

連携記事

9% Ni鋼 LNG タンク用溶接材料

Welding Consumables for LNG Storage Tank Made of 9% Ni Steel

福田和博 (株) 神戸製鋼所 溶接事業部門
技術センター 溶接開発部
主任研究員
Kazuhiro Fukuda

1 はじめに

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るようになり、その消費量は世界的に増加しつつある。また、消費量の増大に伴い LNG 基地や LNG 運搬船の建造が活発になっている¹⁾。天然ガスの主成分はメタンであり、液化すると体積は気体の 1/600 となることから貯槽や運搬には好都合である。しかし、その沸点は -162℃ と極めて低温であることから LNG タンクには極低温でも十分な靱性を有し、安全に貯槽できる材料が必要となる。このような背景から、LNG タンクには強度と靱性に優れた 9% Ni 鋼が主に用いられている。本報では地上式 9% Ni 鋼 LNG タンク用の溶接材料にスポットを当て解説する。

2 9% Ni 鋼 LNG タンクの溶接

溶接材料に求められる特性としては、① 9% Ni 鋼母材と同等の機械的性質を有すること、② 極低温でも脆性破壊が起こらないこと、③ 溶接性が良く溶接欠陥が生じにくいことなどが挙げられる。また、大型構造物である LNG タンクの溶接施工はその大半が現地で行われることから、後熱処理の要らない溶接材料が必要となる。9% Ni 鋼と共金成分の溶接材料は、溶接のままの状態では極低温での靱性を確保できない。そのため、溶接材料には Ni 基合金が用いられている²⁾。

図1および表1に 9% Ni 鋼 LNG タンクの溶接施工法一例を示す。LNG タンクの溶接では下向、立向上進 (以下、立向)、横向の他、上向溶接姿勢が要求される。安全性の観点から最も重要な部位となるタンク側板は、立向と横向姿勢で溶接が行われる。溶着速度が大きいサブマージアーク溶接 (以下 SAW) は溶接線の長い側板横向継手に最適な溶接法であり、LNG タンクの建設当初から採用されており多数の実績があ

る。ガスタングステンアーク溶接 (以下 GTAW) は高品質な溶接金属が得られるものの低能率であるため、当初は LNG タンクのような大型構造物には不向きと考えられていた。しかし 1980 年代に神戸製鋼により MC-TIL (磁気制御付き自動ティグ溶接装置) 法が開発され、GTAW が LNG タンクの施工法として確立された。その後、アーク倣い機能などが搭載された TIL-AUTO シリーズが開発され、国内の LNG タンク建造における側板立向継手の主要な溶接法として定着している³⁾。海外では、地域によって高品位な純 Ar ガスの入手が困難であ

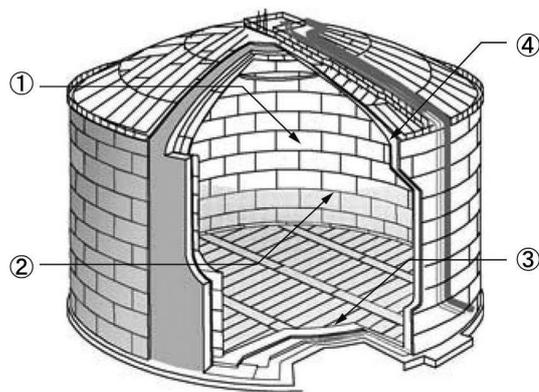


図1 国内 9% Ni 鋼 LNG タンクの溶接施工法一例 (表1 参照)

表1 国内 9% Ni 鋼 LNG タンクの溶接施工法一例

継手 (図1参照)	①	②	③	④
タンク部位	側板	側板	底板	屋根骨
溶接姿勢	立向	横向	下向 重ねすみ肉	水平すみ肉
施工法 (国内)	SMAW GTAW (自動)	SAW	SMAW	SMAW SAW FCAW*1
施工法 (海外)	SMAW FCAW	SAW	SMAW FCAW	_*2

