

新日本製鐵における最近の厚板製造技術の進歩と今後の展望

Progress and Outlook of Steel Plate Production Technology at Nippon Steel Corporation

霧 茂 則⁽¹⁾ 西 岡 潔⁽²⁾ 野見山 裕 治⁽³⁾
Shigenori TSURU Kiyoshi NISHIOKA Yuji NOMIYAMA

抄 録

最近の厚板の需要はバブル崩壊後の低迷期を脱し回復基調にあるが、需要家からの品質要求は一段と高度化、厳格化、多様化が進んでいる。これらの要求に対応するために、様々な厚板の製造技術開発、商品技術開発が進められた。製造技術では、労働生産性、圧延能率、直行率の向上及び平坦度制御技術を中心とした圧延制御技術の開発等が進められた。商品技術では、造船用に衝突安全性対応のHIAREST鋼、橋梁用に飛来塩分があっても裸で使用できる新耐候性鋼、建築用に耐震性の極低降伏点鋼の開発等が進められた。今後はコスト競争力の強化、新たな需要創生に加え、地球環境保護等に対応した技術開発や需要家での加工・利用も含めた一貫商品技術開発が重要になる。

Abstract

The latest demand for steel plate indicates that surroundings around the steel plate have been pulled out of the low hanging state after the burst of the bubble and are now reviving. On the other side of it, however, quality requirements from customers have been highly levelod. still severer and further diversifiled. In order to cope with these requirements, Nippon Steel has set about developing various manufacturing technologies and product technologies for the steel plate. In the aspect of the steel plate manufacturing technologies, improvements in those of labor productivity, rolling efficiency and direct passing ratio have been pushed forward, and developments of rolling control technologies laying stress on flatncss control technology have been pressed ahead. In the product technologies, developments of HIAREST steel for shipbuilding having effect on maintaining the safety against collision, a new corrosion resistant steel for bridge to be able to use without coating as it is even in a condition of receiving water containing much salt, and an extra-low yield point steel being proof against carthquake, have been pushed forward, too.

Henceforth, it will be important to develop such technologies to cope with the earth environmental protection and to develop integrated product technologies including processing and utilizing technologies at the side of customers, in addition to augment the cost compctitiye power and create a new demand for the steel plate.

1. 緒 言

厚板は、鋼構造用材料の中心的役割を占める商品である。構造物の設計技術は、最近の安全性や環境問題、あるいはコスト低減等の様々な要求の中で、ますます高度化され、鋼材に要求される品質、機能も一段と厳格化、多様化されてきた。例えば、原油タンカーの油流出事故に端を発した衝突安全性への要求は、船殻の二重化に加え、鋼材自身の破壊・亀裂伝播特性の向上を促した。橋梁分野では海浜地域での使用、省メンテナンス要求が加わり飛来塩分があっても裸で使用できる新耐候性鋼の要求へとつながった。建築分野では阪神大震災を契機として、耐震性を重視した建築構造・鋼材への要

求がさらに高まりつつある。又、お客様での製造コスト削減、生産効率向上の要求から、寸法、平坦度要求の厳格化や高精度の異形断面鋼板への要求も高まった。新日本製鐵は、これらの要求に対応する技術開発を進め、国内外の需要家の高い評価を得ている。本稿では、最近の厚板製造技術の進歩、及び各分野の需要家要求への対応技術について、その概要を述べる。

2. 厚板製造技術の最近の進歩

2.1 最近の生産量と品種構成の推移

図1は、1985年から1996年までの新日本製鐵の厚板生産量の推移

⁽¹⁾ 本社 厚板営業部 部長

⁽²⁾ 君津製鐵所 厚板工場長(部長)

(元 本社厚板営業部 部長代理)

