



鉄の歴史
海外技術の吸収と
日本鉄鋼業の発展-2

継目無鋼管製造にマンドレルミル圧延法の導入

Enhancement of Mandrel Mill Rolling Technology in the Field of Seamless Tube Manufacturing

宇多小路勝 元 住友金属工業 (株)
Masaru Utakoji

1 はじめに

石油産業等のエネルギー産業に依存度が高い継目無鋼管の生産は日本、西欧、旧ソ連、中国、北米、南米の一部に限られ、なかでも高級品の生産は西欧と日本に限定される特殊な鉄鋼製品分野である。この継目無鋼管の製造プロセスは1960年当時、マンネスマン・プラグミル法が主流であった。マンドレルミル圧延法は1949年に米国で工業的に立ち上がり、その後1965年にドイツで今日の原型となるミルが開発され、マンドレルミル隆盛の火蓋が切られた。

我が国のマンドレルミルが和歌山県海南市で生産を開始したのは1968年の1月23日の深夜である。この圧延ミルは今日継目無鋼管圧延の主流となっているが、日本への技術導入は比較的遅かった。日本鉄鋼業が量的にも質的にも右肩上がりの最中での技術導入である (図1)。

今回マンドレルミル圧延法の導入とその技術を世界一に育てる過程を紹介申し上げる任を受けたが、たまたま筆者がその当事者にはまっていたという偶然によるものである。話に必要な情報は継目無鋼管生産を我が国で初めて1910年に開始した住友金属工業 (株) からが主になる事はご容赦をお願い

したい。また技術の詳細は林千博著「鋼管の製造法」¹⁾が詳しいので参照されたい。

2 はじめはユージーン・セジュールネ
押出し法

圧延と押出しは塑性加工技術ジャンルが著しく異なるが、住友金属工業 (株) のローカルな事情からマンドレルミル圧延法の導入と縁が切れないゆえ押出し法 (図2) について触れておかねばならない。

2.1 画期的なトライボロジー技術開発

継目無鋼管の製造にユージーン・セジュールネ押出し技術と設備が1958年に神戸製鋼、ついで住友金属、山陽特殊製鋼、八幡製鐵で順次導入された。

熱間押出し法の鋼管製造設備はジンガー法によるものが住友金属工業で1基稼動していたが、最大製品外径が100mmで材質も低炭素鋼のみに限定されており、小口対応が有利な事以外とても競争力があるとは言えないプロセスであった。その最大の原因が潤滑剤に黒鉛を使っているため工具寿命が短い事にあった。

フランスのセジュールネ氏が黒鉛をガラスに置き換える事で



図1 和歌山製鉄所 (海南) マンドレルミル工場全景

表1 継目無鋼管生産量推移

	単位: KT/年		
	国内 継目無鋼管生産量	住金 継目無鋼管生産量	住金 マンドレルミル生産量
1965年	753	442	0
1970年	1,673	903	331
1975年	2,298	1,175	445
1980年	3,903	1,501	544
1985年	4,082	1,614	809
1990年	2,634	959	544
1995年	1,919	936	513
2000年	1,692	790	750

