

# 高度な製造技術で応える高品質高性能厚鋼板

The Leading High Performance Steel Plates with Advanced Manufacturing Technologies

小俣 一夫 鉄鋼事業部 厚板セクター部 部長  
 吉村 洋 総合材料技術研究所 圧延プロセス研究部 部長  
 山本 定弘 総合材料技術研究所 鋼材研究部 部長

Kazuo Omata  
 Hiroshi Yoshimura  
 Sadahiro Yamamoto

近年の鋼構造物は、設計および製造技術の高度化による大型化に加え、製造コストとメンテナンスコストの低減もさまざまな分野で重要な因子となっている。こうした背景のもと、厚鋼板には高強度化、高施工性、高機能性が求められている。これらの要求特性を満足するためには、精緻かつ高度な材料設計技術と製造技術が必須となる。本稿では当社の開発した厚板加速冷却装置 *Super - OLAC* の開発経緯の概要とそれを活用した高品質高性能厚鋼板を中心に紹介する。

*Recent development of construction and design technology gives larger and heavier steel structures. In addition, reductions of construction and maintenance cost are also recently focused in various fields. From this viewpoint, higher strength, better weldability and higher performance are required for structural steels. In order to achieve these requirements, advanced and sophisticated process technology is critical in addition to precise material design. This paper describes the development of the Super-OLAC(On Line Accelerated Cooling) and its various products.*

## 1. はじめに

近年の厚鋼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、最終的な製品、構造物の設計や製造技術の高度化とトータルコスト削減の要求は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渡り、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。

本稿では、このような背景の下で当社が近年開発実用化してきた厚板加速冷却装置 (*Super - OLAC*) の開発とこれを駆使した高性能厚鋼板の開発と諸特性などについて紹介する。

## 2. *Super - OLAC* の開発

加速冷却は、制御圧延とともにTMCR(Thermo-Mechanical Controlled Process)技術の中核をなす技術で<sup>1)</sup>、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<sup>2)</sup>。

この *OLAC* は、福山厚板工場の仕上圧延機とレベラーの間に設置され、圧延で組織制御された鋼板をオッシレーションさせながら冷却する滞り型冷却設備で (Table 1)、上面冷却には柱状の冷却水を鋼板に落下させる円管ラミネーター方式を、下面冷却にはテーブルロール間に配置したスプレーノズルで水を鋼板に噴射するスプレー冷却方式を採用した<sup>2)</sup>。

Table 1 List of *OLAC* application in NKK plate mills

Name	<i>OLAC</i>	<i>OLAC</i>	<i>Super - OLAC</i>
Works	Fukuyama	Keihin	Fukuyama
Establishment	1980 (Removed when <i>Super - OLAC</i> was installed)	1985	1998
Cooling type	Simultaneous	Progressive	Progressive
Length (m)	44	20	20
Distance from FM*) (m)	24	53	68
Top	Pipe laminar	Curtain laminar	Corridor flow
Bottom	Spray	Suction laminar	Close suction laminar
Number of zones	-	12	22

\*)FM : finishing mill

1985年には、京浜厚板工場に、第2号機にあたるOLACを設置した。これは、鋼板を通過させながら冷却する通過型冷却設備で、上面冷却には平面状のラミナー流を落下させるフラットラミナー方式を、下面冷却には水槽内の水を同伴させる導管付噴水冷却を採用した。OLACの稼動によって京浜・福山両所のオンライン加速冷却鋼板の供給体制が確立した。

1990年代に入って、加速冷却鋼の需要が高まってきた結果、従来、冷却ひずみのため発生していた再矯正作業を大幅に低減し大量生産できるよう、より均一な冷却が求められるようになった。また、製品品質に対する要求が厳しくなり、鋼板の強度バラツキを少なくする、あるいは、狙いの強度レンジを狭レンジ化するなどのニーズが高まったことから、加速冷却の冷却停止温度の精度向上が望まれた。そこで当社では、これらのニーズに対応すべく、冷却に関する基礎的な研究を進め、従来にはない全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、実機化した<sup>3)</sup>。



Photo 1 *Super-OLAC* at Fukuyama Works

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。鋼板を加速冷却する場合を考えると、冷却開始時は、表面温度が高く、膜沸騰状態で冷却が進行するが、表面温度が下がってくると、蒸気膜が不安定になり、局部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、不安定な冷却である。

