

低温貯槽とその破壊防止について

大阪大学工学部 佐藤 邦彦

低温貯槽の現状

近年、石油に比べイオウ分の少ないいわゆるクリーン・エネルギーとしてLPG（液化石油ガス—ブタン、プロパンなど）、LNG（液化天然ガス—主成分はメタン）が脚光を浴びている。アメリカでは既に第2次世界大戦から生産地と消費地を直結する長距離ガスパイプラインの建設が進められ、天然ガスを気体のままで輸送するという手段によってエネルギーとしての利用が進んでおり、総エネルギー需要のおよそ35%に達している。これに対して周囲を海にかこまれたわが国では総エネルギー需要のおよそ70%を原油に依存し、天然ガスの占める割合は10%に満たない現状である。しかし最近の公害問題にからんで、低公害エネルギーとしてのLPG、LNGの需要も高まって来ており、これにともなってこれらの液化ガスの大量輸送のためのLPG船、LNG船の建造および陸上基地における貯槽の建設が進められつつある。

これらのガスは常圧下で冷凍液化して大量海上輸送され、陸上基地に貯蔵される。表1に示すように液化温度はガスの種類によって異なるが、LNGでは -162°C といった低温になるので輸送・貯蔵用タンクに使用される材料は十分な切欠靱性を有するものが要求され、安全性の見地からタンクの脆性破壊防止のための設計・建造技術上の配慮が必要である。

LPGがわが国にはじめて輸入されたのは昭和36年のことで、LPG船およびLPG貯槽については既に10年以上の実績があり、LPGタンク容量10万 m^3 —これは家庭用燃料にすると約24万世帯の1年分に相当する—の大型専用船も建造されている。

これに比べるとLNGのわが国への輸入は比較的近年のことであるが、表2に示すようにその需用が増加する機運にある。このため過去数

表1. 各種液化ガスの沸点とその低温用材料

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	沸点 ($^{\circ}\text{C}$)	ガス名	比重		使用材料
			気体	液体	
20	0~5	ブタン	2.01	0.605	ニッケル鋼 低合金鋼
0	-5	ブタジエン	1.87	0.621	
-20	-34	アンモニア	0.6	0.817	アルミニウム鋼 〔焼きならしまたは調質処理〕
-40	-42	プロパン	1.56	0.580	
-60	-79	炭酸ガス	1.53	1.107	2.5%Ni鋼
-80	-90	エタン	1.0494	0.694	
-100	-103	エチレン	0.9780	0.625	3.5%Ni鋼
-130					
-140					9%Ni鋼
-160	-162	メタン	0.554	0.415	
-180	-183	酸素	1.1053	1.140	アルミニウム合金
-180	-186	アルゴン	1.3794	1.402	
-200	-196	窒素	0.9674	0.810	オーステナイト系ステンレス鋼
-220					
-240	-253	水素	0.0695	0.070	
-250	-269	ヘリウム	0.1368	0.147	
					使用材料
		液化ガス	比重		

年間わが国では官界・学界・産業界が一体となってLNGタンク用材料およびLNG船の設計・建造技術の開発に大きな努力をはらって来た。表3はわが国におけるLNG船建造体制の現状を示したものである。表に示すように -162°C といった低温における切欠靱性の見地から、タンク用材料としては9%Ni鋼・Al合金(5083-0)・オーステナイト・ステンレス鋼などが使用される。現在世界で約50隻のLNG船が完成あるいは建造中であるが、わが国では第1船として12.5万 m^3 型のを現在建造中である。これはAl合金製タンクによるMoss型独立タンク方式で昭和52年に竣工の予定である(図1)。

一方、陸上受入基地におけるLNG貯槽の建設も東京湾、大阪湾などで進められている。陸上におけるLNG貯槽には地上タンクと地下タンクとがある。地上タンクは二重殻円筒型で、

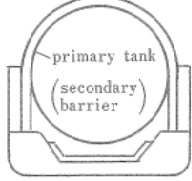
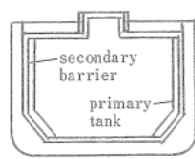

