

特集：建設関連技術の最新動向

建築鉄骨柱用可搬型現場溶接ロボットの開発と現場適用

日鉄エンジニアリング株式会社
片山 翼

1. はじめに

近年、建設業界では溶接技能者の不足が深刻化しており、その影響が施工現場に顕著に表れている。特に、鉄骨構造の主要部材であるコラム柱における現場溶接作業は、高度な熟練技能を要することから、従事者の確保が難しくなっている。コラム柱の現場溶接は、溶接姿勢が横向きである上、コーナー部を含むため、高い技術と経験が必要とされる作業である。今後さらに技能者の減少が進むことで、施工品質や工期への影響が一層深刻化すると予想される。こうした課題に対応するため、我々は建築鉄骨柱の現場溶接作業に求められる技量の低減と省力化を目的とし、溶接未熟練者でも高い施工品質を実現できる現場溶接ロボットを日鉄溶接工業（株）と共同で開発した^{1), 2)}。本稿では、開発した溶接ロボットの設計思想と機構的な特長について詳述するとともに、溶接施工法試験結果や建設現場での適用実績を紹介する。

2. ロボットの特長

2.1 機器構成

開発した溶接ロボットの外観を図1に示す。本溶接ロボットは、溶接トーチを把持しながら所定の溶接線に沿って動作するロボット本体と専用のガイドレールの他、ワイヤ送給装置、溶接電源、これらを統合的に制御するための制御装置から構成される。

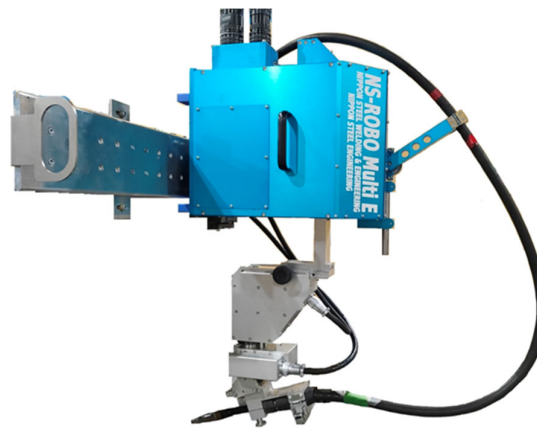


図1 溶接ロボット外観

制御装置は、溶接作業場所の近くに設置される中継盤と、溶接作業場所から離れた場所（例えば、溶接作業階とは異なる地上階など）に設置される制御盤、溶接電源との二重構成となっており、それ

ぞれがケーブルによって有線接続されている。このケーブルは最長 100m まで延長が可能である。ロボットの操作はタブレット型の無線操作端末を採用しており、オペレータは離れた場所からでもリアルタイムでロボットの動作状況を確認・制御することが可能である。建設現場では、溶接対象の柱ごとに運搬が必要となるのはロボット本体、中継盤、ワイヤ送給装置などの比較的軽量で運搬が容易な機器のみで済む。溶接電源や制御盤は、ケーブル長 100m の範囲内で据え置きのまま使用することが可能である（図 2 参照）。

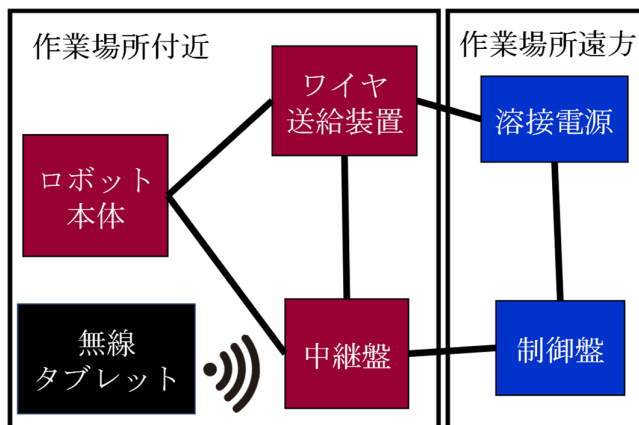


図 2 機器構成図

2.2 5 軸制御機構による効率的な溶接プロセス

本ロボットの最大の特徴の一つは、図 3 に示すように可搬式直交型ロボットとして国内初となる 5 軸制御機構の導入である。この 5 軸は、以下のように分類される。第一に、溶接線に対して直角方向に沿う「開先幅方向軸」、第二にロボットの走行軸、すなわち「溶接線の長手方向軸」、第三にコラムの板厚方向に相当する「深さ方向軸」、これらに加えて、第四に、図 4 に示すように、トーチを溶接線前後方向に傾斜させることで、建方ジグ（柱同士を組立てる際に使用するジグ）との干渉を回避しながら溶接を可能にする「前進／後退角軸」、最後に、各溶接パスに最適な角度でトーチを保持し、横向姿勢での高品質な溶接を実現する「トーチ狙い角軸」である。

