特集

新生ニッポンを築く新産業創成への挑戦

第II部 新生ニッポンを築く業界構想と溶接の役割

タンク（日本産業機械工業会 タンク部会）

— LNG 貯槽の溶接施工と

日本におけるものづくりカー*

新見健一郎^{**}，土田 義夫^{**}

新見健一郎

土田 義夫

Tanks (The Japan Society of Industrial Machinery Manufactures—Tanks Department—)
—Welding Procedure for LNG Storage Tanks and Manufacturing Technologies of Japan—
by NIIMI Kenichiro^{**} and TSUCHIDA Yoshio^{**}

キーワード

天然ガス，LNG貯槽，9%Ni 鋼，自動溶接，プラズマガウジング，9%Ni 鋼用溶接材料，
FCAW，溶接の高能率化，品質安定化，溶接ロボット，7%Ni 鋼

1. はじめに

天然ガスは，燃焼時に窒素酸化物（NO_x）や二酸化炭素（CO₂）の排出量が他の化石燃料に比べて少なく，また硫黄酸化物（SO_x）を発生しないことから，環境負荷の少ないクリーンエネルギーとして，近年，特に注目を集めているエネルギー源のひとつである。

わが国では，天然ガスの産出量が少なく，1969年に液化天然ガス（LNG：Liquefied Natural Gas，気体である天然ガスを−162℃に冷却・液化したもの）として輸入を開始して以来，そのほとんどを海外からの輸入に頼っており，世界のLNG輸入量の約4割を占める最大の輸入国となっている。わが国のLNG輸入量をみると，中東諸国のほか豪州・東南アジアからの輸入量が多い。特にオーストラリアは豊富なガス資源量を背景に，近年，液化基地の新設・増設が続いており，日本資本によるプロジェクトも進捗中であることから，今後のオーストラリアからのLNG輸入量が大幅に増加することが見込まれている。

また，2011年の東日本大震災以降，LNGを燃料とした火力発電所の増強計画が促進されており，都市ガス販売量の拡大，工業用の燃料転換による使用量の伸びとともに，LNG需要は今後も益々増加すると見込まれている。このような需要の増加予測に伴い，電気事業者，ガス事業者，石油会社などによるLNG受入基地の新規計画・貯槽増設計画が増えている。現在稼働中のLNG一次受入基地は28箇

所であるが，2012年以降に運用開始される新規一次受入基地及び一次受入基地用増設貯槽は，現在建設中（一部，運用開始済み）のものだけでも，表1の通り計10基地（3基地は貯槽の増設）に及ぶ。

LNG安定供給の観点から，貯蔵設備としてのLNG貯槽は，今後も多くの建設計画が見込まれている。

2. LNG貯槽の構造と形式

LNG貯槽は，地上式及び地下式に大きく分類されるが，近年建設が多い地上式LNG貯槽は，図1に示すような形式が建設されている。各形式の特徴を以下に述べる。

(A) 金属二重殻式貯槽

LNGを貯える低温用鋼製の内槽，その廻りの保冷材，そして保冷材を保持する外槽から構成される平底円筒貯槽であり，貯槽の周囲には，万が一のLNGの漏洩に備えてコンクリート製の防液堤が設置される。

(B) PC・外槽一体型貯槽

防液堤をプレストレスト・コンクリート（PC）製とし，

表1 新規LNG一次受入基地／増設貯槽の計画

基地名称	LNG貯槽 (容量×基数)	貯槽形式	運用開始 (予定年)
沖縄電力	吉の浦火力発電所 14万KL×2基	PC外槽一体型	2012年
北海道ガス	石狩LNG基地 18万KL×1基	PC外槽一体型	2012年
東京ガス	扇島工場 25万KL×1基（増設）	地下式	2013年
国際石油開発帝石	直江津LNG基地 18万KL×2基	PC外槽一体型	2014年
ひびきエ&エ&シー	ひびきLNG基地 18万KL×2基	PC外槽一体型	2014年
JX日鉱日石エネルギー	八戸LNGターミナル 14万KL×2基	PC外槽一体型	2015年
東京ガス	日立LNG基地 23万KL×1基	PC外槽一体型	2015年
大阪ガス	泉北第一製造所 23万KL×1基（増設）	PC外槽一体型	2015年
東北電力	新仙台火力発電所 16万KL×2基	PC外槽一体型	2016年
東邦ガス	知多緑浜工場 22万KL×1基（増設）	地下式	2016年

