

富士電機技報

FUJI ELECTRIC JOURNAL

2023
Vol.96 No.

3

特集 カーボンニュートラルの実現に向けた
ソリューション・技術



特集 カーボンニュートラルの実現に向けた ソリューション・技術

2050 年カーボンニュートラルの実現に向けて、富士電機はパワー半導体、パワーエレクトロニクス、計測・制御などのコア技術を活用して脱炭素に貢献する製品・ソリューションおよび新技術について幅広く取り組んでいます。これからも、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ていきます。

本特集では、カーボンニュートラルの実現に貢献する富士電機の取り組みを紹介します。

表紙写真

- ①蓄電池 PCS「PVI1400CJ-3/2600」
「PVI1500CJ-3/2750B」
- ②超音波流量計「M-Flow PW」
- ③蒸気発生ヒートポンプ「FHP-30」
- ④パワー半導体モジュール「M675」



目次

特集 カーボンニュートラルの実現に向けたソリューション・技術

〔特集に寄せて〕カーボンニュートラルと電力システム 安田 恵一郎	119 (3)
-------------------------------------	---------

〔現状と展望〕カーボンニュートラルの実現に向けた ソリューション・技術の現状と展望 大野 健 ・ 外山 健太郎	120 (4)
---	---------

全体最適を実現するデジタルツインモデル型 CEMS 亀田 尚登 ・ 飯坂 達也 ・ 松本 宏治	127 (11)
--	----------

再生可能エネルギーの導入拡大を支える電力流通ソリューション 岡林 弘樹 ・ 三好 龍之介 ・ 藤尾 昂弘	133 (17)
---	----------

電力の安定供給に貢献する系統用蓄電システム 金本 真依 ・ 毛内 俊晴 ・ 宮村 尚孝	138 (22)
--	----------

新たな分散型電力システムの設備導入に向けた 設備設計シミュレーション技術 石上 雄太 ・ 佐藤 智希 ・ 林 巨己	145 (29)
---	----------

船舶・港湾分野におけるカーボンニュートラルへの取り組み 造田 大祐 ・ 林 寛明 ・ 項 東輝	151 (35)
--	----------

自動車の電動化に貢献するパワー半導体 長畦 文男 ・ 池田 良成 ・ 松尾 壮太	156 (40)
---	----------

コンビニエンスストア店舗向け省エネルギーソリューション 石原 雄大	162 (46)
--------------------------------------	----------

水素社会の実現に貢献する燃料電池ソリューション 高野 洋	166 (50)
---------------------------------	----------

高効率な直流配電システムの構築を可能にする DC/DC コンバータ 依田 和之 ・ 田重田 稔久 ・ 山田 隆二	170 (54)
---	----------

熱プロセスの電化に貢献する排熱回収・利用技術 岩崎 正道 ・ 白井 英登 ・ 安嶋 賢哲	175 (59)
---	----------

水素・アンモニアの普及を支える計測技術 小泉 和裕 ・ 山内 芳准 ・ 武田 直希	179 (63)
--	----------

新製品紹介論文

LED 照明用 第 4 世代臨界モード PFC 制御 IC 「FA1B10N」	184 (68)
デザインを一新した「コマンドスイッチ」(φ 16 系、φ 22 系)	187 (71)
ストライカ引外し式限流ヒューズ付高圧交流負荷開閉器	189 (73)

略語・商標	191 (75)
-------	----------

Contents

Carbon-Neutral Solutions and Technologies

[Preface] Carbon Neutrality and Electric Power Systems YASUDA, Keiichiro	119 (3)
Carbon-Neutral Solutions and Technologies: Current Status and Future Outlook ONO, Takeshi TOYAMA, Kentaro	120 (4)
Digital-Twin Model Based CEMS for Total Optimization TATTA, Naoto IIZAKA, Tatsuya MATSUMOTO, Koji	127 (11)
Power Distribution Solutions to Support the Increased Use of Renewable Energy OKABAYASHI, Hiroki MIYOSHI, Ryunosuke FUJIO, Takahiro	133 (17)
Grid Storage Systems to Stabilize Power Supply KANEMOTO, Mai MONAI, Toshiharu MIYAMURA, Naotaka	138 (22)
Equipment Design Simulation Technology for Introducing Distributed Power System ISHIGAMI, Yuta SATO, Tomoki HAYASHI, Naoki	145 (29)
Initiatives to Achieve Carbon Neutrality in the Ship and Harbor Sector ZODA, Daisuke HAYASHI, Hiroaki Donghui, Xiang	151 (35)
Power Semiconductors for Facilitating Electrification of Automobiles NAGAUNE, Fumio IKEDA, Yoshinari MATSUO, Sota	156 (40)
Energy Saving Solutions for Convenience Stores ISHIHARA, Yudai	162 (46)
Fuel Cell Solutions to Create a Hydrogen Society TAKANO, Hiroshi	166 (50)
DC/DC Converters That Enable the Building of DC Electricity Distribution Systems YODA, Kazuyuki TAJUTA, Toshihisa YAMADA, Ryuji	170 (54)
Technology for the Recovery and Use of Waste Heat, Contributing to the Electrification of Thermal Processes IWASAKI, Masamichi SHIRAI, Hideto AJIMA, Masaaki	175 (59)
Measurement Technology for Increasing Use of Hydrogen and Ammonia KOIZUMI, Kazuhiro YAMAUCHI, Hojun TAKEDA, Naoki	179 (63)

New Products

“FA1B10N” 4th-Generation Critical Mode PFC Control IC for LED Lighting	184 (68)
“Command Switches” Refined in Appearance Design (φ16 Series, φ22 Series)	187 (71)
High-Voltage AC Load Break Switch with Striker-Tripped Current-Limiting Fuse	189 (73)
Abbreviations and Trademarks	191 (75)

特集に寄せて

カーボンニュートラルと電力システム

Carbon Neutrality and Electric Power Systems

安田 恵一郎 YASUDA, Keiichiro

東京都立大学 教授 工学博士

一般社団法人 電気学会 第110代 会長



2015年9月に開催された国連サミットにおいて採択されたSDGs（Sustainable Development Goals）は、社会の持続可能な発展のために全世界が協力をして達成すべき目標と位置付けられている。SDGsは2030年を期限とした17の主要な目標から構成されており、地球環境問題、貧困・飢餓・教育問題、不平等・格差問題など、環境・経済・社会における多様な目標が含まれている。

カーボンニュートラルは、“温室効果ガスの排出量を地球全体として実質ゼロにすること”を意味する。温室効果ガスの排出量を削減し、地球全体として実質ゼロにすることは、地球環境を保護し、持続可能な社会を築くために不可欠であるため、カーボンニュートラルの実現はSDGsの達成における重要な役割を担っている。

一方、カーボンニュートラルと電気エネルギーの関係に目を向ければ、わが国で排出される温室効果ガスの90%以上はCO₂であり、その排出に占める電力由来のCO₂は40%程度とされている。今後の世界的な電気エネルギーの普及を踏まえれば、電力由来のCO₂の削減、すなわち電力システムにおけるCO₂の削減は、カーボンニュートラルの実現、さらにはSDGsの達成にも不可欠となる。

電力システムは、電気エネルギーの発生・変換・輸送・消費における機能別の要素技術を対象とする電力工学と、これらの機能を一つのシステムとして捉えた電力システム工学を主要な学術体系としてきた。電力システムは大規模・複雑なシステムであるにもかかわらず、“負荷の自己制御性”や“同期発電機の同期化力・慣性力”の存在、有効電力・周波数、無効電力・電圧の間の強い関係、有効電力・周波数の全体性と無効電力・電圧の局所性、地域独占による電力システムの一元管理体制などにより、安定な運用を維持しやすい良構造のシステムであった。

しかしながら、近年の電力システムにおいては、電力自由化の進展、再生可能エネルギーの大量導入に伴うインバータ連系機器の増加などを背景に、“負荷の自己制御性”や“系統の同期化力・慣性力”の低下が進むことによりシステムの良構造性が崩れつつある。電力システムの悪構造化の中で、一層の経済性や安定性を実現するために、IT・システム技術・AI技術の活用による高効率・高品質・高信頼度の電力供給システムである“スマートグリッド”や、スマートグリッドを中核に、交通システム、都市、さらにライフスタイルまで発展する次世代エネルギー・社会システムである“スマートコミュニティ”の構想が提案されるに至っている。

電力システムはその良構造性が崩れつつあると同時に、電力エネルギーシステムを超えて情報通信システム、さらには人や社会の振る舞いをも含む文理融合的な経済・社会システムとしての一面も持ちつつある。スマートグリッドを中核とした電力システムに、地域社会における住宅や産業、各種の施設、交通網、公共サービスなどを統合した社会システムとしてのスマートコミュニティは、“超システム（System of Systems）”として捉えることもできる。

前述のように、SDGsやカーボンニュートラルなどの世界的な“合意”の潮流の中で、電力システムはこれまでにない大きな変革期・過渡期を迎えており、新たな電力システムの構築に向けた技術的・制度的なさまざまな試行錯誤が行われている。変革期・過渡期における試行錯誤の段階では、技術的・制度的方向性を決定することが困難となるため、多様な技術や制度が生まれることになる。

技術と制度は互いに影響を与え合うが、歴史的に見ても優れた革新的技術が社会制度に与える影響は大きい。カーボンニュートラルを目指した電気エネルギーの発生・変換・輸送・分配における要素技術（電力工学）と電力システムのモデル化・解析・制御・運用におけるシステム技術（電力システム工学）の革新、および新たな社会制度の設計を、文理融合的な経済・社会システムの観点、さらには科学的・技術的な事実や根拠に基づいた中長期的な展望を踏まえて産学官が密接に協力して行うことが重要である。

電力システムに大きな変革期・過渡期をもたらしたカーボンニュートラルを、成熟分野とされてきた電力分野が技術的・制度的・産業的にも革新的な飛躍・発展を遂げる好機として捉え、学術的・技術的・制度的な深化と発展を目指した多様な研究・開発を継続することが重要である。電力システムが技術的・産業的な魅力はもちろんのこと、学術的な魅力をも今後一層高めることを期待したい。

カーボンニュートラルの実現に向けた ソリューション・技術の現状と展望

Carbon-Neutral Solutions and Technologies: Current Status and Future Outlook

大野 健 ONO, Takeshi

外山 健太郎 TOYAMA, Kentaro

① まえがき

2015 年、気候変動問題に関する国際的な枠組みである「パリ協定」において、次に示す目標が採択された。

- 世界の平均気温上昇を産業革命以前と比べて 2℃より十分に低く保ち、1.5℃に抑える努力をする。
- できる限り早く世界の温室効果ガス排出量をピークアウトし、21 世紀後半には温室効果ガス排出量と吸収量のバランスを取る。

世界全体の温室効果ガス排出量の約 2% を日本が占めており（2019 年時点⁽¹⁾⁽²⁾）、その削減が求められている。

2020 年 10 月、日本政府は“2050 年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、すなわち 2050 年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す”ことを宣言し、“2030 年度において、温室効果ガス 46% 削減（2013 年度比）を目指すこと、さらに 50% の高みに向けて挑戦を続ける”ことを 2021 年 4 月に表明した。これを踏まえて“2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略”を策定し、温室効果ガスの削減と経済成長の両立を目指している。経済産業省は、2050 年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにするために必要な経済社会システム全体の変革であるグリーントランスフォーメーション（GX：Green Transformation）を提唱し、GX に積極的に取り組む“企業群”が、官・学・金と一体として経済社会システム全体の変革のための議論と新たな市場の創造のための実践を行う場として“GX リーグ”⁽³⁾を設立した。富士電機も GX リーグに参加しており、カーボンニュートラルの実現と経済成長に貢献していく。本稿では、カーボンニュートラルに向けたさまざまな動きが加速する状況における、富士電機のカーボンニュートラルの実現に向けたソリューション・技術の現状と展望について述べる。

② 商材・ソリューション

2.1 全体像

富士電機では、脱炭素社会の実現に向け、エネルギーの供給サイドから需要サイドおよびそれをつなぐ流通分野までのそれぞれの領域で、商材・ソリューションを展開している。図 1 に富士電機のカーボンニュートラル全体像を示す。

供給サイドでは、各種の再生可能エネルギー（再エネ）発電設備を手掛けており、太陽光発電や地熱発電では、トップクラスのシェアを保持している。

需要サイドでは、工場などの電化や省エネルギー（省エネ）設備、EMS（Energy Management System）による最適化でエネルギーの効率的な運用に貢献している。また、交通分野でもカーボンニュートラルの取組みが進んでおり、富士電機は船舶の電動化や港湾から船舶への電力供給設備、および港湾の EMS による最適運用を顧客に提供している。自動車の電動化においても、高性能なパワー半導体を提供することで電費の向上に貢献している。

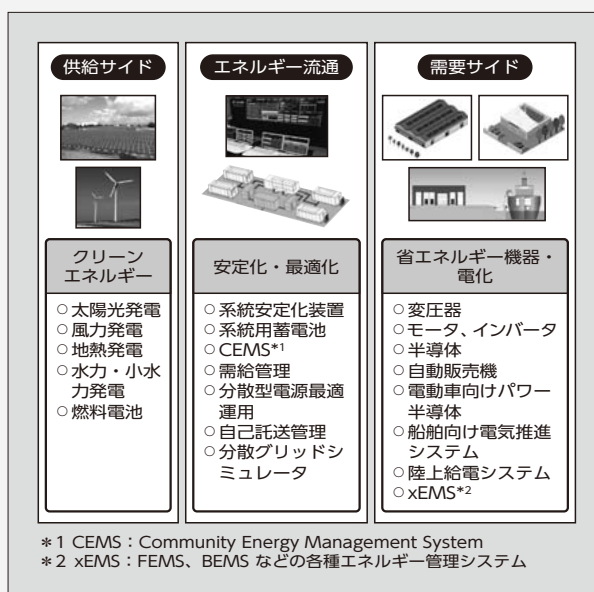


図 1 富士電機のカーボンニュートラル全体像

エネルギーの供給と需要をつなぐ流通分野では、EMS や需給管理・蓄電システムにより、再エネ拡大に対応する電力システムの安定化やエネルギーの最適運用に貢献している。

2.2 エネルギーマネジメント分野

(1) 電力流通ソリューションの取組み

パリ協定や RE100 など、環境問題への取組みが世界的に求められている中、持続的な経営を行うため、ESG（環境・社会・ガバナンス：Environment Social Governance）の観点を重視する考え方が広まっている。そのため、企業では、消費電力の再エネへの転換が進んでおり、自社の屋根や隣接地に太陽光発電設備を設置し、自家消費するケースが急増している。ただ、それだけでは自社の需要を賄いきれないため、遠隔地に再エネ発電設備を設置して、自社に供給する自己託送やオフサイト PPA 事業者の増加が見込まれている。

富士電機では、電力システム改革による電力小売りの全面自由化が開始したときから小売り事業者向けに提供してきた需給管理サービスを発展させ、再エネ予測を加えた自己託送の管理システムを開発し、需要家や PPA 向けに展開を計画している。また、卒 FIT（Feed-in Tariff）を見据え、再エネ事業者向けに市場取引を最適に行うシステムを開発し、系統用蓄電システムと連携したソリューションの提案を展開している。図 2 に最適運用システムを示す。

一般送配電事業者向けには、配電系統における再エネ分散型電源の増加による影響をシミュレーションできる系統計画支援システムを提供している。安定的な電力供給を可能とする配電系統の設備設計業務に活用されている（133 ページ、「再生可能エネルギーの導入拡大を支える電力流通ソリューション」参照）。

(2) EMS の取組み全般と最新技術

地方都市における地域の活力を維持するための施策として、コンパクトシティ^(*)3)の構築が各地で行われている。コンパクトシティでは、熱と電気を地産地消するコージェネレーションプラントを核とする地域単位のエネルギーシステムを構築して、エネルギー利用を最適化する取組みが求められている。大規模災害時に

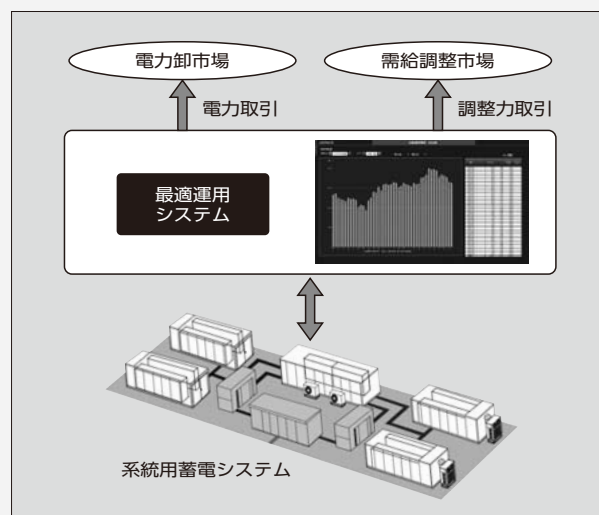


図2 最適運用システム

もエネルギー供給を確保し、BCP（事業継続計画：Business Continuity Plan）や LCP（生活継続計画：Life Continuity Plan）を実現するためにも、効率的なエネルギー運用の基盤となる地域エネルギーマネジメントシステム（CEMS：Community Energy Management System）が重要となっている。CEMS の中核となる EMS 技術は長年進化を続けており、需要予測や最適化計画、デマンドレスポンス機能の高度化や運用の自動化を進め、省力化や省エネ、CO₂削減に貢献するとともに、設備管理の高度化も図られている。各種エネルギー設備の効率を監視してその変動要因を見える化し、運用者を支援することが可能なシステムに進化している。また、各種 EMS を支えるプラットフォーム技術の最新化により、導入費用の低減に加え、設備の変更・追加に対応するシステムのメンテナンス作業の効率化を図り、ライフサイクルコストの低減にも取り組んでいる（127 ページ、「全体最適を実現するデジタルツインモデル型 CEMS」参照）。

(3) 系統用蓄電システム技術

近年、定置型蓄電池には、発電から需要まで、さまざまなニーズがあり、国の支援の後押しを受けておのの用途への導入が進んでいる。再エネ発電では、系統連系要件に適合させるための電力安定化に蓄電システムが用いられている。今後は、裁定取引など

(*)1 RE100

事業に使うエネルギーを 100% 再エネ電力で賄うことを目標として 2014 年に結成された企業連合のことである。

(*)2 オフサイト PPA

オフサイト PPA（Power Purchase Agreement）とは、再エネ電源の所有者である発電事業者と電力の購入者が、事前に合意した価格および期間における再エ

ネ電力の売買契約を締結し、需要地ではないオフサイトに導入された再エネ電源で発電された再エネ電力を、一般の電力系統を介して当該電力の購入者に供給する契約方式のことである。これに対してオンサイト PPA とは、発電事業者が需要家の敷地内に太陽光発電設備を発電事業者の費用により設置して所有・維持管理した上で、発電設備から発電された電気を需要家に供給する仕組みである。

(*)3 コンパクトシティ

人口減少や高齢化による人口問題を解決するため、全国の中で特に地方自治体に取り組んでいる都市構造のことである。居住を公共交通沿線や日常生活の拠点到緩やかに誘導し、人口集積を維持・増加させて居住と生活サービス施設との距離を短縮する。これにより、生活サービス施設の立地と経営を支え、市民の生活利便性を維持することを狙いとしている。

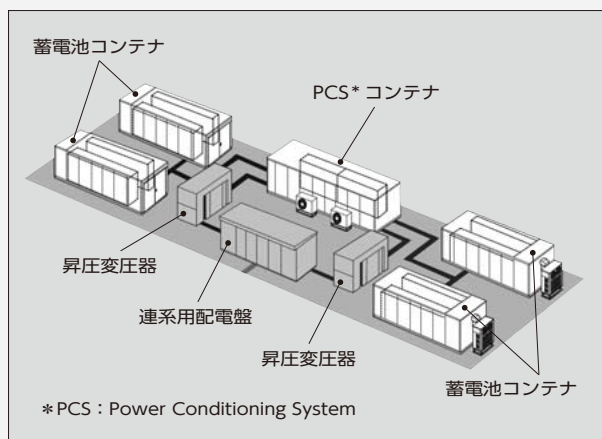


図3 系統用蓄電システムの構成

のニーズが拡大してくると想定している。送配電分野では、系統用蓄電池を運営する蓄電事業者が増加しており、各種市場（電力卸市場・需給調整市場・容量市場）で取引を行うための系統用蓄電池が急増している。図3に系統用蓄電システムの構成を示す。需要家では、需要のピークカットや、再エネをムダなく使用するために蓄電池の導入が始まっており、電力料金の高騰や環境対策の観点から、今後、増加していくと想定している。

富士電機は長年、蓄電池を使った電力安定化技術や、各種実証実験を経て高度化させてきた。また、さまざまなメーカーの蓄電池を適用できるようにPCS（Power Conditioning System）や制御システムを進化させてきた。現在、制御ソフトウェアのパッケージ化を進めており、より低価格で高性能な蓄電システムの展開を目指している（138 ページ、「電力の安定供給に貢献する系統用蓄電システム」参照）。

(4) 分散型電力システムの設計シミュレーション技術

近年、脱炭素先行地域をはじめ、さまざまな地域で地域マイクログリッドの導入の検討が進んでいる。図4に地域マイクログリッドのシステムモデル例を示す。地域のカーボンニュートラルの実現に有効であると考えられており、その実現のためには地域の再エネを地域でムダなく使う地産地消が必要となる。もう一つの目的に、地域のBCPがある。自然災害などによる停電時でも、重要施設（病院や避難所など）へのエネルギーの供給を継続させることが求められている。数多くの設備が複雑に関係するこのようなグリッドの設計は非常に難しく、さまざまな検討や実証研究が必要である。富士電機では、これまでの実証試験で得た知見と電力システムのシミュレーション技術により、グリッドの設備設計を支援する設計シミュレータを開発し、シミュレーションサービスを行っている。

このシミュレータは、地域マイクログリッドの構成により、最適な設備容量を算出するとともに、電力品

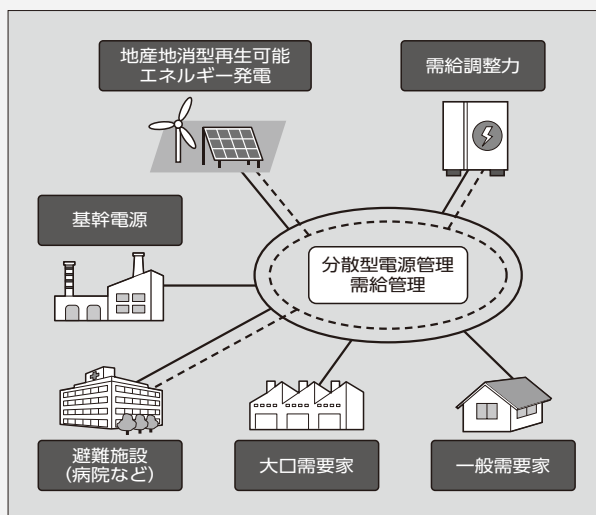


図4 地域マイクログリッドのシステムモデル例

質評価を行うものである。現在、機能拡充を行っており、再エネ発電事業者向けの蓄電設備の設計や運用計画の検証を行う機能などを開発している（145 ページ、「新たな分散型電源システムの設備導入に向けた設備設計シミュレーション技術」参照）。

2.3 交通・輸送分野

(1) 交通・輸送分野の取組み全般

運輸部門のCO₂排出量で約8割を占める自動車において、CO₂排出量の削減を図るため、次世代自動車の普及促進が進められている。燃費規制の活用や導入支援、インフラ整備を図るとともに、ICT（Information and Communication Technology）技術を活用した交通流の円滑化の取組みの強化を図っている。また、CO₂排出原単位の小さい輸送手段への転換として、公共交通の利用促進や、トラック輸送の効率化、海運や鉄道へのモダルシフトのさらなる推進を図っている⁽⁴⁾。

日本の鉄道は世界トップクラスの輸送量を誇り、他の輸送機関と比較して単位輸送当たりのCO₂排出量が低い環境のトップランナーであるが、さらに「鉄道事業そのものの脱炭素化（鉄道の脱炭素）」「鉄道アセットを活用した脱炭素化（鉄道による脱炭素）」「環境優位性のある鉄道利用を通じた脱炭素化（鉄道が支える脱炭素）」の三つの柱に沿った取組みを推進している。富士電機は、鉄道の脱炭素化に向けて、再エネ、駆動装置高効率化、車両の回生電力を有効活用する自励式電力回生インバータを提供している。

次世代自動車で伸長する電動車市場においては、航続可能距離の向上などが求められており、電力損失の低減、および搭載スペースの制限から高電力密度化と小型化がパワー半導体の大きな課題となっている。富士電機は、シリコン（Si）製RC-IGBT製品を他社に先駆けて開発し、Si製品より大幅に電力損失低減が可

能な炭化けい素^(※5) (SiC) 製品を開発している。モジュール製品の系列拡大による軽・小型車向けの小型・薄型パッケージ系列の拡充と、電気自動車向けの SiC 新製品の開発を推進している⁽⁵⁾ (156 ページ、“自動車の電動化に貢献するパワー半導体” 参照)。

(2) 船舶・港湾分野の取組み

世界各国での 2050 年のカーボンニュートラル実現に向け、港湾の脱炭素化への関心が高まっている。日本における CO₂ 排出量は、製油所、発電プラント、鉄鋼、化学工業などが約 6 割を占める⁽⁶⁾。これらの多くは臨海部に立地し、輸出入や運搬に港湾を使う。港湾では、従来の化石燃料から電気への切替え(電化)が進んでいる。さらなる脱炭素化のため、日本政府は港湾・船舶に関連する企業・団体から成るコンソーシアムを構築し、“カーボンニュートラルポート^(※6)”の実現に向けた検討を進めている。

富士電機は、カーボンニュートラルポートのコンソーシアムに参画しており、自社製品やシステムの標準規格化を視野に検討を推進している。富士電機は、これまでも港湾・船舶のカーボンニュートラルに取り組んでおり、日本初の完全バッテリー駆動船である“e-Oshima”には、富士電機の電気推進システムが採用されている。また、国内メーカーで唯一、直流配電方式を採用することで、電力変換装置の小型化、省スペース化も実現している。他にも、富士電機の陸上電力供給システムは、港に停泊する船舶への電力供給を担う。船舶が港に停泊する際、船舶内の発電機(ディーゼルエンジン)を停止させ、船舶に必要な電力を陸上から送電することで、CO₂ 排出量削減に貢献している。本システムは、業界トップクラスの大容量・小型化を実現した。

カーボンニュートラルポートの構築を通して、大幅な脱炭素化に貢献している(151 ページ、“船舶・港湾分野におけるカーボンニュートラルへの取組み” 参照)。

③ 新製品・新技術

3.1 全体像

社会課題あるいは顧客課題解決に向けた取組みとして、新しい価値を創出する新製品の開発に取り組んで

いる。この取組みの一つとして、新製品開発に特化したプロジェクト室を立ち上げ、2023 年 2 月に閣議決定された“GX 実現に向けた基本方針”や顧客への直接ヒアリングによる将来動向の調査結果を基にしたロードマップを独自に策定することで、新製品の市場展開時期を想定しながら開発を進めている。

脱炭素社会の実現に向け、省エネ技術のさらなる深掘りや社会的な変化点となる燃料転換に対応した新製品開発の取組みと展望を述べる。

3.2 省エネ

(1) 省エネの取組み全般

省エネの観点による新製品創出では、小売業における店舗の脱炭素化に向けた店舗トータル省エネソリューション、工業熱プロセスの排熱を活用した蒸気発生ヒートポンプ、冷熱を発生させるエジェクタ冷却機による熱の省エネソリューションの開発を進めている。

また、太陽光発電拡大や水素燃料電池、蓄電池、電気自動車などの普及により需要家の直流負荷が増加することを想定し、既存の交流配電システムに対して変換ロス低減による省エネ効果が期待できる直流配電システムの検討も進めているので、その取組み状況を述べる。

(2) 店舗の省エネ化

昨今の環境配慮意識の高まり、エネルギーコスト高騰を背景として、コンビニエンスストアにおいても省エネは重要な経営課題として認識されている。富士電機は、店内の快適性を損なうことなく、高い省エネ性能を実現する技術の開発に取り組んでいる。店舗内の快適性と消費電力量は、天気や季節に大きく影響を受ける。これらを把握するために、店舗全体をモデル化し、さまざまな条件を再現するシミュレータを開発した。なお、快適性を定量的に評価するために、人間の温冷感を指標化した予想平均温冷感申告(PMV: Predicted Mean Vote)を判断指標として採用した。

また、店舗全体の消費電力量を削減するために、消費電力の最大値を下げるピークカットを実現するための店舗内機器の制御技術の開発も進めている。例えば、ショーケースにおいて定期的に実施する必要がある熱交換器の除霜動作は消費電力が大きいので、多数ある

(※4) RC-IGBT

Reverse-Conducting IGBT (逆導通 IGBT) の略である。モジュールにおいて対で使われる IGBT と FWD をワンチップ化した素子である。IGBT 部と FWD 部が交互に動作するので放熱性に優れ、モジュール内のチップ数を削減できるため、IGBT モジュールの小型化とパワー密度向上につながる。

(※5) 炭化けい素 (SiC)

けい素 (Si) と炭素 (C) の化合物である。3C、4H、6H など多くの結晶の構造多形が存在し、構造によって 2.2~3.3eV のバンドギャップを持つワイドギャップ半導体として知られる。絶縁破壊電圧や熱伝導率が高いなどパワーデバイスとして有利な物性を持つため、高耐圧・低損失・高温動作デバイスが実現できるとして実用化が進められている。

(※6) カーボンニュートラルポート

港湾において、水素・燃料アンモニアなどの大量・安定・安価な輸入・貯蔵などを可能とする受入れ環境の整備や、港湾オペレーションおよび港湾立地産業の脱炭素化を図り、脱炭素化社会の実現に貢献していく港湾のことである。

熱交換器の除霜タイミングが重ならないように制御することで最大消費電力を抑えることができる。他にも、ウォークインショーケースや空調機を制御する技術も開発を進めている（162 ページ、“コンビニエンスストア店舗向け省エネルギーソリューション” 参照）。

(3) 工業熱プロセスの省エネ化

富士電機では、長年にわたり自動販売機に適用して培ってきたヒートポンプ技術を独自に発展させ、主に産業分野における未利用エネルギーから効率的に熱エネルギーを回収し、産業分野のさまざまな加熱プロセスや冷熱プロセスに再利用する排熱回収技術、電化技術に取り組んでいる。2018 年には、60℃以上の排温水から排熱を回収して 120℃の飽和蒸気を出力することができる排熱回収型の蒸気発生ヒートポンプを発売した。小型で分散配置可能な製品として、飲料製造における殺菌工程や、半導体工場でのクリーンルームの加湿工程などに導入が進んでいる。

飲料工場での殺菌工程への適用例として、図 5 に新たな飲料殺菌の熱プロセスを示す。ここでは、加熱殺菌用の蒸気の供給源として蒸気ボイラと蒸気発生ヒートポンプを併用する。加熱殺菌後に排出される 70℃以上の排温水が持つ熱エネルギーを、ヒートポンプにより回収して高温の蒸気を発生することにより、蒸気ボイラが消費する燃料を減らして CO₂ の排出量を削減できる。さらに、高温蒸気発生ヒートポンプから排出される 60℃以上 70℃未満の比較的低温の排温水は、これまでは有効活用されてこなかったが、エジェクタ冷却機を適用すれば、この低温の排温水からさらに熱エネルギーを回収し、チラーと組み合わせることにより冷水を高効率に生成することができる。

排熱回収技術の適用分野のさらなる拡大を目指して、より高い 150℃の飽和蒸気を発生する高温蒸気発生ヒートポンプの開発を進めている。高温の蒸気を効率良く発生するために、排温水から排熱を回収する部分

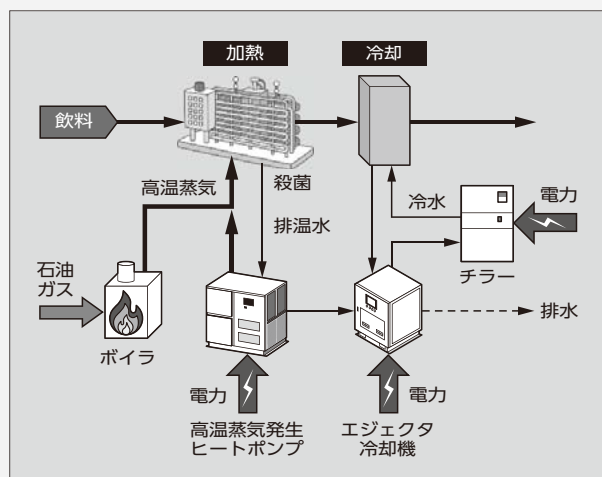


図 5 新たな飲料殺菌の熱プロセス

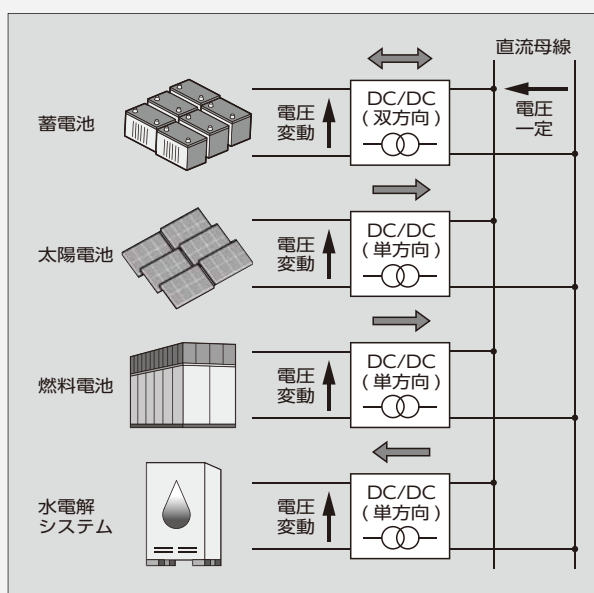


図 6 再エネの直流配電システム

と高温熱源で水を沸騰させる蒸気発生部の二つの圧縮膨脹サイクルを、同時に実現できるスクロール方式の 2 段圧縮機構を開発している。スクロールの外周から中心までの間を分割構造とし、外側を低段圧縮室、内側を高段圧縮室とすることにより、一つの圧縮機構で 2 段圧縮を実現する。この分割構造では、圧縮室間の冷媒逆流による圧縮動力の増大が懸念されるが、圧縮室の圧力を均圧化する圧縮室連通溝構造により逆流を抑制することができている（175 ページ、“熱プロセスの電化に貢献する排熱回収・利用技術” 参照）。

(4) 直流配電システム

カーボンニュートラルの実現に向けて、動力源を従来の内燃機関から蓄電池に替えた電気自動車や電気推進船、あるいは CO₂ を排出しない燃料電池を動力源とする燃料電池自動車や燃料電池船、燃料電池建設機械の実用化も検討が進んでいる。蓄電池や燃料電池など直流で動作する機器を高効率に利用するために、直流配電システムは有力な手段の一つである。図 6 に再エネの直流配電システムを示す。

富士電機は、高効率な直流配電システムの構築を可能にする DC/DC コンバータを開発している。その回路構成として、広範囲の入出力電圧で高い変換効率を維持できるデュアルアクティブブリッジ（DAB：Dual Active Bridge）を採用し、容量 200 kW の試作機により定格条件で変換効率 98% を達成している（170 ページ、“高効率な直流配電システムの構築を可能にする DC/DC コンバータ” 参照）。

3.3 燃料転換

(1) 燃料転換の取組み全般

社会的な変化点となる燃料転換に貢献する新製品開

発の取組み状況において、水素燃料に関しては、その活用として市販の車載用燃料電池を活用した開発を進めている。

また、水素・アンモニアの流通を実現する上で必要不可欠な計測技術の開発も進めている。

(2) 水素活用（燃料電池）

カーボンニュートラル社会の実現に向けて、水素を有効活用する手段の一つに燃料電池がある。燃料電池は、燃料を燃焼させることなく電気化学反応により発電するため、排ガス中に大気汚染物質をほとんど含まず、低騒音・低振動であり、発電出力が小さくても高い発電効率が得られるという特徴がある。そのため、自動車、荷役機械などの移動体用から家庭・事業所などの定置用まで、さまざまな用途への適用が期待されている。

燃料電池は、使用される電解質の種類によって、アルカリ形、熔融炭酸塩形、りん酸形、固体酸化物形、固体高分子形などの種類があり、それぞれの特徴に合わせて製品化されている。富士電機は、1961年からさまざまな種類の燃料電池の開発を開始し、りん酸形燃料電池においては、1998年に商品機を発売し、これまでに137台を納入した⁽⁷⁾。

長年の開発を通じて獲得した知見を生かして、現在、純水素を燃料に用いる固体高分子形燃料電池システムを開発している。図7に工場施設向け120kW燃料電池実証機の外観を示す。このシステムは、信頼性が確認されている車載用燃料電池モジュールを採用し、富士電機の保有する燃料電池の制御・メンテナンス技術や電気機器を組み合わせたシステムであり、産業向けの定置用のみならず、港湾クレーンや船舶などの移動体用途をもターゲットにしている（166ページ、“水素社会の実現に貢献する燃料電池ソリューション”参照）。

(3) 水素・アンモニア計測技術

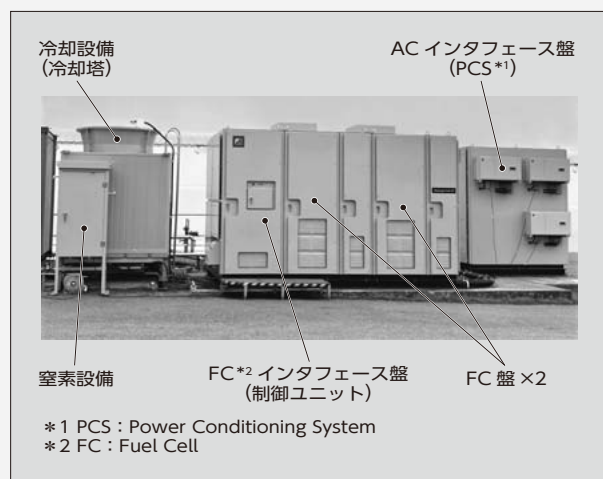


図7 工場施設向け120kW燃料電池実証機

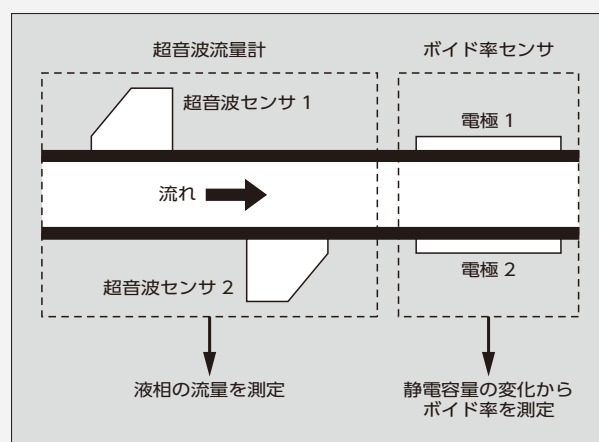


図8 混相流量計の構成

水素は、一般的なガス分析計で計測に使われる赤外線吸収強度が低く、毒性のあるアンモニアは、安全性の確保が必要であり、漏えいがないことを確認する計測機器として、極めて低い濃度（数ppm以下）を測定できない。このため、水素とアンモニアのガス濃度測定では、高感度化が共通の課題となっている。高感度化のためにはノイズの影響を除去する技術が重要であるため、ウェーブレット変換方式を採用した。

さらに、水素・アンモニアに対しては、気相と液相が混在する混相流を測定できることが望まれている。

図8に開発中の混相流量計の構成を示す。

液体の流量を測定する超音波センサ⁽⁸⁾と、単位体積の混相流体中に気相が占める体積割合であるボイド率を測定するボイド率センサから構成される。超音波センサによる流量測定については、従来からの伝搬時間差方式に加えて、気泡がある状態で測定することができるパルスドップラー方式でも動作する構成を検討している。測定したボイド率に基づいて、超音波センサの流量測定方式を伝搬時間差方式とパルスドップラー方式のいずれか精度の高い方に切り替えることで、混相流の流量を安定して測定することが可能になる（179ページ、“水素・アンモニアの普及を支える計測技術”参照）。

4 あとがき

富士電機のカーボンニュートラルに関する現状の取組みと今後の新製品創出の展望を述べた。これからも環境にやさしい機器とシステムにて、社会のカーボンニュートラルの実現に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) “Climate Change 2023 Synthesis Report”. IPCC.
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/>

report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf, (参照 2023-8-30).

- (2) “日本国温室効果ガスインベントリ報告書 2023年”. 国立研究開発法人 国立環境研究所. https://www.nies.go.jp/gio/archive/nir/jqjm1000001v3c7t-att/NIR-JPN-2023-v3.0_J_gioweb.pdf, (参照 2023-8-30).
- (3) “GXリーグ基本構想”. 経済産業省. 2022-02-01. https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/GX-league/gxleague_concept.pdf, (参照 2023-08-30).
- (4) “令和4年度版国土交通白書”. 国土交通省. 2022-06-21. <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001486961.pdf>, (参照 2023-08-30).
- (5) 佐藤悠司ほか. xEV向けIGBTモジュールの高電力密度化を実現するパッケージ技術. 富士電機技報. 2022, vol.95, no.4, p.185-188.
- (6) “カーボンニュートラルポート (CNP) の 形成に向けた施策の方向性”. 国土交通省. <https://www.mlit.go.jp/>

kowan/content/001448303.pdf, (参照 2023-8-30).

- (7) 高野洋ほか. 各種燃料電池の研究・開発と 100kW リン酸形燃料電池の商用化. 電気化学. 2023, vol.91, no.3, p.358-361.
- (8) 矢尾博信ほか. ハイブリット超音波流量計. 富士時報. 2004, vol.77, no.6, p.432-435.



大野 健

系統監視制御およびエネルギーマネジメントシステムのエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社エネルギー事業本部エネルギーマネジメント事業部長。電気学会会員。



外山 健太郎

パワーエレクトロニクス、変電機器の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社インダストリー事業本部開発統括部長兼エネルギー事業本部開発統括部長。日本機械学会会員、日本 AEM 学会会員。



全体最適を実現するデジタルツインモデル型 CEMS

Digital-Twin Model Based CEMS for Total Optimization

竜田 尚登 TATTA, Naoto

飯坂 達也 IIZAKA, Tatsuya

松本 宏治 MATSUMOTO, Koji

近年、CO₂ 排出量削減の社会的要求が高まっており、効率的なエネルギー運用が求められている。富士電機は、地域単位でのエネルギー需給一体の運用課題を解決するために、“新さっぽろ駅周辺地区 I 街区開発プロジェクト”に参画し、AI 技術を活用したデジタルツインモデル型の地域エネルギーマネジメントシステム（CEMS）を新たに構築した。街区にある各施設のエネルギー需要を高精度に予測し、その予測に基づいてエネルギー供給側と需要側の双方を自動的に調整することにより、効率的なエネルギー運用を実現し、街区全体の大幅な CO₂ 削減に貢献する。

In recent years, reductions in CO₂ emissions have been increasingly sought in society, necessitating increased efficiency in the use of energy. Fuji Electric participated in the New Sapporo Station District I Development Project and built a community energy management system (CEMS) based on digital-twin model using AI technology to solve the challenge of regionally consolidating the management of energy supply and demand. This system accurately predicts the energy demand of each facility in the district and automatically adjusts the supply and demand to use energy efficiently, significantly reducing CO₂ emissions for the whole district.

