富士電機技報　第 90 巻　第 1 号（通巻第 893 号）　2017 年 3 月 30 日発行　ISSN 2187-1817

富士電機技報

FUJI ELECTRIC JOURNAL

2017
Vol.90 No. 1

特集　持続可能な社会の実現に貢献する
創エネルギーと社会インフラソリューション

富士電機

Innovating Energy Technology

富士電機技報
FUJI ELECTRIC JOURNAL

2017
Vol.90 No. 1

特集　持続可能な社会の実現に貢献する
創エネルギーと社会インフラソリューション

持続可能な社会の実現のための CO_2 の排出量低減には，再生可能エネルギーのさらなる活用が求められています。そのための発電ソリューションや，パワーエレクトロニクス技術を駆使した電力系統安定化ソリューションの重要性がますます高まっています。

本特集では，エネルギー・環境技術の革新により，安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献している，富士電機の創エネルギーと社会インフラソリューションに関する取組み，ならびに最新技術・製品を紹介します。

表紙写真（左上から右回りおよび真ん中）

南早来変電所向け交直変換装置，他励式配電系統用 SVC，ラヘンドン地熱発電所 5 号機・6 号機の全景，上北六ヶ所太陽光発電所全景（写真提供：新むつ小川原株式会社）

目　次

特集　持続可能な社会の実現に貢献する創エネルギーと社会インフラソリューション

〔特集に寄せて〕電力システムにおける価値の変化　3（3）
荻本　和彦

〔現状と展望〕創エネルギーと社会インフラソリューションの現状と展望　4（4）
藤原　正洋

インドネシアのラヘンドン地熱発電所５号機・６号機とウルブル地熱発電所３号機・４号機　11（11）
村上　　隆　・　高宮　　淳

商業用原子力発電炉に係る新規制基準に適合した耐震配電盤　16（16）
今野　雅行　・　藤本　義雄　・　長澤　武則

DC71 MW/AC51 MW 上北六ヶ所太陽光発電所　20（20）
尻無濱 立穂　・　本田　大祐　・　久保薗 隆治

燃料電池の新展開　26（26）
青木　　信　・　堀内　義実

電圧変動問題の解決に貢献する配電系統用静止型無効電力補償装置　31（31）
小島　武彦　・　磯谷　仁志　・　山田　　真

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　36（36）
毛内　俊晴　・　須﨑　久晴　・　矢野　敬二

ガラパゴス諸島向け鉛蓄電池・リチウムイオン電池併用による電力安定化システム　42（42）
曽根　　学　・　長田　悠人

バチルス菌による新排水処理ソリューション　47（47）
田口　和之　・　佐藤　匡則　・　花井　洋輔

解　説

バチルス菌　52（52）

新製品紹介論文

車載用第３世代直接水冷型パワーモジュール　53（53）

SiC ハイブリッドモジュールを適用した北米向け大容量 UPS「UPS7300WX−T3U」　55（55）

略語・商標　58（58）

富士電機技報
FUJI ELECTRIC JOURNAL
2017
Vol.90 No. 1

Contents

Energy Creation and Social Infrastructure Solutions Contributing to Creation of Sustainable Societies

[Preface] Value Transition in a Power System 3 (3)
OGIMOTO, Kazuhiko

Energy Creation and Social Infrastructure Solutions: Current Status and Future Outlook 4 (4)
FUJIWARA, Masahiro

Units 5 and 6 at Lahendong Geothermal Power Plant and Units 3 and 4 at Ulubelu Geothermal Power Plant in Indonesia 11 (11)
MURAKAMI, Takashi TAKAMIYA, Atsushi

Seismic-Resistant Switchboards Conforming to New Regulatory Standards Concerning Commercial Nuclear Reactors 16 (16)
KONNO, Masayuki FUJIMOTO, Yoshio NAGASAWA, Takenori

Kamikita Rokkasho Photovoltaic Power Plant with Capacity of 71 MW DC / 51 MW AC 20 (20)
SHIRINASHIHAMA, Ritsuho HONDA, Daisuke KUBOZONO, Takaharu

Status of Development and Sales Strategy of Fuel Cell Systems 26 (26)
AOKI, Makoto HORIUCHI, Yoshimi

Distribution Static Var Compensators and Static Synchronous Compensators for Suppressing Voltage Fluctuation 31 (31)
KOJIMA, Takehiko ISOTANI, Hitoshi YAMADA, Makoto

Large-Scale Power Conditioning System for Grid Storage Battery System with Redox Flow Battery Having World's Highest Capacity Class of 60 MWh 36 (36)
MONAI, Toshiharu SUZAKI, Hisaharu YANO, Keiji

Power Stabilization System with Lead-Acid Batteries and Lithium-Ion Batteries for Galapagos Islands 42 (42)
SONE, Manabu OSADA, Yuto

New Wastewater Treatment Solution Using Bacillus 47 (47)
TAGUCHI, Kazuyuki SATO, Masanori HANAI, Yosuke

Supplemental Explanation

Bacillus 52 (52)

New Products

3rd-Generation Direct Liquid Cooling Power Module for Automotive Applications 53 (53)

"UPS7300WX-T3U," Large-Capacity UPS Using SiC Hybrid Modules for North America 55 (55)

Abbreviations and Trademarks 58 (58)

特集に寄せて

電力システムにおける価値の変化

Value Transition in a Power System

荻本　和彦　OGIMOTO, Kazuhiko
東京大学生産技術研究所 人間・社会系部門
エネルギー工学連携研究センター 特任教授

地球温暖化問題への対応のために，省エネルギー，電化の推進，低炭素排出電源の活用が求められており，電力システムは大きく変わろうとしている。再生可能エネルギー，とりわけ多くの国々や地域で大きな導入量が期待される太陽光発電と風力発電は，政策的な支援の下，欧州をはじめ一部の国，地域における導入が先行した。わが国では，東日本大震災後，固定価格買取制度による極めて有利な買取価格の下，太陽光発電の導入量が飛躍的に増加した。太陽光発電の導入が最も進展しつつある九州エリアでは，16 GW の最大需要に対し，約 7 GW の太陽光発電が導入され，これは単一の再生可能エネルギーとしては，ドイツの割合をはるかに超えた値であり，2016 年 5 月 4 日 13 時には，需要電力の 66% を太陽光発電が供給した。

太陽光発電と風力発電の出力は天気により，不確実に変化する。このため，これらの導入量が増加すると，電力システムの運用において，需要と供給のバランスを取ることが困難になり，毎日，毎時，毎分，毎秒の安定な需給運用が難しくなる。この状況で，近年，世界的に認識されてきたのが，このバランスを取るために供給あるいは需要による調整の能力である“需給調整力”の重要性である。需給調整力は，従来も必要であったが，再生可能エネルギーによる変動性と不確実性の増加と，従来調整力であった火力などの運用容量の低下の中で，その不足が顕在化した。

需給調整力の必要性は酸素に似ているところがある。人間をはじめとして生き物が生きていくために不可欠なものでありながら，地上ではふんだんに存在するため，われわれは酸素の必要性を意識する機会は少ない。しかし，水に潜ったり，宇宙に行く場合はその必要性は明らかであり，費用をかけて酸素を確保することになる。需給調整力も，以前から必要なものであったが，太陽光発電や風力発電の出力の増加による需給運用における変動性と不確実性の増加の下，その必要量が増加し，費用をかけて市場で取り引きを行って確保することがより重要になりつつある。

需給調整力の確保にはまず火力や揚水といった従来電源が使われるが，より多くを確保するためには，よく話題に出る蓄電や需要の調整のほか，太陽光発電や風力発電の出力制御，さらには連系線の運用の高度化や増強が考えられる。これらは，当該設備やインフラの増強・高度化が必要な上に，電力損失の増加や電力の利用制限を伴うが，調整力を提供できることが，電力システムにおける新たな価値となる。

需給調整力の不足の顕在化により，欧米諸国の市場運営やシステム運用においては，卸電力市場やアンシラリーサービス市場の精緻化に向けた制度整備が継続的に行われている。米国カリフォルニア州では再生可能エネルギーの変動と不確実性に対応するために，先行した蓄電池導入に加え，無数の需要側資源を，アグリゲーションを通して活用する試みが実際の取引により開始されている。他方，卸電力市場の価格はドイツをはじめとして低下傾向にあり，一部の時間帯では負の価格も発生している。この流れは，従来 kWh で測られてきた電力の価値が，需給調整力に移行することを意味する。

新たな価値が生まれるということは，その価値を実現するための新たな技術の開発と導入・普及が必要であることを意味する。瞬時の調整から一日の需給変動の平準化，あるいは季節間の調整など，さまざまな時間領域の需給調整が，それぞれの電力システムの需給の構造の変化，さらには送配電網の能力の違いにより必要となる。この新たな価値（ニーズ）を的確に捉え，技術の開発・普及を行うことにより，安価で安定した新たな電力システムを創ることが世界で求められる。

2015 年に決定された長期エネルギー需給見通しの策定において，発電コスト検証ワーキンググループでは，どの種類の電源の発電コスト（円 /kWh）がより安価であるかを比較したが，同時に系統コスト，系統制約と呼ばれる，いわゆる需給調整力の重要性についても一定の理解が進んだ。今後の地球環境問題を含めた電力，ひいてはエネルギー問題の，安定かつ経済的な課題解決に向けては，新たな価値とそれぞれの技術の長所短所を認識し，組み合わせることで，エネルギー資源に制約のあるわが国の将来の形を築くことができると考える。研究者，技術者，経営者，そして技術の価値を生かすための政策・制度を整備する全ての人々の真摯（しんし）な取組みを期待したい。

現状と展望

創エネルギーと社会インフラソリューションの現状と展望

Energy Creation and Social Infrastructure Solutions:
Current Status and Future Outlook

藤原　正洋　FUJIWARA, Masahiro

1　まえがき

世界の電力需要は，経済協力開発機構（OECD）非加盟国で年率1.9%，需要が飽和しているOECD加盟国でも年率0.6%の継続的な伸びが予測されている。世界的な視野で見れば，原油価格の不安定な動向，2016年秋に発効した「パリ協定」によるCO_2を代表とする地球温暖化ガスの排出削減などへの対応が必要である。国内では，電力改革の確実な遂行をはじめ，2015年に策定された「長期エネルギー需給見通し」の取組みの履行や，「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」（FIT）の制度改定，2017年4月からのガスの小売全面自由化などへの対応が課題となる。富士電機では，これらへの対応のために運転効率や保守性の向上などお客さまの総合的な経済性の改善に貢献できるよう努めており，創エネルギーとして，火力発電をはじめ，地熱発電，原子力発電，太陽光発電，風力発電，燃料電池などの分野において，技術開発と製品化に取り組んでいる。

社会インフラソリューションは，人々の生活や経済活動を支えることにつながるものであり，これまでは快適で効率的な仕組みを目指した高度化がなされてきた。しかしながら，設備の老朽化に伴う事故および複数の震災の経験から，本質安全性，環境性能，レジリエンスなどの新たな評価指標への対応が急務である。

富士電機は，“エネルギー・環境技術の革新により，安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献する”を経営方針の一つに掲げ，エネルギー・環境に関する多種多様な技術のたゆまぬ革新を続けている。とりわけ創エネルギーと社会インフラソリューションにおいては，事業を推進するに当たり“5つのK（環境，効率，経済性，価値創造，革新）を極める”をスローガンに日々活動を続けている。本稿では，富士電機が取り組んでいる創エネルギーと社会インフラソリューションから代表的なものを取り上げ，現状と展望を述べる。

2　火力発電分野

海外では，電力需要が旺盛な台湾や韓国，東南アジア，アフリカの一部の地域を中心に火力発電のニーズが多い。国内においても原子力発電所の稼動問題，FITに呼応したバイオマス発電(＊1)や新電力による電源の確保などを背景に火力発電のニーズがある。

富士電機は，火力発電の経済性を向上させながら環境負荷の低減と大幅な効率の向上を実現させ，顧客の価値創造の一翼を担っている。具体的には，蒸気条件の高温・高圧化をはじめ，中・小容量タービンの再熱化，蒸気タービンの小型化やケーシング数の削減など，確実で信頼性の高い技術を提供している。これらの技術やノウハウを駆使して，現在は内陸型の大型ガスタービンコンバインドサイクル発電，超々臨界圧火力発電(＊2)，バイオマス発電など多数の案件を抱え，工期通りの竣工を目指して設計，製作，建設を進めている。今後も，国内外において顧客の要望に応えられるよう，技術の革新やエンジニアリング能力の向上に努めていく。

アフターサービスにおいても，単なる定期補修や延命化だけではなく積極的に最新技術を適用して効率向上や運用改善を行っている。種々の診断技術を適用した予防保全によって稼動率の大幅な向上などにも寄与している。また，海外のサービス拠点（米州，台湾，韓国，東南アジア，中近東）の充実を図るとともに，現地で行う補修技術の開発などにより発電所の停止期間の最短化に貢献している。さらに，川崎地区に“プラント運転支援センター”を設置して，国内外のプラント稼動状況の遠隔監視を行い，運転・保守面におけ

（＊1）バイオマス発電
バイオマスとは，動物・植物などを由来とする有機性資源のことである。バイオマス発電は，これを火力発電の燃料として利用し，発電する。バイオマスは，廃棄物系と栽培作物系があり，燃料として利用するときには，乾燥させる場合と，チップやペレット状に加工する場合がある。

（＊2）超々臨界圧火力発電
超臨界圧発電とは，水の臨界圧を超える高温・高圧条件下に置くことによって，水を気化させるための熱エネルギーを削減し，高効率に発電する方式のことである。発電効率を向上するために段階的に高温高圧化が図られ，圧力が24.1 MPa以上で，かつ温度が566℃を超えると超々臨界圧発電という。

る効果的なアドバイスを行っている。今後も，顧客の多種多様なニーズに確実に応えながら，積極的なサービスの提案活動を行っていく。

3　地熱発電分野

天候などの自然条件に左右されない安定的な再生可能エネルギーとして，温泉発電を含む地熱発電が国内外で見直されている。フラッシュサイクル発電(＊3)が適用できる地熱源は，既に発電所が稼動済あるいは計画・開発の途上にある。一方で，低位熱源を活用できるバイナリーサイクル発電(＊4)は今後も大きなポテンシャルを持っており，年間の新設規模でフラッシュサイクル発電を抜くのも時間の問題と予想されている。

インドネシア，フィリピン，メキシコ，イタリア，アイスランド，ケニアなどの地熱発電が盛んな国々では，引き続き地熱発電所の建設計画がある。国内でも，長期エネルギー需給見通しで2030年までに地熱発電の割合を現在の3倍に拡大する計画である。さらに，リスクのある地熱源探査や井戸の掘削に対して，国からの支援として，石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）からの資金援助が活用できる状況にあり，現在では多くの計画が持ち上がっている(1)。

富士電機では，地熱発電分野における世界のトップメーカーとして，プラントの経済性や運転効率の改善および機器の耐腐食性，信頼性，保守性などを向上するために技術開発を続けている。また，アフターサービスについても，火力発電分野と同様にサービス拠点やサービスメニューの拡充を行い，顧客のプラントの安全・安定・経済的な運用のために積極的なサービスの提案活動を行っている。

富士電機は，フラッシュサイクル発電では，インドネシアで4基のプラントを完成させ，アイスランド，メキシコおよびフィリピン向けのプラントを建設中，もしくは機器を製作中である（11ページ“インドネシアのラヘンドン地熱発電所5号機・6号機とウルブル地熱発電所3号機・4号機”参照）。バイナリーサイクル発電においては，2017年3月に作動媒体が代替フロン系の5MWの国内最大規模のプラントを完成させ，作動媒体がノルマルペンタンの同容量のもう1基のプラントの機器を製作中である。さらには，温泉発電分野への参入も進めている。

4　原子力分野

原子力発電は，長期エネルギー需給見通しで2030年において20～22%を担う電源と位置付けられている。ただし，安全の確保が大前提であり，福島第一原子力発電所の事故の教訓を生かした新規制基準を満足することが再稼動や建設継続の必須条件となる。このため，既に12基の廃炉が決定し，再稼動を目指している発電所は37基であり，2016年末において5基が再稼動済である（**図1**）。

現在，原子力損害賠償・廃炉支援機構（NDF）を中心に廃炉計画の達成に向けた汚染水対策や，燃料デブリを取り出すための技術開発および装置設計が，国を挙げて鋭意進行中である。同時に，使用済燃料を再処理し，回収するウラン・プルトニウム混合物を平和的に有効利用しようという核燃料サイクルについても鋭意推進されている。原子力の分野では，当面，原子力発電所の再稼動と廃炉に向けた取組みの両面から継続したソリューション技術が求められている。

富士電機は，原子力施設の運転や廃炉の過程で発生する放射性廃棄物の安全な処理・処分や保管を可能とするため，種々の優れた特徴を持ったジオポリマー材料を活用する固化技術の研究・開発を，英国のエイメック・フォスター・ウィラー社と共同で進めている。また，核燃料サイクルに貢献するために混合酸化物燃

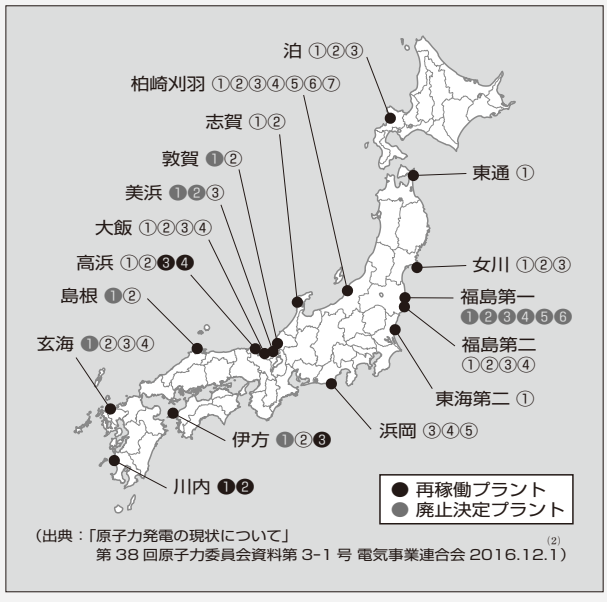


図1　国内の原子力発電所の稼動状況

（＊3）フラッシュサイクル発電
坑口から噴出する蒸気に多くの熱水が含まれる場合，気水分離器によって蒸気のみを抽出し，直接蒸気タービンを回す発電の方式である。

（＊4）バイナリーサイクル発電
温度が低い蒸気や熱水などの熱源利用する場合には，ペンタンなどの低沸点の媒体に熱を伝えて高圧の蒸気を作り，タービンを回す発電の方式である。フラッシュサイクル発電方式では利用できない低位（低温）熱源に適した発電方式である。

料（MOX 燃料）の製造設備，遠隔ハンドリング装置，耐震配電盤などにおいて，新規制基準に対応した技術や製品を提供している（16 ページ“商業用原子力発電炉に係る新規制基準に適合した耐震配電盤”参照）。

5　太陽光発電分野

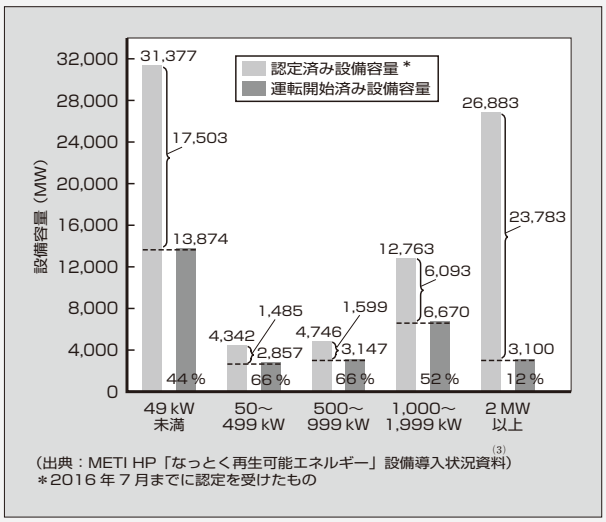
国内で 2012 年に FIT が導入されて以降，これまでに認定を受けた設備容量は累計で 80 GW に上るが，運用を開始している設備は 30 GW にとどまっている。まだ運用を開始していない設備のうち，49 kW 以下の低圧連系発電設備が 17.5 GW，2 MW 以上の特別高圧連系発電設備が 23.8 GW であり，小規模設備と大規模設備の二極化した市場となっている（**図 2**）。

富士電機は，保有するパワーコンディショナ（PCS）や特高変電設備などのシステム機器製品，EPC（土地の造成などを含めたフルターンキー）におけるノウハウの強みを生かし，500 kW 以上の設備容量をカバーして市場に応えている。PCS の累計納入量は 1,800 MW，EPC による累計納入量は建設中のプラントを含めて 400 MW に上っている。

直近は，FIT 買取価格の低下による採算性確保のためのコストダウン，ならびに再生可能エネルギーの導入量の増加に伴う系統の安定化が課題になっている。富士電機は，このような課題を確実に克服するために高性能・低価格を実現した PCS や系統安定化システムを開発し，提供している（20 ページ“DC71 MW/AC51 MW 上北六ヶ所太陽光発電所”参照）。

高性能・低価格の PCS は，主力製品である 1 MW 屋外型を開発し，2017 年 10 月から販売を開始する予定である。

系統安定化システムについては，従来の安定化システムに大容量蓄電池を追加搭載した低価格の新しい系統安定化システムを開発し，複数のプラントへの納入が既に決まっている。このシステムの導入により，蓄電池の容量を低減することができ，蓄電池の低価格化とのシナジーにより厳しい条件下にあった複数の案件において事業性を成立させた。



（出典：METI HP「なっとく再生可能エネルギー」設備導入状況資料）(3)
＊2016 年 7 月までに認定を受けたもの

図 2　2016 年 7 月までに認定を受けた太陽光発電設備の設備容量と，そのうち運転を開始した設備容量（容量別）

6　風力発電分野

風力発電についても FIT の恩恵を受け，導入促進の期待がかかってはいるが，7.5 MW 以上の設備については約 3 年かかる環境アセスメントが義務付けられているために，大規模なウインドファームの建設が本格的に始まったのは 2016 年度からである。また，太陽光発電においては大きく低下した買取価格が，風力発電においては 22 円/kWh で維持されているために，太陽光発電事業者が新たな投資先として風力発電にシフトする動きもあり，当面の導入計画は増加傾向になるものと考えられる。

富士電機は，数 MW 級の発電所の EPC なども手掛けてきており，系統連系設備や電力安定化設備などのエンジニアリングとシステム機器製品の販売に注力してきた。

風力発電に適する風況の良い地域は，北海道と東北に多いことはよく知られている。送電網の容量が比較的小さい地域では，風況の変化に伴う出力変動による電力品質への影響が課題となっている。例えば，北海道電力株式会社では，“風力発電設備の出力変動緩和対策に関する技術要件”を 2016 年度に発表し，新規に建設する風力発電所において蓄電池などを設置し，電力系統の周波数調整に影響が出ないレベルに出力変動を抑えることを要請している。

富士電機では，蓄電池と PCS を組み合わせ，最適制御を行うことにより，蓄電池の適切な充放電によって風力発電所の出力変動を抑制し，電圧や周波数を要

図 3　電力安定化装置用パワーコンディショナ

求値以内に安定させる電力安定化システムを実用化して納入している（**図3**）。

このシステムは，東北電力管内をはじめ，国内の離島やガラパゴス諸島など多くの納入実績がある（42ページ“ガラパゴス諸島向け鉛蓄電池・リチウムイオン電池併用による電力安定化システム”参照）。

今後は，電力安定化システムを軸として太陽光発電設備のEPCで培ったノウハウを付加することにより，風力発電設備のEPCにも本格的に取り組む。

7 燃料電池分野

燃料電池は，燃料に化学反応により水素を生成できる物質が含まれていればよいので多様な燃料が使用できる。実用的には，都市ガス，LPGおよび下水消化ガスなどのバイオガス，さらには水素が使われることが多い。

燃料電池の特徴として，小容量でも発電効率が高いこと，排ガス中にNO_XやSO_Xなどの大気汚染物質をほとんど含まないこと，ならびに低騒音・低振動であり環境特性がよい発電装置であることが挙げられる。したがって，分散型電源として適しており，排熱を回収してコージェネレーションシステムとすれば総合効率が90%にも達する非常に優れた電源である。

燃料電池の種類は，使用する電解質によって，りん酸形（PAFC），固体高分子形（PEFC），溶融炭酸塩形（MCFC），固体酸化物形（SOFC）などがある。それぞれに動作温度や発電効率が異なるため，適した用途も異なっている（**表1**）。

富士電機は，1973年からりん酸形燃料電池の開発に着手し，国の支援や電力会社，ガス会社の協力を得ながら，5MW機までの種々の出力や用途の90台以上のユニットについてフィールドテストを実施してきた。そこで得た知見を生かして1998年に100kWオンサイト型商用機の納入を開始し，2016年までに世界各地に75台を納入してきた（**表2**）。一台当たりの累積運転時間も最長で124,000時間（約15年間）を超えており，装置としての高い信頼性と充実したアフターサービス体制を実証している。

富士電機は，現在，りん酸形燃料電池の普及を図るために，機能の高度化，用途の拡大および低価格化に取り組んでいる。国内では，独立給電による災害対応機能とFITに対応したバイオガス発電(*5)への適用を，海外では，排ガスを利用して対象空間全体に低酸素雰囲気を作る防火システムを軸に拡販を図っている。また，次世代の高効率コージェネレーションシステムとして固体酸化物形の開発を鋭意進めている（26ページ“燃料電池の新展開”参照）。

表1　燃料電池の種類と用途

種　類	りん酸形（PAFC）	固体高分子形（PEFC）	溶融炭酸塩形（MCFC）	固体酸化物形（SOFC）
動作温度	190～200℃	70～90℃	600～700℃	700～1,000℃
発電効率	40～45%	35～40%	45～50%	45～60%
主な用途	業務用	家庭用，自動車用	業務用	業務用，家庭用

表2　りん酸形燃料電池商用機の納入先（2016年12月現在）

納入先		納入台数
国　内	オフィスビル	6
	研修施設，展示施設	5
	大学，庁舎	8
	病院，ホテル	8
	工　場	8
	下水処理場	28
	実証試験	1
海外（ドイツ，韓国，米国，南アフリカ）		11
合　計		75

8 電力流通分野

東日本大震災において，長時間にわたる停電や計画停電など，電力供給の脆弱（ぜいじゃく）性があらわになった。このため，エネルギーセキュリティの向上のために，国や自治体によるさまざまな施策が推進されている。とりわけ，FITの導入により太陽光発電を主体とした再生可能エネルギーを利用する発電設備の建設が飛躍的に増えた。この結果として，系統の安定化という課題が顕在化してきた。具体的には，太陽光発電や風力発電などの不安定な発電出力による系統周波数の問題，ならびに分散型電源からの逆潮流による配電線の電圧の問題などが挙げられる。

また，期を同じくして，電力システム改革による電気料金の抑制，電力の安定供給，新たな電力事業者の参入機会の拡大などが推進され，2015年に電力広域的運営推進機関が設立され，2016年から電力小売りの全面自由化が始まった。今後は，料金規制の撤廃や発送電分離などのさらなる改革が進んでいく。

新たな安定した電力供給システムとして，地域エネルギーマネジメントシステム（CEMS）を発展させたバーチャルパワープラント（VPP）の実証が進行中で

（＊5）バイオガス発電
バイオガスとは，生ごみや汚泥などの有機性資源を原料として嫌気性微生物の力を利用することにより生産されるガスのことである。バイオガス発電は，このバイオガスを利用して発電する方法である。

ある（**図 4**）。

また，新たな電力取引市場として，“1 時間前市場”“リアルタイム市場”“容量市場”“ネガワット市場”などの枠組みを，順次導入していくことが検討されている（**図 5**）。

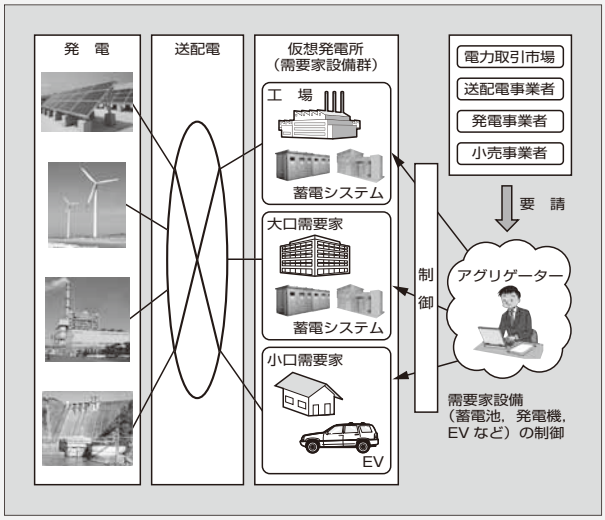
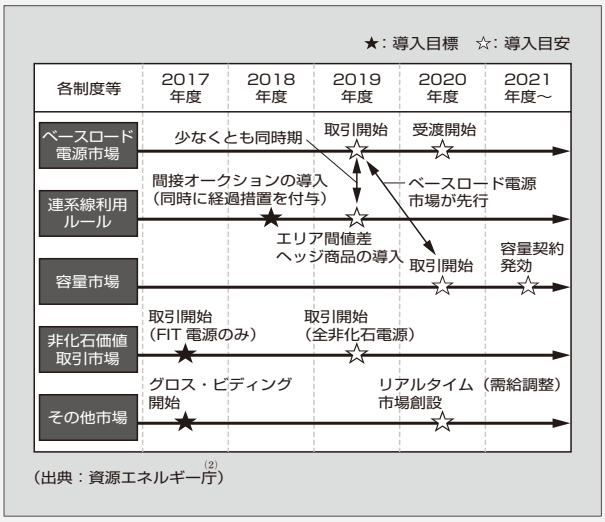


図 4　バーチャルパワープラントの実証イメージ



（出典：資源エネルギー庁[2]）

図 5　今後の電力取引市場の動向（導入目標・導入目安）

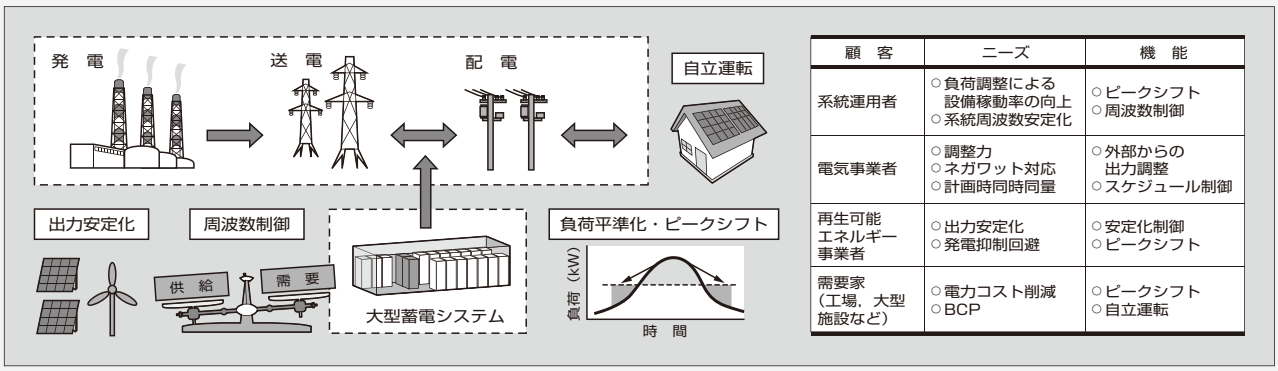
さらに，地域では，エネルギーの地産地消や雇用創出を目指した地域エネルギー供給サービス事業の企画・設立が進み，企業などの需要家側では，エネルギーコストの最小化や，自然災害時などに事業資産の喪失を最小限にする事業継続計画（BCP：Business Continuity Plan）において新たなエネルギーシステムの構築が進んでいく。

富士電機は，発電設備や受変電設備における監視，運用，制御に関わる技術や製品に対し，さまざまな実証事業を通じて得た知見や自主開発の成果などを反映し，さらに ICT（Information and Communication Technology）を付加することにより，顧客の多種多様なニーズに確実に応えていく。具体的には，系統の最適運用のための計算機システム，系統の安定化や需要側のピークシフトのための大型蓄電システム，ならびに系統電圧を規定値以内に保持するための静止型無効電力補償装置（SVC：Static Var Compensator）などを開発し，順次，市場に投入している。導入事例を次に示す。

富士電機の蓄電システムは，**図 6** に示すように種々のニーズに対して適切な PCS と制御装置を組み合わせることにより，図中の全ての種類の蓄電池制御機能を実現している。

電力会社などの系統運用者向けは規模が大きくなり，容量は数十 MWh に及ぶことも珍しくない。北海道電力株式会社の南早来変電所向けに，住友電工株式会社製のレドックスフロー電池（15 MW，60 MWh）の複数バンクについて最適な統合制御を行うシステムを 2015 年に納入した（**図 7**）。一般的に蓄電池は早い応答性や容易な拡張性などの特徴を持ち，また，従来，ピークシフトに用いられてきた揚水発電と比べても短いリードタイムや設置場所の制約が少ないなどの長所もある。このため，これからの導入拡大が期待される（36 ページ“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”参照）。

