

(解説)

厚板需要業界の技術動向と当社の対応状況

Latest Technical Trends in Steel Plate and Action in Kobe Steel



岡野重雄*
Shigeo OKANO



大番屋嘉一*
Yoshikazu OBANYA



安部研吾**
Kengo ABE



細井宏一***
Koichi HOSOI

Production of steel plate has increased since 2003 along with the rapid economical growth in Asia led by China. This article states that Kobe Steel needs to continue necessary efforts such as safety and cost reduction to prepare for the predicted fierce competition in the market. It also introduces examples of demands for steel constructions in the various product markets as well as the efforts and actions of Kobe Steel to meet such demands in the last decade.

まえばき = 世界の厚板需要量は中国が牽引するアジア経済の成長に支えられ、'03年頃から造船やエネルギー分野を中心として急拡大が続いている。それにともない、我が国の厚板需給関係に重大な影響を及ぼす日韓中3国の厚板生産量は増加しており、中でも中国の生産量の伸びは爆発的であり、'06年には4,000万トン/年に達し、さらに'08年には6,000万トン/年と日本の4倍以上の規模になるものと予想されている。また韓国でも'10年頃までに現状の日本の生産能力レベルに匹敵する1,100万トン/年程度に増強されると報じられている¹⁾。

これらの韓中の能力増強においてはヨーロッパ製の圧延機に加えて最新のTMCP(Thermo-Mechanical Control Process)設備も導入されており¹⁾、これまで最高水準であった我が国の厚板製造技術・高付加価値型商品の開発においても韓中との競争激化が不可避な状況が到来すると思われる。当社の厚板・溶接分野とも、熾烈な国際競争の中で勝ち残るためには、ますます厳格化している安全・コストダウンなどに対する国内外の顧客からの要望にこたえ続ける必要がある。

本稿では、需要業界ごとに、ここ10年ほどの鋼構造物に対する様々な要望の例と当社での対応状況を紹介する。

1. 造船業界

1.1 造船業界の趨勢と造船用厚板の特徴

現状、新造船の建造意欲は極めて旺盛で、'06年度の世界の竣工量は5,200万総トンと過去最高を記録し、'07年には6,500万総トンと、'92年の3倍、'02年の2倍に達するものと予想されている²⁾³⁾。

オイルタンカー、バルクキャリア、コンテナ船など様々な船型があるが、従来からの共通する課題として、台風などの過酷な気象・海象条件で大きな外部応力が

作用した場合にも十分な安全性を有すること、大量の鋼材(30万トン級のVLCCで35,000トン以上)を溶接によって組上げるため、溶接施工コストを低減すること、輸送効率向上の観点から船体の軽量化を図ること、などがあった。このような課題に対応するため、国内厚板ミルでは'80年代初頭に導入したTMCP設備をフル活用した耐脆性破壊性能や溶接施工性に優れた高強度鋼板(YP325, 355MPa級が中心)を開発し、造船業界に大量供給してきた。

1.2 最近の造船用厚板への要望と当社の対応

1.2.1 オイルタンカーにおける動向

オイルタンカーの溶接施工では、突合せ溶接以上にすみ肉溶接施工の割合が非常に高いことから、品質の向上はもとより、施工効率の向上が常に要望されてきた。

当社ではこのような課題に対し、種々のすみ肉溶接専用のフラックス入りワイヤを開発・実用化する⁴⁾とともに、「TOP法⁵⁾」と呼ばれるすみ肉溶接の片側を2電極で溶接する施工法を開発することで、溶接速度を従来の約2倍(約1.5m/min.)にすることが可能となり、建造効率の向上に大きく貢献してきた。また、近年、さらに進化した施工法として「新TOP法」を独自技術により開発した。さらなる溶接速度の向上を可能にするものとして、国内外の造船所より大きな注目を集めている。

