

(技術資料)

# LNGタンク向けTMCP型7%Ni鋼の性能

## Properties of 7%Ni TMCP Steel for LNG Storage Tanks



仮屋崎 誠\*1

Makoto KARIYAZAKI

To be operated safely in cryogenic circumstances, LNG storage tanks are made of 9%Ni steel plates. For the sake of reducing Ni content, 7%Ni TMCP steel plate has been developed as a substitute for 9%Ni steel plate. Controlling the volume fraction of residual austenite( $\gamma$ ) is important to ensure high toughness. By utilizing TMCP technology, much residual  $\gamma$  is distributed in the base structure to achieve the same toughness as 9%Ni steel plate. For 7%Ni TMCP steel plate, the thickness of which is 40mm, the properties of the plate and the welded joint were investigated under cryogenic conditions. The results showed both properties of 7%Ni TMCP steel to be at the same level as those of 9%Ni steel. This result means that 7%Ni TMCP steel plate is eligible to be used for LNG tanks.

ま え が き = CO<sub>2</sub>ガス排出規制および東日本大震災以降の原子力発電所の稼働停止により、クリーンエネルギーであるLNGの需要が増加している。LNG等の極低温液化ガスを貯蔵する容器には9%Ni鋼が広く用いられており、現在も主流となっている。一方、鉄鋼各社ではNi量削減に向けた開発が進められており、実用化への取り組みも報告されている<sup>1)~4)</sup>。また、工業用規格に関して、JIS G3127に7%Ni鋼(規格名SL7N590)が規定されたことから、9%Ni鋼に代わって今後、7%Ni鋼が広く使用されることが予想される。

このような背景の中、当社はTMCP (Thermal-Mechanical Control Process) 型7%Ni鋼を開発し、試作材における性能評価を行った<sup>3), 4)</sup>ので本稿でその概要を紹介する。

### 1. TMCP型7%Ni鋼の低温靱性確保の考え方

高Ni鋼ではNiによるマトリックスの靱性向上に加え<sup>5)</sup>、**図1**に示すように、マイクロ組織のラス境界に沿って生成した残留 $\gamma$ (オーステナイト)が破壊単位となるブロックやパケットを分断するため、靱性が優れていると考えられる<sup>6)</sup>。

7%Ni鋼の開発にあたり、Ni量が9%から7%に減少することによるマトリックスの靱性劣化を補うために、残留 $\gamma$ の増量を目指した。そのための手段として、残留 $\gamma$ の生成サイトであるラス境界を増やすこと、すなわち、ラス組織微細化<sup>7)</sup>を狙いTMCP技術を活用した。

**図2**にTMCP型7%Ni鋼と従来の9%Ni鋼のマイクロ組織を示す。TMCP型7%Ni鋼はラス組織が微細化し、残留 $\gamma$ が増加していることがわかる。

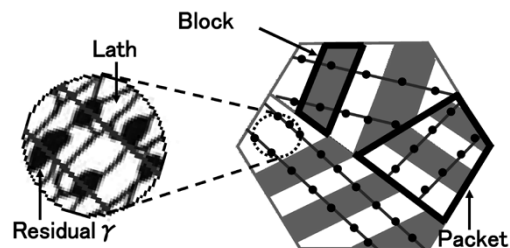


図1 高Ni鋼の組織概念図

Fig. 1 Metallurgical concept of high Ni steel

Material	7%Ni TMCP steel	9%Ni steel
Lath structures and residual $\gamma$		
Amount of residual $\gamma$	8.5%	3.2%

図2 TMCP型7%Ni鋼と9%Ni鋼の組織比較

Fig. 2 Microstructure comparison of 7%Ni TMCP steel with 9%Ni steel

### 2. TMCP型7%Ni鋼の主要特性

#### 2.1 評価項目

40mmの厚鋼板を用いて溶接継手試験片を作製し、母材および溶接継手における基本性能および脆(ぜい)性破壊抵抗を評価する各種試験(**表1**)を実施した。

#### 2.2 母材特性

##### 2.2.1 基本性能

**表2**に引張試験結果、**表3**にシャルピー衝撃試験結果を示す。いずれもSL7N590の規格値を満足している。

\*1 鉄鋼事業部門 技術開発センター 厚板開発部

表 1 特性評価試験項目

Table 1 Test items for performance evaluation

	Basic performance	Resistance to brittle fracture
Plate properties	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Tensile test</li> <li>•2mmV Charpy impact test</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•CTOD test</li> <li>•Duplex ESSO test</li> </ul>
Welded joint properties	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Tensile test</li> <li>•2mmV Charpy impact test</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•CTOD test</li> <li>•Cross weld notched wide plate test</li> </ul>