富士電機の配電系統の電圧制御方法は，現在主流で



顧 客	ニーズ	機 能
系統運用者	○負荷調整による設備稼動率の向上 ○系統周波数安定化	○ピークシフト ○周波数制御
電気事業者	○調整力 ○ネガワット対応 ○計画時同時同量	○外部からの出力調整 ○スケジュール制御
再生可能エネルギー事業者	○出力安定化 ○発電抑制回避	○安定化制御 ○ピークシフト
需要家（工場，大型施設など）	○電力コスト削減 ○BCP	○ピークシフト ○自立運転

図 6　電力系統における蓄電池システムの用途

図 7　南早来変電所の大型蓄電システム

はあるが動作回数制限のある自動電圧調整器（SVR：Step Voltage Regulator）ではなく，動作回数制限のないSVCを使用している。SVCには，無効電力を発生させる方式により自励式と他励式の2種類がある。このうち，他励式の配電系統用SVCは，東北電力株式会社と共同で開発した装置であり，可変インダクタを用いることで無段階に連続制御を行うことを可能にしている。また，冷却ファンレス方式により従来のSVCと比べて小型・軽量化でき，信頼性も優れているため，柱上に設置することが可能である。さらに，現在は，国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の“分散型エネルギー次世代電力網構築実証事業”において，SiC（炭化けい素）モジュールを用いて，より高性能，小型・軽量化を実現し，単柱に取付けが可能な次世代型のSVCを開発中である。配電系統全体の電圧維持に貢献するために，監視制御を行う計算機システムと合わせて市場に提供していく（31ページ“電圧変動問題の解決に貢献する配電系統用静止型無効電力補償装置”参照）。

9　水環境分野

工場や事業所から出る産業排水は「水質汚濁防止法」および各自治体の条例による“上乗せ基準”により水質の規制が厳しく設けられ，厳正な処理を行うことが義務化されている。これに従い，工場の新設や増設を行う際などには排水処理設備の整備が必須である（**図8**）。年々，水質の規制が厳しくなる傾向は変わらず，企業側としては排水基準を厳守しながらランニングコストを削減することが課題となっている。

例えば，食品・飲料の業界では，インスタント食品やレトルト食品の需要の増加，ならびに幅広い年齢層をターゲットとした種々の飲料の発売に伴い，生産量や生産品目の増加および製造プロセスの変更などが必要となっている。これに伴い，排水量や排水の水質の変化が発生し，排水処理の管理が難しくなってきている。さらに，周辺環境への配慮や労働環境の改善などの観点から，アンモニアや硫化水素などに由来する悪臭の抑制も必要となってきている。食品・飲料工場の排水は，その多くが高濃度の有機性排水であり，標準活性汚泥法に代表される生物処理が多用されている。この場合，排水量の増加や排水の水質に変化がある場合では，土木工事を伴う処理能力の増強もしくは前処理・後処理設備の追加など，いずれも多大な設備投資が生じる対応を取らざるを得ない。

図 8　排水処理施設

富士電機は，排水処理コストの削減と悪臭対策を同時に可能とするバチルス菌(＊6)を使った新排水処理ソリューションを開発した。これは，有機性物質を効率的に分解するバチルス菌を使ったものであり，バチルス菌の分解能力を最大化する専用の活性剤を遺伝子や酵素の高度な解析を通じて開発し，組み合わせたものである（**図9**）。

新排水処理ソリューションは，大規模な設備投資が不要であり，ランニングコストを削減しながら悪臭も抑えることができるという優れた性能を持っている。具体的には，高濃度の有機性物質を短時間で分解するだけでなく，産業廃棄物の一つとなる余剰汚泥の発生を抑えるという特徴を持ち，悪臭を検出下限以下に抑えながら汚泥の処理費用を従来比で20～40%削減できる。さらに，通性嫌気性のため曝気（ばっき）ブロワの動力も従来比で10～40%削減できる。

富士電機は，宇都宮大学との共同研究により，バチ

図 9　バチルス種菌と活性剤

（＊6）バチルス菌
52ページ「解説」参照

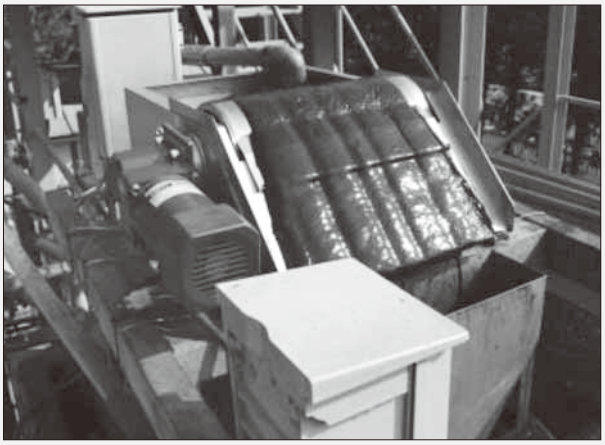


図 10　汚泥レス排水処理システム（磁気分離装置）

ルス菌の活用を発展させ，排水処理設備の新設や増設に当たり初期投資とランニングコストを圧倒的に削減できる“汚泥レス排水処理システム”を開発した。このシステムは，宇都宮大学が持つ“磁化活性汚泥法”とバチルス菌を組み合わせたシステムであり，初期投資，ランニングコストおよび設置スペースを同時に削減できるものである。具体的には，生物処理における固液分離に，**図 10** に示す磁気分離装置を採用しているため，生物処理槽の容量を従来比で 1/2 ～ 1/3 に圧縮できる。また，沈殿槽も不要になるため建設コスト（初期投資）を大幅に削減できる。さらに，バチルス菌により生物の自己酸化が増強されることから，余剰汚泥をゼロにできる。これにより，汚泥処理に必要な汚泥脱水機が不要となり，薬品費，電力費，処理費もなくなるのでランニングコストも大きく削減できる（47 ページ“バチルス菌による新排水処理ソリューション”参照）。

10　あとがき

富士電機が取り組んでいる創エネルギーと社会インフラソリューションから代表的なものを取り上げ，現状と展望を述べた。このほか，ドイツのフォイトハイドロ社と協業している水力発電分野や，国内トップシェアの電力スマートメーター，行政向け無害化・業務パッケージソフトウェアなどについてもさまざまな取組みを行っている。

富士電機はこれからも，お客さまに目を向け，お客さまの声を聞き，お客さまと力を合わせ，お客さまの価値創造を達成していくために，たゆまぬ技術革新とサービスの向上に努めていく。そして，安全・安心で環境にやさしい創エネルギーと社会インフラソリューションの提供により，持続可能な社会の実現に大きく貢献し続けていく所存である。

参考文献

(1)　平成28年度助成金交付および出資・債務保証実績. 独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）. http://www.jogmec.go.jp/geothermal/geothermal_10_000007.html#002,（参照 2016-11-01）.

(2)　市場整備WGにおける検討結果. 資源エネルギー庁. http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/kihonseisaku/denryoku_system_kaikaku/pdf/03_03_00.pdf,（参照 2016-11-01）.

(3)　なっとく再生可能エネルギー. 経済産業省. http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/statistics/index.html,（参照 2016-11-01）.

藤原　正洋
富士電機株式会社執行役員，発電・社会インフラ事業本部長。

インドネシアのラヘンドン地熱発電所５号機・６号機とウルブル地熱発電所３号機・４号機

Units 5 and 6 at Lahendong Geothermal Power Plant and Units 3 and 4 at Ulubelu Geothermal Power Plant in Indonesia

村上　隆　MURAKAMI, Takashi　　高宮　淳　TAKAMIYA, Atsushi

インドネシアでは深刻化している電力不足の打開策として地熱開発を促進している。富士電機は，CO_2 排出量が少なく，環境面に優れ，かつ天候に左右されずに安定した電力供給が可能な地熱発電に以前から注力しており，数多くの技術を保有している。また，EPC 案件においては，パートナーとの関係性を重視し，経験と実績に基づいたさまざまな創意工夫を行うことで，建設工期の短縮にも努めている。ラヘンドン地熱発電所 5 号機・6 号機およびウルブル地熱発電所 3 号機・4 号機は，当初計画よりも最大 3 か月前倒しで営業運転を始めることで，インドネシアの電力事情の改善に貢献している。

Indonesia has been promoting geothermal development as a measure to overcome its increasingly serious power shortage. Fuji Electric has long been committed to geothermal power generation, which has low CO_2 emissions and provides an eco-friendly and stable power supply independent of weather conditions. We possess a large number of technologies in this field. We emphasize the relationship with partners and work to shorten the construction period by applying various ideas and making efforts based on our experience and track record for promoting an engineering, procurement and construction (EPC) project. Units 5 and 6 at the Lahendong Geothermal Power Plant and Units 3 and 4 at the Ulubelu Geothermal Power Plant started commercial service up to 3 months ahead of the initial schedule, helping to improve the electricity situation in Indonesia.

1　まえがき

再生可能エネルギーである地熱資源を利用した地熱発電は，水力発電，太陽光発電，風力発電と同様に，化石燃料を燃焼する発電方式に比べて CO_2 の排出量が格段に小さく，CO_2 排出量削減の観点から世界的に注目されている。

富士電機は国内外において，2,900 MW を超える容量の地熱発電の主要設備を納入しており，過去 10 年のシェアは世界で約 40% を占めている（**図 1**）。これは，腐食やスケールなど地熱発電所特有の課題に対する富士電機の技術，および工程短縮の実現など一括請負工事（EPC）としてプロジェクトを遂行する能力が総合的に評価されている成果である。また，世界最大容量となるトリプルフラッシュ式地熱発電所をニュージーランドに建設した実績があり，地熱発電設備に特有のシリカ析出対策，タービン翼の材質選定などの技術に対して高い評価も得ている。

インドネシアでは，深刻化している電力不足の打開策として地熱開発を促進している。富士電機が主要機器を納入したラヘンドン地熱発電所 5 号機・6 号機およびウルブル地熱発電所 3 号機は，当初の計画よりも前倒しで営業運転を開始した。さらに，ウルブル地熱発電所 4 号機は 2017 年 4 月の完成に向けて，建設工事が順調に推移している。

本稿では，これらの地熱発電所の概要と工期短縮について述べる。

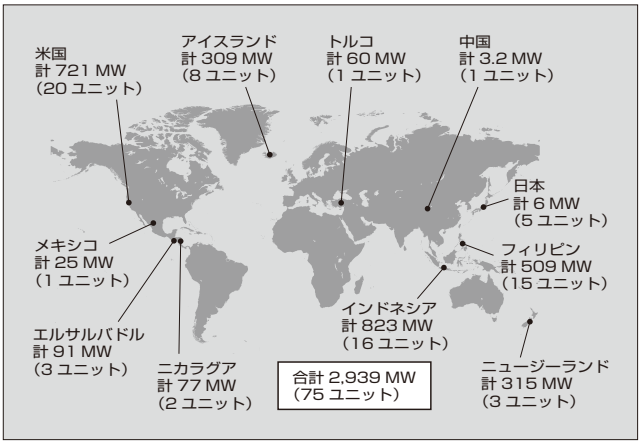


図 1　富士電機の地熱発電設備の納入実績

2　インドネシアの地熱発電

インドネシアは，東南アジア諸国連合（ASEAN）を代表する国であり，豊富な天然資源および労働力を持ち，今後も大いなる発展が見込まれる。

近年，インドネシアの電力需要は，顕著な増加傾向にある一方で，電力開発計画は遅延気味である（**図 2**）[(1)〜(3)]。現在も電化率が 70% 程度と低く，計画停電が実施されるなど電力不足が深刻化しており，新たな発電所の建設および送電線網の強化が求められている。

インドネシアの地熱発電設備の総容量は，米国，フィリピンに次ぎ世界第三位であり，2015 年時点で約 1,340 MW の地熱発電が行われている。地熱資源ポテンシャルは，世界第二位となる 29,000 MW と推定されているが，利用率は約 5% に留まっている（**図 3**）。

このような背景から，インドネシアのエネルギー鉱物資源省は，地熱発電所による電力供給を拡大し，同国の地熱エネルギーによる電力総容量を 9,500 MW とする目標を掲げている[(4)]。

富士電機は，地熱発電設備分野における技術力および経験を生かし，インドネシアに 3 台の発電機と 16 ユニット（タービン・発電機）の地熱発電設備を納入している。納入した地熱発電設備の総容量は，約 823 MW に至っている。

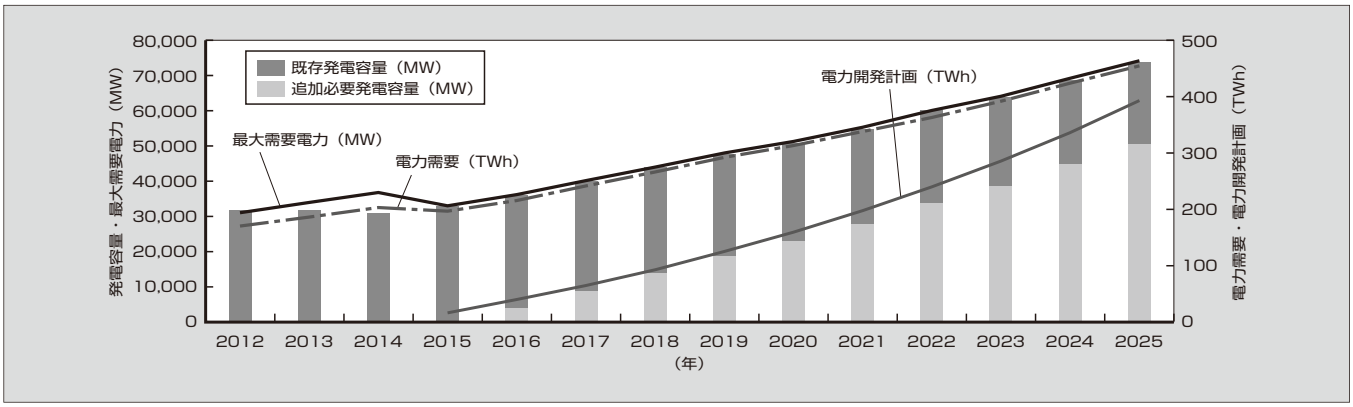


図２　インドネシアの電力需要予測と開発計画

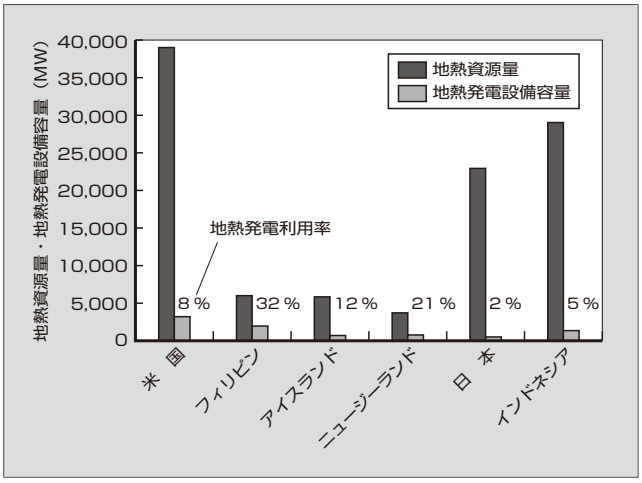


図３　主要国の地熱発電利用率の比較

2014 年度に，ラヘンドン地熱発電所 5 号機・6 号機における 2 ユニットのプロジェクト，およびウルブル地熱発電所 3 号機・4 号機における 2 ユニットのプロジェクトを受注した（**図 4**）。

両プロジェクトは，高品質および高性能な設備を短納期で納入する提案を行ったことで，顧客の高い評価を得ることができ，地熱市場の競争が激化する中，受注に至った。現在，ウルブル地熱発電所 4 号機の建設を推進中であり，既にラヘンドン地熱発電所 5 号機・6 号機およびウルブル地熱発電所 3 号機は，当初計画よりも最大約 3 か月前倒しで営業運転を開始した。

ウルブル地熱発電所 4 号機の建設は工事および試運転が順調に推移しており，2017 年 4 月の営業運転の開始を目指している。

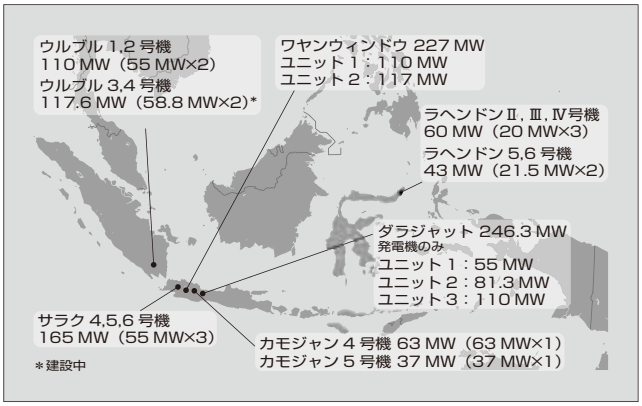


図４　インドネシアにおける富士電機の地熱発電設備の納入実績

3　ラヘンドン地熱発電所５号機・６号機

3.1　プロジェクトの概要

ラヘンドン地熱発電所 5 号機・6 号機は，インドネシアのほぼ中央にあるスラウェシ島ミナハサ州トンパソ郡タリクラン村の標高約 800 m の山中に建設された。スラウェシ島の北端に位置する北スラウェシ州の州都マナドから車で約 1 時間 20 分の距離にある。発電容量は送電端出力 40 MW（20 MW×2 台）である。この地区の近くのラヘンドン村では，既設のラヘンドン地熱発電所Ⅱ号機からⅣ号機が営業運転を行っている。いずれも富士電機が納入したものである（**図 5**）。

本プロジェクトは，住友商事株式会社を主契約者として，2014 年 12 月 1 日にプルタミナ ジオサーマル エナジー社から土木据付け込みの EPC 契約として受注したものである。富士電機は住友商事株式会社と契約を結び，主機である地熱蒸気タービン・発電機，復水器をはじめとする発電所の主要設備を納入した。また，SAGS（Steam-Above-Ground System）などは，インドネシアの大手エンジニア

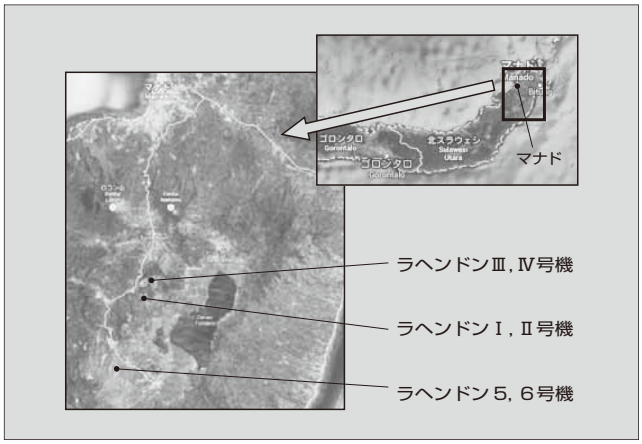


図５　ラヘンドン地熱発電所の位置

図６　ラヘンドン地熱発電所５号機・６号機の全景（右側が５号機）

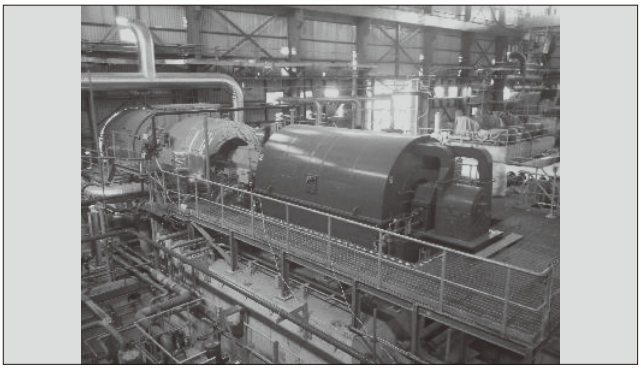


図７　ラヘンドン地熱発電所５号機のタービン・発電機

リング会社であるレカヤサ インダストリ社が納入した。

図６にラヘンドン地熱発電所５号機・６号機の全景を，**図７**に５号機のタービン・発電機の外観を示す。

３.２　プロジェクトの特徴

本プロジェクトのタービンは，排気損失の少ない軸流排気を採用している。復水器は，ガス冷却ゾーンを内蔵したコンパクトな直接接触式を採用している。タービン・発電機は，建設工期を短縮するためスキッド方式(注)で設計と製作を行い，日本から出荷した。

地熱蒸気中の不凝縮ガス成分は１%（重量 %）である。この不凝縮ガス成分を復水器から取り出すガス抽出設備には，蒸気エゼクタと真空ポンプからなるハイブリッド方式を採用した。ガス抽出設備は，50% 容量２台（常用）と 50% 容量１台（予備）の計３台で構成される。冷却塔は FRP 製の塔体構造であり，３セルで構成されている。ホットウエルポンプは 50% 容量２台の運転である。本発電設備は，ホットウエルポンプが１台停止した際に瞬時に出力

〈注〉スキッド方式：蒸気タービンと発電機がそれぞれパッケージ化された方式である。パッケージのまま出荷，輸送，設置ができるため，現地での組合せが不要であり，現地での建設工期の短縮に大きく貢献できる。

表１　ラヘンドン地熱発電所５号機・６号機のタービン・発電機の主な仕様

項　目		仕　様
タービン	型　式	単気筒単流，軸流排気，反動式，復水タービン
	送電端出力	20,000 kW
	入口圧力	8.0 bar（絶対圧）
	入口温度	170.2 ℃
	復水器真空	0.075 bar（絶対圧）
発電機	型　式	空気冷却ターボ発電機
	容　量	25,300 kVA
	電圧，周波数	11 kV，50 Hz
	力　率	0.85（遅れ）

設定を下げ，復水器への冷却水量を 50% に絞って運転するランバック機能を持っている。

分散型制御システム（DCS）にはタービン自動起動装置を搭載しており，ボタンを押すだけで主蒸気止弁開から 100% 定格出力まで自動的にプラントを立ち上げることができる。

表１に，タービン・発電機の主な仕様を示す。

４　ウルブル地熱発電所３号機・４号機

４.１　プロジェクトの概要

ウルブル地熱発電所３号機・４号機は，スマトラ島南端のランプーン州タンガムス県ウルブル郡の山中で標高約 800 m の地点に建設している。発電容量は送電端出力 110 MW（55 MW×２台）である。富士電機が納入し，2012 年に運転を開始した既存のウルブル地熱発電所１号機・２号機に隣接している（**図８**）。

スマトラ島はインドネシアの中でも最大の地熱資源ポテンシャルがあると推定されており，ウルブルはスマトラ島においていち早く地熱開発が行われた地域である。

富士電機は，住友商事株式会社およびレカヤサ インダストリ社と協働してプロジェクトを進めている。ウルブル地熱発電所３号機は 2016 年７月に営業運転を開始しており，４号機は 2017 年４月の完成に向け建設中である。本発電所で発電する電力は，インドネシア国営電力会社を通

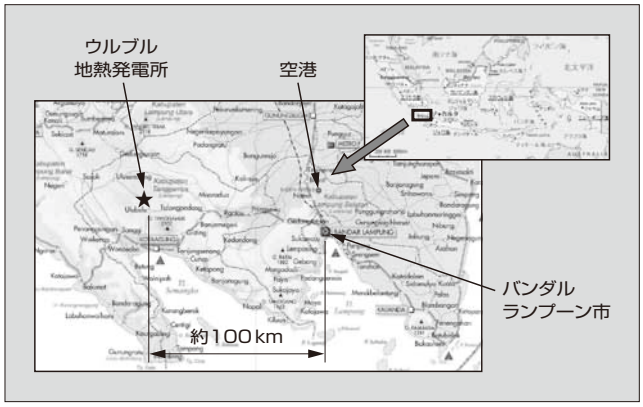


図８　ウルブル地熱発電所の位置

図９　ウルブル地熱発電所３号機・４号機の全景

図10　ウルブル地熱発電所３号機のタービン・発電機

じてランプーン地域に供給され，同地域における慢性的な電力不足の解消に大きく貢献している。

図９ にウルブル地熱発電所３号機・４号機の全景を，**図10** に３号機のタービン・発電機の外観を示す。

ウルブル地熱発電所３号機・４号機は，大統領令の下でインドネシア政府が推進する再生可能エネルギー開発案件の一つに位置付けられている。また，プロジェクトの資金は世界銀行からの借り入れで賄われており，インドネシア国内における注目度は高い。

４.２　プロジェクトの特徴

地下において液体の水が主体である熱水卓越型の地熱資源（二相流体）は，複数の生産井より輸送配管を通して生産基地に集められ，汽水分離器によって蒸気と熱水に分離される。蒸気は圧力と流量が調整されて発電所に導かれ，熱水は還元井を経て地下に戻される。これらの輸送配管の総延長は 30 km 以上に及ぶ。分離された蒸気は，発電所に設置されたベント設備で一定圧に制御され，発電所の蒸気スクラバによって湿分除去が行われた後，蒸気タービンに導かれる。

発電所の主要設備として，下向き排気の反動型復水式蒸気タービン，全閉空気冷却式発電機，直接接触式復水器，各大型電動機およびタービン発電機制御装置がある。これらを富士電機が製造し，汽水分離器，湿分分離機，電気設備，FRP 管，ケーブル類はインドネシア国内で調達した。

表２　ウルブル地熱発電所３号機・４号機のタービン・発電機の主な仕様

項　目		仕　様
タービン	型　式	単気筒，ダブルフロー，下向き排気，反動式，復水タービン
	送電端出力	55,000 kW
	入口圧力	7.6 bar（絶対圧）
	入口温度	168.0 ℃
	復水器真空	0.08 bar（絶対圧）
発電機	型　式	空気冷却ターボ発電機
	容　量	70,000 kVA
	電圧，周波数	11 kV，50 Hz
	力　率	0.85（遅れ）

発電所の全体配置は敷地面積および地形により制約され，東西に３号機と４号機を並べ，高台となる北側に冷却塔，中央部分にタービン建屋と電気室，南側に開閉所を配置する計画とした。

表２ に，タービン・発電機の主な仕様を示す。

５　地熱発電プロジェクトの遂行における留意点

５.１　パートナーとの協働

住友商事株式会社は，コンソーシアムリーダーとして，主に商務全般，保険，船積み業務を担い，プルタミナ ジオサーマル エナジー社との調整および折衝を行うとともに，レカヤサ インダストリ社ならびに富士電機をサポートした。

レカヤサ インダストリ社は，現地ポーションを一手に引き受け，SAGS，電気設備，現地工事を担うとともに，インドネシア国法規への対応ならびに地域社会との調整も主体的に担当した。

住友商事株式会社，レカヤサ インダストリ社および富士電機は，インドネシア地熱発電設備の建設において，多くの受注活動ならびにプロジェクト遂行を 10 年以上にわたり共に取り組んでおり，シナジー効果を発揮し，理想的なパートナーシップを構築している。

５.２　顧客満足度の向上

富士電機は，設備のライフサイクルを考慮して，運転とメンテナンス性に重点を置いて設計している。顧客満足度の向上の観点から，保守・管理を考慮した発電所配置の最適化，機器へのアクセス性の考慮および操作性などに対する顧客の要望を，エンジニアリング段階ならびに現地工事段階で最大限反映している。

5.3　プロジェクトの短納期化

近年，地熱発電所の建設工期は従来と比べて短くなっている。ラヘンドン地熱発電所5号機では，工期に22か月が求められた。これは，同じく富士電機が納入した，同規模で営業運転中であるカモジャン地熱発電所5号機の工期が23か月であったことに対し，1か月の短縮である。ウルブル地熱発電所3号機の契約工期は23か月であり，同エリアで営業運転中であるウルブル地熱発電所1号機の工期が28か月であったことに対し，5か月の短縮が要求された。富士電機は，ガス抽出設備の配置を自ら計画するなどして全体配置を最適化し，発電所のコンパクト化を図るとともに，タービン，発電機，薬品設備などをパッケージ化することで現地工事の物量を減らし，工期の短縮の要求に応えた。

プロジェクトの初期段階では，レカヤサ インダストリ社と工事工程ならびに試運転工程を細部にわたり調整した。プロジェクトの建設中は，レカヤサ インダストリ社と合意した工程に沿い，機器および材料の搬入計画を立て，現地工事に滞りが生じないようにした。エンジニアリングの段階においては，エンジニアリングデータの交換が重要であることから，レカヤサ インダストリ社との間で交換期日を事前に定め，そのスケジュールに従って進めることで，機器仕様および土木建築の詳細設計の早期完遂に努めた。また，プルタミナ ジオサーマル エナジー社とは，インドネシア，日本を問わず積極的に打合せを行い，設計方針の決定ならびに懸案事項の解決を図った。

これらの活動が，プロジェクト初期段階における基幹エンジニアリングの推進につながり，計画に沿った機器搬入および工事推進が実現した。

その結果，当初計画していた日程よりもラヘンドン地熱発電所5号機は約1か月，6号機は約3か月，ウルブル地熱発電所3号機は約3週間の前倒しで営業運転を開始した。ウルブル地熱発電所4号機の建設工事も順調に推移している。

6　あとがき

ラヘンドン地熱発電所5号機・6号機およびウルブル地熱発電所3号機・4号機について述べた。

今後，インドネシアにおける地熱発電所の建設においては，地理的な条件や環境への配慮などにより，さらに建設の難易度が高くなると見込まれている。富士電機は，経験と実績を最大限に生かすことで環境とエネルギーの両面での貢献を目指す。

さらに，数多くの実績に基づく，富士電機の技術を生かし，CO_2排出量が少なく，環境面で優れ，かつ天候に左右されずに安定した電力供給が可能な再生可能エネルギーとして，地熱発電のいっそうの発展に努めていく所存である。

最後に本地熱発電所の建設に当たり，お客さまであるプルタミナ ジオサーマル エナジー社殿をはじめ，住友商事株式会社殿ならびにレカヤサ インダストリ社殿に多大な協力をいただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

(1)　エネルギー鉱物資源省電力総局.“インドネシアの電力事情報告書”. http://energy-indonesia.com/07basicinfo/0140319inturn.pdf,（参照 2016-12-24).

(2)　国際エネルギー機関（IEA).“Southeast Asia Energy Outlook 2015”. https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/world-energy-outlook-special-report-on-southeast-asia-2015. html,（参照 2016-12-24).

(3)　エネルギー鉱物資源省.“Power Policy and National Deopment Plan in Indonesia”. Symposium on Sustainable Power Supply Mix in the Future. 2015-12-20. https://eneken.ieej.or.jp/data/6458.pdf,（参照 2016-12-24).

(4)　日本貿易振興機構（JETRO).“インドネシアの電力エネルギー事情”. http://energy-indonesia.com/03dge/0130625Pak%20Rida.pdf,（参照 2016-12-24).

村上　　隆

火力・地熱発電設備の取りまとめ業務に従事。現在，富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部発電プラント事業部火力・地熱プラント総合技術部主席。

高宮　　淳

火力・地熱発電設備の建設に従事。現在，富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部発電プラント事業部火力・地熱プラント建設部主任。

商業用原子力発電炉に係る新規制基準に適合した耐震配電盤

Seismic−Resistant Switchboards Conforming to New Regulatory Standards Concerning Commercial Nuclear Reactors

今野　雅行 KONNO, Masayuki　　藤本　義雄 FUJIMOTO, Yoshio　　長澤　武則 NAGASAWA, Takenori

原子力発電所をはじめとした原子力関連施設では，機器の重要度に応じて耐震性が要求される。東日本大震災以降，原子力規制基準が見直され，より高い耐震性を持つ機器が求められるようになった。これに応えるため，富士電機では，新規制基準に適合した高い剛性を持つ耐震配電盤を開発してきた。剛性を評価するための固有振動数解析と，可動部を持つ動的機器の機能維持を確認するための加振試験を行い，目標とする固有振動数 30 Hz 以上を達成する見通しを得ることができた。

Nuclear power plants and other nuclear-related facilities are required to have a certain level of seismic capacity according to the importance of their equipment. After the Great East Japan Earthquake, the nuclear regulatory standards have been revised and demand a greater seismic capacity of related equipment. To meet the demand, Fuji Electric has been developing high-rigidity seismic-resistant switchboards that conform to the new regulatory standards. We evaluated the rigidity with natural frequency analysis and verified that dynamic components can retain their functions with vibration testing. The results show that we would achieve a target natural frequency of 30 Hz or more.

