

新日鐵住金(株)の厚板TMCPを支える冷却制御技術

Plate Cooling Technology for the TMCP (Thermo Mechanical Control Process)

in Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation

芹澤良洋*	中川繁政	角谷泰則
Yoshihiro SERIZAWA	Shigemasa NAKAGAWA	Yasunori KADOYA
山本龍司	上野博則	原口洋一
Ryuji YAMAMOTO	Hironori UENO	Yoichi HARAGUCHI
橋久好	岩城泰輔	小田朋哉
Hisayoshi TACHIBANA	Taisuke IWAKI	Tomoya ODA

抄 録

TMCP技術の根幹となる冷却制御技術は、1980年代に当時として画期的な冷却装置の導入に始まった。ますます高度化する鋼材特性と均質な材質を両立させるために発展を遂げてきた、新日鐵住金(株)のTMCPを支える加速冷却装置と冷却制御システムについて述べた。冷却装置は基本的なコンセプトは維持しつつ、冷却方法の抜本的な改造により、優れた冷却均一性と広範な冷却速度制御が可能な装置としている。さらに、冷却停止温度を予測するための温度計算モデルを基礎実験に基づき構築するとともに、冷却制御システムについては先進的な学習制御技術の導入により、材料間の冷却停止温度のばらつきを大幅に低減している。

Abstract

The plate cooling technology, which comprises of an essential part of TMCP, was initiated by installing the innovative cooling system in 1980. In this article, the accelerated cooling equipment and the cooling control system, which have been developed to meet the demand of both the advanced and uniform steel mechanical characteristics from the user, are described. The cooling equipment has been developed on the unvarying basic concept of the wide range of cooling rate and then undergone the fundamental redesigning of water spay, achieving highly homogeneous cooling. For the cooling control system, the precision temperature calculation system has been established based on the empirical data. And the advanced learning control scheme has been developed to reduce the inter-plate temperature fluctuation significantly.

1. 緒 言

高機能厚板の製造のため1980年代に導入されたTMCPにおける冷却技術では、幅5m、長さ数十m、板厚6～100mmの厚板を、さまざまな冷却速度で均一に冷却することを求められている。冷却には、水を冷媒として使用しているが、鋼板は高温であるために水は後述する様々な形態で沸騰する。このため、冷却に際しては鋼板の上を流れる冷却水の流れの影響、鋼板温度により刻々と変わる水の沸騰形態、あるいは鋼板の表面性状などの外乱による影響を考慮して鋼板幅方向、鋼板上下面の冷却均一性を制御できる冷却装置と冷却制御技術が必要である。本稿では、新

日鐵住金(株)が独自に開発した冷却制御技術について述べる。

2. 冷却装置の構成

表1に世界の厚板工場に導入されてきた冷却装置の設置時期と主な冷却装置構成上の特徴を、図1に構成例を示す¹⁾。注目されるのは近年、中国では独自に開発した冷却装置が7基も導入されていることである²⁾。冷却装置構成の差異は、鋼板を平坦にするホットレバラーの位置、数、通板型冷却/停止冷却、鋼板を挟み込む拘束ロールの有無によって生じる。

* プロセス研究所 プロセス技術部 主幹研究員 千葉県富津市新富 20-1 〒 293-8511

表1 世界の主要厚板ミルの加速冷却設備仕様
Specification of cooling equipments of the plate mill in the world

Country	Company mill		Start up	Location of HL (before, after, both of ACC)	ACC pinching roll	Length (m)	Nozzle		Direct quench availability
							Top side	Bottom side	
Japan	NSSMC	A	1984	Before	○	21	1st part: Slit jet 2st part: Spray	1st part: Slit jet 2st part: Spray	○
			2012						
		B	1983	Before	○	20	1st part: Slit jet 2st part: Spray	1st part: Slit jet 2st part: Spray	○
			2005						
		C	1986	Before	○	21	1st part: Slit jet 2st part: Spray	1st part: Slit jet 2st part: Spray	○
			2009						
	D	1983	After		27	Slit laminar	Spray		
		1979	After		14	Spray	Spray	○	
		2010	Both		24	Multi jet	Multi jet	○	
	A	A	1983	Both		39	Laminar	Spray	
			1985	Both		22	Slit jet + Laminar	Slit jet + Spray	○
	B	A	1985	After	○	20	Laminar	Close suction laminar	○
			2004	Both	○	20	Corridor flow	Close suction laminar	○
		B	1983	After		40	Rord-like nozzle	Dish-like jet	
1983			After	○	13	Immerssion + Stir	Immerssion + Stir	○	
2003			Both	○	12	Corridor flow	Close suction laminar	○	
C			1980	After		44	Laminar	Spray	
	1998	Both	○	20	Corridor flow	Close suction laminar	○		
Europe	C	A	1986	After		30	Pipe	Pipe	○
	D	A	1984	After		12	Pipe	Pipe	○
	E	A	1984	After		12	Laminar	Laminar	○
U.S.A.	F	A	1995	Both			Mist	Mist	○
Taiwan	G	A	1994	Both		24	Laminar jet	Laminar jet	
Korea	H	A	1989	After		30	Mist + Pipe	Mist + Pipe	○
			2003	Both		24	Pipe	Pipe	○
China	I-O	A-G	2010	Both		24	1st part: Slit jet 2st part: Spray	1st part: Slit jet 2st part: Spray	○

