



受賞技術-17

# 熱延ミル冷却帯内鋼板温度計による 高精度冷却制御技術の開発

## High-Accuracy Cooling Control Technology for Hot Rolled Strip Using Fountain Pyrometers

新日鐵住金(株) 技術開発本部  
プロセス研究所

中川 繁政  
Shigemasa Nakagawa

日鉄住金テクノロジー(株)

植松 千尋  
Chihiro Uematsu

新日鐵住金(株) 技術開発本部  
プロセス研究所

本田 達朗  
Tatsuro Honda

新日鐵住金(株)  
鹿島製鐵所

武衛 康彦  
Yasuhiko Buei

新日鐵住金(株) 技術開発本部  
プロセス研究所

橘 久好  
Hisayoshi Tachibana

### 1 緒言

熱延ミルのランアウトテーブル(以下、ROT)における冷却工程は、鋼板の機械特性を左右する重要な工程であり、近年、品質改善、歩留向上の観点から冷却制御の高精度化が求められている。また、CO<sub>2</sub>削減の観点から自動車の軽量化ニーズが強まっており、軽量化に有効なハイテン材の需要が伸びているが、ハイテン材などのより優れた機械特性を備えた鋼板を製造するためには金属組織を積極的に制御する必要があり、ROT冷却後の鋼板温度(巻取温度)だけでなく、ROT上での温度降下履歴の精密な制御が求められている。そこで、この課題に対処すべく、注水環境下においても鋼板温度を高精度に測定できる冷却帯内鋼板温度計(ファウンテン・パイロメーター; FPと略記)と、これを活用したROT冷却制御技術を開発した。

本開発技術は、平成25年度科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞(開発部門)を受賞した。本稿では、冷却帯内鋼板温度計と、この温度計を活用したROT冷却制御技術について紹介する。

### 2 開発技術の概要

#### 2.1 熱延ミルのランアウトテーブル冷却装置

熱延ミルでは、スラブと呼ばれる鋼塊を加熱炉で1200℃程度に加熱し、粗圧延を経て仕上圧延機にて所定の板厚まで圧延される。仕上圧延後の板厚は薄いもので1mm程度、温度

は800~900℃、速度は最速で時速100kmに及ぶ。その後、鋼板はROT冷却装置を経てコイラーでコイル状に巻き取られる。

ROT冷却装置の概要を図1に示す。冷却装置は冷却水の供給系統で区分され、その1つの区分を冷却バンクと呼ぶが、冷却帯1(近接)と冷却帯2(遠方)はそれぞれ6個と10個

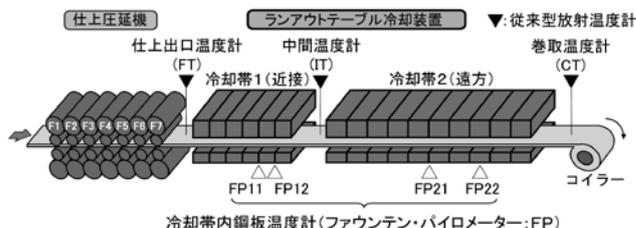


図1 熱延ミルのROT冷却装置の概要

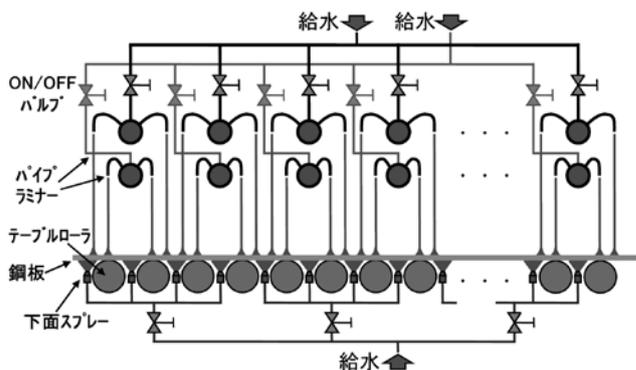


図2 冷却バンクの構造

の冷却バンクから構成されている。図2に冷却バンク内の構造を示しているが、鋼板上面にはパイプミナ、鋼板下面にはフルコーン型のスプレーが備えられている。なお、流量制御は各冷却ノズルの上流側に設置されているON/OFFバルブの操作により行うが、バルブは冷却装置全体で300個以上もあり、これらは冷却制御モデルの指令により開閉される。

