

日本鉄鋼協会共同研究会熱経済技術部会冷却技術研究小委員会

© 1988 ISIJ

委員会報告

## 最近の鋼材冷却技術

委員長 福田 脩 三\*

Cooling Technology Subcommittee, Heat Economy Technology Committee, The Joint  
Research Society of ISIJ  
Recent Development of Cooling Technology in Japanese Steel Industry

Shuzo FUKUDA

## 1. 背 景

わが国の鉄鋼業においては、昭和40年代の後半から、プロセスの合理化・省力化、および製品の高級化・多様化に対応すべく、プロセス技術の研究・開発が極めて活発に行われた。周知のように、鉄鋼プロセスには加熱・冷却の工程が数多く含まれており、加熱技術、冷却技術に関してもこの例に漏れず、多くの研究・開発努力が払われ新技術として実用化されたものもかなりの件数にのぼる。

このうち、製品である鋼材の冷却技術に関しては、特に目覚ましい発展があつた。つまり、冶金学的な製品技術としてのTMCP (Thermo-Mechanical Controlled Processing) の進歩に伴うオンライン熱処理設備の技術開発ニーズの高まりがあり、冷却に関する基礎研究、および設備・操業技術の開発的研究が極めて盛んに行われ、新設備の実用化も顕著なものがある。これらは製造コストの低減、製品品質の向上、新製品の開発、製品の高付加価値化を達成したものであり、わが国鉄鋼業の国際競争力向上に多大の貢献をしたものとして、国内・国外から高く評価されている。

以上のような研究・開発・実用化の過程は、鉄鋼協会をはじめとする内外の学会の場において活発に報告されており、冷却に関わる技術は、鉄鋼製造におけるプロセス技術の一分野として、確固たる地位を占めるに至つたと言えよう。

熱経済技術部会としては、既に昭和51年4月から約1年半、「鋼材強制冷却小委員会」の活動があり、当時、研究・開発の気運が盛り上がり出した冷却技術につき、

基本的なまとめを行つている。この結果は鉄鋼協会から、「特別報告書 No. 29」として公刊され、鉄鋼のプロセス技術の開発にたずさわる多数の研究者、技術者に好評を博した。しかしながら、この小委員会から現在に至る約10年間、新たに発表された冷却に関する新技術、および新設備は、きわめて多くのプロセスにおいて多様な発展を見せており、また基礎研究も活発に行われ、学問的にも高度なレベルにあるものも多い。

以上のような背景から、熱経済技術部会では研究小委員会を組織し、鉄鋼プロセスにおける最新の冷却技術に関する整理・評価と取りまとめを行うこととなつた。

本小委員会は、このような経緯で発足したものであるが、前小委員会で扱つた内容との重複はなるべく避け、最近の10年間に的を絞る。わが国の鉄鋼業各社から発表された、冷却技術に関する基礎研究、および実用化された、または実用化の過程にある新技術・新設備に重点を置き、技術的視点からの横断的・統一的整理、評価を最新の技術情報にもとづいて行つた。その目的とするところは、今後の冷却技術、ひいては鉄鋼プロセスにおける設備技術のいつそうの進歩・発展に寄与しようということである。

## 2. 活 動 状 況

本小委員会は、昭和61年4月から昭和62年9月まで約1年半にわたり、8回の研究委員会と3回の編集委員会を開催し、活動を行つてきた。委員は表1に示すように鉄鋼各社の研究所、および製造現場の技術者・設計者で構成されており、基礎的な面と、製造現場における要求をぶつけ合い、討議する上で好適な構成であつたと

昭和63年3月2日受付 (Received Mar. 2, 1988)

\* 本会共同研究会熱経済技術部会、冷却技術研究小委員会委員長 NKK 研究総務部調整室次長 (Technical Coordination Sec., Research Administration Dept., NKK Corporation, 1-1 Minamiwatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

Key words : steel product ; cooling ; thermomechanical treatment ; process control ; thermal efficiency ; continuous casting ; controlled rolling ; rolling equipment ; continuous annealing ; heat transfer.

