

パルス幅変調制御による噴水焼入れ法の開発

Development of a Water-Spray Quenching Method
by Pulse-Width Modulation Control

齊藤 数馬*

Kazuma Saito



小林 幸義*

Yuki Yoshi Kobayashi



田中 慎二**

Shinji Tanaka



熊谷 保之***

Yasuyuki Kumagai

要 旨

鋼材の油焼入れは火災の危険や油煙による作業環境悪化といったデメリットがあり、当社はこれに代わる冷却方法として噴水冷却による方法を開発した。噴水冷却中に噴射流量密度を増減させることで鋼材の冷却を制御することはすでに多くの文献で報告されている。しかし、油焼入れの特性を噴射流量密度低減により得ようとする、微粒化した液滴群が鋼材の高温面に衝突する前に蒸発し、油焼入れの特性が噴水冷却では得られないことがわかった。当社はこの問題を解決するために、パルス幅変調制御を用いた新たな噴水焼入れ法を開発し、油焼入れ相当の冷却状態を噴水冷却により得ることに成功した。また、本法による焼入れを大型鍛鋼品へ適用し、それらの品質を油焼入れ品と比較することで本法が油焼入れの代替となることを確認した。さらに、本法により大型ロータシャフトの鍛鋼品焼入れ時における冷却速度を任意に制御することにも成功した。

— Synopsis —

Japan Steel Works M&E, Inc. (JSW M&E) has developed a water-spray quenching method as an alternative to oil quenching due to the disadvantages of the latter such as the risk of fire and the deterioration of the work environment with oil smoke. Controlling the cooling state of steel by increasing or decreasing the spray flow density during spray cooling has already been reported in many documents. However, when JSW M&E tried to obtain the characteristics of oil quenching simply by reducing the spray flow density, the atomized droplet groups evaporated before colliding with high-temperature surfaces of the steel, and it was found that the characteristics of oil quenching could not be obtained by water-spray cooling. JSW M&E has, therefore, developed a new water-spray quenching method using pulse-width modulation control to solve the above problem and has succeeded in obtaining a cooling state equivalent to oil quenching using water-spray cooling. Additionally, it was confirmed that this method can be used as an alternative to oil quenching by applying this method to large, forged steel products and comparing their qualities with oil-quenched products. Furthermore, JSW M&E has succeeded in arbitrarily controlling the cooling rate during quenching of a large rotor shaft using this method.

1. 緒 言

鋼材の油焼入れは、フェライト析出温度域である高温域を速く冷却しつつ、マルテンサイト変態が起こる低温域を冷却するという冷却特性を持っており、鋼材の機械的性質を確保しながら焼割れを防止できるといったメリットがある。一方、

油焼入れは火災の危険や油煙の発生による作業環境悪化といったデメリットもある。油焼入れに代わる冷却方法として噴水冷却による方法を考案した。噴水冷却とは、微粒化した液滴群を用いて、顕熱および潜熱移動により被冷却体を冷却する方法である。一般に、噴水焼入れは液体浸漬焼入れよりも制御性に優れているとされている。したがって、噴水

*: 日本製鋼所 M & E 株式会社 室蘭製作所 素形材製造部 / Materials Manufacturing Department, Muroran Plant, Japan Steel Works M&E, Inc.

** : 株式会社 日本製鋼所 経営企画室 / Corporate Planning Office, The Japan Steel Works, Ltd.

*** : 日本製鋼所 M & E 株式会社 室蘭製作所 / Muroran Plant, Japan Steel Works M&E, Inc.

焼入れは油焼入れの代替法となるだけでなく、冷却速度変化によって水と油の間となるような冷却を得ることも期待され、それによる機械的性質改善、製品開発も期待される。このような背景のもと、当社では油焼入れ法の代替となる噴水焼入れ法を開発し、大型鍛鋼品へ本法を適用した。本報ではそれらの結果について報告する。

