

JFE スチールの TMCP 技術の進歩とそれによる高性能厚板

Development of Thermo-Mechanical Control Process (TMCP) and High Performance Steel in JFE Steel

遠藤 茂 ENDO Shigeru JFE スチール スチール研究所 鋼材研究部長・工博
中田 直樹 NAKATA Naoki JFE スチール スチール研究所 圧延・加工プロセス研究部長

要旨

TMCP (Thermo-mechanical control process: 加工熱処理, 熱加工制御) は, 制御圧延技術と制御冷却技術を組み合わせ, 優れた機械的性質を引き出す鋼材の製造技術体系である。JFE スチールは 1980 年に厚板のオンライン加速冷却装置 (OLAC[®]: On-Line Accelerated Cooling) を西日本製鉄所 (福山地区) にて世界で初めて実用化して以来, TMCP の高度化に向けた取組みを続けている。1998 年には均一冷却, 高冷却速度による加速冷却が可能な Super-OLAC[®] を開発, 稼働させ, 2011 年には Super-OLAC[®] を発展させた Super-OLAC[®]-A を導入し, 高度な要求特性に対応している。また, TMCP のオンライン化を追求し, 2004 年には, オンラインの誘導加熱装置 (HOP[®]: Heat-treatment On-line Process) を世界で初めて実用化した。さらに, 2009 年には制御圧延の高効率化と Super-OLAC[®] との組合せによる新しい材質制御が可能となる Super-CR を京浜地区で実用化している。本稿では, これら技術を活用した最近の TMCP の展開と高性能厚板の開発について概説する。

Abstract:

Thermo-mechanical control process (TMCP) is one of microstructural control techniques, combining controlled rolling and controlled cooling, to obtain excellent properties of steel plates, such as high strength, excellent toughness and weldability. JFE Steel has continued efforts to develop TMCP technologies, ever since JFE Steel started operation of the accelerated cooling equipment, OLAC[®] (On-Line Accelerated Cooling), in the plate mill at West Japan Works (Fukuyama) in 1980, which was the first industrial accelerated cooling system in the world. OLAC[®] has continued to evolve to Super-OLAC[®] and Super-OLAC[®]-A, in 1998 and 2011. In 2004, HOP[®] (Heat-treatment On-line Process) was also installed in the plate mill at Fukuyama. Super-CR enabling quite unique cooling patterns during controlled rolling has also installed at East Japan Works (Keihin) in 2009. This paper describes features of those leading facilities and the recent development in TMCP with some examples of new products in JFE Steel.

1. はじめに

溶接鋼構造物の設計・製造技術の進歩とトータルコスト削減の要求から, そこに用いられる厚板には常に高強度化・高施工性が求められてきた。さらに, 近年では構造物の大型化と使用環境の苛酷化が進むと同時に, 安心・安全設計が重要視される傾向にあり, 厚板に要求される性能は高度化かつ複合化している。このような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くる。

厚板の高性能化は合金設計技術とともに, TMCP (Thermo-mechanical control process: 加工熱処理, 熱加工制御) のたゆまない進歩によって支えられている。TMCP の発展は連続化, オンライン化の追及のたまものともいえる。制御圧延・制御冷却技術はオフラインの熱処理でしか製造

できなかった高強度と高靱性の両立を可能にした。JFE スチールは世界で初めてオンライン加速冷却設備 OLAC[®] を厚板製造ラインに実用化して以降, たゆまない技術開発により冷却設備の高性能化を追求している^{1,2)}。さらにオンライン加熱設備 HOP[®] により焼き戻しプロセスの連続化を行ない²⁾, より高強度の厚板のオンライン製造を実現した。また, 制御圧延の連続化という新しい概念を提案し³⁾ 圧延機直近強冷設備 Super-CR を実用化している。このような, プロセスの連続化は工業製品に常に求められる高生産性と工期短縮にも応えている。

一方, 溶接構造用鋼としての厚板には, 溶接施工性の向上が求められる。高強度化に伴う溶接低温割れ性の低下と溶接熱影響部 (HAZ: Heat affected zone) 靱性の劣化という課題は, TMCP を適用することによる低合金成分での高強度化によって解決された。また, 大入熱溶接に対応した厚板は, 析出物, 介在物の制御技術の進歩によってその性能は大きく向上したが, その根底にはやはり TMCP を前提

