

熱間圧延加熱炉自動燃焼制御

Furnace Combustion Control in Hot Strip Mills

三原 紀章 MIHARA Noriaki 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)
横田 修二 YOKOTA Shuji JFE スチール 東日本製鉄所(千葉地区) 制御部制御技術室 主任部員(課長)
本屋敷洋一 MOTOYASHIKI Yoichi JFE スチール 西日本製鉄所(福山地区) 熱延部熱延技術室 主任部員(課長)

要旨

熱間圧延工場における生産能力向上, 省エネルギーおよび CO₂ 排出量削減を目的に, 加熱炉自動燃焼制御を開発した。本制御は, 加熱炉内および圧延工程における材料温度履歴制約と, 最短圧延スケジュールからの抽出時刻要求を満足する最適な加熱炉温度設定を特徴としている。この技術は, 熱力学モデルに基づく加熱炉内でのスラブの昇温モデル, 加熱炉抽出後の圧延過程での温度降下モデル, および圧延ライン上の搬送時間予測に基づく最適抽出ピッチ計算(ミルペーシング技術)との構成を特徴としている。

Abstract:

An automatic furnace combustion control system has been developed and applied to Fukuyama No. 2 Hot Strip Mill in order to increase productivity, to save energy and to reduce CO₂ discharge. The optimum furnace operation that satisfies slab temperature profile in the furnace and its cooling during rolling processes, and slab discharge schedule to for minimize rolling interval at each mill is characterized in this system. This new system consists of modeling of strip temperature prediction from charging to the furnace to the exit of the finishing mill, based on thermal conduction, and mill pacing technology considering strip traveling time calculated from rolling schedule.

1. はじめに

JFE スチールでは, 従来から製鉄所における省エネルギー対策を積極的に進めている。熱間圧延ラインにおいては, 1998 年に業界に先駆けて西日本製鉄所福山地区第 1 熱延工場に全帯リジェネバーナ加熱炉を導入したのをはじめ, 西日本製鉄所倉敷地区, 東日本製鉄所千葉地区においても既存加熱炉のリジェネバーナ化を進めてきた。

一方, 加熱炉操炉において最新ソフトウェア技術を導入し省エネルギーも実施している^{1,2)}。

ここで紹介する加熱炉自動燃焼制御は, 既存加熱炉に対する制御システムの刷新によって, 圧延能率の向上と省エネルギーを目指した例である。

2. 加熱炉燃焼制御概要

2.1 加熱炉操炉

圧延ラインの加熱炉は, 上流工程で製造されたスラブ(インゴット状の半製品鋼塊)を熱間圧延に必要な 1200°C 前後まで加熱する設備である。燃料には製鉄所での副生ガス(コークスガス, 高炉ガス, 転炉ガスをカロリー調整し

たもの)のほか, 天然ガス, 重油などが用いられる。多くは連続式となっており, 装入口と抽出口が対向して設けられ, スラブが冷片の場合, 加熱炉装入からおよそ 3 時間程度で抽出される。

炉は直火型構造で, 加熱においては炉内ガスからの放射熱伝達が支配的である。加熱炉本体の効率化に関しては, 排ガス熱交換効率の向上を目的に, 近年リジェネバーナの導入がさかんであり, 当社各地区の熱間圧延ラインの加熱炉にも増改造により導入が進められている。

加熱炉自動燃焼制御は, 加熱時間と加熱温度を厳密に管理し, 使用燃料の最小化と同時に加熱時間の最小化を図ることを命題としており, 制約条件を

$$\text{抽出時のスラブ温度} \geq \text{抽出目標温度} \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{抽出時刻} \geq \text{抽出予定時刻} \dots\dots\dots (2)$$

