

誘導加熱による鋼板塗膜の乾燥

Drying of Coating Film on Cold-rolled Strip by Induction-heating

山 崎 忠*
Tadashi Yamazaki

前 山 公 夫**
Kimio Maeyama

相 沢 均***
Hitoshi Aizawa

嶋 田 俊 一****
Shun-ichi Shimada

田 中 司*****
Tsukasa Tanaka

Synopsis:

A drying furnace used in the cold-rolled strip coating line is required to have not only high heating efficiency but also quick response to a process speed variation or small thermal capacity.

In order to meet the above requirements, an induction-heating process that uses high-power and high-frequency thyristor inverter has been successfully applied to the furnace instead of the convection and radiation method conventionally used.

This paper describes some fundamental considerations in designing the furnace of induction-heating type, and an example of successful application to the drying furnace for silicon steel processing line.

1. 緒 言

冷延ストリップの表面処理ラインにおける、塗布、乾燥設備は、主に、ストリップに処理液を塗布するコートと、乾燥および焼付のための乾燥炉とから構成されている。これらの設備が、塗膜のはく離や損傷を極力抑えるために連続処理ラインの出側ループ後面のコイラー直前に設置されることも多い。

この場合の乾燥炉には、製品品質の安定のため、巻取りコイル取出し時のストリップの減速、停止、再起動に対する即応性をもつこと、すなわち、熱容量の小さいことが要求される。

一般に、乾燥炉の加熱方式としては、放射加熱、対流加熱、および、この両者を組合せた方式が広く用いられているが、これらの方式で熱容量を小

さくすれば、断熱性が犠牲になり、加熱効率は低下する。一方、誘導加熱方式を用いれば熱容量の極めて小さい炉が実現できるが、高周波発生装置の効率が低かったために、これまで、この方式が適用されたことはなかった。

近年、高効率、大容量の高周波用サイリスタ・インバータが開発された結果、加熱効率の高い乾燥炉の設計が可能になった。

本報告では、加熱効率の改善を目的として、このような乾燥炉に誘導加熱方式を適用するにあたっての基本的な考え方、および、けい素鋼帯製造ライン中の乾燥炉への適用例について紹介する。

2. 誘導加熱の原理

2.1 誘導電流密度

厚さ $2a$ (m) の無限な広がりをもつ平板状導体

* 阪神製造所企画部企画開発室主査(副部長待遇)

*** 阪神製造所企画部企画開発室主査(掛長待遇)

***** 阪神製造所設備部設備技術室

(昭和56年2月19日原稿受付)

** 阪神製造所企画部企画開発室主査(課長待遇)

**** 阪神製造所企画開発室

(被熱材)を、面に平行な正弦波状の均一な交番磁界内においた時、被熱材の中央を原点にとると、被熱材内部の厚さ方向に x (m) の位置における誘導電流密度の実効値 I_x (A/m²) は、次式で表わされる^{1,2)}。

$$I_x = -\gamma H_a \frac{\sinh(\gamma x)}{\cosh(\gamma a)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\gamma = \frac{1+j}{\sqrt{2}} \sqrt{2\pi f \mu \sigma} \quad (\text{m}^{-1})$$

$$j = \sqrt{-1}$$

H_a : 被熱材表面 ($x=a$) の磁界の強さ
(実効値, A/m)

f : 交番磁界の周波数 (Hz)

μ : 被熱材の透磁率 (H/m)

σ : 被熱材の導電率 ($\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)

2-2 電流の浸透深さ

誘導電流の表面近ほうへの集中の程度を表わすのに、全誘導電流が被熱材表面の電流密度 I_a で一様に分布すると仮定した時の表面からの換算深さを用い、これを電流の浸透深さという。これを δ (m) で表わすと次のようになる¹⁻³⁾。

$$\delta = (\pi f \mu \sigma)^{-1/2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、透磁率は、被熱材が鋼の場合には、磁界の強さ H (A/m) に支配され、周波数によっても変化する。通常の誘導加熱では飽和点以上の高い磁束密度となるため、その実効的な値の評価は難しいが、低炭素鋼の場合、次式が広く用いられている^{1,4,5)}。

$$\mu = \frac{\alpha \cdot B_m}{H} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$B_m = 1.6 \sim 2.0$ (Wb/m²) : 飽和磁束密度

