の超薄肉穿孔はたとえビレット材料が炭素鋼であっても難しい。高加工度の薄肉穿孔ではシェル材料はパスラインの方向に延伸すると同時に円周方向に膨らもうとしてフレアリング現象を呈するからであり、甚だしければシェル管肉がディスクロールエッジと主ロールの出側間隙にはみ出してピーリングされてしまうからである。このようなトラブルに対処するためには、ディスクロールエッジと主ロールの出側間隙を最小にするように、ディスクロールの軸芯をパスラインに対してスキューさせるのが最も効果的である。著者らはディスクロールの両端支持構造を工夫してディスクロールのスキューイング機構を開発し、これによって高交叉角・拡張穿孔法の開発を完成させ、肉厚/外径比で2.5%までの超薄肉穿孔法の開発に成功した。拡張穿孔によって回転鍛造効果は更に抑制されるばかりでなく、通常の肉厚/外径比の範囲では表面振れ剪断変形も消失せしめることが可能となり、ユジーン押出し製管に準じたメタルフローを実現することが出来る。もちろん、高拡張比の超薄肉穿孔では若干の附加剪断変形の残存は避けられないが、拡張穿孔によって回転鍛造効果は確実に抑制されることになる。また、拡張穿孔ではより小径のビレットを使用するので穿孔荷重、穿孔トルク、穿孔所要動力、そして消費電力は顕著に低減出来る。高交叉角・拡張穿孔法の穿孔原理を図2に、高交叉角・拡張穿孔法の一例を図3に示した。

高交叉角・拡張穿孔機は1997年、操業を開始した住友金属(和歌山)の16-3/4インチ・マンドレルミルの中核技術と

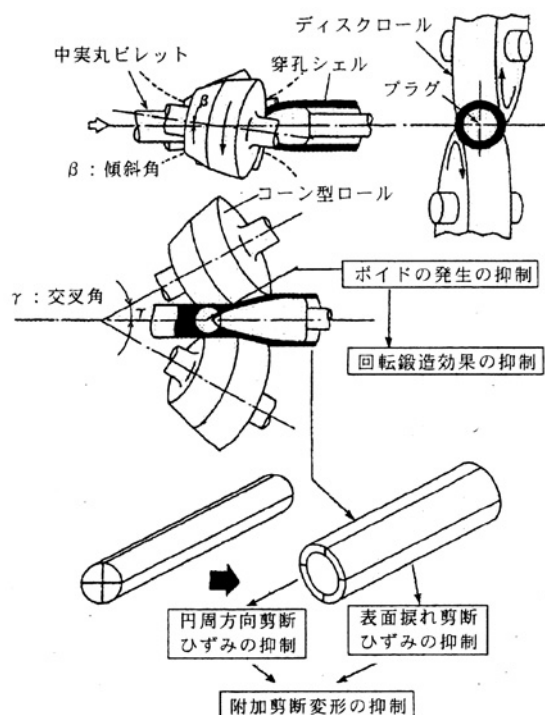


図2 高交叉角・拡張穿孔法の穿孔原理

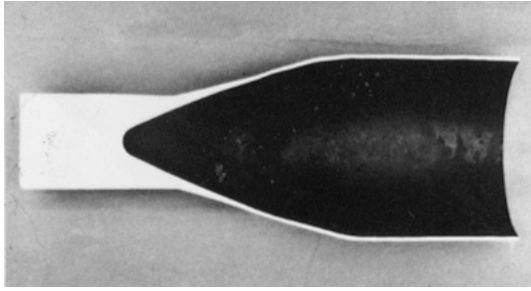


図3 高交叉角・拡管穿孔法の一例

して採用され、順調に操業を続けている。ロシアおよび旧共産圏の様子ははっきりしないが、情報によればロシアでも交叉穿孔機が操業を開始したらしく、これを加えれば現在、少なくとも13基、おそらく15基ぐらいの交叉穿孔機が世界中のプラグミルライン、マンドレルミルライン、アッセルミルラインで操業中である。21世紀初めにはプッシュベンチミルラインにも採用されよう。

