

多目的 LPG 船のタンク材料と信頼性

New Low-Temperature Steel Plate and Its Application for Multi-Purpose Gas Carrier

技 術 本 部 多 田 益 男^{*1} 斉 藤 正 洋^{*2}
長 崎 造 船 所 橋 本 州 史^{*3} 白 木 原 浩^{*4}
坪 内 大 泉^{*4}

多目的 LPG (液化石油ガス) 船のタンク材料には、通常の LPG タンク材料の特性に加えて、貨物の特殊性に対する配慮が必要である。多目的 LPG タンクへの使用を目的として、新たに規格を設定し、降伏点 315 MPa 級低温用鋼板 LLF 32 を開発・実用化した。当該鋼板は、多目的 LPG 船タンク材料として、大入熱溶接継手部も含め十分な低温靱性と、液化アンモニアを積む場合のアンモニア応力腐食割れ (SCC) の十分な防止性能を有していることを実証した。新低温用鋼板 LLF 32 の使用により、多目的 LPG タンクの高い安全性と信頼性が確保できる。

In the selection of materials for cargo tanks for multi-purpose gas carriers, special consideration should be paid to the peculiarities of the cargo as well as to the general material properties required for an LPG carrier. A new low temperature steel (LLF32), which has a yield stress of 315 MPa level in accordance with new specifications, has been developed and put to practical use. This steel plate has been proven to have sufficient toughness at low temperature as a tank material for multi-purpose gas carriers, even if welded with a large heat input, and also to have stress corrosion cracking resistance to liquid ammonia. It is considered that highly safe and reliable tanks for multi-purpose gas carriers can be constructed using application the new LLF32 low temperature steel.

1. ま え が き

LPG (液化石油ガス) 船は、その貨物性状のため船殻及びタンクの構造や材料、施工に関して高い安全性と信頼性が求められる。

当社は、昭和 37 年に LPG を大量にしかも専用に運搬する低温式 LPG 船を世界で初めて新造、引き渡しし、以来数多くの LPG 船を建造してきた。さらに、通常の LPG 船に加えて、LPG (プロパン、ブタン) のほか、無水アンモニア、プロピレン、ブチレン、塩化ビニルモノマ (VCM) 等の多種類にわたる貨物が積載可能な多目的 LPG 船の建造を開始した。多目的 LPG 船の建造に当たっては、船殻及びタンクの構造信頼性の検証や貨物の特殊性からのタンク材料の品質に関する検討を実施した。

本報では、多目的 LPG 船タンク材料として開発・実用化された降伏点 315 MPa 級新低温用鋼板とその強度特性について述べる。本新低温用鋼板は、母材の強度・靱性はもちろんのこと、優れた溶接継手部の靱性と耐応力腐食割れ性が確保されている。

2. 多目的 LPG 船タンク材料への要求性能

当社建造の多目的 LPG 船と通常の LPG 船の主要目を、表 1 に示す。

多目的 LPG 船は貨物が多種類にわたることから、そのタンク材料は通常の LPG タンク材料に比べ下記の点を考慮したものでなくてはならない。

- (1) 設計温度 (最低使用温度) が -50°C (通常の LPG は -46°C) となり、 -50°C での信頼性が確保された材料であること。
- (2) 液化アンモニア積みによる応力腐食割れ (SCC) 防止対策が講じられた材料であること。

LPG 船等の液化ガスばら積船の構造材料に関しては、IMO のガスコード⁽¹⁾や各国の船級協会規則⁽²⁾⁽³⁾で指針が示されている。特に、アンモニアを積むタンクの材料には、SCC の危険性を最小限

にするため特別要件が定められており、規格最小降伏点が 355 MPa 以下であって、実際の降伏点が 440 MPa 以下とされている。

これらの指針に準拠し、多目的 LPG 船タンク材料として、 -50°C (最低使用温度) における低温靱性と SCC の防止を考慮した降伏点 315 MPa 級低温用鋼板 LLF 32 を新たに規格化し、開発・実用化した。新低温用鋼板 LLF 32 の化学成分及び機械的性質を、表 2 及び表 3 に示す。同表中には、通常の LPG タンク材料として実用されている、降伏点 325 MPa 級低温用鋼板 KL 33 の規格値⁽²⁾も示した。

