

# 三菱電機技報

6

2026  
Vol.100 No.6

持続可能な社会を支えるインフラソリューション  
— 脱炭素への貢献 —

## No.6

## 特集 持続可能な社会を支えるインフラソリューション—脱炭素への貢献—

## Infrastructure Solutions for a Sustainable Society —Contributing to Decarbonization—

## 巻頭言

社会インフラの未来を“循環型 デジタル・エンジニアリング”で切り拓く  
—デジタル基盤“Serendie”が加速させるイノベティブ・カンパニーへの変革— 1-01  
根来秀人

Pioneering the Future of Social Infrastructure through “Circular Digital Engineering”  
- Digital Platform “Serendie” Accelerates the Transformation into an Innovative Company -  
Hideto Negoro

南洋理工大学・REIDS実証を活用した  
マイクログリッドの検証…………… 2-01  
水城 優・小島康弘・松田啓史

Microgrid Verification via REIDS in Collaboration with Nanyang Technological University  
Yu Mizushiro, Yasuhiro Kojima, Keishi Matsuda

第2世代スマートメーターシステム  
の実現と今後の展望…………… 3-01  
森野友理香・甬水佳奈子・深沢翔平・藤井紀帆

Realization and Future Prospects of 2nd Generation Smart Meter System  
Yurika Morino, Kanako Homizu, Shohei Fukasawa, Kiho Fujii

電力の安定供給を支える  
分散型エネルギーリソース統合基盤…………… 4-01  
木皿大介・石崎 啓・岡本健太郎

Distributed Energy Resource Integration Platform for Ensuring Stable Power Supply  
Daisuke Kisara, Hiromu Ishizaki, Kentaro Okamoto

電力需給最適化の高度化に向けた取組み…………… 5-01  
大山貴央・森川史也

Efforts to Advance Optimization of Power Supply and Demand  
Takahisa Oyama, Fumiya Morikawa

未来の電力需給を支える統合ソリューション…………… 6-01  
松村洪作・高田一輝・中野晴也・前田はるか

Integrated Solution for Future Power Supply and Demand  
Kosaku Matsumura, Ikki Takada, Seiya Nakano, Haruka Maeda

EV充電最適化ソリューション  
“HubCharge”の取組み…………… 7-01  
小林弘幸・浅木森孔貴

Initiatives of EV Charging Optimization Solution “HubCharge”  
Hiroyuki Kobayashi, Koki Asakimori

浮体式洋上風力向けHVDC変換器システム…………… 8-01  
灘 香帆・畷尾昌弘・山中大輔

Floating Offshore Wind HVDC Converter Station  
Kaho Nada, Masahiro Hario, Daisuke Yamanaka

上水道プラント運転支援装置“WE-SMART”…………… 9-01  
川島啓吾・入来院浩司・眞辺信也

Operation Support System “WE-SMART” for Water Treatment Plants  
Keigo Kawashima, Koji Irikin, Shinya Manabe

下水道の脱炭素化を切り拓くセンシング技術…………… 10-01  
吉田 航・池田直樹・藤原 拓・金海秀紀

Sensing Technologies Leading the Way in Sewer System Decarbonization  
Wataru Yoshida, Naoki Ikeda, Taku Fujiwara, Hideki Kinkai

温室効果ガス観測センサーTANSO-3  
の開発と初期運用…………… 11-01  
二見充輝・黒川正人・吉岐 航・玉田晃均

Development and Initial On-Orbit Operation of Greenhouse Gas Observation Sensor  
TANSO-3  
Mitsuaki Futami, Masato Kurokawa, Wataru Yoshiki, Akihito Tamada

液体燃料合成に向けたSOEC共電解システム…………… 12-01  
川本 誠・藤岡恭平・下笠諒平・篠木俊雄・西口博人

SOEC Co-electrolysis System for Liquid Fuel Synthesis  
Makoto Kawamoto, Kyohei Fujioka, Ryohei Shimokasa, Toshio Shinoki, Hiroto Nishiguchi

執筆者の所属は執筆時のものです。

本号に記載されている会社名、製品名はそれぞれの会社の商標又は登録商標です。

三菱電機では、サステナビリティ経営を実現するビジネスエリアとして、「インフラ」「インダストリー・モビリティ」「ライフ」を設定しています。

三菱電機技報ではこのビジネスエリアを中心に特集を紹介しています。

今回の特集ではインフラ領域の“持続可能な社会を支えるインフラソリューション —脱炭素への貢献—”をご紹介します。

# 巻頭言

## 社会インフラの未来を“循環型 デジタル・エンジニアリング”で切り拓く — デジタル基盤“Serendie”が加速させるイノベティブ・カンパニーへの変革 —

Pioneering the Future of Social Infrastructure through “Circular Digital Engineering”  
- Digital Platform “Serendie” Accelerates the Transformation into an Innovative Company -



根来 秀人 Hideto Negoro

常務執行役 インフラビジネスエリアオーナー  
Executive Officer, Infrastructure Business Area Owner

私たちの生活を支える社会インフラは今、歴史的な転換点に立たされています。地球規模での気候変動に伴う災害の激甚化、エネルギー価格の不安定化、そして国内の労働力不足や設備の老朽化といった課題は、もはや従来の“安定供給”という守りの姿勢だけでは克服できません。今、私たちに求められているのは、インフラそのものがデータによって自律的に最適運用され、環境変化や予期せぬ事態に柔軟に適応する、持続可能な社会基盤の構築です。

三菱電機グループは、この大きな変革期において“イノベティブ・カンパニーへの変革”を掲げ、それを実現するために当社のデジタル基盤“Serendie”（セレンディ）によるビジネスモデルの変革を進めています。Serendieは、当社が供給してきた“製品”と、長年培ってきた“現場の豊富な知見”から得られる膨大なデータを集約し、最新のデジタル技術と掛け合わせることで新たな知見や価値を創出するプラットフォームです。インフラビジネスエリア(IBA)はこの戦略を最もダイレクトに社会実装する役割を担っています。

三菱電機技報6月号と7月号の2巻にわたってお届けする“持続可能な社会を支えるインフラソリューション”特集号では、IBAの事業基盤である“エネルギー”“ファシリティー”“モビリティ”の各領域の中から、6月号では“脱炭素への貢献”、7月号では“運用・保守の自動化”をサブテーマに、最新の技術成果について紹介します。

エネルギー領域では、脱炭素化社会の鍵を握る再生可能エネルギーの導入拡大と、それを支える電力系統の高度化に注力しています。シンガポール・南洋理工大学との共同実証によるマイクログリッド制御技術や、浮体式洋上風力発電の普及に不可欠な小型・低損失のHVDC(高圧直流送電)変換器の開発は、グローバルな脱炭素化を牽引(けんいん)する当社のハードウェアと制御技術の融合の成果です。また、次世代スマートメーターやデマンドレスポンス対応のデジタルプラットフォーム、そして複雑化する電力市場に対応したAIによる需給運用最適化ソリューションは、分散するエネルギーリソースをデジタルで束ね、新たな経済価値を生み出すものです。さらに、将来のクリーンエネルギー源として期待される水素・合成燃料製造に向けたSOEC(Solid Oxide Electrolysis Cell)共電解システムの開発など、一歩先を見据えた技術開発を推進しています。

ファシリティー領域では、水環境分野で電力費削減とオペレーターの意思決定を支援する運転支援装置“WE-SMART”や、下水処理プロセスでの温室効果ガス削減技術など、デジタル技術を駆使して“環境負荷低減”と“経済性”の両立を追求しています。また、省人・省力化に寄与する、AI技術を活用した“水位・流量予測システム”やスマート保安、各種診断技術の開発など、社会インフラの維持・発展に欠かせない技術の深化も進めています。

モビリティ領域では、鉄道インフラの維持管理に重要な役割を果たす、車両のライフサイクル全般にわたる各種データの蓄積・共有が可能なプラットフォームや、様々な計測器から取得したデータでデジタルツインを構築し、インフラ管理業務を高度化するソリューションなどの開発成果を紹介しています。また、EV(Electric Vehicle)充電最適化ソリューション“HubCharge”は、運輸部門の脱炭素化という課題に対し、エネルギーマネージメントの観点から解決策を提示するものです。

さらに、IBAで培ってきたこれらの高度なエネルギーマネージメント技術や電力変換技術、AI技術、デジタルプラットフォームは、ライフビジネスエリアが持つ冷却技術とともに、AI時代の新たなインフラとなりつつあるデータセンターの省エネルギー化にも大きく寄与します。

当社の強みは、単に優れた製品を提供することにとどまりません。顧客の設備のライフサイクル全体に寄り添い、共に課題を解決し続ける伴走者であること、そして、物理的なモノづくりにデジタル技術を融合し、インフラの可能性を再定義していくことにあります。さらに、私たちは2026年4月1日に制定された“Our Philosophy(私たちの理念)”のPurpose(存在意義)である“飽くなき探求心と驚きの技術で、未来の価値を創造する”を胸に、当社グループにしかできない製品と現場で培った経験を大切にしながら、データで社会をつなぎ、次世代に誇れる持続可能な未来を築き上げていきます。

# 南洋理工大学・REIDS実証を活用した マイクログリッドの検証

水城 優\*  
Yu Mizushiro  
小島康弘†  
Yasuhiro Kojima  
松田啓史\*  
Keishi Matsuda

Microgrid Verification via REIDS in Collaboration with Nanyang Technological University

\*エネルギーシステム事業本部  
†同事業本部(博士(工学))

## 要 旨

近年、再生可能エネルギー(以下“再エネ”という。)の導入拡大が進む中、需給変動や系統安定性に関する課題が存在する。三菱電機は南洋理工大学(Nanyang Technological University)(以下“NTU”という。)と連携し、シンガポール・セマカウ島で進行中のREIDS(Renewable Energy Integration Demonstrator - Singapore)実証プロジェクト<sup>(1)</sup>に参画している。このプロジェクトでは当社の分散型電源制御ソリューション“BLENder RE”<sup>(2)</sup>を導入し、昼間に再エネによる余剰電力を蓄えて夜間に放電することで、島内の再エネ利用率の向上を目指している。事業の海外展開を目指す当社にとって、NTUとの共同実証は、グローバルプレゼンス向上に寄与するものと考えている。

## 1. ま え が き

近年、地政学的リスクや気候変動の影響によって、エネルギーの安定供給は国際的な喫緊の課題となっている。脱炭素化の進展に伴って再エネの主力電源化が期待される一方、天候依存による発電量の変動や系統への影響が懸念される。当社ではこれらの課題に対応するため、再エネ発電設備や蓄電システムを統合制御する分散型電源制御ソリューションBLENder REを開発してきた。今後の海外展開を視野に、シンガポール・セマカウ島のREIDS実証プロジェクトに参画し、NTUと共同で安定かつ効率的なカーボンフリー電力供給の実現を目指す。

## 2. 再エネ活用と系統安定化を支えるBLENder RE

再エネによる電力は天候に左右されるため、需給バランスの不安定化や余剰電力の発生、逆潮流による配電線の電圧変動など、電力系統への影響が懸念されている。当社では、再エネの導入に伴う様々な課題に対応するための分散型電源制御ソリューションBLENder REを開発してきた。BLENder REは再エネ発電設備や蓄電システムを制御し、系統安定性の確保や再エネの効率的な利用を実現するためのソフトウェアである。自社のスマートグリッド実証設備などを活用して蓄積したノウハウと各種技術検証の結果を踏まえて、再エネ発電所、離島、系統用蓄電池など、用途や規模の異なる蓄電システムを国内外に導入し、実運用環境での性能評価と改善を行ってきた。BLENder REでは標準パッケージを整備しており、そのユースケースと機能を図1に示す。

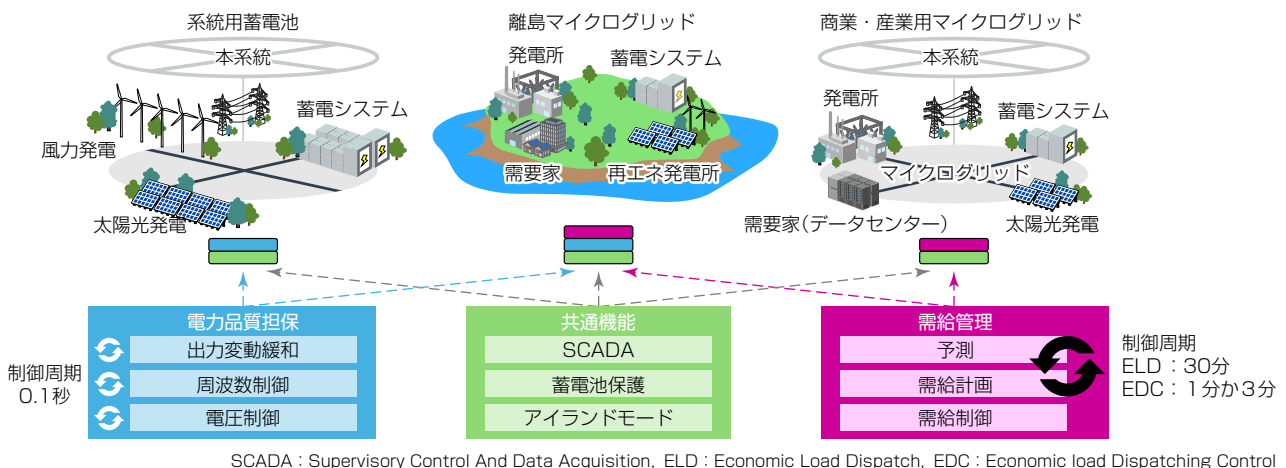


図1 - BLENder RE標準パッケージのユースケースと機能

### 3. 実証の背景と課題

この章では、今回の実証の背景と課題を述べる。

#### 3.1 REIDS実証

当社は2022年、シンガポールで開催された国際シンポジウムでNTUと交流の機会を得たことを契機として、REIDS実証プロジェクトへの参画に至った。電力Digital Energy事業の海外展開を目指す当社にとって、知名度の高い教育・研究機関であるNTUとの共同実証は、グローバルプレゼンス向上に寄与するものと考えている。

