連続溶融亜鉛めっき装置について

高 橋 秀 行^a

^a JFE スチール(株) スチール研究所(〒721-8510 広島県福山市鋼管町1)

About Continuous Hot-Dip Galvanizing Line

Hideyuki TAKAHASHI^a

^a JFE Steel Corporation (1 Kokan-cho, Fukuyama-shi, Hiroshima 721-8510)

Keywords : Gas Wiping, Dross, Radiant Tube, Gas Jet Cooling, Snout

1. はじめに

表面処理鋼板の中でもっとも生産量が多く、幅広い用途に使用されている溶融亜鉛系めっき鋼板(Hot Dip Galvanized Steel)は¹⁾、1931年、センジミヤ-プロセス²⁾を採用した連続溶融亜鉛めっきライン(CGL; Continuous Galvanizing Line)で初めて製造された。この方式を採用したCGLは1953年日本に初めて導入されたが、1980年代後半に至ると、自動車車体防錆強化の観点から亜鉛付着量を増加させるニーズが急速に高まり、それまで自動車用鋼板の主流であった電気亜鉛めっき鋼板(EGS; Electro-Galvanized Steel)から、低コストで厚目付けが可能な溶融亜鉛系めっき鋼板へと需要が急速にシフトするに至った。事実、1990年前後にかけて日本および先進国で、さらに2000年以降になると中国およびインドを中心とした新興国で、数多くのCGLが建設されてきた^{3)~5)}。

2. 設備構成と作業

CGLの基本構成は、入側設備、焼鈍炉、めっき/中央部、および出側設備からなるが、近年では出側設備にトリマー設備や表面検査設備のような検査精整機能が追加・拡充されたCGLも多く建設されるようになっている。CGLは焼鈍炉の配置から、縦型タイプと横型タイプに分類される。また加熱

手法の差異から、無酸化炉(NOF; Non Oxidizing Furnace)型、直火炉(DF; Direct Fired Furnace)型、輻射炉(RTF; Radiant Tube Furnace)型の3タイプに分類される。縦型RTFタイプの設備例として、JFE西日本製鉄所(福山地区)No.4 CGLのライン構成を図1に示す⁶⁾。

2.1 入側設備

一般的な入側設備は、ペイオフリール、シャー、溶接機、ルーバー、表面洗浄設備で構成される。まず冷間圧延されたコイルはコイルカーによりペイオフリールに装入され、リールから鋼板が払い出される。ペイオフリールは通常2基あり、交互に使用することで連続製造が可能となっている。コイルエンドの不良部はシャーによって切断され、溶接機によって先行鋼板と後行鋼板が接続されるが、その処理は鋼板停止状態で行われるため、鋼板貯蔵機能を有するルーバー設備を設置することで、焼鈍炉やめっき/中央部での減速を防止している。

めっき品質を保つ上で、めっき前の洗浄工程は非常に重要であり、電解洗浄設備を備えているのが一般的である。電解洗浄設備は、ディップタンク、スクラパー、電解タンク、リンスタンクおよびドライヤから成る。電解タンクでは、鋼板を対極とした電気分解を行い、その際発生する水素、酸素ガスの機械的剥離・攪拌作用を活用することで、アルカリ洗浄機能を強化している場合が多い⁷⁾。

図1 JFE西日本製鉄所(福山地区)No.4CGL構成図

2. 2 焼鈍炉

焼鈍炉では鋼板の引張り強度や伸びなどの機械特性を調整するため、700～850℃まで鋼板を加熱、一定時間保持し、その後めっきに適した温度(約480℃)まで冷却する必要がある。そのため、焼鈍炉は加熱・均熱帯および冷却帯で構成されるのが一般的である。

2. 2. 1 加熱手段

加熱方式としては、燃焼バーナーを炉壁に設置し、直接鋼板を加熱する直火加熱方式と、燃焼バーナーをラジアントチューブ(以下RT)内に設置し、RTの輻射熱で間接的に加熱するRT加熱方式に大別される。さらに直火加熱方式は直火還元方式と直火無酸化方式に区分される。各加熱方式の模式図および加熱効率を図2に示す⁸⁾。