*原稿受付 平成24年10月17日

** 日本産業機械工業会 タンク部会（川崎重工業㈱プラント環境カンパニー）（The Japan Society of Industrial Machinery Manufactures—Tanks Department—）KAWASAKI HEAVY INDUSTRIES,LTD. Plant & Infrastructure Company

外槽に密着させた貯槽で、内槽は低温用鋼製である。万が一、LNG が内槽から流出しても、PC 製の防液堤内に貯めることができ、安全性が高いことに加え、防液堤がコンパクトであることから、敷地の有効利用が図れることが特徴である。

(C) ピットイン式貯槽

金属二重殻貯槽を、防液堤を兼ねるコンクリート製ピットの中に設置した貯槽である。LNG の液面は地盤面以下とするため、万が一の LNG 漏洩の場合にも、LNG はピット内に留まり、安全性が高く、外部からは屋根しか見えないため、景観上の問題が少なく、敷地の有効利用が図れることが特徴である。

近年では、従来の金属二重殻式貯槽に変わり、PC・外槽一体型貯槽が増えると共に、大容量化が進んでおり、地上式でも最大容量 18万kl の貯槽が建設されている。建設された PC・外槽一体型貯槽の例を図 2 に紹介する。金属二重殻式貯槽、PC・外槽一体型貯槽などの地上式 LNG 貯槽の構造用内槽材には、低温でも十分な強度と優れた靱性を

図1 地上式 LNG 貯槽の各形式

図2 大容量 PC-LNG 貯槽の建設例

図3 LNG 貯槽内槽部材と適用溶接施工法の例

有する 9%Ni 鋼が主に使用されており、低温靱性が確認されている最大板厚 50mm までの板厚が適用されている。2008年にガス事業法における材料の許容安全率が緩和されてより、LNG 貯槽の容量は、前述の最大板厚の中で大きくすることが出来るようになり、容量 23万kl などの更なる大容量の貯槽が計画されている。

LNG 貯槽の需要が増加し大容量化が進むなか、LNG 貯槽の溶接技術には更なる品質安定化、高能率化が求められるようになっている。以下に地上式 LNG 貯槽における溶接施工技術について紹介する。

3. 地上式 LNG 貯槽の溶接施工

3.1 主要部位の溶接施工法

地上式 LNG 貯槽の内槽部主要溶接継手と、各部位に適用される溶接法の例を図 3 に示す。LNG 貯槽の内槽部は、底板、アニュラー板、側板、ナックル板、屋根部（屋根板と屋根骨）から構成され、一般的には最大の液圧が作用する側板最下段が最大板厚となる。内槽材である 9%Ni 鋼の溶接では、その建設初期には被覆アーク溶接（SMAW）が主に適用されていたが、溶接能率の向上と品質の安定化を目的に1970年代には自動化が進められた。特に LNG 貯槽での溶接量の大部分を占める側板縦継手と周継手の溶接については、タンクメーカー各社にて自動化・高能率化・品質安定化に関わる技術開発・適用が継続的に行われており¹⁾、以下にこれらの溶接施工技術について紹介する。

1) 側板縦継手の溶接

国内貯槽における側板縦継手には、ほとんどの場合自動 TIG 溶接（GTAW）が適用されている。自動 TIG 溶接法は、トーチのオシレートと AVC（自動アーク長制御）機能とを組み合わせた溶接装置が開発され、更に溶加ワイヤに通電することで高溶着化を図った施工法が一般化されている。1985年以降は狭開先化が図られ、かつ厚板X開先等の初層溶接に銅当金を用いた裏はつり省略施工法が採用されるに至り、縦継手溶接作業負荷の軽減、工期の短縮、作業環境の大幅な改善が実現した。また最近では、アークセンサによる開先微いやビード高さ制御、モニタリング機構を用いた遠隔操作化等、高機能溶接機の導入が図られ、熟練溶接士の不足、高齢化といった課題に対する技量依存度の軽減対策が進められており、今後の溶接の更なる省人化・無監視化といった合理化アプローチが期待される。