なお、1960年代に開発、実操業化された3ロールピアサおよびプレスピアシングミル (PPM) はいずれも21世紀の穿孔圧延機の主流とはなり得ない。

3ロールピアサは英国、チューブ・インベスメント社のJ.メトカルフらによって開発され、1961年、TIデスフォード、現デスフォードチューブ (デスフォード) のアッセルミルライン、1969年、TIウェルドレス (BSCに吸収された後閉鎖、ウェンズフィールド) のマンドレルミルラインの穿孔圧延機として導入され順調に稼働した。3ロールピアサでは3つの主ロールにより回転鍛造を受けるとき、圧下の方向と直角に引張応力が作用しないので内面疵発生の要因が取り除かれ、連続鑄造鑄片も穿孔できる長所もあったが、反面、機械構造上、主ロール径を大きく出来ないで、生産能率が必然的に低下する短所があった。また、主ロール径が小さいにもかかわらず、プラグおよびマンドレルにかかるスラスト荷重が大きく、機械構造も複雑化する。ロール間で材料がはみ出してフレアリングし易い欠点もある。更に、最近では材料も良質なものを得られ、3ロールである必要性はなくなっている。

次に、プレスピアシングミル (PPM) は1963年、A.カルメスによって発明され、円形孔型を有する2段ロールの中心にプラグを置き、角形ビレットを後方よりプッシャで押し込み、プッシャの力とロールの摩擦力で材料にフィードを与え、穿孔すると同時に外面を円形にする。この穿孔法は圧縮応力だけで穿孔するので回転鍛造効果とは無縁であり、また、附加剪断変形も伴わないので、連続鑄造鑄片のセンタボロシティも圧着されて欠陥とならないとしている。PPMは1973年、ダルミネ (ダルミネ) の14インチ・マンドレルミルラインの穿孔圧延機として採用され、フルリトラクト方式のマンドレルミル (MPM) とともに一時期世界の注目を浴びた。PPM

はその後、1982年、USスチール (フェアフィールド) の9-5/8インチ・マンドレルミル (MPM) ライン、1989年、ソ連 (ボルスキー) の16-3/4インチ・マンドレルミル (MPM) ラインの穿孔圧延機として導入されたが、ダルミネのPPMは1991年に、USスチールのPPMも1998年に廃棄され、現在はマンネスマンピアサで穿孔している。廃棄の理由は角ビレットを採用するメリットに疑念が生じたこととPPM固有の偏肉問題と聞いている。また、ボルスキーでも偏肉問題に悩んでいるように伝え聞く。

新日鉄はA.カルメスのPPMの偏肉発生機構を詳細に解析し、PPMのボックスガイドに替えてV-H配列のローラガイドを採用するプレスロールピアサ (PRP) を開発した。PRPは1977年建設の新日鉄 (八幡) の16インチ・プラグミルラインおよび1983年建設の同じく新日鉄 (八幡) の7-5/8インチ・マンドレルミルラインの穿孔圧延機として相次いで採用されたが、経営上の理由により2001年春、両ミルとも休止した。

3 延伸圧延法の現在と将来

1965年、テイツセンレーレンすなわち後のマンネスマンレーレン (ミュールハイム) にコンピュータを駆使した高生産性、高品質の5-1/2インチ・マンドレルミルが建設されるや、小径継目無鋼管の製造法を革新するプロセスとして脚光を浴び、1968年、住友金属 (海南、5-1/2インチ、後に7インチ)、日本鋼管 (京浜、4-1/2インチ、後に5-1/2インチ)、1970年、マンネスマンレーレンNo.2 (ミュールハイム、7インチ)、川崎製鉄 (知多、6-5/8インチ)、シデルカ (カムパナ、5-1/2インチ)、ソ連 (ニコポリ、4インチ)、1978年、ポーランド (フータジェドノスク、7インチ)、中国 (宝山、5-1/2インチ) への導入が相次いだ。これらはすべてフルフロート・マンドレルミルであり、マンドレルバーを素管の内面に装入したまま、マンドレルバーごと孔型ロールで連続圧延する方式であったが、1977年、ダルミネ (ダルミネ、14インチ)、1978年、バロレック (サンソルブ、5-3/4インチ) で更に高能率、高品質のマンドレルミルとしてリテインド方式のフルリトラクトあるいはセミフロート・マンドレルミルが開発、実操業化され、1983年、住友金属 (海南、5-1/2インチ)、新日鉄 (八幡、7-5/8インチ)、日本鋼管 (京浜、10-3/4インチ)、タムサ (ベラクルス、13-3/4インチ)、1984年、USスチール (フェアフィールド、9-3/4インチ)、1985年、アルゴマ (アルゴマ、7インチ)、1987年、ノーススター (ヤングスタウン、9-3/4インチ)、1988年、シデルカ (カムパナ、9-5/8インチ)、1989年、トーザ、すなわち現在のイスコールチューブ (ヨハネスバーク近郊、6インチ)、ソ連 (ボ

