

富士電機技報

FUJI ELECTRIC JOURNAL

2020
Vol.93 No.



特集 自動化と省エネルギーに貢献する
計測・制御ソリューション



特集 自動化と省エネルギーに貢献する 計測・制御ソリューション

産業分野では労働力不足を背景とした自動化・省力化に加え、設備稼働状況の見える化、設備不具合の予知や解析など、生産改革により競争力を高める動きが活発です。また、環境負荷を低減するための省エネルギー（省エネ）などが推進されています。

富士電機は、計測・制御ソリューションに必要な計測機器、コントローラなどの強いコンポーネント、およびそれらとIoT技術を組み合わせたシステム化技術により、自動化や省エネへの貢献とグローバル化を目指しています。

本特集では、計測・制御ソリューションを支える最新コンポーネントと最新技術、およびそれらを組み合わせたソリューションを紹介します。

表紙写真

①監視制御システム「MICREX-VieW XX（ダブルエックス）」、②現場型診断装置「SignAiEdge（サインアイエッジ）」、③クランプオン式蒸気用超音波流量計、④プログラマブルコントローラ「MICREX-SXシリーズ」



目次

特集 自動化と省エネルギーに貢献する計測・制御ソリューション

〔特集に寄せて〕 Society 5.0 は CPHSoS で 本多 敏	3 (3)
〔現状と展望〕 自動化と省エネルギーに貢献する 計測・制御ソリューションの現状と展望 鉄谷 裕司 ・ 笹谷 俊幸	4 (4)
蒸気のムダを見える化する世界初のクランプオン式蒸気用超音波流量計 宮本 汐里 ・ 木代 雅巳 ・ 坂上 智	11 (11)
船舶スクラバ向けレーザ方式ガス分析計 東 亮一 ・ 田原 雅哉 ・ 赤尾 幸造	16 (16)
モーションコントローラ「MICREX-SX SPH5000M」 下川 孝幸 ・ 宮下 裕史 ・ 久保隅 創	21 (21)
保守性と信頼性を向上した監視制御システム 「MICREX-VieW XX (ダブルエックス)」 笹野 喜三郎 ・ 藤澤 昭博 ・ 永塚 一人	26 (26)
工場ですぐ使えるタッチオペレーションの現場型診断装置 「SignAiEdge (サインアイエッジ)」 松本 充弘 ・ 佐藤 好邦 ・ 坂井 一博	30 (30)
エッジコントローラで動作するモデル予測制御 丹下 吉雄 ・ 桐生 智志 ・ 松井 哲郎	34 (34)
異常兆候を検知し回避手順を示すプラント運転支援システム 鳴海 克則 ・ 鈴木 聡 ・ 館山 淳也	40 (40)
監視制御システムの設計工期短縮と品質向上を実現する エンジニアリング支援ツール「HEART」 北村 純郎 ・ 加藤 邦昭 ・ 吉野 稔	47 (47)
安定操業を実現するセメントプラント監視制御パッケージ 梅基 一生	52 (52)
効率的な維持管理を実現するごみ焼却施設パッケージ 古川 浩司	56 (56)
AI 技術により予測精度を高めたエネルギー制御パッケージ「EMS-Package」 鳴海 克則 ・ 丹下 吉雄 ・ 島崎 祐一	61 (61)
安全・安心に貢献する放射線管理サービスソリューション 前川 修 ・ 加藤 勉 ・ 安部 繁	66 (66)

普通論文

大容量 UPS を用いたデータセンター向け共通予備システム 安本 浩二 ・ 濱田 一平 ・ 根本 健司	72 (72)
--	---------

新製品紹介論文

太陽光発電用パワーコンディショナ「PIS-50/500 (DC1,100 V/50 kVA)」	78 (78)
蒸気用超音波流量計 (クランプオン式)	81 (81)
電機高速コントローラ 「MICREX-VieW XX (ダブルエックス) XCS-3000 Type E」	84 (84)

略語・商標	87 (87)
-------	---------

Contents

Instrumentation and Control Solutions Contributing to Automation and Energy Savings

[Preface] Implementation of Society 5.0 Based on CPHSoS HONDA, Satoshi	3 (3)
Instrumentation and Control Solutions Contributing to Automation and Energy Savings: Current Status and Future Outlook TETSUTANI, Hiroshi SASAYA, Toshiyuki	4 (4)
World's First Clamp-On Ultrasonic Flowmeter for Steam Enabling the Visualization of Steam Losses MIYAMOTO, Shiori KISHIRO, Masami SAKAUE, Satoru	11 (11)
Laser Gas Analyzer for Exhaust Gas Cleaning Systems HIGASHI, Ryoichi TABARU, Masaya AKAO, Kozo	16 (16)
“MICREX-SX SPH5000M” Motion Controller SHIMOKAWA, Takayuki MIYASHITA, Hiroshi KUBOSUMI, Hajime	21 (21)
“MICREX-View XX (Double X)” Monitoring and Control System with Improved Maintainability and Reliability SASANO, Kisaburo FUJISAWA, Akihiro NAGATSUKA, Kazuhiro	26 (26)
“SignAiEdge” On-Site Diagnostic System by Touch Operation That Supports Immediate Implementation to On-Site Diagnosis at Factories MATSUMOTO, Mitsuhiro SATO, Yoshikuni SAKAI, Kazuhiro	30 (30)
Model Predictive Control Implemented in an Edge Controller TANGE, Yoshio KIRYU, Satoshi MATSUI, Tetsuro	34 (34)
Plant Operation Support System that Detects Abnormality Sign and Provides Guidance on Avoidance NARUMI, Katsunori SUZUKI, Satoshi TATEYAMA, Junya	40 (40)
“HEART” Engineering Support Tool for Shortening Design Periods and Improving the Quality of Monitoring and Control Systems KITAMURA, Sumio KATO, Kuniaki YOSHINO, Minoru	47 (47)
Cement Plant Monitoring and Control Package for Stabilizing Operations Umemoto, Kazuo	52 (52)
Waste Treatment Facility Package for Efficient Maintenance FURUKAWA, Koji	56 (56)
“EMS-Package,” Energy Control Package with AI-Based Highly Accurate Prediction NARUMI, Katsunori TANGE, Yoshio SHIMASAKI, Yuichi	61 (61)
Radiation Management Service Solutions Contributing to Safety and Security MAEKAWA, Osamu KATO, Tsutomu ABE, Shigeru	66 (66)

Regular Paper

Common Backup Systems for Data Centers Using Large-Capacity UPS YASUMOTO, Koji HAMADA, Ipppei NEMOTO, Kenji	72 (72)
---	---------

New Products

“PIS-50/500” (1,100 V DC/50 kVA) Power Conditioning System for Photovoltaic Power Generation	78 (78)
Ultrasonic Flowmeters for Steam (Clamp-on)	81 (81)
“MICREX-View XX (Double X) XCS-3000 Type E” High-Speed Controllers for Electrical Machinery Control	84 (84)
Abbreviations and Trademarks	87 (87)

特集に寄せて

Society 5.0 は CPHSoS で

Implementation of Society 5.0 Based on CPHSoS

本多 敏 HONDA, Satoshi

慶應義塾大学名誉教授

慶應義塾大学システムデザイン・マネジメント研究所 上席研究員 工学博士



Society 5.0 は、第 5 期科学技術基本計画で狩猟社会・農耕社会・工業社会・情報社会に続く新たな社会を目指すべきとして、“サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させたシステム（CPS：Cyber-Physical Systems）により、経済発展と社会的課題の解決を両立する、人間中心の社会”の実現が提唱されたものである。次期計画では Society 5.0 の実装と合わせて、国連で設定した SDGs（Sustainable Development Goals）の達成が重要課題となる。

計測技術は農耕社会での、天体観測や、農耕面積・収穫高などの長さや質量の測定技術として始まった。一方、制御技術は第一次産業革命のワットの蒸気機関をうまく稼働させたガバナのハンチングに対するマックスウェルによる安定解析が始まりとされるが、古代ギリシャのクテシビオスは水時計の定流水源にフロートとバルブからなるサーボ機構を用いていた。幸いにしてこの系は負荷変動がほとんどなく時定数も大きいため安定性解析の必要は生じなかった。ということで、計測と制御の歴史は紀元前にさかのぼることになる。もちろん、精緻な制御理論やシステム理論は計測技術とともに、産業革命以後の工業社会・情報社会で大きく発展しており、ドイツの提唱する Industrie 4.0 でいう、第 1 次から第 4 次の産業革命（蒸気機関・電気・情報・CPS）をもたらしてきた。そして、Society 5.0 を担う科学技術として、IoT、ビッグデータ、AI が強調されている。CPS そのものといっても過言でない計測・制御・システム技術は、情報技術とともにこれまで以上に重要性を増すことになる。

ここで、技術から Society 5.0 の主役である、人に目を転じよう。J・サクスは著書『貧困の終焉』の中で

“第一次産業革命にとってなにより肝心なのは石炭そのものではなく、石炭をどのように使うかだった。より広くいえば、新しい形のエネルギーをどのように使うか、である。石炭で学んだことは、他のエネルギー・システムを使うときの基本になった。水力、石油、ガス、核燃料、さらに最近の風力や太陽発電のような再生可能のエネルギーにも応用できるのだ。”（野中、鈴木訳）

と述べている。社会システムに着目するという経済学者

の慧眼はさすがである。著書の主題は開発途上国の極度の貧困対策であり、梯子の初めの段に足をかけることを支援することで解決しようというもので、2015 年までに達成する目標であったミレニアム開発目標（MDGs：Millennium Development Goals）プロジェクトで指導的役割を果たした。このプロジェクトに対する批判・反省を元に、2030 年までの達成を目標とする現在の SDGs につながっている。そこでは、17 のゴール、169 のターゲット、232 のインジケータが設定され、エビデンスベースでの取組みが行われようとしており、Society 5.0 との親和性も高い。

SDGs の目標群は独立ではなく、複雑に絡み合っており、解くべき課題も複合的である。当然その解も複雑になり、表題に掲げた CPHSoS^(注)（Cyber-Physical & Human Systems of Systems）となる。もともとの CPS を人・社会と SoS へと拡張している。運用と管理が独立した個々の構成システム（CPHS：Cyber-Physical & Human Systems）が地理的にも広く分布し、互いにつながることによって創発的な振る舞いをする可能性を持ちながら進化的適応的な発展をする SoS として課題解決にあたることになる。そこでは、サービスの受益者としての人やどのように行動しどれだけの満足度を持つかなどをフィードバックループに含む構造とともに、SoS として個別の CPHS を実現し他の CPHS とどのようにつながるかを判断する社会的合意形成のための枠組みが不可欠となる。

先行する Industrie 4.0 や Industrial Internet に対して、社会と人を含む Society 5.0 を CPHSoS として実現するためには、RAMI4.0（Reference Architecture Model Industrie 4.0）、IIRA（Industrial Internet Reference Architecture）などを踏まえた上で、人と社会を含んだアーキテクチャをもとにソリューション開発を行う必要がある。日本の得意とする優れた先端技術を極めるとともに、このような視点を持つことが重要であり、計測・制御・システム技術者の活躍を大いに期待している。

（注）CPHSoS：CPS を人と社会を含む CPHS へと広げ、さらにそのシステム同士がつながる SoS としたものの

自動化と省エネルギーに貢献する 計測・制御ソリューションの現状と展望

Instrumentation and Control Solutions Contributing to Automation and Energy Savings: Current Status and Future Outlook

鉄谷 裕司 TETSUTANI, Hiroshi

笹谷 俊幸 SASAYA, Toshiyuki

① まえがき

今日、産業分野は二つの大きな環境変化に直面している。

一つ目は人材不足の深刻化であり、多くの企業で人材確保に課題があるとともに、ビジネスにも影響が出ているとされている。また、ロボット、IoT (Internet of Things)、AI などの先端技術の利活用によるデジタル技術の進展に伴う“第 4 次産業革命”である。これに伴い製造業の在り方も効率化の拡大に向けて大きく変化していく。

二つ目は、近年の異常気象による災害は甚大なものであり、この異常気象は地球温暖化に起因するものと言われている。2018 年の国連気候変動枠組条約第 24 回締約国会議 (COP24) では「パリ協定」の運用ルールが決まった。日本は CO₂ などの温室効果ガスの排出量を 2030 年度には 2013 年度比で 26% 削減すると公約しており、省エネルギー (省エネ) への取り組みは企業の大きな課題となっている。

富士電機は、計測・制御ソリューションに必要な計測機器やコントローラなどの強いコンポーネント、およびそれらと IoT 技術を組み合わせたシステム化技術により、自動化と省エネへの貢献、さらにはグローバル化を目指している。

本特集では、計測・制御ソリューションを支える最新コンポーネントと最新技術、およびそれらを組み合わせたソリューション事例について述べる。

② 計測・制御分野の技術動向

計測・制御システムにおけるさまざまなニーズに応えるため、システムの登場から 40 年間、監視・制御を主な機能として、信頼性や拡張性をはじめ、エンジニアリング機能とメンテナンス性の向上を図ってきた。

さらに IT の発展に伴い、製造実行システム (MES : Manufacturing Execution System) や製品情報管理 (PDM : Product Data Management) などの外部の機能と連携することで、システム全体の機能を強化してきた。

この発展の過程には、それぞれを構成する機器の性能向上もさることながら、制御技術やネットワーク技術、データセキュリティの健全性の発展が大きく寄与している。

世界では、2015 年 9 月の国連サミットで“誰一人取り残されない”持続可能で多様性と包摂性のある社会を実現するため、SDGs (Sustainable Development Goals) が採択された。この SDGs では、2030 年に向けて地球規模で解決すべき 17 の目標を定めている。日本ではこの社会的課題の解決と経済発展を両立するため、第 5 の社会 (Society 5.0^(*)) の実現を目指している。そのための基盤技術として、IoT、ビッグデータ解析および AI が強調されている。

IoT は、あらゆるものをインターネットに接続し、そこから収集したデータから新しい価値を生み出す。これにより、品質改善や生産効率向上、働き方改革などの経営課題の全体最適に向けた取り組みが広がってきている。計測・制御システムの目的も同一であり、IoT の実現に向けて計測・制御システムは重要な要素である。

一方、IoT を構成するフィジカル空間はセンシング技術が基盤であり、まさに計測・制御システムの基本要素技術である“はかる”は、IoT における重要な要素となる⁽¹⁾。

③ 富士電機の IoT への取り組み⁽²⁾

富士電機はパワー半導体とセンサをパワエレ技術のキーデバイスと位置付け、これらを活用した高性能・

(*) Society 5.0

Society 5.0 とは、IoT によりサイバー空間 (仮想空間) とフィジカル空間 (現実空間) を連携し、全ての

モノや情報、人を一つにつなぐとともに、AI などの活用により量と質の全体最適をはかる社会のことである。第 5 期科学技術基本計画において、わが国が目

指すべき未来社会の姿として初めて提唱された。

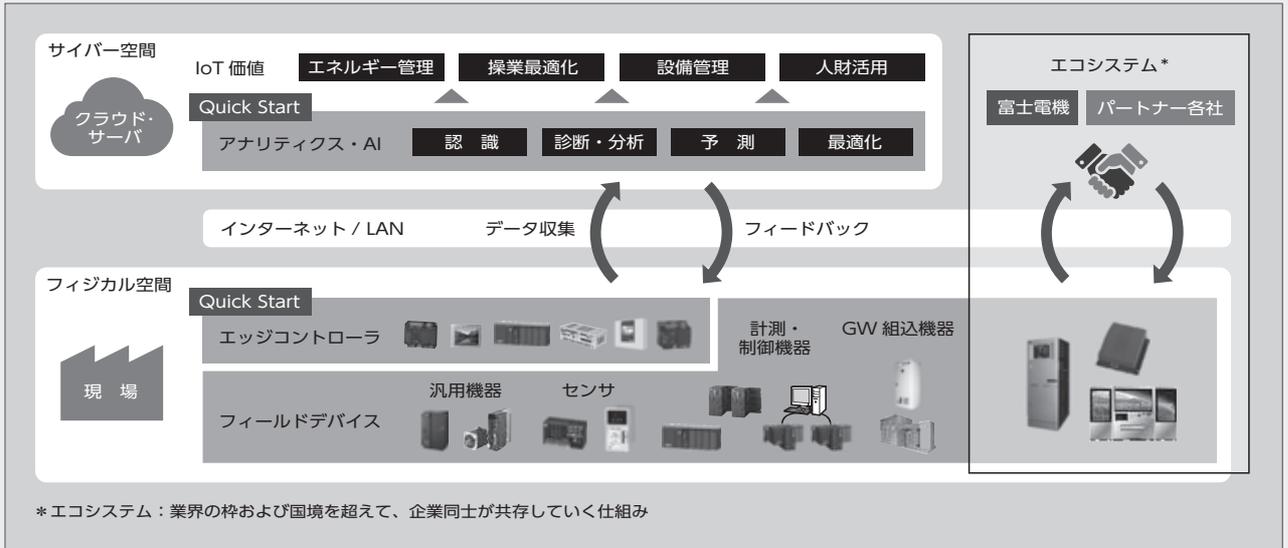


図1 富士電機のIoTコンセプト

高機能なコンポーネントを提供している。さらに、これらコンポーネント群とエンジニアリング技術、サービス、高度な最適制御および各種ソリューション技術によって、インダストリー分野を通じて、安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献している。

富士電機は、製造、流通、社会インフラなどの分野に、省エネ、生産性向上、品質向上のための監視制御システムを提供してきた。この基盤技術は、センシングと制御である。過去の納入経験を基に、長年培ってきた現場サイドのエンジニアリング、アナリティクス・AI、ならびにネットワーク技術を統合したIoTを提供する。

富士電機は、顧客のフィールドにおけるあらゆる情報をデジタル化し、サイバー空間で新しい顧客価値を創出するIoTシステムを、システムソリューションの中核に位置付けている(図1)。“Small, Quick Start & Spiral-up”で素早く始めて着実な効果を得ることができ、機能・性能の継続的な拡充ができることをコンセプトとしている。

4 技術基盤

4.1 センサ技術

富士電機のセンサ技術は、図2のような圧力や流量、温度などの物理量の計測や、ガスや水の分析計において進化してきた。

かつては、濃度や水分量、品質などを高額な分析計や手動計測で行ってきたため、計測は高コストで低頻



図2 富士電機の流量計と分析計

度であった。最近では、このような計測対象を、温度などの高頻度でリアルタイムかつ安価に計測できるセンサデータを基に、統計・機械学習手法を用いて推定するソフトセンサ^(*)技術により、多くのセンシングを実現できるようになってきた。

新たなセンシング技術を確立するためには、数年の歳月を要する。しかし、富士電機は、過去に蓄積してきたセンサ技術を応用できるので、短期間で新たに見える化を促進するセンサが開発できた。

(1) 蒸気の見える化

富士電機は、温室効果ガスの削減に貢献する省エネ機器を創出してきた。近年では、エネルギーの“見える化”“最適化”により省エネを実現するシステムであるエネルギーマネジメントシステム(EMS: Energy Management System)を提供し、電気の省エネに貢献している。

一方で、最終エネルギー消費量は電力だけでなく“熱”が多くを占めている。例えば、日本の産業部門

(*) ソフトセンサ

温度や湿度、圧力を直接測る装置をハードセンサと呼ぶ。密度や重合度といったパラメータは直接測定する

ことができないが、実験を繰り返してデータを取った後、ハードセンサとの間の関係を計算したりすることによってその値を推定し、リアルタイムで推定する装置のことをソフトセンサと呼ぶ。

では最終エネルギー消費量のうち約 56%⁽³⁾ が熱利用となっている。この熱エネルギーの消費量を削減することができれば、温室効果ガスの削減に向けた大きな効果が期待できる。

そこで富士電機は、世界で初めて、工場の製造ラインで使われる低圧〔0.1～0.9 MPa (G)〕の蒸気を配管の外から容易に測ることができるクランプオン式蒸気用超音波流量計を開発した（11 ページ、「蒸気のムダを見える化する世界初のクランプオン式蒸気用超音波流量計」参照）。

(2) 産業用センサの適用分野拡大

「海洋汚染防止条約」（マルポール条約）によ

り、船舶の燃料油中の硫酸分濃度が国際的に規制され、2020 年 1 月からは、ディーゼルエンジンからの硫黄化合物の排出規制（SO_x 規制）として、燃料油中の硫黄分規制値が重量濃度において 3.5% 以下から 0.5% 以下へと強化された。富士電機は、海水で排ガス中の SO_x を洗浄するスクラバを開発し、2018 年度に発売した。さらに、この規制において義務付けされた二酸化硫黄（SO₂）と CO₂ のガス濃度の連続監視に対応でき、小型・軽量で省メンテナンス性を実現した船舶スクラバ向けレーザ方式ガス分析計を開発し、2019 年 8 月に発売した。船舶規格の認証取得を産業用のコンポーネントに拡大して、これらを組み合わせた EGCS（Exhaust Gas Cleaning Systems）を提供している（図 3）（16 ページ、「船舶スクラバ向けレーザ方式ガス分析計」参照）。

4.2 モーションコントローラ「MICREX-SX SPH5000M」

産業用機械・装置では、複雑な動作や加工への対応、工程時間の短縮および高精度化の要求がある。そのため、産業用機械・装置で使われるモーションコントローラには、より多くの制御軸で、かつ、より高速な制御周期で同期制御を行うことができる性能が求められる。

富士電機では、これらの要求に応えるため、統合コントローラ「MICREX-SX シリーズ」の新 CPU モジュール「SPH5000M」を開発した（図 4）。このモジュールは、デュアルコアマイコンによるアプリケー

特集 自動化と省エネルギーに貢献する計測・制御ソリューション

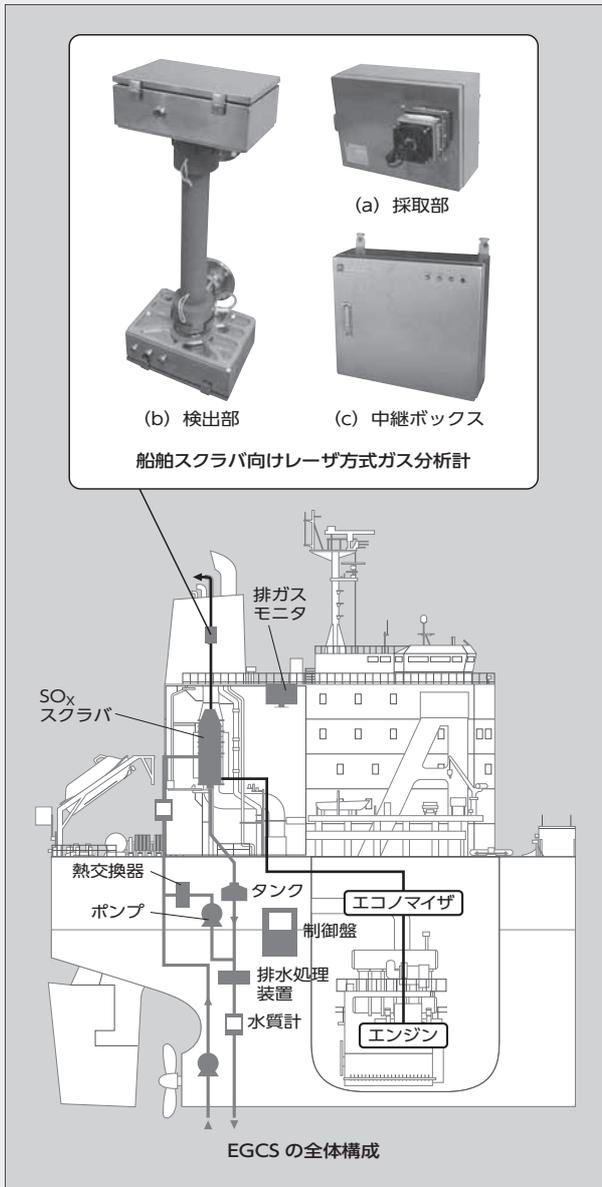


図 3 船舶の EGCS

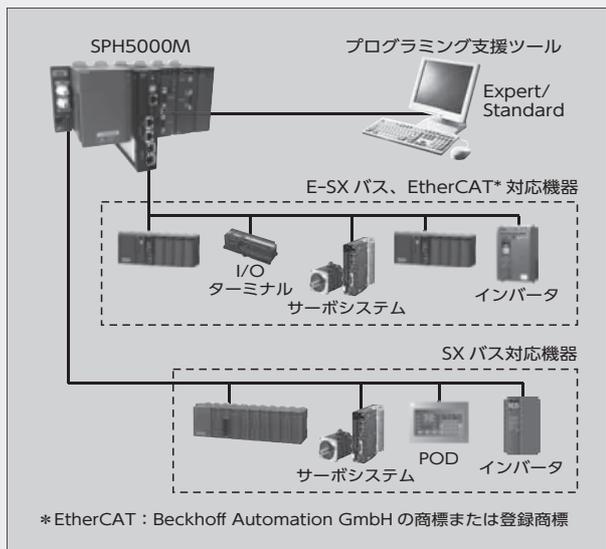


図 4 「SPH5000M」を使用したモーションコントロールシステムの構成例

(*) スクラバ

空気、煙道ガスあるいは他のガスから、さまざまな汚

染物質やばいじん粒子を除去する目的で用いる装置をいう。

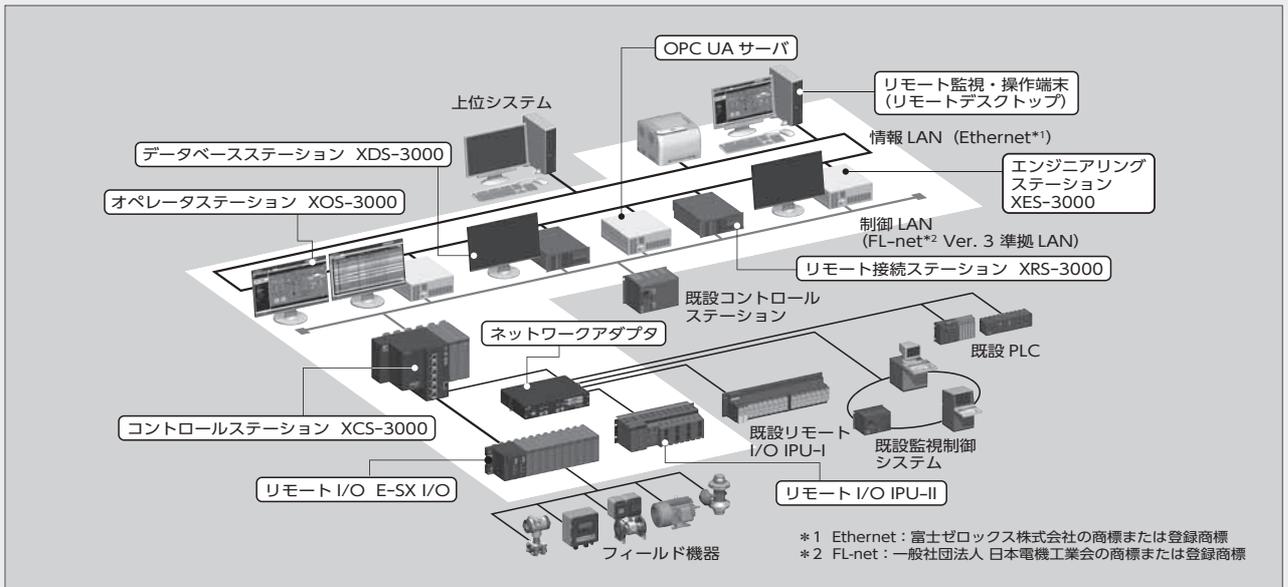


図5 監視制御システム「MICREX-VieW XX」

ションプログラムの並列実行性能技術と、共有メモリ高速化技術によって、モーション制御プログラムを従来の「SPH3000MM」と比べて3倍の速度で実行できる。

一方の演算実行エンジンでシーケンス制御を行い、もう一方の演算実行エンジンでモーション制御を行うことで、従来と同様のシーケンス制御とモーション制御の一体化を継承しつつ、顧客のさらなる要求に応じていく(21ページ、「モーションコントローラ「MICREX-SX SPH5000M」」参照)。

4.3 監視制御システム⁽⁴⁾

富士電機は、基幹の監視制御システムとして「MICREX-VieW XX (ダブルエックス)」を提供している(図5)。このシステムは、停止することが許されない設備の連続稼働を可能とする高信頼性で保守性に優れた監視制御システムである。

IoTレイヤには、フィジカル空間のレイヤとサイバー空間のレイヤがある。監視制御システムはIoTのフィジカル空間において入出力装置などのI/Oであり、サイバー空間では制御装置〔コントローラやHMI(Human Machine Interface)〕となる。また、一方では、監視制御システム全体をフィジカル空間と捉えることもできる。このようなIoTレイヤにおいて監視制御システムは、多くのデバイスや機器と有機的に接続でき、大量のデータを取り扱うことが必要で、規模の拡大、長期データの記録や保存、セキュリティの確保の対応を進めてきた。

(1) 監視制御システム「MICREX-VieW XX」

規模の拡大に伴い、顧客からは、運用の効率化と省人化の要求が高まってきている。これに応えるため、

監視制御システムに新機能を開発した。プラントの過去の動作を監視制御システム上に再現する過去再現機能により、異常解析の迅速化を可能とし、プラントの効率的な運用を実現した。

また、開発した新二重化I/Oにより、システムのリプレースにおける連続性を確保し、保守性の向上を図った(26ページ、「保守性と信頼性を向上した監視制御システム「MICREX-VieW XX (ダブルエックス)」」参照)。

(2) エンジニアリングツール

人材不足の問題を抱える顧客・ユーザーとともに、最近のエンジニアリングツールに対して、経験の浅いエンジニアでも容易に、高度かつ高品質な制御ソフトウェアを、高効率、短納期で設計できることが強く要求されている。エンジニアリング支援ツール「HEART」は、汎用OAソフトウェアで作成した仕様書から制御ソフトウェアを自動生成し、監視制御システムの工期短縮と品質向上を実現する。また、制御対象の機種に依存することなく、容易にエンジニアリングおよびメンテナンスができる環境を提供している。さらに、従来の一般的な運転案の記述方式であるフローの表現を、ソフトウェアが自動生成する新機能も搭載し、さらなる進化を遂げた(47ページ、「監視制御システムの設計工期短縮と品質向上を実現するエンジニアリング支援ツール「HEART」」参照)。

5 計測・制御ソリューション

5.1 エッジコントローラによる最適化^(*)

従来、生産設備の運用を改善するために、解析や最適化する上で、高性能なICT機器を導入し、専用の

システムを構築する必要があった。富士電機の IoT ソリューションは、“Small, Quick Start & Spiral-up”で素早く始めて、着実な効果を得られ、機能・性能の継続的な拡充ができることをコンセプトとしている。

(1) 現場型診断装置「SignAiEdge (サインアイエッジ)」

現場に廉価で簡単に設置でき、容易に診断できる、表示器一体型のエッジコントローラ「SignAiEdge」を提供している。現場情報の解析機能や最適化機能を搭載している。バッチ生産やロット生産に対応しており、導入から運用までをユーザーで行えるので、現場への素早い導入が可能である(30 ページ、“工場ですぐ使えるタッチオペレーションの現場型診断装置「SignAiEdge (サインアイエッジ)」”参照)。

(2) 「MICREX-SX」で動作するモデル予測制御

モデル予測制御は、プラントモデルを用いて未来の挙動を予測しながら高精度な制御ができる優れた制御方式である。今回、廉価なエッジデバイスでもモデル予測制御ができるようにするため、数式処理技術を応用して高速化した。これにより、汎用 PLC (Programmable Logic Controller) 「MICREX-SX」上で実行できるようにした。従来の PID (Proportional-Integral-Differential) 制御に比べて制御性能が向上し、バッチ時間短縮と品質安定化が期待できる。さらに、既存の監視制御システムや他社製の PLC に搭載することも可能である(34 ページ、“エッジコントローラで動作するモデル予測制御”参照)。

5.2 プラント運転への IoT 適応

日本の製造業は、オペレーターの優れた運転技術で、生産効率を上げ、ものづくりで優秀な成果を上げてきた。しかし、熟練オペレーターの高齢化で人材不足が生じ、安定・安全操業が揺らいできている。

さらに、多様化する消費者ニーズに応える多品種少量生産に対応するため設備の頻繁な増強や改造が必要である。そのため制御システムに対して、改造が短期間かつ少人数で実施可能であるという要求が増大している。

経験豊富なオペレーターの減少は、異常時の対応にも経験が不足しているということとなり、重大事故や設備停止につながる可能性があるため、豊富な納入実績を生かしたアナリティクス・AI で、この課題に対するソリューションを提供する。

さらに、エンジニアリングの経験が不足していても、設備の増強や改造において IoT に対応できる、パッ

ケージシステムを提供する。

(1) 異常兆候を検知し回避手順を示すプラント運転支援システム

監視制御システムは、工場内のセンサや機器をネットワークでつなぎ、データの収集・分析によって生産設備を運用している。品質に影響を与えるプロセス変数に対して上下限値を設定し、設備の異常の有無を判断することが一般的である。しかし、複数のプロセス値に相関関係があるため、個々の変数の監視だけでは適切な判断が難しく、熟練オペレーターのノウハウに依存することが多々ある。

このような問題に対して、プラントで収集された多量の計測ログ(トレンド、アラーム、操作履歴)を分析して、アナリティクス・AI を使い、モデル化することで異常兆候を予測しガイダンスを行う機能を提供した。

これにより、非熟練オペレーターによる安定・安全操業、オペレーターの負荷低減に貢献する(40 ページ、“異常兆候を検知し回避手順を示すプラント運転支援システム”参照)。

(2) AI 技術により予測精度を高めたエネルギー制御

日本の製鉄所は、エネルギー効率において世界を凌駕(りょうが)している。これは、排熱回収率と、鉄を生産する過程で発生する副生ガスの利用率の差が大きく影響している。さらに、この副生ガスの最適運用を行うエネルギーセンターの功績が大きい。エネルギーセンターにおいて、図 6 に示すようにエネルギーの見える化をキーに PDCA サイクルを回し、エネルギーの安定供給、省エネ、合理化・省力化、環境管理・防災センターの機能を実現する。

日本の製鉄所にはエネルギーセンターが、ほぼ 100% 導入されている。国外においては、日本のようにエネルギーセンターのコンセプトはなく、個別の設備最適化にとどまっている。そのため、エネルギー効率の大幅な改善ができていない。

この度、富士電機は、国外の製鉄所向けに、製鉄所のエネルギー最適化が容易に行えるように、AI 技術により予測精度を高めたエネルギー制御システムを開発した。

AI 技術を使って、最低限のプラント設備情報、生産計画およびプラント操業の過去データから最適かつ高い予測精度の運転モデルを算出し、省エネやオペレーターの負荷低減に貢献する(61 ページ、“AI 技術により予測精度を高めたエネルギー制御パッケージ「EMS-Package」”)。

(3) 安定操業を実現するセメントプラント

(* 4) エッジコントローラ

産業プロセスなどの産業分野における IoT システム

の中で、現場に設置されたさまざまな現場機器のデータを収集する装置である。

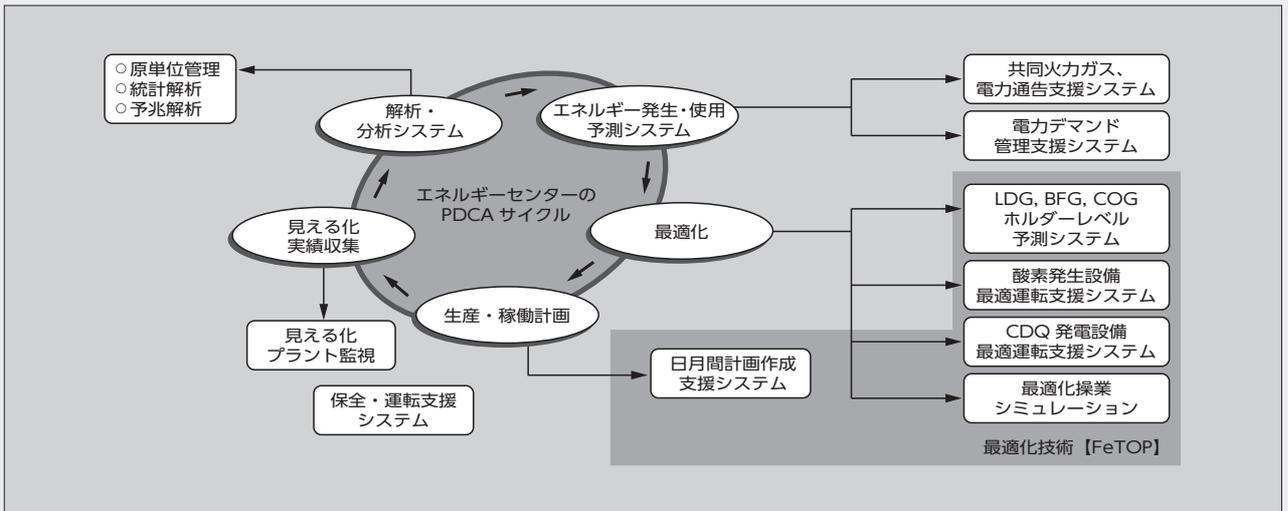


図6 製鉄所のエネルギーセンターのコンセプト

日本におけるセメント需要は、東日本大震災の復興需要が一段落して減少方向にある。東南アジアでは社会インフラの拡充のためにセメントの需要は拡大の傾向にあり、セメント工場の建設が盛んである。

富士電機では、国内外に数多く納入してきたセメントプラント監視制御システムの実績を基に、図7のように設備区分のメニューから必要な設備を選択することで、画面の絵に対応した制御ロジックのテンプレートが自動的に生成するセメントプラント監視制御パッ

ケージを開発し、エンジニアリング効率を向上した。また、IoT技術と融合することで安定した品質を実現した。

今後、国外のエンジニアリングメーカーに対して、本パッケージの適用を拡大していく（52ページ、“安定操業を実現するセメントプラント監視制御パッケージ”参照）。

(4) ごみ焼却施設

富士電機は、国内のゴミ焼却施設に多くの監視制御

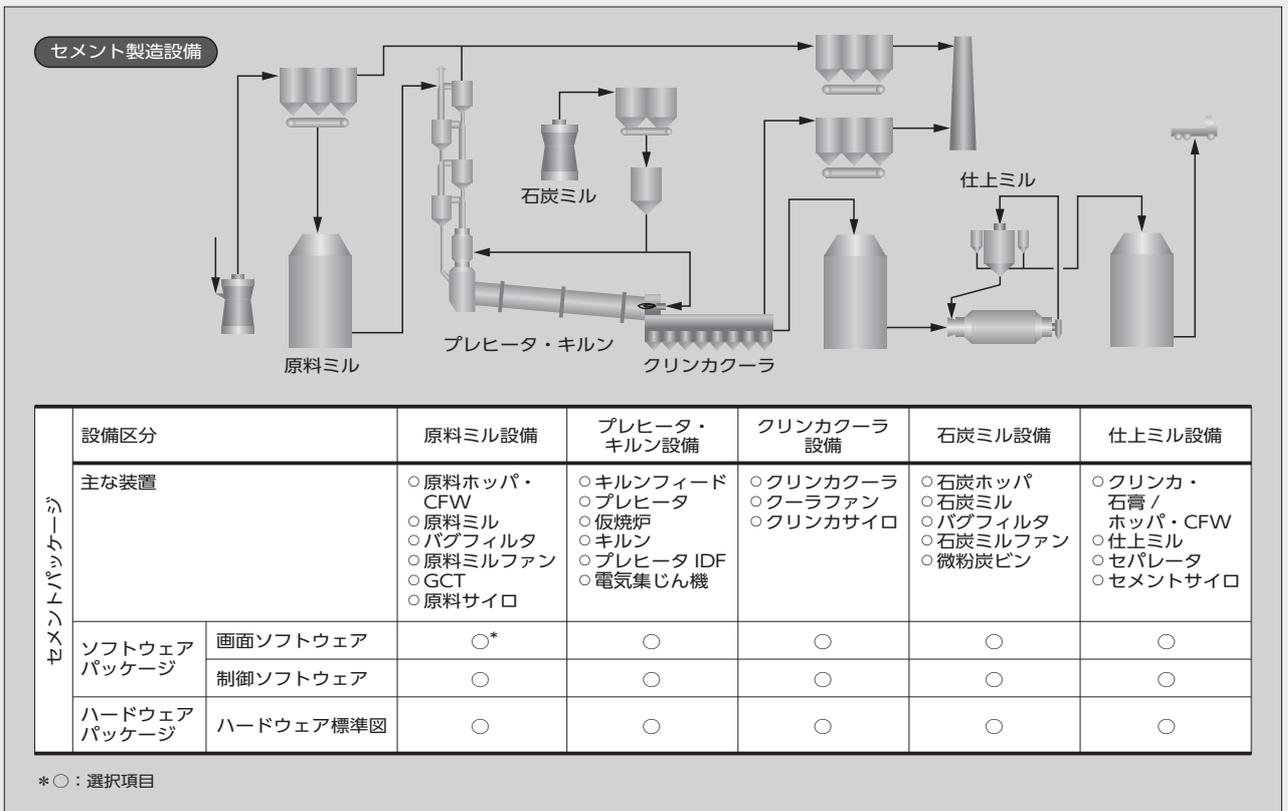


図7 セメントパッケージ機能一覧



図8 日本最大の清掃工場（新江東清掃工場）
（東京二十三区清掃一部事務組合提供・協力）

システムを納入してきた。図8に納入事例を示す。

最近のごみ焼却施設の耐久年数は延長される傾向にあるものの、通常は30年経過すると設備はスクラップ&ビルド（S&B）が行われる。一方、耐用年数が10年から15年である監視制御システムは、ごみ焼却施設がS&Bが行われるまでの中間で更新が行われる。

中間での更新は監視制御システムの単純更新であり、ソフトウェアの自動コンバートが可能なので、短期間におけるシステム全体の切替えや立上げが可能である。しかしながら、S&Bになると、新工場となるため各社競合となる。最近、S&Bでの自治体からの発注は、自治体が資金を調達し、その施設の設計・建設から運営を民間に委託するDBO（Design Build Operate）方式となることが多く、新たな対応スキームを構築する必要がある。

ごみ焼却施設は、受変電設備や焼却設備、発電設備などからなり、富士電機はこれらに対して製品の品ぞろえがある。監視制御システムをパッケージ化して工場丸ごと受注を推進している（56ページ、“効率的な維持管理を実現するごみ焼却施設パッケージ”参照）。

5.3 安全・安心に貢献する放射線管理サービスソリューション

放射線管理システムは、原子力施設、関連施設およびその周辺地域における環境中の放射線量を測定するシステムである。従来、比較的大掛かりなシステムとなり、設置コストや運用などの負担が大きく、導入のハードルが高かった。

富士電機は、IoT技術を導入した新型の放射線測定装置を開発した。放射線の検出には福島県の復興支援

にも活躍した半導体検出器を採用することで、高い信頼性を確保した。さらに、携帯電話網とクラウドサーバを活用して、設置費用およびスペースの大幅削減を実現した。

また、これらのデータを近隣住民に提供するサービスをラインアップしたことにより、透明性を上げた。

さらに、大きな課題であるシステムの安定運用に対応するため、インターネットを介した遠隔運用監視機能を備えたシステムを新たに開発した（66ページ、“安全・安心に貢献する放射線管理サービスソリューション”参照）。

6 あとがき

富士電機が取り組んでいる計測・制御ソリューションの事例を取り上げて、現状と展望について述べた。

富士電機は、SDGsの取組みの中で、エネルギーと環境をキーワードに持続可能で多様性と包摂性のある社会の実現に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 本多敏. 超スマート社会をささえる「はかる」技術. 計量計測, はかる. 平成28年第34巻第4号, p.2-3.
- (2) 保川幸雄ほか. IoTから始まる新しい価値創出ソリューションの現状と展望. 富士電機技報. 2018, vol.91, no.3, p.124-129.
- (3) “熱の有効利用について”. 資源エネルギー庁. 平成27年. https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/sho_energy/pdf/012_03_00.pdf. (参照 2019-12-08).
- (4) 吉川謙ほか. プラントを最適に運用する計測・制御システムソリューション. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.3, p.153-157.



鉄谷 裕司

富士電機株式会社執行役員、パワエレシステムインダストリー事業本部長。



笹谷 俊幸

オートメーション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インダストリー事業本部技師長。一般社団法人日本エレクトロヒートセンター理事。計測自動制御学会会員。

蒸気のムダを見える化する世界初のクランプオン式 蒸気用超音波流量計

World's First Clamp-On Ultrasonic Flowmeter for Steam Enabling the Visualization of Steam Losses

宮本 汐里 MIYAMOTO, Shiori

木代 雅巳 KISHIRO, Masami

坂上 智 SAKAUE, Satoru

近年、温室効果ガスの削減に向けて電気の見える化による省エネルギー（省エネ）が進む一方、蒸気の省エネへの取り組みは遅れている。これは、蒸気のムダの見える化が困難であることが原因であった。そこで富士電機は、クランプオン式蒸気用超音波流量計を開発し、配管を切らずに蒸気のムダを見える化した。クランプオン式流量計は、液体の測定はすでに実用化され普及している。しかし、蒸気は配管からの超音波透過率が極めて小さく、製品化が困難であった。この課題に対し、ノイズ除去技術や板波利用技術、信号処理技術を適用し、世界で初めて低圧蒸気が測定できる流量計を実用化した。

In recent years, energy savings through electricity visualization has been progressing to help mitigate greenhouse gases. On the other hand, initiatives to achieve energy savings in using steam have been delayed due to the difficulty of visualizing steam loss. To address the challenge, Fuji Electric has developed a clamp-on ultrasonic flowmeter for steam that enables visualization of steam loss without the need of pipe cutting. Although clamp-on flowmeters have already been used to measure liquids, they have been difficulties developing products due to the extremely low ultrasonic transmission coefficient of steam from a pipe. To overcome this challenge, we have used technologies for noise removal, lamb wave utilization, and signal processing to achieve the world's first product capable of measuring low-pressure steam.

