

電気錫メッキライン／ リフロー加熱制御の最新技術 ～リフロー条件変更時の鋼板歩留向上～

New Technology of Reflow Control Method for ETL
～Improvement of the yield under change of reflow condition～

神尾 圭司 Keiji KAMIO

製鉄プラント事業部
製鉄プラントエンジニアリング第二部
プロジェクト管理室
鋼板処理プロジェクトグループ長

田代 栄一* Eiichi TASHIRO

制御システム技術センター
製鉄プラント制御システム室 マネジャー

山本 昇一 Shouichi YAMAMOTO

NSプラント設計
制御システムエンジニアリング部
制御チーム チーフ

抄 録

電気錫メッキ鋼板は、耐蝕性、表面光沢性を確保するため、錫メッキを施した後の鋼板を錫の融点(232℃)以上に加熱するリフロー処理が行われる。リフロー処理によって、電気錫メッキ層と鉄層との境界に拡散による錫-鉄合金層が生成されるが、この合金量の目標値は鋼板用途によって異なり、鋼板の加熱量によってコントロールされる。先行材と後行材でリフロー処理条件が異なる鋼板の接続部がリフロー設備を通過する場合、接続部前後での合金量(加熱量)のコントロールが厳密に実施できないという問題があった。これに対し当社ではリフロー処理条件の変更時にも接続部前後の合金量(加熱量)を厳密にコントロールする鋼板加熱制御システムを開発し、鋼板の歩留向上に寄与した。

Abstract

As a part of electrolytic tinning line, the reflow process which heats the strip more than the melting point of tin is provided after tin plating in order to obtain higher corrosion resistance and surface glossiness. At the reflow process, an alloy layer is generated between tin layer and iron layer by diffusion. The suitable thickness of the alloy of tin and iron varies depending on usage of the strip and it should be strictly controlled by adjusting heat input to the process. When the welding point of different size of strips flows into the reflow section, the thickness of the alloy (heat input to the process) could not be well-controlled due to the discontinuity in size of strips. In order to solve the above, NIPPON STEEL & SUMIKIN ENGINEERING developed the new control system which enables accurate heat input to the process under sudden change in section of the strip. As a result, yield rate of tinplate has been significantly improved comparing to the conventional system.

1 緒言

電気錫メッキライン(図1)は、①前処理、②電気錫メッキ、③リフロー、④後処理というプロセス設備から構成されている。当社電気錫メッキラインは、電気錫メッキ設備に金属錫を化学的に溶解して錫イオンを供給する「不溶性陽極システム」、リフロー設備に抵抗加熱装置と誘導加熱装置を併用する「コンビネーションリフローシステム」という特徴的システムを有する。これらのシステムにおいては、これまでハード技術の開発のみならず、制御アルゴリズムの開発も実施してきた。本稿では、リフロー設備(図2)における鋼板加熱制御の最新技術について紹介する。

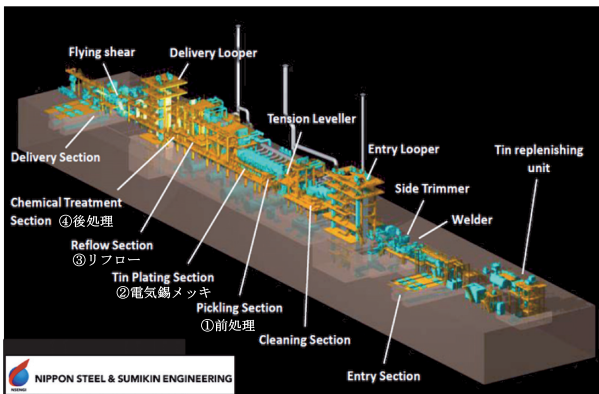


図1：電気錫メッキライン
Fig.1：Electrolytic tinning line

2 電気錫メッキラインのリフロー設備と加熱制御方法

電気錫メッキ鋼板は、耐蝕性、表面光沢性を確保するため、錫メッキを施した後の鋼板を錫の融点(232℃)以上に加熱するリフロー処理が行われる。リフロー処理によって電気錫メッキ層と鉄層との境界に拡散による錫-鉄合金層を生成させるが、この合金量の目標値は鋼板用途によって異なり、鋼板の加熱量によってコントロールされる。この鋼板の加熱制御には抵抗加熱方式(コンダクションリフロー)と誘導加熱方式(インダクションリフロー)がある。電気錫メッキが開発された当初は、装置が比較的単純で安価なコンダクションリフローが主流であったが、この加熱方式では鋼板の電流密度が不均一となるため鋼板表面の錫メッキ層に木目模様ができると

