連続めっきプロセス

原 富 啓*

Continuous Strip Plating Processes

Tomihito HARA*

1. 概 要

表面処理鋼板は低成長期に入った現在でも、品種の多様化と共に量的拡大を示している鉄鋼製品の一つである。その背景には、生活様式の変化から来るニーズの多様化、高級化に伴って、表面処理鋼板の適用範囲が拡大するという需要側の変化がある。一方これら変革するニーズに応えるべく、鉄鋼メーカー側も製造プロセスの合理化、新製品の開発に努め、その時々に応じて必要とされる製品を適正な価格で供給し得る体制を整えてきたこともまた見逃せない事実である。

高度成長期、量の拡大を目指し鉄鋼の製造技術は大型化と高速化連続化の面で大きく進歩した。鉄鋼製造の上工程、即ち鉄鋼分野では主として大型化が、そして圧延以降では高速化連続化が革新技術の中心となってきた。その中にあって、鋼板のめっき、塗装等表面処理プロセスは古く1940年代より連続化が達成されていた分野である。連続プロセスの中での量の拡大は当然のことながら高速化が要求される。他方質の拡充、特に多様化するニーズに応えるべく開発された多種多様な製品を同一ラインで製造するための多目的ラインもまた要求される。本来高速連続ラインは少品種大量生産指向であり、多品種生産ラインとしては必ずしも適切ではない。連続めっきプロセスはこの相反する二つの流れを軸に、現在なお進歩発展が続いている分野である。本稿ではプロセスを中心にこの分野の現状、発展経過、問題点のクローズアップ、今後の方向について概説する。

2. 連続めっきプロセスの現状

2-1 溶融めっき

溶融めっきの連続プロセスはライン内焼鈍方式とライン外焼鈍方式に大別されるが、現在では特殊な例を除き前者が一般的である。このプロセスの特長は、鋼板のめっき前処理（洗滌-活性化）と焼鈍を同一炉内で行なっ

てしまう方法である。炉は加熱帯と還元帯に大別され、前者はストリップの昇温と同時に表面に付着している圧延油等を燃焼除去する機能を有する。加熱は直火加熱により行われるが、完全な酸化雰囲気中で加熱するセンジミア法から、空燃比を制御して無酸化、または弱酸化にとどめる通称無酸化炉方式に移行してきている。還元帯は N_2-H_2 の混合ガス雰囲気内でラジアントチューブ等を使用、間接加熱が行われるゾーンであり、焼鈍と同時にストリップ表面の酸化物を還元除去（活性化）する機能をもつ。なお、軟質材を製造する目的で、中間でジェットクーリングした上、適当な温度でオーバーエージングを行うためのシェルファニーリングゾーンを有する装置が1965年頃より出現した。この考え方は後にシート用連続焼鈍プロセスの一つの母体となったものである。炉型式は横型、たて型とあるが、設置スペース、通板操作性、設備コスト等を総合的に勘案して決定されている。

ストリップは更に最終冷却ゾーンで、めっきに最適な温度まで冷却されスナウト部を經由して、溶融ポットに導入、めっきされた後、絞り装置、冷却、レベラー、化成処理を経て最終製品となる。代表的なライン構成を図1に例示する。

2-2 電気めっき

電気めっきで、最も古くから連続化が行われたのはスズめっきである。ラインは、脱脂、酸洗、電解めっき、リフロー、化成処理の各セクションから構成されている。この中で最も重要な電解めっきセクションの電解槽構造、電解浴の種類によって方式が分類されており、たて型フェロスタン浴（フェノールスルホン酸浴）、横型ハロゲン浴（塩化第一スズ浴）の二方式が主流となっている（図2）。

なお、缶用材料の分野では、スズめっきに代わるものとして TFS-CT（金属クロム-クロメート処理鋼板）が開発され、工業化されているが、プロセスの源流はスズめっきラインにあり、主にたて型が採用されている（図3）。

