

特集：カーボンニュートラル社会への取り組み

液化水素タンクの溶接技術

川崎重工業株式会社
青木 篤人

1. はじめに

地球温暖化は世界的な問題であり、脱炭素社会に向けた取り組みが加速している。水素はエネルギー源として二酸化炭素を排出しないことはもちろんのこと、世界各地に存在する再生可能エネルギーや未使用エネルギーを運ぶ手段（キャリア）としても注目を集めている。

水素の大量輸送には液化することが有利である。水素は液化すると大気圧下での体積が気体時の約 800 分の 1 と非常にコンパクトになる。しかし、液化水素の温度は、現在主要なエネルギー源である液化天然ガス（LNG）の -162°C よりも低い -253°C であり、その貯蔵や取扱いには、LNG とは異なる対応が必要な場合もあり、現在も技術開発が進められている。

水素社会が現実となるためには、石油や LNG と同様にサプライチェーンを構築する必要がある。水素サプライチェーンの要素には、水素を「つくる」「はこぶ」「ためる」「つかう」のフェーズがあり、それぞれにおいて技術開発が必要である。この水素サプライチェーンの成立性を実証すべく、2015 年からパイロットチェーン実証の NEDO 助成事業が開始された。2022 年には、液化水素運搬船「すいそふろんていあ」（図 1）を用いて、オーストラリアで製造・液化した水素を積載し、日本の神戸液化水素荷役実証ターミナル「Hy touch 神戸」（図 2）までの輸送を行った。加えて、液化水素運搬船から陸上の液化水素タンクへの荷揚げオペレーションを成功させている。



図 1 液化水素運搬船「すいそふろんていあ」

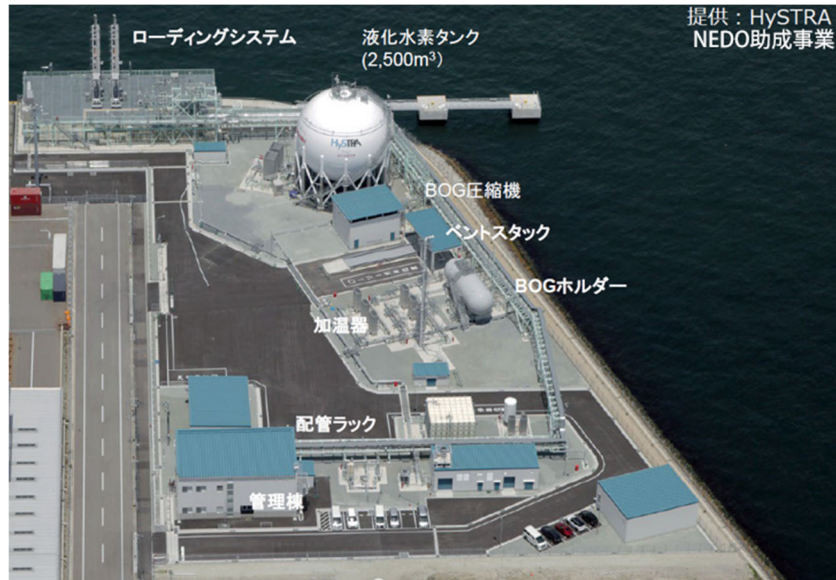


図2 神戸液化水素荷役実証ターミナル「Hy touch 神戸」

これらサプライチェーンにおける主要機器の一つが液化水素タンクである。液化水素タンクの構造としては様々な方式があるが、本稿では、オーステナイト系ステンレス鋼を材料とする液化水素タンクを取り上げる。これまで宇宙航空研究開発機構（JAXA：Japan Aerospace Exploration Agency）のロケット燃料貯蔵用の液化水素タンクが1987年に建造されている。しかしながら、容積はたかだか540m³である。水素は将来的に需要の大幅な増加が見込まれており、そのサプライチェーンを構築するにはタンクの大型化が必要不可欠である。タンクが大型になればなるほどタンクを建造するための溶接技術の重要性が増してくる。

