

(技術資料)

大形鍛鋼品へのポリマー焼入れの適用

Application of Polymer Quenching for Large Forgings



石山 治*
Osamu ISHIYAMA



松本 修*
Osamu MATSUMOTO



高橋 功*
Isao TAKAHASHI



藤田寿夫**
Hisao FUJITA

Kobe Steel introduced polymer quenching instead of oil quenching, to prevent fires and preserve the environment. New polymer quenching equipment was constructed, taking into consideration the cooling ability and temperature changes of polymer solution, and various quenching tests were performed to establish the operational technology. Currently, polymer quenching is being used for large forgings including complex shapes such as a solid-type crankshaft that exceeds the maximum weight of 40 tons.

まえがき＝鋳鍛鋼製品として当社では、主に一体型クランク軸、組立型クランク軸などの船舶用製品を製造している。近年、これらの鋳鍛鋼製品は高強度化の傾向にあり、機械的性質確保の観点から、焼入れ性の高い低合金鋼が多用されている。この場合、熱処理の焼入れ工程では油焼入れが施されることが多いが、油焼入れには次の問題点がある。

- 1) 火災発生の危険性
- 2) 油煙・油臭による作業環境の悪化

上記の油焼入れの問題点を解決する手段として、焼入れ液に水溶性ポリマーを用いた焼入れ方法（ポリマー焼入れ）がある。当社では、安全性のさらなる向上および環境問題への積極的対応の観点から、ポリマー焼入れ装置導入の検討を行ってきた。

一般的に、ポリマー焼入れは油焼入れに比較して冷却速度は大きい。そのため焼割れ発生の可能性が高くなる。一方、焼割れは鋼材が大きいほど、また形状が複雑であるほど起こりやすくなると考えられる。既にポリマー焼入れを導入している国内外の鋳鍛鋼メーカー^{1),2)}はいずれも、熱処理される鋼材サイズが小さいか、丸棒形状や板形状といった焼割れが生じにくいものを対象としている場合がほとんどである。当社が製造する船舶用製品は、例えば一体型クランク軸のように数mもの長さを有する大形の鍛鋼品であり、しかも複雑形状を有している。このような大形複雑形状の鍛鋼品を工業的にポリマー焼入れしている例はこれまでに報告がなく、当社におけるポリマー焼入れ装置の導入は、技術的に新しい取組みであるといえる。

このような状況のもと、当社の大形複雑形状鍛鋼品に適用できるポリマー焼入れ設備の仕様を検討し、適正な操業条件の検討を行いながら新しいポリマー焼入れ設備を導入した。その結果、ポリマー焼入れ技術を工業的に

適用することが可能となったので以下に報告する。

1. 新ポリマー焼入れ設備の仕様

新しいポリマー焼入れ設備の代表的な仕様を表1に、系統図を図1に示す。攪拌（かくはん）ポンプの能力は、ポリマーメーカー推奨値（15～20回/h）を参考にして、17回/hと決定した。冷却用ポンプおよび熱交換器の能力は、製品浸漬中のポリマー水溶液温度の上昇を15℃以下となるよう決定した。当社が採用したポリマー液はポリアルキレングリコール系（Poly Alkylene Glycol、以下PAGという）のUcon-Quenchant E（米国Dow Chemical Companyの商標）である。PAG系ポリマー水溶液は、一定以上の温度に上昇するとポリマーが水と分離（Ucon-Quenchant Eの場合、74℃³⁾）してしまうため、焼入れ中のポリマー水溶液の温度上昇を分離温度以下に抑制する必要がある。

図2に、45tonの一体型クランク軸を焼入れした場合のポリマー水溶液の温度変化を推定（解析）した結果を示す。温度変化の推定は、

- ① クランク軸の冷却にともなう放出熱量を算出し、この熱量によるポリマー水溶液の温度上昇
- ② 熱交換器と冷却用ポンプ能力に基づく水温の低下を求め、初期温度30℃としてポリマー水溶液温度の時間変化を算出した。これにより、ポリマー水溶液温の最大

