

技術展望

高機能厚鋼板の技術進歩と今後の展望

Progress of High Performance Steel Plates

児 島 明 彦*
Akihiko KOJIMA

藤 岡 政 昭
Masaaki FUJIOKA

星 野 学
Manabu HOSHINO

重 里 元 一
Genichi SHIGESATO

金 子 道 郎
Michio KANEKO

田 中 睦 人
Mutsuto TANAKA

抄 録

新日鐵住金(株)の高機能厚鋼板について、製造プロセス、微細粒子利用技術、耐食技術の視点から技術開発の歩みをふり返し、今後を展望した。社会、顧客からの厚鋼板高機能化の要求に応えるべく、多様な分野の専門家が連携して技術開発を推進してきた。

Abstract

Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation has developed a variety of high performance steel plates with manufacturing process, fine particle and corrosion resistance technologies. A number of experts have organically cooperated on such developments in order to meet demands from our customers and society for higher performance steel plates.

1. 緒 言

新日鐵住金(株)の高機能厚鋼板(以後、厚板)について、製造プロセス、微細粒子利用技術、耐食技術の視点から技術開発の歩みをふり返し、今後を展望する^{1)~11)}。

2. 製造プロセスの進歩による厚板の高機能化

2.1 技術開発の歩み

厚板の母材の高機能化は、TMCP(Thermo Mechanical Control Process: 加工熱処理または熱加工制御)を中心にプロセスメタラジー、設備技術、製造技術、品質管理技術の高度化によって実現されてきた。TMCPは図1に示すように制御圧延と加速冷却で構成され、厚板の強度、靱性、溶接性を飛躍的に高める根幹的な技術である。以下に新日鐵住金の歩みをふり返る。

1970年代以降、制御圧延の高度化を推し進めることで、NIC(Nippon Steel Inter-critical Rolling)プロセス、SHT(Sumitomo High Toughness)法、ULCB(Ultra Low Carbon Bainite)鋼など、先進的な技術が開発され、厚板の高機能化がはかられてきた。

加速冷却の適用は、1960年に広畑製鉄所でDQ(Direct Quench: 直接焼入れ)によってHT60(TS(Tensile Strength) 590MPa級)を製造したのが最初である。その後、1983

年に君津製鉄所に本格的なオンライン冷却設備CLC(Continuous on Line Control Process)が導入された。同年、鹿島製鉄所にDAC(Dynamic Accelerated Cooling Process)が導入された。CLCは冷却前に熱間矯正機を有し、ロールによる鋼板の拘束、スプレーによる強冷却、鋼板通過型冷却など独自の冷却装置であった。近年、CLCの第二世代としてCLC- μ が開発され、冷却均一性と自在冷却能力が格段に高められた。

このような最先端の加速冷却技術は、造船、建築、橋梁、海洋構造物、ラインパイプ、建設産業機械、タンク、ペンストックなど、今日ではほぼ全ての用途の高機能厚板に適用されている。DQ-焼戻しやDQ途中水冷停止型も含めて、最先端のTMCPは高機能厚板にとって必要不可欠な技術であり、この技術を用いて、たとえば表層超細粒高アレスト鋼HIAREST[®]、オースフォームドベイナイト鋼、新LNGタンク用鋼、高変形性能ラインパイプ用X80、建築用高張力鋼BT-HT、予熱低減HT80(TS780MPa級)、海洋構造物用YS(Yield Strength)550、橋梁用SBHS500、造船用YP(Yield Point)460、船体用高延性鋼NSafe[®]-Hull、耐摩耗鋼ABREX[®]など、時代を切り拓く数多くの新商品が開発されてきた。

