



入門講座

伝熱工学－9

鉄鋼の冷却プロセス

Cooling Technologies for Steel Products

上岡 悟史

Satoshi Ueoka

JFE スチール (株)

スチール研究所

圧延・加工プロセス研究部 部長

1 はじめに

鉄鋼業界において冷却は多岐に亘り利用されており重要な技術である。その利用方法は①製造設備の保護や長寿命化、②鉄鋼製品の品質確保に分類できると思われる。設備保護の点では高炉の炉体冷却や圧延ロールの冷却などがあり、品質確保の点では連続鋳造機の2次冷却や熱処理設備などがある。また、品質を維持したまま生産性を向上させる観点ではスラブヤードや製品ヤードでの冷却が挙げられる。近年、企業間競争の激化から高級鋼に品種転換を進めており、特に機械特性の向上のため、熱処理を中心とした冷却技術の重要性が増してきている。一方、熱処理が必要な品種は薄鋼板、厚鋼板、形鋼、線材、棒鋼、鋼管など多岐にわたっている。機械特性の確保の点から、目標とする冷却速度や冷却停止温度となるように温度制御を行うと共に、冷却ムラに起因した形状不良も回避しなければならないため、各品種の形状に応じて冷却装置を工夫する必要がある。特に形鋼は形状が複雑であることに加えて、フランジとウェブにおける複数個所の寸法精度を同時に補償する必要があり、冷却装置の設計の難易度は高い。

高炉メーカーで比較的生産量の多い薄鋼板は、1100～1250℃程度まで加熱して熱間圧延する1次圧延と1次圧延した素材を冷間圧延する2次圧延とに分類することができる。1次圧延では燃焼ガス雰囲気中で加熱した後に大気中で圧延するため、表面に鉄の酸化物（スケール）が生成した状態で冷却が行われる。2次圧延では酸洗後に冷間圧延を経て熱処理を行う。2次圧延後の熱処理では、非酸化雰囲気の炉内で加熱するため、ほぼスケールが生成しない状態で冷却を実施することが多い。また、冷却媒体は目的や環境により異なるものの、コストの安い水や空気を用いた冷却を行うことが多い。このうち水は体積当たりの熱容量が大きいことから、高い冷却能力を有するものの、その沸点よりも高い温度の素材

を冷却する場合は、冷却媒体が液体から気体に相転移するため沸騰熱伝達となる。図1に沸騰曲線の模式図を示すが、表面温度が水の沸点である100℃以下では対流熱伝達、100～200℃では核沸騰となり冷却能力が対流熱伝達よりも高くなるが、水の自発核生成温度である300℃近傍より高い領域では膜沸騰となり冷却能力が低くなる特性がある。また、核沸騰と膜沸騰の中間領域は遷移沸騰と呼ばれる。この膜沸騰から核沸騰への遷移により冷却能力が大きく変化して冷却均一性が損なわれると言われている¹⁾。膜沸騰から核沸騰への遷移温度は、冷却水の流量や衝突速度に加えて、スケールなどの表面性状や液温なども影響するため非常に複雑である。

本講座では生産量が多く形状が単純な薄鋼板と厚鋼板を対象として冷却プロセスの概要を説明すると共に、実操業における課題について解説を行う。また、水冷技術を学ぶ上で沸騰熱伝達の理解は重要であるが、前回の「沸騰・蒸発を伴う伝熱」で詳細が紹介されているため参照いただきたい。