表 1 委 員 構 成

	氏 名	会 社 名	事 業 所 名
委 員 長	福 田 脩 三	N K K	技 術 開 発 本 部
副 委 員 長	高 島 啓 行	住 金 鉄	綜 合 技 研
委 員	大 竹 一 史 (旧)	新 日 鐵	広 畑 研 究 所
	溝 口 良 平 (新)	新 日 鐵	広 畑 研 究 所
	鈴 木 孟 文	新 日 鐵	第 三 技 研 業
	武 藤 振 一 郎	新 川 鉄	千 水 研 究 所
	小 橋 正 満	川 鉄	水 島 山 研 究 所
	栗 原 正 典	N K K	福 和 機 械 加 工 所
	北 村 公 郎	住 神 鋼	山 研 究 所
	高 塚 隆 夫	神 大 愛	加 古 一 生 産 技 術
	峯 追 和 明	神 大 愛	加 古 一 生 産 技 術
	山 口 研 三	中 山	第 一 本 社
	田 中 康 日 古	中 山	第 一 本 社
幹 事	田 頭 基 司	N K 鋼	本 社 付 研
協 力 者	森 高 満	神 鋼	機 械 研
事 務 局	竹 内 正 幸	鉄 鋼 協 会	

(昭 63 年 1 月現在)

言える。

研究活動は次のような方針に従って進めた。

本小委員会の活動にあたり最も苦慮した点は、10 年前の前回小委員会活動結果との関連である。委員会の初期の活動時期に、この点につき全員で討議の結果、次のような基本方針で活動を進めてゆくこととした。

(i) 前回小委員会から以後、研究・開発・実用化の各領域において、それぞれ顕著な進歩のあつた技術を主な対象とする。

(ii) 前回小委員会の報告書内容の見直し、再整理は行方が単純な重複となるような部分は調査対象としない。

(iii) 冷却技術の周辺の技術領域で、冷却にたずさわる技術者が知っていることが望ましい事柄も対象とする。

以上のような視点に立ち、委員会活動を続け、その結果を報告書として取りまとめ、昭和 62 年 11 月、第 81 回熱経済技術部会にて報告した。報告書は基礎編と応用編に分かれ、基礎編は伝熱現象の基礎理論と、冷却に関する基礎的な実験・解析法(特に熱伝達係数の算出法)、各種冷却法による冷却能力の推定式の各章の他、基本方針の(ii)に該当する章として、熱応力(熱変形)および鋼材冷却の冶金的背景に関し、冷却技術者としての基礎的素養についてまとめている。

応用編は各プロセスごとに、基本方針の(i)および(ii)に該当する技術に関しまとめている。具体的には以下のようなものである。

- ① 連続铸造二次冷却におけるミスト冷却
- ② 厚板制御冷却設備
- ③ 熱延ランナウトテーブルにおけるスリットラミナ、および下面冷却
- ④ 形鋼冷却設備
- ⑤ 鋼管冷却設備
- ⑥ 棒鋼仕上ミル~冷却床間冷却設備
- ⑦ 線材仕上ブロックミル~捲線機間、捲線機~集束機間冷却設備
- ⑧ 薄板連続焼鈍ラインにおける一次冷却設備

応用編ではこれ以外に、冷却設備の設計等にあたり留意すべき事項として、ノウハウに属するようなことも含めて章としてとりまとめ、最後に付録として熱物性値と機械的物性値を付してある。

研究活動の実際にあつては、主に最近 10 年間に公表された文献に基づき調査し、各章・節ごとに担当者を決め、統一的まとめ、横断的整理を行つたが研究委員会段階での討議は全員参加で行い、委員各自、直接担当でない部分の理解も十分に深まつた。研究・調査活動の過程で、一部、各社にアンケート調査を依頼する必要が生じ、連铸、厚板、熱延、鋼管、棒鋼、線材の各プロセスについて、関係者の絶大なる御理解のもと詳細かつ貴重なデータを採取することができ、研究活動内容の充実が図れたことは研究小委員会として深く感謝するところである。