シンガポールは、再エネの導入に積極的な姿勢を示している。しかし、その国土面積は東京23区程度と極めて小さく、地理的条件からも天然資源に乏しい。こうした背景から、同国の電源構成は輸入燃料に大きく依存しており、発電の約95%を輸入天然ガスが占めている<sup>(3)</sup>。

REIDSは、シンガポール及びアジア太平洋地域全体での持続可能で費用対効果の高いエネルギーソリューションの設計、実証、試験に焦点を当てた研究開発実証である。シンガポール国内の企業等を支援することで広範囲な分野の体系的な研究開発を促進し、急速に成長する再エネ及びマイクログリッド分野での競争力強化を目指している。

実証場所は、シンガポール本島の南約8kmに位置するセマカウ島である。国土面積の限られたシンガポールでは、1990年代初頭に本土のごみ処分場容量が限界に達して、政府は沖合に新たな埋立地を建設する計画を立案した。そして、1999年に世界初の沖合埋立地としてセマカウ島が開業した<sup>(4)(5)</sup>。現在では廃棄物処理施設としての役割に加えて、再エネやマイクログリッドの実証拠点としても活用されている。図2に示すように、島内のREIDSテストベッドは、相互接続された八つのマイクログリッドと、太陽光発電(PV)やディーゼル発電機、負荷といった共有アセットで構成されており、パートナー企業と協力した再エネ活用ユースケースの実証を目的にしている。また、このテストベッドはパートナー企業にとって技術デモンストレーションの場としても機能しており、世界中の関係者が継続的に訪れている。テストベッドに配備されたマイクログリッドは、島内の実負荷施設に平均約200kWhの電力を供給している。さらに、将来的には島内にある魚の養殖施設への電力供給も計画されている。

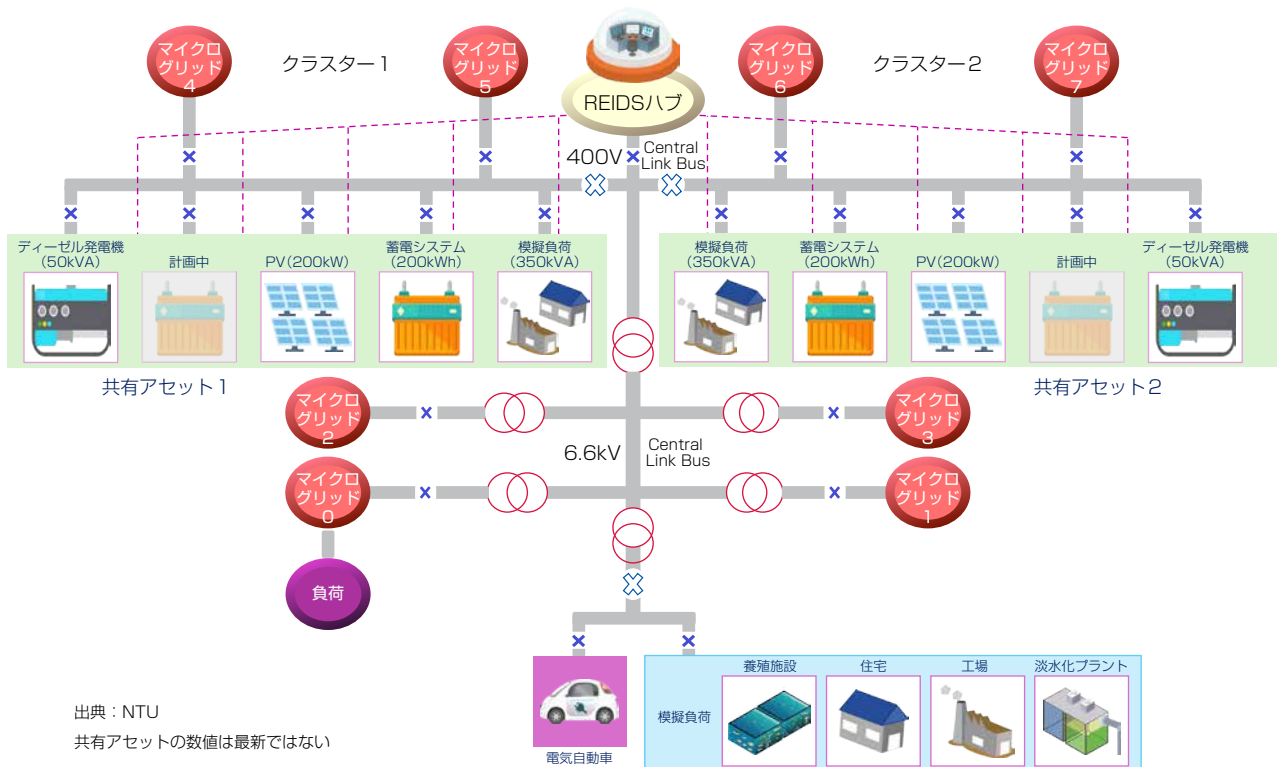


図2-セマカウ島でのREIDSテストベッドの設備構成図

## 3.2 セマカウ島での課題

現在、島内の実負荷にはテストベッドからのPV電力が供給されているものの、蓄電システムを活用した運用は行われていない。PVの容量は160kW、実負荷による昼間の需要は平均200kW、ディーゼル発電機の出力下限値は150kWである。そのため、PVに対して50kWに出力抑制することでマイクログリッドシステムの安定性を保っており、余剰電力を有効活用できていない。一方、夜間はPV電力がゼロになるため、負荷の全量をディーゼル発電機によって賄っている。この運用形態では、PVの利用率が低いため、CO<sub>2</sub>排出量の削減効果が限定的になってしまう。

そこでBLENder REを導入し、昼間の余剰電力を蓄電システムに蓄えて、夜間に放電する運用を行う。これによって、島内のPV利用率の向上を実現する。また、急激な天候変化によるPV出力の変動を蓄電システムで吸収し、マイクログリッド全体の需給安定性を高める。

## 4. 今回の実証の概要

この章では、今回の実証の概要を述べる。

### 4.1 ユースケースと実現方法

今回の実証でのBLENder RE導入の主目的は、島内でのPVの利用率を最大限に高めることである。具体的には、昼間に発生する余剰電力を蓄電システムに蓄えて、夜間に放電することでディーゼル発電機の稼働を抑制することを目指している。今回は、BLENder RE標準パッケージに搭載されている“再エネ出力変動緩和機能”を基本機能として採用した。この機能は、PVや風力発電といった天候に依存する再エネ電力の変動を蓄電システムの充放電によって平滑化し、需給バランスへの影響を最小化するものである。また、昼間の余剰電力を蓄えて夜間に放電する運用を組み合わせることで、再エネ利用率の向上も同時に実現する。さらに、現地のシステム構成や運用制約などサイト固有の要件は、標準パッケージで対応可能な各種制約に当てはめて対応した。

運用に当たっては、次の二つの制約条件を遵守する必要がある。

#### (1) ディーゼル発電機の出力下限値

実負荷に併設されているディーゼル発電機は負荷追従型であり、出力下限制約が設けられている。そのため、ディーゼル発電機の出力が下限値を下回らない範囲で電力供給を行う必要がある。現時点ではディーゼル発電機の出力を直接計測できないため、代替策としてテストベッドから実負荷へ供給する電力のしきい値、つまり連系線潮流の上限値(昼間と夜間で異なる)を設定し、その範囲内で蓄電システムを制御する方式を採用した。これによって、ディーゼル発電機の安定運転を確保しつつ、再エネ利用率の向上を図る。

#### (2) 現地試験時のシステム構成

現地試験では実負荷を直接使用できないため、本運用とは異なる設備構成で試験を行う必要があった。そこで、“運用モード”と“試験モード”の2種類の運転モードを実装した。両モードとも制御ロジックは共通であるが、試験モードでは試験時のシステム構成に合わせた入力信号を適用し、本運用モードのロジック妥当性を検証できる仕様とした。これによって、試験環境下でも本運用時と同等の制御挙動を再現し、現地試験の信頼性を確保した。

これらのユースケース及び制約を満たすために必要になる再エネ出力抑制機能や連系線潮流上限制約機能は、どちらもBLENder RE標準パッケージに含まれる既存のものを適用している。これによって、新規開発や大規模なカスタマイズを行うことなく導入を実現した。

### 4.2 システム構成

本運用時及び現地試験時のシステム構成は、**図3**のとおりである。**図2**のマイクログリッド0に設置された合計160kWのPVと、共有アセットの一部として新設された100kW/355kWhの蓄電システムが実負荷に接続されて、電力供給を行う。BLENder REによる監視又は監視制御対象は蓄電システムを含む**図3**の赤枠の範囲である。

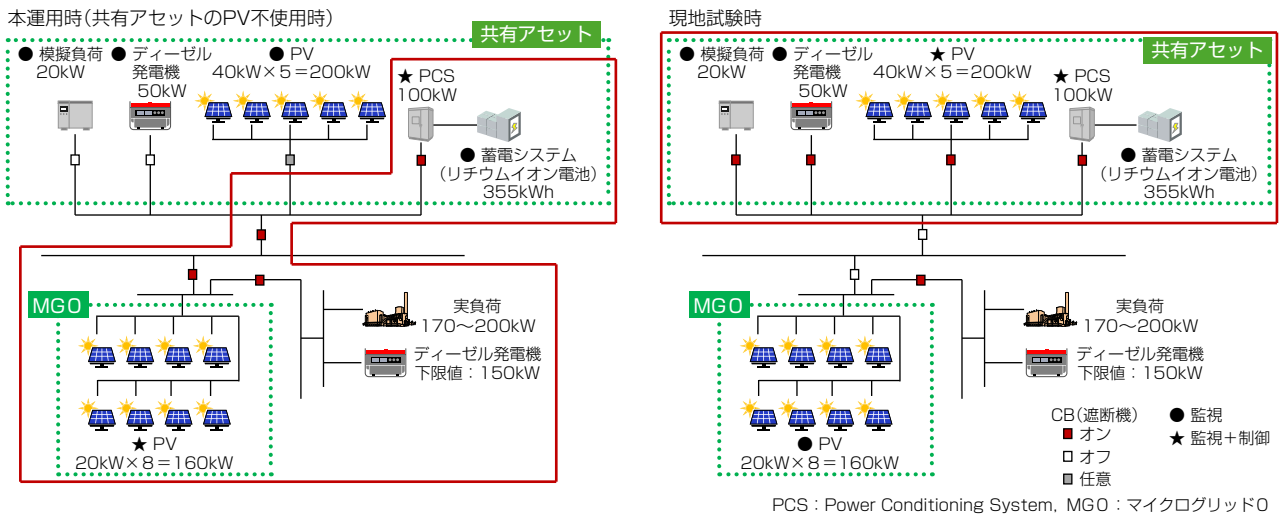


図3-本運用時及び現地試験時のシステム構成

### 4.3 期待される効果

現地試験は2025年5月に完了しているが、2026年2月現在、政府による本運用の認可待ちの状況である。そこで、認可までの間に本運用を想定した幾つかのシミュレーションを実施したため、その結果を述べる。

図4は、晴天の日を仮定した任意のPV発電カーブにのっとり一日の運用パターンである。実負荷への供給しきい値は、昼間50kW、夜間15kWに設定している。7時頃から18時頃までPV(図4薄赤色線)が発電しており、9時頃から11時頃にかけては、実負荷への供給(図4緑色線)と蓄電システムへの充電(図4薄青色線)に割り当てられる。11時頃以降、PV発電量が更に増加するため、出力抑制が開始される(図4赤色線)。それに加えて、蓄電システム保護機能によって、SOC(State of Charge : 充電率)(図4濃青色線)が100%に近づくと充電電力も制限される。13時頃にSOCが100%(満充電)に近づいたら充電電力を絞るとともにPVを出力制御するため、大きなPV出力抑制(図4赤色線)が発生する。16時頃にPV発電量が日中のしきい値である50kWを下回ると蓄電システムからの放電(図4薄青色線)が開始されて、夜間は夜間しきい値(15kW)に応じた放電が継続される。