従来の加速冷却では、鋼板上に落下した冷却水は、鋼板上に滞留して、広い範囲で二次的な冷却を引き起こす。このとき、上面滞留水による二次的な冷却は、不安定な遷移沸騰状態になりやすく、冷却に伴って温度ムラを増大し、鋼板の不均一冷却を引き起こす元凶であった。

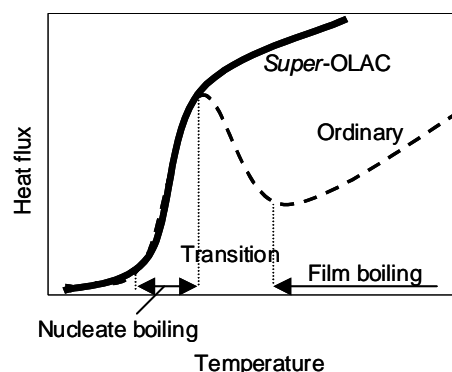


Fig.1 Boiling curve of *Super-OLAC*

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。この上下非対称な冷却方式は、上下のアンバランスが懸念されたが、実際には、冷却能力が高い核沸騰を上下両面で実現させることで、鋼材内部からの熱の拡散が律速となるような急速冷却状態に到達するため、上下の冷却は均等になる。したがって、鋼板の板厚方向中心の冷却速度は、板厚によって一義的に決定される (Fig.2)。また、*Super-OLAC*後の鋼板表面温度は、加速冷却を行わない *As Roll*材と同等の均一な分布が得られている。

この *Super-OLAC*の優れた冷却均一性と、高い冷却能力を生かして、さまざまな新商品が誕生している。これまでに、超大入熱1パス溶接が可能なコンテナ船用 *YP40*キ口鋼、従来の鋼管に比較して耐震性能を大幅に向上させたラインパイプ (*NK-HIPER*) や、強度のバラツキを標準偏差 ( ) で  $9\text{MPa}$ まで極小化した、耐サワーラインパイプ

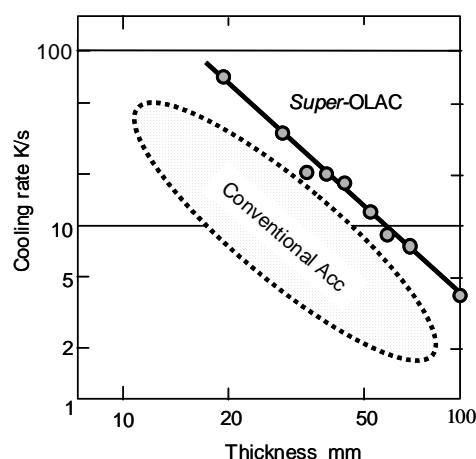


Fig.2 Cooling Rate of *Super-OLAC*

(X65)用厚鋼板などを創出した。また、*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3年間で約150万トンに達している。

### 3. 造船用鋼材

#### 3.1 大型コンテナ船向け超大入熱溶接用高張力鋼

コンテナ船では船倉内の仕切壁がなく、甲板の開口部が大きいため、船側上部に厚肉の高強度鋼板を用いて船全体の強度を確保する構造となっている。最近のコンテナ船大型化の動きの中で鋼材の厚肉化、高強度化が進み、6000TEUを超える大型船では、最大板厚65mm、降伏強度390N/mm<sup>2</sup>級の鋼板が用いられ始めている。このような厚肉鋼板の溶接には、高能率のエレクトロガスアーク溶接による1パス施工が適用されるが、その入熱は400kJ/cm～500kJ/cmと超大入熱となる。このため溶接熱影響部(HAZ)の組織が粗大化し、低温靱性の確保が課題となる。さらに鋼板の厚肉化と高強度化に対しては炭素等量(Ceq)を高める必要があるが、これは溶接性とHAZ靱性を損なうため、Ceqをおさえた成分系での高強度・厚肉化のための製造技術が求められてきた。

