

# 低温貯槽タンク用鋼板

## Steel Plate for Low-Temperature Service Tanks

川畑友弥/Tomoya Kawabata・鹿島製鉄所 厚板生産技術部 厚板商品技術室

大西一志/Kazushi Onishi・鹿島製鉄所 厚板生産技術部 厚板管理室 室長

壺岐 浩/Hiroshi Iki・鹿島製鉄所 厚板生産技術部 厚板商品技術室 参事補

稲見彰則/Akinori Inami・鋼板事業部 厚板技術部 参事

### 要 約

エネルギー貯蔵および運搬に重要な役割を持つ LPG, LNG などの低温貯槽タンクは、貯蔵内容の液化温度に応じて材料に対する靱性要求レベルが変化する。本報では、LPG 貯槽タンク用鋼としてアルミキルドタイプの SLT365TMC および 1.5%Ni 添加型の SLT1.5N365TMC 鋼板と、LNG 貯槽タンク用鋼として 9%Ni 添加型の SLT9N590 鋼板の性能を、それぞれの開発に関する基本的な考え方と併せて紹介する。

### Synopsis

Steel plates for low-temperature service tanks for LPG or LNG, which play an important role in energy storage and transportation, are required to withstand various temperature levels corresponding to the liquified temperature of the container material. This brief report presents the concepts and the properties of aluminum-killed steel (SLT365TMC) and 1.5%Ni bearing SLT1.5N365TMC for LPG storage tanks and 9%Ni bearing SLT9N590 for LNG storage tanks.

## 1. 緒 言

LPG, LNG を液化状態で安全に保存するために、使用鋼材には低温における高い信頼性が要求される。第 1 表に脆性破壊に対する溶接構造物の安全性に対する一般的な指標を示す<sup>1)</sup>。第 1 段階は溶接欠陥などの初期欠陥から脆性破壊発生を防止するレベルである。第 2, 第 3 段階は発生した脆性き裂を停止 (アレスト) させるレベルである。一般的には、適切な組立、溶接施工の品質管理が行われていれば安全性確保の観点からは第 1 段階、あるいはアレスト性まで考慮に入れるとしても第 2 段階にて充分である。しかしながら、タンク設置場所が都市部である、あるいは溶接施工の管理において溶接環境などに起因する不確定要素がある場合は第 3 段階の脆性破壊に対する安全性を有する鋼材が要求される場合もある。万が一脆性き裂が発生、伝播しても第 3 段階の靱性を有していれば溶接継手を伝播したき裂が母材を進展することなく、タンク全体の破壊を防ぐことができると考えられるためである。これらの安全性指標に従って、タンク用鋼板の開発を進めてきた。

第 1 図に示すとおり LPG, LNG の液化温度は大気圧下でそれぞれ  $-42^{\circ}\text{C}$ ,  $-161.5^{\circ}\text{C}$  であることから、一般的に LPG タンク用には上述の安全性に対する指標に従って低

温用アルミキルド鋼あるいは 1.5~2.5%Ni 鋼を、LNG タンク用には 9%Ni 鋼が用いられる。ここでは、LPG タンク用に TMCP 技術を活用して開発を行った低温用アルミキルド鋼 (SLT365TMC), 1.5%Ni 鋼 (SLT1.5N365TMC) を、LNG タンク用にはタンクの大容量化に対応すべく開発した厚肉の 9%Ni 鋼 (SLT9N590) を中心に諸性能を紹介する。

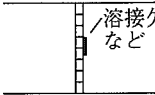
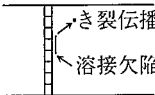
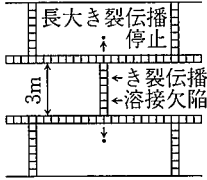
## 2. LPG 貯蔵タンク用鋼板