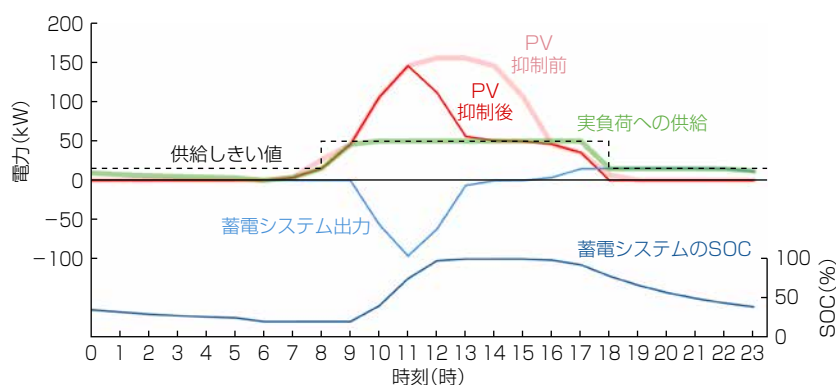


図4-一日の運用パターン(晴天時)

図5(a)は、PV導入前、PV導入後、PVと蓄電システム導入後のPV抑制率(PVの出力抑制量/PVの発電量)とPV利用率(PV及び蓄電システムからの供給電力の合計/負荷電力の合計)を示している。PV発電量は、シンガポールの年間気候統計に基づいて、晴天30%、曇天70%の発生確率と仮定し、図5(b)に示すPV発電カーブを用いて算出した。その結果、蓄電システムの導入によってPV抑制率は現在の16.2%から9.6%へと改善し、PVの有効活用量は約1.7倍の向上が見込まれる。

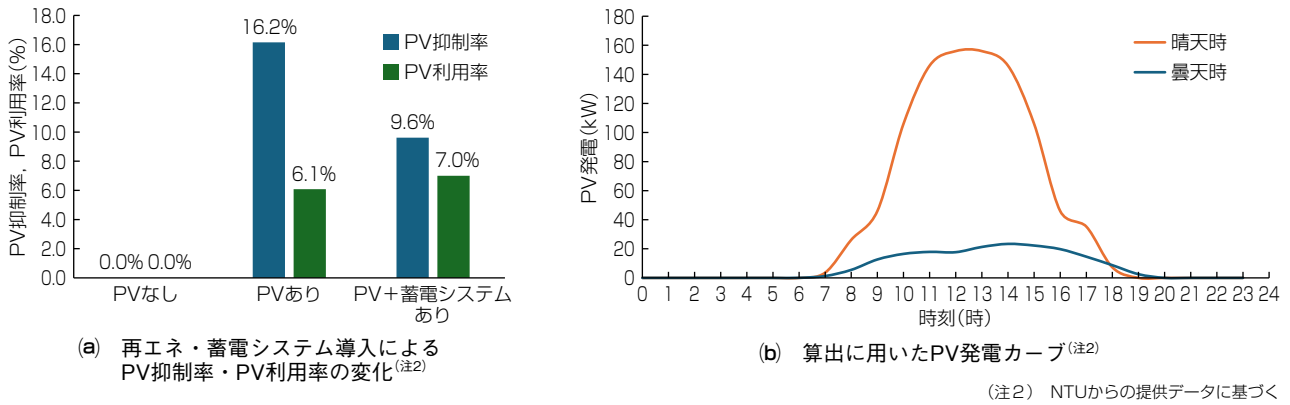
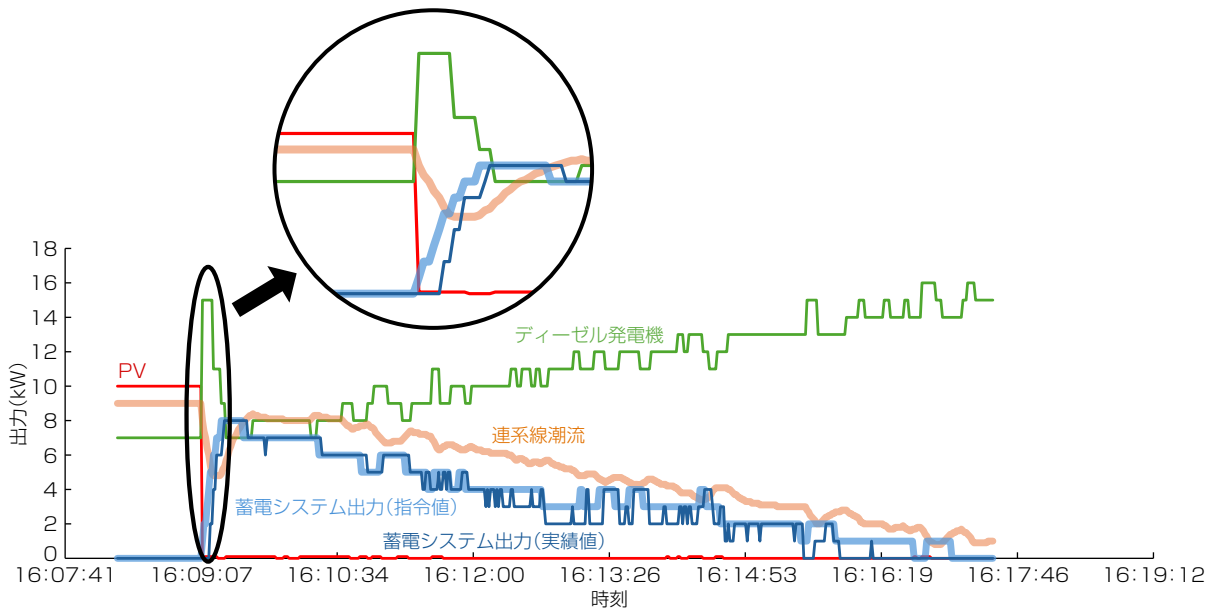


図5-再エネ・蓄電システム導入によるPV抑制率・PV利用率の変化とその算出に用いたPV発電カーブ

図6は、現地試験でのPV変動緩和機能の結果である。PVの急変を模擬するため、図6の黒丸で示した時刻にPV(図6赤色線)10kWを瞬時に解列した。制御ロジックへの入力は連系点潮流(図6オレンジ色線)であり、PV出力(図6赤色線)の減少に伴ってディーゼル発電機出力(図6緑色線)が増加し、その増加分が連系点潮流の減少として現れた。この変化は蓄電システム出力の指令値(図6薄青色太線)に反映され、蓄電システム出力の実績値(図6青色細線)も指令値に追従していることが確認できる。結果として、ディーゼル発電機(図6緑色線)は元の出力値に回復し、その後は設定したレート(1%/min)に基づく蓄電システムの出力に応じて緩やかに変化する挙動を示した。これらの結果から、現地試験で制御機能が正しく動作していることを確認できた。



## 5. む す び

2026年2月現在、政府による本運用開始の認可待ちであり、許可取得後はコミッショニングを経て運用を開始する予定である。本運用では、昼間の余剰PV電力を夜間に活用することによる島内のPV利用率向上、PV出力変動緩和によるマイクログリッドシステムの安定運用が見込まれる。さらに、今回の実証の成果は、本技術の有効性を示すとともに、国際的な認知向上や海外展開への可能性を示唆するものである。

## 参考文献

- (1) Nanyang Technological University : Renewable Energy Integration Demonstrator - Singapore  
<https://www.ntu.edu.sg/erian/research-capabilities/renewable-energy-integration-demonstrator---singapore>
- (2) 三菱電機：電力ICTソリューション「BLEnDer」  
<https://www.mitsubishielectric.co.jp/ict-power-system/business/solution1/>
- (3) Energy Market Authority : Natural Gas  
<https://www.ema.gov.sg/our-energy-story/energy-supply/natural-gas>
- (4) AFPBB News : 「ごみのエデンの園」シンガポール唯一の埋め立て地  
<https://www.afpbb.com/articles/-/3475035>
- (5) CNA : IN FOCUS: Where will Singapore' s rubbish go after Semakau landfill is full?  
<https://www.channelnewsasia.com/singapore/semakau-landfill-waste-recycling-rubbish-in-focus-5358016>



# 第2世代スマートメーターシステム の実現と今後の展望

森野友理香\*  
Yurika Morino  
甬水佳奈子\*  
Kanao Homizu  
深沢翔平\*  
Shohei Fukasawa

藤井紀帆\*  
Kiho Fujii

\*電力システム製作所

Realization and Future Prospects of 2nd Generation Smart Meter System

## 要旨

スマートメーターシステム(以下、“SMS”という。)は、各家庭や工場に設置したスマートメーター(以下、“SM”という。)から電力使用量をヘッドエンドシステム(以下、“HES”という。)へ自動的に収集(自動検針)し、運用・管理する仕組みである。三菱電機は、電力会社向けにSMSを開発・納入し、検針業務効率化に寄与してきた。近年の再生可能エネルギー(以下、“再エネ”という。)普及に伴って、電力データの高度活用や利用拡大の必要性が高まって、第2世代SMSでは自動検針の高粒度化や共同検針等の要件が追加された。当社はこれらの要件を実現するため、通信の大容量化とスループット向上、高機能化、HESのアーキテクチャー刷新による拡張性向上を実施した。今後は、これらの成果を生かして、海外展開を含む事業領域拡大を図る。

## 1. ま え が き

SMSは、各家庭や工場に設置したSMから電力使用量を取得し、通信ネットワークを介してHESへ自動収集・集中管理する仕組みである。2014年から導入された第1世代SMSは、遠隔自動検針による事業者の業務効率化、家庭等での省エネルギー促進、さらに電力市場制度(30分値同時同量制度、インバランス料金精算)への活用など、電力事業の基盤として重要な役割を果たしてきた。当社は電力会社向けにSMSを開発・納入し、検針業務効率化を継続的に支援している。

第1世代SMSを運用する中で、太陽光や風力発電等の再エネの普及が進んで、各地に分散設置される小規模発電・蓄電設備(分散型エネルギーリソース)への期待が高まった。これに伴って、次世代の配電プラットフォームでは、データ活用による電力ネットワーク運用の高度化、電力分野以外への電力データ利用拡大、需要側リソースの拡大に伴う取引ニーズの多様化への対応が求められるようになった。一般家庭用SMは、計量法によって10年間での交換が義務付けられており、2025年度から順次、第2世代SMSへの更新が始まる。これに先立って、国の“次世代スマートメーター制度検討会”で、カーボンニュートラル時代に向けたプラットフォームとして、第2世代SMSの仕様・機能要件が整理された<sup>(1)</sup>。

本稿では、第2世代SMSの要件と、それを具現化した当社の開発成果について述べる。

## 2. 第2世代SMSの要件

第2世代SMSは、レジリエンス強化、再エネ大量導入・脱炭素化及び系統全体の需給安定化、需要家利益の向上という三つの視点を軸に要件が定義された。次にその三つの要件について述べる。

### 2.1 レジリエンス強化

災害や事故等による電力供給の途絶に対して、電力システムが迅速かつ正確に状況を把握し、復旧作業の効率化や被害の最小化を図ることが求められる。これに対して次の機能が追加された。

#### (1) 停電検知・復旧検知

30分値や5分値の計量データ、メーターの動作状況を確認するポーリング機能を活用し、停電や復旧状況を検知することによって停電状況を早期に把握する。

#### (2) 遠隔アンペア制御機能

災害時や需給ひっ迫時に遠隔で需要家のアンペア値(契約電流の上限値)を制御し、面的に需要を抑制する。これによって、広域での計画停電を回避可能にする。

## 2.2 再エネ大量導入・脱炭素化及び系統全体の需給安定化

再エネの大量導入と脱炭素化を支えて、系統全体の需給安定化を実現するため、次の機能が追加された。

### (1) 高粒度データ(5分値)取得

有効電力量・無効電力量・電圧の5分値を取得し、ヒストリカルデータやリアルタイムデータを迅速に一般送配電事業者に送信する。これによって、再エネ変動に応じたきめ細かな電圧制御や電力損失削減を可能とする。

### (2) 15分値取得

将来の電力市場制度が30分単位から15分単位に移行した場合に、円滑な制度移行を可能とする。

### (3) Bルート(SM~需要家機器間)通信の柔軟化

Wi-SUN(Wireless Smart Utility Network)<sup>(注1)</sup>方式に加えて、Wi-Fi<sup>(注2)</sup>やEthernet<sup>(注3)</sup>方式を選択可能とし、複数の需要家機器との接続を容易化する。

### (4) 特例計量器データ活用

SMネットワーク経由で、特定計量制度に基づく計量器(特例計量器)の30分値を一般送配電事業者に送信する。これによって、分散型リソースを活用した新たな需要家サービスの創出、分散型リソースの需給調整市場への参画促進につなげる。

(注1) Wi-SUNは、Wi-SUN Allianceの登録商標である。

(注2) Wi-Fiは、Wi-Fi Allianceの登録商標である。

(注3) Ethernetは、富士フイルムビジネスソリューション(株)の登録商標である。

## 2.3 需要家利益の向上

需要家利益の向上を目的として、SMネットワークを経由し、ガス・水道メーターの計量値を取得する共同検針機能が追加された。この機能によって、一般送配電事業者がガス・水道事業者と共同で検針システムを運用できるようになり、システム整備や運用の効率化によるコスト削減が可能になる。また、検針の遠隔化によって、検針作業の省力化や迅速化が実現し、需要家に対するサービス品質の向上にもつながる。