① まえがき

日本国内の人口減少・少子高齢化が進む中、国土交通省は、特に地方都市において地域の活力を維持するために、医療機関、福祉施設、商業施設などの生活機能を確保し、高齢者が安心して暮らせるよう、地域公共交通と連携したコンパクトシティを推進している。コンパクトシティでは、熱と電気を地産地消するコージェネレーション設備を核とする地域単位のエネルギーシステムを構築してエネルギー利用を最適化し、都市の活動に必要なインフラを高度に整備した快適な街づくりを目指している。また、大規模災害時にもエネルギーの供給を確保し、事業継続計画（BCP：Business Continuity Plan）や生活継続計画（LCP：Life Continuity Plan）を実現することも求められている。地域においてエネルギーを最大限に効率よく利用することは、今や地球規模の課題であるカーボンニュートラルの実現に貢献することにもつながる。

このエネルギー運用を実現する基盤となるのが地域エネルギーマネジメントシステム（CEMS：Community Energy Management System）である。富士電機はこれまで、エネルギー運用に必要となるさまざまな計測・分析・制御技術を開発し、個々のお客さまにシステムとして提供してきた。最近では、“新さっぽろ駅周辺地区 I 街区開発プロジェクト”に参画してデジタルツインモデル型 CEMS を構築した。本稿では、全体最適を実現するデジタルツインモデル型 CEMS について述べる。

② CEMS の課題

一般的な CEMS の適用例を図 1 に示す。対象地域へのエネルギー供給源としては、電力会社からの系統電力に加

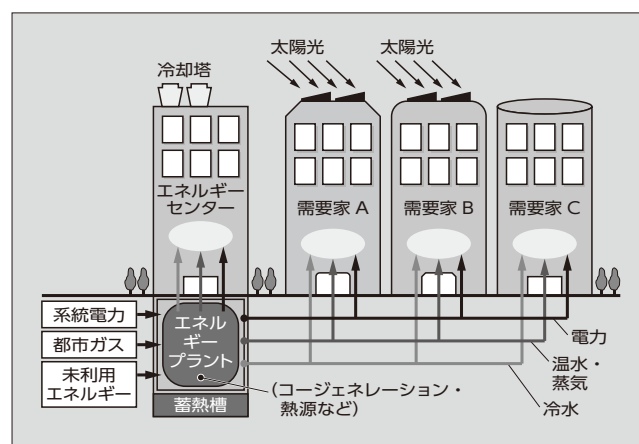


図 1 一般的な CEMS の適用例

えて、地産地消するための電力と熱を同時に供給するコージェネレーション設備を導入することが多く、さらに太陽光発電などの再生可能エネルギー発電設備や蓄エネルギー設備、あるいは河川水や地中熱などの未利用エネルギーを有効活用する設備が加わる場合もある。エネルギー需要側に対しては、消費電力量などを計測して収集するためのスマートメータを需要家ごとに設置し、コージェネレーション設備からの熱を利用する設備には熱量計なども取り付ける。これらの計測システムを通じて地域全体のエネルギーの需要と供給の状態に関する情報がエネルギーセンターに集約される。この結果を分析して把握した地域の状況に基づいて、エネルギーセンターからエネルギーの需給を調整する指示が出される。具体的な需給調整の方法としては、例えば、需要に応じたコージェネレーション設備の出力調整、需要ピークに備えた蓄熱設備の活用、あるいは、需要が供給を上回ると予想される際には各需要家にエネルギー消費を抑制するように促すことなどがある。これらを適切

に組み合わせて運用し、地域全体でのエネルギー利用効率を高めることが CEMS の目的となる。

このように CEMS を運用して地域のエネルギー需給を管理する上で、次のような課題が明らかになっている。

(1) 課題 1：需要側と供給側の連携の強化

エネルギーの需要と供給を均衡させるために需要側に調整を促すことはデマンドレスポンス（DR：Demand Response）と呼ばれる。その代表的な手法として、エネルギー需要が逼迫する時間帯に需要を抑制した需要家に何らかの報酬を与えるインセンティブ型 DR がある。この DR は多くの需要家に適用しやすいが、需要が実際にどの程度調整されるかは個々の需要家に委ねられている。したがって、報酬を得ることよりもこまめに省エネルギーを行う手間を惜しむなどにより、実際に調整される需要の量やタイミングが必ずしもエネルギーセンター側の期待どおりになるとは限らない。

エネルギー供給側にも同様の状況があり、季節の移り変わりや需要の変化に対して供給設備の運用調整が限られた場合にしか実施されず、初期設定のまま運用されることが多い。

(2) 課題 2：需要予測と需給調整の高精度化

エネルギーの需給調整をリアルタイムに実行できる手段が限られているので、エネルギー需要を精度良く適切なタイミングで予測することは CEMS を運用する上で不可欠である。エネルギー利用効率を一層高めるためには、予測精度の向上が課題である。

さらに、この予測に基づいて、どのような需給調整手段を組み合わせて指示するかの判断は、専らエネルギーセンターのオペレーターに委ねられていた。そのため、地域のエネルギー利用効率をどこまで高められるかはオペレー

ターの経験と力量に頼るところが大きく、エネルギーセンターの運用実績に精通したオペレーターが望まれている。昨今の社会の少子高齢化に伴う人手不足の状況の下で、熟練したオペレーターが培った運用技術を、経験未熟なオペレーターでも実行できるようにシステム化することが課題となっている。

③ デジタルツインモデル型 CEMS の構成と機能

3.1 デジタルツインモデル型 CEMS の構成

②章で述べた課題に応えることができる、AI（Artificial Intelligence）技術を活用したデジタルツインモデル型 CEMS を新たに構築した。デジタルツインとは、文字通りの意味は“デジタルで出来た双子”であり、現実世界（フィジカル空間）に存在する対象をデータによってコンピュータ上（サイバー空間）に再現したものを、その対象の“双子”になぞらえた名称である。図 2 にデジタルツインモデル型 CEMS の構成を示す。このように、デジタルツインモデル型 CEMS は高度 CEMS と進化型 CEMS から構成される。従来の CEMS を高機能化したものが高度 CEMS である。この高度 CEMS の運用対象となる地域内のエネルギー需給設備などと高度 CEMS とを併せてデジタルデータで再現して構築したものが進化型 CEMS である。

高度 CEMS は、従来の CEMS と同様にエネルギーセンターに設置して地域内のエネルギー需給調整を実行するためのオンプレミス^(注)型のシステムである。進化型 CEMS はクラウド上に構築され、さまざまな状況の下での高度 CEMS の運用をシミュレーションする機能を持つ。クラウド上に構築することにより、CEMS の機能を改良する

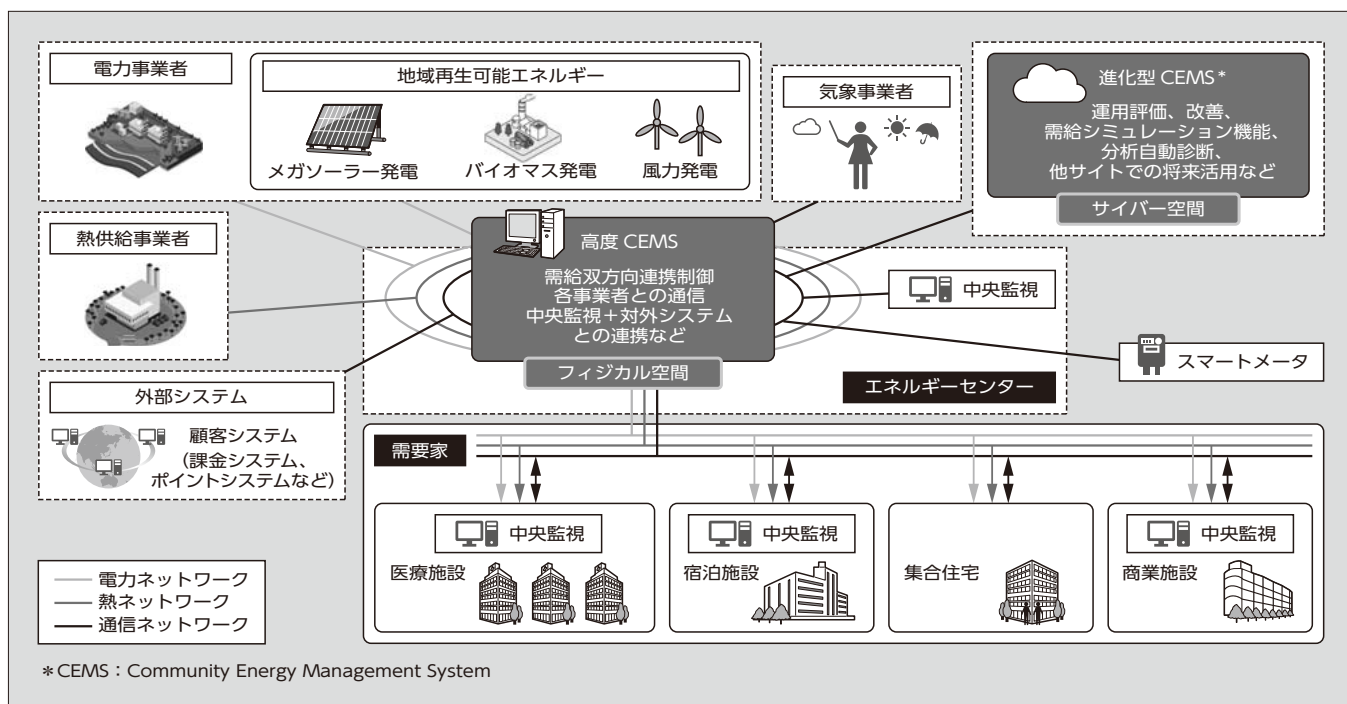


図 2 デジタルツインモデル型 CEMS の構成

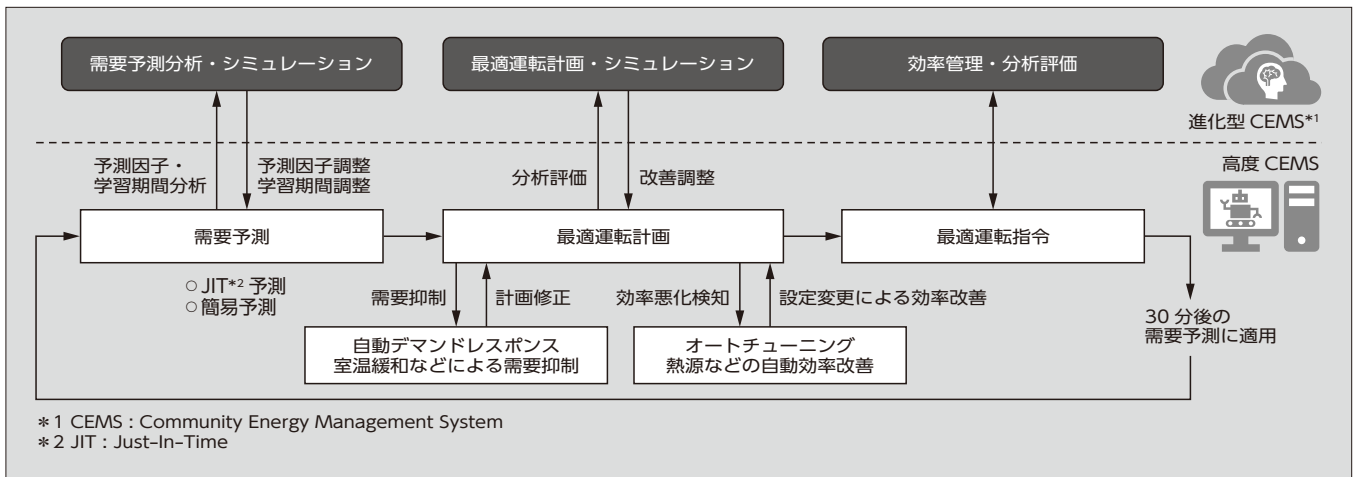


図3 高度CEMSと進化型CEMSの主要機能

際も、その効果をあらかじめシミュレーションにより容易に検証することができる⁽¹⁾。

3.2 デジタルツインモデル型CEMSの機能の概要

図3に高度CEMSと進化型CEMSの主要機能を示す。高度CEMSは、地域内のエネルギー需要を予測し、最適運転計画を立案する機能を備えるとともに、需要側の空調設備や、供給側のコージェネレーション設備などの制御パラメータを自動調整する機能も持っている。

また、進化型CEMSでは、高度CEMSを介して取得する地域の実際のエネルギー需給の状況のデータを使って需給調整の効果をシミュレーションにより確認することができる。より効果的な運用結果が得られたら、その運用を高度CEMSで実施して現実化することができる。

3.3 需要予測機能

エネルギー需要予測は、従来はエネルギーセンターのオペレーターが経験に基づいて行うことが多かった。これを自動的に行うために、統計的機械学習手法を用いてオペレーターの予測手順を再現するJIT (Just-In-Time) 予測法を開発した。図4にJIT予測の構造を示す。JIT予測法は、代表的なAI手法の一つであるディープラーニングと比較して、次の三つの利点がある。

- (a) 予測手順がオペレーターと類似するため、予測結果の説明が容易
- (b) 少ない学習データでも予測可能
- (c) 突発的な負荷変動にも追従容易

(a)の特徴は、運用者に安心感を与えるメリットがある。(b)の特徴は、CEMSの運用実績が少ない再開発地域でも予測できるメリットがある。(c)の特徴は、負荷のばらつきが大きい小地域の需要でも高精度に予測できるメリットがある。

〈注〉 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、使用者が管理している施設の構内に機器を設置して運用すること。

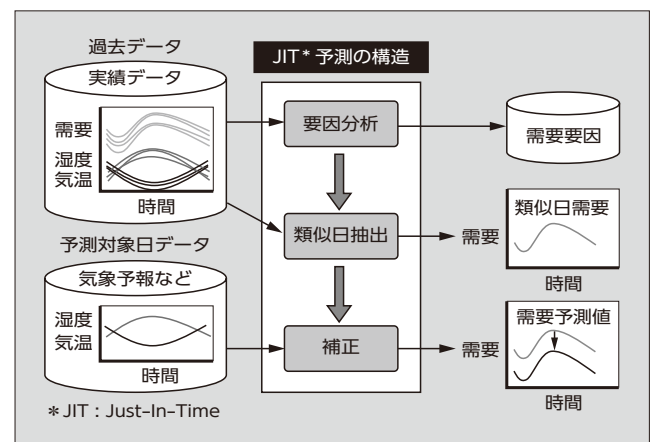


図4 JIT予測の構造

ある。

CEMSの運用対象となる地域の環境はさまざまな理由で変化する。季節ごとの気象条件による需要の変化や、設備の更新に伴う変化などである。JIT予測法では、予測モデルを更新することでこれらの環境変化に対応して予測精度を維持することができる。この予測モデルの調整をエネルギーセンターのオペレーターが担うことは一般的に難しいが、進化型CEMSを使って予測モデル候補を評価することができる。予測精度の高いモデルを選んで高度CEMSに適用することにより、一般のオペレーターでも環境変化に容易に対応できる。

3.4 需給双方向最適運転計画

富士電機は、以前からエネルギー供給設備の最適運用支援機能を提供している。この最適運用支援機能には、設備の動作をシミュレーションできるようにするためのモデリング機能と、このモデルを使ったシミュレーションを繰り返して設備間の最適な供給配分を求める機能が含まれる。運転条件として、エネルギー単価、メンテナンス単価、CO₂換算係数などを設定し、需給バランスなどの運用上の制約条件を満たすシミュレーションが実行できる。

エネルギー需要を満たしながらエネルギー供給設備の運

用を最適化する前述の運用計画支援機能に加えて、今回のデジタルツインモデル型 CEMS では、需要と供給のそれぞれを事前に調整して最適化する機能を新規に開発した。その一つは、従来同様の需要予測を出発点としながら、エネルギー供給設備の能力と効率を考慮して需要量を自動調整する需要抑制（ADR：Auto Demand Response）機能である。もう一つは、エネルギー供給設備の効率に関わる制御パラメータを需要量に対して供給設備の効率が最大になるように自動調整するオートチューニング（AT：Auto

Tuning）機能である。図5に需給双方向最適運転計画を示す。このようにして、ADR 機能と AT 機能を利用して地域内のエネルギー需給設備の運転計画を段階的に最適化する。計画作成プロセスにおける ADR と AT の動作の例を図6に示す。

運転計画の策定手順として、初めに、需要予測に基づいて従来と同様に供給設備の運転計画を作成する。並行して、需要家側ではエリア内の快適性を確保できる範囲でエネルギー消費量が最小限となるような需要家の空調設備の運転条件があらかじめ設定されており、これに基づいてエネルギー需要を定常的に抑制する。

次に、ADR 機能を利用して、エネルギー需要をわずかに抑制することで供給設備の運転効率を向上できる場合がないかを、供給設備の調整可能な範囲で探し出して、需要家設備の運転条件を自動的に変更することで需要量を追加的に抑制し、予測される需要量を見直す。

続いて、見直された需要量に基づいて AT 機能を利用する。その働きを冷熱源設備の場合で説明する。冷熱源設備は一般に年間の需要量のピークを賄えるように設備容量が決められ、需要である空調の使用条件に適合するように制御パラメータが決められているので、需要が少ない状態では運転効率が低いことがある。ここで、冷熱源設備から供給される冷水の温度を上げると冷熱源設備のエネルギー消費効率（成績係数）（COP：Coefficient of Performance）が高くなるが、空調設備の需要を満たすために供給する冷水流量と、それに伴う搬送ポンプの消費電力が増加する可能性がある。このような冷熱源設備の特性やトレードオフ関係も含めてモデル化しておき、需要量を賄いつつエネルギー消費量が最も少なくなるような供給

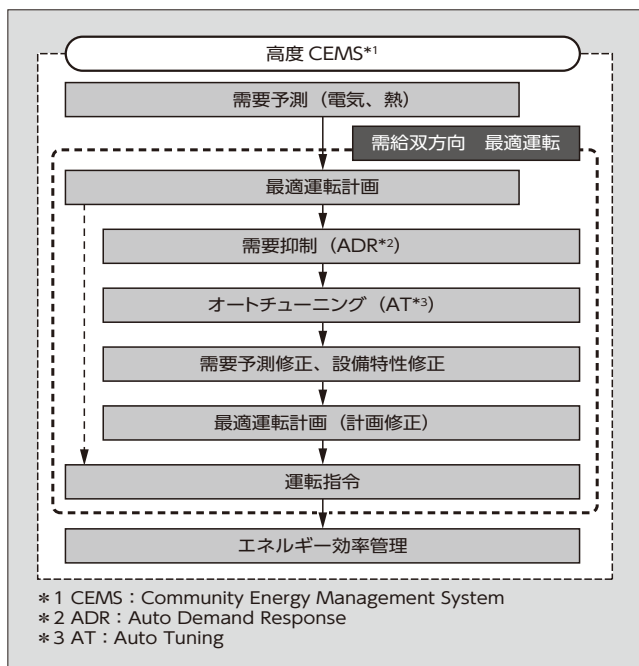


図5 需給双方向最適運転計画

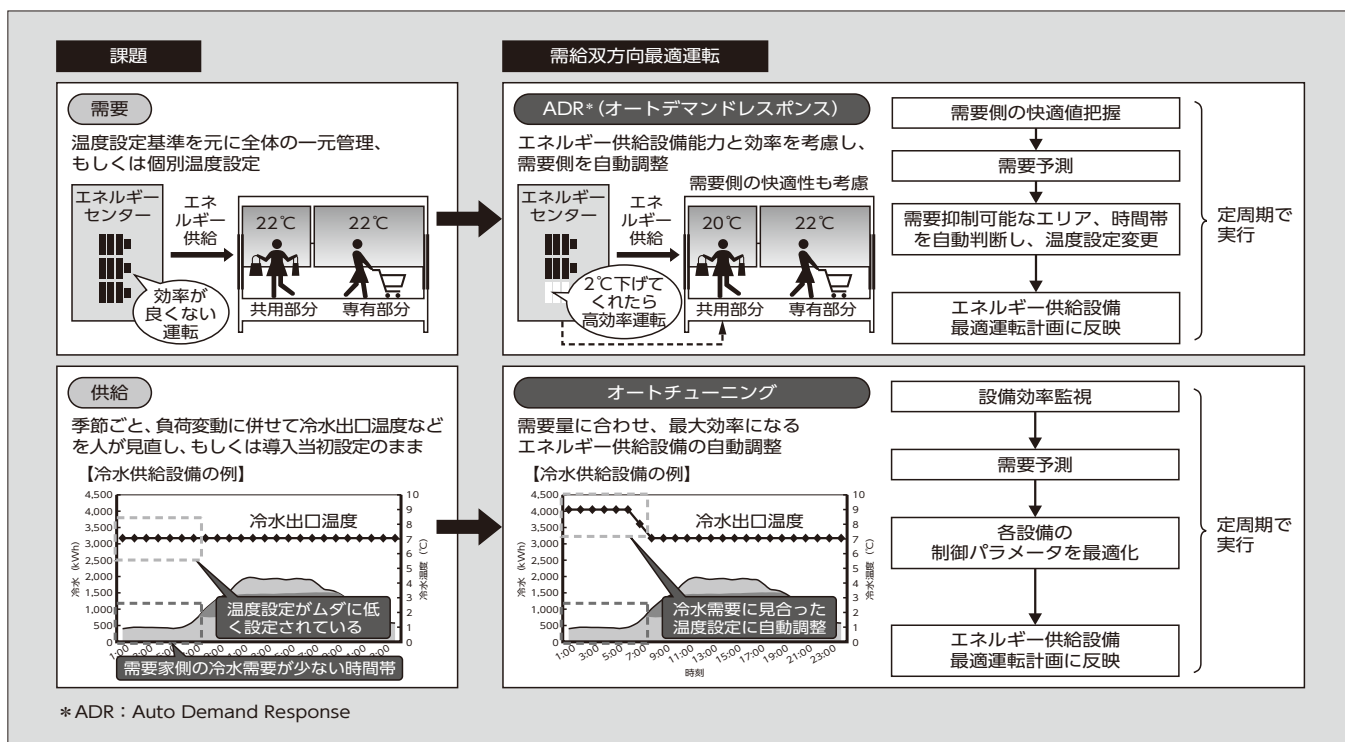


図6 ADR と AT の動作の例

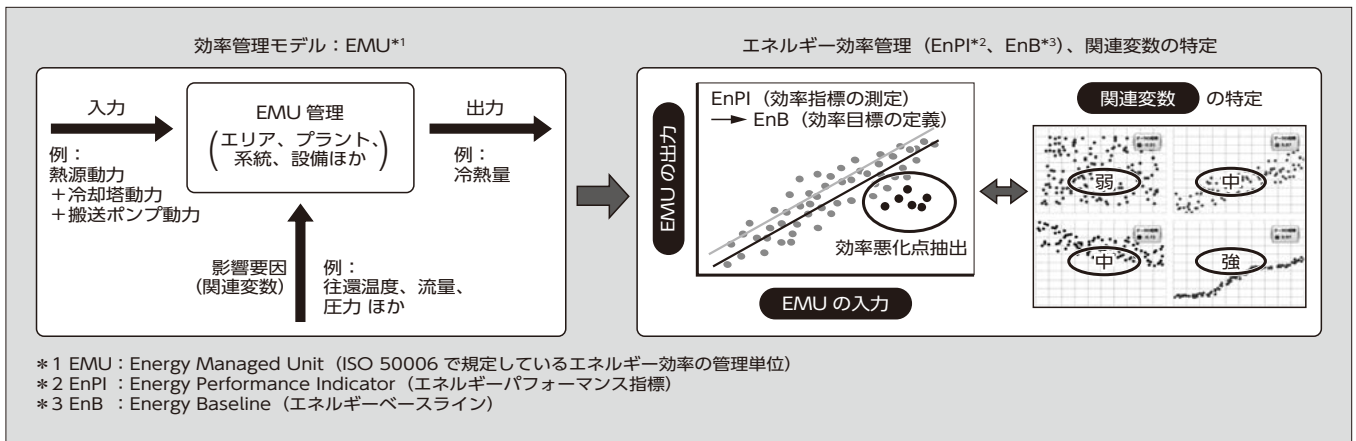


図7 エネルギー効率管理モデル

設備の制御パラメータを求める。この結果に基づいて当初の運転計画を修正して最適化された運転計画として決定し、これに従って各設備を運転する。これにより、これまで実施できなかった需要側と供給側を連携させた運用が実現できる。

また、最適化された運転計画によるエネルギー需給調整の効果を進化型 CEMS により確認することもできる。

3.5 エネルギー効率管理

エネルギー管理手法を定めた国際規格 ISO 50006 に則って CEMS を運用できるように実績データからエネルギー効率に影響する要因を自動抽出する AI エンジンを開発した⁽³⁾。

ISO 50006 の管理フレームワークでは、図7に示すエネルギー効率管理モデルのように、エネルギー効率を管理する領域を定めた上で、エネルギー効率に影響を与える要因（関連変数）を散布図を用いた相関分析などにより特定することを重要視している。過去の効率実績データから管理目標値の基準を定め、エネルギー効率（プラント効率、機器効率など）の管理、効率に深く影響を及ぼす関連変数を管理することが重要である。

今回開発した AI エンジンを用いると、最も効率に影響する因子項目とそのデータ境界値が自動抽出できるので、エネルギー効率の改善活動に貢献できる。進化型 CEMS を用いて抽出した因子の影響を詳細に評価し、それに基づいて運用の改善策を検討することができる。

④ デジタルツインモデル型 CEMS の実用化

“新さっぽろ駅周辺地区 I 街区開発プロジェクト”は、他地域に見られる民間デベロッパー主体でパッケージ化された街づくりとは異なり、自治体の策定する計画に沿って地元企業主体のコンソーシアムにより推進されている。自治体が示す長期的ビジョンの下、少子高齢化社会を見据えて病院や住宅などの多用途で構成されるコンパクトシティを目指している。新さっぽろ駅周辺地区 I 街区を図8に示す。この開発プロジェクトにおける建物用途は、医療施設



図8 新さっぽろ駅周辺地区 I 街区
(写真提供：北海道ガス株式会社)

(3 専門病院とメディカルビル)、マンション、ホテル、商業施設の全 7 棟からなる。駅徒歩圏内にある、延床面積約 10 万 m² の開発プロジェクトである⁽⁴⁾。

富士電機はこのプロジェクトに参画し、新たなエネルギーセンターの運用を支援するデジタルツインモデル型 CEMS を構築した。街区にある各施設のエネルギー需要を高精度に予測し、その予測に基づいてエネルギー供給側と需要側の両方を自動的に調整して地域全体のエネルギー利用効率を最適化することを目指している。デジタルツインモデル型 CEMS を使って街区全体のエネルギー効率を管理するモデルを図9に示す。街区全体、エネルギーセンター、各需要家、各設備と階層を掘り下げて分析していくドリルダウン分析を実施し、進化型 CEMS を用いて、エネルギー効率の目標と実績の乖離（かいり）を把握して効率に影響を与える要因を逐次捕捉することで、エネルギー利用を適正に運用するための示唆が得られる。これを高度 CEMS 側にフィードバックすることにより、ボトムアップにて ADR や AT による部分最適化と、予測精度調整、最適運転計画調整による全体最適化を実施して、街区全体を考慮した効率的なエネルギー運用を実現する。

2023 年 11 月 30 日、商業施設が開業したことで、新さっぽろ駅周辺地区 I 街区の建物が全てそろう、街開きと

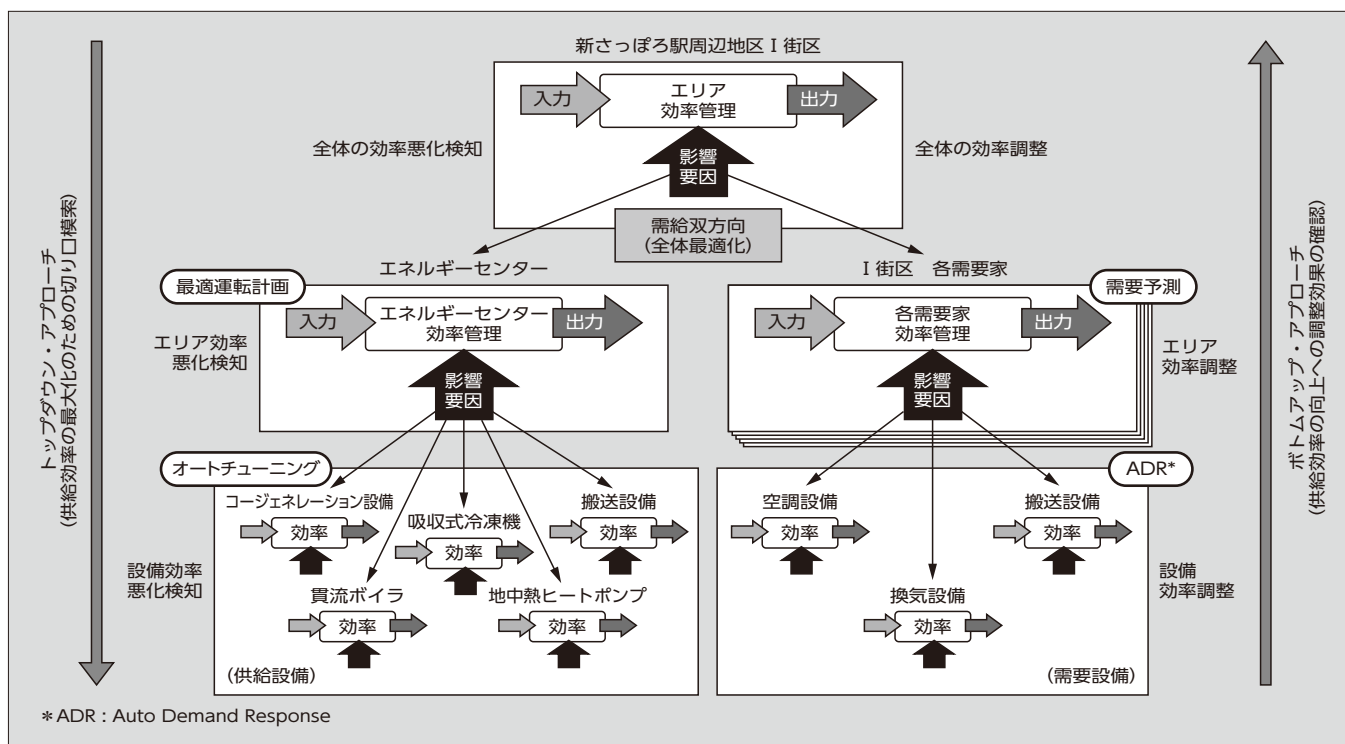


図9 街区全体のエネルギー効率管理モデル

なった。今後、高度 CEMS で収集した各建物のデータを進化型 CEMS で分析するとともに、高度 CEMS の各種機能を評価していく。

5 あとがき

全体最適を実現するデジタルツインモデル型 CEMS について述べた。富士電機はこれまでに培ってきたエネルギー管理ソリューションをさらに進化させて、エネルギー管理に関するお客さまの多様なニーズに応じていく所存である。

最後に、本システムを構築するに当たり、お客さまである北海道ガス株式会社殿および大成建設株式会社殿には多くのご協力をいただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- (1) 鈴木武彦ほか，“地方都市コンパクトシティにおける先導的スマートコミュニティ技術に関する研究（その2）：CEMS（地域エネルギー管理システム）の概要”，空気調和・衛生工学会，2022。
- (2) 飯坂達也ほか，価値創出のコアとなるアナリティクス・AI，富士電機技報，2018，vol.91，no3，p.169-174。
- (3) 竜田尚登ほか，国際規格に準拠したエネルギー運用効率の

改善—アナリティクス・AIを活用したEMSアドオン機能—，富士電機技報，2018，vol.91，no3，p.130-134。

- (4) 萩野伸悟ほか，“地方都市コンパクトシティにおける先導的スマートコミュニティ技術に関する研究（その1）プロジェクトとエネルギー管理システムの概要”，空気調和・衛生工学会，2022。



竜田 尚登

製造管理・エネルギー管理・監視制御システムの企画・開発・技術に従事。現在、富士電機株式会社インダストリー事業本部情報ソリューション事業部 DX 技術部主査。エネルギー管理士。



飯坂 達也

各種産業システムへの予測、最適化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デジタルサイエンス研究センター AI 研究部マネージャー。電気学会上級会員。博士（工学）。



松本 宏治

各種プラント制御システムのシステム設計・開発企画業務に従事。現在、富士電機株式会社インダストリー事業本部プラント制御システムセンターシステム技術部主席。エネルギー管理士。

再生可能エネルギーの導入拡大を支える 電力流通ソリューション

Power Distribution Solutions to Support the Increased Use of Renewable Energy

岡林 弘樹 OKABAYASHI, Hiroki

三好 龍之介 MIYOSHI, Ryunosuke

藤尾 昂弘 FUJIO, Takahiro

日本政府は“第6次エネルギー基本計画”において、その取組みの一つとして太陽光発電をはじめとした再生可能エネルギー（再エネ）の導入を促進している。富士電機は、再エネ発電事業者向けに蓄電池を制御して発電出力を安定化させる、需給管理システムを開発している。また、新しい調整力として系統用蓄電池を運用する事業者向けに最適化技術を適用し需給調整市場に入札する、系統用蓄電池運用システムを開発している。さらに、送配電事業者向けに再エネの大量導入時に配電系統全体を俯瞰（ふかん）し、問題点を抽出して対策を検討できる系統計画支援システムを提供している。

As one of the initiatives of the 6th Strategic Energy Plan, the Japanese government is promoting the introduction of renewable energy. Geared toward renewable energy power producers, Fuji Electric is developing a supply-demand management system that controls storage batteries to stabilize power generation output. We are also developing a grid storage battery operation system for operators that use grid storage batteries as a new supply demand adjustment capability, allowing them to bid on the reserve market using optimization technology. Our grid planning support system provides transmission system operators with a comprehensive view of entire transmission grids including large amounts of renewable energy sources, helping them to identify problems and evaluate countermeasures.

① まえがき

“2050年カーボンニュートラル”の実現に向けて、日本政府は“第6次エネルギー基本計画”において、2030年に電源構成に占める再生可能エネルギー（再エネ）の比率を36～38%に高める見通しを掲げている。この再エネの中で、最も大きな比率が見込まれているのが太陽光発電（PV：Photovoltaic）である。

買取価格を保証することにより再エネ発電事業者の参入を促して再エネの普及を後押ししてきた「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」（FIT：Feed-in Tariff）は段階的に縮小され、新たに、再エネ発電事業者の売電価格が市場価格に連動して変わる制度（FIP：Feed-in Premium）が2022年に開始されている。FIT制度とは異なり、FIP制度の下では再エネ発電事業者が自ら発電計画を管理する必要がある。富士電機は、そのための“需給管理システム”を開発している。

PVや風力発電などの再エネの発電量は気象条件に左右されるので、需要に合わせて調整することができない。しかし、蓄電システムを導入すれば、余剰電力を蓄えておくことで発電量が不足する際に需要に見合う電力を供給することができるだけでなく、需要が供給を上回って市場価格が高いときに電力を売るビジネスも可能になる。こうした用途に向けて、富士電機は“系統用蓄電池運用システム”を開発している。

送配電事業者は、電力系統に接続（連系）される再エネの規模などに応じて、系統を維持するために必要な設備を検討しなくてはならない。富士電機はこの課題に向けて、再エネの導入拡大などの配電系統全体への影響をシミュレーションして、事前の対策を検討できる“系統計画支援システム”を提供している。

本稿では、PVをはじめとする再エネの導入拡大を支える電力流通ソリューションとして、前述の三つのシステムについて述べる。

② 再エネ発電事業者向け需給管理システム

2.1 課題

FIT制度においては、再エネ発電事業者は発電した電力の全量を固定価格で一般送配電事業者（TSO：Transmission System Operator^{〈注1〉}）に売却することができ、買い取られた電力はTSOから一般社団法人 日本卸電力取引所（JEPX：Japan Electric Power Exchange）に販売される。FIP制度の場合は、再エネ発電事業者が自ら販売先（相対取引先）を確保した上で、次に述べる義務を果たす必要がある。

- (a) 発電販売計画の作成、JEPXでの市場取引、電力広域的運用推進機関（広域機関）への計画提出といった需給管理業務を毎日行う必要がある。そのため、運用者の需給管理業務の負担を軽減する必要がある。
- (b) 発電計画に対して発電量の実績が乖離（かいり）するインバランスを発生させるとインバランス料金を負担しなければならないが、そのインバランス単価は系統の需給状況によって動的に変わる。そのため、単価が高い時間帯にインバランスを発生させて費用負担が増えることのないように、常にインバランスを抑制する必要がある。

〈注1〉 TSO：Transmission System Operatorの略であり、旧一般電気事業者（電力会社）の送配電部門のことである。

2.2 特徴

2.1 節の課題を踏まえ、PV を対象とした需給管理システムを開発している。表1 に再エネ発電事業者向け需給管理システムの業務機能を示す。本システムは自動で発電量を予測し、発電計画の作成を支援する。また、JEPX や相対取引先への販売計画の作成や、広域機関への計画提出業務をワンストップで行うことができるので、運用者の負担軽減や属人化の排除に寄与する。さらに、リアルタイムに蓄電池を自律制御させることでインバランス量を低減する。

本システムの主な特徴は次のとおりである。

- (a) 気象予報や発電実績値から算出される発電量予測を定周期に補正し続けることで、実需給時に精度の高い発電計画を作成できる。また、発電計画の精度向上は、必要な蓄電池容量の削減に貢献する。
- (b) 小売電気事業者向け需給管理システムの需要予測機能と組み合わせることで、再エネによる自己託送^(注2)に対応できる。

図1 に需給管理システムの全体構成を示す。本システムは需給管理サーバと蓄電池制御装置で構成される。需給管理サーバはJEPX や電力広域的推進機関（広域機関）と連携し、市場取引や計画提出をオンラインで実施する。また、インバランス抑制を目的として蓄電池制御装置に発電計画値を送信する。蓄電池制御装置は、電力系統との連系点の潮流と PV の出力状況を監視しながら、単位時間（30 分）当たりの系統への逆潮流量が発電計画どおりになるよう蓄電池を制御する。

表1 再エネ発電事業者向け需給管理システムの業務機能

機能名	需給管理サーバ	蓄電池制御装置	内容
発電量予測	○	—	気象情報配信会社から受信した日射量予報より発電量を予測する。
発電計画作成	○	—	発電量予測を元に30分粒度の発電計画を作成する。
市場取引	○	—	JEPX*に入札し、約定結果を取得する。
計画提出	○	—	計画帳票を作成し、広域機関に提出する。
発電計画値送信	○	—	30分粒度の発電計画値を蓄電池制御装置に送信する。
蓄電池制御	—	○	連系点潮流が計画値通りになるよう蓄電池の充放電を自律制御する。
実績監視・記録	○	—	蓄電池制御装置から取得する計測情報を監視し、蓄積する。

*JEPX : Japan Electric Power Exchange

〈注2〉自己託送：自家用発電を設置する者が TSO の電力システムを使用して、別の場所にある自社の工場などに電力供給することという。

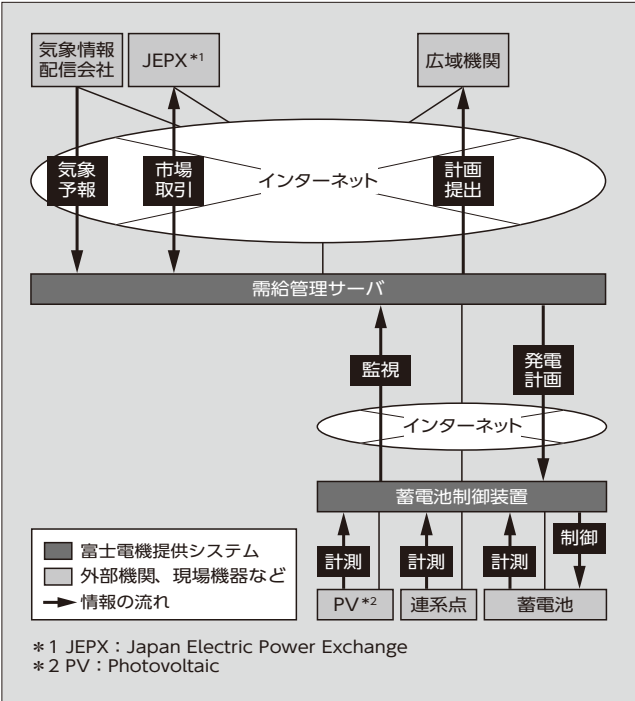


図1 需給管理システムの全体構成

3 系統用蓄電池運用システム

3.1 課題

電力系統に必要な調整力を効率的に調達し運用することを目的とする需給調整市場^(注3)が2021年に開設された。調整力を供給する有力な手段として蓄電システムが挙げられる。さらに、日本政府は蓄電システムを広く普及させるため、その導入^(注4)に対する補助金の交付や長期脱炭素電源オークションなど新しい制度を整備している。このように、蓄電池を適切に運用することで利益を上げられる仕組みが整ってきたことから、大手電力会社やエネルギー企業、商社など幅広い事業者が需給調整市場に期待を寄せている。

一方で、蓄電池の運用には、次の課題がある。

- (a) 需給調整市場における時間帯ごと、調整力の種類に応じた複数の電力商品ごとの価格を想定しながら蓄電池の運用計画を作成する必要があるが、これを人手で実施するのは不可能であるため、最適な計画を自動的に作成する機能が必要である。

〈注3〉需給調整市場：一般送配電事業者が周波数制御・需給バランス調整を行うために必要となる調整力を公募調達する市場をいう。送配電網協議会が運営するものである。

〈注4〉長期脱炭素電源オークション：電源の新たな建設を促しながら、カーボンニュートラル実現のための電源に切り替えていき、カーボンニュートラルや電力の安定供給の実現を目指す制度である。系統用蓄電池も対象となる。落札電源には、固定費分の収入を20年間得られる。電力広域的運営推進機関が運営するものである。

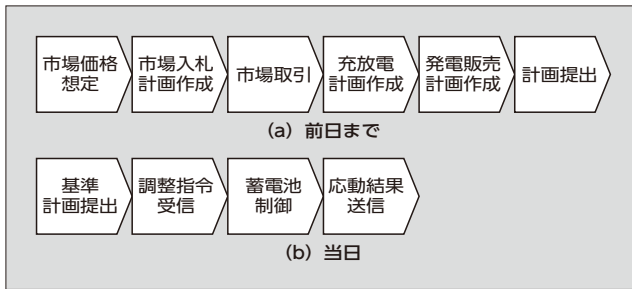


図2 業務フローの例

(b) 図2に業務フローの例を示す。このように、当日は出力調整指令に従った蓄電池の制御や応動結果の返送、および蓄電池状態の監視など、リアルタイム性を持って監視するシステムが必要である。

3.2 特徴

需給調整市場に参入する事業者向けに、系統用蓄電池運用システムを開発している。本システムは、卸電力市場や需給調整市場の価格を予測した上で、充電・放電時間を最適化して収益が最大となる蓄電池の充放電計画を作成することにより、図3に示す電力市場における裁定取引を実行するための機能を提供する。具体的には、最新の充電率や入札計画、約定結果を踏まえ、30分周期で最適な充放電計画、入札計画を算出し続ける。また、電力市場への入札、広域機関への計画提出、リアルタイムでの制御・応動監視など、必要な業務をワンストップで行うことができる機能を搭載し、事業者の業務負担を軽減する。

図4に系統用蓄電池運用システムの全体構成を示す。本システムは、このようにAC（Aggregation Coordinator）サーバとRA（Resource Aggregator）サーバ、現場側の蓄電池制御装置で構成される。表2に系統用蓄電池運用システムの業務機能一覧を示す。ACサーバは、外部機関とオンライン連携し、計画の作成、入札、提出などの支援機能を提供する。RAサーバは、ACサーバが作成した充放電計画を蓄電池制御システムに転送する。また、蓄電池制御装置の計測情報を収集してACサーバに送信する。リソースがTSOと専用線で接続される場合、蓄電池制御

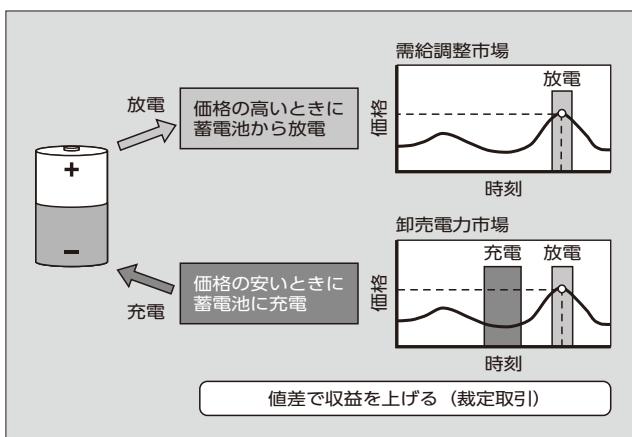


図3 電力市場における裁定取引

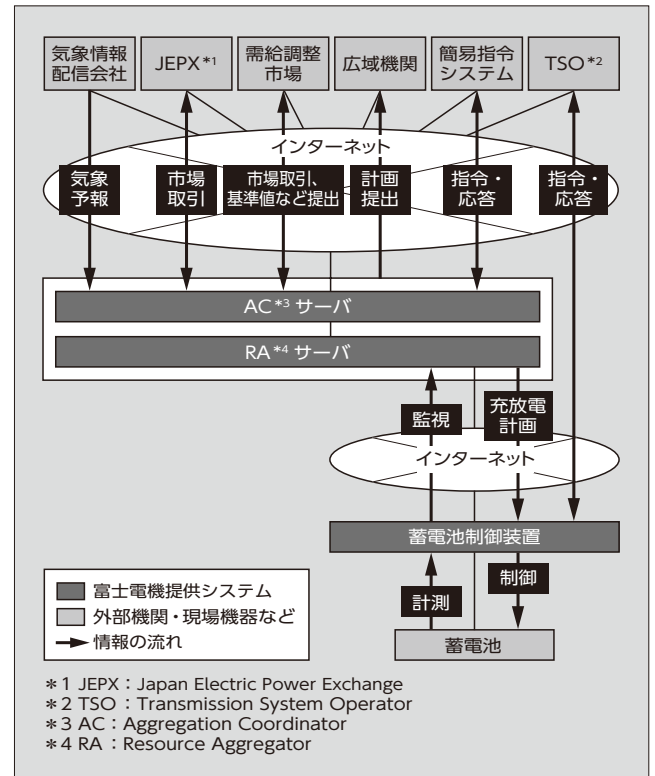


図4 系統用蓄電池運用システムの全体構成

表2 系統用蓄電池運用システムの業務機能一覧

機能名	AC*1 サーバ	RA*2 サーバ	蓄電池 制御 装置	内容
電力市場 価格予測	○	—	—	気象予報や過去の約定実績などを活用しJEPX*3、需給調整市場の商品価格を予測する。
最適計画作成	○	—	—	価格予測結果を元に収益を最大化する充放電計画、入札計画を作成する。
市場取引	○	—	—	JEPX、需給調整市場への入札、売買の成立結果を取得する。
計画提出	○	—	—	提出が必要な帳票を作成し、広域機関や需給調整市場に提出する。
リソース制御・ 計測実績受信	—	○	—	ACサーバ経由で簡易指令システムから要求される需給調整指令や充放電計画を蓄電池制御装置に送信する。また、蓄電池制御装置から受信した計測情報をACサーバに送信する。
蓄電池制御	—	—	○	RAサーバから受信した充放電計画と需給調整指令に基づいてリソースを制御する。
制御応動返送	—	—	○	リソース状態、応動実績をRAサーバに送信する。
実績監視・ 記録	○	—	—	リソース状態を監視する。また、取得した実績データを蓄積する。

