

# 討20

## 厚板のオンライン制御冷却技術の開発

日本鋼管(株) 中央研究所。神尾 寛、上野 康、吉原 直武  
 福山製鉄所 平部 謙二、大尾 和彦  
 京浜製鉄所 滝川 信敬

### 1. 緒言

厚板圧延後、ただちに制御冷却すると、高強度、高靱性および溶接性の優れた鋼板が製造できることは、冶金学的には明らかとなっている。しかし、材質のバラツキや冷却ひずみといった均一冷却の難しさ、および冷却速度のコントロールなどの問題から、近年まで厚板では実用化されていなかった。当社では、この難問を克服すべく研究を重ね、昭和55年8月、福山製鉄所厚板工場にオンライン制御冷却設備を開発し実用化に至った。ここでは、設備化を可能にした基本的な冷却方式、およびひずみ制御技術を中心としたオンライン制御冷却技術について述べる。

### 2. 冷却設備の基礎検討

均一冷却ができ、適用鋼種拡大のために冷却速度コントロール範囲が広く取れ、しかもメンテナンス性に優れた冷却方式を検討した。

#### 2.1 冷却方式

冷却開始から終了までの鋼板全面の温度履歴が合わせられれば、均一冷却は可能である。この観点から、図-1に示すように、圧延後の鋼板を一旦冷却ゾーン内に納めた後、鋼板全面に同時一斉に冷却開始し、停止する方式を採用した。上面側は一般材の圧延反りに対しても支障のない程度にノズル高さを取りたく(無拘束型)、これを踏まえて、冷却効率、冷却能力制御範囲などの総合評価から、上面側円管ラミナーフロー、下面側スプレー冷却の組合せが適切であると判断した。本冷却方式で均一冷却を実現するためには、同時一斉冷却で重要となる冷却開始および停止性の向上、そして、ラミナーフローノズル間での均一性を確保することである。この目的のために、特殊なラミナーフローノズルを開発し、ラミナーフローの噴射、停止性の向上を図った。また、ノズル間での均一冷却に対しては、ノズル間の干渉や水膜の影響などを考慮したダイナミックシミュレーション(実験、計算)を行い、板幅方向、長手方向の温度むらの小さい適正なノズル配列を検討した。ラミナーフローノズルを特殊な千鳥配列にすると、図-2に示すように、ノズル間での冷却速度のバラツキは±5%以内に納められ、材質のバラツキやひずみの面でも問題ないことを確認した。

#### 2.2 冷却能力の制御性

ノズル配列を考慮した同時一斉冷却方式により、鋼板面の冷却停止温度をほぼ均一に合せられる。また、特殊ラミナーフローノズルの開発により、下限水量範囲もかなり拡大され、図-3に示すように、薄物材に

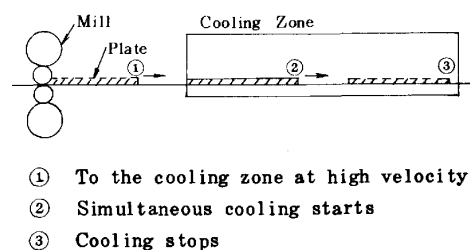


Fig.1 On-off type cooling method

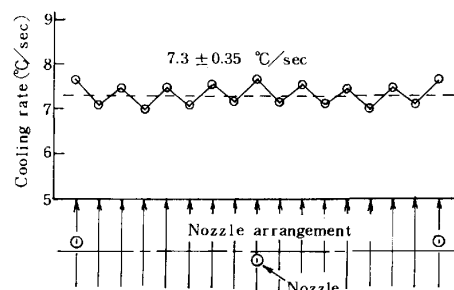


Fig.2 Cooling rate distribution

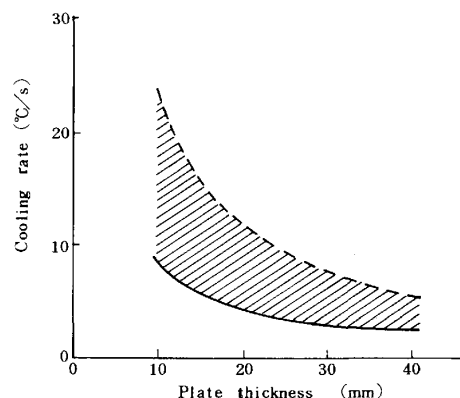


Fig.3 Controllable range of cooling rate

おいても  $10^{\circ}\text{C}/\text{sec}$  程度の冷却速度が得られるし、効率良く上限水量までの広範囲の冷却速度を冷却停止温度とともに自由に制御できる見通しが付いた。

3. 冷却ひずみの制御

ノズル間での均一性は前述したとおり、検討したが、その他に、板端部の過冷の問題、上面の滞留水の問題、および上下面の冷却能力の問題などをまだ残している。そこで、冷却ひずみ防止のために、本冷却方式での均一冷却化をさらに検討した。