1　まえがき

原子力発電所をはじめとした原子力関連施設において，安全性を確保する上で主要な配電盤には，地震時に生じる加速度によって盤自体が破損しないことや，内部の電気機器が誤動作しないことなどが要求されている。地震時に配電盤および内部の電気機器に生じる加速度（応答加速度）は，一般的に配電盤の固有振動数が高いほど低減できる。そのため，安全上重要な配電盤は，設置される建屋よりも十分に固有振動数の高い剛構造とし，耐震性を確保している。

2011 年に発生した東日本大震災以降，商用原子力発電所において配電盤の耐震性強化が進められ，耐震配電盤の需要が高まる状況にあった。富士電機は，国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構を中心とした研究施設向け耐震配電盤の納入実績があった。さらに，商用原子力発電所向けの耐震配電盤として採用されるようにするために，耐震配電盤の開発に取り組んできた。課題は次のとおりである。

研究施設向けでは，固有振動数が 20 Hz 以上の剛構造とした設計で十分であった。しかし，商用原子力発電所向けでは，固有振動数が 30 Hz 以上であることを要求される場合があり，それに応える構造とする必要がある。

2013 年 7 月に改訂された「商業用原子力発電炉に係る新規制基準」（新規制基準）では，設計時に想定しなくてはならない地震の規模が見直され，以前よりも厳しい地震力（配電盤に生じる加速度）に耐える構造とする必要がある。

本稿では，開発を進めてきた新規制基準に適合した耐震配電盤について述べる。

2　耐震設計

従来の耐震設計では，耐震配電盤の耐震強度は，設計用地震力よりも十分高くして，水平加速度として 1 G，鉛直加速度として 0.5 G を基準にしていた。東日本大震災以降に耐震設計に使用する基準地震動が見直されることになり，配電盤に高い耐震性が要求されるようになった。設計用地震力は設置する地域の地盤を考慮するため地域により異なるが，その最大値は，水平加速度で 3 G，鉛直加速度で 2 G となった。

耐震配電盤の固有振動数は，20 Hz 以上で十分であるとされてきたが，地域によっては 30 Hz 以上が必要である場合もあるので，開発目標は 30 Hz 以上とした。

耐震設計条件は次のとおりである。

(a)　固有振動数：30 Hz 以上

(b)　耐加速度：水平方向 3 G 以上，鉛直方向 2 G 以上

耐震配電盤の開発フローを**図 1** に示す。盤設計の手順は，剛構造設計，動的機器の機能維持検証，実機モデル検証の三項目に分けられる。

(1)　剛構造設計

製作図に基づき盤体の固有振動数解析を行う。固有振動数が目標を満足する盤体となるように，梁（はり）の追加や板厚の変更などの構造の見直しを行う。

(2)　動的機器の機能維持検証

盤内の収納機器のうち，可動部を持つ動的機器（遮断器，保護継電器，補助継電器，タイマなど）は地震発生時に機能を維持できるかどうかを構造解析から確認することはできない。そこで，実際に機器を単体で加振して評価し，機能維持確認加速度を把握する。完全に固定せずに引出し部を持つ機器については，実機と同じ固定状態を模擬して加振試験を行い，機能維持確認加速度を把握する。

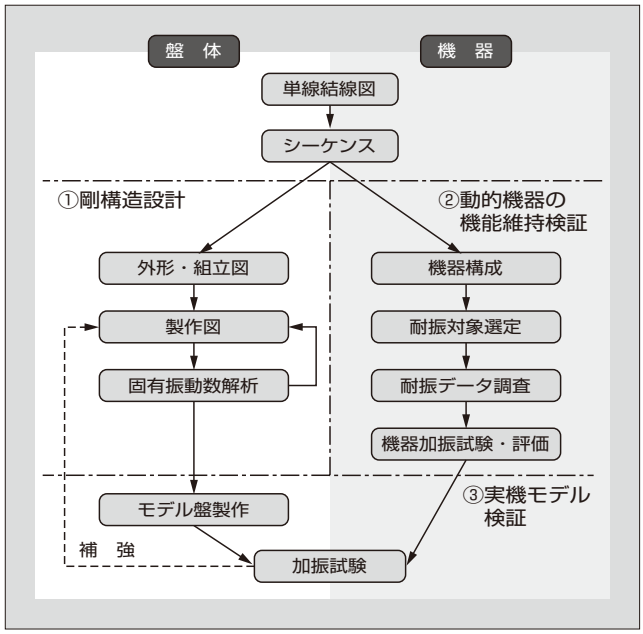


図 1　耐震配電盤の開発フロー

(3)　実機モデル検証

(1)の構造設計の結果を検証するため，実機サイズのモデル盤である耐震検証用高圧配電盤を製作し，加振試験を行って固有振動数を確認する。また，(2)で評価した収納機器を耐震検証用高圧配電盤に収納し，加振時の機能を確認して健全性を確認する。

3　高圧配電盤の高耐震化

3.1　耐震配電盤設計

高圧配電盤は，供給される電力を負荷設備の仕様に合わせて分配する設備であり，遮断器，保護継電器，補助継電器，変成器，変流器などから構成されている。

今回採用した高圧配電盤は，真空遮断器（VCB）を上下 2 段に配置し，定格電流は一般的に使用している 1,200 A または 2,000 A とし，遮断容量は 40 kA とした。保護継電器は，電力向けで一般的に使用しているデジタル型多機能リレー「F-MPC60B」を採用した。主な仕様を**表 1** に示す。

高圧配電盤は，遮断器などの引出機器の主回路断路部にシャッタを装備している。断路を行った上で遮断器を試験位置に引き出すと，自動的にシャッタが閉じて主回路充電部が覆われ，点検時などの安全性を向上させている。また，主回路用補助機器（計器用変圧器，接地計器用変圧器，避雷器）は，移動台車に搭載して交換が容易に行えるようにするとともに収納スペースのコンパクト化を図っている。しかし，保守性を考慮し，真空遮断器などを容易に交換できるようにした構造が，耐震性の面で弱点とならないような工夫が必要である。そこで，盤のフレームと機器を面接触させることで機器の揺れを抑えて耐震性を確保するとともに，クランプ機構を採用して固定と出し入れを容易にしている。また，真空遮断器は，運転位置においても試験位置においても耐震性を確保している。耐震検証用高圧配電盤の外形図を**図 2** に，組立図を**図 3** に示す。

表 1　高圧配電盤の主な仕様

項　目		仕　様
高圧配電盤	盤型式	JEM-1425 MWG
	定格電圧，相数	7.2 kV，三相 3 線式
	定格周波数	50/60 Hz
	定格母線電流	3,000 A
	定格短時間電流	40 kA，2 秒
	定格絶縁電圧	商用周波耐電圧：22 kV，1 分間 雷インパルス耐電圧：60 kV
	外　形	W1,000 × D2,600 × H2,300（mm）
真空遮断器（VCB）	定格操作電圧	AC100/200 V，DC100/125 V
	定格遮断電流	40 kA
	定格電流	1,200 A，2,000 A
	投入操作方法	電動・スプリング式

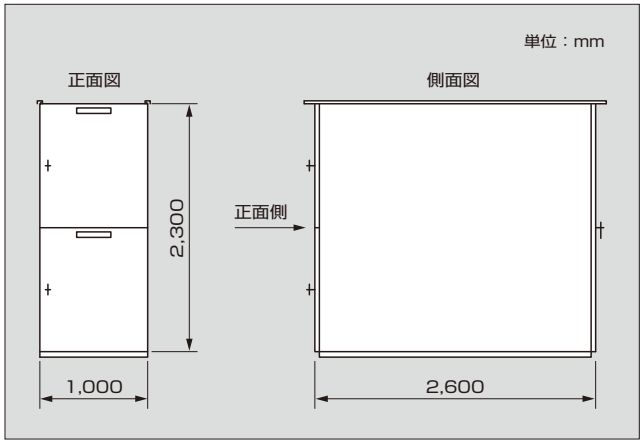


図 2　耐震検証用高圧配電盤の外形図

3.2　固有振動数解析

耐震設計による盤の設計図を基に，構造解析ソフトウェア NX NASTRAN を用いて固有振動数解析を実施した。解析結果を**図 4** に示す。36.7 Hz で盤筐体（きょうたい）全体の揺れが発生することが解析結果として得られ，固有振動数が耐震設計条件を満足することが確認できた。

3.3　耐震検証用高圧配電盤の製作

図 5 に，耐震検証用高圧配電盤の外観を示す。耐震性を強化するため，角パイプで骨組み（縦柱および天井の合計 8 辺）を構成し，サイドパネルと組み合わせて剛性を高めている。また，30 Hz 以上の固有振動数を確保するために，ベースフレームと盤本体との連結を強化している。

3.4　加振試験

高圧配電盤の耐震性を検証するために加振試験を行った。**図 6** に，加振台への据付け状況と盤内の機器取付け状況を示す。

固有振動数の確認および耐加速度を測定するために盤筐

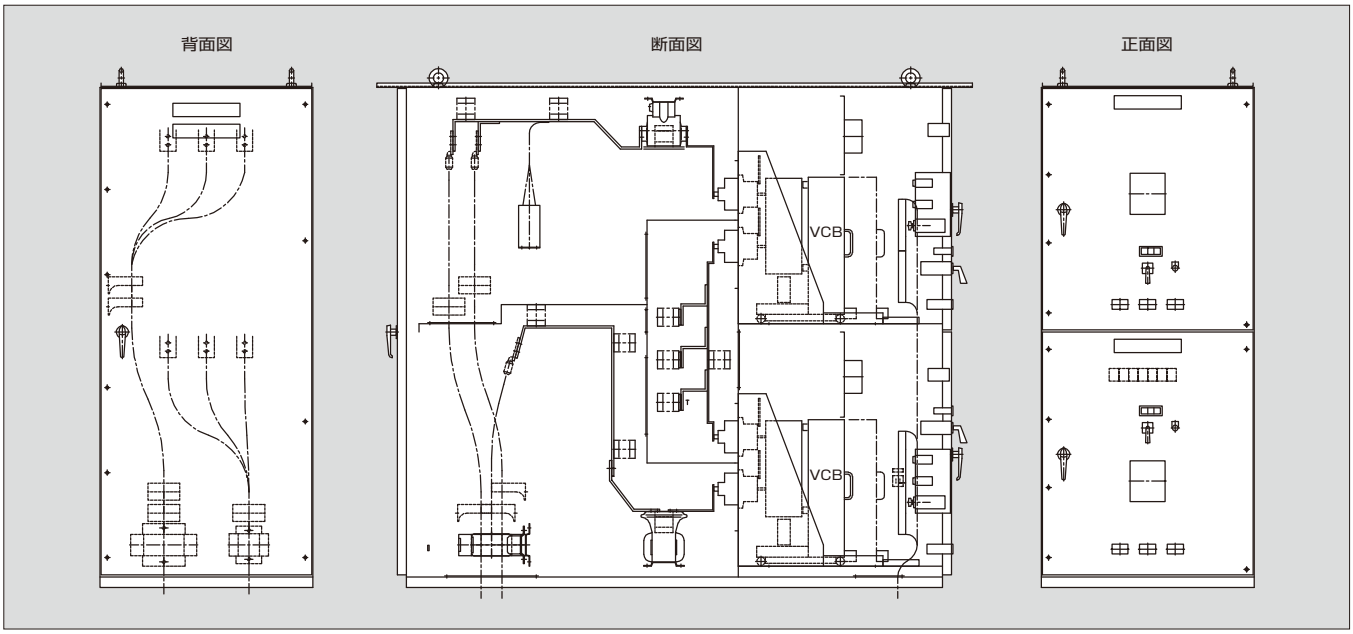


図 3　耐震検証用高圧配電盤の組立図

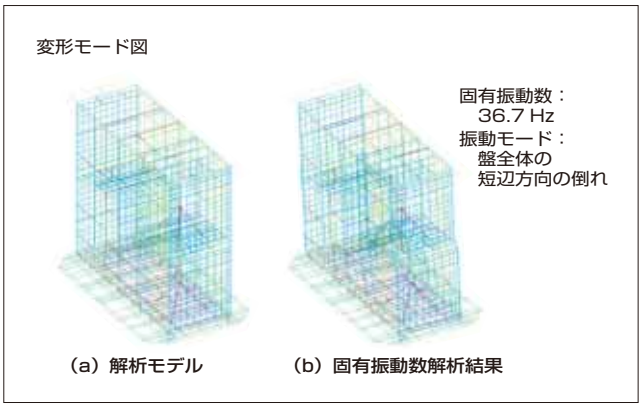


図 4　固有振動数解析結果

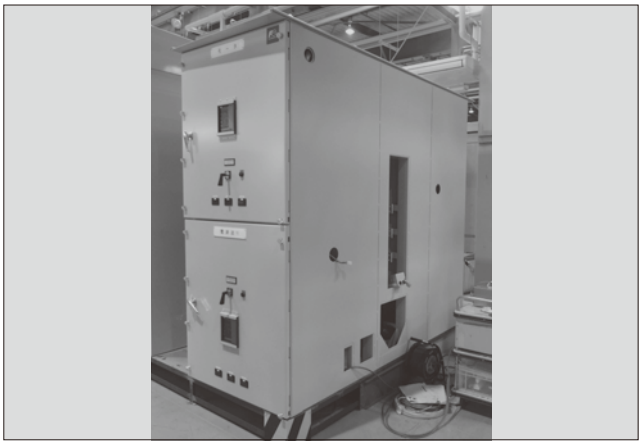


図 5　耐震検証用高圧配電盤

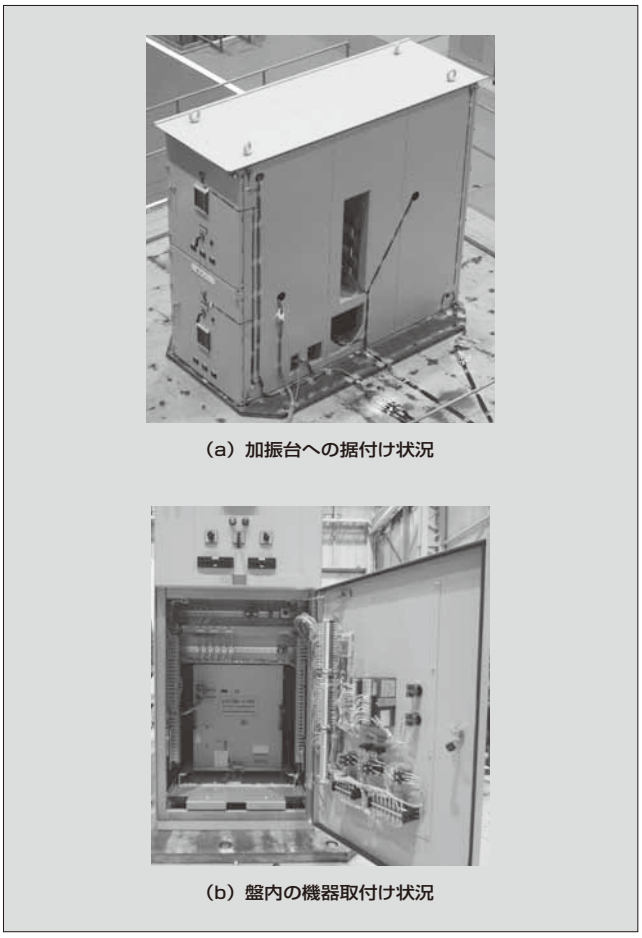


図 6　加振試験の状況

体と主要な内部収納機器に加速度計を取り付け，加振時の応答加速度を測定した。入力加速度 100 Gal〈注 1〉（正弦波）において，5 ～ 50 Hz の範囲を 0.1 Hz/s で掃引し，水平，鉛直の 3 方向の固有振動数を測定した。**図 7** は，水平方向（奥行方向）について振動台に取り付けた加速度計を基準とし，盤体フレームに取り付けた加速度計の応答倍率を周波数に対してプロットしたものである。応答倍率が最大になる周波数が固有振動数となる。この盤筐体の固有振動数

〈注 1〉 Gal：加速度の単位で 1 Gal=0.01 m/s²

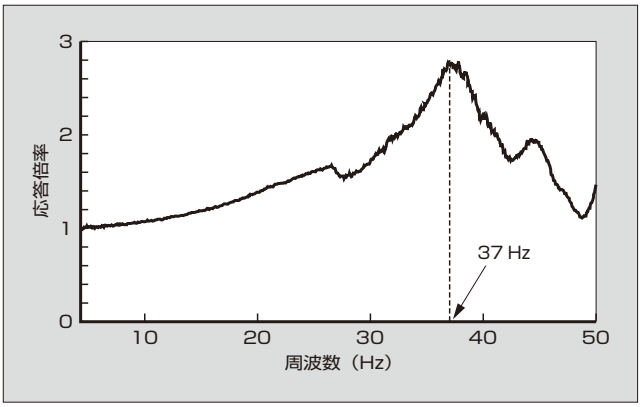


図 7　加振試験結果

の測定値は約 37 Hz であり，解析により求めた値と非常によい一致を示した。

さらに，各方向ともに固有振動数は，30 Hz を超える見通しを得ている。

4　低圧配電盤と収納機器の高耐震化

パワーセンタやコントロールセンタといった低圧配電盤の開発も高圧配電盤と同様の設計条件と手順で行い，耐震性を確保している。

また，収納機器を盤体に取り付けた状態で加振試験を行うとともに，単体での加振試験を実施することにより，機器ごとの機能維持確認加速度を把握している。**図 8** に，機器加振試験の状況を示す。

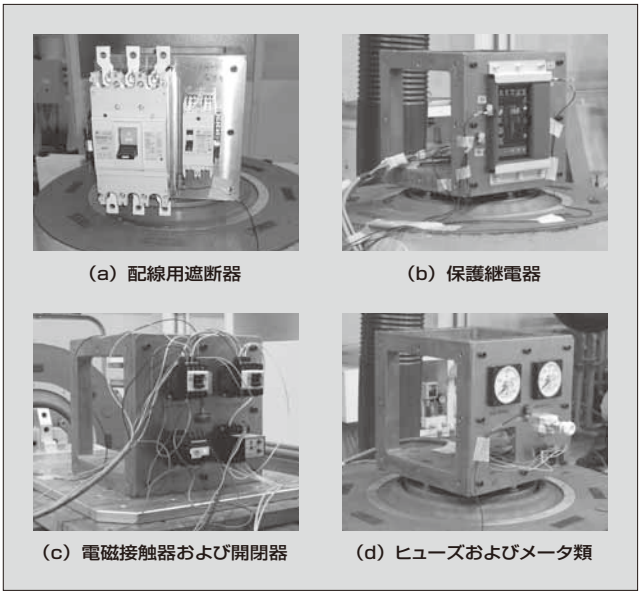


図 8　機器加振試験の状況

機器には，配線用遮断器（MCCB），保護継電器，補助継電器など，高圧配電盤と低圧配電盤で同じ機種が使用されているものがあるため，重複しているものは代表型式を決めて単体で評価を実施し，耐震性を把握している。

5　あとがき

商業用原子力発電炉に係る新規制基準に適合した耐震配電盤について述べた。新規制基準対応の耐震配電盤の開発において，高圧配電盤の収納機器評価と耐震解析，応力解析から始め，低圧配電盤の耐震解析，モデル盤での検証，収納機器の限界加速度の把握などを順次実施してきた。

今回，実機サイズの高圧配電盤を試作して加振試験を行い，目標とする固有振動数 30 Hz の達成の見通しを得た。これにより，高圧配電盤から低圧配電盤まで一連の配電盤について，新規制基準などで要求される耐震性を持つ配電盤の開発が完了した。

今後，耐震配電盤の供給により，原子力発電所をはじめとした原子力関連施設における安全性向上に貢献していく所存である。

今野　雅行

原子力関連施設向け電気設備の技術取りまとめ業務に従事。現在，富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部発電プラント事業部原子力プラント部主査。

藤本　義雄

配電盤の製品設計に従事。現在，富士電機株式会社パワエレ機器事業本部神戸工場盤装置部課長補佐。日本電機工業会スイッチギヤ技術専門委員。

長澤　武則

配電盤の構造設計に従事。現在，富士電機株式会社パワエレ機器事業本部神戸工場製造部。

DC71 MW/AC51 MW 上北六ヶ所太陽光発電所

Kamikita Rokkasho Photovoltaic Power Plant with Capacity of 71 MW DC / 51 MW AC

尻無濱 立穂 SHIRINASHIHAMA, Ritsuho　　本田 大祐 HONDA, Daisuke　　久保薗 隆治 KUBOZONO, Takaharu

富士電機は高効率パワーコンディショナ（PCS）を開発し，太陽光発電所に多くの納入実績を持っている。DC71 MW/AC51 MW の上北六ヶ所太陽光発電所を一括請負工事（EPC）として受注し，2017 年 1 月に納入した。51 台の 1,000 kW PCS で出力 AC51 MW に変換し，受変電設備により 154 kV に昇圧後，東北電力株式会社の送電線へ連系している。2016 年 11 月に総合機能試験を実施し，発電所に求められる所定の機能と性能を持っていることを確認した。2017 年 2 月に東北電力株式会社への 20 年間の売電事業を開始した。

Fuji Electric has developed high-efficiency power conditioning sub-systems (PCSs) and has a number of track records in delivering them to photovoltaic power plants. We won an engineering, procurement and construction (EPC) contract for Kamikita Rokkasho Photovoltaic Power Plant with a capacity of 71 MW DC / 51 MW AC and completed the delivery in January 2017. The output is converted to 51 MW AC with fifty-one 1,000-kW PCSs, boosted to 154 kV with an electric substation facility, and then transmitted to the power grid of Tohoku Electric Power Co., Inc. We conducted a general function test in November 2016 and verified that the plant has the specified functionality and performance required of a power plant. In February 2017, the plant started operations to sell electric power to Tohoku Electric Power Co., Inc. for 20 years.

1　まえがき

双日株式会社が出資する未来創電上北六ヶ所株式会社（特定目的会社）の上北六ヶ所太陽光発電所が，2017 年 2 月に運転を開始した。この発電所は，青森県上北郡六ヶ所村の新むつ小川原株式会社が所有する約 150 ha の土地を利用して，発電容量 DC71 MW となる太陽電池モジュール 263,172 枚を配置した総出力 AC51 MW の大規模太陽光発電所であり，富士電機が一括請負工事（EPC）契約で受注した。建設工事は，2013 年 11 月の着手から 2017 年 1 月末の引渡しまで無事故・無災害で完工した。2017 年 2 月に東北電力株式会社（以下，東北電力）への 20 年間の売電事業を開始した。本発電所は，運転開始時において太陽電池容量ベースで国内第 4 位の大規模太陽光発電所である。(注1)

本稿では，上北六ヶ所太陽光発電所の建設工事と設備の構築について述べる。

2　上北六ヶ所太陽光発電所の概要

上北六ヶ所太陽光発電所は，発電所用地の中央部を東西方向に村道が通っている（**図 1**）。村道の北側約 50 ha にパワーコンディショナ（PCS）19 台を，南側約 100 ha に PCS32 台を配置している。太陽電池の容量 DC71 MW は，富士電機製の 51 台の 1,000 kW PCS で出力 AC51 MW に変換し，富士電機製の受変電設備により 154 kV に昇圧後，東北電力の送電線へ連系している。全体システム構成を**図 2** に示す。

本発電所の年間売電電力量は，65,930 MWh が見込まれている。これは一般家庭 18,400 世帯分の年間消費電力量に相当する。また，CO_2 削減量は 35,200 t-CO_2/年に相当する。

図 1　上北六ヶ所太陽光発電所全景
（写真提供：新むつ小川原株式会社）

3　発電所の建設工事

表 1 に，発電所建設工事の主要工程を示す。上北六ヶ所太陽光発電所の工事は，2013 年 11 月に着手してから，試運転調整を完了し 2017 年 1 月末に引き渡すまでの 3 年 3 か月であった。なお，冬季の積雪のため工事を停止していた 9 か月間を除いた正味の工事期間は，2 年 6 か月であった。

発電所の工事は森林の伐採・抜根から着手し，工事用道路の整備，用地の整備を実施してから，太陽電池を取り付ける架台工事，PCS などの機器の基礎工事，電気配線工事や試験調整を実施して引渡しを完了した。

〈注 1〉国内第 4 位の大規模太陽光発電所：富士電機調べ（2017 年 2 月現在）

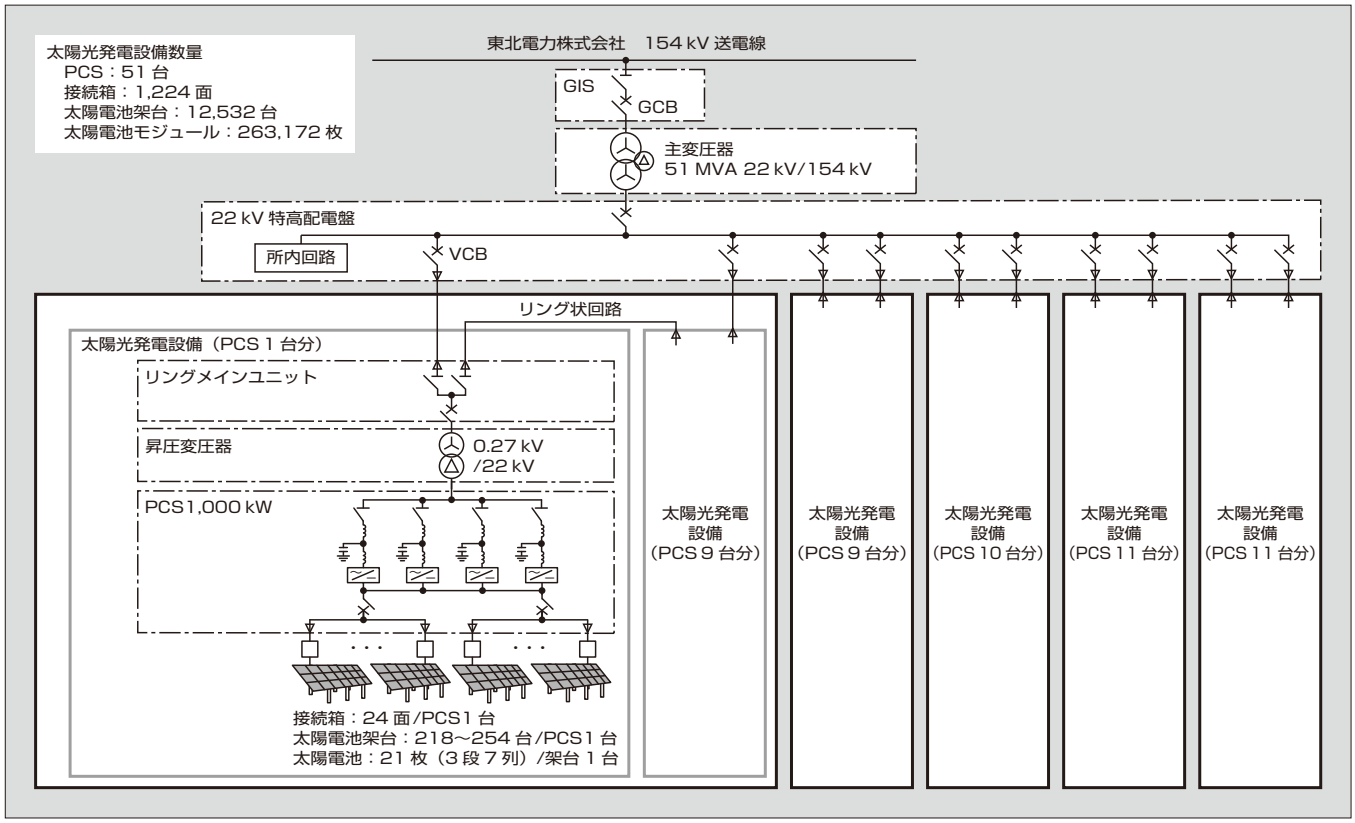


図 2　全体システム構成図

表 1　上北六ヶ所太陽光発電所工事の主要工程

No.	工種 ＼ 年月	2013			2014												2015												2016												2017		
		10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
Ⅰ	土木工事	▼着工																																									
(1)	伐採・伐根・整地工事																																										
(2)	アレイ基礎工事																																										
(3)	架台・モジュール組立工事																																										
(4)	構内道路・フェンス工事																																										
(5)	設備基礎工事					冬季休工												冬季休工												冬季休工														
Ⅱ	電気工事																																										
(1)	太陽電池アレイ周辺工事																																										
(2)	PV サイト機器据付工事																																										
(3)	特高幹線工事																																										
(4)	連系変電設備工事																																										
Ⅲ	154 kV 電路工事																																										
Ⅳ	現地試験調整																																										
Ⅴ	総合試験調整																																										

★受電　★系統連系（全 PCS）　▼運転開始

3.1　太陽電池架台と PCS の設置工事

太陽電池架台は，H 形鋼 6 本を約 4.1 m 地中に埋め込む杭基礎を採用し，土地の地形をそのまま利用して設置した。**図 3** に，太陽電池架台の設置状況を示す。太陽電池架台〔W11,540×D2,616×H2,710（mm）〕には 3 段 7 列で合計 21 枚の太陽電池モジュールを取り付けることができる。この太陽電池架台を用地内に 12,532 台設置した。太陽電池架台は冬季の積雪を考慮して，太陽電池モジュールの取付角度は 30 度，最低地上高は 1.2 m とした。南北方向の太陽電池架台の間隔は冬季の低い太陽高度の影響を考慮して，平地で 5.0 m を確保した。地形を利用した配置としているため，南斜面では間隔を狭めて配置し，北斜面では間隔を広げて配置している。

PCS とそれに付随する昇圧変圧器および周辺機器（リングメインユニット）は，用地内の 51 か所に配置し基礎高さは積雪を考慮して，地面から 1.0 m の高さを確保した。**図 4** に，PCS，昇圧変圧器，リングメインユニットの設置状況を示す。

3.2　電気工事

9 台から 11 台の PCS を一つのリング状につないだ回路とし，合計 5 回路の 22 kV ケーブルを埋設管で敷設した。埋設管の総延長は約 20 km にも及び，ケーブルの敷設に

(a) 正　面

(b) 背　面

図 3　太陽電池架台の設置状況

図 4　PCS・昇圧変圧器・リングメインユニットの設置状況

12 か月を要した。北用地と南用地の間は，村道の地下を推進工法で掘削して埋設管を設置し，ケーブルの敷設を行った。

3.3　154 kV 電路工事・変電設備工事

154 kV 電路は発電所周囲に設置されている風車への影響を考慮して，鉄塔方式ではなく埋設ケーブル方式を採用した。東北電力の 154 kV 鉄塔から架空線で鉄塔近傍の門型鉄構に引き込み，発電所の変電設備まで埋設管で敷設した。この電路は，隣地斜面を長さ約 500 m にわたって開墾，掘削し，埋設管を設置してケーブルの敷設を行った。

154 kV 変電設備の主要設備である，ガス絶縁開閉装置（GIS），主変圧器，22 kV 特高配電盤は，総重量が約 140 t に上る。この荷重に耐えるように地質改良を行った後に基礎工事を行い，各機器を設置した。

4　太陽光発電設備

太陽光発電設備は，太陽電池モジュール，接続箱，PCS，昇圧変圧器，リングメインユニットで構成する。太陽電池モジュールで発生した直流電力を PCS に集約し，交流出力に変換して送電する設備である。

4.1　太陽電池モジュール・接続箱

表 2 に，太陽電池モジュールと接続箱の主な仕様を示す。太陽電池モジュールには，1 枚当たりの最大出力が 270 W の単結晶シリコンを採用した。太陽電池モジュールは，PCS の 1,000 V 入力に対応して，3 段，7 列の 21 枚で一つのアレイ・架台を構成し，1 アレイで DC5.67 kW の出力となる。8 アレイから 11 アレイ分の電力をまとめて接続箱に集約し，接続箱 1 面当たり 45.4 kW から 62.4 kW までの出力となり，24 面分を集約して PCS の直流入力となる。PCS の入力アレイ数は従来の低圧 750 V 入力 PCS に比べ，30% 以上少なくできるため，施工コストの低減に寄与している。

4.2　PCS・昇圧変圧器・リングメインユニット

PCS は，接続箱 24 面から入力された DC1,000 V を AC270 V に変換し，最大で 1,000 kW の交流電力を出力する。この PCS は，国内で最大の単機 1,000 kW 機で 3 レベルインバータ方式であり，業界最高レベルの変換効率 98.5%（ユーロ効率 98.2%）を達成している。また，屋外型外気冷却方式を採用することにより，コンテナ収納タイプの PCS の場合に必要な空調設備が不要となり，運転中の補機動力損失を削減した[(1)]。

PCS の直流入力部は 24 分岐タイプを採用している。そのため，従来の 4 分岐タイプに設けていた集電箱は不要である。また，直流入力 24 分岐ごとに電流検出器（DCCT）を設けて直流入力電流も計測監視できるようにした。

PCS の運転データは，多重伝送システム（RS-485，光通信）により，変電設備の近傍に設置した上位監視システムで運転データを監視できるようにしている。また，PCS は，この監視システムから遠隔操作で起動・停止が可能である。

PCS の出力は，昇圧変圧器（容量 1,000 kVA）で 22 kV に昇圧後，リングメインユニットを経由して変電設備の 22 kV 特高配電盤に集約される。**表 3** に，PCS の主な仕様を示す。

表 2　太陽電池モジュール・接続箱の主な仕様

(a) 太陽電池モジュール

項　目		仕様・特性
基本仕様	セルタイプ	単結晶シリコン
	セル使用数量	60 枚
	モジュール寸法	長辺 1,640 ×短辺 1,000 × 厚さ 35（mm）
	最大耐荷重	5,400 Pa（正荷重）*1, 2,400 Pa（負荷重）*2
	質　量	16.8 kg
	前面カバー材質	強化ガラス
	背面カバー材質	バックシート
	フレーム材質	陽極酸化アルミニウム合金
	フレーム色	アルミニウム合金地色
	モジュール納入数量	263,172 枚
	製造者	LG Electronics（韓国）
電気的特性	最大出力（P_{max}）	270 W
	モジュール効率	16.50%
	最大出力動作電圧（V_{pm}）	31.50 V
	最大出力動作電流（I_{pm}）	8.58 A
	開放電圧（V_{oc}）	38.50 V
	短絡電流（I_{sc}）	9.17 A
	P_{max} 温度係数	−0.430%/℃
	V_{oc} 温度係数	−0.310%/℃
	I_{sc} 温度係数	0.040%/℃
	システム最大電圧	1,000 V
	試験条件（STC）	セル温度 25℃，AM1.5 *3, 照射量 1,000 W/m^2

