

厚板・鋼管分野における溶接技術の進歩と展望

Progress in this Decade and Future Prospect of Welding Technologies on Steel Plates and Pipes

児嶋 一 浩*
KOJIMA Kazuhiro

抄 録

鋼構造物の特性に対する要求は、強度、靱性、耐食性、耐熱性、溶接性等と多岐に渡っており、最近では、ますます多様化、過酷化してきている。それに伴い、溶接技術に対する要求も厳しいものになってきており、高能率、高品質、高機能、省力化、低コスト等、多種多様である。これらニーズに応じて開発された最近の鋼材とその溶接技術について、造船、建築、橋梁、貯槽、再生可能エネルギーで開発された代表的な溶接技術について述べ、最後に将来を展望した。

Abstract

Various aspects of qualities are required in steel structures, such as strength, toughness, heat resistance, weldability, anti-corrosion and the requirements have been getting severer. Welding science, therefore, should be more sophisticated in many fields such as efficiency, quality, energy and cost save. In this session, the author will review the progress of steel and welding technology along this decade, and will introduce some topics in shipbuilding, civil construction, bridge engineering, tanks, and renewable energy fields.

1. 緒 言

鋼材は種々の加工を経て構造物となり、はじめて社会的価値を発現する。溶接は鋼構造物を作製するうえで必要不可欠の技術であり、鋼構造物の特性や信頼性は溶接で決まるとしても過言ではない。構造物に使用される材料には、その使用環境に応じて多様な特性が必要とされるが、溶接部にも鋼材と同等以上の特性が要求される場合が多い。このため鋼材の特性を最大限に活かすことができる溶接技術は極めて重要である。また、鋼材にはより容易に溶接できる特性(溶接性)が求められ、溶接施工には、省力化、高能率化が求められる。

この傾向は、従来と比較してもますます顕著となり過酷化の一途である。新日鉄住金(株)では、これらの要求に応えるべく、高機能、高品質の厚鋼板および鋼管を開発し、グループ会社である日鐵住金溶接工業(株)と綿密に連携して溶接ソリューション技術を鋼材とセットで商品化してきた。また、需要家での多様な接合技術課題を解決し、設計自由度の拡大を可能とする提案を通して、需要家での加工技術の支援を行ってきている。本稿では直近の約10年間

で開発された鋼材とその溶接技術例を紹介し、その動向と将来展望を紹介する。

2. 最近の溶接技術の動向

2.1 造船

世界経済の成長に伴い、大量輸送の社会的ニーズが高まり、コンテナ船は大型化の傾向にある。このため、シャーストレイキやハッチサイドコーミングに板厚50mm以上の鋼板が使われるようになった。このような厚鋼板を効率的に溶接すべく、図1に示す2電極エレクトロガス溶接方法が開発されコンテナ船に適用されている^{1,2)}。2電極溶接とすることで図2のように施工効率が飛躍的に高まり、溶接欠陥の抑制も同時に可能としている³⁾。さらなる極厚鋼板の溶接にも対応すべく、図3に示すような4電極VEGA®溶接法が開発されており、図4のような板厚200mmにおいても1パスでの立向溶接が可能となっている³⁾。

また、1990年代以降タンカーの原油流出による海洋汚染が非常に大きな問題となり、IMO(International Maritime Organization:国際海事機関)でタンカーの国際ルールが厳格化されてきた。代表的なものとしては、構造対策ではダ