また, 目的関数を

$$J = f(\text{炉内ガス温度履歴}(t)) \rightarrow \min \dots\dots\dots (3)$$

ここで,

J: 目的関数(燃料最小化評価関数)

f(): 支配方程式(スラブ加熱に必要な燃料)

t: 時刻

として, 燃焼温度推移(時系列)を求解する, ある種の最適化問題と規定できる。目的関数の支配方程式は加熱炉内

でのスラブ伝熱モデルとなる。制約条件の、抽出目標温度と、抽出予定時刻もまた、それぞれ部分モデルにより決定される。

2.2 炉内スラブ昇温モデル

加熱炉燃焼制御の難しさは、加熱中のスラブ温度の実測の困難さによる。加熱炉内のスラブ温度は、加熱炉壁に穴をあけ、Si、PbSなどの素子を用いた放射温度計によりその表面温度を計る方法が一般的である。これらの素子による放射温度計は赤外領域の波長に対して選択的に反応することにより、炉内ガス（主成分はN₂、CO₂、H₂O）の放射エネルギーによるノイズを回避することを目的にしているが、実際にはこの方法では、炉内ガスとほぼ等温の炉内ガス中のダスト（多くは酸化鉄）の温度も検出する問題があり、スラブ表面の温度を正確に計測することは困難である。

そこで、熱電対を埋め込んだ测温スラブを一般スラブと同時に加熱してスラブ温度を実測することにより、炉内ガス温度とそれによるスラブの加熱との関係をあらかじめモデル化しておき、このモデルに従って、炉内ガス温度から時々刻々のスラブ温度を推定する方法が行われる。この時、炉内ガスからスラブへの入熱は、放射熱伝達と対流熱伝達に分けられるが、放射熱伝達による影響が大きく支配的であるため、すべて放射熱伝達と見なし、そのときの輻射率を総括熱伝達係数（以下、 ϕ_{CG} ）と呼ぶ。前述のスラブ测温によって ϕ_{CG} の同定を行う。

加熱炉内ガスからスラブへの熱伝達の関係は次式で表される。

$$\dot{q}(t) = \Phi_{CG}\sigma[(T_{炉温} + 273)^4 - \{T(H/2) + 273\}^4] \quad \dots\dots\dots (4)$$

また、スラブ内部の熱伝導の関係は次式で表される。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right] = c \cdot \gamma \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (5)$$

境界条件は次式で与えられる。

$$\lambda \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=\frac{H}{2}} = -\dot{q}_{TOP}(t) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\lambda \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=\frac{H}{2}} = -\dot{q}_{BOTTOM}(t) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、

$T(x, t)$: 厚さ方向位置 x , 時刻 t における
スラブ温度 (°C)

t : 時刻

x : スラブ厚さ方向の位置 (厚さ方向中央を 0)

H : スラブ厚

σ : スラブ表面の輻射率

c : スラブ比熱

γ : スラブ比重

λ : スラブ熱伝導率

\dot{q}_{TOP} : スラブ上表面への伝熱量

\dot{q}_{BOTTOM} : スラブ下表面への伝熱量

2.3 抽出目標温度の決定

熱間圧延ラインにおいて、仕上圧延加工後の材料温度は製品の材質を決定する重要な管理指標である。圧延ラインでは冷却による温度降下が支配的であるため、仕上圧延機出側の温度を達成できるよう加熱炉抽出時のスラブ温度は決定される。このとき、必要最低限の抽出温度を求める際、圧延ライン上のスラブ温度降下履歴の厳密な計算が必要となる。

圧延ライン上の温度降下モデルは、搬送時の輻射、空冷温度降下、圧延加工時のロール抜熱温度降下と加工発熱による温度上昇などがあり、以下の伝熱モデルより構成される。

スラブへの熱伝導は、式(8)で与えられる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right] = c \cdot \gamma \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial q_a}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (8)$$

境界条件は、以下の式による。

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{表面} = \dot{q}_{rad} + \dot{q}_{air} + \dot{q}_{spray} + \dot{q}_{roll} + \dot{q}_{flict} \quad \dots\dots\dots (9)$$

輻射項 : $\dot{q}_{rad} = \epsilon \cdot \sigma [(T + 273)^4 - (Ta + 273)^4]$

空冷項 : $\dot{q}_{air} = \alpha_a \cdot (T - Ta)$

水冷項 : $\dot{q}_{spray} = \alpha_w \cdot (T - Tw)$

ロール接触伝熱項 :

$$\dot{q}_{roll} = \frac{2 \cdot \lambda \cdot \lambda_r}{\sqrt{ar} \cdot \lambda + \sqrt{as} \cdot \lambda_r} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{(T - Tr)}{\sqrt{t}}$$