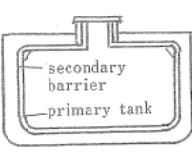
生産と技術

表2 日本向けLNGプロジェクト一覧表

	プロジェクト(積地)	需 要 家	輸 入 量	出荷開始	輸送距離	輸 送 船 舶
1	アラスカ(ケナイ)	東 電・東京ガス	98万 ^{トン} /年	'69-11	6,000km	71,500m ³ ×2隻
2	ブルネイ	{ 東 電・東京ガス 関 電・大阪ガス	519万 ^{トン} /年		4,400km	75,000m ³ ×7隻
3	サラワク(ミリ沖合)	{ 東電・東京ガス・関電 大阪ガス・日本鋼管	600万 ^{トン} /年	'72-11	4,400km	125,000m ³ ×5隻
4	アブダビ(ダス島)	東 電・東京ガス	200万 ^{トン} /年	'76	12,500km	125,000m ³ ×3隻 80,000m ³ ×1隻
5	スマトラ北部 (アルン)	{ 東 電・関 電 中 電・九 電 東京ガス・大阪ガス 新日鉄	450万 ^{トン} /年	'77		128,000m ³ ×7隻
6	東カリマントン (バダック)	東京ガス・大阪ガス 新日鉄	300万 ^{トン} /年	'77		128,000m ³ ×2~3隻
7	アブダビ (ハラス島)(検討中)		140万 ^{トン} /年	'76		125,000m ³ ×2隻
8	イラン(交渉中)	中 電・その他	500万 ^{トン} /年	'78		125,000m ³ ×5~6隻
9	チッタゴン (バングラディシュ)		250万 ^{トン} /年			125,000m ³ ×3隻
10	北樺太(USSR) (交渉中)		168万 ^{トン} /年			パイプラインの 可能性有
11	ヤクート(USSR) (交渉中)		532万 ^{トン} /年			

(出典：海洋技術開発促進委員会調査研究報告書(その1)昭和49年8月(財)日本船用機器開発協会)

表3 LNG船用タンク方式と建造体制

タンク方式	独立タンク方式						メンブレン方式		セミメンブレン方式		
	球 形 (円筒形)			方 形							
船体横断面	 moss-kvaerner type			 conch type			 gaz-transport type		 BS type		
技術保有者	moss-kvaerner	techni-gaz	gaz-transport	conch	ESSO(一重)タンク	ESSO-conch(二重)タンク	techni-gaz	gaz-transport	B.S. 液化ガス	石 播	
日本の提携会社	川重三菱	住重	三井	三菱住重	日立	—	三井住重	鋼管三井	佐世保重	石 播	
材質	primary	9% Ni, Al	9% Ni	9% Ni	Al	9% Ni	Al	ステンレス	36% Ni (インバー)	9% Ni	Al
	secondary	不要	—	—	合板およびポリウレタン表皮	—	Al	合 板	36% Ni	合 板	合 板
	防 熱	ポリウレタン, ポリスチレン, フォーム	—	—	バルサおよびポリウレタンフォーム	—	ポリウレタンスラグ張り付け	バルサ	合板箱入りパーライト	ポリウレタンフォーム	フェノールフォーム ポリウレタン
特 徴	1. 構造解析が完全にできる。 2. 設計面から二次防壁が不要である。 3. タンク部と船体部を別個に製作しうするため船台期間を大巾に短縮できる。 4. 防熱費用が最も安い。			1. 球形にくらべ船体内のスペースを有効に利用できる。 2. 球形同様船台期間を短縮できる。 3. 防熱費用はメンブレンより安い。			1. 船体内のスペースが最も有効で、容積効率最もよい。 2. 構造的にタンクの大型化が可能である。 3. タンクの構造材料が少なくすみ材料費も最も安い。		1. メンブレン同様、船体内のスペースが有効に利用できる。 2. タンクの大型化も可能である。 3. 材料料費が独立タンクより安い。		

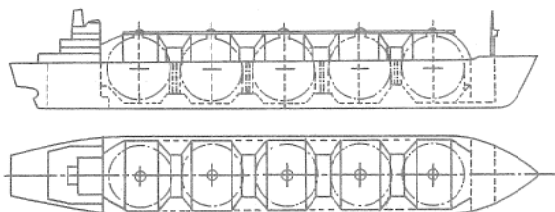
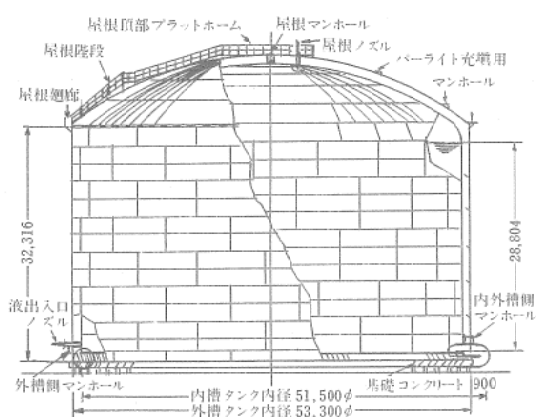


