

# 地上式 LNG 貯槽建設に向けた 立向姿勢サブマージーク溶接法の開発

## Development of Vertical Submerged Arc Welding Method for Aboveground LNG Storage Tank Construction

坂元理絵	技術開発本部生産技術センター溶接技術部	博士（工学）
小林和行	技術開発本部生産技術センター溶接技術部	
飯島亨	技術開発本部生産技術センター溶接技術部	部長
西村善仁	プラントセクター工事統括部	主査
溝豊	株式会社 IHI 検査計測 研究開発事業部生産技術部	部長

海外における地上式 LNG 貯槽の 9% Ni 鋼製内槽側板の縦継手の溶接には主に被覆アーク溶接が用いられているが、工期短縮と溶接効率化のため、シールドガスが不要で、シンプルな自動溶接機を用いた溶接法の開発が望まれている。そこで当社は、細径ワイヤとウィービングを併用した新しい立向姿勢サブマージーク溶接法の開発に着手し、溶接装置および専用溶接材料の開発によって、安定した施工と品質を得ることができた。溶着速度は 50 ～ 80 g/min であり、効率化できる溶接法であることを示した。

Manual metal-arc welding has mainly been applied to vertical joints in LNG storage tanks made of 9%Ni steel abroad. To shorten the construction period and improve welding efficiency, a new welding method using simple devices and without using shielding gas has been required. IHI has developed a new vertical submerged arc welding method with small diameter wire and weave technique. Stable welding and quality have been obtained by developing welding devices and new welding materials. Deposition rate of the method is in the 50 g/min to 80 g/min range. This shows possibility of welding efficiency improvement using vertical submerged arc welding method.

### 1. 緒 言

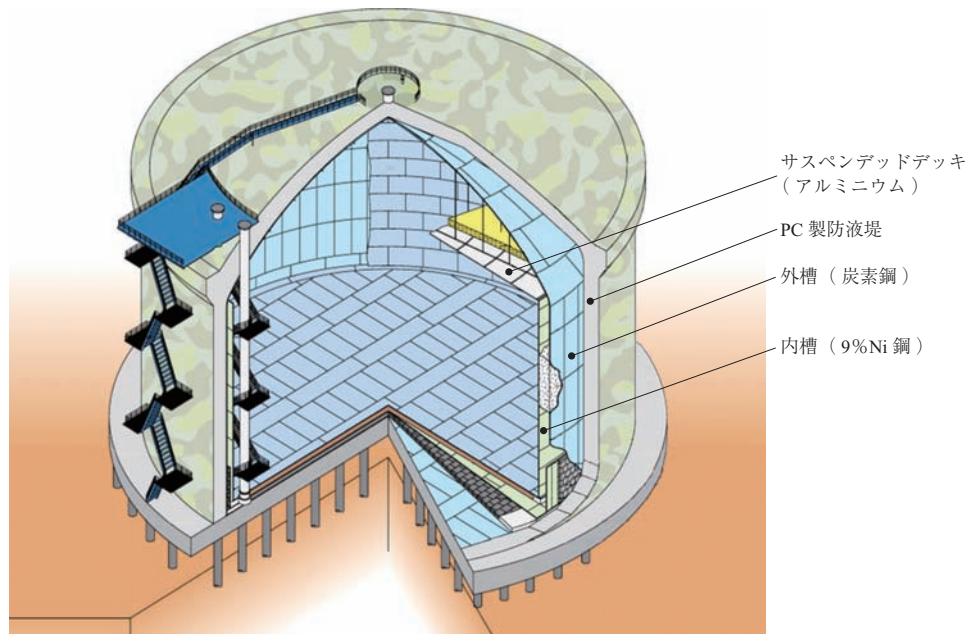
当社は、1969 年に東京ガス株式会社根岸 LNG 基地に 9% Ni 鋼製で我が国初の地上式 LNG 貯槽を建設して以来、LNG 受入ターミナルおよび LNG 貯槽の国内トップシェアをもっている。さらに、国内で培った技術を駆使し、海外へも積極的に進出しており、2004 年に営業運転を開始したインド初の LNG 受入ターミナルを筆頭に、メキシコ、台湾、アメリカ、カタール、スペインなどにおいて LNG 受入ターミナルおよび LNG 貯槽の建設を行っている。近年、地上式 LNG 貯槽は国内、海外ともに外槽にプレストレストコンクリート（PC）、内槽に 9% Ni 鋼を使用した PCLNG が主流となっている。第 1 図に現在、海外で一般的に建設されている PCLNG 貯槽の構造を示す。

9% Ni 鋼製内槽の溶接には、当初被覆アーク溶接（以下、MMA と呼ぶ）が適用され、1970 年代から周継手には横向サブマージーク溶接が適用されるようになった。

