

鋼管製造プロセスにおける水冷技術

Water Cooling Technologies for Steel Pipe Production Processes

坂本明洋* 山本憲司 岡村一男
Akihiro SAKAMOTO Kenji YAMAMOTO Kazuo OKAMURA
荒井勇次 芹澤良洋
Yuji ARAI Yoshihiro SERIZAWA

抄 録

エネルギー分野をはじめとして様々な用途で用いられる高機能鋼管の熱処理における水焼入技術について、均一水冷を阻害する鋼管特有の技術課題として、周方向/長手方向の非対称性が強いことなどが挙げられる。この課題を工業的な精度で解決した量産設備としては大きく4方式に分類される。特にスプレー方式は設計の自由度が高く水量制御性も良いため、多くの特許が公開されている。新日鐵住金(株)においては、このスプレー方式の水冷技術を高度化するために、水冷速度の定量評価技術や独自の回帰分析手法を開発することで、高度な焼入シミュレータを開発した。

Abstract

Water-cooling technology is applied in various pipe heat treatment processes for high-grade pipes, especially in quench processes. Roughly 4 types of industrial water quench processes have been developed to solve the technical issues to uniformly quench pipes. Water sprays type, especially, has several merits of its flexibility and high controllability of flow rate, and so on. Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation (NSSMC) has been developing the technology to quantify and to analyze the heat transfer performance. By applying the analyzed heat transfer data to the boundary condition, NSSMC has been also developing numerical simulators of pipe quenching.

1. 緒 言

鉄鋼製品の一種である鋼管製品は、一般配管用、機械/一般/海洋構造物、熱交換器用、化学/原子力工業用、油井管/ラインパイプ用など多様な目的で使用されている。これらの目的に応じて最適なサイズ、鋼種、グレードが選択される。鋼管製造プロセスにおいては、その要求に応じて鋼管を作り分けられ、様々な形態の製管プロセスが開発されてきた。低コストで高品質の鋼管を製造する電気抵抗溶接方式(ERW)や、交叉穿孔により溶接部のない継目無鋼管を製造するマンドレルミル方式などである^{1,2)}。

特段の強度や耐食性などが要求される場合に対しては、製管ままではなく熱処理を施して製品化する。本稿においては、特に熱処理プロセスにおける水焼入技術について、鋼管特有の技術課題や新日鐵住金(株)において開発されてきた水冷評価技術について紹介する。

2. 鋼管の水冷焼入技術

2.1 水冷の課題と方式の分類

鋼管の熱処理プロセスにおいては、所定の鋼材特性(強度、靱性、耐サワー性など)を得るために必要な焼入冷却速度を達成できるよう、様々な冷却方式が用いられる。その冷却媒体としては、コストメリットおよび冷却速度から水を用いることが大半であるが、熱処理条件によってはガスジェットやオイルバスなどが選択される場合もある。以下では特段に断らない限り、水冷による焼入技術を論じるものとする。

平坦度の高い板状の材料と違い、鋼管を対象とする水冷装置の設計の際には次のような鋼管特有の難点を考慮する必要がある。

①水冷面の非対称性(内面/外面、上面/側面/下面、先端/終端)

一般的な長尺鋼管の内面と外面を同じ手段で水冷することは物理的に不可能であるため、外面用の冷却手段と内

面用の冷却手段を別個に設計する必要がある。安定製造のためには周方向、長手方向、内面と外面で均一な冷却速度とすることが理想的であるが、現実的には不可能と言ってよい。すなわち、鋼管を水平に構えた状況では、外面においては上面、側面、下面において水流の主流方向と重力の方向が変わるため、衝突圧や排水性が変化する。内面においては底部に水が溜まりやすい。また排水口は管端しかないため、長手方向で冷媒温度や蒸気と冷媒の比率が変動するために、冷却速度が不均一となる。冷却中に回転させることで周方向の冷却速度不均一を改善できるが、完全に均一にすることは困難である。

