

NISSIN
ELECTRIC

日新電機グループ技術論文誌

日新電機技報

The Nissin Electric Review

2025 Vol. 70 No.2

(Serial No.164)

特集 エネルギーソリューション



各論文に付与しているSDGsのアイコンは、それぞれのSDGsに貢献する、あるいは貢献しようとするアイコンを付与しています。

○論文に使用の SDGs(Sustainable Development Goals) のアイコンについて

日新電機技報に掲載のSDGsのアイコンは、国連事務局*より許諾を得て使用しております。

なお、使用しているアイコンの選定を含め、各論文の内容には、国連は関係しておりません。

* SDG Permissions

○ NOTICE : About the SDGs (Sustainable Development Goals) icons used in the treatise

The content of this publication has not been approved by the United Nations
and does not reflect the views of the United Nations or its officials or Member States.

○国連 SDGs Web Site（右の QR コードからもアクセスできます。）

▷ <https://www.un.org/sustainabledevelopment/>



目 次

卷頭言

- ごあいさつ (1)
野 村 昭 二

特集:エネルギーソリューション

- 蓄電池活用ソリューション (2)
原 田 瑞 恵 東 秀 訓 實 政 直 樹
山 田 智 博

- 下水処理施設におけるカーボンニュートラルに向けたエネルギーソリューション (9)
柏 谷 幸太郎 今 岡 博 義 大久保 章
漆 壇 謙 次 吉 田 宏 司

- 高圧大容量瞬低対策装置MEGASAFEの再開発について (17)
平 林 祐 作 福 田 有 貴 佐 野 耕 市
河 崎 吉 則

- 国際無線通信規格Wi-SUN FAN 1.1認証の世界初の取得と今後の展望 (22)
濱 田 雄 一

一般論文

- パワーデバイスのためのチャネリングイオン注入技術 (25)
浜 田 信 吉 平 井 裕 也 白 井 洸 佑
田 中 浩 平 和 田 涼 太 黒 井 隆

通巻120号から今号までの「日新電機技報」は、
下記URLまたは右記QRコードからご利用いただけます。

<https://nissin.jp/technical/index.html>
バックナンバー：<https://nissin.jp/technical/technicalreport/index.html>

(今号)



(バックナンバー)



CONTENTS

Message (1)

Nomura Shoji

Energy Solution

Solutions Utilizing Energy Storage Systems (2)

Harada Mizue , Higashi Hidenori , Jitsumasa Naoki , Yamada Tomohiro

Energy Solutions for Carbon Neutrality at Municipal Wastewater Treatment Facilities (9)

Kasuya Kotaro , Imaoka Hiroyoshi , Okubo Akira , Urushigaki Kenji , Yoshida Hiroshi

Re-development of MEGASAFE, a Voltage Dip Compensator for Medium-Voltage/Large-Capacity Systems (17)

Hirabayashi Yusaku , Fukuda Yuki , Sano Koichi , Kawasaki Yoshinori

The World's First Certification of the International Wireless Communication Standard Wi-SUN FAN 1.1 and Its Future Prospects (22)

Hamada Yuichi

Technical Papers

Channeling Ion Implantation Technology for Power Devices (25)

Hamada Shinkichi , Hirai Yuya , Usui Kosuke , Tanaka Kohei , Wada Ryota , Kuroi Takashi



ごあいさつ

常務執行役員 野 村 昭 二
Nomura Shoji

日頃より、当社製品・サービスをご愛顧賜り、心より厚く御礼申し上げます。

近年、地球温暖化に起因すると考えられる異常気象の多発を機に、脱炭素化の取組みがさらに活発化され、再生可能エネルギーでの発電計画が拡大されています。しかしながら、風力発電などの建設コストが増加しており、その結果、発電開始時期の遅れや中止が発生しています。一方で、電力需要は、電力を多く消費するデータセンターや半導体工場の建設や増設に伴い、増加が見込まれる状況となっています。そのような中で、2025年2月には第7次エネルギー基本計画として、再生可能エネルギーの最大電源化（2040年度の電源割合4～5割程度）の目標が示され、同時に「GX（グリーントランسفォーメーション）2040ビジョン」と「地球温暖化対策計画」も閣議決定されるなど、取り巻く事業環境の変化が大きく、脱炭素電源の重要性はさらに高まっています。

このような事業環境の中、当社は2025年度を2021年度からスタートした中期経営計画「VISION2025」の最終年度と位置付けています。「日新一新^(*)」「変化への適応・変化の創造」の方針の下、「①環境配慮製品の拡大、②分散型エネルギー対応、③再生可能エネルギー対応、④DXの製品・事業への適用、⑤新興国環境対応需要の捕捉、⑥EV拡大に伴う事業拡大」の6つの成長戦略で活動してきた成果を次のビジョンに繋げていく重要な年でもあります。

電力・環境システム事業分野では、「カーボンニュートラル」に向けた取組みを加速しており、再生可能エネルギーの拡大や電力需要の変化に対応した電力インフラの需給調整市場、地域マイクログリッドでの電力安定化や電力レジリエンス強化に向けた製品開発・ソフト技術開発を積極的に行ってています。また、下水道市場向けにカーボンニュートラルを目指した製品の開発も行い、インフラの安定化に貢献しています。

ビーム・プラズマ事業分野では、電子線照射装置など顧客ニーズに対応した各種製品をラインアップしています。さらに、社会基盤を支える多種多様な半導体などの製造に欠かせない装置の開発において有害物質の排除や省エネ化を進めることで、環境負荷の低い装置の創出に取組んでいます。特に、需要が急速に拡大することが期待されるSiC（炭化ケイ素）パワー半導体用イオン注入装置については、デバイス性能の向上と製造技術の進歩を目指しています。

装置部品ソリューション事業分野では、積極的な設備投資によりASEAN地域を中心に高難度で品質の高い部品製造を行い顧客から好評を得ています。

本号では、特集「エネルギーソリューション」に加え、一般論文では、高精度のチャネリング注入を実現できる技術「パワーデバイスのためのチャネリングイオン注入技術」を掲載しております。是非ともご高覧賜り、ご意見・ご指導を頂戴できれば幸甚に存じます。

最後になりましたが、ステークホルダー各位のますますのご繁栄をお祈りし、巻頭の挨拶とさせていただきます。

(*) 「日新一新」は日新電機株の登録商標です。

特集論文

関連するSDGs



蓄電池活用ソリューション

Solutions Utilizing Energy Storage Systems

原田瑞恵

Harada Mizue

實政直樹

Jitsumasa Naoki

東秀訓

Higashi Hidenori

山田智博

Yamada Tomohiro

概要

データセンターの新增設等に伴う電力需要の増加、世界情勢の影響による化石燃料調達リスクの高まり、カーボンニュートラルを2050年に実現するための取組み等から、太陽光発電をはじめとする再生可能エネルギーへの投資と活用の重要性が増している。他方で、再生可能エネルギーは天候の影響で出力が変動するため、その大量導入により電力系統が不安定化するという課題を伴う。この課題への対策の一つが調整力の確保であり、調整力を捻出できる蓄電池の活用が注目されている。

当社はトータルエンジニアリングをもとに、蓄電池から受変電設備までのシステムを一括導入するソリューションを提供している。昨今、蓄電池の活用についてさまざまなニーズが登場していることを踏まえ、本稿では、当社ソリューションに、住友電気工業株式会社のエネルギー・マネジメントシステムであるsEMSA^{(*)1} (Sumitomo Energy Management System Architecture) を組み合わせた蓄電池活用ソリューションを紹介する。

Synopsis

The importance of investment in and utilization of renewable energy sources such as solar power is increasing as a result of increases in electricity consumption due to the new construction and expansion of data centers, the fossil fuel procurement risk arising from geopolitical factors, and efforts to achieve carbon neutrality by 2050. However, the output of renewable energy sources fluctuates depending on weather conditions and the large-scale integration of renewable energy sources leads to instability in the power system. One solution for maintaining stable and reliable operations is to ensure flexibility through the use of batteries. Our company provides a solution that integrates the entire system from batteries to substations based on total engineering. This paper introduces a battery utilization solution that combines our company's solution with Sumitomo Electric Industries, Ltd.'s energy management system, sEMSA (Sumitomo Energy Management System Architecture) in order to meet various needs regarding battery utilization.

キーワード：蓄電池、調整力、電力取引市場、エネルギー・マネジメントシステム、sEMSA

1. はじめに

2022年度において、日本の電源構成に占める再生可能エネルギー（以下、再エネ）比率は約22%で、その内、

太陽光は9.8%、風力は1.1%を占めた。2025年2月に公表された「第7次エネルギー基本計画」では、2040年度の電源構成として、再エネ比率が4~5割、その内、

太陽光は23~29%程度、風力は4~8%程度を占めるとの見通しが示されており、再エネの主力電源化に向けた太陽光発電や風力発電への期待は大きい⁽¹⁾。

一方、太陽光発電や風力発電は天候によって出力が変動する不安定な電源（以下、変動性再エネ）であるため、それらを大量に導入すると電力系統が不安定化する可能性がある。その対策の一つとして重要視されているのが調整力である。調整力は需給調整や周波数の変動抑制に利用される電力で、その確保のために蓄電池の活用が注目されている⁽²⁾⁽³⁾。蓄電池は、充放電の応答速度が速く、変動性再エネの出力や需給状況に応じて柔軟に充放電することで調整力を捻出することができる分散型電源^{※1}である。

日新電機は、図1に示すとおり、蓄電池、パワーコンディショナ（以下、PCS）、蓄電池制御装置、さらには受変電設備に至るまで、蓄電池システムを一括導入するソリューションを用意している。また、昨今の調整力ニーズや蓄電池活用の動きを踏まえ、sEMSA（Sumitomo Energy Management System Architecture）というエネルギーマネジメントシステム（以下、EMS）を提供している住友電気工業株式会社（以下、住友電工）と、両者の技術・ノウハウを組み合わせた蓄電池活用ソリューションを共同提案している。

本稿では、近年の蓄電池活用例とsEMSAについて説明した後、当社と住友電工が提案する蓄電池活用ソリューションを紹介する。

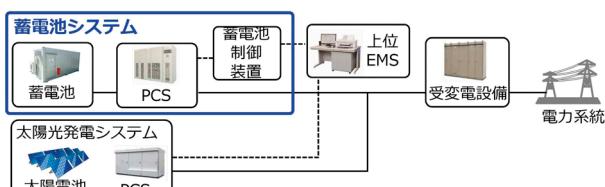


図1 日新電機の蓄電池システム

2. 電力取引市場と蓄電池の活用例

前述のとおり、変動性再エネの導入拡大と系統安定化のため、調整力の確保と調整力を捻出できる蓄電池の導入・活用が進んでいる。本章では、調整力を確保する仕組みと近年の蓄電池活用例を以下に記載する。

2. 1 電力取引市場

調整力は、電力取引市場の1区分である需給調整市場（2021年に開設）で取引される（表1）。

表1 電力取引市場の区分と概要

市場名	概要
需給調整市場	電力の需給バランスのために調整力（ΔkW）を取引する市場
容量市場	将来的必要な発電能力/供給力（kW）を取引する市場
卸電力市場	電力量（kWh）を取引する市場

調整力は、発電機や蓄電池等の調整力を捻出できる電源や設備を保有する発電事業者や需要家から、アグリゲータという事業者を介して、市場へ提供される。そして、その調整力を一般送配電事業者が調達し、発電事業者や需要家、およびアグリゲータは、市場から調整力の提供に対する対価を得る。アグリゲータを介した調整力取引の流れを図2に示す。

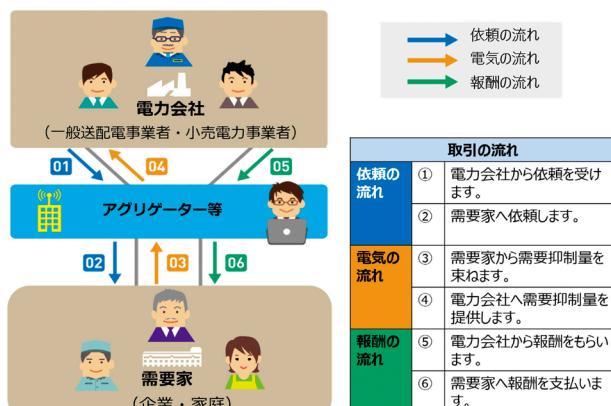


図2 アグリゲータを介した調整力(需要抑制分)取引の流れ
(出典：文献(4)の図：ネガワット取引のイメージを一部加工して転載)

2. 2 蓄電池の活用例

蓄電池の活用例は、主に、需要家併設蓄電池、系統用蓄電池、および再生可能エネルギー電源併設型蓄電池（以下、再エネ併設蓄電池）の3つに整理される（図3）。

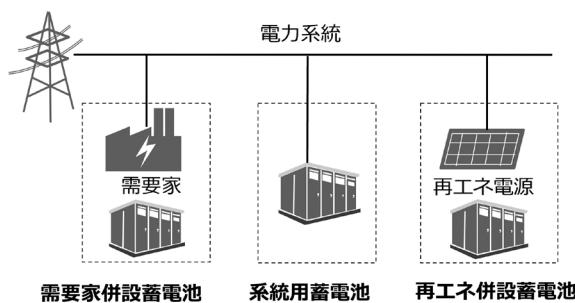


図3 蓄電池の活用例

需要家併設蓄電池は、家庭や工場等の需要家施設内に設置された蓄電池である。電力需要がピークの時に蓄電池から放電することでピークカットを実現し、電力コストを削減する。また、災害時の非常用電源としての利用や、需要家施設に太陽光発電があ

る場合は、再エネ余剰を蓄電池に充電し、電力需要が多い時に放電することで再エネの有効活用を実現する。近年では、電力取引市場が整備されたことで、蓄電池の調整力や供給力を市場に提供して対価を得る運用も可能となった。

系統用蓄電池は、電力系統に直接接続され、需給調整や周波数の変動抑制等の系統安定化のために活用される蓄電池である。補助事業等の支援や電力取引市場が整備されたこと、容量市場で脱炭素電源の新設・更新を促す入札制度として長期脱炭素電源オークション^{*2}が開始されたことが影響し、系統用蓄電池の導入が進んでいる⁽⁵⁾。このように、系統用蓄電池は、電力系統にとっては需給調整に資する電源であり、運用事業者にとっては複数の市場で活用することで収益を生み出す事業資源となる。

再エネ併設蓄電池は、メガソーラー等の大規模な再エネ電源に併設して設置する蓄電池である。太陽光パネルの過積載^{*3}によりピークカットされる発電分や、一般送配電事業者から出力制御^{*4}を受ける発電分を蓄電池に充電することで、再エネ発電を有効活用できる。また、FIP (Feed-in Premium) 制度^{*5}を利用し、市場価格が安い時間帯に充電して高い時間帯に放電する運用をすることで、売電収入を増やすことも可能となる。