以下では、水素サプライチェーン構築の第一歩とすべく、液化水素向けタンクの試験設備として開発した1000m³の仮型タンクにおける溶接技術について紹介する。

2. 液化水素タンク

液化水素タンクには、液化水素への入熱による気化を防ぐ断熱性能が求められる。これを実現するため内槽と外槽を持つ二重殻構造とし、内外槽間を真空にすることで対流伝熱による入熱を防止する。さらに内槽の外側には真空積層フィルムを施工し、輻射伝熱による入熱を防止する。またタンク大型化には、内槽をロッドで吊り下げる従来方式では重量の面から困難である。このため断熱性能に優れたGFRP（Glass Fiber Reinforced Plastic）柱材による支持構造を採用した。

2.1 二重殻タンク仕様

タンク容量の開発目標は仮型の3000m³級タンクとし、試験用タンクとしては長さを約3分の1とした1000m³のタンクでの技術確立を行った。このタンクの外観を図3¹⁾に、主要諸元を表1に示す。



図3 1000m³試験タンク外観¹⁾

表1 1000m³タンク仕様

形状	φ11m x L17m
重量	200t (うち内槽 85t)
容積(幾何容積)	1,000m ³
材質	オーステナイト系ステンレス鋼
板厚	15~30 mm

2.2 大型真空二重タンク製作手順

大型真空二重殻タンクの製造手順を図4に示す²⁾。内槽を製造し真空積層フィルムを施工したのち、設置した外槽下部に内槽を設置する。次に外槽下部に外槽鏡板をはめ込み接合する。さらに外槽上部を合わせ、継ぎ目を溶接封止する。

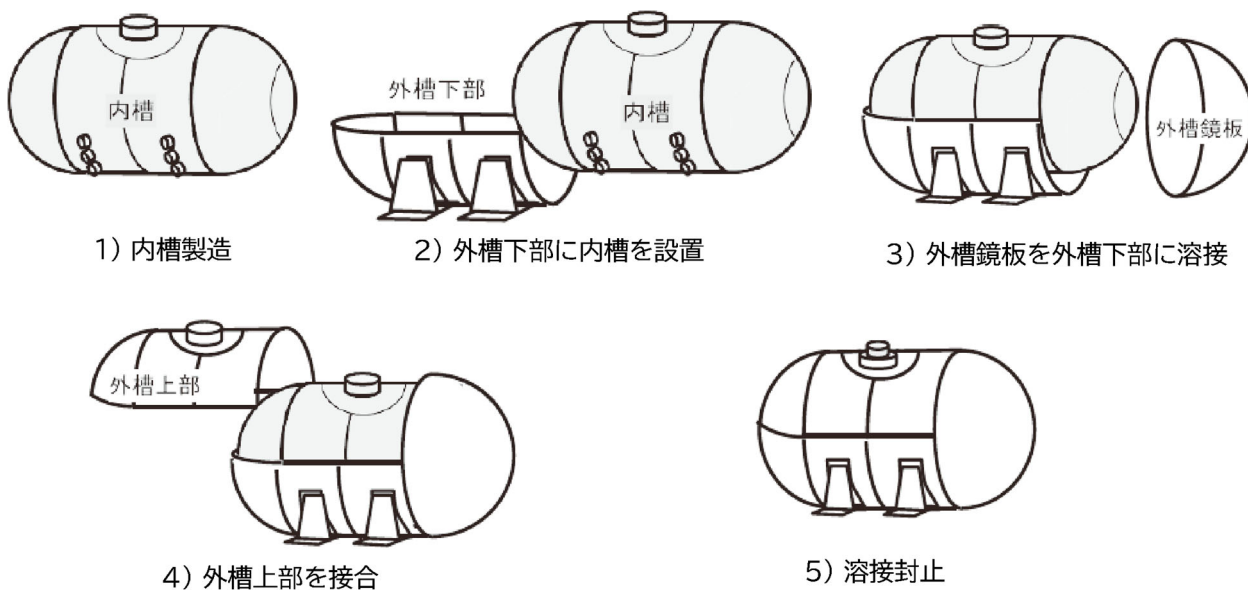


図4 タンク建造手順

2.3 タンクの溶接

真空二重タンクの溶接部は、構造的な強度が必要であることはもちろんであるが、内槽に液化水素を貯蔵すること、内外槽間を真空にすることから、気密性も求められる。

ステンレス鋼製の低温貯槽容器の溶接では、安定した溶接品質、特に低温じん性が得られやすいティグ溶接が第一候補となる。しかしながらティグ溶接は施工能率が低いため、長期の製造リードタイムおよび多くの溶接士が必要となり、経済性の面で不利である。このため、ミグ/マグ溶接といった低温じん性性能が得られやすく、施工能率も高い消耗電極式溶接の適用が望まれる。

