



21 世紀の溶接鋼管の製造法を展望する

Perspectives on Welded 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については既に展望したが、その続報として溶接鋼管の製造法について展望する。

溶接鋼管の製造法は鍛接法、電縫溶接法そして潜弧溶接法に大別することが出来る。鍛接法は1920年代にフレッツ・ムーンミルとして近代化され、1950年代には米国、エトナスタンダード社により量産ミルに革新され、一貫製鉄所において大量に生産されるホットコイルを処理する戦略ミルとして未曾有の活況を呈したが、1973年以降の2度のオイルショックを契機に衰退の一途をたどっている。このミルに明るい未来は期待できない。電縫溶接法では1960年代の低周波溶接から高周波溶接への転換が電縫鋼管80年の歴史の中で最も画期的な技術革新であったが、今なお発展期にあり、今後は中径電縫管ミルの誘導溶接化、小径電縫管ミルのケージミル化の流れが加速されよう。現在のところ、小径電縫管ミルのケージミル化の動きは我が国の方が先行しているが、中径電縫管ミルの誘導溶接化の動きはむしろ欧米の方が一歩先行しているとするのが公平な見方であろう。潜弧溶接法による大径鋼管の製造法にはUOE成形法、ピラミッドロール成形法、そしてスパイラル成形法があるが、特に、UOE潜弧溶接法は1960年以降のパイプライン建設プロジェクトの具体化とともに大きく発展してきた。そして、その発展は製管技術のみならず、製鋼技術、連続鋳造技術、制御圧延技術、制御冷却技術の目ざましい進歩を促し、我が国の大径溶接鋼管の製造技術を世界一の地位に押し上げた。今後はX100級の高強度、高靱性鋼管の製造が当面の課題となる。

2 鍛接管ミルの現在と将来

1825年、英国のC. ホワイトハウスによって発明された突

き合わせ鍛接法（ベルマウス式鍛接法）は1世紀を経過して1921年、米国のJ. ムーンによって近代的な連続製管方式に革新された。そして1950年代前後、エトナスタンダード社のW. ロツダらによって従来技術を大きく革新するロータリホットソーやロータリスクリュウキッカが開発され、スタンド数も6スタンドから12～14スタンドへ倍増され、製管速度は400m/minも可能となった。また、酸素をジェット噴射するウェルディングホーンやエッジブロー装置が開発され、能率のみならず、品質、自動化、コスト省力化の面で著しい進歩を見た。そして数々の新技術を取り入れたフレッツ・ムーンミルは従来ミルとは比較にならない量産ミルに変貌し、アメリカ、ヨーロッパおよび日本において建設ラッシュが続いた。

我が国で最初にフレッツ・ムーンミルを導入したのは日本鋼管であった。1954年、日本鋼管（京浜）は6スタンドの4インチミルを導入し、専用の帯鋼工場とともに操業を開始した。9年おくれで1963年、住友金属（和歌山）で12スタンドの4-1/2インチミルが稼働し、当時最新鋭のロータリホットソーが採用された。この時、同時に垂鉛メッキ設備が稼働した。翌1964年、日本鋼管（京浜）でも第2の鍛接管工場として6スタンドの4-1/2インチミルが操業を開始した。このミルは1982年に10スタンドミルに、1994年に8スタンドミルに改造されている。続いて1969年、新日鉄（君津）および住友金属（鹿島）で相次いで14スタンドの4-1/2インチミルが稼働、更に、1970年、新日鉄（名古屋）、1971年、川崎製鉄（知多）で同じ仕様のミルが稼働した。いずれも実質経済成長率6%以上という高度成長期を背景に、一貫製鉄所において大量に生産されるホットコイルを処理する戦略ミルとして未曾有の活況を呈した。7基のミルのうち5基は12ないし14スタンドから構成される4-1/2インチミルであり、公称月産能力25,000トン、最大ミル速度450m/minクラスの最新鋭ミルであった。

しかしながら活況は10年も続かなかった。1973年以降の2度のオイルショックを契機に鍛接鋼管市況は低迷し、各ミルは50%を割り込む低操業時代に突入し、エネルギーコストの高騰と戦いながらきわめて過酷なサバイバル競争時代を迎えた。鍛接管プラント最大の問題点は加熱炉の燃焼効率の低いことにあり、廃ガスを利用する予熱帯を有する近代ミルでもその熱効率はたかだか35%程度であった。各社とも燃料原単位の低減に懸命の努力を重ね、O₂自動制御計の導入、旋回バーナの採用、炉体の断熱強化、燃焼制御システムの開発などあらゆる対策を講じてきた。鍛接鋼管全盛時代には我が国において7基のフレッツ・ムーンミルが稼働し、フル生産を続けたが、1982年、住友金属（和歌山）および日本鋼管（京浜）の1号機、1985年、新日鉄（名古屋）のミルが相次いで休止し、各社1基ずつの4基体制となったが、1985年、住友金属（鹿島）の4-1/2インチミルは熱間の高周波誘導溶接ミルに大改造され、15年遅れて2000年、川崎製鉄（知多）の4-1/2インチミルも温間の高周波誘導溶接ミルに改造された。

住友金属（鹿島）のフレッツ・ムーンミルではエネルギー危機に際し、高騰し続けるエネルギーの抜本的削減をはかるため、帯鋼のエッジ部のみを誘導加熱するエッジヒータによる低温操業法を開発し、1979年に実用化したが、更に、5年間の現場試験を経て、1985年、世界最初の熱間電縫管ミルに

