

(技術資料)

9%Ni鋼製LNGタンク用自動溶接システム

山崎健太*1・馬庭啓史*1・北川良彦*1(博士(工学))・三輪剛士*2・石崎圭人*2

Development of Automatic Welding System for 9% Ni Steel LNG Tanks

Kenta YAMASAKI・Hirofumi MANIWA・Dr. Yoshihiko KITAGAWA・Tsuyoshi MIWA・Keito ISHIZAKI

要旨

需要の増加が見込まれている液化天然ガス（LNG）の貯蔵・輸送に使用されるタンク（陸上用・船用）は、一般的に9%Ni鋼で製造されている。その溶接施工は融合不良などの欠陥が生じやすく、高い技量が要求される。本稿では、9%Ni鋼の溶接に対する脱技能化、高能率化を目的に開発した可搬型専用ロボットシステムについて紹介する。本システムは、直角座標型ロボットをベースに、取り付け治具、センシング方法、溶接電源、最適溶接条件を9%Ni鋼製LNGタンクの製造に合わせて見直し、これらを組み合わせて一つのシステムとしたものである。このロボットシステムを用いることで、9%Ni鋼の立向溶接施工において健全な品質の溶接継手を得ることができ、またオペレータによるロボット二台持ちにより大幅な効率化が期待できることが明らかとなった。

Abstract

The demand for liquefied natural gas (LNG) is expected to rise, and 9% nickel steel is the material of choice for tanks (both for land and sea applications) used to store and transport it. However, welding such tanks requires high skill levels and is prone to defects like lack of fusion. To address this issue, this paper introduces a portable, specialized robot system designed for the highly efficient and deskilled welding of 9% Ni steel. The system utilizes a cartesian coordinate robot with mounting fixtures, sensing methods, welding power supply, and optimal welding conditions tailored to the manufacturing of 9% Ni steel LNG tanks. This robot system allows welders to produce sound-quality welded joints during vertical welding of 9% Ni steel with reduced defects. Furthermore, an operator can employ two robots simultaneously, leading to significant improvements in efficiency.

検索用キーワード

液化天然ガス（LNG）、9%Ni鋼、溶接材料、Ni基合金、フラックス入りワイヤ（FCW）、溶接ロボット、KI-700、立向溶接、デジタル電源、脱技能

まえがき＝世界的なカーボンニュートラルに向けた脱炭素化の流れに伴い、石油や石炭に比べてCO₂排出量が少なく重要なトランジションエネルギーである天然ガスの需要が急激に高まっている¹⁾。ガスを貯蔵、船舶で輸送する際は-162℃に液化されて専用タンクに封入されることが一般的であり、そのため液化天然ガス（Liquefied Natural Gas : LNG）用タンクの多くは強度と低温じん性に優れた9%Ni鋼によって製造されている。

本稿では、需要の増加が見込まれる9%Ni鋼製LNGタンクの溶接施工について、当社製のNi基合金フラックス入りワイヤ（以下、Ni基FCWという）との組み合わせにより脱技能、高能率化を可能にする小型可搬型ロボット（商品名「KI-700」）による自動溶接システムの開発について紹介する。

1. 開発背景

Ni基合金は溶融時に高粘性で湯流れが悪く、また融点が高い。9%Ni鋼母材に比べて低いため溶接時に融合不良欠陥が発生しやすい。そのため、適切な開先形状を設定し、溶接時に開先を十分に溶かす特別な運棒が必要である。また、大気などから混入する酸素や水分に起因するブローホールも発生しやすく、適切なシールド性の確保やア

ーク長のコントロールも要求される。これらの要因から、Ni基合金溶接材料を用いる溶接には高い技量が求められる。溶接士の技量による品質のばらつきも生じやすい。いっぽう、熟練溶接士の退職などによる高技量な溶接士不足の問題が深刻化しており、9%Ni鋼構造物の溶接を行う環境はより厳しくなっている²⁾。

このような背景から、当社では需要が急増しているLNG燃料タンクの溶接に適用できる小型可搬型ロボット「KI-700」による自動溶接システムを商品化した。このシステムは溶接士不足、技量低下を補い、ひいてはCO₂削減に欠かせない貯蔵設備建造の高能率化、高品質化に貢献すると期待される。

