

特別講演

□渡辺義介賞受賞記念

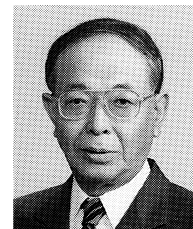
ステンレス鋼の発展と生産の近代化

Synergy between Market Demand, Manufacturing Technologies and New Products in Development of Stainless Steel

星野和夫

Kazuo Hoshino

日新製鋼(株) 代表取締役会長
(現 取締役相談役)



* 脚注に略歴

1 はじめに

我が国のステンレス鋼の発展は概ね図1のような関係にあると言える。すなわち、戦後の日本経済の復興とともに大衆の生活様式が向上し、生産財・大衆消費財としてのステンレス鋼の顕在的・潜在的需要が高まり、市場はより安く品質の安定したステンレス鋼の供給を要求した。メーカーはステンレス鋼の需要の伸びを期待し、生産性に富みかつ低コストのステンレス鋼を多量に製造可能な技術の導入、新設備の建設を重ねながら技術を進化させた。その結果、より安いステンレス鋼を市場に提供することが可能となり、ステンレス鋼は市場に定着しながら新しい需要を喚起した。また市場は新商品を世に出すために新しいステンレス鋼を要求し、開発された新しいステンレス鋼はまた新しい需要を生み出してきた。

新しいステンレス鋼を生み出すに当たっては、時には従来の製造技術では達成できない、より高度な製造技術を要求し、技術向上のドライビングフォースとなった。一方、製造技術

の進化は更なるステンレス鋼の新製品を生み出す力となった。このように我が国のステンレス鋼の発展は市場、製造技術、新製品という3つの要素が相互に触発しながらスパイラル状に進んできたと考えられる。

図2は1955年以降の国内におけるステンレス熱間圧延鋼材生産量の推移¹⁾と市場・設備導入の動向を概観したものである。熱間圧延鋼材生産量をマーケットの拡大とみなすと、前述したように製造技術・新製品・市場が相互に触発してステンレス鋼は階段上に発展してきたと言える。ここでいう市場には世の中の環境変化や規制の導入が含まれていることも無視し得ない。

この小論では、ステンレス鋼の製造技術の進展ならびにその用途拡大への取り組みを中心に、「我が国のステンレス鋼の発展」について述べたい。(なお、内容を絞るため筆者の身近な日新製鋼周南製鋼所が取り組んできた技術導入・技術

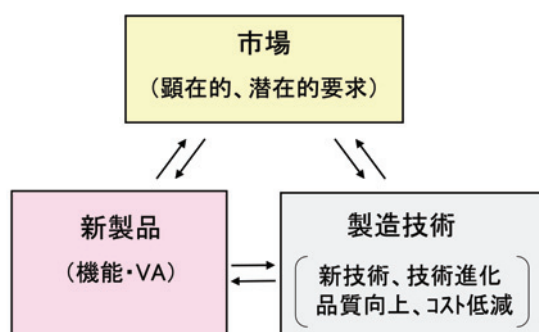


図1 市場、製造技術、新製品の関係

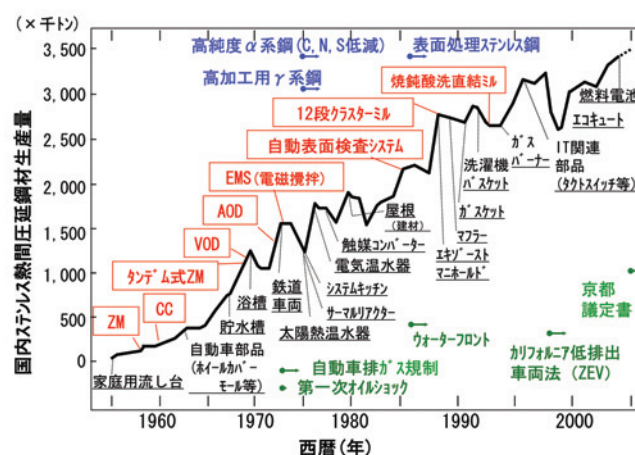


図2 国内におけるステンレス熱間圧延鋼材生産量の推移¹⁾と市場・設備導入の動向

* 昭和38年3月阪大工学部を卒業後、38年4月日新製鋼(株)入社、62年3月周南製鋼所製鋼部長、平成3年研究管理部長及び鉄鋼研究所長、5年6月取締役、7年6月取締役周南製鋼所長、8年6月常務取締役、11年6月専務取締役ステンレス事業本部長を歴任し、13年6月代表取締役副社長に就任した。平成14年4月代表取締役会長に就任。

