



UDC 536.242 : 66.045.5 : 669.1

## 水噴流冷却の特性と鉄鋼業への応用

上野 康\*・杉山 峻一\*・国岡 計夫\*<sup>2</sup>

### Characteristics and Applications to the Iron and Steel Making Processes of Water Jet Cooling

Yasushi UENO, Shunichi SUGIYAMA, and Kazuo KUNIOKA

#### 1. ま え が き

水噴流冷却は鉄鋼製造のほとんどのプロセスで使用されており、その成否が品質・コストへ影響する大切な要素技術である。炉体、スキッド、ロールといった設備の冷却；各種熱処理のための冷却；連鑄の凝固制御；デスクレーン急冷；圧延ラインでの温度調整などさまざまな用途があるが、それぞれの冷却によつて要求される特性もまちまちである。

水冷却の基本特性としては冷却能力；均一性；省水量省動力性；制御性；保守性などがあげられよう。この内、冷却能力については研究の歴史も相当にあり、大略が把握されているが、他の特性に関する報告はほとんど見られない。

本稿では、これら基本特性につき現況と技術的ポイントを解説するとともに鉄鋼業における最近の応用例を紹介する。あわせて、水噴流冷却技術に関する今後の課題も考察したい。

#### 2. 各種冷却法の概要

各種冷却法につけられた名称は人によつて定義がまちまちであり、かなりあいまいな面もある。例えば、ラミナーフローとジェットのように区別をすることが非常に難しい場合もあるが、ここでは平田の区分に従い<sup>2</sup>～<sup>3</sup>のコメントを付け加えたい。

##### (1) ラミナーフロー冷却

水を加圧してノズルから噴射し水噴流を作つたとき、噴流の出口速度が比較的低いときは平滑な層流噴流を形成する。この噴流はある距離落下すると軸対称な振動を生じて破断にいたり液滴流となる。この層流噴流により冷却する方法をラミナーフロー冷却という。振動を生じない範囲では噴射距離が長い方が強冷却が得られること

から、噴射距離が遠く、しかも強冷却が必要な場合（例えば熱延のランナウト）に使われる。

##### (2) ジェット冷却

噴流出口速度が増すと乱流噴流となり、噴流表面にはこぶ状の乱れを生じて破断にいたる。この破断にいたる以前の連続的な噴流により冷却する方法をジェット冷却という。ペネトレーション（貫通）性能が大きく、水膜の厚い場合（例えば厚板の焼入れ：RQ, PQ）に使われる。

##### (3) スプレー冷却

水を加圧してノズルから噴出するとき、連続噴流以上の流速では液流は破断し、液滴群となつて固体面に衝突する。この液滴群で冷却する方法をスプレー冷却という。最も一般的に使用されており、各用途に合ったノズルが数多く市販されている。しかし、同一ノズルで制御し得る冷却能力範囲はあまり広くなく、しかも他の冷却法より高圧が必要である。

##### (4) ミスト冷却

水を噴霧するために加圧した空気を用い、高速空気流とともにノズルから噴射して冷却する方法をミスト冷却という。液滴を加速して冷却能力を高める目的で空気を用いる場合と、液滴をごく微粒化しあまり大きな運動量を与えず冷却能力を微細制御する目的で空気を用いる場合がある。後者を一般的にフォグ冷却と呼ぶ。空気を使用することからヘッダー・ノズル構造や配管系統がやや複雑となるが、空気から強水冷まで極めて広範囲に冷却能力を制御できる特色がある。このように広範囲に冷却を制御する場合や水の使用量に制限があり、しかも強冷却が必要な場合に有効である。

##### (5) 浸漬冷却

大量の冷却水の中へどぶ漬けにして冷却する方法を浸漬冷却という。最も単純な冷却方法で古くから使われて

昭和 56 年 5 月 6 日受付 (Received May 6, 1981) (依頼解説)

\* 日本鋼管(株)技術研究所 (Technical Research Center, Nippon Kokan K. K., 1-1 Minamiwatarida-cho Kawasaki-ku 210)

\*<sup>2</sup> 日本鋼管(株)本社 工博 (Nippon Kokan K.K.)

いるが、冷却能力のコントロールが難しい；均一性に乏しい；水温により冷却能力が大きく変わるなど問題点が多い。

### (6) 管内流冷却

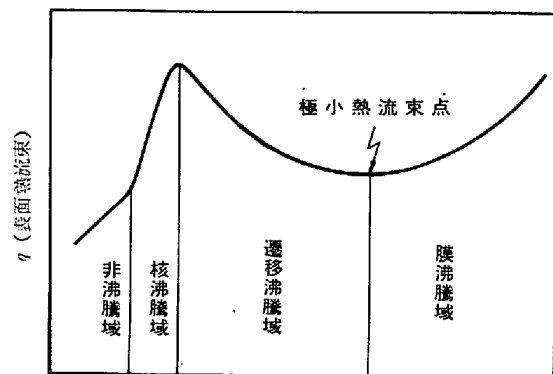
管内や平行板間に水を流して冷却する方法を管内流冷却という。水が伝熱面に平行に流れる場合と衝突する場合とでは、後者の方が大きな冷却能力が得られるように思われがちであるが、実際には自由表面を持たない状態での平行流の方が達成可能な最大冷却能力の点で優れている。弱冷却法としては不適當であるが、ノズル吐出圧力が低く高冷却均一性が得られるため、強冷却法として将来多用されると思われる。