②周方向の鋼材特性の不均一

継目無鋼管においては周方向の肉厚が均一でないことがある。これは、穿孔工程においてピレットの正確な中心を穿孔することが現実的に不可能だからと言える。一方、溶接管においては溶接部（シーム部）の特性が母材と異なっているため、冷却方法を別個に用意する必要がある。これらの結果として、水冷速度が均一でも水冷中に鋼管の曲がりが発生することがあり、最悪の場合は搬送装置や水冷装置で鋼管が停止してしまうトラブルに発展することがある。

③焼き割れ

海洋や発電所などの過酷環境（高温、高圧、腐食、振動）で使用される鋼材は、Cr量をはじめとする合金成分やC量の比率が高められている。これらの材料は焼入性も硬度も高いために強水冷で焼入すると脆性割れや熱応力割れを発生させやすい。これらの材料を焼入する際は十分に冷却速度の遅い手段を選択したうえで、上記①②の非対称性も考慮した冷却方法を慎重に設計する必要がある。以上のような課題を工業的な精度で解決できる水冷方式として、古くから図1に示すような水冷装置構成が熱処理条件に応じて選択されてきた。ただしいずれの方式においても、長手方向や周方向の冷却速度に不均一性が発生するため、想定される冷却速度のばらつきの範囲内で製品規格を満足する材料性能が得られるような合金成分設計も不可欠である。

図1(a)に示す浸漬冷却は最も簡便な強冷手法と言える⁴⁾。ただし対象材が巨大になるほど搬送装置などに対する負担が大きくなる。また水槽への投入時には管内部に水が存在しないため、鋼管の浮き上がりトラブルや冷却不均一の問題が発生することがある。また外面が蒸気膜で覆われて冷却速度が低下することを防ぐため、槽内攪拌機構を設置しておくことが望ましい。

この浸漬水冷の難点を解決し、比較的簡便に強冷する方法としてラミナ冷却方式が考案され実用化されてきた⁵⁾。1990年代後半に多く出願された特許には、図1(b)に示すとおりスリット数を2列以上とすることで水流を安定させ、均一強冷却を実現させる技術が開示されている。なお上半