とした低合金設計がある。

本論文では、TMCP の技術革新を中心に JFE スチールの厚板製造技術の進歩をレビューする。また、これらプロセス技術を最大限に活用して開発された、さまざまな分野で使用されている高性能厚板の特長について概説する。

2. JFE スチールの TMCP 技術の進歩

2.1 オンライン加速冷却設備 Super-OLAC[®]

加速冷却は制御圧延とともに TMCP の根幹をなす技術である。JFE スチールは 1980 年に厚板のオンライン加速冷却装置 (OLAC[®]: On-Line Accelerated Cooling) を西日本製鉄所 (福山地区) にて世界で初めて工業的に実用化して以来、加速冷却設備の高度化に向けた取組みを続けている。

独自の水流制御技術により理論限界相当の高冷却速度による加速冷却を実現した Super-OLAC[®] を開発し¹⁾、1998 年に西日本製鉄所 (福山地区) で稼働させた。従来の冷却方式では核沸騰と膜沸騰とが混在した遷移沸騰領域が存在するため、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。Super-OLAC[®] では全面核沸騰による冷却を追及し、収束冷却による均一冷却を達成するとともに、高冷却速度も実現し、TMCP 鋼の品質を格段に向上させた²⁾。

Super-OLAC[®] は西日本製鉄所 (倉敷地区) (2003 年稼働)、東日本製鉄所 (京浜地区) (2004 年稼働) の 3 厚板工場への展開を完了して、TMCP を最大限に活用する体制を完了している。さらに、2011 年には福山地区に Super-OLAC[®] を発展させた Super-OLAC[®]-A を導入し、近年の高度な要求特性に対応している。

2.2 オンライン加熱設備 HOP[®]

調質鋼の製造は、従来から圧延ラインとは切り離れた熱処理設備において行われてきた。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、西日本製鉄所 (福山地区) における Super-OLAC[®] の後段に、誘導加熱装置 HOP[®] (Heat treatment On-line Process) を世界で初めて導

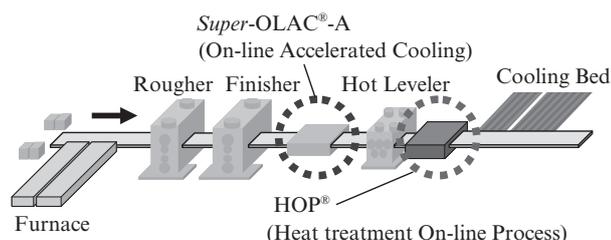


図 1 西日本製鉄所 (福山地区) 厚板工場のオンライン加速冷却-熱処理設備のレイアウト

Fig. 1 Layout of on-line accelerated cooling and heat-treatment facilities of West Japan Works (Fukuyama)

入し、2004 年に稼働させた²⁾。

HOP[®] はソレノイド式電磁コイル (インダクター) によって、鋼板に誘導電流を流して、抵抗発熱により加熱を行なう誘導加熱方式である。鋼板の内部で発生する熱量は投入する電力で厳密にコントロールして均一かつ高精度な温度管理を実現している。設備の配置を図 1 に示す。HOP[®] はホットレベラーの直後に配置され、冷却後の鋼板が持つ顕熱を有効に活用して加熱の効率化も図られた一貫加熱プロセスとして設計されている。

これにより、従来は主に焼入れ-焼もどしプロセスで製造されていた引張強度 600 MPa 以上の高強度ハイテンがオンラインで製造できるようになり、製造能力の増強、リードタイムの大幅な短縮を実現している。同時に、誘導加熱ならではの急速加熱により、焼もどし過程で形成される炭化物が均一かつ微細になるため、オフラインで焼もどしたものと比較して、特に靱性が向上することが見い出されている⁴⁾。さらに、Super-OLAC[®] の優れた温度制御性と相まって、従来の TMCP では不可能だった水冷停止直後の再加熱が可能となり、これに基づく新しい組織制御技術を開発して、特長ある高強度ハイテン商品に適用している^{5,6)}。