## 3. 水噴流の冷却能力

水噴流の冷却能力は冷却設備の仕様や作業条件を決める上で最も重要な特性である。そのため、これまでの研究は、この冷却能力に関するものが大半を占め、鉄鋼製造プロセスで重要となる高温面の冷却に関しても相当数の報告がなされている<sup>2)~4)</sup>などが、研究者間のデータにはかなりのばらつきが見られる。これは高温面の冷却が沸騰を生じる複雑な現象であり、実際上解析が困難であるからである。

沸騰熱伝達の定性的説明には図1の沸騰曲線がよく使われる。近年、桜井ら<sup>5)</sup>により、加熱時と冷却時に起こるヒステリシスなどを含め、より詳細な沸騰曲線が示されているが、定性的には図のように大きく4つの領域に分けられる。ここで特徴的なことは高温になると熱流束はいつたん下がり（遷移沸騰域）極小値を持つことである。この点は冷却条件により異なり定量的には表せないが、通常の水噴流冷却ではライデンフロスト点\*より100~200°C 以上高いと思われる。

HOOGENDOORN<sup>6)</sup>は、スプレアの冷却実験からステンレス板上のライデンフロスト点を推定している。この報告によれば、ライデンフロスト点は水流密度により大きく影響を受け、水流密度  $10^{-4} \sim 2.5 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{m}^2\text{s}$  の範囲で 330~900°C である。このようにライデンフロスト点は大きく変わり得るものではあるが、いずれにせよ水噴流冷却ではかなり高温ですでに膜沸騰から遷移沸騰に移行していると考えられる。資料(7)中のミストを除いた各種冷却法の熱伝達係数算出式から推定される沸騰曲線にも極小熱流束点は存在せず、あたかも遷移沸騰がいつまでも続くかのようである。これらの結果からは水噴流冷却では非常に高温か弱冷却の場合を除き完全な膜沸騰は存在し得ないようにも思われる。しかしいずれにせ



ΔTsat (表面温度-水の沸点 (100°C))

図1 沸騰曲線

よ水噴流の冷却能力は表面上での流れを強度に乱すことや、表面上での流れに急激な速度勾配を持たせること、あるいは噴流と表面との接触頻度を増やす（ライデンフロスト点を上げる）ことなどによつて向上することは確かであり、噴流の持つ運動量の強い関数となつていくことが予想される。

水噴流の冷却能力を支配する種々の因子に対する評価は、各研究者間で必ずしも一致しているわけではないが、大まかには表1のように整理できると思われる。

これらのうち水流密度・表面での流速・噴射距離は、衝突点で水噴流が持つ運動量に関する因子なので、これらをまとめて「運動量」という一つの因子として整理できそうである。国岡ら<sup>9)</sup>はこの考えに基づき、ラミナーフロー、スプレー、ミストなどの冷却能力を各表面温度ごとに統一的に整理し、良好な結果を得ている。この結果だけを次に示す。表2は各種冷却法に個々の流れ状況をすべて管内流のような完全連続流体の場合に換算した時の代表長さとして算出した代表長さと代表速度を示した表である。図2はこのようにして算出した代表長さと代表速度を用いて熱伝達係数を無次元化整理した一例であり、一本の線で高精度に推定できることがわかる。また、表3は各表面温度での水噴流熱伝達係数の回帰式を示している。この回帰式は、これまでに提案されている熱伝達係数算出式と比べ精度的に優れている点と、各種冷却法を統一的に整理している点で評価されよう。

問題は、この回帰式が実験室データを基として作られたものであり、外乱因子が数多く考えられる実ラインの冷却に対しては相当の誤差があり得る点である。従つて実ラインでの各種冷却法の冷却能力を推定する場合には、資料(7)の P. 98~P. 99 の冷却能力推定式のまとめを参考にされることを勧める。

## 4. 水冷却の均一性

均一に冷却できるかどうか冷却プロセスの成否、優劣に直結していることがしばしばある。特に、鋼材の熱処理を目的とした冷却では均一性こそ重要な課題となる。

\* ライデンフロスト点

1756年 Leidenfrost は赤熱鉄板上の水滴の挙動から赤熱鉄板上の水滴は直接鉄板に触れず蒸気層を通してその上に水滴があることを明らかにした。しかし徐々に鉄板の温度を下げて行くと蒸気層がなくなり水滴が鉄板表面を濡らすようになる。この時の鉄板温度をライデンフロスト点という。この温度以下では冷却能力は急激に増大し、多量の蒸気が発生する。

