

LNG タンクの構造と溶接

株式会社 I H I 技術開発本部
猪瀬 幸太郎

1. はじめに

天然ガスは他の化石燃料と比較して環境負荷が低く、発電燃料としての経済的優位性も高い。そのため一時的な需要減はあるものの年々生産量を伸ばし続けている。特にアジアの天然ガス消費量は2040年には2011年の3倍強に増大するとの試算もあり、この地域の多くの企業がLNG事業に進出している^{1,2,3}。LNGタンクの建設も活発であり、日本のファブリーケーターも、例えばインド、台湾、中国などで設計・調達・建設業務を担当している。図1に日本の企業が建設した貯槽の一例を示す。一方国内では、2011年の東日本大震災の影響により、LNG火力発電所の増強が計画されている。一次受入基地のLNGタンクは2012年以降に運用が予定されているものだけでも10基地に及ぶとの報告もある⁴。

当然の事ながらLNGタンクは安全性が特に重視されている。それでも過去に海外では貯蔵プラントの全設備が被災するような大事故が発生した。事故から得た貴重な教訓がそれ以後のLNGタンクの構造、材料、設計には生かされている⁵。本報ではこうした技術の概要を示す。



図1 インドで日本企業が建設したLNG貯槽の外観(PC-LNGタンク)

2. LNGタンク種類と構造

LNGタンクには図2に示すように地上式と地下式などがあり、その関係基準としては、例えば国内では、「LNG地上式貯槽指針(日本ガス協会)」⁶および「LNG地下式貯槽指針(日本ガス協会)」⁷がある。LNGタンクの設計・製作・建設はこれらに準拠する。

地上式タンクは、かつてアルミニウム合金製タンクも建設されたが、その後内槽(9%ニッケル鋼)・外槽(炭素鋼)の間に保冷材を詰めた9%ニッケル(Ni)鋼製平底円筒形・球面屋根付き金属二重殻の自立式地上式タンク(以下、金属二重殻LNGタンクとする)が多く建設された。外槽には貯液機能が無い場合周囲には防液堤が必要となる。最近では防液堤をタンク本体(外槽)に密着させたPC(Pre-stressed concrete)構造が主流である(以下、PC-LNGタンクとする)。軟鋼(炭素鋼)とPC製防液堤で構成する外槽は万が一LNGが漏洩したときの液荷重、温度荷重に対応して設計するため、外

槽は直接 LNG を貯留することができる⁸⁾。

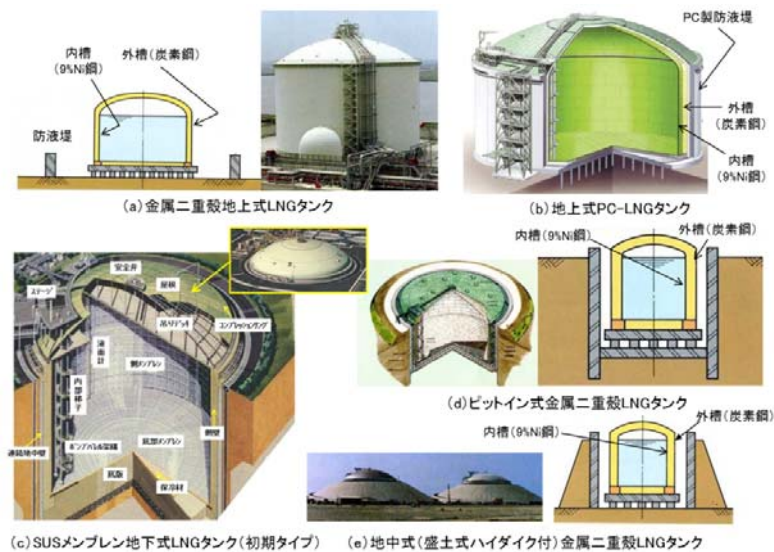


図 2 地上式および地下式 LNG タンクの構造

地下式 LNG タンク（メンブレン）は地中に設けたコンクリート躯体に保冷材を介し、それ自体は自立しないメンブレン（SUS 304 などの薄膜）を張り付けて貯液機能を得る。メンブレンには図 3 に示すように液の出し入れに伴う温度変化（常温～LNG 温度： -162°C ）で生じる約 3mm/m の熱膨張・熱収縮を吸収するコルゲーションを設ける。屋根を地表に出す形式のほかに、景観に配慮した完全埋設式も建設されている^{9),10)}。完全埋設式タンクでは、屋根部にもメンブレンを配置し、 0.02MPa 程度の微圧を加えるものもある。地下式 LNG タンクは耐震設計、景観、土地の有効利用、航空路障害対策などにおいて有利である。ただし前述した地上式 PC-LNG タンクは防液堤が無いため、占有する土地の広さについては地下式タンクと同じ程度となっている。地下式 LNG タンクは 25 万 kL タンクも建設されているが、土地の有効利用に関しては優位性が薄れてきた事もあり、採用は少なくなる傾向にあるように思える^{11,12)}。

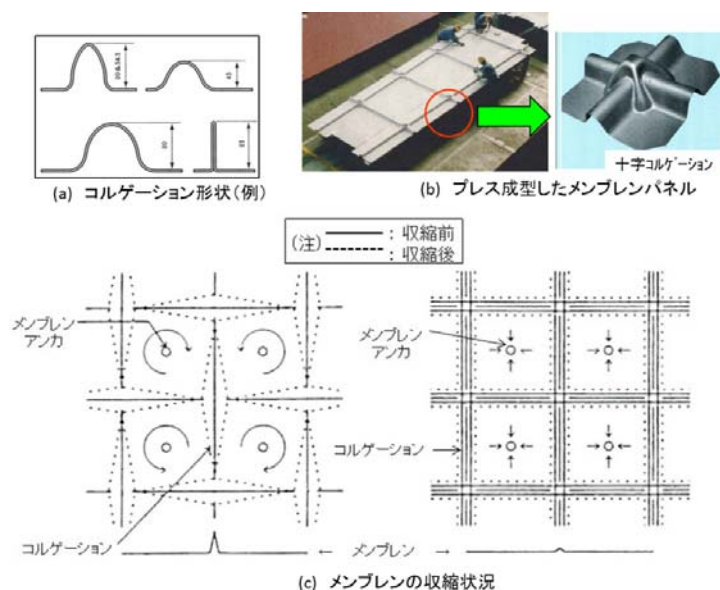


図 3 地下式タンクにおけるメンブレンの構造と温度差による変形挙動

図4に9%Ni鋼製地上PC-LNGタンクの溶接継手構造を示す⁶⁾。基本構造は「平底円筒形・球面屋根付き自立式タンク」であるため底板、側板、屋根板から構成される(図2(b)参照)。