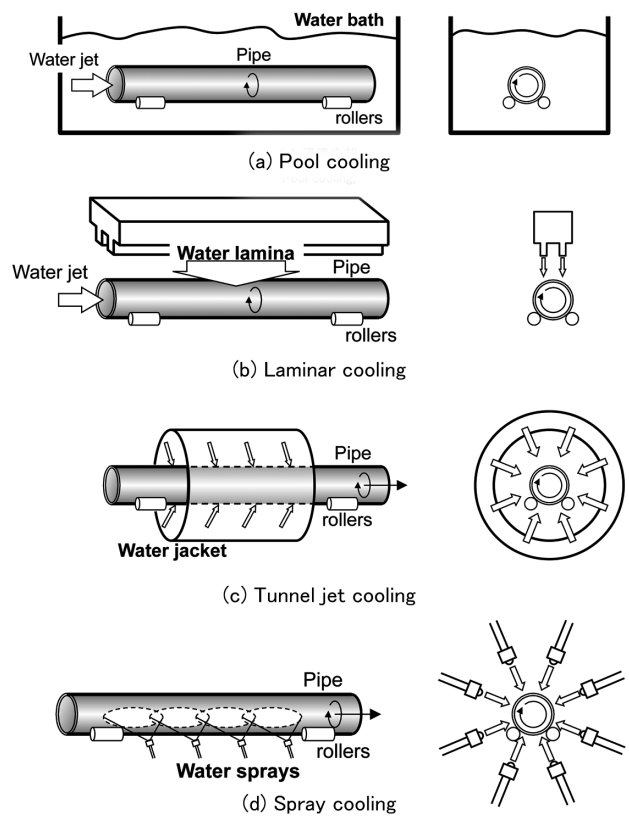


図1 代表的な鋼管水冷の構成
Cooling methods for steel pipes

面のみが強く冷却されるため、周方向冷却むら防止のための鋼管を回転させる装置構成が望ましい。

浸漬冷却とラミナ冷却はバッチ処理（定置処理）を想定したものであるため、鋼管を装置内に出し入れするためのリードタイムなどの無駄時間が発生し、処理速度が比較的遅い。これに対し、連続処理で強冷を得られる方式が図1(c)トンネル冷却である⁶⁾。この方式では鋼管外周を包むように設置した巨大なジャケット内を十分に充満させられるだけの大流量の水を流すことにより、浸漬冷却と同等以上の周方向冷却均一性と外面冷却速度を得ることができる。一方で長手方向に送管しながら管内に大量の冷却水を供給することは難しいため、外面の方が強く焼入される傾向になりやすい。

図1(d)に示すスプレー冷却はバッチ式／通管式のいずれの方式にも対応可能な冷却方式である⁷⁾。ノズルの種類や配置方法などの自由度が高く、強冷、弱冷、制御冷却など目的に応じた水冷装置を設計することができる。一方で、ノズルの配置方法が不適切であれば均一冷却性が担保できない。またノズル閉塞を防ぐための対策を講じておく必要がある。

2.2 公開情報から俯瞰した鋼管冷却技術のトレンド

国内外で公開されている鋼管の冷却技術に関する学術論文は極めて少ない。この原因は、大学などの公的研究機関においては、前節で述べたように鋼管の水冷面の非対称性

のために基礎的な研究体系を構築することが難しく、また大径管の冷却実験はコストなどの面から難しいことが一因ではないかと考えられる。また企業においては、製造技術に直結する技術であるために、各企業の知的財産として権利化されるか、企業内で秘匿化される場合が多いと考えられる。国内の鉄鋼企業の技報では、鋼管の技術展望論文の一部で水冷技術が簡単に触れられているに過ぎない¹³⁾。

一方、近年（1990年～2012年）の鋼管冷却装置に関する国内特許件数を調査したところ、鋼管の焼入技術を中心に67件公開されていた。このうち冷却媒体としては水を用いることが多く（87%）、その他の冷却媒体としてはガスジェット、オイル、液体窒素、固体（ガイドロールなど）が稀に用いられる。冷却速度や材質面で特段の要求がない限り、水を用いるコストメリットが大きいと認められる。

水冷装置構成は図1に示した4種に大別される⁴⁷⁾。いずれも古くから存在する技術であるが、加速冷却方法、均一冷却方法（特に鋼管の曲がり防止）、冷却速度制御方法に関しての新知見が出願されている。出願件数の推移から、次のような技術トレンドが観察された。

- ①ラミナ冷却は1990年代後半に集中して出願されており、この時期に技術開発が盛んであったと考えられる。ラミナの方式として、2列以上のスリットラミナに関連した出願が多い。
- ②スプレー冷却は年代を問わず万遍なく出ており、幅広く使用されている技術であると言える。またターンドアウンを広く取りやすいことから、制御冷却技術との相性も良い。
- ③浸漬冷却、トンネル冷却の出願件数は疎らで少ない。これらの技術は大流量で強冷却する目的で用いられることが多く、制御冷却などの新規性を付加しにくいと認められる。

3. 新日鐵住金における鋼管冷却技術

3.1 鋼管の製造設備と試験設備

新日鐵住金における鋼管製造設備について、例えば西川が代表的な設備の一覧表および工程フロー図を紹介している²⁾。これらの工程の一部は、水冷焼入設備をはじめとする種々の熱処理設備を備えている⁴⁷⁾。その水冷能力評価のため、各種の試験設備も導入されている。図2はその一例であり、浸漬水冷、スプレー水冷などの冷却モードに応じて多様な小規模水冷試験が可能な設備を構築している。この試験設備で定量計測した冷却温度データより、以下に述べるような分析評価を実施し、水冷現象や焼入現象の数値シミュレーションモデルを構築している。