(1) RT (Radiant Tube)加熱方式：

CGLではめっき品質確保のために、焼鈍中の雰囲気は、例えば水素10%－窒素90%程度の還元性ガスに制御するのが普通である。その際、燃焼ガスが炉内雰囲気を汚染しないようにRTを採用した加熱方式がRT加熱方式である。

本加熱方式はチューブ内のガス循環方法によって、プッシュ方式、プル方式、プッシュ・プル方式に分類することができる。このうち、CGLではプッシュ・プル方式が採用されることが多い。これは、プッシュ方式ではRT内部が陽圧となるため、RTが破損した際、焼鈍炉内に燃焼ガスが流出してしまう危険があるため不適であること、さらにプル方式は、流量比例制御性に優れた均圧弁制御方式や流量制御方式の採用が難しく、燃焼制御に不可欠な空気比の制御方法が大幅に限定されることになるため、大型設備であるCGLには不向きである。

一方、プッシュ・プル方式は両方の利点を併せ持っており、給気ファンで燃焼空気を供給することで優れた空気比制御性を確保しつつ、吸引ファンでチューブ内圧を炉圧以下に保つことが可能であるため、チューブ破損時等の炉内雰囲気悪化も防止可能となっている。

(2) 直火(Direct Fired)加熱方式：

直火加熱は文字通り、直接バーナー火炎で鋼板を加熱する手法であり、加熱効率はRTに比較して高いため、設備のコンパクト化が可能であるが、反応性の高い燃焼ガスが直接鋼板に作用することになるため、表面品質に影響を及ぼす場合がある。そのため、従来から燃焼条件の最適化やバーナー構造を工夫した設備が見られていたが^{9),10)}、近年では、逆に火

炎雰囲気鋼板表面状態への影響を積極的に活用することで、高張力鋼板製造に適した設備とした例も見られるようになってきた¹¹⁾。

(3) その他の加熱方式：

その他加熱方式としては、誘導加熱、ロール加熱、電気抵抗加熱、直接通電加熱、ソルトバス加熱、エレクトロンビーム加熱が挙げられる。これらの多くは建設コストやランニングコスト等、その採算性に課題があったが、近年、熱履歴の最適化による材質向上などを目的として、いくつか採用される例もみられるようになってきている¹²⁾。

2. 2. 2 測温手段

前述した通り、鋼板の機械特性は熱履歴の影響を強く受けるため、オンラインで鋼板温度を精度良く測定することは非常に重要である。CGLでは、非接触での測定が可能となる放射温度計の採用が多くみられるが、鋼種や操炉条件によって鋼板表面の放射率は大きく変化するのが通常である。したがって精度良く温度を測定するためには、みかけの鋼板放射率を適正な放射率に補正する必要があるため、2種類の波長における放射率を測定/補正する方法¹³⁾、ロール鋼板クサビ部における多重反射を利用してみかけの放射率を1に近づけて測定する方法¹⁴⁾などが開発、適用されている。一方、接触式での測温法としては測温ロールを用いた例などがみられる¹⁵⁾。

2. 2. 3 冷却設備・手段

溶融亜鉛めっき鋼板の機械的性質は、加熱・均熱後の冷却速度によっても大きく左右される。薄鋼板の冷却法としては、ガスジェット冷却、水焼入れ冷却、熱水冷却、気水冷却、ロール冷却等があるが、CGLでは冷却後に亜鉛めっきが施されるため、一般的には鋼板酸化の起こりにくいガスジェット冷却(Gas Jet cooling)が採用される。

GJ冷却は最も低コストで鋼板を冷却できる手法の1つであり、温度制御能力も高いが、一方でその冷却能力は、1mm厚で5～50(℃s⁻¹)程度と他の冷却法に比して低い。そのため、その向上が課題となる場合が多く、以下の観点で技術的改良が行われてきた¹⁶⁾。

