

富士電機技報

FUJI ELECTRIC JOURNAL

2018
Vol.91 No.

1

特集 環境保護と生産性向上に貢献する
インダストリーソリューション



特集 環境保護と生産性向上に貢献する インダストリーソリューション

富士電機は、国際的な重要課題である地球環境保護のために、革新的エネルギー・環境技術の開発に取り組み、エネルギーを創る供給側と使う需要側の両面での社会貢献に努めています。

本特集で紹介するインダストリーソリューションの分野においては、パワーエレクトロニクスの技術を駆使して、エネルギーの需要側で環境保護と生産性の調和に取り組んでいます。

プラントを含めた生産工場のあらゆる分野で、自動化・省力化・省エネルギーに貢献するファクトリーオートメーション製品、環境の見える化により安全と安心を提供する計測機器・センサ、基幹交通システムである鉄道の安全な運行と環境負荷の低減に貢献する輸送システム製品を紹介します。

表紙写真

① JR 東日本 E235 系車両（山手線）、② ドアシステム、③ プログラマブルコントローラ「SPH3000D」、④ 水冷式高圧大容量インバータ「FRENIC4800VM6」、⑤ スペクトルサーベイメータ「NHC8」



目 次

特集 環境保護と生産性向上に貢献する インダストリーソリューション

〔特集に寄せて〕現代の重要課題とソリューション 藤本 康孝	3 (3)
----------------------------------	-------

〔現状と展望〕環境保護と生産性向上に貢献する インダストリーソリューションの現状と展望 友高 正嗣 ・ 鉄谷 裕司 ・ 松本 康	4 (4)
--	-------

ファクトリーオートメーション

IoT 技術とモーション制御技術による FA ソリューション 藤川 泰孝 ・ 吉崎 久之 ・ 豊田 謙郎	12 (12)
---	---------

過酷な環境下に設置可能な耐環境インバータ 「FRENIC-eFIT」 吉田 敏弘 ・ 田久保 拓 ・ 佐藤 圭輔	17 (17)
--	---------

プロセスオートメーション

ユーザの多様なニーズに応える水冷式高圧大容量インバータ 「FRENIC4800VM6」 宮下 勉 ・ 中村 暢佑 ・ 岩元 麗之	22 (22)
--	---------

技術伝承と生産性の向上に貢献するプラント運転支援システム 吉川 譲 ・ 渡辺 大介 ・ 井上 昭夫	26 (26)
--	---------

最新の海外棒鋼・形鋼圧延設備用電気品および駆動制御システム 小粥 史一 ・ 川口 鉄平	30 (30)
--	---------

環境・社会ソリューション

世界最小の船舶用サイクロン式 SO _x スクラバ 青木 幸男 ・ 豊角 浩之 ・ 高橋 邦幸	35 (35)
--	---------

水環境保護に貢献するバチルス菌排水処理システム 「FBS-Premium システム」 田口 和之 ・ 佐藤 匡則 ・ 井上 公平	40 (40)
--	---------

安定生産と収益性の向上に貢献する農業ソリューション「SmileAGRI」 吉田 仁 ・ 河村 賢	45 (45)
---	---------

環境保護に貢献する放射線管理ソリューション 中島 定雄 ・ 松本 巖 ・ 小西 英之	50 (50)
---	---------

輸送品質向上を目指した JR 東日本 E235 系車両（山手線）向け ドアシステム 辻村 勲 ・ 梅澤 幸太郎 ・ 藤田 憲司	55 (55)
---	---------

解 説

バチルス菌	60 (60)
-------	---------

略語・商標	61 (61)
-------	---------

Contents

Industrial Solutions Contributing to Environmental Protection and Productivity Improvement

[Preface] Today's Major Challenges and Solutions	3 (3)
FUJIMOTO, Yasutaka	

Industry Solutions Contributing to Environmental Protection and Productivity Improvement: Current Status and Future Outlook	4 (4)
TOMOTAKA, Masatsugu TETSUTANI, Hiroshi MATSUMOTO, Yasushi	

Factory Automation

FA Solution That Applies IoT and Motion Control Technology	12 (12)
FUJIKAWA, Yasutaka YOSHIZAKI, Hisashi TOYODA, Kenro	

"FRENIC-eFIT" Environmentally Resistant Inverter Designed for Harshest Installation Conditions	17 (17)
YOSHIDA, Toshihiro TAKUBO, Hiromu SATO, Keisuke	

Process Automation

"FRENIC4800VM6" Medium-Voltage High-Capacity Inverter with Water-Cooling System Designed to Meet Various User Needs	22 (22)
MIYASHITA, Tsutomu NAKAMURA, Yosuke IWAMOTO, Kazuyuki	

Plant Operation Support System That Helps Transfer Skills and Improve Productivity	26 (26)
YOSHIKAWA, Yuzuru WATANABE, Daisuke INOUE, Akio	

Latest Electrical Equipment and Drive Control Systems for Bar and Shape Rolling Mills Outside Japan	30 (30)
OGAI, Fumikazu KAWAGUCHI, Teppei	

Environmental and Social Solutions

World's Smallest SO_x Removal Cyclone Scrubber for Marine Vessels	35 (35)
AOKI, Yukio TOYOZUMI, Hiroyuki TAKAHASHI, Kuniyuki	

"FBS-Premium System" <i>Bacillus</i> Wastewater Treatment System Contributing to Water Environmental Protection	40 (40)
TAGUCHI, Kazuyuki SATO, Masanori INOUE, Kohei	

"SmileAGRI" Agricultural Solution for Stable Production and High Profitability	45 (45)
YOSHIDA, Hitoshi KAWAMURA, Satoshi	

Radiation Management Solutions Contributing to Environmental Protection	50 (50)
NAKASHIMA, Sadao MATSUMOTO, Iwao KONISHI, Hideyuki	

Passenger Door System for Series E235 Train of East Japan Railway Company (Yamanote Line) Designed to Improve Transportation Quality	55 (55)
TSUJIMURA, Isao UMEZAWA, Kotaro FUJITA, Kenji	

Supplemental Explanation

<i>Bacillus</i>	60 (60)
------------------------	---------

Abbreviations and Trademarks	61 (61)
-------------------------------------	---------

特集に寄せて

現代の重要課題とソリューション

Today's Major Challenges and Solutions

藤本 康孝 FUJIMOTO, Yasutaka

横浜国立大学工学研究院教授 博士（工学）



現代社会において地球温暖化問題と少子高齢化問題は、多重に対策を施して対応していかなければならない重要な課題である。前者はグローバルかつ時定数の長い問題で、後者は主に先進国で顕在化している問題である。

地球温暖化現象は産業活動などに伴って排出された温室効果ガスが主な原因であり、これは科学的見地から疑いようのないものと考えられている。その対策は温室効果ガスの排出量削減と貯蔵（炭素固定）の2種類に大別され、幅広い領域の技術と政策が必要となる。温室効果ガスの排出量削減は対策の時期が早ければ早いほど温暖化を抑制する効果が大きく、今後20～30年の対策が将来に決定的な影響を及ぼすことから喫緊の課題である。エネルギーの供給面では、ベースロード電源としての原子力発電の利用、熱効率改善のためのコンバインドサイクル発電の導入、コージェネレーションなどの分散電源の導入、風力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギーの導入などが対策として挙げられる。エネルギーの需要面では、産業用動力の電動化やガソリン自動車の電気自動車への置換など電化の推進、モータのインバータ化率の向上、ヒートポンプや誘導加熱技術の導入、モータや電力変換器の効率向上などが挙げられる。特にモータの消費電力は総電力消費量の5割以上を占め、そのインバータ化率は家庭用・業務用ともに低いレベルにとどまっていることから効果は非常に大きい。

少子高齢化問題は、先進国の中でも特に日本でいち早く顕在化している問題である。この問題には高齢者人口の増加に伴う社会保障の増大という側面と、生産年齢人口の減少に伴う労働力の減少という側面がある。前者についてはその対策として、高齢者の自立支援や医療従事者・介護従事者の負担軽減を目的とした機器の開発・普及が挙げられる。後者については労働生産性を向上させる自動化技術の適用拡大が挙げられる。

プロセス産業においては1930年代にPI調節計が登場し、以降プロセスオートメーション（PA）として発展してきた。時期を同じくして古典制御理論の整備も進み、1960年代には現代制御理論が登場した。1970年代にはDCSが登場し、アナログ計装からデジタル計装への転換が始まっ

た。また、加工組立産業においては1960年代にNC工作機械や産業用ロボットが登場し、以降ファクトリーオートメーション（FA）として発展してきた。1980年代以降にはCAD/CAMとの連携による設計・製造やCAEによるシミュレーション技術が登場し、CIMとして統合されてきた。1970年代にリレー回路の代替として登場したPLCは以降FAの中核的制御装置となり、1990年代には産業用ネットワークに接続され、監視制御を行うSCADAシステムと連携するようになった。SCADAがさらに上位の実行系のMESや計画系のSCP、ERPと連携することで名目上は統合的な管理が可能となった。このようなシステムを実現する上で課題となるのが、異なるベンダの機器やソフトウェア間の接続性の問題である。2011年に提唱されたIndustrie 4.0では、この接続性の問題を標準化により解決することを目的の一つとしている。近年では自動化技術の適用範囲は製造業のみにとどまらず、主に海外において物流、調剤、酪農などにおいて大規模な自動化システムが導入され始めている。

もともとこれらの自動化技術は生産コスト低減や生産量拡大、人員削減を目的として導入されてきたが、結果として精度向上や柔軟性向上をもたらすこととなった。生産工程従事者数は最近20年間で約2割しか減っていないが、一方で専門的・技術的職業従事者数は約3割増加している。自動化システムを実装するためのエンジニアリング業務やシステムインテグレーション業務の需要が増していることが理由の一つであると考えられる。総合的な生産性を向上させるためには、これら業務の効率化・省力化が必須である。しかし、近年注目されているディープラーニングなどの機械学習技術の適用は現時点では限定的である。自動化システムの実装においては垂直立ち上げや高い稼働率の実現が重要であり、過剰なカスタマイズはスピードが損なわれる可能性がある。また、中小企業への導入はもう一つの大きな課題となっている。さらには人材不足となっている技能工のスキルの自動化はブレークスルーが必要な技術課題であり、近年研究が活発化しているハプティクス技術がそのソリューションの一つになると考えられる。

環境保護と生産性向上に貢献する インダストリーソリューションの現状と展望

Industry Solutions Contributing to Environmental Protection and
Productivity Improvement: Current Status and Future Outlook

友高 正嗣 TOMOTAKA, Masatsugu

鉄谷 裕司 TETSUTANI, Hiroshi

松本 康 MATSUMOTO, Yasushi

① まえがき

人々の暮らしが快適・便利になるにつれ、地球温暖化が影響しているといわれる自然災害の増加、急激な経済発展による大気汚染の拡大やエネルギー需給の逼迫（ひっばく）など、地球レベルで困難な課題を抱えている。

一方では、AI、IoT（Internet of Things）、EV（Electric Vehicle：電気自動車）など近年話題になっている技術を駆使して、さらなる暮らしの向上、生産性の向上、経済の発展を成し遂げようとする国や地域レベルでの成長戦略の取組みが加速している。

富士電機は、エネルギー・環境技術をコアに“パワーエレクトロニクス”“発電”“電子デバイス”“食品流通”の四つの事業を通じて、安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献している。本稿では、パワーエレクトロニクス（パワエレ）を中心とした環境保護と生産性向上に貢献するインダストリーソリューションと題し、インダストリーソリューションの現状と展望を述べる。

② ファクトリーオートメーション分野

国内外ともに生産性を向上させるための製造設備・装置への投資が旺盛である。常にファクトリーオートメーション技術の進歩が図られ、多様な製品・システムを駆使することで製造業界は活性化している。過去においては、技術の高い先進国での伸長が目立つ業界であったが、近年では東南アジア、インド、中国といった地域との技術格差が急速に縮まっており、グローバルで高度な技術が求められている。

2.1 ドライブ分野

インバータや回転機を商材とするドライブ分野では、

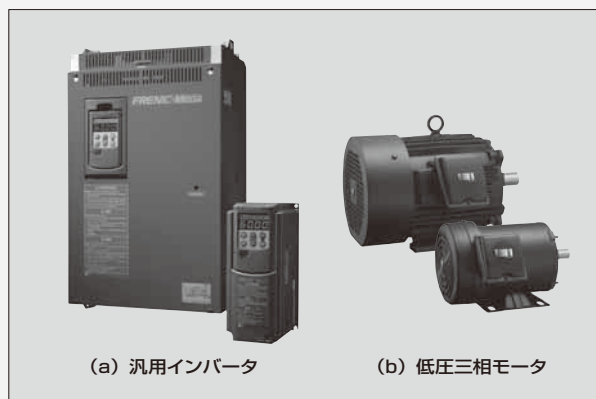


図1 汎用インバータと低圧三相モータ

多様化が進む用途に汎用機の機能や性能の向上で対応するとともに、主要な用途であるクレーン、エレベータ、空調などに対しては専用機を用意してきめ細かい対応を行っている。また、さらなる低損失と高精度制御が可能となる^{(*)2} SiCデバイスの実用化が活況で、これを搭載したインバータの技術も確立されつつあり、さらなる用途の拡大が期待されている（17 ページ「過酷な環境下に設置可能な耐環境インバータ「FRENIC-eFIT」」参照）。

富士電機は、“電子デバイス事業”を持っており、デバイス部門とドライブ部門の技術の結集で、より低損失、小型化、高性能なドライブ製品を開発できることが強みである（図1）。

2.2 モーション制御システム分野

サーボ、コントローラ、HMI 端末を商材とするモーション制御システム分野では、スマートフォンをはじめとする IT 機器、および EV が著しい普及を続けており、増産に対応するための工場や生産設備の自動化、半導体製造装置、工作機械などでの需要が増えている

(*)1 インバータ

三相交流モータへの電源周波数を自在に変えることにより、モータの回転数を制御する駆動装置である。

(*)2 SiC

けい素（Si）と炭素（C）の化合物である。3C、4H、6H など多くの結晶の構造多形が存在し、構造によって 2.2 ～ 3.3 eV のバンドギャップを持つワイドギャッ

プ半導体として知られる。絶縁破壊電圧や熱伝導率が高いなどパワーデバイスとして有利な物性を持つため、高耐圧・低損失・高温動作デバイスが実現できる。



図2 サーボシステム「ALPHA7」とモーションコントローラ「SPH3000D」

(図2)。

富士電機は、業界最高レベルの制御性能を持つモーション制御システムを各業界に展開している。その中で組立加工分野において、異常時に停止しない設備の実現に向けたデータ収集システムを提供している。1サイクルの生産に関わるあらゆるデータから設備異常や不良の要因を漏れなく収集するシステムであり、解析技術と診断技術を組み合わせることでさらなる生産性と安全性の向上、ロスコストの削減に貢献していく(12ページ“IoT技術とモーション制御技術によるFAソリューション”参照)。

③ プロセスオートメーション分野

プロセスオートメーションにおいては、駆動制御技術、計測制御技術および溶解炉・加熱装置などの工業電熱技術をコアとして、生産設備の安定稼動とエネルギー原単位削減を実現する機器・システムを展開している。

3.1 駆動制御分野

駆動制御分野では、鉄鋼・非鉄および一般産業向けに、高速ドライブ制御システムやシステム機器を納入している。

高速ドライブ制御システムでは、自動車や家電の生産集積地として期待されるインドネシアの製鉄会社向けに、圧延設備用電気品および駆動制御システムを納入した。制御パッケージの適用拡大による品質向上、海外パートナー製品の採用による現地サービスの拡大、生産設備の状況を時間軸と製品軸で収集・解析するシステムの提供、ならびに障害発生時の即応性を向上するための現地窓口の強化など、生産設備の安定稼動を行うためのエンジニアリングを基本計画の検討から納

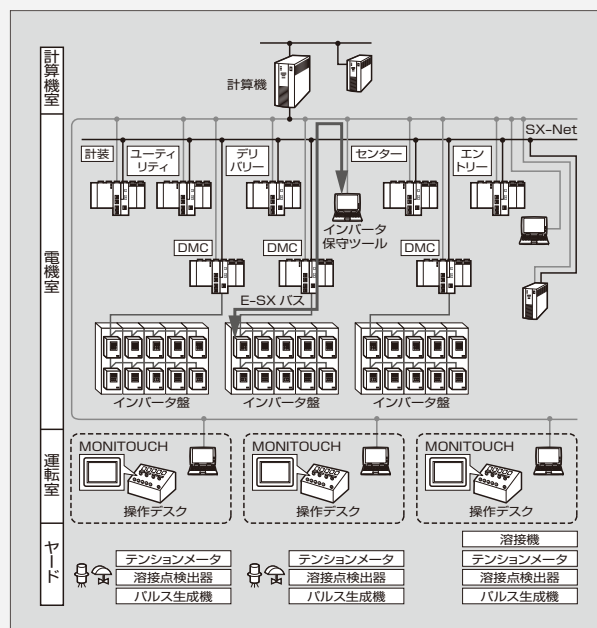


図3 高速ドライブ制御システムのシステム構成

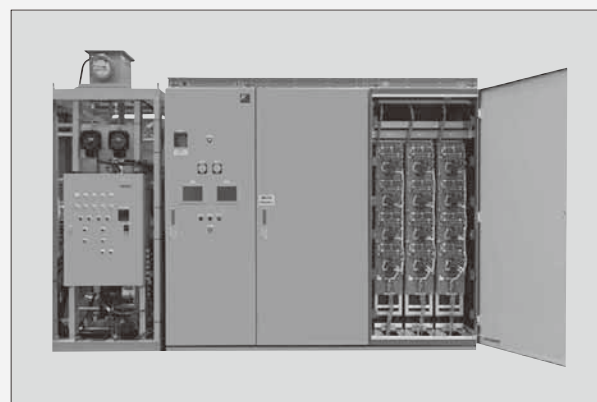


図4 中大容量ドライブシステム「FRENIC4800VM6」

入までの全工程にわたって実施し、制御システムに反映している。高速ドライブ制御システムのシステム構成を図3に示す(30ページ“最新の海外棒鋼・形鋼圧延設備用電気品および駆動制御システム”参照)。

システム機器では、産業用中大容量インバータの新機種「FRENIC4400VM6」と「FRENIC4800VM6」を製品化し、国内の鉄鋼・非鉄メーカー向けに納入した「FRENIC4800VM6」の外観を図4に示す。出力周波数の拡大、制御機能の追加・改善といった基本性能の向上だけでなく、ユーザ支援機能の拡充による使いやすさの向上も実現している。(22ページ“ユーザの多様なニーズに応える水冷式高圧大容量インバータ「FRENIC4800VM6」”参照)。

3.2 計測制御分野

計測制御分野では、化学、食品、ごみ処理およびセメントなどのプロセスオートメーション分野に、高度

な制御技術をコアとしてプラントエンジニアリングにおけるノウハウを駆使した事業を展開している。

(1) 化学業界

化学業界は、海外の巨大企業の再編や原材料の高騰などにより各社の競争がますます激しくなっており、高付加価値な製品を高効率、かつ、いかに低コストで生産するかが重要な課題である。このような背景から、生産におけるエネルギー原単位や原料などを最適化し、技術を結集した新しいスマート化された仕組みを構築することが望まれている。

富士電機では、従来の制御技術に加え、省エネルギー（省エネ）や設備異常の予見に関する提案を行っている。今後は、プラントシミュレータなど操業支援機能の拡充を計画している。

(2) 食品業界

食品業界は、他の産業に比べて消費が安定した市場である。しかし、原料価格の上昇やデフレにより収益を上げることが難しくなっている。また、人口の減少や個人ニーズの多様化により、多品種少量生産への対応がさらに進んでいる。生産現場では、高齢化による熟練者の退職が進み技術伝承の問題が挙げられている。このような多品種少量生産や技術伝承の問題に対応しつつ、複雑化したプラント運用への対応が求められている。

富士電機では、これまで新製品や製品改良に柔軟に対応できる機能を提供してきた。今後は、生産性向上につながる情報系システムの提案を行うとともに、現場ノウハウの集積や運用を支援できる機能の拡充を図っていく（26 ページ“技術伝承と生産性の向上に貢献するプラント運転支援システム”参照）。

(3) ごみ処理業界

ごみ処理業界では、循環型社会の形成と推進の観点から、CO₂ 削減やエネルギー回収を行う熱回収施設や先進的設備の導入が要求されている。ごみを計画的に処理するだけでなく、ごみ処理工場の外に蒸気や電気を継続的に供給するために、施設の安定かつ効率的な運用は不可欠になってきている。これまで各工場独自の運転・維持管理を行ってきたが、今後は一括収集・管理を行うことにより、最適な監視・解析・運用を行うための IoT 環境の構築が急務である。

富士電機では、このような状況に対応するため、電気・計装・計算機の統合システムを提供し、操業安定化のためにデータが容易に収集できるシステムを構築

した。今後は、収集した大量のデータを解析することにより、異常発生を抑制し、異常発生時には早期復旧を行うなどの総合支援が可能なシステムを提供する計画である。

(4) セメント業界

セメント業界は、循環型社会に貢献するため廃棄物や副産物の有効利用などの取組みが高まっている。また、制御のみならず、設備稼働管理や機器異常の予測などによる予防保全、ダウンタイムの短縮が求められている。

富士電機は、セメントプラント向けに原料調合制御システムやキルン制御システムを提供してきた。最近では通信回線を使い、製造データや品質データなどを本社部門にて一元管理することも多くなってきている。それらのデータを遠隔監視し、設備の劣化や異常兆候の予測など、運転支援に活用できるプラントの最適運用を提案している。

3.3 工業電熱分野

工業電熱分野では、省エネ性と環境の改善性を持つ電気加熱の需要が堅調である。富士電機は、環境保全とともに生産性向上に適した加熱方式である誘導加熱の用途拡大を図っている。さらに特徴として、被過熱物の直接発熱、急速加熱、高温加熱、局部加熱や均温加熱への対応、設定温度への容易な加熱、クリーンな電気エネルギーの利用などがあり、電磁界解析および熱解析の技術を用いて、装置の改善を図っている。

素形材産業分野は、多種多様な工業炉が使用されており、燃焼炉の占める割合は大きい。今後、CO₂ を削減するため化石燃料を使用する燃焼炉から電気加熱に置き換えが進み、誘導加熱技術への期待は大きい。

鋳鍛造などの鉄鋼プロセスでは、溶解炉や加熱炉の省エネを推進することが、コストダウンや合理化のポイントであり、さらには地球温暖化対策につながる。

富士電機では、これらを推進するためさまざまな取り組みを行っている。

誘導加熱の周波数帯は、50/60 Hz の商用周波から 1 MHz もの高周波領域まで広範囲にわたっている。パワエレ技術を駆使することでこれらの電源を実現してきた。サイリスタインバータが主流の誘導炉用電源では、業界に先駆け IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）を用いたインバータにより高効率化を実現している。高周波るつぼ形誘導炉の外観を図 5 に

(※ 3) サイリスタ

電圧や周波数を変換する回路で使用するスイッチング用の半導体素子の一種で、npnp の 4 層構造からなる。過電流耐量が大いという特徴はあるが、非導通状態にするために大電流が必要となり、損失が大いという欠点がある。

(※ 4) IGBT

Insulated Gate Bipolar Transistor の略である。ゲート部は MOSFET と同じ構造で、酸化物絶縁膜で絶縁されたゲート部を持つ電圧制御型デバイスである。MOSFET とバイポーラトランジスタの長所を生かしたものである。バイポーラ動作であるため伝導度変調

を用いることができるので、インバータへの応用に十分なスイッチング速度と高耐圧・低オン抵抗を両立できる。

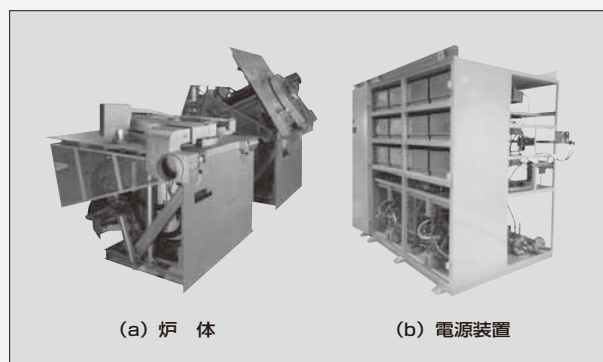


図5 高周波るつぼ形誘導炉

示す。

④ 環境・社会ソリューション分野

環境・社会ソリューション分野では、社会のさまざまな環境分野に貢献する製品群を、富士電機の保有する基盤技術を軸に独自性のあるコンポーネントとして創出してきた。現在、これらのコンポーネントをシステム化し、社会インフラや産業インフラなどに提供している。今後はIoTを応用し、データベース化による自己診断機能を付加することで、さらに幅広い分野における環境監視や設備保全および異常予知などの事業を拡大していく。

このように環境・社会ソリューション分野では、富士電機の環境計測ソリューションおよび環境監視ソリューションを提供することで、社会インフラや産業インフラに貢献していく。

4.1 船舶分野

船舶分野では、排ガス規制による環境保護への対応が急がれている。2020年に施行されるグローバル規制に対応した世界最小の「SO_x スクラバ」と、排ガス浄化システム（EGCS：Exhaust Gas Cleaning System）を供給する（図6）。コンパクトな大きさであることから船内配置が容易であり、新造船だけでなく既存船や就航船の改修（レトロフィット）にも適用可能であり、日本を含むアジア、欧州を中心に環境改善に寄与していく（35ページ“世界最小の船舶用サイクロン式SO_x スクラバ”参照）。

4.2 道路インフラ分野

道路インフラ分野では、図7に示したトンネル換気システムの他、高速道路用車両検知器、道路遠方監視制御システムなどのソリューションシステムを提供し

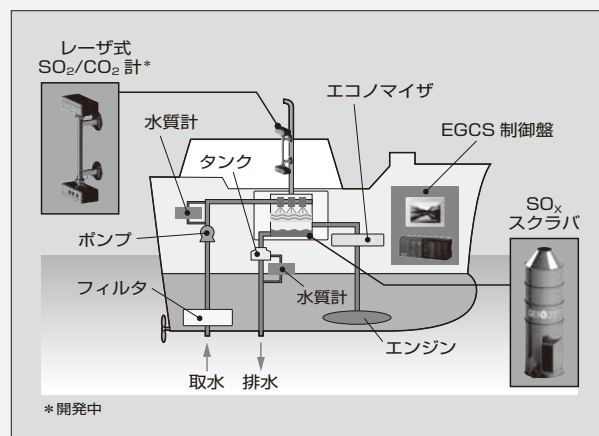
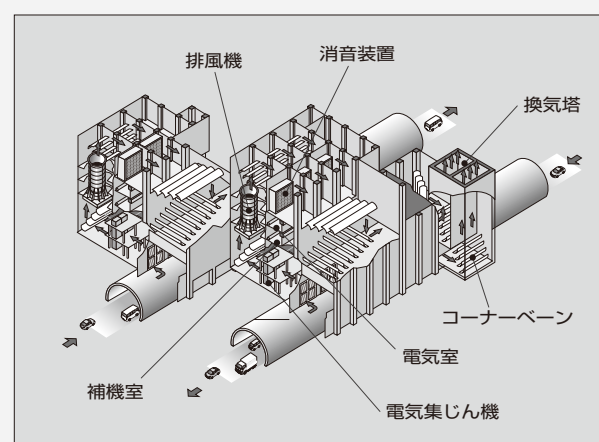
図6 SO_x スクラバと排ガス浄化システム

図7 富士電機のトンネル換気システム

ている。その中でトンネル用電気集じん機やジェットファンなどのトンネル換気システムは、トンネル周辺の大気環境を改善するために、全国の道路トンネルで貢献している。富士電機の電気集じん機は、放電線が断線しにくい対策を施した放電板を用いた交流電気集じん方式を採用し、ナノオーダより大きな粒子を高効率に集じんすることが可能である。これにより、集じん機下流壁面の汚染を防止するなど道路環境の改善に寄与している。

4.3 産業分野

産業分野では、富士電機の特徴的な技術として産業用排水処理ソリューションおよび植物工場プラントの農業ソリューションがある。

(1) 産業用排水処理ソリューション

産業用排水処理ソリューションを図8に示す。産業用排水処理ソリューションでは、独自の排水処理用パチルス菌^(*)「FBS-Premium」を活用したパチルス菌排

(*) パチルス菌

60ページ「解説1」“パチルス菌”を参照のこと

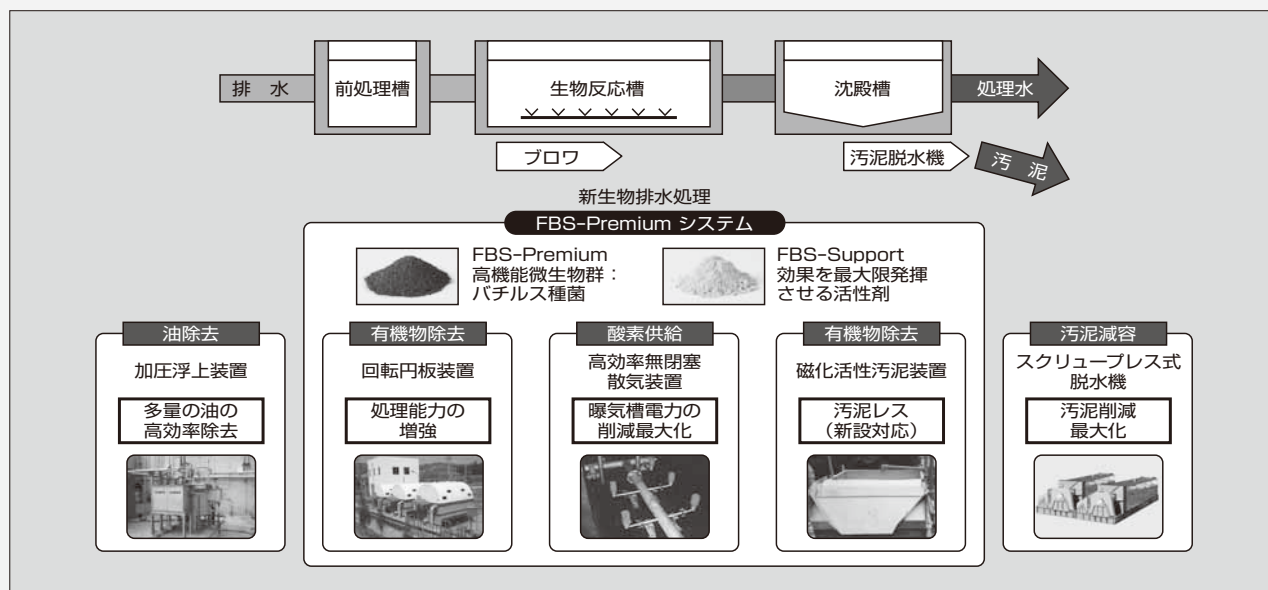


図8 富士電機の産業用排水処理ソリューション

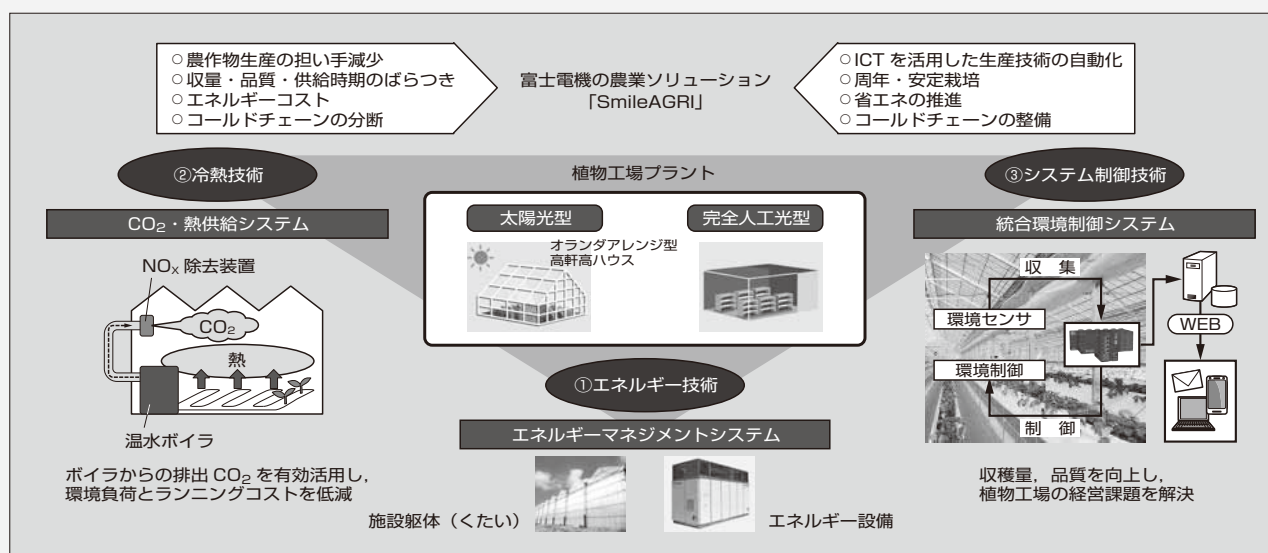


図9 富士電機の農業ソリューション

水処理システム「FBS-Premium システム」を提供している。このバチルス菌を排水処理設備に投入することにより、有害な薬剤などを使用することなく処理能力を向上させ、処理水の浄化と悪臭を抑制する。この技術は、既存の排水処理システムを省エネ型に変えるだけでなく、ランニングコストを低減する。昨今、「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法」に基づいた「再生可能エネルギー固定価格買取制度」(FIT: Feed-in Tariff)を背景に、畜産系廃棄物を利用したバイオガス発電プラントが増加しつつある。FBS-Premium システムは、バイオガスを作る過程で出る消化液の処理課題を解決し、かつランニングコストの削減につながる消化液の排水処理システムである^(注)。これまでの実績と高い品質により、省

ランニングコスト、省エネ、省スペースを実現した。産業利用した排水をクリーンな状態で自然に戻し、貴重な水資源と自然保護につなげ、環境負荷の低減に寄与する(40 ページ「水環境保護に貢献するバチルス菌排水処理システム「FBS-Premium システム」」参照)。(2) 農業ソリューション「SmileAGRI」