3.2 水冷速度評価技術

鋼材を水冷する際、鋼材面においては水の沸騰形態が様々に変化するために、水冷速度が複雑に変化する。新日

鐵住金においては、図2の鋼管冷却試験装置をはじめとする物理試験から沸騰特性曲線の定量評価と整理分析を試行してきた。

沸騰特性曲線の系統的研究は1930年代のJakobや抜山らの研究を嚆矢として、現在に至るまで様々な研究が続けられている⁸⁾。特に冷媒として水を用いる状況は、鋼材の熱処理や原子炉の冷却水配管内で頻繁に表出する現象であるため、研究開発が盛んである⁸⁻¹⁰⁾。

一方、沸騰冷却中の冷却形態は非線形性の強い現象である。すなわち、固体面（鋼材面など）から冷媒へ熱移動する形態としては、対流伝熱、核沸騰、遷移沸騰、膜沸騰の4形態があり（図3）、水冷中にこれらの冷却形態が連続的に遷移する⁸⁾。それぞれの形態における熱移動量や遷移するタイミングは、様々な影響因子（水量密度、スタンドオフ、水温、液滴径、液滴速度、気温、鋼材表面温度、鋼材表面状態、等）に左右されるため、全ての因子を網羅的に考慮した沸騰特性曲線の確立はまだ途上にあると言える。

日本鉄鋼協会の熱経済技術部会において、多数の沸騰特性曲線報告結果を冷却方式毎に分類整理し、沸騰形態に応じて水量密度と水温の影響の重回帰整理をしている⁹⁾。例えばスプレー冷却の衝突面における熱伝達係数について、水量密度および鋼材表面温度の累乗および指数関数の重回帰

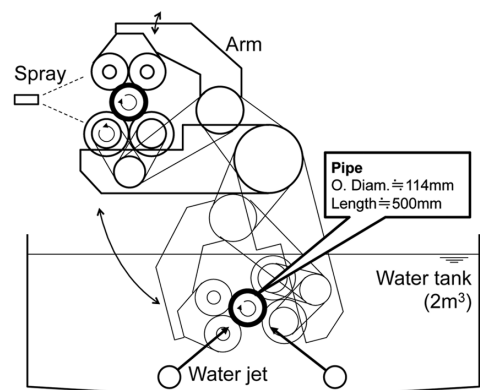


図2 鋼管冷却試験装置
Experimental equipment of cooling pipes

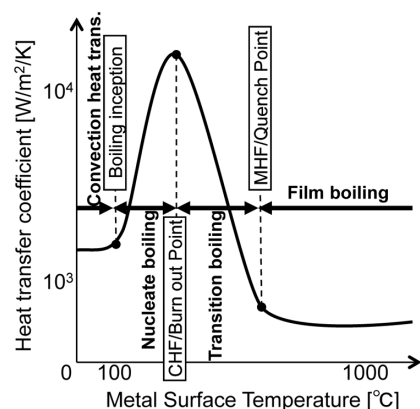


図3 沸騰特性曲線
Boiling curve

式を与えている。なお水温が殆ど考慮外であることと、沸騰状態の境界温度で曲線が不連続になる所に難点がある。

一方、日本機械学会においては多数の基礎研究成果を沸騰形態ごとに分類して紹介している^{8,10)}。網羅的な整理は限定的であるものの、一部の研究では無次元整理式が与えられているため汎用性が高い。例えば、静水中に円柱を水平に浸漬水冷する場合の膜沸騰域での冷却速度について、Bromleyの有次元整理式をPitshmanらが拡張した無次元整理式を紹介している⁸⁾。