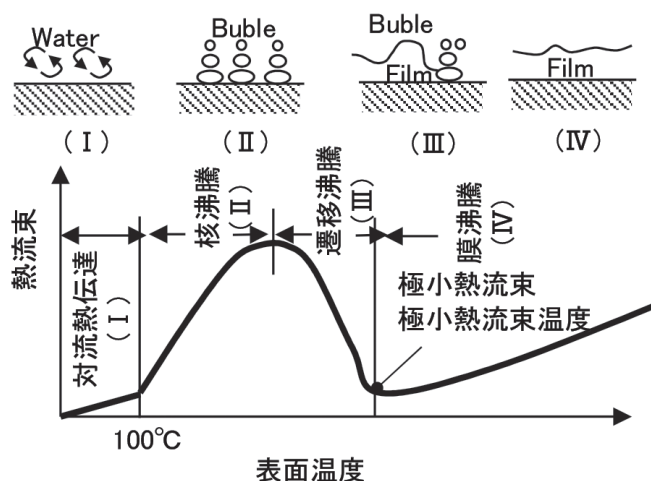


図1 沸騰曲線の模式図

2 冷却プロセスの事例

2.1 熱延鋼板の冷却プロセス

図2に熱延鋼板の製造ラインの例を示す。厚み200～300mm、幅1000～2000mm程度のスラブを副生ガスや天然ガスなどを燃料とする連続加熱炉で1200℃前後まで加熱した後、HSB (Hot Scale Breaker) やFSB (Finishing Scale Breaker) で10MPa以上の高圧水を噴射することで表面に生成したスケールを除去して、粗圧延、仕上圧延を実施し、2～3mm程度の厚みまで熱間圧延した後に、ランアウトテーブルで冷却してコイラーで巻き取られる。代表的な冷却装置は、ロールクーラント、ストリップクーラント及びランアウト冷却である。

ロールクーラントの主な目的は、熱による圧延ロールの肌荒れの防止²⁾やロールの熱膨張³⁾の低減となる。特に、ロールの軸方向の温度差に起因したサーマルクラウンは、製品の幅方向における板厚プロフィールや鋼板形状の制御に重要

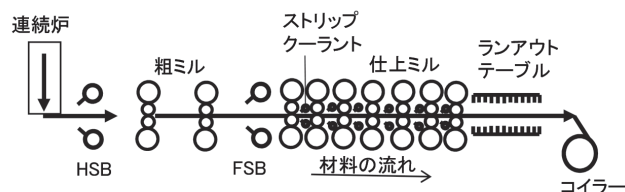


図2 熱延鋼板の製造ラインの例

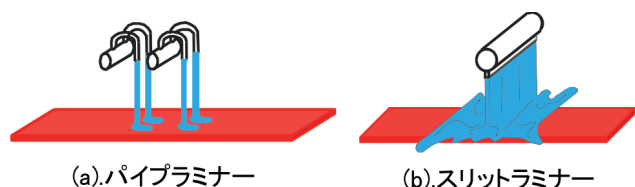


図3 冷却装置の例(Online version in color.)



図4 冷却水噴射状況⁴⁾

な因子である。また、仕上圧延機に設置されているストリップクーラントは、主に仕上温度 (FDT : Finishing Delivery Temperature) の調整に使われている。ロールクーラント及びストリップクーラントは設置スペースなどの制約からスプレー冷却を実施することが多い。

ランアウト冷却では、一般的に直径15～20mm前後の円管パイプを幅方向に配置したパイプラミナー (図3a、図4) が用いられることが多く、搬送方向に複数機並べて冷却される。熱延鋼板は鋼板長が数百mと非常に長く、仕上圧延と冷却が同時に行われるため、製品厚み (1.2～25mm) や圧延中の速度 (100～1500mpm) に応じて、目標の巻取温度 (CT : Coiling Temperature) となるように冷却水の噴射ヘッダ数を制御することが一般的である。そのため鋼板の加減速に応じて高速で冷却水の噴射や停止ができるようにヘッダ構造に工夫が施されている^{5,6)}。更に、通板トラブル時にノズルの破損を避けるために、パスラインから1000mm以上の距離を確保してノズルを設置することが多い。このため、冷却の安定性を確保する点で、柱状の冷却水が破断しないようなノズル径・流量を選定するなどの工夫を行っている⁷⁾。また、図3bに示すようにスリット状の噴射口を持つスリットラミナー (カーテンウォールクーリング⁸⁾) が採用されることもある。本方式はパイプラミナーよりも高い冷却能力を得ることができるため、機械特性の向上や設備機長の短縮といった観点から採用されることが多い。また、近年は高冷却速度を得るために、更に大流量で鋼板を冷却する技術も開発されており^{9,10)}、結晶組織の微細化やベイナイト・マルテンサイトなどの変態組織を活用した高級鋼板の製造も行われている。

2.2 厚鋼板の冷却プロセス

図5に厚鋼板の製造ラインの例を示す。加熱工程は熱延鋼板と同じで、圧延機は粗ミルと仕上ミルの二機、若しくは仕上ミル一機のためのいずれかで構成されている。それぞれの圧延機でリバース圧延され、所定の板厚及び板幅に調整され、圧延が完了した鋼板は冷却装置で冷却される。厚鋼板の材質制御技術はTMCP (Thermo-Mechanical Control Process) と呼ばれる技術を活用することが多く、鋼板を低温で圧延する制御圧延 (CR : Controlled Rolling) と制御圧延後の加速

