



鉄の歴史 海外技術の吸収と 日本鉄鋼業の発展-1

継目無鋼管製造技術—プラグミル法関連—

Seamless Pipe Manufacturing Technology on Plug Mill and Assel Mill Processes

松木則夫
Norio Matsuki

エムアイエヌ コンサルタント (株)

1 はじめに

継目無鋼管の熱間圧延法の代表的プロセスにはプラグミル法とマンドレルミル法があり、ここではプラグミル法について記す。戦後復興・発展期における先人たちのめざましい鋼管製造全般の技術開発は鉄鋼協会共同研究会の内容とともに三瀬元鋼管部会長が「鉄の歴史」¹⁾でご報告されている。また個々の技術内容と展開についてはすでに多くの優れた説明、解説・展望や論文などが発表されているので引用文献に譲らせて頂くこととしたい²⁻⁴⁾。

歴史的にはプラグミル法・マンドレルミル法ともに、管の円形孔型カリバーによる多数回圧延で仕上げていたスウェーディッシュミルの合理化プロセスとしてアメリカで実験・開発されたものであるが、スティーフェルらの努力によりプロセスとしては比較的単純なプラグミル法(オートマチックミルと称されていた)が1905年確立されて以来、長らく熱間継目無鋼管製造の主流となっていた。最近に至りマンドレルミル法が高い生産性と大径化への圧延技術改良が加えられた

ために普及した。しかしプラグミル法はそのフレキシビリティより小ロット、大径厚肉、ステンレス鋼の圧延等有利性や利便性を生かしてマンドレルミル法と並存しよう⁴⁻⁵⁾。重要なことは継目無鋼管の製造・商品技術の多くはプラグミル法全盛時代に確立されたことである。主要ミルの変遷を図1に示す。

著者は1960年住友金属工業(株)に入社して継目無鋼管の素材から熱間圧延・精整、製品開発に従事し、鉄鋼協会共同研究会の先輩諸氏のご指導を得た。社内では圧延理論研究会が「鈴木弘先生ご指導会」として恒例化し、個々のテーマについてご指導を頂いた。その鋼管部門の「鈴木先生ご指導会」の幹事を担当し直接色々のご感想などを聞く機会を得た。先生は「鋼板部門は日本から独自の優れた圧延技術・設備が確立されて来たが、鋼管部門はどうも独自の技術が育たないですね」と良く警鐘を鳴らされた。独自技術が育ち難かった理由は国内市場が小さく、またヨーロッパと違って鋼管およびミルメーカーはともに基本的プロセスの自主開発はあまり行わずに、実績のある米国のエトナスタンダード社、ドイツの

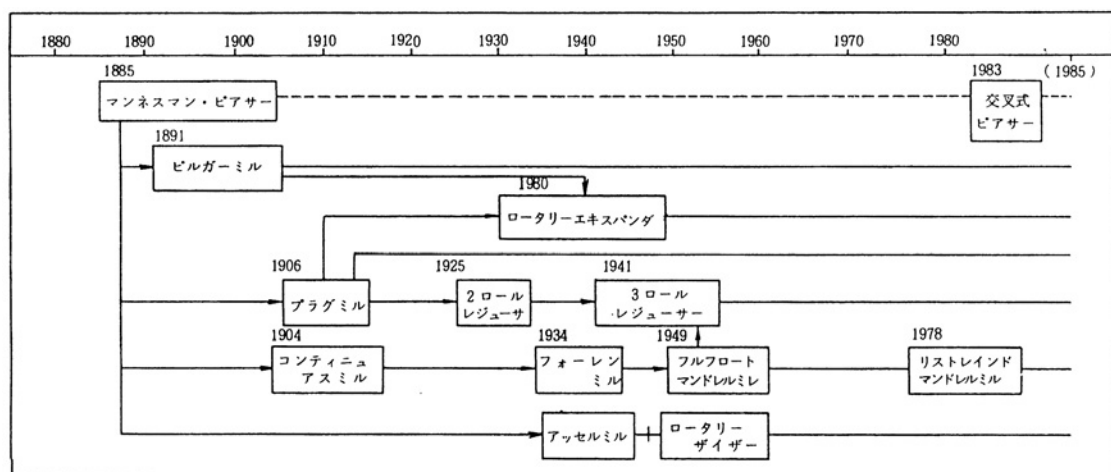


図1 主要ミルの変遷

マンネスマンメーア社、デマーク社、コックス社およびイタリアのイノセンチ社などからのライセンス生産かハード輸入に終始したからであろう。高交叉角ピアサーを研究開発した林千博博士らの努力は異質である⁶⁾。他方デマーク・メーアなどの海外ミルメーカーはマンネスマン社などの鋼管メーカーと密接な関係にあり、強い連携を持って新プロセスや技術開発に非常に熱心であった。これらの海外ミルメーカーは最近でも企業合併を繰り返し、2000年7月よりメーア社、イノセンチ社、エトナスタンダード社はSMS-デマーク AG 社の一部門であるSMSメーア社となり、ミル設計から操業指導まで新ミルはもとより、設備更新を含めてターンキーベースで中進国への技術輸出をより積極的に行っている。そのため、設備的には中進国ミルも我が国のミルと遜色がない程度まで自動化、高級化が進んできているのは我が国鋼管業界には脅威と言えよう。

しかし戦後間もない時代から海外技術を積極的に見習い、技術導入し、自社技術を高度化してきたのであり、今や操業技術や商品技術は世界最高水準にある。この間先輩格の米国・ヨーロッパミルへ技術指導を多数行って、恩返しを行ってきた事は特筆すべきである。

2 主要な継目無鋼管製造での技術進歩

海外技術導入をベースに発展した主要な技術進歩はいろいろあるが、ここでは

① 管材の著しい進歩

リムド鋼、上注キルド鋼、下注キルド鋼から連続鑄造鋼へ

② 新形式加熱炉

傾斜炉床式加熱炉から回転炉床式加熱炉・ウォーキングベーム炉へ

③ ストレッチレデューサーの導入

④ 新プロセスの導入

(アッセルミルについて記述、マンドレルミルはマンドレルミル編)