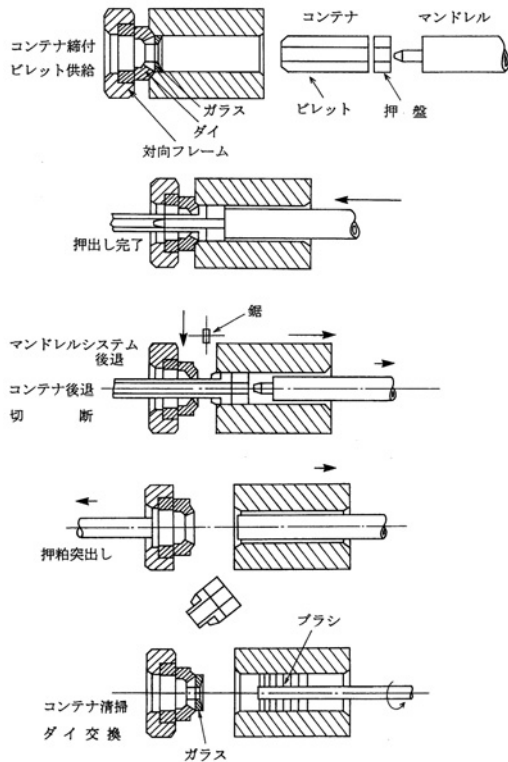


図2 ユージン・セジュールネ押し法

問題を一挙に解決したのであった。ガラスを粉末にして加熱鋼材（ピレット）の内外表面に適量塗布し、溶融ガラスを利用して押出す方法である。ガラスは断熱性が高いから工具の昇温を軽減出来るとともに摩擦係数が低い為押し力をミニマイズ出来る。このプロセスの工業化で従来熱間加工法では製造困難であったステンレス、チタン、ジルカロイなどの管や型材の製造が著しく容易になった。

当時急速な拡大期に入っていた石油化学、原子力発電、高温高压ボイラ等が求める基礎資材の一つである上記材料の継目無管の供給問題を一挙に解決したのがユージン・セジュールネ押し法である。この技術開発は当時の世界の鉄鋼技術開発のなかでも技術的価値の高いものである。

2.2 継目無鋼管需要増対応は押し法に期待

1965年頃の住友金属工業の継目無鋼管生産は年間約50万Tでフル操業をしていた。それが1970年の需要は75万Tと予想され、何らかの新ミルの導入を検討するチームが結成され、1960年入社筆者も参加していた。

既存のマネスマン・プラグミル法を高性能化するか押し法を大型化、高速化するか議論が伯仲した。押しし設備は縦型穿孔プレスと横型押しプレスで構成されるが、後者の押し力は当時国内外各社とも概ね2500T程度であった。生産能力は年間最大でも数万Tであったろう。年間20万T以上の能力にするにはプレス力を倍増して大きな外径の管を

押しし、下工程で外径を絞り（ストレッチ・レデュサ圧延機による）、長尺化する事とサイクルタイムの短縮で可能である。

ミル選択の決め手はプロダクトミックスであった。製品外径範囲と製品材質である。石油化学はステンレス鋼管等の高合金鋼管を求め、外径も上は300mmまでが量が多いと言う。一方油井用鋼管は外径サイズが最大426mmまでであるが、材質は当時低合金鋼であった。石油化学系の需要伸長か油井用鋼管の伸びかの判断は、何れも伸びるだろうからあらゆる材質に対応出来る押しし法を新ミルで採用することになった。押しし力6500Tという巨大プレスを中心にした、当時で約100億円の巨大投資である。1966年春常務会決裁を経て着工が指示された。工期は1968年3月の操業開始である。なおこの時期に神戸製鋼がほぼ同じ起業計画を走らせていた。

2.3 ドイツのマンドレルミルに遭遇

設備製作は国内で出来るが、既存の押しし設備の倍以上もある設備のエンジニアリングは欧州に依存しなければならない。加えて操業技術上の未解決問題（中実ピレットの中心に偏芯なく熱間穿孔する技術と熱間で押し出された管表面を覆う溶融ガラスを高压デスクレーで除去する技術）の解決目途をつける必要があった。

以上の事情から1966年梅雨明けに本プロジェクトの担当部長と設計課長に筆者も同行し渡欧した。当時は南回りの、途中三ヶ所で給油する長旅であった。設備の基本設計はイギリスの水圧プレス会社に内定しほぼ順調に進捗していったが、操業技術問題はスケールアップが余りに大きい為参考になる技術にも遭遇せず、問題先送りの感が濃厚で心が重い旅になっていた。

旅のついでに、この年操業開始直後の最大製品外径140mmのマンドレルミルライン（図3）を見学する機会が出来た。ドイツのフェニックス・ラインロール社の工場である。完全な秘密工場であるが、同行の部長と先方の製造所長が懇意であったのでプライベートに見せてやると言ってくれたのである。このミルは今から10年ほど前にブラジルに移設され、現在も元気に稼働しているとのことである。