表 1 当社建造の多目的 LPG 船と通常の LPG 船の主要目
Particulars of multi-purpose gas carrier

項 目		多目的 LPG 船	通常の LPG 船
船 型	全 長 (m)	170	230
	型 幅 (m)	27.4	36.6
	型 深 (m)	18.2	20.4
タンク	方 式	方形独立型	方形独立型
	容 積 (m ³)	35 000/3 タンク	78 000/4 タンク
設計温度 (°C)		-50	-46

表 2 新低温用鋼板 LLF 32 の化学成分
Chemical compositions of LLF 32 steel plate

(重量%)							
鋼 種	製造法	C	Si	Mn	P	S	Ceq
LLF 32	TMCP	≤ 0.10	0.10~0.50	0.7~1.60	≤ 0.015	≤ 0.005	≤ 0.35
KL 33 (通常材)	Q&T TMCP	≤ 0.14	0.10~0.50	0.7~1.60	≤ 0.030	≤ 0.025	≤ 0.41

*1 長崎研究所第一実験課 工博

*3 造船設計部船殻設計課長

*2 長崎研究所材料・溶接研究室主務

*4 造船設計部船殻設計課

表3 新低温用鋼板 LLF 32 の機械的性質
Mechanical properties of LLF 32 steel plate

鋼種	引張特性			シャルピー衝撃特性	
	YP (MPa)	TS (MPa)	El (%)	試験温度(℃)	vE (J)
LLF 32	315~440	440~560	≥22	$t \leq 25$: -55 $25 < t \leq 30$: -60 $30 < t \leq 35$: -65	T 方向: ≥27
KL 33 (通常材)	≥325	440~560	≥20	$t \leq 25$: -51 $25 < t \leq 30$: -56 $30 < t \leq 35$: -61	T 方向: ≥27

El: 伸び (ゲージ長=5.65√断面積)

3. 新低温用鋼板 LLF 32 の強度特性と評価

3.1 基本的特性

新低温用鋼板 LLF 32 は表2に示したように、母材及び溶接熱影響部の低温靱性を確保するために低C-低Ceqの成分系で製造され、またTMCP (Thermo Mechanical Control Process) の活用で母材強度の制御と強化が図られている。

タンク材料として実用された LLF 32 鋼板の降伏点 YP 及び引張強さ TS の頻度分布を図1に示す。また、-55℃におけるシャルピー一吸収エネルギー vE(-55℃) の頻度分布を図2に示す。

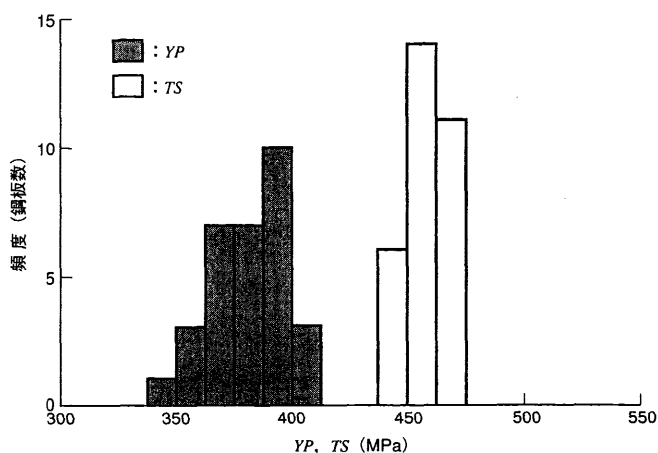


図1 LLF 32 鋼の引張強度特性頻度分布の例 ($12.5 \leq t \leq 20$, T 方向) YP, TS 共に規格強度を満足し、しかも非常に狭い範囲で制御されて製造されている。
Example of tensile properties of LLF 32 steel plate