$\alpha = 1.8$: 定数

(3)式は、 $H \geq 3500$ の範囲でよく成立すると言われている。しかし、磁界の強さがこれより低い場合、あるいは、被熱材が特殊な鋼種の場合の誘導コイルの設計においては、あらかじめ使用周波数における透磁率、および定数 α の値を調査する必要がある。

2-3 吸収電力

被熱材が磁界の強さ H の磁場から吸収する電力

P_w (W/m²) は、無効電力も含めて、次式で表わされる^{1,2,4-6)}。

$$\begin{aligned} P_w &= S_w \int_{-a}^a |I_x|^2 \cdot \rho \cdot dx \\ &= 2 S_w H_a^2 \frac{\rho}{\delta} \left(\frac{2a}{\delta} Q - j \frac{2a}{\delta} P \right) \\ &= 2 \pi f H_a^2 \cdot \mu \cdot A_w \cdot l_c (Q - jP) \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ρ : 被熱材の固有抵抗 ($=1/\sigma$), ($\Omega \cdot \text{m}$)

S_w : 被熱材の表面積 (m²)

A_w : 被熱材の断面積 (m²)

l_c : 誘導コイルの長さ (m)

ここに、 P , Q は被熱材の形状によって決まる磁束係数で、次式のように表わされる¹⁻⁵⁾。

$$P = \frac{\delta}{2a} \cdot \frac{\sinh \frac{2a}{\delta} + \sin \frac{2a}{\delta}}{\cosh \frac{2a}{\delta} + \cos \frac{2a}{\delta}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$Q = \frac{\delta}{2a} \cdot \frac{\sinh \frac{2a}{\delta} - \sin \frac{2a}{\delta}}{\cosh \frac{2a}{\delta} + \cos \frac{2a}{\delta}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

また、被熱材の力率 $\cos \phi_s$ は、(4)式より、次のようになる。

$$\cos \phi_s = \frac{Q}{\sqrt{Q^2 + P^2}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

P , Q , および $\cos \phi_s$ の関係を Fig.1 に示す。

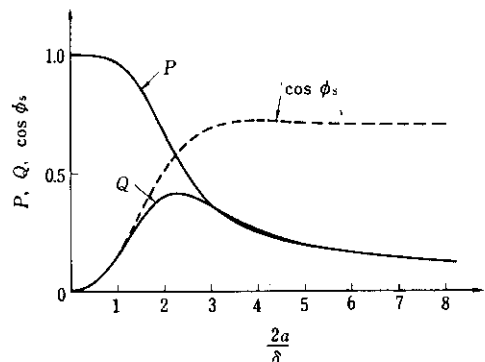


Fig. 1 P , Q and $\cos \phi_s$ as functions of $2a/\delta$ for steel strip

これから、次のことが言える。

(1) Q の値は、 $2a/\delta \approx 2.25$ の時に最大となり、吸収電力には、ピーク特性がある。ここで、 $2a/\delta = 2.25$ を満足する周波数 f_c (Hz) は、(2)式を用いて、(8)式で求められる。 f_c は周波数選定時の重要な要素であり、許容最低周波数と呼ばれる¹⁻⁶⁾。

$$f_c = \frac{2.25^2}{\pi} \cdot \frac{1}{\mu \cdot \sigma \cdot (2a)^2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

(2) 被熱材の力率が高く、かつ、安定しているのは、 $2a/\delta \geq 3.0$ の範囲である。この条件を満足する周波数は、磁界条件を一定とすれば、 f_c よりも少し高い値となる。