① まえがき

2016年に発効された気候変動対策の国際的な枠組み「パリ協定」の下、世界各国で温室効果ガス削減の政策が進められている。温室効果ガスを削減するため、再生可能エネルギーの導入や電気使用量の見える化や削減などの電気の省エネルギー（省エネ）が一般的となっている。今まで、富士電機は温室効果ガスの削減に貢献する省エネ機器を創出してきた。近年では、エネルギーの見える化・最適化により省エネを実現するシステムであるエネルギーマネジメントシステム（EMS：Energy Management System）を通じて、電気の省エネに貢献している。

一方で、最終エネルギー消費量は電力よりも熱が最も多くを占めている。例えば、日本の産業部門の最終エネルギー消費量のうち約56%が熱利用である⁽¹⁾（図1）。この熱エネルギーの消費量を削減できれば、温室効果ガスの削減に向けた大きな効果が期待できる。

富士電機は熱の省エネ機器として、工場の温排水を再利用して蒸気を発生させるヒートポンプなどを提供している。これらの商材を生かし、今後は電気だけでなく熱も含めた

EMSを提供することで、総合的な省エネに貢献することを目指している。

② 熱の省エネルギーの課題

省エネを効率的に進めるには、まずエネルギーがどこでどれだけムダになっているかを計測により“見える化”した後、“最適化”のステップを踏むことが有効である。図2に熱エネルギーの見える化の一例を示す。

工場では、蒸気の熱エネルギーが加熱・殺菌・空調などに利用される。蒸気の熱エネルギーは、ボイラの排ガスなどによる熱の排出だけでなく、輸送中の蒸気配管からの放熱、蒸気配管や周辺設備の不具合による蒸気漏れ、ドレン（蒸気凝縮水）を捨てることなどにより失われる。これらのエネルギーロスを見える化したところ、平均で44%ものエネルギーが失われていて⁽²⁾（図3）、大きな改善の余地があることが分かる。これらのエネルギーロスに対する省エネの例としては、ボイラ稼働台数制御による燃焼効率の向上、配管経路の最適化、漏れ箇所の補修、ドレンから蒸気を作り再利用するヒートポンプの導入などが考えられる。

富士電機は、各社の工場でのどのようなエネルギーの見える化の取り組みを行っているかについて訪問調査を行った。その結果、多くの工場では電気の見える化は容易であるため取り組んでいるが、熱については蒸気の見える化は難しく取り組みが遅れていることが分かった。

蒸気流量計には差圧式や渦式があるが、これらの製品は配管を切らないと取付けができない。そのため、24時間稼働の工場や異物混入が許されない製造ラインでは配管を切断しないと設置できないことが蒸気の見える化の障壁となっていた。

そこで、この問題を解決するため、富士電機は、世界で

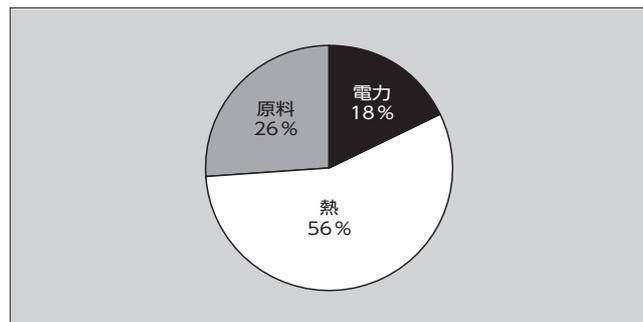


図1 産業部門の最終エネルギー消費量の用途内訳⁽¹⁾

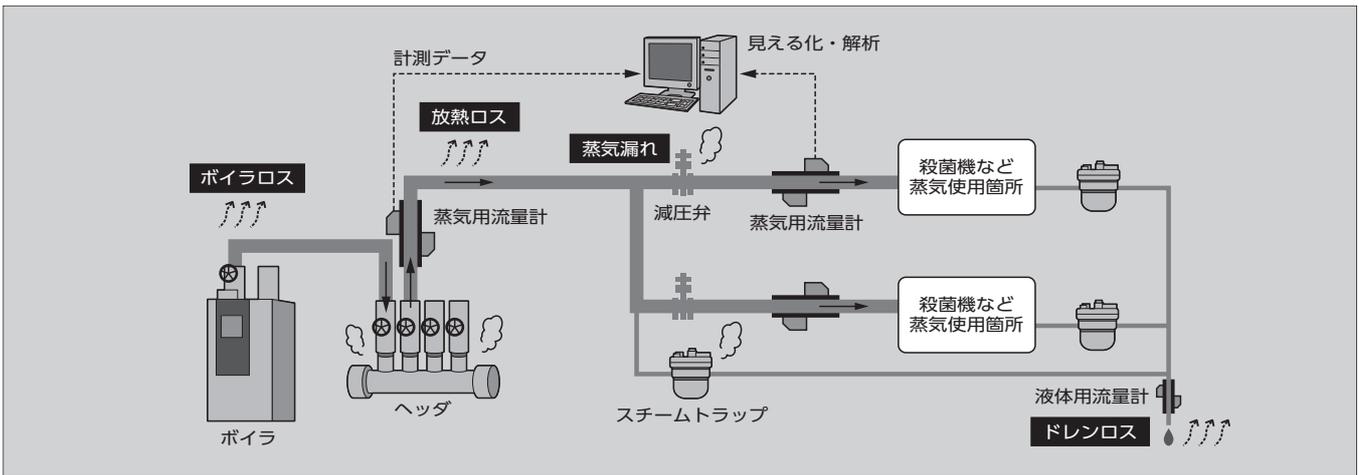


図2 熱エネルギーの見える化の例

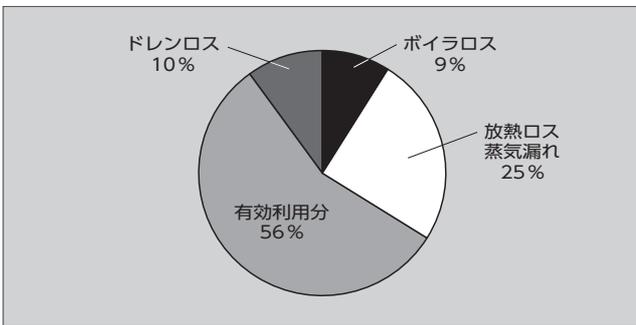


図3 蒸気の有効利用率⁽²⁾

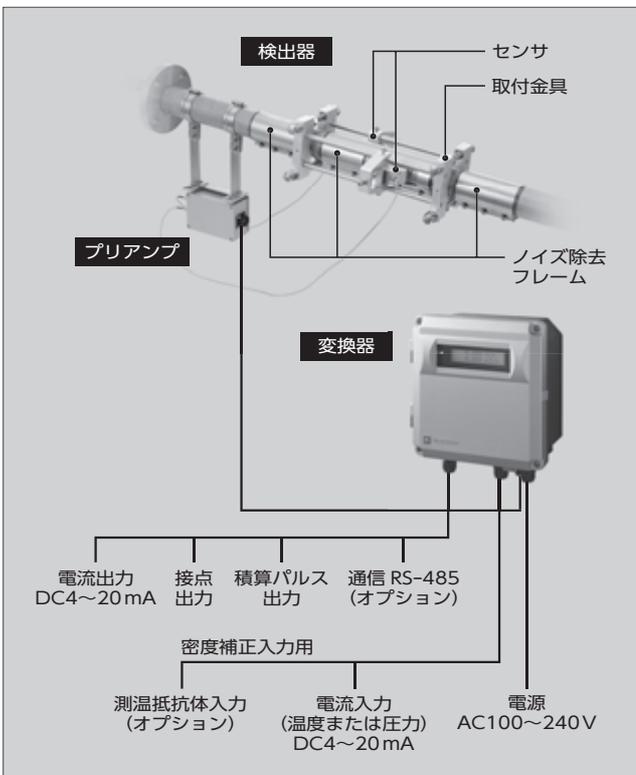


図4 クランプオン式蒸気用超音波流量計

初めて、工場の製造ラインで使われる低圧〔0.1～0.9 MPa (G)〕の蒸気流量を配管の外から測ることができるクラン

プオン式蒸気用超音波流量計を製品化した(図4)。

3 製品の特徴

今回開発した蒸気流量計は、超音波を用いることにより配管外付け(クランプオン式)による測定を可能としたことが最大の特徴である。他方式との比較を表1に、クランプオン式蒸気用超音波流量計の仕様を表2に示す。さらに、

表1 他方式との比較

方式	超音波式 (クランプオン式)	渦式	差圧式
配管工事	○不要	×必要	×必要
精度	○±3% of rate	◎±1% of rate	○±2% of rate
圧力損失	○無し	×有り	×有り
流量0からの測定可否	○	×	×

表2 クランプオン式蒸気用超音波流量計の仕様

項目	仕様
測定流速範囲	0～±50 m/s
精度	直管長：上流20D* ¹ (1.0 m) 以上 下流10D (0.5 m) 以上の場合 流速10 m/s以下：±0.3 m/s 流速10～30 m/s：±3% of rate 流速30超～50 m/s：±5% of rate
適用配管	材質：鋼、ステンレス鋼 口径：50 A* ² 肉厚：2.8～4.0 mm
流体温度	120～180℃
流体圧力	0.1～0.9 MPa (G)
入力信号	1点：DC4～20 mA、1点：測温抵抗体 (オプション)
出力信号	1点：DC4～20 mA、2点：接点
通信機能	RS-485 (Modbus* ³) (オプション)
電源	AC100～240 V 50/60 Hz
消費電力	20 VA以下

*1：D：配管内径
*2：他口径は順次対応予定
*3：Modbus：Schneider Automation, Inc.の商標または登録商標

他方式と比べたときのメリットは次に示すとおりである。

- (a) 配管工事が不要なので設備が稼働していても任意の場所に設置できる。
- (b) 差圧式や渦式流量计のような配管内構造物（オリフィスや渦発生体）による圧力損失がないため、不要なエネルギー損失が生じることがない。
- (c) ウォーターハンマーや過流量によって流量计が破損することがなくメンテナンスが不要である。

また、差圧式や渦式流量计は、測定原理上、流量 0 付近の測定ができなかった。一方、本製品では超音波を利用した測定なので、流量 0 から測定でき、バルブ劣化などによる微量な蒸気漏れも検出することができる。

4 測定原理

本製品は、伝搬時間差式により測定する。伝搬時間差式は、上流側と下流側から斜めに超音波パルスを伝搬させ、流れにより生ずる時間差を検出して流量を測定するという原理に基づいている（図5）。

既に、本原理を使った液体の流量计は製品として提供している。金属配管から液体の超音波透過率は約 6.3% である。0.1 MPa (G) 程度の低圧蒸気の透過率は 0.0026% であり、液体の場合のわずか $1/(2.4 \times 10^3)$ にすぎない（図6）。そのため、本原理を蒸気流量计に適用しようとしても、配管から蒸気への超音波の透過率が極めて小さく、製品化が困難であった。

そこで、富士電機は、ノイズ除去技術、板波利用技術、信号処理技術を用いてこの課題を解決した。

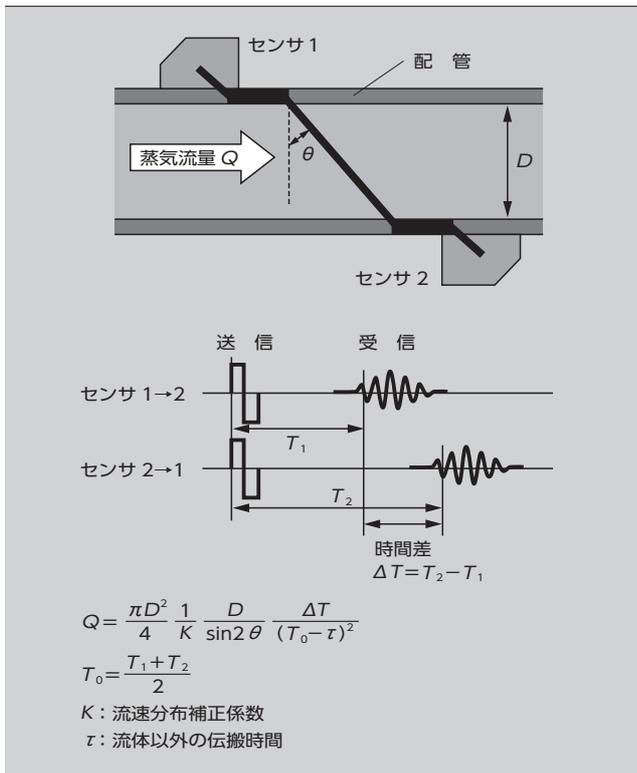


図5 測定原理

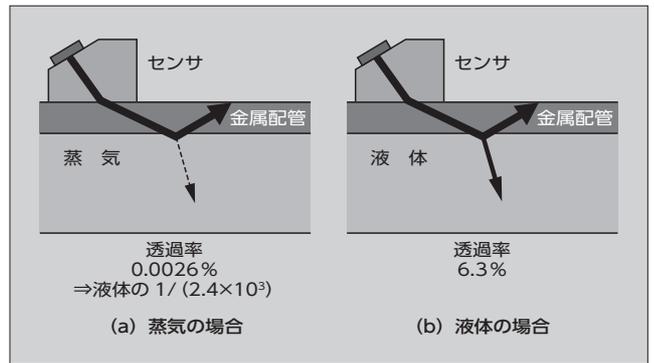


図6 蒸気測定の難しさ

5 適用技術

5.1 ノイズ除去技術

蒸気配管では、配管の金属内部を回り込む信号がノイズとなる。金属から蒸気に透過する信号よりもこのノイズの方が大きく、信号と同じ周波数を持つため、フィルタ処理で取り除くことは困難である。そこで、図7に示すように配管の外にノイズ除去シートを巻くことが考えられる。しかし、配管は曲面で凹凸もあることから、シートを密着させることが難しい。塗料タイプのノイズ除去材は密着させやすいが、着脱が難しい。富士電機は、ノイズ除去シートを金属フレームで均一に抑える構造を開発し、簡単に着脱できるようにした。

5.2 板波利用技術

一般的に超音波流量计には縦波や横波が用いられる。しかし、本製品では、板波（Lamb 波）を利用する新たな技

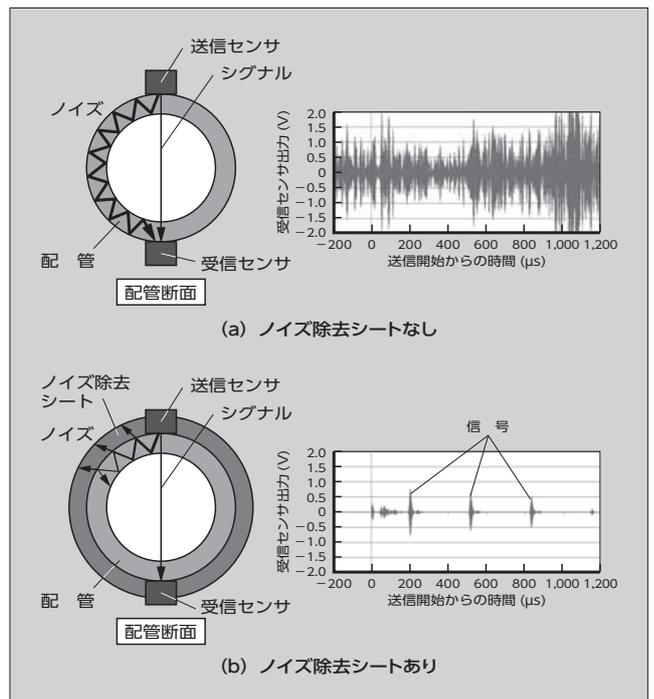


図7 ノイズ除去技術

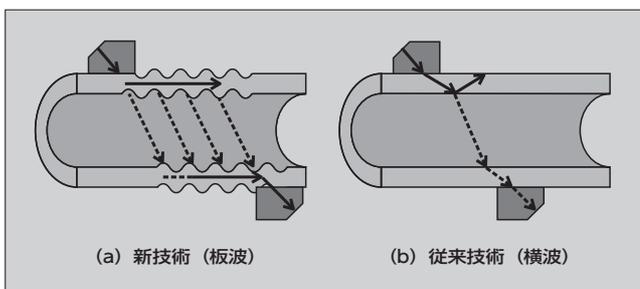


図8 板波技術

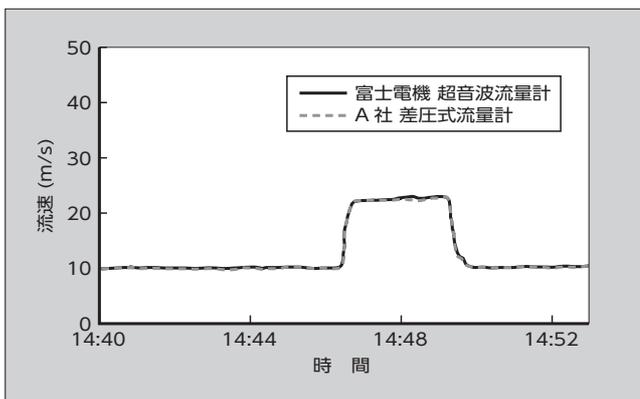


図9 0.1 MPa (G) 蒸気の測定例

術により、蒸気でも十分な受信振幅が得られるようになった。板波とは、板表面で超音波が複雑に反射を繰り返して低い減衰率で遠くまで伝わる波である(図8)。板波は、板の厚さに応じてセンサの周波数および入射角を特定の値に設計すると発生させることができる。板波を広い幅で流体に入射させることにより、受信強度の向上に成功した。また、蒸気配管内に多く存在する蒸気が冷やされて凝縮した飛沫(ひまつ)に強いという特徴がある。

5.3 信号処理技術

蒸気の測定では、液体の測定と比べて受信信号が小さい。さらに、変換器に信号が伝わるまでに信号が減衰してしまうという問題があった。対策として、検出器の近くにノイズフィルタと微小信号を増幅する超低ノイズのプリアンプを設けることにより、測定が可能なレベルの信号を受信できるようにした。

5.4 測定データ例

前述のノイズ除去技術、板波利用技術、信号処理技術により、蒸気流量の測定を可能とした。蒸気流量の測定例を図9に示す。差圧式流量計と超音波流量計を並べて設置して測定値を比較し、誤差が±3%以下であることを確認した。

6 適用事例

現在は50 A配管向けを発売している。今後は25～100 A配管向けの製品を開発し、図2に示したような工場

全体の熱エネルギーの見える化システムに適用できるようにすることを目指している。

既に、食品工場や化学工場、半導体工場などでフィールドテストを行い、実用性が高いことを実証した。次に事例について述べる。

6.1 過剰蒸気流速の判明(適用事例1)

某A工場で本製品を使って蒸気流速を測定したところ、設計値よりも速い流速で蒸気が流れていることが分かった。蒸気流速が速いとエロージョンによる配管の減肉やウォーターハンマーによる機器の故障を引き起こし、重大事故につながる危険性がある。また、圧力損失が増え、エネルギーロスや蒸気使用機器に十分な圧力を得られない問題が発生する。今後、この問題に対しては、配管の再設計により流速を抑える省エネ・安全対策を予定している。

6.2 設備停止中の蒸気流入の判明(適用事例2)

某B工場の殺菌設備に流入する蒸気量を、遠隔・リアルタイムで監視するシステムを構築した。本設備においてフィールドテストを行ったところ、設備停止中も蒸気が流れており、ムダがあることが分かった。今後、劣化したバルブやスチームトラップの修理によってムダの削減を予定している。

7 あとがき

蒸気のムダを見える化する世界初のクランプオン式蒸気用超音波流量計について述べた。今後、25～100 A配管の測定に向けて開発を行い、本製品を熱EMSに適用し、熱の省エネルギーに大きく貢献することを目指していく所存である。

参考文献

- (1) “熱の有効利用について”。資源エネルギー庁。平成27年。
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/sho_energy/pdf/012_03_00.pdf, (参照 2019-12-08)。
- (2) “蒸気ロス診断”。東京電力エナジーパートナー株式会社。
<http://www.tepco.co.jp/ep/solution/heatpump/seisan/about02.html>, (参照 2019-12-08)。
- (3) 尾上守夫ほか。板を伝わる超音波。生産研究。1966, vol.18, no.12, p.319-328。



宮本 汐里

計測機器のマーケティング、流量計の開発に従事。現在、富士電機株式会社パワエレシステム インダストリー事業本部開発統括部計測機器開発部。日本機械学会会員。



木代 雅巳

計測機器の開発に従事。現在、富士電機株式会社
パワエレシステム インダストリー事業本部開発統
括部計測機器開発部主任。計測自動制御学会会員。



坂上 智

計測機器の開発に従事。現在、富士電機株式会社
パワエレシステム インダストリー事業本部開発統
括部計測機器開発部主任。電気学会会員。



船舶スクラバ向けレーザー方式ガス分析計

Laser Gas Analyzer for Exhaust Gas Cleaning Systems

東 亮一 HIGASHI, Ryoichi

田原 雅哉 TABARU, Masaya

赤尾 幸造 AKAO, Kozo

船舶の排ガス規制の強化が進む中、SO_x 規制に対応する排ガス浄化システム（EGCS）に不可欠な排ガス監視装置として、船舶スクラバ向けレーザー方式ガス分析計を開発した。レーザー方式により、測定対象以外のガスの影響を受けにくい。光源の変動を装置の内部で自ら補正でき、校正ガスを用いた頻繁な校正は不要であるため、メンテナンスが容易で頻度も低い。また、光軸を重ねる光学系をコンパクトにまとめ、信号処理回路も内蔵することにより小型・軽量化でき、検出部全体の運搬と設置を容易にした。さらに、一般財団法人日本海事協会と DNV・GL 船級協会の認定を取得した。

In order to help meet the requirements of intensified marine vessel exhaust regulations, Fuji Electric has developed a laser gas analyzer for exhaust gas cleaning systems (EGCSs) as an exhaust gas monitoring system indispensable to EGCSs designed to comply with SO_x regulations. By using a laser, it is less susceptible to interference from undesired gases when performing measurement. It is capable of correcting light-source fluctuations by itself inside the system and does not require frequent calibration using calibration gas, achieving easy and less frequent maintenance. In addition, using a compact optical system with optical-axis superposition and a build-in signal processing circuit has made it small and lightweight, facilitating the transport and installation of the entire detector component. Furthermore, it has been certified by classification societies: ClassNK and DNV GL.

1 まえがき

環境保全の観点から、国際的に大気環境規制が強化されている。海事分野においては、「海洋汚染防止条約」(マルポール条約) に基づき、船舶の排ガス規制が進められている⁽¹⁾。2020 年 1 月からは、ディーゼルエンジンからの硫黄酸化物 (SO_x) の排出規制 (SO_x 規制) として、燃料油中の硫黄分規制値が重量濃度において 3.5% 以下から 0.5% 以下へと強化された (図 1)。本規制により大気環境の改善が見込める一方で、規制に適合する低硫黄燃料 (A 重油) を使用するか排ガス浄化システムを設定することが義務付けられている。しかし、低硫黄燃料の使用は運航コストの上昇につながる。

SO_x 規制では、低硫黄燃料適用と同様の SO_x 低減効果のある同等措置として、排ガスに洗浄水を噴射して SO_x を除去する排ガス浄化システム (EGCS: Exhaust Gas Cleaning Systems) の設定が認められていて⁽¹⁾、環境への負荷を抑えながら低コストの高硫黄燃料 (C 重油) が継続して使用できる。EGCS は、規制強化による需給バランス

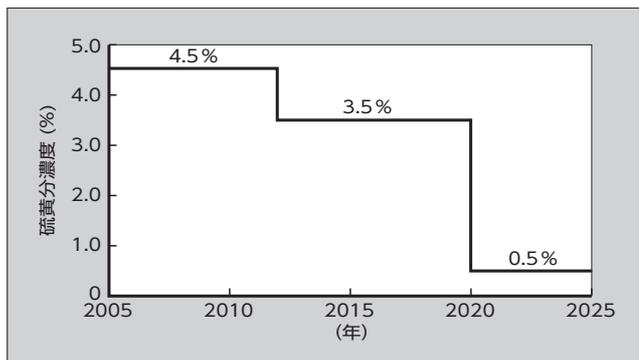


図 1 一般海域における船舶の燃料油中硫黄分濃度規制値の推移

の変化により低硫黄燃料の価格が高騰するため、EGCS の導入費用を考慮しても運航コスト上昇を抑制する効果があると予想されている⁽²⁾。

富士電機は、海水で排ガス中の SO_x を洗浄するスクラバを開発し、2018 年 10 月に発売した。さらに、スクラバ運転時に二酸化硫黄 (SO₂) および CO₂ の各ガス濃度を連続監視するガス分析計を開発し、2019 年 8 月に発売した。富士電機はこれらを組み合わせた EGCS を提供している。

本稿では、排ガス監視装置としての船舶スクラバ向けレーザー方式ガス分析計について述べる。

2 排ガス浄化システム (EGCS)

EGCS の全体構成を図 2 に示す。EGCS は、SO_x スクラバ、ガス分析計、ならびに洗浄水の水質を監視する水質計などを含む、各種の計測・制御・駆動機器から構成されている。

EGCS におけるガス分析計の要件は、国際海事機関 (IMO: International Maritime Organization) が発行した EGCS ガイドラインに記載されている⁽⁴⁾。SO_x スクラバによって処理した排ガスに含まれる SO₂ と CO₂ を測定し、これらのガス濃度比 (SO₂/CO₂ 比) を排ガス浄化性能として、この比が規制値以下でなければならない。この排ガス浄化性能は、燃料油中の硫黄分濃度 (質量濃度) と排ガス中の SO₂/CO₂ 比 (体積濃度比) とが比例関係にあることを根拠としている (図 3)。例えば、マルポール条約では、燃料中の硫黄分濃度の規制値が 0.50% なので、排ガス中の SO₂ (ppm) /CO₂ (%) 比の規制値は 21.7 となる。CO₂ 濃度が 5.00% であったとすると、硫黄分の高い燃料を使ってもスクラバで浄化した後の SO₂ 濃度が

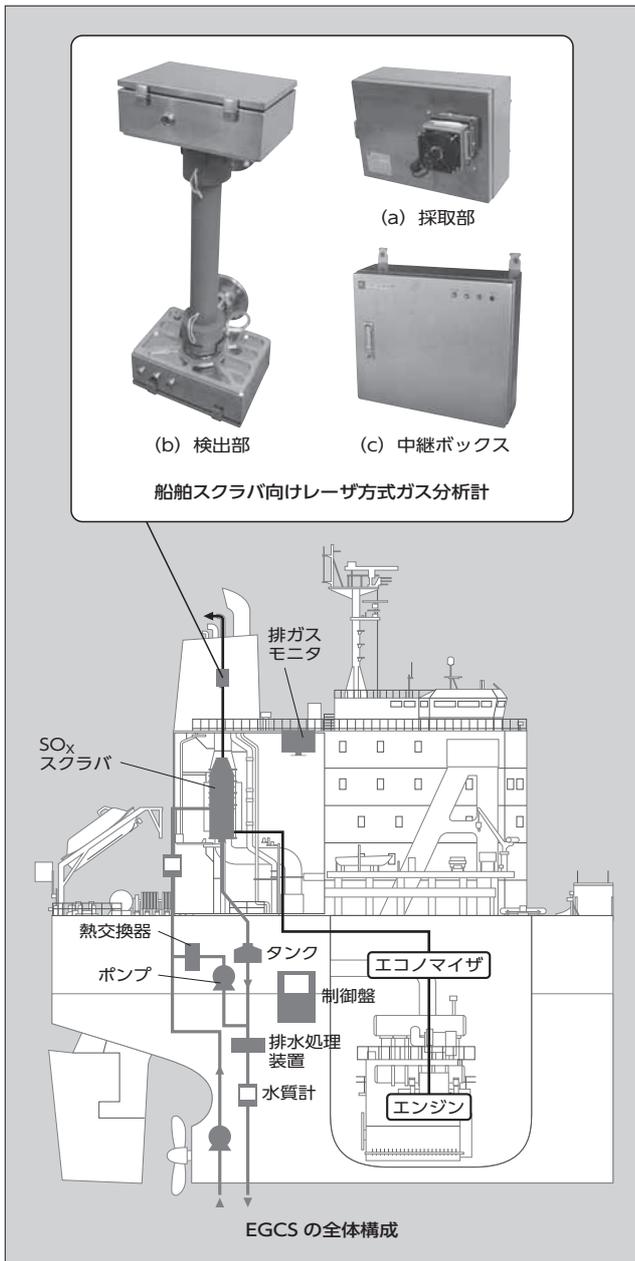
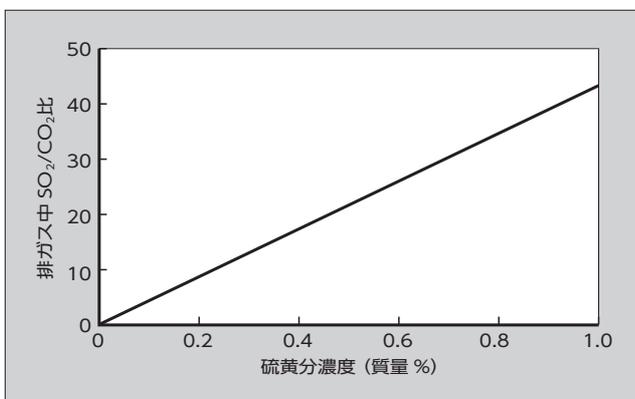


図2 EGCSの全体構成

図3 燃料油中の硫黄分濃度と排ガス中の SO₂/CO₂ 比の関係

108 ppm (小数点以下切り捨て) 以下であればよい。しかし、エンジン負荷や、スクラバの洗浄性能などにより、SO₂ スクラバで処理した排ガスの SO₂/CO₂ 比が絶えず変化する。そのため、ガス分析計には、スクラバ出口の煙道を通る排ガスをリアルタイムかつ正確に測定することが求められる。

EGCS に設置されたガス分析計などの計器による測定に異常が発生した場合、1 時間以内に復旧できなければ EGCS を停止させて、規制適合油に切り替えなければならないと規定されている⁽⁵⁾。したがって、測定の長期的な安定性は、EGCS において最も重要な要件である。

また、運用面では顧客から次の要望がある。

- (a) 狭小なスペースに設置可能であること
- (b) メンテナンスが容易で頻度が少ないこと

③ レーザ方式ガス分析計の特徴

船舶スクラバ向けレーザ方式ガス分析計を、②章で述べた実用上の要請に応えられるように開発した。次に、一般的なレーザ分析計の測定原理と、本開発における船舶スクラバ向けに特化したレーザ方式ガス分析計の特徴をそれぞれ述べる。

3.1 一般的なレーザ方式ガス分析計の特徴

(1) 装置構成

レーザ方式による排ガス分析計は図 4 に示す⁽⁶⁾ように、発光部や受光部、データ処理部などで構成される。発光部のレーザ素子には、発振波長が単一であり、かつ波長スペクトル線幅が狭い分布帰還型レーザ (DFB: Distributed Feedback Laser) などが用いられる。受光部に内蔵されている受光素子には、光源の波長に感度を備えるフォトダイオードや光導電素子などが用いられる。

パーティクルは、排ガス中のダストやミストといった汚れから発光部および受光部を保護するために用いられる。データ処理部では、レーザ光の吸光からガス濃度を演算し、出力する機能を備えている。

(2) 測定原理

SO₂、CO₂ などの各種ガス分子は、分子を構成する原子種や結合エネルギーが異なることから、固有の吸収スペクトルを持っている。赤外線の吸収スペクトルは、量子化された分子の振動準位や回転準位の間遷移に対応した離散的な多数の吸収線からなる。レーザ方式では、他ガス (測定対象以外のガス) の吸収線と重ならない測定対象ガスの吸収線を選び、その吸収線と同じ波長のレーザ光源を使って測定することにより、他ガスの干渉を受けない測定ができる。

図 4 において、発光部から照射されたレーザ光は、測定光路上にある排ガスを透過して、受光部で検出される。このとき、レーザ光はランベルト・ベールの法則に基づき煙道内の排ガスに含まれる測定対象ガス濃度に応じて吸収され、受光部の受光素子に到達する。この受光量を検知し、

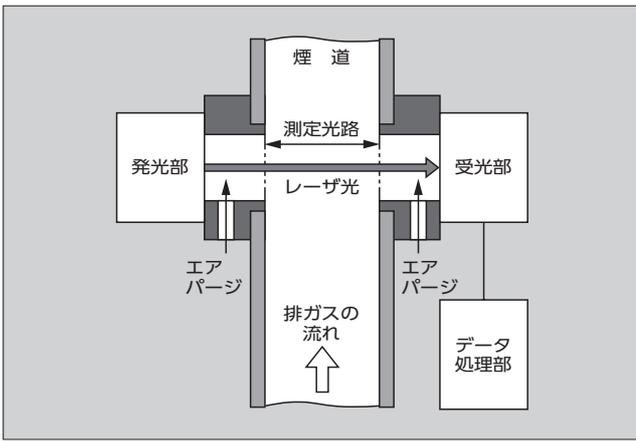


図4 一般的なレーザ方式ガス分析計の構成例

排ガス中の測定対象ガス濃度を測定する。ランベルト・ベールの法則は次の式(1)で表される。

$$I(L) = I_0 \exp(-knL) \dots\dots\dots(1)$$

- $I(L)$: 受光強度
- I_0 : 照射強度
- k : 比例係数
- n : 測定ガスの濃度 (密度)
- L : 測定光路長

レーザ方式の長所は、他ガスの影響を受けにくいだけでなく、光源の変動を装置の内部で自ら補正できるため、校正ガスを用いた頻繁な校正を必要としないという点にある。光源に用いるDFBレーザは、発光波長が単一であるだけでなく、駆動電流や駆動温度によって波長を変えることができるという特徴を備えている。そこで、測定対象ガスの吸収スペクトルに対して、吸収強度が極大となる波長と、吸収強度が極小となる波長で交互に測定する。これにより、受光強度が光学系の汚れや光軸ずれで多少変動しても、安定的にガスの吸収を抽出できる。

レーザ方式と、従来から用いられてきた非分散型赤外線(NDIR: Non-Dispersive Infrared)方式との比較を表1に示す。他ガスの干渉や、光源出力や受光量の変動を受けにくいレーザ方式を使えば、高精度で安定な測定が可能である。

3.2 船舶スクラバ向けレーザ方式ガス分析計の特徴

船舶スクラバ向けレーザ方式ガス分析計の装置構成は図2に示すとおりである。本製品は、次の三つのユニットとそれらを接続する配線、配管から構成されている。

表1 レーザ方式とNDIR方式の比較

測定原理	レーザ方式	NDIR方式
波長範囲	特定の吸収線	複数の吸収線 (吸収帯)
他ガスの干渉	吸収線の選定により影響少	測定成分により影響あり
受光パワー変更の影響	補正処理により影響少 ⇒校正間隔長い	補正不可で影響大 ⇒校正間隔短い

- (a) 煙道から排ガスを吸引し、ダストや水蒸気を除去する採取部
- (b) 採取部から流入する測定ガス中のSO₂とCO₂のガス濃度をレーザで測定する検出部
- (c) 採取部と検出部への電源供給、通信ならびに外部インタフェースとの通信を行う中継ボックス

(1) 測定方式

船舶への適用に当たっては、温度や振動などの環境を考慮して、測定方式を比較検討し、採取式を採用した。直接挿入式と採取式の比較を表2に示す。直接挿入式では、図4に示したように排ガスをその場で測定できるため、高速応答(1~5秒)が可能である⁽⁶⁾。この特長を生かして、排ガス監視だけでなく排ガスの除害化や燃焼ガスの制御に用いられる。一方、設置時に光軸調整が必要であり、煙道の振動や変形による光軸ずれのリスク、校正時の取外しなどの実用上の欠点がある。そこで、船舶用では、図5に示すようにガス流通セルに対して発光部と受光部が一体となった検出部を採用することにより、前述の欠点を克服した。また、排ガスの採取部の内部において測定を阻害するダストをフィルタで取り除くことにより、光学系を保護し、測定の安定性をさらに高めている。

(2) SO₂ ガスを検出する新型レーザ素子と受光素子

SO₂ ガスを ppm レベルで検出するためには、高い検出感度が必要である。本製品では、SO₂ ガスの吸収強度が最も大きい波長7μm帯で発光可能な量子カスケードレー

表2 直接挿入式と採取式の比較

測定方式	直接挿入式	採取式
光軸調整	設置時に調整が必要	ガス流通セルと一体のため出荷時の調整のみ
耐振動・衝撃	煙道の振動により光軸ずれのおそれあり	壁掛けの検出部で光軸ずれ低減
光学系保護	エアパーシによる保護	エアパーシ不可能のため排ガス前処理が必要
現場での校正	発光部、受光部を取り外す必要あり	ガス流通セルが校正セルを兼ねるため取外し不要

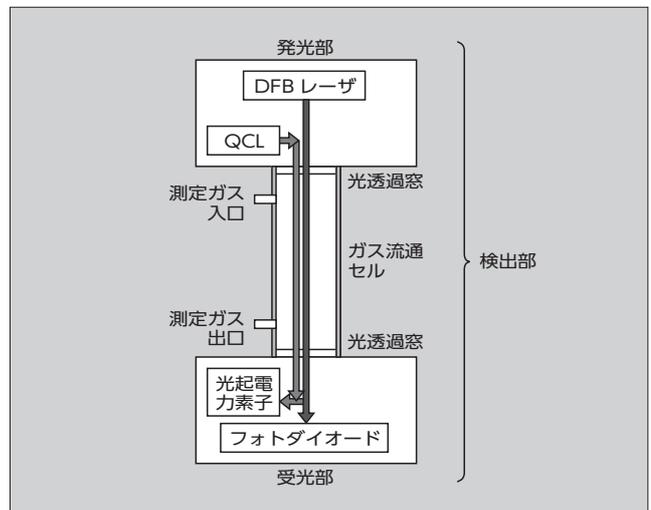


図5 検出部の光学系

ザ (QCL: Quantum Cascade Laser) を新たに採用している。この QCL は、機関室内部のような高温環境においても安定した波長と出力で発光するように設計・製造・評価されたものであり、約 10 年間交換が不要である。また、波長 7 μm 帯の受光素子には、環境に配慮した高感度光起電力素子を採用した。

これらの素子により、SO₂ ガスの測定を 0~300 ppm の測定レンジにおいて $\pm 1\%$ フルスケール以下の測定精度で実現している。

(3) SO₂ ガスと CO₂ ガスを同時に検出する光学系

SO₂ と CO₂ のガス濃度比を正確に測定するためには、一つのガスサンプルの SO₂ 濃度と CO₂ 濃度を同時に分析する必要がある。一方、各ガスの吸収波長が異なるため、それぞれのガス専用のレーザ素子や受光素子が必要になる。そこで、検出部には光軸が重なった 2 組のレーザ素子と受光素子を内蔵した光学系とした (図 5)。また、光軸を重ねる光学系をコンパクトにまとめ、信号処理回路も内蔵することにより、小型・軽量とすることで検出部全体の運搬と設置を容易になるようにした。

(4) SO₂ ガスの損失を防ぐ採取部での温度管理と除湿

EGCS ガイドラインでは、採取した排ガス中に含まれる SO₂ ガスの溶解損失を防ぐよう定められている⁽⁴⁾。溶解損失とは、採取した排ガスが通る配管中に液体状の水があると、水に排ガス中の SO₂ が溶解するために、検出される SO₂ 濃度が低くなる現象である。

SO_x スクラバは、排ガスに水を吹きかけて洗浄するため、排ガスは湿っている。したがって、採取した排ガス (サンプルガス) は結露しやすい状態である。結露すれば溶解損失が発生するため、対策が必要となる。

従来のガス分析計では、加熱導管を使用している。この導管では、採取部から検出部に至る導管を加熱するヒータと、保温するための断熱材があるため、設置スペースが大きくなる欠点がある。船舶用においては、機関室などの限られた狭小空間に、多大な電力を用いて高温 (約 180 $^{\circ}\text{C}$) に加熱し、スペースを要する加熱導管を配管するのは困難である。

本製品の採取部では、洗浄した排ガス温度より高い状態に保温し、結露を防止している。さらに、採取部の内部では、膜式エアドライヤを利用してサンプルガス中の水蒸気を乾燥空気側に移動させることによりサンプルガスを乾燥させている。このような対策により、溶解損失を防いでいる。前述の対策により、採取部内でガスを乾燥した状態にできるため、検出部に至る導管は加熱導管を必要とせず、柔軟な配管設計が可能である。

4 EGCS への適合認証

船舶スクラバ向けレーザ方式ガス分析計を船舶に適用するためには、旗国の承認が必要となる。そのために、船級協会による型式認証試験 (環境試験) および EGCS 適合鑑定を受けている。型式認証試験では、船舶用機器に対す

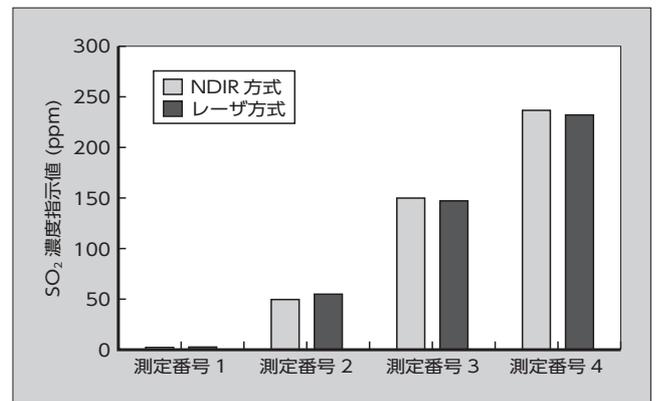


図 6 同等性試験における排ガス中 SO₂ 濃度の測定結果例

る独自の温度試験、振動試験、EMC (Electromagnetic Compatibility) 試験に合格している。性能試験では、EGCS ガイドラインで定められた正確さ、精度、ドリフト、ノイズに加えて、実際のディーゼルエンジン排ガス測定による NDIR 方式との同等性試験 (図 6) に合格し、一般財団法人 日本海事協会と DNV・GL 船級協会からの認定を取得した。

5 あとがき

船舶スクラバ向けレーザ方式ガス分析計について述べた。レーザ方式の適用により長期的な安定性を実現した。また、船舶用途に対する独自の設計により、小型・軽量で省メンテナンス性を実現した。本分析計の適用により、EGCS の自動化および安定的な稼働の実現を目指していく所存である。

参考文献

- (1) 国際連合. 1973年の船舶による汚染の防止のための国際条約に関する1978年の議定書 (MARPOL73/78) 附属書VI: 船舶からの大気汚染防止のための規則.
- (2) 春海一佳ほか. 船舶の省エネ・環境技術の評価に関する研究. 海上技術安全研究所報告. 第15巻第1号 (平成27年度) 総合報告, p.35-86.
- (3) 青木幸男ほか. 世界最小の船舶用サイクロン式SO_xスクラバ. 富士電機技報. 2018, vol.91, no.1, p.35-39.
- (4) “2015 guidelines for exhaust gas cleaning systems”. IMO Resolution MEPC 259 (68). <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/MEPC.259%2868%29.pdf>, (accessed 2019-11-28).
- (5) “Guidance on indication of ongoing compliance in the case of the failure of a single monitoring instrument, and recommended actions to take if the exhaust gas cleaning system (EGCS) fails to meet the provisions of the 2015 EGCS guidelines (resolution MEPC.259 (68))”. IMO MEPC. 1/Circ.883. <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/>

Documents/MEPC.1-Circ.883.pdf, (accessed 2020-02-26).

- (6) 小西英之ほか. 省エネルギーに貢献する直接挿入レーザ方式ガス分析計「ZSS」. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.1, p.59-62.



赤尾 幸造

ガス分析計の開発に従事。現在、富士電機株式会社パワエレシステム インダストリー事業本部開発統括部計測機器開発部マネージャー。



東 亮一

レーザ方式ガス分析計の開発に従事。現在、富士電機株式会社パワエレシステム インダストリー事業本部開発統括部計測機器開発部主任。博士（工学）。応用物理学会会員。



田原 雅哉

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 インダストリー事業本部オートメーション事業部 FA システム技術第三部主任。応用物理学会会員。

特集
自動化と省エネルギーに貢献する計測・制御ソリューション



モーションコントローラ「MICREX-SX SPH5000M」

“MICREX-SX SPH5000M” Motion Controller

下川 孝幸 SHIMOKAWA, Takayuki

宮下 裕史 MIYASHITA, Hiroshi

久保隔 創 KUBOSUMI, Hajime

モーションコントローラには、より多くの制御軸で、かつ、より高速な制御周期で同期制御を行えることが求められている。富士電機は、この要求に応えるために「MICREX-SX シリーズ」の新 CPU モジュールとして「SPH5000M」を開発した。マルチコアマイコンにより従来機種に対してアプリケーションの実行性能が3倍向上した。また、シーケンス制御やモーション制御をマルチ CPU に分散して並列・同期実行を行うことにより、アプリケーションプログラム実行周期を高速化した。これにより、従来と同様のシステム構成のままで、機械のさらなる高機能化と高速化を行うことが可能である。

Motion controllers are required to have capability to perform synchronous control with more control axes and shorter cycle. To meet these requirements, Fuji Electric has developed the “SPH5000M” as a CPU module of our “MICREX-SX Series.” Its multi-core microcomputer improves application execution performance threefold that of conventional models. The application program execution cycle has also been sped up by distributing sequence control and motion control to multiple CPUs and executing them synchronously in parallel. As a result, this controller enables machinery to have higher functionality and speed even when the same system configuration is used as previous systems.

1 まえがき

モーションコントローラは、産業用ロボットをはじめとする産業用機械や装置のモーション制御を行うものである。産業用機械や装置には、複雑で高精度な動作や加工への対応および工程時間の短縮の要求がある。モーションコントローラには、より多くの制御軸で、かつ、より高速な制御周期で同期制御を行えることが求められている⁽¹⁾。

富士電機では、これらの要求に応えるため、統合コントローラ「MICREX-SX シリーズ」の新 CPU モジュールとして、「SPH5000M」を開発したので、その内容を述べる。

2 「SPH5000M」の特徴

SPH5000M をモーションコントローラとして使用したとき、モーション制御プログラムは従来機種の「SPH3000MM」と比べて3倍の速度で実行できる。

SPH5000M のモーションコントロールシステムの構成例を図1に示す。

SPH5000M の新プロセッサバスによる高速制御の連携例を図2に示す。SPH5000M の主な特徴を表1に、外観を図3に示す。また、従来機種の「SPH3000」とSPH3000MM とのアプリケーション実行性能の比較を図4に示す。

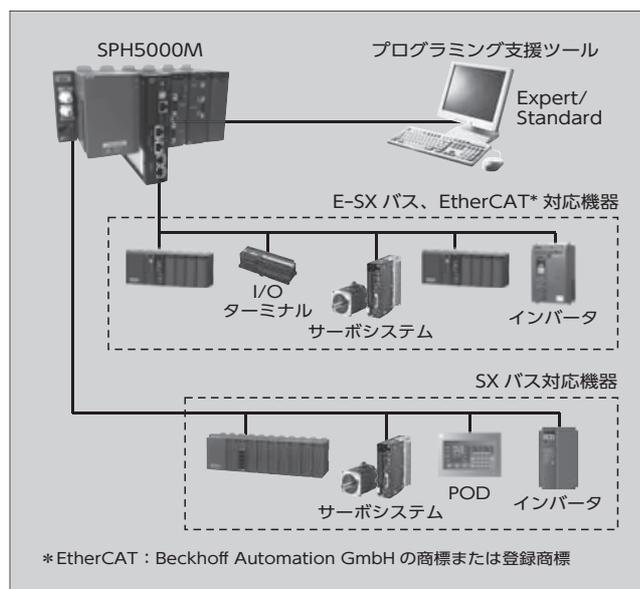


図1 「SPH5000M」を使用したモーションコントロールシステムの構成例

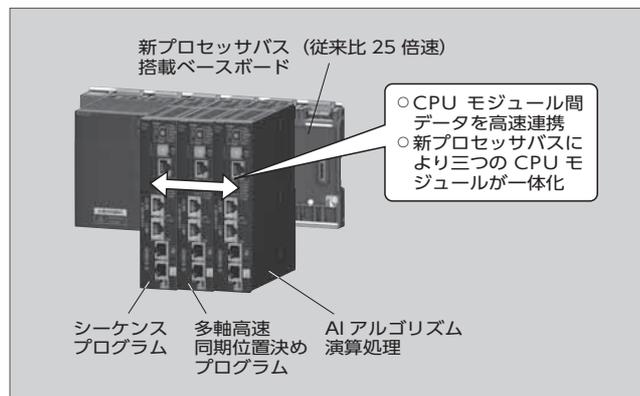


図2 新プロセッサバスによる高速制御連携例

表1 「SPH5000M」の主な特徴

項目	特徴
アプリケーション実行性能	マルチコアマイコンによる従来機種SPH3000MMに対して3倍高速化
大容量メモリ	プログラムメモリ : 512 Kステップ データメモリ : 5,120 Kワード
データバックアップ	バッテリーレスデータバックアップ方式によるバッテリーのメンテナンスフリー
情報ネットワーク	Gigabit Ethernet*1による高速通信
モーションバス	富士電機製E-SXバスまたはEtherCAT*2をサポート
C言語アプリケーション実行機能	PLCアプリケーションプログラムとC言語アプリケーションプログラムの並列実行が可能 【C言語機能の適用例】 ○C言語によるユーザ専用の命令をPLCアプリケーションプログラムから読み出して実行する。 ○PCなどで実行していた情報処理ソフトウェアをPLCに内蔵して実行する。 ○C言語アプリケーションプログラムの読出し機能を持たせていないため、アプリケーションプログラムの不正コピーが防止できる。
マルチCPU間データ伝送	新プロセッサバスにより従来比25倍の伝送速度高速化 SPH5000Mの3台並列実行による高速制御が可能
I/O局間出力同期機能	E-SXバスによるI/O機器の局間出力同期およびE-SXバス系統間同期が可能

*1 Ethernet : 富士ゼロックス株式会社の商標または登録商標
*2 EtherCAT : Beckhoff Automation GmbHの商標または登録商標

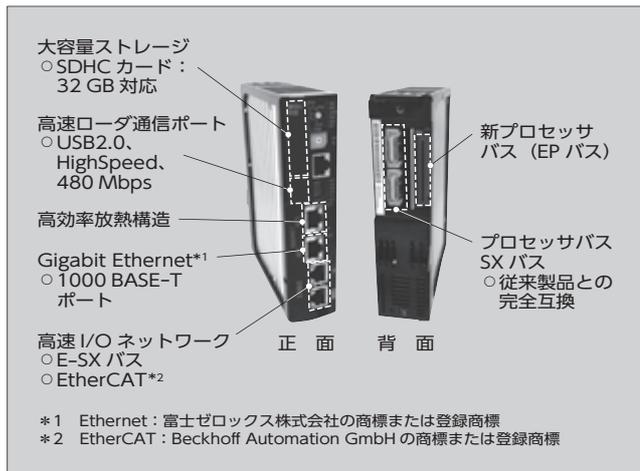


図3 「SPH5000M」の外観

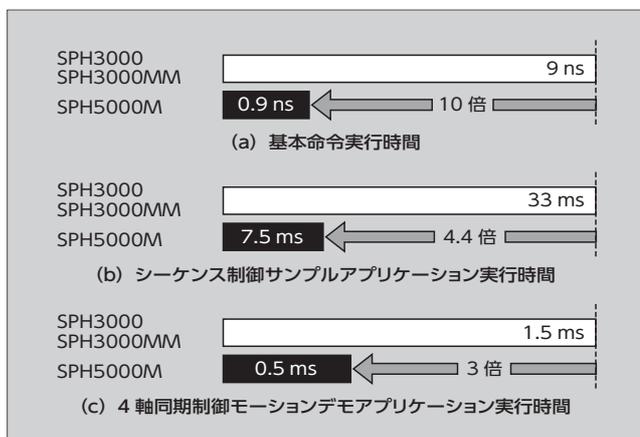


図4 アプリケーション実行性能比較

③ 高速化を支える技術

3.1 プログラムの並列・同期実行技術

SPH5000Mには、マルチコア演算実行エンジンアーキテクチャを採用した(図5)。

このアーキテクチャは、二つの演算実行エンジンをマルチコアマイコン上で並列に動作させ、コア間で共有可能な高速大容量のキャッシュメモリ上にアプリケーションプログラムのデータや各種のユーザデータを配置し、高速な内部バスでメモリを共有可能とするものである。二つの演算実行エンジンには、それぞれ専用のデータメモリ領域と共有して使う共有データメモリ領域がある。これらのメモリはデータ量に応じて、データメモリと共有データメモリの総容量の範囲内でメモリ領域を増減できる。また、アプリケーションプログラムメモリは、合計して512 Kステップの十分なメモリサイズがあり、さまざまなアプリケーションプログラムに対応できるように、二つの演算実行エンジンに割り当てるメモリ量を総容量512 Kステップの範囲内で増減できる。さらに、これらのデータメモリ、アプリケーションプログラムメモリを1 GHzで動作するキャッシュメモリ上に配置しているので、最速0.9 ns/命令でアプリケーションプログラムが実行できる。

従来機種では、キャッシュメモリに配置できないアプリケーションプログラムは実行時間が長くなってしまっていた。本機種では、十分なサイズのキャッシュメモリを確保することによって、アプリケーションプログラムのサイズによるアプリケーション実行性能低下の影響のない仕組みとなっている。

演算実行エンジンの制御周期をSXバスまたはE-SXバスのどちらに同期するかを選択することができるので、既設の制御システムにおいて、SXバスに同期する「SPH2000」、SPH3000、E-SXバスに同期するSPH3000MMなどからSPH5000Mへ容易に置き換えることができる。演算実行エンジン間のデータ交換は内部バスによって同期性を維持するので、一般的には煩雑になる二つのエンジン間でのデータの受渡しが非常に簡単になっている。これにより、分散アプリケーションを作成すると