2.3 圧延機直近強冷却設備 Super-CR

制御圧延は、オーステナイトの未再結晶温度域で加工を加えることによって転位を蓄積し、結晶粒界だけでなく結晶粒内にも変態の核生成サイトを発生させて組織を微細化させて強度の向上を図る技術であり、制御冷却よりも早くから、実機に適用されている⁷⁾。

制御圧延材の製造では、一般の圧延材よりも仕上圧延温度を低く設定しているため、多くの場合、圧延の途中で温度調整のための冷却待ちが発生し、その時間は製品板厚が厚いほど長くなる傾向にある。冷却待ちの時間を短縮する手段としては、従来からシャワー状の水を供給して冷却する技術があるが、鋼板を搬送する時間、水冷を行なう時間、復熱させて目標の温度まで冷却できたことを放射温度計で確認するまでの時間がかかり、一般の圧延材に比べて生産能率を低下させる原因であった。また、水量密度が少ないゆえ冷却速度が限られ、鋼板上面の滞留水が過大な冷却を引き起こし、全体を均一に冷却することが難しいという問題が指摘されていた³⁾。

このような課題を解決するために、また制御圧延と冷却を組み合わせることによる TMCP の高度化を実現するために、圧延機直近の急冷設備としては世界初となる Super-CR (Super-Controlled Rolling) を、東日本製鉄所 (京浜地区) に導入し、2009 年に稼働させた。

図 2 に設備の配置を示す。Super-CR は圧延機直近に設置した強冷却設備であり、厚板のようなリバース式で圧延と水冷を同時に行なうことを初めて可能とした。水量密度が極めて高い冷却を多パスで適用して、冷却の累積効果を得て、

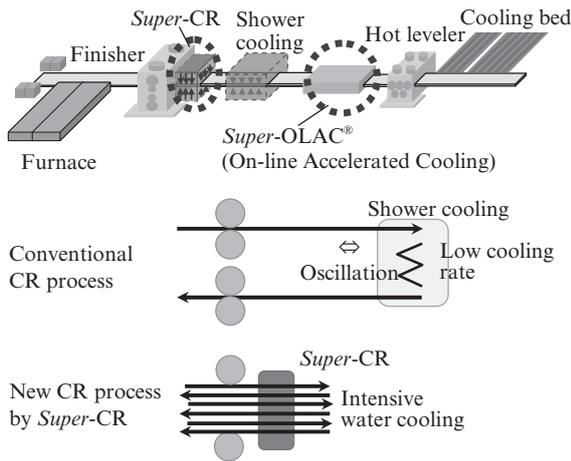


図2 東日本製鉄所(京浜地区)厚板工場のレイアウトと Super-CR による制御圧延の高能率化

Fig. 2 Layout of plate mill of East Japan Works (Keihin) and new controlled rolling process by Super-CR

生産の高能率化を図ることに成功した。水冷に関しては、特殊な水流制御により、鋼板全体を均一かつ急速に冷却する技術を確認した。しかも、操業中はオンラインで鋼板温度を正確に把握し、必要な冷却量に応じて水冷パス数や圧延速度の最適値を求めて温度制御を行なっている。また、圧延で反りが発生しないよう、鋼板上下面の温度差は常に適正な範囲内に抑えている。Super-CR 技術の確立により、制御圧延材の圧延能率が格段に向上し、JFE スチールの TMCP 型高強度鋼の供給能力が向上した。稼動以来の生産量は累積で 150 万トンを超えている。

また、Super-CR と加速冷却設備 Super-OLAC[®] を組み合わせることによる 2 段階の冷却を適用することが初めて可能となり、TMCP の自由度が高まった。造船用、建築用、パイプ素材向けなどで従来よりも変形特性に優れた高強度鋼板の製造への応用や、表面温度の制御によるスケール密着性の向上などの効果も期待されている。

3. 高性能厚鋼板への展開

3.1 造船用鋼板

造船用鋼板の高性能化は TMCP の発展の歴史である。初期の TMCP の工業化により 1980 年代に実用化された YP390 MPa 級鋼板は船舶の軽量化に寄与するとともに、低い炭素当量 (Ceq) で高強度化しているため、高能率の大入熱溶接も適用できることから、船舶建造の効率化にも大きく貢献した。