仕上圧延機の出口には仕上出口温度計 (FT)、冷却帯1と冷却帯2の間に中間温度計 (IT)、コイラー前には巻取温度計 (CT) が設置されているが、これらは鋼板表面に滞留する冷却水を排除するスペースが必要なため、冷却帯からある程度離れた場所に設置している。また、開発した冷却帯内鋼板温度計は、冷却帯1および冷却帯2に複数箇所設置されているが、これらは冷却帯内の鋼板下面のテーブルローラ間に設置しており、冷却水を排除する対策は行っていない。

## 2.2 冷却帯内鋼板温度計

### 2.2.1 冷却帯内における鋼板温度計測の外乱

測定対象である鋼板は上述のように高温・高速である上に、鋼板先端では鋼板パスライン変動が非常に大きい場合がある。そのため、鋼板温度測定には、鋼板との衝突を回避するため遠隔的測定である放射温度計が用いられてきた。

冷却帯にて放射温度計測を行う上で外乱となる冷却水の様子を図3に示す。図3- (a) は鋼板上面から冷却するパイプミナの冷却水であるが、冷却水は鋼板と衝突した後、一部は鋼板上に滞留する。図3- (b) は鋼板下面のテーブルローラ間の写真であるが、鋼板下面にも大量の水滴状の冷却水が存在

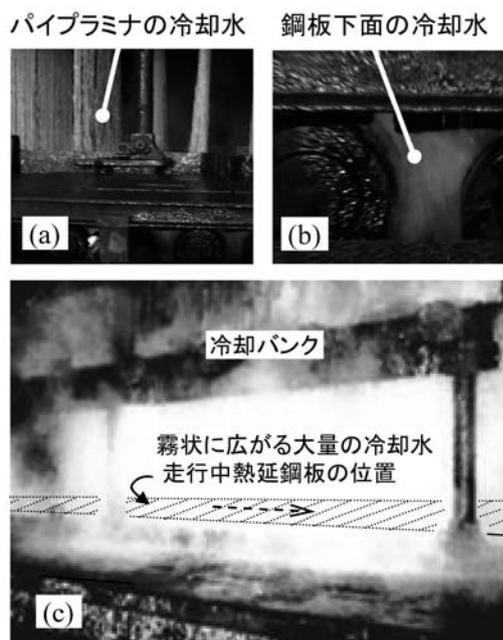


図3 冷却帯の温度計測環境

する。図3- (c) は下面スプレーから激しく冷却水が噴射されている状況で、吹き上げられた水滴状の冷却水が拡散し、赤熱鋼板でも冷却帯外側から観測することができない。このような状況は冷却条件によって刻々と変化し、工場内の温度・湿度などによっても変化する。温度計にはこのような大きな環境変化の中での安定測温が求められる。

放射温度計は、測定対象からの熱放射を検出し、プランクの黒体放射の式などに基づき対象温度を求める。測定対象と放射温度計の間に水が存在すると、検出すべき熱放射が水により吸収され減衰し測定値は低下する (吸収誤差)。また、図3- (b) (c) のような状況では、測定対象と放射温度計の間水滴により熱放射が散乱され、放射温度計の出力は大きく低下する (散乱誤差)。強力なエアパージを用いて、これら水滴を放射温度計の視野から取り除く方法も考えられるが、エアパージによる鋼板表面の局所的な冷却や強力パージが周囲の冷却状態に影響を与えるなど、測温値の代表性を損なう恐れがある (冷却誤差)。