ルスキー、16-3/4インチ)、1990年、シドール (ベラクルス、9-5/8インチ)、1992年、中国 (天津、10-3/4インチ)、1994年、中国 (衡陽、5-1/2インチ)、1996年、中国 (包頭、9-5/8インチ)、1997年、住友金属 (和歌山、16-3/4インチ) に相次いで導入された。このうちマンネスマン・レーレン (ミュールハイム) の7-1/2インチミルはリテインドマンドレルミルに改造され、また、同所の5-1/2インチ・マンドレルミルは現在、ブラジル・マンネスマンに移設されている。なお、日本鋼管 (京浜、10-3/4インチ) のフルリトラクト・マンドレルミルは1995年に休止し、新日鉄 (八幡、7-5/8インチ) のセミフロート・マンドレルミルも2001年春には休止した。

マンネスマン・マンドレルミル工程を図4に示したが、当初は5-1/2インチクラスの小径継目無鋼管の製造から出発したマンドレルミルはこの10年間の間に16-3/4インチの中径継目無鋼管の製造にまで波及し、現在では小径、中径を問わず継目無鋼管の最も近代的な製造法はリテインド方式のマンドレルミルとなり、フルフロート方式のマンドレルミルも既に過去の製造法となっている。

次に、マンドレルミルによる連続多スタンドの延伸圧延は過酷な穿孔圧延の加工度を分担し、内外面疵の発生を回避するのに役立ってきたが、特に、高交叉角・拡張穿孔法が開発されて高加工度薄肉穿孔が可能になるとマンドレルミルの少数スタンド化の趨勢が加速されてきた。マンドレルミルの本体設備はきわめて堅牢であり、主機電動機の容量もプラグミルに比較して非常に大きくなり、スタンド数が増えるほど設備費は高騰する。更に、マンドレルミルのロール替えはスタンド交換によって行われるので、スタンド数が増えるほど予備スタンドの保有数も増加する。また、操業面から言っても

連続多スタンドの操業はかえって安定性に欠け、特に中径薄肉鋼管の圧延では溝底側でバックリング、フランジ側で穴あきを発生しやすく、安定した操業が難しくなる。

以上、最近四半世紀のマンドレルミルの歴史を振り返れば、21世紀のマンドレルミルは少数スタンドのリテインドマンドレルミルとなり、小径はセミフロート方式、中径はフルリトラクト方式が定着する。

話は前後するが、これまで中径継目無鋼管はマンネスマンピアサ、ロータリエロンゲータ、プラグミル、リーラ、サイザから構成される2重穿孔方式のマンネスマン・プラグミル工程で製造されてきた。2重穿孔方式は1926年、ナショナルチューブ社 (エルウッドシティ) で実操業化されたプロセスで、我が国では1957年、住友金属 (和歌山)、1967年、日本鋼管 (京浜)、1976年、住友金属 (尼崎)、1978年、川崎製鉄 (知多) で採用されてきた。なお、1977年に操業を開始した新日鉄 (八幡) では穿孔圧延機にプレスロールピアサ (PRP) を採用しているので結果的に3重穿孔方式となっている。

このように、ナショナルチューブ社の発明以来、半世紀以上の間、2重穿孔方式は中径継目無鋼管の標準的製造法として定着したが、前述したように、1982年、マンネスマンレーレン (ラート) はマンネスマンピアサおよびロータリエロンゲータを撤去し、マンネスマン・デマージ・メア社開発のスーパーピアサと称する交叉穿孔機にリプレースし、2重穿孔方式を1重穿孔化することに成功した。続いて、1998年、ルーマニアのペトロチューブ (ルマン) の中径プラグミルラインの穿孔圧延機にも交叉穿孔機が導入され、中径サイズのマンネスマン・プラグミル工程でも1重穿孔方式が普及し始めた。現代のマンネスマン・プラグミル工程を図5に示したが、2重穿孔方式の歴史は3/4世紀に及び、また、プラグミルそのものの起源は更に古く、1世紀に及ぶのでマンネスマン・プラグミルプロセスはいかにも古く、いずれリプレースされる運命にある。