⑤ プロセス・コンピューターの導入

②と関連させて簡単に記述

について、著者の経験したいくつかの課題項目について触れてみたい。

3 連続鑄造管材への歩み

管材品質の安定化、高品質化は鋼管技術者にとって念願であったが、これを実現してくれている現在の連続鑄造技術は驚嘆に値するものである。上工程にただただ感謝の気持ちで

一杯である。住友金属工業では戦前、海軍のボイラータブを主力製品としていて、この規格がリムド鋼ベースであったので、著者が入社した1960年当時も特殊鋼をのぞいてリムド鋼製管が残っていた。1950年2月からキルド鋼による製造が開始されたが、未だリムド鋼で安くてよいパイプを作るため、穿孔に関する多くの試験が行われた。キルド鋼でもコストの安い3トン上注鋼塊が主体に使われていたが、やがて品質の安定している下注鋼塊が一般化してパイプの内面疵が激減し、安堵した記憶が強烈に残っている。キルド鋼ではパイプの外表面疵が多く、対策として管材ピーリングが標準工程に組み込まれていた。管材処理のヤードには何台かのピーラーが必須であり、キザリング社製高能率ピーラー等が設備導入され、ピーリングも重要技術であった。やがて簡易ピーラーが国内で開発されて各社に多数設置された。肉眼検査後チップピングかガススカーフィングによる手入れが普通であった。管材のピーリング代は7mmから5mmとなり、3ないし2mmまで減少して技術の進歩と称したが、管材の曲がりもあり、ピーリング代は時に増減した。やがて1977年ごろから黒皮製管が試みられるようになった。これに伴い管材検査の自動化が必要となり、研究所ではSAM (Sumitomo Automatic Magnetic Inspection System) 検査設備が開発されて、黒皮管材本格使用への道を拓いた。一方遅々として進まなかった管材の連続鑄造(以下CC)技術が急速に進展し、パイプ内外面疵も激減して黒皮製管も可能となり、安定した高品質パイプの製造が出来るようになった。これに伴い管材検査も特殊品を除いて省略されるようになった。これは一連の継目無鋼管製造プロセスの中では最大の技術革新であったと言ってよい。

この一連の管材連続鑄造化の過程では多くの品質上の技術課題に遭遇し、紆余曲折があったので触れておく。継目無管材は世界的に鋼材の中でも連続鑄造化が一番遅れた部門のひとつで、1975年の国内での適用率は一般鋼材30%に比し、9%に過ぎなかった。このために管材連続鑄造化を推進するいろいろなミッションが各社から派遣されて技術調査・試験が行われた。また主として連続鑄造化が先行したヨーロッパよりビレットや連続鑄造製のパイプを購入して製管試験や品質確認試験を数多く行った。プロセスとしてはラウンドCC、回転連続鑄造(Rotating Round CC, RCCという)や大断面ブルームCC+圧延など多様な工程の管材が当時の標準工程としての下注鋼塊材の品質と比較調査された。鋼質としてのマクロやミクロはもとより、微小な内外面疵の許容限界の評価は判断の難しい問題であった。特に内面疵では鋼塊とは若干性状の異なる疵が発生した。製管後パイプを縦割りして酸洗、ダイチェックすると検出されるこの種の微小疵は連続鑄造材特有の疵で、実用性は問題なさそうだが、これを許容すると

の決断はなかなか下せず、時間が流れた。何とか製管段取で改善する努力が必要となり、連続鑄造材用のピアサープラグ形状の研究なども行われた。一般的には製管サイドでは鈍頭型のプラグ形状の方が、連続鑄造管材固有の中心部不連続部より誘起される内面欠陥を抑制することは自明であった。しかし穿孔効率は若干低下することと、鋼塊材と連続鑄造材が並行して製管されることからプラグ形状は両者同じものが通常使用された。NKKではフランスのVallourec社の子会社S.C.E.C社が1968年より開発に着手し、Saint Saulve工場で成功したRCC法を技術導入して1977年京浜製鉄所で本格採用して国内で先行した。これは英断であったと思う。NKK社長から住友金属工業会長にRCCの導入勧誘があり、急遽実態調査に田中元鋼管部会長らとヨーロッパ・米国を回るミッションに出発し、連続鑄造および鋼管製造を見学した。しかし品質は満足できるものではなく、代わりに品質の安定しているコンキャスト式大断面ブルームCC+圧延方式を和歌山製鉄所で採用した。やがて生産性の高いラウンドCCが品質改善なされ、今日見るような標準プロセスとして定着した。特殊な管材としては大断面ブルームCC+圧延方式や電気炉鋼に依存するものが当然残るが、大きな回り道であった気がする。

さらに継目無鋼管にはサワーガス用油井管・ラインパイプなどでは結構、仕様が厳格に記述されたものが多い。仕様書には通常素材管理の単位としてヒートを規定してある。しかし連続鑄造材ではタンディッシュで転炉鋼の連続するヒートが混入するので、そのヒートの区分けの定義などはユーザーから厳格に追及されて、やむなく混入分を使用しないということを容認するメーカーまで現れて、著者らを慌てさせたものである。

素材プロセス変更と言えば、平炉・電気炉時代から転炉・電気炉時代への転換期も当然同じような問題が多かった。輸出主体であるので米・ヨーロッパユーザーからの仕様書には平炉もしくは電気炉指定と言う仕様書が一般的であった。日本では米英よりも転炉製鋼法が先行したので、転炉鋼の方が品質は良い事をユーザー説得し、転炉鋼承認を得るには大変な時間と努力を費やしたものである。

4 回転炉床式加熱炉の採用と プロセス・コンピューターの適用

継目無鋼管製造の技術課題には内外面疵や機械疵の減少、スケールロス減少による歩留向上や寸法精度・表面性状の向上などがあるが、いずれも加熱炉操業に関連している。しかし従来のロールダウン式傾斜炉床式加熱炉(丸い管材を人力でロールダウンする)は操業環境が過酷で約15人/シフトを

要し、管材の温度制御が難しく、内面疵の原因になったり、隣り合う管材を炉内オーバーヒートしてパネルのように溶着して炉口から引き出せなくなるトラブルやオーステナイト系ステンレス鋼管材ではオーバーヒートして、田んぼのひび割れのような穿孔材を造ったり、ミルトラブルによる長時間在炉で結晶粒粗大化を招いて全管材をスクラップ化したりすることなどもあった。

シームレスミルでは炭素鋼からMo鋼、2.25%Cr-1%Mo,9%Cr-1%MoのCr-Mo鋼および、13%Crマルテンサイト系・22-25%二相系ステンレス鋼など連続して、時にはオーステナイト系ステンレス鋼も含めて製管することが多い。これに伴い鋼種ごとの理想的加熱パターンのもとでの高能率均一加熱は極めて重要で、熱伝導の異なる鋼種を最少スケールロスで最適に焼き上げることは技術的にも難しい。また寸法精度の向上では管材の均一な加熱と偏肉の少ない穿孔が基本である。丸い管材を長手方向および断面内で均一な加熱を行うことはポテンシャル操炉では結構難しいものである。

これらの技術課題を解決し、省力合理化を実現でき(2, 3人/シフト)、さらに継目無鋼管の高付加価値品増加に伴う品質・寸法精度向上要求をも実現できる加熱炉として、米国で普及していた回転炉床式加熱炉が、1957年我が国で初めて住友金属工業和歌山製鉄所に技術導入され稼動した。暑熱環境・重筋労働の代表格であった傾斜炉床式加熱炉(図2)は1965年まで存在したが、新形式炉の優秀性が高く評価されて、以後国内では回転炉床式のほかウォーキングビーム式加熱炉へ全て替わっていった。

回転炉床式加熱炉はドーナツ型炉床に管材を置いて、一周して所定のヒートパターンの元で適正温度に均一加熱出来る上部燃焼3面加熱方式で、生産性が良く、スケールロスも少なく、自動化が容易であった。ただし傾斜炉床炉と異なり、稼動部分が多く設備の安定稼動には多大な改善が必要であった。炉床やウォーターシール機構、管材の挿入・抽出機など



