

連携記事

LNGタンク内槽用厚鋼板の技術開発

Development and Progress of Steel Plates for LNG Inner Tanks

長尾年通

Toshimichi Nagao

新日鐵住金(株) 厚板事業部
厚板技術部 厚板商品技術室
上席主幹

1 緒言

世界規模での環境対策の必要性が議論される中、従来からクリーンエネルギーとして知られている液化天然ガス(LNG)の需要が増大している。それに伴い、LNGタンクの建造が増加すると考えられている。

LNGは、マイナス162℃前後で貯蔵されるため、LNGタンクの内槽材には、極低温における高い強度と共に破壊に対する高い安全性が要求される。これらの特性に優れた9% Ni鋼が、地上式LNGタンクの内槽材として約半世紀に亘り広く使用されている。これは、9% Ni鋼以外の鋼材で建造された幾つかの貯槽用タンクにおける破壊事故を契機に鋼材の改良がなされたことに加え、溶接技術と検査技術、および、設計面での進歩など、LNGタンクに携わるオーナー(施主)、ファブリケーター(施工者)、素材メーカー(素材製造者)(鋼材、溶材)など業界全体による徹底した安全性と経済合理性の両立追求(継続的な新技術開発、導入)によるものである。尚、9% Ni鋼は米国で生まれ、適用が開始された鋼材であるが、設計、建造、鋼材という全ての面での進歩において、我が国も重要な役割を果たして来たと言える。

本稿では、LNGタンク内槽用9% Ni鋼の米国での誕生に始まり、我が国を中心としたオーナー、ファブリケーター、鋼材メーカーの共同での努力による安全性と経済合理性両立の追求による普及・拡大、そして、半世紀振りの新LNGタンク用鋼板の実適用という、最新の状況に至るまで、LNGタンク内槽用厚鋼板の技術開発に関する状況を紹介する。

2 9% Ni鋼の歴史

2.1 9% Ni鋼の開発・普及

LNGタンクは1940年代に米国で建造が開始されたが、1944年、米国クリーブランド州で4,050m³のLNGタンクが

脆性破壊により崩壊し多数の犠牲者が出る大惨事が発生した。鋼材は3.5% Ni鋼であり、約マイナス162℃の極低温では十分な靱性を持たないことから、鋼材選定の誤りであったと考えられる¹⁾。この事故を契機に、米国International Nickel Company (INCO) が9% Ni鋼を開発し、1952年にASTM A353 (NNT:2回焼ならし後、焼戻し) が規格化され、その後、現在広く使われているA553 type I (QT: 焼入れ後、焼戻し) が1965年に規格化された。その間の1960年にINCO社-USS社-CB & I社で行われたOperation Cryogenicsと呼ばれる実際の圧力容器破壊試験の結果、9% Ni鋼(A353,A553)はSR処理をせずにLNG温度まで良好な破壊特性を有することが明らかになった。これにより大型LNGタンク内槽材に9% Ni鋼が広く適用できる道が開けた。また、SR処理はかえって悪い結果をもたらすことが証明され、当初は製作時に義務付けられていたSR処理は板厚2インチまでは不要という、その後のASME基準の改定に繋がった²⁾。同時に、9% Ni鋼の溶接法の研究・開発が進められ、LNGタンク内槽材として9%Ni鋼が広く適用されることになった。

日本では1964年に日本溶接協会鉄鋼部会が中心となって発足した9N委員会で、9% Ni鋼の母材特性、加工性、溶材の特性など、タンク建造に必要な基本技術が調査・検討された³⁾。

そして、1968年に、我が国初のLNGタンクが根岸に建造された。ここに当社製9% Ni鋼も初出荷材として使用されている。

2.2 9% Ni鋼の安全性の議論

LNGタンク内槽材として9% Ni鋼の適用が進むなか、1977年、カタールでC-Mn鋼製LPGタンクが脆性破壊した結果、爆発炎上し、石油随伴ガス精製基地が全壊する大事故が発生した⁴⁾。この事故を契機に、溶接構造物として、脆性破壊の発生を防止するだけでなく、万一、脆性き裂が発生した場合でも、そのき裂伝播を停止する特性が必要という考え方がShell社によって提唱された。これを受け、1980年代にGRI

(Gas Research Institute) プロジェクトとしてLNGタンク内槽用鋼材としての9% Ni鋼の安全性に関する世界的な研究・議論がなされた。この取り組みで日本は、オーナー1社をリーダーとして、ファブリケーター2社、鋼材メーカー2社の5社がコンソーシアムを組み、学識経験者の指導を受けながら、9% Ni鋼の脆性き裂伝播停止特性の評価・解析を行った。その結果、9% Ni鋼が十分な耐破壊特性を有する事が証明され、1986年、第8回LNG国際会議 (LNG8) でGRIより研究成果が報告され、9% Ni鋼製LNGタンクが高い安全性を有する事が世界的に認識された⁵⁻⁸⁾。LNGタンク内槽材に求められる要求特性を図1に示す。