表 2 引張試験結果

Table 2 Results of tensile tests

Material	Thickness (mm)	Position	Direction	YS (MPa)	TS (MPa)	EL. (%)
7%Ni TMCP steel	40	1/4t	C	655	738	31
9%Ni steel	36	1/4t	C	726	743	33
SL7N590	-	-	-	590 $\leq$	690~830	21 $\leq$

C: Transverse to rolling direction

表 3 シャルピー衝撃試験結果

Table 3 Results of Charpy impact tests

Material	Thickness (mm)	Position	Direction	vE <sub>-196°C</sub> .ave (J)	BA <sub>-196°C</sub> .ave (%)
7%Ni TMCP steel	40	1/4t	L	256	0
9%Ni steel	36	1/4t	L	243	0
SL7N590	-	-	-	41 $\leq$	-

L: Parallel to rolling direction

vE<sub>-196°C</sub>: Charpy absorbed energy at -196°C

BA: Brittle fracture appearance value at -196°C

また、シャルピー衝撃試験片の脆性破面率 (BA) は 0%であり、TMCP型 7%Ni鋼の靱性は -196°Cにおいて非常に安定している。加えて、9%Ni鋼と同等の特性を有することを確認した。

### 2.2.2 脆性破壊抵抗

極低温で使用される構造物に求められる最も重要な特性は脆性破壊に対する十分な抵抗力である。そこで、TMCP型 7%Ni鋼の抵抗力を脆性破壊の発生と進展に分けて評価した。

発生に対する抵抗力は、CTOD (Crack Tip Opening Displacement) 試験により評価した。CTOD試験とは、破壊が発生する際の疲労き裂先端でのき裂開口変位量 (以下、限界CTOD値という) を測定する試験であり、限界CTOD値が大きいほど脆性破壊発生抵抗は高い。図 3 にCTOD試験方法を示す。

40mmの厚鋼板が使用されるLNGタンク側面部には大別して3種類の溶接継手があり (図 4)、14万<sup>3</sup>m<sup>3</sup>LNGタンクにおける各継手の必要限界CTOD値は、短周期地震時には最大0.085mmとなることが報告されている<sup>8)</sup>。表 4 にLNGタンクの使用温度である -165°CにおけるCTOD試験結果を示す。TMCP型 7%Ni鋼の限界CTOD値は0.085mmよりもはるかに大きく、9%Ni鋼と比較しても同等以上の値であり、TMCP型 7%Ni鋼は十分な脆性破壊発生抵抗を有している。

脆性破壊の進展に対する抵抗力を混成ESSO試験により評価した。混成ESSO試験の方法、形状は図 5 に示すとおりであり、熱処理により脆化させた鋼板 (脆化板) をき裂進展の助走材としている。混成ESSO試験とは、脆化板にて発生、進展させた脆性き裂が試験板内で停止

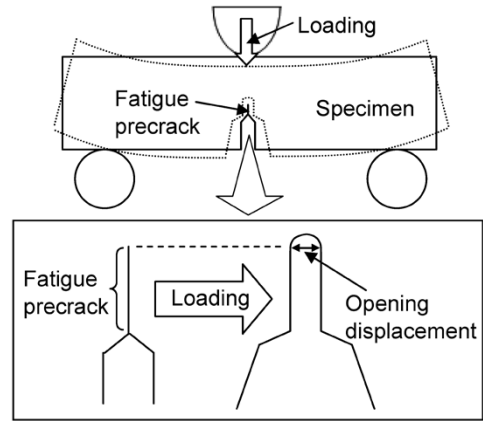


図 3 CTOD試験概略図

Fig. 3 Schematic drawings of CTOD test

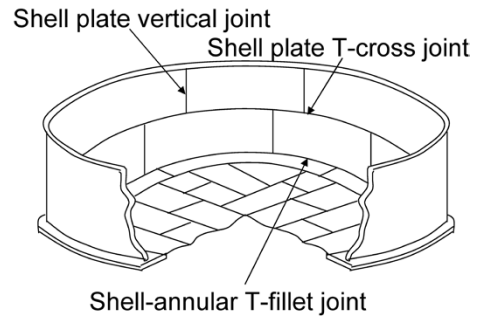


図 4 タンク内槽模式図

Fig. 4 Schematic view of tank interior

表 4 CTOD試験結果

Table 4 Results of CTOD tests

Material	Thickness (mm)	Direction	Temperature (°C)	Critical CTOD value (mm)
7%Ni TMCP steel	40	L	-165	1.18 1.05 1.18
9%Ni steel	36	L	-165	0.65 0.70 0.68

