

# 直接通電加熱技術の薄板クラッド製造プロセスへの適用

浜田 幸一\*・井坂 和実\*・土居 大治\*<sup>2</sup>・米満 善久\*<sup>3</sup>・岩崎 信吾\*<sup>4</sup>

Application of the Direct Resistance Heating for Stainless Steel/Aluminum Clad Manufacturing Process

Kouichi HAMADA, Kazumi ISAKA, Daiharu DOI, Yoshihisa YONEMITSU and Shingo IWASAKI

**Synopsis** : Clad steel sheet is formed by cladding different metals and used for the functional material, which has convenient characteristics of each metal. Especially, a lot of stainless steel/aluminum clad strip is produced for electromagnetic rice cookers which are in demand because of the higher thermal conductivity, having magnetism and corrosion resistance. For the demand, continuous cladding technology of the wide width stainless steel/aluminum strip has been developed by warm rolling after the rapid heating process. Recently, much higher uniformity for peeling strength is required as the market grows. So, a new heating process, in which uniform heat generation is achieved by the electric resistance of metals and the directly applied current, is developed in place of the conventional process of induction heating. After solving some technical problems about sparks and temperature uniformity, direct resistance heating equipment have installed in the manufacturing line. As the result, high-quality clad steel sheets, which have the uniform peeling strength, can be produced by the improvement of temperature deflection on rolling.

**Key words**: direct resistance heating; stainless steel/aluminum clad strip; peeling strength; temperature uniformity; spark.

## 1. 緒言

異種金属を接合したクラッド鋼板は、それぞれの金属がもつ優れた性質や特長を兼ね備えた機能材料である。なかでも磁性を有し耐食性に優れたステンレス鋼と熱伝導性に優れたアルミニウムとを組合わせたクラッド鋼板は、インダクションヒーター(IH)式炊飯器の内釜や電磁調理器用の鍋などに使用され需要が増加している。

筆者らは、これまでに接合強度が高く、且つ高能率に圧延接合できる連続温間圧延接合法により、最大幅が1000 mmの広幅クラッドコイルの製造を行ってきた<sup>1,2)</sup>。

温間圧延接合法では、素材コイルを短時間で急速に加熱する必要があるため、開発当初より横断磁束型誘導加熱装置を導入して対応してきたが、近年のユーザーニーズの高度化にともない、接合強度のさらなる均一性向上が求められるようになってきた。このため、従来の誘導加熱方式に代わる温度均一性に優れた加熱方式として、直接通電加熱方式に着目した<sup>3-5)</sup>。

直接通電加熱方式とは、被加熱材に直接電流を供給して電気抵抗により発熱させる加熱方式である。本加熱方式の特色としては、供給される電力をジュール熱に効率よく変換することができ、給電ロール間の短ゾーンで加熱を行うことで、熱慣性の小さいコンパクトな加熱設備として既存

ライン内への設置が容易である点などが挙げられる。

一方、直接通電加熱は棒鋼や線材ではすでに実用化された例もあるが、薄肉の広幅コイル材に対して適用した例は少ない。この理由は、走行する板材へ電流を直接供給するため、給電ロールとの接触部においてスパークの発生が懸念され、スパーク疵により製品の品質を著しく劣化させるからである。

筆者らは、薄肉の広幅コイル材を被加熱対象材とした際のスパーク抑制対策や板幅方向の加熱均一性について技術課題を解決し、直接通電加熱設備を実機クラッドライン内に設置した。本報では、これらの概要について述べる。

## 2. 直接通電加熱の概要

直接通電加熱とは、Fig. 1に示すように給電ロールを介して走行する被加熱材に直接電流を供給し、ジュール発熱により加熱を行うものである。

### 2.1 昇温特性の検討

直接通電加熱において発熱量 $q$ を求める基本式は式(1)で与えられる。

$$q = i^2 r \Delta t \dots \dots \dots (1)$$

$i$ : 対象領域の通過全電流,  $r$ : 対象領域の全抵抗,  
 $t$ : 通電時間

平成13年6月29日受付 平成13年10月31日受理 (Received on June 29, 2001; Accepted on Oct. 31, 2001)

- \* 住友金属工業(株) 総合技術研究所 (Corporate Research & Development Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-8 Fuso-cho Amagasaki 660-0891)
- \* 2 住友金属工業(株) ステンレス・チタン事業部 (Stainless Steel & Titanium Technology Department, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)
- \* 3 住友金属工業(株) ステンレス・チタンプロジェクト推進部 (Corporate Research & Development Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)
- \* 4 (株) 住友金属直江津 製造部 (Production Department, Sumitomo Metal (Naoetsu), Ltd.)

