

新日鉄名古屋No.5連続溶融亜鉛めっきライン焼鈍炉の板温自動制御

Automatic Strip Temperature Control of No.5 Continuous Galvanizing Line at Nippon Steel's Nagoya Works

新日本製鉄(株)設備技術センター
技術本部
名古屋製鉄所長谷川明彦*・田本仁一
関本総裕
宮崎徹也・中川忠昭

1. 緒言

名古屋製鉄所No.5連続溶融亜鉛メッキライン(5CGL)は、1990年6月より営業運転を開始したが、稼動当初より焼鈍炉各炉の板温自動制御を行っており、品質の確保、オペレータの作業負荷軽減などに大きな効果を発揮している。本報では、板温制御の全体概要並びにRTF(還元炉)の板温制御の内容について報告する。

2. 板温制御の全体概要

5CGLの焼鈍炉はRTF(還元炉)、SF(均熱炉)、SCF(徐冷炉)、JCF(急冷炉)の4つの炉から構成されており、それぞれの炉に対してFig.1のように板温制御を行っている。入力情報として、各炉の目標出側板温、入出側板温実績、炉温実績、板厚・板幅情報、中央ライン速度などを用い、各モデル式によりCOG(コークスガス)流量などを計算し、下位の制御系に設定することにより自動制御を行っている。

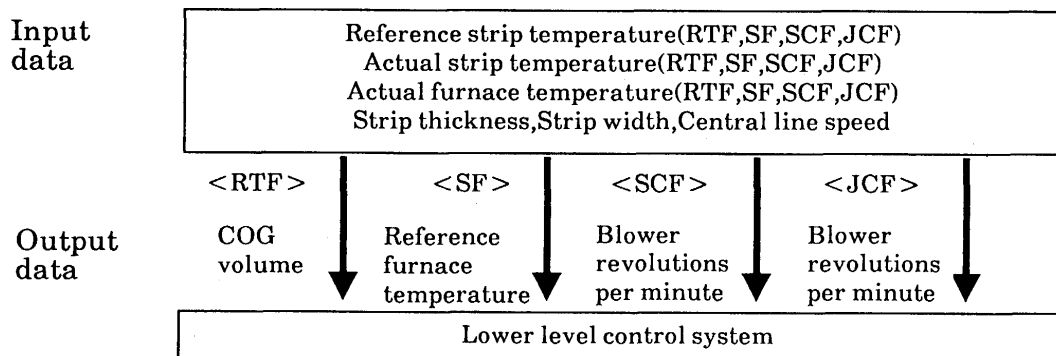


Fig.1 Outline of Strip temperature control system

3. RTF板温制御

3.1 板温動特性モデルの概要

RTFの出側板温は、次式に示すようなモデルで表現する。

$$y(t) = \sum_i a_i y(t-i) + \sum_k b_k u(t-k) + \sum_l c_l v_l$$

ここで、 $y(t)$ が板温、 $u(t)$ が操作量であるCOG流量、 v_l が板厚や中央ライン速度などの変化要因による補正項であり、 t がサンプリング時刻を表す。本動特性モデル式は、過去の板温およびCOG流量の時系列並びに外乱補正項から板温を推定するものであり、本モデル式によれば、定常状態のみならず、過渡状態すなわち目標板温の変更や板厚や中央ライン速度などの変化時にも板温の予測が可能である。さらに炉温についても同様な動特性モデル式を導入しており、後に述べる制御に利用している。

3.2 制御方式の決定

最適な制御方式の決定に当たっては、次に述べる指針によった。

- (1) 将来の板温の予測値と目標板温との偏差が容易に制御計算に取り込めること
 - (2) プロセス特性の経時変化が想定されるので、このことにより制御精度が悪化しないこと
- 簡単に説明を加えれば、(1)はプロセスにむだ時間や時間遅れがあるため、将来の目標板温変更や実績板温の変化をある程度早めに制御の計算に取り込み早期の制御動作を行うことで制御精度を向上させたいということであり、(2)は板温や炉温のモデル式中のパラメータ a_i, b_k, c_l の値の厳密な同定は困難かつ経時変化が想定されるので、これに対して制御が不安定にならないあるいは制御性能が悪化しないことが求められるということである。