ACC: Accelerated cooling

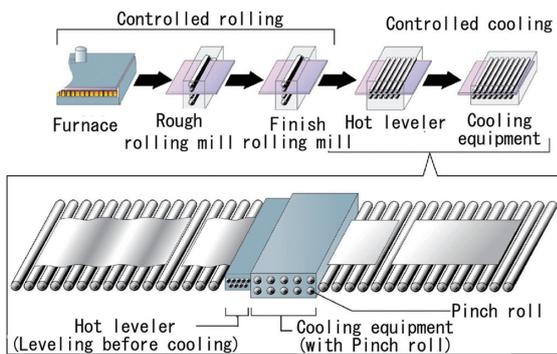


図1 圧延製造ラインと冷却装置
Cooling equipment in the plate rolling mill

2.1 ホットレベラー位置に関する動向

冷却に際しては冷却水が鋼板に衝突する際の距離や鋼板上での水の流れが影響するために鋼板は平坦であることが望ましい。冷却装置前のホットレベラー (HL) の役割は冷却前の鋼板を平坦にすることにより冷却の均一化を図るものである。一方、冷却装置後のホットレベラーは冷却による形状悪化部を後工程での移送を容易にするために平坦にする目的で設置されている。

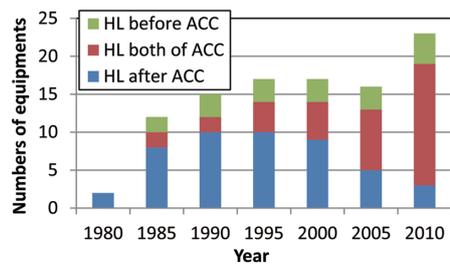


図2 ACCにおけるホットレベラー位置の変遷
Transition of the number of cooling equipment classified by the hot leveler position

しかしながら、鋼板冷却直後の鋼板内温度偏差がある状態で平坦化すると常温まで温度が低下した際には、高温部位は大きく収縮し、低温部の収縮は小さいために鋼板変形をおこす可能性があるため、冷却直後の平坦化は行わないことが望ましいと推定される。図2に設置年代ごとのホットレベラーの位置の推移を示している。図に示すように当初は冷却装置の後方のみにホットレベラーが設置される例が多かった。これは初期のTMCP技術において冷却後の鋼板形状が悪く、矯正必要性が高かったと推定される。一方、冷却装置前のホットレベラーは1995年代から増加し、

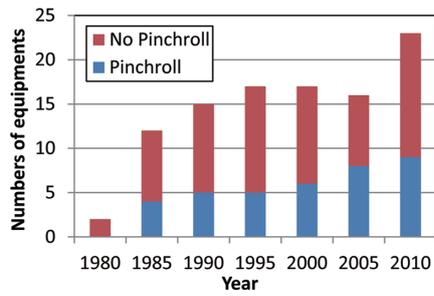


図3 ACCにおけるピンチロール設置状況の変遷
Transition of the number of cooling equipment with or without the pinch rolls

冷却装置後のホットレベラーを併設するケースも含めると、最近ではこのレイアウトが主流となっている。新日鐵住金では冷却前の鋼板平坦度向上により冷却均一化を図るという考え方の下、冷却装置前にホットレベラーを設置している。

2.2 拘束ロール設置の動向

冷却装置の拘束ロールは鋼板を上下から挟みこんで冷却中の板変形の抑制による冷却均一化、形状改善や冷却帯の分離を行う機能を有する。鋼板冷却においては鋼板のサイズや目標材質に応じて冷却停止温度や冷却時間が大きく変化する。そのため、冷却装置機内の冷却帯の長さを調整することが必要である。拘束ロールは冷却水が冷却帯の後方に漏れることを抑制し、冷却帯以外での鋼板上面の乗り水による不均一冷却を防止しており、冷却帯を非冷却帯と分離しているのである。図3は年代ごとの拘束ロールの設置された冷却装置の基数の推移を示している。図3に示すように拘束ロールを備えた冷却装置の基数が増加してきている。新日鐵住金では鹿島製鉄所を除いて設置当初より拘束ロールを備えており、近年世界標準となりつつある機能を備えている。