- ・噴出ガス速度を高め、風量も多くする¹⁷⁾
- ・鋼板とノズル距離を可変とし、極力縮める¹⁸⁾
- ・H₂ガス濃度を高める^{16)～19)}

ガス冷却の場合、冷却能力を表す指標の1つである熱伝達係数 h_c (kcal m⁻² hr⁻¹ °C⁻¹)を鋼板表面あたりの風量密度 Q

名称	直火還元加熱	直火無酸化加熱	ラジアントチューブ加熱
模式図			
加熱効率	高	中	低

図2 加熱方式

($\text{m}^3 \text{min}^{-1} \text{m}^{-2}$)で整理すると、図3に示す通り、下記式で整理できる¹⁹⁾。

$$h_c = 5.5Q^{0.7}$$

CGLは最大2m幅の鋼板を連続的に通板し、めっきする設備であるため、巾方向の温度均一性確保も非常に重要である。ガスジェット冷却では鋼板幅方向へのガス流れが発生するため、一般に鋼板エッジ部はセンター部に比較して熱伝達係数 h_c が大きくなることが知られている^{20), 21)}。温度均一性を向上させるため、鋼板エッジ部から吐出される風量を抑制する方法や、プレナムチャンバを幅方向で分割する方法、異なる風量分布のノズルを組み合わせる方法などが採用されている。

2. 3 めっき / 中央部

めっき / 中央部は、材質調整のために焼鈍、冷却した鋼板にめっき処理を施す所であり、熔融亜鉛を保持する「亜鉛ポット」、亜鉛浴中のロール及びこれを支持する「浴中機器」、めっき付着量を制御するための「ワイピング装置」、その他スナウトなどの付帯設備から構成される²²⁾。一例を図4に示す⁶⁾。

2. 3. 1 スナウトと雰囲気管理

焼鈍炉で還元された鋼板は、スナウトと称される設備を介して熔融亜鉛ポットに導かれ、めっきされる。めっき前は鋼板酸化を抑制する必要があるため、鋼板に対して還元性を保つ必要があるが、一方、還元性雰囲気では、熔融亜鉛浴から

図3 熱伝達係数と風量密度の関係

図4 めっき / 中央部構成例

図5 亜鉛ポットの例

亜鉛蒸気が発生しやすく、その蒸気はスナウト壁面状でアッシュ化し品質上の問題を引き起こす場合がある^{23), 24)}。そのため、スナウト内雰囲気中の酸素や水分量を制御する等により、鋼板に対しては還元性を保ちつつ、浴面からの過剰な亜鉛ヒュームの発生を抑制する等の対策が取られる場合がある^{25), 26)}。

2. 3. 2 亜鉛ポット(熔融亜鉛槽)とドロス

めっきに供する亜鉛を450～475℃(亜鉛融点419.47℃)の温度で熔融、保持しているのが亜鉛ポットである。従来のポットは鉄製であったが、Fe溶出によるドロス生成等、品質への悪影響およびポット寿命の観点から現在は、熔融亜鉛に侵食され難いセラミック製が主流となっており、浴の加熱手段も誘導加熱方式が多くなっている^{6), 27)}(図5)。

熔融亜鉛めっきのめっき浴には、鋼板と熔融金属との反応性を適切に調整するため、通常0.1～0.3%程度のAlを含む。めっきによって消費される亜鉛、アルミはそれぞれインゴットによって補給されるが、その方式は、めっきを行うポットにインゴットを直接投入する方式とプリメルトポットと呼ばれる亜鉛溶解用の専用ポットで溶解した後、めっきポットに移送する方式の2つに大別される²²⁾。ポットに投入された亜鉛の一部は、比重の軽いトップドロス(主成分: Zn, ZnO)や比重の重いボトムドロス(Fe-Zn金属間化合物)に変化するが、両者とも鋼板に付着すると品質上大きな問題となるため、古くから各種対策が行われてきた。トップドロス対策については、その主成分に酸化物を多く含んでいることから、酸素濃度を100～1000ppmに制御し酸化を抑制したガスワイピング法や、フラックスなどを用いての再生処理などが提案されている^{28)～30)}。

一方のボトムドロスは、鋼板から溶出したFeとZnが反応した金属間化合物(FeZn_{17} , 比重7.25)を主成分としているため亜鉛との比重差が非常に小さく、無対策の場合、その多

くは浴中に浮遊し、鋼板に付着することで品質欠陥となる場合が非常に多かった。したがって、従来からめっき浴中 Al 濃度制御や、浴中機器配置の最適化、プリメルトポットによる浴成分や温度、浴レベルの変動最小化等の各種対策がなされてきた^{31)~33)}。さらに近年では技術の進歩が目覚ましい CFD (Computational Fluid Dynamics) を積極的に活用した事例も多くみられるようになってきた^{34)~36)}。