表 1 水噴流冷却能力の因子

因子	冷却法					
	ラミナーフロー	ジェット	スプレー	ミスト	浸漬	管内流
水流密度	○	○	○	○	—	—
表面での流速	○	○	○	○	○	○
噴射距離	○	△	×	×	—	—
表面温度	○	○	○	○	○	○
水温	△	△	△	△	○	△
液滴径	—	—	×~△	×~△	—	—
表面性状	△	△	×	×	△	△
ノズル配列	○	△	×	×	—	—

○ 支配的因子, △ 二次的因子, × 無視し得る因子, — 適用不可

表 2 代表長さとして代表速度の算出法

冷却法	代表長さ $\delta$	液滴衝突(水流)速度 $v_0$	代表速度 $v$	測定量
ラミナーフロー	$\delta_l = d^2/8r$	$v_0 = \sqrt{v_e^2 + 2gh}$	$v = \sqrt{w_0 v_0}$	$v_e, h$
スプレー	$\delta_s = (d/4) \sqrt{w_0/v_e} (v_e/v_0)$	$v_0 = \frac{1}{2} \frac{\rho_f}{\rho_g} w_0 \left( \sqrt{1 + 8 \frac{\rho_g}{\rho_f} \frac{Pg_c}{\rho_f w_0^2}} - 1 \right)$	〃	$P, w_0$
ミスト	$\delta_m = (S/2) (w_0/v_0)$	〃	〃	$P, w_0$
噴水	$\delta_f = d^2/8r$	$v_0 = \sqrt{2g(h_0 - h_1)}$	〃	$h_0, h_1, d$
管内流	$\delta_k = d$	$v_0 = v$	$v = v$	$v$

ここで  $d$ : ノズル, 噴水, 管径  $h$ : ノズル高さ  $r$ : よどみ点からの距離  $\rho_f$ : 水の密度  $w_0$ : 水流密度  $g$ : 重力加速度  $g_c$ : 重力換算定数  
 $h_0$ : 自由噴水柱高さ  $h_1$ : 水面・板間距離  $\rho_g$ : ガスの密度  $v_0$ : ノズル出口流速  $P$ : 衝突圧力  $v_0$ : 衝突点での流速  $S$ : スリット幅

表 3 水噴流熱伝達係数の回帰式

表面温度 °C	回帰式
50	$Nu = 19.4 \times 10^{-3} Re^{0.8} Pr^{0.4}$
200	$Nu = 6.41 \times 10^{-3} Re^{0.88} Pr^{0.4}$
400	$Nu = 3.40 \times 10^{-3} Re^{0.94} Pr^{0.4}$
600	$Nu = 1.43 \times 10^{-3} Re^{0.99} Pr^{0.4}$
800	$Nu = 0.75 \times 10^{-3} Re^{0.99} Pr^{0.4}$

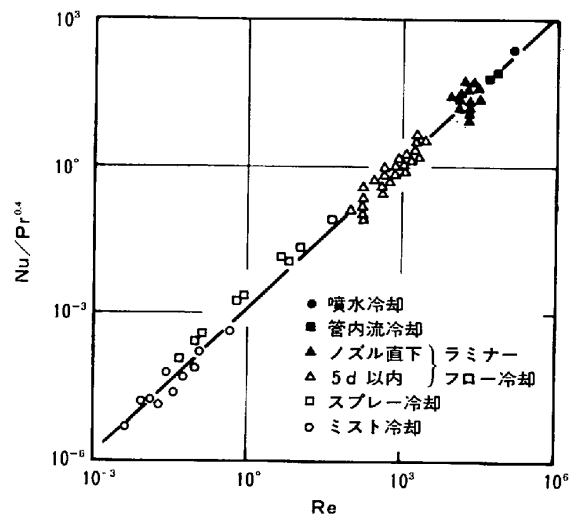
ここで  $Nu$ : ヌッセルト数  $= \alpha \delta / k$   $Re$ : レイノルズ数  $= v \delta / \nu$   
 $Pr$ : プラントル数  $= \nu / \alpha$   $\alpha$ : 熱伝達係数  $k$ : 熱伝導率  
 $\nu$ : 動粘性係数  $a$ : 熱拡散係数

例えば、板状の熱間材を冷却する場合、表裏面の冷却差は反りとして、板面内の冷却差は座屈波として熱変形し、形状を損うのみならず材質の不均一をもまねく。また、不均一残留応力としても蓄積され、需要家使用段階でトラブルとなることもある。

4.1 表裏面冷却アンバランスと反り

図 3 に、上下面の冷却能力比と反りの関係を示す。本図は、上面ラミナーフローと下面スプレーの組み合わせで鋼板を移送冷却した時の実験例である<sup>17)</sup>。上下面の平均冷却能力をバランスさせ反り変形をなくすには、下面水量は上面の 2~3 倍をも要し、この比は水量密度が高いほど大きくなる。

薄いストリップでは上下面冷却能力がアンバランスでも熱拡散と自重拘束のため反りは発生しにくい、板厚が厚くなると問題が顕在化してくるので上下面水量比を



ここで  $Re$ : レイノルズ数  $= v \delta / \nu$   
 $Nu$ : ヌッセルト数  $= \alpha \delta / k$   
 $Pr$ : プラントル数  $= \nu / \alpha$