2. 油焼入れの代替となる噴水焼入れ法の開発

油焼入れ相当の冷却を噴水焼入れにより得られるかどうかを確認するため、図1に示す噴水焼入れ試験装置で噴水焼入れ試験を実施した。本装置は1流体スプレーノズルにて4方向から水が噴射される構造であり、配管の途中に取り付けた流量計で流量を測定しながら流量制御が可能である。試験材としてφ300 mm×1200 mmのNiCrMoV鋼製円柱材を用意した。これにドリル穴加工を行い、穴内に熱電対を装着して油焼入れ時の内部温度を測定した。その結果を図2に示すが、油焼入れでは700℃から400℃に温度が低下する間に、500℃程度を境に冷却速度を急激に変化させるような冷却状態を得ている。液滴群の噴射を利用した場合も、油焼入れに代わる冷却方法としては同様の冷却状態が求められる。これを達成するため、以下の手順で噴水焼入れにて油焼入れと同等の冷却を得るために必要な噴射流量変化を求めた。

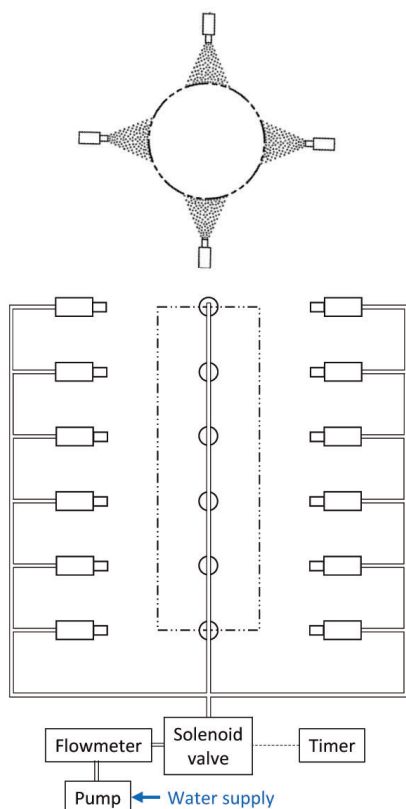


図1 噴水焼入れ試験装置（上が平面図、下が正面図）

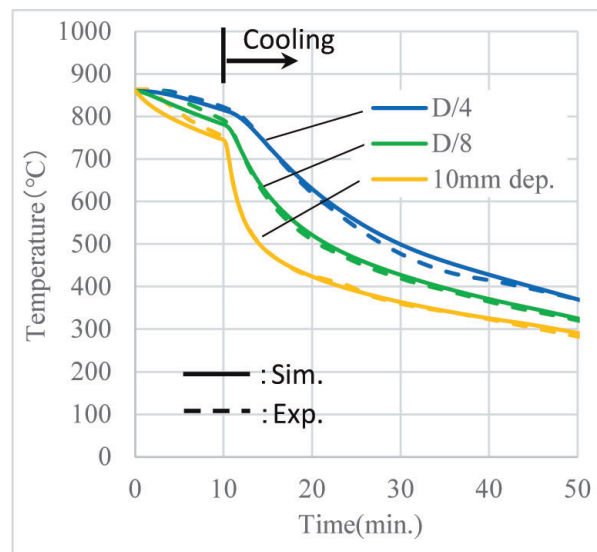


図2 油焼入れ時の冷却カーブ

- (1) 油焼入れ時の冷却カーブをもとに FEM 解析で油焼入れ時の熱伝達係数を逆計算して求める。
- (2) 噴水冷却中の噴射流量密度 W ($L/m^2 \cdot min.$) と熱伝達係数 α ($kcal/m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$) ($= \times 1.163 W/(m^2 \cdot K)$) の関係式、(1)式 (400℃未満)⁽¹⁾ および (2)式 (400℃以上)⁽²⁾ を検証試験にて図1の試験装置の場合に合うよう補正。

$$\alpha = A \cdot W^{0.8} \cdot 10^{B \cdot \theta_s} \quad (\theta_s = 125^\circ C \sim 475^\circ C) \quad (1)$$

$$\alpha = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_h^2 + T_1^2) \cdot (T_h + T_1) + 2.292 \times$$

$$10^8 \frac{W^{0.616}}{\theta_s^{2.445}} \quad (\theta_s = 400^\circ C \sim 800^\circ C) \quad (2)$$

(T_h, θ_s : 表面温度、 T_1 : 水温、

ε : 放射率(0.8)、

σ : ステファン・ボルツマン定数、 $A \cdot B$: 定数)