図2 傾斜炉床式加熱炉(最終操業)

可動部の保守は困難を極めた。そこで尼崎製造所の設置では多くの改良が加えられるとともに設計を含めてすべて純国産化を行った。外周に比して内周は短く管材長手方向に加熱負荷が異なるので温度差がつき、また通常管材は炉床に挿入したままで回転しないので、上下方向にも加熱負荷が異なり、管材断面に温度差が生ずるので、操炉には従来とは異なる注意が必要であった。管材の均熱とは長手方向および断面内の温度差をたとえば $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以下に制御して操炉することである。この自動化を実現できればコストメリットは極めて大きいと判断された。コンピューターも漸く普及して、一定のモデルの下にシミュレーションが可能となっていた。そこで住友金属工業尼崎製造所で計算機制御するメリットの大きい加熱炉を中心に、製管から精整間での一貫した工程管理と自動制御を行うプロセス・コンピューターを導入し、回転炉床式加熱炉の性能を十分に発揮する計画を立てた。

継目無鋼管製造は板圧延に比して素材から製品の一時検査までの分岐を伴うプロセスが複雑で、取り扱う本数も格段に多い。当時は世界に例を見ないほどの製管・精整トラッキングシステムであり、受注したコンピューターメーカーも大変苦労をした。板の経験を十分取り入れることとした。多くの高精度センサーの適正な選択や開発が必要であり、また加熱炉の燃焼制御および製管ミルの制御モデルの開発が必須であった。板で経験のある研究所の全面的な協力のもと、コンピューターメーカーとともにプロジェクトを組んでその開発にあたった。図3に代表的なセンサー配置概略を示す。システムは製品トラッキング、加熱炉燃焼制御システム、ステンシル制御各システムから成り立つ。プラグミル制御などは第二段階としたが、後に和歌山製鉄所で完成し、寸法精度向上に大きく寄与した。

ピーストラッキングを基本として加熱炉の材質別の加熱温

度・均熱度・ヒートパターン、各ミル毎の仕上り温度、サイザー外径測定などを取り込むと同時に、冷却・矯正後のヒート管理用ヒートNo.を自動ステンシルし、NDIとしてのアマログ・ソノスコープの検査結果や超音波厚み計のパイプ品質をも取り込んでフィードバックを可能にしたシステムで1977年に尼崎工場で完成した。

熱間仕上鋼管は長らく、精整後の最終検査としてマグナフラックス検査が主に使われていた。よほど高級な用途以外には超音波検査の適用は例外的であった。しかし熱間仕上鋼管、中でも油井管の高級化に伴って非破壊検査として超音波検査指定品が増え、また石油業界では有名なアマログ・ソノスコープ指定が増加してきたので、この非破壊検査設備のオンライン導入を計画し、時代を先取りしようとした。しかし熱間仕上鋼管に非破壊検査は不要で贅沢だという上司意見が大勢を占めた。また住友金属工業の研究所ではちょうどSAMの開発が進んでおり、導入するのであればまずはSAMからという意見が強かった。妥協上管材へのビレットSAMと焼入焼戻後の製品SAMの導入とを組み合わせ、AMFチューボスコープ社からアマログ・ソノスコープを導入した。SAMと異なり、多くの出荷実績を持つアマログ・ソノスコープは設備が頑丈にできていてキャリブレーションなど段取りや寸法変更も短時間でできるような工夫が多くなされていた。内外面疵の検出精度やマーキング精度はSAMと比較すると技術上多くの問題を抱えていたが、研究所のSAM開発部隊の絶大な協力を得て精度向上ができ、ほぼ満足できるレベルまで達成できるようになった。この結果製管品質結果および寸法測定結果を予想以上の精度で直ちに製管ラインへフィードバックされる体制が取れるようになった。

結果として回転炉床式加熱炉へのプロセス・コンピューターの適用は品質向上とともに燃料原単位が大幅に向上した。

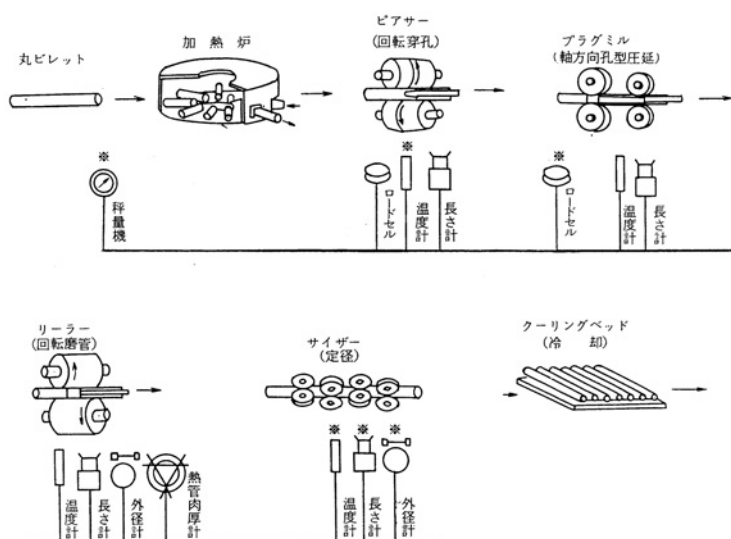


図3 製管ラインのプロセスコントロール用センサー配置

管材スケールロスも0.5—1%減少した。加熱炉の制御性も向上して、炭素鋼では管材径1インチあたり約12ないし15分の加熱でも適正な加熱が得られ、能率向上に大きく寄与した。これで各種鋼種に応じて管材の焼き上がり状況が監視できるようになり、最適加熱温度が自動的に制御されるので内面疵などの発生を最小限に抑制できるとともに、均熱不足に起因する偏肉を最小限にコントロールできるようになるまでに進歩した。

この加熱炉を中心としたシステムは画期的なもので海外から多くの見学者が訪れた。品質管理・技術管理や生産管理データも必要に応じて即座に取れるので、製造管理者にとっては非常に効果が大きく、コンピューターは費用対効果の極めて大きい投資であることを実証する結果となった。このシステムは工場閉鎖に伴い、ハードウェアとともにフランスの継目無鋼管メーカーへ技術輸出された。

実はこのプロセスコンピューターを導入するには大きな障害があった。コンピューター嫌いの上司である。前例のないシームレスミルへプロセス・コンピューターを本格導入しようと計画書をつくり説明したが、直属上司はメリットがないと起業化に反対した。ちょうど著者に本社から海外出張する様に要請があり、直属上司にプロコン計画書の事前承認を求めたが、「君が海外出張している間にこの計画を反故にしておく」という返事である。そこで他の上司の承認印を先に貰う事とし、直属上司だけ承認印が残った。四苦八苦の説得のあとでようやく「それでは計画書に不満の意思表示するために承認印を逆さに押しておく」と印を逆さに押された計画書承認を頂いた次第である。