電気亜鉛めっき分野では、古くからスズめっきを改造して生産された例もあるが、専用連続ラインの多くは1960年代以降設置されてきた。特に日本では、世界に先がけて自動車用に多用されたためもあり、板幅最大1,800

* 日本鋼管株式会社技術研究所（〒210 川崎市川崎区南渡田町1-1）
Research Center, Nippon Kokan K.K. (1-1 Minamiwatarida-cho, Kawasaki-ku, Kawasaki-shi 210)

1. No. 1, No. 2 ペイオフリール	8. めっき機	15. クロム酸処理タンク
2. γ 線ストリップ厚み計	9. エヤージェットクーラー	16. エヤージェットクーラー
3. 入側ループカー	10. ウォータクエンチ	17. 出側ストランドルーバー
4. 無酸化炉	11. γ 線コーティング厚み計	18. コイルプリンター
5. メカニカルワイパ	12. スキャンバミル (将来)	19. 出側シャ
6. 還元炉および冷却炉	13. テンションレベラー	20. オイラ
7. セラミックポット	14. 板幅計	21. No. 1, No. 2 テンションリール

図1 代表的な連続溶融めっきライン

図2 代表的な電気スズめっきライン³⁾

図3 TFS製造ライン概略図⁴⁾

図4 各種の電気亜鉛めっき槽

表1 溶融亜鉛めっきにおける気体絞り技術例

使用ガス体	スリットギャップ	ガス圧	ガス温度
過熱水蒸気	0.15~0.38mm	1.0~4.5kg/cm ²	288~455℃
燃焼排ガス	0.3~3.0	0.05~0.8	300~500
空気	0.6~2.0	0.4~0.7	常温
窒素ガス	0.4	1.5	常温

mm台、板厚最大2.0~3.0mm 台の大型ラインが数多く設置されているのが特長である。槽型式はスズめっきと同様、たて型、横型に大別されるが最近ラジアルセル方式^{注1)}も開発され工業化されている(図4)。

また、アノードは自溶性、不溶性の二方式、電解浴は硫酸浴、塩化浴及び混合浴に大別される。それぞれ、目的、即ち省力、省エネルギー、製造品種等により得失があり、どこに重点を置くかにより、方式が決定採用されている。

3. 高生産性の追求

高能率、高生産性(含労働生産性)をはかる一つの手段が連続化であるが、連続プロセスの中での高生産性の追求は一般的には高速化ということになる。高速化の

問題の中には、溶融めっき、電気めっきを問わず共通的な部分、例えば入側でのストリップの溶接、出側での走行切断、走行中の検査技術、あるいはコンピューターを活用した制御技術等の発展が必須である。しかしここでは、主としていわゆるめっき技術を中心に問題点を絞って論をすすめた。

3-1 溶融めっき

3-1-1 付着量制御一気体絞り技術

溶融めっきでは高速化するに伴い、ストリップ表面に随伴して引き上げられる溶融金属の量が増大する。この増大する溶融金属を適正かつ均一に抑える技術としては、古くから使われていたロール絞り法では限界がある。1960年代に開発された気体絞り技術は、高速操業を可能ならしめた画期的な技術といえよう。この技術は

1960年代前半、日新製鋼⁶⁾とナショナルスチール⁷⁾からはほぼ同じ時期に別個に開発、発表されたもので、その後多くの改善が行われ、発展してきた。用いられる気体は表1に示すように高温のスチームから、空気まで多種多様であるが、基本はストリップに直角に配置されたスリットノズルから、ストリップ全幅にわたり気体を吹きつけその圧力(エネルギー)で溶融金属を下

方へ絞り落とす所にある。

より高速化をはかるための問題点としては

- (1) 気体絞りエネルギー(風量、圧力)の増大
- (2) ストリップの振動
- (3) 上記(2)に関連したノズルストリップ間距離の変動
- (4) スプラッシュの増大