側板と底板の間には、アニュラプレート(成形した扇形の板を円弧状に敷き並べて相互に溶接したもの)を配置する。側板同士およびアニュラプレート同士は完全溶込み突合せ溶接とする⁶⁾。この部位は溶接線が近接するため、縦継手と水平継手の交点相互間の間隔は厚い方の板厚の5倍以上離すように定められている⁶⁾。側板縦継手とアニュラプレート相互の継手、アニュラプレート相互の継手と底板相互の継手、さらに底板相互の継手の交点相互間の間隔は300mm以上離すように計画される⁶⁾。アニュラプレートと底板および底板同士の溶接継手は重ね継手であり、アニュラプレートと底板の重ねすみ肉溶接では板の重ね部の長さを60mm以上としている⁶⁾。ただし、国内向け工事では、重ねすみ肉溶接ではなく図4に示すように突合せ溶接とする場合が多い。また海外でも施主の意向により、突合せ溶接とする事もある。また、国内では底板同士の溶接を、裏当金付き突合せ溶接ではなく、裏当金なしとするように施主から要求される場合もある。

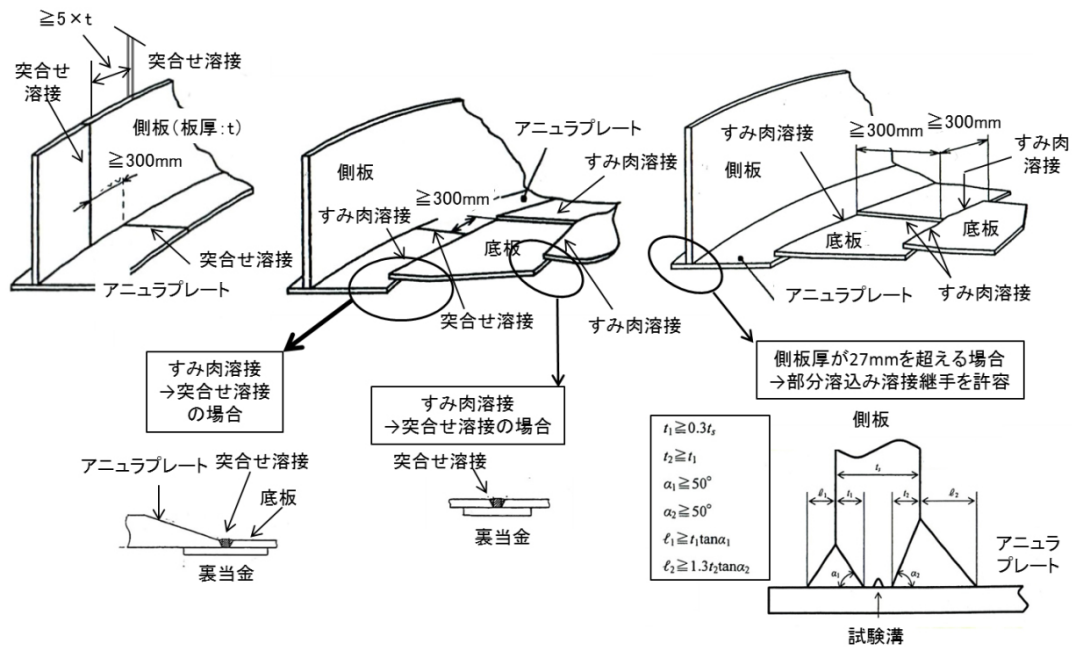


図4 側板・アニュラプレート・底板まわりの溶接継手

側板とアニュラプレートとの溶接継手は完全溶込み溶接が基本ではあるが、側板の厚さが27mmを超える場合は部分溶込み溶接が認められる。この場合、側板両面の開先深さの和が側板の公称呼び厚さの60%以上であり、非溶着金属部に対して漏えい試験用の穴および溝を設けることが条件となる⁶⁾。図5に示すように、アニュラプレートの内面側止端は疲労強度への配慮から滑らかに仕上げるように規定されている⁶⁾。

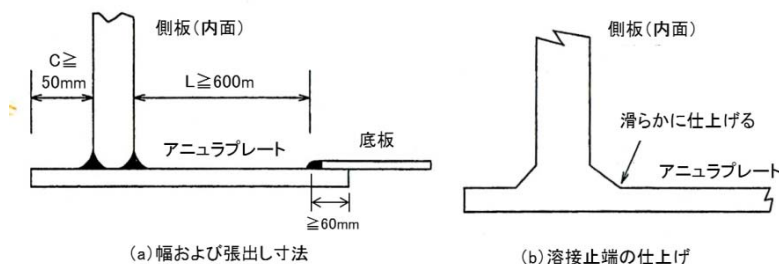


図5 アニュラプレートの寸法と側板との溶接

図6に地下式 LNG タンクに適用が認められている溶接継手の種類と形状を示す⁷⁾。初期にはメンブレンに“せき板突合せ片側全厚重ねすみ肉溶接”も行われていたが、現在は“片側全厚すみ肉溶接”および“へり溶接”となっている。品質重視のため溶接継手はひずみが高い部分を避けるだけでなく、へり溶接は用いず片側全厚すみ肉重ね溶接のみとする設計もある。抵抗シーム溶接は、海外において使用実績がある¹³⁾。