摩擦熱項 : $\dot{q}_{flict} = \mu \cdot km \cdot \frac{Vr}{2} \cdot \frac{f^2 + b^2}{f + b} \cdot A \cdot \eta$

加工発熱項 : $q_d = km \cdot \epsilon \cdot A$

ここで、

ϵ : 輻射率,

α_a : 空冷熱伝達係数,

α_w : 水冷熱伝達係数,

λ_r : ロール熱伝導率,

as : 材料温度伝導度,

km : 材料変形抵抗,

Ta : 雰囲気温度,

Tw : 冷却水温度,

Tr : ロール温度,

ar : ロール温度伝導度,

Vr : 圧延速度,

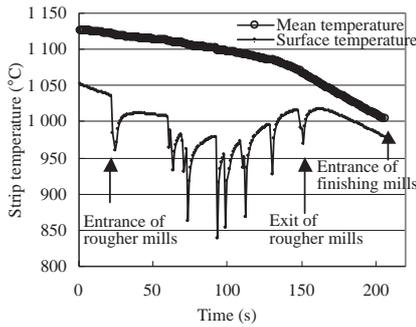


Fig.1 Example of strip temperature profile

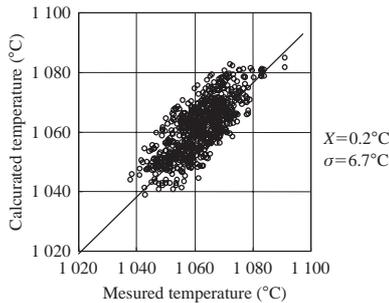


Fig.2 Accuracy of temperature prediction

f : 先進率, b : 後進率,
 A : 仕事熱量, η : 分配係数

鋼板表面の熱伝達は、圧延ラインでの搬送時を、空冷熱伝達、水冷熱伝達、ロール接触熱伝達、摩擦伝熱の4種類に分け、各設備に応じた冷却長と熱伝達係数を与えた。鋼板内部の熱伝達は板厚方向8分割の差分モデルとした。各係数は、ライン上の放射温度計による、鋼板表面温度の計測結果により同定した。ある条件下での抽出後のスラブ温度降下例を示す(Fig. 1)。また、推定温度精度を Fig. 2 に示す。

抽出目標温度は、この温度降下モデルを用いて、オンラインまたはオフラインで求められる。

2.3 抽出予定時刻の決定

もうひとつの制約条件である抽出予定時刻は、ミルベisingと呼ばれる、圧延ライン上の材料搬送タイミング制御技術によって求める。通常、圧延ライン上には、同時に、複数の圧延材が存在しているため、圧延材同士の衝突を避け、さらに、能率最大化のためにはアイドルタイム(非生産時間)を最小にしなければならない。ミルベisingとは、先行材と当該材とがミルライン上で衝突しない最短のバー間となるよう、圧延諸元や搬送シーケンスの予測から、加熱炉抽出タイミングや、仕上圧延機への進入タイミングを決定する機能である。搬送タイミング制御には、圧延材の先尾端が各設備に到達する時刻を管理する、搬送ダイアグラムが用いられる(Fig. 3)。

搬送ダイアグラムの予測精度を Fig. 4 に示す。

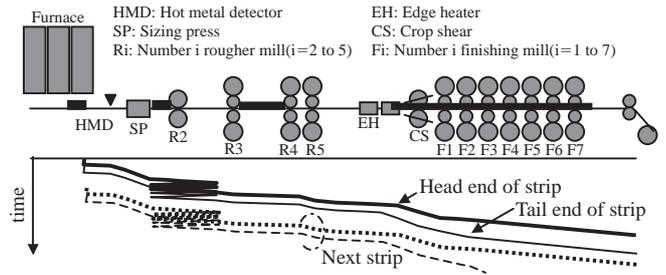


Fig.3 Example of tracking diagram

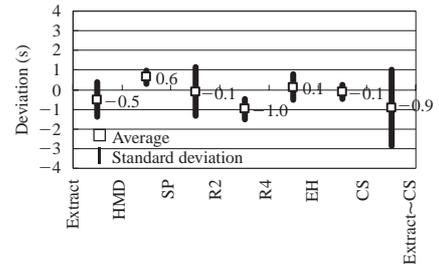


Fig.4 Accuracy of tracking prediction

ある炉内スラブの抽出予定時刻は、現在から、先行する炉内スラブがすべて抽出されるまでの時間であるが、それはまた、先行する炉内スラブをすべて圧延するために必要な時間ともいえる。すなわち、

