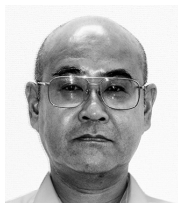


「化学プラント（技術トピックス編）」

— 7%Ni-TMCP鋼製地上式LNG貯槽の建設 —*

平井 秀一**, 三田 俊幸**, 山下 眞輝***, 飯田 淳***, 西上 博之***



平井 秀一



三田 俊幸



山下 眞輝



飯田 淳



西上 博之

Chemical Plant(Technical Topics)

— Construction of the Above-ground LNG Storage Tank Made of 7%Ni-TMCP Steel —*

by HIRAI Shuichi**, MITA Toshiyuki**, YAMASHITA Maki***,
IIDA Atsushi*** and NISHIGAMI Hiroshi***

キーワード LNG, 7%Ni-TMCP鋼, PCLNG貯槽, 自動ティグ溶接, サブマージアーク溶接, ハステロイ, 安全係数3.5

1. はじめに

LNG（液化天然ガス）は、温暖化・大気汚染などの地球規模での環境問題に対応するクリーンエネルギーとして脚光を浴び、その需要は増加の一途を辿っている。LNGは約 -162°C の極低温で貯蔵されるため、使用される材料は極低温で優れた靱性を保有することが非常に重要になる。また、所定の強度を兼ね備え、切断や曲げなどの加工性、溶接性にも優れた材料である必要がある。このような観点から、建設の当初から約半世紀にわたりほとんどのLNG貯槽内槽に9%Ni鋼が適用されている。一方、近年の世界的なレアメタルの高騰によるニッケル価格の大幅な変動の影響を回避するためと、貴重なレアメタルの資源保護の観点から、ニッケル含有量を低減したLNG貯槽内槽材の出現が切望されていた。著者らは新日鐵住金(株)と共同で、安心して長期間に渡り安全に運用できる材料として9%Ni鋼と同等な諸物性、特性を兼ね備えた7%Ni-TMCP鋼の開発を行った。このニッケルを低減した新素材である7%Ni-TMCP鋼は大阪ガス(株)泉北製造所に設置される5号LNGタンクへ採用されており23万klの世界最大級地上式PCLNG貯槽として建設中である。

*原稿受付 平成26年9月3日

** トーヨーカネツ株式会社 Toyo Kanetsu K.K.

*** 大阪ガス株式会社 Osaka Gas Co., Ltd.

本書は7%Ni-TMCP鋼製地上式LNG貯槽の構造、設計、施工手順、溶接施工についてその概要を紹介する。

2. 地上式 LNG 貯槽形式と容量の変遷

LNG貯槽の形式には種々あるが、大きく地上式と地下式に区分される。ここでは地上式LNG貯槽の形式と容量の変遷について記述する。一般的な構造はLNGを貯液する内槽とその外表面を覆う断熱材を保持する炭素鋼の外槽からなる二重殻で構成されている。初期のLNG貯槽と現在のものとで内槽についてその構造に変化はないが、図1に示すように外槽については国内外の貯槽において時代とともに大きく変化した。

(1) 第一世代の貯槽形式

海外においては1970年代まで、国内においては1990年

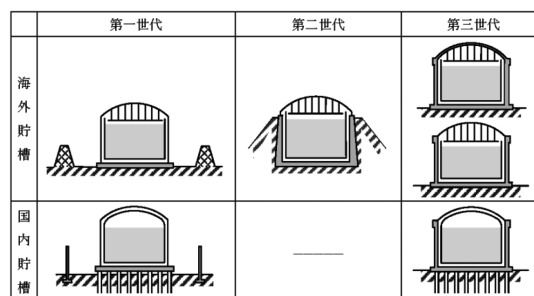


図1 地上式 LNG 貯槽型式の変遷

代前半までに数多く建設された。外槽は軟鋼材で構成され、万が一の漏洩時に広域流出を防止する防液堤を周囲に設けた構造で、EEMUAやEN14620によると「シングルコンテインメント（一重格納貯槽）」と呼ばれるものである。日本ガス協会 LNG 地上式貯槽指針によると「金属二重殻 LNG 貯槽」と呼ばれる。