図1. モス方式LNGタンカー

(タンク容量: 87,600 m³、L_{pp}: 237,00 m、
B: 40.00 m、D: 23.00 m、
d = 10.50 m、C_B: 0.712)



工事概要

名称	LNG超低温貯蔵タンク
企業者	東京瓦斯㈱
所在地	千葉県君津郡袖ヶ浦町南袖ヶ浦中袖1-1
設計	石川島播磨重工業㈱
施工	同上
据付	同上
貯蔵物	液化天然ガス
幾何容積	60,000kl (呼称容量)
形状	平底球面屋根二重殻式円筒形タンク
内径	51,500mm (内径)
圧力	0.12kg/cm ² G (内槽)
使用鋼種	A 5083-0 材 (内槽)
主要鋼材板厚	12~55mm (内槽)
基数	60,000kl×1基
接合方法	溶接
工期	47.8~48.9 (現地据付期間)

図2. LNG低温貯槽

内槽材にはAl合金、9%Ni鋼が使用される(図2)。

液化ガス貯蔵用低温タンクの建造に当っては、安全性の見地から材料・溶接・防熱技術など解決されねばならない問題点が多い。ここではタンクの脆性破壊防止のための問題点について述べる。

破壊防止設計の要点

一般に鋼のような材料は室温付近では十分な延性を示すが低温では脆性破壊を生じる。特に

大型構造物では、構造自体の応力集中部・溶接のToe部、Root部などの応力集中部の存在・材料および溶接欠陥の存在・製作時の熱加工および機械的加工にともなう靱性の劣化などの要因がからみ合うため、小型丸棒引張試験では十分な延性を示す温度でも応力集中部から脆性破壊を発生する可能性をもっている。図3はこのことを模式的に示したものである。切欠をもつ広巾試験片の破壊応力 σ_F (Net Stress)は曲線ABCDのようになり、 T_s 以下の温度では破面にいわゆる脆性破面を生じ、 T_y 以下の温度では材料の引張降伏応力以下の低応力で脆性破壊を生じる。この曲線は切欠端付近の破壊靱性の劣化、切欠長さの増大にもなって高温側へ移動し、曲線EFGHに近づく。きれつ停止温度曲線(CAT)とよばれるこの曲線の右側の領域ではきれつの不安定伝播は生じない。

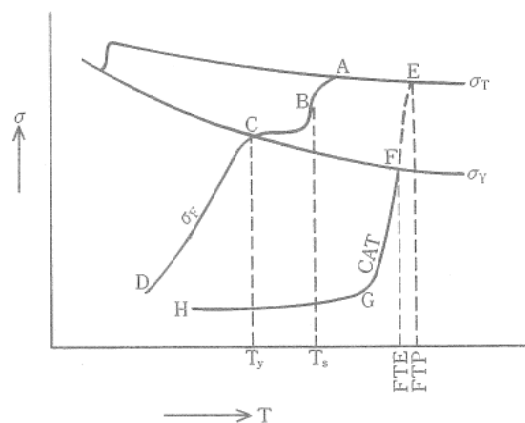


図3. 切欠材の破壊応力(σ_F)におよぼす温度(T)の影響

σ_Y : 切欠のない材料の引張降伏応力
 σ_T : 切欠のない材料の引張強さ

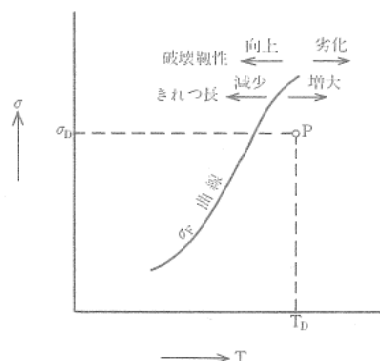


図4. 最低使用温度 T_D のもとで応力 σ_D をうける場合の材料の選定

いま、ある構造要素が最低使用温度 T_D のもとで応力 σ_D に耐えるように要求される場合を考える。構造用材料を適当に選び、完成後の検査で発見できる最小のきれつ長さに対して与えられた構造要素の形状・寸法と材料の最低破壊靱性値とから破壊応力 σ_F を図4のように求める。P点 が σ_F 曲線の右側にくるように材料を選べば、この構造要素は設計応力 σ_D のもとで破壊をおこすことはない。 σ_F 曲線を左方へ移動させるには、材料の破壊靱性値を増すかあるいは製作時の品質管理技術と検査技術を向上してより小さな欠陥まで発見できるようにすればよい。