2.4 コイルインピダンスおよび力率

誘導コイルの一次側から見た、インピダンス Z_c (Ω) 力率 $\cos \phi_c$ は、Fig. 2 に示す等価回路から最終的に次のように求められる^{2,4-6)}。

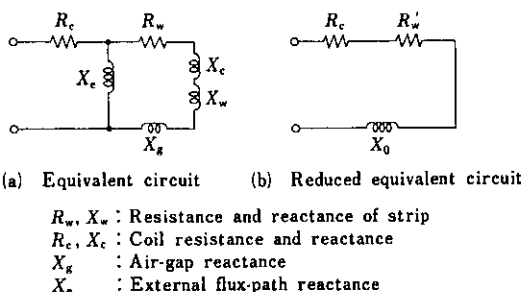


Fig. 2 Equivalent circuit of the short coil

$$Z_c = (R_c + R'_w) + jX_0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\cos \phi_c = \frac{R_c + R'_w}{\sqrt{(R_c + R'_w)^2 + X_0^2}} \quad \dots\dots\dots (10)$$

R'_w, X_0 : 等価抵抗および等価リアクタンス(Ω)

このコイルインピダンスおよび力率は、誘導コイル設計時の基本的な要素であるが、特に、(10)式による力率の理論計算値は、均一な正弦波状の磁界であるなどの仮定のほかに、外部磁路のもし磁束によって生じるコイル導体や周辺物の渦電流損失が考慮されていないために、磁界の強さや設置条件などにもよるが、Fig. 3 に例示したように、実測値よりも小さくなる傾向がある。

したがって、被熱材によってはあらかじめ実験により正確な値をは握して、計算値を補正する必要がある。

3. 乾燥炉設計上の留意点

乾燥炉におけるストリップのヒートサイクルは、

Strip thickness : 0.35mm
Strip width : 1 000mm
Frequency : 9kHz

Coil air-gap height

① : h_1
② : h_2

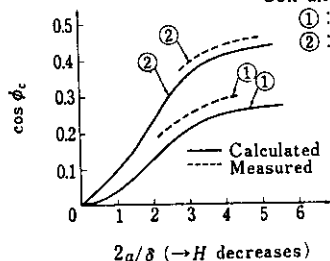


Fig. 3 Comparison of calculated and measured power factor

Fig. 4 に示すように、加熱-蒸発-焼付の3ゾーンに大別できる。蒸発ゾーンでは、単なるストリップの加熱と異なり、塗布溶媒の蒸発が完了するまでは、ストリップの昇温はほとんど見られない。

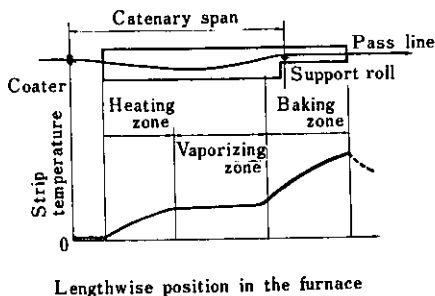


Fig. 4 A typical heat cycle for drying process

誘導加熱方式の場合には、ストリップでのエネルギー発生率を非常に高くすることも可能ではあるが、溶媒と雰囲気蒸気の蒸気圧差によって決まる蒸発速度が乾燥の律速条件となるため、雰囲気中の蒸気圧を低下させるための設備上の配慮や蒸発速度に見合う適切な電力密度の選定が必要となる。

このように、乾燥炉では各ゾーンの特性がそれぞれ異なるため、それに合致した誘導コイルの設計などが必要である。

以下に、このような乾燥炉に誘導加熱を適用するに際しての基本的な考え方および留意点を記す。

3.1 誘導加熱装置

3.1.1 周波数および電力密度の選定

加熱装置の電力余裕を大きくし、かつ、制御の

安定性を高めるためには、2・3項で述べた力率が
高く、安定した状態となる $2a/\delta \geq 3.0$ を満足する
ような周波数、ないしは、電力密度を選定する必
要がある。