3. 加速冷却での沸騰冷却現象と課題

高温鋼板を水で冷却する場合の冷却能力は日常で見られる沸騰とは異なっており図4に示す沸騰曲線と呼ばれる特性を示す⁴⁾。高温領域では鋼板と水の間に蒸気層が存在し、水が鋼板に直接接触しない膜沸騰と呼ばれる状態となっており、冷却能力が高温領域にも関わらずやや低くなっている。鋼板温度の低下に伴い、鋼板と水の接触が始まり、温度低下とともに鋼板と水の接触面積が広がり冷却能力が増加する遷移沸騰領域となる。さらに鋼板温度が低下すると気泡発生が主体の核沸騰領域となる。鋼板の冷却において難しいのは、遷移沸騰域での冷却である。この領域では、鋼板温度の低下とともに冷却能力が向上するために鋼板内の冷却初期の温度ばらつきの拡大、鋼板ごとの冷却停止温度のばらつきが発生する。近年材質の高度化とともに遷移沸騰域での冷却対象材が増加し、冷却後の後処理の増加など生産負荷が増え、このため、冷却均一性の向上と冷却制

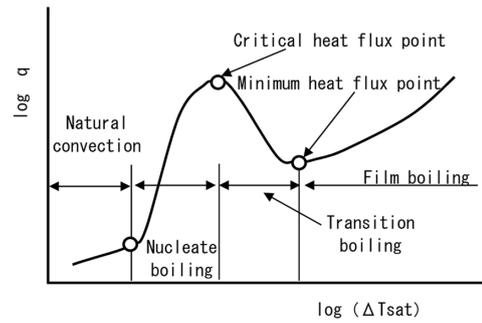


図4 水の沸騰冷却時の熱伝達率特性
(q :熱流束, Δsat :伝熱面過熱度:伝熱面温度と液体飽和温度の差)

Boiling curve of water

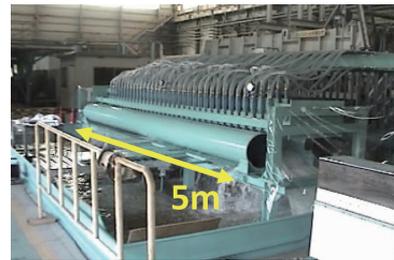


図5 冷却装置開発時の実機大試験装置
Photograph of real-size test equipment

御の高度化ニーズが高まったために、2000年以降第二世代の冷却装置を導入してきた。

4. 冷却装置の開発

4.1 実機大試験装置による性能検証

冷却装置は、上下に鋼板を拘束するロール群を備え、ロール間に配置された冷却ノズル群から単位面積単位時間当たり $1 \sim 2 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{min}$ の大水量で上下各面から厚鋼板を冷却する。これは、板幅4mとすると、板長さ1mあたり $8 \sim 16 \text{ m}^3/\text{min}$ となり、1分間でドラム缶40本から80本が満たされるほどの大水量である。冷却装置はこのように大水量を扱い、幅が最大5mもの広さであるために多くの散水ノズルを備えている。こうした冷却装置に必要とされる機能は材質を自在に制御するための広範囲な冷却能力、幅方向の均一性である。

開発に当たっては、小規模な試験を行うだけでは実際の大規模装置での性能保証を行うことは困難である。そこで図5に示すように、実機を想定した試験装置と実際に使用する散水用ヘッダーを試験的に製造し、その散水性能確認試験とともに均一冷却性調査試験を行った。ヘッダーの散水機能に関しては、低水量から高水量まで水量を変化させて、幅方向の分布を実測した。その結果を図6に示す。図に示すように、散水量の分布は $\pm 2\%$ 以内と良好であった。このヘッダーを使用して、散水しながら幅方向数か所で加熱試験片を装入して冷却試験を行った。

冷却試験においては、試験片冷却時の中心部での冷却速度を幅方向の6か所、及びロール間の3か所で測定した。

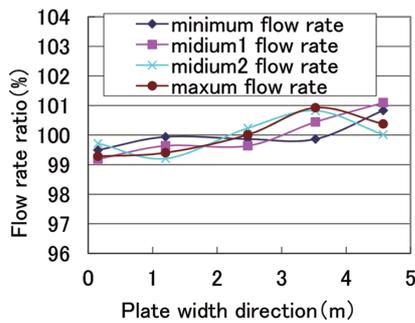


図6 散水時のヘッダー圧力変化時の幅方向水量分布
Flow rate distribution of water header of cooling equipment in the plate width direction

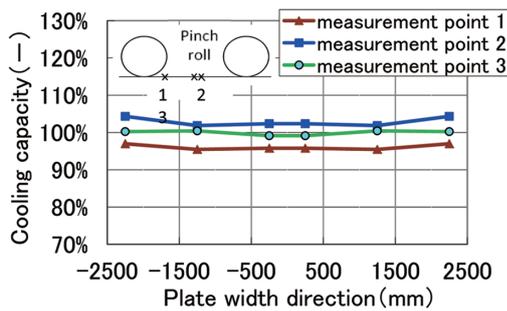


図7 冷却装置の幅方向冷却能力分布
Cooling capacity distribution of cooling equipment

この結果を冷却速度の平均値で除した比率を幅方向の各位置ごとに図7に示す。図7に示すように、開発した装置の冷却速度は幅方向で1~2%の差で高い均一性を有している。また、ロールに近い部分でもロール間中心部の95%と高い冷却能力を有していることが判明した。