*1 AC : Aggregation Coordinator
 *2 RA : Resource Aggregator
 *3 JEPX : Japan Electric Power Exchange

装置が直接TSOと連携する。蓄電池制御装置は、上位からの充放電計画に従って、蓄電池を制御する。

表3に系統用蓄電池運用システムの対象商品一覧を示す。従来からのJEPXにおける取引きとともに、需給調整市場

表 3 系統用蓄電池運用システムの対象商品一覧

No.	市場	商品	運用時期
1	JEPX*	スポット市場	運用中
2		時間前市場	運用中
3	需給調整市場	一次調整力	2024年度開場予定
4		二次調整力①	同上
5		二次調整力②	同上
6		三次調整力①	運用中
7		三次調整力②	運用中

* JEPX : Japan Electric Power Exchange

が取り扱う商品も提供することができる。今後、新しく追加される商品についても、順次対応する予定である。

4 系統計画支援システム

4.1 課題

一般送配電事業者は、電圧と周波数が安定した電力を需要家に供給する義務を負っており、保有する配電系統設備を効率的に運用するだけでなく、停電事故からの早期復旧が可能な設備構成を構築するため、系統計画業務を行っている。発電量が天候に左右されて不安定な PV をはじめとする再エネを、大量に系統連系することが要請される現状においては、系統計画業務は飛躍的に複雑化している。したがって、放射状に広がる配電系統全体を俯瞰（ふかん）して精度良く問題点を抽出し、その対策を事前に検討できる支援システムが求められている。

4.2 特徴

系統計画支援システムは主に次の機能を備える。これらの機能を活用することで、配電系統設備の最適な構成を検討することができる。

(1) 系統図メンテナンス機能

画面上で、配電系統設備の変更が可能である。また、連系を予定している需要家（負荷）や分散型電源を追加することができる。操作端末画面に表示される配電系統に対して対象設備を登録することで、運用者が設置場所をイメージしやすくしている。

(2) 負荷設定機能

解析を行う系統の負荷状態を設定する機能である。現状の系統の実績データを配電自動化システム^(注5)から取り込み、任意の時点の負荷実績を参照し、必要に応じて変更することもできる^(注2)。新たに登録した需要家の負荷や分散型電源の発電量も設定できる。

〈注 5〉配電自動化システム：配電系統運転業務の省力化・効率化を目的とした計算機システムである。一般送配電事業者が運用する。配電系統に設置される区分開閉器を遠隔監視制御し、配電線の事故の早期復旧を核機能として、その他設備保守作業を支援するものである。

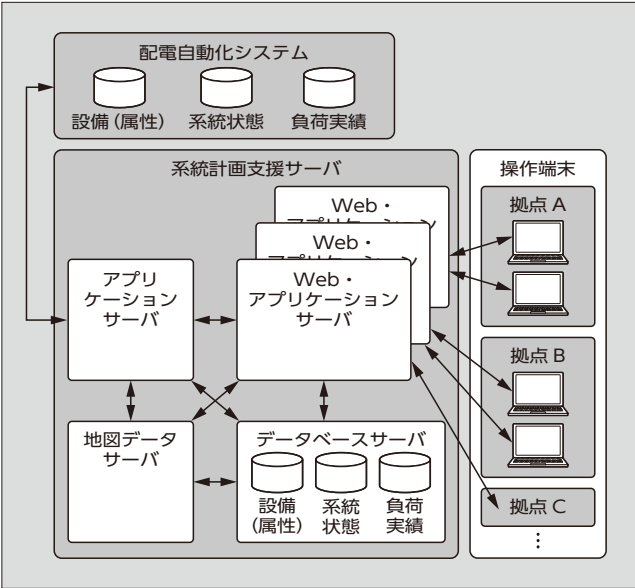


図 5 系統計画支援システムの全体システム構成

(3) 解析・シミュレーション機能

系統全体の電圧と電流を計算し、規定値からの逸脱の有無を確認する機能である。適用する潮流計算エンジンは、系統に連系される PV の動作とともに、系統中に配備される SVR（ステップ式自動電圧調整器：Step Voltage Regulator）、SVC（静止型無効電力補償装置：Static Var Compensator）などの電圧調整機器の動作を精度良く模擬することができ、区間ごとの電圧と電流を算出できる。定常運用時の解析だけでなく、事故のシミュレーションも実行できる。配電系統における事故とは、自然災害や設備故障時に起きる停電のことを指す。事故発生時の緊急対策として、事故発生箇所以外の健全な区間に対して連系されている別の配電線から電力を供給して事故の影響を最小化するような運用の効果を検証することができる。配電線の事故だけでなく、配電用変電所のバンク事故にも対応できる。

図 5 に系統計画支援システムの全体システム構成を示す。

系統計画業務に必要な配電系統設備データ、負荷データを取得するため、配電自動化システムとオンラインデータ連携可能な構成としている。また、系統計画業務は従来から複数拠点（各配電営業所など）で実施しており、専用の操作端末が必要であった。そこで、サーバと操作端末は、汎用ブラウザで利用可能な Web 方式を採用した。専用の操作端末が不要だけでなく、各担当の PC でシステム操作ができるため、系統計画業務の人員増加にも容易に対応可能となった。

5 あとがき

再生可能エネルギーの導入拡大を支える電力流通ソリューションについて述べた。開発している再エネ発電事業者向け需給管理システムや系統用蓄電池運用システムは、発電事業者の利益確保への貢献に期待ができ、再エネを利

用する発電事業者の増加を促進すると考える。

また、PVの増加に対応した配電系統の設計や計画を行う系統計画支援システムを一般送配電事業者に提供することで、配電系統側からも再エネの導入量拡大に貢献する。

富士電機は、これらのシステムにより、カーボンニュートラル社会の実現に貢献する所存である。

参考文献

- (1) 石橋直人ほか. 太陽光発電の発電量予測技術. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.3, p.207-210.
- (2) 松枝剣. 配電自動化システムにおけるレジリエンス. 技術雑誌スマートグリッド. 大河出版. 2023, no.1.



岡林 弘樹

電力流通分野のシステム開発推進およびエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社エネルギー事業本部エネルギーマネジメント事業部電力流通技術部担当課長。



三好 龍之介

電力流通分野のエネルギーマネジメントシステムのエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社エネルギー事業本部エネルギーマネジメント事業部電力流通技術部課長補佐。



藤尾 昂弘

電力流通分野の系統計画支援システムのエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社エネルギー事業本部エネルギーマネジメント事業部電力流通技術部。



電力の安定供給に貢献する系統用蓄電システム

Grid Storage Systems to Stabilize Power Supply

金本 真依 KANEMOTO, Mai

毛内 俊晴 MONAI, Toshiharu

宮村 尚孝 MIYAMURA, Naotaka

再生可能エネルギーの主力電源化に向けて、電力系統における需要と供給のバランスを保つための調整力として系統用蓄電システムが期待されている。富士電機はDC1,500Vに対応した大容量の蓄電池PCSを新たに開発し、高電圧化が進む蓄電池パッケージとの接続を実現し、設置面積を大幅に低減した。また、PCSは重耐塩仕様にも対応し、沿岸部の遊休地などにも設置でき、高効率で安定した運用を実現している。制御システムは、需給調整市場および卸電力市場に対応している。

With the aim of transforming renewable energy into society's primary source of power, grid storage systems are expected to serve as a balancing force between supply and demand in power grids. Fuji Electric has developed a new, large-capacity storage battery PCS capable of supporting 1,500 V DC, enabling connections to battery packages of increasingly high voltages while greatly reducing their footprint. With its heavy salt damage-resistance, the PCS can be installed on idle land along the coast to use efficiently and stably. The control systems are compatible with the reserve market and the energy market.

① まえがき

2050年までに温室効果ガスの排出を実質ゼロにするカーボンニュートラルの実現に向けて、再生可能エネルギー（再エネ）の主力電源化が、重要な戦略の一つとして政府の“第6次エネルギー基本計画”に謳（うた）われている。再エネの拡大は、環境への影響を軽減する一方で、日照や風速など天候の変動によって発電量が不安定になるため、電力需給バランスを保つことが難しくなる。その解決策として、蓄電池の充放電で電力需給バランスを調整する系統用蓄電システムは重要な役割を果たす。

2022年には、「電気事業法」の改正が行われ、直接電力系統に接続する大型蓄電池から放電を行う事業が、発電事業に位置付けられたことで、電力の市場取引をターゲットとした系統用蓄電システムの導入が活発になっている。

富士電機は、電力安定化を目的としたさまざまな取り組みを実施してきた。本稿では、電力の安定供給に貢献する系統用蓄電システムについて述べる。

② 電力安定化への取り組み

富士電機の電力安定化への取り組みを図1に示す。1990

2000		2010		2020 (年)	
1995 ○交直変換装置 (50 kW、100 kW、 250 kW、500 kW) NAS電池*1	2004 ○風力出力安定化実証設備 向け交直変換装置 (±6 MW) レドックスフロー電池	2007 ○事業用ウィンドファーム 出力安定化装置 LL形鉛蓄電池	2010 ○離島向け太陽光発電・系統 安定化設備 リチウムイオンキャパシタ 沖縄3離島	2012 ○離島向け系統安定化設備 (300 kW) ニッケル水素電池 ○風力出力安定化検証設備 新型電池 (国外製)	2016 ○ガラパゴス電力安定化 リチウムイオン電池+ LL形鉛蓄電池 ○メガソーラー安定化 リチウムイオン電池
1997 ○電池評価用交直変換装置 (30 kW) 鉛蓄電池	2005 ○瞬時変動補償機能付UPS (300 kVA) FVH*2型鉛蓄電池	2008 ○変動緩和型太陽光発電設備 (300 kW) 電気二重層キャパシタ	2011 ○北九州スマートコミュニ ティ実証設備 リチウムイオン電池+ ウルトラバッテリー	2017 ○直流マイクログリッド設備 リチウムイオン電池 ○ピークカットシステム LL形鉛蓄電池	2017 ○需要家向けピークカット (長崎県諫早市) リチウムイオン電池 (リ ユース)
1998 ○電池評価用充放電装置 NAS電池	2006 ○風力発電出力安定化実証 設備 LL形鉛蓄電池+ニッケル 水素電池+電気二重層 キャパシタ	2009 ○離島マイクログリッド実 証設備 リチウムイオン電池+ LL形鉛蓄電池	○風力事業者向け安定化設備 (±4.5 MW) LL形鉛蓄電池	2014 ○トンガ王国マイクログ リッド リチウムイオンキャパシタ	2019 ○トンガ王国系統安定化シ ステム リチウムイオンキャパシタ
1999 ○変電所用交直変換装置 (500 kW) NAS電池	○マイクログリッド研究設備 ニッケル水素電池+SLM 型鉛蓄電池	○風力事業者向け安定化設 備 (±4.5 MW) LL形鉛蓄電池		2015 ○系統用蓄電システム (±30 MW) レドックスフロー電池 ○嶺島 (こしきじま) 蓄電 センター リチウムイオン電池 (リ ユース)	○需要家向けコージェネ レーション協調 EMS*3
2002 ○電池評価用電力貯蔵機能付 SPS (50 kVA、500 kVA) レドックスフロー電池適 用	○瞬時変動補償機能付PCS (250 kVA) & UPS (800 kVA) FVH型鉛蓄電池			○製品質評価技術基盤機構 リチウムイオン電池	2017 ~ 2020 ○北海道地区蓄電池併設型 メガソーラー ○発電機協調システム NAS*4

*1 NAS電池：東京電力ホールディングス株式会社の商標または登録商標 *2 FVH：古河電池株式会社の商標または登録商標 *3 EMS：Energy Management System
*4 NAS：東京電力ホールディングス株式会社および日本碍子株式会社の商標または登録商標 *5 EV：Electric Vehicle

図1 富士電機の電力安定化への取り組み

年代から系統安定化用途の蓄電システムの開発に着手し、2006年には株式会社ウィンパワーの保有する西目風力発電所向けに、各種蓄電デバイスを活用した再エネ出力を平滑化する制御装置を開発した。さらに、2010年に離島における電力安定化を担うマイクログリッドシステムを納入した。2011年からの北九州スマートコミュニティ実証事業では、地域の電力平準化を行う蓄電システムを開発し、2016年からのバーチャルパワープラント（VPP：Virtual Power Plant）実証事業では、VPP対応需要家蓄電システムを開発した。これらのさまざまな取り組みを通してノウハウを蓄積し、電力需給の最適化・安定化に貢献する制御技術を磨いてきた。富士電機は、高度な電力安定化技術および業界最高レベルの変換効率を持つ富士電機製パワーコンディショナ（PCS：Power Conditioning System）と、リチウムイオン、レドックスフロー、NAS^(注)、鉛、キャパシタなど各種蓄電デバイスとの豊富な組合せ実績を強みに、用途に応じて最適な蓄電システムを構築する技術を持っている。次に代表的な蓄電システム構築事例について述べる。

2.1 離島マイクログリッドシステム

多くの離島では、電力系統は独立して小規模であり、ディーゼル発電が主力電源であるため、燃料の輸送費が掛かり発電コストが高く、環境負荷も高い。マイクログリッドシステムでは、燃料が不要な太陽光発電などの再エネを導入し、燃料のたき減らしによるコストダウンと環境負荷を低減すると同時に、蓄電制御システムを導入し、ピークシフトによる需給調整機能、周波数制御機能（ガバナフリー制御など）を実装することで、需給バランスや電力品質確保を行っている。図2にマイクログリッドシステムの設備の外観を示す。

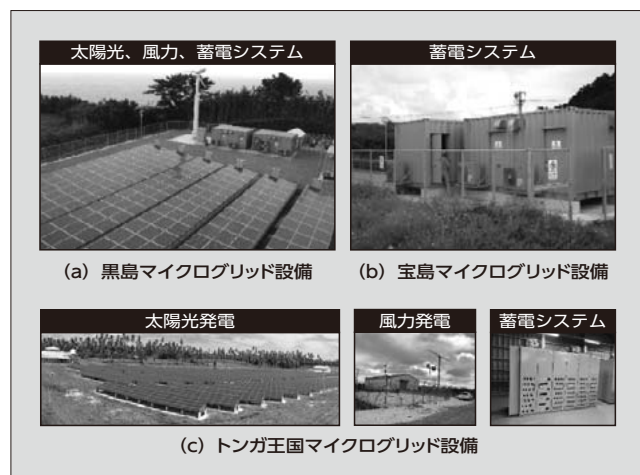


図2 マイクログリッドシステムの設備

〈注〉NAS：東京電力ホールディングス株式会社および日本碍子株式会社の商標または登録商標

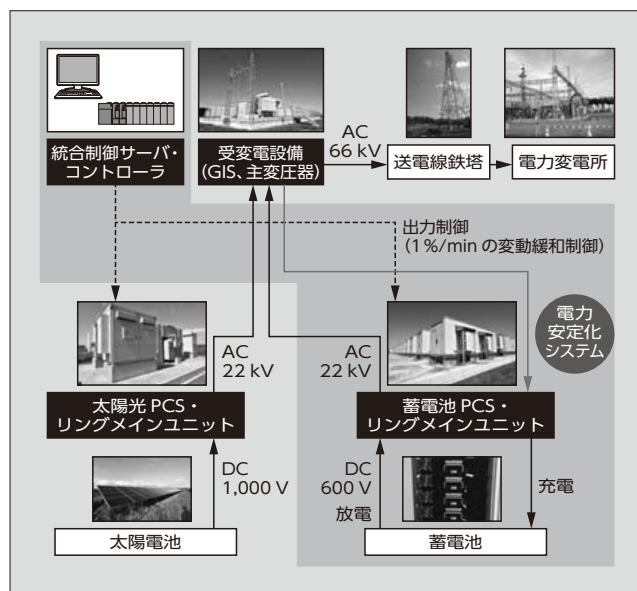


図3 再エネ発電出力変動補償システムの構成例

2.2 再エネ発電出力変動補償システム

富士電機では、メガソーラーを中心とした事業用の再エネ発電設備を多数納入している。北海道電力株式会社管内では、再エネの導入量が増加し電力系統への影響が大きくなったため、これを低減するために連系電力の変化率1%以下/分の要件を設けた。この要件を満足するために、再エネの出力変動を蓄電池によって平滑化する蓄電システムを多数納入している。この安定化用ソフトウェアは富士電機の独自技術により蓄電池の設備容量を最小化することが可能である。図3に再エネ発電出力変動補償システムの構成例を示す。

2.3 大規模系統用蓄電システム実証設備

北海道電力株式会社と住友電気工業株式会社が共同で構築した世界最大級（定格出力15,000kW、容量60,000kWh）の大規模系統用蓄電システム向けに、600kVAのPCS65台と周波数制御技術を適用した制御装置を2015年に納入した。制御機能として、電力系統の周波数変動に対応して高速に充放電を行うガバナフリー制御、中央給電指令所からのリモート制御（LFC：Load Frequency Control）を実装している。これは需給調整市場の一次調整力、二次調整力に該当するものであり、制御応答性能は需給調整市場の要件より、高速である。蓄電池の状態に合わせて、65台の蓄電池PCSを高速に制御することで、大規模な蓄電池の充放電制御を実現した⁽¹⁾。納入した交直変換装置（蓄電池PCS、昇圧変圧器、高圧遮断機など）の複数設置状況として、図4に南早来変電所向け大規模系統用蓄電システムの外観を示す。

2.4 EV用蓄電池を再利用した蓄電システム

ガソリン車に代わり電気自動車（EV：Electric Vehicle）の普及がさらに進むことが予想される。EV用の蓄電池は

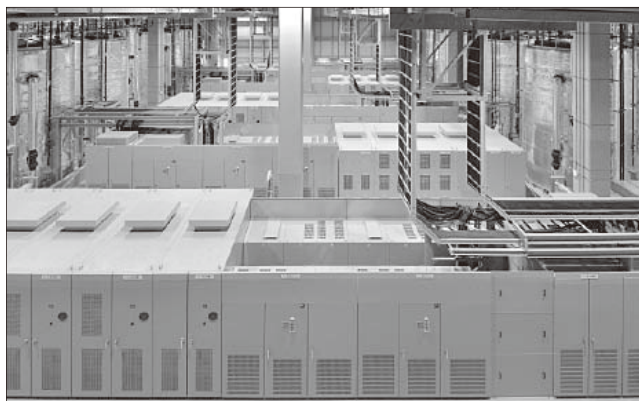


図4 南早来変電所向け大規模系統用蓄電システム

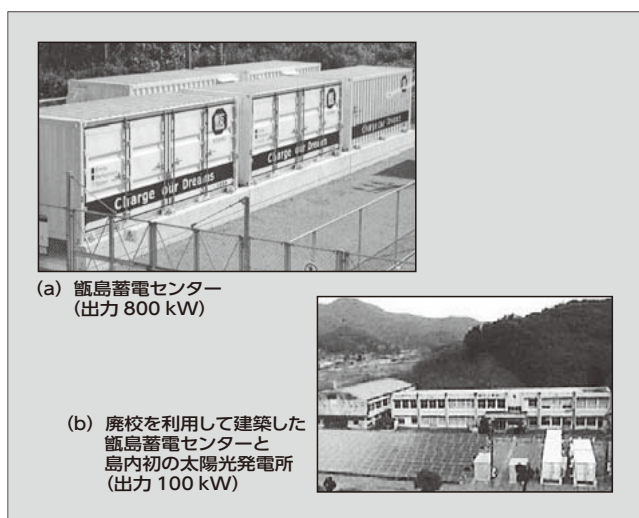


図5 甕島蓄電センターに納入したEV リユース蓄電システム

5～7年程度で交換が必要となるが、自動車用途ほど使用条件が厳しくない産業用途に再利用し、さらに継続運用が可能である。富士電機は、住友商事株式会社が構築したEV用リユース蓄電システムのPCSおよび制御装置を納入した。このシステムは、EVに搭載されている蓄電池パックをそのままコンテナに実装してリユース時の作業最小化を図ったこと、さらに富士電機の制御装置に蓄電池の容量測定機能を実装してリユース蓄電池の寿命管理ができることを特徴としている。図5に甕島蓄電センターに納入したEVリユース蓄電システムの外観を示す。

③ 系統用蓄電システムの現状

2021年に需給調整市場が開設され、一般送配電事業者が調整力を市場から調達するしくみができた。また、近年発生している需給ひっ迫問題は、卸電力市場において、電力価格の高騰や時間帯の違いによる料金差の拡大を引き起こしており、料金差を利用した裁定取引による事業性が増している。このような状況に加えて、経済産業省などの系統用蓄電システムに対する補助金制度も事業者を後押しし、大容量の系統用蓄電システムの導入が進められている⁽²⁾。

3.1 系統用蓄電システムの全体構成

富士電機は系統用蓄電システムを構成する主要コンポーネントであるPCSから、高圧・特別高圧連系設備、制御装置までの機器を提供するとともに、システム設計からアフターサービスまでトータルでソリューションを提供することができる。富士電機は蓄電池を製品として保有してい

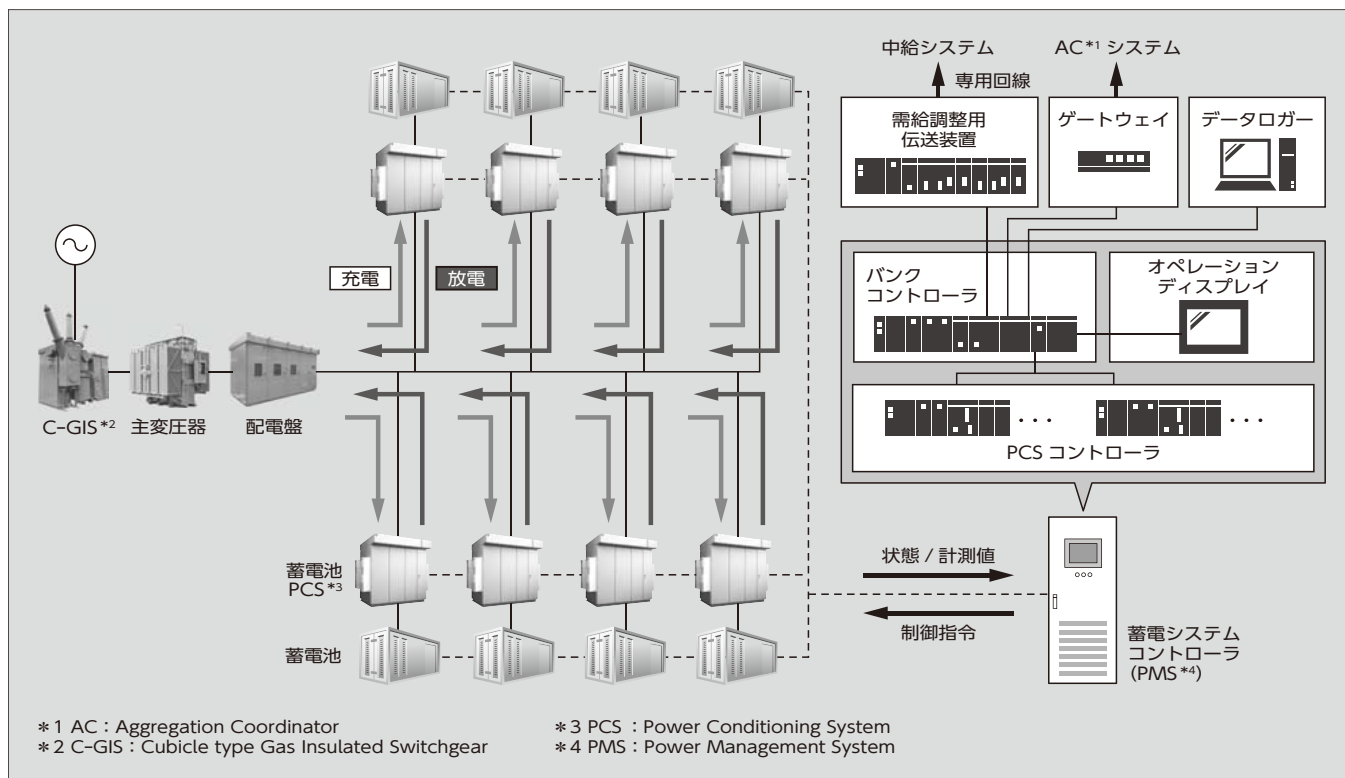


図6 系統用蓄電システムの全体システム構成例

ないが、以前から多様な蓄電池メーカーと連携し、各種システムを納入した実績がある。近年、蓄電池は、大容量化、パッケージ化が進んでいるが、顧客の要望やシステムニーズに合わせ、多様な蓄電池の中から、最適な蓄電池を採用しシステム化することが可能である。図6に系統用蓄電システムの全体システム構成例を示す。

3.2 系統用蓄電システムの課題

近年の系統用蓄電システムは経済産業省などの補助事業により初期費用が抑えられるため、多くの事業者が参入しているが、次に示す課題がある⁽³⁾。

(1) 基本性能の向上

さらなる高効率化や省エネルギー（省エネ）化、小型化などが求められる。

(2) 直流電圧の高電圧化

蓄電池メーカーは、エネルギー密度向上、kWh 単価低減のため、直流電圧の高電圧化を図った標準のコンテナ蓄電池パッケージとして販売しており、この電圧範囲に対応する必要がある。

(3) 重耐塩仕様への対応

参入するエネルギー事業者の多くが、沿岸部の遊休地の活用を考えているため、適切な塩害対策が求められる。

(4) 高速な充放電制御

需給調整市場の一次調整力では最も短い応動時間が求められるため、周波数を高速で検出し、偏差に応じた充放電制御を行う必要がある。

(5) 上位システムとの連携

需給調整市場、卸電力市場などの市場取引に対応するため、上位にあって各需要家のエネルギー資源を束ねて需給調整を行うアグリゲーションシステムとの情報連携、および同様に上位にあって需給バランス調整などの指令を出す簡易指令システムからの指令に合わせて充放電制御を行う必要がある。

3.3 大容量蓄電池 PCS の特徴

3.2 節の課題の対策として、屋外に設置できる大容量の PCS をラインアップに加えた。制御装置としても従来から蓄積した制御機能に加え、経済産業省の VPP 実証事業などで開発した上位システムとの連携機能を実装し、系統用蓄電システムに必要な機能を実現している。定格容量 2,600 kVA PCS「PVI1400CJ-3/2600」と定格容量 2,750 kVA PCS「PVI1500CJ-3/2750B」を新たに加えて拡充した蓄電池 PCS のラインアップを図7に示す。このラインアップの拡充により、使用する蓄電池電圧、連系点の出力容量、使用用途に応じて、PCS を選択して、最適なシステムを提案することが可能である。PVI1400CJ-3/2600 および PVI1500CJ-3/2750B の仕様を表1に、同一の外観を図8に示す。

これらの大容量蓄電池 PCS は次の特徴を備える。

(1) 基本性能の向上

(a) 高効率化、省エネルギー化

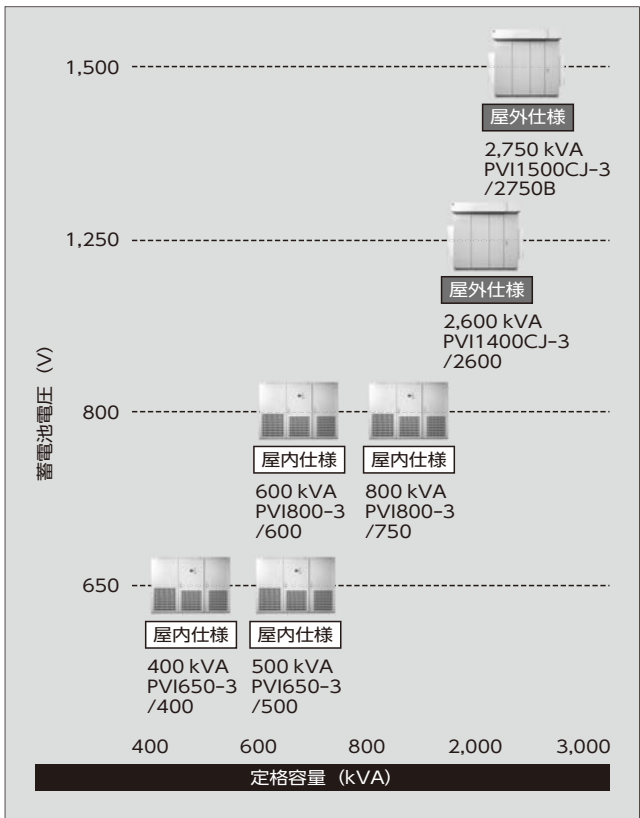


図7 蓄電池 PCS のラインアップ

表1 「PVI1400CJ-3/2600」と「PVI1500CJ-3/2750B」の仕様

項目		仕様	
型式		PVI1400CJ-3 /2600	PVI1500CJ-3 /2750B
定格容量 (kVA)		2,600	2,750
有効電力 (kW)		±2,600	±2,750
無効電力 (kvar)		±1,560	±1,650
交流	定格電圧 (V)	465	590
	出力電流 (A)	3,228	2,692
直流	運転電圧範囲 (V)	805 ~ 1,250	1,020 ~ 1,500
	最大入力電圧 (V)	1,400	1,500
	最大入力電流 (A)	3,296	2,752
装置仕様	装置最高効率 (%)	98.4	98.4
	保護リレー	OV、UV、OF、UF、単独運転検出 (能動、受動)、直流地絡検出	
	サイズ (mm)	W2,516×D1,545×H2,653	
設置環境	設置場所	屋外	
	周囲温度 (℃)	-20 ~ +57	-20 ~ +47
	相対湿度 (%Rh)	4 ~ 100	
	標高 (m)	2,000 m以下	

最新の 高 効 率 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) の 採 用 に よ り 最 高 効 率 と し て、PVI1400CJ-3/2600 は 98.4%、PVI1500CJ-3/2750B は 98.7% を 達 成 し た。電 力 ロ ス を 削 減 し た こ と に よ り、ス タ ン バ イ 中 に 冷 却 フ ァ ン を 停 止 で き る よ う に な り、待 機 電 力 を 低 減 し、省 エ ネ に 貢 献 で き る。



図8 「PVI1400CJ-3/2600」と「PVI1500CJ-3/2750B」

(b) 屋外設置仕様

従来の屋内仕様のPCSを屋外に設置するため、コンテナや建物を用意する必要があり、さらに空調設備を設け、PCSの運転環境を常に保つ必要があった。新開発のPCSでは、屋外に直接設置できることで、初期費用としてはコンテナや建物を不要とし、また、空調設備運転や定期交換のランニングコストを削減できる。

(c) 設置スペースの大幅な削減

電力変換回路の見直しにより、入力電圧の許容範囲の上限を大幅に引き上げた。従来タイプと比べて蓄電池の直列数を増加できるようになり、蓄電システムの設置面積を大幅に削減した。また、主回路をユニット化構造にすることで、装置の小型化を実現し、2,600 kVA 帯で世界最小レベルの設置面積（3.89 m²）を実現している。

(d) 運用継続性

PVI1400CJ-3/2600の単線結線図を図9に示す。交流側、直流側ともにSPD（Surge Protective Device）、ACB（Air Circuit-Breaker）、直流側に地絡過電圧継電器を設けている。交流側はバスダクト接続、直流側は蓄電池コンテナが並列接続可能な端子を設けている。パワーユニット（インバータ回路）は四つのユニットから構成されており、一つのパワーユニットが故障した場合でも、残りのユニットで縮退運転が可能である。よって、故障時も事業に与える影響を最小限にして運転継続することができる。

(2) 直流電圧の高電圧化

現在、系統用蓄電システムに採用されている蓄電池の主流はリチウムイオン蓄電池であり、エネルギー高密度化による省スペース化、コストダウンが進んでいる。さらに、限られた設置スペースに、輸送・設置の効率を高めるために、蓄電池をコンテナに実装したパッケージでの提供を行っている。このため、蓄電池の直流電圧範囲も高くなってきている。

富士電機のPCSは高密度な蓄電池コンテナの電圧範囲であるDC805～1,500 Vに対応し、国産メーカーをはじめ、中国や韓国など国外のメーカーを含む各社蓄電池コンテナパッケージに接続できるようになり、システム構築の効率を高めている。

(3) 重耐塩仕様への対応

海岸に近い遊休地などで長期的な運用を可能とするため

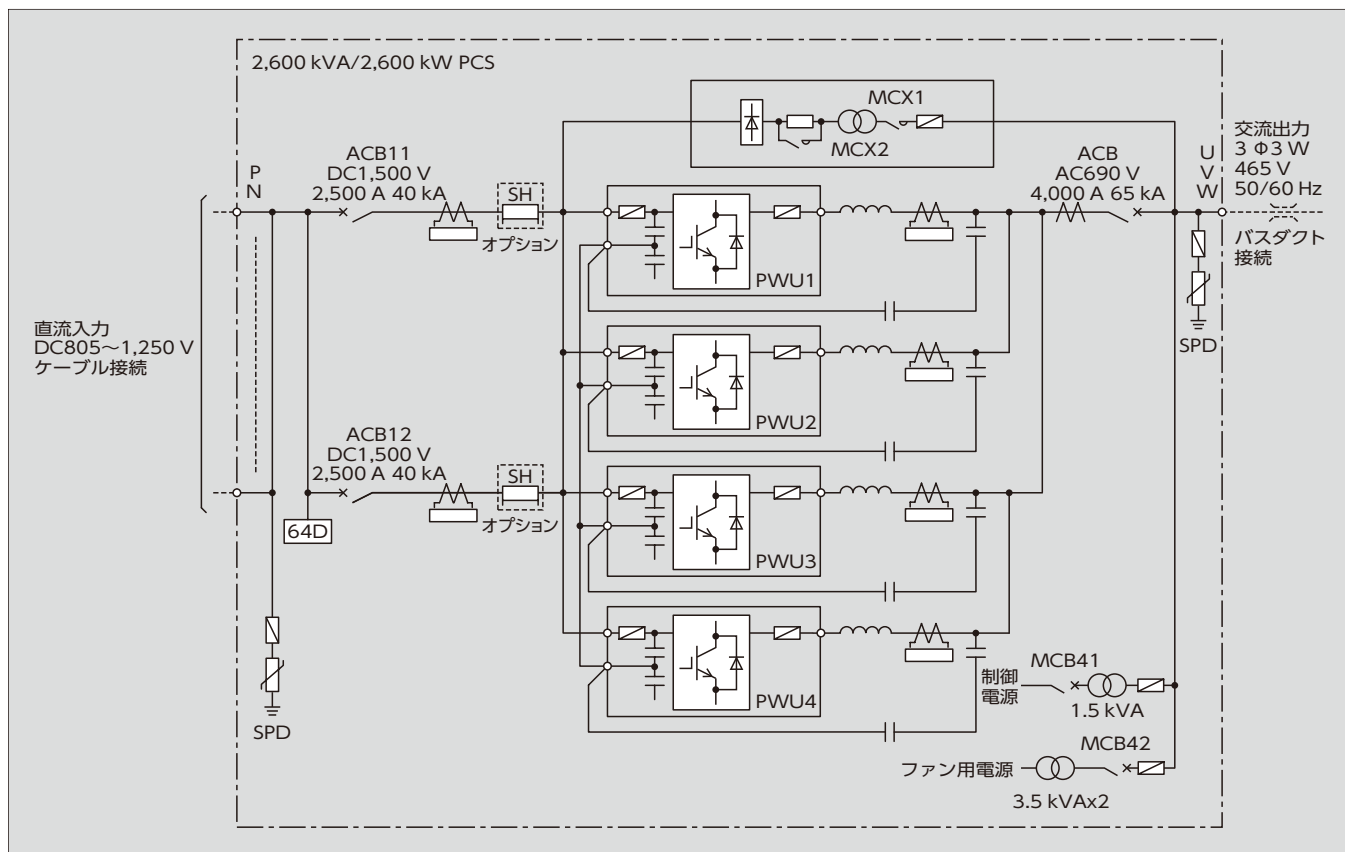


図9 「PVI1400CJ-3/2600」の単線結線図

に塩害対策が要求されている。屋外設置仕様の大容量蓄電池 PCS の冷却構造を図 10 に示す。PCS の内部を気密エリアと外気エリアに区分し、それぞれで冷却している。制御装置、インバータなどの環境影響を受けやすい重要機器は、熱交換器で冷却することで外気を導入しない気密エリアに格納している。環境影響を受けにくい冷却用ヒートシンクとリアクトルは、強制空冷ファンで冷却する外気エリアに格納している。外気エリアについては、納入実績の多い屋外型太陽光 PCS の稼働実績ノウハウを基に外装素材の一部腐食しやすい部分へのステンレス鋼やアルミニウムの適用、塗装対策、メンテナンスにおける交換周期の見直しなどを施して耐塩性を高めている。

(4) 高速な充放電制御

需給調整市場において、2024 年度に開始される一次調整力はガバナフリー相当制御と同じ役割と位置付けられており、高速な応答が必要である。富士電機製 PCS は、指令値のステップ変化に対する出力の 90% 応答時間が 30 ms 以下であるとともに応答波形に振動がほとんどなく、一次調整力相当の高い応答性能を備えている。図 11 に蓄電池 PCS の応答性能を示す。

(5) 上位システムとの連携

富士電機の制御システムは、系統用蓄電システムとして求められる、需給調整市場の一次から三次までの全ての調整力、および卸電力市場に対応している。また、蓄電所の要件として求められる連系点での力率制御も実現している。

上位のアグリゲーションシステム・簡易指令システムからの制御指令に合わせて充放電制御を行う連携機能につ

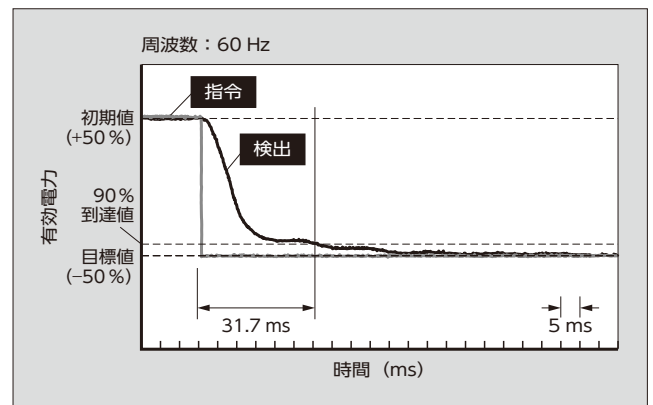


図 11 蓄電池 PCS の応答性能

いては、経済産業省の VPP 実証事業（2016～2020 年）において開発し、商品化している。

3.4 制御機能の特徴

系統用蓄電システムに求められる要件に柔軟に対応するため、制御ソフトウェアのプラットフォームを構築・標準化し、次の対応を行っている。

(1) 高速分散制御

蓄電池の充電可能量、放電可能量および、PCS の状態に応じて、リアルタイムに複数 PCS に充放電指令値を一次調整力に対応できる高速で分配している。

(2) 蓄電池保護

蓄電池の過充電や過放電を防止する保護機能を実装し、電池を保護して劣化を抑制する充放電制御方法についても研究を進めている。

(3) 機能のモジュール化

上位システムとのインタフェースと、リミッタ制御、保守機能などの制御機能や、各種蓄電池との通信インタフェースをモジュール化し、制御システムを効率的に構築できるようにしている。

4 あとがき

電力の安定供給に貢献する系統用蓄電システムについて述べた。系統用蓄電システムは、今後、再生可能エネルギーのさらなる導入と主電源化に伴い、調整力としてのニーズが高まると予想される。さらに、電力システムの電圧問題、慣性力不足などへの対策が必要になるため、富士電機は PCS の機能として、電圧制御機能などを持つスマートインバータや疑似慣性を持った GFM（Grid Forming Inverter）の機能開発を進めている。

今後も将来動向に注視しながら、市場にマッチし、カーボンニュートラルに貢献できる技術、製品を開発・提供していく所存である。

参考文献

- (1) 毛内俊晴ほか、世界最大級の 60 MWh レドックスフロー電池による系統蓄電池用の大容量交直変換システム、富士電機

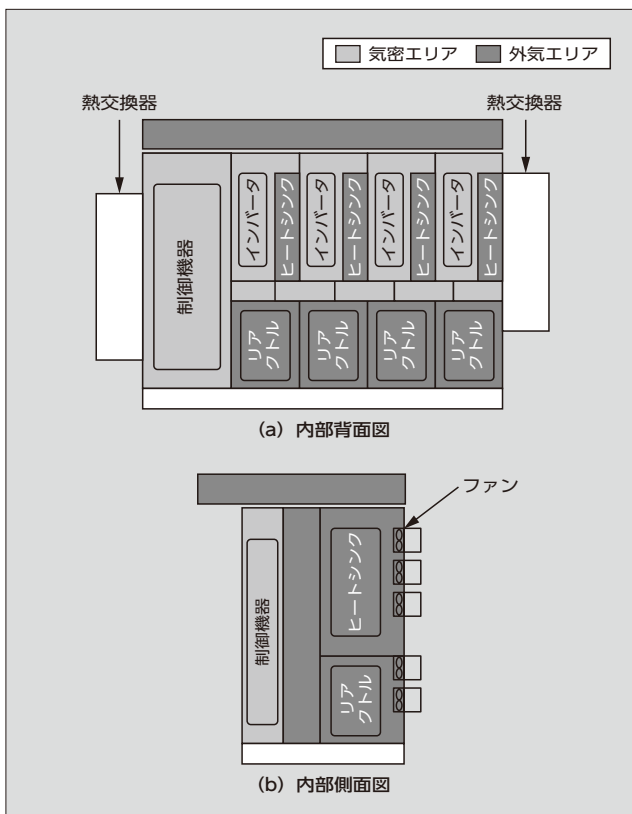


図 10 屋外設置仕様の大容量蓄電池 PCS の冷却構造

技報. 2017, vol.90, no.1, p.36-41.

- (2) 宮村尚孝ほか. “[電機業界] カーボンニュートラル実現に貢献する技術”. 2023年電気学会D部門大会シンポジウム. 5-S9-3, 名古屋市, 2023-8-22/24, 電気学会.
- (3) 笛木豊ほか. カーボンニュートラル実現に貢献する富士電機の技術. 技術雑誌スマートグリッド. 大河出版. 2022, no.10.