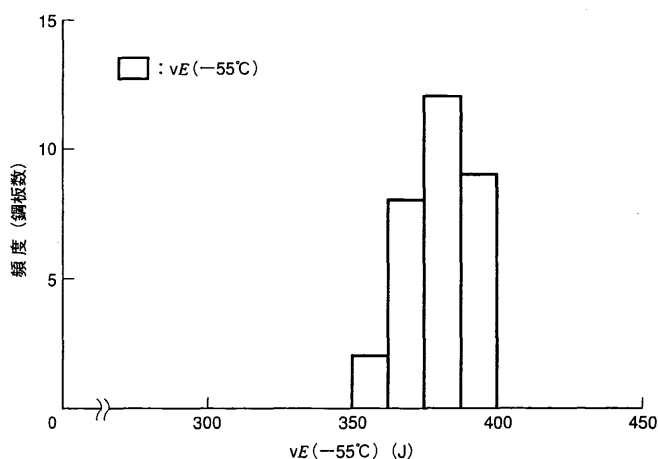


図2 LLF 32 鋼の吸収エネルギー頻度分布の例 ($12.5 \leq t \leq 20$, T 方向) vE(-55℃) は規格値を十分満足しており、優れた低温靱性を有している。
Example of absorbed energy of LLF 32 steel plate

図1及び図2は、板厚が12.5~20 mmの31鋼板の例である。YP, TS共に非常に狭い強度範囲で製造され、SCCの防止を考慮したYP規格内(表3参照)に制御されている。vE(-55℃)も十分に確保されており、優れた低温靱性を有している。

溶接熱影響部(HAZ)の溶接割れ(低温割れ)性を表す指標として、HAZの硬さが用いられる。図3は、JIS Z 3101に基づき実施したLLF 32鋼板(板厚16 mm, 3鋼板)のHAZ最高硬さ試験結果を、通常のLPGタンク材料として既に実用され安全使用実績の豊富なTMCP型KL 33鋼板の結果^{(4)~(6)}と比較して示したものである。LLF 32鋼板のHAZ最高硬さは、KL 33鋼板の下限界線に近い。すなわち、LLF 32鋼板は、熱硬化性が極めて低く、優れた低温割れ防止性能を有していることが明らかである。

以上の結果から、新低温用鋼板 LLF 32 は、多目的LPGタンク材料として使用した場合、十分な低温靱性と、HAZ低温割れ防止性能を有していると判断でき、高い信頼性が確保できるものと考えられる。

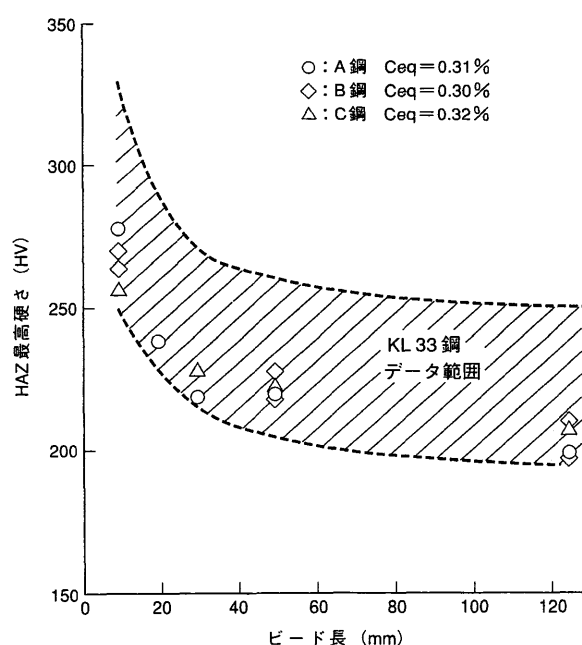


図3 LLF 32 鋼のHAZ最高硬さ試験結果(JIS Z 3101) (板厚16 mm, 試験温度0~25℃) LLF 32 鋼は、熱硬化性が低く優れた低温割れ防止性能を有していると判断できる。
Relation between maximum hardness and bead length obtained by maximum hardness test (JIS Z 3101)

3.2 溶接継手部の靱性

LPGタンクの代表的大入熱溶接継手である、片面サブマージーク溶接(SAW)継手のシャルピー衝撃試験結果を図4に示す。図4は、板厚16 mmのLLF 32鋼板3種でそれぞれ溶接熱入力HIを変えた継手(鋼板圧延方向と溶接方向が同一のT方向継手)の各切欠き位置におけるvE(-55℃)の平均値を示したものである。ここで、溶接継手に対する要求吸収エネルギーは、表3に示した母材規格値と同一とした。

