

# 限界冷却速度による オンライン加速冷却設備

J F E スチール株式会社  
代表取締役社長 數 土 文 夫

J F E スチール(株) 厚板セクター部 部長	小 俣 一 夫
J F E スチール(株) スチール研究所 圧延加工プロセス研究部 副部長	藤 林 晃 夫
J F E スチール(株) 厚板セクター部 主任部員	和 田 典 巳
J F E スチール(株) 西日本製鉄所 福山地区 熱延部 主任部員	本屋敷 洋 一
J F E スチール(株) 西日本製鉄所 倉敷地区 条鋼部 部長	渡 邊 誠

## はじめに

本設備は、高温に加熱した鋼素材を熱間圧延により加工した直後に、種々の冷却速度で冷却することにより鋼の特性を広範囲に制御する加速冷却技術に関するものである。これまで加速冷却は、優れた特性を有する鋼材の創生を期待されてきたが、冷却における温度の不均一、及び冷却能力の不足により、加速冷却が適用できる範囲に限界があった。そこで熱間鋼材の冷却過程で生じる冷却不安定を排除して理論限界までの超急冷速を可能とする新設備を開発し、はじめに厚鋼板製造ラインへ、続いて、形鋼、熱延鋼帯の製造ラインへ設備化した（写真1）。本加速冷却設備は、ユーザーの高いニーズを満足する鋼材製品を生み出すことを可能とした。

設備の特徴は、理論限界までの超急速冷却と、全面均一な冷却状態が安定して同時に得られる加速冷却で、蒸気の発生がないことである。これは冷却不安定の原因である“蒸気膜”を完全に一掃することに着目し、鋼板に触れた冷却水がいったん蒸気になっても、新鮮な水をすぐに供給することで蒸気を凝縮させ、常時冷却水を鋼板表面に接触させる事により吸熱効果を上げ、同時に温度分布を収斂させるという基本的考えよりスタートし、基礎研究から実用化

試験を経て完成したものである。実設備において冷却速度は、ほぼ理論限界の板厚20mmで65 /sと、従来の2～10倍の冷却能力を有するとともに冷却による温度のバラツキの発生がほぼゼロである。本設備は、既に複数の厚鋼板・形鋼製造ラインに実用化されており、世界で初めて熱延鋼帯製造におけるオンライン加速冷却技術の適用を実現した。

## 開発のねらい

加工熱処理技術は、結晶粒微細化や組織制御を通して鋼の強度・靱性を高める技術として広く用いられている。近年、極寒地向ラインパイプ用鋼板の厳格化（高強度・高靱性化やバラツキ低減）、あるいは、大規模地震の際の鋼材に対する信頼性向上（高靱性化）から、更なる鉄



写真1 厚鋼板の新加速冷却設備の概観

鋼材料への高強度・高靱性化や溶接性向上が望まれている。その中で加工熱処理の中核技術である加速冷却に対して、これまでは高冷却速度を工業的に得られず、高強度鋼の低炭素当量化には限界があった。不均一冷却による熱歪から、寸法制約及び是正のための再矯正作業が生じ、量産化が阻害されていた。また、品質バラツキが大きく、加速冷却の適用対象が限定されていた。複雑な断面形状を持つ形鋼や高速搬送の薄肉熱延鋼帯には適用不可能であった。以上の理由から鋼材の適用範囲及び生産量は、制約を受けていた。

そこで、これらを解消すべく新加速冷却設備の開発に着手した。具体的な開発目標を次のように設定した。

- (1) 超急速冷却 均一オンライン加速冷却設備  
冷却速度：理論限界近傍(板厚20mm65 /s)  
冷却温度バラツキ：3 20
- (2) 新加速冷却の厚板・形鋼・熱延鋼帯への適用

### 装置の概要

本設備は、理論限界までの超急速冷却と、全面均一な冷却状態が安定して同時に得られる加速冷却設備で、蒸気の発生がないことを特徴とする。これは冷却不安定の原因である“蒸気膜”を完全に一掃することに着目し、鋼板に触れた冷却水がいったん蒸気になっても、新鮮な水をすぐに供給することで蒸気を凝縮させ、常時冷却水を鋼板表面に接触させる事により吸熱効果を上げている。