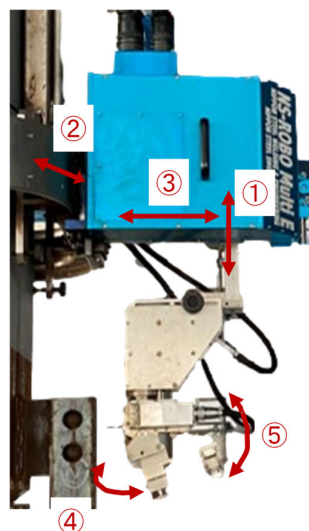


図 3 ロボット各軸説明図

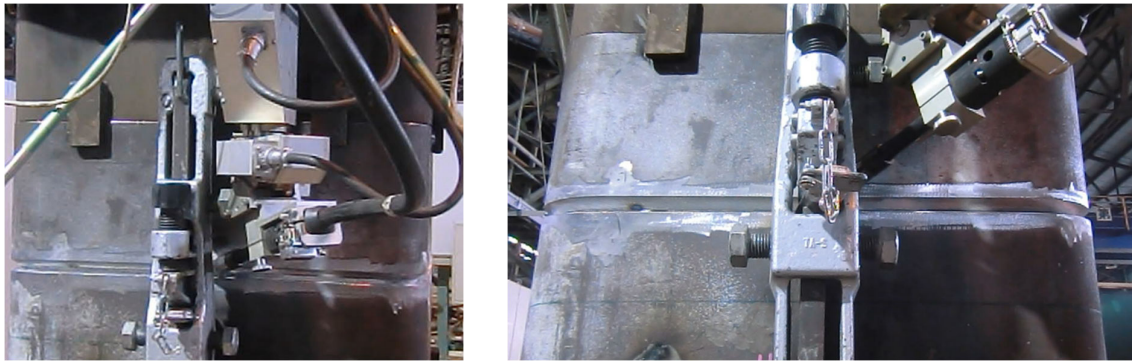


図4 建方ジグ下溶接時のトーチ姿勢

このような5軸制御の導入により、本溶接ロボットは一度ガイドレールへ設置すると、ロボットを取り外すことなく、建方ジグで区切られた複数区画の溶接作業を連続的に行うことが可能である。具体的には、図5に示す通り、まず1パス目では建方ジグを自動的に回避しながらコラム全周を溶接し、続く2パス目では溶接方向を反転させて再度コラム一周を溶接する。その後、建方ジグの除去とエレクションピースの切断を行い、以降は溶接方向をパスごとに交互に反転させながら、連続的な全周溶接を実施する。この施工フローにより、ロボットのガイドレールからの取り外しや再設置による時間的ロスを大幅に削減し、施工を効率化している。

