# LNG(液化天然ガス)貯槽

# -世界最大級LNG貯槽の自動化技術による高品質・ 低コスト化への取り組み-

Liquefied Natural Gas (LNG) Tank

 Optimizing Quality and Cost with Automation Technology for the World's Largest Class LNG Tank



梅田 聡①\* Akira Umeda 宮﨑 充弘② Mitsuhiro Miyazaki 恒川 昌宏③\* Masahiro Tsunekawa 赤松 政彦④\*\* Masahiko Akamatsu 新見健一郎⑤ Kenichiro Niimi 青木 篤人⑥\*\* Atsuhito Aoki

LNG貯槽は、-164℃の極低温の液体であるLNGを貯蔵することから、安全性すなわち高い品質が求められる.

当社では、品質の安定化が可能な溶接の自動化技術の開発を進めてきた。地上式LNG貯槽では、ナックルプレートの自動溶接ロボットを開発し、溶接品質の安定化と高能率化に寄与している。地下式LNG貯槽では、メンブレンパネルの溶接自動技術を開発して、工場でのブロック溶接へ適用し、優れた品質と自動化率95%を達成した。

LNG tanks require high standards of safety and quality as they store natural gas liquefied at a cryogenic temperature of  $-164^{\circ}\text{C}$ .

Kawasaki has been developing automated welding technology as part of an effort to ensure consistent quality. For aboveground LNG tanks, an automated welding robot was developed for the processing of knuckle plates to ensure consistent quality and high efficiency. For in-ground LNG tanks, a new automated welding technology was developed for membrane panels. By applying this technology to block welding in shop fabrication, Kawasaki has achieved both excellent quality and an automation rate of 95%.

## まえがき

LNGは、化石燃料のなかでも燃焼時の二酸化炭素の排出が少ないクリーンなエネルギーとして脚光を浴びている。特に、2011年の東日本大震災以降は火力発電燃料としての需要も高まり、国内での使用量は増加している。

そうした中で、LNGを安定的に確保・供給するために、 LNG貯槽の建設が各地で進んでおり、当社でも新技術を 取り入れながらさまざまな形式のLNG貯槽を社会に提供 している.

#### 1 地上式、地下式LNG貯槽の概要と当社の取り組み

#### (1) 地上式LNG貯槽の概要

地上式LNG貯槽の概要を図1に示す.貯槽は、液密性・ 気密性を保持し、地震などに対する耐荷性能が要求される 内槽、必要な断熱性能が要求される保冷層、保冷層内の窒 素ガスの気密性能が要求される外槽、内槽からのLNG漏 液時に液密性能が要求される防液堤などから構成される. 内槽材には、低温における強度と靭性および溶接性から 9% Ni鋼を使用している.

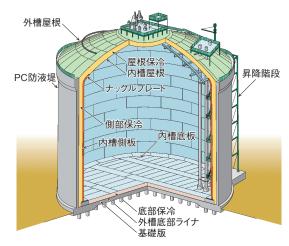


図 1 地上式LNG貯槽構造概要 Fig. 1 Aboveground LNG tank structure

①②③ プラント・環境カンパニー 化学・低温貯槽プラント総括部 低温貯槽プラント部

④⑤ プラント・環境カンパニー 生産本部 生産管理部

⑥ 技術開発本部 システム技術開発センター 生産技術開発部

\*\*技術士 (機械部門)

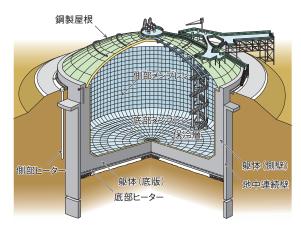


図2 地下式LNG貯槽構造概要 Fig. 2 In-ground LNG tank structure

#### (2) 地下式LNG貯槽の概要

地下式LNG貯槽の概要を図2に示す. 貯槽は、液密性・ 気密性を保持するメンブレン、断熱性能を有しメンブレン から受ける荷重を躯体に伝える保冷層、貯蔵液圧や土圧に 対する耐荷性能や地下水に対する止水性能が要求される躯 体、気密性と耐荷性能が要求される鋼製屋根から構成され る. メンブレン材には、低温収縮を吸収する波型(コルゲ ーション)を設けたステンレス製の薄板を使用している.

# (3) 当社の取り組み

当社は、これまでに国内外で地上式LNG貯槽32基(う ち建設中7基), 地下式LNG貯槽12基(うち建設中1基) の実績を有している. この数年のLNG貯槽の大容量化, 短工期での建設、建設コスト縮減などのニーズへの取り組 みとして、溶接の自動化技術の開発を進めている.

#### 2 工場製作における溶接自動化

当社のLNG貯槽は、その重要構造部である屋根部・側部・ 底部などを、複数の部材を組立・溶接して大ブロック化す る工場ブロック工法を採用して製作している. 工場ブロッ ク工法では、 品質を高めるための自動化を進めることがで きるので、作業者の技量依存性や作業環境の影響を受けや すい現地工法に比べ、品質・工程の変動要因を最小限とし て安定化できるメリットがある。加えて、現地施工での負 荷低減、安全性向上につながり、建設工事の全体工期短縮 や品質の安定化が可能となる. 以下に当社工場製作での溶 接自動化技術について紹介する.