また両ドロスの制御には Al 濃度の制御も非常に重要であるため、一定期間毎に ICP 発光分光測定法で測定されるのが一般的であるが、近年、Al 起電力を利用したアルミセンサー³⁷⁾や Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS)³⁸⁾の開発により、オンラインでの Al 濃度の測定が可能となりつつある。

2. 3. 3 浴中機器

浴中機器は鋼板の進行方向を変えるシンクロール、付着量を制御する位置における鋼板の振動と反り矯正するサポートロールと付帯機器、及びこれらを支持するフレームで構成される。シンクロールは亜鉛浴から 1 m 程度の深部に位置し、駆動が困難なことから非駆動で使用する。そのため、鋼板との間でスリップしないようにロール表面に溝加工(グループ加工)や、軸受設計に工夫がされている^{39),41)}。サポートロールは鋼板パスラインを安定させるためのロールであり、1 本の場合と 2 本の場合があるが、近年は 2 本ロールを採用するラインが増えている(図 6)^{6),39)~42)}。これは、2 本のロールを適度にオフセットすることで鋼板形状のフラット化が可能であり、また鋼板振動の低減効果も得られることから、付着量の精密制御には有利なことになる。なお、これらの浴中ロールは反応性の高い溶融亜鉛中で使用されるため、ドロス等が付着しないようにセラミックでロールを溶射したものや³⁹⁾、ロール材質自体をセラミックにした例などが報告されている⁴³⁾。

2. 3. 4 ワイピング装置および付着量制御技術

電気めっきと異なり、溶融亜鉛めっきラインにおいては溶融した金属を物理的に制御する必要があるが、浴から持ち上げられた鋼板には、必要な目付量より余剰な亜鉛が付着しているのが普通である。以前はロール法と呼ばれる接触型のワイピング法により余剰亜鉛の掻き落としが行われていたが、均一性やめっき絞り性の限界や表面疵などの問題から、近年のラインのほとんどでガスワイピング法が採用されている⁴⁴⁾。ワイピング装置の概要図を図 7 に示す⁶⁾。ガスワイピング法は鋼板表裏にはほぼ直角に配置された一対のスリットノズルか

ら、空気や N₂ などの高圧の気体を吹付け、Zn を絞り落とす手法である。国内においては、ノズルスリットギャップは 0.5 ~ 1.6 mm 程度で使用されている。

ガスワイピング法において、亜鉛付着量はラインスピード、ガスワイピング装置のガス圧力やガス量、ノズル形状、ノズル-鋼板距離等の多くの影響を受けるが、通常、ガス圧力と鋼板-ノズル間距離の調整で目標の付着量に制御する場合が多い⁴⁵⁾。

前述の通り、ガスワイピング法では、表裏ノズルから噴流が噴射されるため、鋼板の存在しない位置では、表裏 2 つの噴流が互いに衝突・干渉することになるが、その影響で鋼板中央部に比して幅端部では亜鉛付着量が相対的に多くなることが知られている⁴⁶⁾。そのため、ノズル中央部より端部のスリットギャップを大きくしたテーパ付スリットノズルや、ギャップ自体を可変にした例⁴⁷⁾、端部専用補助ノズルを有する例、バッフルプレートと呼ばれるプレートを鋼板両端部近傍に近接して設置する例等で対策される^{22),46)}。

ガスワイピング法では高速化の際、スプラッシュと呼ばれる亜鉛飛沫に起因する表面欠陥の発生が大きな問題となる。スプラッシュ発生状況を整理する式としては、例えば下記不等式が提案されている⁴⁸⁾。

$$We \geq We_c$$

$$\text{ただし, } We = \frac{\rho_g U_g^2 \delta_0}{\sigma}, \quad We_c = 42.4 \left(\frac{\delta}{\delta_0} Re_d \right)^{-0.369},$$

$$Re_d = \frac{\rho_l V_c \delta_0}{\mu_l}$$

図 7 ワイピング装置例

図 6 サポートロール配置例

ρ_g : ガス密度, U_g : ガス速度, δ_0 : 初期膜厚
 σ : 表面張力, δ : 最終膜厚, ρ_l : 亜鉛密度
 V_c : ライン速度, μ_l : 亜鉛粘度