工場を見た瞬間、まさにその時歴史が動いたと言える。工場の操業を見て驚愕した。15秒ごとに長さ100mの継目無鋼管が冷却床上に圧延されてくる。圧延能率は100T/Hに近い壮観な操業である。

2.4 建設計画の見直しに踏み切る

ドイツの新マンドレルミルとの遭遇は経営に深刻な動揺をもたらした。押しし法はプロダクトミックスを全方位カバー出来るが、概ね外形140mm以下の低合金鋼の油井用鋼管や

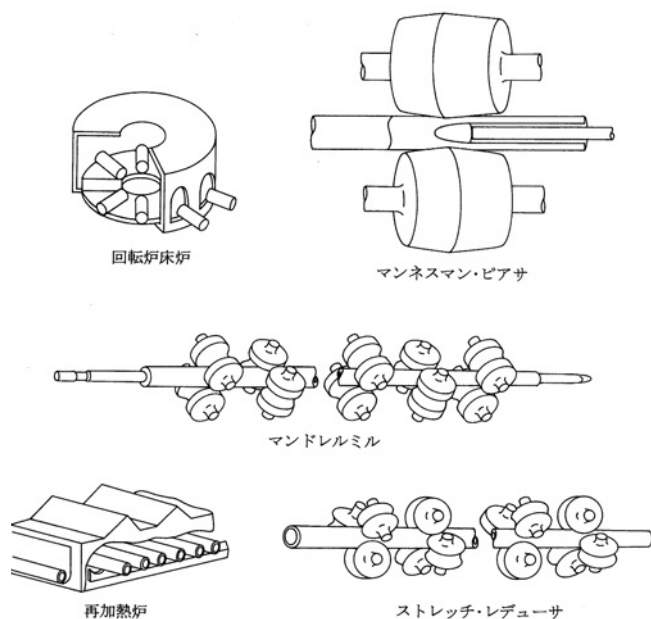


図3 マンドレルミルライン

一般用鋼管の競争力が充分かとの問題を投げかけた事になる。百貨店か強力な専門店にするかとの問題提起でもあろうか。

筆者はこの再評価の作業に巻き込まれた。秘密工場ゆえ駆け足の小1時間程度の工場見学ではあったが、投資規模、要員配置、資材費用等マンドレルミルのコストを知ってしまったのだからデータに不足は無い。押出し法で製造出来てマンドレルミルで作れなくなる品種を、コストは上昇するがいかにも他のプロセスで穴埋めするか、そしてマンドレルミルによるコストダウンを織り込んだ継目無鋼管事業の総便益はいかようになるのかの策定作業である。

押出し法の未解決の技術問題をコストに織り込みつつ、立場上苦しいが、結局押出し設備の導入を白紙に戻し、マンドレルミルに転換せざるを得ない上申書となった。内容は経営幹部に報告され、先の常務会決議内容を覆す決定が下された。しかも予算及び1968年3月稼働の工期は変えられないと言う条件付きである。建設資金の一部を世界銀行からも調達していた時代だから、工期も予算も動かせない、切羽詰まった会社の事情が一方にはあったのである。

事態はまさに喧噪である。設備メーカーを含む建設部隊は体制再構築に、社内の操業関係者は案画書の再作成と技術ソフト収集及び整備に奔走する。格別基本エンジニアリング導入先を緊急に決めなくてはならない。見学先のドイツの会社は市場で競合している相手に簡単にソフトを提供してくれそうもない。マンドレルミルを持っていた米国のUSスチール社も同様である。残るのは米国のマンドレルミルの設計に関与し、ドイツの新ミルにも一部関与していた製鉄機械エンジニアリング会社ブローノックス社に特命する事であった。

なお当時の継目無鋼管ミルの設計エンジニアリング会社はドイツのマンネスマン・メアー社と上記のブローノックス社が双壁であった。

③ マンドレルミル建設に邁進

マンドレルミル着工までの混乱と時間の空費は技術者に大きな反省と教訓を与えた。それはグローバルな技術情報の入手と分析に基づく、市場の要求にマッチングする技術シーズの蓄積が充分出来ていなかったことであろう。