⁽³⁾ 本社 厚板営業部 マネジャー

東京都千代田区大手町 2-6-3 ☎ 100-71 ☎ (03)3275-7802

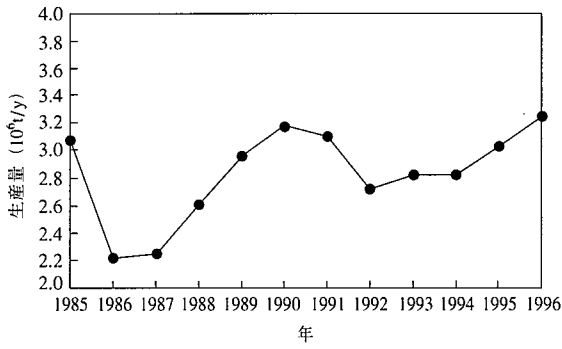


図1 生産量の推移

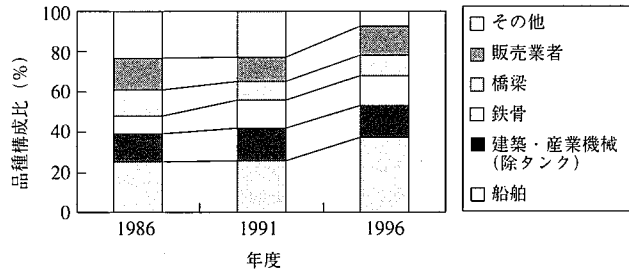


図2 品種構成比の推移

を示す。厚板生産量は、1980年代後半の円高不況以降、バブル崩壊に伴う一時的な落ち込みはあったものの、この数年間は、着実な回復基調にある。図2には厚板の代表的な用途別構成比率の推移を示す。厚板の主な用途は、船舶、建築、産業機械、鉄骨・橋梁等であるが、中でも船舶の比率が1990年以降増加していることが最近の特徴である。これは、1970年代に建造されたVLCC (Very Large Crude Oil Carrier) の代替需要に加え、度重なる原油流出事故に端を発したVLCCの構造変更(二重船殻化)等がその背景にある。

2.2 生産性の向上¹⁾⁻³⁾

厚板工場の総合的な生産性の向上は、将来にわたって持続的に推進すべき最も大きな課題の一つである。以下に、主要指標である労働生産性及び圧延能率について近年に達成された成果を述べる。

2.2.1 労働生産性の向上

近年のエレクトロニクスの進歩に伴う高性能センサーや制御装置の出現を背景として、長年にわたり培ってきた厚板製造技術を自動化システム技術として集大成することにより、飛躍的な労働生産性の向上を達成してきた。

例えば、大分製鐵所厚板工場(以下大分とする)では、高度な製造技術を基盤として自動化の水準を徹底的に高めたと同時に、作業員を側面から支援する設備監視システムや品質異常診断システム等を相次いで開発することにより、操業のあらゆる局面において発生する人的介入や作業負荷の大幅な軽減を図ってきた。その結果、1995年6月には、世界に先駆けて加熱、圧延、剪断各工程のワンマンオペレーション化を実現させた。図3に、大分における労働生産性の推移を示す。君津製鐵所厚板工場(以下君津とする)においても、図4に示すようにガス切り工程の能力向上を伴う自動化(プラズマ切断導入)を実現する等、精整工程における大幅な省力化を可能としてきた。

また、倉庫・出荷工程では、君津、大分におけるリフマグクレーンの自動化技術の開発により、業界に先駆けて大規模厚板倉庫の無

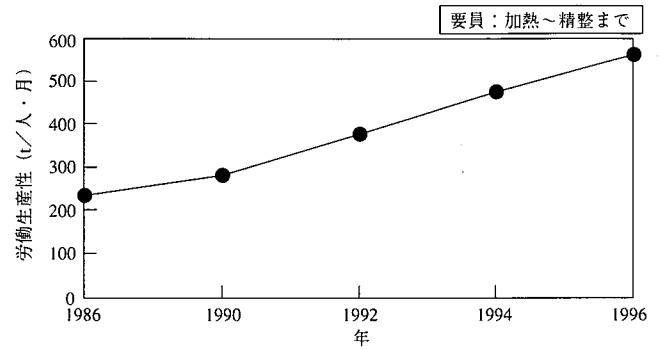


図3 労働生産性の推移(大分)