これらの整理式を使用する際は、その適用範囲に注意を払いつつ、鋼材表面の温度域（膜沸騰、遷移沸騰、核沸騰、対流冷却）毎に場合分けする必要がある。この作業は煩雑であるうえに、温度域の結合部分で整合性が崩れたり、適用対象によっては整理式の範囲外であったりするなどの難点がある。

新日鐵住金においては、図2の試験機にてスプレー水冷の噴出水量や水温を種々変更して冷却速度を計測する試験を実施し、水量と水温の影響を定量評価した。回帰分析にあたり二相曲線を利用することで、先述の適用範囲毎の場合分けの煩雑さを解消する独自手法を開発した。

二相曲線（Biphasic curve）とは、次式で定義される非線形曲線である。

$$h = h_1 + \frac{h_2 - h_1}{1 + \exp(m_1(T_s - T_1))} + \frac{h_3 - h_1}{1 + \exp(m_2(T_2 - T_s))} \quad (1)$$

ここで h が熱伝達係数係数 ($W/m^2/K$)、 T_s が鋼材表面温度 ($^{\circ}C$) であり、他は定数係数である。この係数を適切に選べば、全ての鋼材表面温度域における熱伝達係数変化を近似可能なうえ、各係数は冷却特性の物理量に直結した情報を有するという特長がある。すなわち、 h_1 、 h_2 、 h_3 、 T_1 、 m_1 、 T_2 、 m_2 はそれぞれ極大熱流束点近傍の熱伝達係数、対流熱伝達の熱伝達係数、膜沸騰の熱伝達係数、核沸騰域での変曲点の鋼材表面温度と傾き、遷移沸騰域での変曲点の鋼材表面温度と傾きに対応する（図4）。またクエンチ温度 T_q は次式で一意に与えられる。

$$T_q \cong T_2 + m_2/2 \quad (2)$$

従来の回帰分析方法では膜沸騰域と遷移沸騰域を分離して回帰分析するため、その分離を手作業で行うか、適当なロジックで自動分離するしかないため、技術者に依存したクエンチ点が算出されるという難点があった。さらに、各係数から物理的な意味を読み取ることが困難である。二相曲線では全温度域を一本の二相曲線で近似するため、このような不確定性を排除できる利点がある。

表1に熱伝達係数計測試験の条件範囲を示す。表面にスケールが付きにくい材料として、SUS310Sを利用した。この理由は表面スケールの不規則性により計測データの再現性が著しく低下することを避けるためである。15mm厚の板状鋼材を電気加熱炉で1000 $^{\circ}C$ に加熱、均熱したあと、

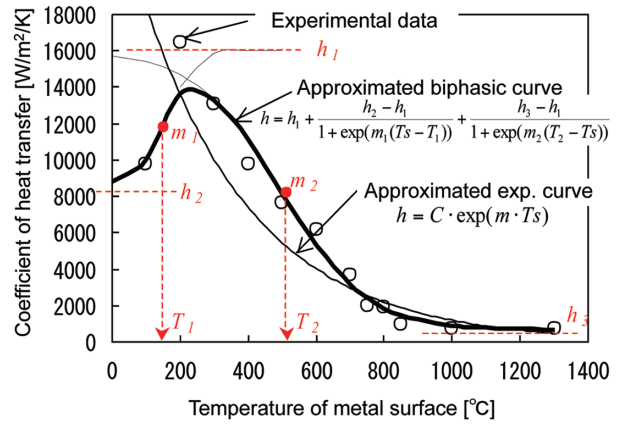


図4 二相曲線による沸騰曲線の近似
Approximated boiling curve by biphasic curve

表1 熱伝達係数計測試験条件
Experimental conditions to identify heat transfer coefficients of water spray

Steel plate (test section)	Grade	SUS310S
	Size	T15×H120×W324 mm
Water spray (coolant)	Water flux W	80 - 1400 L/min/m ²
	Water temperature T_w	13 - 50 $^{\circ}C$

