

(解説)

船舶・海洋構造物の分野で拡大するフラックス入りワイヤ

Flux Cored Wires with Expanding Applications in Shipping and Offshore Industries



伊藤和彦*
Kazuhiko ITO



日高武史*
Takeshi HIDAKA

Kobe Steel's flux-cored wires (FCWs) are often referred to as “NUMBER ONE” and “ONLY ONE of a Kind” in welding industries all over the world, with their high qualities, high reliability, their ease of use and overall welding performance. This article describes the characteristics of FCWs along with the development trends and prospects forthcoming in the future to maintain Kobe steel's position as “NUMBER ONE” in the industry.

まえがき = フラックス入りワイヤ (以下、FCW という) が船舶・海洋構造物を中心としたさまざまな分野で本格的に適用され、鋼構造物の製造に不可欠な溶接材料となつてから約 30 年が経過している。溶接材料全体に占めるその使用比率は、景気変動を考慮しても増加傾向にある (図 1)^{1),2)}。この使用比率は量的な増加を示しているが、それは FCW の高能率性や優れた溶接作業性などの基本特性が高く評価され、従前の被覆アーク溶接棒から切替わってきたことを意味している。しかし同時に、FCW の特性や信頼性を高める開発を継続的に行ってきた結果、船舶・海洋構造物などの分野において、新たに付与した特性が認められ、適用が広がってきたことも意味している。当社は、その伸長する FCW の分野でオンリーワン・ナンバーワンの地位を維持し続けている。これは、常にマーケットニーズを見据えた継続的な製品開発および需要増加に対して品質の維持・向上を前提とした生産・供給体制の増強などに基づくものである。

本稿では、船舶・海洋構造物などの分野で多用されている炭素鋼用 FCW を取上げ、当社製 FCW のオンリーワン・ナンバーワン製品について品質の特長や市場での優

位性などを解説する。

1. 船舶・海洋構造物向け FCW の特長及び開発動向

当社製 FCW の代表銘柄であるチタニヤ系 FCW の DW-100 は、全姿勢 (下向、横向、立向、上向) の優れた溶接作業性、高品質な溶接金属の機械的性質、極めて安定したワイヤ送給性などが開発より約 30 年経過した現在においても高く評価されている。とくに、ワイヤ送給性は、大型の船舶・海洋構造物において、送給経路が長尺で曲率が小さい場合でも安定した溶接施工を行うための重要な特性である。また、長時間の使用において送給性の劣化が極めて小さいことも重要である。それらの点で当社製 FCW は市場で高く評価されている。また、他社の追随を許さない優れたワイヤ送給性は、溶接施工能率の向上に加え、溶接電流の安定化によって溶接欠陥の防止にも効果を発揮する (表 1)。当社製 FCW の優れた送給性は、焼鈍・酸洗工程を全く必要としない独自の伸線技術、および極めて微量の潤滑剤を均一に塗布できる特殊な表面処理技術の成果である。また、大量生産において所定の品質を確保するための緻密な製造管理技術も含め、当社 FCW 事業の揺ぎない基盤技術となっている。

一方、DW-100 の約 10 年後に製品化された MX-200 は、

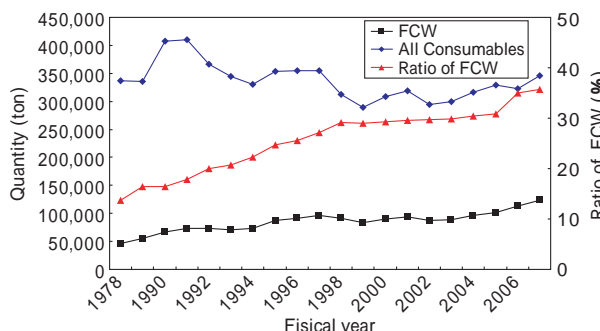
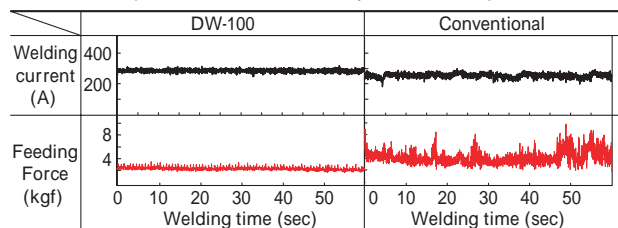


図 1 日本における溶接材料に占める FCW の生産推移

Fig. 1 Production ratio of FCW to whole welding consumables in Japan

表 1 厳しい送給系でのワイヤ送給性の比較

Table 1 Comparison of wire feedability under sever path condition



*Path condition : 6mTorch length with flexure of 300mm

* 溶接カンパニー 技術開発部

船舶建造におけるすみ肉溶接の施工比率が約70%と高いことに着目して設計・開発されたメタル系FCWである。このワイヤは、高能率で高品質なすみ肉溶接を可能とする専用FCWである。とくに、建造中の防錆を目的とするプライマ塗布鋼板の水平すみ肉溶接において、塗料中の水素や亜鉛が主因である気孔欠陥の発生数が従来の全姿勢用FCWに比較して極めて少ないことが高く評価されている(図2)。すみ肉溶接専用FCWであるMX-200の開発技術は、その後、従来比約2倍の高速性を実現する溶接施工法「Twin Tandem One Pool法(以下、TOP法)」とその専用FCW「MX-200H」の技術開発へと展開されている³⁾。