一方で、'89年のエクソンバルディス号の座礁事故での原油流出による大規模な環境汚染が契機となって2重船殻化が進められたが、その後もエリカ号などの油流出事故が相次ぎ、さらなる構造規制強化の圧力が強まっている。直近では、一定規模以上のタンカーとバルクキャリアに対しては'06年4月以降の契約船について、最も環境の厳しい北大西洋航路での25年就航に耐えられる設計が求められ、全船級協会の統一規則であるCSR(Common Structural Rule)が制定され、腐食予備厚の

*鉄鋼部門 厚板商品技術部 **鉄鋼部門 加古川製鉄所 技術研究センター ***溶接カンパニー 技術開発部

増加が求められている⁶⁾。

各造船所では CSR に対応する設計を推進中であるが、船体重量が増加する方向への対応が必要になるものと考えられる。また、同様の規則制定が他の船型に対して行われるといわれており、厚板に対して今後、船体重量の増加を最小限にとどめるような何らかの新たな要望が具体化してくるものと考えられる。

その一方で、二重船殻化により原油タンク内の構造や温度などの環境因子に変化が生じたため、底板の孔食が著しくなったのではないかとの問題提起があり、'97 年以降、船主、造船所、大学および国内鉄鋼メーカーが共同で研究を行ってきた⁷⁾⁸⁾⁹⁾。その知見に基づき、当社をはじめとする各鉄鋼メーカーでは耐食性に優れた鋼板の開発を進めてきた。

当社では、独自の孔食促進評価試験手法の開発とともに、硫黄や強酸性溶液といった原油タンク底板の過酷な腐食環境でも反応抵抗の大きい成分系を見極め、従来鋼板と同様の強度や靱性、溶接性を兼ね備えた耐食鋼を開発している。本鋼板はすでに(財)日本海事協会の製造法承認を取得しており、現在、タンカー実船への適用による実環境での耐食性評価を推進している¹⁰⁾。

同時に、孔食を抑制する手段として IMO (International Maritime Organization) では塗装義務化および塗装仕様厳格化の動きがあるが、その代替手段として耐食鋼の適用を国内鉄鋼メーカー全体で提案しており、その認知により原油タンク底板の孔食防止という課題に対して、より低コストな対策として広く採用されることが期待されている¹¹⁾。

造船業界ではさらに、旺盛な需要にこたえるための建造ピッチの短縮や、近い将来に問題となる熟練技能者不足への対応として、切断や溶接、ぎょう鉄(加熱による部材の曲げ加工)などで鋼板の変形が少なく安定化できることへの要望が高まっている。当社ではこのような要

望にこたえられるヒズミレス鋼板(一般用)^{2),13)}や、スーパーヒズミレス鋼板(曲げ加工用)を当社独自メニューとして有しており、造船所と一体となった適用効果の検証を通してその優位性が確認され、オイルタンカーだけでなくバルクキャリアにも広く採用されている。

1.2.2 コンテナ船における動向

アジア圏の経済成長が進展し、コンテナ輸送も著しく拡大するとともに、コンテナ船の大型化が進んできた。

'90 年代初頭には 4,000TEU (Twenty Feet Equivalent Unit: 長さ 20 フィートの標準サイズのコンテナの積載個数)程度であったものが現状は 10,000TEU を超えるものも建造されるようになってきている¹⁴⁾(図 1)。コンテナ船は、完成した工業製品の輸送に使用されることから短時間で運行することが必要であり、そのための軽量化が重要である。また、船の上部がコンテナ荷物の積込のために大きく開口していることから、構造としての強度確保を目的として YP390MPa 級の高強度鋼¹⁵⁾の 50mm 以上の厚肉材が使用されることが特徴である。

そのような観点から、他の船型以上に高強度厚肉材の採用が進んできたが(図 2)、最近の超大型化にともない、従来の造船用鋼板の一般的な最高強度である YP390MPa 級から 2 ランク強度アップした YP460MPa 級鋼板で板厚 60mm 程度の採用が現実となっている。