開発などに若干偏りがちになってしまったこと、会社名は当時の社名になっていることをご容赦願う。）

2 製造技術の発展

2.1 製鋼技術

図3にステンレス製鋼技術の発展を示す。戦後間もなくアメリカから酸素製鋼によるステンレス溶解法が伝えられ、1951年頃から日本冶金、日本金属工業、日本ステンレスのステンレス専業3社が試行を始めた。日新製鋼・周南製鋼所がステンレス製鋼を始めたのは1962年であるが、当時の電気炉法による製鋼を振り返ってみると、

- (1) クロム歩留が不安定で、高価な低炭素フェロクロムの原単位が高かった。
- (2) 低Cステンレス鋼の溶製は、生産性・歩留が非常に低かった。
- (3) 介在物が多いことから、それに起因した表面疵による歩留低下や、時にはエンドユーザーでの加工割れの問題などが生じていた。

のが実情であった。このような生産効率、歩留、製造コスト、ユーザートラブル等多くの問題に対して電気炉溶湯を真空下で処理する試みがなされたが、当時は実際の生産には活用されていなかった。

2.1.1 LD-VOD, AOD法の導入と発展

かかる状況下、日新製鋼・周南製鋼所は高脱炭可能なLD転炉と真空中の取鍋に入れられた溶鋼の表面に酸素を吹き込んでCrの酸化を抑えながら脱炭するEdelstahlwerke Witten社のVOD法をドッキングし、加えるに昭和電工が開発した固相還元プロセスを利用した高炭素フェロクロムプラントをオンサイトに配したLD-VOD製鋼プロセス(図3)を1969年に建設した²⁾。真空中で酸素吹錬することに対してか

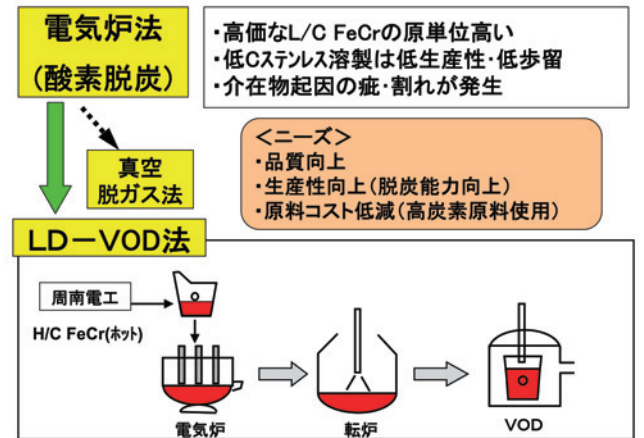


図3 ステンレス製鋼技術の発展

なり疑問が持たれていた時期での断行であり、操業当初は各プロセスのアンマッチ、転炉耐火物の寿命など多くの問題に遭遇したが、技能習熟、技術改善の積み重ねでステンレス製鋼の一連のプロセスとして完成させた。

時を同じくして、米国のUnion Carbide社が希釈脱炭法として分類されるAOD法を開発し、我が国では1971年に日本金属工業が導入した³⁾のに続いて各社が相次いで採用した。現在ではLD-VOD法とAOD法がステンレス製鋼の2大プロセスとして位置付けられている。図4に両プロセスの導入と発展について示したが、それぞれに特徴を有するのでその是非を論じることはできない。ただ、AODの方がSUS304のような量産型鋼種の生産性に富むためか、世界規模でみるとその導入数が多い。ただし、後述するが、LD-VOD法の技術進化なくして高純度フェライト系ステンレス鋼の発展はあり得なかった。1976年、川崎製鉄は複数の羽口を有する取鍋底から転炉で粗脱炭した溶湯に大量のアルゴンガスを吹き込み、溶湯を強攪拌して極低域までC, Nを低減できることを実証し、高純度高Crフェライト系ステンレス鋼生産の先鞭をつけた。一方、AOD法では低C, N域での脱炭・脱窒が非効率であったが、大同特殊鋼は1991年にAODに真空機能を付与した設備を実用化し、新日本製鐵もその技術を導入するに至っている。