通常は、加熱—蒸発—焼付のプロセス上要求さ
れる炉長、および、負荷電力に対し、 $2a/\delta \geq 3.0$
を満足するような適正周波数を選定するが、被熱
材が非常に薄い場合とか、固有抵抗が大きい場合
には、許容最低周波数 f_c が 10kHz をこえることが
ある。

大容量サイリスタ・インバータでは、現在、10
kHz が周波数の限界となっているため、この周波
数でこのような材料を加熱しようとすれば、電力
密度を低く（炉長を大きく）して $2a/\delta = 3.0$ に近
づける必要がある。

3・1・2 誘導コイル断面高さ

誘導コイル断面の空けきは、リアクタンス分と
なるため、高さを大きくすれば Fig.5 に示すよう
にコイル力率 $\cos \phi$ が低下する。したがって、効
率的な加熱をするためには、断面高さを可能な限
り小さくするのが良い。

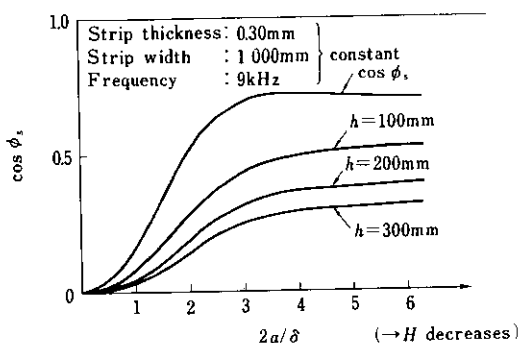


Fig. 5 Influence of cross-sectional height, h ,
of coil on power factor

乾燥炉内では、ストリップは長いカテナリ状態
で搬送されるため、通常、断面高さは、カテナリ
の変化量や、耳のびなどの形状不良を考慮して決
める。しかし、誘導加熱方式の場合、これ以外に、
誘導電流の端面効果によってストリップ端部の
温度が高くなり、中央部と端部とで延びの差が生
じる結果、Fig.6 に示すように、ストリップが幅

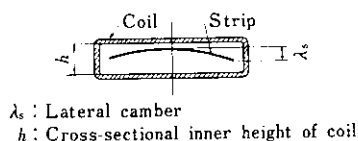


Fig. 6 Cross section of strip lateral camber
within coil

方向にわん曲することも考慮しなければならない。
このわん曲量は、板が薄く、板幅が広くなるほど
著しくなるが、カテナリ・スパンの中央部から離
れるにしたがって減少するので、これに合せて断
面高さを変えるなどの配慮が必要であり、これに、
コイルの互換性や軸方向電流のバランスなどを考
えて、実際の寸法を決定する。

3・2 溶媒の蒸発促進策

3・2・1 誘導コイルの構造

通常、誘導コイルはストリップ面からの放熱損
失を少なくするため、コイル導体内面にアスベ
ストセメント板などを張付けた密閉構造となってい
る。しかし、水溶液などが塗布されたストリップ
を乾燥する乾燥炉の加熱・蒸発ゾーンでは、蒸発
水分などがコイル内に滞留して蒸発をさまたげ
るとともに、結露して、コイル天井壁に付着し、こ
れがストリップ面に滴下して品質上のトラブルを引
き起こす。これを防止するには、コイルの構造を
Fig.7 のようにすることが必要である。

- (1) コイル断面の天井部に傾斜を設け、結露して
付着した水滴などが、天井に沿って左右に流れる
ようにする。(Fig.7(a)参照)。
- (2) コイル導体断面の下部に断熱材を介して樹脂
製の溝形フレームを取付け、水冷された導体部で
の結露や滴下を防ぐ (Fig.7(b)参照)。
- (3) コイル導体をアスベスト・セメント板などで
密閉せず、かつ、導体間のピッチを粗くして、す
き間のある構造にする (Fig.7(c)参照)。