内槽側板縦継手の最下段部を溶接施工する際、溶接機の下端部がアニュラー板に干渉することから通常の自動

主要継手	板厚(mm)	溶接方法 (姿勢)
① 側板縦継手	50	自動 T I G (立向)
② 側板水平継手	50	サブマージアーク (横向)
③ 側板最下段縦継手 (自動溶接困難箇所)	50	被覆アーク 特殊自動 T I G (立向)
④ アニュラー板突合継手	30	被覆アーク (下向)
⑤ 側板×アニュラー板	50×30	被覆アーク (下向水平)
ナックル板突合継手	50	被覆アーク (立向～傾斜上向)
屋根骨H組溶接	7～20	サブマージアーク F C A W (隅肉)
屋根板相互溶接	7～20	被覆アーク 手動 T I G (下向)

TIG 溶接機の適用が困難であり、下端部から約 400mm については従来は SMAW で施工するか、側板最下段のみジャッキアップして自動 TIG 溶接を行い、溶接後ジャッキダウンして据え付ける工法（ジャッキアップ／ダウン工法）が採用されてきた。しかし、この工法では工期が長くなる欠点があることから、ジャッキアップ／ダウンを行うことなく最下段部まで自動溶接でアプローチ可能な溶接機がタンクメーカー各社で開発・適用されている^{1),2)}。

2) 側板周継手の溶接

側板周継手では、タンク内周長が 250m を越えるような大型化が進んでおり、溶着能率の高いサブマージアーク溶接（SAW）が横向水平姿勢で適用されてきた。完全溶込み溶接の要求をクリアするための裏はつり施工には、従来アークエアガウジングが適用されてきたが、はつり面の整形作業負荷や粉塵、騒音といった点で課題があった。そこで作業能率の向上と作業環境の改善を目的にプラズマガウジングの適用が図られ、自動プラズマガウジング装置が設備化されてタンクの建設工事に適用されている。適用状況を図 4 に示すが、従来のアークエアガウジング施工に比較してヒュームや粉塵、騒音の発生が極めて少なく作業環境が改善されており、またガウジング面の性状は極めて均一で滑らかであることから、はつり面の非破壊検査や後溶接のためのグラインダ整形作業が著しく軽減された。

一方で、周継手溶接に横向水平 GTAW を適用し、裏波溶接を行うことで裏はつりを省略する施工法も提案され、国内貯槽への適用例が紹介されている³⁾。この施工法は SAW に比べると溶着能率の面で劣るものの、余盛りやパス間のビード整形、はつり面のグラインダ整形作業が不要となり、建設工事トータルでの施工が合理化される利点がある。

3) 屋根部

LNG 貯槽の屋根部製作においては、自動溶接の適用が困難な R 部材の溶接や、小型ピース同士の断続溶接といった自動化による合理化効果が得られ難い溶接部位が多々あり、これらは熟練溶接工による SMAW 施工に依存してきた。1990年代になって、品質・性能に優れた 9%Ni 鋼用のインコネル系フラックス入りワイヤが実用化され、屋根骨や屋根板の一部に適用されている³⁾。

図4 LNG 内槽溶接部へのプラズマガウジング適用例

3.2 溶接材料と溶接施工の留意点

地上式 LNG 貯槽の構造用内槽は、低温での十分な強度と優れた靱性が要求されるため、9%Ni 鋼用の溶接材料としては 70%Ni 合金系の溶接材料が適用されている。被覆アーク溶接用には従来から実績のあるインコネル系（Ni-Cr 合金）が、自動溶接用としては耐高温割れ性に優れたハステロイ系（Ni-Mo 合金）が開発され主に適用されている。現在適用されている溶接材料を用いた 9%Ni 鋼溶接継手の性能例を表 2 に示す⁴⁾。LNG 貯槽用 9%Ni 鋼溶接の最大の特徴は、母材とは組成の異なる Ni 基合金を適用する異材溶接であるという点であり、このために以下に紹介するような様々な施工上の留意が必要となる。

1) 融合不良・溶接作業性

70%Ni 合金系の溶接材料は母材である 9%Ni 鋼と比べて 100℃ 以上融点が低く、炭素鋼での一般的な共金溶接よりも開先部で溶込みが浅くなり、融合不良が発生し易い。また同じ理由で溶接ビードが垂れ易く、適切な溶接条件、運棒方法、オシレート条件などの選定とその実現のための高い溶接技量が必要である。