熱間仕上鋼管へのプロセス・コンピューターやオンライン非破壊検査の適用など現在では至極当然であるが、当時としては新しい試みであった。新しいことへの技術チャレンジには結構いろいろな形の理解不足や抵抗が予想されるが、多くの場合不確実性から“メリットが余りない”という経験からの保守的な上司判断が働きやすい。その実現にはプロセスや商品市場の動向とその先取性を見極めて上司を説得する力をつけることが重要であり、特に最近の若いエンジニアに望みたいことである。

5 3ロール式ストレッチレデューサー

大きな母管を中空のまま外径を圧下して小径管に仕上げる従来のレデューサーはサイザーと同じく、管軸方向に応力がかからないように圧延するもので、肉厚が増加するシンキングタイプであった。1930年代にNational Tube社を中心に米国で管軸方向に大きな応力(変形抵抗の約50ないし80%)をかけて肉厚を制御する一連の実験が行われ成功した。この

方式の圧延機がストレッチレデューサーで、通常10数ないしは26スタンドから成り立つ。管軸力の制御はスタンドロール速度比を変更することにより行い、所定の肉厚を得ることができる。広く継目無鋼管製造や溶接鋼管製造にも用いられる。

このストレッチレデューサーは米国では2ロール式が継目無鋼管製造用に、ヨーロッパでは3ロール式が主として溶接管用に開発されて使用され始めた。日本ではNKKが1953年2月米国のエトナスタンダード社より2ロール式14スタンドのストレッチレデューサーをプラグミルラインに導入した。1960年住友金属工業は尼崎第一製管課(工場)を中径油井管工場から小径厚肉ボイラー管を製造する工場に体質改善するため3ロール式ストレッチレデューサーの導入を決定。上司は機種の選定などの事前調査および3ヶ月に及ぶ海外調査を経てエトナスタンダード社、メア社、コックス社の中から西ドイツのマンネスマンメア社製の採用を決定し、1961年3月に3ロール式ストレッチレデューサーを稼働させた(図4)。ちょうど著者は1960年に入社してストレッチレデューサーの技術担当となった。

5.1 3ロール式ストレッチレデューサーの特徴と技術課題

ストレッチレデューサーは最終圧延工程で、製品としての寸法精度や表面状態などが重視される。また複雑な圧延機だけに技術課題は多く、

- ①管端厚肉部長さ(クロップロス)の短縮
- ②内面角張り
- ③工具費・メンテナンス

などがその代表的なものであった。

管の両管端部は中央に較べ、軸方向張力が十分にかからないために肉厚が増す。肉厚公差たとえば±12.5%を超える部分はクロップロスとして切り捨てられるので歩留への影響が大きい。この管端厚肉部長さはスタンドピッチの長さに比

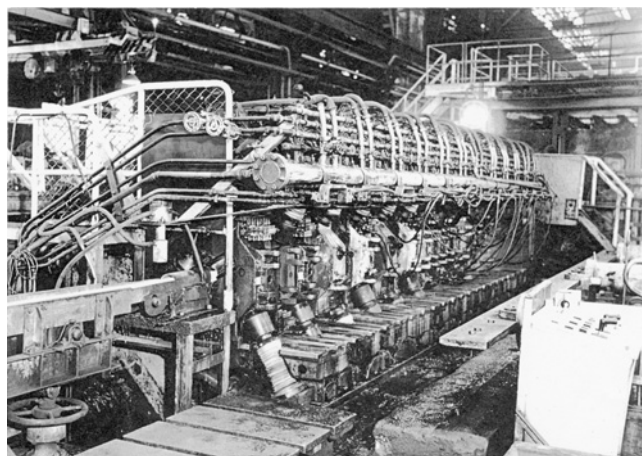


図4 3ロール式ストレッチレデューサー

例するので、レデューサーではスタンドピッチを極端に短く、たとえばロール径300-320mmに対してスタンドピッチが240-300mm程度のコンパクトな設計が普通で、操業は神経を使う圧延機である。

3個のロールはロールスタンド（ハウジング）内にコンパクトに内蔵されるが、歯車を内蔵する1軸駆動と3軸駆動方式がある。これらの20数スタンド全体を駆動するシステムに個別モーター駆動方式、油圧駆動方式や交流モーター＋直流モーター組み合わせ方式など多様な駆動方式があり、製造する管種やロットにより一長一短がある。またコスト・メンテナンス、管の歩留などが大幅に異なり、どの形式を選定するかが極めて重要な技術課題である。当工場の場合は小径厚肉ボイラー管の熱間仕上げを目的とした工場体質改善起業であり、生産品種の自由度や品質の向上が重要で、さらに3ロール式ストレッチレデューサーの小径厚肉管への適用が世界で初めてであったので未経験の分野であった。このため方式選定には上司も随分迷ったようで「初めての設備だから勉強のつもりで導入し、3年ぐらいて元をとったら、より良い形式のものに更新したら良い」という判断で比較的安価なメーア社の油圧駆動方式が選定された経緯があった。

5.2 技術指導から試圧延、内面角張りと操業

メーア社からはシュライ氏（圧延理論と操業面）とフォルバッハ氏（設備面）が派遣されてきて、設備の設置から操業までの指導を受けた。操業面ではロール回転数の計算方法やカリバーデザインの理論・考え方、メンテナンスやロール切削法など指導を受けた。試運転が全て終了して一本目の試圧延が行われた。2ロールシンキングレデューサーに慣れている著者らにとって60メートル近い熱間仕上げパイプが極めて真っ直ぐに高速圧延でき、その素晴らしさに驚くとともに歓声を上げて祝福したものである。試圧延は安全上から比較的薄肉管が仕上げられた。外径・肉厚の製管可能範囲を確認するテストになり、日を追って逐次厚肉になると内面の六角張りが目立ちだした。溶接管の肉厚を超える継目無鋼管の得意とする中肉厚管になると内面は六角スパナのようになり、とてもパイプとはいえない製品になることが判明した（図5参照）。

操業ではロール磨耗、頻繁な仕上げサイズ替えでのスタンド入れ替え、駆動油圧ポンプ・モーターの保守と油漏れ、スタンド内でのパイプトラブル（ちょうちんと称した）の処理、ロール駆動安全シアピンの破断など困難を極めたが、作業員のたゆまぬ努力で克服していった。いずれもレデューサー圧延理論の展開が重要であった。