- (3) 油焼入れ時の熱伝達係数に対応した噴射流量密度を温度ごとに求める。

図2に油焼入れ時の冷却カーブ測定値と解析値、図3に逆計算して求めた油焼入れ時の熱伝達係数、図4に油焼入れ時の熱伝達係数に対応した噴射流量、すなわち油焼入れと同等の冷却を得るための噴射流量変化を示す。なお、本試験材の両端部を除いた外表面積が約1 m²であり、ノズルから噴射された液滴群すべてが冷却に寄与するものと仮定すると、噴射流量密度と噴射流量は等しくなる。

図5は、図4の噴射流量条件で連続噴射を行いφ300 mm試験材を焼入れした結果である。図5では、鋼材表面から10 mm深さの位置では温度が低下して一旦500℃程度になった後に、再度温度が上昇する現象が認められた。これは鋼材温度と噴射条件が時間的に

変化したことにより、微粒化した液滴群が試験材の高温面に到達する前に蒸発する状態になった、すなわちライデンフロスト現象が生じた可能性があることを示している。したがって、油焼入れの特性を連続噴射中の噴射流量密度低減により得ようとする、微粒化した液滴群が鋼材の高温面に衝突する前に蒸発し、油焼入れの特性が噴水冷却では得られないことがわかった。

