

JFE スチール 西日本製鉄所 (福山地区) No. 5 連続焼鈍ラインの自動操業最適化システム

Plant Optimal Control System for No. 5 Continuous Annealing Line (CAL) at West Japan Works (Fukuyama), JFE Steel

見坂 卓郎 MISAKA Takurou JFE スチール 西日本製鉄所 (福山地区) 制御部制御技術室
豊福 達生 TOYOFUKU Tatsuo JFE スチール 西日本製鉄所 (福山地区) 制御部制御技術室 主任部員 (課長)
岡田 誠康 OKADA Masayasu JFE スチール 西日本製鉄所 (福山地区) 制御部制御技術室 主任部員 (課長)

要旨

連続焼鈍プロセスにおいて、炉内通板速度 (以下、炉速) は板の品質を決める重要な要素である。従来、炉速はオペレータの経験に基づいて設定されてきたため、人により炉速設定値や炉速変更タイミングにばらつきを生じていた。その対策として、JFE スチール 西日本製鉄所 (福山地区) No. 5 連続焼鈍ラインに自動操業最適化システムを導入した。本システムでは、炉速は Level-2 計算機 (プロセス計算機) における最適計算に基づいて自動設定されるようになる。本システム導入により、上記の問題を解消し、板の品質安定性を向上させることができた。

Abstract:

In a continuous annealing process, the line speed of the furnace section is one of the important factors determining the qualities of cold strips. Conventionally, the line speed was set manually based on the experiences of the operators. Therefore, the setting and the timing of changing of the line speed differ with individuals. JFE Steel has developed a plant optimal control system for the No. 5 Continuous Annealing Line (CAL). In this system, the line speed is set automatically based on the optimal calculations made by the Level-2-Computer. As a result, JFE Steel has resolved the above problems and improved the quality stability of cold strips.

1. はじめに

中国、東南アジアにおけるぶりき・ローモ材需要増加を見込んで、JFE スチールの西日本製鉄所 (福山地区) に No. 5 連続焼鈍ライン (以下、福山 5CAL) を建設し、2010 年 12 月から営業運転を開始した¹⁾。従来、連続焼鈍ラインにおける炉内通板速度 (以下、炉速) はオペレータの経験に基づいて設定されてきたため、人により炉速設定値や炉速変更タイミングにばらつきを生じていた。上記の対策として、福山 5CAL に自動操業最適化システムを導入した^{2,3)}。本システムでは、炉速は Level-2 計算機 (プロセス計算機) における最適計算に基づいて自動設定されるようになる。

本論文では、自動操業最適化システムの機能概要および導入効果について報告を行なう。

2. 概要

2.1 設備概要

図 1 に福山 5CAL の設備レイアウトを示す。福山 5CAL

はぶりき用鋼板を扱う連続焼鈍ラインであり、2 ゾーンに分かれた加熱帯と、均熱帯および 3 つの冷却帯を有している。また焼鈍設備の他にクリーニング設備、テンションレベラー、入出側ルーパ、スキンパスミル、トリマーなどを備え、調質圧延設備・精整設備機能が集約化されたラインである。

2.2 システム概要

図 2 に福山 5CAL のシステム構成を示す。Level-2 計算機本体には汎用サーバを採用し、同スペックの開発系を併設することで、実データによるシミュレーションテストが可能となった。また、PLC (Programmable logic controller) と HMI (Human machine interface) の共通化を行ない、各運転室に配置した端末から Level-2 計算機および PLC の設定値の表示や入力を行なえるようにした。

機能分担としては、Level-2 計算機ではライントラッキングを行ないながら、Level-3 計算機 (ビジネス計算機) からのコイル情報、操業条件を元にして下位の PLC および DCS (Distributed control system) への設定を行なう。自動操業最適化システムでは、PLC に対しての炉速設定を行なう。本システムの詳細については 3 章で説明する。