いう欠点があった。インダクションリフローは装置が高価ではあるが、この木目模様を解消でき、より高い表面光沢が得られるという品質改善効果により近年採用が増えている。当社では両方式の特徴(イニシャルコスト抑制と品質向上)を活かせるコンビネーションリフローシステムを採用している。(図2、3)。

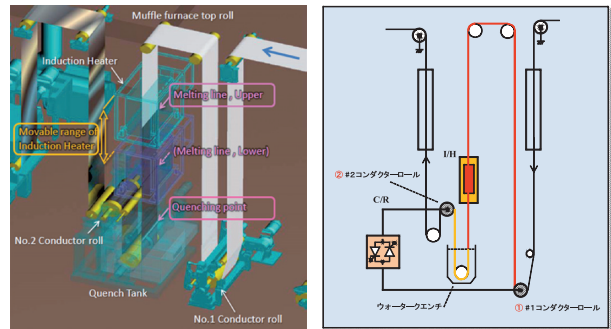


図2：リフローセクション
Fig.2：Reflow Section

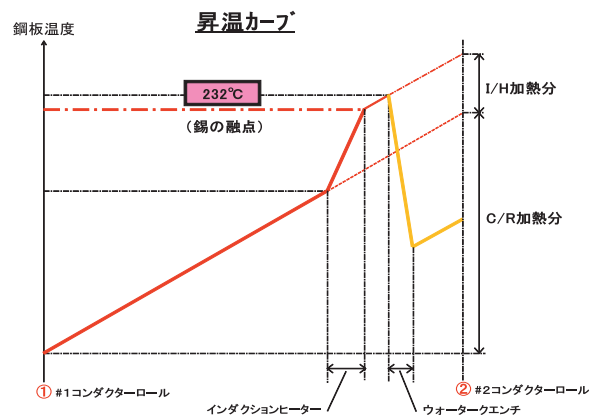


図3：昇温カーブ
Fig.3：Heating process of reflow

3 コンダクションリフローでの昇温制御とその課題

コンダクションリフローはコンダクターロールを通じて鋼板に電流を流すことにより発生するジュール熱を利用した加熱(昇温)技術である。故に、加熱制御を行うには、昇温に見合った熱量、即ち、鋼板へ与える電力($P_{cs} = I^2 \cdot R$)を計算し、供給することになる。

$$P_{cs} \propto Kc \cdot A \cdot V \cdot \Delta Tc \quad (1)$$

Kc ：鋼板の比熱・比重等の要素を含んだ係数

A ：鋼板の断面積($A=b \cdot d$) b ：鋼板の幅、

d : 鋼板の厚み)

V : 鋼板速度(ライン速度)

ΔT_c : コンダクションリフロー設定昇温温度
リフローセクションを通過する鋼板が一定断面積の場合、コンダクションリフローによる昇温制御は、昇温に必要な電力を上述(1)式より算出し、その電力を投入するように電力変換器(サイリスタ)をコントロールするという比較的簡単な方法で行うことができる。

ところが、連続的に処理される鋼板の接続部前後で加熱条件が異なる場合、例えば、異断面の接続部、即ち、接続部前後の断面積が異なる鋼板がリフローセクション(厳密にはコンダクターロール間)を通過する際の昇温制御には、次の課題がある。

- ① 接続部前後の鋼板(各々の断面積)に対する必要電力が異なること
- ② 接続部は移動しているため、電力変換器から見たコンダクターロール間の鋼板抵抗値(前後鋼板の合成抵抗)は時々刻々と変化していること
- ③ 上記のため、同じ電流を流しても発熱量($I^2 \cdot R$)が異なること

この異断面接続部通過時のコンダクションリフローによる加熱制御において、供給電力(P_{cs})は一定のため、図4に示すように、鋼板の断面積が大きい方が加熱不足、小さい方が加熱過剰となる。過加熱による板破断を避けるため、従来は必要電力が小さい方の設定電力に切り替えて制御する方法が用いられてきた。結果的に必要熱量が確保されていない部分では所定の合金量が確保できず、鋼板の歩留悪化を招いていた。