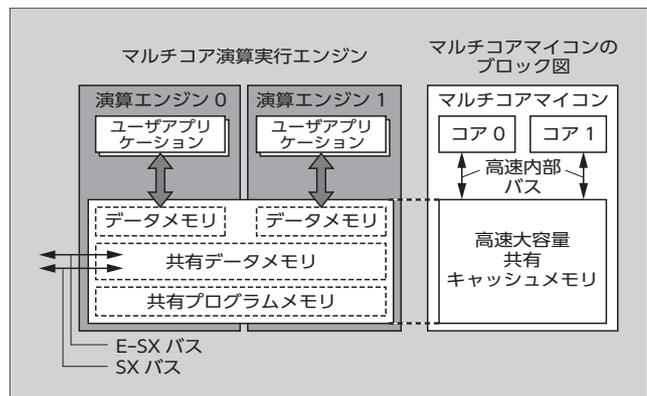


図5 マルチコア演算実行エンジンアーキテクチャ

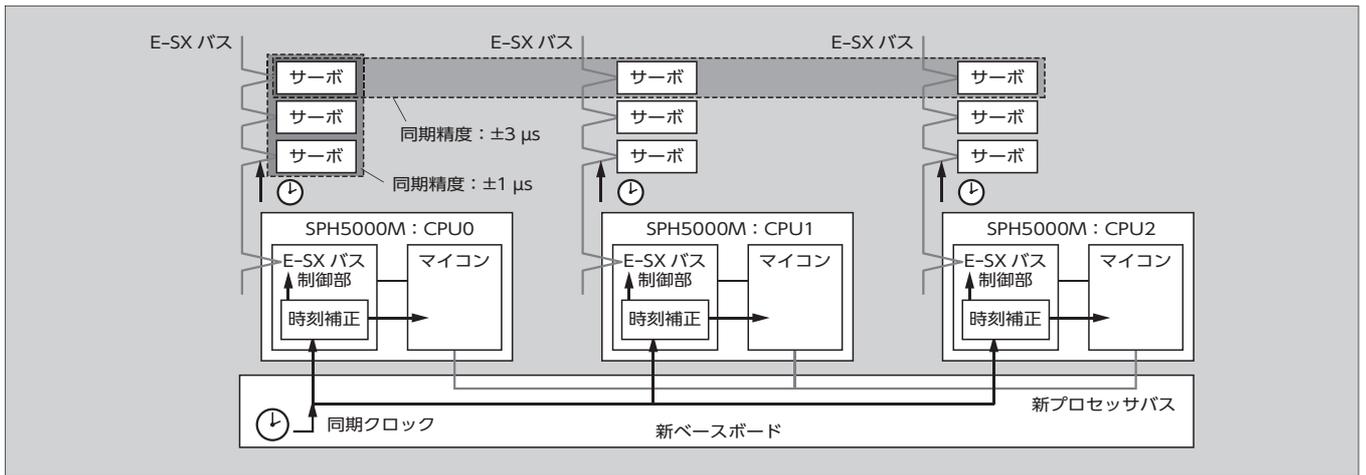


図6 マルチ CPU 間の時刻同期

きに、ユーザーは処理の同期を意識する必要がない。また、一方の演算実行エンジンでシーケンス制御を実行し、もう一方の演算実行エンジンでモーション制御を並列で実行して、処理時間を短縮することも容易に実現できる。また、制御周期の精度は $\pm 1 \mu\text{s}$ 以下（E-SXバスを指定時）であり、揺らぎのない制御を行うことができる。

3.2 マルチ CPU 間の同期実行技術

SPH5000Mは新ベースボードに設置し、最大3台のマルチCPUで構成して制御周期を同期することができる。マルチCPUで構成した各SPH5000MのE-SXバス制御部は、この新ベースボードが内蔵する同期用のクロックに合わせて時刻を補正する（図6）。CPUモジュール内の演算エンジンとE-SXバスは、 $\pm 1 \mu\text{s}$ 以下の精度で実行周期を同期し、かつSPH5000M間で演算実行エンジンとE-SXバスが $\pm 3 \mu\text{s}$ 以下で同期する。これにより、各SPH5000MのE-SXバスに96台（1台当たり32台）の入出力機器を接続しても、システム間の出力タイミングは $\pm 3 \mu\text{s}$ 以下で同期できる。

シーケンス制御やモーション制御をマルチCPUに分散して並列実行することで、アプリケーションプログラム実行時間の高速化が可能である。例えば、制御周期を最小0.25msとしたときは、最大12軸（1バス当たり4軸で3台のSPH5000Mを使用）までの多軸モーション制御が可能である。図7にマルチCPUを用いた処理の分散例を示す。

さらに、3台のCPUモジュールの一部を最短周期の整数倍の周期に設定することで、最短周期で実行するモーション制御アプリケーションプログラムと最短周期の整数倍長の周期で実行する大容量入出力データを扱う機械制御アプリケーションプログラムを、一つのシステム上で同時に実行することも可能である。

新ベースボードに設けた従来比25倍のデータ伝送性能の新プロセッサバスを用いてCPUモジュール間の大容量かつ高速なデータの受渡しが可能なので、ユーザーは処理の同期を意識せずにアプリケーションが作成できる。図8



図7 マルチ CPU を用いた処理の分散例

に新プロセッサバスのマルチCPU間データアクセスの仕組みを示す。

このように、制御対象に合わせてマルチコアおよびマルチCPUでの分散処理機能を活用することで、柔軟にシステム構築を行うことができる。

3.3 ハードウェア技術

プログラムの並列実行処理を実現するため、SPH5000Mはマルチコアマイコンを搭載し、かつ共有メモリの動作を従来の130MHzから1,600MHzに高速化した。これに伴う発熱量の増加と搭載部品の高集積による小型化を実現するため、放熱フィン表面を外気に露出させる筐体（きょうたい）構造を採用した（図9）。

この放熱構造により、従来のSPH3000MMに比べて発熱量が6%増加しているにもかかわらず、モジュール体積を15%縮小し、占有スロットサイズを従来の2スロットから1スロットに収めながら、従来と同様に自然空冷方式で最高使用周囲温度55℃を実現した。

次に、従来は電源遮断時の設定値などのデータ保持に

特集 自動化と省エネルギーに貢献する計測・制御ソリューション

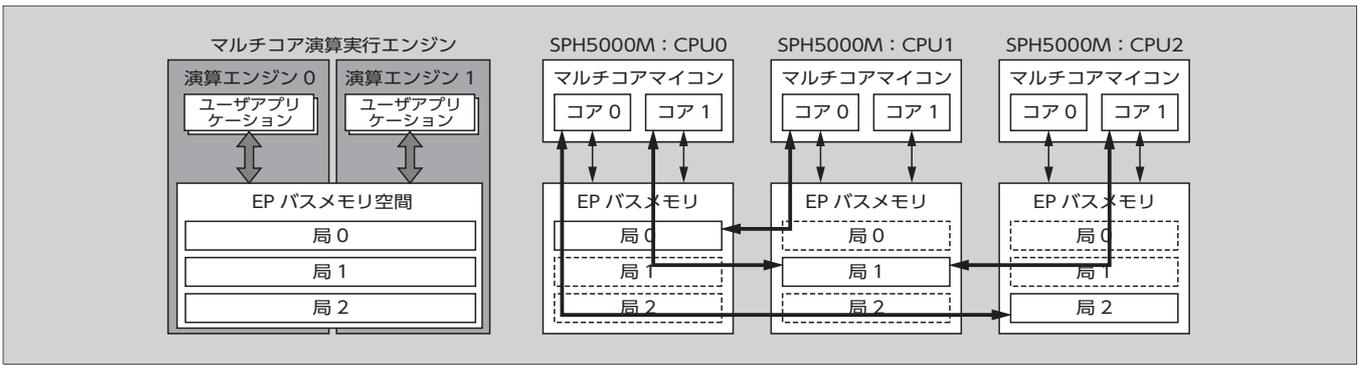


図8 新プロセッサバスのマルチ CPU 間データアクセス

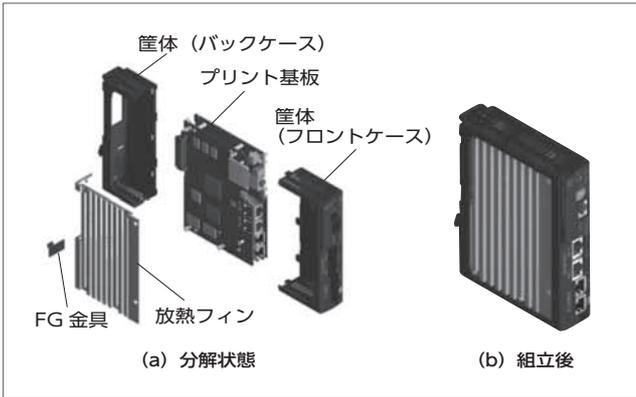


図9 「SPH5000M」のCPUモジュール構造

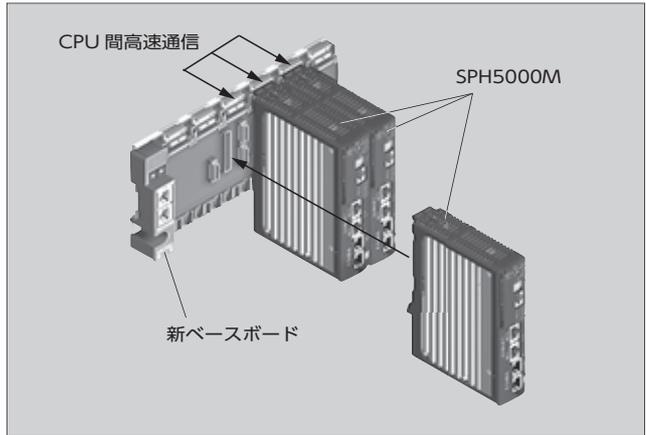


図10 「SPH5000M」のCPU間高速通信構成

使用していた SRAM (Static Random Access Memory) のデータのバックアップにはバッテリーが必要であった。このバッテリーの寿命は 5 年であるため、定期的な保守が必要であった。SPH5000M は、不揮発メモリを採用したので、データバックアップ用のバッテリーが不要となった。これによりバッテリー交換の保守作業が不要になり、メンテナンス性が向上した。なお、電源投入時には不揮発メモリに保存したデータを高速な DRAM (Dynamic Random Access Memory) にコピーしてプログラムの実行を高速化した。電源遮断時に DRAM のデータを不揮発メモリにコピーするため、電気二重層コンデンサを搭載している。

新プロセッサバスの伝送速度は、5 Gbits/s である。高周波の電気信号がプリント基板の配線パターンを伝送する場合、インピーダンス不連続点において反射や共振が生じて信号が減衰し信号を正常に伝達できなくなったり、外来ノイズの影響を受けやすくなったりすることがある。このため新プロセッサバスを搭載するベースボードでは新プロセッサバスの伝送信号のインピーダンスマッチングのために、モジュールの接続コネクタをプリント板挿入部品から表面実装部品に変更して内層パターンの配線領域を確保した上で、信号の差動ペア同士の配線パターンの等長化や、異信号間のクリアランスを確保してクロストークの干渉を抑制した。さらに、プリント板単体ではなく、SPH5000M を 3 台、ベースボードに搭載した状態で、コネクタを介して接続される複数のプリント板でのパターンの複合伝送線路解析モデルを作成し、高速信号の信号品質

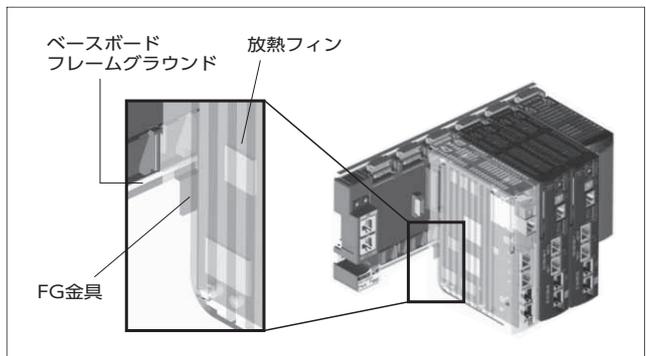


図11 耐ノイズ性能の確保

を検証して最適となるように各プリント基板の配線パターンを設計し、5 Gbit/s の通信を実現した (図10)。

SPH5000M のプリント板には外来ノイズの影響を受けやすい高速で動作する部品 (マイコン、メモリ、通信 LSI など) を多数搭載している。SPH5000M の放熱フィンに装着した金具がベースボードのフレームグラウンド (FG) に電氣的に接触させる構造とし、これらの部品が外来ノイズの影響を受けて誤動作しないように耐ノイズ性能を確保し、高い信頼性を確保した (図11)。

4 適用例

SPH5000M の適用事例として印刷機システムについて

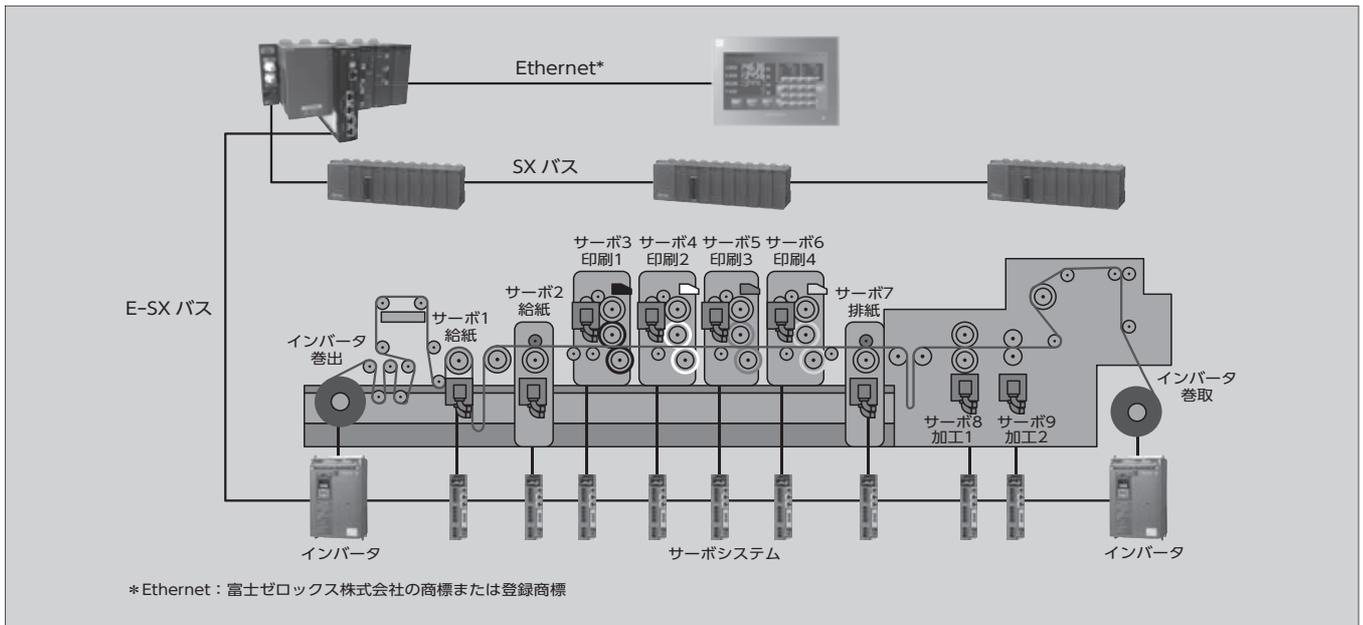


図 12 印刷機システムの適用例

述べる。

印刷機システムは、複数のセンサやアクチュエータを使用してシーケンス制御やモーション制御を行っている。特に、生産性や品質を向上するために、高速・高精度のモーション制御が要求されている。

従来の SPH3000MM を使用した印刷機システムでは、内蔵する二つの CPU 機能の一方の CPU 機能でシーケンス制御を行い、他方の CPU 機能でモーション制御を行っていた。SPH5000M では、さらにシーケンス制御の機能の高度化と高速・高精度のモーション制御の要求に対応するため、マルチコア演算実行エンジンを活用したシステム構成とした。図 12 に SPH5000M を使用した印刷機システムの適用例を示す。

一方の演算実行エンジンでシーケンス制御を行い、もう一方の演算実行エンジンでモーション制御を行うことで、従来と同様のシーケンス制御とモーション制御の一体化を継承しつつ、シーケンス制御の高度化と高速・高精度のモーション制御の要求を満足し、従来と同様のシステム構成のまま高機能化と高速化を行うことが可能である。

5 あとがき

モーションコントローラ「MICREX-SX SPH5000M」について述べた。

「SPH5000M」をモーション制御に適用することで、シーケンス制御と多軸高速同期制御の高性能化による機械のさらなる高速化・高精度化の実現と生産効率の向上を実現できる。さらに、C 言語アプリケーションプログラムに

より AI アルゴリズムを組み込むことで、FA システムの不具合予兆診断にも適用できる。

今後も、製造現場の課題解決に向けて、コントローラの適用拡大を図っていく所存である。

参考文献

- (1) 福島幸治, 下川孝幸, 「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.



下川 孝幸

プログラマブルコントローラの開発業務に従事。現在、富士電機株式会社パワエレシステム インダストリー事業本部開発統括部コントローラ開発部マネージャー。



宮下 裕史

プログラマブルコントローラの開発業務に従事。現在、富士電機株式会社パワエレシステム インダストリー事業本部開発統括部コントローラ開発部主任。



久保 創

制御システム、プログラマブルコントローラの開発業務に従事。現在、富士電機株式会社パワエレシステム インダストリー事業本部開発統括部コントローラ開発部主任。

保守性と信頼性を向上した監視制御システム 「MICREX-VieW XX (ダブルエックス)」

“MICREX-VieW XX (Double X)” Monitoring and Control System with Improved Maintainability and Reliability

笹野 喜三郎 SASANO, Kisaburo

藤澤 昭博 FUJISAWA, Akihiro

永塚 一人 NAGATSUKA, Kazuhito

監視制御システムは、熟練者でなくてもプラントの安全・安定操作ができるように、監視操作の簡単化、機器や部品の交換保守の容易化、および堅牢なシステムによる信頼性の向上が重要になっている。これらの課題を解決するため、富士電機は、定期交換時期をオペレーターに通知するハードウェア異常検知（予防保全）機能、プラントのデータを収集記録して再現表示するプラント過去再現機能、ならびに伝送回線の1か所で故障が発生しても二重化の系切替えを行わずに継続運転ができるE-SXバスループ化機能などを監視制御システム「MICREX-VieW XX (ダブルエックス)」に搭載した。

Monitoring and control systems are required to simplify monitoring operations, facilitate maintenance for replacing equipment and components, and improve reliability through system robustness so that even unskilled operators can operate a plant stably and safely. To meet these requirements, Fuji Electric has equipped the “MICREX-VieW XX (Double X)” monitoring and control system with additional functions: a hardware error detection (preventive maintenance) that notifies operators of periodical replacement, plant operation reproduction by collecting and recording plant data, and E-SX bus looping that allows continuous operation without duplex system switching even if a failure occurs in the transmission lines.

1 まえがき

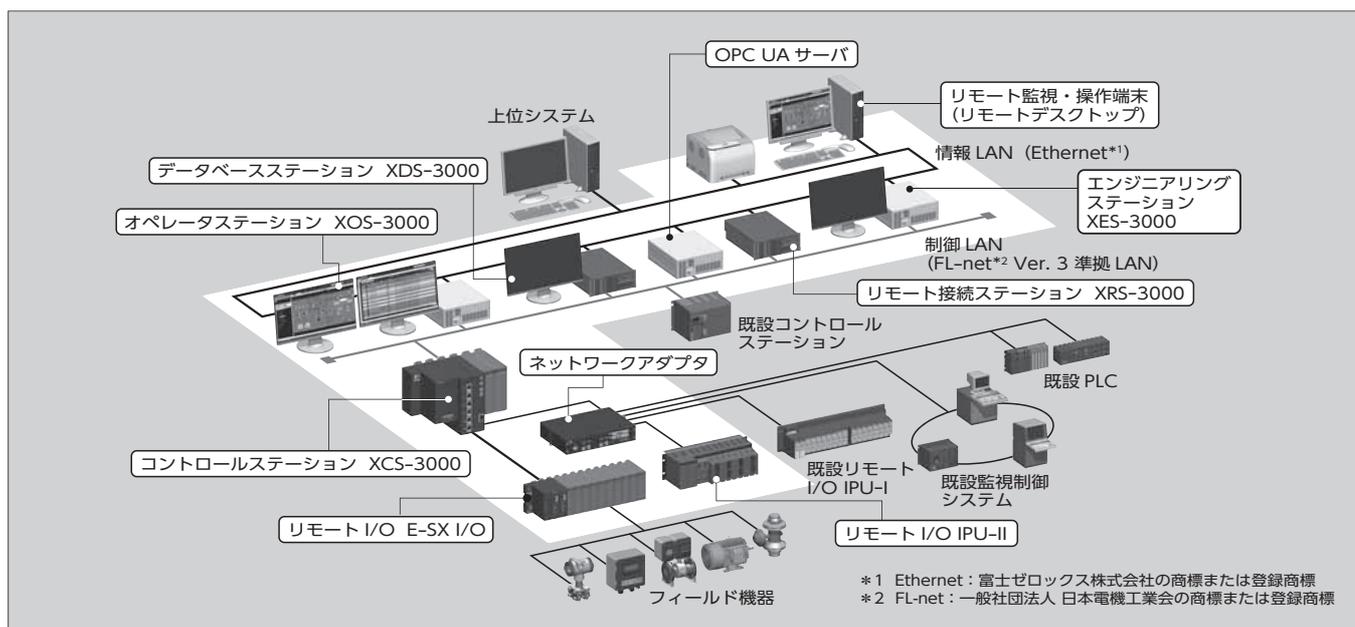
富士電機の監視制御システム「MICREX-VieW XX (ダブルエックス)^{(1)~(3)}」は2014年に発売して以来、さまざまな分野で使用され、ユーザ設備の生産性向上とともに安全・安定操作に貢献してきた。一方、製造業をはじめとする産業界においては、少子高齢化による労働人口の減少や3K職場からの人材流出が起きている。さらに企業間競争が激化する中、生産性向上のためのロボット化、自動化、省力化などが行われている。

このような背景の中、通常運転時だけでなく異常発生時を含め、熟練者でなくても対応ができるように、監視操作

の簡単化、機器や部品の交換などの保守の容易化、ならびに堅牢（けんろう）なシステムによる信頼性の向上が監視制御システムにおいて重要になっている。

2 監視制御システムの課題

図1に、MICREX-VieW XXを採用したシステムの構成例を示す。オペレータステーション「XOS-3000」、データベースステーション「XDS-3000」またはオールインワンステーション「XAL-3000」でプラントの監視操作を行い、コントロールステーション「XCS-3000」のほか、リモート I/O およびフィールド機器により、プ



*1 Ethernet：富士ゼロックス株式会社の商標または登録商標
*2 FL-net：一般社団法人 日本電機工業会の商標または登録商標

図1 「MICREX-VieW XX」のシステム構成例

ラント操業に必要なデータ収集と制御を行う。この中で、監視制御システムが抱える課題とそのソリューションについて述べる。

2.1 プラント運用機能の強化

監視操作を行う XOS-3000、XDS-3000 および XAL-3000 は、プラントの操業データを蓄積するため、有寿命品であるハードディスクドライブ (HDD) またはソリッドステートドライブ (SSD) を備えている。これらの記憶装置が故障すると、機器が動作しなくなる場合がある。

そのため、これらのハードウェアに異常が発生したときの対応手順を明確にするとともに、有寿命品の交換時期を事前に把握できる異常検知機能が求められている。

また、プラントに異常が発生してもそのときの状況が把握できず、原因調査が困難になる場合がある。

そこで、ドライブレコーダのようなプラントの再現機能が望まれている。

2.2 プラントの安全・安心操業への対応

MICREX-View XX は、故障した I/O モジュールなどを部分的に停止させた状態でシステムを運用する縮退運転の機能を備えている。さらに、MICREX-View XX は、信頼性を高めるため、システムの構成機器であるコントローラや I/O ネットワーク、I/O モジュールなどを二重化する機能を備えている。

しかしながら、ネットワークケーブルは故障率が高く、これが故障するとシステムの稼働系と待機系が切り替わる。そのときに、警報停止操作や異常内容の確認などが必要となる。また、I/O が故障したときに、システムを停止せずに機器単体の保守を活線状態で行わなければならないことから、保守の容易性を高める機能が求められている。

3 「MICREX-View XX」 拡充機能

前述の課題に対するソリューションについて述べる。

3.1 ハードウェア異常検知 (予防保全) 機能

XOS-3000、XDS-3000 および XAL-3000 に内蔵する HDD や SSD などの記憶装置は、稼働時間による定期交換周期 (例えば 3 ~ 5 年) が決まっている。そこで、図 2 に示すように、定期交換時期を知らせる警報によってオペレーターに通知する機能を組み込んだ。

XOS-3000 および XDS-3000 は Windows OS を搭載した産業用 PC と専用のソフトウェアで構成され、推奨 PC の場合には、そのベンダが提供する RAS (Remote Access Server) ツールと連携して、HDD や SSD などの記憶装置および各種ハードウェア (電源、ファンなど) の異常も検知することができる。

〈注 1〉 Windows : Microsoft Corporation の商標または登録商標

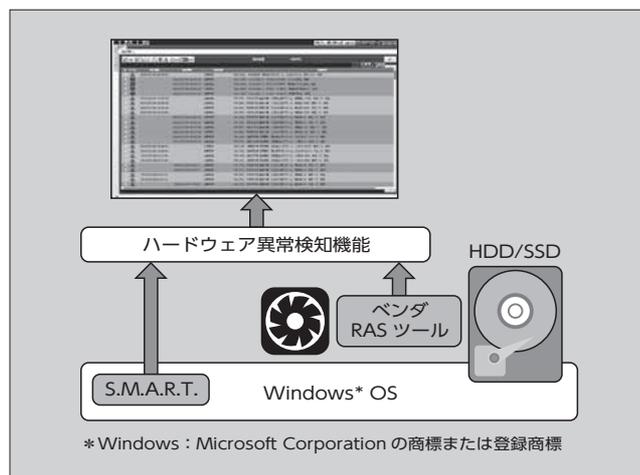


図 2 ハードウェア異常検知機能 (説明図)

推奨 PC 以外でも HDD や SSD などの記憶装置が S.M.A.R.T. (Self-Monitoring, Analysis and Reporting Technology) と呼ばれる自己診断機能に対応していれば、その情報を基に HDD や SSD などの記憶装置の各種情報 (エラー発生率、通電時間などの稼働状況) が取得できる。

ハードウェア検知機能は、RAS ツールや S.M.A.R.T. から取得した情報をチェックし、エラー発生率や稼働時間があらかじめ設定したしきい値を超えた場合に、オペレーターが認識できるように XOS-3000 の画面にメッセージを表示し、XDS-3000 内のデータベースにメッセージ履歴として記録する。推奨 PC を使うことにより、次に示す異常が検知できる。

- 温度異常
- 冷却ファン状態
- 電源ユニット状態 (機種による)
- ディスク状態

推奨 PC 以外でも S.M.A.R.T. の詳細な情報を取得できるが、HDD や SSD などの記憶装置のメーカーによってサポートしている項目が異なる。代表的な項目は次のとおりである。

- 工場出荷時からの通電時間
- 電源 ON/OFF 回数
- データリード・ライトエラーカウント
- 磁気ヘッドエラー
- 振動・衝撃カウンタ

3.2 プラント過去再現機能

MICREX-View XX は、ブロードキャスト通信機能により各 XCS-3000 に接続された計測機器からプラントデータ (TAG データ) を収集し、プラント画面やループ画面 (計器図) などに表示し、ヒストリカルトレンドを時系列データとして記録している。

この TAG データの収集記録を行う機能 (レコーダ) と、過去の再現表示を行う機能 (プレーヤ) を新たに開発している。

プラントの過去を再現する機能は、図 3 のシステム構

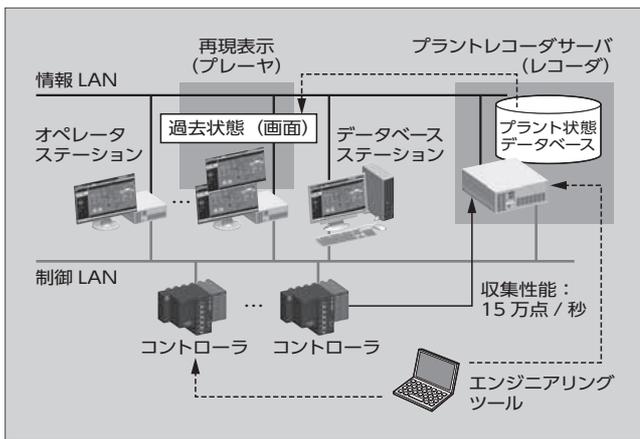


図3 過去再現機能の概要

成に示すように、現状のシステム上に組み込んだプラントレコーダサーバに制御LAN上のデータを記録し、情報LAN経由にて、XOS-3000のプラント画面上に過去データを表示する。

レコーダ機能は、低周期である一部のパラメータデータを除き、自動的に全てのTAGデータを高周期で記録する。従来必要であったデータ記録用のTAG登録作業が不要であるため、記録点数制限によるデータ選択行為が一切不要となるという特徴がある。

プレーヤ機能は、プラント画面上に記録したデータを現行と同等の更新速度で遅延なく再生できる。再生データの伝達には情報LANを使うので制御LANの伝送負荷には影響を与えない。プラントレコーダサーバにもオペレータステーションの機能を搭載したので、プラントレコーダサーバ上でプラントの過去データを再生できる。再生機能については、通常再生の他にN倍速再生や逆再生などの機能を備えている。

今後、MICREX-VieW XXを導入したプラントでは、レコーダとプレーヤによる過去再現機能を使って操業中に発生した異常の原因調査を容易に行うことができる。また、熟練者が高品質な製品を製造したときのデータをオペレータ教育に使うことで、常に高品質な製品を製造することが期待できる。

さらに、将来は、最適化・可視化技術や異常兆候予測技術、ライフサイクル管理などのプラントが持つビッグデータを利用した技術およびAIを用いたプラント自動運転のデータ基盤として活用する予定である。

3.3 E-SX バスループ化

E-SXバスは富士電機の制御システムの基幹I/Oネットワークであり、物理層に100Mbps/s Ethernet^(注2)(100BASE-TX)を採用している。E-SXバスに接続された機器に故障などの不具合が生じても、継続運転を行うために、これまで縮退運転や二重化接続により対応してきた。

〈注2〉 Ethernet：富士ゼロックス株式会社の登録商標

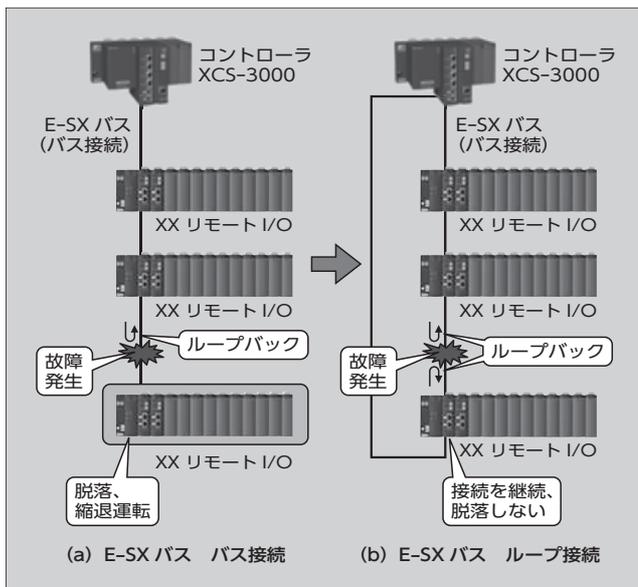


図4 「XCS-3000」のE-SXバスループ(説明図)

縮退運転では、デージーチェーン方式^(注3)で各局を接続する。専用LSIにより故障状態を2サイクル以内に検出し、折り返して復旧するループバック機能を備える。回線異常時は異常発生箇所まで伝送信号を折り返し、マスタ局から異常検出局までの通信を継続して縮退運転ができるだけでなく、異常箇所の特定や表示もできる。

一方、E-SXバスとXCS-3000を二重化(システム二重化)すると、シングル接続の場合と異なり、断線が発生した場合はコントローラを含む二重化の系切替えによって、継続運転を行うことになる。しかしながら、これまでの顧客システムにおける実際の障害情報を統計調査した結果、4割以上が一過性のノイズ、接触不良や断線、コネクタ脱落などネットワーク回線の物理的な状態変化によることが分かった。そのような故障により系切替えが発生すると、プラント管理者は系切替え後、異なる系でのプラント制御に問題がないことの確認、故障箇所の復旧後、復旧箇所の動作確認、ならびにこれらの状況を書類にまとめるなどの煩雑な作業が必要になる。

この課題を解決するために、回線をループ状に接続するE-SXバスループ化機能を新たに開発した。E-SXバスループ接続構成を図4に示す。MICREX-VieW XXシステムでは、1か所の伝送回線故障発生でも二重化の系切替えを行うことなくシステムを継続運転することができる。また、ケーブル故障箇所の交換など保守作業時においても、局脱落など縮退状態を招くことなく安心して継続運転でき、保守性と可用性が両立する。

3.4 高信頼I/O機能

富士電機の旧リモートI/O「IPU-II」では、I/Oネットワークの二重化に加え、I/Oモジュールの二重化もでき

〈注3〉 デージーチェーン方式：複数の機器を数珠つなぎに接続する方式

る。しかし、二重化のペアとなるモジュールは、同一ラック上に隣接して実装することが条件となっていた。そのため、I/O モジュールの故障時は、正常な隣接ペアモジュール側の I/O 配線などに影響を及ぼさないよう注意しながらコネクタや外部端子台インタフェースを外し、モジュールを活線状態でラックから抜き出して交換などの保守作業を行う。しかし、昨今の運転要員の経験不足や育成不足などから、現場機器に精通していることが必要であるこのような複雑な交換作業ではなく、より簡単で安全で安心な保守作業が求められている。そこで、MICREX-VieW XX は、図5に示す“ラック単位 I/O モジュール二重化方式”に対応した。この方式を採用することにより、二重化の対象となるペアの I/O モジュールを同一、別々のラックを問わず実装を可能とした。また、本方式により、故障した I/O モジュールが実装されたラックの電源を落とし、安全な状態で I/O モジュールを交換し、交換完了後に電源を再投入することで復旧する。また、ラックの電源などが故障した場合も、二重化ペアの片側のラックが正常であればシステムは問題なく継続運転ができるので、故障発生時の可用性が向上する。I/O モジュールを隣接して実装する二重化にも継続して対応している。そのため、ユーザーは、富士電機の I/O モジュールを、従来方式の隣接実装する方式か、より簡単な保守ができるラック単位 I/O モジュール二重化方式かを選択できる。

さらに、二重化ペアとなる二つのラックのうち片側の I/O 構成定義とパラメータ設定をユーザーが行うだけで、

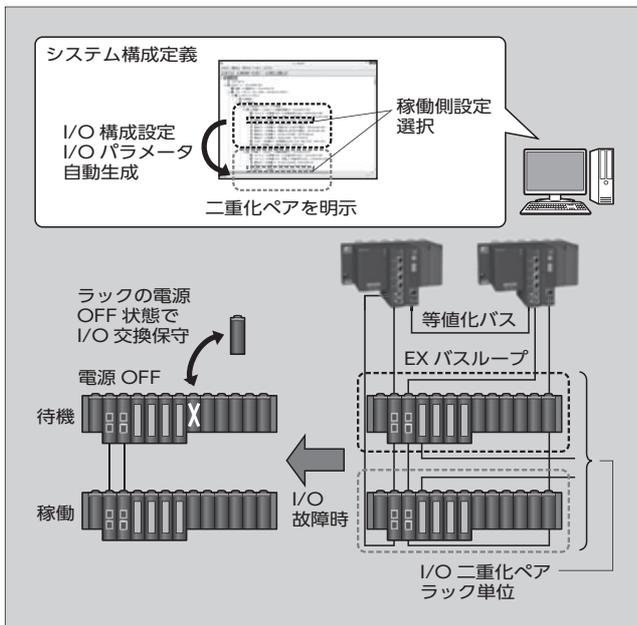


図5 新二重化 I/O モジュールの概要

エンジニアリングツールが自動的に他方の I/O 構成を明示し、同一性チェックとパラメータ転送を行う二重化ペア I/O 自動設定機能を開発した。これにより、保守員は異なるラックに配置した二重化 I/O モジュールのペアが、同じ位置に同じ形式のモジュールが同一の設定で配置されていることを確認することができるため、システム運用の安全性が増し、より容易な保守ができる。

4 あとがき

保守性と信頼性を向上した監視制御システム「MICREX-VieW XX (ダブルエックス)」について述べた。これらの機能は産業分野の自動化、省力化に貢献するものである。

今後も顧客設備の安全・安定操業に伴う課題解決に向け、監視制御システムの機能拡充を図っていく所存である。

参考文献

- (1) 西脇敏之ほか. 顧客資産の継承と進化を実現する中小規模監視制御システム「MICREX-VieW XX」. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.1, p.44-48.
- (2) 佐藤好邦ほか. 中小規模監視制御システム「MICREX-VieW XX」の最新オペレーション機能とエンジニアング機能. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.1, p.49-53.
- (3) 永塚一人ほか. 進化する監視制御システム「MICREX-VieW XX (ダブルエックス)」. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.3, p.186-192.



笹野 喜三郎

計測制御システムの商品企画に従事。現在、富士電機株式会社パワエレシステム インダストリー事業本部オートメーション事業部プラント営業技術部主査。



藤澤 昭博

計測監視制御システムにおける設計業務に従事。現在、富士電機株式会社パワエレシステム エネルギー事業本部エンジニアリング統括部プラントシステムセンターオートメーションシステム技術部課長。



永塚 一人

監視制御システムにおける企画・開発業務に従事。現在、富士電機株式会社パワエレシステム インダストリー事業本部開発統括部システム開発企画部マネージャー。

工場ですぐ使えるタッチオペレーションの現場型診断装置 「SignAiEdge (サインアイエッジ)」

“SignAiEdge” On-Site Diagnostic System by Touch Operation That Supports Immediate Implementation to On-Site Diagnosis at Factories

松本 充弘 MATSUMOTO, Mitsuhiro

佐藤 好邦 SATO, Yoshikuni

坂井 一博 SAKAI, Kazuhiro

近年、IoTによる製造業のデジタル化の中で、特にエッジコントローラによる現場情報の解析・最適化機能を搭載するエッジヘビー化が進められている。富士電機は、アナリティクス・AIを搭載した表示器一体型のエッジコントローラである「SignAiEdge (サインアイエッジ)」を開発した。バッチ生産とロット生産に対応している。導入から運用までをユーザー自身で行える。また、富士電機製品のプログラマブル表示器「MONITOUCH」を基にその技術を発展させることで、タッチオペレーションが可能であり、工場ですぐに使うことができる。

In the recent digitalization of the manufacturing industry using the IoT, the introduction of edge-heavy systems is increasing, in which analysis and optimization of field information are performed especially on edge controllers. Fuji Electric has developed the “SignAiEdge” edge controller with a built-in display equipped with analytics and AI to support batch production as well as lot production applications. It supports users to introduce and operate the system by themselves. In addition to above features, we have advanced the technology of our “MONITOUCH” programmable operator interfaces to enable user friendly touch operation, making the system easier to be deployed to solutions for factories.

1 まえがき

近年、IoT (Internet of Things) による製造業のデジタル化が進んでいる。特に、エッジコントローラによる現場情報の解析・最適化機能を搭載するエッジヘビー化の取り組みが進められている。

富士電機では、早くから情報分析技術としてアナリティクス・AIに力を入れており、多くの適用実績を持った強い技術として確立している。

「SignAiEdge (サインアイエッジ)」は、富士電機のアナリティクス・AIの表示器一体型エッジコントローラである(図1)。バッチ生産とロット生産に対応しており、導入から運用までをユーザーが行うことができる。現場での素早い導入と使いやすさに貢献することができる。

本稿では、SignAiEdgeの特徴である診断技術と診断方法について述べる。



図1 現場型診断装置「SignAiEdge」

2 「SignAiEdge」の特徴

2.1 表示器一体型診断装置

SignAiEdgeは、表1に示すラインアップを擁している。顧客設備に近い“現場”で“すぐ”に使ってもらうことをコンセプトにして開発した。このコンセプトを実現するために、次の三つの特徴を持つ装置にした。

- (a) ユーザインタフェースとなる画面を備えること
- (b) さまざまな診断対象設備からデータ収集ができること
- (c) 診断処理を高速に実行できるプラットフォームであること

そこで富士電機製品であるプログラマブル表示器「MONITOUCH」の技術を発展させ、新たにシステムソフトウェアを開発して搭載することで、表示器一体型診断装置を実現した。

診断に必要な機能を全て搭載した表示器一体型診断装置は、タッチオペレーションが可能なので、PCのようにマウスやキーボードを使うことなく、現場で誰にでも使いやすい診断装置である。

2.2 バッチプロセスの診断

SignAiEdgeは、Ethernet^(注)などの通信手段により診断対象装置に接続し、対象装置の状態データを取得して診断する(図2)。

半導体製造や機械加工などの生産は、現場で一連の動作を繰り返して行うバッチプロセス(図3)により製造する。SignAiEdgeはこのバッチプロセスを対象とした診断を行

(注) Ethernet：富士ゼロックス株式会社の商標または登録商標

表1 「SignAiEdge」のラインアップ

型 式	UHK-0034	UHK-0037	UHK-0035	UHK-0038	UHK-0036
ベース機種型式	V9080iSLBD	V9100iSB	V9100iSLBD	V9120iSB	V9120iSLBD
画面サイズ	8.4型	10.4型	10.4型	12.1型	12.1型
画面解像度	SVGA (800×600)				
電 源	DC	AC	DC	AC	DC
タッチパネル	アナログ抵抗膜方式				
無線LAN	非搭載				
LANインタフェース	2CH	1CH	2CH	1CH	2CH
シリアルインタフェース	3CH				
USBポート	Type A、Type mini-B (Ver.2.0)				
診断データの保存	SDカード				
SDカードに記録された診断データへのアクセス	FTP				

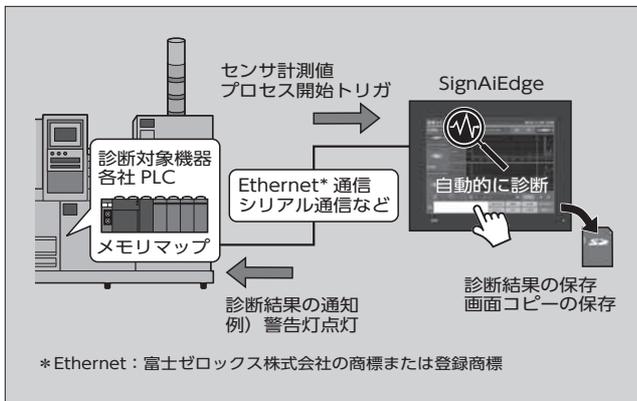


図2 「SignAiEdge」と診断対象装置の接続

う診断装置である。

SignAiEdge は、診断対象装置に搭載されたプログラマブルコントローラ (PLC : Programmable Logic Controller) と通信を行い、バッチプロセスの開始トリガとなる信号を監視し、検出すると、診断対象装置の状態を診断パラメータとして連続して計測する。あらかじめ設定した回数 of データ収集を終えると、診断パラメータを用いて自動的に診断し、結果を画面に表示する。

SignAiEdge の診断機能は、表 2 に示す診断データを扱うことができる。

表2 「SignAiEdge」の診断機能の仕様

項 目	仕 様
診断パラメータ数	1 ~ 最大100
診断パラメータ収集点数	2 ~ 最大1,000
診断パラメータ収集周期	0.1 ~ 60.0 s (0.1 s刻み)

3 診断技術

今回診断機能に適用した技術は、多変量統計的プロセス管理 (MSPC : Multivariate Statistical Process Control) を用いた独自のバッチプロセス向け異常診断技術である。ここでは、診断技術について述べる。

3.1 MSPC⁽²⁾

統計的プロセス管理とは、統計手法を活用してプロセスの運転状態を監視することで仕様を満たさない製品の製造を未然に防ぎ、生産性を向上させるための技術である。以前から広く使われている一変量統計的プロセス管理 (USPC : Univariate Statistical Process Control) は、品質に影響を与えるプロセス変数に対して管理限界の上下限を設定することで異常を診断する技術である。

これに対して、MSPC とは単純な上下限で異常を判定

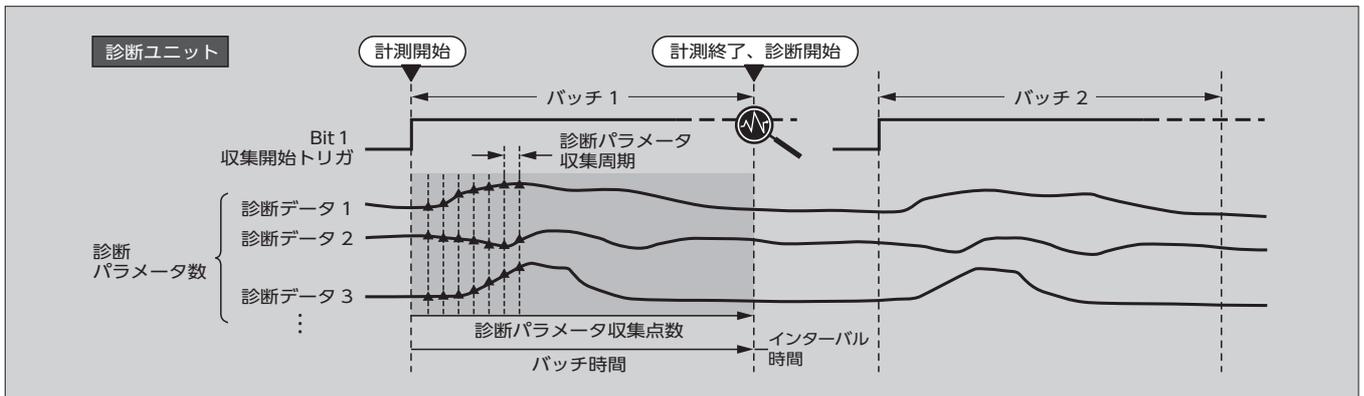


図3 バッチプロセスの診断タイムチャート

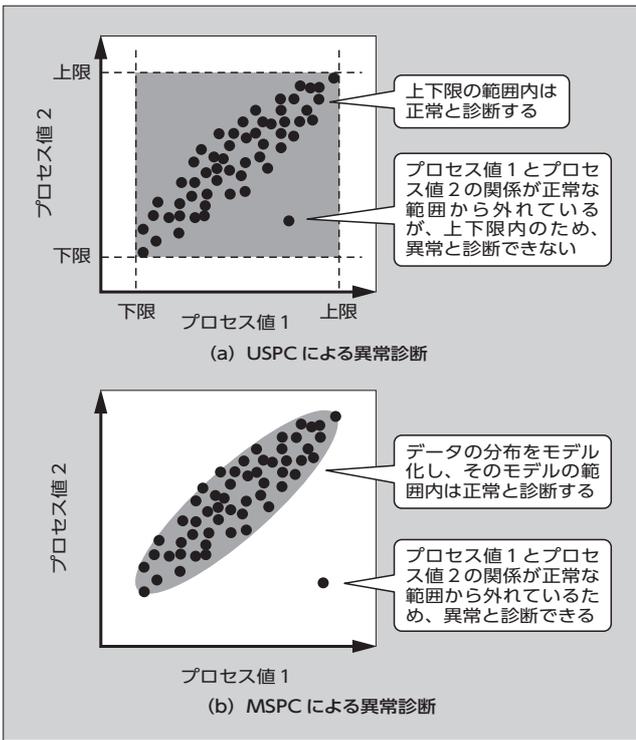


図4 USPCとMSPC

するのではなく、変数間の相関関係を考慮した診断方法である〔図4(a)〕。まず、正常範囲のデータを主成分分析手法によりモデル化する。そのモデルを用いて、図4(b)に示したような楕円(だえん)形の範囲を正常範囲と定義する。診断時には、診断対象の変数の値と正常モデル範囲との乖離(かいり)度合いから判定を行う。これにより、MSPCではUSPCで検知できない異常を正確に検知できる。

MSPCの手順は次のようになる。

(1) モデル化

過去の正常なデータから主成分分析などの多変量解析手法を用いて正常モデル(変数間の相関を表す係数行列)を作成する。

(2) 監視診断

計測データの正常モデルからの乖離度合いを異常指標であるQ統計量、 T^2 統計量の二つの指標として監視する。

$$Q = \|x - \hat{x}\|^2 = \sum_{n=1}^N (x_n - \hat{x}_n)^2 \dots\dots\dots(1)$$

\hat{x} : 入力変数 x のモデル上の推定値(次元圧縮後のデータを元の次元空間上の座標に再構築した値)

N : 変数の数

$$T^2 = \sum_{m=1}^M \frac{t_m^2}{\sigma_{t_m}^2} \dots\dots\dots(2)$$

t : 主成分スコア

σ_{t_m} : m 番目の主成分スコアの標準偏差

M : 主成分の数

3.2 バッチプロセス向けMSPC⁽³⁾

一般にバッチプロセスはプロセス値が一定状態でなく途中で変数間の相関関係が変化する。したがって前述のMSPCをそのまま適用すると、工程の進行に応じた相関関係の大きな変化に埋もれてしまい、異常を検出することが難しい。この問題を解決するため、バッチプロセスの生データから標準プロファイル(平均的なバッチプロセスの動き)を差し引くことにより、変数間の定常的な相関が明確に現れる手法を開発した。図5にこの処理のイメージを示す。

この標準プロファイルを差し引いた後のデータを前述のMSPCに適用する方式を採用し、バッチ内の各サンプリング周期において異常指標のQ統計量・ T^2 統計量を正確に算出している。

3.3 診断技術の適用事例

バッチプロセス向けMSPCを冷蔵ショーケースシステムに適用した事例を示す。冷蔵ショーケースは、コンビニ

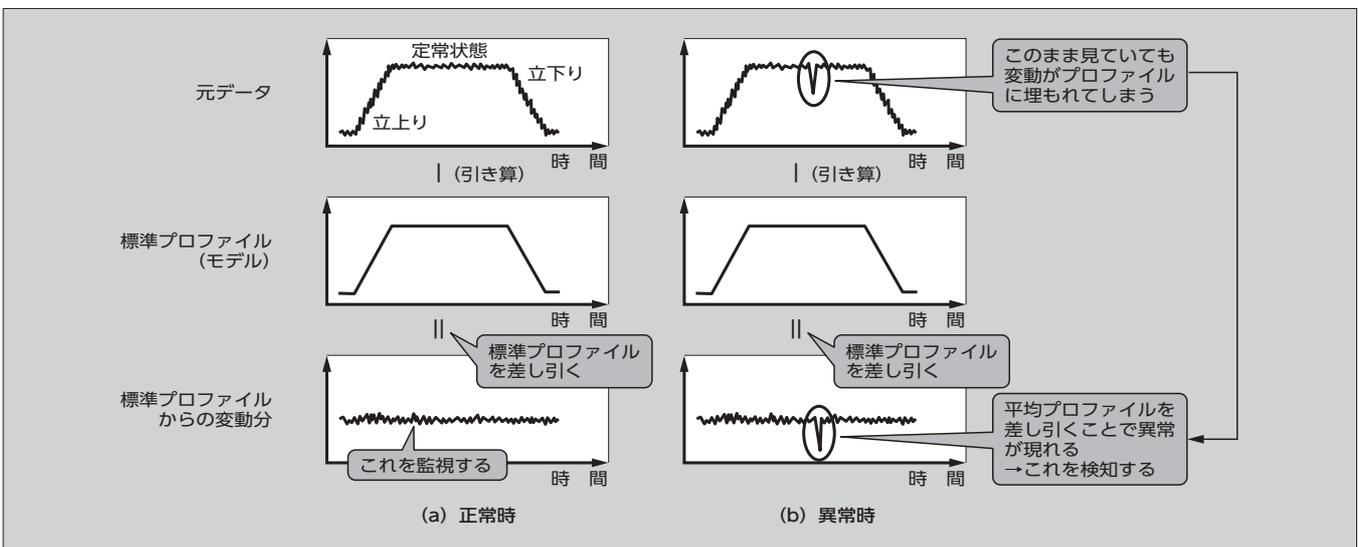


図5 バッチプロセス向けMSPCの処理イメージ

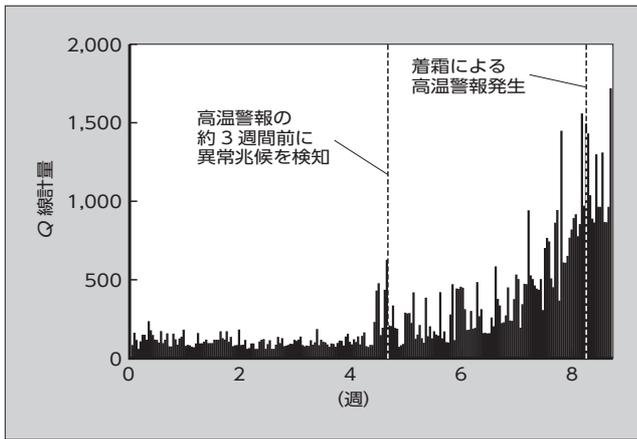


図6 適用事例

エンスストアやスーパーマーケットなどで生鮮食料品の販売に用いられる。システムが故障すると店舗にとって消費者にとっても大きな損失となる。そのため、これを事前に検知して対処することが大きな課題となっている。ショーケースは一定時間ごとに除霜処理が行われ、温度などのデータが周期的に変化するためバッチプロセスとして扱うことができる。そこで今回この冷蔵ショーケースシステムのデータに対し、バッチプロセス向けMSPCを適用して異常診断効果を検証した。

ある実店舗において、着霜による高温警報発生に対して診断を行い、得られた異常指標のQ統計量の時系列グラフを図6に示す。

従来は警報直前にならないと発見できなかったが、異常発生の約3週間前に診断指標が急激に大きくなっており、異常の兆候を検知していることがわかる。

4 あとがき

工場ですぐ使えるタッチオペレーションの現場型診断装

置「SignAiEdge (サインアイエッジ)」について述べた。

エッジヘビー化の要求が高まる中で、コア技術を軸にコンポーネントの製品群を活用することで、お客さまの課題解決につながる製品を提供できるよう、開発を進める所存である。

参考文献

- (1) 松本充弘. 操作性と視認性を追求したプログラマブル表示器「MONITOUCH TS1000 Smartシリーズ」. 富士電機技報. 2018, vol.91, no.3, p.183-185.
- (2) 村上賢哉ほか. バッチプロセス向けオンラインMSPCシステムの開発. 電気学会C部門大会. 2015.
- (3) 村上賢哉, 林伸治. バッチプロセス向け多変量統計的プロセス管理による設備の異常診断技術. 計装. 2017, 3月号.