大改造した。熱間電縫鋼管ミルのレイアウトを図1に示したが、帯鋼はスケルプ加熱炉により850℃前後に加熱され、5スタンドの2ロールミルから構成される成形、溶接ミルによって熱間で高周波誘導溶接し、うち、外面のビードを切削除去した後、走行しながら再加熱し、続いて24スタンドの3ロール・ストレッチレデュサで外径、肉厚を調整する。熱間の高周波誘導溶接ミルに大改造した結果、加熱温度は1,300℃から850℃へドラスチックに低下し、燃料原単位は抜本的に節減出来た。同時に接合面の品質は常温の電縫鋼管並に向上した。熱間電縫溶接ミル開発の最大のブレークスルーポイントは内外面ビードの切削機構の開発であり、特に内面ビード切削バイトの長寿命化対策に苦戦したが、最終的にはディスク型のバイトを採用し、管軸方向にスキュー角を与え、ビードの切削抵抗で自転する機構を開発してこの問題をクリアした。内面ビードの切削機構の概略を図2に示した。この開発の経済的効果としては圧力配管用あるいは機械構造用の炭素鋼管など高グレード品種を冷間の高周波誘導溶接から熱間の高周波誘導溶接に転換することにより生産性は飛躍的に向上し、耐溝食性、二次加工性に優れた高品質の鋼管の高速製管に成功した。また、一般配管用炭素鋼管については高温のフレッツ・ムーン鍛接法から低温の熱間高周波誘導溶接法に転換することにより、抜本的な燃料原単位の低減が実現出来たばかりでなく、スケールロスの減少、加熱炉メンテ

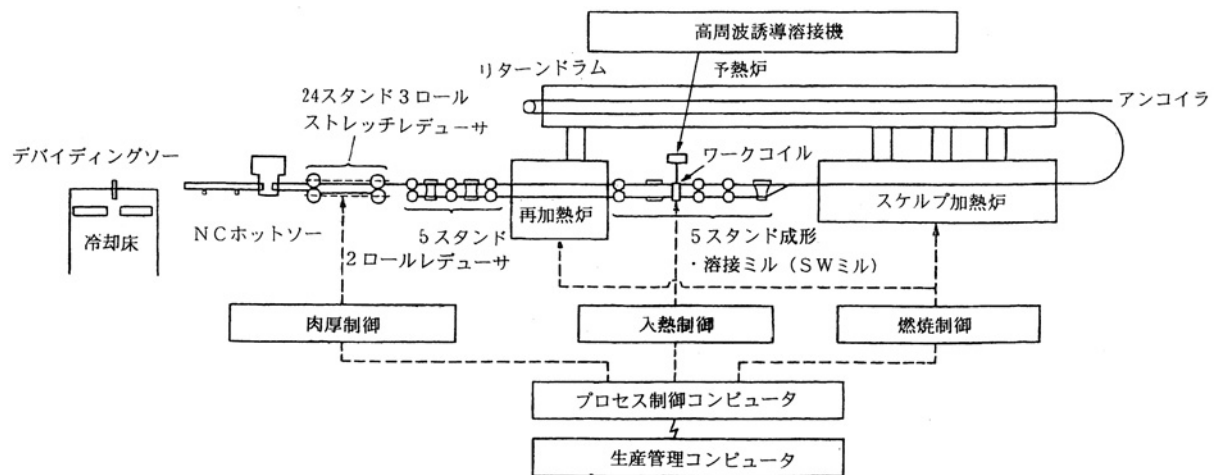


図1 熱間電縫鋼管ミルのレイアウト

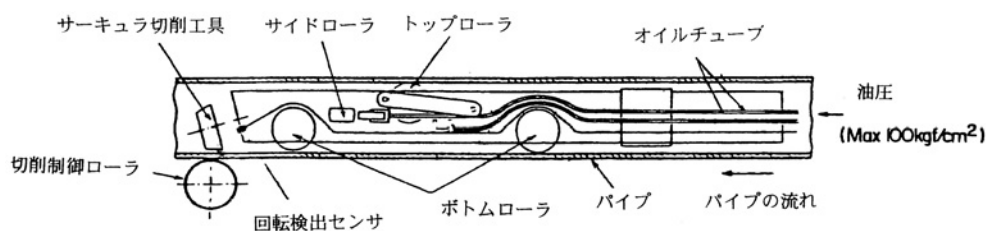


図2 内面ビードの切削機構の概略

ナンス費の低減などコスト合理化が実現した。熱間電縫鋼管は熱間で成形、溶接、絞り圧延されるため、素材は加工硬化せず、溶接部と母材部に硬度差がないので、曲げ加工性、ねじ切削性は鍛接鋼管と同等であり、一般電縫鋼管より良好である。溶接部のミクロ組織も母材部と同一であり、均一な組織が得られるので鍛接管同様、耐溝食性に優れる。また、帯鋼のエッジ面を高周波誘導で溶融接合するのでエッジ面のスケール、スラグはビードとして排出され、接合部の信頼性は高く、フレア加工、バルジ加工、絞り加工など過酷な二次加工も可能である。もちろん、鍛接鋼管と同様に高速製管が可能であり、生産性は一般電縫鋼管より高く、ストレッチレデュースの導入により小径管の低コスト化がはかられる。