2) 磁気吹き

9%Ni 鋼は強磁性体であるため磁気を帯びやすく、溶接開先部の残留磁気は溶接時の磁気吹きに起因する溶接欠陥の発生に結びつく。特に直流電源を使用する自動溶接においてその影響が大きく、鋼材側への要求仕様として 50×10^{-4} テスラ以下となるように脱磁を行い、磁気吹きによる欠陥の発生を防止する対策を講じている。

3) 溶接割れ

70%Ni 合金系の溶接であることから高温割れが発生し易く、その防止のための適切な溶接条件の選定が重要であ

表2 9%Ni 鋼溶接継手性能の一例（50mm 厚）

Applied joint	Groove shape	Amp. [A]	Volt. [V]	Speed [cm/min]	Heat input [kJ/cm]
Side plate and/or Knuckle plate (Vertical Up)	GTAW	250 ~ 290	10 ~ 11	4.5 ~ 6.0	≤45 (Ave.)
	SMAW	125	23	5.1 ~ 6.3	≤45 (Ave.)
Side plate (Horizontal)	SAW	300	26	25 ~ 50	≤40

Joint classification		Tensile strength [MPa]	Absorbed energy [J] at -196°C		Critical CTOD [mm]	
					Min.	Ave.
GTAW	9%Ni×9%Ni	752, 752	Min. 185	Ave. 192	1.275	1.315
			(1/4t, WM)		W. M.	W. M.
SMAW	9%Ni×9%Ni	754, 760	Min. 68	Ave. 70	0.448	0.474
			(1/4t, WM)		W. M.	W. M.
SAW	9%Ni×9%Ni	760, 760	Min. 135	Ave. 138	0.679	0.733
			(1/4t, WM)		W. M.	W. M.

る。また、SMAW での溶接終端部にはクレータ割れ発生は避けられないことから、棒継ぎを行う箇所には必ずグラインダー処理を行ってクレータ割れを除去する必要がある。

4) 母材の希釈による影響

高 Ni 基合金を用いる溶接のため、母材の過度な希釈を受けると溶接金属部の強度や低温靱性が低下する。過度な母材希釈を避けるため、適切な溶接条件を選定し、過大な溶接入熱量にならないための施工管理が重要である。

3.3 溶接の高効率化と品質安定化

欧州危機を背景とした円高圧力に押され、近年ますます製造技術の海外流出が加速している。国内産業の空洞化は深刻な課題であるが、国際競争力確保のためには製造業として避けては通れない問題であることも確かである。

LNG 貯槽の部材加工やブロック組立溶接についても、海外ファブリケーターでの製造が展開されている。一方で国内 LNG 貯槽用の部材製作は、その品質安定化と工程確保厳守のニーズが高く、LNG 製造におけるキー技術である 9%Ni 鋼の溶接施工については、前節で述べた施工技術を十分に理解し実行できる生産技術力、技量、施工管理能力が要求される。国内タンクユーザーの要求や国内規格・基準を満足し、かつ安定した品質確保のためには、日本国内での工場製作を継続しつつ、海外ファブリケーターとのコスト競争に打ち勝てるものづくり力が重要となろう。前述した

図5 LNG 貯槽部材への溶接ロボット適用事例

高機能化溶接設備の適用による省人化は一つの解決策であり、更なる合理化手法として、ロボット溶接適用による無監視化・脱技量依存を目指す試みが実現しつつある。

例えばナックルプレート同士の板継溶接については、3 次元的な曲面形状の継手溶接線を立向姿勢や上向姿勢で長時間連続溶接する必要がある。9%Ni 鋼の高難度の溶接施工となっていた。これらの問題を解決するため、筆者の事業所では多関節型溶接ロボットシステム適用による自動 TIG 溶接施工が実現されている。本溶接ロボットシステムは高機能開先做い装置が搭載され、無監視かつ安定した品質での施工と、複数台ロボットによる高能率施工を実現している。LNG 貯槽部材の工場製作における溶接ロボットの適用事例を図 5 に紹介する。

3.4 溶接部の非破壊検査

LNG 貯槽の溶接部は、前述のように 9%Ni 鋼の母材と高 Ni 基溶接材料とで溶接されており、異材継手となっている。このため、溶接内部品質の非破壊検査方法として、超音波探傷検査 (UT) の適用には技術的課題があり、放射線透過検査 (RT) が適用され、保証されてきた。しかし、近年の貯槽大型化に伴う継手の厚板化により RT 撮影により多くの時間が必要となっていることから、合理化検査施工法が開発され、適用が進められている。以下にその事例を簡単に紹介する。