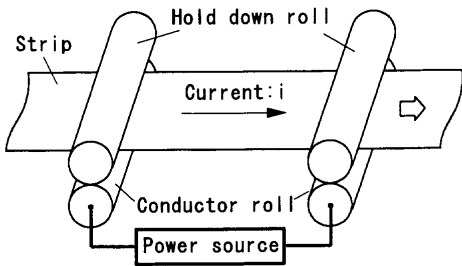


Fig. 1. Schematic figure of direct resistance heating equipment.

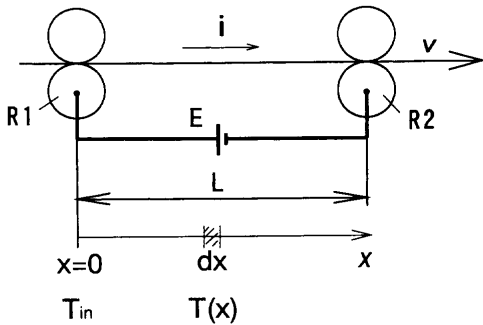


Fig. 2. Calculation model.

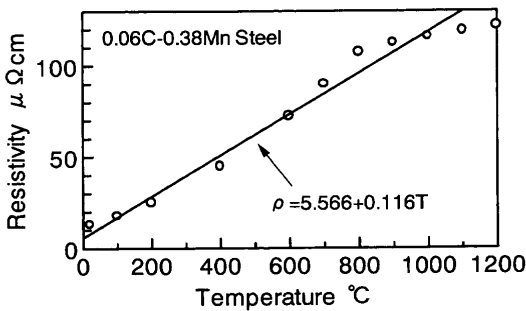


Fig. 3. Temperature dependence of resistivity.

まず、Fig. 2のような一次元のモデルを仮定し、給電ロールR1, R2間での走行方向における昇温特性について基礎的な考察を行う<sup>6)</sup>。

いま、通電電流( $i$ )、ライン速度( $V$ )、給電ロール間距離( $L$ )が与えられているとして、走行加熱時における長手方向の温度分布( $T(x)$ )を求めてみる。

一般に被加熱材である炭素鋼やステンレス鋼などの金属の固有抵抗値( $\rho$ )はFig. 3に示すような温度依存性を有している。ここでは1000°C以下の領域を考え、式(2)のような直線一次による近似を行った。

$$\rho = \alpha + \beta T \dots\dots\dots(2)$$

次に、給電ロール間における被加熱材の電気抵抗 $r$ は

$$r = \rho \frac{L}{A} \dots\dots\dots(3)$$

$A$ : 被加熱材の断面積

で表される。

このとき、Fig. 2のように $x$ 座標を定めると微小要素 $dx$ におけるジュール発熱量は式(4)で表される。一方、 $dx$ を $dT$ だけ昇温させるために必要な熱量は、ライン速度が一定で大気への放散熱や伝熱効果を無視すれば式(5)で表される。