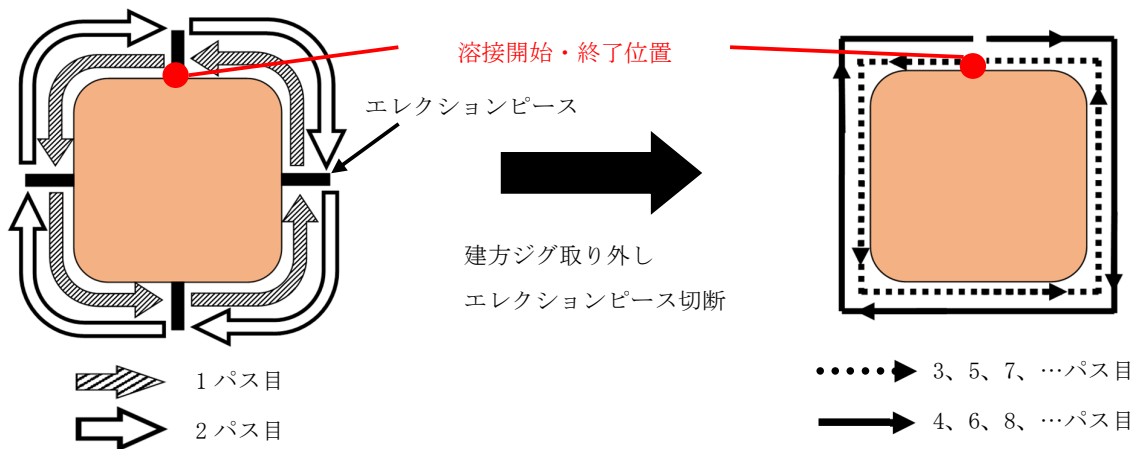


図5 溶接シーケンス

2.3 自動化技術による溶接作業の効率化と操作性向上

本溶接ロボットには、自動開先センシング機能および積層溶接条件の自動演算機能が搭載されており、これらが溶接品質の安定化と操作の簡便化に大きく寄与している。自動開先センシング機能は、従来手作業で行っていた開先形状の測定や開先原点のティーチング作業を自動化する。センシング点（例えば、コラム全周で20点）にスリットレーザを照射し、その反射光をカメラで取得した後、画像処理技術によってルートギャップ、開先深さ、開先角度などの幾何情報を自動的に取得する（図6、7）。このシステムは、開先表面の錆の有無に関わらず安定した計測精度を維持しており、現場でのスムーズな計測を可能にしている。

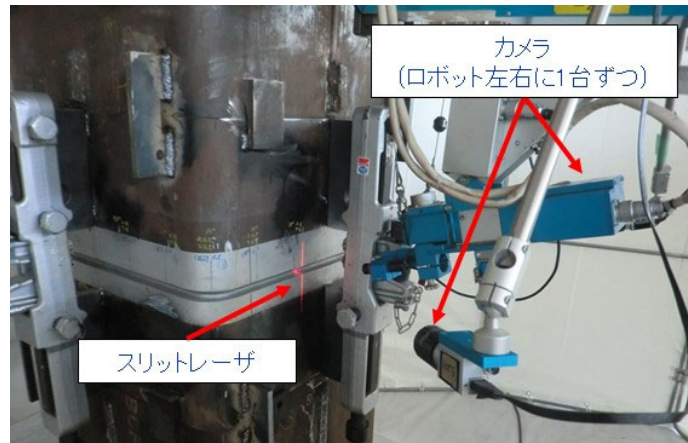


図6 自動開先センシング状況

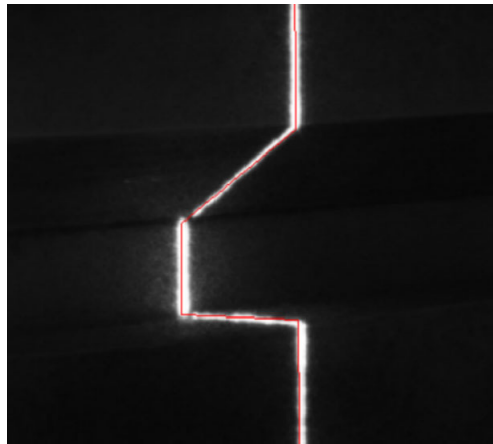


図7 開先検出結果例

次に、取得した開先情報を用いて、積層溶接条件の自動演算機能によって、各層・各パスの最適な溶接条件（電流、電圧、速度、ウィービング幅など）が自動的に演算される（図8）。さらに、開先寸法の変動に応じてトーチ狙い位置、溶接速度、ウィービング幅を自動で補正することで、コラム全周にわたり均質なビード形成を実現する。この適応制御により、従来必要だった溶接条件の逐次調整作業を完全に自動化している点も大きな特長である。

加えて、本溶接ロボットは一人のオペレータが複数台を同時に操作できるように設計されており、溶接中の状態をリアルタイムでモニタリング可能な映像システムを搭載している。このシステムにより、離れた場所から複数台のロボットの溶接状態を監視でき、必要に応じてトーチ狙い位置などの微調整を溶接中に行うことも可能である。これによりオペレータ 1 人あたりの施工能率を大幅に向上させることが可能である。

