日本におけるステンレス鋼業の現状と将来

斎 藤 喜 一*

1. は じ め に

ステンレス鋼は Faraday(1822)の 1~3%Cr 鋼の研究や Berthier(1921)の高 Cr 鋼の試作研究に端を発し、その後の Brustlein(1875~86)による低 Cr 鋼の工業生産、あるいは Hadfield(1892)による 9%Cr 鋼の研究など、約一世紀にわたる長い胎動期を経て今世紀の初め、Guillet(1904), Monnartz(1908), Brearley(1912)らによる Cr 系ステンレス鋼として、あるいは Maurer や Strauss(1909)らによる Cr-Ni 系ステンレス鋼として漸くこの世に出現し、爾来すでに 3/4 世紀を経過した。出現当時の最初の用途は軍事目的が主であったが、その後の生産技術の著しい発達、とりわけ近年の量産化に向けた溶製、鍛造、圧延並びにその周辺技術の目覚ましい進歩と鋼中不純物の低減などによる品質の向上、さらには用途に応じた新鋼種の開発などにより、その需要分野も当初の軍事目的から民生用としての産業用機械類や原子力を含むエネルギー関連分野、宇宙、航空機、自動車、車輛などを含めた輸送用機械器具の分野および最近のエレクトロニクスを含めたハイテク分野や家庭用の耐久消費財関連分野に至るまで、その範囲は急速に広まり、現在の繁栄をみるに至った。

本稿ではこのようなステンレス鋼の我が国における現状について、先ずその需要動向を簡単に述べた後、需要拡大の原動力となった生産技術の進歩と新鋼種の開発状況などを中心に概説し、併せて将来を展望した。

2. ステンレス鋼の生産量と需要動向

最近の世界のステンレス鋼の生産状況をみると、約 30

* 日本ステンレス株式会社直江津製造所副所長
Today and Tomorrow of Stainless Steel Industry in Japan; Kiichi Saito (Naoetsu Works, Nippon Stainless Steel Co., Ltd., Naoetsu)
Keywords: stainless steel, secondary refining, decarburization, desulphurization, dephosphorization, continuous casting, rheocasting, sendzimir mill, automatic gauge controller, automatic flatness controller
1988 年 7 月 19 日受理

年前の 1960 年当事、僅か約 215 万トンにしか過ぎなかった生産量が 10 年後の 1970 年には 495 万トンと約 2.3 倍(伸び率 8.7%)に、また 1979 年には 750 万トンと 1.5 倍(伸び率 4.7%)に、さらに 1986 年には 802 万トンと 1.2 倍(伸び率 3.5%)にまで伸びた。このような伸びは特に我が国において著しく、1960 年当事僅か 20 万トン台であった生産量は 1979 年までの 20 年間に 227 万トンにまで増加し(6.9 倍、伸び率 12.6%)、1970 年には米国を抜いて世界一の生産国となった。その後の 1980 年から 1986 年までの 6 年間には 263 万トン(世界のシェアの 33%)を記録し(伸び率 2.3%)⁽¹⁾⁽²⁾、さらに 1987 年度後半以降は政府の内需拡大策もあってその後も史上最高の生産量を続けており、1987 年度の生産量は鋼塊ベースで 300 万トンを超えると予想されている。このようにステンレス鋼の需要は大きく伸びてきているが、普通鋼を含めた全粗鋼の生産量に比較すると、まだステンレス鋼の占める割合は、生産量の多い我が国でも 2% 程度(世界では約 1%)に過ぎず、今後需要の高級化志向とコストの低減が進めば普通鋼からの置き替えがさらに進む可能性もあり、将来とも若干の変動はあるとしてもなお年率で 2~3% の伸びは確実とみられている。一方上述のような生産量に対する最近の需要動向は、最終用途の判明しているものでは図 1 の受注量⁽³⁾⁽⁴⁾の推移にみられるように、建材と自動車関連分野は堅実にそのシェアを伸ばし

図 1 ステンレス鋼用途別受注量の推移⁽³⁾⁽⁴⁾。

てきており、1987年度の需要量は1967年からの約20年間に建材は9倍に、また自動車は10倍になり、この傾向はなお当分続くものとみられている。この中、建材は建築金物と建設用材に大別されるが、その中の建設用材の伸びが顕著で、建材全体の伸びを際立たせている(建築金物4.6倍、建設用材8.7倍)。これは第1次石油危機以来、長持ちする省資源型材料としてのステンレス鋼が再評価された結果で、建具類のインテリアをはじめ、屋根材や受水槽、看板、標識などの屋外構造物に至るまで、需要の裾野を広げてきたことと、意匠面でも従来のHL仕上げのほか鏡面仕上げを始めとする各種仕上げ、さらにはカラー化により多様化する意匠ニーズへの対応を進めたことが結実したとみられている。その他最近の家電やエレクトロニクス関連の弱電部門の需要が旺盛なことや、さらに自動車を除く輸送用機器も1986年のシェアでみるとまだ2.6%程度にしか過ぎないが、鉄道車輛などは過去20年間に約5倍の需要増を示しており、ステンレス鋼の機能性からこの増加傾向は今後も更に続くものと思われる。

3. 生産技術

(1) 溶製および鑄造技術

ステンレス鋼が優れた耐食性を維持するには、炭素量の低減は不可欠の要素であるが、Strauss⁽⁵⁾やMonnartz⁽⁶⁾らによって耐食性に及ぼす炭素の影響が明らかにされて以来、ステンレス鋼の製造技術、とりわけ溶製技術は低炭素化に向けて多くの努力が払われてきた。