FCWの特長の一つは、ワイヤ溶融速度が大きいことである。ソリッドワイヤと比べると、同一溶接電流の場合、電流が外皮金属を優先的に流れるため、ワイヤ断面が全て金属であるソリッドワイヤよりも電流密度が高く

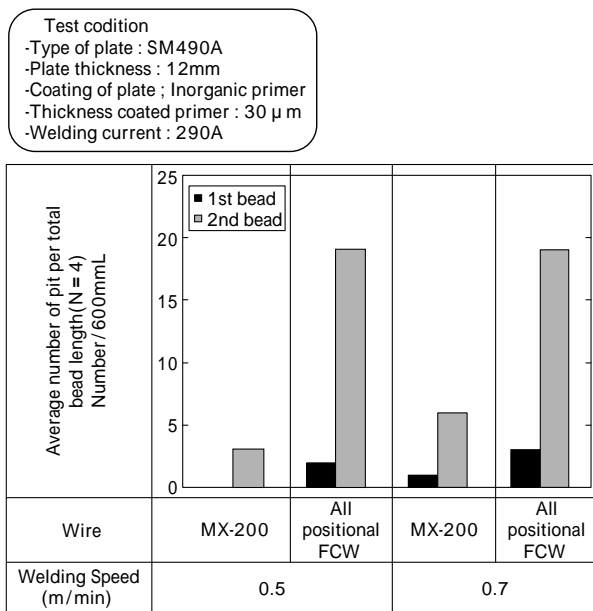


図2 MX-200と全姿勢用FCWとの耐気孔性の比較(ワイヤ径: 1.2mm)
 Fig. 2 Comparison of the resistance to porosity between MX-200 and all positional FCW (Wire Dia. : 1.2mm)

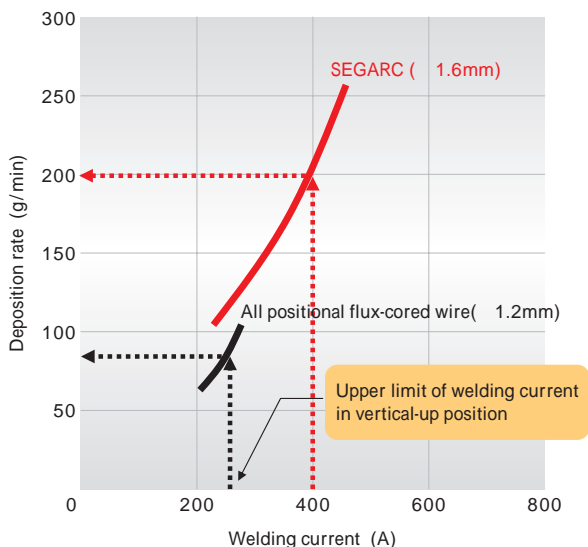


図3 SEGARC法の高効率性の比較
 Fig. 3 Higher welding efficiency with SEGARC process

なり、単位時間あたりの溶着金属量が増加する。この高能率性を活用した溶接施工法に立向上進の自動溶接法であるエレクトロガスアーク溶接法(当社: SEGARC法)がある。SEGARC法は1パスで厚板の溶接継手を作製する施工法であるため、単位時間あたりの溶着金属量を多くする必要はある。高溶着量のFCWはこの施工法に最適な溶接材料であるといえる。当社では、溶接作業性や溶接金属の特性なども考慮し、SEGARC法専用のDW-S43G, DW-S1LGなどを開発・製品化している。

このSEGARC法と専用FCWの組合せによって、溶着速度は全姿勢用FCWの約2.5倍に増大する(図3)。また、パス間温度管理やスラグ除去作業などが不要という点も評価され、船舶の船側外板など、溶接長が15~20mと長い立向溶接継手を中心に国内外の多くの造船所で実用化されている。

2. 船舶・海洋構造物での市場ニーズ

前述の如く、FCWが実用化されて約30年が経過しているが、市場から常に改善要求が寄せられている。換言するとこれは、FCWが必要不可欠な溶接材料として定着していることの証しでもあり、FCWの新たな開発への期待が常に大きいことを示している。FCWは、外皮金属とフラックスの無限の組合せが可能であることから、新特性の付与や品質の改良・改善への期待が高い。図4は、現在の溶接材料に対する開発要求をまとめたものであり、溶接作業環境(赤文字)、施工能率(青文字)、および継手品質(緑文字)に関するものに大別される。基本的に、当社のFCWの開発・改良はこれらの要求に沿って行われているが、船体や海洋構造物の設計基準や要求性能の変更などに基づいて行われる場合も少なくない。