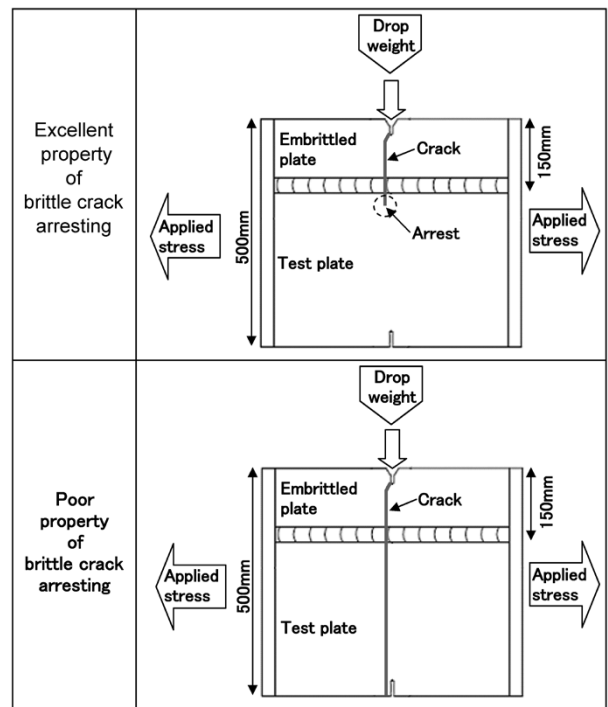


図 5 混成ESSO試験概略図

Fig. 5 Schematic drawings of Duplex ESSO test

するかを評価する試験であり、停止すればその試験板は脆性破壊進展抵抗が高いといえる。なお、混成ESSO試験は、LNG温度である $-165^{\circ}\text{C}$ よりも厳しい $-196^{\circ}\text{C}$ で実施した。

表5に混成ESSO試験結果、図6にき裂の進展状況を示す。脆化板より進展した脆性き裂は、TMCP型7%Ni鋼の試験板に突入後直ちに停止した。この結果から、TMCP型7%Ni鋼は9%Ni鋼と同等の脆性破壊進展抵抗を有するものと考えられる。

## 2.3 溶接継手特性

### 2.3.1 溶接条件

LNGタンク建造時に多用されている被覆アーク溶接 (Shielded Metal Arc Welding : SMAW) にて継手を作製した。溶接条件は表6に示したとおりであり、LNGタンクの側板の溶接を想定して立向上進にて溶接を行った。

### 2.3.2 基本性能

表7に引張試験結果を示す。継手強度はSL7N590の規格値を満足し、9%Ni鋼継手と同等の性能であることが確認できた。

図7にシャルピー衝撃試験片のノッチ位置を示す。衝撃試験片は1st側から採取し、ノッチ位置は、WM center (溶接金属中央)、FL (溶接金属:母材=1:1)、さらにFLから1mm、3mm、5mm母材側に移行した計5箇所とした。図8にシャルピー衝撃試験結果を示す。いずれの衝撃値もSL7N590の規格値を満足し、9%Ni鋼継手と同等の性能であることが確認できた。

### 2.3.3 脆性破壊抵抗

シャルピー衝撃試験のノッチと同様の位置に疲労き裂を導入してCTOD試験を実施した。図9にCTOD試験結果を示す。全ての位置で、14万 $\text{m}^3$ LNGタンクの継手における必要限界CTOD値である0.085mmを満足しており、TMCP型7%Ni鋼は溶接継手においても十分な脆性破壊発生抵抗を有している。

また、実際のタンク側板部には、図4で示したように

表5 混成ESSO試験結果  
Table 5 Results of duplex ESSO tests

Material	Thickness (mm)	Direction	Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	Applied stress (MPa)	Judgement
7%Ni TMCP steel	40	L	-196	392	No-Go
9%Ni steel	36	L	-196	392	No-Go

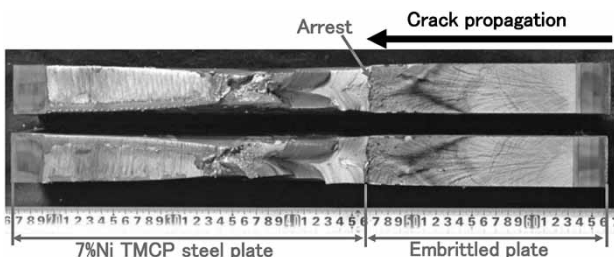


図6 破断面写真 (TMCP型7%Ni鋼)  
Fig. 6 Photograph of fracture surface (7%Ni TMCP steel)