富士電機は、これまでに培った電気・熱エネルギーやプラント制御の技術とノウハウを生かし、農業ソリューション「SmileAGRI」を提供している(図9)。このソリューションは、植物工場プラントの構築に最

〈注〉「FBS-Premium」をコアとした応用技術で国立環境研究所・日刊工業新聞社主催 平成 29 年度環境賞「優秀賞」を受賞

適な各種設備や機器、プラントシステムの設計とエンジニアリングにより構築されている。特に、モデルプラントをベースに CO₂・熱供給システムや計測機器、コントローラなどを活用した環境制御システム、国内規格に合わせた施設を用いて運用している（45 ページ“安定生産と収益性の向上に貢献する農業ソリューション「SmileAGRI」”参照）。今後、伸長が期待される植物工場プラントは施設のコスト低減、エネルギー効率化を進めるとともに、育成対象の安定生産と生産性の向上を図ることが重要である。

4.4 放射線機器・システム分野

放射線機器・システム分野においては、原子力関連施設の内部や管理地域、その周辺地域における、放射線量および放射能に関する環境監視活動に貢献する放射線管理システムが導入されている。富士電機は、国内の放射線計測機器やシステムのメーカーとして、最も長い歴史と実績を持っている。その製品やシステムは、原子力施設をはじめ研究所、病院、大学などで、幅広い分野で採用されている。放射線管理システムを図 10 に示す。代表例として、放射線管理区域内の労働者の外部被ばくや内部被ばくを測定・管理する個人被ばく管理システム、発電所敷地内外の空間 γ 線量率やダスト濃度を測定・監視する環境放射線モニタリングシステム、ならびに電力会社や病院、大学向けの放射線機器、放射線管理システム、サーベイメータなどがある。震災後の復興や復旧活動における環境測

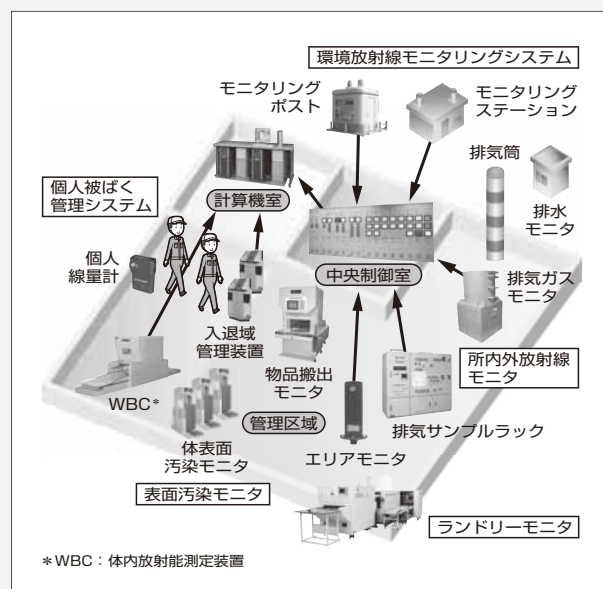


図 10 富士電機の放射線管理システム

定の経験を生かして、IoT 環境モニタによる環境監視サービスをはじめ、他社に先駆けてシンチレータ材料による化ストロンチウムを採用した高分解能かつ小型・軽量のスペクトルサーベイメータや、浮遊じんあい中の放射能濃度を連続監視する大気モニタ、震災復興関連施設の焼却施設向け排ガス放射性物質濃度監視装置、土壌濃度分別装置などを新たに開発している。放射線機器システムは、放射線管理によって人と環境に安全を提供するために、各種放射線を正確かつリアルタイムに計測している（50 ページ“環境保護に貢献する放射線管理ソリューション”参照）。

4.5 IT ソリューション分野

業務環境の改善や生産性を向上する IT ソリューション分野には、図 11 に示すように、電子自治体向け電子行政サービスシステム、ワークフローパッケージ「ExchangeUSE」、データベース検索ソフトウェア「軽技 Web」などがある。

電子行政サービスは、行政業務の効率化や住民サービスを高度化するために、行政内部事務を効率化したリスピードアップしたりと“いつでも・どこでも”の身近な自治体サービスを支援する。利用法人の保有設備で運用する自庁型（オンプレミス）と、インターネット経由のクラウドサービスとして機能を提供する ASP 型（SaaS）がある。さらに、複数の地方自治体向けアプリケーションベンダの行政業務機能をイン

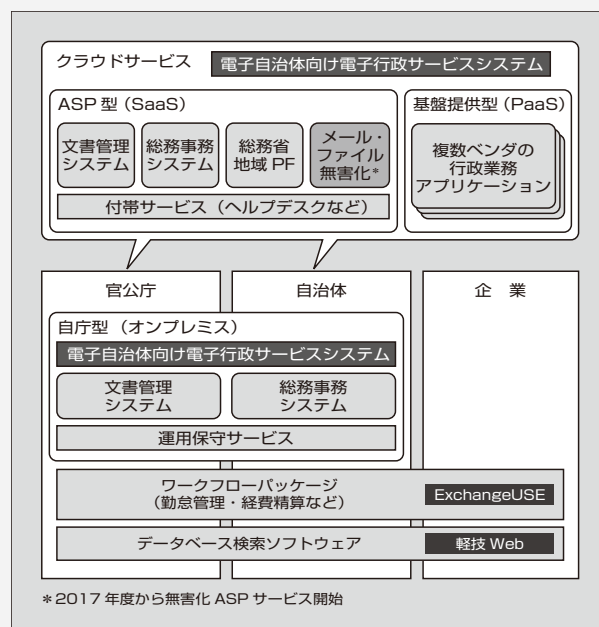


図 11 富士電機の IT ソリューション

（* 6）シンチレータ

シンチレータ（scintillator）は、放射線に励起されることにより蛍光を発する特性を持った物質であり、放

射線を検出する素子として利用される。シンチレーション検出器は、シンチレータに光電子増倍管などの光検出器を結合することにより、放射線による蛍光を

電気信号に変換し、電流パルスとして取り出すものである。代表的なシンチレータとしては、NaI（TI）シンチレータおよび CsI（TI）シンチレータがある。

ターネット経由で提供するために、アプリケーション実行プラットフォームを提供する基盤提供型 (PaaS) として、“クラウド・モール”を運営している。ExchangeUSE は、全ての企業をはじめとした事業体に共通する勤怠管理や経費精算などの業務を、柔軟なカスタマイズに応えられる基本機能としてパッケージ化し、比較的低予算で顧客に合わせた生産性向上を実現する国内ワークフローのシステムである。軽技 Web は、データベースの汎用検索、非定型検索を通じて、必要なデータを必要なときに必要な形で素早く集計して提供するものである。顧客の業務や情報活用を活性化する EUC (End User Computing) を使用し、生産性を高めるビッグデータ時代の BI (Business Intelligence) ツールである。

4.6 輸送ソリューション分野

世界的に都市化が急速に進展する中で、1950 年に 30% であった都市人口比率は、2050 年には 66% になると予想されている⁽¹⁾。主に発展途上国の都市部では過度な交通集中による渋滞が頻発し、排ガスからの CO₂、NO_x などによる環境破壊が進行している。

この中で鉄道は、人流・物流・大気汚染抑制の面で環境に優しい交通機関として注目されている。単位輸送量 (人・km) 当たりのエネルギー消費量を比較すると、鉄道は、自家用車の約 1/6、航空機の約 1/4 である⁽²⁾。

富士電機は、鉄道車両を走行させる駆動システム、車両に安定的な電力を供給する補助電源装置、旅客の安全・安心を支えるドアシステムを統合的に供給できる国内唯一のメーカーであり、環境に優しい鉄道システムの日々の安全・安定輸送・快適な運行に大きく貢献している。

富士電機の鉄道車両用装置は、安全・安定輸送・快適な運行に欠かせない信頼性において鉄道事業者から高い評価を得ており、社会生活の利便性と質の維持・向上に貢献している。さらに、赤道直下の高温多湿地域や砂漠地域から亜寒帯まで、さまざまな環境で多くの実績を持っている。

(1) 駆動システム

鉄道車両を走行させるための重要な装置である高速車両用の駆動システムは、主に架線から供給される高電圧の電源を降圧する主変圧器、速度や運転指令に応じて、降圧した電源を適切な交流電源に変換する主変換装置、ならびに変換した交流電源により駆動力を発生させる主電動機から構成される。

富士電機は、JR 東海 (東海旅客鉄道株式会社) と共同で新幹線向け主変換装置を開発している。開発した主変換装置には、SiC (炭化けい素) を用いたパワー半導体モジュールを採用している (図 12)。従来の Si-IGBT パワー半導体モジュールに対して、パワーユニットを約 20% 小型化し、約 8% 軽量化した。図 13 に、主変換装置の外観を示す。小型・軽量化した主変換装置は、車両の重量低減に寄与し、製造から廃棄までのライフサイクルにおける環境負荷を低減している。また、軽量化や SiC デバイスの採用による回生 (ブレーキ時の発電) 可能電力の増大により、車両走行に伴うエネルギーを削減して環境保護に貢献している。2015 年に現車試験による評価を開始し、約 2 年間にわたり不具合なく良好な評価結果が得られた。高速鉄道用の駆動システムに、SiC モジュールを採用した走行試験は世界初である。

現在は、評価試験結果を踏まえて、図 14 に示す次

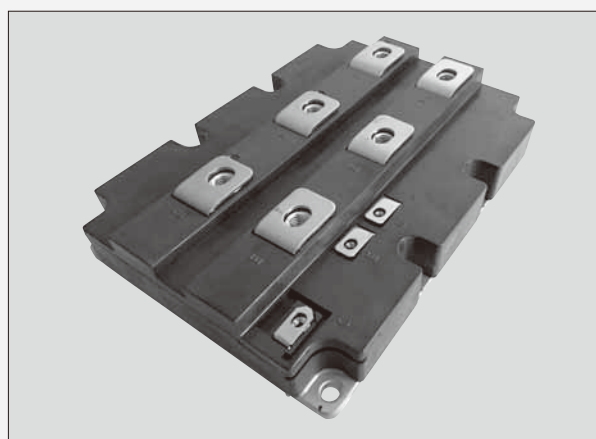


図 12 SiC パワー半導体モジュール



図 13 主変換装置

(※ 7) ASP 型 (SaaS)

ASP は Application Service Provider の略であり、SaaS は Software as a Service の略である。インターネット経由で必要な機能やサービスを利用できるよう

に提供する仕組みのことである。

(※ 8) PaaS

PaaS は Platform as a Service の略であり、インター

ネット経由でアプリケーション実行のプラットフォームを提供する形態のことである。



図 14 次世代新幹線車両

世代新幹線車両の量産先行車両向けに、主変圧器や主変換装置、主電動機を開発している。2018年に量産先行車両を使った現車試験を実施し、実用化に向けて最終確認を行う予定である。今後は、営業運転に向けて製品化を推進する。

(2) 補助電源装置

補助電源装置は、鉄道車両の安全・安定輸送・快適な運行のために、各種制御機器およびブレーキなどに使用される電動空気圧縮機に電力を供給している。また、快適な車内空間のために、旅客用情報提供装置や空調装置にも電力を供給している。

富士電機は、主に都市圏輸送用の直流電車用大容量補助電源装置、信頼性をさらに高めた待機二重化装置、新交通システムなどの小型車両向け高周波リンク式装置の他、交流電車および気動車用装置などの幅広い用途に対応した製品を取りそろえている。

また、電力を平滑する機能を担うフィルタコンデンサは、従来のオイルコンデンサから乾式フィルムコンデンサに替えるなど環境負荷が少ない部品を使用している。

(3) ドアシステム

ドアシステムは、鉄道車両の中でも乗客に近い場所で乗客の安全を守る装置である。加えて、都市部の通勤電車や地下鉄などの混雑地域では円滑な乗降のための開閉動作や各種検知機能により、ドアの開閉動作に伴う安全性を向上するとともに、車両運行の定時性の維持に貢献している。

富士電機は、ドア制御系全体の待機冗長方式や電源冗長方式を備えたドアシステムを提供しており、万一の不具合の際にも機能が低下することなく安全な開閉動作を可能にしている。故障検知機能や自己診断機能は、システムの異常や故障を素早く検知して影響範囲を極小化するとともに、修繕対応や原因調査を支援している。点検機能は、機能の安全性と健全性を確認するとともに、顧客の予防保全活動のために機器情報を提供している。戸挟み検知機能は、安全性の向上はも

ちろん、戸挟みの発生していないドアを分離した開閉動作を行うことにより、出発遅延を低減している。

2017年5月22日には、最新の電子デバイスや戸挟み検知技術などを適用したドアシステムを搭載し、JR東日本（東日本旅客鉄道株式会社）のE235系山手線量産車両が営業運用を開始した。今後、本製品をプラットフォームとした製品を、地下鉄や新交通システムなどの国内外の鉄道車両に展開していく予定である（55ページ“輸送品質向上を目指したJR東日本E235系車両（山手線）向けドアシステム”参照）。

5 あとがき

富士電機が取り組んでいる環境保護と生産性向上に寄与する代表的な取り組みを取り上げ、現状と展望について述べた。

富士電機はこれからも環境との調和を図り、地域社会のよき企業市民として、地域、お客さま、パートナーとの信頼関係を深め、誠実にその使命を果たしていく所存である。

参考文献

- (1) World Urbanization Prospects [highlights] 2014 Revision. p.7, United Nations, <https://esa.un.org/unpd/wup/publications/files/wup2014-Highlights.pdf>, (参照 2017-12-15).
- (2) 国土交通省交通関連統計資料集、Ⅲ. 交通関連エネルギー、Ⅲ-3. 交通関連エネルギー情勢、エクセルシート、ウ エネルギー消費原単位（ア）旅客, <http://www.mlit.go.jp/statistics/kotsusiryo.html>, (参照 2017-12-15).



友高 正嗣

富士電機株式会社執行役員常務、パワエレシステム事業本部長。



鉄谷 裕司

富士電機株式会社パワエレシステム事業本部副本部長、ファクトリーオートメーション事業部長。



松本 康

富士電機株式会社パワエレシステム事業本部開発統括部長。

IoT 技術とモーション制御技術による FA ソリューション

FA Solution That Applies IoT and Motion Control Technology

藤川 泰孝 FUJIKAWA, Yasutaka

吉崎 久之 YOSHIZAKI, Hisashi

豊田 謙郎 TOYODA, Kenro

スマートマニュファクチャリング技術の急速な発展を背景に、製造業における FA ソリューションにおいて、さらなる生産性の向上や付加価値の創出・最大化が求められている。富士電機は、IoT 技術を駆使し、自動車製造加工ラインにおける生産性の向上やコストの削減が可能となる品質トレーサビリティソリューションを実現した。さらに、食品工場の包装ラインにおいて、高性能コントローラを駆使したモーション制御技術を開発した。これにより、包装速度に関係なく安定したシーリングが可能となり、包装機システムの最適制御を実現した。

The rapid development of smart manufacturing technologies has created the need to further improve productivity and create and maximize added values as FA solutions for the manufacturing industry. Fuji Electric has made use of IoT technologies to achieve quality traceability solutions, capable of improving productivity and reducing costs on automobile manufacturing assembly lines. In addition, we have also developed a motion control technology that makes use of high-performance controllers for the packaging lines of food factories. Those technologies make it possible to achieve stable sealing regardless of the packaging speed, as well as optimize control for packaging machine systems.

① まえがき

近年の産業界は、ドイツにおける Industrie 4.0 や米国の IIC (Industrial Internet Consortium) など産業変革への急速な流れの中、日本においても IoT 推進コンソーシアムが設立されるなどスマートマニュファクチャリングに向けた動きが世界的に活発化している⁽¹⁾。

この背景には、IoT (Internet of Things) やビッグデータ解析、人工知能 (AI) などの技術の加速的な発展が挙げられる。製造業における関心が相当高まっているものの、これらの技術を具体的にどのように活用して生産性向上や付加価値の創出につなげるかといった新たな課題に直面している⁽²⁾。

本稿では、この課題解決の事例として富士電機の持つ IoT 技術を駆使した加工ライン向け品質トレーサビリティソリューションと、業界最高レベルの制御性能を持つモーション制御技術による FA ソリューションについて述べる。

② 自動車製造加工ライン向け品質トレーサビリティソリューション

2.1 背景

自動車市場はグローバルに成長を続けている。近年では、電動化と自動運転技術への対応によって開発工数の増大などによる国内外の人手不足、頻発する品質問題への対応など、これまで以上の生産性向上が求められている⁽³⁾。自動車製造現場における生産性向上の課題は、不良撲滅とコスト削減である。表 1 に示すとおり、不良をなくすための品質向上と、不良発生時における問題解決のリードタイム短縮といった要件の実現が急務である。

これらの要件を実現するためには、生産や稼働、品質、

表 1 自動車製造現場における課題解決への要件

項 目	要 件
不良撲滅に求められる要件	良品条件の把握と不良発生メカニズムの明確化による品質向上
	4M (人・機械・材料・方法) の変化点管理
コスト削減に求められる要件	日常点検工数、保全工数、品質チェック工数の削減
	チョコ停止、突発故障停止削減
	ツーリングの寿命向上
	問題解決のリードタイム短縮

表 2 ビッグデータ取扱い時の主な課題

課 題	内 容
必要データの特定	加工中、待ち時間、メンテナンス時間など全ての時間帯でデータを収集するため、データの蓄積が進むほどデータ量が膨大となり、必要データを検索する手間が大きい。
収集データの加工	データ活用方法が明確になっていないことが多く、さらにデータを収集してもフォーマットや収集周期が統一されていない。そのため、分析時にはデータ加工が必要となり、蓄積された膨大なデータの加工がユーザの多大な負担となる。
収集データの選定	収集データの選定時には、トライ&エラーにより収集装置へのデータ追加・削除が必要となる。しかし、収集装置への対象データの追加/削除は簡単にできず、メーカーに頼むと高額な費用が発生する。

保全に関わる膨大なデータ収集が行われている。しかし、ユーザ自身が効果的に活用と分析を行うことは困難であるため、有効活用されない情報があふれることとなる。このようなビッグデータを取り扱う上での課題の一例を表 2 に示す。

富士電機の加工ライン向け品質トレーサビリティソリューションは、これらの課題を解決するために、各製品の加工中のデータ収集機能、データ分析を前提としたデータ収集機能、ユーザでもできるメンテナンス機能を持ち、

ユーザの生産性向上に貢献する。

2.2 ソリューション概要

富士電機が提供する品質トレーサビリティソリューションの概要を図1に示す。大きくは、製造設備やセンサ類を通信のI/Oで接続して生データを収集するデータ収集部と、これらのデータを蓄積するデータベース用のサーバ部に分けられる。ユーザが設定した必要なデータを必要なタイミングで収集し、蓄積データのトレースが必要になった際は簡単に検索できる仕組みを提供する。

(1) データ収集部

(a) データ収集機能

加工ラインのコンピュータ数値制御（CNC：Computer Numerical Control）やプログラマブルコントローラ（PLC：Programmable Logic Controller）、圧力や振動などの各種センサから、1サイクル（対象ワー

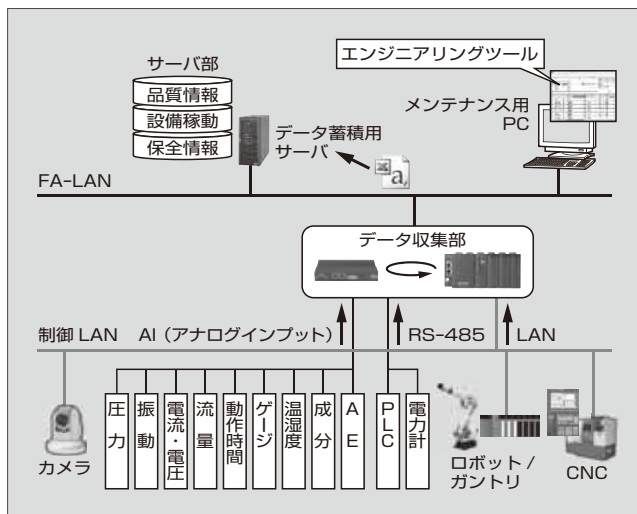


図1 品質トレーサビリティソリューションの概要

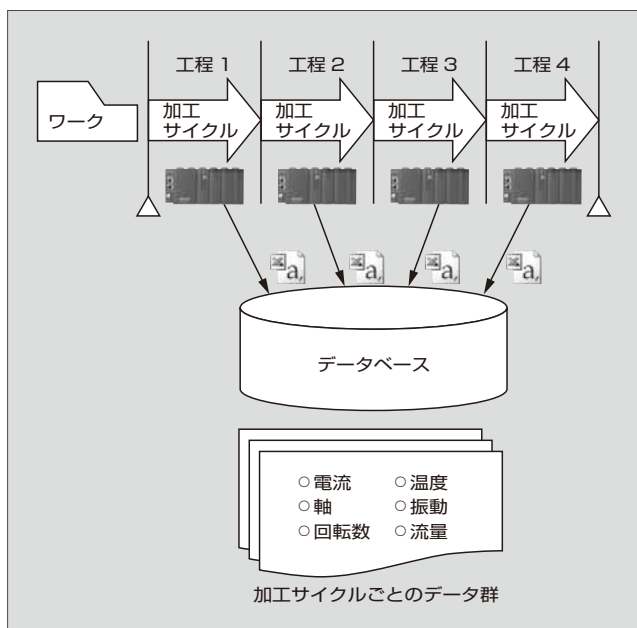


図2 データ収集機能のイメージ

クを加工する開始から完了までの周期）のデータを収集する。そして、図2に示すように1サイクル単位で収集データをひとまとめ（ワンパッケージ）にする機能を持っている。

これにより、データを常時収集する方式と比較すると、必要なデータを必要なタイミングで収集できるためデータ量を減らすことができる。その結果、分析時のデータの特定制や加工の手間が少なくなり、ユーザの負担を大幅に削減できる。

(b) カメラサーバ連携機能

4M（人・機械・材料・方法）の変化点管理のため、カメラで撮影した動画を振動や電流などのアナログデータとともに一元的に管理したいというニーズがある。しかし、カメラは主にカメラ用システムで管理されており、センサから収集されるアナログデータとは管理システムが異なるため、一元的に管理できないという課題があった。

本ソリューションでは、データ収集端末とカメラサーバを連携することで、図3に示すように現場の発生事象をカメラによる録画映像とアナログデータの推移を同期させてモニタできる仕組みを提供している。

(c) エンジニアリングツール

エンジニアリングツールは、システムのマスタメンテナンスやデータの追加、削除を行うものである。本ソ

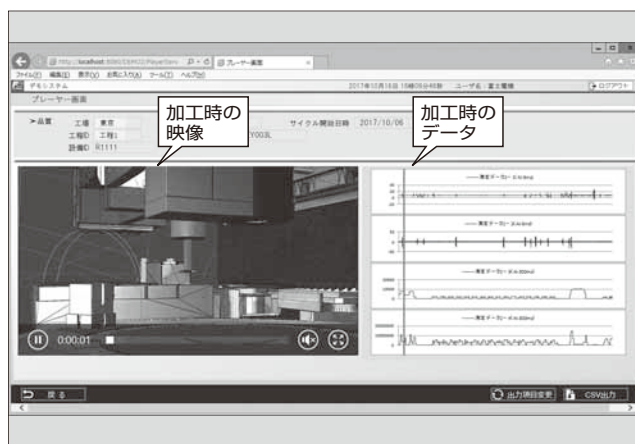


図3 カメラサーバ連携機能の画面例

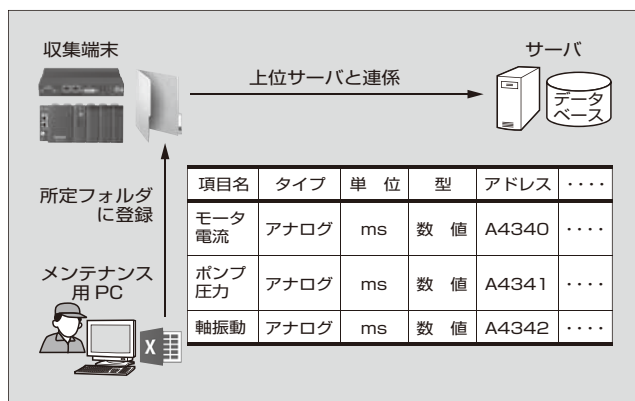


図4 エンジニアリングツールの概要

ソリューションでは Excel^{〈注〉} を活用したエンジニアリングツールを用意しており、その概要を図 4 に示す。メンテナンス用の PC 上に準備したエンジニアリングツールから、収集データの項目名、データタイプ、格納アドレスなどを定義し、収集端末の所定フォルダに登録するものであり、課題であったユーザによる収集データの追加や変更を簡単に行うことができる。

(2) サーバ部

(a) トレーサビリティ検索機能

製造設備の稼動情報と製品の品質情報は、密接に関連している。そのため、ユーザは生産ラインの問題発生時、稼動情報と品質情報を同時に確認することが多い。しかし、品質情報は製品単位で、稼動情報は設備単位で管理されており、情報の検索に手間がかかっていた。本ソリューションでは、設備軸とワーク軸の両方から検索可能な仕組みを提供して、ユーザの情報検索作業を軽減している。

(b) データサマリー機能

蓄積されたデータ量が膨大であるため、異常要因の追跡に多くの手間が必要とされた。本ソリューションでは、計測値が保全しきい値を超える異常や計測項目の最大値、最小値、平均値をサーバのアプリケーションを用いて検出し、その上でトレーサビリティ検索画面上に表示する。これにより、ユーザのデータ確認作業の軽減を支援する。

表 3 「MICREX-OnePack」の概略仕様

項目	概略仕様
電源	単相AC100～240V
外形寸法(mm)	W275×D130×T90 (従来品に対して体積95%低減)
IO	AI*1×16ch, DI*2×1ch, DO*3×1ch
通信	Ethernet 100Mbps/s 2ch (上位機器、設備) Ethernet 1Gbps/s 1ch (表示) 汎用通信 (RS-232C 1ch/422 2ch/485 1ch) 計4ch増設ポート
内蔵プロトコル	三菱PLC, FOCAS II
データ保存	SDHC規格カード対応 (32GB対応)

*1: AI (アナログインプット)
*2: DI (デジタルインプット)
*3: DO (デジタルアウトプット)

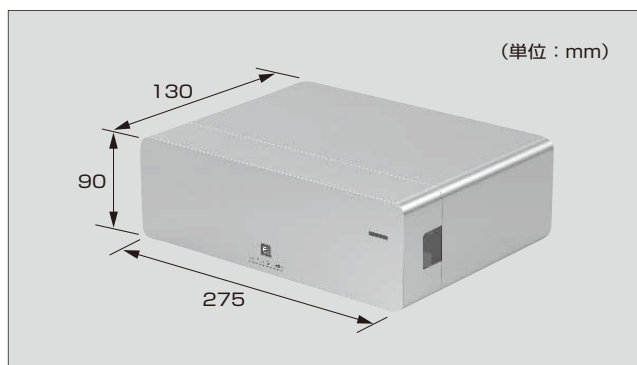


図 5 「MICREX-OnePack」

〈注〉 Excel: Microsoft Corporation の商標または登録商標

2.3 設備情報収集システム「MICREX-OnePack」の開発

富士電機はデータ収集部の小型化や低価格化を行うため、2.2 節で述べた機能を集約した設備情報収集システム「MICREX-OnePack」を開発している。従来の富士電機製品の収集装置部に対して、体積を 95% 低減する。概略仕様を表 3 に、外観を図 5 に示す。

③ モーション制御技術による包装機制御

3.1 背景

中国やインドをはじめとしたアジア地域では人口増加に伴って食料品の需要が増え、それに従い食料品を包装する機械の需要も大きく伸びている。この地域では単位時間当たりの包装能力を向上させるため、機械式からサーボ式に変更するなどして各包装機メーカーが性能改善を進めている。

3.2 縦型ピロー包装機の制御

(1) 縦型ピロー包装機のシステム構成

縦型ピロー包装機の基本的なシステム構成を図 6 に示す。

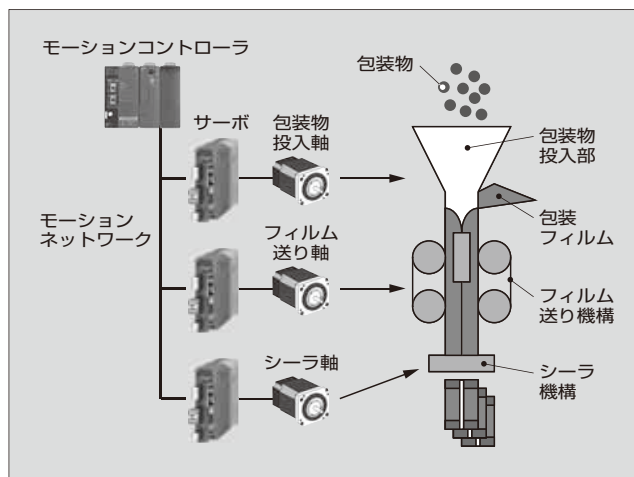


図 6 縦型ピロー包装機のシステム構成

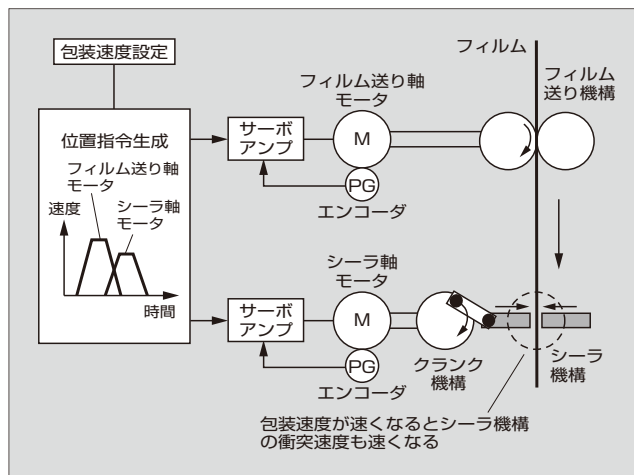


図 7 従来制御方式の概略

縦型ピロー包装機とは、包装フィルムをフィルム送り機構によって上から下へ縦方向に送り、主に重力を利用して包装物をフィルム内に投入したのち、加熱したシーラ機構によって袋の口を密閉し包装する装置である。

(2) 従来制御方式の課題

従来制御方式の概略を図 7 に示す。フィルム送り軸モータとシーラ軸モータは、一般的に台形加減速により位置が制御されており、各軸の回転速度は包装速度に応じた比率で決定されている。包装速度を上げるとシーラ機構の衝突速度も速くなり、衝撃が大きくなる。そのため、機械全体が振動して安定した品質のシーリングができなくなるという課題があった。

(3) モーション制御の応用

富士電機の PLC 「SPH シリーズ」とサーボシステム

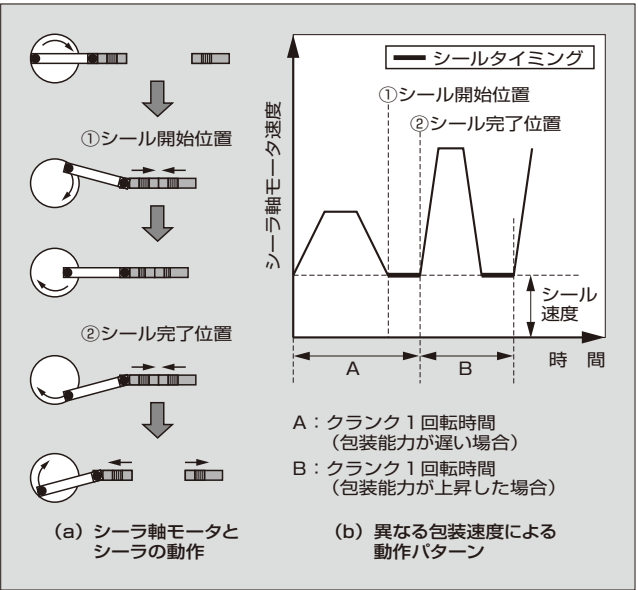


図 8 モーション制御の概略

「ALPHA5」を使用した包装機制御を、図 8 に示す。

このモーション制御では、フィルムをシールするときのシーラ軸の回転速度を一定とし、それ以外の区間の速度を変化させることで包装速度を変更し、包装速度に関係なく安定したシーリングを可能とした。

この制御を導入することにより、インド地域の包装機メーカーでは、従来に比べて包装速度を大幅に改善している。

3.3 モーション制御ファンクションブロックと「SPH3000D」

(1) モーション制御ファンクションブロック

前述のようなモーション制御プログラムを多くのユーザーに使用していただくため、富士電機では SPH シリーズに適用できるファンクションブロック (FB) を開発し、アジア地域のユーザーを中心に展開を図っている。表 4 にモーション制御の FB 一覧を示す。

表 4 モーション制御 FB の一覧

No.	FB名称	制御内容
1	VM00_VM	同期制御のための仮想主軸、外部PG予測演算のための用FB
2	VM01_PTP	一般的な位置決め (ポイントtoポイント制御) 用FB
3	VM02_INTP	2軸直線補間および2軸円弧補間制御用FB
4	VM03_PSYNC	比率同期制御用FB
5	VM04_RSYNC	回転型区間同期制御FB 主にロータリーシャー制御に適用
6	VM05_FSYNC	往復型区間同期制御FB 主にフライングシャー制御に適用
7	VM06_CAM	電子カム運転制御用FB
8	VM07_CAMPTN	電子カム運転の運転パターン作成用FB
9	VM08_VEL	速度制御用FB
10	VM09_TRQ	トルク制御用FB

表 5 「SPH3000D」の概略仕様

形 式		NP1PU-048EZM	NP1PU-096EZM	NP1PU-128EZM	NP1PU-256EZM
実行制御方式		ストアードプログラム、サイクリックスキャン方式 (デフォルトタスク)、定周期タスク、イベントタスク			
入出力接続方式		直結入出力方式 (SX バス) リモート入出力方式 (DeviceNet、OPCN-1 など、リモート I/O リンク)			
入出力制御方式		SX バス上：タクト同期リフレッシュ			
		リモート I/O リンク上：リモートマスタによる定周期リフレッシュ (スキャンに非同期)			
CPU		32ビットRISCプロセッサ			
プログラミング言語		IEC 61131-3 準拠 IL 言語 (Instruction List)、ST 言語 (Structured Text)、LD 言語 (Ladder Diagram)、 FBD 言語 (Function Block Diagram)、SFC 要素 (Sequential Function Chart)			
命令実行時間	シーケンス命令	9 ns/命令～			
	応用命令	8 ns/命令～			
入出力点数		8,192 (点)			
ユーザメモリ		545 (Kワード)	1,409 (Kワード)	1,473 (Kワード)	2,753 (Kワード)
プログラムメモリ		98,304 (ワード)	196,608 (ワード)	262,144 (ワード)	524,288 (ワード)
		49,152 (STEP)	98,304 (STEP)	131,072 (STEP)	262,144 (STEP)
データメモリ (高速領域)		459,776 (ワード)	1,246,208 (ワード)	1,246,208 (ワード)	2,294,784 (ワード)
		229,376 (ワード)	229,376 (ワード)	229,376 (ワード)	229,376 (ワード)



図9 「SPH3000D」

(2) SPH3000D

SPH シリーズの最新 CPU モジュールには FB がシステム命令として搭載されており、モーション制御用に特別な CPU を追加しなくてもサーボシステムを制御することができる。図9にSPH3000Dの外観を示す。

また、従来はモーション制御 FB をユーザ FB としてライブラリに登録してから使用する必要があったが、SPH3000D ではシステム命令として搭載しているため、この必要がなく、容易にモーション制御システムを構築できるようになった。

さらに、SPH3000D では従来製品に対して制御速度を上げるため、次に示す工夫をしている。

- (a) モーション制御 FB のプログラムコードを C 言語化し、プログラム容量をできる限り小さくした。
- (b) データメモリ領域のうち、高速領域の容量を従来機種種の 32 K ワードから 229 K ワードに拡大した。表5にSPH3000Dの概略仕様を示す。

結果として、従来機種と比較して2倍の速度でモーション制御を行うことができ、包装機などの高性能化に貢献している。

4 あとがき

IoT 技術とモーション制御技術による FA ソリューショ

ンについて述べた。今後ますます進歩していくこれらの技術により、製造業のニーズは、より高度化・複雑化していくことになる。現在の取組みをより発展させ、さらなる付加価値を創出し、ユーザのニーズに応えていく所存である。

参考文献

- (1) IoT推進コンソーシアム. “「IoT推進コンソーシアム」の設立について”. <http://www.iotac.jp/news/establish/>, (参照 2017-12-14).
- (2) “製造業を巡る現状と政策課題”. http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/seizou/pdf/005_01_00.pdf, (参照 2017-12-14).
- (3) “自動車産業を巡る構造変化とその対応について”. http://www.meti.go.jp/policy/economy/keiei_innovation/sangyokinyu/GB/04.pdf, (参照 2017-12-14).
- (4) 福島幸治ほか. 「MICREX-SXシリーズ」のモーションコントローラ「SPH3000D」. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.4, p.296-298.



