

解 説

受賞技術-4

# 限界冷却速度による オンライン加速冷却技術の開発育成

Development of Online Accelerated Cooling Technology with Extremely-High Cooling Rate

小俣一夫  
Kazuo Omata

JFE スチール (株) 東日本製鉄所  
所長

## 1 緒言

熱間圧延後の鋼材の水冷技術は、鋼材の高機能化（高強度化・高靱性化など）、省合金（溶接性向上、コスト削減）、製造プロセスにおける省エネルギーなど、多大な効果をもたらす極めて重要な技術である。

鋼材に対する要求性能は年々多様化しており、様々なニーズに応えるべく、製造条件を綿密に制御し、材質を造り込む必要性が高まっている。鋼材の強靱化を支えてきたTMCP<sup>1)</sup>（熱加工制御：Thermo-mechanical Control Process）は、制御圧延と加速冷却を有機的に組み合わせ、制御することによって鋼材のミクロ組織をコントロールする技術であるが、製造における制御パラメータの増加は、一方でばらつき要因となる可能性があるため、TMCPの更なる高度化には、加速冷却の均一性向上、温度制御精度の向上が不可欠である。

この要求に応えるために、JFE スチールでは、従来にはなかった全く新しい発想で、『限界冷却速度によるオンライン加速冷却技術』を開発した。この技術は、Super-OLAC<sup>®</sup> (On-Line Accelerated Cooling) として、JFE スチールの厚板、熱延、形鋼の合計5ミルに展開したものであり、高付加価値商品の製造に利用されている。平成14年度第49回大河内記念技術賞、平成14年度岩谷直治記念賞、平成15年度日本産業技術対象審査委員会特別賞、平成16年度全国発明表彰発明賞、平成16年度新機械振興賞、平成21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、開発技術の内容と効果を紹介する。

## 2 開発技術の内容

### 2.1 従来の冷却技術の課題

例えば、厚板オンライン加速冷却は1980年から実用化されているが<sup>2)</sup>、従来の技術では、鋼材表面に冷却水が直接接触して熱伝達する核沸騰と、鋼材表面と冷却水の間に蒸気膜が発生し、これを通して熱伝達する膜沸騰が混在する、いわゆる遷移沸騰状態で冷却が行われていた。遷移沸騰状態では、図1に示すように、鋼材の表面温度が低いほど冷却能力が増大する特性を示す。そのため、加熱や圧延によって生じたわずかな温度むらも、冷却によって拡大する。

冷却中に温度むらが大きくなると熱歪によって、反りや残留応力が発生し、切断加工性が低下したり、操業トラブルにつながったりする。さらに、材質のばらつきも大きくなるので、お客様の品質要求にお応えできなくなったり、製造プロセスでの歩留まりを低下させたりする。従来は、安定製造が

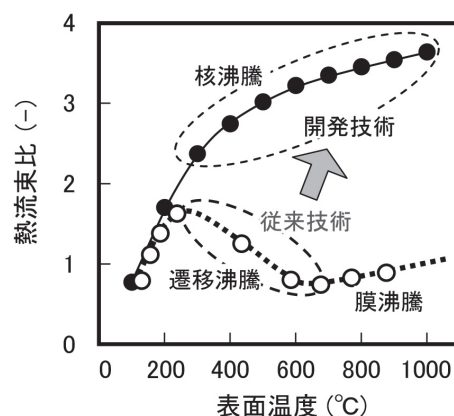


図1 鋼板表面温度と冷却能力(熱流束)の関係

できる条件に限って（厚板生産量の10%程度）しか適用されていなかった。

また、鋼材を高い冷却速度で冷やそうとすると、大量の冷却水を供給しなければならず、冷却後の排水を円滑に行いながら鋼材全体を均一に冷却しなければならない。しかし、先尾端で張力をかけずに仕上圧延を行う熱延鋼板の場合、ランアウトテーブルで大量の冷却水を供給すると、通板性を確保しにくくなるという問題がある。複雑な断面形状をもつ形鋼の場合、冷却を均一に行うことが極めて難しく、熱歪が発生しやすいという問題がある。したがって、熱延鋼板や形鋼のオンライン加速冷却を実用化できていなかった。

