

JFE スチールの TMCP 技術の進歩と高性能鋼材

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

伊木 聡 IGI Satoshi JFE スチール スチール研究所 鋼材研究部長【現 接合・強度研究部長】(理事)・博士(工学)
三宅 勝 MIYAKE Masaru JFE スチール スチール研究所 圧延・加工プロセス研究部長・博士(工学)

要旨

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 (Thermo-mechanical control process: 加工熱処理, 熱加工制御) の高度化と TMCP を活用した高性能厚板の開発を続けている。TMCP は、制御圧延技術と制御冷却技術を組み合わせて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。現在では、超急速冷却と均一な冷却を両立した Super-OLAC[®]-A およびオンラインの誘導加熱装置 (HOP[®]: Heat-treatment On-line Process), さらに圧延機直近の強冷却装置 Super-CR を実用化し、新しい材質制御を行っている。2011 年には近年の深海向けのパイプラインプロジェクトに対応するため、高強度厚肉鋼管の成形を可能とする NEO プレス[®]を導入し、高能率製造プロセスを確立した。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・鋼管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 in an effort to develop TMCP technologies, ever since JFE Steel started operation of the accelerated cooling equipment, OLACTM (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. TMCP technologies in JFE have kept on evolving to Super-OLAC-A in 2011 to achieve super rapid cooling rate and uniform cooling all over the plate, HOPTM (Heat-treatment On-line Process) and Super-CR enabling quite unique microstructural control to the plate. NEO pressTM has also installed at West Japan Works (Fukuyama) in 2011 to produce high strength and heavy wall thick linepipes for deep water off-shore pipeline projects. 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、溶接鋼構造物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) のたゆまぬ進歩によって支えられている。TMCP の発展は連続化、オンライン化追及のたまものともいえる。この制御圧延技術、制御冷却技術により、従来はオフラインの熱処理なしには不可能であった、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[®] (On-Line Accelerated Cooling) を厚板製造ラインに実用化して以降、たゆまぬ技術開発により冷却設備の高性能化を追求してきた^{1,2)}。さらにオンライン加熱設備 HOP[®] (Heat-treatment On-line Process) により焼戻しプロセスの連続化を行ない²⁾、より高強度な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⁾、圧延機直近強冷却設備 Super-CR を実用化した。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）の韌性劣化という課題は、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り性能が大きく向上したが、これは TMCP を前提とした低合金設計に基づくものである。

本論文では、TMCP の技術革新を中心に当社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る高性能厚板の特長について概説する。

2. JFE スチールの厚板・鋼管製造プロセスの進歩

2.1 JFE スチールの厚板 TMCP 技術

当社は、TMCP 技術の核となる独自の冷却技術の開発により、1980 年に西日本製鉄所福山地区で世界初となる厚板のオンライン加速冷却装置 OLAC を実用化した¹⁾。1998 年には、超急速冷却と均一な冷却を両立する新加速冷却技術 Super-OLAC[®] も実用化している²⁾。本技術は、西日本製鉄所福山地区および倉敷地区、東日本製鉄所京浜地区の 3 厚板工場に適用され、超大入熱用鋼、耐震用鋼管などの高性能厚鋼板の製造に寄与してきた³⁾。さらに本冷却技術は熱延ミ