当社の超大入熱溶接用鋼(YP:~355N/mm<sup>2</sup>,入熱:~200kJ/mm)では、HAZ靱性の劣化原因となるフリー窒素の低減による靱性向上技術(NK-HIWEL)を従来より適用してきた。今回の大型コンテナ船向け超大入熱溶接用鋼では、さらなる厚肉化(板厚:~65mm)、高強度化(YP:~390N/mm<sup>2</sup>)、超大入熱溶接(入熱:~500kJ/cm)に対応するため、超大入熱溶接時の組織制御を可能とするマイクロアロイング技術を適用することにより、HAZ組織を微細化し、HAZ靱性を大幅に改善することが可能となった。さらに、本鋼板の製造には前述の*Super* - OLACを用いて、従来鋼と同レベルのCeqで溶接性を損なうことなく最大板厚65mm、YP390N/mm<sup>2</sup>級までの高強度鋼板の製造が可能となった。この結果、Fig.3に示すように-40の低温においても良好なHAZ靱性を確保し、造船用Eグレード鋼板において超大入熱溶接が可能となった。本開発鋼は

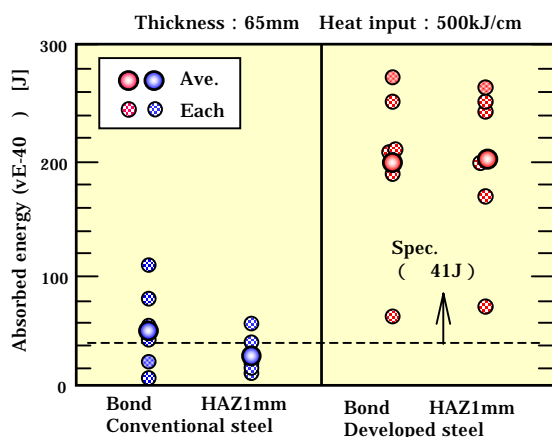


Fig.3 Toughness of SEGARC welded joints

需要家より高い評価を受けており、北米航路、欧州航路などの幹線ルートに投入される大型コンテナ船向けに、既に10000トンを越える受注、製造を行っている。

#### 3.2 原油タンカーデッキプレート用高耐食鋼板

原油タンカーのカーゴタンクではデッキプレート裏側の腐食が船舶の耐用寿命を制約する大きな要因の一つとなっている。当社では耐食鋼に関する豊富なノウハウの蓄積を基に、原油タンカーデッキプレート用鋼板の腐食に対する合金元素の効果、およびショッププライマーの機能強化についての体系的な研究を行ってきた。この結果、少量の特殊合金元素の添加とTMCP技術を組み合わせた最適な成分バランス設計により、ショッププライマーの防食期間を約2倍に延長するとともに、鋼板の腐食を低減させる効果が得られた。また、本鋼板の製造には前述の*Super* - OLACを用いたTMCP技術を適用することで、軟鋼グレード(YP:235N/mm<sup>2</sup>級)はもとより、高張力鋼(YP:315, 355N/mm<sup>2</sup>級)においても現状と同等のCeqによる製造が可能となった。これらの技術を結集することにより、従来鋼と同等の溶接性を有し、コストアップを最小に抑えつつ、耐食性を大幅に改善したデッキプレート用鋼板:「NAC5」を開発、商品化した。「NAC5」を原油タンカーのデッキプレートに適用することにより、デッキプレートの耐用寿命を延長(当社推定:約5年)することが可能となる他、船舶の修繕ドック時に必要とされるメンテナンス費用も半減することが可能となる。さらにデッキプレートの腐食を低減することにより、カーゴタンク内への鉄錆の落下を減少し荷揚げポンプの保護効果も期待できる。

本開発鋼「NAC5」は以下の特長を有している。

- ・ショッププライマーとの併用で、原油タンクのデッキプレートの腐食を抑制し、船舶の耐用寿命を延長。
- ・現用鋼と同等の溶接性を有し、現用の溶接材料が使用可能。さらに溶接部においても母材と同等の耐食性を確保。
- ・最低限のコストアップで最大限の効果が得られ、優れた経済性を有する。