上記のような外乱環境の下、安定的に温度測定する方法として下記の噴水状水パージを用いた冷却帯内鋼板温度計を開発した。

### 2.2.2 冷却帯内鋼板温度計の概要

図4に開発した冷却帯内鋼板温度計の構造を、表1に仕様

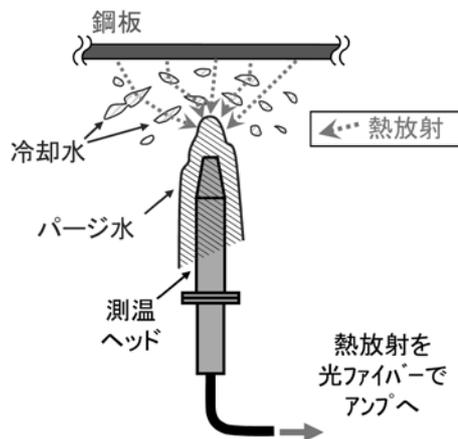


図4 冷却帯内鋼板温度計の概要

表1 冷却帯内鋼板温度計の仕様

形式	FP1	FP2
設置位置	冷却帯1	冷却帯2
検出波長	0.65~0.83 $\mu$ m	1.1 $\mu$ m
測定温度	500~1200 $^{\circ}$ C	360~800 $^{\circ}$ C
応答性	10ms	20ms

を示す。この温度計は独自の噴水状水パージを用いて熱放射検出のための光路の安定化（水滴による散乱抑制）と水による吸収誤差の抑制を図っている。また、水パージを鋼板に衝突させないので、鋼板表面が水パージにより冷却されることも抑制している。

冷却装置内では、大量の冷却水の水滴などにより熱放射が散乱、吸収されるため、通常の放射温度計では熱放射を安定的に検出することが難しい。そこで、パージ水により熱放射の光路を安定化させ、散乱する熱放射を捉えると共に、水中での透過率が高い波長の熱放射を選択的に検出することで、熱放射の吸収に対処している（図5）。

図5に市水の分光透過率を示す。1 $\mu\text{m}$ あるいは1.2 $\mu\text{m}$ より長い波長において強い吸収が見られる。水による熱放射の吸収を抑制し、十分な検出光量を得るため透過率の高い0.83 $\mu\text{m}$ より短い波長帯の熱放射を検出するタイプ（FP1）と1.1 $\mu\text{m}$ 近傍の熱放射を検出するタイプ（FP2）を開発した。表1に示すように、FP1とFP2を測定対象温度に応じて使い分けられている。

上述のように冷却水は多数の水滴として鋼板近傍に存在する場合がある。この水滴環境下において、熱放射の安定検出光路の確保と鋼板とパージ水の接触による冷却を抑制することを両立させるため、鋼板直下近傍までの水パージを用いることとした。図6は水パージを行いつつ、外乱水による散乱誤差を評価した試験結果である。外乱水による散乱の影響により温度計の出力ばらつきが増大する。このばらつきの最大振幅を散乱誤差として評価した結果、受光点を光源が覆う視野角 $\theta > 75^\circ$ の場合に出力ばらつきを10 $^\circ\text{C}$ 程度と実用可能なレベルに抑制できることを見出した。

2.3 冷却帯内鋼板温度計を活用した冷却制御技術

ROT冷却制御では、コイラーで巻き取られる際の巻取温度を目標値に制御し、所定の機械特性を備えた鋼板を作り込

む、巻取温度制御が主流である。巻取温度制御の基本動作は、鋼板の温度計算モデルを用いて仕上出口から巻取までの温度降下を予測し、この予測温度が目標温度と一致するように冷却装置を1秒未満の短周期で時々刻々操作するものである。このため、鋼板上に仮想的な制御点を設け、制御点の位置をトラッキングしつつ、各制御点の温度予測計算を行い（図7）、この予測結果に基づいて冷却装置のバルブ操作設定を行う。この制御方法は冷却装置の設定を連続的に行うことから、ダイナミック制御と呼んでいる。

2.3.1 冷却帯内鋼板温度計を活用したフィードフォワード制御

実操業では、外乱等の影響で、鋼板の計算温度と実績温度には誤差が発生する。したがって、計算温度と実績温度の誤差が大きい場合には、ダイナミック制御を行っても巻取温度を精度良く目標温度に制御することができない。このため、