以上のような研究・調査の結果を報告書としてとりまとめた。応用編の各プロセスにおいては、基本方針の(i)、(ii)で述べたように新しい冷却技術を主体にまとめているが、従来から行われている冷却方法についても、基礎編の「各種冷却法の冷却能力の推定式」の章で総括的にまとめてあり、本報告書のみで冷却技術全般につき十分カバーした内容となつている。

### 3. 研究の成果

以下に報告書の内容に沿い、研究の成果を述べる。

#### 3.1 冷却技術の基礎

冷却技術の根本となる伝熱現象の基礎理論について述べた。主体は、水を冷却媒体とした沸騰伝熱面における諸現象の記述においている。最新の研究をふまえ、沸騰熱伝達における高温固体面と液滴の濡れ現象の解説を行い、さらに冷却時の伝熱特性におよぼす諸因子の影響を詳述した。

主要因子としての水量密度 [ $l/m^2 \cdot min$ ]、水温、表面温度につき代表的な研究者のデータを比較・整理した。材質、表面粗度などについての研究も紹介している。

#### 3.2 伝熱解析と熱伝達係数算出法

冷却に関する研究・開発実務に際し、被冷却物である鋼材内温度分布の時間的推移を知ることは、必須の要件である。このための手法として、コンピューターによる理論計算と、実際の测温実験による冷却曲線の実測がある。

さらに、研究の場でも、また設備設計やプロセス解析の場でも、冷却能力を表すものとして熱伝達係数  $h$  ( $kcal/m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$ ) が最も一般的に使われる。本章では研究・開発の実際の場合で必要とされる、これらの手法につき述べた。

伝熱解析は差分法と有限要素法が最も代表的に使われている。いずれの場合も熱伝導率、比熱等の物性値の温度依存性を正しく扱つたものでないと、精度の良い結果

は得られない。小委員会メンバーの中でも種々の手法で計算を行っており、例として変換温度法と直接差分法の計算結果を比較したところ、直接差分法では熱伝導率の与え方しだいではかなりの誤差を生ずることが判明した。

実際の冷却曲線を実測し、熱伝達係数を逆算して求めることが一般的に行われる。従って、精度の良い技術データを蓄積し、かつ冷却現象を整理する上で、測温実験も極めて重要である。このような実験にあつての注意事項を定常測定、非定常測定の種々の場合につきまとめた。また、実測データと伝熱計算をつき合わせることにより、表面温度および表面熱流束を逆算推定し、熱伝達係数を求める手法として、小委員会メンバーの中だけでも約四種類の手法が使われていることがわかり、これらの相互比較も行つた。各手法で原理的に異なることは無く、メッシュ分割の仕方、測温点の位置、物性値の補間の仕方が結果に大きく影響することがわかり、これらの傾向をまとめて実務上の指針とした。

### 3.3 各種冷却法の冷却能力の推定式

スプレー、ラミナーフロー（パイプラミナー、スリットラミナー）、ミスト、および浸漬、強制風冷、自然放冷の場合につき、最新のデータを取りこみつつ、冷却能力の推定式（回帰式）を一覧表の形でまとめた。各冷却法とも、前回小委員会の時点から多くの基礎データが発表されている。また、前回報告書に記載の式も、その後の実測データと一致の程度の悪いものは削除した。従つてこの部分は前回報告書の見直しとなつており、研究にあつての参考と同時に、設計・解析に便利な章である。

### 3.4 冷却過程における熱変形

多くの場合、冷却技術には熱応力による熱変形、残留応力の問題がつかまとう。被冷却物が製品である鋼材の場合、形状不良を生じたり甚だしい場合はワレ等の欠陥の原因となる。冷却技術者としては主に冷却速度や冷却の均一性に目が向き、かつ、やや専門外として扱いがちな技術領域であるが、製品品質の高度化に伴い重要な項目である。本章では、冷却技術者として知つておくべき熱応力・熱変形に関する基礎事項を解析事例も含めてまとめた。解析事例は鉄鋼製品についての最近の報告から、代表的なものとして i) 加熱・冷却時の薄鋼板の熱変形、ii) 厚板条切り材のキャンパー、iii) 厚板空冷中の弾性座屈、iv) ホットストリップ冷却後の熱変形などをとりあげている。特にホットストリップの例は、相変態に伴う ( $\alpha$ ,  $\gamma$ ) の比率に応じた物性値変化をとり込んだ解析である。しかし、この種の解析では単相の物性値の不完全さや、応力緩和現象のとり込みが無いなど、いまだ解析手法として不完全な領域である。