2.1.2 連続 casting 技術

ステンレス鋼のスラブ連铸機は1960年八幡製鐵・光製鐵所に初めて導入され、これに続き1970年代までに各社ともスラブ連铸機を導入した。

ステンレス鋼の連続 casting において注目すべき技術は新日本製鐵・室蘭製鐵所が1973年に初めて導入した電磁攪拌装置である。SUS430に代表されるフェライト系ステンレス鋼では板製品を加工するとリジングと呼ばれる縞状の表面起伏が生じ、製品品質(外観)を劣化させる。リジング現象はスラ

LD-VOD法	時期	AOD法
日新製鋼周南導入	1969年	
新日鐵八幡導入	1971年	日金工相模原導入
	1972年	日金工衣浦導入
・原料炭素値に制約されない(原料選択の自由度大)		・設備投資少
・機能分化により高効率化		・温度・成分のコントロール容易
・高純度α系ステンレス鋼発展に寄与		・γ系ステンレス鋼の量産に寄与
炭素・窒素の超極低化		低炭素域での脱炭能力向上
SS-VOD開発(川崎製鉄)		真空AOD開発(大同特殊鋼)

図4 LD-VOD法とAOD法の導入と発展

ブ凝固組織の柱状晶に起因し、その後の熱延・冷延工程においても残存する結晶方位の近いバンド状の集合組織が原因と考えられている^{4,5)}。このリジングの改善方法として、熱延・冷延工程での改善が種々検討されたが、抜本的な解決策には至らなかった。しかし、ある液相・固相比率の時点で電磁攪拌を付与することによりスラブ凝固過程での柱状晶の成長が抑制され、等軸晶率が増大してリジング現象が著しく改善されることが見出された。この電磁攪拌技術はその後のフェライト系ステンレス鋼の需要拡大に大きく寄与したと言える。

2.2 冷延技術

2.2.1 センジミアミルとクラスターミルの導入

国内のステンレス鋼の生産は1950年代までシートを4段圧延機で繰り返し圧延するのが一般的であった。しかしながら、SUS304などは加工硬化が著しいため、ワンパス当たりの圧延率を大きく取れず、生産性の低いものであった。硬質で圧延にくい材料に対して、Tadeusz Sendzimirは小径のワークロールと堅牢で剛性の高い一体型のハウジングから構成したセンジミアミルを開発した。図5にその外観を示す。この圧延機はステンレス鋼の圧延生産性を飛躍的に向上させるもので、1945年にWashington Steel社に導入されて以降、米国を中心に急速に発展した。

ステンレス鋼の今後の需要拡大を予見した日新製鋼は、日立製作所の協力により純国産センジミアミルの導入を推進し、1958年に周南製鋼所に国産第1号機となるセンジミアミルを建設した。このミルは同時に日本初の広幅圧延用センジミアミルでもあった。当時、国内のステンレス鋼冷延品の生産量が月産2,000トン前後（注：昭和33年当時のステンレスホットコイル生産高67,394トン）だったことを考えれば1社で全国生産量を上回る設備導入であったが、翌1959年には日本冶金がDemag社から導入し、以降各社ともセンジミ

アミルの導入を積極的に行った。その結果、10年間で11基が国内で稼動することになり、市場からの旺盛なステンレス冷延製品の需要に応えることとなった。

ステンレス鋼の冷間圧延機としてその地位を獲得したセンジミアミルだが、その構造上の問題より圧延形状には限界があった。1980年代後半より広幅コイルで高精度の平坦度を求める新規の用途が台頭し始め、圧延形状の改善が重要な問題となった。そこで日新製鋼は新たな圧延機の導入に踏み切り、センジミアミル並みの小径ワークロールを使用できる12段クラスターミルを初めて広幅ステンレス鋼の冷間圧延に採用した。以降、現在に至るまで国内外で10基が稼動した。12段クラスターミルではセンジミアミルで改善困難であったクォーター延びが大幅に改善され、新しい需要に対応した。

2.2.2 冷間圧延プロセスの連続化

センジミアミルとクラスターミルによりステンレス冷延鋼板の需要拡大には対応してきたが、これらリバーシブルミルは各圧延パス毎にコイルのトップ、ボトムでは減速しなければならないこと、コイルのハンドリングに時間を要することなど、生産効率、労働生産性に欠ける面があった。これらの点を克服するために日新製鋼はラインの連続化に挑戦した。以下に2例を述べる。