# (1) 地上式LNG貯槽・ナックルプレートの 溶接自動化技術

地上式LNG貯槽のナックルプレートは、図3に示すよ

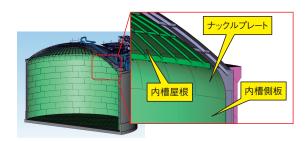


図3 ナックルプレート概要 Fig. 3 Knuckle plate

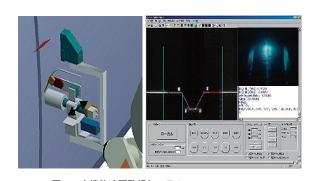


図4 高機能遠隔監視システム Fig. 4 High-functional remote monitoring system

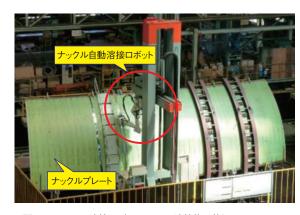


図5 ナックル溶接ロボットによる溶接施工状況 Fig. 5 Welding with automated knuckle plate welding robot

うに内槽屋根と内槽側板とを接続する重要部位(厚板;最 大50mm) であり、現地据付工事の板継溶接施工において 工期短縮・品質安定化が必要である. そのため、自動溶接 ロボットを適用して、2~3枚のナックルプレートを溶接 する工場ブロック化を図り、全体工程短縮と溶接品質の安 定化を実現した.

ナックルプレートの板継溶接は、9% Ni鋼板の3次元 曲面形状の継手溶接線を、立向や上向姿勢で長時間連続溶 接する必要があり、高難度な溶接施工となっていた.

これらの課題を解決するために開発したナックル自動溶 接口ボットの概要を以下に示す.

#### (i) 高機能遠隔監視システム

ナックルプレート板継溶接において、安定した品質で連続施工を行うために開発した、高機能遠隔監視システムの概要を図4に示す。本システムの採用により、レーザセンサによる開先形状の自動認識、およびアークモニタカメラによるアーク状態確認を単独の溶接工が遠隔監視できるようになり、複数台の溶接ロボットを用いた同時施工を実現した。

#### (ii) 施工状況

複数台のナックル自動溶接ロボットにより、高能率溶接施工を実現し、LNG貯槽建設工事の全体工期短縮、品質安定化を図った。本システムを搭載したナックル自動溶接ロボットによる溶接施工状況を図5に示す。

#### (2) 地下式LNG貯槽メンブレンパネルの自動溶接技術

現在,当社では国内22万kL地下式LNG貯槽を2016年完成予定に向けて建設中である。地上式と同様に品質・工期安定化のため工場ブロック工法を採用している。プレスによりコルゲーション加工したステンレス薄板(SUS304,厚さ2mm)のメンブレンパネルを,当社専用工場で複数枚組み合わせて工場ブロックに仕上げている(図6)。

従来、地下式LNG貯槽のメンブレンパネル溶接工程については、熟練溶接工が自動TIG溶接装置を用いて、溶接による部材変形に対し、溶接トーチ位置の補正や溶接条件の微調整を行いながら施工していた。

そこで今回,オペレータの技量に依存せず,無監視で溶接可能なメンブレンパネル自動溶接装置を開発し,溶接施工の信頼性向上を図った.

#### (i) 自動溶接技術

メンブレンパネルの溶接において、従来の専用機による 施工では、主に以下の課題があった.

① 溶接中の歪み変形の影響により溶接トーチ(電極) の狙い位置が変動するため、オペレータが常時アーク 状態を監視して溶接トーチ位置を微調整していた.

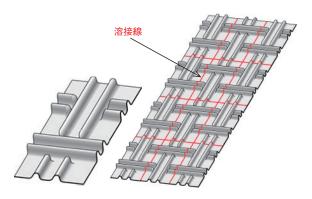


図 6 地下式LNG貯槽・メンブレンパネル概要図 Fig. 6 Membrane panel of in-ground LNG tank

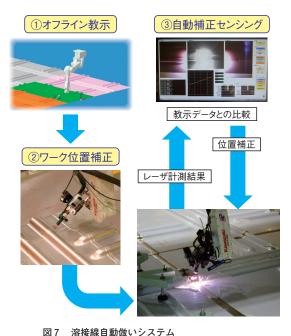


Fig. 7 Automated weld seam tracking system

② 薄板ステンレスの溶接施工であるため、大きな溶接 歪みが発生して溶接装置が停止して、溶接欠陥が発生 する場合があり、補修溶接が必要であった.