* 鉄鋼研究所 接合研究部 主幹研究員 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

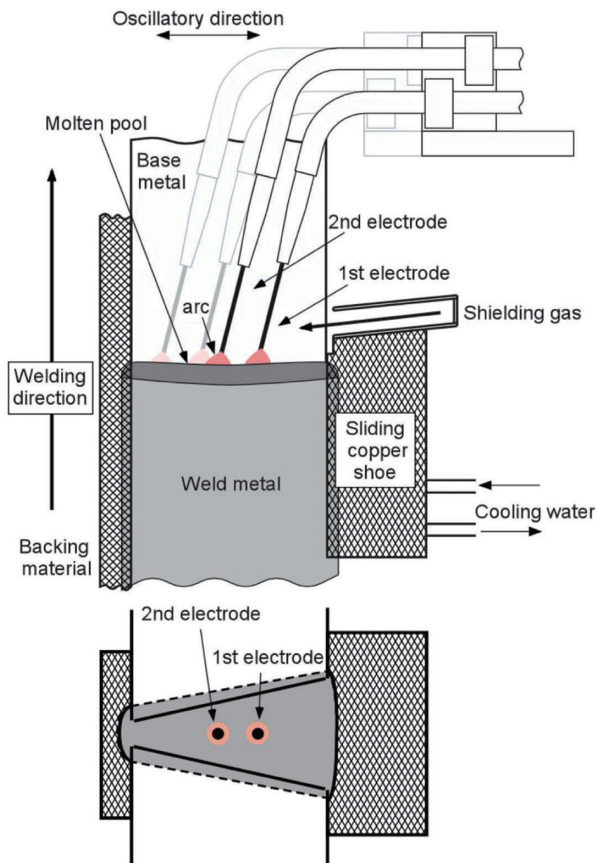


図1 2電極 VEGA® 溶接法の模式図

Schematic diagram of two-electrode VEGA® welding process

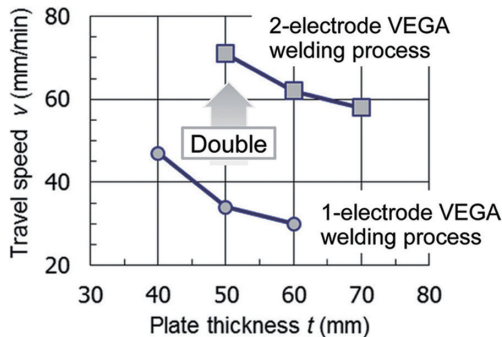


図2 1電極および2電極 VEGA® 溶接法の溶接速度比較
Comparison of travel speed with single- and two-electrode VEGA®

ブルハル化が、腐食対策では原油タンク (Crude Oil Tank : COT) の防食基準化 (MSC.288(87)) 等がある。

原油タンクの底板の腐食は、図5に示すように局部的に起こる穴状の形態のものであり²⁾、深さは最大で10mmにも及ぶ。実船調査と実験室検討結果から導き出された腐食機構を図6に示す⁴⁾。原油タンク底板には、原油積載運航時に腐食に不可欠な水が滞留していることが観察されている。この水は高濃度の塩化物を含む中性水(ブライン)であり、原油中の含有水分が搬送中に析出したものと考えられている。一方、原油タンク内面にはオイルコートと称されている原油成分が固着している。このオイルコートは塗

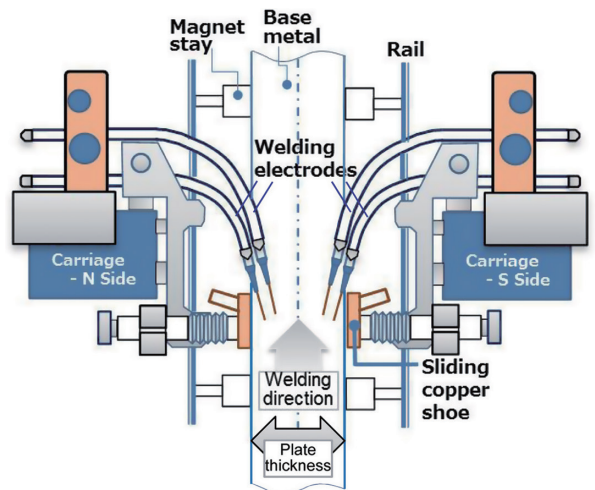


図3 4電極 VEGA® 溶接法の模式図

Schematic diagram of four-electrode VEGA® welding process

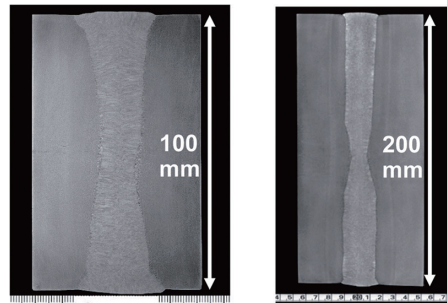


図4 4電極 VEGA® 溶接継手の断面マクロ組織
Macrostructure of welds 100 mm and 200 mm thick with four-electrode VEGA® welding process

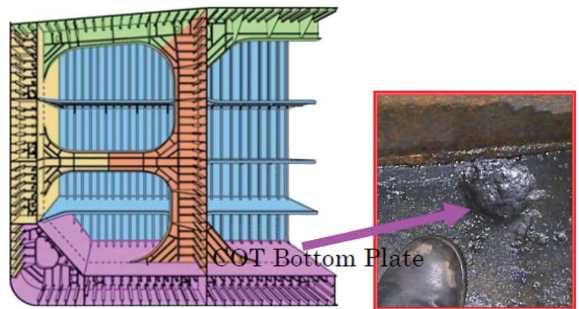


図5 原油タンカー底板に発生する食孔の一例
Example of pit corrosion on COT (Crude Oil Tank)