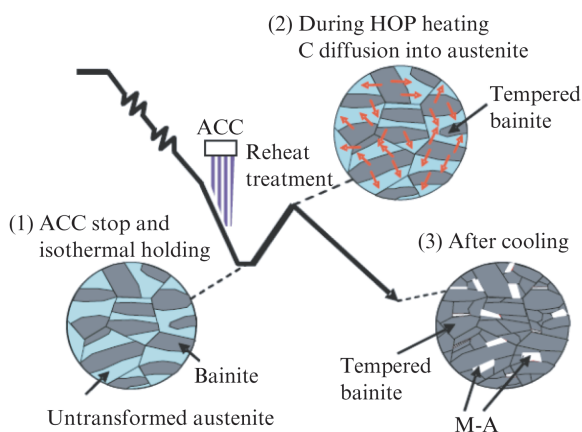


図 1 誘導加熱技術を活用したマイクロ組織制御

Fig. 1 Microstructure control by induction heating technology

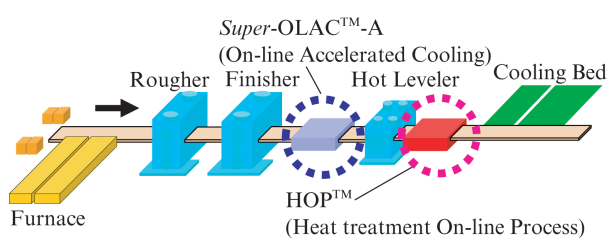


図 2 オンライン加速冷却・熱処理設備のレイアウト

Fig. 2 Layout of on-line accelerated cooling and heat-treatment facilities

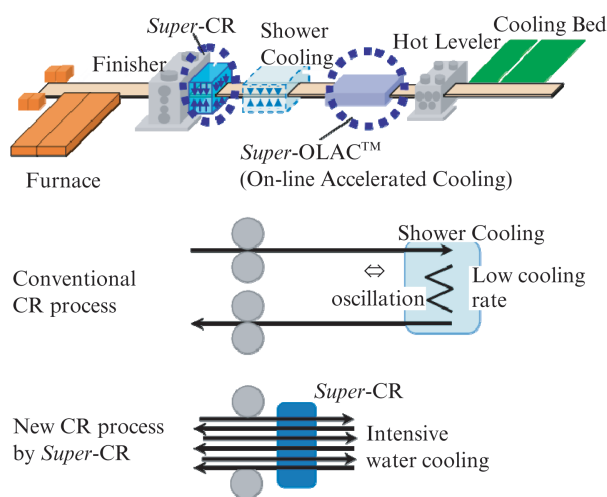


図 3 Super-CR による制御圧延の高効率化

Fig. 3 Improvement of productivity in controlled rolling by Super-CR

ル (Super-OLAC-H⁴⁾) や形鋼ミル (Super-OLAC-S⁵⁾) にも適用し、大幅な合金元素削減、溶接性向上、加工性向上を実現した。また、2004 年には世界で初めてオンライン誘導加熱装置 HOP を導入し⁶⁾、Super-OLAC による冷却制御を組み合わせ、従来は主として焼入れ・焼戻しプロセスによって製造されていた高強度高張力鋼板のオンライン熱処理化を実現した^{3,7)}。図 1 に誘導加熱技術を活用したマイクロ組織制御の概念を示す。

さらに、2011 年には Super-OLAC を進化させた Super-OLAC-A を開発し、近年の高度な要求特性に対応している⁸⁾。西日本製鉄所福山地区の厚板工場のオンライン加速冷却・熱処理設備の配置を図 2 に示す。

また、TMCP の要素技術のひとつである制御圧延の高効率化を可能とする Super-CR を実用化し、2009 年に京浜地区に適用した。Super-CR により制御圧延の高効率化を達成するとともに、図 3 に示すように Super-OLAC と組み合わせることにより 2 段階の冷却を可能とし、TMCP の自由度を向上させた⁸⁾。

2.2 JFE スチールの厚板高強度鋼管製造プロセス

近年のエネルギー需要増大を背景として、深海等での新たなエネルギー源の開発が進むとともに、生産地から消費地まで 1000 km を超える長距離のガス、石油の輸送が増加している。高効率に、大量に長距離輸送するためパイプラインの操業圧力が高くなり、その圧力に耐える厚肉、高強度管の需要が増加している。また、輸送距離を短くするために地中海、黒海などで水深 2000 m を超える深海に敷設される鋼管もあり、水圧によるコラプス（圧壊）を防止するために厚肉管の適用が増えている。

当社では、従来からの UOE 方式に加えて、より厚肉・小径の造管を可能にするプレスバンド法を開発した⁹⁾。西日本

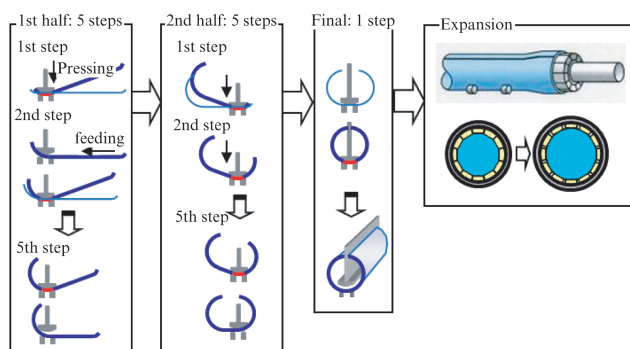


図4 プレスバンド法による鋼管の高生産率製造プロセス

Fig. 4 Schematics illustration of high productivity process of large diameter pipe by high productivity press bending