$$q = i^2 \rho \frac{dx}{A} \frac{dx}{V} \dots\dots\dots(4)$$

$$q = C \gamma dx A dT \dots\dots\dots(5)$$

$C$ : 比熱,  $\gamma$ : 密度

ここで、式(4)および式(5)より、式(6)の関係が成立する。

$$dT = \frac{i^2 \rho}{A^2 V C \gamma} dx \dots\dots\dots(6)$$

式(2)を式(5)に代入すると、

$$dT = \frac{i^2}{A^2 V C \gamma} (\alpha + \beta T) dx \dots\dots\dots(7)$$

であり、式(7)の微分方程式を、 $x=0$ で $T(x)=T_{in}$ (入口温度)なる境界条件下で解くと、

$$\begin{aligned} T(x) &= e^{\int \frac{i^2 \beta}{A^2 V C \gamma} dx} \left[ \int \frac{i^2 \alpha}{A^2 V C \gamma} e^{-\int \frac{i^2 \beta}{A^2 V C \gamma} dx} dx + C' \right] \\ &= e^{\frac{i^2 \beta}{A^2 V C \gamma} x} \left[ \int \frac{i^2 \alpha}{A^2 V C \gamma} e^{-\frac{i^2 \beta}{A^2 V C \gamma} x} dx + C' \right] \\ &= e^{\frac{i^2 \beta}{A^2 V C \gamma} x} \left[ -\frac{\alpha}{\beta} e^{-\frac{i^2 \beta}{A^2 V C \gamma} x} + C' \right] \\ &= -\frac{\alpha}{\beta} + C' e^{\frac{i^2 \beta}{A^2 V C \gamma} x} \end{aligned}$$

ここで、 $x=0$ で $T(x)=T_{in}$ より、 $C' = T_{in} + \alpha/\beta$ であるから

$$T(x) = \left[ \frac{\alpha}{\beta} + T_{in} \right] e^{\frac{i^2 \beta}{A^2 V C \gamma} x} - \frac{\alpha}{\beta} \dots\dots\dots(8)$$

となる。

計算例をFig. 4に示す。計算条件は、入口温度を0°C、出口温度を1000°Cとし、Fig. 3の固有抵抗値をもつ板厚0.5mm、板幅120mmの炭素鋼を仮定した。また、ライン速度は1mpm、10mpmとした。

Fig. 4より、入口、出口温度が与えられている場合はライン速度に関係なく温度分布は一定となる。また、被加熱材の固有抵抗値の温度依存性により、昇温にともない抵抗値が増大するため、通電電流が一定であれば発熱量も増大

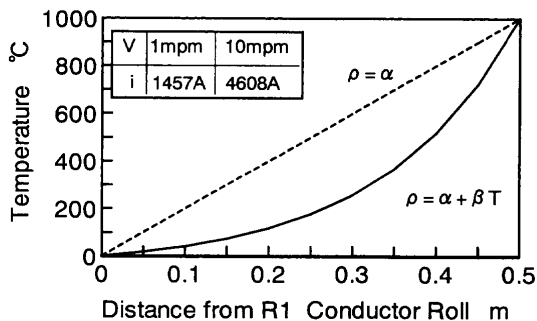


Fig. 4. Calculation of heating characteristics.

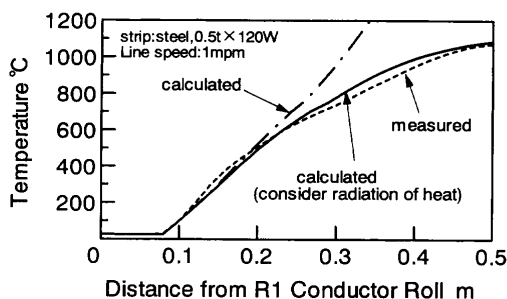


Fig. 5. Comparison between measured and calculated heating characteristics.

する。このため、下流側の給電ロールに近づくにつれ昇温速度が増し、急速に加熱されることがわかる。

次に、モデル実験結果との比較を Fig. 5 に示す。

モデル実験は大気中で実施しており、式(8)のジュール発熱量に加えて大気中への放熱を考慮した。放熱量は式(9)で表される自然対流熱伝達による放熱と式(10)で表される輻射熱伝達による放熱の和とした。

計算結果と実験結果は良好な一致を示し、本手法により昇温特性を精度良くシミュレーションすることができる。

$$q_1 = H A_s (T(x) - T_R) \dots \dots \dots (9)$$

$$q_2 = 4.88 \epsilon A_s \left\{ \left[ \frac{T(x) + 273}{100} \right]^4 - \left[ \frac{T_R + 273}{100} \right]^4 \right\} \dots \dots \dots (10)$$

H: 熱伝達係数 =  $1.162 \times 10^{-2}$  KW/m<sup>2</sup>°C, A<sub>s</sub>: 表面積,  
T<sub>R</sub>: 雰囲気温度, ε: 輻射率 = 0.7 で仮定