また、国内では縦継手に自動ティグ溶接（以下、自動 TIG 溶接と呼ぶ）の適用が進められるようになり、1980 年代からは、さらに溶着速度を改善したホットワイヤ方式の MC-TIG（Magnetic Controlled-TIG）溶接法が、縦継手のみならず主要な継手にも適用された。当社では自動 TIG 溶接のさらなる能率向上を目指して遠隔操作自動 TIG 溶接装置の開発<sup>(1)</sup> および高能率自動 TIG 溶接法（SEDAR-TIG）の開発<sup>(2)</sup>を行い、実用化してきた。

一方、海外の建設工事における溶接施工は、要求仕様や現地の環境、さらには、直接施工を担当するサブコントラクターが準備できる機材などによって溶接法を選定するが、縦継手の溶接は、主に MMA が適用されている。しかし、MMA は棒継ぎの際にクレータ部をグラインダ処理する必要があり、溶接効率の改善にも限界があることから、簡易で高効率な溶接法の開発が望まれていた。

そこで、当社では溶着速度が高く、かつ、シールドガスが不要で安定した施工が可能なサブマージーク溶接を縦継手に適用するため、立向姿勢サブマージーク溶接法



第 1 図 PCLNG 貯槽の構造 (海外仕様)  
 Fig. 1 Structures of PCLNG tank (overseas specification)

(以下、立向 SAW (Submerged Arc Welding) と呼ぶ) を開発した<sup>(3)</sup>。サブマージアーク溶接はフラックスと呼ばれる粉末を使用することから、従来、下向および横向姿勢に限定されていた。しかし、溶接装置および溶接材料の開発によって、9%Ni 鋼に対する立向姿勢溶接でも安定した施工と品質が得られることを確認した。

## 2. 立向 SAW の概要

サブマージアーク溶接法は、散布された粒状フラックス中に溶接ワイヤを自動送給し、フラックス内でアークを発生させて溶接する方法であり、一般には、直径 4.8 mm の太径ワイヤを使用し数百アンペアの大電流を通电して溶接する高能率な溶接法である。これに対し、当社が開発した立向 SAW は、直径 1.2 mm の細径ワイヤを用いてウィービングしながら低電流域で溶接を行い、溶接入熱を抑えてビード形状をコントロールできる特長をもつ。

第 2 図に立向 SAW の原理を示す。立向姿勢で上進溶接を行うためフラックスがこぼれないよう保持するフラックスバスケットを用いている。対象継手を覆うように設置したフラックスバスケットとノズルを外した半自動トーチがともに溶接台車に取り付けられ、移動する。溶接電源は一般的な定電圧特性の直流電源を使用し、溶接中にトーチを左右に振るウィービング動作を併用し上進溶接を行うことで、立向姿勢のサブマージアーク溶接を可能とした。溶接ワイヤは、9%Ni 鋼用 SAW 溶接材料として、下向ま