＊1：正荷重：モジュール正面から受ける荷重をいう。
＊2：負荷重：モジュール裏面から受ける荷重をいう。
＊3：AM（Air Mass）1.5：日本付近の緯度の地上における平均的な太陽光スペクトルを意味し，大気を通過する距離が垂直入射に対し 1.5 倍であることを表す。

(b) 接続箱

項　目		仕様・特性
基本仕様	設置場所	屋　外
	周囲温度	−25 ～+40℃
	外形寸法	W800 × D300 × H900（mm）
	外被保護構造	IP44
	主回路導体	1,500 V 電線 WL2
	外線接続	端子台方式
	納入数量	1,224 面
電気仕様	定格使用電圧	DC1,000 V
	定格絶縁電圧	DC1,200 V
	入力ストリング回路	11 回路
	定格母線電流	110 A
	ストリング回路保護	ヒューズ保護（15 A）
	主開閉器	MCCB
	耐雷保護	SPD

表 3　PCS の主な仕様

項　目		仕　様
シリーズ名		PVI1000-3/1000
定格出力		1,000 kW
絶縁方式		トランスレス方式
電気仕様（DC 入力）	直流入力電圧範囲	0 ～ 1,000 V
	運転電圧範囲	450 ～ 950 V
	MPPT 範囲	460 ～ 850 V
	直流入力分岐数 *1	24
電気仕様（AC 出力）	定格出力容量	1,000 kW
	定格出力電圧	270 V　−10 ～+12%
	定格周波数	50/60 Hz ± 5%
	出力相数	3 φ 3W　非接地系対応
	定格出力電流	2,138 A
	出力力率 *2	>0.99（定格出力時）
	出力電流ひずみ率（総合）*3	<5%（定格出力時）
	出力電流ひずみ率（各次）	<3%（定格出力時）
	装置最高効率	98.5%
	装置効率（EURO 効率）	98.2%
	過負荷耐量	100% 連続
	騒　音	70 dB 以下
系統連系	系統保護	OV，UV，OF，UF
	単独運転検出方式（受動）*4	電圧位相跳躍検出
	単独運転検出方式（能動）*4	無効電力変動方式
	電圧上昇・抑制機能	無効電流補償・有効電流出力抑制
	FRT	JEAC 9701 準拠
盤構造	設置方式 *5	屋外自立型
	適合 IP *6	IP54
	システム方式	サブステーション方式
	ケーブル引き込み	下　部
	冷却方式	強制空冷
寸　法	PCS 単体	W3,500 × D2,300 × H2,800（mm）
	サブステーション	W6,050 × D2,400 × H2,800（mm）
質　量	PCS 単体	7,000 kg
	サブステーション	12,500 kg
環境条件	保存温度	−20 ～+50℃
	動作温度 *7	−20 ～+40℃
	相対湿度 *8	15 ～ 95%
	標　高	2,000 m 以下
準拠規格		IEC 62109-1，JIS，JEM，JEC
通信方式		RS-485，MODBUS *9，TCP

＊1：オプション　＊2：単独運転 Q 出力を除く　＊3：出力 1/8 ～定格時
＊4：不使用　＊5：耐塩害仕様　＊6：パウダースノー対策仕様
＊7：寒冷地仕様　＊8：結露なし
＊9：Schneider Automation, Inc. の商標または登録商標

5　特高変電設備・系統連系設備

図 5 に，154 kV 門型鉄構と変電設備の外観を示す。PCS から出力された電力を 22 kV 特高配電盤に集約し，主変圧器で 22 kV から系統連系電圧の 154 kV に昇圧し，GIS を経由して東北電力の送電線に連系している。

22 kV 特高配電盤は，リングメインユニットの回路に対応して真空遮断器（VCB）10 台で構成され，構内電路の異常時には該当回路を遮断する機能を備えている。

（a）154 kV 門型鉄構

（b）変電設備（GIS，主変圧器）

図 5　154 kV 門型鉄構と変電設備

主変圧器には油入自冷式変圧器を採用し，PCS51台分の100% 出力容量と同じ 51 MVA としている。

系統連系用の遮断器には，154 kV ガス遮断器（GCB）を採用した。特高変電設備や送電線の事故時に系統から切り離して遮断する。GCB の遮断能力は，25 kA，5 サイクルである。東北電力との責任分界点は，連系鉄塔のジャンパ線接続部としている。

6　保護装置・監視制御設備・付帯設備

特高変電設備，154 kV 連系線の保護装置および発電所監視装置は，変電設備近傍のコンテナタイプのパッケージ内に設置している。

上北六ヶ所太陽光発電所が連系している東北電力の送電線には他事業者の風力発電所も連系しており，送電線保護装置として東北電力指定の PCM 保護装置を設置している。この保護装置により，各変電所間，風力発電所間の送電線事故を検出し，本発電所の解列(注2)を行う。

発電所監視装置は，PCS の主要データを収集し，系統監視画面表示，計測値表示，トレンド表示，日報・月報表示機能を持っている。PCS の直流側 24 分岐回路の電流を計測可能なシステムを採用しており，電流値のトレンドデータから各分岐電流の差異を自動的に判断して偏差表示を行う機能を持っている。24 分岐回路の 1 回路は，接続箱 1 面に対応しており，この機能により接続箱内のストリングヒューズ溶断箇所の早期発見につながる。

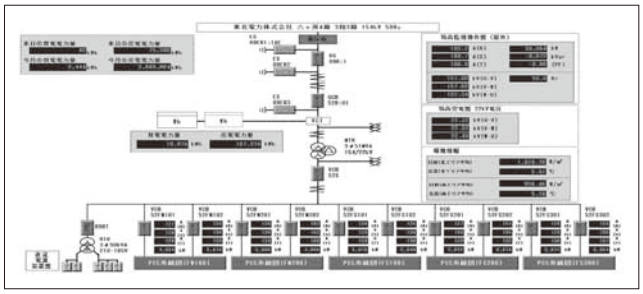


図 6　監視装置の系統図監視画面

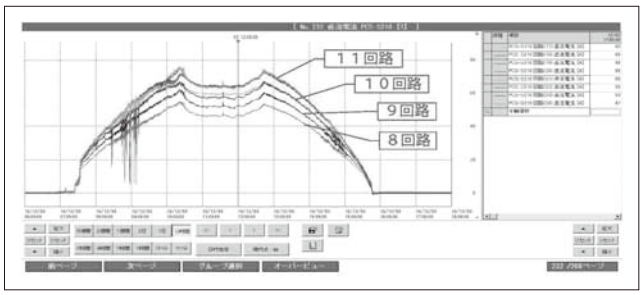


図 7　PCS の 24 分岐回路の電流値トレンド画面

図 6 に監視装置の系統図監視画面を，**図 7** に PCS の 24 分岐回路の電流値トレンド画面を示す。

発電所は，太陽電池やケーブルなどの盗難被害を防止するため，警備会社の専用機器により周囲のフェンスと発電所門扉に対して 24 時間のセキュリティ監視を行っている。

7　総合機能試験・性能認定試験

2016 年 11 月に総合機能試験として，総合インタロック試験，制御電源喪失試験，負荷遮断試験および負荷試験を実施し，発電所に求められる所定の機能と性能を持っていることを確認した。PCS は最大 51 MW を出力し，154 kV 系統に送電できることを確認した。

発電性能は，推定電力量と実際の出力とを比較して評価を行った。推定電力量は，発電所内に設けたそれぞれ 10 台の日射計と気温計による日射量と気温のデータを用いて，JIS C 8907 に準拠した発電電力量推定法により算出し，実際の出力は売電用電力量計の出力値を用いている。性能認定試験は，日射量が安定している状態で 1 時間当たり 300 W/m^2 以上，気温 30 ℃ 以下でかつモジュール面に積雪や汚れのない状態で行った。その結果，推定発電量に対して売電電力量が 101.6% から最大で 113.2% となり，所定の発電性能を満足していることを確認した。**図 8** に，性能認定試験の結果を示す。

本発電所は，使用前自主検査および安全管理審査の合格を経て 2017 年 1 月末に発電所引渡しを完了した。

〈注 2〉解列：電力系統から発電設備などを切り離すこと

認定試験データ

12月3日	発電所全体				
時　刻	日射量 (Wh/m²)	気　温 (℃)	売電電力量 (MWh)	推定発電電力量 (MWh)	比　率 (売電/推定)
0:00	0.0	5.3	0.0	0.0	0.0%
1:00	0.0	5.3	0.0	0.0	0.0%
2:00	0.0	5.3	0.0	0.0	0.0%
3:00	0.0	5.3	0.0	0.0	0.0%
4:00	0.0	5.3	0.0	0.0	0.0%
5:00	0.0	5.3	0.0	0.0	0.0%
6:00	4.8	5.2	0.0	0.3	0.0%
7:00	203.7	5.5	7.8	12.0	65.1%
8:00	457.5	6.3	28.3	26.5	106.8%
9:00	661.0	7.2	42.0	37.2	113.2%
10:00	782.1	8.1	49.2	43.5	113.1%
11:00	820.3	8.7	50.0	45.2	110.6%
12:00	776.3	9.0	48.0	42.8	112.1%
13:00	643.0	8.8	39.6	36.1	109.5%
14:00	440.9	8.1	25.7	25.3	101.6%
15:00	146.3	7.2	4.5	8.7	51.7%
16:00	0.2	5.9	0.0	0.0	0.0%
17:00	0.0	5.3	0.0	0.0	0.0%
18:00	0.0	3.9	0.0	0.0	0.0%
19:00	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0%
20:00	0.0	−0.1	0.0	0.0	0.0%
21:00	0.0	−2.3	0.0	0.0	0.0%
22:00	0.0	−2.7	0.0	0.0	0.0%
23:00	0.0	−1.7	0.0	0.0	0.0%
1日の合計発生電力量 (MWh)			295.1	277.6	106.3%

認定試験結果

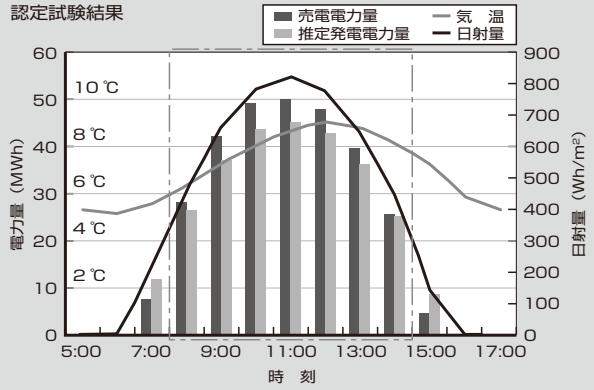


図 8　性能認定試験結果

8　あとがき

DC71 MW/AC51 MW 上北六ヶ所太陽光発電所の建設工事と設備の構築について述べた。

太陽光発電所の建設は「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」（FIT）の見直しに伴い減少傾向にあるが，今後，出力変動緩和対策や系統電圧変動対策が要求される大規模太陽光発電所の伸長が予想される。蓄電池併設型 PCS，系統変動抑制型 PCS など富士電機の PCS 技術を最大限に活用して，さらなる再生可能エネルギーの拡大に貢献していく所存である。

参考文献

(1)　藤井幹介ほか. メガソーラー向け屋外設置型高効率PCS「PVI1000」. 富士時報. 2012, vol.85, no.3, p.245-249.

尻無濱 立穂

太陽光発電所 EPC 建設工事のエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部新エネプラント事業部太陽光・風力発電技術部。

本田　大祐

太陽光発電所 EPC 建設工事のエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部新エネプラント事業部太陽光・風力発電技術部。

久保薗 隆治

太陽光発電所 EPC 建設工事のサイトエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部プラント建設部。

燃料電池の新展開

Status of Development and Sales Strategy of Fuel Cell Systems

青木　信 AOKI, Makoto　　堀内　義実 HORIUCHI, Yoshimi

富士電機は，りん酸形燃料電池（PAFC）の機能の高度化と用途の拡大に取り組んでいる。国内では，独立給電による災害対応機能を持つ機種とバイオガス発電に対応した機種を中心に納入を進めている。海外では，燃料電池の低酸素濃度の排ガスを利用する防火用途に適用し，納入を進めている。また，次世代の高効率コージェネレーションシステムとして，50% を超える発電効率を目標に固体酸化物形燃料電池（SOFC）についても開発に取り組み，実証機の設計・製作と性能評価を進めている。

Fuji Electric has been working to improve the functions of phosphoric acid fuel cells (PAFCs) and expand their applications. For the Japanese market, we are mainly offering models that have grid independent power supply mode for emergency and models that generate electricity from biogas. For the market outside Japan, we are providing the PAFCs for fire-prevention equipment that utilizes low oxygen concentration exhaust emitted from a fuel cell system. We have also been developing solid oxide fuel cells (SOFCs) for next-generation, high-efficiency cogeneration systems. We are designing, manufacturing and evaluating the performance of them to aim for a power generation efficiency exceeding 50%.

1　まえがき

2015 年 7 月に資源エネルギー庁から発表された「長期エネルギー需給見通し」では，エネルギー供給の安全性，安定供給，経済効率性および環境適合の観点から徹底した省エネルギーが必要とされており，燃料電池を含むコージェネレーションシステムの導入の加速が期待されている。燃料電池は他のコージェネレーションシステムと比較して，多様な燃料を利用できることに加えて，小容量でも発電効率が高くランニングコストや CO_2 排出量を低減できること，環境性に優れていることなど，多くの特徴を持っている。中でも，りん酸形燃料電池（PAFC）は 124,000 時間（約 15 年）以上に及ぶ長期の商用での運用実績が豊富にあり，中小規模のコージェネレーションシステムとして実用的な選択肢となっている。また，りん酸形燃料電池よりもさらに発電効率が高い固体酸化物形燃料電池（SOFC）が，業務用として実用化が間近になってきた。

富士電機は，1998 年に 100 kW りん酸形燃料電池の販売を開始した。エネルギーコストが比較的割高な中小規模の施設向けに，発電容量 100 kW のコージェネレーションシステムに特化して，調達や生産，エンジニアリングの効率化を図ってきた。燃料電池本体の長寿命化や設置性の向上にも取り組み，2010 年から周辺設備を含めてオールインワンパッケージ化するとともに，寒冷地にも対応したりん酸形燃料電池「FP-100i」を販売している（**図 1**）。

本稿では，FP-100i の仕様と用途展開を中心に，次世代の高効率コージェネレーションシステムとして開発中の固体酸化物形燃料電池についても述べる。[(1)〜(11)]

図 1　りん酸形燃料電池「FP-100i」

2　「FP-100i」の仕様とオプション機能

表 1 に FP-100i の主な仕様を示す。燃料に関しては，改質系機器を自社で開発している強みを生かして，インフラが整備されている都市ガスのほか，再生可能エネルギーとして注目されているバイオガス（消化ガス）に対応した機種も展開している。さらに，次世代のインフラとして期待されている水素での発電が可能な機種もラインアップしており，48% という高い発電効率を実現している。

コージェネレーションシステムとしての用途に加え，オプション機能として，LP ガスをバックアップ燃料として独立給電が可能な災害対応型，クリーンな低酸素濃度空気の供給が可能な火災予防対応型などを用意している。FP-100i の主なオプションラインアップを**表 2** に示す。

表1 「FP-100i」の主な仕様

項　目	仕　様		
燃　料	都市ガス	バイオガス	純水素
出　力	105 kW（発電端）		
出力電圧 / 周波数	210 V/50 Hz または 60 Hz		
発電効率（LHV）*	42%	40%	48%
熱出力	123 kW	116 kW	99 kW
総合効率（LHV）	91%	84%	93%
排ガス	NOx：5 ppm 以下 SOx，ダスト：検出限界以下		NOx，SOx， ダスト：なし
外形寸法	W2.2 × D5.5 × H3.4（m）		
質　量	14 t		13.5 t

＊ LHV：ある一定の状態に置かれた単位量の燃料が断熱的に完全燃焼し，その燃焼ガスを元の温度まで冷却したときに放散される熱量を“発熱量”という。発熱量には，水蒸気の潜熱を含める高位発熱量（HHV：Higher Heating Value）と，これを含めない低位発熱量（LHV：Lower Heating Value）がある。

表2 「FP-100i」のオプションラインアップ

準拠基準	燃　料	機　能				備　考
		熱電併給	独立給電	燃料切替	低酸素空気供給	
JIS 適合	都市ガス	○	—	—	—	
		○	○	○	—	災害対応型
	消化ガス	○	—	—	—	
	純水素	○	—	—	—	
CE 適合	天然ガス	○	—	—	—	
		○	—	—	○	火災予防対応型
	純水素	○	—	—	—	

3　国内の納入状況と導入事例

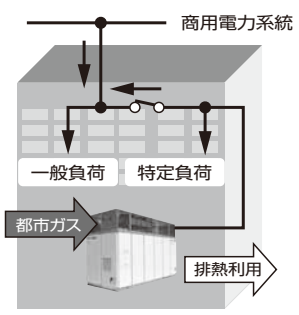
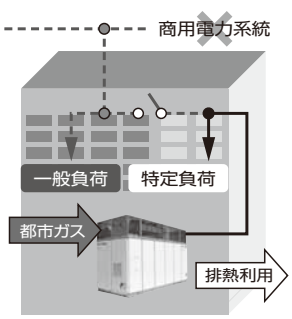
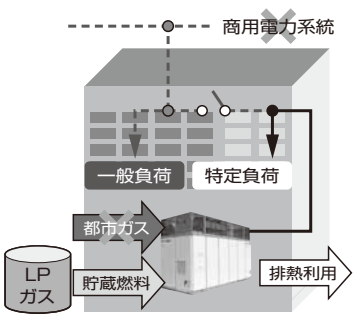
国内におけるコージェネレーションシステムの導入量は，燃料価格高騰の影響により 2004 年をピークに減少傾向にあったが，2011 年 3 月の東日本大震災以降はエネルギーセキュリティへの関心が高まり回復傾向にある。富士電機では，電気や都市ガスの供給が停止した場合でも燃料を瞬時に LP ガスに切り替えて重要負荷への独立給電が可能な災害対応型を開発し，災害発生時の拠点となる病院や公共施設などに納入している。

表 3 に，災害対応時の運転切替の動作を模式的に示す。通常は商用の電力系統に連系して運転している。停電が発生した場合には，自動的に系統から解列〈注〉し，いったん待機運転モードに移行した後，停電を検知してから約 30 秒で自立運転が開始できる。待機運転モードとは，燃料電池は単独で発電を継続し，発電した電力は燃料電池発電設備内で消費する運転モードである。自立運転状態で負荷に接続した場合には，過電流保護機能，負荷保護機能およびリミッタ機能により，突入電流が発生する回転機類の連続投入を可能にしている。都市ガスの供給が止まった後，LP ガスでの運転時には出力は 70 kVA に制限されるが，50 kg ボンベで約 3 時間の給電が可能である。

常時の電気・熱の供給に加えて，非常時には太陽電池や蓄電池とも連動して重要負荷への独立給電を可能とした燃料電池設備を，2015 年度に富士電機の東京工場に設置した。さらに，新たな用途展開として，燃料電池の排ガスがクリーンであることを生かし，CO_2 濃度が大気の約 150 倍高い排ガスの一部を，併設した植物工場実験施設に供給して植物育成環境の制御に活用している（**図 2**，**図 3**）。

一方，2012 年 7 月に施行された「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」（FIT）が追い風となり，下水処理

表3　災害対応時の運転切替動作

状　態	常用時	停電時	停電＋都市ガス遮断時
切替動作	系統に連系して運転する	系統から解列し， その後，特定負荷に給電する	系統から解列し，燃料切替を経て， 特定負荷に給電する
出　力	105 kW	100 kVA	70 kVA
燃　料	都市ガス	都市ガス	LP ガス（50 kg ボンベで 3 h）
運　転	系統連系運転	自立運転	自立運転
電力供給範囲			

〈注〉解列：電力系統から発電設備などを切り離すこと

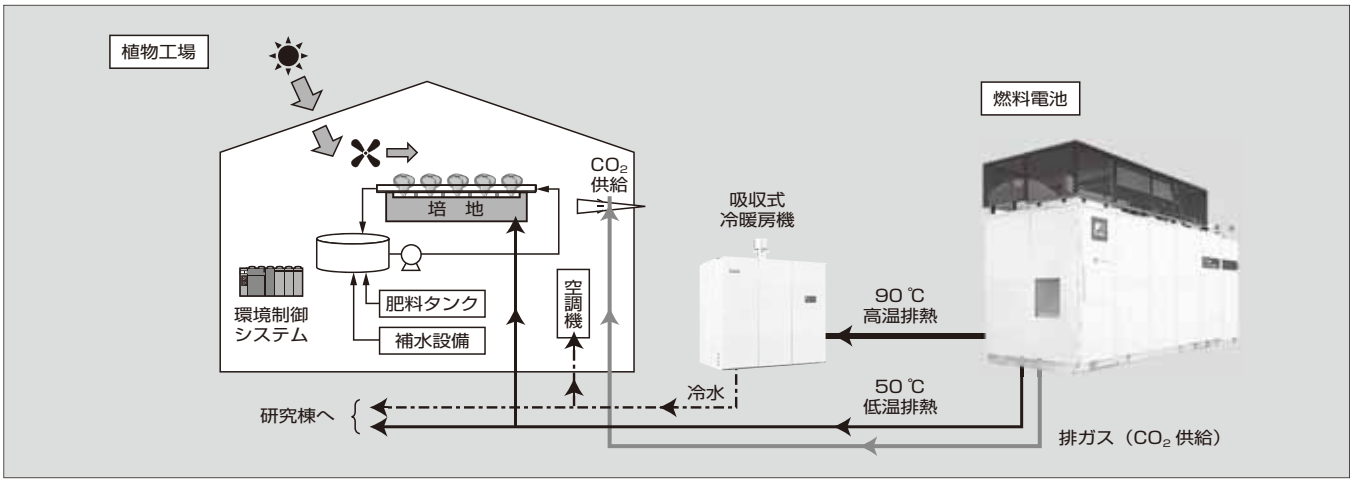


図 2　東京工場におけるコージェネレーションシステムと植物工場への CO_2 の供給

図 3　東京工場に設置した燃料電池

場への導入が進んでいる。カーボンニュートラルである下水消化ガスで発電した場合，発電した電力を 1 kWh 当たり 39 円で 20 年間売電することができる。発電効率が高い燃料電池は，同規模の他方式の発電装置と比較して，より多くの電力を発生させることができるので，ライフサイクルでのメリットの観点から燃料電池が選択される事例が増えている。2014 年度は 4 か所に合計 10 台を，2015 年度は 1 か所に 8 台を納入しており，引き続き活発な引き合いが見込まれる。

4　海外の納入状況と導入事例

海外では，家庭用に先行して業務用燃料電池の導入が進んでいる。富士電機は 2010 年に海外向けに出荷を開始し，これまでドイツを中心に，韓国，米国，南アフリカの 4 か国に合計 11 台を納入した。

ドイツは，2022 年までに国内の原子力発電所 17 基を全て停止することを決定した。しかし，太陽光発電，風力発電，バイオマス発電などの再生可能エネルギーの導入が進むにつれ，電力系統の不安定化が問題となってきている。これを緩和する手段として，出力調整が容易なコージェネレーションシステムに期待が寄せられている。富士電機では，コージェネレーションシステムの新たな付加価値として，ドイツで普及しつつある室内の酸素濃度を低減することで火災を予防する防火システムに，燃料電池から排出されるクリーンな低酸素濃度の空気を適用する取組みを行い，倉庫やデータセンターへ納入した。燃料と空気を燃焼させて発電するエンジン発電機とは異なり，燃料電池では電解質によって隔てられた燃料と空気を電気化学反応で発電する。このため，空気に関しては，発電の過程で酸素だけが選択的に消費され，排出される空気は有害な燃焼排ガスを含まない低酸素濃度の空気となる。数千 m の高地レベルの低酸素分圧下では，建材や紙などに着火しないことに加え，人体に直ちに影響は及ぼさない効果が得られる。**図 4** に示すとおり，従来の膜分離・吸着分離を利用して空気から窒素を作り供給することで室内の酸素濃度を低減するシステムに比べ，コンプレッサによるエネルギー消費（ランニングコスト）や騒音・振動を抑え，環境性が高く高効率なシステム構成を実現している。**図 5** にドイツでの実証機の設置状況を示す。

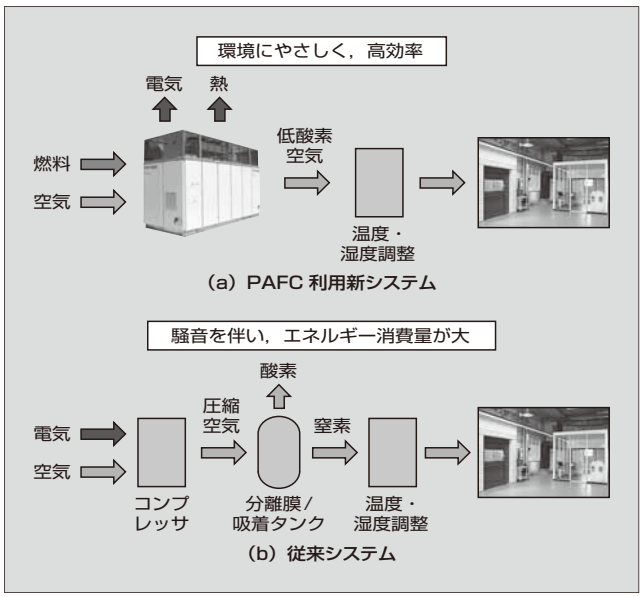


図 4　室内の酸素濃度を低減するシステムの比較

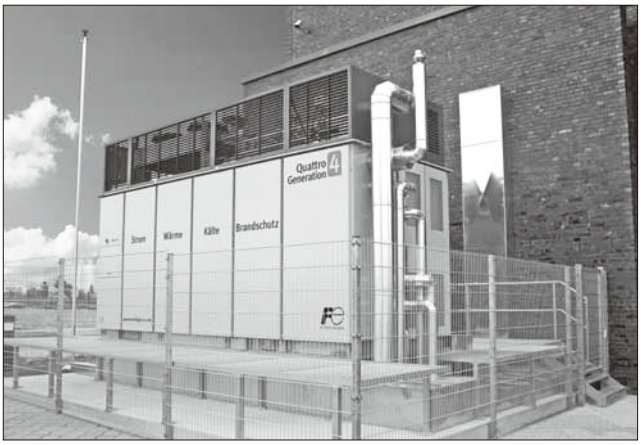


図 5　ドイツ・ヴィスマールに設置した防火用実証機

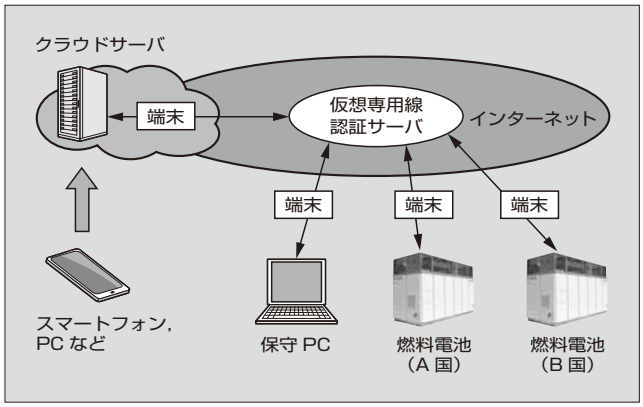


図 6　クラウド型燃料電池遠隔監視システムとメンテナンスシステム

2016 年 1 月には，低酸素防火システムのパートナーとしてドイツでの拡販を進めてきた N_2telligence 社を買収した。同社の特許と販売網を活用して，ドイツをはじめ欧州での拡販を加速していく。EU で販売される製品には CE マークの貼付が義務付けられる。燃料電池は，電気と機械が一体となった一種の化学プラントで，対象となる EU 指令も多岐にわたる。国内の燃料電池で CE マーク適合の前例がなかったが，装置の改造を含めて対処を進め，第三者認証機関から適合証明を得た。また，ドイツの系統連系規格 VDE 4105 についても，第三者認証機関による適合認証を取得済みである。

ドイツでは，都市ガス中に 10% 程度の窒素を含む低カロリーガスが流通している地域も多い。燃料電池内では，燃料ガスを燃料処理装置により水素を多く含むガスに変換した後，燃料電池本体に供給し発電を行っている。従来の燃料処理装置では，窒素が多い燃料ガスを使うと，副生成物として燃料電池本体にとって有害なアンモニアを生成していた。そこで，新規触媒の選定などの改良を行い，窒素が多い燃料ガスでもアンモニアを発生させることなく水素を多く含むガスに転換可能な燃料処理装置を開発した。今後，低カロリーガスが流通している地域への普及が期待できる。

韓国では，「再生可能エネルギー義務割当制度」（RPS）や新規建屋への再生可能エネルギーの導入義務化などの政策が追い風となり，業務用燃料電池の導入が拡大している。富士電機は，2014 年に韓国向けに出荷を開始し，これまでに商業ビルとデータセンターに納入した。

南アフリカは，“BRICS”の一角として成長が期待される一方，発電施設の老朽化などで電力不足が深刻化している。企業では，防衛手段として自家発電の導入を積極的に進めている。富士電機は，2014 年に南アフリカのオフィスビルに燃料電池を納入した。平常時は系統に連系してビル内に送電し，計画停電時には重要負荷に電力を供給する独立給電機能を持っている。

富士電機では，これらの海外納入機に対してインターネットを用いたクラウド型燃料電池遠隔監視システムやメンテナンスシステムを開発し，日本から状態監視やソフトウェアの変更などを行っている（**図 6**）。クラウドサーバへの稼動データの保存と，保守 PC から燃料電池ソフトウェアの遠隔更新を同時に実現し，携帯端末からクラウドサーバにログオンすれば，いつでもどこでも稼動データの監視が可能である。本システムを活用し，燃料電池の安定稼動を実現している。

5　固体酸化物形燃料電池

りん酸形燃料電池に加え，固体酸化物形燃料電池の開発を進めている（**図 7**）。高い発電効率が得られることが最大の特徴であり，**表 4** に示す実証機の目標仕様から数十 kW 規模の業務用コージェネレーションシステムを想定し，2014 年度から国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術

図 7　固体酸化物形燃料電池実証機の外観イメージ

表 4　固体酸化物形燃料電池実証機の目標仕様

項　目	目標仕様
発電出力	50 kW 級
発電効率（LHV）	50% 以上
排熱回収効率（LHV）	30% 以上（温水出力）
総合効率	80% 以上
装置寸法	W5.0 × D2.2 × H2.8（m）

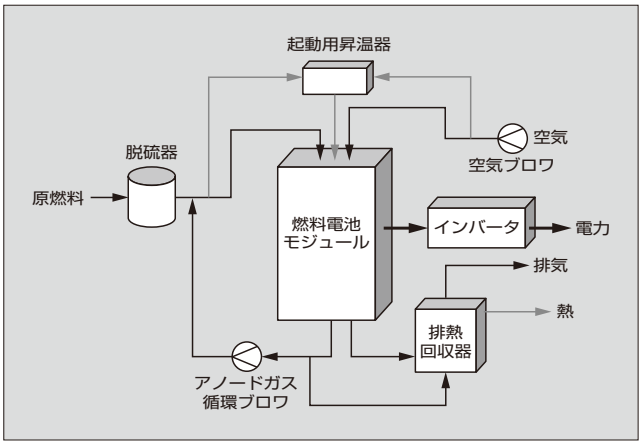


図 8　固体酸化物形燃料電池の機器構成

総合開発機構（NEDO）の支援を受けて開発を進めている。回収した熱を全て利用した際の総合効率はりん酸形と同等であるが，熱に比べて電気の出力割合が大きい。そのため，熱利用がそれほど多くない設置サイトでも経済的で効率的な運用が可能である。

2014 ～ 2015 年度に常圧型電池モジュールなどの要素技術開発を行い，2016 ～ 2017 年度にコージェネレーションシステムの実証機の設計・製作と性能評価を進めている。開発中の固体酸化物形燃料電池の機器構成を**図 8** に示す。本システムは，内部改質型のセルスタックを採用している。そのため，機器数が少なくシンプルな構成で，主要機器は，脱硫器，燃料電池モジュール，排熱回収器およびアノードガス循環ブロワである。燃料電池モジュールの燃料側の排ガス（アノードガス）を循環させることにより，電池反応によって生成した水を循環し，燃料ガスの改質反応に必要なスチームを供給する。これにより，運転中に外部からの水の補給を不要とする水の自立を図るとともに，システム全体での燃料の利用率を高めることが可能となり，高い発電効率を実現している。水の自立は，水処理装置のメンテナンス間隔を長くし，メンテナンスコストを抑制する上で必要であり，実用化には必須な技術である。また，燃料電池モジュールの最適設計と 3 レベルインバータの採用による高効率化や，3D モデルを使った熱流体解析に基づくパッケージ内の機器配置設計など，高い発電効率を目指し開発を進めている。

6　あとがき

りん酸形燃料電池については，電源セキュリティ機能や低酸素濃度の空気を供給する防火機能などの付加価値を生かすとともに，バイオガスや水素など多様な燃料への対応を強みに拡販していく。一般のコージェネレーションシステムの市場には，りん酸形に加え，発電効率の高い固体酸化物形燃料電池を投入していく。

長年培った燃料電池技術を活用し，燃料電池の特長を生かした各種アプリケーションの開発と適用拡大を進め，日本だけでなく世界に向けて，地球温暖化防止および環境保護，持続可能な社会の実現に貢献していく所存である。

参考文献

(1)　千田仁人ほか. PAFCのポテンシャリティと導入実績. 燃料電池. 2010, vol.9, no.4, p.11–17.
(2)　堀内義実, 吉岡浩. 停電時対応燃料電池について. クリーンエネルギー. 2012, vol.21, no.1, p.21–25.
(3)　岡嘉弘. 低酸素濃度空気供給燃料電池発電設備について. 電機. 2013, vol.760, p.41–44.
(4)　腰一昭ほか. 新規ニーズに対応した燃料電池. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.2, p.134–138.
(5)　吉岡浩. 富士電機のりん酸形燃料電池の開発. 日本エネルギー学会誌. 2013, vol.92, no.11, p.1065–1070.
(6)　黒田健一, 吉岡浩. りん酸形燃料電池の稼働状況について. 燃料電池. 2015, vol.14, no.3, p.10–16.
(7)　黒田健一. 燃料電池. 電設技術. 2015, vol.61, no.2.
(8)　黒田健一. 富士電機の水素事業への取組み. 電機. 2015, vol.778, p.32–35.
(9)　大内崇ほか. りん酸形燃料電池の適用事例. 日本ガスタービン学会誌. 2016, vol.44, no.4, p.259–264.
(10)　青木信ほか. 富士電機におけるりん酸形燃料電池の展開. 燃料電池. 2016, vol.16, no.1, p.42–48.
(11)　大栗延章ほか. 業務用SOFCの開発状況. 第23回燃料電池シンポジウム講演予稿集. 2016, p.73–74.

