

# 鋼板処理ライン／板温制御システムの開発 ～新モデルによる安価システムの構築～

## Development of Strip Temperature Control System

國方 康生\* Yasuo KUNIKATA  
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 シニアマネジャー

### 抄 録

鋼板処理設備のコスト競争力強化を目的として、焼鈍炉の板温制御について伝熱式を基にした新たなモデル式を考案し、計装制御と適切な機能分担を行うことでコンパクトな板温制御システムを開発した。CGL(連続亜鉛メッキライン)にて本システムを採用した結果、約20%のコストダウンを達成した。

### Abstract

In order to improve competitiveness of the strip processing line, Nippon Steel Engineering Co. Ltd. has developed the strip temperature control system of the annealing furnace. This is a new compact model controlled by the appropriate function assignment with the furnace controller, and we confirm that this system is able to achieve almost 20% cost reduction comparing with conventional lines in the Continuous Galvanizing Line.

## 1 緒言

当社では、C.A.P.L.(連続焼鈍ライン)やCGL(連続亜鉛メッキライン)などの鋼板処理設備の制御システムにおいて、従来、ライン制御に含めていた重要プロセスの制御部分(コアプロセス制御)を切り出し、パッケージ化して独立させることで、コストダウンを図ってきた(図1)。

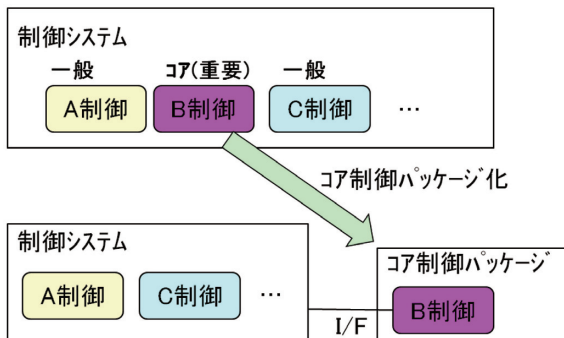


図1 コアプロセス制御パッケージ化  
Fig. 1 Concept of core process control package

CGLに関しては、図2に示すように4つのパッケージ化に取り組み、炉計装パッケージで4つのパッケージ化が完成した。

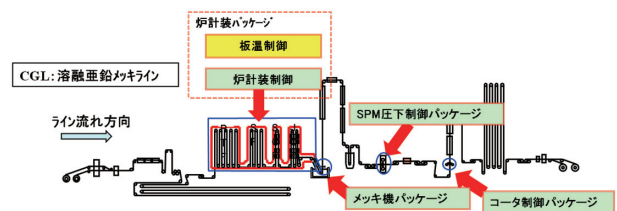


図2 CGLにおけるコアプロセス制御パッケージ化  
Fig. 2 Core process control package in CGL

本稿では、当社のCGLにおいて新たに開発した板温制御システムの内容および適用事例について述べる。

\* 〒804-8505 福岡県北九州市戸畑区大字中原46-59 Tel : 093-588-7145

## 2 板温制御システムのコンセプト

### 2.1 制御コンセプト

図2に示すように、炉計装パッケージは板温制御と炉計装制御から構成されている。板温制御は各炉出側の板温を材質毎のヒートサイクルに基づいた所定の設定板温にするために適切な設定値を計算し、炉計装制御へ設定する機能であり、炉計装制御は板温制御からの設定値に従って、燃焼や冷却の制御を行う。制御に当たっては、コイル切替え時の板サイズ、板温設定変更時の過渡状態と板サイズ、板温設定変更がない定常状態を考慮する必要がある。

過渡状態では板温が変動するので、炉計装制御のPID制御のみではその変動を抑えるのに時間がかかり、板温外れ部が多く出てしまう。特に、板厚が薄から厚への変更の場合などは板温の下振れが起こり、品質的に問題である。このような過渡状態の板温制御は、コイル切替え時の板温変更を予測して板温不良部を最小限にすべく適切な設定値を計算する必要があり、その計算にはモデル式を用いるのが適している。また、定常状態では、板温制御は定値制御であるので、PID制御でのフィードバック制御で対応可能である。

