

高効率高周波誘導炉「F-MELT100G シリーズ」

“F-MELT100G Series” High-Efficiency, Medium-Frequency Induction Furnace

田中 克尚 TANAKA, Katsuhisa

松永 和久 MATSUNAGA, Kazuhisa

山本 勝也 YAMAMOTO, Katsuya

近年、自動車生産台数の増加に伴い、鋳物部品の生産で使われる高周波誘導炉設備の需要が高い。また、各国の省エネルギー規制の強化により、高効率化や大容量化のニーズが高くなっている。富士電機は、溶解原単位を向上させた高効率炉体と高電圧 IGBT スタックを搭載した「F-MELT100G シリーズ」を開発した。これにより使用電力量の低減と、設備電源容量が 20 MW までの幅広いラインアップに対応した。また、セルフチェック機能と RAS 機能を備えたダイレクトデジタル制御ユニットの採用により、設備の安定稼働と、故障発生時の原因特定の所要時間短縮も実現している。

The recent growth in automobile production has increased the demand for medium-frequency induction furnace used in production of casting parts. In addition, the increase in the stringency of energy saving regulations in various countries has created a greater need for high efficiencies and large capacities. Fuji Electric has developed the “F-MELT100G Series,” which comes with a high-voltage IGBT stack and high-efficiency furnace body that improves the melting consumption rate. These enhancements reduce electricity consumption, and a wide range of products are available with a power supply capacity of up to 20 MW. Moreover, this series is equipped with a direct digital control unit with self-check and RAS functions, enabling it to stabilize operations for systems and to quickly identify the cause of failures.

① まえがき

高周波誘導炉は、数百 Hz の交流電流による電磁誘導作用を利用して金属を千数百℃に加熱・溶解する装置であり、自動車や機械に使用される鋳物部品の生産設備として広く用いられている。近年、中国における自動車生産台数の増加に伴い、高周波誘導炉設備の需要が高くなっている。また、各国で省エネルギー規制が強化され、高効率化や大容量化のニーズに加え、メンテナンス性の向上や予防保全といった機能に対するニーズも高くなっている。日本国内だけでなく、このような中国や東南アジアを中心とした海外のニーズに応えるため、高効率高周波誘導炉「F-MELT100G シリーズ」を開発した。本稿では、設備損失（誘導炉設備の通電電力損失）を低減した 3～30 t の金属を溶解できる炉体容量と、3～20 MW の電源容量のラインアップを持つ F-MELT100G シリーズについて述べる。

② 鋳物生産工程における電力消費量の実態

鋳鉄鋳物製造業は出荷額に占める生産に必要な消費電力料金の割合が、一般機械機器製造業に比べ 10 倍以上のエネルギー消費型産業である⁽¹⁾（図1）。中でも鋳物製造において約 60% を占める溶解工程の消費電力量の削減は、鋳鉄鋳物製造業における経営課題の一つとなっている。

一般に溶解工程の消費電力量は式(1)で表わされる。

消費電力量 = 溶解エネルギー + 設備損失 + 操業損失 … (1)

溶解エネルギー：金属を溶解するための必要エネルギー

設備損失：誘導炉設備の通電電力損失（メーカー課題）

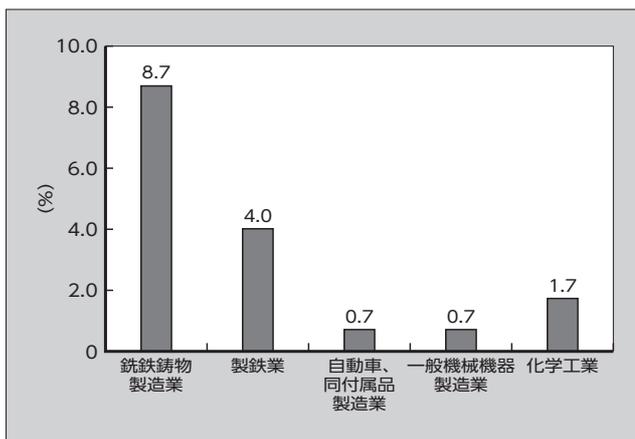


図1 出荷額に占める消費電力料金の割合

操業損失：待機電力や溶解金属の過昇温に要した電力などの金属の溶解に直接寄与しない電力（ユーザ課題）

したがって、溶解工程の消費電力量を削減するためには設備損失と操業損失の低減が必要である。

③ 「F-MELT100G シリーズ」の特徴

F-MELT100G シリーズの主要構成機器である金属を溶解する“炉体”と、数百 Hz の高周波電流を炉体に供給する“高周波電源”、ならびに高周波電源に新たに搭載した“ダイレクトデジタル制御ユニット”の特徴について述べる。