等が挙げられる。これらの問題を解決するために、基礎的な数値解析^{8),9)}や工業的な気体流れの改善^{10)~12)}、ストリップの振動防止技術の開発等²⁾が行われ、実用化されつつある。

3-1-2 その他

高速化に伴いめっき部に発生するドロスの増大もまた問題である。これに対しては新しい考え方に基づいたドロス回収技術が開発され実用化されている^{13),14)}。

また単位時間当たりの地金消費量増大に対する補給法としてはインゴットの大型化がはかられ、現在国内では多くのめっきラインで1 t程度的大型インゴットが自動的に供給されるようになっている。

3-2 電気めっき

3-2-1 電流密度-高電流密度操業

代表的な連続電気めっきプロセスの一つであるスズめっきでは1940年代すでに米国において2,000fpm (約600mpm)まで高速化が達成されており、その後の改善も含めほぼ完成されたプロセスである。電流密度は高々数十A/dm²程度であるが、付着量も一般的には2.5～5g/m²程度と少く、電解部が律速にはならない。また品質面からも良好な光沢面を有する領域として電流密度の上限に制約があり、スズめっきの分野では高電流密度操業があまり重要な問題ではない。

しかし、1965年以降急増し、かつ現在でも拡大が続いている電気亜鉛めっきの分野では、付着量が20g/m²～40g/m²と多く、電解部が律速となるため、高電流密度操業が高速化のための大きな技術課題となってきた。高電流密度操業技術については本誌の研究会¹⁵⁾及びその他^{16), 17)}でもしばしば取り上げられ、内外を問わず多くの研究開発が行われてきた。電流密度の限界は金属イオンの拡散律速と考えられ、この解決策として超音波の利用、パルス電解法等も検討されてきたが、工業的にはめっき液のかくはん、鋼板の連続めっきにおいてはストリップとアノード間のめっき液の相対流速の増大が最も効果があり且つ実用的である。電解槽の構造、めっき液の噴流方式等、工業的にはいくつかの方法が提唱され、実用化されてきた(図5)。その結果、現在では150A/dm²の高電流密度操業が工業的に可能となっている。

3-2-2 その他

高電流密度操業に付随して、コンダクターロールの通電容量の増大、コンダクターロールとストリップの接触部でのスパーク発生の危険性増等派生する問題がある。ロールの構造、冷却法、ロールとストリップの接触法等種々の解決策がはかられている。

なお最近開発されている合金めっき系では、電析する合金の組成に対し、電流密度が変動要因となるのでスズめっきの場合と同様、品質面からの制約を生じ、必ずしも高電流密度操業になじまない一面を有し、今後問題を残している。

4. 省エネルギーの追求

エネルギーコストの増大に伴い、省エネルギーは鉄鋼業における最大の合理化対象となっている。熔融めっきラインにおいては、エネルギーの大部分はストリップの加熱に消費される。ここでの省エネルギー対策は一般的な連続加熱炉の対策、例えば排熱を空気予熱に利用する

等と同じ技術領域に属するものであって、めっきプロセス特有のものではない。一方、電気めっきでは電解に消費されるエネルギーが対象となり、めっき技術特有の省エネルギー対策が必要となってくる。

4-1 電解エネルギー

電解効率一定の場合は、めっき付着量を確保するための電気量(電流×時間)は付着量に比例して決まってくるが、消費電力はこれと所要電圧の積と考えて良い。即ち一定の付着量をもった製品を作るための電解プロセスにおける省エネルギーは如何に所要電圧を下げるかにある。電解部での電流は図6に示すようにアノード→電解浴→ストリップ→コンダクターロールと流れ、電圧を支配する要因は、この間の全抵抗値である。