信頼性をさらに増す為には、P点 がきれつ停止温度曲線 (CAT) の右側にくるように材料を選定することである。そうすれば何かの予期せざる原因で事故がおこって設計応力 σ_D 以上の応力が働ききれつが発生しても、その伝播が阻止されて大きな破壊に至るおそれはない。現在アラスカで建設中のガスパイプラインではこのような考え方に立って材料の選定が行なわれているが、一般には材料が高価になり経済的

ない。したがって通常の構造物では、検査で十分発見できる程度のきれつ長さを想定して、使用時にきれつを発生しないように材料と施工法が選定されている。

低温貯槽の破壊防止上の問題点

陸上基地における低温貯槽についても上記の通常の構造物に準じて材料と施工法の選定が行なわれている。すなわち σ_D として設計応力あるいは耐圧試験応力を取り、この応力のもとでの脆性破壊の発生が検討される。通常の構造物と同様、先在する切欠としては溶接きれつなどの欠陥が問題となる。また溶接による残留応力や溶接による角変形など先在欠陥の付近のひずみ集中を助長させる要因も考慮しなければならない。これらの要因を考慮した試験法として角変形付十字継手広巾引張試験がある。図5は9% Ni 鋼溶接継手についての実験例である。材料の高い破壊靱性のために -190°C といった極低温でも目立った低応力破壊をおこさない。しかし通常の構造用鋼では、角変形量と切欠寸法によっては室温付近でも低応力脆性破壊を生じ

