

脆性亀裂伝播停止性能に優れた 9%Ni 鋼

9% Ni Steel with High Brittle Crack Arrestability

1. はじめに

アジア諸国のエネルギー需要が急速に増大する状況のなか、地球環境問題からクリーンエネルギーの利用が拡大する傾向にある。LNG（液化天然ガス）は石炭や石油に比べ CO₂ 排出量が少なく、また、長期供給の安定性が高いことから需要が増加している。それを貯蔵する LNG タンクは国内外で数多く稼働中であるが、LNG タンクには常に高い安全性が求められている¹⁾。地上式 LNG タンクの内槽材には低温靱性に優れた 9%Ni 鋼板が使用され、鋼材に対しては、LNG 温度域（-162℃）での高い脆性亀裂発生抑制特性に加え、万一の LNG タンク破壊事故の重大性を考慮し、脆性亀裂伝播停止特性が重要視されている。

JFE スチールでは、従来にも増して優れた脆性亀裂伝播停止特性を有する直接焼入-焼もどし（以下、DQ-T）プロセスによる 9%Ni 鋼を開発しているが²⁻⁶⁾、優れた温度制御性を有する Super-OLAC[®] (On-Line Accelerated Cooling)⁷⁾ を適用することにより、DQ-T 型 9%Ni 鋼の安定製造技術を確立した。ここでは、DQ-T 型 9%Ni 鋼の母材の一般性能および脆性亀裂伝播停止特性について焼入-焼もどし（以下、Q-T）材と比較して紹介する。

2. DQ-T 型 9%Ni 鋼の特徴

2.1 供試材

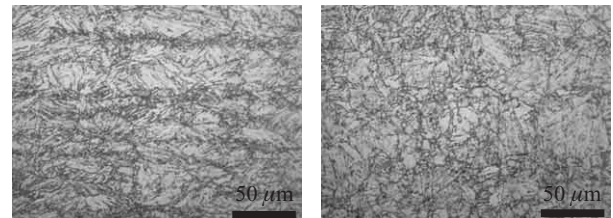
供試材の化学成分を表 1 に示す。P、S は十分に低く制御されており、JIS G 3127 SL9N590 規格を満足する。適正な条件での圧延により板厚を 32 mm とした後、Ar₃ 点以上の温度から直接焼入（以下、DQ）を実施し、580℃で焼もどした。DQ には Super-OLAC を適用した。比較材としての Q-T 材の熱処理条件は、焼入温度を 810℃、焼もどし温度を 565℃とした。

表 1 9%Ni 鋼の化学組成

Table 1 Chemical composition of 9%Ni steel

	(mass%)					
	C	Si	Mn	P	S	Ni
Ladle	0.06	0.25	0.61	0.002	0.001	9.22
JIS G 3127 SL9N590	≤0.12	≤0.30	≤0.90	≤0.025	≤0.025	8.50-9.50

2007 年 8 月 16 日受付



(a) DQ-T (Direct quenching and tempering)

(b) Q-T (Quenching and tempering)

写真 1 9%Ni 鋼のミクロ組織

Photo 1 Microstructures of 9%Ni steels

2.2 ミクロ組織

供試材のミクロ組織写真を写真 1 に示す。いずれも焼もどしマルテンサイト組織を示しているが、Q-T 材は等軸粒であるのに対し、DQ-T 材は DQ 前の圧延による結晶粒の伸長とともに、パケット、ブロックなどの粒内組織の微細化が認められる。

2.3 機械的特性

供試材の機械的特性を表 2 に示す。本供試鋼は JIS G 3127 SL9N590 規格値を十分に満足する強度と靱性が得られている。板厚方向の位置による強度差は小さく、Q-T 材と同様に板厚方向に均一な硬さ分布を有している（図 1）。

表 2 9% Ni 鋼の機械的特性

Table 2 Mechanical properties of 9%Ni steels

	Position	Direction	Tensile test* ¹			Impact test* ²
			YS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	$\sqrt{E_{-196^{\circ}\text{C}}}$ (J)
DQ-T	1/4t	Longitudinal	689	732	29	190
		Transverse	710	747	28	180
	1/2t	Longitudinal	691	733	30	187
		Transverse	713	750	28	191
Q-T	1/4t	Longitudinal	679	719	30	218
		Transverse	681	719	29	192
	1/2t	Longitudinal	676	721	30	211
		Transverse	677	718	29	202
JIS G 3127 SL9N590			≥590	690-830	≥21	≥41 (Ave.) ≥34 (min.)