2000年建設の川崎製鉄(知多)の温間高周波誘導溶接ミルの成果についてはいまだ報告されていないが、超微細組織を有し、二次加工性に優れた鋼管(HISTORY鋼管と称する)を市場に提供することを目的としており、これによって我が国のフレッツ・ムーンミルはまた一つ消え去り、新日鉄(君津)およびNKK鋼管(京浜)の2基のみとなった。いずれにせよ、フレッツ・ムーンミルには明るい未来は期待出来ない。

③ 電縫管ミルの現在と将来

電縫溶接法では低周波溶接から高周波溶接への転換が電縫管80年の歴史の中で最も画期的な技術革新であり、品質と生産性の両面において大きな変革を遂げた。

1940年代末、欧米では電磁誘導により非接触で溶接部を加熱する中周波誘導溶接方式が考案された。フランスのラルール方式は4kHz、アメリカのヨード方式は10kHzであり、誘導電流で加熱して圧接する原理であったが、溶接機は高価であり、品質は低周波電縫鋼管に劣ったので普及しなかった。一方、サマツール社のW.ラッドは400kHzの高周波による誘導加熱によってアルミニウム管の溶接を研究したが成功せず、1952年、結局、接触子を使って直接通電して成功した。その後、サマツール社はインピーダを使ってアルミニウム管の高周波誘導溶接にも成功している。鋼管の高周波溶接としては1956年、米国のリパブリックスチールおよびアクメチューブがその溶接機をサマツール方式に変更して稼働させたのがその最初であり、以後、急速に普及することになる。話は前後するが、アルミニウム管の高周波溶接はサマツール社より早く、ヨード社でも成功していた。ヨードのT.クロフォードが発明し、1951年に特許申請し、1954年に承認されたもので450kHzの高周波をアルミニウム管の周囲に巻いたコイルに通して誘導溶接に成功したが、ヨード社は鋼管への適用については追求しなかった、また、サマツール社も直接

通電方式に専念し、誘導方式については追求しなかったのがこの隙に米国、西欧、日本の溶接機メーカーが高周波誘導溶接機の製造、販売を始め、主として小径電縫鋼管の設備として普及した。高周波抵抗溶接法と高周波誘導溶接法を図3に示した。

我が国では1950年代後半、三宝伸銅が非鉄管の製造に高周波を採用したのが最初であり、鋼管では1961年に東洋鋼管、日本パイプ、丸一鋼管、東芝鋼管、松下電工などがサマツールの高周波抵抗溶接機あるいは国産の高周波誘導溶接機を採用した。大容量の高周波電源が開発されると高炉メーカーもようやく重い腰を上げ、急ピッチで低周波を高周波に切り替えた。なかには新設の低周波をわずか1年未満で高周波に切り替えたところもあった。1961年より設置し始めた高周波溶接機は1964年には実に67基となり、低周波の49基をはるかに凌駕することになった。1958年建設の日本特殊鋼管(光)の14インチミルは1967年、16インチミルにサイズアップされた時に高周波抵抗溶接ミルとなり、更に、1967年に20インチ、1980年に24インチまでサイズアップされた。1961年建設の住友金属(和歌山)の16インチミルは1966年に18インチミルにサイズアップされた時に高周波抵抗溶接ミルに改造され、更に、1970年に20インチ、1984年に24インチにサイズアップされた。また、1964年には日本鋼管(川崎)の16インチミルと川崎製鉄(知多)の20インチミルが稼働したが、この2つのミルには実用化されたばかりの高周波抵抗溶接機が採用された。日本鋼管(川崎)の16インチミルは1966年にケージロールフォーミング方式の20インチミルに更新され、更に、1984年には24インチにサイズアップされた。また、川崎製鉄(知多)の20インチミルは現在、14インチミルとして使用されている。

高周波溶接の特徴は電流を突き合わせたエッジに集中させることにつぎるが、現場操業としては低周波時代には全く想像することが出来なかった利点があった。高周波電縫溶接を低周波電縫溶接と比較すれば

- (1) 酸洗など帯鋼材料の表面処理が不要である。
- (2) 高速溶接が可能となり、製管能率は顕著に向上する。
- (3) 低合金鋼の溶接も可能であり、きわめて広い範囲の材質

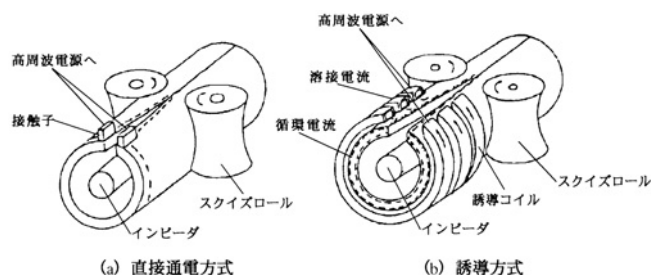


図3 高周波抵抗溶接法と高周波誘導溶接法

が溶接出来る。

- (4) 薄肉、厚肉、小径、大径を含めて製造可能範囲が広い。
- (5) 内外面ビードが小さく、ビードの切削が容易になる。
- (6) 電極の改削が不要となる。

低周波溶接では電極輪の切削が最大の難点であったが、高周波の導入によりいとも簡単にブレイクスルー出来た。更にもその上、従来の低周波溶接機は僅かな改造で高周波溶接機への転換が可能であり、ほんの数年の間に従来の低周波溶接機は8インチ以上の中径サイズは直接通電方式、8インチ以下の小径サイズは誘導方式の高周波溶接機に転換された。