2.3 タンク大型化に伴う9%Ni鋼厚肉化対応

1990年代に入ると、世界的にLNGタンクの大容量化が進んだ。日本の地上式LNGタンクでも敷地面積の有効活用、および、タンク建造コストの低減等の理由から、それ迄の8万³程度から、14万³、18万³へと大容量化が進んだ。これに伴い9% Ni鋼に対しては、それ迄の最大板厚30mm程度を大きく超える板厚50mmの極厚材が必要となった。板厚の増大による破壊靱性値の低下が懸念されるため、従来鋼材と比較して母材、継手共に、より高い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^{5,9,10)}。

このような需要家の要望から、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、新日鐵住金では、中間熱処理 (二相域焼入れ処理)¹¹⁾の採用と共に、低P、低S化などの高純度化に加え、鋼中Si量の低減とMoの微量添加を行い、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鋼を開発した⁹⁾。そして、学識経験者、オーナー1社、ファブリケーター2社、鋼材メーカー2社が共同で、様々な角度から脆性破壊に対する安全性を評価し、十分な安全性を有する事を確認したうえで、最大板厚50mmの極厚9% Ni鋼が国内LNGタンクに適用されている^{10,12,13)}。当該極厚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¹⁰⁾。

今までに述べた様な、鋼材の改善に加え、溶接技術と検査技術、および、設計面での進歩など、LNGタンクに携わる業界全体の努力により、9% Ni鋼が地上式LNGタンク内槽材として約半世紀に亘り広く使われてきた。

3 新しいLNGタンク内槽用Hi-Ni鋼 (新LNGタンク用鋼板)

LNGタンク内槽用鋼材に対する高い安全性が求められるなかで、LNGタンクの建造費用削減の観点から、高価かつ価格変動が大きいNiの添加量低減のニーズが有った。新日鐵住金では、1960年代からNi低減鋼の開発に取り組み、1970年代にNi添加量を5.5%まで低減した新鋼材を開発した。これは、Mn増加、CrおよびMo添加による成分最適化と共に、従来の焼入れ-焼戻しに中間熱処理を追加したものであった。学識経験者を含めた委員会でLNGタンクへの適用検討が行われ^{14,15)}、適用可能と判断されたものの、検討時期が9% Ni鋼の黎明期でもありLNGタンク用としては実用化には至らなかった。

その後、1990年代にTMCP (Thermo-Mechanical Control Process、熱加工制御) の適用を含めた基礎研究が開始され、2010年に表3に示す7.1% Ni成分系の開発を完了した¹⁶⁻¹⁸⁾。7.1% Ni成分系は7% Ni鋼としてガス事業法適合性評価委員会の審議¹⁹⁾により9% Ni鋼と同等の性能を有する事が認められ、2011年に国内最大クラスである23万³の大阪ガス泉北製造所第一工場5号LNGタンク (大阪府) に世界で初めて適用された。9% Ni鋼の誕生から、およそ半世紀振りの新鋼材適用である。7% Ni鋼の初適用も、オーナー、ファブリケーター、鋼材メーカーという、業界全体での新技術適用の取り組みにより実現したもので、地上式LNGタンク分野で世界をリードしてきた日本の総合力の結晶であると言える。