$$n \text{ 番目スラブの在炉時間} = \sum_{i=1}^{n-1} (T_i) \dots \dots \dots (10)$$

ここで、

T_i : スラブ i の圧延所要時間と先行材とのアイドル時間の和

このように、搬送ダイアグラムの誤差は、抽出予定時刻の誤差に対しては、積分で影響する。

この搬送ダイアグラムは、2.3 節で述べた抽出後のスラブ温度降下予測にも用いられる。Fig. 1 の横軸は、搬送ダイアグラムによって予測される、加熱炉抽出から各設備までの到達時間でもある。搬送ダイアグラムは、抽出予定時刻と、抽出目標温度の両面で、加熱炉燃焼制御の制約条件を決める重要なモデルである。

3. 西日本製鉄所福山地区第2熱延工場への加熱炉自動燃焼制御技術の導入

3.1 設備概要

福山地区第2熱延工場の設備配置を示す(Fig. 5)。本工場の特徴は、上流工程である第5連続鋳造機と直結していることである。これにより、スラブを加熱炉で再加熱せず直接圧延するHDR(hot direct rolling)と、スラブヤードに降ろすことなく直接加熱炉に装入するDHCR(direct hot charge rolling)が可能となっている。その他、スラブヤードへいったん降ろすものの鋳造単位で装入を行うHCR、熱

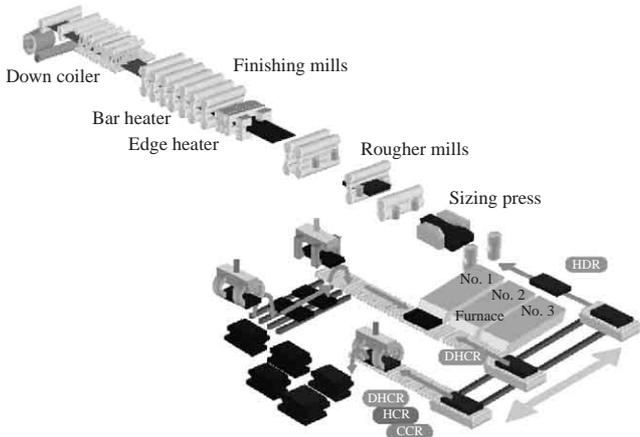


Fig. 5 Mill layout

片のまま加熱炉へ装入する HCR (hot charge rolling), いったん冷ましてから手入れ後に加熱炉へ装入する CCR (cold charge rolling) といった, 多様な加熱炉の装入方法を実施している。これらの装入方法のうち, 鑄造計画と熱間圧延以降の 2 次ミルの生産計画, 品質条件などを考慮し, 最も適切なものが選ばれる。

これら装入形態と, 燃料原単位および CO₂ 排出量との関係を Table 1 に示す。HDR は燃料原単位や CO₂ 排出量という面では最も効率が良いが, 連続鑄造側の工程進捗に熱間圧延側が完全に同期している必要があり, 実際には断続的な作業待ちなどが発生し, その場合生産性が低下する。したがって, 製造計画としては DHCR, または HCR を適

Table 1 Relation between furnace operation and fuel consumption, CO₂ emission

Furnace operation	Fuel consumption	CO ₂ emission
CCR	High	High
HCR	↑	↑
DHCR (One touch storage)	↓	↓
DHCR (Direct transfer)	↓	↓
HDR (Pass the furnace)	Low	Low