(2) 第二世代の貯槽形式

海外における LNG 貯槽の構造に関しては、1977年にカタールで起きた LPG 貯槽の爆発事故を契機に1980年に京都で開催された LNG 国際会議においてシェル社によりダブルインテグリティ（二重保安）のコンセプトが提案された。外槽を鉄筋コンクリート（RC）製としその外周を盛土で補強した形式で1980年代に建設された。

(3) 第三世代の貯槽形式

ダブルインテグリティの設計思想が発表された後、9%Ni 鋼の安全性の議論が世界的に起こり、GRI（Gas Research Institute）が中心となり 9%Ni 鋼の脆性破壊特性に関する大がかりな研究がなされた。日本グループ 5 社は脆性き裂伝播停止特性の実験と解析を行い 9%Ni 鋼が優れた脆性き裂伝播停止性能を有していることを実証した。これらの成果は1986年の LNG 国際会議で発表され 9%Ni 鋼の安全性が世界的に認められた。これを契機に、外槽をプレストレストコンクリート（PC）と

したフルコンテインメント（完全格納貯槽）と呼ばれる貯槽が、1990年代以降現在に至るまで建設されるようになった。この形式は、万が一の流出液を PC 外槽で保持する機能とともに、この時の気化ガスを安全に排出する機能を有することが要求されている。国内では LNG 地上式貯槽指針によると「PCLNG 貯槽」と規定され1993年に大阪ガス(株)で初めて建設されて以降主流となっている。

国内の LNG 貯槽の大容量化の動向については、図 2 に示すように LNG が初めて国内に導入された頃の貯槽は 5 万 kl 未満であったが、年代とともに容量が増加している。2000年代に入り18万 kl が多く建設されているがその後さらに大容量化が進み、現在、大阪ガス(株)泉北製造所第一工場にて 7%Ni-TMCP 鋼製 23 万 kl の PCLNG 貯槽が建設中である。

3. 7%Ni-TMCP 鋼製 LNG 貯槽の構造

3.1 7%Ni-TMCP 鋼製 LNG 貯槽の構造

現在建設中の LNG 貯槽は 23 万 kl で世界最大級であるが、厚肉 9%Ni 鋼で培った開発技術、設計安全係数 3.5 の適用により超大型化を実現している。以下に 7%Ni-TMCP 鋼製 LNG 貯槽の仕様と構造の一端を紹介する。

(1) 主要仕様

- 貯蔵容量：公称 230,000 kl
- 適用法規・規格：ガス事業法（解釈例別添：安全係数 3.5）
- LNG 地上式貯槽指針
- 内槽： 内径：φ87,000 mm
- 側高さ：38,700 mm
- 最高液面高さ：38,700 mm
- 主要材質：7%Ni-TMCP 鋼 + 9%Ni 鋼
- PC 防液堤：
 - PC 防液堤外径：φ90,800 mm
 - 主要材質：プレストレストコンクリート