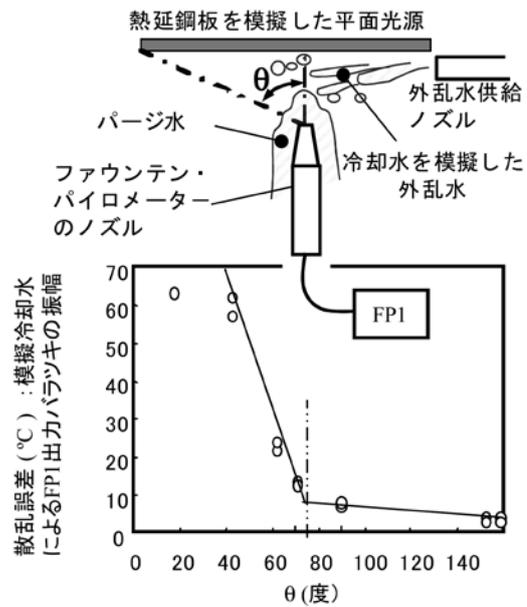


図6 水の散乱による測温誤差

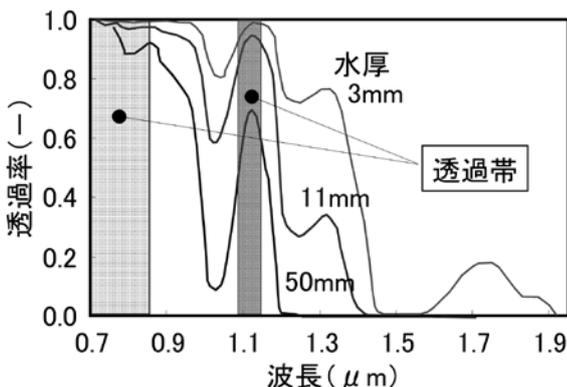


図5 市水の分光透過率

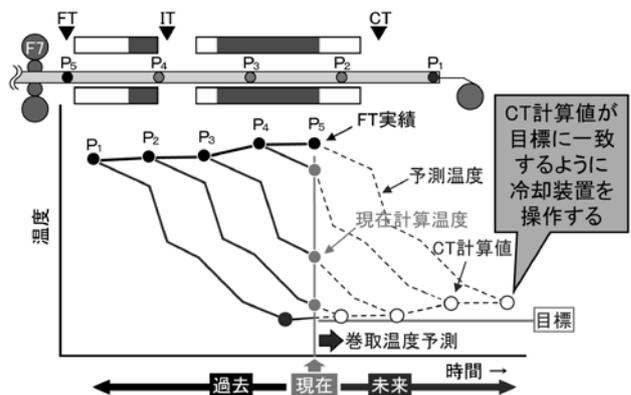


図7 制御点に対する巻取温度の予測計算

巻取温度偏差を抑制するフィードバック制御が用いられてきたが、先端部分の温度外れに対しては有効ではなく、バルブの応答性の悪さや温度測定位置から冷却帯までの距離が長くむだ時間が大きいなど、十分な制御効果を得ることが難しい。

また、冷却中に鋼板温度が低下し過ぎると、鋼板表面における冷却水の沸騰状態が変化し、鋼板温度が急速に低下する沸騰領域（遷移沸騰領域）に入り、巻取温度精度が悪化する。ハイテン材は巻取温度が一般材に比べ低いことから、このような沸騰状態の変化による悪影響を受けやすく、巻取温度外れが定常的に多いため、巻取温度制御の精度改善が大きな課題であった。

そこで、冷却帯内鋼板温度計を用いて、冷却帯途中の鋼板温度を測定し、フィードフォワード制御（FF制御）を行う技術を開発した。

冷却帯内鋼板温度計を活用したFF制御は、ROT冷却制御のダイナミック制御機能に冷却帯2での鋼板冷却途中の測温結果（FP21、FP22）をリアルタイムに取り込み、FF制御を多段階に適用して、巻取温度制御精度の向上を図るものである（図8）。