なお、JIS Z 3001-7 : 2018 では、シールドガスに 0.5%以上の酸素又は炭酸ガスの混合ガスを用いるガスシールドアーク溶接をマグ溶接と定義している。これに従い、ステンレス鋼溶接に適用するガスシールドアーク溶接について、100%アルゴンガスから、次節で説明する少量の酸素や炭酸ガスを添加したシールドガスを範囲に含め、本稿では「ミグ/マグ溶接」と表記する。

2.4 ステンレス鋼のミグ/マグ溶接

各種消耗電極式溶接法のうちステンレス鋼には、主に不活性ガスをシールドガスとして用いるミグ/マグ溶接が適用される。ステンレス鋼の液化水素タンクにミグ/マグ溶接を適用するには、次の 3 つの課題が挙げられる。

- ① 溶接現象：アーク安定性
- ② 溶接継手品質：低温じん性の確保
- ③ 溶接施工性：姿勢溶接への対応

一般的なステンレス鋼を消耗電極式溶接法で溶接する場合、母材の陰極点を安定させるためシールドガスに数%の酸素や炭酸ガスを添加する。これらガスの微量の活性成分によって溶融池上に酸化物が形成され、これにアークが飛び、つまり陰極点が定まりアークが安定する。またこれらシールドガス中の添加酸素成分が溶接金属に混入することにより粘性が低下し、凸ビードを抑制する効果もある。しかしながら、酸素は低温じん性を悪化させる元素であり、液化水素向け溶接製品では溶接金属への酸素混入を極力低下させたい要求がある。

また、ステンレス鋼の溶融金属は一般的な炭素鋼に比べ粘性が高く、凸ビード、ハンピングビードが発生しやすいことが知られている。また、立向姿勢では、極端に開先中央付近に溶接金属が集まり、垂れ落ちにつながる (図 5)。この現象は、10 度程度の傾斜でも現れる。



図 5 従来ミグ/マグ立向溶接の断面マクロ

対象の大型タンクは、図 4 で示した建造手順のようにタンクを回転させることは難しく、ほとんどが傾斜のある溶接姿勢で溶接施工せざるを得ない。姿勢に応じた溶接法を選定することはもちろん有用であるが、効率的なミグ/マグ溶接が適用できる部位がかなり限られてしまう。

3. ミグ/マグ溶接の適用性検証試験

以上の背景から本開発の目的として、ミグ/マグ溶接の全姿勢積層溶接施工技術の開発を行った。

ステンレス鋼ミグ/マグ溶接の立向姿勢が難しい要因として、溶接入熱が大きすぎて垂れ落ちること、溶融金属量が開先内で凝固できる速度を超えて過大であることが考えられる。この対策として入熱や溶着量を抑える溶接プロセスの適用を検討した。具体的には、溶接入熱を抑えるために、電流を低くして、溶接の安定化を図るためにパルス溶接を適用した。以降ではこれを、低電流パルス溶接プロセスと呼ぶこととする。

溶接施工試験はいずれもロボットを用いて実施した。標準的なミグ/マグ溶接条件の場合、立向上進溶接では溶接ビードの垂れ落ちが発生してしまう。そこで、低い溶接電流を用いて、母材への入熱を低減するとともに、ワイヤ送給量も少なくなり溶融金属量を抑えたプロセスを検証した。試験条件を表 2 に示す。溶接電源の溶接法の設定として、一般的なステンレス鋼の溶接施工に最適化されたモードが用意されており、本試験では、溶接電源の「MIG(2%O₂)SUS solid wire DC pulse」モードを用いた。

表 2 低電流パルス溶接試験条件

溶接姿勢	30/60/90/120/180 度(鉛直下から立向)				
溶接試験体	板厚 16mm、開先角度 60 度				
溶接電源	ダイハシ DP350				
溶接電源モード	MIG(2%O ₂) SUS solid wire DC pulse				
溶接速度	電流	電圧	ウィービング		
8-32 cm/min.	100-165 A	17-19V	正弦波状/台形状	幅 3-20mm	0.25-2.0Hz