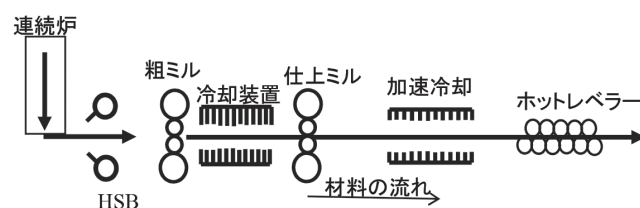


図5 厚鋼板の製造ラインの例

冷却 (AcC : Accelerated Cooling) から構成されている¹¹⁾。制御圧延では圧延中に未再結晶温度域 (850~950℃) まで温度を下げて再度圧延を実施するが、この温度調整は放冷若しくは水冷却をすることが多い。放冷した場合は放冷中の鋼板と圧延ライン上で後続する鋼板が干渉することがあり、その間は圧延ができず生産性の低下を招くことがあるため、粗圧延機と仕上圧延機の間に冷却装置を設置することもある。また、図6のように圧延機に近接した位置に冷却装置を設置して、圧延と同時に温度制御を実施する例もある¹²⁾。

加速冷却は、未再結晶温度域で圧延した組織を冷却することで結晶組織の微細化と変態組織の制御を行うため、強度や靱性などの機械特性を決定する重要なプロセスである。

一般的に加速冷却は一斉冷却若しくは通過冷却を行う。一斉冷却では、冷却装置下で鋼板をオシレーションしながら目標の冷却停止温度になるまで冷却する。厚鋼板の最大板長は20~60m程度あるが、鋼板全長に一斉に冷却水を注水するため、板長と同等以上の長さの冷却設備を設置する必要がある。また、通過冷却する場合は、冷却装置内の通板速度と冷却ヘッダの使用本数を調整することで目標の冷却停止温度に制御する。通板速度を遅くすることで設備機長の短縮が可能であり、一斉冷却と比較して短い設備長で冷却が可能であ

る。一方、圧延機と冷却装置で通板速度を独立に調整するためには、加速冷却装置の前後で厚鋼板が滞在できるスペースが必要となる。

冷却方式は、先に述べたパイプラミナーやスリットラミナーなどに加えて、均一性と高冷却速度を両立した設備の開発が各社で行われている^{1,10,13,14)}。熱延鋼板と比較して、板幅が広い厚鋼板では全面で均一冷却をすることが難しく、高度な冷却制御が必要となる。特に、不均一冷却に起因した機械特性のバラツキや形状不良は未だに課題として残存しており、各社では継続して改善を進めている。

2.3 冷延鋼板の冷却プロセス

図7に薄鋼板の連続焼鈍ラインの例を示す。前工程で製造したコイルをペイオフリールでリコイル、洗浄などの処理をしたのちに、加熱帯・冷却帯・過時効帯で熱処理され、テンションリールで再び巻き取られる。炉内はラジアントチューブ (RT : Radiant Tube) で加熱されることが多く、燃焼ガスが炉内に混入しないため、大気と比較するとほぼ無酸化と呼んで差し支えない雰囲気となっている。冷却帯は群噴流を用いたガスジェット冷却 (GJC : Gas Jet Cooling) を用いることが多い。GJCの冷却速度はおおよそ20~40℃ /sec程度であり、炉内雰囲気と同じガスで冷却することができ、冷却による表面酸化は極めて少ない。また、GJC帯ではガス吹付圧力やガス温度を調整することにより、冷却速度や冷却停止温度の制御を行う。

一方、高強度ハイテンの製造のため、ウォータークエンチ (WQ : Water Quench) のように、水中に多段スリットノズルを設置して、衝突圧力で蒸気膜を除去して高冷却速度を得る技術がある¹⁶⁾。本技術により、鋼板の冷却速度は1000℃ /sec以上を得ることができる。一方、水中で冷却することから冷却停止温度の制御は難しく、ほぼ水温まで鋼板を冷却することになる。