その後、2010年に表3に示す6.3% Ni成分系の開発²⁰⁾が完

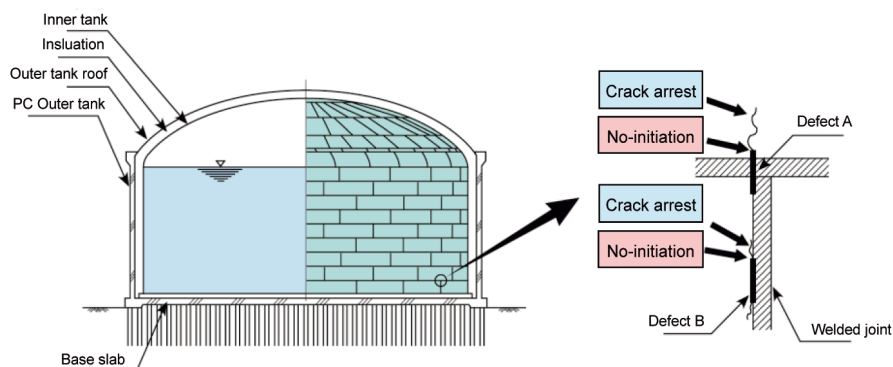


図1 LNGタンク内槽材に要求される破壊特性

了した。そして、2013年にJIS、ASTM、および、ASMEにNi量6.0～7.5%の範囲で規格化された。更に、2014年11月に海外における地上式LNG円筒形タンク設計規格の主流であるAPI620 Appendix Qに登録する事が承認され、全世界で適用可能な状況になっている。規格化の状況を表1、規格の概要を表2に示す。尚、図表中では、7.1% Ni成分系をHeatA、6.3% Ni成分系をHeatBとして記載した。

JIS はJIS G 3127 (低温圧力容器用ニッケル鋼鋼板) にSL7N590 として登録された。Ni 量を6.0～7.5%とし、化学成分、製造方法以外はすべて9% Ni 鋼 (SL9N590) と同じ規定

である。海外においても、2013 年にASTM (米国材料試験協会)、ASME (米国機械学会) に登録された。ASTM ではA841 (Standard Specification for Steel Plate for Pressure Vessels, Produced by TMCP) のGrade G として登録されており、成分、製造方法以外はすべて9% Ni 鋼 (A553 type I) の規定が踏襲された。Ni 含有量はJIS と同じく6.0～7.5% に規定された。なお、ASTM においては、強度レベルが従来の9% Ni鋼と同等であるClass 9に加えて、より高強度のClass 10 が規定された。

新LNGタンク用鋼の成分および製造方法を表3、製造方

表1 新LNGタンク用鋼の規格化状況

	Organization	Designation	Status
Material code	ASTM	A841 grade G Class 9 A841 grade G Class 10	Published (October,2013)
	JIS	SL7N590	Published (March, 2013)
	ISO	(9328)	Under preparation
	EN	10028	Under preparation
Design code	ASME	Code Case 2736 for Div.1 Code Case 2737 for Div.2	Published (August, 2013)
	API	620 Appendix. Q	Approved (Nov, 2014)
	EN	14620	Under preparation
	Japanese Government	Gas business act (Ni=7.0～7.5%)	Published (March, 2011)

表2 新LNGタンク用鋼の規格概要

Standard	Designation		Ni (mass%)	Manufacturing process*	Mechanical properties		
					YS (MPa)	TS (MPa)	vE-196°C (J)
JIS	G3127	SL7N590	6.0-7.5	TMCP-T** (TMR-T,DQ-T)	≥ 590	690-830	≥ 41
		SL9N590	8.5-9.5	RQ-T **			
ASTM	A841Gr.G	Class9	6.0-7.5	TMCP*** (TMR-I-T,DQ(-I)-T)	≥ 585	690-825	≥ 27
		Class10	6.0-7.5		≥ 620	750-885	≥ 27
	A553	Type I	8.5-9.5	RQ(-I)-T	≥ 585	690-825	≥ 27

*TMR; Thermo mechanical rolling, DQ; Direct quenching, RQ;Reheat quenching, I; Intermediate heat treatment, T; Tempering
**Intermediate heat treatment can be applied.
*** TMR-I-T and DQ(-I)-T are defined as TMCP.

表3 新LNGタンク用鋼の化学成分と製造方法

		Chemical composition(mass%)						Production process
		C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	
Developed steel	Heat A (7.1%Ni)	0.05	0.05	0.8	7.1	added	added	TMCP(DQ-I-T)
	Heat B (6.3%Ni)	0.05	0.06	1.0	6.3	added	added	TMCP(DQ-I-T)
Conventional steel	9%Ni-steel	0.05	0.22	0.65	9.2	Tr.	Tr.	RQ-T

DQ:Direct quench,RQ:Reheat Quench
I:Intermediate heat treatment, T:Tempering

法と金属組織を図2に示す。Ni低減だけでは靱性が低下するため、化学成分を最適化し、さらに、製造プロセスにも工夫を加えた。母材靱性の確保には、焼戻し脆性の回避や安定なオーステナイトの確保、さらに金属組織の微細化が重要となる。このため、Ni低減を補う元素として同じオーステナイト生成元素であるMnの増量に加え、Mo等を添加すると共に、直接焼入れもしくは制御圧延に、二相域熱処理・焼戻しを組み合わせたTMCP (Thermo-Mechanical Control Process、熱加工制御) を適用した。