宮村 尚孝

電力・エネルギー分野の EMS 関連の企画・開発・エンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社エネルギー事業本部エネルギーマネジメント事業部カーボンニュートラル推進部主席。電気学会会員。



金本 真依

EMS、蓄電制御システムの企画・開発・エンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社エネルギー事業本部エネルギーマネジメント事業部エネルギー制御技術部担当課長。



毛内 俊晴

電力・エネルギー分野の電力変換システム、特に蓄電制御システムの企画・開発・エンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社エネルギー事業本部エネルギーマネジメント事業部エネルギー制御技術部課長。



新たな分散型電力システムの設備導入に向けた設備設計シミュレーション技術

Equipment Design Simulation Technology for Introducing Distributed Power System

石上 雄太 ISHIGAMI, Yuta

佐藤 智希 SATO, Tomoki

林 巨己 HAYASHI, Naoki

分散型エネルギー資源の導入拡大や電力取引市場に対応し、災害時も安定した電力供給ができる新たな分散型電力システムの実現が求められている。本システムの構築に必要な設備の設計や運用を事前に検証できる、用途別の三つの設備設計シミュレータを開発した。一つ目の需要家発電設備運用シミュレータは、再生可能エネルギー電源を最大限活用するための最適な蓄電池設備の検証を、二つ目の電力取引シミュレータは、複数の市場取引で収益を最大化するための系統用蓄電池の設備容量と最適運用の検証を、三つ目の分散型グリッド運用シミュレータは、自立運転の検証をそれぞれ可能とした。

Demand is increasing for new distributed power systems that can use increasing distributed energy resources and are adapted to the power exchange market, as well as stably supply power even in the event of a disaster. Fuji Electric has developed three equipment design simulators for separate applications to verify the design and operation of equipment used in these systems in advance. The first is a utility customer power generation equipment operation simulator that enables the verification of optimal storage batteries to make the maximum use of renewable energy sources. The second is a power exchange simulator that enables the verification of capacity and optimal operation of grid storage batteries to maximize revenue in multiple market transactions. Finally, the third is a distributed grid operation simulator that enables the verification of isolated operations.

① まえがき

2021年10月に閣議決定された“第6次エネルギー基本計画”において、日本は2030年度の温室効果ガス排出量を2013年度に比べて46%削減することを目指すことを表明した。これを達成するためにエネルギー供給側では再生可能エネルギー（再エネ）の比率を高めることが求められている。また、災害時においても、地域の再エネや蓄電池などの分散型エネルギー資源（DER：Distributed Energy Resources）を活用して安定した電力供給を可能にする分散型グリッドへの関心が高まっている⁽¹⁾。さらに、国内では電力システム改革により電力取引市場が整備されてきており新たな発電事業の機会が提供される状況となっている。

このような環境変化に対応するため、DERを活用した電力システム（新たな分散型電力システム）を検討する機会が増加している。新たな分散型電力システムの構想段階では、設備容量、再エネ比率、運用方法、投資対効果などさまざまな検討が必要である⁽¹⁾。富士電機では、構想段階における検討事項を複数の条件で繰り返しシミュレーションして評価することを提案している。これにより、過剰設備を抑制し最適な設備設計を行うことができる。さらに、この設備をどのように運用すれば効果的であるのかを事前に把握可能である。富士電機では、このシミュレータを使用したサービスを提供している⁽²⁾。

本稿では、新たな分散型電力システムの設備導入に向けた設備設計シミュレーション技術について述べる。

② 設備設計シミュレータの概要

設備設計シミュレータの構成を表1に示す。設備設計シ

表1 設備設計シミュレータの構成

項目	需要家発電設備運用シミュレータ	電力取引シミュレータ	分散型グリッド運用シミュレータ
用途	再エネ電源と蓄電池設備の設備設計と運用の検証	電力取引市場における蓄電池の設備設計と運用の検証	自立運転可能な分散型グリッドの設備設計と運用の検証
想定利用者	高圧・特高圧需要家（オンサイト電源）	発電事業者（卸電力取引など）	高圧・特高圧需要家（オンサイト電源）
対象設備	オフサイトPV*+蓄電池	系統用蓄電池	分散型グリッド

*PV：Photovoltaic

ミュレータは、用途に合わせて“需要家発電設備運用シミュレータ”“電力取引シミュレータ”“分散型グリッド運用シミュレータ”の三つのシミュレータで構成される。

各シミュレータを用いることで、設備容量の最適値の検討や運用シミュレーションによる費用対効果の検討が可能である。さらに、構築したシミュレータの設備モデルは、実運用における実際の設備の動作をリアルタイムに表現することを可能とすることで、デジタルツインへの応用を予定している。デジタルツインを構築することで、電力取引市場の価格予測やプラント全体の電圧・周波数の予測精度向上などが可能になる。

③ 需要家発電設備運用シミュレータ

3.1 概要

大口需要家における再エネ設備の導入時には、需要家設備の消費電力に応じた蓄電池設備の有効利用によりピークシフトの検討を行い、再エネ比率を向上させることが必要である。その最適解を算出したいといったニーズに応えるため、需要家発電設備運用シミュレータを開発した。需要

家発電設備運用シミュレータは、大口需要家向け蓄電池システムの設備容量と運用のシミュレーションにより、再エネ電力を最大限活用するための最適な蓄電池システムの出力と容量を導き出すことが可能である。設備導入コストとCO₂ 排出コストから設備容量の関係を見直し、経済効果最大・再エネ比率最大・稼働率最大の3点から各コストを考慮した最適設備容量を検討する。

3.2 最適設備容量の算出方法

(1) 想定する系統

需要家設備検証用シミュレーションの系統例を図1に示す。本例においては、オフサイトに設置された太陽光発電(PV: Photovoltaic)の発電電力を需要家に託送する。PVの発電電力は天候に左右され不安定であり、託送時に計画値と実績値のずれであるインバランスが大きくなるリスクがあるため需要家構内に蓄電池を設置し、リスク低減を図る。このような系統構成にて、目的に応じたPVと蓄電池の設備容量を求めることが可能である。

(2) 設備容量の導出方法

需要家がPVや蓄電池などの設備を導入する目的に応じて、必要な設備容量は異なる。設備導入量の算出方法も目的によって異なる。目的を、再エネ比率最大、経済効果最大、稼働率最大として設備容量を算出した。

(a) 再エネ比率最大

再エネ比率を最大化するためには、CO₂ 排出コストを目的関数とし、これが最小となるように各設備の導入量を求める。小売電気事業者から調達する電力や、化石燃料を用いた発電機の電力は、CO₂ を排出するためにCO₂ 排出コストが高くなる。したがって、この目的を選択した場合はCO₂ を排出する発電機ではなく、再エネ電源や蓄電池が多く導入されるため再エネ比率は最大となる。しかし、設備導入費用が高額となり、経済性は悪くなる。

(b) 経済効果最大

経済効果を最大にするためには、設備導入コスト、ランニングコスト、CO₂ 排出コストの和を目的関数として、目的関数値が最小となるように各設備の導入量を求める。したがって、経済効果は最大となる。しかし、PVなどの再エネ電源や蓄電池は高価であるため、この

目的を選択した場合は、再エネ比率は小さくなる。

(c) 稼働率最大

稼働率最大では、経済効果最大と再エネ比率最大で算出したそれぞれの導入量の間で値を変化させ、稼働率最大となる導入量を算出する。

ここで稼働率とはさまざまな定義が考えられるが、一例を次に示す。最初に、再エネ比率最大化で算出した再エネ電源と蓄電池の容量を初期値とする。次に、再エネ電源の容量を固定し、蓄電池容量を低減していく。蓄電池容量を低減すると、設備導入費用も低減していくが、蓄電池容量を低減し過ぎると再エネ電力を充電しきれなくなり、再エネ抑制が発生してしまう。この再エネ抑制が発生する直前の蓄電池容量を、稼働率最大と定義した。

すなわち、稼働率最大は、最も安い設備投資で再エネの抑制が発生しない状況であり、導入した再エネ設備を最も有効に活用していると捉えることができる。

3.3 最適設備容量の算出事例

(1) 前提条件

図2にシミュレーションに用いた電力需要を示す。シミュレーション評価例として、ピーク500kWの電力需要に電力供給する場合を考える。この電力需要にPV出力、蓄電池充放電、小売電気事業者から調達する電力(買電)を組み合わせ、経済効果最大、再エネ比率最大、稼働率最大の観点から、設備導入量を求める。ただし、再エネ比率は30%以上の制約を設けた。なお、シミュレーションサービスでは年間の需要カーブを対象とする。

(2) シミュレーション結果

目的に応じた各設備の最適導入量と、初期導入費、運用費を合わせたトータルコストおよび再エネ比率を表2に、目的に応じた蓄電池の導入量とコストの関係を図3に示す。これらの結果より、需要家発電設備運用シミュレータを用いれば、再エネ比率、コスト、稼働率を考慮して顧客の目的に応じた設備導入量およびコストを算出することが可能となる。

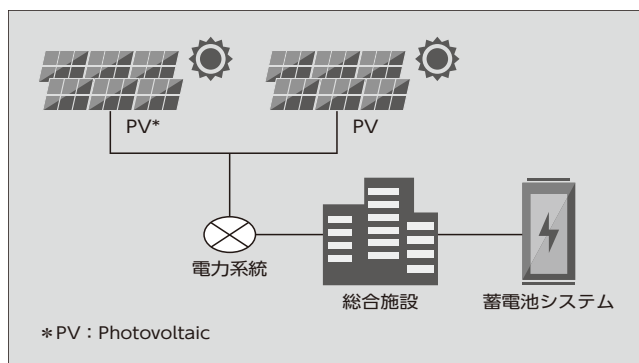


図1 需要家設備検証用シミュレーションの系統例

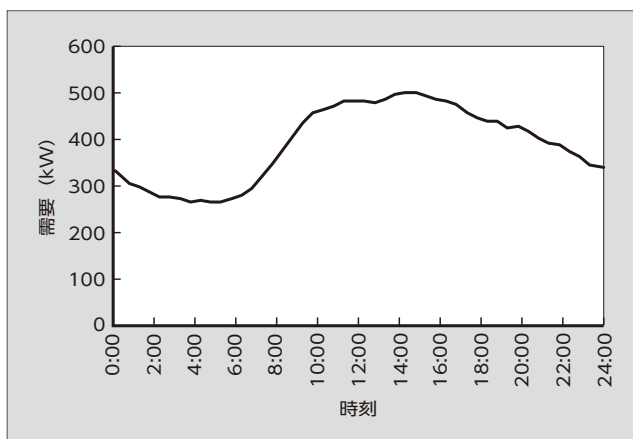


図2 シミュレーションに用いた電力需要

表2 目的に応じた各設備の最適導入量とコストおよび再エネ比率

目的	蓄電池		PV* (kW)	買電 (kW)	コスト (億円)	再エネ比率 (%)
	容量 (kWh)	出力 (kW)				
再エネ比率最大	4,663	428	824	0	3.43	100.0
経済効果最大	0	0	357	429	1.03	30.0
稼働率最大	2,557	428	824	158	2.50	89.4

*PV : Photovoltaic

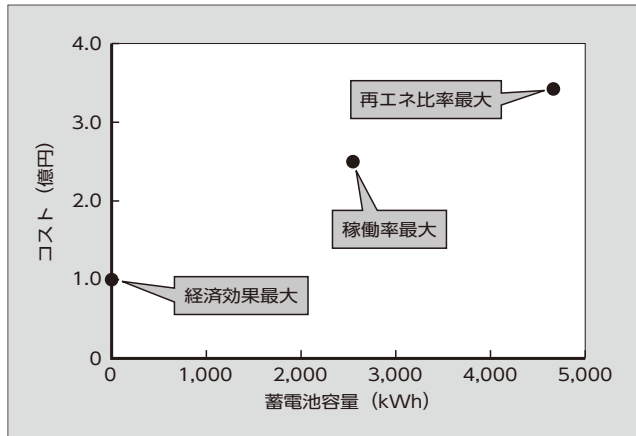


図3 目的に応じた蓄電池の導入量とコストの関係

4 電力取引シミュレータ

4.1 概要

系統用蓄電池システムを用いて、各種電力取引市場にて充電（買電）・放電（売電）を行い、価格の安い時に系統から電力を買い、価格の高い時に系統に電力を売る裁定取引による利益を最大化させるための蓄電池設備と運用について、発電事業者などから事前検証が求められている。電力取引シミュレータは、複数の市場取引を行う運用のシミュレーションを行い、収益を最大化する運用を検討することができる。さらに、年間の運用シミュレーション結果を用いて最適な設備容量を導出することができる。

4.2 最適設備容量と最適運用の算出方法

(1) 想定する系統

電力取引検証用シミュレーションの系統例を図4に示す。本シミュレータでは、顧客の要望に応じて卸電力市場、需

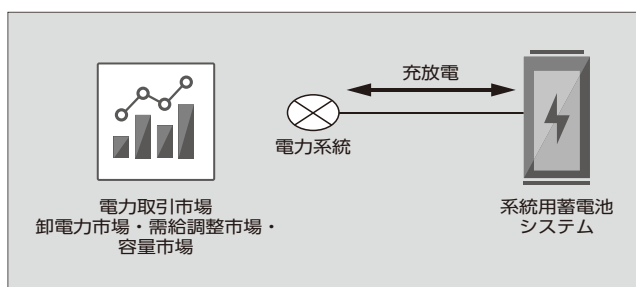


図4 電力取引検証用シミュレーションの系統例

給調整市場、容量市場に対する取引を検証することが可能である。

(2) 市場価格予測

系統用蓄電池システムは、市場価格の安い時間を買電して蓄電池を充電し、価格の高い時間帯に蓄電池から放電して売電することで利益を得る。したがって、本シミュレーションでは市場価格予測結果を入力データとして使用する。本シミュレータが対象とする卸電力市場、需給調整市場のうち、卸電力市場のスポット市場の価格予測機能は開発済みである⁽³⁾。卸電力市場の時間前市場および需給調整市場の五つの商品（一次、二次①、二次②、三次①、三次②）の価格予測については、市場の開設時期に合わせて逐次開発を進めている。

(3) 充放電計画

系統用蓄電池システムの容量が決まっている場合は、市場価格予測結果に基づき、日々の蓄電池の運用計画（充放電計画）を作成する。

(a) 目的関数

蓄電池による1日の取引収支（取引で得られる収入－取引で支払う費用）を最大化する。

(b) 制約条件

蓄電池を活用した市場取引を行う上でさまざまな制約を考慮する。次に制約の例を示す。

- 蓄電池出力の上下限制約
- 蓄電率の上下限制約
- 蓄電率の最終目標値制約

(4) 最適設備導出

系統用蓄電池システムの容量を算定する場合は、市場価格の年間パターンを作成し、各パターンに対する取引収支を勘案して最適な蓄電池容量を求める。

(a) 目的関数

最適設備導出においては、式(1)を用いて目的関数を最小化するように設備容量を求める。

目的関数 = 単年度当たりの蓄電池導入コスト－蓄電池による年間取引収支……………(1)

(b) 制約条件

充放電計画と同様の制約条件を考慮する。

4.3 評価例

評価例として、系統用蓄電池システムの容量が決まっている場合の1日の充放電計画の作成例を示す。

(1) 前提条件

シミュレーションの前提条件を次に示す。

- 蓄電池容量：20 MWh
- 蓄電池出力：±20 MW（+ は放電、－ は充電）
- 蓄電率上限：96%
- 蓄電率下限：8%
- 取引対象市場：卸電力市場、スポット（売買可能）
需給調整市場、三次②（売りのみ可能）
- 最低入札量：スポット 100 kWh
三次② 5,000 kWh

(2) 結果

電力取引検証用シミュレーションの評価例を図5に示す。図5(a)は電力市場取引計画と電力価格を示している。スポット価格の安い時間帯(1:30、4:00、12:00、20:00、20:30)で買い取引を行い、スポット価格の高い時間帯(8:00、21:00、21:30)、および三次②価格の高い時間帯(15:00～17:30)で売り取引を行っている。

図5(b)は蓄電池充放電計画と蓄電率を示している。市場取引計画に連動して蓄電池の充放電が計画され、また、充電率の上下限の制約が守られていることが確認できる。

本シミュレーション例における取引収支を表3に示す。スポットおよび三次②による取引収入からスポットによる取引費用を減じた取引収支は、約175万円という結果になった。このように本シミュレータを用いれば、最適な取引計画と蓄電池の充放電計画を立案することが可能となる

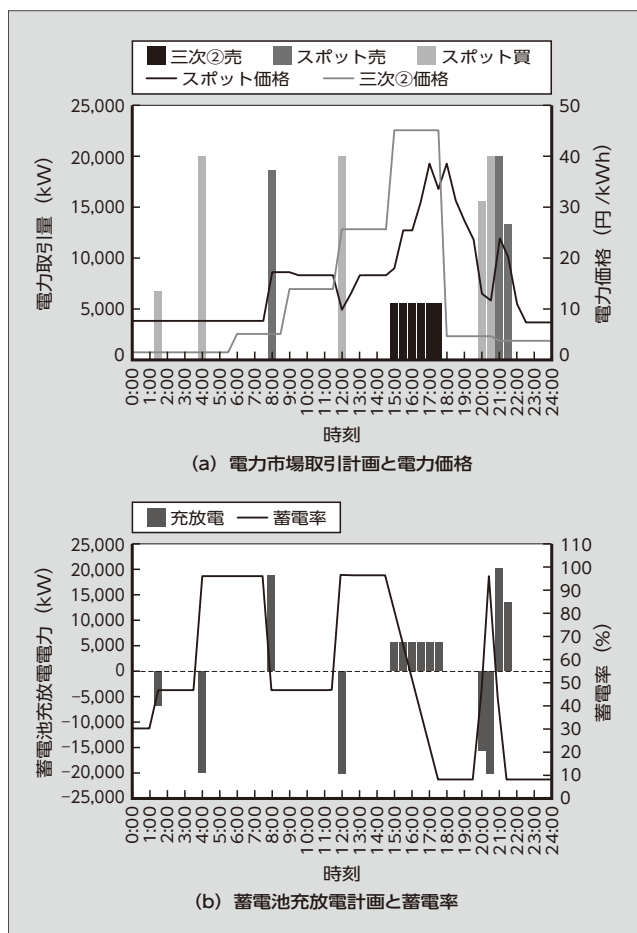


図5 電力取引検証用シミュレーションの評価例

表3 取引収支

項目	収支(円/日)
スポット取引収入	1,070,635
三次②取引収入	1,511,554
スポット取引費用	836,626
取引収支	1,745,563

とともに、日々の蓄電池運用における収支の見通しを立てることが可能となる。

5 分散型グリッド運用シミュレータ

5.1 概要

需要家構内に発電設備を設置し、DERを利用することで安定的に電力を供給する分散型グリッドの仕組みが検討されている。また、分散型グリッドにおいて、カーボンニュートラルとレジリエンス強化を両立するために必要な設備と、その運用方法の検証が求められている。特に、災害時の商用系統停電時には、分散型グリッドを自立運転させた際の電力品質の視点での検証が必要である。分散型グリッド運用シミュレータは、自立運転に必要な最適設備容量のシミュレーションと、電力品質(電圧、周波数)を考慮したシミュレーションを実施することができるため、最適な設備容量、自立運転計画、電力品質の維持、再エネ導入可能量の検討が可能である。

5.2 最適設備容量と最適運用の算出方法

(1) 想定する系統

分散型グリッドの運用シミュレーション系統例を図6に示す。電力系統において停電が発生した際に、受電点の遮断器を開放して一部の需要家や分散型グリッドを電力系統から切り離し、電力系統から独立して自立運転させることで需要家構内や分散型グリッド内への電力供給を継続させる。大口需要家では、ガスコージェネレーションシステムなどの自家発電設備と負荷で自立運転を行う場合がある⁽⁵⁾。しかし、近年はPVなどの再エネ電源も設置され、レジリエンスの観点から災害時の電源供給源としても利用されている⁽⁶⁾。

一方、PVは天候によって出力が変動する電源であるため、PVの出力変動によって自立系統の電圧と周波数が変動することが想定される。そのため蓄電池設備を設置し、PVの出力変動を蓄電池の出力制御により平滑化して自立系統の周波数や電圧を安定維持する。

(2) 自立運転時の検討項目

シミュレーションの検討項目としては、主に次のような

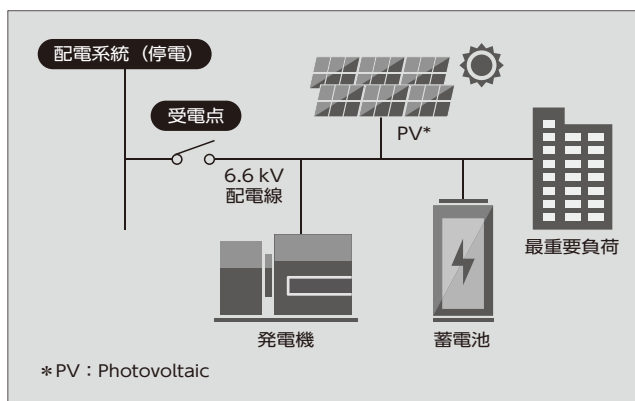


図6 分散型グリッドの運用シミュレーション系統例

項目が挙げられる。

(a) PV 出力変動

PV の出力変動による電圧変動と周波数変動を評価する。また、発電機や蓄電池システムの出力制御による電圧変動と周波数変動の抑制効果も評価する。

(b) 負荷変動

PV 出力変動の評価と同様に、負荷変動時の電圧変動と周波数変動を評価する。

(c) 変圧器投入

配電線に変圧器を連系させると変圧器の鉄心が磁束飽和し、変圧器の一次側に大電流が流れる場合がある。この大電流による電力品質への影響を評価する。

(d) 誘導電動機の同期投入

大容量ファンやブロウなどの誘導電動機を配電線に直接連系させると、誘導電動機に始動電流が流れる。始動電流による電力品質への影響を評価する。

(e) 再エネ電源比率算出

発電機などの安定電源に対し、PV などの再エネ変動電源の比率を変えた場合の電力品質への影響を評価する。

5.3 評価例

(1) 前提条件

シミュレーションモデル例を図 7 に示す。このモデルを用いて PV の出力変動が発生した場合の電圧変動と周波数変動の影響を評価する。図 8 に PV 出力変動例を示す。PV の出力変動は、図 8 に示す出力データを PCS モ

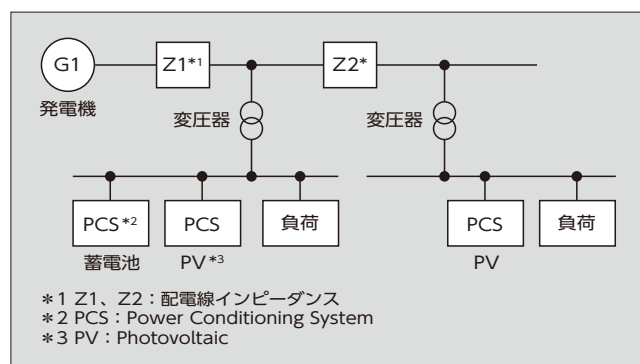


図 7 シミュレーションモデル例

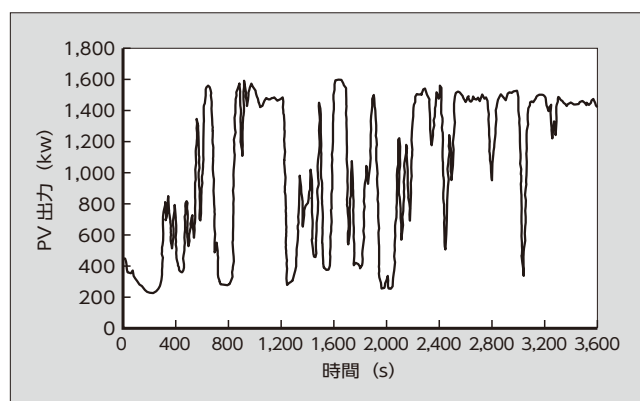


図 8 PV 出力変動例

デルから出力させる。また、発電機はガスエンジン発電機 2,000 kVA とする。PV は合計 1,600 kW、負荷は合計 1,800 kW とした。蓄電池は 600 kW とした。

(2) 結果

図 9 に周波数変動結果例を示す。蓄電池がない場合、分散型グリッドの系統周波数は、ガスエンジン発電機の周波数一定制御が働いておおよそ 50 Hz になるよう制御されているにもかかわらず、PV の出力変動の影響により図 9 (a) に示すとおり大きく変動し、 50 ± 0.3 Hz の目標範囲を逸脱する場合がある。一方、蓄電池を加えた場合は、図 10 に示す蓄電池の充放電出力によって高い周波数の成分が抑制されているため、周波数は図 9 (b) に示すとおり目標範囲に収まっていることが分かる。このように、PV 出力による電力品質への影響を事前に把握し、蓄電池の要否や、

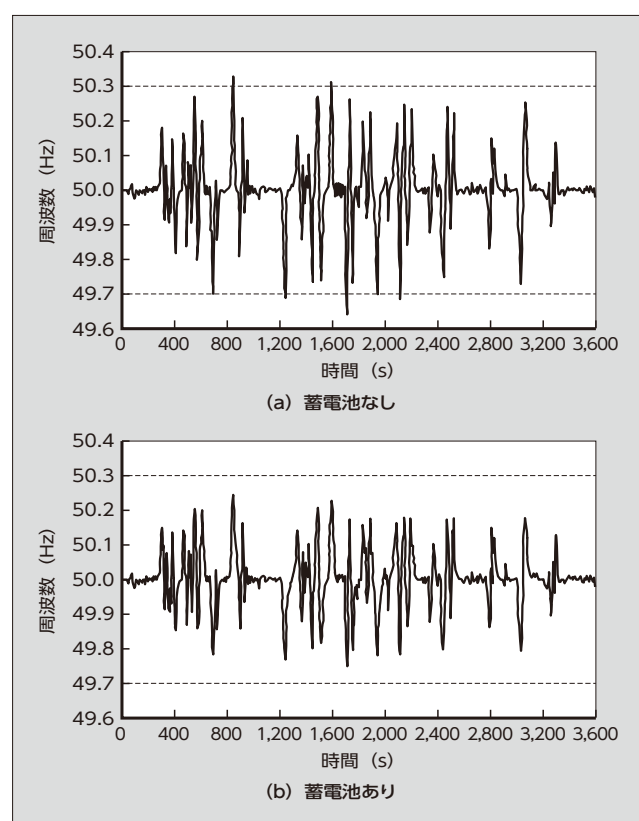


図 9 周波数変動結果例

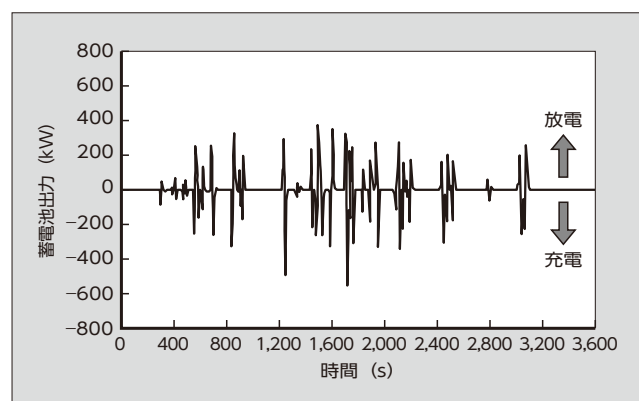


図 10 蓄電池の充放電出力例

必要な容量を評価することが可能である。

6 あとがき

新たな分散型電力システムの設備導入に向けた設備設計シミュレーション技術について述べた。富士電機は、本稿で述べたシミュレーションによる検証をはじめ、実際の電力設備の導入から保守までをワンストップで推し進めることで、再生可能エネルギー比率の向上、災害時におけるDER活用、ならびに電力取引市場への対応を可能にする新たな分散型電力システムの実現に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) “地域マイクログリッド構築のてびき”. 経済産業省. 2021. https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/energy_resource/pdf/015_s01_00.pdf, (参照 2023-07-18).
- (2) “設備設計シミュレーションサービスの製品情報”. 富士電機株式会社. https://www.fujielectric.co.jp/products/energy_ctrl_mng/facility-design-simulation.html, (参照 2023-07-18).
- (3) 増田達矢ほか. “JITモデリングをスポット市場に適用した電力市場価格予測に関する基礎検討”. 令和5年電気学会全国大会. 6-109.
- (4) “社会課題を解決する 2050年分散型グリッドの絵姿”. 一般社団法人 日本電機工業会. 2022-3. <https://www.jema->

[net.or.jp/Japanese/info/download/220331.pdf](https://www.fujielectric.co.jp/products/combined_heat_and_power/), (参照 2023-07-18).

- (5) “富士コージェネレーションシステムの製品情報”. 富士電機株式会社. https://www.fujielectric.co.jp/products/combined_heat_and_power/, (参照 2023-07-18).
- (6) 大賀英治, 樺澤明裕. 北九州スマートコミュニティ創造事業におけるダイナミックプライシング社会実証. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.3, p.166-172.



石上 雄太

エネルギーマネジメント事業の開発に従事。現在、富士電機株式会社エネルギー事業本部エネルギーマネジメント事業部エネルギー制御技術部担当課長。博士（工学）。電気学会会員。



佐藤 智希

電力システムのシミュレーション・制御・解析に関する研究・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デジタルプラットフォームセンターシステム制御研究部担当課長。電気学会会員。



林 巨己

エネルギーマネジメントおよびカーボンニュートラルに関連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デジタルデジタルサイエンス研究センター AI 研究部主任。電気学会会員。



船舶・港湾分野におけるカーボンニュートラルへの取組み

Initiatives to Achieve Carbon Neutrality in the Ship and Harbor Sector

造田 大祐 ZODA, Daisuke

林 寛明 HAYASHI, Hiroaki

項 東輝 Donghui, Xiang

脱炭素化に向けて船舶の電動化が期待されている。富士電機は、船舶・港湾分野の脱炭素化に貢献できる商材を開発している。船舶の電気推進システムは、電力変換器や推進用電動機の冷却方式を水冷ジャケット式とすることで空冷式に比べて小型化し、システムの設置スペースが削減できる。港湾の陸上給電設備は、電源設備をコンテナに収納しパッケージ化することで施工性が向上し、工期が短縮できる。港湾 EMS では、水素・アンモニアなどの代替燃料も含めた港湾のエネルギーマネジメントにより、省エネルギーと脱炭素化を進めることができる。

As a step toward decarbonization, the electrification of ships is expected to progress. Fuji Electric is developing products that can contribute to decarbonization in the ship and harbor sector. Ship electric propulsion systems that use a water jacket cooling system are smaller than that using a conventional airflow cooling system, reducing system footprint. Onshore power supply systems have improved the installation and shortened construction periods by packaging power supply equipment in a container. Our harbor EMS manages harbor energy, including hydrogen, ammonia and other alternative fuels, contributing to energy saving and decarbonization.

① まえがき

地球温暖化対策として、温室効果ガス排出の削減、カーボンニュートラル実現への加速が叫ばれるようになってきている。日本政府も“2050 年カーボンニュートラル”を 2020 年に宣言し、その達成に向けた施策を打ち出している。日本の CO₂ 排出量の約 17% は運輸部門由来であると報告されている⁽¹⁾。これは発電などのエネルギー転換部門、産業部門に次いで大きく、これを削減することも喫緊の課題である。富士電機は、各部門におけるカーボンニュートラルに貢献するさまざまな製品を提供している。本稿では、船舶・港湾分野におけるカーボンニュートラルへの取組みについて述べる。

② 船舶・港湾分野における取組み

富士電機は、船舶・港湾分野においてパワーエレクトロニクス技術を活用して、脱炭素化に貢献できる製品の開発を推進している。船舶に対しては電気推進システム、港湾に対しては停泊中の船舶への陸上給電設備・港湾のエネルギーマネジメントシステム（EMS：Energy Management System）と荷役機械向け水素燃料電池システムの開発に注力している。

船舶の電動化は、脱炭素化に向けた重要な手法である^{(2), (3)}。バッテリー、水素燃料電池を動力源とする電気推進システムを搭載した小型船舶が、ここ近年建造されている。2019 年にバッテリー船 e-Oshima が、2022 年にバッテリー船 EV タンカーあさひが、2023 年には同型のあかりがそれぞれ竣工している⁽⁴⁾。2023 年には、2025 年日本国際博覧会（大阪・関西万博）での運航に向けて水素燃料電池船が建造開始されている。富士電機は、e-Oshima の電気推進シ

テムを納入しているが、今後の電気推進システムの普及に貢献すべく、新たに電気推進システム向けの電力変換器・電動機の開発を推進している。電動化の拡大には、経済合理性も重要な要素である。電気推進システムの導入に対して、導入費用および設置スペースを極力抑えることと、システムの効率を高めることを目標に開発を進めている。

停泊中の船舶のエンジンを止めることで脱炭素化に貢献する港湾の陸上給電設備は、欧米で普及が進んでいる^{(5), (6)}。国内に設置する陸上給電設備においても、外航船に対応するためには国際規格に準拠する必要がある。富士電機は、IEC 規格に準拠した陸上給電設備の開発を進めている。

脱炭素化に向けた代替燃料として、水素・アンモニアなどの検討が進んでいる港湾・臨海地区を中心に、従来扱っていない代替燃料に対するインフラ設備や、代替燃料を燃料源とする設備・機器が新たに導入されていく^{(7)~(9)}。富士電機は、代替燃料も含めた港湾のエネルギーマネジメントが脱炭素化に必要な技術であると考え、EMS の開発を進めている。また、荷役機械への動力源として水素燃料電池システムの開発も進めている。

③ 電気推進船向け電力変換器・電動機

3.1 概要

富士電機は、プラントの可変速駆動システムとして 1980 年代から交流可変速駆動装置を製品化し、共通直流電源方式の電力変換器を鉄鋼プラントなどで展開してきた^{(10)~(12)}。現在、産業分野向け電力変換器のフルモデルチェンジ開発を進めており、船舶向けの要件を付加したラインアップも計画している。機器の小型化のために自社の第 7 世代 IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）を採用、大容量器を水による冷却としている。また、直流配電システ

ムにも対応し、交流配電システムに対してシステムが簡素化でき、導入費用・設置スペースの削減および効率の向上を図ることができる。

電動機に対しては、水冷ジャケット式の永久磁石形同期電動機（PM モータ：Permanent Magnet Synchronous Motor）の開発を進めており、従来の誘導電動機に比べ小型・高効率化を図っている。また、横軸取付形に加えアジマス型プロペラに有用な立軸取付形のラインアップをそろえており、船内への設置の自由度を高めている。

3.2 電力変換器

図1にバッテリー船の電気推進システムの構成例を示す。直流配電方式を採用したもので、2組の独立したDC母線に対して電力変換器とリチウムイオン電池が接続されている。

リチウムイオン電池を動力源として推進用電動機、補機および船内電源に電力を供給している。また、陸上電源を使ってリチウムイオン電池の充電を行っている。電力変換器は推進用電動機駆動用インバータ、補機駆動用インバータ、船内給電用インバータ、および陸上電源用コンバータで構成される。また、図には示されていないがリチウムイオン電池の充放電などに使用するDC/DCコンバータの開発も進めている。図1の構成において交流配電方式を採用した場合、補機駆動用インバータや船内給電用インバータは不要になるが、リチウムイオン電池の出力を交流に変換する変換器や推進用電動機駆動用インバータに給電するための整流器が必要になる。直流配電方式は、交流配電方式に比べてシステムを簡素化できるため、導入費用、設置スペースの削減およびシステム効率の向上が可能となる。

水冷式の電力変換器は、空冷式に比べて船内設置スペース削減に有効である。表1に空冷式変換器と水冷式変換器の仕様例を示す。同一のIGBTを使った空冷式と水冷式の比較である。水冷式は、空冷に対して冷却効率が良いので、

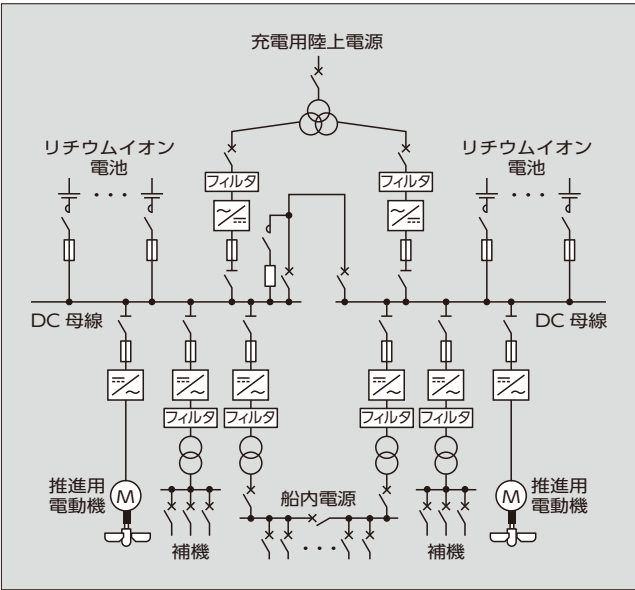


図1 バッテリー船の電気推進システムの構成例

表1 空冷式変換器と水冷式変換器の仕様例

項目	仕様	
冷却方式	空冷式	水冷式
定格容量 (kVA)	650	830
定格電流 (A)	544	695
最大出力電圧 (V)	AC690	
寸法 (mm)	W220×D550×H1,400	

同一寸法で容量を約30%大きくすることができる。例えば2,000kW推進モータを駆動する場合、電力変換器は空冷式では4台必要だが、水冷式だと3台で済む。したがって、システムの設置スペースの削減に貢献できる。

3.3 水冷式永久磁石形同期電動機

プロペラを駆動する推進用電動機として水冷式PMモータを開発している。表2に水冷式PMモータの仕様を示す。499総トン型内航船、749総トン型内航船および280総トン型タグボートの推進用電動機をターゲットとしており、アジマス型プロペラ向けは立軸取付形としている。

冷却方式を水冷ジャケット式としているため、従来必要であった別取付け熱交換器や他力通流ファンが不要となる。また、PMモータとしているため、従来の誘導電動機に比べて非常に小さくなる。表3に水冷式PMモータと従来の誘導電動機のサイズ例を示す。水冷式PMモータは、誘導電動機より定格トルクが10%大きくなっているのにも関わらず、体積は70%以上小さくなっている。

表2 水冷式PMモータの仕様

項目	仕様	
取付方法	横軸取付形	立軸取付形
冷却方式	水冷ジャケット式 (IC71W)	
定格電圧 (V)	AC600	
定格容量 (kW)	400～2,300	600～3,000
定格回転数 (r/min)	600～1,000	750～1,000
用途	ラインシャフト型プロペラ	アジマス型プロペラ

表3 水冷式PMモータと従来の誘導電動機のサイズ例

項目	誘導電動機	水冷式PMモータ
冷却方式	IC666	IC71W
定格トルク (kN-m)	12.9	14.3
定格容量 (kW)	1,618	1,500
定格回転数 (r/min)	1,200	1,000
高さ (mm)	3,160*	900
奥行 (mm)	3,045*	1,700
幅 (mm)	1,250*	900
体積比率 (%)	100*	21.6

* 熱交換器や他力ファンを含む

④ 陸上給電設備向けコンテナパッケージ・ケーブルマネジメントシステム

船舶向けの陸上給電設備（陸電）は、港湾に停泊している船舶、造船所で建造・修繕中の船舶に電力を供給する。いずれの場合も船舶のエンジンを止めることができるため、CO₂の排出を削減できる。富士電機は、国内の造船所向けに陸電を納入してきたが、今後の港湾での陸電導入に対応すべく開発を進めている。

図2に陸電のシステム構成を示す。受電設備、コンテナパッケージ、給電コンテナ、ケーブルマネジメントシステム（CMS : Cable Management System）から構成される。

4.1 陸電の IEC 規格対応

船舶が外航船の場合、国内だけでなく国外でも陸電を利用することが求められるので、陸電は IEC 規格に準拠する必要がある。表4に陸電の IEC 規格を示す。基本となる

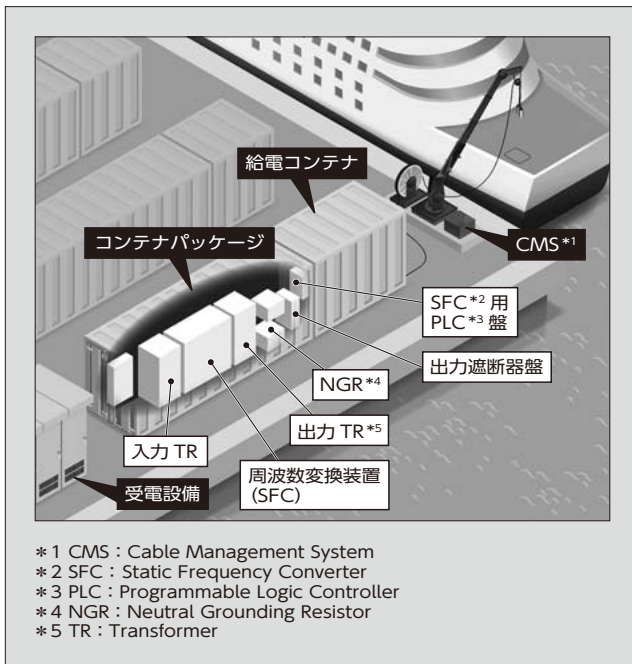


図2 陸電のシステム構成

表4 陸電の IEC 規格

規格	内容
IEC/IEEE 80005-1	Utility connections in port - Part 1 : High voltage shore connection (HSVC) systems - General requirements 高圧陸上電源接続システム 一般要件
IEC/IEEE 80005-2	Utility connections in port - Part 2 : High and low voltage shore connection system - Data communication for monitoring and control 高圧および低圧陸上電源システム 監視および制御のためのデータコミュニケーション
IEC PAS 80005-3	Utility connections in port - Part 3 : Low voltage shore connection (LVSC) system - General requirements 低圧陸上電源接続システム 一般要件

る陸電の IEC 規格に付随して、給電ソケットや安全に係る IEC 規格への準拠も必要となる。富士電機で開発中の陸電は IEC 規格に則った製品のため、既に欧米で陸電を利用している外航船でも利用可能である。

4.2 陸電用コンテナパッケージ

陸電を導入する際の施工性を向上させ、工期短縮・早期運用を目的とし、電源設備をコンテナに収納したパッケージの開発を行っている。コンテナパッケージには、電源設備として必要な変圧器、周波数変換装置などを収納しており、給電コンテナには、各船への電力の分配・給電に必要な遮断器盤などを収納している。

船舶の電源の周波数は、一般的に 60 Hz である。東日本地区では 50 Hz なので、周波数変換装置が必要になる。

表5にコンテナパッケージの一覧を示す。

周波数変換装置がありで 6.6 kV を船舶に給電する場合、40ft コンテナ1台で 1.25 MVA が給電可能な8台のコンテナを並列接続することで、10 MVA が給電可能となる。周波数変換装置がなしの場合、20ft コンテナ1台で 1.25 MVA が給電可能である。

表6にコンテナパッケージと給電コンテナの設置環境条件を示す。岸壁近傍に設置するので、塩害や強風への対策を考慮した。

4.3 ケーブルマネジメントシステム

陸電設備から船舶に給電用ケーブルを渡す際、ケーブル重量が 100 kg を超える場合があり、そのための機構として CMS が必要となる。CMS には、船舶にケーブルを渡す以外に主に次の要件が求められ、これを満たす CMS の

表5 コンテナパッケージの一覧

周波数変換装置	電圧	容量					
		625 kVA	1.25 MVA	2.5 MVA	5 MVA	7.5 MVA	10 MVA
あり	440 V	40 ft* ¹ 1台	—				
	6.6 kV	—	40 ft 1台	40 ft 2台	40 ft 4台	40 ft 6台	40 ft 8台
なし	440 V	20 ft* ² 1台	—				
	6.6 kV	—	20 ft 1台	屋外仕様変圧器+屋外盤			

*1 40 ft : 40 フィートコンテナ

*2 20 ft : 20 フィートコンテナ

表6 コンテナパッケージと給電コンテナの設置環境条件

項目	仕様
周囲温湿度	外気温度 -20 ~ +40 °C 85 %RH以下
風速	46 m/s以下
塩害	コンテナ本体 : ISO 668海上貨物輸送コンテナ仕様 室外機 : 重耐塩仕様
積雪荷重	1.0 m/m ² 以下
防水	IEC 60529 保護等級4 (防まつ型)
コンテナ設置向き	扉、室外機は山側に設置

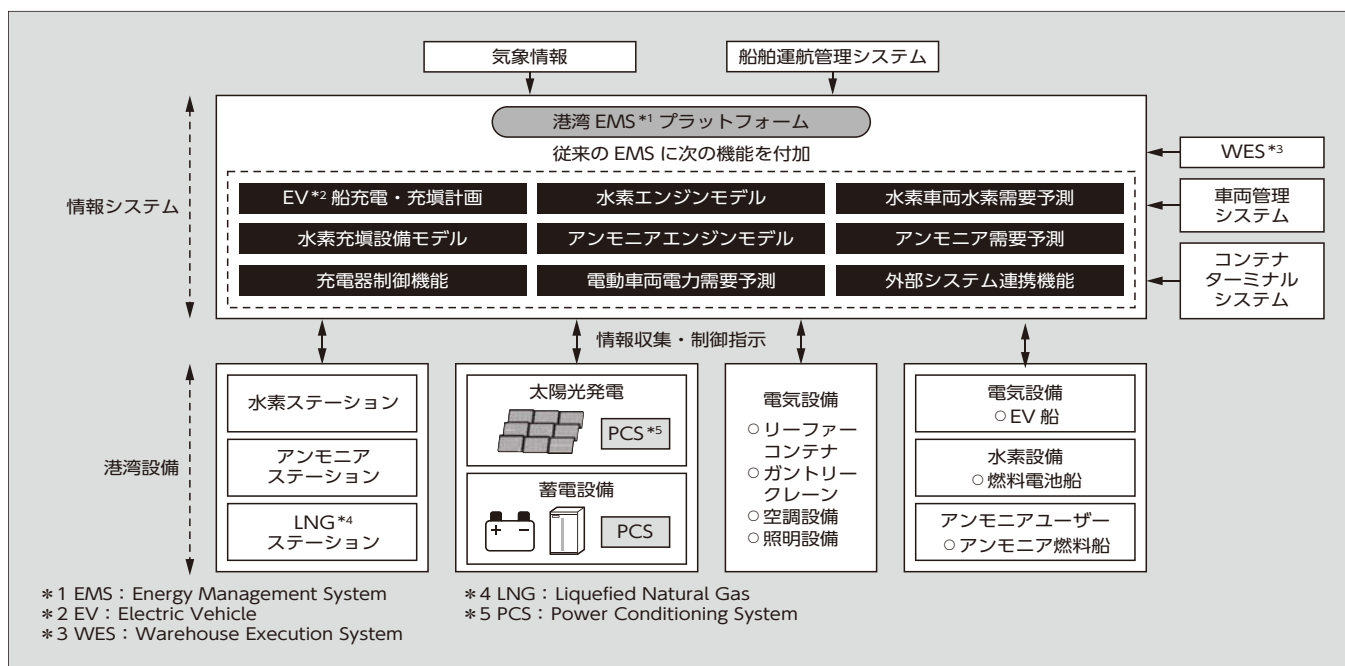


図3 港湾 EMS の機能構成

開発を進めている。

- (a) 作業者の安全確保
- (b) 海面の干満差、波の影響などによるケーブルの破断防止
- (c) スピーディなケーブルの脱着

4.4 港湾エネルギーマネジメントシステム

港湾での脱炭素化に向けて、水素・アンモニアなど代替燃料を取扱う設備・機器の導入の検討が行われている。富士電機は、脱炭素化を目的として港湾 EMS の開発を進めている。エネルギー需給の最適運用、他システム連携によるエリア全体のエネルギー安定供給、港湾エリア内のエネルギー利用効率の自動分析により省エネルギーを進め、脱炭素化を実現する¹³⁾。図3に港湾 EMS の機能構成を示す。従来の EMS に対して代替燃料への転換に伴う機能および船舶に対するエネルギーの供給に伴う機能を追加している。港湾 EMS を実現するために具体的に次の機能を開発している。

- (a) 港湾から船舶まで統合した設備に対しての多様化するエネルギー源を考慮した最適運用の実現
- (b) 従来の電力のほか、水素、アンモニアなどの代替燃料の需要予測機能の搭載、エネルギーネットワークモデルの構築
- (c) エネルギー供給設備の充放電スケジュール、燃料充填（じゅうてん）スケジュールの立案

4.5 港湾クレーン用燃料電池システム

国土交通省が提唱するカーボンニュートラルポートの実現に向けた一助として、ディーゼルエンジン発電機から給電されている荷役機械、特に RTGC（Rubber Tire Gantry Crane）を水素燃料電池システムからの給電に

切り替える研究・開発が各社で行われている¹⁴⁾。富士電機も、自動車用に開発された燃料電池モジュールを応用した RTGC 向け燃料電池システムの開発を推進している（166 ページ、「水素社会の実現に貢献する燃料電池ソリューション」参照）。

5 あとがき

船舶・港湾分野におけるカーボンニュートラルへの取組みについて述べた。今後は、電気推進システムが導入された船に対応する陸電が必要である。船内への給電機能の他に、リチウムイオン電池の充電機能を付与する必要がある。給電方式・適用規則など国内外の動きを調査し、電気推進システムと併せて陸電を提供できるよう検討していく。これらの取組みにより、カーボンニュートラルの実現に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) “2021年度温室効果ガス排出・吸収量（確報値）概要”。環境省 脱炭素社会移行推進室。国立環境研究所 温室効果ガスインベントリオフィス。https://www.env.go.jp/content/000129138.pdf, (参照 2023-12-11)。
- (2) 坂本大輔ほか。“三菱造船の電動船への取り組み-客船、物理探査船、LNG船の例”。日本マリンエンジニアリング学会誌。2021, vol.56. no.5, p.10-14。
- (3) 原田遥太ほか。“船用電動化に対応したZペラの開発-環境負荷低減に対応した推進システム”。日本マリンエンジニアリング学会誌。2021, vol.56, no.5, p.67-70。
- (4) 西田英幸ほか。“送迎船向け全電気推進システムの概要”。日本マリンエンジニアリング学会誌。2020, vol.55, p.20-24。
- (5) 福島豊。“コンテナターミナルにおける環境対策”。

Quarterly 78, 2009, vol.2, p.26-29.