図 2 各種水噴流冷却法の熱伝達係数

適正に選択する必要がある。

4.2 板面内の不均一冷却と制御

さて、前述の例で上面側の方が冷却効率が良いのは、ラミナーフローとしての強冷却を終えたあとも鋼板上に滞留、流動して広い面積にわたり 2 次的冷却作用をおこすためであるが、このような上面流動水は板面内の不均一冷却の原因ともなりやすい。

いま、棒状ラミナーフローが鋼板上に落下したあと板

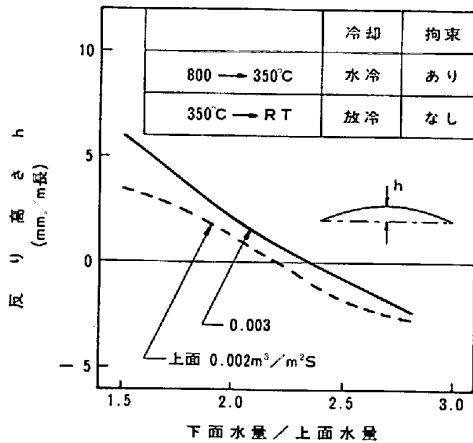


図 3 上下面水量比と反りの関係

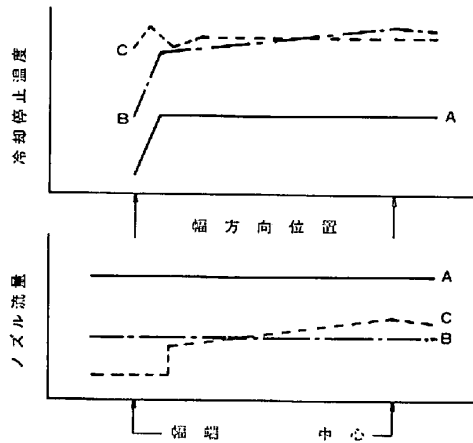


図 4 板幅方向の温度分布

幅方向へ流動して排出される条件を対象とすると、その冷却能力分布は図4のようになる<sup>17)</sup>。ノズル流量を幅方向で均等にしておくと、水量密度が少ないケースBでは2段勾配型の温度分布がつき、端部側が冷却されやすい。水量が多いケースAでは、中央側の分布は改善されるが端部の過冷は残る。このような冷却能力の分布は、幅方向へ流出する水の流速が落下水の集積効果によってエッジ側ほど加速され、2次冷却度が増すためと思われる。結局、冷却後に均一な温度分布をうるには、図4のケースCのような流量パターンが必要となる。

4.3 冷却停止温度と不均一性

鋼材熱処理の冷却では、ある温度で水冷却を停止させることが多いが、温度むらは停止温度レベルによつて大きく影響される。特に、ライデンフロスト点以下で停止させる場合は冷却水が鋼板面へ濡れてしまい、冷却中の均一性と水切り条件のいかんでは高熱伝達効果とあいまって温度むらが拡大的に出てくる。さらに常温近くで停止する場合はみかけには停止温度むらは縮小するが、その途中過程での温度差による形状問題は残る。いずれにせよ、不均一原因の除去と水切り対策が基本となる。

4.4 熱伝導にもとづく不均一

材質不均一のもう1つの形態として、熱伝導にもとづ

く問題もある。すなわち、厚物鋼材を連続的に強冷すると表面と内部の冷却速度の差が大きくなりすぎ、組織や機械的性質の分布がついてしまうこともある。間歇冷却によつて、表面の急冷・復熱をくり返しつつ内部側との冷却差を縮少するようにくふうをしいられることがある。

以上に不均一冷却の代表例をいくつか述べたが、これらに関連した報告はほとんどない。均一性向上のためには、流動水・滞留水の2次の冷却現象の把握と流れ分布のコントロールがもつとも大切のように思える。冷却方式と均一性の関連については、ケースバイケースとみた方がよいが、ミスト方式と管内流型は均一性の確保が比較的容易とみえる。

5. 省水量・省動力

一貫製鉄所で用いられている全水量は約 140 m<sup>3</sup>/粗鋼 t と推定され、この大部分が水冷却を目的としたものである。循環使用に要する動力をエネルギー単位に換算すると、約 15 × 10<sup>4</sup> kcal/粗鋼 t となる。多量に水を使用する代表は高炉、連铸、熱延であるが、このうち熱延工場ではデスクーリング、ワークロール冷却を目的とした中高圧水が相当に使われており、水冷却コストが比較的高い。

今後は、水冷却プロセスを評価する尺度として、省水量・省動力性が1つの視点となる。すなわち、所望の冷却性能を得るのに、できるだけ低圧少量の水ですむ方法が大切である。以下に、省水量の基本的考え方を述べる。

5.1 ラミナーフローの適正使用

省水量の基本は単位水量あたりの奪熱量が多い冷却方式を採用することにあるが、これに関する報告<sup>18)</sup>がほとんどないため確立された選択基準はない。そこで、他の