## 3. 第2世代SMSに向けた開発成果

当社は、第2世代SMSの要件を包括的に満たすことを目指して、システムの高度化開発を実施した。当社が考えるシステム全体構成を図1に、当社の第2世代SMSでの技術的対応を図2に示す。この章では、各開発成果について述べる。

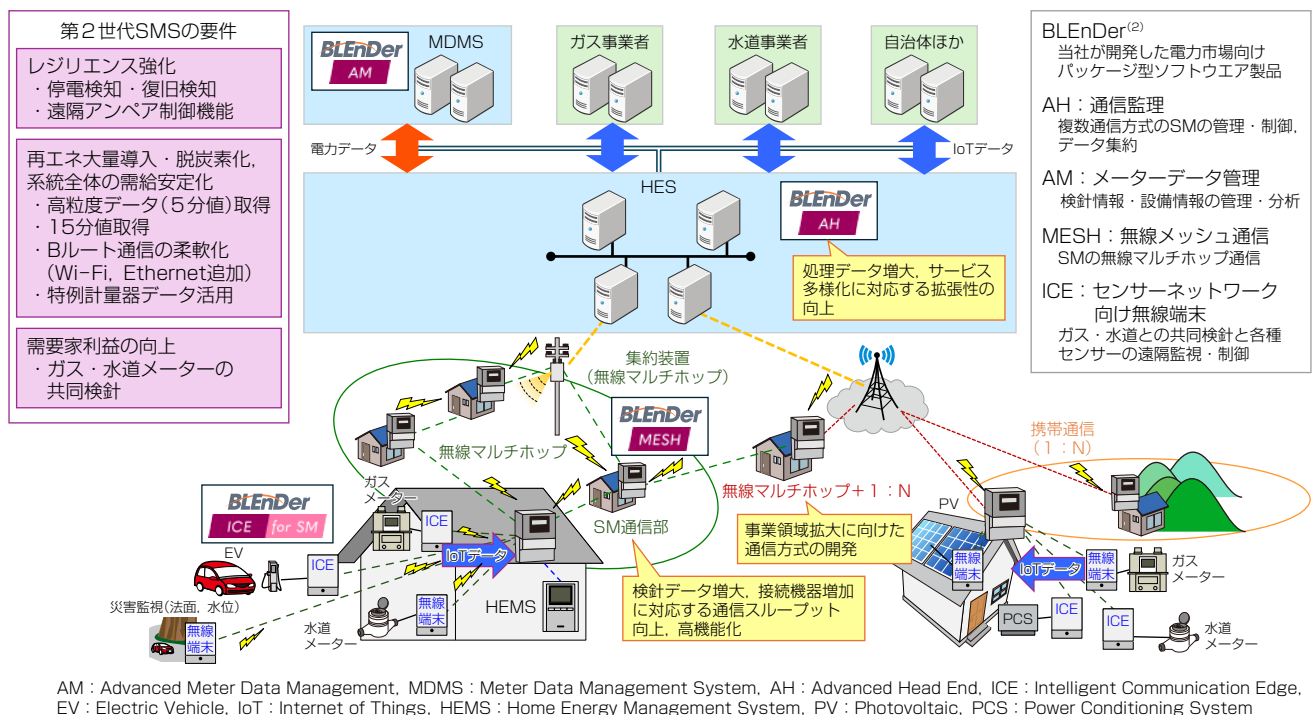


図1-第2世代SMSの要件と当社が考えるシステム全体構成

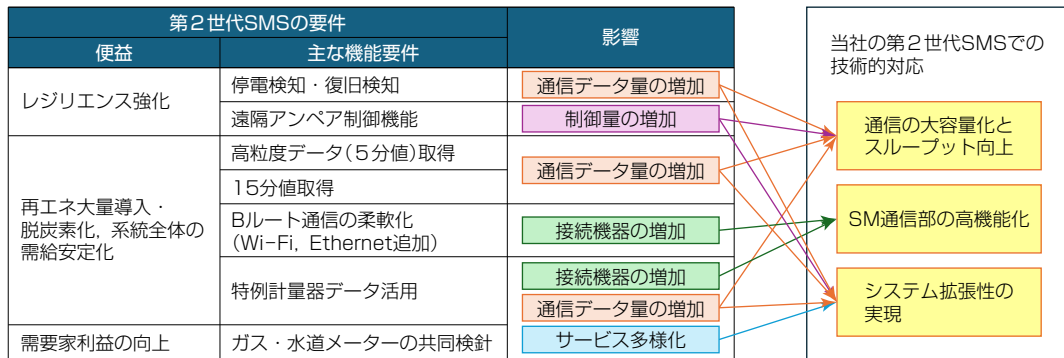


図2-当社の第2世代SMSでの技術的対応

### 3.1 通信の大容量化とスループット向上の実現

2章で述べたとおり、第2世代SMSでは、従来の30分値連係に加えて、再エネ大量導入・脱炭素化及び系統全体の需給安定化、需要家利益の向上のため、高粒度データ(5分値)の連係、検針粒度の細分化(15分値追加)、特定計量・共同検針対応が追加になった。SM通信部(以下、“通信部”という。)1台当たりの920MHz帯での通信頻度は第1世代SMSと比較して10倍に増大(図3)しており、無線輻輳(ふくそう)が懸念されるため、通信の大容量化とスループット向上が必要である。

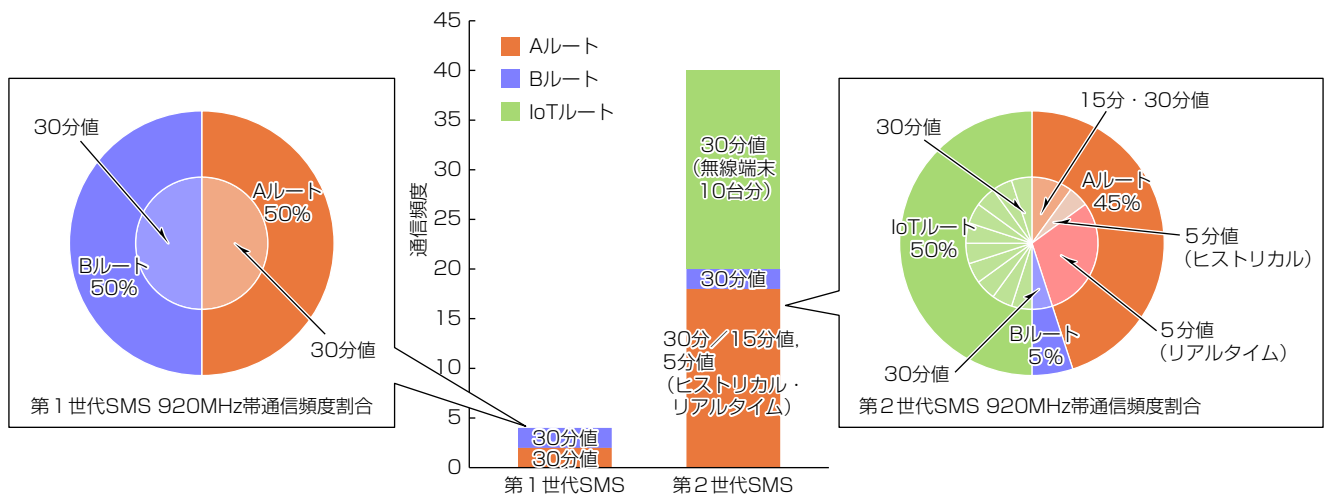


図3-第1世代及び第2世代SMSでの通信部1台当たりの920MHz帯通信頻度の比較

第1世代SMSで、当社はAルート(SM~送配電事業者間)に920MHz帯のGFSK(ガウス型周波数偏移変調)方式(100kbps)を適用したが、第2世代SMSでは、OFDM(直交周波数分割多重)方式(300~600kbpsマルチレート)を追加した(図4)。通信速度を上げることで単位時間当たりに送信できるデータ量を増やして、通信時の無線占有時間を減らすことによる通信スループット向上を狙った。

図4のとおり、通信部は第1世代SMSから第2世代SMSへの移行に当たる混在期でもネットワークを維持していく必要がある。混在期でもネットワークを維持できるように、GFSKとOFDMの同時待ち受け及びGFSKとOFDMの選択送信を可能とした。それに加えて、第2世代SMSの通信部間では通信品質が確保できる場合に積極的にOFDMを使用する仕組みを導入し、OFDMの中でも通信速度を300~600kbpsの範囲で可変とする適応変調も適用し、通信の大容量化とスループット向上を実現した。

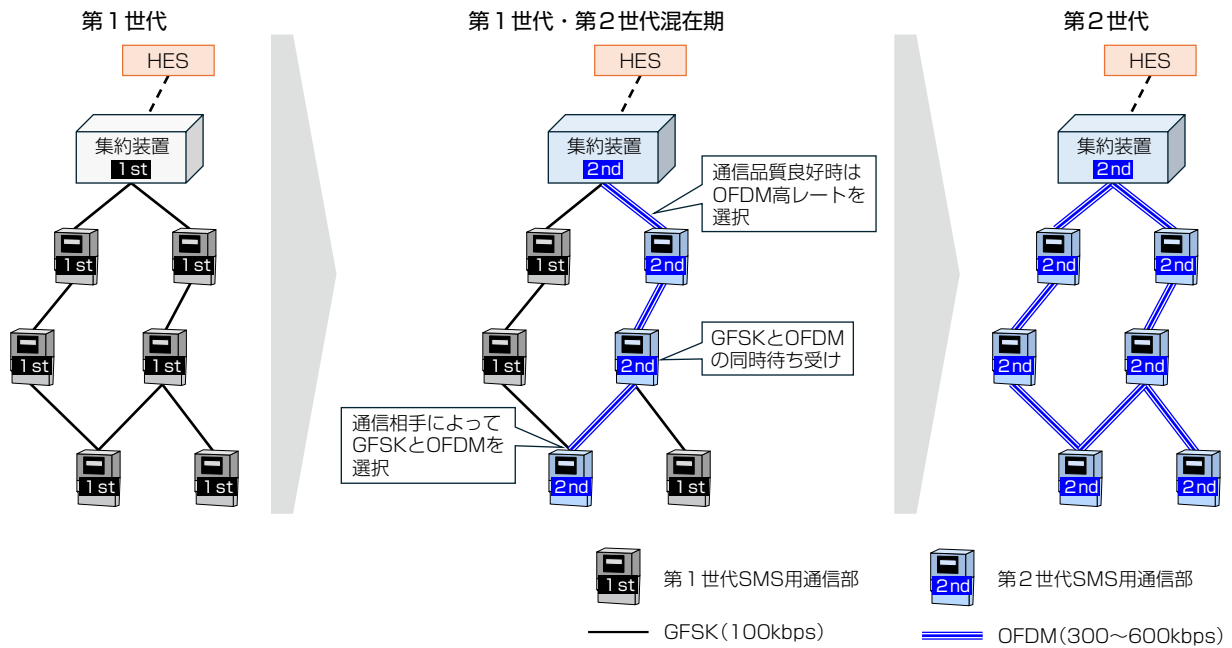


図4-当社の第1世代及び第2世代SMSのネットワーク構成

### 3.2 通信部の高機能化の実現

第2世代SMSでは、再エネ大量導入・脱炭素化及び系統全体の需給安定化を支えるため、Bルートの利便性向上・柔軟性向上を狙ったWi-Fi 2.4GHz(無線)方式や、特例計量器データの活用に向けたIoTルートが追加された。これに伴って、各種ガイドライン<sup>(3)(4)</sup>への対応や接続機器の増加に対応するための通信部の処理性能向上が求められた。

開発時は制度立ち上げの過渡期によって仕様策定と並行して進める必要があったが、チップベンダーを巻き込んだ開発推進や、当社が第1世代SMSで導入したICE無線端末開発の知見を生かして、各種ガイドラインへの対応を実現した。

また、この要件への対応によって、通信部1台当たりに接続する機器数が第1世代SMSと比較して増加(図5)しており、これに対応するため、メモリー・CPUパワーの増強を行った。さらに、ソフトウェア機能の共通化を行うことでソフトウェア処理負荷の低減を図って、多数の機器が接続された状態でも安定動作できるようにした。