結果として、溶接中にオペレータが行う作業は、パス間作業（ビード継目の整形、スラグ除去など）や溶接状態のモニタリング程度に限定される。従来、約 1 時間を要していたティーチング作業も、カメラのキャリブレーションや溶接前の空運転確認を含めて最短約 30 分で完了可能であることが確認されている。このように、本溶接ロボットは高度な溶接技能を必要とせず、溶接未熟者でも簡単に高品質な溶接を実現可能であるというメリットがある。

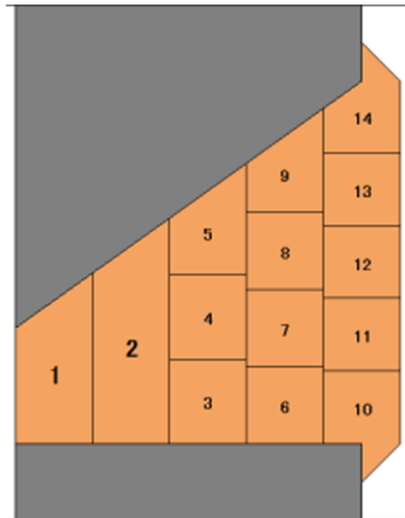


図 8 積層演算機能による積層図例

3. 溶接ロボットの現場適用

3.1 溶接施工法試験

本溶接ロボットを実施工へ適用するにあたり、溶接継手の品質と機械特性を確認するために溶接施工法試験を実施した。試験は、WES8703「建築鉄骨溶接ロボットの型式認証における試験方法及び判定基準」に準拠して行った。試験体には、建築鉄骨柱で広く使用される BCP325 材を採用し、寸法は□650mm×t16mm とした。ルートギャップは現場で想定される最小値 4mm と最大値 10mm の平行ギャップを設定し、2 種類の継手を用意した。溶接材料には、横向き姿勢における溶融金属の垂れ落ちの生じにくさやアーク安定性、溶け込み深さ等の観点から YGW18 相当のメタル系フラックス入りワイヤ (Φ1.2mm) を使用し、シールドガスは炭酸ガスを用いた。自動演算により得られた各溶接パスの入熱量は、凡そ 8~27 kJ/cm の範囲内であった。

なお本試験のロボットオペレータは、JIS Z 3841 の下向姿勢の資格を有しているものの、溶接作業を専門的に行っていない、いわゆる非熟練溶接技能者を選定した。対象者には、ロボット操作に関する基礎的な教育とロボットによる溶接作業について、5 日間の集中的な訓練を実施した後、溶接施工法試験を行った。

試験の結果、溶接後のビード外観は非常に良好であり、幅や高さのばらつきが少ない均一なビードが得られた。また、超音波探傷検査 (UT) では、2 継手とも合格基準を満たす結果であった。さらに、溶接継手部より採取した試験片に対して機械試験を実施したところ、引張試験では引張強さの平均値 (n=3) が 703N/mm² と、合否判定基準である 530 N/mm² を上回った (表 1)。加えて、0℃で実施したシャルピー衝撃試験では、吸収エネルギーの最小値が溶接金属部で 130J、熱影響部 (HAZ) で 132J と、いずれも合否判定基準 (27J) を大幅に超える結果となった (表 2)。

表 1 引張試験結果

試験片 番号	試験温度 [°C]	試験片径 [mm]	引張強さ [N/mm ²]		伸び [%]	絞り [%]
			(個々値)	(平均値)		
W-1			705		24	61
W-2	22	12.52	688	703	25	63
W-3			716		25	65

表 2 シャルピー衝撃試験結果

試験片番号	試験温度 [°C]	吸収エネルギー[J]		試験片番号	試験温度 [°C]	吸収エネルギー[J]	
		(個々値)	(平均値)			(個々値)	(平均値)
RG10mm W-1		151		RG4mm W-1		130	
RG10mm W-2		159	155	RG4mm W-2		139	138
RG10mm W-3		154		RG4mm W-3		146	
RG10mm H-1	0	200		RG4mm H-1	0	263	
RG10mm H-2		135	156	RG4mm H-2		244	248
RG10mm H-3		132		RG4mm H-3		238	