高周波溶接によって薄肉管の溶接が容易になったので、特に中径サイズのロール成形に部分的あるいは全面的にケージフォーミング方式を採用するミルが増加した。ケージフォーミングミルは1950年代後半にヨーダ社とトーランス社によってそれぞれ独立に開発され、多数の小径ロール群をライン方向に密に並べ、ダウンヒル成形して成形材の各位置を無理なく均一に成形する。帯鋼エッジ部にエッジストレッチがないため、従来の成形法に比較して所要動力も少なく済み、薄肉成形性に優れ、特にロールのサイズ共用範囲が広く、ロール替え頻度も少なく済み。トーランスのケージミルは経済性を徹底的に追及した構造であり、駆動ロールはブレイクダウンロールとフィンパスロールのみという徹底ぶりであった。これに対してヨーダのケージミルは成形過程の幾何学的相似性に着目し、ロールの2軸方向の位置決め調整を1軸化することによりロールの調整時間を短縮し、セッティングの再現性とミル剛性に優れる。我が国最初のケージミルは1966年、住友金属(和歌山)で稼働したトーランスの48インチ・フルケージミルであり、薄肉大径鋼管の製造に威力を発揮し、後述するTAPSプロジェクトで大活躍したが、1979年に休止した。また、高周波溶接によって低周波が苦手とする厚肉溶接も可能となり、厚肉の新規需要が広く出てきたので成形ロールやシームアニーラ冷却ゾーンなどに特別設計を配慮した特殊電縫管ミルが計画され、先ず、1965年、住友金属(和歌山)の6-5/8インチミルが稼働し、続いて1967年、日本鋼管(京浜)の6-1/2インチミル、1968年、川崎製鉄(知多)の6-5/8インチミル、富士三機(名古屋)の6-5/8インチミルおよび新日鉄(君津)の4-1/2インチミルが稼働した。また、電縫管ミルの段取り替え回数を減らし、生産性を高める方法として溶接機にホットストレッチレデュースを接続したプロセスがドイツで開発され、1963年、富士三機(名古屋)、1964年、八幡鋼管(光)、川崎製鉄(西宮)が導入した。

1975年から1985年にかけて我が国の高炉各社は電縫管ミルのサイズアップと厚肉化をはかりながら各所に分散する電縫管ミルを集約し、要員合理化をはかってきた。先ず、川崎

製鉄は1972年から1973年にかけて西宮の電縫管設備の一部を廃棄し、残りを知多に集約した。住友金属(和歌山)は1980年、4ラインの小径電縫管ミルを2ラインに集約し、一般構造用鋼管の生産を日本パイプに移した。新日鉄は1982年、中津の電縫鋼管ミルを名古屋へ移設、更に1983年、名古屋、君津、光の16基の電縫管ミルラインを7ラインに集約し、要員半減を実現した。1994年、新日鉄は東芝鋼管の小径電縫管設備を譲渡され、名古屋の小径電縫管ミルを分社化して日鉄鋼管を設立した。このような集約化、統合化によって1975年当時、およそ165基稼働していた我が国の電縫管ミルは1985年には125基となり、1995年にはおよそ110基まで集約された。1999年、日本鋼管(京浜)の電縫鋼管部門の分社化、住友金属(和歌山)の電縫鋼管部門と日本パイプ(市川および尼崎)の合併が実現し、それぞれNKK鋼管、住友鋼管として新発足した。

このように、ここ20年の間に電縫管ミルの集約化、統合化、分社化が繰り返されたが、注目すべきは革新的な電縫管ミルの建設が相次いだことである。先ず、1978年、川崎製鉄(知多)にヨーダ社の26インチ・フルケージミルが建設された。これは1スタンドのブレイクダウンロールの後にエッジベンディングロールを配置し、その後の3スタンドのフィンパスロールとの間を数10個のケージロールで接続したフルケージミルであり、肉厚・外径比1%程度の高強度薄肉ラインパイプなどの成形を安定させ、最大径26インチ、最大肉厚22mmまでの製造可能範囲を有する。このミルは1990年に改造され、ラインパイプなどの鋼管のみならず、相当量の大型コラムを生産している。注目すべきは1986年、新日鉄(名古屋)に建設された16インチミルである。このミルは製管ミル本体のみならず精整、検査、NDIラインに現代における最新の技術を結集し、集大成したミルであり、中径ミルとしては初めてWベンド法を採用したセミケージミルであり、ロール交換にも斬新な設計が織り込まれ、ロール替え時間を短縮した。

溶接には自動制御の採用はもちろんのこと、サイズによって抵抗溶接、誘導溶接切り替え可能であり、1,300kWの大容量の溶接電源を有する。中大径サイズで高周波誘導溶接出来るミルは我が国においてこのミルが最初であり、高く評価出来る。なお、1989年改造の日本鋼管(京浜)の12インチミルも抵抗、誘導切り替え可能な兼用ミルであったが、1995年に休止している。1993年には丸一鋼管(東京第2)に15インチクラスの丸角兼用ミルが建設された。このミルはマンネスマン・メーアにより開発されたリニアフォーミング方式(MMミル)を設計のベースにした誘導溶接ミルであり、第2世代のセミケージミルと言える。ケージロールの動きをユニットとして単純化し、APCによって調整の再現性を