*1: 限定的に FCAW の適用実績がある

*2: 海外 LNG タンクでは屋根部分に炭素鋼 + 天井にサスペンドデッキ (アルミ製) を適用

ることや、装置のメンテナンスが難しいことなどの理由により自動GTAW溶接施工は普及せず、側板立向の溶接には被覆アーク溶接棒（以下SMAW）が主に適用されている。また近年では、機械的性質および耐高温割れ性に優れたフラックス入りワイヤ（以下FCW）が開発され、適用拡大が進んでいる。

2.1 9% Ni鋼用Ni基合金溶接材料の化学成分

溶着金属化学成分の特徴をAWS規格を例にとって説明する。表2に溶着金属化学成分の規格範囲を示す。これらの合金成分は、各種溶接方法や使用部位に適した機械的性質、溶接性を確保するために長年研究開発が進められ、9% Ni鋼母材同様に多くの専門家によって十分な安全性の検証を経た上で規格化・実用化されている。

9% Ni鋼溶接用のNi基合金には様々な種類があるが、基本的にはNiを60%以上含有し、Cr、MoあるいはNbなどを添加することで強度と極低温における靱性を高めていることを特徴としている。SMAWはNi-Cr-Nb系のインコネル合金系（インコネルは、ハンティントン アロイズ カナダリミテッドの登録商標）が主であり、ENiCrFe-9タイプやこれに近い成分系のENiCrMo-6がある。SAWにおいても、9% Ni鋼LNGタンクの建設が開始された1960年代はSMAWと同じインコネル合金が採用されていたが、当時の溶接材料はSAWのように高電流かつ高速度の溶接条件で使用するには耐高温割れ性の点で不十分であった。加えて、これらの

溶接材料は低強度や気孔欠陥等の問題を抱えていたため、さらなる改良が求められていた。わが国では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盛んに行われた。そのなかで、1980年代初めにインコネル合金に代わってNi-Moを主体とするハステロイ合金（ハステロイは、ヘインズ インターナショナル インコーポレーテッドの登録商標）系溶接材料ERNiMo-8などが開発された。これにより、耐高温割れ性が大幅に改善され、SAW施工の実用化に大きく貢献した。ERNiMo-8は9% Ni鋼の溶接に特化した成分系となっているが、耐食用途などでも広く使用されるハステロイ合金のAlloy C276系（ENiCrMo-4）合金成分も9% Ni鋼溶接用に使用されている。

FCWによるフラックスコアードアーク溶接（以下FCAW）ではインコネル合金のAlloy 625系（ENiCrMo-3）が使用されている。Alloy 625系は耐食用途や高温用途などにも適している。神戸製鋼では、機械的性質や耐高温割れ性を重視した新たなハステロイ合金成分系ENiMo-13を開発し、北米、オーストラリア、韓国、インドネシア、マレーシアなどの海外LNG案件で実用化が進んでいる⁴⁾。

2.2 9% Ni鋼用Ni基合金溶接材料の機械的性質

表3に9% Ni鋼用Ni基合金溶接材料の機械的性質一例を示す。国内の9% Ni鋼LNGタンクはガス事業法や電気事

表2 9% Ni鋼用Ni基合金溶接材料の溶着金属化学成分規格の一例*1 (mass%)

区分	SMAW		SAW, TIG用ワイヤ		FCW	
AWS 規格	A5.11		A5.14		A5.34	
化学成分を表す記号	ENiCrFe-9	ENiCrMo-6	ERNiMo-8	ENiCrMo-4	ENiMo-13	ENiCrMo-3
C	≤0.15	≤0.10	≤0.10	≤0.02	≤0.10	≤0.10
Si	≤0.75	≤1.0	≤0.50	≤0.08	≤0.75	≤0.50
Mn	1.0~4.5	2.0~4.0	≤1.0	≤1.0	2.0~3.0	≤0.50
P	≤0.02	≤0.03	≤0.015	≤0.04	≤0.020	≤0.02
S	≤0.015	≤0.02	≤0.015	≤0.03	≤0.015	≤0.015
Ni	≥55.0	≥55.0	≥60.0	残	≥58.0	≥58.0
Co	-	-	-	≤2.5	-	-
Ti	-	-	-	-	≤0.75	≤0.4
Cr	12.0~17.0	12.0~17.0	0.5~3.5	14.5~16.5	4.0~8.0	20.0~23.0
Mo	2.5~5.5	5.0~9.0	18.0~21.0	15.0~17.0	16.0~19.0	8.0~10.0
Fe	≤12.0	≤10.0	≤10.0	4.0~7.0	≤10.0	≤5.0
V	-	-	-	≤0.35	-	-
W	≤1.5	1.0~2.0	2.0~4.0	3.0~4.5	2.0~4.0	-
Nb+Ta	0.5~3.0	0.5~2.0	-	-	-	3.15~4.15