とくに、海洋構造物の分野では、板厚の減少による工期短縮や鋼材重量の軽減のため、高強度鋼の適用拡大が進みつつある。構造物の安全性向上(脆性破壊の発生防止)や使用環境の変化(寒冷域化)への対応とあいまって、脆性破壊防止特性(CTOD値)の向上など、高品質化の要求も一段と高まっている⁴⁾。

当社は、このような要求に対し、不純物量を極少化した特殊原料や溶接金属の組織制御技術を活用してワイヤ

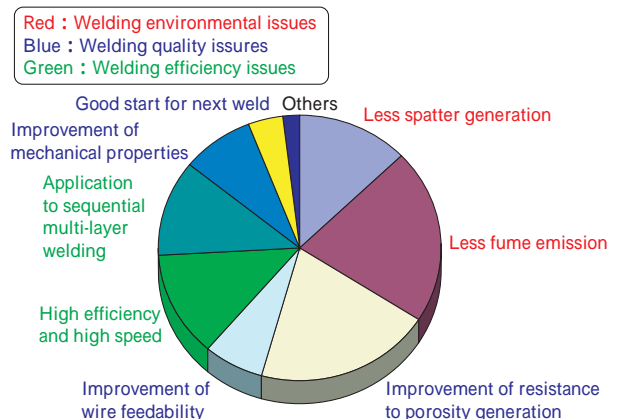


図4 溶接材料に対する市場のニーズ
 Fig. 4 Market requirements to welding consumables

設計を行い、良好な溶接作業性を継承しつつ、高強度かつ高靱性が得られる FCW を数多く開発してきた。それによって FCW の適用分野が大きく拡大した。

近年開発・改良が行われ、ユーザで高く評価されている FCW やその施工法を次章以降で紹介する。

3. 低ヒューム・低スパッタ

船舶・海洋構造物の溶接現場は代表的な3K職場の一つであったが、環境改善の意識高揚に伴い、ヒュームやスパッタの発生低減が重要課題とされてきた。当社は、溶接環境の改善を図るべく低ヒューム・低スパッタを特長とする FCW の開発に着手し、10 数年以上前に DW-Z100, MX-Z200 などの「Z シリーズ」の発売を開始^{2),5)}した。約30%のヒューム発生量低減、約25%のスパッタ発生量低減という溶接環境改善に寄与したことから、当時としては画期的な特性として注目を浴びた(図5)。具体的にはワイヤのC量に着目し、とくに、溶接電流が流れる外皮金属中のC量をコントロールすることにより、ワイヤ先端の溶滴でのCOあるいはCO₂の発生・爆発を抑制し²⁾、ヒュームおよびスパッタの発生量を低減している。この技術は、その後の当社製 FCW の全てに活用されている基礎技術であり、市場では「当社製 FCW = 低ヒューム・低スパッタ」の評価が定着し、FCW 市場での優位性が維持されている。

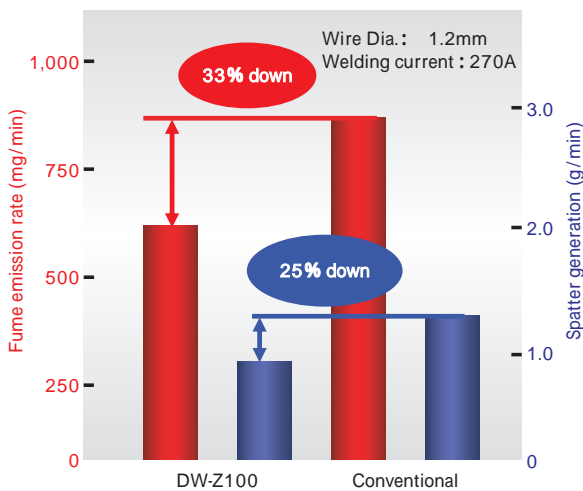


図5 “Z シリーズ”ワイヤの低ヒューム・低スパッタ性
Fig. 5 Performance of low fume and low spatter with “Z series” FCW

4. 優れた立向上進性を有した FCW

全姿勢用の DW-100 とは別に、とくに立向上進性を重視した FCW 「DW-100V」を開発しており、高能率性や優れた溶接作業性の点で高い評価を得ている。一方で、現在、立向上進での溶接作業性やスラグ剥離性についてさらなる改善要求も寄せられている。これは、いわゆる団塊の世代といわれるベテラン溶接工がリタイアし、若手の溶接工が増加していることに起因している。また、海外では、韓国をはじめ中国やベトナムで FCW の適用が急速に広まっているが、社会構造や産業構造の変化によって溶接施工のやりやすい FCW が求められていることも大きな要因である。