3.1 マンドレルミル

ミルの選択変更と同時にプロダクトミックスも急遽見直すことにした。右肩上がりの需要トレンドもあって油井用鋼管が前計画の倍増する見込み量が提示される等将来の需要拡大に対応しうるミル能力が必要となった。熱間圧延設備は将来増強出来る余地を織り込み、下工程も同様としながら当初予算規模を守る事にした。この結果ミル最終能力は年間50万Tとし、立ち上げ時の生産規模は同20万Tと決定された。押出しプロセスを考えていたときのミル能力の倍である。生産能力だけでもドイツを追い越す余地を持たせようとする暗黙の競争意識が見え隠れする。

製品最大外径は140mmとした。したというより出来なかったのである。マンドレルミルはロール穴型を組み込んだ8スタンドが近接して配置され、奇数スタンドと偶数スタンドは交互に90度、垂直に対して45度傾斜している。そのためロール駆動入力軸も45度傾いている。ロールを駆動する700KW×3基直列の直流電動機を45度傾斜配置する技術は当時無かったので、減速機にスパイラルベベル歯車が必要であるが、2m近い歯車を作れるのは米国グリーソン社のみでこれ以上大きなものが作れなかったのである。

さてマンドレルミル法は図3のごとく、圧延機はマンネスマン・ピアサー、マンドレルミル、ストレッチ・レデューサの3機構成である。ピアサとレデューサは当社に既存のプラグミルラインで操業技術を蓄積していたが、マンドレルミルは技術がブラックボックスであった。

3.2 マンドレルミル操業技術を渴望

巨額の投資をする設備及び技術の知識を後々の憂いが無いよう集めたいのだが、米国とドイツの企業は工場見学をさらりと受けてくれるだけで設備と操業に必要な設計データはほとんど開示してくれない。

エンジ会社はミル仕様を提示してくれるが、その設計根拠は企業機密として説明をしてくれない。彼等にしても操業技術経験は無いから潤沢なデータを保有していないであろう。

しかしこちらにしても一生に二度とないであろうこの機会に世界最強のミルを作りたい。一方建設工事部隊は基礎の杭打ちを即着工したいから、ミルの大きさと重量を早く示せと矢の催促である。

押し問答を長時間やれないゆえ圧延荷重はエンジ会社の提示をそのまま受け入れた。提示された8スタンドの加工配分と筆者らが見て来た圧延温度での荒っぼい計算からしか検証出来ない。マンドレル圧延理論の研究など全くやっていなかったのだから致し方がない。このようにして最大圧延分離荷重は400Tとなった。操業してみると1割は過大であり、反省するも小さいよりましと自分を慰めた。

次が電動機出力である。サイクルタイムは前後のミルの経験的技術限界とドイツの例を考慮し、15秒と決められたが、問題は圧延長とミル全体の加工度、および圧延長とサイクルタイムで決まる圧延速度等である。

マンドレルミル圧延長はドイツのミルが世界最大で22mであった。しかし世界一のミルを作りたいとの思いが絶ち難く、また油井用鋼管の当ミル最大外径140mmの規格長さで10mゆえこれを3本採取したい事もあり、31mに決めた。エンジ会社も競合他社も肯定的な意見を言うてくれなかったが、筆者らの思いだけがそうさせたのだ。当初はさすがに25mでスタートしたが、2年を待たず実現したのだから自慢出来る。ミル全体の断面積加工比も最大5とし、当時の世界最大4.5を凌駕する値である。これに基づき駆動用の電動機定格は1スタンドあたり700KW×3瞬時過負荷250%とドイツミルの1.4倍もの巨大なものになったが、後々最大外径を180mmに拡大するときにおおいに役立つ無意識の先見となった。しかし肉厚の薄い鋼管の圧延では操業開始後苦戦し、開発部門による圧延理論の高度化で克服して行った。

こうして基本仕様が決まると、建設はまさに昼夜兼行の突貫工事で進む。当時日本は建設ラッシュ時代であったから、砂利、鋳鋼、ベアリング、ケーブル等々の調達は関係者を悩まし続けた。それにも関わらず投資規模約100億円の設備製作と据付工事を白紙の設計から始めて1年3ヶ月で完了させた。関係者は365日働き続け、チームワークを乱さなかったお陰である。