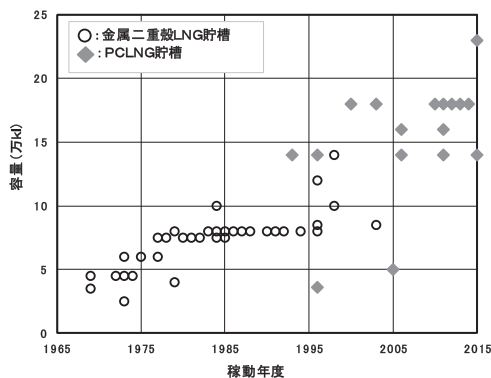


図 2 国内貯槽の動向

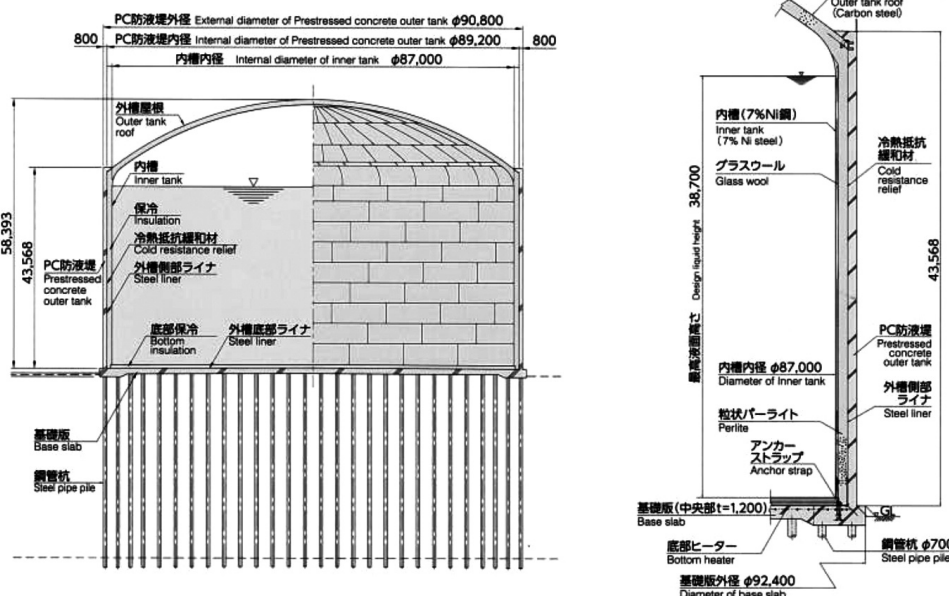


図 3 7%Ni-TMCP 鋼製 23 万 kl PCLNG 貯槽の概略図

(2) 構造

内槽はアニュラ板、底板、側板、ナックルプレート、屋根板、屋根骨で構成されている。側板は最下段が最も厚く 50mm 材が適用されており、上段に向かうほど徐々に薄くなる構造となっている。PC 構造の外槽はプレストレストコンクリート製防液堤と一体となっており内面には側ライナ（板厚 3.2mm の SS400）、底部ライナ（板厚 4.5mm の SS400）が内貼りされている。内槽と外槽の間の空間には外からの温度を遮断するために貯槽の各部位に応じて粒状パーライト、泡ガラス、グラスウール、ポリウレタンフォーム、軽量気泡コンクリート、パーライトコンクリートブロックなどの断熱材が充填、敷設されている。貯槽の概略図を図 3 に、建設中の貯槽の俯瞰を図 4 に示す。

3.2 7%Ni-TMCP 鋼板

7%Ni-TMCP 鋼の特性として極低温での靱性が極めて重



図 4 建設中の LNG 貯槽外観

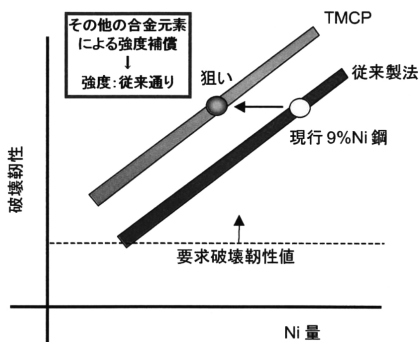


図 5 7%Ni-TMCP 鋼開発の狙い

表 1 化学成分 (mass%)

鋼板	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
7%Ni-TMCP 鋼	0.05	0.05	0.8	7.13	添加	添加
9%Ni 鋼	0.05	0.22	0.65	9.2	---	---