上式不等号式は、ワイピングガスの揚力とめっき液の表面張力の比を表す We (ウェーバー数) が We_c (臨界ウェーバ数) を超えるとスプラッシュが発生することを示した式である。この式からスプラッシュ抑制にはワイピングガスの低速度化が非常に有効であることが示唆され、めっき絞り性に優れたワイピングノズル形状などが提案されている⁴⁹⁾。

ガスワイピング法において、付着量を安定させるためにはワイピング部における鋼板-ノズルの位置関係を一定に保つことが非常に重要である²²⁾。前述した浴中サポートロールの配置や押し込み量制御のほか、浴上にもタッチロールと呼ばれるロールを設置することで、反りや振動を緩和する場合がある。ただし、浴上に設置されたロールは半熔融状態の亜鉛に直接接触することになるため、ロールへの亜鉛付着や鋼板光沢低下等の問題が発生する場合があるため、その使用は制限される場合がある。最近では、タッチロールの代わりに電磁石を配置し、その吸引力で反りや振動を抑制する非接触型装置の事例が見られるようになった^{50)~52)}。

ワイピング後の亜鉛付着量は、鋼板が常温近傍まで低下した位置で、蛍光 X 線方式により測定されるのが一般的である。ワイピング直後の鋼板温度は浴温とほぼ同じ温度($\sim 430^\circ\text{C}$)であるため、付着量測定が可能となる位置は、ワイピング位置から 100 m 程度は下流になる。したがって仮に測定付着量が目標付着量から乖離している場合でも、迅速な対応は難しい場合が多い。上記対策のため、近年では熱間で付着量測定が可能な設備(ホットゲージ)を設置したラインも見られるようになった^{53),54)}。

2. 3. 4 合金化炉・合金化制御

亜鉛めっき直後に鋼板を加熱して、Zn-Fe 合金を生成させた製品がガルバニール(GA: Galvanneal, Galvanize + Anneal)であり、その処理をガルバニール処理と呼ぶ。ガルバニール処理設備は加熱帯、保持帯、冷却帯で構成される。一例を図 8 に示す^{6),55),56)}。

加熱帯では、ワイピングにより 430°C 程度まで下がった鋼板温度を、Zn-Fe 合金化反応が進行する温度まで昇温する。目標とされる合金化温度は、鋼板の合金成分、めっき浴中の Al 濃度、めっき浴温、めっき侵入板温、ライン速度等の影響を受けるが⁵⁷⁾、通常は 500°C 程度である。加熱方式は、古くは熱風循環吹付式が使用されていたが、その後、加熱効率に優れる直火式あるいは直火・熱風循環併用方式になり、さらに最近では、オール誘導加熱方式あるいは直火+誘導加熱併用方式が採用されるケースが増加している。これは制御性の高い誘導加熱方式を用いることで、ガルバニール鋼板の主な用途である自動車用鋼板の高い品質要求に対応しやすくなることがその一因と考えられる。

保持帯では、合金化反応の進行に必要な時間を確保するため、加熱帯の燃焼排ガス等を利用することで、鋼板温度はほぼ一定に保たれる。めっき後に鋼板が最初に接触するロールをトップロールと称するが、当該ロールを鋼板が高温で通過

図 8 ガルバニール設備の概要

する場合、金属面同士の接触に起因した擦れ痕が入るなど外観不良を発生させる。したがって鋼板は保持帯後に設置された冷却帯によって 300°C 程度以下まで冷却されることになるが、その冷却手法はガスジェット又は気水冷却が各社の設計思想によって選択されている。

ガルバニール材はプレス加工時の圧縮変形領域において粉状に剥離する、いわゆるパウダリングを発生させやすいという欠点を持つ。上記回避のためには Zn-Fe 合金度(Fe%)の適正制御が非常に重要であり⁵⁸⁾、合金度をインラインでモニタリングする手法が種々開発されている^{59),60)}。また、Zn-Fe 合金化反応は鋼板温度の影響が極めて大きいため、鋼板温度を精度良く測定することも重要である。インラインで鋼板温度を測定する手段としては焼鈍炉と同様、放射温度計が用いられるが、合金化過程においても鋼板表面の放射率は大きく変化するため、その補正は重要であり、種々の報告がなされている^{61)~63)}。