さらに、近年、海上輸送の効率化、燃料費削減、環境負荷の軽減に対するニーズが高まり、造船用鋼板とその適用技術も大きく進歩している。コンテナ船の大型化は使用鋼材の厚手化を招き、軽量化のためにさらなる高強度鋼のニーズを生み、YP390 MPa 級鋼の強度を超える YP460 MPa 級

鋼の開発が望まれた。さらに、コンテナ船の厚肉材の溶接には高能率立向き溶接方法であるエレクトログラスアーク溶接 (EGW: Electrogas arc welding) が適用されており、大入熱溶接部の品質も満足することが要求された。

また、板厚 50 mm を超える極厚鋼板を使用した大型コンテナ船の強力甲板において、鋼材および溶接構造の脆性破壊に対する安全性の観点からアレスト靱性も具備することが求められた。この様にコンテナ船用 YP460 MPa 級鋼には高強度化とともに大入熱溶接への対応そしてアレスト靱性という複合的かつ高度な要求特性が課せられた。

JFE スチールは、JFE EWEL[®] 技術^{8,9)} の深化により、高強度化と大入熱溶接部の高品質化を両立した YP460 MPa 級鋼を開発、実用化している¹⁰⁾。JFE EWEL[®] 技術において重要な基本技術要素のひとつ Super-OLAC[®] の適用による、Ceq の低減とともに、マイクロアロイング技術にさらなる改良を加えて、粗粒域幅極小化と内部の組織の微細化により大入熱溶接部の優れた靱性を達成した。

また、制御圧延の高度化によって 60 mm 以上の極厚鋼板においても高いアレスト靱性を有した鋼板の製造技術も確

表 1 造船 YP460 MPa 級鋼の化学成分例

Table 1 Chemical compositions of YP460 MPa class steel plate

Grade	Thickness (mm)	Chemical composition (mass%)						
		C	Si	Mn	Nb	Ti	Others	Ceq*
YP460	60	0.05	0.07	1.55	0.01	0.01	Cu, Ni, Ca, B, etc.	0.39

*Ceq = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15

表 2 造船 YP460 MPa 級鋼の機械的特性例

Table 2 Mechanical Properties of YP460 MPa class steel plate

Grade	YP (MPa)	TS (MPa)	El (%)	vE-40 (J)
YP460	508	654	21	282

YP: Yield point TS: Tensile strength
El: Elongation vE: Absorbed energy

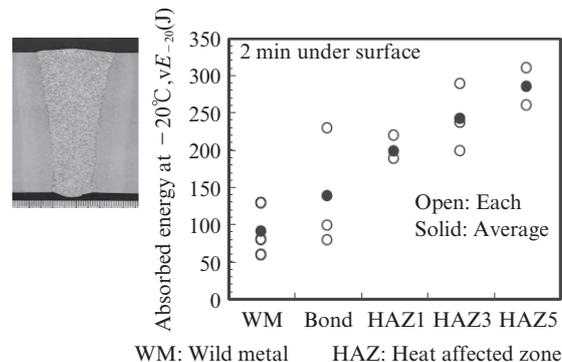


図3 造船 YP460 MPa 級鋼の EGW 継手特性例

Fig. 3 Charpy impact properties of electrogas arc welding (EGW) welded joint of YP460 MPa class steel plate

立している。開発された造船用 YP460 MPa 級鋼の化学成分、機械的特性、EGW 継手特性の例を表 1、表 2、図 3 に示す。高強度と造船 E グレードの母材低温靱性および大入熱溶接継手の低温靱性を満足している。

JFE スチールでは、コンテナ船に使用される厚板への高度で複合化したニーズに応えるべく、YP355~YP460 MPa 級の極厚鋼板に対して、大入熱溶接仕様、高アレスト靱性仕様の製造体制を整えている^{11,12)}。

3.2 建築用鋼板

近年の高層建築物では、大スパン化や構造の複雑化が進み、このため、高強度の厚肉鋼材が求められている。また、建築用鉄骨材料では、耐震性要求から降伏比（降伏点 / 引張強さ）が低くかつ高靱性で、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。

JFE スチールは耐震性に優れた TMCP 型建築用低降伏比高張力鋼 HBL[®] シリーズを幅広い強度グレードと板厚において開発、商品化している。表 3 にそのラインアップを示す。