藤川 泰孝

産業分野向け FA システムの企画・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エレシステム事業本部ファクトリーオートメーション事業部 FA システム技術部主席。



吉崎 久之

モーション制御システムの国内外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エレシステム事業本部ファクトリーオートメーション事業部ドライブ・モーション技術部課長。



豊田 謙郎

産業分野向け FA システムの企画・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エレシステム事業本部ファクトリーオートメーション事業部 FA システム技術部主任。

~~~~~

# 過酷な環境下に設置可能な耐環境インバータ 「FRENIC-eFIT」

“FRENIC-eFIT” Environmentally Resistant Inverter Designed for Harshest Installation Conditions

吉田 敏弘 YOSHIDA, Toshihiro

田久保 拓 TAKUBO, Hiromu

佐藤 圭輔 SATO, Keisuke

近年、インバータはさまざまな分野で用いられるようになってきており、腐食性ガス雰囲気下や屋外などの過酷な環境で、盤に収納せず単体で使用したいというニーズがある。富士電機は、過酷な環境下に設置可能な耐環境インバータ「FRENIC-eFIT」を開発した。冷却ファンレスの全閉構造にして電子部品を保護するとともに、SiC デバイスの低損失・高温動作という特性を利用して熱的課題を解決した。要素技術開発の結果を製品設計に適用して高速スイッチングによるノイズ課題を解決するとともに、富士電機製品のノウハウやフィールドテストの結果に基づき耐環境性能の信頼性を向上させている。

Inverters have been increasingly used in various industrial fields and are sometimes required to endure harsh environmental conditions without being installed in a controlboard. Fuji Electric has developed the “FRENIC-eFIT” as an environmentally resistant inverter especially designed for harsh installation conditions. In addition to protecting electronic components with a totally-enclosed enclosure that adopts a fanless cooling system, the unit has also eliminated thermal issues by utilizing SiC devices, which have characteristics of low-loss and heat resistance. Furthermore, we have applied our developed elemental technologies to mitigate high-speed switching noise while utilizing the technological know-how and field test results of Fuji Electric products to improve environmental resistance reliability.

## ① まえがき

近年、省エネルギー、生産性向上の観点からインバータはさまざまな分野で用いられるようになってきており、今まで使われていなかった腐食性ガス雰囲気下や屋外などの過酷な環境で、盤に収納せずインバータ単体で使用したいといったニーズがある。このような環境や条件で使用するためには、冷却ファンレスの全閉構造にして半導体デバイスや電子部品を腐食性ガスなどから守る必要がある。加えて、前述の過酷な環境下に大容量クラス（～37 kW）の設備も設定したいという要求も多い。冷却ファンレスの全閉構造を実現するためには、従来のインバータを超えた熱的課題を解決する必要がある。低損失・高温動作という特性を持つ SiC（炭化けい素）デバイスを使用することにより、熱的課題を解決し過酷な環境で設置可能な耐環境インバータ「FRENIC-eFIT」を開発した（図1）。

本稿では、FRENIC-eFIT の SiC デバイス適用技術、耐

候・耐食性における信頼性向上技術、放熱設計技術について述べる。

## ② SiC デバイス適用技術

SiC デバイスは、低損失という特性と併せて高速スイッチングデバイスであるという側面を持つ（図2）。高速でスイッチングするということは、よりノイズが多く発生することであり、これが適用時の大きな課題となる。表1に、FRENIC-eFIT の主な仕様を示す。FRENIC-eFIT



図1 「FRENIC-eFIT」(37 kW/400 V)

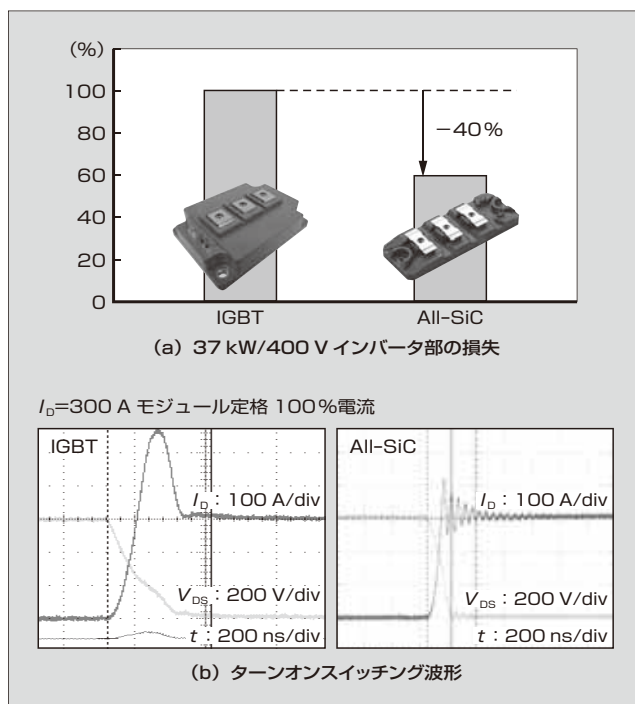


図2 損失とターンオンスイッチング波形

表 1 「FRENIC-eFIT」の主な仕様

| 項 目      | 詳 細              |
|----------|------------------|
| 採用デバイス   | All-SiCモジュール     |
| 設置環境     | IEC規格の環境パラメータに準拠 |
|          | 屋内・屋外            |
| 周囲温度     | 50℃（出力低減なし）      |
| メンテナンス   | 設計寿命10年          |
| 保護構造     | IP55（IEC 60529）  |
| 冷却方式     | 自然空冷（冷却ファンレス）    |
| 外形寸法（mm） | W680×D375×H845   |

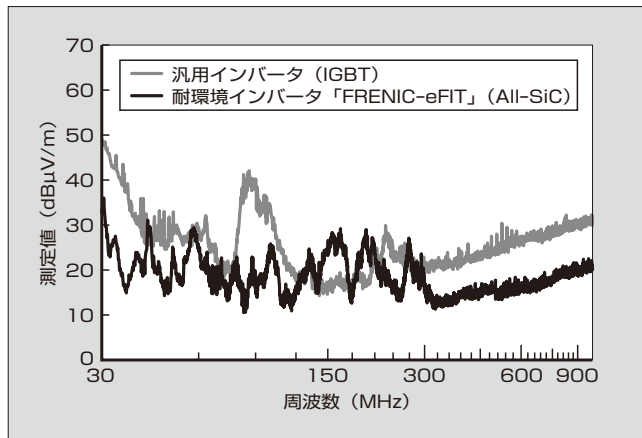


図 3 放射ノイズ比較（37 kW/400 V）

は、屋外設置を含めた耐環境性を向上するために採用した金属製の密閉筐体（きょうたい）を利用して磁気シールドを行い、開放型の筐体に Si-IGBT を搭載した汎用インバータよりも放射ノイズ発生量を抑制した（図 3）。また、IEC 規格で定められる保護等級で見ると、従来の汎用インバータが防じん・防水性を持たない開放型（IP00）であるのに対し、FRENIC-eFIT は全閉型（IP55）の保護等級を持っている。

### ③ 耐候・耐食性における信頼性向上技術

欧州メーカーの耐環境性を高めたインバータでは、IEC 規格（IEC 60721-3-4：環境条件の分類）に定められる環境パラメータを、カタログや取扱説明書に表記して設置可能な環境条件をユーザに訴求している。FRENIC-eFIT では、マーケティングに基づいて選定した業種とその工場環境から、IEC 規格に規定される環境パラメータが 4C4 である化学的な汚染物質を放出する工業地域に設置できるようにする必要があった。このため、図 4 に示す腐食性ガス 4 種に加えて一般的な工業環境下で要求される、日射・塩害・油といった環境因子を評価対象とした。これらに対して、自動販売機、屋外盤、太陽光発電用 PCS、鉄道車両機器など過酷な環境下に設置される富士電機製品のノウハウ、テストピースによる基礎実験、ユーザの協力を得てサンプル機のフィールドテストで収集した環境データを用い

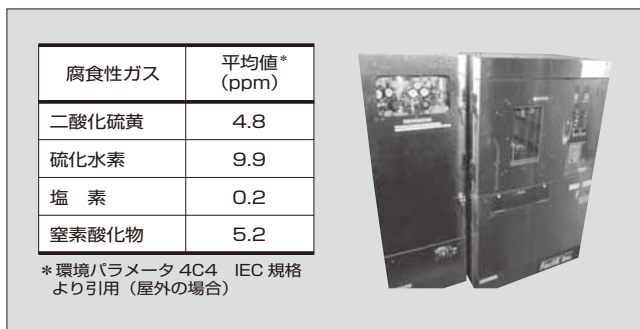


図 4 選定した腐食性ガスと混合ガス腐食試験機

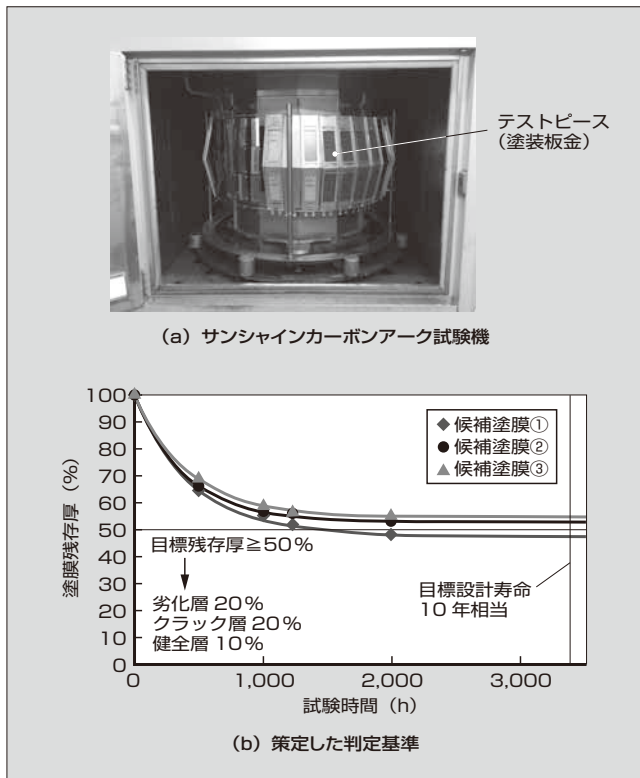


図 5 塗装板金の紫外線劣化試験とその判定基準

て、評価項目・内容と判定基準を策定した。例として図 5 に、サンシャインカーボンアーク試験機による塗装板金の紫外線劣化試験と、策定した判定基準を示す。

策定した評価項目・内容と判定基準を用いて、耐腐食性ガスや耐候性、耐油性などについて複合的に評価試験を行い、結果を定量的に判断することで、過酷な環境下に対する耐候・耐食性<sup>(2)</sup>において、従来にない設計寿命 10 年の信頼性を確保した。

### ④ 放熱設計技術

図 6 に、FRENIC-eFIT の主回路結線と内蔵周辺機器を示す。FRENIC-eFIT を収納盤レスとするため、インバータの周辺機器（EMC フィルタ、直流リアクトルなど）を内蔵した上で、冷却ファンレスでの密閉構造を実現しなければならない。このため、汎用インバータと比較して筐体内部の発熱が大きくなり、温度上昇が懸念されるため、放



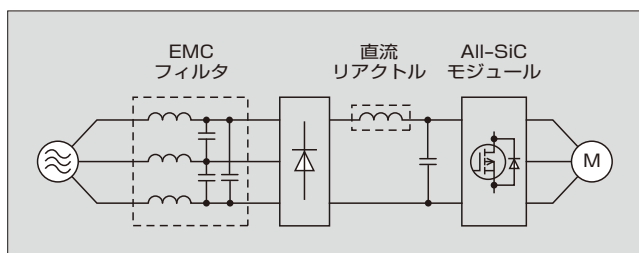


図6 主回路結線と内蔵周辺機器

熱設計が課題となる。デバイスの発生損失による熱が筐体内部に放出されて温度が過度に上昇しないよう放熱設計を行う必要がある。

SiC デバイスを採用することにより、発生損失を大きく低減することができる。筐体内の発生損失の一部を、放熱フィンへ熱伝導させることで筐体外部へ放出し、全体温度の適正化を図った。まず、SiC デバイス、電源基板に次いで損失が大きい直流リアクトルと熱に弱い主回路電解コンデンサに着目した。これらの部品から放熱フィンへの伝熱を大きくするため接触面積が最も大きくなるように配置し、熱伝導シートを介して固定した（図7）。

施策前後において熱シミュレーションを行った（図8）。その結果、本施策だけでは基板実装部品の温度が、所定温度内に収まらなかった。直流リアクトルによって暖められた空気が対流し、基板側へ回ってくるのが要因であるこ

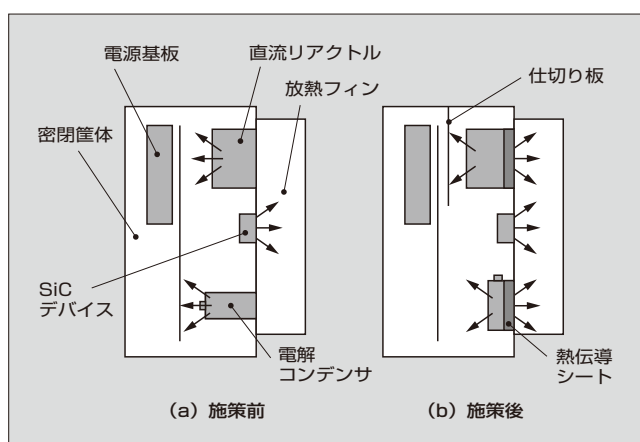


図7 放熱経路イメージ（右側面断面図）

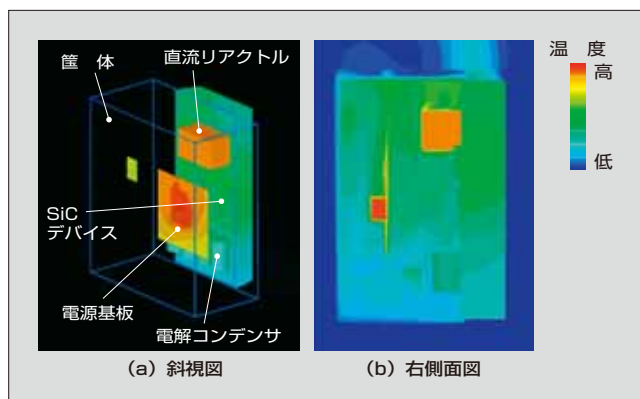


図8 熱シミュレーション（施策実施後）

とが確認できた。最も効果的な対策として、筐体内部の攪拌（かくはん）用の冷却ファンを用いて筐体内の温度を均一化して下げること考えた。しかし、有寿命部品である冷却ファンを設けるとメンテナンスフリーが実現できない。そこで、攪拌用の冷却ファンを不要とするために、直流リアクトルに暖められた空気が基板側に回らないよう遮蔽（しゃへい）する仕切り板を設けた。ただし、完全に基板側と主回路部品側の区画を仕切ってしまうと、温度差で起こる対流を阻害し、筐体内の温度に偏りが生じることが熱シミュレーションで確認できたため、対流ルートは残しつつ、直流リアクトルに暖められた空気を筐体の板金天面へ誘導して熱伝導を促した。最終的に各部品の温度上昇を約18%、筐体内の温度上昇を約8%抑えて、冷却ファンレスでの密閉構造を実現した。

## ⑤ 「FRENIC-eFIT」の仕様と特徴

開発の第1ステップとして、ファンやポンプ系の設備に積極的に普及を図って実績を積み、さらなる信頼性を高めつつ重要設備であるプロセスラインへの展開を第2ステップとして図っていくこととした。このため、第1ステップではファンやポンプの駆動を主体にした汎用インバータの制御機能を搭載し、次ステップで高性能インバータの制御機能を搭載する。また、これらの機能は制御・電源基板の載せ換えで対応できるようプラットフォームとして構成している（図9）。

また、FRENIC-eFIT は屋外や悪環境下においてスタンドアロンで設置されることを想定し、次に示す三つの特徴を持っている。

### (1) カスタマイズロジック機能

ユーザが独自に機能をカスタマイズできるカスタマイズロジック機能を搭載している（図10）。ユーザの機械装置や用途ごとに必要な制御機能を、簡易プログラマブルコントローラや外部リレー、タイマなどで構成した外部回路を使用せず、インバータ内部の各種演算機能を組み合わせて実現できる。プログラミングステップ数は最大で200ステップであり、特殊な開発環境は不要で直感的なロジック

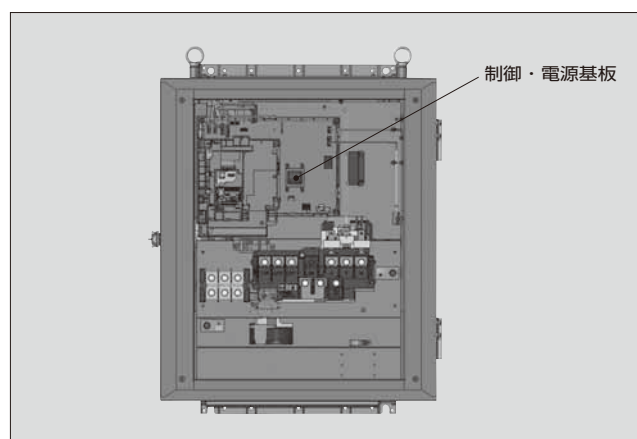


図9 「FRENIC-eFIT」の内部構成（前面扉開放）

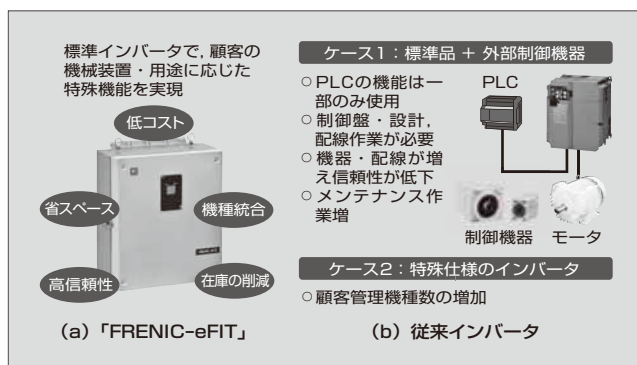


図10 カスタマイズロジック機能

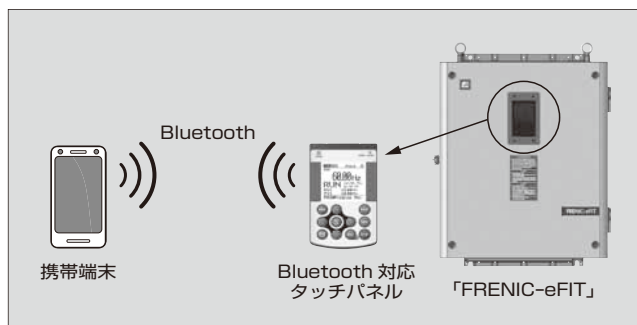


図11 遠隔操作が可能なBluetooth対応タッチパネル

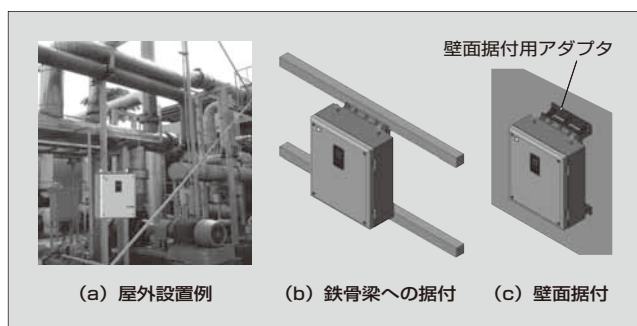


図12 設置イメージ

シンボルを使ったプログラミングツールを、富士電機のホームページにおいて無償で提供している。

## (2) Bluetooth対応タッチパネル

遠隔操作が可能なBluetooth対応タッチパネル（2018年度発売予定）をオプションで選択し、収納することが可能な構造としている（図11）。FRENIC-eFITの筐体は金属製の密閉構造であるが、タッチパネル部を部分的に開放している。特殊フィルムとパッキンで防水し、さらに耐候性の高いアクリル製の化粧カバーで保護することにより、耐環境性を確保しつつ、電波妨害などの影響を受けないよう配慮している。このBluetooth対応タッチパネルを装着すると、機能コードの編集や読み込み、インバータの各種情報のモニタリング、電流、電圧、トルクなどのリアルタイム

〈注1〉 Bluetooth：Bluetooth SIG, Inc. の商標または登録商標

〈注2〉 RoHS規制：電気・電子機器に含まれる特定有害物質の使用制限についてのEU（欧州連合）の規制

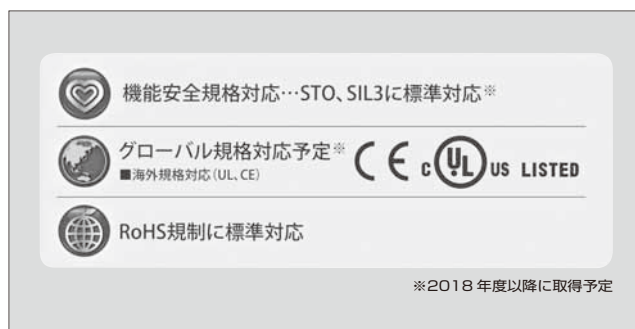


図13 取得海外規格

ムトレース、省エネルギー診断なども離れた場所から携帯端末を使って可能となり、ユーザのニーズに込えている。

## (3) 据付構造

汎用インバータと周辺機器を収納した盤を屋外に敷設する場合、コンクリートで基礎を打ち、アンカーボルトを用いて盤を固定するのが標準的な工事であるが、費用と工期が掛かるためユーザにとって非常に大きな負担となっていた。FRENIC-eFITは、この屋外盤と同等以上の機能を備えつつ、体積を約1/4と大幅に縮小しており、既存の構造物などの壁面に設置できる（図12）。標準で付属の据付脚に加え、壁面据付用アダプタなど、設置場所に依じてさまざまな設置方法を選択可能とすることにより、新設時の工事費は70%削減でき、工期は60%短縮できる。

また、設置環境を気にせず、モータ近傍にインバータを設置すると、出力配線が短くなり、配線コストが削減できる。これに加えて、モータサージやノイズの抑制も期待でき、サージフィルタや各種ノイズ対策が不要となる。この点からもユーザの負担が軽減する。モータ近傍に設置することで、ポンプ設備の流量計を見ながらインバータで吐出量が調整できるので、フィールドテストにおいてユーザから非常に使い勝手が良いという感想を得ている。

## [6] 海外規格への対応

FRENIC-eFITは、グローバル市場への展開も計画しており、欧州の機能安全規格、CEマーキング、米州のUL規格、RoHS規制などに準拠している。2018年度から順次認証を取得する（図13）。

## [7] あとがき

SiCデバイスのインバータ製品への採用に関しては、SiCデバイスの特性を生かした差別化商材の開発からスタートし、さまざまな知見を得た。また、今後はSiCデバイスの複数並列使用による大容量化を指向し、これらの適用技術をプラットフォームとして構築し、汎用機や他のパワーエレクトロニクス機器に拡大していく所存である。

## 参考文献

(1) 玉手道雄ほか、パワーエレクトロニクス機器の電磁ノイズ

シミュレーション技術. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.1, p.35-39.

(2) 青山昌弘ほか. 汎用インバータの硫化ガス対策. 富士時報. 2007, vol.80, no.5, p.331-333.



### 吉田 敏弘

インバータの開発に従事。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駆動機器開発部。



### 田久保 拓

SiCをはじめとしたパワー半導体デバイスの応用技術の研究に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所エネルギー技術研究センターエネルギー変換技術研究部グループマネージャー。



### 佐藤 圭輔

材料および生産技術の研究に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所材料基礎技術研究センター材料基盤技術研究部。工学博士。表面技術協会会員。



# ユーザの多様なニーズに応える水冷式高圧大容量インバータ「FRENIC4800VM6」

“FRENIC4800VM6” Medium-Voltage High-Capacity Inverter with Water-Cooling System Designed to Meet Various User Needs

宮下 勉 MIYASHITA, Tsutomu

中村 暢佑 NAKAMURA, Yosuke

岩元 麗之 IWAMOTO, Kazuyuki

プラントの主要設備である大容量インバータを更新する際には、高い制御機能に加えて充実したユーザ支援機能が、ユーザが製品を選択する上で重要な判断基準となっている。水冷式高圧大容量インバータ「FRENIC4800VM6」は、従来機種に比べて出力周波数の拡大やプラント制御機能の向上を図ったことにより、高品質・多品種製品の生産や歩留りの向上を実現する。また、これまで高度な技量と多くの人手を必要としていた保全作業を省力化し、プラント全体の安定操業に貢献するため、大型プログラマブル操作表示器を採用するとともに、ロードシステムなどのユーザ支援機能を刷新した。

When revamping high-capacity inverters used as major equipment in plants, customers place a heavy emphasis on products that incorporate advanced control function and fulfilling user support tools. The “FRENIC4800VM6” medium-voltage high-capacity inverter with water-cooling system was designed to enhance plant control function and expand output frequency over previous products to achieve better productivity and yield for a wide range of high-quality products. Furthermore, featuring a large programmable operation display and renovated user support functions such as a loader function, the inverter helps users reduce the amount of sophisticated and labor-intensive maintenance work, while also contributing to the overall stability of plant operations.

## ① まえがき

近年、プラント全体の生産性の向上やダウンタイムの短縮を図るため、古い設備の合理化や集約が進んでいる。プラントの主要設備である大容量インバータを更新する際には、高い制御機能に加えて充実したユーザ支援機能が、ユーザが製品を選択する上で重要な判断基準となっている。

このようなユーザの要求に応えるため、2011年に発売したプラント用大容量インバータ「FRENIC4800VM5」を進化させ、このたび「FRENIC4800VM6」を開発した。

本稿では、制御機能を向上し、ユーザ支援機能を刷新した水冷式高圧大容量インバータ「FRENIC4800VM6」について述べる。

## ② 「FRENIC4800VM6」の概要

図1に富士電機のプラント用インバータの製品ラインアップを示す。適用分野に適した3種類の出力電圧で、10kVAから26,000kVAまでの幅広い容量範囲をカバーしている。

この中で、ハイエンドモデルである FRENIC4800VM6 は、鉄鋼・非鉄の大型圧延機、大型プロワ、ポンプ、風洞試験設備などの電動機の駆動に使用される水冷式高圧大容量インバータである。FRENIC4800VM6 は、従来機種の FRENIC4800VM5 に比べて出力周波数の拡大やプラント制御機能の向上を図ったことで、高品質・多品種製品の生

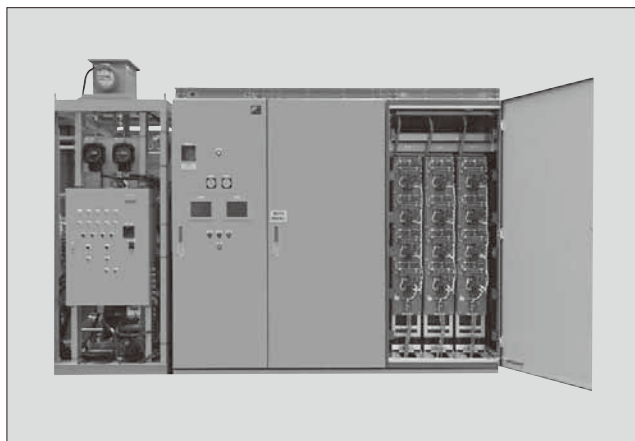


図2 「FRENIC4800VM6」の盤の外観

| シリーズ名         | 特 徴                | 出力電圧 (V) | 容量範囲 (kVA) |     |       |        |
|---------------|--------------------|----------|------------|-----|-------|--------|
|               |                    |          | 10         | 100 | 1,000 | 10,000 |
| FRENIC4000VM5 | プラント用ベクトル制御インバータ   | 400      |            |     |       | 5,400  |
| FRENIC4000FM5 | プラント用 V/f 制御インバータ  | 400      |            |     | 900   |        |
| FRENIC4400VM6 | 大容量ベクトル制御インバータ     | 800      |            |     |       | 8,000  |
| FRENIC4800VM6 | 水冷大容量高圧ベクトル制御インバータ | 3,300    |            |     |       | 26,000 |

図1 プラント用インバータの製品ラインアップ



表1 「FRENIC4800VM6」の電気仕様

| 項目           | 仕様                          |      |      |      |
|--------------|-----------------------------|------|------|------|
| 構成(多重)       | 単機                          | 2多重  | 3多重  | 4多重  |
| コンバータ容量(MW)  | 6.0                         | 12.0 | 18.0 | 24.0 |
| インバータ容量(MVA) | 6.6                         | 13.2 | 19.8 | 26.4 |
| 電圧           | 入力3.1kV 3φ 50/60Hz, 出力3.3kV |      |      |      |
| 過負荷耐量        | 150% 1分間                    |      |      |      |
| 駆動電動機        | 誘導機, 同期機                    |      |      |      |

産や歩留りの向上を実現する。また、これまで高度な技量と多くの人手を必要としていた保全作業を省力化し、プラント全体の安定操業に貢献するため、大型プログラマブル操作表示器を採用するとともに、ロードシステムを刷新した。FRENIC4800VM6の盤の外観を図2に、電気仕様を表1に示す。

### 3 制御機能の向上

#### 3.1 出力周波数の拡大

FRENIC4800で使用している高耐圧IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)モジュールのスイッチング周波数を上げると損失が大きくなるので、従来機種のFRENIC4800VM5では、インバータの最高出力周波数を15Hzに制限していた。FRENIC4800VM6では、キャリア位相と出力電圧の位相を同期させる同期PWM(Pulse Width Modulation)制御を搭載することでスイッチング周波数を低減し、インバータ容量を低減することなく最高出力周波数を業界トップレベルの100Hzまで拡大した。

図3に、インバータ出力周波数による線間電圧の違いを示す。インバータ出力周波数が15Hzを超えると同期PWM領域となる。同期PWM領域では最大スイッチング周波数を超えないようにスイッチング回数を減らしている。

また、過変調領域まで同期PWM制御を使用することで、インバータ出力電圧を従来機種の3.1kVから3.3kVに上げることができる。これにより、盤外形寸法を変えずに単機容量を従来機種の6.2MVAから6.6MVAに拡大している。水冷装置を除いたコンバータとインバータ単機構成での盤の外形寸法は、従来機種と同じW2,800×D1,650×H2,400(mm)である<sup>(1)</sup>。

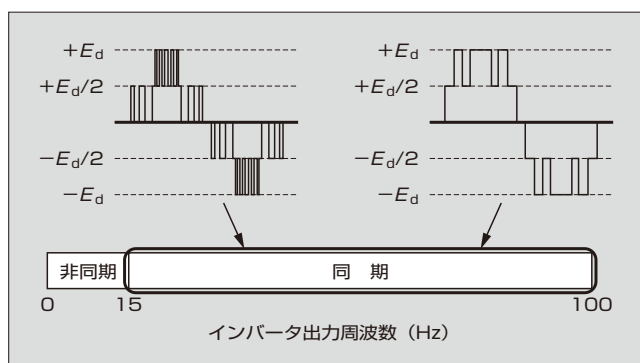


図3 インバータ出力周波数による線間電圧の違い

#### 3.2 プラント制御機能の向上

FRENIC4800VM6は、オプションでドライブ装置間の通信用にPROFIBUS<sup>〔注1〕</sup>通信カードを搭載することが可能である。また、PROFIdrive<sup>〔注2〕</sup>通信フォーマットを採用しているため、富士電機製のドライブ装置だけではなく、PROFIdriveに対応する他社製のドライブ装置とも比較的容易に通信ができる。さらに、これまでプラントを制御するための複雑な機能は、ドライブ装置に接続される上位のプログラマブルコントローラ(PLC)に搭載されていた。この複雑な機能をFRENIC4800VM6に搭載することで、上位PLCを介することなくドライブ装置間で直接プラント制御が行えるので、高速・高精度な制御が可能になった。

ドライブ装置間のプラント制御の一例として、タンデムに配置された圧延機間の圧延材に生じる張力を抑制する制御(無張力制御)のシステム構成を図4に示す。一般に2台の圧延機によって同時に圧延するタンデム圧延において、2台の圧延機のロール周速差によって圧延材に張力が発生すると製品の形状に悪影響を及ぼす。そこで、圧延材にかかる張力を抑制することが圧延機の制御に求められる。

図4の例では、FRENIC4800VM6は垂直圧延機を駆動するドライブ装置で、水平圧延機を駆動するドライブ装置から水平圧延機の回転速度やトルク検出値などを、PROFIBUS経由で直接受信する。FRENIC4800VM6は、これらの値とロードセルからアナログ入力された圧延荷重を用いて、圧延材に生じる張力を抑制するように垂直圧延

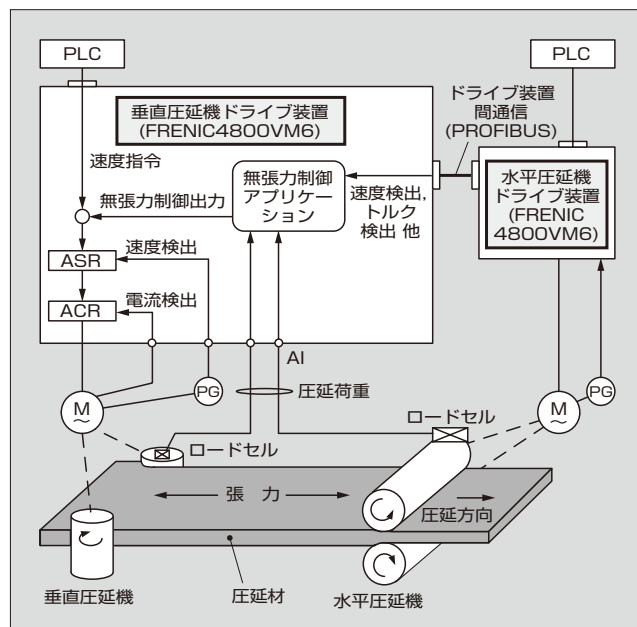


図4 ドライブ装置によるプラント制御のシステム構成例

〔注1〕 PROFIBUS : PROFIBUS User Organization の商標または登録商標

〔注2〕 PROFIdrive : PROFIBUS User Organization の商標または登録商標

図6 千二夕画面（インバータ側）

大規模プラント設備では、数百台のインバータが設置されていることも珍しくはない。保守作業においては、パソコンローダを使用して全てのインバータの状態を監視していくことが必要である。しかしながら、従来のパソコンローダ（1:1ローダ）は一度に1台のインバータしか接

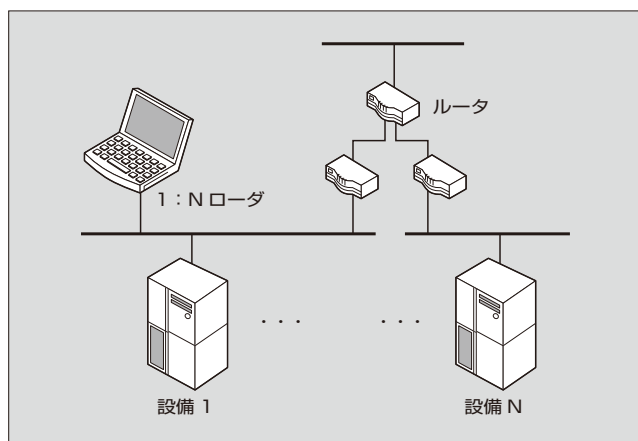


図7 1:N ロードのネットワーク構成

続できないため、インバータの台数が多い場合、その保守作業は多くの人手と時間を必要とし、ユーザにとって大きな負担となっていた。また、インバータのデータ管理も煩雑であった。

今回開発したパソコンロード（1:N ロード）は、複数台のインバータを同時に保守作業できるように、図7のようなネットワーク構成とした。

1:N ロードとインバータの接続に Ethernet<sup>〈注3〉</sup>を採用することで、物理的な距離に関係なく同一ネットワーク内に接続されている複数台のインバータを同時に操作・監視できるようになった。1:N ロードの特徴を次に示す。

#### (1) 監視機能

接続している全てのインバータの運転状態と故障状態を一元監視することが可能である。

#### (2) 比較機能

接続している各インバータの設定パラメータをロード上で比較することが可能である。

#### (3) 管理機能

接続しているインバータ内部に保存されている情報（設定、故障履歴、トレース）を一括で保存（管理）すること

〈注3〉 Ethernet：富士ゼロックス株式会社の商標または登録商標

が可能である。

1:N ロードは、1:1 ロードが持っていた機能をそのままに複数台のインバータを同時に接続できるようになったため、ユーザの保守作業の労力を大幅に削減することが可能である。

## ⑤ あとがき

従来機種に比べて、制御性能やユーザ支援機能を大幅に向上させた水冷式高圧大容量インバータ「FRENIC4800VM6」について述べた。富士電機のプラント用インバータのハイエンドモデルとしてさらなる機能の向上を推進し、適用分野の拡大を図っていく所存である。

## 参考文献

- (1) 木谷昌史ほか. 水冷大容量高圧インバータ「FRENIC 4800VM5」. 富士時報. 2012, vol.85, no.3, p.210-214.



### 宮下 勉

電動力応用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事業本部プロセスオートメーション事業部技術第一主査。



### 中村 暢佑

産業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事業本部開発統括部パワーエレ機器開発センター駆動機器開発部。



### 岩元 麗之

電動力応用プラントの設計に従事。現在、富士電機株式会社パワーエレクトロニクス事業本部エンジニアリング統括部システム技術センターオートメーション技術部。

# 技術伝承と生産性の向上に貢献するプラント運転支援システム

Plant Operation Support System That Helps Transfer Skills and Improve Productivity

吉川 譲 YOSHIKAWA, Yuzuru

渡辺 大介 WATANABE, Daisuke

井上 昭夫 INOUE, Akio

プラント操業において、技術伝承と生産性の向上が課題となっている。富士電機は、この二つの課題を解決するため、過去に開発したプラント運転支援システムを、現在の監視制御システムのあり方に合わせて再開発を行うことにした。この再開発によって、運転を支援する対象設備の監視制御システムに、汎用的なインタフェースで接続できるようになった。さらに、属人的であった運転技術を共有し、運転員のノウハウや技術レベルを平準化することで技術伝承が可能となった。また、運転員に依存しない運転手順や運転操作の確立により、標準化を行うことで生産性が向上した。

In industrial plant operations, major challenges involve transferring skills and improving productivity. To help solve these two tasks, Fuji Electric has decided to redesign its previously developed plant support system to match current monitoring control systems. As a result, The monitoring control system of target facilities can be connected through a general-purpose interface to support operation. This development also makes it possible to share personal operator skills and to standardize operator knowledge and a skill level, helping users to transfer skills. Moreover, standardizing operating procedures and operation that are independent on operators improves productivity.

## ① まえがき

富士電機の計測機器は約 60 年の歴史があり、1975 年に最初の分散型制御システム（DCS：Distributed Control System）を発売した。これまで、富士電機は、プラント操業においてお客さまの課題解決や要求に応えるため、さまざまなソリューションを提供してきた。しかし、時代とともに課題や要求は変化してきており、今日の大きな課題は、技術伝承と生産性の向上となっている。

## ② プラント操業の課題

### 2.1 技術伝承における課題

プラント操業が自動化される前は、運転員がプラントの特性や機器の状態を完全に把握して、手動で操業していた。このためトラブルやミスも多かったと考えられる。一方で、運転員はプラントに関するノウハウや、制御技術を学ぶ機会が必然的に与えられ、日常運用の中でプラント操業に関する技術が伝承されてきた。