ステンレス鋼がこの世に出現した今世紀の初頭では、溶解法はもっぱらるつば炉溶解に頼っていたが1920年頃には、1900年にHeroultによって開発されたアーク炉による溶製技術が確立され、量産化が可能となり、実用材料としての基礎を固めた。しかし当時の炭素量は低炭素でも約0.2%で⁽⁷⁾、現在の低炭素鋼と比較すると極めて大きな隔りがあった。ステンレス鋼の低炭素化が量産化と共に進み、いわゆる民生用としての地歩が築かれたのは1950年頃に登場した酸素精錬法が開発されてからで、本法の採用により始めてスクラップの使用が可能となり、かつC≤0.03%の18-8ステンレス鋼を中心とした低炭素ステンレス鋼の量産化が急速に進んだ。また、これを契機として次々とその周辺の技術革新も進み、現在の繁栄へとつながったが、それでもステンレス鋼(18-8)の価格は、当時の価格で60~70万円/トンの高価なもので、大衆のものとなるにはまだかなりの開きがあった。そして酸素精錬法が出現してから約20年後の1960年代の後半に至り、現在の革新的精錬技術であるVOD(1965)およびAOD(1968)の炉外精錬法が確立され、アーク炉は単なる溶解専用炉として用いられ、精錬はすべて炉外

の取鍋内で行なわれるようになり、生産能力も大幅に高められた。また生産コストも1950年当時の約1/2にまで低減し得るようになり、價格的にも漸く大衆の手に届くまでになった。

一般にステンレス鋼のようなCrを多量に含む鋼ではCの活量が低下するため、炭素鋼に比べ脱炭は困難である。さてステンレス鋼の脱炭反応機構は総括的には

$$K_1 = a_{\text{Cr}}^3 \cdot P_{\text{CO}}^4 / a_{\text{Cr}_3\text{O}_4} \cdot a_{\text{C}}^4 \quad (2)$$

ただし K_1 は式(1)の反応の平衡定数、 a_{Cr} 、 a_{C} は鋼中[Cr]および[C]の活量、 $a_{\text{Cr}_3\text{O}_4}$ はスラグ中 (Cr_3O_4) の活量、 P_{CO} は雰囲気中のCOガスの分圧、で表わされている。いま、生成Cr酸化物を Cr_3O_4 と仮定し、Hilty ら⁽⁸⁾の求めた平衡定数

$$4 \log [\% \text{C}] + 1432/T [^\circ \text{C}] \\ = 3 \log [\% \text{C}] + (160T - 0.0476) [\% \text{Cr}] + 57100/T - 35.16 + 4 \log P_{\text{CO}} \quad (3)$$

から18%Crにおける温度とC量との関係求めて図示すると図2⁽⁹⁾のようになる。図2より[Cr]を酸化させないで脱炭を行うには、溶鋼温度を高くし、かつ P_{CO} を低下させればよいことが分かる。しかし溶鋼温度を高くすると耐火物の損傷が大きくなるので、鋼浴温度には自ずと制限があることから、 P_{CO} を下げる方法の実用化努力が強力に進められた。その結果雰囲気圧を減圧する方法とArなどの不活性ガスを鋼浴中に吹込んでCOガスを稀釈する2種類の方法が提案され、その中の減圧法がいわゆるVOD法となり、Ar稀釈法はAOD法となった。このようなVOD炉やAOD炉は、すでに1987年末で前者は世界で62基(我が国で13基)が、また、後者は世界で90基(我が国で13基)が稼動中であるが⁽⁹⁾、

図2 18%Cr鋼におけるC%-温度- P_{CO} の関係⁽⁹⁾。

これら炉外精錬法の特徴を挙げると、VOD 法では、

(1) [C]濃度に対応した真空度の制御により、[C]の酸化を完全に抑制した脱炭が可能であり、脱炭後のスラグ中の(Cr_3O_4)を還元するための還元剤の添加量が少ない。

(2) 取鍋内での精錬であり、精錬後の[N]、[C]の吸収がないため、 $\text{C+N} \leq 100 \text{ ppm}$ の超低炭素鋼の製造が可能。

(3) ただし減圧下で起る突沸などの設備トラブルを防止するために酸素の送り速度が制限されるので、高炭素域からの脱炭は困難。

であり、一方、AOD 法では

(1) 多量のガス吹込みが可能であるので高炭素域からの脱炭が容易であり、生産性が高い。

(2) 熱効率が良好であり、多量の冷却材の添加が可能。

(3) 強力なガス攪拌が行ない得るので、極低硫鋼($\text{S} \leq 10 \text{ ppm}$)の製造が容易。

(4) ただし脱炭時の[Cr]の酸化は VOD 法よりも多く、したがって還元剤の添加量が多い。

(5) 出鋼時の炉壁に附着したスプラッシュによる[C]濃度の増加や大気中の N の吸収があるため、VOD 法におけるような超低 C+N 鋼の製造は困難。

であり⁽¹¹⁾、それぞれ特徴に応じた使いわけがなされている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。なおこれら炉外精錬における脱炭反応は、脱炭により生じた CO ガス気泡中に鋼中[N]が拡散し、気泡と共に系外に除去される機構によっている。このようなステンレス鋼の VOD 法あるいは AOD 法による炉外精錬では 1973 年に AOD 法での Ar の代りに H_2O を用いる CLU 法⁽¹²⁾が実用化されて、製造コストの低減が図られたり、また 1976 年には VOD 法の底吹きガスの流量を増加することにより、 $\text{C+N} \leq 100 \text{ ppm}$ の超低炭素鋼の製造を可能にした SS-VOD 法⁽¹³⁾や VODC 法⁽¹⁴⁾が開発されて、製造コストのさらなる低減や高純度化による品質の向上努力が払われている⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。また、これら炉外精錬法では、従来困難とされていた脱硫も、(1)溶浴中に Al, Ti, Si などの脱酸剤の添加による酸素