このように「NAC5」は船舶の建造費用やメンテナンス費用の低減のみならず、デッキプレートの信頼性向上や良好な施工性を両立させる材料として期待されている。

### 4. 橋梁用鋼材

#### 4.1 海岸耐候性鋼

当社は橋梁分野をはじめとした屋外鋼構造物のライフサイクル延長によるコスト低減への社会的要請に応えるため、飛来塩分量が多く従来の耐候性鋼では適用できなかった海岸地域でも使用可能な「海岸耐候性鋼」を開発している。本開発鋼は耐候性能が格段に優れているばかりでなく、溶接施工性にも優れている。

本開発鋼「CUPLOY400-CL, CUPTEN490, 570-CL」は以下の特長を有している。

- ・飛来塩分の多い(0.05mmd~0.40mmd)海岸地域においても緻密なさび層を形成するため耐候性が優れ、無塗装での使用が可能。
- ・初期の流れさびが少なく、景観が良好。
- ・機械的性質は JIS G 3114 の耐候性鋼材 SMA に合致。
- ・溶接などの施工性が良好。

宮古島における暴露試験の結果、低 Ni 系の成分系ながら最適な合金設計により優れた耐候性を有しており、経済性にも優れた鋼材であることから、今後も橋梁分野を中心に種々の用途に拡大していくものと期待されている。

#### 4.2 耐候性鋼のさび安定化処理剤「カプテンコート M」

耐候性鋼は、橋梁などの鋼構造物のライフサイクルコスト低減要求の高まりとともに、近年その需要が拡大しているが、安定さびが形成されるまでの流れさびなどによる景観汚染が問題となっている。さび安定化処理は、耐候性鋼の流れさびを防止する目的で行われるが、従来のさび安定化処理は

- ・多層の塗り重ねや特殊な化成処理が必要であり施工が煩雑。
- ・クロム化合物の使用など環境負荷が大。

などの課題があった。当社が今回開発した「カプテンコート M」は以下の特長を有する画期的なさび安定化処理剤である。

- ・単層(1回塗り)による優れた施工性。当社独自技術により、さび安定化に必要な機能(安定さび熟成、流れさび防止、塩分透過抑制)を単層塗膜に兼ね備えることが可能となり、優れた施工性を実現。
- ・クロム・鉛化合物完全フリー、長期景観保持機能など、優れた環境調和性を実現。
- ・カプテンコート M のプレコート鋼板もラインナップし、客先製品プラスト工程を簡略化し得る新施工プロセスが可能となり、さらなる施工費の縮減を実現。

カプテンコート M はこれらの特長がユーザーに評価され、数多くの物件に採用されており、今後も合理的な鋼構造物の製作を推進するユーザーの多様なニーズに対応するものと期待されている。

## 5. 建築用鋼材

### 5.1 建築用高施工性 590N/mm<sup>2</sup> 級鋼板

建築物のボックス柱などに既に使用され、建設省総合技術開発プロジェクトでその利用技術指針が策定された高性能 590N/mm<sup>2</sup> 級高張力鋼は当社が世に先駆けて開発した鋼である。本開発鋼は、溶接性を考慮しつつ、最適成分設計と特殊熱処理を施すことにより、耐震性の観点から重要な降伏比を 80%以下に制御したもので、1992 年大河内記念技術賞を受賞している。1996 年には建設大臣一般認定を取得し、NKK-SA440 として既に 15 物件、約 1 万トンを受注、製造してきた。しかしながら、従来の SA440 鋼は

強度が高いために 490N/mm<sup>2</sup> 級鋼に比べ、溶接施工時の予熱温度、ビード長さなどに制約が多く、その改善が求められていた。

このような背景のもと、当社では現用鋼の有する優れた特性(高強度、耐震性、高靱性)を継承しつつ、Ceq を約 2/3 に低減することで飛躍的に溶接施工性を改善した NKK-SA440B-U および NKK-SA440C-U を開発した。本開発鋼は現用鋼に比べ以下の特長を有している。

- ・突き合わせ溶接部、付属金物取り付け部の材質変化が小さい。
- ・局部加熱による材質変化が小さい。
- ・組み立て溶接(仮付け溶接)の溶接ビード長さを短くできる。
- ・予熱温度を低減あるいは予熱作業を省略できる。