このような鋼板の溶接にあたっては、その施工効率向上のために 1 パスの大入熱溶接の適用が不可欠であり、その HAZ (Heat Affected Zone: 溶接熱影響部)および溶接金属の靱性確保が大きな課題となっている。このような課題に対して、母材成分として C (炭素)や合金元素の添加量を最小限とすることが有効であるが、一方で厚肉での高強度確保が困難となる。このため当社では、圧延後の加速冷却速度の増加に加え、均一な冷却を実現するための加速冷却設備前面へのプレレバラの設置、および冷却設備改造・冷却制御技術の改善を行っている。ま

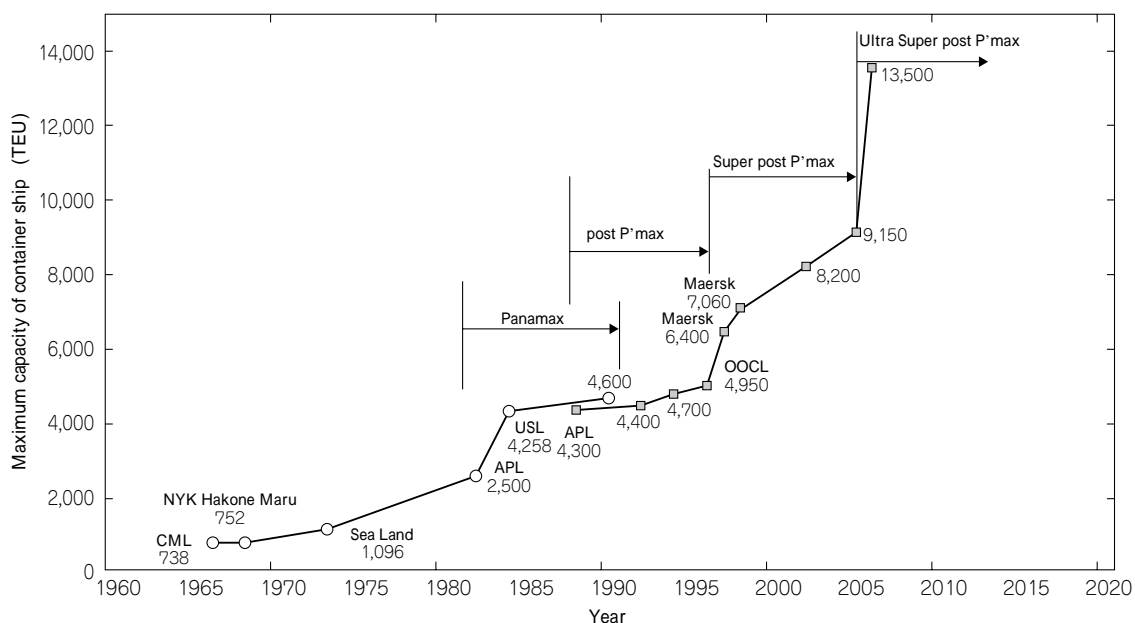


図 1 世界のフル・コンテナ船の最大船型の推移¹⁴⁾

Fig. 1 Transition of maximum capacity of full container ship in the world

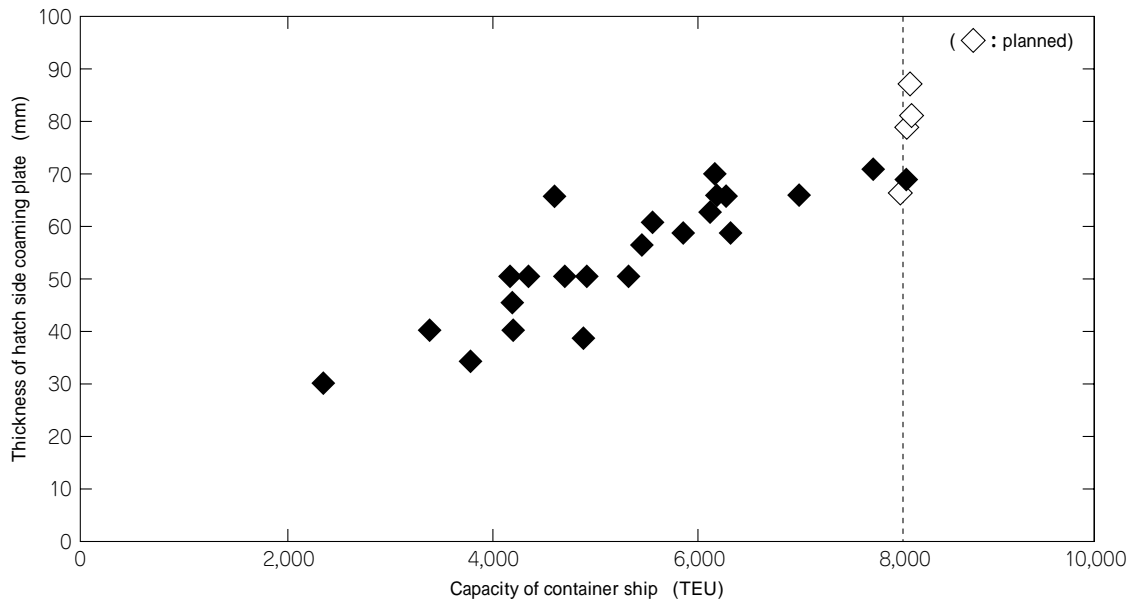


図2 コンテナ船の船型とハッチサイドコーミング使用板厚の関係¹⁴⁾