3.1 炉体の特徴

(1) 炉体の構造

電磁誘導作用により金属を溶解する炉体での電力損失は、

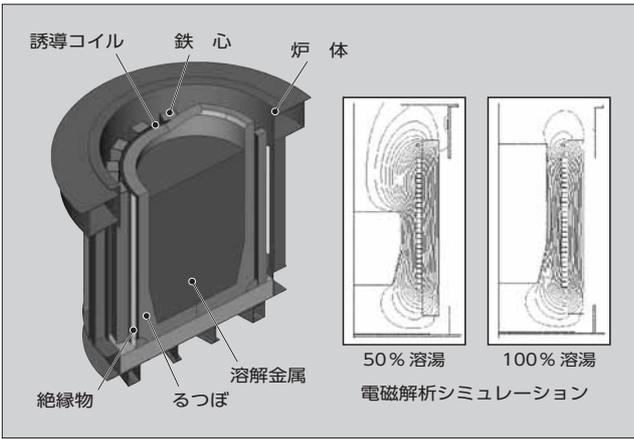


図2 炉体構造図と電磁解析シミュレーション例

設備損失全体の約70%を占めている。図2に示すように、炉体は、溶解する鉄などの原料を入れる耐火物でできた容器（るつぼ）と、その周囲に配置した誘導コイル、および誘導コイル外周に配置した鉄心から構成されている。これらの形状と位置関係が電力損失に大きく影響する。そこで、図2に示す炉体構造に対して、溶解工程の開始から、金属を追加投入しながら所定の温度になるまで加熱していく過程で変化する溶解金属量（体積）を考慮した電磁界解析を行った。誘導コイルに投入した電力が効率よく溶解に使われるように、誘導コイルの径と高さ、誘導コイルのターン間ギャップ、鉄心形状などを見直して独自の誘導コイル構造を作り出した。

誘導コイルの外周に配置した鉄心は、磁束を最適な分布にする働きと、溶解金属の温度上昇に従ってるつぼの径方向に発生する熱膨張を抑制する支持構造も兼ねている。

図3に示すように、従来は耐火セメントによって鉄心を炉枠に固定していた。そのため、るつぼが熱膨張すると鉄心を構成しているけい素鋼板に変形が生じて損失が増加するという問題があった。そこで、鉄心の炉枠への固定を間接的に行う構造に変更し、温度が上昇したときに鉄心に生じる内部応力を従来よりも抑制して鉄損の増加を防いだ。