たは横向姿勢に用いられている 70%Ni 合金系材料と同じ成分のワイヤを使用した。

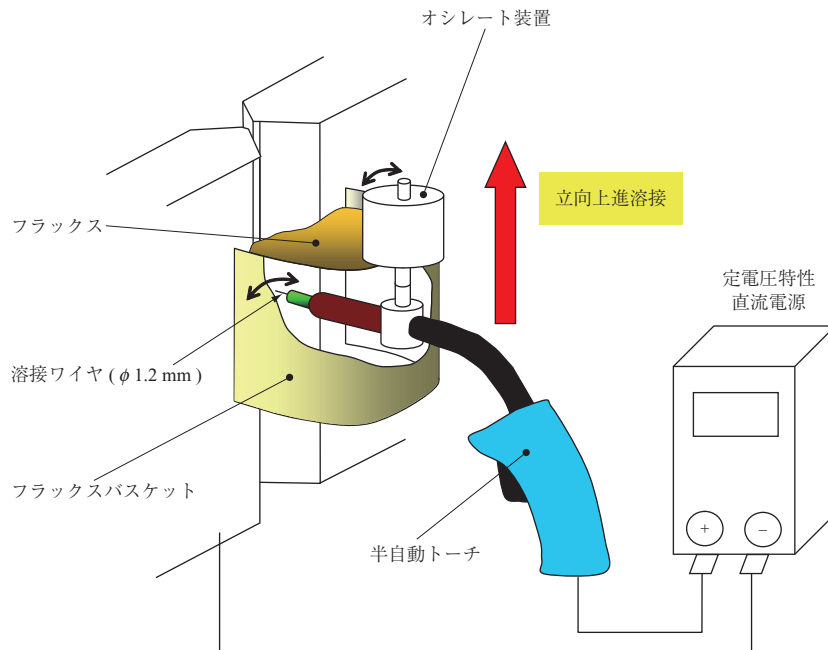
## 3. 9%Ni 鋼用立向 SAW 溶接材料の開発

### 3.1 市販フラックスを用いた溶接作業性の比較

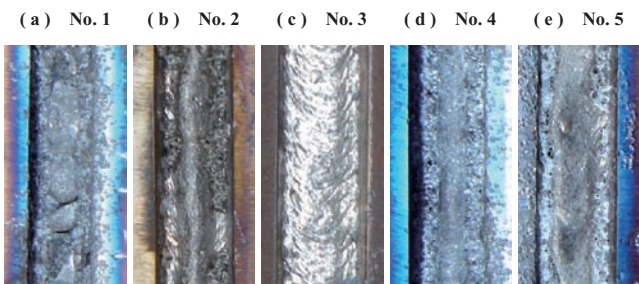
専用の溶接材料開発に先立ち、各種市販フラックスを用いて、立向 SAW の溶接作業性を評価した。なお、ここでは 9%Ni 鋼用フラックスに限らず各種用途のフラックスを用いた。評価項目は、ビード形状の平滑性、スラグ (溶接部表面に生じる非金属物質) のはく離性、放射線透過試験 (以下、RT と呼ぶ) による品質とした。試験には、幅 20 mm、深さ 10 mm の U 溝開先を施した板厚 19 mm の炭素鋼板を用い、溶接ワイヤには直径 1.2 mm の 70%Ni 合金系材料を用いた。

第 3 図に各種フラックスによるビード外観の一例を示す。ビード形状とスラグのはく離性の点で最も良好な結果が得られたのは No. 3 (- (c)) フラックスであった。No. 2 (- (b)) フラックスはスラグのはく離性は比較的良好であったが、ビード形状が凸であった。No. 1 (- (a))、No. 4 (- (d))、No. 5 (- (e)) フラックスはビード形状が凸となりスラグの噛み込みが強かった。No. 3 フラックスはボンドタイプのフラックスであり、 $T_1O_2$  および  $Al_2O_3$  を多く含むフラックスであった。

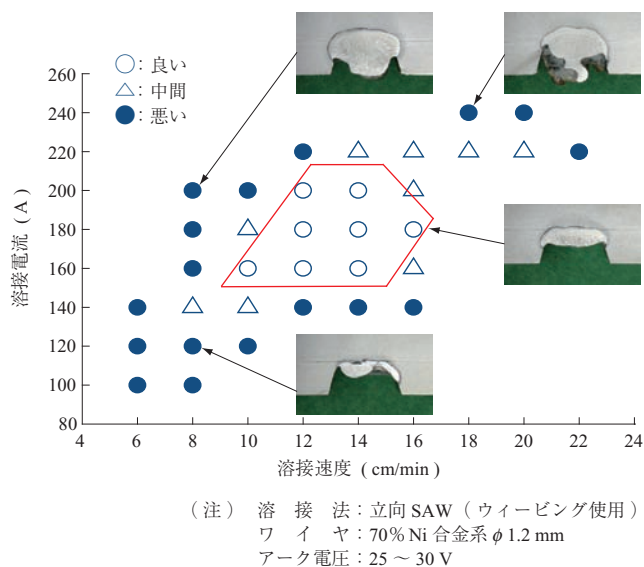
第 4 図に No. 3 フラックスを用いた場合の適正溶接条件範囲を示す。なお、アーク電圧およびウィービング速度



第2図 立向 SAW の原理  
Fig. 2 Schematic illustration of vertical SAW



第3図 市販フラックスによる立向 SAW ビード外観の例  
Fig. 3 Examples of bead appearances by vertical SAW using commercial fluxes



第4図 立向 SAW の適切な溶接条件範囲 (フラックス No. 3)

Fig. 4 Appropriate welding condition range of vertical SAW (Flux No. 3)

は溶接電流および溶接速度に応じて適切に調整した。以上から、溶接電流 160 ~ 200 A、溶接速度 10 ~ 16 cm/min の広い範囲において安定した施工が可能であることが確認できた。しかし、RT を実施した結果、ブローホール (溶接金属中に生じる球状の空洞) が多数認められ、耐ブローホール性の点で溶接材料の改良が必要であることが分かった。