1) 放射線透過検査の合理化

RT 施工時には、溶接部が高 Ni 基合金である異材継手のため、母材と溶接金属の X 線透過度を補正するための特殊なマスクを使用して撮影を行っている⁴⁾。LNG 貯槽での適用最大板厚が 50mm まで増大してきた現状では、従来一般的に用いられてきた 300kVp 級の可搬式 X 線装置による撮影では、非常に長時間を要することになる。このため、400kVp 以上級の大型 X 線装置の適用にフィルム側の像質改良とを組み合わせる撮影時間を短縮する試みがタンクメーカー各社で実施されている。大型の線源を使用する場合はその重量から建設現場での施工性に課題があり、移動や設置を自動化した総合的な合理化設備の適用が必要となる。

2) 超音波探傷検査の適用検討

LNG 9%Ni 鋼溶接部では、異材継手であること、溶接金属が高 Ni 基合金のオーステナイト柱状組織であることか

表3 9%Ni 鋼用ハステロイ系フラックス入りワイヤの全溶着金属化学成分の一例 (mass %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe	Nb	W
0.02	0.2	2.7	0.010	0.003	Bal.	7.0	17.6	7.7	<0.01	2.4

表4 9%Ni 鋼用ハステロイ系フラックス入りワイヤによる溶接継手性能例

Cross-sectional macro structure	tensile strength of weld joint	Absorbed energy at -196°C	Longitudinal bend	Critical CTOD
766, 766 [MPa] Fractured position: Weld metal	108, 106, 103 [J] (Ave. 105) 1/4t, Weldmetal	Acceptable	0.590, 0.508, 0.652 [mm] Notch position: Weld metal

表5 7%Ni 鋼溶接継手性能の一例

Joint classification	Tensile strength [MPa]	Absorbed energy [J] at -196°C		Critical CTOD [mm]	
		Min.	Ave.	Min.	Ave.
GTAW	7%Ni×7%Ni	714, 718	Min. 176 Ave. 184 (1/4t, W.M.)	0.332	0.548
SMAW	7%Ni×7%Ni	736, 740	Min. 89 Ave. 89 (1/4t, W.M.)	0.401	0.457
SAW	7%Ni×7%Ni	735, 735	Min. 85 Ave. 98 (1/4t, F.L.)	0.352	0.371

ら、従来 UT の適用は欠陥検出能力の面で困難であると考えられてきた。しかし、近年の情報処理技術の高度化による TOFD 法やフェイズドアレ法といった UT 技術の進歩により、LNG 貯槽溶接部への試適用が紹介されている⁹⁾。最近ではこれら複数の探傷方法を組み合わせた自動 UT システムが開発・適用化されつつあり、貯槽建設の非破壊検査工程合理化が期待されている。

4. これからの LNG 貯槽溶接技術

4.1 各種溶接法の適用拡大 (MIG, FCAW)

9%Ni 鋼を用いた LNG 貯槽建設の黎明期には、MIG 溶接の適用が検討された。当時は Ni 基溶接の課題である溶込み不良やアーク不安定によるブローホールの発生といった技術課題が解決できないまま適用が見送られたが、近年のデジタル溶接電源の進化に伴い、MIG 溶接でも安定した溶接品質確保が可能となりつつある。

9%Ni 鋼溶接部には優れた破壊靱性が要求されることから、MIG 溶接では 100% アルゴンのシールドガス適用が必要となるが、従来型の溶接電源ではアークが不安定となり、溶込みの不均一やアークのふらつきによるブローホール発生が避けられなかった。最近、溶接電源のデジタル制御化が飛躍的に進み、電流波形制御を用いてアークの安定化を図ると共に、最適なビード形状が実現できる技術環境が整備されつつあり、従来の TIG 溶接の代替として高能率の MIG 適用による溶接工期の大幅な短縮が期待される。将来的にはワイヤ送給系やロボットコントローラ等周辺機器をデジタル制御で統合することで、更なる合理化ツールとしての適用範囲拡大が期待される。