以上の観点から、最適な制御方式として、最新の現代制御理論の一つであるClarkeらによる一般化予測制御(Generalized Predictive Control)を適用することとし、プロセス特性の経時変化への対処としてモデルパラメータのオンライン適応修正機能を付加し、Self Tuning Controller(STC)の形式とした(一般化予測制御型STC)。

ここで、一般化予測制御についてFig.2を用いて簡単に紹介する。

現在からある時点先 $N2$ までの制御量 y の変化を予測し評価関数 J (下記参照)、即ち目標値 r と制御量予測値 y の偏差の二乗和(Fig.2ハッチング部)と操作量 u のある時点先 NU 迄の変動の二乗和の和をミニマム化する操作量 u の変化量 Δu を求める。

$$J = \sum_{j=1}^{N2} \{r(t+j) - y(t+j)\}^2 + w \sum_{k=1}^{NU} \Delta u(t+k-1)^2 \rightarrow \min.$$

ここで、重み w の大小により制御の応答性および操作量の変動量が変化する。 w を大きくすれば、操作量の変動量は小さくなるが制御の応答性は低下し、逆に w を小さくすれば、操作量の変動量は大きくなるが制御の応答性は向上する(Table.1)。よって、制御の応答性および操作量の変動量の両者の最適なバランスを取るように w の値を調整することが必要である。

本制御は、このように将来の制御偏差を直接的に評価できる制御方式であり、(1)の指針にうまく合致する。また、モデルパラメータのオンライン適応修正方式は、実プロセスでの実績が多い逐次型最小2乗法をベースにして、これを改良したモデルパラメータ毎に異なる適応修正ゲインが設定できるベクトル型忘却係数を持つ重み付き逐次型最小2乗法を適用することにした。適用の狙いは、ベクトル型忘却係数により適応修正の安定化を、また重みの設定により通板量の少ない材料に対するモデルの精度向上を図ることである。

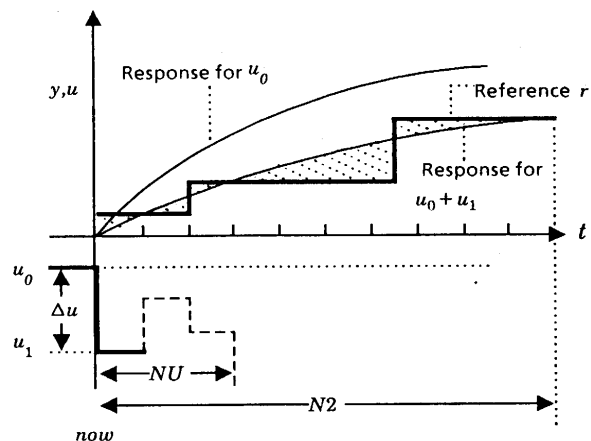


Fig.2 Idea of Generalized Predictive Control

Table.1 Effect of changing w

w	Response of control output	Fluctuation of control input
Big	Slow	Small
Small	Fast	Big

3.3 評価関数の決定

本制御の制御量はRTF出側板温であるが、RTFは複数の燃焼帯により構成されており、燃焼帯間の燃焼負荷バランスによってはある燃焼帯の炉温が高くなることが懸念される。そこで、次のように制御の評価関数を決定することでこの問題に対処することにした。

$$J = w_1 \sum_{j=1}^{N2} \{r(t+j) - y(t+j)\}^2 + w_2 \sum_{j=1}^{N2f} \{r_f(t+j) - y_f(t+j)\}^2 + w \sum_{k=1}^{NU} \Delta u(t+k-1)^2$$