 Fig. 2 Relationship between container ship capacity and hatch side coaming plate thickness

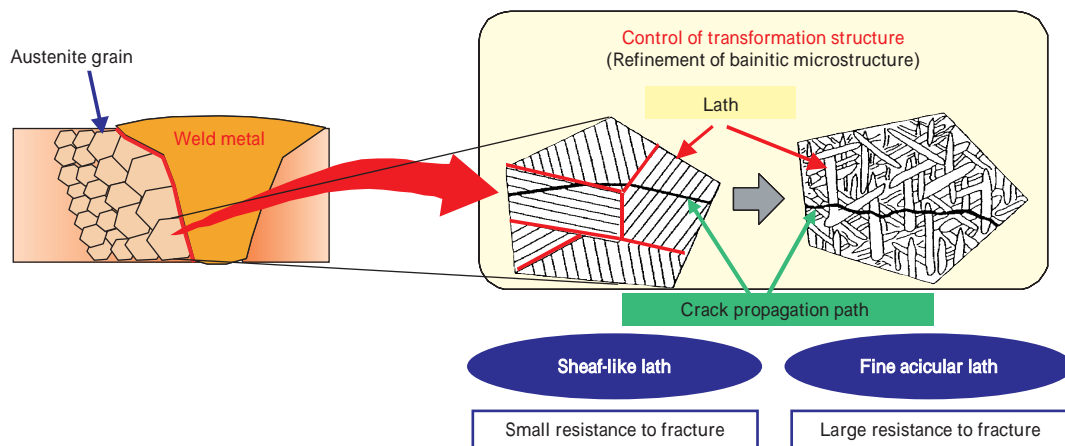


図3 多方位ベイナイト技術による靱性の改善の機構¹⁸⁾
 Fig. 3 Mechanism of improvement of fracture toughness by randomization of crystallographic orientation in HAZ

た、厚肉材ほど確保が困難となる母材靱性についても、結晶粒を微細化するために必要な温度域に必要な圧下量を確保しつつ、同時に鋼板の平坦度も確保できる「プロメ圧延」技術^{16),17)}も開発・実用化している。

あわせて、冶金技術面での対応としても独自技術を活用している。すなわち、HAZ 靱性改善手法として、従来は、高温でも安定な介在物の活用により、著しく粗大化するボンド部の結晶粒を微細化することに主眼が置かれてきた。当社は、粗大化する結晶粒内の組織単位の方角をランダム化することにより破壊の抵抗を上げるといふ、全く新たな思想に基づく「低C（炭素）多方位ベイナイト技術」を開発・実用化している¹⁸⁾（図3）。