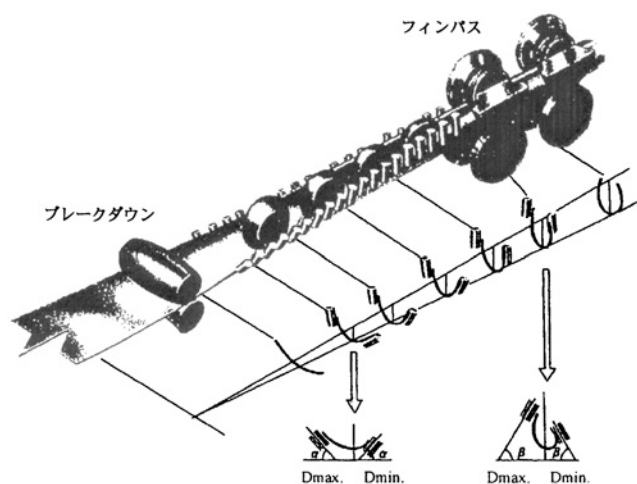


図4 リニアフォーミングミルの概略

かり、実用性を高めている。ロール交換にインナカセット方式を採用し、ロール交換は30分程度で終わることが出来、オフラインのロール組み替えも自動化されている。リニアフォーミングミルの概略を図4に示した。しかしながら、欧米の中大径電縫鋼管ミルではセミケージ方式の高周波誘導溶接ミルが広く普及しており、例えば、マンネスマン・ヘッシュ（デュッセルドルフ）の20インチミル、BSC（ハートルプール）の20インチミル、アメリカンスチールパイプ（アラバマ）の24インチミルはセミケージ方式の高周波誘導溶接専用ミルであり、我が国の中大径電縫鋼管ミルは欧米と比べてむしろおくれをとっている。

また、小径電縫管ミルの分野では、ブレイクダウン成形におけるロールの共有化をはかり、かつ、成形機能の向上を期待してフレキシブルフォーミングミル（FFミル）が開発された。この成形法は中田製作所の開発によるもので、ロールプロフィールにインボリュート曲線を導入し、ロールの設定位置を数値制御して滑らかで精度の高い変形を実現しようとする。1988年、川鉄建材（知多）の3インチミル、1991年、日新製鋼（尼崎）の4インチミル、日鉄鋼管（名古屋）の2-3/8インチミル、鋼管建材（姉ヶ崎）の4インチミル、1992年、日鉄建材（君津）の5インチミル、1996年、日金工（衣浦）の12-1/2インチミル、日本パイプ（市川）の7インチミル、1997年、同所の4インチミル、1998年、同じく日本パイプ（尼崎）の2インチミルその他に相次いで導入され、西欧を含めて既に20基以上を稼働させている。なお、日金工（衣浦）の12-1/2インチFFミルはTIG溶接である。フレキシブルフォーミングミルの成形原理を図5に示した。

また、最近では厚肉品の製造を可能とするミルの建設または改造が相次いでいる。その中では日本鋼管の小径電縫管ミルが評価出来る。1987年、日本鋼管（京浜）で4インチの厚肉ミルが操業を開始した。このミルは肉厚／外径比25%の

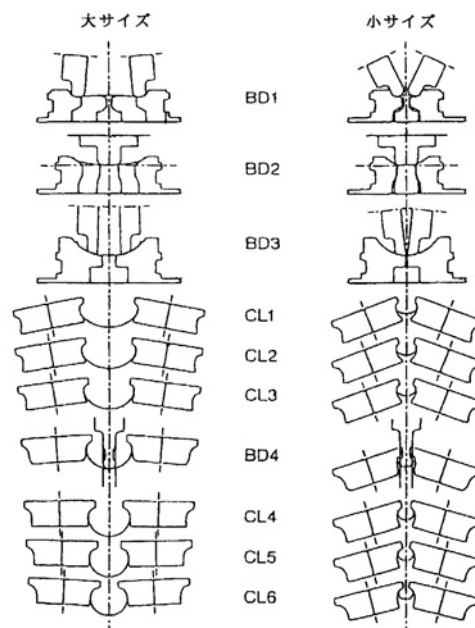


図5 フレキシブルフォーミングミルの成形原理

厚肉鋼管の製造が可能であり、最大肉厚は13.5mm、このクラス最大である。成形前段のバーチカルロールによる予備成形とエッジ部の充満圧延によって厚肉のエッジ成形と溶接を可能としている。同じく肉厚／外径比20%クラスの小径厚肉電縫管ミルとしては1993年に建設、稼働した住友金属（和歌山）の2インチミルを挙げることが出来る。このミルでは電縫管ミルの後方に6スタンドの冷間3ロールサイザを接続し、これによって10%程度の外径リダクションを与え、小径厚肉になると困難になる溶接の問題を回避する。冷間3ロールサイザは同じく1993年に稼働した川崎鋼管（豊岡）の5/8インチミル、1996年改造の新日鉄（君津）の4インチミルにも採用されている。なお、1991年建設の日鉄鋼管（名古屋）の2-3/8インチFFミルでは4ロールサイザが接続している。

今後は中大径電縫鋼管においても高周波抵抗溶接から誘導溶接への転換がはかられ、小中径電縫鋼管においてもケージミル化の動きが加速されよう。

4 潜弧溶接ミルの現在と将来

1927年、初めて大径溶接鋼管の製造に成功したA. O. スミス社（ミルウォーキー）の26インチミルが採用した溶接法はフラッシュバット溶接法であつが、1930年、USスチール社傘下のナショナルチューブ社（クリスティパーク）の30インチミルの溶接には潜弧溶接法が初めて採用された。両者の工程には溶接法の相違はあるもののきわめてよく似ており、その後建設された大径溶接鋼管工場の標準となった。これら2