1) センジミアミルのタンデム化

図6にタンデム式センジミアミルの構成を示す。センジミアミルはワークロールが小径であり、圧延時に鋼帯の先端が噛み込み難いこと、また張力の無い尻抜き圧延が困難なことなどの問題があった。それらの課題を克服すべく、圧延機入側に溶接機とルーパーを配置するとともに、圧延機前後にピンチロールを配することで圧延時の張力を常に確保したタンデム式センジミアミルを建設した⁶⁾。今日、圧延機のタンデム化は普通鋼の分野では一般的なものとなっているが、当時日本鋼管福山で計画が進んでいた日本初の連続式タンデムミ

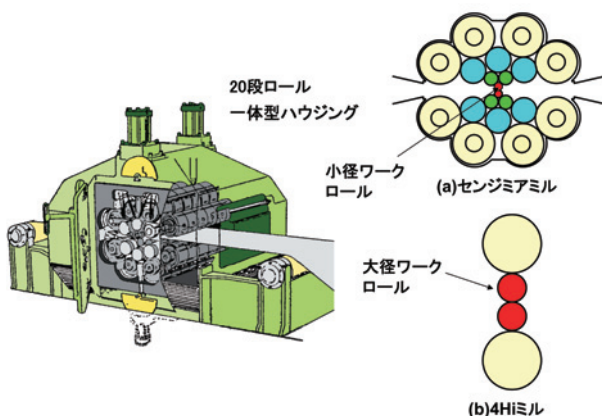


図5 センジミアミルの外観

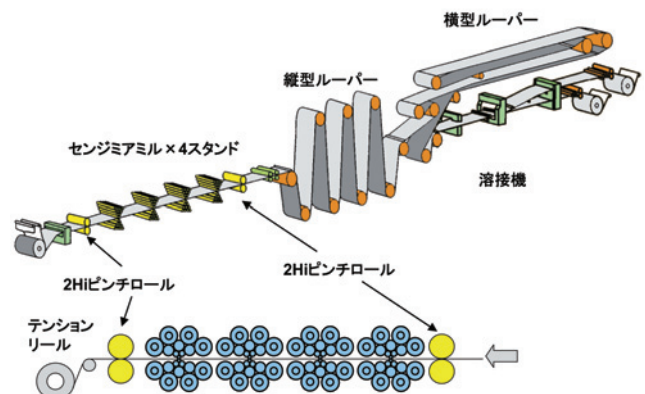


図6 タンデム式センジミアミルの構成

ル導入に先駆けること2年前であった。

建設後、2回のリフレッシュ改造で進化を続け、運転の自動化、全スタンド自動板厚制御の導入等で省力化、高生産性を達成し、現在の生産量は月産3万トン強となっている。

2) ホットコイルの焼鈍酸洗ラインと圧延機の直結

図7に焼鈍・酸洗工程の後段に冷間圧延工程を直結したラインの構成を示す。ステンレスホットコイルの焼鈍酸洗ラインに圧延機を直結することに対して、高Crステンレス鋼表面に発生する線状疵および圧延時のロールマークという2つの大きな問題があった。

高Crステンレス鋼は酸化し難いため、熱間圧延時のスケール生成量が少なく、ロールと鋼板との間で焼き付きが生じ、線状疵が発生し易い。そのため冷間圧延前の疵取り研磨作業が必須となり、焼鈍酸洗と圧延を直結するにはこの問題を解決しなければならなかった。そこで熱延工程においてハイスロールの採用と流体潤滑の適用によって熱延での線状疵発生を抑制するとともに、ホットコイル表面の酸化物を除去するデスケール工程で酸洗と表面研削を強化し、健全なホットコイルを圧延機に送入するという技術確立した。一方、圧延時のロールマークは圧延ロールに生じる疵の転写によるものである。ロールマークの防止にはブラシロールによる異物除去が有効であるという認識のもと、圧延機には6Hi-UCミルを選定し、かつワークロールをできるだけ小径にするために中間ロール駆動とした。

以上のような技術革新により、圧延機の出側ではコイル毎に停止することなく常に一定のプロセス速度で操業が可能となった⁷⁾。

ラインの連続化について世界の潮流をみると、海外ではホットコイルの焼鈍工程を省略し、メカニカルデスケールングの後、小径のワークロールとこのワークロールの水平たわみを防止するためのサイドサポートロールを有したZ-Highミルで圧延し、さらに冷延コイルの焼鈍・酸洗工程までも連結