溶接熱影響部靱性の確保には、セメンタイト析出を阻害するSiの低減によるオートテンパー効果増大や、Mn、Mo、Cr等の添加量調整による焼入れ性最適化を通じたマイクロ組織の適正化を活用した。これらにより、9% Ni鋼と同等の母材靱性、および、溶接継手靱性を実現した^{16-18,21,22)}。図3にCTOD試験結果 (脆性き裂の発生防止特性の評価)、図4に混成ESSO試験体、表4に混成ESSO試験結果 (脆性き裂の伝播停止特性

の評価) を示す。いずれも従来9% Ni鋼と同等の高い特性を有している。

7% Ni鋼は、その後、東邦ガス知多緑浜工場No.3LNGタンク (愛知県)、石油資源開発相馬LNG基地LNGタンク (福島県) に採用され、建造が進んでいる。また、初適用案件である大阪ガス泉北製造所第一工場5号LNGタンク (大阪府) は、2015年11月末に予定通り建造が完了し、現在に至るまで順調に稼働中である。この建造のなかで、7% Ni鋼の加工性 (曲げ、切断など)、および、溶接性は、従来9% Ni鋼のものと同等であることが確認されている²²⁾。API620 Appendix Qへの登録も承認済であることから、今後、日本以外の全世界への適用拡大が期待されている。