濃度の低減、(2)溶鋼温度の上昇、(3)CaO 吹込みによるスラグの高 CaO 濃度化と MnO 濃度の低減などにより、 $[\text{S}] \leq 10 \text{ ppm}$ の極低硫鋼が得られるようになってきている。また AOD 法でも [C]レベルに応じ O_2/Ar 比を変えた吹錬により短時間で精錬を行ない、コスト低減や炉寿命の延長を狙った高効率精錬法⁽¹⁷⁾や転炉を省略した溶銑-AOD 法⁽¹⁸⁾、あるいは上、底両方より吹錬を行ない、生産性や脱炭効率の向上を目指した複合吹錬法⁽¹⁹⁾などの精錬技術の効率化も進められている。その他の溶製技術としては、従来極めて困難とされてきた脱磷技術も CaC_2 - CaF_2 系フラックスにより $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ の形で脱磷する還元脱磷法(CAR 法⁽²⁰⁾)や Li_2CO_3 系⁽²¹⁾⁽²²⁾あるいは BaCO_3 系⁽²³⁾⁽²⁴⁾フラックスを用い、 $\text{PO}_4^{3-}(\text{P}^{5+})$ としてスラグ中に磷を移行せしめ脱磷する酸化脱磷法などが開発され、 $\text{P} < 100 \text{ ppm}$ の低磷ステンレス鋼の製造も可能となり、より高純度、高品質ステンレス鋼の製造に拍車をかけた。この中の CAR 法についてはさらに処理費の低コスト化を狙った効率的操業法も検討されている。表 1⁽²⁵⁾には VOD または AOD 法により到達し得る高純度化の現在のレベルを示したが、このような高純度化溶製技術の出現は、後述するスーパーフェライト鋼出現の動機となった。

以上のようなステンレス鋼溶製技術の進歩は、また平行して開発の進んだ関連技術としてのカントバック⁽²⁶⁾に続く蛍光 X 線分析法⁽²⁷⁾や赤外線吸収法⁽²⁸⁾、あるいはガスクロマトグラフ法⁽²⁹⁾などの機器分析法を中心とした分析技術の進歩が大きな支えとなっており、これら分析法の高精度化と迅速化により、C, P, S, O, N, などの微量元素の炉前分析を可能にし、品質の安定化に大きく寄与した。さらには溶湯の直接测温技術の進歩も見逃してはならない。

溶製技術と並んで目覚ましい発展を遂げた製造技術に鋳造法としての連続鋳造技術がある。連続鋳造法の歴史は Bessemer⁽³⁰⁾が板硝子製造の原理を応用して低熔融金属の板を初めて作った 1858 年の昔にさかのぼるが、工業的規模で普及したのは我が国では 1960 年以降である。

表 1 VOD 法と AOD 法の高純化精錬レベル⁽²⁵⁾。

精錬法 元素	VOD 法		AOD 法	
	達成レベル	精 錬 条 件	達成レベル	精 錬 条 件
C	< 10 ppm	フェライト系ステンレス鋼 精錬時間約 9.6 ks(160 min)(SS-VOD)	<100 ppm	Ar による強攪拌
N	< 30 ppm	[C]>1%の脱炭量確保	<100 ppm	[C]>1%の脱炭量確保
S	< 10 ppm	特殊ランス使用 Al 焼熱による温度補償	< 10 ppm	Al 還元によるシングルスラグ法
O	< 30 ppm	Al 脱酸	< 30 ppm	Al 脱酸
P	<100 ppm	CaC_2 による脱 P	<100 ppm	Li_2CO_3 系スラックスによる脱 P

すなわち 1955 年にビレット、ブルーム用連鑄機によりステンレス鋼が始めて鑄造され、続いて 1960 年に 1200 mm 幅のスラブ型連鑄機が設置され、本格的なステンレス鋼の連鑄鑄造が開始された。初期の連鑄設備は垂直型であったが、設備費の低減を目的に次第に湾曲型へと

図 3 連鑄機設備型式代表例⁽³¹⁾。

図 4 薄鋼片用連鑄機の型式例⁽³⁵⁾。

移行し(図 3⁽³¹⁾)、現在ではすでに水平連鑄機も一部でステンレス鋼用に実用化されつつある。このような連鑄技術の進歩は、AOD や VOD 法などによる脱ガス処理技術の進歩に負うことは論をまたないが、同時に鑄片品質の信頼性の向上をもたらした浸漬ノズルを用いたパウダーキャスティング技術の開発⁽³²⁾⁽³³⁾、さらには特にフェライト系ステンレス鋼の製品品質の改善に寄与した電磁攪拌技術⁽³⁴⁾の応用も特筆すべきであろう。これら連鑄技術は現在後述する熱間圧延との直結が普通鋼を中心に進行中であるが、更に薄鋼片用連鑄機(TSC または SC—図 4⁽³⁵⁾)や、半凝固加工技術による薄鋼板帯の製造技術(図 5⁽³⁶⁾)による熱延工程の簡略化または省略化に向けた次世代の連鑄機を目指した開発も急速に進みつつあり、その早期実現が待たれている。