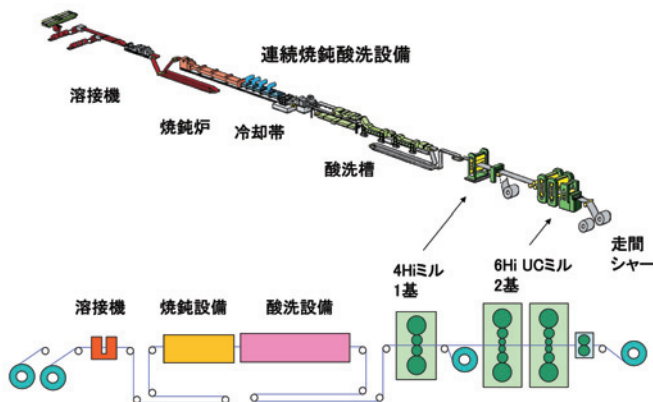


図7 焼鈍・酸洗設備とタンデム式冷間圧延機を直結したライン構成

した構成のラインが出現している。単一ラインでホットコイルから冷延製品が製造できるというすばらしい構想であるが、稼動実態が公表されていないのでその生産性、優位性を評論することはできない。ただ、プロダクトミックスまで含めてそれぞれの工程が最大限にその能力を発揮できる配慮がなされているか、すなわち“兎と亀の二人三脚”になっていないかどうかによってその評価は分かれると思われる。

3 市場動向と新商品

3.1 オーステナイト系ステンレス鋼の発展

3.1.1 加工誘起マルテンサイトの生成とその適用

図8に加工誘起マルテンサイト生成の概念を示す。SUS304、すなわち18Cr-8Ni鋼は平衡状態図上では α 相と γ 相の二相組織となるが、実際の焼鈍後には γ 単相組織である。これは、 α 相の化学自由エネルギーが低くなる T_0 温度以下でも拡散変態が生ずることなく、マルテンサイト変態を起こす可能性のある準安定な状態で室温に持ち来たされていることに因っている。マルテンサイトに変態するには界面エネルギーやひずみを克服する必要があるため、 M_s 点は T_0 温度よりも $200\sim 300^\circ\text{C}$ 低温にあるといわれている。SUS304やSUS301は室温では正にこの状態にあり、機械的駆動力が与えられればマルテンサイト変態を生じる鋼である。

図9に各種オーステナイト系ステンレス鋼の応力-ひずみ曲線を示す。応力は一種のひずみ一定モデルで示されるように、加工誘起マルテンサイト相の強度とその体積率、母相のオーステナイト相強度とその体積率で決まる。加工誘起マルテンサイトの強度は侵入型元素C、Nに依存し、母相のオーステナイト相の強度はひずみと加工誘起マルテンサイト相の体積率で決定される。すなわち、SUS304、SUS301は加工誘起マルテンサイトが生成することにより大きな加工硬化能と高い均一伸びを示す。