3.3 落胆の圧延試運転

1967年12月16日にはミルの最上流設備である管材加熱用直径40mの世界最大の回転炉床式加熱炉に火が入り、レデューサやピアサなどの個別熱間試運転が概ね順調に進んでいた。自前の操業技術の賜物で、エンジ会社の指導は皆無で進められる。

いよいよマンドレルミルの熱間試運転である。このミルの前には保温設備が無いゆえ、回転加熱炉ーピアサーマンドレ

ルミルに至る一貫圧延が必要である。孔設計図面、ロール回転数設定、ミルスプリング量設定など全てをエンジ会社が有償で提供した。1968年1月11日深夜一本目が電動機と減速機の轟音を響かしてミルを通過して行った。しかし、マンドレルミルは名のごとく鋼管の内径に長尺(約20m)のマンドレル(棒)が挿入されて孔型ロールとの間で肉厚圧下されるが、そのマンドレルが圧延後抜けないのである。何回やっても竹輪になって鋼管を採取出来ない。落胆とともに試運転は失敗してしまった。

圧延後の熱収縮を考慮した孔型設計が不適切であった。筆者を含む現場張り付きの技術者は立ち会いのエンジ会社技術者を信用出来ぬと、圧延試運転を穴の明くほど凝視しながら得た現象を糧に急遽孔型の設計見直しに掛かった。失礼ながらエンジ会社はオフリミットにさせて頂いた、それほど筆者らは動転していたのである。

修正した圧延孔型による第二回の試験圧延は1月23日、これまた深夜に行われ、歓喜とともに成功し、国内初のマンドレルミルが誕生した。2月15日には修祓式を挙行し、とても実現不可能と思われた3月操業開始計画を半月繰り上げたのである。熱間試運転開始後の一年後には年間ベース30万Tと計画の1.5倍の生産レベルを達成する急速な立ち上がりを実現したが、真に有り難い需要環境の時代であった。

4 自らの技術獲得にこだわる

事業は結果であるから、押出し法からマンドレル法への転換による混乱やマンドレルミル操業技術が不備のままでの設備建設にも関わらず、事業としては予期以上に立ち上がったので全て良しとも言える。しかしそのプロセスは言うまでもなく問題が多い。以下反省を込めて取り組んだ独自技術について言及しておきたい。

4.1 必死の基礎技術開発

経営はマンドレルミルの操業技術不備により円滑な操業に支障が出る事を最も危惧し、ドイツからの技術導入を必死に画策したが、ミルの立ち上げには間に合わなかった。また技術導入は成就したものの操業にあまり大きなインパクトを与えずに終わった。その最大原因は圧延理論等の基礎部分のソフト提供が無かった為であった。

それゆえ後追いにはなったが、研究所を中心に基礎研究が精力的に着手され、モデル試験機も大規模なものが設置されて三現主義に立った研究が成されるようになった。この開発研究の成果が10年、20年後に国産の世界的技術として生産工場で華を開くのである。

そのはしりが林による膨大なマンドレルミル塑性理論式の

開発である。これによって圧延の過渡現象を含む挙動が把握出来るようになった。内容は彼の著「鋼管の製造法」¹⁾に詳しく紹介されている。この後FEM解析手法を駆使した、より精度の高い解析に発展し、今世紀に入っても各方面で取り組みが継続されている。