## 2.2 板幅方向均一加熱性の検討

### 2.2.1 自己温度補償効果

次に、板幅方向の加熱特性について述べる。直接通電加熱では、例えば局所的な低温域のように温度不均一な部分が板幅方向に存在したような場合には、高温域から低温域へ幅方向に電流が流れることで低温域が集中して昇温し、やがて幅方向に均一加熱される特性をもつ<sup>7,8)</sup>。

以下に、このメカニズムについてジュール発熱解析結果を用いて説明する。

本解析では、板幅方向を二次元平面要素としてモデル化

し、計算は給電ロール間に相当する節点に電圧を付与し、1回の計算ごとに節点を順次移動させることで走行加熱状態を模擬して行った。ただし、解析の前提として板幅方向に電位差が発生しない理想状態を仮定して等電位を与えた。また、本解析では幅方向に流れる電流によるジュール発熱の影響のみを検討するため、熱伝導や放熱による影響は無視して行った。

初期状態として、上流側の給電ロール入側で、Fig. 6(A)のように板幅方向に低温部が存在したと仮定する。

低温部が上流側の給電ロールを通過した直後における電流密度分布を Fig. 6(B) に示すが、高温部から低温部へ板幅方向に電流が流れることで、低温部の電流密度が高くなっていることがわかる。

この結果、低温部での発熱量が増え、下流側給電ロールを通過する直前では、Fig. 6(C) に示すように板幅方向に均一加熱される。

### 2.2.2 給電方法による影響

2.2.1項で述べたように、直接通電加熱では板幅方向に等電位が付与された状態では優れた温度均一性を確保することができる。しかし、実機への適用を想定した場合には、一般に電流は給電ロール軸端に設けられた摺動ブラシなどを介して板材へ供給されることが多い。この場合、使用する電源タイプや給電ロール径などにより、ロール軸方向に電位差が発生し、温度分布に影響すると考えられる。このため以下では、最適な給電方法に関する検討をFEM解析により行った<sup>9)</sup>。本解析では、電源タイプを直流と交流とした場合の給電ロール軸方向の電位分布をあらかじめ求めておき、2.2.1項と同様の二次元平面モデルを用い、節点電圧を順次移動させて計算を行った。また、ジュール発熱による影響のみを検討するため、熱伝導や放熱の影響は無視した。

給電方法として Fig. 7 のような板幅方向における、走行方向の同じ軸端部から給電を行った場合((A)-(A)、片側給電と称する)、および、走行方向の対角をなす軸端側から給電を行った場合((A)-(B)、対角給電と称する)について比較した。

下流側給電ロール直近における板幅方向温度分布の解析結果を Fig. 8 に示す。片側給電方法の場合には、給電側の温度が高くなるような不均一な分布となる。これに対して、対角給電方法を行った場合には、幅方向に对称な温度分布となり、均一な加熱が可能である。

また、電源タイプを交流と直流と比較すると、直流の場合の方が温度偏差が抑制され、均一性は良好である。これは、ロール胴部での軸方向の電気抵抗が交流の場合に比べて直流の場合の方が小さく、板幅方向に発生する電位差が小さいためである。