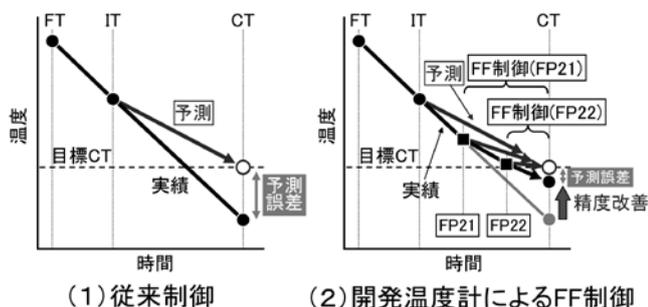


図8 冷却帯内鋼板温度計を用いたFF制御

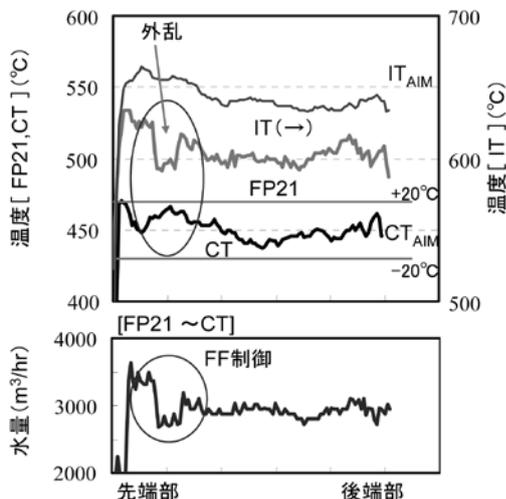


図9 冷却帯内鋼板温度計によるFF制御の例

冷却帯内鋼板温度計を活用したFF制御の適用例（板厚4.26mm、目標巻取温度450℃）を図9に示す。IT通過後に温度外乱が発生した例で、約30℃の急激な温度低下がFP21にて検出されたものである。この急激な温度変化に対して、FP21を用いたFF制御が働き、FP21以降の冷却バンクの冷却水量をフィードフォワード的に約600m<sup>3</sup>/hr減少させることで、巻取温度の変動を効果的に抑制していることが分かる。

冷却帯内鋼板温度計を活用したFF制御は、ハイテン材を中心とした目標巻取温度550℃未満の低温巻取材を対象に重点的に適用している。表2に大量評価を行った結果を示す。±20℃適中率は、巻取温度が目標温度の±20℃以内に入ったコイル長さの全長に対する割合を表すが、冷却帯内鋼板温度計を活用したFF制御の導入により、ハイテン材の±20℃適中率が、440MPa鋼において5.8%、590MPa鋼において9.7%改善し、また低温巻取材全体では6.4%改善した。

以上のように、冷却帯内鋼板温度計を活用したFF制御機能が冷却途中の温度変化に即応し、冷却装置を適切に操作することで巻取温度を精度良く制御することが可能になった。

### 2.3.2 冷却履歴制御

冷却履歴制御の概念を図10に示す。機械特性がより優れた鋼板を製造するには、金属組織を積極的に制御する必要がある。これにはROT冷却工程における温度降下履歴を鋼板の長手方向に渡って精密に制御することが必要で、従来の制御対象であった巻取温度に加え、急冷停止温度と中間空冷時間を同時に所定の値に制御することが求められる。

先に記したように、ROT冷却制御のダイナミック制御にお

表2 巻取温度制御精度の向上

熱延鋼板の種類	± 20℃適中率
440MPa 鋼	5.8 %
590MPa 鋼	9.7 %
低温巻取材	6.4 %

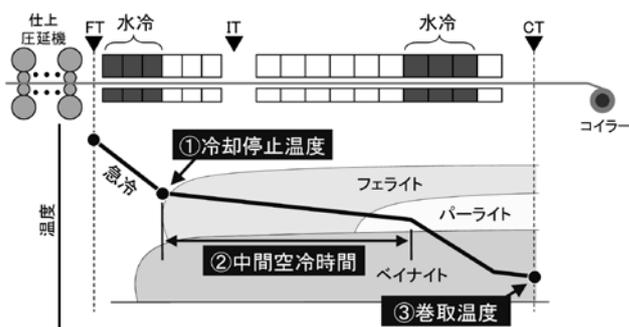


図10 冷却履歴制御の概要

いて、各制御点の温度降下履歴予測を短周期で実施しているが、冷却履歴制御では、この結果を用いて急冷停止温度、中間空冷時間、巻取温度が目標値と一致するように各冷却バンクを操作する。