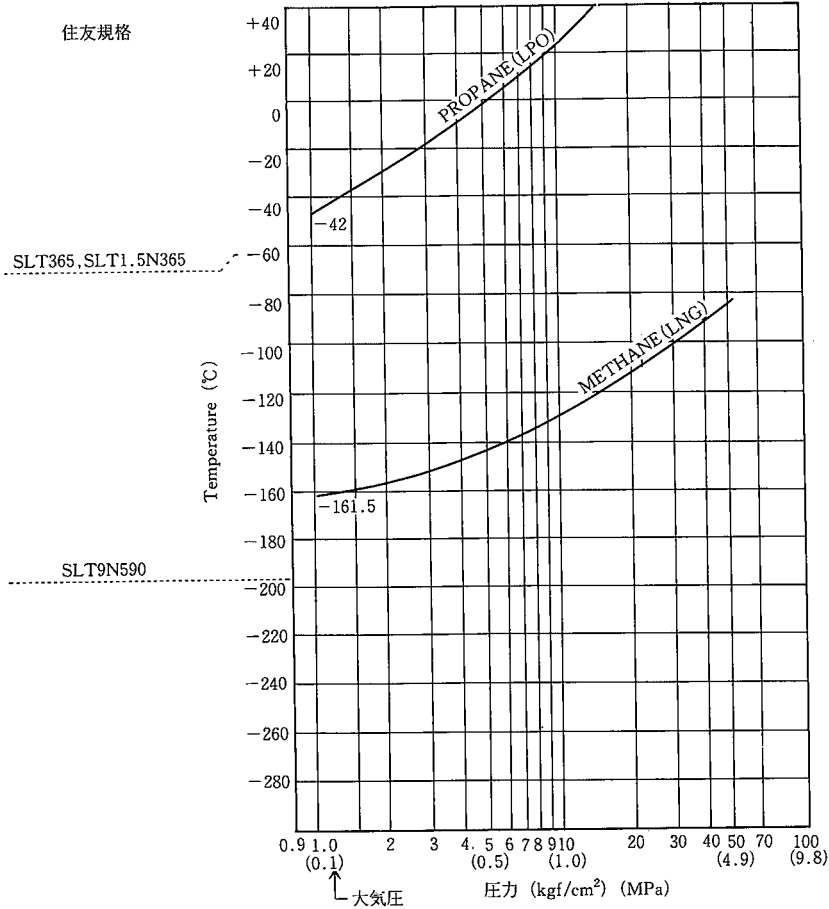
### 2-1 低温アルミキルド鋼板 (SLT365TMC) における TMCP 適用効果と HAZ 靱性

LPG 貯蔵タンクは  $-45^{\circ}\text{C}$  から  $-50^{\circ}\text{C}$  の範囲で設計され、これまで JIS 低温圧力容器用鋼 (Z 3126) のアルミキルド鋼 SLA325B (当社規格 SLT325B), SLA360 (当社規格 SLT365) などが広く適用されてきた。低温用アルミキルド鋼において特に問題となるのは溶接熱影響部 (HAZ) の靱性であり、その性能改善ポイントは基本的には HAZ 組織を微細フェライト組織にする点にある。本鋼において HAZ 靱性を向上させるためには低  $\text{Ce}_q$  化と Ti 処理が有効である (第 2 図) が、開発鋼は制御圧延と加速冷却を組み合わせた TMCP 法<sup>2)</sup>を用い、更にその条件を適正にコ