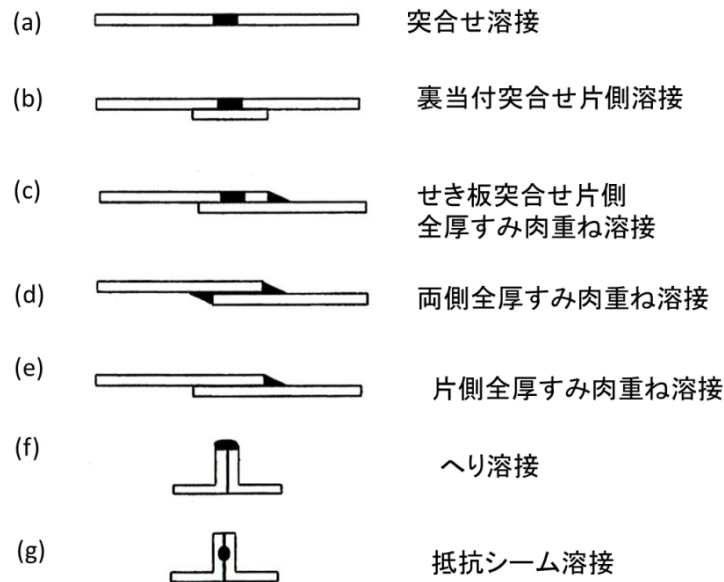
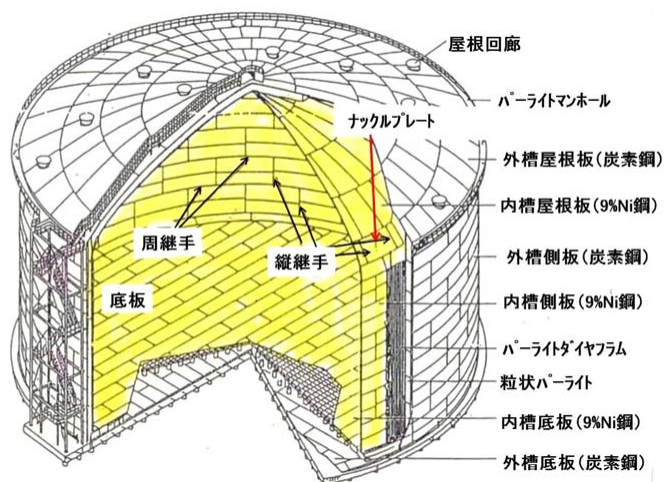


図6 地下式 LNG タンク（メンブレン）の溶接継手

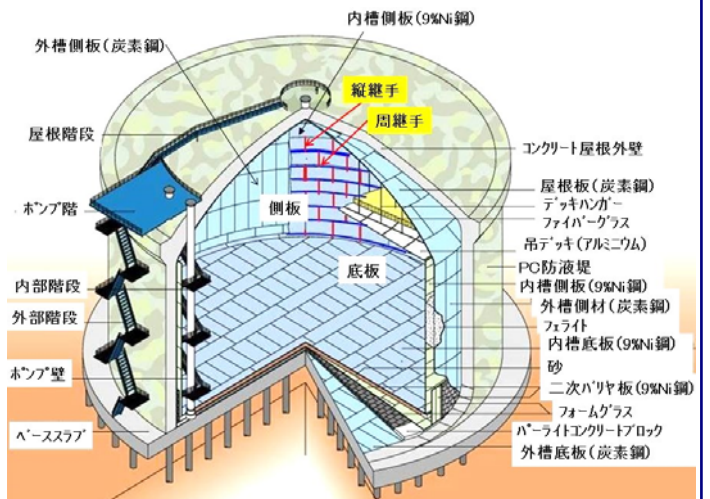
3. 設計思想と溶接継手への性能要求

LNG タンクには前述した構造形式の他に、性能面からシングルコンテナメント、ダブルコンテナメント、フルコンテナメントにも分類される¹⁴⁾。シングルコンテナメントのタンク外槽は貯液機能がなく、よって防液堤が必要となる(図7(a)参照)。一方、ダブルコンテナメントのタンク外槽は内槽から漏れ出した内容液を貯蔵する能力を有し、フルコンテナメントでは内容液に加えてガスも貯蔵する(図7(b)参照)。この分類は LNG タンクの安全が外槽の能力によってのみ確保されているとの印象を与えるが、内槽は安全に特に配慮した設計施工がなされている。例えば地上式 LNG タンクの内槽に用いる鋼材や溶接金属はじん性が重要視され、表1に例示するようなシャルピー吸収エネルギーの値が要求される。また溶接継手についても所定のシャルピー吸収エネルギーを要求するが横膨出量も要求するようになった⁶⁾。地下式 LNG タンク（メンブレン）に使用されている SUS304 などのオーステナイト系ステンレス鋼では脆性破壊は生じないが、LNG の受入れ、貯蔵、払出のサイクルで生じる温度差によってメンブレンが大きく変形しても、これに対応できる疲労強度を有している事などが求められる。

さらに、内槽の安全性を確保する設計思想としてダブルインテグリティ設計（破壊に対する二重の安全性）がある。まずは大規模破壊に至るき裂を発生させない事、そして万一き裂が発生しても停止させる事が基本となる^{15,16)}。地上式 LNG タンクにおける想定き裂寸法（初期欠陥の想定）とねらいき裂停止位置（き裂を停止させる位置）の概念を図8に示す。



(a) シングルコンテナメントタンクの例
(金属二重殻地上式 LNG タンク)



(b) フルコンテナメントの例
(PC-LNG タンク) の例

図7 性能面からみたタンクの分類例

表1 9Ni 鋼製 LNG タンクの許容応力とシャルピ吸収エネルギー

項目	案件	海外		国内	備考
		A	B	C	
適用規格		BS7777	API620	ガス事業法	
材料規定		A553M Type1/ BS777 Type V	A533M Type1/ API620Q	JIS/SL9N590	
許容応力 (MPa)		260	229.8	163	
化学組成 (不純物、%)		$P \leq 0.010$	$P \leq 0.010$	$P \leq 0.025$	
		$S \leq 0.003$	$S \leq 0.003$	$S \leq 0.025$	
鋼材シャルピ値 (J)		100	100	41	-196°C
溶接金属シャルピ値 (J)		50	55	34	

