

# LNGタンク用高靱性スーパー9%Ni鋼の開発

## Development of Super-9%Ni Steel Plates with Superior Low - Temperature Toughness for LNG Storage Tanks

星野 学<sup>(1)</sup> 斎藤 直樹<sup>(2)</sup> 村岡 寛英<sup>(3)</sup> 佐伯 修<sup>(3)</sup>  
 Manabu HOSHINO Naoki SAITOH Hirohide MURAOKA Osamu SAEKI

### 抄 録

LNGタンク用9%Ni鋼の厚手化に向け、板厚50mmの極厚材についても母材、継手ともに優れた強度と低温靱性を兼ね備える9%Ni鋼(スーパー9%Ni鋼)の製造技術を確立した。二相域焼入れ処理の採用に加えて、鋼中Si量の低減とMoの微量添加により工場製造された板厚50mmのスーパー9%Ni鋼板は、LNGタンク用鋼板として十分な特性を有することが確認された。

### Abstract

Nippon Steel has developed 9%Ni thick steel plates for large LNG storage tanks by applying not only intercritical heat treatment but also decrease of Si content and small addition of Mo. The commercially produced 50mm thick plate exhibits sufficient mechanical properties for LNG storage tanks.

### 1. 緒 言

地球規模の環境問題からクリーンなエネルギーとして液化天然ガス(LNG)は、ますますその需要が増加する傾向にある。9%Ni鋼は1952年に初めて液体酸素容器に適用されて以来、フェライト系の極低温材料として、主にLNGタンクの内槽材として適用されてきた。特に、構造物の安全性に大きく関わってくる脆性破壊特性に関しては従来から精力的に検討されてきており<sup>1)</sup>、これにより地上式LNGタンク用材料として溶接部も含め十分な特性を有していることが明らかとなった。

しかしながら、国内で建設されてきた地上式LNGタンクでは、敷地面積の有効利用、建設コストの低減等から従来の内容積(主に80000m<sup>3</sup>程度)を越えてタンクが大型化しており、現在では180000m<sup>3</sup>級のものが建設され稼働している。これらの大型タンクでは、従来の適用板厚(30mm程度)を大幅に越える50mm厚の極厚9%Ni鋼板が使用されている。このような極厚9%Ni鋼では板厚の増大による破壊靱性値の低下が懸念されるため、従来鋼板と比較して母材、継手ともにより十分な低温靱性を有する鋼板を安定して製造する技術を確立する必要があった。

以上のような市場ニーズから、新日本製鐵では、極厚9%Ni鋼においてもLNGタンクとして高い安全性を有する鋼板を提供するために、母材および溶接継手ともに優れた強度と低温靱性を兼ね備えた新しい9%Ni鋼(以下、スーパー9%Ni鋼と呼ぶ)を開発し、国内LNGタンクに適用されている。本稿ではその開発の考え方と母材および継手の材質特性を中心に述べる。

### 2. 極厚材における高強度と高靱性の両立の検討

#### 2.1 スーパー9%Ni鋼の開発の考え方

9%Ni鋼は、JISおよびASTM等で成分系および熱処理法が厳格に規定されている。開発にあたっては、規格範囲内での成分系変更が可能でかつ目的とする母材強度確保と(継手)靱性の改善を図ることが可能なSiおよびMoに着目して検討を行った。さらに、母材靱性を著しく向上できる熱処理法として実績のある二相域焼入れ法<sup>2-4)</sup>を適用した。

#### 2.2 鋼中Si量の低減による靱性向上

9%Ni鋼において、従来から、Si量の低減は母材靱性の向上に有効である事が知られている<sup>5)</sup>。これは、Siを0.05%程度にすることで、焼戻し脆化感受性が著しく低減され、また鋼中のオーステナイト相も安定化することで、焼戻し後の靱性が向上することによる。

