

(解説)

9%Ni鋼溶接用フラックス入りワイヤ

Flux Cored Welding Wire for 9%Ni Steel



鈴木正道*

Masamichi SUZUKI

For over 30 years, Kobe Steel has been manufacturing welding consumables uniquely designed for welding 9% nickel steel and has established a good reputation. Kobe Steel's approach is different from other companies abroad which use general-purpose alloy. This paper describes conventionally used materials as well as a new flux cored wire developed for high efficiency welding.

まえがき = 近年、液化天然ガス (LNG) は、他の化石燃料に比べて環境負荷が小さいエネルギー源として評価され、その消費量は世界的に増加しつつある。それに伴い、LNG 基地の建設や LNG 船の建造が活発化してきている。

LNG は、-162 の極低温で貯蔵される。そのため、地上式タンクの場合には、強度と低温靱性に優れる 9% Ni 鋼が用いられる。また、その溶接材料として、溶接ままで高靱性が得られる Ni 基合金が用いられている。海外溶材メーカーが汎用の Ni 基合金を推奨するのに対し、当社は 9%Ni 鋼専用の溶接材料を推奨し、30 年以上の実績の中でユーザより高い評価を受けてきた。

現在、LNG タンクで主流となっている溶接施工法は、被覆アーク溶接 (以下、SMAW という)、サブマージアーク溶接 (以下、SAW という)、TIG 溶接である。一方、フラックス入りワイヤ (以下、FCW という) によるマグ溶接 (以下、FCAW という) は SMAW よりも高能率であり、造船分野等で広く使われている。しかし、溶接割れや強度と低温靱性の問題から LNG タンクへの適用例は少ない。

本報では既存の溶接材料のほか、近年の高能率化の要

求に対応すべく開発した FCW について解説する。

1. 9%Ni 鋼用溶接施工法および溶接材料の変遷

1.1 施工法の変遷

地上式タンクの溶接では、下向、立向、横向それに上向のすべての溶接姿勢が要求される。最も重要な部位である円柱状タンクの側板には、立向と横向溶接が適用されている。以下、LNG タンクに用いられる 9%Ni 鋼の立向および横向姿勢における溶接施工法の変遷をまとめる。

図 1 に、立向と横向溶接姿勢における 9%Ni 鋼用溶接の施工法と溶接材料の変遷、表 1 に、溶接材料の成分の一例を示す。1960 年ごろ、立向および横向溶接は SMAW、すなわち手動の溶接が主流であった^{1),2)}。

1970 年代はじめ、溶接効率の向上を目的に自動溶接が検討された。しかし、当時の溶接材料は、耐割れ性に問題があり、国内では実用化にいたらなかった。1970 年代後半には横向溶接において SAW による自動溶接が実用化され、タンク施工の工期短縮に大きく寄与した。さらに、1980 年代には溶接部の品質の良さを生かせる自動 TIG 溶接方法の適用が検討され、立向姿勢で実用化され

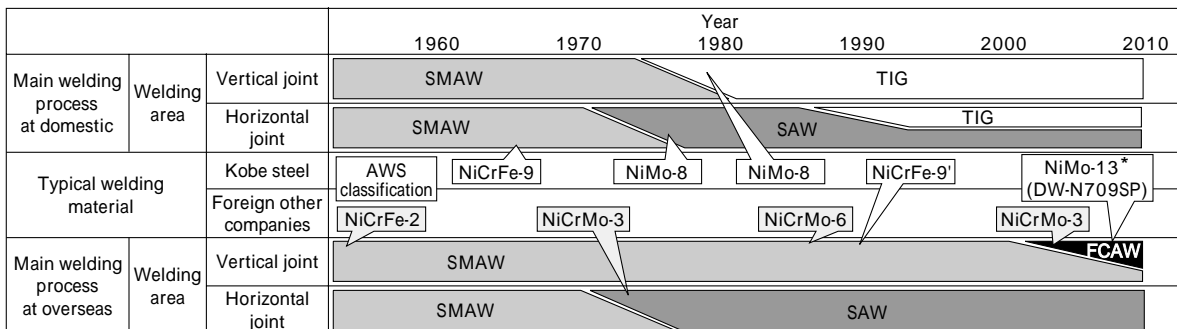


図 1 9%Ni 鋼用溶接の施工法と合金タイプの変遷
Fig. 1 Transition of welding process and alloy type for 9% Nickel steel