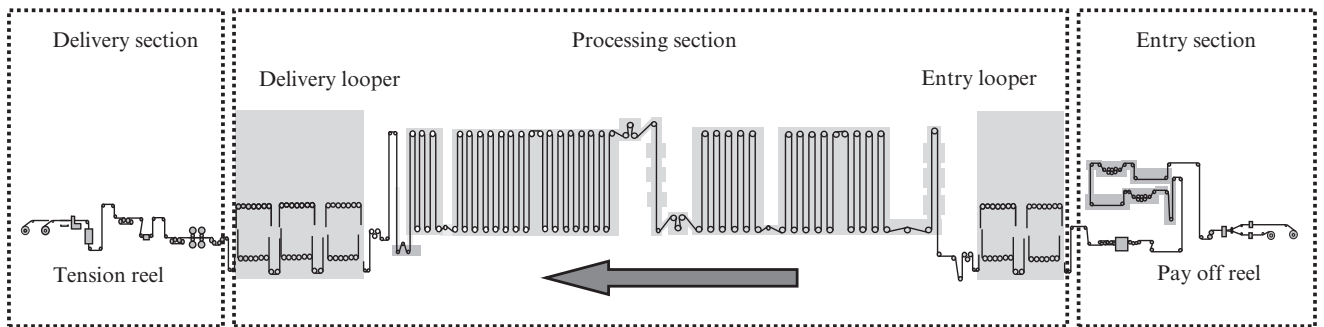
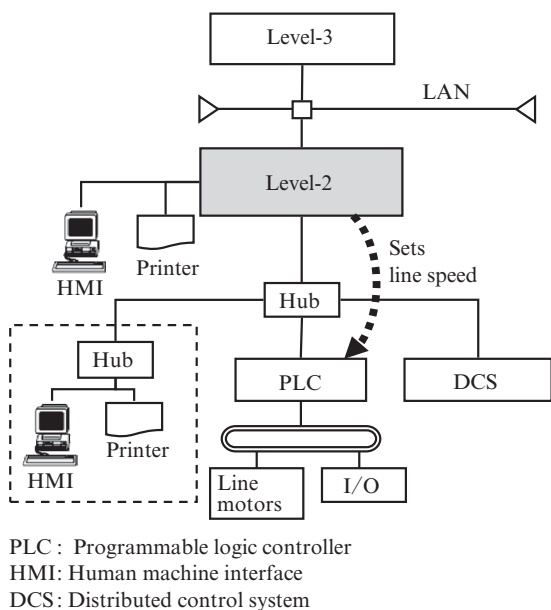


図1 西日本製鉄所（福山地区）No.5 連続焼鈍ライン（福山5CAL）設備レイアウト

Fig. 1 Line layout of No. 5 Continuous Annealing Line (CAL)



PLC: Programmable logic controller
HMI: Human machine interface
DCS: Distributed control system

図2 西日本製鉄所（福山地区）No.5 連続焼鈍ライン（福山5CAL）システム構成

Fig. 2 System configuration diagram of No. 5 Continuous Annealing Line (CAL)

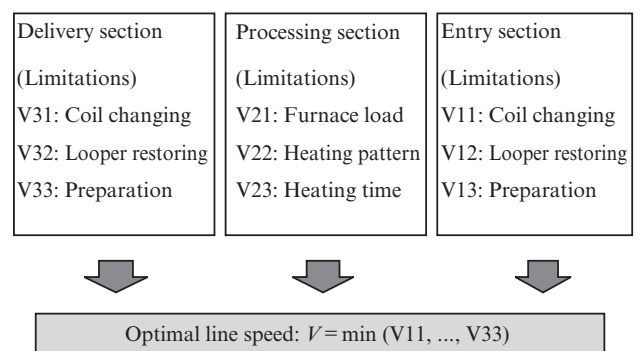


図3 自動操業最適化システムの概要

Fig. 3 Outlines of the plant optimal control system

3. 自動操業最適化システム

図3に自動操業最適化システムの概要を示す。生産能力を最大とするためには、品質を保証しつつ極力大きい炉速で操業することが理想である。しかし、入側コイル切替（溶接）や出側コイル分割などのタイミングでは、炉速を減速させなければならない状況が発生する。このような炉速に対する速度上の制約（以下、制約炉速）が掛かるタイミングは、コイル長などのコイル諸元や操業状態に影響されるため一定ではなく、さらに複数の制約が同時に掛かる場合もある。

したがって、図4に示すように、自動操業最適化システムでは、各制約炉速の開始・終了タイミングを考慮して、掛かる制約炉速の中から最小の炉速を決定し、現在の炉速実績値などの操業条件を踏まえ、ライントラブルにならない炉

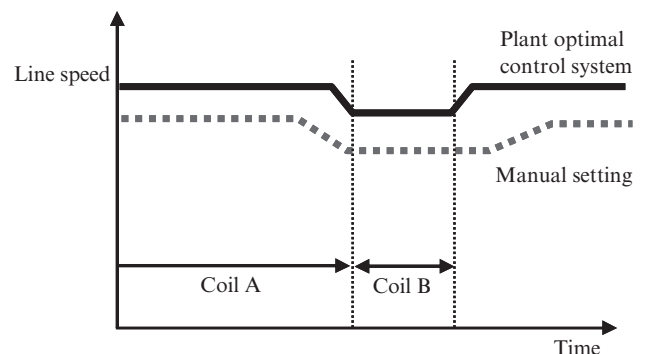


図4 炉速の設定例

Fig. 4 Example of the line speed setting

速を設定する。

本システムの計算フローを説明する。まず Level-3 計算機からの操業条件をもとに、各コイルの制約炉速を算出する（表1）。次に、制約炉速計算で算出した各制約が掛かるタイミングを算出し、目標とすべき炉速を決定する。ここで得た目標炉速はあくまでも理論上の最高炉速であり、実際には板温実績や板の蛇行量実績などにより、想定していない制約が発生することがある。そのため、これらの実績をもとにして目標炉速に修正を加える。最後に、加減速率や制御周