要な特性となる。図 5 は 7%Ni-TMCP 鋼開発の狙いを示したものであるが、LNG 貯槽の破壊安全性を確保するためには、母材および溶接部の所定の強度を確保しかつ耐脆性破壊特性を有していることが大前提であるが、単純に 9%から 7%へ Ni 量を 2% 低減することはこれらの諸性能を損なうことになる。Ni 量低減による諸特性の低下を補うための技術的手法として、化学成分の最適化と TMCP 技術が活用されている。表 1 は化学成分を 9%Ni 鋼と比較して示した一例である。7%Ni-TMCP 鋼は Si 量を 9%Ni 鋼よりかなり低く抑えて溶接熱影響部 (HAZ)、特に溶接止端 (Toe) の耐脆性破壊特性をオートテンパーの促進と Cr, Mo の添加による焼入性の向上により改善している。また、母材のき裂伝播停止性能に関しては、図 6 に示すように最適化された TMCP 技術の活用によりマイクロ組織の微細化と残留オーステナイトを増加させることにより改善している。TMCP の最終過程である加速冷却後に二相域焼入れと焼戻しを行っており図 7 に示すとおり 9%Ni 鋼 QT 材を上回る残留オーステナイトを確保している。開発鋼を実用化するにあたって、9%Ni 鋼の国内適用実績の最小、最大厚さである 6mm, 50mm を含む 5 種類の供試験鋼板に対して 9%Ni 鋼の LNG 貯槽への適合性を評価した際の評価項目^{2, 3)}を参考にして表 2

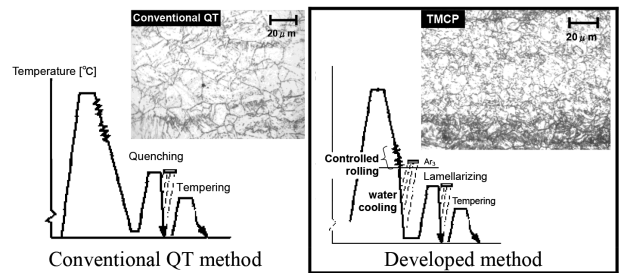


図 6 7%Ni 鋼の TMCP 法の概要とマイクロ組織の例

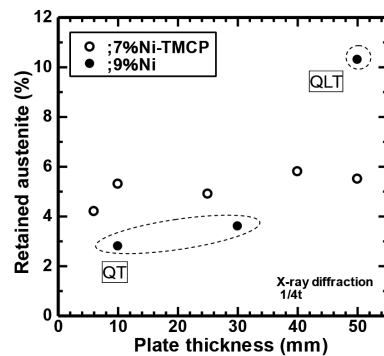


図 7 残留オーステナイト測定結果

表 2 評価試験項目

評価試験	対象	基本性能試験	破壊靱性試験
薄板・厚板における母材・溶接継手性能 (板厚 6mm, 50mm) (板厚 10, 25, 40mm)	母材	化学成分、マクロ組織、マイクロ組織、サルファプリント、清浄度、断面硬さ、側曲げ試験、常温引張試験、低温引張試験、シャルピー衝撃試験、歪時効シャルピー衝撃試験	CTOD 試験*、DT 試験***、混成 ESSO 試験***
	溶接継手	マクロ組織、マイクロ組織、断面硬さ、縦曲げ試験、常温継手引張試験、シャルピー衝撃試験	CTOD 試験*、貫通切欠付十字継手広幅引張試験**
7%Ni-TMCP 鋼と 9%Ni 鋼の異材溶接継手性能 (板厚 40mm)	溶接継手	マクロ組織、マイクロ組織、断面硬さ、縦曲げ試験、常温継手引張試験、シャルピー衝撃試験	CTOD 試験 貫通切欠付十字継手広幅引張試験

*6mm材は対象外、**10mm材は対象外、***6, 10mm材は対象外

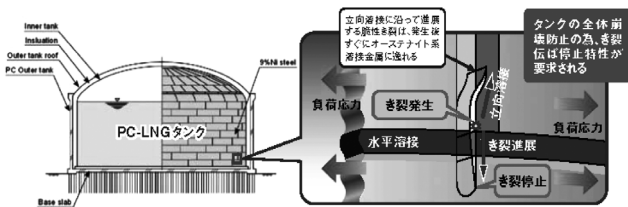


図8 LNG貯槽における破壊安全性概念図

表3 混成 ESO 試験結果

材料	製造法	公称板厚	方向	温度 (°C)	作用応力 (N/mm ²)	判定
7%Ni-TMCP	TMCP	25mm	L	-196	393	No-Go
		40mm	L	-196	393	No-Go
		50mm	L	-196	393	No-Go
9%Ni	QT ²⁾	40mm	L	-196	393	No-Go
	QLT ³⁾	50mm	L	-196	393	No-Go