*Applying

*溶接カンパニー 技術開発部 (現 神鋼タセト株)

表 1 9%Ni 鋼用溶接材料の化学成分一例

Table 1 Typical chemical compositions of welding consumables for 9% Nickel steel

Welding process	Manufacturer	AWS Classification	Typical chemical composition of all weld metal (mass%)										
			C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe	Nb	W
SMAW	Foreign other companies	A5.11 NiCrFe-2	0.05	0.4	2.8	0.010	0.010	Bal.	15.0	1.5	10.0	2.3	-
	Foreign other companies	A5.11 NiCrMo-6	0.06	0.2	2.7	0.008	0.008	Bal.	13.2	6.0	5.6	1.3	1.3
	Kobe steel	A5.11 NiCrFe-9	0.09	0.3	2.3	0.004	0.002	Bal.	13.9	3.7	9.8	1.7	0.6
	Kobe steel	A5.11 NiCrFe-9'	0.09	0.2	2.2	0.003	0.002	Bal.	16.4	5.0	8.8	1.2	0.6
	Kobe steel	A5.11 NiMo-8	0.03	0.5	0.3	0.003	0.002	Bal.	1.9	18.6	6.8	-	2.9
SAW	Foreign other companies	A5.14 NiCrMo-3*	0.01	0.4	2.2	0.010	0.003	Bal.	21.0	9.0	2.9	3.3	-
	Kobe steel	A5.14 NiMo-8*	0.02	0.6	0.3	0.002	0.001	Bal.	1.8	18.6	8.3	-	2.9

* Classification of wire

た。1990年代には、横方向の自動TIG溶接法も実用化された。現在、本溶接方法は主要な施工法となっている。

海外において、SMAWとSAWは、人件費やインフラの観点から最近まで主要な施工法であった。しかし、2000年以降、能率重視の傾向の高まりによって立向溶接がSMAWに代わりFCAWで施工されるケースも見られるようになってきた。

1.2 溶接材料の変遷

図1および表1に示したように、9%Ni鋼用溶接材料の合金タイプは施工法とともに変遷してきた。1960年代に使用された被覆アーク溶接棒は、NiにCr、Nbを添加したAWS規格NiCrFe-2に代表されるインコネル合金（インコ社：International Nickel Company（現Special Metals Corporation）のNi基合金の商標）が主流であった。しかし、当時の材料は強度が低いうえに、溶接割れや気孔欠陥といった問題を抱えており、改良が求められていた^{3), 4)}。

国内では、1970年代のオイルショックを契機に、LNGおよびLNGタンクの需要が増大し、溶接材料の改良開発が意欲的に行われた。当時の被覆アーク棒は、直流専用の設計であり、溶接時に発生する磁場によってアークが偏向し、気孔欠陥が多く発生していた。そこで当社は、被覆アーク棒を直流から交流仕様に改良することにより、気孔欠陥を低減することに成功した⁵⁾。

また、1970年代には、横方向溶接においてSMAWに代わってSAWが適用されはじめた。そのきっかけとなったのが、Ni-Mo系材料(NiMo-8)が開発されたことである。この材料は、従来の溶接材料よりも耐高温割れ性が非常に優れている。さらに、フラックスの継続的な改良により、耐欠陥性や溶接作業性の向上が進められ、SAW施工への信頼性が高まった^{6), 7)}。

その後、1980年代には、高能率自動TIG溶接法が開発され、このNiMo-8の材料との組合せにおいて実用化された。現在もこのタイプの溶接材料が広く使用されている。一方、被覆アーク棒においてもNiMo-8の溶接材料が市販されているが、その他のタイプに比べて高価であり、その適用は、SAWおよびTIG溶接金属の補修溶接にとどまっている。

2. 溶接金属の性能におよぼす合金元素の影響

9%Ni鋼用溶接材料に必要な性能のうち、とくに重要なものとして、強度と靱性のバランス、および耐高温割れ性があげられる。以下、これらの特性におよぼす合金元素の影響についてまとめる。