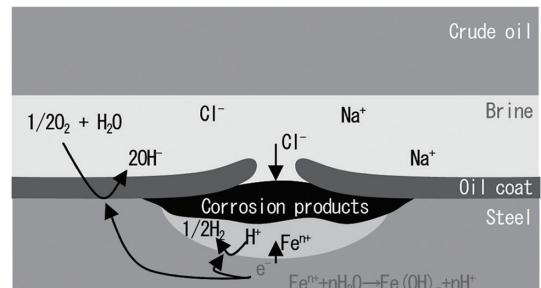


図6 底板の腐食機構の模式図

Summarized process and mechanism of localized corrosion on COT bottom plate

装と同様の環境絶縁性を有する。このため腐食はオイルコート欠陥部で生じると考えられる⁴⁾。

欠陥部で腐食が生じると加水分解によって pH が低下する。底板には 10 mass% の高濃度のブラインが滞留しているため、腐食部は強い酸環境になり得る。このため、ピット内では活性溶解が生じ半球状の腐食が形成すると考えられる。実際にピット内部の pH 値を計測した結果、pH 値が 1.5 以下を示す結果が示されている⁴⁾。一方で(社)日本造船研究協会第 242 研究部会 (SR242) の調査結果からピットの進展はドック検査後に停止すると考えられることから⁵⁾、新日鐵住金は上記環境での腐食速度を大幅に低減した NSGP[®]-1 を開発し、併せて日鐵住金溶接工業と協力して専用溶接材料を開発した。

NSGP[®]-1 の溶接部の腐食試験結果の例を写真 1 に示す。IACS (International Association of Classification Societies : 国際船級協会連合) 統一解釈 UI SC258 では、溶接部の段差が 30 μ m 以下、もしくは段差 50 μ m 以下かつ境界部傾斜 15 $^\circ$ 以下を合格としている⁴⁾。従来溶材を用いた場合では、母材と溶接金属の境界に約 60 μ m の明確な段差があり目標値を満足しないが、新開発の専用溶接材料を用いた場合では母材と溶接金属の境界に段差は認められず目標値を満足している。また、入熱約 13kJ/mm の片面サブマーリアーク溶接により作製した溶接継手のシャルピー衝撃試験結果を表 1 に示すが極めて良好な靱性が得られており⁴⁾、NSGP[®]-1 は既に約 10 隻以上の大型原油タンカー (Very Large Crude Oil Carrier : VLCC) の原油タンク底板に適用されている。

2.2 建築

建築では都市部において土地を高度利用すべく、超高層建築のニーズが高い。代表的な建造物では東京スカイツ

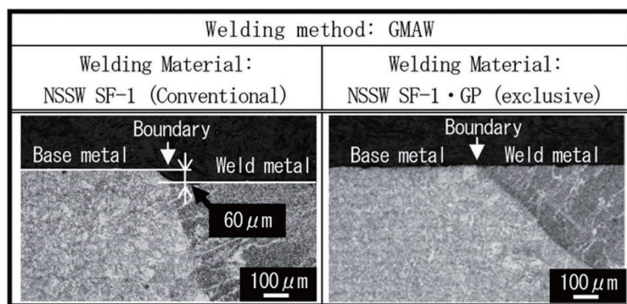


写真 1 NSGP[®]-1 溶接継手部の腐食試験後の断面 (一例)
Cross section view of welded joints of NSGP[™]-1 after corrosion test

表 1 NSGP[®]-1 の継手靱性 (板厚 : 20mm)
Impact test results of welded joint (plate thickness: 20mm)

Notch location	Weld metal	Fusion line	HAZ		
			1 mm	3 mm	5 mm
Absorbed energy at 0 $^\circ$ C (J)	117	103	103	193	208

HAZ: Heat Affected Zone

リー[®] や大阪のあべのハルカス等を挙げることができるが、ここでは超高層建築の溶接技術例として東京スカイツリー[®] に使用された溶接技術を紹介する。東京スカイツリー[®] は、写真 2 に示すように鋼管トラス構造が採用されている⁶⁻⁸⁾。このため、図 7 に示すように横向溶接 (2G) や斜め円周溶接 (6G) のような溶接姿勢が多数あり、全姿勢溶接が可能な溶接材料が望まれていた。また、使用されている鋼材の降伏強度が 400MPa と高強度であり、溶接継手にはオーバーマッチが要求されたことから、フラックス入りワイヤ SF-55 を日鐵住金溶接工業とともに新たに開発した。

このワイヤは図 8 に示すようにシームレス型であるためフラックスが大気に触れることがない。このため銅製外皮に充填した後にワイヤを高温で焼鈍することが可能であり、



写真 2 東京スカイツリー[®] の外観
Appearance of the TOKYO SKYTREE[®]

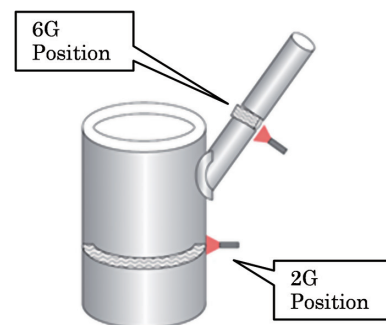


図 7 東京スカイツリー[®] で使用された溶接姿勢例
Example of welding positions required in the TOKYO SKYTREE[®]