延伸圧延法としてはこのほかアッセルミルがある。アッセルミルは1935年、ティムケン・スチール&チューブ社のW. アッセルが発明し、第2次世界大戦後普及した。我が国では1966年、住友金属 (尼崎)、1970年、山陽特殊製鋼 (姫路) が導入している。前述したように、マンネスマン・アッセルミル工程でも最近ではマンネスマンピアサに替えて交叉穿孔機の採用が相次いでいる。交叉穿孔機によれば拡張穿孔によって高加工度薄肉穿孔が可能なので、アッセルミルの肉厚加工を交叉穿孔機に分担させ、薄肉製管で発生し易いフレアリングトラブルを回避する。1989年、中国 (ダーイエ)、1991年、インドのカルヤニスチール (パラマチ)、1993年、イン

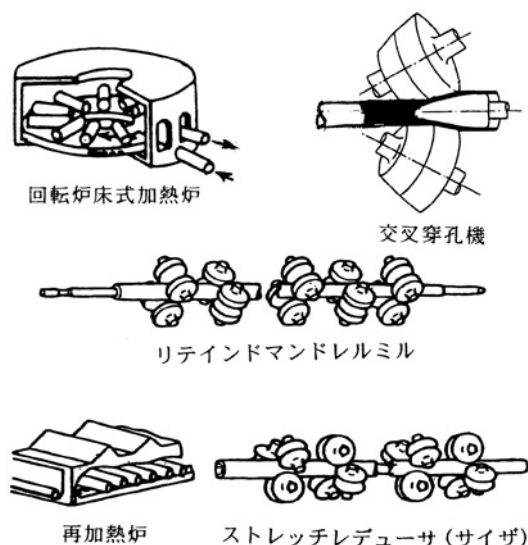


図4 マンネスマン・マンドレルミル工程

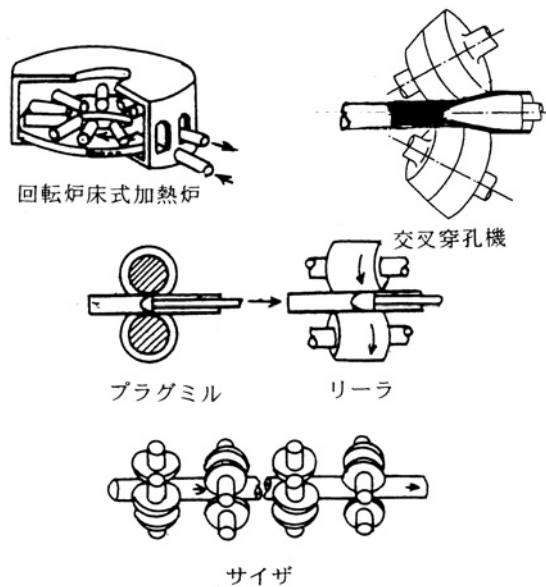


図5 マンネスマン・プラグミル工程

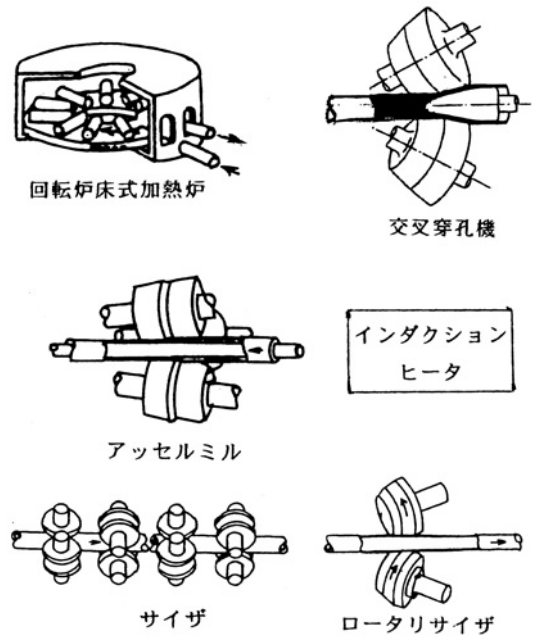


図6 マンネスマン・アッセルミル工程

ドのソーパイプ（ナシク）、1997年、スウェーデンのオバコスチール（ホフオルス）に建設された4インチから9-5/8インチのアッセルミルラインはこのレイアウトである。交叉穿孔機を採用するアッセルミルラインは今後も普及するものと考えられるが、アッセルミルプロセスは所詮、生産能力が制限されるので継目無鋼管製造の主流とはなり得ない。マンネスマン・アッセルミル工程を図6に示した。

4 プレス製管法の現在と将来

1980年代に入ってマンネスマン・デマーグ・メーア社は一世に続いた古典的なエルハルト・プッシュベンチミル工程を大きく革新するプロセスの開発に成功した。エルハルト・プッシュベンチミル工程では加熱した角鋼塊を円形のコンテナに入れ、円筒形のポンチを押し込んで穿孔し、得られた底付素管をラック&ピニオンでマンドレルを駆動する非駆動の3ロール・プッシュベンチミルで延伸圧延し、マンドレルバーリーラで管の内外面を磨くと同時にマンドレルバーを抜き易くし、ストリッピングした後、再加熱してストレッチレデュサーで絞り圧延して小径継目無鋼管を製造する。無理のない製管法で設備費がきわめて安価であり、かつ、ある程度生産能力が確保出来るため、欧州を中心に広く普及したが、プレス穿孔であるがゆえに偏肉特性に劣り、穿孔長さも短かい。