図 5 半凝固加工プロセス概念図⁽³⁶⁾。

(2) 圧延技術

(a) 冷延技術

ステンレス鋼業は加工硬化性の大きなステンレス鋼の冷間圧延に適したゼンジミア圧延機の出現により、冷延鋼板を中心に飛躍的な進展を遂げた。従来鉄、銅、アルミニウムなどの冷延には、1920 年以降に普及した四段圧延機が主流を占め、大きな役割りを演じてきたが、ステンレス鋼に対しては、その高い加工硬化特性の故に、大径のバックアップロールと大きなハウジングを必要としていた。そのためこのような四段圧延機のコンパクト化を図るべく、4 本のバックアップロールでワークロールを支えた形式の六段圧延機、いわゆるクラスターミルが出現したが、この圧延機も図 6⁽³⁷⁾に示した如くワークロール径を小さくし、圧延圧力を高めるには限界があった。この問題を解決するため、バックアップロールを 10 本または 18 本とした多段式圧延機、いわゆるローン圧延機⁽³⁸⁾が開発されたが、この圧延機は幅ストリップの圧延には不向きなので、1960 年、独の Sundwiger 社により、ローン圧延機の上部ハウジングを 4 本の柱で支える形式の四柱式多段圧延機(ズンドビック圧延機⁽³⁹⁾)が開発された。本圧延機ではバックアップロールに外輪の

図 6 クラスター圧延機概念図⁽³⁷⁾.

み回転するベアリングとサドルが用いられ、圧延圧力はこれらのサドルからハウジングに伝える機構が入れられ、漸く念願の広幅材の圧延が可能となった。この種の圧延機は特に欧州において数多く稼動しているが、我が国でも 1958 年に銅合金用⁽⁴⁰⁾に 200 mm 幅の、また 1963 年にステンレス鋼用として同じ 200 mm 幅の圧延機が設置されている⁽⁴¹⁾。この考えをさらに発展させたものが二十段ゼンジミア圧延機で、そのロール配置はローン圧延機とほぼ同じであるが(図 7)、ロールの支持方法は全く異なり、圧延荷重はワークロールから中間ロール、

図 7 二十段ゼンジミア圧延機のロール配置⁽³⁷⁾.
A ロール: 4 本, B ロール: 3 本, C ロール: 2 本, ワークロール: 1 本 図 8 二十段ゼンジミア圧延機のハウジング
(Sendzimir 社カタログより).

バックアップベアリングおよびサドルを介して図 8 に示した如き箱型の一体構造をもった厚肉ハウジングに伝える構造となっており、軽量にもかかわらずミル剛性が高く、かつ小径ワークロールのため加工硬化の大きいステンレス鋼でも中間焼純なしに、たとえば SUS304 で原板厚 3.2 mm から 0.4~0.3 mm までの圧延を可能にした。このようなゼンジミア圧延機のステンレス鋼用としての我が国への導入は、1953 年に 300 mm 幅の磨き帯鋼用として設置されたのが最初で、その後広幅の需要増大からメートル幅、および 4' (約 1200 mm) 幅、さらに 5' (約 1500 mm) 幅の広幅圧延機の設置が進み、また生産性とコスト低減を目的に広幅(4')ゼンジミア圧延機のタンデム化⁽⁴²⁾が図られるなど広幅ゼンジミア圧延機の設置が急速に進み、1958 年に 4' 幅圧延機が最初に導入されて以来今日までにすでに 23 基を数えるに至っている。この間性能的にも特に 1970 年以降圧延機の広幅化と併せて 1958 年当時に比べ主電動機出力は約 1120 kW から 4850 kW に、圧延速度は 200~250 m/min(3.33~4.17 m/s)から 500 m/min(8.33 m/s)に、巻取機張力は 28 トンから 60 トンに増加し、オイル循環量も約 3000 L/min(0.05 m³/s)から 12000 L/min(0.2 m³/s)へと増加するなど大幅な向上をみた。

上述のようなゼンジミア圧延機の稼動率の上昇に合わせてその周辺技術にも数多くの進歩がみられ、たとえばロールの材質も当初の冷間ダイス鋼(SKD 11 相当高炭素 12%Cr 鋼)から使用条件の過酷化と表面品質の厳しい要求に応えるべくハイス系ロールが用いられるようになり、さらに極く最近では、板厚の薄肉化に伴い、WC などの粉末からの焼結材が試用されるなど、事故率の軽減はもとより表面品質や精度の向上が図られている。また圧延油も当初のナフテン系高粘度ミネラルオイルから低粘度のパラフィン系やソリュブルオイルに転換され、さらに最近ではパラフィン系オイルに高級アルコール類を添加し、より低粘度化を図る試みもなされている。一方これらオイルの品質と同時にオイルの清浄性を向上させるために開発されたスパミックフィルターは、製品光沢度の向上に大きく寄与しており、表面品質改善に向けて絶えざる努力が続けられている。また板厚の測定もゼンジミア圧延機導入当初は接触型のフライングマイクロメータが用いられていたが、圧延速度の高速化と板厚精度に対する要求の厳格化に伴い、X 線マイクロメータを用いた板厚の自動制御(AGC)化が進められ、応答性に優れた HYROP-F⁽⁴³⁾が開発され(1978)、広く普及した。この種の AGC は 1981 年頃までにはほとんどのミルに設置され、製品の板厚精度も 5 μm 以内での制御が可能となった。このような AGC 装置についてはさらに精度向上を目指して、従来のフィードバック方式に対しフィードフォワード AGC⁽⁴⁴⁾やマスフロー AGC⁽⁴⁵⁾などが検