そこで、板温制御と炉計装制御の機能分担を下記のように設定した。

- [1] 過渡状態に板温が大きく変動(特に下振れ)しないように、本板温制御でモデル式によるフィードフォワード制御を行う。
- [2] 安定通板時は板温設定に基づいて炉計装制御で板温PID制御によるフィードバック制御を行う。

このように機能分担することで、板温制御はフィードフォワード制御時のみに設定値計算を行えばよいので、ソフトウェア容量をコンパクトにできる。

### 2.2 対象とする焼鈍炉

CGLにおける標準的な構成である、加熱帯(RTF)、徐冷帯(SCF)、急冷帯(JCF)からなる縦型炉を対象とした。

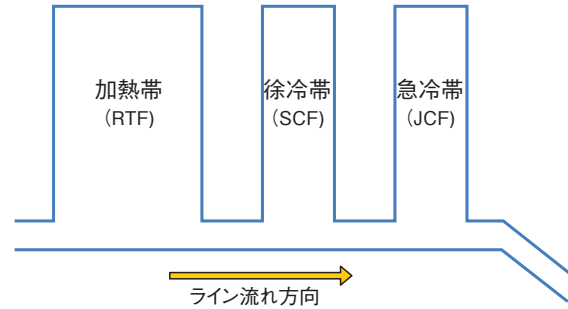


図3 CGLの焼鈍炉構成  
Fig. 3 Composition of CGL annealing furnace

### 2.3 制御精度目標

制御精度については、品質や燃料原単位を確保するための条件として下記を目標とした。

- ・定常状態  
安定通板時：+ / - 10℃以内
- ・コイル切替え時  
加熱帯：現行材・後行材とも板温の下振れ防止  
- 10℃以内

## 3 制御ロジック

上記の制御コンセプトに基づいた、加熱帯(RTF)での制御ロジック及び冷却帯(SCF・JCF)における制御ロジックを以下に示す。

### 3.1 加熱帯(RTF)

本板温制御は、板温PIDコントローラにフィードフォワードおよびフィードバック板温設定を行い、バーナ燃焼量をカスケード制御することで板温を調整する方式とした。フィードフォワード制御時の板温設定の計算に伝熱理論から新たに考案したモデル式を用いた。

図4に制御概念図を示す。

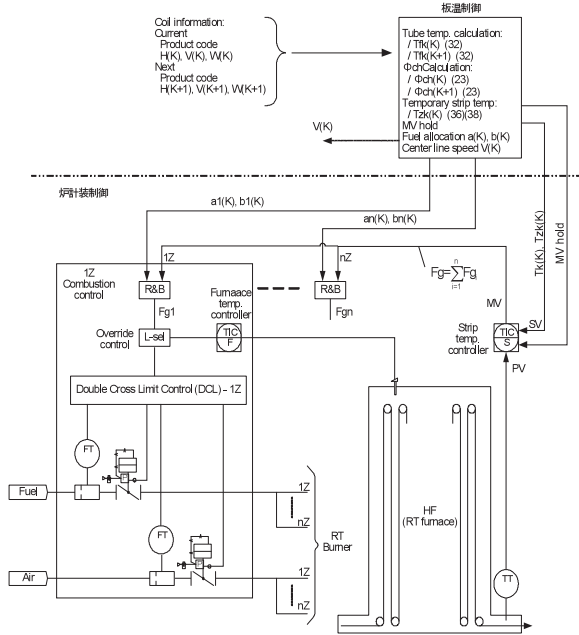


図4 加熱帯の制御構成概念図  
Fig. 4 Basic configuration of HF control

[1] フィードフォワード制御

まずフィードフォワード制御方式を以下に示す。

- ①現コイル、次コイルのそれぞれの厚み  $H(k)$ 、 $H(k+1)$  および速度  $V(k)$ 、 $V(k+1)$  からモデル式(1)により必要なラジアントチューブ温度  $Tfk(k)$ 、 $Tfk(k+1)$  を計算する。

$$\left[ \tan^{-1} \frac{Tk}{Tfk} + \tanh^{-1} \frac{Tk}{Tfk} \right]_{Tfk}^{Tfk} = f(\phi ch, V, H) \quad (1)$$