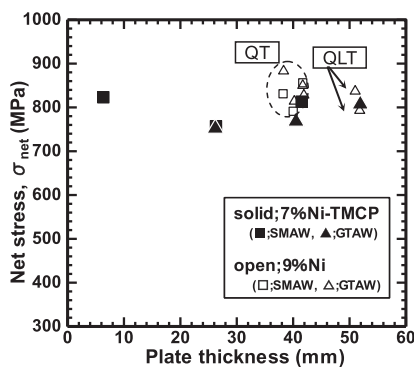


図9 貫通切欠付十字継手広幅試験結果

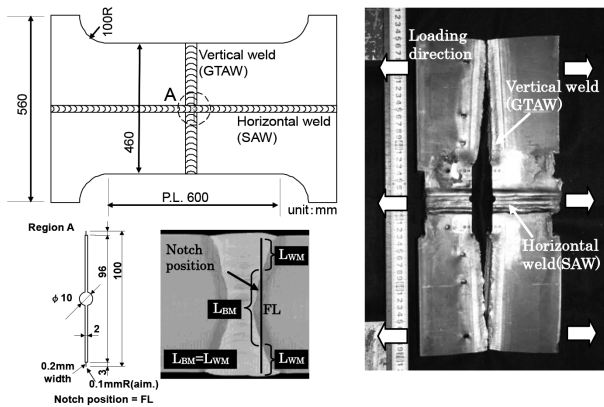


図10 貫通切欠付十字継手広幅試験片形状と試験後の外観 (50 mm, GTAW)

に示す確認試験を実施した。特に耐脆性破壊特性の観点から、内槽材には図8に示すような2つの性能が要求される。一つ目は脆性破壊を引き起こさないように十分な脆性き裂発生阻止性能を有すること、二つ目は万一不測の事態により脆性き裂が発生した場合にも、大規模な破壊に至る前に脆性き裂の伝播を阻止する性能を有することである。開発鋼がこれらの性能を有していることを実証するために、CTOD 試験, DT 試験, 混成 ESO 試験, 貫通切欠付十字継手広幅試験が実施された。

表3は母材の脆性き裂伝播阻止特性を確認した混成 ESO 試験の結果である。作用応力 393 N/mm²の条件の

もと -196°C において脆化板を伝播した脆性き裂が母材に突入後直ちに停止していることを確認した。図9は溶接部の脆性破壊発生阻止性能を貫通切欠付十字継手広幅引張試験で確認した結果である。7%Ni-TMCP 鋼溶接継手はいずれの試験体もき裂は切欠先端から溶接金属に逸れて溶接金属部で全断面降伏して最大荷重を経て破断する挙動を示した。図10に50 mm材自動ティグ溶接の試験片形状と試験後の外観を示す。これらの適用評価試験を実施して7%Ni-TMCP 鋼は9%Ni 鋼と同等の基本性能と耐脆破壊特性を有していることが実証された⁴⁻⁶⁾。また、その他にも曲げ・プレスによる加工性, 溶接施工性(歪み, 残留磁気), 補修溶接性, 放射線透過試験など LNG 貯槽用としての適合性を確認している。

4. 適用法規と設計

ガス事業法の新設計基準(解釈例別添)を採用することにより, LNG 貯槽の大型化が可能となった。以下にその詳細を記す。

(1) ガス事業法 新設計基準(解釈例別添: 安全係数 3.5)の採用

適用法規として, 2008年に制定されたガス事業法/ガス工作物技術基準の解釈例別添が採用された。この新基準は, LNG 貯槽各部の板厚決定に用いられる許容応力の設定基準となる安全係数が, 国際基準との整合化を図り従来基準の4.0から3.5に改定されているのが特徴となっている。この新基準の適用により, LNG 貯槽の最大容量は従来の18万klクラスから, 更なる大容量化23万klが実現された。