2.2 技術開発のコンセプト（全面核沸騰の実現）

この技術は、鋼板に接触して多量の熱を奪った冷却水が蒸気になろうとしても、新鮮な水を大量に供給して、それを完全に防止することを基本理念としており、なおかつ経済的な設備コスト、ランニングコストで安定的に全面核沸騰状態を維持できる技術である。図1に示すように、鋼材の表面温度が高いほど多量の熱を奪うので、冷却前の温度むらが収斂（低減する）し、熱歪や材質むらの発生がない。

さらに、鋼材表面をこれ以上冷やそうとしても内部から熱が伝わってこないという、熱伝導律速の状態を作り出し、図2に示すように、従来よりも格段に高い、理論限界に近い冷却速度<sup>3)</sup>を実現できる。これにより、合金成分の多量添加を行わなくても微細な組織作りこみができ、高強度・高靱性など、高機能な鋼材の製造が可能となる。

2.3 オンライン加速冷却設備の概要

鋼材の冷却姿勢（水平上面、水平下面、垂直面）や搬送速度など、操業条件に応じて、冷却水の噴射方式、噴射速度、

噴射角度、ノズルの形状と寸法、ノズルレイアウトなどを最適化した新水流制御技術を開発した。これにより、蒸気膜が発生せず、全面核沸騰を安定的に、しかも経済的な設備コスト、ランニングコストで実現できるオンライン加速冷却技術を世界で初めて確立した。JFEスチールでは、表1に示すオンライン加速冷却設備を厚板、熱延、形鋼の5ミルに導入し、工程生産に適用した。

厚板の上面冷却では、鋼板に沿ってある相対速度で冷却水を流して、核沸騰を維持する冷却方式を、下面冷却では水槽内に配置したノズルから冷却水を噴射して、回りの水を随伴させて、多量の冷却水を供給する冷却方式を開発した<sup>4)</sup>。

熱延鋼板の冷却では、鋼板に近接化したノズルを高密度で配置し、鋼板上下面に高速のラミナー流を噴射する技術を開発した。搬送ロール間にエプロンガイドを設け、ノズル先端をガイド内に収めることによって、良好な通板性を確保した。

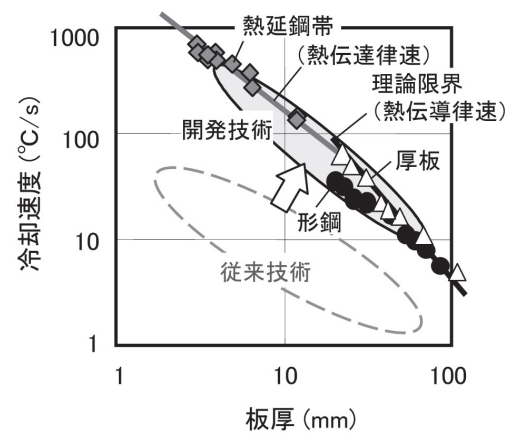


図2 理論限界に近い高冷却速度の実現

表1 オンライン加速冷却方式の概要

| 冷却対象 | 冷却姿勢 | 移動速度   | 冷却方式                  | 設備概要 |
|------|------|--------|-----------------------|------|
| 厚板   | 水平面  | ～2m/s  | 上面：新水流制御<br>下面：導管付噴水  |      |
| 熱延鋼板 | 水平面  | ～20m/s | 近接型多孔噴流               |      |
| 形鋼   | 垂直面  | ～5m/s  | 外面：多孔噴流<br>内面：高流量スプレー |      |

形鋼の冷却は、H形鋼のフランジ冷却に適用した。外面冷却は、サイドガイドを兼用した冷却ヘッドに多数の孔を設け、ラミナー状の冷却水を噴射する方式とし、内面冷却は、高水量密度スプレー冷却方式とした。熱延鋼板、形鋼に加速冷却を適用する設備として、世界で初めて実機化することに成功した。