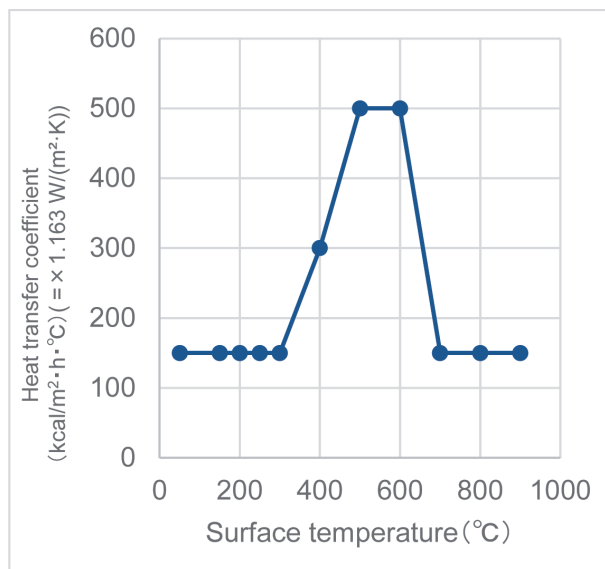


図3 油焼入れ時の熱伝達係数

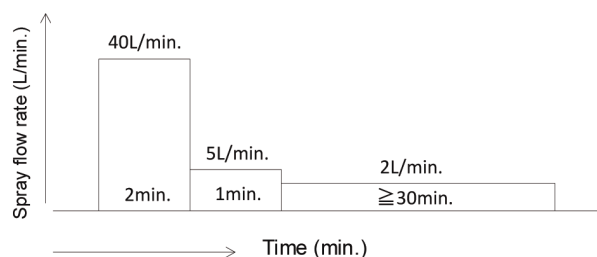


図4 油焼入れと同等の冷却を得るための噴射流量変化

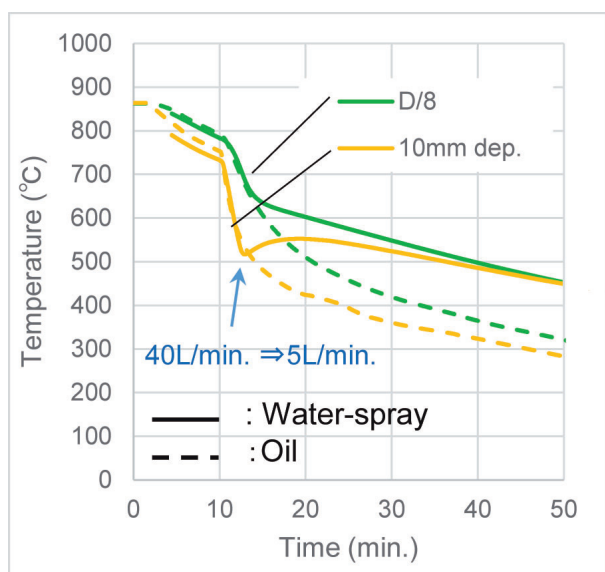


図5 連続噴射による冷却試験結果

微粒化した液滴群を高温面へ強制的に到達させる方法として、2流体ノズルを用いてエアブローさせることが一般的に考えられるが、飛散液滴(水蒸気)による作業環境悪化や導入コスト、制御の簡易さの面で1流体ノズル(水のみ)の方が望ましい。図5で明らかとなったように、1流体ノズルによる噴水焼入れ中の噴射流量変化は、被冷却体表面温度に対応したある一定量以上の噴射流量を確保しながら行われる必要がある。そこで、液滴群が高温面に衝突できる一定以上の噴射流量で冷却途中に噴射をパルス化し、パルス幅とパルス時間間隔を変化させること(パルス幅変調制御)で一定時間あたりの平均噴射流量を決定する方法を考案した。図6は図4の油焼入れと同等の冷却を得るための噴射流量変化をパルス化したものであり、電磁弁に取り付けたタイマーなどでパルス幅とパルス時間間隔を変化させるパルス幅変調制御による噴射を行えば、連続噴射では困難であった低噴射流量での噴水焼入れが可能になると考えた。図7は、噴射流量が図6に示す流量となるようにあらかじめ算定し、かつ実際の温度変化をモニターし流量調整を行いながらパルス幅変調制御による噴射を行いφ300 mm試験材を冷却した試験結果を示している。油焼入れによって冷却した際の温度変化とほぼ同じ結果が得られており、液滴群の噴射によって適正な冷却結果が得られている。パルス幅変調制御の最適化によって、油焼入れの代替法となる噴水焼入れ法を確立することができた。

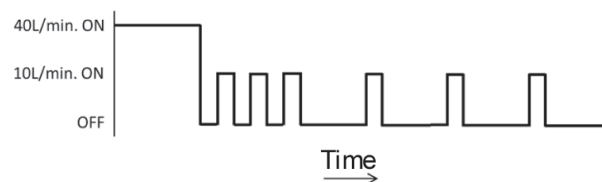


図6 パルス化した噴射流量変化

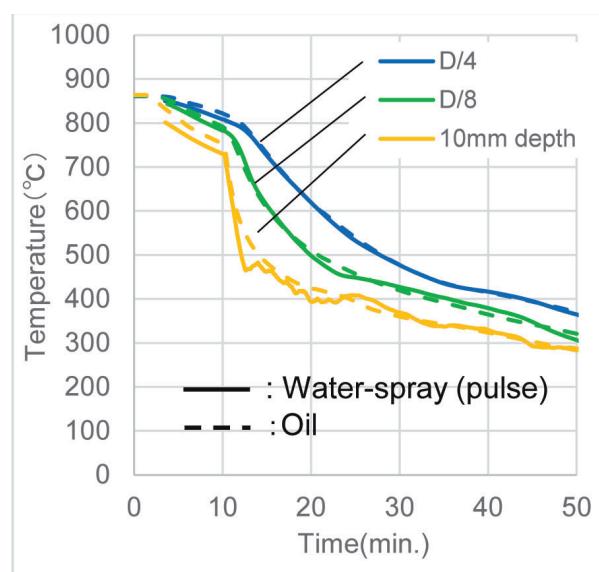


図7 パルス噴射による冷却試験結果

3. 長尺軸材製品への噴水焼入れ適用

開発した噴水焼入れ法を実際に大型製品へ適用するために、図 8 に示す長尺軸材用噴水焼入れ装置を製作した。本装置を用いて、φ 250 / φ 300 mm、全長約 6.5 m の NiCrMoV 鋼製長尺製品に噴水焼入れを行った。なお、噴射流量条件は 2 章で得た知見を参考にした。噴水焼入れを行った製品の機械的性質を図 9 に示すが、油焼入れ品と同等の強度－靱性バランスが得られていることがわかる。図 10 には油焼入れと噴水焼入れの曲がりの比較を示す。最大曲がり量は同等であったが、平均では噴水焼入れの方が大きかった。これらはノズルから噴射される水の重なりが不均一であったためと推定しており改善が必要であるが、噴水焼入れされた製品は油焼入れ品と同様のプレス矯正が実施され、その後の機械加工では問題なく製品形状を確保できたため製品として出荷された。