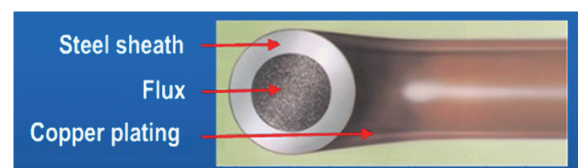


図 8 シームレス型フラックス入りワイヤの断面図
Schematic image of cross section on seamless type flux cored wire

表 2 SF-55 を用いた溶接金属の化学組成と機械的特性例
Example of chemical compositions and mechanical properties of weld metal with the SF-55 flux cored wire

Brand name	Classification	Typical chemical composition of weld metal (mass%)					Mechanical properties			
		C	Si	Mn	Mo	Others	YP	TS	EL	Charpy absorbed energy
SF-55	JIS Z 3313 YFW-C55DR (T550T1-1CA-G-UH5)	0.06	0.4	1.28	0.15	—	560 MPa	629 MPa	25%	94 J at 0°C

YP: Yield point, TS: Tensile strength, EL: Elongation

この焼鈍時にワイヤ内に残存している水分を低減することが可能である。このため、フラックス入りワイヤとしては極低拡散性水素量である 4 ml/100 g 以下を達成し⁹⁾、予熱の低減または省略で溶接施工の効率化に貢献した。またシームレス型のフラックス入りワイヤは開封後もフラックスの再吸湿がないので、この観点からも施工管理の信頼性を一段と高めている。一例として、SF-55 の機械的特性を表 2 に示す。

2.3 橋梁

橋梁においては新しい鋼材規格である SBHS500 の適用が進んでいる。SBHS500 は 2008 年に制定された JIS 規格であり、新日鐵住金はその前身となる BHS 規格の萌芽期から鋼材の要求性能の策定、規格化および実用化に先導的な役割を果たしてきた。SBHS500 は溶接性に優れ、大入熱溶接にも対応でき、溶接施工の高効率化に貢献している^{10,11)}。写真 3 に示す東京ゲートブリッジでは世界初となる全溶接大型トラス構造が採用された。海上橋で腐食が懸念されるボルト接合を避け、写真 4 に示すような溶接構造の格点と



写真 3 東京ゲートブリッジの外観写真
Appearance of the Tokyo Gate Bridge



写真 4 東京ゲートブリッジの格点
Example of the panel points on the Tokyo Gate Bridge

したことで橋梁の安全性も向上している¹⁰⁾。

大入熱溶接が適用された例では東京都の永田橋を挙げることができる¹¹⁾。板厚 67 mm の SBHS500 が使用されているが、10 kJ/mm の大入熱溶接（従来の SM570 では 7 kJ/mm の制限がある）と現場溶接の予熱省略とを併せて工期短縮が図られた。表 3 に大入熱サブマージアーク溶接 (SAW) の開先形状とマクロ断面の例を、図 9 に当該溶接継手のシャルピー吸収エネルギーの例を示す。11 kJ/mm の大入熱溶接を行っても、永田橋の継手靱性の要求値である 47 J を満足している¹¹⁾。

表 3 SBHS500 の大入熱溶接開先とマクロ断面
Groove geometry and macro section of high arc energy SAW

Electrode	Y-DM (diameter: 4.8 mm)
Flux	NF-320M
Groove preparation	
Macroetch cross-section	

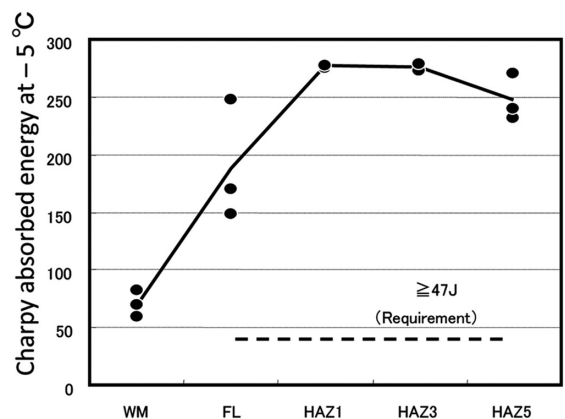


図 9 SBHS500 の大入熱溶接継手のシャルピー試験結果
Charpy impact test results of welded joints on SBHS500 steel by high arc energy SAW

また、橋の格点部近傍に 50mm を超える厚手の SBHS 500 が使用される例も増加している。新名神高速道路の朝明川橋や東京都の築地大橋では、50mm を超える板厚が約半数を占め、朝明川橋では最大厚 86mm、築地大橋では最大厚 80mm の SBHS500 が使用され、今後も橋梁の軽量化や安全性向上への活用が期待される¹¹⁾。