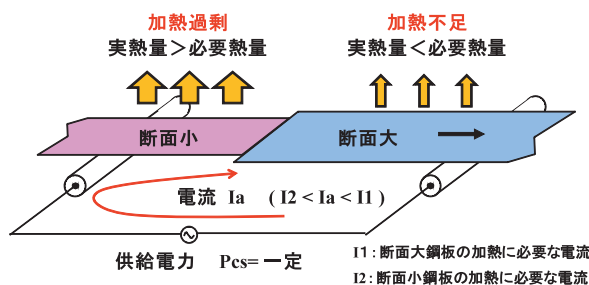


Fig.4 : Heating condition of conduction reflow at passing the connection point

4 リフロー最新制御

従来の電気錫メッキラインでは、リフローセクションを異断面接続部が通過する時に、「コンダクションリフローの電力切替え」を行うため、接続部前後に製品不良(加熱量の過不足による合金量の目標値外れの鋼板)が発生し、その最大長さは#1、#2コンダクターロール間を通過する鋼板長さ分となり、歩留悪化を招いていたが、以下に述べる解決技術(特許番号5268658)を開発し、市場導入した。

4.1 異断面接続部通過時の電力制御

上述の如く、リフローセクションを異断面接続部が通過する際は前後の鋼板に対する必要電力が異なるが、それを制御する手段である電流は前後の鋼板共通に流れるため、コンダクションリフローの電力制御のみでは、加熱過不足を解消することは不可能である。しかし、接続部がリフローセクションを通過する際の鋼板加熱過不足状態を正確に把握できれば、リフローセクションの後段に位置し、急速加熱が実現できるインダクションヒーターを用いることにより、その過剰・不足分を補償することが可能となる。

以下、図5を参照しつつ、加熱過不足量の把握、及びその補償方法について説明する。

4.1.1 加熱過不足量の把握

加熱過不足量を把握するためには、まずは、接続部前後の鋼板の合成抵抗値(R_a)をリアルタイムに計算する必要がある。そのため、接続部を入側コンダクターロール(1CDR)からトラッキングして、その位置(L_{1a})を把握することで、鋼板の合成抵抗(R_a)を下記式で導き出すことができる。

$$R_a = \rho \cdot ((L_2 - L_{1a}) / A_1) + P \cdot (L_{1a} / A_2) \quad (2)$$

(図5①)

ρ : 鋼板の抵抗率

A_1 : 先行材の断面積

A_2 : 後行材の断面積

L_{1a} : 入側コンダクションロールから接続部までの距離

L_2 : 入側コンダクションロールから出側コン

ダクターロールまでの距離(固定)

続いて、断面積に応じた接続部前後の鋼板の加熱に必要な電流(I1、I2)とコンダクターロール間に実際に流れている電流(Ia)差から、接続部前後の鋼板各々のサンプリング時間(Δts)当たりの過不足熱量(ΔQcd1、ΔQcd2)を算出する。

なお、コンダクションリフローの設定電力(Pcs)は加熱過不足量を極力少なくするために、先行材の設定電力から後行材の設定電力へなだらかに変化させる。(図5②)

$$I_a = (P_{cs} / R_a)^{0.5} \quad (3) \quad (\text{図5③})$$

$$\Delta Q_{cd1} = K_q \cdot (I_a^2 \cdot R1 - I1^2 \cdot R1) \cdot \Delta t_s \quad (4)$$

$$\Delta Q_{cd2} = K_q \cdot (I_a^2 \cdot R1 - I1^2 \cdot R2) \cdot \Delta t_s \quad (5)$$

