

9 % Ni 鋼 の LNG 地 上 式 大 容 量 貯 槽 厚 板 構 造 へ の 適 用

Applicability of Heavy Gauge 9 % Ni Steel
for Large Capacity LNG Storage Tanks

横 浜 製 作 所 西 岡 信 之^{*1}

技 術 本 部 出 口 明 雄^{*2} 川 上 善 道^{*3}

多 田 益 男^{*4}

地球環境問題から活発化している LNG 動向を踏まえ、貯蔵効率を向上した 20 万 kl クラスの大形 LNG 貯槽を実現するために必要な板厚約 50 mm の厚板 9 % Ni 鋼を 7 鋼種供試し、実機貯槽の最下段を想定した狭開先 TIG 溶接継手の適用性を検討した。その結果、熱処理、化学成分などを工夫した厚板 9 % Ni 鋼及びその溶接継手の強度及び低温靱性は、従来板厚材と比較して同等以上の性能を有していることを確認した。また、破壊力学手法に基づき、狭開先溶接継手の限界 CTOD 値が、耐用期間中の脆性破壊防止に必要な CTOD 値を十分に上回ることを確認し、大容量貯槽としての強度信頼性を検証した。

LNG is expected to be the source of clean energy meeting the increasing demands of the global environment and a large scale LNG storage tank needs to be constructed. Heavy gauge 9% Ni steel plates with narrow gap TIG welded joints, the lowest course of which was fabricated by the vertical weld seam process, were examined with a view to their stability for 200,000kl-class LNG storage tanks. As a result, they showed adequate strength and low temperature toughness. It is also confirmed that a large scale LNG storage tank made of heavy gauge 9% Ni steel plates has sufficient safety margins in terms of brittle fracture through the evaluation based on the fracture analysis.

1. 緒 言

地球環境問題に関連して LNG (液化天然ガス) 需要は増加しており、貯蔵効率の向上を図るため、LNG 貯槽の大型化ニーズが増大している⁽¹⁾⁽²⁾。内槽材が耐圧部材である LNG 地上式貯槽では、大容量化に伴い、素材である 9 % Ni 鋼の厚板化が要求され、20 万 kl クラスの建設には、JIS 規格での最大板厚 50 mm が必要となる。

従来標準的に建設されてきた 8 万 kl クラスの板厚約 30 mm から 20 万 kl クラスの 50 mm への変化は、材料面から考えると、厚板化による熱処理時の板厚中央部での冷却速度低下に起因した軟化、塑性拘束の増大による脆性破壊強度低下などの留意事項がある。

一方、国内製鉄 5 社の 9 % Ni 鋼板は、低温靱性を確保するため、鋼中不純物 P, S を低減するなどの工夫が行われ、当社では、このような 9 % Ni 鋼板の脆性破壊発生や伝ば停止に対して十分な低温靱性を有していることを実験的に確認し、貯槽の安全性を検

証してきた⁽³⁾⁽⁴⁾。しかし、平成 2 年の 9 % Ni 鋼板に関する JIS 規格改訂に伴い、化学成分や熱処理の規定が緩和され、製鋼上の工夫の幅が広がり、微細な残留オーステナイト相の増加による低温靱性の向上が可能となった。

大型 LNG 貯槽の強度信頼性を一層向上させるためには、このような厚板 9 % Ni 鋼の特性を十分に活用することが合理的である。

本報では、40~55 mm の新厚板 9 % Ni 鋼に関する母材及び溶接継手の低温靱性を主体とした特性と、大容量 LNG 貯槽への適用性の評価について述べる。

2. 供試厚板 9%Ni 鋼と狭開先溶接継手

供試した 9 % Ni 鋼は、板厚 40~55 mm の 7 鋼種であり、化学成分と機械的性質を表 1 に示す。前述のとおり、いずれも製鋼段階で鋼中の不純物を低減した清浄鋼であり、成分、熱処理などが工夫されている。ビッカース硬さ計測結果などから、いずれの鋼種も板厚中央部の焼入れ性は、良好で軟化していないことを確認した。

表 1 供試厚板 9 % Ni 鋼の化学成分と機械的性質
Chemical composition and mechanical properties of heavy gauge 9 % Ni steel plates tested