2.4 貯槽

ここでは貯槽関連として液化天然ガス (LNG) タンクに関する技術を紹介する。天然ガスは燃焼時の環境負荷が小さくクリーンエネルギーとして従来から注目されてきた。さらに今般の北米でのシェールガス開発により、一次エネルギーとしての重要度は一層増大している。今後、世界規模での LNG 需要増大に伴い、地上式 LNG タンクの建造が増加すると考えられている。地上式 LNG タンク内槽材には極低温での優れた強度と低温靱性を有する 9%Ni 鋼が使用されている。

9%Ni 鋼はアメリカの International Nickel Company (INCO) により開発され、半世紀以上にわたる使用実績があり、その高い安全性が認められている。しかしながら、LNG タンクの建造費用削減の観点から、高価かつ価格変動が大きい Ni の使用量低減が望まれていた。ここでは新日鐵住金が 1960 年代から進めてきた Ni 低減鋼の開発とその適用事例を紹介する。Ni 低減鋼の化学組成例を 9%Ni 鋼と比較して表 4 に示す。Ni 低減鋼は Ni を 6~7% へ低減して Mn を増量するとともに、Cr と Mo を添加している¹²⁾。

9%Ni 鋼と Ni 低減鋼の製造方法を比較して図 10 に示す。9%Ni 鋼が RQ-T (Reheat Quenching-Tempering: 再加熱焼入れ-焼戻し) であるのに対して、Ni 低減鋼は TMCP-L-T (Thermo Mechanical Control Process-Lamellarizing-Tempering: 直接焼入れ-中間熱処理-焼戻しを指す) で製造を行う。この製造方法により金属組織の微細化が可能となり、Ni 添加量の低減が実現した。図 11 に Ni 低減鋼を使用した溶接継手の CTOD (Crack Tip Opening Displacement) 試験結果を示す。表 4 に示す Heat A, Heat B の両成分において 9%Ni 鋼と同様の優れた結果が得られている¹²⁾。

さらに実際の LNG タンク溶接部を想定した大型破壊試験として十字継手広幅引張試験も実施した。試験片形状を図 12 に、試験結果を表 5、および図 13 に示す。立向姿勢の GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) 継手と SMAW