討されており、また圧下と張力の二面制御 AGC⁽⁴⁶⁾も開発され、すでに実用に供されるなど AGC 効果の一層の向上が図られつつある。また板形状についても従来の人手による打診から形状検出器⁽⁴⁷⁾による形状性改善努力も板厚の薄肉化とも相まって進められており(図 9⁽⁴⁸⁾)、さらに最近の 100 μm レベルの超極薄広幅製品などでは VC ロール⁽⁴⁹⁾の活用による形状性の改善も実行に移されている。

一方広幅ゼンジミア圧延機の導入は、ステンレス鋼冷延薄板の製造方式を完全に変えた。すなわち工程の全てをコイル方式で処理するため、冷延中または冷延後の焼鈍や酸洗は、これらの処理の連続化を可能にする連続焼鈍酸洗ラインによって行なわれるようになり、このラインを中心とした冷延板製造用の周辺技術がまた大きく進歩した。ステンレス鋼用連続焼鈍酸洗ラインは冷間圧延済コイルの焼鈍・酸洗を目的としたものの他に、熱間圧延済コイルの焼鈍・酸洗を目的としたもの、あるいはその両者を兼用できるよう設計されたものがあり、焼鈍炉と焼鈍時に生ずるスケールを除去する酸洗槽が、ソルトバスやメカニカルデスケール設備などと共にライン化されている。さらに焼鈍・酸洗後にコイルのサイドトリミングや調質圧延あるいは矯正をも同一ライン上で処理できるよう、トリマーやスキンプスロールなどをライン化し、製造工程の短縮化を図っている例もある⁽³⁸⁾。これら焼鈍・酸洗ライン(AP ライン)の焼鈍炉では従来のバッチ式炉に対し、限られた炉長内をコイルが通過する間に焼鈍を完了しなければならないので、ラインスピードに合わせて炉温を焼鈍目標温度より 50~200 K 高く設定し、高温短時間の処理をする高速焼鈍化が図られているほか、このような高温短時間処理に適するよう配慮したステン

レス鋼も登場してきている。さらに最近ではこれらの炉も生産性向上を狙って炉体を大形化したのに伴い、大きくなった熱損失を軽減するための省エネルギー化も進んでいる⁽⁵⁰⁾。また炉の温度制御も抽出口に設置されたストリップ温度測温器の測温値により、直接炉温を制御し、ストリップ本体の温度管理の自動化も図られている。そのほか AP ラインの最近の新技术としては、炉温制御と同様、酸液の濃度管理の自動化⁽⁵¹⁾やレーザ光を利用した表面検査の自動化も進行中であり、また精整技術の分野では製品の平坦度、急峻度などの形状性の改善にスキンプス後、さらにテンションレベラーにより形状を修正する方法も普及しつつある。そのほか表面品質の改善と酸洗処理の省略を可能にした光輝焼鈍設備も、その自動制御化が大幅に進み、高品質の鏡面板の量産化を可能にしており、今後の伸びが期待されている。

(b) 熱延技術

広幅ゼンジミア圧延機を用いたストリップフォームによるステンレス鋼の製造において、品質的に優れたホットコイルを準備することは基本的問題であるが、当初ホットコイル用の大型鋼塊の造塊やその分解圧延、さらにはホットコイルへの熱延は技術的にも全く未経験であり、いずれも大きな技術的ブレークスルーを要する重大課題であった。しかし 1957 年以降から始った我が国普通鋼メーカーの四段ダンデムミルによる普通鋼のホットストリップ用圧延技術の進歩は、ステンレス鋼ホットコイルの製造にも応用されると同時に、ステンレス鋼の熱間圧延に影響する組成、熱間変形抵抗、高温変形能など幾つかの冶金的要因の解明も大型鋼塊、連铸スラブ共に急速に進み、同時に鋼塊はほとんど連铸スラブに置換えられるに至った。さらにその後ステッセルミル(1961)やプラネタリミル(1966)もステンレス鋼ホットコイル用熱延ミルとして導入されるなど、我が国ステンレス鋼ホットコイルの製造技術は一段と進んだ。このうちタンデムミルは生産能力 200~500 万トン/年の量産型設備で、普通鋼とステンレス鋼兼用で用いられており、我が国では現在 11 基がステンレス鋼用として稼動している。一方ステッセルやプラネタリミルのそれは数十万トン/年で、少量多品種のホットコイル製造に適しており、現在国内ではそれぞれ一基ずつ稼動している。図 10⁽⁵²⁾は上述した各種ホットコイル用熱延ミルの原理図を示したものである。

最近のステンレス鋼ホットコイル熱延上の課題は、一つには生産能率の向上と歩留りの改善を目指したホットコイルの薄肉化と単重の増加があり、すでに現在肉厚は 3~4 mm から 2 mm に、また単重も最大 19 トンまで製造が可能となった。しかし同時に熱延条件は過酷となり、薄肉材ではコイルエッジ部のロールとの焼付きによる肌荒れに起因した歩留りの低下が表面化している。これらに対してはエッジヒーターの導入などは有効と考え

図 9 形状計の原理図(a)と形状計による形状制御システム(b)の一例⁽⁴⁸⁾。

図 10 各種の帯鋼熱間圧延機の原理図⁽⁵²⁾.