青木　　信

燃料電池および無機材料の開発，エンジニアリング業務に従事。現在，富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部新エネプラント事業部燃料電池技術部。工学博士。日本化学会会員。

堀内　義実

燃料電池および新エネルギーのエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部新エネプラント事業部燃料電池技術部。電気学会会員。

電圧変動問題の解決に貢献する配電系統用静止型無効電力補償装置

Distribution Static Var Compensators and Static Synchronous Compensators for Suppressing Voltage Fluctuation

小島　武彦 KOJIMA, Takehiko　　磯谷　仁志 ISOTANI, Hitoshi　　山田　真 YAMADA, Makoto

近年，太陽光発電の導入が急速に拡大しているが，導入の拡大に伴って配電線の電圧上昇などの問題が生じてくる可能性がある。富士電機では，配電系統の電圧問題の対策として無効電力により電圧を制御する静止型無効電力補償装置（SVC）を開発している。他励式配電系統用 SVC は，高調波フィルタが不要なことからシンプルな装置構成であり，東北電力株式会社管内でのフィールド試験により電圧上昇を抑制する効果を確認した。自励式配電系統用 SVC は，SiC 素子を用いており，その低損失の特性を生かした自然空冷で単柱への取付けが可能な小型・軽量の装置である。

The rapidly expanding introduction of photovoltaic power systems in recent years may cause problems such as a voltage rise in distribution lines. To solve the voltage problems in distribution systems, Fuji Electric has developed static var compensators (SVCs) and static synchronous compensators (STATCOMs), which control voltage with reactive power. Fuji Electric's SVCs offer a simple equipment configuration without the need for a harmonic filter. We confirmed the effect of suppressing a voltage rise by conducting a field test within the territory of Tohoku Electric Power Co., Inc. The distribution STATCOMs are compact and lightweight devices that use SiC devices to achieve single-pole tower mounting with natural air cooling by taking advantage of these low power dissipation characteristics.

1　まえがき

近年，「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」（FIT）などにより，太陽光発電の導入が急速に拡大している。一方，太陽光発電は天候により出力が変動する不安定な電源であり，導入の拡大に伴って配電線の電圧上昇などの問題が生じる。従来の電圧制御方法は，配電線の自動電圧調整器（SVR：Step Voltage Regulator）などにより，適正電圧の範囲内に収まるようにしていた。SVR は，タップ切換えによる段階的な電圧制御や時間遅れがあるため，不規則かつ急峻（きゅうしゅん）な電圧変動への対応は困難であった。

富士電機では，配電系統の電圧を安定化させるため，無効電力で電圧を制御する配電系統用の静止型無効電力補償装置（SVC：Static Var Compensator）を提供している。本稿では，この配電系統用 SVC の構成や特徴について述べる。

2　配電系統用 SVC の特徴

2.1　SVR と SVC の違い

図 1 に，SVR と SVC における電圧調整の概念図を示す。

従来の電圧制御の中心となっている SVR は，変圧器のタップを切り換えることにより電圧を調整する直列機器である。タップが切り換えられると，SVR が設置された地点より先の電圧が一律に変更される。SVR による電圧の制御方法は，SVR の設置点における電圧および通過電流を計測して目標の電圧になるようにタップを動作させるものである。タップ動作であるため，**図 1** (a)に示すように電圧調整は 100 V 幅など段階的となる。

一方，SVC は無効電力を系統に注入することにより電圧を調整する並列機器である。SVC の設置点と変電所の間におけるインダクタンス X と無効電力 Q の関係は次の式で近似的に計算できる。

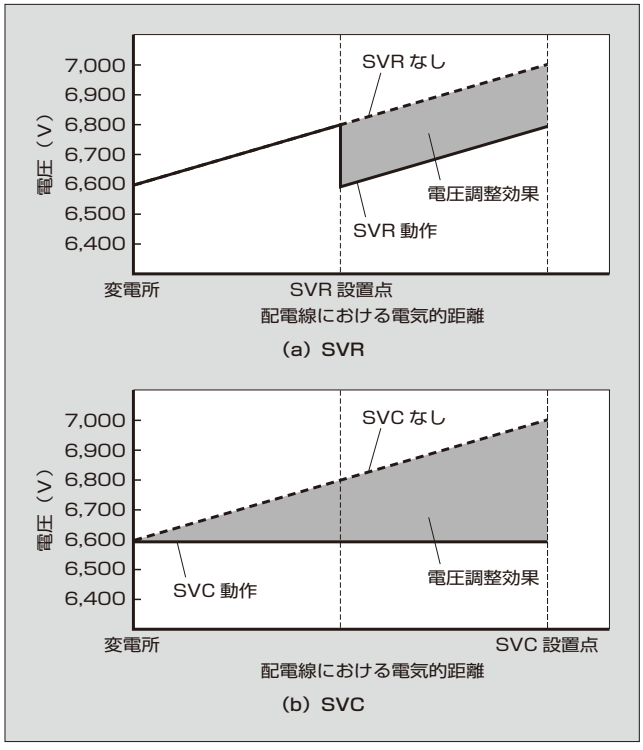


図 1　電圧調整の概念図

$$\Delta V=\frac{X\cdot Q}{V} \quad \cdots\cdots(1)$$

ΔV：電圧の調整幅（V）

X：変電所から SVC 設置点までのインダクタンス（Ω）

Q：無効電力（var）
V：系統の電圧（V）

SVC による電圧の制御は，SVC の設置点で計測した電圧と目標電圧の差に応じて必要な無効電力を出力することによって行う。なお，SVC の無効電力は連続的な出力ができるため，**図 1**(b)に示すように電圧調整幅は連続的となる。

SVC は，変電所からのインダクタンスが大きくなる箇所，つまり変電所から離れた箇所に設置する方が変電所に近い箇所に設置するより電圧を調整できる。そのため，太陽光発電などにより変電所から離れた地点で電圧上昇などの問題が発生した場合は，SVC による電圧調整が有利となる。また，太陽光発電などによる急峻な電圧変動を SVR で対応しようとすると，SVR の機械的なタップ動作の回数が増加してしまい，場合によっては SVR の交換時期が早まってしまう恐れもある。一方，SVC であれば急峻な電圧変動を制御しても機械的な動作がないため交換周期が短くなることはない。

SVR と SVC の特徴を考慮すると，SVR を変電所側に設置し，SVC を配電線の末端側に設置することがそれぞれの特長を生かす方法となる。**図 2** に，SVR を 2 台設置した場合と，SVR および SVC を 1 台ずつ設置した場合の電圧調整の概念図を示す。

図 2(a)では 2 台の SVR により電圧調整を行っているが，末端で電圧上昇が発生している。一方，**図 2**(b)では SVR と SVC により系統全体で電圧上昇の発生を抑制できている。特に，末端の電圧上昇は SVC の制御によって抑制し，変電所側の電圧上昇は SVR の制御によって抑制できている。このように既存の SVR と SVC で協調しながら系統全体の電圧を健全に保つことが可能となる。

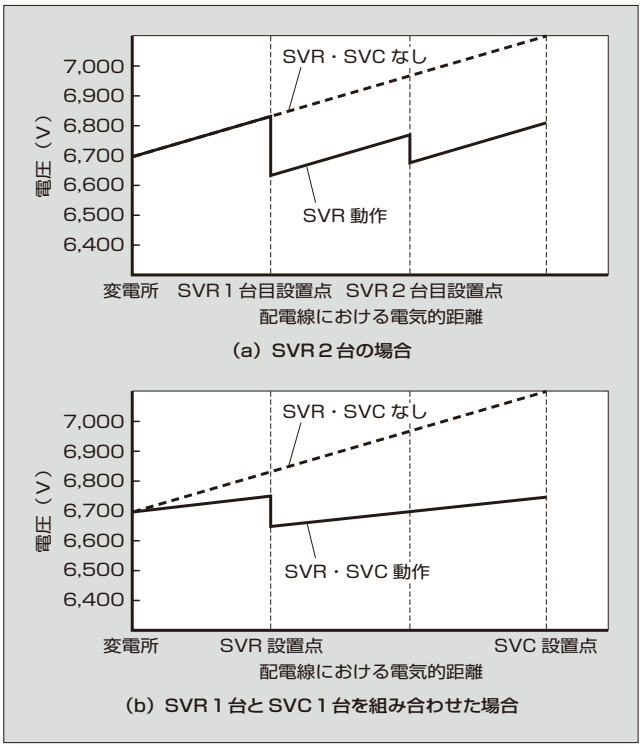


図 2　複数台による電圧調整の概念図

なお，SVC には 2 種類あり，リアクトルなどに流れる電流を制御することで無効電力を発生させる他励式 SVC，ならびに自己消弧形のスイッチング素子を用い，任意の位相の電流または電圧を発生することで無効電力を発生させる自励式 SVC がある。富士電機で開発している他励式および自励式の配電系統用 SVC について次に述べる。

2.2　他励式配電系統用 SVC の構成

一般に，他励式配電系統用 SVC には，サイリスタを用いてリアクトルに流れる電流を直接スイッチングすることにより制御するサイリスタ制御リアクトル方式（TCR：Thyristor Controlled Reactor）がある。この方式では，リアクトルの電流をサイリスタによって直接入切するため高調波フィルタが必要である。これに対して，富士電機は，東北電力株式会社と共同研究を行い，磁束制御技術を適用した可変インダクタを用いて新型の他励式配電系統用 SVC を開発した[1]。この方式では，直流電流によってリアクトルに流れる電流を制御できることから高調波フィルタが不要となり，従来に比べてシンプルな装置構成の SVC を実現できる。

新型の他励式配電系統用 SVC の基本原理を**図 3** に示す。従来の他励式配電系統用 SVC とは原理が異なっている。磁心に交流巻線と制御巻線を実装しており，制御巻線に直流電流を流すと磁気飽和が生じ，実効的な透磁率が減少する。この原理により，磁束密度を制御し，透磁率を変化させることで実効的なインダクタンスを制御することができ，系統に流入する無効電力を調整することができる。主回路が鉄心や巻線のみで構成できるため，サージなどに対する耐性が強く信頼性を確保しやすい構成が可能となる。また，無効電力の出力を調整する制御電流は直流であるため，制御回路およびソフトウェアのアルゴリズムもシンプルに構成できる。

開発した他励式配電系統用 SVC の外観を**図 4** に，仕様を**表 1** に示す。

2.3　自励式配電系統用 SVC の構成

自励式配電系統用 SVC は，自己消弧形のスイッチング素子を用いて無効電力を調整し，電圧を調整する装置であ

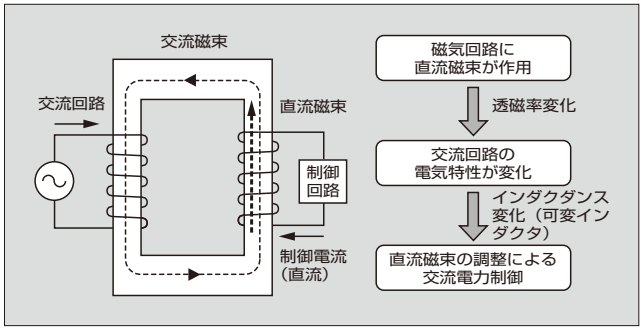


図 3　他励式配電系統用 SVC の基本原理

図 4　他励式配電系統用 SVC

表 1　他励式配電系統用 SVC の仕様

項　目	仕　様
定格容量	300 kVA
可変容量	0 ～ 300 kvar（遅れ）
定格電圧	6,600 V
周波数	50/60 Hz
冷却方式	自然空冷
質　量	4,000 kg 以下
外形寸法	W2,500 × D1,500 × H2,000（mm）
主回路	可変インダクタ （高調波フィルタレス）

る。従来の自励式配電系統用 SVC は Si（シリコン）半導体素子を用いたものであり，高耐圧と高周波スイッチングが難しく，損失と騒音の低減に限界があった。このため，従来は冷却ファンが必須であることからメンテナンス性に難があり，電柱への取付けは 2 本柱が必要であった。

富士電機では，この対策として，冷却ファンが不要な自励式配電系統用 SVC の実現を目指し，Si 素子に代わるパワー半導体素子として SiC（炭化けい素）素子を適用した SVC の開発を進めている。SiC は Si に比べて，高耐圧と高周波スイッチングが可能な半導体材料である。現在，3.3 kV 200 A の SiC パワー半導体を開発し適用している。開発した自励式配電系統用 SVC の回路を**図 5** に，仕様を**表 2** に示す。

3.3 kV の SiC-MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）と SiC-SBD（Schottky Barrier Diode）からなる SiC モジュールを用いた 3 レベルインバータと連系変圧器によって，自励式配電系統用 SVC を構成している。熱解析を行うことにより，本構成で冷却ファンが不要な自然空冷を達成できる見通しを得ている。

SiC 素子の適用で自励式配電系統用 SVC は他励式配電系統用 SVC と比較して軽量化でき，単柱への取付けも可能な質量と体積となっている。

2017 年度に一般財団法人 電力中央研究所の赤城試験センターでの実証試験を予定しており，2018 年度には電力会社のフィールドでの実証を予定している。

なお，この自励式配電系統用 SVC の成果は，国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の“分散型エネルギー次世代電力網構築実証事業”において得られたものである。

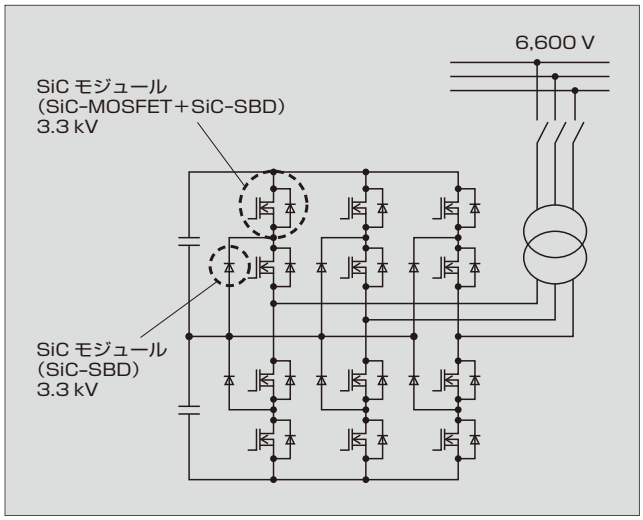


図 5　自励式配電系統用 SVC の回路

表 2　自励式配電系統用 SVC の仕様

項　目	仕　様
定格容量	300 kVA
可変容量	0 ～ 300 kvar（進み，遅れ）
定格電圧	6,600 V
周波数	50/60 Hz
冷却方式	自然空冷
質　量	1,800 kg 以下（60 Hz）
外形寸法	W1,300 × D1,000 × H2,500（mm）以内
主回路	変圧器，インバータ

3　配電系統における SVC の動作

新型の他励式配電系統用 SVC による電圧調整の動作を確認するため，東北電力株式会社の協力を得て，東北電力株式会社管内の実配電線においてフィールド試験を実施している[(2),(3)]。フィールド試験における系統図を**図 6** に，設置状況を**図 7** に示す。

フィールド試験の結果を**図 8** と**表 3** に示す。**図 8** は，他励式配電系統用 SVC を設置する前後のそれぞれ 1 日間の電圧変化の例を示したものである。このケースでは，他

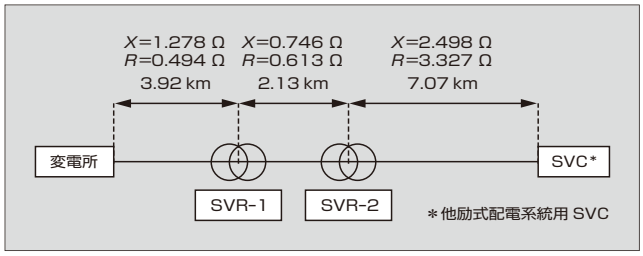


図 6　フィールド試験系統図

図7　フィールド試験における他励式配電系統用 SVC の設置状況

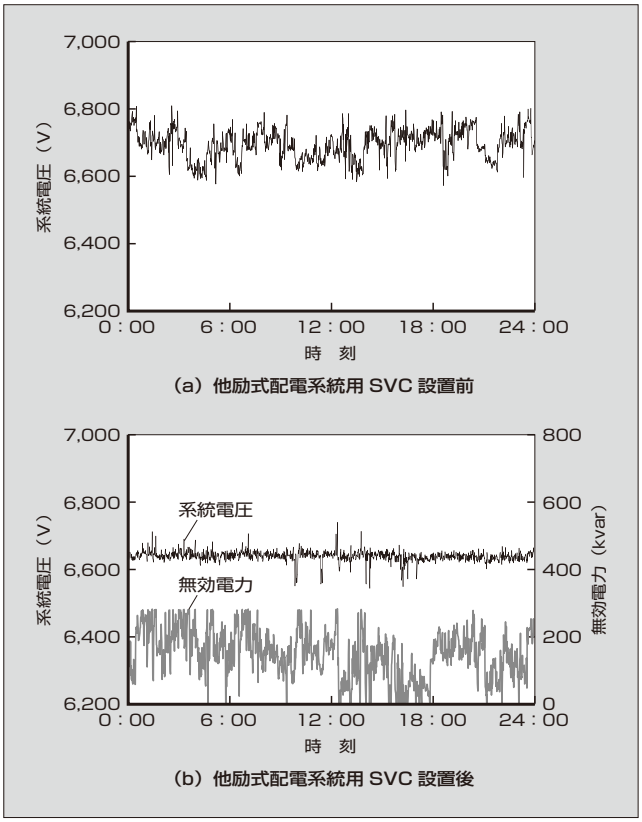


図8　フィールド試験結果の例

表3　フィールド試験の結果

項　目	試験結果	
	設置前	設置後
平均電圧	6,680 V	6,639 V
最大電圧	6,838 V	6,740 V
最小電圧	6,512 V	6,543 V
電圧管理範囲内の頻度 *1	72.9%	99.9%
平均無効電力量	−	146 kvar
最大電圧変化 *2	210 V	120 V
SVR-2 の動作回数	15 回	5 回

＊1：管理範囲を 6,350 V から 6,720 V と仮定し，1 日を 100%とした際に電圧が範囲内にある割合
＊2：現在の電圧データと 1 分前の電圧データとの差分の絶対値で最大のもの

励式配電系統用 SVC の制御として上限電圧（6,700 V）を超過すると無効電力を出力して電圧上昇を抑制する制御方式としている。対象の系統は，他励式配電系統用 SVC を設置する前は一時的に 6,800 V を超える電圧が発生するなど平均的に電圧が高い系統であった。設置後では，最大電圧および平均電圧が低下し，電圧上昇を抑制できていることが確認できる。さらに，急峻な電圧変動を抑制する効果も確認できる。

また，系統内の SVR-2 における一日の動作回数が他励式配電系統用 SVC を設置する前に比べ，設置後には減少していることが確認できる。一般に，SVC と SVR を同一系統に設置した場合に，お互いの制御が干渉して SVR の動作回数が多くなるハンチング現象や，SVC のみに制御が偏って SVR が動作しなくなるという問題が起こることがある。しかし，SVR の設置位置や整定値を考慮し，SVC の制御や整定を適切に行うことによりハンチングなどの問題を抑制することができる。今回のフィールド試験において，SVR の動作回数が多くなるなどの問題が発生せず良好な結果となり，SVR と他励式配電系統用 SVC が協調して制御できることを確認できた。太陽光発電の導入が増えるとその出力変動が問題となるが，それに起因した SVR の動作回数の増加を抑制する効果があることが分かった。

4　あとがき

本稿では，配電系統用 SVC について電圧調整方法や自励式および他励式の原理や構成について述べた。他励式配電系統用 SVC のフィールド試験において電圧上昇を抑制する効果が確認でき，SVC によって太陽光発電による配電系統の電圧変動問題の解決に貢献できる。

富士電機では，配電系統用 SVC の製品開発を継続し，太陽光発電などの再生可能エネルギーの導入拡大に貢献する装置を提供していく所存である。

最後に，他励式配電系統用 SVC の開発・設計・実証試験に多大なるご指導とご協力をいただいた東北電力株式会社殿，ならびに自励式 SVC の開発・設計に多大なるご指導をいただいた国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）殿の“分散型エネルギー次世代電力網構築実証事業”の関係各位に深く感謝する次第である。

参考文献

(1)　有松健司ほか. 磁束制御型高圧電圧調整装置の制御特性およびフィールド試験結果. 平成24年電気学会電力・エネルギー部門大会 No.28.
(2)　大日向敬ほか. 磁束制御型高圧電圧調整装置の協調動作に関する一考察. 平成26年電気学会電力・エネルギー部門大会 No.171.
(3)　大日向敬ほか. 磁束制御型高圧電圧調整装置の協調動作に

関する一考察（その2）. 平成27年電気学会電力・エネルギー部門大会 No.199.

小島　武彦

電力・エネルギー制御システムの開発およびエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部社会システム事業部次世代配電プロジェクト部担当部長。電気学会会員。

磯谷　仁志

配電自動化システムの開発およびエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部社会システム事業部次世代配電プロジェクト部課長補佐。

山田　　真

電力流通分野の制御・保護・解析装置の企画・開発・エンジニアリング業務に従事。現在，富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部社会システム事業部電力流通総合技術部課長補佐。電気学会会員。

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

Large–Scale Power Conditioning System for Grid Storage Battery System with Redox Flow Battery Having World's Highest Capacity Class of 60 MWh

毛内　俊晴 MONAI, Toshiharu　　須﨑　久晴 SUZAKI, Hisaharu　　矢野　敬二 YANO, Keiji

富士電機は，住友電気工業株式会社から，世界最大級の 60 MWh レドックスフロー電池による系統安定化実証設備のうち交直変換装置（2.5 MVA×13 バンク）とバンクコントローラ盤から成る大容量交直変換システムを受注し，北海道電力株式会社 南早来変電所に納入した。交直変換装置は，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相当制御，中央給電指令所からのリモート制御，電池状態に基づく補充放電制御などを行う。バンクコントローラ盤は，65 台ものパワーコンディショナの状態を管理し，大規模で高速な並列運転を実現する。

Fuji Electric received an order from Sumitomo Electric Industries, Ltd. for a large-scale power conditioning system consisting of power conditioning equipment (2.5 MVA × 13 banks) and storage-bank control panels, which are part of a power system stabilization demonstration facility using a redox flow battery system having the world's highest capacity class of 60 MWh. We delivered the system to the Minami-Hayakita Substation of Hokkaido Electric Power Co., Inc. The power conditioning equipment is capable of governor-free equivalent control for quick charging and discharging in accordance with the frequency fluctuation in the power system, remote control from the central load dispatching center, and supplementary discharge control depending on the battery status. The bank controller panels control the statuses of as many as 65 power conditioning sub-systems to achieve large-scale and high-speed parallel operation.

1　まえがき

風力発電や太陽光発電は，天候に依存するため不規則な出力変動を生じる。このため，電力系統への導入の拡大に伴って周波数などの電力品質への影響が懸念されている。こうした背景の下，電力系統における再生可能エネルギーの出力変動を抑制するため，経済産業省の“大型蓄電システム緊急実証事業”が進められている。その中で，北海道電力株式会社と住友電気工業株式会社が共同でレドックスフロー電池（RF 電池）による系統安定化実証事業を推進しており，2015 年 12 月から実証試験が行われている[(1),(2)]。系統安定化実証設備は，定格出力 15,000 kW，定格容量 60,000 kWh であり，13 バンク〈注 1〉で構成される。蓄電容量が世界最大級の設備である。

この実証設備のうち，富士電機は住友電気工業株式会社から受注した大容量交直変換システムを，2015 年 12 月に北海道電力株式会社 南早来変電所に設置した。

現在，風力発電や太陽光発電などにおいては，出力変動を抑制するため，発電所に蓄電池設備を併設することが求められるエリアも存在する。これに対して，今回納入した交直変換システムは，大規模電力系統における変動を抑制するために変電所に設置した。

本稿では，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について述

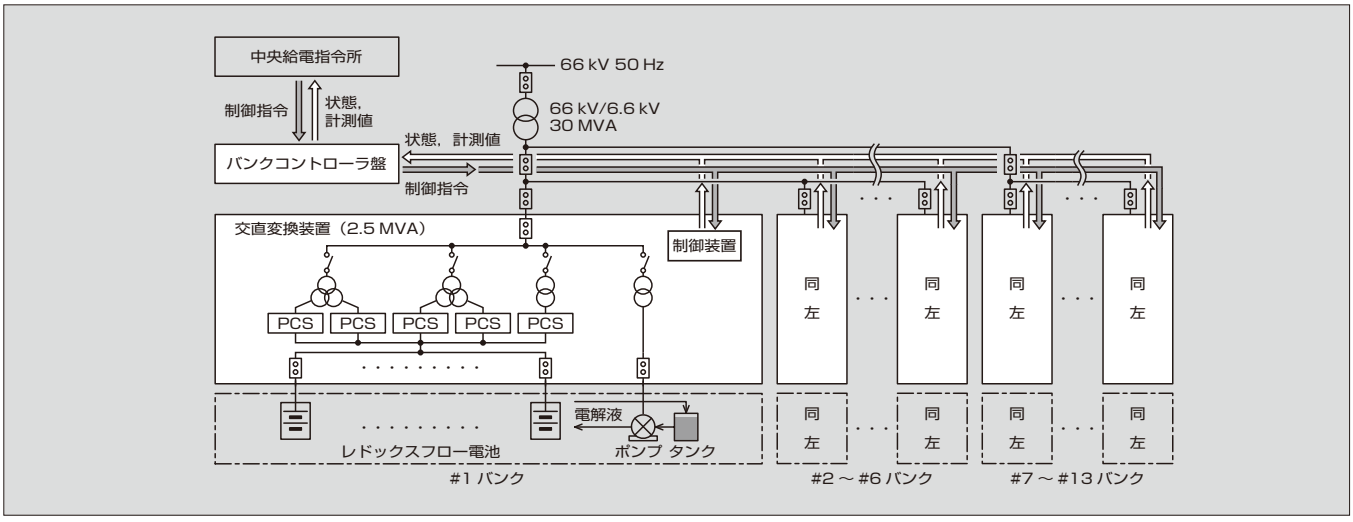


図 1　交直変換システムの概要

〈注 1〉バンク：本稿では，“バンク”を交直変換装置と，これに接続される蓄電池の組合せ単位として定義している。

べる。

2　交直変換システムの概要

交直変換システムの概要を**図 1** に示す。蓄電池設備に用いる交直変換装置は，従来は 1 MVA 以下の小規模のものがほとんどであったが，本システムは最大出力が 30 MW と大容量である。1 バンク2.5 MW の交直変換装置を 13 バンク分と，これらを束ねるバンクコントローラ盤で構成し，大規模で高速な並列運転を行うとともに省スペース化を実現している。

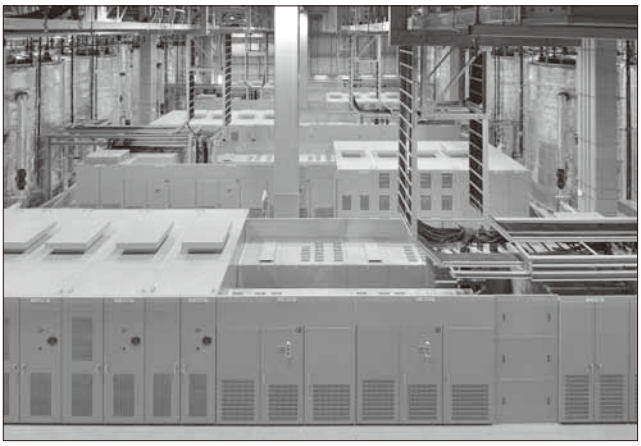


図 2　交直変換装置の設置状況

(1)　交直変換装置

交直変換装置は，RF 電池を交流系統に連系し，ガバナフリー相当制御や中央給電指令所からの指令などに基づき充放電を行う。設置状況を**図 2** に示す。

(2)　バンクコントローラ盤

バンクコントローラ盤は，中央給電指令所からの制御指令を各バンクの交直変換装置に適正に配分し，交直変換装置を制御する。

3　交直変換装置の構成

1 バンク当たりの交直変換装置の構成を**図 3** に，主な仕様を**表 1** に示す。交直変換装置は，パワーコンディショナ（PCS）部，高圧連系部，電池接続部で構成する。

3.1　PCS 部

PCS 部は，AT-NPC（Advanced T-type Neutral-Point-Clamped）3 レベル IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）モジュールを搭載したメガソーラー用 PCS「PVI750-3/500[(3)]」をベースに，蓄電池用途に開発した「PVI800-3/600」を 5 台並列した構成であり，高効率，省スペース，低ノイズが特徴である。系統連系保護機能，FRT（Fault Ride Through）機能，PCS 内蔵のプログラマブルコントローラ（PLC）「MICREX-SX」を経由した上位との通信インタフェース，上位からの制御指令に対し

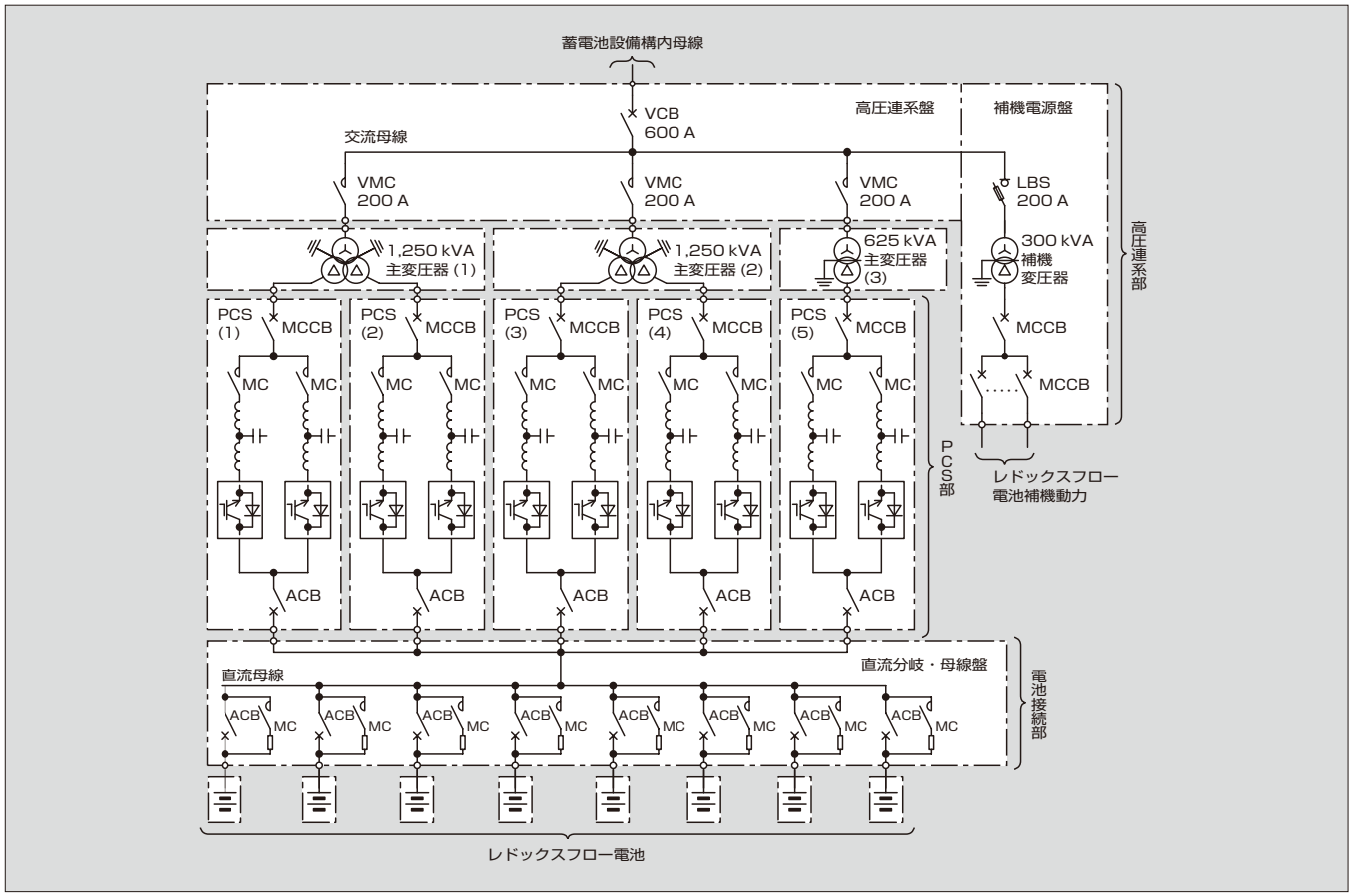


図 3　交直変換装置の構成（1 バンク当たり）

表 1　交直変換装置の主な仕様（1 バンク当たり）

項　目		仕　様
方　式	主回路・変換方式	自励式電圧形正弦波 PWM
	制御方式	電圧形電流制御
	運転方式	系統連系
	冷却方式	強制空冷
直流入出力	直流分岐数	8 分岐
	直流電圧範囲	DC480 ～ 750 V
	直流最大電流	連続 6,400 A（800 A × 8 並列）
交流入出力	相　数	三相 3 線式
	定格電圧と変動範囲	6,600 V±10%
	定格周波数と変動範囲	50 Hz±1 Hz
	交流受電端定格容量	2,500 kVA
	高調波電流含有率	総合 5%以下，各次 3%以下
	力　率	0.95 以上
制御応答時間		−100%～+100%にて 100 ms 以内
騒　音		70 dB 以下
外形寸法		W15,233 × D2,920 × H2,870 (mm)