プラント操業は、マイコンの発展とともに PC やプログラマブルコントローラ（PLC：Programmable Logic Controller）などにより監視制御のシステム化が進み、自動化は格段に進歩した。今や監視制御システムは当たり前のように構築され、高いレベルまで自動制御されるようになった。そのため現場でのトラブルは減ったが、非常状態やその現象に至ったプラント特性など、プラントに関する知識を蓄える経験機会は少なくなった。

技術伝承の課題は継続的に議論がなされ、40 年が経過した。今後は、団塊世代の退職にみられたように、熟練運転員の不足がさらに進むことが懸念される。

### 2.2 生産性向上における課題

生産性の向上における大きな課題となっている要素は、プラント操業の運転環境である。

プラント操業において、製造実行システム（MES：Manufacturing Execution System）の導入やタブレット端末の現場使用、バーコードや IC タグ利用などによる現場データの上位関係など、情報システムの普及とともに現場の見える化やデータ関係が進んだ。しかし、生産性が向上し、少人数でのプラント運用が可能となった反面、運転員 1 名当たりの作業範囲が拡大し、オペレーションは複雑化と高度化が進んだ。

少子高齢化による人手不足や労働時間の短縮、生産性の向上にはいっそうの対応が求められている。

富士電機では、前述の二つの大きな課題を解決するため、過去に開発した運転支援システムを、現在の監視制御システムのあり方に合わせて開発することにした。

## ③ プラント運転支援システムの開発概要

### 3.1 システム導入の目的

技術伝承や生産性の向上ができるプラント操業の仕組みや運転環境を提供する必要がある。技術伝承に対して、属人的になっている運転技術を共有し、運転員のノウハウや技術レベルを平準化することで対応する。生産性の向上に対しては、運転員に依存しない運転手順や操作の確立により、標準化することで対応する。これらの仕組みをシステムで実現することで次の四つの効果が期待できる。

- (a) ベテランと新人運転員の力量差の改善
- (b) 運転ノウハウの継承
- (c) 属人化脱却による品質の均一化
- (d) オペレーションのむりやむだの削減



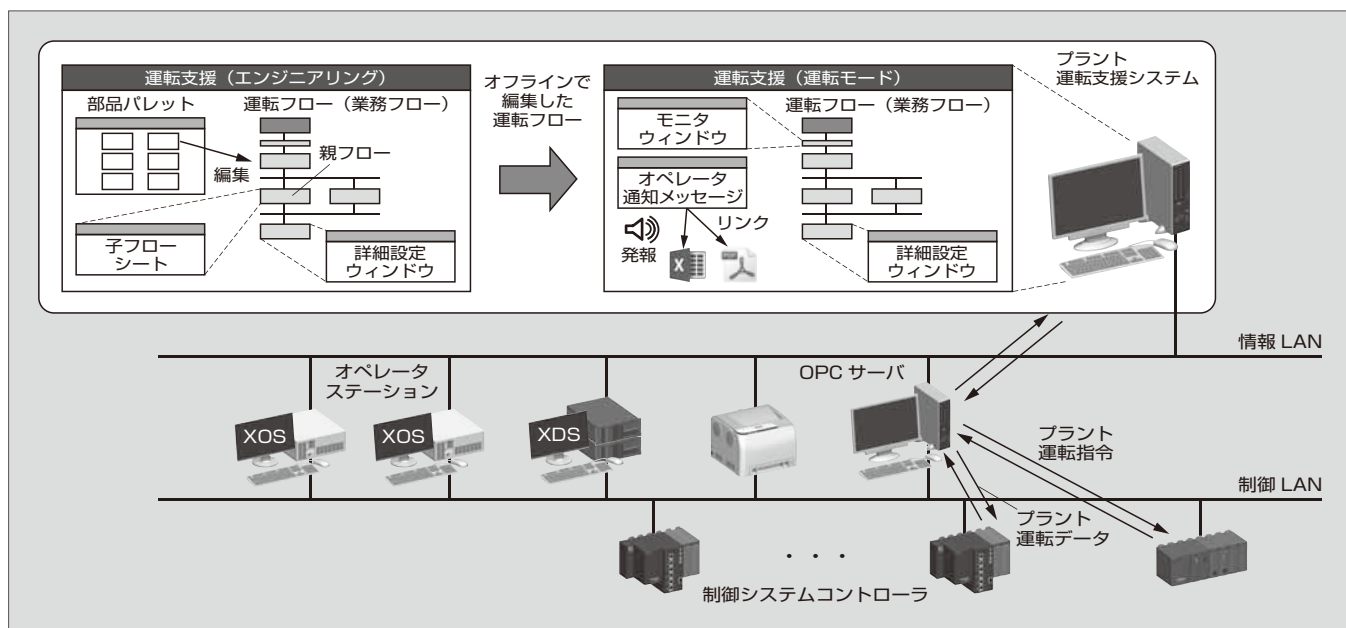


図1 システム構成図

### 3.2 システム開発のコンセプト

システムの構築により、プラント操業の課題を解決できる仕組みを実現しても、提供するシステムの構築特性や操作性を考慮しないと、他への転用や現場で継続的に使用してもらうことは難しい。この問題を回避するため、今回のシステム開発のコンセプトは、システム構築が容易であること、およびプラント操業に対して汎用性があることとした。このコンセプトの下、富士電機が2005年に開発したプラント運転支援システムをベースに再開発を行った。

富士電機の旧世代やシリーズの異なるシステムだけでなく、他社システムとの接続も視野に入れ、オープンなインタフェースである OPC インタフェースを実装している。従来は機種に依存していたプラント運転支援機能を、機種に依存せずに利用できるようにした。

プラント運転支援システムのシステム構成図を図1に示す。このシステムを導入すると、次のことが可能になる。

- (a) 運転手順の運転フロー図への落とし込み
- (b) 運転手順の追跡とガイダンスによる作業通知
- (c) 運転時の操作や警報の記録

## 4 プラント運転支援システムの機能

プラント運転支援システムが実装している機能について述べる。

### 4.1 運転手順の運転フロー図への落とし込み

対象とするプラントの運転手順をプラント運転支援システムのフロー図に落とし込むため、次の機能を提供している。

#### (1) 運転フロー図の構造

運転フロー図は、作業管理あるいは処理を実行する工程

部と次の作業へ移行するための条件部から構成される。工務部や条件部は、各種部品を提供し容易に作成できる構造としている。また、運転フロー図は親フローと子フローの2階層まで管理することができる。

#### (2) 新規作成および編集機能

運転フロー図を新規に作成する場合は、フロー図を起票し、工務部と条件部におのおの対応した部品一覧からドラッグ＆ドロップする（図2）。選択した部品群の移動や、反復処理がある場合に便利なコピーなどの編集機能がある。

#### (3) タグ関係

工務部や条件部のタグ定義には、運転支援システムが提供しているタギー一覧から選択する。タグの関係には、汎用性を持たせるために特定システムのデータベースと関係することなく、CSV（Comma Separated Value）形式で対象システムのタグを取り込むことができる。

通常、システムで使用されているタグやコメントは、運転員には分かりづらい。そこで、プラント運転支援システム上の表記を別に定義できるようにしている。

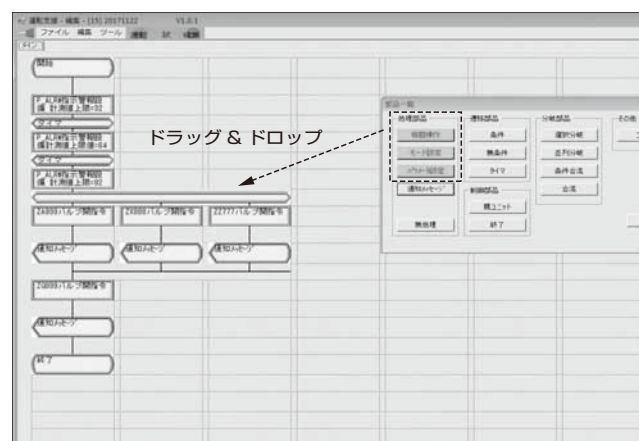


図2 運転フローの画面例

#### (4) タグ検索

取り込んだシステムタグの数が多いと、タグ一覧から選択するのは困難になる。そこで、作成者が定義したいタグをタグやコメントで絞り込む機能を実装している。

### 4.2 運転手順の追跡とガイダンスによる作業通知

#### (1) 監視機能

作成した運転フロー図をオンラインモードにすることにより、関係しているシステムからの信号変化で工程進捗の監視や条件移行が可能になる（図3）。

#### (2) ガイダンス機能

関係したシステムからの信号状態の変化に応じて、運転員に作業指示を通知するガイダンス機能には3種類ある。

- (a) ポップアップ画面によるコメント通知
- (b) 運転員に判断を促す通知と判断結果の入力
- (c) 音声によるガイダンス通知

#### (3) 運転および試運転モード

オンラインモードには、運転および試運転の二つのモードがある。運転モードは、実際の運用で使用する。試運転モードは、対象の監視制御システムにおける出力タイミング確認のメッセージ通知を行うが、実際の指令信号は出力しない。作成した運転フローが作成者の意図したとおりに動作することを、実際のプラント操業で確認できる。

### 4.3 運転時の操作や警報の記録

#### (1) 記録機能

図4に示す操作・警報履歴では、運転員の操作履歴やシステムの処理結果を記録している。この記録機能を用いて、過去の手順をレビューして運転手順の改善や見直しが検討できる。また、操作・警報履歴の情報をCSV形式で出力することもでき、汎用ツールでも容易に運転手順が解析できる。

#### (2) 検索機能

図4 操作・警報履歴画面例

操作・警報履歴において次の条件で検索できる。

- (a) 検索期間
- (b) 運転フロー名称
- (c) タグおよびコメント

運転中にトラブルなどがあれば、発生期間やキーワードから下位システムで管理されている操作・警報履歴と合わせて効率的に調査することができる。

### 5 事例紹介

今回、本システムをある工場に納入した。適用する対象システムは、富士電機が納入したシステムと他社が納入したシステムの合わせて二つの監視制御システムである。これらのシステムでは監視制御が既に行われており、今回は異なる二つのシステムからおのおの OPC サーバにより接続し、これらを統括する一つのプラント運転支援システムを富士電機が新たに構築した。図5に納入したプラント運転支援システムを示す。

### 6 将来へ向けた機能拡充

今回開発した機能をベースとして、IoT (Internet of Things) 関連の投資にも適用できるように主に次の機能を拡充していく計画である。

- (a) 多品種少量生産プラントに対応できる機能

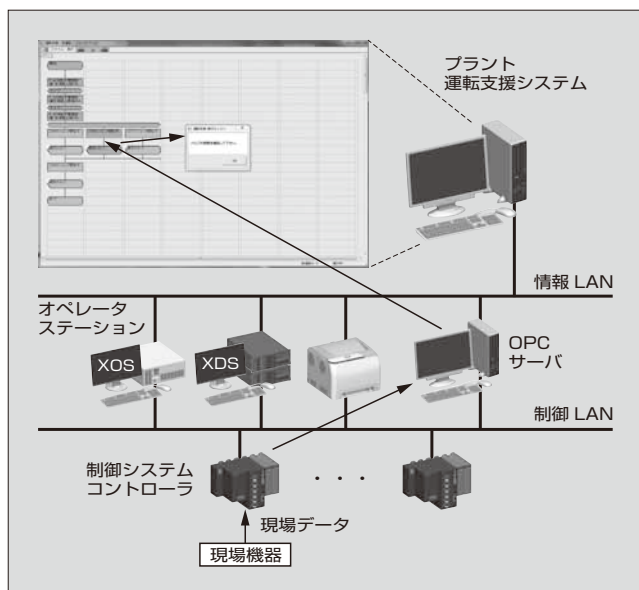


図3 運転および試運転モードの画面例



図5 納入したプラント運転支援システム

- (b) タブレット端末など携帯情報機器との連携機能
- (c) 操作履歴や実績データの管理機能

## 7 あとがき

技術伝承と生産性の向上に貢献するプラント運転支援システムについて述べた。運転支援に関するパッケージは数多く世に出されている。このため今回の開発では、今後の拡張性を重視し、新機能を開発した場合にも容易に既存に追加できる構造とした。今後の追加開発では、さらなる機能改善や機能増強を図り、よりいっそうお客さまに使いやすいシステムを提供していく所存である。

## 参考文献

- (1) 山野景章ほか. 新情報制御システム「MICREX-NX」の機能拡充. 富士時報. 2008, vol.81, no.2, p.121-125.



### 吉川 譲

化学，食品分野の計測制御システム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エレシステム事業本部オートメーション事業部技術第二部課長。



### 渡辺 大介

化学，医薬品，食品分野の計測制御システム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エレシステム事業本部オートメーション事業部技術第二部主査。



### 井上 昭夫

食品分野，化学分野の情報システムのエンジニアリングに従事。現在，富士電機株式会社パワエレシステム事業本部エンジニアリング統括部システム技術センター産業システム部。



# 最新の海外棒鋼・形鋼圧延設備用電気品および駆動制御システム

Latest Electrical Equipment and Drive Control Systems for Bar and Shape Rolling Mills Outside Japan

小粥 史一 OGAI, Fumikazu

川口 鉄平 KAWAGUCHI, Teppei

棒鋼・形鋼の圧延設備では、常に安定した操業が求められる。これを実現するためには、生産能力を向上させる高い情報処理能力と高速制御、および歩留りを向上させる高精度な処理が要求される。今回、海外のコンバインドミル工場の圧延設備用に、電気品と駆動制御システムを納入した。ここでは、生産性が高く安定した操業を実現するために、インバータやコントローラを主としたシステムを高速ネットワークで高精度に連係させた。加えて、日本から迅速なサポートを実施するために、操業や制御の状態を常に収集して閲覧できるリモートメンテナンスサポートシステムを組み込んだ。

Bar and shape steel rolling mills are constantly required of stable operations. Thus the equipment needs high information processing capability and high speed control to improve productivity, as well as highly accurate processing to increase yield. Fuji Electric has delivered electrical equipment and drive control systems for use in the rolling mills of combined mill plants outside Japan. To achieve high productivity and stable operations, its control systems, mainly comprise inverters and controllers, are interlinked with high precision via high-speed networks. Moreover, to provide timely support from Japan, remote maintenance support systems are installed in the systems to continuously collect and inspect operating and control data.

## ① まえがき

国内の製鉄会社とインドネシア企業との合弁会社により、棒鋼と形鋼の製品を同一ラインで製造できるコンバインドミル工場がインドネシアに建設された。富士電機は、その工場に圧延設備用の電気品と駆動制御システムを納入した。

棒鋼・形鋼の圧延設備において常に求められることは、安定した操業、すなわちダウンタイムの少ない自動運転、高効率な操業、限りなく省力化された自動操業である。このような操業・運転は、生産能力を向上するための大容量の情報処理能力と高速制御、歩留りを向上させる高精度な処理機能が要求される。富士電機では、インバータやコントローラを主とした駆動制御システムで大容量の情報処理を的確に高速処理し、それらを高精度に連係させる、高速フィールドバスを駆使したネットワークを用いることで実現している。

各駆動装置の制御値や機械設備の位置、被検出物の挙動などのデータは、高速データ収集・解析支援システム「f(s) NISDAS」で常に収集しており、操業状況の分析や制御状態の解析を迅速に支援できるようにしている。さらには、インターネットを利用して遠隔地である日本国内の富士電機から現地の状況を知ることができるリモートサポートシステムも構築している。

## ② 圧延設備の概要

圧延設備は、素材であるビレット（角材状の鉄塊）を加熱し、コンバインドミルを用いて圧延することにより、棒鋼や形鋼に仕上げる設備である。主要設備には、加熱炉、連続圧延機スタンド18基、クロップシャーおよびディバイディングシャー、冷却床、矯正機、コールドシャー、精整設備などがある。

この設備によって作られる製品は主に建築用資材であり、異形棒鋼（サイズ12種）、丸棒（サイズ8種）、L字形鋼（サイズ15種）、溝形鋼（サイズ5種）、平鋼（サイズ19種）といった、多品種の製品を生産できる。図1に圧延設備の全景を示す。



図1 圧延設備の全景

〈注1〉コンバインドミル：一つの圧延設備の中で圧延スタンドや圧延ローラを組み替えることによって、多品種の棒鋼・形鋼を圧延する共用の圧延設備のことである。



### ③ 圧延設備用電気品および駆動制御システム

顧客の要求仕様を満足させる生産性の高い操業を実現するために、電動機約 500 台（合計出力 26 MW）、変圧器 14 台、操作盤 42 面の電気品と、インバータ 105 式、コントローラ 7 台からなる駆動制御システムを構築した。

#### 3.1 電動機

圧延機用主機電動機として、インバータ駆動誘導電動機計 20 台を 4 種類の仕様に集約し、納入した。表 1 に、主機電動機の使用別・容量別の納入台数を示す。

(a) 対応規格

JEC-2137-2000

(b) 冷却方式

700 ～ 1,100 kW 電動機：IC416（他力通流外被表面冷却形）

1,500 kW 電動機：IC666（他力通流取付け熱交換器形、周囲冷媒使用）

図 2 に、代表的な 700 kW 主機電動機の外観を示す。900 kW，1,100 kW も外観は同様である。

#### 3.2 駆動装置

直流中間回路を共通電源方式にした産業プラント用インバータを適用した。容量に応じて、AC800 V 出力 3 レベル IGBT インバータ「FRENIC4400VM5R」（図 3）と AC400 V 出力 IGBT インバータ「FRENIC4000VM5R」（図 4）の 2 種類のインバータとした。

表 1 各圧延エリアの納入電動機数

| 電動機定格<br>ベース<br>トップ | 700 kW<br>1,000 min <sup>-1</sup><br>2,000 min <sup>-1</sup> | 900 kW<br>900 min <sup>-1</sup><br>1,800 min <sup>-1</sup> | 1,100 kW<br>900 min <sup>-1</sup><br>1,800 min <sup>-1</sup> | 1,500 kW<br>750 min <sup>-1</sup><br>1,500 min <sup>-1</sup> |
|---------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 粗圧延                 | 4台                                                           | 1台                                                         | 1台                                                           | —                                                            |
| 中間圧延                | 2台                                                           | 1台                                                         | 2台                                                           | 1台                                                           |
| 仕上圧延                | —                                                            | 1台                                                         | 4台                                                           | 3台                                                           |

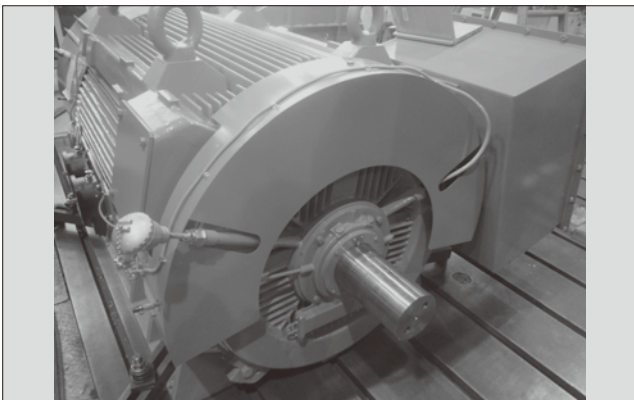


図 2 700 kW 主機電動機の外観

〈注 2〉力行：電動機の動力を負荷側に伝えている状態のこと

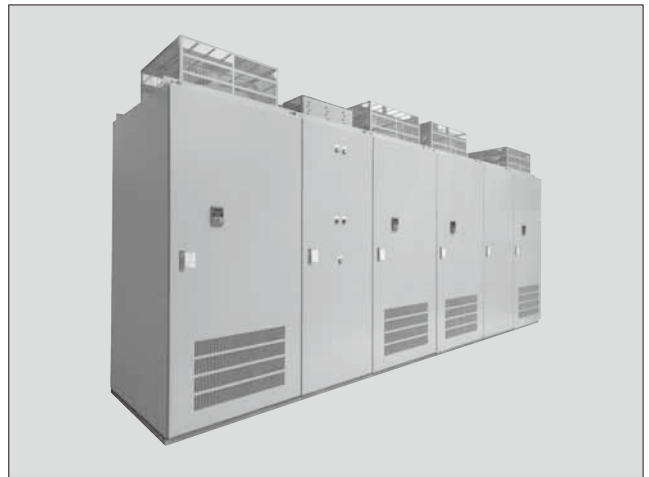


図 3 「FRENIC4400VM5R」

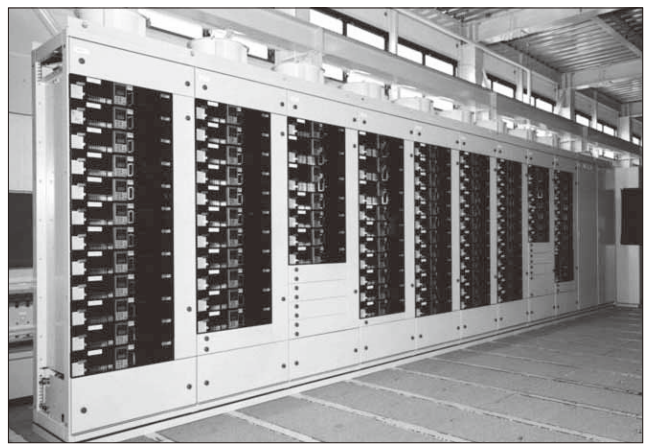


図 4 「FRENIC4000VM5R」

#### (1) 産業プラント用インバータの特徴

直流中間回路共通電源方式により、直流共通母線を介して力行エネルギーと回生エネルギーを授受するため、プラントの高効率運転に寄与している。

ミル用コンバータには、電源側の高調波を低減するため 12 相整流方式のダイオードコンバータを導入した。

また、保守性を向上するため、装置の保守は全て盤の前面から行うことができるように設計している。前面には液晶ディスプレイ付きタッチパネルを備えており、容易に運転や監視、保守の操作を行うことができる。

サポートツールとしては、チャート用アナログ出力機能、パソコンロード、高速データ収集システムなどを備えている。

#### (2) 3 レベル IGBT インバータ「FRENIC4400VM5R」

AC800 V 系の共通電源方式インバータであり、3 レベル PWM 制御により高調波やトルク脈動を抑え、電動機や機械側への影響を低減させている。本件の特殊仕様を次に示す。

##### (a) パラメータ切替機能

本件では、一つの圧延スタンドで 2 種類の電動機を切り替えて使うコンビネーションスタンドが設置されている。これまでは主機電動機 1 台に対してインバータ 1 台

の構成としてきたが、本件ではシステムのスリム化および保全作業の省力化のため、異なる仕様の電動機2台を1台のインバータで切り替えて駆動させる構成を採用した。これを実現するため、2種類の電動機の制御パラメータをインバータ内に設定できるように設定領域を拡張し、パラメータを切り替えて運用できるようにした。

#### (b) 「FRENIC4400VM5R」によるシャアの駆動

従来、補機電動機は一般的に AC400 V 系インバータで駆動していたが、電動機出力が比較的大きい鋼材の先端と後端を切断するクロップシャアならびに鋼材を定尺に切断するディバイディングシャアを AC800 V 系インバータで駆動し、圧延機駆動用直流中間共通電源に接続する構成とした。これにより、出力電流の低減とともに、全体としてのコンバータの数および容量を低減でき、ケーブルの低減や盤の省スペース化が可能となった。また、クロップシャアおよびディバイディングシャアには、新しく開発した小容量（650 kVA）のインバータを適用し、容量選択の最適化を図った。

#### (3) 多段積み低圧 IGBT インバータ「FRENIC4000VM5R」

AC400 V 系の共通電源方式インバータであり、300 kVA 以下のインバータはプラグインのユニット方式であるため、盤1面当たり最大12台のユニットを収納できる。異なる容量のユニット同士や、ベクトル制御と V/F 制御の混在も可能であり、プラント用に多くの小容量インバータを用いる場合において有用な省スペース化を実現している。

また、ユニットごとに冷却ファンを設けるのではなく、盤ごとに天井の共通ファンを用いて冷却する設計としている。これにより、消耗交換部品であるファンの台数を減らすことができ、保守作業の削減に貢献している。

#### (4) 高周波漏えい電流対策

IGBT 素子のスイッチングによる高周波電流漏えいの抑制、ならびに電動機軸受や電動機に結合される機械軸受の電食を防止するため、JIS 規格に基づいた次に示す対策を行った。

- 可変速駆動システムの構成として、入力に高圧・低圧変圧器が用いられ、かつ系統が対地から絶縁される IT システムを採用した。
- 伝送系統も同様に IT システムを採用した。
- インバータと電動機を接続する動力ケーブルは、シールドの両端を接地し、さらに電動機のフレーム接地もインバータ側で行うことで、高圧・低圧変圧器の二次側の機器間を星形等電位ボンディングにする構成とした。

### 3.3 駆動制御システム

#### (1) システム構成

図5に、本件のシステム構成を示す。このシステムでは、高速な動作が要求される圧延設備を精度良く制御するために、高速ネットワーク「SX-Net」と高速・大容量制御ネットワーク「E-SX バス」を搭載した富士電機の最新のコントローラである「MICREX-SX SPH3000MG」を採

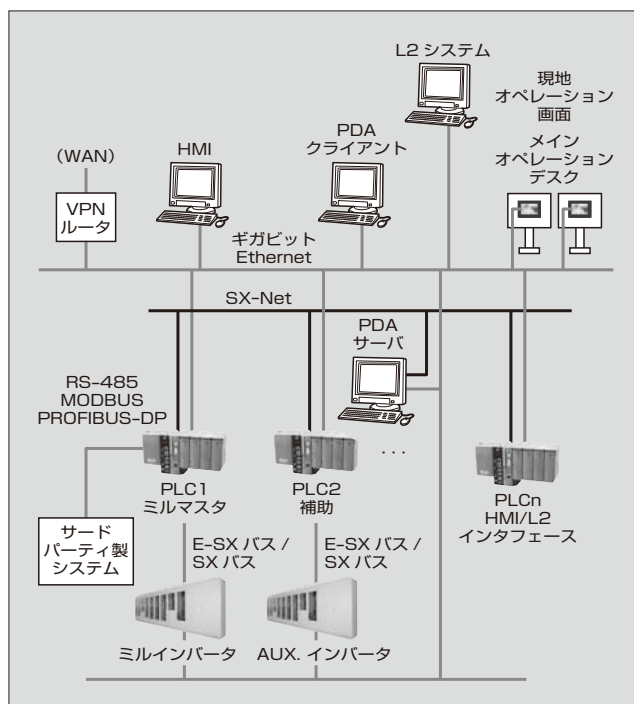


図5 システム構成

用している。複数のコントローラを同期させることで、機械制御システムから圧延制御システムまでのさまざまな規模や要求に対応したシステムを構築し、生産性を向上させた。また、操業・制御データを高速収集する PDA システムである f (s) NISDAS を組み込み、操業・制御の状態を監視できるようにした。さらに、日本の拠点から迅速なサポートを提供するため、遠隔でデータ閲覧や制御プログラム閲覧を可能とするリモートメンテナンスサポートシステムを組み込んでいる。

#### (2) 制御機器

##### (a) 高速・大容量フィールドバス「E-SX バス」

E-SX バスは、従来の SX バスの性能を大幅に向上させた高速・大容量のフィールドバスである。E-SX バス内のデータ出力タイミングを同期できるため、高精度な制御が可能となる。表2に E-SX バスと SX バスとの性能の比較を示す。

##### (b) 高速・大容量制御ネットワーク「SX-Net」

SX-Net はギガビット Ethernet <sup>(注3)</sup> をベースとする高速・大容量の制御ネットワークであり、E-SX バスと ±80μs

表2 SXバスとE-SXバスの性能比較

| 項目       | SXバス       | E-SXバス          | 従来比   |
|----------|------------|-----------------|-------|
| 入出力点数    | 8,192点     | 65,536点         | 8倍    |
| 伝送速度     | 25 Mbits/s | 100 Mbits/s     | 4倍    |
| リフレッシュ周期 | 500 μs ~   | 250 μs ~        | 2倍    |
| タクト精度    | 100 μs     | 1 μs以下          | 100倍速 |
| バス内同期    | なし         | あり<br>(±1 μs以下) | —     |

〈注3〉 Ethernet：富士ゼロックス株式会社の商標または登録商標

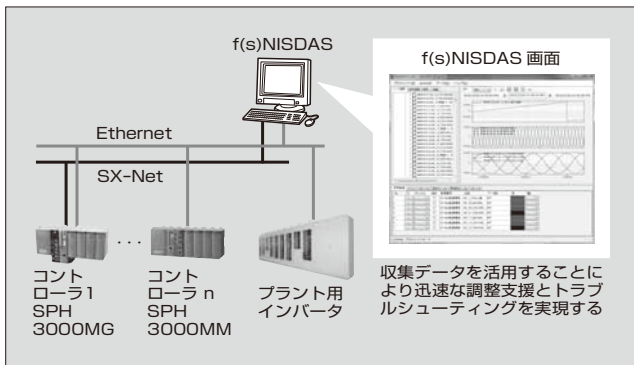


図6 「f(s)NISDAS」の適用例

で同期することが可能である。これにより、これまで困難であったコントローラ間の同期制御が可能となり、プラント制御の高精度化を実現した。主な仕様を次に示す。

- ① 最大接続局数：126 台
  - ② 伝送方式：コモンメモリ、メッセージ
  - ③ 最小ネットワーク周期：500 $\mu$ s
  - ④ コモンメモリデータ領域：128 K ワード
- (c) 高速データ収集・解析支援システム「f(s)NISDAS」

f(s)NISDAS は、コントローラやインバータの内部データを高速で収集するデータ収集システムである。1 K ワード/ms で高速収集し、大規模かつ複雑なシステムに対する操業の可視化に貢献する。図6 に f(s)NISDAS の適用例を示す。

### 3.4 プラント制御

(1) 「MICREX-SX SPH3000MG」による高速・高精度制御  
プラント制御システムでは、生産の効率化や操業の可視化に伴ってプラントデータが大容量化しているため、制御ネットワークはこれまで以上に高速かつ大容量であることが要求される。また、製造品質を向上するためには分散配置されたコントローラを同期して制御することが望ましい。

本プラントの制御システムは、7 台の MICREX-SX SPH3000MG と 3 台の HMI 端末で構成されている。これらの装置が制御ネットワークで接続され、数十から数百台のインバータやセンサなどがフィールドバスで各コントローラに接続される。MICREX-SX SPH3000MG と SX-Net を使用することで、高速・大容量のコントローラ間通信が可能となるだけでなく、これまで困難であったコントローラ間の同期制御も可能となった。さらに、SX-Net はコモンメモリ方式を採用しているため、各コントローラはネットワーク上のメモリを容易に参照できる。このように、MICREX-SX SPH3000MG と SX-Net を使用することで、制御ネットワークの高速・大容量化と、コントローラ間同期によるプラント制御システムの高精度化が実現できる。

MICREX-SX SPH3000MG、ならびに SX バス対応の高速 I/O モジュールとインバータを用いて、圧延される鋼材の検出からインバータに指令を出すまでのスループットを高速化した。これにより、インバクトドロップ抑制や最

小張力制御など、以前から提供してきた圧延品質を向上するための制御に関する精度を高めることに成功した。

### (2) リモートメンテナンスサポート

海外の新設案件では、“プラントを網羅する制御情報の一元管理”と“日本からの迅速なサポート提供”というリモートメンテナンスサポートが、生産性向上のためには欠かせない要素となっている。そこで本プラントでは、データ収集の対象をコントローラや HMI 端末だけではなく、f(s)NISDAS とドライブ装置用のデータ通信モジュール「plusFSITE」を連係させることで、ドライブ装置のデータも f(s)NISDAS で収集できるようにした。これにより、f(s)NISDAS の端末にプラントの制御情報を集約し、プラントを網羅する制御情報の一元管理を実現した。また、クライアントサーバ方式を採用したことにより、日本からインドネシアのプラントに対してアクセスしても制御ネットワークに影響を与えないようにするなど、リモートメンテナンスによるサポートの効率化を実現した。

### 3.5 その他機器

#### (1) 変圧器

主機変圧器は、電源側の高調波を低減するために一次側巻線に千鳥結線を採用し、ダイオードコンバータによる整流と合わせて 24 相整流とした。これにより、発生する電源側への高調波を低減させている。

補機変圧器は、タイの FUJI TUSCO 社製の油入変圧器（容量合計 12,300 kVA）を納入した。

#### (2) 各種制御盤

機側操作盤、群駆動電動機保護用の各個保護盤、分電盤、MCC（モータコントロールセンター）は、日本から十分な品質管理を行い、東南アジアで設計製作を行った。これにより国内製作拠点と同等の品質を確保することが可能となり、富士電機の東南アジア向け鉄鋼エンジニアリングにおいて新たな選択肢としての実績を作った。

## 4 あとがき

最新の海外棒鋼・形鋼圧延設備用電気品および駆動制御システムについて述べた。本稿で述べた以外にも、富士電機が提供する機器や設備の技術は日々開発が行われ、急速に進化している。加えて、今後も海外に圧延設備用電気品を納入していく機会はますます増加すると考えられるため、リモートメンテナンスサポートの充実をさらに検討し、追求していく所存である。



### 小粥 史一

主に鉄鋼プラント用駆動制御システムのエンジニアリングならびに企画に従事。現在、富士電機株式会社パワエレシテム事業本部プロセスオートメーション事業部技術第一部。



### 川口 鉄平

産業プラント用電動力応用システムの企画・設計および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エレシテム事業本部エンジニアリング統括部システム技術センターオートメーション技術部。





# 世界最小の船舶用サイクロン式 SO<sub>x</sub> スクラバ

World's Smallest SO<sub>x</sub> Removal Cyclone Scrubber for Marine Vessels

青木 幸男 AOKI, Yukio

豊角 浩之 TOYOZUMI, Hiroyuki

高橋 邦幸 TAKAHASHI, Kuniyuki

船舶排ガス中には硫黄酸化物 (SO<sub>x</sub>) が多く含まれ、大気環境保護の観点から国際的な問題となっている。排ガス中の脱硫技術である SO<sub>x</sub> スクラバは大型のものが多く、小型化が望まれている。しかし、小型化に有利な脱硫方法であるサイクロン方式は、一般的に他の方式と比べて脱硫性能が劣る。富士電機は、小型かつ脱硫性能が優れた世界最小のサイクロン式 SO<sub>x</sub> スクラバを開発し、実船上試験で指定海域でも使用可能であることを実証した。SO<sub>x</sub> スクラバの小型化で普及が加速し、低価格の高硫黄燃料油が継続使用可能となり、国際物流を支える海運会社の事業コスト低減に寄与することができる。

The exhaust gas of marine vessels contains a high concentration of sulfur oxide (SO<sub>x</sub>), which from the viewpoint of protecting the environment, has become a worldwide problem. Most SO<sub>x</sub> scrubbers that desulfurize exhaust gas are large in size, and there has been increasing demand for more compact ones. In this respect, cyclone types have the advantage of being smaller in size, but their desulfurization performance in general is inferior to other types of scrubbers. Fuji Electric has developed the world's smallest cyclone SO<sub>x</sub> scrubber with high level desulfurization performance and has demonstrated that the scrubber is capable of being used in emission control areas through field tests on ships. Downsizing a SO<sub>x</sub> scrubber will facilitate its prevalence, allowing low-priced high-sulfur fuel oil to be used continuously. This could contribute to reducing the operating cost of shipping companies that support international logistics.

## ① まえがき

船舶の主機関や補機関として用いられているディーゼル機関の排ガス中には、硫黄酸化物 (SO<sub>x</sub>) や窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>)、浮遊粒子状物質 (PM: Particulate Matter) が多く含まれ、大気環境保護の観点から国際的な問題となっている。国際海事機関 (IMO: International Maritime Organization) では、「改正 MARPOL 73/78 条約付属書Ⅵ」を 2008 年に発効し、排ガス中の SO<sub>x</sub> および PM を低減するため、低硫黄燃料油を用いるか、あるいはこれと同等の措置と旗国主管庁に認められた排ガス浄化システム (EGCS: Exhaust Gas Cleaning Systems) を搭載するよう定めている<sup>(2)</sup>。図 1 に排ガス規制スケジュールを示す。これまで北米沿岸や北海などの指定海域 (ECA) に限定して燃料に含まれる硫黄分濃度の上限を設定していたが、2020 年からは一般海域に対しても規制が強化される。このため、2020 年以降は全ての船が規制に適合する燃料油