(2) 技術基準適合性評価委員会

2010年度のガス事業法適合性評価委員会において, 7%Ni-TMCP 鋼を LNG タンクに適用することが認められた。これは, 7%Ni-TMCP 鋼が, JIS G 3127 に定める 9%Ni 鋼と同等の性能を有することが認められたことによるものである。

(3) 7%Ni-TMCP 鋼の規格

7%Ni-TMCP 鋼は JIS G 3127 SL7N590, ASTM A841 Gr. G, ASME Code Case 2736, 2737への登録が完了しており, ISO, API 620 Appendix Q への登録申請も行われている。

5. 建設の施工手順

現地の建設においては, PC 防液提へ鉄筋・コンクリートの打設を連続的に施工するスリップフォーム工法の適用, 内槽側板の大板化による側板段数の減少, 自動溶接の比率を高めるなど建設工期の短縮化が図られている。図11に現地建設の施工手順を示す。

6. 7%Ni-TMCP 鋼の溶接施工

7%Ni-TMCP 鋼製 LNG 貯槽はガス事業法の適用のもとで建設が進められている。7%Ni-TMCP 鋼に関するガス事業法の溶接施工法は, 解釈例別添28条に従って, 工場加工分と現地工事分を合わせて42セットを取得した。内槽

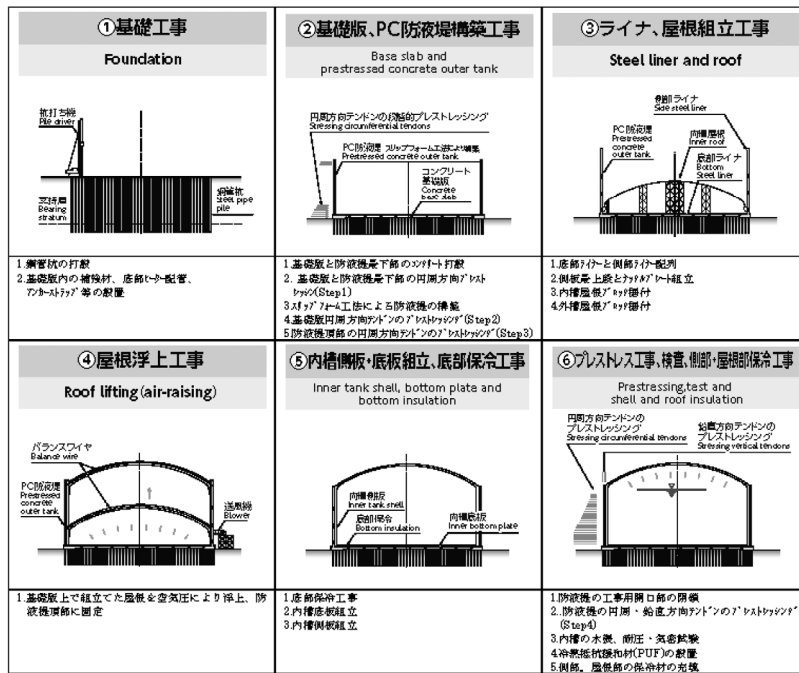


図11 現地建設の施工手順

表4 9%Ni 鋼用溶接材料溶接金属の化学成分と機械的性質

溶接方法	JIS規格	製品	溶接金属の化学成分 (%)											溶接金属の機械的性質				
			C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe	Nb	W	その他	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	vE ₋₁₉₆ (J)
SMAW	Z3225 D9Ni-1	A	0.09	0.24	3.27	0.008	0.003	65.1	15.0	2.32	10.4	1.56	-	Cr0.02	420	700	40	76
	Z3225 D9Ni-2	B	0.03	0.49	0.28	0.003	0.002	68.6	1.9	18.6	6.8	-	2.9	-	440	730	48	83
GTAW	Z3332 YGT9Ni-2	C	0.02	0.03	0.03	0.002	0.001	70.4	2.0	19.0	5.5	-	3.0	-	460	730	47	160
SAW	Z3333 FS9Ni-H	D	0.03	0.74	0.58	0.003	0.002	64	1.7	17.2	14.9	-	2.7	-	410	680	43	70