このような背景に鑑み、従来の DW-100V をベースに溶接金属の粘性やスラグ発生量などをさらに改良し⁶⁾、立向上進での溶接作業性を飛躍的に向上させたワイヤが「New DW-100V」である。このワイヤでは、従来不可能であった大きなギャップを有する継手においても、280A 程度の高電流域で溶接金属が垂れ落ちることなく良好なビードが得られる(図6)。このため、経験の浅い溶接作業業者でも安心して溶接できることから脚光を浴びている。また、立向上進溶接でウィーピングを行わない場合でも、9mm 程度の脚長までフラットでなじみの良好なビードが得られる。このように、New DW-100V では極めて高能率な溶接が容易に行える。従来、脚長の大きな溶接ビードを得るにはウィーバ機能付きの装置が必須であったが、New DW-100V を用いることにより、ウィーピング機能を持たない比較的簡易で安価な装置の適用が可能となった。

以上のような特長により、設備コストの低減、施工能率の向上、溶接監視時間の低減による装置の多台持ち化など、大きなメリットが生まれている。また、図7に示すように、スラグ剥離性も改善したことで溶接後のスラグ除去作業の時間削減も重なり、数多くのユーザから高い評価を得ている。

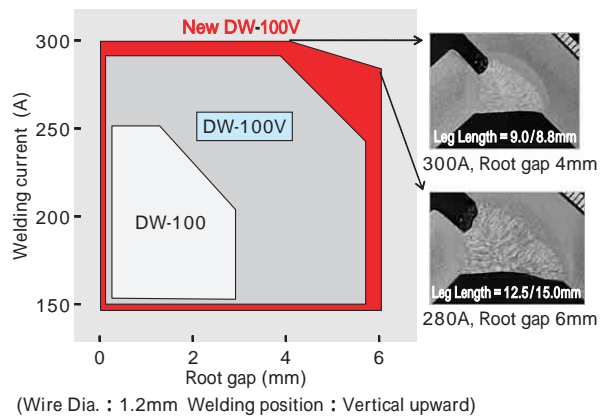


図6 立向上進すみ肉溶接の耐ギャップ性
Fig. 6 Applicable welding range on current and gap in vertical upward position



図7 スラグ剥離外観の比較
Fig. 7 Comparison of slag detachment between DW-100V and conventional one

5. 新3電極高速すみ肉溶接法の開発

現在、韓国、中国など国内外の数多くの造船所で前述のTOP法(2電極高速すみ肉溶接法)が専用のMX-200Hとの組合せで実用化されている(溶接速度:1.0m/min程度)。しかし、さらなる高速化の要求に対しては、ビード外観や耐気孔性の点で課題が多い。1.5m/min以上の超高速で溶接する場合、所要の脚長を得るにはワイヤ送給量を増加させる必要があり、溶接電流を480A程度以上にまで高めなければならない。しかし、溶接電流の増加に伴い、ワイヤ電極間のアーク干渉によって溶接移行や溶融金属が不安定となり、良好なビード形状や耐気孔性が得られなくなる。このため、溶接速度の高速化には限界があった。当社では、これらの課題を解決するため、現在のTOP法を進化させた新しい3電極高速すみ肉溶接法「New TOP法」を開発し、市場に提案してきた⁷⁾。図8に示すようにNew TOP法は、TOP法の2電極間に専用ワイヤを挿入した3電極の全く新しい溶接施工法である。挿入電極には、DCEP(直流電極プラス)ではなく、反対の極性であるDCEN(直流電極マイナス)を適用し、通電するもののアークは発生させない。挿入電極をDCENにすることで両側の電極と逆の磁界が発生し、アーク干渉が緩和されて溶滴移行および溶融池が安定化する(図9)。これによって非常に安定した高速溶接(最大2.0m/min)が実現された。また、挿入電極ではアークが発生しないため溶接入熱やアーク挙動への影響も極小化している。