を使用するか EGCS を搭載する必要がある。

EGCS は、指定海域に隣接する欧米主導で実用化されており、その主要機器は排ガス中の SO<sub>x</sub> をアルカリ性の水で吸収して中和する湿式スクラバ (通称: SO<sub>x</sub> スクラバ) である。しかし、既存の SO<sub>x</sub> スクラバは大型のものが多く、機器配置上の制約が厳しい場合、搭載しにくいといった課題がある。本稿では、世界最小の船舶用サイクロン式 SO<sub>x</sub> スクラバの特徴および性能について述べる。

## ② 排ガス浄化システム (EGCS) の構成

富士電機が提案する EGCS は、排ガス中の硫黄成分を除去するための SO<sub>x</sub> スクラバ、EGCS 運転時に SO<sub>2</sub> および CO<sub>2</sub> の排出量を連続監視するためのガス分析計、ならびにスクラバ水の水質を監視する水質計から構成されている。

EGCS の運転方法として、海水をくみ上げて排ガスを洗浄する運転モード (Open loop) と、海水あるいは精製水にアルカリ剤を添加して循環使用する運転モード (Closed loop) があり、通常の世界では Open loop を使用する。図 2 の Open loop のシステム構成例に示すように、システムが簡素であるため投資の負担と、設置スペースを抑えることができる。

洗浄水排出禁止海域に対応する場合、Closed loop を採用する必要がある。Closed loop モードには、全く洗浄水を排出しない Full-Closed loop と、除濁などの浄化処理後に洗浄水を排出する Semi-Closed loop がある。図 3 に Closed loop のシステム構成例を示す。Open loop と比較して、Closed loop の場合は熱交換器や水処理装置などのシステム構成機器が多くなるため、大きな船内空間が必要になってしまう。EGCS において、主要構成機器である

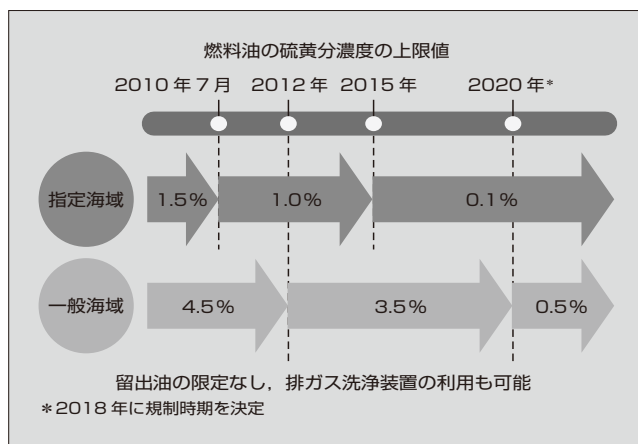


図1 SO<sub>x</sub>・PM 規制の施行スケジュール

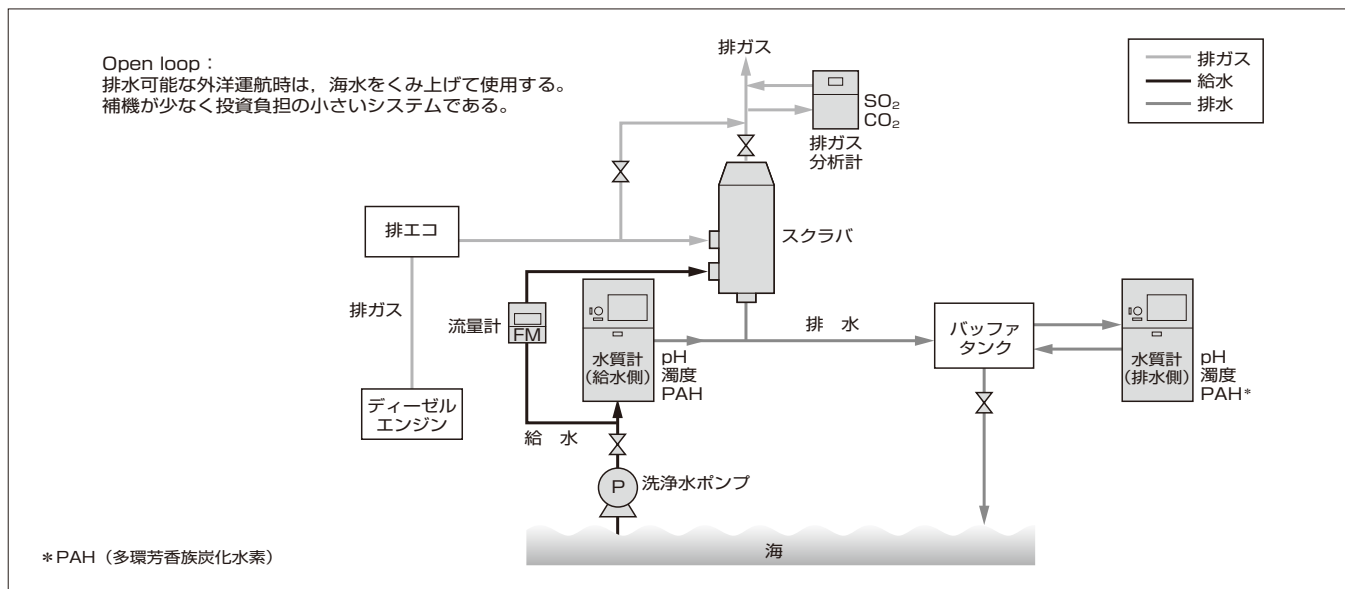


図2 Open loop のシステム構成例

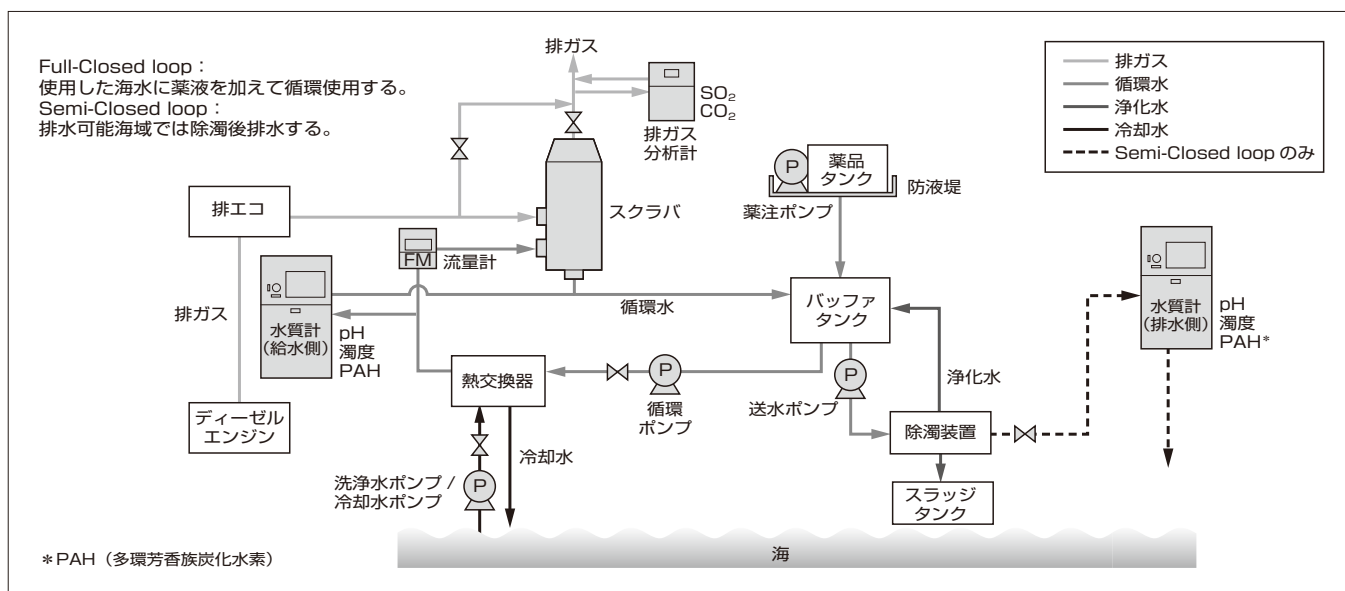


図3 Closed loop のシステム構成例

SO<sub>x</sub> スクラバは最も装置の寸法が大きい。最大限、船内空間を確保するため、SO<sub>x</sub> スクラバの小型化が強く求められる。

### ③ サイクロン式 SO<sub>x</sub> スクラバ

#### 3.1 従来の SO<sub>x</sub> スクラバ

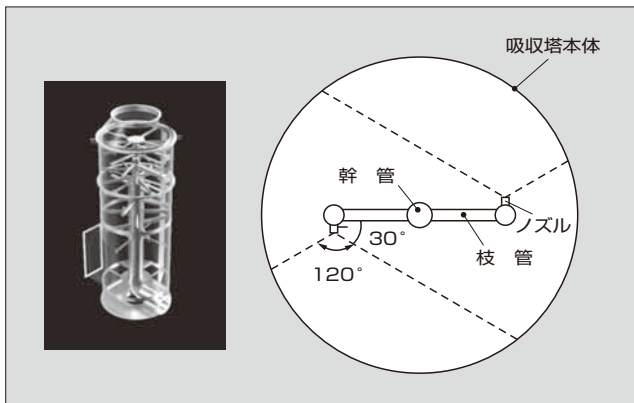
表1に陸上の施設で使用されてきた従来の SO<sub>x</sub> スクラバの処理方式を示す。一般に、排ガスの空塔速度が速いほど小型化が可能であるが、SO<sub>x</sub> スクラバの SO<sub>x</sub> 除去率（脱硫性能）は空塔速度が遅いほど高くなる。そこで、富士電機は、小型化と高脱硫性能の両立、ならびに内燃機関の許容背圧への影響を最小限にするサイクロン式 SO<sub>x</sub> スクラバに着目した。サイクロン方式は装置内で渦流を発生させ、気液分離を行う構造であるため、対向流型などの従来法と

表1 SO<sub>x</sub> スクラバの処理方式

| 仕様と方式      | サイクロン                            | スプレー塔                          | 充填塔                       | 棚板/充填剤+スプレー    |
|------------|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------|----------------|
| 空塔速度 (m/s) | ～ 10                             | ～ 10                           | 1.0 ～ 1.5                 | 1.6 ～ 3.5      |
| 吸収材液量      | 中                                | 多                              | 少                         | 少              |
| 脱硫率 (%)    | ～ 95                             | ～ 90                           | 95 ～ 98                   | 95 ～ 98        |
| 特徴         | ○塔中心から吸収液を噴霧<br>○簡単な構造<br>⇒小型化可能 | ○簡単な構造<br>○ガスの偏流リスク有<br>⇒脱硫率低下 | ○脱硫率高<br>○圧力損失高<br>○保守性悪い | スプレー塔と充填塔の中間特性 |

比較して圧力損失が大幅に小さい。また、空塔速度を他の方式の2～5倍にでき、大幅な小型化が可能である。

図4にサイクロン式 SO<sub>x</sub> スクラバの構造例を示す。円

図4 サイクロン式 SO<sub>x</sub> スクラバの構造例

筒状の塔の底部から旋回上昇する排ガスに、塔内のスプレーノズルから塔内半径方向に噴霧される液滴を接触させて SO<sub>x</sub> を吸収し、中和する。船舶用ディーゼル機関から排出される SO<sub>x</sub> はほとんどが SO<sub>2</sub> であり、アルカリ性の海水によって式(1)および式(2)に示すように、吸収と中和が行われる。なお、式(2)において A はアルカリ金属を示す。



通常、スプレーノズルは枝管に対して垂直に設置される。この場合、スプレーノズルの噴霧パターンが扇形であれば噴射角度は広くても 120 度であり、少なくとも中心方向の 30 度分には液滴が噴霧することはない。また、枝管の延伸方向側の周壁とスプレーノズルの噴口との間の距離が短いため、この部分に噴霧される液滴の飛距離は短くなる。SO<sub>x</sub> スクラバの脱硫性能は、排ガスと液滴との接触面積および接触時間に依存する。したがって、スプレーノズルから噴霧される液滴が広い範囲に拡散しない場合には十分な接触面積が得られない。また、飛距離が短い場合には、十分な接触時間が得られない。このように性能向上のためには、スプレーノズルの数を増やして気液接触性を確保する必要があり、スクラバが大型になってしまう。また、一般的な実用サイズのサイクロンスクラバは、SO<sub>x</sub> 除去率が 90 ～ 95% 程度であるが、この程度の性能では指定海域の規制には対応できない<sup>(4)</sup>。

### 3.2 船舶用サイクロン式 SO<sub>x</sub> スクラバの開発

EGCS ガイドラインでは、SO<sub>x</sub> スクラバの排ガス浄化性能について、排ガス中の成分濃度比 (Ratio Emission : SO<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>) を指標として連続監視するよう要求している。表 2 に燃料油中の硫黄濃度に対する SO<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 比を示す。ECA 基準 (0.1% 硫黄燃料油使用と同等) に対応するためには、上述の Ratio Emission が 4.3 以下を満足しなければならない。船舶に搭載する脱硫装置は、最大 98% (3.5% 硫黄⇒0.1% 硫黄) の脱硫性能が求められているが、従来のサイクロン式 SO<sub>x</sub> スクラバでは脱硫性能を満足できない。そこで、サイクロン式の高風速処理で低圧力損失であるという特長を生かしながら、98% 以上の脱硫効率を達

表 2 燃料油中の硫黄濃度に対する SO<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 比

| Fuel Oil Sulphur Content<br>[% 質量 (mass)] | Ratio Emission SO <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub><br>[ppm/% 体積 (volume)] |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 4.50                                      | 195.0                                                                  |
| 3.50                                      | 151.7                                                                  |
| 1.50                                      | 65.0                                                                   |
| 1.00                                      | 43.3                                                                   |
| 0.50                                      | 21.7 (Global)                                                          |
| 0.10                                      | 4.3 (ECA基準)                                                            |

成できるように開発した。

富士電機では、排ガスと液滴との接触面積および接触時間を増加させるため、SO<sub>x</sub> スクラバの内部構造を工夫している。内部構造の最適化により、効率よく液滴と排ガスを接触させることで脱硫効率が向上する。

## ④ 船上における EGCS 性能実証試験

上述のような設計技術を基に、段階的なスケールアップ検証を陸上試験で実施した。その成果を基に設計・製作したサイクロン式 SO<sub>x</sub> スクラバを実船搭載し、船上試験を行った。図 5 に実証船である NADESHIKO の外観を、図 6 にサイクロン式 SO<sub>x</sub> スクラバを示す。9 MW エンジンを積んだ船に富士電機の SO<sub>x</sub> スクラバ〔φ 2,000×H6,000 (mm)〕を搭載し、性能試験を行った。性能目標は ECA 基準に対応可能な Ratio Emission を 4.3 以下とした。

### 4.1 Open loop 運転における性能試験結果

図 7 に、エンジン負荷 50% で運航した際の Open loop 運転による脱硫性能を示す。約 6 時間の連続運転を行い、ECA 基準を安定して満足することを実証した。

図 8 に、エンジン負荷 85% で運航した際の Open loop 運転による脱硫性能を示す。約 1 時間の連続運転を行い、SO<sub>x</sub> スクラバの設計ポイント (最大排ガス量) において、

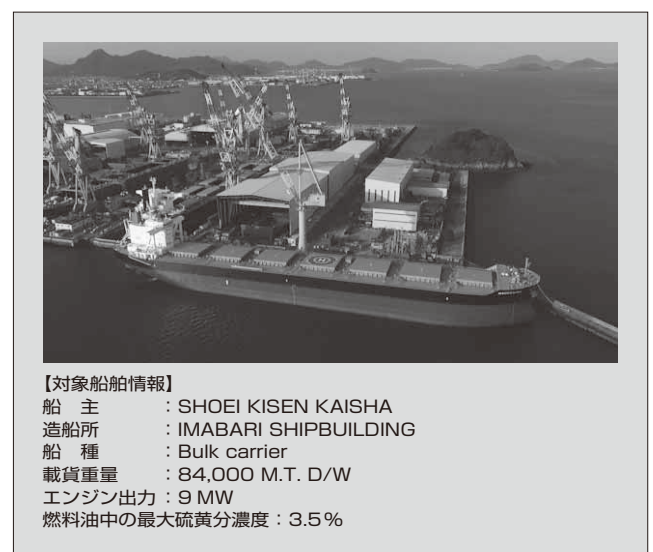


図5 NADESHIKO の外観



【SO<sub>x</sub> スクラバ仕様】  
スクラバサイズ：φ2,000 × H6,000 (mm)  
スクラバ重量：4.5 t

図6 サイクロン式 SO<sub>x</sub> スクラバ

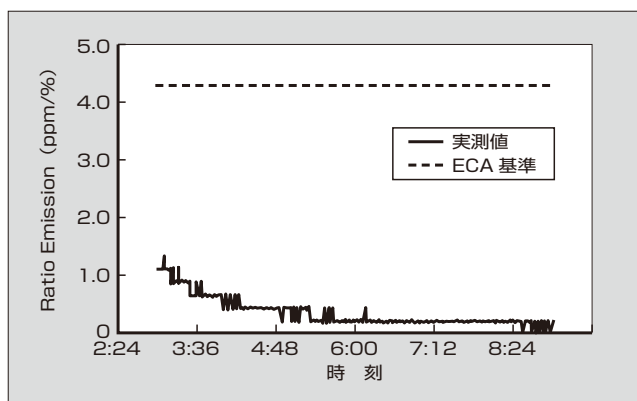


図7 エンジン負荷 50% 時の Open loop 脱硫性能

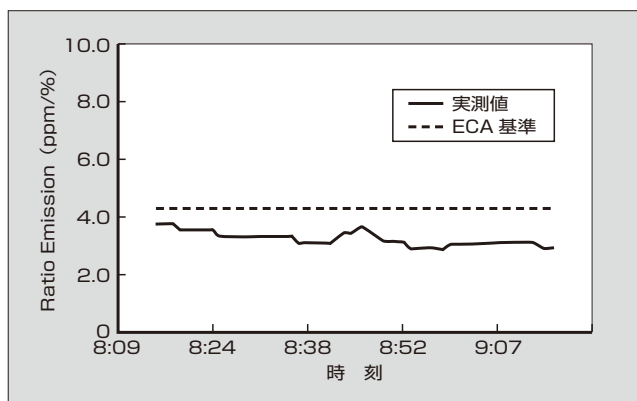


図8 エンジン負荷 85% 時の Open loop 脱硫性能

ECA 基準を安定して満足することを実証した。

#### 4.2 Closed loop による性能試験結果

図9 にエンジン負荷 50% で運航した際の Semi-Closed loop 運転による脱硫性能を、図10 にエンジン負荷 50% で運航した際の Full-Closed loop 運転による脱硫性能を示

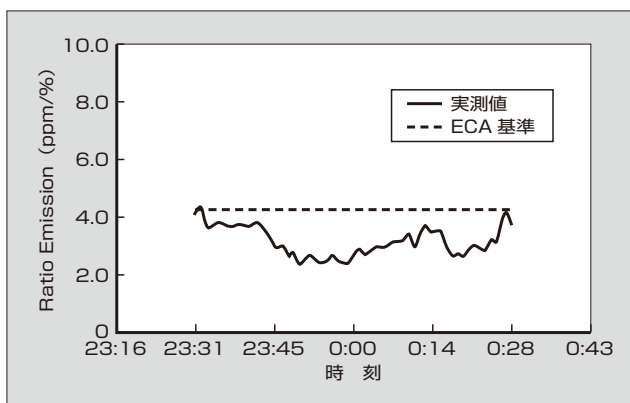


図9 エンジン負荷 50% 時の Semi-Closed loop 脱硫性能

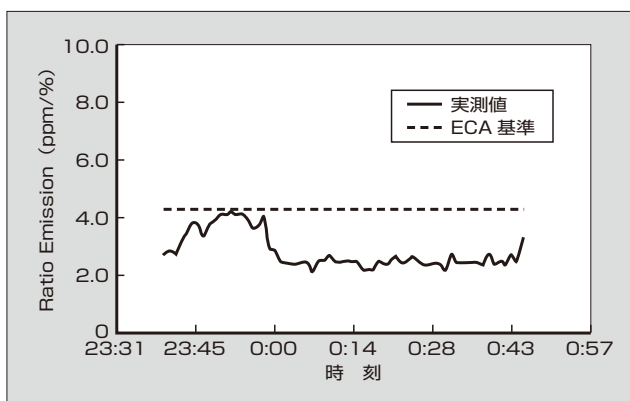


図10 エンジン負荷 50% 時の Full-Closed loop 脱硫性能

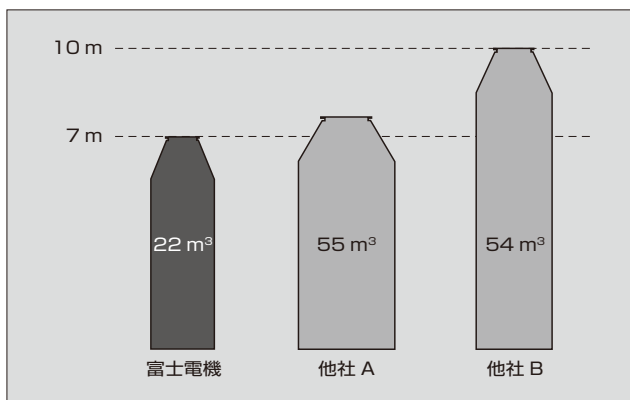


図11 SO<sub>x</sub> スクラバの体積比較 (10 MW 級)

す。約1時間の連続運転を行い、いずれの場合も ECA 基準を安定して満足することを実証した。

#### 5 実証試験の成果

EGCS 性能実証試験結果から、富士電機の SO<sub>x</sub> スクラバは各運転モードで十分な脱硫性能を発揮することを確認できた。

図11 に、船上試験用試作機相当のサイクロン式 SO<sub>x</sub> スクラバと従来の SO<sub>x</sub> スクラバの体積比較を示す。富士電機のサイクロン式 SO<sub>x</sub> スクラバは、従来と比較して体積が 50% 以下でありながら、ECA 基準を満足する排ガス浄



化性能を達成した。また、低圧力損失と小型化に伴う軽量化により、船内への設置性が一段と高まる。

## 6 あとがき

世界最小の船舶用サイクロン式 SO<sub>x</sub> スクラバについて述べた。

今回の船上試験では、実船に搭載した EGCS が船舶の SO<sub>x</sub>・PM 規制において最も厳しい指定海域にて使用可能であることを実証した。SO<sub>x</sub> スクラバの小型化で普及が加速し、従来どおりの低価格な高硫黄燃料油が使用可能となり、国際物流を支える海運会社の事業コスト低減に寄与することができる。

今後、SO<sub>x</sub> スクラバのさらなる小型化と EGCS の運用コスト低減を可能とする技術開発を行い、より多くの船種に適用可能な EGCS を市場に提供することで、世界的な環境負荷低減に貢献していく所存である。

なお、船上試験は、正栄汽船株式会社、今治造船株式会社および一般財団法人日本海事協会との共同研究体制の下、日本海事協会の“業界要望による共同研究”のスキームにより研究支援を受けて実施している。富士電機は、今治造船株式会社から業務委託され、本研究開発において、EGCS 設備一式の設計・製作および試験遂行を実施した。関係各位に謝意を表する。

## 参考文献

- (1) “Prevention of Air Pollution from Ships”. <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Air-Pollution.aspx>, (accessed 2018-02-01).
- (2) “2015 GUIDELINES FOR EXHAUST GAS CLEANING

SYSTEMS”. <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/MEPC.259%2868%29.pdf>, (accessed 2017-12-07).

- (3) 株式会社NEプロジェクト. NEサイクロンラバー. <http://neproject.eco.coocan.jp/yunittokiki.html>, (参照 2018-02-01).
- (4) 乾貴誌ほか. 排ガス浄化システム (SO<sub>x</sub>スクラバ) の小型化技術. 日マリ学誌, 2015, vol.50, no.3, p.324-331.
- (5) 乾貴誌ほか. IMOの国際的規制に対応した小型化を可能とする排ガス浄化システムの技術開発. 日本船舶用工業会.
- (6) 富士電機株式会社. 排ガス処理装置. 特許第5998915号. 2012-12-19 (出願日).
- (7) 富士電機株式会社. 排ガス処理装置. 特許第5983802号. 2015-02-24 (出願日).



青木 幸男

船舶用排ガス浄化装置ほか道路トンネル用集塵システム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エレシステム事業部ファクトリーオートメーション事業部 FA システム技術部課長。



豊角 浩之

船舶用排ガス浄化装置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エレシステム事業部 FA システム技術部。



高橋 邦幸

船舶向け脱硫装置ほか業務用 SOFC の開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所エネルギー技術研究センター熱エネルギー技術研究部主任。技術士（機械部門）。日本技術士会会員、電気学会会員。

# 水環境保護に貢献するバチルス菌排水処理システム 「FBS-Premium システム」

“FBS-Premium System” *Bacillus* Wastewater Treatment System Contributing to Water Environmental Protection

田口 和之 TAGUCHI, Kazuyuki

佐藤 匡則 SATO, Masanori

井上 公平 INOUE, Kohei

バイオガスを生成して利用するバイオガス発電において、メタン発酵処理後に残った消化液は肥料として活用してきた。一方、未活用の消化液は排水処理設備を設置し、排水基準に適合した処理を講じる必要があり、処理設備の増設で初期投資がかさみ、FIT による売電収益を圧迫していた。富士電機は、これらの課題を解決するため、バチルス菌を用いた排水処理システムに回転円板装置を組み合わせた排水処理システム「FBS-Premium システム」を開発した。これにより、処理設備の増設が不要で、ランニングコストを約 30% 削減することができた。

In biogas power generation, generating and using biogas as fuel, the digestive fluid that is a residue product of the methane fermentation process has been utilized as fertilizer. Unused digestive fluid, however, has to be treated by the wastewater processing facility to meet with the wastewater standards. The addition of the processing facility increases initial investment, and this, in turn, suppresses the profitability of power selling through the Feed-in Tariff Scheme. To help mitigate these problems, Fuji Electric has developed the “FBS-Premium System” as a wastewater treatment system that incorporates a rotary disk device into wastewater treatment systems that use *bacillus*. This system makes it unnecessary to add additional treatment facilities, thus reducing running costs by about 30%.

## ① まえがき

2012 年、「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法」に基づき、「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」(FIT) が開始された。これを背景に、畜産系廃棄物をメタン発酵させてバイオガスを生成・利用するバイオガス発電が拡大基調となっている。

このバイオガス発電において、メタン発酵処理時に発生する残渣(ざんさ)である消化液は、従来は堆肥や液肥として活用されてきた。一方、未活用の消化液については、排水処理設備を設置し、排水基準に適合した処理を講じる必要がある。ただし、従来の排水処理技術である活性汚泥法などで消化液を処理する場合、排水処理設備の設置のためのインシタルコストおよびランニングコストがかさみ、FIT による売電収益を圧迫することが課題となっている

(図 1)。

富士電機は、バイオガス発電の消化液排水処理設備におけるこれらの課題を解決するため、バチルス菌<sup>(注)</sup>を用いた排水処理システムに回転円板装置<sup>(1)</sup>を組み合わせた排水処理システム「FBS-Premium システム」を開発した。

## ② メタン発酵消化液の排水処理

メタン発酵の残渣である消化液は従来、前述のとおり農地還元利用されてきた。しかし、受入農地の不足やバイオガス発電設備の増加に伴うさらなる消化液の発生により、消化液を環境中に放出できる基準にまで浄化する排水処理の必要性が高まっている。

消化液を含め、排水処理の手法としては生物学的、物理的および化学的な方法がある。これらの中でも、生物学的

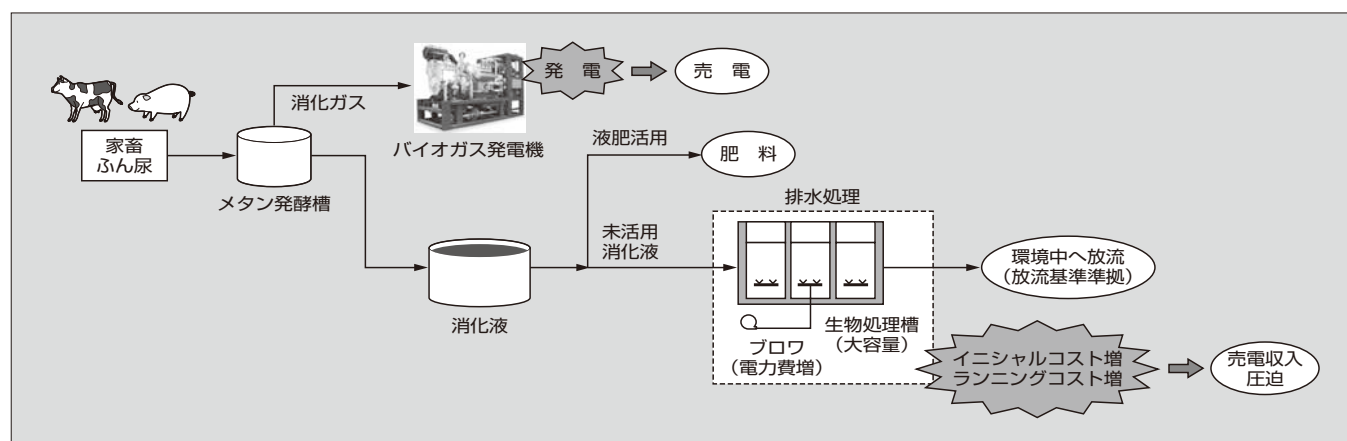


図1 メタン発酵フロー図と課題

〈注〉バチルス菌：60 ページ「解説 1」を参照のこと

処理が最も安価で、オペレーションが容易なことから標準活性汚泥処理が一般的に普及している。しかし、この処理方式には次の課題がある。

#### (1) 多額のイニシャルコスト

消化液は、メタン発酵処理で一度生物処理された残渣であるため、生物で分解しにくい有機物成分が多い。以前からある標準活性汚泥処理では、一般的な有機系排水処理と比べて長時間の処理が必要となり、排水を貯留して処理するための大容量の水槽が必要となる。そのため、排水処理設備の躯体（くたい）工事や土木工事によって多額のイニシャルコストがかかる。さらに、生物処理において必要な空気を送り込む大容量の送風機（ブロウ）が必要であり、これもイニシャルコストがかさむ一因となっている。

#### (2) 多額のランニングコスト

排水処理設備で水槽が大容量化されると、ブロウも大容量化されることは前述のとおりである。また、ブロウは排水処理設備において電力費の大半を占めるため、ランニングコストが増加する。

### ③ 排水処理システム「FBS-Premium システム」

富士電機は、バチルス菌を用いた排水処理システムに回転円板装置を組み合わせることで排水基準に適合しつつ、前述のコストに関する課題を解決する排水処理システム「FBS-Premium システム」を開発した。

#### 3.1 概要

##### (1) 「FBS-Premium システム」

FBS-Premium システムの概略フローを図2に示す。本システムは、回転円板装置において1次処理を行い、生物処理槽である曝気（ばっき）設備において2次処理を行う。その後、処理水と汚泥を分離するため沈殿槽において固液分離を行うものである。

##### (2) バチルス菌による排水処理

本システムの運用においては、図2に示したとおり、バチルス菌を初回のみ投入する。また、バチルス菌を優占化させるための活性剤を毎日、少量を添加する。FBS-

Premium システムで用いられるバチルス菌は自然界にある数多くのバチルス菌の中でも、高濃度の有機物を短時間で分解し、かつ処理に伴い発生する余剰汚泥（産業廃棄物、系外に需要家が有償で処理委託）を分解する酵素を大量に分泌するという特徴を持っている<sup>(1),(2)</sup>。

富士電機では、このバチルス菌と活性剤を用いた排水処理システムを開発し、食品、飲料工場などの排水処理に採用されている。

また、活性剤は、けい素、鉄、マグネシウムなどのミネラルを主成分としており、バチルス菌の増殖を促進するとともに、バチルス菌の優占化や菌濃度・処理性能の維持がなされ、処理水質が安定化する。

##### (3) 回転円板装置

回転円板装置（図3）は、バチルス菌と汚泥を付着させる立体網状構造の接触体（図4）に、排水を通水し接触させることにより浄化する装置である。本装置は、多量のバチルス菌や汚泥を円板体に付着（図5）させるので、従来技術に比べて、曝気容積がより小容量となり、多量の有機物などの汚濁成分の分解除去が可能である。さらに、大容量の水槽を用いていた従来技術に比べて約20～40%安価である。

回転円板装置の模式図を図6に示す。円形の接触体は複数枚並列に配置し、回転する。接触体の下側半分が水槽内



図3 回転円板装置の外観

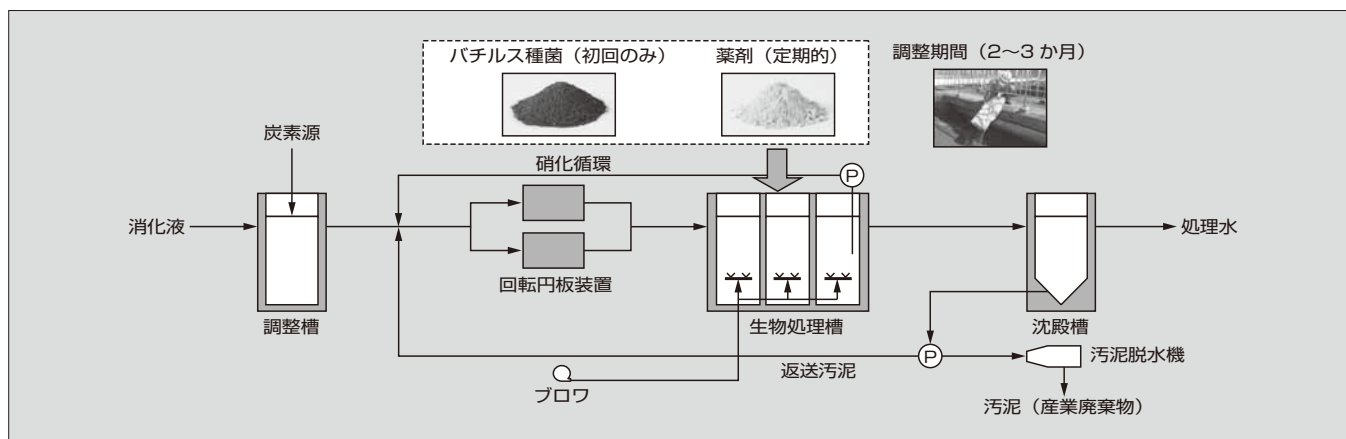


図2 「FBS-Premium システム」の概略フロー



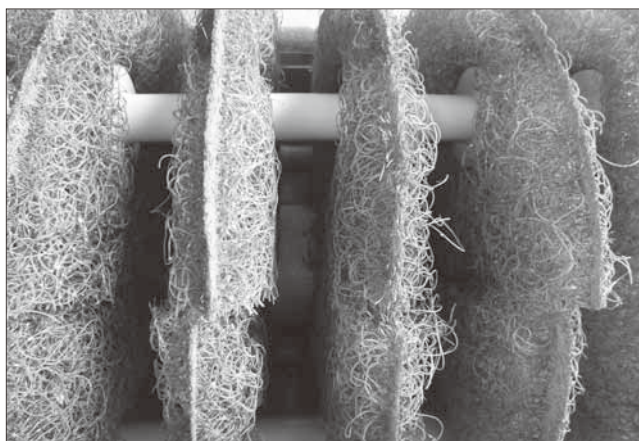


図4 回転円板装置の接触体（汚泥付着前）



図5 回転円板装置の接触体（汚泥付着状態）

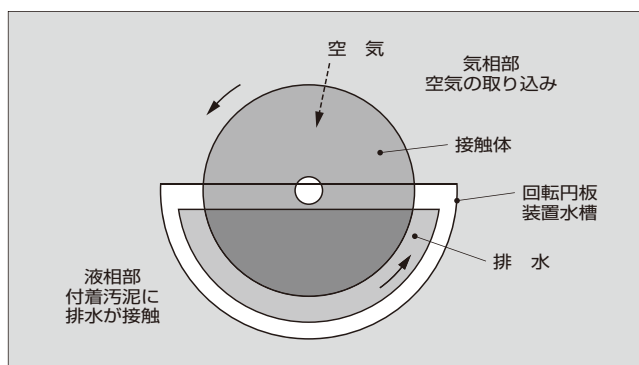


図6 回転円板装置の模式図

の排水に浸かり、接触体に付着した汚泥に排水が接触する。また、上側半分は水槽の外にあり、空気に接触するため接触体に付着した汚泥に空気が取り込まれる。

接触体は立体網目構造であるため、内部にまで活性汚泥を付着保持できる。これにより、接触体の内部および付着した活性汚泥の内部は空気の供給が制限されることになり、嫌気状態となる。したがって、回転円板装置は接触体の回転によって、嫌気領域と好気領域の両方を形成するため、微生物の脱窒反応を高効率で進行させ、窒素の除去能力を高く保持することができる。

#### (4) 曝気設備

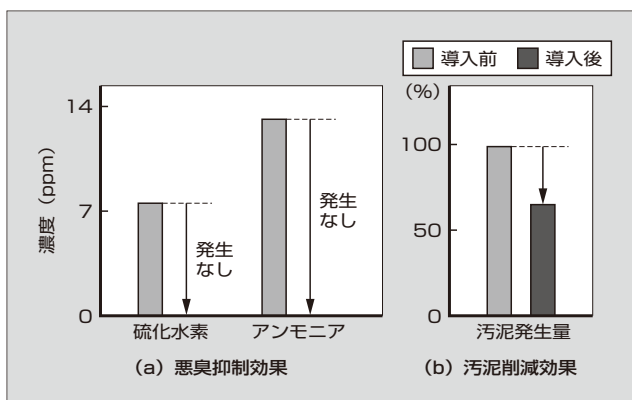


図7 パチルス菌による悪臭抑制および汚泥削減効果の例

回転円板装置では、円板の回転運動が微生物に空気を送り込むので、微生物は酸素を自給することができる。これに加えて、パチルス菌は、少ない酸素量で汚濁成分を浄化できるため、空気を送る量を大幅に削減することができ、図2に示した生物処理槽へ空気を送るためのブロウなどの曝気設備のダウンサイジングが可能となる。

### 3.2 特徴

#### (1) イニシャルコスト削減効果

排水処理設備の設備面積の低減およびブロウなどの曝気設備のダウンサイジングにより、従来と比較してイニシャルコストを約20～40%削減できる。

#### (2) ランニングコスト削減効果

前述のとおりパチルス菌と回転円板装置の組合せにより、空気を送り込む量が削減できるため、曝気電力費を従来と比較して約20～50%削減できる。

#### (3) 悪臭の抑制効果

パチルス菌は、悪臭成分である硫化水素やアンモニアなどを無臭の成分に変換し、悪臭の発生を抑制する<sup>(1)</sup>。図7(a)の悪臭抑制効果から分かるように、排水処理設備の周辺環境や労働環境の改善を図ることができる。

#### (4) 汚泥の削減効果

パチルス菌は、汚泥の主成分であるたんぱく質や炭水化物を分解する酵素を大量に分泌する。汚泥が削減されるのは、この酵素の働きによるものであり、図7(b)に示したように、発生する汚泥を約20～40%程度削減することが可能である<sup>(1)</sup>。産業廃棄物である汚泥の発生を抑制することによって産廃処分費が削減できる。

## ④ 畜産（乳牛）メタン発酵プラント排水処理パイロット試験例

### 4.1 背景、目的

本事例では、標準活性汚泥法が導入されている畜産業を営むA社におけるメタン発酵プラントの排水処理設備の処理能力増強について述べる。

A社では、飼育する家畜数の増加に伴い、発生する消化液排水量が半年後に1.5倍（40m<sup>3</sup>/日→60m<sup>3</sup>/日）に



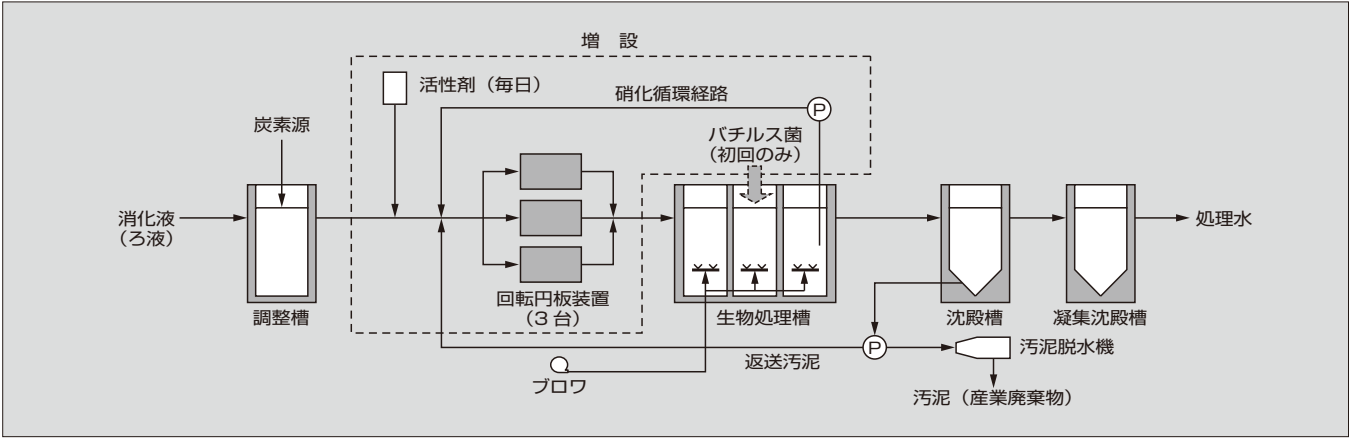


図8 「FBS-Premium システム」のフロー

増加することが見込まれていた。既存の排水処理設備の規模のままでは排水処理能力が不足し、規制値を順守した処理が不可能であった。そのため、今回開発したFBS-Premium システムによる処理能力増強を計画した。

また、既設の排水処理設備において土木構造物を増設することなく、回転円板装置の追加と標準活性汚泥法からバチルス菌を用いた排水処理法への変更により、イニシャルコストおよびランニングコストを抑制できる構成とした。目標値は次に示すとおりである。

- (a) 回転円板装置の追加により現状の消化液量を1.5倍とした条件でも処理水質が放流基準値を達成すること
- (b) 標準活性汚泥法で増設した場合に比べて、イニシャルコストを大幅に削減すること
- (c) 標準活性汚泥法で増設した場合に比べて、ランニングコストを約30%削減すること

#### 4.2 「FBS-Premium システム」の構成

図8に本事例でのFBS-Premium システムのフローを示す。既存の排水処理設備では、調整槽、生物処理槽、沈殿槽、凝集沈殿槽がある。開発したFBS-Premium システムでは、生物処理槽の前段に3台の回転円板装置を追加し、生物処理槽および回転円板装置にバチルス菌を導入し、汚泥返送を回転円板装置に返す構成である。さらに、窒素除去をより進めるため生物処理槽から回転円板装置に曝気液を循環させる硝化循環経路を設ける。

バチルス菌の優占化、菌濃度維持、処理性能維持のために必要な活性剤の添加設備も設置する。

FBS-Premium システムの処理性能を評価するため、実規模の約1/100スケールのパイロット試験を行った。

既存のメタン発酵消化液の原液の浮遊物質（SS：Suspended Solid）は30,000 mg/Lであり、生物処理で分解できない成分を大量に含む。そのため、この固形物を取り除く凝集固液分離処理を行い、その処理した排水を処理対象として浄化する。表1に固液分離後の消化液の水質を示す。

パイロット試験の結果、放流基準項目である生物学的酸素要求量（BOD：Biochemical Oxygen Demand）、化学

表1 水質データ

| 項目         |     | 値        |
|------------|-----|----------|
| 固液分離後消化液水質 | pH  | 中性       |
|            | BOD | 500 mg/L |
|            | COD | 950 mg/L |
|            | SS  | 180 mg/L |
|            | T-N | 900 mg/L |

表2 「FBS-Premium システム」の運転条件

| 項目      | 運転条件                                |
|---------|-------------------------------------|
| 排水量     | 60 m <sup>3</sup> /日                |
| 回転円板装置  | 3台（新設）                              |
| 生物処理槽容積 | 530 m <sup>3</sup><br>（既設水槽のみで増設なし） |
| 硝化循環率   | 300～600%                            |
| 汚泥返送率   | 50～100%                             |
| 炭素源     | 添加                                  |
| 後処理     | 凝集沈殿処理                              |

表3 「FBS-Premium システム」の処理後の水質と放流基準値

| 項目  | 処理水質    | 放流基準       |
|-----|---------|------------|
| pH  | 8       | 5.8～8.6    |
| BOD | 69 mg/L | 120 mg/L以下 |
| COD | 45 mg/L | 120 mg/L以下 |
| T-N | 46 mg/L | 60 mg/L以下  |

的酸素要求量（COD：Chemical Oxygen Demand）、全窒素濃度（T-N：Total Nitrogen）の全てにおいて放流基準値を満たすことができた。

FBS-Premium システムの運転条件を表2に、処理後の水質および放流基準値を表3に示す。

#### 4.3 導入効果

##### (1) イニシャルコスト

FBS-Premium システムを導入することで、生物処理槽の増設が不要となり、表4に示すようにイニシャルコストは大幅に削減できる。

表 4 コストの相対比較