気水冷却のように水をガスの運動量でミスト状にして冷却する技術もある。本技術では冷却水量の調整により冷却速度

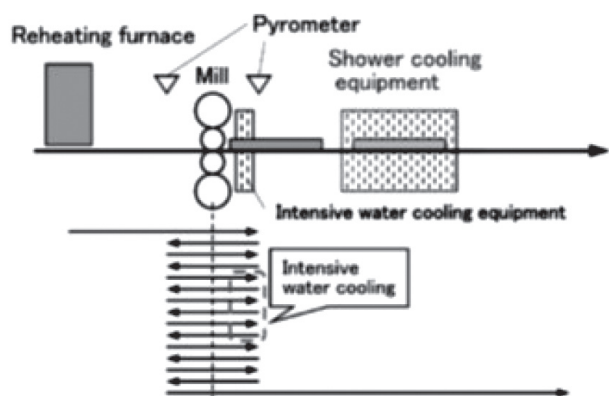


図6 厚鋼板圧延時の冷却の例¹²⁾

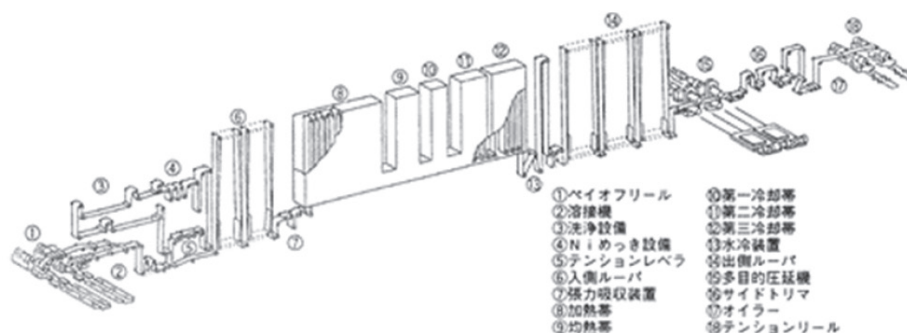


図7 薄鋼板の連続焼鈍ラインの例¹⁵⁾

は100～400℃ /sec程度となり、GJCとWQと中間的な冷却速度で制御することができる。

また、ロールクエンチ (RQ : Roll Quench) のように、複数の水冷ロールと鋼板を接触させ、その接触角度を調整することで冷却速度と冷却停止温度を制御する技術もある¹⁶⁾。本技術では巻き付け角度の制御により、冷却速度は気水冷却と同じく100～400℃ /sec程度となり、GJCとWQと中間的な冷却速度で制御することができる。

3 冷却における課題

冷却設備を運用するにあたり、冷却素材の寸法精度や機械特性を損なう代表的な因子として、(1) 熱歪、(2) スケール、(3) 相変態の影響がある。この章ではそれぞれの課題についての過去の知見に基づいて解説を行う。

3.1 熱歪

冷却する際に素材内で温度偏差が発生すると、熱収縮量の違いから形状不良が発生する。代表的な鋼板の形状不良の例を図8に示す。形状不良の原因としては、(1) 面内の温度均一性の不良、(2) 鋼板表裏面の温度差、(3) 急激な熱収縮による鋼板の座屈に分類できると考えられる。

冷却時に鋼板の面内で温度偏差が発生した場合、熱収縮量の差により鋼板内で残留応力が生じて面外変形して、耳波や中伸びなどの形状不良が発生することがある¹⁷⁾。また、鋼板製造時では面外変形に至らないものの、その後鋼板のスリット加工をした後に曲がり (キャンバー) が発生することがある¹⁸⁾。キャンバー量の測定例を図9に示す。温度偏差の一因として、鋼板の幅端部近傍の過冷却があり、冷却水マスキングなど冷却方式の工夫を行うことがある。