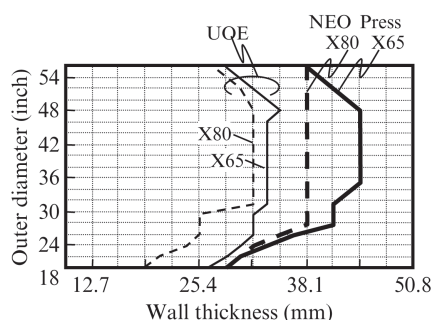


図5 大径溶接鋼管の製造可能範囲 (最大厚)

Fig. 5 Available size range of SAWL pipe

表1 コンテナ船用 YP460 MPa 級開発鋼の化学組成

Table 1 Chemical composition of developed YP460 MPa class steel plate for container ship

Steel	C	Si	Mn	Others	Ceq (IIW)	Pcm
Developed	0.06	0.15	1.93	Cu, Ni, Cr, Nb, Ti	0.47	0.20
Specification of EH47-BCA (IACS UR W31)	≤0.18	≤0.55	0.90 - 2.00		≤0.55	≤0.24

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

$$Pcm = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

製鉄所福山地区に本プレスバンド法によるNEOプレス®を設置し、図4に示す厚肉、高強度鋼管の高生産率製造プロセスを確立した¹⁰⁾。

高生産率プレスバンド法の開発により、生産率は従来のプレスバンド法の約3倍となり、プレス機の力量はUOE方式の1/7に抑えられている。また、当社における製造可能範囲は、図5に示すとおり最大管厚が1.2倍に拡大した¹⁰⁾。

3. 高性能鋼材の開発

3.1 造船用鋼板

近年の海上輸送の増加に伴う効率化、燃料費削減のニーズと環境規制強化による船体構造設計の変化により、造船用鋼板とその適用技術も大きく進歩している。

コンテナ船のさらなる大型化の流れは留まることなく、2020年には20000 TEUを超えるコンテナ船が計画されている。この大型化の動きは、使用鋼材の厚肉化と高強度鋼のニーズを生み、2017年に板厚100mmのYP460 MPa級のアレスト鋼が開発された。大型コンテナ船の強力甲板について、脆性破壊に対する安全性の観点から、2014年1月以降に契約したコンテナ船には、構造上の安全性確保とともに、板厚50mm以上のYP460 MPa級鋼板に対するアレスト（脆性亀裂伝播停止）性能が義務付けられた。当社では結晶粒の微細化に加え、加熱温度や圧延温度を精緻に制御する

表2 開発鋼の引張特性およびシャルピー衝撃特性

Table 2 Tensile test and Charpy impact test results of developed steel plate

Steel	Thickness (mm)	Direction Position	C		L
			YP (MPa)	TS (MPa)	vE ₄₀ (J)
Developed	100	1/4t	483	594	350
		1/2t	472	585	293
Conventional	60	1/4t	523	645	308
Specification of EH47 (IACS UR W31)			≥460	570-720	≥75

YP: Yield point, TS: Tensile strength, vE: Charpy absorbed energy

表3 開発鋼の母材CTOD特性

Table 3 CTOD test result of developed steel plate

Specimen size	Direction	Temperature (°C)	CTOD (mm)
B×B (B=100mm)	L	-10	0.89 (δ_u^M)
			1.59 (δ_u^M)
			2.81 (δ_u^M)

CTOD: Crack tip opening displacement

TMCP技術 Super-OLAC-A を活用し、鋼板の板厚中央部のき裂伝播に抵抗する方向の結晶比率を高める独自の集合組織制御技術を適用、世界最高厚となる100mmの