松本 充弘

HMIの企画・マーケティングに従事。現在、富士電機株式会社パワエレシステム インダストリー事業本部オートメーション事業部システム営業技術部主任。



佐藤 好邦

監視制御システムの開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社パワエレシステム インダストリー事業本部開発統括部 HMI 開発部グループマネージャー。



坂井 一博

IoT・AI関連のソリューション開発・適用推進業務に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部デジタルイノベーション研究所 AI ソリューションセンター IoT 推進部長。

エッジコントローラで動作するモデル予測制御

Model Predictive Control Implemented in an Edge Controller

丹下 吉雄 TANGE, Yoshio

桐生 智志 KIRYU, Satoshi

松井 哲郎 MATSUI, Tetsuro

省エネルギー化や多品種少量生産などの要求に応えるため、プラントのオートメーションにおいて、よりきめ細やかな運用を低コストで実現することが求められている。従来は、高性能な計算機を用いて運用されてきたモデル予測制御(MPC)を、富士電機のPLC「MICREX-SX」で実行できるようにしたエッジ型MPCを開発した。運転データからのMPC用のモデル同定と最適ゲインの可視化をオフラインで行うことにより、オンライン制御では、安定した高度制御を実現できる。さらに、PLCの柔軟性と信頼性を生かし、現場に容易に導入できる。

In order to meet the demands of energy savings and high-mix, low-volume production, plant automation is required to achieve much thorough operation at lower costs. Fuji Electric has developed edge-controller-based model predictive control (MPC) that can be implemented in our “MICREX-SX” PLC although MPC had conventionally been performed on a high-performance computer. By performing offline MPC model identification and optimum gain visualization using operating data, it can perform stable online control. Furthermore, the flexibility and reliability of the PLC makes it easy to use MPC on the shop floor.

① まえがき

省エネルギー化および温室効果ガス削減に関する社会的要求の高まりや、さまざまなニーズに応じた多品種少量生産に対応するため、プラントのオートメーションにおいても、よりきめ細やかな運用が必要となってきている。本稿では、きめ細やかな運用の実現に貢献する、エッジコントローラで動作するモデル予測制御(MPC: Model Predictive Control)について述べる。

② バッチ式プロセスにおける課題と富士電機の取り組み

プロセス系のプラント運転には、主にバッチ式と連続式があり、多品種少量生産に対する融通の良さから、現状の多くがバッチ式を採用しているといわれている。バッチ式制御では、ある目標値のプロファイルに沿った運転や、外乱に対する一定値の運転が行われている。

特に、望ましい品質を達成する過去の代表的なバッチデータをゴールデンバッチと呼び、そのプロファイルが目標値に用いられている。一方で、バッチごとの運転状態にばらつきがあると、ロット品質が安定しないため、バッチ間の品質の違いを検出したり、ばらつきを抑制したりすることが課題である。

富士電機は、これまで、バッチ多変量統計的プロセス管理(MSPC: Multivariate Statistical Process Control)と呼ぶバッチ間のプロファイル差に基づく異常検知技術を開発してきた。

制御に関しては、従来、バッチ式プラントを運転する際は、古典的なPID(Proportional-Integral-Differential)制御や、モデルを使って予測を行うMPCが用いられてき

た。しかし、これらには次に示すような課題があった。

(a) PID制御のパラメータ調整が難しく、プロファイルの初期と後期でゲインを変える(ゲインスケジューリング)などの工夫が必要である。

(b) MPCは、最適化に伴う計算が複雑であるため、高性能な計算機が必要である。

バッチ式のプロセス制御向けに、現場でも容易に設置できるエッジ型コントローラ上で高性能な制御が可能なMPCが実装できれば、顧客課題の解決につながると考えられる。そこで、富士電機のプログラマブルコントローラ(PLC: Programmable Logic Controller)である「MICREX-SX」⁽²⁾や、分散型制御システム(DCS: Distributed Control System)である「MICREX-View XX(ダブルエックス)」⁽³⁾に搭載可能な、新しいエッジ型MPCを開発し、高性能な専用計算機や複雑なネットワークの取り回しを必要とせず、低コストで現場に導入できる制御機能を実現した。

③ エッジ型MPCの構成技術

開発したエッジ型MPCは、オフライン支援系とオンライン制御系で構成される(図1)。オフライン支援系で事前のモデル同定(予測のためのプロセスモデルを作成すること)と最適ゲイン設計を行うことにより、オンライン制御系の計算量を大幅に削減し、PLCなどのエッジコントローラでは、オフライン支援系で同定したモデルと最適ゲインを用いた高速な制御アルゴリズムを動作させる。

3.1 オフライン支援技術

MPCの実行に当たっては、予測のためのプロセスモデルが必要である。従来はプロセスモデルを作成するために

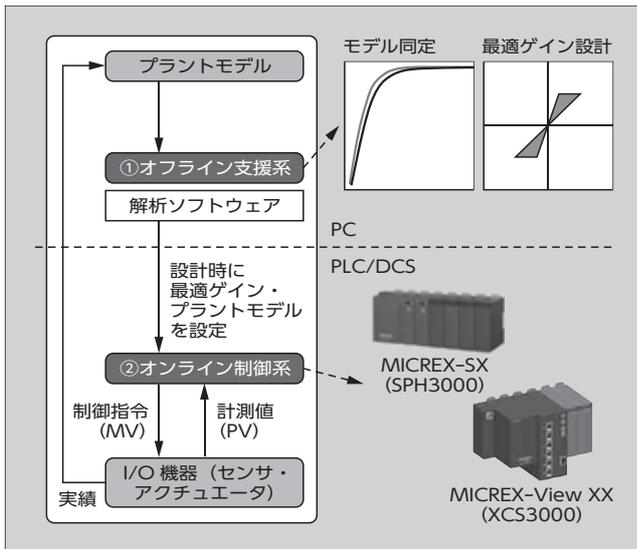


図1 エッジ型 MPC の構成技術

ステップ応答試験など運用に影響する試験が必要であった。今回、ステップ応答試験などを実施することなく、現状の運転データからモデル同定が可能な技術を開発した(図2)。過去のバッチデータから、制御量、操作量、計測可能な外乱などを用いてモデルを同定することができる。

一例として、温度制御の場合、制御量(PV: Process Variable)は温度、操作量(MV: Manipulative Variable)は熱媒体の流量調節弁開度、計測可能な外乱(DV: Disturbance Variable)は外部温度などが考えられる。

従来の MPC では、現在から所定の期間の未来を制御周期ごとに予測し、制御量(PV)が適切な軌道になるような操作量(MV)を最適化演算によって求める。未来の期間が毎回移動していくさまが地平線に似ていることから、

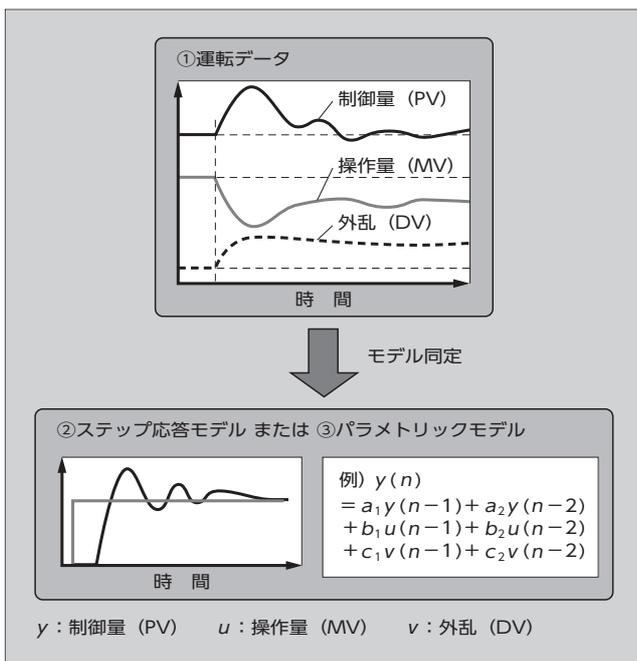


図2 モデル同定技術

予測ホライズン(未来を計算する長さに相当)あるいは後退ホライズンと呼ばれる。最適化演算は、代表的な数値計画法の一つである2次計画法などの行列演算が用いられてきた。このように、複雑な計算を行う MPC を、エッジコントローラ上で実現するには、次に示すような課題があった。

- (a) CPU 性能とメモリ容量に制約があり、複雑な計算ができない。
 - (b) 安定した演算時間で毎回計算を終える必要がある。
- このような課題を克服する手法として、エッジ型 MPC では、オフラインで事前に最適ゲインを計算する方式を採用した。

最適ゲインの計算の際は、プロセスモデルと制御仕様を指定し、数式処理技術によって、最適なゲイン、すなわち制御仕様を満たす操作変化量の領域を可視化する(図3)。制御仕様は、目標値からの偏差が予測ホライズン中にどのように収束するか条件と、操作変化量の上下制限を与える。さらに、プロセスモデルの候補を複数用意し、それらのモデルに対する最適ゲインを可視化して重ね合わせることで、モデル変化に柔軟に対応できるゲインを設計することもできる⁽⁴⁾。

3.2 オンライン制御技術

オンライン制御系では、オフライン支援系で事前に設計した最適ゲインと、プロセスモデルとを使ってフィードバック制御を行う。図4に示すように、現在から所定の未来までの制御量の変化を予測し、現在の目標値からの偏差を未来の目標値からの偏差へと補正した補正偏差を計算

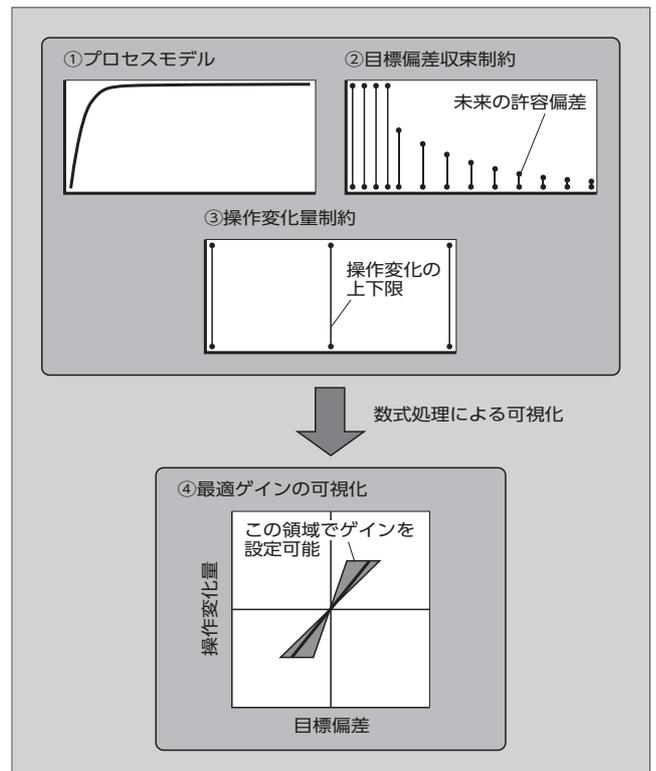


図3 最適ゲイン可視化技術

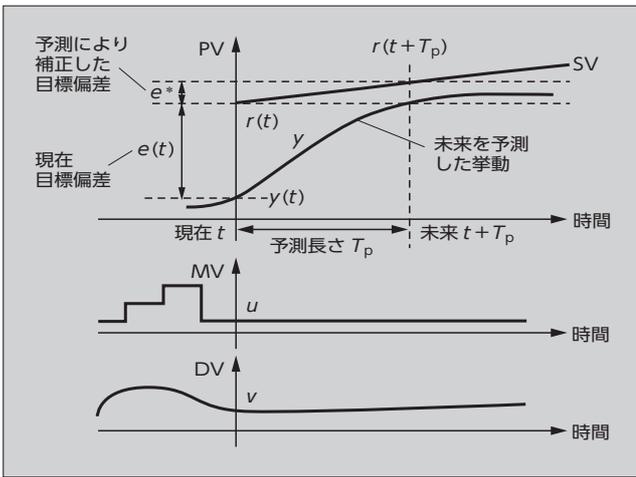


図4 予測による補正

する。補正偏差の計算の際は、現在時刻 t までに観測した操作量 (MV) と計測可能な外乱 (DV) の情報を用いる。また、操作量 (MV) には、1 制御周期における変化量の上限と下限、また、操作量自体の上限と下限をそれぞれ独立に設定でき、操作量 (MV) の急激な変化を抑制したり、動作範囲を制限したりできる。

オンライン制御系の機能を、IEC 61131-3 規格に対応した FB (ファンクションブロック) として実装した。IEC 61131-3 は、1993 年に IEC SC65B/WG7/TF3 により制定され、日本では、1997 年に JIS B 3503 として規格化されている。本規格に対応することのメリットを次に示す。

- (a) 既存の制御プログラム資産との結合が簡単にできるので、開発を効率的に行うことができる。
- (b) すでに普及している PLC や I/O モジュールなどのハードウェアや PLC 開発ソフトウェアで開発が可能である。
- (c) 標準規格として継続的な互換性が期待できる。

実装した FB は、各種の通信プログラムや制御ロジックなど、既存の IEC 61131-3 規格に準拠した制御プログラムの資産と容易に連携することができる。図 5 に示すように、IO 通信を行う処理を従来資産のまま、演算処理部を PID-FB から MPC-FB へと入れ替えるプログラム構成も可能である。

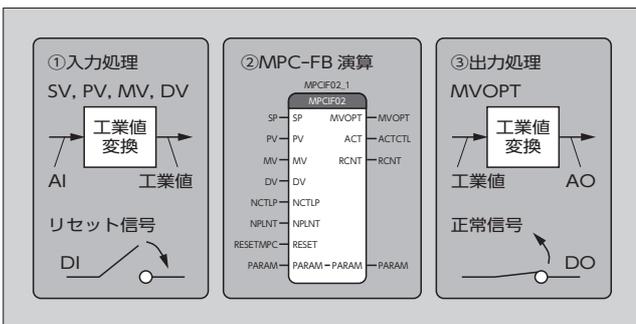


図5 プログラムの構成例

4 制御上の特徴

4.1 システム構成の柔軟性

エッジ型 MPC は、「MICREX-SX SPH3000」および「MICREX-VieW XX XCS-3000」上に搭載できる。新設のシステムにおいて、これらの PLC や DCS に搭載できるのはもちろんのこと、図 6 に示すように、既設の制御システムの近くにある増設盤に設置した、これらの PLC や DCS に搭載して連携を図ることもできる。

また、他社製のシステムなど、プログラムの改造が困難な既設システムとの連携をするデータの受渡し (通信) を行う。

4.2 制御性能の向上

エッジ型 MPC では、図 4 に示したように、未来の応答をモデルに基づいて予測し、目標値からの偏差を収束させる操作量を計算する。未来の応答に基づく制御では、次に示す利点がある。

- (a) 時定数が長いプロセスなどにおいてすぐに現れない影響を考慮できる。
- (b) PID 制御が苦手とするムダ時間 (操作量を変化させてから制御量に変化し始めるまでにかかる時間) のあるプロセスに対応できる。
- (c) 直近の変動に過度に左右されず、操作量の急激な変化が低減できる。

また、エッジ型 MPC では、従来の最適化演算に基づく MPC と比べ、次に示す利点がある。

- (a) タイムラグのない応答ができる。
- (b) 最適化に伴う繰返し演算がないため、計算時間が安定しており、一定の演算時間で実行できる。
- (c) 離散操作量も含めた予測ができるので、弁の全閉・全開といったオンオフ操作しかできない場合にも対応が可能である⁽⁵⁾。

図 7 にエッジ型 MPC の演算時間を示す。例えば、100 ms 以内に計算を完了させたい場合は、予測ホライズンは 100 ステップ (1 ステップは制御周期の長さに相当) まで、700 ms 以内に計算を完了させたい場合は、予測ホライズンは 300 ステップまで対応可能である。

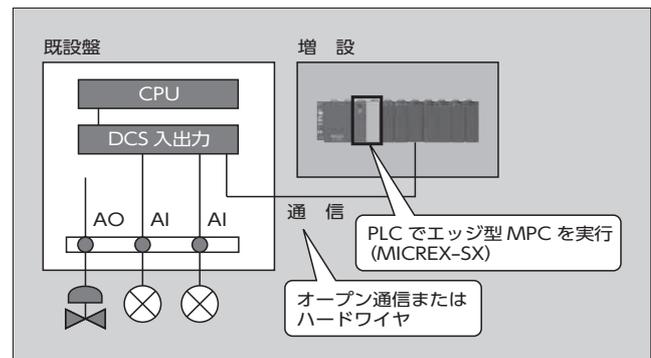


図6 他社の制御システムとの連携例

したがって、実用の場面では、図7から予測ホライズンのステップに関するエッジ型 MPC の演算時間を参考に、その時間を上回る制御周期が数百 ms から数 min 程度のプロセスにおいて適用できる (図8)。

図9に化学反応炉の構成例を示す。化学反応炉の反応温度は精密に制御する必要がある。このため、バッチ式プロセスの場合には、反応熱に起因する外乱の影響を抑え込む必要がある。時定数は、数分から数時間にわたる場合があり、MPCによる予測が有効である。エッジ型 MPC では、300 min 先までの未来を予測し、制御周期を 1 min とする制御を、予測ホライズンを 300 ステップとした場合、300 min 先までの未来を予測しつつ、演算時間 700 ms で実行できる。

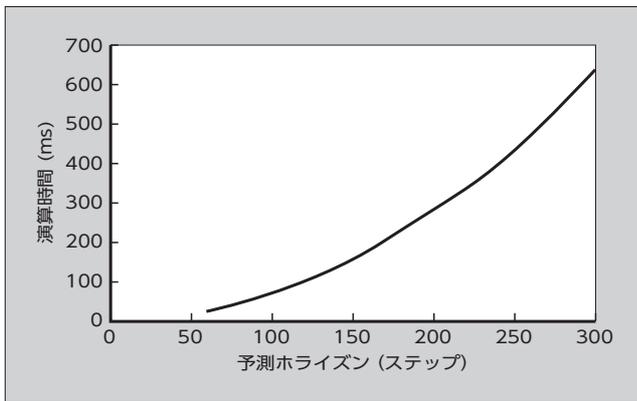


図7 エッジ型 MPC の計算所要時間例

4.3 安定性・保守性

エッジ型 MPC では、コントローラ上で最適化問題を解く必要がなく計算時間が毎回安定しているため、制御周期を一定に保つことができる。このことは、図5に示したように IO 処理やロジック処理、オペレータ操作に応じた処理などの即応性が必要な処理と連動する際に重要である。

プラント設備を 10 年、20 年と継続して安定運用するために、富士電機は、PLC や DCS に 24 時間操業を前提とした高耐久性のモジュールを用意している。加えて、二重化機能などを用いることで、より信頼性の高いシステムが構築できる。その上で、コントローラを適宜保守していくことが重要である。

また、MPC-FB は、国際規格として長い実績がある IEC 61131-3 規格に対応した FB であることから、既設 PLC 更新において、ソフトウェア資産のマイグレーションにも対応できる。

5 想定ケースでの性能検討

プロセスモデルをデータから同定して、エッジ型 MPC を一定目標値に追従させる制御に適用するケースを示す。図10に示すようなフィードバックループにより、外乱 (DV) に対し、制御量 (PV) を一定の目標値 (SV: Setting Value) に保つことが目的である。

MPC では、事前に同定したプロセスモデルが必ずしも

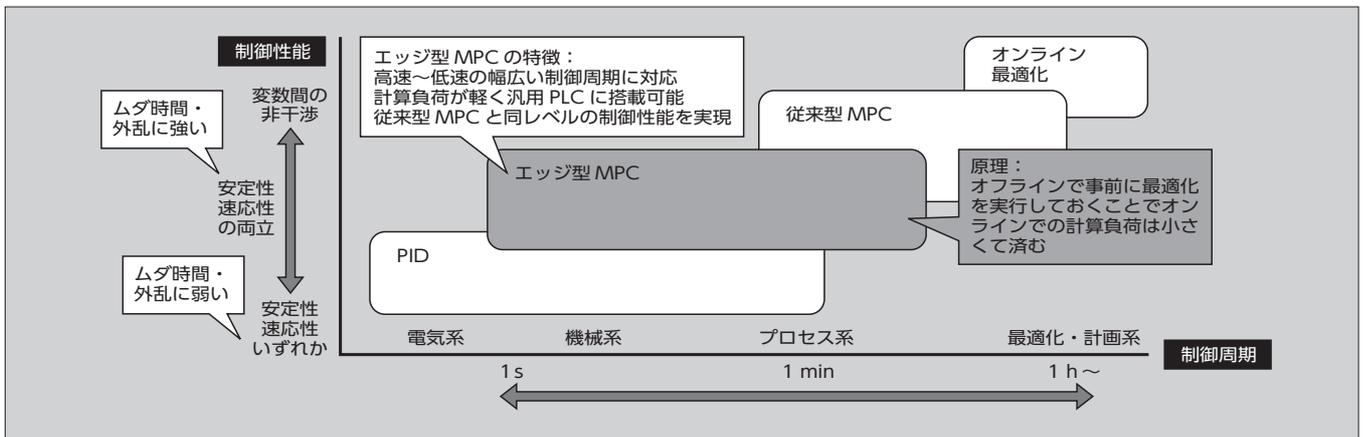


図8 エッジ型 MPC の適用範囲

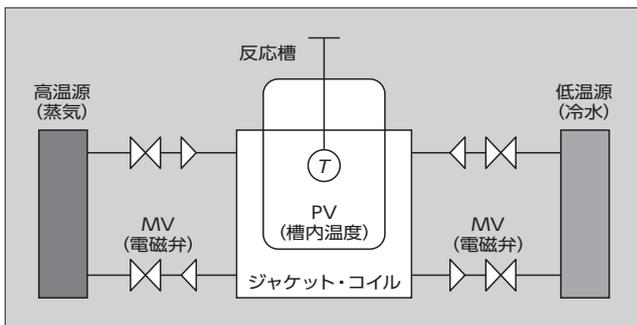


図9 化学反応炉の構成

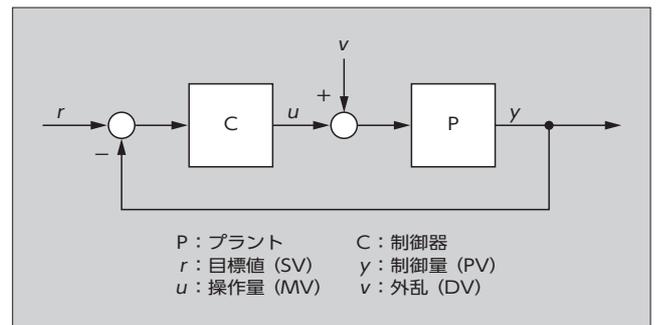


図10 フィードバックループの例

特集 自動化と省エネルギーに貢献する計測・制御ソリューション

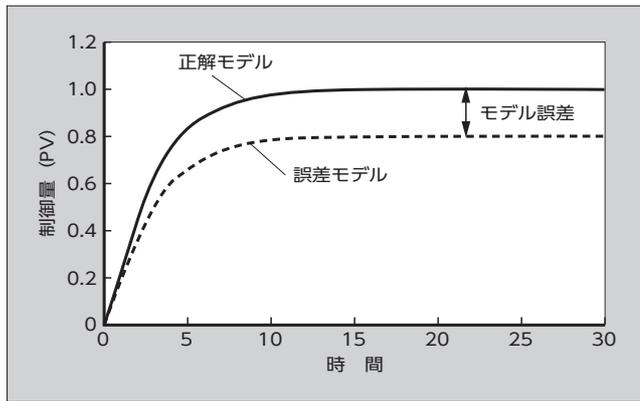


図 11 正解モデルと誤差モデルのステップ応答

正しいとは限らない。そこで、次に示す二つのケースを想定して目標値への追従性を検討した。

- (a) 正解のモデルに基づいて設計したケース
- (b) 正解モデルとは誤差のあるモデル（誤差モデル）に基づいて設計したケース。

図 11 に、正解モデルと誤差モデルのステップ応答の差異を示す。

また、ベトラーク法に基づくパラメータ調整（一巡伝達関数のモデルマッチングに基づく調整）を行った PID 制御を、エッジ型 MPC の比較対象として設計した。

図 12 に、各ケースで設計した制御器を適用した場合の外乱応答を比較した結果を示す。図 12 (a)の正解モデルに基づいた設計の場合においても、図 12 (b)の誤差モデルに基づいた設計の場合においても、MPC が PID を上回る外

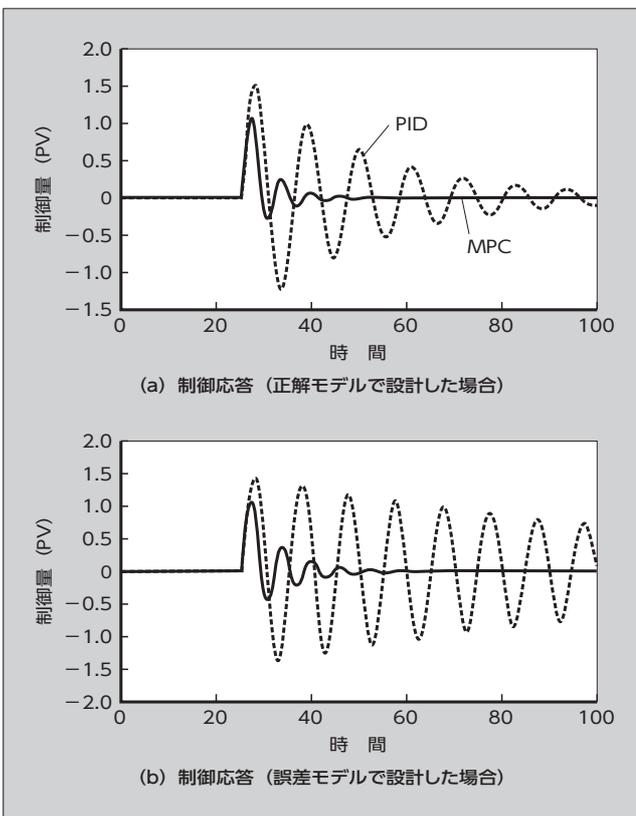


図 12 想定ケースでの外乱応答比較

乱抑制性能を達成している。すなわち、ある程度のモデル誤差があっても、エッジ型 MPC が十分な外乱抑制性能を発揮できているといえる。

6 あとがき

エッジコントローラで動作するモデル予測制御について述べた。富士電機で標準的なベトラーク法による PID 制御に対して、予測に基づく制御により大幅な性能改善が期待できる。事前に、運転データからの MPC 用のモデル同定と最適ゲインの可視化をオフラインで行うことにより、オンライン制御では、安定した高度制御を実現できる。

PLC や DCS を現場の制御盤に設置する形態で利用することができ、少ない設備改造で導入が可能である。

IoT 技術によるプラント操業の安定化・高度化を実現するニーズは今後ますます増加していくと考えられる。富士電機のコントローラ製品上で高度制御を実現するアイテムとして、化学プロセス、医薬品製造をはじめとする高精度制御が求められる分野への適用を推進していく所存である。

参考文献

- (1) 松井哲郎ほか. IoTソリューションを支える数理応用技術. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.3, p.198-203.
- (2) 石井靖. 機械制御から高度なモーション制御まで実現する統合コントローラ「MICREX-SXシリーズ」. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.1, p.54-58.
- (3) 永塚一人ほか. 進化する監視制御システム「MICREX-VieW XX (ダブルエックス)」. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.3, p.186-192.
- (4) 丹下吉雄ほか. 数式処理と時間応答に基づくロバスト制御ゲイン設計に関する考察. 平成30年電気学会全国大会. 2018, p.372-373.
- (5) 丹下吉雄ほか. 離散操作量に対応したエッジ型モデル予測制御. 平成31年電気学会全国大会. 2019, p.71-72.



丹下 吉雄

プラント制御技術・EMS 技術・数理アルゴリズムの産業応用に関する研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部デジタルイノベーション研究所 AI ソリューションセンター AI 研究部主任。計測自動制御学会会員、電気学会会員。



桐生 智志

数値アルゴリズムの産業応用に関する研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部デジタルイノベーション研究所 AI ソリューションセンター AI 研究部。電気学会会員。



松井 哲郎

各種産業システムへの最適化・予測・診断技術の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部デジタルイノベーション研究所 AI ソリューションセンター AI 研究部長。電気学会会員、計測自動制御学会会員。



異常兆候を検知し回避手順を示すプラント運転支援システム

Plant Operation Support System that Detects Abnormality Sign and Provides Guidance on Avoidance

鳴海 克則 NARUMI, Katsunori

鈴木 聡 SUZUKI, Satoshi

館山 淳也 TATEYAMA, Junya

プラント操業では、さまざま場面に依りて適切に操作ができる技術が求められている。また、プラント設備では運転データなど多様なデータが大量に蓄積されている。富士電機は、大量のデータを解析することにより、適切な操作を行うことができるプラント運転支援システムを開発した。多変量解析などによる複数の予測モデルを用いて同時に予測を行い、予測値を総合することで予測精度が向上する。これにより、精度の高い異常兆候を早期に検知できる。また、異常兆候を検知すると回避手順データベースから該当する回避手順を検索し、ユーザーに通知する機能も実装した。

Plant operations require technologies capable of performing appropriate operations in various situations. Plant equipment stores large amounts of various types of data, such as operation data. Fuji Electric has developed a plant operation support system that can perform appropriate operations through the analysis of large amounts of data. The system uses multivariate analysis with multiple prediction models to perform simultaneous prediction and aggregates predicted values to improve predict accuracy. This allows for early detection of abnormality sign with high accuracy. When detecting an abnormality sign, it will search the database for avoidance procedures to inform users of them.

1 まえがき

プラントの安定・安全操業を支えてきた熟練オペレーターが減少し、非常操作や緊急操作の経験が十分に伝承されていない。また、操業手順を完全にマニュアルに落とし込むことは困難であり、自動化ソフトウェアやモデルを構築することもマンパワーやコスト面で現実的ではない。一方、プラント設備の監視制御システムには、過去の運転データ（センサなどから得られる運転データ）やオペレーターの操作および制御動作などのイベントログ、アラームログなど多様なデータが大量に蓄積されている。

富士電機はこれらの課題を解決するため、監視制御システムに蓄積された大量のデータ（ビッグデータ）を解析することにより、異常兆候を早期に検知（異常兆候検知）し、異常を未然に回避する手順（回避手順指示）を示すプラント運転支援システムを開発した。

2 プラント運転支援システムの全体構成

2.1 プラント運転支援システムのニーズ

プラントでは、製造する製品の品質を確保するために、品質に影響を与えるプロセス変数に対して上下限值を設定し、異常の有無を判断することが一般的である。しかし、複数のプロセス変数に相関関係があることから、個々の変数の監視だけでは適切な判断が難しい。また、プロセス変数が大きく変動していても品質が確保できる正常な運転状態もある。このように、上下限值の設定だけでは適切な判断が難しいという問題もある。そのため、複数の変数間の相関を考慮しながら診断する技術が求められている。

プラントの起動・停止や異常発生時などの非常運転時には人手による対応が必要となる。しかし、プラントの異

常を経験する機会が減っていることや熟練オペレーターの減少などによって、対応に時間がかかっている。操業はマニュアルに沿って原則行われているものの、手動操作の場合はオペレーターの経験に沿って操作が異なることもあり、さまざまな場面に依りて最適な操作を行うことができる技術が求められている。

このような課題に対して、プラントにおける計測トレンドデータやアラームデータ、動作ログデータ、手動による操作のログデータを分析してプラントの操業支援に活用することが望まれている。

2.2 プラントにおけるログデータと運転データ

プラントにおいて大別するとログデータと運転データが収集・蓄積される。

ログデータは、監視制御システムが発するアラームのログの他、制御システムの動作ログ、オペレーターによる操作ログなどがある。

運転データには、監視制御システムが計測しているセンサデータ（流量、圧力、温度、水位など）に加えて、制御系の設定値やバルブなど、アクチュエータの指令値と応答（開度や電流値）も含まれる。

2.3 データ解析による運転支援

図1にプラント運転支援システムの模式図を示す。プラント運転支援システムは、蓄積したログデータと運転データを活用して、プラントの運転支援を行う。

まず、データからプラントの挙動を何らかの形式で模擬するモデルを構築する。モデル化の方法には、ログデータの場合はパターン分類、運転データの場合は多変量解析などがある。このようにして構築したモデルに直近のデータを入力する、あるいは比較することにより、現在のプラン

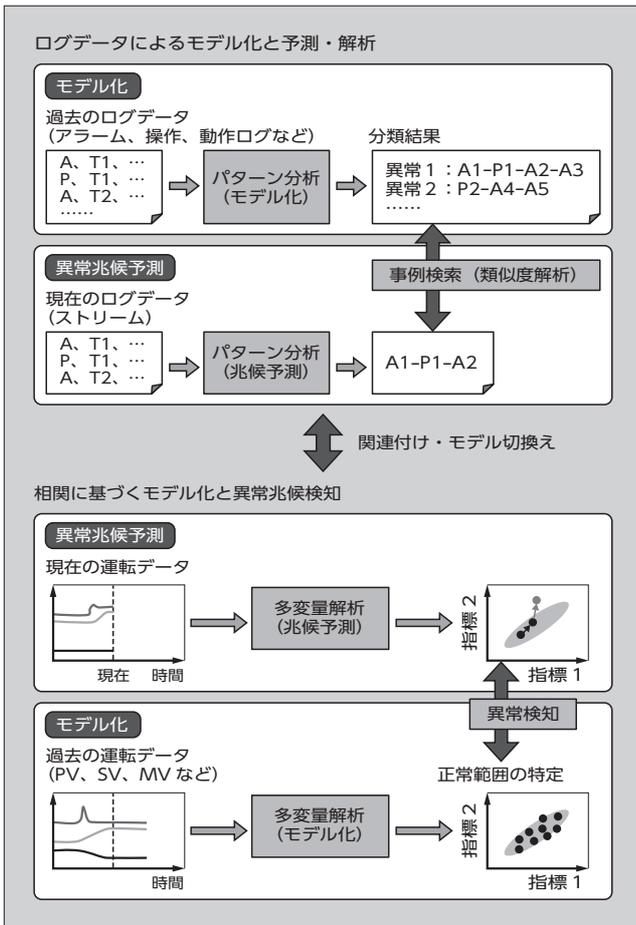


図1 データ解析によるプラント運転支援システム

ト運転状態を推定、あるいは予測して運転支援に利用する。

2.4 システム全体構成

図2にプラント運転支援システムの全体構成を示す。このシステムは監視制御システムと連携して、プラントデータに基づき異常兆候予測を行い、異常に対する回避手順候補をユーザーに通知する。

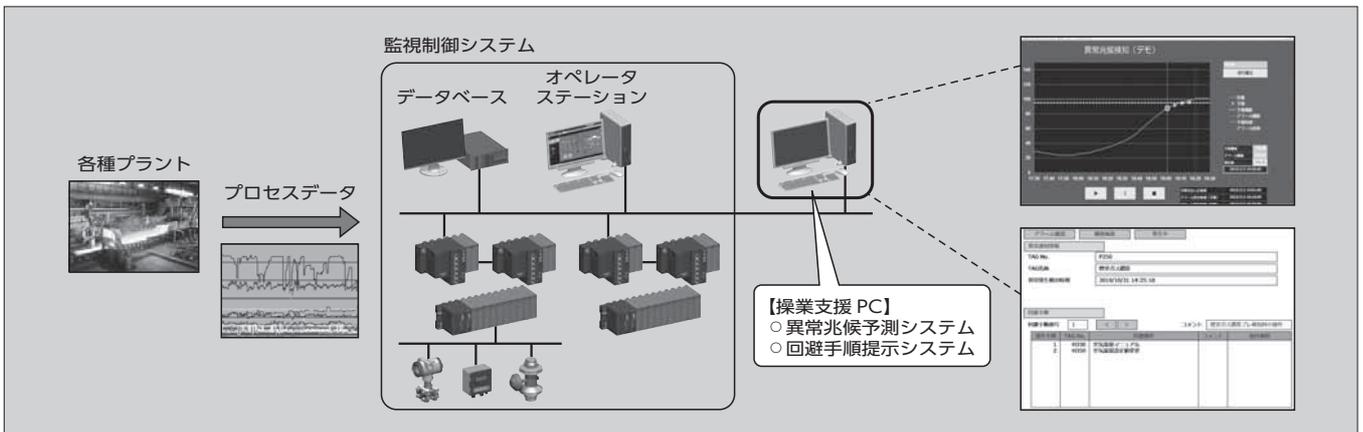


図2 プラント運転支援システムの全体構成

3 異常兆候検知

3.1 異常兆候検知の必要性

プラントの異常監視においては、監視対象となる連続量を変数（監視変数）として、設定した管理限界（上下限の管理しきい値）を逸脱したときにアラームを発することが一般的である。これに対し、監視変数の未来値を予測し、その予測値が管理限界を逸脱することで異常の予兆検知を行う異常兆候予測では、プラント異常が発生する前にオペレーターが回避操作を行い、事前に異常を回避できるので、より効果的である。

ここでは、監視変数の予測に基づく異常兆候予測の概要と、予測値に対する管理限界の設定の仕方によりユーザーの仕様に合った予測精度を得るための方法について述べる。

3.2 予測器によるアラーム発生予報

予測器とは、ある連続変数の未来値を、現在までに得られている情報から予測するモデルである。予測器には、一般に物理モデルによるものと統計モデルによるものがある。プラント運転支援システムでは、次に示すオンラインとオフラインの枠組みによって、物理モデルと統計モデルの両方に対応できる。

予測器を用いた異常兆候の予測の手順を図3に示す。プロセス予測値が管理しきい値を超えることを“異常兆候”として扱う。プラント運転支援システムは、プロセス計測値の近い将来の予測を行い、予測値が管理の上限しきい値を上回るまたは下限しきい値を下回ると予測されたときに“異常兆候を検知した”と通知する（図4）。

オフラインにおいて、過去の計測データを使う統計モデルや物理現象を数式で表した物理モデルなどを使って、時間 T だけ未来の監視変数の値を予測する予測器を構築する（図5）。次にこの構築した予測器を用いて、オンラインで監視変数の時間 T だけ未来の値を時刻ごと（1分周期ごと）について予測する。こうして得られた予測値が予測値用管理しきい値を逸脱すると、異常兆候検知を発報する（図6）。

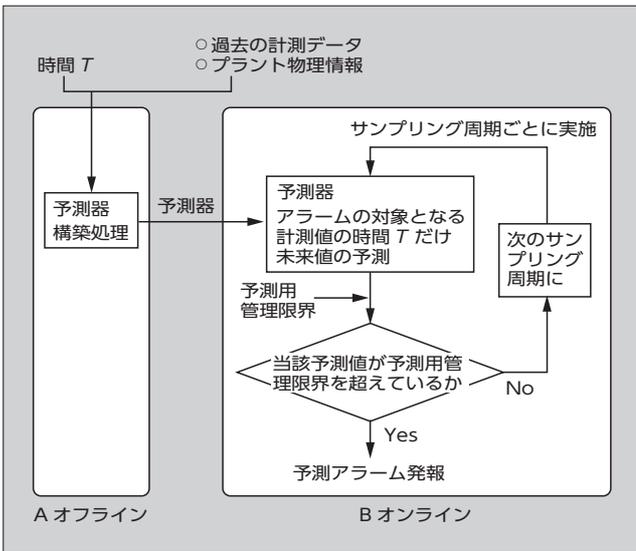


図3 予測器による異常兆候予測の枠組み

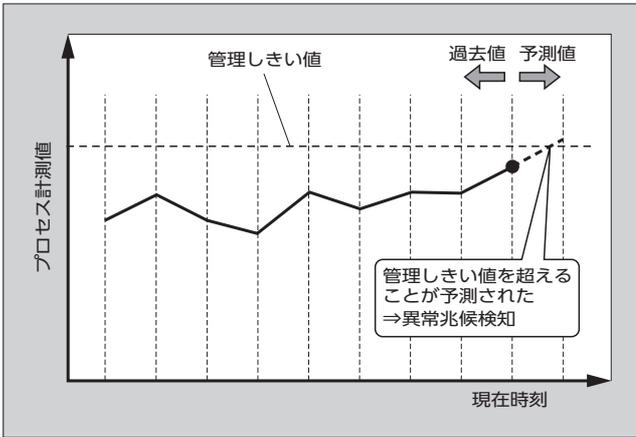


図4 予測器による異常兆候予測の概念図

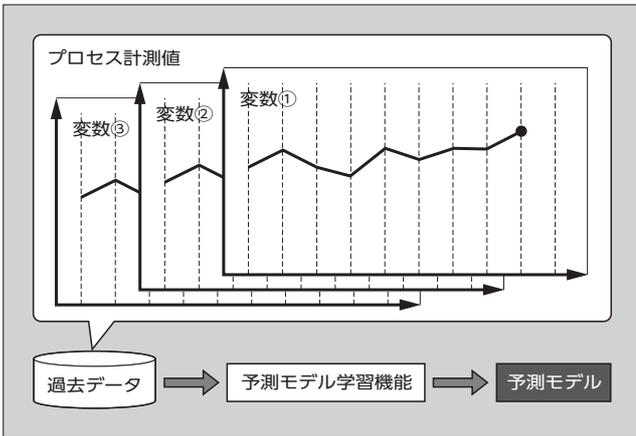


図5 予測器の学習

3.3 異常兆候予測の精度評価と管理限界の設定

3.2節で述べたように管理限界での異常兆候予測による各時刻（1分周期ごと）の異常判定結果は、監視変数予測値の管理限界からの逸脱の有無と、それに対応する実績値の逸脱の有無により、表1のいずれかに分類される。逸脱

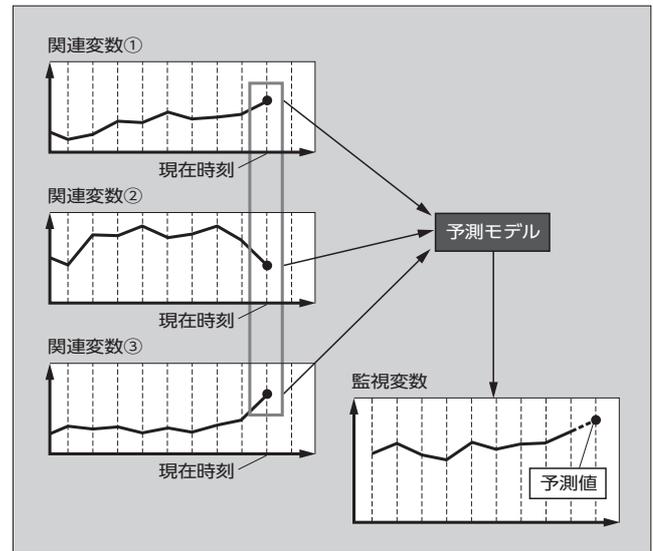


図6 予測器による予測

表1 異常兆候予測の逸脱の有無

項目		実績	
		正常	異常
予測	異常	③誤検知	④正しい予測
	正常	①正しい予測	②検知漏れ

しない場合を正常、逸脱した場合を異常としている。

①と④が正しい予測であり、②は検知漏れ、③は誤検知である。

一般に、次の二つの指標の式(1)と式(2)を使って異常兆候予測の精度を評価する。この二つの指標はトレードオフの関係にあるため、一方を小さくすると他方が大きくなる。例えば、誤検知が増えても検知漏れをなくすなどの安全サイドの判断になるような最適化を図る。

$$\text{検知漏れ率} = \frac{②}{(② + ④)} \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{誤検知率} = \frac{③}{(③ + ④)} \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{予測正解率} = \frac{④}{(② + ④)} \dots\dots\dots(3)$$

実績値と予測値は図7に示すように正の相関がある。す

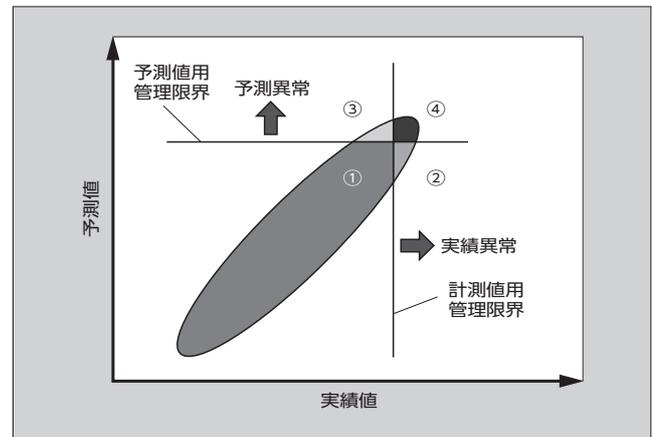


図7 実績値と予測値の散布図による評価（模式図）

ると、実績値に対する管理限界（実績値用管理限界）は図の縦線、予測値に対する管理限界（予測値用管理限界）は図の横線に対応する。

ここで、予測値用管理限界を変化させると①～④の値が変化し、誤検知率や検知漏れ率も変化する。したがって、過去の監視変数の実績値とそれに対応する予測値があれば、予測値用管理限界を変化させ、これに連動して図7に示すように散布図上で①～④の数値や漏れ検知率、誤検知率を表示することで適切な予測値用管理限界をユーザーが定めることができる。

3.4 予測器の構成

ここで、予測器の構成方法について述べる。プラント運転支援システムでは、予測器として機械学習を使った予測モデルを用いた（表2）。

(1) PLS（部分的最小二乗法）

プラントの監視対象の変数に対して、他の計測変数との関係を、運転データに基づき部分的最小二乗法（PLS：Partial Least Squares）でモデルを作成した。PLSは、入力変数同士に相関がある場合にも、それらを潜在変数と呼ばれる中間変数に集約した上で出力変数を表現する。そのため、多重共線性^(注)がある場合でも、適切なモデルが得られる。

また、PLSでは入力変数が多くても、重回帰分析モデルのように事前分析で入力変数を絞り込む必要がなく、そのまま全変数を用いて簡単にモデルを作ることができる。そのため、モデル作成の手間を非常に軽減できる。このようにPLSは、特に入力変数が多いプロセスや多重共線性を持つプロセスを対象とする場合に非常に有用である。

PLSモデルによる監視対象変数の推定値は、式(4)で得られる。

$$\hat{y} = Q(W^T P)^{-1} W^T x \dots\dots\dots(4)$$

- \hat{y} : 監視対象変数の推定値（スカラー）
- x : モデルへの入力変数ベクトル
- W : 重み行列
- W^T : 行列 W の転置行列
- P, Q : 入力変数と推定値に関する係数行列

表2 予測モデルの方式

方式	特徴
PLS (部分的最小二乗法)	監視変数と監視変数に関連する変数の相関がある対象に向く。 ○ バイアスがある監視変数の場合は差分予測を使用する。 ○ 監視変数に関連する変数の過去値との相関がある場合はダイナミック化を使用する。
LW-PLS (局所部分的最小二乗法)	非線形要素、特性変動に対応が可能である。
ARMA (自己回帰移動平均法)	監視変数の変化傾向を捉えることに向く。

なお、通常の PLS モデルでは、入力変数の現在値に対する出力変数の現在値を推定する。これに対して、今回のモデルは予測器として使用するの、入力変数の現在値に対する出力変数の将来の値を推定する。さらに、将来の値を推定するときに、現在値だけでなく過去値の影響も考慮したい。そこで、プラント運転支援システムでは、入力変数の過去値と出力変数の現在値から推定を行うモデルを構築している。さらに、PLS モデルの入力変数を多重化して、入力変数の過去値（5 分前、10 分前、15 分前、…）と出力変数の現在値との関係をモデル化している（図8）。