2. Ni基合金フラックス入りワイヤアーク溶接（Ni基FCAW）プロセスの開発

本稿で紹介するプロセスは、耐高温割れ性に優れた当社製ハステロイ系Ni基FCWに最適化した専用の溶接ロボットと、デジタル溶接電源および専用ルールで構成されている。本章ではロボット、電源、ルールについての詳細を述べる。本プロセスの開発にあたり、立向姿勢の半自動溶接で施工能率を下げる一因は短尺溶接継ぎの発生に伴う補修作業であると考え、長尺溶接の実現に焦点

*1 溶接事業部門 技術センター 溶接開発部 *2 溶接事業部門 技術センター

を当てた。9%Ni鋼板の最大幅である4 m長の立向溶接において、溶接を途中で停止することなく完了し、健全な溶接金属が得られることを目標とした。

2.1 小型可搬型ロボットの開発

KI-700は、鉄骨・橋梁・造船産業などにおける中厚板の一般炭素鋼かつ短尺の溶接で実績のある機種（以下、従来ロボットという）がベースとなって開発された、可搬型の直角座標形ロボットシステムである。マンピュレータ、コントローラ、ティーチングボックスを含めてKI-700と呼称する。KI-700の外観を図1に示す。

KI-700の特徴は、マンピュレータ重量が約6 kgと小型・軽量であり、ティーチングボックスを使用した遠隔操作が可能なことである。また、ソフトウェアの機能により、タッチセンシングで自動検出した開先形状データをもとに、Ni基FCWに合わせた適切な積層パターンおよび溶接条件を自動生成することができる。そのため、加工・組立精度のばらつきに対して幅広く対応でき、技能熟練者でなくとも簡単な操作で安定した溶接品質が得られる。

開先センシング方法の改良について図2に示す。従来ロボットが適用される中厚板分野の溶接ではルートギャップを4~10 mm程度設けるが、KI-700の使用が想定される船用タンクの溶接においては薄板かつルートギャップ0 mmでの使用が想定される。そのため、従来のセ



図1 小型可搬型Ni鋼用溶接ロボットKI-700外観
Fig.1 Appearance of KI-700 compact portable welding robot for nickel steel

ンシング方法で想定していた開先よりも相対的に狭くなることから、高精度の形状検知が要求される。そこで、従来は多少の曲がりがある溶接ワイヤでセンシングを兼用していたのに対し、加工精度・剛性に優れたティーチング専用の金属製チップを採用した。センシング時はコンタクトチップを外し、この専用チップに交換する。また、従来のタッチセンシングは溶接開先面の位置情報しか取得できなかったのに対し、新たに開発したタッチセンシングでは溶接開先面だけでなく近傍の母材表面位置情報も合わせて取得するようにした。

2.2 溶接条件/積層パターン自動生成機能の最適化

2.1節で示したとおり、KI-700は開先形状データをもとにNi基FCWに合わせた適切な溶接条件および積層パターンを自動生成するが、その特徴について述べる。

LNGタンクの立向溶接において最も留意すべき点は、1章の冒頭で述べた湯流れの悪さや母材との融点の違いによる融合不良と、母材希釈に伴う溶接金属中の合金成分低下による継手強度低下である。継手強度低下は、とくに薄板で問題となる。その理由は、溶接時の母材温度が上がりやすく、かつ母材希釈が大きくなりやすいルート部の占める割合が大きいためである。これらの点を考慮して最適化を行った。

具体的には、融合不良を回避するためのワイヤ狙い位置、希釈を抑えるためのパスごとの溶接入熱とウィービング幅、ルート溶接でアーク安定性が確保できる溶融プールの状態適正化、フラットなビード形状が得られるような積層パターンやウィービング条件が考慮されている。その結果、3章以降に示す良好な立向溶接試験結果が得られる溶接施工が可能となった。

2.3 溶接電源

Ni基FCWを用いる9%Ni鋼の溶接では、高温割れ防止のために比較的低い電流域で施工される。従来のサイリスタ制御電源では制御周波数が低く、低電流域のアーク安定性に欠けるため、インバータ電源が望ましいと考えられる。当社が2010年に販売を開始したロボット専用デジタル制御インバータ溶接電源SENSARC™ AB500は高度な電流・電圧制御能力を有し、その能力を活かした中厚板溶接に最適な高品質かつ多彩な溶接モードを搭載している³⁾。また、立向溶接姿勢でNi基FCW