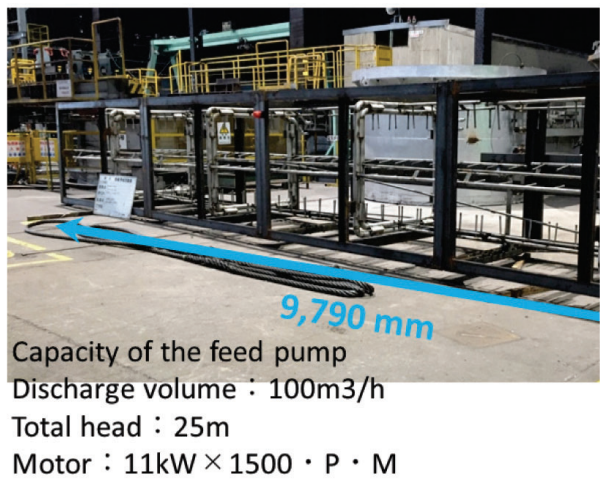


図 8 長尺軸材用噴水焼入れ装置

4. ロータシャフトへの噴水焼入れ適用

従噴水焼入れを高 Cr ロータへ適用することを検討した。高 Cr ロータは焼入れ加熱温度が高く加熱保持時間も長い。そのため生成する酸化スケール層が厚く、表面熱伝達条件がこれまでと異なる可能性がある。また、ロータには段差があり、径の大小によってノズルから冷却面までの距離が変化するため、同じ噴射流量密度でも液滴の当たる勢いに差が生じる。そのためライデンフロスト現象を抑えながら噴水焼入れを行うには噴射流量密度だけでなく噴射打力についても考慮する必要がある。さらに高 Cr 鋼は割れやすいため実機サイズの試験材を製作して繰り返し冷却試験を行うことが困難と推察し、事前に小試験材による試験を実施した。