HBL[®]385 は経済性、耐震性、溶接性のバランスに優れた引張強さ 550 MPa 級の TMCP 鋼として開発され、業界の先陣を切って 2002 年に国土交通大臣認定を取得した。HBL[®]385 は、Super-OLAC[®] を活用した高精度 TMCP 技術を駆使することによって、従来の 520 MPa 級 TMCP 鋼（基準強度 355 MPa）と同等の溶接性を保持したまま、80% 以下の低降伏比と 385 MPa の基準強度を実現したものである^{13,14)}。

さらに、従来は多段熱処理で製造されていた SA440（引張強度 590 MPa 級）の機械的特性をオンラインで製造する技術を確認し、HBL[®]440 として商品化を完了している。制御圧延条件の厳格な管理と Super-OLAC[®] の優れた温度制御性により開発、実用化されたものである^{15,16)}。

建築用高強度厚板は四面ボックス柱に使用されることが多いが、その組立てには、高能率のサブマージアーク溶接（SAW）やエレクトロスラグ溶接（ESW）が適用される。これらの溶接は、入熱量が SAW で 600 kJ/cm、ESW では最

表 3 建築用 TMCP 鋼 HBL[®] シリーズのラインアップ

Table 3 Lineup of thermo-mechanical control process (TMCP) steel plate HBL[®] for building structure

Grade	Thickness (mm)	YS (MPa)	TS (MPa)	YR (%)	vE ₀ (J)
HBL [®] 325	40 ≤ t ≤ 100	325-445	490-610	≤ 80	≥ 27
HBL [®] 355	40 ≤ t ≤ 100	355-475	520-640	≤ 80	≥ 27
HBL [®] 385L HBL [®] 385	12 ≤ t ≤ 19 19 ≤ t ≤ 100	385-505	550-670	≤ 80	≥ 70
HBL [®] 440	19 ≤ t ≤ 100	440-540	590-740	≤ 80	≥ 70
HBL [®] 630L	12 ≤ t ≤ 40	630-750	780-930	≤ 85	≥ 70

YS: Yield strength TS: Tensile strength
YR: Yield ratio vE: Absorbed energy

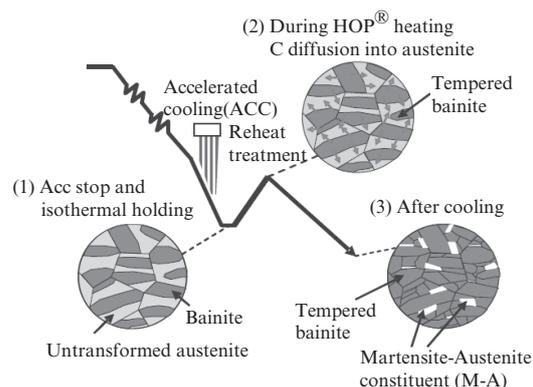


図 4 HOP[®]を活用したオンライン型低降伏比高張力鋼のマイクロ組織制御の考え方

Fig. 4 Schematic illustration of microstructure change by HOP[®] for dual phase microstructural control

大 1000 kJ/cm にもなる大入熱溶接であり、特別な対策を施さない鋼材では HAZ の靱性が著しく劣化し、高層ビルの耐震性能が低下する。JFE スチールでは、大入熱溶接熱影響部の品質向上技術 JFE EWEL[®] を適用した高 HAZ 靱性鋼を HBL[®]325~HBL[®]440 のグレードにおいて商品化している⁹⁾。

また、同様にこれまでオフライン多段熱処理の適用が不可欠であると考えられてきた低降伏比 780 MPa 級鋼板の製造に関してもオンライン製造化が達成されている⁶⁾。HBL[®]630L は TMCP と HOP[®] を活用し、鋼板のマイクロ組織をベイナイト主体組織と、微細な島状マルテンサイト (M-A: Martensite-Austenite constituent) の複相組織とすることにより（図 4）、建築構造用鋼として優れた母材部の機械的特性と優れた溶接性および溶接部靱性を達成している。HBL[®]630L は、至近、新宿東宝ビルの溶接 4 面ボックス柱用鋼材として、約 250 トン採用された。

3.3 建機・産機用鋼板

建設・産業機械分野では軽量化のニーズが強く、高強度～超高強度鋼が積極的に用いられているが、使用環境の過酷化にともない加えて低温靱性も要求されている。一般的に高強度化と靱性の向上は相反するものであり、これらの特性を両立させるためには特別な製造技術が必要になる。