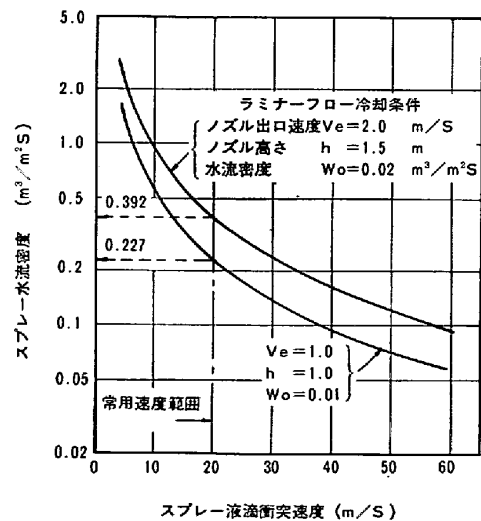


図 5 ラミナーフロー相当の冷却能力を得るためのスプレー液滴衝突速度とスプレー水流密度の関係

研究者のデータも含めて良好な整理結果をえている表 2, 3 の実験式を用いてラミナーフローとスプレーの冷却能を比較してみた。

図 5 に各種ラミナーフローの平均冷却能力 (ノズル径の 5 倍以内の範囲) に匹敵するスプレー条件を示す。スプレー液滴の衝突速度を 20 m/s とすると、スプレーの方が 20 倍以上もの水量を必要とすることになり、いかにも常識をはずれているようにも思える。しかしこれは、非常に強冷却の範囲でラミナーフローとスプレーを比較していることに起因するものである。すなわち、本質的にラミナーフローの方がスプレーより冷却能力が高く、特にノズル径 5 倍以内でのラミナーフローの平均冷却能力は非常に高く、スプレーでこのように高い冷却能力を得ることは実際困難であることを意味している。

もちろん実設備では鋼板上の水膜、流れの相互干渉、板速度の影響、ラミナーフローの乱れなど特にラミナーフローの冷却能力を顕著に下げる要因があり、これ程の大きな差にはならない。例えば田中ら<sup>16)</sup>によれば、ラミナーフローの冷却能力は板速度と負の相関があり、ノズルピッチなどの条件しだいでは板速度が 50~100m/min で静止状態の半分以下になることもあり得る。しかし、ラミナーフローを適切な条件で用いればスプレーよりはるかに少ない水量で所定の冷却能力を得ることができることは確実であろう。

5.2 噴水式下面冷却<sup>9)</sup>

4 章でふれたようにスプレーによる下面冷却が上面ラミナーフローと同じ平均冷却能となるためには、上面の 2~3 倍の水量を要し、冷却効率が悪い。

いま、図 6 のように水槽底部から水噴流  $Q_n$  を上方へ噴射すると水槽の水が同伴されて水面から噴出する水量は  $Q_t > Q_n$  となり、鋼板下部へ衝突する水量は投入水量の数倍となる。衝突水は重力で水槽へ落下し、水槽の水位はオーバーフローにて一定高さに維持される。このような噴水式下面冷却では、冷却水が有効に接触している面積がスプレー式に比して極めて大きくなる特徴もある。結果として、投入水量あたりの奪熱能力は上面ラミナーフローなみのものが設計可能であり、水量低域に有効である。

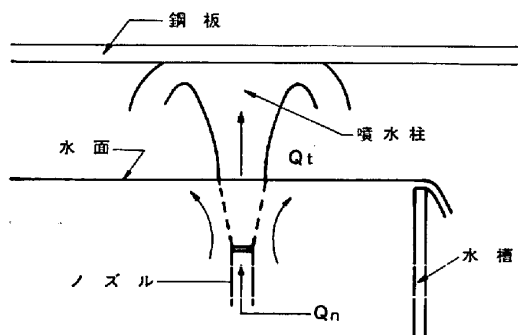


図 6 噴水式下面冷却

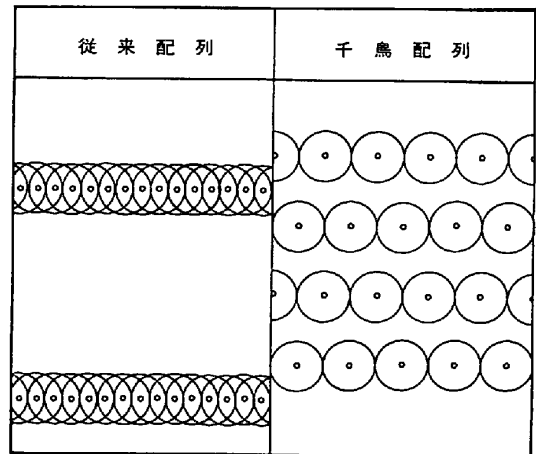


図 7 ラミナーフローノズル配列

5.3 ノズル配列の適正化<sup>9)</sup>

ラミナーフローのノズル配列として、図 7 の従来タイプと千鳥タイプの 2 つの代表例が考えられる。従来タイプは幅方向ノズルピッチを詰めて、長手間隔をとつたもので熱延ランナウトに多用されている。この方式はラミナーフロー直下の高熱伝達域が重なり合うため幅方向の冷却能力差がないことが特徴となるが、冷却効率は悪い。