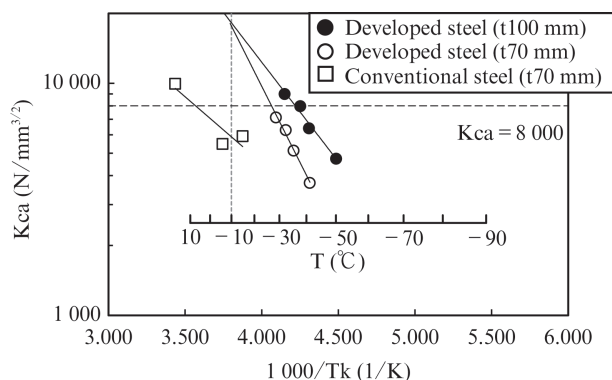


図6 温度勾配型標準 ESSO 試験結果

Fig. 6 Results of temperature gradient type standard ESSO test

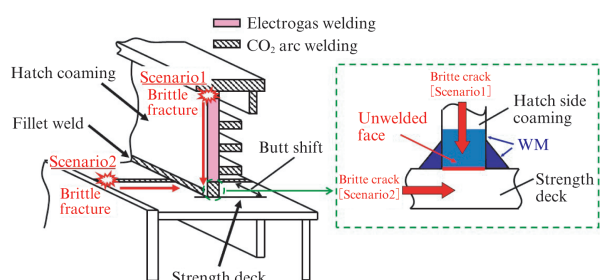


図7 構造アレスト設計による脆性亀裂の停止

Fig. 7 Brittle crack arrest by structural arrest design

YP460 MPa 級鋼板においても、高アレスト性能を実現した。開発された造船用 YP460 MPa 級鋼の化学成分を表 1、シャルピー特性、CTOD 性能、アレスト特性の例を表 2、表 3、図 6 にそれぞれ示す。高強度、造船 E グレードの母材低温靱性、CTOD 特性およびアレスト性のいずれも満足している。

これに加え、当社では、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、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)}。

一方、構造設計により高いアレスト性能を確保する技術も開発されている。構造アレスト設計は、図 7 に示すとおり、ハッチサイドコーミングと強力甲板の T 継手部に非溶着部が存在することを利用して脆性亀裂を停止させる手法である。効果は実験で検証されており、通常の鋼板と低温靱性の適正な溶接材料により脆性亀裂を停止させるもので、合理的な設計手法といえる。

また、アジアでの LNG の需要増加を背景として、シェールガス革命により供給体制が整った米国とアジアとを結ぶガス運搬船が注目され、2016 年に拡張工事が完了したパナマ運河を通峡可能な最大船型の設計の中で、高強度化、軽量化につながる厚鋼板のニーズが高まっていた。

当社では、中厚（板厚 50 mm 以下）の YP460 MPa 級の高強度厚鋼板を TMCP 技術を用いて製造し実用化した。開

発鋼では、Super-OLAC-A および溶接熱影響部の靱性劣化を抑制する JFE EWEL[®] 技術により溶接熱影響部の組織を最適に制御することで、溶接部の強度と靱性を両立させた。本鋼板は、2016 年に就航した 164 700 m³ 型 LNG 船に中厚の TMCP 型 YP460 MPa 級高強度厚鋼板として世界初適用され、高能率の大入熱溶接も適用できることで、船舶建造の効率化にも大きく貢献した。

3.2 建築用鋼板

近年の高層建築物では、大スパン化や、商業スペース、オフィス、ホテルの重層化などに伴い構造の複雑化が進んでいる。そのため、高強度で厚肉の鋼材が求められる中で、建築用鋼材には、耐震性の観点から降伏比（降伏強度/引張強度）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。

当社は、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で開発、商品化している。表 4 にそのラインアップを示す。

HBL385 は経済性、耐震性、溶接性のバランスに優れた引張強度 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^{13,14)}。

HBL440 は超高層建築向けに 19～100 mm 厚でかつ高強度と高い耐震性、溶接性を兼ね備えた引張強度 590 MPa 級の TMCP 鋼として商品化した。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、実用化したもので、2013 年に国土交通大臣認定を取得した^{15,16)}。

HBL630L 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 1）、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。HBL630L は、2009 年に国土交通大臣認定を取得した¹⁷⁾。

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く、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 では最大

表 4 建築用 TMCP 鋼 HBL[®] シリーズのラインアップ
Table 4 Lineup of HBLTM steel plate 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	12 ≤ t ≤ 19	385-505	550-670	≤ 80	≥ 70
HBL 385	19 ≤ t ≤ 100				
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, YR: Yield ratio

1 000 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 の韌性が著しく劣化する。当社では、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 韌性鋼を HBL325~HBL440 のグレードで商品化している¹⁸⁾。一方、柱と柱の現場溶接には比較的小入熱の溶接が適用されている。小入熱溶接では溶接熱影響部での硬化による溶接割れが懸念されるため、HBL シリーズでは TMCP 技術を活用し、鋼材の化学成分を適正化している。

また、これらの鋼材は溶接組立 H 形鋼、角形鋼管（プレスコラム）、円形鋼管への適用が進められており、母材の機械的特性として優れた低降伏比を実現している HBL シリーズは、冷間成形後の鋼管においても優れた耐震性を有することを確認している¹⁴⁾。