2.1 強度と靱性

9%Ni鋼の溶接に用いられるNi基合金には様々な種類があるが、基本的にはNiにCr、MoあるいはNbを添加することにより強度と靱性を高めている。

図2に、SMAWによる溶接金属の強度と-196における吸収エネルギーの関係を示す。合金によって強度は様々であるが、強度の増加とともに靱性は低下する傾向にある。NiMo-8は強度と靱性のバランスが他の合金よりも高いレベルにあることがわかる。なお、強度は合金成分の微調整やスラグ成分によっても変動することがある。

国内のLNGタンクは、電気事業法やガス事業法を基に設計されており、溶接部には、660MPa以上の強度が

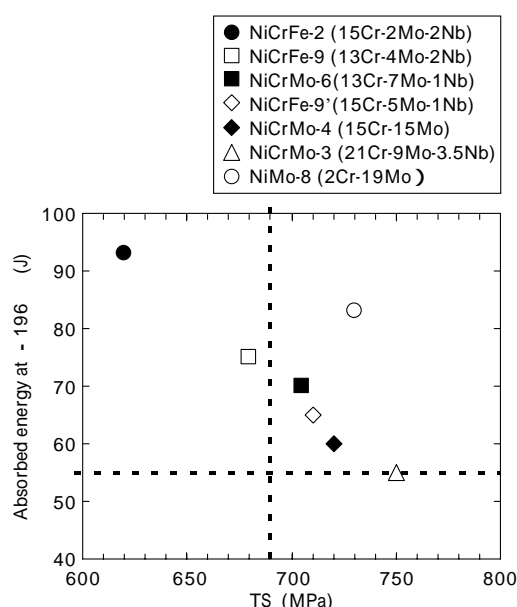


図2 各Ni基合金の強度と靱性の関係（施工法：SMAW）
Fig. 2 Relationship between strength and toughness of various Nickel based alloys (Process : SMAW)

求められる。一方、海外では母材と同じ 690MPa 以上が必要とされている。そのため、最近では 9%Ni 鋼用の溶接材料として 690MPa 以上の引張強さが必須性能となっている。図1に示した当社被覆アーク溶接棒は、NiCrFe-2 から NiCrFe-9, NiCrFe-9' へと変遷しており、順次、高強度側に移行してきたことがわかる。また、-196 の吸収エネルギーは国内で 34J 以上、海外で 45~55J 以上を求められることが一般的である。

2.2 耐高温割れ性

Ni 基溶接金属は、溶接時に凝固割れ、再熱割れが発生することがある。Ni 基溶接金属の高温割れは、溶接金属の化学成分と密接な関係があり、これまでもフィスコ割れ試験や T 形溶接割れ試験など種々の試験・評価が行われてきた^{8), 9)}。

近年、溶接金属の合金元素から凝固脆性温度領域 (Brittle Temperature Range, 以下 BTR という) を予測して耐高温割れ性を評価する方法が提案されている。BTR 予測式を式 (1) に示す。

$$\begin{aligned} \text{BTR (K)} = & 38.7 + 358.7 \times \text{C (mass \%)} + 29.3 \times \text{Si (mass \%)} \\ & - 0.3 \times \text{Mn (mass \%)} + 212.7 \times \text{P (mass \%)} + \\ & 330.8 \times \text{S (mass \%)} + 2.6 \times \text{Cr (mass \%)} + 1.0 \times \\ & \text{Mn (mass \%)} + 14.5 \times \text{Nb (mass \%)} + 2.9 \times \text{Fe} \\ & \text{(mass \%)} \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

この BTR 予測式は、溶接時の凝固偏析を考慮した凝固プロセスモデルによる固液二相領域の温度幅の計算結果と、その回帰から導出されている。この指数が高いほど溶接時に凝固割れしやすいことを示している¹⁰⁾。

BTR 予測式によると、C, P, S が他の成分に比べ大きな影響を持つ。そのため、当社溶接材料のうち SAW と自動 TIG 用の溶接材料において、C は 0.03 (mass%) 以下と必要最小量に抑制し、P, S は極力低減するようにしている。