ここで、第1項が板温偏差の項、第3項がCOG流量変動の項であり、さらに第2項に炉温偏差の項を追加した。本第2項は炉温上限制約となる燃焼帯の炉温を評価するもので、 $r_f(t)$ が目標炉温、 $y_f(t)$ が炉温上限制約となる燃焼帯の炉温の予測値である。そして、Fig.3に示すように目標炉温 $r_f(t)$ を炉温上限値より少し小さい値に設定し、炉温の上昇につれて板温偏差の重み w_1 を1→0へ徐々に変更すると共に炉温偏差の重み w_2 を0→1へ徐々に変更することで実績の炉温が上限を外れるのを防止するようにした。

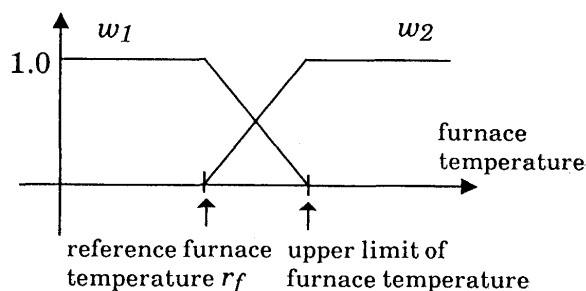


Fig.3 Functions of weight W_1 and W_2

また、COG流量変動の評価時間 NU については、長くするとCOG流量変動が過敏になる傾向があり、かつ $NU \geq 2$ とするとオンラ

インで逆行列計算を行う必要があるため、 $NU=1$ とした(文献1においても安定なプロセス系では $NU=1$ で妥当な制御性能が得られることが述べられている)。以上まとめると、一般化予測制御型STCによるRTF板温制御の全体制御フローはFig.4のようになる。

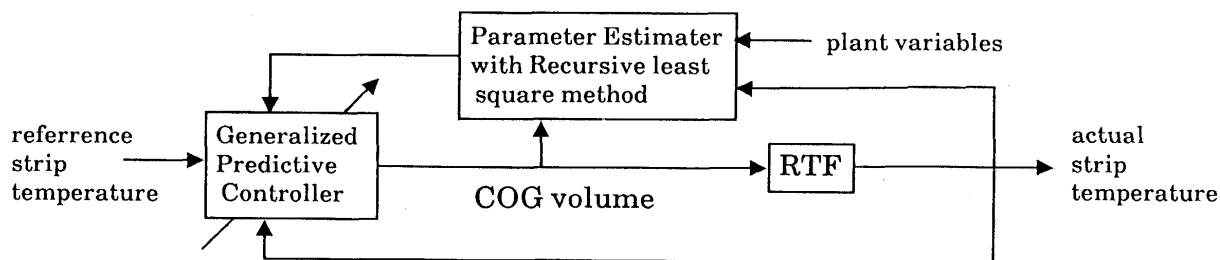


Fig.4 Overall flow diagram of RTF strip temperature control

3.4 制御の調整

制御の評価関数におけるCOG流量変動量の重みである w の値の大きさにより、制御の応答性が決定されるが、最初は安全サイドの考えからCOG流量変動が小さくなるように w の値を大きく設定してチューニングを開始し、実板温の応答をみながら徐々に w の値を小さくしてゆき、最適値に設定した。また、板温の予測時間 $N2$ や炉温の予測時間 $N2f$ は最初はそれぞれ板温の立上がり時間、炉温の立上がり時間に近い値としたが、目標板温変更時の追従性向上を図るために最終的にはこれらの値をやや長くし、早期の制御動作を行うようにしてこれに対処した。

Fig.5に本制御の制御チャートの一例を示すが、目標板温に良好に追従できている。なお、本制御はラインのホットランの後半より調整を開始し、ライン稼動後約2週間では調整を完了することができた。