(2) LW-PLS（局所部分的最小二乗法）

局所部分的最小二乗法（LW-PLS⁽⁴⁾：Locally-Weighted Partial Least Squares）は、事前に予測モデルを構築するのではなく、プラントの特性変動に追従し、現在値と類似の過去データから予測モデルの再構築を繰り返すことのできる非線形 PLS の一つである。

(3) ARMA（自己回帰移動平均法）

自己回帰移動平均法（ARMA：Autoregressive Moving Average）は、予測対象の複数の過去値から予測値を求める方法なので、予測値の変化傾向を捉える場合に向いている。

3.5 アンサンブル機能

一つの予測モデルを使用し続けると、プラントの経年変化などにより、予測精度が下がる。また、プラントに特性変動がある場合は、一つの予測モデルだけでカバーすることは難しくなる。

これらの課題に対応するために、プラント運転支援システムでは複数の予測モデルを用いて同時に予測を行い、それらの予測値を総合することによって予測精度を向上させる仕組みを備えている。この仕組みをアンサンブルと呼んでいる。アンサンブルは、複数の予測モデルの予測値の重み付き平均を求めることにより、最終的な予測値を得る。

重みは、各予測モデルの予測誤差の成績に応じて自動調

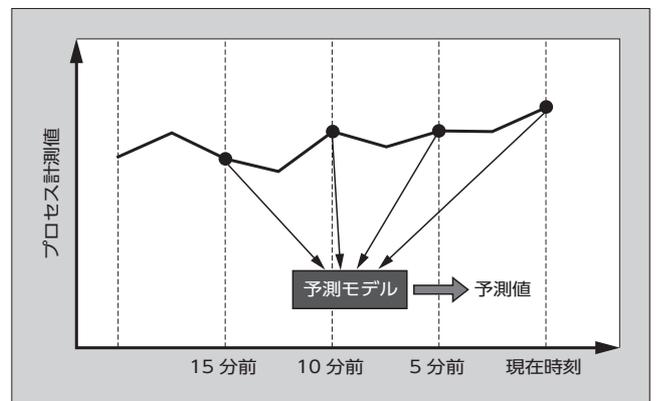


図8 多重化および過去値を用いた予測モデル

〈注〉多重共線性：入力変数の間に強い相関関係があると、一般的な重回帰分析では適切なモデルが構築できないことをいう。

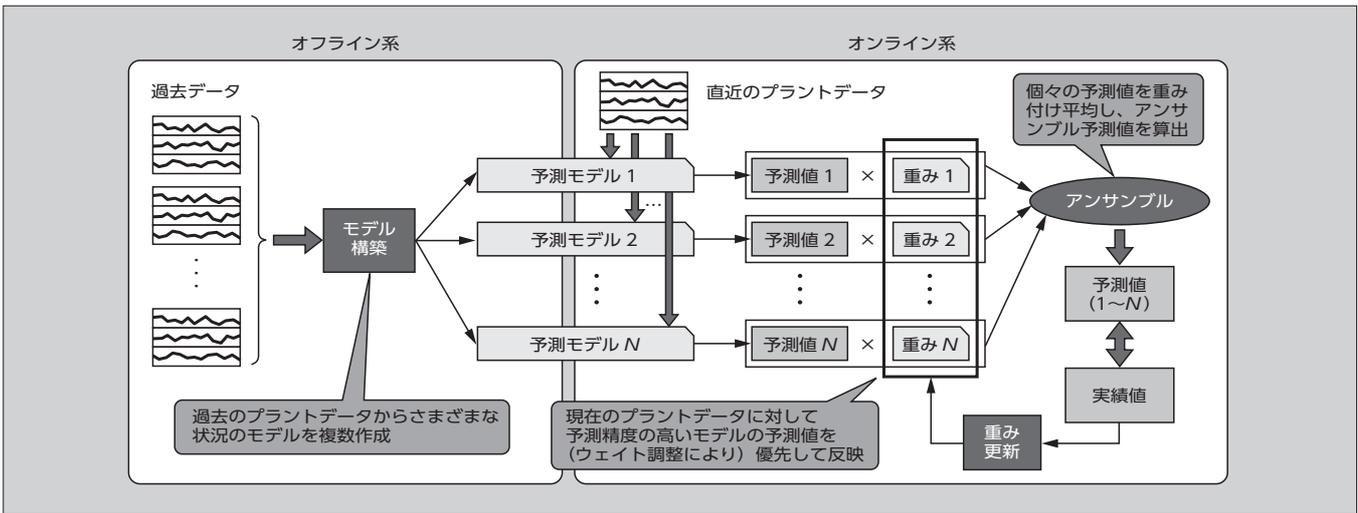


図9 アンサンブル機能

整され、予測精度の高い予測モデルが優先されるようになる(図9)。

また、プラント運転支援システムでは、PLSモデルを一定期間ごとに自動生成してアンサンブルに加える仕組みもあり、これにより、経年変化に応じてモデルを再構築し、精度の維持を図っている。

3.6 評価実験結果

あるプラントデータで一定の期間を学習期間として、その間のデータを使って予測器(PLSモデル)を作成した。学習期間とは別の期間を評価期間として、設定した管理限界に基づいて異常兆候検知の精度を評価した。

その結果、予測正解率(式(3))は83%と検知漏れ率(式(1))は17%であった。

4 回避手順指示システム

4.1 回避手順指示システムによる運転支援

多くのプラント運転の現場では、異常を検知したらオペレーターは経験に基づき異常を回避する操作をしている。一方で、プラントの信頼性の向上と自動化が進み、異常を経験する機会が減っていることや経験豊富なオペレーターが減少しているという課題がある。

この課題を解決するため、プラント運転支援システムでは回避操作の手順(回避手順)を自動的に表示する機能も実装している。

4.2 回避手順指示システムの機能構成

プラント運転支援システムは、オフライン(エンジニアリング)機能とオンライン(運転支援)機能とで構成している(図10)。

(1) オフライン(エンジニアリング)機能

オフライン機能は、過去の操業データから対象とする異常の発生と関連の強い操作データを抽出し、回避手順をデータベースとして蓄積するエンジニアリング機能である。

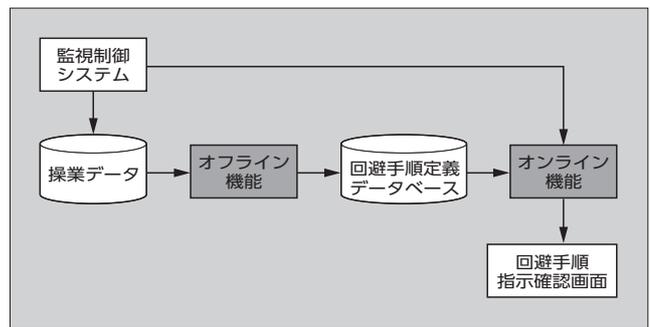


図10 回避手順指示システムの機能構成

オフライン機能の概略フローを図11に示す。

- (a) 過去の操業データから異常発生時点のデータを切り出す。
- (b) 操作ログを検索して異常を回避し、復旧するために操作した履歴を抽出する。
- (c) ユーザーに提示し、確認後、当該の操作ログを回避手順情報として登録する。

オフライン機能においてユーザーに提示する画面のイ

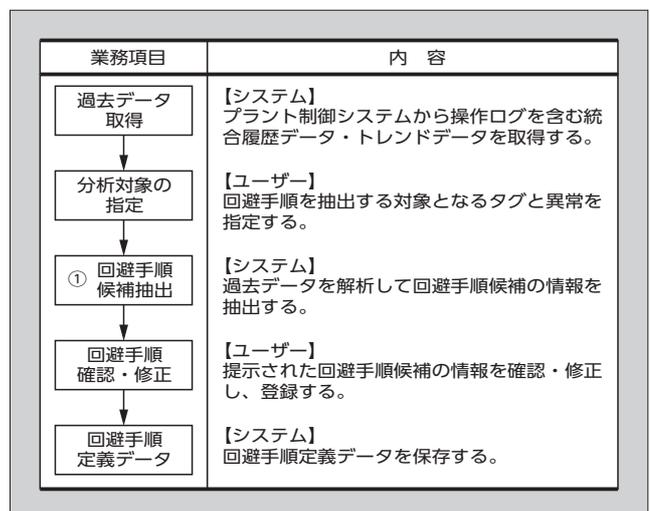


図11 オフライン機能フロー

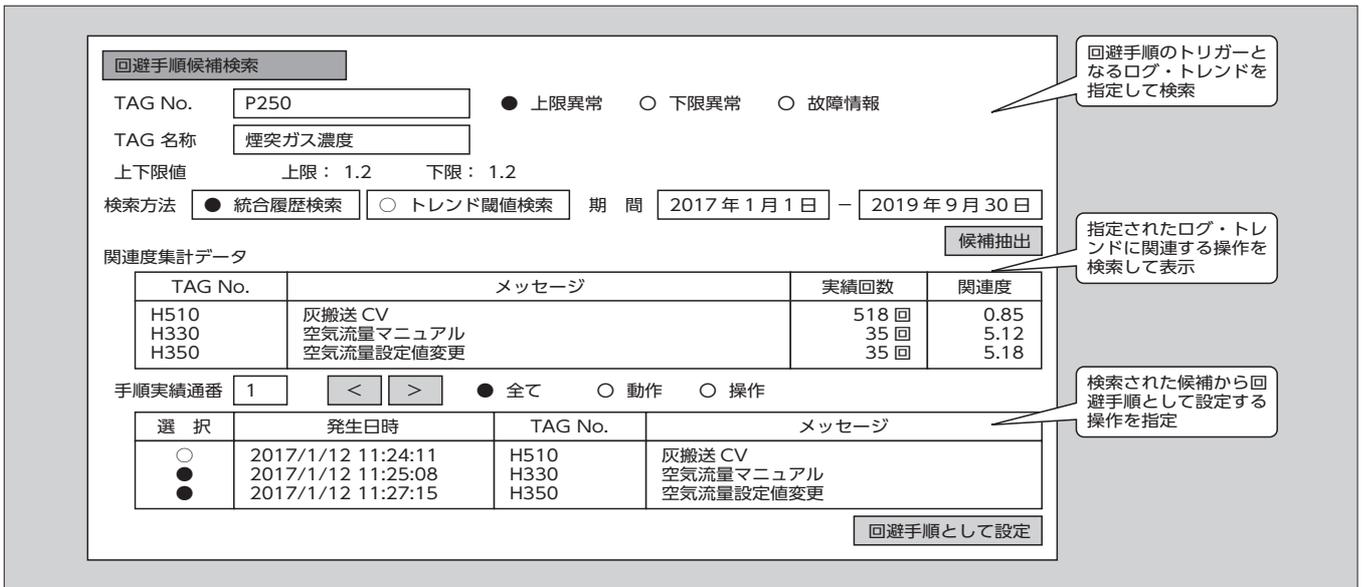


図 12 オフライン機能画面

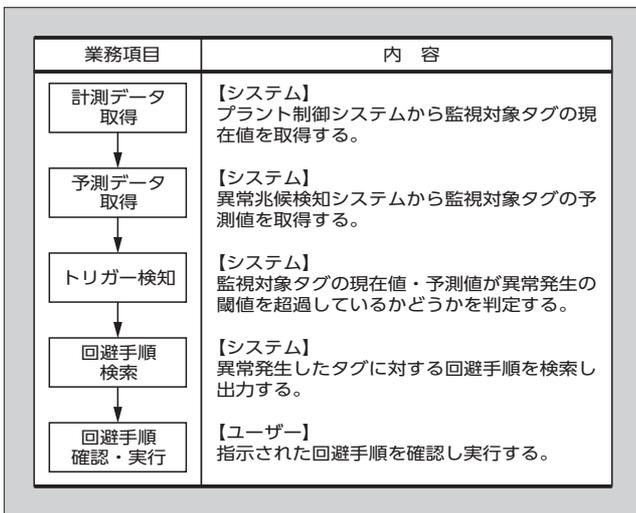


図 13 オンライン機能フロー

メッセージを図 12 に示す。

(2) オンライン（運転支援）機能

オンライン機能は、プラント運転中の異常の兆候を監視し、異常の兆候を検知すると回避手順データベースを参照して該当する回避手順を検索し、ユーザーに通知する運転支援機能である。オンライン機能の概略フローを図 13 に示す。

- (a) 異常発生を検知する。
- (b) 回避手順定義データベースを検索して、定義されている回避手順を提示する。

オンライン機能においてユーザーに提示する画面を図 14 に示す。

4.3 エンジニアリング精度向上の技術

ここでは、回避手順候補抽出機能（図 11 ①）を実現する上で課題となった事項と、その対策を示す。

(1) 課 題

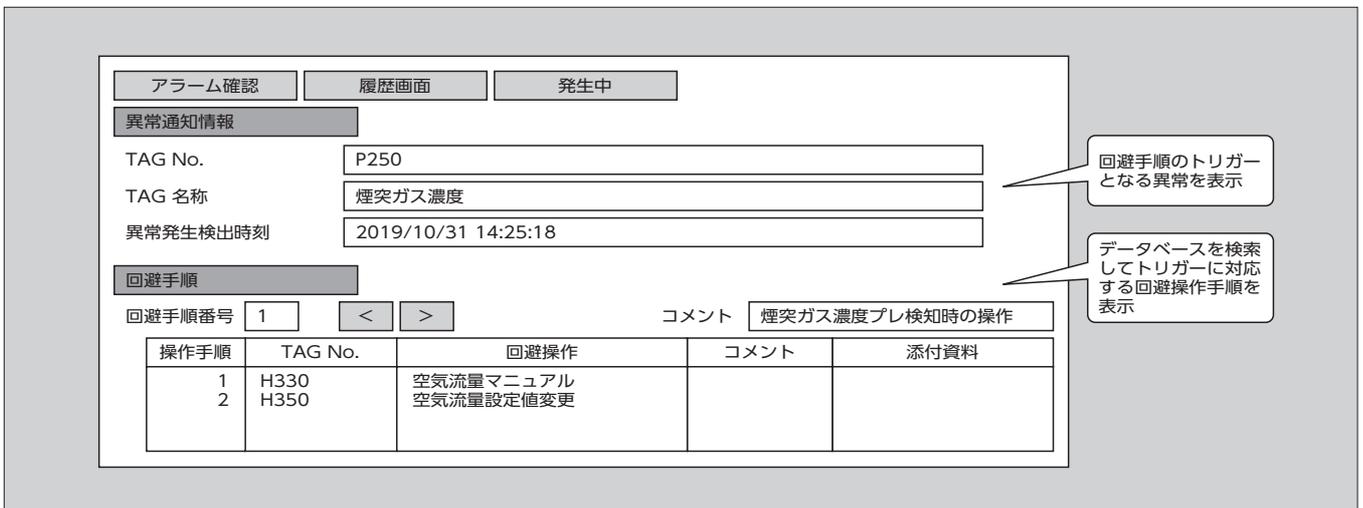


図 14 オンライン機能画面

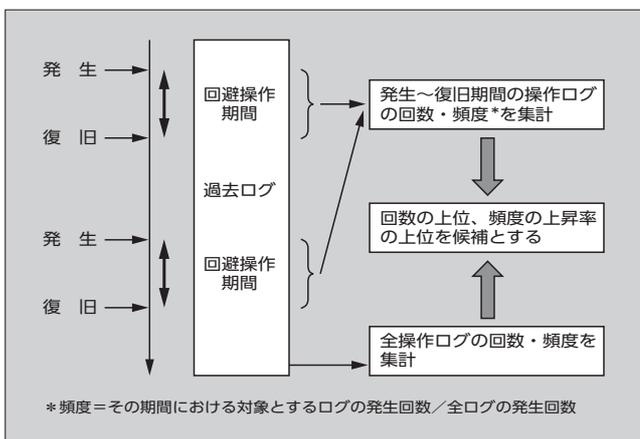


図 15 エンジニアリング精度向上の技術

一般にプラントの監視制御システムにおいては、多種多様のログが同時に発生する。オフライン機能（エンジニアリング）において過去の運転データを解析する際に、対象とする異常に関連する操作だけを抽出できるようにすることが必要であった。

(2) 対策

異常発生時には、平常時に比べて特定の運転ログが高頻度で出現することに着目した。この傾向を利用して、図 15 に示すように対象とする異常と各運転ログの関連度を算出し、関連度で運転ログをフィルタリングして回避手順の候補を抽出する技術を開発した。

⑤ あとがき

異常兆候を検知し回避手順を示すプラント運転支援システムについて述べた。

異常を事前に検知し、その回避手順まで指示することで非熟練オペレーターによる安定・安全操業、およびオペレーターの負荷低減に貢献できると考えている。

近年、特に高まっているプラント設備の安全かつ効率的な運転に対する操業支援ニーズに対して、プラント運転支援システムを監視制御システムと連携することにより、プ

ラント設備の安全性の向上と高効率化への貢献を図っていく所存である。

参考文献

- (1) 松井哲郎ほか. プラント制御におけるデータ分析技術. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.1, p.33-37.
- (2) 村上賢哉ほか. アラーム予測モデルの精度評価方式の開発. 2014, 電気学会全国大会.
- (3) V. Venkatasubramanian. et al. “A review of process fault detection and diagnosis Part I : Quantitative model-based methods, Part II : Qualitative models and search strategies, Part III : Process history based methods.”. Computers and Chemical Engineering, 2003, vol.27, p.293-346.
- (4) 加納学ほか. プロセスケモメトリクスによる統計的プロセス管理. システム/制御/情報, 2004, vol.48, no.5, p.165-170.



鳴海 克則

鉄鋼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 インダストリー事業本部オートメーション事業部技術第一部担当課長。



鈴木 聡

情報・制御システムの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部デジタルイノベーション研究所 AI ソリューションセンター AI 研究部主任。計測自動制御学会会員、人工知能学会会員。



館山 淳也

情報・制御システムの開発に従事。現在、富士電機株式会社パワエレシステム インダストリー事業本部開発統括部 HMI 開発部主任。



監視制御システムの設計工期短縮と品質向上を実現する エンジニアリング支援ツール「HEART」

“HEART” Engineering Support Tool for Shortening Design Periods and Improving the Quality of Monitoring and Control Systems

北村 純郎 KITAMURA, Sumio

加藤 邦昭 KATO, Kuniaki

吉野 稔 YOSHINO, Minoru

昨今、経験を積んだレベルの高いエンジニアが高齢化により引退することに加えて、国外においては離職率が高いため経験が浅いエンジニアの起用が必要となり、エンジニアリングそのものの容易化が求められている。エンジニアリング支援ツール「HEART」は、制御機能仕様書から制御ソフトウェアを自動作成し、エンジニアリングの各フェーズを圧縮し、大幅なリードタイムの短縮と品質向上に貢献する。さらに、記述に必要な各種シンボルなどを備え、使い慣れた汎用 OA ソフトウェアを用いて分かりやすい仕様書表現が容易に実現できる。

In recent years, many high-level experienced engineers in Japan have reached their retirement age, while those overseas have often succumbed to high turnover rates. As a result, it has been necessary to recruit inexperienced engineers and simplify engineering. “HEART” is an engineering support tool that automatically creates control software using control function specifications. It streamlines each phase of engineering to significantly reduce lead time and improve quality. Furthermore, it provides various symbols necessary for documentation and can help create easy-to-understand specifications using familiar general-purpose OA software.

① まえがき

最近の IoT (Internet of Things) および AI の急速な進歩によって、工場の生産現場の制御システムは、お客さまの多様なニーズに迅速かつ最適に応えるため、SCM (Supply Chain Management)、MES (Manufacturing Execution System) に IoT および AI 技術を取り入れた形態に移行している。高付加価値かつ高品質の製品を短納期、高効率、低コスト、省エネルギー、省資源で生産することが必要である。この生産現場を制御するアプリケーションソフトウェア (制御ソフトウェア) はさらに高度化し、そのエンジニアリング業務は、より一層複雑化している。

一方で、それらを企画・設計・製作・試験する上で国内では、高度成長期に新設プラントの建設に携わった経験豊富な高レベルの国内のエンジニアが高齢化により多くが引退し、代わりに採用されたエンジニアは経験が浅い。国外では、離職率が高く、エンジニアの多数は若年層で経験が浅い。よって、最近のエンジニアリング支援ツールは、経験の浅いエンジニアでも容易に、高度かつ高品質な制御ソフトウェアが高効率、短納期で設計することが必要である。

本稿では、このような要件を満足するエンジニアリング環境としてエンドユーザーおよびエンジニアリング会社に注目されているエンジニアリング支援ツール「HEART (High Efficient Advanced engineeRing Tool)」のコンセプト、特徴、機能および以前より HEART をご使用いただいている雪印メグミルク株式会社における活用例について述べる。

② コンセプト

HEART は、顧客の要求に合わせて、進化するエンジニアリング支援ツールである。製品コンセプトを次に示す。

- (a) エンジニアリングの容易化の実現
- (b) エンジニアリングの高効率化の実現
- (c) ソフトウェアの高品質化の実現

③ 特徴

HEART は次に示す特徴により、エンジニアが容易にエンジニアリングおよびメンテナンスができる環境を提供している。

(1) 顧客表現によるエンジニアリング (仕様表現)

HEART は、従来のコントローラプログラムロードで使用されていたラダーダイアグラムやファンクションブロックダイアグラム、さらにはメーカー独自の表現形式や定義体ではなく、計装フローや方案フローなどの制御機能仕様書に記述された内容を使ってエンジニアリングを行うことができる。これにより、制御ソフトウェアが分かりやすく表現でき、プログラムロードになじみのないエンジニアでも使いやすくなっている (図 1)。

(2) 制御機能仕様書から制御ソフトウェアの自動作成 (自動設計)

HEART は Excel^(注1) や Visio^(注2) を使って作成された制御機能仕様書を制御ソフトウェアに自動で変換できるので、従来 6 フェーズで行っていたエンジニアリングを 3 フェーズに

〈注 1〉 Excel : Microsoft corporation の商標または登録商標

〈注 2〉 Visio : Microsoft corporation の商標または登録商標

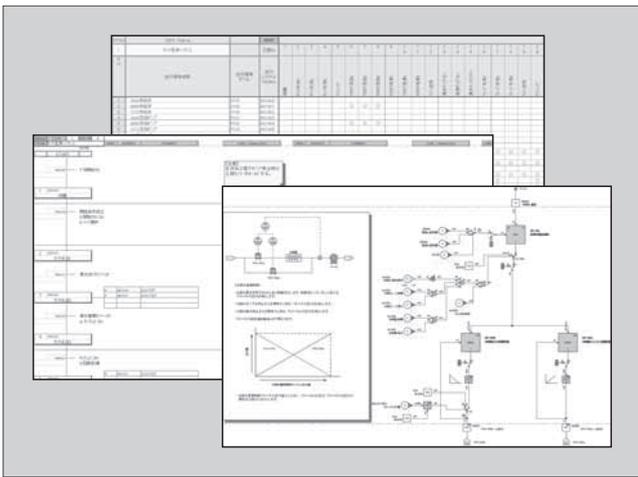


図1 顧客表現による仕様記述例

圧縮することができる(図2)。これにより、エンジニアリング全体のリードタイムを短縮し、高効率で高品質なエンジニアリングが可能になる。

(3) 汎用ソフトウェア(OAソフトウェア)主体のエンジニアリング

HEARTは、汎用の統合OAソフトウェアである、Microsoft社のExcelやVisioを用いてエンジニアリングを行うことができる。HEARTが持つ編集機能に加え、ExcelやVisio自体が持つ優れた編集機能も使用できるため、独自の専用エンジニアリング支援ツールなどと比べ、効率的なエンジニアリングを行うことができる。また、使い慣れた汎用ソフトウェアの採用により導入時のエンジニアへの作業負担も軽減できる。さらに制御機能仕様書の記述に必要な各種シンボルを備え、ドラッグ&ドロップなどの簡単な操作により容易なエンジニアリング環境を提供する。

(4) 対象コントローラに依存しないエンジニアリング

HEARTは新旧のPLC(Programmable Logic

Controller)から分散型制御システム(DCS:Distributed Control System)コントローラまでサポートしている。これにより、一つの制御機能仕様書を各種コントローラ用に自動変換するので、既設設備を更新するときのマイグレーションにも大いに役に立つ(図3)。

(5) 高品質な制御ソフトウェア(制御機能仕様書=制御ソフトウェア)

制御機能仕様書から制御ソフトウェアに自動で変換できるので、従来のような制御機能仕様書から制御ソフトウェアへの展開時の人による誤りを防ぐことができる。また、試験時に制御ソフトウェアだけを修正し制御機能仕様書の修正を忘れることなどがなくなり、制御機能仕様書と制御ソフトウェアが一致した状態が維持できる(図2)。

(6) 設計・試験支援機能

エンジニアにとって負担となっていた異常時にシーケンスの一時停止、強制終了、指定ステップへのジャンプ、異常時の出力状態(全出力OFF、全出力ON、無処理、出力個々の状態指定)処理などの作業が、Excelの表を用いて容易に作成できる。

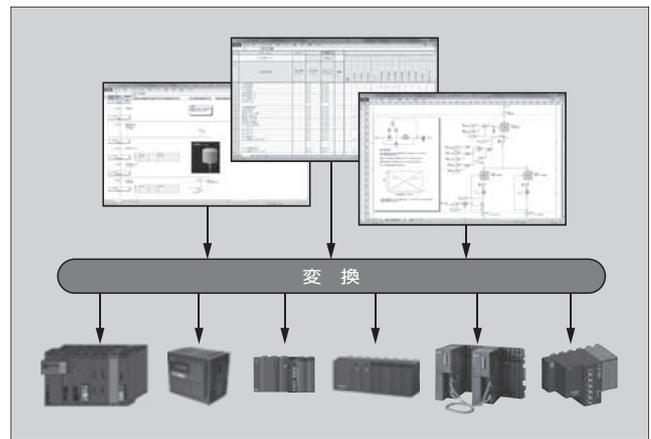


図3 対象コントローラに依存しないエンジニアリング

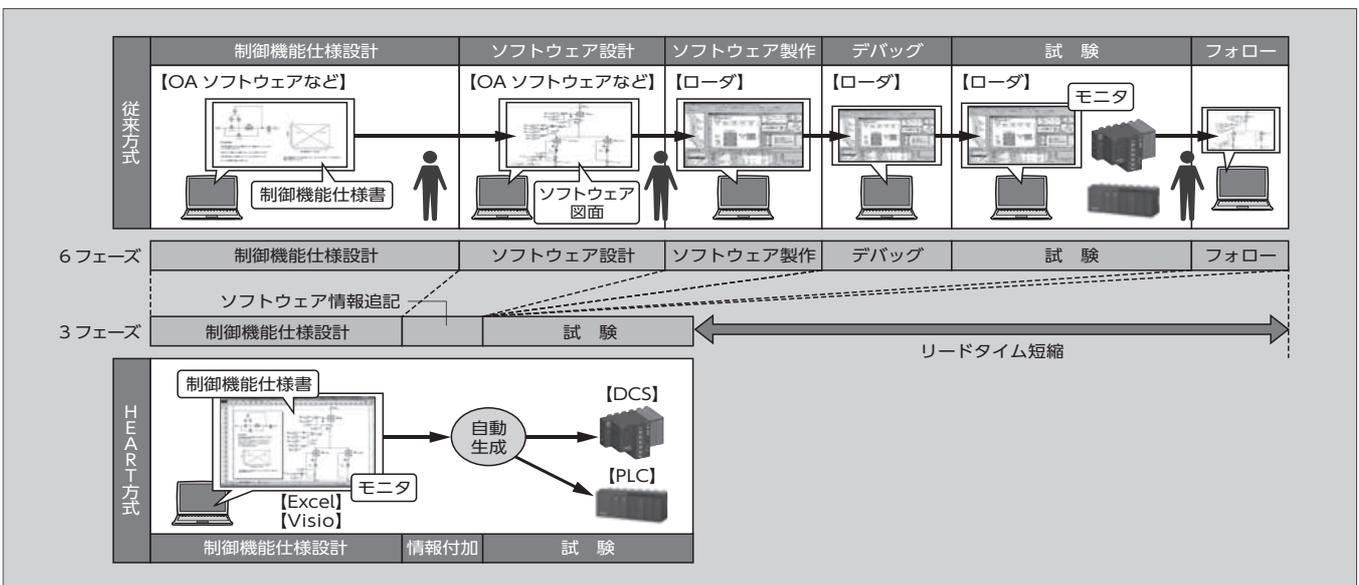


図2 エンジニアリング方式の比較

ステーション内に信号のラベルやコメントを一元管理するリストを持っている。設計時に、Excel や Visio 上の制御機能仕様書にそのリストからドラッグ＆ドロップで各種信号を配置できる。手入力に比べて容易で効率よく作業ができる上、同じ信号であっても使用箇所ごとに異なるラベルやコメントを入力してしまうミスを抑えることができる。

数十枚、数百枚の制御機能仕様書となった場合に、人手で信号の使用先と作成元を表記するのは、膨大な時間と労力が必要である。しかし、制御ソフトウェアで使用される機能のように HEART では、信号間の参照関係を制御機能仕様書上で自動的に生成できる。紙で印刷した際には、該当の信号の使用先または作成元のページとページ内の位置の表記により確認することができる。さらに PC 上では、同一信号を使用しているページの該当箇所間を自動で切替表示を行うことで、設計・試験または納入後のトラブル時の迅速な調査が可能になる。

(7) オンラインモニタ・設備運転条件の監視

コントローラ上で動作している制御ソフトウェアの実行状態を制御機能仕様書上でモニタし、色替わりや数値表示により、各状態の確認ができる点を特徴としている。従来は、制御ソフトウェアを該当コントローラ専用の支援ツール上でモニタし、制御機能仕様書は別途見比べながらデバッグを行っていたが、制御機能仕様書自体でモニタを行うため、見比べる必要がなく即時に確認できる。

また、作業中に何らかのトラブルが発生した際、オペレータステーション上に HEART の該当シートを呼び出し、モニタすることで、不具合箇所の特定を容易に行うことができる。

(8) 国際標準規格 (IEC)・オープン言語の採用

HEART システムで自動変換した制御ソフトウェアは国際標準規格 (IEC 61131-3) の言語を使っているので、オープン性が確保できている。

4 機能

4.1 既存機能

HEART には、用途に合わせ Visio 上で動作する「HEART-BELIEVE」、Excel 上で動作する「HEART-ESPER」、「HEART-SELECT」の三つのツールを用意している。

各ツールともに、汎用の OA ソフトウェア上で動作し、作成したファイルは Excel や Visio のファイル形式であるため、制御機能仕様書としての補足を目的とした吹き出しコメントや写真・イラストなどの画像、グラフなどの貼り付けができ、分かりやすい制御機能仕様書の作成が可能である。

(1) 計装ループ

HEART-BELIEVE を使い、PID 調節計、指示警報、積算計などの計装ループのエンジニアリングを行うことができる (図 4)。

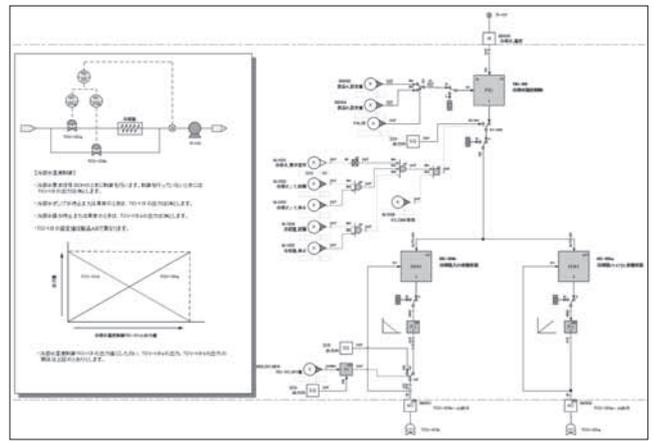


図 4 計装ループ作成例

(2) IBD (Interlock Block Diagram)

HEART-BELIEVE を使い、IBD (インターロックブロックダイヤグラム) のエンジニアリングを行うことができる (図 5)。

(3) SFC (Sequential Function Chart)

HEART-ESPER を使い、SFC のステップの流れとステップごとの出力、ステップを進めるための移行条件ロジックが作成できる。

HEART-ESPER は SFC として単独でシーケンスを作成することができる。さらに、HEART-SELECT と連携し、ステップの流れは SFC で表現し、各ステップでの出力は後述のタイムチャート表現で記述することもできる (図 6)。

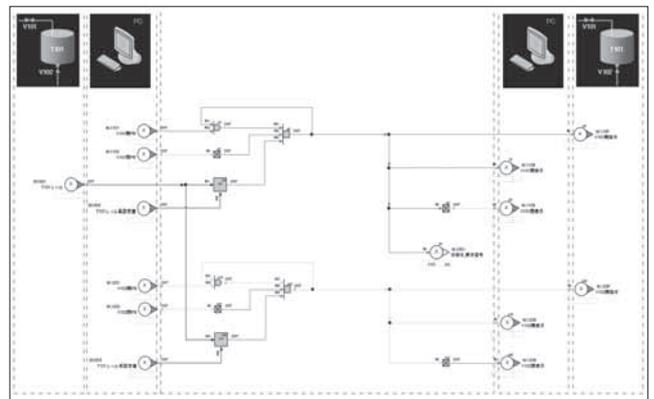


図 5 IBD 作成例

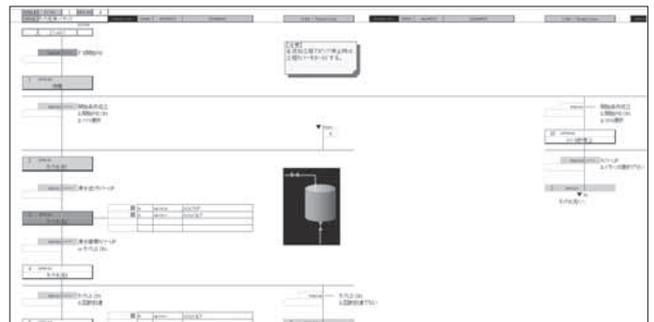


図 6 SFC 作成例

表現で容易に制御ソフトウェアを作成できることから、社内の情報共有も円滑に行うことができ、技術者教育にも活用できる。

(5) 今後

今回、新機能の活用により運転方案としての表現と制御ソフトウェア展開が強化され、エンジニアリング効率を大幅に向上できた。今後もより視覚的で操作性の良さを追求するとともに全体の構造設計に効果のある機能など、さらなる進化が期待できる。また、富士電機が乳業メーカー特有の制御スキルを蓄積していくことで、両社のエンジニアリング部門が持続的に成長していけるものとする。

6 あとがき

監視制御システムの設計工期短縮と品質向上を実現するエンジニアリング支援ツール「HEART」について述べた。今後も時代の要請およびユーザーの要求に迅速に対応しながら、経験の浅いエンジニアでも容易に、高度かつ高品質な制御ソフトウェアが高効率、短納期で設計できるエンジニアリング支援ツールの進化を常に行い、最適な価値を提供していく所存である。

参考文献

- (1) シーケンス制御の技術動向. 電気学会技術報告. 2000, no.781, p.42-44.
- (2) 吉野稔ほか. OAソフトウェアを用いたエンジニアリング支

援ツール. 計装. 2001, vol.44, no.7, p.65-70.

- (3) 吉野稔ほか. 生産性と品質を向上させるエンジニアリング支援ツール. 富士時報. 2001, vol.74, no.9, p.511-516.
- (4) 吉野稔ほか. エンジニアリング革命ツール「HEARTシリーズ」. 富士時報. 2002, vol.75, no.12, p.671-676.
- (5) 吉野稔ほか. 生産性・品質向上のためのエンジニアリング支援システム. 富士時報. 2006, vol.79, no.3, p.270-273.



北村 純郎

計装制御システムのシステム設計・開発企画業務に従事。現在、富士電機株式会社パワエレシステム エネルギー事業本部エンジニアリング統括部プラントシステムセンターオートメーションシステム技術部主査。



加藤 邦昭

雪印メグミルク株式会社生産技術部設備技術グループ担当課長。



吉野 稔

プラントシステムの企画・設計及び開発企画業務に従事。現在、富士電機株式会社パワエレシステム エネルギー事業本部エンジニアリング統括部プラントシステムセンター長。電気学会会員。



安定操業を実現するセメントプラント監視制御パッケージ

Cement Plant Monitoring and Control Package for Stabilizing Operations

梅基 一生 Umemoto, Kazuo

富士電機は、世界中の顧客にセメントプラント監視制御システムを数多く納入してきた。リーズナブルな価格でシステムを提供できるようにするため、これまでに納入したシステムを整理してセメントプラント監視制御パッケージを完成した。本パッケージを適用することにより、受変電設備や駆動装置、制御機器、計測機器などを組み合わせて、顧客ごとに最適なソリューションをワンストップで提供できる。これは、最適で信頼性が高く、安定した操業を実現する監視制御システムを短期間で立ち上げることに伴い、顧客にとっても価値のあるものとなっている。

Fuji Electric has been providing customers around the world with a number of cement plant monitoring and control systems. In order to provide these systems at a reasonable price, we have developed a cement plant monitoring and control package by consolidating features from existing systems that we have delivered to customers. Deployment of this package enables us to provide optimized one-stop solutions suitable for each customer through combination of equipment, including substation equipment, drive equipment, control systems and measuring instruments. This allows customers to rapidly build monitoring and control systems that achieve optimal, reliable and stable operations, providing them with value.

1 まえがき

富士電機は、世界中のお客さまにセメントプラント監視制御システムを数多く納入してきた。国内外の新設工場向けに信頼性が高く、しかもリーズナブルな価格でシステムを提供できるようにするため、これまでに納入したシステムを整理し、制御機能パッケージを完成した。本稿ではこのセメントプラント監視制御パッケージの概要を説明し、

お客さまの課題に対するソリューションについて述べる。

2 セメントプラント監視制御パッケージ

2.1 開発思想

セメントプラントにおける監視制御機器や計測機器、センサ、モータなどの構成を図1に示す。一般に、セメントプラント監視制御システムは、案件ごとに顧客と綿密に仕

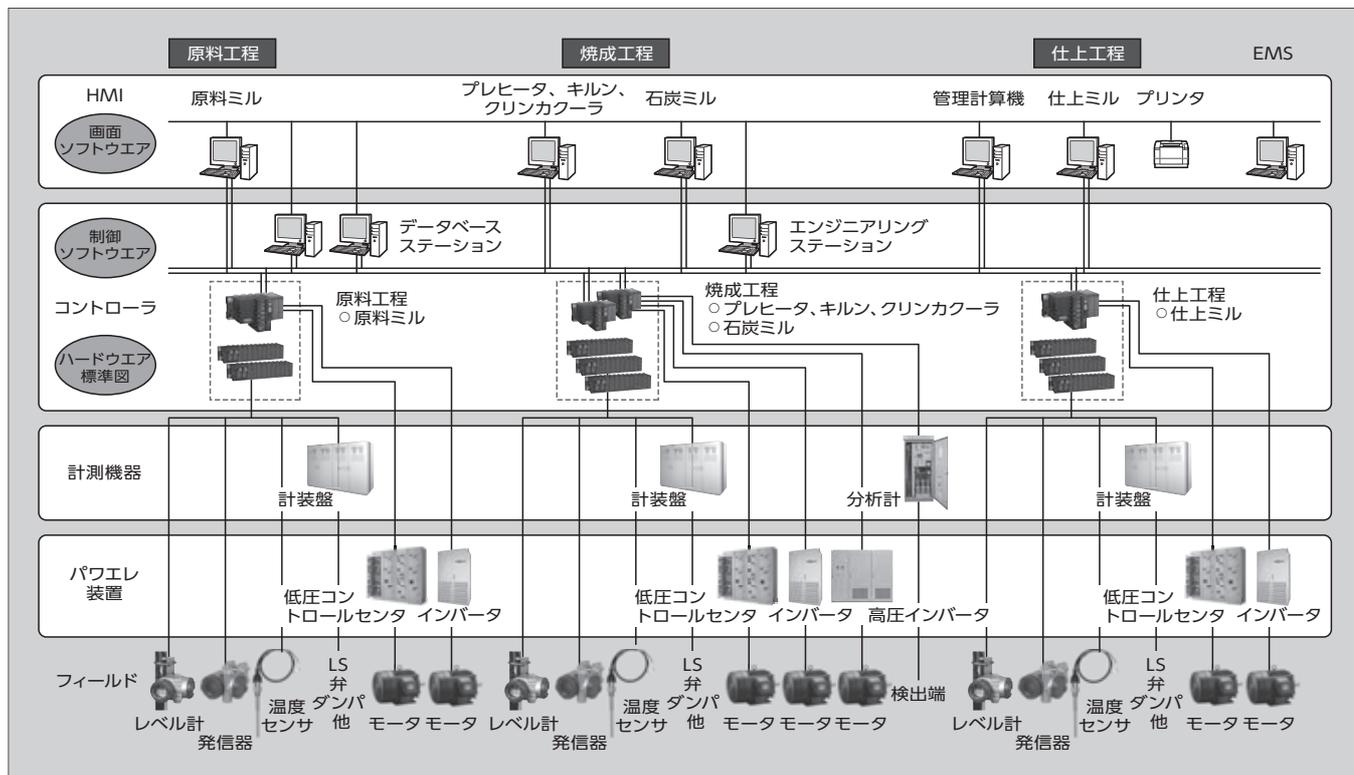


図1 セメントプラント監視制御システムの構成図

様を確認した後、詳細設計や制御ソフトウェア製作、試験を行ったのち納入となる。このような手順であったため、受注から納入までのリードタイムが長かった。また、設計者や試験者にはプラントを熟知していることが求められ、エンジニアリング初級者ではハードルが高いものとなっていた。

そこで、セメントプラント向けの受変電設備やモータをはじめとする駆動装置や制御機器、計測機器などの製品を組み合わせ、顧客ごとに最適なソリューションをワンストップで提供できるようにするため、セメントプラント監視制御パッケージを開発した。

特徴は、次のとおりである。

- (a) ハードウェアとソフトウェアのオールインパッケージ
- (b) セメントプラントの監視制御に必要な機能を標準化
- (c) カスタマイズが容易
- (d) 富士電機の経験とノウハウが凝縮

さらに本パッケージを適用すると、ユーザーごとに最適で、信頼性が高く、安定した操業を実現する監視制御システムを短期間で立ち上げることができる。

2.2 概要

従来、セメントプラントにおける監視制御システムは設備ごとに異なっていた。また、このプラントには監視制御を行わなければならない多数の項目がある。そこで、セメントプラント監視制御パッケージでは、顧客ごとの各設備に必要な監視制御項目をあらかじめ用意してあるファンクションブロックやテンプレートなどから選択し、それを組み合わせてエンジニアリングを行えるようにしている。このような方法であれば、実際の経験が少ないエンジニアでも容易にシステムが構築できる。監視制御項目のエンジニアリングだけでなく、プラント画面の仕様やハードウェア

の仕様もテンプレートから選択できる。

実際には顧客が異なっても共通的なものが数多いものの、顧客ごとに異なる監視制御内容もある。このような差異を吸収するため、次の点に留意して開発した。

- (a) 特定のユーザーや機械設備の違いによるシステムへの影響を最小限に抑えたものであること
- (b) ソフトウェアとハードウェアは、ともに標準機能を組み合わせることで最適なシステムが構築できること
- (c) プラントエンジニアリングの経験が少ない国内外のパートナーでもエンジニアリングが可能であること

図2にセメントプラント監視制御パッケージの概念図を示す。セメントプラント監視制御パッケージは、大きくソフトウェア監視制御パッケージとハードウェア監視制御パッケージに分けることができる。これらの必要な機能を選択して組み合わせることで、実際の設備に合ったシステムが構築できる。次節以降にこの概略機能を説明する。

2.3 ソフトウェア監視制御パッケージ

ソフトウェア監視制御パッケージは主として次の三つを提供している

(1) ファンクションブロック

パッケージの基礎となる制御部分である。設備のグループ起動やグループ停止や、ならびに可逆モータの操作や表示などセメントプラントで必要となる基本機能をファンクションブロックとして用意している。エンジニアは、これらのファンクションブロックを選択して組み合わせることで制御ソフトウェアを完成させることができる。また、アナログ制御においてもPID制御や比率制御、パルス積算といった機能も標準で備えている。

(2) ソフトウェアテンプレート

前述したファンクションブロックを組み合わせることでセメント

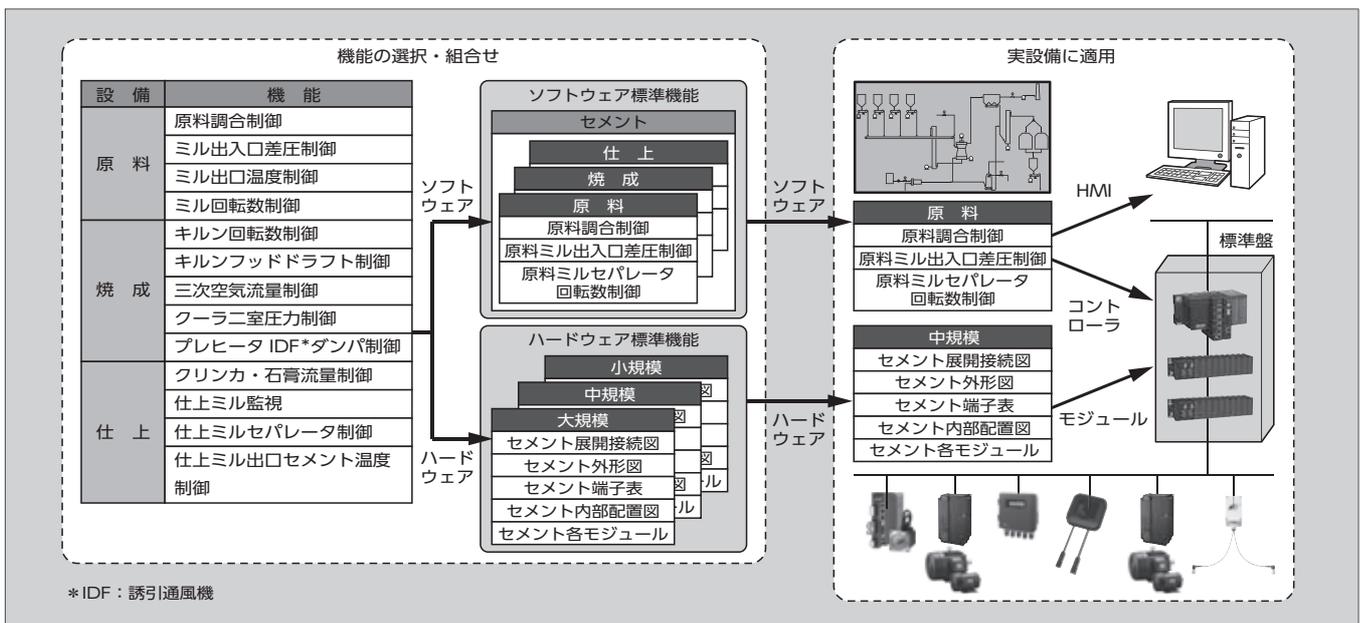


図2 セメントプラント監視制御パッケージの概念図

トプラント向けに必要な制御が行えるよう、あらかじめソフトウェアテンプレートが用意されている。各種入出力インタフェースやインタロックおよび操作モードに対応するセメントプラントに必要な全てのソフトウェアテンプレートを備えている。

ソフトウェアテンプレートの取扱説明書には、表1に示すように全てのテンプレートを掲載している。さらに、図3に計装ループ制御とシーケンス制御の例を示すように、個別の制御内容が入出力変数および制御ロジック図などを掲載している。また、各ソフトウェアテンプレートに対応するプラントのフローシートも掲載しているので、エンジニアはプラントをイメージしながらエンジニアリングを行うことができる。

(3) 画面素材

セメントプラントを運転する際には、HMI (Human Machine Interface) を使い、各種機器の状態の監視と操作を行う。オペレーターにとって監視や操作がしやすい画面は、安定操業につながるストレスのない運転を実現する。

従来、監視や操作がしやすい画面を設計する際に、エンジニアは設備や運転の知識、さらには画面シンボルのデザインなど多岐にわたるノウハウを持つ必要があった。しかし、ソフトウェア監視制御パッケージでは、サイロやベルトコンベヤなどの機器シンボルのほか、機器の状態を表示するフェースプレートや機器を操作するためのフェースプレートなども用意している。したがってエンジニアは、必要なシンボルやフェースプレートを選択して組み合わせる

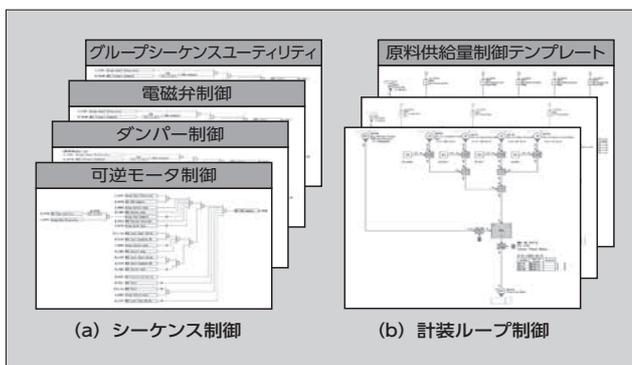


図3 計装ループ制御とシーケンス制御の例

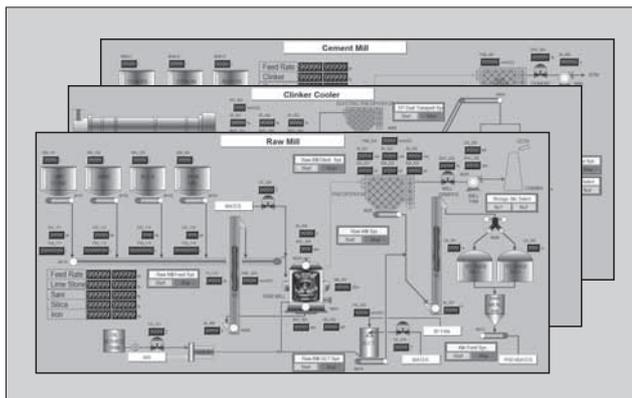


図4 プラント画面例

表1 テンプレート一覧

系 統	制御項目	制御内容	制御項目	制御内容
原料工程	プロセス制御	<ul style="list-style-type: none"> ○原料調合制御 ○切出量制御 ○各原料比率制御 ○原料ミル出入口差圧制御 ○原料ミル出口原料温度制御 ○原料ミルセパレータ回転数制御 ○原料ミルBE電力（電流）制御 ○原料ミル振動監視 ○原料ミルモータ電力監視 	プロセス制御	<ul style="list-style-type: none"> ○原料ミルHAG出口ガス温度制御 ○原料ミル入口GCT入口温度制御 ○原料ミル入口GCT入口圧力制御 ○原料サイロレベル監視 ○原料ミルファン・ダンパ制御
			シーケンス制御	<ul style="list-style-type: none"> ○原料ミルフィード ○原料ミル ○原料ミルディスチャージ ○原料ミルGCT
仕上工程	プロセス制御	<ul style="list-style-type: none"> ○クリンカ・石膏流量制御 ○切出量制御 ○各比率制御 ○仕上ミル音響制御 ○仕上ミルBE電力制御 ○仕上ミル戻り粉流量監視 ○仕上ミルセパレータ回転数制御 	プロセス制御	<ul style="list-style-type: none"> ○仕上ミル出口セメント温度制御 ○仕上ミルファン・ダンパ制御 ○セメントサイロレベル監視
			シーケンス制御	<ul style="list-style-type: none"> ○セメントミルフィーディング ○セメントミルメインドライブ ○セメントミルディスチャージ
焼成工程	プロセス制御	<ul style="list-style-type: none"> ○SP（サスペンションプレヒータ）温度監視 ○各部ガス温度監視 ○各部原料温度監視 ○SP各部圧力監視 ○キルン窯戻温度監視 ○キルン窯戻ガス分析（O₂、CO） ○原料投入量制御 ○キルン回転数制御 ○キルンモータ電力監視 ○キルンシェル温度監視 ○キルン焼点温度監視 ○クーラ落口温度監視 ○キルンフードドラフト制御 ○三次空気流量制御 ○クーラ二室圧力制御 ○クーラ各室冷却空気流量制御 	プロセス制御	<ul style="list-style-type: none"> ○プレヒータ出口ガス分析（O₂、CO） ○プレヒータIDFダンパ制御 ○プレヒータIDF回転数制御 ○クリンカーサイロレベル監視 ○プレヒータファン・ダンパ制御 ○クーラファン・ダンパ制御 ○クーラ各室ファン・ダンパ制御
			シーケンス制御	<ul style="list-style-type: none"> ○キルンフィード ○キルンIDF ○キルンメインドライブ ○キルンファイアリング ○EPダストトランスポート ○AQCクーラファン ○AQCクーラプレート ○クリンカトランスポート

ことで、容易に図4に示すような画面が設計できる。また、用意してある標準的なプラント画面をアレンジすることで短時間にエンジニアリングが可能である。

2.4 ハードウェア監視制御パッケージ

監視制御システムにはソフトウェアだけでなく、コントローラやI/Oを実装する制御盤などのハードウェアも必

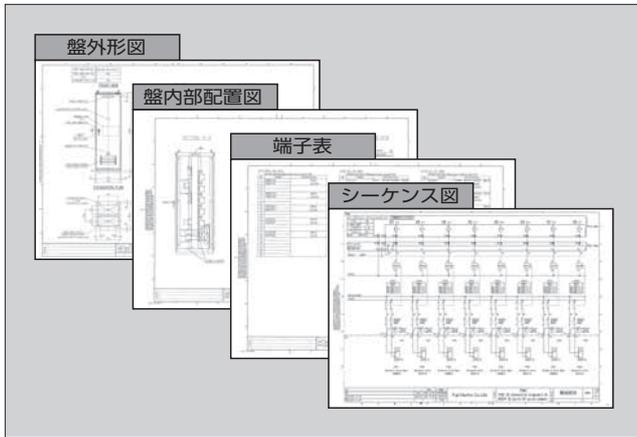


図5 ハードウェア標準図の例

要である。このパッケージは、図5に示すような制御盤を設計する上で必要になる盤外形図や盤内部配置図、端子表、シーケンス図などの標準図を全てそろえている。

③ あとがき

安定操業を実現するセメントプラント監視制御パッケージについて述べた。本パッケージは、国内外のパートナー企業とともに展開し、信頼性の高い制御システムや電機品をお客さまに納入できるよう対応を図っており、お客さまにとって価値のあるものとする。富士電機はお客さまの課題解決に向けて、さらに機能拡充を図っていく所存である。



梅基 一生

窯業分野の計測制御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 インダストリー事業本部オートメーション事業部技術第二部主任。



効率的な維持管理を実現するごみ焼却施設パッケージ

Waste Treatment Facility Package for Efficient Maintenance

古川 浩司 FURUKAWA, Koji

PFI (Private Finance Initiative) 事業には幾つもの方式がある中、ごみ焼却分野では、DBO (Design Build Operate) 方式を適用する事例がほとんどである。DBO 方式の狙いの一つとして、事業期間中に発生するライフサイクルコストの削減がある。富士電機は、技術ノウハウを伝承できる運転支援システムや異常兆候を検知し、最適な点検やメンテナンスの時期を知らせる異常兆候早期検出パッケージや設備管理などの定型業務と突発的な故障対応など非定型業務を最適かつ漏れなく支援する設備保全管理システムにより、プラントの効率的な維持管理に貢献している。

There are several business models of private finance initiative (PFI) projects, but the waste incineration sector almost always uses the design, build and operate (DBO) model. One of the aims of the DBO model is to reduce the life cycle costs incurred during the project period. Fuji Electric is contributing to efficient plant maintenance by providing various kinds of systems for plant operation: operation support systems that allows inheritance of our cultivated technical expertise; early-stage abnormality sign detection package that detects abnormalities and inform operators of optimal inspection and maintenance schedules; and equipment maintenance management systems that optimally and reliably support regular tasks, such as equipment management, and irregular tasks, such as providing guidance on sudden failures.