3.3 耐候性・耐食性鋼材

長期間にわたり使用される橋梁には、ライフサイクルコスト低減の必要性から、建設の初期や補修時の塗装が必要ない無塗装耐候性鋼板が全体の約 2 割で使用されている¹⁹⁾。一方で、海岸の近傍や、凍結防止剤を散布する環境など飛来塩分の高い地域では、耐久性の高い塗装した鋼板や高塩分対応型のニッケル系高耐候性鋼板が用いられる^{20,21)}。しかし、腐食の激しい環境では塗装の塗替えの必要があり、また、高耐候性鋼板の適用は初期材料コストを上昇させることから、ライフサイクルコストの低減に向けた要望が強い。

当社はこの要望に応え、塗装が必須とされる高塩分環境でも塗替え頻度を抑え長期使用が可能な、塗装寿命延長鋼板 EXPAL[®]を開発、商品化した^{22,23)}。また、高コストのニッケル系高耐候性鋼板に代わり、JIS G 3114 (SMA) の鋼組成をベースとし、ニッケルの添加量を抑制しつつ、塩分環境での耐食性を低下させる恐れのあるクロムを添加せず、耐食元素を微量複合添加することを特徴とした LALAC[®]-HS を商品化した^{24,25)}。

EXPAL は、鋼中に添加された複数の耐食元素が、鋼板の表面に緻密で、かつ塩分の地鉄表面への透過を電氣的に抑制する保護性のさび層を形成することで、鋼板の腐食と塗装劣化を抑制する。LALAC-HS も、複合添加した耐食元素により形成される緻密な保護性さびにより、従来のニッケル系高耐候性鋼とほぼ同等の耐候性を得ることに成功してい

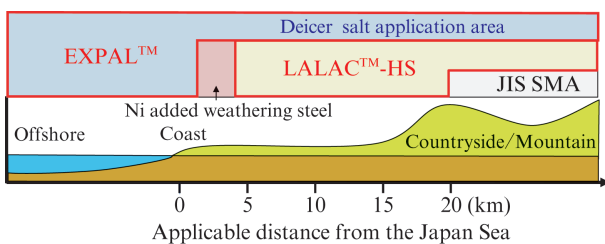


図 8 塗装寿命延長鋼および耐候性鋼の適用地域
Fig. 8 Applicable area of EXPAL[™] and LALAC[™]-HS

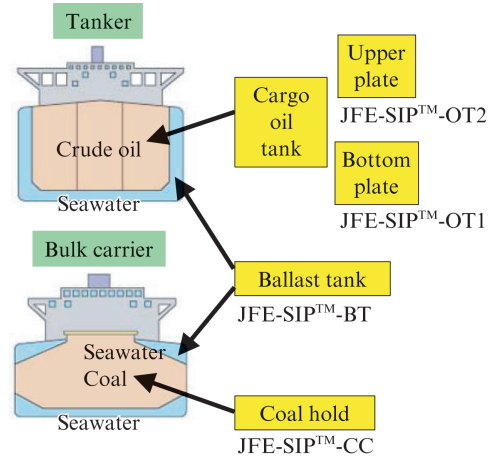


図 9 各造船用耐食鋼の適用部位

Fig. 9 Applicable part of corrosion resistant steels for shipbuilding

る。

EXPAL および LALAC-HS は、TMCP 技術の活用により、一般溶接構造用鋼と同等の良好な溶接施工性を確保しつつ、併せて良好な耐食性を有するコストパフォーマンスに優れた鋼板である。EXPAL および LALAC-HS の適用地域を 図 8 に示す。

腐食は、船舶にとって安全性の低下や寿命の短縮につながる大きな問題である。タンカーの荷油タンク底板では原油に含まれる海水により激しい孔食を生じ、上板は防爆用の排ガスと原油から発生する硫化水素が混合された雰囲気での昼夜の温度変化による乾湿繰り返しにより全面腐食を生じる²⁶⁾。船舶バラストタンクは塗装して使用されるが、海水による厳しい腐食環境のため、塗膜下腐食を生じる²⁷⁾。石炭を運搬するバルクキャリアーのカーゴ内では、石炭由来の希硫酸腐食による局部腐食を生じる²⁸⁾。これらの腐食は構造強度低下をもたらす懸念があることから、耐食性向上が求められている。