また、制御稼動後板温モデルのパラメータ a_i, b_k, c_l の値は数%から数十%とかなり大きく変動しているが、制御精度は良好であり、一般化予測制御型STCの有効性が確認できた。特に目標板温変更時や板厚や中央ライン速度の変化時などの過渡状態においても制御精度は良好であり、適用率もほぼ100%を達成している。

3.5 制御精度及び効果

板温自動制御を実施していない4CGLとの板温精度比較をFig.6に示すが、過渡状態を含めた全点で板温偏差の $\sigma = \text{約}10^\circ\text{C} \rightarrow 6^\circ\text{C}$ と板温精度を大きく向上することができた。また、材質特性不良発生比率(対4CGL比)をFig.7に示すが、4CGLに比べ約半減することができた。更に、オペレータの作業負荷の軽減、操業性の向上などにも大きく寄与している。

4. 結言

名古屋製鉄所No.5CGLにおける板温制御の全体概要並びにRTF(還元炉)の板温制御の内容について報告した。現在、全炉の板温自動制御が順調に稼動を継続中であり、品質の確保、オペレータの作業負荷の軽減などに大きく寄与している。特にRTF(還元炉)の板温制御では、最新の現代制御理論の一つである一般化予測制御型STCを国内で初適用し、良好な制御結果を得ることができた。尚、本制御の基本的な考え方は類似ラインである君津製鉄所No.2CAPLおよび名古屋製鉄所No.2CAPL、No.1CGLにもトランスファーされている。今後も類似ラインへの適用拡大を図ってゆきたい。

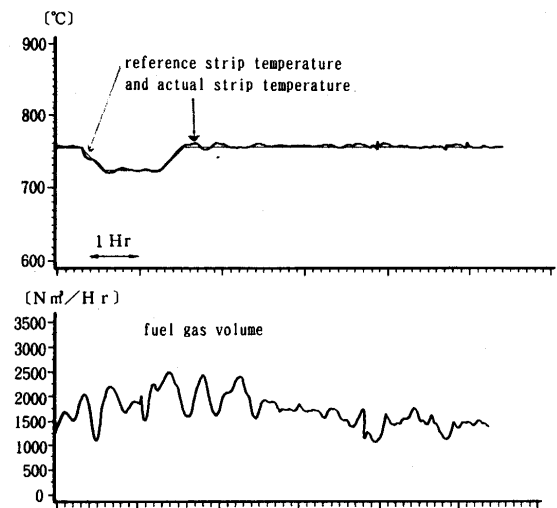


Fig.5 Actual control

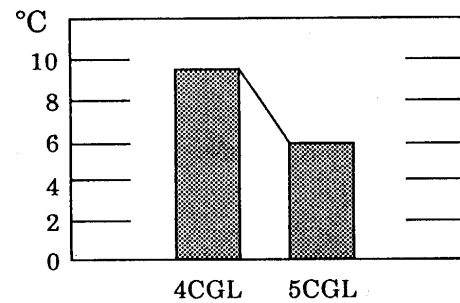


Fig.6 Comparison of temperature accuracies

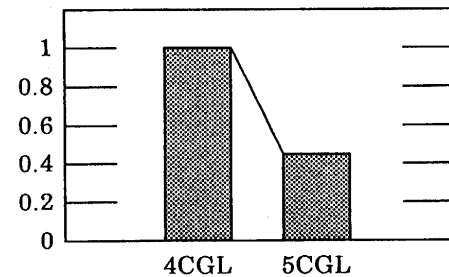


Fig.7 Comparison of defect ratios of mechanical properties

参考文献

- 1) D.W. Clarke, C. Mohtadi, and P.S. Tuffs: 'Generalized Predictive Control-Part I, The Basic Algorithm', Automatica, Vol.23, No.2, 137/148 (1987)
- 2) 長谷川: 一般化予測制御型STCによる連続溶融亜鉛メッキライン加熱炉の最適板温制御、計測自動制御学会論文集, Vol.27, No.6, 700/704 (1991)
- 3) 新日本製鉄(株) (私信) 1992年6月