3・2・2 送風装置

雰囲気蒸気圧の低下による蒸発の促進、および
結露防止のためには、外部からの強制通風が極め
て有効である。この場合の送風方式としては、蒸
発水分などのライン外への拡散と、わん曲したス

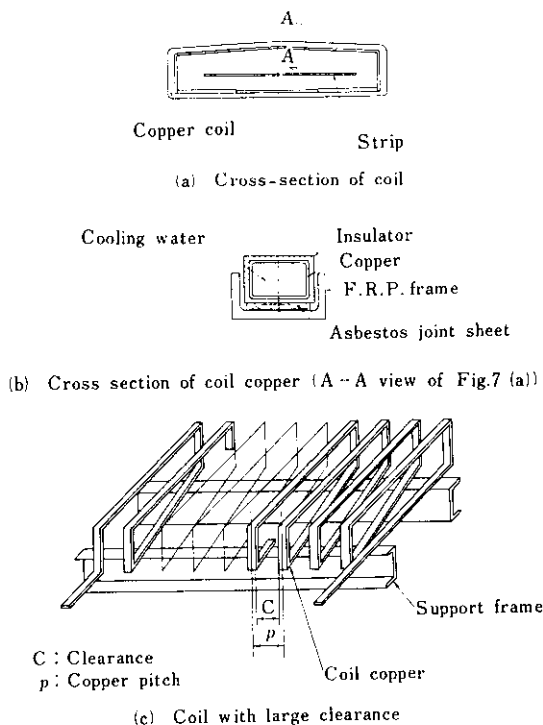


Fig. 7 Schema of induction coil

トリップ裏面への送風を考え、Fig. 8 に示すように、サイドフローとカウンタフロー方式を併用するのが良い。

ただし、通風については対流効果によるストリップからの放熱損失に対する配慮が必要である。

例えば、蒸発ゾーンにのみ送風するか、周辺設備の排熱を利用して温風を送ることなどである。

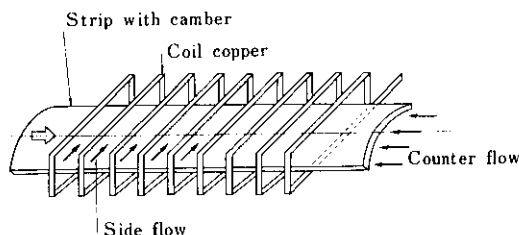


Fig. 8 Schema of ventilation for induction-heating furnace

4. 単一インバータによる運転・制御の検討

誘導加熱装置の電源部であるサイリスタ・インバータの全設備費に占める割合は相当に高い。し

たがって、設備費低減のためには、加熱-蒸発-焼付の全ゾーンを1台のインバータで運転できることが望ましい。以下に、その場合の留意点を記す。

4.1 板厚によるヒート・サイクルの変化

乾燥炉における全負荷 P_{WT} (kW) は、(11) 式、および Fig. 9 に示すように、板厚にのみ比例する部分と塗布量にのみ比例する部分とで構成される。板幅、ライン速度一定の場合、板厚を変更しても塗布量は変わらないため、負荷は板厚に比例しない。この結果、1台のインバータで運転する場合には、ヒートサイクル上で蒸発終了点が移動するなどの変化が生じる。

$$P_{WT} = A \cdot b \cdot v \{ (2a) \cdot C_s \cdot \gamma_s \cdot \Delta\theta_s + G_1 \cdot C_{w1} \cdot \Delta\theta_{w1} + G_2 (C_{w2} \cdot \Delta\theta_{w2} + q') \} \dots (11)$$

v : ライン速度 (m/s)

b : 板幅 (m)

γ_s : ストリップの比重量 (kg/m³)

C_s, C_{w1}, C_{w2} : ストリップ、塗布液の溶質および溶媒の比熱 (kcal/kg·°C)