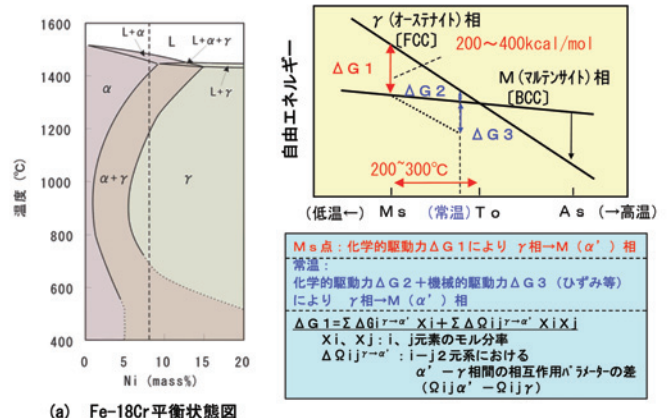


図8 加工誘起マルテンサイト生成の概念

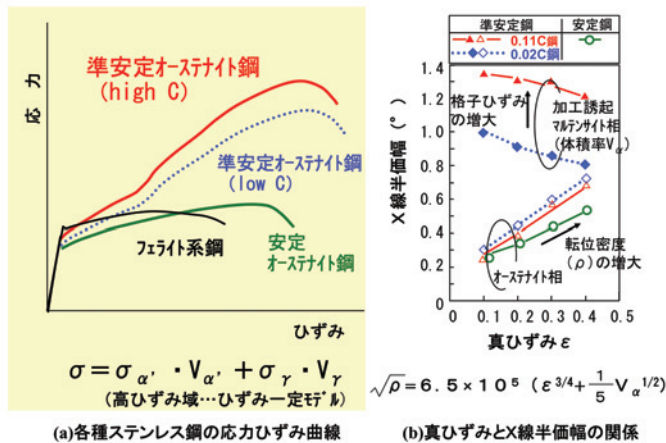


図9 各種ステンレス鋼の応力ひずみ曲線

3.1.2 オーステナイト系ステンレス鋼の鋼種拡大

オーステナイト系ステンレス鋼は耐食性に富むうえに、上述したような機械的性質を有することから、その特性を活かして需要を伸ばしてきた。SUS301はロールテンパー処理によって高強度化し得ることよりばね材として適用されている。また、均一伸びが大きいことから張り出し成形品にも使用されている。SUS304もばね材として適用されるとともに、伸びフランジ性、縮みフランジ性に優れることから、複合成形が施される部品、部材に多用されている。一方、 γ 相安定型ステンレス鋼のSUS305は多段絞り成形品や非磁性用途に適用されている。しかし、これらの鋼種が市場の要求を全て満足してきた訳でなく、新たなニーズに対して種々の改善もなされてきた。以下に2つの事例を紹介する。

鉄道車両用材は従来から普通鋼板に塗装して使用されていた。1970年代に入り、ポスト塗装の省略、すなわちメンテナンスフリー化や高速化に伴う車両の軽量化を目的として耐食性と強度を兼ね備えたステンレス鋼板が適用されるに到り、米国New Yorkの地下鉄車両でAISI301が採用された。SUS301は高強度ではあるが、C含有量が多いため溶接部が鋭敏化して発生する粒界腐食が懸念され、沿岸地域を走行し、かつ高温多湿な環境に曝される日本国内の電車網への適用に当たってはこの解決が必要であった。そこでC量を低減し、Cと同様に固溶強化能に優れた溶接部の耐食性を損なわないN量を高めた鋼種が開発された⁸⁾。車両の各部位毎に調質圧延率や板厚の仕様を日本の車両メーカーとともに設定しステンレス車両が実現した。この材料は現在SUS301LとしてJIS規格化され、鉄道車両用素材は勿論のこと、他用途へも展開されている。

SUS304は複合成形に適しているが、図10に示すように縮みフランジ成形品に適用すると時期割れが発生する場合がある。この割れは加工後数時間から長い時には数ヶ月後に発生する遅れ破壊現象で、加工誘起マルテンサイトがある量以上

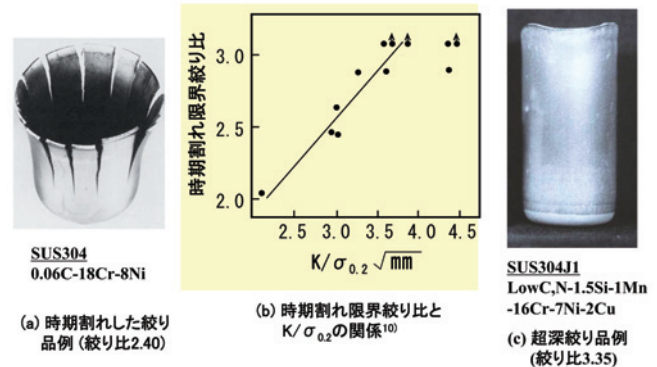


図10 絞り品例と時期割れ限界比と応力拡大係数の関係

生成されている部位で発生する。図10中には時期割れ限界比と冷間加工を施し加工誘起マルテンサイトを生成させた材料の応力拡大係数との関係¹⁰⁾も示したが、加工硬化に比し応力拡大係数の大きい、すなわち軟質なマルテンサイトが誘起される鋼種は時期割れに対して耐性があることがわかる。これらの知見により改良された鋼種は縮みフランジ成形にも適しており、超深絞り品や複雑な張り出し成形品にも適用されている。この鋼種はSUS304J 1、J 2としてJIS規格化されている。

