

JFE スチールの厚板製造プロセスと商品展開

JFE Steel's Advanced Manufacturing Technologies of Leading High Performance Steel Plates

藤林 晃夫 FUJIBAYASHI Akio JFE スチール スチール研究所 圧延・加工プロセス研究部 主任研究員(副部長)
小俣 一夫 OMATA Kazuo JFE スチール 厚板セクター部長

要旨

近年の鋼構造物の大型化や製造コストの低減という厚板に求められたニーズに対応するために、JFE スチールでは、厚板製造の革新的なプロセスとして、理論限界までの高い冷却能力と冷却均一性を有する次世代型厚板加速冷却装置 *Super-OLAC* と、短納期を可能とする誘導加熱型のオンライン熱処理プロセス HOP (heat-treatment on-line process) を開発した。また、これらの厚板製造プロセスを駆使して、造船、建築など、さまざまな分野の高品質・高性能厚板を開発した。

Abstract:

Higher strength, better weldability and higher performance are required for structural steel plates. In order to achieve these requirements, advanced and sophisticated process technology is essential. JFE Steel has developed advanced processing technologies, i.e., *Super-OLAC* (on line accelerated cooling), which has critical cooling ability and uniformity, and HOP (heat-treatment on-line process) by using induction heating, which drastically reduces delivery time.

1. はじめに

近年、厚板に要求される性能は、各用途分野別に多少の相違はあるものの、最終製品、構造物の設計・製造技術の高度化並びにトータルコスト削減の背景から、ますます厳しいものとなっている。具体的には高強度化・高施工性・高機能性など多岐にわたり、これらの要求性能を満足するためには、精緻な材料設計技術とともに高度な製造技術が必須となっている。

このような背景のもと、当社では、溶接性に優れた高強度・高靱性鋼の製造技術として、水冷技術を中核とした加工熱処理法 (TMCP) の開発にいち早く取り組んできた。本稿では、当社が近年開発実用化してきた新厚板加速冷却技術 (*Super-OLAC*)、加速冷却後のオンライン熱処理プロセス HOP (heat-treatment on-line process)、および、これらの高度な加工熱処理法を駆使することに加え新機能コールドレベラで鋼板に内在する残留応力をほぼゼロにした *Easyfab*[®] 鋼板の製造法に関して解説する。また、これらのプロセスから創生された高性能厚板について紹介する。

2. 新加速冷却技術「*Super-OLAC*」の開発

加速冷却は、制御圧延とともに TMCP (thermo

mechanical control process) 技術の中核をなす技術で¹⁾ 当社では、他に先駆けてこの加速冷却の開発に取り組み 1980 年に世界で初めて厚板のオンライン加速冷却法 *OLAC*[®] (on line accelerated cooling) の実用化に成功した²⁾。

1990 年代に入って、加速冷却を駆使した TMCP 鋼は飛躍的な溶接性の向上と高強度化を実現し、造船を初めとした広い分野で溶接構造物の施工合理化と安全性の向上に貢献してきた。しかし、近年では、鋼板の強度偏差縮小など、品質要求はますます厳格化している。当社では、これらのニーズに対応するために、従来の冷却がもつ課題を抜本的に解決すべく基礎的な研究を進め、まったく新しい概念の次世代型加速冷却法 *Super-OLAC* (Photo 1) を開発し、1998 年、初号機を西日本製鉄所 福山地区 厚板工場に実機化した³⁾。

鋼材を水冷した場合の伝熱現象、沸騰には、大きく分けて 2 つの形態が存在する (Fig. 1)。鋼材に直接冷却水が接触し、気泡が発生して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。鋼板を冷却する場合、冷却開始時には、表面温度が高く、膜沸騰が支配的であるが、表面温度が下がってくると蒸気膜が不安定になり、局所的に冷却水が鋼板に接触し始め、徐々に核沸騰へ移行する。この膜沸騰と核沸騰が共存する遷移沸騰状態では、冷却の進行に対応して冷却能力が増加する特性を示すため、冷却前の温度差は拡大する冷却