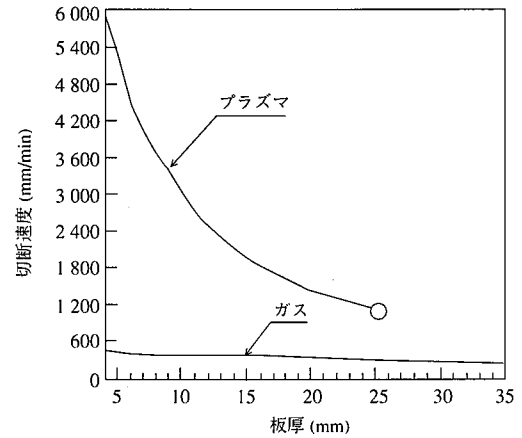


図4 板厚と切断速度との関係

人化を達成した。更に、大分では出荷作業の高効率化を目的に計画型エキスパートシステムを開発し、出荷作業の負荷軽減を可能とした。なお、リフマグクレーンの自動運転技術の開発については本特集号の別報に詳記した。

2.2.2 圧延能率の向上⁴⁾

圧延能率については各工場とも1980年代から1990年に大きな向上を実現した。これは主機を始めとする速度制御技術の改善、圧延制御モデルの高精度化による人的介入の低減を基盤として、形状制御ミルの開発、実機化(君津：ベアクロス、大分：ワークロールシフト)によって大きく進展したものと考えられる。特に君津のベアクロスについては本特集号の別報で詳細に述べるが、世界で初めての厚板圧延機へのベアクロスの導入を行った。これにより、従来は平坦度とクラウン確保のために実施していた圧延最終段階の軽圧下圧延を省略することが可能となり、パス回数的大幅な減少による圧延能率を飛躍的に向上させた。

2.3 直行率^{5),6)}

直行率は、圧延を完了した製品の内、表面疵による手入や再矯正等の二次的に発生する付帯工程を伴わない製品の比率であり、注文歩留と並んで圧延製造技術のレベルを測る重要な操業指標のひとつである。図5に直行率の推移、図6にこれを阻害する再矯正率及び疵手入率の推移を示すように、再矯正率、疵手入率の改善に伴って直行率は順調に改善されてきた。

再矯正率の低減には、前述した君津、大分において実機化した形状制御ミルによる積極的な平坦度制御とそれぞれの厚板工場において精力的に推進されたTMCP鋼の均一冷却制御技術の高度化が大き