鋼板の表裏面で温度差が発生した場合は、C反り若しくは

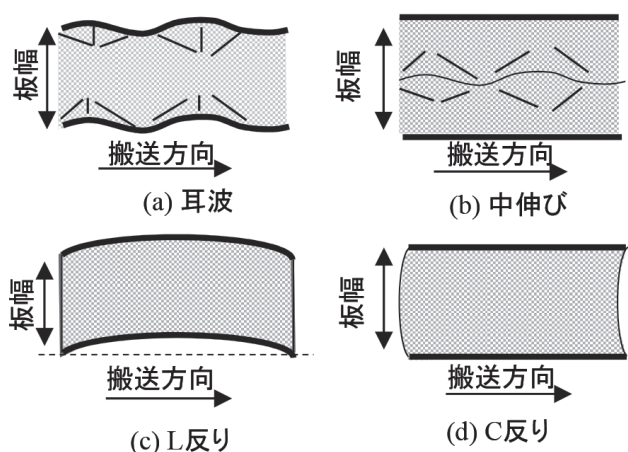


図8 鋼板の形状不良の例

L反りが発生することがある¹⁹⁾。熱延鋼板や厚鋼板のように水平方向の搬送するラインでは、重力の影響で鋼板上面に厚い液膜が生成するため、鋼板下面に対して上面の冷却能力が高くなる傾向にある。そのため、鋼板の上下面において同一条件で水冷すると温度偏差が発生する。C反りを回避するためには、上下面の冷却水量比率の調整などを行う必要がある。

通過冷却をした場合は、先端から順次冷却されていくため、長手方向に生じる温度勾配に起因した熱収縮により、鋼板が座屈して形状不良が発生することがある²⁰⁾。図10に冷却長による形状の変化について解析した結果を示す。座屈現象であるため、板厚みが薄い、板幅が広いなど剛性が低い条件で変形しやすいと考えられる。この場合、面外変形を防止するために、ロールなどによる鋼板の拘束を実施することもある。

このような平坦度不良が発生した場合は、薄鋼板ではスリットパスミルやテンションレベラー、厚鋼板ではローラーレベ

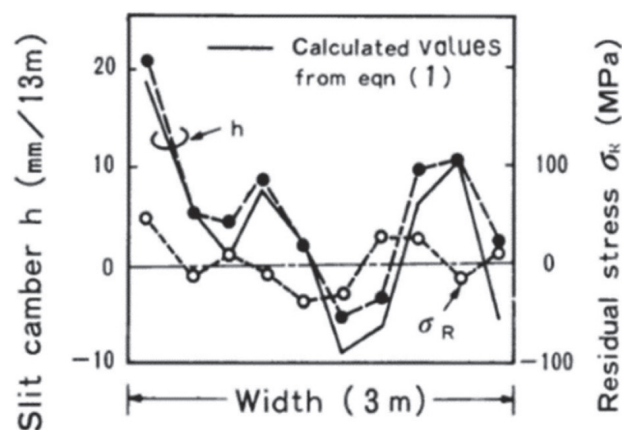


図9 スリット加工後のキャンバーの測定例¹⁸⁾

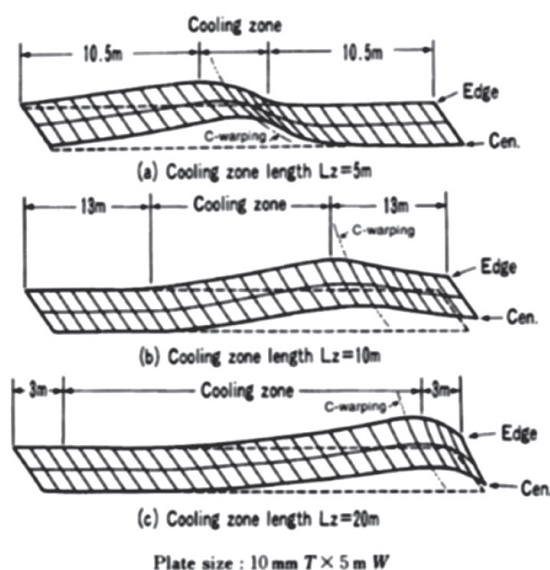


図10 長手方向温度勾配発生時の形状解析の例²⁰⁾

ラーやプレスにより矯正される。一方、追加工程による製造コストの増加や工期が長くなるなど製品の競争力低下に繋がる為、可能な限り冷却工程で平坦化することが望まれている。

3.2 スケール

熱処理では鋼板温度が冷却水の沸点よりも高いため沸騰熱伝達となるが、伝熱面の表面粗さ、熱伝導性や濡れ性などにより、沸騰曲線における極小熱流束温度は変化する。特に、鋼板表面に生成するスケールは、熱伝導率が低いため本来は断熱材として作用するが、逆に冷却を加速させる効果があるため「断熱材のパラドックス」と呼ばれる現象が発生する²¹⁾。図11にスケールの厚みが異なった時の冷却履歴について示す²²⁾。スケールが厚くなるほど冷却速度が加速する温度 (Quench Point) が高温化していることが分かる。そのため、遷移沸騰温度以下まで冷却する場合、急激に冷却速度が高くなり冷却停止温度の制御が困難になることがある。