### 3.2 9% Ni 鋼立向 SAW 用溶接材料の開発

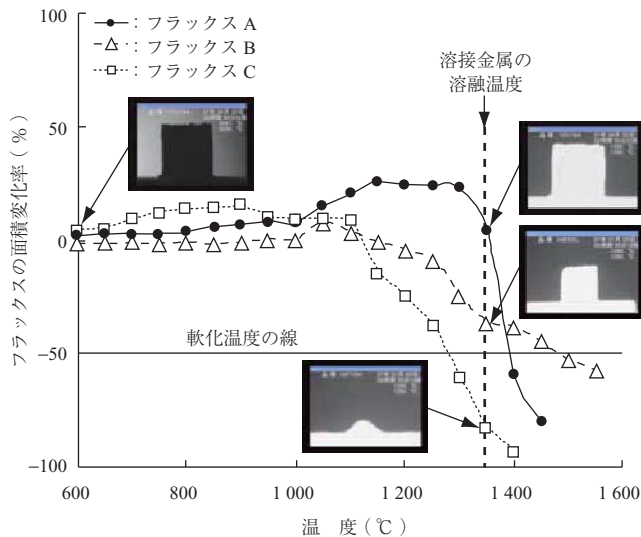
3.1 節の結果を受け、立向 SAW を実現するため、多層溶接の作業性にかかわるビード形状の平滑性とスラグはく離性、および、品質にかかわる耐ブローホール性を兼ね備えた溶接材料の開発に取り組んだ。

立向 SAW では、溶接アーク熱によって溶けた溶接ワイヤとフラックスが熔融池を形成し、これが、冷却によって凝固してスラグと溶接金属となる。スラグが溶接金属よりも早く凝固して溶接金属の垂れを押さえることで平滑なビードが得られる。このため、スラグの凝固速度が重要であり、ここではそれをフラックスの軟化温度として評価した。また、ビード形状の平滑にはアークの安定性も影響することから、フラックスの粒度を変化させたときの影響を調べた。

#### 3.2.1 軟化温度評価によるフラックス成分の調合

ビード形状を平滑にするためにはスラグ凝固温度を高く、つまり、フラックス軟化温度を高くすることが有効であり、フラックス中の Al 量を調整するとともに主成分を

変更して評価を行った。ここで、フラックス軟化温度とは、円筒状に固めたフラックス塊の温度上昇による形状変化をとらえ、その投影面積が室温の時の面積に比べて-50%になる温度と定義した。評価試験結果を第5図に示す。軟化温度が溶接金属の溶融温度よりも高いフラックス A および B で良好なビード形状が得られた。さらに、耐



第5図 フラックス軟化温度評価試験結果<sup>(4)</sup>

Fig. 5 Results of flux softening temperature evaluation test<sup>(4)</sup>

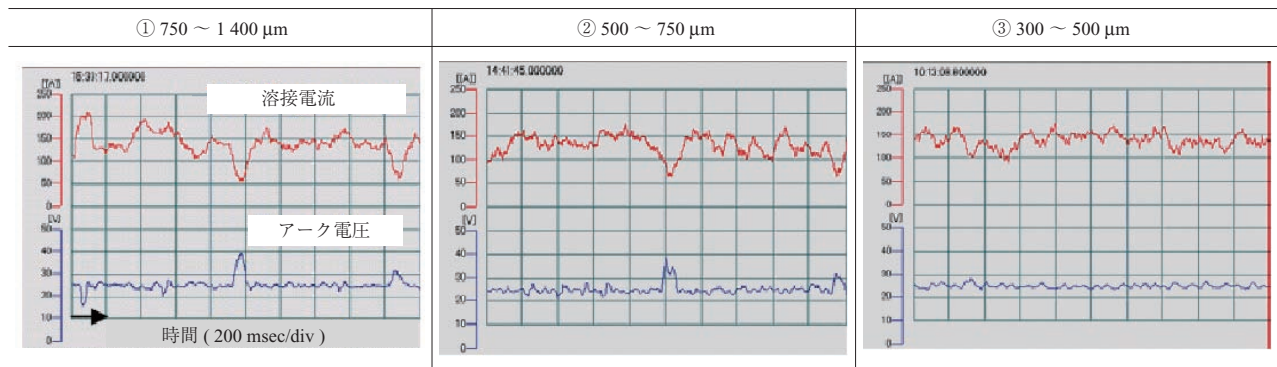
ブローホール性はフラックスおよびワイヤに Al を添加することで良好な結果が得られた。これは、Al 含有によって脱酸素、脱窒素を促すことで、ブローホールの発生を低減できたものと考えられる<sup>(4)</sup>。

### 3.2.2 アーク安定性評価によるフラックス粒度の決定

ビード形状の平滑化には安定したアーク状態を保つことが有効であると考えられる。ここでは、フラックスの粒度がアークの安定性に及ぼす影響を評価した。フラックス粒度と、溶接電流およびアーク電圧波形を測定した結果を第6図に示す。粗目粒度よりも細目粒度の割合が多いフラックスの方が、アーク電圧の変動が小さく、溶接電流が安定しており、より平滑なビード形状が得られた。これは、フラックス粒度が細かい方がフラックスの溶融が均一となったためと考えられる<sup>(5)</sup>。