試験片番号 xx W-1~3 は溶接金属、xx H-1~3 は HAZ を示す

断面マクロ試験では、ルートギャップが異なる両試験体（4 mm および 10 mm）に対し、それぞれ直線部およびコーナー部において観察を実施した結果、どの部位においても内部欠陥（ブローホール、スラグ巻き込み、未融合など）は確認されなかった。これら一連の試験結果から、非熟練溶接技能者であっても、短期間の訓練により高品質かつ高信頼性の溶接施工が可能であることが確認された。

3.2 現場試適用

溶接施工法試験で所定の品質を満足することが確認できたため、本溶接ロボットを当社の施工現場のコラム柱溶接へ実際に適用した。本適用は、現場条件下での安定稼働性や作業性を確認することを目的とした。現場での施工には、前節の溶接施工法試験と同じオペレータを配置し、試験との連続性と技量の一貫性を確保した。施工対象としたコラム柱の仕様は、試験時と同様に断面サイズ□650mm×t16mmであり、計 10 本のコラム柱をロボットで溶接した。本試適用では、ロボット 1 台のみを現場へ持ち込み、作業にあたる人員体制としては、ロボット操作を担当するオペレータ 1 名に加え、補助作業を担当するヘルパー 1 名の合計 2 名で対応した。各作業者の役割分担として、オペレータはロボット本体および付属機器の運搬、現場でのロボット設置、ならびにロボットの操作および溶接作業の全般を担当し、一方でヘルパーは、機器類の運搬および設置作業を補助するとともに、建方ジグの取り外し作業や、溶接ビード表面の後処理（スパッタ除去や清掃等）を主に担当した。

本試適用の結果、現場においても開先センシング機能は安定して動作し、センシングで得た開先寸法の情報からロボットが自動で演算した溶接条件を適用することで、ルートギャップなどが様々にばらつく現場の開先に対しても良好な溶接外観が得られ、UT および外観検査ともに合格基準を満た

す結果が得られた（図9、図10）。

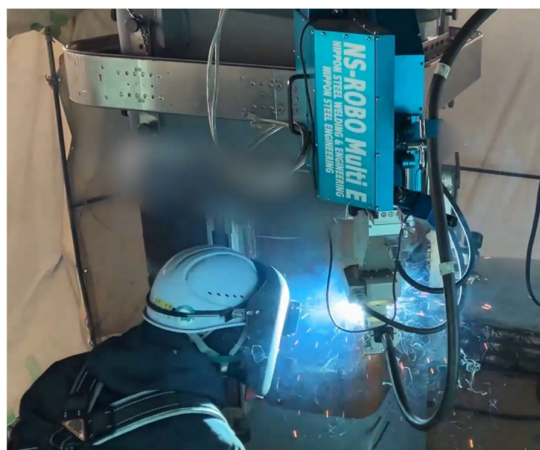


図9 現場溶接施工状況



図10 現場溶接ビード外観

その他、確認できた事項として、①半屋外環境においても風防対策によりブローホール等の溶接欠陥が防止可能であること、②施工現場の他設備からのノイズ影響を受けず、試験時と同様の機器動作・溶接電源出力が得られること、③鉄筋上のような足場の悪い作業環境下においても横持ち運搬が可能であること、などが挙げられる。また、1本のコラム柱に対する全溶接工程（ロボット設置から溶接完了、撤収まで）に要した時間を計測したところ、機器の移動・準備時間を含めて1継手あたり約4.5時間であった。従来の熟練溶接技能者による施工能率にはまだ及ばないものの、非熟練溶接技能者でも現場溶接の品質確保が可能であることから、従事者層拡大による溶接技能者不足解消の可能性が示された。今後、1継手当たりの溶接量がより大きいコラムを対象とすることで、ロボット溶接の施工能率向上が可能であると考えられる。以上の結果より、熟練溶接技能者への依存を軽減する「脱技能化」および省人化・高能率化の観点から、本ロボットの現場適用は極めて有効であると結論づけられる。

4. 最新の取組み状況

4.1 少パス（パス数を低減した）溶接の実現に向けて

ロボット溶接の更なる効率化のため、ロボットならではのメリットを活かした高能率施工方法の確立を検討している。溶接技能者による手作業の溶接と比較して、ロボットを用いた自動溶接では、より高精度で再現性の高い運棒動作が可能であるため、人間の技能者では困難な溶接条件（例えば、非常に高溶着量の条件）においても安定した溶接ができる可能性がある。一般に、溶接のパス数が多い場合、パス間作業やパス間の待ち時間が増え、アークタイム率が低下する（すなわち、能率が低下する）ほか、ロボットの動作回数が増えることで予期せぬトラブルが生じる可能性も高くなる。そこで本検討では、従来よりもパス数を低減した施工法確立を試みた。