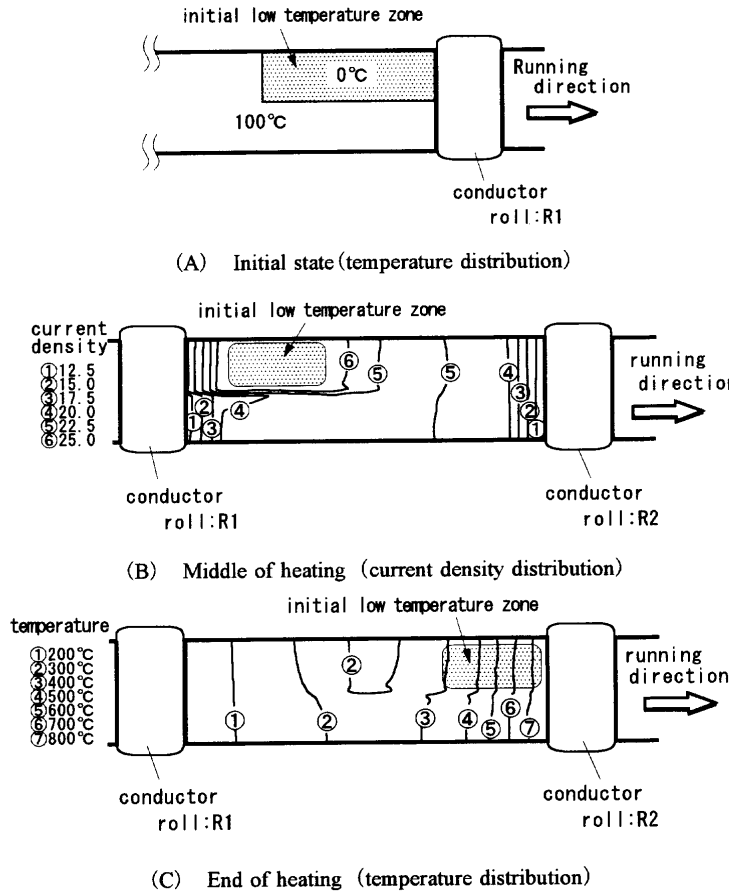
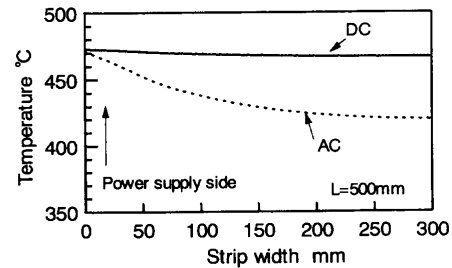


Fig. 6. Self temperature compensate effect of direct resistance heating.

Table 1. Influence of power source type for temperature uniformity.

| Power source type | Resistance of axis direction of roll | Potential difference | temperature uniformity |
|-------------------|--------------------------------------|----------------------|------------------------|
| DC                | low                                  | low                  | ○                      |
| AC                | high                                 | high                 | △                      |



(A) Temperature distribution of one-side power supply method

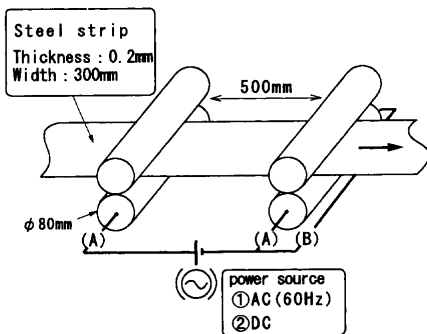
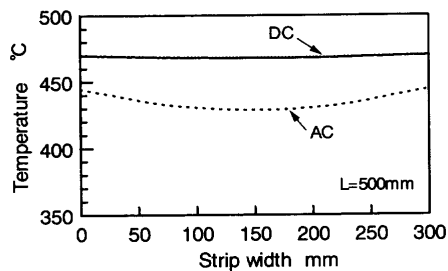


Fig. 7. Schematic figure of analysis model.



(B) Temperature distribution of diagonal power supply method

Fig. 8. Results of FEM analysis.

### 3. スパーク抑制技術

直接通電加熱を実機設備に適用するには、被加熱材と給電ロールの間で発生するスパークを抑制することが必須で

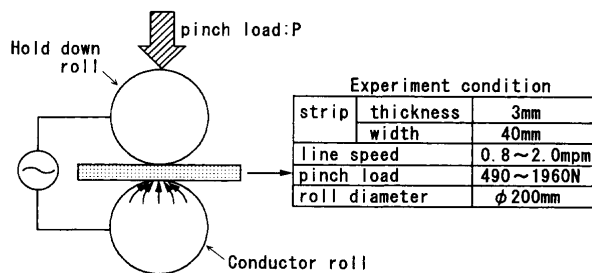


Fig. 9. Experiment method.

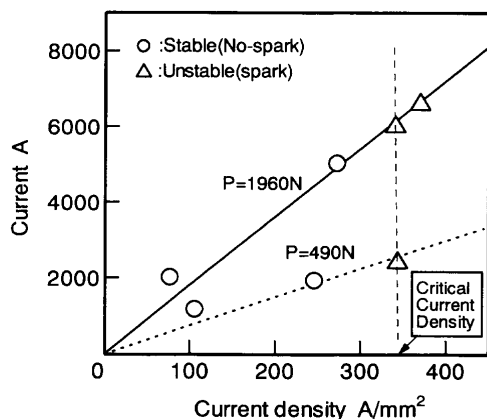


Fig. 10. Critical current density of direct resistance heating.