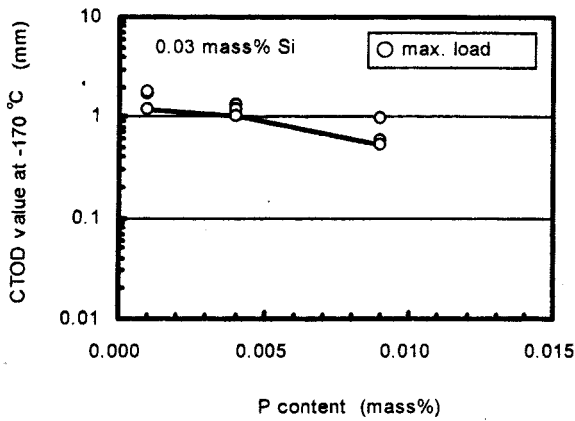
さらに、本検討において、低Si化は溶接熱影響部(HAZ)においても母材と同様に低温靱性の改善に有効であることを確認した。検討の一例として、図1に低Si化した9%Ni鋼と従来Si量である0.26%Si鋼の溶接部き裂先端開口変位(CTOD)試験の結果を示す。供試鋼は0.05%C-0.55%Mn-0.001%S-9.2%Niの基本組成を有し、Si量とP量を変化させた実験室溶解鋼を32mm厚に熱間圧延した後、焼入れ-焼戻し処理した鋼板であり、入熱3.9kJ/mmにてタングステンイナートガス溶接(GTAW)により継手を作製した。開先形状はHAZの局所脆化組織の影響が現れやすいようにK開先とした。ノッチ位置は母材とHAZの境界である。

一般に、P量の増加はHAZ靱性を低下させることが知られている

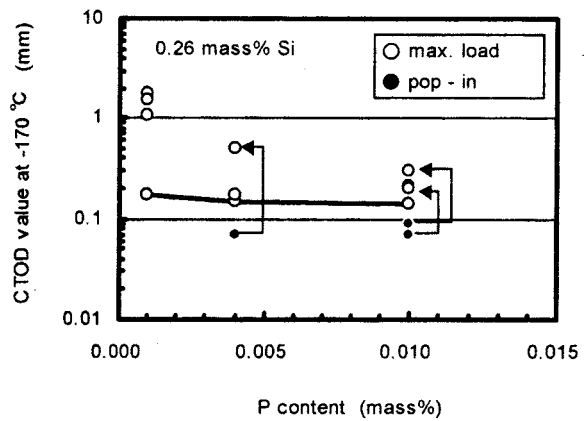
<sup>(1)</sup> 技術開発本部 名古屋技術研究部 主任研究員  
 愛知県東海市東海町5-3 〒476-8686 TEL052-603-7623

<sup>(2)</sup> 技術開発本部 名古屋技術研究部 主幹研究員

<sup>(3)</sup> 名古屋製鐵所 厚板工場 マネジャー



(a) 0.03 mass% Si steel



(b) 0.26 mass% Si steel

図1 母材 / HAZ境界部のCTOD特性に及ぼすSi量およびP量の影響( GTAW K開先 )  
The influence of Si and P content on the CTOD value at HAZ/base metal boundary (GTAW, K-groove)

が、図1を見ると明らかのように、低Si化によりP量が0.009%程度でもPop-inの発生が認められず、HAZ靱性が格段に向上していることが分かる。これは、母材 / HAZ境界において局所的に生成しやすい脆化組織である島状マルテンサイトの生成量が低Si化により減少したことによる。

2.3 Moの微量添加による高強度と高靱性の両立

9%Ni鋼のような焼入れ性の高い鋼材においても、従来の成分系では50mmを超えるような極厚材の安定した強度確保は難しい。さらに、低温靱性の向上を目的に鋼中Si量を低減すると母材強度が低下するため、靱性を阻害しない新たな強化因子の導入が必要となる。

そこで、焼入れ性を向上させるとともに焼戻し脆化感受性を低減する効果も有するMoに着目し、詳細な検討を行った。図2に板厚が32mmの焼入れ-焼戻し鋼の母材強度に及ぼすMoとSi量の影響を示す。縦軸は従来9%Ni鋼(0.25mass%Si-Mo無添加鋼)を基準にした相対的な強度で示した。0.09mass%の微量のMo添加で約80MPaと大きな強度上昇が得られる。なお、Si量の低減により約40MPaの強度低下が認められるが、Moの微量添加により従来鋼よりさらに40MPaの強度上昇が可能となる。

次に、Mo添加がHAZ靱性に及ぼす影響の検討例として、図3に低Si鋼の溶接部CTOD特性に及ぼすMo量の影響を示す。図1と同様の溶接条件であり、ノッチ位置は母材とHAZの境界である。Moを0.1mass%程度まで添加しても、低Si化によるHAZ靱性向上を阻害し