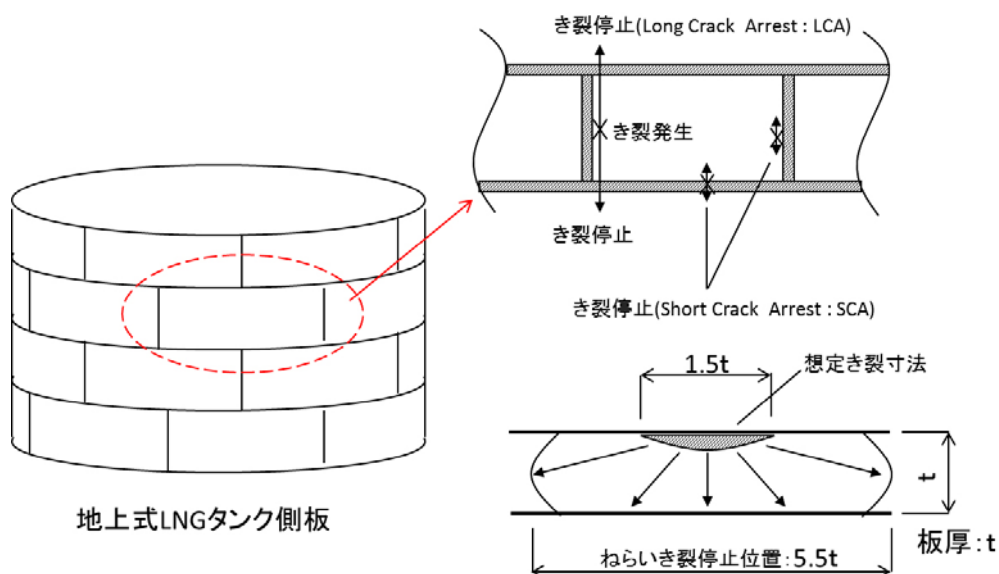


図8 き裂発生防止における想定き裂寸法

まずは想定されるようなき裂が存在してもき裂が発生しないレベルのじん性を要求する。その指標として CTOD (Crack Tip Opening Displacement) 値を用いるときの材料試験の要領を図 9 に示す。溶接継手を対象とする試験では溶接金属、ボンド、HAZ それぞれを評価する。要求する限界 CTOD 値は応力や継手施工の許容誤差 (目違い、角変形) などを考慮に入れ WES2805 によって算出する¹⁷⁾。この手法は工業的に利便性が高く、実績も多い。HAZ を対象とする試験ではごく小規模なポップインが頻発する場合がある。X 開先の場合ではあるが、どのレベルまでをポップインとして扱うかについて合理性と安全性の検討が多数なされている¹⁸⁾。

万一、き裂が発生した場合は溶接部で早く停止させる“ショートクラックアレスト (SCL)”によって大規模漏えいを防止する。その許容できるき裂進展の限界長さは板厚の 5.5 倍 (貫通き裂) までとする場合が多い^{19,20)}。溶接金属は 70%Ni 系合金であり、降伏耐力が母材のそれより小さく、じん性が高い。そのため HAZ で生じたき裂が溶接金属に逸れて停止すると想定されている。

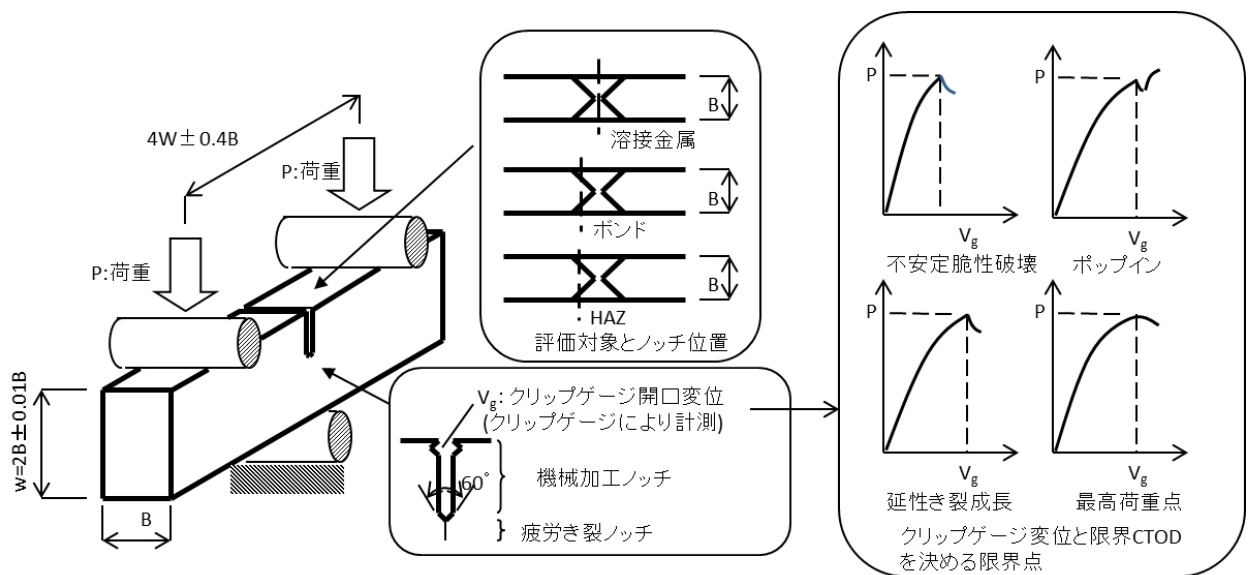


図 9 CTOD 試験要領

図 10 にき裂伝播停止性能を確認するアレスト試験要領を示す。試験温度は LNG 温度であり、助走板 (脆化板) に打撃を与えてき裂を誘発する。脆化板のじん性が高すぎるとき裂が発生せず、低すぎると所定の公称応力を導入する前にき裂が発生し試験として成立しない。また脆化板と供試鋼 (もしくは供試継手) の接合は 3.5Ni 溶接材を用いる。これは突入するき裂の駆動力を保持するためであり、その確認のためき裂突入前後の伝播速度をクラックゲージによって計測する。このとき、き裂が停止する前に応力が低下していない事も同時に確認する。これらはアレスト試験における留意事項の一部であり、試験の適切な実施には専門知識と高い実験技術が求められる。き裂が供試鋼 (もしくは供試継手) に突入した後は、板厚の 2 倍以内で停止すれば前述の板厚の 5.5 倍の長さの貫通き裂相当以下と見做し、“停止”と判定する^{19,20)}。