| 項 目      | 標準活性汚泥法 | FBS-Premiumシステム |
|----------|---------|-----------------|
| イニシャルコスト | 100     | 60              |
| ランニングコスト | 100     | 70              |

(2) ランニングコスト

ランニングコストは、曝気にかかる電気代の削減と毎日投入する活性剤によるコスト増加分を差し引いても、FBS-Premium システム全体のランニングコストは、約 30% 削減できる。

5 あとがき

水環境保護に貢献するバチルス菌排水処理システム「FBS-Premium システム」について述べた。

本システムの適用拡大により、拡大基調であるバイオガス発電プラントの運営コスト削減ならびに水環境の保護に貢献していく所存である。

参考文献

(1) 田口和之ほか. バチルス菌による新排水処理ソリューション. 富士電機技報. 2017, vol.90, no.1, p.47-51.

(2) 田口和之ほか. バチルス属細菌を優占種とする活性汚泥法の処理性能と汚泥削減の検討. 第49回日本水環境学会講演集. 2015, p.213.



田口 和之

排水処理システムの開発，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エレシステム事業本部環境ソリューション事業部水環境プロジェクト部主査。日本生物工学会会員。



佐藤 匡則

排水処理システムの電気，計装の設計，開発に従事。現在，富士電機株式会社パワエレシステム事業本部環境ソリューション事業部水環境プロジェクト部部長。



井上 公平

排水処理システムの開発，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エレシステム事業本部環境ソリューション事業部水環境プロジェクト部主任。

# 安定生産と収益性の向上に貢献する農業ソリューション「SmileAGRI」

“SmileAGRI” Agricultural Solution for Stable Production and High Profitability

吉田 仁 YOSHIDA, Hitoshi

河村 賢 KAWAMURA, Satoshi

近年、農業従事者の減少や気象などの栽培環境の不安定化などにより、安定生産と収益性の向上が急務となっている。富士電機は、通年で安定した農産物の生産をサポートする農業ソリューション「SmileAGRI」を展開している。株式会社北海道サラダパプリカの植物工場においては、オランダ規格に準拠したハウス新工法を開発し、収穫量を約10%向上させた。暖房熱を得る際に発生する排ガスからCO<sub>2</sub>を供給するシステムを開発し、暖房コストを25%程度削減した。また、作業の一元管理と栽培状況の見える化を実現する生産管理パッケージの開発を計画的に進めている。

In current agricultural industry, owing to the decrease of workforce and unstable cultivation environment such as abnormal weather, rapid measures are required to achieve stable production and improve profitability. Fuji Electric has been laying out its “SmileAGRI” agricultural solution to support stable agricultural production all year round. At the plant factory of Hokkaido Salad paprika Co., Ltd., we have been able to improve crop yield by approximately 10% by developing a new construction method for houses that is compliant with the Nederland’s standard. We have developed a system that is capable of reducing heating costs by about 25% by supplying CO<sub>2</sub> from the exhaust gas generated during heating. Furthermore, we are developing production management package software that can consolidate operation control and visualize cultivation situations in a planned way.

## ① まえがき

近年、施設園芸業界は農業従事者の減少や気象などの栽培環境の不安定化などにより、安定生産と収益性の向上が急務となっている。

富士電機は業界の要請に応えるため、通年で安定した農産物の生産をサポートする農業ソリューション「SmileAGRI」を展開している。SmileAGRIでは、コア技術である“エネルギー技術”“冷熱技術”“システム制御技術”<sup>〔注2〕</sup>を活用し、植物工場プラントの収益性を向上するため

の運用コストの削減、設備を適正化することによる作業性の向上を実現している。図1に、SmileAGRIの概略図を示す。代表的な展開先の一つとして、2016年に北海道釧路市に建設した株式会社北海道サラダパプリカの太陽光利用型植物工場がある。同工場には、太陽光の採光性や作物の栽培作業性を向上させたハウス、エネルギーコストを最小限に抑えてランニングコストの削減につなげる熱供給システム、歩留り・収穫性を向上させる環境制御システムなどを納入している。

本稿では、植物工場の設備市場動向、北海道サラダパプ

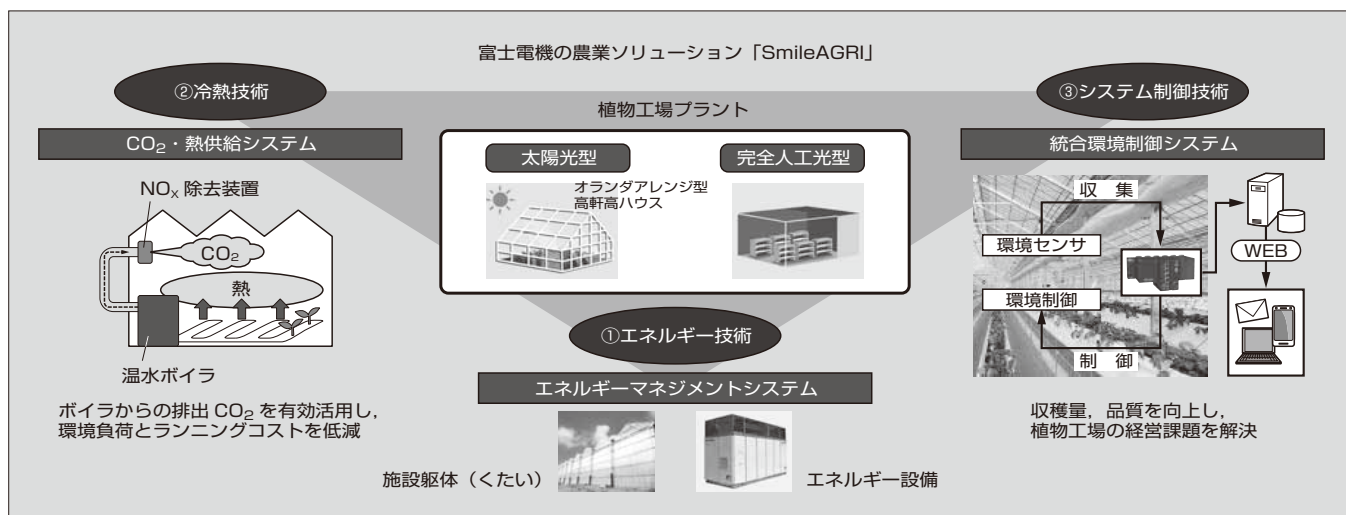


図1 「SmileAGRI」の概略図

〔注1〕施設園芸：農地をより高度に利用するために、ビニールハウス・温室・灌水（かんすい）・換気・空調などの設備で行われる農業のことである。その中でも施設内の栽培環境を制御し、安定した生産性を実現するものを植物工場という。

〔注2〕植物工場プラント：富士電機では、高度な環境制御により植物の周年生産や計画生産が可能な栽培施設に加えて、エネルギー設備を備えた施設を植物工場プラントと称している。

リカの概要および安定生産と収益性の向上に貢献する設備・システムについて述べる。

## ② 植物工場の設備市場動向

2009年12月施行の改正「農地法」により、植物工場の参入障壁が大きく緩和され、農地の集約化と異業種からの参入が急速に進んでいる。さらに、民間企業の参入と投資資本の拡大により大規模化が進んでいる。結果として採算性が向上し、植物工場の設備市場は、長期的な成長傾向に変化した。図2に国内の設備市場推移を示す<sup>(1)</sup>。2023年には2017年の約2.1倍の設備市場規模に達する見通しである。一方で、農業従事者が減少する中、大規模農園における生産管理の不足、ならびにエネルギーを効率的に利用することなどのニーズが高まってきている。

このような状況を踏まえて、農林水産省は2013年から植物工場の収益性を向上させるため、オランダの先進的な技術を日本向けにアレンジした拠点を整備するとともに、高度な環境制御技術の導入による生産性向上や、地域エネルギーを活用する取組みを進めている<sup>(2)</sup>。

## ③ 北海道サラダパブリカの概要

株式会社北海道サラダパブリカは、北海道釧路市にある植物工場で、2016年からパブリカを生産している。富士電機、ウシオ電機株式会社をはじめその他6社が共同出資している。図3に北海道サラダパブリカの栽培室の外観を、図4に全体図を示す。

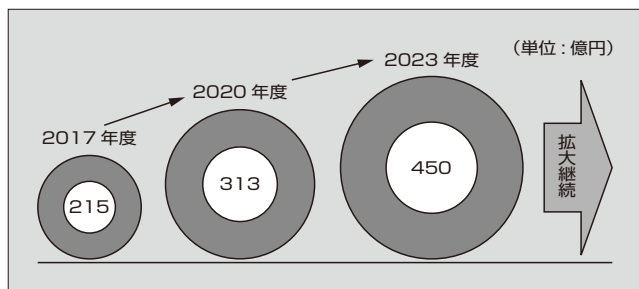


図2 植物工場の国内設備市場推移



図3 北海道サラダパブリカの栽培室の外観

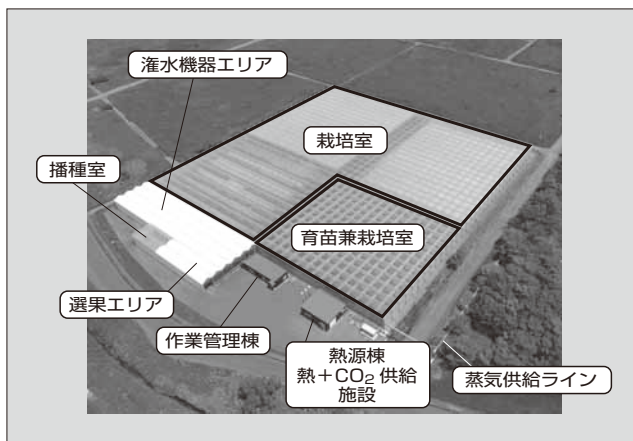


図4 北海道サラダパブリカの全体図

北海道サラダパブリカは、一つの温室の面積が約2.3ha（間口9.6m×奥行148.6m×軒高5.7m×19連棟）であり、五つのエリア（栽培室×3、初期育苗室、育苗兼栽培室）で生産を行う。栽培品目は釧路の気候に合うパブリカ7種類を選定し、周年生産の体制を構築している。

その他に、設備費削減と作業性を両立した“オランダアレンジ型高軒高ハウス”，エネルギーを最小限に抑える“熱+CO<sub>2</sub>生成システム”，栽培環境を最適化させる“環境制御システム”，冬場の日射量を補うナトリウムランプを備えている。

## ④ 安定生産と収益性の向上のための施策

パブリカは23℃以下が栽培の最適温度であり、図5に示すとおり、釧路市は年間を通して冷涼な気候のため、その生育に適切な場所である。

パブリカの国内売上高は、毎年5～10%伸びているが85～90%は外国産であり、国産は10～15%のシェアにとどまっている。その要因の一つとして、他の果菜類に比べて関税が3%と低く、安定供給力と販売価格の面で外国産が国産を上回っていることが挙げられる。

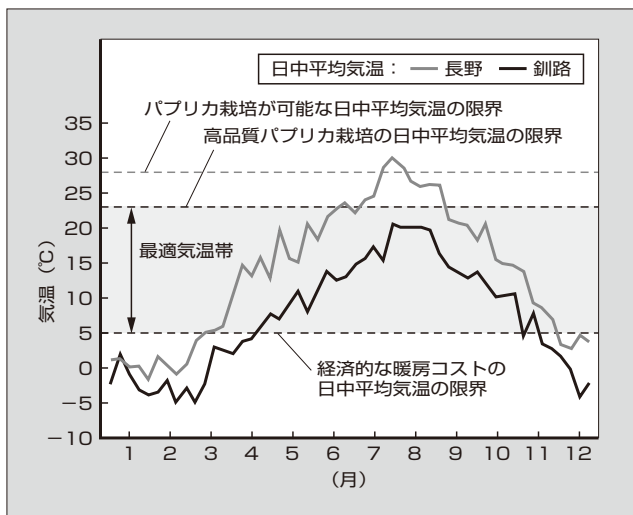


図5 釧路市の年間気温



安定生産と収益性の向上のためには、施設の大型化によるスケールメリットが必要であるが、同時にエネルギーコスト（暖房、CO<sub>2</sub>）の削減、設備コストの削減、ハウス性能の向上（採光性・作業性）、環境の均一化がより重要となってくる。

#### 4.1 オランダ規格に準拠したハウス新工法

一般的な国内基準によるハウスは、軒高が低く（4m）、間口（8m）や奥行方向の支柱の間隔（3.75m）が狭い。そのため、支柱の影によって生じる日陰といった日射量の不均一、単位面積当たりに設置可能な栽培レーン数の減少、さらには使用する骨材増によるコスト増につながっている。鉛直方向に成長し、多数の栽培レーンを用いるパブリカ栽培では、採光性と作業性の向上は収益性の向上において必要不可欠であるため、オランダ規格（オランダ規格協会 NEN 準拠）の先進的なハウス工法に着目した。

オランダ規格は、高軒高（5.7m）のため支柱の影によって生じる日射量の不均一が軽減される。また、間口（9.6m）、支柱間隔（4.5m）が広いので、単位面積当たりの日陰が少なく栽培レーンも多く設置できる。だが採用においては、国内でのハウス認可条件は、日本施設園芸協会の“園芸用施設安全構造基準”を満たすことが必要である。このため、基準を満足した上でオランダ規格の長所を採り入れることとした。表1に主なアレンジ項目を示す。これらの施策の結果、骨材の削減による設備コストの削減と同時に採光性や作業性を高め、総じて収穫量を約10%向上させた。

#### 4.2 工場排熱利用型 CO<sub>2</sub>・熱供給システム

釧路市は年間を通じて冷涼な気候であるが、厳冬期は-20℃となることも少なくない。一方で、パブリカの生育に必要な17℃以上の温度にハウス内の室温を保つにはエネルギーコストが膨大になる。また、光合成を促して植物の成長を促進し収量を上げるためには、ハウス内にCO<sub>2</sub>を供給する必要がある。一般的にCO<sub>2</sub>を供給するには、液化炭酸ガスが用いられるが、釧路においては道内の輸送であるため、輸送インフラが発達している本州内の輸送に比べて1.6～2倍の輸送コストが必要となる。

##### (1) 工場排熱余剰蒸気の活用

エネルギーコストを削減するため、近隣工場の排熱から熱交換器により生成された温水を暖房源とした熱源システムを検討した。コスト試算の結果、近隣工場の余剰蒸気を用いることで、農業において一般的に使われるA重油を

表1 主なアレンジ項目

| アレンジ項目                   | 効果                       |
|--------------------------|--------------------------|
| 間口拡大（8m⇒9.6m）            | 日射量向上による単位面積当たりの収穫量4%UP  |
| 高軒高化（4m⇒5.7m）            |                          |
| 外壁フィルムの最適化および遮光カーテンの最適配置 | 日射量均一化による単位面積当たりの収穫量3%UP |
| その他効果                    | 生産性向上による収穫量3%UP          |

使用した場合に比べ、40%のコストで必要な暖房エネルギーを得られることが分かった。だが、パブリカは温湿度に敏感であり、最低温度を下回った場合、数十分レベルで生育に影響が発生してしまう。供給量の変動や大規模停電時などに熱源供給不足が発生した場合、パブリカの生産に大きな影響を与えてしまうリスクがあった。余剰蒸気を活用するためには、熱源供給量を補完する設備が必要である。

##### (2) CO<sub>2</sub>と熱の同時供給

余剰蒸気による暖房の補完とCO<sub>2</sub>の供給を同時に行うため、温水ボイラで暖房熱を得る際に発生する排ガスからCO<sub>2</sub>の供給も併せて行うシステムを開発した。図6に、CO<sub>2</sub>・熱供給システムの概念図を示す。本システムを用いることで、安定的なCO<sub>2</sub>の供給と熱供給が可能になる。その結果、CO<sub>2</sub>と熱を個別に供給する従来の設備に比べて、暖房コストを25%程度削減するとともに、環境負荷の低減にも貢献した。図7に年間エネルギーコストを示す。開発はボイラ燃料の選定に留意しながら行った。ボイラ排ガスからのCO<sub>2</sub>をハウス内に供給するため、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>の排出量を考慮して、A重油、灯油、都市ガスの三つを検

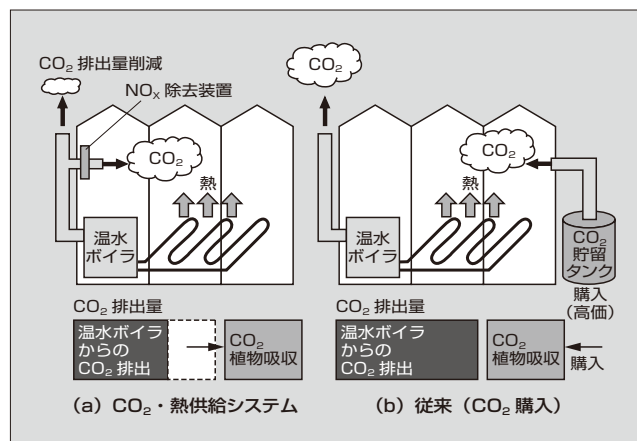


図6 CO<sub>2</sub>・熱供給システムの概念図

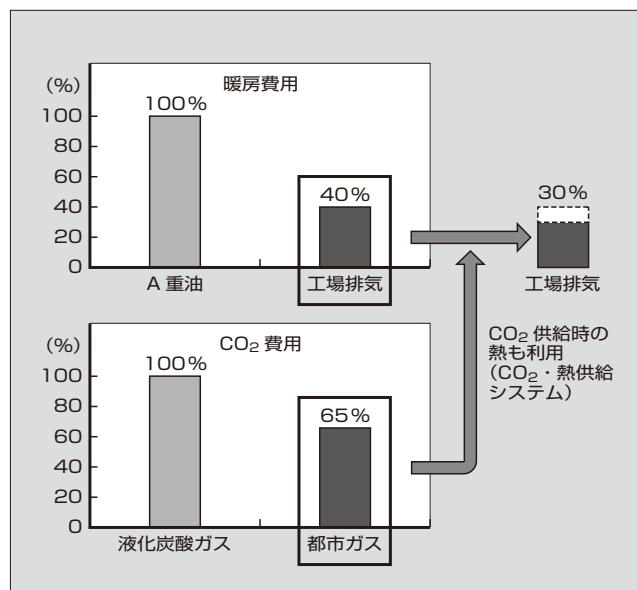


図7 年間エネルギーコスト比較

討した。A 重油は  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$  とともに排出量が多い。灯油は燃料コストが低く  $\text{SO}_x$  の排出量は少ないが、 $\text{NO}_x$  の排出量が多い。結果として、 $\text{SO}_x$  と  $\text{NO}_x$  の排出量が小さい都市ガスを用いた。次に、低  $\text{NO}_x$  仕様のバーナを選定し、ボイラ出口で 30 ～ 40 ppm 程度に、さらに  $\text{NO}_x$  除去装置を導入することで最終的に 5 ppm 以下に低減した。また、施設内には  $\text{CO}$  センサを設置し安全対策を施している。

### (3) 環境制御システムを用いた効率運用

環境制御システムを活用し、二つの熱源エネルギーの効率運用を図った。通常の運用では余剰蒸気を優先利用し、熱量が不足した場合は不足分を温水ボイラで賄う。 $\text{CO}_2$  の供給時には都市ガス燃料の温水ボイラを優先して利用し、熱量が不足した場合には、不足分を余剰蒸気で賄う制御とした。

## 4.3 環境制御システム

### (1) システム構成

北海道サラダパブリカのハウス内環境は、環境制御システムにより制御している。図 8 に環境制御システムのシステムの構成を示す。本システムにおける計測項目は、ハウス内の温湿度、 $\text{CO}_2$  濃度、日射量、給排水の EC（肥料濃度）と pH および流量、ならびにハウス外における温湿度、風向・風速、日射量・積算日射量であり、降雨や降雪も検知する。測定した環境データを基にハウス内環境を制御し、周年栽培を実現する。

なお、本システムは富士電機の製品群から、 $\text{CO}_2$  濃度分析計「ZFP 形」やガス分析計「ZSU 形」を含むさまざまな計測機器、 $\text{CO}_2$ ・熱供給システムなどの制御機器、プログラブルコントローラ「MICREX-SX」などを用いて構成している。

### (2) 制御機能

ハウスは五つに分かれているエリアごとに独立した制御

が可能である。加温（融雪）、換気、保温、遮光、 $\text{CO}_2$  供給、空気循環、灌水、補光を制御する機能を備えており、それぞれを単独で、あるいは複合的に動作させることができる。本施設で採用している作物を密集させて栽培面積が向上する“ダブルローハンギングガター方式”（栽培プランター部分をワイヤで吊り下げる方式）で必要となる厳密な温湿度管理を、これらの制御機能により適切に行うことができる。この中で、本施設の特徴的な制御機能である加温機能について詳しく述べる。

### (3) 加温機能

ハウス内の温度が低下した場合、またはハウス内の湿度が上昇した場合に加温装置を制御する機能である。本機能で制御する対象機器と加温装置を次に示す。

#### (a) 制御対象機器

##### ① 熱交換器（余剰蒸気）

ハウス内の温湿度、配管やタンク内の温水温度に応じて蒸気量を制御する。

##### ② 温水ボイラ（熱・ $\text{CO}_2$ 供給）

余剰蒸気の供給が停止した場合やハウス内の温度が低下した場合に自動起動させ、供給再開後に停止する。

#### (b) 加温（暖房）装置

##### ① 周囲温水放熱パイプ

養液タンクと殺菌タンク内の熱交換用ホースに温水を流し、タンク内の水を加温する。

##### ② レールヒーティングパイプ

栽培レーン間の床面上に設置されており、温水を流しハウス内を暖房する。温度設定によって温水温度の変更が可能である。

##### ③ 屋根融雪パイプ

融雪用の温湯管に温水を流すことで、ハウス全体の融雪を行う。

本機能では、1 日を最大で六つの時間帯に分けて制御できる。加温による温度制御は、状況に応じて緩やかな温度シフトができ、また日射量や積算日射量に応じた制御パラメータの自動調整が可能である。これにより、熱応答が遅い温水利用型暖房を植物工場にも適用可能とした。加えて、換気や空気循環の機能も複合的に制御することで、ハウス内の適正な温湿度を提供している。

## 5 生産管理パッケージの開発

安定生産と収益性の向上のためには、現在の設備およびシステムを改良することによるエネルギーの効率化利用に加えて、昨今の労働者不足（未熟練農業者の増加）の中で安定的な生産性の確保と、経営に関する支援が重要な課題である。そこで、富士電機では、作業の一元管理と栽培状況の見える化を行うことで、植物工場の収益改善につながる生産管理パッケージの開発を計画的に進めている。

生産管理パッケージは、次の三つのパッケージで構成されている。図 9 に生産管理パッケージの構成を示す。

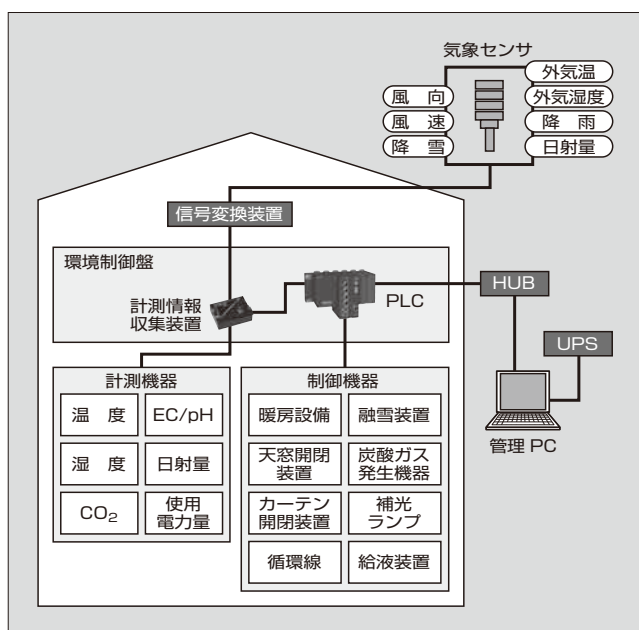


図 8 環境制御システムの構成

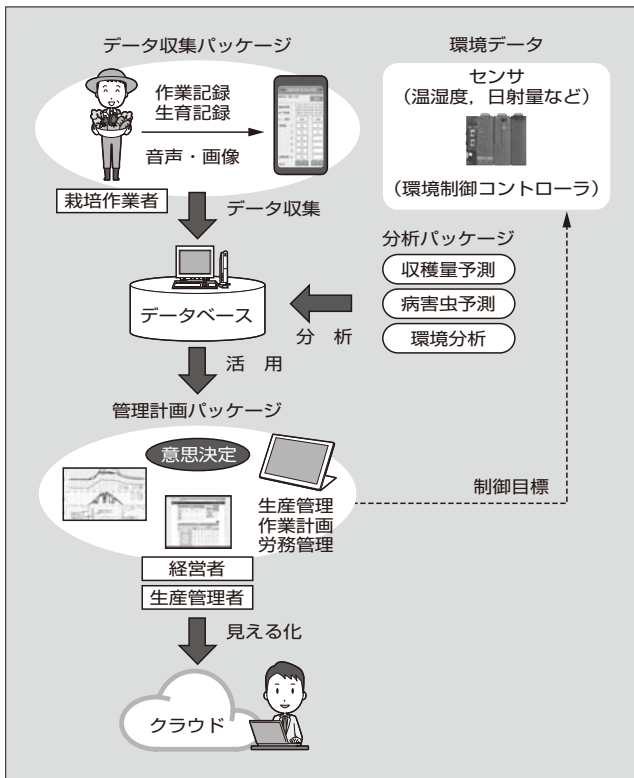


図9 生産管理パッケージの構成

## (1) データ収集パッケージ

音声認識技術などを活用することで、作業状況や育成状況の情報を作業者が作業を中断することなく収集する。例えば、携帯しているタブレット端末から音声入力を行う。

## (2) 分析パッケージ

複合環境制御システムから入手した環境データに加えて、データ収集パッケージから得たデータを加味し、収穫量予測、作業効率などの分析を行う。

## (3) 管理計画パッケージ

データ収集パッケージ、分析パッケージから得られた情報を基に、経営の意思決定に関する情報（予実情報、労働

生産性など）を提供する。

現在、北海道サラダパブリカにおいて、フィールドテストを実施中である。分析パッケージの収穫量予測機能については、短期予測（3～4日）において予測誤差17%を達成している。

## [6] あとがき

安定生産と収益性の向上に貢献する農業ソリューション「SmileAGRI」について述べた。今後も、富士電機のコア技術である冷熱技術、システム制御技術、数理応用技術を生かして総合的な技術開発に取り組み、ソリューションを強化していく所存である。

## 参考文献

- (1) 富士経済社. アグリビジネスの現状と将来展望. 2016.
- (2) 農林水産省. 次世代施設園芸導入加速化支援事業. <http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/engei/NextGenerationHorticulture/index.html>, (参照 2018-01-11).
- (3) 日本施設園芸協会. 園芸用施設安全構造基準.
- (4) 長瀬一也ほか. 計測・制御技術を活用した植物工場ソリューション. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.3, p.163-166.



## 吉田 仁

植物工場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エレシステム事業本部環境ソリューション事業部産業流通技術部担当課長。



## 河村 賢

植物工場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エレシステム事業本部環境ソリューション事業部産業流通技術部課長補佐。環境計量士（騒音・振動関係）。

# 環境保護に貢献する放射線管理ソリューション

Radiation Management Solutions Contributing to Environmental Protection

中島 定雄 NAKASHIMA, Sadao

松本 巖 MATSUMOTO, Iwao

小西 英之 KONISHI, Hideyuki

富士電機は、放射線および放射能汚染に関する環境保護活動に貢献する放射線管理ソリューションと放射線計測機器を提供している。今回、IoT 環境モニタによる環境監視サービス、よう化ストロンチウムシンチレータを搭載したスペクトルサーベイメータ、大気中の放射性浮遊じんあいをリアルタイムで監視できる大気モニタを開発した。震災復興関連の放射線計測装置としては、仮設焼却施設における排ガス放出管理に用いる排ガス放射性物質濃度監視装置、ならびに除染作業で発生した汚染土壌の中間貯蔵処理施設での放射能濃度による分別のための土壌濃度分別装置を開発した。

Fuji Electric offers radiation management solutions and radiation measurement equipment that contribute to environmental protection activities involving radiation and/or radioactive contamination. We have developed an environmental monitoring service using IoT environmental monitors, radiation spectral survey meter with a strontium iodide scintillator, and atmospheric monitor that can monitor radioactive aerosol in atmosphere in real time. We also have developed radiation measurement equipment for earthquake reconstruction: a radioactive aerosol monitor in exhaust gas from the temporary incineration facilities and a radioactive soil sorting equipment to sort contaminated soil produced from decontamination activities based on the radioactive concentration in the intermediate storage facilities.

## ① まえがき

富士電機は、原子力施設や関連施設およびその周辺地域において、放射線および放射能汚染に関する環境保護活動に貢献する放射線管理ソリューションと放射線計測機器を提供している。

本稿では、東京電力福島第一原子力発電所（福島第一原発）の事故を伴った東日本大震災からの復興活動に貢献するために開発した、環境保護に貢献する放射線管理ソリューションについて述べる。

## ② 環境モニタリングシステム

環境モニタリングシステムは、原子力施設や関連施設およびその周辺地域において、環境の放射線および放射能を監視するシステムである。富士電機は、以前から環境モニタリングシステムを原子力事業者や周辺自治体向けに提供してきた。このたび、環境監視サービスのためのシステムを開発した。

環境モニタリングシステムは、モニタリングポストおよびモニタリングステーションの据置型環境放射線監視設備、サーベイメータ、可搬型モニタリングポスト、環境線量計などの携帯型または可搬型の環境γ線測定機器の他に、環境ガストモニタおよび環境よう素モニタなどの環境放射能測定機器、テレメータシステムで構成する。このたび、新たな構成機器としてスペクトルサーベイメータおよび大気モニタを開発した。

### 2.1 環境監視サービス

環境モニタリングシステムには、専用のモニタリングポストまたはモニタリングステーション、テレメータシステム

ムや監視システムの構築および監視体制の整備が必要となる。このため、高コストで設備の建設に長期間を要し、環境監視を行う人材の育成も必要となり、導入のハードルは相当高いものになる。今回、開発したIoT（Internet of Things）環境モニタによる環境監視サービスは、小型線量計測ユニットとクラウドシステムを組み合わせ提供するものであり、より多くの地域や施設において導入しやすいサービスである。環境モニタ本体である小型線量計測ユニットは、バッテリーのみで最長3か月の測定と携帯電話回線によるデータ通信が可能であり、導入や設置のコストを大幅に抑えている。

IoT 環境モニタの主要な仕様を表1に、環境監視サービスのシステム構成を図1に示す。

### 2.2 スペクトルサーベイメータ

サーベイメータは、施設や周辺環境の空間放射線量率の測定を手で行うために使用されている。小型、軽量であるため持ち運びが便利であり、緊急時にもとても役立つ放射線測定器である。

従来のサーベイメータが測定できたのは、空間放射線量

表1 IoT 環境モニタの主な仕様

| 項目       | 仕様                                                      |
|----------|---------------------------------------------------------|
| 測定線種     | γ線（X線）                                                  |
| 検出器      | シリコン半導体検出器                                              |
| 測定範囲     | 積算線量：1 nSv ～ 99.99 mSv<br>線量率：0.01 μSv/h ～ 999.99 μSv/h |
| データ伝送方式  | 携帯電話回線による通信                                             |
| データ収集サーバ | クラウドサーバ                                                 |
| 電源供給     | リチウムイオンバッテリーまたは商用電源<br>バッテリーでの動作期間：最大3か月                |



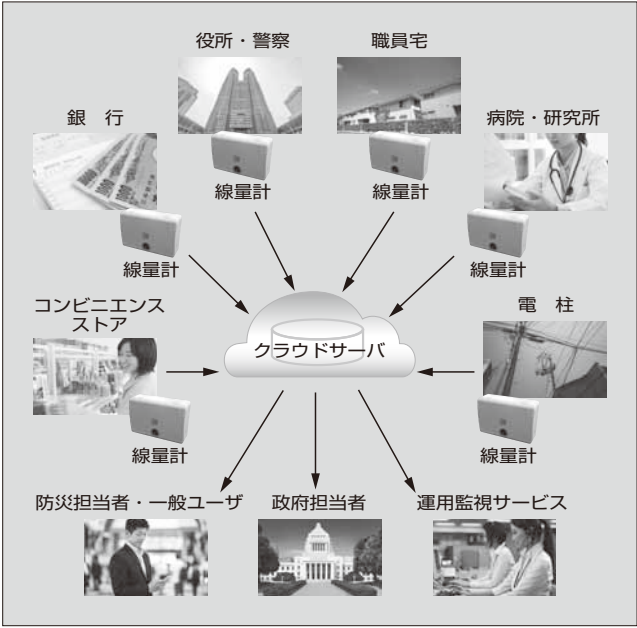


図1 環境監視サービスのシステム構成

率だけであった。福島第一原発の事故の経験から緊急時に小型で軽量なスペクトルサーベイメータのニーズがあることが分かった。そこで、緊急の環境モニタリングや復旧時の環境測定ができる核種分析機能を付加した。

富士電機では、高分解能であるだけでなく、小型軽量で安価な検出器素材として、よう化ストロンチウムシンチレータ〔SrI<sub>2</sub> (Eu)〕を搭載したスペクトルサーベイメータを他社に先駆けて開発した。表2に、よう化ストロンチウムシンチレータと、サーベイメータで一般的に使用されるよう化ナトリウムシンチレータ〔NaI (TI)〕の特性比較を示す。エネルギー分解能は4%と大きく減衰時間も長い核種分析に必要な性能を備えており、発光量がよう化ナトリウムシンチレータの2倍以上あり、小型サイズのシンチレータで広いエネルギー範囲の測定が可能である。

図2に両者のγ線スペクトルの比較を示す。よう化ストロンチウムシンチレータの方が明瞭なフォトピークを示すことが分かる。

開発したスペクトルサーベイメータ「NHC8」の外観を図3に、主な仕様を表3に示す。特徴は次のとおりである。

- (a) 検出器に高分解能のよう化ストロンチウムシンチレータを採用し、分解能は4%以下を確保している。
- (b) 線量率やスペクトルデータなどをBluetoothで送信

表2 よう化ストロンチウムシンチレータ〔SrI<sub>2</sub> (Eu)〕とよう化ナトリウムシンチレータ〔NaI (TI)〕の特性比較

| 検出器素材                 | 融点 (°C) | 密度 (g/cm <sup>3</sup> ) | 潮解性   | 発光波長 (nm) | 発光量 (Photon/MeV) | エネルギー分解能 (662 keV) | 減時間衰 (ns) | 発光量比例性 5~1,000 keV | 自己放射能           | 最大口径 (mm) |
|-----------------------|---------|-------------------------|-------|-----------|------------------|--------------------|-----------|--------------------|-----------------|-----------|
| SrI <sub>2</sub> (Eu) | 538     | 4.6                     | 非常に強い | 430       | 80,000           | <4%                | 800       | <5%                | Non             | 25        |
| NaI (TI)              | 661     | 3.7                     | 非常に強い | 415       | 38,000           | 7%                 | 230       | 17%                | <sup>40</sup> K | 600       |

〈注〉 Bluetooth : Bluetooth SIG, Inc. の商標または登録商標

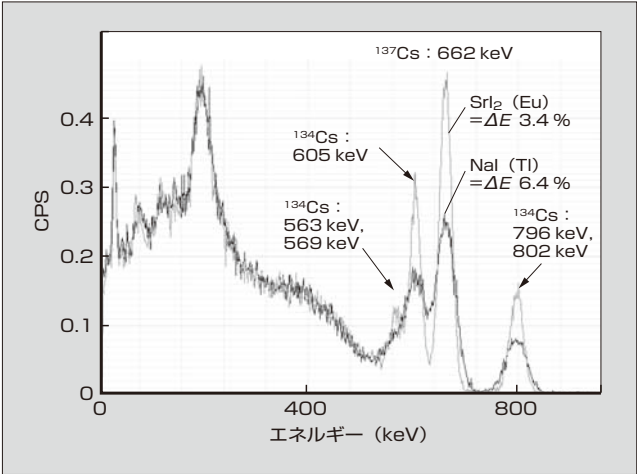


図2 よう化ストロンチウムシンチレータ〔SrI<sub>2</sub> (Eu)〕とよう化ナトリウムシンチレータ〔NaI (TI)〕のγ線スペクトル比較



図3 スペクトルサーベイメータ「NHC8」

し、モバイル機器またはPCで解析可能である。

- (c) MCA (Multi-Channel Analyzer) 機能は、0 ~ 2MeVの測定エネルギー範囲を1,000チャンネルに分解し、核種同定が可能である。

2.3 大気モニタ

大気モニタは、原子力災害などの緊急事態に、屋外空気を吸引してろ紙に集めた放射性浮遊じんあいの濃度を連続監視する装置である。測定したデータは、本体に装備したUSBメモリなどの記憶媒体に保存するとともに、携帯電話回線網または衛星回線網を利用したサービスにてデータ収集サーバに送信し、リアルタイムで監視できる。また、装置の遠隔操作が可能であり、これにより平常時は待機状

表 3 スペクトルサーベイメータ「NHC8」の主な仕様

| 項 目     | 仕 様                                                          |
|---------|--------------------------------------------------------------|
| 測定線種    | γ線（X線）                                                       |
| 検出器     | よう化ストロンチウムシンチレータ〔SrI <sub>2</sub> （Eu）〕<br>（サイズφ1" ×1"）      |
| エネルギー特性 | 60 keV ～ 1.5 MeV：±25%以内（ <sup>137</sup> Cs基準）                |
| 検出器分解能  | 4%以下（ <sup>137</sup> Csにて）                                   |
| 有効測定範囲  | 線量率：0.000 ～ 70（μSv/h）<br>計数率：0.000 ～ 99.9（ks <sup>-1</sup> ） |
| データ記録   | 最大1,000件                                                     |
| 電 源     | 単三アルカリ乾電池（LR6）×6本<br>USB給電（オプション）<br>ACアダプタ（オプション）           |