表6 溶接条件  
Table 6 Welding condition

Welding method	Direction of welding	Welding material		Welding condition	
		Brand	Diameter	Position of weld	Maximum heat input
SMAW	Transverse to rolling direction	NI-C70S	$\phi$ 4.0mm	Vertical up	4.4kJ/mm

表7 引張試験結果  
Table 7 Results of tensile tests

Material	Thickness (mm)	TS (MPa)	Fracture location
7%Ni TMCP steel	40	713	Weld metal
9%Ni steel	36	748	Weld metal
SL7N590 (base metal)		$690 \leq$	-

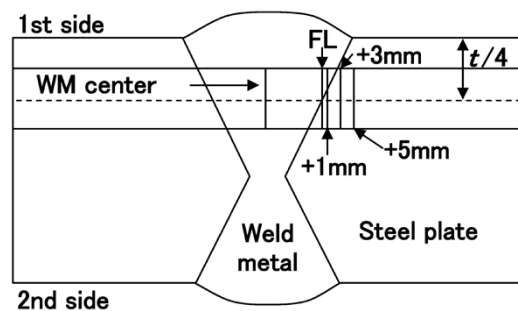


図7 シャルピー衝撃試験ノッチ位置  
Fig. 7 Notch positions for Charpy impact tests

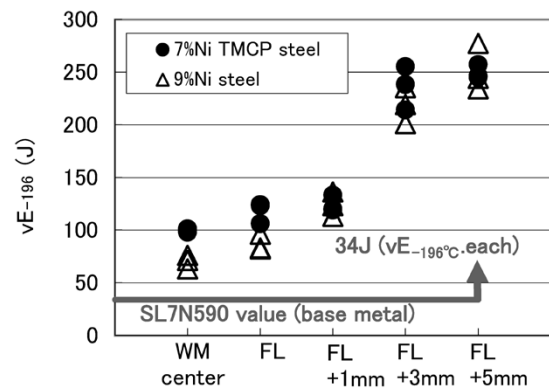


図8 シャルピー衝撃試験結果 (t/4位置)  
Fig. 8 Results of Charpy impact tests (t/4 position)

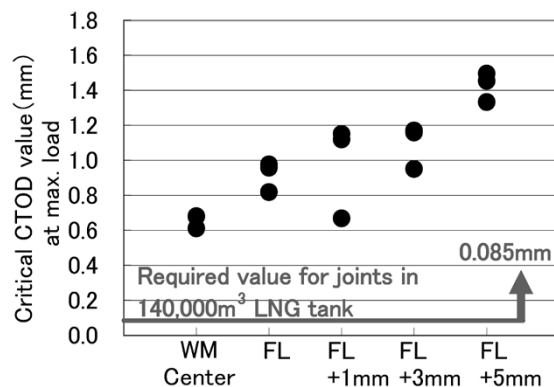


図9 CTOD試験結果  
Fig. 9 Results of CTOD tests

立向継手と周継手から成るTクロス部が存在する。この部分では、周継手の影響によって非常に大きな引張応力が立向継手に残留していることから、他の溶接継手に比べ脆性破壊が起こりやすい可能性がある<sup>9)</sup>。

そこで、Tクロス部の脆性破壊抵抗を評価するために、-165℃にて十字継手貫通切欠付広幅引張試験を実施した。図10に試験片形状を示す。まず、立向き溶接を被覆アーク溶接で行い、その後サブマージアーク溶接(Submerged Arc Welding: SAW)を横向姿勢で行って試験片を作製した。ノッチ位置は被覆アーク溶接金属のFL上とした。