① まえがき

1997年7月に制定された法律によって公共施設などの建設、維持管理、運営などを民間の資金、経営能力および技術的能力を活用するPFI (Private Finance Initiative) の手法を、ごみ焼却分野でも2000年頃から利用する自治体が増加している。

このPFI事業には幾つもの方式がある。ごみ焼却分野では、DBO (Design Build Operate) 方式を適用する事例がほとんどである。この方式では、まず、自治体のごみ焼却施設の建設を計画する。次に、自治体または広域組合などが建設費用を調達し、入札で決定した造機メーカーが、設計 (Design)、建設 (Build)、運営 (Operate) を行う。なお、運営期間は通常15～20年である。

DBO方式の狙いの一つとして、事業期間中に発生するライフサイクルコストの削減がある。

富士電機は、ごみ焼却施設への商材として特高受変電設備、高圧配電盤、無停電電源装置、分散型制御システム (DCS: Distributed Control System)、プログラマブルコントローラ、電動機、汎用インバータ、分析計、計測機器などのさまざまな製品を豊富にラインアップしている。これら製品を②章で述べるパッケージを適用し、プラントを効率的に維持管理することでライフサイクルコスト削減に貢献できる。

一方、世の中ではAI技術を適用した製品やIoT (Internet of Things) 技術を付加した製品が求められている。

本稿では、これらの技術を適用した、富士電機の効率的な維持管理を実現するごみ焼却施設パッケージを紹介する。

② ごみ焼却施設パッケージの概要

ごみ焼却施設に求められる主な機能は、次の四つである。最近では、そのうちの余熱利用が盛んになっている。

- (a) 燃焼残さ中の未燃物を一定限界以下に維持しながら計画ごみ量を焼却
- (b) 公害規制値を超えない安定した燃焼
- (c) 余熱利用設備を使った余熱や蒸気の所内外における利用
- (d) 発電設備を使って発電した電気の所内外における利用

施設の安定操業のためには、焼却設備や公害防止設備、発電設備などが安定して正常動作を継続することが不可欠である。年度計画に基づいた焼却運転、ならびに休止中の点検が重要である。

DBO方式による効率的な運転および維持管理をする上で従来の運用において幾つかあった課題は、維持管理パッケージを活用することにより、解決できる。

2.1 運転支援システム

ごみ焼却施設では、さまざまな設備同士が関連し合っている。安全・安心な操業を維持するためには、複雑な制御を行う必要がある。さらに、少子化や運転員の高齢化、グローバル化に対応した外国人労働者の受入れなどの課題もある。少子化による運転員の不足だけでなく、設備投資予算の縮小で原価を低減するため運転員の作業量が増加し、運転品質への影響が懸念される。

また、設備に精通した熟練運転員の定年退職が進んでいる。その結果、現場力が低下し、作業忘れや作業ミスなどが発生するリスクが高まり、安全・安心で安定した操業への影響が考えられる。

一方で、それぞれの運転員が保有している技術に偏りがあり、操作の順序やタイミングがまちまちである。熟練者などが保有している個人のノウハウの共有化や継承が行われないと、ノウハウの属人化によって設備の安定稼働を阻害する要因にも成りかねない。

そこで富士電機は、技術ノウハウを伝承できるようにするため、図1に示すようにPDCAサイクルを回しながら、主に運転支援PCと運転支援タブレットからなる運転支援システムを構築した(図2)。

(1) Plan

管理者は、運転員よりヒアリングした過去に発生した故障発生時の対応手順を整理する。その中から、最も良い手順を選ぶ。

(2) Do

管理者は、選んだ対応手順を基に、運転支援PCに作業フローを入力し、完成する。

(3) Check

実際に故障が発生した場合、運転員は運転支援タブレットに表示された作業フローに従い作業を行う。

完了した作業実績が後から確認できるため、作業フロー

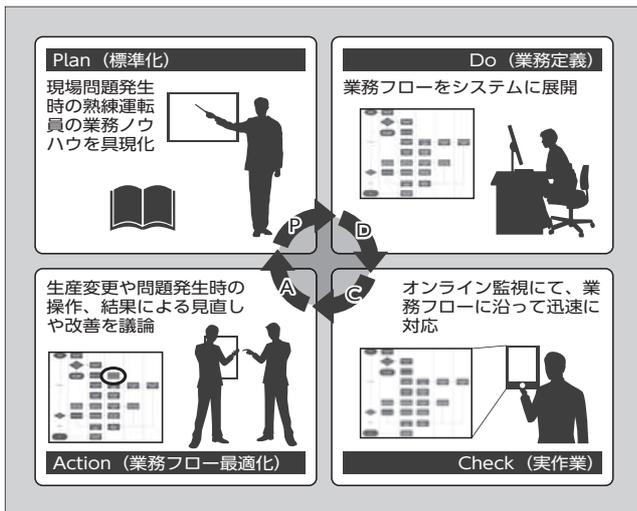


図1 現場技術伝承のPDCAサイクル

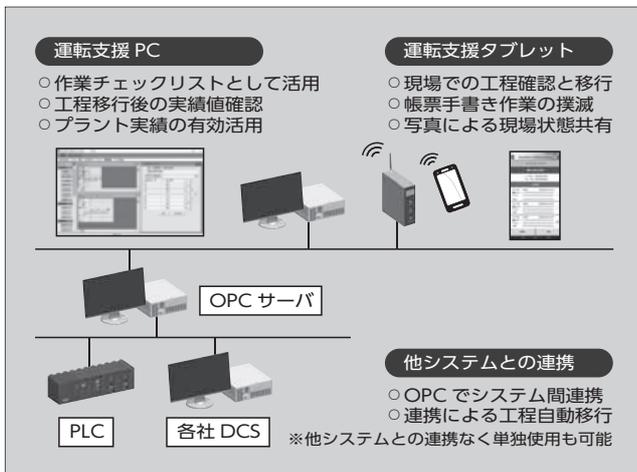


図2 運転支援システム構成

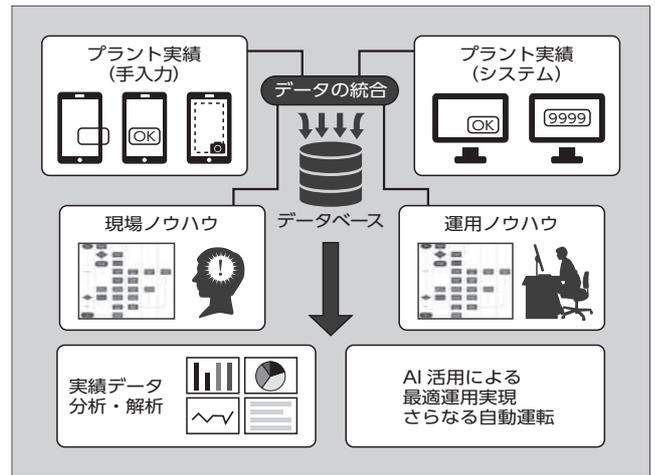


図3 プラント実績データの統合と活用

の改善などに役立てることができる。

(4) Action

(3)で使用した作業結果により作業フローの問題点、改善点を運転員と再度議論し、管理者は(2)で作成した作業フローの最適化を行う。

また、他社DCSとOPC(OLE for Process Control)通信によりシステム連携も可能であり、いったん作成した作業ノウハウを他事業所などへ流用することも可能である。

本運転支援システムの導入により、属人化したノウハウが経験値の異なる運転員に高いレベルで展開できるようになる。最適運転による利益創出、安全・安心なプラント運用が可能になる。さらには、図3に示すようにプラントの実績データに基づいて運転計画の再調整を行うことができるなど、データ駆動型工場への変革につなげることができる。

2.2 異常兆候早期検出パッケージ

ごみ焼却施設のDCSにおいて、さまざまな制御対象を最適に制御するためにチューニングを行っている。一方で、機器の経年劣化により変化する制御範囲に対応しながら、プラント側(設備)の異常兆候を捉えることが重要である。

異常兆候早期検出パッケージは、制御範囲の変化に基づいて異常兆候を検知し、最適な点検やメンテナンスの時期を知らせるシステムである。

以前は、プラント設備を運用する中で故障発生の予測は画一的で限定的であったため、ほとんどの故障は予期せず突然発生することとなり信頼性は十分でなかった。さらに、発生した故障の要因の特定や、発生頻度の低い異常への対処方法の決定に時間を要することもあった。これらは、熟練の運転員の減少に伴い、異常への対処ノウハウが伝承されずに欠落していることも原因の一つである。

そこで、異常兆候早期検出パッケージでは、ビッグデータを活用して異常兆候を高い信頼性で検知するシステムを次の機能で実現している(図4)。

(1) プラントデータ収集

トレンド、警報履歴、操作履歴を実績データベースに収

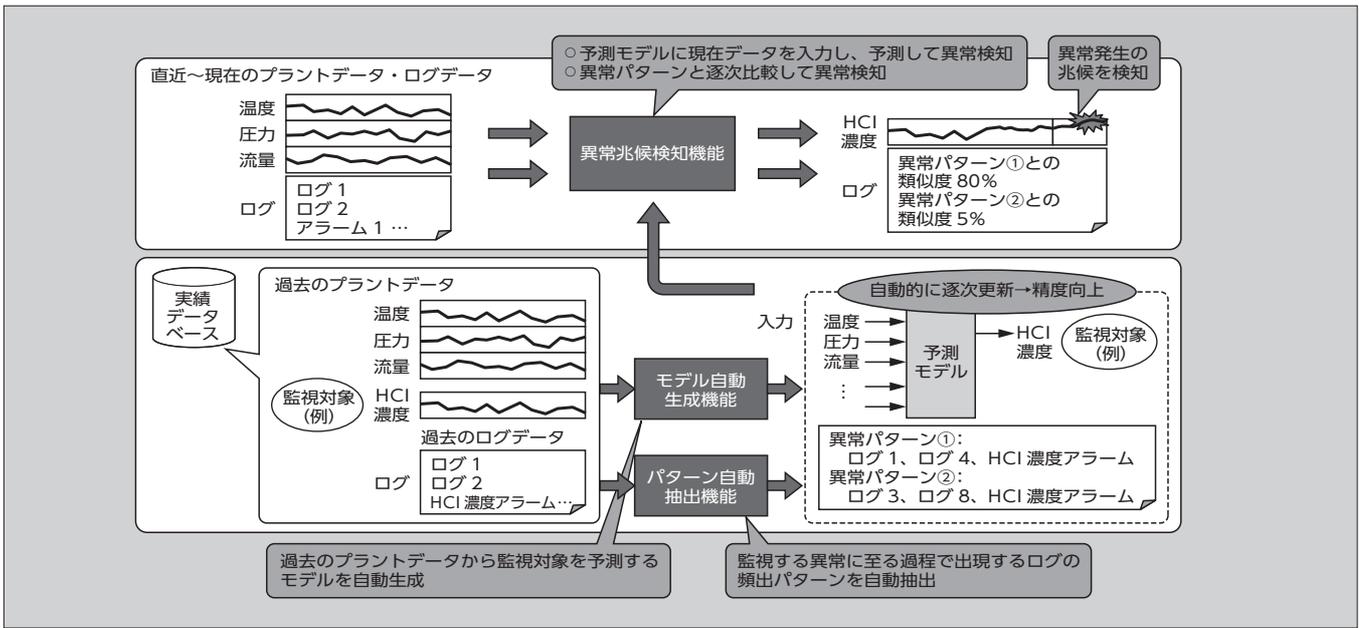


図4 ビッグデータを活用した異常兆候の検知システム

集する。

(2) モデル自動生成

過去のプラントデータから監視対象を予測するモデルを自動生成する。

(3) パターン自動抽出

過去のプラントデータから監視対象が異常に至る過程で出現するログの頻出パターンを自動で抽出する。

(4) モデル自動更新

モデル生成およびパターン抽出は、自動的に随時更新し予測モデルの精度の向上を図っている。

このようにして、前述の予測モデルに現在データを入力して予測すると、異常パターンと逐次比較して異常兆候を検知する。図5に示すとおり、今までは予備アラームが発報して本アラームが発報する間の余裕時間が、改善後は異常兆候が表れた時刻Aの時点(現時点)で、本アラーム

の発報時刻を予想し注意喚起を行う。このため、運転員はさらに余裕を持って補正操作を行うことができるため、プラントの異常を最小限に抑えることができる。

さらに、アラームの履歴データを基に作成した異常発生時のアラームパターンと直近のデータを比較し、異常に至るパターンとの類似度を指標にして異常兆候を検出している。

これにより、モデルによる予測ができないような想定外の動作が発生した場合、異常兆候パターンの補完が行われ異常兆候検出機能の精度向上が図れる。

2.3 設備保全管理システム(メンテナンスステーション)

メンテナンスステーションは、次の機能によって設備機器の状況を把握しながら、最適かつ漏れのない保全業務を支援するシステムである。

- (a) 設備情報の管理
- (b) 部品情報および倉庫からの入出庫管理
- (c) 点検作業の計画と記録
- (d) 故障情報の起票と記録
- (e) 設備保全に関するコストの出力
- (f) ユーザー固有の帳票へのデータ出力

プラント管理に必要な定型業務をシステム化し、突発的な故障対応業務に集中できるようにサポートしている。

定型業務は、マニュアルに基づいた手順を進める業務であり、情報収集作業、定型帳票作成、定型の故障・復旧対応、検査結果登録などがある。これらの定型業務は、力仕事や繰返し作業であり、簡単ではあるが時間がかかる作業が多い。

一方、非定型的な業務では、突発的な故障対応のように深い経験も必要であり、マニュアルに落とし込むことが難しい知見(暗黙知)に基づく状況判断や、臨機応変な対応も必要である。具体的には、故障の要因分析、エネル

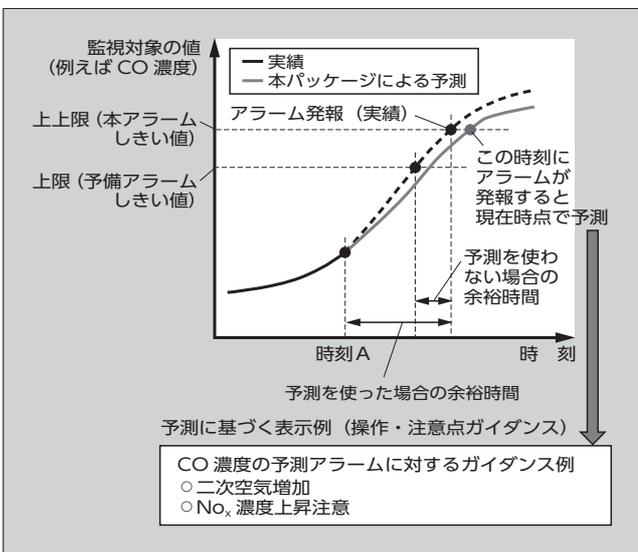


図5 モデル生成予測による異常兆候検知

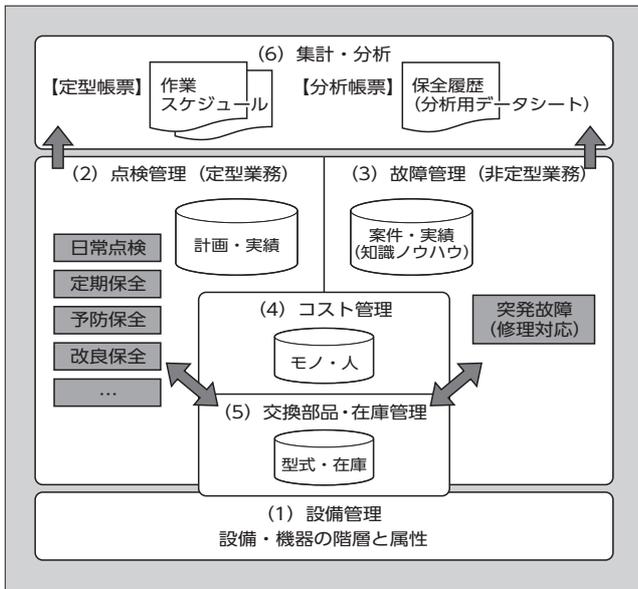


図6 保全業務管理に必要な機能構成

ギー・環境評価、安全・信頼度評価、検査結果の評価、保全計画とコスト評価などの業務も含まれる。

保全業務の管理に必要な最もシンプルな機能構成を図6に示す。

各機能は次のとおりである。

(1) 設備管理

設備の階層構成(場所や工程など)や属性データを管理し、設備に基づく部品情報を管理する。

(2) 点検管理

設備に対する保全作業(定期点検、予防作業など)の入力項目を登録・管理する。

設備の作業計画と作業実績の管理が可能であり、タブレット端末を使って現場でオンライン入力などのリモート作業も可能である。

オプションとして、保守作業の進捗状況をロケーションごとに建屋や工程の図面にグラフィカルに表示することができるロケーション管理機能も持っている。

(3) 故障管理

故障が発生すると、設備管理者は故障に対応するための作業指示書を起票する。この作業指示書を運転員が確認し、故障対応作業を行い、作業結果を入力する。

これらの情報は、故障対応記録としてデータベースに登録され、知識・ノウハウとして過去に発生した故障履歴を参照する際に活用される。

また、故障対応を、現象、幾つかの要因、真の原因、処置に整理し、過去トラブル調査を支援できる。

(4) コスト管理

保全作業のコスト(時間、金額)を設備ごとに集計する。

(5) 交換部品・在庫管理

設備ごとの交換部品(交換周期・最終納期確認日など)を登録・編集し、部品を倉庫の棚単位で管理し、交換部品の在庫情報も管理する。

交換部品の在庫数と安全在庫数を管理し、日常点検時に部品交換数などの実績を在庫数に反映する。

(6) 集計・分析管理

保全作業で行った点検や故障対応などの内容を履歴のデータシートとして出力し、データシートにピボットやマクロなどを自由に組み込み、再利用することができる。

これらの機能によって保全管理の業務シナリオに沿った保全情報の管理や活用が可能なので、業務の効率化や知識ノウハウの一元管理、周知などを容易に行うことができる。

このメンテナンスステーションでは、図7に示すようにまず業務フローをユーザーとともに作成する。ついで、業務フローの目指す在り方を共有しながら、現状分析を行う。再構築した業務フローに沿ってデータベースに反映することで、使いこなせるメンテナンスステーションとなる。

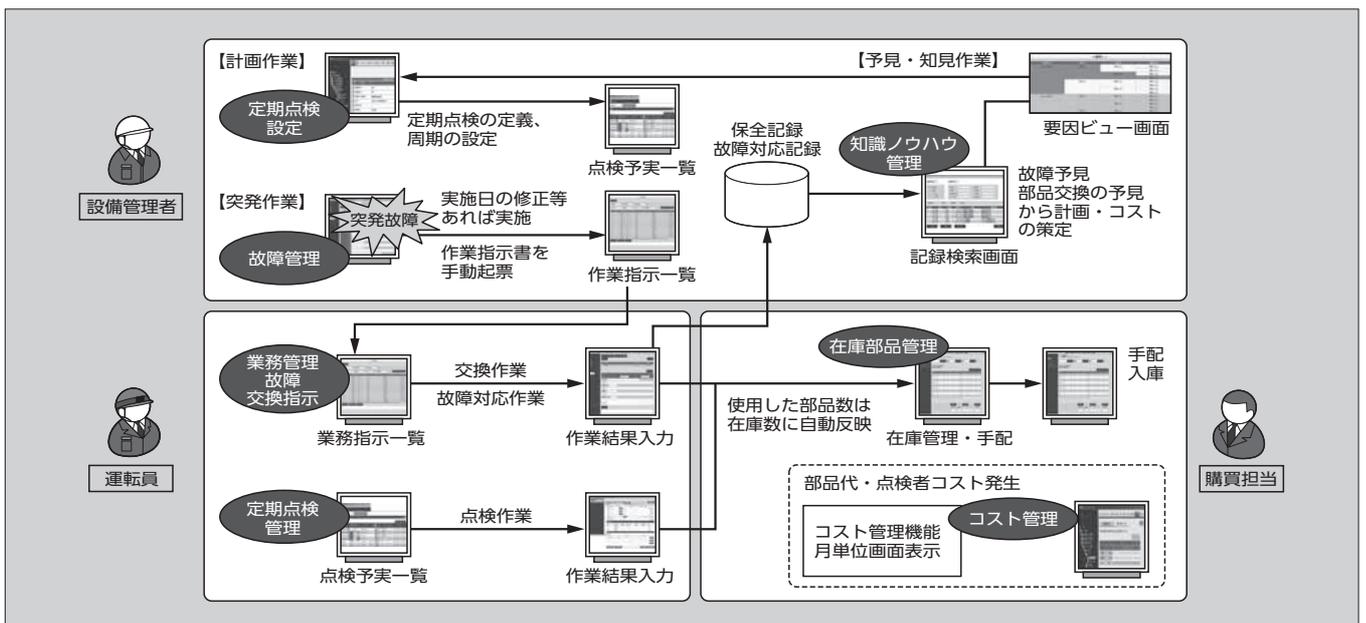


図7 メンテナンスステーションの使用モデル

特集 自動化と省エネルギーに貢献する計測・制御ソリューション

③ あとがき

効率的な維持管理を実現するごみ焼却施設パッケージについて述べた。

今後、さらに進化した AI 技術の取組みを行い、運転員の負荷軽減に貢献できると考える。

例えば、プラント運転支援システムと異常兆候早期検出パッケージの連携を行い、運転員の手動介入回数を削減できれば、完全自動運転に向けた取組みが可能となり、最適運転によるさらなる利益創出が期待できる。

一方、IoT を活用したモノと人の結び付きを強くすることで、さらに安全・安心な設備運用が可能になると考える。

参考文献

- (1) 北谷保治ほか. 設備の安定稼働を支援するサービスソ

リューション. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.3, p.167-170.

- (2) 保川幸雄ほか. IoTから始まる新しい価値創出ソリューションの現状と展望. 富士電機技報. 2018, vol.91, no.3, p.124-129.

- (3) 吉川譲ほか. プラントを最適に運用する計測・制御システムソリューション. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.3, p.153-157.



古川 浩司

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 インダストリー事業本部オートメーション事業部技術第二部。

AI 技術により予測精度を高めたエネルギー制御パッケージ「EMS-Package」

“EMS-Package,” Energy Control Package with AI-Based Highly Accurate Prediction

鳴海 克則 NARUMI, Katsunori

丹下 吉雄 TANGE, Yoshio

島崎 祐一 SHIMASAKI, Yuichi

国外の製鉄所では、個別設備のエネルギーが計測できていないところが多く、製鉄所全体のエネルギーの見える化が進んでいない。そのため、需要予測の精度が上がらず、最適運用計画の省エネルギー（省エネ）効果も低い。これに応えるために富士電機は、AI 技術を用いて個別設備のエネルギーが計測できていない製鉄所にも適用できる予測方式を開発し、「EMS-Package」に追加した。本パッケージは、主にモデリング、可視化、最適運用、需要予測の機能で構成され、最適計算エンジンにより最適運用計画を作成し、これに沿ってオペレーターが運用することによって省エネが実現できる。

Many steelworks outside Japan cannot reliably measure the energy of individual pieces of equipment. As a result, it has not been possible to visualize the energy of the entire steelworks. This has hindered accuracy in demand prediction and has caused their optimal operation plans for energy savings to be less effective. To improve this situation, Fuji Electric has developed a new AI-based forecast method that steelworks can apply even if they cannot measure the energy of individual pieces of equipment. The package mainly consists of functions for modeling, visualization, optimal operation and demand forecast. It uses an optimization calculation engine to create optimal operation plans for operators to save energy.

1 まえがき

製鉄所では、生産に必要なエネルギー量は一定ではなく生産状況により大きく変動する。重油や LNG (Liquefied Natural Gas)・LPG (Liquefied Petroleum Gas)、電力などの購入エネルギーに加えて、生産設備で生じる副生エネルギー（副生ガスや蒸気、電力など）などの多様なエネルギーが製鉄所で消費されている。

製鉄所のエネルギー管理部門は、複雑に絡み合う購入エネルギーと副生エネルギーの需要と供給を均衡させるだけでなく、最適に制御することでエネルギー消費量や温室

効果ガスの排出量を削減する重要な役割を担っている。

富士電機は、このようなエネルギー管理部門向けに予測モデルとプラントモデルによる複数エネルギーの需要予測を行い、最適運用方案を作成し、それに基づいた自動制御を特徴とした鉄鋼分野向け EMS (Energy Management System) ソリューション⁽¹⁾を 2011 年に上市した。

また、特に国外の製鉄所向けに、プラント設備情報や設備特性など最低限の情報入力と過去のプラント操業データを基にエネルギーの需要を予測し、その結果から最適運用計画を一定時間ごと（30 分ごと）に自動出力する「EMS-Package」を開発した。オペレーターがこの最適運用計画

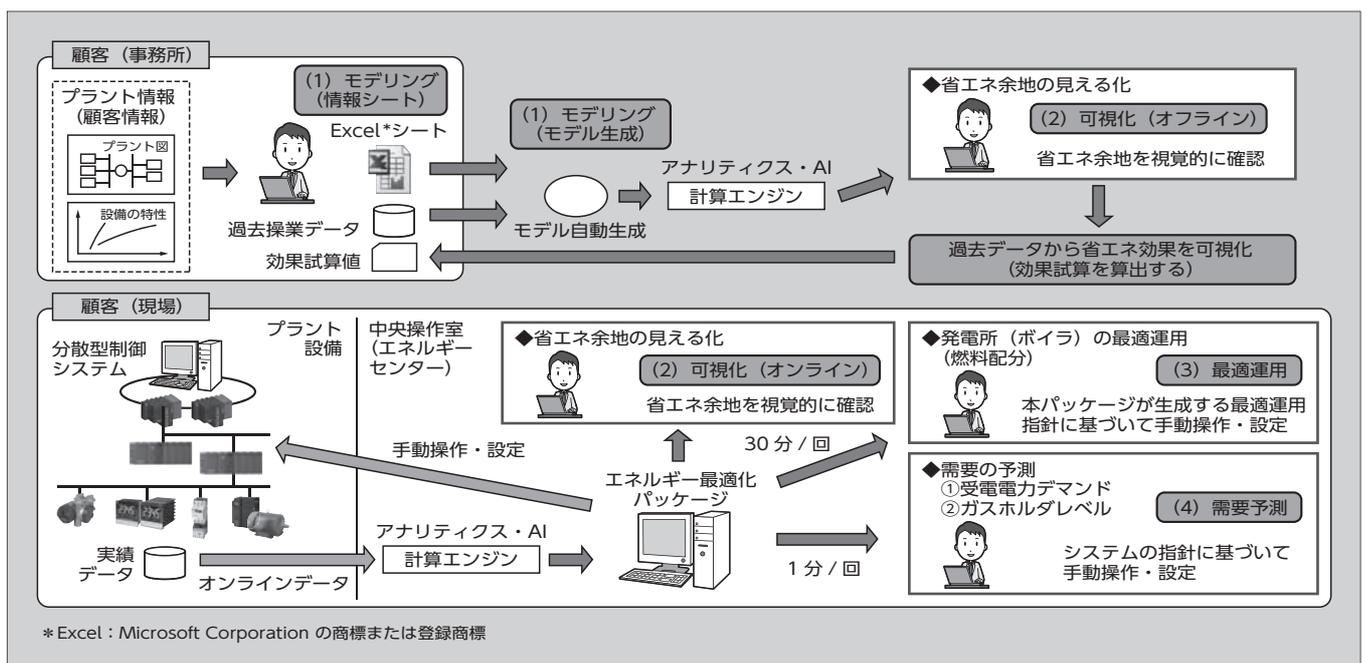


図1 「EMS-Package」の全体処理フロー

を基に操業することで、購入エネルギーの低コスト化を図ることができる。

しかし、国外の製鉄所では、個別設備のエネルギーが計測できていないところが多く、製鉄所全体のエネルギーの見える化が進んでいない。そのため、需要予測の精度が上がらず、最適運用計画の省エネルギー（省エネ）効果も低い。

そこで、個別設備のエネルギーが計測できていない国外の製鉄所にも適用できるように予測方式（AI 技術）を開発して EMS-Package に追加した。図 1 に本パッケージの全体処理フローを示す。

② 「EMS-Package」の主要機能

本パッケージは、次の四つで構成されている。

- (1) モデリング（情報シート、モデル自動生成）
- (2) 可視化（オフライン、オンライン）
- (3) 最適運用（ボイラの燃料配分）
- (4) 需要予測

2.1 モデリング

ユーザー自身が簡単にモデルを構築できる仕組みとした。すなわち、OA ツールとして標準的な Excel 形式の“情報シート”^(注)に、製鉄所の発電設備であるボイラ・タービンなどの台数、設備特性情報、設備間接続情報（各設備のエネルギー供給元・エネルギー供給先情報）、購入エネルギーのコスト情報（単価）などを所定のフォーマットに入力する。さらに、過去の運用実績データを入力することで、モデルを自動生成する。省エネの目的ごとに、次の 6 種類の最適モデルが生成される。

- (1) 購入電力コスト
- (2) 受電コスト
- (3) 副生ガス放散量
- (4) ボイラの燃焼配分
- (5) タービンの蒸気配分
- (6) タービンの抽気配分

2.2 可視化

可視化（オフライン）においては、過去の実績データを 6 種類の最適モデルごとのエネルギーコストに変換する。その結果をグラフ上にプロットすることで、操業中の省エネの改善余地を可視化することができる。

可視化（オンライン）においては、既存プラント設備と OPC（Open Platform Communications）インタフェースで通信が可能である。リアルタイムに収集したプラントの現状と、最適運用後の省エネ状態を同時に表示できるため、省エネ運用状態の効果を可視化することができる。

2.3 最適運用と可視化（オンライン）

最適運用においては、プラントデータ（実績データ）をオンラインで収集し、最適計算エンジンにより 30 分ごとで 24 時間先までの発電所の最適運用計画（エネルギー配分）を作成する。オペレーターが、この最適運用計画に沿って運用することによって、省エネが実現できる。

2.4 需要予測

国外では副生ガスの発生量を転炉ごとではなく合計量だけを計測している製鉄所が多い。

また、高炉ガスや転炉ガス、コークスガスなどの各副生ガスを混合したガス（MIX ガス）を発電設備やコークス工場などの設備で使用し、残った MIX ガスを MIX ガスホルダに貯蔵している製鉄所も多い。

オペレーターが、この MIX ガスホルダの貯蔵量（レベル）を的確に予測した最適運用計画に沿って操業できれば、余剰となってしまった副生ガスの大気への放散量を低減するだけでなく、重油や LNG・LPG、電力などの購入エネルギーを削減して、運用コストが削減できる。

MIX ガスホルダのレベルの予測精度を高めるため、2018 年度に、線形回帰を用いた予測方式を開発した（予測誤差率 7～8%）。さらに、2019 年度には、AI 技術を活用し、非線形回帰を用いた予測方式もラインアップして予測誤差率の向上を図った。

③ 回帰予測の比較

線形回帰を用いた予測方式と AI 技術による非線形回帰を用いた予測方式の予測精度結果を示す。図 2 は、線形回帰予測方式で予測精度の検証を行った国外の製鉄所のプラントの概略図である。

3.1 線形回帰予測方式

MIX ガスホルダのレベル（図 2 ⑤）を的確に予測するには、転炉ガスからの払出量（転炉ガスホルダからボイラへのガス供給量）（図 2 ②）の予測精度を高める必要がある。転炉はいわばバッチ処理なので、転炉の操業計画を用いて転炉ガスの発生量（図 2 ①）を予測することが望ましい。しかし、設備の都合により操業計画の入手ができなかった。そのため、現時刻における転炉ガス払出量（図 2

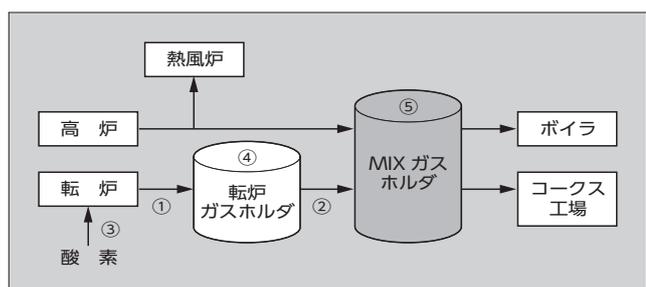


図 2 線形回帰予測方式の検証プラント概略図

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

②)、現時刻および5分前の転炉の酸素ガスの使用量(図2③)、および転炉ガスホルダのレベル(図2④)の計五つの情報から線形回帰を使って転炉ガスの払出量(図2①)を予測した(線形回帰予測)。

図3に示すように転炉ガスの払出量の予測結果からMIXガスホルダのレベルを予測した値と実績値とから予測誤差率を算出した。その結果、7.76%の誤差であった。

3.2 非線形回帰予測方式 (AI 技術による予測)

図4に示すようなホルダ容量が小さい場合は、オペレーターは常にガス払出量を調整してホルダのレベルを許容範囲に保つ必要がある。MIXガスホルダのレベルの予測値の誤差が大きい場合は、ムダなエネルギーを消費することになる。

具体的には、次のとおりである。

- (a) MIXガスホルダのレベルが上限を上回った場合、ガスを大気に放散する。
- (b) MIXガスホルダのレベルが下限を下回った場合、ガスをボイラへ供給することができないため、発電量が下がる。そのため、重油を使って発電するか、購入受電(受電)を増やす必要がある。

前述のようなムダなエネルギー消費を抑えるためには、現状の線形回帰予測よりも高い精度が必要である。そこで

新たにAI技術による予測方式(非線形回帰方式)を検討した。その結果、予測誤差率が7.76%以下である線形回帰に対して、非線形回帰では6%以下にすることができ、試算したところ年間31百万円のコストダウンができることが分かった。

15分先のMIXガスホルダのレベルを目的変数とし、各設備の現状実績値(転炉ガス払出量合計値・高炉ガス払出量合計値・ボイラ負荷量合計値・熱風炉負荷量合計値・コークス工場負荷量合計値)を入力変数として相関分析を行った。

一般に相関係数は、±1に近いほど強い相関となり予測精度が高くなる。しかし、これらの入力変数のうち、目的変数である15分先のMIXガスホルダのレベルと相関があるのは各時点のMIXガスホルダのレベルだけであり、しかも相関係数も0.72となり、図5に示すようにばらつきが大きい結果となった。

そこで、予測精度を上げるため、入力変数に各設備の各時点の実績値に加え15分先の各設備の実績値も加えて、相関分析を行った。図6に示すように相関係数は0.96となった。

15分先の各設備データを精度よく予測できれば、15分先のMIXガスホルダのレベルを高精度に予測できることが分かった。

図7に線形回帰モデルに15分先の各設備のデータの実績値を入力して得られた予測値と実績値のトレンドを示す。線形回帰モデルの予測値と実績値がほぼ一致していることを確認した。

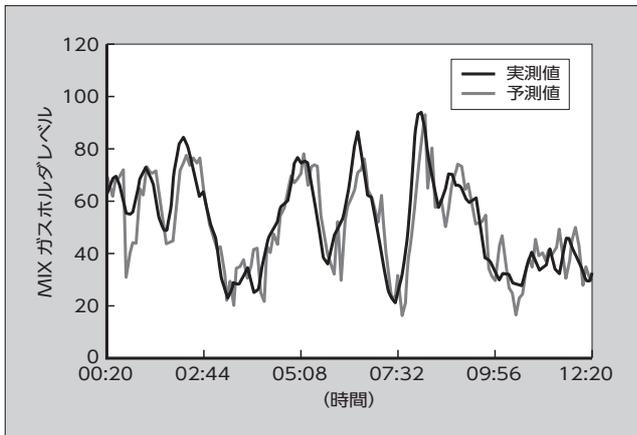


図3 実績値と予測値のトレンド

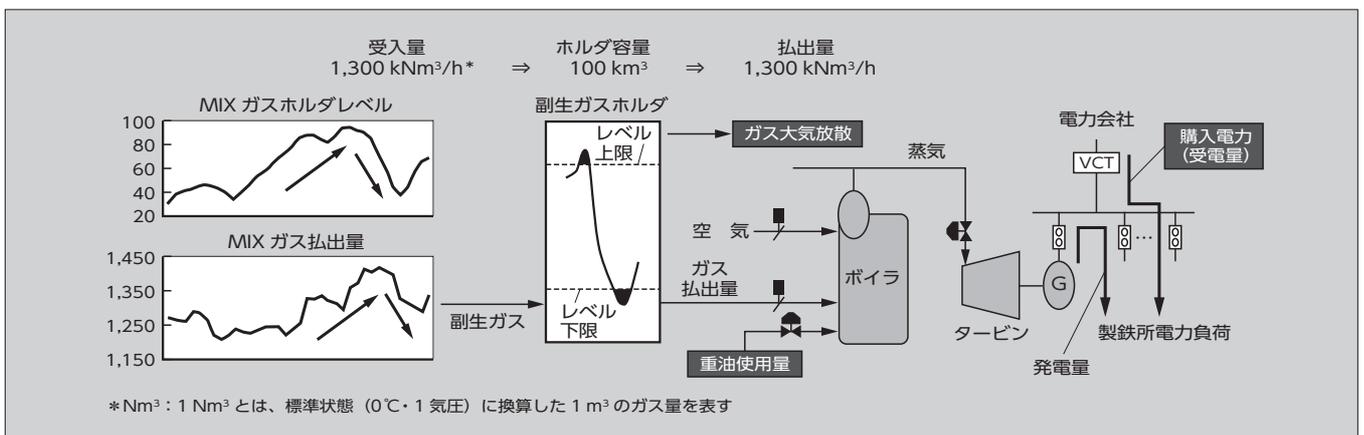


図4 予測精度向上の必要性

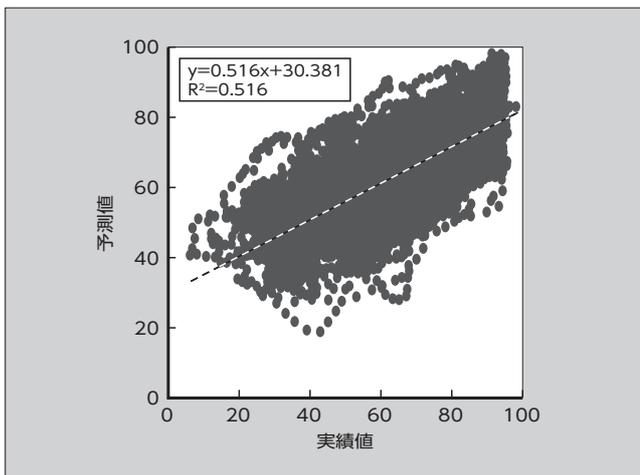


図5 各設備の実績値との相関分析散布図

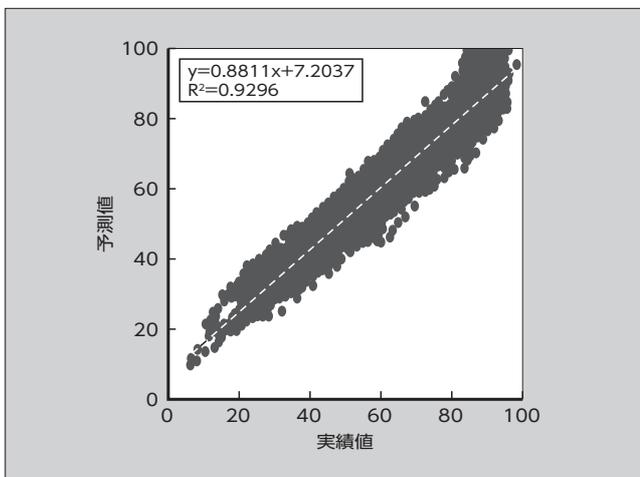


図6 各設備の15分先の予測値との相関分析散布図

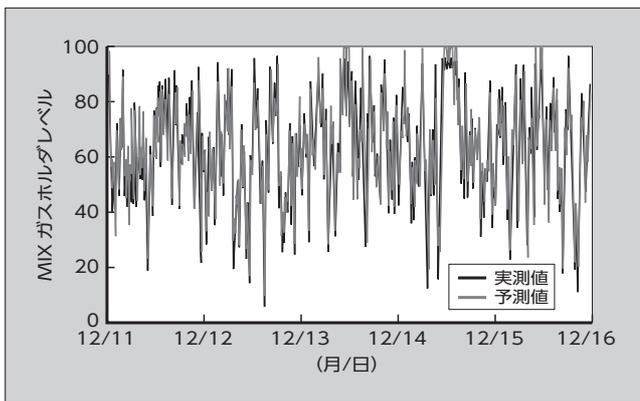


図7 15分先の線形回帰モデル予測値と実績値のトレンド

4 適用する予測方式の検討

15分先の各個別設備データの予測値を高精度なものにするために、表1に示す線形回帰方式であるPLS (Partial Least Squares)、AI技術を使用した非線形回帰方式であるJIT (Just-In-Time) とDL (Deep Learning) の3種類の予測モデルで検討した。

表1 適用した予測モデル

予測モデル	説明	非線形性
PLS (Partial Least Squares)	部分的最小二乗法	線形
JIT (Just-In-Time)	データベースに蓄積された過去事例の中から、予測対象時の条件(要求点データ)の近傍となる類似事例のみを抽出し、近傍内データにより局所モデルを構築する手法	非線形
DL (Deep Learning)	予測対象と入力因子の関係を、入力層、中間層(隠れ層)、出力層のユニットからなるニューロモデルにより表現する手法	非線形

(1) 各設備の15分先の予測

図8に示す各設備の①転炉ガス抽出量合計値、②高炉ガス発生量合計値、③高炉ガス負荷量合計値および④コークス工場負荷量合計値の15分先の予測結果(予測誤差率)を表2に示す。線形手法であるPLSよりも、非線形手法であるJIT、DLの予測精度のほうが高いことが確認できた。

(2) 15分先のMIXガスホルダのレベルの予測

各設備とMIXガスホルダのレベルの予測方式を検討するに当たり、各時点の15分先の予測を1分ごとに2日分のデータで表3に示す6種類の条件で比較した。なお、処理能力の観点からJITよりもサーバへの負荷が少ないDLのほうが適しているため、MIXガスホルダのレベルの予測にはPLSとDLを使用した。

表3に示す検証結果から、各設備の15分先をDLで予測し、その結果を用いて、PLSを使って15分先のMIXガスホルダのレベルを予測する方式の予測誤差率が6%以下と最も低い結果となった。これにより、製鉄所における購入エネルギーのコストダウンにつながる予測誤差率の改善が達成できた。

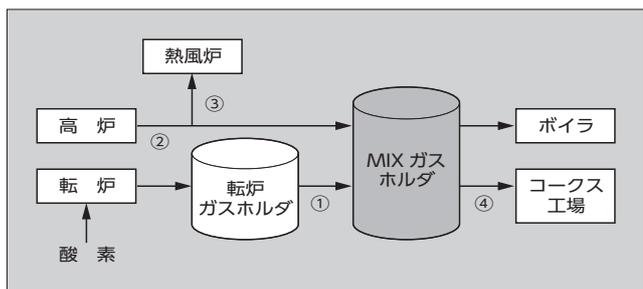


図8 非線形回帰予測方式の検証プラント概略図

表2 各設備の15分先の予測誤差率(%)

各設備のエネルギー	予測誤差率(%)		
	PLS	JIT	DL
①転炉ガスの抽出量	7.71	7.34	6.73
②高炉ガスの発生量	0.84	0.54	0.65
③高炉ガスの負荷量	5.67	4.02	3.83
④コークスガスの負荷量	1.41	1.33	1.17

表 3 MIX ガスホルダの予測誤差率 (%) の検証結果

ケース	アルゴリズム		予測誤差率 (%)
	各設備	MIXガスホルダのレベル	
1	PLS	PLS	8.10
2	JIT	PLS	7.46
3	DL	PLS	5.82
4	PLS	DL	7.95
5	JIT	DL	7.55
6	DL	DL	6.89

5 あとがき

AI 技術により予測精度を高めたエネルギー制御パッケージ「EMS-Package」について述べた。

富士電機では、製鉄所のエネルギー運用に関する長年の経験を生かして、最先端の制御技術、ソフトウェア技術（最適化技術）を用いたエネルギーの最適化による省エネルギー運用を実現している。

省エネルギー運用を実現できていない国外製鉄所、特にインドや中国向けに導入・普及させることによって、国外においても省エネルギーや温室効果ガスの排出削減に貢献していく所存である。

参考文献

(1) 鳴海克則ほか. 製鉄所のエネルギー管理を最適化する「鉄

鋼EMSパッケージ」. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.3, p.177-181.

(2) 鳴海克則ほか. 発電設備のエネルギー最適化パッケージ「EMS-Package LITE」. 富士電機技報. 2018, vol.91, no.3, p.135-138.