### 3.2.3 開発した溶接材料

以上の評価結果を基に、ビード形状の平滑性、スラグはく離性および耐ブローホール性を兼ね備えた2種類の溶接材料 X (ワイヤ X × フラックス X) および Y (ワイヤ Y × フラックス Y) を開発した。それぞれの化学成分を第1表および第2表に示す<sup>(4)</sup>、<sup>(5)</sup>。



第6図 フラックス粒度分布の溶接電流・アーク電圧への影響<sup>(5)</sup>

Fig. 6 Influence of particle size distribution on welding current and arc voltage<sup>(5)</sup>

第1表 溶接ワイヤの化学成分<sup>(4)</sup>、<sup>(5)</sup>

Table 1 Chemical compositions of welding wires<sup>(4)</sup>、<sup>(5)</sup>

溶接ワイヤ	ワイヤ径 (mm)	化学成分 (質量%)							
		C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	W	Al
ワイヤ X	1.2	0.02	0.05	0.01	76.4	-	20.1	3.0	0.01 ~ 0.43
ワイヤ Y	1.2	0.02	0.05	<0.1	70.2	2.0	19.0	3.0	-

第2表 フラックスの化学成分<sup>(4)</sup>、<sup>(5)</sup>

Table 2 Chemical compositions of fluxes<sup>(4)</sup>、<sup>(5)</sup>

フラックス	主成分	粒度
フラックス X	TiO <sub>2</sub> -MgO-CaF <sub>2</sub>	12 × 100 メッシュ
フラックス Y	MgO-ZrO <sub>2</sub> -CaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>	12 × 65 メッシュ

## 4. 立向 SAW 施工法の開発

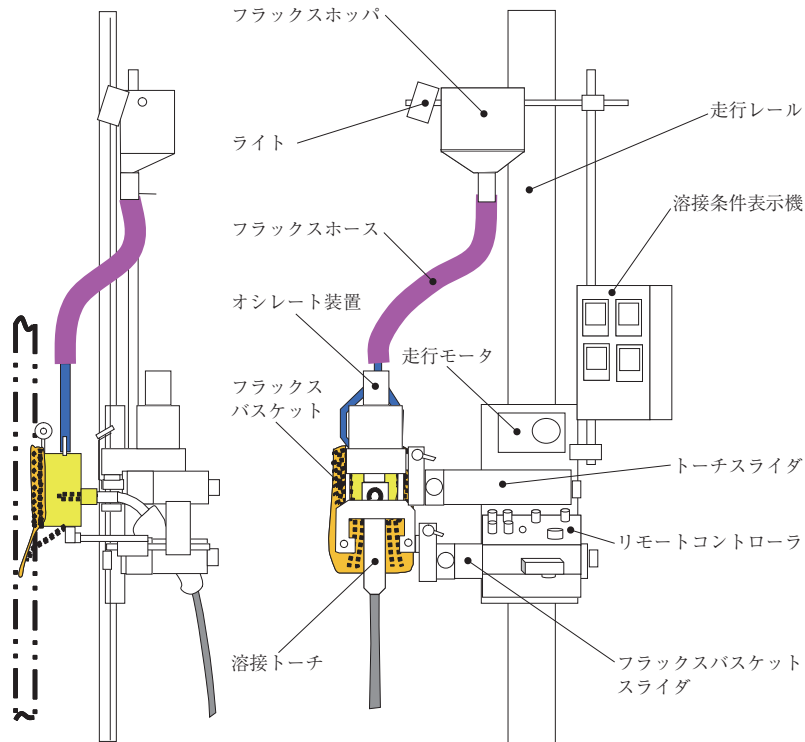
現地建設工事を想定した立向 SAW に用いる自動溶接装置を開発するとともに、開発した溶接材料を用いて溶着速度を評価した。