- (6) Power Technology Research Services Companyホームページ. <https://ptr.inc/onshore-power-supply-in-europe-an-overview/>, (参照 2023-08-20).
- (7) 神戸市. “神戸港CNP形成計画”. 2023, p.21-26.
- (8) 名古屋港管理組合. “名古屋港カーボンニュートラル(CNP)形成計画”. 2023, p.13-18.
- (9) 大阪市. “大阪港カーボンニュートラル(CNP)形成計画”. 2023, p.13-16.
- (10) 千足正吉ほか. 産業用高性能インバータFRENIC4000VM. 富士時報. 1986, vol.59, no.10, p.665-670.
- (11) 上村猛ほか. 最近の可変速駆動装置. 富士時報. 1988, vol.61, no.5, p.326-334.
- (12) 保坂忍ほか. 産業用電動力応用プラントの可変速駆動システム. 富士時報. 1997, vol.70, no.10, p.516-521.
- (13) 西田英幸ほか. 港湾における環境配慮技術の取り組み. 港湾荷役. 2021, vol.66, p.615-621.
- (14) “港湾クレーン向け水素燃料電池パワーパックの試運転完了”. 株式会社三井E&S. 2022, https://www.mes.co.jp/press/2022/0901_001885.html, (参照 2023-08-20).



造田 大祐

船舶・港湾向けエンジニアリングに従事。現在、富士電機株式会社インダストリー事業本部輸送システム事業部船舶・交通・特機システム部主査。



林 寛明

ドライブ装置の設計開発、ドライブシステムのエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社インダストリー事業本部プロセスオートメーション事業部主席。



項 東輝

エネルギーマネジメントシステムの企画・開発・プロジェクトの技術取りまとめに従事。現在、富士電機株式会社インダストリー事業本部情報ソリューション事業部 DX 技術部主査。工学博士。計測自動制御学会会員。



自動車の電動化に貢献するパワー半導体

Power Semiconductors for Facilitating Electrification of Automobiles

長畦 文男 NAGAUNE, Fumio

池田 良成 IKEDA, Yoshinari

松尾 壮太 MATSUO, Sota

自動車の電動化が加速している。電動車（xEV）においてパワートレイン系に適用されるパワー半導体は、電力制御を行ってモータを制御するため、自動車の走行性に直結し、人命を預かる重要なキーパーツである。富士電機は、信頼性が高く、高電力密度化と小型・薄型化を目指した、パワートレイン系用パワー半導体モジュール製品を量産化してきた。一方、これらの製品やその構成部品の生産においても、温室効果ガス排出量の削減が必要である。その遂行に向けて、再生可能エネルギー電力の購入や、自社内太陽光発電システムの設置、省エネルギー機器への更新を推進している。

The electrification of automobiles is accelerating. Power semiconductors for power train system in electrified vehicles (xEVs) control electric power of the motor. Therefore, they are key components for determining driving performance and protecting people's lives. Fuji Electric has mass-produced power semiconductor modules for power train system with high reliability and power density, as well as reduced module size and thickness. On the other hand, it is necessary to reduce greenhouse gas emissions in the production of these products and their components. For that purpose, the purchases of renewable energy power, the installation of in-house solar power generation systems, and the renewal of energy-saving equipment are accelerated.

① まえがき

国際エネルギー機関（IEA：International Energy Agency）から2021年に公表された、2050年にCO₂排出ネットゼロを達成するための提言をまとめた報告書⁽¹⁾では、輸送セクターにおいても化石燃料の使用比率を大幅に減らし、電化や水素エネルギーの利用を進めることを求めている。このような社会情勢を受け、各自動車会社でも自動車の電動化を加速している。

電動車（xEV）では、電子スイッチ、DC/DCコンバータ、車載充電器など多くの機器にパワー半導体が使われている。xEVに搭載される機器の中でも、電動ポンプや電動コンプレッサに付随するモータや走行用モータを駆動するためにはインバータが必要であり、このインバータを構成するパワー半導体はxEVの最重要部品の一つである。

パワー半導体製品は、単体もしくは複数のパワー半導体デバイスの一つのパッケージに収めた形で提供される。xEVの動力制御に用いるインバータには、搭載スペースの制限から高電力密度化と小型化が求められるため、パワー半導体製品の中でも三相インバータブリッジ回路を内蔵した水冷タイプのパワー半導体モジュール（パワーモジュール）が使用されることが多い。このようなパワーモジュールでは、チップ性能を高めて損失を低減するのはもちろんのこと、冷却効率の向上や内部インダクタンスの低減など、パッケージ設計により性能が左右される。また、安全性の観点から、寒冷地や高温多湿環境での使用についても考慮して信頼性設計を行う必要がある。

本稿では、カーボンニュートラルの観点から、自動車の電動化に貢献するパワー半導体について述べる。

② xEV 向けパワー半導体の概要と課題

2.1 概要

富士電機は、自動車のエレクトロニクス化の要求に応じた、さまざまなパワー半導体を開発している。図1に、富士電機製パワー半導体製品の適用例を示す。自動車に適用されるパワー半導体は、大別してパワートレイン系、エンジン系、ボディ系の三つに分類される。xEV向けパワートレイン系パワー半導体は、インバータに搭載されて電力制御を行ってモータ制御するため、自動車の走行性に直結

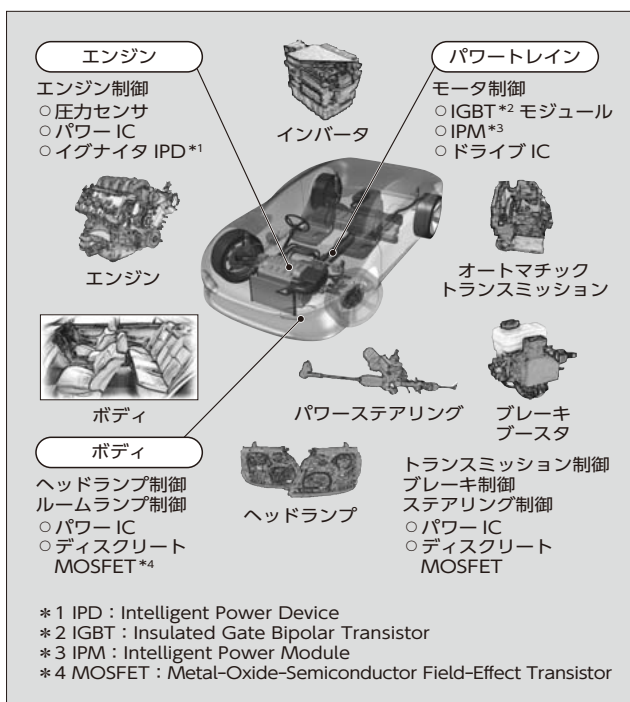


図1 富士電機製パワー半導体製品の適用例

し、人命を預かる重要なキーパーツである。

図2にモータ制御用回路構成例を示す。基本回路は、バッテリー電圧を昇降圧するコンバータ回路とインバータ回路で構成される方式と、インバータ回路のみで構成される方式に大別される。適用されるパワー半導体は、IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）に代表されるスイッチング素子と還流用ダイオード FWD（Free Wheeling Diode）である。モータ制御に適用されるパワー半導体は、複数の IGBT と FWD を内蔵したパワーモジュールが主流である。

図3に、富士電機製モータ制御用パワーモジュール例を示す。富士電機はこれまで、IGBT/FWD を2回路構成し、駆動回路や保護機能を含むドライブ回路をモジュール内に内蔵した2個組インテリジェントパワーモジュール（IPM：Intelligent Power Module）⁽²⁾、図3に示す IGBT/FWD を6回路構成した6個組 IGBT モジュール⁽³⁾、図2に示す昇降圧コンバータ、インバータ1およびインバータ2、ならびに IGBT 駆動回路や保護機能を含むドライブ回路を搭載した14個組 IPM⁽⁴⁾などを量産化してきた。図3に示す6個組パワーモジュールは、図2に示すインバータ回路用に開発したものである。搭載されている半導体素子は、従来のモジュールでは IGBT と FWD は別々の素子で回路を構成していたが、図3に示す製品では、IGBT と FWD を一体化した逆導通 IGBT（RC-IGBT：Reverse-Conducting IGBT）と密閉型のアルミニウム製冷却器を適用した、最新世代の量産品である^{(5),(6)}。

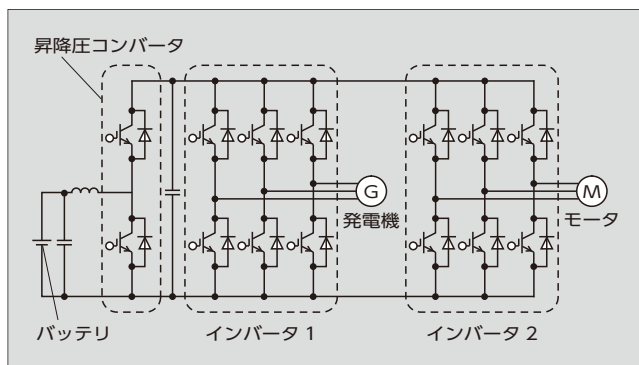


図2 モータ制御用回路構成例

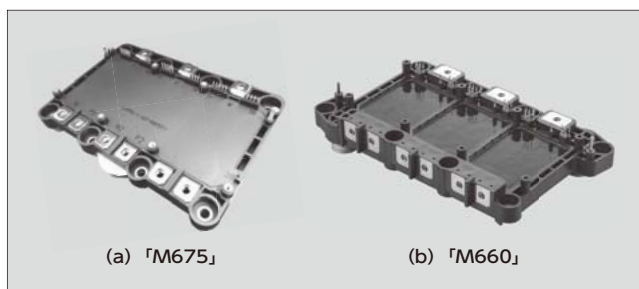


図3 富士電機製モータ制御用パワーモジュール例

2.2 課題

図4に、パワーコントロールユニット電力密度の年次推移を示す⁽⁷⁾。電力密度は、年次で上昇しており、電気自動車やハイブリッド車用インバータは特に高い電力密度が求められる。

図5に機電一体型システムのイメージを示す。従来はモータとインバータはxEV内で独立に配置されていたが、最新の動向として図5に示すようなモータ、トランスミッションなどとインバータが一体化した、機電一体型の構造が主流となっている。xEVでは、図5に示すシステムが前輪か後輪の一方、あるいは両方の駆動用として搭載される。機電一体型とすることで、インバータに使われる部品点数を削減し、システムを軽量化することが可能となる。さらに、モータ、インバータをコンパクトなユニットに統合し、車軸をダイレクトに駆動させることで、パワートレインの効率が向上するだけでなく、低コスト化も実現できる。モータとインバータの一体化への要望は高く、今後も一体化を含めた駆動系ユニットの小型化の開発が、積極的に進められていくと考えられる。

さらに、近年はパワー半導体素子としてSiC（炭化けい素）化のニーズが高まりつつある。SiCが実現した場合、通電電流が小さい軽負荷時に発生損失が低減することで、一充電当たりの走行距離を変えずにバッテリー容量を削減できる。これにより、軽量化によるさらなる電費向上が期待できる。

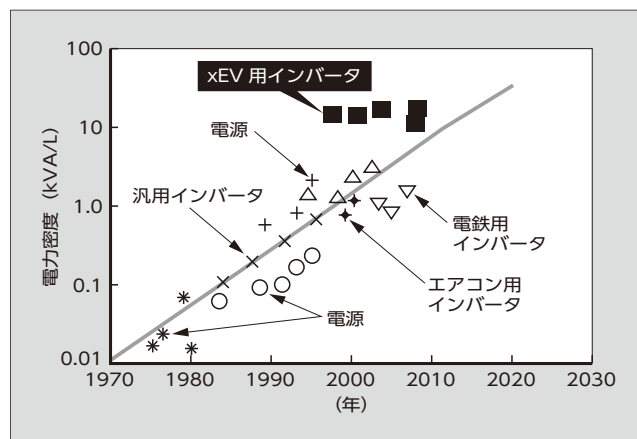


図4 パワーコントロールユニット電力密度の年次推移

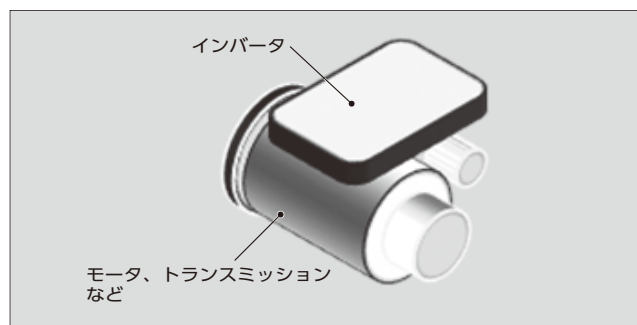


図5 機電一体型システムのイメージ

これらのことから、自動車用インバータの高電力密度化・機電一体化に向けて、パワーモジュールの目指す方向は、高電力密度化と小型・薄型化である。また、自動車用としての信頼性の確保も重要である。さらに将来のSiC化に対して、最適なパッケージ構造が必要である。

③ xEV 向けパワー半導体の特徴

3.1 パワー半導体素子技術

xEV 向けパワーモジュールでは、高電力密度化、小型・薄型化の要求に対応し、パワー半導体素子の性能向上を進めてきた。図6に、1,200V 定格パワー半導体素子の電力密度と発生損失の年次推移を示す。従来、IGBTとFWDをxEV 向けパワー半導体として用いており、性能改善を進めてきた。さらなる進化として、Si材料でIGBTとFWDとを一体化したRC-IGBTの採用拡大とともに、ワイドバンドギャップ材料SiCを用いたSiC-MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) の採用が始まっている。

3.2 高電力密度化パッケージ構造

xEV 向けパワーモジュールは、高電力密度化が必要とされている。図7に、富士電機製 xEV 向けモジュール電力密度の年次推移を示す。

富士電機は、パワーモジュールを高電力密度化するために必要な半導体素子やパッケージ構造の開発に取り組んでいる。図8に xEV 向けパワーモジュール「M677」を示す⁽⁸⁾。M677は、電動車のパワートレインを構成するキーコンポーネントとして100kWクラスのインバータをターゲットとしており、業界トップクラスの超小型RC-IGBTモジュールである。

M677では、小型化と高出力化を両立させるため第7世代RC-IGBTを採用し、さらにその導通損失を低減するため、Siウェーハの薄化と表面構造の最適化を行って

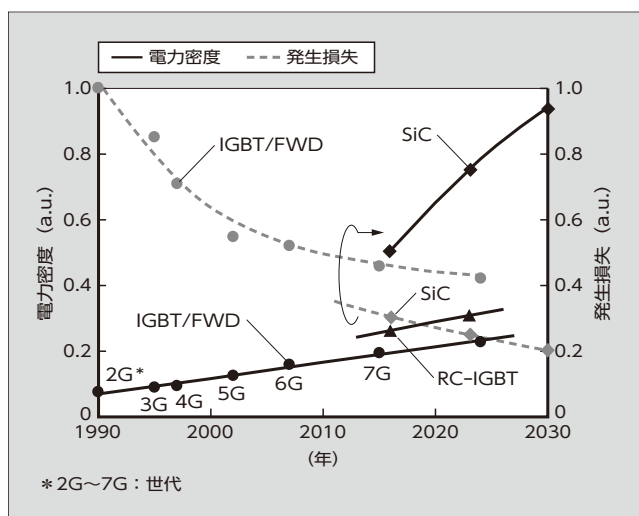


図6 1,200V 定格パワー半導体素子の電力密度と発生損失の年次推移

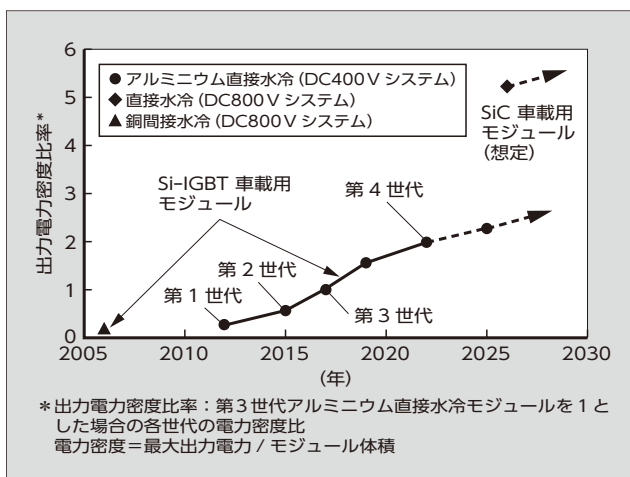


図7 富士電機製 xEV 向けモジュール電力密度の年次推移

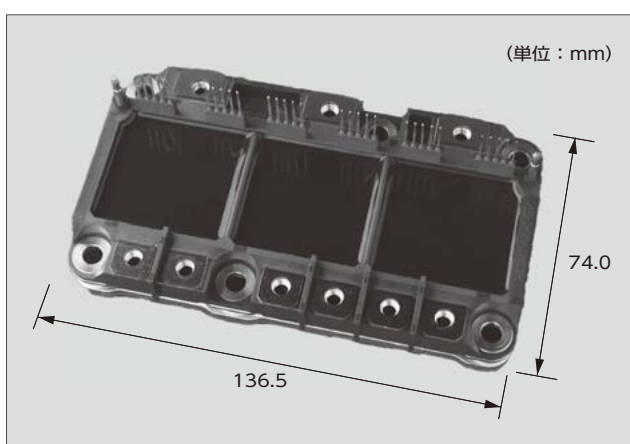


図8 xEV 向けモジュール「M677」

いる。表1にリードフレームによる小型・高電力密度化を示す。図9に富士電機製 xEV 向けモジュールの冷却性能の推移を示す⁽⁹⁾。チップ体積の減少に伴い熱容量が減少し、内部温度が上昇しやすくなることへの対策として、従来のアルミニウムワイヤ配線に比べて電気抵抗が低く、放熱性の高い銅製リードフレーム（表1）や、高い冷却性能を備えるフィン構造（図9）を採用し、xEV 向けパワーモジュールの小型化を同時に実現している。

リードフレーム配線では、パワーモジュールの短絡動作に伴うチップの破壊までに要する短絡耐量エネルギーは、

表1 リードフレームによる小型・高電力密度化

	M653	M677
内部回路構成	RC-IGBT 銅製リードフレーム アルミニウムワイヤ 絶縁基板	RC-IGBT 銅製リードフレーム アルミニウムワイヤ 絶縁基板
回路面積 (arb.unit)	1.00	0.49
電力密度 (arb.unit)	1.00	1.98

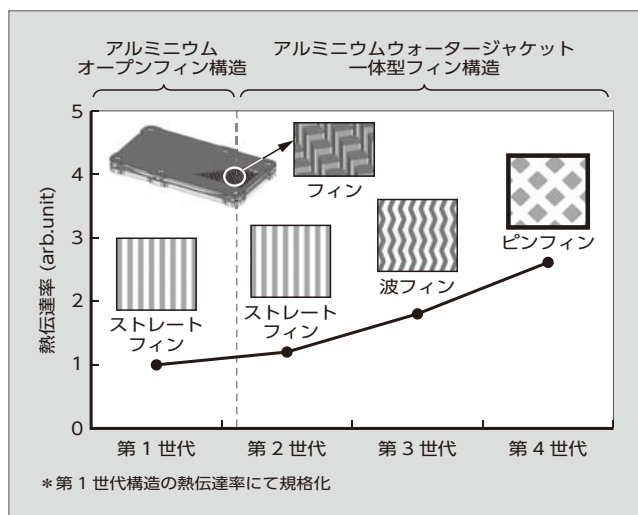


図9 富士電機製 xEV 向けモジュールの冷却性能の推移

従来品の 1.4 倍に高まった。また、高電力密度、高温環境下で使用されることにより、配線抵抗や熱抵抗の上昇を引き起こすことが懸念されるはんだ接合部のエレクトロマイグレーションに対しては、このパッケージが十分な耐性を備えていることを信頼性試験で確認している⁽⁹⁾。

次に、SiC デバイスを搭載した、パワーモジュールのパッケージ技術について述べる。

SiC デバイスを搭載したモジュールとしては、電鉄向けなど産業向けが先行して市場投入されてきた。SiC デバイスは、Si デバイスと比べて大幅に高速なスイッチングが可能であり、スイッチング時のサージ電圧を抑制する必要がある。図 10 に PN ラミネートを採用したモジュール断面構造を示す。3.3 kV 耐圧の大容量 SiC モジュール「HPnC」では、図 10 に示す配線構造を採用し、低インダクタンスを実現してサージ電圧を抑え込んでいる。また、ここ数年で太陽光発電や風力発電といった再生可能エネルギーの分野においても、発電効率の向上やコスト低減を図るため、DC バス電圧の高圧化が進んでいる⁽¹⁰⁾。このような高耐圧のパワー半導体が要求される産業用途向けには、第 2 世代 SiC トレンチゲート MOSFET を搭載した定格電圧 1,700 V の All-SiC モジュールと、その系列製品を開発している。

前述のように、SiC-MOSFET は、Si-IGBT に比べて

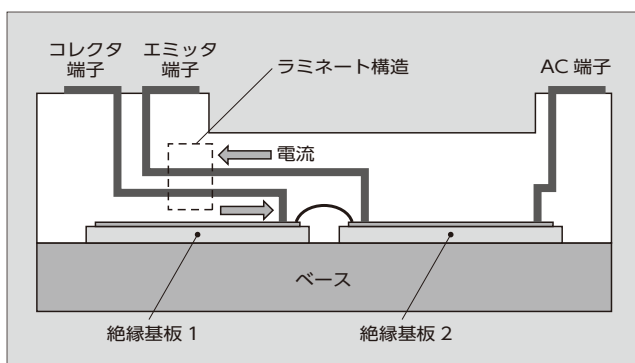


図 10 PN ラミネートを採用したモジュール断面構造

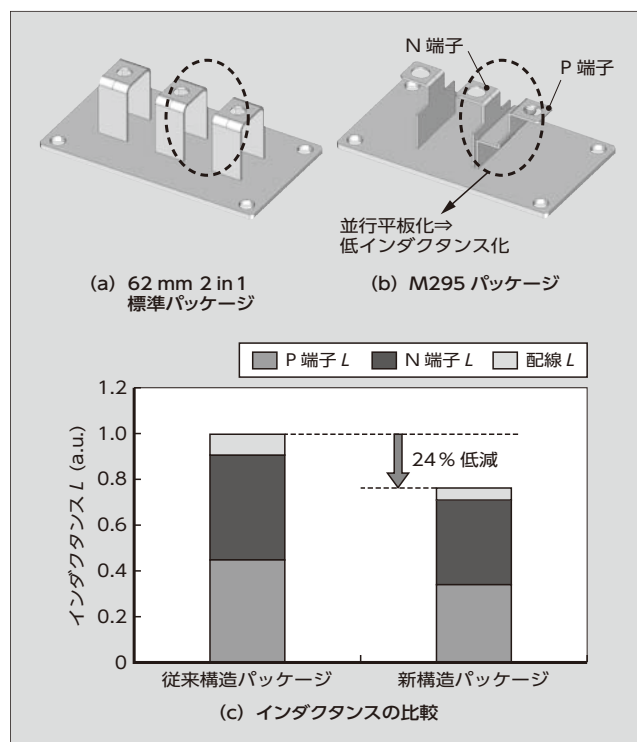


図 11 低インダクタンス化した内部配線構造

はるかに高速なスイッチングが可能であるが、高速スイッチング時には、モジュール内部の配線インダクタンスにより高いサージ電圧を引き起こすという弊害がある。図 11 に、低インダクタンス化した内部配線構造を示す。今回開発した All-SiC モジュールにおいても、図 11 に示すような内部構造の変更により、配線インダクタンスを 24% 低減している⁽¹¹⁾。これに加えて、第 7 世代「X シリーズ」IGBT の 2 in 1 パッケージの外形および端子配置との互換性を確保し、Si-IGBT との置換えも可能にしている。

xEV 向け SiC モジュールにおいても、前述したリードフレーム配線での高電力密度化と短絡耐量向上、さらに産業向けで適用が進んでいる低インダクタンス配線などのパッケージ構造を展開し、カーボンニュートラルに貢献していく。

3.3 環境を考慮した生産

富士電機では、長期視点でカーボンニュートラル、環境負荷ゼロを目指すことを骨子とした“環境ビジョン 2050”を策定し、2030 年度の目標としてサプライチェーン全体の温室効果ガス排出量を、2019 年度に比べて 46% 超削減することを目標に掲げて施策に取り組んでいる⁽¹⁴⁾。図 12 に、サプライチェーン排出量の構成を、図 13 に温室効果ガス排出量の実績と目標を示す。

xEV 向けモジュールは、温室効果ガス排出量低減を目指し開発しており、それらを構成する部品についても、温室効果ガス排出量が削減された工程で生産することを顧客から求められている。さらに、市場要求として、SiC パワー半導体新規納入から、再生可能エネルギー 100% の“グリーン工場”での生産の要求を受けている。

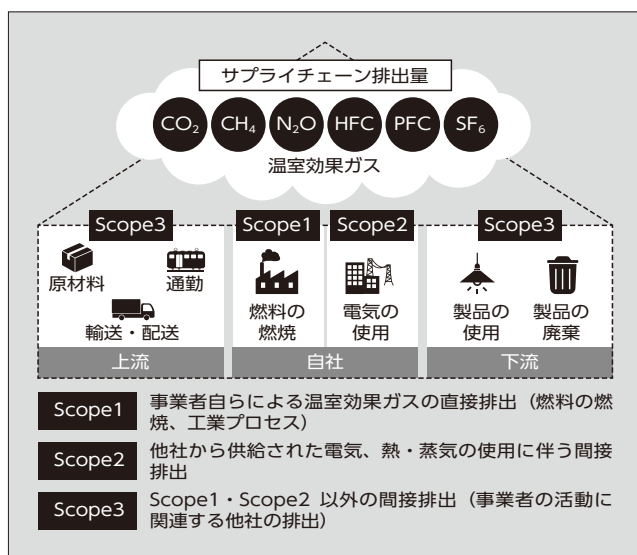


図12 サプライチェーン排出量の構成

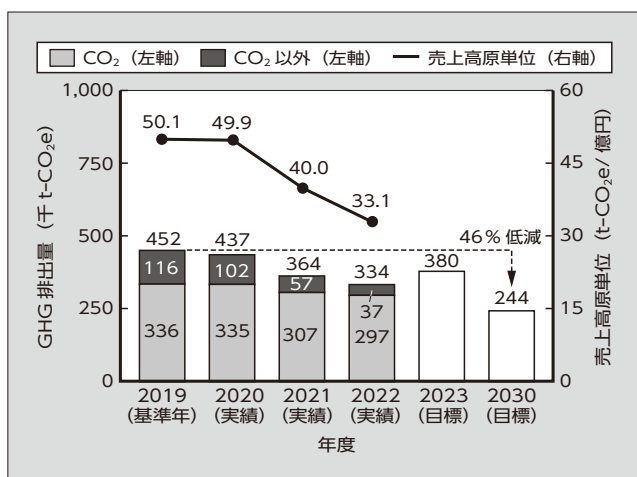


図13 温室効果ガス排出量の実績と目標

半導体事業本部では、2022年から毎年4%超の温室効果ガス排出量低減を継続し、2030年に46%超の削減を実現する計画を策定した。計画遂行に向けて、再生可能エネルギー電力の購入、自社内太陽光発電システムの設置、省エネルギー機器への更新を推進している。また、太陽光や風力などの再生可能エネルギー由来の電力を導入する案件も検討している。

④ あとがき

自動車の電動化に貢献するパワー半導体について述べた。これからは製品性能と同等に、カーボンニュートラルに貢献するため、どのように製品を作るかが問われる時代になっている。これからも、xEV向けパワー半導体製品において、材料から生産、製品性能で温室効果ガス排出量への影響を考え、カーボンニュートラル社会に貢献できるように、技術革新、生産革新に努めていく所存である。

参考文献

- (1) International Energy Agency. “Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector”. May 2021. https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf, (参照 2023-07-18).
- (2) 西浦彰ほか. ハイブリッド車用IGBTモジュール. 富士時報. 2006, vol.79, no.5, p.350-353.
- (3) 日達貴久ほか. 車載用直接水冷IGBTモジュール. 富士時報. 2011, vol.84, no.5, p.308-312.
- (4) 郷原広道ほか. ハイブリッド自動車用IPMのパッケージ技術. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.4, p.258-262.
- (5) Ebuchi, Y. et al, “Low loss and High-cooling-performance automotive power module for 160 kW EV application”, PCIM Asia 2023, p.232-235. <https://www.vde-verlag.de/proceedings-en/566131041.html>, (参照 2023-07-18).
- (6) 大澤彰浩ほか. 車載用大容量IGBTモジュール「M660」. 富士電機技報. 2017, vol.90, no.4, p.238-241.
- (7) 平野尚彦ほか. ハイブリッド自動車用インバータ 両面放熱パワーモジュール「パワーカード」. デンソーテクニカルレビュー. 2011, vol.16, p.30-37, <https://www.denso.com/jp/ja/-/media/global/business/innovation/review/16/16-doc-6-ja.pdf>, (参照 2023-07-18).
- (8) 安達新一郎ほか. xEV向け100 kWクラス超小型RC-IGBTモジュール「M677」. 富士電機技報. 2019, vol.94, no.4, p.236-239.
- (9) 佐藤悠司ほか. xEV向けIGBTモジュールの高電力密度化を実現するパッケージ技術. 富士電機技報. 2022, vol.95, no.4, p.185-189.
- (10) 立石義博ほか. xEV向け超小型RC-IGBTモジュールの冷却技術. 富士電機技報. 2021, vol.94, no.4, p.240-245.
- (11) 関野裕介ほか. 大容量SiCハイブリッドモジュール「HPnC」. 富士電機技報. 2017, vol.90, no.4, p.228-232.
- (12) Stevanovic et al. “Highly Efficient, Full ZVS, Hybrid, Multilevel DC/DC Topology for Two-Stage Grid-Connected 1500 V PV System with Employed 900 V SiC Devices”. 2019, IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electronics, vol.7, no.2, p.811-832.
- (13) 高久拓ほか. 第2世代1,700 V All-SiCモジュールの系列拡大. 富士電機技報. 2022, vol.95, no.4, p.190-194.
- (14) 富士電機ホームページ. 環境ビジョン2050. 生産時の温室効果ガス排出量削減, https://www.fujielectric.co.jp/about/csr/global_environment/management_02_02.html?ui_medium=jp_glnavi, (参照 2023-07-18).

**長畦 文男**

電気・ハイブリッド自動車用モジュール・IPMの開発に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部電装事業部電装設計第一部主席。工学博士。

**松尾 壮太**

電子デバイスの技術開発管理および半導体事業本部の環境対策管理に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部開発統括部担当部長。

**池田 良成**

パワー半導体モジュールの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部開発統括部パッケージ開発部課長。博士（工学）。エレクトロニクス実装学会会員、日本機械学会会員、電気学会会員。



コンビニエンスストア店舗向け省エネルギーソリューション

Energy Saving Solutions for Convenience Stores

石原 雄大 ISHIHARA, Yudai

近年、コンビニエンスストア各社は、2050 年カーボンニュートラルを目標とした取組みを加速している。直近では、電気料金高騰によるコンビニエンスストア本部および加盟店の負担増を受け、店舗の省エネルギー化への要望が強まっている。そこで、これまでの機器個別の最適化だけでなく、店舗全体の消費電力量を削減する取組みを始めている。ショーケースの除霜時期を予測して事前に調整する機能と、店舗全体の消費電力が最大需要電力を超えないようにリアルタイムに機器を制御する機能を備えることで、店舗の消費電力の平準化が期待できる。

Convenience store companies are accelerating efforts to achieve carbon neutrality by 2050. Demand for energy saving at convenience stores has recently grown as a result of increases in costs for convenience store headquarters and affiliated stores because of the sharp rise in electricity prices. To address this issue, Fuji Electric has begun to make an effort not only to optimize individual pieces of equipment but also to reduce the power consumption of entire stores. The system predicts and determines the defrosting times of the showcases beforehand, as well as controls equipment in real time, so that the power consumption of the entire store does not exceed the maximum demand power, enabling power consumption leveling in stores.

① まえがき

コンビニエンスストア各社は、2030 年に 2013 年対比で CO₂ 排出量 50% 削減、2050 年カーボンニュートラルを目標に、CO₂ 排出量削減の取組みを加速している。^{(1)~(3)}その目標達成に向け、コンビニエンスストア本部では、店舗設備の省エネルギー（省エネ）化、太陽光パネルの設置、再生可能エネルギーの購入など、さまざまな取組みを行っている。直近では、電気料金高騰によるコンビニエンスストア本部および加盟店の負担増を受け、店舗の省エネ化への要望が強まっている。

富士電機ではこれまで、ショーケースなどの機器単体の高効率化の追求を行い消費電力量削減に貢献してきた。さらなる店舗内機器の省エネに貢献するため、機器個別の最適化だけでなく、店舗全体の消費電力量を削減する取組みを始めている。さらに、消費電力の最大値を下げるピークカットによる省エネ化の取組みも試みている。

本稿では、コンビニエンスストア店舗向け省エネソリューションについて述べる。

② 現状の課題

富士電機は、ショーケースなどの機器単体の高効率化の追求、店舗内の気圧を店舗外の気圧よりもわずかに高い圧力に保つことで空調設備の運転効率を改善する正圧化制御システムの開発など、機器個別の最適化を行ってきた。さらなる省エネのためには、これらの機器やシステムの運転条件を協調させて店舗全体の最適化に取り組む必要がある。

また、省エネ化により電気料金を抑える効果も期待できる。月ごとの電気料金には、その月の使用電力量に応じて決まる電力量料金と、契約電力によって決まる基本料金が

含まれる。実際に使われた 30 分ごとの平均使用電力のうちの最大値を最大需要電力といい、直近の過去 1 年間の最大需要電力が契約電力となる。したがって、省エネ化施策により、機器が消費する電力の累計である使用電力量を抑えて電力量料金を削減するとともに、30 分ごとの平均使用電力が平準化するように機器の消費電力を制御し、最大需要電力を抑えることが基本料金を下げることにつながる。

③ コンビニエンスストア店舗向け省エネ施策

3.1 店舗全体空調による省エネ化

店舗全体の最適化は、省エネに加え快適性も確保する必要がある。その両立のため、店舗全体のモデル化を行い、快適性の評価指標である予想平均温冷感申告（PMV: Predicted Mean Vote）を用いた相関評価を行った。その結果、夏季では空調の温度設定、冬季では外気を有効活用することで、省エネと快適性を両立する可能性を見出し⁽⁴⁾ている。

さらに今後は、換気量の最適化を図るため、店内の CO₂ 濃度も含めた、店舗全体の省エネと快適性の両立を目指している。

3.2 消費電力の平準化

店舗全体の消費電力が前述した最大需要電力の目標値を超えることを未然に防ぐ機能とリアルタイムに防止する機能を開発している。

(1) ショーケースの除霜タイミングの調整

ショーケースには、庫内の空気を冷却するための熱交換器が内蔵されている。湿気を含む庫内の空気が熱交換器を通ると、低温になっている熱交換器の表面に空気中の水分

が結露し、さらに霜に成長する。霜が増えると空気を冷却する効率さが下がるため、一時的に熱交換器を加熱して霜を取り除く除霜動作が必要となる。この除霜動作中から終了後にかけて消費電力が大きくなるため、多数の熱交換器を同時に除霜すると、その間の消費電力量が増大してしまうので、これを回避する制御技術を開発している。

図1にショーケース除霜開始時刻の最適化の電力量予測を示す。このように、店舗全体の消費電力量の推移は過去の実績から予測することができる。この例では、図中の点線枠で示す部分が除霜に伴い消費電力量が増加する時間帯である。この前後には消費電力量が比較的小さい時間帯が存在する場合があります。一部の熱交換器の除霜のタイミングを点線枠部分から前後の比較的小さい消費電力量が小さい部分に移すことにより、店舗全体の消費電力量を平準化できる可能性がある。除霜のタイミングをずらすことにより消費電力量を平準化する効果はシミュレーションにより予測することができる。その計算例を、表1の除霜開始時刻の最適化パターンに示す。ショーケースの冷却特性上、除霜のタイミングを大きくずらすことは難しいため、除霜開始時刻の変更範囲は除霜開始時刻の前後1時間とし、パターン③の10:00開始を中心に、パターン①の9:00開始からパターン⑤の11:00開始まで、30分間隔で開始時刻をずらした五つの変更パターンについて評価している。この例では、30分後ろにずらしたパターン④の場合に、最大消費電力量が最小の14.13kWhとなって平準化の効果が最大となるため、このパターンを選択する。この制御を複数のショーケースグループごとに実施することにより、

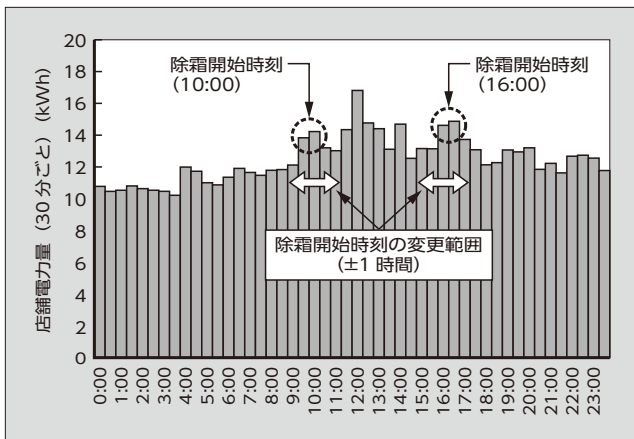


図1 ショーケース除霜開始時刻の最適化の電力量予測

表1 除霜開始時刻最適化パターン

パターン	除霜開始時刻	測定開始時刻				
		9:00	9:30	10:00	10:30	11:00
①	9:00	14.06*	14.32	13.41	13.23	12.33
②	9:30	13.93	14.36	13.42	13.31	12.33
③	10:00	13.93	14.23	13.46	13.32	12.41
④	10:30	13.93	14.13	13.33	13.36	12.42
⑤	11:00	13.93	14.23	13.33	13.23	12.46

*表中の数値：店舗全体30分ごとの消費電力量 (kWh)

店舗全体の消費電力が最大需要電力の目標値を超えないことに寄与することができる。

(2) その他の機器の短時間運転抑制

店舗全体の消費電力を左右する要因のうち、ショーケースの除霜とは異なり予測することが難しいものについては、店舗全体の消費電力をリアルタイムに測定した結果に基づいて機器を制御する技術を開発している。

図2に店舗の1日の電力量推移を示す。この中で、点線枠で示した30分間の平均電力が最大となっている。この30分間を対象として、制御の概要を図3に示した店舗全体の消費電力量の推移を例にして述べる。店舗全体の30分間の消費電力量の目標値である目標電力量（図3中の経過時間30分時の目標電力量）は、前述した最大需要電力が目標値を超えないように設定される。店舗全体の消費電力は、店舗内の各機器の運転状況に応じて変化するもので、この店舗全体の消費電力を常時測定し、その積算値として消費電力量（電力量測定値）を求める。この電力量測定値の監視を30分ごとに繰り返す。ある時点の電力量測定値が、あらかじめ設定した上限電力量を超えた時点でデマンド警報を発生する（図3中では測定開始後15分の時点）。図3中に一点鎖線で示した上限電力量は、電力量測定値がこの上限を超えてそのままのペースで推移した場合に、30分間の消費電力量が目標電力量を超過する恐れが

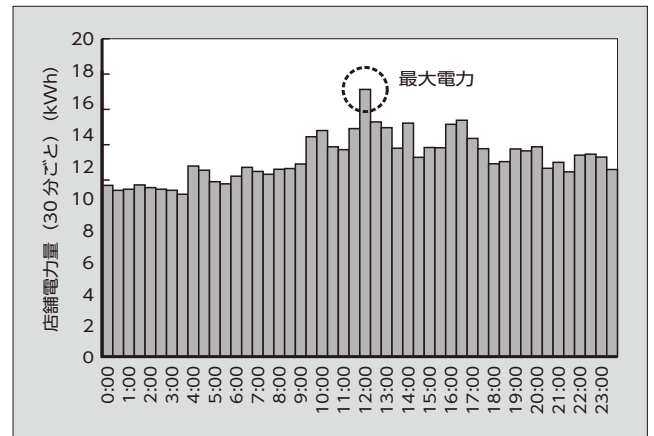


図2 店舗の1日の電力量推移

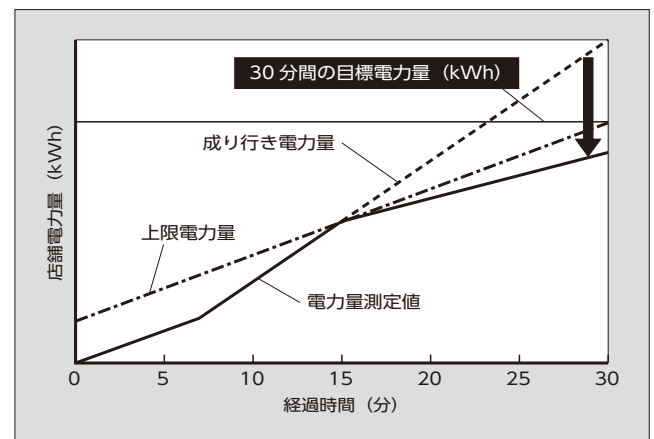


図3 店舗全体の消費電力量の推移

高いと考えられる値に設定してある。デマンド警報が発生した場合は、次に述べる各対策を実施して、店舗全体の30分間の消費電力量が目標電力量を超過しないようにする。

(a) ウォークインショーケースの短時間運転調整

コンビニエンスストアに設置しているバックヤードと商品陳列ケースを一体で冷却するウォークインショーケースは、陳列商品の品質確保のため商品温度を所定の範囲に保つ必要がある。そのため、商品温度を確保できる温度範囲を見極めて制御する。図4にウォークインショーケースにおける短時間運転調整の制御フローを示す。デマンド警報が発生後、ウォークインショーケースの庫内温度を確認し、庫内温度が設定範囲の上限より低ければ、ウォークインショーケースの設定温度を変更する。設定温度を高くすることで、ウォークインショーケースの負荷が減り、消費電力量を抑制することができる。

(b) 空調機の短時間運転調整

店舗に設置してある空調機の電力調整は、店内の快適性を維持した上で実施する必要がある。そのため、前述のPMVを指標に用いて、図5に示す空調機における短時間運転調整の制御フローで実施する。デマンド警報が発生後、店舗内のPMV値を確認し、PMV値が目標範囲内であれば、空調機の運転モードを送風に切り替える制御となる。空調機の運転モードを送風に切り替えることで、温度調整に要していた負荷が減り、消費電力量を抑制することができる。

(c) 蓄電池緊急放電

ウォークインショーケースや空調機の運転を調整して

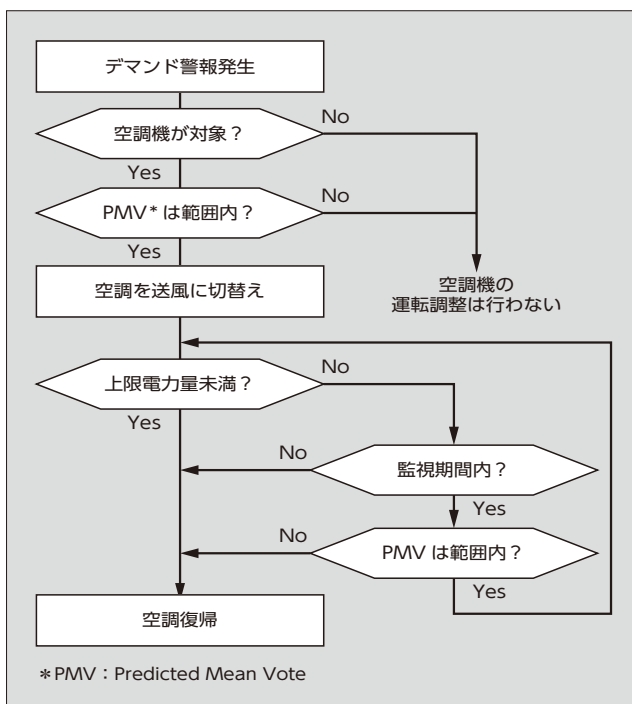


図5 空調機における短時間運転調整の制御フロー

も店舗全体の消費電力が上限電力を超える場合は、店舗外に設置した蓄電池を利用して、蓄電池が放電した電力を店舗に供給することにより、目標電力量を超えないようにする制御システムも開発している。

4 あとがき

本稿では、コンビニエンスストア店舗向け省エネルギーソリューションについて述べた。

今後は、店舗の需要予測および発電予測、夜間電力などを組み合わせ、蓄電池の充放電の最適な計画を行い、蓄電池の最適稼働を進めることにより、さらなる省エネルギー化に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) “環境宣言『GREEN CHALLENGE 2050』”. 株式会社セブン&アイ・ホールディングス. https://www.7andi.com/sustainability/policy/environment_03.html, (参照 2023-08-01).
- (2) “ファミマecoビジョン2050（環境の中長期目標）”. 株式会社ファミリーマート. <https://www.family.co.jp/sustainability/ecovision.html>, (参照 2023-08-01).
- (3) “環境ビジョン Lawson Blue Challenge 2050!”. 株式会社ローソン. <https://www.lawson.co.jp/company/activity/bluechallenge/>, (参照 2023-08-01).
- (4) 宮越智也, 水澤竜也. 店舗における省エネルギーの施策. 富士電機技報. 2022, vol.95, no.3, p.151-154.