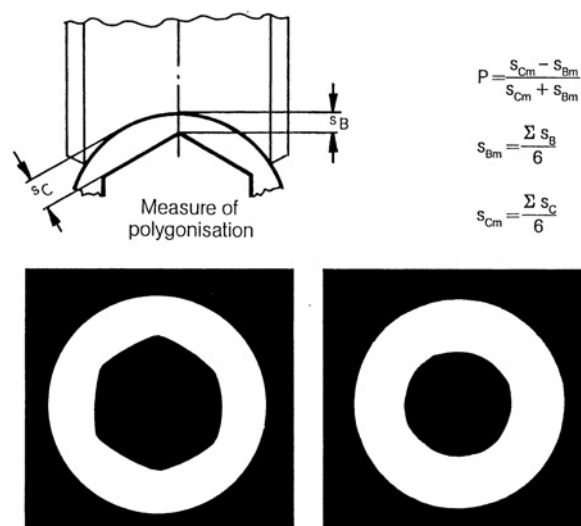


図5 パイプ内面角張り

5.3 カリバーデザインの改良

余りにも激しい内面六角張りで、カリバーデザインが悪いのではと思ったが、ロール回転数の設定を色々変えても改善されず、これはあるいは3ロール式の基本欠陥ではないかと悪い予感もあり、当初判断がつかなかった。メーア社も薄肉溶接管向けの経験しかなく、いろいろ考えられるパラメーターを変更して試圧延をしたが、改善に時間が掛かるばかりであった。上司以下技術者は事務所に連続で泊り込む日々が続いた。その内に上司はメーア社員に「このレデューサーは欠陥品だから、持って帰れ」と言い出す始末であった。

そこで基本実験を行うこととした。すなわちカリバー形状を変え、薄肉から厚肉までの母管を用いて広範な外径圧縮率を変えていろいろな外径に上げるとともに、種々のストレッチ係数パターンを変えた回転数を設定して一連の内面角張りの実験を計画した。また一連の圧延中途止め材（以下ストップ材と表現。タケノコのような形状をしているので皆がタケノコと呼んだ。）を作り内面角張りがスタンドを通過するごとにどのように形成されるかを調べる実験を行った。これによりロールとパイプとの接触面もよく観察した。内面角張りの程度は視覚的な面も強く、六角張り率なるインデックスを定義して判定に望んだが、内面六角張りの許容限界の判定は予想外に難しかった。断面切断と肉厚測定、六角張り率の変化、角張りの視覚的判定とロール接触面のトレースが日夜続いた。

実験によると薄肉では角張りは少ないが、厚肉では極端に角張る。ロールとの接触長さも厚肉になるとカリバーエッジ部では短く変化することなどが観察され、孔型圧延での管の変形が周方向に不均一であることが原因であるらしいことが判明した。2ロールの孔型圧延ではサイドリリースを通常プラスに取るのが常識であり、メーア社から提示された3ロー

ルカリバーもサイドリリーフがプラスであった。エッジマークの発生を恐れずに3ロールの孔型をよりクローズドにする、すなわちサイドリリーフをマイナスにすると内面角張りが著しく改善されることが確認された。ロール溝底およびエッジ部でのロール接触面長さが圧延方向に等しく(矩形接触と呼ぶ)すると円周方向の変形が均一になり、自由変形の内面も丸く仕上がるという結果は今では至極当然と受け取られるが、当時としてはカリバーデザイン上の大きな発見であり、住友金属工業(株)の特許となった。

5.4 ストレッチレデューサーの実験と塑性理論^{6,8,9)}

エトナスタンダード社やメーア社から事前に入手したデータには実験データや圧延理論に裏付けられたデータ類は皆無であった。当時唯一レデューサー圧延の管の変形についての論文はNeumann & Hankeの理論⁷⁾が有名であった。この塑性理論を用いて実際のレデューサーの20スタンドにも及ぶスタンドに逐次適用して解を求めるのは大変な仕事であった。しかし当初はこの理論の正確さを検証する意味もあって、理論計算をすることとなった。計算機と言えば当時は手回し式タイガー計算機と機械用計算尺だけで、後は自然対数表が頼りであった。くる日もくる日も手回し式計算機を回しつつけた。理論計算では母管と仕上げ外径に対して一定の外径リダクションパターンに対応してスタンド数が決まり、管軸応力(ストレッチと呼ぶ)を仮定して回転数を計算し、理論上の肉厚変化を求める。これをストレッチレデューサーでストップ材を作って実験し、各スタンドでの肉厚の計算値と実測値を比較する。極めて多くの実験を行った。図6に示すように実測値は計算値ほど薄くならないことが判明した。

このことからストレッチパターンがメーア社から入手したデータほどにはかからないこと、つまり摩擦係数や変形抵抗、回転数設定理論がかなり不備なことなどが類推できた。そこでレデューサーに関する塑性理論を少しでもレベルを上げようと、多スタンドのロール分離力の測定は困難なので、全スタンドのトルクを測定することとなった。多スタンドなので、研究所を含めて社内にあるオッシログラフの多くを拝借して実験を行った。

この実験結果はその後、製造所や研究所、メーア社で解析されて、ストレッチレデューサーの塑性基本理論が大幅に進歩し、スタンド間張力を推定できる理論へと展開できるようになった(図9)。

従来のサイザーやレデューサー理論というと圧延分離力Pは唯一Rodderの式

$$P = 1.5\sqrt{2aR} \cdot t \cdot K_f \dots\dots\dots (1)$$

t: 肉厚、Kf: 実行変形抵抗、2a: 外径減少率、
R: ロール半径

を基礎としたもので、トルクはこの式にトルクアームを掛けたものであった。エトナスタンダード社のレデューサー所要動力の計算はすべてこの式に準拠しており、後方張力や前方張力の考慮がなかった。この結果単独駆動のレデューサーモーター容量は既成の100kWか200HPなどが通常用いられて、常に厚肉管の圧延では過少でモータートリップがつきものであった。作業トラブルが絶えないと数多く報告や相談を受けた。

著者らは実験結果に基づき、中立線と後方張力、前方張力

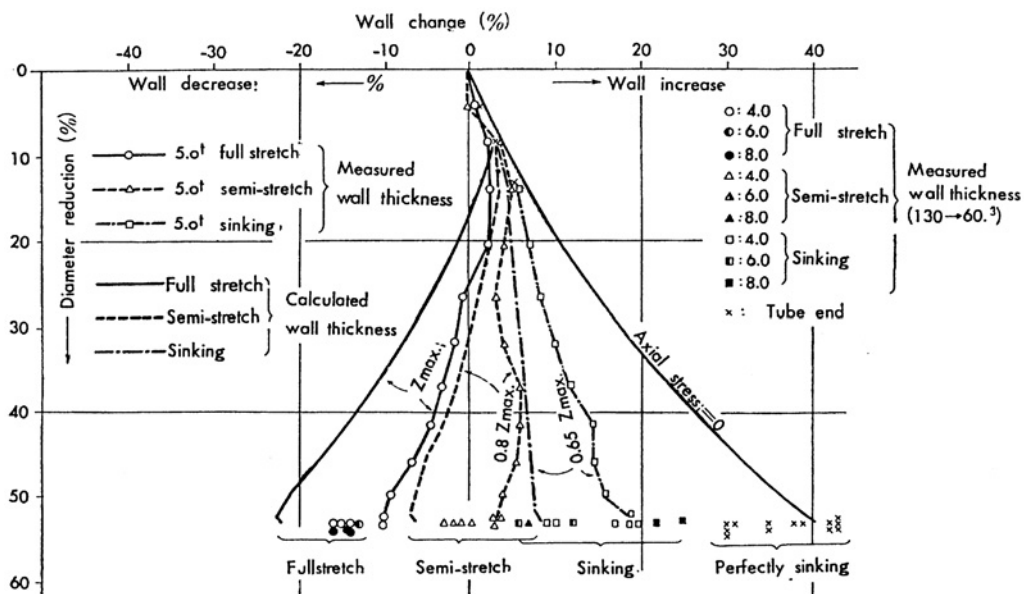


図6 各スタンドにおける肉厚変化の実測値と計算値

を考慮した式を基に理論的展開を試み、3 ロール面の中立線を決定してロールの有効半径を求める方法を採用した (図7)。中立線は管軸方向の釣り合い方程式

$$F_0 + P_r = \mu P(S_0 - S_1) + F_1 \dots\dots\dots (2)$$

F_0 : 後方張力、 F_1 : 前方張力、 P_r : ロール分離力
管軸方向力、 P : ロール分離力、 S_0 : 後方すべり領域面積、 S_1 : 前方すべり領域面積