本体の溶接施工には自動ティグ溶接 (GTAW)、サブマージアーク溶接、被覆アーク溶接が適用されている。ここでは、7%Ni-TMCP 鋼製 LNG 貯槽の内槽に適用されている溶接材料と溶接施工方法について概要を紹介する。

6.1 適用溶接材料

9%Ni 鋼用の溶接材料には以下の特性が要求される。

- ①極低温における切欠靱性が優れていること。
- ②溶接金属の強度が9%Ni 鋼と同等であること。
- ③耐高温割れ性能を有していること。
- ④溶接金属の熱膨張係数が9%Ni 鋼と同等であること。
- ⑤溶接作業性に優れていること。

以上の特性をすべて満たす溶接材料として Hasteloy 系、インコネル系の 70% ニッケル合金が使用されている。自動ティグ溶接、サブマージアーク溶接においては溶接金属の高強度・高靱性化と耐割れ性能の観点から Hasteloy 系の溶接材料が適用されている。被覆アーク溶接は基本的にインコネル系の溶接棒を使用しているが、自動溶接継手の補修溶接においては放射線透過試験の透過度を合わせるために Hasteloy 系溶接棒が使用される。7%Ni-TMCP 鋼の溶接においても 9%Ni 鋼と全く同じ溶接材料が適用されている。各溶接材料の溶接金属の化学成分と機械的性質の一例を表4に示す。

6.2 自動ティグ溶接

自動ティグ溶接は高純度で高品質な溶接継手が安定して得られる。また、ビード外観も非常に美麗であるため

中間層や表層のグラインダ処理を必要とせず補修が極めて少ない特徴を有している。この溶接方法は側板縦継手、ナックルプレートの突合せ溶接などに適用されている。ティグ溶接は一般的に高品質であるが能率の悪い溶接方法であると捉えられているが、本自動ティグ溶接法はオシレート機構やアーク長制御を導入することにより厚板への適用を可能にしている。さらに、磁気制御装置 (MC: Magnetic Control) を備えているため溶着速度が従来の自動ティグ溶接の2倍に高能率化されている。図12にMC自動ティグ溶接の概念図を図13に溶着速度の比較を示す。開先形状も狭開先化が図られ溶着量と溶接歪量の低減を図っている。実施工においては、側板の枚数と工程の進捗度を考慮して6-10台の溶接機を投入して高品質重視の溶接施工が進められている。自動ティグ溶接による側板縦継手の溶接施工状況を図14に示す。

6.3 サブマージアーク溶接

側板周継手は溶接線が非常に長いため建設工程を維持するために高能率で高品質な溶接継手を安定して得ることができるサブマージアーク溶接が適用されている。サブマージアーク溶接は溶け込みが大きく母材希釈量が多くなることから継手強度、耐割れ性、作業性に優れた2.4mm径の Hasteloy 系ワイヤによる1電極1ワイヤ方式で直流溶接を行っている。側板周継手の裏はつりはプラズマガウジングを適用して作業環境の改善を図っている。溶接施工手順としては内槽外面側の溶接完了後に裏はつりを行い内