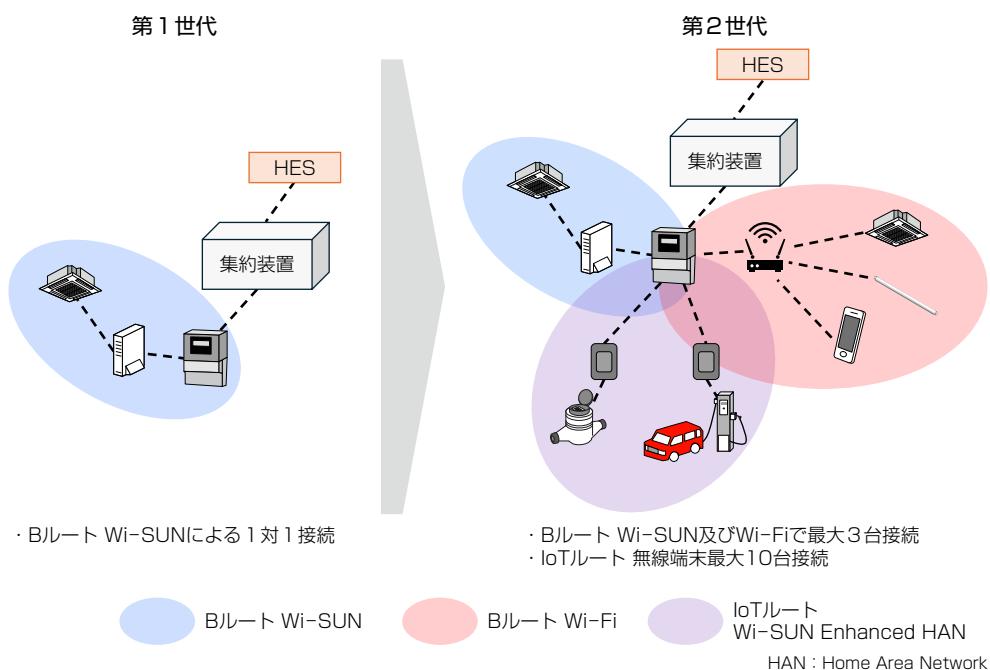


図5-第1世代及び第2世代SMSでの通信部1台当たりの外部機器接続構成の比較

### 3.3 処理データ増大、サービス多様化に対応するシステム拡張性の実現

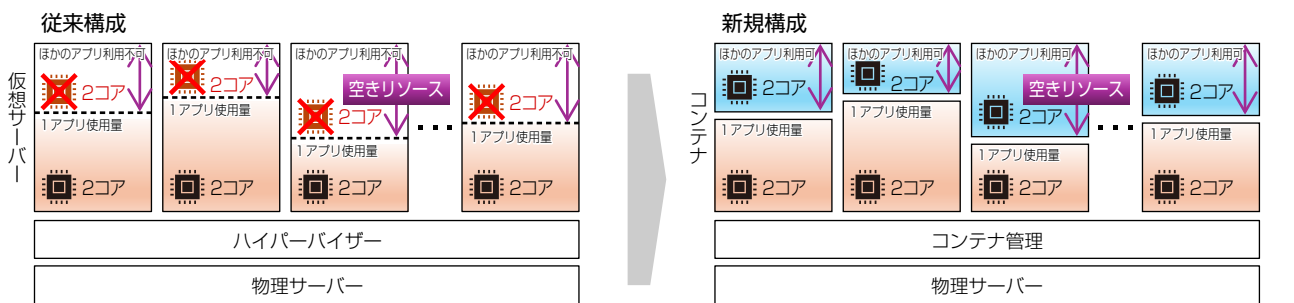
2章に示したレジリエンス強化を目的とした遠隔アンペア制御での大量データ制御、再エネ大量導入・脱炭素化及び系統全体の需給安定化を支える5分値・15分値の高粒度データ取得や特例計量器データ活用、需要家利益の向上のための共同検針をはじめとする将来的なサービス多様化に対応するためには、システムに拡張性を持たせる必要がある。この開発ではHESのアーキテクチャーを刷新し、データベース構成の見直しとコンテナ仮想化技術の導入を実施した。

第2世代SMSに適用されるHESでは、上位システムからの大量制御や高粒度データの追加取得に伴って、処理対象データ量の増大が見込まれる。このため、スケールアウト可能な構成への移行が不可欠であった。従来は、RDB(リレーショナルデータベース)だけで構成していたものを、HESで扱うデータ特性を踏まえて、分散型NoSQL(Not Only Structured Query Language)データベースとRDBを併用する構成とした。これによって、処理負荷を分散し、大量データ処理に最適なデータベース構成とした。NoSQLにはCassandra<sup>(注4)</sup>を採用し、スケールアウトによる容易な拡張性を確保している。

また、従来の物理サーバー及び仮想マシン環境では、アプリケーション(以下“アプリ”という。)がインフラと密結合していたため、サービス拡張への迅速な対応が困難であった。特に、固定的なリソース割当てによって、余剰リソースがあっても、柔軟に活用できない課題があった。これに対して、新アーキテクチャーでは、コンテナ仮想化技術を導入し、アプリの高密度配置と動的なリソース割当てを可能とした(図6)。これによって、リソースの効率的な集約と配分を実現した。さらに、Kubernetes<sup>(注5)</sup>によるオーケストレーションを採用し、障害発生時のコンテナ自動復旧を行うことで、高可用性を確保した。この開発ではHESのアプリを機能部位ごとにコンテナ化し、特定のコンテナを追加・変更することで、部分的な機能追加や変更を容易にしている(図7)。また、オンプレミス環境とクラウド環境の双方に対応し、適用先の要件に合わせて最適な実行環境を選択できる柔軟性を備えた。

(注4) Cassandraは、The Apache Software Foundationの登録商標である。

(注5) Kubernetesは、The Linux Foundationの登録商標である。

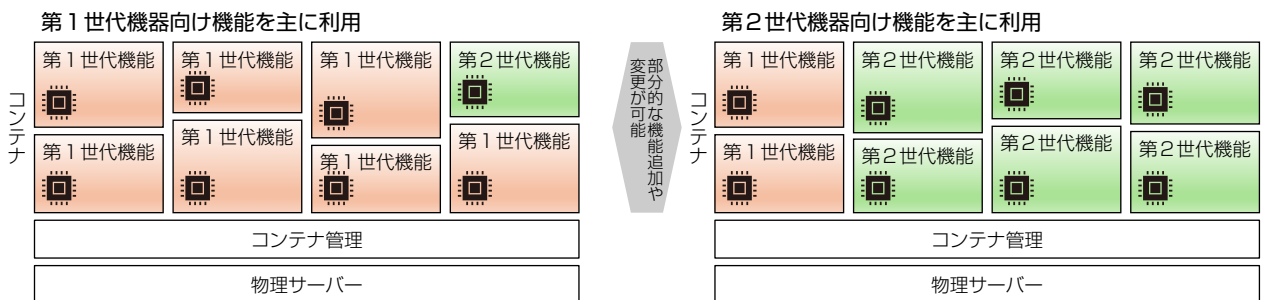


構成例 物理サーバー：48コア、仮想サーバー：4コア×12、一つのアプリのコア使用量：2コア

従来の構成では、空きリソースをほかのアプリで利用できないため、最大で12個のアプリしか同時に動作させることができなかった。

コンテナ化した新しい構成では、空きリソースをほかのアプリで利用可能になるため、最大で24個のアプリが同時に動作可能になった。従来の構成と比較してリソースの利用率が2倍に向上した。

図6-HESの従来のサーバー構成とコンテナ化した新規構成



HESは第1世代機器と第2世代機器を収容し、各世代の機器台数に応じて、対応するアプリのコンテナ数を調整可能

図7-利用機能に合わせたコンテナアプリの配置

## 4. 当社事業領域拡大に向けて

当社は、今後の事業領域拡大を見据えて、第2世代SMSでは、Aルートに複数通信方式対応可能な通信部を開発した<sup>(5)</sup>。従来の集約装置方式は、1台の集約装置配下に多数の通信部を接続できる一方、集約装置のハードウェアが通信部と比較して大型であり、設置場所が制限される。この制約を解消するため、集約装置相当の機能を備えて、1:N無線と920MHz無線マルチホップを併載する複数通信方式を備えた通信部を新たに開発した(図8)。この複数通信方式対応通信部はほかの通信部と同等サイズで、通信部300台の収容が可能である。

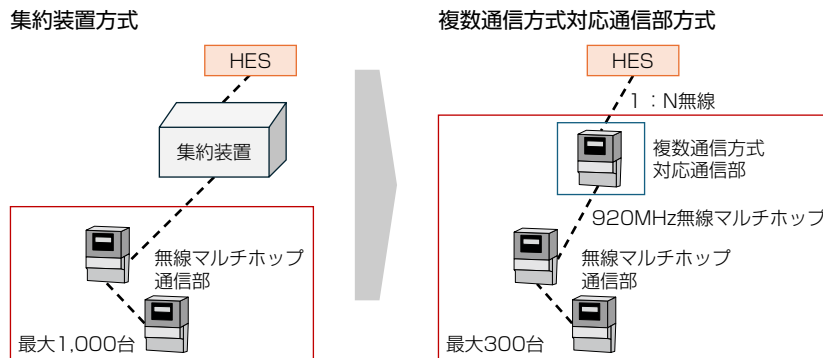


図8-集約装置方式と複数通信方式対応通信部方式

海外展開による事業拡大に向けては、各国の電波法・通信規格に起因する周波数帯の差異、現地通信キャリア仕様の違いや、計量部仕様の差異に対応する必要がある。当社は国内開発との共通化を最大限に図りつつ、差異による変更範囲を最小化する設計思想で開発を実施する。通信仕様の差異については、各国の制度・技術要件に精通する現地ベンダーと、共同で通信部の開発を実施する。計量部仕様の差異については、仕様ごとに計量データ処理機能の分離を行い、仕様変更時の影響範囲を最小化する設計を採用する。これらのアプローチによって、各国の制度・技術要件を満たしつつ、海外市場特有の短納期に対応し、迅速な開発の完遂を目指す。

## 5. む す び

第2世代SMSでは、5分値・15分値の高粒度データ取得、通信方式の追加、共同検針等の高度化要件が追加された。これらを実現するため、当社は、通信の大容量化とスループット向上、通信部の高機能化、HESのアーキテクチャー刷新による拡張性の向上を実施した。今後は、開発した第2世代SMSを提供し、カーボンニュートラル社会の実現に貢献するとともに、これらの技術を生かして海外展開を含む事業領域拡大を進めていく。

## 参 考 文 献

- (1) 経済産業省：次世代スマートメーター制度検討会 取りまとめ (2022)  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/jisedai\\_smart\\_meter/pdf/20220531\\_1.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/jisedai_smart_meter/pdf/20220531_1.pdf)
- (2) 三菱電機：電力ICTソリューション「BLEnDer」  
<https://www.mitsubishielectric.co.jp/ict-power-system/business/solution1/>
- (3) 経済産業省：EMS・アグリゲーションコントローラー スマートメーターBルート(低圧スマート電力量メーター)運用ガイドライン[第5.0版] (2022)  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/jisedai\\_smart\\_meter/pdf/20220531\\_2.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/jisedai_smart_meter/pdf/20220531_2.pdf)
- (4) 経済産業省：特定計量(IoTルート)運用ガイドライン【第1.0版】(2024)  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/jisedai\\_smart\\_meter/pdf/20220531\\_4.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/jisedai_smart_meter/pdf/20220531_4.pdf)
- (5) 深沢翔平, ほか：通信システム、通信端末、通信装置、制御方法、およびプログラム, 特許第7646106号 (2025)

# 電力の安定供給を支える 分散型エネルギーリソース統合基盤

木皿大介\*  
Daisuke Kisara  
石崎 啓\*  
Hiromu Ishizaki  
岡本健太郎\*  
Kentaro Okamoto

Distributed Energy Resource Integration Platform for Ensuring Stable Power Supply

\*電力システム製作所

## 要 旨

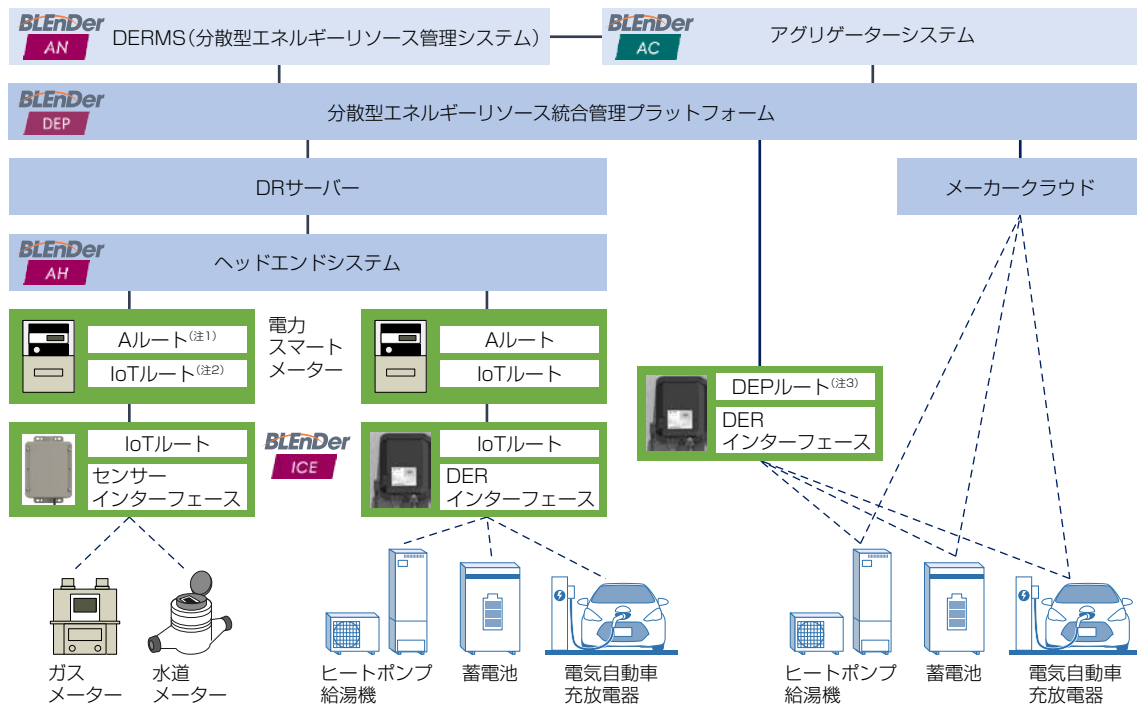
2050年カーボンニュートラル達成に向けて再生可能エネルギーの導入が進む一方、出力変動による電力需給の不安定化が課題である。電力需給の調整力を高めるには、需要側に存在する分散型エネルギーリソース(DER)の有効活用が重要であり、その一手段として需要家機器のDRready対応が求められる。