溶接材料としても、新たな厚肉材をいかに高品質、かつ、高効率で溶接施工できるかという点での開発に注力してきた。具体的には、SEGARC（セガーク）法と呼ばれる高能率エレクトロガスアーク溶接法による1パス大入熱溶接施工（溶接入熱 50kJ/mm）であっても、鋼板と同等以上の強度を有しつつ、安定した衝撃性能や破壊靱性などを満足する専用フラックス入りワイヤを開発して

いる。さらに、本溶接材料は、実際の溶接施工時の使いやすさ（溶接作業性）も従来材と同等以上となるように考慮して設計されており、ユーザーにとって実用性の高い溶接材料との評価を受けている。

このような最先端の技術の適用により開発した YP460MPa 鋼板は、高価な元素である Ni を添加しなくても、板厚 60mm の 1 パス大入熱溶接の場合にも十分な HAZ および溶接金属の靱性を確保している。また、YP355MPa 級に対して板厚が従来の 65mm 程度から 80mm までへの拡大要望があったが、同様の技術の活用により、対応が可能となっている。

一方で、最近、厚肉材を使用する超大型コンテナ船においては、薄肉材¹⁹⁾とは異なり、万一脆性破壊が発生した場合には、亀裂が停止せず船体の重大な破壊事故につながる懸念があるとの問題提起がなされ²⁰⁾、産・官・学での研究が開始された。上記の当社の開発商品は、脆性破壊停止特性も良好であることを確認しており、さらに船体構造上の工夫と組み合わせることにより、脆性破壊停止の課題を解決できることを造船所との共同研究により

確認している。本対策はすでに（財）日本海事協会の認知を得ており、これを前提として本鋼板の実船への適用を進めて行く予定である。

2. 建築業界

2.1 建築業界の趨勢と建築用厚板の特徴

鉄骨構造物の建設はバブル崩壊以降低迷が続いてきたが、厚板が使用される超高層ビルでは大型化の進展もあり、ほぼ120万トン/年の厚板需要を維持してきた。

地震国である我が国の鉄骨建造物に対しては耐震性能を確保することが最優先で求められる。このため、'81年の新耐震設計法では、極めてまれな大地震が発生した際にも、骨組が適度に変形することによって地震エネルギーを吸収し、建物の崩壊を回避するという基本的な考え方が採用された。鋼材面では'94年のSN鋼（建築用圧延鋼材）のJIS規格化のように、塑性変形時のエネルギー吸収能を確保するために、降伏比（降伏強度の引張強度に対する比）の低減を求められることが建築用厚板の大きな特徴である²¹⁾。

さらに、鉄骨用部材では、最終形状・加工法が多岐にわたることも特徴である。ボックス柱は幅が数100mm、長さが10数m程度の長方形に切断した厚板を4枚組合わせて角部を溶接組立したものであり、超高層ビルの低層部など大きな力の作用する柱として使用される。これに対して、角形鋼管は厚板をプレス曲げすることで断面形状の角部が丸みを帯びた四角形とした柱材であり、ボックス柱よりも負担する力の小さい領域に使用される。円形鋼管は外観がソフトであるといった意匠面でのメリットや耐座屈性の向上といった構造面でのメリットもあり、近年採用が増加している。

これらの部材ごとに厚板としての必要性能も異なっている。ボックス柱用素材では角部に適用されるサブマージアーク溶接や、柱内部に挿入されるダイヤフラム部に適用されるエレクトロスラグ溶接が超大入熱溶接（入熱40～100kJ/mm程度）であるため、それに耐えられる高いHAZおよび溶接金属の靱性が求められる。一方で、厚肉小径の円形鋼管や角形鋼管の角部では、曲げ加工が厳しく、その場合に加工硬化を受けても降伏比の上昇を抑え、靱性低下を最小限とすることが要求される。

さらに鉄骨用厚板として特徴的なのは、ビルの高層化・大スパン化に対応するため、柱材で高強度化と厚肉化が進展し、厚さ100mmまでのYP440MPa級（HT590）までの多様な素材が広く使われていることである。