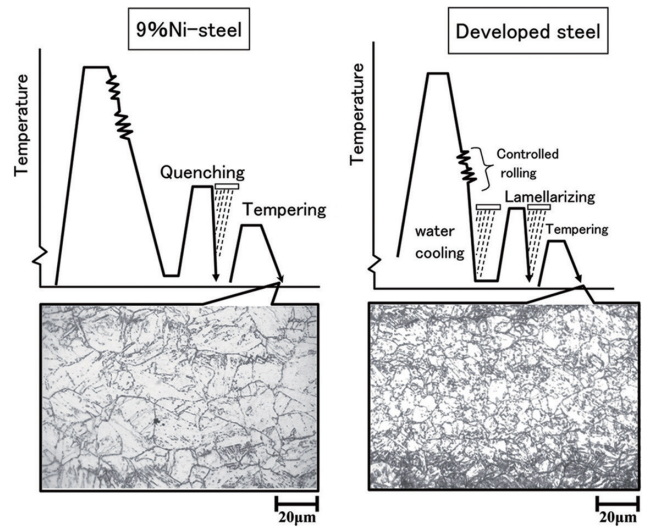


図 10 製造方法と金属組織
Production process and microstructure

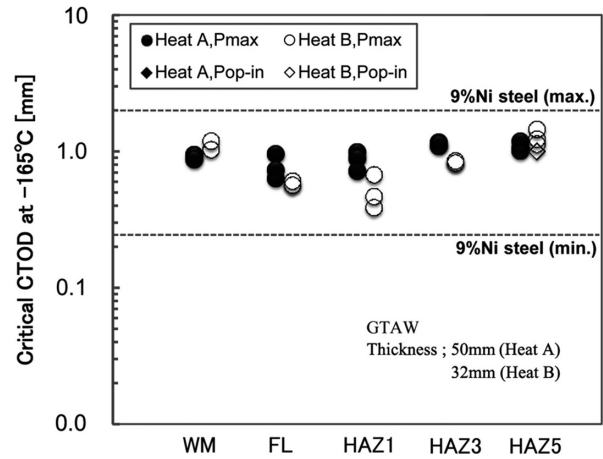


図 11 溶接部の CTOD 試験結果
CTOD test results of welded joints

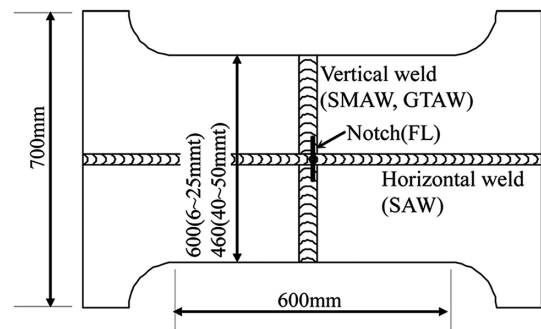


図 12 溶接部の CTOD 試験結果
CTOD test results of welded joints

表 4 化学成分と製造方法
Chemical compositions and production process

		Chemical compositions (mass%)						Production process
		C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	
Developed steel	Heat A (7.1%Ni-steel)	0.05	0.05	0.8	7.1	added	added	TMCP (DQ-L-T)
	Heat B (6.3%Ni-steel)	0.05	0.06	1.0	6.3	added	added	TMCP (DQ-L-T)
Conventional steel	9%Ni-steel	0.05	0.22	0.65	9.2	Tr.	Tr.	RQ-T

DQ: Direct Quenching, RQ: Reheat Quenching, L: Lamellarizing, T: Tempering

表5 十字継手広幅引張試験結果
Results of cross weld notch wide test

	Thickness (mm)	Width (mm)	Welding method	Notch		Temperature (°C)	Fracture stress (net) (MPa)
				Position	Length (mm)		
Heat A (7.1%Ni-steel)	6	600	SMAW	Fusion line	36	-166	822
	25	600	GTAW	Fusion line	50	-167 -- -181	752
	25	600	SMAW	Fusion line	50	-168 -- -185	756
	40	460	GTAW	Fusion line	80	-165 -- -179	768
	40	460	SMAW	Fusion line	80	-166 -- -179	812
	50	460	GTAW	Fusion line	100	-163 -- -173	807
Heat B (6.3%Ni-steel)	6	600	SMAW	Fusion line	36	-165	1002
	12	600	SMAW	Fusion line	24	-165	954
	12	600	GTAW	Fusion line	24	-165	983
	32	600	SMAW	Fusion line	64	-165	857
	32	600	GTAW	Fusion line	64	-165	851

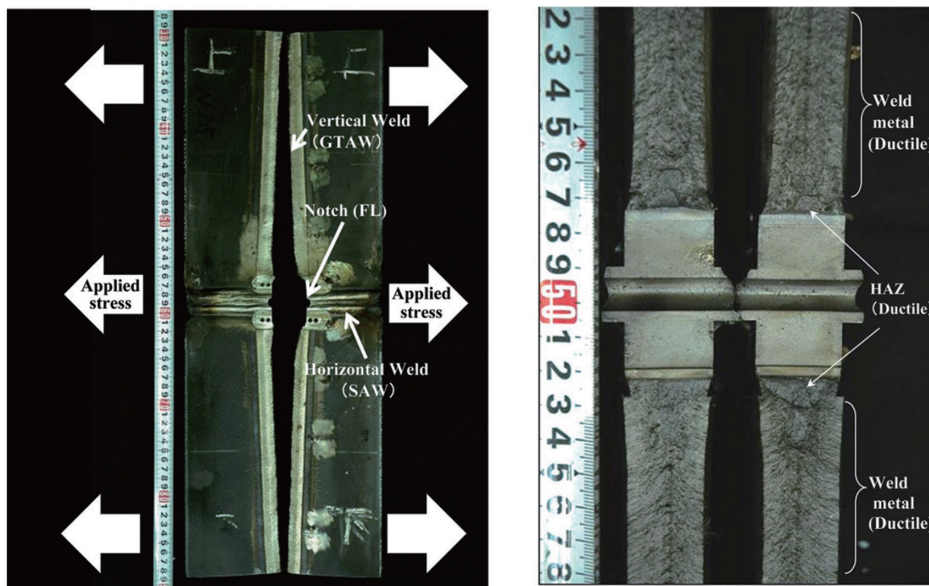


図13 十字継手広幅引張試験体破断経路と破面
Fracture path and fracture surface of cross weld notch wide test (Heat A, 25mm)

(Shielded Metal Arc Welding) 継手のフュージョンライン (FL) に板厚の2倍長さの貫通切欠きを導入し、-165°Cにおける破壊応力 (σ_{net}) を計測したが、いずれも750MPa以上と非常に高い値であり、9%Ni鋼の特性とほぼ同じレベルであった¹²⁾。またいずれの試験片もき裂が切欠先端から溶接金属に逃れ最終的に全面降伏し、最大荷重を経て破断する挙動を示した。以上から、Ni低減鋼では母材および溶接継手部においての9%Ni鋼と同等以上の脆性き裂発生抑制特性を有することを確認した¹²⁾。これらの成果として、Ni=7.0-7.5%の範囲のNi低減鋼は2010年度ガス事業法技術基準適合性評価委員会の審議を経て、国内最大クラスの大坂ガス(株)泉北製造所第一工場5号LNGタンクに採用された。