$Tk$  : 加熱帯入側板温 [K]       $\phi ch$  : 総括形態係数  
 $Tik$  : 加熱帯出側板温 [K]       $V$  : ラインスピード [mpm]  
 $Tfk$  : ラジアントチューブ温度 [K]       $H$  : 板厚 [mm]

本モデル式は、鋼板のある点が炉入口から出口に向けて炉内を移動した際の、炉出口での板温とラジアントチューブの温度の関係を、総括形態係数(鋼板が受取るラジアントチューブからの放射束の割合)、ラインスピードや板厚などの通板情報を用いた放射伝熱式を基に求めたものである。

- ②上記で求めたラジアントチューブ温度  $Tfk$  とラインスピード  $V$  の増減に応じて、表1のアクションをとる。

フィードフォワードアクション時の板温設定、ラインスピード、燃焼ガス流量設定の動きを図示したものを図5に示す。

重要な点は、コイル切替え時の板温低下を防

表1 加熱帯のフィードフォワードアクション  
Table 1 Feed forward action of HF control

	$Tfk(k) < Tfk(k+1)$	$Tfk(k) \geq Tfk(k+1)$
$V(k) < V(k+1)$	① 1A、2A、3A	④ 2A、3A
$V(k) = V(k+1)$	② 1A、2B	⑤ 2B
$V(k) > V(k+1)$	③ 1B、2B、3B	⑥ 2C、3B

1A、1B : 板温設定値変更  
 2A、2B、2C : コントローラ MV ホールド  
 3A、3B : ラインスピード変更  
 □内数字はフィードフォワードアクション番号

ぐために、フィードフォワードアクション1～3の後行材のラジアントチューブ温度計算値が現行材より高くなる場合は、溶接点が入る前にあらかじめ昇温しておくことである。また、フィードフォワードアクション4～6の後行材のラジアントチューブ温度計算値が現行材以下になる場合は、溶接点が加熱帯を通過中

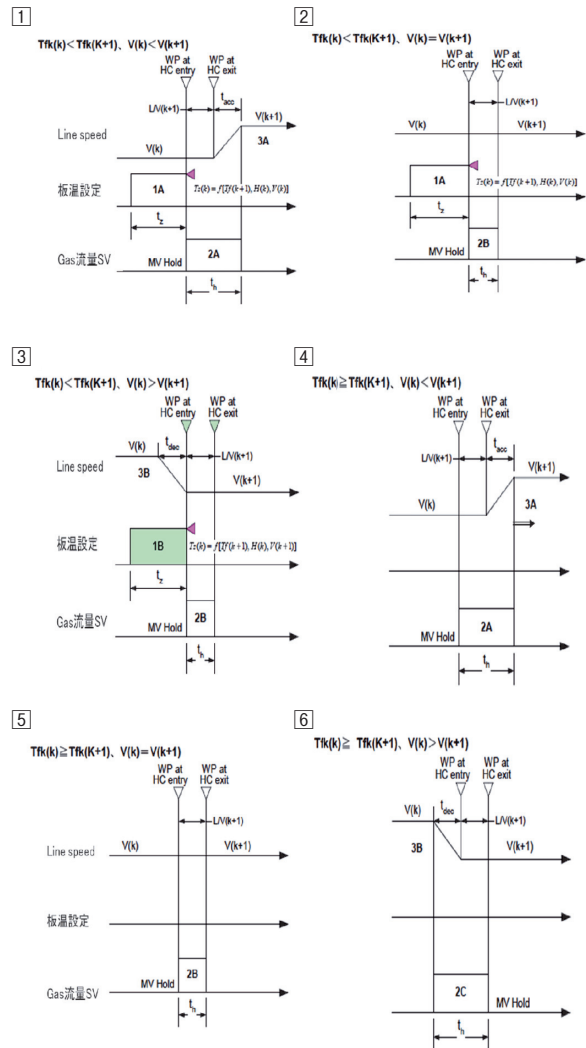


図5 加熱帯フィードフォワードアクションの動き  
Fig. 5 Graphic of HF feed forward action  
(図左上の□内の数字(1～6)は、表1の□内の数字に対応)