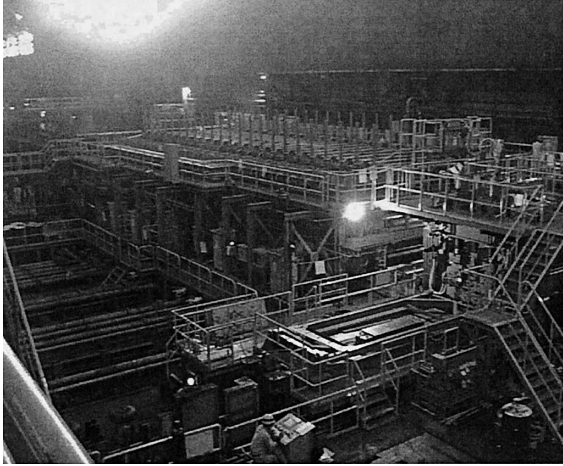


Photo 1 Super-OLAC at Fukuyama District, West Japan Works

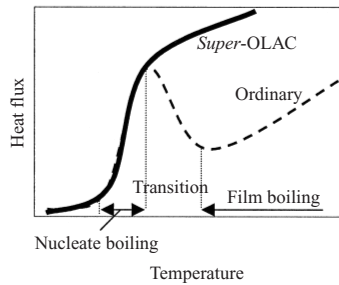


Fig. 1 Boiling curve of Super-OLAC

となる。

従来の冷却方法、たとえばスプレー冷却やラミナー冷却において、水量を増やして冷却を強くと、核沸騰と膜沸騰とが混在した遷移沸騰へと速く移行する。したがって、冷却は不安定となって、冷却の進行にともなって温度偏差を増大させ、鋼板の品質が安定しないという問題があった (Fig. 2)。

この問題を解決すべく Super-OLAC では、遷移沸騰を避け、冷却開始とほぼ同時に、全面が核沸騰状態になるような冷却方式を追究した。その結果、上面の冷却は、鋼板に近接させたノズルから鋼板搬送方向に、一方向に冷却水を流す方式 (新水流制御冷却) を、下面の冷却は、水槽内に高密度に配置したノズルから冷却水を噴射し、その随伴流で冷却を行う方式 (高密度導管付噴水冷却) を採用した。この冷却方式によって、冷却能力が高い核沸騰を上下両面で実現した。これにより、板厚 30 mm 以上では、鋼材内部からの熱の拡散が律速となる (1) 式で示される理論限界の冷却速度⁴⁾ とほぼ同等の高冷却速度を実現した (Fig. 3)。

$$\frac{T(x, t) - T_0}{T_1 - T_0} = \frac{4}{\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{2i-1} \sin \left\{ \frac{(2i-1)\pi x}{s} \right\} \exp \left\{ -\frac{(2i-1)^2 \pi^2 a t}{s^2} \right\} \quad (1)$$

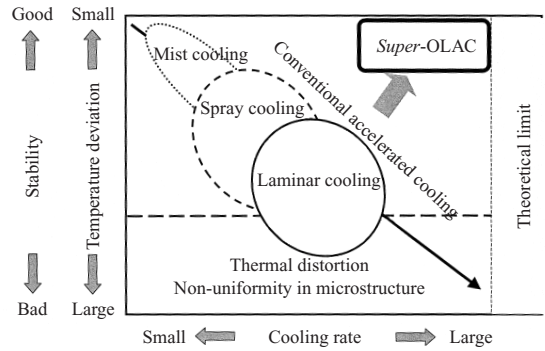


Fig. 2 Cooling rate and temperature uniformity

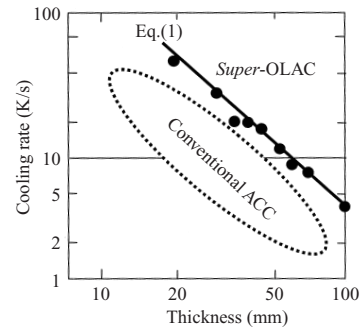


Fig. 3 Cooling rate of Super-OLAC

$T(x, t)$: 板厚方向 x , 時刻 t の温度

T_1 : 初期温度

T_0 : 冷却水温度

s : 板厚

α : 熱拡散率

これは従来の加速冷却と比べると、2-5 倍の急速冷却である。また Super-OLAC 後の鋼板内 (平面) 表面温度分布は加速冷却を行わない圧延ままの (as-rolled) 鋼板と同等の均一な分布が得られている。