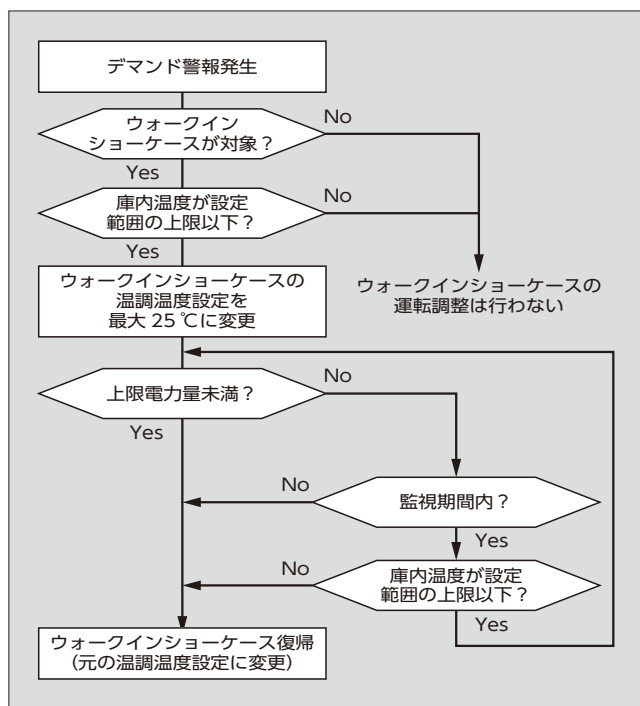


図4 ウォークインショーケースにおける短時間運転調整の制御フロー



石原 雄大

店舗機器のシステム開発に従事。現在、富士電機株式会社食品流通事業本部事業統括部システム技術部主任。



水素社会の実現に貢献する燃料電池ソリューション

Fuel Cell Solutions to Create a Hydrogen Society

高野 洋 TAKANO, Hiroshi

わが国は2017年に“水素基本戦略”を策定し、水素社会の実現に向けて取り組んでいる。水素社会を構築する鍵の一つとして、水素から電気を作ることができる燃料電池がある。富士電機は、1998年からりん酸形燃料電池を販売し、長期運転実績を獲得してきた。現在、定置用発電システムのみならず、港湾クレーンや船舶を対象とした移動体用発電システムに向け、信頼性が確認されている車載用燃料電池モジュールに燃料電池制御技術を組み合わせた燃料電池システムを開発し、評価している。ライフサイクルコストを低減する製品の提供により、これからの水素社会の実現に貢献していく。

Japan formulated its Basic Hydrogen Strategy in 2017 and is working toward the creation of a hydrogen society. One of the keys to creating a hydrogen society is fuel cells, which can generate electricity from hydrogen. Since 1998, Fuji Electric has been offering phosphoric acid fuel cells with a track record of long-term operation. In addition to stationary power generation systems, we are currently developing and evaluating fuel cell systems that combine fuel cell control technology with reliable on-vehicle fuel cell modules for mobile power generation systems to be used in gantry cranes and ships. We will provide products that reduce life cycle costs to achieve a hydrogen society.

① まえがき

カーボンニュートラルの実現を目指す上で、エネルギー源として使用してもCO₂を排出しない水素の活用が注目されている。わが国は2017年に世界に先駆けて水素の国家戦略“水素基本戦略”を策定した。その後、水素戦略を策定した国・地域は、2022年までに26と広がっている。2023年に改定されたわが国の水素基本戦略では、2030年に最大300万t/年、2040年に1,200万t/年程度、2050年に2,000万t/年程度の導入目標を掲げ、水素社会の実現に向けて取組みを加速している。

水素社会を構築する鍵の一つとして、水素から電気を作ることができ、自動車、荷役機械などの移動体用から家庭や事業所などの定置用まで、さまざまな用途での利用が期待されている燃料電池（FC：Fuel Cell）がある。

本稿では、来るべき水素社会におけるさまざまな用途に応じた電力供給を担う富士電機の燃料電池ソリューションとして、②章ではこれまで開発してきたりん酸形燃料電池（PAFC：Phosphoric Acid Fuel Cell）について、③章では新規に開発している固体高分子形燃料電池（PEFC：Polymer Electrolyte Fuel Cell）について述べる。

② PAFC の取組み

富士電機は、1961年に燃料電池の開発に着手し、その後、60年以上にわたり、アルカリ形燃料電池、熔融炭酸塩形燃料電池、PAFC、固体酸化物形燃料電池、PEFCなど、さまざまな種類の燃料電池の開発、商用化に取り組んできた。PAFCにおいては、1980年代に関西電力株式会社と共同で開発を行った国産初の定格出力30kW機を皮切りに、100台近くの実証試験を実施し、1998年に

100kW商品機「FP-100E」を発売した。その後、2010年にはセルスタックや改質器の設計寿命を60,000時間に延ばし、屋外設置に対応した100kW機「FP-100i」を発売した。

FP-100iのシステムフローを図1に示す。原燃料である都市ガスや消化ガスなどの炭化水素を約80%濃度の水素ガスにするための改質装置（脱硫器、改質器、CO変成器）をはじめ、水素と酸素の電池反応により発電する燃料電池セルスタック、ポンプやブロワ、熱交換器などの補機（BOP：Balance of Plant）、発電した直流電力を交流電力に変換するインバータなどで構成されている。

FP-100iは日本国内のみならず、欧州や韓国などにも販売し、2023年8月末までに137台を納入した。2023年8月時点の納入台数と運転時間の実績を表1に示す。

改質器や脱硫器を自社開発している強みを生かし、イン

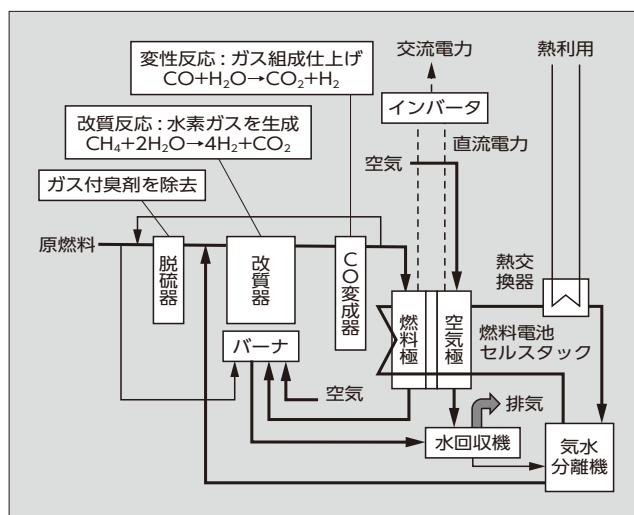


図1 「FP-100i」のシステムフロー

表1 納入台数と運転時間の実績（2023年8月時点）

主な納入先	納入台数	最長運転時間 (万時間)	累積運転時間 (万時間)
国内	都市ガスタイプ	34	14.3
	バイオガスタイプ	32	17.9
	純水素タイプ	1	3.4
国外	都市ガスタイプ	70	7.7
合計	137	—	669

フラが整備されている都市ガスの他、再生可能エネルギーとして注目されている下水消化ガス（バイオガス）仕様の機種、さらに純水素ガス専用機も開発し、国内で67台、国外では70台の納入実績がある。

信頼性確立のため、劣化メカニズムに基づいたセルスタックでの寿命検証試験、運転データの遠隔監視およびメンテナンスを実施しており、累積運転時間は669万時間、平均稼働率95%以上を達成している。

図2に富士電機山梨工場設置のFP-100iの外観を示す。2012年2月に納入したこの4台は、スマートファクトリー化の一環として、システムの瞬低対策、操業の確保といったエネルギーリスクの回避とエネルギーコストの削減を図るために導入された。燃料はLNG（液化天然ガス：Liquefied Natural Gas）を使用し、交流電力、高温水（90℃）と低温水（50℃）を供給する。総合効率率は89%を達成している。

PAFCはエネルギーリスクの回避やエネルギーコストの削減が行われており、長期運転実績を獲得してきた。しかし、次に示す問題点があり、普及は限定的に留まっていた。

- 高温のりん酸を使用するため、電池構成材料に耐食性の高い高価な材料の使用が必要となり、イニシャルコストが高くなる。
- 運転温度が約180℃と高く、システム起動に4時間程度を要することにより、頻繁な停止や出力変更への応答が困難で運用方法が制限される。



図2 富士電機山梨工場設置の「FP-100i」（4台）

③ PEFC システム

3.1 概要

昨今、車載用PEFCモジュールが開発、市販され、量産効果による低価格化、エンジンと遜色のない短時間の起動や出力応答性が注目されている。これにより、前述のPAFCシステムの問題点であった高コストと運用方法の制限が、飛躍的に解決される可能性がある。

そこで、富士電機では車載用PEFCモジュールを適用し、工場施設など産業向けの定置用発電システムのみならず、港湾クレーンや船舶向けの移動体用発電システムとして、純水素を用いた燃料電池システムの開発、評価を進めている。

製品開発においては、各用途で共有する制御や冷却の一部、排気部などを標準化したプラットフォーム（FCプラットフォーム）として共通開発し、各用途のシステムに展開することで、開発期間の短縮と、他用途への展開を目指している。

多用途展開の一つとして、港湾クレーンの一つであるRTGC（Rubber Tire Gantry Crane）向け燃料電池への適用例を述べる。現行の燃料タンク一体型発電機を用いたハイブリッドシステムとして、RTGCのディーゼル発電機のシステム構成を図3に示す。ディーゼル発電機とつり荷をつり下げる際に発生する回生電力を吸収する蓄電池、移動やつり上げに用いる駆動モータ、モータを駆動するドライブ盤などで構成される。これに対し、図4に示すように、ディーゼル発電機をFCと水素タンクに変えることで、カーボンニュートラルの実現に有効な水素を活用するRTGC向け燃料電池システムとなる。

図5に社内検証に用いたRTGC向け燃料電池システムの外観を示す。今後、クレーン実機での検証を実施し2025年度の上市を予定している。本製品では、富士電機独自の燃料電池スタック高耐久化制御技術による長寿命化を実現する予定である。また、工場・施設向け定置式燃料電池システムなど、社内複数のアプリケーションとの共通

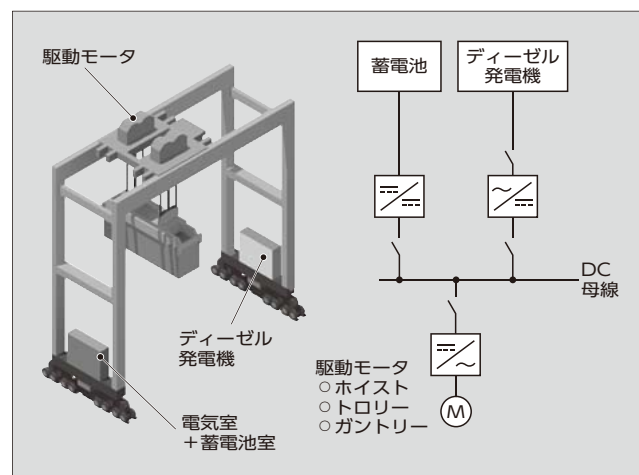


図3 RTGCのディーゼル発電機のシステム構成

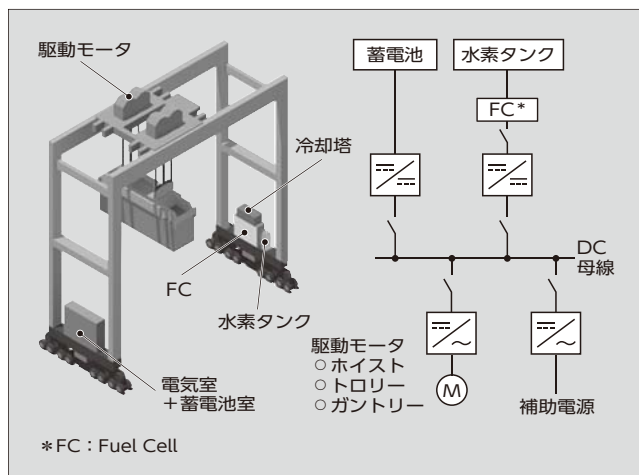


図4 RTGC向け燃料電池のシステム構成

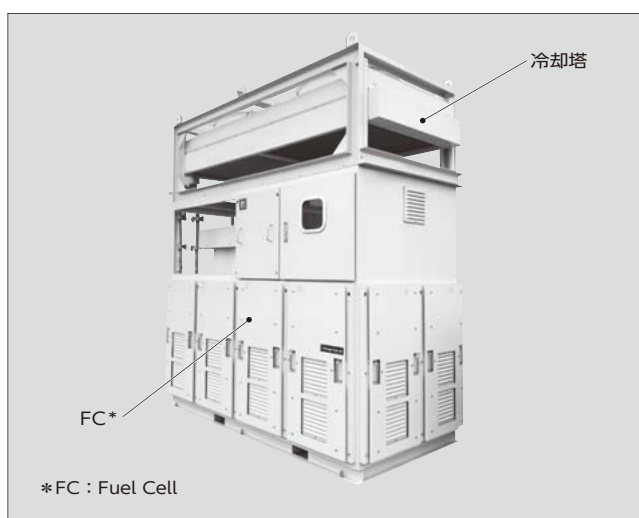


図5 RTGC向け燃料電池システム

化（プラットフォーム化）によるコストダウンを実現する予定である。

3.2 工場施設向けシステム構成

工場施設向け120 kW 燃料電池実証機のシステム構成・配線図を図6に、その外観を図7に示す。FCプラットフォームを2台搭載したFC盤2基、FCインタフェース盤1基を連結した基本構成に、PCS（パワーコンディショナ: Power Conditioning System）を含むACインタフェース盤、冷却塔や窒素供給設備などの付帯設備を接続している。なお、FC盤内に設置したFCプラットフォームは、容易に引き出して交換できる構造となっており、保守性が向上している。

運転制御はFCインタフェース盤内にあるコントローラに独自開発した技術を組み込み、FCプラットフォームを最適制御することで、高効率の長期連続運転を実現している。

配線はFCプラットフォーム計4台の直流出力を並列で集約し、それを太陽光発電用の富士電機製汎用50 kW PCSに3台並列で分流させて交流に変換している。また、

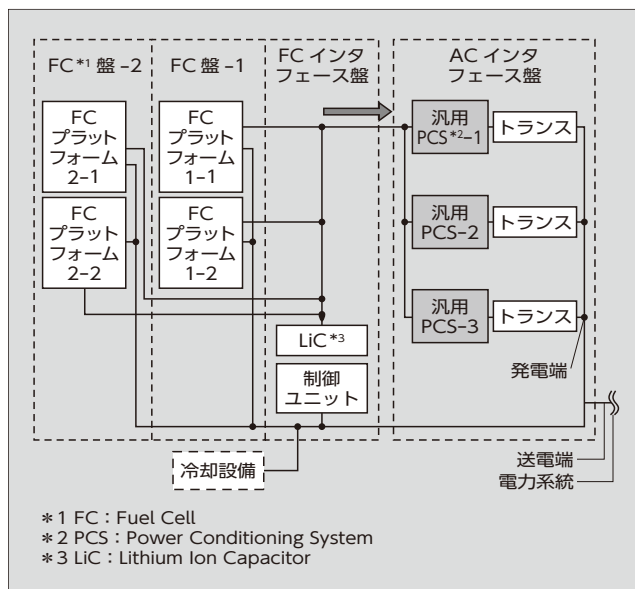


図6 工場施設向け120 kW 燃料電池実証機のシステム構成・配線図

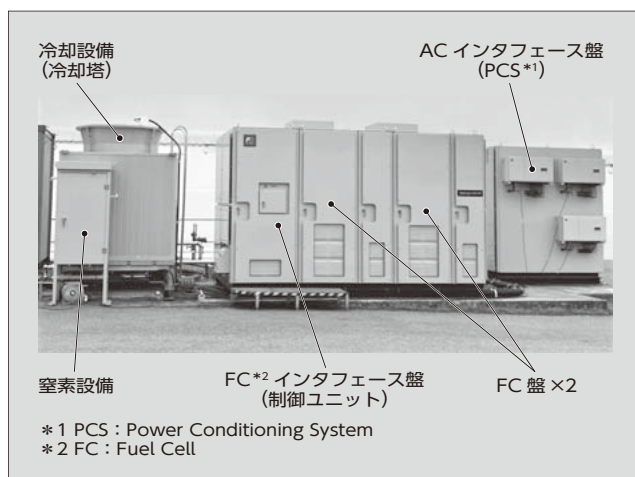


図7 工場施設向け120 kW 燃料電池実証機

直流出力にリチウムイオンキャパシタ（LiC: Lithium Ion Capacitor）を接続してFCプラットフォームの出力を補完することで電力を安定化させている（図5）。

3.3 工場施設向けシステムの評価試験

120 kW 燃料電池実証機は、富士電機千葉工場内に設置し、性能評価試験を実施した。

PEFC モジュールは、一定時間の運転後に停止することが必要とされている。一方、工場施設などでは1日24時間連続稼働が必要となる。この連続運転を、複数のFCプラットフォームを用いて交互に運転・停止を切り替えることで実現する独自の運転制御方式を開発し、連続して安定的に電力を供給できることを検証した。図8にFCプラットフォーム切替運転評価結果を示す。4台のFCプラットフォームにおける運転・停止の切替えを、2台交互に実施して送電端出力の変動を評価した結果である。

FCプラットフォーム4台の運転・休止を連携して制御

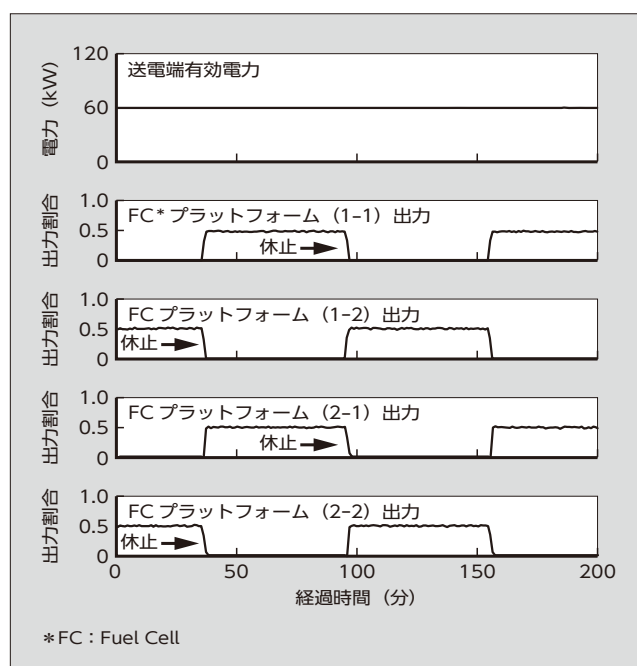


図8 FCプラットフォーム切替運転評価結果

することで、FCプラットフォーム運転・休止を切り替えした際も、4台のシステム全体では一定で連続した発電出力を得ることが可能となった。

FCプラットフォームの故障により、部分的に発電停止状態となった場合においても、他のFCプラットフォームで出力を補完し、発電を継続させることが可能である。

120 kW 実証機では、FC盤を2基並列した構造としているが、FC盤の並列数を自由に追加可能な設計とし、用途に応じた幅広い要求出力に対し、柔軟かつ安価に製造することが可能となる。

3.4 150 kW 製品機の開発仕様

120 kW 実証機を基にして、高出力と約30%の小型化を目指した150 kW 製品機を開発している。2024年上市予定の150 kW 水素燃料電池の開発仕様を表2に示す。

本装置に供給する純水素は、燃料電池車（FCV：Fuel Cell Vehicle）などで使用されるISO 14687に準拠した

表2 150 kW 純水素燃料電池の開発仕様

項目	150 kW 製品機
方式	固体高分子形燃料電池
燃料	水素 (ISO 14687) 圧力：0.8 MPaG、流量：113 Nm ³ /h
定格出力（送電端出力）	150 kW
電圧 ^{*1} 、周波数 ^{*1}	AC三相210 V、50/60 Hz
発電効率（発電端、定格運転）	47% (LHV ^{*3})
熱出力 ^{*2}	60℃温水
運転方法	全自動運転、系統連携・自立運転
起動時間	5分以内

*1：標準仕様

*2：オプション

*3：LHV：Lower Heating Value

高純度水素であり、水素流量は113 Nm³/h、水素の供給圧力は0.8 MPaGである。発電効率47%（LHV：Lower Heating Value）、起動時間5分以内を目標に開発している。

4 あとがき

水素社会の実現に貢献する燃料電池ソリューションとして、純水素燃料電池システムの新たな取組みについて述べた。これまで開発してきたりん酸形燃料電池で培った高信頼性技術とパワーエレクトロニクスを組み合わせたシステム化技術を基に、信頼性が確認された車載用燃料電池モジュールを組み込むことで、ライフサイクルコストで有利となる製品を開発し、水素社会の実現に向けて貢献する所存である。



高野 洋

純水素燃料電池システムの開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部新製品開発プロジェクト室プロジェクト推進部。日本化学会員。

高効率な直流配電システムの構築を可能にする DC/DC コンバータ

DC/DC Converters That Enable the Building of DC Electricity Distribution Systems

依田 和之 YODA, Kazuyuki

田重田 稔久 TAJUTA, Toshihisa

山田 隆二 YAMADA, Ryuji

再生可能エネルギーによる電力を直流で配電する際に、電力平準化に用いる蓄電池の充放電を行う、200 kW の双方向絶縁 DC/DC コンバータを開発した。電池の電圧変動 400 ～ 800 V に対応できる回路方式としてデュアルアクティブブリッジを採用し、SiC-MOSFET モジュールを用いてスイッチング周波数を 16 kHz としたことにより、絶縁トランスを商用周波数用のものに比べて、体積は 11% に、質量は 7% に小型・軽量化した。変換効率、定格条件で 98% に達する高効率を得た。これを 1 台のユニットとして直並列接続することにより、さらに大容量化が可能である。

Fuji Electric has developed a 200-kW bi-directional isolated DC/DC converter. The equipment charges and discharges storage batteries for electrical power leveling when DC power from renewable energy is distributed. Adopting a dual active bridge circuit system that can handle battery voltage fluctuations between 400 to 800 V and using SiC-MOSFET modules to set the switching frequency to as high as 16 kHz have reduced the volume of the isolation transformer to 11% and the mass to 7%. The conversion efficiency reaches 98%. Serial-parallel connection of the units can increase the capacity.

① まえがき

カーボンニュートラルの実現に向けて、動力源を従来の内燃機関から蓄電池に替えた電気自動車や電気推進船、あるいは CO₂ を排出しない燃料電池を動力源とする燃料電池自動車や燃料電池船、燃料電池建設機械の実用化検討が進んでいる。さらに、エネルギー供給における再生可能エネルギー（再エネ）の導入が加速している。太陽光発電に代表される再エネは天候によって発電電力が変動するものがあるため、これを平準化する手段として蓄電池を併設するシステムが増えている。また、非化石燃料として注目されている水素を燃料にした燃料電池は、急峻（きゅうしゅん）な負荷変動に対応できないので、これに対応するために蓄電池を併設する必要がある。さらに、再エネ由来の電力を使って水素を生成する水電解システムも検討されている。

これらの機器は、入出力する電力が直流なので、図 1 に示す再エネの直流配電システムのように直流母線を介して相互接続すると、簡素で高効率なシステムを構成することができる。この際、蓄電池や燃料電池などは電圧が変動するため、一定電圧の直流母線との電圧整合のために直流電力変換器（DC/DC コンバータ）が必要となる。

富士電機ではこれらの用途に適した大容量の双方向絶縁 DC/DC コンバータを開発した。本稿では、高効率な直流配電システムの構築を可能にする DC/DC コンバータについて述べる。

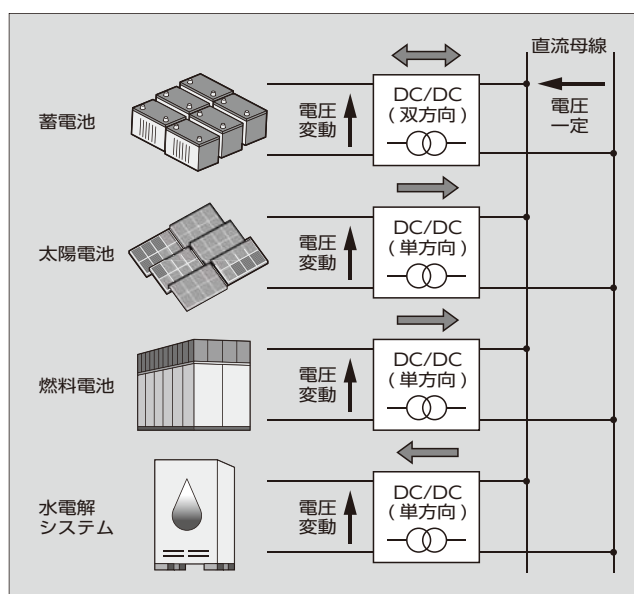


図 1 再エネの直流配電システム

② 直流配電システム用 DC/DC コンバータの課題

直流配電システムでは直流母線の電圧を一定に保つ必要がある。太陽電池や蓄電池などからの出力電圧の変動を母線電圧に整合させることが DC/DC コンバータに求められる基本機能である。さらに、地絡などから電池を保護し、あるいは漏えい電流による電池の損傷を防ぐために母線と蓄電池などとの絶縁機能が求められる。

これまでの絶縁型 DC/DC コンバータの多くが単方向に電力が流れる用途に使われていたが、蓄電池に適用する場合は充放電動作を可能にするために双方向の変換機能が必要である。こうした用途では 100 kW から MW クラスに

達するものが求められる。さらに言うまでもなく、エネルギーの有効利用のために高効率であることも必須条件である。

用途に応じてさまざまな電圧・電流仕様の直流配電システムを容易に実現できることも重要である。

③ 双方向絶縁 DC/DC コンバータの回路方式

直流電力変換においても、入出力間を電氣的に絶縁する場合には一旦交流に変換し、トランスを介することにより絶縁する。さらに双方向の電力変換が可能な回路は、トランスを挟んで一次側と二次側が対称に構成されることが原則となる。また、トランスを小型化するため、10 kHz 以上の高周波交流を用いるのが通例である。これらの要件を満たした上で大容量化に適した回路方式として、図 2 に示す対称形の双方向 LLC 共振コンバータと、図 3 に示すデュアルアクティブブリッジ (DAB : Dual Active Bridge) が知られている。

さらに、一次側の許容電圧範囲は接続する電源の出力電圧の変動範囲を十分カバーしなければならない。例えば、リチウムイオン電池の出力電圧は、満充電状態と放電末期で約 1.5 倍の差があり、これを一定の電圧に変換できる性能が求められる。

LLC 共振コンバータは、共振回路の伝達特性が周波数によって変化する特性を利用して出力を制御する。図 4 に LLC 共振回路の電流波形を示す。高周波交流部 (i_1 または i_2) のうち、電力伝送側に当たる側の電流波形は、双

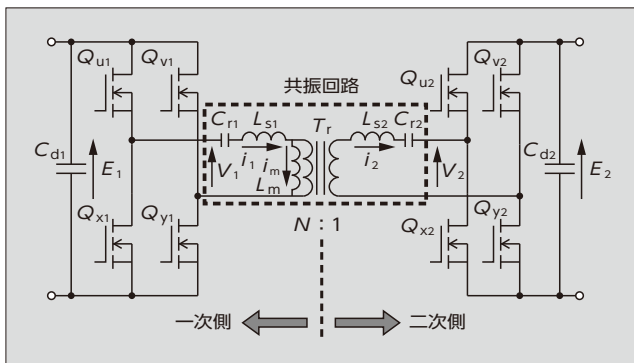


図 2 双方向 LLC 共振コンバータの回路方式

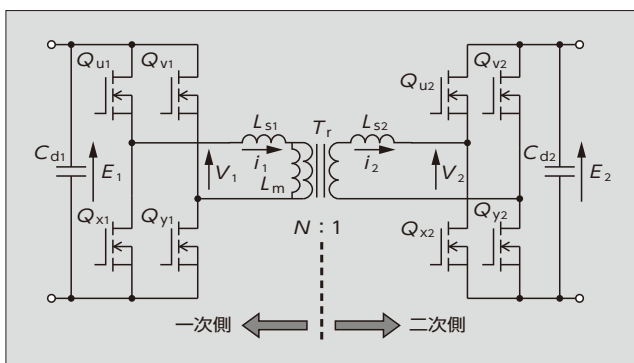


図 3 DAB の回路方式

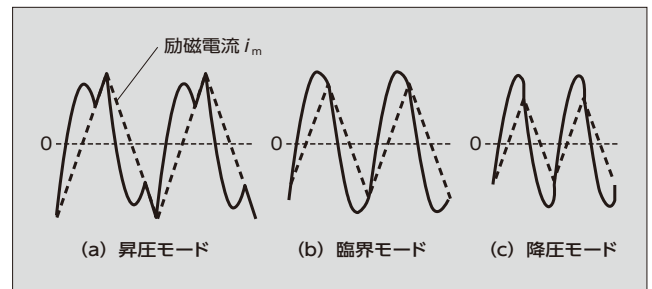


図 4 LLC 共振回路の電流波形

方向動作のため一次側と二次側で入れ替わる。ここでいう“昇圧”はトランスの変圧比 $N:1$ に対して $E_1 < N \cdot E_2$ を指し、“降圧”は一次側から二次側に電力伝送する場合、 $E_1 > N \cdot E_2$ を指す。入力電圧に対し出力電圧を上げる場合には周波数を下げ、トランス T_r の励磁電流 (並列インダクタンス L_m の電流) を大きくして、この電流で直列コンデンサ (C_{r1} , C_{r2}) を充電することにより、直流電圧 (E_1 または E_2) よりも高い電圧を交流端電圧 (V_1 または V_2) として出力する。一次側から二次側への電力伝送の際、二次側スイッチング素子 ($Q_{u2} \sim Q_{y2}$) は順方向には導通せず、単なる整流素子 (ダイオード) として動作する。電圧を下げる場合には、周波数を上げることで、直列リアクトル (L_{s1} , L_{s2}) での電圧降下を大きくする。

LLC 共振コンバータは、共振回路の直列共振点〔図 4(b)の臨界モード〕付近では、共振回路の力率が 1 に近づくため高い効率を示すが、昇圧モードでは大きな励磁電流を流すことによる損失が大きくなる。特に、軽負荷時には励磁電流が交流電流の大部分を占めるようになり、著しく効率が低下する場合がある。

電力変換装置の効率については、従来は定格出力の効率が重視されていたが、実際の運用において伝送電力が装置定格に近くなることはむしろ稀 (まれ) である。このため年間運用でのトータルエネルギー効率を改善するために、50% 負荷やさらなる軽負荷で、高効率を維持することが求められるようになってきている。したがって、回路方式も幅広い負荷範囲で高効率となるものが望ましい。

DAB は、一見 LLC 共振コンバータから共振コンデンサ (C_{r1} , C_{r2}) を除去しただけで、構成上大差ないように見えるが、その動作は大きく異なる。

この回路は、一次側および二次側の両方に能動的にスイッチング可能な素子が配置されていることを利用して、双方のスイッチング動作により出力制御を行う。図 5 に DAB の動作波形 (位相差制御) を示す。一次電圧 (V_1) と二次電圧 (V_2) にタイミング差 t_d による位相差を持たせ (位相シフト)、電圧極性の差異により電流の増減を行うものである。例えば、一次直流電圧 E_1 より二次直流電圧 E_2 が高い場合にも、正の一次電圧に対し負の二次電圧を与えることで正の電流を増加させ、昇圧動作を行うことが可能である。そのため、LLC 共振コンバータと異なり昇圧のために励磁電流を増加させる必要がなく、また直列コンデンサも不要である。

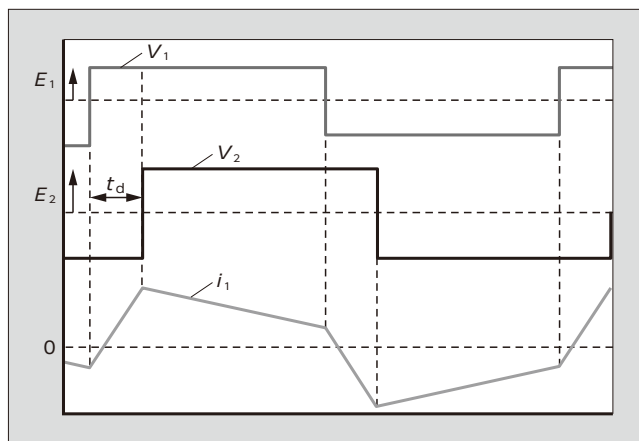


図5 DABの動作波形（位相差制御）

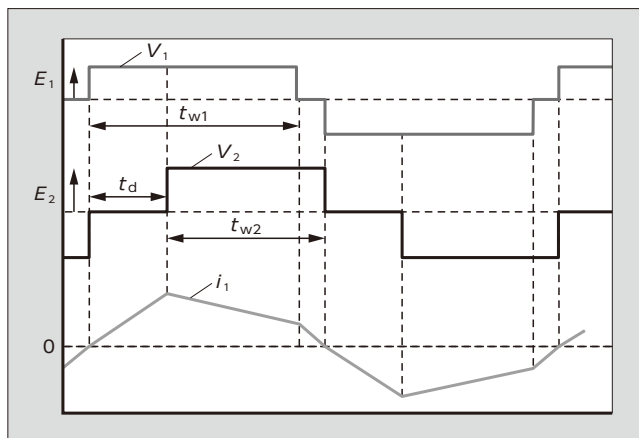


図6 DABの動作波形（位相差・パルス幅制御）

さらに、一次側と二次側ともにフルブリッジ構成であるので、一次電圧および二次電圧は、正、ゼロ、負の三つのレベルを設けることができ、より細かい制御が可能となる。これを利用した DAB の動作波形（位相差・パルス幅制御）を図6に示す。 t_d に加えパルス幅（ t_{w1} 、 t_{w2} ）による制御を併用したものである。

この制御機能を活用することにより、DAB は LLC 共振コンバータよりも入出力電圧の広い範囲にわたって高い効率を維持することが可能となるので、電池と直流母線との電圧整合手段として用いる場合、対称形 LLC 共振コンバータより効率面で有利になる⁽¹⁾。また、高耐圧を要する共振コンデンサが不要になる利点もある。これらの理由により、双方向絶縁 DC/DC コンバータの回路方式として DAB を採用した。

④ 試作機による性能の検証

直流配電システムへの適用を想定した DAB 方式の双方向絶縁 DC/DC コンバータを試作して性能を検証した。表1に試作変換ユニットの仕様を、図7に試作変換ユニットの回路構成と主要部品の外観を示す。容量は 200 kW とし、大容量かつ高周波動作を実現するため、スイッチング素子には富士電機製 SiC-MOSFET (Metal-Oxide-

表1 試作変換ユニットの仕様

項目	仕様
容量	200 kW
回路方式	DAB (Dual Active Bridge)
スイッチング素子	All-SiCモジュール
動作周波数	16 kHz
一次電圧・二次電圧	400 ~ 800 V/700 ~ 800 V
トランス T_r	容量
	100 kW×2台 (一次側直列・二次側並列)
	コア材
	ナノ結晶軟磁性材料
コンデンサ (C_{d1} 、 C_{d2})	フィルムコンデンサ、910 μ F
変調方式	パルス幅制御+位相シフト

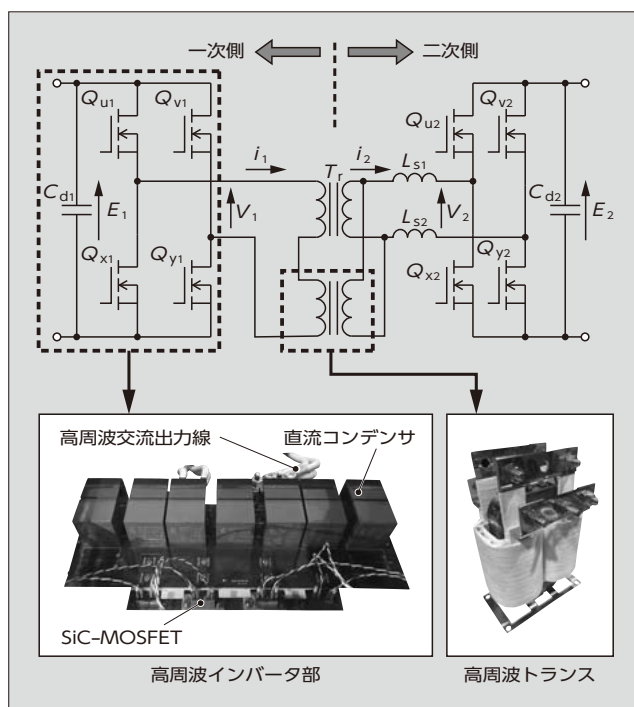


図7 試作変換ユニットの回路構成と主要部品

Semiconductor Field-Effect Transistor) モジュールを用いた。トランスのコア材には、同様に大容量・高周波に適するナノ結晶軟磁性材料を用いた。入手が容易な市販のコアを使うことを前提に 1 台当たりの容量を 100 kW とし、2 台を一次側で直列、二次側で並列接続として 200 kW 相当とした。

SiC-MOSFET の高周波特性を活用し、スイッチング周波数は 16 kHz とした。これにより、絶縁トランスは同じ電力を伝送する商用周波数用のものに比べて、体積は 11%、質量は 7% になる。

L_{s1} 、 L_{s2} は最小電圧が高く、したがって電流の小さくなる二次側のみに配置した。これらは一次・二次間で直列に作用するため、リアクトル全体としての動作は図3に示したものと同様である。直流部のリップル周波数は動作周波数の 2 倍に当たる 32 kHz となり、周波数が高いため大容量の平滑コンデンサは不要である。このため、一般的な電力変換装置で用いられる有寿命の電解コンデンサに代えて、

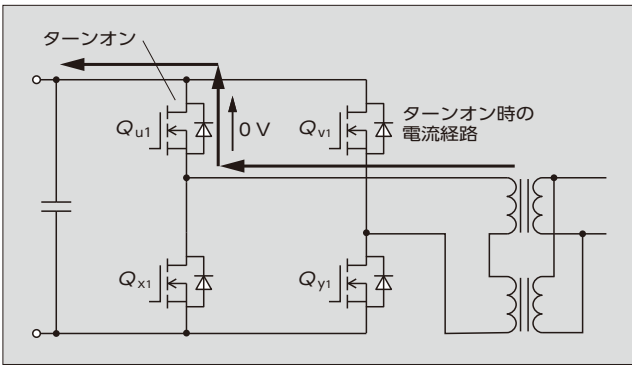


図8 ゼロ電圧ターンオン（ソフトスイッチング）

小型のフィルムコンデンサを用いた。

スイッチング素子の制御には、図6に示した位相差とパルス幅を制御する動作に加え、富士電機が独自に開発したパルスタイミング制御を用いた。これによって入出力電圧の広い範囲でスイッチング素子のピーク電流を抑制した。また、この回路では図8に示すゼロ電圧ターンオンが可能である。これは、スイッチング素子に並列に設けたダイオードが導通している間に主素子をオンすることにより

ゼロ電圧でスイッチングを行い、ターンオン損失の発生を防止するものであり、ソフトスイッチングと呼ばれている。このゼロ電圧ターンオンが入出力電圧の広い範囲で成立するようにし、効率を改善した。さらに回路の伝達特性モデルを制御回路内に内蔵することにより制御性能を改善し、安定性と高速応答特性を確保した。

出力制御としては、直流電圧制御系と直流電流制御系の両方を設け、定電圧モードおよび定電流モードを選択できるようにしている。

試作機の動作の評価結果を図9に示す。一次電圧最小・最大、二次電圧最小・最大の組合せの各条件において、定格電力を一次側から二次側に伝送した際の、一次側ブリッジ回路と二次側ブリッジ回路の高周波交流電圧（ V_1 、 V_2 ）と一次電流 i_1 の波形を評価した。いずれの条件においても、図5あるいは図6で示したように位相差とパルス幅の調整により電圧と電流が制御され、結果的に所望の電力が得られていることを確認した。定格電圧条件（入力 600 V・出力 750 V）における変換効率は 98.0% であった。なお、 $E_1=400$ V、 $E_2=800$ V 条件において一次電圧波形に現れるサグ状の波形は、SiC-MOSFET の寄生キャパシタンス充放電に伴うものであり、回路動作上正常なものである。

5 容量の拡張性

今回開発した DC/DC コンバータユニットは、前述した試作機でも実施したように、直列または並列に接続することで容量や電圧範囲を拡張し、幅広い用途に適用することができる。図10にユニットの直並列接続を示す。4台のユニットを一次側で並列に、二次側で直列に接続した構成であり、電力は 800 kW、最大電圧は 3,200 V となる。負出力（ N_2 ）を接地した場合、最上位のユニットの対地電位は 3,200 V となるので、トランスの一次・二次間絶縁耐圧はこれを前提として設計している。

直列接続した側では、各ユニットの電圧バランスを取る必要があるので、出力電圧が全電圧/ユニット数になるよ

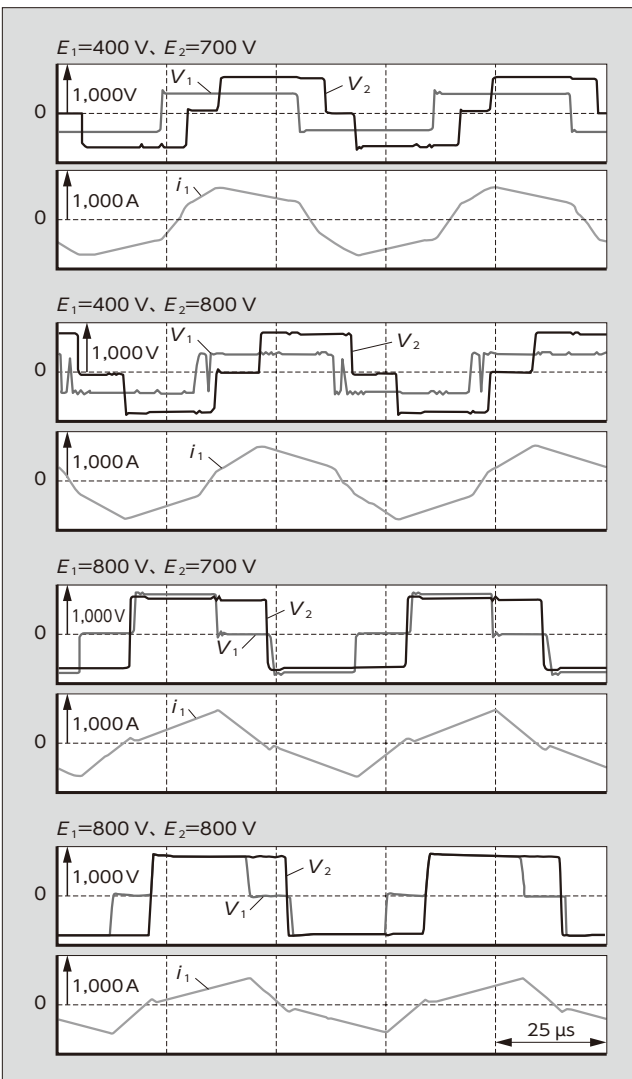


図9 試作機の動作の評価結果

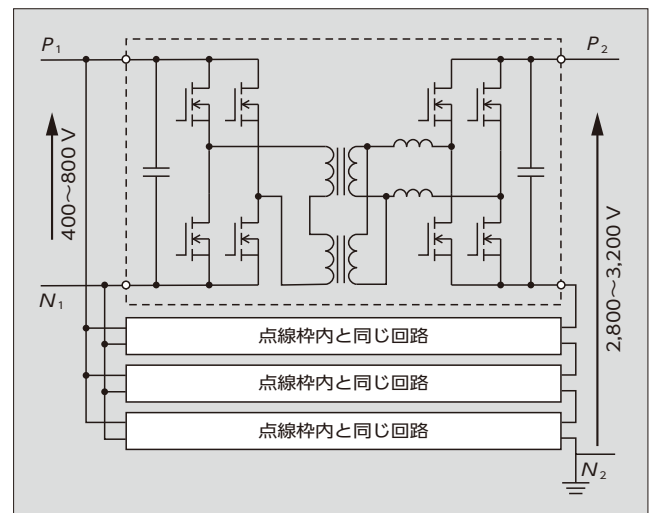


図10 ユニットの直並列接続

うに各ユニットにおいて伝送電力の調整を行う。

図 10 のユニット群を並列接続することにより、さらに電力容量の大きいシステムを構築することも可能である。

⑥ あとがき

高効率な直流配電システムの構築を可能にする DC/DC コンバータについて述べた。再生可能エネルギーなどの直流配電システムに適用することができる絶縁型で、双方向の電力伝送が可能な大容量直流変換装置を開発し、200 kW の単位変換ユニットを試作して評価した。回路構成として一次側と二次側が対称構成となるデュアルアクティブブリッジを採用し、SiC-MOSFET による高周波スイッチングによる絶縁トランスの小型化を実現した。併せて回路動作や伝送特性に合った制御方式を開発した。

変換効率については、定格条件で 98% に達する高効率を得られた。引き続き、今回開発した双方向絶縁 DC/DC コンバータをキーコンポーネントとする直流配電システムの実用化に取り組み、お客さまのカーボンニュートラルの実現に貢献する所存である。

参考文献

- (1) Yamada, R. et al. “Improvement of Efficiency in

Bidirectional DC-DC Converter with Dual Active Bridge Using GaN-HEMT”, IEEJ Journal of Industry Applications. 2023, vol.12, no.3, p. 264-272.