当社では原油タンカー荷油タンク向けに 2008 年に底板用耐食鋼 JFE-SIP[®]-OT1、上板用耐食鋼 JFE-SIP-OT2 を開発した^{29,30)}。また、2008 年に船舶バラストタンク用に JFE-SIP-BT^{31,32)}を開発した。さらに、2014 年に石炭運搬船のカーゴホールド用に JFE-SIP-CC を開発した^{33,34)} (図 9)。これらの耐食鋼は、合金元素の働きにより形成された保護性の腐食生成物が、荷油タンク底板の孔食および上板の全面腐食、バラストタンクの塗膜下腐食、石炭カーゴホールドの局部腐食を抑制する。

特に、原油タンカー荷油タンクについては、2010 年に国際海事機関 (IMO) の性能基準が制定されており、塗装するかもしくは耐食鋼の使用が義務づけられている。上述した底板用耐食鋼 JFE-SIP-OT1、上板用耐食鋼 JFE-SIP-OT2 は NK 船級、ABS 船級等の承認を受けており³⁰⁾、その適用により、船舶の安全性向上に貢献できると考えている。

表 5 海洋構造物用鋼板のラインアップ

Table 5 Available strength and thickness of steels for offshore structures

YS Class (MPa)	Charpy temp. (°C)	CTOD test temp. (°C)	Thickness (mm)
355	-40	-10	≤101.6
	-60	-40	≤76.2
420	-40	-10	≤101.6
	-60	-40	≤76.2
500	-40	-10	≤75
	-40	—	≤150
550	-40	—	≤150
	-60	—	≤108
620	-40	—	≤180
	-60	—	≤210
690	-40	—	≤210
	-60	—	≤210

3.4 エネルギー用鋼材

新興国の発展に伴う世界的なエネルギー需要の増加により、海洋油田やガス田開発を行うための海洋構造物の建造が今後さらに活発になると予測される。新たな資源開発を行う地域は極寒地や水深の深い海域に広がりつつあり、鋼材に要求される板厚や強度、低温靱性といった機械的特性に関する要求も厳格化してきている。

極寒地で使用する採掘リグやプラットフォームに使われる厚板には、厳しい低温靱性が要求され、船級規格の高張力鋼板である E 級鋼 (-40°C 仕様) や F 級鋼 (-60°C 仕様) などのほか、NORSOK や EN 規格に準拠した YP500 MPa 級の厚肉鋼板が用いられる。さらに、溶接鋼構造物の安全性を確保するため、これらの厚板の溶接継手部には、厳格な破壊力学パラメータの一つである CTOD (Crack tip opening displacement) に基づく破壊靱性が要求されている。

当社は、マイクロアロイ技術を活用した高度な材質設計、製鋼技術と加速冷却装置 Super-OLAC-A を用いた最新鋭の制御圧延技術、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を両立させるとともに、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^{35, 36)}。

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。当社は、これら QT (Quench and Temper) 熱処理プロセスの厳格仕様極厚鋼板についても厚肉材まで対応した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、多数の製造実績がある。表 5 に開発した海洋構造物用鋼板の例を示す。

3.5 大径鋼管, 大径鋼管用鋼板

海洋油田やガス田の開発に伴い、大径管の使用も、より水深の深い海域やサワー環境の厳しい地域に広がっており、パイプラインに用いられる大径鋼管に対する仕様の要求も厳格化してきている³⁷⁾。

耐サワー性能に関しては、近年、より高い濃度の硫化水素 (H₂S) を含む厳しいサワー環境のパイプラインが計画されており、より均一に表面硬度を管理した大径鋼管、大径鋼管用鋼板が求められている。当社では Super-OLAC-A を導入し、冷却の均一性アップと冷却速度の高精度コントロールにより、鋼板の表面を軟質なグラニューベイナイト (GB) 主体組織とし、表面硬さを安定的に制御することを可能とした³⁸⁾ (図 10)。

インド、中央アジア、アフリカ地域のエネルギー需要の増大とともに、輸送距離を短くするため、地中海や黒海などの水深 2000 m を超える深海にパイプラインを敷設するプロジェクトが現実のものとなっている。深海に敷設されるパイプラインは、水圧によるコラプス (圧壊) を防止するため、厚肉管の適用が増えている。

当社では、西日本製鉄所福山地区に高能率プレスバンド法を実現する NEO プレスを設置することにより、加速冷却装置 Super-OLAC-A と制御圧延による最適な TMCP 技術によりマイクロ組織を均一に制御した厚肉大径鋼管用鋼板を用いた、厚肉、高強度鋼管の高能率製造プロセスを確立し