Kq：係数

R1：先行材の抵抗値

R2：後行材の抵抗値

Δts：サンプリング時間

次に、上記サンプリング時間(Δts)当たりの過不足熱量を過不足温度(ΔTcd1、ΔTcd2)に換算する。

$$\Delta T_{cd1} = \Delta Q_{cd1} / (K_c \cdot A1 \cdot L2) \quad (6)$$

$$\Delta T_{cd2} = \Delta Q_{cd2} / (K_c \cdot A2 \cdot L2) \quad (7)$$

Kc：係数

このサンプリング時間(Δts)当たりの過不足温度(ΔTcd1、ΔTcd2)を、接続部が#1コンダクターロールを通過した直後からインダクションヒーター入側に至るまでの間、先行材はサンプリング時間(Δts)毎に積算し、後行材は接続部から一定間隔(例えば、サンプリング時間で移動する距離毎)にトラッキングポイントを発生させ、そのポイント毎に積算することで、温度過不足量(Tcd1、Tcd2_n)を把握する。(図5④)

$$T_{cd1} = \sum \Delta T_{cd1} \quad (\text{インダクションヒーター位置を通過する先行材の加熱過不足量}) \quad (8)$$

$$T_{cd2_n} = \sum \Delta T_{cd2} \quad (n = 0 \sim L2 : \text{接続部から一定間隔毎の後行材の加熱過不足量}) \quad (9)$$

4.1.2 加熱過不足量の電力補償

先行材においては接続部がインダクションヒーターを通過するまで、後行材においては把握した一定間隔毎のトラッキングポイントがインダクションヒーターを通過する度に、加熱過不足分をインダクションヒーターの加熱補償電力(ΔPcomp1、ΔPcomp2)に換算する。

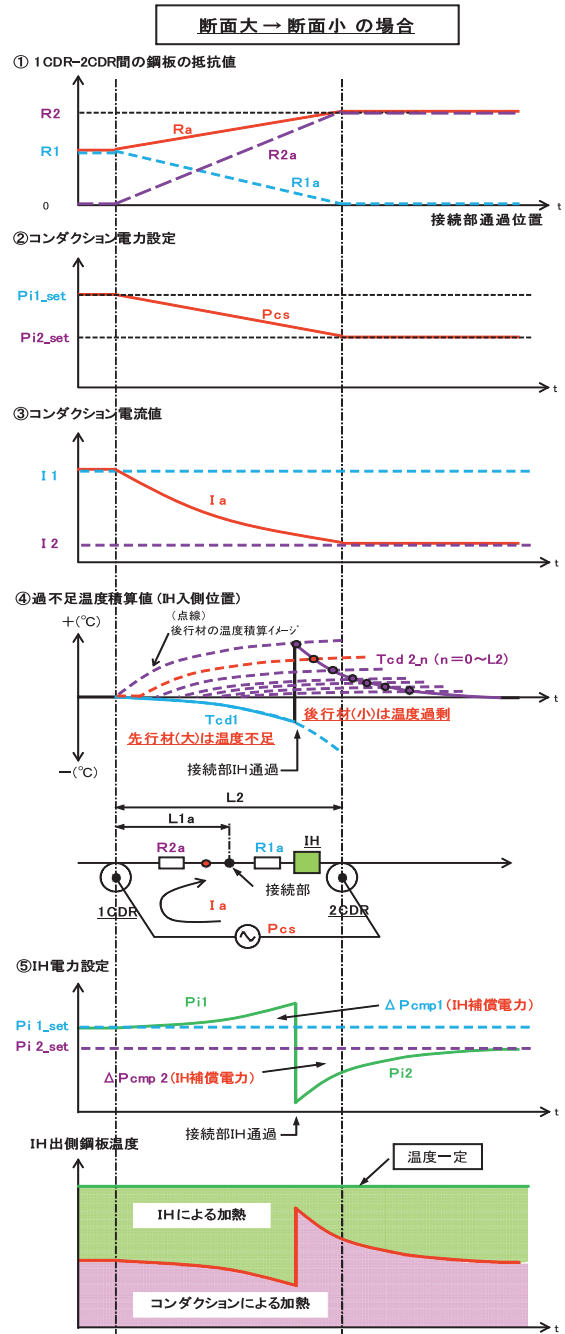


図5：断面大⇒小時の抵抗加熱の抵抗推移と電流、過不足補償電力

Fig.5：The heating compensation method at the time of change of reflow processing conditions

$$\Delta P_{cmp1} = -K_c \cdot A_1 \cdot V \cdot T_{cd1} \quad (10)$$

$$\Delta P_{cmp2} = -K_c \cdot A_2 \cdot V \cdot T_{cd2_n} \quad (11)$$

換算後、インダクションヒーターが接続部前後のそれぞれの鋼板を加熱するために本来必要な設定加熱電力(P_{i1_set} 、 P_{i2_set})に対し、加熱補償電力分(ΔP_{cmp1} 、 ΔP_{cmp2})を加算して、補償後の設定加熱電力(P_{i1} 、 P_{i2})とする。