千鳥タイプは同じ水量密度で冷却速度が約 1.5 倍に向上する。ただし、幅方向の冷却速度差は平均値に対して、±4~5% 以内で変動する。高度の冷却均一性が要求されない限りは千鳥タイプの方が省水量型である。

5.4 水量分配の適正化

水量密度の高い HQ (ハイクエンチ) ゾーンと比較的少ない LQ (ロークエンチ) ゾーンを順次通過させて厚板を焼入れする場合、HQ と LQ の適正配分によつて全体水量を低減できる。

図 8 は、板厚中心冷速に及ぼす HQ 時間の影響例を

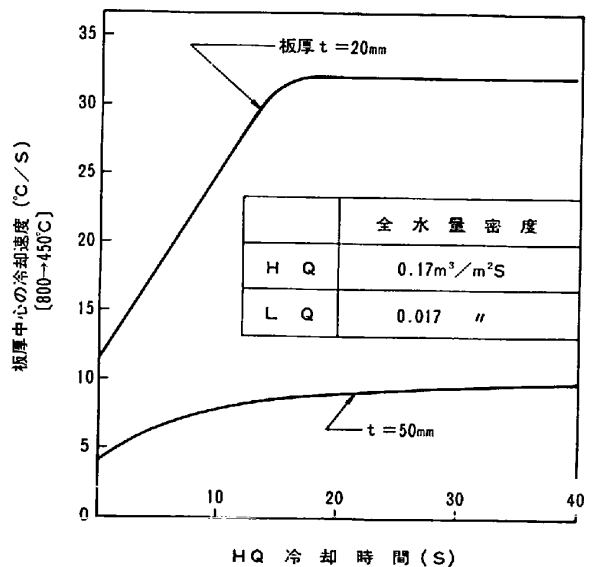


図 8 焼入れ冷却速度とハイクエンチ時間の関係

示したものである<sup>17)</sup>。HQ 時間がある時間を超えると焼入冷速はほぼ飽和してしまい、それ以上の HQ 時間をとつても全水量がいたずらに増えるばかりである。

厚板の焼入れでは熱流束が最大となる表面温度が約 300°C になるまで HQ で急速冷却し、以降は LQ に切り換えて表面温度を徐々に下げるのが全体水量の低減につながる。板厚が厚くなると伝導律速となり HQ の影響が鈍くなる。

## 6. 水冷却の制御性

低コスト型の高品質鋼を製造するために鋼材の熱的履歴と塑性加工歴を最適化する加工熱処理技術が普及してきており、水噴流冷却に対しても高い制御性が望まれるようになってきた。

例えば、熱延ランナウト冷却の制御によつて 2 相組織型の低降伏比ハイテンを圧延ままで製造する方向が検討されているが<sup>10)</sup>、この場合は単に巻き取り温度を制御するのみならず時間的要素を含めた温度経過そのものを制御する<sup>11)</sup>こととなる。かかる高度な制御を精度よく実現するためには、水冷却現象を十分に反映した冷却モデル式をベースに計算機制御を構成する必要があるが、従来モデル式は総括的、簡便的なものが多く、精度向上はなかなか難しい。

例えば、上面側からの水噴流は鋼材に落下、衝突して 1 次冷却を終えたのちさらに上面に滞留、流動、排出しながら 2 次冷却を少なからずおこし、冷却現象を複雑なものとしている。滞留水の流体的挙動と冷却効果は形状、幅、速度、投入水量、時間的累積によつて影響をうけるほか水温依存性などが 1 次冷却と異なるなど高精度な計算機モデルをうるのは相当に困難である。今後とも冷却を要素別に細分化した定量化努力はされようが、滞留・流動水の排出方法、水切り強化などのハード的対応が十分でないとは高精度制御は難しい。

その他のハード的問題として、冷却ノズルの水量制御性があるが、これを表 4 に示す。ミスト冷却は、水量調整によつて冷却能力が大幅に制御できる。スプレーの場合は、ノズルヘッダー圧が相当に高くないと制御範囲が広くならず、従つてゾーンコントロールが主体となる。ラミネーターは流量の変更範囲が比較的大きくとれるが、回転樋などによる機械的 on-off を併用すればさらに制御性が向上する。

表 4 冷却ノズルの水量制御性

	水量の最大 / 最小比	下 限	上 限
スプレー	2~3	液滴条件	圧力限界
ラミネーター	4~7	on-off 性	Re 限界
ミスト	∞	気体のみ	圧力限界

## 7. 鉄鋼業への応用

これまでに述べてきた冷却能力、均一性、省水量、制御性などの観点からみて比較的特徴のある水冷却設備をいくつかピックアップし、その基本的考え方と特質を紹介する。

### 7.1 厚板圧延後の加速冷却<sup>12)</sup>

圧延後に特定の温度域を 5~15°C/s で加速冷却(OLAC) すると靱性を損なうことなく強度の上昇があり、特に CR 効果と組み合わせると靱性、強度、溶接性の優れた厚板が経済的に製造できる。