られているが、ロール焼付きの機構についてはまだ不明な点が多く、早期の解明が待たれている。一方ホットコイルの寸法精度については、特にここ数年の間に AGC の適用が進み、急峻な板厚変動に対し制御応答性の高い油圧 AGC が採用されて ± 約 10 μm まで精度の向上が達せられているほか、クラウンの精度向上に対してもロールベンディングミル、ロールシフトミル、ロールクラウン変更ミルあるいはクロスロールミルなどの採用により、すでに従来の板厚比 3~4% から 1.5~2% まで精度が向上し、冷延材特に $\leq 100 \mu\text{m}$ 厚の極薄板の平坦度改善に大きく寄与している。

他方、熱間圧延技術のうち、生産財用中厚板の分野では、溶接工数の低減や歩留りの向上を狙った大板化が進んでおり、我が国では現在最大 4 m 幅までの超大板の製造が可能となっているほか、エッジャー⁽⁵³⁾または MAS 法⁽⁵⁴⁾などの平面形状制御技術の進歩により、クロップ代が 1% 程度にまで低減され、歩留りの著しい向上が図られている。

4. 新鋼種の開発

既述の如くステンレス鋼の最近の著しい需要の伸びは、生産技術の目覚ましい発達による製品品質の向上とコストダウンによる価格の低減に負うところが大きい。同時にまた生産技術の進歩とも相まった新鋼種の開発が大きな牽引力となったことを忘れてはならない。このような新鋼種誕生の動機は一つには市場ニーズによるところが大で、たとえばかつての自動車排ガス規則に際しての新しいステンレス鋼開発の要請や、その後のモータ材や車体の軽量化を狙った排気系新材料のニーズ、あるいは最

近ではエレクトロニクスを中心としたハイテク分野の著しい拡大に伴い、今まで注目されなかった新しい磁気的電気的あるいは熱的機能を持ったステンレス鋼の開発が求められていることなどである。他の一つはシーズ研究が実り、需要喚起を狙って開発が進められるもので、炉外精錬技術の結実により、超低 C および N 化が可能となった高純度フェライトステンレス鋼の出現などはその一例である。

現在我が国において JIS に規定されているステンレス鋼は、1984 年に改訂された JIS G 4304 では表 2 の如く 61 種類あり、この中右肩に 1) を付した鋼種は 1981 年より新たに JIS 化された鋼種であり、また右肩に 2) を付した二相鋼 (SUS329 J2L) は 1984 年の改訂時に追加されたものである。このような 1981 年以降 JIS 化が進んだ鋼種の特徴は、一つには時代の要請に応えた高強度と高耐食性を兼ね備えた SUS304 N や 316 N などにみられる N 添加鋼や耐孔食性あるいは耐海水性の向上を目指した SUS317 J1 などにみられる高 Mo ステンレス鋼、または SUS329 J2L などの二相ステンレス鋼あるいは耐応力腐食割れ性のほか、耐高濃度硝酸や耐酸化性を備えた SUSXM15J1 などにみられる高 Si ステンレス鋼などであり、他の一つは SUS304 の代替も可能な VOD または AOD などの炉外精錬技術に支えられた SUS444 に代表される超低 C+N の高靱性高純度フェライトステンレス鋼である。さらには SUS420 J1 や 420 J2 にみられる刃物または工具類などへの需要に応えた高炭素 13~16Cr 鋼の冷間帯としての追加である。

上述の如き JIS 規定鋼種のほかに、国内ステンレス鋼メーカー各社では、JIS 鋼種の差別化を含め各社それぞれの特色を生かした新鋼種の開発も積極的に進められており、

現在新鋼種として公表されているだけでも国内メーカ 23 社で、オーステナイト系; 132 種類, フェライト系; 87 種類, オーステナイト-フェライト二相系; 30 種類,

表 2 ステンレス鋼の種類(JIS G4304-1987 解説)。

分類	鋼 種	組 成
オ ス テ ナ イ ト 系	SUS201	17Cr-4.5Ni-6Mn-N
	SUS202	18Cr-5Ni-8Mn-N
	SUS301	17Cr-7Ni
	SUS301J1 ¹⁾	17Cr-7.5Ni-0.1C
	SUS302	18Cr-8Ni-0.1C
	SUS302B	18Cr-8Ni-2.5Si-0.1C
	SUS303	18Cr-8Ni-高S
	SUS303Se	18Cr-8Ni-Se
	SUS304	18Cr-8Ni
	SUS304L	18Cr-9Ni-低C
	SUS304N1 ¹⁾	18Cr-8Ni-N
	SUS304N2 ¹⁾	18Cr-8Ni-N-Nb
	SUS304LN ¹⁾	18Cr-8Ni-N-低C
	SUS305	18Cr-12Ni-0.1C
	SUS305J1	18Cr-13Ni
	SUS309S	22Cr-12Ni
	SUS310S	25Cr-20Ni
	SUS316	18Cr-12Ni-2.5Mo
	SUS316L	18Cr-12Ni-2.5Mo-低C
	SUS316N ¹⁾	18Cr-12Ni-2.5Mo-N
	SUS316LN ¹⁾	18Cr-12Ni-2.5Mo-N-低C
	SUS316J1	18Cr-12Ni-2Mo-2Cu
	SUS316J1L	18Cr-12Ni-2Mo-2Cu-低C
	SUS317	18Cr-12Ni-3.5Mo
	SUS317L	18Cr-12Ni-3.5Mo-低C
	SUS317J1 ¹⁾	18Cr-16Ni-5Mo
	SUS321	18Cr-9Ni-Ti
	SUS347	18Cr-9Ni-Nb
	SUS384	16Cr-18Ni
	SUSXM7	18Cr-9Ni-3.5Cu
	SUSXM15J1	18Cr-13Ni-4Si
オ イ ラ イ ト イ ス ・ ス テ ン ナ エ	SUS329J1	25Cr-4.5Ni-2Mo
	SUS329J2L ²⁾	25Cr-6Ni-3Mo-N-低C
フ ェ ラ イ ト 系	SUS405	13Cr-Al
	SUS410L ¹⁾	13Cr-低C
	SUS429	16Cr
	SUS430	18Cr
	SUS430F	18Cr-高S
	SUS430LX ¹⁾	18Cr-Ti 又は Nb-低C
	SUS434	18Cr-1Mo
	SUS436L ¹⁾	18Cr-1Mo-Ti, Nb, Zr-極低(C, N)
	SUS444 ¹⁾	19Cr-2Mo-Ti, Nb, Zr-極低(C, N)
	SUS447J1 ¹⁾	30Cr-2Mo-極低(C, N)
	SUSXM27 ¹⁾	26Cr-1Mo-極低(C, N)
マ ル テ ン サ イ ト 系	SUS403	13Cr-低Si
	SUS410	13Cr
	SUS410S	13Cr-0.08C
	SUS410J1	13Cr-Mo
	SUS416	13Cr-高S
	SUS420J1 ¹⁾	13Cr-0.2C
	SUS420J2	13Cr-0.3C
	SUS420F	13Cr-高S
	SUS429J1 ¹⁾	16Cr-0.3C
	SUS431	16Cr-2Ni
	SUS440A	18Cr-0.7C
	SUS440B	18Cr-0.8C
	SUS440C	18Cr-1C
	SUS440F	18Cr-1C-高S
析 硬 化 出 系	SUS630	17Cr-4Ni-4Cu-Nb
	SUS631	17Cr-7Ni-1Al
	SUS631J1	17Cr-8Ni-1Al