表1 ポリマー焼入れ設備の仕様
Table 1 Main specification of polymer quenching equipment

Items	Capacity
Tank dimension	Length : 15m Width : 3.6m Depth : 4m
Stirring pump	11.25m ³ /min×4units
Cooling pump	8.05m ³ /min×1unit
Heat exchanger	4,700,000kcal/h

*鉄鋼事業部門 鋳鍛鋼事業部 鋳鍛鋼工場 鍛圧部 ** (株)コベルコ科研

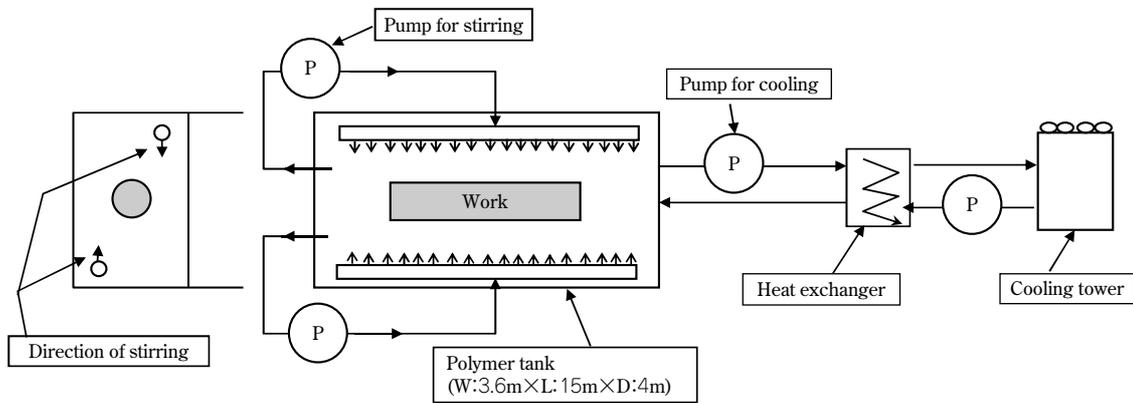


図1 ポリマー焼入れ設備の系統図
Fig. 1 System constitution of polymer equipment

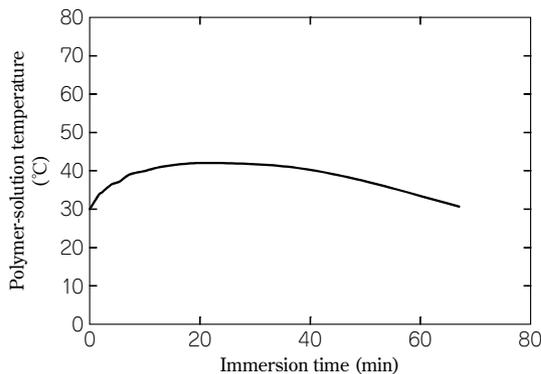


図2 45トンの一体型クランク軸をポリマー焼入れした際のポリマー水溶液の温度変化解析結果
Fig. 2 Analysis result of change of polymer-solution temperature for 45ton solid-type crankshaft quenching

上昇温度は15℃以下となっており、ねらいどおりに温度管理ができることがわかった。

2. 基礎試験

2.1 ポリマー水溶液適用時の鋼材冷却速度

ポリマー水溶液を適用した際の鋼材の冷却速度を確認するため、焼入れ測温試験を実施した。試験片の形状は、代表的な一体型クランク軸の相当直径を模擬してφ540×4,500mmとし、表層部の焼入れ時の温度を測定した。比較として、油焼入れと水焼入れの場合の測温試験も実施した。図3に示したように、ポリマー焼入れの冷却速度は水焼入れよりも遅く、油焼入れと比較して35%速い程度であった。