圧延反りへの対応のためノズル高さがパスラインより約 1.5 m が要求され、このように距離がある状態でなおかつ強冷却能を維持するにはラミネーターフローが最適である。上面円管ラミネーターフローと下面フラットスプレーが採用された。

OLAC では冷却ひずみ防止と材質均一性に特に注意を払つた。厚板上面の流動水の挙動を把握し、板幅方向の投入流量分布の制御(図 4 の C パターン); 板長方向の前後端の注水時間を中央定常部と変えるような冷却時間差制御によつて板面内均一冷却を図つたほか上下面水量比を最適化した。(図 3 参照) 省水量の観点では図 7 のような千鳥型ノズル配列をとつた。

### 7.2 大径溶接鋼管の焼入れ<sup>9)</sup>

大径鋼管の焼入れでは強冷却能と均一性が要求される。特に、大径管の矯正は難しいので良好な形状が維持できるような均一冷却性が肝要である。

外面冷却方法を図 9 に示す。鋼管に衝突した水噴流はできるだけ飛散せずパイプ外面に沿つて流れるように伏角、横角をもつて噴出させる。中央部にて反対向きの旋回流と衝突させ、狭い干渉帯を通して水を排出させるような流れコントロールにくふうがある。内面は、不均一のもとなる滞留水を少なくするためミスト方式とし、回転も加えた。

強冷却のニーズとも勘案し、外面ラミネーターフロー(低速ジェット)、内面ミストによる冷却方式が最適であつた。

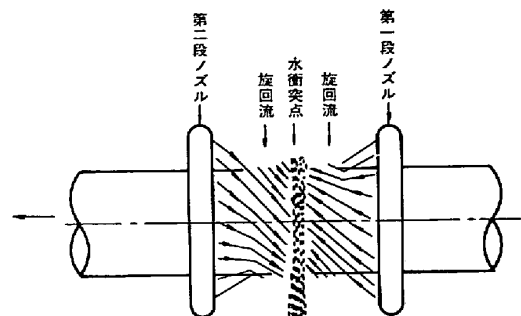


図 9 鋼管焼入れ外面冷却

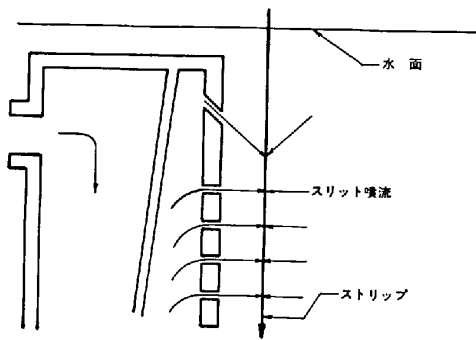


図10 ストリップの水焼入れ

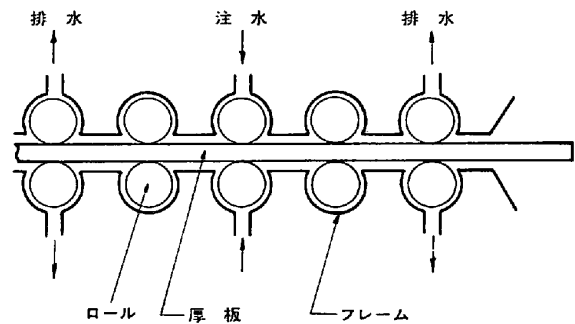


図11 厚板焼入れ装置

### 7.3 ストリップ連続焼なましにおける水焼入れ

ストリップ連続焼なましによつて軟質鋼板あるいはハイテンを製造するにあたり水焼入れが重要な要素技術となる。しかし、蒸気膜がエッジから消滅しはじめ中央部にまだらに残るような挙動があり、板面内の温度差によつてストリップ形状は悪くなる。十分な平坦度を得るには蒸気膜を強制的に除去し、板全体が一様に濡れに近い状態になるのが望ましい。

図10のようなスリットノズルから噴流を与え、その衝突噴流圧が15 cm Aq以上とすると蒸気膜が効果的に除去されて良好な形状がえられる<sup>13)</sup>。逆に、90°C近い温水中へストリップを焼入れて、板全体を蒸気膜で均一に覆つてしまい、蒸気膜が存在する温度域で焼入れ停止する考え方もある。

### 7.4 厚板の直接焼入れ

圧延後の保有熱を利用したオンライン直接焼入れが省エネルギーの有効手段として指向されており、高効率かつ均一性の優れた冷却設備の開発が望まれる。図11に示した厚板焼入れ設備は、このようなニーズに適合したユニークな冷却法の1つである<sup>14)</sup>。注入された水噴流は高速で板表面上を長手方向へ流れ排水される方式であり、管内流冷却のごとく単位体積水が高温面へ接触チャンスが多いため投入水量あたりの奪熱能力が優れている。(フレームと板面のギャップがあまり大きくない範囲で) また、水の流れが板長方向にそろつており、板幅方向に温度分布を作る要因が少ないため、冷却ひずみが発生しにくいこと及び低圧水ですむことなどが評価される。