■ 3. 住友電工のエネルギー管理システム sEMSA

蓄電池の充放電を制御して最適運用を支援するシステムとしてEMSがある。本章では、住友電工製のEMSであるsEMSAを取り上げる。

3. 1 sEMSAの概要とシステム構成

sEMSAは、分散型電源の最適な運用計画を立案し、それに基づいて分散型電源を自動制御するEMSである。近年は電力取引市場が整備されたことで、アグリゲータ向けEMS（以下、アグリゲータシステム^{*6}）としてsEMSAを導入する事例が増えている。

sEMSAは、複数拠点にある分散型電源をクラウド上で統合管理して電力取引市場システム^{*7}と連携するsEMSAサーバと、分散型電源の各拠点に設置する拠点EMS^{*8}であるsEMSA端末から構成される（図4）。

sEMSAサーバは、電力取引市場システムからの指令や予測等の各種情報をもとに分散型電源を最適運用する計画を立案し、sEMSA端末に送信する。サーバ内部には、電力取引市場システムとの連携機能、予測機能、最適運用計画機能、下位システム（sEMSA端末）との連携機能等、さまざまな機能を

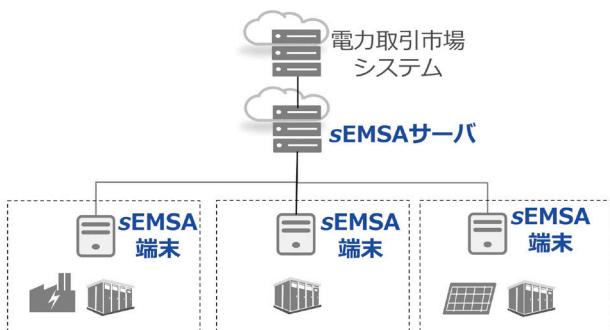


図4 sEMSAを適用したシステム構成例

搭載できる。これらを顧客ニーズをもとに柔軟に組み合わせてサーバは構築される。

sEMSA端末は、sEMSAサーバから送信される運用計画等をもとに蓄電池等の分散型電源を制御し、また、分散型電源や取引メータの実績値を取得して、sEMSAサーバへ連携する機能を有する。

3. 2 sEMSAの特長

sEMSAの機能として、最適運用計画機能、制御機能、電力取引市場システムとの連携機能等がある。これらの機能を用いることで、蓄電池の高精度な制御、および複数市場での蓄電池活用が可能となる。

3. 2. 1 最適運用計画機能

sEMSAサーバは、電力需要、発電予測、分散型電源の情報等をもとに30分単位での分散型電源の運用計画を定期的に作成し、sEMSA端末へ数分単位で送信する。このような制御運転中は、分散型電源の制御状況をリアルタイムでモニタリングし、実際の制御実績値と計画・目標値との間に乖離が生じると、追加の制御指令を送信して制御の補正を行う⁽⁶⁾。

3. 2. 2 制御機能

sEMSAの制御機能は、sEMSAサーバの運用計画に基づく制御と、sEMSA端末が自発的に行う制御の2つに分類される。

sEMSA端末では秒単位での監視・制御を行っており、制御にはルールベースの条件制御とフィードバック制御がある。ルールベースの条件制御は、受電点ベースで需要量が常に一定量を超過しないように制御するもので、デマンド制御^{*9}や太陽光発電潮流防止制御^{*10}等が該当する。フィードバック制御は、受電点ベースで電力量が常に一定の値と一致するように制御するもので、計画値同時同量^{*11}や需給調整市場の三次調整力^{*12}等、高い制御精度が求められる場合に必要となる⁽³⁾。なお、フィードバック制御後も制御実績が当初の計画・目標値に達しなかった場合は、sEMSAサーバで運用計画を修正し、

sEMSA端末へ新たな制御指令を送信する仕組みをとっている。sEMSAの最適運用計画立案と制御フローを図5に示す。

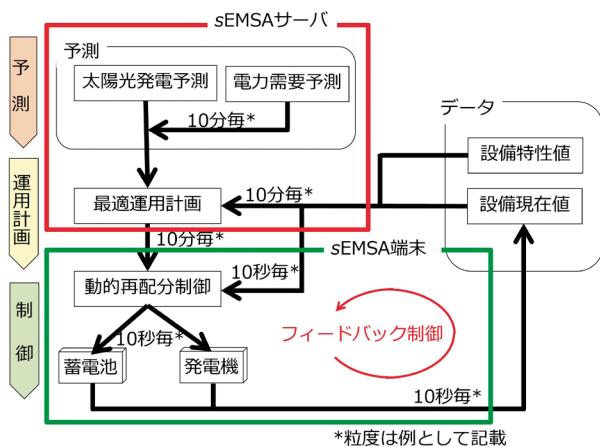


図5 sEMSAの最適運用計画立案と制御フロー

経済産業省のバーチャルパワープラント構築実証事業（～2020年度）において、2拠点（当社の前橋製作所と住友電工の横浜製作所）にある蓄電池やコーディネーション等の分散型電源を、sEMSAで群制御した一例を紹介する。図6に需給調整市場三次調整力の実証試験のシステム構成を示す。2拠点の合計受電電力を目標値の±10%以内に収める制御を実現し、需給調整市場の三次調整力で求められ

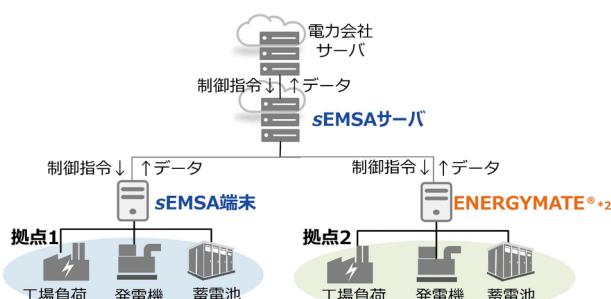


図6 需要調整市場三次調整力の実証試験のシステム構成

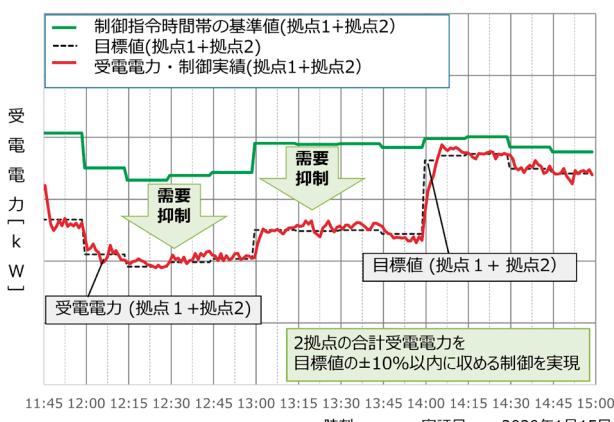


図7 実証試験結果
(出典: 文献(7)の図6(p.14)を加工して作成)

る制御精度（供出可能量^{※13}±10%以内）を達成できることを確認した（図7）⁽⁷⁾。

3. 2. 3 電力取引市場システムとの連携機能

sEMSAサーバは需給調整市場や容量市場のシステムと連携でき、各市場から制御指令を受信する。仮に同一の分散型電源が複数市場に参加する場合、アグリゲータシステムは複数の制御指令を受信することになる。sEMSAサーバは、事前に定めた指令の優先度にしたがって運用計画を更新して制御指令値を送信するため、複数市場での運用も可能である。

現在、sEMSAサーバは、需給調整市場や容量市場において、分散型電源を活用するためのシステムとして複数のアグリゲータに利用されている。

4. 蓄電池活用ソリューション

当社は、省エネルギー、省コスト、二酸化炭素排出量削減等に貢献するため、機器の販売だけでなく、受変電設備や電力系統機器にソフトウェアやネットワーク技術を組み合わせたソリューションを提供している⁽⁸⁾。また、近年の蓄電池活用ニーズを踏まえ、住友電工のsEMSAを組み合わせた蓄電池活用ソリューションを提案している。

本章では、蓄電池活用ソリューションとして、需要家併設蓄電池向けソリューション、系統用蓄電池向けソリューション、および再エネ併設蓄電池向けソリューションを紹介する。

4. 1 需要家併設蓄電池向けソリューション

需要家併設蓄電池向けソリューションでは、蓄電池の新規導入を検討する需要家に対して、システム構築前の事前相談、システム構築、アフターサポートまでを一括支援する。

需要家併設蓄電池の構成例を図8に示す。提案対象システムは、蓄電池、受変電設備、PCS、蓄電池制御装置、拠点EMS等である。需要家施設にある太陽光発電の出力や電力負荷は、変動するため事前予測が難しい。したがって、需要家にとってコストパフォーマンスの良い蓄電池仕様をいかに決定するかが蓄電池導入時の課題である。当社は、システム構築前に顧客ヒアリングと簡易シミュレーションを行い、その結果をもとにシステム容量や機器等を提案している。

近年、自家消費用太陽光発電に蓄電池を併設して再エネの利用率を高める、また、需給調整市場や容量市場で活用する等、需要家併設蓄電池をさまざまな用途で運用するニーズが登場している。

蓄電池の導入効果を高めるには複数用途での運用

が有効であるが、その分、蓄電池の充放電計画は複雑化する。また、アグリゲータを介して需給調整市場や容量市場に参加する場合、需要家施設内にある拠点EMSとアグリゲータシステムを通信連携するが、連携実績のない拠点EMSとアグリゲータシステムを連携する場合、事前に仕様調整やソフトウェア開発を必要とすることがある。

これらの課題に対して、住友電工のsEMSAサーバは次のような有効な解決策を提供する。自家消費用太陽光発電に蓄電池を併設する運用では、sEMSAサーバを用いることで蓄電池の充放電計画の立案を自動化できる。また、複数拠点に太陽光発電と蓄電池を設置する場合も、sEMSAサーバ1式で複数施設の運用計画を立案することも可能である。

電力取引市場での蓄電池運用については、sEMSAサーバを使用するアグリゲータを介して市場に参加する場合、拠点EMS（sEMSA端末）とアグリゲータシステム（sEMSAサーバ）間は連携できる前提となるため、事前の仕様調整やソフトウェア開発費等を抑えられるメリットがある。

なお、需要家が需給調整市場に参加する場合、現在は、受電点のデータを評価対象として、調整力の制御精度を供出可能量の±10%以内にすることが求められるが、負荷変動が大きい需要家にとって、受電点データでの評価は市場参入の障壁になっていた。ただ、2026年度以降は機器端計測^{※14}が導入される予定であり、機器単位データでの評価が認められるようになる。そのため、従来より求められる制御精度を満たせる可能性が高まり、需給調整市場での蓄電池活用が今後増えていくと考えられる⁽⁹⁾。

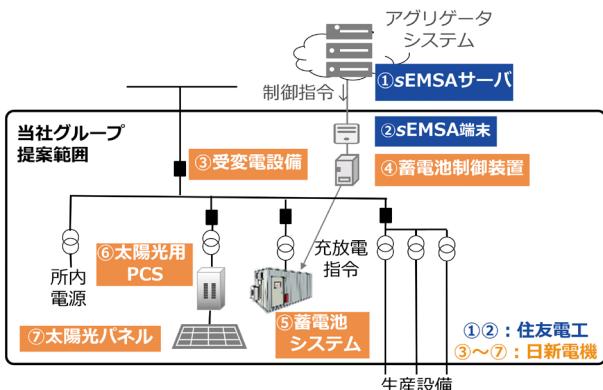


図8 需要家併設蓄電池の構成例

4. 2 系統用蓄電池向けソリューション

系統用蓄電池向けソリューションでは、系統用蓄電池事業を展開する事業者に対して、システム構築前の事前相談から、システム構築、アフターサポートまでを一括支援する。システムとしては、蓄電池、

受変電設備、蓄電池制御装置、PCS、およびEMS（拠点EMS、アグリゲータシステム）の一括提供が可能である⁽¹⁰⁾。

系統用蓄電池の構成例を図9に示す。系統用蓄電池が設置される拠点（以下、蓄電所）には、蓄電池、受変電設備、PCS、蓄電池制御装置、拠点EMS等の機器が設置されるが、これらの機器の調達元はさまざまであることが多い。この場合、蓄電所の全体システムは、異なるメーカーの機器を連携させて構築されるが、設置する各機器の機能配置や通信インターフェース^{※15}の仕様調整、および連携後の動作確認試験に一定の時間・労力を要することが時に課題になる。

系統用蓄電池向けソリューションでは、蓄電池、受変電設備、PCS、蓄電池制御装置、拠点EMS（sEMSA端末）、およびアグリゲータシステム（sEMSAサーバ）を、当社ならびに住友電工が事前にインターフェースの調整を済ませた上で一括導入するため、機能配置や仕様調整にかかる時間と労力を削減できる。そして、アグリゲータシステム（sEMSAサーバ）は需給調整市場や容量市場に対応した機能を搭載しているため、系統用蓄電池をこれに繋げることで複数市場での運用が可能になる。

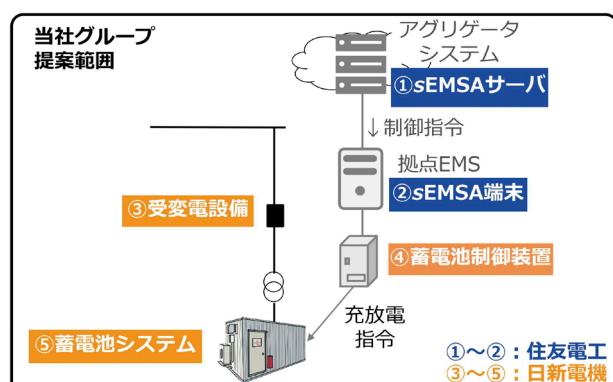


図9 系統用蓄電池の構成例

4. 3 再エネ併設蓄電池向けソリューション

再エネ併設蓄電池向けソリューションは、蓄電池導入を検討する太陽光発電事業者を対象にしている。

出力制御エリアが全国に拡大し、出力制御量も増加傾向にあるため、太陽光発電所に蓄電池を併設して出力制御分を充電するニーズが増えることが予想される。また、太陽光発電が多く普及するエリアでは、発電余剰のために卸電力市場の電力価格が0.01円/kWhと安値になる時間帯も多い。FIP制度を利用し、市場価格の高い時間帯になるべく売電して収入を増やす運用が期待される。

再エネ併設蓄電池向けソリューションについても、当社の蓄電池システムと住友電工のsEMSAを組み合わせて、太陽光発電の有効活用や売電収入増加につながるような蓄電池システムの導入と運用を支援する計画である。

■ 5. まとめ

変動性再エネの導入拡大や系統の安定化のために、蓄電池の役割は今後もますます重要になり、蓄電池運用に対する顧客ニーズも多様化することが予想される。このような状況を踏まえ、当社は、住友電工のsEMSAを組み合わせた蓄電池向けソリューションを提案している。需要家併設蓄電池、系統用蓄電池、再エネ併設蓄電池に関心がある顧客に対し、蓄電池システム、受変電設備、EMS等のシステムを一括提供し、さらに、電力取引市場での活用等、蓄電池の付加価値向上に資する運用を支援する。