次いで悪影響を及ぼす成分は、Si と Nb である。Si および Nb は、Ni-Si または Ni-Nb の低融点化合物を生成し、液化割れの原因となることが知られている。したがって、強度・靱性とのバランスを考慮しながら、十分な耐高温割れ性を確保できるように合金成分設計する必要がある。

被覆アーク溶接棒の主流である NiCrMo-6, NiCrFe-9' は、NiCrFe-2 に比べて C, Mo が高く、Nb が低く設計されている。本合金は、C, Mo の増量によって強度を増加させ、C によって低下した耐高温割れ性を Nb の低減によって改善している。また、Mo は前述の Ni-Nb 化合物と反応して比較的高融点の Ni-Nb-Mo 化合物を形成するため、耐割れ性を向上させる効果を持つ。

SAW は、SMAW に比べて適用される電流と速度がともに大きく、溶接割れが発生しやすい。さらに母材の溶込みが大きいので、合金成分が希釈されて強度が下がりやすい。

海外メーカーは、汎用の合金である NiCrMo-3 (Ni-21% Cr-9% Mo-3.5% Nb) を用いている。この材料は、強度こそ高いものの、式 (1) から予測される BTR 値が非常に大きく、溶接時に凝固割れが発生しやすい。そのため、

適用溶接条件範囲は狭く、融合不良などの欠陥も生じやすい。

当社は、9%Ni 鋼用溶接材料を SAW 専用に設計し、耐高温割れ性と強度・靱性バランスを兼ね備えた合金として、NiMo-8 (Ni-2% Cr-19% Mo) を開発した。この合金は、広い溶接条件範囲で融合不良などの欠陥を減少させることができる。NiMo-8 は、NiCrMo-3 タイプに比べ高価なものの、手直しなどの減少によりトータルコストが抑制されたことおよび、溶接部の信頼性が高まったことにより、国内において主流となっている。

3. フラックス入りワイヤの開発

一般に、FCAW は SMAW よりも高能率な施工法として知られており、造船や建築、橋梁など広い分野で使用されている。LNG タンクの分野においても FCAW は、SMAW の能率向上の観点から高いニーズがある。しかし、FCAW は、ほかの施工法に比べて溶接金属の酸素量が高く、耐高温割れ性や靱性が低くなりやすいため、溶接部に対する信頼性が十分ではない。そのため、国内では FCAW の適用があまり進んでおらず、LNG タンクの特定部位に使用実績があるのみであった。そこで、当社は、高能率化のニーズにこたえるために、良好な性能と全姿勢での作業性を兼ね備えた FCW を開発した。

3.1 フラックス入りワイヤの開発目標

本 FCW の開発目標性能を以下のように設定した。
溶接速度 40cm/min 以下で割れが発生しないこと。
立向での突合せ溶接や上向でのすみ肉溶接などの全姿勢溶接が可能であること。
溶着金属の引張強さ: 690MPa 以上、-196 における吸収エネルギー: 75J 以上を満足すること。

3.2 基本合金設計

全姿勢溶接で良好な溶接作業性を得るには、チタニヤ系のスラグ成分が必須である。しかし、このスラグ成分では溶接金属の酸素量が高くなり、耐高温割れ性、靱性が不十分になることが予想された。そこで、チタニヤ系のスラグでも目標性能を満足できる合金成分を見出すために、ワイヤの試作およびシミュレーション技術の活用により溶接金属の性能を評価した。

FCW の試作において、耐高温割れ性を劣化させる Nb を含まず、また低炭素量を前提とした。そして、表 2 に示すように、主に Cr を 2~15%、Mo を 5~20% の範囲で変化させた 15 種類の FCW を試作した。各ワイヤで全溶着金属を作製し、引張強さ、-196 における吸収エネルギーを測定した。また、凝固割れ感受性の評価としてトランスバレストレイン試験を行い、BTR を測定した。

引張および衝撃試験は、JIS Z3111 に従った。トランスバレストレイン試験は、FCW で作製した肉盛溶接金属の表層より 5×50×100 mm の試験片を採取し、図 3 に示す要領で TIG 溶接をしながら試験片にひずみを付与した。このときの最大割れ長さとして試験片の温度履歴から BTR を求めた。