2. 3. 5 後処理

GI では伝統的に、白錆発生防止や塗装密着性の向上を目的として、クロメート処理、りん酸塩処理などの化成処理が適用されてきた。クロメート処理方法はかつて浸漬型(反応型)が多かったが、最近では皮膜付着量制御と皮膜組成制御が容易なロールコート法を用いた塗布型クロメート処理の適用が増加している。クロメート(6 価クロム)は環境負荷物質であることから、6 価クロムを使用しない化成処理が開発され、実用化されている⁶⁴⁾。なお、GA は自動車メーカーや家電メーカーなどの客先で化成処理(りん酸塩処理)され塗装された状態で使用されることを前提とした製品であるから、りん酸塩処理性を阻害するクロメート処理は適用されない。

溶融亜鉛めっき鋼板のプレス成形性を向上させる目的で、めっき表面に薄い無機化合物皮膜や有機皮膜を付与する技術も開発・適用されている。無機化合物皮膜としては、P-Mn-Zn-O 複合皮膜⁶⁵⁾、Ni 系化合物皮膜⁶⁶⁾、りん酸塩処理 (pre-phosphate) が代表的である。有機皮膜としては、自動車車体組み立て工程におけるアルカリ脱脂で脱膜するタイプの潤滑皮膜が提案されている⁶⁷⁾。また、近年 GA 表面を改質・制御することを特徴とした新しいタイプの潤滑鋼板が製造されるようになってきた⁶⁸⁾。

2. 4 出側設備

一般的には出側ルーパー、調質圧延機、サイドトリマー、静電塗油装置、シャー、テンションリールで構成される。出側ルーパーはシャーカット時などの出側減速時に中央セクションを減速させないためのバッファとして設置されている。近年、鋼板形状、表面外観、表面粗度に対する需要家のさまざまな要求への対応や、伸び等材質特性調整のため、ライン内に調質圧延機を備えるのが一般的になった。表面粗度はロール表面の凹凸を転写することで調整されるが、サイクル後半ではロールダル目が目詰まりを起こすことがあり、操業中にロール交換が必要となる場合があるため、2 基の調質圧延機を備えた例もみられる。また、溶接点が圧延機を通過するときには、高精度トラッキングと同調して、ロール疵を考慮した鋼板速度、圧延荷重、ベンディング力等の設定値に変更し、溶接点通過後に次コイルの設定値に変更する制御を行っている。サイドトリマーは調質圧延機の直後にレイアウトされ、トリム開始・終了時に出側ラインを停止することなく作業できる走間自動中替機能を有したトリマーも増えてきている。

連続溶融亜鉛めっきラインは溶融亜鉛めっき鋼板製造における最終ラインとしての機能を有しており、出側に、板厚計、板幅計、超音波探傷装置等が設置され、更に最近の動向として、表面欠陥検出装置を設置するラインが増えて来ている⁶⁹⁾。表面欠陥検出装置の方式としてはレーザー方式や CCD カメラ方式が主流である。連続処理設備において、検査精整作業は、生産能率を確保するために停止することなく連続的に機能しなければならない。このため、近年、作業員による検査の多くは検査機器による自動検査・判定に移行している。このため、プロセス計算機は板厚計、板幅計、表面検査機器等の検査データを集約し、様々な集計処理や製品出荷判定を行うロジックを持つようになっている。また、従来ログシートやチャートで保管されていた検査データや各種実績データも電子化され、前工程を含めた一貫履歴管理のデータベースとして、製品保証や操業解析に使われていく傾向にある。

3. おわりに

中国等の新興国の台頭などもあり、鉄鋼業は新たな時代を迎えつつあるが、現在においても日本国内には世界最強の競争力・技術力を有する製鉄所を数多く擁しており、その中核設備の 1 つが連続溶融亜鉛めっきラインである。今後も、我が国鉄鋼業が有する国際競争力を維持・発展させるため、連続溶融亜鉛めっき技術のさらなる技術革新が期待される。

(Received August 9, 2017)