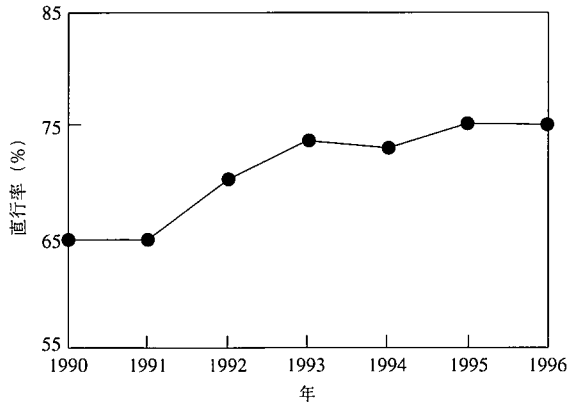


図5 直行率の推移

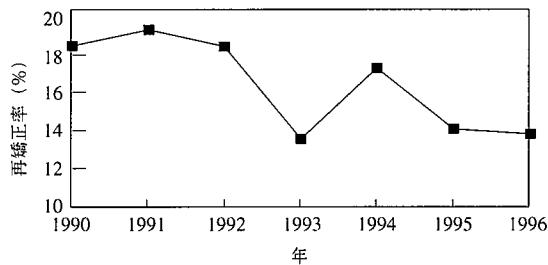


図6 (a) 再矯正率の改善状況

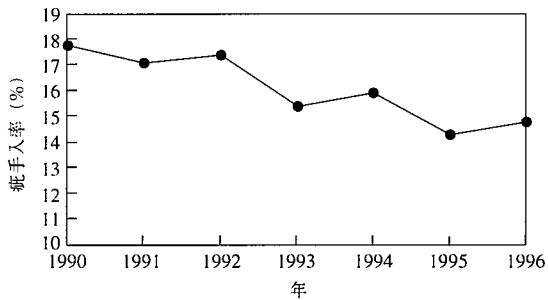


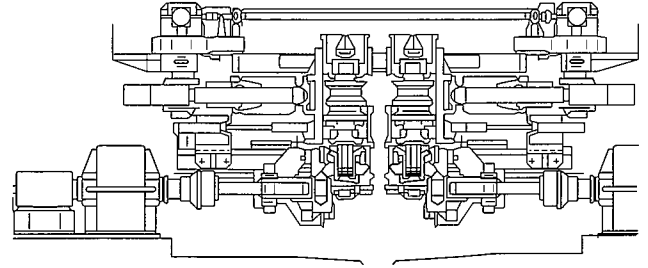
図6 (b) 疵手入率の改善状況

く寄与している。一方、疵手入率では、名古屋製鐵所厚板工場(以下名古屋とする)でスラブグラインダーを導入しスラブ四周の疵防止対策を図った他、君津では幅出し圧延時に発生するオーバーラップを回避する手段として図7に示すスラブコーナー成形設備を設置した。また、大分でも四周疵防止を目的としたエッジャーの効果的使用法の確立に加え、前工程起因の疵を減少させる目的でスラブコーナー溶削機を設置した。

しかしながら、圧延寸法精度の向上と注文歩留の向上により四周疵低減の必要性は益々高まってきており、スケール疵やハンドリング疵等の広範囲にわたった課題も依然残されており、今後更なる技術開発が必要である。

2.4 HCR(Hot Charged Rolling)率の向上

1980年代からのHCR率の向上代は大きく、特に大分のHCR率は1996年下半期の平均で84.7%と業界トップレベルを維持している。今後の更なる向上を図るには品質冷片の削減、スラブ表面の改質の他、製鋼—圧延の能力バランスを考慮した物流システムの高度化が不可欠である。



Applicable Slab Size	Thickness : max. 300mm
	Width : 1 000~2 300mm
	Length : 2200~10 800mm
Forming Pitch	Max : 90sec (1pass)
	Min : 120sec (3pass)
Forming Force	Max : 280ton f
Forming Torque	Max : 42ton m
Kal. Roll Dia.	Φ730~780 (300'mm)
	Φ706~756 (242'mm)
Gap Set Speed	0~7mm / sec

図7 スラブコーナー成形設備の概要

2.5 板厚制御技術

新日本製鐵ではこの10年間に於いて寸法制御、平坦度制御等、圧延の基本技術を大きく進展させた。以下にこれらの概要について述べる。

板厚精度については、早くから絶対値AGC(Automatic Gauge Control)を導入し、その発展としての圧延機の左右非対称性を考慮したDual-AGC、及び板内厚偏差の改善を目的としたS-AGCを開発する等、常に業界をリードしてきた。近年においては、これらの先駆技術と計算機の性能向上を背景にして、圧延理論に基づく高精度数学モデル(荷重予測モデル、温度予測モデル等)の開発、実機適用化を推進したことでゲージメータ精度を飛躍的に向上させることができた。この成果は、単に板厚精度の向上に留まらず、セットアップと厚板圧延固有のパス間適応制御システムをより確実なものとする事で、先に述べた大分における圧延のワンマンオペレーション化の大きな原動力となった。

更に、君津、大分において実施された近接γ線によるモニターAGCの適用で業界トップレベルの板厚精度を達成するに至っており、定常部の板厚精度はほぼ完成に近づきつつある。一方、板先後端部(非定常部)の板厚精度は、AGCコントローラの高速度等で改善が図られてきたが、寸法精度の極限を追求する上では未だ不十分であり、今後更なる技術開発が必要である。