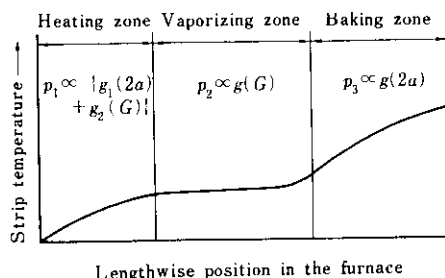
$\Delta\theta_s$: ストリップの終温と初温の差 (°C)

$\Delta\theta_{w1}, \Delta\theta_{w2}$: 溶質および溶媒の終温と初温の差 (°C)

G_1, G_2 : 溶質および溶媒の量 (kg/m²)

q' : 溶媒の蒸発潜熱 (kcal/kg)

A : 定数 (kW·s/kcal)

Fig. 9 Required power, P , of each zone in drying furnace

誘導加熱におけるストリップの吸収電力は、(4) 式に示しているが、周波数が一定、同一磁界、同一板幅という条件では、

$$E_c = g(v, \theta_{so}, 2a, b) \quad \dots\dots\dots(14)$$

ここで、炉出口板温 θ_{so} 、板厚 $2a$ 、板厚 b をパラメータにして(12)式と(16)～(21)式を用いて関数 g を求め、この結果から最終的な関数形を決定する。

$$P_{co} \div P_{WT} + q_L \quad \dots\dots\dots(15)$$

$$P_{ci} \div P_{co} / \eta_c \quad \dots\dots\dots(16)$$

$$P_{co} \div 10^{-3} P_W = 2\pi f \cdot H_a^2 \cdot l_c \{ \mu(2a) \cdot b \cdot Q \} \times 10^{-3} \quad \dots\dots\dots(17)$$

$$H_a = I_c \cdot \frac{N_c}{l_c} \quad \dots\dots\dots(18)$$

$$\frac{E_c}{N_c} = \sqrt{\frac{P_{ci}}{\cos \phi_c} \cdot \frac{Z_c}{N_c^2}} \quad \dots\dots\dots(19)$$

$$E_c = I_c \cdot Z_c \quad \dots\dots\dots(20)$$

P_{co}, P_{ci} : コイルの出力, 入力 (kW)

q_L : 放熱損失 (kW)

η_c : コイル効率

N_c : コイル巻数

I_c : コイル電流 (A)

炉出口板温 θ_{so} を一定として、板厚および板幅をパラメータにとって計算し、直線近似した関数の設計例を Fig.11 に示す。

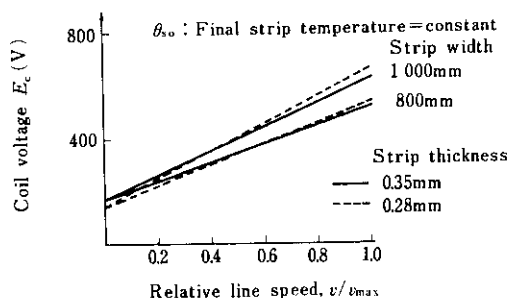


Fig. 11 An example of coil voltage as a function of line speed at constant final strip temperature

5. 実施例

5-1 適用対象

当製造所、方向性冷延けい素鋼帯製造ライン中の酸化マグネシウムと水の混合スラリ塗布後の乾燥炉に、従来の遠赤外線ヒータによる放射加熱方式に替えて、誘導加熱方式を適用した。

この酸化マグネシウム塗膜は、次工程のコイル状での高温焼鈍時のストリップの密着防止と、絶縁皮膜形成のために必要となるもので、このために、本工程での塗布量と焼付温度は厳密な管理を必要とする。