本開発鋼は開発直後より鉄骨製作者のみならず、設計者からも高い評価を受け、既に数多くのプロジェクトに採用され約 4000 トン以上の受注、製造を達成している。

### 5.2 建築用量産型高張力鋼板「HIBUIL385」

都市部の高層建築用として強度の高い鋼材が求められている。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。また最近では、経済情勢を反映し、建設コストの低減が強く求められている。

当社では、このようなニーズに対応し、経済性・耐震性・溶接性を併せ持った高張力鋼材として、降伏点下限値 385N/mm<sup>2</sup> の厚板『HIBUIL385』を開発し、2002 年 4 月に建築基準法第 37 条による国土交通大臣の認定を取得した。本鋼材は当社が誇る最先端の加速冷却設備を用いた TMCP 技術を駆使することにより、世界で初めて製造可能になった鋼材である。

HIBUIL385 の板厚範囲は 19mm から 100mm、降伏点の下限値は 385N/mm<sup>2</sup> (レンジ 120N/mm<sup>2</sup>)、引張強さの下限値は 550N/mm<sup>2</sup> (レンジ 120N/mm<sup>2</sup>)、降伏比は 80%以下、0 シャルピー吸収エネルギーは 70J 以上、化学成分は低炭素当量化を実現しており、HIBUIL355 と同一の規格値としている。

現在使用されている建築用鋼材を降伏点強度ランクで見ると、235N/mm<sup>2</sup>、325N/mm<sup>2</sup>、355N/mm<sup>2</sup> および 440N/mm<sup>2</sup> となる。一般に高強度の鋼材を使用した方が、必要部材断面の減少による鋼材重量の軽減、および鉄骨加工、運搬・建方負荷などの軽減がもたらされるため、高層建築になるほど鋼材の高強度化が求められる。一方、SA440 は強度が高く優れた性能を持っているが、合金元素の添加と圧延後の複雑な熱処理工程が不可欠であり、鋼材コストが高くなることが避けがたく、また鉄骨加工時の溶接施工においても厳格な管理が必要であるなどの難点があった。このため、高層建築の鋼材は、325N/mm<sup>2</sup> 級が建築標準と

なっていた。

当社は TMCP 分野ではパイオニアであり、トップレベルの製造・品質管理技術と豊富な実績を有してきた。今回、圧延、加速冷却条件を高精度に制御することにより、成分アップを抑制しながら強度アップを可能にし、Fig.4 に示すように鋼材の低コスト高強度化を実現した。HIBUIL385 の溶接施工性は HIBUIL325, 355 と同等であるため、強度が高い割には鉄骨加工時の溶接施工コストを低く抑えることが可能である。325N/mm<sup>2</sup> 級鋼材で設計された場合に比べ、所要鋼材重量の最大 15%削減が可能であり、また、鉄骨コストについても最大 10%削減が可能となる。溶接部の衝撃特性についても充分配慮した成分系になっており、鉄骨加工時の大入熱溶接の厳しい要求性能にも対応が可能となっている。

HIBUIL385 は降伏点 235 ~ 440N/mm<sup>2</sup> 級鋼材の中で強度、経済性、耐震性、溶接性のトータル性能として最も優れた高性能高張力鋼材である。HIBUIL385 の提供により、設計の自由度を拡大し、また高層建築用鋼材の降伏点グレードとして、385N/mm<sup>2</sup> を新しい強度スタンダードにすることで、多様化する社会的ニーズに対応が可能と考えている。

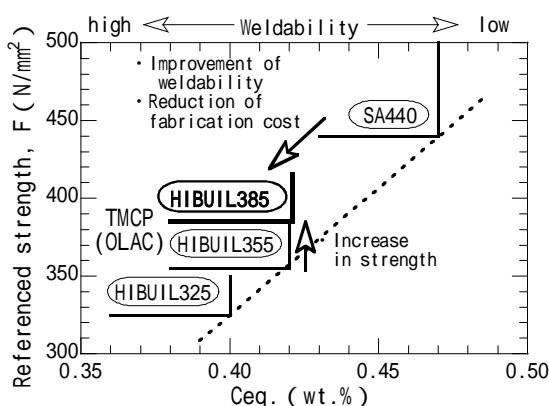


Fig.4 Concept of the developed HIBUIL385

## 6. 建産機用鋼

### 6.1 建設・産業機械用新高張力鋼

本高張力鋼は、建設・産業機械の軽量化のために当社が独自に開発したものであり、各種パーツに使用されている。中でもラフテレイクレーン（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 780N/mm<sup>2</sup> 級鋼では、高張力とともに優れた低温靱性も要求される。今回開発した新高張力鋼（NK-HITEN LE シリーズ）は Ni のような高価な合金元素を多量に添加することなく、マイクロアロイ技術と特殊熱処理技術により 780N/mm<sup>2</sup> 級の高強度レベルにおいても -40 の低温域で優れた低温靱性を確保している。