2.6 クラウン・平坦度制御技術⁴⁾

従来、厚板圧延における板クラウン・平坦度制御は、圧延最終段階のパスにおける圧下配分を調整することで所定のクラウンと平坦度のレベルを確保していた。しかしながら、この方法では圧延機本来の能力を著しく制約すると同時に、圧延条件の変化に対応して積極的にクラウン・平坦度を制御することはできないため、本格的な形状制御ミル(ベアクロス、ワークロールシフト)への改造を実施した。

形状制御ミルは薄板のタンデム圧延機では早くから導入されていたものの、シングルスタンドでかつ広幅・大荷重の厚板圧延機では板厚精度や板曲り等の品質を初め、設備的にも克服すべき課題が数

多くあり、これらを精力的に解決することで実現できた。また、これらの設備改造と並行して形状制御ミルの効果を最大限發揮すべく圧延平坦度計を利用した平坦度適応制御システムを構築した他、厚板圧延機固有のロール変形挙動を考慮した高精度クラウン予測モデルやロールプロフィール予測精度の飛躍的な向上を図る二次元サーマルクラウンモデルを開発し、クラウンを低減した。

2.7 板幅・キャンパー制御⁷⁾

厚板圧延は、仕上げ圧延(板の長手方向L)の前段階で幅出し(板の幅方向T)圧延を実施することを特徴としているが、この幅出し圧延のために薄板圧延では見られない長手方向凸状の過大な幅偏差が発生する。従って、従来より幅偏差を改善するために油圧圧下装置によって先後端部を過補償成形する方法があり、これにT方向とL方向のエッジングをそれぞれの特徴に応じて組合せた高度な平面形状制御技術が名古屋、大分で開発、適用されてきた。更に近年、大分ではエッジャーに油圧圧下装置を設置して板内でAWC(Automatic Width Control)制御を適用することにより、長手方向幅偏差を大幅に低減(図8参照)させた。

また、板間の幅精度は、幅出し圧延最終パスの幅長さ計による幅出し制御精度向上と仕上げ圧延でのエッジング精度向上により改善してきたが、大分では幅長さ測定を走行で行うことを可能とした独自開発技術により測定に費やす圧延時間ロスを解消した。

一方、平面形状の矩形化を図る上ではキャンパー制御も幅制御と並んで重要な技術である。新日本製鐵では早くからキャンパー制御技術の開発を進め、スタンド左右の荷重差を検出して板道を修正する蛇行制御を初め、左右のミル剛性を考慮してウェッジ制御を行うDual-AGC等の適用を推進してきた。近年においては、これらの技術を基盤にセンサーを駆使した次世代キャンパー制御の適用が図られており、大分では63mの業界最大圧延長でトップレベルの低キャンパー圧延を実現している。

2.8 特殊形状圧延制御

厚板の主要需要分野において、材料の加工、組立、溶接等の一連の製造工程の省力・省工程化が進められている。このような市場ニーズに対応する鋼板として、図9に示す異形断面鋼板が最近改めて注目を集めている。これらの異形断面鋼板の製造技術としては平板圧延に求められる板厚・平坦度制御技術に加え、高度な計算機制御技術が要求される。新日本製鐵においては、三次元(厚、幅、長)セットアップ計算や適応制御システムを開発し、異形断面鋼板の完全自動化による安定的かつ高効率な製造体制を構築した。

3. 厚板商品技術の最近の進歩

3.1 造船分野⁸⁾⁻¹⁰⁾

造船用鋼材の品質は船舶の建造における品質、能率、コストに対して極めて大きな影響を及ぼす。新日本製鐵では幅広・長尺鋼板供給体制を確立し、“高能率大ブロック建造法”の実現を通じて国際的船価競争力確保の面から顧客を支援してきた。