三菱電機は、スマートメーターのIoT(Internet of Things)ルートに対応した無線端末である“BLENder ICE(Intelligent Communication Edge)”の試作と、DERを統合管理するIoTプラットフォーム“BLENder DEP(Digital Energy Platform)”を開発し、既存インフラを活用した多様なDERの接続及び制御を実現している。今後、膨大なDERの統合監視・制御を通じて、再生可能エネルギーの有効活用と電力需給の安定化に貢献する。

## 1. ま え が き

2050年のカーボンニュートラル達成に向けて、再生可能エネルギーの導入が急速に進んでいる。一方、太陽光発電や風力発電は天候や環境条件に左右されやすく、電力需給の不安定化の要因になっている。そのため、需給バランスを調整する手段の確保が重要な課題である。デマンドレスポンス(DR)は、需要側の電力消費を需給状況に応じて調整する仕組みであり、ピーク負荷の削減や再生可能エネルギー過剰時の需要引上げに有効である。

需要家の持つヒートポンプ給湯機や蓄電池などのDERが遠隔制御によるDRに対応できる状態であることをDRready



(注1) スマートメーターからの計量データを送配電事業者に送るルート  
(注2) 特定計量器・ガスメーター・水道メーターからの検針データをスマートメーターシステムを経由して共同検針するルート  
(注3) 分散電源から収集したデータを送配電事業者に送るルート

AN: Active Network Management, AC: Aggregation Coordinate, AH: Advanced Head-End

図1-DERの遠隔制御を実現するシステム構成

という。DRreadyの普及は、再生可能エネルギー出力抑制の回避による二酸化炭素排出量削減など、社会全体の環境負荷低減に寄与する。しかし、一般家庭や小規模オフィスでのDERは、数は多いが一件当たりの容量が小さく、大規模工場などに比べて活用が十分に進んでいない。これらの低圧需要家のDER活用を進めるには、遠隔制御に必要な通信設備や機器のコストが課題になる。スマートメーターのIoTルートを活用したDRはその解決策の一つである。既存の通信インフラを活用することで低コストでのDERの制御を実現し、従来は経済性の観点から困難であった低圧需要家のDR参加を促進できる<sup>(1)</sup>。

当社は、太陽光発電、蓄電池、EV(Electric Vehicle)充電器、ヒートポンプ給湯機などの多様なDERと接続し、さらにスマートメーターのIoTルートに対応する無線端末BLEnDer ICEを試作した。これによって、既存電力インフラを活用したDERの遠隔制御を実現している。また、多様な接続経路を持つDERを統合管理するIoTプラットフォームBLEnDer DEPを提供し、DER活用基盤の構築を進めている(図1)。

本稿では、電力の安定供給を支えるための当社の取組みを述べる。

## 2. DERのDRready対応

DERのDRready対応としては、上位システムからの“需給調整に対応できる”ことに加えて、実際に機器・システムが指令に応じて信頼性高く動作できる準備状態が定義されている。

国内では資源エネルギー庁／経済産業省の勉強会で蓄電池やヒートポンプ給湯機を対象に次のとおり挙げられている<sup>(2)(3)</sup>。

### (1) 通信接続機能

機器が外部システムと構造化されたデータ形式で通信可能であること。

通信はDRイベントの指令受信と状態送信のための基盤であり、この機能搭載が前提である。

- ・ゲートウェイやアグリゲーターとの通信インターフェースを保有
- ・標準化されたプロトコルを用いた通信が可能(ECHONET Lite<sup>(注4)</sup>など)
- ・機器がサーバーや制御システムと双方向に通信可能

### (2) 外部制御機能

機器本体が外部からの指令に応じて動作制御できること。

- ・アグリゲーターからの制御指令を受信・実行可能
- ・消費電力や充放電量を送信可能
- ・個別機器ごとの識別及び制御対象機器を特定可能
- ・計画的な充放電スケジュールを構築・調整可能

### (3) セキュリティー

通信・制御機能の安全性を確保するためのセキュリティ対策が実装されていること。

DRreadyは外部制御の仕組みであるため、サイバー攻撃や不正制御の対策は必要になる。

- ・認証機能(不正アクセス防止)
- ・通信暗号化
- ・セキュリティ適合性評価・ラベリング基準への準拠(JC-STARなど)

(注4) ECHONET Liteは、エコーネットコンソーシアムの商標である。

## 3. BLEnDer ICE

この章では、BLEnDer ICEの特長や機能について述べる。

### 3.1 BLEnDer ICEの特長

低圧需要家に分散する多数のDERを経済的に遠隔制御する基盤を確立することを目的として、2章で述べた要件のうち通信接続機能及び外部制御機能に着目し、BLEnDer ICEを試作した。BLEnDer ICEは、上位の電力スマートメーターシステムと需要家側のDERやガスメーター、水道メーターなどの機器を接続する装置である。装置内でIoTルートアプリケーション及びDRアプリケーションが動作することでDERの制御及びデータ処理を可能とする構成である(図2)。

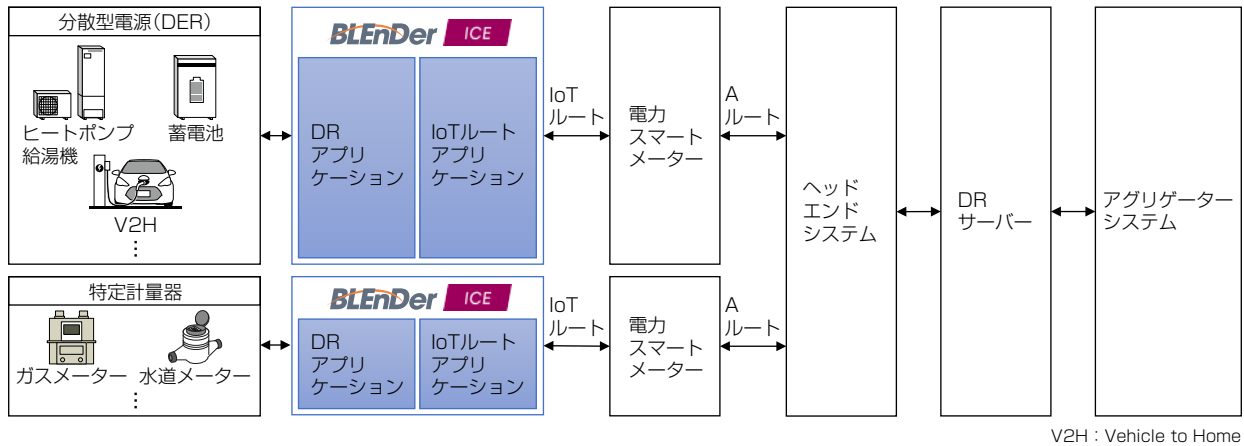


図2-スマートメーターIoTルートを活用したDRの通信構成

V2H : Vehicle to Home

全国に普及しているスマートメーターのIoTルートに対応し、DERやガスメーター、水道メーターと新たな通信インフラを構築することなく広域展開できる点を特長とする。DERとEthernet<sup>(注5)</sup>等の標準インターフェースを介して接続し、ECHONET LiteやModbus<sup>(注6)</sup>など複数のプロトコルに対応することで、多様な機器の計測・制御を統合的に実現する。

(注5) Ethernetは、富士フィルムビジネスイノベーション(株)の登録商標である。

(注6) Modbusは、Schneider Electric USA Inc.の登録商標である。

### 3.2 BLENder ICEの機能

BLENder ICEは、DRサーバーからAルートを經由したIoTルート網によって指令を受信し、IoTルート電文内の独自電文を解釈して対象DERに対してECHONET Liteプロトコルで制御を実行する。

BLENder ICEに実装したソフトウェア機能の概要を次に示す。各機能の①～④の番号は図3に示すソフトウェア構成中のモジュールの番号に対応している。

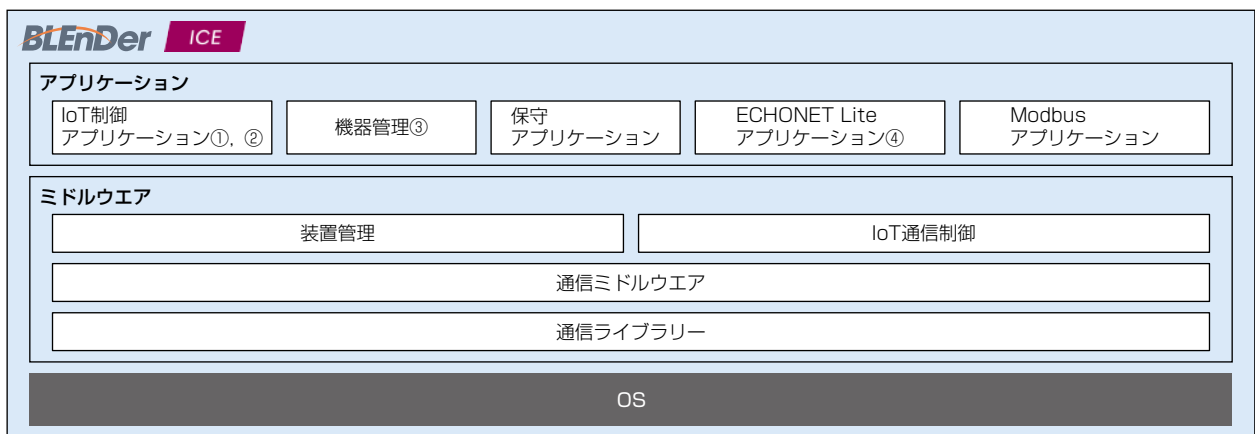


図3-BLENder ICEのソフトウェア構成

#### ①ネットワーク管理

電源投入後、IoTルートを介して電力スマートメーターを探索し、自動的に接続を確立する。その後、制御対象であるDERを探索・接続し、接続したDERの情報を上位のDRサーバーや4章で詳述するBLENder DEPへ通知する。

#### ②収集・制御

上位サーバーから連携された計測・制御指令に基づいて、対象DERのデータ収集及び動作制御を実行する。運用指令に基づく機器動作を担う。

③DER情報通知

DER情報(蓄電池の充電量など)やDER状態(蓄電池の充電・放電状態など)を上位サーバーへ一定周期で通知する。

④アプリケーション連携

接続したDERの設定及び取得可能なECHONET Liteのプロパティ一覧を管理する。上位サーバーからの独自電文を受信したIoTルートアプリケーションとDRアプリケーションが連携し、対象DERのECHONET Liteプロトコルに基づく設定及び取得処理を実行する。

先に述べた機能を持つBLENder ICEの試作及び検証によって、DERの遠隔制御及び計測データのBLENder DEPとの連携が可能であることを確認した。今後は、対応機器の拡充及び標準化動向への適合を進めて、更に広範なDERへの適用と機能高度化を図る。

## 4. BLENder DEP

当社はDERを統合管理するIoTプラットフォームのBLENder DEPを開発している。BLENder DEPは、クラウド上で動作する分散型エネルギーリソース統合管理基盤であり、BLENder ICEと連携してエッジとクラウドの役割分担を実現する。DERからデータを収集・蓄積し、それを活用するための機能を提供するとともに、事業者からの要求に従ってDERを制御する機能を持つ。AWS(Amazon Web Services)<sup>(注7)</sup>上で稼働するマルチテナント(一つのシステムやアプリケーションを複数のユーザーや企業が共有して利用する方式)のサービスであり、当社が開発した需要家のDERを運用するパッケージの“BLENder AC”や再生可能エネルギー・蓄電池を監視・制御するパッケージの“BLENder RE(Renewable Energy)”とともに、複数の事業者にサービス提供を開始している。

スマートメーターのIoTルートを活用したDRの検討が進む中で、BLENder DEPはこのIoTルートを活用したDRにも対応していく。BLENder DEPはメーカークラウド、IoTルートなど多様な接続経路が存在するDERを統合監視・制御することを志向している。次にBLENder DEPの最新の開発状況について述べる。

(注7) AWS, Amazon Web Servicesは, Amazon. com, Inc.の登録商標である。

### 4.1 BLENder DEPの機能要件

BLENder DEPの機能要件には、デバイス接続、データ収集・管理、データ可視化・分析、デバイス制御、アプリケーション連携などがある(図4)。この節では、これらの要件のうち、デバイス接続に関する開発状況を述べる。