つの工場の最初の大量受注は天然ガスのラインパイプであった。しかし、ナショナルチューブ（クリスティパーク）は何故か1932年より休止し、A. O. スミスは1940年代後半まで大径溶接鋼管の生産を独占した。1944年、米国テキサスのガルフ湾から東部に原油を輸送するビッグインチ・パイプラインと石油製品を輸送するリトルビッグインチ・パイプラインが建設された。1947年、ニューメキシコ州とテキサス州西部のガス田とロサンゼルスを結ぶ30インチのビゲストインチ・パイプラインが建設され、このラインパイプの少なくとも一部はコンソリデーテッドスチールによって製造された。製管工程はナショナルチューブ（クリスティパーク）とほぼ同じであるが、ピラミッドロールで成形した。定径には水圧拡管機が採用され、真円度と真直度を確保し、ここに1930年代から求めてきた定径法がようやく実現した。1948年、リパブリックスチール（ガスデン）にピラミッドロール成形法による30インチミルが稼働した。製管工程はコンソリデーテッドスチールとほぼ同じで水圧拡管機も設置したが、溶接工程では外面潜弧溶接の後、内面潜弧溶接を行った。溶接速度の向上をはかるため、芯線を2本使用するタンデム潜弧溶接法が採用され、これも広く普及したが、ピラミッドロール成形法は成形工程に長時間を要し、仕上がり製品の形状にも難点があり、以後、建設される工場ではプレス成形法が主流となった。

1948年、カイザスチール（ナパ）、1950年、ナショナルチューブの2工場では大径溶接鋼管の製造に再びプレス成形法を採用した。両社とも最大径は36インチ、最大肉厚は1/2インチであり、両エッジを成形ロールで曲げた後、成形プレスでU成形し、次にO成形して溶接し、エキスパンドするいわゆるUOE方式を採用した。両社には成形ロールの容量に大きな相違があり、カイザはUプレスが450トン、Oプレスが5,000トンであったが、ナショナルチューブはUプレスが2,000トン、Oプレスが18,000トンあった。カイザのUプレスおよびOプレスは自社設計、ナショナルチューブのUプレスはバーソン製、Oプレスはハイドロプレス製であり、成形プレスの型式、容量にはそれぞれ独自の考え方があったが、以後、1950年から1960年にかけて建設されたUSスチール、アメリカンブリッジ（オレンジ）、英国のサウスダーラムスチール（ストックトン）、USスチール、コンソリデーテッドウエスタン（プロボ）、リパブリックスチール（ガスデン）、ドイツのマンネスマン（ミンデルハイム）、フランスのロレーンエスコ（セダン）、カナダのウエンランドチューブ（ウエンランド）、ベスレヘムスチール（ステイルトン）、カナダのカムローズチューブ（カムローズ）、イタリアのイタルシーダ（タラント）などの36インチから42インチまでのUOE鋼管設備にはカイザ型かバーソン型のいずれかが多

く採用された。

これらの大径溶接鋼管は1950年に完成したトランスアラビア・パイプライン、1967年完成のトランスアルパイン・パイプラインはじめ大小いくつかのパイプラインの建設に供せられた。パイプラインは径を拡大して輸送能力を増やすと輸送費は顕著に減少する。ポンプステーションを増加させても輸送能力は増すが径の拡大ほどの効果はない。そのため、径が次第に大きくなる傾向があった。大径化が進行するに従って初期に主流であった両エッジのロール成形加工も強度的に無理となり、A. O. スミス方式のクリンピングプレスが再び採用された。また、Uプレス、Oプレスの容量も大きくする必要があり、特にOプレスは周長リダクションを与えてはじめて完全な成形が出来るとの考えからプレス容量も大幅に増強した。水圧拡管機では水の充填に時間を要し、また、高強度の鋼管では管端付近の拡管が困難になるのでメカニカルエキスパンドの採用が主流になった。メカニカルエキスパンドでは鋼管内に装入した円筒形に並ぶくさび型のセグメントを中心の円錐形状の軸を油圧で引くことによって管径を拡大する。鋼管の両側に1基ずつ設置してそれぞれ管端から中央までの拡管を分担する。このようにして現在の標準的な大径溶接鋼管の製造工程が完成した。現代の標準的な大径鋼管の製造工程を図6に示した。

さて、我が国で最初にUOE製管法を採用したのは日本鋼管（京浜）であった。1960年、日本鋼管はカイザの40インチミルを導入し、稼働させた。このミルは後に42インチミルに改造された。1970年、日本鋼管（福山）の56インチミル、新日鉄（君津）の56インチミル、1974年、住友金属（鹿島）の64インチミル、川崎製鉄（千葉）の64インチミル、更に1979年、住友金属（和歌山）の42インチミルが相次いで稼働した。住友金属（鹿島）の64インチミルは1987年に60インチミルに改造された。また、住友金属（和歌山）の42インチミルおよび日本鋼管（京浜）の42インチミルは1987年に休止した。我が国のUOE設備では日本鋼管のリンクアーム方式を別としてロッカアッセンブリ方式が多く採用されてきたが、住友金属（和歌山）の42インチミルはサイドシリンダ方式であった。この方式は設定の自由度が高く、ロッカアッセンブリ方式に比較して成形可能範囲ははるかに広く、厚肉側はもちろん、薄肉側の成形能にも優れる。成形工程の3方式を図7に示した。なお、電縫鋼管用に開発されたケージロールフォーミングによって成形し、高周波電縫溶接で仮付け溶接し、その後内外面を潜弧溶接し、水圧拡管する製管法が開発され、1965年、カナダのビッグインチで操業を開始した。我が国では1966年、住友金属（和歌山）が48インチのケージミルを導入した。このミルは1979年廃棄されるまでおよそ13年間稼働した。