さらに、New TOP法用として専用FCWであるMX-200HSを開発しており、同一の溶接電流で既存のFCW

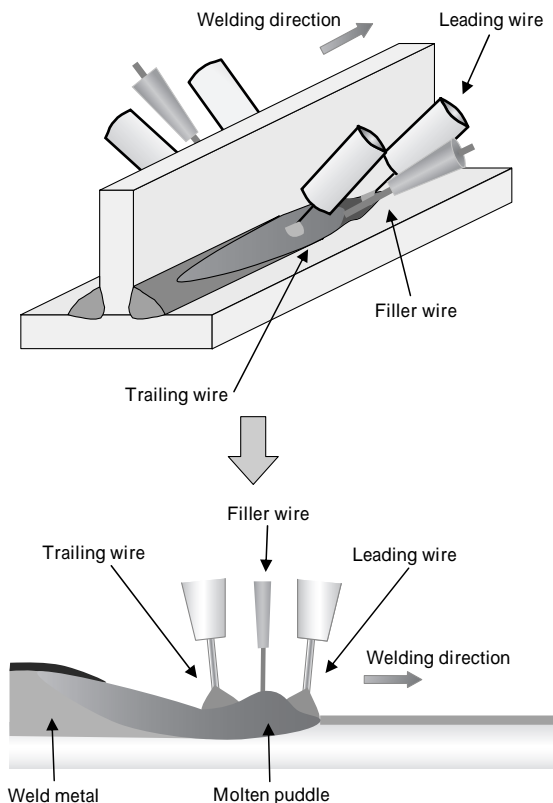


図8 New TOP法の概略図とその電極配置

Fig. 8 Schematic of New TOP process and its location of torches

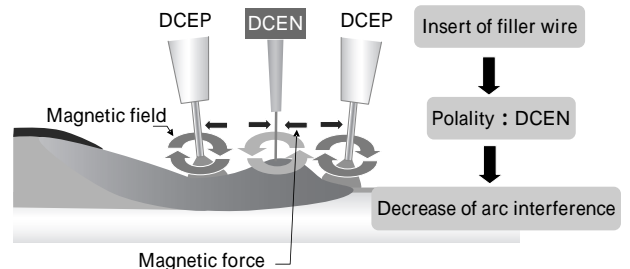


図9 New TOP法におけるフィラワイヤの効果

Fig. 9 Effect of filler wire in New TOP process

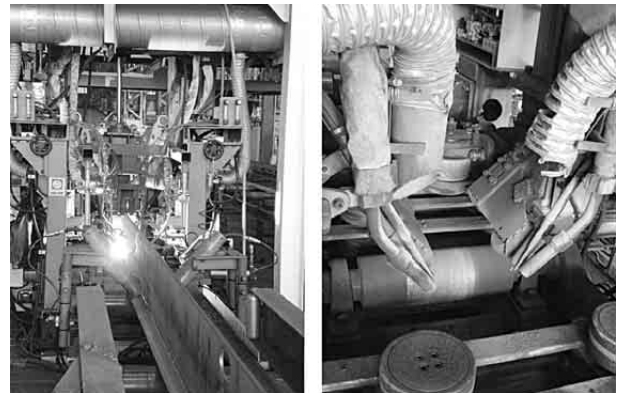


図10 住友重機械マリンエンジニアリング株式会社におけるNewTOP法

Fig.10 Operating New TOP process at Sumitomo Heavy Industries Marine & Engineering Co., Ltd

よりも多くの溶着金属量が得られる⁷⁾。

この新しい施工法は、2008年5月より住友重機械マリンエンジニアリング(株)において業界で初めて導入・実用化された(図10)。本施工法は、溶接速度の増加に伴うエネルギー向上(従来比1.2~1.5倍)に加え、溶接後の手直し率の大幅な低減(ほぼゼロ)という点で極めて高い評価を得ている。

6. 極厚板継エレクトロガス溶接用FCW

当社製エレクトロガス溶接法であるSEGARC法は、その高能率性や溶接金属性能の信頼性などが評価され、造船やタンクなどの厚板の立向溶接に活用されている。

近年、コンテナ船の超大型化(10,000個積み)に伴い、応力が集中する船体の部分(シャーストレッキやハッチコーミングサイドなど)に最大で80mmの極厚板が適用されるようになってきている⁸⁾。鋼板の極厚化に対し、単位時間あたりの溶着金属量を増やすため、当社ではSEGARC法の2電極装置を開発した。また、専用FCWとして、DW-S50GTF(鋼板表面側)、DW-S50GTR(鋼板裏側)の2種類のワイヤも開発した。2電極SEGARC法では、50kJ/mm程度の大入熱においても鋼板と同等以上の強度ならびに安定した衝撃性能などが得られる⁹⁾。この2電極装置の最大の特長は、従来使用している1電極装置に鋼板裏側の1極を追加するという簡便な改造で2電極化が可能になるという点であり、設備投資軽減にも配慮している(図11)。

船体の強度アップを目的とした厚板化が進む一方、船体の重量軽減の観点から鋼板の高強度化による薄板化も進展しつつある。従来、降伏強度390MPa級の鋼板が一

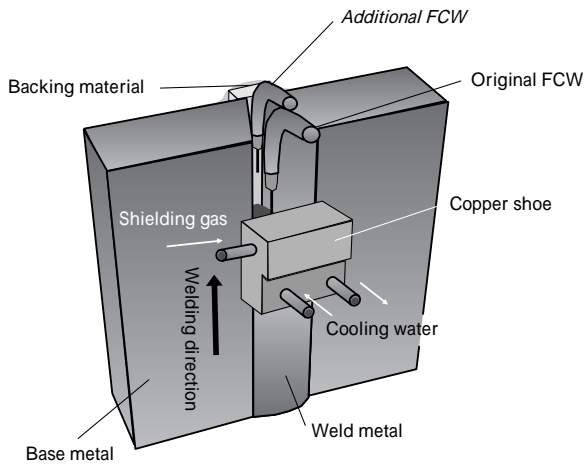


図11 2電極 SEGARC 法のご概念図

Fig.11 Schematic of Tandem SEGARC process with two FCWs

- Plate thickness : 60mm
- Groove design : 20 °V - 10mmG
- Welding position : Vertical upward
- Heat Input : 39.8kJ/mm
- Shielding gas : 100%CO₂