4 結言

以上、1940年代まで遡りLNGタンク内槽材の歴史、その中における日本のオーナー、ファブリケーター、鋼材メーカー共同での世界をリードする活動を紹介した。

今後も、更なる安全性と経済合理性の両立追求の諸要望が出てくるものと思われる。これらに対し今迄と同様に、オーナー、ファブリケーター、素材メーカー等の業界全体での取

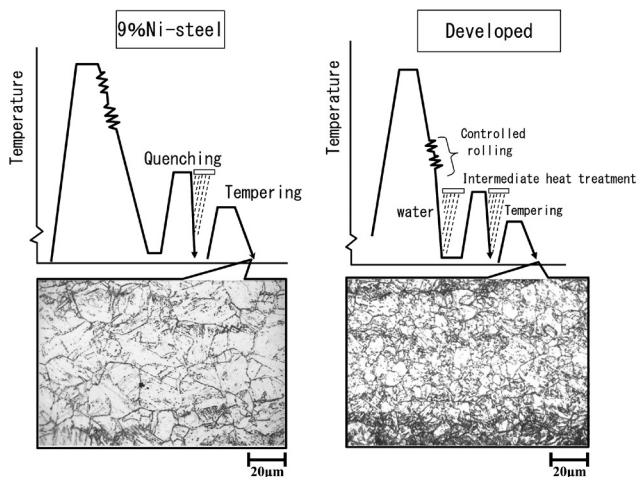


図2 新LNGタンク用鋼の製造方法と金属組織

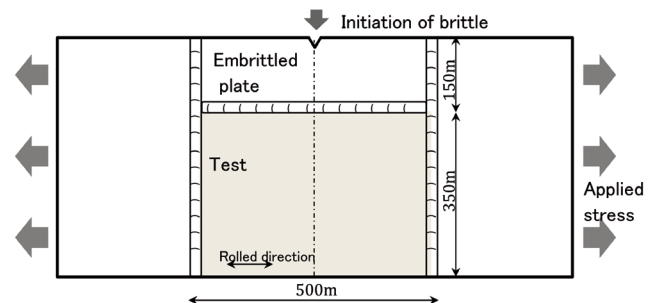


図4 混成ESSO試験体

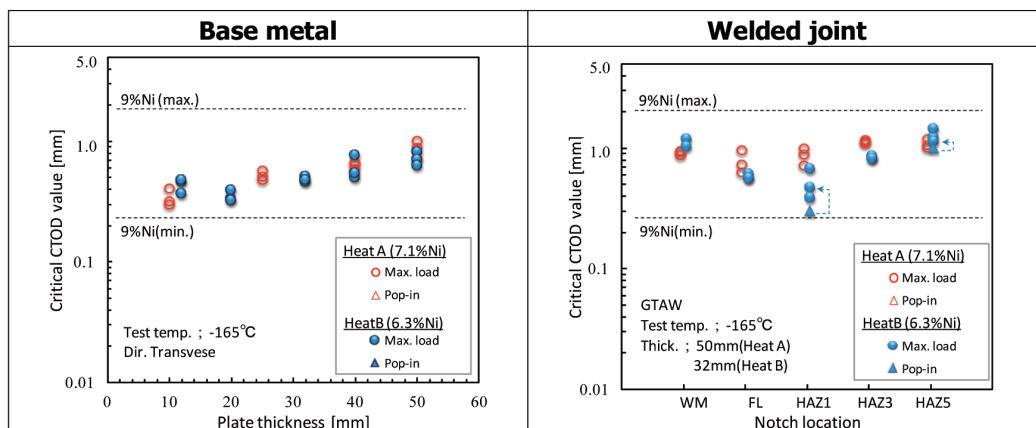


図3 新LNGタンク用鋼のCTOD試験結果

表4 新LNGタンク用鋼の混成ESSO試験結果

Material	Manufacturing process	Thick. [mm]	Aimed temp. [°C]	Applied stress [MPa]	Judgment*
Heat A (7.1%Ni)	TMCP(DQ-I-T)	25	-165	393	No-Go
			-196		
	TMCP(DQ-I-T)	40	-165	393	No-Go
			-196		
	TMCP(DQ-I-T)	50	-165	393	No-Go
			-196		
Heat B (6.3%Ni)	TMCP(DQ-I-T)	32	-165	408	No-Go
			-196	393	
	TMCP(DQ-I-T)	40	-165**	393	No-Go
			-196	393	No-Go
	TMCP(DQ-I-T)	50	-165	393	No-Go
			-196	393	No-Go
Conventional 9%Ni	RQ-T	40	-165	393	No-Go
			-196		
	RQ-I-T	50	-165	393	No-Go
			-196		

*No-Go ; Crack propagation was arrested at test plate within t (plate thickness)

**Test at -196°C is not carried out.

り組みにより、諸先輩が築き上げた世界をリードする技術を更に高めることが出来ると考えている。

参考文献

- 小倉信和：JHPI, 10 (1972), 2881.
- ASME Code Case 1308-4, May 1 (1963)
- 小倉信和：日本機械学会誌, 83 (1980) 739, 720.
- 日本溶接協会鉄鋼部会・化学機械溶接研究委員会：9% Ni 鋼の溶接・加工に関する共同研究, (1966)
- 久保尚重：JHPI, 38 (2000), 169.
- 廣瀬仁志：溶接構造シンポジウム講演論文集, (2009), 77.
- 有持和茂：JHPI, 36 (1998) 6, 433.
- Consortium of Five Japanese Companies (OSAKA GAS CO., LTD., ISHIKAWAJIMA-HARIMA HEAVY INDUSTRIES CO., LTD., TOYO KANETSU K.K., NIPPON STEEL CORPORATION, SUMITOMO METAL INDUSTRIES LTD.) : Gas Research Institute, Report GRI-86/0007 (1986)
- 斎藤直樹, 山場良太, 村岡寛英, 佐伯修：新日鐵技報, 348 (1993) 25.
- 星野学, 斎藤直樹, 村岡寛英, 佐伯修：新日鐵技報, 380 (2004), 17.
- 矢野清之助, 桜井浩, 三村宏, 脇田信雄, 小沢勉, 青木宏一：鉄と鋼, 59 (1973) 6, 752.
- 町田進, 石倉則義, 久保尚重, 片山典彦, 萩原行人, 有持和茂：JHPI, 29 (1991) 6, 25.
- 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 (1993) 1, 19.
- H.Takashima, H.Yoshimura and K.Tanaka : Proceedings for Symposium on Low Temperature Containment Welding, Nov. (1973) 265.
- 栗山良員, 河野武亮, 豊増清明, 片山典彦, 横倉三雄：石川島播磨技報, 17 (1977) 2, 125.
- 加賀谷崇之, 古谷仁志, 加茂孝浩, 高橋康哲, 若松引宣, 長尾年通, 大西一志：新日鐵住金技報, 400 (2014) 38.
- 川畑友弥, 藤原知哉, 有持和茂, 廣瀬仁志：日本高圧力技術協会秋季公演会概要集, 12 (2005)
- 久保尚重, 高田昌典, 山下眞輝, 廣瀬仁志, 坂戸直和, 村本誠一, 平井秀一, 密本巨彦, 川畑友弥, 有持和茂, 加茂孝浩, 大西一志：日本高圧力技術協会秋季公演会概要集, 10 (2008)
- 平成22年度ガス工作物安全解析等調査報告書
- H.Furuya, N.Saitoh, Y.Takahashi, K.Kurebayashi, Y.Kayamori, T.Inoue, R.Uemori and M.Okushima : OMAE2011-49594, Rotterdam, (2011)
- H.Furuya, T.Kawabata, Y.Takahashi, T.Kamo, T.Inoue, M.Okushima, R.Ando and K.Ohnishi : LNG17 (2013), paper for poster session.
- H.Nishigami, M.Yamashita, T.Kamo, H.Furuya, T.Nagao, S.Hirai and M.Mitsumoto : LNG18 (2016), paper for poster session.

(2016年6月29日受付)