引張強さ、-196 における吸収エネルギー、BTR について、得られた試験結果をページアン RBF ネットワー

表2 試作 FCW の全溶着金属化学成分範囲 (mass%)
Table 2 Chemical composition range of Trial FCW all weld metal (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe	W
0.01 ~0.03	0.04 ~0.35	0.5 ~0.8	0.003 ~0.008	0.001 ~0.005	Bal.	1.2 ~14.3	4.8 ~20.1	3.1 ~7.2	2.2 ~2.5

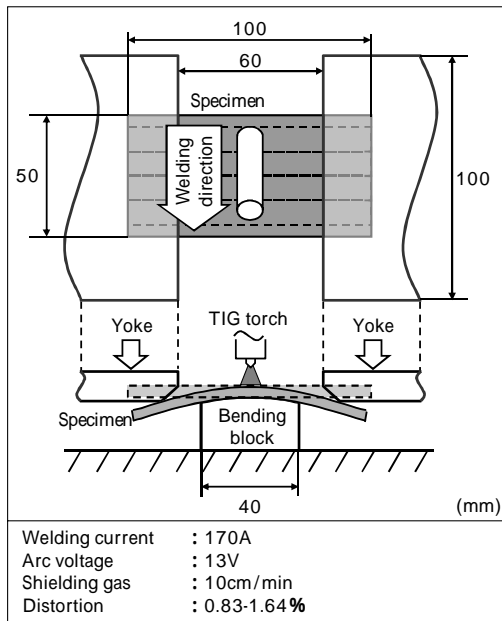


図3 トランスバレストレイン試験条件
Fig. 3 Transversal V restraint test condition

クの手法を用いて定式化したカウンターマップを図4に示す。

引張強さは、高Cr、高Mo側で高くなる傾向が見られた。-196における吸収エネルギーは低Cr、高Mo側、耐凝固割れ性は低Cr、低Mo側でそれぞれ向上する傾向が見られた。これらの結果から、低Cr、高Mo (Ni-2%Cr-19%Mo)の組成領域であれば強度と靱性の要求性能を十分に満足し、さらにBTRの点でも実用性は十分であることが判明した¹¹⁾。以上より、SAWで適用されているNiMo-8 (Ni-2%Cr-19%Mo)は、9%Ni鋼の溶接材料として最適であることが示された。

ところで、FCWの実用化には、Ni基合金外皮の量産可否が大きなポイントとなる。すなわち、外皮の溶製・圧延が容易であり、価格の面でも市場で受け入れられることが重要である。そこで、前述のNi-2%Cr-18%Mo系溶着金属を実用化するため、Ni基合金外皮の製造性を検討したが、最終的には安定した製造は困難との結論に至っ

た。そのため、外皮の量産が可能で強度、靱性、耐高温割れ性をバランスよく確保できる溶接金属の成分系としてNi-7%Cr-17%Moを選定した。

3.3 スラッグ成分の調整

溶接材料には、強度・靱性バランス、耐高温割れ性のほか、耐気孔性や平滑なビード形状などが要求される。Ni-7%Cr-17%Moの合金成分を決定した後、これらの特性を得るためにスラッグ成分の調整を行った。本FCWは、全姿勢溶接性、なかでも立向姿勢の作業性を良くするため、スラッグを高融点のチタニヤ系としている。そのため、立向溶接時に溶融金属をスラッグが支えることで、ビード形状を平滑に保つことができる。しかし、高融点のスラッグであるために、下向溶接時にはガス抜けが悪くなり、ビード表面にピットと呼ばれる気孔欠陥が発生しやすくなる。この課題を解決するために、チタニヤ以外の酸化物やフッ化物などの添加量を調整した。