$$P_{i1} = P_{i1_set} + \Delta P_{cmp1} \quad (12)$$

$$P_{i2} = P_{i2_set} + \Delta P_{cmp2} \quad (13)$$

図5の⑤は、加熱過不足電力必要補償量(ΔP_{cmp1} 、 ΔP_{cmp2})の推移、コンダクションリフロー、インダクションヒーター各々の加熱温度ならびに両者を加算した温度(即ち、インダクションヒーター出側鋼板温度)の推移を表したものである。この図からも分かるように、本制御方式を用いることで、コンダクションリフローによる加熱過不足をインダクションヒーターで完全に補償することが可能である。

4.2 従来方式との比較

図6に、リフローセクション(コンダクターロール間)を鋼板の接続部が通過中に、コンダクションリフローの設定電力を断面の小さい(設定電力の低い)方に切り替える従来制御方式で加熱した場合と、上述した当社最新技術であるインダクションヒーターによる加熱電力補償制御を用いて加熱した場合の、インダクションヒーター(IH)出側の鋼板温度のシミュレーション結果を模式的に表したものである。

板幅1,000mm×板厚0.20mmの先行材から、板幅900mm×板厚0.18mmという後行材(約23%の断面積減少)に変更されたという条件において、従来制御方式では、先行材は最大約40℃の加熱不足、後行材は同約20℃の加熱過剰となるところを、当社最新制御方式(電力補償制御)では、理論上過不足を無くすることができることが分かる。その他のシミュレーション前提条件を以下に示す。この方式を採用することで、従来制御方式で発生していた加熱過不足による不良部を理論上皆無にすることが可能とな

る。

【シミュレーション条件】

※設備条件

- ・コンダクションロール間距離：24m
- ・入側コンダクションロール(1CDR)からIH出側距離：15.6m

※加熱条件

- ・入側コンダクションロールでの鋼板温度：40℃
- ・加熱設定温度(IH出側温度)：240℃
- ・インダクションヒーター加熱設定温度：50℃

(注)：表中の電力(KW)表示は便宜上コンダクションリフローおよびインダクションヒーターの加熱効率は無視している

5 実ラインへの適用

当社のリフロー電力補償制御をインドネシアLatinusa社ETLへ適用し、実ラインにおける機能検証を実施した。

図7に本電力補償制御を用いた場合のインダクションヒーター出側鋼板温度、コンダクションリフロー出力電力、インダクションヒーター出力電力を示す。本図からインダクションヒーター出力電力が横軸の時間経過、すなわち接続部の移動とともに、加熱過不足補償電力分を含んだ曲線状に制御され出力されていることがわかる。この制御を適用した結果、溶接部前後での合金量不良部長さが約2mとなり、これまでの約20mの1/10に短縮され、本電力補償制御の有効性(鋼板の歩留向上)を実ラインにおいて確認できた。

【操業条件】

- ・鋼板速度：260mpm
- ・接続部前後の鋼板サイズ(小断面→大断面)
 - (先行材)：板厚 0.25mm×板幅 880mm
 - (後行材)：板厚 0.28mm×板幅 905mm