更に、溶接工数の低減、溶接線の低減、切断工程の省略、加工品質の安定化、管理コストの低減等、船舶建造における様々な要求に対しては、それぞれ、予熱不要のTMCP型高張力鋼、異形鋼板、高精度寸法鋼板の開発や出荷鋼板品質管理の厳格化等で応えてきた。

また、従来にない新鋼材であるLPG(Liquid Petroleum Gas)船用大入熱低温用鋼やコンテナ船用厚手高強度鋼の開発、実用化を

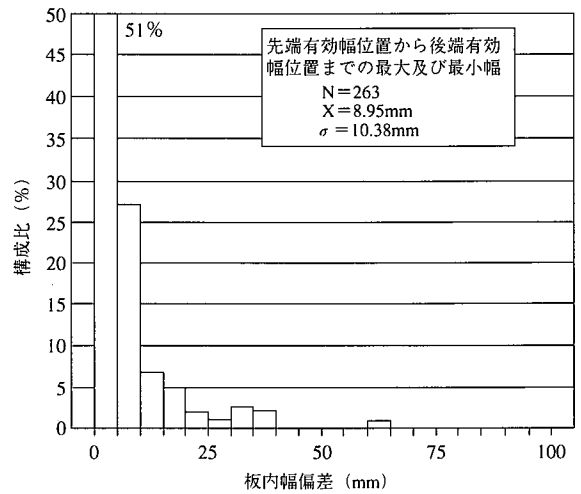


図8 AWCによる長手方向幅偏差低減効果

鋼板形状	名称
	差厚プレート
	多段差厚プレート
	LPプレート (テーパープレート)
	幅方向 テーパープレート
	差厚波厚鋼板

図9 異形断面鋼板

行い、高付加価値船の建造を支えてきた。

近年は、VLCCの座礁事故、バルクキャリアの破損、沈没事故、船舶同士の衝突事故等の社会的影響を受け、船価競争力確保に加え、環境、安全問題への対応要求や船舶のメンテナンスコスト低減等の課題が益々増大しつつある。このような非常時の安全問題への対応要求に対してHIAREST鋼(High crack-ARrestability Endowed Steel)を開発し、実船適用を開始した。HIAREST鋼の材料の特徴は本特集号で詳細に述べる。

3.2 海洋構造物分野¹¹⁾⁻¹³⁾

近年、海底のエネルギー資源の開発拠点はより深海域へ、更に北海北部や北極海のような寒冷海域へ移りつつある。これに伴い設置される海洋構造物も大型化すると同時に厳しい環境に曝されるため、破壊に対する安全性がより重要視されている。又、より一層の経済性追求の見地より経済設計適用、施工工程の簡略化によって構造物建造コスト低減の努力がなされている。

これらの面から低温でも十分な破壊靱性を有し、溶接施工も容易な厚手、高強度の鋼材が要求されている。新日本製鐵では破壊評価

法として海洋構造物に適用されているCTOD (Crack Tip Opening Displacement)の支配因子を冶金的に解明する研究開発を推進し、海洋構造物用のCTOD保証鋼の製造体系を確立し、数多くのプロジェクト向けに鋼材を供給してきている。

3.3 建築分野¹⁴⁾⁻¹⁶⁾

我が国の建築構造物は、大都市における地上空間の活用の観点からの高層化、大スパン化の傾向と共に大空間(アトリウム)の採用、美観の追求等大きく様変わりしてきた。建築設計面からは、極厚で高い強度と、優れた耐震性と溶接性をもち、デザイン性の演出をサポートする鋼材、また、経済性の面からは建築構造物の建設コスト削減の要求が高まっている。

新日本製鐵は、このようなニーズに応えるため建築分野にもTMCP鋼の初適用をはかり、厚肉で溶接性を高めた鋼材を供給し、高層化や大空間化に寄与してきた。更に、阪神大震災以降耐震性の要求が高まり、建築物への制振ダンパーの組込みが活発に行われ、このダンパー用鋼材として極低降伏点鋼も開発した。