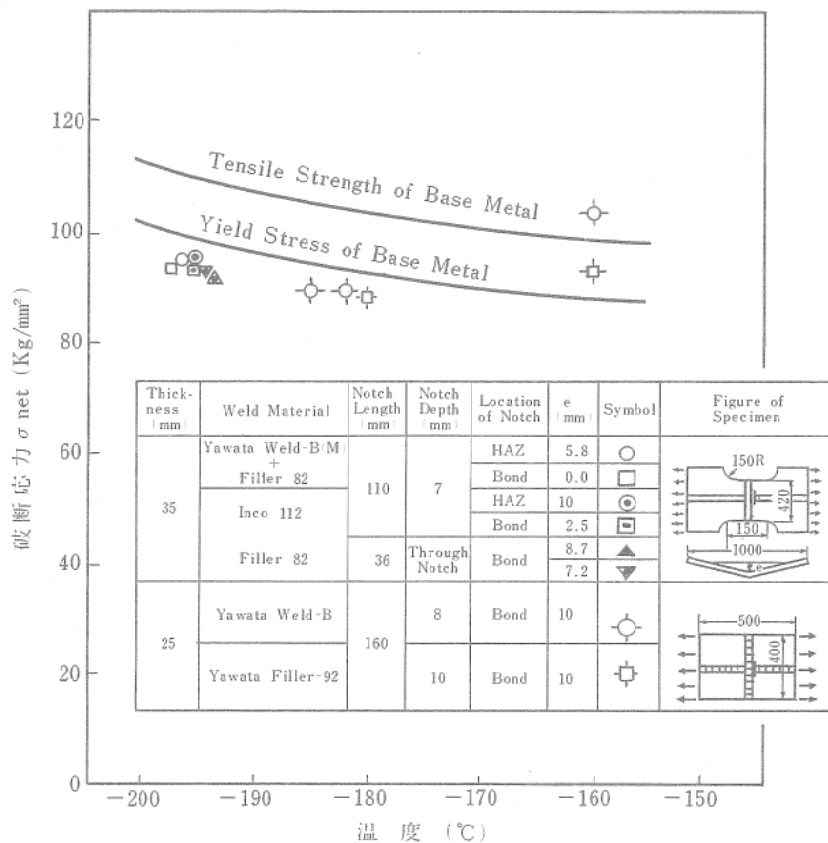


図5. 9% Ni 鋼の十字継手広幅引張試験

ることがあるので、タンクの破壊防止上重要である。

陸上において強固な基礎の上に建設される低温貯槽では、地震時における低サイクル疲労を除けば疲労による問題はまずおこらないと考えられるが、船用タンクでは船体の上下、左右および前後加速度および波浪中のモーメントによる動荷重をうけるので、疲労強度についての検討も重要である。LNG船では万一LNGがタンクから漏洩して船殻構造に触れた場合に船体が低温脆性によって破壊する危険を避けるため、一般にはLNGタンクの外側に二次防壁を設けることが要求される。しかし最近のFEM構造解析の進歩と破壊力学の研究の発展により、タンク各部の詳細な応力解析が行なわれる場合には、次に述べる“Leak Before Failure”の設計理念により、二次防壁が簡略化される。この設計理念によれば、(1)解析によって与えられた応力レベルの下でタンク本体の疲労きれつ伝播の様相を明らかにすること、(2)疲労きれつが伝播して最低一航海(約2週間)の間に板厚を貫通しガスが漏洩してもタンク本体が不安定破壊をおこさないよう破壊力学的解明がなされていること、が必要である。この為LNG船用タンク材料については、広巾脆性破壊試験の他に、疲労きれつ伝播試験も重要である。

疲労きれつ伝播試験の結果は一般に次のような形にまとめられる。

$$\text{きれつ伝播速度} \frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

ただし、 ΔK ：応力拡大係数の振巾、 C 、 m ：材料定数。いま、想定される初期きれつ長さを $2a_0$ 、変動応力によってこの初期きれつから疲労きれつが発生する繰返し数を N_c とすると、任意の繰返し数 N に対するきれつ長さ $2a$ は上式を積分して

$$\frac{1}{C} \int_{a_0}^a \frac{da}{(\Delta K)^m} = N - N_c$$

から求められる。 ΔK は試験片あるいは構造要素の寸法ときれつ長さ $2a$ の関数である。したがって疲労きれつ伝播試験によって材料定数 C 、 m が求められていると、構造要素における初期きれつからの疲労きれつ伝播特性を推定するこ

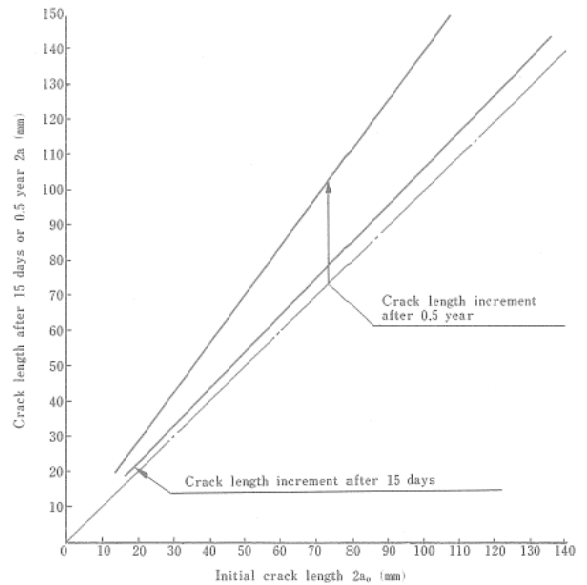


図6. 初期きれつ長さ($2a_0$)から疲労によって伝播する15日後および6カ月後のきれつ長さの予想値

とができる。

9% Ni鋼およびその溶接継手の疲労きれつ伝播試験結果と船体に作用する変動外力の応答値の頻度分布とから、15日間および6か月間の疲労きれつ伝播を予想した結果の一例を図6に示す。

あとがき

以上、わが国における低温貯槽の現状とその破壊防止のために取るべき材料と施工法の選択についての考え方を述べた。しかし、低温貯槽に限らずあらゆる構造物の安全性を高めるためには、外力の推定の妥当性と外力によって構造要素に働く応力解析の妥当性の検討も重要であり、これらをあわせて総合的に問題を取り扱うことが、構造物の信頼性向上のために重要であろう。

参考文献

- 1) 日本造船学会誌 546号(昭49-12) LNG特集
- 2) Studies on 9% Nickel Steel for Moss-type Liquefied Natural Gas Carriers, KMN委員会報告書(1972)
- 3) 溶接技術 21 10(1973) LNGタンク特集