上記の課題を解決するため、当社の自動化・ロボット化技術を適用し、オペレータの監視運転が不要で、かつ安定した品質で施工可能なメンブレンパネル自動溶接装置を開発した。主な開発項目の詳細を以下に示す。

#### (ii) 溶接線自動倣いシステム

メンブレンパネルの溶接施工において、高品質な溶接施工を実現するために、溶接歪みに対して溶接トーチの狙い位置を適宜、位置補正する必要があった。そのため、レーザセンサにより、溶接線の位置・ギャップ量(溶接部の部材同士の隙間)をリアルタイムに計測し、溶接トーチ狙い位置を自動補正するセンシングシステムを開発した。溶接線自動倣いシステムの概要を図7に示す。

### ① オフライン教示

溶接ロボットに対し、オフライン教示(ロボットの 機体を使用せずPC上のCAD情報から溶接線情報を教 示する)を行う.

② ワーク位置補正

溶接ロボットのタッチセンシング機能により,メンブレンパネル溶接部の位置補正を行う.

③ 自動補正センシング

溶接施工中、レーザセンサにより、重ね継ぎ手の位置・高さ、およびギャップ量をリアルタイムに計測する。教示データ情報との差異から補正量を算出し、溶接狙い位置を0.1mm精度で自動補正する。

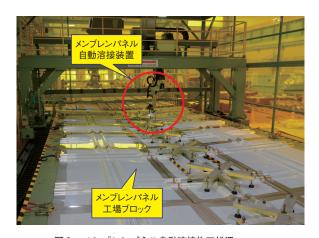


図8 メンブレンパネル自動溶接施工状況 Fig. 8 Automated welding of membrane panels

#### (iii) 溶接歪み変形予測技術

メンブレンパネルの工場ブロック製作は、18枚の単体パ ネルを組み合わせ、約5×11mに大ブロック化する.工場 ブロックの品質確保および現地施工時の据え付け作業の時 間短縮のため、工場ブロック全体の溶接歪みを低減するこ とが重要である。しかしながら、複数の溶接線を施工する 場合、オペレータが最終出来形の溶接歪みの発生量を正し く予測することは困難であった. そのため, 薄板のメンブ レンパネルに対して、溶接変形シミュレーションを適用し、 歪み量を低減する最適な溶接施工順序を決定した.

このシミュレーション結果を反映させた施工手順でモッ クアップによる施工確認を行い、熟練溶接工による従来の 施工と比較して、溶接歪み量を半減できることを検証した. さらに, 実際の工場ブロック製作へ適用し, 溶接歪みの最 小化を達成した.

#### (iv) 施工状況

工場ブロック製作に, 溶接線自動倣いシステム, 溶接条 件データベースなどを搭載したメンブレンパネル自動溶接 装置を適用し、良好な溶接品質を確保できた. また無監視 化を実現し、工場ブロックの溶接自動化率は約95%となっ た. メンブレンパネル自動溶接装置の施工状況を図8に示 す.

#### 3 現地施工における合理化溶接技術の開発

海外での地上式LNG貯槽の建設現地における溶接施工 は、ニッケル鋼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建設現場の 設備や環境面で適用困難な場合がある.この解決策として. 技量依存性が低く、高能率溶接による工期短縮も期待でき

るフラックス入りワイヤでの溶接法(FCAW)を、内槽 耐圧部に適用することが求められている. 当社でも、10年 程前から非耐圧部材に限定して国内貯槽へFCAWを適用 してきたが、耐圧部内槽への適用を実現するために、各種 FCAW溶接材に関する溶接性や継手性能の評価を実施し た. この結果、LNG貯槽の要求性能を十分に満足しかつ 従来の被覆アーク溶接法と同等以上の継手強度・靱性や優 れた破壊靱性が確認でき、また、耐割れ性が確保できる適 正溶接条件を確立できた. このため, 現在建設中の海外 LNG貯槽において、内槽耐圧部への適用を開始している. 今後、技術データと実績を積み上げることで、将来的には 国内LNG貯槽でも耐圧部材への適用拡大を進めていきた V).

#### あとがき

LNGは環境に優しいクリーンエネルギーとして、日本 のみならず世界的にも高需要が継続している. 当社は本稿 にて紹介した研究や取り組みを通じ、さらなる製品の低コ スト化、高品質化、工程短縮を実現させ、今後もエネルギ 一の安定供給という社会的貢献を果たしていく所存であ

#### 参考文献

- 1) 山川, 千田, 新見, 石山, 岩上, 中山: "大容量LNG 地上式貯槽の溶接施工",川崎重工技報,No.130, pp. 33-38 (1996)
- 2) 赤松: "大型地下式LNG貯槽の溶接技術", 月刊溶接 技術, 2015年1月号, pp. 50-53 (2015)
- 3) 新見, 土田: "LNG貯槽の溶接施工と日本における ものづくり力", 溶接学会誌, Vol. 82, pp. 46-50 (2013)



梅田



宮崎 充弘



恒川 昌宏



赤松 政彦



新見健一郎



青木 篤人