厚手材の高機能化においては、熱間圧延での圧下率を大きくとることができないことから、スラブ内部の残存ポロ

* 鉄鋼研究所 厚板・形鋼研究部長 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

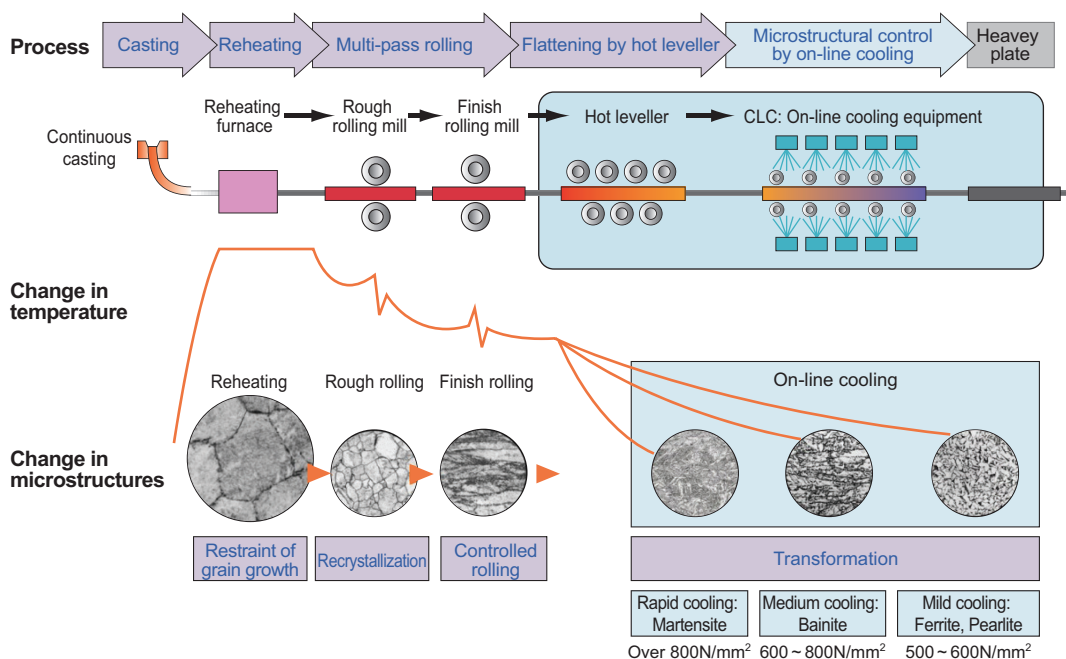


図1 厚板製造プロセス“TMCP”の概要と金属組織の変化
Schematic illustration of TMCP and microstructural changes

シティ（空隙）を圧着させるために高温での高形状比圧延を適用する必要があるため、TMCPの適用が困難な場合があった。この課題に対して、連続製造プロセスの進歩によるスラブ品質の向上（ポロシティや偏析の軽減）によって、厚手材へのTMCP適用が可能となり、たとえばペンストック用HT100（TS950MPa級）の板厚100mm材が開発された。このような製鋼プロセスの技術進歩は、高品質な極厚スラブを製造する新型製造設備へと発展し、たとえばラック用HT80の板厚210mm材が開発された。

2.2 今後の展望

TMCPの適用は、結晶粒微細化や変態強化によって強度や靱性を高め、また、炭素当量の低減を可能として溶接性を高めることで、高機能厚板の開発に大きなメリットをもたらした。当初HT50（TS490MPa級）への適用からはじまったこの技術も、今ではHT100を超える高強度鋼や、 -196°C 仕様の低温用鋼などに適用されるまで進歩してきた。最近の要求特性は単純なものではなく、高強度、高靱性、高延性、厚手など相反する特性が高い次元で複合的に要求される傾向にあり、より広範で高度な金属組織制御が必要である。そのためには、ベイナイトやマルテンサイトを含む金属組織の形成過程を十分に理解し、制御することが重要である。

TMCPでは、微量の添加で金属組織を大きく変化させるTi、Nb、B等が活用されてきたが、これらの微量元素の存在状態を解明し、精緻に制御することが重要である。近年、最先端の電子顕微鏡分析技術を駆使することで、Bのオーステナイト(γ)粒界偏析量を定量分析することが可能となっ

た。また、第一原理計算などの計算科学の発達により、粒界偏析現象に対する理解が深まっている。今後、TMCPにおける微量元素の制御を、分析と計算の両面から原子レベルで追及していく必要がある。

金属組織制御の高度化の観点から、鋼成分、TMCP条件、金属組織、材質の関係を一貫で結びつけた材質予測モデルがHT50を対象に開発され、厚板の高機能化に活用されてきた。今後、ベイナイトやマルテンサイトも対象に加え、モデル精度の向上と適用範囲の拡張をはかり、技術開発を効率化するための強力なツールとして進化させていく必要がある。