4-1-1 めっき浴

めっき浴の電導度は高い方が良い。一般的には高濃度の主剤に電導度補助剤を添加し浴抵抗を下げるが行われている。但し高濃度といっても溶解度の面から限界がある。一方、アニオンの効果が大きいこともまた良く知られている。例えば酸性浴であっても、表2に示するような浴組成では、硫酸浴に比べ塩化浴の抵抗値は約1/4となり、省エネルギーの観点からは塩化浴が有利である。

図5 各種高速めっき槽

4-1-2 極間距離

ストリップとアノード間距離は接触しない範囲で小さい方がよい。そのため自溶性アノードを使用するプロセスでは、アノードの減少につれて、アノード位置を変更し、極間距離を最少に保つ工夫がなされている。図7にその一例を示す。不溶性アノード方式では、アノード自体変化しないので、極間距離を限界に近い所まで小さくすることが可能であり、自溶性方式に比べ有利である。いずれの場合も、限界に近づくとストリップとアノードの接触の危険が増すので、特に高速化に伴うストリップの振動増大に対して、対策を必要とする。例えば、ストリップとアノードの間に、インシュレーターを設置する方法、ストリップの上下面に流れるめっき液の噴流方向、流速を制御することによりストリップの振動を極少

図6 電解槽別電流の流れ方
電流の流れ …> 溶液 ⇒ ストリップ
→ コンダクターロール

表2 めっき浴電導度 (50℃)

浴タイプ	金属イオン濃度	電導度 mΩ/cm
硫酸浴系	2 Mol	96
混合浴係	" (ZnCl ₂ /ZnSO ₄ モル比 1:2)	103
塩化浴系	" + 5.6mol NH ₄ Cl	400
"	" + 1.9mol NH ₄ Cl	220

にする方法等が具体的に実施されている。

4-1-3 アノードとコンダクターロール間距離

高電流速度操業になると、ストリップの抵抗も無視し得ない値となる。この対策としてはストリップの中を電流が流れる距離を短くすることが挙げられる。この点から考えると U.S.Steel で開発された CAROSEL は図6に示すように、電流はストリップの板厚方向に流れておりほぼ理想的なプロセスといえよう。他の槽型式では、たて型であれ横型であれ、電流はストリップの長手方向に流れることになり、この間の電圧降下は、電流の増大に伴って、無視し得ない大きさとなる。高電流密度操業は電解反応の面から解決されても、このような省エネルギー的観点から実用的には限界がある。従って現実的には高生産性ライン即高電流密度操業ラインとはならず、設備費、エネルギー費のバランスを考慮した上で、電流密度の上限が決まってくる。

4-2 その他

不溶性アノード方式は前述のように極間距離を極少にするには有利であるが、他方アノードでの電解エネルギーは通常酸素発生に消費され、金属イオンは系外から、溶解供給する必要がある、トータルエネルギーからみれば、必ずしも有利な方法ではない。しかしこのプロセスはアノード交換が不要というメンテナンスの面及び高速化の面では大きなメリットがあり、日本で開発されるすぐれたプロセスの一つである¹⁸⁾。

なお、電解効率については、スズめっき、亜鉛めっき共 100% に近く、問題とはならない。また TFSC のように 30% 程度のももあるが、この場合は付着量が 0.1 g/m² と少いため、エネルギーの面からはさほど問題ではない。むしろ今後開発されるであろう亜鉛系合金めっきにおいては付着量も、電気亜鉛めっきと同程度を要求されるので、品種によっては、省エネルギーの観点からも電解効率向上に留意する必要がある。

5. 多目的ライン

5-1 溶融めっき

溶融めっきの分野での品種多様化は

(1)めっき金属の種類、例えば、亜鉛、アルミニウム、亜鉛-アルミニウム合金、アルミニウム-シリコン合金等。

(2)めっき表面仕上、例えばスパングルの形態、ガルバニール等。

(3)化成処理、例えばクロメート処理、リン酸塩処理等。

めっきラインでの各プロセスが関与する。

5-1-1 めっき金属

連続溶融めっきラインにおけるめっき金属の変更は一般的に容易ではない。パスラ

図7 極間距離調整機構の一例

インは変更せず、めっきポットまたはめっき金属を取替える方法、めっきポットをタンデムに二系統持ちスナウト以降バスラインを変更する方法がある。いずれも切替時の操業停止時間の問題等があるが、後者の方が操業面では有利である。