ての高速な応答機能，安定に充放電を行うための出力抑制機能などを備えている。

3.2　高圧連系部

交直変換装置の高圧連系部は，5 台の PCS の交流出力を交流母線に集約して蓄電池設備構内母線（6.6 kV）に接続する高圧連系盤と，PCS の交流出力を昇圧するための主変圧器盤，および構内母線から RF 電池の補機動力を供給する補機電源盤で構成する。

高圧連系盤では，蓄電池設備構内母線と交流母線との接続部に高圧真空遮断器（VCB）を採用し，PCS の交流出力を交流母線に集約する回路には VCB よりも小型の真空電磁接触器（VMC）を採用した。これらによって省スペース化を実現している。

主変圧器盤では，4 台の PCS に対して 2 台の 3 巻線モールド変圧器を設置した。2 巻線モールド変圧器の場合に比べて大幅に設置スペースを削減している。また，残りの 1 台の PCS に対しては超高効率モールド変圧器を設置した。これらの組合せによって高圧連系部の高効率化を実現している。

高圧連系盤や主変圧器盤のほかに，高圧連系部の系統連系保護・装置保護に必要な保護リレーや，交直変換装置の主制御部となる PLC を備えている。高圧連系部の PLC は，ガバナフリー相当制御のほか，バンクコントローラ盤や PCS 内の PLC との通信インタフェースを担う。これらの通信には，いずれも富士電機の高速データ通信ネットワーク「PE リンク」を採用し，省配線，省スペース，および高速な制御応答を実現している。

3.3　電池接続部

交直変換装置の電池接続部は，8 分岐の RF 電池を入力するための直流分岐盤と，各分岐を直流母線に集約し，5 台の PCS に共通の直流電圧を供給するための直流母線盤とで構成する。また，電池接続部の電流や電圧を信号変換器によって検出し，高圧連系部の PLC にこれらの計測信号を入力する。

直流分岐盤は，低圧気中遮断器（ACB），RF 電池の初期充電用回路〔抵抗と電磁接触器（MC）〕，および直流電流検出用信号変換器で構成する。直流電流検出用信号変換器を各分路に設置することにより，制御精度の向上を図っている。

直流母線盤は，DC6,400 A を通電するブスバーで主回路を構成し，この主回路に直流地絡検出装置や直流電圧検出用信号変換器を集約している。

これらの主回路構成ならびに計測機能や保護機能の配置によって，大容量の RF 電池の接続に適した直流回路を実現している。

4　交直変換装置の制御機能

交直変換装置の制御機能は，従来，火力発電所や水力発電所で実施されていたガバナフリー制御ならびに中央給電指令所からの指令による負荷周波数制御を，大規模な蓄電池設備で行う画期的なものである。これに加え，蓄電池の特長を生かした長周期変動抑制制御などを行っている。

4.1　ガバナフリー相当制御

ガバナフリー相当制御は，交直変換システムにおいて電力系統の周波数（系統周波数）を検出し，基本周波数に戻すように交直変換装置の出力を調整する短周期変動抑制制御である。系統周波数の変化と調定率から電力変化量を算出し，PID 調節器によりガバナ指令値を 10 ms ごとに生成することで，交直変換装置の出力を決定する（**図 4**）。

系統周波数が基本周波数よりも低い場合は，電力系統において供給が需要を下回っているため，系統周波数を増加させる方向のガバナ指令値を生成する。逆に，系統周波数が基本周波数よりも高い場合は，電力系統において供給が需要を上回っているため，系統周波数を減少させる方向の

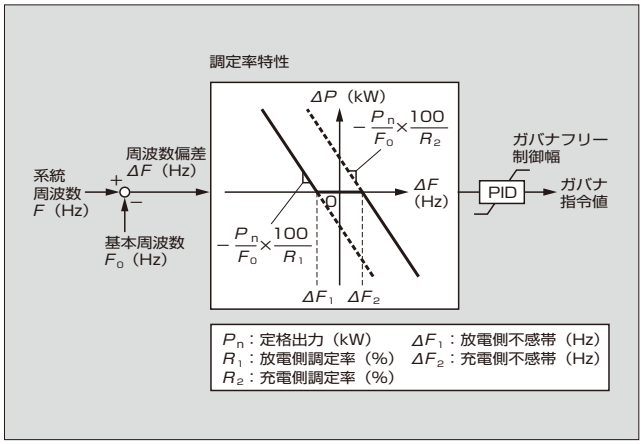


図 4　ガバナフリー相当制御の制御ブロック

ガバナ指令値を生成する。なお，交直変換装置の出力は系統周波数を検出してから 100 ms 以内で応答する。

このように，交直変換装置によるガバナフリー相当制御は，充電と放電の双方向で高速な周波数調整運転を実現している。

4.2　リモート制御

交直変換装置は次の制御において，中央給電指令所からの指令信号をバンクコントローラ盤経由で受信し，RF 電池の充放電についてリモート制御を行う。

⑴　短周期変動抑制制御

複数の風力発電や太陽光発電の合成出力の短周期変動（周期 20 分以下）を緩和する変動補償制御，ならびに系統全体の需給インバランス量を水力発電所や RF 電池に配分する負荷周波数制御である。

⑵　長周期変動抑制制御

風力発電や太陽光発電の出力予測に基づき長周期変動（周期 20 分以上）を緩和する制御である。

⑶　下げ代不足対策運転制御

出力予測と需給計画から余剰電力の発生を回避する制御である。

⑷　短・長周期ハイブリッド制御

短周期変動抑制制御と長周期変動抑制制御を組み合わせて，蓄電システム全体として最適な運転を行うための制御である。

4.3　補充放電制御

補充放電制御は，RF 電池の充電状態 *SOC* を検出し，補充放電特性から得られる補充放電指令値によって *SOC* を目標範囲に調整する制御である（**図 5**）。

SOC が設定値 S_2 よりも低い状態では充電方向の補充放電指令値となり，*SOC* が設定値 S_3 よりも高い状態では放電方向の補充放電指令値となる。補充放電指令値はガバナフリー相当制御などの電力指令値と合成し，合成後の指令値を PCS に与えることで，*SOC* を目標範囲に調整できる。

なお，補充放電指令値の時間変化は，設定値 τ によって電力系統に影響を与えない変化速度に調整できる。

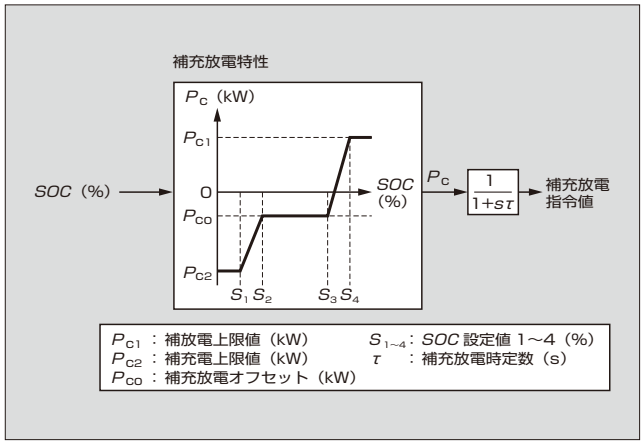


図 5　補充放電制御の制御ブロック

4.4　初期充電とメンテナンス制御

納入時や保守時といった RF 電池の起電力が 0 V の状態において，交直変換装置から RF 電池を充電することを初期充電と呼ぶ。

初期充電においては，最初に PCS のうち 1 台は直流電圧一定制御の整流モードで，残りの 4 台は系統連系モードで運転する。系統連系モードの PCS の出力を，整流モードの PCS で発生する充電電力が減少する方向に調整しながら，抵抗を持つ初期充電用回路を介して RF 電池を順次接続する。これにより，RF 電池と整流モードの PCS の突入電流はそれぞれの許容電流値以内に低減できる。

次に，突入電流がなくなった状態で，全ての電路を初期充電用回路から ACB 回路に順次切り替えた後，整流モードの PCS を系統連系モードに切り替える。最後に，全ての PCS を定電力充電で運転し，RF 電池を所定の起電力まで増加させて，初期充電が完了する。

起電力が 0 V の状態の RF 電池に対して低い直流電圧を印加すれば突入電流を減少させることができるが，チョッパレスの PCS では低い直流電圧の制御は技術的に不可能である。これに対して，交直変換装置による初期充電は，前述のような複数の PCS を組み合わせた制御や，最適な抵抗値で設計した初期用充電回路の MC・ACB の開閉制御によって実現している。

また，メンテナンス制御とは，RF 電池の性能を確認するために，RF 電池の制御盤から入力される設定値や操作信号に基づいて充放電を制御するものであり，次の動作特性を持つ運転ができる。

⑴　直流充電運転

直流定電流，直流定電力および直流定電圧の特性を持つ充電動作である。

⑵　直流放電運転

直流定電流，交流定電力および直流定電圧の特性を持つ放電動作である。

⑶　交流充電運転

交流定電力および直流定電圧の特性を持つ充電動作である。

⑷　交流放電運転

交流定電力および直流定電圧の特性を持つ放電動作である。

5　バンクコントローラ盤の機能

バンクコントローラ盤は，並列に接続された 65 台ものPCS の状態を管理し，かつ高速で最適な制御を実現している。中央給電指令所から受信した制御情報などに対して，運転バンクの選択や出力を決定し，13 バンクの交直変換装置に制御指令を配分する。また，各バンクの運転情報などを集約して管理し，中央給電指令所に送信する。

短周期変動抑制制御において望ましい応答を得るためには，これらの制御用情報の処理や授受は迅速に行われる必

要がある。そのため，バンクコントローラ盤では，中央給電指令所や交直変換装置との通信方式，制御用計測信号の検出方式，およびバンクの運転アルゴリズムについて，高速に実行できるものを採用している。

5.1　中央給電指令所との双方向通信

バンクコントローラ盤は，PLC により中央給電指令所からの下り制御指令を受信し，交直変換システムの計測値や状態信号といった上り情報を中央給電指令所に送信する双方向通信機能を持つ。中央給電指令所とバンクコントローラ盤の間の通信においては専用のプロトコルを適用し，大容量蓄電池システムを使用した電力系統運用に必要な制御情報を授受している。

5.2　交直変換装置との双方向通信

PLC により交直変換装置の計測値や状態信号を受信し，交直変換装置への電力指令値や運転指令などの制御指令を送信する通信機能を持つ。交直変換装置とバンクコントローラの間の通信においては PE リンクを採用することで，交直変換システムとしての高速な制御応答を実現している。

5.3　高速周波数計測装置による周波数計測

ガバナフリー相当制御の要である系統周波数は，バンクコントローラ盤の高速周波数計測装置にて検出している。高速周波数計測装置は，高性能型多用途複合計測端末「PowerSATELITE Ⅱ」を高速な周波数検出に特化してカスタマイズしたものである。離島向けマイクログリッドシステム[(4)]でも採用しており，50 Hz 系統においては 30 ms 程度で系統周波数を検出できる。高速で検出した系統周波数信号を，各バンクの交直変換装置によるガバナフリー相当制御や，後述の一括指令運転用のガバナフリー相当制御に使用することで，周波数調整の応答性能を高めている。

5.4　個別指令運転

個別指令運転とは，中央給電指令所からバンクを個別に操作・制御する運転である。

負荷周波数制御などで中央給電指令所からの制御指令は，バンクコントローラ盤によって中央給電指令所が指定したバンクの交直変換装置に与えられる。この構成によって，中央給電指令所は，指定したバンクのリモート制御，ガバナフリー相当制御および補充放電制御を実行できる。

5.5　一括指令運転

一括指令運転とは，中央給電指令所からのバンク一括の制御指令に対して，バンクコントローラ盤の制御により複数のバンクの電池を一つの大容量蓄電池として扱う運転である。

中央給電指令所から一括指令運転の対象となるバンクとバンク一括の電力指令値が与えられると，PLC にて電力指令値の大きさなどに応じて運転バンク数を決定し，対象となるバンクのうち優先順位の高いバンクを選択することで起動や停止を行う。優先順位の決定には次の二つのモードを選択できる。

(1)　スケジュール参照モード

バンクの優先順位をあらかじめ日間スケジュールに登録して，当日の運転バンクの優先順位を決定する。

(2)　電池状態参照モード

各バンクの RF 電池の *SOC* などの電池状態に基づいて，運転バンクの優先順位を随時更新する。

また，交直変換装置のガバナフリー相当制御は個別指令運転に対応しているが，バンクコントローラ盤においては一括指令運転用のガバナフリー相当制御を実装し，一括ガバナ指令値を生成することができる。

バンクコントローラ盤で生成する一括ガバナ指令値は，中央給電指令所からのバンク一括の電力指令値と合成し，バンク一括の合成指令値となる。バンク一括の合成指令値は，RF 電池の *SOC* などの大きさに応じて切り分け，運転中のバンクに配分する。この電力指令値がバンクごとの出力制限値を超える場合は，ほかのバンクに再配分する。これを，バンク間出力配分制御と呼ぶ。これらの指令値配分処理は PLC にて 20 ms ごとに行う。交直変換装置の出力は配分された電力指令値に追従するため，バンク一括の合成指令値に交直変換装置の合成出力を常に一致させることができる。

5.6　計測サーバ

計測サーバは，設備監視システム「MICREX-VieW PARTNER[(5)]」を導入したサーバ PC である。中央給電指令所との間の上り・下り情報，ならびに RF 電池や交直変換装置における状態・警報信号や計測値・制御変数をバンクコントローラ盤から Ethernet[〈注 2〉] 経由で収集して一元管理を行うことにより，交直変換システム全体の運転状況を把握する。状態・警報信号の履歴表示，計測値・制御変数の 1 秒トレンド表示，CSV データでの自動保存などが可能である。トレンド表示の例を**図 6** に示す。

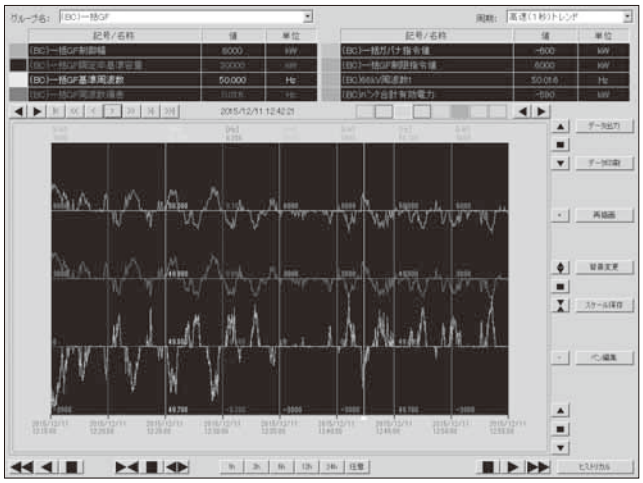


図 6　「MICREX-VieW PARTNER」のトレンド表示の例

〈注 2〉 Ethernet：富士ゼロックス株式会社の商標または登録商標

6 あとがき

本稿では，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について述べた。実証試験においては，周波数変動抑制などの効果が確認され，再生可能エネルギーの出力変動に対する新たな調整力としての成果が期待されている。

再生可能エネルギーのさらなる導入拡大のためには，特に大容量の電力貯蔵装置は電力系統に欠かせない存在であり，今後，多数導入されていくものと考えられる。富士電機では，優れた技術を積極的に取り入れ，最適な構成・制御での蓄電システムを提供することで，再生可能エネルギーの導入促進に寄与していく所存である。

最後に，大容量交直変換システムの開発，設計，製作に当たり，ご協力をいただいた北海道電力株式会社殿に深く感謝する。

参考文献

(1) 多田邦彦ほか. 南早来変電所大型蓄電システム実証事業(1)－実証事業の概要について－. 平成28年電気学会電力・エネルギー部門大会予稿集. 2016, no.225, p.4-5-17-4-5-18.
(2) 矢野敬二ほか. 南早来変電所大型蓄電システム実証事業(2)－60 MWhレドックスフロー電池システムの性能評価－. 平成28年電気学会電力・エネルギー部門大会予稿集. 2016, no.226, p.4-5-19-4-5-20.
(3) 中川雅之, 項東輝. 大規模太陽光発電システム技術. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.2, p.118-123.
(4) 小島武彦, 福屋善文. 離島向けマイクログリッドシステム. 富士時報. 2011, vol.84, no.3, p.188-193.
(5) 鈴木健浩ほか. 統合EMSと容易に連携可能な設備監視システム「MICREX-VieW PARTNER」. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.3, p.193-197.

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，富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部社会システム事業部電力流通総合技術部課長補佐。

須﨑　久晴

水力・風力・太陽光発電設備や電力安定化設備のプラントエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部社会システム事業部電力流通総合技術部課長補佐。

矢野　敬二

レドックスフロー電池システムのエンジニアリング業務に従事。現在，住友電気工業株式会社エネルギーシステム事業開発部電力貯蔵技術部。電気学会会員。

ガラパゴス諸島向け鉛蓄電池・リチウムイオン電池併用による電力安定化システム

Power Stabilization System with Lead–Acid Batteries and Lithium–Ion Batteries for Galapagos Islands

曽根　学 SONE, Manabu　　長田　悠人 OSADA, Yuto

世界自然遺産であるガラパゴス諸島向けに，鉛蓄電池とリチウムイオン電池の併用による電力安定化システムを開発し，2016 年 3 月に納入した。この電力安定化システムは，風力発電機と特性の異なる 2 種類の電池からの出力を組み合わせることにより，数十秒から数時間にわたる周期の変動を平滑化し，安定した合成出力を電力系統に送電する。これにより，既存の風力発電機の最大出力と設備利用率を大きく引き上げ，化石燃料使用量ゼロに向けて第一歩を踏み出すことに大きく貢献した。

Fuji Electric has developed a power stabilization system using lead-acid batteries and lithium-ion batteries and delivered it to the Galapagos Islands, a World Natural Heritage site, in March 2016. By combining the outputs from wind turbine generators and two types of batteries with different characteristics, this power stabilization system smooths periodic fluctuations over several tens of seconds to several hours and transmits stable combined output to the electric power system. This achieved a great increase of the maximum output and facility utilization ratio of the existing wind turbine generators and markedly contributed to taking the first step toward zero consumption of fossil fuels.

1　まえがき

エクアドル共和国の世界自然遺産であるガラパゴス諸島の電力供給は，ディーゼルなどの小規模火力発電所が中心であり，その排ガスによる環境汚染が危惧されている。近年の観光地化による観光客や人口の増加に対応するためには，環境負荷の少ない電力供給システムの整備・導入が喫緊の課題となっている。エクアドル政府は，2020 年までにガラパゴス諸島における化石燃料の使用をゼロにする目標を 2007 年 4 月に政策として設定し，その目標を達成するために取り組んでいる。

富士電機は，日本政府の環境プログラム無償資金協力“太陽光を利用したクリーンエネルギー導入計画”の一環として，太陽光発電システムと電力安定化システムから成るプロジェクトをフルターンキーで受注し，2016 年 3 月に納入した。

本稿では，本プロジェクトの中心となる電力安定化システムについて述べる。

2　プロジェクトの概要

プラントの全景を**図 1** に示す。プロジェクトにおけるシステムの全体像を**図 2** に，システムと主要機器の仕様を**表 1** に示す。

再生可能エネルギーの中でも，太陽光発電や風力発電は気象条件によってその発電出力が大きく変動する。そのため，これらの電源を小規模な電力系統に導入すると，電力系統の電力品質（電圧や周波数）に影響を与えることがある。エクアドル政府は，本プロジェクトに先行して 3 基の 750 kW 風力発電機から成る風力発電所を導入した。しかし，出力変動に伴う電力品質の問題が生じたために，十分

図 1　プラントの全景

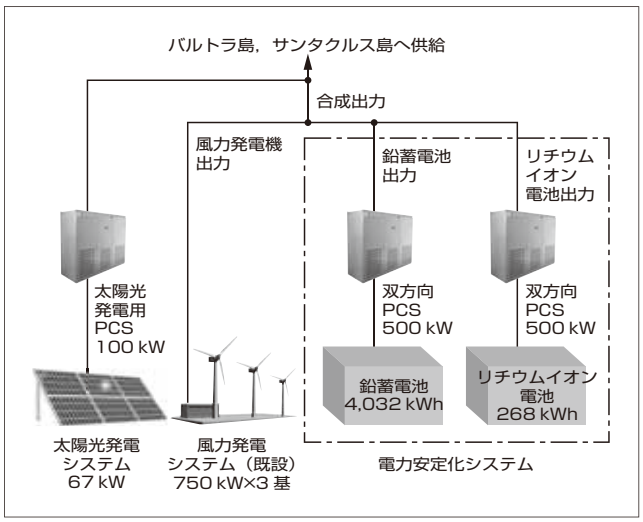


図 2　プロジェクトにおけるシステムの全体像

表1　プロジェクトにおけるシステムと主要機器の仕様

システムと主要機器		仕　様
太陽光発電システム		出力：67 kW
電力安定化システム	双方向 PCS	型式：PVI650-3/500
		変換方式： 3 レベル式正弦波 PWM
		直流入力 運転電圧範囲：345 ～ 600 V 最大入力電流：1,507 A
		交流出力 定格容量：500 kVA 定格電圧：210 V 最大出力電流：1,527 A
		最大変換効率：97.3%
	鉛蓄電池	容量：4,032 kWh
	リチウムイオン電池	容量：268 kWh
風力発電システム（既設）		出力：750 kW × 3 基

な風が吹いていながら定格出力で運転できない状態が続き，設備利用率は非常に低かった。

そこで今回，電力安定化システムを導入することにより，風力発電機の出力変動を抑制し，設備利用率を高めるとともに，再生可能エネルギーの電力供給量を増やすことに成功した。本システムは，双方向パワーコンディショナ（PCS）にて蓄電池の高速充放電を制御するとともに，鉛蓄電池とリチウムイオン電池を組み合わせることにより，それぞれの蓄電池の特長を生かして高品質な電力を供給する。

3　電力安定化システム

3.1　概　要

電力安定化システムは，風力発電機，鉛蓄電池およびリチウムイオン電池からの出力を組み合わせることにより，数十秒から数時間にわたる周期の変動を平滑化し，安定した合成出力を電力系統に送電する。鉛蓄電池は，容量当たりの価格が安いため，大きな容量が必要となるピークシフト制御に適している。一方，リチウムイオン電池は，エネルギー密度が高く，高頻度かつ急速な充放電が可能なため，短時間の出力変動抑制に適している。

本システムの主要な機能を**表 2** に，構成を**図 3** に示す。

風力発電機出力変動抑制機能は，風力発電機出力の数十秒から数時間にわたる周期の変動を電池の出力によって打ち消すことを目的とする。このための出力変動抑制指令値を算出し，鉛蓄電池とリチウムイオン電池に配分する。

ピークシフト機能は，電力需要が小さく発電能力に余裕がある夜間などの時間帯に電池を充電し，電力需要のピーク時に電池を放電することで負荷を平準化することを目的とする。監視操作 PC からピークシフト出力目標値とその開始・終了時刻を設定し，電力を平準化するためのピークシフト指令値を算出する。

出力変動抑制のバックアップ機能は，リチウムイオン電池がメンテナンスや故障などで停止した場合に，鉛蓄電池によるピークシフトを止め，出力変動抑制のバックアップを行う。これにより，出力変動抑制に使用できる鉛蓄電池出力を増加して，風力発電の運転を継続することを目的とする。

各電池はそれぞれの指令値に応じた出力を行って，高品質な電力供給を実現する。

表2　電力安定化システムの主要な機能

機　能	鉛蓄電池	リチウムイオン電池
風力発電機出力変動抑制機能	使　用 （ピークシフト時は出力を制限する）	使　用
ピークシフト機能	使　用 （バックアップ時は使用を止める）	—
出力変動抑制のバックアップ機能	使　用	—

3.2　風力発電機出力変動抑制機能

(1)　設　計

風力発電では，連系する系統への影響を最小限にとどめるために，例えば，任意の時間幅における出力の最大値と最小値の差を一定値以下にするなどの周波数変動対策を行うことがある。

本システムの風力発電機出力変動抑制機能では，風力発電機の出力変動に応じて，**図 3** の出力変動抑制機能が持つ変動成分除去フィルタの時定数を連続的に制御する可変時定数制御[(1)]を採用している。この制御は，出力変動が大きい場合には時定数を大きくし，出力変動が小さい場合には時定数を小さくすることにより，合成出力の変動を一定の変化率〈注 1〉以下に維持できる。設計に先立ち，富士電機のグループ会社である富士グリーンパワーが保有する西目風力発電所において測定した風速データを使用し，本システムの出力変動抑制シミュレーションを実施した。その結果，95% の時間帯で変化率を 45 kW/min 以下に維持できることが分かった。この値は，風力発電機定格出力の 2% に相当し，出力変動抑制として十分に小さい変化率である。本プロジェクトのサイトでは，西目風力発電所よりも風速変動が小さいため，より高い効果が期待できる。

出力変動抑制指令値の出力配分は，出力変動率を一定値以下に維持するため，各電池の目標充電量を維持するように鉛蓄電池とリチウムイオン電池に配分する。

鉛蓄電池と比較してリチウムイオン電池の容量は小さいため，リチウムイオン電池に配分が集中すると，充電に必要な空き充電量あるいは放電に必要な充電量が足りなくなる恐れがある。空き充電量あるいは充電量が足りず，リチウムイオン電池の出力が制限されてしまうと，出力変動抑制の維持が困難になる。鉛蓄電池では，出力変動抑制に用

〈注 1〉一定の変化率：顧客の指定する時間幅における出力変動（最大値－最小値）を時間幅で割ったものである。

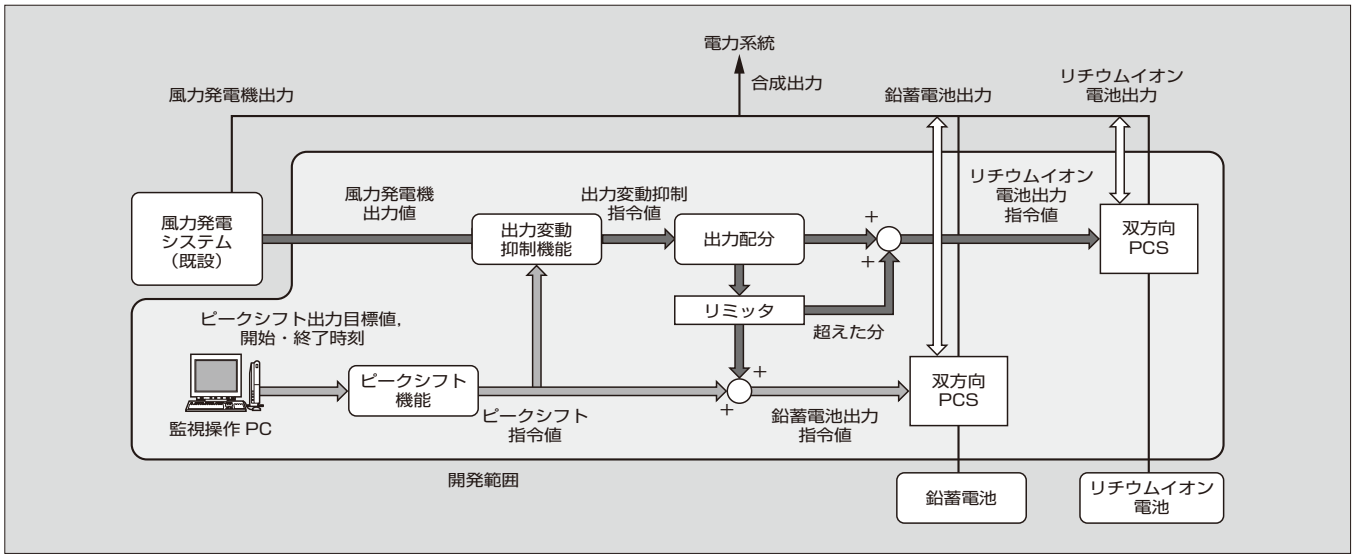


図 3　電力安定化システムの構成

いる充電量に比べてピークシフトに用いる充電量の比率が大きい。そのため，ピークシフトにおいて，充電する場合には事前に低く設定した目標値になるように充電量を調整しておき，放電する場合には事前に高く設定した目標値になるように充電量を調整しておく。リチウムイオン電池では，風力発電機出力が低い場合には，出力の急増に備えて目標充電量を低く設定し，風力発電機出力が高い場合には，出力の急減に備えて目標充電量を高く設定する。

出力変動抑制指令値を鉛蓄電池へ配分した後は，ピークシフトを阻害しないようにするために二つのリミッタを設けている。一つ目は，鉛蓄電池の別の機能であるピークシフトの指令値を打ち消さないようにするため，鉛蓄電池への配分を ±500 kW〈注 2〉からピークシフト中は ±200 kW に制限する。二つ目は，ピークシフトに必要な充電量を確保するため，目標充電量から現在の充電量が一定以上乖離（かいり）した場合に，鉛蓄電池への配分を制限している。なお，制限値を超えた分はリチウムイオン電池が出力する。

風力発電機出力変動抑制機能についてシミュレーションと現地試験によって動作確認を行った。

(2)　シミュレーション

シミュレーションによって，模擬の風力発電機出力をステップ状に与え，風力発電機出力変動抑制機能の動作確認を行った。**図 4** (a)にシミュレーションの結果を示す。

10 時 6 分ごろに模擬の風力発電機出力を 1.5 MW から 1.0 MW にステップ状に 0.5 MW 減少させた。鉛蓄電池とリチウムイオン電池の出力容量の合計は 1.0 MW であり，0.5 MW の変動より大きいため，合成出力の変化率が 45 kW/min となるように可変時定数制御によりステップ変動を打ち消している。

また，10 時 18 分ごろに模擬の風力発電機出力を 1 MW から 2.2 MW にステップ状に 1.2 MW 増加させた。この変動は，鉛蓄電池とリチウムイオン電池の出力容量の合計よ

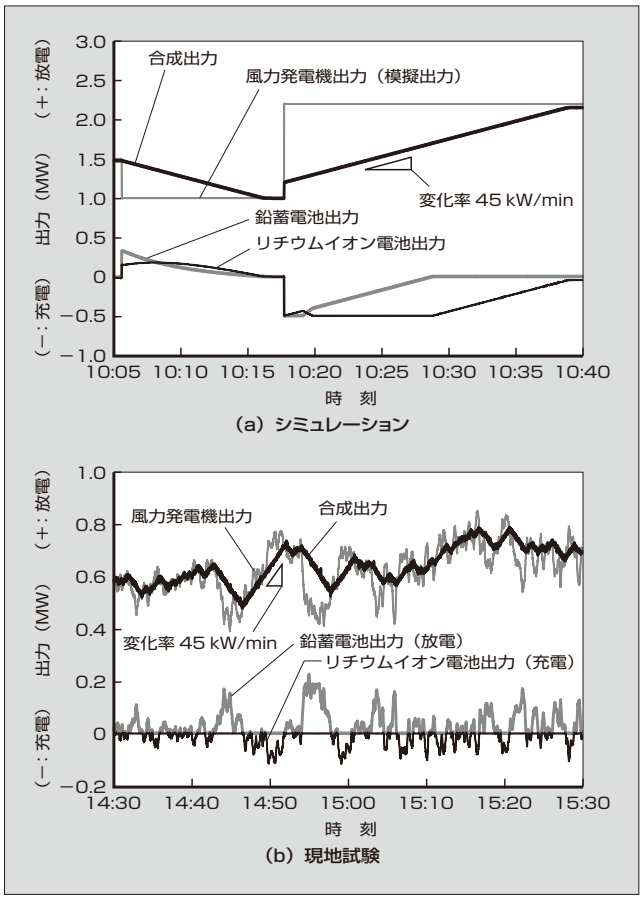


図 4　風力発電機出力変動抑制機能の動作確認

り大きかった。そのため，両電池の出力を最大にすることで変動を 0.2 MW に抑制し，系統に与える影響を最小限に抑えている。

さらに，10 時 6 分ごろから 10 時 15 分ごろまでの時間帯においては，目標充電量に近づけるために必要な両電池の充電量が同程度であるため，両電池は同程度の放電を行っている。風力発電機出力が上昇した 10 時 18 分ごろから 10 時 40 分ごろまでの時間帯においては，その後の出力