2.2 最近の建築用厚板への要望と当社の対応

2.2.1 溶接施工効率改善への要望

前述の厚肉高強度鋼板の製造に際しては、溶接低温割れ防止の観点から合金元素や炭素量の増加を極力抑える目的でTMCP法が適用されるが、'80年代初頭に始まった我が国のTMCPは対象が造船用の薄肉で比較的低強度（YP315MPa級（HT490）、板厚20mm程度まで）材であった。これに対して建築用高強度厚肉材の製造においては、冷却速度の上昇を図る必要があり、同時に冷却強化に付随する変形・不均一残留応力などの問題を解決

するために均一冷却化などを行っているが、建築用としての特徴である低降伏比の要求を満足する母材組織を得るために、冷却開始・停止温度の厳格制御など、設備・制御面での改善も行っている。

溶接材料面での施工改善策としては、四面ボックス柱については、板厚増大に伴う超大入熱化に対応したサブマージアーク溶接やエレクトロスラグ溶接材料が開発されている。そして、現在、主流となっている鋼管コラム構造ではガスシールドアーク溶接ロボットによる自動溶接化の進展が著しい。ロボット溶接についても無人操業の利点を最大限発揮させるべく、スラグの発生量を抑制して、効率向上と欠陥低減を両立するロボット専用ワイヤを開発し、市場への浸透を図っている²²⁾。

2.2.2 高HAZ靱性鋼板への要望

ボックス柱用厚板については、阪神・淡路大震災での柱-梁接合部（入熱3kJ/mm以下の小入熱CO₂溶接）でのスカラップや裏当材による応力集中に起因した破断事例をきっかけとして、溶接継手部の必要靱性値が70J以上と規定され、それを守れるような厚板、溶接材料、溶接施工法（パス間温度など）が規定された²³⁾。一方で、上述の超大入熱溶接部の必要靱性値に関する検討も進められ、最近では物件によっては、安全性というビルの価値を上げる目的で、この超大入熱溶接部（HAZ、溶接金属）に対しても70J以上の保証が求められる場合が増えている。

HAZ靱性改善手法として、前述の結晶粒内の方位のランダム化により、破壊の抵抗を上げるという「低C多方位ベイナイト」技術により、この課題に対応している²⁴⁾。

超大入熱となるボックス柱角部（2電極サブマージアーク溶接）および内ダイヤフラム部（エレクトロスラグ溶接）それぞれの溶接金属の靱性は、焼入性促進元素の種類と添加量の最適化により、粗大な粒界フェライトの生成抑制と微細なベイナイト主体の組織とすることで高い靱性値の要求に対応している²⁵⁾。

2.2.3 新たな強度クラスの鋼板・鋼管への要望

これまで鉄骨用厚板としてはYP325, 355, 440MPa級のもものが広く使用されてきたが、近年の超高層ビルでは様々な意匠面・構造面での新規性追求要望から、より高強度のYP630MPa級（HT780）鋼や、それらの中間強度のYP385MPa級（HT550）鋼の実用化が求められた。当社ではTMCP技術の最大活用と前述の「低C多方位ベイナイト」技術の活用により、溶接施工性（耐溶接割れ性、大入熱溶接性）が優れた鋼板を実用化し²⁶⁾、鋼板に加え円形鋼管についても国土交通大臣の認定を取得している。

これらの新しい強度クラスの鋼板用の溶接材料としては、種類によってはJIS規格が未整備となっており、随時大臣認定を取得し、適用が可能となっている。

3. 橋梁業界

3.1 橋梁用厚板の最近の動向と当社の対応

近年、我が国では財政事情の悪化に対応するため公共事業費は大きく縮減され、'06年度予算では7.2兆円と

'98年度予算の約半分となり、鋼橋の受注量は'99年度の85万トンを超えて減少し、現状ではほぼ半減の状況となっている。このような環境下、新設橋梁の建設コストだけでなく、既設橋梁の維持管理費の低減が強く要望されている²⁷⁾。