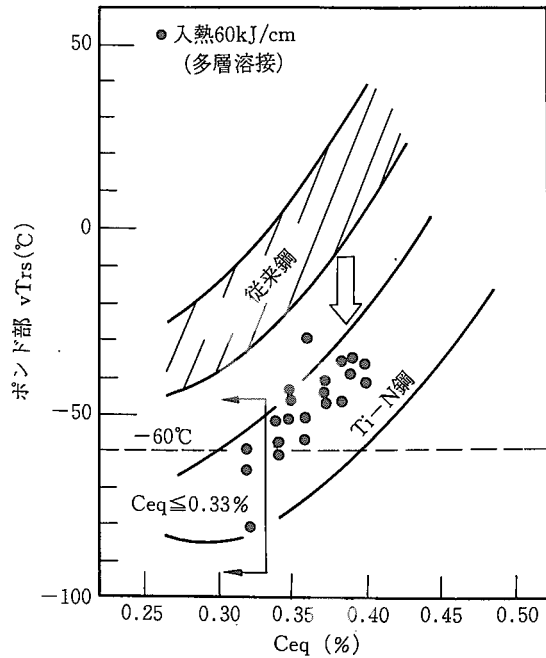
製品紹介

第1表 陸上低温用タンクの安全性と低温用鋼選定に関する考え方

段階	0	1	2	3
規制	衝撃値	脆性破壊発生特性	脆性破壊伝播停止特性	
			通常仕様	特別仕様
内容	従来の経験に基づく衝撃値規制  (例) $C_v \geq 20 \text{ J/kgm}$ など	検査技術（検出可能な欠陥寸法と形状）と稼働条件（設計応力，応力集中，疲労など）により必要靱性値を規制  	溶接継手最脆化部で脆性き裂が発生しても，周辺条件（残留応力，溶接部の機械的性質の不均一分布など）によりき裂が母材に突入，伝播を停止する。  	現実的ではないが，タンク立溶接部全長にわたって脆性き裂が進展しても，母材に突入すると伝播を停止する。  
		(例) 溶接ボンド部での破壊靱性 $\delta c \geq 0.1 \text{ mm}$ など	(例) 母材において伝播を停止し得る脆性き裂長さ $2C = 200 \text{ mm}$	(例) 母材において伝播を停止し得る脆性き裂長さ $2C = 3\,000 \text{ mm}$
LPG タンク	低温用 Al キルド鋼			
	1.5% Ni 鋼			
LNG タンク				
	9% Ni 鋼			

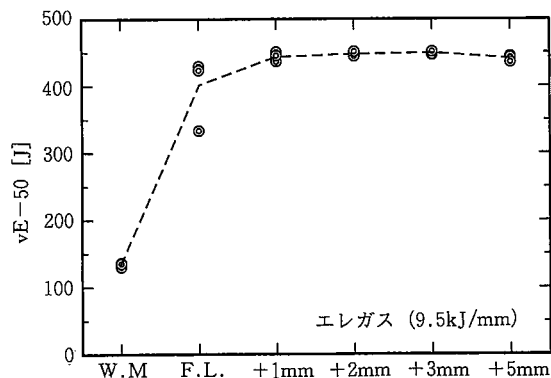


第1図 LPG, LNG の液化温度と適用鋼種



第2図 Ceqとポンド靱性の関係

ントロールすることによって低Ceq化を達成することを通じてHAZ靱性の向上を図った。開発鋼・SLT365TMCは第2表に示すとおり、優れた母材特性を有するとともに第3図に示すとおり9.5kJ/mmの大入熱エレクトロガスアーク溶接においてもHAZ全域にわたって高い溶接継手靱性を確保している。



第3図 継手衝撃試験 (SLT365TMC 鋼)

第2表 低温用アルミキルド鋼 (SLT365TMC) の母材特性例

## 【化学成分】

mass%

鋼種	規格	板厚	C	Si	Mn	P	S	Ni	Ti	Ceq
開発鋼	SLT365TMC	20mm	0.06	0.20	1.35	0.006	0.001	0.42	0.012	0.30

$$Ceq = C + 1/24Si + 1/6Mn + 1/40Ni + 1/5Cr + 1/4Mo + 1/14V \quad (\%)$$

## 【機械特性】

規格	製法	方向	引張試験			衝撃試験			NRL
			Y.S. N/mm <sup>2</sup>	T.S. N/mm <sup>2</sup>	El. %	vE-60 J	vE0 J	vTs °C	
SLT365TMC	TMCP	L	383	543	57.4	336	379	-94	-
		C	394	549	54.9	220	305	-79	<-50

引張試験片：全厚，JIS 5号，衝撃試験片：1/4t採取，JIS 4号フルサイズ

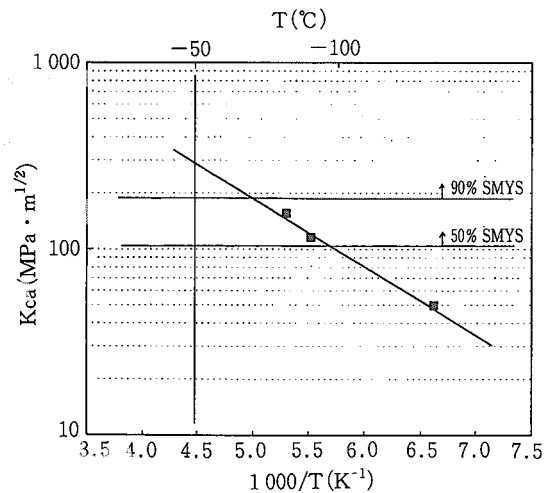
## 2-2 1.5%Ni 鋼板 (SLT1.5N365TMC) の特徴と脆性き裂伝播停止性能