建設コスト削減等の要求に対して高温(600℃)に耐力が常温設計基準温度の2/3以上を保証する高温耐火特性に優れた耐火鋼を開発し、耐火被覆軽減、あるいは無被覆化を実現し、多くの実績をあげている。

建築構造物は近い将来更なる高層化が進展し、超々高層ビルの実現も考えられるため、建築用HT780N/mm²鋼を開発し、実用化も完了している。また、建築構造物の安全性の観点から建築専用JIS規格(SN鋼)制定についても自社の研究設備を活用して構造解析、破壊実験を行い、更なる安全性を追求した新建築用鋼材の開発に取り組んでいる。

3.4 橋梁分野¹⁷⁾⁻¹⁹⁾

近年、国内の橋梁分野では建設費用縮減を目的とした技術改善に積極的に取り組み、新しい構造形式を適用する動きが活発化している。鋼製橋梁においては合理化設計がポイントであり、少数主桁化及び一部材一断面化等がキーワードとなっている。これらを実現するためには予熱温度低減鋼、高強度鋼等の高性能鋼が要求される。平成8年12月に改訂された道路橋示方書は上記の背景に対応し適用板厚の拡大(50mm⇒100mm)しており、最近建設されている少数主桁には50mmを超えるSM570Q鋼板が適用されるようになってきている。適用板厚拡大、高強度化に伴い現地溶接に適する予熱温度低減性能や大入熱溶接適用等の溶接施工に関連する要求も高まりつつある。また、海浜地域での鋼橋の使用や省メンテナンスの観点から、さらなるミニマムメンテナンス化に対応できる鋼材への要求が高まってきている。

これらの要求に対する新日本製鐵の対応の概要は以下の通りである。1桁フランジ等にTMCPを適用した490N/mm²級鋼、570N/mm²級鋼の適用を進め、予熱低減化による溶接施工性の大幅改善を可能とした。さらに、ウェブに大入熱溶接部特性に優れた鋼を採用することにより、エレクトログラス溶接適用が可能となり、大幅な施工の合理化が進められた。長大橋の分野ではHT780N/mm²級鋼の高張力鋼の使用が必須であったためTMCP技術と析出強化機構の組み合わせによりCu析出型予熱低減HT780N/mm²鋼を開発し、明石海峡大橋に採用されている。

また、ミニマムメンテナンス化の要求に対しては、耐候性鋼及び表面処理型の耐候性鋼による対応を進めてきたが、最近では飛来塩分があっても裸で使用できる新耐候性鋼(3Ni系)の開発も進め、実

用化を推進中である。

3.5 その他の主な分野別動向²⁰⁾⁻²²⁾

1) 水圧鉄管分野

現状の設計のままでも強度レベルがHT780N/mm²級高強度鋼板までは水圧鉄管の製作に適用することが可能である。しかし、この場合鋼板が厚肉となるためコストの面からHT950N/mm²級高強度鋼の導入が検討されつつある。新日本製鐵でもHT780N/mm²級高強度鋼とほぼ同等な溶接性、加工性を有し、かつ一層の強度上昇を図った950N/mm²級高強度鋼を開発済みであり、今後の適用が期待できる。

2) 化学工業分野

近年、地球環境問題や燃料の多様化施策を背景に、従来の石油系燃料や石炭に加え都市部を中心にLNG、LPG等ガス焚きの火力発電設備の建設が多く進められている。一般に火力煙突の内面には筒身の保護のためにライニングが施されている。しかし、ライニングの多くは経年劣化状況に応じたメンテナンスが必要となり、相当の費用と補修期間を要し、プラントの操業停止により多大な損失を生じることがある。

これらの課題に対して、天然ガス焚きの場合は燃料中に硫黄分を含まないため比較的穏やかな環境となることを考慮し、新日本製鐵は三菱重工業(株)の協力を得て、Cu、Niを添加しない経済性の優れた耐食鋼(WELACC5)を開発、実用化した。合金設計の考え方等は本特集号で別紙に詳記した。

