

ステンレス鋼の製造技術進歩と今後の展望

Technical Progress of Stainless Steel and Its Future Trend

池 田 聡*
Satoshi IKEDA

抄 録

ステンレス鋼の需要は堅調に拡大しており、直近10年を見ても平均で5%の生産量の伸びを示している。ステンレス鋼の製造技術は、この需要拡大を背景に、より性能の良い製品をより低コストで市場に供給するために進化してきた。その結果、高品質化、高能率化のための技術開発とあわせ、設備の連続化、大型化が進んだ。また、高純度フェライト、二相鋼といった高機能材料の開発も行われたが、この量産化にも製造技術の進歩が大きく貢献している。ここにステンレス鋼の製造技術の進歩を振り返るとともに、今後の動向について展望した。

Abstract

A demand for Stainless steel continues to expand largely and production is increasing about 5% par year for latest 10 years. The stainless steel manufacturing technology is progress to improve quality and to reduce manufacturing cost against the expanding market. As a result, the manufacturing technologies are developed to improve the efficiency. Furthermore, mill sizes are scaled up, and some processes are combined to get the high productivity. And these progress of manufacturing technology contribute to mass-produce high purity ferritic stainless steel or dual phase stainless steel. In this paper, the history of stainless steel manufacturing technology is traced and the future trend of the stainless steel manufacturing technology is surveyed.

1. 緒 言

わが国で1958年にゼンジミア式20段広幅圧延機が導入され、ステンレス鋼薄板の量産が始まってからちょうど半世紀が経過し、その間、経済発展とともに国内におけるステンレス鋼の需要は着実に増加してきた。海外に目を転じて、近年の中国を初めとするアジア各国の経済発展に伴ってステンレス鋼の需要は大きく拡大している。また、昨今の環境問題に対する世界的な関心の高まりの中、耐熱性、耐食性といったステンレス鋼本来の特性を活かし、高温化する自動車排気ガス系や高塩害環境である海水淡水化プラントなどの環境関連分野へ適用される等、ステンレス鋼の用途自体も大きな広がりを見せている。一方、長期的に見たレアアースメタルの世界的な需給逼迫を受け、Niを含有しない高純度フェライト系ステンレス鋼や、低Ni含有量で高耐食、高強度を有する二相鋼といった、省資源、高機能型の新材料開発も積極的に行われており、既に一定規模の市場を占めるに至っている。

このようなステンレス鋼の需要拡大や新規開発材料の量産化を支えたのは、この間の製造技術の向上であり、逆に、より安価で品質、性能に優れたステンレス鋼の製造技術、供給体制の構築と、高純度フェライト系や二相鋼といった難製造材の量産製造技術の確立がステンレス鋼の市場拡大に大きく寄与しているといえる。以下に、ステンレス鋼の製造技術に関するこれまでの発展と今後の展望について述べる。

2. ステンレス鋼の製造技術の動向

2.1 ステンレス鋼生産量と生産体制の推移

直近10年間におけるステンレス鋼粗鋼の生産量推移を図1¹⁾、図2²⁾に示す。全世界におけるステンレス鋼粗鋼生産量はこの間も年率でおよそ5%の伸びを示している。国別に生産量推移を見ると、日本、アメリカ、ドイツ、イギリスなどの先進国における生産量がほぼ横這いであるのに対し、中国、韓国、インド、ベルギー、フィンランドなどの生産量が増加している。中でも、急激な経済成長と旺盛

* 新日鐵住金ステンレス(株) 技術部 生産技術室長(部長) (現 光製造所 生産管理部長) 東京都千代田区大手町2丁目6番1号 〒100-0004 TEL:(03)3276-5280