1981年、マンネスマン・デマーグ・メーア社は穿孔プレスに替えてマンネスマンピアサで穿孔し、クリッピングプレスで片端をクリッピングして底付素管に準じた形状となし、プッシュベンチミルに供給する製造プロセスを開発した。い

わゆるCPE（クロスピアサ&エロンゲータ）プロセスであり、いわばマンネスマン・プッシュベンチ法とでも言うべきプロセスであって、これによって偏肉問題は解決し、生産能力も顕著に改善された。1981年、インドのマハラシトラ（デルハイ）、1983年、スペインのチューブロイニドス（アムーリオ）、1985年、ドイツのベンテラ（バイデナウ）、1990年、イタリアのピエトラ（プレスチア）、1991年、再びベンテラ（デインスラーケン）、1997年、オーストリアのフェストアルピーネ（キンドベルヒ）が相次いでこのプロセスを導入した。現在の製造可能範囲は7インチまで、生産能力は月産25,000～30,000トンであるがいずれも更に拡大しよう。マンドレルミルプロセスと比較すればもちろんのこと、プラグミルプロセスと比較しても設備費は格段に安価であるので、月産30,000トン以下の生産量であればこのプロセスのコスト競争力は抜群であり、特に、ベンテラ、フェストアルピーネ社などの欧州ミルは我が国のシームレスミルにとって強烈な競合ミルとなろう。マンネスマン・プッシュベンチミル工程を図7に示したが、マンドレルバー・リーラで圧延材の温度低下が大きく、再加熱炉は省略できない。

最後に押し出し製管法の将来であるが、ガラス潤滑剤を特徴とするユジーン・セジュールネ法は1942年、フランスのJ.セジュールネとユジーン社のダイス材料の共同研究で誕生した。1950年、ユジーン（ペルサン）で操業を開始し、翌1951年にはB & Wで各種のステンレス鋼管、純Mo、純Ti管の製管に成功し、ナショナルチューブはじめ、米国、欧州そして日本の各社に次々と導入された。我が国では1958年、神戸