(2) 炉体の高電圧化

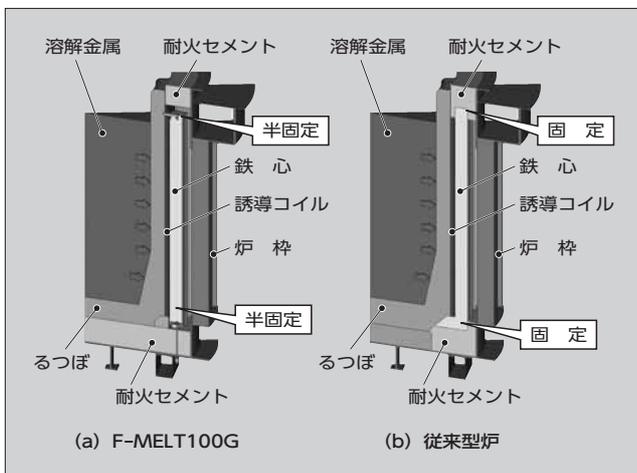


図3 鉄心固定構造の比較

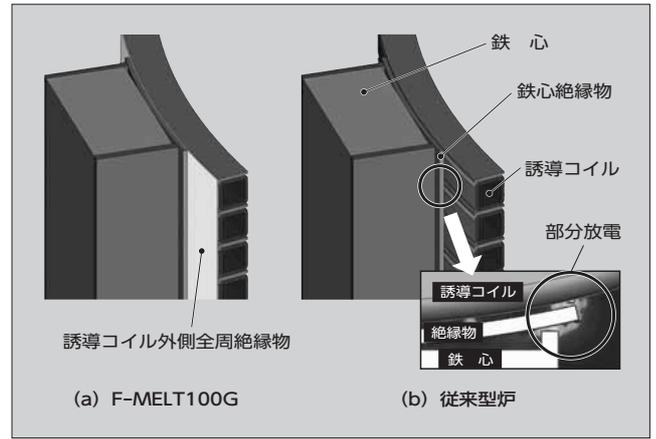


図4 部分放電の発生場所

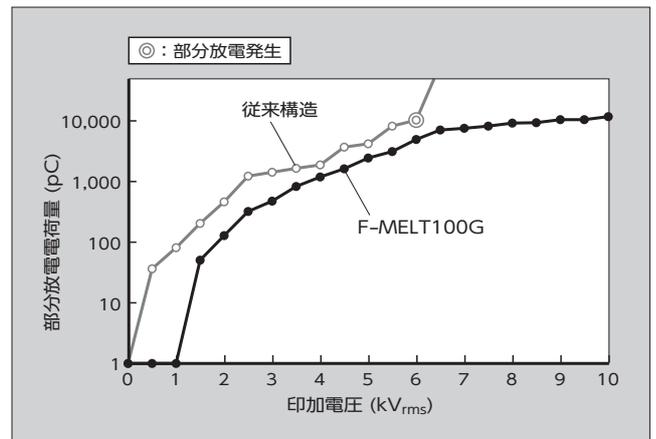


図5 絶縁施工方法に拠る部分放電電荷量の発生状況比較

昨今の企業を取り巻く環境変化により、コークスに比べCO₂排出量が少ない誘導炉への転換により大型炉市場が拡大することが見込まれる。F-MELT100Gシリーズでは、電源容量を従来の8MWから最大で20MWまで拡大するとともに、容量拡大に伴う主回路電流の増加による配線ロスを抑制するため、誘導コイルに印加する電圧を従来の2倍の6kVに高電圧化している。しかし、従来の絶縁構造のまま高電圧を印加すると、図4に示すように鉄心端部と誘導コイル間に部分放電が発生するという問題があった。

そこで、絶縁距離を伸ばすだけでなく、高温・多湿で塵埃（じんあい）が多い誘導炉の使用環境においても、比誘電率の変化が少なくかつ体積抵抗率の低下も少なく、可撓性・屈曲性に優れた絶縁物に見直すとともに、誘導コイルの外側全周に絶縁物を施工した。これにより、従来は図5の◎部に示すように、印加電圧6kVで部分放電が開始していたが、10kV以上に改善した。

3.2 高周波電源の特徴

(1) 新型 IGBT スタック

F-MELT100Gシリーズでは、3～20MWの電源容量に対応するため、新型構造の高電圧IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）スタックを開発した。図6