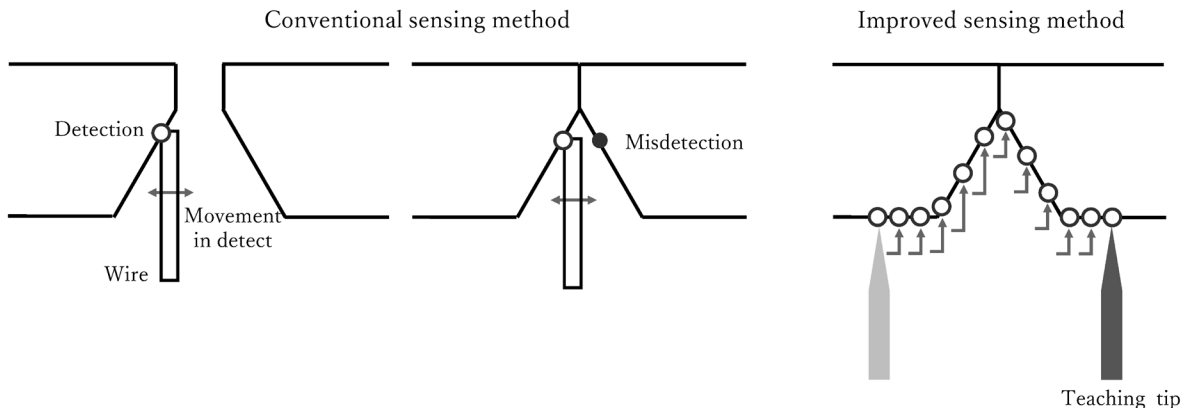


図2 センシング方法の模式図
Fig.2 Schematic diagram of improved sensing method

を使用するため、200 A以下の低電流域のアーク安定性向上を目的に、KI-700にはNi基合金フラックス入りワイヤアーク溶接（Ni基FCAW）プロセス専用モードを新たに搭載した。

LNGタンクでの溶接長4 mにかかる溶接時間を想定して、40分間の連続溶接をした後のシールドノズル外観を図3に示す。シールドノズルへのスパッタの付着はシールドガスの乱れの原因となるが、当社のNi基FCWの特徴である低スパッタ設計および、電源のデジタル制御によるさらなる低スパッタ化により、40分間の連続溶



図3 40分間連続溶接後のノズル外観

Fig.3 Nozzle appearance after 40 minutes continuous of welding

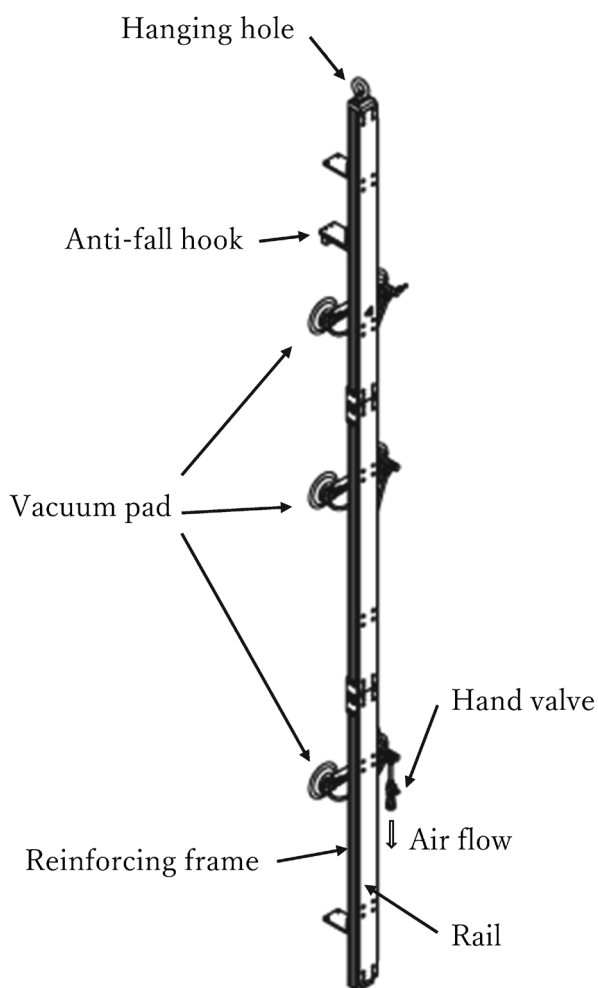


図4 KI-700専用4 m長尺溶接対応レール

Fig.4 KI-700 dedicated 4 m long welding rail

接においてもシールドノズルへのスパッタ付着量は少ないことが確認された。さらに、長時間溶接による耐熱性を考慮し、従来ロボットよりも定格使用率が高い溶接トーチを選定した。