当設備の構成を Fig.12 に示すが、塗膜のはく離を極力少なくするために、出側ルーパやブライドルロールの後面に設置されている。

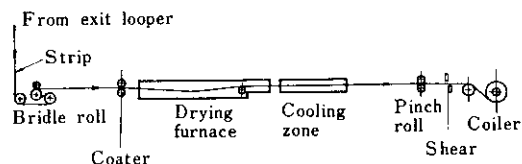


Fig. 12 Exit equipment of continuous processing line for silicon steel strip

5-2 設備仕様

本加熱方式を適用した塗布ライン、および、乾燥炉の仕様は以下のとおりである。

(1) ライン仕様

通板材料	冷延けい素鋼帯
板厚	0.27～0.35mm
板幅	800～1 200mm
通板速度	60m/min (最大)

(2) 乾燥炉仕様

炉形式	誘導加熱式、誘導コイル8組
構成を	Photo.1 および Fig.13 に示す。
塗布液	酸化マグネシウム粉末と水の混合スラリ
鋼板加熱温度	300℃ (最大)

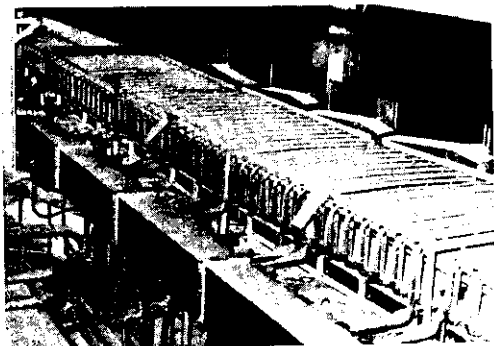


Photo.1 A bird-eye view of induction-heating furnace

高周波電源 サイリスタ・インバータ盤
出力 800kW, 9kHz, 800V, 3φ
送風装置 ファン容量: 100m³/min×450
mmH₂O

5.3 稼動状況

従来炉では、断熱性、したがって熱効率を犠牲

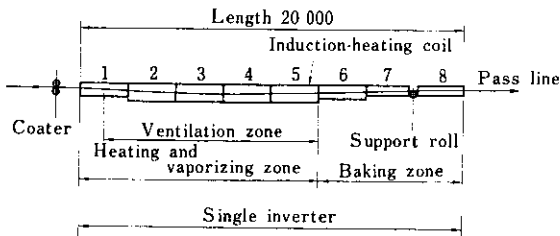


Fig. 13 Outline of Induction-heating furnace

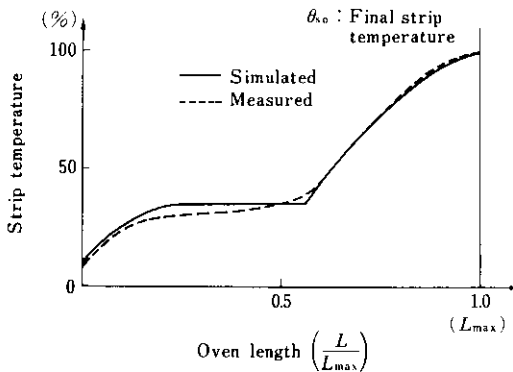


Fig. 15 Comparison of heat cycles measured and simulated for induction furnace

にして、速度変化への応答性を高めていたが、本設備の稼動後は、速度変化への応答性を損なうことなく、電力原単位が従来の約 1/3 に低減され、(加熱効率では、23~26%が 70~75%に改善)、ほぼ当初の目標通りの省エネルギーが達成されている。

ストリップの温度制御については、Fig. 14 にストリップ速度の変化に対する炉出口板温の推移、Fig. 15 に設計段階でのシミュレーションと実測データによるヒートサイクルの比較例を示した。Fig. 14 は、炉出口板温が速度変化時にも、設定値に対して $\pm 5^\circ\text{C}$ の誤差内に制御されていることを示しており、本制御方法が有効であることが分かる。