文 献

- 1) 庄司政浩; 鉛と亜鉛, **32**, (2), 22 (1995).
- 2) U.S. Patent 2,110,893 (1938).
- 3) H. Kagechika; *GALVATECH*'07, 1 (2007).
- 4) J. Faderl; *GALVATECH*'07, 14 (2007).
- 5) 藤井史郎; *J. Jpn. Soc. Colour Mater.*, **82**, 198 (2009).
- 6) 日本鉄鋼協会編; 第5版鉄鋼便覧第2巻第1編, p.247 (日本鉄鋼協会, 2014).
- 7) 井上昭彦, 相場雅次, 花岡 博, 岩本芳昭; 新日鉄技報, **391**, 103 (2011).
- 8) 日本鉄鋼協会編; 第5版鉄鋼便覧第2巻第1編, p.232 (日本鉄鋼協会, 2014).
- 9) 吉田 弘, 井田忠臣, 栗原正典, 福田修三, 阿部正広, 中山道夫; *NKK 技報*, **127**, 120 (1989).
- 10) 福田修三, 阿部正広; 工業加熱, **23**, 25 (1986).
- 11) H. Martin; *Galvatech* 2013, 414 (2013).
- 12) G. M. Cola; *Proceedings of 28th ASM Heat Treating Society Conference*, 21 (2015).
- 13) 田中富三男, 大平尚, 増田正宏, 丸山孝一, 大浜光正; 鉄と鋼, **79**, 772 (1993).
- 14) 山田建夫, 真壁英一, 原田直樹, 今井清隆; 日本鋼管技報, **103**, 92 (1984).
- 15) 芹生浩之, 増野豊彦, 中島康久, 小川博之; 鉄と鋼, **79**, 765 (1993).
- 16) 芋瀬正行; 第88・89回西山記念技術講座, p.79 (日本鉄鋼協会, 1983).
- 17) 川邊 潔, 大串圭二; 産業機械, **671**, 30 (2006).
- 18) 柳島章也, 下山雄二, 鈴木宗利, 角南秀夫, 芳賀雄彦, 井田幸夫, 入江敏夫; *川崎製鉄技報*, **13**, 1 (1981).
- 19) 日本鉄鋼協会編; 第5版鉄鋼便覧第2巻第1編, p.237 (日本鉄鋼協会, 2014).
- 20) 柳 謙一, 福島丈雄, 三原一正, 貝原利一, 鮫島一郎, 井田幸夫; 三菱重工技報, **25**, 346 (1988).
- 21) H. Martin; *Advances in Transf.*, **13**, 1 (1977).
- 22) 日本鉄鋼協会生産技術部門表面処理鋼板部会編; 溶融亜鉛めっき鋼板マニュアル, p.40 (日本鉄鋼協会, 1999).
- 23) Y. W. Kim, S. C. Kung, W. C. Sievert, R. Patil; *GALVATECH*'89, 120 (1989).
- 24) D. S. Shin, J. Choi, S. J. Lee; *ISIJ International*, **40**, 484 (2000).
- 25) J. L. Arnold, S. L. Boston, F. Caudill; *GALVATECH*'89, 130 (1989).
- 26) 有村光史, 浦井正章, 堺 裕彦; 材料とプロセス, **3**, 660 (1990).
- 27) 古賀秀人, 内山休男, 本多来生, 井出英吉, 扇山信夫; 鉄と鋼, **73**, S439 (1987).
- 28) 荒川晴美, 神原繁雄, 木村忠雄; 鉄と鋼, **62**, S194 (1976).
- 29) 酒井完五, 下川靖夫, 斉藤勝士, 日戸 元, 水谷 治; 鉄と鋼, **67**, S989 (1981).
- 30) 日本鋼管技報; **81**, 178 (1979).
- 31) M. Puech; *INTERGALVA*'88, GF3/1 (1988).
- 32) E. Vliet, R. Mallens, P. Hasselt; *GALVATECH*'07, 159 (2007).
- 33) B. Rovins; *AISTech 2006 Proceeding-Volume*, 203 (2006).
- 34) 石井俊夫, 石岡宗浩, 井口 学; 材料とプロセス, **18**, 83 (2005).
- 35) S. J. Lee, S. Kim, M. S. Koh, J. H. Choi; *ISIJ International*, **42**, 407 (2002).
- 36) 栗田興一, 君和田宣之; 材料とプロセス, **10**, 1388 (1997).
- 37) 木村秀雄, 上田 潤, 山口 周, 幸塚善作; 材料とプロセス, **8**, 1559 (1995).
- 38) C. Dulcy, F. Caldon; *GALVATECH*'07, 23 (2007).
- 39) 可児保宣, 飯田芳彦, 中川帥夫, 大河内敬彦; 日立評論, **72**, 429