特集 省エネルギー・小型化と生産性向上に貢献するパワーエレクトロニクス

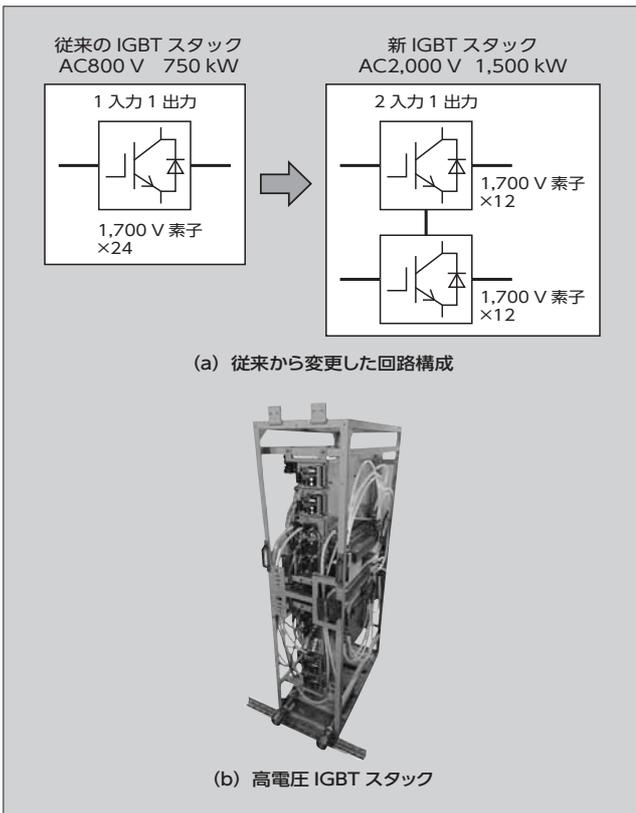


図6 高電圧 IGBT スタックと回路構成

に、高電圧 IGBT スタックと回路構成を示す。設置・交換作業を効率化するため、高電圧 IGBT スタックは、IGBT モジュールを搭載したインバータ部や直流を平滑するコンデンサ、主回路接続用ブスバーをユニット化した。それぞれのモジュールに接続したブスバーの長さが異なると、高周波駆動時には、配線インピーダンスの差異が大きくなり、電流アンバランスが顕著になる。そこで、高電圧 IGBT スタックでは、複数の IGBT モジュールと平滑コンデンサ間を同じ距離になるように配置することで、配線インピーダンスの差異を抑え込んだ(図7)。また、図8に示すように盤への収納性を高め、省スペース化した。

(2) 高電圧化による容量拡大

フルブリッジ回路を2直列化して高電圧化することで

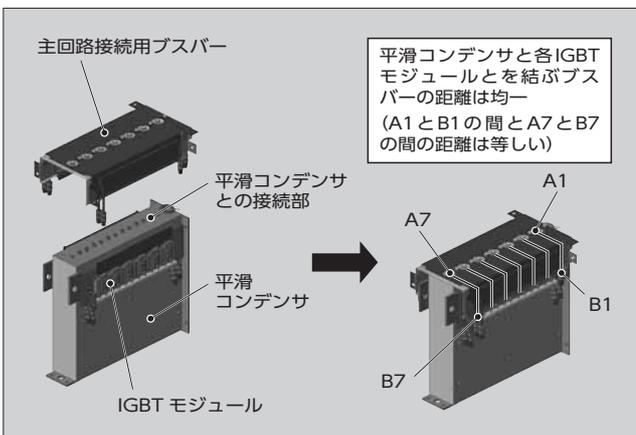


図7 IGBT モジュールと平滑コンデンサ配置

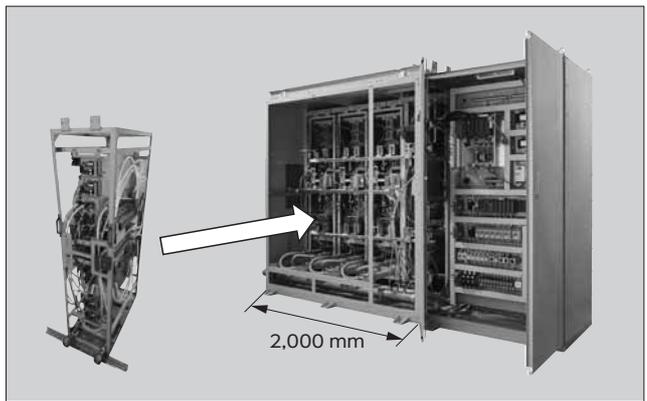


図8 高電圧 IGBT スタックと電源盤

同一数の IGBT モジュールでスタック 1 台当たりの電力容量を 2 倍 (750 kW → 1,500 kW) に拡大した。

(3) 電源盤の小型化

高電圧 IGBT スタックでは、複数台のスタックの並列接続によって生じる電流アンバランスを、最短距離で接続することにより十分に小さく抑え込んで、電流バランス用リアクトルを不要としている。これにより同じ電源容量で比較すると、図8に示すとおり、電源盤の幅を従来の 2,670 mm から 2,000 mm に小型化した。

(4) メンテナンス性の向上

操業率の観点から、生産現場の設備に故障が発生した時のダウンタイムをいかに短縮するかが重要である。特に、鑄造工場の上流工程の誘導炉設備が停止すると、鑄造工場全体の操業に大きく影響する。