海外における LNG 貯槽建設では、Ni 基溶接の施工技量を持つ熟練溶接工の確保が著しく困難であったり、専用の自動溶接設備がインフラ面で適用困難なケースもあり、工期短縮と溶接能率を重視するニーズから、FCAW を耐圧部の縦継手にまで適用した貯槽が紹介されている。これらの FCAW 溶接材料はインコネル625合金向けのものが適用されている事例が主であり、長い技術改良の歴史を経て LNG 貯槽用に溶接材料を最適化してきた我が国では、耐圧部材である内槽部への適用には緻密な技術検証が必要となる。しかし、現地建設のネック工程である側板溶接の工期短縮は、国内においても最重要課題の一つであり、耐圧部である側板縦継手への FCAW 適用は魅力的な合理化ツールとなる可能性を秘めている。最近になって国内溶接材料メーカーより、耐高温割れ特性に優れた立向溶接にも適用可能なハステロイ系のフラックス入りワイヤが開発・紹介されている(表 3³⁾、表 4)。LNG 貯槽の要求性能を十分に満足し、

かつ SMAW と同等以上の継手強度・靱性や優れた破壊靱性が報告されていることから、非耐圧部への半自動溶接やロボット溶接への適用拡大が期待される。技術データと実績を積み上げることで、将来的には国内貯槽でも TIG や SAW に代わる耐圧部材への適用拡大を期待したい。

4.2 新しい内槽材 (7%Ni 鋼) の適用

従来地上式 LNG 貯槽の内槽材には、LNG 温度で優れた強度と靱性を有する 9%Ni 鋼が適用されてきた。しかし、原料となる Ni 価格の高騰に起因する本鋼材の大幅な調達コスト上昇や供給能力制約のリスクを軽減する対策も重要になっている。

近年複数の鉄鋼メーカーから、LNG 貯槽向け内槽材として Ni 含有量を 7% 程度に低減した新しい鋼板が開発され紹介されている⁹⁾。これらは Ni 量低減による母材靱性低下を補うために、TMCP (熱加工制御) 技術と適切な他の熱処理条件とを組み合わせることで、従来の 9%Ni 鋼と同等の耐脆性破壊特性を確保していることが報告されている。既に各鋼板についての溶接継手部の強度・靱性や大型破壊靱性試験による破壊特性の確認が実施され、7%Ni 鋼については安全性の評価を経た上で、現在建設中の PC-LNG 貯槽へ適用が開始されている。表 5 に 7%Ni 鋼の溶接継手性能を例示する。

5. おわりに

現在、LNG 貯槽では一層の工期短縮と建設コスト低減が要請されており、主要工程である溶接施工の合理化が重要な課題となっている。LNG 貯槽の溶接関連技術は近年めざましい進歩を遂げており、革新的な開発技術の適用による合理化と、グローバル市場でのコスト競争力確保が大いに期待される。同時に、諸先輩方が築いてきた安全性確保の理念と技術の積み上げこそが、今の LNG 貯槽への信頼の基盤となっていることを、一人のエンジニアとして後身に伝え守ることも最優先の課題であろう。

LNG 貯槽の安全性を従来通りに担保しつつ、前述した様々な合理化溶接法・溶接材料や新しい材料の開発・適用を進めることは、新興国には真似のできない我が国のものづくり力の強みであり、タンクユーザー、材料メーカー、タンク製造者が互いに連携して総合力を発揮することにより、天然ガス産業に貢献できるものと信じている。

参考文献

- 1) 山川他：大容量 LNG 地上式貯槽の溶接施工，川崎重工技報，130 (1996)，33-38
- 2) 飯島他：LNG 貯槽の溶接技術に関わる生産現場力，溶接学会誌，76 (2007)，44-47
- 3) 鈴木：9%Ni 鋼用フラックス入りワイヤ，神戸製鋼技報，59-1 (2007)，111-115
- 4) 山川他：地上式 LNG タンク用厚板 9%Ni 鋼の母材および溶接継手の性能，川崎重工技報，136 (1998)，52-59
- 5) 上林他：LNG 地上式タンク 9%Ni 鋼溶接継手への UT 法の実用化に関する研究，圧力技術，43-2 (2005)，30-40
- 6) 久保他：Development of 7%Ni-TMCP Steel Plate for LNG Storage tanks，溶接学会論文集，第28巻第1号 (2010)，130-140