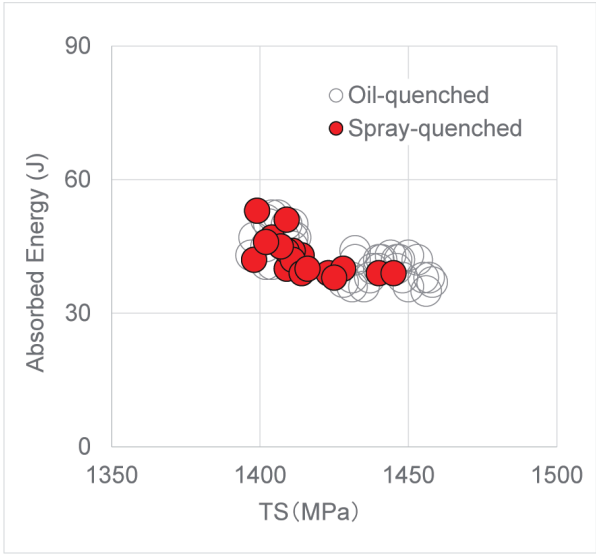


図 9 引張強さと吸収エネルギーの関係

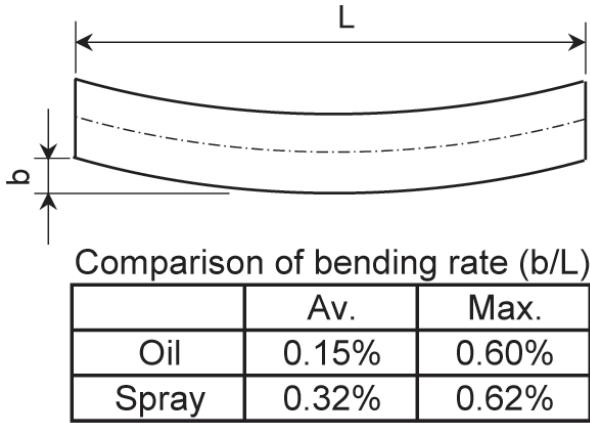


図 10 曲がりの比較

4.1 酸化スケールの影響

噴水焼入れ中の表面熱伝達条件に酸化スケールが与える影響を調査した。供試材には変態潜熱の影響を排除することを目的にオーステナイト系ステンレス鋼を選定し、φ 80 mm × 320 mm に加工したうえで内部温度測定用にドリル穴加工を施し熱電対を挿入して内部温度を測定した。高 Cr ロータは一度の焼入れ加熱によって約 0.35 mm 程度のスケール層が生成することがわかっており、ステンレス鋼に 0.35 mm のスケール層を生成させるには事前試験より 1100℃ × 13.5 Hrs. 必要と判明した。図 11 に 1100℃ で 13.5 Hrs. 保持して酸化スケール 0.35 mm とした試験材と 0.5 Hrs. 保持の試験材に同一噴射流量密度で噴水焼入れした結果を示す。0.5 Hrs. 保持ではライデンフロスト現象が発生するが、13.5 Hrs. 保持では発生しない。これは高温加熱面の表層に熱伝導率の低い酸化スケール層が付着することで表面温度が下がり、液滴群の到達を容易にしているためである。その結果両者の冷却カーブに差が生じている。したがって、ライデンフロスト現象を抑える

噴射条件を設定するためには酸化スケールも考慮する必要があることがわかった。

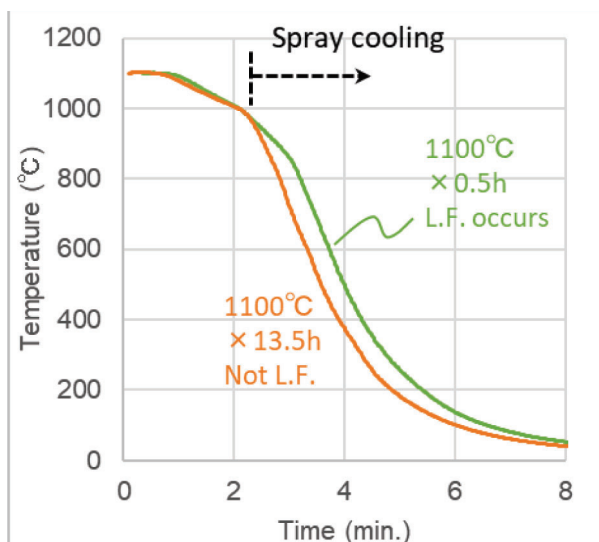


図11 スケール有無の影響

4.2 ライデンフロスト現象を抑える噴射流量密度と噴射打力

高 Cr ロータ表面酸化スケール状態(1100°C×13.5 Hrs.保持)でライデンフロスト現象が発生する閾値を調査した。ノズルの種類やノズル - 試験材間距離を変更して噴水焼入れを繰り返した結果、図12に示すように噴射流量密度 $\geq 500 \text{ L/m}^2 \cdot \text{min.}$ 、噴射打力 75 N/m^2 以上の噴射条件が必要ことが判明した。なお、噴射打力 H は(3)式によって計算される。

$$H = r \cdot Q \cdot C_v \cdot V \quad (3)$$

(r : 水の比重 = 1000 kg/m^3)

Q : 流量 m^3/s , C_v : 大気中の流速減退係数,

V : 流速 m/s)

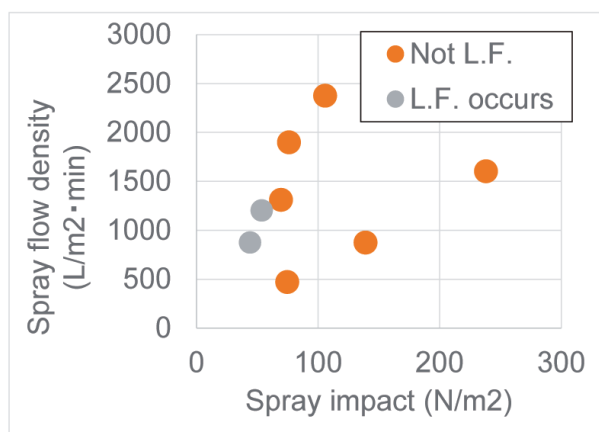


図12 打力と噴射流量密度

4.3 高 Cr ロータへの噴水焼入れ適用

上記で求めた高 Cr ロータ噴水焼入れに必要な噴射流

量密度と噴射打力をもとに、ロータ用噴水焼入れ装置を設計、製作した。高 Cr 試験ロータとして図13に示す最大径 $\phi 1200 \text{ mm}$ 、全長 4500 mm (25トン)を用意し、これの噴水焼入れ条件を決定するために、FEM 解析によって油焼入れと同等となるパルス噴射パターンを決定した。焼入れ中に実際の温度変化をモニターし流量調整を行いながらパルス幅変調制御による噴射を行った結果、図14に示すように油焼入れと同等の冷却カーブを得ることができた。また図15には胴径 $\phi 750 \text{ mm}$ ロータに対し意図的に油焼入れよりも冷却を速くするためにパルス噴射パターンを設定し、噴水焼入れした結果を示す。このように本噴水焼入れ法は油焼入れの代替法となるだけでなく、任意の冷却状態を得ることも可能であり、製品の機械的性質改善や新製品素材開発に繋がる方法となる。なお、いずれのロータにおいても焼割れは発生しなかった。