は炉計装制御による板温 PID 制御の操作量を保持するのみで、通過後に同制御を再開し、目標板温に追従させることで板温低下を防げる。

以下に各アクション内容詳細を示す。

〈Action 1 A〉

現行材通板中に板温設定値  $T_k(k)$  を予め  $T_{kz}(k)$  に上げる。この  $T_{kz}(k)$  は、板厚・ラインスピードが現行材通板条件  $H(k)$ 、 $V(k)$  のままでラジアンチューブ温度が  $T_{fk}(k+1)$  になったと仮定した場合の板温であり、下式(2)で計算する。

$$\left[ \tan^{-1} \frac{T_k}{T_{fk}(k+1)} + \tanh^{-1} \frac{T_k}{T_{fk}(k+1)} \right]_{T_{kz}(k)}^{T_k(k)} = f(\phi ch, V(k), H(k)) \quad (2)$$

〈Action 1 B〉

Action 1 A との違いは(2)式において  $V(k)$  を  $V(k+1)$  に変更したものであり、その他は Action 1 A と全く同様である。本 Action は、減速を伴って薄手から厚手になる場合であって、溶接点が炉出側に来たときの大幅な温度低下による板温の下振れを防止するためである。

〈Action 2 A〉

溶接点が加熱帯入口到達時点のガス流量設定値を、板温 PID コントローラを“Man”モードにすることにより次の期間一定に保持する。

保持開始：溶接点が加熱帯入口に到達した時  
 保持時間： $60 * L / V(k) + T_{acc}[\text{sec}], V(k) < V(k+1)$   
 但し、 $L$  炉内 Strip 長 [m]  
 $T_{acc}$  加速時間 [sec]

すなわち、溶接点が加熱帯出口に到達した後、加速時間経過したときが保持終了タイミングである。

〈Action 2 B〉

保持期間を除いては Action 2 A と考え方は全く同様である。

保持開始：溶接点が加熱帯入口に到達した時  
 保持時間： $60 * L / V(k) [\text{sec}], V(k) \geq V(k+1)$

〈Action 2 C〉

保持期間を除いては Action 2 A と考え方は全く

同様である。

保持開始：溶接点が加熱帯入口前で減速開始時  
 保持時間： $60 * L / V(k) + T_{dec}[\text{sec}], V(k) \geq V(k+1)$   
 但し、 $T_{dec}$  減速時間 [sec]

〈Action 3 A〉

溶接点が加熱帯出口到達で増速。

〈Action 3 B〉

溶接点が加熱帯入口前に減速開始し、減速終了時に溶接点が炉入口に到達。

[2] フィードバック制御

次に、フィードバック制御について説明する。

フィードフォワード動作終了後に、板温制御より材質毎のヒートサイクルに基づいた所定の板温設定値を炉計装制御へ設定し、板温 PID 制御にて加熱帯出側板温を設定値に制御する。

3.2 冷却帯：徐冷帯(SCF)、急冷帯(JCF)

本板温制御は、コイル切り替え時のフィードフォワード制御は冷却ブロウ回転数設定を行うことで、また、フィードバック制御は板温設定値を炉計装制御の板温 PID コントローラに設定してブロウ回転数を制御することで冷却帯出側の板温調整を行う方式とした。