2.2 冷却速度に及ぼすポリマー水溶液濃度の影響

小試験片(φ25×60mm)を用い、冷却速度に及ぼすポリマー濃度の影響を調査した。図4に示すように、ポリマー水溶液の濃度が高くなるにしたがって冷却速度は遅くなる傾向にある。しかし、濃度25%と27%では顕著な差異が認められなかった。このためポリマー水溶液濃度は、経済性を考慮して25%に決定した。

2.3 標準浸漬時間の決定

ポリマー焼入れ時の浸漬時間を決定するため、φ540mm、φ320mm、φ200mmの丸棒を25%濃度のポリマー水溶液に浸漬し、試験材の表面と中心部の温度を測定した。それぞれの測温結果を図5および図6に示す。

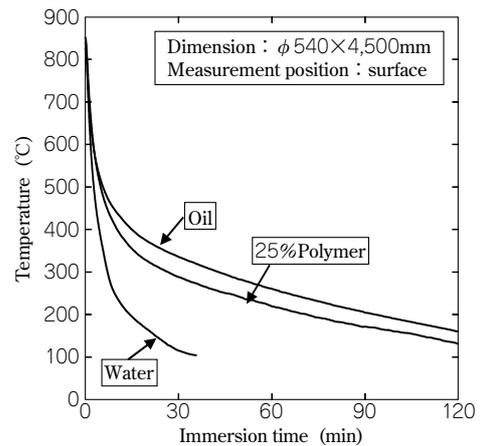


図3 水、ポリマーおよび油の冷却速度比較
Fig. 3 Comparison of cooling rate of water, polymer and oil quenching

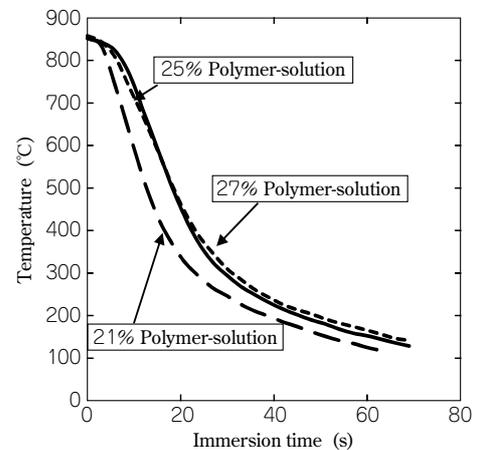


図4 冷却速度に及ぼすポリマー濃度の影響
Fig. 4 Influence of polymer concentration on cooling rate

これらの測温結果を基に、 t 秒間の試験材温度変化から冷却量 ΔQ_c は式(1)で表すことができる。

$$\Delta Q_c = \rho V c_p (T(t) - T(t - \Delta t)) / \Delta t \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ρ :密度、 V :試験材体積、 c_p :比熱、 T :体積平均温度、 Δt :測温間隔

また、この試験材冷却量から総括熱伝達率 h を式(2)から算出した。

$$h = \Delta Q_c / (A \times (T(t) - T_{polymer}(t))) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 A :試験材の表面積、 T :試験材の温度、 $T_{polymer}$:ポリマー水溶液の温度

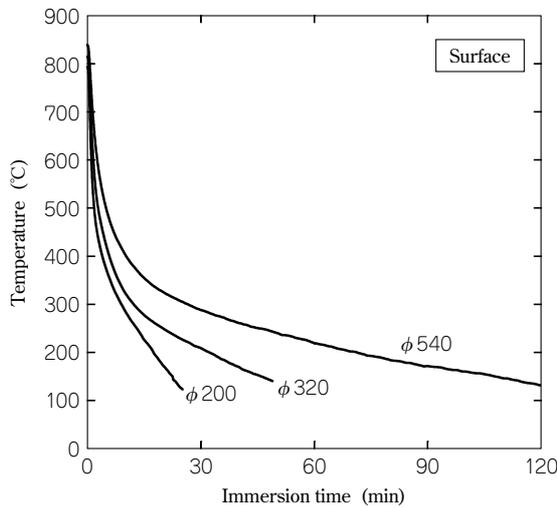


図5 25%濃度ポリマー水溶液における種々試験材の冷却速度変化(表面)