- (1990).
- 40) 服部重夫, 前田恭志, 中村秀樹, 岡野正之, 清水正文; 神戸製鋼技報, **39**, 85 (1989).
- 41) T. MASUI, Y. Kaseda, K. Ando; *ISIJ Int.*, **31**, 262 (1991).
- 42) 中村秀樹, 清水正文; 神戸製鋼技報, **40**, 110 (1990).
- 43) 小川衛介, 佐野義一, 濱吉繁幸, 横須賀伸一, 山下竜一; 材料とプロセス, **19**, 978 (2006).
- 44) 梅田昭三; 日立評論, **57**, 427 (1975).
- 45) 安谷屋武志, 阿部雅樹, 庄司政浩, 矢野秀勝; 鉄と鋼, **66**, 835 (1980).
- 46) J. R. Park; *Ironmak Steelmak*, **28**, (1), 53 (2001).
- 47) H. Iwamoto, A. Yamauchi, Y. Hasegawa, T. Isono; *GALVATECH'98*, 757 (1998).
- 48) 武石芳明, 鈴木 豊, 矢葺邦弘; 混相流, **14**, (2), 194 (2000).
- 49) 羽田隆司, 横山英男, 酒井完五, 小林克義, 西村猛夫, 岩崎清俊, 村上伸和, 末光敬正; 製鉄研究, **304**, 85 (1981).
- 50) 田崎澄晴, 藤岡宏規, 米倉 隆; 産業機械, **725**, 38 (2011).
- 51) A. Jordan, M. Irle; *Metall Plant Technol Int*, **30**, 44 (2007).
- 52) H. G. Hartung, P. Fontaine, H. Behrens; *Metall Plant Technol Int*, **33**, 54 (2010).
- 53) 片山誠一, 後藤久夫, 東城吉清, 森野久和, 紅粉寿雄; 住友金属, **41**, 245 (1989).
- 54) 片山誠一, 豊福清隆, 森野久和, 藤原達哉, 中西功; 材料とプロセス, **2**, 1677 (1989).
- 55) 後藤久夫, 岩橋 稔, 豊福清隆, 三木伸一, 山内昭良; 住友金属技報, **44**, 31 (1992).
- 56) M. A. Faria, P. R. Rios; *ISIJ International*, **43**, 267 (2003).
- 57) 大和康二; 第138・139回西山記念技術講座, p.1 (日本鉄鋼協会, 1991).
- 58) H. Hisamatsu; *GALVATECH'89*, 3 (1989).
- 59) 川辺順次, 橋本 弘, 太田龍之介, 高橋竣雄; 鉄と鋼, **73**, S1187 (1987).
- 60) 関屋武之, 辺見直樹, 増田正宏, 田中富三男, 井内 徹; 鉄と鋼, **70**, S1110 (1984).
- 61) 田中富三男, D. P. Dewitt; 公開特許公報, 平2-85730 (1990).
- 62) 福高善己, 山根弘郷, 飯田永久, 菱刈 功, 井手敏彦, 鈴木利房; 材料とプロセス, **4**, 1379 (1991).
- 63) 山田健夫, 真壁英一, 原田直樹, 今井清隆; 日本鋼管技報, **103**, 92 (1984).
- 64) 金井洋, 山崎真, 森陽一郎, 植田浩平, 森下敦司, 古川博康, 中澤真人, 石塚清和, 和気亮介; 新日鉄技報, **371**, 43 (1999).
- 65) 鈴木真一, 金丸辰也, 新井勝利; 材料とプロセス, **6**, 1545 (1993).
- 66) 櫻井理孝, 平谷 晃, 橋本 哲, 浦川隆之, 稲垣淳一, 山下正明; 材料とプロセス, **9**, 1297 (1996).
- 67) M. A. Faria, P. R. Rios; *ISIJ International*, **43**, 267 (2003).
- 68) JFEスチール(株); JFE技報, **16**, 54 (2007).
- 69) K. Kishi, F. Yamamoto, H. Okubo, Y. Adachi, R. Murayama, K. Hiramoto; *Rev Metall Cah Inf Tech*, **94**, 803 (1997).
- ~~~~~