2.5 再生可能エネルギー

風力発電は再生可能エネルギーとして太陽光発電と並ぶ有望な発電方法として注目されている。風力発電の設置場

所は、陸上と洋上があり、特に洋上は一般的に風速が強く乱れが小さいことから風力発電に適している。日本の近海では欧州と異なり、遠浅な海域が少ない。このため水深が深い海域でも使用できる浮体式洋上風力の実用化が検討されている。新日鐵住金は2011年度から、丸紅(株)(プロジェクトインテグレータ)、東京大学(テクニカルアドバイザー)を中心とした10社とともにコンソーシアムを組んで浮体式洋上windファーム実証研究事業に参画し、研究に取り組んでいる。

本事業は複数の浮体式洋上風車と浮体式洋上変電所からなるwindファームとして世界初のものである¹³⁾。ここでは、洋上風力発電の課題の一つである大入熱溶接技術を紹介する。浮体式構造においても、着床式と同様に大型風車を搭載する場合、重要構造部位では厚手材が適用される。したがって、今後、大型風車が大量に設置されることを想定すると、厚手材の溶接施工コスト低減、すなわち溶接の高効率化が洋上風力発電を普及させる上で解決すべき

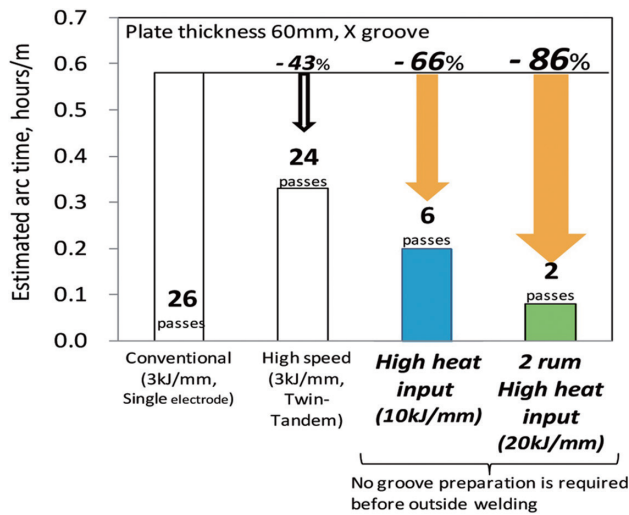


図14 大入熱溶接法のアークタイム削減効果
Advantages of high heat input SAW in arc time

重要な課題となる。この課題を解決すべく、大入熱溶接を検討した事例を以下に示す。大入熱溶接では図14に示すようにアークタイムを大幅に削減でき、効率的な溶接施工が可能である¹³⁾。

ただし、入熱量が大きくなると、溶接金属 (WM) および溶接熱影響部 (HAZ) の靱性は一般に低下する傾向にあり、洋上風力分野で要求される 0℃ ~ -40℃ の低温での靱性を確保することが難しくなる場合がある。新日鐵住金では、このような状況においても、高温で熱的に安定な超微細ナノ粒子により HAZ 組織の粗大化を抑制する技術 HTUFF® (エイチタフ: High HAZ Toughness Technology with Fine Microstructure Imparted by Fine Particles) 鋼およびこの特性を最大限に活用できる溶接技術をグループ会社の日鐵住金溶接工業とともに保有している。一例として、入熱 31 kJ/mm の片面 SAW における溶接継手のマクロ断面を図15に、当該溶接継手のシャルピー試験結果を図16に示す¹³⁾。図16のいずれのノッチ位置においても優れた吸収エネルギーが確認されており、高エネルギー溶接施工の実現と安全性確保の両立に貢献している。

2.6 その他

本稿で紹介した内容以外にも、高温材料では SAVE12AD¹⁴⁾ や HR6W¹⁵⁾ など次世代 USC ボイラへの適用が期待される優れたクリーブ特性と溶接性を両立する材料が開発されている。電縫溶接 (ERW) 鋼管ではプラズマシールドを付与して接合部の酸化物を低減することで品質改善が達成されている¹⁶⁾。また、近年注目されているシェールガス関連では川下の化学プラントにおいてコーキングを軽減する新しい鋼管が開発され、それに対応する溶接技術も検討されている¹⁷⁾。さらに、近未来の普及が期待される水素エネルギーについても溶接が可能で配管材料が開発され¹⁸⁾、研究成果は着実に具現化されている。