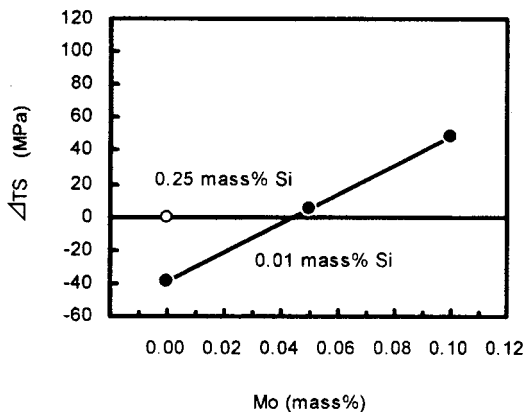


図2 母材強度( TS )に及ぼすMo添加量の影響

The influence of Mo and Si content on the tensile strength (TS) of base plate

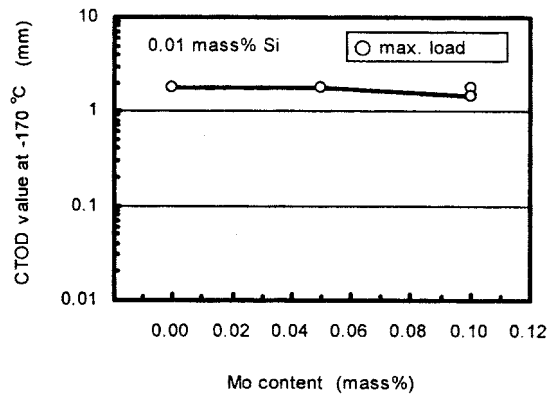


図3 母材 / HAZ境界部のCTOD特性に及ぼすMo量の影響( GTAW K開先 )  
The influence of Mo content on the CTOD value( GTAW, K-groove, notch location : HAZ / base metal boundary )

ないことが分かる。

これらの知見とその他の詳細な検討に基づき、50mm以上の極厚材において鋼中Si量を低減した鋼においても、Moを微量に添加することでSL9N590鋼として十分な母材の強度と母材および継手の低温靱性が得られることが分かった。

3. 50mm厚高靱性スーパー9%Ni鋼板の製造結果

3.1 鋼板の製造方法及び母材性能試験結果

前章で述べた実験室段階での検討に基づき、実製造ラインにより板厚50mmのスーパー9%Ni鋼の量産試作を行った。表1に試験に用いた供試材の化学成分と母材の機械試験結果を示す。前節にて述べた検討結果に基づき、従来の9%Ni鋼の成分系と比較してSi添加量を抑制すると共に、0.08mass%の微量のMoを添加している点が大きな特徴である。本供試鋼は転炉で溶製され、新鑄造法<sup>9)</sup>を適用してスラブを製造した。厚板加熱、圧延の後、焼入れ(Q)二相域焼入れ(L)焼戻し(T)処理を行い、各種性能評価試験を実施した。

本供試鋼はJISの値を十分に満足する強度と靱性が得られており、特に衝撃吸収エネルギーは250J以上の高い値を示し、全て延性破面率100%である。

3.2 溶接継手部性能試験結果

この節では板厚50mmのスーパー9%Ni鋼の溶接継手部の各種性能試験結果を述べる。

表2に溶接条件を示す。自動タングステンイナートガス溶接

表1 供試鋼の化学成分と母材の機械的性質  
Chemical composition and mechanical properties of steel tested (comparison with the results of conventional 45mm thick 9%Ni steel)

	Plate thickness	Chemical composition (mass%)							Mechanical properties				
		C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	Position Orientation <sup>*1</sup>	Tensile test <sup>*2</sup>			Impact test <sup>*3</sup> √E(-196℃) (Average) (J)
										0.2% proof stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	
JIS G 3127 SL9N590	6-100mm	0.12	0.30	0.90	0.025	0.025	-	8.50-9.50	-	590	690-830	21	34(min.) 41(ave.)
Conventional 9%Ni steel	45mm	0.05	0.24	0.56	0.002	0.001	-	9.39	1/4t -L 1/2t -L	609 612	713 713	34 33	284 294
Super 9%Ni steel	50mm	0.05	0.08	0.59	0.003	0.000	0.08	9.35	1/4t -L 1/2t -L	632 633	747 751	33 32	277 258

\*1 L : Rolling direction, \*2 JIS No.4 specimens (G.L. : 50mm), \*3 JIS No.4 specimens

表2 試験板の溶接条件  
Test plate welding condition

Welding method	Position	Plate thickness	Current	Voltage	Speed	Heat input	Test item
GTAW	Vertical	50 mm	280 - 300 A	10 V	4.0 - 4.5 cm/min	4.0 - 4.5 kJ/mm	Tensile test Brittle fracture test