また、単一インバータで運転する場合には、板厚の変更により蒸発終了点が移動するが、Fig. 16 の例では、その量が 1 m 以下で炉出口板温は一定

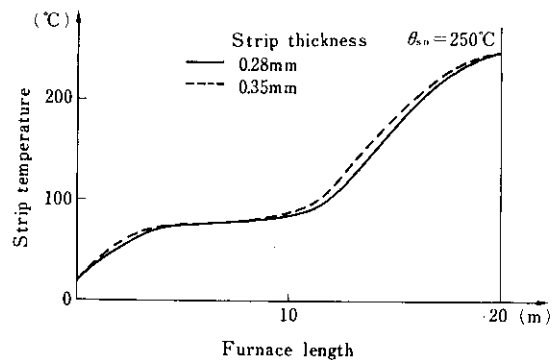


Fig. 16 Influence of strip thickness on measured heat cycle

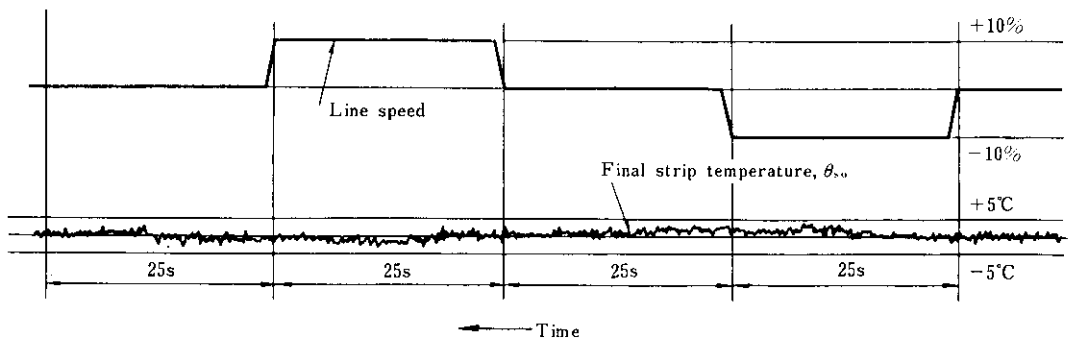


Fig. 14 Control performance of final strip temperature versus strip speed variation in induction-heating furnace

値に制御されており、操業上の支障はまったくない。

このほか、発生水蒸気の結露や、加熱方式の変更による製品品質上のトラブルもなく、順調に稼動を続けている。

6. 結 言

冷延ストリップの表面処理ラインにおける塗布乾燥工程中の乾燥炉への誘導加熱方式の適用について、その基本的な考え方、および、実施例を紹介した。

誘導加熱そのものは古くから知られ、製鉄設備の多くの分野で利用されているが、加熱効率の改

善を主目的としてこれを冷延ストリップに適用した例は報告されていない。しかし今回、冷延けい素鋼帯の酸化マグネシウム塗布後の乾燥炉に本加熱方式を適用し、大幅な省エネルギーを達成できた。

このようにエネルギー単価的には不利な電力を用いても十分効率的な乾燥設備の設計が可能となる分野があるため、高効率、大容量の高周波サイリスタインバータの開発が進むにつれて、同様の適用例は今後しだいに増加してゆくであろう。

本報告が同種の設備の省エネルギー化への一助となれば幸いである。

末尾ながら、実機の設計に際し色々と御指導、御協力をいただいた三菱電機㈱の担当各位に対し感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 菅沼ほか：工業電気加熱ハンドブック（日本伝熱工学委員会編），（1968），282〔電気書院〕
- 2) 中村：高周波加熱（1974），121〔恒星社〕
- 3) 電気工学ハンドブック，（1967），62, 1416〔電気書院〕
- 4) P.G.Simpson：Induction Heating, Coil and System design, (1960) 1, 30 [McGraw-Hill Book Company Inc.]
- 5) R.M.Baker：Design and Calculation of Induction-heating Coils, AIEE, (1957) 3, 31
- 6) 東芝誘導加熱装置ガイドブック，（1978）〔東京芝浦電気株式会社〕