## 2.4 限界冷却速度と均一冷却の実現

鋼材全面を核沸騰冷却できる技術を確立したことにより、理論限界に近い高冷却速度、従来に比べてきわめて高い冷却均一性が得られるようになった。

厚板では、冷却の均一性が格段に向上した。冷却後の鋼板面内の温度ばらつきは従来比40%に低減し、冷却停止温度誤差を従来比50%まで低減させた。

加速冷却の対象も大幅に広がり、30%程度となった。これは、材質設計上、加速冷却を必要とするもののほぼ100%（従来は30%）である。冷却速度は、鋼板厚20mmで、従来は10℃/s程度であったが、65℃/sという理論限界に近い値まで上げることができた。

熱延鋼板の冷却では、鋼板厚3mmの冷却速度が、従来は100℃/s程度であったが、700℃/sとなった。本開発技術の冷却設備長12mで、従来のランナウト冷却設備長100m分の冷却が可能となった。

H形鋼の冷却では、熱歪が発生しないようフランジの外面と内面の冷却バランスを保ちながら、加速冷却を行い、限界に近い冷却速度を得ることができた。

## 2.5 高付加価値新商品の開発とTMCP技術のさらなる高度化

今回の開発により、高冷却速度での加速冷却と、冷却の均一性・温度制御性の向上が達成された。これにより、省合金化による鋼材の溶接性向上が可能となったほか、HBL385<sup>⑤</sup>などの高機能ハイテン新商品が数多く開発された。また、次工程にオンラインプロセスを設けることによって、TMCP技術をさらに高度化することを可能にした。2004年に福山に導入したオンライン誘導加熱プロセス（HOP<sup>®</sup>：Heat treatment On-line Process）は、加速冷却の均一性と温度制御性の向上を前提として初めて工業的に実用化された、世界最先端のTMCP技術である<sup>⑥</sup>。既に、高強度高変形能ラインパイプ材などの画期的な新商品開発<sup>⑦</sup>に結びついている。

## 3 技術開発を通しての技術・人材の育成

技術開発にあたり、様々な要素技術が育成された。従来なかった冷却設備を実現するための設計技術、限界冷却速度を実現する水流制御技術、高精度な温度制御技術、高付加価値商品を製造する操業技術と品質管理技術、さらには、従来技術の枠にとらわれずにプロセス・材質の理想を追求する研究開発力が育っていった。

また、技術者、特に若手の開発マインドを育成できた。従来技術を守り、レベルアップしていくことも大切であるが、新しいことにチャレンジできるという喜び、新しい知見を求める探究心、任された仕事をまっとうする責任感、多くの壁を乗り越えていく忍耐力、技術をシステムとして構築するために必要な連帯感、技術を完成させた時の達成感、技術者をプロとして、そして人として大きく成長させた。まさに『技術開発は人を育てる』という言葉のとおり、多くの人的財産を築きあげることができた意義は、非常に大きい。

## 4 結言

限界冷却速度によるオンライン加速冷却設備を、JFEスチールの厚板、熱延、形鋼の5ミルに展開して、毎年200万t以上の高付加価値商品を生産している。本開発技術には、将来にわたる大きな経済効果があり、様々な分野で社会貢献がなされるものと期待される。今後も、新しい高付加価値商品の開発、加速冷却の適用拡大を続け、さらに進んだ加速冷却技術を開発し、造船、建築、自動車産業など多くの産業の発展にも寄与していきたいと考える。

## 参考文献

- 1) 小指軍夫：制御圧延・制御冷却，地人書館，(1997)，17.
- 2) 東田幸四郎，大北智良，大内千秋，長嶺多加志，平部謙二，八子一了：日本鋼管技報，89，(1981)，1.
- 3) 甲藤好朗：伝熱概論，養賢堂，(1984)
- 4) 小俣一夫，吉村洋，山本定弘：NKK技報，179，(2002)，57.
- 5) 石井匠，藤沢清二，大森章夫：JFE技報，21，(2008)，1.
- 6) 藤林晃夫，小俣一夫：JFE技報，5，(2004)，8.
- 7) 石川信行，遠藤茂，近藤丈：JFE技報，9，(2005)，19.

(2011年1月11日受付)