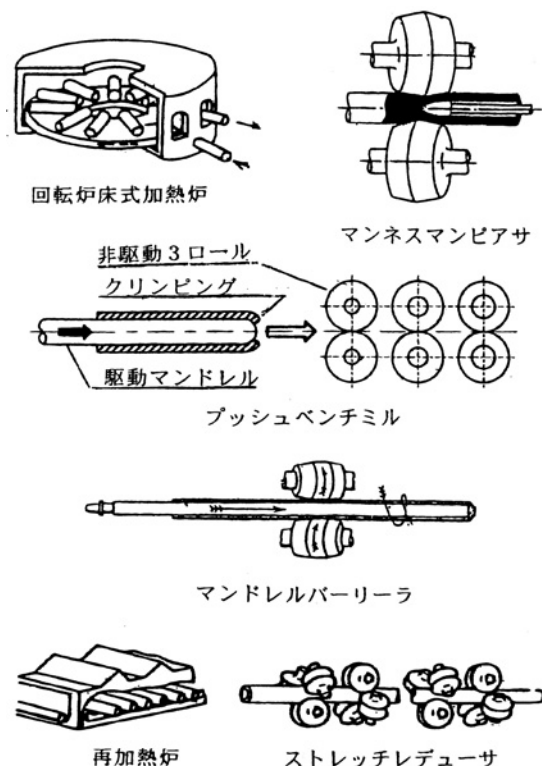


図7 マンネスマン・プッシュベンチミル工程

製鋼（長府北）、1959年、住友金属（尼崎）、山陽特殊製鋼（姫路）、八幡製鉄（光）に相次いで導入された。製品は山陽特殊製鋼のベアリング材を別として当時需要の旺盛なステンレス鋼であった。その後、1967年、神戸製鋼（神戸）で5,500トンの大型プレスで炭素鋼鋼管を押し出し、ストレッチレデューサで小中径鋼管を絞り圧延するプロセスが操業を開始したが1974年に休止した。また、1968年には住友金属（尼崎）でNo.2ユジーン設備が操業を開始し、1970年には日本鋼管（京浜）にも導入された。一時期は6基稼働していたが円高の進行により需要が低迷し、1987年には住友金属（尼崎）のNo.1、1994年には日本鋼管（京浜）のユジーン設備が休止した。

ユジーン・セジュールネ押し製管法の欠点はコスト高であり、ビレットの切削加工、工具の摩耗対策にコストがかかり、また、ガラスの除去にもコストを要する。生産率もマンネスマンプロセスに比較すれば格段に低く、トップ、ボトムの偏肉精度も悪い。従って、ステンレス鋼、高合金鋼でもマン

ネスマンプロセスで対応出来る量産品種は出来るだけマンネスマンミルに配分すべきであるが、マンネスマンプロセスでは加熱炉の慣性が大きく、加熱温度を自由自在に変更出来ないで少量、多品種の小口対応には問題が残る。ユジーン・セジュールネ押し製管法は依然として小口対応には威力を発揮し、マンネスマンプロセスを補完するものと考えられる。ユジーン押し法はコールドピルガミルによる高加工度冷間圧延との組み合わせにより小径ステンレス鋼管など小径高級鋼管の製造法として特に威力を発揮する。スウェーデンのサンドヴィック社が日本ミルにとって強烈な競合ミルとなる。なお、コールドピルガミルは往復両行程でターンするメカトロニクス方式のコールドピルガミルが主流となろう。

5 おわりに

以上、21世紀の継目無鋼管の製造法について展望したが、継目無鋼管に限らず、鉄鋼業の主役は先進国から中南米はじめ東欧、中国、インドそして東南アジアの開発途上国へ確実に移行して行く。今や、先進国より開発途上国の製鉄設備の方が格段に優れている。都合悪いことに最近の製鉄設備はコンピュータのソフトウェア付きで完全に自動化されており、鉄鋼技術の知識や経験がなくともそれなりの品質で製品が得られるようになっている。後発のハンデキャップは急速に小さくなって行く。更に、1985年のプラザ合意以来の円高誘導は我が国のコスト競争力を急激に弱体化させている。このような経済的逆境にあって我が国の鉄鋼産業をいかにして再生させるかについては最期の挑戦が必要であると言をまたない。もう時間的余裕は残されていない。

詳しくは文献2)を参照されたい。

参考文献

- 1) 今井 宏：パイプ作りの歴史，アグネ技術センター，(1989)
- 2) 林 千博：鉄鋼技術の流れ，第2シリーズ，第5巻，鋼管の製造法，日本鉄鋼協会，(2000)
- 3) 林 千博：ふえらむ，6 (2001)，352.

(2001年3月27日受付)