3.1 上下面水量比と反り変形 上下面の冷却能力をバランスさせないと反り変形が発生する。特に、冷却中に反ると上面側の滞留水の流れの状況が変わり、上下面の不均一冷却はもちろん、板面内においても不均一冷却を起こす原因となる。このため、上下面の冷却能力をバランスさせる適正な水量比を把握することは重要である。本冷却方式は上下面の冷却方法が異なっていることや、上面側は滞留水による二次的な冷却作用があることなどから、上面側の冷却が強い。反り変形を防止するためには、下面水量は上面の  $2.0 \sim 2.5$  倍必要であり、この比率は水量が多いほど大きくなる。

3.2 冷却停止温度 水冷却では、被冷却物の表面温度が低くなってくと沸騰現象が変わり、急速に冷却能力が増大する。このためわずかな冷却むらも助長される傾向があるし、冷却停止温度制御も難しくなる。冷却実験から、ひずみ防止の面では図-4に示すように冷却停止温度は  $450^{\circ}\text{C}$  以上が望ましい。一方、当社のオンライン制御冷却は、材質上の冷却効果を得るために高温停止することを特徴としているが、これはひずみの面からも両立が図れる。

3.3 滞留水の幅方向流れの影響 板幅方向の上面ラミネーションを等水量にして冷却すると、冷却停止時の幅方向温度は、中央から端部に行くに従って低く、また、端部近辺でさらに急激に低下する2段勾配型の温度分布が付く。そして、鋼板は最終的には幅方向端部に圧縮応力が入り耳波形状となる。このような幅方向の不均一冷却の発生原因は滞留水の幅方向流れによる二次的な冷却作用によるものと思われる。図-5に板幅方向に対する滞留水の平均流速および平均熱伝達係数の分布を例示する。板端部側ほど滞留水の平均流速は増大する。また、これに対応するように平均熱伝達係数も増大しており、この増大傾向は低水量ほど顕著である。板端部近辺では、滞留水の平均流速は急速に増大しており、これに端部の3次元形状が加わって過冷されるものと思われる。

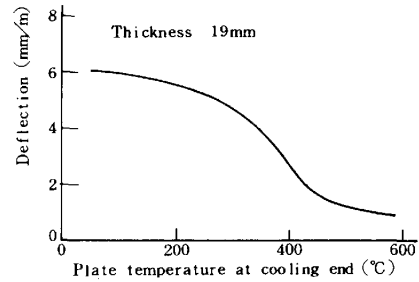


Fig. 4 Relation between plate temperature at cooling end and deflection

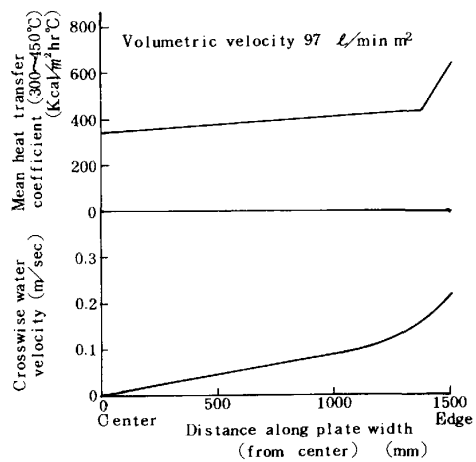


Fig. 5 Distribution of crosswise water velocity and mean heat transfer coefficient

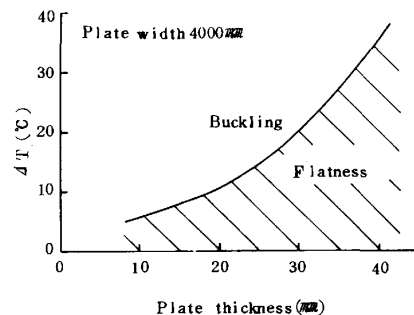
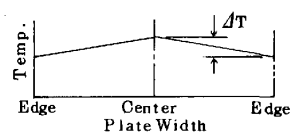


Fig. 6 Allowable temperature difference for no-buckling

3.4 幅方向温度分布と座屈限界 冷却停止時の幅方向温度分布が最終的に耳波形状を発生させるものと考え、熱弾性座屈解析により幅方向温度分布と座屈限界について検討してみた。図-6に示すように、温度分布モデルから、板幅方向の許容される温度勾配は、板厚20mmの場合、約5℃/m以下であり、これ以上大きくなると座屈することになる。また板端部の温度ドロップに対しても温度分布モデルから検討してみたが、例えば端部100mm間で許容される温度ドロップは50℃(20mm<sup>-1</sup>)であった。板幅方向の許容温度勾配はかなり小さく、低水量での冷却ではこの温度勾配だけでも座屈してしまう。一方、高水量での冷却においては温度勾配があまり付かないため、さほど問題にならないが、板端部の温度ドロップは50℃以上あるのでやはり座屈してしまう。このため、これらの不均一冷却を軽減する必要がある。