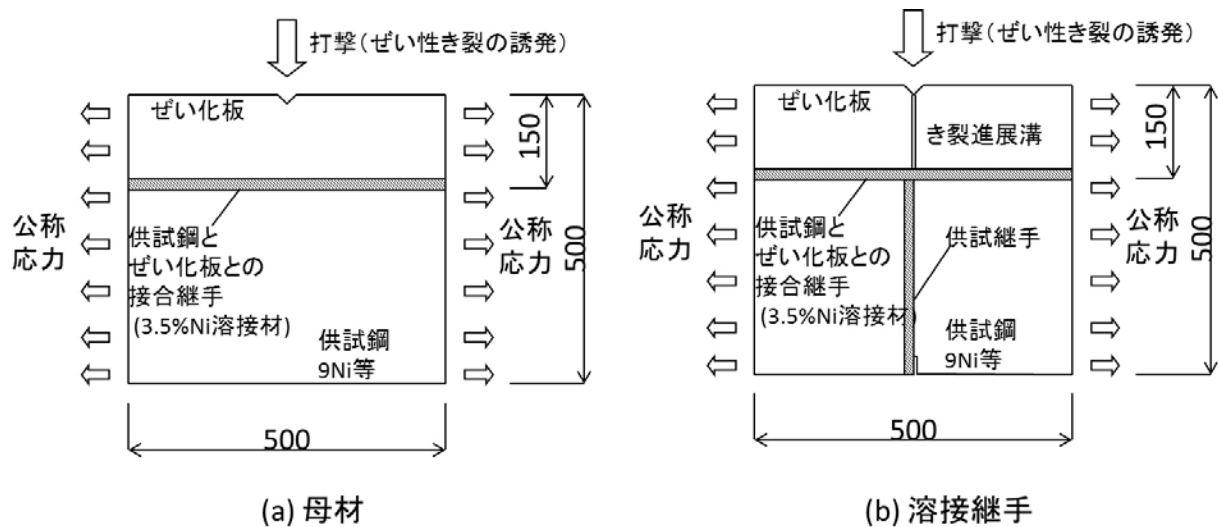


図 10 アレスト試験供試体と試験要領

4. 材料・製作・現地施工

LNG タンクに使用される材料には、 -162°C の極低温でもぜい性破壊が生じないことが求められる。かつては前述のようにアルミニウム合金 (A5083-O 材) 製地上式 LNG タンクも建造されたこともあり、大電流ミグ溶接や簡易自動ミグ溶接が用いられた²¹⁾。しかし、タンクの大容量化に伴い 1986 年以降の建設はなく、現在の内槽材はすべて SL9N590 材 (焼入焼戻し 9%Ni 鋼) となっている。

表 2 に地上式 LNG タンクに用いる鋼材および溶接金属の化学組成と機械的性質の例を示す²²⁾。焼入焼戻し鋼に替り 2 段焼入焼戻し鋼 (QQT 材) が開発されたため鋼材のじん性が向上し、55mm を超える板厚も製造可能となった。また、タンク部材は冷間曲げ加工を行うため、ひずみ時効シャルピー衝撃試験によるじん性の確認も行っている。冷間加工による曲げひずみが 3% を超えた 9%Ni 鋼は熱処理 (温度: $550\sim 585^{\circ}\text{C}$ 、保持時間: 1h/板厚 25mm) が要求されている⁶⁾。

表 2 9%Ni 鋼製地上式 LNG タンクの内槽用鋼材

種類	規格 JIS	化学組成 %										強度 (MPa)		VE _{-196°C} (J)	備考		
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	Nb	Fe	0.2%耐力			引張強さ	
鋼材	SL9N590	0.05	0.22	0.65	0.001	0.001	9.21							657	712	248	45mmt, QQT [†]
SMAW	Z3325 D9Ni-1	0.09	0.31	3.21	0.008	0.005	67.7	14.9	2.2	-	1.7	9.9	430	680	64	A社	
		0.08	0.34	2.02	0.004	0.003	67.2	14.3	4.0	0.6	1.7	9.9	421	686	67	B社	
	Z3325 D9Ni-2	0.04	0.13	2.17	0.002	0.002	75.3	-	17.6	3.2	-	2.5	442	742	111	A社	
		0.03	0.29	1.00	0.003	0.002	68.3	1.9	18.3	2.8	-	7.4	451	725	79	B社	
GTAW	Z3332 YGT9Ni-2	0.02	0.03	0.03	0.003	0.005	74.0	-	19.4	2.8	-	1.2	487	742	157	A社	
		0.02	0.01	0.01	0.001	0.001	70.5	2.0	19.1	2.9	-	5.5	470	764	147	B社	
SAW	Z3333 FS9Ni-H	0.03	0.40	1.15	0.006	0.004	73.2	-	19.4	2.9	-	2.5	398	701	78	A社	
		0.03	0.74	0.58	0.002	0.001	62.2	1.7	17.2	2.7	-	14.9	402	686	83	海外	

(注) *:2段焼入+焼戻し表 3 9%Ni 鋼製地上式 LNG タンク溶接継手の許容応力

近年複数の鉄鋼メーカーによって、レアメタルである Ni を 6~7% 程度に低減した鋼材も開発された。Ni の低減を補うため TMCP 処理と適切な熱処理条件を組み合わせているようである。9%Ni 鋼と同等の安全性が確認され、7%Ni 鋼を用いた地上式 LNG タンクが建設されている²³⁾。