依田 和之

新製品のマーケティング、技術企画に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部新製品開発プロジェクト室担当部長。電気学会会員。



田重田 稔久

パワーエレクトロニクス製品の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所エネルギー変換技術研究部マネージャー。電気学会会員。



山田 隆二

UPS、情報用電源などのパワーエレクトロニクス機器の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所エネルギー変換技術研究部担当部長。電気学会会員。



熱プロセスの電化に貢献する排熱回収・利用技術

Technology for the Recovery and Use of Waste Heat, Contributing to the Electrification of Thermal Processes

岩崎 正道 IWASAKI, Masamichi

白井 英登 SHIRAI, Hideto

安嶋 賢哲 AJIMA, Masaaki

2050 年カーボンニュートラルの実現を目指して、熱プロセスの脱炭素化、省エネルギー（省エネ）化のニーズが高まっている。富士電機は、長年培ってきた自動販売機のヒートポンプ技術を独自に発展させ、主に産業分野における未利用排熱から効率的に熱エネルギーを回収し、さまざまな加熱・冷熱プロセスに再利用する技術の開発に取り組んでいる。高効率な加熱を実現する高温蒸気発生ヒートポンプ、および高効率な冷却を実現するエジェクタ冷却機により、食品や飲料、自動車、化学、半導体、データセンターなどの熱プロセスにおける省エネや、温室効果ガス排出量の削減が期待できる。

To achieve carbon neutrality by 2050, thermal processes increasingly necessitate decarbonization and energy saving. By building on the proprietary vending machine heat pump technology that Fuji Electric has cultivated over many years, we are developing technologies to efficiently recover heat energy from unused waste heat and reuse it for various heating and cooling processes, mainly in the industrial sector. High-temperature steam-generating heat pumps for efficient heating and ejector cooling systems for efficient cooling are expected to save energy and reduce greenhouse gas emissions from thermal processes in the food and beverage, automobile, chemical, semiconductor, and data center industries.

① まえがき

日本政府は 2030 年の温室効果ガスの排出量を 2013 年に対して 46% 削減する目標を掲げ、2050 年までのカーボンニュートラルの実現を目指して、官民上げて脱炭素化に取り組んでいる。国内のエネルギー政策の基本方針として、カーボンニュートラルに向けた産業部門の取組みを図 1 に示す。産業部門では、製造プロセスに加えて、熱・燃料での新たな脱炭素技術の取組みとして、電化、特に産業用ヒートポンプを用いた熱プロセスの脱炭素化、省エネルギー（省エネ）化のニーズが高まっている。⁽¹⁾

一方で、国内の一次エネルギーと未利用熱エネルギーとの関係を図 2 に示す。一次エネルギーの約 2/3 が未利用の熱エネルギーとして失われていることから、その未利用な熱エネルギーを効率よく回収し、利活用する技術が注目されている。⁽²⁾

本稿では、熱プロセスの電化に貢献する排熱回収・利用技術について述べる。

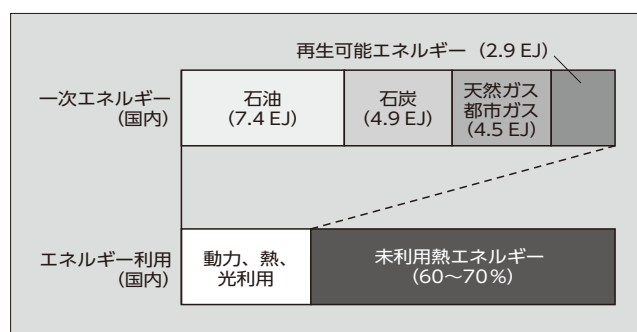


図 2 一次エネルギーと未利用熱エネルギーとの関係⁽³⁾

② 熱プロセスの事例と課題

富士電機では、長年にわたり自動販売機に適用して培ってきたヒートポンプ技術を独自に発展させ、主に産業分野における未利用エネルギーから効率的に熱エネルギーを回収し、産業分野のさまざまな加熱プロセス、冷熱プロセスに再利用する排熱回収技術、電化技術に取り組んでいる。図 3 に示す排熱回収型の 120℃蒸気発生ヒートポンプ「FHP-30」は、ボイラと比較して低圧蒸気ながらも、小型で分散配置可能な製品として 2018 年に市場投入し、飲料製造における殺菌工程、半導体工場でのクリーンルームの加湿工程などに導入が進んでいる。

熱プロセスの代表例として、飲料工場での殺菌工程の熱プロセスを図 4 に示す。飲料の殺菌工程は加熱と冷却とを組み合わせたプロセスとなっている。加熱には、石油やガスを燃料とする蒸気ボイラからの 130℃以上の蒸気を用いる。加熱殺菌後の蒸気は 70℃以上の排温水となり、放熱槽やクーリングタワーにより、法的な規制に則って 40℃以下まで大気中に熱を放出した後に河川や地下に

産業部門	熱・燃料	脱炭素技術		実現方法	
		電化		産業用ヒートポンプ	
製造プロセス	熱・燃料	バイオマス活用		廃液、廃材の燃料利用	
		水素化		水素の燃料利用	
		アンモニア化		アンモニアの燃料利用	
		水素還元		—	
	製造プロセス	CO ₂ 吸収		—	
		人工光合成		光触媒など	

図 1 カーボンニュートラルに向けた産業部門の取組み

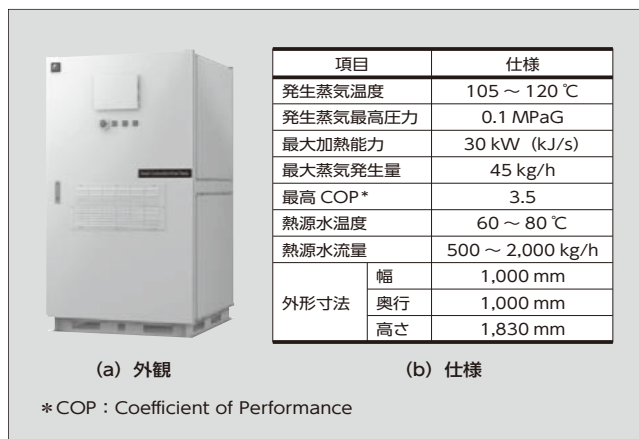


図3 排熱回収型の 120 °C 蒸気発生ヒートポンプ「FHP-30」

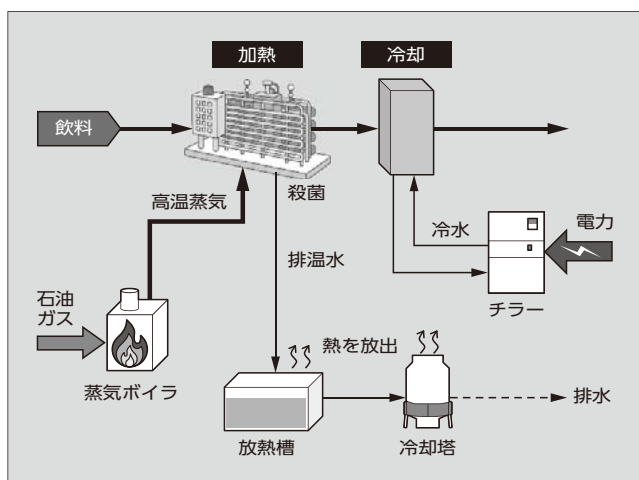


図4 飲料工場での殺菌工程の熱プロセス

排水している。冷却の熱プロセスでは、加熱殺菌後に高温となった飲料をチラーからの 10 °C 以下の大量の冷水を用いて、常温付近まで冷却する。

前述した飲料殺菌の熱プロセスにおいて、課題であるエネルギーコストと CO₂ 排出量の削減を実現する手段として、図5に示す新たな飲料殺菌の熱プロセスが有効であ

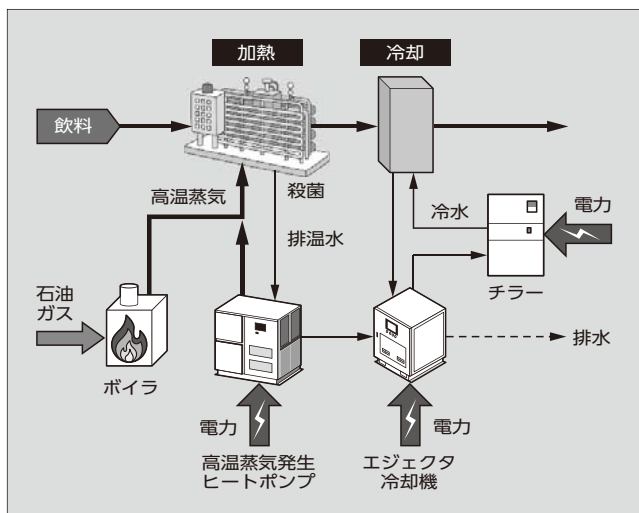


図5 新たな飲料殺菌の熱プロセス

ると考えられる。この新たな熱プロセスにおいて、加熱殺菌用の蒸気を発生する蒸気ボイラが消費する燃料を減らして CO₂ の排出量を削減するためには、高温蒸気発生ヒートポンプの併用が有効である。加熱殺菌後に排出される 70 °C 以上の排温水が持つ熱エネルギーを、ヒートポンプにより回収して高温の蒸気を発生することにより、蒸気ボイラの焚き減らしを実現できる。さらに、高温蒸気発生ヒートポンプから排出される 60 °C 以上 70 °C 未満の比較的低温の排温水は、これまでは有効活用されてこなかったが、エジェクタ冷却機を適用すれば、この低温の温排水からさらに熱エネルギーを回収することができ、チラーと組み合わせることにより冷水を高効率に生成することが可能となる。

③ 新たな排熱回収・利用技術

3.1 高温蒸気発生ヒートポンプ

図6に蒸気発生ヒートポンプの位置付けを示す。このように、従来のボイラは広い温度範囲の蒸気の生成が可能であるが、これ以上の成績係数 (COP : Coefficient of Performance) の向上は困難になっている。そこで、未利用な熱エネルギーを活用したヒートポンプを用いて、ボイラの COP (0.9 ~ 0.97) に対して、200% 以上の効率向上、COP (2.0 ~ 4.0) が実現できる 150 °C までの蒸気を生成可能な排熱回収・利用の高温蒸気発生ヒートポンプを開発している^{(4)~(6)}。

(1) 冷媒サイクル技術

図7に高温蒸気発生ヒートポンプの機構を示す。図7(a)は、給排水系を含めたシステム構成を冷媒サイクルと併せて示したものである。本システムは、排温水の排熱回収部、回収した排熱を利用して高温熱源を生成するヒートポンプ部、ならびに高温熱源で水を沸騰させる蒸気生成部から構成される。ヒートポンプへの電気入力に対する加熱出力の比である COP を向上するためには、冷媒サイクルを工夫して圧縮機動力を低減することが重要である。従来の単段のヒートポンプ部で冷媒サイクルを構成すると、排温水

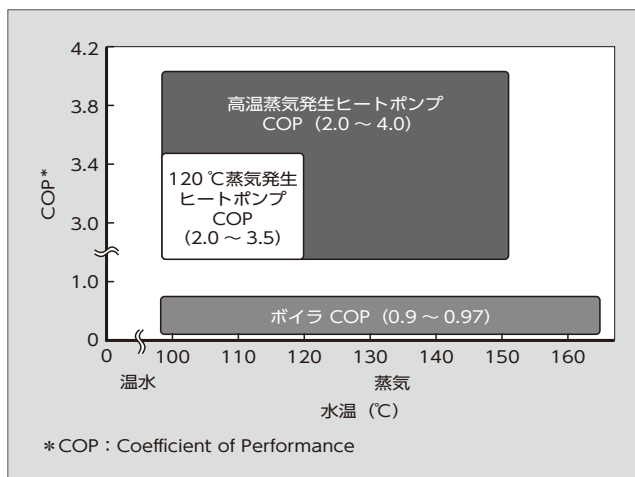


図6 蒸気発生ヒートポンプの位置付け

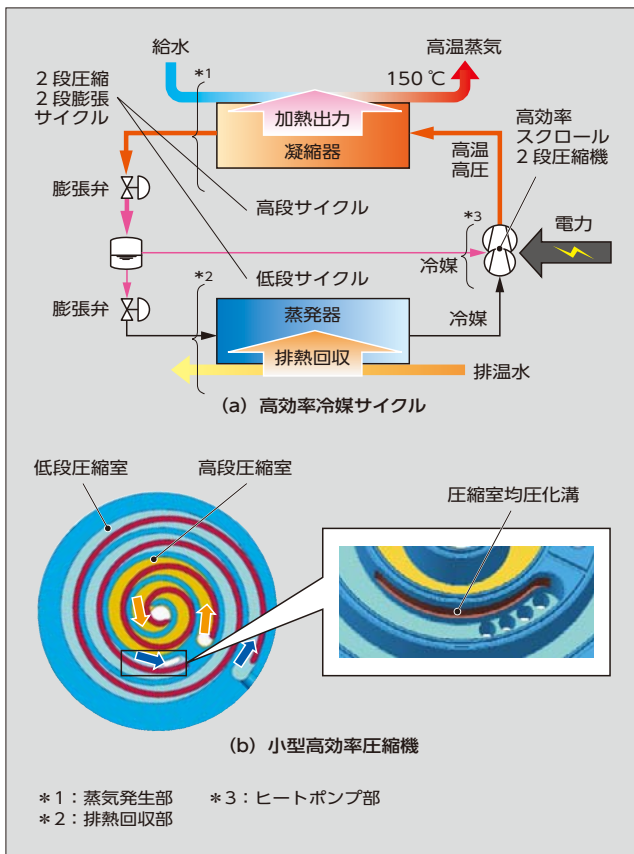


図7 高温蒸気発生ヒートポンプの機構

に加熱された冷媒を 150℃以上の高温まで圧縮する必要がある。そのために、圧縮機での圧縮比が大きくなり、圧縮動力が増加して COP が低下していた。そこで、排温水の排熱回収部と高温熱源で水を沸騰させる蒸気生成部に、ヒートポンプ部を2分割し、排熱回収部の低段サイクルと蒸気生成部の高段サイクルとでそれぞれ最小限の冷媒流量を流すことで圧縮機での圧縮比を小さくし、圧縮動力を減少する高効率な2段圧縮2段膨張サイクル技術を開発した。

(2) 2段圧縮機構

工場や施設内の熱プロセスでは、設置スペースの制約や工事コストを低減するために、排温水が生じるプロセス近傍での分散配置が可能な機器の小型化が求められる。前述した2段圧縮2段膨張サイクルを実現する手段として、従来は圧縮機2台を用いていたが、ヒートポンプが大型化する。そこで、図7(b)に示すように、圧縮機1台で2段圧縮が可能なスクロール方式の2段圧縮機を新たに開発した。スクロールの外周から中心までの間の外側を低段圧縮室、内側を高段圧縮室とした分割構造にすることで、一つの圧縮機構で2段圧縮が可能である。また、この分割構造に圧縮室均圧化溝を設けることで低段圧縮室出口付近に生じる冷媒の逆流を抑制できるため、圧縮動力の低減も可能である。

3.2 エジェクタ冷却機

図8にエジェクタ冷却機の位置付けを示す。このように、

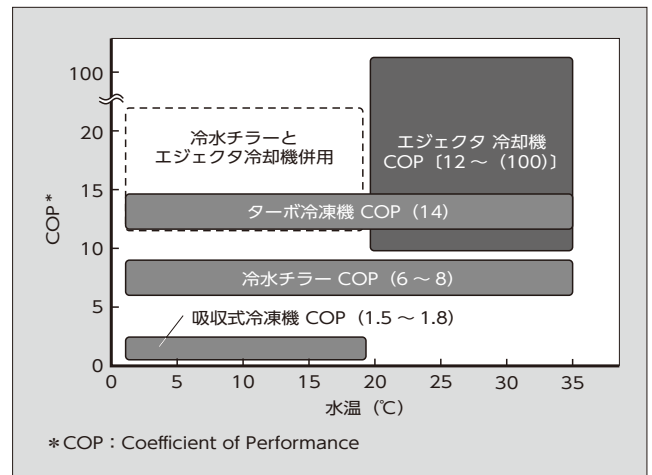


図8 エジェクタ冷却機の位置付け

従来の圧縮機を用いた冷水チラーやターボ冷凍機は広い温度範囲の冷水の生成が可能であるが、これ以上の COP の向上は困難になっている。未利用な熱エネルギーを活用した高効率冷媒サイクルの原理を用いて、冷水チラーやターボ冷凍機の COP（6～14）に対して、200%以上の効率向上、COP〔12～（100）〕が実現できる20℃以上の冷却水を生成可能な排熱回収・利用のエジェクタ冷却機を開発している。

(1) 冷媒サイクル技術

図9にエジェクタ冷却機の機構を示す。図9(a)は、エ

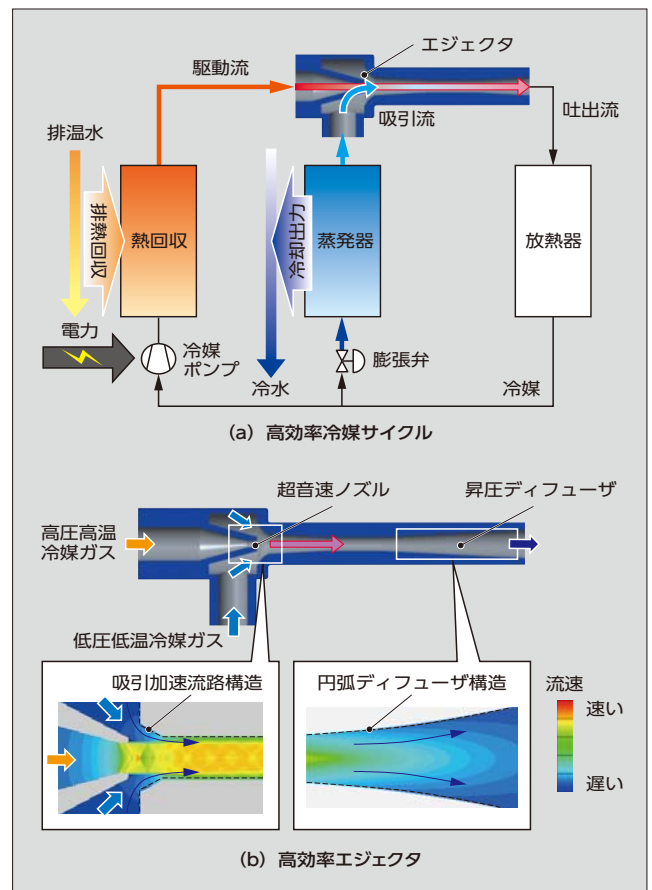


図9 エジェクタ冷却機の機構

ジェクタ冷却機の給排水系を含めたシステム構成を冷媒サイクルと併せた高効率冷媒サイクルを示したものである。エジェクタ冷却機では、エジェクタにより、排温水の排熱を利用して生成した高圧ガス冷媒の駆動流を、ノズル部で超音速まで加速して噴射することによる引き込み作用にて低圧低温の吸引流を発生させ、蒸発器で冷熱を生成する。従来の圧縮機を用いた冷水チラーに比べて、低温の冷水を生成するエジェクタへの電気入力に対する冷却出力の比である COP を高くすることが可能である。さらに、排温水温度の変化により冷却性能や COP が大きく影響を受けないように、エジェクタ冷却機での高圧ガス冷媒の駆動流と低圧低温の吸引流との最適な流量を実現する制御技術も開発した。

また、この手法では摺動（しゅうどう）部品を搭載する従来の圧縮機を使わないので、信頼性を高めることも可能である。

(2) エジェクタ

エジェクタ冷却機の COP を高めるため、エジェクタ本体の高効率化にも取り組んでいる。図 9 (b) に示すようにエジェクタ内部の超音速の流れに起因する摩擦損失に着目し、これを低減するために超音速ノズル出口で合流する吸引流を加速する流路構造、昇圧ディフューザでの速度分布均一化となる円弧ディフューザ構造を新たに開発した。これにより、従来のエジェクタに比べて、吸引流量を向上する高効率なエジェクタを実現した。

[4] あとがき

熱プロセスの電化に貢献する排熱回収・利用技術について述べた。高効率な加熱を実現する高温蒸気発生ヒートポンプ、および高効率な冷却を実現するエジェクタ冷却機により、食品、飲料、自動車、化学、半導体、データセンターなど熱プロセスにおける省エネルギー、温室効果ガスの削減を進めることにより、カーボンニュートラルの実現に貢献する所存である。

参考文献

(1) “エネルギー政策の基本的方向性について”. 資源エネルギー

庁. 2022.7.28. https://www.expo2025.or.jp/wp-content/uploads/220726_1-5.pdf, (参照 2023-11-08).

(2) “未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発中間評価報告書”. 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構第63回研究評価委員会. 2021.1. <https://www.nedo.go.jp/content/100927301.pdf>, (参照 2023-11-08).

(3) “平成30年度（2018年度）におけるエネルギー需給実績（確報）”. 資源エネルギー庁. 2020.4. https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/stte_030.pdf, (参照 2023-11-08).

(4) 安嶋賢哲、岩崎正道. 地産地消型の排熱回収蒸気発生ヒートポンプ. 計測技術. 日本工業出版. 2019, no.1. https://www.nikko-pb.co.jp/products/detail.php?product_id=4493, (参照 2023-11-08).

(5) 安嶋賢哲、岩崎正道. 排熱回収高温蒸気発生ヒートポンプの開発状況. 電気評論. 3月号. 2019, p.50.

(6) 山口貴久、安嶋賢哲. 排熱回収型蒸気発生ヒートポンプ. BE建築設備. 9月号. 2022, p.1.



岩崎 正道

ヒートポンプの研究・開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所エネルギー技術研究センター機械システム技術研究部長。日本機械学会会員、日本伝熱学会会員。



白井 英登

エネルギーマネジメントのエンジニアリング業務およびシステム開発に従事。現在、富士電機株式会社インダストリー事業本部情報ソリューション事業部 DX 推進室システム開発部長。技術士（電気電子部門）、電気学会会員。日本冷凍空調学会会員。



安嶋 賢哲

ヒートポンプの研究・開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所エネルギー技術研究センター機械システム技術研究部主任。日本冷凍空調学会会員。

水素・アンモニアの普及を支える計測技術

Measurement Technology for Increasing Use of Hydrogen and Ammonia

小泉 和裕 KOIZUMI, Kazuhiro

山内 芳准 YAMAUCHI, Hojun

武田 直希 TAKEDA, Naoki

カーボンニュートラル実現に向けて拡大する水素・アンモニアの利用には、ガス濃度や流量の測定は欠かせない。そこで、光技術、超音波技術、微弱信号処理技術を駆使して水素・アンモニア向け計測機器の開発を進めている。ガス分析計では、低濃度を高精度で測定する高感度化技術、ならびに複数のガス成分を同時に測定する多成分測定技術を、流量計では、液体水素を測定対象とし、極低温の気液混相状態を高精度で測定する混相流量計測技術を開発している。これらの多様な計測技術で、水素・アンモニアの普及に貢献する。

Increasing use of hydrogen and ammonia to achieve carbon neutrality needs the measurement of gas concentrations and flow rate. Fuji Electric is thus developing measurement instruments for hydrogen and ammonia using its optical, ultrasonic, and small signal processing technologies. For gas analyzers, we have developed a high-sensitivity technology to measure low concentrations with high accuracy, as well as a multi-component measurement technology to measure multiple gas concentrations simultaneously. For flowmeters, we have developed a multiphase flow measurement technology for liquid hydrogen to highly accurately measure gas-liquid multiphase states at extremely low temperatures. With these various measurement technologies, Fuji Electric will contribute to the increasing use of hydrogen and ammonia.

① まえがき

カーボンニュートラルの実現に向けて、化石燃料に変わり水素・アンモニアなどの新しいエネルギーの利用が世界的に推進されている。2023年9月に開催された国際会議“水素閣僚会議 2023”で、水素について2030年までに世界全体で活用する量を1億5,000万tに増やす目標が設定された。発電分野の導入量が堅調に増加するとともに、水素還元製鉄をはじめとする産業分野、船舶・航空機分野の利用も大きく拡大することが予想されている。水素・アンモニアの安全、効率的な利用には、ガス濃度や流量の測定は欠かすことができない。このような要求に対応するため、富士電機では、コア技術である光技術、超音波技術、微弱信号処理技術を駆使して水素・アンモニア向け計測機器の開発を進めている。本稿では、水素・アンモニアの普及を支える計測技術について述べる。

② 水素・アンモニアを利用する上での課題

鉄鋼の生産において、従来のコークスに替えて水素を利用する水素還元製鉄の実用化が検討されている⁽¹⁾。その水素の供給源として、他の工程で生じる副生ガスから水素を取り出すことも検討されている。このような水素利用プロセスを実現するには、水素ガス濃度のリアルタイム測定が必要となる。

燃やしてもCO₂を発生しないアンモニアを燃料とする⁽²⁾発電設備や船舶用エンジンの検討も進んでいる。これらの用途では、毒性のあるアンモニアを扱うために、配管からの漏えい検知や、燃焼しきれずに排出されるアンモニアスリップの測定、アンモニアの窒素に起因する窒素酸化物の排出監視などの検出技術が求められる。

また、水素・アンモニアの製造、輸送、貯蔵の各段階では、流量を高精度に測定することが必要であり、特に極低温流体で混相流になりやすい液体水素向け流量計の実現が望まれている。そこで、水素・アンモニア向けガス分析技術、および液体水素向け混相流量計測技術について述べる。

③ 水素・アンモニア向けガス分析技術

3.1 現行技術の課題

以前から、プラントの排ガス計測には光式ガス分析計が広く適用されている。光源にレーザを用いたレーザ式ガス分析計は、ダクトに直接取り付けることが可能であり、高温でダストの多い排ガスに対しても短時間で測定でき、メンテナンス頻度が少ないといった利点を備える。図1に、富士電機のレーザ式ガス分析計「ZSS」の外観を、図2にその測定原理を示す。発光部から射出されたレーザ光は煙道内の測定ガス濃度に応じて吸収され、受光部に到達する。レーザは単一波長で発光するが、その波長をレーザの駆動電流や温度を変化させることで変調することができる。測定対象ガスの吸収スペクトルを中心に一定周期で波長を変

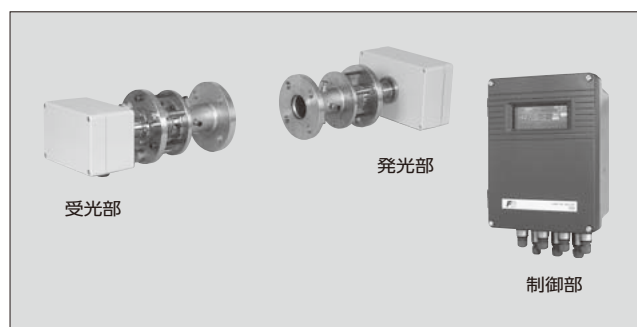


図1 レーザ式ガス分析計「ZSS」

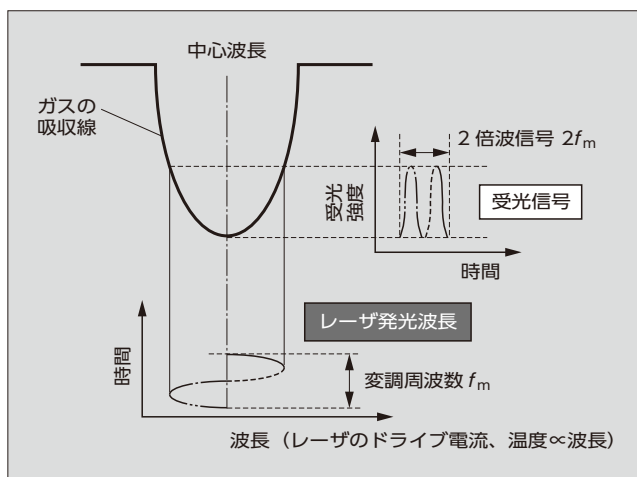


図2 レーザ式ガス分析計の測定原理

調して照射すると、周波数特性を持つ受光信号が得られ、吸収による微弱な減衰信号を周波数成分として取り出すことで精度良くガス濃度を測定できる。

現行のガス分析計の測定対象である O_2 、 CO 、 CO_2 などと比べて、水素は赤外線の吸収強度が低いので、水素を測定するには高感度化が課題となる。アンモニアの場合は、漏えいがないことを確認するために数 ppm 以下の極めて低い濃度を検出することが求められるので、こちらも高感度化が課題となる。また、水素に含まれる不純物の測定や、アンモニア燃焼時の排ガス成分の監視では、対象とするガス成分が複数存在するため、それらを同時に測定する多成分計測が課題となる。

3.2 高感度化技術

(1) ノイズ低減

レーザ式ガス分析計におけるノイズ除去前のガス吸収信号波形の例を図3に示す。ガス吸収信号には、電気ノイズ、光ノイズなど、さまざまなノイズが重畳されており、高感度測定の妨げになっている。これらのノイズの周波数は信号に比べて高い場合が多いので、このノイズを除去するためにローパスフィルタを用いる場合が多い。しかしながら、ガス吸収波形は局在した単一パルス波形となっており、そ

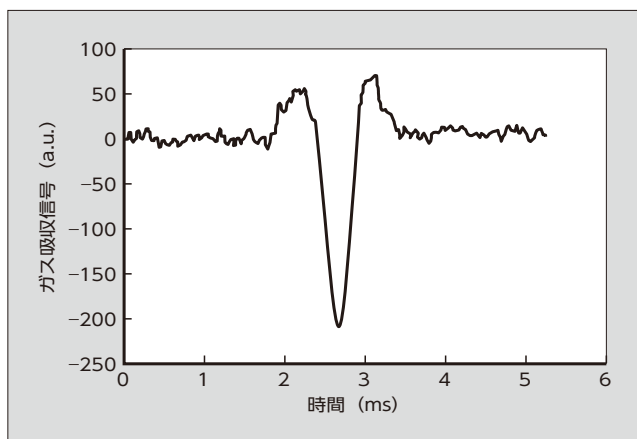


図3 ノイズ除去前のガス吸収信号波形の例

の周波数成分は広帯域であるため、ローパスフィルタを適用すると信号成分も減少してしまう。これを解決するため、画像処理の分野などで適用されているウェーブレット変換の適用を検討している。

ウェーブレット変換とは、信号や画像データを解析するための数学的手法の一つで、ウェーブレット関数と呼ばれる局在した波形を用いて、データを異なるスケール（解像度）と位置で表現することが特徴である。ウェーブレット変換は時間と周波数の両方の情報を得ることができるため、信号の局所的な特徴を捉えるのに優れ、信号とノイズの分離に適している。ウェーブレット関数としてガス吸収波形に類似したトップハット型関数を選択し、ガス吸収波形をウェーブレット変換してノイズ領域を削除した後、逆ウェーブレット変換を行うことにより、信号の特徴を保持したままノイズを除去することができる。図4に、ノイズ除去後のガス吸収信号波形の例を示す。図4(a)は、従来方式のローパスフィルタ処理でノイズを除去した信号波形であり、図4(b)は、ウェーブレット変換でノイズを除去した信号波形である。従来方式と比較すると、波形の振幅を維持した状態でノイズを除去できている。この技術により、ガス濃度測定の高感度化を実現することができる。

(2) 信号強度の増強

レーザ式ガス分析計は、受光部と発光部の間に存在する測定対象ガスによるレーザ光の吸収を利用するため、受光部と発光部間の光路長が長いほど信号である吸収強度が大きくなる。従来の排ガス測定分野では、測定を行う煙道の直径が1 m以上であったため光路長を十分に確保する

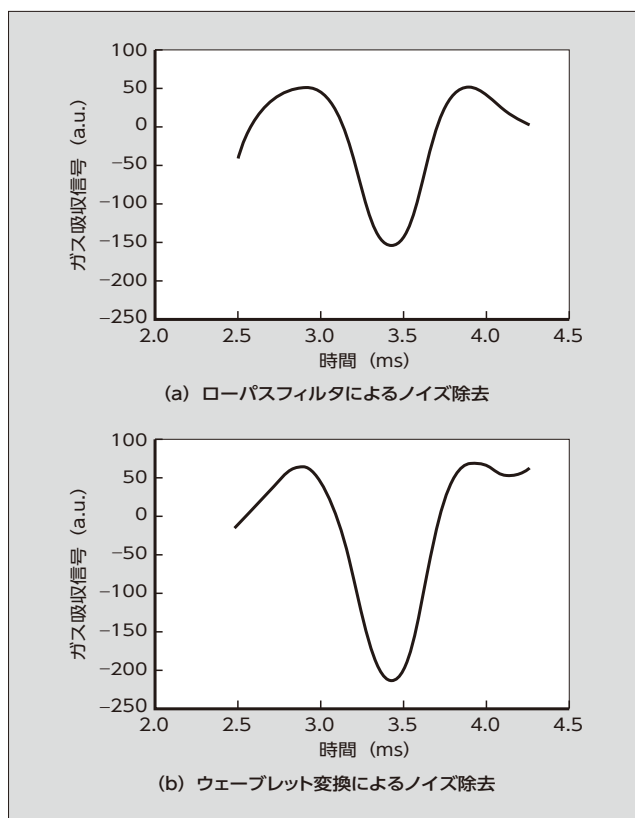


図4 ノイズ除去後のガス吸収信号波形の例

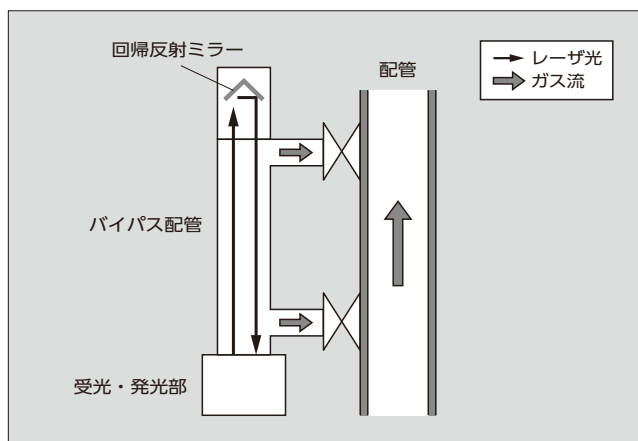


図5 バイパス配管方式回帰反射型ガス分析計の構成

ことができた。一方、水素・アンモニアの測定では、一般的に配管径が小さく光路長を確保できない場合が多いので、光路長を拡大して測定感度を確保する構成を検討し、バイパス配管方式と回帰反射型光路を組み合わせた構成を開発している。図5にバイパス配管方式回帰反射型ガス分析計の構成を示す。受光部と発光部を一体化し、受光・発光部と対向した位置に回帰反射ミラーを設けてバイパス配管内で光を回帰反射させて光路長を確保することにより、高感度化を実現する。

3.3 多成分測定技術

現行のレーザ式ガス分析計に適用しているレーザの発光は単一波長であるため、基本的に測定できるガス成分は一つに限定される。複数のガス成分を測定するためには、レーザを複数搭載することになり、現実的でなかった。この問題を解決するため、光源の波長を広帯域化できる光周波数コム（光コム）の適用を検討している。

光コムは、長さの国家標準にも採用された“光のもののさし”⁽⁴⁾である。図6に光コムの発光スペクトルの模式図を示す。このように、多数の周波数スペクトル（波長）が一定間隔で並んだ櫛状（くしじょう）（コム形）のスペクトルを持った光源であり、さまざまな波長のレーザが集まった光源と捉えることができる。

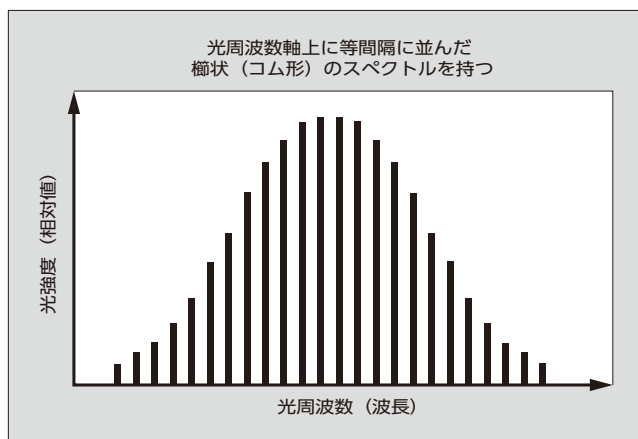


図6 光コムの発光スペクトル（模式図）

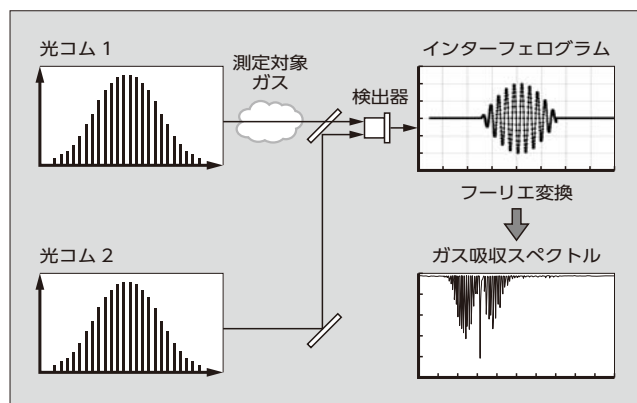


図7 デュアルコム分光法によるガス濃度測定の実理

光コムをガス濃度測定に適用する場合、光コムを二つ使用するデュアルコム分光法を用いる。図7に、デュアルコム分光法によるガス濃度測定の実理を示す。デュアルコム分光法は、波長がわずかに異なる二つの光コムの干渉計測によって得られるインターフェログラムをフーリエ変換することで、ガス吸収スペクトルを得る。このスペクトル強度⁽⁵⁾から測定対象ガスの濃度を測定することができる。

④ 液体水素向け混相流量計測技術

4.1 現行技術の課題

配管内を流れる純水、薬液、油などの液体、あるいは空気や飽和蒸気などの気体の流量を測定する手段として、超音波流量計が普及している。図8に伝搬時間差方式による流量測定の実理を示す。これは超音波流量計の測定原理でもある。上流側の超音波センサ1から下流側の超音波センサ2に超音波パルスを発信し、超音波の伝搬時間 T_1 を測定する。さらに、下流側の超音波センサ2から上流側の超音波センサ1に超音波パルスを発信し超音波の伝搬時間 T_2 を測定する。この T_1 と T_2 の伝搬時間の差から流量を算出することができる。製品の一例として、富士電機が提供している超音波流量計「M-Flow PW」の外観を図9に示す。既設配管への取付けが容易であることを特徴としている。

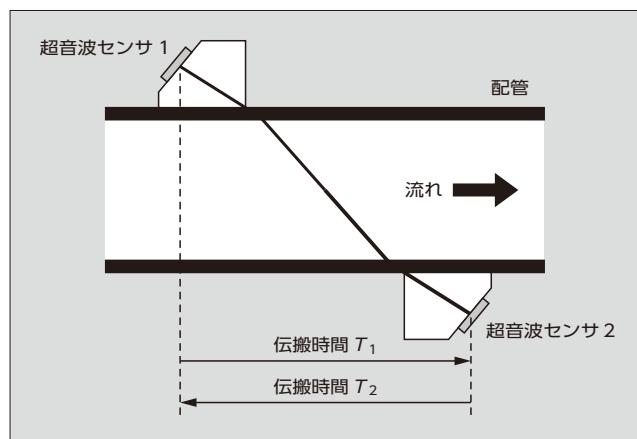


図8 伝搬時間差方式による流量測定の実理



図9 超音波流量計「M-Flow PW」

水素・アンモニアが広く利用される際には、液体で輸送し貯蔵されることが想定される。特に、液体水素は -253°C の極低温であり、圧縮性が高いため、圧力や温度の変動で容易に液体から気体、気体から液体に変化する。そのため、配管内では液体の水素だけでなく気泡となった気体の水素が混在する状態（混相流）が想定される。超音波による伝搬時間差方式の流量計測では、流体中の気泡量が多くなると超音波の到達確率が低下し、測定が困難となる。そこで、混相流に対応できる流量計測技術の確立が課題となる。

4.2 混相流の流量計測技術

混相流の流量を計測するために、測定原理の異なる二つの方式を組み合わせる方法を検討している。図10に、パルスドップラー方式による流量測定の方法を示す。超音波センサから発信された超音波パルスが液体中の気泡から反射されて戻り受信し、ドップラー周波数が流速で変化することを利用して流速分布を求める。この流速分布から演算によって流量を測定する。したがって、気泡があることで測定することができるパルスドップラー方式は、気泡がない状態でより精度良く測定することができる伝搬時間差方式と相互補完関係にある⁽⁶⁾。

流体中の気泡の量を判定し、その結果に応じて前述のパルスドップラー方式と伝搬時間差方式を切り替えて測定するために、ボイド率センサを併用する。図11に混相流量計の構成を示す。このように、ボイド率センサは一對の電極から構成され、この電極間の静電容量の変化から、混相

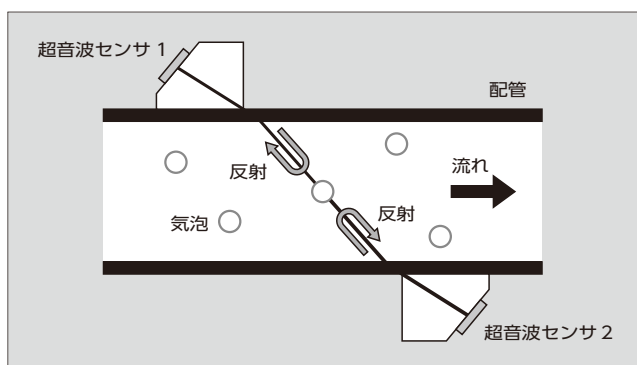


図10 パルスドップラー方式による流量測定の方法

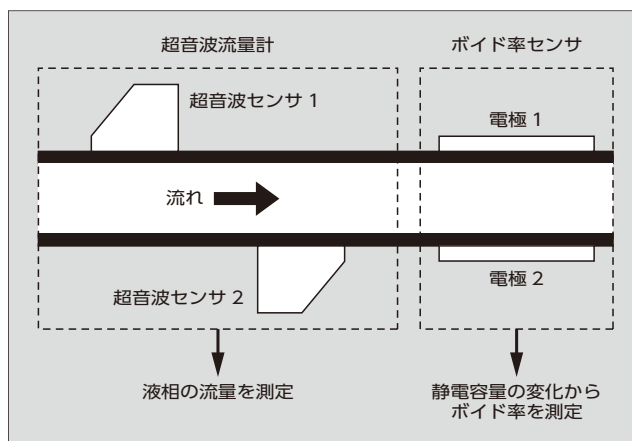


図11 混相流量計の構成

流体の単位体積に占める気体の比率であるボイド率を測定する。ボイド率が低い状態では伝搬時間差方式により流量を測定し、ボイド率が高い状態では、気泡からの反射波で流量を測定するパルスドップラー方式に切り替えることにより、混相流の流量を安定して測定することが可能になる。

5 あとがき

カーボンニュートラルの実現に向けて、気運が高まっている水素・アンモニアの利用拡大を実現する上で欠かすことのできない計測技術について述べた。これらの実用化を目指して、基本的な性能を達成することはもとより、ガス分析計では防爆対策を、流量計では極低温に耐える材料や構造を、それぞれ確立するための開発にも引き続き取り組むことを計画している。今後もコンポーネントからシステムの構築まで、お客さまの課題解決に向けた計測ソリューションを提案していく所存である。

参考文献

- (1) “製鉄プロセスにおける水素活用”. NEDO. <https://green-innovation.nedo.go.jp/project/utilization-hydrogen-steelmaking/>, (参照 2023-07-18).
- (2) “燃料アンモニアサプライチェーンの構築”. NEDO. <https://green-innovation.nedo.go.jp/project/building-fuel-ammonia-supply-chain/>, (参照 2023-07-18).
- (3) 小西英之ほか. 省エネルギーに貢献する直接挿入レーザー方式ガス分析計「ZSS」. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.1, p.59-62.
- (4) “国家標準「光周波数コム装置」”. 産業技術総合研究所. <https://unit.aist.go.jp/ripm/ofmes-g/research.html>, (参照 2023-07-18).
- (5) Yumoto, T. et al. All-polarization-maintaining dual-comb fiber laser with mechanically shared cavity configuration and micro-optic component. Optics Continuum. 2023, vol.2, Issue 8, p.1867-1874.
- (6) 矢尾博信ほか. ハイブリッド超音波流量計. 富士時報. 2004, vol.77, no.6, p.432-435.