5-1-2 めっき表面仕上

めっき表面仕上の分類例を表3に示す。プロセスとしては、(1)高圧飽和水蒸気、高圧水、中性塩-水溶液、金属亜鉛粉末をめっき直後に吹付けることにより、スパングルの形態を制御する方法、(2)めっき後再加熱して亜鉛-鉄合金層とするいわゆるガルバニール法、(3)スキンパスロールを通して機械的に表面を平滑化する方法等がある。これらの装置はそれぞれ独立してライン内に設置されているのが一般であり、目的に応じ使われている。

なお、化成処理については電気めっきの項を参照されたい。

5-1-3 片面めっき

片面めっき製品は近年自動車外板用として急増しており、多くのプロセスが開発されている。表4に示すように両面めっきをしてから片面を研削等で除去する方法、最初から片面のみをめっきする方法に大別される。後者の方が考え方としては合理的であり、大勢は非研削の方向に向かっている。非研削法も表に示したようにいくつ

表3 溶融亜鉛めっき製品の種類と特徴⁴⁾

表面仕上げ	特 徴	用 途
レギュラスパングル	スパングルあり	土木、建築、器物
ミニマムスパングル	スパングルを極小化している	家電、建築、自動車
ゼロスパングル	スパングルを消去している	家電、建築、自動車
ガルバニール	めっき層をFe-Zn合金化	自動車、家電

表4 片面溶融亜鉛めっき鋼板製造法のいろいろ

分 類	方 法
両面被覆後片面除去	a. 片面研削法 b. 差厚めっき後薄めっき側を電解はく離 c. 片面にめっきはく離剤を塗布
片面のみ被覆	a. メニスカスによる接触 b. 各種噴流による吹きつけ c. ロールによるコーティング

かの方法が提唱されており、それぞれ実用化されている。

5-2 電気めっき

5-2-1 めっき金属

電気めっきで電着金属の変更を行うためにはめっき浴、及び自溶性アノード方式ではアノードも変更する必要がある。缶用材料の分野ではある時期、ブリキとTFS-CTが兼用ラインで生産された例がある。また、亜鉛めっきと、鉛-スズ合金めっきを同一ラインで生産している例もある²⁰⁾。

プロセスとしては共用めっき槽でバスラインを変更し

表5 亜鉛系合金めっき鋼板

合金系	組成例
Zn-Co-Mo	Co : 1~3%, Mo : 0.1~0.5% (東洋鋼板)
Zn-Co-Cr	Co : 0.3%, Cr : 0.05% (日本鋼管)
Zn-Ni	Ni : 13% (住友金属)
Zn-Ni-Co	Ni : 17%, Co : 0.3% (新日鉄)
Zn-Fe	Fe : 5~35% (日本鋼管), (神戸製鋼), (新日鉄)
Zn-Al	Zn30g/m ² 中, Al 粉末3~5g/m ² の共析 (川崎製鉄)
Zn/Mn	Zn10g/m ² 下層, Mn10g/m ² 上層の2層 (新日鉄)

ない方法、及びめっき槽を二系統配置しパスラインを変更する方法がある。前者では浴の混合汚染の問題があり、後者では、設備費が増大するというデメリットがある。

電気亜鉛めっき系で最近各種の合金めっきが開発され工業化されている(表5)。プロセスの詳細は発表されていないため不明であるが、一般的には兼用ラインでスタートし、需要量に応じて専用化して行くものと思われる。