3) タンク分野

国家石油備蓄計画終了後、数量は減少しているもののタンクの需要はエネルギー危機への備え、地球環境保全等の面から、及びLNG等のクリーンエネルギーへの切り替え施策により確実に需要が見込まれると想定できる。LNGタンクの大型化に伴い、最近では厚手・高韌化の需要があり、これに対応するため厚手用9%Ni鋼を開発して施主、ファブリケーターとの共同試験を実施し、従来の30mmから50mmの厚手化を達成した。その結果、大阪ガス泉北18号(容量：18万kl)に適用すべく受注を開始した。

また、LPGタンク分野では溶接部の脆性破壊に対する安全性が高い1.5%Ni-TMCP鋼を開発し、オーストラリアWOPプロジェクト等へ供給し、実用化が始まっている。

一方、石油タンク用鋼板についてはメンテナンス費用削減を目的に屋根板用亜鉛めっき鋼板及び底板用亜鉛溶射鋼板を開発し、需要家での評価を推進中である。

4. 今後の展望

需要家の厚板に対する要求特性の厳格化、多様化は、ここ数年特に著しく、新日本製鐵は、総力を挙げて対応することで国内外の需要家から高い評価を得てきた。しかし最近、韓国を始めとする海外厚板ミルも次々と設備増強を図ってきており、国際競争も一段と厳しさを増している。これまでの技術優位性が永続するものではないことは自明の理であり、今後、コスト競争力の更なる強化に加え、地球環境保護等の新しい価値観に対応した技術開発や、厚板の製造から需要家での加工、利用も含めた一貫商品技術開発がより重要になるものと考えられる。

また、足下での厚板需要の活況もVLCCの代替需要を主たる背景としたものであり、決して永続的なものではなく、今後、浮体構造物や鋼橋等、新たな需要創生に向けた商品技術開発も重要な課題で

ある。

このような状況を踏まえ、新日本製鐵は、今後、高レベルの品質を高效率で製造するための設備、操業技術や、地球環境保護に対応した省エネルギー、省プロセス技術等の厚板製造技術の開発を追求しつつ、需要家と一体となった一貫商品開発を推進することで、厚板の需要拡大と品質要求に的確に応えてゆく所存である。

参考文献

- 1) 例えば日経産業新聞. 1995.10.2
- 2) 久富木 ほか：CAMP-ISIJ. 5. 1573(1992)
- 3) 中野 ほか：CAMP-ISIJ. 6. 502(1993)
- 4) 例えば、新井勝：鉄と鋼. 79(11).783(1993)
- 5) 関谷 ほか：CAMP-ISIJ. 6. 1387(1993)
- 6) 久富木 ほか：CAMP-ISIJ. 3. 1364(1990)
- 7) 山田 ほか：CAMP-ISIJ. 10. 316(1997)
- 8) 大野 ほか：製鉄研究. 326. p.45(1987)
- 9) 石川 ほか：新日鉄技報. (348). p.3(1993)
- 10) 例えば、石川 ほか：日本造船学会論文集. (177). 259-267(1994)
- 11) 土師 ほか：製鉄研究. 326. p.36(1987)
- 12) 山本 ほか：日本金属学会会報. 28. p.514(1989)
- 13) 寺田 ほか：鉄と鋼. 73. S1308(1983)
- 14) 千々岩 ほか：新日鉄技報. (348). p.55(1993)
- 15) 作本 ほか：日本建築学会論文集. (427). p.107(1991)
- 16) 大橋 ほか：新日鉄技報. (334). p.17(1989)
- 17) 中村 ほか：新日鉄技報. (334). p.10(1989)
- 18) 岡村 ほか：鋼構造論文集第1巻第1号(1994. 3)
- 19) 例えば、山口 ほか：CAMP-ISIJ. 8. p.1602(1995)
- 20) 斎藤 ほか：新日鉄技報. (348). p.25(1993)
- 21) 宇佐見 ほか：第43回腐蝕防食討論会. C-130 p.417
- 22) 江原 ほか：三菱重工技報. 34(L). p.46(1997)