4.2 冷却装置実機の改造効果

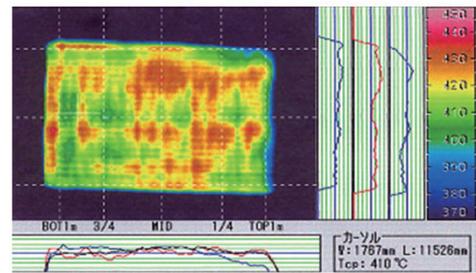
このように小規模試験から大規模試験まで行い、性能を検証した冷却装置による操業結果を図8に示す³⁾。開発後の冷却装置での冷却後の板内温度偏差は従来装置に比較して50℃から30℃とほぼ半減され均一冷却性を大幅に改善できることを確認した。

5. 冷却における鋼板温度予測モデル

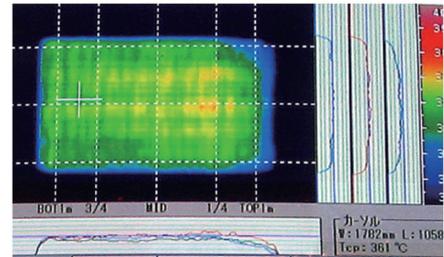
冷却における温度予測は、始点を冷却装置の入側温度計位置、終点を装置出側温度計位置とし、鋼板温度予測モデルを用いて、入側温度測定値から冷却停止温度（出側温度）を予測する。以降、本稿では、冷却装置の入側温度計で測温された鋼板温度を冷却開始温度（SCT：Start Cooling Temperature）と呼び、冷却装置の出側温度計で測温された鋼板温度を冷却停止温度（FCT：Finish Cooling Temperature）と呼ぶ。

5.1 ノズル噴流の水冷却熱伝達モデル

目標とする鋼板材質によっては、冷却停止温度が遷移沸騰領域に設定される製造条件も有り、このような鋼板を安



By former equipment



By developed equipment

図8 厚板冷却後の鋼板温度分布
Temperature distribution after cooling

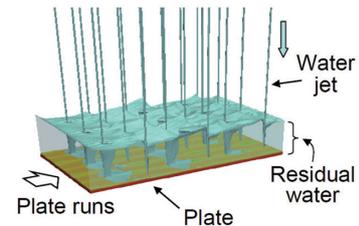


図9 ノズル噴流の数値流体解析結果
Numerical analysis result of the nozzle jet and the residual water

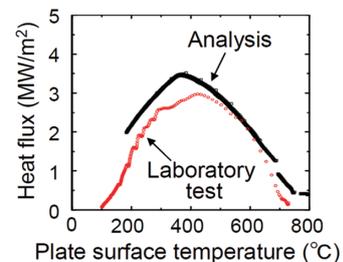


図10 冷却特性の実験結果と解析モデル結果の比較
Comparison between laboratory test result and analysis model result of cooling properties

定製造するには、沸騰状態を考慮した水冷却熱伝達係数のモデル化とそのモデルを用いた鋼板温度予測の高精度化が必要である。そこで、図9の冷却装置のノズルから噴出されたジェット噴流解析^{5,6)}と図10に示す冷却試験⁷⁾を行って鋼板上の冷却挙動を定式化し、沸騰状態を考慮した水冷却熱伝達モデルを開発した。

オフラインの詳細解析モデル（数値流体解析モデル）においては、ジェット噴流や滞留水を含む冷却水の流動状態を気液混相流の数値解析を用いて解析し、得られた冷却水の温度や流速、鋼板の表面温度を用いて水冷却熱伝達係数の

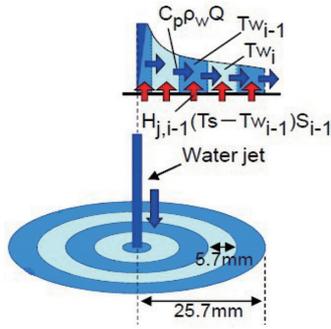


図 11 ノズル噴流衝突後の熱伝達特性のモデル化
Heat transfer model around the jet

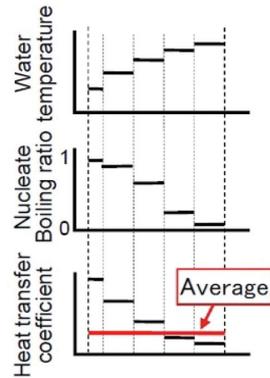


図 12 噴流周囲の熱伝達係数, 核沸騰比率, 水温の変化
Heat transfer model in cooling section

分布を詳細に算出した。そのような解析を水温やジェット流速といった冷却条件を変更しつつ行い、得られた熱伝達の分布を鋼板表面にわたって平均化することで、各冷却条件に対応する沸騰曲線を得た。以上の数値解析結果ならびに冷却実験結果を参考にして、オンライン制御用の水冷熱伝達モデルを作成した。