5-2-2 化成処理

化成処理としてはクロメート処理、リン酸塩処理、高耐食特殊処理、等種々の方法がある。これらの処理はプロセス的には一段処理から二段または三段処理を行うものがあり、全てを独立したセクションで処理し、かつ多種類のプロセスを可能ならしめるには設備が膨大になり過ぎる。一般的には数種類の処理タンクを保有し、使いわける方法がとられている。

5-2-3 片面めっき

電気めっきではスズめっきにおけるハロゲン方式のように古くから片面ずつめっきするプロセスがあり、原理的にも比較的容易である。ただ片側のみ電流を流しても裏面にめっきが回ることがあるので、槽型式によってそれぞれ工夫が必要である。この点からみるとたて型より横型の方が片面めっきの操業性は良い。なお CAROSEL は片面を目的に開発されたプロセスであり、片面専用としては種々すぐれた特長をもっているが、両面兼用プロセスとしては、設備費、操業性等から必ずしも有利ではない。

6. 今後の展望

鋼板の表面処理分野はすでに述べてきたように、量、質、品種共まだ拡大を続けている分野である。プロセスとしては量の拡大に対応し、専用高速ラインの方向と、多種生産に応ずべき多目的兼用ラインの方向がある。今後更に開発されるであろう数多くの新製品は、多目的兼用ラインの中でプロセスが確立され、量に応じて専用化の方向に独立して行くものと予想される。そして、更に

理想的には、多目的かつ高速高生産性プロセス、例えば品種切替の容易なプロセスの開発が積極的に行われるものと期待される。そのためには、ハード面での開発もさることながら、めっきプロセスそのものの変革、例えばドライプレATINGの活用等も考えて行くべきであろう。

文 献

- 1) 松永, 中村, 村上, 三田村; 神戸製鋼技報, **26**, [2], 82 (1976)
- 2) 羽田, 横山, 酒井, 小林, 西村, 岩崎, 村上, 末光; 製鉄研究, 第304号, 85 (1981)
- 3) 東洋鋼板株式会社; ぶりきとティンフリー・スチール, p. 80 (1974, アグネ社)
- 4) 堀川; 金属表面技術第65回学術講演大会要旨集, [3], 168 (1982)
- 5) R.H. Higgs, M.E. Komp, E.J. Oles; *SAE Paper*, [2], 25 (1980, Detroit)
- 6) 大浜, 岩崎; 特公昭44—17243
- 7) ジョン・トーマス・メイヒュー; 特公昭41—4085
- 8) 安谷屋, 阿部, 庄司, 矢野; 鉄と鋼, **66**, 835 (1980)
- 9) A. Nikoleizig, T. Koots, F. Weber, M.Espenhahn; *Stahl u Eisen*, **98**, [7], 336 (1978)
- 10) 日戸, 酒井, 麻川, 斉藤; 鉄と鋼, **67**, [5], S. 320 (1981)
- 11) 酒井, 斉藤, 日戸, 麻川, 藤田; *ibid.*, **67**, [12], S. 988 (1981)
- 12) 酒井, 下川, 斉藤, 日戸, 水谷; *ibid.*, **67**, [12], S. 989 (1981)
- 13) 郡司, 高田, 伊藤, 神原; *ibid.*, **67**, [5], S. 321 (1981)
- 14) 日本鋼管技報; No. 81, 66 (1979)
- 15) 川崎; 本誌, **27**, 355 (1976)
- 16) A. Weymeersch, R. Winand, L. Renard; *Plating and Surface Finishing*, **68**, [4], 56 (1981)
- 17) A. Weymeersch, R. Winand, L. Renard; *ibid.*, **68**, [5], 118 (1981)
- 18) M. Morimoto, et al.; *AES Second Continuous Plating Seminar*, (1977, 1月)
- 19) A.W. White; *The Third AES Continuous Strip Plating Symposium*, 23 (1980, 4月)
- 20) B. Meuthen; *Sheet Metal Industries*, **57**, 975 (1980)