溶接材料は強度とじん性を兼ね備え、線膨張係数が母材に近いオーステナイト系の 70%Ni 系合金が用いられる。本表には被覆アーク溶接、自動溶接(ティグ(TIG)およびサブマージアーク溶接(SAW))の溶接金属の成分例も示す。これらの溶接材料の規格は降伏点(0.2%耐力)が $\geq 360\text{MPa}$ (SAW は 365 MPa)であり、母材($\geq 590\text{MPa}$)と比較して低い。また引張強さは $\geq 660\text{MPa}$ であり、母材 ($\geq 690\text{MPa}$)より若干低い。

表 3 に 9%Ni 鋼製地上式 LNG タンク内槽材の許容応力を示す。国内における設計応力の設定の基本は継手強度/安全率が基本である。鋼材の強度規格(引張強さ)に対して 70%Ni 系溶接金属の許容応力は 95%とされ、溶接継手の許容応力はそれを安全率で除した値としている。従来のタンクは安全率: 4.0 で設計・建設されているが、近年、安全率が 3.5 に緩和されており、最大板厚を PWHT が不要な 50mm 以下に抑えられるため、タンク容量の増大に貢献する改定と言える(ガス事業法, 2008 年)。

地下式 LNG タンク(メンブレン)では前述した SUS304 の他に炭素量が少ない SUS304L が用いられており厚さは 2mm である。また 36%Ni 鋼(インバー鋼)も認可されている⁷⁾。溶接材料には、YS308 または YS308L が主に使用されているが、溶加棒を用いないノンフィラ方式もある。

表 3 9%Ni 鋼製地上式 LNG タンク溶接継手の許容応力

鋼材の強度規格(N/mm ²)		溶接金属の強度規格(N/mm ²)*1		溶接継手の許容応力(N/mm ²)*3	
最小降伏点	最小引張強さ	0.2%耐力	引張強さ*2	安全率:4.0	安全率:3.5
590	690	362	655	163	187

(注)*1: オーステナイト系溶接材料との異材継手
 *2: 母材の許容引張応力(最小引張強さ)×95%
 *3: 溶接金属の許容応力/安全率

表 4 に 9%Ni 鋼製地上式 LNG タンクの内槽における溶接施工法と自動化の例(国内向け)を示す。1969 年に完成した第 1 号タンクはすべてに被覆アーク溶接が用いられたが、1980 年頃に MC(Magnet Control) ティグ溶接法が開発され、側板縦継手、アニュラ板/アニュラ板や底板などの突合溶接に適用拡大が図られた。MC ティグ溶接はワイヤに微小電流(直流ワイヤプラス)を流し、ホットワイヤ効果と磁場を利用して溶着量を増やしている。ティグ溶接は溶接能率が低いものの、狭開先化による溶接材料の低減、ビード整形や裏はつりの省略などのコストメリットに加え品質も高い。比較的溶接量の多い周継手には、横向サブマージアーク溶接が適用されてきたが、図 11 に示す 2 電極ティグ(SEDAR-TIG: Super Energetic Dual Arc-TIG) 溶接なども開発され実用化された²⁴⁾。一方海外工事では、横向サブマージアーク溶接(周継手)および被覆アーク溶接(縦継手)の組合せが主流となっている。

表 4 9%Ni 鋼製地上式 LNG タンクの溶接施工法の例(国内)

部材・継手	溶接継手	溶接施工法	自動化*1
底板	突合せ	自動ティグ*2	'74~
アニュラプレート	突合せ	自動ティグ*2、SAW	'80~
アニュラプレート板×側板	T	SMAW、SAW*3	'83~
側板(縦継手)	立向突合せ	自動ティグ*2	'74~
側板(周継手)	横向突合せ	SAW、自動ティグ*2	'73~
ナックルプレート	突合せ	自動ティグ*2	'83~
屋根板、骨材	突合せ、すみ肉	SMAW、自動ティグ*2	'79~

(注)*1: IHIの場合
 *2: MCティグ溶接
 *3: タンデムSAWを含む(IHI)

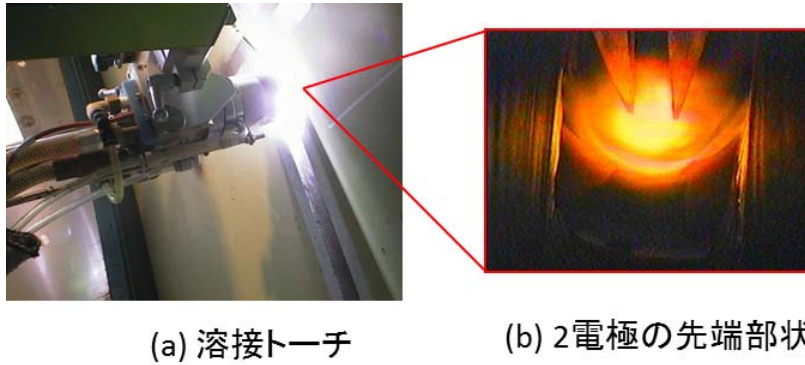
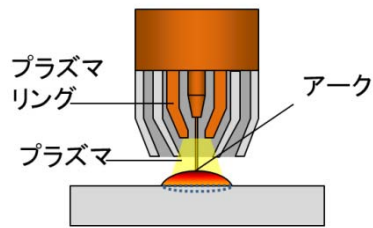


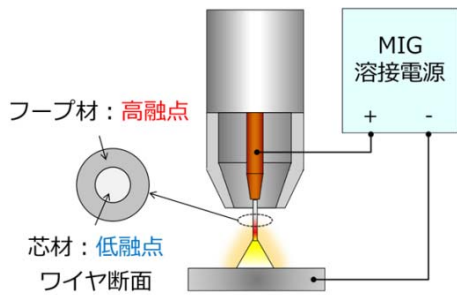
図 11 高効率ティグ溶接 (SEDAR-TIG) 施工状況

現在、実用化が進められている溶接技術としてはクリーンミグ溶接がある。純アルゴン雰囲気での溶接施工は高い継手じん性が期待できる反面、アーク現象は不安定であり施工は困難である。そこで図 12 に示すプラズマ溶接、図 13 に示す同軸複層ワイヤが提案されている²⁵⁾。前者はプラズマによってアークの乱れを整える技術であり、後者は溶接ワイヤの芯材にフープ材よりも低融点の材料を用いて溶滴移行を円滑にし、安定したアークを得る。電流波形の制御による安定化技術との併用や、Ni を低減した共金ワイヤを用いたクリーンミグ溶接など、関連する技術の報告も多い²⁶⁾。共金ワイヤについては、高降伏点の特徴を活かすことにより、例えば屋根部材などにおいて、製作の自由度を上げることが期待されている。