2.4 KI-700専用レール

9%Ni鋼製LNGタンクの立向溶接継手の長さは鋼板の幅と同じであり、最長4 m程度となる。また、9%Ni鋼は帯磁しやすく、アーク溶接においては磁気吹きによる溶接欠陥の原因となる。そのため、マニピュレータの落下防止および走行軸となる歯付き鋼製レールを母材に固定する機構として、最も一般的に使われているマグネットを利用することはできない。しかし、KI-700はマニピュレータの軽量効果により、着脱が容易な真空クランプでも十分に固定が可能であると判断したため、本システムには真空クランプを採用した。

開発したKI-700専用レールの概要を図4に示す。吊り上げを考慮した剛性の確保のために、メインレールに対して補強フレームを取り付けた。真空クランプの吸着力は、マニピュレータやケーブル類の重量に耐えうるものであるが、不慮の落下を防止するために落下防止治具も付けて安全性を確保した。

3. KI-700による立向溶接試験

本章では、KI-700によるLNGタンク実施工を想定した立向溶接試験の詳細について紹介する。

9%Ni鋼製LNGタンクは、貯蔵時に使用される「陸上用タンク」と、船舶での運搬や燃料タンクとして使用される「船用タンク」に大別される。それらは溶接部に要求される機械性能が異なるため、Ni基FCWにはPREMIARC™DW-N709SP（陸上用）とPREMIARC™DW-N609SV（船用）の2種類をラインナップしている。いずれの製品も、立向溶接時の作業性が優れる点は共通である。2.1節と2.2節で示したとおり、KI-700がセンシングした開先形状に応じて、それぞれのNi基FCWにおいて最適な溶接条件（電流-電圧-速度-ウィービング方法）と積層パターンが自動的に算出された。この溶接条件・積層パターンにおいて溶接試験を実施した結果、3.1節と3.2節で示す良好な溶接品質が得られたので、以下に詳述する。

3.1 陸上用LNGタンク想定条件

陸上用LNGタンクの溶接施工を想定したKI-700の適用範囲を表1に示す。また、陸上用LNGタンク用溶接ワイヤPREMIARC™DW-N709SPとの組み合わせで、板厚12 mmの継手溶接を入力条件として自動生成された推奨溶接条件の出力結果を表2に示す。この結果をもとに、実際に開先を形成した。その手段は、1st側は

表1 KI-700の適用範囲（陸上LNGタンク仕様）

Table 1 KI-700 applicable groove dimension for aboveground LNG storage tank

| Welding position | Thickness | Groove angle | Root gap |
|------------------|-----------|--------------|----------|
| Vertical upward | 12-35 mm | 55-65° | 3-7 mm |

表2 KI-700が生成した溶接条件 (板厚12 mm **PREMIARC™** DW-N709SP)
 Table 2 Welding conditions for **PREMIARC™** DW-N709SP generated by KI-700

| Root gap 3 mm | | | | |
|---------------|---------------------|-----------------|------------------------|----------------------------|
| | Welding current (A) | Arc voltage (V) | Welding speed (mm/min) | Welding heat input (kJ/mm) |
| 1st | 150 | 26 | 156 | 1.5 |
| | 160 | 26 | 219 | 1.1 |
| 2nd | 160 | 26 | 132 | 1.9 |
| | 160 | 26 | 114 | 2.2 |
| Root gap 7 mm | | | | |
| | Welding current (A) | Arc voltage (V) | Welding speed (mm/min) | Welding heat input (kJ/mm) |
| 1st | 150 | 26 | 96 | 2.4 |
| | 160 | 26 | 162 | 1.5 |
| 2nd | 160 | 26 | 132 | 1.9 |
| | 160 | 26 | 114 | 2.2 |

※Machining [back chipping]
 ※Ceramic backing bar consumable was used.