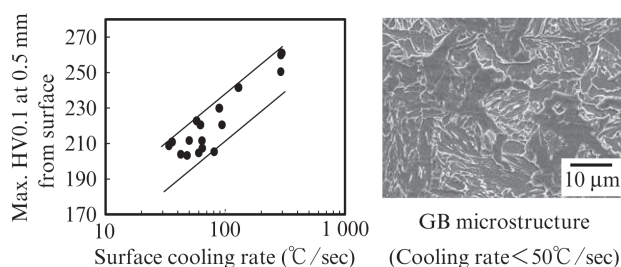


図 10 X65 級厚鋼板の表層冷速と硬さの関係とマイクロ組織

Fig. 10 Relationship between surface cooling rate and maximum surface hardness and microstructure in grade X65 steel plate

表 6 X65 ラインパイプの機械的性質

Table 6 Mechanical properties of grade X65 linepipe

Tensile properties				DWTT
YS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	YR (%)	SA at -10°C (%)
507	594	64	85	100
0.5% Comp. YS (MPa)		Ovality (%)	Collapse pressure (MPa)	
As formed	After heated			
452	486	0.2	44.2	

DWTT: Drop weight tear test

た¹⁰⁾。

表 6 は試作した X65 ラインパイプの機械的性質の一例である。-10℃の DWTT で延性破面率は 100%，かつ成形時点および 230℃で 5 分間の時効処理を施した後も規格最低降伏強度を上回る圧縮強度を示している。DNV GL 規格式により計算されるコラプス圧も併記しているが、優れたコラプス性能を示すことが確認された。

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 や厚肉鋼管の製造が可能となる NEO プレスに關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り商品化した、高性能高強度鋼板について概説した。

当社は、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

- 東田幸四郎, 大北智良, 大内千秋, 長嶺多加志. OLAC の実用化研究 -1 厚鋼板へのオンライン加速冷却 (OLAC) の適用. 日本鋼管技報. 1981, no. 89, p. 121-132.
- 小俣一夫, 吉村 洋, 山本定弘. 高度な製造技術で応える高品質高性能厚板. NKK 技報. 2002, no. 179, p. 57-62.
- 藤林晃夫, 小俣一夫. JFE スチールの厚板製造プロセスと商品展開. JFE 技報. 2004, no. 5, p. 8-12.
- JFE スチール. <https://www.jfe-steel.co.jp/products/usuita/catalog/blj-001.pdf>
- 木村達巳, 山本晃輝, 青木秀未. TMCP (加工熱処理) を活用した靱性に優れた高強度 H 形鋼の開発. JFE 技報. 2010, no. 26, p. 30-35.
- 遠藤茂, 多賀根章, 日野善道, 水野浩, 諏訪稔. 誘導加熱を用いた厚板オンライン熱処理設備. 素形材. 2009, vol. 50, no. 7, p. 8-12.
- 鹿内伸夫, 三田尾眞司, 遠藤茂. 最近の TMCP による厚板組織制御技術の進展と高性能化. JFE 技報. 2007, no. 18, p. 1-6.
- 遠藤 茂, 中田直樹. JFE スチールの TMCP 技術の進歩とそれによる高性能厚板. JFE 技報. 2014, no. 33, p. 1-6.
- 堀江正之, 田村雅哉, 三輪俊博, 三宅 勝, 壁矢和久. プレスバンド鋼管の拡管特性. 塑性と加工. 2018, vol. 59, no. 694, p. 203-208.
- NEO プレス[®]による大径溶接鋼管の高効率製造プロセス. JFE 技報. 2018, no. 42, p. 100-101.
- 一宮克行, 角博幸, 平井龍至. 「JFE EWEL[®]」技術を適用した大入熱溶接仕様 YP460 級鋼板. JFE 技報. 2007, no. 18, p. 13-17.
- Hase, K.; Ichimiya, K.; Ueda, K.; Handa, T.; Eto, T.; Aoki, M. Texture-controlled YP460 N/mm² Class Heavy Thick Plate for Ultra-large Container Carriers. International Journal of Offshore and Polar Engineering. 2019, vol. 29, no. 3, p. 315-321.
- 林謙次, 藤沢清二, 中川一郎. 建築用高性能 550 MPa 級高張力鋼板—鉄骨コストのミニマム化と環境負荷軽減を実現する新設計基準強度厚板「HBL385」—. JFE 技報. 2004, no. 5, p. 45-50.
- 中川佳, 植木卓也, 難波隆行. 耐震安全性と経済性を両立させる建築構造用 550 N/mm² 級鋼材「HBL[®]385 シリーズ」. JFE 技報. 2013, no.

31, p. 8-15.