図11に引張試験後の試験片を示す。破断経路および破断面が示すとおり、ノッチ先端部、すなわち、FLで発生したき裂は直ちに被覆アーク溶接金属へ伝播し、溶

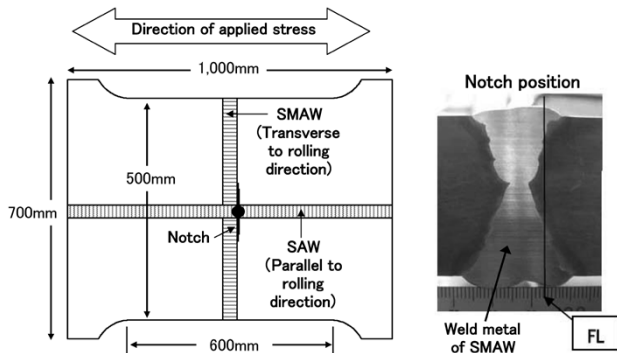


図10 十字継手貫通切欠付広幅引張試験片形状  
Fig.10 Cross weld notched wide plate test specimen

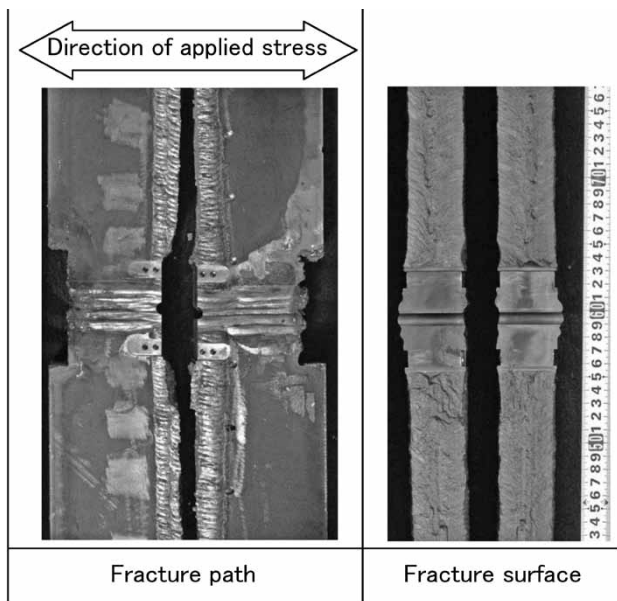


図11 破断経路および破断面 (TMCP型7%Ni鋼)  
Fig.11 Photograph of fracture path and surface (7%Ni TMCP steel)

表8 十字継手貫通切欠付広幅引張試験結果  
Table 8 Results of cross weld notched wide plate tests

Material	Thickness (mm)	Welding method	Temperature (°C)	At max. load	
				$\sigma_{gross}$ (MPa)	$\sigma_{net}$ (MPa)
7%Ni TMCP steel	40	SMAW-SAW	-165	651	775
9%Ni steel	36	SMAW-SAW	-165	714	834

接金属は延性的に破壊した。この結果から、Tクロス部であっても脆性破壊発生抵抗に優れていることがわかる。

表8に十字継手貫通切欠付広幅引張試験の結果を示す。LNG地上式貯槽指針では、地震時に許容応力375MPaが必要とされている<sup>8)</sup>。この指針に対し、TMCP型7%Ni鋼の試験結果( $\sigma_{net}$ )は775MPaであったことから、9%Ni鋼と同様に十分な強度を有していることがわかる。

むすび=新たに開発したTMCP型7%Ni鋼の特長をマイクロ組織、母材および溶接継手の特性面から紹介した。TMCP型7%Ni鋼は9%Ni鋼よりもNi成分を低減しているが、母材や溶接継手の強度、シャルピー衝撃特性ともに9%Ni鋼と同等性能を有している。また、安全性確保のために最も重要視されている極低温での脆性破壊抵抗に関しても、9%Ni鋼と同等の性能を示すことが確認された。

当社はエネルギー資源の採掘、運搬、貯蔵に関わる各種構造物に適した厚鋼板を商品化している。TMCP型7%Ni鋼はこれからの主要な商品と位置付けており、9%Ni鋼の代替材としてLNGタンクに適用されることを期待したい。

エネルギー分野では、構造物の大型化とともに安全性の更なる向上が求められている。それとともに、優れた材料特性への要望が一段と高まっている。これからも当社は、需要家のニーズに対応した材料を提供することでエネルギー分野の発展に貢献していく所存である。

#### 参考文献

- 1) 久保尚重ほか. 溶接学会論文集. 2010, Vol.28, No.1, p.130-140.
- 2) 古谷仁志ほか. CAMP-ISIJ. 2010, Vol.23, p.1322.
- 3) 仮屋崎誠ほか. 日本高圧力技術協会春季講演会概要集. 2012, p.13-16.
- 4) 宮脇ちよ美ほか. 日本高圧力技術協会秋季講演会概要集. 2013, p.63-66.
- 5) 長島晋一ほか. 鉄と鋼. 1972, Vol.58, No.1, p.128-141.
- 6) 牧 正志. 日本金属学会会報. 1988, Vol.27, No.8, p.623-629.
- 7) 藤原知哉ほか. 鉄と鋼. 1994, Vol.80, No.10, p.771-776.
- 8) 町田 進ほか. 圧力技術. 1991, Vol.29, No.6, p.341-355.
- 9) 南 二三吉. 溶接学会誌. 2009, Vol.78, No.4, p.283-297.