このモデルでは、1つのノズルの冷却現象に着目し、図 11 に示すように、ノズルから噴出したジェット噴流は鋼板に衝突し、冷却水は円形に拡散するものとして流動状態を考える。拡散円の面積は冷却ヘッダーに占めるノズル 1 個あたりの面積とし、続いて次のように熱伝達をモデル化する。拡散円を同心円状に分割し（分割された部位をセルと呼ぶ）、中心セルから最外周セルまで各セルの沸騰状態（核沸騰割合）、熱伝達係数、及び冷却水温を中心セルから流れに沿って順次算出する。このとき、拡散円内各セルの鋼板表面温度は一定とした。各セルの熱伝達係数は、最初に核沸騰域と膜沸騰域の熱伝達係数を前述の実機冷却条件に則した解析検討により導いた式 (2)～(3) を用いて個別に算出し、それぞれの領域における核沸騰割合に応じて配分し式 (4) を用いて算出する。

さらに冷却水温は図 12 に示すように、各セルにおいて鋼板からの抜熱がセル上を通過する冷却水に様に吸収されるとして、式 (1) を用いて通過後の（1つ外側のセルにおける）水温を算出する。

$$T_{wi} = T_{wi-1} + \frac{H_{j,i-1} (T_s - T_{wi-1}) S_{i-1}}{C_p \rho_w Q} \quad (1)$$

$$H_{Nj} = C_{Nj} P_r^{c_1} R_e^{c_2} S_b^{c_3} S_p^{c_4} \frac{\lambda_w (T_s - T_{sat})}{(T_s - T_{wi}) L_j} \quad (2)$$

$$H_{Fj} = C_{Fj} P_r^{c_5} R_e^{c_6} \frac{\lambda_w (T_{sat} - T_{wi})}{(T_s - T_{wi}) L_j} \quad (3)$$

$$H_j = B H_{Nj} + (1 - B) H_{Fj} \quad (4)$$

$$R_e = \frac{V_j L_j}{\nu} \quad (5)$$

$$S_b = \frac{C_p (T_{sat} - T_{wi})}{h_{lv}} \quad (6)$$

$$S_p = \frac{C_{pv} (T_s - T_{sat})}{h_{lv}} \quad (7)$$

ここに、 H :セル熱伝達係数、 S :セル面積、 C_p :水の比熱、 C_{pv} :蒸気の比熱、 ρ_w :水の密度、 Q :ノズル水量、 N :核沸騰を示す添え字、 F :膜沸騰を示す添え字、 i :セル番号を示す添え字、 j :冷却ヘッダー部を示す添え字、 P_r :水のプラントル数、 λ_w :水の熱伝導率、 B :核沸騰割合、 V_j :冷却水拡散速度、 L_j :代表長さ、 T_{sat} :水の飽和温度、 h_{lv} :水の蒸発潜熱、 C_{Nj} ; C_{Fj} :調整パラメータ、 $C_{1\sim5}$:実験導出パラメータ、である。

以上により、図 12 のように各セルの熱伝達係数が算出されるが、最終的には拡散円内の値を平均して用いる。また、このような計算は各冷却ヘッダーにおける全ノズルに対して行うことはせず、鋼板の幅中央点を含む必要な温度計算ポイントについてのみ行うことで、計算負荷の低減を図る。そして得られた温度計算ポイントにおける平均熱伝達係数を用いて、冷却ヘッダー部の温度計算を行う。

5.2 冷却ヘッダー間の水冷熱伝達モデル

冷却ヘッダー間の水冷熱伝達モデルは、冷却ヘッダー部から排出された冷却水が鋼板幅方向に排水される現象をモデル化したものである。冷却ヘッダー部の熱伝達モデルに新たに追加したモデル化のポイントとしては 2 点あり、ひとつは冷却水の水速として前述の解析検討により板幅とヘッダー水量の関数として定式化した幅方向の排水速度を用いることである。もうひとつは冷却水温として冷却ヘッダー部から排出された水温を用いることであり、その水温には拡散円の最外周セルから排出された計算水温を使用する。なお、下面は冷却水の影響を受けにくいと考えられるため、対流と輻射のみの空冷部として扱う。

5.3 熱伝達モデルによる温度予測結果

調整パラメータを最適化した提案モデルによる出側温度計算値（冷却停止温度）と測定温度（実績冷却停止温度）の散布図を図 13 に従来モデルと比較して示す。ここで、従来モデルでは、水冷熱伝達モデルとして、水冷実験に基づくノミナルな水冷熱伝達係数曲線に対して実績データに