図13 高 Cr 試験ロータ

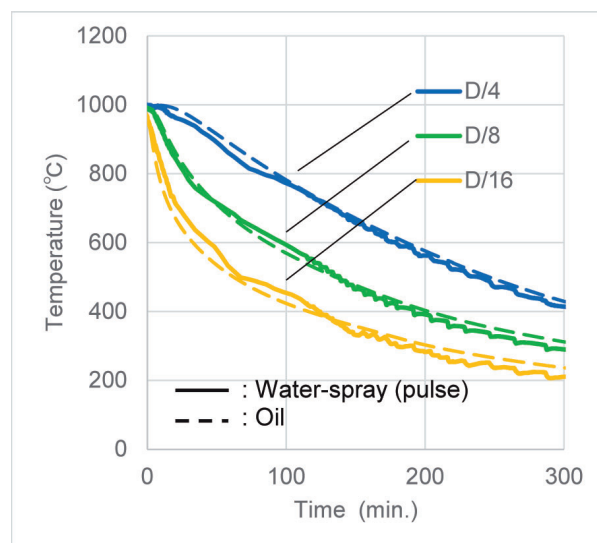


図14 油焼入れを目指した冷却カーブ
(胴径 1200 mm 高 Cr 試験ロータ)

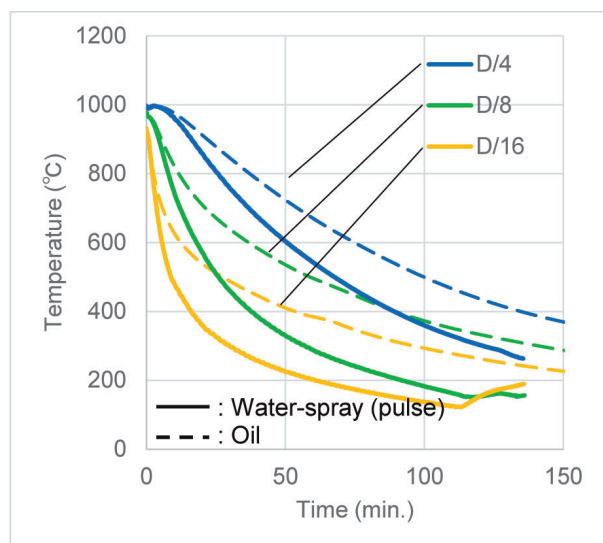


図 15 冷却を速く設定した冷却カーブ
(胴径 750 mm 高 Cr 試験ロータ)

5. 結 言

油焼入れの代替法としてパルス幅変調制御による噴水焼入れ法を開発した。本法を大型鍛鋼品に適用し、油焼入れ相当の冷却速度を実現することができ油焼入れ品と同等の機械的性質を得た。また、焼入れ温度が 1,000℃を超え、胴径がφ 1,000 mmを超える高 Cr 鋼製ロータ試験材に本法を適用し、焼割れを発生させることなく油焼入れ相当の冷却を得た。本噴水焼入れ法は任意の冷却状態を得ることが可能であり、製品の機械的性質改善や新製品素材開発に繋がる方法となる。当社は本法の開発によって油槽の撤廃の検討を進め、SDGsを見据えた次世代の熱処理工場へと進化していく。

参 考 文 献

- (1) 三塚正志，福田敬爾：“高温鋼板水スプレー冷却時の冷却特性および熱伝達率”，鉄と鋼，69（1983）第 2 号，pp. 262-267
- (2) 三塚正志：“高温鋼材水スプレー冷却時の表面温度 400～800℃間での熱伝達率”，鉄と鋼，69（1983）第 2 号，pp. 268-274