#### 1. 厚鋼板加速冷却設備

厚鋼板全面を経済的な水量で蒸気膜を一掃できる水流方式として、上面冷却には、鋼板に沿って冷却水を流す新水流制御冷却(図1)を、下面冷却には、水槽内に高密度に配置したノズルから冷却水を噴射して、水槽内の水を随伴させ、その随伴流で鋼板を冷却する高密度導管付噴水冷却(図2)を考案した。

冷却水を鋼板に垂直で衝突させた従来の上面

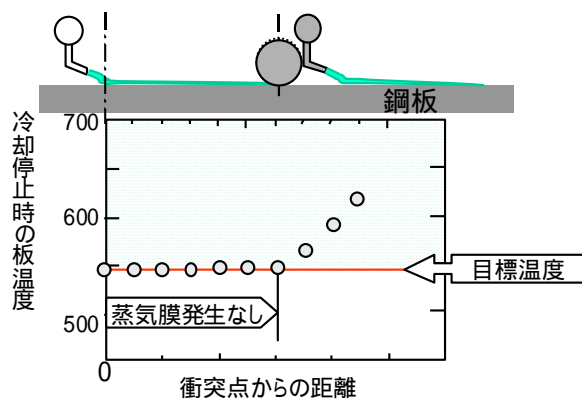


図1. 厚鋼板の新加速冷却法(上面冷却)

冷却方式(ラミナー冷却)では、衝突点下流に、蒸気膜の発生が見られた。そこで、冷却水の衝突角度をできるだけゼロに近い~板に沿って冷却水を流す~ことで蒸気膜の発生を抑えることを試みた。冷却水噴射角度を小さくすると下流まで、核沸騰が持続する実験結果を得た。しかしながら、ある程度下流まで行くと蒸気膜発生は避けられないことが判明した。冷却水が鋼板から奪った熱で昇温し、沸騰しやすくなるためである(発生した蒸気を凝縮する能力がなくなる)。そこで、蒸気膜が発生する前に、水切りロールを設けて、温度の上昇した冷却水を排除し、別のノズルから新鮮な冷却水を供給する冷却方式を考案した。

一方、下面の冷却方式は、重力の影響で上面と同じ水流方式では蒸気膜の一掃が難しい。そこで、水槽内に高密度に配置したノズルから冷却水を噴射して、水槽内の水を随伴させ、その随伴流で鋼板を冷却する上面冷却と全く異なった高密度導管付噴水冷却を考案した。

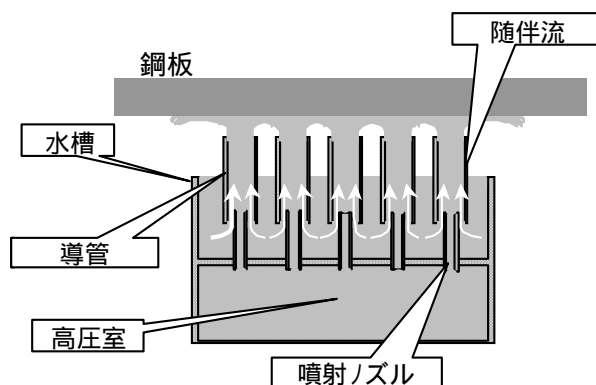


図2. 厚鋼板の新加速冷却法(下面冷却)

## 2. 熱延鋼帯・形鋼の新加速冷却設備

熱延鋼帯の加速冷却は、鋼帯の剛性が小さく、かつ、鋼帯が70km/hrという高速で走行するため、これまで実用化できていない。高速で搬送される鋼帯に対して、通板性を維持した上で、均一かつ急速に冷却することはきわめて困難な課題であったが、鋼帯を送るテーブルローラーの駆動方法を工夫することで、通板性を確保しつつ、超急速冷却速度700 /s(板厚3mm炭素鋼、世界最高冷却速度)を可能とした。また、冷却能力が大幅に向上したことで、従来約100~120m必要であったランナウト冷却設備長は、12m程度までに大幅短縮することが可能となり、今後の熱延鋼帯製造設備建設時には、大幅な敷地面積の削減を可能とした。