*¹JIS No. 4 specimens *²JIS 2 mm-V notch specimensYS: Yield strength TS: Tensile strength EL: Elongation
 $\sqrt{E_{-196^{\circ}\text{C}}}$: Charpy absorbed Energy at -196°C

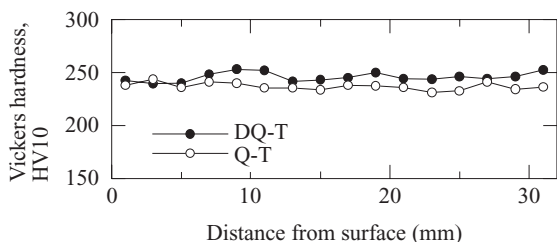


図 1 9%Ni 鋼の板厚方向硬さ分布

Fig.1 Hardness distribution over the thickness of 9% Ni steels

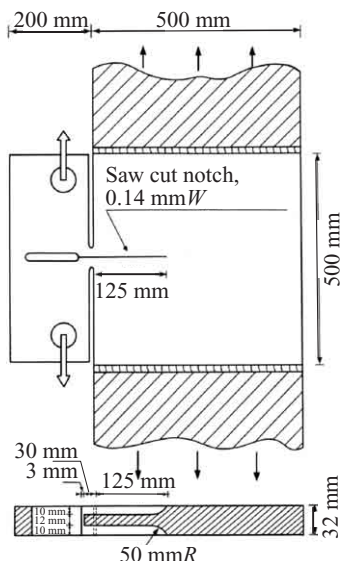


図 2 表面切欠付二重引張試験片形状

Fig.2 Specimen for surface-notched double tension test

2.4 脆性亀裂伝播停止特性

脆性亀裂伝播停止特性は、表面切欠付二重引張試験^{2-4,6)}により評価した。試験片形状を図 2 に示す。亀裂発生部から伝播部にかけて表面欠陥を模擬した幅 0.14 mm の鋭い切欠を設けることを特徴としている。試験は -170°C および -196°C で実施した。

表面切欠付二重引張試験結果を図 3 に示す。また、試験後の破面の例を写真 2 に示す。ここで、負荷応力は亀裂伝播部に付与した応力値、停止亀裂長さは亀裂伝播部入口から脆性亀裂先端までの長さを表し、図 3 中の上向き矢印は亀裂が停止しないまま破断に至った実験点を示す。

Q-T 材では、 -170°C において負荷応力が地震時の許容応力 (375 MPa)⁸⁾ を上回る 490 MPa の場合にも亀裂は停止する。しかし、より低温の -196°C において負荷応力 294 MPa の場合には、発生した亀裂は切欠部を通過し、停止することなく試験片を貫通する。

一方、DQ-T 材では、 -196°C において負荷応力 539 MPa の場合にも、切欠部を進展してきた亀裂は切欠先端を通過した直後に鋼板表面に到達することなく停止する (写真 2)。

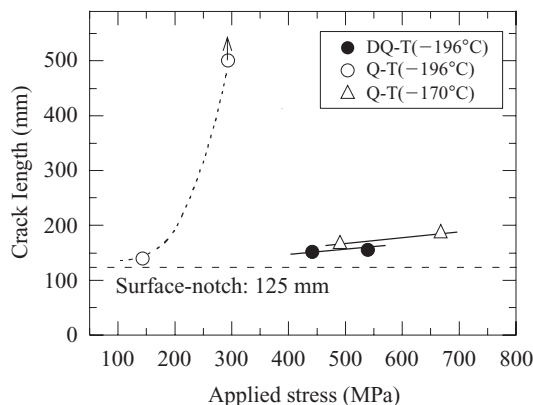
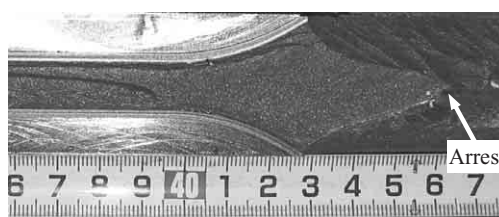


図 3 表面切欠付二重引張試験結果

Fig.3 Results of surface-notched double tension test



DQ-T Testing temperature: -196°C Applied stress: 539 MPa

写真 2 表面切欠付二重引張試験後の破面

Photo 2 Fracture appearance of surface-notched double tension test

以上のことから、DQ-T プロセスにより製造した 9%Ni 鋼は Q-T 材を大幅に上回る脆性亀裂伝播停止特性を有していることが確認された。

3. おわりに

適正な条件の DQ-T プロセスにより製造した 9%Ni 鋼は、規格を十分に満足する強度・靱性および Q-T 材を大幅に上回る脆性亀裂伝播停止特性を有しており、LNG タンクの安全性に対する要求に適合するものである。今度、DQ-T 型 9%Ni 鋼が LNG タンク用途をはじめとするエネルギー分野において幅広く適用されることが期待される。

参考文献

- 1) 久保尚重. 圧力技術. 2000, vol. 38, no. 3, p. 47.
- 2) 渡邊之, 鈴木元昭, 松田稔, 田川寿俊, 松井和幸, 島田俊一. 日本鋼管技報. 1984, no. 104, p. 2.
- 3) 渡邊之, 鈴木元昭, 松田稔, 山形俊介, 矢島浩. 日本造船学会論文集. 1984, vol. 155, p. 368.
- 4) 渡邊之, 鈴木元昭, 松田稔, 山形俊介, 矢島浩. 日本造船学会論文集. 1984, vol. 155, p. 380.
- 5) 松田稔, 鈴木元昭, 渡邊之. 日本造船学会論文集. 1985, vol. 158, p. 667.
- 6) 田川寿俊, 松井和幸, 伊沢徹, 渡邊之, 鈴木元昭, 徳永高信. 日本鋼管技報. 1986, no. 111, p. 1.
- 7) 小俣一夫, 吉村洋, 山本定弘. NKK 技報. 2002, no. 179, p. 57.
- 8) LNG 地上式貯槽指針. 日本ガス協会. 2002.