今後もさまざまなニーズに応えたソリューションを提供すべく、住友電工グループで連携しながら対応する所存である。

用語集

※1 分散型電源

需要家がいるエリアに分散して設置された発電設備で、太陽光発電、コーチェネレーションシステム、蓄電池等が該当する。

※2 長期脱炭素電源オークション

二酸化炭素を排出しない脱炭素電源への新規投資・リプレースを促すことを目的とした入札制度。脱炭素電源に投資する事業者がオークションに参加して落札した場合、落札額が20年間支払われる。

※3 過積載

PCSの容量を超えて太陽光発電のパネルを設置すること。

※4 出力制御

需給調整のために、一般送配電事業者の指示により発電事業者が太陽光発電所の出力を抑制すること。

※5 FIP(Feed-in Premium)制度

発電事業者が卸電力市場で売電する際に、売電収入に加えて、プレミアムと呼ばれる補助額が上乗せされる制度のこと。

※6 アグリゲータシステム

一般送配電事業者と事業者との間で、需給調整市場や容量市場に関する制御指令や制御実績等のデータをやり取りするために、アグリゲータ

が運用するシステム。電力取引市場システム（簡易指令システム）から指令を受信した後、下位のシステムに送信するとともに、下位のシステムから実績値を受信して市場（簡易指令システム）に送信する。

※7 電力取引市場システム

電力取引市場システムの例としては簡易指令システムがあり、一般送配電事業者が、需給調整市場や容量市場に関する制御指令や制御値等のデータを、事業者とやり取りするために運用する。

※8 拠点EMS

需要家施設や蓄電所等の現地に設置され、分散型電源の監視や制御を行うエネルギー・マネジメントシステム。サーバと通信連携されることで、サーバから制御指令を受信するとともに、計測データをサーバに送信する。

※9 デマンド制御

30分毎の平均電力使用量（デマンド値）を監視し、最大デマンド値を抑制するため、事前に設定した目標値等を超過しないように電力機器を制御すること。

※10 太陽光発電逆潮流防止制御

需要家施設にある太陽光発電の発電量が電力需要量より多い場合、需要家側から系統側へ電力が逆流する可能性があるが、このような逆潮流を防ぐために太陽光発電の出力等を制御すること。

※11 計画値同時同量

発電実績や需要実績を、事前に立てた発電計画や需要計画と一致させること。

※12 三次調整力

需給調整市場で取引される調整力の商品区分の一つ。市場取引される商品区分は一次調整力から三次調整力まであり、それぞれ求められる役割や要件が異なる。

※13 供出可能量

発電設備や蓄電池等が提供できる調整力の量。

※14 機器端計測

電力の使用状況を個別の機器や装置毎に計測すること。

※15 インターフェース

異なる機器・システム間で情報をやり取りするための接続部分や規格。

参考文献

- (1) 経済産業省資源エネルギー庁 :「エネルギー基本計画の概要」(令和7年2月)
<https://www.meti.go.jp/press/2024/02/20250218001/20250218001-2.pdf>
(参照：2025/6/13)
- (2) 平田 :「モビリティとエネルギーをつなぐEMS事業の展開」、住友電工テクニカルレビュー、第204号(2024年1月)
- (3) 三好 他 :「脱炭素社会の実現に向けたエネルギー管理システム(sEMSA)」、住友電工テクニカルレビュー、第200号(2022年1月)
- (4) 経済産業省資源エネルギー庁 :「VPP・DRの活用」
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/advanced_systems/vpp_dr/negawatt.html#tag3
(参照：2025/8/29)
- (5) 経済産業省資源エネルギー庁 :「系統用蓄電池の現状と課題」(2024年5月29日)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/062_05_00.pdf
(参照：2025/6/13)
- (6) 田村 他 :「クラウド型サーバによる分散型エネルギーソースの最適制御」、住友電工テクニカルレビュー、第195号(2019年7月)
- (7) 田村 他 :「クラウド型サーバによる分散型エネルギーソースの最適制御」、電気評論、第106巻第3号、pp.11-15(2021.3)
- (8) 藤原 他 :「持続的な成長を支えるスマート電力供給システム(SPSS)」、日新電機技報、Vol.66 No.2, pp.46-59(2021. 11)
- (9) 経済産業省資源エネルギー庁 :「エネルギー・リソース・アグリゲーション・ビジネスに関するガイドラインの改定について」(2024年8月2日)
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/jisedai_bunsan/pdf/010_05_00.pdf
(参照：2025/6/13)
- (10) 藤原 他 :「環境配慮を支えるスマート電力供給システム(SPSS)」、日新電機技報、Vol.66 No.2, pp.2-13(2024. 12)

(*1) 「sEMSA」は、住友電気工業(株)の登録商標です。

(*2) 「ENERGYMATE」は、日新電機(株)の登録商標です。

執筆者紹介



原田 瑞恵 Harada Mizue
システムエンジニアリング事業部
エネルギー・システム技術部 主査



實政 直樹 Jitsumasa Naoki
システムエンジニアリング事業部
エネルギー・システム技術部 主幹



東 秀訓 Higashi Hidenori
システムエンジニアリング事業部
エネルギー・システム技術部長



山田 智博 Yamada Tomohiro
システムエンジニアリング事業部
エネルギー・システム技術部 主査

特集論文

関連するSDGs



下水処理施設における カーボンニュートラルに向けた エネルギーソリューション

Energy Solutions for Carbon Neutrality at Municipal Wastewater Treatment Facilities

柏谷 幸太郎
Kasuya Kotaro
大久保 章
Okubo Akira
吉田 宏司
Yoshida Hiroshi

今岡 博義
Imaoka Hiroyoshi
漆垣 謙次
Urushigaki Kenji

概要

政府のカーボンニュートラルに向けた政策に従い、水処理施設における二酸化炭素の排出量削減の要求が高まっている。当社では、下水処理施設のカーボンニュートラル達成のためのエネルギーソリューションとして、省エネルギー対策や再生可能エネルギー導入、ならびにそれらを効果的に使用するためのエネルギー・マネジメントシステムなどを提供している。本稿では、近年の下水処理施設向けエネルギー・ソリューションを紹介する。

Synopsis

At water treatment facilities such as water supply and sewerage facilities, there is increasing demand to reduce CO₂ emissions in line with the government's policy toward carbon neutrality. We provide energy solutions for carbon neutrality at municipal wastewater treatment facilities, such as energy saving measures and the introduction of renewable energy, as well as energy management systems for the effective use of these solutions. This paper introduces recent energy solutions for sewerage facilities.

キーワード：下水道施設、カーボンニュートラル、エネルギー・ソリューション、省エネルギー、再生可能エネルギー

1. はじめに

わが国は、2030年までに温室効果ガス排出量を2013年度比で46%削減し、2050年までにカーボンニュートラルを達成するという目標を掲げている。2021年度の下水道施設からの温室効果ガスの発生量は約520万トンであり（図1）⁽¹⁾、これはわが国の温室効果ガス排出・吸収量（11億2,200万トン）⁽²⁾の約0.5%に相当する。また、自治体の事務事業における温室効果ガス排出量のうち、下水処理が占める割合は大きい。そのため、自治体が排出量削減の目標を達成するためには、下水処理施設のカーボンニュートラル化が不可欠である。

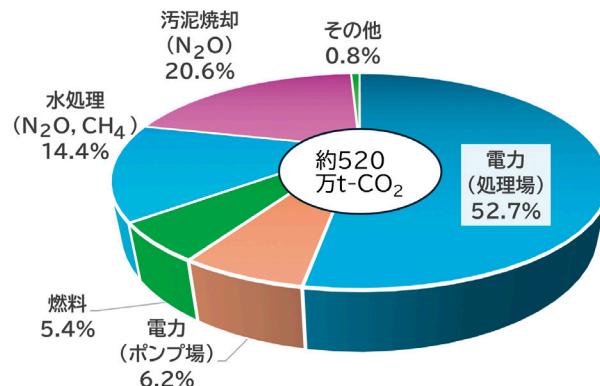


図1 下水道施設からの温室効果ガス発生量（2021年度）

■ 2. 下水処理施設におけるカーボンニュートラルへの取組み

下水処理施設におけるカーボンニュートラルの実現に向けた取組みは多岐にわたる。そのうちの主な取組みの状況、および課題とその対策を以下に述べる。

2. 1 エネルギー消費量の削減

下水処理施設の多くは老朽化が進行し、エネルギー効率の低下や事故リスクの高まりが懸念されている。老朽化設備の計画的な更新が喫緊の課題となっているが、設備更新の際にはカーボンニュートラルの達成も念頭に置く必要がある。エネルギー消費量を削減するために、最新の省エネルギー（以下、省エネ）機器の導入やエネルギー効率の高い機器への交換はもとより、設備制御（ポンプ運転など）の最適化、操作方式の見直しによる省エネ制御システムの開発および新規導入、運転条件や負荷の最適化、最新の省エネ技術の導入などが進んでいる。

2. 2 再生可能エネルギーの導入

敷地内の遊休地を利用した太陽光発電や汚泥処理過程で発生する消化ガスを活用した発電など、下水処理施設へ再生可能エネルギー（以下、再エネ）を導入することによりエネルギー自給率を高め、電力負荷の軽減と二酸化炭素（CO₂）排出量の削減が進められている。

2. 3 運用のスマート化とエネルギー管理

少子高齢化により熟練技術者の減少と次世代の担い手不足が深刻化している。これは、下水処理施設の運用の継承や効率化、および技術革新の妨げとなり、保有技術の継承が重要課題となっている。

そこで、情報通信技術（ICT）や人工知能（AI）を活用した監視制御・維持管理システムにより、最適なエネルギー利用を追求し、エネルギー管理の効率を向上させる技術の開発および市場投入が徐々に進んでいる。例として、効果的な運用を促進する運転支援装置、AIを活用したエネルギー管理、設備稼働データに基づいたアセットマネジメントなどがある。

■ 3. 水処理設備における消費電力量の削減

下水道施設における消費電力量の設備別の内訳を図2に示す⁽¹⁾。水処理設備（図3）の消費電力量の全体に占める割合は45%と高いことから、ここでの消費電力量を削減することが下水道施設全体の消費電力量の削減に有効であり、その方策として水処理設備の省エネ運転や送気量制御の適正化が挙げられる。

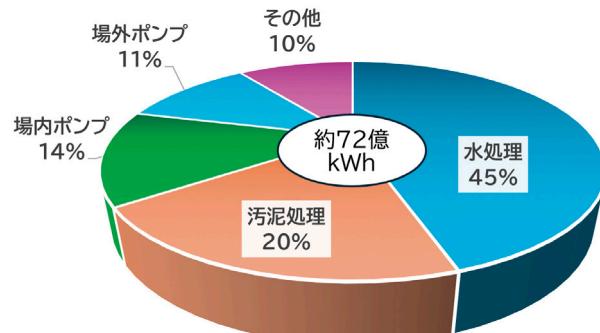


図2 下水道施設における消費電力量の設備別内訳(2021年度)

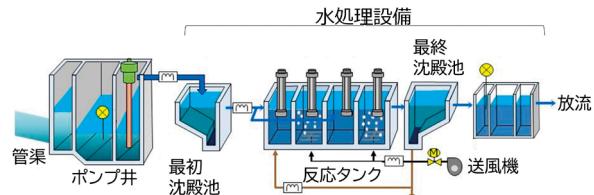


図3 下水処理施設の水処理設備

3. 1 水処理設備の省エネ運転

国土交通省の「新下水道ビジョン加速戦略」⁽³⁾では、健全な下水道経営の確保に向けた取組みとして省エネ技術の採用等によるコスト縮減の徹底が掲げられており、適切な処理水質を維持しながら省エネ化が進められている。

ここでは当社が提案する省エネ運転技術を紹介する。

3. 1. 1 水中攪拌機の間欠運転

反応タンク内の水中攪拌機は、活性汚泥^{*1}の沈降を防ぎ、汚水と活性汚泥との良好な接触を促す。一般に、水中攪拌機の消費電力は大きいことから、汚水の流入量が多い時間帯など、反応タンク内で一定の攪拌効果が期待できる場合は、水中攪拌機の間欠運転を行うことで水質の維持と消費電力量の削減を図れる。

水中攪拌機の連続運転と間欠運転の概念を図4に示す。実際の運転計画は、流入水量や送気量などの運転条件から想定される攪拌効果の時間特性に応じて設定する。

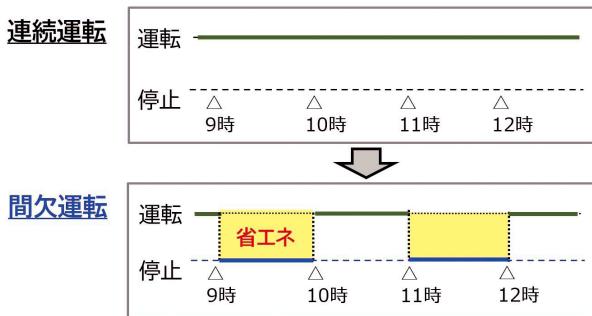


図4 水中攪拌機の連続運転と間欠運転

3. 1. 2 水中攪拌機の回転数調整

水中攪拌機が間欠運転に対応していない場合は、反応タンク内の攪拌状態に応じて攪拌機の回転数を調整することによって省エネ化が図れる。

例えば汚水の流入量が多く、反応タンク内で一定の攪拌効果が期待できる時間帯は、通常よりも低い回転数での運転が可能であり、これによって消費電力の削減が期待できる（図5）。

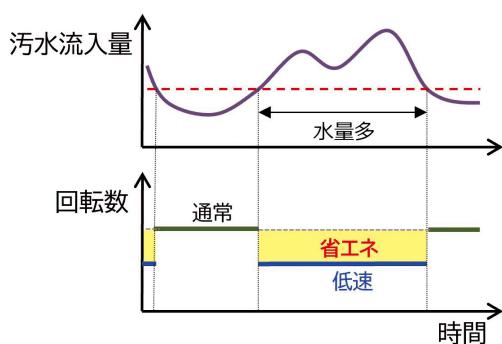


図5 汚水流入量に基づいた水中攪拌機の回転数調整

3. 1. 3 循環ポンプの流量調整

汚水中の窒素成分を生物学的に除去するための下水処理方法として「循環式硝化脱窒法」や「嫌気無酸素好気法」が知られており、これらの方法では、反応タンクの下流側から上流側へ活性汚泥の混合水を返流する循環水ポンプが運転される。循環水流量の増加に伴い理論的な窒素除去率は向上するため、循環水の流量は、反応タンクへの汚水流入量とほぼ等しくなるよう、あるいはそれ以上になるように運転される。したがって、汚水中の窒素濃度に応じて循環水流量を調整することにより、処理水質の安定化とポンプ消費電力の削減が期待できる。

汚水中の窒素濃度に基づいて循環水流量を調整すると（図6）、汚水中の窒素濃度が低い時間帯、すなわち、窒素の除去率を高く設定しても目標の処理水質が得られる時間帯に循環水の流量を少なくできるため、処理水質の維持と省エネ化が図れる。