3.4 DW-N709SPの特徴および各種試験結果

上記の検討結果に基づき開発した“DW-N709SP”の特徴および各種試験結果を以下に示す。

表3に全溶着金属の化学成分を示す。Ni-7%Cr-17%Moの基本成分であり、耐高温割れ性の観点からNbを含有しておらずC、Si、P、Sを低く抑制している。

表4に全溶着金属の機械試験結果を示す。引張強さは718MPa、-196における吸収エネルギーは89Jが得られており、それぞれ目標性能を十分満足している。

耐高温割れ性を評価するためにフィスコ割れ試験を行った。図5にフィスコ割れ試験条件を示す。開先形状はLNGタンクの溶接で高温割れが最も発生しやすい突合継手の初層を模擬したものであり、耐高温割れ性に大きな影響をおよぼす溶接電流と溶接速度を変化させて溶接を行なった。割れの有無は、溶接金属の放射線透過試験とビード表面、表面から1mm研削した面、および2mm研削した面における浸透探傷試験にて評価した。なお、溶接のスタート部とクレータ部に発生した割れは判定の対象外とした。

図6に各条件における割れ発生の有無を示す。高電

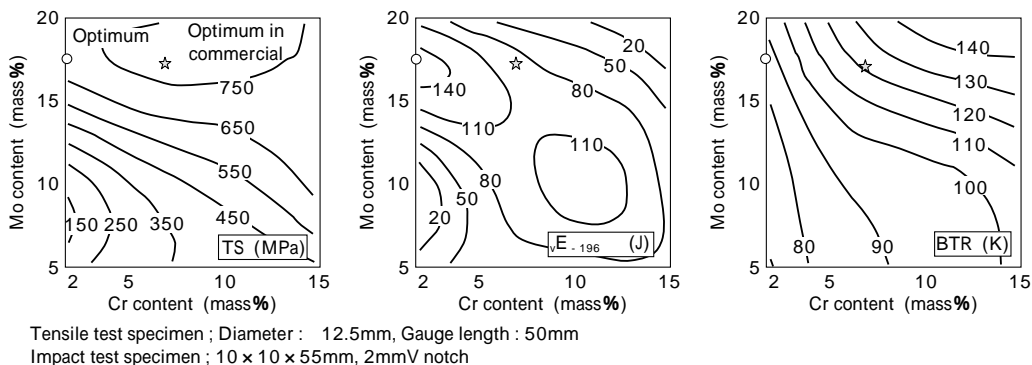


図4 化学成分 (Cr, Mo) と強度、靱性および BTR の関係
Fig. 4 Effect of chemical content (Cr, Mo) on strength, toughness and BTR

表3 DW-N709SP の全溶着金属化学成分の一例 (mass%)
Table 3 Typical chemical composition of DW-N709SP (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe	Nb	W
0.02	0.2	2.7	0.010	0.003	Bal.	7.0	17.6	7.7	<0.01	2.4

表4 DW-N709SP の全溶着金属の機械性能一例
Table 4 Typical mechanical properties of DW-N709SP

0.2% Proof strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Absorbed energy at -196 (J)
459	718	46	46	89

Tensile test specimen ; Diameter : 12.7mm, Gauge length : 50.8 mm
Impact test specimen ; 10 × 10 × 55 mm, 2mmV notch