入熱量の増加とともにvEが低下する傾向が認められるが、各継手共に要求吸収エネルギー、すなわち、

T方向継手: vE(-55℃) ≥ 27 J

を十分満足している。

一方、SAW継手ボンド部に0.1 mm幅の切欠きを加工した中央

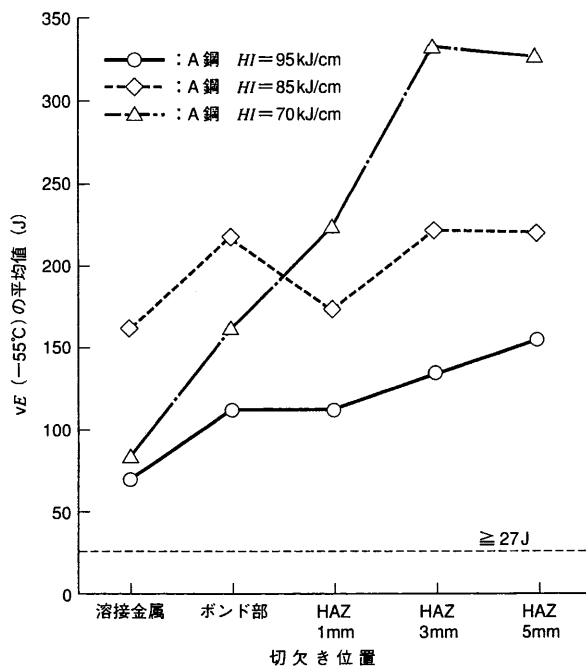


図4 LLF 32 鋼 SAW 継手のシャルピー衝撃試験結果 (板厚 16 mm) $vE(-55^{\circ}\text{C})$ は規格値を十分満足しており、大入熱溶接継手においても優れた低温靱性を有している。
Relation between absorbed energy and notch location of SAW joints obtained by Charpy impact test

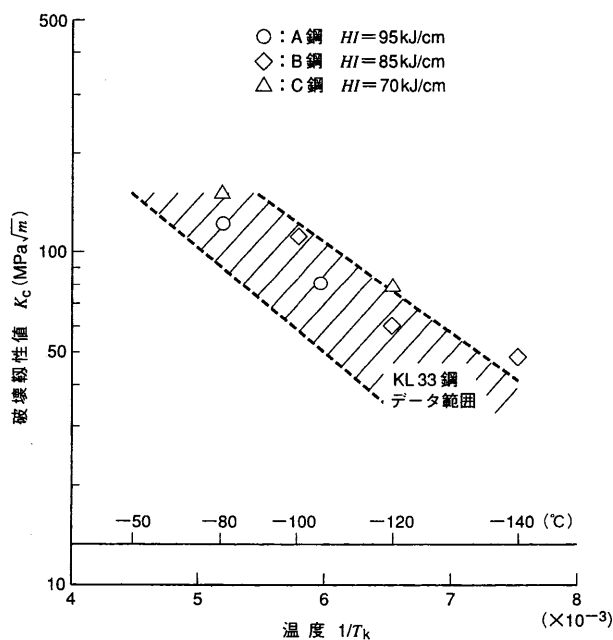


図5 LLF 32 鋼 SAW 継手の中央切欠付広幅引張試験結果 (切欠き位置: ボンド部) 大型の試験片による破壊靱性試験の結果、大入熱溶接継手においても優れた破壊靱性を有していることが確認できた。
Relation between fracture toughness value and temperature for fusion line of SAW joints obtained by center notched wide plate tensile test

切欠付広幅引張試験片 (幅 400 mm, 切欠き長さ 240 mm) による破壊靱性値 K_{IC} と温度 (絶対温度 T_K) との関係を図 5 に示す。供試継手は、シャルピー衝撃試験供試継手と同一である。図 5 中には、TMCP 型 KL 33 鋼板 SAW 継手のデータ範囲⁽⁴⁾⁽⁵⁾も示した。LLF 32 鋼板 SAW 継手の K_{IC} は、入熱量の増加とともに低下する傾向が認められるが、図中に示した KL 33 鋼板の上限界線に近