ある。筆者らがこれまでにモデル実験を重ねてきた結果、広幅の薄肉コイル材を被加熱材とした際のスパーク発生要因は次の2つに大別される。局所的な電流集中に起因するものと、給電ロールに生成するサーマルクラウンに起因するものである。

以下に、これらについて検討した結果を示す。

### 3.1 給電安定限界

広幅の薄肉コイル材を被加熱材とした際には、ライン速度や加熱温度にもよるが、給電ロールとの狭い接触部を大電流が通過するため、電流密度（全投入電流／接触面積）が極めて高くなる。このとき、電流密度がある限界値を超過すると、とくに板端近傍などで局所的な電流集中が生じ、板表面が溶融・飛散するようなスパークが発生する。

このようなスパークの発生限界について、モデル実験による検討を行った。

Fig. 9に示すように、被加熱材を走行させながら、その上下に配したロール間からの給電により、大電流を通電した状態で実施した。

実験結果をFig.10に示す。ここで、給電安定限界の指標として電流密度に着目し、全投入電流量との関係について整理した。給電安定限界は、全投入電流量やピンチロールの加圧力ではなく電流密度で整理されるとみなすことができる。

これより、直接通電加熱の適用に際しては、安定限界電流密度以下となるよう給電を行う必要がある。

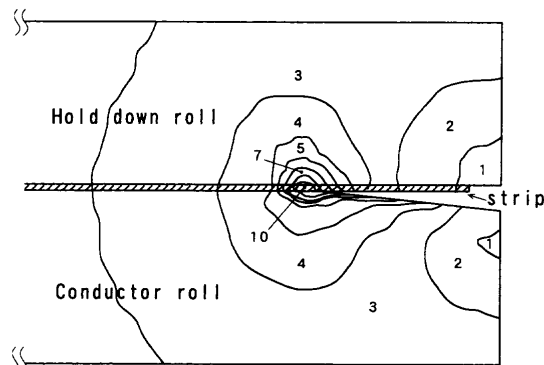


Fig. 11. Result of current density distribution analysis.

### 3.2 サーマルクラウン生成の影響

前項における安定限界電流密度は板材と給電ロールとの接触が板幅方向に安定な場合での許容値であるが、広幅の薄肉コイル材をピンチロールで加圧したような状況下では、給電ロールの熱膨張によるサーマルクラウンや板クラウン、エッジドロップなどの板形状や中伸び・耳波などの平坦不良により幅方向での接触が安定であるとは限らない。

また、モデル実験で平坦不良のない板材を用いた際にも、加熱初期には低温側、高温側のいずれにもスパークの発生が認められなくても、一定時間が経過した後では高温側の給電ロールの板端近傍で連続的なスパークが観察されることがある。

これは、給電ロールにサーマルクラウンが成長することで板端部に隙間が形成され、その隙間近傍でスパークが発生していると考えられる。

このような隙間近傍における電流密度分布を把握するため、モデル実験と同様に板材の上下に配したロール間での給電において、給電ロールと板との接触部について板幅方向断面を二次元平面要素でモデル化し、下ロールのみにサーマルクラウンが生成して板端部に隙間が発生した場合の電流密度分布について解析を行った。

Fig.11は、板幅中央で給電ロールと板が安定して接触している部位の電流密度を1とした相対値で評価した電流密度分布を示す。

隙間近傍の電流密度は、安定して接触している部位の10倍以上に高くなる。このような高電流密度下で板材と給電ロールが接触や非接触を繰り返すことでスパークが発生しやすくなると考えられる。このため、スパークの抑制には、サーマルクラウンの生成を抑制することが有効である。

## 4. 実機適用結果

上述したような基礎検討結果に基づき、直接通電加熱設備を実機クラッドラインのステンレス材加熱用として導入

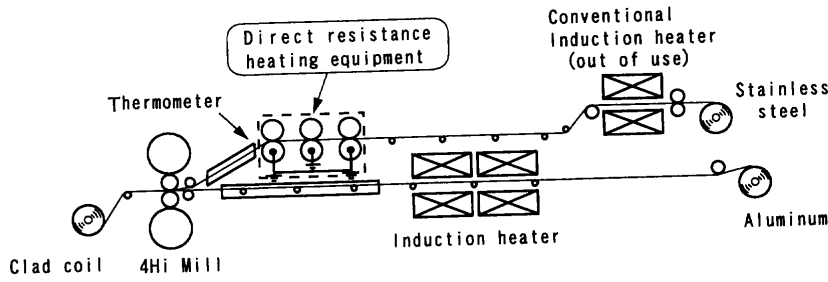


Fig. 12. General arrangement of clad manufacturing process.