そこで、復旧までの作業時間を短縮するための工夫の一つとして、質量が約 300 kg と重い高電圧 IGBT スタックにキャストを設けて、電源盤から容易に引き出せるようにしている。これにより、交換作業の時間を従来に比べて半分に短縮した。さらに、盤の正面側からだけで交換作業ができるようにしたので、従来必要であった盤の背面側のメンテナンススペースを不要にしている。

(5) 起動前自己故障診断機能

故障の未然防止と設備の安定稼働のためには日常点検が必要である。中でもインバータのゲート駆動回路などの抵抗や電圧の点検には専用の計測器や専門の技術が必要であった。そこで F-MELT100G シリーズには設備の起動前自己故障診断機能を新たに搭載した。この機能により、ゲート駆動回路や駆動用電源のセルフチェックが容易にできるため、日常の点検作業を軽減できる。

3.3 ダイレクトデジタル制御 (DDC) ユニット

溶解中の材料の熱抵抗変化により生じる急激な負荷インピーダンスの変動に対し、過電流や過電圧を避けるため、誘導炉用高周波電源は高速に応答する必要がある。これまでの製品では、マイコンを用いたデジタル制御だったため応答速度が遅く、急激な負荷変動への対応は難しかった。F-MELT100G シリーズでは、FPGA (Field Programmable Gate Array) とマイコンを組み

合わせたダイレクトデジタル制御（DDC：Direct Digital Control）および高速制御ソフトウェアを組み合わせることで、誘導炉用インバータ制御をデジタル化し、応答性を改善した。図9(a)に DDC ユニットの外観を示す。

(1) 有効電力算出機能の高速化

電力制御を高速化するための有効電力の演算方法について述べる。図9(b)の(i)、(iv)が動作時の出力電圧は+2,000Vである。(ii)、(iii)が動作時の出力電圧は-2,000Vである。次に、出力電流と出力電圧の瞬時値を図10のように出力電流と出力電圧を3μsごとに積算して電力を求め、その電力値を30msのローパスフィルタで平均化することで、平均電力を算出した。算出した平均電力を電力一定制御のPV（フィードバック）値とした。このFPGAでの演算により、マイコンでは1sかかっていた有効電力の演算が、30msでできるようになった。さらに、従来のアナログ制御では制御値をデータとして扱うことが