Super-OLAC を使った加速冷却鋼板の累積生産量は、立ち上げ後の 5 年間で 300 万トンを超えている。さらに Super-OLAC の第 2 号機が 2003 年 5 月に西日本製鉄所倉敷地区厚板工場で、第 3 号機が 2004 年 7 月に東日本製鉄所京浜地区厚板工場それぞれ稼働し、JFE スチールの厚板の 3 ミルに最新の加速冷却設備が完備された。なお、この新加速冷却技術 Super-OLAC は、2002 年度岩谷直治記念賞、大河内記念技術賞、2003 年度日本産業技術大賞審査委員会特別賞、2004 年度全国発明表彰発明賞を受賞した。

3. 新オンライン熱処理プロセス「HOP」

これまで調質鋼の製造は、圧延ラインとは切り離れた熱処理設備においてオフラインで行われてきた。このオフライン処理をオンライン化して効率化を図る目的で、西日本

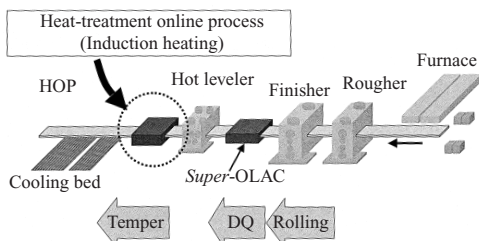


Fig. 4 Layout of on-line heat-treatment facilities

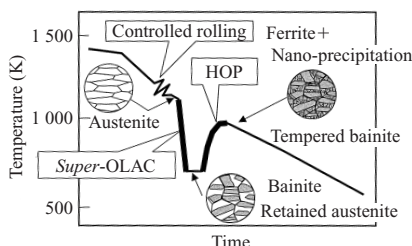


Fig. 5 JFE Steel's on-line heat-treatment process

製鉄所福山地区厚板工場にオンライン熱処理プロセス HOP (heat-treatment on-line process) を設置・稼動した。

当社は、熱間圧延仕上げ前の幅 2 m の粗バー誘導加熱設備を開発した⁵⁾が、この技術では幅 4.5 m もの厚板の加熱にこれまでに類を見ない大規模誘導加熱電源の開発を必要とする。新たに開発した複数台の高周波電源を同期して並列に駆動させる技術は、これをブレイクスルーし、厚板の誘導加熱を世界で初めて実現させた。

今回、新たに開発した HOP は、電磁コイル(インダクター)によって、鋼板に誘導電流を流して、電流の発熱で加熱を行う誘導加熱方式である。電磁コイルは、加熱効率と装置の簡単さの面から、ソレノイド式を採用した。熱は鋼板の内部で発生するが、その量は投入する電力で厳密にコントロールできる。誘導加熱の発熱量をガス加熱の場合の熱流束に便宜的に置き換えると、経験的に $10^5 - 10^7 \text{ W/m}^2$ 程度の熱流束相当の加熱が可能であることが分かっている^{5,6)}。この値は、ガス加熱の百倍程度であり極めて大きなエネルギー密度での加熱が実現可能である。

設備の配置を Fig. 4 に示す。HOP はホットレバラーの直後に配置している。これは Super-OLAC 後の鋼板が持つ顕熱を有効に活用して、加熱の効率化を図るためである。このように HOP はホットレバラーに近接してインダクターを設置する一貫加熱プロセスとして設計されている。

HOP の特長は以下の 2 点である。

- 1) 圧延と同期した完全オンライン熱処理を実現
圧延加速冷却熱処理を完全にオンライン化することで超短納期対応と量産化を実現した。
- 2) 新しい厚板の組織制御が可能
加速冷却 Super-OLAC との組み合わせにより相変態

の自在コントロールと炭窒化物の析出制御 (Fig. 5) が可能となった。

誘導加熱の優れた特長を活かした HOP は、今後の画期的新商品開発に向けた厚板の新たなプロセスとして期待されている。

4. 多機能良加工性鋼板「Easyfab[®]」

厚板製品は、造船や建築・橋梁分野を中心に、さまざまな部材形状に切断された後、組立部材として使用されるが、近年その使用性への要求が厳格化している。当社は Super-OLAC の優れた冷却制御特性を活かし、切断性、加工性、溶接性、さらに疲労特性等の付加機能も兼ね備えた多機能良加工性鋼板「Easyfab[®]」を商品化している (Fig. 6)。本章では、「Easyfab[®]」機能の一つである良切断性を付与するための残留応力制御技術について述べる。