Table 2. Main specifications of direct resistance heating equipment.

|                     |                                     |
|---------------------|-------------------------------------|
| Material            | 1.16%Cr-Nb,Cu<br>2.LowC,18%Cr-10%Ni |
| Thickness           | 0.5 ~ 0.9mm                         |
| Width               | 700 ~ 1000mm                        |
| Line Speed          | 5.0 ~ 15.0mpm                       |
| Heating Temperature | R.T. to 350 °C                      |
| Applied Current     | DC max 20KA                         |
| Applied Voltage     | DC max 25V                          |

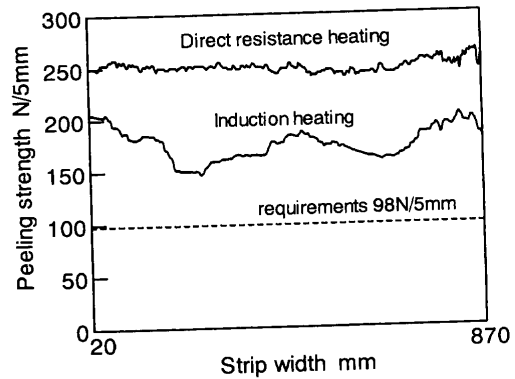


Fig. 14. Transverse distribution of peeling strength in a stainless/aluminium clad sheet.

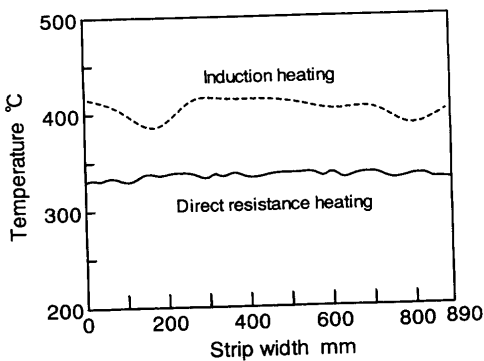


Fig. 13. Distribution of temperature in the direction of strip width. (Stainless steel: 16%Cr-Nb, Cu, thickness: 0.61 mm, width: 890 mm, line speed: 15 mpm)

した(Table 2, Fig.12)<sup>8,10,11</sup>。

本加熱設備では、給電ロールを3組のピンチロールで構成し、最上流側および最下流側の給電ロールを短絡接地することで、通電電流がライン内の他設備へ漏洩することを抑止している。また、給電方法には対角給電方式を採用することで、板幅方向に均一加熱することが可能である。さらに、通電加熱装置の出側に温度計を設置し、PIDフィードバック制御を行うことで加熱温度の自動制御を実施している。

#### 4.1 実機適用結果

##### 4.1.1 板幅方向温度均一性

通電加熱装置の出側で測定した板幅方向の温度分布をFig.13に示す。本設備では、対角給電方式を採用することで板幅方向の温度偏差は3%以内と良好であり、従来まで

使用していた誘導加熱方式に比べて大幅に改善された。

##### 4.1.2 走行方向温度均一性

PIDフィードバックによる温度自動制御を実施しており、走行方向における温度変動は±2°C以内と良好である。

##### 4.1.3 スパーク発生状況

本設備では操業時の電流密度を、3.1項で述べた安定限界値に比べて十分低くなるよう設定しているため、これに起因したスパーク発生の懸念はない。

また、下流側の給電ロールにおいて生成するサーマルクラウンを抑制するため、給電ロールおよび押えロールをそれぞれヒータを用いて通板される板温度と同じ温度にまで加熱を行っている。このため、サーマルクラウンの成長が十分に抑制され、スパークの発生がない安定した給電が可能である。