*1: その他 Cu≤0.50mass%, 他元素合計≤0.50mass%

業法に基づき設計されており、溶接材料に対する要求性能はJIS規格が引用される。溶接金属の機械的性質要求値はSMAW、SAW、GTAWともに概ね共通しており0.2%耐力はMin.360MPa、引張強さはMin.660MPa、-196℃におけるシャルピー吸収エネルギーはAvg.Min.34Jとなっている。国内では9% Ni鋼LNGタンクへのFCWの適用が進んでいなかったため、9%ニッケル鋼用フラックス入りワイヤのJIS規格は存在しないが、2014年にISO 12153をベースとしたJIS Z 3335：ニッケル及びニッケル合金アーク溶接フラックス入りワイヤが制定された。JIS Z 3335は9% Ni鋼用Ni基合金FCWのみならず耐食用途や高温用途で使用されるNi基合金FCWも対象としているため、溶着金属の機械的性質が規定されている点が前述の9% Ni鋼用溶接材料の規格と異なっている。

海外の9% Ni鋼LNGタンクはAPI 620などに基づき設計

されており、溶着金属の機械的性質要求は様々である。ただし、SMAW、SAW、FCWに共通している場合が多く、溶着金属化学成分についてはAWS規格またはISO規格が引用される場合が多い。溶着金属の機械的性質要求一例としては0.2%耐力Min.400MPa、引張強さMin.690MPa、-196℃におけるシャルピー吸収エネルギーはAvg.Min.50または55Jとなっている⁵⁾。

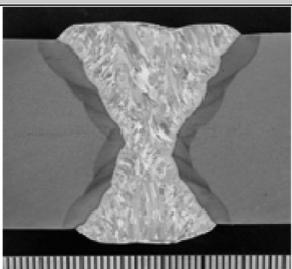
表4に神戸製鋼の9% Ni鋼用Ni基合金溶接材料の継手性能一例を示す。継手引張試験では母材の耐力が高いため先に降伏する溶接金属部で破断したが、十分に高い強度が得られている。脆性破壊の発生に対する抵抗力であるCTOD値に対する要求値は様々で、例えば20万m³クラス9% Ni鋼LNGタンクの側板最下段立向継手における必要CTOD値はおおよそMin.0.1mmであり⁶⁾、試験結果のCTOD値は優れた脆性破壊発生抵抗を有していることが分かる。

表3 9% Ni鋼用Ni基合金溶接材料の溶着金属機械的性質一例

区分	銘柄 ^{*1}	AWS 規格	室温引張強さ			-196℃における シャルピー 吸収エネルギー (J)
			0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%,G.L=4D)	
SMAW	PREMIARC™ NI-C70S	A5.11 ENICrFe-9	450	703	43	63
SAW (Flux/Wire)	PREMIARC™ PF-N4/ PREMIARC™ US-709S	A5.14 ERNiMo-8 (ワイヤ)	434	712	53	88
GTAW	PREMIARC™ TG-S709S	A5.14 ERNiMo-8 (ワイヤ)	467	731	51	200
FCAW	PREMIARC™ DW-N709SP	A5.34 ENiMo13Tx-y	457	711	47	88

*1: PREMIARC(PREMIARC™)(プレミアーク)は神戸製鋼の合金量の多い鋼やステンレス鋼、非鉄金属用溶接材料の品名に冠せられる商標である。商標名の由来：PREMIUM (高付加価値なもの) と ARC (アーク) を繋いだ造語。