| 外形寸法    | W100×D230×H160（mm）                                           |
| 質 量     | 約1.6 kg（電池含む）                                                |



図 4 大気モニタ

表 4 大気モニタの主な仕様

| 項 目                | 仕 様                             |
|--------------------|---------------------------------|
| 測定線種               | β線                              |
| 検出器                | プラスチックシンチレーション検出器               |
| 最高検出感度             | 全β線に対して100 Bq/m <sup>3</sup> 以下 |
| 連続測定期間<br>（ろ紙交換周期） | 1週間以上<br>（ろ紙送り周期1時間の場合）         |
| データ伝送方式            | 携帯電話回線および衛星回線による通信              |

態であり、緊急事態になったときに稼動を開始することも可能である。図 4 に大気モニタの外観を、表 4 に大気モニタの主な仕様を示す。

3 震災復興関連の放射線計測装置

3.1 焼却施設向け排ガス放射性物質濃度監視装置

震災復興のため、福島県や周辺地域に、発生した可燃性廃棄物を焼却・減容する仮設焼却施設が多数建設された。また、現在、建設が進められている中間貯蔵施設内にも焼却施設が設置される予定である。

焼却施設の排ガスを排気口から放出するに当たっては、環境省のガイドラインに定められた排ガス中の放射性物質濃度を監視し、空気中濃度限度（<sup>134</sup>Cs 20Bq/m<sup>3</sup>，<sup>137</sup>Cs 30Bq/m<sup>3</sup>）を超える場合には、濃度限度，測定値および最大濃度地点における濃度計算値を比較して周辺環境への影響を判断することが必要とされる。

富士電機は、表 5 に示す要求事項を満足するため、排ガス放射性物質濃度監視装置を開発した。表 6 に主な仕様を示す。本装置は、排気口に設置するサンプリングノズル，サンプリング配管，装置本体および排気口への戻り配管で構成する。装置本体は、開放型計装ラック構造であり，パージフィルタ，検出器ジャケット（検出器収納），捕集部（ろ紙装着），流量計，圧力計，ポンプ，接続配管，同配管ヒータ，同温度計，制御部，操作表示器および計装空気パージラインで構成する。図 5 に開発した排ガス放射性物質濃度監視装置の外観を示す。

表 5 排ガス放射性物質濃度監視装置の開発ポイント

| 要求事項                              | 開発のポイント                                                                                                    |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 焼却炉排ガスは180℃の高温で腐食性物質を多量に含み露点が140℃ | (1) ノズルから検出器捕集部までの配管を露点140℃以上に加熱し結露を防止する<br>(2) γ線検出器は、ジャケットに収納して捕集部と隔離し、許容温度45℃以下に空冷する                    |
| 環境省の要求水準書で排ガスの結露は禁止               | (1) 捕集部出口以降の配管を露点140℃以上に加熱する<br>(2) 系統内を多数のヒーティング区分に分けて細かく温度制御し、局所的な結露を防止する<br>(3) ポンプおよび計器類は耐高温仕様の製品を使用する |

表 6 排ガス放射性物質濃度監視装置の主な仕様

| 項 目      | 仕 様                                                                                                                 |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 設置方式     | 床置固定式                                                                                                               |
| 測定対象核種   | <sup>134</sup> Cs， <sup>137</sup> Cs                                                                                |
| 測定線種     | γ線（X線）（50 keV以上）                                                                                                    |
| 検出器      | よう化ナトリウムシンチレーション検出器〔NaI（TI）〕                                                                                        |
| 排ガス温度    | 180℃（通常運転中）                                                                                                         |
| ヒータ制御温度  | 140℃以上（ヒータ耐熱温度：400℃）                                                                                                |
| 検出感度     | 2 Bq/m <sup>3</sup> 以下（エネルギー範囲527 ～ 740 keV）<br>BG条件：0.15 μSv/h（ <sup>137</sup> Cs相当）<br>計数時間：30 min<br>捕集時間：60 min |
| 指示誤差     | 5%以内                                                                                                                |
| ダスト捕集材   | GB-100R（ガラス繊維ろ紙）                                                                                                    |
| 捕集効率     | 99.99%（JIS Z 8901）                                                                                                  |
| 遮 蔽      | 鉛シールド約5 cm厚さ                                                                                                        |
| サンプリング流量 | 50 L/min以上                                                                                                          |
| ポンプ構成    | 2 台（二重化）                                                                                                            |
| 外形寸法、質量  | 本体（チャンネルベース含む）：<br>W1,600×D800×H1,700（mm），<br>約1,150 kg<br>ポンプ架台：<br>W500×D800×H950（mm），<br>約100 kg                 |

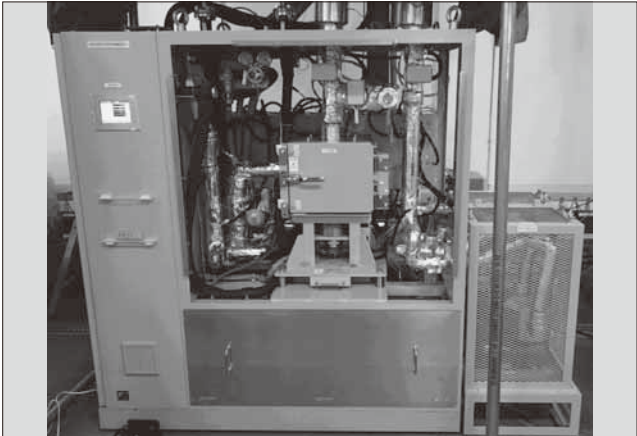


図5 排ガス放射性物質濃度監視装置

3.2 土壌濃度分別装置

東日本大震災から7年が経過し、福島第一原発の事故により放射性物質で汚染された土壌などの除染事業については、帰還困難区域を除き面的除染がほぼ完了している。汚染土壌は、福島県内の仮置場にフレキシブルコンテナに収納した状態で仮置きされており、早期に処理、処分、保管することが要請されている。効率的にこれらの作業を進めるためには、汚染土壌の放射能濃度により分別し、その区分に応じた処理、処分、保管を行うことが必要となる。

汚染土壌の放射能濃度を精度良く測定し、正確に分別するための土壌濃度分別装置を清水建設株式会社と共同開発した。本装置の開発ポイントを表7に示す。

本装置の構成図を図6に、外観の例を図7に、主な仕様を表8に示す。

本装置は、土壌を受け入れるホッパ、土壌を一定量切り出すフィーダ（コンベヤ）、切り出した土壌の重量を測定する静的重量測定器、土壌を搬送する搬送コンベヤ、土壌を成形するローラ型土壌成形器、土壌の放射能を測定する放射線測定機および土壌を仕分けする回転式シュータで構成する。放射線測定機は、搬送コンベヤのベルト下部に検出器6本をコンベヤ幅方向に配置し、これらの検出器を鉛シールドで前後左右下の5面から取り囲み、バックグラウンド放射線を低減させる構造にしている。放射線測定機と上流のローラ型土壌成形器の間には形状測定機をコンベヤ上部に設置し、流れる土壌ロットの形状測定（長さ、傾斜

表7 土壌濃度分別装置の開発ポイント

| 要求事項                  | 開発のポイント                                                                                |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| 高精度の測定                | (1) 所定量の土壌を切り出して一定形状にローラ成形した土壌ロットを測定するバッチ測定方式とする<br>(2) 土壌ロットの質量および形状寸法を測定し、放射能濃度補正を行う |
| 正確な分別                 | 土壌ロット単位で仕分けを行うことで正確な分別                                                                 |
| 処理能力の確保<br>(70 t/h以上) | (1) 大量の土壌を処理するため、土壌の搬送はコンベヤ方式とする<br>(2) 仕分けは高速の回転式シュータを採用する                            |

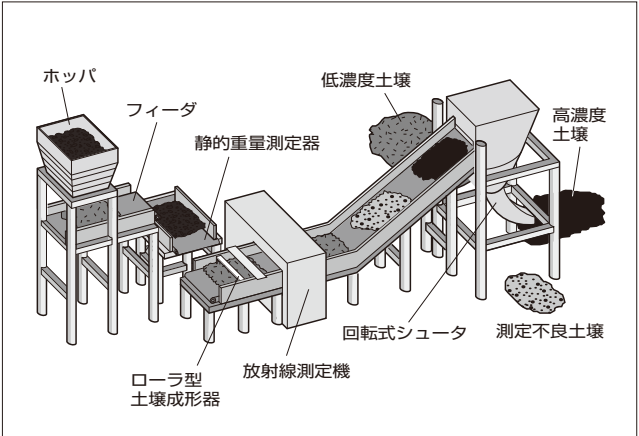


図6 土壌濃度分別装置の構成図



図7 土壌濃度分別装置の例

表8 土壌濃度分別装置の主な仕様

| 項目                | 仕様                                                        |
|-------------------|-----------------------------------------------------------|
| 設置方式              | 床置固定式                                                     |
| 測定対象核種            | <sup>134</sup> Cs, <sup>137</sup> Cs                      |
| 測定線種              | γ線 (527 ~ 740 keV)                                        |
| 検出器               | よう化ナトリウムシンチレーション検出器<br>[NaI (TI)] 6本                      |
| BG線量率             | 2.5 μSv/h以下                                               |
| 土壌ロット形状<br>(標準形状) | 台形土壌<br>上底: 1,423 mm 下底: 1,900 mm<br>幅: 650 mm 高さ: 200 mm |
| 測定誤差              | ±10%                                                      |
| コンベヤ速度            | 400 mm/s                                                  |
| 基準値               | 8,000 Bq/kg                                               |
| スクリーニングレベル        | 7,200 Bq/kg                                               |
| 仕分方法              | 回転式シュータにより分別<br>(放射能高, 放射能低, 測定不良)                        |
| 処理能力              | 70 t/h以上                                                  |

部安息角、高さ)を実施している。

これら装置本体の他に、検出器の制御、信号処理および濃度演算を行う測定機モニタ盤、ならびにコンベヤなどを駆動・制御する動力盤がある。

#### 4 あとがき

環境保護に貢献する放射線管理ソリューションについて述べた。今後は、さらなる環境モニタリングの強化や品質向上、震災復興への貢献および廃炉に使用する機器・システムの開発を進めていく所存である。

最後に、土壌濃度分別装置の共同開発者である清水建設株式会社殿のご指導、ご鞭撻に謝意を表する。

#### 参考文献

- (1) アンペール産業機器. “シンチレータ ヨウ化ストロンチウム”. <http://fa.ampere.co.jp/products/scintillator/>, (参照 2017-12-14).
- (2) 環境省. 第五部 放射能濃度等測定方法等ガイドライン. 平成25年3月第2版.



#### 松本 巖

放射線測定器の開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社パワエレシステム事業本部生産統括部東京工場放射線・計測装置部。



#### 小西 英之

放射線計測装置の開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社パワエレシステム事業本部生産統括部東京工場放射線・計測装置部課長。



#### 中島 定雄

放射線計測機器・システム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エレシステム事業本部環境ソリューション事業部放射線システム部長代理。日本保健物理学会会員。





# 輸送品質向上を目指した JR 東日本 E235 系車両（山手線）向けドアシステム

Passenger Door System for Series E235 Train of East Japan Railway Company (Yamanote Line)  
Designed to Improve Transportation Quality

辻村 勲 TSUJIMURA, Isao

梅澤 幸太郎 UMEZAWA, Kotaro

藤田 憲司 FUJITA, Kenji

鉄道車両用電気式ドアシステムは、乗務員の開閉操作に従ってモータ動力でドアを開閉する装置である。富士電機は、JR 東日本が運用を開始した E235 系車両（山手線）向けにラック・アンド・ピニオン式ドアシステムを納入している。このドアシステムでは、既存製品に比べて永久磁石の使用量を低減し、装置全体で 14% 軽量化した。また、調整箇所や部品点数を削減したことにより、メンテナンスコストの削減や故障率低減を実現した。さらに、ロック装置の方式変更により引抜き性と耐こじ開け性の両立を図りつつ、制御シーケンスの改善により戸挟み検知感度と引きずり検知性能が向上した。

Electric door systems for rail cars are motor-powered devices for opening and closing passenger doors in accordance with the door operations of crew members. Fuji Electric has delivered rack-and-pinion type door systems to East Japan Railway Company for the Series E235 train (Yamanote Line), which started operation. The door system uses less permanent magnets than conventional products, thus reducing overall weight by 14%. Furthermore, by reducing the number of parts and adjustment points, the system reduces maintenance costs and failure rates. Moreover, by changing the type of locking device, the system achieves better obstruction pulling and anti-forced opening characteristics. Additionally, by improved control sequencing, the system is increased in sensitivity of obstruction detection and dragging detection.

## ① まえがき

鉄道車両用電気式ドアシステムは、乗務員の開閉操作に従ってモータ動力でドアを開閉する装置である。富士電機は、JR 東日本（東日本旅客鉄道株式会社）が 2017 年 5 月 22 日に運用を開始した、図 1 に示す E235 系車両（山手線）向けにラック・アンド・ピニオン式ドアシステムを納入している。

このドアシステムは、軽量化と低消費電力化を実現した既存製品を基に、2009 年 1 月に発足した“改良型戸閉装置開発検討会”を通じて機能や性能を改良したものである。本検討会では、JR 東日本の本社部門、開発部門、車両検修部門に加えて、車両メーカーやドアシステムメーカーが参加し、安全性、信頼性、メンテナンス性などに関する要望事項に基づいて、次世代車両向けドアについて議論され、開発コンセプトがまとめられた。この検討会において議論された要望事項と評価内容の一部は次のとおりである。

### (a) 戸挟み検知感度

既存機器以上の検知が可能であること

### (b) 引抜き性

停車時に障害物を引き抜けること

### (c) 引きずり検知性能

発車時に挟んだ障害物を引きずる状態の検知が可能であること

### (d) 耐こじ開け性

走行時に手動で開扉できないこと

### (e) メンテナンス性

メンテナンスの頻度を下げつつ、容易にすること

本稿では、これらの要望事項に対応するために、本ドアシステムで実施した解決手段と採用技術について述べる。



図 1 E235 系車両の外観

## ② 装置の概要

図 2 に、ドアシステムの構成を示す。このドアシステムは、ドアパネルを開閉する動力源となるモータ、モータ動力をドアパネルに伝達するラック・アンド・ピニオン機構を格納する本体、戸閉状態において施錠を担保するロック装置、モータやロック装置を制御する制御装置、ドアパネルを保持するスライド式ドアレールおよび戸づり金具から構成されている。

### 2.1 モータ

このドアシステムには、薄型の永久磁石式モータを専用開発した（図 3）。このモータは、既存のリニアモータに対して永久磁石の使用量を 1/10 以下に低減した。これにより、ドアシステム全体で 14% 軽量化した。また、位置分解能 0.01 mm、0~100% の推力応答 750  $\mu$ s、停止時の

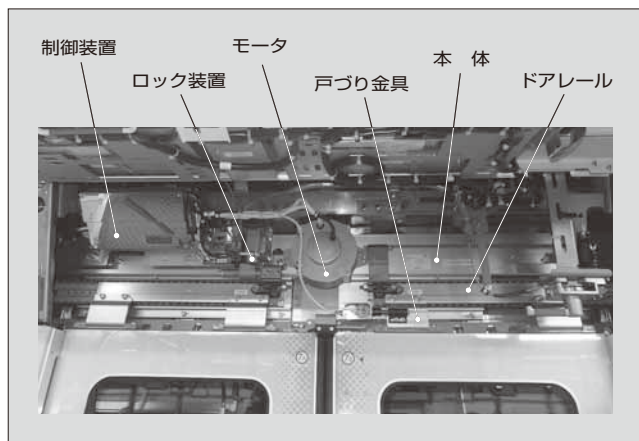


図2 ドアシステムの構成

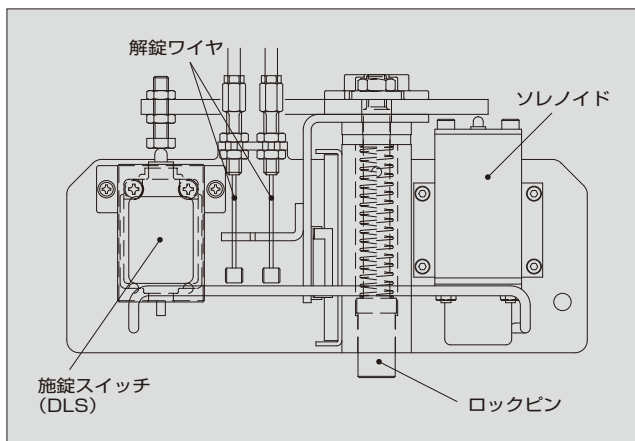


図5 ロック装置の構成

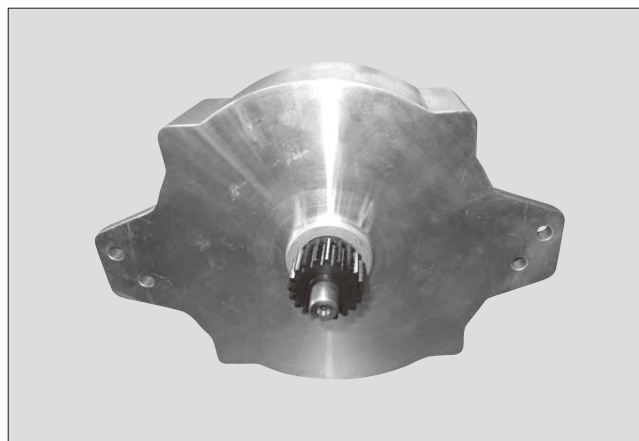


図3 モータの外観

押し付け推力 500 N を実現した。さらに、密閉構造の高精度光学式エンコーダを内蔵することで耐環境性と戸挟み検知感度の向上を可能にした。

## 2.2 ラック・アンド・ピニオン式ドアシステム

ラック・アンド・ピニオンは、E231 系車両や E233 系車両などで採用されている。

図 4 に示すように、ラック・アンド・ピニオン式ドアシステムはモータ軸にピニオンを直結し、上ラックと下ラックを直接駆動している。この変速ギアのない簡素な機構が

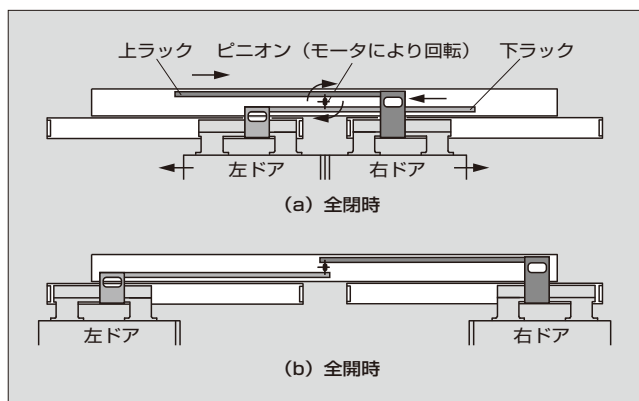


図4 ラック・アンド・ピニオン式ドアシステムの原理

部品点数を削減し、機器故障を少なくすることにより信頼性を向上し、さらにメンテナンスコストを低減した。加えて、モータ制御の性能を最大限に引き出すとともに、高精度なエンコーダを採用することで検知性を向上した。また、このラック・アンド・ピニオン機構を格納する本体は、粉じん環境・振動環境を配慮した既存車両向けドアシステムの構造を踏襲している。

## 2.3 ロック装置

図 5 に、ロック装置の構成を示す。ドアパネルが戸閉位置にある状態でロックピンを下げ、ロックホールと勘合させることでドアパネルを閉状態に維持する。開動作時は、制御装置からの指令に基づき、ソレノイドがロックピンを持ち上げることで解錠動作を行う。また、メンテナンス時や非常時は、車内と車外に設けられた解錠ハンドルの操作により、解錠ワイヤを介してロックピンを引き上げて解錠状態とする。この無駄がないロック装置は、施錠・解錠動作における動作シーケンスの自由度を広げる。さらに、制御装置に内蔵したソフトウェアとの組合せにより、さまざまな動作を可能とし、検知性が向上した。

## 2.4 制御装置

制御装置には待機冗長方式を採用しているため、万一不具合が生じても機能や性能を落とすことなく開閉動作が継続できる（図 6）。また、上位装置との通信は高機能化と高容量化を行った。

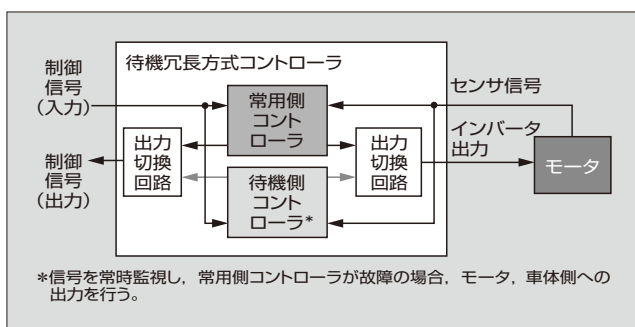


図6 制御装置の基本構成

制御装置には最新の電子デバイスを適用することで、各種機能の追加にもかかわらず既存機種に対して体積を半分以下に低減した。この小型化により戸閉装置本体への取付けや一体化が可能となり、車体取付け作業を省力化し、配線を省線化した。

### ③ 装置の特徴

#### 3.1 引抜き性と耐こじ開け性の両立

表 1 に、引抜き性と耐こじ開け性の要求機能の比較を示す。ドアシステムは、駅停車中は引抜き性、車両走行中は耐こじ開け性という相反する機能の要求がある。

これらの要求機能に対し、既存の電気式ドアシステムはロック装置により戸閉状態でモータ電力をオフにし、消費電力を低減する。加えて、電源供給のない場合やモータの定格以上の外力が加えられた場合にも、ロック装置により戸閉を維持している。この従来の電気式ドアシステムでは、引抜き性や引きずり検知性能が悪く、一度ロックがかかると人力では開扉することができなかった。これまで、引抜き性を向上するためにロック装置を調整して施錠位置を広げていたが、全閉時の戸隙が拡大し、耐こじ開け性が低下するという問題があった。

この問題を解決するために、ドアシステムの要求機能を精査し、ロック装置の施錠位置を十分な引抜き性が確保できる寸法まで広げた。施錠機能だけに限定することでロック装置を簡素化し、モータ推力による常時押付け機能により全閉を維持する方針とした。図 7 に、戸閉と施錠の動作シーケンスを示す。駅において出発前の停車中は、全閉状態を維持しつつ、引抜き性や引きずり検知性能を考慮したモータ推力とする。走行中は全閉状態を維持しつつ、耐こ

表 1 要求機能の比較

| 要求機能     | 有効な条件     | 要求内容                      |
|----------|-----------|---------------------------|
| 引抜き性向上   | 駅停車中、駅出発時 | 挟まった障害物を引き抜ける分だけ容易に開扉可能   |
| 耐こじ開け性向上 | 車両走行中     | 車両振動・いたずらなどの外乱に対し強固に全閉を維持 |

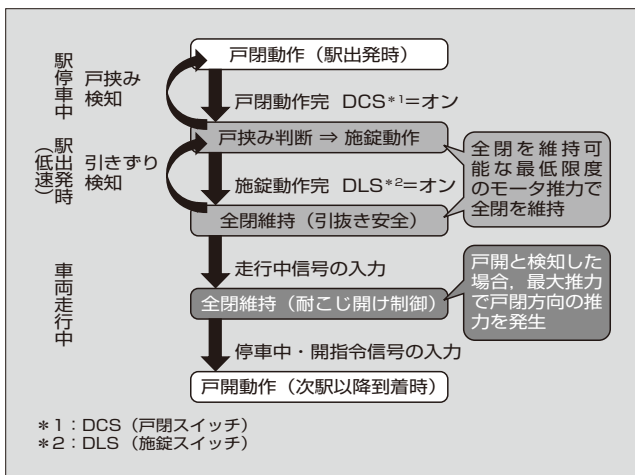


図 7 戸閉・施錠動作の動作シーケンス

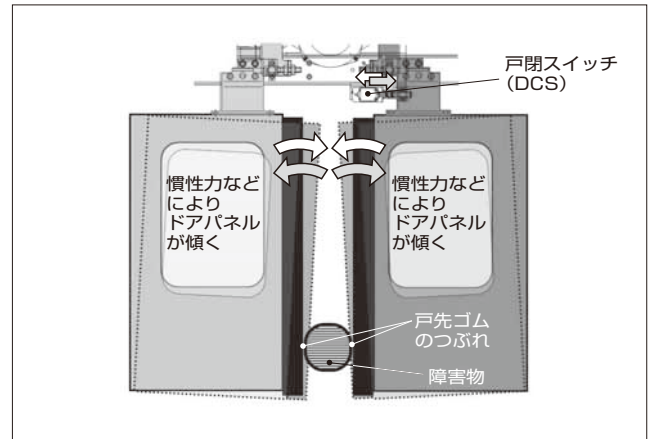


図 8 戸閉知らせ灯が瞬時点灯する原因

じ開け性を考慮したモータ推力とする。

また、耐こじ開け性を実現するため、押し返し制御を採用した<sup>(2)</sup>。強引にドアを開こうとする外力を瞬時に判定し、強固に押し返すこと<sup>(3)</sup>で開扉を防止する。

#### 3.2 戸挟みと引きずりにおける課題

戸挟みや引きずり（戸挟みした状態で車両が動き出した状態）の検知は、乗客の安全に関わる重要な機能である。これらの機能による誤検知や誤作動は運行遅延に直結するため、高い信頼性が求められる。

電気式のドアシステムは、一般に車両内の施錠スイッチ（DLS：Door Lock Switch）と戸閉スイッチ（DCS：Door Close Switch）によって、戸挟みなどがなく全閉かつ施錠の状態となったことを検知している。このスイッチの直列回路により車両走行に関わる装置とのインタロックを取っており、車両側面でドアの開扉を知らせる車側灯や運転台にある戸閉知らせ灯の点灯にも使用されている。

検知性の要求機能を精査している中で、既存のドアシステムでは幅の狭い障害物を挟んだ場合に戸閉知らせ灯が瞬時点灯すると同時に、車側灯が瞬時消灯することが判明した。慣性力などにより戸先ゴムがつぶれることやドアパネルが傾くことでドア上部が全閉位置に達するとすぐに施錠し（DCS と DLS とともにオン）、慣性力がなくなると DCS のみオフする。この動作は障害物を挟む位置が低く、モータ推力が大きいほど顕著であり、戸閉知らせ灯の瞬時点灯が発生しやすい傾向が確認できた（図 8）。この瞬時的な動作は、乗務員の誤認や誤判断を誘発する可能性があるため、検知性能の向上と合わせて対策することとした。

#### 3.3 戸挟み検知シーケンスの改善

次の項目を考慮して、外乱に強い検知動作シーケンスを検討した。

- 慣性力がなくなるまで解錠維持する。
- 戸挟みの有無を判断するタイミングにおいて戸閉を保持できる最低限度までモータ推力を低減する。
- 施錠時は確実に施錠できるモータ推力を印加する。

図 9 に従来の戸挟み検知動作シーケンスを、図 10 に新



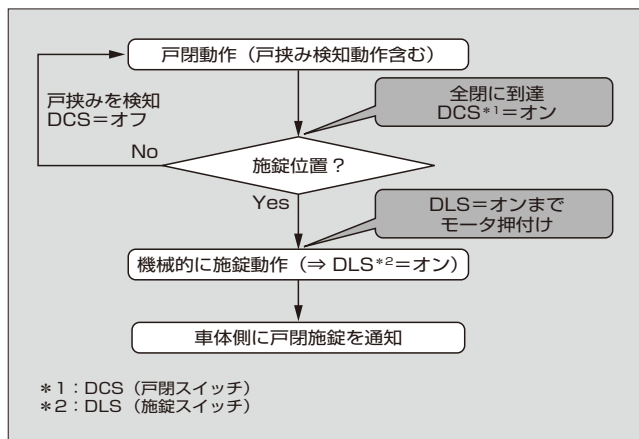


図9 従来の戸挟み検知シーケンス

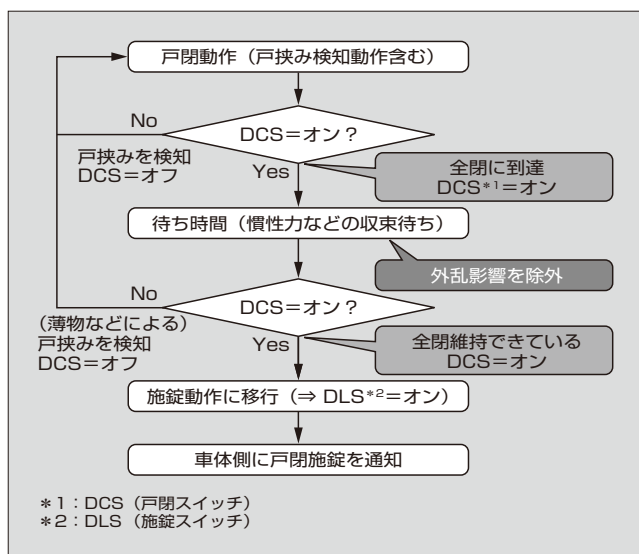


図10 新しい戸挟み検知シーケンス

しい戸挟み検知シーケンスを示す。従来のシーケンスでは、DCSのオンに続き、機械的に施錠動作してDLSがオンになり、車体側に全閉・施錠を通知する。制御装置の認識する戸挟み検知ステータスとは無関係に施錠動作するため、施錠できる程度に薄い障害物の検知情報は車体側に伝達されない。

一方、新しい検知動作シーケンスでは、DCSのオンから施錠動作までに一定の待ち時間を設けている。これにより、乗客が挟まったものを抜くなどにより生じるドアの微開がないことを確認した後にロック装置を施錠できることに加え、ドアパネルの慣性力などの外乱影響を除外することができる。すなわち、継続的にDCSがオンとなる場合のみ、障害物がないと認識してロック装置が施錠する。車両走行に関わる装置とのインタロック回路は、DCSとDLSの信号を直接受け取って全閉かつ施錠状態であることを検知する。制御装置が戸挟みを検知している場合は、全閉でないことを確認し再度戸閉動作に戻るため、インタロック回路に戸挟み検知状態であることを伝達できる。

表2 評価試験結果の比較

|          | 全閉位置付近における戸挟み検知感度           | 引きずり検知性能<br>(検知時の引き抜き力)   |
|----------|-----------------------------|---------------------------|
| 既存製品の実績  | 15 mm検知・10 mm施錠<br>瞬時点灯動作あり | DCSでは検出不能                 |
| 新方式の測定結果 | 8 mm検知・7 mm施錠<br>瞬時点灯動作なし   | DCSで検出可能<br>(引き抜き力：100 N) |

#### 4 評価試験結果

今回開発したドアシステムは、JR 東日本の車両モックアップおよび実車両にて評価試験を実施している。

車両モックアップにて車両走行中を模擬した信号条件でドアパネルをこじ開ける評価試験を実施し、意図的にドアが開かないように強固に戸閉状態を維持してDCSがオフしないことを確認した。動作時の位置、速度、推力の制御信号からも、こじ開け検知時のモータ推力の立ち上がり動作において良好な応答性を確認した。

新しい戸挟み検知シーケンスと新型ロック装置を搭載した試作機の評価試験を実施した。表2に、評価試験結果の比較を示す。評価の結果、薄い障害物を挟んだ際の瞬時点灯が抑制できること、富士電機の既存装置に対して戸挟み検知感度と引きずり検知性能の両方が高まり、安全性が向上することが確認できた。

#### 5 あとがき

このドアシステムの開発に着手してから8年半、数多くの仕様検討や試作検証を積み重ね、機能や性能を抜本的に見直しすることにより、改良したドアシステムを納入することができた。このドアシステムを搭載したE235系山手線量産車両は2017年5月22日に運用を開始し、2020年春ごろまでに全49編成（539両分、合計4,312台）が順次営業投入される予定である。

本技術をプラットフォーム化した上で、各地域・事業者の要望に適用した系列製品を展開、さらなる安全性・信頼性の向上を目指し、引き続きドアシステムの改良を重ねていく。

富士電機はこれからも環境に優しい鉄道システムの安全、安定輸送、快適な運行を支える製品を供給することで、社会の生産性向上に貢献していく。

最後にこのドアシステムの仕様検討、開発、試験などにおいて多大なご指導、ご協力を頂いたJR 東日本（東日本旅客鉄道株式会社）をはじめ、関係各位に謝意を表する。

#### 参考文献

- 前田賢二ほか. 戸閉装置の変革（改良型戸閉装置の開発）. JR East Technical Review. 2015, no.53, p.23-28.
- 稲玉繁樹ほか. 電気式戸閉装置のロック機構簡素化を目指した押し返し制御. 第20回鉄道技術・政策連合シンポジウム.



J-RAIL2013 S5-1-1, (2013).

- (3) 稲玉繁樹ほか. 外力抑制制御によりラッシュ時の戸閉遅れを解消する電車でドアシステム. 第18回鉄道技術・政策連合シンポジウム. J-RAIL2011 S5-2-4, (2011).



**辻村 勲**

回転機/発電機・リニアモータの設計業務を経て鉄道車両用ドア装置の設計に従事。現在，富士電機株式会社パワエレシステム事業本部生産統括部鈴鹿工場車両・産業可変速部主査。



**梅澤 幸太郎**

施設設備関連エンジニアリング業務を経て鉄道車両用電機品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エレシステム事業本部生産統括部鈴鹿工場車両・産業可変速部マネージャー。



**藤田 憲司**

パワーエレクトロニクス関連の開発業務を経て鉄道車両用ドア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エレシステム事業本部輸送システム事業部輸送機器部主任。電気学会会員。



## 解説 1 バチルス菌 *Bacillus*

p.7, 40

バチルス菌とは土壌や水中など自然界に普遍的に存在するグラム陽性菌であり、内生孢子を形成し、細胞形態が桿状（かんじょう）で、好気性または通性嫌気性の従属栄養細菌である。バチルス菌には、いろいろな産業用酵素（食品用、洗剤用など）の生産に用いられる枯草菌（*Bacillus subtilis*）や生物農薬に用いられる卒倒病菌（*Bacillus thuringiensis*）などがある。納豆菌は枯草菌の一種である。また、高温や低温、高 pH や低 pH、高塩濃度、高压といったさまざまな極限環境に適応している種類も多数存在している。このように、バチルス菌には約 300 種類の性質の異なるものが存在していることが知られている。富士電機は、この中から排水処理に適したバチルス菌を発見し、排水処理システムに使用している。

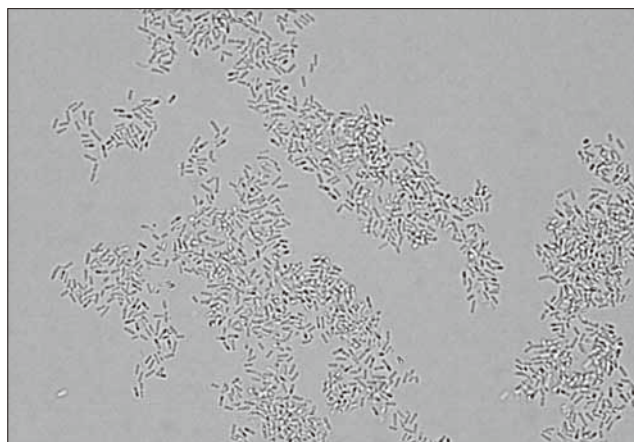


図 1 排水処理用バチルス菌