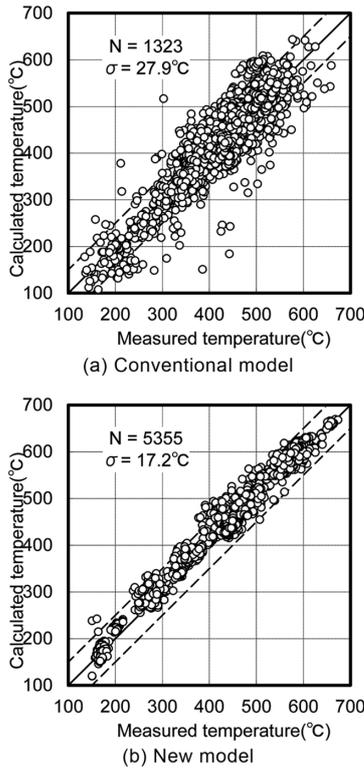


図 13 冷却停止温度予測の従来モデルと新モデルの比較
Comparison between calculated and measured temperature of FCT

よる係数学習を行うモデルを使用していた。図 13 より、提案モデルでは、特に 200℃～450℃の領域で計算精度が従来と比べて改善しており、低温域での予測精度が向上していることが分かる。また、提案モデルでは $\sigma = 17.2^\circ\text{C}$ となり、従来モデルの $\sigma = 27.9^\circ\text{C}$ に比べ σ が 38% 小さく、高精度な冷却停止温度予測が可能となった。

6. 冷却停止温度制御

鋼板の冷却停止温度制御の基本的な動作は、鋼板温度予測モデルを用いて、冷却後の鋼板温度を予測し、この予測温度が目標温度と一致するように冷却装置を操作するものである。これを実現するための冷却制御は、プリセット制御、ダイナミック制御及び学習制御の各機能から構成されるが、以下に、各制御機能について説明する。

6.1 プリセット制御

プリセット制御は、鋼板の先端部が入側温度計に到達したタイミングで起動され、鋼板の冷却前に冷却装置の各種初期設定を行う制御機能である。開発したプリセット制御では、冷却停止温度の制御だけでなく、冷却速度についても、目標冷却速度を実現できるような制御機能を開発した。開発したプリセット制御では、目標冷却停止温度と目標冷却速度から冷却時間を算出して、鋼板の搬送速度を求め、続いて鋼板温度予測モデルを用いて、冷却停止温度の予測値が目標冷却停止温度となるために必要な冷却水量を算出

し、これらを設定する。この際、適切な搬送速度及び冷却水量を求めるため、搬送速度と冷却水量の収束計算を行う。

6.2 ダイナミック制御

鋼板の冷却制御では、冷却停止温度を鋼板全長に渡って、高精度に目標温度に制御することが求められる。しかしながら、圧延後の鋼板は長手方向に温度変動を伴って冷却装置内を通過し、操作する冷却装置も搬送方向に分散配置されているため、鋼板と冷却装置の位置関係を正確に把握し、各時点の状況に適した冷却装置の設定を、時々刻々行うことが必要である。連続熱間圧延鋼板の冷却制御では、鋼板長が非常に長い（数百 m～2000 m）、鋼板上に仮想的な制御点を設け、制御点の生成、トラッキングならびに制御点の温度トラッキングを行って、冷却水量を動的に調整するダイナミック制御⁸⁻¹⁰が行われているが、鋼板長が短い（数十 m 程度）厚鋼板の冷却制御においては、冷却装置の冷却水量を動的に修正する制御方式ではなく、冷却装置入側温度での実績温度に基づいて進入板速度微調整と通板中の板速度制御を行う制御方式^{11,12}が一般的であった。

本制御では、長手方向の冷却停止温度の均一化を高精度に実現するため、鋼板の搬送速度を途中調整する制御方式ではなく、冷却装置の冷却水量を動的に調整するダイナミック制御の開発を行った。

開発した冷却装置におけるダイナミック制御では、鋼板上に一定間隔（1 m ピッチ）で複数の仮想的な制御点を設け、この制御点に対する温度予測計算を行い、冷却停止温度予測値が目標温度となるような、冷却装置の冷却水量を求め、制御点の位置を正確にトラッキングしながら、制御点に対する冷却水量の設定を行う（図 14）。

6.3 学習制御

プリセット制御及びダイナミック制御は、鋼板温度の予測結果に基づいた制御を実施しており、予測モデルの計算精度が制御精度を左右する。しかしながら、実操業においては、鋼板温度予測モデルで予測が困難な誤差要因が存在するため、予測に基づく制御だけでは高精度化には限界が