Fig. 5 Change of cooling rate for various sized test piece at quenching 25% polymer-solution (surface)

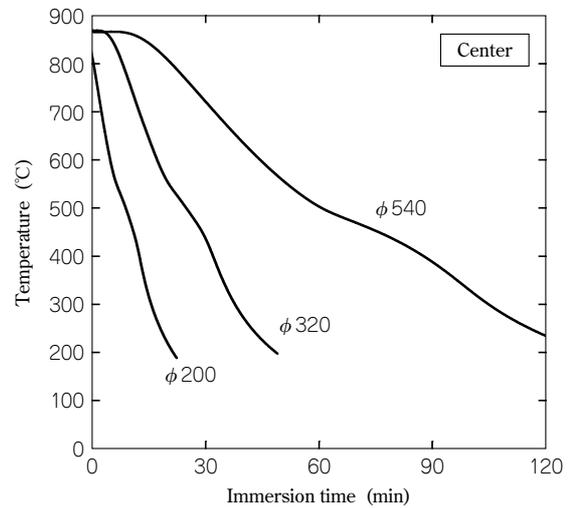


図6 25%濃度ポリマー水溶液における種々試験材の冷却速度変化(中心)

Fig. 6 Change of cooling rate for various sized test piece at quenching 25% polymer-solution (center)

表2 ポリマー焼入れを実施した製品の形状と数量

Table 2 Manufacturing experience and schematic shape of forgings applied polymer quenching

Products	Shape	Treated number	Maximum weight
Solid type crankshaft		1,500	45ton
Crank throw for built-up type crankshaft		248	5ton
Intermediate shaft		275	36ton
Mold steel		111	28ton

算出した総括熱伝達率を用い、丸棒中心温度が所定温度に到達する時間(浸漬時間)を種々の直径について求めた。こうして求めた浸漬時間と製品直径の関係を数式化し、ポリマー焼入れ時の標準浸漬時間の算定式とした。

3. 実製品へのポリマー焼入れの適用

3.1 操業

実製品へのポリマー焼入れは、2007年9月から開始した。ポリマー焼入れを適用した製品の材質は低合金鋼(Ni-Cr-Mo鋼, Cr-Mo鋼)および炭素鋼である。最大重量45tonの一体型クランク軸をはじめ、組立型クランク軸のクランクロー、中間軸、および型用鋼と多くの実製品に適用している。ポリマー焼入れ操業開始後から2010年1月の間にポリマー焼入れを実施した製品の形状と本数を表2に示す。焼割れが生じやすい大形複雑形状の鍛鋼品でありながら、すでに相当数のポリマー焼入れが問題なく実施できている。一例として、大形一体型クランク軸のポリマー焼入れ直前の状況を図7に示す。



図7 ポリマー焼入れタンクにおいて焼入れを開始する一体型クランク軸

Fig. 7 Solid-type crankshaft before quenching in the polymer tank

3.2 機械的性質

ポリマー焼入れを適用した製品において、表面および内部とも、要求される機械的性質を十分に満足することを確認している。図8および図9は、Cr-Mo鋼の一体型クランク軸のポリマー焼入れ品、および油焼入れ品の機械的性質を示す。ポリマー焼入れ品の引張強度レベル