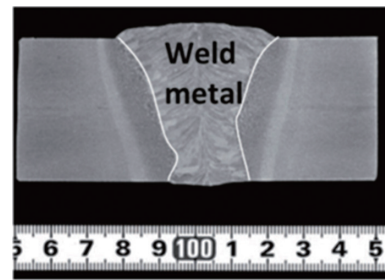


図15 大入熱溶接のマクロ断面例
Example of macro sections by high arc energy welding

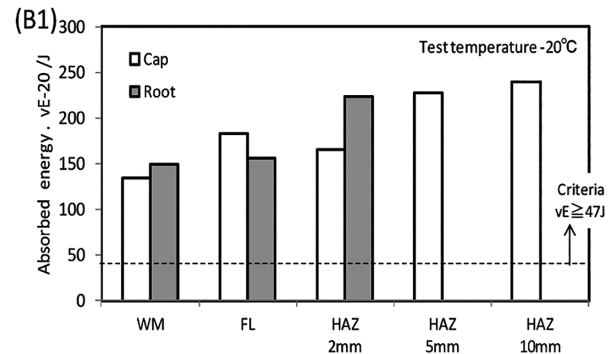


図16 大入熱溶接のシャルピー試験結果
Charpy impact test results of welded joints by high arc energy welding

3. 結 言

以上に直近約 10 年間における溶接関連技術を紹介した。溶接部は金属組織、化学成分、残留応力や熱変形のような力学的特性のすべてにおいて不連続な部分であり、構造物の安全性や使用可能寿命は溶接の巧拙にかかっている。鋼材のみならず、溶接部においても要求される特性は、単一のものではなく、強度、靱性、疲労特性、耐熱性など多岐に渡っており、最近ますます多様化、過酷化の一方である。これに伴い溶接技術も更なる進化と深化が求められる。今後、信頼性の高い鋼構造物を効率良く製造していくためには、溶接、接合の基本的な現象を深く理解し、鋼材・溶材開発を行っていくとともに、設計・管理技術、施工技術等、顧客側を正確に理解し、それに応えていくことがますます重要になると考えている。

参照文献

- 1) 笹木聖人 ほか：高エネルギー 2 電極エレクトロガスアーク溶接法の開発. 新日鉄技報. (380), 57 (2004)
- 2) 植森龍治 ほか：海運や建設現場を支える鋼材 (造船・建産機分野). 新日鉄技報. (391), 37 (2011)
- 3) 橋場裕治 ほか：新開発厚板用溶接材料および溶接技術の開発. 新日鉄住金技報. (400), 92 (2014)
- 4) 伊藤 実 ほか：原油タンカー用高耐食性厚鋼板 (NSGP®). 新日鉄住金技報. (400), 86 (2014)
- 5) 日本造船研究協会第 242 研究部会：原油タンカーの新型コ

- ロージョン挙動の研究－研究概要総括書－. 2002
- 6) 加賀美安男：東京スカイツリー®における最新の技術と材料. 溶接学会誌. 82 (4), 8 (2013)
- 7) 小西厚夫 ほか：東京スカイツリーの構造計画. 溶接学会誌. 82 (4), 16 (2013)
- 8) 廣田 実 ほか：東京スカイツリーを支える極厚高強度鋼材. 溶接学会誌. 82 (4), 21 (2013)
- 9) 村田義明 ほか：東京スカイツリー建設工事に使われた溶接材料. 溶接学会誌. 82 (4), 30 (2013)
- 10) 東京の新たなシンボル“東京ゲートブリッジ”新技術を織り込み大型橋梁の未来を拓く. Nippon Steel Monthly. (6), 3 (2011)
- 11) 安藤隆一 ほか：新日鐵住金(株)の橋梁用高降伏点鋼板 SBHS 500. 新日鐵住金技報. (400), 114 (2014)
- 12) 加賀谷崇之 ほか：新 LNG タンク用鋼板. 新日鐵住金技報. (400), 38 (2014)
- 13) 本間竜一 ほか：福島沖浮体式洋上ウィンドファームの実証研究における洋上風力発電用鋼板及び疲労ソリューション. 新日鐵住金技報. (400), 52 (2014)
- 14) 伊勢田敦朗 ほか：次世代ボイラ用 9Cr 鋼管 SAVE12AD の開発. 平成 27 年度火力原子力発電大会論文集. 49 (2015)
- 15) 仙波潤之 ほか：先進超々臨界圧 (A-USC) 発電用ボイラ鋼管の開発. 新日鐵住金技報. (397), 71, (2013)
- 16) Hideki Hamatani et al: DEVELOPMENT OF LAMINAR PLASMA SHIELDED HF-ERW PROCESS. Proceedings of the 2012 9th International Pipeline Conference. IPC2012-90214
- 17) 西山佳孝 ほか：精製・化学プラント分野における材料技術・溶接技術. 溶接学会誌. 83 (6), 488 (2014)
- 18) 平田弘征 ほか：高圧水素ガス環境下におけるオーステナイト系ステンレス鋼溶接金属の水素脆化に及ぼす化学成分及び組織の影響. 溶接学会論文集. 31 (4), 246 (2013)



児嶋一浩 KOJIMA Kazuhiro
鉄鋼研究所 接合研究部
主幹研究員
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511