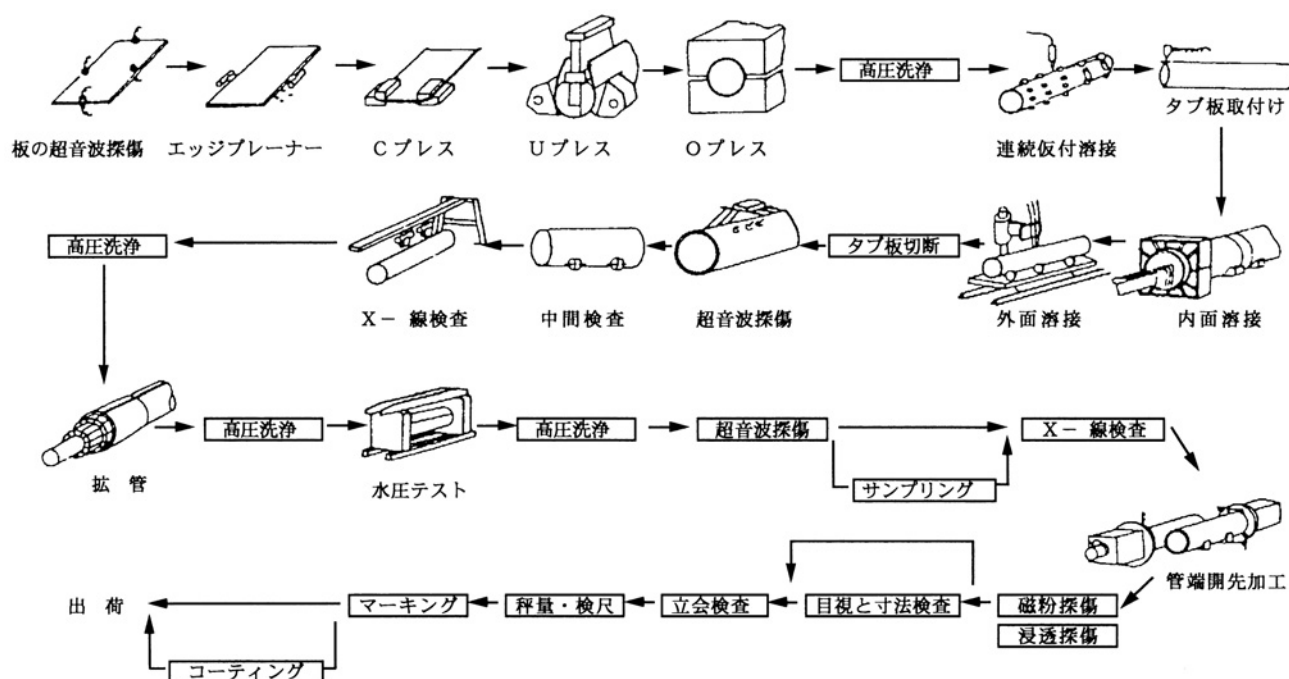


図6 標準的な大径鋼管の製造工程

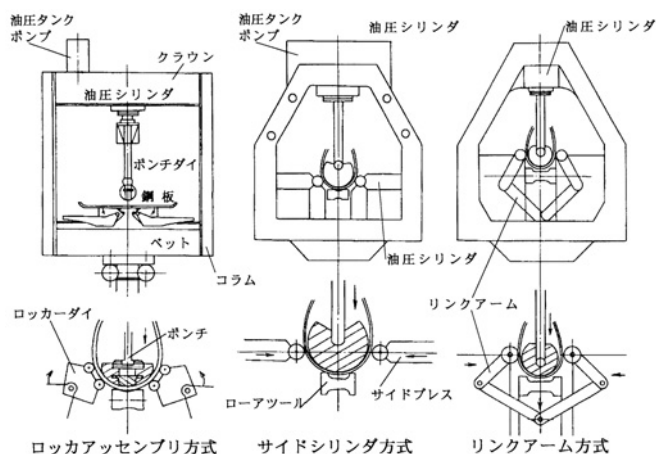


図7 U成形工程の3方式

1968年、トランスアラスカ・パイプラインシステム (TAPS) の大プロジェクトが策定され、48インチのラインパイプが必要になった。1970年当時、48インチを超えるミルは計画中のUO設備を含めてドイツに1社、日本に3社あるだけであった。更に、鋼種はX60およびX70で、最低降伏点は 42.2 kg/mm^2 および 49.2 kg/mm^2 という高張力鋼である上に、真冬には -70°C になる酷寒の地における敷設になるので厳しい低温靱性が要求され、また、現地溶接のため、炭素当量に厳しい仕様が要求された。TAPSはアメリカ、ドイツ、日本の各社と打ち合わせを重ねたが、アメリカ、ドイツとは合意に達せず、最終的には日本の3社すなわち、住友金属 (和歌山)、日本鋼管 (福山) および新日鉄 (君津) の3社でおおよそ50万トンの全

量を受注した。1969年、先ず、住友金属 (和歌山) の48インチ・ケージミルで生産を開始し、1970年、建設して間もない新日鉄 (君津)、日本鋼管 (福山) の56インチミルが後から合流する形となった。日本3社はこの厳格な仕様に対して、低C、低S鋼を使用し、加熱から圧延終了までの圧延温度と圧下スケジュールを制御し、各社それぞれ独自の制御圧延法を開発して厳格な仕様をクリアし、全量を完納した。我が国の鋼管3社の実績は寒冷地ラインパイプの製造法の端緒を切り開いたものとして高く評価され、世界の溶接鋼管の歴史に永くその名を残す快挙となった。