No.	板 厚 (mm)	化 学 成 分 (%)						機 械 的 性 質			
		C	Si	Mn	P	S	Ni	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸 び (%)	シャルピー吸収エネルギー vE _{190°C} (J)
1	40	0.036	0.26	0.56	0.002	0.001	9.06	670	715	47	270
2	45	0.06	0.25	0.59	0.002	0.001	9.43	620	720	55	260
3	50	0.05	0.24	0.64	0.001	0.001	9.33	630	715	34	265
4	50	0.035	0.26	0.56	0.002	0.001	9.06	650	715	49	270
5	50	0.05	0.23	0.57	0.004	0.0009	9.10	610	705	35	220
6	55	0.048	0.04	0.58	0.002	0.001	9.20	630	740	51	290
7	55	0.05	0.22	0.56	0.002	0.0005	9.36	610	720	34	255

*1 鉄構技術部プラント設計課主務

*3 横浜研究所構造・強度研究室

*2 横浜研究所構造・強度研究室長 工博

*4 長崎研究所強度研究室 工博

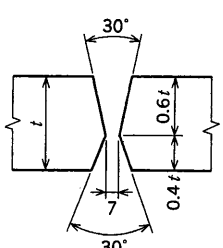
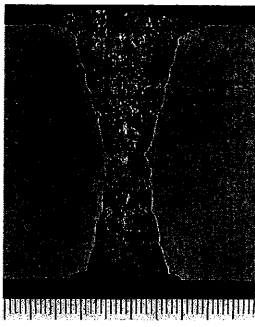
溶接法 (姿勢)	開先形状	溶接入熱 (kJ/cm)	代表的なマクロ組織
TIG 溶接 (立向)		28~38	

図1 供試継手の溶接条件と代表的なマクロ組織 厚板9%Ni鋼の供試継手の実機の側壁最下段を想定した溶接条件及び狭開先継手の代表的なマクロ組織を示す。

Welding condition of tested joints assumed fabrication of lowest course shell of LNG tanks and representative macro structure of welded joint of heavy gauge 9% Ni steel

供試した溶接継手は、側壁最下段への適用を想定し、70%Niオーステナイト系溶接材料（ハステロイ）を用い、立向TIG溶接で実機と同じ条件により作製した。開先形状は、厚板化による溶接量や熱変形の増大を回避するため、従来の55°から30°への狭開先化を図った。溶接条件及び代表的なマクロ組織例を図1に示す。継手引張り、曲げなどの一般的な強度特性は、十分な性能を有していることを確認した。

3. 母材及び溶接継手の破壊靱性

3.1 3点曲げCTOD試験

LNG温度での破壊靱性値を把握するため、厚板9%Ni鋼の母材及び溶接継手熱影響部の3点曲げCTOD試験を実施した。いずれの鋼種においても、LNG温度での限界CTOD値が0.4mm以上の値を示した。絶対値の評価については後述するが、実機の溶接継手を想定した狭開先立向TIG溶接継手は、良好な低温靱性を有している。

この限界CTOD値について、従来9%Ni鋼の12~36mmの従来開先溶接継手のデータと板厚別に対比して図2に示す。厚板9%Ni鋼は従来板厚の鋼板と同等以上の性能を有しており、厚板化及び狭開先化したことによる脆化の問題は認められない。

3.2 混成 ESSO 試験

LNG温度または-196℃において392~490MPaの引張応力を負荷した混成 ESSO 試験を実施した。供試体形状を図3に示す。

混成 ESSO 試験は、フープ応力場にある側板に万が一の脆性き裂が発生したことをモデル化し、材料の脆性き裂伝ば停止性能を求めると同時に、大破壊に至るか否かを判定する試験法である。いずれの試験も、地震時の短期許容応力を大きく超えた応力を負荷した状態で、脆化させた助走板に故意に脆性き裂を発生させ、厚板9%Ni鋼に突入させたが、脆性き裂は停止した。十分な脆性き裂伝ば停止性能を示し、破壊伝ば抵抗値 $K_{ca} > 280 \text{ MN/m}^{3/2}$ であることを確認した。

3.3 3面スリットシャルピー衝撃試験

9%Ni鋼は靱性が高いため、通常材料受入れ試験として行われる-196℃の液体窒素温度でのV-ノッチシャルピー衝撃試験では、切欠靱性や脆性き裂伝ば性能の差が判定できない場合があ