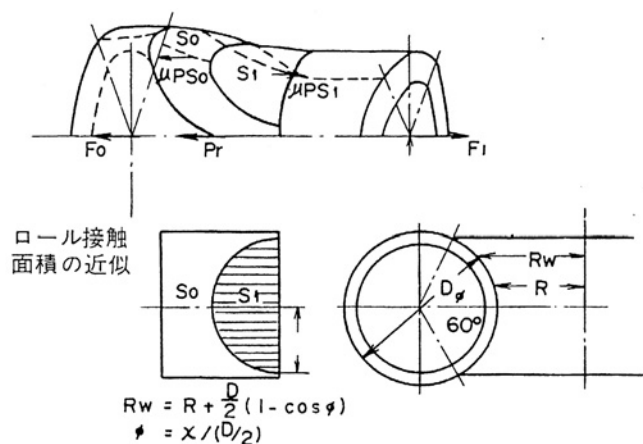


図7 中立線による有効半径の求め方

から前方すべり領域、後方すべり領域の面積をもとめ、有効ロール径を求める方式を採用した。これによりロール有効回転数が計算できるが、これを用いるとより肉厚の計算値と実測値が近づくことが判明した。また軸力は摩擦係数に依存するので、摩擦係数と達成可能なストレッチ係数のパターンなどを近似計算した (図8)。大きな仮定を設けて過渡状態の張力変動を計算し、管端厚肉化現象の計算も試みた (図9)。

これらから管端厚肉カーブをある程度推定でき、製品公差

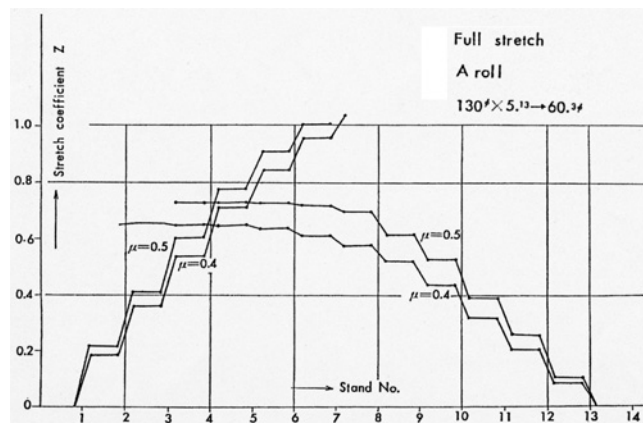
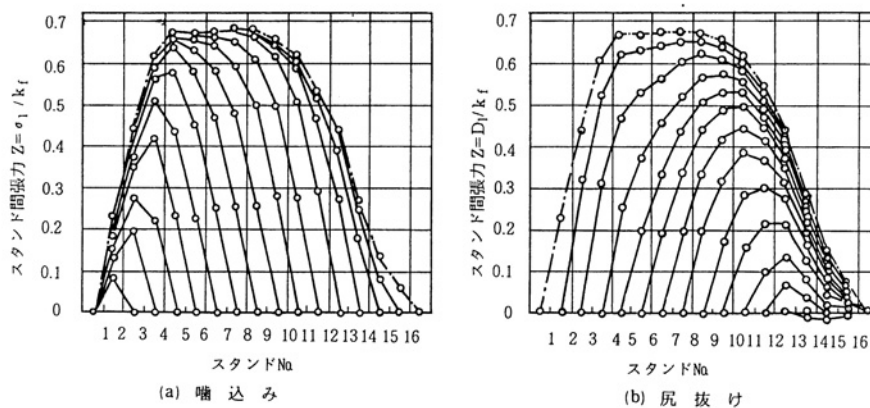


図8 多スタンドにおけるストレッチ係数分布 (摩擦係数 $\mu = 0.4, 0.5$ の場合)

過渡状態における張力変動の解析例



管端厚肉化現象の解析例

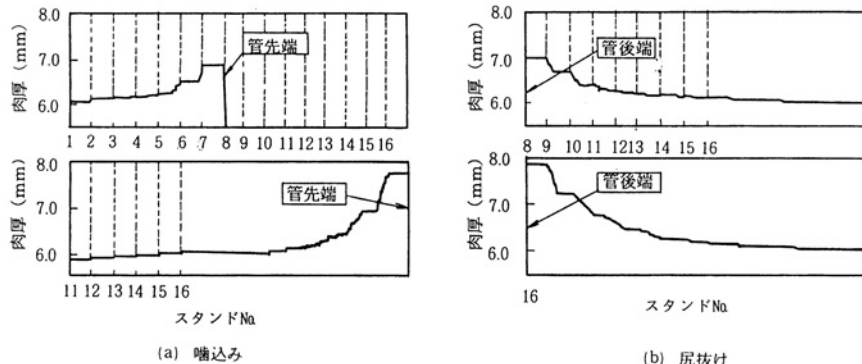


図9 管端厚肉現象の解析例

に応じた管端切捨て長さの計算なども行えるようになった。

これらの理論をベースにレデューサー出口に精度の良い管測長機を開発設置し（特許化）、先行材の測長結果から回転数比を設定調整する学習制御を行うまでに進歩した。

1966年住友金属工業尼崎工場のリブレース工場として、海南市に海南鋼管（株）が設立されて、新ミルを建設することとなり、冷管工場から操業に入った。熱間ミルとして当初は技術的に偏肉を改善できる見通しの基で、小径厚肉管や特殊材質の増加を見込んで、縦型ダイレクトピアシングプレス＋横型押出プレス＋ストレッチレデューサーの野心的方式を計画した。しかし海外出張メンバーらが新鋭マンドレルミルの威力を見学して信念が揺らぎ、さらにN社のマンドレルミル設置決定情報を入手するに及んで、マンドレルミルに急遽変更された。K社がこのプロセスを先行設置したが、技術上の多くの問題に突き当たって本格操業に至らずに閉鎖した。継目無鋼管ミル新プロセスの歴史でよくあることであった。住友金属工業は先見性があったと思う。当時押出部隊が自信ありと誇示したダイレクトピアシング技術は現在でも確立できていないことと、押出ユージンプレスのガラス除去はいまだ困難で直接圧延や後処理の障害となっており、今後の大きな課題として残っている。