4.1 Super-OLAC による残留応力制御技術

鋼板に発生する残留応力は、主に、圧延(加速冷却)終了時点での鋼板内の温度分布に起因する。温度分布を持つ鋼板が室温まで冷却される場合、部位によって不均一な熱収縮が生じる。この不均一熱収縮量が残留応力を発生させるが、従来の加速冷却技術では冷却停止直後の温度偏差が大きく、これが鋼板内および鋼板間での大きな残留応力の偏差を生む原因となり、切断加工時の変形量に偏差が生じていた。冷却均一性に優れた加速冷却技術 Super-OLAC は残留応力発生の原因である冷却停止直後の温度を均一化し、TMCP 型鋼板の残留応力を as-rolled 材(非水冷材)レベルまで低減させた。

4.2 新機能コールドレバラーと極低残留応力鋼板への展開

Super-OLAC による均一冷却に加えて鋼板の平坦度矯正に用いられているコールドレバラー (C/L) の全幅均一大ひずみ付与機能を併用することにより、極低残留応力鋼板の製造が可能となる。C/L による残留応力制御の概念を Fig. 7 に示す。C/L の曲げひずみが大きいほど矯正後の残留応力(図中点線: 従来加速冷却, 実線: Super-OLAC)は小さくなる。また、従来の加速冷却材に比べ、コールドレバリング前の残留応力が低い Super-OLAC の方が、より

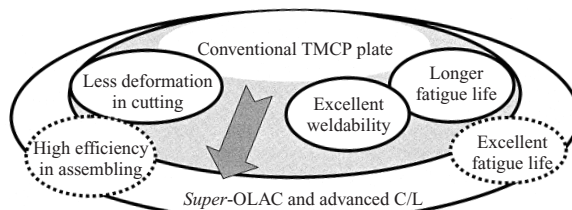


Fig. 6 Concept of Easyfab[®]

小さな C/L 曲げひずみで、極低残留応力の領域に到達する。当社は、2003 年 10 月に矯正能力の拡大とともに極低残留応力鋼板の製造を目指し、西日本製鉄所 倉敷地区 厚板工場の C/L に以下の新機能を付加した (Fig. 8)

〔1〕油圧ダイナミック制御による縦たわみ補償 (Stretch Control)

矯正中の実測荷重から矯正機の弾性変形量を算出し、ダイナミックに圧下位置を補正することにより縦たわみを補正する。

〔2〕ウェッジ制御による横たわみ補償 (Deflection Control)

矯正ロールのたわみ量を算出し、ウェッジにより板幅方向での圧下量を均一化することにより、横たわみを補償する。

〔3〕ホールドダウンロールによる反り制御 (Intermesh Control)

ホールドダウンロールによる反り制御機能を導入し、ロール磨耗等による圧下精度の低下を補正する。

ひずみゲージを貼り付けた鋼板を新機能 C/L にて矯正した際の最大曲げひずみの板幅方向分布を Fig. 9 に示す。新機能により、全幅均一に大きな曲げひずみが与えられており、世界最大級 (5 350 mm) の広幅材での、均一強圧下矯正技術を確立した。