表3 KI-700による溶接継手のビード外観,断面マクロおよび機械試験結果 (**PREMIARC™** DW-N709SP)
 Table 3 Bead appearance, cross-sectional shape of weld metal, mechanical test results of weld metal by **PREMIARC™** DW-N709SP

| | Root gap 3 mm | Root gap 7 mm |
|--|--|--|
| Bead appearance | | |
| Macro-structure | | |
| Tensile strength (MPa) (Test temperature : 20°C) [Target value ≧ 690 MPa] | 754 (Fractured position : weld metal) | 725 (Fractured position : weld metal) |
| Absorbed energy (J) (Test temperature : -196°C) V notch [Target value ≧ 55 J] | 91,78,92 Avg. 87 | 86,95,78 Avg. 86 |

ガス切断とグラインダ研削を組み合わせ、2nd側は1st側溶接後にフライス盤などの機械加工を行った。表2の条件で自動溶接を行った際の、ビード外観、断面マクロ写真および機械性能を表3に示す。ルートギャップが3 mmと7 mmのどちらの条件においても、良好な外観・機械性能が得られている。継手引張試験では溶接金属破断となったものの、母材の強度規格を満足しており、圧力容器の規格であるJIS B 8265の要求を満足している。

溶接士による半自動溶接では、立向姿勢での最大連続溶接長は概ね700 mm程度と考えられる。KI-700においては、この制限がないため、1 m以上といった長尺溶接においても安定した連続溶接が可能となっている。長尺溶接における安定性を評価するために、1 m長の立向溶接継手を作製して放射線透過試験を行った。その溶接条件と結果を表4に示す。溶接長900 mmに対して融合不良は発生しておらず、ブローホール数は7個になっている。これはJIS B 8265の合格規準 (JIZ Z 3106の1類または2類) を十分に満足する水準であり、**PREMIARC™** DW-N709SPとKI-700の組合せによる長尺連続溶接の高

表4 KI-700が生成した溶接条件 (板厚16 mm **PREMIARC™** DW-N709SP) とX線透過試験結果

Table 4 Welding conditions for **PREMIARC™** DW-N709SP generated by KI-700 and radiography results

| | Welding current (A) | Arc voltage (V) | Welding speed (mm/min) | Welding heat input (kJ/mm) |
|-----|---------------------|-----------------|------------------------|----------------------------|
| 1st | 150 | 26 | 126 | 1.9 |
| | 160 | 26 | 149 | 1.7 |
| 2nd | 160 | 26 | 136 | 1.8 |
| | 170 | 27 | 143 | 1.9 |
| | 160 | 26 | 116 | 2.2 |

※Air-arc gouging + grinder [back chipping]
 ※Ceramic backing bar consumable was used.

| Linear defect | Spherical defect | JIS B 8265 |
|---------------|--|------------|
| N.D. | Blow hole 7pieces (dia. 0.6~0.9 mm) | Satisfied. |

※Evaluation length in radiography : 900 mm

表5 KI-700の適用範囲 (船用LNGタンク仕様)

Table 5 KI-700 applicable groove dimension for marine LNG storage tank

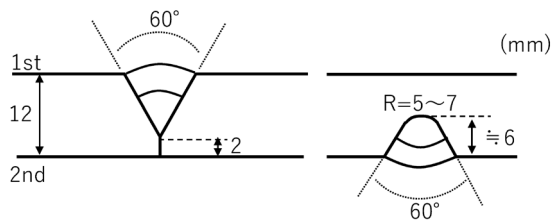
| Welding position | Thickness | Groove angle | Root gap |
|------------------|-----------|--------------|----------|
| Vertical upward | 12-35 mm | 55-65° | 0-3 mm |

表6 KI-700が生成した溶接条件 (板厚12 mm PREMIARC™ DW-N609SV)

Table 6 Welding conditions for PREMIARC™ DW-N609SV generated by KI-700

| | Welding current (A) | Arc voltage (V) | Welding speed (mm/min) | Welding heat input (kJ/mm) |
|-----|---------------------|-----------------|------------------------|----------------------------|
| 1st | 160 | 27 | 181 | 1.4 |
| | 170 | 27 | 151 | 1.8 |
| 2nd | 160 | 25 | 237 | 1.0 |
| | 170 | 27 | 191 | 1.4 |

※Air-arc gouging + grinder [back chipping]