マンドレルミル方式に変更決定された後、当然ストレッチレデューサーの形式も検討された。プロジェクトメンバーは当初やはり安価なメーア社製の油圧駆動方式を候補としたが、尼崎工場に余りにメンテナンスに手を焼いた事でもあり、また将来の制御性よりエトナスタンダード社の個別モーター駆動方式を推奨した。これにより延伸制御や管端肉厚制御への道を拓いた。また適正モーター容量を実験から得た変形抵抗を用いて計算し、スタンド当り300-350kWを提示したが、社内およびエトナスタンダード社の人々にも大容量でびっくりされた。これらは現在でもメーア社に引き継がれている。

5.5 その他の付帯技術

この3ロール式ストレッチレデューサーの導入を契機に、多くの技術が改良されたり、新プロセスの実験が行われたりしたので紹介しておく。

メーア社のフォルバッハ氏が3ロールストレッチレデューサー導入を契機にノズルを円周上に配置した本格的なノズル式デスケラーヘッドを設計してくれたので、ノズルを米国より輸入して製作使用したところ、管表面が素晴らしく綺麗に仕上がって、皆が「冷間仕上鋼管のようだ」と驚くほどその威力を発揮した。旧式の2ロールレデューサーではスリットリングデスケラーを使用していた。いずれも圧力は工場内の70atmラインであったが、ノズルの効率のよさに驚いた。1958年大学3年の夏の某製鉄所工場実習での知見では

古いプルオーバー式板圧延では竹箒で掃いてスケールを飛ばしていたのを覚えていたのだが、当時はいまだそういう時代であった。継目無鋼管には特殊鋼が多いので、デスケリングが困難である。そこで圧力を120atmへ、さらに220atmへと高圧化を計り、本格的ラインとした。これをベースにデスケラーの使用をレデューサーからサイザー、リーラー、ピアサーへと拡大し、表面性状の向上を実現した。

工具関係の技術改善にも中抜きチルドロールを中心に日立金属（株）が遠心鋳造法を全面適用して長寿命化を実現し、グレンロールも耐摩耗性が向上して鋼管表面性状の向上、ロールコストダウンに極めて重要な役割を果たした。

プロセス開発ではこのストレッチレデューサーを用いてユージンセジュールネ法＋ストレッチレデューサー法の試験検討を繰り返し行った。押出ガラス付き素管のデスケラーによる剥離状況の確認試験はプロセス開発上極めて重要であった。ガラスは220atmデスケラーでも除去できなかった。鋼管押出技術の分野では“ガラスの上にも3年”と称して剥離性の良い「パラリガラス（パラリと落ちるガラス）の開発」が大きなテーマであったが、結局のところ失敗に終わっている。商品技術開発としてはストレッチレデューサーでの加工度が比較的大きいことを利用して、加工熱処理的な実験もスタートしたものである。外径1.900インチへの適用を一部行っていた。またデスケラーヘッドを用いて、油井管の焼入れ基礎実験を行い、焼入れノズルヘッドの設計や成分系の設計を行って油井管専用の焼入れ焼戻炉を完成し、油井管の新時代を築いた。

6 アッセルミルの導入・稼動

米国ではプラグミルと並行にアッセルミルが設置されているラインが普及した時代があった。プラグミルが中薄肉サイズを製管するに対して、アッセルミルは中厚肉サイズを分担し、段取替え時のダウンタイムを短縮できるメリットもあった。尼崎製造所では1960年代からアッセルミルをプラグミルに併設する計画があり、レイアウト案はほぼ完成していた。

1965年K社が5500トンプレスによるユージンセジュールネ法＋ストレッチレデューサー方式でシームレスパイプに本格参入することが決まった。このプロセスは世界で初めてのプロセスで、成功すれば厚肉分野でプラグミル法は太刀打ちできない。そこで急遽関係上司が海外出張して対応を検討し、戦略起業と位置付けて尼崎製造所にアッセルミルの導入を決定した。設備だけを購入して操業関連一切は全て自社でやることとなった（図10）。

アッセルミルはパイプ出口側からの駆動で、圧延後管は減

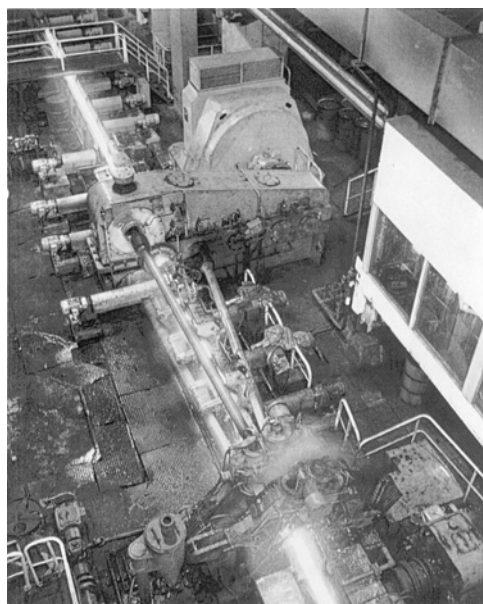


図10 アッセルミル（尼崎鋼管製造所）

速機内を通過してゆくユニークな構造である。さらには本体が3個のパレル型ロールなので、小径の管圧延ではロール径も小さく、ロール軸径も極端に細く、限界設計が多い設備であることに驚いた。

マンドレル上でのパイプ圧延はプラグミルでマンドレル試験圧延（失敗した）した経験しかなく、アッセルミルは文献で知っているだけであった。アッセルミルの欠点はパイプ終端でのフレアリングであり、薄肉側で極端に能率が悪くなる。これを防止できる高能率高性能のトランスバルミルが当時既にフランスのバロレック社で開発されて稼動していたが、その情報は入手できずに、エトナスタンダード社への発注となり、国内でライセンス生産された。図面をチェックすると1940年代50年代の古いものの寄せ集めであった。ミル本体やガイド類は全てボルト・ナット締めで新ミルとは思われなかった。アッセルミルはクロスローリングなので、当然かなりの振動を伴うだろうことは、想像に難くない。当時プラグミルラインの剛性アップで油圧固定がどんどん進んでいた時代であり、このような時代遅れのミルは受け入れ難いと設計変更を申し入れた。米国の設計者と国内製作者というメーカー間の立場は微妙で、思うように新鋭化は出来なかったのは至極残念であった。

このアッセルミルは我が国最初のもので、1966年9月に稼動した（図10参照）。これに先立ってマンドレルの製法や材質と焼入れ焼戻し・補修法などが種々検討されて、後のマンドレルミル導入に役立った。マンドレル操作法はフルフロート法、セミフロート法、リトラクト法などマンドレルミル法とほぼ同じで、潤滑剤も種々使用した。