4.2 見える技術で世界を越えたい

生産量の伸長と品質の向上は「ラーニング・バイ・ドゥーイング」で着実に世界マーケットで評価されるレベルへと進歩して行った。ちなみにこの工場は1981年に月産66,299Tのマンドレルミル生産量世界記録を達成し、今も破られていない。この背景には現場のオペレーターの技術習得と飽くなき改善努力が支えになっている。しかしこれだけでは技術で欧米を越えたとは言えない。何か形を、が筆者らの思いである。そこで取り組んだ第1はレデューサへの計算機制御の適用である。ストレッチ・レデューサは名のごとくスタンド間テンションを掛けながら外径を孔型ロールで縮経して行く圧延法であるが、先端と後端はテンションが充分掛からず肉厚が増大する。この増肉部分を短くするため、過渡状態で回転数を制御することを考えた。また圧延後の長さバラツキをミニマイズし、肉厚の精度を向上する制御も同時に導入した。今となれば当たり前のことだが、当時は先例の無いことで実験的にミニコンを工場に持ち込み実証してから実用化する手順を踏んだ。その結果、継目無鋼管ミルでは世界で初めて本格的な計算機制御が実用化されたのである²⁾。これらの技術開発には研究所で行われていた理論解析が大いに役立った。その後マンドレルミルの過渡応答制御などを加え、一段と寸法精度の向上に活用し、塑性加工学会論文賞を受賞するに至った³⁾。

しかしこれでは満足出来ずマンドレルミルに油圧圧下制御を導入しようと実機ミルでの実験を開始した。レデューサでの管端増肉部分をさらに短くするため、マンドレルミルの管両端の肉厚を中央部より油圧圧下で薄くしようとする発想である。圧延速度5m/secの管の管端約500mmの範囲で油圧圧下を作動させるのは相当の難題であったが、油圧サーボ技術の進歩もあって工業化に成功する事が出来⁴⁾、鉄鋼協会の依論文賞や米国IEEE学会論文賞等を頂く名誉に浴させて頂いた。この技術も世界に先駆けて開発したものであり、その後各社で導入された。

4.3 また欧州の技術に先行される

マンドレルミルは母管にマンドレルを挿入して8スタンド孔型ロールで外径と肉厚を同時圧延しているが、マンドレルの長手方向の動きは何ら拘束されず、圧延材とともに動いていく、つまり、フローティングしている。このため圧延材が



図4 リティインド・マンドレルミル

噛み込み、戻抜けする時にマンドレルの走行速度が変動し、スタンド間張力を変動させてしまう。この現象が圧延材の外径と肉厚に変動を与え、寸法精度を劣化させる。ロール回転数制御や油圧圧下では改善が不十分な事を経験的に知っていたが、手を加えられていなかった。

これに対しイタリアのカルメス氏がマンドレルを拘束し、一定速度で送り込む圧延法を開発し(図4)、1978年に製品外径339mmのダルミネ社の圧延ミルに導入して工業化を成功させた。つづいてフランスのパロレック社の小径マンドレルミルにも適用され、リティインド・マンドレルミルとして以後世界に普及して行く事になる。

また外国に出し抜かれたのだ。筆者らも追試の実験を実機ミルの簡易試験設備やモデルミルでやって知識を蓄積していたが、現ミルの改造はスペースや停機期間からとても期待出来ず、国際市場で品質競争力を失わないかと心配をしていた。

5 チャンスが来た、今度は真実世界へ

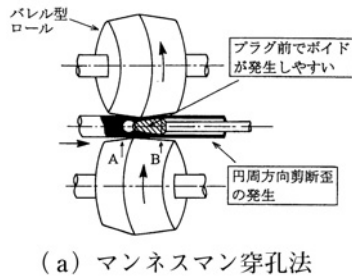
1980年には継目無鋼管の当社年間生産量が150万Tに達し、以後の需要予想では更に新ミルが必要と想定される状況になり、新ミルの検討が開始された。

5.1 世界一技術は穿孔技術の革新で

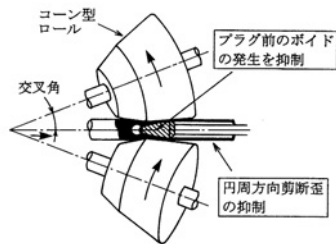
社内ではミルのサイズの選択で議論伯仲したが、結局製品外径140mmの小径マンドレルミルを新設する事になった。製品の寸法精度の向上に加え、かつて押し出し法で描いたステンレス鋼管も容易に圧延出来るミルを目指す決意で臨んだ。