(a) プラズマMIG溶接トーチ構造 (b) プラズマMIG溶接装置外観

図 12 クリーンミグ溶接 (純アルゴンガス・プラズマ溶接)



(a) 同軸複層ワイヤ概念図 (b) 同軸複層ワイヤ溶接現象

図 13 クリーンMIG溶接 (純アルゴンガス・同軸複層ワイヤの例)

地下式 LNG タンク（メンブレン）の溶接では、溶接品質の確保のためギャップは 0.5mm 以下に抑えられる。また大型タンクでは溶接長が 20km 以上にもなる場合もあり、早くから溶接の自動化が進められてきた。1977 年に自動パルスティグ溶接が導入され、今では 90% 程度が自動化されている。溶接速度が従来法より速く、重ね部の段差によるアーク長の違いを電流の変化として読み取り、自動的に位置修正を行う回転ティグ溶接も適用された^{10,13)}。視覚センサ、画像処理などによる自動食い、プラズマ溶接の適用も報告されている^{27,28,29)}。

溶接施工の作業環境であるが、一般的な工法ではコンクリート躯体を完成させ、次に屋根部を建造・搭載する。このため底板、側板の溶接は風雨の影響を受けずに施工できる。屋根の搭載は図 14 に示すような空気圧によって建造した屋根を浮上するエアレイジング工法も行われる¹¹⁾。ここに示すのは地下式タンクの例であるが、地上式 LNG タンクでも先に製作した PC 壁を用いて屋根をエアレイジングする。最近では工期を大幅に短縮できるジャッキライミングメソッド³⁰⁾ やスリップフォーム³¹⁾ など、これまでにない工法も実用化されている。

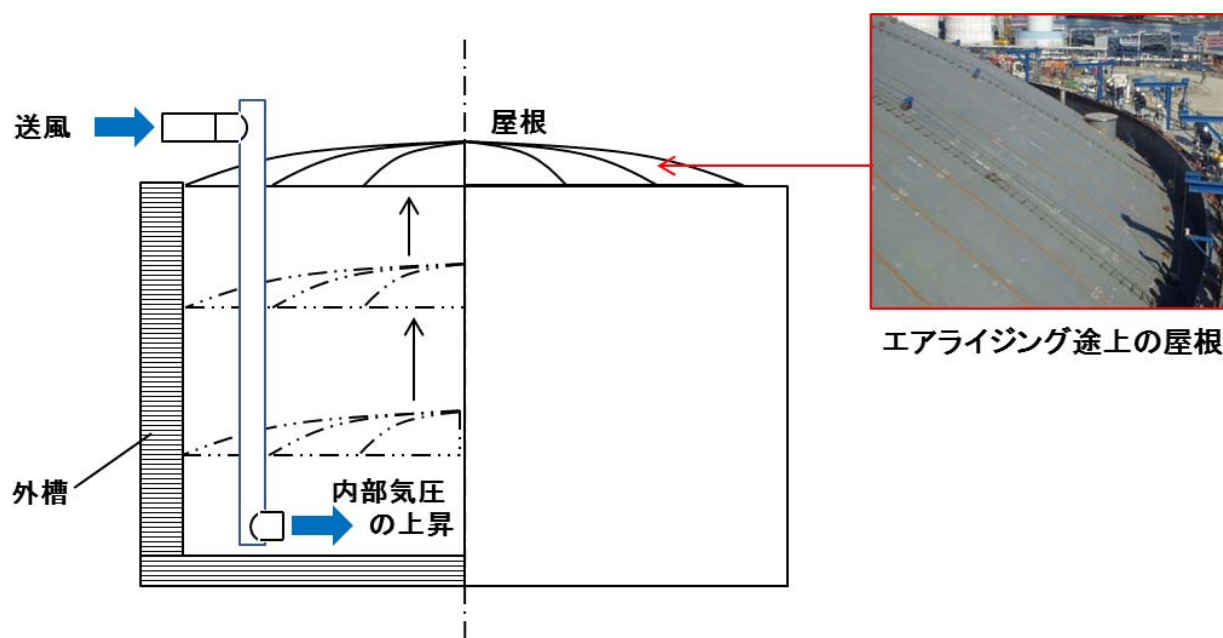


図 14 エアレイジング工法（内槽設置前の屋根の搭載：地下式タンクの例）

5. まとめ

本報では LNG タンクの溶接技術について、概要を簡潔にまとめる事を試みた。LNG タンクの建造における重要課題は安全性の確保と合理性の両立である。その実現のため、多くの技術開発がタンクの大型化に併せて行われてきた。こうした材料、製作、工法における取組は現在も継続されているが、それらが日本の国際競争力向上に資する事を願う。また、著者としても微力を尽くしたいと考えている。