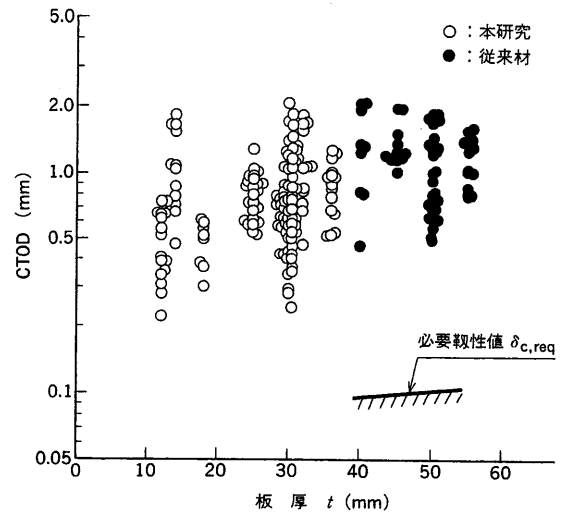


図2 9%Ni鋼溶接継手のLNG温度における限界CTOD値と板厚との関係

厚板9%Ni鋼狭開先溶接継手の限界CTOD値について、従来板厚データとの関係を対比した。
Critical CTOD values of heavy gauge 9% Ni steel welded joints of narrow gap compared with ones of usual gauge 9% Ni steels

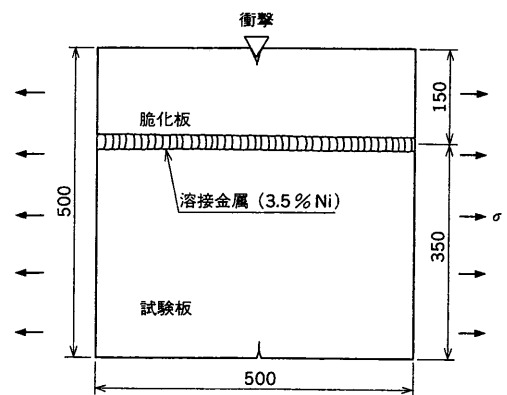


図3 混成 ESSO 試験供試体形状 脆性破壊停止性能を求めるための混成 ESSO 試験供試体形状を示す。
Configuration of duplex ESSO test specimen

る⁽⁵⁾。このような材料用に開発した3面スリットシャルピー衝撃試験を-196℃及び液体ヘリウム温度(-269℃)で行った。本試験は、通常のV-ノッチシャルピー衝撃試験より、延性/脆性遷移温度が約60℃上昇する厳しい試験法である。

母材試験結果を図4に示す。このような厳しい試験法であるにもかかわらず、液体窒素温度(-196℃)では、供試材料すべての脆性破面率が0%であり、厚板9%Ni鋼はLNG温度において優れた切欠靱性と脆性き裂伝ば停止性能を有していると判断され、混成 ESSO 試験結果を裏付けている。従来材と比較しても、優れた特性を有していると言える。なお、-269℃で認められた脆性破面の1例を図5に示す。微細な脆性/延性破面の混在が認められており、このような微細なネット状の延性部分が全体としての靱性を維持していると考えられる。

4. 大容量 LNG 貯槽への適用

4.1 安全性評価の考え方

LNG貯槽の安全は、地震時などの万一の場合においても絶対に破壊が発生しないことによって確保される。すなわち、

(1) 溶接継手の最脆化部に、建設時に見逃すはずのない大きな欠

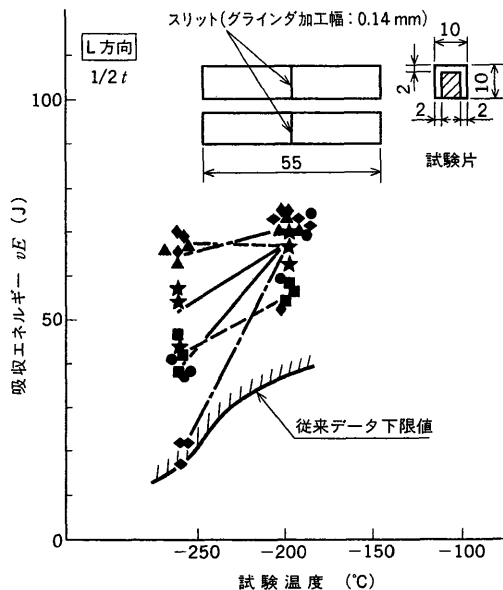


図4 3面スリットシャルピー衝撃試験結果 厚板9%Ni鋼の液体窒素温度(−196℃)及び液体ヘリウム温度(−269℃)での3面スリットシャルピー衝撃試験における吸収エネルギーの温度変化を示す。
Relationship in three surface slitted Charpy impact test