### 4.1 立向 SAW 装置の開発

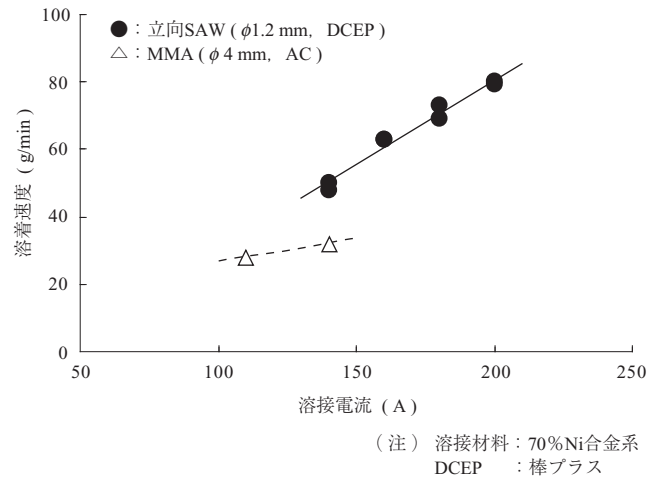
第 7 図に開発した立向 SAW 装置を示す。全体の構成は走行レールと走行台車を基本とし、左右と上下のスライドおよびオシレート装置を搭載している。また、現地での作業性を考慮し、組立が容易なユニット方式として構造の簡略化を図っている。溶接トーチはノズルを外した一般的な半自動トーチを用い、トーチ先端部分はフラックスバスケット内に挿入する。バスケットには台車に取り付けたホップからフラックスが供給される。また、直感的な操作が行えるよう、溶接条件の表示にはアナログ表示を採用した。

### 4.2 溶着速度の評価試験結果

開発した溶接材料を用いて溶着速度を計測した結果を第 8 図に示す<sup>(4)</sup>。立向 SAW は 50～80 g/min の溶着速度の範囲で安定した溶接が行えることが確認できた。なお、図中には比較のため、立向姿勢での MMA の溶着速度を併せて示す。立向 SAW は、連続した自動溶接が可能であり、溶接棒の交換作業が必要な MMA に比べて、作業効率が向上することが期待できる。



第 7 図 立向 SAW 装置  
Fig. 7 Devices for vertical SAW



第 8 図 立向 SAW と MMA の溶着速度比較  
Fig. 8 Comparison of deposition rate between vertical SAW and MMA

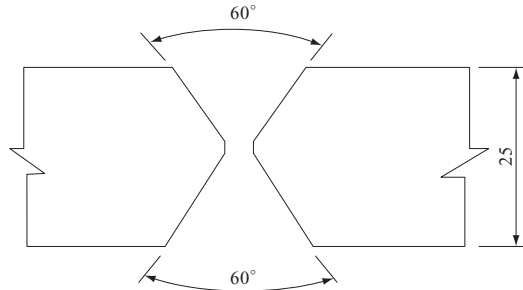
## 5. 継手性能試験

### 5.1 基本継手性能

開発した溶接装置および溶接材料を使用し、溶接継手の基本性能を評価した。母材には板厚 25 mm の 9% Ni 銅板 (ASTM A553M-95 TYPE1) を用いた。第 3 表に母材の化学成分および機械的性質を示す。第 9 図に開先形状を、第 4 表に溶接条件を示す。評価項目は ① 断面マクロ観察 ② 断面ミクロ観察 ③ 硬さ試験 ④ RT ⑤ 溶接金属引張試験 ⑥ 継手引張試験 ⑦ 曲げ試験 ⑧ シャルピー衝撃試験、と

第3表 母材 9%Ni 鋼板の性質  
Table 3 Properties of 9%Ni steel plates used

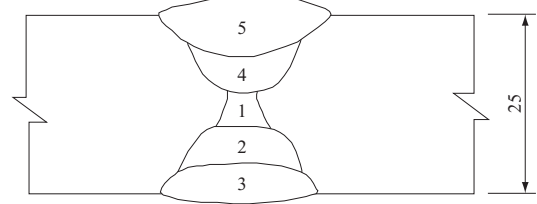
板厚 (mm)	化学成分 (質量%)									機械的性質			
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Al	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	衝撃値 (-196℃) (J)
25	0.06	0.24	0.6	0.004	0.001	0.01	9.16	0.02	0.037	680	730	28.2	240
28	0.06	0.26	0.61	0.005	0.001	0.01	9.13	0.02	0.041	665	715	28.6	212



第9図 X開先形状 (単位: mm)  
Fig. 9 Shape of X-groove (unit: mm)

第4表 継手性能試験の溶接条件  
Table 4 Welding conditions of test plate

項目	単位	条件範囲
溶接入熱	kJ/cm	18.5 ~ 21.6
オシレーションピッチ	mm	2 ~ 2.8
オシレーション回数	回/min	25 ~ 35



(注) 1~5: 積層順

第10図 断面マクロ組織および積層法 (単位: mm)  
Fig. 10 Macro section and pass sequence (unit: mm)

した。第10図に断面マクロを示す。断面マクロおよびミクロ観察において有害な欠陥や組織は観察されなかった。ビッカース硬さは熱影響部において最高硬さ HV348 であった。継手性能試験結果を第5表に示す。いずれも良好な結果を得ることができた。