3.2 フェライト系ステンレス鋼の発展

3.2.1 フェライト系ステンレス鋼の短所と長所

SUS430はSUS304に比し、孔食や粒界腐食が発生し易いこと、厳しい加工に追従できないことを挙げられる。他方、長所は応力腐食割れ (SCC) がないこと、熱膨張係数が小さいことである。したがって、フェライト系ステンレス鋼の耐粒界腐食性、耐食性、加工性が改善されればSUS304では対応できない用途に展開できるというコンセプトに基づいて、多くの研究開発がなされてきた。Key Technologyは鋼中C、N、Sの低減と前述したリジング改善である。これらの特性を改善することで水環境部材、ウォーターフロント建造物、自動車排ガス部材等の新規市場を拡大してきた。

3.2.2 フェライト系ステンレス鋼の鋼種拡大

C、Nは耐粒界腐食性に悪影響を及ぼすため、Ti、Nbを添加してこれらを炭窒化物として固定することが有効である。C、Nの固定に必要なTi量は化学量論的には (C+N) の4倍、Nbの場合は約7倍であるが、溶接熱影響部は非平衡であるので良好な耐粒界腐食性を得るには最低でも15倍以上の (Ti+Nb) 量が必要である¹¹⁾。高純度フェライト系ステンレス鋼の耐食性を向上させる主たる元素はCr、Moであるが、Crに比較してMoのほうがその向上への寄与は大きく、19Cr-2Mo鋼の孔食電位はSUS304の孔食電位より高い値を示す。Ti、Nbの単独あるいは複合はフェライト系

ステンレス鋼の加工性向上にも効果があり、深絞り性が大幅に改善される。このように、フェライト系ステンレス鋼は製造技術の発展とともに進化を遂げ、様々な用途に展開されてきた。ここでは電気温水器缶体の開発事例を紹介する。

電気温水器缶体には、元々、珪瑯材が使用されていたが、軽量化、耐衝撃性の面からステンレス鋼が注目された。しかし、ステンレス化の初期には腐食に関わるトラブルが多発した。図11に電気温水器缶体と隙間腐食の模式図を示す。温水器缶体では下鏡/胴板の溶接部(図中丸印の位置)に隙間が形成される。隙間内部では酸素濃度が低下し、隙間内外で酸素濃淡電池が形成される(①)ことにより隙間内で腐食が発生する。隙間内で溶出した金属イオンの加水分解により隙間内のpHは低下し(②)、さらに電気的中性を保つために塩素イオンが進入し(③)、隙間内はより厳しい腐食環境となり腐食が進行する。この用途では耐食性に優れるSUS304のようなオーステナイト系ステンレス鋼が適材と考えられるが、SUS304はSCCが生じやすい。しかし、SUS304程度の孔食電位しか示さないフェライト系ステンレス鋼では隙間腐食が抑制できない。豊富な腐食データ、モニター試験のもと、新日本製鐵はこの用途に19Cr-2Mo-Ti, Nb鋼を投入¹²⁾し、電気温水器の普及を促した。

フェライト系ステンレス鋼が多量に使用されるようになったもうひとつの分野は自動車排ガス部材である。1976年に自動車排ガス規制が施行され、自動車メーカーは耐熱性、耐食性を具備したステンレス鋼の排ガス部材への適用を試みた。高温・常温という繰り返す熱履歴を受ける排ガス部材ではオーステナイト系ステンレス鋼は熱膨張係数が大きいこと、スケール剥離が起こり易いこと、熱疲労特性に劣ることなどから、フェライト系ステンレス鋼を採用した。現在使用されている材料系は自動車メーカー、車種によってまちまちであるが、基本的なコンセプトは排ガス経路の上流部には耐熱性(高温強度、耐酸化性)、下流には耐食性に優れた鋼種が適用