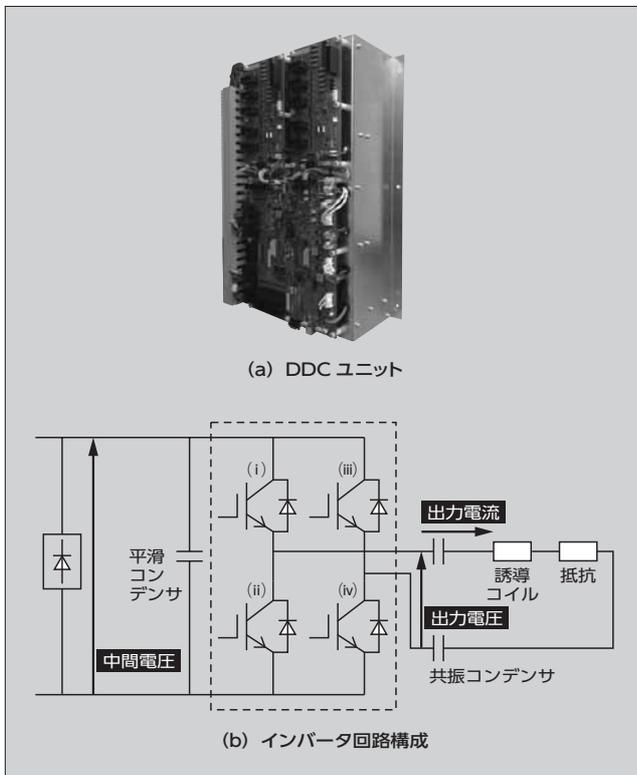


図9 ダイレクトデジタル制御（DDC）ユニットの特徴

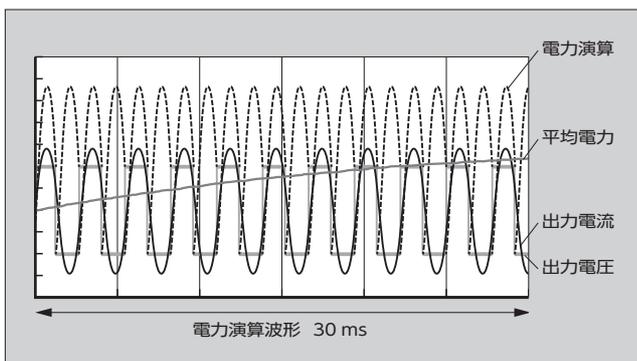


図10 高速電力演算の波形

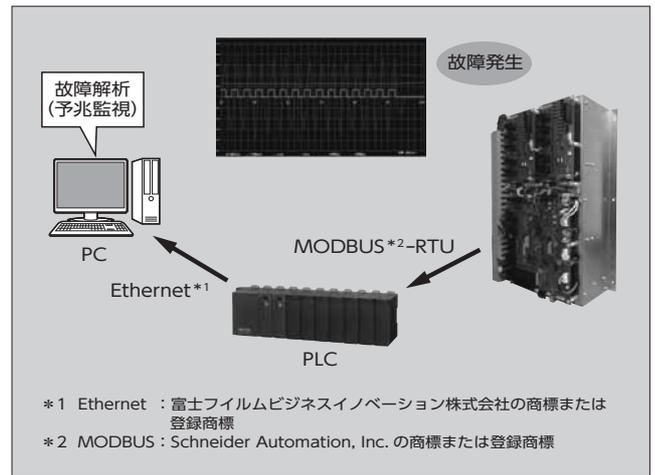


図11 遠隔監視機能（DDCユニットとPLC接続）

できなかったが、この DDC により PLC（Programmable Logic Controller）と通信によってデータとして蓄積し、運転状態の解析に利用できるようになった。

(2) RAS 機能

F-MELT100G シリーズでは、万が一故障が発生した場合に、原因調査に要する設備のダウンタイムを短縮するため、RAS（Reliability Availability and Serviceability）機能を DDC に搭載している。誘導コイルの短絡や地絡などの故障発生前後のインバータ出力電圧や電流、ゲート信号などの運転データを RAM に記録し、故障発生時には、自動的に故障発生前後の運転データを EEPROM（Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory）に保存する。PC を DDC ユニットの接続すると、故障発生前後の波形をモニタできるので、故障の原因が容易に特定できる。また、DDC ユニットには MODBUS-RTU を使った通信機能があり、図11に示すように PLC と接続することで遠隔から故障発生状況が確認できる。この機能により、サービス員が直接現場に行く回数を削減できる。故障情報が不足であった従来に比べ、原因特定の所要時間を大幅に短縮できるようになった。

(3) 複数炉の同時制御

高周波誘導炉の casting 工程では、複数炉の合計電力が契約電力の上限値を超えないよう各炉に電力配分を行う。F-MELT100G シリーズは、金属の溶解が完了した炉が出湯・ casting 中に保温運転を行い、他の炉で溶解運転を開始するといった状態の異なる複数の炉の電力を DDC が同時に制御する。これにより、下流の casting 工程の進捗状況に応じて、投入電力の変更が必要になった場合にも、各炉への電力配分を高速に制御することにより、効率的な操業に対応することができる。

〈注〉 MODBUS：Schneider Automation, Inc. の商標または登録商標

特集 省エネルギー・小型化と生産性向上に貢献するパワーエレクトロニクス

4 あとがき

高効率高周波誘導炉「F-MELT100G シリーズ」について述べた。今後は冒頭で述べた溶解工程のエネルギー消費削減に対し、ユーザ課題の解決に向けてIoTを活用した鋳造工場全体の生産効率アップ機能、設備の運転状況から異常を予知する予防保全機能を開発・商品化することで、鋳造業界の生産性・安定性向上に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 角田悦啓. “環境規制強化と鋳造業の課題”. 素形材. 2011, vol.52, no.2, p.2-7.



松永 和久

工業電熱用インバータの製品開発に従事。現在、富士電機株式会社パワーエレクトロニクス インダストリー事業本部開発統括部パワーエレクトロニクス開発センターオートメーション機器開発部マネージャー。



山本 勝也

工業電熱製品の生産業務に従事。現在、富士電機FA サービス株式会社工業電熱統括部長。



田中 克尚

工業電熱プラントのエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社パワーエレクトロニクス インダストリー事業本部プロセスオートメーション事業部工業電熱技術部主査。





*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。