LPG 貯蔵タンク用途に対して極めて高い脆性破壊に対する安全性 (第3段階) を確保する場合には、従来 QT 型 3.5%Ni 鋼などが適用されてきた。これに対しても当社では経済性向上の観点から TMCP 技術を活用した SLT1.5N365TMC、SLT2N225TMC を開発した。第3表に母材特性例を示す。第4図に1.5%Ni 鋼の温度勾配型 ESSO 試験結果を示す。1.5%Ni 鋼は TMCP の適用により破面単位の微細化を通してアレスト性能向上効果が発揮されているため、90%SMYS 負荷時の A 種温度においても -73°C と LPG タンクの設計温度および地震時を想定した設計応力を考慮しても十分な性能であることが確認できている。

また、80%SMYS 応力負荷想定時の長大き裂伝播停止性能と NDT との関係が川口ら<sup>3)</sup>により下式のように提唱されている (安全側の評価として)。

$$\text{長大き裂伝播停止温度} = \text{NDT} + 40^\circ\text{C} \quad (a)$$

1.5%Ni 鋼の NDT は -105°C であることから、(a)式により長大き裂伝播停止温度は -65°C と計算され、LPG タンクの設計温度を考慮すると十分なレベルであると言える。これにより、1.5%Ni-TMCP 鋼 (SLT1.5N365TMC)



第4図 温度勾配型 ESSO 試験結果

製品紹介

第3表 1.5%Ni鋼（SLT1.5N365TMC）、2.5%Ni鋼（SLT2N255TMC）の母材特性例

【化学成分】										mass%
規格	板厚	C	Si	Mn	P	S	Ni	Nb	Sol. Al	Ceq
SLT1.5N 365TMC	20mm	0.06	0.26	1.21	0.007	0.001	1.55	0.014	0.030	0.32
SLT2N 255TMC	34mm	0.05	0.24	0.87	0.006	0.002	2.44	0.010	0.040	0.27

$Ceq=C+1/24Si+1/6Mn+1/40Ni+1/5Cr+1/4Mo+1/14V$  (%)

【機械特性】										
規格	製法	板厚	方向	引張試験			衝撃試験			NRL
				Y.S. N/mm <sup>2</sup>	T.S. N/mm <sup>2</sup>	El. %	vE-70 J	vE-105 J	vTs ℃	NDT温度 ℃
SLT1.5N 365TMC	TMCP	20mm	L	477	554	46.0	300	213	-140	-
			C	492	572	46.0	300	185	-124	-105
SLT2N 255TMC	TMCP	34mm	L	453	591	64.0	354	313	-180	-
			C	468	609	59.0	267	226	-180	-145

引張試験片：全厚採取，JIS 5号，衝撃試験片：1/4t採取，JIS 4号フルサイズ

は「第3段階」の脆性破壊に対する安全性を有していることが確認できた。

次に第4表に示す要領で入熱1.5～3.5kJ/mmのSMAW，MIGにて作成した溶接継手性能を第5表に示す。インコネル溶接材料との組み合わせにて衝撃，CTOD特性はもちろんHAZ部のNRL(アレスト)特性においてもLPGタンク用として優れた特性を有している。

3. LNG 貯蔵タンク用鋼板

3-1 9%Ni 鋼板（SLT9N590）の特徴と性能例

LNG貯蔵タンクは設計温度が-162℃程度の超低温となるため，使用される材料もアルミニウム合金あるいは9%Ni鋼に限定される。JIS G 3127が示すように9%Ni鋼には2回焼きならし焼き戻し材（SLT9N520）と焼き入れ，