## 5.2 ぜい性破壊特性

地上式 LNG 貯槽に用いられる 9%Ni 鋼とその溶接部

には、ぜい性破壊を引き起こさないよう十分なぜい性き裂発生阻止性能と、万一、ぜい性き裂が発生した場合に大規模な破壊に至る前にき裂の伝播を阻止する性能とが要求される。そこで、溶接部のぜい性き裂発生阻止性能およびぜい性き裂伝播停止特性を評価した。

ぜい性き裂発生阻止性は -165℃ における CTOD (Crack Tip Opening Displacement) 試験によって評価し

第5表 溶接継手性能試験結果  
Table 5 Results of weld joint performance tests

規格	JIS Z 3106	ASME SEC.IX						API620 APPENDIX Q				
		引張試験						縦ビード曲げ試験		シャルピー衝撃試験 (-196℃)		
		溶接金属 (φ12.7)				溶接継手						
試験内容	RT	0.2%耐力 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸び (%)	絞り (%)	引張強度 (MPa)	表曲げ	裏曲げ	吸収エネルギー (ノッチ位置: 溶接金属)			
要求値	1種 1類または2類	≥ 390	≥ 690	-	-	≥ 690	< 3 mm	< 3 mm	≥ 37	≥ 50		
結果	1種1類	435 440	698 710	35 36	33 30	719 737	無欠陥	無欠陥	採取位置	t/2 110 110 104 t/4 102 109 112	108 107	

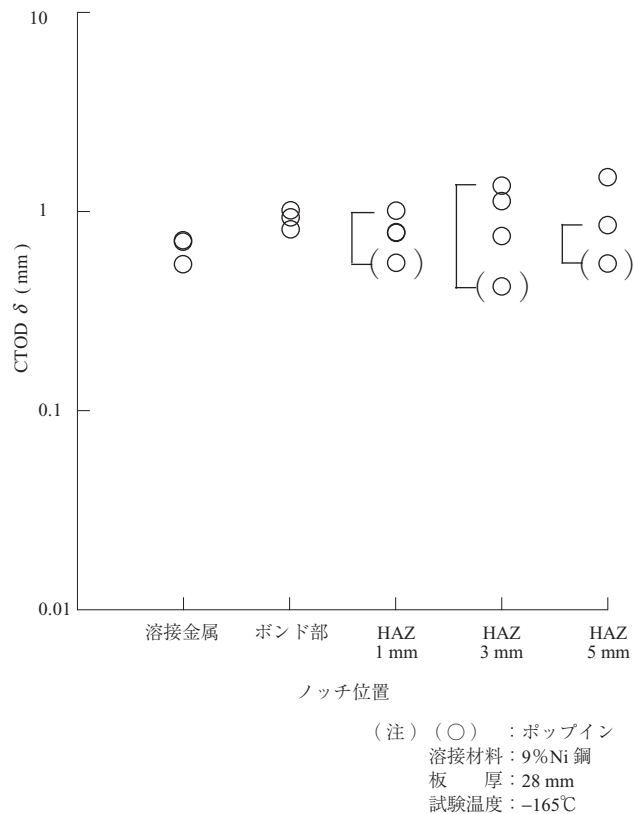
(注) t: 板厚  
Ave.: 平均値

た。試験結果を第 11 図に示す。CTOD 値は溶接金属、ボンド部（溶接金属と母材の比率が 1：1 となる位置）、熱影響部（HAZ 部）1, 3, 5 mm はボンド部からの距離）のいずれにおいても 0.4 mm 以上の十分大きな値が得られた。

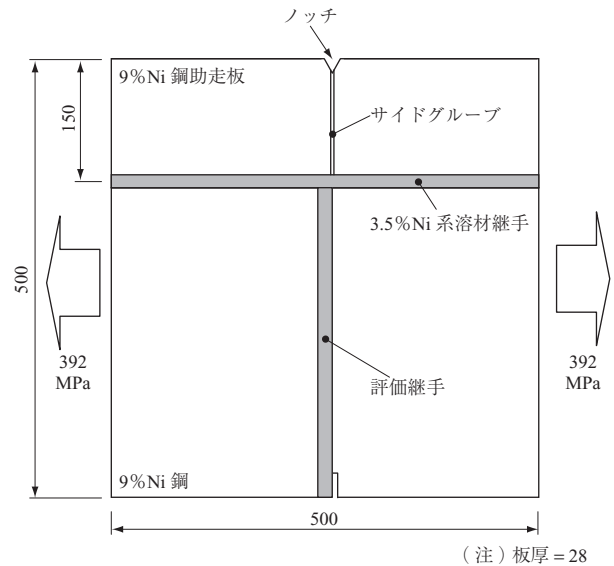
ぜい性き裂伝播停止特性は  $-165^{\circ}\text{C}$  における混成 ESO 試験により評価した。試験片形状を第 12 図に示す。幅 500 mm、長さ 350 mm、板厚 28 mm の溶接試験体に、ぜい化熱処理を施した 9%Ni 鋼助走板を 3.5%Ni 系溶接材料で溶接した試験板を用いた。引張応力 392 MPa を負荷した状態で、ノッチ部に楔を落とし、助走板から試験体溶接継手の熱影響部にぜい性き裂を突入させ、き裂が停止する長さを評価した。き裂は対象部位への突入と同時に停止し、十分高いき裂伝播停止性能を持つことを確認した。