い品質安定性が確認された。

3.2 船用LNGタンク想定条件

船用LNGタンクの溶接施工を想定したKI-700の適用範囲を表5に示す。燃料用タンクであるため容量保証が厳しく、溶接時の変形で低容量側に振れないように、ルートギャップ許容範囲は陸上用LNGタンクより狭い0-3 mmとなっている。2.1節で示したように、従来のセンシング方式ではギャップ0 mmにおけるタッチセンシング点数が減少するとともに、開先幅方向のセンシングでの検知ミスが発生しやすい。そのため、船用LNGタンクの条件では、新開発センシング法を採用した。

陸上用LNGタンク用溶接ワイヤPREMIARC™ DW-N609SVとの組み合わせで、板厚12 mmの継手溶接を入力条件としたときの推奨溶接条件の出力結果を表6に示す。この結果をもとに、実際に開先を形成した。その手段は、1st側はガス切断とグラインダ研削を組み合わせ、2nd側は1st側溶接後にエアアークガウジングとグラインダ研削を組み合わせた。表6の条件で自動溶接を行った際の、ビード外観、断面マクロ写真および機械性能を表7に示す。良好な外観と機械性能が得られていることがわかる。

陸上用LNGタンクの場合と同様に、船用の開先における長尺溶接安定性を評価するために、溶接長2 mの立向溶接継手を作製して放射線透過試験を行った。溶接条件と結果を表8に示す。溶接長1,800 mm当たりのブローホール数は5個であり、融合不良は発生していない。

表7 KI-700による溶接継手のビード外観、断面マクロおよび機械試験結果 (PREMIARC™ DW-N609SV)

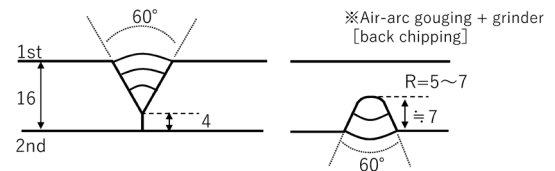
Table 7 Bead appearance, cross-sectional shape of weld metal, mechanical test results of weld metal by PREMIARC™ DW-N609SV

| | |
|---|---------------------------------------|
| | Root gap 0 mm |
| Bead appearance | |
| Macro-structure | |
| Tensile strength (MPa) (Test temperature : 20°C) [Target value ≧ 690 MPa] | 722 (Fractured position : weld metal) |
| Absorbed energy (J) (Test temperature : -196°C) V notch [Target value ≧ 34 J] | 84, 80, 80 Avg. 81 |

表8 KI-700が生成した溶接条件 (板厚16 mm PREMIARC™ DW-N609SV) とX線透過試験結果

Table 8 Welding conditions for PREMIARC™ DW-N609SV generated by KI-700 and radiography results

| | Welding current (A) | Arc voltage (V) | Welding speed (mm/min) | Welding heat input (kJ/mm) |
|-----|---------------------|-----------------|------------------------|----------------------------|
| 1st | 160 | 27 | 207 | 1.3 |
| | 170 | 27 | 194 | 1.4 |
| | 170 | 27 | 167 | 1.7 |
| 2nd | 160 | 25 | 199 | 1.2 |
| | 170 | 27 | 153 | 1.8 |



| Linear defect | Spherical defect | JIS B 8265 |
|---------------|--|------------|
| N.D. | Blow hole 5pieces (dia. 0.6~0.9 mm × 4, dia. 1.0 mm × 1) | Satisfied. |

※ Evaluation length in radiography :1800 mm

前述のPREMIARC™ DW-N709SPと同様に、JIS B 8265の合格規準を十分に満足する水準であり、PREMIARC™ DW-N609SVとKI-700の組合せにおいても長尺連続溶接における高い品質安定性が確認された。

4. KI-700使用による施工能率の向上効果

Ni基合金では、ビード終端のクレータ部にほぼ必ず割れが発生してしまうため、ビード継ぎの際にはクレータ部をグラインダで完全に除去する必要がある。3章で述べたように、KI-700を用いたLNGタンク立向溶接では品質の安定した長尺溶接が可能である。このため、半自動溶接で必要とされる約700 mmごとのビード継ぎ時のグラインダ作業が削減される。また、溶接士が立向継手の溶接位置に合わせて足場を移動するといったことも