耐候性鋼は、塗装を施さない状態で風雨に曝されながら時間の経過とともに緻密なさび層が形成され、腐食の進展が抑制される鋼材であり、JIS規格が制定されている。普通鋼に塗装する鋼橋では平均10年に1回の割合で塗替が必要とされるのに対して、耐候性鋼を使用した場合に塗替費用が不要であるため、LCC(ライフサイクルコスト)低減効果が非常に大きい。実際に直近では、橋梁用鋼材全体の受注量が減少している中で耐候性鋼の比率が25%以上にまで拡大している。一方で、飛来塩分量が高い地域では、JIS耐候性鋼では裸使用が困難なケースも少なくないため、耐塩害性を改善した新しい耐候性鋼を求める声が高まっていた。このような中、Ni, Cu, Tiなどの添加により塩分に対する耐候性を改善した鋼材が鉄鋼各社により開発されてきた。当社では適用環境に応じて最適コストの素材を選択できるよう1%Ni-Ti系²⁸⁾と2.7%Ni-Ti系の2品種の鋼板を開発するとともに、それらに適合した溶接材料、ボルトも当社グループとして実用化し、すでに1万トン以上の鋼板の実績を積み重ねている。

一方で、鋼橋のコンクリート橋に対する競争力向上を目的として、鋼材重量の低減につながる高強度化と溶接施工コストの低減につながる溶接施工性向上を両立させた「橋梁用高性能鋼材(BHS500他)」が鉄鋼連盟製品規定として2005年に制定され²⁹⁾、東京港臨海大橋(仮称)への適用が始まっている。当社では前述の「低C多方位ベイナイト」技術を活用することにより、YP500MPa級(HT590)の高強度を確保しながら従来のYP355MPa級(HT490)と同等以上の優れた溶接施工性を有する鋼板を開発し、上記物件への採用が決定している。

これらの鋼板に対する溶接材料として、前者の耐候性鋼用溶接材料は、鋼板成分と母材希釈率を考慮して、母材と溶接金属で異種金属接触腐食が生じないように成分系を決定している。また、後者のBHS500鋼用溶接材料は、溶接金属の引張強度が570MPa以上、-5℃でのシャルピー吸収エネルギーが47J以上を達成できるように設計されている。それぞれの溶接材料は、溶接作業性、耐割れ性などの他の要求性能も十分に考慮に入れて製品化され、すでに市場に提供されている。

4. エネルギー業界

4.1 エネルギー用厚板の最近の動向と当社の対応

タンク業界においては、国内では原油の国家備蓄用円筒タンクなどの建造が一巡しているが、中近東などでは各種エネルギー開発の進展とともにエチレン、プロパンなどの需要が増加し、圧力(球形)タンクの建設計画は多い。これらのタンクが大型化するとともに鋼板が厚肉化し、溶接施工後のSR(Stress Relief: 応力除去焼鈍、以下SRという)時間を長くする必要が生じ、その際の強

度低下・靱性劣化を防止できる鋼板への要望が高まっている。

重電業界においては、発電効率の向上を目指して、機器の使用環境が高温高圧化し、高グレードのCr-Mo鋼が使用されているが、溶接低温割れやSR割れの懸念があり、これらに対する感受性の低い鋼板が要望されている。

当社では、タンク・重電分野における十分な実績を有しているが、厚板製造時～溶接時～SR処理時の各種合金元素の固溶・析出・凝集などの挙動に関する基礎的な知識を基に、これらの開発要望にこたえている。

これらのエネルギー関連の新規開発鋼に対応する溶接材料としては、高強度2.25%Cr-1%Mo-V鋼用溶接材料³⁰⁾や9~12%Cr鋼用溶接材料³¹⁾を開発・実用化している。前者は、鋼材同様V添加により耐水素侵食性を向上させており、なおかつC, Nb, Mnの最適化による酸化物制御・析出物制御とP, Snなど不純物元素の低減によって、優れた耐クリーブ破断性能と靱性・耐焼戻脆化特性を両立している。一方、後者はCr, Ni, Mo, Wなどを用いた析出物制御に加えて、 A_{c1} 変態点に対する検討も行っており、優れた耐クリーブ破断性能を獲得している。いずれの溶接材料も日本国内のみならず中国など海外の案件でも数多くの適用実績をあげている。