陥の存在を想定し、

- (2) しかも、その欠陥が貯槽の耐用期間中に負荷される変動応力の繰返しによって疲労き裂として成長することを考慮し、
- (3) このような潜在き裂に想定される荷重が作用しても、絶対に脆性破壊が発生しない、

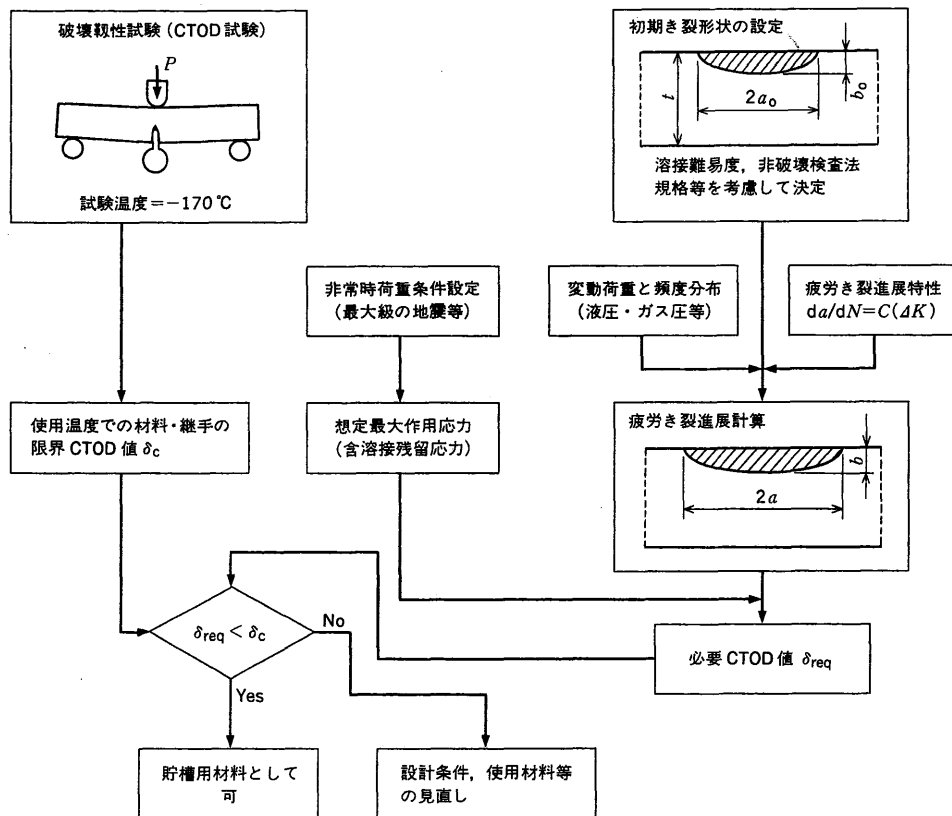


図6 LNG貯槽の安全性評価フローチャート LNG貯槽における脆性破壊に対する安全性評価のフローチャートを示す。
Safety evaluation flow chart of LNG storage tanks

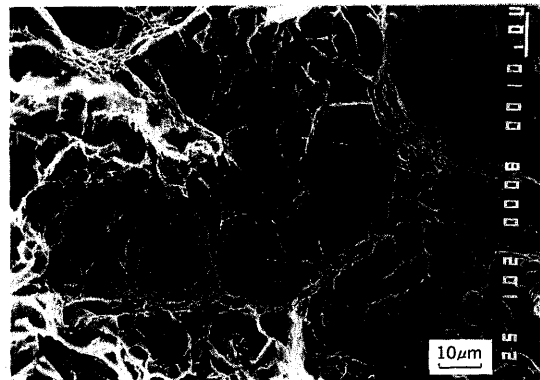


図5 −269℃での3面スリットシャルピー衝撃試験片の破面 −269℃での3面スリットシャルピー衝撃試験片の破面では、脆性/延性破面の微細な混在が認められる。
Fracture surface of three surface slitted Charpy impact test specimen at −269℃