〈注 2〉 ±500 kW：＋は放電を，－は充電を指す。

の急減に備えるため，目標充電量を高く設定したリチウムイオン電池の充電を優先している。

(3)　現地試験

図 4 (b)に現地試験の結果を示す。シミュレーションと同様に，風力発電機出力の変動を鉛蓄電池出力とリチウムイオン電池出力で抑制できることを確認した。合成出力は一定の変化率を維持している。なお，本試験の前に行った均等充電の試験により，鉛蓄電池は満充電に近い状態になっている。充電の余裕を確保するために鉛蓄電池の放電を優先しており，放電は鉛蓄電池で，充電はリチウムイオン電池で行っている。

3.3　ピークシフト機能

(1)　設　計

電力需要が小さく発電能力に余裕がある夜間などの時間帯に電池を充電し，電力需要のピーク時に電池を放電することで負荷を平準化する。これにより，ガラパゴス諸島の既存の発電機であるディーゼル発電機の出力の急変を抑制し，起動停止回数を削減し，さらに，発電効率が悪くなる低出力運転の排除が可能になる。

また，夕方の需要ピークに合わせて鉛蓄電池を放電することにより，ディーゼル発電機の稼動台数を減少させ，燃料の消費とそれに伴う CO_2 排出の抑制が可能である。なお，需要の変化は平日と休日で異なるため，それぞれのピークシフト時刻を設定できるようにした。

ピークシフト機能について工場試験と現地試験によって動作確認を行った。

(2)　工場試験

図 5 (a)に工場試験の結果を示す。13 時 40 分に設定したピークシフト放電開始時刻になると放電を開始し，14 時 10 分に設定したピークシフト終了時刻に合わせて放電が終了する。系統への影響を小さくするため，ピークシフトの開始時と終了時には，45 kW/min の変化率で出力する。これらのことから，監視操作 PC で設定したピークシフト出力目標値とその開始・終了時刻のとおりにピークシフトを行うことを確認した。

(3)　現地試験

図 5 (b)に現地試験の結果を示す。鉛蓄電池がピークシフトと出力変動抑制を同時に行うことを確認した。夕方の 18 時ごろから 22 時ごろまでは需要ピークをシフトさせるため，500 kW で放電を行っている。また，深夜の 2 時から朝の 8 時までは需要が小さくなるので，300 kW でピークシフトのための充電を行っている。鉛蓄電池がピークシフトと出力変動抑制を同時に行っているため，鉛蓄電池の出力がピークシフト出力目標値で一定とならずに変動している。

3.4　出力変動抑制のバックアップ機能

(1)　設　計

リチウムイオン電池がメンテナンスや故障などで停止した場合には，鉛蓄電池はピークシフトを止め，出力変動抑制のバックアップを行う。これにより，出力変動抑制に使用できる鉛蓄電池出力が増加して，風力発電が運転を継続できる。

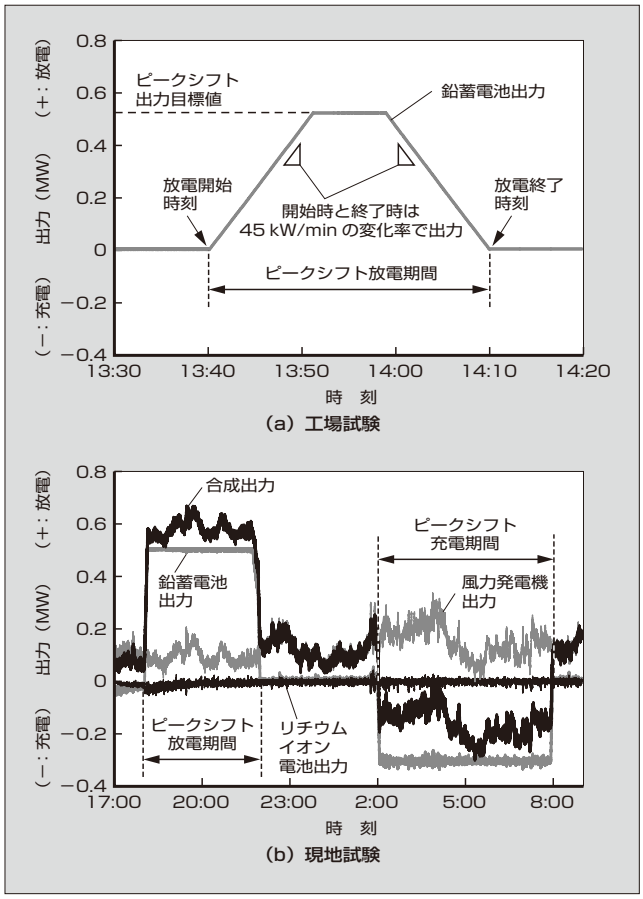


図 5　ピークシフト機能の動作確認

リチウムイオン電池が停止した場合に，鉛蓄電池だけで出力変動抑制とピークシフトを同時に行うことは困難である。出力変動抑制機能が維持できないと，風力発電機出力の変動が連系する電力系統の電力品質へ悪影響を及ぼす場合があるため，風力発電機出力を抑制するか，最悪は停止しなければならない。しかし，これは風力発電機の発電機会の損失につながるため，リチウムイオン電池が停止した場合は，鉛蓄電池によるピークシフトを停止させて出力変動抑制のみを行う。このバックアップ機能により，風力発電機は運転を継続できる。

出力変動抑制のバックアップ機能についてシミュレーションと現地試験によって動作確認を行った。

(2)　シミュレーション

図 6 (a)にシミュレーションの結果を示す。出力変動抑制中にリチウムイオン電池を停止させると，リチウムイオン電池の出力はゼロとなるが，鉛蓄電池がバックアップを行い，合成出力に影響を与えず，出力変動抑制を継続することを確認した。

(3)　現地試験

図 6 (b)に現地試験の結果を示す。試験条件として，19 時 51 分ごろから 19 時 56 分ごろまでリチウムイオン電池の運転を停止させた。リチウムイオン電池の出力が低下す

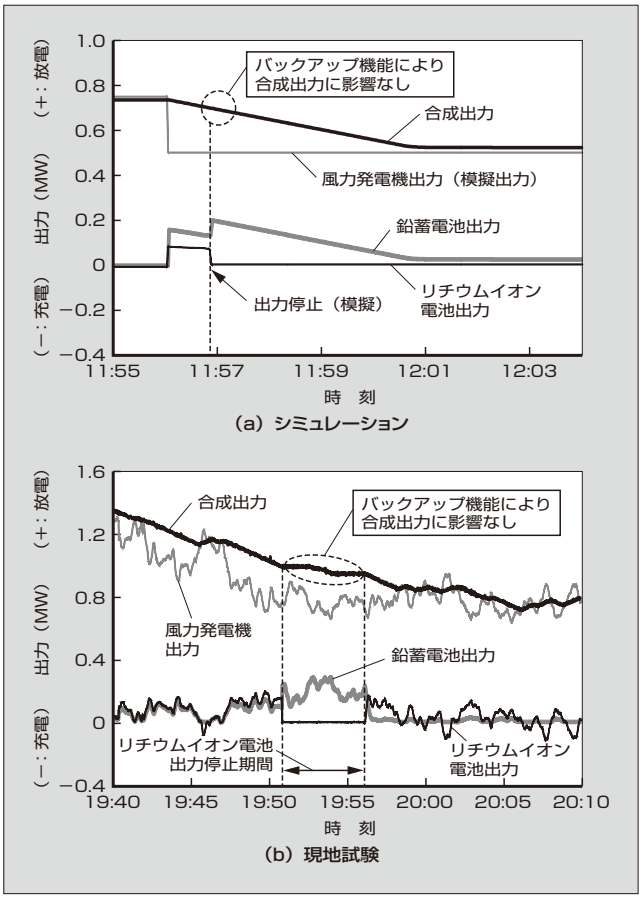


図 6　出力変動抑制のバックアップ機能の動作確認

ると同時に鉛蓄電池の出力が上昇し，リチウムイオン電池の出力分を鉛蓄電池がバックアップを行うことで，合成出力には影響を与えず，出力変動抑制を継続することを確認した。また，リチウムイオン電池が復帰すると同時にリチウムイオン電池による出力変動抑制を開始し，合成出力には影響を与えず，出力変動抑制を継続することを確認した。

4　あとがき

ガラパゴス諸島向けの鉛蓄電池・リチウムイオン電池併用による電力安定化システムについて述べた。このシステムの導入により既存の風力発電の最大出力と設備利用率を大きく引き上げ，化石燃料使用量ゼロに向けて第一歩を踏み出すことに大きく貢献した。

本システムで培った技術を基に，短周期のみならず長周期の出力変動抑制にも対応できる電力安定化システムを開発し，再生可能エネルギーのいっそうの導入拡大に貢献する所存である。

参考文献

(1)　淺沼圭司ほか. 風力発電向け電力安定化装置. 富士時報. 2008, vol.81, no.3, p.203–206.

曽根　　学

電力安定化システムの開発および受注案件にてエンジニアリング・試験業務に従事。現在，富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部新エネプラント事業部太陽光・風力発電技術部課長補佐。

長田　悠人

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コア技術研究所制御技術開発センターエネルギーソリューション開発部。電気学会会員。

バチルス菌による新排水処理ソリューション

New Wastewater Treatment Solution Using Bacillus

田口　和之 TAGUCHI, Kazuyuki　　佐藤　匡則 SATO, Masanori　　花井　洋輔 HANAI, Yosuke

食品・飲料，化学工場などを対象に，バチルス菌による新排水処理ソリューションを開発した。自然界に数多くの種類があるバチルス菌の中から排水処理に適したものを発見し，使用したものである。これにより，既設の排水処理設備において大規模な改造や増設を行うことなく，曝気（ばっき）電力費や汚泥処分費の削減が可能である。また，汚泥レス排水処理システムは，磁力によって汚泥を分離する磁気分離装置を付加したものであり，大幅な省スペース化と処理性能の向上を実現する。工場の排水処理への適用例において，ランニングコストをそれぞれ20%，25%削減した。

Fuji Electric has developed a new wastewater treatment solution using Bacillus. This solution uses special Bacillus bacteria that we found suitable for wastewater treatment among a number of such species existing in nature. This allows existing wastewater treatment facilities to reduce the electric power cost for aeration and sludge disposal cost without the need for large-scale modification or extension of the facilities. The sludge-less wastewater treatment system has a magnetic separator that separates sludge by magnetic force, achieving significant space-saving and better treatment performance. In an application example for factory wastewater treatment, the new wastewater treatment solution reduced the running cost by 20%, and the sludge-less wastewater treatment, by 25%.

1　まえがき

工場や事業所の排水は「水質汚濁防止法」および地方自治体の条例で定められた“上乗せ基準”により，排水基準が厳しく設けられ，適正に処理することが義務付けられている。排水処理には，標準活性汚泥法が広く用いられているが，電力費や汚泥処分費などのランニングコストが大きい。

富士電機は，食品・飲料，化学工場などを対象に，ランニングコストを低減するため，バチルス菌による新排水処理ソリューションを開発した。

2　排水処理とランニングコスト

各種工場の有機性排水の処理において，維持管理のしやすさから，生物処理，その中でも標準活性汚泥法が広く用いられている。**図1**に，排水処理の基本フローと施設の例を示す。標準活性汚泥法は，微生物を排水中に浮遊させ，排水中の汚濁成分を微生物に取り込ませて排水を浄化し，その後，微生物を沈殿させて除去する方法である。微生物は取り込んだ汚濁物質を分解するときに酸素を必要とするため，ブロワ（送風機）により排水中に空気を吹き込む曝気（ばっき）を行い，排水中の溶存酸素濃度を微生物の必要量まで高める必要がある。また，微生物は汚濁物質を分解して増殖し，成長するため，過剰に増殖した微生物の塊（余剰汚泥）を系外に排出する必要があり，排出された余剰汚泥は産業廃棄物として処分される。

図2に，工場における排水処理のランニングコストの例を示す。ランニングコストのうち，曝気電力費と汚泥処分費（産業廃棄物処分費）は，排水処理ランニングコストの40%程度と大きな割合を占める。

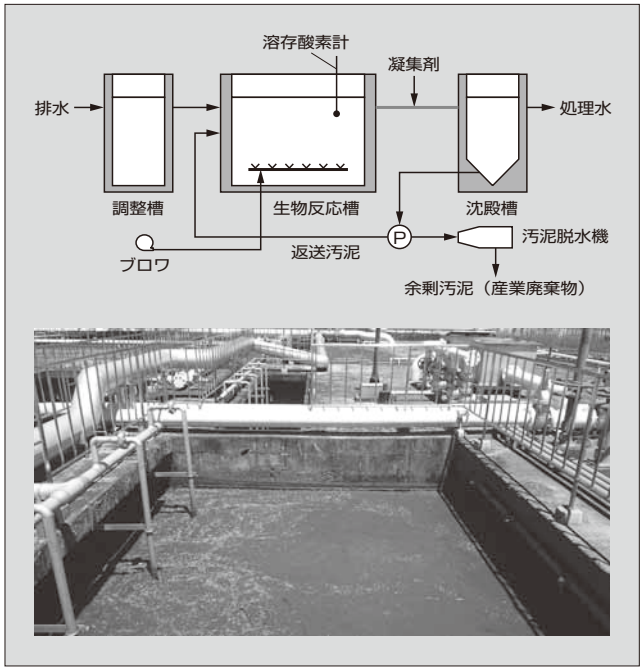


図1　排水処理の基本フローと施設例

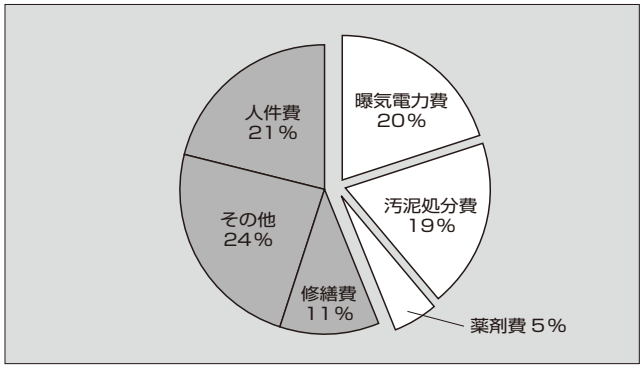


図2　排水処理ランニングコストの例

3　バチルス菌による排水処理

自然界にある数多くの種類のバチルス菌〈注1〉の中には，高濃度の有機物を短時間で分解できる排水処理の浄化能力が高く，かつ余剰汚泥を分解する酵素を大量に分泌するバチルス菌が存在する。富士電機はそれを発見し，排水処理用バチルス菌として使用することにより，排水処理のランニングコストの削減と処理性能の向上を実現した。

3.1　特　徴

(1)　ランニングコスト削減効果

(a)　曝気電力費を従来比で 10～40% 削減できる。

(b)　汚泥処分費を従来比で 20～40% 削減できる。

(c)　薬剤費を従来比で 10～20% 削減できる。

(2)　処理性能向上

(a)　流入する排水の水質変動に対応できる範囲を拡大できるため，従来よりも処理性能に優れ，水質を改善する。

(b)　悪臭を抑え，周辺環境や労働環境を改善する。

(3)　容易な導入と維持管理

(a)　バチルス菌による排水処理は，既設の排水処理施設や設備について改造や増設を行うことなく，汚泥発生量および曝気量を削減できるため，大規模な設備投資が不要である。

(b)　運用においては，バチルス菌を初回のみ既存の生物反応槽に投入する。バチルス菌の優占化および性能維持のために薬剤（活性剤）を毎日，少量添加するだけでよい。

(c)　バチルス菌数が初期の約 100 倍を超える状態（バチルス菌優占化状態）を維持することで，水質を確保しつつ，余剰汚泥の削減と曝気量の削減の効果を保つことができる。

(d)　調整期間は 2～3 か月であり，曝気量と汚泥濃度の調整を行うことでバチルス菌を優占化させる。

図 3 に，バチルス菌による排水処理の概略フローを示す。調整項目は主に曝気量と汚泥返送量である。

3.2　排水処理におけるバチルス菌の働き

(1)　排水処理用バチルス菌

バチルス菌は少ない溶存酸素〈注2〉でも生育できる通性嫌気性菌〈注3〉である。標準活性汚泥法においては，活性汚泥中に普遍的にバチルス菌が存在しているが，より少ない酸素量で汚濁成分を浄化できるのが排水処理用バチルス菌であり，ブロワの運転風量を下げることができるため，曝気電力費の削減が可能になる。

(2)　活性剤

排水処理用バチルス菌は，けい素，鉄，マグネシウムなどのミネラルを主成分とする活性剤を加えることにより，菌の増殖が促進されて優占化を維持でき，浄化性能が安定化する[1]。排水処理用の活性剤は排水処理用バチルス菌に対し，汚泥成分であるタンパク質や炭水化物などを分解する酵素の分泌量を増やすことを促す。そのため，余剰汚泥の分解が促進され，汚泥発生量が減少する。

また，排水処理用バチルス菌は，活性剤を添加するとタンパク質分解酵素の活性（酵素の分泌量）が約 30 倍に増加する性質を持つ。他種のバチルス菌に比べても約 10 倍の活性を持つ（**図 4**）。同様に，排水処理用バチルス菌は，活性剤を添加すると炭水化物分解酵素の活性が約 25 倍に増加する性質を持つ。他種のバチルス菌に比べても約 3 倍の活性を持つ（**図 5**）。これらの性質により，排水中の汚濁成分を分解する能力や汚泥成分を浄化する能力が従来に比べて向上する。

(3)　汚泥の削減

排水処理用バチルス菌により余剰汚泥が削減されるのは，菌の分泌する酵素の働きによるものであることを解明した。

図 6 は，標準活性汚泥法を行っている排水処理施設の余

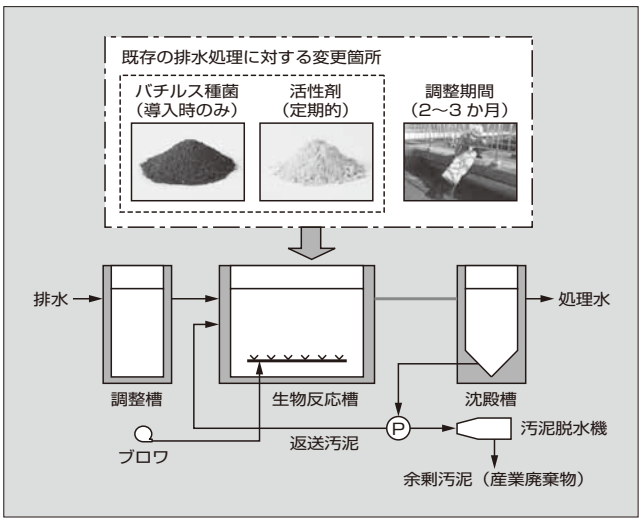


図 3　バチルス菌による排水処理の概略フロー

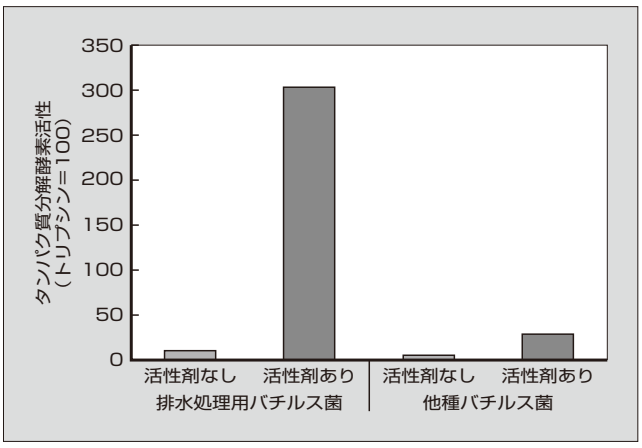


図 4　タンパク質分解酵素の活性

〈注 1〉バチルス菌：52 ページ「解説 1」を参照のこと

〈注 2〉溶存酸素：水中に溶け込んでいる酸素

〈注 3〉通性嫌気性菌：酸素があってもなくても生育できる，すなわち低い酸素濃度で生育できる菌の総称

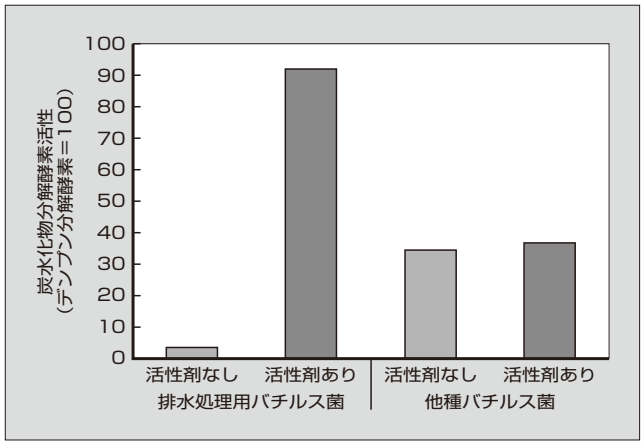


図 5　炭水化物分解酵素の活性

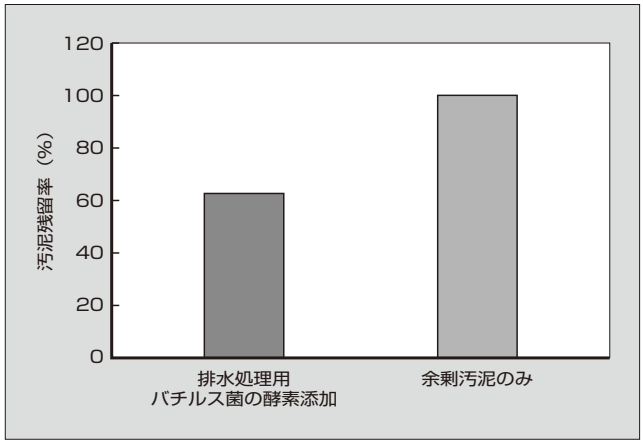


図 6　排水処理用バチルス菌の酵素による汚泥の分解

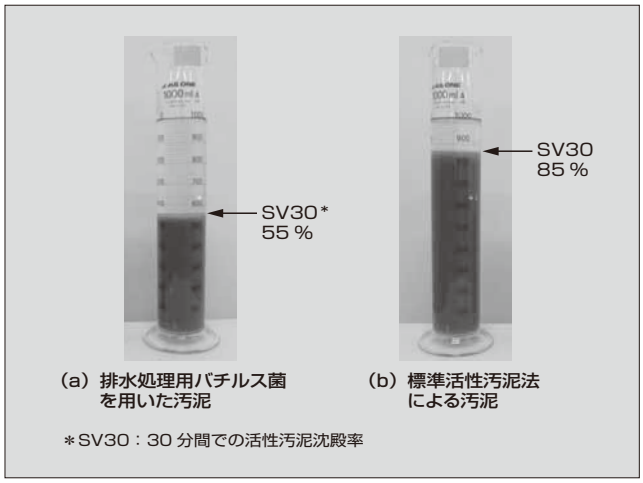


図 7　排水処理用バチルス菌による汚泥沈降性の改善

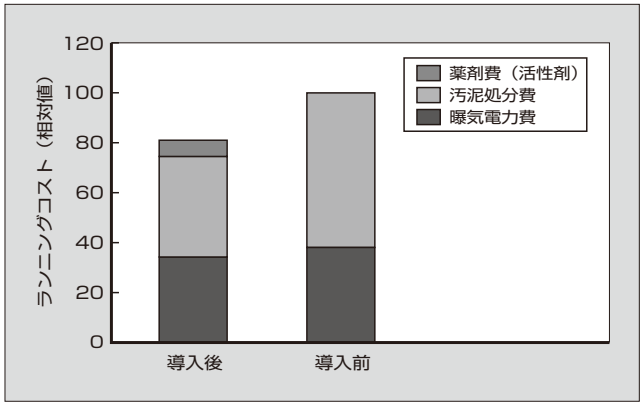


図 8　排水処理用バチルス菌の導入例

剰汚泥に排水処理用バチルス菌の酵素（培養液を除菌した液）を添加し，汚泥の残留量を比較したグラフである。酵素を添加すると約 40% の汚泥が分解除去された。このことから，汚泥削減の効果は酵素によるものであることが分かる。

(4)　汚泥の沈降性の改善と無臭化

排水処理用バチルス菌は，凝集性，粘着性が高く，汚泥の沈降性を改善できる。

図 7 は，排水処理用バチルス菌を用いた汚泥と標準活性汚泥法の汚泥について，30 分間での SV（Sludge Volume：活性汚泥沈殿率）を比較したものである。排水処理用バチルス菌を用いた汚泥は，標準活性汚泥法の汚泥よりも短時間で沈降するため，固液分離しやすく汚泥の流出を低減できる。

また，排水処理用バチルス菌は，悪臭成分である硫化水素やアンモニアなどを分解し，無臭化できる。

3.3　適用例

標準活性汚泥法が導入されている，排水量 1,500 m^3/ 日の A 社工場に，排水処理用バチルス菌による排水処理を適用した。排水処理ランニングコストにおける汚泥処分費の削減が目的である。

(1)　導入形態

導入に当たり，既存の排水設備には改造や増設は行わず，排水処理用バチルス菌の種菌の投入のみを行った。活性剤は，所定量を生物反応槽に毎日投入した。3 か月間にわたる調整期間中は，曝気量の調整および返送汚泥量と引抜汚泥量の調整を行った。この調整期間で，排水処理用バチルス菌は初期の割合の約 100 倍になり，優占化したことを確認した。

(2)　導入効果

排水処理用バチルス菌を使用することにより，曝気電力費は導入前に比べて 10% 減少し，汚泥処分費は 35% 減少した。毎日投入する活性剤の増加分を差し引くと，排水処理全体のランニングコストは約 20% 削減できた（**図 8**）。

4　汚泥レス排水処理システム

排水処理用バチルス菌を使用するとともに磁気分離装置を付加すると，余剰汚泥がほとんど発生しない汚泥レス排水処理システムを構築することができる。**図 9** に，本システムのフローを示す。**図 3** で示したバチルス菌による排水処理に対して磁気分離装置を付加することにより，沈殿槽と返送汚泥がなくなり，汚泥脱水機も不要になる。

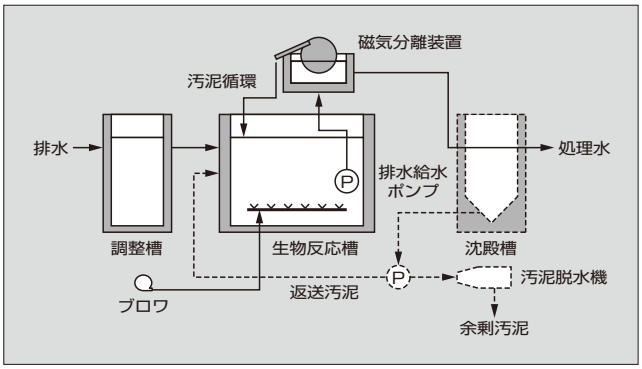


図 9　汚泥レス排水処理システムのフロー

4.1　特　徴

本システムは，工場の増産や統合によって排水量とともに汚濁物質量が増加し，排水処理施設の更新，新設または増設をしなければならない事業場を主な対象としている。非常に狭いスペースに建設するニーズや，増加する排水処理のランニングコストを抑制するニーズに応えるシステムである。本システムは，標準活性汚泥法による従来システムに比べて次に示す特徴がある。

(1)　ランニングコストの効果

(a)　汚泥処分費を 90% 以上削減できる。有機性汚泥の発生はゼロであり，無機物の堆積物引抜きは年に数回程度である。

(b)　汚泥処理に付帯する曝気電力費が不要となる。

(c)　汚泥処理に付帯する薬剤費が不要となる。

(2)　汚濁成分浄化能力の向上

汚濁物質濃度は，従来システムの場合の 3 倍まで対応できる。

(3)　初期投資の低減

(a)　沈殿槽が不要である。

(b)　生物反応槽容積が 1/2 ～ 1/3 である。

(c)　汚泥脱水機が不要である。

磁気分離装置により固液分離を行うため，従来の沈殿槽そのものが不要となる。また，有機性汚泥が発生しないため汚泥脱水機も不要になる。ただし，無機性汚泥については年に数回程度，除去する必要がある。

(4)　省スペース化

排水処理占有スペースは，従来システムの場合に比べて半減できる。

(5)　処理性能向上

(a)　窒素除去率は，90% 以上である。

(b)　悪臭の抑制により，周辺環境や労働環境を改善する。

4.2　システム構築

(1)　汚泥発生量の算出

排水処理における汚泥発生量は，式(1)に示すように *BOD*（Biochemical Oxygen Demand：生物学的酸素要求量）と *SS*（Suspended Solid：浮遊物質）のそれぞれに排水量と汚泥への転換率を掛けて算出される汚泥増加量（微生物の増殖分）から，汚泥の自己消化と酵素の汚泥分解作用により減少する汚泥量を引いたものである[2]。

本システムのバチルス菌は，前述のように汚泥を分解する酵素を大量に分泌する。その汚泥を分解する酵素の量は，バチルス菌の濃度に応じて増える。したがって，生物反応槽内の汚泥濃度（MLSS：Mixed Liquor Suspended Solids）を高め，本システムのバチルス菌の濃度を高くすれば，汚濁物質の生物処理によって増加する汚泥量に対して，本システムのバチルス菌の分泌する汚泥分解酵素の量が増える。これにより，汚泥の分解が促進され，汚泥発生量がゼロとなる運転が可能となる[3]。

$$W=A\times BOD\times Q+B\times SS\times Q-C\times MLSS\times V \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

W：汚泥発生量（kg/d）

BOD：生物学的酸素要求量（kg/m^3）

SS：浮遊物質（kg/m^3）

$MLSS$：活性汚泥浮遊物濃度（kg/m^3）

Q：排水量（m^3/d）

V：生物反応槽容積（m^3）

A：BOD 汚泥転換率（%）

B：SS 汚泥転換率（%）

C：自己消化率（%）

(2)　汚泥の固液分離

活性汚泥中の菌体は表面にマイナスの電荷を持ち，磁性粉（マグネタイト，Fe_3O_4）はプラスの電荷を持つ。したがって，両者を混合するとお互いに吸着し，活性汚泥は磁性を持つようになる。

図 10 に示すように，活性汚泥に磁性粉を添加して撹拌（かくはん）すると速やかにお互いに吸着する。そのため，活性汚泥が磁化活性汚泥となり，磁力によって高速で高効率に固液分離ができる[3),(4)]。

(3)　磁気分離装置

磁力によって磁化活性汚泥の連続的な固液分離を行う磁気分離装置を開発し，最終沈殿が不要な排水処理フローを構築した。従来の重力沈降による固液分離に比べて強制的に汚泥を濃縮できるため，生物反応槽内の汚泥を高濃度に

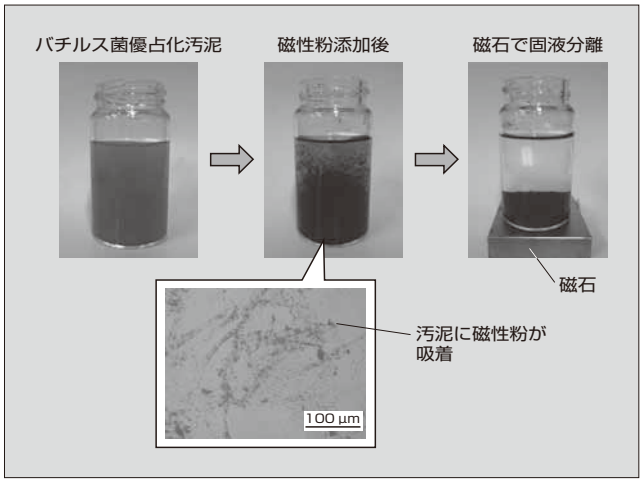


図 10　磁化活性汚泥

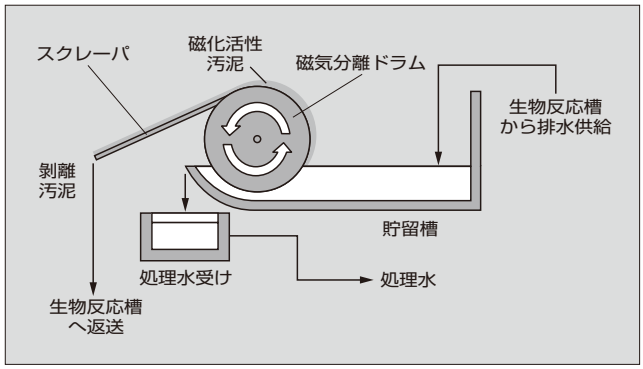


図 11　磁気分離装置模式図

維持できる。これにより，汚泥の増加と自己消化のバランスを取り，汚泥の発生がゼロとなる運転が実現できる。

図 11 に，本システムの磁気分離装置の模式図を示す。生物反応槽内の磁化活性汚泥についてポンプアップを行い，磁気分離装置の貯留槽に送る。貯留槽内では磁力を持つ磁気分離ドラムが回転しており，磁気分離ドラムを通過するときに磁化活性汚泥は磁気分離ドラムに吸着する。その後，スクレーパでかき落として生物反応槽に戻す。

(4)　浄化能力の向上

生物反応槽内の活性汚泥を高濃度で維持することにより，生物反応槽の単位容積当たりの汚濁物質の浄化能力が約 3 倍に向上する。

4.3　適用例[(5)]

標準活性汚泥法が導入されている排水量 2,000 m^3/ 日の食品製造 B 社工場に，本システムを適用した。汚泥処分費の削減と増産による排水負荷の増加への対応が目的である。

(1)　導入形態

導入に当たり，磁気分離装置およびそれに磁化活性汚泥を供給するポンプを新設した。本システムの生物反応槽には，バチルス菌の種菌と磁性粉を投入した。活性剤は所定量を生物反応槽に毎日投入した。

(2)　導入効果

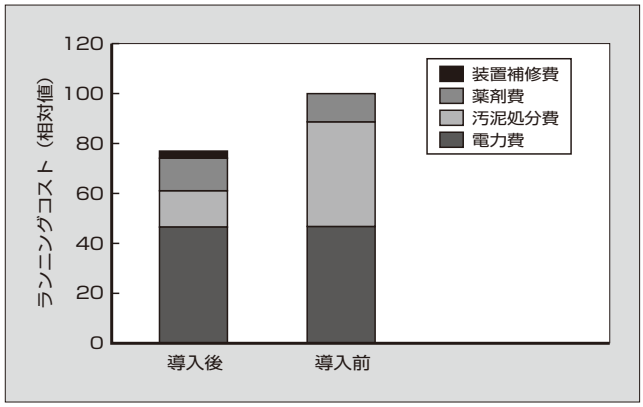


図 12　汚泥レス排水処理システムの導入効果

本システムにより，生物処理によって発生する汚泥は従来比で 90% 減少し，前処理による汚泥を含めた全体の汚泥発生量は約 66% 減少した。排水の汚濁物質は，従来の 3 倍の量を処理することが可能である。毎日投入する薬剤（活性剤）の増加分，磁性粉の補充および磁気分離装置の補修費を差し引くと，排水処理全体のランニングコストは約 25% 削減できた（**図 12**）。

5　あとがき

食品・飲料，化学工場などの排水処理設備を対象にした，バチルス菌による新排水処理ソリューションについて述べた。このソリューションの適用拡大により，排水処理における運営管理コストの削減と環境負荷の低減に貢献していく所存である。

参考文献

(1)　田口和之ほか. バチルス属細菌を優占種とする活性汚泥法の処理性能と汚泥削減の検討. 第49回日本水環境学会講演集. 2015, p.213.
(2)　日本下水道協会編. 下水道施設計画・設計指針と解説2009年版.
(3)　花井洋輔ほか. 高濃度有機性排水処理に向けた磁化活性汚泥法の汚泥削減性能の向上. 第48回日本水環境学会講演集. 2014, p.391.
(4)　花井洋輔ほか. 磁化活性汚泥法における汚泥削減性能の検討. 第49回日本水環境学会講演集. 2015, p.495.
(5)　花井洋輔ほか. 余剰汚泥の大幅減量可能な磁化活性汚泥法による食品排水処理の実用化検討. 第50回日本水環境学会講演集. 2016, p.224.