炉から手動搬出し、30秒以内に水冷を開始した。この試験材には熱電対が、冷却面から1mmの厚み位置に基盤目状に裏面から埋め込まれており、各位置における水冷中の温度を経時計測している。水冷に使用したノズルは楕円スプレーノズルで、水量とスタンドオフを種々変更（水量密度換算で80～1400L/min/m²）した。また水温は13 $^{\circ}C$ ～50 $^{\circ}C$ の範囲で設定した。

二相曲線を利用して熱伝達係数を重回帰分析する手順を図5に示す。測温結果より、各測温位置における冷却面の熱伝達係数を逆計算で算出し、非線形最小自乗法で二相曲線近似した。さらに二相曲線係数を各試験条件変数の累乗関数と近似して重回帰分析して(3)式に示す。

$$\ln K = C_0 + C_1 \ln W + C_2 \ln T_w \quad (3)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} & \mathbf{K}: \text{Vector of variables} \\ & = (h_1, h_2, h_3 [W/m^2/K], T_1, T_2 [^{\circ}C], m_1, m_2 [-])^T \\ & C_0, C_1, C_2: \text{Vectors of constants} \\ & W: \text{Flux of water [L/min/m}^2] \\ & T_w: \text{Temperature of water [}^{\circ}C] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

原データと回帰結果との平均自乗誤差は24%であり、実用上十分な精度で回帰できた。これを次節で述べる焼入シミュレータの境界条件として与えることにより、焼入状態の分布を詳細に予測分析可能な数値シミュレータを構築した。

3.3 焼入現象の数値シミュレーション技術

鋼材の熱処理が適正でないとな局所的な焼入過不足、焼入ひずみによる寸法精度悪化、高い残留応力、焼割れなどの問題が発生してしまうため、理想的には設備設計段階で、

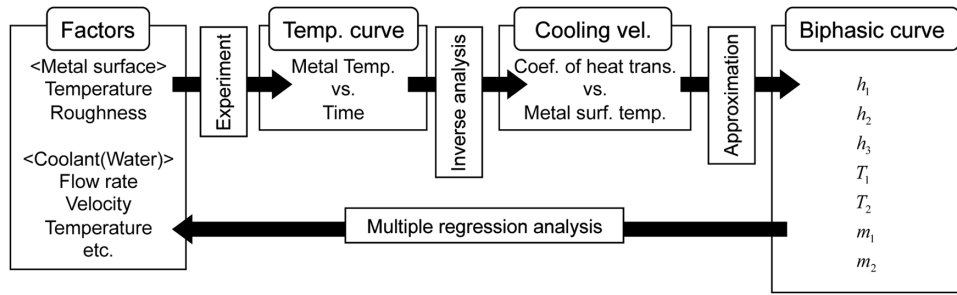


図5 二相曲線を利用した熱伝達係数の重回帰分析手順
Sequence of multiple regression analysis for heat transfer coefficient by biphasic curve

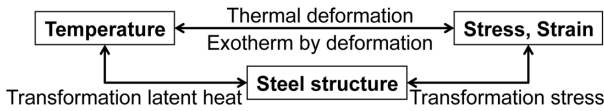


図6 変形解析の連成モデル
Numerical analysis model of deformation

熱処理が適正に実施されているか判定することは非常に重要である。このためのツールとして、熱処理を数値模擬する熱処理シミュレータの開発が進められてきた。

熱処理シミュレータは、解法が比較的良好に定まっている熱弾塑性解析ソフトウェアを基盤として、鋼材組織の相変態とそれに伴う熱的・力学的材料特性の変化、体積変化、潜熱、変態塑性を連成させて解き、結果として熱処理組織の相変態比率、硬度、残留応力、ひずみ量を得ることを目的とする(図6)^{11,12)}。これを実現した商用ソフトウェア(SYSWELD, DEFORM-HT, DANTE, GRANTASなど)が既に開発され、運用されている。