### 3.5 鋼材冷却の冶金的背景

熱応力と同様に、冷却技術者にとって重要な関わりがあるにもかかわらず、専門外として扱いがちな領域であ

る。ここでは過去 10 年間に開発・実用化の顕著だつた厚板の加工熱処理技術の基礎を概説した。さらに各プロセスごとの制御圧延技術・加工熱処理 (TMCP) 技術の冶金学的背景を説明している (厚板、熱延、形鋼、棒・線材)。

さらにこれとは別に、冷延薄板の連続焼鈍のメタラジー (軟質化焼なまし、過時効処理) についてもふれている。

## 3.6 鉄鋼の各プロセスにおける冷却技術

### (1) 連続鋳造プロセス

連鋳では、2次冷却帯のミスト冷却を採り上げた。ミスト冷却が導入され実際に使用されている国内の代表的連鋳機 11 基について、アンケート調査を実施し、設備仕様と冷却能力についてまとめた。

この結果をスプレー、およびミストの冷却能力整理式と対比して考察を行つているが、特にスプレーとの対比においては、水量密度の低い領域でミストの方がスプレーより大きな熱伝達が得られた。

この他ミスト冷却の特徴 (利点) として、水量制御範囲が広いこと、均一冷却性に優れていることなどを文献をもとにまとめ、さらにミスト冷却とスプレー冷却の運転コストの比較も行つた。

### (2) 厚板

厚鋼板のオンライン制御冷却は近年の代表的な冷却技術の開発・実用化例であり、本小委員会の検討対象としてアンケート調査を行つた。国内の 7 設備を対象とし、i) 設備仕様、ii) 実測データによる冷却能力、iii) 冷却制御システムについて調査した。

設備仕様としてはレイアウト (ミル、レベラーとの位置関係)、設備長、入・出側の測温位置、冷却方式 (通板冷却式か、同時一斉冷却式か)、上・下部のノズル形式、拘束の有無、水量密度範囲、代表サイズでの冷却速度範囲である。通板冷却式がやや多く、加速冷却型では非拘束が、冷却速度を早くとする直接焼入れ型では、拘束しているものが多い。

ノズル形式では上部はパイプラミナー、またはスリットラミナー、下部はスプレーが多い。冷却能力についてはアンケートにより、鋼種と板厚、冷却開始・停止温度をそろえた条件で、水量密度と冷却時間の実測値を提出していただいた。これをもとに各実設備の熱伝達係数と表面温度の関係を逆算・推定し、水量密度との関係でとりまとめた (ただし、上面側のみ)。

冷却制御システムは、各設備ともプロセスコンピューターに温度予測モデルと形状制御モデルを組み入れ、水量、冷却時間、上下水量比、端部遮へい、水量クラウン等で制御する方法をとつている。

### (3) 熱延ランナウトテーブル

冷却に関する新技術開発と、その報告が着実に進んでおり、その目的は

## 1) 急冷による材質的メリット

## 2) 省電力・省用水等のプロセスメリット

の二つに大別できる。

最近の報告例ではスリットラミナ冷却(上面)、パイプラミナ式および噴水式の下面冷却が、新技術として注目に値する。本節では、これらの新技術に的を絞って設備仕様、冷却能、操業状況に関し、アンケート調査をもとにまとめた。アンケートの対象は国内の5ラインである。

上面冷却としてのスリットラミナを、最も積極的に導入しているラインでは、冷却ゾーン長比率で約60%のものと、50%のものがある。冷却能力としては同一水量密度のパイプラミナに比し、すべてのデータが約1.5倍の熱伝達係数を示した。このことから、同一の冷却能を得るには、スリットラミナではパイプラミナの約50%の水量密度で済むこととなり、大きな省用水効果が期待できる。今回の調査結果にもとづき、上面のパイプラミナ、およびスリットラミナの熱伝達率推定式を求めることができ、これを基礎編(前述の3・3)の推定式一覧表にも収録してある。