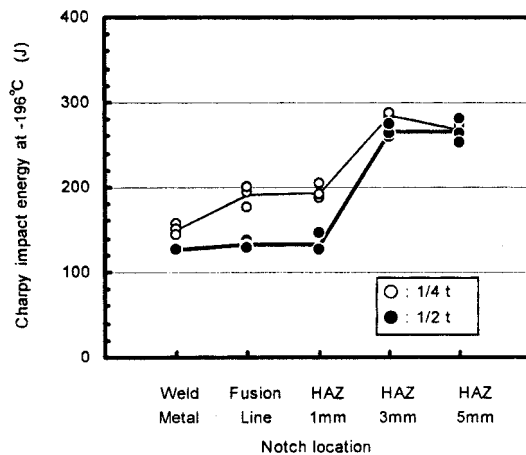


図4 溶接継手部シャルピー試験結果(GTAW)  
Results of Charpy impact test for GTAW welded joint

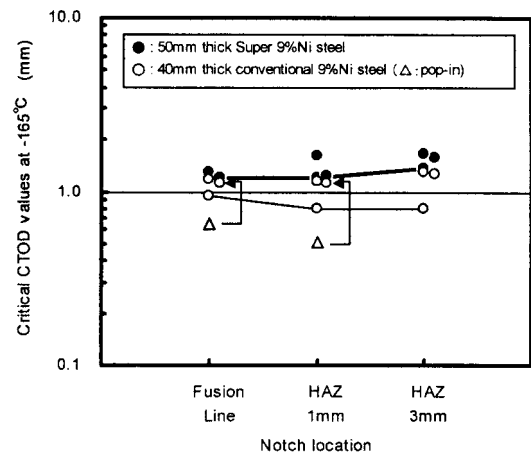


図5 溶接継手部CTOD試験結果(GTAW)  
Critical CTOD values at -165 for GTAW welded joints

(GTAW)は70%Niのオーステナイト系の溶接金属を用いて縦向きで溶接施工した。

継手部引張試験結果は726MPa以上の良好な値を示すとともに、全て軟質な溶接金属で破断している。

図4に-196における継手シャルピー試験結果を示す。70%Ni系の溶接材料は母材より低強度であるため、継手フュージョンライン(FL)近傍の試験ではき裂は溶接金属(WM)側にそれる。従って、これらの吸収エネルギーは溶接金属の値に大きく影響される。1/2t部(t:板厚)の溶接金属の吸収エネルギーは約130Jであるが、HAZでは1/4t, 1/2tともに130J以上の高い値を示すと同時に、延性破面率は全ての試験片で100%であった。

### 3.3 破壊靱性試験結果

次に、大型LNGタンク材としての脆性破壊に対する安全性を評価するために、母材と溶接継手部の脆性破壊発生阻止性能、及び母材の脆性き裂伝播停止性能を調べた結果について述べる。

#### 3.3.1 脆性破壊発生阻止性能

BS5762-1979に従って-165のLNG温度にて実施した母材のCTOD試験結果は圧延方向(L)、圧延直角方向(C)採取試験片ともに脆性破壊は起こさず、モードVの破壊形態にて1.0mm以上の値で

あった。

図5に-165のLNG温度における50mm厚スーパー9%Ni鋼のGTAW継手のCTOD試験結果を示す。40mm厚の従来9%Ni鋼のGTAW継手のCTOD値<sup>4)</sup>と比較しても、50mm厚スーパー9%Ni鋼の値はいずれのノッチ位置においてもこれを上回る値であり、かつPop-inの発生は認められていない。WES-2805に準拠した欠陥評価によればLNGタンクとして必要な溶接部CTOD値は最大でも0.1mm程度であり<sup>7)</sup>、スーパー9%Ni鋼では母材、継手ともにこの値を大きく上回っている。スーパー9%Ni鋼は母材、継手ともに極めて優れた脆性破壊発生阻止性能を有していると言える。

なお、十字継手貫通切欠付広幅引張試験(試験片に設けたノッチ形状は、参考文献<sup>7)</sup>と同じ)も実施し、-165において、日本ガス協会「LNG地上式貯槽指針<sup>8)</sup>」における地震時の許容応力(375MPa)の2倍以上の破壊応力であることを確認している。

#### 3.3.2 脆性き裂伝播停止性能

LNG等の気化しやすい液体の貯槽においては、破壊の発生を阻止することは言うまでもないが、更に、万が一脆性き裂が発生してもできるだけ短いき裂で停止させることが必要である。一方、9%Ni

鋼の溶接継手は、溶接金属の強度が低い軟質継手であり、万が一溶接HAZ部から脆性き裂が発生したとしても、き裂はすぐに溶接金属部にそれてしまい、溶接HAZ部に沿った伝播はしないことが知られている<sup>1)</sup>。従って、母材における脆性き裂伝播停止特性の確保がより重要である。