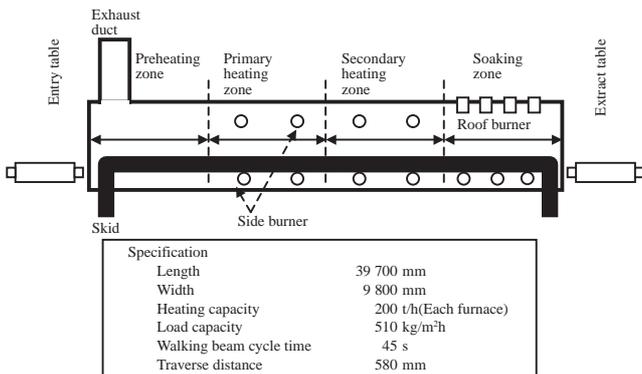


Fig. 6 Reheating furnace

用するのが, 生産性と燃料原単位や CO₂ 排出量の削減を両立させる最もよい方法といえる。

Fig. 6 に第 2 熱延工場の加熱炉仕様を示す。

バーナ配置について説明する。予熱帯にはバーナはなく, 第 1 加熱帯, 第 2 加熱帯には東西, 上下にサイドバーナが 2 個ずつ設置され, 均熱帯は下部にサイドバーナが東西それぞれ 3 個設置され, 上部はルーフバーナが 24 個設置されている。これらのバーナにて炉温/流量制御を実施している。

3.2 制御システム概要

加熱炉自動燃焼制御システムの機能分担図を示す (Fig. 7)。

製品コイルごとに Level 3(B/C) によって, 製造諸元が作成される。このとき, 圧延ライン上での鋼板温度目標値, 加熱炉内, 抽出時のスラブ温度目標値なども同時に作成される。これらの製造諸元は, Level 2(P/C) へ送信され, Level 2 では, 圧延ラインでの温度降下予測を考慮して抽出目標温度が決定される。また, ミルペーシングにより抽出予定時刻が予測される。加熱炉自動燃焼制御では, 現在のスラブの温度を, 炉内熱電対によって計測した炉内温度を元に炉内伝熱モデルから推定する (炉内温度トラッキング)。加熱炉自動燃焼制御では, この推定したスラブ温度と, 前述の制約条件 (抽出目標温度, 抽出予定時刻) から加熱炉の各帯の設定炉温を演算し, Level 1(DCS) へ出力する。Level 1 では, Level 2 の設定炉温を各帯の TIC-SV として採

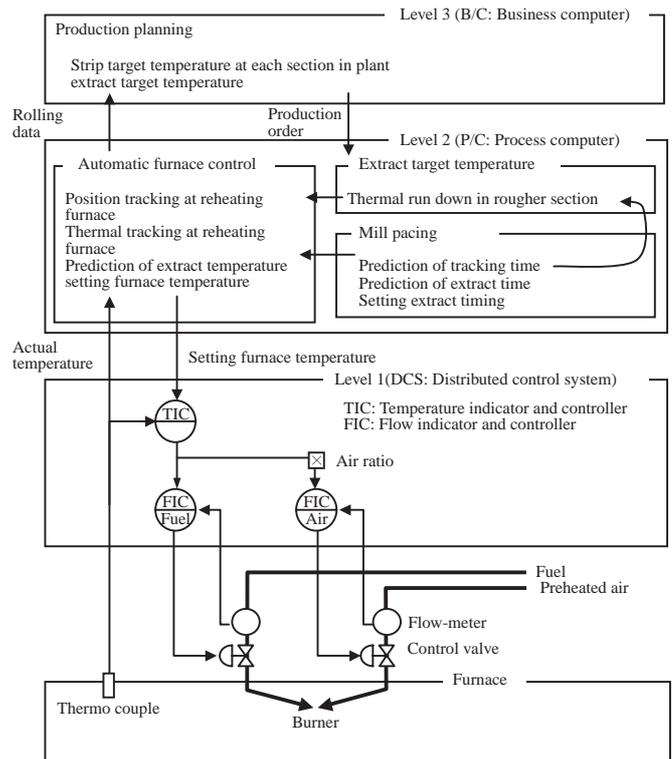


Fig. 7 Control system

用し、燃料 FIC および、空気 FIC によってバーナ出力の調整を行い、所望の炉温とする。

4. 導入結果

4.1 抽出目標温度追従性

Fig. 8 に、抽出目標温度の変化に対する実績抽出温度の追従の様子を示す。横軸はあるスラブの抽出時刻を起点とした、経過時間であり、ひとつの点がひとつのスラブを表す。抽出目標温度の変化に応じて実績抽出温度が変化していることとともに、材炉時間の変化によらず、実績抽出温度が目標値に追従していることが分かる。