リティインド・マンドレル設備技術はまた海外技術導入である。しかし操業技術の自社開発は総力を上げて取り組み、海外に依存しない事にし、それは実現した。工場全体の自動化や自動倉庫の導入、インライン熱処理などは当然自社開発し実機化した。しかし熱間圧延ラインでの技術目玉が欲しいとの思いから交叉穿孔方式の導入を経営にぶつけた。

交叉穿孔技術は当時モデルミルでの実験段階にあり、研究所の林が発想し、従来のマンネスマン方式との対比を地道に研究していた。図5にあるごとくその違いはマンネスマン方式がロール軸が穿孔管材に平行で、バレルロールの外径が概ね出入り口部分で同じであるが、交叉穿孔法はロール軸が交叉し、ロールの外径の出口部分が大きくなっている事である。



(a) マンネスマン穿孔法



(b) 交叉穿孔法

図5 マンネスマン穿孔法と交叉穿孔法

この結果マンネスマン方式のロール周速度の穿孔方向速度は穿孔圧延される管材より遅くなり、ブレーキが掛かる為材料は捻れる変形となる。交叉穿孔法はこれが無い。言い換えると交叉穿孔法は押し出し法に近い変形プロセスがとれ、難加工材のステンレス材等も品質良く製管出来る事になる。これらの優位性をモデル実験で証明しつつ、実機導入を説得したのである。

交叉穿孔法の唯一の欠点はロール軸が交叉しているから設備が複雑かつ巨大化して投資規模が大きくなる事であった。しかし押し出し法に近い加工性能による得られる利点と便益を評価して実機導入が決断されたのである。このとき交叉角度10度であった。1982年10月12日当社にとって2基目のマンドレルミル工場は大過なく自力で立ち上った。独自開発した交叉穿孔法はその後世界中のほとんどの新設ミルで導入されるまでになっている。

5.2 大河内賞を受賞しても満足出来ない

上記のミルは大河内賞を頂くが、この時点では特に国内において新規参入の川崎製鉄を含め各社で続々と新鋭のマンドレルミルを導入していた。一方当社は製品外径426mmのミルが老朽化しており、この更新を念願しつつ新技術の開発を

進めていた。継目無鋼管事業はこの後幾多の事業上の困難に遭遇するが、1997年に交叉角度20度の交叉穿孔機と世界最大の426mmの製品外径が圧延出来るリテインド・マンドレルで構成された新鋭ミルが当社の和歌山製鉄所で操業を開始し、継目無鋼管圧延技術力世界一を証明したのである。

1968年にすったもんだの末、国内初のマンドレルミルが産声を上げて以後、世界最高峰に登りつめ、見える形で証明するのに30年の月日を費やした事になる。

6 あとがき

継目無鋼管製造にマンドレルミルの海外技術導入から海外技術を超えきるまでの過程を、その大半に関わって来た幸運な筆者が振り返る役を担わせていただいた。

マンドレルミルというポイントになる技術を導入し、事業として成り立たせるのは、第一に現業第一線のオペレーターから経営者までが、ラーニング・バイ・ドゥーイングを徹底的に実行してきた人とその心である。このことは鉄鋼業の文化のみならず日本の製造業の基盤であるし優位性であり、今も変わるまい。第二は古いと言われようが、追い付け追い越せという明確な目標設定と現実とのギャップを埋める具体的行動である。それは全員の意識でもあるし、技術開発の最大の動機付けであったと思われる。

この二点はこれからも生き続ける教訓であると思うが、更にビジネス・モデルを考えるように科学的、論理的、理論的なアプローチを加えて、今日の困難を乗り越えて頂きたいと願い、筆を置く事にしたい。

参考文献

- 1) 林千博：鋼管の製造法，叢書 鉄鋼技術の流れ-5，日本鉄鋼協会，(2000)
- 2) C.Hayashi, M.Utakoji, T.Yamada and K.Yoshioka：The Sumitomo Search, 31 (1985), 31.
- 3) 林千博，山田建夫，宇多小路勝，平尾文樹：塑性と加工，24-273 (12983), 1078.
- 4) C.Hayashi, M.Utakoji, T.Yamada, M.Watanabe and R.Nakanishi：Trans.ISIJ, 28 (1988), 440.

(2001年9月13日受付)