鳴海 克則

鉄鋼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ーエレクトロニクスインダストリー事業本部オートメーション事業部技術第一部担当課長。



丹下 吉雄

数理アルゴリズムを利用したエネルギーマネジメントに関する研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部デジタルイノベーション研究所 AI ソリューションセンター AI 研究部主任。電気学会会員。



島崎 祐一

各種産業システムへの予測技術の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部デジタルイノベーション研究所 AI ソリューションセンター AI 研究部主任。電気学会会員。



安全・安心に貢献する放射線管理サービスソリューション

Radiation Management Service Solutions Contributing to Safety and Security

前川 修 MAEKAWA, Osamu

加藤 勉 KATO, Tsutomu

安部 繁 ABE, Shigeru

富士電機は、放射性物質を取り扱う施設やその近隣自治体に対して、安全・安心に貢献する放射線管理サービスを提供している。東日本大震災の復旧・復興支援にも活用された、富士電機の放射線計測技術と最新のIoT技術を融合した環境放射線監視サービス、放射線管理システムなどを開発した。クラウドサーバやMVNOなどの携帯電話通信網の採用により、安価かつ短期間で導入できる。また、被ばく管理システムでは、線量計に通信機能を内蔵し、Wi-Fiやスマートフォンからシステムに接続することで、作業管理者が遠隔で作業者の被ばく線量をリアルタイムで把握できる。

Fuji Electric provides radiation management services contributing to the safety and security for facilities that handle radioactive materials and for their neighboring municipalities. We have developed an environmental radiation monitoring service and radiation control systems by combining the latest IoT technology with our radiation measurement technology, which was also used for recovery and reconstruction work in the Great East Japan Earthquake area. These solutions can be introduced inexpensively and quickly by utilizing cloud servers and mobile virtual network operator (MVNO) networks. Furthermore, in our radiation exposure management system, a dedicated dosimeter with a built-in communication function can be connected to the system via Wi-Fi or cellular networks to remotely notify the manager of radiation dose of workers in real time.

1 まえがき

富士電機の放射線計測技術は、東日本大震災からの復旧・復興支援にも活用された。また、富士電機は、原子力発電所や核燃料サイクル工場ならびに放射性医薬品を使用する高度医療機関などの放射性物質を取り扱う施設やその近隣自治体に対して、安全・安心に貢献する放射線管理サービスを提供している。本稿では、最新のIoT (Internet of Things) 技術を融合した新型環境放射線監視サービスについて述べる。

さらに、大規模自然災害に対処する環境放射線監視システムの伝送多重化、保守性が向上した医療分野向け放射線管理システム、無線機能を備えた新型電子線量計を用いたIoT対応新型線量管理システムおよび被験者や管理者の負担を軽減したホールボディカウンタなどの被ばく管理システムについても併せて述べる。

2 新型環境放射線監視サービス

2.1 概要

環境放射線監視システムは、測定地点に設置される放射線測定部とデータを管理するサーバシステムにより構築されている。システム導入に際しては、電源や通信回線などのインフラ構築が必要であるだけでなく、設置場所の確保や設置工事など、多くの時間と費用も必要である。

IoT対応新型環境放射線監視システムは、従来のシステムと比較すると、放射線測定部は小型になっている。さらにクラウドサーバを採用しているため、ユーザーがサーバを設置する必要がなく、安価かつ短期間で導入できる⁽¹⁾。

このシステムを使ったサービスは図1に示すように放射線測定部で測定された環境中の放射線量(γ線量)を、仮

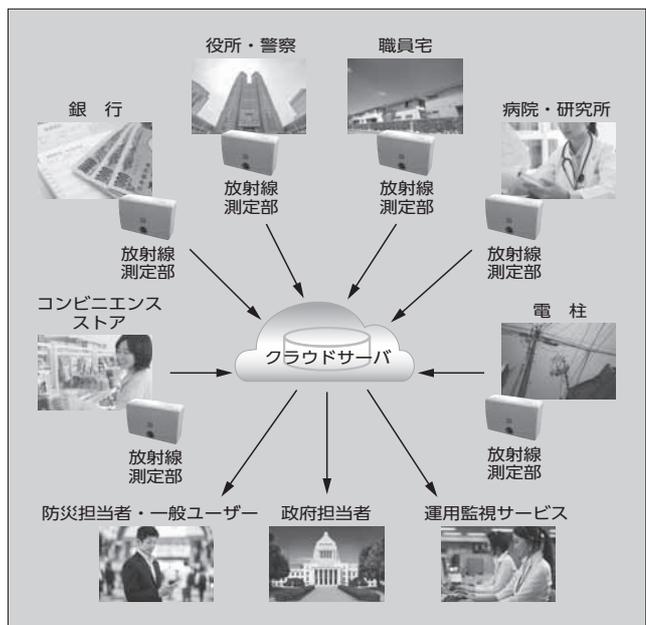


図1 システム概念図

想移動体通信事業者(MVNO: Mobile Virtual Network Operator)の廉価な携帯電話回線網を経由してクラウドサーバに収集蓄積する。演算処理したのち、インターネットを介して関係者をはじめ広く公衆にデータを公開する。

2.2 特徴

(1) 放射線測定部

放射線測定部は、計測部、データ処理部、通信部、電源制御部および防水筐体(きょうたい)により構成される。放射線測定部の外観を図2に、計測部の外観を図3に、放射線測定部の主要性能を表1に、計測部の主要性能を表2にそれぞれ示す。計測部には、自治体などへの導入実績



図2 放射線測定部



図3 計測部「DOSE e」

表1 放射線測定部の主要性能

項目	内容
通信機能	携帯電話回線網
電源	AC100～240V 50/60Hz バッテリー駆動(本体別置)
使用温度範囲	-10～+40℃
使用湿度範囲	90%以下(相対湿度) (ただし、結露なきこと)
外形寸法	W270×H185×D88(mm) (突起部を除く)
質量	約3kg

がある小型の高機能積算線量計「DOSE e」を採用し、本体の小型化と高性能・高信頼性を実現した。データ処理部には、富士アイティ株式会社製 IoT/M2M コントローラ「FiTSA Σ」を採用し、測定データの演算処理を担うとともに、放射線測定部とクラウドサーバ間のデータ伝送機能も備えている。通信部であるモバイルルータは、国内のみならず国外の通信規格や SIM (Subscriber Identity Module) カードにも対応しているため、国内外の設置に対して柔軟に対応できる。電源制御部は、AC 外部電源に加えてバッテリー電源からの入力にも対応している。また、バッテリー駆動時には、内部タイマに従って内部機器に間欠

表2 計測部の主要性能

項目	内容
検出器	シリコン半導体検出器
測定線種	γ (X) 線: 60 keV ~ 1.5 MeV
測定範囲	積算線量: 1 nSv ~ 99.99 mSv
	線量率: 0.01 ~ 999.9 μSv/h
指示誤差	積算線量: ±10% (1 μSv ~ 99.99 mSv、 ¹³⁷ Cs基準)
	線量率: ±15% (1 ~ 999.9 μSv/h、 ¹³⁷ Cs基準)
エネルギー特性	±30% (60 keV ~ 1.5 MeV、 ¹³⁷ Cs基準)
方向特性	±25% (¹³⁷ Cs、0°基準) (水平±180°、垂直-60° ~ +240°)
データ記録機能	記録件数: 9,000件
	記録間隔: 1分、2分、3分、4分、5分、10分、30分、1時間
	記録項目: 時刻、積算線量、記録間隔内の最大線量率

的な電源供給を行い、省電力化による長時間稼働を実現している。

(2) クラウドサーバ

放射線測定部で測定されたデータを、MVNO などの携帯電話回線網を介してクラウドサーバに集約し、管理する。ユーザーは、スマートフォンなどを介して専用の Web サイトにアクセスすることで測定データをいつでも確認できる。Web サイトは、一般ユーザーの利用を想定し、マップ表示とグラフ表示の二択のシンプルな構成とした。図4に示すマップ表示画面で表示するマップの地域や、グラフ表示画面が表示するトレンドの期間を1日、1か月または1年単位で、ログインユーザー別にデフォルト設定できる。また、ユーザーの用途に応じてトレンド表示が可能である。一方、システム管理者向けの機能として、測定値の上昇やシステムの異常をクラウドサーバ側で検出し、あらかじめ登録されたユーザー管理者や保守員にメールを配信する機能も備えている。



図4 Web画面イメージ

特集 自動化と省エネルギーに貢献する計測・制御ソリューション

③ 外国向け環境放射線監視システム

3.1 概要

日本以外の原子力発電所を持つ国やその周辺国においても環境放射線量を監視したいというニーズがある。富士電機の国内向け環境放射線監視システムの技術を基に、各国のインフラに対応した電源や通信回線とするとともに、国情に合わせてサーバのオンプレミス^(注1)対応や Web 画面は多言語にも対応し、国内と同等の放射線管理サービスが提供できる。すでに一部の国では、現地の要求に対応した放射線測定部や現地の言語で表示する Web サイトとともに、環境放射線監視システムが導入されている。

3.2 放射線測定部

本システムを構成する放射線測定部は、各国のユーザーのニーズや用途に合わせてさまざまなタイプから選択できる。リアルタイム線量率計は太陽電池を採用することにより外部からの電源供給が不要なので、インフラが整わない地域にも設置できる。一方、可搬型モニタリングポストは、計測部に NaI (Tl) シンチレーション検出器を採用し、低線量率領域における測定値の高精度化と波高分析機能を持ち、測定値の微小な変動の検出を必要とするユーザーにも対応している。リアルタイム線量率計の外観を図5に、基本仕様を表3に、可搬型モニタリングポストの外観を図6に、基本仕様を表4にそれぞれ示す。

3.3 環境放射線監視システムにおける伝送の多重化

(1) 概要



図5 リアルタイム線量率計

〈注1〉 オンプレミス：サーバやソフトウェアなどの情報システムを使用者（通常は企業）が管理する設備内に設置・導入し、運用すること

表3 リアルタイム線量率計の基本仕様

項目	内容
設置方法	屋外固定設置型
検出器	シリコン半導体検出器
測定範囲	BG ~ 99.9 μSv/h
駆動電源	AC100 ~ 200Vおよびソーラーパネル



図6 可搬型モニタリングポスト

表4 可搬型モニタリングポストの基本仕様

項目	内容
設置方法	屋外固定設置、可搬兼用型
検出器	シリコン半導体検出器および NaI (Tl) シンチレーション検出器
測定範囲	BG ~ 100 mGy/h
駆動電源	AC100 ~ 200Vおよびソーラーパネル

環境放射線監視システムは、原子力発電所をはじめとする原子力関連施設およびその周辺地域において、各種法令や協定に基づき設置が義務付けられていて、24時間休みなく環境放射線量を測定し、監視している。測定局で測定されたデータは、原子力施設内の中央制御室に伝送され常時監視されている。また、国が管理するシステムにもデータが伝送されており、ホームページを介して広く情報開示されている。このように原子力関連施設の健全性に深く関わるシステムであり、地域住民の安全・安心を守るために高い信頼性を持っている。しかし、大規模な自然災害が近年多発している。そのため、本システムの稼働にも影響を与える可能性があり、さまざまな対策を計画し実行している。特に伝送の多重化は重要な取組みの一つである。

(2) 仕様

本システムは、通常、携帯電話回線網を使用して各種データを伝送している。大規模災害発生時は、携帯電話の利用が極度に集中し、回線の輻輳（ふくそう）によりデータ伝送が滞る恐れがある。富士電機はこのような状況に備え、輻輳の恐れが低い衛星携帯電話をバックアップ用回線として導入し、携帯電話回線網が不通のときには、衛星携帯電話網に切り替えて伝送を継続する。また、環境放射線監視システム用に付与された電波帯域を利用する環境放射

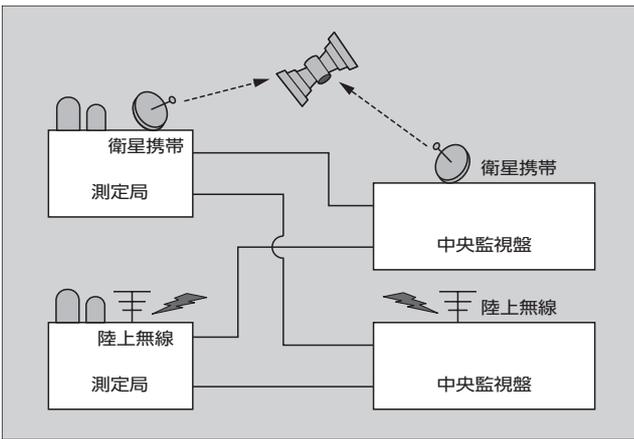


図7 伝送概念図

線監視システム専用の陸上無線装置を開発し、導入している。この陸上無線装置は、通常の防災無線装置の内蔵部品やソフトウェアを見直し、環境放射線監視システムへの最適化を図っている。伝送概念図を図7に示す。

4 医療分野向け放射線管理システム

4.1 IoT 対応新型放射線管理システム

(1) 背景

富士電機は、医療施設への導入が加速する重粒子線治療装置や陽電子放射断層撮影（PET 検査：Positron Emission Tomography 検査）などの核医学利用施設において放射線を管理するための放射線管理システムを製作し、納入している。

一例としてシンチレーションカメラ（SPECT 装置：Single Photon Emission CT 装置）を用いた診断では、放射性医薬品を患者に投与して検査している。そこで、医療分野向け放射線管理システムでは、これらの検査や治療で発生する放射性物質を含む排ガスおよび排水、ならびに放射性物質に起因する放射線をモニタリングし、オペレーションコンソールにデータを伝送し、集中監視を行って、「医療法」や「放射性同位元素等規制法」に順守した管理

を行う。

従来のシステムは、院内で完結するスタンドアロン型システムが主流であった。万が一、故障が発生した際は、保守員が現地に赴き故障部位を調査し特定した後、機器交換などを行う。しかしながら、システムが停止すると、治療や検査に影響を与えるので、信頼性の向上は病院運営においても重要な課題の一つである。そこで、富士電機は、モニタリング状況を遠隔監視し、故障が発生した時の初動対応を迅速化する IoT 対応新型放射線管理システムを開発した。

(2) 特徴

システムの中核であるオペレーションコンソールを全面的にリニューアルし、システム監視用クラウドサーバに各種システム情報を送信する機能を備えた。システム監視用クラウドサーバが不具合を発見すると、事前に登録した顧客施設の管理者や富士電機の保守員などのメールアドレス宛てにメールを迅速に自動配信する。メールを受信した保守員は、クラウドサーバに保存されたシステムの各種情報をまず分析し、あらかじめ想定した故障箇所の部品を準備して持参することで復旧時間の短縮を図ることができる。また、定期点検においても事前に情報を分析し、故障予兆診断を行うことで、システムの停止を未然に防ぐことがで

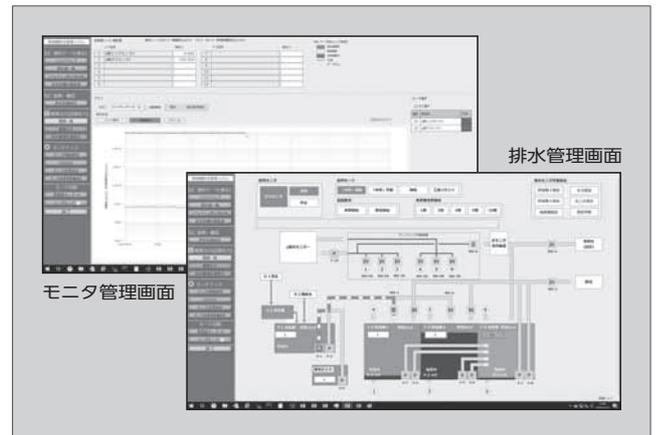


図9 コンソール画面例

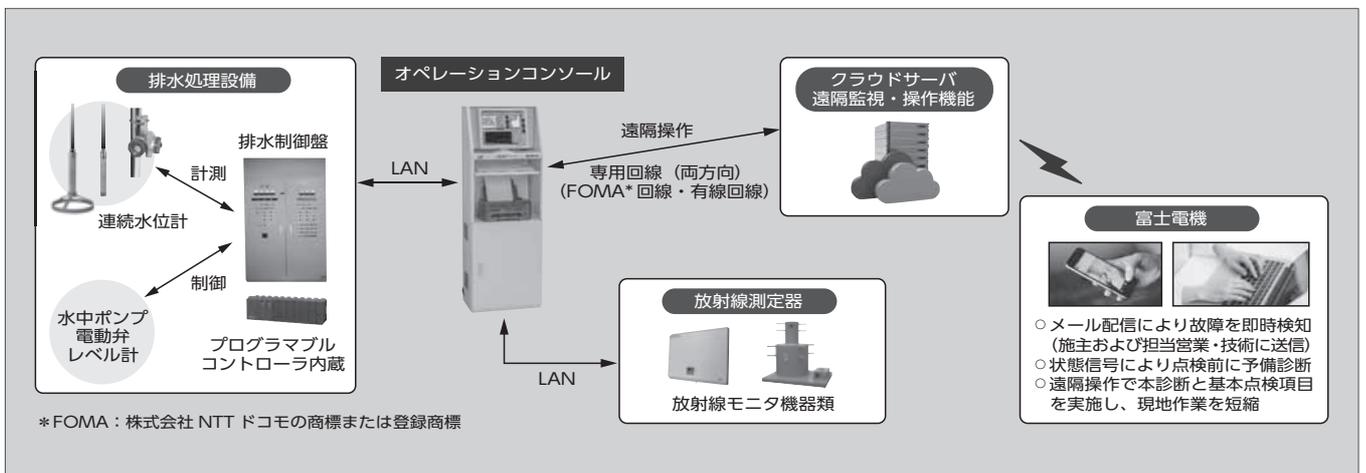


図8 IoT 対応新型放射線管理システムの概要

きる。

なお、遠隔監視を使用するネットワーク回線には、富士アイティ株式会社がMVNO事業者として運営する廉価な回線（FiT モバイル）を採用することで、顧客の経済的負担を低減する。

IoT 対応新型放射線管理システムの概要を図8に、コンソール画面例を図9に示す。

5 被ばく管理システム

5.1 IoT 対応新型線量管理システム

(1) 概要

法令により、放射線管理区域内で作業する作業従事者の被ばく線量を管理することが義務付けられているため、作業従事者は線量計を装着して作業に当たっている。今回述べるIoT 対応新型線量管理システムは、原子力施設内での運用を想定した堅牢（けんろう）な構造と国内外ユーザーのニーズに基づく最新のIoT 技術を適用した新型電子線量計「NRF」と、遠隔監視用のクラウド監視サーバにより構成される。

(2) 線量計「NRF50」の特徴

「NRF50」は線量計の国際規格IEC 61526をはじめ、国内規格であるJIS Z 4312や米国の規格ANSI N42.20に準拠している。さらに、MIL-STD461Fを満足するEMC性能やIP65/67の防水性能を持っている。また、従来の線量計にはないWi-Fi^(注2)やBluetooth^(注3)など通信機能を内蔵しており、リアルタイムに被ばく線量が監視できる。また、作業者が緊急事態を即座に通報できるコールボタンや、被ばく線量や警報状態をより分かりやすく作業者に通知する大型ドットカラーディスプレイの採用など、従来の線量計にはない機能を多く実装している。主要性能と特徴を表5に示す。

(3) クラウド線量管理システム

NRF50は900MHz帯通信無線（米国向け）またはWi-Fiから通信方式を選択することができる。Wi-Fiルータやスマートフォン（Bluetooth、テザリング機能）を経由してクラウド線量管理システムに接続することで、作業管理者は遠隔で作業者の被ばく線量をリアルタイムに把握できる。

原子力施設内での作業や除染作業における作業者の被ばく低減効果に加え、例えば、放射性物質を用いたテロ発生時において、初動対応者の被ばく管理用として利用することも想定される。

5.2 ホールボディカウンタ

ホールボディカウンタ（WBC：Whole Body Counter）には、スクリーニング測定用WBCと精密測定用WBCが

〈注2〉Wi-Fi：Wi-Fi Allianceの商標または登録商標

〈注3〉Bluetooth：Bluetooth SIG, Inc.の商標または登録商標

表5 「NRF50」の主要性能と特徴

項目	内容
検出器	シリコン半導体検出器
測定線種	γ線およびX線
測定範囲	1 μSv ~ 10 Sv (積算線量) 0.1 μSv/h ~ 10 Sv/h (線量率)
エネルギー特性	±20%以下 (50 keV ~ 6 MeV)
指示誤差	±10%以下 (¹³⁷ Cs)
規格	JIS Z 4312 (2013) 適合、IEC 61526 (2010) 準拠、ANSI N42.20 (2003) 準拠、MIL-STD-461F準拠、IP65/67
通信方式	USB、Bluetooth、IR、Wi-Fi もしくは900 MHz帯通信
表示	大型モノクロドットLCD カラーバックライト (白、赤、黄)
外形寸法	W60×H105×D29/18 (mm)
質量	約150 g (クリップ、電池含む)
特徴	Wi-Fi、900 MHz帯通信などの無線機能を本体に内蔵 (従来は無線モジュールを別途取付)
	緊急用コールボタンを側面に配置
	大型モノクロドットLCDにより文字表示が可能

ある。主な仕様を表6と表7に示す。

スクリーニング測定用WBCでは、放射性物質による体内汚染の有無を判定する。体内汚染があると判定されると、精密測定用WBCを使って体内の放射性物質から放出されるγ線を体外から測定して、核種の定性・定量分析、預託実効線量（内部被ばく線量当量）の算出に使用する体内放射性物質量を把握する。

(a) 形状

WBCは測定時の被検者の姿勢により、チェア型、

表6 基本仕様（スクリーニング測定用）

項目	内容
検出器	プラスチックシンチレーション検出器またはNaI (TI) シンチレーション検出器
遮へい方式	シャドーシールド方式
測定時間	30秒～2分
BG値	約2,500 ~ 4,000 min ⁻¹ (100 keV ~ 2.0 MeV : 30分測定)
検出感度	約150 ~ 250 Bq (¹³⁷ Cs)
	約50 ~ 100 Bq (⁶⁰ Co)

表7 基本仕様（精密測定用）

項目	内容
検出器	高純度ゲルマニウム検出器またはNaI (TI) シンチレーション検出器
遮へい方式	シャドーシールド方式
測定時間	約10分
BG値	約2,500 ~ 4,000 min ⁻¹ (100 keV ~ 2.0 MeV : 30分測定)
検出感度	約120 ~ 150 Bq (¹³⁷ Cs)
	約60 ~ 90 Bq (⁶⁰ Co)

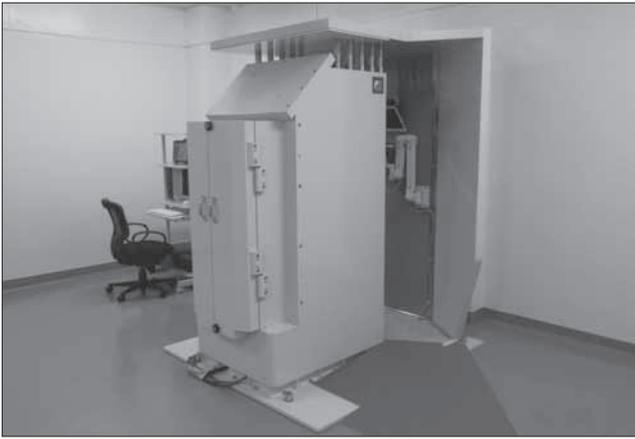


図 10 チェア型 WBC

ベッド型、立位型に分類される。例えば、チェア型は被検者が遮へい体の中の椅子に座って測定を受ける。図 10 に示す富士電機のチェア型は、遮へい体の左右両方に出入口を設けているので、設置場所のレイアウトによる制約を受けにくい。また、自然放射線の入射を抑制するシャドーシールドを行っている⁽²⁾ので、バックグラウンド放射線の影響を抑えた測定が可能である。車載用に天井の低いタイプもラインアップしている。

(b) 被検者への配慮

被検者は遮へい体に囲まれた WBC 本体に入って受検するため、音声や表示により測定案内を行い、被検者が戸惑うことのないように配慮している。また、測定中にビデオなどの映像を提供するなど、被検者の測定中の負担を軽減しており、受検時の快適さの向上を図っている。

(c) 管理者による管理業務の容易化

測定終了と同時に測定データはサーバに伝送される。このデータは、管理区域に入域する際に実施される WBC 受検有無のチェックなどに使用される。また、測定結果はサーバに一元保存され、管理者は管理用 PC の画面で各種情報を確認することができる。また、受検スケジュール管理機能と、被検者へのメールによる測定案内から測定までの自動化により、スケジュール管理、測

定案内に要する負担低減に大きく貢献している。

⑥ あとがき

安全・安心に貢献する放射線管理サービスソリューションについて述べた。今後も、さらなる信頼性と利便性の向上を図るために、日々進歩する IoT 技術などの最新技術を取り込み、震災復興支援への積極的な参与とともに医療分野および国外の原子力施設へのシステム導入を通じ、作業者の被ばく低減や環境放射線の管理強化に寄与していく所存である。

参考文献

- (1) 中島定雄ほか. 環境保護に貢献する放射線管理ソリューション. 富士電機技報. 2018, vol.91, no.1, p.50-54.
- (2) 富士電機株式会社. 放射線検出装置. 特許第6515739号. 2015-08-25 (出願日).



前川 修

原子力関連施設の放射線計測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 インダストリー事業本部社会ソリューション事業部放射線システム部長代理。



加藤 勉

原子力関連施設の放射線計測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 インダストリー事業本部社会ソリューション事業部放射線システム部課長補佐。



安部 繁

原子力関連施設の放射線計測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 インダストリー事業本部社会ソリューション事業部放射線システム部課長補佐。日本保健物理学会会員、日本原子力学会会員。



大容量 UPS を用いたデータセンター向け共通予備システム

Common Backup Systems for Data Centers Using Large-Capacity UPS

安本 浩二 YASUMOTO, Koji

濱田 一平 HAMADA, Ippei

根本 健司 NEMOTO, Kenji

データセンターで使われている無停電電源システム（UPS）は、信頼性や省エネルギー、経済性が重要である。これまで採用されていた待機冗長や並列冗長システムは、冗長容量が単機 UPS 容量となるので単機 UPS 容量の小さい方が経済性に優れていた。近年、さらに信頼性の高い共通予備システムの採用が望まれており、その場合には単機 UPS 容量の大きい方が経済性に優れる。そこで富士電機は、単機 UPS 容量、負荷容量に関わらず冗長容量が変わらず、信頼性と経済性に優れた共通予備システムを構築した。

Uninterruptible power systems (UPS) used in data centers require reliability, energy savings and economic efficiency. In standby redundant and parallel redundant systems, redundant capacity will equal the capacity of a single-unit UPS. As a result, smaller capacity units provide more economic efficiency. In recent years, there has been growing demand to deploy common backup systems with enhanced reliability, whose economic efficiency increases as the single unit UPS capacity becomes higher. It is against this backdrop that Fuji Electric has developed highly reliable and economical common backup systems whose redundant capacity does not depend on single-unit UPS capacity and load capacity.

1 まえがき

データセンターでは、システムの安定稼働のため、あらゆる設備を冗長化している。

この中で使われている無停電電源システム（UPS：Uninterruptible Power Systems）は、信頼性や省エネルギー（省エネ）、経済性が重要である。省エネについては、インバータ出力電圧を3レベルにしたもの⁽¹⁾、主回路素子にSiCを採用したもの⁽²⁾、サーバ負荷に直接電源供給が可能⁽³⁾な三相4線式、三相4線式に台数制御と常時商用給電を付加したもの⁽⁴⁾を開発し、高効率なシステムを提供してきた。

UPSを設計する上で、負荷容量や冗長システムを考慮して単機容量を決定することが重要である。これまで、冗長システムには、待機冗長や並列冗長、 $2N$ システム^(注1)などが主に採用されてきた。この中で、二つのUPSを構築する $2N$ の信頼性は他と比較すると非常に高くなる。ただし、冗長率は1である。これに類似した信頼性の高い共通予備システムでは、群の容量を冗長するため冗長率を $1/N$ にできる^(注3)。したがって、このシステムでは群を構成する単機

UPS容量が大きくなるほど台数が削減でき経済的となる。

これまでUPSにおける待機冗長や並列冗長などのシステム信頼度計算^{(6),(7)}が紹介されている。しかし、共通予備システムの計算例は見かけない。また、UPSの主回路や制御方法はメーカーにより異なる。そこで、富士電機のUPS回路構成や制御方法を考慮した計算を行い、共通予備システムの信頼性の高いことを確認した。

これにより単機容量を大きくしたUPSのシリーズ化により、信頼性の高い共通予備システムの採用が進んでいく。

2 単機 UPS 容量の選定方法

富士電機では、表1に示すように単機容量500kVAと1,000kVAを開発し、大容量UPSのシリーズ化を進めている。いずれも最大8台まで並列が可能である。さらに、三相4線式では、単機容量1,200kVAを開発中である。

バイパス付き単一UPSを基本システムとして、これを組み合わせて図1に示すように待機冗長、並列冗長、共通予備、 $2N$ 、 $2(N+1)$ などの冗長システムを構成する。

表1 富士電機の大容量UPSシリーズ

UPS型式	7000HX-T3 ⁽¹⁾	7000HX-T4 ⁽³⁾	7000HX-T4E ^{(3),(4)}	7400WX ⁽⁵⁾
給電方式	常時INV	常時INV	常時INV 常時商用	常時INV 常時商用
結線	三相3線	三相4線	三相4線	三相3線
電圧(V)	420	400	400	480
単機容量(kVA)	500	500	500	1,000
幅寸法(mm)	1,500	1,600	1,600	3,000

〈注1〉UPSシステムの構成は、一般に N という用語を使用する。 N とは、負荷容量と同等なUPS台数のことである。

〈注2〉負荷容量に対してどれだけ余分な容量があるかを指標として示すため、冗長率を（予備のUPSの台数）/（給電に必要なUPSの台数）で定義する。並列冗長 $N+1$ では、給電に必要な N 台と予備機分の1台の合計 $N+1$ 台のUPSを設置する。1台が故障しても残りのUPSで給電が継続できる。この場合、冗長率は $1/N$ となる。

〈注3〉共通予備システムにおいて各負荷に対して電源を構成する単機UPSの集まりを群と定義する。

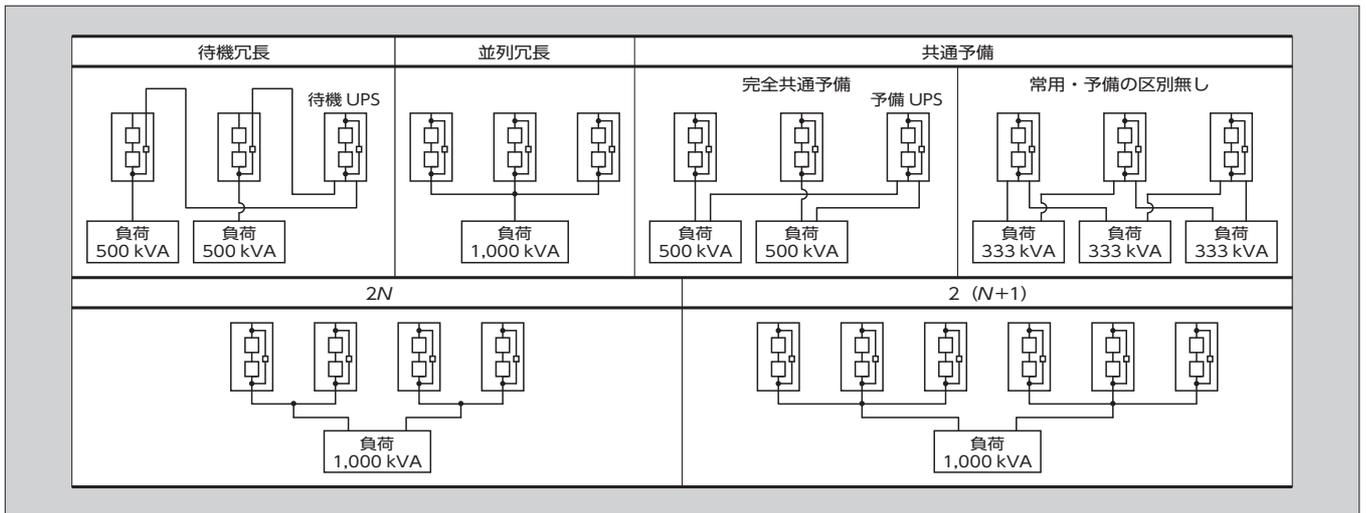


図1 各冗長システムのUPSと負荷の関係（単機UPS容量500kVA、負荷容量1,000kVAの例）

表2 各冗長システムの単機容量に対する冗長容量（負荷容量3,000kVA×4）

冗長システム	単機容量 (kVA)	UPS構成	冗長容量 (kVA)
待機冗長	500	単機 (6+1) × 4式	2,000
	1,000	単機 (3+1) × 4式	4,000
並列冗長	500	並列 (6+1) × 4式	2,000
	1,000	並列 (3+1) × 4式	4,000
共通予備	500	並列6台 × (4+1) 群	3,000
	1,000	並列3台 × (4+1) 群	3,000

これらのシステムに対するUPSと負荷の接続状態を図1に示す。各システムはUPS単機容量500kVA、負荷容量1,000kVAとした。

各冗長システムの単機容量に対する冗長容量を表2に示す。負荷容量3,000kVA×4、UPS単機容量500kVAと1,000kVAとして待機冗長、並列冗長、共通予備システムを比較した。待機冗長と並列冗長では群ごとに予備機が1台必要になるので、単機容量に比例して全体の冗長容量が増加する。これに対して共通予備システムでは単機容量に関係なく一つの群の容量が冗長容量となる。そのため、単機容量が大きいほど回路数は削減され経済性の面で有利となる。また、UPSの群が増えても冗長容量は一定なので、群の数が増えるほど経済性の面で有利となる。

3 冗長システムの信頼性

図1に示すシステムの故障率を計算して信頼性の違いを3.1節で比較する。故障率の単位は1時間当たりの故障する回数(1/h)である。

3.1 バイパス切換えにおける故障率の考え方

インバータ給電中に故障が発生すると、バイパスに切換えて給電を継続する。

冗長システムにおける各機器などの故障率の扱いを

表3 冗長システムにおける各機器の故障率の扱い

故障率	機器	バイパス付き単一UPS	待機冗長	並列冗長	共通予備
バイパス回路 λ_{SB}	バイパス側のMC4	○	○	○	○
バイパス切換回路 λ_C	MC4インタフェースユニット	○	○	除外	○
	サイリスタスイッチ	○	○	除外	○
	サイリスタ駆動ユニット	○	○	除外	○
切換制御部 λ_{CT}	並列用CT	—	—	○	○
並列ユニット λ_{PIU}	並列ユニット(負荷分担)	—	—	○	○
切換制御部 λ_{CH}	並列ユニット(切換機能)	—	—	○	○
並列ユニットの切換機能 λ_{DIU}	切換制御部	—	—	○	○

表3に示す。バイパス回路とバイパス切換回路は、UPSが故障後に動作する機器でありインバータ給電時の故障率 λ_{UPS} には関係しない。

バイパス付き単一UPSの場合は、インバータ給電からバイパスへの切換え失敗で電源供給は停止する。

並列冗長システムの場合、1台だけの切換え失敗であれば、電源供給は可能である。したがって、表3の λ_C を対象から除外して考える。その代わりに並列ユニットの切換機能の故障率を考慮に加える。並列ユニットで、故障時に全台数に対して切換指令を送信するので、この切換機能が故障すると切換えができず給電を停止する。

共通予備は各群に冗長性は持たせないなので、表3の全ての機器を考慮の対象とする。

3.2 バイパス付き単一UPSの故障率

バイパス付き単一UPSを図2に示す。バイパス回路に

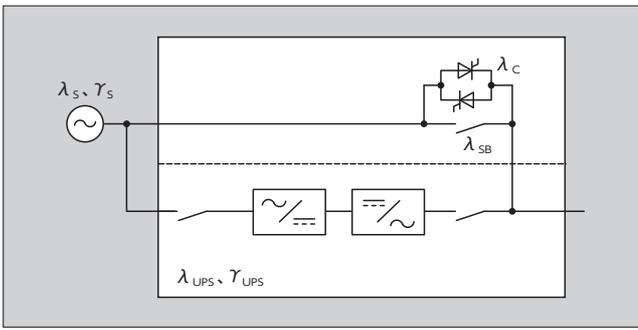


図2 バイパス付き単一UPS

は、サイリスタスイッチと電磁接触器（MC）を並列に設けている。UPS が故障すると瞬時にサイリスタスイッチが点弧し、インバータ給電からバイパス給電に切り換える。その後、MC を並列投入しサイリスタスイッチが消弧する。

(a) UPS が故障し、バイパス回路に無瞬断切り換えとなる。

$$\lambda_{UPS} \dots\dots\dots(1)$$

(b) UPS の故障修復中に、商用電源が停電またはバイパス回路が故障すると給電が停止する。

$$\lambda_{UPS} (\lambda_s + \lambda_{SB}) \gamma_{UP} \dots\dots\dots(2)$$

(c) さらにバイパス切換回路の故障で給電停止となる。したがって、単機システムの故障率 λ_{SM} は式(3)のようになる。

$$\lambda_{SM} = \lambda_{UPS} (\lambda_s + \lambda_{SB}) \gamma_{UPS} + \lambda_c \dots\dots\dots(3)$$

3.3 待機冗長システムの故障率

待機冗長システムを図3に示す。常用UPSのバイパス入力回路には予備UPSの出力回路を接続する。常用UPS

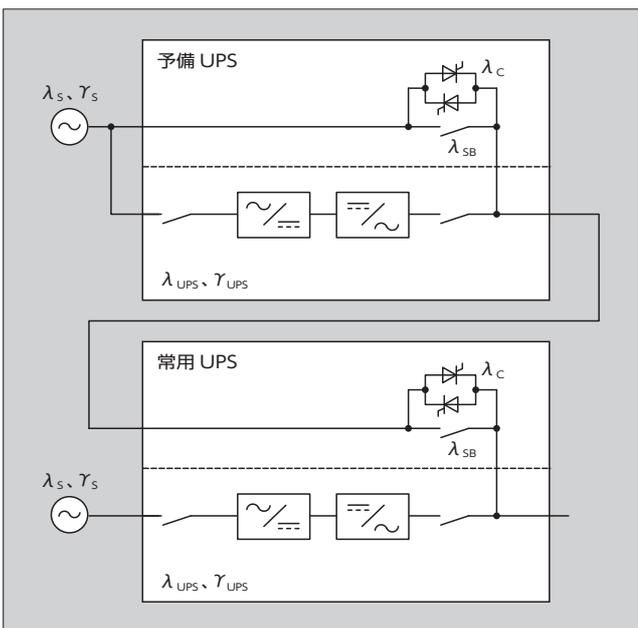


図3 待機冗長システム

から負荷に給電する。常用UPSが故障すると、バイパス切換して予備UPSからインバータ給電を行う。

(a) 常用UPSがN台の場合、UPS故障率はN倍となる。

$$N \lambda_{UPS} \dots\dots\dots(4)$$

(b) 常用UPSの故障の修復中に、常用UPSのバイパス回路または予備UPSが故障すると給電を停止する。

$$N \lambda_{UPS} (\lambda_{SM} + \lambda_{SB}) \gamma_{UPS} \dots\dots\dots(5)$$

(c) 常用UPSがバイパスへの切換えを失敗すると給電を停止する。

待機冗長システムの故障率 λ_{SR} は式(6)のようになる。

$$\lambda_{SR} = N \lambda_{UPS} (\lambda_{SM} + \lambda_{SB}) \gamma_{UPS} + \lambda_c \dots\dots\dots(6)$$

3.4 並列冗長システムの故障率

並列冗長システムを図4に示す。UPSが故障するとバイパス回路に切換えとなる。バイパス給電中に、停電またはバイパス回路と並列ユニットの切換回路が故障すると給電を停止する。

(a) 並列台数N台の場合、UPSの故障率はN倍となる。

$$N (\lambda_{UPS} + \lambda_{NB}) \dots\dots\dots(7)$$

(b) UPSが故障修復中に、他のUPSが故障するとバイパスに切り換える。

$$N (N-1) (\lambda_{UPS} + \lambda_{NB})^2 \gamma_{UPS} \dots\dots\dots(8)$$

(c) また、並列システムには、負荷分担制御を行うため電流計測のためのCTや並列ユニットがある。これらの機器が故障すると負荷分担ができず、過電流となりバイパスに切り換える。

したがって、バイパスに切換えとなる故障率 λ_{PINV} は式(9)のようになる。

$$\lambda_{PINV} = N (N-1) (\lambda_{UPS} + \lambda_{NB})^2 \gamma_{UPS} + N (\lambda_{CT} + \lambda_{PIU}) \dots\dots\dots(9)$$

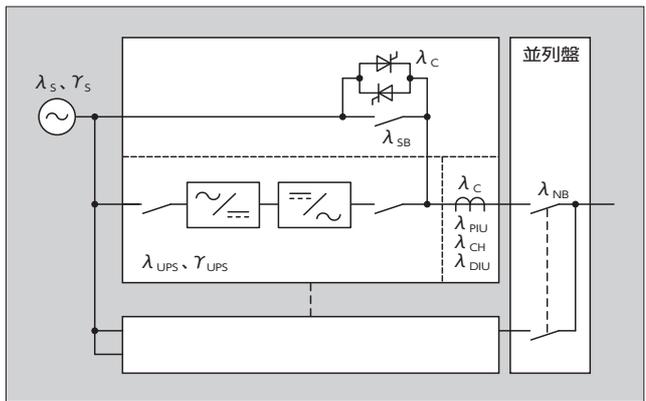


図4 並列冗長システム

(d) バイパスに切換え後、 N 台中 1 台のバイパス回路が故障する。

$$N \lambda_{SB} \dots\dots\dots(10)$$

(e) バイパス回路の故障の修復中に残りの $(N-1)$ 台中の 1 台のバイパス回路が故障すると過負荷となり給電停止する。

$$N(N-1) \lambda_{SB}^2 \gamma_S \dots\dots\dots(11)$$

(f) さらに停電が発生すると商用給電停止する。

$$N(N-1) \lambda_{SB}^2 \gamma_S + \lambda_S \dots\dots\dots(12)$$

(g) UPS の故障の修復中に(f)が発生すると商用給電停止する。

$$\lambda_{PINV} [N(N-1) \lambda_{SB}^2 \gamma_S + \lambda_S] \gamma_{UPS} \dots\dots\dots(13)$$

(h) さらに並列ユニットの切換機能と切換制御部が故障すると給電停止する。

並列冗長システムの故障率 λ_{PR} は、式(14)のようになる。

$$\lambda_{PR} = \lambda_{PINV} [N(N-1) \lambda_{SB}^2 \gamma_S + \lambda_S] \gamma_{UPS} + N(\lambda_{CH} + \lambda_{DIU}) \dots\dots\dots(14)$$

3.5 共通予備システムの信頼性

共通予備システムを図5に示す。共通予備方式のシステムは図1に示したように完全共通予備の方式と常用・予備を区別しない方式の2種類がある。いずれの方式も故障率は2群のUPSが停止し、負荷への電源供給が不可能となった場合とする。負荷側で二つの電源を切り換える機器があるが、その故障率については考慮しないものとする。

(a) UPSが故障すると、バイパスに切り換える。また、並列システムには、負荷分担制御を行うため電流計測

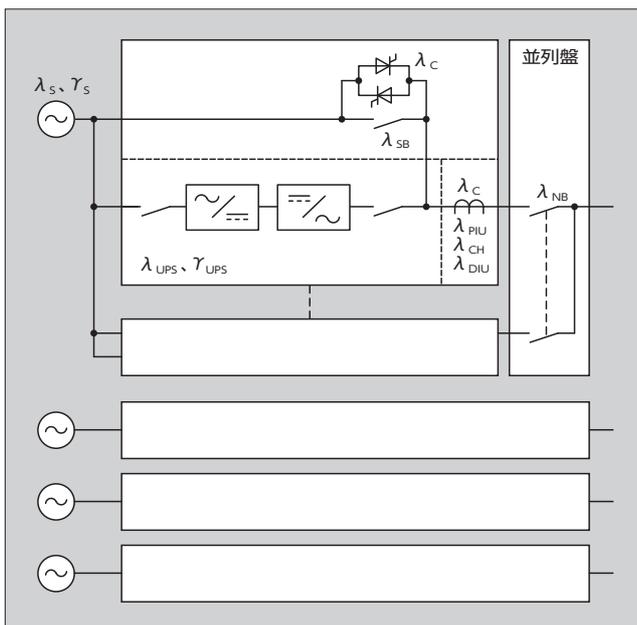


図5 共通予備システム (4群の例)

のCTや並列ユニットがある。これらの機器が故障した場合、負荷分担ができず、過電流となりバイパス切換えとなる。一つのUPSシステムの並列台数が N 台の場合、故障率は N 倍となる。

$$N(\lambda_{UPS} + \lambda_{NB} + \lambda_{CT} + \lambda_{PIU}) \dots\dots\dots(15)$$

(b) 故障したUPSの修復中に、停電またはバイパス回路が故障すると商用給電が停止する。

$$N(\lambda_{UPS} + \lambda_{NB} + \lambda_{CT} + \lambda_{PIU})(N\lambda_{SB} + \lambda_S) \gamma_{UPS} \dots\dots(16)$$

(c) さらに並列ユニットの切換機能や切換制御部、バイパス切換回路が故障すると給電を停止する。並列システムの故障率 λ_P は、式(17)のようになる。

$$\lambda_P = [N(\lambda_{UPS} + \lambda_{NB} + \lambda_{CT} + \lambda_{PIU})](N\lambda_{SB} + \lambda_S) \gamma_{UPS} + N(\lambda_{CH} + \lambda_{DIU} + \lambda_C) \dots\dots\dots(17)$$

(d) 二つのUPSシステムが故障すると電源供給が停止する。共通予備システムの故障率 λ_{CS2} は、式(18)のようになる。

$$\lambda_{CS2} = N_S(N_S - 1)(\lambda_P)^2 \gamma_{UPS} \dots\dots\dots(18)$$

なお、 $2(N+1)$ システムは、並列冗長システムを2セット設けたもので、故障率は次のとおりである。

$$\lambda_2(N+1) = 2\lambda_{PR}^2 \gamma_{UPS} \dots\dots\dots(19)$$

3.6 冗長システムの可用性

商用電源の停電の発生頻度は年に4回とすると、商用電源の故障率 λ_S は次式のようになる。

$$\lambda_S = 4 / (365 \times 24) = 1 / (2.19 \times 10^3) (1/h) \dots\dots\dots(20)$$

また、整流器やインバータの冷却ファンは冗長化していること、定期的な交換を前提としており、 λ_{UPS} の故障率からは除外した。

故障修復時間を8時間として、「7000HX-T4」を用いた場合の単機、待機、並列冗長システムの可用性(Availability)を表4に示す。待機冗長は、常用機の台数に関係なく一定である。これは、単機システムと同様に、バイパス切換回路の故障率が支配的となるためである。並列冗長は台数が増えるに従い小さくなる。

表4 単機、待機、並列冗長システムの可用性 (単機容量 500 kVA)

冗長システム	負荷容量 (kVA)	稼働率 (%)	年間停止時間 (s)
単機	500×1	99.9995	158
(1+1) 待機冗長	500×1	99.9995	158
(7+1) 待機冗長	500×7	99.9995	158
(1+1) 並列冗長	500×1	99.99991	28
(7+1) 並列冗長	3,500×1	99.9996	126

同じく 7000HX-T4 を用いた場合の並列冗長と共通予備、 $2N$ 、 $2(N+1)$ システムの可用性を表 5 に示す。負荷容量は 2,000 kVA とした。並列冗長、共通予備、並列 $2N$ 、並列冗長の $2(N+1)$ の順に可用性は大きくなる。さらに、並列冗長に比べて共通予備の年間停止時間は 173 s から 0.03 s となり、可用性は飛躍的に向上する。

可用性は、システムが継続して稼働できる能力のことである。可用性の数値としての表現は稼働率を用いる。修理可能な系や機器、部品などがある特定の瞬間に機能を維持している確率（瞬間稼働率）、または規定の時間で機能を維持している確率（平均稼働率）のことである。稼働率 A と平均故障間隔（MTBF：Mean Time Between Failure）、平均復旧時間（MTTR：Mean Time To Recovery）の関係は式(21)のようになる。

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \dots\dots\dots(21)$$

MTBF= 稼働時間 / 故障回数で算出され、MTBF の値が大きいほど、故障間隔が長く信頼性が高い。なお、MTBF は故障率 λ の逆数である。

表 5 並列冗長、共通予備、 $2N$ 、 $2(N+1)$ システムの可用性 (単機 UPS 容量 500 kVA、負荷容量 2,000 kVA)

冗長システム	UPS台数	負荷容量	稼働率 (%)	年間停止時間 (s)
並列冗長	(4+1)	2,000 kVA×1	99.9995	173
共通予備	2台並列×3群	1,000 kVA×2	99.99999992	0.03
$2N$	2×4	2,000 kVA×1	99.99999997	0.009
$2(N+1)$	$2(4+1)$	2,000 kVA×1	99.999999989	0.0003

4 大容量 UPS を用いた共通予備システム的设计

常用と予備を区別しない場合、1 台または複数台の UPS からなる UPS 群が停止しても、他の健全な UPS 群が均等に負荷を分担して過負荷とならないようにする必要がある。

負荷容量に応じて各 UPS 群の容量と数 N_s を決めると、出力分岐の最小の回路数は $N_s(N_s-1)$ となり、同時に分岐の各容量を決めることができる。負荷容量 2,000 kVA、単機 UPS 容量を 1,000 kVA とした場合の例を図 6 に示す。なお、1 回路当たりの容量 P_L は、UPS の単機容量を P とすると式(22)を使って計算できる。

$$P_L = P(N_s - 1) / N_s \dots\dots\dots(22)$$

また、各負荷への入力電源が二つの場合の組合せは、 $N_s C_2$ になるので、表 6 に示すように、UPS 群の数が増えると組合せが増え回路が複雑になるので、全体の経済性と信頼性を勘案して決定する必要がある。

常用と予備を区別しないシステムを採用するためには、UPS 出力の回路数、1 回路当たりの容量および負荷の給電システムを決める必要があり負荷側の給電設計に制約が生じる。一方、完全共通予備ではこのような制約は無く給電設計が容易となる。

表 6 共通予備システムの出力分岐設計例 (UPS 群の容量 1,000 kVA の例)

負荷容量 (kVA)	群の数 N_s	最小出力分岐数	出力分岐 1 回路の容量 (kVA)	負荷の入力電源の組合せ数 $N_s C_2$
2,000	3	6	666.6	3
3,000	4	12	500.0	6
4,000	5	20	400.0	10
5,000	6	30	333.3	15

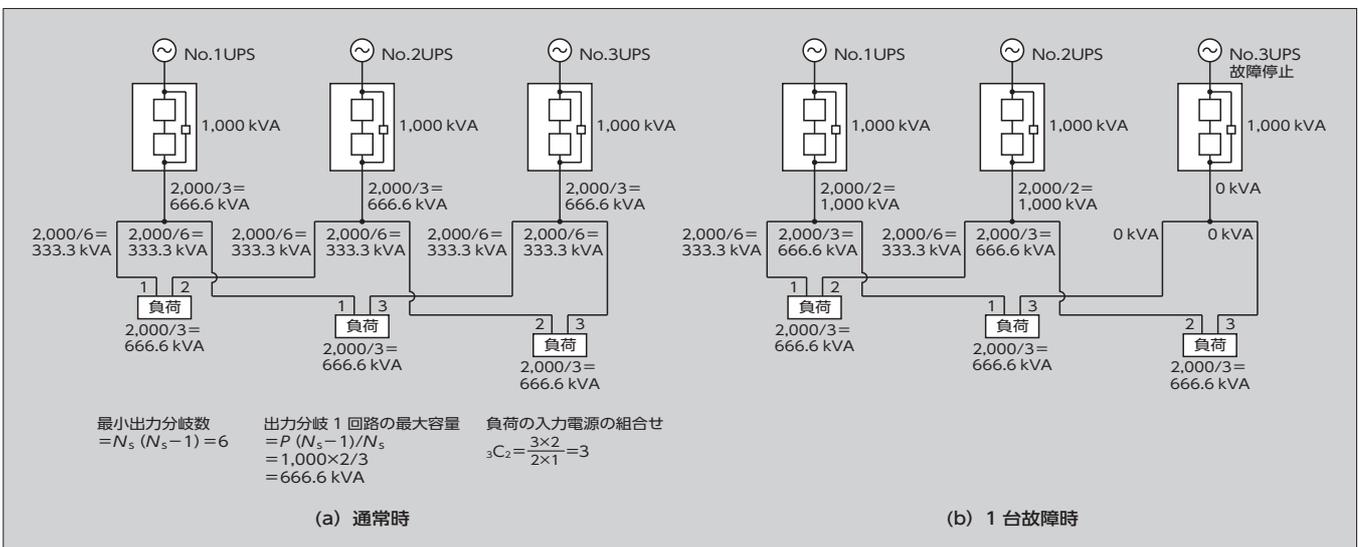


図 6 常用・予備を区別しない共通予備システム (3 群、UPS 群の容量 1,000 kVA、負荷容量 2,000 kVA の例)

5 あとがき

大容量 UPS を用いたデータセンター向け共通予備システムについて述べた。大容量 UPS をシリーズ化することで信頼性、経済性で優れる共通予備システムが構築できる。また、UPS システムを設計する上で必要となる単機 UPS 容量の選定、各種冗長システムの信頼性について解説した。

今後、負荷容量の増大に UPS システム容量が増大していくことも予測される。大容量システムにも対応できるシステム設計や製品開発に注力していく所存である。

〔この論文中の記号〕

- λ_S : 商用電源の故障率 (1/h)
- γ_{UPS} : UPS の故障修復時間 (h)
- γ_S : 商用、バイパス回路の故障修復時間 (h)
- λ_{UPS} : UPS (インバータ給電) の故障率 (1/h)
- λ_{SB} : バイパス回路の故障率 (1/h)
- λ_C : バイパス切換回路の故障率 (1/h)
- λ_{NB} : 出力遮断機の故障率 (1/h)
- λ_{CT} : 並列用 CT の故障率 (1/h)
- λ_{PIU} : 並列ユニットの故障率 (1/h)
- λ_{CH} : 切換制御部の故障率 (1/h)
- λ_{DIU} : 並列ユニットの切換機能故障率 (1/h)
- λ_{SM} : 単機システムの故障率 (1/h)
- λ_{SR} : 待機冗長システムの故障率 (1/h)
- λ_{PINV} : バイパスに切換えとなる故障率 (1/h)
- λ_P : 並列システムの故障率 (1/h)
- λ_{CS2} : 共通予備システムの故障率 (1/h)
- N : 並列冗長の UPS 台数、待機冗長の常用 UPS 台数
- N_s : 共通予備システムの UPS 群の数
- L : 1 回路当たりの容量 (VA)
- P : UPS 群の容量 (VA)
- A : 稼働率
- MTBF : 平均故障間隔
- MTTR : 平均復旧時間

参考文献

- (1) 山方義彦ほか. データセンター向けA-NPC 3レベル適用大

容量高効率UPS「UPS7000HXシリーズ」. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.3, p.250-254.