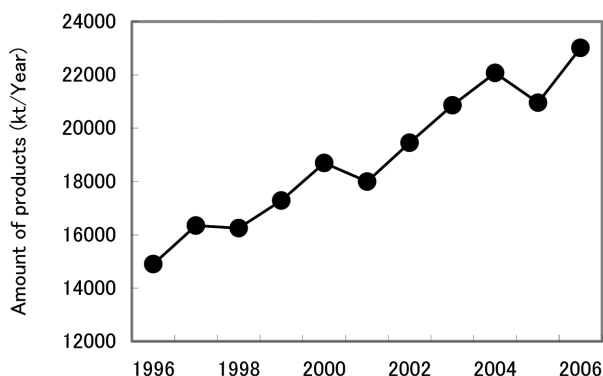


図1 全世界のステンレス鋼生産量推移
Production of stainless steel in the world

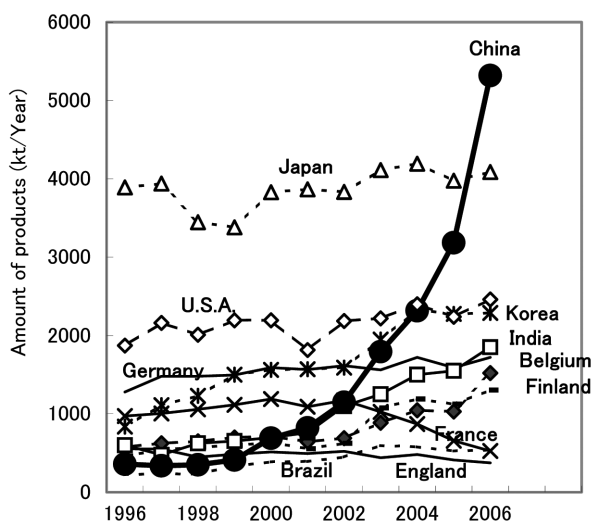


図2 国別ステンレス鋼生産量推移
Production of stainless steel in the each country

な需要拡大に支えられた中国の生産量増加が突出しており、特に、2000年以降の平均伸び率は年率45%に達している。

中国におけるステンレス鋼生産設備投資は現在も継続しており、スラブ生産規模が1社で300万t/年と、日本全体の生産能力に匹敵する巨大なステンレス鋼メーカーも出現している。また、インドでも大規模設備投資計画が発表されており、世界のステンレス鋼の需給バランス、とりわけアジア地区における需給バランスについては今後更に注視してゆく必要がある。

一方、ヨーロッパではステンレス鋼メーカーの統合による生産規模の拡大が進んだ。1976年に21社あったステンレス鋼メーカーが2001年には200～300万t/年の生産能力を持つ4社に統合、集約された。

更に、韓国、台湾でも200万t/年を越すステンレス鋼粗鋼生産能力を持った巨大メーカーが出現し、世界規模での生産の集約、大規模化が進展している。

2.2 最近のステンレス鋼製造技術の進歩

2.2.1 製鋼技術

オーステナイト系ステンレス鋼はNi, Cr, Mn, Mo等の高価な元素の含有量が多いためスクラップのリサイクル活用が進んでおり、現在ではこのステンレス鋼スクラップをベースとした電気炉法が一般的となっている。ステンレス鋼用の電気炉容積は、従来は30t/chから60t/chが主流であったが、直近の新設炉は90t/chから160t/chと大型化してきており、従来炉についても炉容積拡大が図られてきている。また、溶解性向上を目的とした助燃バーナー設備、吹酸設備の設置が標準化しつつあり、更に、電力原単位削減のためのアルミニウム導体フレームの設置も進む等、製鋼工程の生産性向上、生産コスト低減が図られている。

ステンレス鋼の精錬ではステンレス鋼の主成分であるCrによりCの活量が低下するため脱炭が難しく、特に低炭素域でCrの優先酸化により脱炭反応が阻害される。ステンレス鋼の精錬はクロムの酸化を抑制しつつ効率的に脱炭を行うための技術開発の歴史であり、その中でAOD (Argon-Oxygen-Decarburization) 法および、VOD (Vacuum-Oxygen-Decarburization) 法もしくは、これらを組み合わせたAOD-VOD法、転炉-VOD法などが開発された。現在は、電炉-AOD法と転炉-VOD法がステンレス鋼精錬技術の主流を占めている。特に、転炉-VOD法の確立はその後の高純度フェライト系の発展に大きく貢献した。

AOD法は、VOD法に比べ高炭素域からの脱炭が可能で、能率にすぐれているが、一方で、低炭域での脱炭速度が遅く、ばらつきも大きい。また到達C濃度もVOD法に対し劣っている。更に精錬中のCO分圧を下げるために、希釈ガスとして酸素と同時にN₂もしくはArを吹き込む必要があるが、特に多量のArの吹き込みはコストアップにつながる。このAOD法の長所とVOD法の長所を活かした技術としてV-AOD法 (VCR) が1991年大同特殊鋼により開発された²⁾。

これは、AOD炉に真空機能を付加し、AOD法の特徴(強力攪拌)を生かしつつ、減圧下においてO₂吹錬なしに溶解酸素及びスラグ中の酸化物などを利用する低酸素脱炭技術である。新日鐵住金ステンレス光製造所も1996年にV-AODプロセスを導入し、更に2001年、中炭素領域([C] ≤ 0.6%) から炉内を減圧制御し、希釈ガスなしで吹酸脱炭を実施することで脱炭酸素効率の大幅な改善を図り、精錬時間の大幅な短縮と還元用シリコンの削減を達成した。図3にV-AODプロセス(減圧高速脱炭法)の概念を示す。V-AODプロセスは、従来希釈脱炭を行っていた[C]=0.6～0.1%の範囲で、炉内圧を低下させ、底吹O₂を希釈することなく高い脱炭酸素効率を得ることが特徴である。