焼き戻し材（SLT9N590）があるが，ここでは特に低温靱性に優れたQTタイプのSLT9N590材についてその特徴と性能例を紹介する。第6表に厚肉50mm材の母材特性例を示す。極低温まで優れた特性を示している。また，第7表，第8表に母材，溶接継手の混成ESSO試験結果を示す。67%SMYSの応力負荷時においても超低温でのアレスト性を確保できることが示された。更に，27mm材を用いて第5図に示す大型試験片を作成し，長大き裂伝播停止性能を混成二重引張試験により実施した。試験温度はLNG液化温度である-162℃にて実施した。第6図にき裂伝播経路，負荷応力を示すが，SMYS(590N/mm<sup>2</sup>)の67%の応力負荷時においても半長が1.5mのき裂は供試9%Ni鋼に進展しなかった。このことから，万が一タンク側板溶接部全長に進展したき裂が存在しても，母材へのき裂進展の危険性の無いことが証明され，「第3段階」の脆性破壊に対する安全性を有していることを確認できた。

第4表 1.5, 2.5%Ni鋼溶接条件

マーク	鋼種	板厚 mm	溶接方法	姿勢	溶接材料	入熱 kJ/mm	開先形状
1	1.5%Ni	20	SMAW	立向	インコネル	2.5	X
2			MIG	下向	インコネル	2.5	X
3	2.5%Ni	34	SMAW	立向	インコネル	3.5	K
4			MIG	下向	インコネル	1.5	X

第5表 1.5, 2.5%Ni鋼の溶接部諸特性

マーク	鋼種	板厚 mm	T.S. N/mm <sup>2</sup>	ノッチ位置	シャルピー	CTOD	NRL
					vE-55 J	δc-55 mm	NDT ℃
1	1.5%Ni	20	606	ボンド	118	0.43	-110
2			598	ボンド	201	0.44	-110
3	2.5%Ni	34	590	ボンド	129	-	-135
4			568	ボンド	180	>1.46	-150

第6表 9%Ni鋼 (SLT9N590) の母材特性例

## 【化学成分】

mass%

規格	板厚	C	Si	Mn	P	S	Ni	Ceq
SLT9N590	27,50mm	0.05	0.21	0.67	0.010	0.005	9.48	0.41

$$Ceq = C + 1/24Si + 1/6Mn + 1/40Ni + 1/5Cr + 1/4Mo + 1/14V \quad (\%)$$

## 【機械特性】

規格	製法	板厚 mm	方向	引張試験			衝撃試験	
				Y.S. N/mm <sup>2</sup>	T.S. N/mm <sup>2</sup>	El. %	vE-196 J	vTs °C
SLT9N590	QT	27	L	672	735	29.7	185	<-196
			C	668	737	29.6	189	<-196
		50	L	628	722	33.8	266	<-196
			C	631	716	33.2	265	<-196

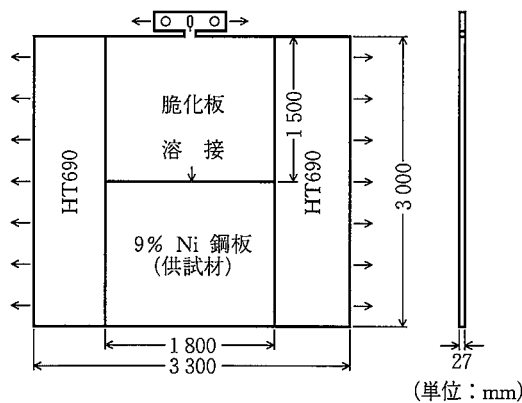
引張試験片：1/4t採取，JIS 4号，衝撃試験片：1/4t採取，JIS 4号フルサイズ

第7表 単一温度型母材混成ESSO試験結果 (SLT9N590)

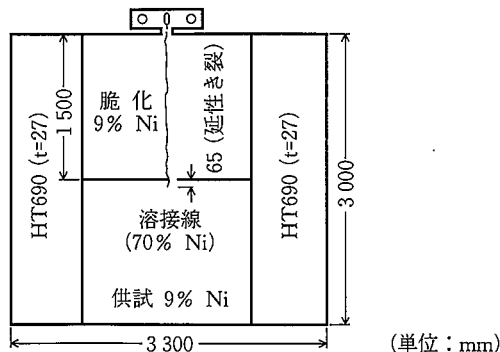
マーク	板厚 mm	試験温度 °C	$\sigma_{gross}$	突入き裂長さ mm	Kca MPam <sup>1/2</sup>	Go or No Go
1	50	-196	67%SMYS	0	>904	No Go
2	50	-196	67%SMYS	0	>904	No Go