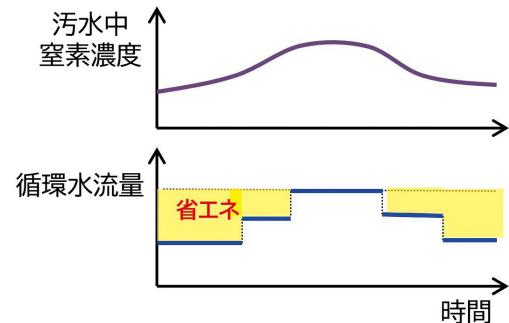


図6 汚水中窒素濃度に基づいた循環水流量の調整

3. 1. 4 消泡水ポンプの間欠運転

反応タンクなどで泡が発生すると処理水質の悪化や悪臭の発生を招くため、連続的に消泡水ポンプを運転して泡の発生・拡大を抑制している。泡が発生する要因や程度は、季節、時間帯、運転条件などによってさまざまである。したがって、各下水処理施設での泡発生の傾向や特性に応じて、間欠運転を取り入れるなど、消泡水ポンプの運転を調整することでポンプ消費電力量の削減が図れる。消泡水ポンプの連続運転と間欠運転の概念を図7に示す。

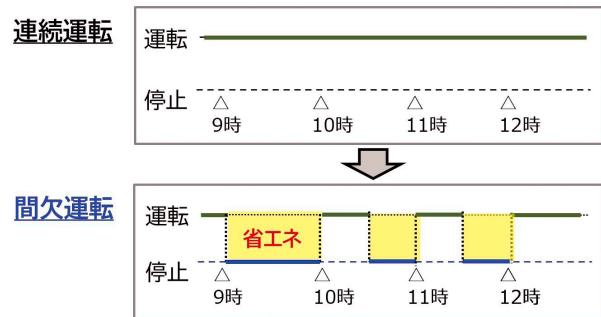


図7 消泡水ポンプの連続運転と間欠運転

3. 2 アンモニア計を活用した送気量制御

下水処理施設では、反応タンクのエアレーションに用いる送風機に多くの電力が使用されている。特に、アンモニア性窒素（以下、NH₄-N）の硝化^{※2}には多くの送気量を必要とするため、処理水質を維持しつつ、送気量を適正化して省エネを達成することが重要な課題となっている。

当社は、地方共同法人日本下水道事業団（以下、JS）と株式会社日新システムズと共に、水中のNH₄-N濃度を連続的に計測するアンモニア計（以下、NH₄-N計）を活用して送気量を適正に制御する技術を既に開発している。ここでは本技術の概要を紹介する。

3. 2. 1 制御方法

本技術は、反応タンク内の上流側に設置したNH₄-N計の計測値（以下、前段NH₄-N濃度）によるフィードフォワード制御と、下流側に設置したNH₄-N計の計測値（以下、後段NH₄-N濃度）によるフィードバック補正を組み合わせて反応タンク送気量の自動制御を行う技術であり、活性汚泥法^{※3}（OD法^{※4}を除く）を用いる処理施設を対象とする。

本制御技術の概要を図8に示す。本技術は、「アンモニア計による送気量フィードフォワード制御技術」として、JSの新技術導入制度における新技術I類に選定されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

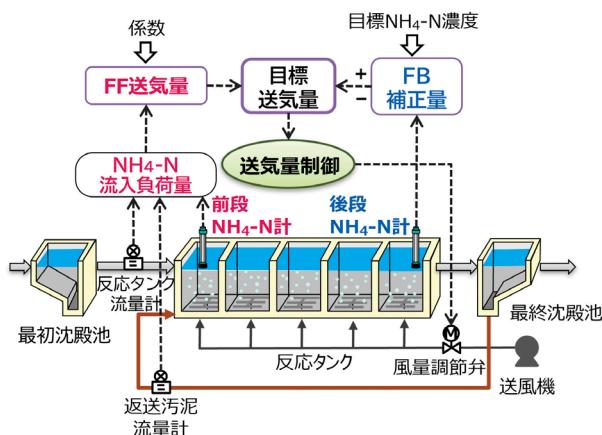


図8 アンモニア計を活用した送気量制御技術の概要

3. 2. 2 技術の特長

NH₄-N流入負荷量^{※5}の変動に対する後段NH₄-N濃度と送気量について、従来技術であるDO一定制御^{※6}と本技術を比較したイメージ図を図9に示す。従来技術では、流入負荷量が低い時間帯もDO（溶存酸素）濃度が目標値となるよう送気量を制御するため、必要酸素量に対して送気量が過剰になりやすい傾向がある。一方で、流入負荷量が急激に増加した場合は、制御動作の遅れにより送気量が不足し、硝化の進行が不完全になることが懸念される。

これに対して本技術は、NH₄-N流入負荷量を指標とする反応タンクへの流入負荷量の変動に対してリアルタイムに追従するフィードフォワード制御を採用しているため、必要酸素量の変動に対して送気量を適正に追従させることができるとなる。さらに、後段NH₄-N濃度の計測値と目標値との偏差に応じて送気量をフィードバック補正することにより、後段NH₄-N濃度を目標値に維持することが可能となる。

3. 2. 3 導入効果

本技術により、従来技術に対して概ね10%以上の送気量の削減、およびそれに伴う送風機消費電力の

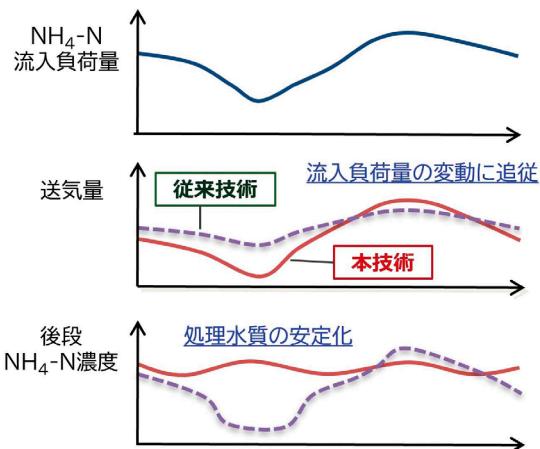


図9 アンモニア計を活用した送気量制御技術と従来施術との比較(イメージ)

低減が図れる。ただし、消費電力の詳細な低減効果については、送風機の仕様、動力特性、運転条件などに依存する。また、後段NH₄-N濃度に応じて送気量を補正することで、処理水NH₄-N濃度の安定化が図れる。

4. 再エネの導入と資源の有効活用

4. 1 太陽光発電

人口減少による流入水量の減少に伴い、処理場内の整備が見直され、遊休地や未利用地が増加することが想定される。このような増加スペースに加え、処理棟の屋上、水処理施設上部などに太陽光パネルを設置し、そこで発電した電気を施設内で利用することでCO₂排出量を削減できる。また、水処理施設上部への設置は、藻類発生の抑制や異物飛来防止にも貢献する。

ただし、処理場が電気を必要とするタイミングと太陽光パネルが発電するタイミングには差異があるため、状況によっては無駄が発生する可能性がある。これに対しては、蓄電池を設置して蓄放電することにより、電力の無駄を抑制し、より効果的に電気を使用することが可能となる(図10)。

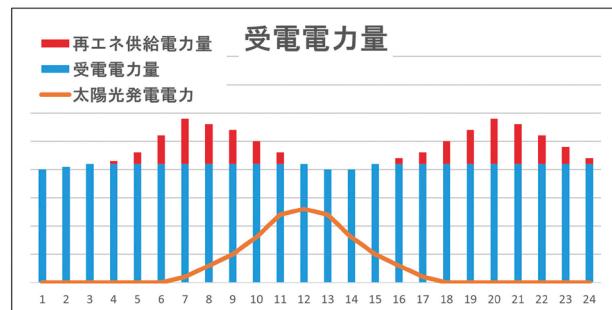


図10 太陽光発電と蓄電池を活用したピークカット

4. 2 消化ガス発電

下水処理施設で回収された下水汚泥は濃縮消化タンクに投入されるが、タンク中では微生物の働きにより消化ガスが発生する。消化ガスは、メタン(CH_4)と二酸化炭素(CO_2)を含んだ可燃性ガスであり、大気放出できない(メタンは CO_2 の25倍の温室効果がある)。そのため、従来、消化ガスは、消化タンクを加熱するためのボイラー燃料として使用するか、焼却処分していた。

消化ガスは、専用のガス発電機を用いることで、発電機燃料として使用可能である。また、消化ガス発電の際に発生する排熱を回収し、消化タンクの加温に使用したり(図11)、冷房・暖房用、および給湯用の熱源として利用したりすることができる。

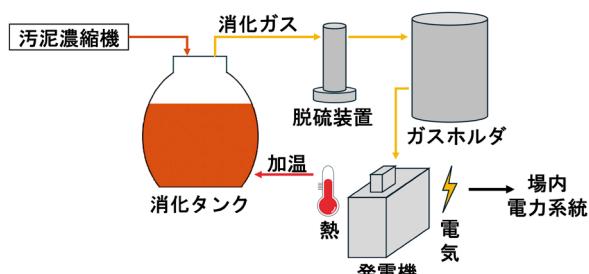


図11 消化ガス発電システム構成図

また、消化ガスはガスホルダ内に貯留することができるため、処理場が電気や熱を必要とするタイミングで利用することにより、より効果的な発電が可能である(図12)。さらに、下水汚泥は「バイオマス」に該当することから、消化ガスを使用する際に放出される CO_2 は温室効果ガスとはみなされない。したがって、この発電を下水処理施設に利用することで、カーボンニュートラルにも貢献できる。

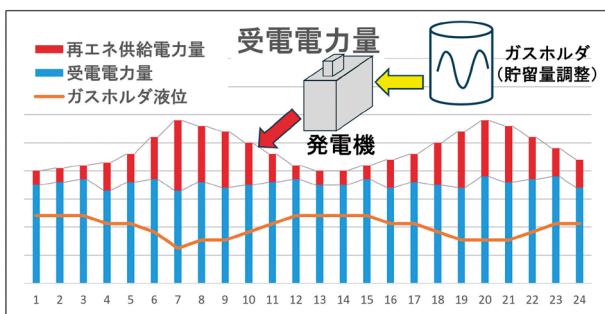


図12 ガスホルダ貯留による消化ガス発電

以下に、京都府木津川上流流域下水道の木津川上流浄化センター(以降、浄化センター)に消化ガス発電を導入した事例を紹介する⁽⁶⁾。

浄化センターは、木津川上流域(木津川市、精華町)を対象として平成11年(1999年)に供用を開始した。同浄化センターのある精華町は民間企業の研究拠点等が集積する関西学術研究都市に位置してお

り、同都市における企業や住宅の立地の増加に伴い、浄化センターへの汚水流入量も増加傾向にある。令和元年度末(2019年度末)時点の処理人口は90,958人、処理能力水量は32,280m³/日であった。

浄化センターでは、下水処理の過程で発生するメタンガス(消化ガス)を利用する消化ガス発電設備(図13)を平成27年(2015年)に4台、令和3年(2021年)に3台導入した。合計7台の消化ガス発電設備を利用することで、次のような効果が期待できる。

(1) 年間の消化ガス発電電力量は一般家庭約500世帯分の年間消費電力量に相当する約150万kWhを予定している。これを全て浄化センター内で使用することで、浄化センターにおける年間消費電力の約25%がまかなえると共に、約510トンの温室効果ガスの削減につながる。

(2) 従来は温水ボイラーを使用していた消化タンクの加温に、消化ガス発電機の排熱が利用できる。消化タンク内の温度および加温用温水の温度を計測して熱量が十分であるかを評価し、不足時には温水ボイラーで追い炊きを行うことで、安定的な消化工程を維持することができる。



図13 木津川上流浄化センター消化ガス発電設備

5. デジタル技術の活用によるスマート化

下水処理施設のエネルギー消費量は大きいため、エネルギー管理が非常に重要となる。効率的なエネルギー管理は、エネルギーコストの大幅な削減だけでなく、温室効果ガス排出量の削減も期待できるため、地球温暖化対策に貢献する。また、汚泥処理の過程で発生する消化ガスを再エネとして利用するなど、資源の有効利用を促進することにもつながる。

さらに、日本国内では人口減少に伴って設備の維持管理の効率化と省人化も課題となっている。このため、デジタル化を通じて、AIを活用した自動制御や、設備の稼働データの分析による劣化診断等を行い、計画的

な設備保全や更新計画の立案を進めることが求められている。

ここでは当社が取組んでいる、中央監視制御装置との連携によるエネルギー管理とアセットマネジメントのスマート化の例を紹介する。

5. 1 効率的な運用を促進する運転支援装置

前出のNH₄-N計を活用した硝化制御システムは、流入負荷分析支援機能、曝気風量設定支援機能、目標値出力機能を備えた運転支援装置と監視制御装置を連携することにより、省エネ運転を実現している(図14)。

運転支援装置は、各種流量、NH₄-N濃度、送気量などの実績データを取り込み、反応タンクへのNH₄-N流入負荷量と送気量の関係を自動表示する。ここで表示されるグラフに基づき、制御係数の設定、および運転状況や処理状況の確認を行なうことができる。

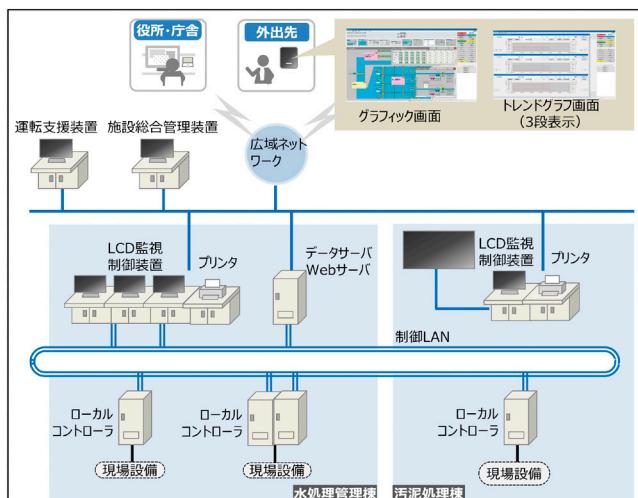


図14 監視制御システム構成例

5. 2 AIを活用したエネルギー管理

水質汚濁防止法では下水処理施設からの放流水の排水基準が定められており、化学的酸素要求量(COD)が管理対象となっている。瀬戸内海などの特定地域内の下水処理施設では、全窒素含有量(TN)、全りん含有量(TP)が追加規制の対象となっている。処理場では、これらを自動測定装置を使って監視しているが、流入する汚水の水質や下水処理工程の状況によっては処理水質が悪化することがある。悪化した水質を正常状態に戻すためには、維持管理者の経験やノウハウが求められ、また、一定の時間を要する。