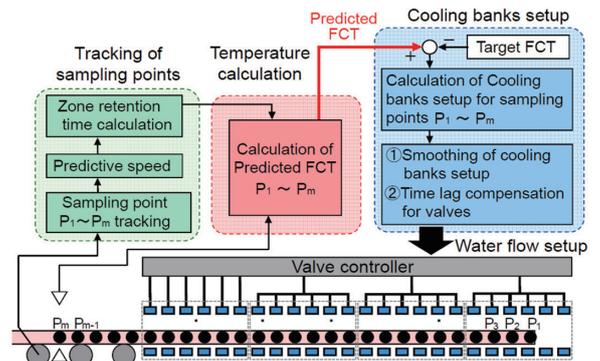


図 14 ダイナミック冷却制御システム
Schematic diagram of dynamic control model

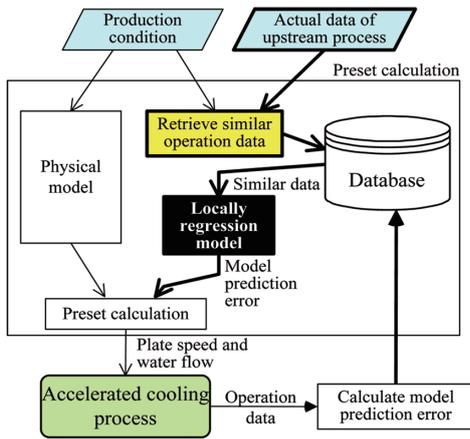


図 15 データベース活用した学習制御方法
Outline of proposed adaptation method

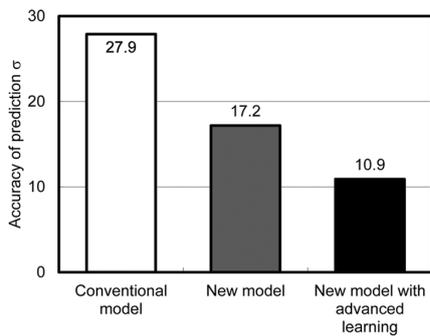


図 16 学習制御による冷却停止温度予測向上効果
Accuracy of prediction of finish cooling temperature

ある。通常、冷却制御の学習においては、熱伝達係数に対する補正係数をパラメータ学習する方式¹³⁾が一般的であるが、本学習制御では、モデル予測誤差を直接的に学習する方式とし、データベースを活用した先進的な学習方法を導入した¹⁴⁾。

本方法では、図 15 に示すように、鋼板の冷却終了時に鋼板温度予測モデルの予測誤差を計算し、製造条件や操業実績データとともにデータベースに保存する。そして、次材の冷却開始前に、製造条件や圧延工程での製造実績が今回の条件に類似するデータをデータベースから抽出し、類似データを用いた局所回帰モデリングによりモデル予測誤差を推定する。次材のプリセット制御及びダイナミック制御では、制御モデルが狙う目標値を前記推定したモデル予測誤差分だけバイアス補正する。この際、厚鋼板長手方向におけるモデル誤差の差異を学習制御に反映させるため、長手方向に区間を分割してモデル誤差学習を行う。

本学習制御を適用することで、図 16 に示すように、冷却停止温度予測精度がさらに向上し、冷却停止温度制御を高精度に行うことができる。

7. 実機適用結果

開発した冷却制御モデルを冷却装置の冷却制御に適用した。

図 17 に開発した冷却制御モデルによる制御結果の一例を示す。本例は、板厚 30mm、目標 FCT=450℃の事例である。鋼板の先端部は、プリセット制御にて冷却水量が設定され、先端部以降から尾端部にかけては、ダイナミック制御により鋼板長手方向にわたって冷却水量が連続的に設定された制御例を示している。厚鋼板の冷却開始温度 (SCT) はサーマルランダウンにより先端側から尾端部にかけて徐々に温度降下していくのが通例であるが、本例では操業上の外乱要因により先端部からミドル部に掛けて、SCTの上昇がみられ、ミドル部から尾端部にかけてはSCTが低下している。このような状況に対して、ダイナミック制御では、先端部からミドル部に掛けてオンライン加速冷却装置の冷却水量を増やし、ミドル部から尾端部に掛けて冷却水量を減じている。この結果、鋼板の長手方向全長にわたり、冷却停止温度 (FCT) が目標値 (目標 FCT=450℃) から±25℃以内に制御されていることが分かる。

図 18 に鋼板を 159 本連続冷却した際の冷却水温、冷却

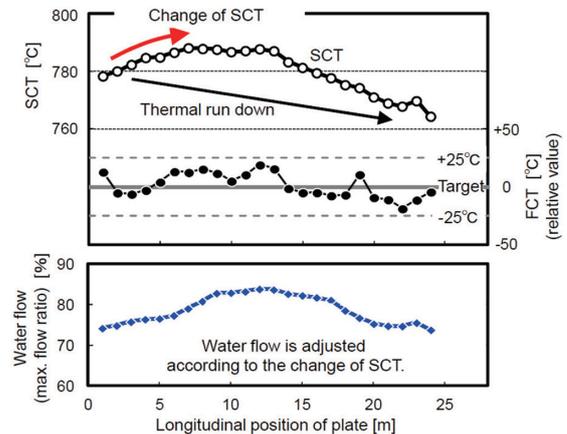


図 17 ダイナミック冷却制御の結果
(板厚 30mm, 冷却停止温度 450℃)
Result of dynamic control
(plate thickness 30mm, FCT = 450)