4.2 スラブ温度的中度

また、Fig. 8 に抽出目標温度に対する実績抽出温度のばらつきを示す。抽出目標温度は、抽出後の圧延が可能な最低温度として与えられるため、目標に対するばらつきを正方向にオフセットさせて調整している。よって抽出目標温度に対する平均誤差は、 $+12.2^{\circ}\text{C}$ となっている。

4.3 燃料原単位および、能率向上

Fig. 9 に装入スラブ温度と燃料原単位との関係を示す。横軸は装入スラブ温度、縦軸は従来を 100 としたときの燃料原単位である。それぞれの点は 100 本前後の圧延サイクルを表す（1 点でおおよそスラブ 100 本分の代表値）。加熱炉への装入温度が高ければ、それだけ加熱に必要な燃料は少なくてすむために、グラフ全体が右下がりになっている。加熱炉自動燃焼制御の導入により、燃料原単位改善が可能であることを確認した。

また、Fig. 10 は、装入スラブ温度と圧延能率との関係を示す。横軸は装入スラブ温度、縦軸は従来を 100 としたときのサイクルごとの平均圧延能率である。加熱炉への装入温度が高ければ、それだけ加熱に必要な時間が少なくて済むために、圧延ラインの能力が加熱炉の能力に勝っているときには、加熱炉の能力向上がそのまま圧延能率の向上

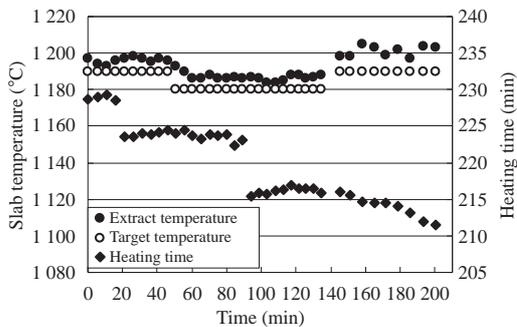


Fig. 8 History of slab temperature and heating time

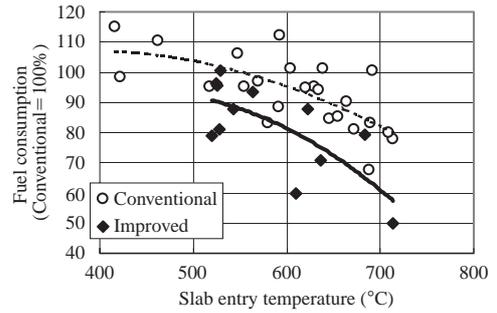


Fig.9 Fuel consumption

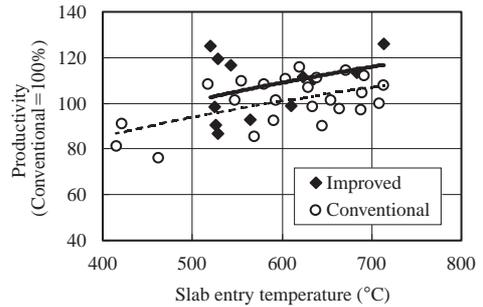


Fig.10 Fuel consumption

につながる。加熱炉自動燃焼制御の導入により、圧延能率も向上できることが判明した。

5. おわりに

省エネルギーは、製鉄業にとって永遠のテーマである。熱間圧延加熱炉に関しては、今後はスラブをできるだけ熱いうちに加熱炉へ装入するための生産計画システムの高度化も重要である。西日本製鉄所福山地区第2熱延工場ではその多様な加熱炉装入形態を最大限活用し、さらなる省エネルギー技術の開発を進めていく。

参考文献

- 1) Yokota, S. et al. High productivity improvement in JFE Fukuyama No. 1 Hot Strip Mill. IFAC World Congress 2005. We-A21-TO-1.
- 2) JFE スチール. 熱間圧延における加熱炉燃焼制御方法. 特開 2005-248230. 2004-03-03.



三原 紀章



横田 修二



木下 敦洋