### 6.2 新耐摩耗鋼

耐摩耗鋼はショベルカーのショベル部分やダンプカーのベッセル部分などに用いられており、耐摩耗性と曲げ加工性、耐衝撃特性などの特性が要求される。また、高張力鋼以上に経済性が重視される製品である。今回開発した新耐摩耗鋼 NK-エバーハード 360LE は、合金元素の添加を最小限に抑えて、マイクロアロイ技術と特殊熱処理技術によって高硬度、高延性と同時に、耐摩耗鋼としては極めて低い温度である -40 で優れた靱性を確保している。

以上の 2 種類の新規開発鋼はいずれも炭素等量（ロイド式）で 0.40%以下を保証しており、従来鋼に比較して溶接性に優れており、予熱温度を 25 ~ 50 低減することが可能となっている。

## 7. 圧力容器用高性能 610N/mm<sup>2</sup> 級高張力鋼

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鋼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伴い、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。当社ではこうしたニーズに応えるため、最新の材質設計と製造技術を駆使して Table 2 に示す高性能 610N/mm<sup>2</sup> 級高張力鋼を開発している。NK-HITEN610U2 は JIS G 3115 圧力容器用鋼板 SPV490 相当鋼であり、従来鋼に対し予熱温度の低減と溶接部硬さの低減を可能としている。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側板用には、大入熱溶接時の継手強度と溶接部の靱性を向上させた大入熱溶接用 610N/mm<sup>2</sup> 級高張力鋼板 NK-HITEN610E2 を開発しており、既に数多くの採用実績がある。また、-50 程度までの低温靱性を兼ね備えた低温用高靱性 610N/mm<sup>2</sup> 級高張力鋼板

Table 2 NKK's 610N/mm<sup>2</sup> class high performance steel plate series for pressure vessel use

Grade	Available thickness (mm)	Feature	Typical applications
NK-HITEN610U2	6 t 75	Excellent weldability, Superior toughness, etc.	Penstock, tank, pressure vessel, etc.
NK-HITEN610E2	6 t 75	Excellent weldability, Superior properties of weldments for high-heat input welding, superior toughness, etc.	Oil storage tank, etc.
NK-HITEN610U2L	6 t 75	Excellent weldability, Superior toughness at lower temperature, etc.	Tank for low temperature use, etc.

NK-HITEN610U2L の開発も完了している。以上の新規開発鋼はいずれも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。なお、これらの新規開発 610N/mm<sup>2</sup> 級高張力鋼板の詳細については紙面の関係で、ここでは詳細な記述はひかえるが、文献 4) にその詳細が記述されているので参照されたい。

#### 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, pp.121-132(1981).
- 3) 日本鉄鋼協会. “わが国における厚板技術史”. 東京, 2001. 247p.
- 4) 柚賀正雄ほか. “圧力容器用高性能 610N/mm<sup>2</sup> 級高張力鋼板”. 溶接構造シンポジウム 2002 論文集 (2002 年). 121p.

## 8. おわりに

近年の多岐に渡る施工特性要求を満足し、かつ、コストパフォーマンスに優れた厚鋼板製造を可能とする次世代型加速冷却装置 *Super*-OLAC と、この設備を最大限に活用した独自商品を中心に、当社の高品質・高性能厚鋼板について用途別分野ごとにその特徴を紹介した。21 世紀は、これまでの延長線上にない新たな厚鋼板への要望と、それを達成するための全く新しい設計概念と高度な製造技術が必要となる可能性がある。新プロセス・新商品開発における当社のパイオニアスピリッツは JFE に継承し、今後とも新たなニーズに即応できるよう開発に邁進していきたい。