むすび=造船、建築、橋梁、エネルギー業界の最近の技術動向と当社の厚板・溶接材料の対応を概説した。高強度化、厚肉化、溶接施工コスト低減などの要望が従来以上に強まっているとともに、破壊に対する安全性、LCCなどの向上や意匠性への配慮も要望され、材料に求められるキーワードに変化が生じていることが実感される。当社は、厚板に加え溶接材料・溶接システムなどを有する鋼構造物用素材の総合メーカーとして、各需要業界の期待にこたえることにより、社会を支える一翼を担い続けていきたい。

参考文献

- 1) 津山青史:「21世紀を拓く高性能厚板」,第191・192回西山記念技術講座(2007)p.47.
- 2) ロイド統計「World Fleet Statistics」
- 3) ロイド統計「World Shipbuilding Statistics」
- 4) 長岡茂雄ほか:R&D神戸製鋼技報,Vol.54, No.2(2004)p.20.
- 5) T.Nakano et al.:IIW Doc. -1896-06.
- 6) 白木原浩:21世紀を拓く高性能厚板,第191・192回西山記念技術講座,(2007)p.67.
- 7) 日本造船研究協会:SR242 研究部会成果報告書「原油タンカーの新型コロージョン挙動の研究」,(2002).
- 8) K. Katoh et al.: Study on Localized Corrosion on Cargo Oil Tank Bottom Plate of Oil Tanker, World Maritime Technology Conference, (2003) A15.
- 9) D. Yasunaga et al.: Study on Cargo Oil Tank Upper Deck Corrosion of Oil Tanker, World Maritime Technology Conference, (2003) A16.
- 10) S.Sakashita et al.: ISST2007, Osaka, (2007).
- 11) 日本船舶技術研究協会:IMO会議出席報告,DE50 議題/報告,(2007).
- 12) 谷 徳孝ほか:日本造船学会論文集,189(2001)p.299.
- 13) 谷 徳孝ほか:日本造船学会論文集,190(2001)p.599.
- 14) 長塚誠治:KANRIN日本船舶海洋工学会誌,第11号(2007)p.10.

- 15) 岡野重雄ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.52, No.1 (2002) p.2.
- 16) 前田恭志ほか：CAMP-ISIJ, Vol.17 (2004) p.227.
- 17) 藤内秀人ほか：CAMP-ISIJ, Vol.14 (2001) p.1040.
- 18) 畑野 等ほか：まてりあ 金属学会会報，Vol.43(2004) p.244.
- 19) 日本造船研究協会：SR147 研究報告書「船体用高張力鋼板大入熱溶接継手の脆性破壊強度評価に関する研究」,(1976).
- 20) Y. Yamaguchi et al. : Proc. Design and Operation of Container Ships, (2006.11.26) RINA, p.43.
- 21) 藤田哲也ほか：溶接学会誌，Vol.76 (2007) No.6, p.7.
- 22) 鈴木励一ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.58, No.1 (2008) p.57.
- 23) 日本建築センター：鉄骨梁端溶接接合部の脆性破断防止ガイドライン，(2003.9).
- 24) 川野晴弥ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.54, No.2 (2004) p.110.
- 25) 川野晴弥ほか：溶接技術，2004年8月号，p.65.
- 26) 畑野 等ほか：R&D神戸製鋼技報，Vol.52, No.2(2004) p.105.
- 27) 岡野重雄：溶接学会誌，Vol.76 (2007) No.7, p.12.
- 28) 川野晴弥ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.52, No.1(2002) p.25.
- 29) 日本鉄鋼連盟：日本鉄鋼連盟製品規定 MDCR0014-2004「降伏点500N/mm²及び降伏点700N/mm²溶接構造用圧延鋼材」,(2005.3).
- 30) 後藤明信ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.53, No.2(2003) p.79.
- 31) 丸山敏治ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.54, No.2(2004) p.34.