~~~~~

略語（本号で使った主な略語）

AI	Artificial Intelligence	人工知能
ASP	Application Service Provider	
BOD	Biochemical Oxygen Demand	生物学的酸素要求量
CNC	Computer Numerical Control	コンピュータ数値制御
COD	Chemical Oxygen Demand	化学的酸素要求量
DCS	Distributed Control System	分散型制御システム
ECA	Emission Control Area	指定海域
EGCS	Exhaust Gas Cleaning Systems	排ガス浄化システム
EMC	Electromagnetic Compatibility	電磁両立性
EV	Electric Vehicle	電気自動車
FIT	Feed-in Tariff	再生可能エネルギー固定価格買取制度
HMI	Human Machine Interface	
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	
IIC	Industrial Internet Consortium	
IoT	Internet of Things	
MCA	Multi-Channel Analyzer	
MES	Manufacturing Execution System	製造実行システム
MMC	Motor Control Center	
OPC	OLE for Process Control	
PaaS	Platform as a Service	
PAH	Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	多環芳香族炭化水素
PCS	Power Conditioning System	パワーコンディショナ
PLC	Programmable Logic Controller	プログラマブルコントローラ
PM	Particulate Matter	浮遊粒子状物質
PWM	Pulse Width Modulation	パルス幅変調
SaaS	Software as a Service	
SS	Suspended Solid	浮遊物質
T-N	Total Nitrogen	全窒素濃度
USB	Universal Serial Bus	

商標（本号に記載した主な商標または登録商標）

Bluetooth	Bluetooth SIG, Inc. の商標または登録商標
Ethernet	富士ゼロックス株式会社の商標または登録商標
Excel	Microsoft Corporation の商標または登録商標
MODBUS	Schneider Automation, Inc. の商標または登録商標
PROFIBUS	PROFIBUS User Organization の商標または登録商標
PROFIBUS-DP	PROFIBUS User Organization の商標または登録商標
PROFIdrive	PROFIBUS User Organization の商標または登録商標

その他の会社名、製品名は、それぞれの会社の商標または登録商標である。

訂正：富士電機技報・2017, vol.90, no.4, p.224, 2章の1行目と7行目, p.225, 3.3節の2行目.

(正)

X シリーズ PrimePACK™

(誤)

X シリーズ PriemPACK™

主要事業内容

パワーエレクトロニクス

●エネルギーソリューション

確かな技術で電力インフラを支え、エネルギーの安定供給、最適化、安定化に貢献します。

エネルギーマネジメント

FEMS, 新電力流通, スマートメータ

変電システム・電力変電

産業変電, 鉄道地上変電, 産業電源設備

電源システム・無停電電源装置 (UPS)

パワーコンディショナ (PCS), データセンター, 配電盤

器 具

受配電, 制御機器

●インダストリーソリューション

パワーエレクトロニクス応用製品に計測機器, IoT を組み合わせ、工場の自動化や見える化により、生産性の向上と省エネを実現します。

ファクトリーオートメーション

インバータ, FA コンポーネント, FA システム, 回転機

プロセスオートメーション

駆動制御システム, 計測制御システム, 工業電熱

環境・社会ソリューション

計測機器・センサ, 放射線管理システム, 植物工場, 物流システム, 輸送システム

IT ソリューション・情報システム

情報システム

発 電

高度なプラントエンジニアリング力で、高効率かつ環境にやさしいクリーンエネルギーを供給する各種発電プラント設備を通じて、拡大する電力需要にお応えします。

発電プラント

火力・地熱発電設備, 水力発電設備

新エネルギー

太陽光発電システム, 風力発電システム, 燃料電池

電子デバイス

産業・新エネルギー分野, 自動車分野といった分野において、パワーエレクトロニクスのキーデバイスであるパワー半導体を提供し、高効率化や省エネ化に貢献します。

半導体

パワー半導体

ディスク媒体

食品流通

コア技術である冷熱技術に、メカトロニクス技術や IoT を組み合わせ、食品流通分野における最適な商材とソリューションを提供することにより、食の安全・安心に貢献します。

自販機

飲料・食品自動販売機

店舗流通

店舗設備機器, 金銭機器, エネルギー管理システム

次号予定

富士電機技報 第91巻 第2号

特集 2017年度の技術成果と展望

富士電機技報企画委員会

企画委員長 近藤 史郎

企画委員幹事 吉田 隆

企画委員 荻野 慎次 斎藤 哲哉 片桐 源一 高松 武史

奥田 善久 鈴木 智宏 熊谷 明恭 久野 宏仁

吉田 隆 橋本 親 眞下 真弓 大山 和則

特集委員 奥田 善久 池田 卓史 渡部 雅教 高松 弘光

事務局 木村 基 小野寺拓也 小野 直樹 山本 亮太

富士電機技報 第91巻 第1号

平成30年3月20日 印刷 平成30年3月30日 発行

編集兼発行人 近藤 史郎

発行所 富士電機株式会社 技術開発本部
〒141-0032 東京都品川区大崎一丁目11番2号
(ゲートシティ大崎イーストタワー)

編集・印刷 富士オフィス&ライフサービス株式会社内
「富士電機技報」編集室
〒191-8502 東京都日野市富士町1番地
電話 (042) 585-6965
FAX (042) 585-6539

発売元 株式会社オーム社
〒101-8460 東京都千代田区神田錦町三丁目1番地
電話 (03) 3233-0641
振替口座 東京 6-20018

定 価 756 円 (本体 700 円・送料別)

* 本誌に掲載されている論文を含め、創刊からのアーカイブスは下記 URL で利用できます。

富士電機技報 (和文) http://www.fujielectric.co.jp/about/company/contents_02_03.html

FUJI ELECTRIC REVIEW (英文) <http://www.fujielectric.com/company/tech/contents3.html>

* 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。

© 2018 Fuji Electric Co., Ltd., Printed in Japan (禁無断転載)



Innovating Energy Technology

エネルギー技術を、究める。

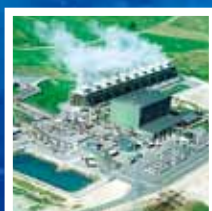
電気、熱エネルギー技術の革新の追求により、
エネルギーを最も効率的に利用できる製品を創り出し、
安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献します。

F 富士電機

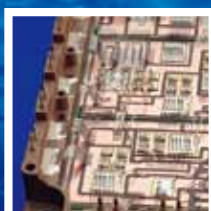
Innovating Energy Technology

エネルギー技術を、究める。

電気、熱エネルギー技術の革新の追求により、
エネルギーを最も効率的に利用できる製品を創り出し、
安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献します。



耐食・材料・熱水利用技術
地熱発電プラント



デバイス技術
IGBTパワー半導体



パワーエレクトロニクス技術
メガソーラー向けPCS
(パワーコンディショナ)



パワーエレクトロニクス技術
インバータ



パワーエレクトロニクス技術
UPS(無停電電源装置)



熱交換・冷媒制御技術
ハイブリッドヒートポンプ式
自動販売機

FE 富士電機