## 6. 大形溶接試験

実工事を想定した溶接長 4 m のモックアップ試験を実施し、溶接安定性などを評価した。第 13 図に溶接状況を示す。試験は、実際に使われている移動足場を使用し、建設現場を再現して実施した。溶接長 4 m の連続溶接が安定して行えることを確認するとともに、万一、溶接が中断



第 11 図 立向 SAW 溶接部の CTOD 値  
 Fig. 11 CTOD values of welding joint by vertical SAW



第 12 図 混成 ESO 試験片形状 (単位：mm)  
 Fig. 12 Duplex ESO test specimen (unit : mm)



第 13 図 大形試験板を用いての溶接モックアップ試験の状況 (板厚：28 mm)  
 Fig. 13 Appearance of welding mock up tests with using large-size test plate ( Plate thickness : 28 mm )

した場合を想定し、MMA による補修溶接および自動溶接の再開も実施した。溶接後の検査では有害な欠陥は認められず、良好な品質が得られた。

## 7. 結 言

地上式 LNG 貯槽の 9%Ni 鋼製内槽側板の縦継手を対象に、立向姿勢サブマージアーク溶接法を開発した。本溶接法の開発結果を以下に示す。

- (1) 直径 1.2 mm の細径ワイヤを用い、オシレートを用いる独自の施工法による立向 SAW を開発した。

- (2) 多層溶接の作業性にかかわるビード形状の平滑性とスラグはく離性、および耐ブローホール性を兼ね備えた立向 SAW 専用の溶接材料を開発した。
- (3) 立向 SAW は、50～80 g/min の溶着速度で安定した溶接が行えることを確認した。
- (4) 開発した溶接材料を用いて継手性能試験およびぜい性破壊試験を実施し、要求品質を満たすことを確認した。
- (5) 現地建設工事を想定して開発した立向 SAW 装置を用い、溶接長 4 m のモックアップ試験を実施した。連続溶接が安定して行えることを確認したとともに、溶接が中断した場合を想定した補修溶接箇所においても、良好な品質が得られることを確認した。

この新しい溶接法の利点を活かし、地上式 LNG 貯槽の 9%Ni 鋼内槽縦継手に対し、MMA に代わり得る効率的な溶接法として実用化を目指していく。

#### — 謝 辞 —

本研究の溶接材料開発に当たり、日鐵住金溶接工業株式会社、株式会社神戸製鋼所から多大なご協力をいただきました。ここに記し、深く感謝の意を表します。

#### 参 考 文 献

- (1) 今村和久, 奈雲 悟, 渡辺真也, 富所 栄, 手島秋雄, 片山典彦: LNG 低温タンク遠隔操作自動 TIG 溶接装置の開発 石川島播磨技報 第 36 巻 第 1 号 1996 年 1 月 pp. 31 - 36
- (2) 小林和行, 結城正弘, 手島秋雄, 西村善仁: 高能率 TIG 溶接法 (SEDAR-TIG) の開発 石川島播磨技報 第 42 巻 第 3 号 2002 年 5 月 pp. 127 - 132
- (3) 飯島 亨, 小林和行, 溝 豊, 水本 学, 長崎肇: 立向き姿勢サブマージアーク溶接法の開発 - 溶接施工法の検討 - 溶接学会全国大会講演概要 第 82 集 2008 年 4 月 pp. 46 - 47.
- (4) 水本 学, 元松隆一, 長崎 肇, 飯島 亨, 小林和行, 溝 豊: 立向き姿勢サブマージアーク溶接法の開発 - 9%Ni 鋼用溶接材料の検討 - 溶接学会全国大会講演概要 第 82 集 2008 年 4 月 pp. 48 - 49.
- (5) 福田和博, 渡邊博久, 鈴木正道: 立向き姿勢サブマージアーク溶接材料の開発 溶接学会全国大会講演概要 第 85 集 2009 年 9 月 pp. 90 - 91