表4 DW-N709SP立向継手試験結果

断面マクロ 写真	継手引張強さ (MPa)	-196℃における シャルピー 吸収エネルギー (J)	-196℃における CTOD 値 (mm)
	738, 738 破断位置: 溶接金属	85, 91, 89 (Avg.88) ノッチ位置: 溶接金属中央 (板厚中央から試験片採取)	0.39, 0.39, 0.38 (Avg. 0.38) ノッチ位置: 溶接金属中央

- ・母材：9%Ni鋼，板厚 28mm
- ・ワイヤ径：1.2mm
- ・溶接姿勢：立向
- ・シールドガス組成：80%Ar-20%CO₂ (25 ℓ / min.)
- ・溶接条件：170A(DCEP)-26~27V-4.2~7.6cm/min.

2.3 9% Ni鋼用Ni基合金溶接材料の施工上の注意点

9% Ni鋼用Ni基合金溶接材料の施工上の主な注意点と対策を表5に示す。

(1) 高温割れ

耐高温割れ性に優れるハステロイ合金系溶接材料においても、開先の初層や板厚が大きく拘束度の強い箇所での溶接では高温割れへの注意が必要であり、狭い開先角度や高電流・高速度の溶接は避けるべきである。なお、クレータ部はグラインダ処理により完全に除去する必要がある。

(2) ブローホール

炭素鋼と同様に開先内のスケール、油脂、防錆剤等がブローホール発生源となるため、溶接前に脱脂やグラインダによってこれらを十分に除去する必要がある。また溶接材料の保管、再乾燥方法は溶材メーカーが推奨する条件に従って行うのが良い。なおSMAWについては、スタート部にブローホールが発生しやすいため、捨て金法やバックステップ法の適用が推奨されている。

(3) 融合不良

一般に、Ni基合金溶融金属の湯流れ性は悪く融合不良に影響を及ぼす因子として知られている。湯流れ性は母材と溶融金属の融点の差などの物性に関係しており、特に9% Ni鋼とNi基合金は湯流れ性が悪い組み合わせとなる⁷⁾、湯流れ性には溶接入熱も影響し、湯流れ性を改善するために溶接電流(入熱)を高くして溶接する場合がある。母材および溶接金属が炭素鋼の場合は基本的に共金溶接であるため、母材と溶融金属の融点の差が小さく両者の物性も類似している。そのため、上記方法で湯流れ性を改善することが比較的容易である。しかし、9% Ni鋼母材とNi基合金溶接材料の場合、Ni基

合金は母材に比べ融点が100℃程度低く、オーバーラップや溶融プールの先行による融合不良を誘発する危険性があるため、適正な溶着量を維持するように溶接条件の調整が必要である。また、Ni基合金は電気比抵抗が炭素鋼に比べ高いことから、溶接電流を必要以上に増加させると溶着量が過大となり、立向溶接では溶融金属の溶け落ちが発生しやすくなる。

(4) 磁気吹き

9% Ni鋼の自動溶接で主に問題となるのが磁気吹きによるアーク偏向である。図2に磁気吹きの模式図を示す。溶接を行うと溶接電流により磁界が発生し、磁力線は強磁性体の母材側を通りやすく母材側に引き寄せられることから、母材終端部の磁力線分布が密になる。導体にはたらく電磁力は磁力線分布間隔が狭い側から広い側に向かって生じることから、継手終端に対して逆方向に向かってアークが偏向する⁸⁾。この偏向は磁気を帯びた母材で顕著になるため、磁気を帯びやすい9% Ni鋼では磁気吹きが問題となることがある。SMAWにおいては磁気吹き対策としてAC極性の採用を溶材メーカー

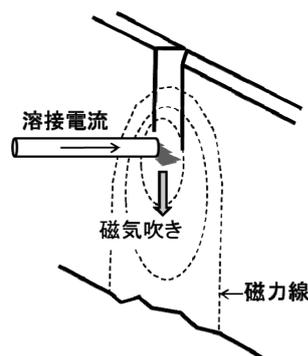


図2 磁気吹きの模式図(立向上進溶接)