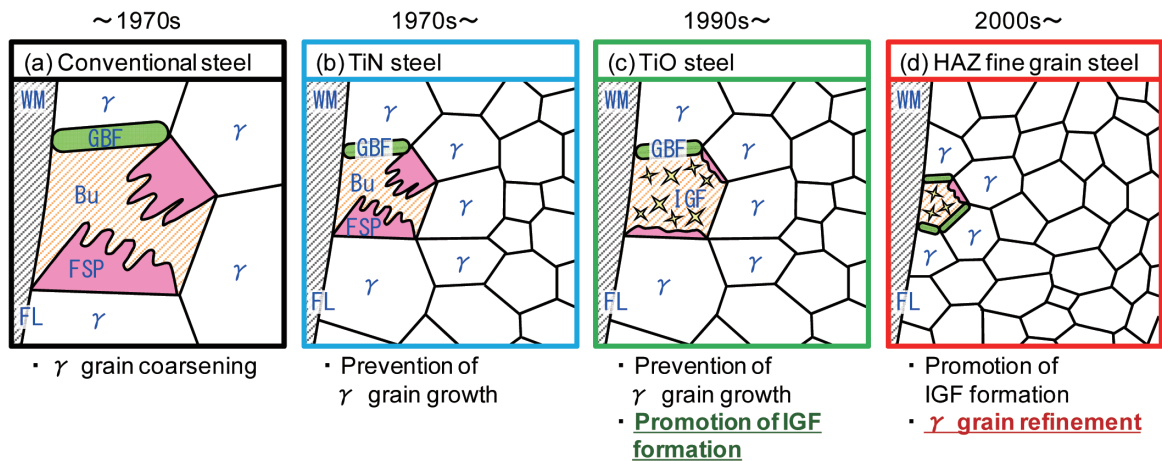
TMCPを駆使した造船用YP460の開発では、脆性き裂の伝播停止性能を8000トン大型引張試験機によって評価し、鋼材開発とともに船級の規格化を進めてきた。このような破壊力学的な検討は、溶接構造物の信頼性と経済性を合理的にバランスさせる視点からも今後ますます重要である。

3. 微細粒子利用技術の進歩による厚板の高機能化

3.1 技術開発の歩み

厚板は溶接構造物に用いられるため、母材と同様に溶接部の特性が重要である。特に、溶接熱影響部（Heat Affected Zone：HAZ）の靱性は、厚板を高機能化する際の最重要課題の一つである。溶接構造物における信頼性の向上、使用環境の苛酷化、溶接能率の向上、軽量化、大型化などのニーズを踏まえ、HAZ靱性の向上技術が進歩してきた。以下に新日鐵住金の歩みを振り返る。

HAZ靱性の向上において最も重要な点は、溶融線近傍



WM: Weld Metal, FL: Fusion Line, γ : Austenite, GBF: Grain Boundary Ferrite, FSP: Ferrite Side Plate, IGF: Intra Granular Ferrite, Bu: Upper Bainite

図2 新日鐵住金におけるHAZ高靱化技術HTUFFの歩み
Progress of HAZ toughening technology HTUFF in NSSMC

の1400℃以上に加熱される粗粒領域において、変態後のHAZ組織をいかに微細化するか、である。このような観点から、図2に代表されるようなHAZ組織微細化技術が開発されてきた。これらの技術の要点は、熱的に安定な微細粒子を、HAZの熱履歴の中で、 γ 粒成長を抑制するピン止め粒子として、あるいは、 γ 粒内におけるフェライト変態核として利用することである。後者の作用によって生成するフェライトをIGF (Intragranular Ferrite) と呼ぶ。

図2に示すように、1970年代にTiN鋼が開発された。この技術は主にピン止めの観点から数10nmのTiNを利用する技術であり、同時にIGF変態核としての有効性も知見された。現在、TiN鋼は標準的な技術として広く普及している。1990年代には、Al無添加Ti脱酸によって数 μm 以下のTi酸化物を鋼中に分散させ、IGF変態核として利用するTiO鋼が開発され、オキサイドメトラジエーの概念が提唱された。2000年代には、オキサイドメトラジエーの追求によってHAZ細粒鋼が開発された。これはMgやCaを含有する数10nm～数100nmの酸化物や硫化物を鋼中に分散させ、溶融線近傍の γ 粒成長を強力にピン止めする技術である。