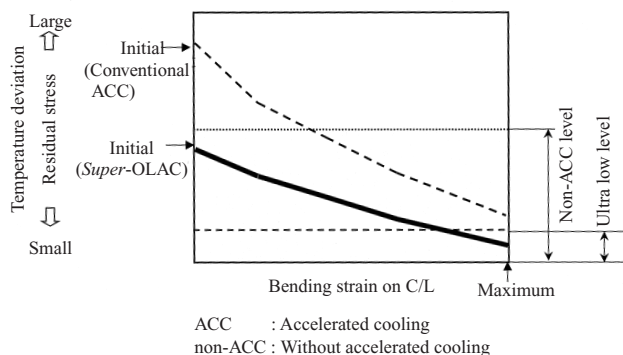


Fig.7 Residual stress controlled by Super-OLAC and C/L

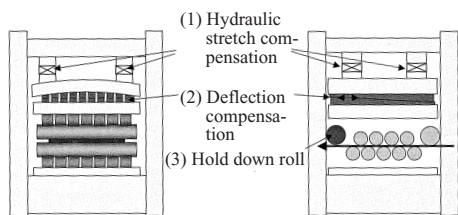


Fig.8 Schematic diagram of advancement in the C/L

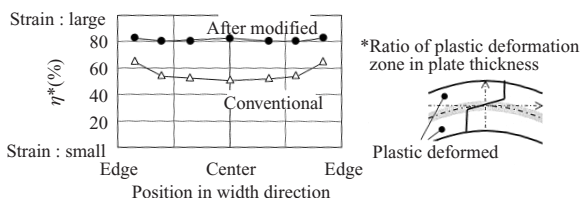


Fig.9 Distribution of bending strain in width direction

以上のように Super-OLAC の均一冷却能を活用することで、極めて効果的に新機能 C/L を利用でき、極低残留応力鋼板の製造が可能となった。

5. 革新プロセスにより製造される新商品

5.1 造船用鋼材

最近のコンテナ船大型化の動きの中で鋼板の厚肉化、高強度化が進み、溶接は、超大入熱となる。このため熱影響部 (HAZ : heat affected zone) の組織が粗大化し、低温靱性の確保が課題となる。このようなニーズに対して、当社では、高い冷却速度と冷却均一性を有する Super-OLAC を用いて、従来鋼と同レベルの炭素当量 (C_{eq}) で溶接性を損なうことなく厚肉の高強度鋼板の製造が可能となった。

5.2 建築用鋼材

都市部の高層建築用鉄骨材料では高強度の厚板が求められている。一方、兵庫県南部地震における梁端溶接部の破断被害などから、建築鉄骨に降伏比 (降伏点 / 引張強さ) が低く、靱性が高く、しかも溶接性の良い高性能鋼材のニーズが高まっている。最近では、四面ボックス柱に用いられる大入熱 HAZ の靱性を高めた鋼材のニーズが高まっている。当社では、このようなニーズに対応し Super-OLAC による先進的な TMCP 技術を駆使することにより経済性、耐震性、溶接性を合わせ持った高張力鋼材として降伏点下限値 385 N/mm^2 の厚板「HBL385 (ハイビル 385)」を開発し、国土交通大臣の認定を取得した。また引張強度 490 N/mm^2 級鋼から 590 N/mm^2 級鋼までの大入熱溶接用高 HAZ 靱性鋼も開発し、商品化している。

5.3 橋梁用鋼材

橋梁は社会基盤を構成する重要な構造物であり、高い品質と高度な製作技術が要求される。近年構造物の大型化や製作の高効率化の要求が高まるなかで、高強度かつ高靱性で溶接性と経済性にすぐれた高性能高張力鋼板が強く求められてきている。このようなニーズに対し当社では Super-OLAC の機能を最大限に活用し、また合金元素の微量添加により焼き入れ性を制御し、強度、靱性バランスの最適化を図った非調質型 SM570TMC 鋼板を開発、商品化した。この技術は、さらに、炭素含有量を約 0.02 mass % 未満とした極低碳素ベイナイト型高張力鋼に導入され、橋梁の設計・製造の合理化と高性能化を目指して新たに提案された規格 BHS500(W), 700 W⁽⁷⁾ に対応した商品製造を実現した。高強度でかつ溶接硬化性が著しく低く、また圧延ままのため短納期対応を可能としている。

5.4 建設・産業機械用鋼

JFE-HITEN780LE に代表される建設・産業機械用新高

張力鋼は、軽量化のために当社が独自に開発したものであり、各種部品に使用されている。中でもラフテレインクレーン（大型クレーン車）のブームやアウトリガー（車体固定時に両側に張り出す脚）などに使用される780 N/mm² 級鋼では Super-OLAC と HOP により -40 の低温域で優れた低温靱性の確保を可能としている。