- 大森章夫, 中川佳, 中川郷司, 室田康宏, 石川操. 建築構造用高性能 590 N/mm² 級 TMCP 鋼板「HBL[®]440」. まてりあ. 2012, vol. 51, no. 3, p. 111-113.
- 大森章夫, 中川佳, 中川郷司, 室田康宏, 石川操. 建築構造用高性能 590 N/mm² 級 TMCP 鋼板「HBL[®]440」. JFE 技報. 2014, no. 33, p. 25-31.
- 植田圭治, 遠藤茂, 伊藤高幸. 硬質第 2 相分散組織制御型低 YR780 MPa 級鋼板. JFE 技報. 2007, no. 18, p. 23-28.
- 鈴木伸一, 一宮克行, 秋田俊和. 溶接熱影響部靱性に優れた造船用高張力鋼板—大入熱溶接部の高品質化を実現する JFE EWEL 技術—. JFE 技報. 2004, no. 5, p. 19-24.
- 日本橋梁建設協会. <https://www.jasbc.or.jp/technique/works/>. 2020.
- 竹村誠洋, 田中賢逸, 鈴木伸一, 森田健治, 藤田栄. 海岸耐候性鋼の開発. まてりあ. 2001, vol. 40, no. 3, p. 289-291.
- 塩谷和彦, 川端文丸, 天野茂一. 溶接性に優れた極低炭素ペイナイト型新耐候性鋼. 川崎製鉄技報. 2001, vol. 33, no. 2, p. 97-101.
- JFE スチール. <https://www.jfe-steel.co.jp/release/2018/09/180926.html>. 2018.
- 中村直人, 三浦進一, 羽鳥聡. 塗装寿命延長鋼 EXPAL[®]の開発. JFE 技報. 2020, vol. 46, p. 38-43.
- JFE スチール. <https://www.jfe-steel.co.jp/release/2019/10/191003.html>. 2019.
- 三浦進一, 羽鳥聡, 鹿毛勇. 海浜環境等高塩分環境向け新高耐候性鋼 (LALAC[®]-HS) の開発. JFE 技報. 2020, vol. 46, p. 44-49.
- 日本造船研究協会. 第 242 研究部会, 原油タンカーの新形コロージョン挙動の研究—研究概要総括書—. 2002.
- Nippon Kaiji Kyokai. Guidance for Corrosion Protection System of Hull Structures — For Water Ballast Tanks and Cargo Oil Tanks — Second revision. 1995.
- 小林佑規, 田中義久, 後藤英信, 松岡一祥. ばら積石炭船倉内の腐食を模擬した希硫酸環境における造船用鋼の腐食および腐食疲労. 日本造船学会論文集. 1999, vol. 185, p. 221-232.
- JFE スチール. <https://www.jfe-steel.co.jp/release/2008/01/080129.html>. 2008
- 池田博司, 寒沢至, 三島永嗣. 原油タンカー荷油タンク用耐食鋼 (JFE-SIP[®]-OT1, OT2) の開発. JFE 技報. 2020, vol. 46, p. 8-14.
- JFE スチール. <https://www.jfe-steel.co.jp/release/2008/02/080228.html>. 2008.
- 塩谷和彦, 橋俊一. パラスタタンク耐食鋼適用船の塗装劣化挙動. 日本船舶海洋工学学会論文集. 2016, vol. 24, p. 211-218.
- JFE スチール. <https://www.jfe-steel.co.jp/release/2014/05/140515.html>. 2014.
- 池田博司, 塩谷和彦, 伊木聡, 山村直一, 長谷和邦. 石炭運搬船用高耐食性鋼板の開発. まてりあ. 2018, vol. 57, no. 3, p. 117-119.
- 寺澤祐介, 田中敏隆, 鈴木伸一. 海洋構造物用溶接継手 CTOD 仕様 YP500 N/mm² 級鋼板. JFE 技報. 2020, no. 46, p. 50-56.
- 海洋構造物用極低温靱性仕様極厚 YP690 N/mm² 級鋼. JFE 技報. 2020, no. 46, p. 83-84.
- 伊木聡. 産業界の最近の動向と溶接工学, III 構造製作, 2. パイプライン・ベンストック. 溶接学会誌. vol. 88, no. 5, p. 75-78.
- 嶋村純二, 伊木聡, 田村雄太. 表層硬さ厳格仕様耐サワーラインパイプ. JFE 技報. 2020, no. 46, p. 64-69.



伊木 聡



三宅 勝