また、前述の電炉-AOD、転炉-VODプロセスのほかに、特徴的な製鋼プロセスとしてCr鉍石をそのまま用いたSR

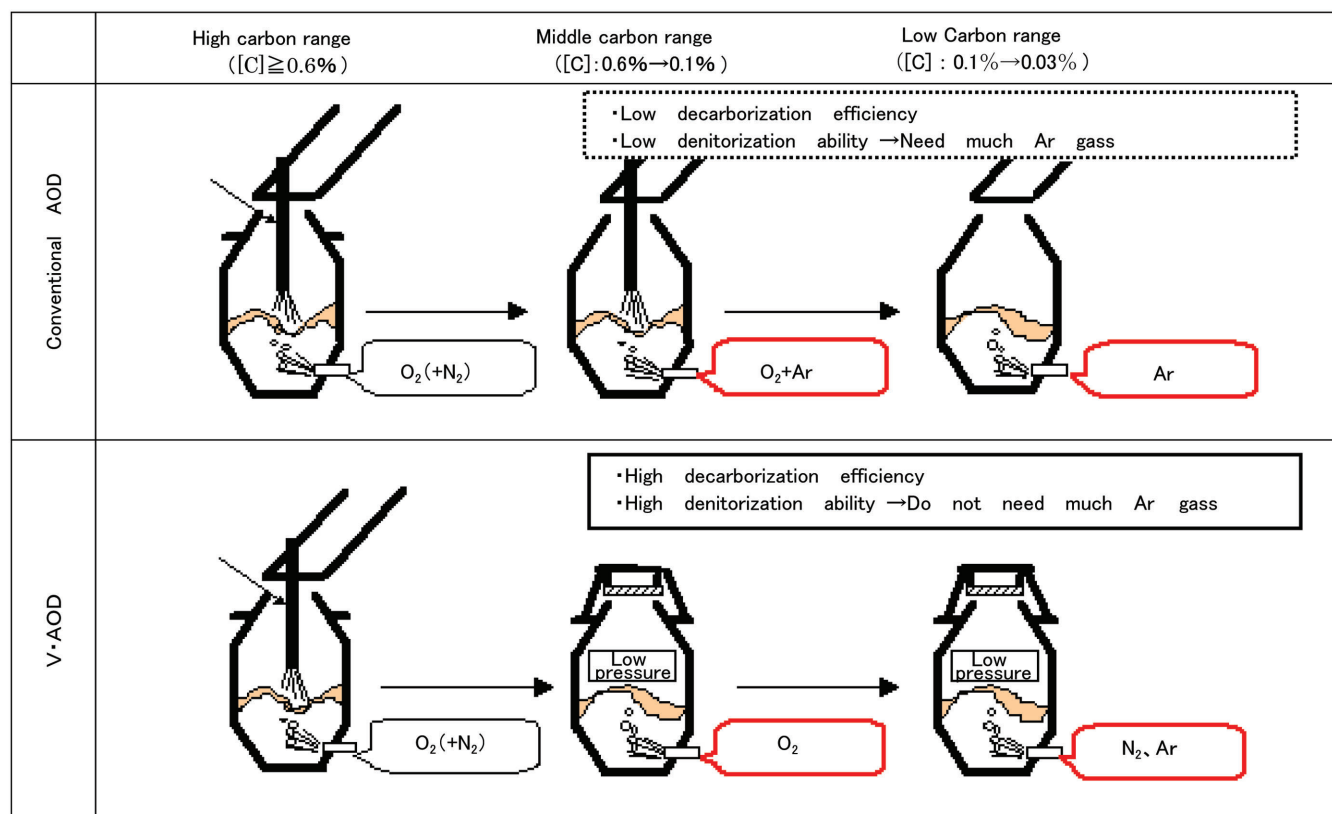


図3 V-AODプロセス
Schematic of V-AOD process

(溶融還元炉) -DC (脱炭炉) -VODプロセスも開発、実用化されている³⁾。

今後、製鋼プロセスのありかたについては、原料リサイクル、廃棄物リサイクルを含めた幅広い視野で考えてゆく必要がある。現在、汎用型のオーステナイト系についてはスクラップの集荷も含めた高度なりサイクルプロセスが確立されているが、直近材料開発、用途開発が進んでいるフェライト系ステンレス鋼、二相鋼、あるいは、低Ni-高Mn系ステンレス鋼 (いわゆる200系ステンレス鋼) といった省資源型ステンレス鋼については、まだ十分なスクラップ集荷・リサイクルプロセスが確立されているとは言えない。