一方、H形鋼は、断面形状がH字の形を持っているために、水冷後の歪みが著しい。そこでH形鋼の新加速冷却方法では、熱歪みを発生させないようにH形鋼の内面冷却を工夫し、加速冷却を可能とした。この歪み制御機能は、高さ、幅、各部厚みのサイズ変更が頻繁に行なわれる形鋼製造には、必要不可欠な技術である。

### 技術上の特徴

鋼材を水冷すると、蒸気が発生して、鋼材温度が下がる。この伝熱現象は沸騰といわれ、2種類の沸騰形態が存在する。それは、鋼材に直接冷却水が接触して気泡が発生し、熱が伝達される核沸騰と、鋼材と冷却水の間に蒸気の膜が形成されてその蒸気膜を通して熱が伝達される膜沸騰である。核沸騰の方が冷却能力は高い。例えば1000 の鋼材をスプレー冷却する場合を考えると表面温度が高い状況では膜沸騰途中で、蒸気膜が不安定になり局所的に冷却水と接触が発生し、突沸して徐々に核沸騰へ遷移する。この膜沸騰と核沸騰が共存する遷移沸騰状態は、冷却の進行に対応して冷却能力が増大する特性を示すために、不安定な冷却である。すなわち、温度が高い部分より温度が低い部分が

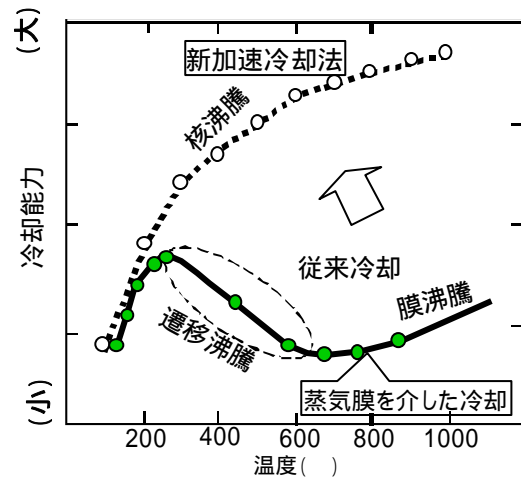


図3. 新加速冷却技術の伝熱特性

冷えるので、冷却前より冷却後に温度ムラが拡大する。このように従来の冷却法は、不安定な冷却を避けられなかった(図3)。

従来冷却法の一つである、厚鋼板のラミナー冷却では、移動する厚鋼板にラミナー状の冷却水が落ちる部分は、冷却水が直接鋼板に接触して核沸騰状態となるが、冷却水が前後に横流れる部分では、冷却水と鋼板との間に蒸気膜が発生し、遷移沸騰状態となって、不安定な冷却となっていた。また、熱延鋼帯のランナウト冷却においては、熱延鋼帯の巻き取り温度が500以下になると、温度がハンチングして冷却停止温度を制御することが難しいことが知られている。これは、鋼帯の温度が高い状態では蒸気膜が定在する膜沸騰状態であったが、温度が低下すると遷移沸騰状態に突入して、温度のムラが拡大し、冷却停止温度の制御が難しかった。