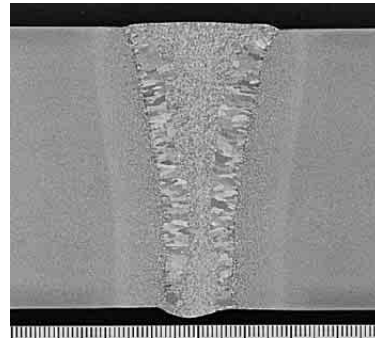


図12 DW-S460LG の断面マクロ組織

Fig.12 Macrostructure of joint welded of DW-S460LG

表 2 DW-S460LG による溶接継手性能の一例
Table 2 Typical mechanical properties with DW-S460LG

Welding material	Trade name	YP (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	Absorbed energy (J ; -20 °C)	Location of specimen
Electro-gas wire	DW-S460LG	501	648	21	135	<p>Thickness : 60mm</p>
Typical specification		460	570 ~ 720	17	53	

般的であったが、新たに同 460MPa 級の鋼板が開発され、実用化が開始されつつある⁸⁾。このような高強度鋼板の使用による船殻の設計変更に対しても、1 電極専用の SEGARC 法用 FCW 「DW-S460LG」の開発により、迅速に対応している¹⁰⁾。

DW-S460LG の溶接金属は、大入熱溶接においても鋼板と同等以上の引張強度を有し、かつ優れた衝撃性能と破壊靱性も備えている。さらに、従来の FCW と同様に優れた溶接作業性も維持しており、実用性に富んだ溶接ワイヤとなっている (図 12, 表 2)。

7. PWHT 可能な高靱性 FCW

従来のチタニヤ系 FCW では、溶接後熱処理 (以下、PWHT という) を行うと、溶接金属中の Nb, V などの不純物が炭化物を生成し硬化 (析出硬化) するため靱性が劣化する。この問題が、PWHT が施される分野へ FCW を適用する際の障害の一つとなっていた。溶接金属の靱性は、図13 に示すように、溶接のまま (以下、AW という) および PWHT 後いずれにおいても Nb, V 量が少ないほど優れていることが確認されている。AW で Nb, V 量が少ないほど靱性が優れているのは、溶接金属の再熱部に Nb や V の炭化物が析出することが主因である¹¹⁾。

これらの不純物は、FCW の溶接作業性を確保するために必要な酸化チタン (チタニヤ) に含まれるものであり、溶接作業性を維持したまま PWHT 対応の特性開発は不可能と考えられていた。

そこで当社では、このような熱履歴による脆化 (析出

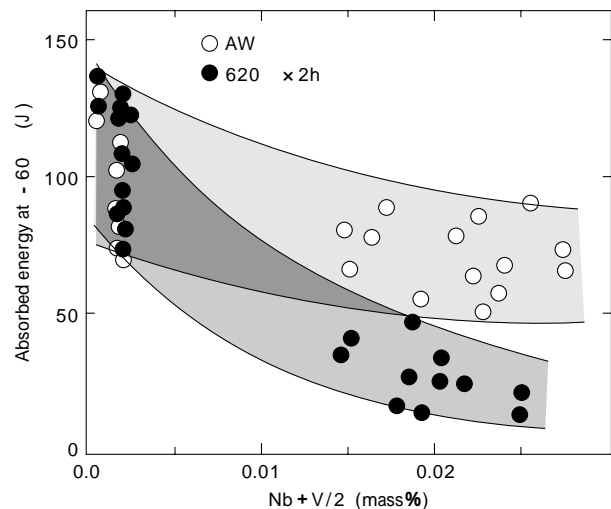


図13 溶接金属 Nb, V 量と靱性の関係

Fig.13 Influence of Nb, V content in deposited metal on notch toughness

硬化、焼戻し脆化) を制御するため、従来の結晶粒の微細化や合金成分最適化などの技術に加え、Nb, V 量を極少に制御した特殊原料を適用し、PWHT 対応の高靱性を達成した。それらの技術にさらに良好な溶接作業性を付加して DW-55LSR, DW-A55LSR などを開発・実用化し、海洋構造物への FCW の適用に成功した。図14 に DW-55LSR 溶接金属の衝撃試験結果を示すが、従来 FCW と比較して AW, PWHT とともに -60 程度までの低温靱性が極めて良好である。また、従来の FCW では不安定であった CTOD 値が高位安定化するため (表 3)、破壊靱性が重視される海洋構造物での適用が進んでいる。