そこで、AIが過去の実績データを基にして将来の水質変動を予測し、それに基づいて維持管理者が水

質悪化を未然に防ぐことができれば、維持管理者の負担を軽減できる。当社は、このような技術を開発し、運転管理の効率化に向けた取組みを実施している(図15)⁽⁷⁾。

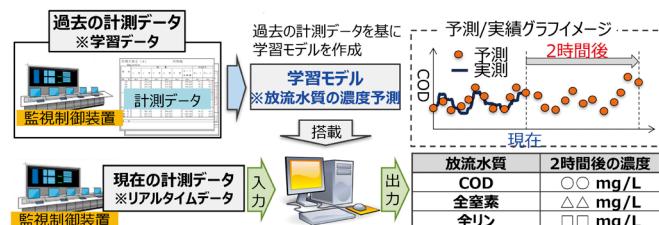


図15 AIを活用した放流水質予測技術の開発

5. 3 設備稼働データに基づいたアセットマネジメント

電気設備は設置環境により劣化の度合いが異なるため、環境状況を常に監視して把握することが重要である。当社では、現場設備の設置環境をデータ化して収集する複合環境センサ(図16)を製品化し、データ分析による劣化診断技術の開発に取組んでいる⁽⁸⁾。



図16 製品化された複合環境センサ

当社の監視制御装置は各種データリンク機能を備えており、複合環境センサの稼働データとリンクする。また、下水処理施設の設備情報を登録する設備管理台帳機能を有し、日々の現場設備点検業務の内容および点検結果をデータベース化して報告書作成支援を行う施設総合管理装置と、この監視制御装置を連携することにより、各種データの統合化、リンク付け、紐付け検索、および分析を支援する(図17)。

分析結果から、計画的な点検と修繕計画作成の支援を行い、アセットマネジメント計画を立案し、老朽化設備の更新を促すことで、カーボンニュートラルの達成を推進する。



図17 監視制御装置と施設総合管理装置の連携

■ 6. おわりに

本稿では、下水道施設のカーボンニュートラルに向けたエネルギーソリューションの中から、水処理設備の省エネ制御技術や再生可能エネルギーの導入、下水由来の資源有効活用、およびデジタル技術を活用したスマート化について紹介した。

脱炭素社会の実現には、設備更新による省エネ機器の採用や省エネ制御の導入に加えて、再エネの導入拡大が不可欠であり、再エネを有効に活用して社会的コストを最適化することが求められる。環境性だけでなく、安全性や経済性も考慮した全体最適視点からのアプローチが重要となり、その取組みは多岐にわたる。当社は、本稿では紹介できなかった環境配慮製品の開発や、再エネ電源や蓄電池の利活用に適したシステムの開発も進めている。今後もたゆまぬ研究開発を行い、社会ニーズに対応した最適なソリューションの提供を進めていく所存である。

用語集

- ※1 活性汚泥
汚水中の汚濁物質(有機物や窒素、リン)を摂取・分解する微生物を含む汚泥。
- ※2 硝化
微生物の働きにより、水中のアンモニア性窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)が、亜硝酸性窒素($\text{NO}_2\text{-N}$)を経て硝酸性窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)へ酸化される現象。
- ※3 活性汚泥法
活性汚泥を利用して汚水の水質浄化を行う水処理方法。
- ※4 OD法
オキシデーションディッチ法。最初沈殿池を設けず、水深の浅い循環水路を反応タンクとする活性汚泥法。
- ※5 流入負荷量
下水処理施設や反応タンクへ流入する汚濁物質の量。
- ※6 DO一定制御
反応タンク内のDO(溶存酸素)濃度が一定となるよう、送気量を自動制御する技術。

参考文献

- (1) 国土交通省:「上下水道:脱炭素化／資源・エネルギー利用」https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_sewerage_tk_000124.html (参照: 2025/7/7)
- (2) 環境省:「2021年度(令和3年度)の温室効果ガス排出・吸収量(確報値)について」(2023)
<https://www.env.go.jp/content/000128750.pdf> (参照: 2025/8/1)
- (3) 国土交通省:「新下水道ビジョン加速戦略(令和4年度改訂版)」(2023)
- (4) 漆垣 他:「アンモニア計による送気量フィードフォワード制御技術」、日新電機技報、Vol.65, No.2, pp.72-75(2020)
- (5) 漆垣 他:「下水処理場向けアンモニア計によるフィードフォワード制御技術」、住友電工テクニカルレビュー、第198号、pp.101-103(2021)
- (6) 日新電機:「2021年の技術成果[4] 水処理用設備」、日新電機技報、Vol.67, No.1, pp.15-16(2022)
- (7) 大久保 他:「AIを活用した放流水質予測技術の開発」、日新電機技報、Vol.66, No.1, pp.28-32(2021)
- (8) 長塩 他:「水処理用監視制御装置の技術と展望」、日新電機技報、Vol.67, No.2, pp.29-35(2022)

執筆者紹介



粕谷 幸太郎 Kasuya Kotaro
電力・環境システム事業本部
システムエンジニアリング事業部
環境技術部長



今岡 博義 Imaoka Hiroyoshi
電力・環境システム事業本部
システムエンジニアリング事業部
環境技術部 主幹



大久保 章 Okubo Akira
電力・環境システム事業本部
システムエンジニアリング事業部
ソリューション技術部 主幹



漆垣 謙次 Urushigaki Kenji
電力・環境システム事業本部
システムエンジニアリング事業部
ソリューション技術部 主査



吉田 宏司 Yoshida Hiroshi
電力・環境システム事業本部
システムエンジニアリング事業部
環境技術部 グループ長

特集論文

関連するSDGs



高圧大容量瞬低対策装置 MEGASAFEの再開発について

Re-development of MEGASAFE, a Voltage Dip Compensator for Medium-Voltage/Large-Capacity Systems

平林 祐作
Hirabayashi Yusaku
佐野 耕市
Sano Koichi

福田 有貴
Fukuda Yuki
河崎 吉則
Kawasaki Yoshinori

概要

本稿では、当社のパワーエレクトロニクス技術を応用して開発した高圧仕様の瞬時電圧低下対策装置について、更なる省スペース化と高効率化を目指し、再開発を行ったことを紹介する。

Synopsis

This paper introduces the re-development of a medium-voltage voltage dip compensator for medium-voltage/large-capacity systems based on our power electronics technology, the aim of which was to achieve further space savings and improved efficiency.

キーワード：瞬低、パワエレ、電力品質

1. まえがき

当社のMEGASAFE^(*)（以下、メガセーフ）は、大容量高圧用の瞬時電圧低下（以下、瞬低）対策装置であり、瞬低による設備の停止から運転状態を保守するための瞬低補償専用機器である。

当社の瞬低対策装置の歴史は、電解コンデンサを採用した低圧用の「UNISAFE」（以下、ユニセーフ）の登場（1986年）から始まる。ユニセーフに加え、高圧重要負荷回線を一括で補償するために大容量化かつ高圧仕様として2001年に販売されたのがメガセーフである。これらの装置は、現在に至るまで、重要負荷設備を瞬低による停止被害から守り続けている⁽¹⁾。

瞬低による被害としては、設備停止による製品や材料の廃棄損失、生産機会の損失、納期遅延、さらには設備故障による修理費の発生が挙げられる。

近年、製品に対する品質要求の高度化や、自動化・省人化による生産設備の精密化が進む中、瞬低による設備への被害が発生しやすくなっている。さらに、異常気象による瞬低発生頻度も増加していることから、

瞬低対策装置の需要は今後増加すると想定される。

しかし、メガセーフを構成する主要機器の中には納期の長い部品を使うものがある。そのため、使用機器の見直しを行うことで納入までの期間を現在の2/3に削減した。また設置面積を現行から30%削減することを目標に再開発を行ったので紹介する。

2. 製品紹介

図1にメガセーフの全体構成および瞬低補償時の動作を示す。メガセーフは、事前に電解コンデンサに電荷を蓄えることで瞬低発生時の系統電圧の不足エネルギーを出力する。この動作には不足電圧補償方式が採用されている。これは、系統電圧に直列に接続された機器が、瞬低によって不足した電圧分を出力する方式であり、電圧低下幅の小さい瞬低ほど補償時間が長いという特性をもつ。また、不足電圧のみを補償するようにエネルギーを利用するため、繰り返し発生する瞬低に対して対応することができる。

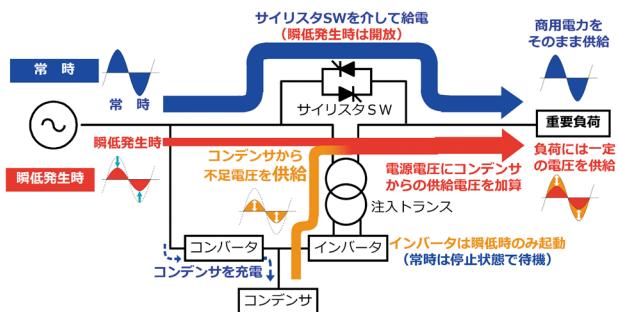


図1 メガセーフの全体構成と瞬低補償時の動作

3. 開発経緯

メガセーフの主要機器であるサイリスタスイッチは、近年の半導体市場における需給逼迫の影響を受けて長納期化が進んでいる。さらに、素材価格の高騰により製品コストも上昇している。

そこで当社では、サイリスタスイッチの代替として、次章で紹介する高速開極型の真空電磁接触器（以下、高速VMC）と高速遮断制御を組み合わせた新たな高速遮断技術を開発した。従来のサイリスタスイッチに依存しない新たなスイッチソリューションを確立したことにより、部品調達が安定し、かつ、大幅な小型化とコスト競争力をもつ製品の実現に成功した。さらに、従来のサイリスタスイッチで発生していた通常時の通電損失をほぼゼロに低減し、ファンレス化も実現することで、システム全体の高効率化を達成している。

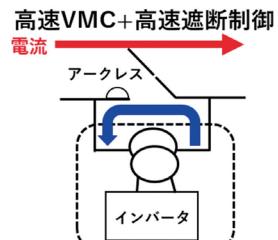
4. 導入技術

本章では、メガセーフを再開発するにあたって、新たに導入した技術について説明する。

4. 1 高速VMC化

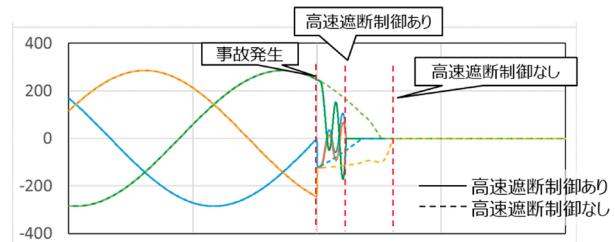
メガセーフでは、特に瞬低動作時の切替え時間^{*1}において、電圧が0Vになる時間が商用周波数の1/4サイクル以内の無遮断⁽²⁾であることが求められる。しかしながら、開発品の高速VMCは、接点の開極動作自体は約1msecで完了する高速性を有しているが、単に接点を高速に開極するだけではアーカ放電^{*2}の発生を抑制できないため、1/4サイクル以内に切替えを実現することが困難であった。この課題に対し、当社では、現行のメガセーフ構成に着目した。図2に示すように、スイッチと並列に接続されたインバタ回路を積極的に活用する高速遮断制御を導入した。本方式では、接点開極指令と同時に、スイッチに流れる電流と逆方向の電流をインバタから供給することで電流ゼロ点を創出することにより、機械式の接点でありながら半導体スイッチに匹敵する高速かつアーカレスな遮断が実現できる。

図3に、高速遮断制御の有無による動作波形のシミュレーション結果を示す。高速遮断制御ありの場合は、フィードバック制御^{*3}により、より早くゼロ点が創出されていることが確認できる。



スイッチに流れる電流と逆方向の電流を
インバータから供給することで
電流ゼロ点を創出し高速遮断を実現

図2 高速遮断制御（概念）

図3 高速遮断制御の有無による動作波形の
シミュレーション結果

4. 2 三相インバータ化

メガセーフの開発は単相回路から開始された経緯から、現行のメガセーフでは、各相に単相インバータを3セット組み合わせた構成が採用されていた。今回、単相インバータ構成で使用されるインバータユニット(INV)で三相インバータの回路構成に変更した場合、単相インバータの回路構成と比べて、理論的に約15%の出力容量向上が見込まれた。そこで、インバータ台数の削減可能性に着目し、新たに三相インバータ化を図った。この変更により、必要なインバータ台数の削減が可能になり、システム全体の構成簡素化およびコスト削減への寄与が期待できる。図4に単相インバータ構成と三相インバータ構成の比較を示す。

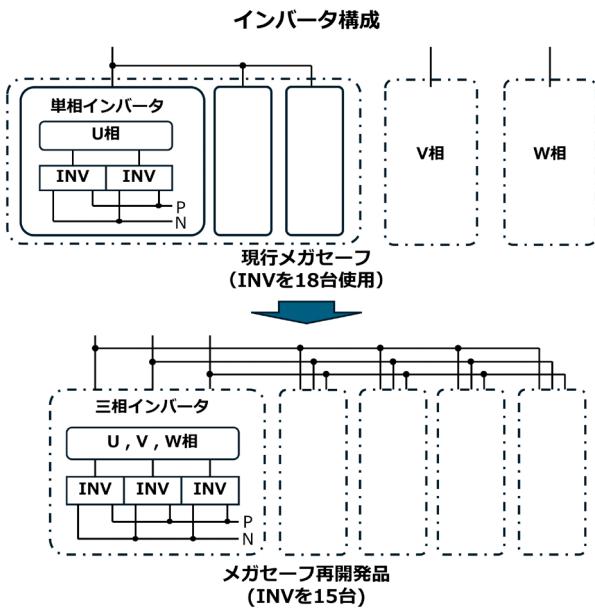


図4 インバータ構成の比較

三相インバータにおいては、直流電圧の利用率を向上させる手法として三次高調波重畠法^{※4}が一般的である。今回、三相インバータ化することにより、三次高調波重畠法を適用できるようになり、これにより補償時間の延長や、補償エネルギーを蓄える電解コンデンサの容量削減といった効果が期待される。しかしながら、メガセーフのようなシステムでは、二線間短絡事故などにおいて補償すべき電圧波形に逆相成分が含まれる場合がある。そのため、従来の三次高調波重畠法をそのまま適用するのではなく、逆相成分を適切に考慮する必要があった。