ことが9%Ni鋼で構成される内槽において成立つ必要がある。このような考え方に立脚した安全性評価のフローチャートを図6に示す。欠陥として長さ100mm、深さ $t/5$ の表面半だ円き裂を想定し、内槽の側壁最下段に厚板9%Ni鋼狭開先溶接継手を適用した場合の安全性について、以下に検討した。

4.2 厚板9%Ni鋼の側壁最下段縦溶接継手への適用性評価

大形LNG地上式貯槽への厚板9%Ni鋼及び狭開先溶接継手の適用性について評価を行った。

側壁最下段の検討対象位置を図7に示す。作用応力にはFEM解析結果に基づいた表2に示す値を用いた。ここで、地震荷重には、最大級の地震を想定した。また、溶接による角変形及び目違いの構造不整は表2の欄外に示した値を考慮した。

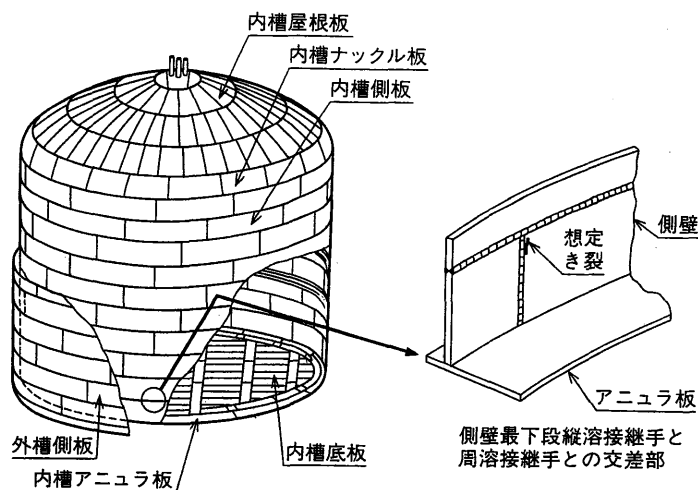


図7 検討対象位置 LNG貯槽における側壁最下段の縦溶接継手の安全性評価を行った位置を示す。
Selected position for safety evaluation

疲労き裂進展解析には、満液から空液の液圧変動 2 000 回及び地震荷重の繰返しを考慮した。また、最終破壊強度の評価には、残留応力の影響は実測値の 60 % が有効とし⁽³⁾⁽⁴⁾、耐用期間中に想定し得る最大き裂部に地震荷重が作用した場合にも、絶対に脆性破壊が発生しないために必要な破壊靱性値を算出した。

ここで、疲労き裂の進展解析には、金属材料技術研究所太田らの提案による溶接継手の最安全側のき裂進展速度データ、すなわち式(1)を用いた。

$$da/dN = 2.60 \times 10^{-11} (\Delta K^{2.75} - 2.0^{2.75}) \quad (1)$$

$$da/dN : \text{m/cycle}, \quad \Delta K : \text{MN/m}^{3/2}$$

また、応力拡大係数の計算には、J. C. Newman らの式を用いた⁽⁶⁾。

$$K = (\sigma_m + \sigma_b) \cdot \sqrt{\pi a} \cdot (F/\phi) \quad (2)$$

ここで、
 σ_m : 膜応力
 σ_b : 曲げ応力
 a : き裂深さ
 F : 形状係数
 ϕ : 完全だ円積分

このようにして求めた側壁最下段の必要靱性値から、必要 CTOD 値への変換は、さらに次式を用いた。

$$\delta_{c,req} = (K_{c,req})^2 / (E \cdot \sigma_y) \quad (3)$$

以上のき裂進展解析より求めた 40, 45, 50 及び 55 mm の各板厚に対する最大想定欠陥、必要靱性値、必要 CTOD 値などを表 3 に示す。板厚が厚くなると、想定欠陥深さが増すために必要靱性値が増大の傾向にある。