このような観点から、9%Ni鋼母材において短かいき裂での伝播停止特性(ショートクラックアレスト)が評価検討されてきた<sup>9,10)</sup>。その中で、実際の停止性能評価における混成ESSO試験の有効性が確認されており、50mm厚のスーパー9%Ni鋼の母材についても混成ESSO試験を実施した。図6に試験片形状を、表3に試験結果を示す。助走距離150mmから計算された負荷応力拡大係数K値を考慮すれば、-196でも280MPa m<sup>1/2</sup>以上の脆性き裂伝播停止性能を有する。

町田ら<sup>7)</sup>は、長さ5.5(t:板厚)のき裂に対する必要K<sub>ca</sub>値を残留応力の影響も考慮して算定し、地震時に対して母材で167MPa m<sup>1/2</sup>と求めている。この母材混成ESSO試験結果からはこれ以上の靱性を有していることが確認された。

以上のことからスーパー9%Ni鋼は大型LNGタンク用の母材として必要と考えられる脆性き裂伝播停止性能を十分に満足していると言える。

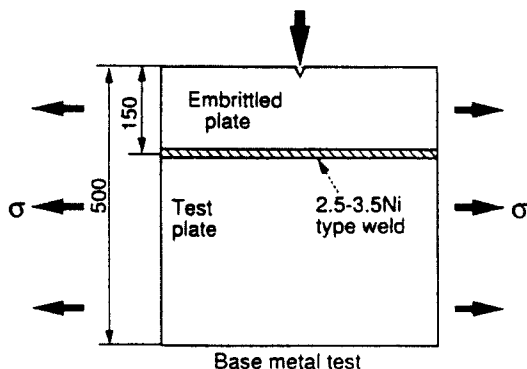


図6 母材混成ESSO試験片の形状  
Duplex ESSO test specimen geometry

#### 4. 結 言

LNGタンク用9%Ni鋼の厚手化に向け、板厚50mmの極厚材についても母材、継手ともに優れた強度と低温靱性を兼ね備えた新しいスーパー9%Ni鋼の製造技術を確立した。二相域焼入れ処理の採用に加えて、鋼中Si量の低減とMoの微量添加を行い、新製造法を適用して工場製造された板厚50mmのスーパー9%Ni鋼板は、LNGタンク用鋼板として、極厚材にもかかわらず従来鋼板を越える優れた母材、継手脆性破壊発生阻止性能及び母材伝播停止性能を有することが確認された。

尚、スーパー9%Ni鋼は大型LNGタンク用途だけではなく、様々な極低温容器用鋼として板厚100mm程度の超極厚鋼板まで製造が可能である。

スーパー9%Ni鋼は、エネルギー分野をはじめとする高度な安全性が要求される極低温容器・装置製造分野において、幅広い利用が期待される。

#### 謝 辞

厚手9%Ni鋼における大型LNGタンクへの種々の適用研究にあたり、終始ご指導をいただいた東京大学名誉教授町田進氏および大阪ガス(株)石倉則義氏(現中井エンジニアリング(株))、久保尚重氏に感謝いたします。また、同安全性評価に関し、その実施および解析にご尽力いただいた石川島播磨重工業(株)およびトーヨーカネツ(株)に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 例えば,田中潔,佐藤光男,石川忠:製鉄研究,(318),79(1985)
- 2) 日本特許出願公告 昭55-12083. 1980-03-29
- 3) 矢野清之助 ほか:鉄と鋼. 59, 752(1973)
- 4) 齋藤直樹,山場良太,村岡寛英,佐伯修:新日鉄技報,(348),25(1993)
- 5) 大岡耕之:9%Ni鋼の低温靱性に関する研究. 学位論文
- 6) 岡山豊 ほか:新日鉄技報,(380),50(2004)
- 7) 町田進,石倉則義,久保尚重,片山典彦,村本聖一,萩原行人,有持和茂:JHPI. 31(1),19(1993)
- 8) (社)日本ガス協会:LNG地上式貯槽指針.1981
- 9) 田中潔:大型低温貯槽用材料の安全性評価に関する研究. 学位論文
- 10) Consortium of Five Japanese Companies(OG,IHI,TKK,NSC,SMI):Crack Arrest Properties of 9%Ni Steel and Relation between Crack-Initiation and Crack-Arrest Tests. GRI Report, GAS Research Institute, 1986, GRI-86-0007

表3 母材混成ESSO試験結果  
Results of duplex ESSO test for base plate

Test location	Plate thickness	Test temperature	Applied stress	Judgement	K <sub>ca</sub>
Base plate	50 mm	-196	392MPa	No - Go	>280MPa m <sup>1/2</sup>

Note 1) Crack starter plate width is 150mm and test plate width is 350mm.

2) Driving force (K-value) of a crack when it reaches the test plate is 280 MPa m<sup>1/2</sup>