上記以外のIGF利用技術として、BNを利用したB添加鋼、TiNとMnSを組み合わせたTiN-MnS鋼、TiNと $\text{Fe}_{23}(\text{CB})_6$ 、 $\text{Fe}_3(\text{CB})$ あるいはBNを組み合わせたTi-B鋼などが開発された。上述のような微細粒子利用によるHAZ高靱化技術を総称してHTUFF® (High HAZ Toughness Technology with Fine Microstructure Imparted by Fine Particles: エイチタフ) と呼ぶ。

HTUFFを適用することで、造船や建築や風力発電などに用いられる大入熱溶接用鋼、海洋構造物向けの高強度低温継手CTOD (Crack Tip Opening Displacement) 保証用鋼、ラインパイプ向けの寒冷地用鋼などが世界に先駆けて開発され、国内外の広範な用途に向けて多くの鋼材が供給され

てきた。製鋼技術力の高さがこれらの量産化を支えてきた。

3.2 今後の展望

HTUFFのメカニズム解明は分析技術の進歩に支えられてきた。たとえば、IGF変態ではTi酸化物周辺のMn欠乏層が重要な役割を演じている。これは、集束イオンビーム加工装置 (FIB) と電界放出型透過電子顕微鏡 (FE-TEM) を駆使することで実証された。今後も先端分析技術によってメカニズムを追求し、更なる高機能化を目指していくことが重要である。

HAZ靱性を向上させるための基盤技術として、靱性支配因子の解明や靱性予測技術の構築が重要である。1980年代にCTOD特性の支配因子がマイクロ破壊力学に基づいて解明された。近年は大入熱溶接を対象に、靱性支配因子に及ぼす合金元素と熱履歴の影響が定式化され、HAZ靱性予測モデルが構築されてきた。今後もこのような基盤的な研究を進めていく必要がある。

高HAZ靱性鋼を実用化するためには溶接材料の開発が必要不可欠である。グループ会社に日鐵住金溶接工業(株)を有する強みを活かし、各種の高HAZ靱性鋼に適合する溶接材料が開発され、厚板と溶接材料がセットで提案されてきた。このような開発体制は、実用化を加速する点でも有意義であり、今後より一層強化していくことが重要である。

4. 耐食技術の進歩による厚板の高機能化

4.1 技術開発の歩み

厚板耐食鋼は、さびやすさを克服するために少量の合金元素を添加して耐食性を向上させた低合金鋼であり、たとえば橋梁に使用される耐候性鋼の耐久寿命は100年の長期に渡る。このように、厚板耐食鋼は省資源と高耐久を両立