JFE スチールでは、制御圧延技術および Super-OLAC[®] と HOP[®] による連続化プロセスの特長を最大限に活用し、優れた低温靱性を有する建設・産業機械用超高強度厚板を開発、商品化している¹⁷⁾。従来の高強度鋼の製造プロセスは再加熱焼入れ焼もどしであるが、連続化プロセスを適用することにより、供給能力の向上と工期短縮とともに、合金成分の削減、高強度と低温靱性の両立を達成している。

これらの厚板においては、制御圧延による加工オーステナイトからの直接焼入れ（オースフォーム）による高強度化と、HOP[®] を用いた焼もどしによる低温靱性の向上効果を活

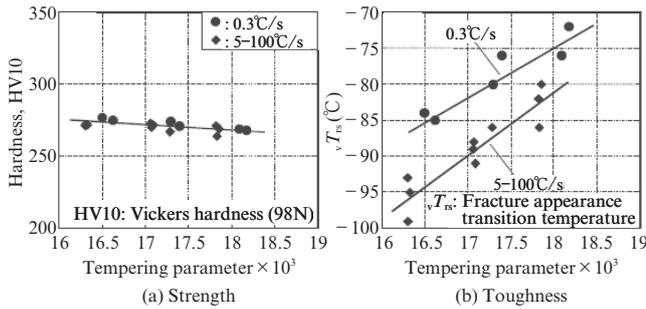


図5 780 MPa 級鋼の焼もどしパラメータと (a) 強度, (b) 靱性の関係

Fig. 5 Relationship between tempering parameter and mechanical properties of TS780 MPa class steel

用している。HOP[®]による加熱は従来のオフライン熱処理の場合に比べ、昇温速度が1~2桁大きいため、セメントイットが均一微細に析出し、この効果により靱性の向上が達成される。これらの組織制御により、図5に示すように優れた低温靱性を有するとともに、超高強度鋼の実用化に重要な耐遅れ破壊特性に優れ、かつ低成分設計のため優れた溶接性を実現している。

HOP[®]によるこのような炭化物の形態制御技術と材質制御技術を適用して、JFE-HITEN 780LE, HYD[®]960LE, HYD[®]1100LEなどの特長ある商品を提供している。

3.4 エネルギー用鋼板

エネルギー資源の開発、生産、輸送および利用に関わるプラント構造物には厚板が重要な役割を果たしている。これらのプラントで求められるのは、建設コストおよび運転コストの低減であり、コストを低減するひとつの手段が高強度材料の適用である。高強度材料を使用することによって、設備の大型化、運転条件の高圧化、高温化が実現できる。同時に使用材料の削減が可能となり、これにともなって設備の軽量化や設備工事の削減などが可能となる。

一方で、高いエネルギー密度を持つ石油や天然ガスを取り扱うために、材料に対して高度の安全性、信頼性が求められている。これは、設計条件に対して十分な安全性を確保するばかりではなく、自然災害や腐食など外的な要因に対しても十分な安全性を確保する必要があることを意味する。

極寒地で使用される採掘リグやプラットフォームに使用される厚板には、厳しい低温靱性が要求される。船級規格の高張力鋼板であるEH36, FH36などが使用される他、生産プラットフォームではジャケットをはじめ、TLP (Tension leg platform) のトップサイド、パイル, SPARのトップサイドでは、API 2W 50 (降伏点 355 MPa 以上), 60 (同 410 MPa 以上) に代表される TMCP 型高張力鋼が使用される。さらに、これらの厚板の溶接継手部には、厳格な破壊

表4 海洋構造物用鋼板のラインアップ

Table 4 Available strength and thickness of steel plates for offshore structures

YP Class (MPa)	Charpy temp. (°C)	CTOD Test temp. (°C)	Thickness (mm)
355	-40	-10	≦101.6
420	-40	-10	≦101.6
	-60	-40	≦76.4
500	-40	—	≦108
550	-40	—	≦108
620	-40	—	≦108
690	-40	—	≦180