特に、200系ステンレス鋼については、他のオーステナイト系ステンレス鋼と同様磁性を有さないことから磁性選別が出来ず、通常のオーステナイト系ステンレス鋼スクラップに混入してスクラップ品位、ひいては、リサイクルプロセスそのものを損なう状況も懸念されている。また、ゼロエミッションという観点からは、ステンレス鋼製造工程で発生するスラグ、スケール、ダスト、スラッジといった副生物のリサイクル比率アップも重要なテーマであり、このための技術開発を進める必要がある。

2.2.2 熱間圧延製造技術

ステンレス鋼の熱間圧延鋼板の製造には普通鋼兼用のタンデム式熱間圧延ミルと、ステンレス鋼専用のステッセル

ミルの2つのタイプが使用されている。特に、直近では中国を中心にタンデム式熱間圧延ミルの建設が盛んに行われているが、新鋭のタンデム式熱間圧延ミルでは、コイルボックスの適用等による品質改善が図られている。

一方、高い生産性を有するタンデム式熱間圧延ミルに対し、生産性は劣るものの初期投資が小さく、また、リバース圧延によりパス回数を任意に設定することができるなど、圧延の自由度が高いステッセルミルは、ステンレス鋼薄板製造メーカーに数多く採用されている。近年では、ダイナミックペアクロス機能により上下のロール群を互いに逆方向に交差させることで板厚精度、及び、クラウン精度を大幅に向上させるとともに、ステッセルミルの欠点であるワークロールの偏摩耗をオンラインロールグラインダーにより防止する技術が開発されている⁴⁾。

2.2.3 薄板製造技術

1958年日新製鋼(旧日本鉄板)にわが国で初めてゼンジミア式20段広幅冷間圧延ミルが導入され、ステンレス鋼薄板の生産性が飛躍的に向上した。加工硬化が大きいういうオーステナイト系ステンレス鋼の特性から、当初、冷間圧延機には小径のワークロールを用い、かつ大圧下で圧延することが可能なモノブロックのゼンジミアミルが採用されてきたが、1990年前後に国内ステンレス鋼各社において、形状制御性や設備の自動化、高速化が容易な12段クラスター分割ハウジングタイプ冷間圧延機が相次いで建

設された。新日鐵住金ステンレスでも世界最高水準である圧延速度1000mpm(1992年・鹿島製造所)と1200mpm(1993年・光製造所)のクラスターミルを導入した。

一方、ゼンジミアミルにおいても改良が進み、従来のSingle As-Uの形状制御機能の改善を図ったDouble As-UおよびFSBA(Flexible Shift Backing Assembly)機構(表1)⁵⁾の開発、および、分割ハウジングタイプのゼンジミアミルが開発され、現在、最高速度1000mpmクラスのゼンジミア圧延機も建設されている。表2⁶⁾に主なステンレス鋼冷間圧延設備のタイプと特長を示す。

冷間圧延においては圧延油も重要な技術要素の一つであり、ステンレス鋼特有の美しい表面品位を造りこむため、現在はニート系が主流となっている。高い光沢を維持するためには薄い油膜の実現が必要であるが、高速圧延時に高圧下を志向すると油膜が局部的に切れる現象が生ずるため、ヒートスクラッチが発生して光沢の低下、および、ムラの原因となる。そのために高温になっても潤滑性を保つ長鎖二塩基酸ジメチルステル⁷⁾等の添加により高速に耐え得る圧延油が開発されているが、更なる高速化のためには

一層の耐ヒートスクラッチ性の向上が不可欠であり、冷却効果の大きいエマルジョン圧延油の開発が必要となる。

新日鐵住金ステンレス光製造所では独自にソリブル圧延油を開発⁸⁾し、エマルジョン粒径を制御することにより世界で唯一ステンレス鋼高光沢製品の圧延にエマルジョン油を適用した高速大圧下圧延を実現した。このエマルジョン圧延油を適用した新日鐵住金ステンレス光製造所4CM(No.4クラスターミル)の120mpm圧延は、リバーstypeのステンレス鋼専用圧延機としては世界最高速度である。図4にニート油とエマルジョン油による圧延材表面光沢の比較を示す。エマルジョン油圧延により、ニート油と同等の表面光沢が得られることがわかる。

また、1980年代後半以降、自動車の環境対応強化やエンジンの高性能化の流れの中で排ガス系統へのステンレス鋼の適用が急激に進み、特に、エキゾーストマニホールド等は複雑な形状に加工されるため、材料に対する加工性向上のニーズも高まった。このニーズに応えるため、材料開発とともに、加工性などの機能向上とコスト低減を目的と

表1 形状矯正機構
Schematic of flatness control system

Conventional single AS-U	Double AS-U	FSBA & SIR
AS-U on BC	AS-U on AB & BC	FSBA AS-U on BC and SIR for top idle roll