い。すなわち、LLF 32 鋼板溶接継手は、通常の LPG タンク材として実績のある KL 33 鋼板継手と同等以上の高い破壊靱性を有していることが明らかである。

以上の結果から、新低温用鋼板 LLF 32 は、多目的 LPG タンク材として使用し大入熱溶接を施工した場合においても十分な破壊靱性を有していると判断でき、脆性破壊の防止に関して高い信頼性が確保できるものと考えられる。

4. 新低温鋼板 LLF 32 の SCC 特性と評価

4.1 液化アンモニア中での炭素鋼の応力腐食割れ

多目的 LPG 船の積荷の一つである液化アンモニア中では、炭素鋼は SCC を起す危険性があることが知られている。液化アンモニアによる炭素鋼の SCC への環境側の因子としては、 CO_2 と空気が共存すると割れやすくなること⁽⁷⁾、0.08 % 以上の水分の添加で割れを抑制できること⁽⁸⁾、室温域に比べ低温になるほど割れ感受性が小さいこと⁽⁹⁾などが明らかとなっている。また、材料側の影響因子としては、高強度鋼ほど割れやすいこと⁽¹⁰⁾などが明らかとなっている。

以上のような影響を考慮して、アンモニアを積むタンクは、2 章で述べたような材料の降伏強度制限が設けられており、さらに、次の①から④のいずれかの規定を満足しなければならないとされている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

- ① 規格最小引張強さが 410 MPa 以下の材料である。
- ② 貨物タンクなどは、溶接残留応力除去のために熱処理を行わなければならない。
- ③ 運搬温度をできる限り貨物の沸点である -33°C 付近に維持し、いかなる場合も -20°C 以上としてはならない。
- ④ 貨物は、重量比で 0.1 % 以上の水分を含むアンモニアでなければならない。

4.2 SCC 試験結果

今回開発・実用化した LLF 32 鋼板の液化アンモニアに対する耐 SCC 性を評価するために、この種の加速評価試験によく使用される 5 重量%のカルバミン酸アンモニウムを添加した液化アンモニウム (酸素飽和) による SCC 試験を実施した。SCC 試験法は、次の 2 種である。

- U ベンド試験
- 4 点曲げ試験

U ベンド試験は、LLF 32 鋼板の母材に対して、試験温度 25°C 、1 000 h の条件で行った。4 点曲げ試験は、LLF 32 鋼板と比較材に TMCP 型 KL 33 鋼板を用い、それぞれの SAW 継手から採取した板状試験片を供試して、試験温度 25°C 、500 h の条件で行った。

SCC 試験結果を表 4 に示す。LLF 32 鋼板母材の U ベンド試験では、明確な割れの発生は認められなかった。SAW 継手の 4 点曲げ試験では、KL 33 鋼板の負荷応力の高いものでは、腐食ピットが溝状に成長している状況が観察された。

これに対し、LLF 32 鋼板では腐食ピットは認められたものの、いずれの条件においても割れにつながるような腐食ピットの成長は見られなかった。

4.3 SCC 特性の評価

4.2 節の試験結果から明らかのように、LLF 32 鋼板では SCC の発生は認められなかった。

一方、液化アンモニア中での SCC 性を検討した結果⁽¹¹⁾によれば、母材の硬さが HV 220 を、HAZ の場合では HV 280 を超えると割れが発生している。図 6 は、LLF 32 鋼板の各種溶接による

表4 応力腐食割れ試験結果

Results of stress corrosion cracking test

鋼種	試験法	試験材	負荷たわみ δ/δ_y^{*1}	試験結果 ^{*2}
LLF 32	Uベンド試験	母材	—	〇〇
	4点曲げ試験	SAW 継手	1.00	〇〇
			2.00	〇〇
			4.00	〇〇
KL 33	4点曲げ試験	SAW 継手	1.00	〇〇
			2.00	〇〇
			4.00	△〇