### 7.5 ミスト冷却による連铸2次冷却<sup>15)</sup>

連铸片の熱片装入あるいは直接圧延が省エネルギーの不可欠技術となつてきており、铸片表層割れの防止が重要である。モールド内で発生した表層割れの核あるいは不均一シェルが2次冷却帯で拡大、破壊されないようにシェル熱応力を緩和することが必要であり、このような観点からミスト冷却による2次冷却法が開発されたことが注目される。

ミスト流はピンチロールの間隔長全体に衝突し、長手方向の熱伝達分布が均一化される。さらに、同じ冷却能を得るのに従来スプレーよりも水量が少なくすむため

ピンチロール溜り水が減少し、ロール直下での急冷が緩和される。すなわち、表面温度のロール間での変動幅が小さくなり、縦割れを誘起する表面応力の緩和に極めて有効である。また、単ノズルでの冷却有効幅が大きく、ノズル数の減少とノズル詰まり防止などメンテナンス面での有利性がある。

## 8. 今後の課題

冷却能力については実験室データを中心におおよそ明確にもみえるが、いざ適正な設備仕様・操業条件などを定めようとするとき不足、不明な点が目立つ。実規模設備における冷却水の流れ挙動が実験室条件と相当に異なるなど従来資料のみでの判断は正確とはいえない。ましてや、均一性、制御性、保守性などの重要な特性がほとんど検討、公表されていない現状では、水冷却の技術レベルは全体として高くない。今後とも、既存プロセスのレベルアップとか新プロセス開発の要素技術として充実に要するが、これらへ対応していくには次に列挙するような項目が課題と思われる。

- (1) ノズル配列にともなう噴流間の相互干渉の影響
- (2) 被冷却物の速度の影響
- (3) 滞留・流動水の2次の冷却効果
- (4) 水温の影響
- (5) 局所冷却能力と全体(平均)冷却能力との関係
- (6) 超高温領域(1000°C以上)と低温領域(50~200°C)のデータ充実
- (7) 噴射角度の影響
- (8) 温度分布と熱変形・熱応力との関係
- (9) 高均一性あるいは省動力型・強冷却能力をもつ冷却新技術の開発(スリットノズルラミネーションの有効利用などを含む)
- (10) 各種冷却法の選択基準の確立など数多くの項目が未解決である。これらの大部分は互いに影響があり、また実験室的な検討だけでは評価が難しい。今後の研究にあたっては実ラインでの精度のよい測定などが必須であり、工場と研究開発部門の一体化がより大切とならう。

### 文 献

- 1) 第35回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編(1975), p. 48
- 2) H. MÜLLER and R. JESCHAR: Arch. Eisenhüttenw., 44(1973)8, P. 589

- 3) E. A. MIZIKAR: *Iron Steel Eng.*, (1970) 6, p. 53
- 4) 石谷清幹, 中西重康, 水野 稔, 曾根正男: 第8回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1971), p. 145
- 5) A. SAKURAI and M. SHIOTSU: *Proceedings of the fifth International Heat Transfer Conference*, 4(1974), P. 81
- 6) C. J. HOOGENDOORN and R. den HOND: *Proceedings of the fifth International Heat Transfer Conference*, 4(1974), P. 135
- 7) 熱経済技術部会鋼材強制冷却小委員会: 鋼材の強制冷却. (1978), p. 98 [日本鉄鋼協会]
- 8) 杉山峻一, 野口孝男, 神尾 寛, 国岡計夫: 日本鋼管技報, (1981) 88, p. 39
- 9) 上野 康, 野口孝男, 日高幸男, 梶田道則, 細谷一夫: 鉄と鋼, 67(1981) 4, S363
- 10) 青柳信男, 小川洋三, 滝沢昇一, 西田 稔, 間野純一, 加藤俊之: 鉄と鋼, 67(1981) 5, S508
- 11) 三宅祐史, 西出輝幸, 宇谷正一, 池永孝雄, 井上利夫, 高木 清: 川崎製鉄技報, 10(1978) 1, p. 58
- 12) 東田幸四郎, 山崎喜崇, 松本和明, 長嶺多加志, 平部謙二, 有方和義: 鉄と鋼, 67(1981) 4, S340
- 13) 中岡一秀, 荒木健治, 久保寺治朗: 鉄と鋼, 62(1976) 6, p. 634
- 14) J. LECLERC, C. ARNAND, B. DUQUAIRE, M. JEANNEAU: *Proceedings of International Conference on Steel Rolling*, 2(1980), P. 1321
- 15) 桑原達朗, 常岡 聡, 山本利樹, 河野拓夫, 麻生寿郎, 和気 誠: 鉄と鋼, 67(1981) 4, S173
- 16) 田中重雄, 鈴木信次郎, 大森舜二, 柳 謙一: 三菱重工技報, 3(1966) 7, p. 24
- 17) 私信