6 結言

電気錫メッキラインのリフローセクションにおいて、先行材と後行材でリフロー条件が変更される接続部前後の合金量(加熱量)も厳密にコントロールで

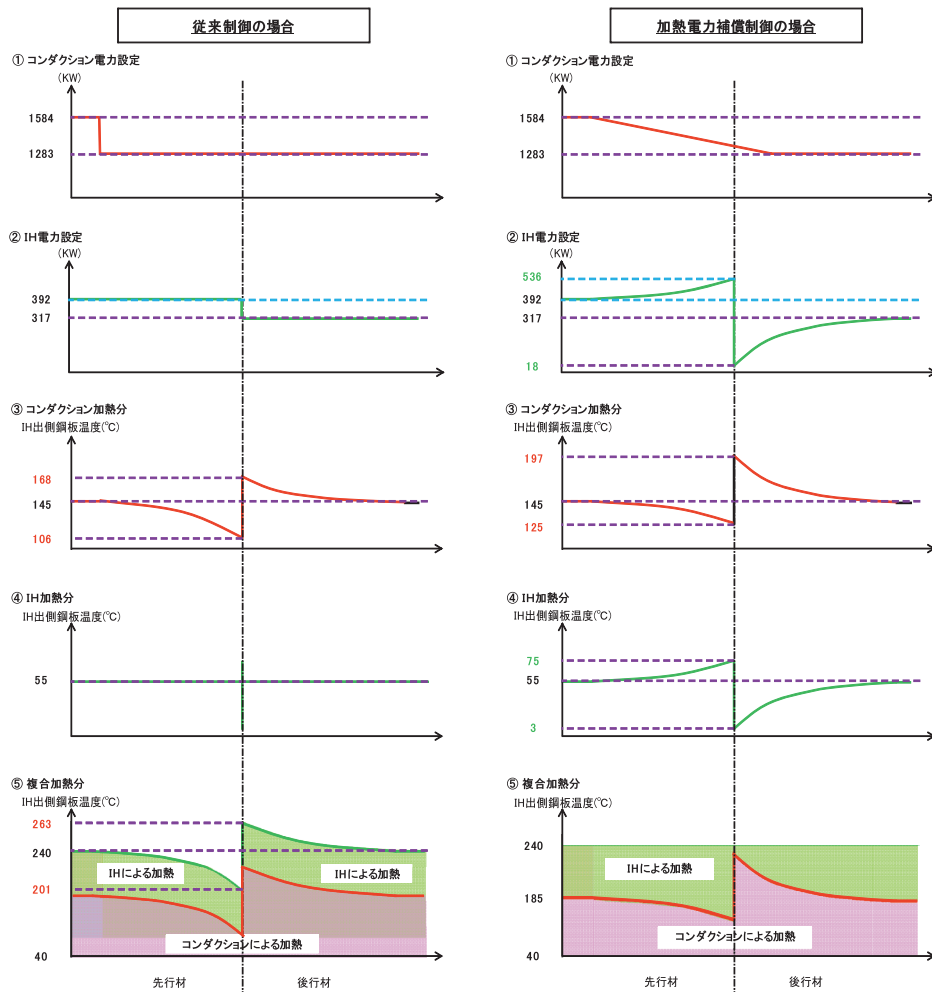


図6：従来制御方式と電力補償制御方式の鋼板温度シミュレーション結果
Fig. 6：Result of simulation of conventional and new control system

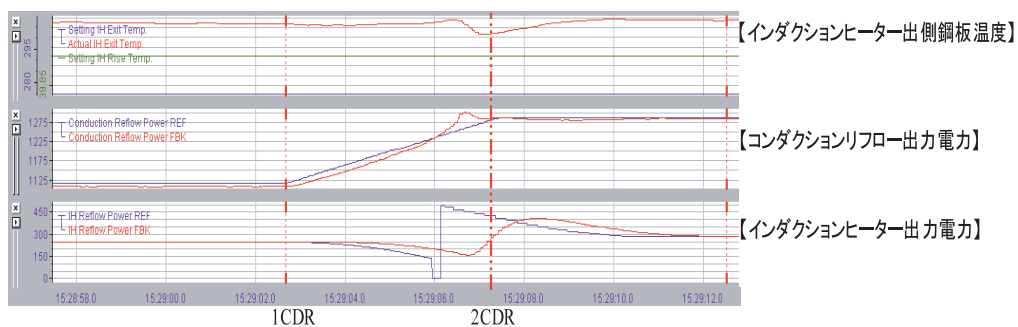


図7：リフロー電力補償制御の実ライン適用結果(インドネシアLATINUSA社ETL)
Fig. 7：Result of application of new reflow power control system for PT. LATINUSA ETL in Indonesia

きる電力補償制御システムを開発し、実機化を完了させた。実機での適用では、リフローセクションでの加熱不良部長さを接続部前後2mとすることに成功し、本電力補償システムの有効性を確認し、本開発技術により鋼板の歩留向上を果たすことができた。

本リフロー電力補償制御のみならず、顧客ニーズにマッチする電気錫メッキ設備の更なる商品性向上に努めていく所存である。