具体的には、板厚 16 mm、ルートギャップ 7 mm、開先角度 35 度のコラムに対して、5 パスでの溶接施工を試みた。一般的に、この開先形状に対し熟練溶接技能者が手作業で溶接を行う場合、少なくとも 7 パス程度を必要とするのが通例で、本ロボットでは 12~14 パス程度を要していた。したがって、もし 5 パスでの施工が可能であれば、パス間のロスタイムを削減し、アークタイム率の向上による施工効率改善効果が見込まれる。

結果、**図 11** に示すように、ビード外観には若干課題が残るものの（ビード同士の凹凸等）、超音波探傷検査の結果は無欠陥であった。これらの結果から、ロボット溶接では従来の手作業による溶接よりも少パスでの溶接が可能であり、施工能率を向上させられる可能性が示された。



図 11 少パス溶接施工 ビード外観

4.2 現場施工能率の更なる改善に向けて

本ロボットの本格的な実用化に向け、さらなる現場施工能率改善を目的に機器および運用体制の最適化を進めている。

直近の現場適用では、ロボット台数を 2 台へ増やし、オペレータ 1 名、ヘルパー 1 名の 2 名構成でロボット 2 台の運用を試みた。本現場では、 $\square 500\text{mm} \times t16\text{mm}$ のコラムを計 12 本施工した。

オペレータ 1 人当たりの施工能率を改善するため、2.3 項で述べたように、オペレータがカメラ映像を通して溶接状況をモニタリングしながら 2 台のロボットの溶接作業を並行して進めることが可能かを検証した結果、現場環境においても 2 台同時の運用が可能であることを確認した (**図 12**)。また、機器の運搬作業をより効率化させるため、これまで使用していた 3 本の通信ケーブルを 1 本の軽量型通信ケーブルに統合し、ケーブル全体の軽量化を実現した (**図 13**)。加えて、ロボットおよび関連機器類の運搬方法の見直しと構造最適化により、運搬機器全体の軽量化も図った。これにより、機器の移動作業がより迅速かつ負担の少ないものとなり、柱間の機器運搬時間が従来から大幅に短縮された。



図 12 現場での 2 台同時溶接状況



図 13 通信ケーブル（緑：改善前、赤：改善後）

これらの改善を施した結果、品質面では全体の欠陥率は約 2%で、現場で許容できる品質レベルであることが実証された。作業能率の面では、1日あたり最大 4 本のコラム柱溶接を完了させることができ、従来比からの能率向上効果が確認された。

5. まとめ

本稿では、熟練溶接技能者不足への解決策の 1 つとして、溶接未熟練者でも扱える溶接ロボットの開発事例と現場適用事例について紹介した。当社では、これまで 4 現場に溶接ロボットの適用を重ねてきており、それらの適用から得られた知見をもとに、今後さらなる機器構成の軽量・簡便化と、より効率的な施工法の開発を進めることで、より一層の省人化・省力化が実現可能と考えている。さらに、ロボット制御の高度化により、建築鉄骨柱以外にもより多様な構造物へも本技術を応用することで、溶接ロボット活用範囲の拡大が期待できる。

参考文献

- 1) 渡邊慎司、松本知史、斎藤雅哉、井上浩良、田中良一、川村研二、野瀬哲郎、片山翼：建築鉄骨用直行型 5 軸ロボットの開発、溶接学会全国大会講演概要 第 115 集(2024-9)
- 2) 田中亮匡、片山翼、後藤憲一、田代裕一朗、遠藤俊志、脇田直弥、渡邊慎司：可搬直交型 5 軸ロボットによる現場溶接、溶接学会全国大会講演概要 第 115 集(2024-9)

※NS-ROBO Multi は日鉄溶接工業株式会社の登録商標です。

<略歴>

片 山 翼 (かたやま つばさ)

2010 年 大阪大学工学部 応用理工学科 卒業

2012 年 大阪大学大学院 工学部 マテリアル生産科学専攻 生産科学コース 卒業

2012 年 新日鉄エンジニアリング株式会社 入社

現在に至る