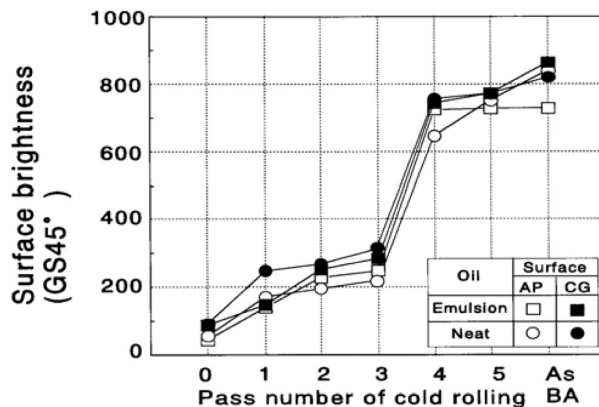


図4 エマルジョン油とニート油の表面光沢
Surface brightness (emulsion oil & neat oil)

表2 ステンレス鋼用冷間圧延機のタイプと特徴
Type and characteristics of cold roll mill for stainless steel

Type	Sendzimir mill	KST mill	KT mill	UC mill	CR mill	
Supply	Sendzimir (Mitsubishi-Hitachi)	KOBELCO	KOBELCO	Mitsubishi-Hitachi	Mitsubishi-Hitachi	
Roll configuration						
Characteristics	Flatness control function	・AS-U ・1st IMR lateral shift	・AS-U ・IMR lateral shift	・IMR taper shift ・IMR bender ・WR bender	・BUR crown adjust ・IMR bender ・WR bender	
	Gage control function	Hydraulic drive eccentric control	・Wedge-type hydraulic roll-gap control ・Electric tilting control	・Hydraulic cylinder ・Hydraulic tilting control	・Hydraulic cylinder ・Hydraulic tilting control	
	Housing construction	Mono-block housing	Four column separate housing	Four column separate housing	Split housing	Split housing
	Work roll diameter	Extremely small	Extremely small	Small diameter	—	Small diameter
	Drive	2nd IMR	2nd IMR	IMR	IMR	IMR

して大径ワークロールを有する普通鋼用タンデム式冷間圧延機を活用したタンデムプロセスが開発された⁹⁾。このタンデムプロセスの確立により、フェライト系ステンレス鋼の自動車への適用が一挙に拡大した。

ステンレス鋼の焼鈍酸洗では、高温の焼鈍が必要になる一方で、焼鈍中に形成されるスケール除去のための長大なデスクール設備が必要となる。このため、熱間圧延板の焼鈍酸洗(HAP)ラインの生産能力向上に際しては、炉能力の拡大、加熱効率の改善と並行して、高研削ブラシの導入によるメカニカルデスクーリング能力アップや、酸洗槽長アップなどが図られている。また化学的デスクーリングにおいても、硫酸および硝酸/弗酸混酸という酸液の基本構成は変化がないものの、高性能鉄イオン除去装置の設置による酸洗能力の安定化、酸洗槽内強制対流による乱流酸洗や、スプレー酸洗の適用などによるデスクーリング能力の向上が図られている。設置スペースに制約のない新設HAPでは、単体生産能力100万t/年レベルのラインが出現している。

仕上げ酸洗焼鈍(FAP)ラインについても、高能率化が図られている。図5にFAPラインの建設時期と中央ライン速度の推移を示すが、建設時期が新しくなるに従って作業能率が向上していることがわかる。