マルテンサイト系; 13 種類およびフェライト-マルテンサイト二相系; 1 種類の合計 263 種類に及んでおり⁽⁵⁵⁾⁻⁽⁵⁸⁾, 外国をも含めると 500 種類を超える勢いである。しかしこのような新鋼種の主流は図 11 に示した如く, ステンレス鋼のアキレス腱といわれている局部腐食, とりわけ耐応力腐食割れや耐孔食または耐すき間腐食性を求めた高耐食鋼が 57 鋼種で全体の 22% を占めて第 1 位にあり, 次いで自動車や暖房機用としての耐熱, 耐酸化性を狙った耐熱鋼(13%)がこれに続いている。また第 3 位には鉄道車輛材あるいは最近のエレクトロニクスを中心としたハイテク産業に向けた強度とバネ性を求めた高強度材(24 種類, 9%)が占めている。

一方上述のような新鋼種と並んで, 最近の耐久消費財の需要増大と共に, 表面処理技術の進歩に支えられた各種の表面処理材も台頭してきており, 特に建材関連の鏡面または HL 仕上板やエンボス, あるいはステンレス鋼のカラー化などが進んでいる。カラスステンレス鋼には陽極酸化法によるものと塗装法によるものなどがあるが, この中の塗装カラスステンレス鋼では従来の結晶性ポリ弗化ビニールまたはポリ弗化ビニールデンに対し, 退色性に強い非晶質ポリマー(たとえばルミフロン)が開発され, その優れた機能性からすでに 1987 年におけるこの種カラスステンレス鋼の出荷量は 17700 トンを記録した。このようなステンレス鋼の表面処理鋼板は, このほか CVD または PVD 技術などを応用したカラー化や表面改質も急速に進みつつあり, その成長が期待されている。

図 11 市販新鋼種の機能別分類。

5. む す び

ステンレス鋼業は既述のように新しい生産技術の開発により製品品質の改善やコスト低減を図り, 需要開拓を進め, 現在の隆盛をみるに至ったが, それでもなおステ

ンレス鋼の使用量は、粗鋼全体でみると世界ではまだ 1% (我が国では 2%) にしか過ぎず、その機能性と経済性を考慮すると、粗鋼全体の中でのシェアがさらに広まることは十分予測される。しかしそのためには今後さらに製造技術の開発と設備の改善が必要であり、特に我が国においては他の追随を許さないようなプライオリティを持った開発努力を進めることが重要であろう。

資源の乏しい我が国では、資源の安定的確保も重要であるが、一方新鋼種の開発においても安易な合金元素の添加に頼らない適切な開発施策も望まれ、たとえば防食技術や表面処理技術などの開発、あるいは複合化技術の応用などによる安価な低級ステンレス鋼の改質などにも力を注ぐべきと考える。