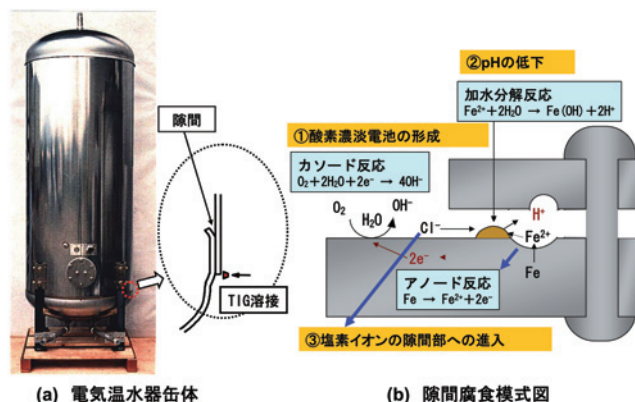


図11 電気温水器缶体と隙間腐食の模式図

されている。とくにエンジンに最も近いエキゾーストマニホールド部位は高温強度に加え優れた熱疲労特性が要求されるため、これらの特性を備えるNb, Mo含有鋼が多く使用されている¹³⁾。

4 むすび

ステンレス鋼における今後の課題として以下の4点について述べ、結びとしたい。

4.1 トータルソリューションの提供による ステンレス市場の拡大

ステンレスメーカーはこれまで市場の顕在的、潜在的要求に対し、いろいろな角度からデータを提供するとともに、新製品を投入しユーザーと一体となって市場拡大に努めてきた。今後は今まで以上に機能を高めた材料開発を進めるとともに、材料機能を活かし得る加工方法、溶接方法を含めたトータルソリューションをベースとした新しい切り口の市場開拓が必要と考える。

4.2 国際競争力の維持

海外のステンレスメーカーは安価な労働力を背景に設備能力を拡大しつつあるが、ステンレスの一貫製造費に占める労務費の割合はただか7%程度である。その差の大小を論じるよりも、日本の高い技術力をベースに高付加価値製品を効率的に製造し、その労務費の差を吸収すべく努めるしかない。そのためにも常に最先端の技術力を維持することが重要と考える。

4.3 プロセスの連続化における留意点

労務費の差を埋める1手段としてプロセスの連続化がある。しかし、プロセスの連続化に当たっては、前述した通り、単なる装置技術だけでなく、周辺技術の開発も非常に重要である。連続化しても個々のプロセスが最大限発揮できるよう設備配置やプロダクトミックスも十分検討する必要がある。

4.4 環境保全への貢献

現在、世界的規模で資源採掘、製造、加工、使用の各断面で環境負荷を低減する追求と製品の資源循環を考慮したライフサイクルという観点で環境負荷最小を目指す追求が進められている。ステンレス鋼の主原料であるCr, Niの製造においてCO₂負荷量が多いことは否めないが、高耐食性、高耐熱性に富むステンレス鋼は製品・構造物の長寿命化を果たし、廃棄物の削減やメンテナンスフリーという相乗効果をもたらし、省エネ、省力化に貢献している。ステンレス鋼は今

後のクリーンエネルギー対策の新技術においても重要な役割を果し続ける材料であり続けなければならないと考える。

参考文献

- 1) 鉄鋼統計月報, 通産省, ステンレス需給資料, JSSA
- 2) 中野良知, 福岡浩, 南立憲一, 佐野泰弘, 高橋右治: 日新製鋼技報, 28 (1973) May, 1.
- 3) ステンレス鋼技術史, 日本金属工業株式会社
- 4) 長谷川守弘, 丸橋茂昭, 村中裕, 星記男, 衣笠雅普: 鉄と鋼, 67 (1981) 8, 1354.
- 5) 植松美博: 京都大学博士論文, (1992)
- 6) 佐藤弘幸, 西本忠博, 戎誠治, 宮成元: 日新製鋼技報, 48 (1983) June, 50.
- 7) 中村照久, 窪田純一, 戎誠治, 杉野隆, 林康生, 兼安信太郎: 日新製鋼技報, 70 (1994) Sep, 74.
- 8) Victor F. Zackay, E.R. Parker, Dieter Fahr and Raymond Busch: Transactions of the ASM, 60 (1967), 252.
- 9) 田中照夫, 大崎慶治, 渡辺治幾, 星野和夫: 鉄と鋼, 69 (1983) 11, 1456.
- 10) 星野和夫: 鉄と鋼, 69 (1983) 8, 998.
- 11) 星野和夫, 吉井紹泰: 日新製鋼技報, 34 (1976) May, 47.
- 12) 小野山征生, 辻正宣, 竹村右: 鉄と鋼, 63 (1977) 5, 641.
- 13) 奥 学: 自動車用材料の高温特性研究の最先端, 日本金属学会, 東京, (2001), 5.

(2006年4月6日受付)