YP: Yield point CTOD: Crack tip opening displacement

力学アプローチの一つである CTOD (Crack tip opening displacement) 特性が要求される。

JFE スチールは、マイクロアロイ技術を活用した高度な材質設計や製鋼技術と加速冷却装置 Super-OLAC[®]を用いた最新鋭の制御圧延・制御冷却技術との組合せにより要求特性を十分に満足する厚板を実用化している。優れた溶接性を有する低 P_{CM} (溶接割れ感受性組成) の成分設計と厚肉材での母材特性の両立を達成するとともに、Ca 系非金属介在物を活用した組織微細化により溶接継手の靱性および CTOD 特性を向上させている^{18,19)}。

一方、ジャッキアップリグのラック材、コード材には極低温靱性仕様の降伏強度 690 MPa 級の極厚鋼板が用いられる。JFE スチールは、これら熱処理型の厳格仕様極厚鋼板においても独自の製造プロセスにより高品質厚板の製造技術を確立しており²⁰⁾、多数の実績がある。表4に開発した海洋構造物用鋼板の例を示す。

4. おわりに

TMCP 技術に関連した JFE スチールの最新鋭設備である Super-OLAC[®]ならびに Super-OLAC[®]-A, HOP[®]さらに制御圧延の高効率化と Super-OLAC[®]との組合せによる新しい材質制御が可能となる Super-CR に関しての基本技術について紹介した。また、これら世界最先端の設備を活用するとともに、製鋼技術や冶金現象を組み合わせることによって商品化された、高性能ハイテンについていくつか概説した。

JFE スチールは、今後もプロセス開発と冶金原理を有機的に結びつけた TMCP を発展させ、「ものづくり」技術をさらに高度化し、お客様のニーズに応えるとともに、社会に貢献する厚板新商品の開発を強力に推進していく。

参考文献

- 1) 小俣一夫, 吉村洋, 山本定弘, NKK 技報. 2002, no. 179, p. 57-62.
- 2) 藤林晃夫, 小俣一夫. JFE 技報. 2004, no. 5, p. 8-12.

- 3) 中田直樹, 黒木高志, 藤林晃夫, 宇高義郎. 鉄と鋼. 2013, vol. 99, no. 11, p. 1-7.
- 4) 長尾彰英, 大井健次, 三田尾真司, 梶田恭之, 杉岡正敏. まてりあ. 2005, vol. 44, no. 2, p. 148-150.
- 5) 石川信行, 遠藤茂, 近藤丈. JFE 技報. 2005, no. 9, p. 19-24.
- 6) 植田圭治, 遠藤茂, 伊藤高幸. JFE 技報. 2007, no. 18, p. 23-28.
- 7) 小指軍夫. 制御圧延・制御冷却. 東京, 地人書館, 1997. p. 47.
- 8) 鈴木伸一, 大井健次, 一宮克行, 木谷靖, 村上善明. まてりあ. 2004, vol. 43, p. 232-234.
- 9) 鈴木伸一, 一宮克行, 秋田俊和. JFE 技報. 2004, no. 5, p. 19-24.
- 10) 一宮克行, 角博幸, 平井龍至. JFE 技報. 2007, no. 18, p. 13-17.
- 11) 西村公宏, 半田恒久, 橋本正幸. JFE 技報. 2007, no. 18, p. 18-22.
- 12) 長谷和邦, 半田恒久ほか. JFE 技報. 2014, no. 33, p. 13-18.
- 13) 林謙次, 藤沢清二, 中川一郎. JFE 技報. 2004, no. 5, p. 45-50.
- 14) 中川佳, 植木卓也, 難波隆行. JFE 技報. 2013, no. 31, p. 8-15.
- 15) 大森章夫, 中川佳, 中川郷司, 室田康宏, 石川操. まてりあ. 2012, vol. 51, p. 111-113.
- 16) 大森章夫ほか. JFE 技報. 2014, no. 33, p. 25-31.
- 17) 長尾彰英, 伊藤高幸, 小日向忠. JFE 技報. 2007, no. 18, p. 29-34.
- 18) 柚賀正雄, 橋本正幸, 鈴木伸一. JFE 技報. 2012, no. 29, p. 41-47.
- 19) 一宮克行ほか. JFE 技報. 2014, no. 33, p. 19-24.
- 20) JFE 技報. 2014, no. 33, p. 72-74.



遠藤 茂



中田直樹