FAPの高速化技術としては、加熱制御技術とデスクール技術の進歩が上げられる。加熱制御については、応答性に

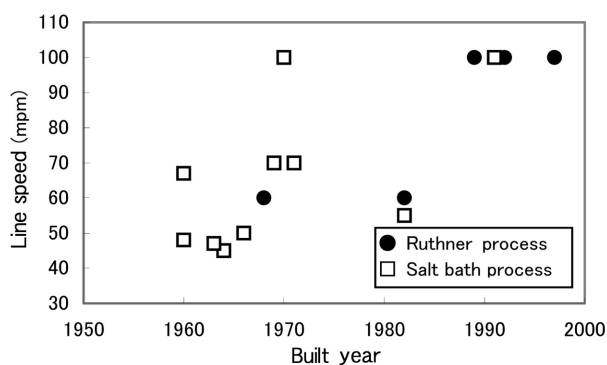


図5 FAPラインの建設時期とラインスピード
Relationship between built year and line speed of FAP

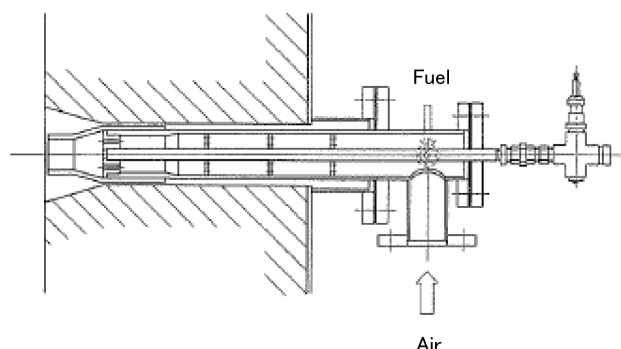


図6 インピンジグバーナーの構造
Structure of impinging burner

優れたインピンジグバーナーによる直火加熱技術が開発され、新日鐵住金ステンレス鹿島製造所において実用化された¹⁰⁾。インピンジグバーナーの構造を図6に示す。

また、FAPでは鋼板表面の肌を荒らさずにデスクールを行う必要があるため、加熱炉で生成したスケールを溶解性の高い構造に改質する必要がある。従来のスケール改質はソルトバス方式が主流であったが、ラインの高速化に伴い操業性に優れたルスナー方式に移行した(図6)。但し、ルスナー方式はSi酸化物の改質が出来ないため、高Si系材料をはじめとして、母材の成分系によってはデスクール性が著しく低下するという課題を有する。新日鐵住金ステンレス鹿島製造所では、ソルトバスの後にルスナーを配置することで、鋼板成分の制約を受けることなく70mpmのラインスピードでデスクールを行っているが、今後、更なる高速化と材料の多様化に対応するために、より効率的なデスクールプロセスの開発が期待される。

一方、欧米の大手ステンレス鋼メーカーや日本、中国をはじめとするアジア圏において、大型高能率設備や、冷間圧延材製造設備の連続化が行われた。連続化技術はいくつかの κατηγοリーに分類する事が出来る。まず、1つ目は冷間圧延の能率と歩留の向上を目的にしたステンレス鋼用小径ワークロールミルのタンデム化で、日新製鋼周南製鋼所が1969年に導入したタンデム式ゼンジミアミル¹¹⁾がその代表例である。2つ目の分類がFAPラインにインラインスキンパス、テンションレバラーを組み込んだ^{10,12)}もので、国内でも、1989年以降に建設されたFAPラインは大半がこの形態をとっている。3つ目の分類が冷間圧延、AP、スキンパス、あるいはTL(テンションレバラー)を連続化した設備であり、汎用ステンレス鋼材を高い生産性で生産することを目的として開発された。HAP~冷間圧延を連続化したもの¹³⁾と、冷間圧延~AP・SPM(調質圧延機)・TLを連続化したものに分けられる。

図7¹⁴⁾に3スタンドタンデムとAP、SPMを連続化したOutokumpu社の設備を示す。このほか、直近では中国のLISCO社にも3スタンドタンデムとAP、SPM、TLを連続化した設備が導入されている¹⁵⁾。

調質圧延機(SPM)は前述の通り高速FAP出側へのインライン化が進んでいる^{10,12)}。ステンレス鋼特有の高い光沢を得るためには、一般的に大径ワークロールの2Hiドライ圧延が適用されているが、オフラインSPMでは生産性を高めるため、リバース化、2Hi/4Hiの兼用化、ウェット/ドライの切替え可能なミルが主流となりつつある。1990年に設置した新日鐵住金ステンレス光製造所の2SPMは6Hi-UCを採用しており、設備単体の能力として世界最高速度700mpmを実現するとともに、優れた平坦制御性を有している。