表 1 制約炉速一覧
Table1 Line speed limitations

Vii	Limitation	Reason for limitations
V11	Coil changing	Securing time to change coils
V12	Looper restoring	Securing time to restore the entry looper
V13	Preparation	Securing time to prepare next coil
V21	Furnace load	Limitation from furnace load
V22	Heating pattern	Securing time to change heating pattern
V23	Heating time	Securing heating time in processing section
V31	Coil changing	Securing time to change coils
V32	Looper restoring	Securing time to restore the delivery looper
V33	Preperation	Securing time to prepare next coil

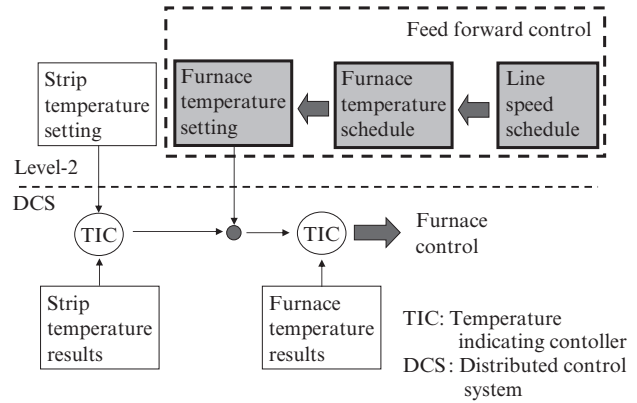


図 5 フィードフォワード (FF) 板温制御ブロック図

Fig. 5 Block diagram of feed-forward (FF) strip temperature control

期に合わせて最終的な炉速を設定する。

4. 自動操業最適化システムと板温制御

福山 5CAL では、自動操業最適化システムによる制御下において自動で板温制御も行なっている。板温制御では、Level-2 計算機において所望の熱処理条件を達成するための炉温設定値を計算し、DCS に対して出力を行なう。熱処理条件とは、加熱帯や均熱帯などの各セクションで達成すべき板温目標値や在炉時間などを指す。品質を保証するためには板温上下限を外れないよう制御することが必要である。そこで、板温制御では、ライン速度の変動時や材料サイズの変更時などの非常定状態においても、許容されている板温上下限範囲に板温実績が入るように制御することを目標とする。

加熱帯と鋼帯との間での熱伝達を表す熱伝達モデル式を用いて、Level-2 計算機で設定炉温を計算する⁴⁾。ただし、福山 5CAL の加熱帯は前半・後半ゾーンに分かれているため、それぞれの熱伝達方程式を連立させて炉温を計算する必要がある。炉温を収束計算するにあたり、連立ニュートン法を使用した。計算に用いた (1)、(2) 式を以下に示す。

炉前半：

$$cs \cdot \gamma \cdot D \cdot \frac{\Delta\theta_i}{\Delta t} = \phi_{cg} \cdot \sigma \cdot (\theta_{g1}^4 - \theta_i^4) \dots\dots\dots (1)$$

炉後半：

$$cs \cdot \gamma \cdot D \cdot \frac{\Delta\theta_m}{\Delta t} = \phi_{cg} \cdot \sigma \cdot (\theta_{g2}^4 - \theta_m^4) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

θ_{g1} ：前半炉温 (K)

- θ_{g2} ：後半炉温 (K)
- θ_i ：入側板温 (K)
- θ_m ：中間板温 (K)
- D ：板厚 (m)
- γ ：材料比重 (kg/m^3)
- ϕ_{cg} ：総括熱吸収率
- σ ：ステファンボルツマン定数 ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4$)
- cs ：材料比熱 ($\text{kcal}/\text{kg} \cdot \text{K}$)

炉速は PLC の加減速率に従い即時変更できるが、加熱のアクチュエータとしてラジエントチューブを用いている加熱帯では、炉温の変化に時間がかかる。そのため、自動操業最適化システムと板温制御とを独立に機能させると、炉速や材料サイズの変化に対して炉の応答が着いて行かず、板温が上下限を外れてしまう。

そこで、自動操業最適化システムと板温制御を連携させるフィードフォワード板温制御機能を新規開発した。本機能は、将来にわたる炉速のスケジュールを算出し、事前に板温制御機能に通知しておくことを特徴とする。本機能により、炉の応答性を考慮して適切なタイミングで炉温変更を行なうことができる。