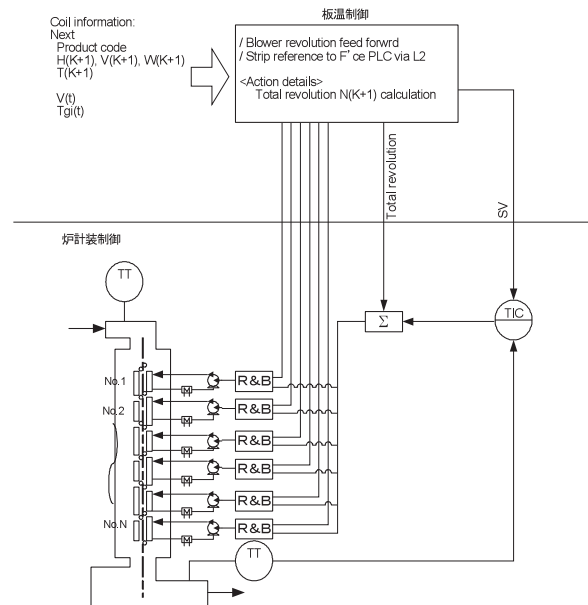


図6 冷却帯の制御構成概念図  
 Fig. 6 Basic configuration of SCF, JCF control

制御の構成図を図6に示す。

本モデル式は、ブロワ回転数を強制対流熱伝達係数および吹付け距離などをパラメータとした帰帰モデル式を求めたものである。また、強制対流熱伝達係数は強制対流の物理式から求めた。

#### [1] フィードフォワード制御

まず、フィードフォワード制御方式を以下に示す。

##### ①後行材の比熱 $C_p$ を計算する。

$$C_p = A1 + A2 * TSdel(k+1) + A3 * TSdel(k+1)^2 + A4 * TSdel(k+1)^3$$

$TSdel$  : 入側板温[°C]、 $A1, A2, A3, A4$  : 定数

##### ②強制対流熱伝達係数： $\alpha$ [Kcal/(m<sup>2</sup>\*Hr\*°C)]

を計算する。

$$\alpha = m * TH(k+1) * V(k+1) * 60 * C_p / ((2 * Lf) * Ln((TSent(k+1) - Tgas(k)) / (TSdel(k+1) - Tgas(k))))$$

$TH$  : 板厚[mm]                       $V$  : ラインスピード[mpm]  
 $Tgas$  : 吹付けガス温度[°C]       $m$  : 密度[kg/m<sup>3</sup>]  
 $Lf$  : ストリップ長[m]

##### ③ブロワ回転数設定値： $N$ [rpm]を計算する。

$$N = f(\alpha, d(k))$$

$d(k)$  : 吹付け距離[m]

##### ④ブロワ回転数設定値の切替えタイミングを、現行材の回転数設定 $N(k)$ と後行材の回転数設定 $N(k+1)$ の関係によって下記とする。

$N(k) > N(k+1)$  のとき  
     : 溶接点が炉出側の X1 [m] 前に来たとき  
 $N(k) \leq N(k+1)$  のとき  
     : 溶接点が炉入側の X2 [m] 前に来たとき

#### [2] フィードバック制御

フィードバック制御は加熱帯と同様に、フィードフォワード動作終了後に、板温制御より材質毎のヒートサイクルに基づいた所定の板温設定値を炉計装制御へ設定し、板温 PID 制御にて出側板温を設定値に制御する。

## 4 制御システムの実証

### 4.1 システム仕様の決定

図7のシステム構成に示すように、板温制御システムはプロセスコンピュータとのみ通信とすることでインターフェースの標準化を行い、今後の変更を最小限にできるシステムとした。

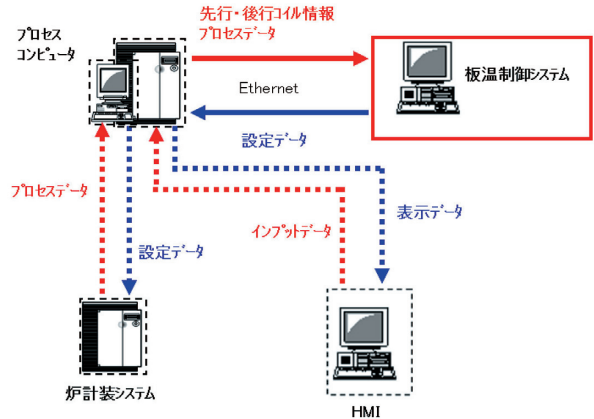


図7 システム構成図  
Fig. 7 System configuration

### 4.2 制御動作確認

板温制御システムを構築し、実機にて動作確認テストを実施した。

加熱帯の制御応答結果を図8, 9に示す。図8はコイル切替え時に、板厚が薄から厚に変更される際のフィードフォワード制御応答である。また、図9は通板条件に変更のない際のフィードバック制御応答である。