図5に逆相成分を考慮した三次高調波重畠法のブロック図を示す。本方式を適用した結果、二線短絡事故においても補償時間の延長効果が確認できた。

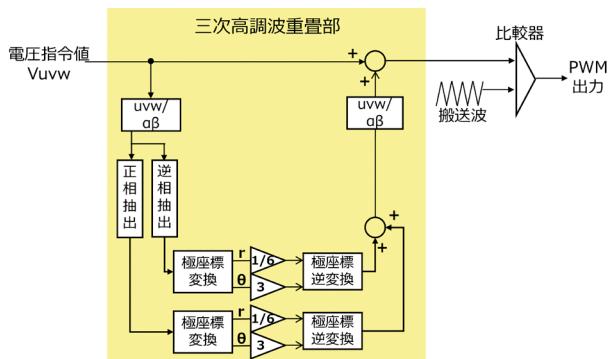


図5 逆相成分を考慮した三次高調波重畠法ブロック図

5. 検証結果

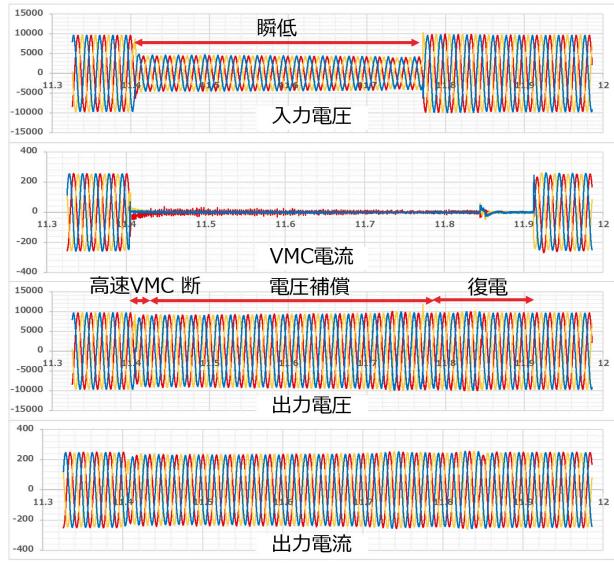
本章では、再開発したメガセーフの瞬低動作時の性能および再開発に伴う目標値の結果について説明する。

5. 1 瞬低補償動作

図6に再開発したメガセーフの瞬低補償動作試験時の波形を示す。

模擬的に瞬低を発生させて動作検証を行った結果、低下した入力電圧に対して、現行のメガセーフ同様に瞬低補償動作により瞬低前と同等の出力電圧を給電できることができることが確認できた。

図7は図6の瞬低発生前後の入力電圧と入力電流および出力電圧を拡大した波形を示す。瞬低検出後、



瞬低補償動作試験条件
瞬低様相: 3LS 60%低下 0.35秒継続

図6 瞬低補償動作波形

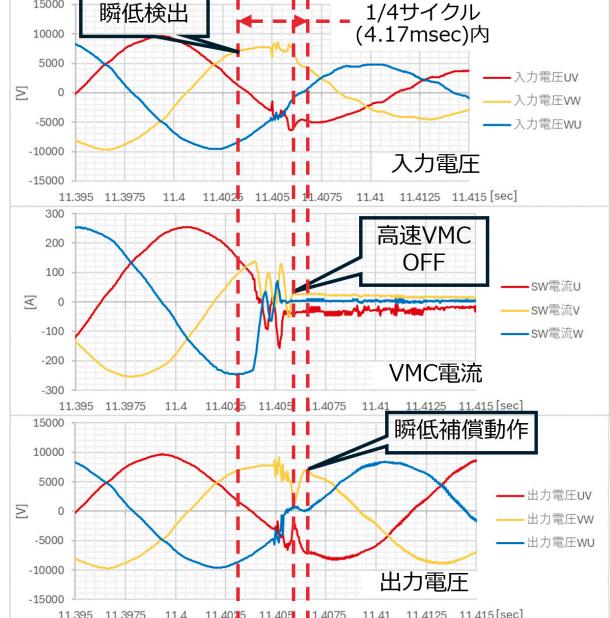


図7 瞬低補償動作波形 瞬低検出時拡大

約3.5msecで高速VMCが開放するとともに速やかに補償運転動作に切り替わり、1/4サイクル以内の切替え時間を確認した。

シリスタスイッチの代替となる高速VMCと高速遮断制御による瞬低補償動作の実現を確認できた。

図8は瞬低補償動作時の出力電圧維持時間を比較したグラフである。実線が逆相成分を考慮した三次高調波重畠法適用時、破線が適用なしを示す。出力電圧90%を基準に各相の電圧を比較すると、適用時の約90msec長く電圧を維持していることが見受けられ、補償エネルギーを効率よく運用できていることが確認できた。

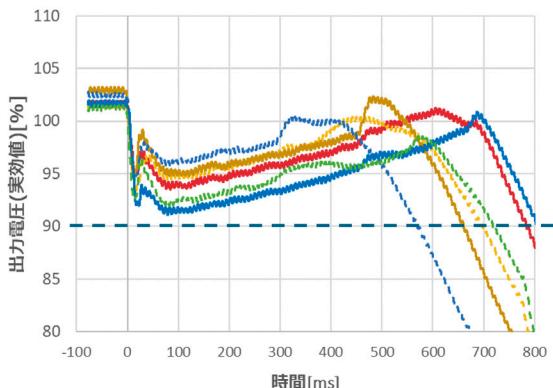
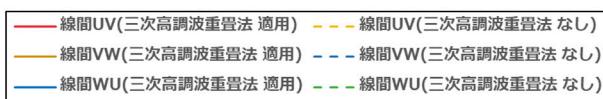


図8 瞬低補償動作時の出力電圧維持時間

5. 2 効率測定

表1に冒頭に掲げていた再開発に伴う目標値および検証結果の値を示す。

新たに導入した技術や高速機械SWなど使用機器を見直した結果、目標値を上回る結果が得られた。

図9にメガセーフ再開発品の外観を示す。

表1 再開発品目標値および検証結果

	メガセーフ再開発品	
	目標値	検証結果
小型化	30%縮小	31.7%縮小
軽量化	30%軽量	31.5%軽量
納期	30%以上短縮	40%程度短縮
効率	99.6%	99.8%



図9 メガセーフ再開発品外観

6. 展望

新たに導入した高速VMCと三相インバータ化の有用性について検証した結果、現行のメガセーフと同等以上の性能であることが確認でき、高効率化が実現した。

今後も瞬低被害に対する課題に積極的に取組み、瞬低被害の低減を目指したい。

用語集

- ※1 瞬低動作時の切替え時間
事故発生から補償運転動作に切り替わり、所定の電圧になるまでの時間。
- ※2 アーク放電
電極間の電位差により絶縁破壊が発生し、気体中を電流が流れること。
- ※3 フィードバック制御
出力値を測定し、その結果を基に入力値を調整することで、目標の出力値を維持または達成する制御方法。
- ※4 三次高調波重畠法
インバータの電圧制御においてPWM信号生成時に発生する第三次高調波を重畠させることで電圧指令値のピーク値を下げて、出力電圧の増加、インバータの電圧利用率を向上させる制御方法。

参考文献

- (1) 河崎、川上、佐野：「電力品質を改善する製品」
日新電機技報、Vol.59 No.2, pp.40-41 (2014)
- (2) 日本電気工業会：JEM-TR186「無停電電源装置
(UPS)のカタログ用語集(2021)」

(*) 「MEGASAFE」は、日新電機株の登録商標です。

執筆者紹介



平林 祐作 Hirabayashi Yusaku
電力・環境システム事業本部
システム装置事業部
パワエレ機器部



福田 有貴 Fukuda Yuki
住友電気工業株式会社
送配電機器・エネルギーソリューション事業部
日新住電エネルギーシステム開発センター
主査



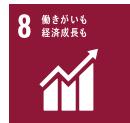
佐野 耕市 Sano Koichi
電力・環境システム事業本部
システム装置事業部
パワエレ機器部
参与



河崎 吉則 Kawasaki Yoshinori
住友電気工業株式会社
送配電機器・エネルギーソリューション事業部
日新住電エネルギーシステム開発センター
主幹

特集論文

関連するSDGs



国際無線通信規格Wi-SUN FAN 1.1 認証の世界初の取得と今後の展望

The World's First Certification of the International Wireless Communication Standard Wi-SUN FAN 1.1 and Its Future Prospects

濱田 雄一
Hamada Yuichi

概要

Wi-SUN FAN（Wireless Smart Utility Network Field Area Network）は、次世代スマートメーター向けに開発された国際的な無線通信規格である。2025年2月、京都大学、株式会社日新システムズ、長野日本無線株式会社の3者は共同で、Wi-SUN FAN 1.1の認証を世界で初めて取得した。この新しい規格では、OFDM（直交周波数分割多重方式）による高速通信、低消費電力のLFN（限定機能ノード）への対応、日本およびその他の国々の電波法規への準拠などの機能強化が導入されており、スマートシティ用途に非常に適している。本稿では、Wi-SUN FAN 1.1の技術的特徴、FAN 1.0との比較、認証取得の意義、および今後の展開について紹介する。

Synopsis

Wi-SUN FAN (Wireless Smart Utility Network Field Area Network) is an international wireless communication standard developed for next-generation smart meters. In February 2025, Kyoto University, Nissin Systems, and Nagano Japan Radio jointly achieved the world's first certification for Wi-SUN FAN 1.1. The new standard introduces enhancements such as OFDM (orthogonal frequency division multiplexing)-based high-speed communication, support for low-power LFN (Limited Function Nodes), and compliance with radio regulations in Japan and other countries, making it well suited to smart city applications. This paper presents the technical features of Wi-SUN FAN 1.1, a comparison with FAN 1.0, the significance of achieving the certification, and future deployment efforts.

キーワード：スマートシティ、スマートメーター、Wi-SUN、LPWA

1. はじめに

近年、都市の持続可能性および住民生活における質の向上を目的として、世界各地でスマートシティの構築が進められている。スマートシティとは、IoT (Internet of Things)、AI (人工知能)、ビッグデータ

解析などの先端技術を活用して都市のインフラやサービスを効率的に管理・運営し、環境負荷の低減、災害対応力の強化、エネルギーの最適利用、交通の円滑化などを実現する新しい都市モデルである。

スマートシティの実現には、都市全体に分散するセ

ンサーヤやデバイスからの情報をリアルタイムで収集・分析し、必要な制御を迅速に行うための安定した通信インフラが不可欠である。特に、電力、ガス、水道などの社会インフラにおいては、数百～数千台規模のスマートメーターやセンサーが設置されるため、通信技術には広域性、低消費電力、高信頼性、およびスケーラビリティ（機器の数が増えても問題なく使い続けられること）が求められる。

従来の通信技術（3G/4G/5G、Wi-Fi^{(*)1}、Bluetooth^{(*)2}など）は、通信速度や利便性に優れるが、通信距離、消費電力、および運用コストの面でスマートシティの要件を満たすには限界がある。これに対し、LPWA（Low Power Wide Area）技術は、低消費電力かつ広域通信を可能とするため、スマートシティにおけるIoT通信の有力な選択肢として注目されている。

LPWA技術にはさまざまな規格があり、その中でも、Wi-SUN FAN（Wireless Smart Utility Network Field Area Network）は、免許不要、自営網型、メッシュ型ネットワーク、および国際標準規格であるという特長を持ち、スマートメーター、スマートグリッド、スマート照明などの分野での活用が期待されている。また、Wi-SUN FANは、複数の国際標準技術に基づいて構成されたIP（Internet Protocol）ベースの無線通信規格である。具体的には国際標準技術として、IEEE 802.15.4g/e（低消費電力で動作する無線通信規格）、IPv6（インターネットの次世代通信規格）、6LoWPAN（IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks：低消費電力の無線ネットワーク上でIPv6通信を可能にする技術）、UDP（User Datagram Protocol：軽量な通信プロトコル）、RPL（Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks：低消費電力かつ通信品質が不安定なネットワーク向けのルーティング技術）などが採用されている。また、これらの技術を組み合わせることで、IPを基盤とした既存のインターネットインフラとの高い互換性と親和性を持つ無線通信システムが実現されている。

当社では、スマートシティの実現に向けてWi-SUN FANの研究開発を継続的に行ってきました京都大学の研究成果を実デバイスで実現するための開発支援、認証取得のための各種支援を行ってきた。2019年には、京都大学、ローム株式会社と共にWi-SUN FAN 1.0の認証を世界で初めて取得している。さらに、Wi-SUN FAN 1.1認証制度が2025年から開始に伴い、京都大学および長野日本無線株式会社と共に、「Wi-SUN FAN 1.1 Conformance: Router (Core + HP)」認証を世界で初めて取得した。

2. Wi-SUN FAN 1.0と1.1の違い

Wi-SUN FAN 1.1が1.0と比較して進化した点を表1に示す。

表1 Wi-SUN FAN 1.0と1.1の違い

項目	FAN 1.0	FAN 1.1
通信速度	最大300 kbps	最大2.4 Mbps (OFDM対応)
1ホップの通信距離	数百m	数km以上 (OFDM対応)
モード切替	固定	FSKからOFDM等動的に切替可能
消費電力	電源が必要	電池駆動可能
各国電波法対応	北米のみ	日本を含む各国の電波法に対応

OFDM：直交周波数分割多重方式

FSK：周波数偏移変調

Wi-SUN FAN 1.1ではOFDM（Orthogonal Frequency Division Multiplexing：直交周波数分割多重方式）を採用したことにより、通信速度がFAN 1.0の8倍向上し、画像やファームウェアファイル（機器の動作を改善・修正するためのプログラムファイル）などの大容量データの伝送も容易になった。また、メッシュの中継を行わない末端の端末では省電力（電池駆動）対応が可能となっている。

3. Wi-SUN FAN 1.1認証取得

認証制度を策定している団体であるWi-SUN Allianceでは、Wi-SUN FAN 1.1の認証制度を以下のように分類している。

●FAN 1.0+

FAN 1.1仕様のうち、FAN 1.0と同様（互換）の処理に関する認証制度

●FAN 1.1 HP (High Performance)

FAN 1.1仕様のうち、OFDMやモード切替に関する処理の認証制度

●FAN 1.1 LE (Low Energy)

FAN 1.1仕様のうち、低消費電力対応に関する処理の認証制度

分類のFAN 1.0+とFAN 1.1 HPの認証制度は合わせて「Core + HP」と呼ばれている。「Core + HP」認証制度は、Wi-SUN Allianceにより2025年2月に開始された。分類のFAN 1.1 LE認証制度は、2025年7月時点ではまだ開始されていない。

認証試験は、一般財団法人テレコムエンジニアリングセンターにて実施され、Wi-SUN Allianceが定める技術仕様に基づき、物理層からアプリケーション層までの包括的な試験が行われる。

当社は京都大学が主体的に研究を行ってきたWi-SUN FAN 1.1ソフトウェアの成果を実デバイスで実現

するための開発支援、及び認証取得のための各種支援を継続的に行っており、FAN 1.1 Core + HP認証制度の開始前から、長野日本無線製の無線機への搭載を試みていた。その後、認証取得に向けて3者で協力し、計画的に事前試験と準備を行った結果、他社に先駆けてFAN 1.1 Core + HP認証試験を受けることができ、世界初の認証取得に至った。

この世界初のWi-SUN FAN 1.1認証取得は、当社の技術力と国際標準への対応力を示すものであり、今後の製品展開や海外市場への進出において大きな信頼と優位性をもたらすと考えている。

■ 4. まとめ

本稿では、スマートシティの実現に向けた通信インフラにおけるWi-SUN FANの役割と、その最新規格であるWi-SUN FAN 1.1の技術的特徴、FAN 1.0との違い、そして京都大学、株式会社日新システムズ、長野日本無線株式会社の3者が世界で初めて取得した認証の意義について報告した。