図 5 に本機能のフローを示す。まず自動操業最適化システムの計算を将来のコイル分まで計算しておくことで、炉速のスケジュールを作成する。次に、炉速のスケジュールを元に板温制御機能において将来必要となる炉温のスケジュールを作成する。そして、炉温の応答遅れ分を考慮して、現在設定すべき炉温・目標板温を算出する。以上により、将来の加減速を見越して炉温をフィードフォワード制御できるようになり、炉温の応答遅れのために板温が上下限を外れるのを防ぐことができる。

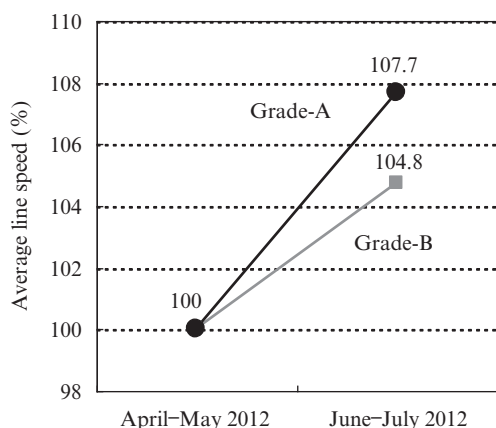


図6 鋼種別平均炉速（板厚<0.24 mm）

Fig. 6 Average line speed (Strip thickness < 0.24 mm)

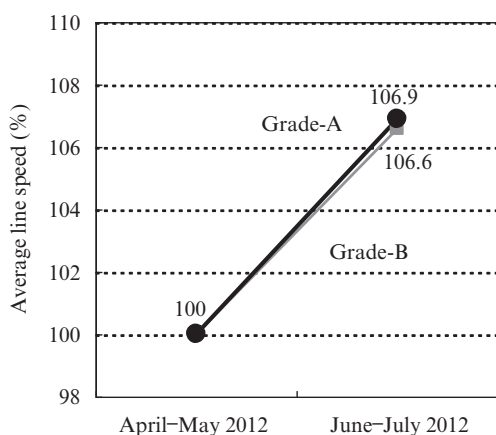


図7 鋼種別平均炉速（板厚≥0.24 mm）

Fig. 7 Average line speed (Strip thickness ≥ 0.24 mm)

5. 適用結果

2012年6月以降、自動操業最適化システムの適用を開始した。2012年6月の自動操業最適化システム適用率は85.8%、7月の適用率は92.2%を達成した。緊急トラブル時など人手介入が必須な場合を除いて、常に自動操業を行なっている状態である。自動操業中はLevel-2計算機の設定値に従い炉速が設定されるため、炉速設定のばらつきを解消することができ、品質の安定化に寄与することができた。また、

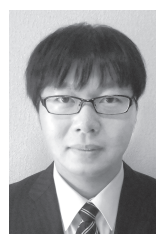
板温のフィードフォワード制御により、非定常部において板温が上下限を外れるのを防ぐことができるようになった。図6および7に、自動操業最適化システム適用前後の平均炉速を示す。鋼種と板厚別に適用比較した結果、いずれも適用後に炉速の向上を達成できた。特に、板厚0.24 mm未満で、炉速変更の影響を受けにくいGrade-Aのコイルにおいて、平均炉速の向上が顕著に見られた。これは、炉の加熱（あるいは冷却）容量による律速が少ない分だけ、向上代が大きくなったものと考えられる。

6. おわりに

JFE スチール 西日本製鉄所（福山地区）No.5 連続焼鈍ライン（福山5CAL）への自動操業最適化システム適用を完了した。2012年7月時点の自動化率は92.2%を達成しており、人手介入が必須な場合を除いて、常に自動操業を行なっている状態である。本システムにより、炉速設定のばらつきを解消することができ、品質の安定化に寄与することができた。また、板温のフィードフォワード制御により、非定常部において板温が上下限を外れるのを防ぐことができるようになった。

参考文献

- 1) JFE スチール ニュースリリース、2010-12-03.
- 2) 横田修二, 山崎拓也. “連続焼鈍ラインにおける自動炉速制御”. 日本鉄鋼協会, 第140回制御技術部会. 2008, 制技140-1-1.
- 3) 見坂卓郎, 豊福達生, 松藤泰大, 渡辺武敏, 西村広. “福山No.5連続焼鈍ラインの自動炉速制御”. 産業応用部門, ものづくり研究会. 2013, MZK13004.
- 4) “鉄鋼プロセスにおける鋼材温度制御”. 日本鉄鋼協会, 分野別部会, 熱経済技術部会. 1995.



見坂 卓郎



豊福 達生



岡田 誠康