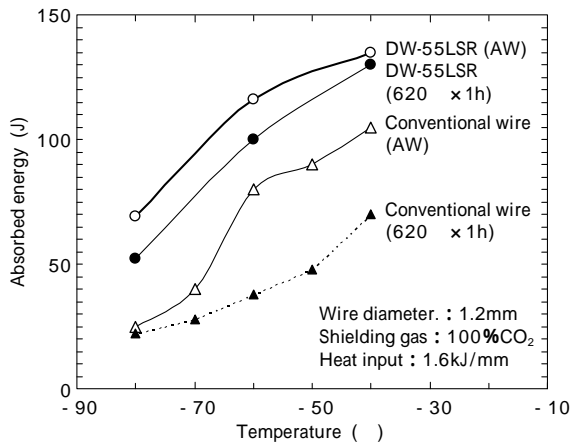


図14 DW-55LSR 溶着金属の衝撃試験結果

Fig.14 Notch toughness of deposited metal of DW-55LSR

表 3 DW-55LSR 溶着金属のCTOD 試験結果

Table 3 CTOD test results of weld metal with DW-55LSR

Welding position	PWHT	Plate thickness (mm)	Heat input (kJ/mm)	Test temp. (°C)	CTOD (mm)
Vertical upward (3G)	As welded	50	2.0	-35	0.78
					0.71
				-40	0.83
					0.51
	620 x 2h	50	2.0	-20	0.99
					1.01
				-30	0.99
					1.05

*) Testing method : WES1108 (W = B)

8. 破壊靱性に優れた FCW

海洋構造物の分野では、1990年代から YP420, YP460MPa 級鋼が適用され始めた。さらに近年では、プラットフォームやジャケットでの高強度化が進み、欧州では YP500MPa 級鋼の実用化がなされている。また、一部では YP550MPa 級鋼の適用も検討されており、溶接材料においても高強度・高靱性化への対応が必要になっている。さらに、構造物の安全性を高めるため弾塑性破壊力学が導入され、鋼板に脆性亀裂の伝播停止特性（アレスト特性）が、溶接継手に脆性破壊の発生防止特性が要求されるようになってきた。具体的には、海洋構造物を中心に破壊靱性値として CTOD 値の要求が付加されるようになった⁴⁾。一般に、海洋構造物の分野で要求される CTOD 値は 0 ~ 10 において 0.25mm 以上であるが、最近では -30 ~ -40 の厳しい要求も見られる。加えて、溶接施工能率や全姿勢での溶接作業性の観点から、FCW での開発が期待されている。

これらの要求に対応するため、DW ワイヤの特長である良好な溶接作業性を維持しつつ、Ti-B 複合添加によるマイクロ組織の微細化、Ni 添加によるマトリックスの強靱化に加え、介在物の形態制御などにより破壊靱性の向上を図った。

図15に YP500 ~ 600MPa 級の溶着金属における酸素量と Upper shelf energy (以下、 vE_{shelf}) との関係を示す。溶着金属中の酸素量の減少に伴い、 vE_{shelf} は増加傾向にあることがわかる。しかし、一般に、FCW の溶着金属中の酸

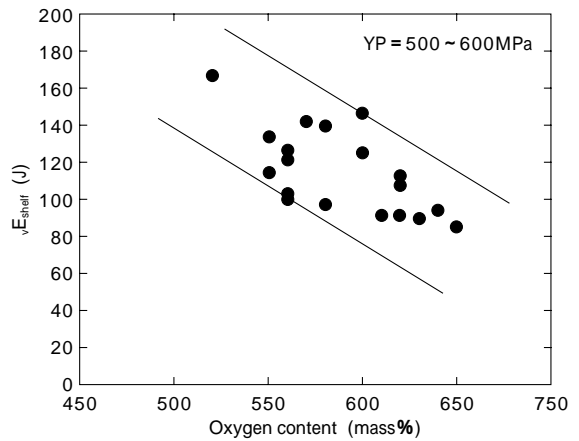


図15 溶着金属酸素量と vE_{shelf} の関係

Fig.15 Relationship between oxygen content and vE_{shelf}

表 4 低温用鋼用 FCW 及び適用可能温度 (°C)

Table 4 FCWs for low temperature service steel and their applicable range of service temperature (°C)

Welding consumable	AWS classification	YS level (MPa)	$vE_{Temp. 47J}$ (MPa)				CTOD _{Temp. 0.25mm}		CTOD _{Temp. 0.10mm}		Note
			-20	-40	-60	-80	0	-20	-40	-60	
DW-55L	A5.29 E81T1-K2C	400	■	■	■	■	■	■	■	CO ₂ shielding gas	
DW-55LSR	A5.29 E81T1-K2C	420	■	■	■	■	■	■			
DW-62L	A5.29 E91T1-Ni2C-J	500	■	■	■	■	■	■	Ar + 20%CO ₂ shielding gas		
DW-A81Ni1	A5.29 E81T1-Ni1M-J	420	■	■	■	■	■	■			
DW-A55L	A5.29 E81T1-K2M	460	■	■	■	■	■	■	(-25)		
DW-A55LSR	A5.29 E81T1-Ni1M	420	■	■	■	■	■	■			
DW-A62L	A5.29 E91T1-G	500	■	■	■	■	■	■			