ステンレス鋼冷間圧延材の製造技術は、上述のように汎用鋼をより安価に量産するための技術を中心に発展してき

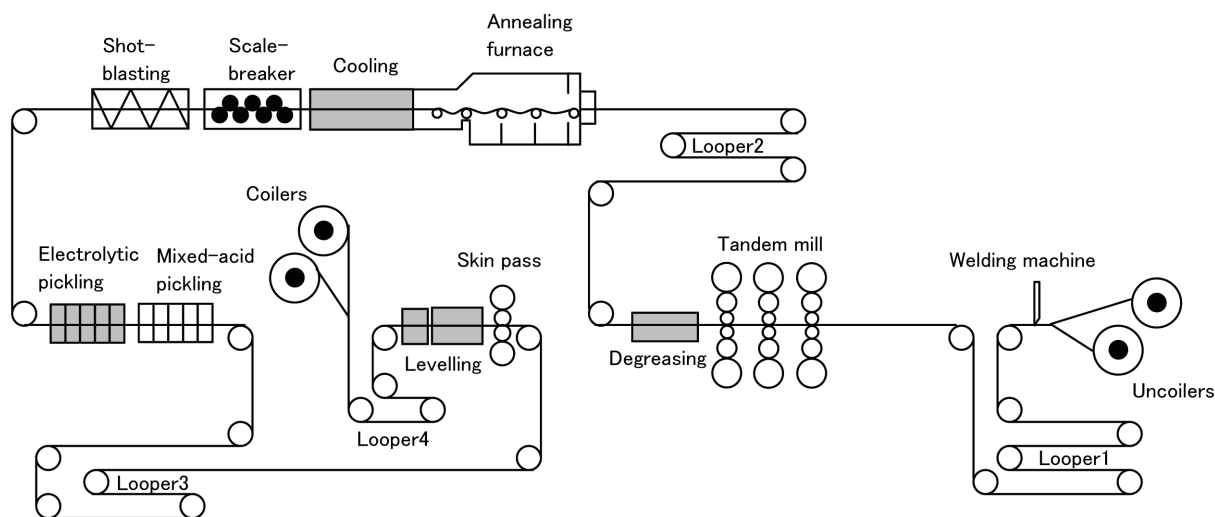


図7 RAPライン概要(Outokumpu社)
Schematic of RAP line(Outokumpu)

た。直近では、緒言でふれたように、需要が高純度フェライト鋼や二相鋼を代表とした機能性ステンレス鋼に分岐、細分化してきていることから、今後、汎用鋼の生産性の向上と合わせ、難製造品種、小ロット品の効率的な生産技術の開発が求められるものと考えられる。

2.2.4 厚板製造技術

ステンレス鋼厚板分野では、近年、ケミカルタンカー用高窒素型 316L 鋼や高腐食環境用スーパーステンレス鋼 (NSSC270) の開発等、新規鋼種の開発や、それらを中心とした操業技術の改善に重点が置かれてきた。その中で進展した具体的製造技術要素としては鋼中の化学成分値バランス管理、トランプ元素の低減、スラブソーキング処理等による熱間加工性向上技術や TMCP (Thermo Mechanical Control Process) による高強度材の安定製造化技術等が挙げられる。ステンレス鋼厚板分野では、将来想定される Cr, Ni, Mo 等ステンレス鋼に必須な合金元素の需給バランスの悪化を踏まえ、従来と同等のパフォーマンスを得られる低コスト (低原料費, 高比強度) 材への転換が進展している。二相鋼の適用分野の拡大等がその代表例であり、二相鋼の生産能力向上に向け、デスケール能力増強の動きが出てきている。

市場では各種プラントの大型化、輸送関連キャリアの大型化や、広幅材適用による溶接作業削減等の加工コスト低減ニーズがますます強くなってきている。新日鐵住金ステンレス八幡製造所ではステンレス鋼専用の 4Hi ミルを用い、最大厚 200mm, 最大幅 4 000mm のステンレス鋼厚板製品を供給できる生産体制をとり、あらゆる分野のニーズに答えてきた。今後は、ステンレス鋼厚板製造設備の大型化、高強度材への対応力強化、難製造材 (難加工性, 難酸洗性, 形状厳格材, 表面品位厳格材) 製造技術の開発、設備対応が更に進展するものと考えられる。

2.2.5 棒線製造技術

線材は、熱間圧延後に加工メーカーでの伸線、鍛造、切削、熱処理など様々な工程を経て最終製品となる。熱間圧延ではブルームからの分塊圧延を行った後、粗圧延、中間圧延、仕上げ圧延を行うことが一般的であり、また、圧延後にオフラインで溶体化熱処理を行っていたが、現在は、直圧やインライン熱処理プロセスで製造を行う技術が実用化されている。新日鐵住金ステンレスの棒線工場では他社に先駆けて 1 パスで大圧下が可能で傾斜圧延機を粗圧延列に導入するとともに、インライン熱処理技術を開発、適用し、直圧インライン熱処理プロセスを実用化した。

傾斜圧延機の概要を図 8 に示す。円錐形の 3 つのロールを円錐状に配置し各ロールは自転するとともに全体が鋼材の周囲を公転する構造となっており、大圧下が可能であるとともに、鋼材表層に大きな歪を付与することが特徴である。表層強加工により再結晶を促進させ、以降の圧延時の変形能を向上させることにより、割れ疵や粗大粒起因のしわ疵を防止することができる。現在新日鐵住金ステンレスでは全量ビレットからの直圧プロセスを適用しており、工期短縮、コスト低減の成果をあげている。