一方、新日鐵住金においては汎用有限要素法ソフトウェア(ABAQUS, Marcなど)に独自のサブルーチンを組み込むことでシミュレータを実現させてきた¹³⁾。

シミュレーション例として、鋼管の外面からスプレー水冷で焼入した状況を模擬し、肉厚方向および長手方向の焼入後残留応力を計算した結果を図7に示す。鋼管の内外面で応力方向(圧縮が負、引張が正)が反転する様子や、最大残留応力は鋼管の端面に発生する様子が確認できる。

4. 結 言

鋼管の水焼入技術について、鋼管特有の技術課題や一般的な水冷方式、および新日鐵住金における技術開発内容を紹介した。高機能材料のニーズや合金成分低減によるコストダウンのニーズは今後も益々高まると予想されており、熱処理技術に対する期待は高いと予想される。これらのニーズに応えるために、本稿で紹介した技術開発をより一層洗練し深化させていくことで、より高機能な冷却設備を開発していく必要があると考える。

参考文献

1) 曾根正輔：鋼管の技術進歩と今後の展望. 新日鉄技報. (362),

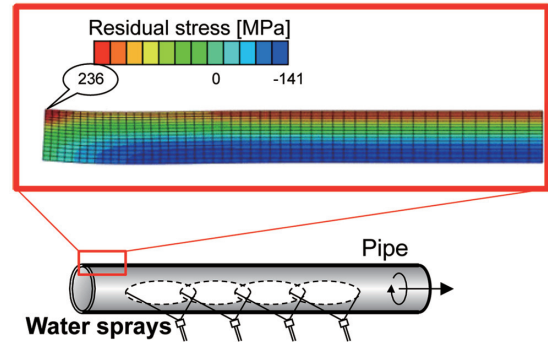


図7 鋼管の焼入シミュレーション例
Sample simulation of pipe quenching

1-5 (1997)
2) 西川幸一良：当社鋼管の主要製品と製造プロセス. 住友金属. 46 (1), 15-26 (1994)
3) 豊岡高明：鋼管研究 10 年の歩み. 川崎製鉄技報. 31 (1), 55-59 (1999)
4) 日本特許出願公開 2012-052197. 公開日 2012.03.15
5) 日本特許出願公開 1996-333636. 公開日 1996.12.17
6) 日本特許出願公開 2012-172173. 公開日 2012.09.10
7) 日本特許出願公開 1998-263687. 公開日 1998.10.06
8) 日本機械学会編：沸騰熱伝達と冷却. 日本工業出版, 1989
9) 熱経済技術部会鋼材強制冷却小委員会：鋼材の強制冷却. 日本鉄鋼協会, 1978
10) 日本機械学会：伝熱工学資料. 改訂第5版. 日本機械学会, 2009
11) Jutta Rohde and Anders Jeppsson: Literature review of heat treatment simulations with respect to phase transformation, residual stresses and distortion. Scandinavian J. of Metallurgy. 29, 47-62 (2000)
12) Inoue, T., Wang, Z.: Coupling between stress, temperature, and metallic structures during processes involving phase transformations. Materials Science and Technology, 1, 845-850 (1985)
13) 福本学, 吉崎正敏, 岡村一男, 山本憲司, 今高秀樹：ヘリカルギアの浸炭焼入れ3次元シミュレーション. 材料. 50, 598-605 (2001)



坂本明洋 Akihiro SAKAMOTO
プロセス研究所 プロセス技術部
主幹研究員 博士(工学)
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



荒井勇次 Yuji ARAI
鉄鋼研究所 鋼管研究部 主幹研究員



山本憲司 Kenji YAMAMOTO
鉄鋼研究所 材料信頼性研究部 研究員



芹澤良洋 Yoshihiro SERIZAWA
プロセス研究所 プロセス技術部
主幹研究員 工博



岡村一男 Kazuo OKAMURA
技術開発本部 フェロー
博士(エネルギー科学)