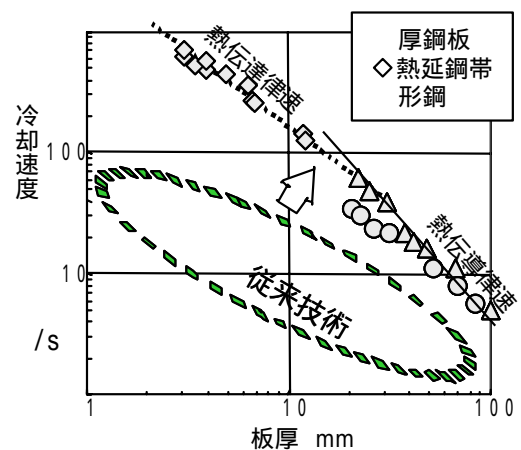


図4. 新加速冷却技術の冷却能力

そこで、新加速冷却法の開発では、不安定な遷移沸騰を避け、蒸気膜の発生を一掃することで、安定した冷却を実現することを目指した。この全温度域にわたり全面を核沸騰状態に維持できれば、不可避免的に存在する冷却前の温度ムラが冷却中に拡大せず冷却停止温度がばらつかないであろうと考えた。開発では、被冷却材の形、サイズ、移動速度に応じて核沸騰状態が得られる水流方法を見出した。その結果、開発目標である冷却速度が理論限界近傍（板厚20mmで65 /s）までの超急速冷却（図4）と、冷却温度バラツキが少ない（3 20）均一冷却を可能とするオンライン加速冷却設備を実現した。

## 実用上の効果

新加速冷却法を適用して享受された鉄鋼製造プロセス上のメリットとして、圧延能率の向上があげられる。従来法では、低温で大きな累積圧下を必要としていたため圧延能率を悪化させていた。これに対して新加速冷却法では、低温での圧延なしで同じ材料の造り込みが可能となった。一例として造船材YP315の圧延能率は、従来法に比べて、約20%向上した。

新加速冷却設備によって商品化された厚鋼板の新商品として、造船用の超大入熱溶接用厚鋼板がある。従来鋼は、強度を確保するために、合金元素を添加していたため、溶接の入熱を大きくすると熱影響部の靱性劣化が避けられなかった。従来は、熱影響が少なくなるように小入熱で多数回溶接を繰り返していた。新加速冷却法では、合金元素添加を低減しても強度確保が可能となったことで、大入熱溶接熱影響部の靱性が劣化しない。従来の小入熱での多数パス溶接が、新加速冷却材では1パスでの超大入熱溶接可能となり溶接能率が大幅にアップし、溶接に要するエネルギーも半減された。

新加速冷却を適用した高炭素熱延鋼板は、従来材に比べて、金属組織が均一、かつ、炭化物が微細に分散するので、焼鈍後に、大幅に

加工性が向上する（バーリング特性～孔拡げ率が従来約の約2倍）。これにより軸受けを有する自動車用部品の成形において、従来は個別成形・接合を行っていた部品加工工程を一体成形化が可能となり、工程省略が計られた。

以上のように、新加速冷却法により、生産性向上、溶接性向上、加工性向上、合金元素削減、高強度化・高靱性化、設備コンパクト化、製造安定化、低残留応力化等の効果が得られており、新加速冷却法の急速冷却と均一冷却を活かした新商品が数多く創製されている。

## 工業所有権の状況

これまでに、新加速冷却設備に関する出願特許は、国内230件以上、外国15件、登録済特許は27件である。

## むすび

厚鋼板、形鋼、熱延鋼帯ラインに本設備が実機化されて生産量は順次増加し、2003年には当社における新加速冷却材の生産量は、合わせて100万t/年を越えた。

新加速冷却設備は、従来の問題点を解決して、次の成果が得られた。

- (1) 主な一次ミルである熱延鋼帯や形鋼へのオンライン加速冷却技術の適用
- (2) 厚板における適用限界寸法の拡大、高強度鋼の適用拡大
- (3) 高冷却速度による高強度鋼材の溶接性、加工性の向上

本研究成果は、冷却の学術的な進歩に貢献するとともに、加工熱処理鋼材の普及を通して、省合金、省エネルギー、省プロセスを実現し、さらに、高性能鋼材が社会に広く浸透することで、多くの経済波及効果と社会貢献が将来にわたってなされるものと期待される。また、新たに創製された高機能鋼材が、造船、建築、自動車産業などの多くの他産業の発展に貢献することを望んでやまない。