4. 結果および考察

4.1 溶接試験結果

低電流パルス溶接試験について、図6に試験状況、各姿勢のビード断面マクロ、および、ビード外観を示す。

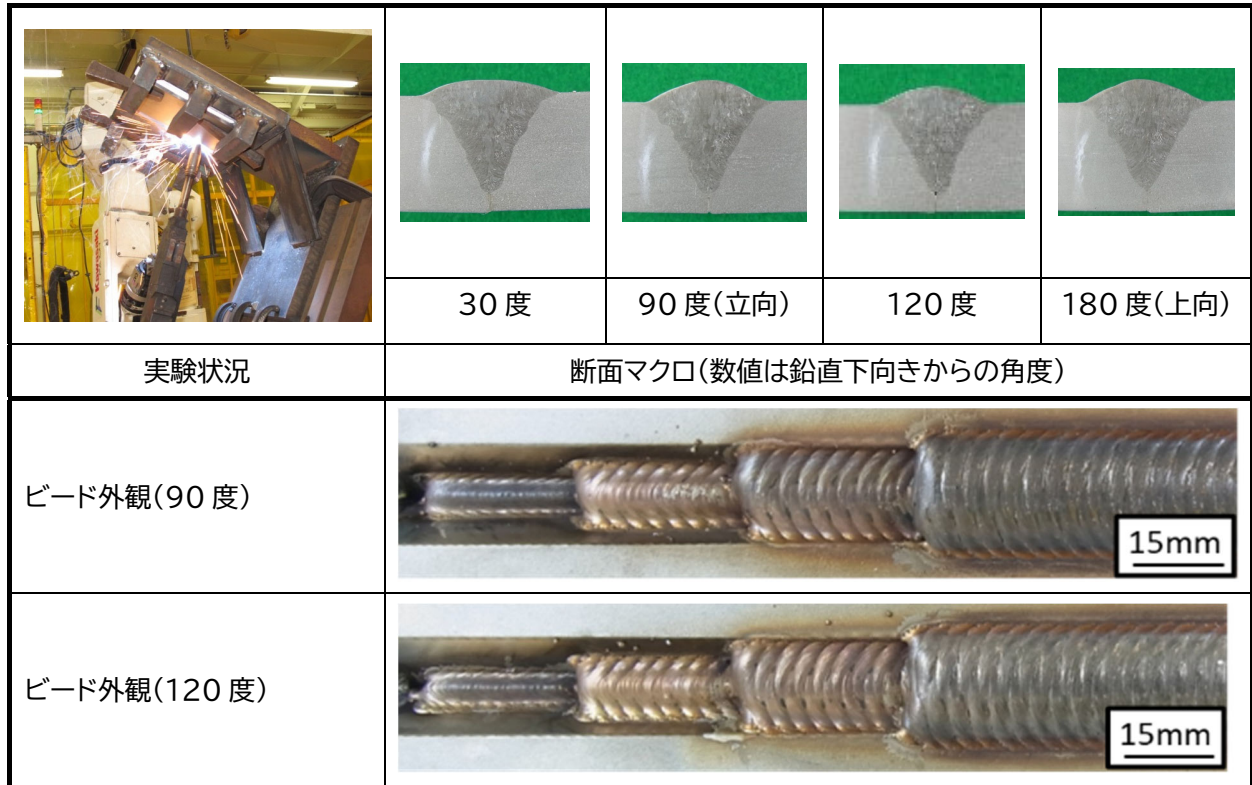


図6 低電流パルス溶接試験結果

いずれの姿勢においても、融合不良などの溶接欠陥が無く、ビード外観も良好な積層溶接が可能であることが確認された。また溶接姿勢が異なっても溶接条件の変更調整量は軽微にとどまった。しかし、ロボット等による一定動作の安定したウィービング動作が必要であった。また、低電流化に伴ってアークの短絡が発生するため、スパッタが発生しノズルが詰まる原因となりうるということが分かった。

4.2 液化水素タンク適用に向けた考察

以上で検討した低電流パルス溶接プロセスを試験タンクに適用する方法について考察する。

実験場のような整備された施工環境においては、立向等の姿勢溶接が可能であることは確認できた。タンクのような大型構造物の溶接施工では、上記のような実験場での試験とは大きく異なる。例えば、開先形状のばらつきや、溶接姿勢変化、溶接電源と溶接場所との距離による電気特性の変化などの外乱が挙げられる。また、現場施工では必ずしも自動溶接装置やロボットが使える環境に無く、一定動作のウィービングが採用できない可能性もある。低電流パルス溶接プロセスの欠点として、短絡の発生によるスパッタへの対策も必要である。