田口　和之

排水処理システムの開発，エンジニアリング業務に従事。現在，富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部社会システム事業部水環境プロジェクト部主任。日本生物工学会会員。

佐藤　匡則

排水処理システムの電気，計装の設計，開発に従事。現在，富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部社会システム事業部水環境プロジェクト部長。

花井　洋輔

排水処理システムの開発，エンジニアリング業務に従事。現在，富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部社会システム事業部水環境プロジェクト部。

解説 1　バチルス菌

Bacillus

p.48

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

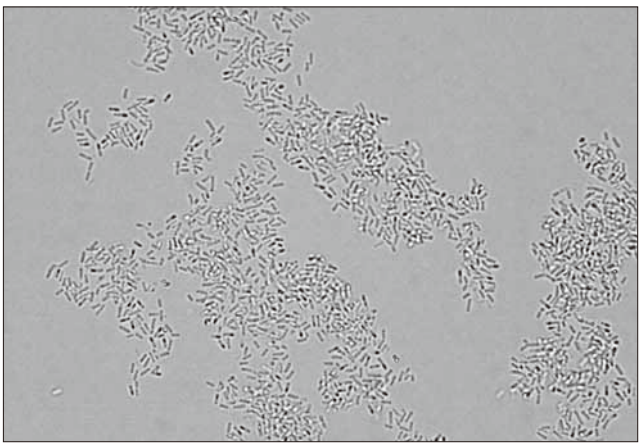


図 1　排水処理用バチルス菌

車載用第３世代直接水冷型パワーモジュール

3rd-Generation Direct Liquid Cooling Power Module for Automotive Applications

榎本　一雄＊ ENOMOTO, Kazuo　　小山　貴裕‡ KOYAMA, Takahiro　　佐藤 憲一郎＊ SATO, Kenichiro

地球温暖化防止に向けた CO_2 排出規制の強化により，エンジンとモータの双方を利用するハイブリッド自動車（HEV）や，モータのみで走行する電気自動車（EV）の開発が急速に進められており，さらなる普及が期待されている。HEV や EV では，動力制御に用いるインバータの設置スペースは限られており，高出力化する電池やモータに対応するため，高電力密度化とさらなる小型化が求められている。

これらの要求に対して，富士電機は車載用第３世代直接水冷型パワーモジュールを開発した（**図１**）。この製品は，冷媒の流路を最適化し，従来品よりも高い放熱性能を持っている。さらに，新たにカバー一体型のアルミニウム製ウォータージャケットと，フランジ構造の冷媒出入り口を採用したことにより，ユーザは，フランジ出入り口に指定流量の冷媒を流す配慮を行うだけでよい。

また，IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）には，第７世代のチップ技術を適用して損失を低減するとともに，FWD（Free Wheeling Diode）を一体化した RC-IGBT（Reverse-Conducting IGBT：逆導通 IGBT）を採用して，モジュールの高電力密度化と小型化を図った。

1　特　徴

今回，製品化した車載用第３世代直接水冷型パワーモジュールの主な仕様を**表１**に示し，特徴を次に示す。

表１　車載用第３世代直接水冷型パワーモジュールの主な仕様

項　目	仕　様
コレクタ－エミッタ間電圧	750 V
定格電流	800 A
最大動作温度	175 ℃
外形寸法	W162 × D116 × H24（mm）
質　量	560 g

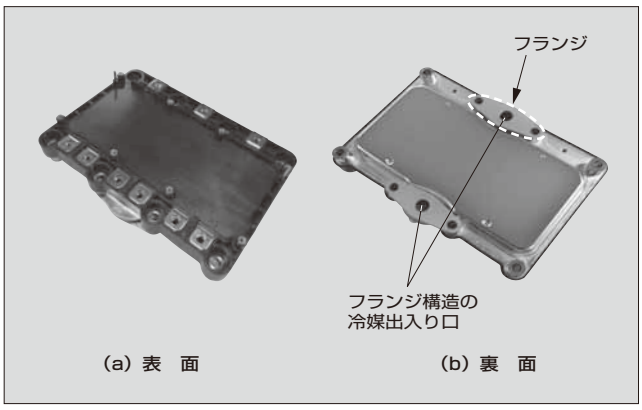


図１　車載用第３世代直接水冷型パワーモジュール

(1)　パワーモジュールの小型化

IGBT と FWD を一体化した RC-IGBT を採用し，従来品と比較して 15% 小型化した。

パワーモジュールの高放熱化水冷フィンとカバーを一体化した冷却器構造により，放熱性の向上と薄型化を実現した。これらにより，車載用第２世代直接水冷型パワーモジュールよりも，約 1.6 倍の高電力密度化を実現した。

(2)　主端子配線の低インダクタンス化

各相の入力端子を独立させることと，配線を最短にすることでインダクタンスを下げて，高速スイッチング動作によるスイッチング損失を低減するとともに，電流遮断時のサージ電圧を低減した。

2　背景となる技術

2.1　RC-IGBT 適用技術

RC-IGBT は，フィールドストップ（FS）型 IGBT を採用し，ストライプ状に交互に IGBT 領域と FWD 領域を一つのチップに配置した構造である（**図２**）。ワンチップ化でチップ周辺部の耐圧を確保するためのガードリングと呼ばれる領域が削減でき，二つのチップで構成する従来よりもチップ面積が小さくなる。また，IGBT 動作時には FWD 部からも放熱し，逆に FWD 動作時には IGBT

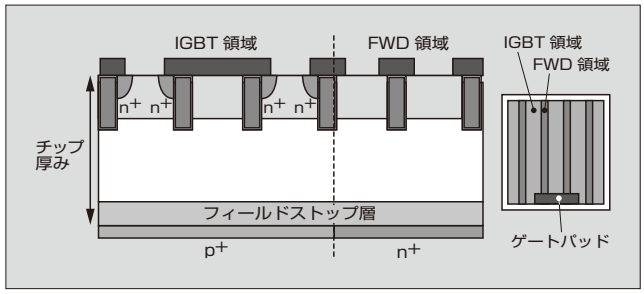


図２　RC-IGBT の概略構造

＊ 富士電機株式会社電子デバイス事業本部事業統括部 EV モジュール技術部

‡ 富士電機株式会社電子デバイス事業本部開発統括部パッケージ実装開発部

部からも放熱するので，IGBT と FWD それぞれの動作時に熱抵抗を低減できる効果がある。さらに，最新の薄ウェーハプロセス技術の適用と，トレンチ構造，チャネル密度などの最適化により低損失化を実現し，チップの小型化が可能になった。

2.2　高放熱冷却技術

図 3 に，直接水冷パワーモジュールの従来構造と，新製品で採用した新構造の断面図を示す。従来構造では，ウォータージャケットはユーザが独自に設計し用意するため，ヒートシンクとウォータージャケットが個別部品となっていた。このため，ユーザは，流路設計だけでなく，水密性やフィン端部とジャケット底面間のクリアランスを考慮した設計が必要であった。新構造では，ヒートシンクとウォータージャケットを一体化してクリアランスの考慮を不要とした。さらに，フィン形状にも工夫を加え，従来構造よりも放熱性を 30% 向上させた。

2.3　低インダクタンス化技術

パッケージ内部の低インダクタンス化により，ターンオフ時と逆回復時のサージ電圧は減少する。RC-IGBT の採用と内部レイアウトの最適化により，従来品に対して新製品の内部インダクタンスは約半分である。一方，パワーモジュールを使用するときは，平滑コンデンサを接続するため，ターンオフ時に PN 端子間に発生するサージ電圧を抑えることも重要である。**図 4** に，ターンオフ時の PN 端子間のサージ電圧を示す。

従来品では，三相の PN 端子をモジュール内で一括配線としているため，PN 間に 100 V のサージ電圧が発生している。一方，新製品では，三相の PN 端子を独立配線とし，内部配線を含めて配線長を極力短くし，配線インダクタンスを小さくした。これにより，電流遮断速度が約 1.5 倍高いにもかかわらず，PN 端子間サージ電圧は 20 V となり大幅に減少している。

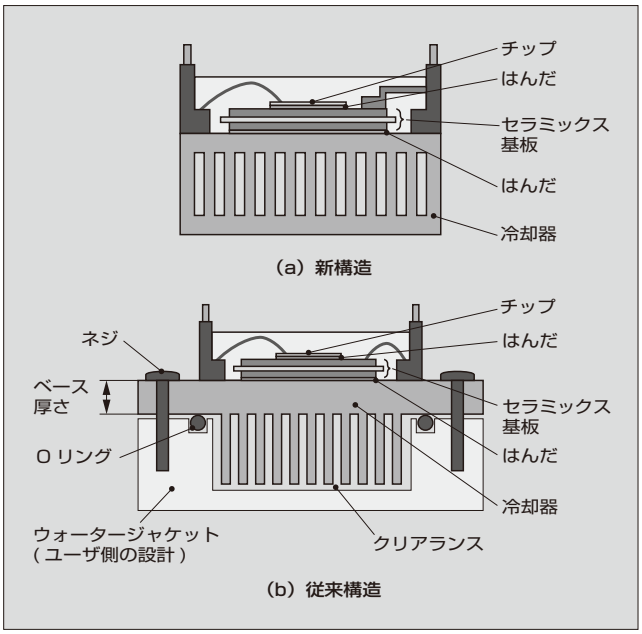


図 3　パワーモジュールの断面構造

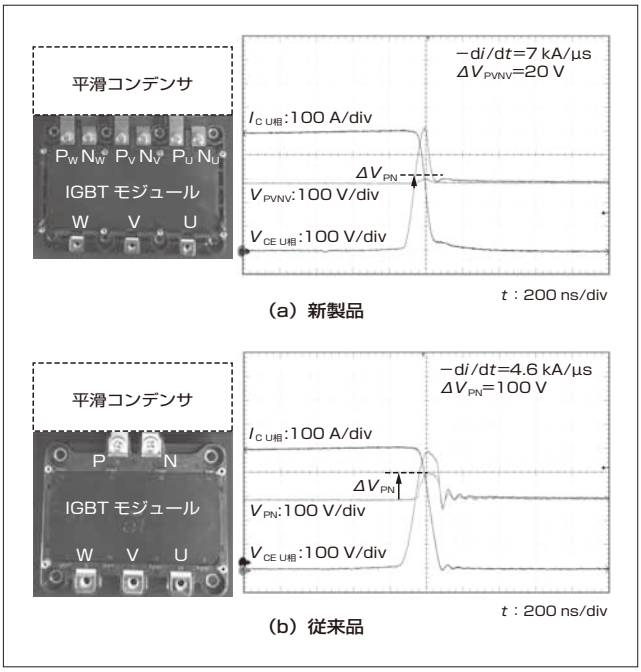


図 4　ターンオフ時の PN 端子間のサージ電圧

発売時期

2016 年 11 月

お問い合わせ先

富士電機株式会社
電子デバイス事業本部営業統括部営業第二部
電話（03）5435-7151

（2017 年 1 月 30 日 Web 公開）

SiC ハイブリッドモジュールを適用した北米向け大容量 UPS「UPS7300WX-T3U」

"UPS7300WX-T3U," Large-Capacity UPS Using SiC Hybrid Modules for North America

佐藤　篤司 * SATO, Atsushi　　村津　宏樹 ‡ MURATSU, Hiroki　　黒崎　智 ‡ KUROZAKI, Tomo

通信機器やネットワークなどの情報通信システムの安定稼動は，情報化社会では前提条件となっており，これらのシステムが停止すると，社会活動に甚大な影響を及ぼす可能性がある。無停電電源装置（UPS：Uninterruptible Power System）は，システムの安定稼動のために 24 時間 365 日安定した電源を供給するための電気機器であり，情報化社会の主要な役割を担うデータセンターにおいては必要不可欠な機器である。

データセンター向け UPS の市場は世界規模で伸長している。富士電機は，2015 年度に北米市場の規格に適合する容量 500 kVA の UPS の販売を開始した。お客さまのさまざまな要求に応えるためには容量系列を増やす必要があり，新たに高効率な 480 V 系オンライン UPS「UPS7300WX-T3U」を開発した（**図 1**）。

1　特　徴

1.1　高効率

本装置は，ダブルコンバージョンモード（VFI：Voltage and Frequency Independent）とエコモード（VFD：Voltage and Frequency Dependent）の切替が可能である（**図 2**）。

VFI では，最高効率が 97.5% と高い装置効率を実現している。これにより，UPS での電力損失が低減するだけでなく，UPS システムに用いる空調機の消費電力も削減できる。

図 1　「UPS7300WX-T3U」（480 V 系 333 kVA 機）

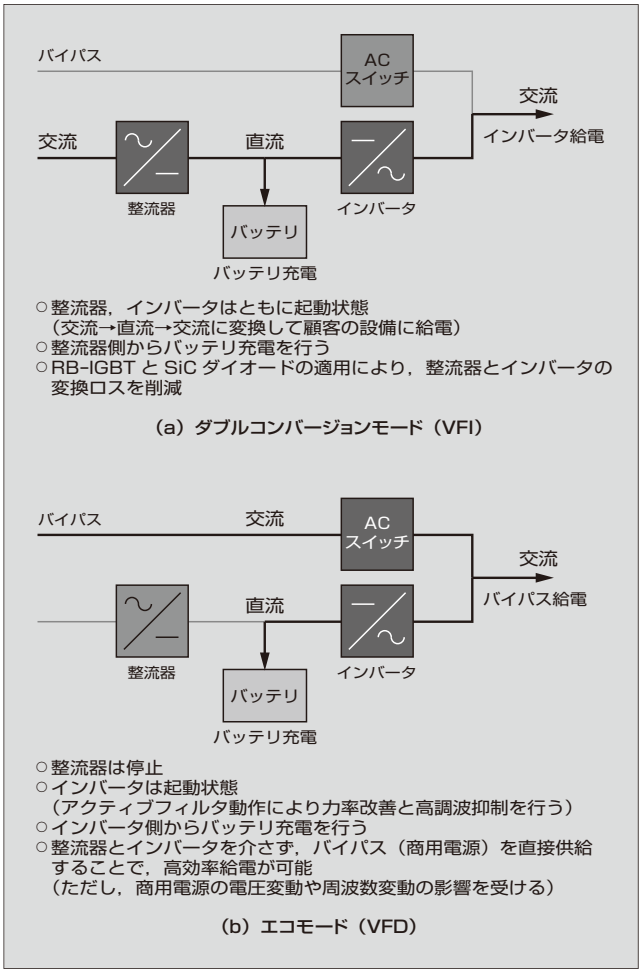


図 2　ダブルコンバージョンモードとエコモード

データセンターではシステムの信頼性を保証するために装置の二重化・冗長化を施しており，一般的に運用時の負荷率が低い。そこで，本装置は低負荷領域（20～50%）における電力損失も低減している。これには，SiC ダイオード適用による軽負荷領域での導通損失低減，および 3 レベル変換器適用によるリアクトルの固定損失低減が寄与している。

図 3 に，国際エネルギースタープログラム(注)の認証試験の結果を示す。VFI では，負荷率が 25～100 % の間で 96.3% 以上の効率である。実運用負荷が低い場合も高効率で運用が可能であり，高い省エネルギー効果が得られる。また，負荷率で重み付けして算出される国際エネルギー

＊ 富士電機株式会社パワエレ機器事業本部パワーサプライ事業部企画部
‡ 富士電機株式会社パワエレ機器事業本部開発センター

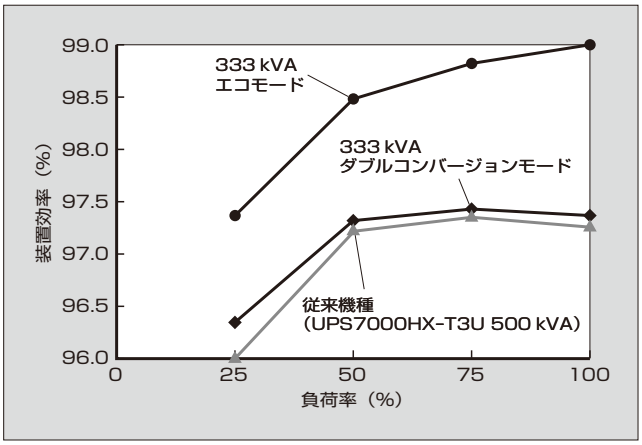


図 3　国際エネルギースタープログラムの認証試験の結果

スタープログラムの認証効率は，97.1% である。さらに VFD では，最高効率は 99.0% であり，従来機種より大幅に高い効率を実現している。

1.2　高信頼性

データセンターにおいては，24 時間 365 日，UPS によって安定した給電を継続する必要がある。本装置は，並列冗長システムや待機冗長システムなどの高信頼性電源システムに対応しており，保守メンテナンス時や万が一の故障時においても給電を継続することができる。

1.3　高力率負荷・進み力率負荷への対応

近年では，高力率化の要求により，力率改善（PFC）を適用した電子機器が増えている。したがって，PFC を適用している高力率の負荷に対し，装置容量を低減することなく電力を供給するため，負荷力率 1.0（333 kW）の出力に対応した。また，前述の PFC を適用している負荷が停止した場合，負荷力率は進みになる。本装置はそのような状況も含めたさまざまな負荷に対応するため，適用可能な負荷力率範囲を 0.7（遅れ）～0.7（進み）としている。

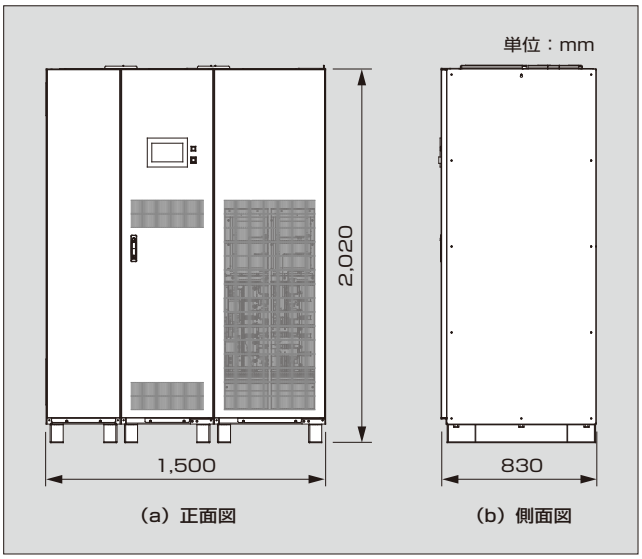


図 4　「UPS7300WX-T3U」の外形寸法

表 1　「UPS7300WX-T3U」の仕様

項　目		仕　様
方　式		ダブルコンバージョンモード（VFI） エコモード（VFD）
定格容量		333 kVA/333 kW
装置最高効率		97.5%（VFI 時）
切替時間		無瞬断（VFI 時） 2 ms（VFD 時）
質　量		1,100 kg
入　力	相　数	三相 3 線
	電　圧	480 V+10%，－ 30%
	周波数	60 Hz ± 10%
	入力力率	0.99 以上
	入力高調波電流	3% 以下
バイパス入力	相　数	三相 3 線
	電　圧	480 V ± 10%
直　流	定格電圧	480 V （240 セル，鉛蓄電池）
出　力	相　数	三相 3 線
	電　圧	480 V
	周波数	60 Hz
	定格出力力率	1.0〔0.7（遅れ）～0.7（進み）〕
	電圧精度	±1% 以下
	過渡電圧変動	±3% 以下 （負荷急変 0 ⇔ 100%）
	過渡変動整定時間	50 ms
	電圧波形ひずみ率	2% 以下（100% 線形負荷） 5% 以下（100% 整流負荷）
	周波数精度	± 0.01%（非同期時）
	周波数バイパス同期範囲	± 5%
	過負荷耐量	125%：10 分 150%：　1 分

1.4　仕　様

UPS7300 WX-T3U の外形寸法を**図 4** に，仕様を**表 1** に示す。

2　背景となる技術

本装置では，ダイオードに SiC を適用した富士電機製の SiC ハイブリッドモジュールを採用している（**図 5**）。

図 6 に，SiC ダイオードと Si ダイオードの特性比較を示す。電流の実使用領域において，SiC ダイオードの方が

〈注〉国際エネルギースタープログラム（エナジースター）：電気機器の省エネルギーのための国際的な環境ラベリング制度である。経済産業省と米国環境保護局の相互承認の下で運営されている。対象となる製品は家電製品から産業機械，コンピュータまでと幅広い。

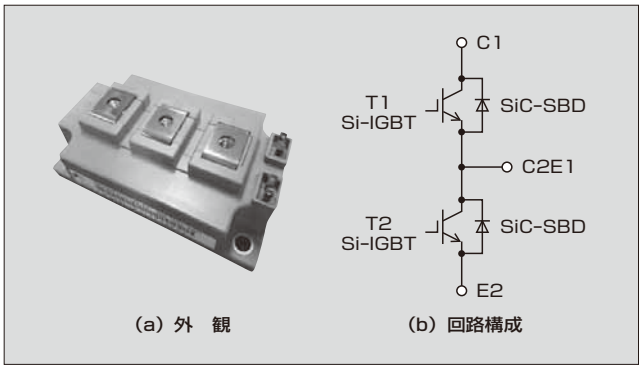


図 5　SiC ハイブリッドモジュール

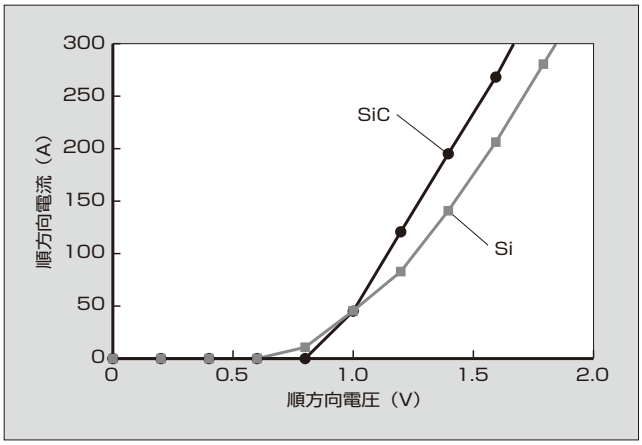


図 6　ダイオードの特性比較

オン電圧が低いため，損失が少なくなる。

PWM コンバータでは，DC リンクコンデンサに充電する際の電流経路においてダイオードの通流率が高くなるため，オン電圧の低い SiC ダイオードを整流器に適用するのが最も効果的である。

発売時期

2016 年 10 月

お問い合わせ先

富士電機株式会社
パワエレ機器事業本部パワーサプライ事業部企画部
電話（03）5435-7091

（2017 年 3 月 6 日 Web 公開）

略語（本号で使った主な略語）

ACB	Air Circuit Breaker	低圧気中遮断器
AT−NPC	Advanced T−type Neutral−Point−Clamped	
BCP	Business Continuity Plan	事業継続計画
BOD	Biochemical Oxygen Demand	生物学的酸素要求量
CEMS	Cluster Energy Management System	地域エネルギーマネジメントシステム
DCS	Distributed Control System	分散型制御システム
EPC	Engineering, Procurement and Construction	
EV	Electric Vehicle	電気自動車
FRP	Fibre Reinforced Plastic	繊維強化プラスチック
FRT	Fault Ride Through	事故時運転継続
FWD	Free Wheeling Diode	
GIS	Gas−Insulated Switchgear	ガス絶縁開閉装置
HEV	Hybrid Electric Vehicle	ハイブリッド自動車
ICT	Information and Communication Technology	
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ
LBS	Load Break Switch	高圧交流負荷開閉器
LPG	Liquefied Petroleum Gas	液化石油ガス
MC	Electromagnetic Contactor	電磁接触器
MCCB	Molded−Case Circuit−Breaker	配線用遮断器
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell	溶融炭酸塩形燃料電池
MLSS	Mixed Liquor Suspended Solids	汚泥濃度
MOSFET	Metal−Oxide−Semiconductor Field−Effect Transistor	
MPPT	Maximum Power Point Tracking	最大電力点追従
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell	りん酸形燃料電池
PCS	Power Conditioning Sub−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
PWM	Pulse Width Modulation	パルス幅変調
RC−IGBT	Reverse−Conducting IGBT	逆導通 IGBT
SAGS	Steam−Above−Ground System	
SBD	Schottky Barrier Diode	
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell	固体酸化物形燃料電池
SS	Suspended Solid	浮遊物質
SV	Sludge Volume	活性汚泥沈殿率
SVC	Static Var Compensator	静止型無効電力補償装置
SVR	Step Voltage Regulator	自動電圧調整器
TCR	Thyristor Controlled Reactor	サイリスタ制御リアクトル方式
UPS	Uninterruptible Power System	無停電電源装置
VCB	Vacuum Circuit Breaker	真空遮断器
VFD	Voltage and Frequency Dependent	
VFI	Voltage and Frequency Independent	
VMC	Vacuum Electromagnetic Contactor	真空電磁接触器
VPP	Virtual Power Plant	バーチャルパワープラント

商標（本号に記載した主な商標または登録商標）

Ethernet	富士ゼロックス株式会社の商標または登録商標
MODBUS	Schneider Automation, Inc. の商標または登録商標

その他の会社名，製品名は，それぞれの会社の商標または登録商標である。

訂正：富士電機技報. 2016, vol.89, no.4, p.254, 図 10.

（正）

X シリーズ：2MBI800XNE120-50

（誤）

X シリーズ：2MBI800XNE20-50

訂正：富士電機技報. 2016, vol.89, no.4, p.283. 英文抄録 1 行目～ 3 行目

（正）

For the relatively large capacity switching power supplies for electronic equipment, a power factor correction (PFC) circuit is required to suppress harmonic current, and a LLC current resonant circuit is also widely used due to the effectiveness in low noise applications.

（誤）

The relatively large capacity switching power supplies for electronic equipment require a power factor correction (PFC) circuit to suppress harmonic current. To meet the requirement, LLC current resonant circuits are widely used because they are effective in low noise applications.

訂正：富士電機技報. 2016, vol.89, no.4, p.283. 英文抄録 4 行目～ 5 行目

（正）

Using these ICs in combination allows power supply systems to improve the efficiency during light loads, achieve low standby power, and reduce the system cost by reducing the number of power supply components.

（誤）

By using these ICs in combination, it is possible to create a cost-saving power system that improves efficiency during light loads, exhibits low standby power and reduces the number of power supply components.

富士電機

主要事業内容

発電・社会インフラ

環境にやさしい発電プラントとエネルギーマネジメントを融合させ，スマートコミュニティの実現に貢献します。

創エネルギー
高効率火力発電設備，地熱発電設備，太陽光発電システム，水力発電設備，燃料電池

エネルギーマネジメント
地域エネルギーマネジメント，スマートメータ

産業インフラ

生産ライン・インフラ設備に関わる，エネルギーの安定供給，省エネルギー，安全・安心を提供します。

生産設備
駆動制御機器，監視制御システム，計測機器，工場電熱

変電設備
受変電設備，大容量整流器，変圧器

設備工事
建築，空調

パワエレ機器

エネルギーの効率化や安定化に寄与するパワーエレクトロニクス応用製品を提供します。

エレベータ，搬送ライン
汎用インバータ，モータ

データセンター
無停電電源装置

メガソーラー
パワーコンディショナ

配電盤
電磁開閉器

電子デバイス

産業，自動車，電源分野および新エネルギー分野に欠かせないパワー半導体をはじめとする電子デバイスを提供します。

インバータ，ロボットなど（産業・新エネルギー分野）
IGBT モジュール，SiC モジュール

自動車電装など（自動車分野）
車載用 IGBT，圧力センサ

サーバなど（電源分野）
電源制御 IC，MOSFET

食品流通

冷熱技術をコアに，メカトロニクスや IT を融合し，最適な製品とソリューションを提供します。

自販機
缶・ペット自販機，カップ自販機，食品・物品自販機

店舗流通
冷凍・冷蔵ショーケース，自動釣銭機，店舗省エネシステム

流通システム
要冷・冷蔵設備，次世代保冷コンテナ

次号予定

富士電機技報　第 90 巻　第 2 号
特集　2016 年度の技術成果と展望

富士電機技報企画委員会

企画委員長　江口　直也
企画委員幹事　瀬谷　彰利
企画委員　荻野　慎次　斎藤　哲哉　片桐　源一　根岸　久方
八ツ田　豊　奥田　善久　竹野入俊司　久野　宏仁
吉田　隆　橋本　親　眞下　真弓　大山　和則
特集委員　片桐　源一　根岸　久方
事務局　木村　基　小野　直樹　山本　亮太　柳下　修

富士電機技報　第 90 巻　第 1 号

平成 29 年 3 月 20 日　印刷　　平成 29 年 3 月 30 日　発行

編集兼発行人　江口　直也

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

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

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

定価　756 円（本体 700 円・送料別）

＊本誌に掲載されている論文を含め，創刊からのアーカイブスは下記 URL で利用できます。
富士電機技報（和文）　http://www.fujielectric.co.jp/about/company/contents_02_03.html
FUJI ELECTRIC REVIEW（英文）　http://www.fujielectric.com/company/tech/contents3.html

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する商標または登録商標である場合があります。
© 2017 Fuji Electric Co., Ltd., Printed in Japan（禁無断転載）

Innovating Energy Technology

エネルギー技術を、究める。

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

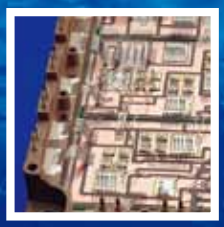
富士電機

Innovating Energy Technology

エネルギー技術を、究める。

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

耐食・材料・熱水利用技術
地熱発電プラント



デバイス技術
IGBTパワー半導体

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

パワーエレクトロニクス技術
インバータ

パワーエレクトロニクス技術
UPS（無停電電源装置）

熱交換・冷媒制御技術
ハイブリッドヒートポンプ式
自動販売機

富士電機

本誌は再生紙を使用しています。

雑誌コード 07797-3　　定価 756 円（本体 700 円）