Wi-SUN FAN 1.1は、FAN 1.0と比較して、通信速度、通信距離、セキュリティ、相互接続性の面で大きく進化しており、スマートメーター、スマートグリッド、スマート照明などの分野において、より高度で柔軟な通信基盤の構築を可能にする。

また、「Wi-SUN FAN 1.1 Conformance: Router(Core + HP)」認証は、国際標準規格に準拠した高品質な製品開発と他社製品との相互接続性を保証するものであり、今回、当社がこの認証を取得したことは、スマートシティの社会実装に向けた重要なステップであるといえる。

世界初のWi-SUN FAN 1.1認証の取得を契機とし、今後は、この技術を社会実装へと展開していく段階に入る。当社は、これまでの研究開発成果をもとに、製品化、量産化、および市場展開を加速させるとともに、スマートシティやスマートメーター分野への応用を推進していく方針である。

製品化においては、今回の認証取得に用いたソフトウェアのライセンスを京都大学から受け、これをベースに、異なる基板への実装が可能なソフトウェアライセンスを提供する予定である。

市場展開としては、北米・欧州・アジア諸国を中心に、スマートグリッドやスマートシティの導入が進む海外地域への展開を視野に入れている。特に、Wi-SUN FAN規格がすでに導入されている米国の公共事業体プロジェクトとの連携を通じて、国際的なプレゼンスの向上を目指す。パートナー企業との協業や現地規制への対応を含めた技術支援体制の構築を進めていく予定である。

将来的には、Wi-SUN FAN技術の応用範囲を、スマートシティのみならず工場、農業、物流などの分野にも拡大していくことが期待される。当社は、Wi-SUN FAN技術を核とした通信インフラの高度化を通じて、持続可能な社会の実現に今後も貢献していく。

■ 5. 謝辞

本研究開発の一部は、京都大学が受託し、研究を行った総務省の「電波資源拡大のための研究開発(JPJ000254)」(仮想空間における電波模擬システム技術の高度化に向けた研究開発)(ミリ波帯等における移動通信システムの展開に関する研究開発)による成果を含んでいる。

京都大学大学院情報学研究科の原田博司教授には、本認証取得にいたる計画、実行、評価、改善に多大なるご尽力をいただいた。原田教授のご指導とご助言は、本認証取得における技術的基盤の確立に大きく寄与するものであり、深く感謝申し上げる。

また、長野日本無線株式会社の皆様には、評価基板の開発および技術検証において多大なるご協力をいただいた。高品質なハードウェアの提供と技術的なご支援により、認証試験を円滑に進めることができた。

関係者の皆様に、この場を借りて深く感謝申し上げる。

参考文献

- (1) 株式会社日新システムズ プレスリリース:「国際無線通信規格 Wi-SUN FAN 1.1の認証を世界で初めて取得」(2025)
<https://www.co-nss.co.jp/press/20250220.php>
(参照: 2025/7/7)

(*1) 「Wi-Fi」は、Wi-Fi Allianceの登録商標です。

(*2) 「Bluetooth」は、Bluetooth SIG, Inc.の登録商標です。

執筆者紹介



濱田 雄一 Hamada Yuichi

株式会社日新システムズ
システム・ソリューション事業部
プロダクト開発部長

一 般 論 文

関連するSDGs



パワーデバイスのための チャネリングイオン注入技術

Channeling Ion Implantation Technology for Power Devices

浜田信吉

Hamada Shinkichi

臼井洸佑

Usui Kosuke

和田涼太

Wada Ryota

平井裕也

Hirai Yuya

田中浩平

Tanaka Kohei

黒井隆

Kuroi Takashi

本稿は「MRS Advances, Volume 10, Issue 4 (2025) pp. 430-433」に掲載された論文に、一部加筆したものである。

概要

パワーデバイスのための高精度チャネリングイオン注入システムを開発した。チャネリングイオン注入とは、結晶格子の特定の向きに沿ってイオンを注入することで、より深くまでイオンを埋め込む技術である。従来のシリコンカーバイド(SiC)パワーデバイスの製造プロセスでは高エネルギー注入装置が使用されているが、チャネリングイオン注入技術はこのプロセスの一部を置き換えることができるだけでなく、デバイス特性を大幅に向上させる可能性を秘めている。注入角度を精密に制御できる本システムを使用することにより、安定したチャネリングイオン注入を繰り返し実現することが可能となる。

Synopsis

We have developed an ion implanter system capable of high-precision channeling for power devices. Channeling implantation is a technique that allows deeper implantation of ions by implanting them along a particular direction of the crystal lattice. This technique not only has the potential to replace parts of the conventional silicon carbide (SiC) power device process that uses a high-energy ion implanter, but also shows promise for significantly improving device characteristics. Our system precisely controls the implantation angle, enabling stable and repeatable channeling ion implantation.

キーワード：シリコンカーバイト(SiC)パワーデバイス、チャネリング注入

1. はじめに

近年、シリコンカーバイド(SiC)パワーデバイスは、特に再生可能エネルギー、クラウドコンピューティング、電気自動車などのいくつかの強力な長期成長市場において、カーボンニュートラルを達成するための重要なコンポーネントとして急速に成長している。SiC

パワーデバイスは、シリコンパワーデバイスと比較して、電力損失が大幅に少なく、より優れた耐熱性と耐電圧性を示す。SiCパワーデバイスの構造は平面型からトレンチ型へと移行しており、スーパージャンクション構造などの高度に設計されたデバイスの製造には、深い領域へのイオン注入が必要となっている。

従来、深い領域へのイオン注入には、イオンの進行方向が結晶構造に依存しないランダム注入と呼ばれる方法が用いられており、高エネルギーのイオン注入装置が必要である。一方、チャネリングイオン注入（以降、チャネリング注入）は、ウェーハの結晶格子軸に沿ってイオンを注入するため、結晶原子との衝突回数がランダム注入より大幅に減少する。これは、デバイス製造のプロセスにおいてより低いエネルギーで深い領域へのイオン注入が可能になるということであり、高エネルギー装置を必要とする従来のイオン注入法に置き換わる可能性を秘めている。実際に、チャネリング注入への置き換えによるいくつかの利点が報告されている⁽¹⁾。例えば、ボックス状プロファイルは、従来、イオン注入後に加速エネルギーを変更し再度イオン注入する工程を複数回繰り返すことで達成していたが、チャネリング注入を用いると、より少ない回数の注入で達成できる。

さらに、ランダム注入では、イオンが結晶原子と衝突しながら進むため、注入の深さが増すにつれて横方向にも広がる。一方、チャネリング注入では、このようなイオンの広がりが最小限に抑えられるため、マスク開口部に対して小さな広がりで正確なドーパントプロファイルが実現する。これにより、高抵抗成分が削減され、オン抵抗の低下につながる⁽²⁾。また、チャネリング注入は、ランダム注入よりも低い加速エネルギーで同等の注入深度を達成できるため、より薄いマスクが使用できるという利点もある。

図1に、当社が開発したパワー半導体製造用の高温イオン注入装置「IMPHEAT^(*)」シリーズ（最大エネルギー：960 keV）の外観および概略図を示す⁽³⁾。本装置にて各種イオンの注入が可能である。注入されたアルミニウムイオンおよびリンイオンのプロファイルは、チャネリング注入を用いると、ランダム注入を用いた場合のそれぞれ約3倍および約2倍の深さになる。イオン種によって注入深さが異なる原因是、SiCへの侵入中のエネルギー損失に影響を与える電子的停止力（Se）がイオン種によって異なるためである⁽⁴⁾。チャネリング注入では注入角度の精密な制御が必要であり、「IMPHEAT」シリーズは垂直および水平方向の平均ビーム注入角度を精密に制御できる機能を提供している⁽⁵⁾。

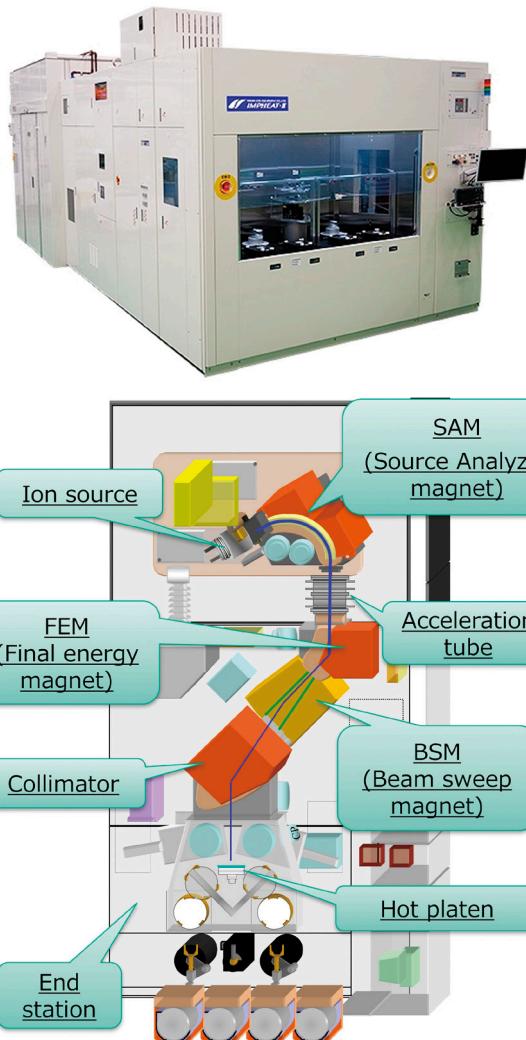


図1 「IMPHEAT」の外観および概略

図2にビーム角度の計測と補正システムの模式図を示す。垂直方向のビーム角度は、プラテン^{*1}上の静電チャックと機械的クランプで保持されたウェーハの傾斜角度を制御しながら、プラテン前方に配置された可動フロントファラデーカップ^{*2}と後方のバックファラデーカップに設置されたシャッターを調整することで計測する。水平方向のビーム角度は、プラテンの前方と後方に配置された2つの多点ファラデーカップによる測定に基づいてコリメータ磁石の磁場を調整することで制御する。「IMPHEAT」シリーズは、垂直方向と水平方向の両方向で、チャネリング注入に適した優れた角度制御性（制御精度±0.1度）を示している⁽⁶⁾。

2. チャネリング注入技術

チャネリング注入技術の実現可能性と量産への実装における大きな懸念事項は、各ウェーハのオフアクシス角^{*3}の信頼性と変動である。チャネリング注入が可能な臨界角はエネルギーに依存しており、最大エネル

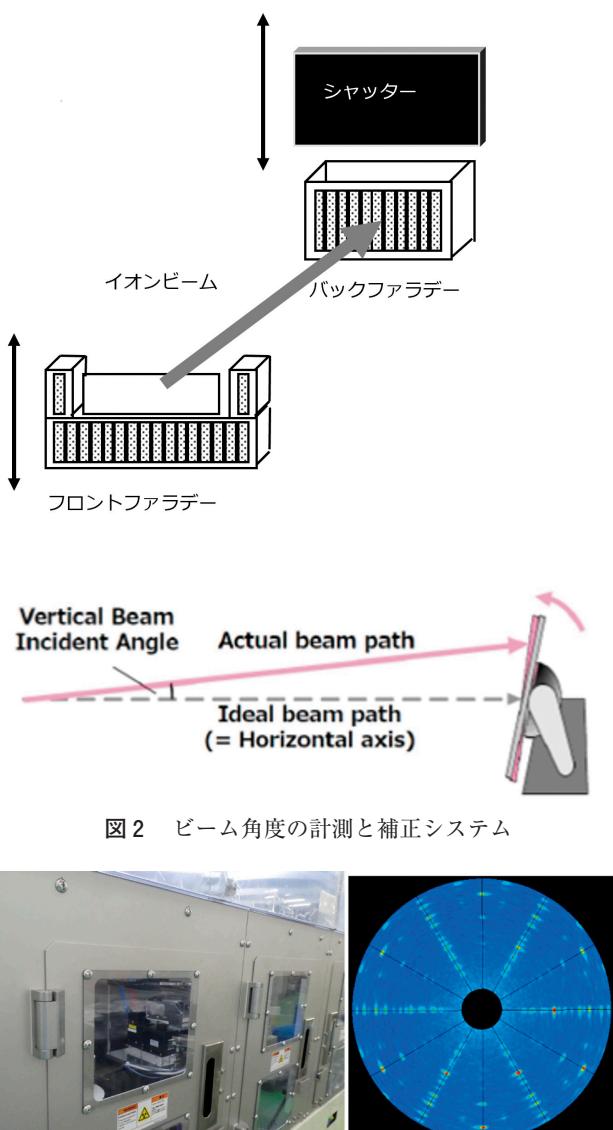


図2 ビーム角度の計測と補正システム

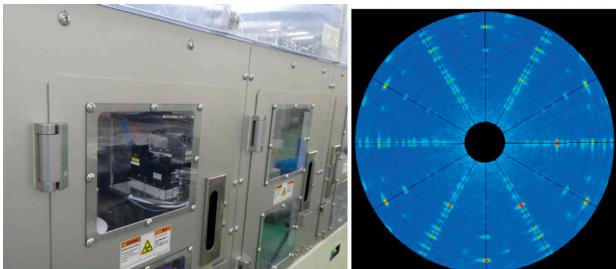


図3 X線回析装置搭載状態とX線回析結果

ギーである960 keVでは ± 0.2 度の注入角度制御を達成する必要がある⁽¹⁾。精密なチャネリング注入を実現するためには、各ウェーハのオフアクシス角を事前に測定し、イオン注入中にイオンビームの角度をオフアクシス角に合わせることが求められる。

そこで当社は各ウェーハのオフアクシス角を測定し、イオン注入ごとにプラテン角のフィードフォワード制御を実施するシステムを開発した。図3にX線回析装置搭載状態とX線回析結果を示す。X線照射装置は、アライナー^{*4}上部と人の作業領域に近いため、X線暴露対策としてウェーハカセット設置扉にインターロックを設けている。X線照射装置は、ウェーハに連続した波長範囲のX線を照射し、ブレーリング条件が各結晶面に対して満たされると、X線は特定の方向に回折し、ラウエ斑点として知られる回折パターンが生成される⁽⁷⁾。これらのラウエ斑点の位置は格子定数およ

び結晶面の配置に関連している。ウェーハへの入射X線の角度と距離に関する情報を提供することにより、ウェーハのオフアクシス角を計測することができる。

さらに、パワーデバイスに使用されるSiCウェーハは変形しやすいが、本システムでは、アライナーの真空チャックによって $\phi 0.8$ mmの測定範囲内で平坦に保持される。このシステムを変形したウェーハに使用した場合でも、ウェーハ全体の表面を50 μm 未満の平坦度を保証するように製造された静電チャックで保持することで、均一なチャネリング注入が可能となる。このアプローチにより、ウェーハの歪みが注入中の角度の正確な制御に与える影響を回避することができる。