##### 4.1.4 クラッド圧延への効果

クラッド圧延材の幅方向における接合強度分布をFig.14に示す。ここで、接合強度は5mm幅の試験片を用いた剥離強さで評価した。

これより、直接通電加熱方式でのクラッド圧延材は、従来の誘導加熱方式での圧延材に比べて接合強度、および、その幅方向均一性が向上していることがわかる。

また、Fig.15に剥離後のステンレス材側の接合界面におけるSEM観察結果を示す。Fig.15で見られる白い網目状の部分は、剥離後のステンレス材側の接合界面に付着残したアルミニウムである。本部分は金属結合した強接合部で

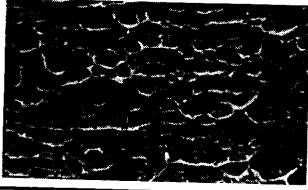

|   | Direct resistance heating   | Induction heating  |
|---|---|--|
| Peeling surface of stainless steel (SEM)<br>100 $\mu$ m |  |  |
| Bonding strength (N/5mm)                                | 250   | 200  |
| Aluminum on peeling surface (wt%)                       | 55.3  | 30.5   |

Fig. 15. Peeling surface of stainless steel (SEM).

あり、接合強度はこの面積率に依存する。

直接通電加熱方式によるクラッド圧延材では、従来の誘導加熱方式に比べてアルミニウム付着残存率が大きく、接合強度が強いことがわかる<sup>12)</sup>。

## 5. 結言

薄肉の広幅コイル材を被加熱対象材とした直接通電加熱技術について検討した。以下にその結果をまとめる。

(1) 走行方向の昇温特性は通電電流を一定とすれば、被加熱材の固有抵抗値の温度依存性により、下流側の給電ロール直近ほど発熱量が増大し、急速に加熱される。

(2) 板幅方向の加熱特性については、走行方向に対して対角をなすロール軸端側より給電を行うことで、均一に加熱することが可能である。

(3) 給電ロールと被加熱材の間で発生するスパークの抑制については、電流密度を安定限界値以下に抑制することと給電ロールに生成するサーマルクラウンの抑制が有効である。

(4) 本加熱設備を実機クラッドライン内のステンレス材加熱用として導入した。その結果、スパーク発生のない安定した加熱が可能であり、板幅方向の温度均一性に関し

ても温度偏差3%以内と良好であった。さらに、クラッド圧延材についても接合強度、および、その幅方向均一性が向上した。

## 文 献

- 1) D.Do, A.Yahiro, T.Masui, K.Hirahara and T.Yoshida: *Bull. Jpn. Inst. Met.*, **32** (1993) May, 364.
- 2) D.Do, T.Tsuruta, K.Nanba, A.Yahiro and K.Hirahara: *Sumitomo Met.*, **45** (1993) 5, 145.
- 3) T.Ohara, S.Odajima, T.Aiso, M.Fukuyama, N.Katsuyama, R.Mizoguchi, T.Osawa and K.Sone: *CAMP-ISIJ*, **4** (1991), 1639.
- 4) T.Hayashida, M.Oda, H.Yoshimura, T.Kiriyama and H.Oikawa: *CAMP-ISIJ*, **5** (1992), 1775.
- 5) M.Fukuyama: *Electro-Heat*, **90** (1996), 50.
- 6) K.Hamada, K.Isaka and T.Masui: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 317.
- 7) K.Hamada, K.Isaka, T.Masui and T.Shibahara: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 1043.
- 8) K.Hamada, K.Isaka, Y.Yonemitsu, S.Iwasaki, T.Hattori and M.Nakano: *Proc. 1998 Jpn. Spring Conf. Technol. Plast.*, (1998), 475.
- 9) K.Hamada, K.Isaka, T.Shibahara, R.Komoda and M.Nakano: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 394.
- 10) K.Hamada, K.Isaka, Y.Yonemitsu, S.Iwasaki, T.Hattori and M.Nakano: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 368.
- 11) S.Iwasaki, T.Ichikawa, Y.Yonemitsu, K.Hamada and K.Isaka: *Sumitomo Met.*, **49** (1997) 4, 38.
- 12) D.Do, Y.Yonemitsu and N.Maekawa: *74th JSME Fall Annual Meeting(II)*, (1996), 37.