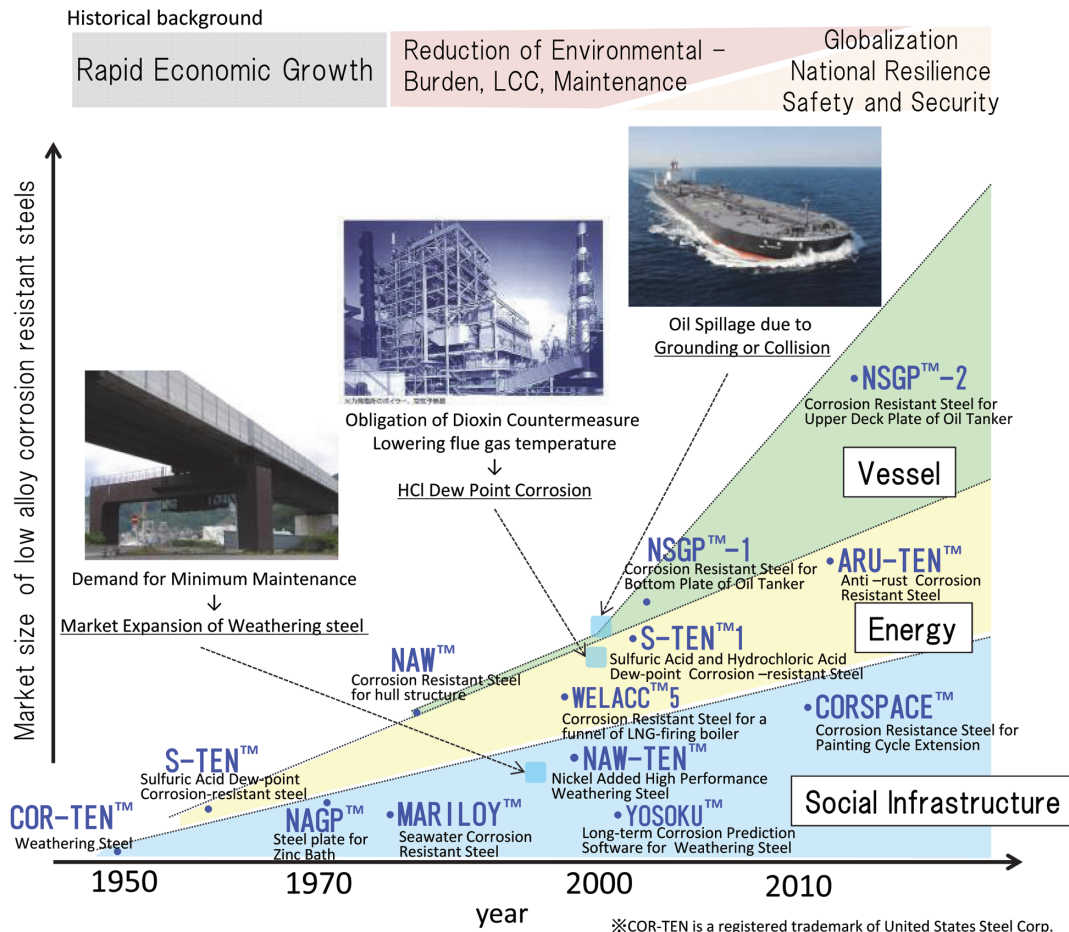


図3 新日鐵住金における厚板耐食鋼開発の歩み
Progress of corrosion resistance steel plates in NSSMC

した材料であり、持続可能社会の実現に大きな役割を果たす。以下に新日鐵住金の歩みをふり返る。

厚板耐食鋼の耐食メカニズムは、ステンレス鋼のような不動態皮膜によるものではなく、添加した合金元素が腐食環境との相互作用で自らを守る保護性のさび層や沈殿皮膜等を形成することである。従って、使用環境と鋼材との界面反応に及ぼす合金元素の影響を明らかにし、腐食および防食のメカニズムを解明することが重要である。放射光を利用した腐食界面のその場観察など、各種の先端解析技術を駆使してメカニズム解明と材料開発が行われてきた。図3に厚板耐食鋼の歩みを示す。

耐候性鋼は、少量のCu、Cr等の合金元素を添加することで大気環境中での曝露期間中に鋼材表面に保護性の高いさび層（保護性さび）が形成し、腐食速度が大幅に低減する。飛来海塩粒子が多く通常の耐候性鋼が使用できない地域では、Cl⁻がさび層を透過して鋼材表面が低pH化するため、この現象を抑える必要がある。Ni添加によってさび層のイオン交換機能を制御し、海塩中のNaを選択的に透過させることでニッケル系高耐候性鋼が開発された。そして、湿潤環境でその場観察を可能とする高度解析技術が開発され、耐食メカニズムが解明された。さらに、耐候性鋼

の寿命推定技術、保護性さびの定量評価、補修技術といった利用技術開発が行われ、橋梁分野のライフサイクルコストのミニマム化が検討されてきた。

エネルギー分野では、ボイラープラントの高温排ガス中に含まれる酸性物質（SO_x、HCl等）が結露し、排煙系統の材料を腐食させる。排ガスへの環境規制により従来の硫酸露点腐食に加え塩酸露点腐食に対応する新S-TEN1が開発された。

造船分野においては、原油タンカーの座礁による海洋汚染を防止する観点から、1992年に船体ダブルハル化が義務付けられた。さらに、原油流出を防止する目的で、原油槽の防食措置が検討され、2013年に日本が提案した無塗装耐食鋼が塗装の代替手段として認められた（国際条約の発効）。この国際条約採択への貢献とともに、原油槽の底板用耐食鋼NSGP®-1と上甲板耐食鋼NSGP-2が開発されてきた。