さて、TAPSプロジェクトは当時としては最高強度のX65であり、 -10°C の低温衝撃試験規定の厳しいものであったが、その後のプロジェクトではますます大径化、厚肉化、高強度化、高靱性化が要求されるようになった。前述したように、UOE大径鋼管の製造は1950年から主としてアメリカおよび西欧で開始され、数多くのUOEミルが建設され、稼働したが、大径化、厚肉化、高強度化、高靱性化の要求に応えられるUOEミルはアメリカに1基、ドイツに1基、イタリアに1基、我が国に4基あるのみであり、いずれも1970年以降に建設されたミルに限られる。すなわち、1970年建設の日本鋼管 (福山) の56インチミルおよび新日鉄 (君津) の56インチミル、1971年建設のイタリアのイタルシダ (タラント) の56インチミル (現在は62インチ)、1974年建設の住友金属 (鹿島) の64インチミル (1987年、60インチミルに改造) および川崎製鉄 (千葉) の64インチミル、1977年改造のマンネスマンレーレン (ミュールハイム) の64インチミルおよび

USスチール(テキサス、ベイタウン)の48インチミルである。

UOEミルの歴史の流れを総括すれば、まず、外径が36インチから64インチに大径化し、同時に管長は40フィートから60フィートに長尺化し、肉厚も1インチから1.5インチに厚肉化した。そしてこれにともなって端曲げ方法はロール方式からプレス方式に替わり、Oプレスは18,000トンから60,000トンに巨大化し、拡管方法は水圧方式からメカニカル方式に替わった。潜弧溶接法も2電極から4電極に替わり、タンデム溶接が一般化した。また、溶接部の品質保証方法もX線透視検査から超音波探傷とX線透視検査の併用に変更された。

さて、ラインパイプの大径化、厚肉化、高強度化、高靱性化の要求に対応するため、低炭素のパーライトフリー鋼、極低S溶製技術、介在物の形態制御技術、中心偏析低減対策、強力な圧延機による制御圧延技術、効率的な制御冷却技術などが開発され、また、連続鋳造法の適用拡大により、高品質で経済的な高級ラインパイプの製造が可能となった。一方、硫化水素を多量に含むガス田、油田が発見され、耐HIC(硫化水素割れ)性能に優れた腐食に強いラインパイプの開発を促した。この間にあって、仕上げ温度の低下も高強度化と高靱性化に有効であることが判明し、フェライト+オーステナイトの2相域圧延も行われたが、2相域圧延は降伏比の上昇やセパレーションの増加などの副作用があり、次第に適用されなくなった。制御冷却技術は1980年代に大きく進歩し、制御圧延との組み合わせはTMCP技術として体系化され、更なる高強度化、高靱性化、厚肉化に大きく貢献した。TMCP鋼ではオーステナイト域で仕上げ圧延し、その後の強冷却により高強度化をはかる。その結果、材料はフェライト+パーライト細粒化による強化から変態強化、すなわち、ベイナイト(アシキュラフェライト)組織の活用による強化に変化した。高強度化をはかるためにC当量を高めれば靱性が劣化するので、TMCP鋼ではC当量を低め、Nb、VあるいはTiなどの合金元素を添加して変態強化がはかられる。

現在、X80級までの高強度ラインパイプが実用化されているが、パイプラインの操業圧力の増加による輸送効率の向上、肉厚減少による現地溶接の施工能率の向上を目的としてX80を超える高強度鋼が求められており、各社ではX100級のラインパイプの研究開発を進めている。X80級までの高強度化の過程において、鋼材のマイクロ組織はフェライト+パーライトからフェライト+ベイナイト組織に変化してきたが、X100級の高強度鋼のマイクロ組織は上部ベイナイト主体の組

織となろう。しかしながら、一般に上部ベイナイト組織では脆性破壊の破面単位が大きく、また、高炭素島状マルテンサイト(M-A)が生成するので低温靱性が低下する可能性がある。従ってX100級ラインパイプの開発では低C、高Mn系をベースに、MoやNbを添加した鋼に制御圧延と制御冷却を駆使してベイナイト組織化による高強度化と微細組織化により強靱化がはかられよう。上部ベイナイト組織の微細化についてはこれまで系統的な研究がなされていないが、加工熱処理条件の最適化によってフェライト組織以上の微細化が可能である。21世紀、近未来においてX100を超える高強度ラインパイプが実用化される日も近い。

5 おわりに

以上、継目無鋼管の製造法に続いて21世紀の溶接鋼管の製造法について展望した。繰り返しになるが、継目無鋼管、溶接鋼管に限らず、鉄鋼業の主役は先進国から中南米、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。総じて、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無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ことは言をまたない。もう時間的余裕は残されていない。

詳しくは文献3)および4)を参照されたい。

参考文献

- 1) 林 千博：ふえらむ，6 (2001)，683.
- 2) 今井 宏：パイプ作りの歴史，アグネ技術センター，(1989)
- 3) 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)
- 4) 小指軍夫：鉄鋼技術の流れ，第1シリーズ，第4巻，制御圧延・制御冷却，日本鉄鋼協会，(1997)
- 5) 林 千博：ふえらむ，6 (2001)，352.

(2001年8月1日受付)