* 1 δ : 負荷たわみ量 δ_y : 負荷応力が降伏点に相当するときのたわみ量

* 2 〇: 腐食ピットのみで割れなし

△: 割れはないが腐食ピットが溝状に成長

HAZの硬さを示したものである。HAZの硬さは、最大でも約HV 230であり、SCCの危険性は極めて低いと判断できる。

以上の結果から、新低温用鋼板 LLF 32 は、多目的 LPG タンク材料として使用した場合、アンモニア積載による SCC の危険性はないものと考えられる。

5. ま と め

新たに規格を設定し開発・実用化した、降伏点 315 MPa 級新低温用鋼板 LLF 32 は、多目的 LPG 船タンク材料として十分な強度特性を有することが実証された。すなわち、多目的 LPG 船タンク材料として、大入熱溶接継手部も含め十分な低温靱性と液化アンモニア積みに対する十分な SCC 防止性能を有しており、当該鋼板を適用した多目的 LPG タンクでは、高い安全性と信頼性が確保で

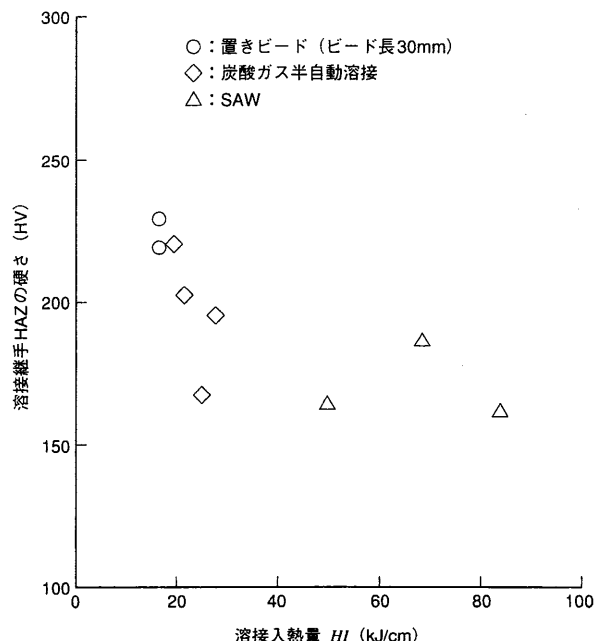


図6 LLF 32 鋼溶接継手 HAZ の硬さと溶接入熱量との関係
LLF 32 鋼の HAZ の硬さは低く、優れたアンモニア SCC 防止性能を有していると判断できる。

Relation between hardness of HAZ in welded joints and welded heat input

きる。

終りに、本研究の遂行に当り、多大なご協力を頂いた鉄鋼メーカー各社の関係各位に、厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) International Marine Organization, The IMO International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk, IGC Code (1995)
- (2) 日本海事協会, 鋼船規則集 N 編液化ガスばら積船 (1996)
- (3) Lloyd's Register of Shipping, Classification of ships rules and regulations Part 2 Manufacture, Testing and Certification of Materials (1997)
- (4) 矢島 浩ほか, 低温型 LPG 船用 TMCP 型高靱性新低温用鋼板の諸特性とその評価, 日本造船学会論文集第 168 号 (1990) p.557
- (5) 矢島 浩ほか, 低温型 LPG タンク用 TMCP 鋼板の破壊靱性とその評価, 圧力技術 Vol.29 No.6 (1991) p.335
- (6) 真谷捷郎ほか, TMCP 型低温用鋼板の現場工作に関する一考察, 西部造船会会報第 80 号 (1990) p.265
- (7) Wilde, B. E., Stress Corrosion Cracking of ASTM A 517 Steel in Liquid Ammonia — Environmental Factors —, Corrosion Vol.37 (1981) p.131
- (8) Kim, C. D. et al., Stress Corrosion Cracking of Line-Pipe Steels in Anhydrous Ammonia, Corrosion Vol.31 (1975) p.255
- (9) 今川博之, 液体アンモニア中における高張力鋼の腐食割れ防止法, 日本金属学会誌 Vol.41 (1977) p.211
- (10) 石沢嘉一ほか, 液体アンモニアによる鋼の応力腐食割れ, 鉄と鋼 Vol.65 (1979) p.402
- (11) 小岩正倫, 金属の腐食損傷と防食技術, アグネ出版 (1983)