以上から圧延中のデスケリング不良などにより冷却の均一性や冷却停止温度の制御に影響を及ぼすことがある。スケール厚みは鋼中成分、温度や時間などにより変化するため、圧延中の温度、デスケリングや冷却条件を適正に調整する必要がある。

3.3 相変態

ランアウト冷却や加速冷却では、鋼板の変態組織を制御して機械特性を調整するため、冷却速度や冷却停止温度を精度よく制御することが重要である。一方、鉄は冷却中にオーステナイトからフェライトやパーライトなどに変態するため、結晶格子の変化や炭化物の生成に伴う発熱が発生する。この時に変態発熱により冷却中の素材温度の停滞若しくは上昇することがある。図12に変態発熱を伴う冷却履歴の例を示す²³⁾。冷却停止温度を目標通りに制御するためには、鉄の相変態を正確に把握する必要がある。図13に変態発熱量の測

定例を示す²⁴⁾。変態潜熱は炭素量により異なり、20~80kJ/kg程度となっている。鋼の比熱を0.5kJ/(kg K)とした場合、瞬間的に変態発熱すると40~160℃温度が上昇するため、温度制御の上では無視できない因子である。一般的な温度予測モデルでは、熱伝導方程式を解くことにより温度予測するが、比熱を温度の関数とすることで変態発熱を比熱に含めて計算することが多い²⁵⁾。変態発熱の大きな高炭素鋼について、相変態の進行を考慮した温度予測モデルにより、冷却水の注水バンク制御を実施した例もある²⁶⁾。

4 おわりに

今回は鋼板の品質に関わる下工程の冷却プロセスについて、技術とその課題について代表的な例を説明した。冷却の均一性の確保や被冷却材の形状や機械特性などの品質面についての課題は、長年の製造ノウハウ蓄積により改善しつつあ