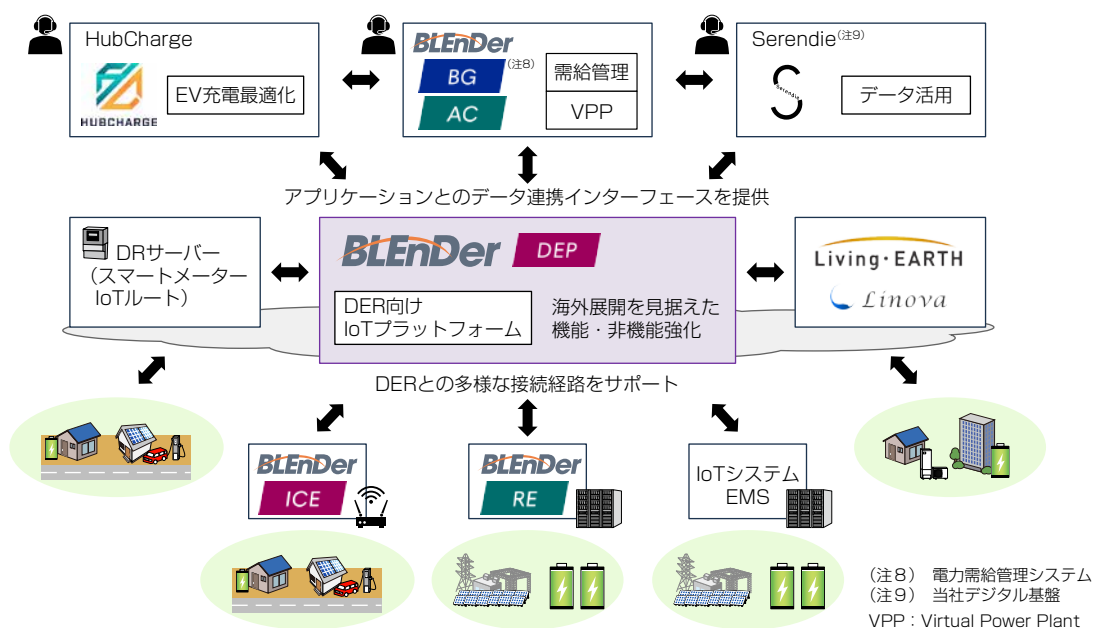


図4-BLENder DEPによるDER接続とアプリケーション連携

DERと接続する際の通信プロトコルは様々なものが存在する。日本の家庭用機器に普及するECHONET Lite、産業用機器のデファクトスタンダードであるModbus、EV充電器の国際標準であるOCPP(Open Charge Point Protocol)、家庭用機器の新たな国際標準であるMatterなどがある。BLEnDer DEPは以前からサポートするECHONET Lite、Modbusに加えてOCPPのサポートも進めており、当社のモビリティソリューション事業推進部で開発するEV充電最適化ソリューション“HubCharge”と連携してEV充電器を制御する技術検証を実施している。また、今後急速な普及が予想されるMatterのサポートも検討している。これらは当社が開発するゲートウェイであるBLEnDer ICEなどを介して接続する。

DERとの接続では、先に述べたようにゲートウェイを新規設置するのではなく、DERと通信可能な既設のIoTシステムやEMS(エネルギーマネジメントシステム)と連携して接続できることも多い。BLEnDer DEPではこれらのIoTシステムやEMSとの連携も進めており、当社が提供する標準インターフェース又は他社が提供するインターフェースを活用して連携する。過去には、主に蓄電池を中心に複数の他社IoTシステム、他社EMSと連携して制御を実現している。当社のIoT・ライフソリューション新事業推進センターで開発する法人向けエネルギー制御システム“Living・EARTH”とも連携し、DERを制御する技術検証を実施している。また、スマートメーターのIoTルートで接続されるDERはDRサーバーと呼ばれるシステムに集約される予定だが、BLEnDer DEPはDRサーバーと連携したDERの制御も視野に入れている。DRサーバーと連携することで従来は経済性の観点で困難であった低圧需要家が所有するDERの活用にも貢献する。

## 4.2 BLEnDer DEPの非機能要件

BLEnDer DEPの非機能要件には、可用性、性能・拡張性、運用・保守性、セキュリティ、移行性などがある。BLEnDer DEPは海外展開を見据えて非機能要件の見直しを進めており、特に性能・拡張性とセキュリティに関して海外の動向とともに開発状況を述べる。

米国では連邦エネルギー規制当局(FERC)によってFERC Order 2222が発令されている。単体では小規模だが大量に存在するDERを束ねて卸電力市場に参加できることをISO(Independent System Operator)／RTO(Regional Transmission Organization)に義務付けた制度であり、DERの導入・活用は今後更に加速すると考えられる。性能・拡張性という観点では数百万～一千万台規模のDERが管理対象になることが想定されるため、BLEnDer DEPはシステムアーキテクチャーの検討に着手しており、その方向性は次のとおりである。

- (1) データ管理 : 従来のRDB(Relational DataBase)に加えて、時系列データ向けにNoSQL(Not Only Structured Query Language)を検証
- (2) アプリケーション連携 : 従来のWeb API(Application Programming Interface)に加えて、オブジェクトストレージを活用したファイルベースの連携を検証
- (3) データ収集 : 大量デバイスの接続やデータ収集は外部パッケージを活用して開発を効率化
- (4) マイクロサービス : データ収集、集計、連携など各機能を独立させた構造にすることで拡張性を担保

現在は要素技術の検証段階であるが、実現の見込みが立ち次第、商用システムへの段階的な適用を進めて、最終的に数百万台規模に対応可能なシステムへと進化させる。

海外展開ではセキュリティの観点も重要になる。特に欧州ではCRA(Cyber Resilience Act : EU(European Union)サイバーレジリエンス法)と呼ばれる製品セキュリティ規制が発行されており、製品を提供するメーカーに対して製品のライフサイクル全体を通じたセキュリティ要件適合や脆弱(ぜいじゃく)性・インシデント報告が要求されている。2026年9月11日から脆弱性・インシデントの報告義務が開始し、2027年12月11日から全ての製品でCRAへの完全準拠が必要になる。BLEnDer DEPでは、CRAのセキュリティ要件に適合するため、CRAに加えて制御システムセキュリティの標準規格IEC 62443も参考にしたリスク分析やセキュリティ設計を進めている。また、脆弱性については複数の脆弱性診断ツールを利用したセキュリティチェックを進めている。これらは開発プロセスの中で継続して実施するが、今後はエビデンスとなる文書の整備や脆弱性・インシデント報告に対応する運用の構築が課題になる。

## 5. む す び

当社は BLEnDer ICE、BLEnDer DEPの開発を通じて、スマートメーターインフラやメーカークラウドを活用したDERの遠隔制御を実現してきた。今後はBLEnDer DEPを中心に機能の高度化を進めて、膨大なDERの統合監視・制御によって再生可能エネルギーの有効活用と電力需給の安定化に貢献する。

## 参考文献

- (1) 林 泰弘：低圧需要家視点での社会インフラの再構築～低圧需要サイドからの「S+3E」にむけて～（2024）  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku\\_gas/denryoku\\_gas/pdf/076\\_05\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/076_05_00.pdf)
- (2) 経済産業省：ヒートポンプ給湯機のDRready要件(案)（2025）  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/dr\\_ready/pdf/004\\_04\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/dr_ready/pdf/004_04_00.pdf)
- (3) 経済産業省：家庭用蓄電池及びハイブリッド給湯機のDRready要件(案)（2025）  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/dr\\_ready/pdf/007\\_03\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/dr_ready/pdf/007_03_00.pdf)



# 電力需給最適化の高度化に向けた取り組み

大山貴央\*  
Takahisa Oyama  
森川史也\*  
Fumiya Morikawa

Efforts to Advance Optimization of Power Supply and Demand

\*電力システム製作所

## 要旨

生成AIの普及に伴うデータセンターの大規模増設や再生可能エネルギー(以下、“再エネ”という。)の大量導入を背景に、電力の需給構造は大きな転換期を迎えている。需給調整市場の前日化や約定ブロックの細分化も進んで、電気事業者(以下、“事業者”という。)には複数市場を横断した高度な需給最適化が不可欠になった。三菱電機は、電力ICT(Information and Communication Technology)ソリューション“BLEnDer”シリーズを活用して、スポット市場・需給調整市場・時間前市場への入札計画での最適化課題を改善した。具体的には、火力発電機の起動停止・出力帯制約や蓄電池の充放電制約、調整力確保制約などを定式化し、電力量と調整力の同時最適化を実現した。併せて、商用ソルバー<sup>(注1)</sup>やAI技術の活用による求解の高速化を推進している。

(注1) 与えられた条件や制約を満たす最適解や解を自動的に探索・計算するソフトウェアやアルゴリズムのこと

## 1. ま え が き

近年、国内の電力需要は構造的な変化の局面を迎えている。総合資源エネルギー調査会をはじめとする各種検討の場でも、生成AIの急速な普及に起因してデータセンター関連の電力需要が今後更に増加し、従来の需要想定を上回る可能性が繰り返し指摘されている<sup>(1)</sup>。それに加えて、半導体工場の国内回帰や電気自動車(EV)の普及拡大も、中長期的な電力需要の押し上げ要因として注視されている。

一方、供給側では、2050年カーボンニュートラルの実現に向けた再エネの大量導入が進展している。2025年2月に閣議決定された第七次エネルギー基本計画では、2040年度の電源構成で再エネの比率を4～5割程度とする方針が示されており<sup>(2)</sup>、太陽光発電の累積導入量は80GWに達しつつある<sup>(3)</sup>。風力発電についても洋上風力を中心に大規模な開発計画が進行中である<sup>(4)</sup>。しかしながら、再エネの出力は天候に左右される変動電源であるため、その導入拡大に比例して電力の需給調整必要量も増大している。この調整力を確保するため、系統用蓄電池やVPP(Virtual Power Plant：仮想発電所)、DR(Demand Response)対応の需要家機器など、新たな電源リソースの導入が急速に進んでいる。

こうしたリソースの多様化は、事業者が管理すべき対象の増大と業務の複雑化を意味する。従来の火力発電所と揚水発電所を中心とした運用計画に加えて、蓄電池の充放電管理、VPPを構成する分散型リソースの統合制御、さらには複数市場への同時入札戦略の立案が求められるようになり、需給運用業務の範囲と難易度は飛躍的に拡大している。

### 1.1 市場制度の変革

制度面でも、電力市場は大きな変化の渦中にある。主に電力量(kWh)価値を扱うJEPX(日本卸電力取引所)に加えて、調整力( $\Delta$ kW)価値を扱う需給調整市場が2021年4月に“三次調整力②(GC(ゲートクローズ)までの再エネ予測誤差に対応する調整力)”の取引を開始し、以降段階的に商品ラインアップを拡充してきた。さらに2026年3月から、それまで週間市場かつ約定ブロックが3時間単位であった商品の取引スケジュールや入札時間単位が見直されて、全商品が前日市場、かつ約定ブロック30分単位になった。この制度変更は事業者にとって入札機会の増加と戦略的自由度の向上をもたらす一方で、意思決定の頻度と計算負荷を飛躍的に増大させた。

なお、需給運用業務は本来、年間の燃料調達計画から月間・週間の発電計画、翌々日計画、翌日計画、当日運用に至るまで多層的な時間軸で構成される。本稿では、このうち翌日計画以降の短期需給最適化、すなわちスポット市場・需給調整市場・時間前市場への入札計画の最適化を主な対象として述べる(表1)。具体的には、事業者は表1に示される市場を時系列に沿って横断的に活用する必要がある。どの市場にどれだけの電力量・調整力を配分するかは、市場価格の見通しや自社リソースの特性に依存する戦略的判断であり、事業収益を左右する重要な経営課題になっている。

表1-前日・当日業務に関わる電力市場と役割

|   | 市場     | 入札締切時刻    | 取引価値  | 役割                              |
|---|--------|-----------|-------|---------------------------------|
| ① | スポット市場 | 実需給前日10時  | kWh価値 | 前日に作成した需給計画を基に電力を取引する。          |
| ② | 需給調整市場 | 実需給前日14時  | ΔkW価値 | システムの安定運用に必要な調整力を一般送配電事業者に提供する。 |
| ③ | 時間前市場  | 実需給開始1時間前 | kWh価値 | スポット市場約定後に予実の差分を埋めるための電力を売買する。  |

## 1.2 市場制度変革に対応した当社の取組み

2016年4月の電力小売全面自由化以降、発電事業者・小売電気事業者間の競争が本格化し、アグリゲーターやVPP事業者など新たなプレーヤーも参入している。各事業者が保有・運用するリソースの構成は多種多様であり、従来の最適化手法では対応しきれない状況が生じている。

このような背景の下、当社は需給管理ソリューションとしてBLENderシリーズの機能拡充と、商用ソルバーやAI技術を活用した次世代の需給最適化基盤の開発に取り組んでいる。2章以降では、現行システムの概要と、今後対応すべき最適化課題、及びその解決に向けた技術的アプローチについて述べる。