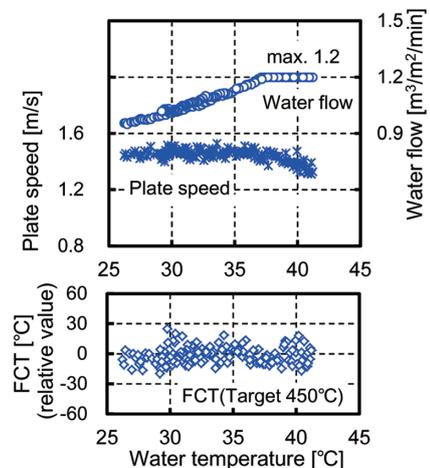


図 18 実操業における冷却水温、冷却速度、搬送速度、冷却停止温度の変化
Prediction error in the case of change of water temperature
(plate thickness 30mm, FCT = 450)

速度、搬送速度、冷却停止温度（先端から4m位置のものを代表点とした）の状況を冷却水温を横軸にして整理したものを示す。冷却水温の大幅な変化に対しても、冷却停止温度の予測誤差が概ね±20℃以内にあることが分かる。また、水温変化に応じて、水量密度と搬送速度を調整し、冷却停止温度をほぼ目標値に制御できていることが分かる。

以上のように、従来、冷却制御が難しいとされてきた温度領域にある目標 FCT が 450℃ の場合でも、開発した冷却制御モデルの適用により、安定製造が可能となった。

8. 結 言

以上のように、冷却装置及び制御技術を開発した成果として、冷却処理比率の推移を図 19 に示す。この 17 年間で冷却処理比率は 3 倍、最近では生産量の約半分を冷却処理しており、高機能鋼材製造、材質の均一性に寄与している。今後も冷却制御技術の向上にまい進し、鋼板製造を通じて社会に貢献していきたい。

参考文献

- 1) 矢澤武男：第 207・208 回西山記念技術講座. 2007, p. 1
- 2) Bingxing, W. et al.: Rolling2013. Venice, 2013, AIM (Associazione Italiana di Metallurgia)
- 3) 上野博則：Nippon Steel Monthly, 163 (11), 11 (2006)

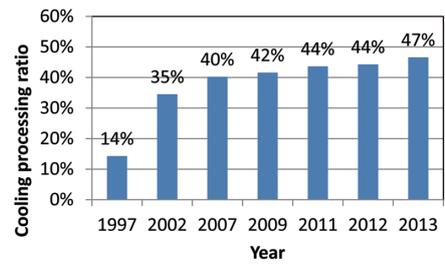


図 19 新日鐵住金における近年の冷却処理比率の推移
Recent cooling processing ratio in NSSMC

- 4) 日本機械学会：沸騰熱伝達と冷却. 初版, 東京, 日本工業出版, 1998, p. 8
- 5) 小林一暎 ほか：CAMP-ISIJ. 25, 1043 (2012)
- 6) 中村修 ほか：CAMP-ISIJ. 25, 1044 (2012)
- 7) 原口洋一 ほか：CAMP-ISIJ. 25, 1042 (2012)
- 8) 中川繁政 ほか：計測自動制御学会論文集. 45 (4), 233 (2009)
- 9) 高橋亮一：鉄鋼業における制御. 初版, 東京, コロナ社, 2002
- 10) 三原紀章 ほか：電気学会金属産業研究会予稿集. 97 (11), 17 (1997)
- 11) 栗林隆 ほか：CAMP-ISIJ. 3, 1369 (1990)
- 12) 高輪武志 ほか：住友金属. 38 (4), 406 (1986)
- 13) 佃岳洋 ほか：R&D 神戸製鋼技報. 61 (2), 75 (2011)
- 14) 角谷泰則 ほか：計測自動制御学会論文集. 50 (7), 528 (2014)



芹澤良洋 Yoshihiro SERIZAWA
プロセス研究所 プロセス技術部
主幹研究員
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



原口洋一 Yoichi HARAGUCHI
鹿島製鉄所 設備部 主幹



中川繁政 Shigemasa NAKAGAWA
大分製鉄所 設備部 制御技術室長
博士(工学)



橋 久好 Hisayoshi TACHIBANA
鹿島製鉄所 設備部 主幹



角谷泰則 Yasunori KADOYA
鹿島製鉄所 設備部 制御開発室長



岩城泰輔 Taisuke IWAKI
設備・保全技術センター
プラントエンジニアリング部 主査



山本龍司 Ryuji YAMAMOTO
君津製鉄所 厚板部 主幹



小田朋哉 Tomoya ODA
大分製鉄所 厚板部 主幹



上野博則 Hironori UENO
名古屋製鉄所 厚板部 厚板工場長