アッセルミルが本来得意とする寸法公差の厳しいベアリン

グ用鋼管は、S社との関係から製造しないという前提で、当時通産省からの導入許可を頂いたので製造できなかった。このために製品はメカニカルチューブ、アクスルチューブや超高压管などを主体に製造したが、これらは少量多品種で、寸法替えが多く、能率はプラグミルと比較すると悪かった。品質的にはアッセルミル仕上げの製品偏肉率はプラグミル仕上げ品（たとえば実力 $\pm 8.5\%$ ）と比較して ± 5 ないし 3.5% 程度まで可能である。このためにはピアサーでの穿孔材から偏肉率の良い素管が重要であり、ピアサーでレデュースドパスが取られる。超厚肉管の圧延も重要で、この場合には特にピアサーでの穿孔材が重要となり、161mm管材径を用いて158mmODX50mmWTなどに穿孔する。アッセルミルでの嚙込性もプラグミルよりは寸法に敏感で、ピアサーでの寸法管理がより重要である。色々なピアサーに関連する操業技術が総合的にレベルアップされた。

アッセルミルのロールは中央部にこぶがあるのが特徴で、メタルフローも局部的で独特である。このために材料の影響を受けやすかった。当時はSiキルド鋼が主体で、A系介在物の多い部分には表面に0.2mm深さの小さい割れ状の疵の発生することがあり、この検出にはマグナフラックス検査が必要になり、多大な工数を掛けてしまったことがあった。SiAlキルド鋼にして問題を解決できた。現在トランスバルミルがベアリング鋼を主体に山陽特殊製鋼（株）で順調に稼動している。

7 おわりに

戦後からの目覚ましい技術開発は「戦後復興・発展期における我が国鉄鋼製造技術史（技術編・学術編）」^{10）}に詳しく述べられている。

今回は長い歴史を持つプラグミル法のプロセスや素材の変遷を海外技術の導入という観点を中心に著者個人の経験と見聞を主体に記述させて頂いた。プラグミル法は異なるプロセスの組み合わせから成り立っていて、各プロセスではその品質向上、高能率化や省力・省エネルギー合理化のためにJK活動を含めて多様な努力がなされてきた。左程大きな海外からの技術導入はなかったと言えるが、技術のきめ細かな改善の積み上げ努力が極めて大きな成果になって今日の世界の最高水準を行くプロセスと新商品群を確立してきたと言える。また製管の付帯設備の改善にはエトナスタンダード社のロダー氏は熱心で、たとえばピアサー出口テーブルの3ロール式バーステディアなどを技術導入でき、多くの改良を経て機能的な設備となったことは特筆しておきたい（図11）。さらにはプラグミルのプラグ交換装置であるリボルバー式プラグーはチェコスロバキアで開発されて、国内に初めて尼崎工

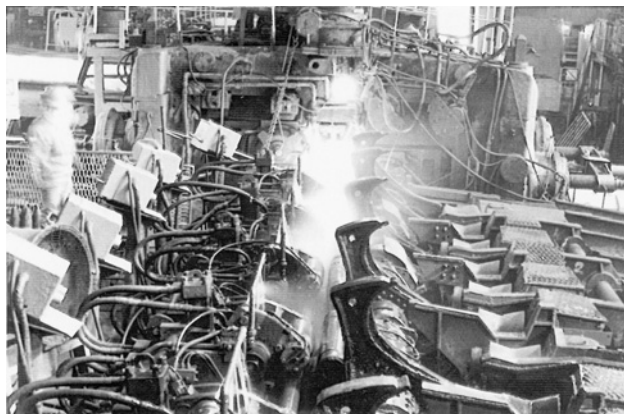


図11 ピアサー出口テーブル

場に導入されたが、240本/時の高能率圧延用の日本式への改良も完成して多大な成果を出しモノグループ化とともにプラグミルの進展に寄与したことを付け加えておきたい。

高生産性のゆえにマンドレルミル法にその地位を譲りつつあるとは言え、冒頭で述べたごとく継目無鋼管の製造プロセス・商品技術の多くはプラグミル法全盛時代に確立されてきたものであるが、今回は紙面の制約からこれらを割愛した。継目無鋼管の代表格としての商品は油井管・ラインパイプであり、これらの消費地の多くは海外に存在しているので、米国・ヨーロッパミルや石油会社から多くのニーズを学び、必要に応じて基本技術を海外から導入し、日本流の品質管理の下に名声を高めた商品を生み出して、今日のプラグミル法の存在意義基盤を築いてきたのである。

残念ながら最近に至り、急激な経済環境の変化と中進国の継目無鋼管製造への大幅な参入と格段の技術進歩により、国内のいずれのミルも特殊な高度商品群以外の国際競争力は著しく低下した。この結果過去10数年内に住友金属工業(尼) (和) プラグミル工場、NKK 9-5/8in マンドレルミル、新日鉄16in プラグミル、7in マンドレルミルなど歴史的にも多くの技術を生み出し、現在でも世界トップレベルの技術力を持つ歴史的ミルが閉鎖を余儀なくされてきた。技術者としては誠に残念の極みだが、50周年記念や閉鎖に伴い工場ごとの記念碑的な出版物も社内的に数多く発行されており、開発の苦難と成功の事例記録が正しく残されて、技術は新ミルに引き継がれている^{11,12)}。この過程の詳細は是非それらを参照し

ていただければ幸いである。

編集委員によると本企画は“……エポックとなった技術導入をとりあげて、……生の体験に基づく開発過程の苦難と成功の記録を残し、……” “……海外で開発され実用化された技術をいかに我が国の環境条件に適合させたか……” “……「日本式～」と名づけても良いようなプラスアルファを盛り込んだ技術開発の紹介……” とある。技術伝承はなかなか難しい課題であり、少しでも若い技術者のご参考になれば望外の喜びである。本編を企画頂いた方々へ深甚の敬意を表して終わりの言葉とする。

参考文献

- 1) 三瀬真作：追付け時代の鋼管製造，ふえらむ，3(1998)，49.
- 2) 鋼材部会報告—鋼材圧延に関する研究—，第1～3巻，日本鉄鋼協会鉄鋼技術共同研究会，日本鉄鋼協会，(1954)
- 3) 我が国における最近の鋼管製造技術の進歩，日本鉄鋼協会共同研究鋼管部会，日本鉄鋼協会，(1974)
- 4) 望月達也：第112・113回西山記念技術講座，鋼管の製造技術の現状と将来「継目無鋼管製造技術の進歩」，日本鉄鋼協会，(1986)，147.
- 5) 山田建夫：高合金継目なし鋼管のマンネスマン製管技術，塑性と加工，35-402，(1994)，804.
- 6) 林千博：21世紀の継目無鋼管の製造法を展望する，ふえらむ，6(2001)，683.
- 7) Neumann u. Hanke：Stahl u. Eisen (1955)，22.
- 8) 三瀬真作，高井岩男，松木則夫：住友金属，17-4(1965)
- 9) 三瀬真作，高井岩男，松木則夫：鉄と鋼，50(1964)
- 10) 戦後復興期におけるわが国鉄鋼技術の発展資料編，日本鉄鋼協会戦後技術史調査小委員会
- 11) 第一製管工場史「熱闘譜」，桐本武志監修，住友金属工業鋼管製造所，(1987)
- 12) 中径管工場創立50周年記念誌「飛翔」，中川恒監修，住友金属工業和歌山製鉄所，(1993)

(2001年11月26日受付)