しかしながら、この温度降下履歴は温度計算モデルによって算出されたもので、計算誤差が含まれており、この誤差が制御精度に反映されてしまう。

その対策として、ROT冷却装置内に複数設置した冷却帯内鋼板温度計を活用し、冷却履歴制御の精度向上を図っている。図11に冷却履歴制御の制御機能を示すが、急冷停止温度と巻取温度に関する2つの制御機能があり、それぞれが急冷停止温度、巻取温度の高精度化に寄与している。

冷却履歴制御の実機制御例を、従来の巻取温度制御と比較して、図12に示す(この図は各制御点に対する仕上出口から巻取までの温度計測定値と温度降下履歴の計算結果を、仕上出口温度の目標値を基準とした温度降下量に換算して図示したものである)。従来の巻取温度制御では、各制御点の温度降下履歴がばらついているが、冷却履歴制御の実施例では、圧延中に鋼板速度を加速し、鋼板速度が変化した場合でも、急冷停止温度、中間空冷時間までの温度降下履歴にばらつきは小さく、また、巻取温度も全長に渡り、目標温度に制御できていることがわかる。

### 3 結言

本稿では、注水環境下にある冷却帯内でも高精度に測温できる冷却帯内鋼板温度計と、この開発温度計を活用したROT冷却制御技術について紹介した。

冷却帯内鋼板温度計を活用したROT冷却制御技術の開発により、従来の冷却制御技術だけでは解決が難しかった、遷移沸騰領域に近い温度領域での高精度温度制御が可能になった。これにより、特にハイテン材の巻取温度精度が向上し、安定製造が可能となった。加えて、本技術により、ROT冷却工程における鋼板温度降下履歴を緻密に制御することが可能になったため、金属組織を制御することが必要な、優れた材料特性を付与した鋼板を安定製造することができるようになった。

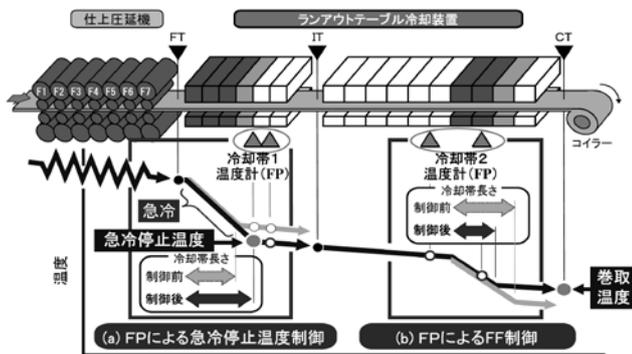


図11 冷却帯内鋼板温度計を用いた冷却履歴制御

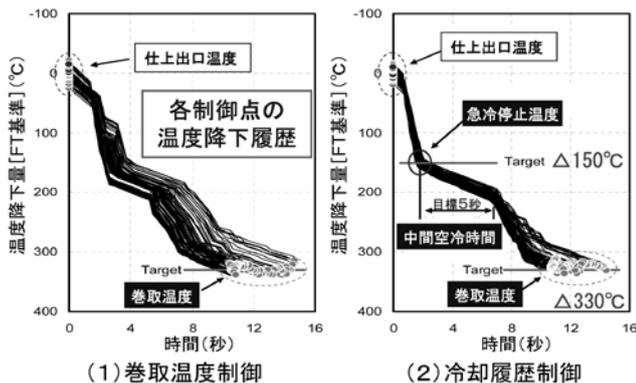


図12 温度降下履歴の比較

#### 参考文献

- 1) 本田達朗, 植松千尋, 橘久好, 中川繁政, 武衛康彦, 阪上浩一, 高橋秀之, 木村和喜: 鉄と鋼, 96 (2010) 10, 17.
- 2) 中川繁政, 橘久好, 本田達朗, 植松千尋: 計測自動制御学会論文集, 46 (2010) 8, 463.
- 3) 中川繁政, 橘久好: 計測自動制御学会論文集, 45 (2009) 4, 233.
- 4) 橘久好, 中川繁政, 植松千尋, 本田達朗, 辻村潤一, 松本和男: CAMP-ISIJ, 25 (2012) 2, 1026.

(2014年1月15日受付)