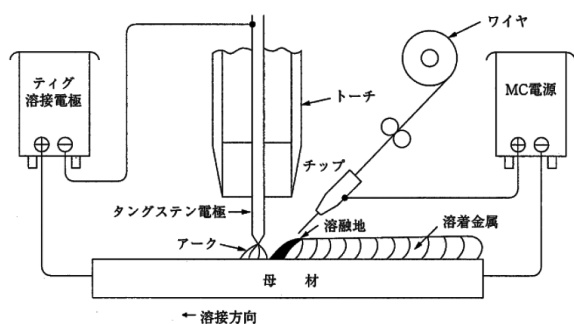


図12 立向姿勢における溶接能率の比較

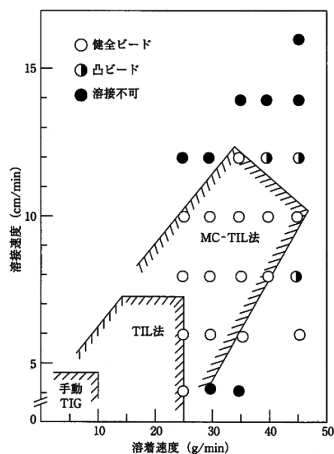


図13 立向姿勢における溶接能率の比較



図14 自動ティグ溶接の溶接状況



図15 側板周継手のサブマージアーク溶接施工状況

面側の溶接を行う手順を採っており、6-10台の溶接機を投入している。図15に側板周継手の溶接施工状況を示す。

6.4 被覆アーク溶接

被覆アーク溶接はLNG貯槽の溶接において基本となる溶接方法であるが、近年のLNG貯槽の大容量化に伴い溶接の高能率化と品質の均一化を図る目的で自動溶接の適用範囲が広がっており、複雑な構造で自動化が難しい部材や溶接線長さが短い部材、主要溶接継手の補修などに適用されている。7%Ni-TMCP鋼製LNG貯槽においては屋根板の裏当金付片面突合せ溶接、屋根骨、ナックルプレートx側板、側板xスチフナ、補強材などの二次部材の溶接を被覆アーク溶接が担っている。

以上、自動ティグ溶接、サブマージアーク溶接、被覆アーク溶接による7%Ni-TMCP鋼の溶接施工について概要を述べたが、9%Ni鋼と同等の良好な溶接施工がなされている。

7. 溶接継手の品質

LNG貯槽の検査は材料、組立、溶接、完成検査と多岐にわたるが、溶接部の非破壊検査として表面欠陥を検出する浸透探傷検査（PT）、内部欠陥を検出する放射線透過検査（RT）が適用されている。PTはビード表面、裏はつりに適用されるほか、部位によっては各層に適用して健全性を高めている。RTは像質を従来どおり確保した高エネルギーの450KVpX線装置を適用して照射時間を短縮しており、7%Ni-TMCP鋼でも9%Ni鋼と同じ検出精度を確保している。

8. おわりに

地上式LNG貯槽の形式と容量の変遷について概説と現在建設中の23万kl 7%Ni-TMCP鋼製地上式LNG貯槽の構造、適用法規と設計、建設の施工手順、溶接施工、溶接継手の品質について概要を紹介した。現在、現地工事は屋根浮上を無事終えて内槽側板6段まで溶接が完了しており、2015年度の完成をめざして建設工事が着々と進められている。

参考文献

- 1) 坂戸, 笹井: LNG貯槽の形式と容量の変遷 進化・巨大化する国内外のLNG貯槽, 配管技術 巻:46号:3ページ:80-85.
- 2) 町田, 石倉, 久保, 片山, 萩原, 有持: 厚肉9%Ni鋼板の破壊特性と大型LNGタンクへの適用性, 圧力技術, Vol 29, No.6, pp.25-39 (1991).
- 3) 町田, 石倉, 久保, 片山, 村本, 萩原, 有持: 厚肉9%Ni鋼板の破壊特性と大型LNGタンクへの適用性 (第2報 高靱性50-55mm厚9%Ni鋼の特性), 圧力技術, Vol 31, No.1, pp.19-33 (1993).
- 4) 川畑, 藤原, 有持, 廣瀬: 日本高圧力技術協会秋季講演会概要集 (2005), pp.12-13.
- 5) 久保, 高田, 山下, Knowless, 廣瀬, 坂戸, 村本, 平井, 密下, 川畑, 有持, 加茂, 大西, 安藤: 日本高圧力技術協会秋季講演会概要集 (2008), pp.10-13.
- 6) 萩原, 岩橋, 久保, 淵元, 山下, 清水, 高田, 廣瀬, 坂戸, 山田, 村本, 密本, 平井, 加茂, 有持, 川畑, 大西, 安藤: 日本高圧力技術協会春季講演会概要集 (2010), pp.1-6.