表5 9% Ni鋼用Ni基合金溶接材料の施工上の主な注意点と対策

問題	内容	溶接時の対策
高温割れ	溶接金属は完全オーステナイト組織であり、高温割れが発生しやすい。	低電流、低速度施工。適切な開先形状の選定。クレータ部を除去する。パス間温度を150℃以下とする。
ブローホール	水分、油脂が原因となる。SMAWではスタート時のガスシールドが不安定な個所で発生しやすい。	溶接材料の適切な管理、開先面の水分、油脂の除去。SMAWでは捨て金法などを適用する。
融合不良	Ni基合金は湯流れが悪く、融合不良が発生しやすい。	適切な開先形状の選定(開先角度60°以上が望ましい)。母材(ルート部)を十分に溶かす運棒法の適用。
磁気吹き	9%Ni鋼は磁化しやすい。	マグネットを近づけない等母材の磁化を極力抑える。タブ板の使用。アース位置の変更。
強度低下	異材溶接であり、母材希釈が大きい場合には、溶接金属の強度が低下する。	特にSAWにおいて過大な電流での施工を避ける。

では推奨している。FCAWにおいては基本的にDCEP極性を使用するため、磁気吹きの影響を受けやすい。立向溶接中に磁気吹きが発生するとアークの偏向やアークの乱れが生じ、ビードが垂れることがある。対策としては溶接電流を極力下げてアーク長を短くする、アースの位置を変更し磁場の方向を変える、磁石などによりアーク偏向を矯正する方法があるが、根本的な解決が難しい場合もある。今後、溶接自動化の推進に向け、FCAWにおける磁気吹き対策技術の開発に期待が寄せられている。

(5) 強度低下

9% Ni鋼母材とNi基合金溶接材料の溶接は、それぞれの化学成分が大きく異なる異材溶接であるため、図3に示すように母材希釈の増加に伴い、継手強度が低下する傾向にある。所定の継手性能を得るために過大な母材希釈を避ける条件選定が必要である。特にSAW施工においては他の施工法に比べ母材希釈率が高くなり易いため注意を要する。

3 おわりに

地上式9% Ni鋼 LNGタンクにスポットを当て、溶接材料の特性や最近の動向について紹介した。LNGおよびLNGタンク需要のさらなる増大を踏まえ、今後ともより安心して使用して頂ける溶接材料、溶接施工技術の開発および改良に取り組み、本分野の発展に貢献していきたい所存である。

参考文献

- 1) 永井一聡：JOGMEC 石油・天然ガスレビュー， 49 (2015) 5, 39.

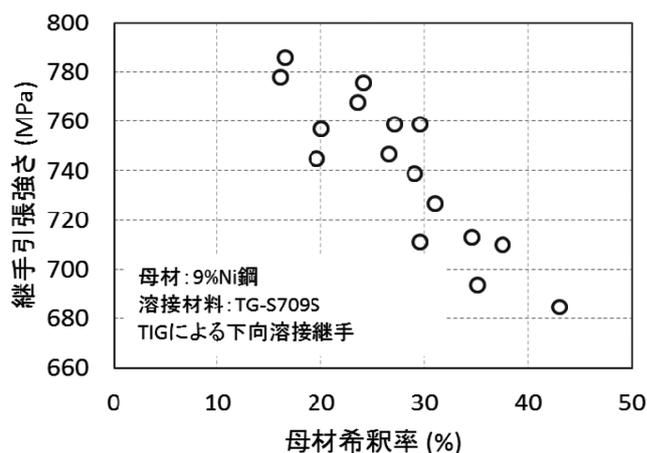


図3 母材希釈率と継手引張強さの関係

- 2) 小川泰之輔, 坂本光弘, 豊増清明, 大山光男, 深川宗光, 雑賀善規：鉄と鋼, 64 (1978) 1, 135.
- 3) 上月映野：神戸製鋼 技術レポート, 36 (1996) 4.
- 4) 福田和博：溶接技術, 64 (2016) 2, 45.
- 5) 片山典彦：溶接学会誌, 73 (2004) 7, 497.
- 6) 西岡信之, 出口明雄, 川上善道：三菱重工技報, 33 (1996) 4, 238.
- 7) 応和俊雄：低温工学, 7 (1972) 5, 229.
- 8) 神戸製鋼所：技術がいど, (1982) 10.

(2016年5月24日受付)