そこで低電流パルス溶接を液水タンクに適用するために、次の3つの課題に取り組んだ。

- (1) タンク溶接実行のための溶接電源の調整パラメータ導入
- (2) スパッタ対策としてのパルス波形最適化
- (3) 溶接士の訓練

5. 液化水素タンクへのミグ/マグ溶接適用検討

5.1 溶接電源パラメータの導入

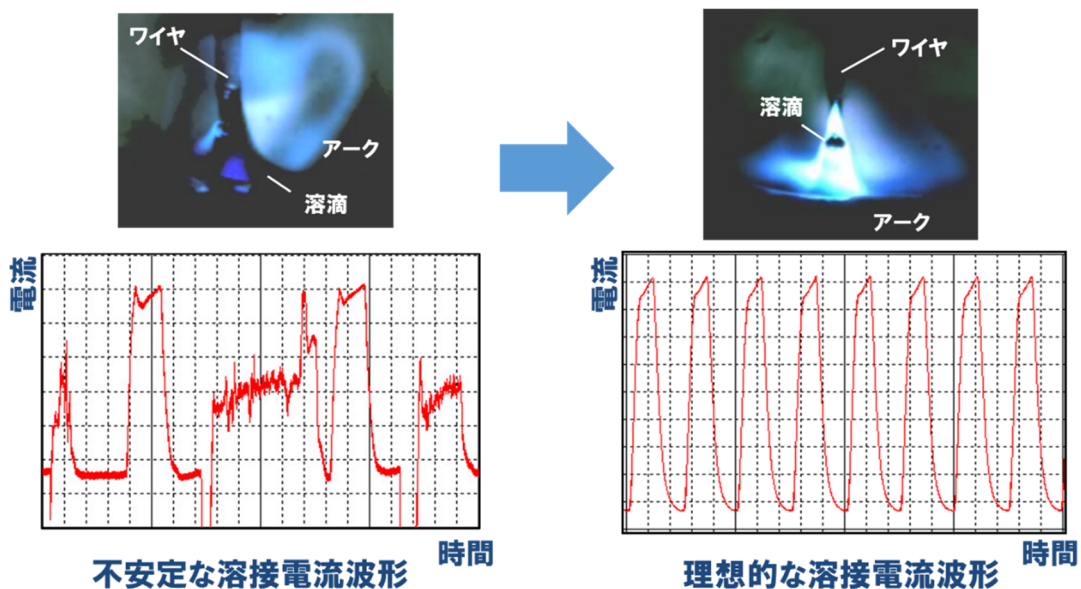
実際のタンク溶接に低電流パルス溶接を適用するため、溶接電源に次の 2 つの調整パラメータを追加した。

- 1) 溶接電源と溶接場所が離れていると長い溶接ケーブルでインダクタンスが発生する。インダクタンスによる応答の遅れにより、溶接アークにおける溶接パルス電流波形がなまってしまう。そこで、溶接状況に応じて、インダクタンスを補正できる機能を追加した。
- 2) パルス溶接電源ではアーク電圧をフィードバックし、電流パルス波形をアークが安定するように調整している。しかし低電流パルス溶接では短絡が発生しやすく、またステンレス鋼を対象とするミグ/マグ溶接自体のアーク不安定性がある。加えて開先内のウィービング溶接が必須でアーク長変動が大きいいため、アーク電圧の異常値が発生することが多々ある。これをそのままフィードバック制御するとパルス溶接制御が破綻する。一般的にフィードバックに用いるアーク電圧には不感帯をもつフィルタを設けて、異常値を排除する仕組みがあるが、今回開発した低電流パルス溶接では、この不感帯を拡大する方向に調整した。

5.2 スパッタの削減

スパッタの発生は、電流パルス波形タイミングと溶滴移行の不一致に起因するところが多い。そこで、低電流パルス溶接の低電流領域でも 1 パルス 1 ドロップの溶滴移行形態が実現できるように、パルス電流波形を調整・開発した。高速度ビデオを用い、パルス電流波形のピーク電流、ピーク時間、ベース電流値を調整した。低電流領域では、ピーク波形時の入熱を上昇、つまり、ピーク電流値を上げたり、ピーク時間を延ばしたりが過剰になると、ワイヤが液柱となって伸び、ワイヤが回転しながら移行するローテーティング移行となる。ローテーティング移行では、アーク長の変化に伴う大きなアーク電圧変動や不規則な短絡が起り、溶接電源のフィードバック制御が破綻する。