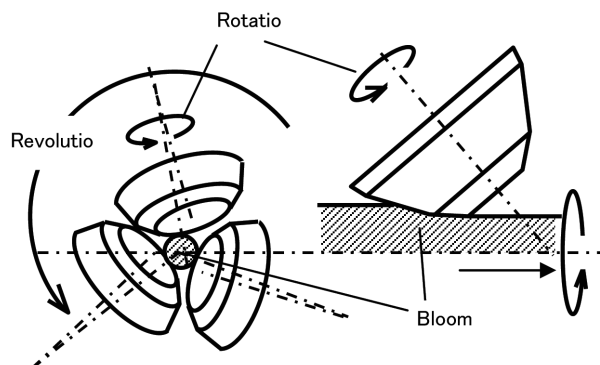


図8 傾斜圧延機
Schematic of HRM

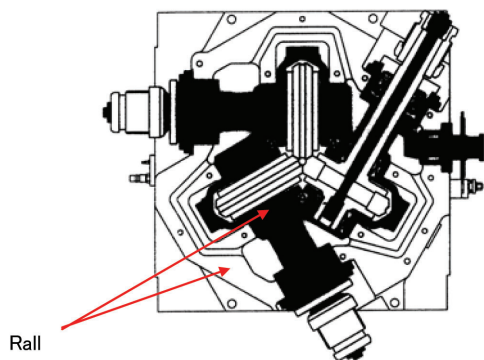


図9 精密圧延機スタンド(3ロール)
Schematic of 3-roll stand used in RSB

また、インライン熱処理技術は、線材熱間圧延後鋼材の持つ顕熱を利用し、制御冷却を行うことで溶体化熱処理を省略することが出来る技術であり、DST (Direct Solid Solution Treatment) と呼ばれ、線材の効率的生産に寄与するとともに、省エネルギーにも大きく貢献している。

圧延工程では、高剛性・高機能ブロックミルを仕上げ圧延機の前または後方に配置することで、寸法精度の向上と、フリーサイズ圧延、制御圧延・制御冷却による材質制御が指向されてきた。ステンレス鋼線材ミルでは、大同特殊鋼¹⁶⁾他、海外ミルでも高剛性・高機能ブロックミルが導入されており、新日鐵住金ステンレスにおいても、2002年に3ロール方式の精密圧延機 (RSB: Reducing Sizing Block) を導入した (図9)。この3ロール-4スタンドの精密圧延機は2ロールに比較して圧延の幅広がり小さいという特性を有しており、寸法精度は、偏径差 $\leq 0.15\text{mm}$ を実現している。加えて、各4スタンドを個別駆動、個別圧下調整を可能とすることでロール交換を実施することなくフリーサイズ圧延が可能である。また、摩耗やサイズ替に伴うロール交換についても予備スタンドとの急速交換により圧延休止時間を大幅に短縮することができ、生産性も大きく向上した。

3. 結 言

ステンレス鋼の製造技術は、需要の拡大を背景により性能の良いステンレス鋼材料をより安価に市場に供給するために進化してきた。長期的に見ると今後もステンレス鋼の需要、用途は拡大していくと予想されるが、その中で、高純度フェライト系、二相鋼といった、機能に特化した鋼種、材料がますます拡大、浸透していくものと考えられる。これは、すなわち鋼種、ロットの細分化が更に進むことを意味し、また、同時に難製造鋼種の比率も拡大することが予想される。従って、ステンレス鋼の製造技術は、これまでと同様に汎用鋼の効率的な生産を追及することとあわせ、これら高機能小ロット難製造ステンレス鋼の効率的な製造技術の開発を進めることが必要であろう。また、ステンレス鋼の優れたリサイクル性を今後とも維持、進化してゆくためにも、各種スクラップや、ステンレス鋼製造で発生する副生成物のリサイクル技術開発とより一層の体制整備が重要なテーマであると考えられる。

参照文献

- 1) Valeinco: World Stainless Steel Statistics 2007 edition. A-37
- 2) 稲垣佳夫 ほか: 材料とプロセス. 7(4), 1068(1994)
- 3) 鍋島祐樹 ほか: 川崎製鐵技報. 28(4), 206(1996)
- 4) 山下明 ほか: 三菱重工技報. 36(6), 292(1999)
- 5) 芳村泰嗣: CAMP-ISIJ. 19, 956(2006)
- 6) 中野恒夫: 第140回塑性加工シンポジウム. 1992, p.37
- 7) 杉井秀夫: 出光技報. 43(1), 12(2000)
- 8) 札軒富美夫 ほか: 塑性と加工. 39(454), 29(1998)
- 9) 永瀬英典 ほか: 鉄と鋼. 81, 34(1995)
- 10) 狩野泰脩ら: 日本ステンレス技報. 26, 87(1991)
- 11) 佐藤弘幸 ほか: 日新製鋼技報. 48, 50(1983)
- 12) 中村照久 ほか: 日新製鋼技報. 70, 74(1994)
- 13) 井上宣治 ほか: 新日鉄技報. (378), 55(2003)
- 14) Pekka Erkkila: Ironmaking and Steelmaking. 31(4), 277(2004)
- 15) http://www.lisco.com.cn/Lianzhong_E.htm
- 16) 佐々木健 ほか: 鉄と鋼. 81(11), T53(1995)



池田 聡 Satoshi IKEDA
新日鐵住金ステンレス(株) 技術部 生産技術室長(部長)(現 光製造所 生産管理部長)
東京都千代田区大手町2丁目6番1号
〒100-0004 TEL:(03)3276-5280