4.2 今後の展望

近年、循環型社会、地球環境保護などの観点から、超長期耐久性や更なる省合金化が求められており、表面処理あるいは塗装と組み合わせた新たな厚板耐食鋼として、耐赤

表1 新日鐵住金の高機能厚板に関する主な受賞実績（2000年以降）
Award records of high performance steel plates of NSSMC in recent years

Year	Award names	Achievements
2000	Ichimura Award	Weathering steel for use in coastal regions
2002	Ichimura Award	Development of high performance 60kgf/mm ² high tensile strength steel plate with strikingly improved welding capabilities
2004	Ichimura Award	Super high HAZ toughness technology with fine microstructure imparted by fine particles (HTUFF)
2007	Ichimura Award	Sulfuric acid and hydrochloric acid dew-point corrosion resistant steel (New S-TEN 1)
2008	Okochi Award	YP 47 kgf/mm ² class higher strength steel plate and new hull structure design for large container ships (jointly with Mitsubishi Heavy Industries)
2009	Ichimura Award	Development of steel plate for improving the fatigue strength in welded joints
2011	Ichimura Award	Corrosion resistant steel for cargo oil tank (NSGP-1)
2012	National Commendation for Invention	Development of the functional steel plate with high enhancement to fatigue life for welded structures
2013	Nikkei Excellent Products & Services Awards	7% nickel steel for LNG tank

鍍性鋼 ARU-TEN® や塗装周期延長鋼 CORSPACE® の開発が進められてきた。このような時代のニーズに適合した開発を推進するため、蓄積した膨大かつ広範囲な知見を体系化していく必要がある。さらに、腐食現象や合金元素の作用に着眼した腐食・防食のメカニズム解明を深化させることで、厚板耐食鋼の機能をさらに高めていくことが重要である。

5. 結 言

新日鐵住金では、社会、顧客からの厚板高機能化の要求に応えるべく、厚板のみならず精錬、凝固、圧延、冷却、溶接、破壊、腐食、構造、分析、数値、他品種等の幅広い分野の研究者、技術者が連携し、操業技術、製造現場、営業販売と一体化した技術開発を推進してきた。その成果は、表1に示す多数の受賞実績からわかるように高い評価を受けてきた。今後も、社会、顧客から提示される新しい課題、難

しい課題を真っ先に解決すべく、あらゆる技術領域の総力を結集して、厚板の技術先進性を極めていく。

参考文献

- 1) 植森龍治 ほか：新日鉄技報. (391), 37 (2011)
- 2) 植森龍治 ほか：新日鉄技報. (391), 67 (2011)
- 3) 岩崎正樹 ほか：新日鉄技報. (391), 88 (2011)
- 4) 小川茂 ほか：新日鉄技報. (391), 94 (2011)
- 5) 高橋学 ほか：新日鉄技報. (391), 127 (2011)
- 6) 林俊一：新日鉄技報. (391), 137 (2011)
- 7) 山村和人 ほか：新日鉄技報. (391), 143 (2011)
- 8) 金子道郎：新日鉄技報. (391), 162 (2011)
- 9) 木村正雄：新日鉄技報. (391), 165 (2011)
- 10) 染谷良：住友金属. 50 (1), 22 (1998)
- 11) 細川能夫 ほか：住友金属. 49 (2), 103 (1997)



児島明彦 Akihiko KOJIMA
鉄鋼研究所 厚板・形鋼研究部長
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



藤岡政昭 Masaaki FUJIOKA
鉄鋼研究所 厚板・形鋼研究部
上席主幹研究員



星野 学 Manabu HOSHINO
鉄鋼研究所 厚板・形鋼研究部
上席主幹研究員



重里元一 Genichi SHIGESATO
鉄鋼研究所 厚板・形鋼研究部
上席主幹研究員 Ph.D



金子道郎 Michio KANEKO
鉄鋼研究所 厚板・形鋼研究部
上席主幹研究員 工博



田中睦人 Mutsuto TANAKA
厚板事業部 厚板技術部 厚板商品技術室長