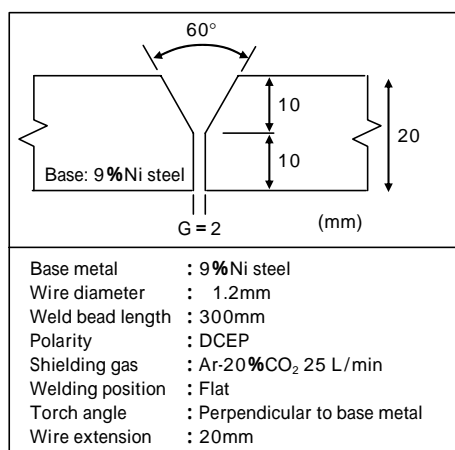


図5 フィスコ割れ試験条件
Fig. 5 Conditions of FISCO test

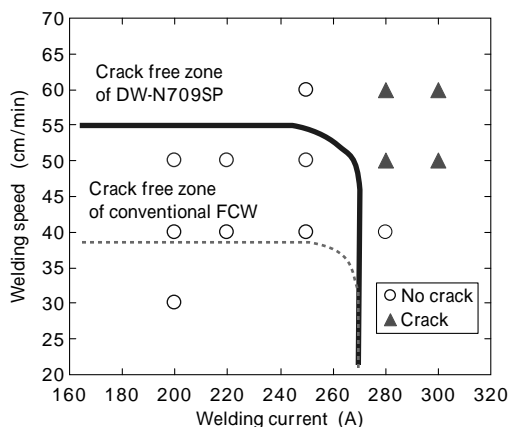


図6 フィスコ割れ試験結果
Fig. 6 Results of FISCO test

流, 高速度の条件で割れが発生することが確認されたが, 250A 以下の電流であれば 50cm/min の速度でも割れは発生していない。また, 従来の FCW に比べて適用できる溶接速度の範囲は格段に広い。DW-N709SP のワイヤ径は 1.2mm であり, 半自動での初層溶接に 250A-50cm/min を超える条件を適用することは考え難い。したがって, DW-N709SP は実工事への適用に十分な耐高温割れ性能を有しているといえる。

母材に 9%Ni 鋼を用いた継手試験結果の一例を表 5 に示す。厚さ 28mm の鋼板を用い, タンク側板の立継手を想定した条件で溶接を実施した。断面マクロから十分な溶込みが得られ, 融合不良などの欠陥がないことが確認できる。また放射線透過試験の結果は, JIS Z3106 に準じた判定で 1 種 1 類であった。継手の引張試験結果は母材

表5 継手溶接試験結果の一例
Table 5 Results of typical weld joint test

Cross-sectional macro structure	Tensile strength of weld joint (MPa)	Absorbed energy at -196 (J)	Longitudinal bend
	738, 738 Fractured position: Weld metal	85, 91, 89 (Avg.88)	Acceptable

Base metal : 9% Nickel steel, Thickness : 28mm, 0.2%PS : 680MPa, TS : 720MPa
Wire : DW-N709SP 1.2mm, Welding position : Vertical up
Welding condition : 170A-26 ~ 27V-4.2 ~ 7.6cm/min

の耐力が高いため, 先に降伏する溶接金属での破断であるが, 十分に高い強度が得られている。シャルピー衝撃試験結果についても良好な値が得られることを確認した。

むすび= 9%Ni 鋼用の溶接材料の変遷を, その合金の特徴に基づいてレビューした。C と Nb を添加することにより強度を高めた Ni-Cr(-Mo) は, 材料コスト面で優れるが溶接割れ感受性が高いため, 割れに対して条件の緩い SMAW で適用されている。

海外溶材メーカーは, Nb 含有の Ni 基合金を SAW にも適用するが, 耐割れ性の観点から, 当社は Ni-Mo 系の材料を推奨している。Ni-Mo 系溶接材料は, コストこそ高いものの, 手直しなどを考えたトータルコストでは優位であるとの市場評価を得ている。

また, 新たに開発した FCW (DW-N709SP) は, Ni-Mo 系の合金設計としており, 全姿勢溶接を可能にすると同時に, 強度・靱性バランスと耐高温割れ性にも優れている。

当社の溶接材料が, LNG タンクの溶接施工に対して高効率化を可能とし, LNG タンクの信頼性を高めるものとして期待する。

参考文献

- 1) 片山典彦: 第 180 回化学機械研究委員会資料.
- 2) 土田栄二: 溶接技術 (1993) 11 月号, pp.114-120.
- 3) 山崎康久ほか: 石川島播磨技報, 第 5 巻, 第 23 号 (1965) pp.26-35.
- 4) 田知本一雄ほか: 石川島播磨技報, 第 6 巻, 第 31 号 (1966) pp.389-396.
- 5) 三浦和三: 溶接技術 (1973) 10 月号, pp.47-53.
- 6) 第一実験部ほか: 石川島播磨技報, 第 16 巻, 第 3 号 (1976) pp.253-262.
- 7) 山崎康久ほか: 溶接技術 (1978) 12 月号, pp.77-83.
- 8) 日本鉄鋼協会編: 鉄鋼便覧, (1979) pp.559-563, 丸善.
- 9) 溶接学会編: 「溶接工学の基礎」, (1983) p.232, 丸善.
- 10) 鈴木正道ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.54, No.2 (2004) pp.43-46.
- 11) 鈴木正道ほか: 溶接学会全国大会講演概要集, 第 78 集 (2006) pp.242-243.