下面冷却としては、スプレー、噴水、パイプラミナのデータの比較を行った。スプレー以外はデータが少なく結論づけるのは尚早であるが、今回のとりまとめからは次のようになった。

1) 噴水は同一水量密度のスプレーに比し、約1.5倍の熱伝達係数が得られる。

2) パイプラミナの熱伝達係数は同一水量密度のスプレーとほぼ同等であるが、スプレーに比し、給水圧力が低くてすみ、その分、省電力となる。

この他、調査対象のミルでの代表的な操業条件を示した。

スリットラミナは板幅方向の均一冷却性に優れ、強冷却能が効率的に得られることから、ランナウトテーブルにおける適用率は今後増大するものと思われる。

## (4) 形鋼

形鋼は断面形状が複雑であるため、冷却技術についても三次元的に制御することが必要である。冷却技術上の要求としては、材質上必要な冷却速度を確保すること以外に、形状・寸法精度の維持と残留応力制御が重要である。

ここでは代表的な設備として、ユニバーサルミルによるH形鋼の例をとり上げ、かつ、制御圧延・制御冷却の基礎的事項、および最近の報告から残留応力の解析例を示した。さらにレールのインライン頭部処理法としての衝風、ミスト、ソルト浴の各方式に関するデータを示した。

## (5) 鋼管

オフラインの焼入れ-焼もどし(Q-T)における冷却設備(6例)と、最近の開発例としての熱間製管直後の

直接焼入れ設備(DQ: 2例)につき調査した。

Q-T設備は外面スプレー方式(3例)と、浸漬方式(3例、攪拌または内面通水を伴う)に大別できる。外面スプレーは、水量密度を算出すると8000~16000 l/m<sup>2</sup>・minという極めて大きな値となり、冷却水の使用効率としては低い状態で使われている。

DQ設備は、浸漬・強攪拌型と外面スリットラミナ・内面高速通水が採用されている。

鋼管の冷却設備については、各社ともデータを秘しがちであるが、特に、冷却水の使用効率の点で設備的な改善の余地があると思われる。

## (6) 棒鋼

最近になって棒鋼にも制御圧延・制御冷却が適用され始めてきており、仕上ミル後の冷却設備(冷却管)に関する報告例が、かなり見受けられる。前回の小委員会での調査対象になつていないこともあり、次節の線材とともに、可能な範囲で詳細な設備仕様調査を行った(調査対象: 国内の8ライン)。

冷却管は種々のタイプが用いられているが、環状のスリット、または環状に配置した複数の孔から、圧延材の進行方向に傾斜させて冷却水を噴射するスプレイ型式のものが5例で最も多い。水切り用の冷却管はいずれも圧延材進行方向と逆に傾斜させて噴射する方式である。

冷却能に関するアンケートでは、サイズと圧延速度をできるだけそろえ、冷却前後の実測表面温度と、冷却時間、復熱時間等を調査し、各設備での平均熱伝達係数と、断面内平均冷却速度を解析・算出した。

この結果を単位冷却長あたりの水量(m<sup>3</sup>/m・h)で整理したところ、浸漬式冷却管の平均熱伝達係数はスプレイ式冷却管に比し、1.5~2倍の値を示し、また、多孔ノズル式冷却管はスプレイ式よりもやや低い傾向にあることがうかがわれる。

## (7) 線材

材質的な品質向上のため、多くの制御冷却が行われている。仕上ブロックミルから捲線機間は冷却管が使われており、捲線機から集束機の間では衝風冷却設備(ステルモア法)が大多数のミルに採用されている。しかし、2,3次加工工程でのパテントングや軟化処理等を省略する目的で、溶融塩による直接パテントング設備や、流動層、沸騰水などによる制御冷却設備の開発も報告されている。