また、耐摩耗性と曲げ加工性や耐衝撃特性などの特性要求が一層厳しさを増す耐摩耗鋼の分野では、高硬度、高延性と同時に -40 で優れた靱性を有する新耐摩耗鋼エパーハード 360LE を提供しているが、これは Super-OLAC の高速冷却と均一冷却能によって商品化が実現した。

以上の2種類の新規開発鋼はいずれも C_{eq} [ロイド式] で 0.40 mass % 以下を保証しており、従来鋼に比較して予熱温度を 25-50 低減することが可能となっている。

5.5 圧力容器用高張力鋼

エネルギー貯蔵設備や化学プラント、発電プラントなどのエネルギー分野では種々の厚板が使用されている。近年、これらの設備の大型化、操業条件や使用条件の過酷化と同時に、さらに建設コストの低減に繋がる施工の高効率化などにもとまらず、材料に対しては高強度化や溶接部靱性などの溶接部を含めた信頼性の向上、溶接施工性の向上などますます厳しい性能が要求されている。当社ではこのようなニーズに応えるため、最新の材質設計と前述の革新的な製造技術を駆使し、予熱温度と溶接部硬さの低減を可能とした高性能 610 N/mm² 級高張力鋼を開発している。

また、大型石油貯蔵タンクなどで高効率の大入熱エレクトロガスアーク溶接が施工される大入熱溶接用 610 N/mm² 級高張力鋼板や -50 程度までの低温靱性を兼ね備えた低温用高靱性 610 N/mm² 級高張力鋼板などの新商品⁸⁾ はいずれも Super-OLAC を前提としたマイクロアロイング元素の活用による材質設計と、高度な厚板製造技術の融合により達成されたものであり、今後多様なニーズに対応できるものと期待される。

5.6 ラインパイプ用鋼

石油ガス田掘削技術や長距離輸送技術の低廉化をとまなう進歩により、寒冷域や深海の石油ガス開発が進み、パイプラインは長距離化する傾向にあり、輸送される流体の性状も多様化してきている。用いられるラインパイプには、高強度、優れた低温靱性と溶接性、さらに H₂S を含有する流体では耐サワー性（水素誘起割れや硫化物応力腐食割れに対する抵抗力）などが要求されている。さらに凍土地帯などの大変形が予想されるパイプラインでは高

変形性能も要求されるようになってきている。

当社では Super-OLAC を適用してこれらの多様で厳しい要求性能を満足できるラインパイプの開発を続けており Super-OLAC を適用して世界で初めて CSA グレード 690 (X100 グレード相当) という世界最高強度のラインパイプの商用生産を行った。また、高強度耐サワーラインパイプや従来鋼管の 1.5 倍の座屈ひずみを有する高変形性ラインパイプ「HIPER」の製造にも Super-OLAC が適用されている。

6. おわりに

近年の多岐にわたる施工特性要求を満足し、かつ、高性能の厚板製造を可能とする新加速冷却技術 Super-OLAC と、世界初かつ世界最大級の誘導加熱方式を採用した HOP の革新的な JFE 厚板の製造プロセスを紹介した。また、これらの最新鋭設備の特長を最大限に活用して生まれた独自商品の特長を用途別分野ごとに紹介した。当社は厳格・多様化する新たな厚板への要望に応えるべく、これら最新鋭設備を駆使した Only 1, No. 1 商品の創生をさらに進めている。

参考文献

- 1) 小指軍夫・制御圧延・制御冷却。東京、地人書館、1997、211p
- 2) 東田幸四郎ほか。厚鋼板へのオンライン加速冷却 (OLAC) の適用。日本鋼管技報。no. 89、1981、p. 121-132
- 3) 小俣一夫ほか。NKK 技報。no. 179、2002、p. 57-62
- 4) 甲藤好朗。伝熱概論。養賢堂、1984
- 5) 裏手徹ほか。熱延におけるインライン加熱。CAMP-ISIJ。vol. 15 2002、p. 1008
- 6) 特開 2003-326302
- 7) 三木千壽ほか。橋梁用高性能鋼材 (BHS500、BHS700) の提案。土木学会論文集。no. 738/I-64、1-10、2003-07
- 8) 袖賀正雄ほか。“圧力容器用高性能 610 N/mm² 級高張力鋼板”。溶接構造シンポジウム 2002 論文集、2002、p. 121



藤林 晃夫



小俣 一夫