**小泉 和裕**

計測機器の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所エネルギー技術研究センターセンシング技術研究部長。日本エアロゾル学会会員。

**武田 直希**

計測機器の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所エネルギー技術研究センターセンシング技術研究部主任。日本エアロゾル学会会員。

**山内 芳准**

計測機器の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所エネルギー技術研究センターセンシング技術研究部主査。電気学会会員。



LED 照明用 第 4 世代臨界モード PFC 制御 IC 「FA1B10N」

“FA1B10N” 4th-Generation Critical Mode PFC Control IC for LED Lighting

藪崎 純* YABUSAKI, Jun

中島 洋至* NAKAJIMA, Hiroyuki

矢口 幸宏* YAGUCHI, Yukihiro

電子機器の小型・軽量化に伴い、スイッチング電源が普及している。スイッチング電源ではコンデンサインプット型の整流・平滑回路が採用されているため、AC 電源ラインに大量の高調波電流が流れる。この高調波電流の増加は、機器の動作障害や、力率の低下による無効電力の増加などの問題を発生させる。高調波電流を一定の値以下に抑えるため、国際規格 IEC 61000-3-2 において、電気・電子機器を四つのクラスに分類し、クラスごとに高調波電流の限度値を設定している。また、照明機器については、ビル設備などのシステム全体としての高調波電流規制が個別にあり、前述の規格（クラス C）を満足することに加え、全高調波ひずみ（THD^{〔注 1〕}：Total Harmonic Distortion）を規定値以下にする必要がある。一般的には THD を 10% 以下にすることが求められる。

この高調波電流を抑制し同時に力率を改善するために、スイッチング電源には、アクティブフィルタ方式の力率改善（PFC：Power Factor Correction）回路が広く使われている。

近年、LED 照明には、AC 電源を投入してから点灯するまでの時間の短縮、および取り扱う上での感電防止と、待機電力の低減が求められている。

富士電機は、これらの要求に応えるため、LED 照明用スイッチング電源に向けた第 4 世代臨界モード PFC 制御 IC 「FA1B10N」を開発した（図 1）。

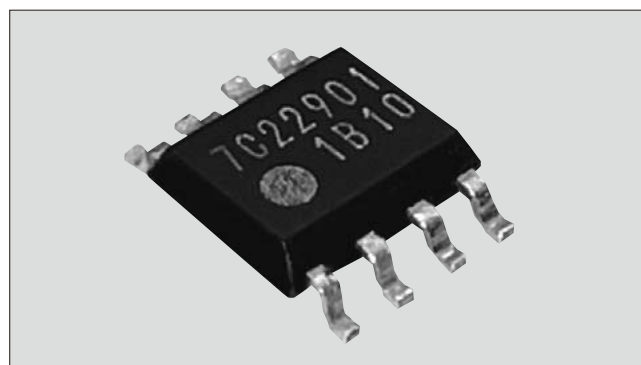


図 1 「FA1B10N」

1 特徴

FA1B10N の主な特徴は次のとおりである。

- (1) THD 改善による高調波抑制（THD<5%^{〔注 2〕}）
- (2) LED 照明点灯開始時間の短縮（<500 ms）
- (3) X キャパシタ〔電源ラインの相間（線間）に接続されているコンデンサ〕の放電機能を内蔵することによる感電防止と、待機電力の低減の両立

2 適用した技術

2.1 THD の改善

スイッチング電源は、入力部のコンデンサへの入力電流が AC 電源入力電流の位相角 10 度から 30 度の領域で急激に流れ込む。このため、図 2 に示すように入力電流がひずむことで、高調波電流が発生し、THD が悪化する。

FA1B10N は、入力電流のひずみを改善し、入力電流波形を正弦波形に近づけるために、AC 電源入力電流の位相角 90 度から 180 度にかけて、COMP 端子電圧を上昇させ、OUT 端子のオンパルス幅を広げる。OUT 端子のオンパルス幅を広げることで、位相角 90 度から 180 度の入力電流が増加する。さらに、位相角 10 度から 30 度

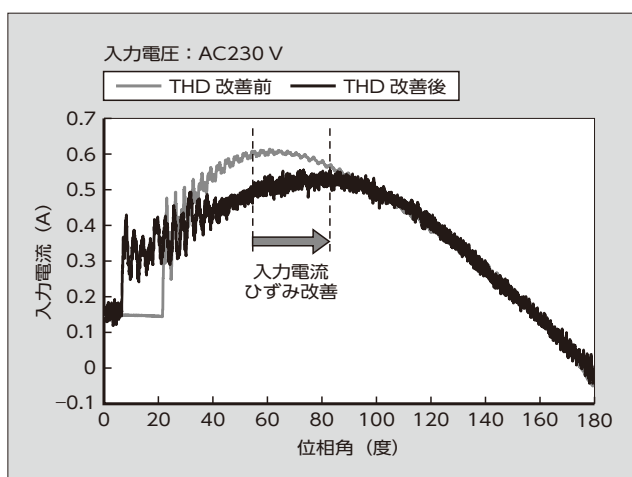


図 2 THD の改善

〔注 1〕 高調波成分の実効値の総和と、基本波成分の実効値の比を表した特性値 $THD = \sqrt{(\sum_{h=2}^{40} I_h^2) / I_1}$

〔注 2〕 AC 入力電圧 115 V、230 V で負荷 ≧ 50% の場合

* 富士電機株式会社半導体事業本部産業事業部産業設計第二部

領域で OUT 端子の出力を停止させ、OUT 端子のスイッチングによる入力電流の増加を削減する。また、位相角 30 度から 40 度領域でのスイッチング再開時に OUT 端子のスイッチング周波数を下げること、入力電流の急な変化を防止する。

これらの動作により入力電流波形を正弦波形に近づけることで、高調波電流の発生を抑え、THD を改善する。

2.2 起動時間短縮

LED 照明は、点灯するまでの時間の短縮が求められる。

これまでは、後段の LLC コンバータ制御 IC の起動回路から PFC 制御 IC に電源供給を行っていた。そのため、LLC コンバータ制御 IC の起動回路からの電源供給が不十分な場合、高速起動が困難であった。

FA1B10N はこの問題を解決するため、VH 端子を入力とする起動回路を内蔵し、高速起動を実現した。図 3 に FA1B10N の代表回路例（AC 入力電圧 90 ～ 305 V、DC 出力電圧 430 V、出力 150 W）を示す。

2.3 安全性向上および待機電力低減

スイッチング電源で発生する伝導ノイズの電源ラインへの流出を低減するため、図 3 に示す X キャパシタ (C_x) を接続する。AC 電源遮断後の C_x の残留電荷による感電を防止するため、国際安全規格 IEC 62368 にて、 C_x の電荷を放電する規格が定められている。この規格を満足するため、従来は図 4 に示す放電抵抗 (R_x) による C_x の放電回路が必要となるが、 R_x により数十 mW の電力損失が発生し、待機電力が増加していた。

そこで、FA1B10N は、X キャパシタ放電機能を内蔵した。VH 端子で AC 電源遮断を検出し、IC 内部の放電ス

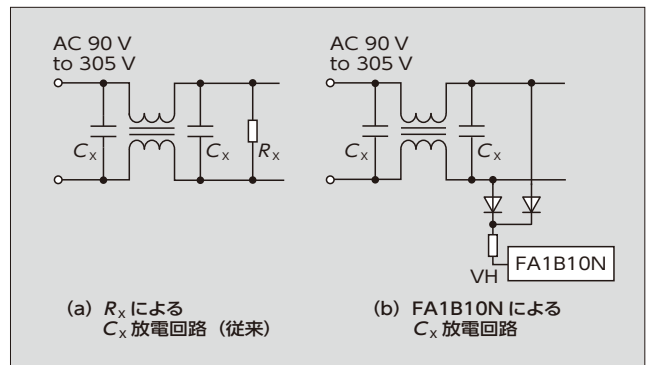


図 4 X キャパシタ (C_x) 放電回路

イッチを使って C_x を放電することで、IEC 62368 を満足する。さらに、 R_x を削減することにより待機電力を低減した。

③ 適用事例

図 3 の代表回路例に従来の IC と、FA1B10N を載せた THD 特性 (図 5)、および、AC 電源投入からの起動時間 (図 6) の比較を示す。

図 5 に示すように、FA1B10N は従来製品に比べ THD は低く抑えられており、標準的な AC 入力電圧である 115 V と 230 V では、負荷 50 %、75 %、100 % のいずれにおいても THD は 5 % 以下となっている。

また、図 6 に示す起動時間においても AC 入力電圧 115 V、230 V、277 V、かつ定格負荷 150 W の条件で一般的な LED 照明用電源に求められる 500 ms 以下であり、従来製品に比べて 15 ～ 19 % 起動時間が短縮した。

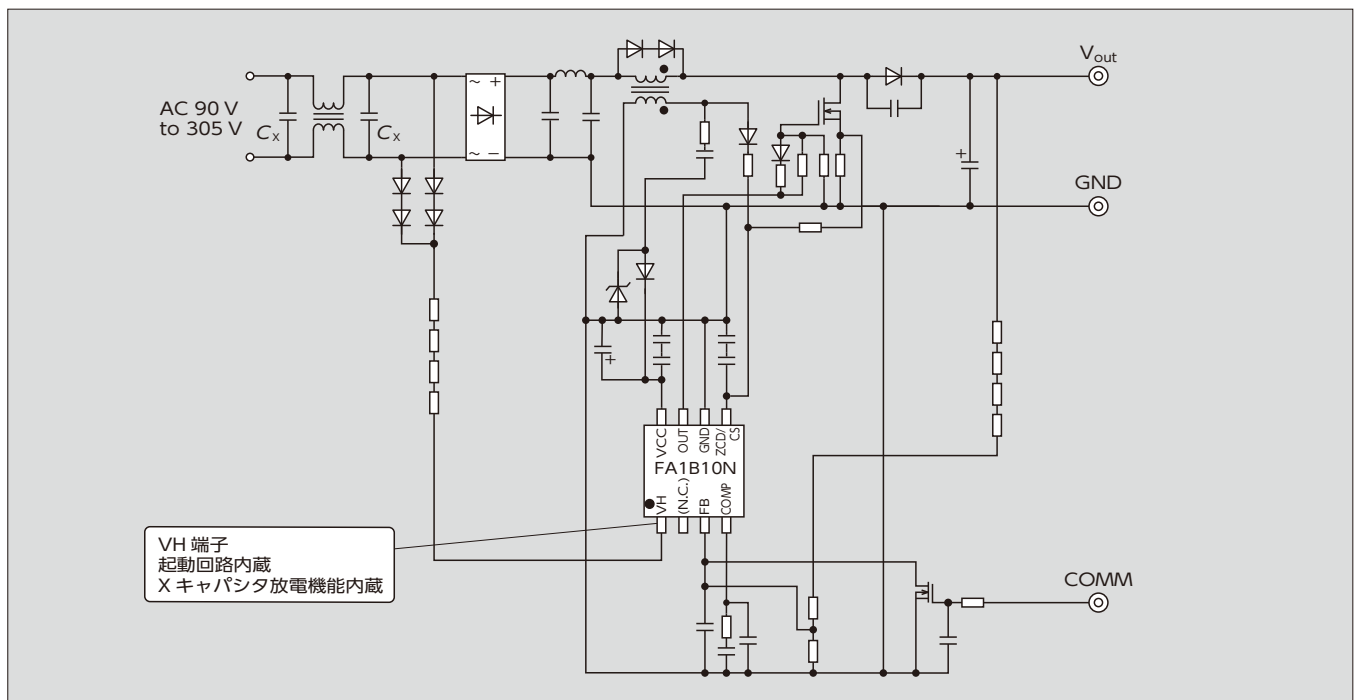


図 3 「FA1B10N」の代表回路例

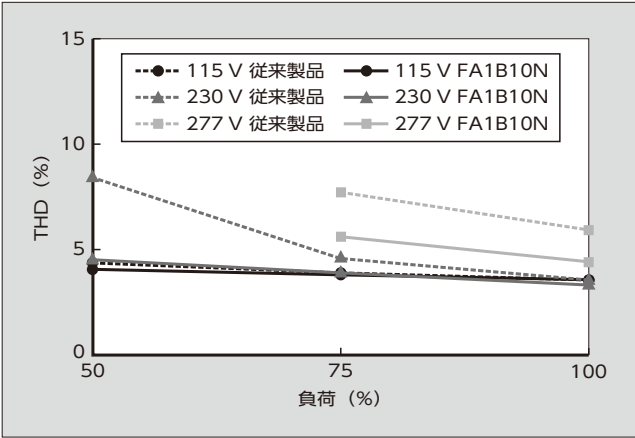


図 5 THD 特性

発売時期

2023 年 6 月

お問い合わせ先

富士電機株式会社
半導体事業本部営業統括部営業第一部
電話 (03) 5435-7018

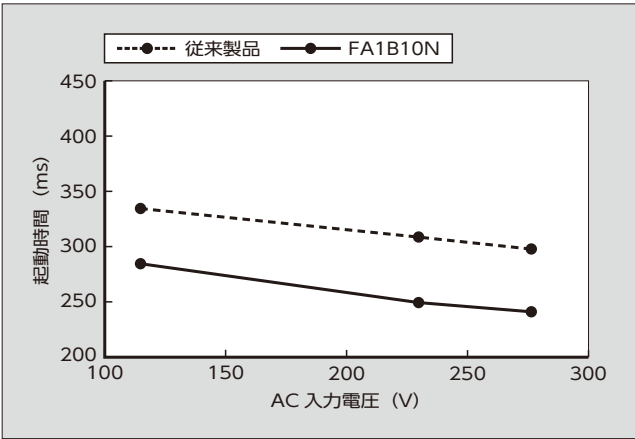


図 6 起動時間

新製品紹介



デザインを一新した「コマンドスイッチ」 ($\phi 16$ 系、 $\phi 22$ 系)

“Command Switches” Refined in Appearance Design ($\phi 16$ Series, $\phi 22$ Series)

高野 芳弘* TAKANO, Yoshihiro

「コマンドスイッチ」は、富士電機の操作用スイッチの商品名で、産業界の自動化や工作機械などの発展に伴い、HMI（Human Machine Interface）を担う機器として成長してきた。

近年、工作機械メーカーなどにおいては商品価値を向上させるため、製品構成要素であるコマンドスイッチに対しても従来の FQCD（Function：機能、Quality：品質、Cost：価格、Delivery：納期）だけでなくデザイン要素が新たに要求されるようになり、次世代の機械や装置などに採用されるための重要な要素となっている。

$\phi 16$ 系コマンドスイッチは、1978 年の発売当初からデザインを変更することなく 350 種類以上の機種を生産してきたが、44 年を経て、ユーザーからデザインの刷新を求められるようになってきた。このたび富士電機は、次世代の機械、装置にも親和するデザインに製品を一新して発売した。

1 特徴

1.1 デザインの一新

デザインを一新してスタイリッシュで魅力的なものとし、使用される機械装置などとの親和性が向上した（意匠登録済み）。新しいデザインのコマンドスイッチ（ $\phi 16$ 系：定格絶縁電圧 AC/DC 250V）を図 1 に、コマンドスイッチ（ $\phi 22$ 系：定格絶縁電圧 AC/DC 600V）を図 2 に示す。

部品の表面には光沢とつやけしを使い分け、質感を変化させて高級感が出るように考慮した。さらに、工作機械メーカーへのアンケート結果に基づいて、市場動向、工作機械のデザインの推移を見極め、多くの案の中から今回のデザインを選定した。

1.2 パネル突出量の小さい薄形シリーズの追加

パネル突出量の小さいデザインは、これからのスイッチのトレンドとなっており、誤操作の防止やパネルをスマートに見せる効果がある。図 3 に薄形シリーズのパネル取付例を示す。

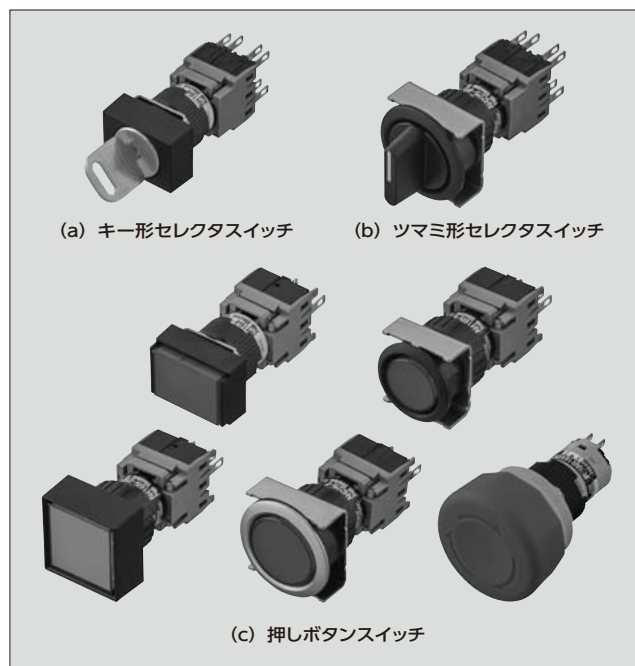


図 1 「コマンドスイッチ」
($\phi 16$ 系：定格絶縁電圧 AC/DC 250V)



図 2 「コマンドスイッチ」
($\phi 22$ 系：定格絶縁電圧 AC/DC 600V)

1.3 照光面の拡大と均一面照光

照光押しボタンスイッチや表示灯は、照光面を現行品の 1.2 倍に拡大し、四隅まで明るい均一面照光によりボタンに記載した情報の視認性が向上している。

* 富士電機機器制御株式会社開発統括部開閉制御開発部

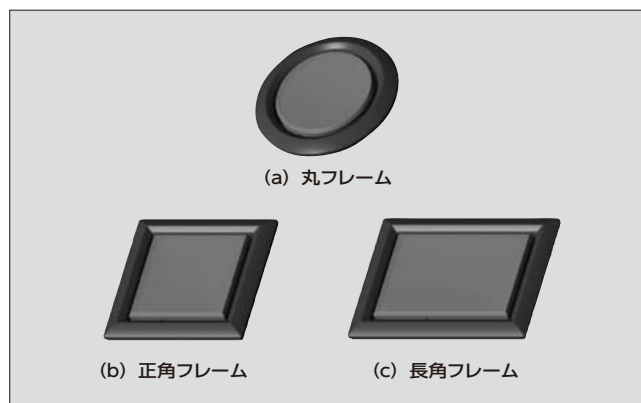


図3 薄形シリーズのパネル取付例

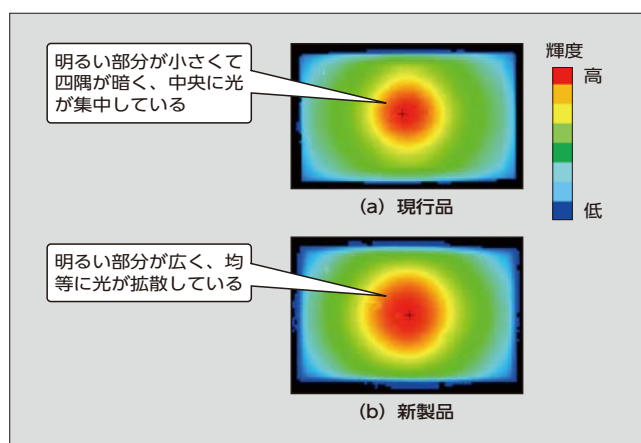


図4 長角形の照光面の輝度分布

照光の光源が中央1か所のため、長角形の場合は四隅まで均等に光を拡散させることが難しかった。

そこで、リフレクタ（反射鏡）や光を拡散させる拡散板の形状、および材料や表面処理の仕様を最適化することにより均一面照光を実現した。図4に長角形の照光面の輝度分布を示す。現行品は、中央と四隅で輝度の差が大きいため四隅が暗く、中央部が極端に明るく見える。新製品は、中央と四隅の輝度差を小さくしたので、現行品と比較すると全体的に明るく見やすくなった。

1.4 操作感触の改善

押しボタンスイッチは、ボタンの中央を緩やかな凹形状を用いて指先にフィットさせ、オペレーターが押しやすく疲れにくい形状にしている。図5にボタンの断面形状を示す。

回転操作があるツマミ形セレクトスイッチは、つまみやすく指に優しい形状にして操作性を改善した。操作するときの接点入切の感覚は、オペレーターに評判の良い現行品のクリック感を継承した。

図6に非常停止用押しボタンスイッチのボタン外周形状の改善を示す。現行品は、丸形ボタン外周の滑り止め用のローレットにごみが付着することがあった。新製品ではローレットを取り止め、代わりに部分的に多角形にすることで問題を解決した（意匠登録、特許出願済み）。

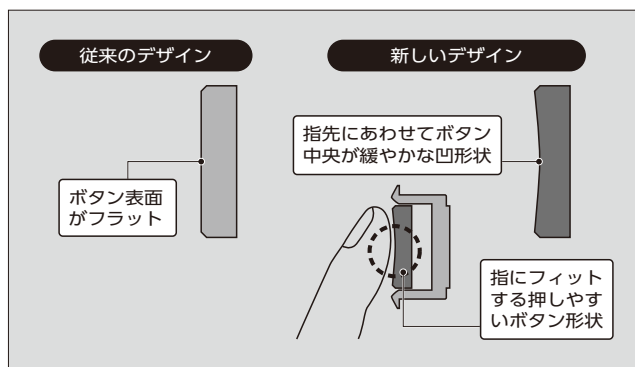


図5 押しボタンの断面形状

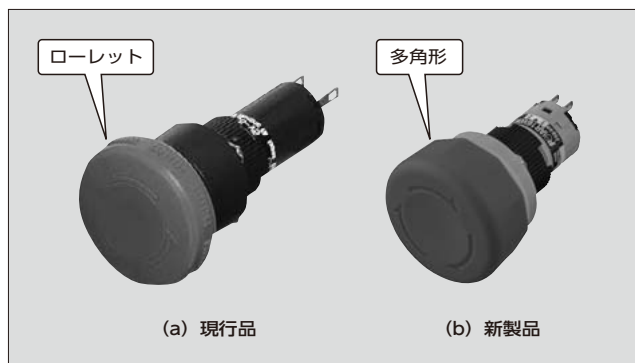


図6 非常停止用押しボタンスイッチのボタン外周形状の改善

1.5 その他の改善点

工作機械は、機能を重視した従来の無骨なデザインから、近未来的でスタイリッシュなデザインへと徐々に移行している。それらの機械に対応するため、今回のコマンドスイッチのデザインは“曲面を多用したスタイルの機械”や“シャープなスタイルの機械”など、あらゆるデザインの機械にも親和するものとした。表面の突出量を抑えた薄形シリーズは、デザイン性に優れているだけでなく、突出部に何かが当たって押してしまうというような誤操作を防止できる。また、スイッチ上部に埃（ほこり）がたまりにくい、清掃の頻度を減らすことができる。

発売時期

2022年11月

お問い合わせ先

富士電機機器制御株式会社
事業統括部業務部
電話（048）548-1408

（2023年12月7日 Web 公開）

ストライカ引外し式限流ヒューズ付高圧交流負荷開閉器

High-Voltage AC Load Break Switch with Striker-Tripped Current-Limiting Fuse

小野 簡士* ONO, Hiroshi

徳永 圭秀* TOKUNAGA, Yoshihide

高圧交流負荷開閉器（LBS：Load Break Switch）は、高圧受配電回路において負荷電流を開閉する装置のことである。中でもストライカ引外し式^{（注1）}限流ヒューズ付 LBS は、負荷電流の開閉から短絡電流の遮断に至る幅広い電流領域で開閉・保護性能を持っている。そのため、キュービクル式高圧受電設備の主遮断装置や変圧器の一次側の保護装置など、さまざまな用途で使用されている。特に、受電容量 300 kVA 以下の PF・S 形高圧受電設備に用いられる主遮断装置の多くに LBS が採用されている。

近年、「プラスチックに係る資源循環の促進等に関する法律」などにより、環境への影響を考慮した樹脂材料の使用が幅広い産業分野に求められている。産業設備においても無視することはできず、開閉器内で用いられる絶縁部品についても、廃棄やリサイクル性を考慮した材料の使用が求められている。

今回、富士電機では前述の需要を考慮したストライカ引外し式限流ヒューズ付 LBS を開発した。

1 特徴

ストライカ引外し式限流ヒューズ付 LBS 「LBS-6A/210」の外観を図1に、ストライカ引外し式限流ヒューズ付 LBS の仕様を表1に示す。

従来品は、絶縁部品に熱硬化性樹脂を採用していた。しかし、熱硬化性樹脂は成形後の再溶融が困難であるため、リサイクル性が悪いという問題があった。本開発品

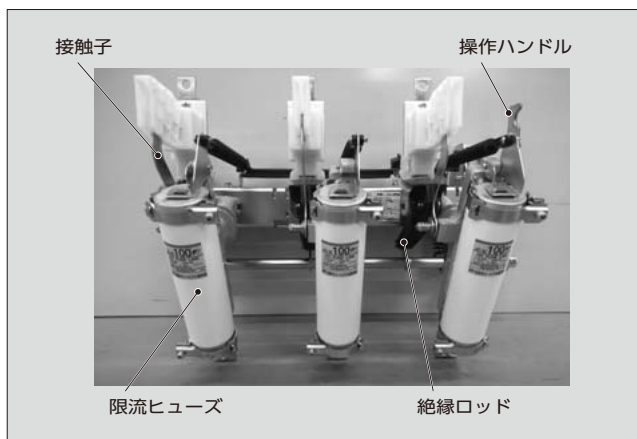


図1 「LBS-6A/210」

表1 ストライカ引外し式限流ヒューズ付 LBS の仕様

項目	仕様	
形式	LBS-6A/200 (F)	LBS-6A/210 (F)
定格電圧	3.6/7.2 kV (50/60 Hz)	
定格耐電圧	60 kV	
定格電流	200 A	
定格投入遮断電流	12.5 kA (1回)	
定格開閉容量	負荷電流 励磁電流 充電電流 コンデンサ電流	200 A (200回) 10 A (10回) 10 A (10回) 50 A (200回、 6%リアクトル付き)
過負荷遮断電流	1,100 A (1回)	
操作方式	手動フック操作	
接点構造	通電接点、アーク接点一体形	
消弧方式	細隙、ガス冷却消弧	
適用ヒューズ形式	JC-6/5 ~ 75	JS-6/100
ヒューズ定格電流	G5 ~ G75 A	G100 A
準拠規格	JIS C 4611	

では環境への影響を考慮し、絶縁ロッドなど、構造上対応可能な一部の部品について、リサイクル性がよく、材料の再資源化が可能な熱可塑性樹脂を採用した。また、RoHS 指令^{（注2）}に対応し、環境有害物質を含まないものにした。

2 適用した技術

2.1 熱可塑性樹脂の採用

富士電機では、これまでストライカ引外し式限流ヒューズ付 LBS の絶縁部品には、耐トラッキング^{（注3）}性の観点から、CTI（Comparative Tracking Index）^{（注4）}の高い材料グループ I に属する熱硬化性樹脂を採用してきた。表2に CTI の分類を示す。今回、再資源化が可能な熱可塑性樹脂を

〈注1〉ストライカ引外し式：限流ヒューズは、溶断したときに溶断表示棒が飛び出す構造となっている。この飛び出す力を利用して負荷開閉器のリンク機構を動作させ、負荷開閉器を開極する方式をいう。

〈注2〉RoHS 指令：電気・電子機器における特定有害物質の使用制限についての EU（欧州連合）の指令をいう。

〈注3〉トラッキング：絶縁物の表面にじんあいや塩分などが付着することにより導電路が形成される現象をいう。

* 富士電機機器制御株式会社開発統括部受配電開発部

表 2 CTI の分類

材料グループ	CTI
I	600≦CTI
II	400≦CTI<600
III a	175≦CTI<400

新たに採用した。これにより、材料グループは従来の“グループ I”から“グループ III a”となり、CTI は大きく低下する。耐トラッキング性能を向上させるためには、CTI の高い材料を選択するか、製品の沿面距離（2 導電部間の絶縁物の表面沿いの最小の距離）を延ばす必要があった。そこで、富士電機では沿面距離を確保する構造設計と部品形状での性能評価を実施することにより、耐トラッキング性能を満足する構造を確立した。

2.2 沿面距離を確保した構造の設計

CTI の低下を補うため、必要な最小沿面距離を求めた。JIS C 60664（低圧系統内機器の絶縁協調）で定義されているトラッキングによる障害を回避するための沿面距離を表 3 に示す。ストライカ引外し式限流ヒューズ付 LBS の定格電圧値は 3.6 kV または 7.2 kV であるため、電圧実効値 8,000 V の場合の材料グループ III a より 125 mm を沿面距離の設計指標の一つとし、構造設計を行った。

ストライカ引外し式限流ヒューズ付 LBS は屋外用配電盤にも使用されており、絶縁性能が劣化しやすい海岸沿いの塩害地域などの環境下で使用する場合がある。そ

表 3 トラッキングによる障害を回避するための沿面距離*

材料グループ	最小沿面距離 (mm)	
	電圧実効値 6,300 V	電圧実効値 8,000 V
I	80	100
II	90	110
III a	100	125

* JIS C 60664 より抜粋

〈注 4〉CTI (Comparative Tracking Index)：比較トラッキング指数の略称であり、トラッキングの起こりにくさを示す指標である。



図 2 絶縁ロッド

のため、2.2 節で定めた設計基準値に対し、さらに余裕を持った沿面距離を確保する構造とした。最終的な製品の沿面距離を決定するに当たり、溶剤を噴霧しながら絶縁性能を評価する耐トラッキング試験にて性能判断を実施した。耐トラッキング試験を実施するに当たり、JIS C 3005（ゴム・プラスチック絶縁電線試験方法）を参照し、製品形状における試験条件を設定した。耐トラッキング試験結果から、試験サンプルの沿面距離と耐トラッキング性能の相関性を判断し、熱可塑性樹脂による CTI の低下を補うために必要な沿面距離を決定した。さらに、LBS の使用環境・使用年数を考慮し、15 年相当の高温放置により劣化させた状態での試験サンプルにて耐トラッキング試験を実施し、長期使用を満足する形状を見極め、熱可塑性樹脂を使用した製品構造を確立した。絶縁部品の一つとして、接触子と操作ハンドルの連結部品である絶縁ロッドの外観を図 2 に示す。

発売時期

2023 年 2 月

お問い合わせ先

富士電機機器制御株式会社
事業統括部業務部
電話(048)548-1408

略語（本号で使った主な略語）

AC	Aggregation Coordinator	
ACB	Air Circuit – Breaker	気中遮断器
ADR	Auto Demand Response	需要抑制
AI	Artificial Intelligence	人工知能
AT	Auto Tuning	オートチューニング
BCP	Business Continuity Plan	事業継続計画
BOP	Balance of Plant	
CEMS	Community Energy Management System	地域エネルギーマネジメントシステム
C-GIS	Cubicle type Gas Insulated Switchgear	キュービクル形ガス絶縁開閉装置
CMS	Cable Management System	ケーブルマネジメントシステム
COP	Coefficient of Performance	成績係数
CTI	Comparative Tracking Index	比較トラッキング指数
DAB	Dual Active Bridge	デュアルアクティブブリッジ
DER	Distributed Energy Resources	分散型エネルギー資源
DR	Demand Response	デマンドレスポンス
EMS	Energy Management System	エネルギーマネジメントシステム
EMU	Energy Managed Unit	
EnB	Energy Baseline	エネルギーベースライン
EnPI	Energy Performance Indicator	エネルギーパフォーマンス指標
ESG	Environment Social Governance	環境・社会・ガバナンス
EV	Electric Vehicle	電気自動車
FC	Fuel Cell	燃料電池
FCV	Fuel Cell Vehicle	燃料電池車
FIP	Feed – in Premium	
FIT	Feed – in Tariff	再生可能エネルギーの固定価格買取制度
FQCD	Function、Quality、Cost、Delivery	
FWD	Free Wheeling Diode	
GFM	Grid Forming Inverter	
GX	Green Transformation	グリーントランスフォーメーション
HMI	Human Machine Interface	
ICT	Information and Communication Technology	
IEA	International Energy Agency	国際エネルギー機関
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	
IPM	Intelligent Power Module	
JEPX	Japan Electric Power Exchange	一般社団法人 日本卸電力取引所
JIT	Just – In – Time	
LBS	Load Break Switch	
LCP	Life Continuity Plan	生活継続計画
LFC	Load Frequency Control	リモート制御
LHV	Lower Heating Value	
LiC	Lithium Ion Capacitor	リチウムイオンキャパシタ
LNG	Liquefied Natural Gas	液化天然ガス
MOSFET	Metal – Oxide – Semiconductor Field – Effect Transistor	
NGR	Neutral Grounding Resistor	
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell	りん酸形燃料電池
PCS	Power Conditioning System	パワーコンディショナ
PEFC	Polymer Electrolyte Fuel Cell	固体高分子形燃料電池
PFC	Power Factor Correction	力率改善
PLC	Programmable Logic Controller	プログラマブルコントローラ
PM モータ	Permanent Magnet Synchronous Motor	永久磁石形同期電動機
PMS	Power Management System	
PMV	Predicted Mean Vote	予想平均温冷感申告
PPA	Power Purchase Agreement	
PV	Photovoltaic	太陽光発電
RA	Resource Aggregator	
RC-IGBT	Reverse – Conducting IGBT	逆導通 IGBT

RTGC	Rubber Tire Gantry Crane	
SDGs	Sustainable Development Goals	持続可能な開発目標
SFC	Static Frequency Converter	
SPD	Surge Protective Device	
SVC	Static Var Compensator	静止型無効電力補償装置
SVR	Step Voltage Regulator	ステップ型自動電圧調整器
THD	Total Harmonic Distortion	全高調波ひずみ
TR	Transformer	
TSO	Transmission System Operator	一般送配電事業者
VPP	Virtual Power Plant	バーチャルパワープラント
WES	Warehouse Execution System	

商標（本号に記載した主な商標または登録商標）

FVH	古河電池株式会社の商標または登録商標
NAS	東京電力ホールディングス株式会社および日本碍子株式会社の商標または登録商標
NAS 電池	東京電力ホールディングス株式会社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。

富士電機技報. vol.96, no.1, p.5、右側下から 15 行目
(正)

コントロールステーション

(誤)

コントローラステーション

富士電機技報. vol.96, no.1, p.28、右側 3 行目
(正)

MainGATE/MSPC

(誤)

MainGATE/SPC

富士電機技報. vol.96, no.1, p.38、表 1（FKP、FKH 列のダイヤフラム材質）
(正)

316 L_SS

(誤)

316 L

富士電機技報. vol.96, no.1, p.49、右側 14 行目
(正)

¹³⁷Cs

(誤)

137Cs

富士電機技報. vol.96, no.1, p.49、表 1、7 行目、10 行目、12 行目、p.50、表 2、6 行目、7 行目
(正)

^{137}Cs

(誤)

Cs-137

富士電機技報. vol.96, no.1, p.51、左側 19 行目
(正)

ブラウザを採用することができる。

(誤)

ブラウザを採用することができる (図 6)。

富士電機技報. vol.96, no.1, p.52、左側 10 行目、11 行目
(正)

(正) ^{241}Am 、 ^{220}Rn

(誤)

(誤) 241 Am、220Rn

富士電機技報. vol.96, no.1, p.60、表 2 の注、p.66、3 行目
(正)

Infineon Technologies AG の商標または登録商標

(誤)

Infineon Technologies AG の商標または商標登録

富士電機技報. vol.96, no.1, p.65、11 行目
(正)

Enterprise Resource Planning

(誤)

Enterprise Resources Planning

富士電機技報. vol.96, no.1, p.66、17 行目
(正)

PLCopen 協会の商標または登録商標

(誤)

PLCopen 協会の商標または商標登録



主要事業内容

エネルギー

エネルギーの安定供給、最適化、安定化に貢献します。

発電プラント

地熱発電、水力発電、燃料電池、火力発電

エネルギーマネジメント

蓄電制御システム、太陽光発電、風力発電

変電システム

変電設備、産業電源

施設・電源システム

無停電電源装置（UPS）、電機盤

器具

受配電・制御機器

設備工事

電気工事、空調設備工事

ITソリューション

ICTに関わる機器・ソフトウェア

半導体

高い品質、変換効率を実現、小型化・省エネ化に貢献します。

パワー半導体

産業分野、自動車分野

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

飲料自販機、食品・物品自販機

店舗流通

店舗設備機器、金銭機器

インダストリー

あらゆる産業分野の自動化と省エネに貢献します。

オートメーション

インバータ、モータ、サーボシステム、コントローラ、プログラマブル表示器、計測機器、センサ、FAシステム、駆動制御システム、計測制御システム

社会ソリューション

鉄道車両用駆動システム・ドアシステム、船舶用排ガス浄化システム、原子力関連設備、放射線機器・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96巻 第4号

特集 自動車電動化・エネルギーマネジメントに貢献する
パワー半導体

富士電機技報 第96巻 第3号

令和6年1月20日 印刷 令和6年1月30日 発行

編集兼発行人 中山 和哉

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

富士電機技報企画会議

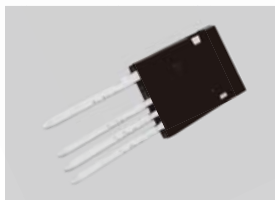
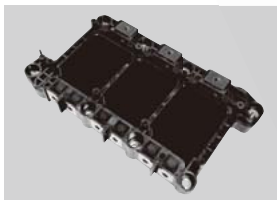
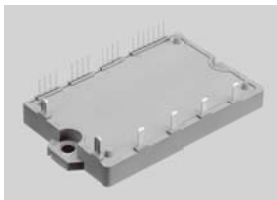
幹事	安川 和行				
企画メンバー	土屋 敏章	前田政一郎	粕谷 敏	渡部 雅教	
	松尾 壮太	片桐 源一	出野 裕	鈴木 健司	
特集委員	大賀 英治	大熊 康浩			
事務局	斎藤 哲哉	青木 信	伊藤 秀之		
編集室	藤木 徹	木村 基	小野寺拓也	小野 直樹	
	高橋 徹				

*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。

© 2024 Fuji Electric Co., Ltd., Printed in Japan（禁無断転載）

未来の集積。

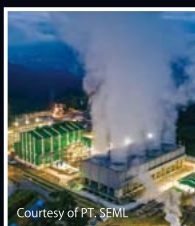
独自のパワーエレクトロニクス技術と用途の可能性を凝縮した、富士電機のパワー半導体。高耐圧・大容量化、低電力損失化、小型軽量パッケージ化を進めているこのキーデバイスは、太陽光発電、風力発電などのクリーンエネルギー分野、産業や家庭に求められる省エネルギー分野、ハイブリッドカー・電気自動車といった交通分野まで、様々な場面で活躍しています。さらに、新素材 SiC を採用した、より高性能な次世代パワー半導体を開発。富士電機は、これからもエネルギー技術を革新し、安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献していきます。



富士電機のパワー半導体



パワーエレクトロニクスを 社会のちからに、優しさに。



地熱発電プラント



パワーコンディショナ



無停電電源装置



パワー半導体



インバータ



自動販売機

サステナブルな社会の実現に貢献

FE 富士電機
Innovating Energy Technology

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。



雑誌コード 07797-1