こうした現象を高速度カメラで確認し、シャープなピーク波形により 1 パルス 1 ドロップの溶滴移行を実現した。アーク電圧フィードバックフィルタとパルス波形調整結果のイメージを図 7 に示す。



なお、パルス溶接における溶滴移行形態は、シールドガス中の酸素や炭酸ガス量が少量でも影響する。今回、低温じん性が要求される継手であり、これを満足させるため低減した酸素や炭酸ガス量のシールドガスであっても、パルス波形を最適化することで、安定した溶接が可能であることを示せた。

5.3 溶接士の運棒

次に調整した溶接電源パラメータで安定的にステンレス鋼の施工に適用できるように、運棒方法を検討した。アーク長を短く保ち、開先両端で十分な時間停止させることで、凸ビードを解消し、フラットな溶接ビードを得ることができる。溶接士がこの運棒方法をできるようにするため、選抜された溶接士を工場内の匠塾にて技能訓練プログラムに基づき訓練した（図8）。

加えて、低電流パルス溶接の運棒操作を実現できる自動溶接機の開発も進めている³⁾。



図8 溶接トーチの運棒状況（左）と溶接継手断面マクロ（右）

5.4 液化水素タンク建造への適用

以上の開発結果を織り込み、試験タンクの溶接施工に低電流パルス溶接を適用した。適用状況の写真を図9に示す。



図9 開発技術の液化水素タンクへの適用⁴⁾

6. おわりに

液化水素タンク製造の溶接施工を対象に、オーステナイト系ステンレス鋼立向姿勢のミグ/マグ溶接施工法の試験用タンクへの適用を目的として開発を行った。

タンク製造に必須となる立向溶接に対し、低電流パルス溶接プロセスが可能であることを示した。

試験タンク製造の溶接プロセスとして低電流パルス溶接を採用し、さらに実施工のために以下の適用技術を開発した。

- ・実施工でのアーク安定性を得るため、溶接電源調整パラメータを追加した
- ・電流パルス波形を最適化し、1パルス1ドロップ溶滴移行を実現した
- ・開発したパルス溶接を安定的に実現する運棒手法を開発し、溶接士に訓練を行った

これらの開発結果を用いて、試験用タンクの製造に適用した。

本報告の開発では、溶接士による半自動溶接により試験タンクを製造したが、液化水素タンクの大形化や溶接士不足に対応するために、今後、溶接自動化の取組みも必要であり、鋭意開発を進めている。

謝辞

本稿の成果は平成 25 年度経済産業省「再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発」および平成 26～29 年度国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）「水素利用等先導研究開発事業」の委託業務、並びに 2015～23 年度 NEDO 課題設定型産業技術開発費助成事業「未利用褐炭由来水素大規模海上輸送サプライチェーン構築実証事業」、2023～25 年度 NEDO 課題設定型産業技術開発費助成事業「液化水素輸送・荷役システムの国際標準化に向けたデータ取得」により得られたものです。ご指導いただきました皆様に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 山下ら，“水素液化貯蔵システムの開発”，エネルギー・資源学会論文誌 Vol. 37, No. 4
- 2) 川崎重工，“平成 26 年度～平成 29 年度成果報告書 水素利用等先導研究開発事業 大規模水素利用技術の研究開発 水素液化貯蔵システムの研究開発”，NEDO 報告書，(2018)
- 3) 川崎重工技報，185 号，p.3，(2023)
- 4) 溶接技術 2022 年 4 月号

<略歴>

青木 篤人（あおき あつひと）

1997 年 岡山大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 博士前期課程 修了
1997 年 川崎重工業（株）入社 生産技術開発センター 配属
2004 年 技術士（機械部門）登録（第 56126 号）
2004 年 国際溶接技術者（IWE）（JP-IWE-000622T）
2020 年 大阪大学大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻 博士後期課程 修了
博士（工学）取得
2022 年 川崎重工業（株）技術研究所 生産技術研究部/部長
現在に至る