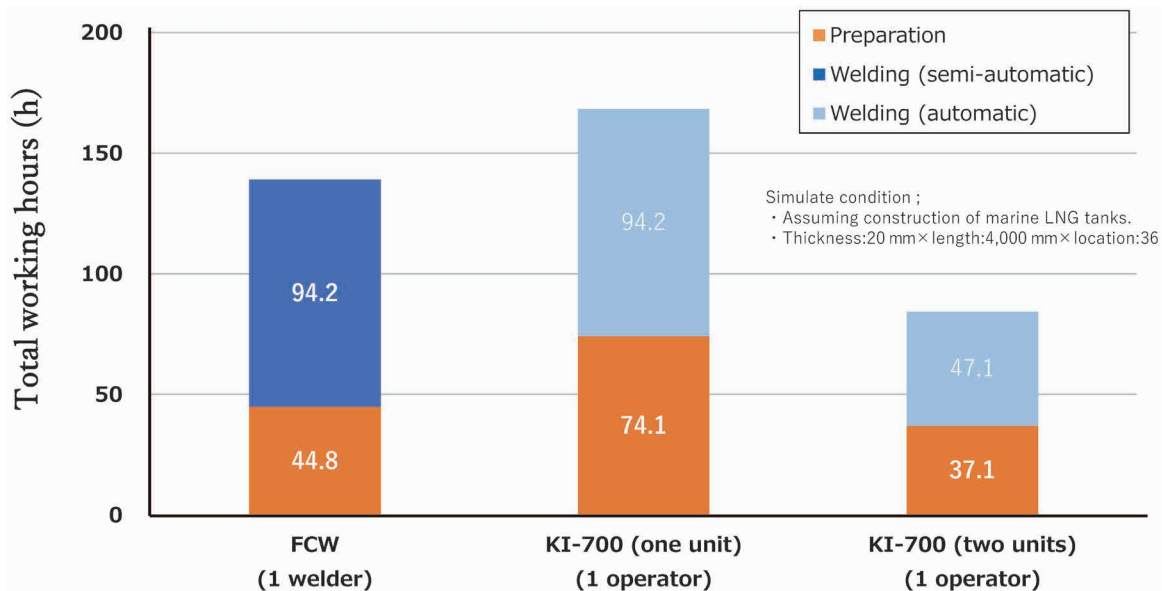


図5 各種施工法による総作業時間の比較
 Fig.5 Comparison of total working hours by various welding procedure

不要になる。さらに、KI-700はスラグを除去する作業以外は常時監視することなく溶接可能なため、オペレータが一人で2継手の施工作業を同時に行うことも可能になる。

板厚 20 mm，溶接長 4 m の立向溶接継手を溶接士が一人で36箇所を施工した場合の，総作業時間試算結果を図5に示す。溶接準備の内訳はスラグ除去，クレータのグラインダ処理（ビード継ぎ），裏はつり，コンタクトチップ交換である。KI-700を適用する場合には，これにレール設置作業とKI-700による開先センシング時間が加わるために準備時間は長くなるが，溶接作業は自動化されるため作業者の作業時間は約50%になる。溶接作業時間は半自動溶接と変わらないものの，溶接士が休憩中でも稼働できるため一日当たりの生産性は高くなる。さらに，一人の作業者が2台のKI-700を扱って交互に準備と溶接を行うことで，溶接を含む作業時間は半自動溶接に比べて約40%短くなり工期の短縮が図れる。

むすび＝本稿では，LNGタンク立向溶接施工の脱技能化・高能率化・品質安定化に対する当社の取り組みを紹介した。当社は「世界で最も信頼される溶接ソリューション企業」を目指している。Ni基FCWと組み合わせたKI-700による自動溶接システムは，ロボット・溶接材料・溶接電源・施工法という当社が持つ技術を活用した，まさに溶接ソリューション商品と言える。近年，カーボンニュートラル実現に向けたエネルギーインフラとして，LNGタンクだけでなく，水素・アンモニアタンク，液化CO₂タンクの建造ニーズも顕在化している。今回紹介した当社溶接ソリューション商品を提案し，社会貢献を図っていく。

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁. 資源・燃料部：2030年/2050年を見据えた石油・天然ガス政策の方向性(案). 総合資源エネルギー調査会 資源・燃料分科会 石油・天然ガス小委員会(第13回). 2021.
- 2) 北川良彦. ほうだより技術ガイド. 技術レポート. 2022, Vol.63 2022-4.
- 3) 辻勝之ほか. R&D神戸製鋼技報. 2013, Vol.63, No.1, p.48-53.