図8においては、板温制御のモデル式にて事前昇温板温を計算・設定(750°C→770°C)した結果、過渡状態時の制御目標の-10°C以内は達成できた。

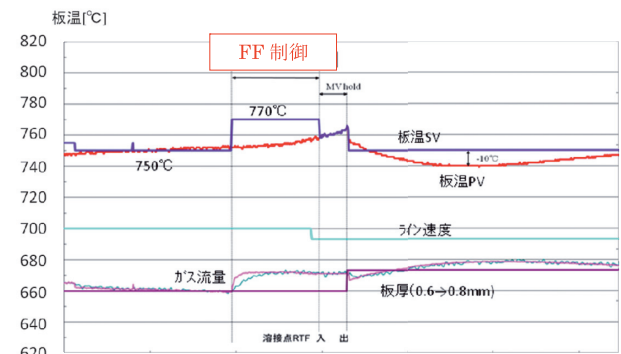


図8 加熱帯フィードフォワード制御応答  
Fig. 8 Actual HF feed forward control response

図9の定常状態においては、炉計装制御の板温PID制御によって所定の板温+/-10℃以内に制御できていることが分かる。

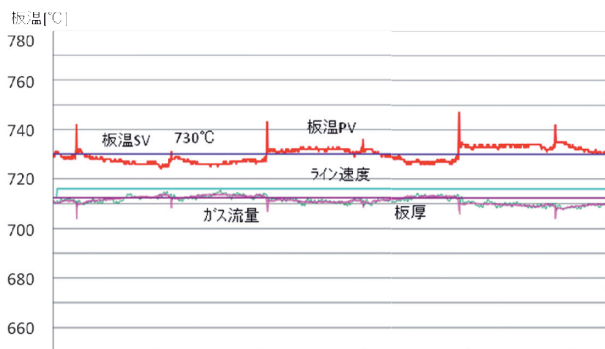


図9 加熱帯フィードバック制御応答  
Fig. 9 Actual HF feed back control response

以上により、加熱帯の板温制御は目標を達成できしており、制御動作の有効性が確認できた。

次に、冷却帯の制御応答結果を図10に示す。フィードフォワード制御、フィードバック制御とも良好に動作しており、制御目標を達成でき、加熱帯と同様に制御動作の有効性が確認できた。

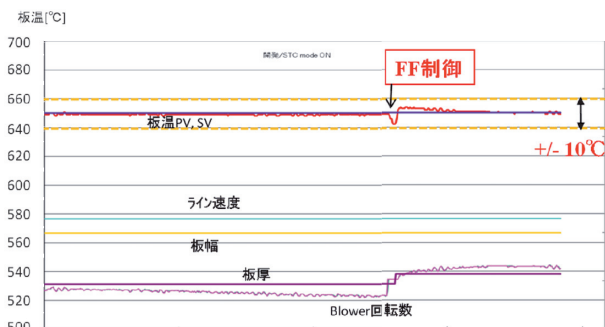


図10 冷却帯の制御応答  
Fig. 10 Actual SCF, JCF control response

### 4.3 コストダウン検証

前述のように板温制御と炉計装制御の機能分担し、システム面でも通信先を統一してパッケージ化を行った結果、ソフトウェア容量を従来よりコンパクト(約20%強減少)にでき、約20%のコストダウンが達成できた。今後、リピート効果によって更なる安価化が期待できる。

## 5 結言

焼鈍炉を持つ鋼板処理ラインにおいて、炉計装パッケージ構築の一環として板温制御システムの開発を行い、安価で制御目標を満足するシステムを構築した。今後も更なる安価化、機能向上を目指して本システムをブラッシュアップしていき、鋼板処理ラインの競争力強化に貢献していく所存である。