- (2) 佐藤篤司ほか. SiCハイブリッドモジュールを適用した北米向け大容量UPS「UPS7300WX-T3U」. 富士電機技報. 2017, vol.90, no.1, p.55-57.
- (3) 安本浩二ほか. 三相4線式無停電電源装置を活用した電源システムの高効率化. 富士電機技報. 2019, vol.92, no.1, p.54-59.
- (4) 安本浩二ほか. 常時商用給電方式と台数制御機能を付加した高効率UPS「UPS7000HX-T4」. 富士電機技報. 2019, vol.92, no.3, p.151-155.
- (5) 佐藤篤司ほか. ハイパースケールデータセンター向けUPS. 富士電機技報. 2019, vol.92, no.3, p.147-150.
- (6) 定由征次. ユーザーズガイドシリーズ 無停電電源装置 (UPS) 導入実践ガイド. 電気書院, 1989年2月.
- (7) 松崎薫. 大規模無停電電源システムの高信頼化技術. 電気学会論文誌D (産業応用部門). 1994年3月, vol.144-D, p.260-p.267.



安本 浩二

道路用電気集じん装置、液晶ガラス基板恒温装置、無停電電源装置の研究・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 エネルギー事業本部施設・電源システム事業部 D プロジェクト部主席。博士 (工学)。技術士 (電気・電子部門)。



濱田 一平

中大容量 UPS 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 エネルギー事業本部開発統括部電源機器開発部主任。電気学会会員。無停電電源システム標準化委員兼 IEC SC22H エキスパート。



根本 健司

中大容量無停電電源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 エネルギー事業本部施設・電源システム事業部 D プロジェクト部。



太陽光発電用パワーコンディショナ 「PIS-50/500 (DC1,100 V/50 kVA)」

“PIS-50/500” (1,100 V DC/50 kVA) Power Conditioning System for Photovoltaic Power Generation

木内 忠昭* KIUCHI, Tadaaki

辻村 記一* TSUJIMURA, Norikazu

森嶋 洋介* MORISHIMA, Yosuke

太陽光発電で用いられるパワーコンディショナ（PCS：Power Conditioning System）は、その発電規模により大きく二つのタイプに分けられる。MW（メガワット）以上の大規模発電には、大型の PCS で電力を集中変換するセントラル式が、小規模発電には、設置工事や管理が容易な小型の PCS を分散配置したストリング式^{（注1）}が用いられてきた。しかし、近年、ストリング式 PCS を複数台接続した大規模発電が増加している。その理由として、ストリング式 PCS は、セントラル式より、小容量 PCS の分散配置で故障時の発電量の低下リスクが低減できる。さらに、個別の昇圧回路による最大電力点追従（MPPT：Maximum Power Point Tracking）制御で発電量が多く得られるなどの利点がある。また、基礎工事や搬入道路、重機を不要とする容易な施工に加え、PCS の容量増加により一台当たりの W（ワット）単価が低下した。これによりシステム全体の導入コストが抑制されたことが挙げられる。

富士電機は、これらの市場変化に合わせ、セントラル式 PCS シリーズに加え、DC1,100 V/50 kVA クラスのストリング式 PCS 「PIS-50/500」をラインアップに加えた（図1）。



図1 「PIS-50/500」

1 「PIS-50/500」の概要

1.1 特徴

図2に PIS-50/500 のシステム構成を示す。電力変換器は、主に太陽電池（PV：Photovoltaic）から得られる電圧を昇圧する昇圧回路（図2-①）と、直流から交流変換し系統電源へ回生する DC/AC 変換回路（図2-②）で構成している。

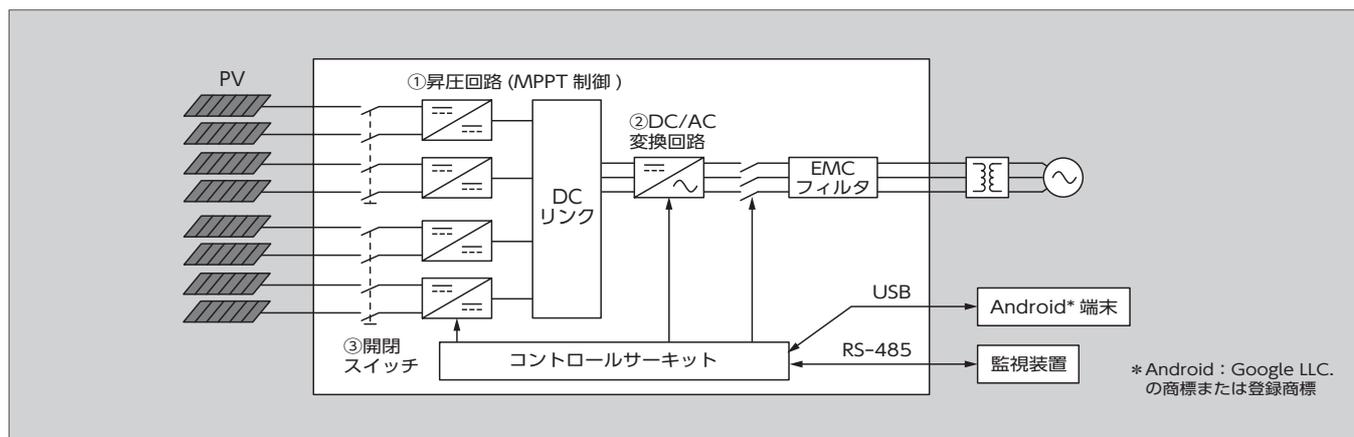


図2 ストリング式 PCS のシステム構成

* 富士電機株式会社パワエレシステム インダストリー事業本部開発統括部パワエレ機器開発部

‡ 富士電機株式会社パワエレシステム エネルギー事業本部開発統括部電源機器開発部

〈注1〉ストリング：所定の電圧・電流となるように複数台の PV パネルを直列に接続する。この直列に接続されたグループを“ストリング”と呼ぶ。

* Android：Google LLC. の商標または登録商標

二つのストリングごとに標準装備した昇圧回路で、朝・夕や曇り空でもPVが発電したわずかなエネルギーを高効率に変換する。さらに、MPPT制御でストリングごとの発電量を最大限発揮するよう構成されている。

本PCSには、PVから直接接続できる配線コネクタと、開閉スイッチ(図2-③)を標準で搭載している。これにより、PVの配線の集約と配線の開閉を行う集電箱が不要になった。

1.2 仕様

主な仕様を表1に示す。

PCSは、電力変換時の損失の低減、すなわち高い変換効率が最も重要な仕様である。本PCSは、昇圧回路を標準搭載しつつも最適なPV制御と、パワー半導体の選定により、効率99%(最大)、98.5%(Euro基準)を達成している。変換効率特性を図3に示す。

通常、ストリング式PCSは、工場などの屋上や、山間部・湖上などへの設置が多いことから、重機なしで搬送

表1 「PIS-50/500」の仕様

項目	仕様	
概要	定格出力	50kVA
	絶縁方式	トランスレス方式
電気仕様 (DC入力)	最大直流入力電圧	DC1,100V
	直流入力電圧 (MPPT範囲)	DC200 ~ 1,000V
	直流入力分岐数	8
電気仕様 (AC出力)	出力電圧範囲	AC500V -10 ~ +10%
	周波数範囲	50/60Hz ±6%
	出力相数	三相3線、非接地系
	装置効率	99% (最大) 98.5% (EURO効率)
構造	適合IP	IP65
	冷却方式	自然空冷
	外形寸法	W930×D260×H540 (mm)
	質量	58kg
	動作温度	-25 ~ +60℃

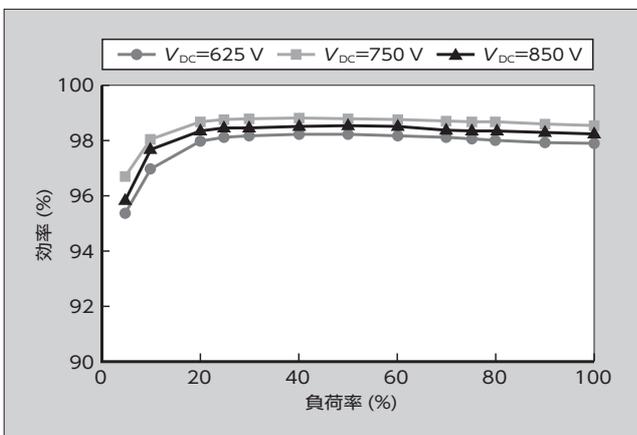


図3 変換効率特性

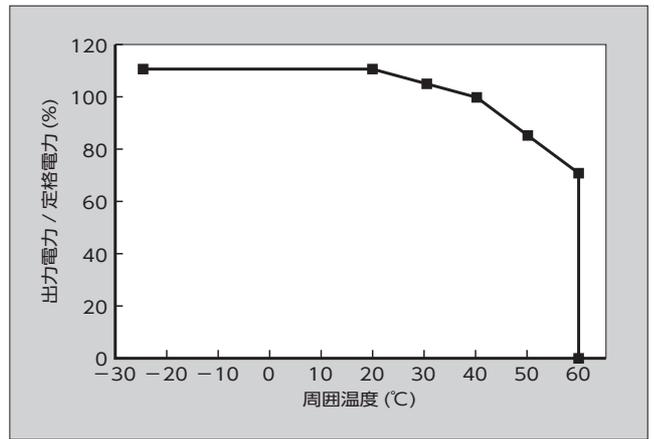


図4 動作周囲温度特性



図5 適用事例

や取付けができる必要がある。そこで、本PCSは質量を抑制しつつ、屋外に設置できるように完全防水の筐体(きょうたい)(IP65)と、電力変換用のパワー半導体の発熱を放熱するための冷却ファンを不要にし、10年間のメンテナンスフリーを実現した。また、周囲温度が最高60℃まで運転できるので、真夏の屋上でも停止することなく運転可能である(図4、図5)。

RS-485通信による遠隔監視装置との通信機能を備えている。また、Android^(注2)端末をPCSに直接接続し、設置工事時の試運転やメンテナンス時の運転操作および状態確認を、屋外で容易に行えるモニタリング機能を搭載している。

2 背景となる技術

2.1 高効率化

パワー半導体が電力変換時に発生する損失を低減するため、電力変換器の昇圧回路にはSiC-SBD(Schottky Barrier Diode)を、DC/AC変換回路には、3レベル変

〈注2〉 Android : Google LLC. の商標または登録商標。

換回路を採用している。また、3レベル変換回路では、半導体がスイッチング時に発生するノイズを抑制しているほか、出力電流の波形ひずみを低減している。さらにスイッチングノイズは、内蔵したEMCフィルタで抑制し、IECおよび各国のEMC基準を満たしている。

2.2 軽量化

一般的な屋外盤は、安価である鉄筐体に防さび剤や強化塗装を施している。一方、本PCSを軽量化するために筐体・構造にアルミニウムを多用し58kgを実現し、重機による設置を不要とした。

2.3 長期メンテナンスフリー

パワー半導体の放熱には、通常ファンによる強制風冷式が採用される。しかしこの方式では、メッシュフィルタなど構造的な工夫を行って、風雨や粉じんの影響を受

けないようにしているものの、定期メンテナンスが必要である。前述したように、パワー半導体の損失低減と、パワー半導体をフィン上に最適になるように分散して配置することにより、ファンを使用しない自然空冷式での冷却ができるようにした。

発売時期

日本、中国、タイ、フィリピン：2019年11月販売済み

お問い合わせ先

富士電機株式会社
発電プラント事業本部営業統括部営業第五部
電話 (03) 5435-7048



蒸気用超音波流量計（クランプオン式）

Ultrasonic Flowmeters for Steam (Clamp-on)

平山 紀友* HIRAYAMA, Noritomo

金井 秀夫* KANAI, Hideo

木代 雅巳* KISHIRO, Masami

2015年に採択された地球温暖化など気候変動問題に関する国際的な枠組みである「パリ協定」(COP21)では、日本は温室効果ガス排出量を2030年度までに2013年度比で26%減らすことを目標に掲げている。

また、2018年の「エネルギー使用の合理化等に関する法律」(省エネ法)の改正では、“省エネ再エネ高度化投資促進税制”によって、新たに購入した省エネルギー(省エネ)設備取得価格の30%の特別償却または7%の税額控除を措置する制度が新設されるなど、社会的に徹底的な省エネの推進が行われている。

このような協定や改正された法律に促されて、各家庭や事業所ではエコ製品の購入や太陽光発電などの再生可能エネルギーの活用により電気の省エネが広く実施されている。

電気エネルギーは容易に測定できるので見える化によってさまざまな省エネが行われていて、これ以上の削減効果は望みにくい。一方、蒸気エネルギーは測定が難しく見える化が困難であるため省エネの実感が分かりにくく、実施できたとしても継続できずに止めてしまうことが多かった。しかし、さらなる省エネを実施する上で蒸気の省エネ化は避けて通ることができない。

1 蒸気用超音波流量計

富士電機は蒸気の見える化を実現するため、配管に外付けするクランプオン式の蒸気用超音波流量計を開発し、製品化した(図1)。

0.1 MPa (G) の低圧力から測定できるクランプオン式の蒸気用超音波流量計は世界初の製品であり、ボイラ設備の末端流量まで測定できる。

従来の差圧流量計は、オリフィスによる圧力損失が大きく、また、詰まりが発生した場合はメンテナンスが必要である。省エネ目的で流量を測る上で圧力損失によってエネルギーロスが生じることはあまり好ましくない。

また、渦流量計を含めたインサート式の流量計は、ウォーターハンマーや蒸気の過大流量により機器が故障するリスクを伴う。

これに対して、クランプオン式の流量計は、圧力損失がなく、測定流体の状態変化に対しても影響を受けるこ

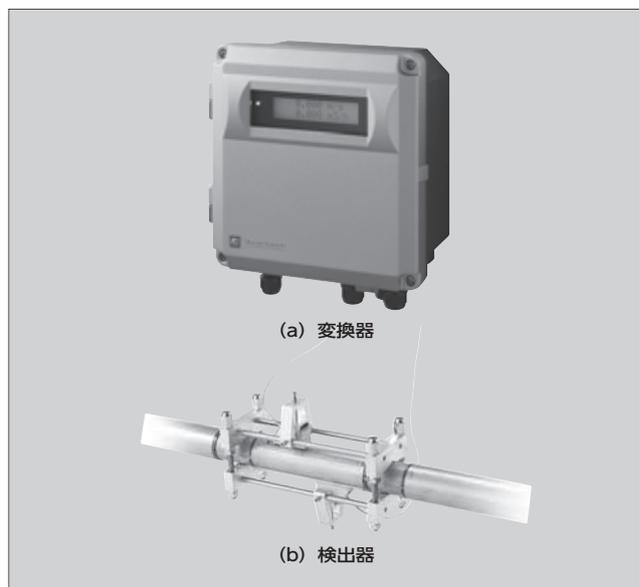


図1 蒸気用超音波流量計（クランプオン式）

とがない。そのため、エネルギーロスがなく、機器故障のリスクが低い。

さらに、センサを設置するために配管を切る必要がないので蒸気漏れの心配がなく、センサ全体を断熱材で覆うことができるため、機器からの放熱によるエネルギーロスが少なく省エネ機器として最適である。

2 特徴

ボイラ設備などの飽和蒸気を測定対象にしている本製品は、次のような特徴がある。

(1) 配管工事不要で設備稼働中でも設置可能

配管外付けタイプであるため設備が稼働中でも自由に設置でき、センサはレール取付けのため取付け位置の調整が容易で、短時間で取付けが可能である。

(2) 低圧の蒸気から高温の蒸気まで測定可能

従来の超音波流量計で測定が難しかった低圧蒸気が測定できる。また、キュリー点よりも低く超音波振動子の磁性が維持できる180℃までの蒸気を測定することが可能である。

(3) 質量流量換算が可能

外部入力信号(Analog Input)やオプションの白金測温抵抗体を使って測定した蒸気温度から密度を求め、質量流量を出力することが可能である。

* 富士電機株式会社パワエレシステム インダストリー事業本部開発統括部計測機器開発部

表1 仕様

項目	仕様
適用流体	飽和蒸気
最低圧力	0.1 MPa (G)
最高流体温度	180℃
精度	±3.0% of rate (10～30 m/s)
口径	50 A (SGP* ¹ 管、SUS* ² 管)
配管厚	2.8～3.9 mm
直管長	上流20D* ³ 、下流10D以上
出力	DC4～20 mA×1点 接点出力×1点 積算パルス出力×1点
電源	AC100～240 V、50/60 Hz

*1：配管用炭素鋼管
*2：ステンレス鋼管
*3：配管内径

(4) 高精度かつ高速応答

搭載している高速FPGA（Field-Programmable gate array）によって0.2秒の応答性を実現している。流速が早い環境にも対応して、クランプオン式でありながら3.0% of rate（10～30 m/s）と高精度な計測が可能である。

製品の主な仕様を表1に示す。

3 測定原理

液体用の超音波流量計と同様に、伝搬時間差法を用いて流量を計測している。伝搬時間差法では、一対のセンサ間で測定流体を斜めに横切るように超音波パルスを往復させる。測定流体に流れがあると流れの影響を受けて伝搬時間に差が生じる。この伝搬時間の差から蒸気の流速を計測する（図2）。

蒸気や気体は液体と比べて超音波透過率が約1/2,400しかなく、従来の技術では測定が困難であった。しかし、センサ構造を見直して超音波の伝搬効率を高めた。また、図3に示すようにノイズ吸収材を配管表面に巻くことにより配管表面から回り込んでくるノイズを大きく低減し

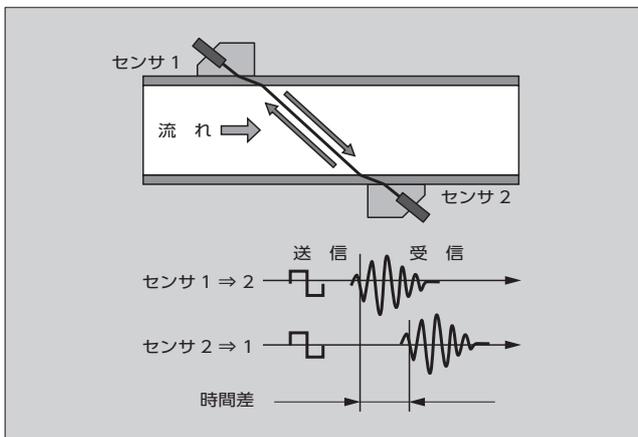


図2 伝搬時間差法

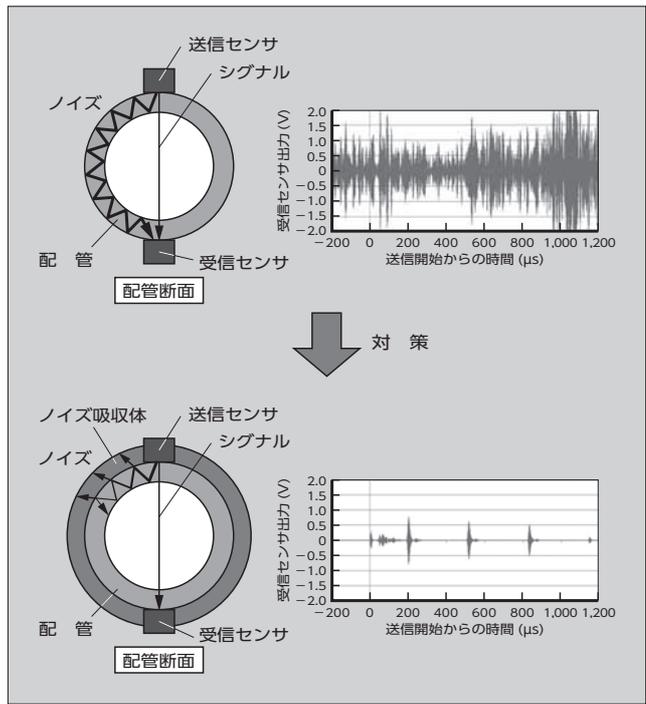


図3 S/N対策

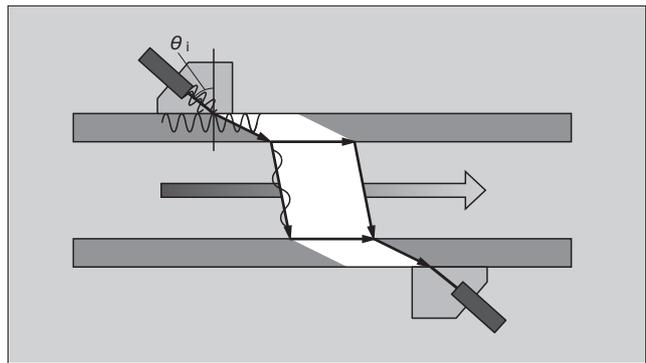


図4 板波の励起条件

てS/N比を高めるなどの対策を行った。

測定に使用する波は液体で使用していた縦波ではなく、板波（ラム波）を利用している。板波から伝搬した流体中の音線は広く分布するため、感度が大きく、また飛沫に対しても強いなどの特徴がある。

板波は、位相速度と楔（くさび）音速と入射角が式(1)を満たすとき励起される。

$$C_p = \frac{C_i}{\sin \theta_i} \dots \dots \dots (1)$$

- C_p ：板波の位相速度
- C_i ：楔の音速
- θ_i ：楔の入射角

楔音速と入射角から板波の位相速度を求め、分散曲線から測定するモードを選定し、配管の横波音速と配管厚さから振動子の周波数を求めて、センサ構成を決定する（図4）。

4 適用事例

4.1 適用事例 1 (殺菌設備)

某 A 工場の殺菌設備で使用している蒸気について、蒸気超音波流量計を使って熱収支分析を行い、省エネ診断のフィールドテストを行った。

この事例の設備において、蒸気は熱交換器の温水を加熱する入熱として利用され、蒸気流量計はその蒸気入口に設置した (図 5)。さらに、温度センサや液体用超音波流量計なども設置し、収集したデータを遠隔・リアルタイムで監視できるように社内評価用サーバに接続するシステムとした。

蒸気の熱量は製品が持ち出す熱量のほか、冷却水排熱、ドレン・廃温水による熱ロスなどによって消費される。

フィールドテストの結果、次のことが分かった。

- (a) 製品出口温度が設計値より 5℃以上高い。
- (b) 排温水から約 30 kW のフラッシュ蒸気が発生する。
- (c) 設備停止中でも蒸気による入熱がある。

そこで、これらの事象の原因を分析した。製品出口温度が設計値より高いのは、熱交換器の経年劣化により回収熱量が設計値より低下していることが原因であった。また、フラッシュ蒸気は 0.3 MPa (G) の高圧水から 0.0 MPa (G) の配管に流れたことで発生していたため、フラッシュタンクで分離回収して利用し、廃温水はヒー

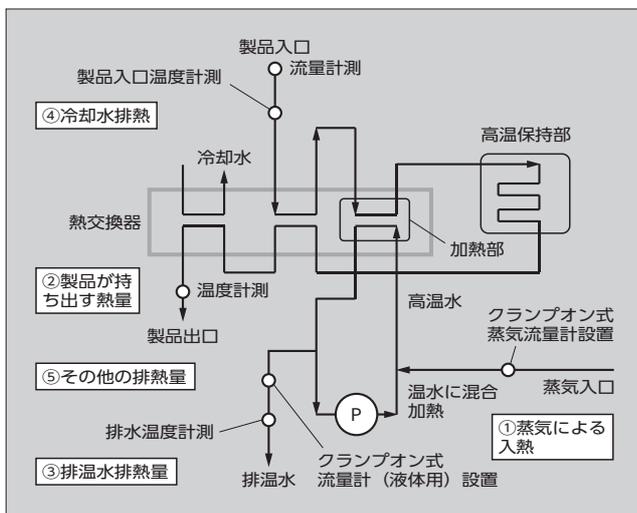


図 5 殺菌設備の熱交換器図

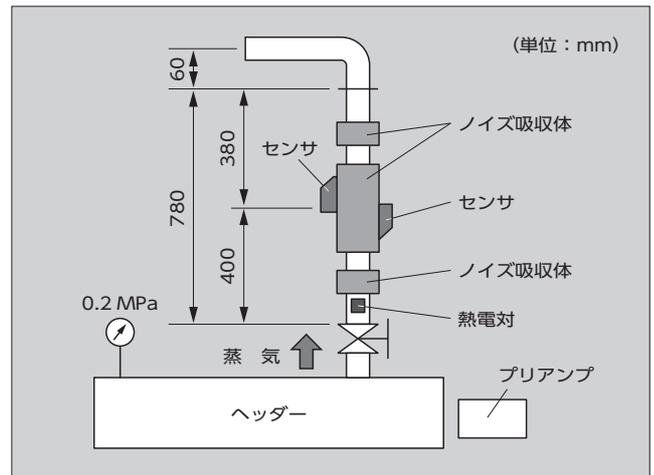


図 6 配管設備図

トポンプなどで排熱回収利用できていることが分かった。

4.2 適用事例 2 (ボイラ設備)

某 B 工場のボイラ設備では今まで蒸気流量を測定したことがなかった。そこで、蒸気流量計を設置して無駄な消費が発生していないかを調査し、省エネ対策を立案することを目的とした。

設置場所は周囲を含めて十分な空間がなかったが、図 6 のようにヘッダー直後の垂直配管にセンサを取り付けた。

約 2 週間測定した結果、人がいない夜間や休日でも常時 4 m³/h の蒸気が流れていることや、休日の決まった時間帯に突発的に大量の蒸気が流れるなど無駄な消費があることが分かり、ボイラの稼働条件を見直した。

これらの事例から分かるように、本製品は蒸気の省エネ対策機器として有効である。

発売時期

2019 年 6 月

お問い合わせ先

富士電機株式会社
 パワエレシステム インダストリー事業本部オートメーション事業部システム営業技術部
 電話 (03) 5435-7021

電機高速コントローラ「MICREX-VieW XX (ダブルエックス) XCS-3000 Type E」

“MICREX-VieW XX (Double X) XCS-3000 Type E” High-Speed Controllers for Electrical Machinery Control

栗原 司* KURIHARA, Tsukasa

永塚 一人* NAGATSUKA, Kazuhito

大坪 宏輔* OTSUBO, Kosuke

電動力応用プラントにおいて、近年プラント規模が拡大し操業効率の向上が求められている。さらには、生産現場ではトレーサビリティの重要度が増している。そのため、このようなプラントシステムで扱うデータ量が増大している。

表面処理設備や圧延設備に代表される鉄鋼プラントでは、電機品はインバータ制御によって駆動している。このようなプラントで使用されるコントローラは、システムの高度化に伴い、高速大容量メモリや高信頼性ネットワークを備えることが求められている。

そこで、生産設備の稼動状況を監視・制御し、高い信頼性を持たせながら、大容量の監視・制御データを高速に更新可能な電機高速コントローラシステムの主要コンポーネントであるコントローラ「MICREX-VieW XX (ダブルエックス) XCS-3000 Type E」を開発した(図1)。



図1 「XCS-3000 Type E」

1 特徴

監視制御システム「MICREX-VieW XX」には、用途により2種類のコントローラを提供している。計測監視制御システム用途には、システム二重化による高信頼性を追求した「XCS-3000 Type I」がある。電動力応用プラントのシステム用途には、高速性と信頼性を追求したXCS-3000 Type Eがある。

XCS-3000 Type Eを使用した電動力応用プラントのシステム構成例を図2に、XCS-3000 Type Eの仕様を表1に示す。

1.1 高速・大容量制御ネットワーク「SX-Net」

「SX-Net」では、ギガビット Ethernet^(注1)を使用することに加え、接続局を高精度で時刻同期して時分割送信権制御により、^(注2)コモンメモリの更新は最速で8Kワード/ms、最大容量として1,128Kワードの更新が可能な富士電機独自の制御ネットワークである。SX-Netによって大規

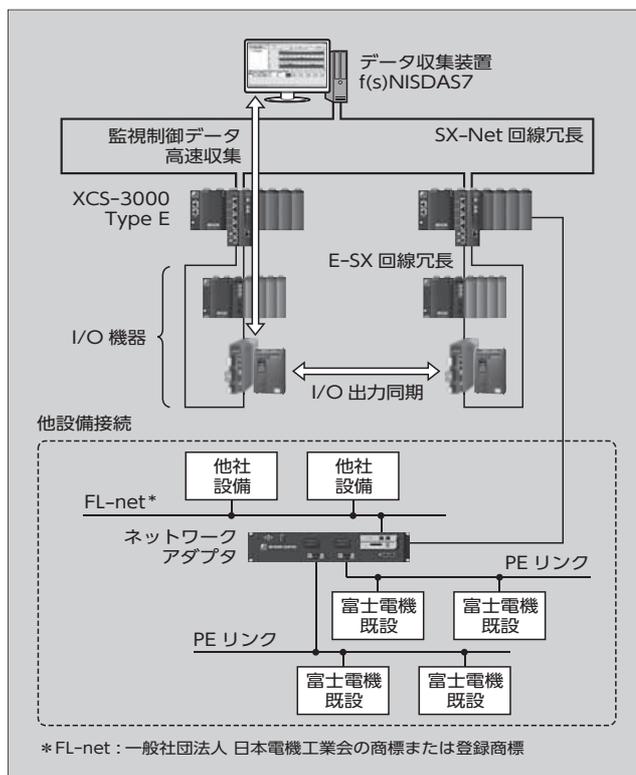


図2 電動力応用プラントのシステム構成例

* 富士電機株式会社パワエレシステム エネルギー事業本部エンジニアリング統括部プラントシステムセンターオートメーションシステム技術部

* 富士電機株式会社パワエレシステム インダストリー事業本部開発統括部システム開発企画部

* 富士電機株式会社パワエレシステム インダストリー事業本部オートメーション事業部技術第一部

表1 「XCS-3000 Type E」の仕様

項目		仕様	
制御ネットワーク	対応プロトコル	SX-NetまたはFL-netを設定で選択	
	SX-Net	速度性能① (物理層伝送速度)	1,000Mbps/s
		速度性能② (コモンメモリ送信速度)	最速8Kワード/ms
		大容量性① (コモンメモリサイズ)	最大1,128Kワード
		大容量性② (接続台数)	最大126台
		信頼性機能 (回線冗長機能有無)	有
I/Oネットワーク	E-SXバス	速度性能① (物理層伝送速度)	100Mbps/s
		速度性能② (I/O速度)	最速512ワード/ms
		大容量性 (I/O容量)	最大4,096ワード
		信頼性機能 (回線冗長機能有無)	有
		同期機能 (出力局同期)	有
アプリケーション	メモリアドドライバ速度	1～70ns	
	エンジニアリングツール	VieW/C (Expert) 富士電機PLCと共通	

模システムであっても高速にデータの収集ができるようになった詳細なデータを、生産加工情報のリアルタイムな見える化や大量の蓄積情報を用いた予兆診断、エネルギー最適化などに活用することができる。

また本システムでは、SX-NetとI/Oネットワーク(E-SXバス)のデータ交換周期、制御アプリケーション実行周期を全て同期動作できるシステム同期機能を持っている。この機能により、E-SXバス上の駆動装置などのI/Oから制御ネットワーク上のデータ収集装置「f(s) NISDAS7」までのデータ転送スループットが向上(最速1.0ms)した。

1.2 高速・高精度同期バス「E-SXバス」

「E-SXバス」は、16軸の駆動装置を0.5ms、駆動装置間の出力タイミングの誤差を±1μsで更新できる、富士電機独自の高速・高精度同期バスである。さらに、前述のSX-Netによるシステム同期機能により、複数のXCS-3000 Type Eの制御周期は同期して動作させることができ、また、それぞれXCS-3000 Type EのE-SXバスも同期して動作(±80μs)させることが可能である。

このようにして、1台の管理用マスタコントローラと複

〈注1〉 Ethernet：富士ゼロックス株式会社の商標または登録商標
 〈注2〉 コモンメモリ：SX-Netに接続された全てのコントローラが共通認識しているメモリブロックのことで、“SX-Netのシステム内コントローラでグローバルな共有メモリ空間”と捉えることができるメモリのことである。

数台のプロセス制御コントローラを配置し、多数の駆動装置を接続する大規模同期制御が可能となる。

1.3 ネットワーク高信頼化

一般的な制御システムでは、コントローラに接続される機器全てが同一ネットワーク上にバス接続されているため、断線などのネットワーク障害発生時にはこれらの機器が一斉に脱落してしまう。本システムでは、制御ネットワークおよびI/Oネットワークにおいてループ接続によって回線を冗長化しているため、設備の操業停止のリスクを低減し、システムの信頼性を高めている。

1.4 計測制御システムと電機制御システムの混在システム

制御ネットワークは、富士電機独自のSX-Netのほか、日本発の産業用オープンネットワークで国際標準となっているFL-net^(注3)を切り替えて使用できるため、計測制御システムと電機制御システムが混在するシステムを構築できる(図3)。

1.5 富士電機既設機器と他社機器の接続機能

プラントシステムにおいては、富士電機の既設機器との接続や、他社機器との接続が求められるが、XCS-3000 Type Eではネットワーク拡張に柔軟に対応できるネットワークアダプタにより、富士電機の既設機器との接続に必要なPEリンクとDPCS-F、他社機器との接続に必要なFL-netが使用できる。ネットワークアダプタとXCS-3000 Type EをギガビットEthernetで接続することにより、大容量のネットワークを複数接続しても50ms以内で全制御ネットワークのデータ交換が可能である。

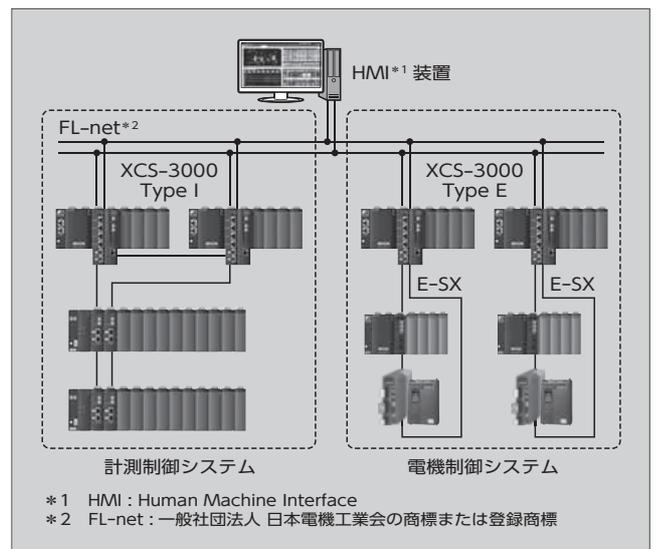


図3 計測制御システムと電機制御システムの混在システム

〈注3〉 FL-net：一般社団法人 日本電機工業会の商標または登録商標

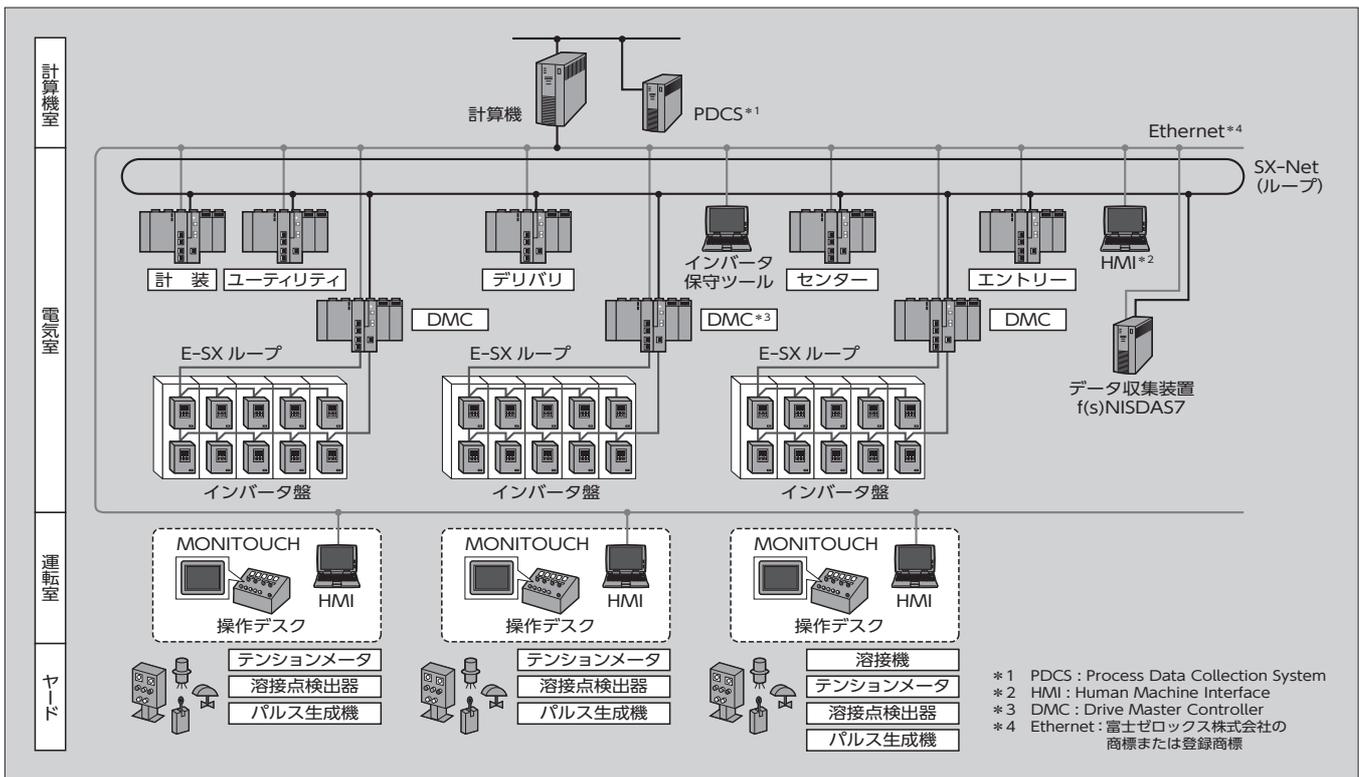


図4 鉄鋼プロセスラインのシステム構成例

1.6 アプリケーション高速大容量化

「XCS-3000」では、高速メモリだけを使ってアプリケーションが実行できる仕組みを搭載しているので、アプリケーション処理速度を向上している。さらに、プログラム容量を大容量化（512kStep）することで、従来は複数のコントローラで行っていたプラント制御を1台にまとめ、システムの導入コストが削減できる。

1.7 統一されたエンジニアリング環境

プラントシステムでは、XCS-3000 Type Eのような大規模な制御が可能なコントローラの配下に小規模な制御用のプログラブルコントローラ（PLC：Programmable Logic Controller）を配置することが多い。富士電機のコントローラは、大規模から小規模まで全て同じエンジニアリングツールを使ってアプリケーションが開発できるので、エンジニアリングの効率化に寄与する。

2 適用事例

XCS-3000 Type Eの適用事例として、図4に示すような鉄鋼プロセスラインのプラント駆動制御システムについて述べる。

鉄鋼材料の加熱、酸洗、鍍金（めっき）、塗布などを行うプロセスラインには、数百台のモータのほかにインバー

タ、バルブおよびセンサなどが動作している。この制御システムの入出力点数は数万点を超える。

ライン制御PLCの制御ネットワークには、SX-Netループ（制御スキャン周期10ms）、インバータのI/OネットワークにはE-SXバスループ（制御タクト周期5ms）を採用した。制御ネットワーク、I/Oネットワークでループ接続を実現することにより、1か所ネットワーク障害が発生しても制御PLCやインバータの脱落が発生しないことを保証し、ネットワーク障害によって発生するライン停止による生産能力が低下してしまうリスクを低減する。

前述のとおり、顧客設備はXCS-3000 Type Eを採用することにより、高速大容量かつ高信頼ネットワークを備えた駆動制御プラントシステムとなり、生産性と操業性が向上する。

発売時期

2019年10月

お問い合わせ先

富士電機株式会社
 パワエレシステム インダストリー事業本部オートメーション事業部プラント営業技術部
 電話（042）585-6125

（2020年2月28日 Web公開）

略語（本号で使った主な略語）

AI	Artificial Intelligence	人工知能
ARMA	Autoregressive Moving Average	自己回帰移動平均法
CPHS	Cyber-Physical & Human Systems	
CPHSoS	Cyber-Physical & Human Systems of Systems	
CPS	Cyber-Physical Systems	
DBO	Design Build Operate	
DCS	Distributed Control System	分散型制御システム
DL	Deep Learning	
DMC	Drive Master Controller	
DRAM	Dynamic Random Access Memory	
DV	Disturbance Variable	外乱
EGCS	Exhaust Gas Cleaning Systems	排ガス浄化システム
EMC	Electromagnetic Compatibility	電磁両立性
EMS	Energy Management System	エネルギーマネジメントシステム
FPGA	Field-Programmable gate array	
HDD	Hard Disc Drive	ハードディスクドライブ
HMI	Human Machine Interface	
IBD	Interlock Block Diagram	
IIRA	Industrial Internet Reference Architecture	
IoT	Internet of Things	
JIT	Just-In-Time	
LAN	Local Area Network	
LNG	Liquefied Natural Gas	
LPG	Liquefied Petroleum Gas	
LW-PLS	Locally-Weighted Partial Least Squares	局所部分的最小二乗法
MDGs	Millennium Development Goals	
MES	Manufacturing Execution System	製造実行システム
MPC	Model Predictive Control	モデル予測制御
MPPT	Maximum Power Point Tracking	
MSPC	Multivariate Statistical Process Control	多変量統計のプロセス管理
MTBF	Mean Time Between Failure	平均故障間隔
MTTR	Mean Time To Repair	平均復旧時間
MV	Manipulative Variable	操作量
MVNO	Mobile Virtual Network Operator	仮想移動体通信事業者
OPC	OLE for Process Control	
OPC	Open Platform Communications	
PCS	Power Conditioning System	
PDCS	Process Data Collection System	
PDM	Product Data Management	製品情報管理
PET	Positron Emission Tomography	
PFI	Private Finance Initiative	
PID	Proportional-Integral-Differential	
PLC	Programmable Logic Controller	プログラマブルコントローラ
PLS	Partial Least Squares	部分的最小二乗法
PV	Photovoltaic	
PV	Process Variable	制御量
RAMI4.0	Reference Architecture Model Industrie 4.0	
RAS	Remote Access Service	
SBD	Schottky Barrier Diode	
SDGs	Sustainable Development Goals	
SFC	Sequential Function Chart	
SIM	Subscriber Identity Module	
SPECT	Single Photon Emission CT	
SRAM	Static Random Access Memory	
SSD	Solid State Drive	ソリッドステートドライブ
USPC	Univariate Statistical Process Control	一変量統計のプロセス管理

商標（本号に記載した主な商標または登録商標）

Android	Google LLC. の商標または登録商標
Bluetooth	Bluetooth SIG, Inc. の商標または登録商標
EtherCAT	Beckhoff Automation GmbH 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
FL-net	一般社団法人 日本電機工業会の商標または登録商標
FOMA	株式会社 NTT ドコモの商標または登録商標
Modbus	Schneider Automation, Inc. の商標または登録商標
Visio	Microsoft Corporation の商標または登録商標
Wi-Fi	Wi-Fi Alliance の商標または登録商標
Windows	Microsoft Corporation 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。



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



主要事業内容

パワーエレクトロニクス エネルギー

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

エネルギーマネジメントシステム (EMS)、電力流通、スマートメータ、変電

施設・電源システム

データセンター、無停電電源装置 (UPS)、配電盤

器具

受配電・制御機器

パワーエレクトロニクス インダストリー

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。

オートメーション

インバータ、モータ、FA コンポーネント、計測機器、FA システム、物流システム、駆動制御システム、計測制御システム、工業電熱

社会ソリューション

鉄道車両電機品、EV システム、放射線管理システム、船舶用排ガス浄化システム

情報ソリューション

情報制御システム

電子デバイス

高い品質、変換効率を実現、小型化・省エネ化に貢献します。

半導体

産業分野 (第7世代 IGBT モジュール、All-SiC モジュール、小容量 IPM、パワー MOSFET)
自動車分野 (車載用直接水冷型パワーモジュール、圧力センサ)

ディスク媒体

発電プラント

高度なプラントエンジニアリング力で、設計・製作から現地据付・試運転・アフターサービスまで一貫して提供します。

再生可能・新エネルギー

地熱発電、水力発電、太陽光発電、風力発電、燃料電池

発電プラント

火力発電、原子力関連設備

食品流通

自動化・省エネを食の安全・安心とともに提供します。

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

*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)

https://www.fujielectric.co.jp/about/company/contents_02_03.html

FUJI ELECTRIC REVIEW (英文)

<https://www.fujielectric.com/company/tech/contents3.html>

富士電機技術期刊 (中文)

<http://www.fujielectric.com.cn/jtkw.html>



次号予定

富士電機技報 第93巻 第2号

特集 2019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 渡部 雅教

熊谷 明恭 出野 裕 吉田 隆 桑山 仁平

眞下 真弓 大山 和則

特集委員 渡部 雅教 富永 保隆 中野 雅仁

事務局 木村 基 小野寺拓也 小野 直樹 高橋 徹

富士電機技報 第93巻 第1号

令和2年3月20日印刷 令和2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 本体700円+税

*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。

© 2020 Fuji Electric Co., Ltd., Printed in Japan (禁無断転載)

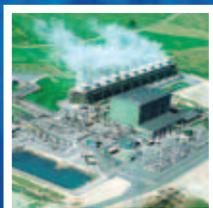
エネルギー・環境事業で、
持続可能な社会の実現に貢献します。



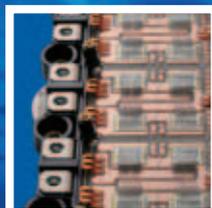
Innovating Energy Technology

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



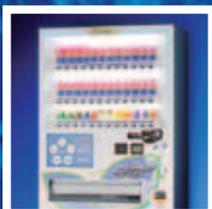
パワーエレクトロニクス技術
メガソーラー向けPCS
(パワーコンディショナ)



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

F 富士電機

本誌は、環境に配慮した FSC® 認証紙および
植物油インキを使用しています。また、ユニ
バーサルデザイン(UD)の考えに基づいた
見やすいデザインの文字を採用しています。