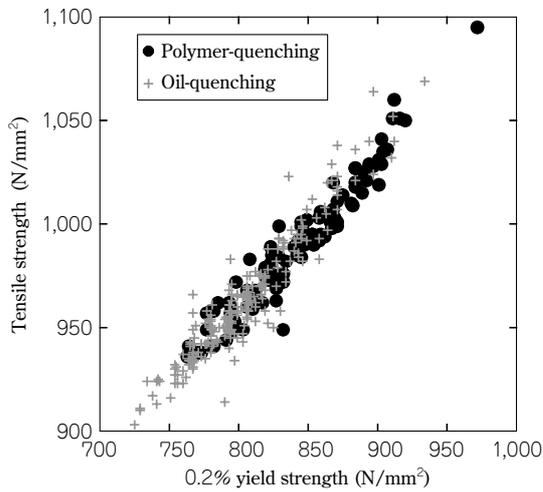


図8 一体型クランク軸 (Cr-Mo 鋼) におけるポリマー焼入れと油焼入れの強度比較

Fig. 8 Comparison of strength between polymer quenching and oil quenching for solid-type crankshafts (Cr-Mo steel)

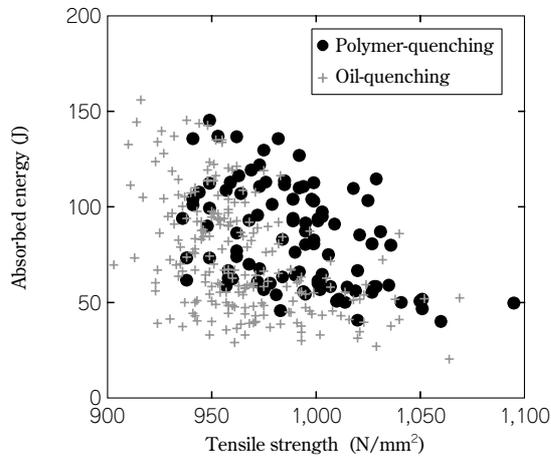


図9 一体型クランク軸 (Cr-Mo 鋼) におけるポリマー焼入れと油焼入れの靱性比較

Fig. 9 Comparison of toughness between polymer quenching and oil quenching for solid-type crankshafts (Cr-Mo steel)

は、若干の差異は認められるものの油焼入れ品とほぼ同等であった (図8)。一方、強度と靱性のバランスにおいては、ポリマー焼入れ品は油焼入れ品よりわずかながら優れる傾向が認められた (図9)。

このように、表2に示す相当数の製品においてそれぞれの要求特性に応じた機械的性質を十分に満足できることがわかった。当社は、従来報告例のない、複雑形状を有する大形鍛鋼品のポリマー焼入れ技術を工業レベルで確立できたと考えられる。

むすび＝当社は、熱処理工程における安全性の確保、環境問題への対応の観点からポリマー焼入れ装置の導入を検討し、以下の結果を得た。

- 1) 油焼入れからポリマー焼入れに変更することにより、火災発生リスクを低減し、油煙・油臭などの環境への影響を低減することができた。
- 2) 生産を行う上での水溶性ポリマーの温度や濃度の条件を適正に定めた結果、従来ポリマー焼入れの適用例がなかった大形複雑形状の鍛鋼品において相当数の生産実績を積むことができた。
- 3) ポリマー焼入れ品の機械的性質を調査した結果、油焼入れ品と同等以上の特性を有することを確認した。
- 4) 上記より、大形複雑形状の鍛鋼品を対象とする、工業レベルでのポリマー焼入れ技術が確立できたと考えられる。

ポリマー焼入れ設備の導入にあたり、(株)三菱製鋼、(株)エンダー、Buderus Edelstahl(独)より貴重な情報を頂いた。また、ポリマー液に関し、ナガセ ケムスペック(株)より貴重な助言を頂いた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) K. Hiltner : 15th International Forgemasters Meeting, Kobe, Japan, Oct. 2003, p.526.
- 2) 清水ほか：三菱製鋼技報, Vol.23, (1989), p.33.
- 3) 鳴海孝雄：工業加熱, Vol.32, No.5 (1995), p.55.