文 献

- (1) 昭和 61 年ステンレス鋼需給資料, 資料 42, ステンレス協会, 昭和 62 年 7 月.
- (2) INCO 社資料, (1980).
- (3) 「ステンレス鋼板の受注動向」— 20 年の歩み —, ステンレス協会調査統計委員会 用途別統計分科会, 昭和 62 年 6 月 25 日.
- (4) ステンレス鋼板用途別受注統計年報, ステンレス協会, 昭和 62 年 6 月 25 日.
- (5) B. Strauss: USA Patent, 1, 316, 817(1919), 1, 339, 378 (1920), 1, 404, 907(1922), 1, 404, 980(1922).
- (6) P. Monnartz: Metallurgie, 8(1911) 6, 161.
- (7) 山本尚義: ステンレス, 8(1964), 9, 27.
- (8) D.C. Hilty, W.G. Forgeng and R.L. Folkman: Trans. AIME, 203(1955), 253.
- (9) 梶岡博幸, 竹内英磨, 片山裕之, 大野剛正, 佐藤信吾: 製鉄研究, (1977), 291, 12197.
- (10) 竹内英磨: 鉄と鋼, 70(1984) 7, 687.
- (11) 竹内英磨: 第 118, 119 回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, (1987), 22.
- (12) T.O. Norrman: Iron & Steel Maker, 2(1975), 28.
- (13) 石原和雄, 阪根武良, 小玉 宏, 森重光之, 眞目 薫: 鉄と鋼, 66(1980), S836.
- (14) H. Bauer and H.J. Flescher: The 3rd VOD Conf. Tokyo, (1977).
- (15) 恵藤文二: 第 28 回西山記念講座, (1974).
- (16) 竹内英磨: 第 118, 119 回西山記念講座, 日本鉄鋼協会, (1987), 18.
- (17) 日本鉄鋼協会共同研究会, 第 69 回特殊鋼部会, (1982).
- (18) 池田敏世, 徳田 誠, 家田幸治, 望月則直: 日本ステンレス技報, (1985), 20, 139.
- (19) 日本鉄鋼協会共同研究会, 第 67 回特殊鋼部会, (1982).
- (20) 鈴木是明, 北村和夫, 竹之内朋夫, 舟崎光則, 岩崎義幸: 学振第 19 委員会資料, 19530.
- (21) 山内 隆, 丸橋茂昭, 笠笠雅普, 山田桂三, 東 洋幸, 松山 猛, 西前 年: 鉄と鋼, 69(1983), S878.
- (22) 丸橋茂昭, 山内 隆, 山田桂三, 東 洋幸, 松山 猛, 西前 年: 鉄と鋼, 69(1983), S878.
- (23) 松尾 亨, 池田隆果, 亀川憲一, 阪根武良: 鉄と鋼, 72 (1986), A33.
- (24) 山本浩太郎, 尾上俊雄, 牧野武久, 荒川高治, 岡村正義: 鉄と鋼, 72(1986), A37.
- (25) 竹内英磨: 第 118, 119 回西山記念講座, (1987), 5.
- (26) 津金不二夫, 沢井富美雄, 斎藤 伸: 鉄と鋼, 49(1963), 1607.
- (27) 杉本正勝: 分析化学, 12(1963), 476.
- (28) LECO 社カタログ, (1980), March.
- (29) '80/ 島津科学機器, (1980), 139.
- (30) H. Bessemer: Stahl Eisen, 11(1891), 921.
- (31) 鉄鋼便覧, II. 製鉄・製鋼, 日本鉄鋼協会編, 丸善, (1979), 624.
- (32) P. Desfossier, W. Gerling and K.O. Zimmer: Stahl Eisen, 86(1966), 6, 321.
- (33) 栗田満信, 市川 浩, 足立隆彦, 岸田 達: 鉄と鋼, 56 (1970), S62.
- (34) 竹内英磨, 松村省吾, 日高良一, 長野 裕, 鈴木康夫: 鉄と鋼, 69(1983), 248.
- (35) 鉄鋼界報, 日本鉄鋼連盟, 1985 年 11 月 21 日, 4.
- (36) 鉄鋼界報, 日本鉄鋼連盟, 1988 年 4 月 1 日, 2.
- (37) E.C. Larke(鈴木 弘, 矢吹 豊, 竹内政夫共訳): 板材の庄延, コロナ社, (1960), 30.
- (38) 白井 堯: 第 118, 119 回西山記念講座, (1982), 92.
- (39) Foil, Sheet and Strip Mills, Kobe Steel, Ltd. Machinery Div. Catalogue, (1985).
- (40) 小出 謙: 日本金属学会会報, 1(1962), 278.
- (41) 升守一典, 倉本百次郎: 日新製鋼技報, 9(1963), 59.
- (42) 西村和美, 尾本 保, 古賀 宏, 田辺寿久: 日新製鋼技報, 25(1971), 1.
- (43) 梶原利幸: 日本機械学会誌, 84(1981), 486.
- (44) 松原 昭, 橋本博志, 田中尚一, 安沢一洋, 宮成 元: 日新製鋼技報, 39(1978), 107.
- (45) 高德芳忠, 紺屋範雄, 神谷昭彦, 山本準一: 川崎製鉄技報, 13(1981), 112.
- (46) 宮本俊光, 米山儀男, 田村一二, 相沢義治, 石川俊也, 宮沢 功, 小田原 貴: 日本ステンレス技報, (1987) 22, 135.
- (47) 浦山精一, 丹羽康之, 高德芳忠, 沢田幸雄: 川崎製鉄技報, 1(1976), 161.
- (48) 藤井国一: 塑性と加工, 20(1979) 217, 89.
- (49) 国本駿策, 米山儀男, 相沢義治: 日本ステンレス技報, (1982) 17, 163.
- (50) 吉川輝美永, 高橋順昭, 西山利文: 日本ステンレス技報, (1981) 16, 115.
- (51) 山本昭雄, 白井 堯, 三浦博昭, 式部一男, 鈴木 智, 阿部慎二: 日新製鋼技報, 50(1983), 69.
- (52) 金井俊睦: 第 44, 45 回西山記念講座, 日本鉄鋼協会, (1977), 37.
- (53) 長田修次, 河原田 実, 中島浩衛, 神山藤雅: 鉄と鋼, 65 (1979), S303.
- (54) 柳沢忠昭, 三芳 純, 坪田一哉, 菊川裕幸, 池谷尚弘, 磯山 茂, 旭 一郎, 馬場和史: 川崎製鉄技報, 11(1979), 2, 168.
- (55) ステンレス, 30(1986) 12, 34.
- (56) ステンレス, 31(1987) 1, 37.
- (57) ステンレス, 31(1987) 3, 20.
- (58) 特殊鋼, 36(1987) 9, 13.
- (59) 鉄鋼界報, 日本鉄鋼連盟, 1988 年 6 月 11 日, 5.