3.5 冷却ひずみ防止策 幅方向の温度勾配を軽減するために、水量分布の調整が有効である。幅中央の水量によって水量勾配は異なるが、図-7に示すように、適正な水量勾配を付ければ幅方向の温度分布は均一化できることがわかった。また、端部の温度ドロップに対してはラミナフローの部分遮蔽が効果的であり、遮蔽幅を調整することにより容易に温度ドロップを解消することができる。さらに、この遮蔽を活用して端部側の温度を高め維持するようにし、圧縮応力領域を中央側に入れるようにすると、図-8に示すように、座屈抵抗が上がり、たとえ幅方向に多少の温度勾配があっても座屈せずに平坦な鋼板が得られることもわかった。以上の検討結果から、幅方向の不均一冷却が起因する座屈の防止のために、幅方向の水量分布調整により、極力温度勾配を軽減し、さらに端部の遮蔽幅を制御することによって温度ドロップを解消する方式を取ることにした。(図-9)

4. 制御冷却設備および操業の概要

福山オンライン制御冷却設備は上述した技術をもとに設備化され、仕上圧延機とホットレベラーの間に設置されている。設備の概要を表-1に示す。冷却水は送水圧力、水量を安定化するために独立した処理水系を有している。鋼板温度は冷却開始および終了時に測定し、前者は制御因子として使用している。操業は自動化されており、要求される材質特性を得るために、材質モデル、冷却モデル、ひずみ防止モデル式などを使用して各操業条件を計算機で計算し、設

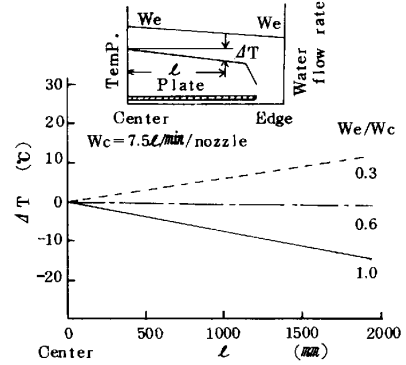


Fig.7 Relation between ratio of water flow rate (Edge/Center) and temperature difference

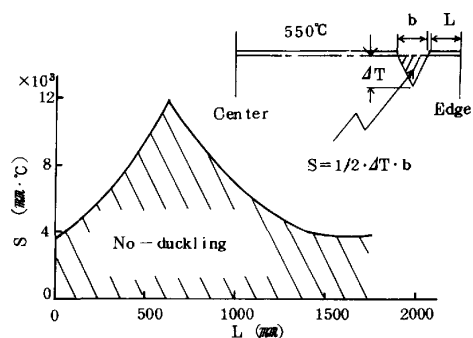


Fig.8 Allowable region of no-buckling

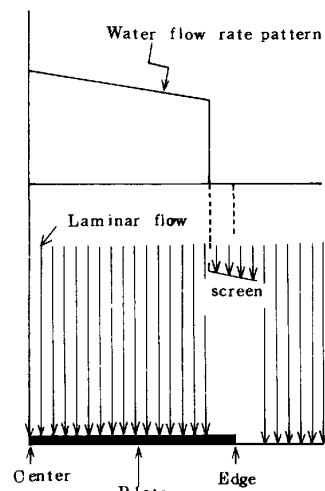


Fig.9 Control method of the uniform temperature distribution

Table 1 An example of specification for controlled cooling equipment

Item	Specification
Dimension of machine	4,500mm×44,000mm
Dimension of a product to be processed	10~75mm×4,500mm×38,000mm
Amount of water	140 ton/min
Pressure of water	6 atm
Cooling method	Simultaneous cooling type Top: Laminar Bottom: Spray
Number of cooling banks	7

定している。これにより、鋼板 1 枚ごとの制御が可能であり、材質的にも図-10に示すように板幅方向、長手方向の各位置における強度変化は  $2 \text{ kg/mm}^2$  内と均一性は良好である。また、圧延ままの鋼板に対しても、靱性を損わずに強度は上昇しており、制御冷却効果は十分に現われている。

5. 結 言

均一性、制御性および冷却効率などの面から基本的な冷却方式を検討した。さらに冷却ひずみ防止の面から、上下面水量比、冷却停止温度および幅方向水量パターンの適正化などのひずみ制御技術を確立し、オンライン制御冷却設備の開発、実用化が可能である見通しを得た。これらの技術をもとにした福山厚板工場のオンライン制御冷却設備は、温度制御性、鋼板形状および材料特性などは良好であり、59年4月末までに30万トン以上の生産実績を上げている。

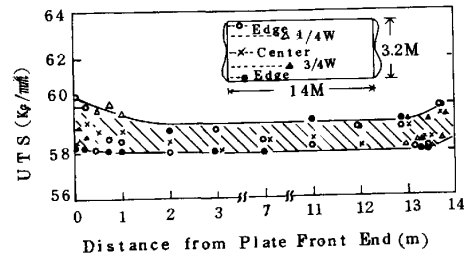


Fig.10 Hardness and ultimate tensile strength distributions in a controlled cooling plate.