第8表 単一温度型継手混成ESSO試験結果 (SLT9N590)

マーク	板厚 mm	試験温度 °C	$\sigma_{gross}$	突入き裂長さ mm	Kca MPam <sup>1/2</sup>	Go or No Go
1	50	-165	67%SMYS	0	>904	No Go
2	50	-165	67%SMYS	0	>904	No Go
3	50	-165	67%SMYS	0	>904	No Go



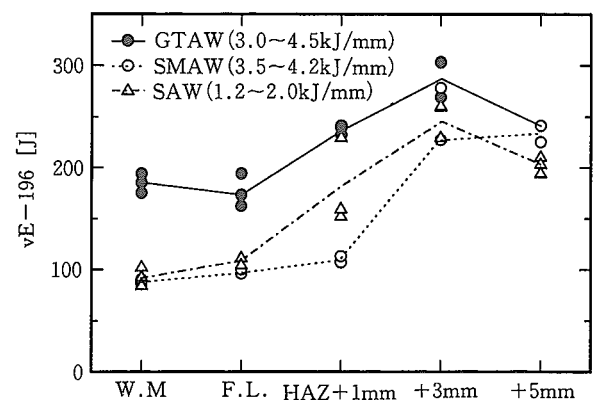
第5図 混成二重引張試験片の形状



第6図 き裂伝播経路 (9%Ni)

## 3-2 9%Ni 鋼板 (SLT9N590) の HAZ 靱性

板厚50mm材に対し，第9表の要領でGTAW，SMAW，SAWにより作成した溶接継手の衝撃特性を第7図に示す。いずれの溶接方法（入熱）のボンド位置におけるシャルピー特性も設計温度よりも低温である-196°C（液体窒素温度）において良好な吸収エネルギーを有しており，LNGタンク用鋼として問題のない性能を確認できた。



第7図 継手衝撃試験結果 (SLT9N590)

製品紹介

第9表 9%Ni鋼板溶接継手作成条件

マーク	鋼 種	板 厚 mm	溶接方法	溶接材料	入熱 kJ/mm	開先形状
1	9%Ni	50	GTAW	YGT9N-2	3.0～4.5	X
2			SMAW	D9Ni-1	3.5～4.2	X
3			SAW	FS9Ni-H/YS9Ni	1.2～2.0	X

4. まとめ

低温貯槽タンク用鋼板に対する破壊安全性要求は近年ますます厳しくなっている。それらの要求は4つの段階に峻別することができる。「第2，3段階」は脆性き裂伝播停止性能のレベルを示しており，「第3段階」とは万一溶接部全長（3 m）を脆性き裂が伝播したと仮定しても母材に

てそのき裂をアレストできるレベルであり，LPGタンク用1.5%Ni鋼（SLT1.5N365TMC）あるいは，LNG貯蔵タンク用9%Ni鋼板（SLT9N590等）がそれに該当する。また，低温用アルミキルド鋼においてはTMCP法の適用によりCeqを低減でき，優れた溶接部靱性を示すことを確認した。なお，参考として当社規格と船級等の一般規格との対比状況を第10表に示しておく。

第10表 一般規格との対比

住友規格	ASTM	BS	JIS	AB	LR	NK
SLT365TMC	A841Gr.A	BS7777 TypeII	G3126 SLA360TMC	V-060	LT-FH36	KL37
SLT1. 5N365TMC					1 <sub>1/2</sub> Ni	
SLT9N590	A553Type1	BS1501- 510	G3127 SL9N590		LL9N-QT	KL9N60

問合せ先  
鹿島製鉄所  
厚板生産技術部 厚板商品技術室  
☎0299(84)2542 川畑

参考文献

1) K.Bessyo : 71CPVT, TMCP Steel Plates for Low Temperature Storage Tanks

2) H.Takeuchi, K.Bessyo, and T.Hashimoto, : The Sumitomo Search, No.32, 1986, p.8

3) Y.Kawaguchi, and A.A.Willoughby : TWI International Symposium on Fracture-safe Design for Large Storage Tanks, Newcastle, 1986, Paper 14