参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁：エネルギー白書 2013, (2013)
- 2) 日本エネルギー経済研究所：アジア/世界エネルギーアウトLOOK 2013, シェール革命がもたらす変革をどう読むか, (2013)
- 3) (財)石油エネルギー技術センター, 海外 LNG 事業へ進出する国営石油ガス企業, JPEC レポート, (2013)
- 4) 新見健一郎, 土田義夫: LNG 貯槽の溶接施工と日本におけるものづくり力, 溶接学会誌, 第 82 巻第 1 号, (2013)
- 5) 例えば, 廣瀬仁志, LNG タンクの構造の変遷, 溶接構造シンポジウム講演集, pp77-84, (2009)
- 6) 日本ガス協会: LNG 地上式貯槽指針 JGA 指-108-12 (2012 版)
- 7) 日本ガス協会: LNG 地下式貯槽指針 JGA 指-107-12 (2012 版)
- 8) 本郷進, 久保尚重: 特集 低温貯槽の大型化と溶接技術の動向 1 LNG 地上式貯槽の現状と大容量化, 溶接学会誌, Vol. 63, No. 2 (1994)
- 9) 中野正文: 技術展望 LNG 地下タンク建設技術の変遷と最新の技術開発, 土木学会論文集, No. 679/VI-5I, 1-20(2001)
- 10) 中野正文, 高木信以智: 特集 低温貯槽の大型化と溶接技術の動向 2 LNG 地下式貯槽の現状と大容量化, 溶接学会誌, Vol. 63, No. 2(1994)
- 11) 新見健一郎, 土田義夫: 特集 新生ニッポンを築く新産業創生への挑戦 第Ⅱ部 新生ニッポンを築く業界構想と溶接の役割 タンク (日本産業機械工業会タンク部会) -LNG 貯槽の溶接施工と日本におけるものづくり力-, 溶接学会誌, Vol. 82, No. 1 (2013)
- 12) 大阪ガスホームページ:
http://www.osakagas.co.jp/company/efforts/rd/technical/1191156_3909.html
- 13) 後藤智巳, 手島秋雄: 2 LNG 低温貯槽の溶接施工, 溶接学会誌, Vol. 68, No. 8 (1999)
- 14) The Engineering Equipment and Materials Users Association EEMUA Pub, No. 147:Recommendation for the Design and Construction of Refrigerated Liquefied Gas Storage Tanks, (1986)
- 15) 深川宗光, 河野武亮, 村山武弘, 貝原正一郎, 低温用鋼溶接部に対する要求性能とその破壊じん性, 石川島播磨技報, Vol. 23, No. 4, (1983)
- 16) H. Miyakoshi, N. Ishikura, T. Suzuki, K. Tanaka, Experience in Japanese Gas Industry on Nine Percent Nickel Steel LNG Tanks, (1981)
- 17) 日本溶接協会: WES2805-2007, 溶接継手のぜい性破壊発生及び疲労き裂進展に対する欠陥の評価方法 (2007)
- 18) 例えば, 有持和茂, 井坂和実, 中西睦夫: 溶接部 COD 試験における Pop-in 現象とその安全性評価法に関する研究, 溶接学会論文集, Vol. 3, No. 1, (1985)
- 19) For example, Japan Consortium 9NA Committee: Crack Arrest Properties of 9% Ni Steel and Relation between Crack-Initiation and Crack-Arrest Tests, GRI-86/0007, (1986)
- 20) 町田進, 石倉則義, 久保尚重, 片山典彦, 村本聖一, 萩原行人, 有持和茂: 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, 第 31 巻第 1 号, pp19-33(1993)
- 21) 永岡栄之: 特集 アルミニウム合金の溶接 II-4 貯槽, 溶接学会誌, Vol. 53, No. 3 (1984)
- 22) 片山典彦, 今村和久, 山川武人, 広瀬仁志: 「3 地上式低温貯槽と溶接技術ー現状と今後の動向」, 溶接学会誌, Vol. 63, No. 2 (1994)

- 23) N. Kubo, M. Tanaka, M. Yamashita, D. Knowles, H. Hirose, N. Sakato, S. Muramoto, S. Hirai, M. Mitsumoto, K. Arimochi, T. Kawabata and T. Kamo: Development of 7%Ni-TMCP Steel Plate for LNG Storage Tanks (Concept of Development and Properties of 10, 25 and 40 mm Thick 7%Ni Steel Plate), Quarterly Journal of JWS, Vol. No. 1(2010)
- 24) 小林和行, 西村善仁, 結城正弘, 牛尾誠夫, 田中学, 嶋村純一, 山下真輝: 2 高能率ティグ溶接法, 溶接技術, Vol. 51, No. 12 (2003)
- 25) 中村照美, 田中学, 平岡和雄: クリーン MIG 溶接プロセス技術の開発, 鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化起案研究プロジェクト, 第 2 回シンポジウム講演予稿集, pp23-24(2012)
- 26) 例えば, 兵間賢吾, 野々村将一, 猪瀬幸太郎, 山岡弘人: 同軸複層ワイヤを用いた純 Ar-GMAW の 9Ni 鋼供金溶接への適用検討, 溶接学会全国大会講演概要, 第 95 集, pp78-79 (2014)
- 27) 井口雅之・飯島亨・牧田昌之・今村和久; メンブレン溶接への画像倣いシステムの適用, 石川島播磨技報, Vol. 39, No. 4 (1999)
- 28) 後藤智己, 越智正行, 多賀昌志, 山田浩敦, 真鍋隆夫, 久保貞夫, 岩本雅弘, 島田忠雄: LNG 地下式貯槽のメンブレン自動溶接装置の高機能化研究, 川崎重工技報, No. 124 (1995)
- 29) 亀井博正, 出口明雄, 西岡信之, 山鳥富己雄, 小粥康弘, 熊倉益男: LNG 地下式貯槽折曲げ型メンブレンの開発, 三菱重工技報, Vol. 33, No. 4(1996)
- 30) IHI ホームページ: http://www.ihico.jp/ihico/all_news/2012/press/2012-7-25/
- 31) 例えば, 桜井邦昭, 近松竜一: 大容量 LNG 貯槽の PC 防液堤を対象としたスリップフォーム工法用コンクリートの開発と実工事への適用, 大林組技術研究所報, No. 77, (2013)

<略歴>

猪瀬 幸太郎 (いのせ こうたろう)

1993 年 金沢大学大学院 機械システム工学 修士課程修了 (機械工学専攻) 修了
 1993 年 石川島播磨重工業 (株) 入社 橋梁事業部配属
 2001 年 技術開発本部・生産技術センター・生産技術開発部
 2004 年 技術開発本部・生産技術センター・生産技術開発部 主任研究員
 2008 年 大阪大学大学院 工学研究科にて博士 (工学) 取得
 2014 年 技術開発本部・生産技術センター・溶接技術部応用グループ
 主任研究員 現在に至る