3. 実験結果

表1に、X線回析ロッキングカーブ測定と、チャネリング注入用に開発した本システムを使用して測定されたウェーハのオフアクシス角の比較を示す。結果には、新しいウェーハの測定結果とイオン注入後に200 μm を超える変形を示すウェーハの測定結果が含まれている。ロッキングカーブ測定ではウェーハ表面が基準位置として使用されるため、ウェーハの変形の影響を受けない測定が可能である。測定結果の差を見ると、新しいウェーハでは0.06度、変形ウェーハでは0.05度であり、アライナーの真空チャックを使用することでウェーハの変形の影響を受けない測定が可能であることが示された。

表1 測定結果一覧

Sample	XRD measurement of rocking curve	SiC offset angle with our system
New SiC	4.11	4.05
Implanted SiC	4.01	3.96
SiC wafer with 1 μm SiO ₂	4.10	4.05
SiC wafer with epi layer	4.12	4.05
Si with resist	0.26	0.25

さらに、表面に1 μm 厚のSiO₂層を有するSiCウェーハ、エピタキシャル成長層を有するSiCウェーハ、およびレジストフィルムを有するSiウェーハを測定したところ、両測定法での測定値の差は、それぞれ0.05度、0.07度、0.01度であり、顕著な違いは見られなかった。これらの結果から、本システムでの測定はウェーハの表面状態に影響されないことが示された。

図4に、チャネリング注入と、チャネリングから注入角度をオフセットしたときのイオン分布を示す。最大エネルギー960 keV、ドーズ量 1×10^{13} ions/cm²のアルミニウムイオンビームを用いて室温で注入を行った。チャネリング現象を評価するための原料として、〈11-20〉方向に4度のオフカットを持つn型4H-SiC

(0001) を用意した。イオンビームの角度とウェーハのオフアクシス角をプラテンの傾斜角に対して相対的にフィードフォワード制御した結果、静電チャックで保持されたウェーハの傾斜角は注入中4.1度に制御された。比較のため、同じビーム条件下で傾斜角を ± 0.2 度および ± 0.4 度オフセットした注入も行った。

SIMSによる注入ドーズ量の深さプロファイル測定の結果、本システムの自動チャネリング注入は ± 0.2 度以内の注入精度を達成し、優れたチャネリングプロファイルが得られることを確認した。

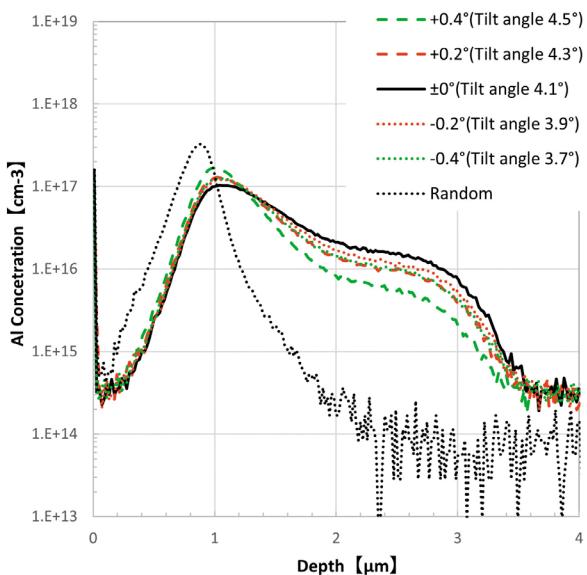


図4 チャネリング注入と、チャネリングから注入角度をオフセットしたときのイオン分布（SIMS評価）

4.まとめ

当社は、チャネリング注入に必要となる正確な注入角度制御を達成するシステムを開発した。本システムは、X線測定からラウエ斑点を使用してウェーハのオフアクシス角を分析し、注入角を自動的に補正するが、その実現のためにイオンビームの注入角に合わせてプラテンの角度をフィードフォワード制御する。本システムは、チャネリング注入角度を ± 0.2 度の精度で制御し、深い領域でのチャネリング注入に使用される高エネルギー注入プロセスの有望な代替手段として位置づけられる。

用語集

- ※1 プラテン 試料を保持するための平面構造物
- ※2 ファラデーカップ イオンのビーム電流を測定するためのデバイス
- ※3 オフアクシス角 ウェーハ表面とSiC(0001)結晶面がなす角度
- ※4 アライナー ウェーハ回転軸を調整する大気側に置かれたデバイス

参考文献

- (1) R. Wada, et al. "The exceptional advantages of channeling implantation into 4H-SiC to make abrupt deep profiles", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 61 SC1033 (2022)
- (2) R. Maloušek, et al. "SiC diode with vertical superjunction realized using channeled implant and multi-step epitaxial growth", Materials Science Forum, Vol. 1062, pp. 549–553 (2022)
- (3) Y. Kuwata, et al. "IMPHEAT-II, a novel high temperature ion implanter for mass production of SiC power devices", MRS Advances, Vol. 7, pp. 1486–1489 (2022)
- (4) G. Hobler, et al. "Simulation study of Al channeling in 4H-SiC", 2018 22nd International Conference on Ion Implantation Technology (IIT), pp. 247–250 (2018)
- (5) S. Sakai, et al. "High performance medium current ion implanter system EXCEED3000AH-G3", AIP Conference Proceedings, Vol. 866, pp. 605–608 (2006)
- (6) H. Das, et al. "P-type and N-type channeling ion implantation of SiC and implications for device design and fabrication", ECS Transactions, Vol. 98 No. 6, pp. 119–124 (2020)
- (7) J. R. Helliwell. "Single-crystal X-ray techniques", International Tables for Crystallography Volume C: Mathematical, Physical and Chemical Tables, Vol. C, pp. 26–41 (2006)

(*)「IMPHEAT」は、日新イオン機器(株)の登録商標です。

執筆者紹介



浜田 信吉 Hamada Shinkichi
日新イオン機器株式会社
半導体装置事業部
主任



平井 裕也 Hirai Yuya
日新イオン機器株式会社
半導体装置事業部
主任



臼井 洋佑 Usui Kosuke
日新イオン機器株式会社
半導体装置事業部



田中 浩平 Tanaka Kohei
日新イオン機器株式会社
半導体装置事業部
グループ長



和田 涼太 Wada Ryota
日新イオン機器株式会社
新事業推進部
主任



黒井 隆 Kuroi Takashi
日新イオン機器株式会社
新事業推進部 グループ長
博士(工学)

社名「日新」の由来

「日新」という社名の由来は、中国の古典である四書の一つ「大学」に記された、殷王朝（紀元前17～11世紀）の創始者である湯王（とうおう）が使っていった盤（洗面器）の銘文にあります。

名高い聖天子であった湯王は、毎朝使う洗面器に「苟（まこと）に日に新にせば、日目に新に。又日に新なり」と刻み、自らを戒めました。1日自分を新しくすることに努力した後は、次の1日1日も新たにし、さらに毎日新たにしていく一つまり、「少しでも新しくしようとする努力を、途切れなく続けなくてはいけない」という意味が込められています。

この精神に則って、日々独創的な技術を生み出し、人と技術の未来をひらくことを志し、「日新」と名づけました。

湯之盤銘曰 苟日新 日日新 又日新

中国の四書の一つ「大学」から

複写される方へ

日新電機株式会社では、複写転載、転載複製及びAI利用に係る著作権を一般社団法人学術著作権協会に委託しています。当該利用をご希望の方は、(社) 学術著作権協会 (<https://www.jaacc.org/>) が提供している複製利用許諾システムもしくは転載許諾システムを通じて申請ください。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が公益社団法人日本複製権センター ((社) 学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体) と包括複写許諾契約を締結している場合にあっては、その必要はございません (社外頒布目的の複写については、許諾が必要です)。

権利委託先：
一般社団法人学術著作権協会
〒107-0052 東京都港区赤坂9丁目6-41 乃木坂ビル2F

日新電機技報 第 70 卷 第 2 号 (通巻 164 号)

2025 年 Vol. 70 No. 2 (Serial No. 164)

2025 年 11 月 28 日 発行

発 行 人 宇都宮 里 佐

印 刷 所 土山印刷株式会社

発 行 所 日新電機株式会社

生産技術本部 知的財産部 技術管理グループ

〒 615-8686 京都市右京区梅津高畠町 47 番地

電話 (075)864-8341 (直通)

FAX (075)864-8433

技報編集委員会

委 員 長 川上 重男

副 委 員 長 宇都宮里佐

委 員 石倉 定幸 大久保 章 蒲生 善英

小松 宣夫 津崎 智之 相馬 功

平良 直樹 高橋 剛貴 中本 哲也

松本 武 松村 文彦 水谷 瞳

吉岡 久

事 務 局 中東 孝浩 井上 恭代 北川恵美子

© 2025 Nissin Electric Co., Ltd., Printed in Japan

禁 無 断 転 載 (非 売 品)

日新電機技報 <https://nissin.jp/technical/>

本誌掲載の商品名称は、それぞれ各社が商標として使用している場合があります。

本誌掲載の国名・地域名は、発刊時点での日本国内における通称・略称で記載している場合があります。

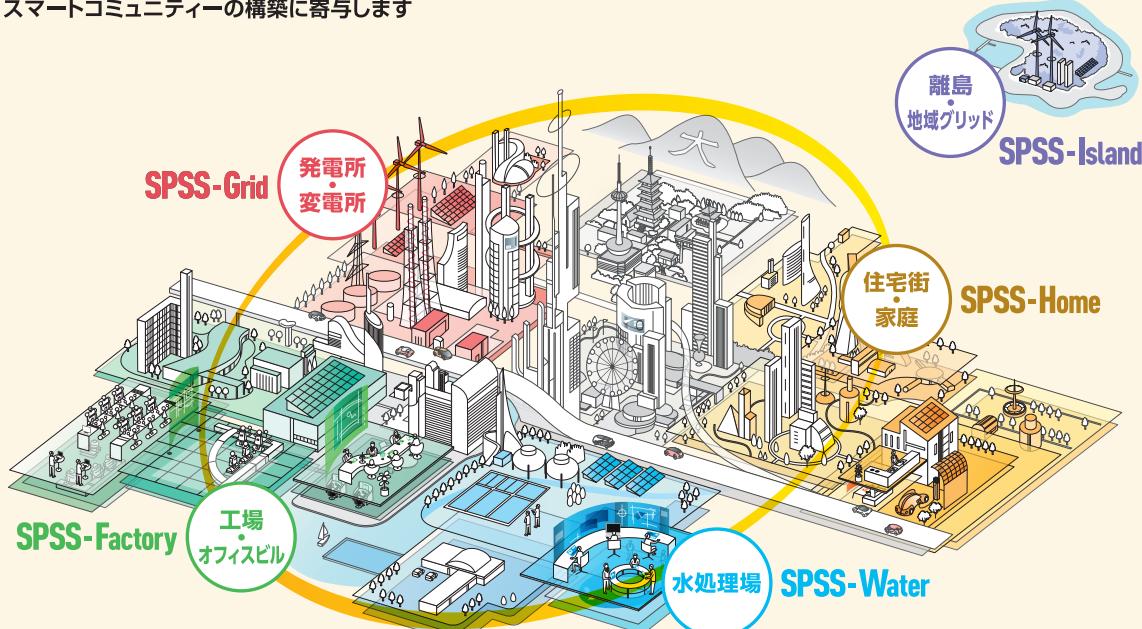
電力の安定的な確保、省エネ、省コスト、CO₂排出量削減を解決するトータルソリューション

日新電機はSPSS®で豊かなエネルギー社会に貢献します!

SPSS (Smart Power Supply Systems : スマート電力供給システム)

発電所から家庭・離島までの5つの市場にSPSSを提案し、

スマートコミュニティーの構築に寄与します



人と技術の未来をひらく
日新電機株式会社

日新電機株式会社 国内営業支社・支店

北海道支店	〒060-0042 北海道札幌市中央区大通西8丁目2番地(住友商事カミヤ大通ビル5階)	TEL (011)221-3589・FAX (011)271-3844
東北支店	〒980-0021 宮城県仙台市青葉区中央2丁目9番27号(プライムスクエア広瀬通6階)	TEL (022)221-6516・FAX (022)225-5473
東京支社	〒101-0054 東京都千代田区神田錦町2丁目2番地1(KANDA SQUARE 19階)	TEL (03)6739-9700・FAX (03)6739-9090
中部支社	〒450-0002 愛知県名古屋市中村区名駅四丁目8番18号(名古屋三井ビルディング北館15階)	TEL (052)561-5511・FAX (052)561-0369
関西支社	〒530-6129 大阪市北区中之島3丁目3番23号(中之島ダイビル29階)	TEL (06)6444-7540・FAX (06)6444-6081
中国支店	〒730-0037 広島市中区中町7番23号(住友生命広島平和大通り第2ビル3階)	TEL (082)246-9701・FAX (082)242-0051
四国支店	〒760-0017 香川県高松市番町1丁目6番1号(両備高松ビル14階)	TEL (087)822-5561・FAX (087)822-7719
九州支店	〒812-0011 福岡市博多区博多駅前3丁目30番23号(博多管絃ビル4階)	TEL (092)451-6931・FAX (092)472-2667
沖縄支店	〒900-0033 沖縄県那覇市久米1丁目4番25号(翔ビル4階)	TEL (098)866-3268・FAX (098)866-9318

国内関係会社

株式会社NHVコーポレーション	〒615-8686 京都市右京区梅津高畠町47番地	TEL (075)864-8801・FAX (075)882-1520
株式会社日新ビジネスプロモート	〒615-8686 京都市右京区梅津高畠町47番地	TEL (075)864-8521・FAX (075)864-8856
日新電機商事株式会社	〒101-0054 東京都千代田区神田錦町2丁目2番地1(KANDA SQUARE 19階)	TEL (03)6739-9716・FAX (03)6739-9720
株式会社日新システムズ	〒600-8482 京都市下京区堀川通綾小路下ル綾堀川町293-1(堀川通四条ビル)	TEL (075)344-7880・FAX (075)344-7901
日新イオン機器株式会社	〒601-8438 京都市南区西九条東比永城町75 GRAND KYOTO 4F	TEL (075)632-9700・FAX (075)632-9701
日本アイ・ティ・エフ株式会社	〒601-8205 京都市南区久世殿城町575番地	TEL (075)931-6040・FAX (075)931-6166
日新パルス電子株式会社	〒278-0022 千葉県野田市山崎2744番3	TEL (04)7123-0611・FAX (04)7123-0620
日新ハートフルフレンド株式会社	〒615-8686 京都市右京区梅津高畠町47番地	TEL (075)882-5991・FAX (075)882-6001
株式会社オーランド	〒615-8686 京都市右京区梅津高畠町47番地	TEL (075)882-5991・FAX (075)882-6001

日新

NISSIN ISSIN

新

変化への適応 変化の創造



日新電機グループは、
多様な価値観が尊重され
チャレンジ意欲を持った活動ができる環境のもと
一人ひとりが社会に貢献していることを実感でき
確かな技術力で持続可能な未来を創造する会社
を目指します。



 日新電機株式会社

<https://nissin.jp/>

日新一新



NISSIN
ELECTRIC

人と技術の未来をひらく
 日新電機株式会社

〒615-8686 京都市右京区梅津高畠町47番地
TEL(075)861-3151(代表) FAX(075)864-8312 <https://nissin.jp/>