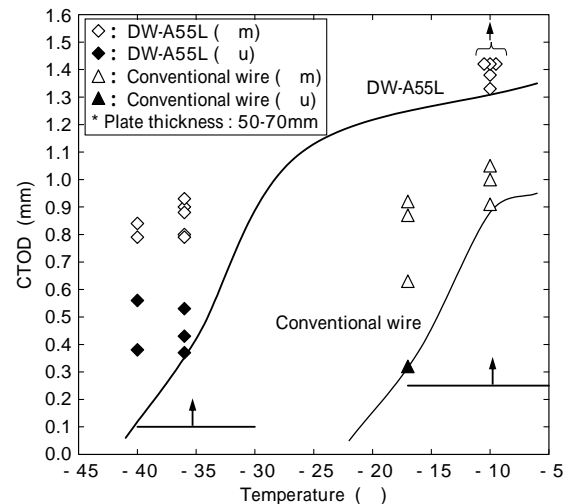


図16 DW-A55L 溶着金属の CTOD 試験結果

Fig.16 CTOD test results of weld metals of DW-A55L

素量は 600ppm 程度であり、全姿勢溶接での溶接作業性を確保した上で低酸素化することは困難である。そこで、溶着金属中の酸化物に着目し、その形態（大きさ、分散）を制御することによって靱性向上が可能であることを見出した¹²⁾。

これらの新たな技術を適用することにより、破面遷移温度 (FATT) を低温側に移行させ、低温での破壊靱性を向上させた FCW を開発した。そのラインナップを表 4 に示す。例えば、YP460 級鋼用の FCW である DW-A55L (1.5%Ni-Ti-B系) は、従来ワイヤに比較し大幅な破壊靱性の向上が可能となった (図16)。また、YP500MPa 級鋼用低温仕様 FCW の DW-62L (2.5%Ni-Ti-

B系)は、-40℃においても安定した破壊形態によってCTOD値0.10mm以上を満足しており、厳しい破壊靱性要求に対応が可能である。

また、高張力鋼の溶接では低温割れ感受性が高まるため、拡散性水素量を低減することが必要である。破壊靱性向上FCWでは拡散性水素量を従来よりも低いレベルに抑えており、良好な耐割れ性も有している。

以上のように、高能率で良好な溶接作業性を有し、かつ破壊靱性に優れたFCWを開発した。これにより、厳しいCTOD値が要求される海洋構造物の分野において、FCWの適用を他社に先駆けて実現した。また、その実用化を通して、当社FCWに対する信頼を着実に高めている。

むすび=当社製FCWは、実用化開始以来約30年にわたり、高品質・高性能のオンリーワン・ナンバーワン製品としてその地位を築いてきた。これは、市場ニーズを的確に把握し、常に新技術、新製品を提案してきたことによる。また、とくに船舶・海洋構造物では、大量に長期間使用した場合の当社FCWの品質安定性が高く評価されたことも一因である。すなわち、FCWの生産技術や工場の工程管理能力の高さも“オンリーワン・ナンバーワン製品”を支え続ける大きな要素である。

当社のFCW生産拠点は国内にとどまらず、韓国、オランダに加えて2009年には中国にも設置される。このような事業展開によってアジア・欧米を中心とした海外市場でも販売量を着実に拡大しており、そのフィールドを広げている。今後も、世界市場のニーズを的確にとらえ、他社に優る基礎技術力、製品開発力、生産技術力、生産管理能力などによってお客様に役立つ製品（オンリーワン・ナンバーワン）を提供し続けていく。

参 考 文 献

- 1) 日本溶接棒工業会調べ：2007年度 溶接材料出荷実績。
- 2) 黒川剛志：R&D 神戸製鋼技報，Vol.50, No.3(2000) pp.74-77.
- 3) T.Suga et al.：IIW Doc. -1456-96 (1996)
- 4) 末永和之：配管技術，45-7 (2003) pp.56-61.
- 5) 菅 哲男：溶接技術，Vol.46, No.4, (1998) pp.64-71.
- 6) 永見正行：技術がいで神戸製鋼所，Vol.46, No.436 (2006) pp.1-5.
- 7) 中野利彦ほか：溶接技術，Vol.54, No.10 (2006) pp.58-62.
- 8) 岡野重雄ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.58, No.1(2008) pp.2-7.
- 9) Y. Yokota et al.：IIW Doc. -1864-05, (2005)
- 10) 柿崎智紀：技術がいで神戸製鋼所，Vol.49, No.457 (2009) pp.1-5.
- 11) T. Suga et al：IIW Doc. X -1492-97 (1997)
- 12) 岡崎喜臣：溶接学会全国大会講演概要，81(2007) pp.246-247.