これらの結果を、先に求めた継手の限界 CTOD 値と対比するため、図 2 中に示す。図 2 から明らかなように、継手の限界 CTOD 値が必要靱性値を十分に上回っており、50 mm 板厚の 9 % Ni 鋼及び狭開先 TIG 溶接継手は、20 万 kl クラスの大容量貯槽に十分適用可能である。

5. 結 言

LNG 貯槽の大型化に向けて 40~55 mm の厚板 9 % Ni 鋼 7 鋼種を供試し、母材の特性及び側壁最下段への狭開先溶接継手の適

表 2 側壁最下段縦継手の作用応力

Applied stress at vertical joint in lowest course of LNG tank

単位: MPa

評価位置	耐圧試験時				通常運転時				地震時 (短周期)				地震時 (長周期)			
	0°		180°		0°		180°		0°		180°		0°		180°	
	σ_m	σ_b	σ_m	σ_b	σ_m	σ_b	σ_m	σ_b	σ_m	σ_b	σ_m	σ_b	σ_m	σ_b	σ_m	σ_b
側壁最下段	287	2.9	144	1.0	251	2.9	40.2	1.0	155	2.0	133	1.0	211	2.0	133	1.0
	316		199		295		71.5									188

下段は、構造不整 (目違い: 3.0 mm, 角変形: 100 mm/1000 mm) による曲げ応力を加算。

表 3 側壁最下段縦継手の必要靱性値、必要 CTOD 値

Required fracture toughness at vertical joint in lowest course of LNG tank

位置	板厚 t (mm)	初期想定欠陥		最大想定き裂		必要靱性値 K_{Ic} ($\text{MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$)	必要 CTOD 値 (mm)
		長さ $2c_0$ (mm)	深さ a_0 (mm)	長さ $2c$ (mm)	深さ a (mm)		
側壁最下段	40	100	8.0	100.68	9.97	126	0.094
	45	100	9.0	100.80	11.02	128	0.097
	50	100	10.0	100.91	12.04	130	0.099
	55	100	11.0	101.02	13.06	131	0.102

用性を検討した結果、次の結論を得た。

- (1) 厚板 9 % Ni 鋼の母材及び狭開先 TIG 溶接継手は、ともに十分な強度及び靱性を有している。
- (2) 貯槽の最下段の縦溶接継手を想定した狭開先立向 TIG 溶接継手の LNG 温度における限界 CTOD 値は 0.4 mm 以上の値を示した。
- (3) 高靱性材料の脆性き裂伝ば停止性能の判定法として提案している 3 面スリットシャルビー衝撃試験を、厚板 9 % Ni 鋼の母材に適用した結果、いずれも -196℃において脆性破面が認められず、優れた脆性き裂伝ば停止性能を示した混成 ESSO 試験結果を裏付けた。
- (4) 側壁最下段に長さ 100 mm、深さ $t/5$ のき裂の存在を仮定し、貯槽の耐用期間中に絶対に脆性破壊しない必要 CTOD 値に対し、溶接継手の限界 CTOD 値が十分に上回る。
- (5) 大容量 LNG 貯槽に対し、厚板 9 % Ni 鋼が実用可能であると同時に、狭開先溶接が適用可能である。

参 考 文 献

- (1) 淵元ほか、LNG 地上式貯槽の現状と将来の展望、圧力技術 Vol.29 No.2 (1991) p.1
- (2) 町田ほか、LNG 貯槽用厚肉 9 % Ni 鋼の脆性破壊特性、圧力技術 Vol.31 No.6 (1993) p.353
- (3) 今井ほか、9 % ニッケル鋼製 LNG 貯槽の破壊力学による安全性評価、三菱重工技報 Vol.21 No.2 (1984)
- (4) Imai J. et al., Safety Evaluation of LNG Storage Tanks of 9 % Nickel Steel Based on Fracture Analysis, Proc. of Int. Conference Transport and Storage of LPG & LNG (1984)
- (5) 出口ほか、9 % Ni 鋼板のアレスト性能と新衝撃試験に関する一考察、日本造船学会論文集 第167号 (1990) p.271
- (6) Newman J. C. et al., Stress-intensity Factors Equations for Cracks in Three-Dimensional Finite Bodies, NASA TM83200 (1979)