本節ではこのような新設備に関しては紹介にとどめ、ほとんどのミルで使用されている冷却管とステルモア設備について詳細な設備・操業データを調査し、とりまとめた。

冷却管の冷却能は、棒鋼の場合と同様な整理を行ったが、冷却域単位長さに対する熱伝達係数は各設備により1けた程度のばらつきがあり、冷却水の効率改善の余地が多いと思われる。

ステルモア設備はノズル配置、ノズル形状および衝風流量について各ミルごとに多様な形態をとっているが、今回のアンケート調査により、かなり詳細にまとめることができた。冷却能については、線材の寸法、温度範囲、コイルピッチをそろえて、単位面積・単位時間あたりの衝風流量 ( $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ) と平均冷却速度で整理した。設備間の冷却能のばらつきが大きく、ノズル型式と冷却能の関係は明瞭にできなかつたが、コイルピッチと冷却速度の関係等、貴重なまとめが幾例かはできたものと考えている。

#### (8) 薄板連続焼鈍

冷延薄鋼板の連続焼鈍は、1970年代の初め頃から実用化され、その後目覚ましい普及を見せている。このうち、一次冷却処理はプロセス内の最も重要な工程であり、水焼入れ方式、ガスジェット方式、ロール冷却方式、気水冷却方式等、種々の方式が実用化されている。本節ではこれらの種々の方式の冷却設備の特徴と冷却速度につき概説的にふれ、さらに個々の設備の冷却能力を、既発表の文献を基にまとめた。連続焼鈍で用いられているガスジェット冷却は、平均熱伝達係数で  $250 \text{ kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$  と、かなり大きく、 $\text{H}_2$  の濃度の影響が予想され、 $\text{H}_2$  濃度に対する熱伝達率の増加程度を吟味した。水焼入れでは浸漬水中での鋼板表面での蒸気膜挙動の考察を、また、ロール冷却方式は、鉄鋼プロセス中でも数少ない接触冷却過程であり、伝熱メカニズムの詳細を紹介している。さらに気水冷却は、縦パスに固有な水切りの必要性和、冷却速度制御のため、気水ノズルとしても、またガスジェットノズルとしても両用に使用できるノズル設備を示し、その終点温度制御性の良好なことを示した。

#### 3.7 冷却設備において留意すべき事項

本章では、冷却設備の設計や運転にあたり、留意すべ

きノウハウ的なことがらをまとめた。

すなわち、各ノズルからの吐出流量をできるだけ一定に保つためのヘッダー設計上のノウハウや、ミストジェットでの脈動現象が生ずる水量の下限界、安定なラミナフローを得るためのラミナフローノズル設計条件などである。この他、省水量・省電力の観点から、全水量と冷却時間を一定とした場合、鋼板の温度降下量を最大とする水量の傾斜のさせ方、および省電力技術としての回転数制御の実際などについてもとりまとめた。

#### 3.8 熱物性値 (付録)

熱物性値については、熱伝導率、比熱、線膨張係数を炭素鋼、低合金鋼、高合金鋼、およびチタン、アルミニウム、ニッケル、銅につき  $50^\circ\text{C}$  きざみの表と、グラフで示し、ハンドブック的な便に供しやすいものとした。

なお機械的物性値 (ヤング率 *etc.*) についてもまとめることを試みたが、データ量が膨大に過ぎるきらいがあり、その掲載文献・資料を示すにとどめた。

## 4. 結 言

鉄鋼製造プロセスにおける冷却技術につき、本小委員会では最近 10 年間の新技術・新設備に重点をおき、既発表データと、アンケート調査を基として横断的、統一的なまとめを行った。厚板のオンライン熱処理設備の実用化を代表とする新冷却技術の発展は目覚ましいものがあり、鉄鋼のプロセス技術における冷却技術の重要性は確固としたものとなつたと言えよう。

本小委員会の活動の成果としての報告書は、63年7月、本会から「鉄鋼製造プロセスにおける冷却技術」として発刊の予定であるが、今後の冷却新技術・新設備の研究・開発にあたり十分参考になるものと思う。

最後に、小委員会活動に際し、種々ご協力いただいた関係各位に対し、厚くお礼を申し上げる。