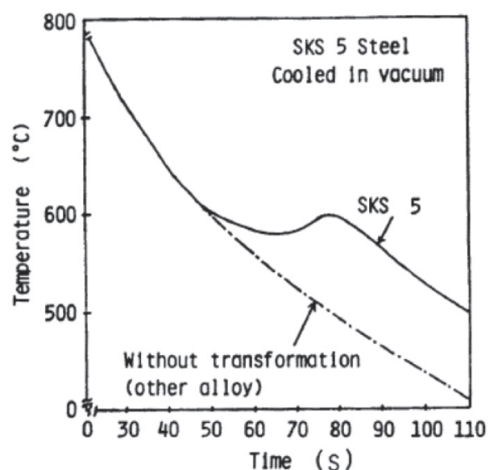


図12 変態発熱を伴う冷却履歴の例²³⁾

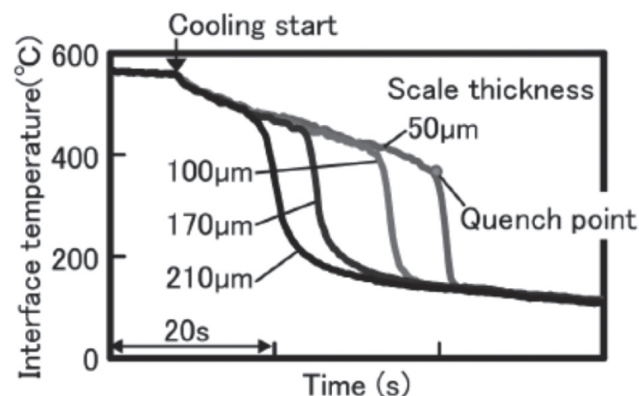


図11 スケール厚みによる冷却履歴の違い²²⁾

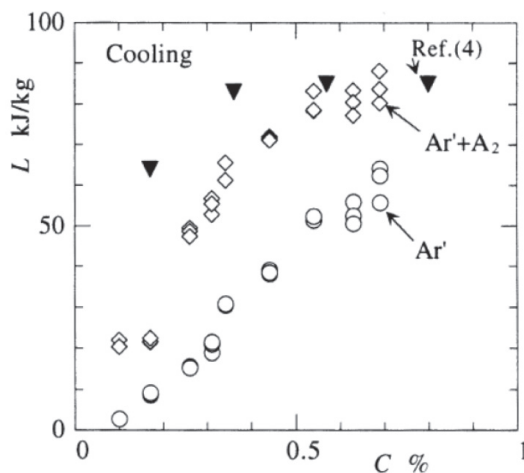


図13 変態発熱量の測定例²⁴⁾

るものの、いまだ完全に解決されたとは言えない。顧客ニーズに対応すると共に、日本鉄鋼業の競争力を維持する点からも更なる新技術の開発に期待をする。

参考文献

- 1) 小俣一夫, 吉村洋, 山本定弘: NKK技報, 179 (2002), 57.
- 2) 新山英輔, 奥本武臣, 蜂須幹雄, 清野信二: 日立評論, 47 (1965), 1603.
- 3) 戸澤康壽: 精密工学会誌, 58 (1992), 938.
- 4) Y.Miyake, T.Nishide and S.Moriya: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 20 (1980), 496.
- 5) 石橋義則, 上西徹, 永田全三, 橘久好, 播木道春: 住友金属, 47 (1995), 104.
- 6) 杉原広和, 上岡悟史, 高橋秀行, 壁矢和久: 鉄と鋼, 103 (2017), 528.
- 7) 杉原広和, 上岡悟史, 日野善道, 木島秀夫, 中田直樹: 鉄と鋼, 100 (2014), 1508.
- 8) 布川剛, 竹本裕, 岩波紀夫, 加藤平二, 樋口均一, 高見章: 石川島播磨技報, 21 (1981), 293.
- 9) L.Pichler, K.Krimpelstaetter, R.Döll and K.Weinzierl: Power cooling – Advanced Strip Cooling Technology for Hot Strip Mills for Maximum Metallurgical Flexibility, High Cooling Rates and for Saving of Alloying Elements, AISTech2021, (2021), Nashville (USA), 577.
- 10) Z.Wang, B.Wang, B.Wang, Y.Tian, T.Zhang, G.Yuan, Z.Liu and G.Wang: ISIJ Int., 59 (2019), 2131.
- 11) 小指軍夫: 制御圧延・制御冷却 圧延による材質創製の流れ, 日本鉄鋼協会監修, 地人書館, 東京, (1997), 17.
- 12) 中田直樹, 黒木高志, 藤林晃夫, 宇高義郎: 鉄と鋼, 99 (2013), 635.
- 13) 芹澤良洋, 山本龍司: 日本機械学会誌, 110 (2007), 162.
- 14) S.Samanta and M.Chalmers: “MULPIC®-The Most Powerful Metallurgical Tool in Modern Plate Production Process”, 2nd ESTAD conference, Düsseldorf (Germany), (2015).
- 15) 森忠洲: 鉄と鋼, 79 (1993), 619.
- 16) 福岡嘉和, 西本昭彦, 野副修: 日本鋼管技報, 105 (1984), 29.
- 17) 吉田博, 佐々木徹, 田中智夫, 広瀬勇次: 鉄と鋼, 68 (1982), 965.
- 18) 吉原直武, 神尾寛: 鉄と鋼, 75 (1989), 1316.
- 19) 玉野敏隆, 有吉敏彦, 重藤博司, 長田元宏: 鉄と鋼, 71 (1985), S1178
- 20) 吉原直武: 鉄と鋼, 76 (1990), 886.
- 21) 大久保英敏, 西尾茂文: 生産研究, 42 (1990), 341.
- 22) 福田啓之, 中田直樹, 木島秀夫, 黒木高志, 藤林晃夫, 高田保之, 日高澄具: 鉄と鋼, 100 (2014), 1514.
- 23) 大塚秀幸, 梅本実, 田村今男: 鉄と鋼, 73 (1987), 144.
- 24) 田島守: 鉄と鋼, 84 (1998), 547.
- 25) 連続鋼片加熱炉における伝熱実験と計算方法 熱経済技術部会加熱炉小委員会報告書: 日本鉄鋼協会共同研究会熱経済技術部会加熱炉小委員会編, 日本鉄鋼協会, (1971), 68.
- 26) 小田高士, 近藤義孝, 小西政治, 村上治則, 末広正芳, 数田俊樹: 鉄と鋼, 81 (1995), 191.

(2022年4月18日受付)