## 2. 電力需給管理ソリューションBLENderの概要

当社は、電力自由化の進展に対応した需給管理ソリューションとしてBLENderシリーズを開発・提供している。

“BLENder BG(Balancing Group)パッケージ製品群”は、BG向けの需給管理システムである(図1)。需要予測から発電計画の策定、各市場への入札、計画値同時同量の管理、インバランスリスクの監視までを一貫して支援する。複数の発電所や需要家を束ねたBG全体の需給バランスを可視化し、経済的に最適な運用計画を立案する機能を備えている。

BLENder BGのうち“BLENder PM(Portfolio Manager)”は、主に発電事業者向けの需給計画システムである(図1)。火力・水力・揚水・再エネなど異なる特性を持つ複数電源の運用計画を統合的に最適化し、燃料調達計画や市場取引戦略と連動した短期から中長期の需給計画を支援する。

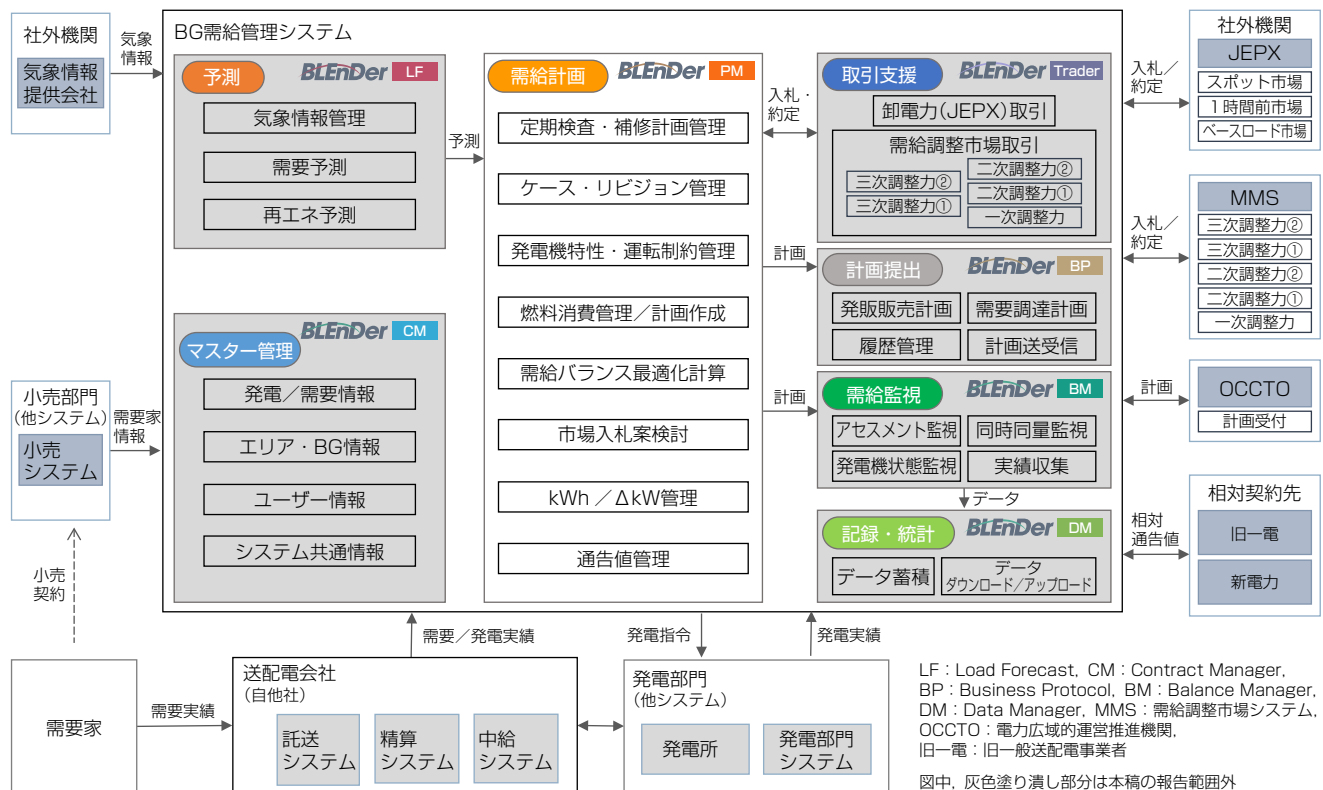


図1 - BLENder BGパッケージ製品群の構成図

当社は20年以上にわたって本領域のドメイン知識を生かした独自の最適化手法の開発を進めて、事業者の需給運用業務を効果的に支援してきた。しかしながら、1章で述べたリソースの多様化、市場制度の複雑化といった環境変化によっ

て、最適化計算の問題規模は急速に拡大しており、従来の機能だけでは十分に対応しきれない領域が生じつつある。3章以降では、今後の需給最適化で考慮すべき制約条件と、その解決に向けた技術的取組みについて詳述する。

### 3. 需給最適化での制約条件の体系

需給計画の最適化問題は、多種多様な制約条件の下で目的関数(主に収益)を最大化する数理計画問題として定式化される。また、事業者ごとに保有リソースの構成が異なるため、制約条件の組合せや重み付けも多様である。このことが、特定の電源構成に依存しない汎用的な最適化エンジンの必要性を示唆している。

この章では、まず最適化の目標になる目的関数を示して、続いて主要な制約条件を平易な数式表現を用いて述べる。

#### 3.1 目的関数

需給最適化の目的関数は、卸電力市場(スポット市場・時間前市場)、需給調整市場との取引で得られる収入と支出の差分から発電機のコストを差し引いた値で、次の数式で表される。

$$\begin{aligned} & \text{Maximize (演算対象時間内の収益)} \\ & = \sum_{t=1}^{t_{end}} (\text{卸電力市場収入}_t + \text{需給調整市場収入}_t - \text{燃料費}_t - \text{起動費}_t - \text{卸電力市場支出}_t) \end{aligned}$$

#### 3.2 需給バランス制約

電力システムの安定運用の大前提として、次式のとおり、各時間帯で供給量と需要量が一致しなければならない。

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{N_{gen}} \text{発電機出力}_i + \sum_{j=1}^{N_{pump}} \text{揚水発電機出力}_j + \sum_{k=1}^{N_{bat}} \text{蓄電池放電量}_k + \text{再エネ発電量(合算)} + \text{卸電力市場購入量} \\ & = \text{需要量} + \text{卸電力市場販売量} + \sum_{j=1}^{N_{pump}} \text{揚水発電機動力}_j + \sum_{k=1}^{N_{bat}} \text{蓄電池充電量}_k \end{aligned}$$

ここで、 $N_{gen}$ は発電機数、 $N_{pump}$ はこのうちの揚水発電機数、 $N_{bat}$ は蓄電池数を表す。この制約は演算対象時間内の全ての時間帯(1日であれば、48コマ)で成立する必要がある。

#### 3.3 火力発電の運転制約

火力発電機には、機械的・熱的な制約から複数の運転条件が課される。

##### (1) 出力上下限制約

各発電機は、機器の安全運転上、定められた最低出力以上かつ最大出力以下の範囲で運転しなければならない。

$$\text{最低出力} \leq \text{発電出力} \leq \text{最大出力}$$

##### (2) 出力帯(バンド)制約

各発電機は異なる複数の出力バンドを持ち、これらはそれぞれ燃焼効率などの運転特性が異なる。出力バンド間の遷移時は、一定時間発電出力を保持する運転制約が課される。

##### (3) 出力変化速度制約(ランプレート)

$$|\text{発電出力}_{i,t} - \text{発電出力}_{i,t-1}| \leq \text{最大変化速度}_i$$

##### (4) 最小運転時間・最小停止時間制約

$$\text{起動後の連続運転時間} \geq \text{最小運転時間}_i, \quad \text{停止後の連続停止時間} \geq \text{最小停止時間}_i$$

これらの制約は、発電機の起動停止計画と密接に関連し、整数変数(0/1)を含む混合整数計画問題としての定式化が必要になる。

#### 3.4 揚水発電の貯水池制約

揚水発電所は、上部貯水池と下部貯水池の間で水を循環させることによって、電力の貯蔵と放出を行う。発電時の貯水池の容量には物理的な上下限があり、計画期間を通じて次の制約を満たす必要がある。

$$\text{最低貯水量} \leq \text{初期貯水量} + \sum_{i=1}^t (\text{揚水量}_i - \text{発電放水量}_i) \leq \text{最大貯水量}$$

また、計画期間の終端での貯水量を指定値に戻す終端水位制約や、複数の発電所が河川の上流・下流に連なる水系制約（カスケード制約）も考慮が必要である。

### 3.5 蓄電池の充放電制約

系統用蓄電池は、揚水発電と類似した充放電の制約を持つが、応答速度が速く調整力としての価値が高いため、次の制約を満たす必要がある。

$$\begin{aligned} \text{最小蓄電容量} &\leq \text{蓄電残量}_{i-1} + \text{充電量}_i \times \text{充電効率} - \text{放電量}_i \leq \text{最大蓄電容量} \\ \text{充電出力} &\leq \text{最大充電レート} \quad \text{放電出力} \leq \text{最大放電レート} \end{aligned}$$

蓄電池の劣化を考慮したサイクル数制約や、充放電効率の非線形性なども、精緻なモデル化では重要な要素になる。蓄電池はスポット市場でのアービトラージ（安価な時間帯に充電し、高価な時間帯に放電して売電する裁定取引）と、需給調整市場での調整力提供の双方に活用できるが、両者は同一の蓄電池容量を共有するため、どちらの用途にどれだけの容量を配分するかという戦略的判断が求められる。

### 3.6 調整力確保制約

需給調整市場への入札に当たっては、各時間帯に必要な調整力（上げ方向・下げ方向）を確保する次の制約が加わる。

$$\begin{aligned} \text{上げ調整力提供可能量}_i &\geq \text{必要上げ調整力}_i \\ \text{下げ調整力提供可能量}_i &\geq \text{必要下げ調整力}_i \end{aligned}$$

調整力の提供可能量は、各電源の運転状態と出力上下限の余裕（マージン）、出力の変化速度から決まるため、電力量の計画と調整力の確保は相互に影響し合う。例えば、ある火力発電機を最大出力で運転すれば電力量としての収益は最大化されるが、上げ方向の調整力余裕は0になる。逆に、出力を抑えて調整力を確保すれば、電力量としての収益機会を逸することになる。この電力量と調整力の同時最適化が、問題の複雑性を大きく増大させる要因の一つである。

## 4. フローネットワークモデルを活用した最適化手法

この章では、フローネットワークモデルを活用した最適化手法について述べる。

### 4.1 問題規模の課題

3章で述べた制約条件を統合し、電力量と調整力を同時に最適化しようとするすると、問題規模は急激に増大する。例えば、30分単位×48コマ×複数リソース×複数市場（スポット・需給調整・時間前）の組合せを考えると、変数の数は容易に数万～数十万のオーダーに達する。さらに、火力発電機の起動停止を表す整数変数が加わることで、混合整数計画問題としての計算困難性が一層増す。これらの課題に加えて、実運用では、スポット市場の入札締切りまでに最適解を得る必要があり、計算時間の制約は極めて厳しい。

### 4.2 フローネットワークによる出力バンドのモデル化

これらの課題に対して、当社ではフローネットワークの枠組みを活用した需給計画手法を開発している<sup>(5)</sup>。

需給調整市場の開設によって、火力発電機の出力バンドを考慮する重要性が高まっている。調整力を落札した場合、送配電事業者の指令に対して定められた応動時間以内に出力を調整する必要があるが、機器の制約上、出力バンドの切替え中は出力を一定時間保持しなければならず、調整力を発動できない。したがって、需給調整市場に入札する時間帯では出力バンドを切り替えない計画を立てる必要がある。

この手法では、従来手法と比較し、起動停止状態と出力バンドの遷移を別々のフローネットワークとして分離・結合する二重構造を構築することで、最適化問題の規模を大幅に縮小し、状態遷移の組合せ爆発を回避している。その結果、計画期間が1週間である比較的大規模な問題を実用的な時間内で解くことが可能になった<sup>(5)</sup>。

シミュレーション評価では、火力発電機3台を対象に週間需給計画を作成し、需給調整市場への入札を考慮することで、スポット市場への入札だけを考慮した場合と比較して収益が4.19%向上する結果を得た。また、需給調整市場へ入札する時間帯では出力バンドを切り替えない計画が得られて、送配電事業者からの調整力発動指令に確実に応じることができる計画の作成が可能であることが確認された<sup>(5)</sup>。この手法によって、事業者が電気のkWh価値（電力量）とΔkW価値（調整

力)を最適に組み合わせて収益を最大化するための計画立案を実現した。

### 4.3 部分問題分解と段階的最適化

全体問題を一括で解くことが計算時間の観点から困難な場合、問題を複数の部分問題に分解して逐次的又は並列的に求解する手法が有効である。例えば、まず、スポット市場向けの電力量計画を最適化し、その結果を前提条件として需給調整市場向けの調整力配分を最適化するという段階的アプローチが考えられる。

実際の市場運用でも、スポット市場の入札締切り後に需給調整市場の入札、さらにその後の時間前市場取引という時系列に沿った段階的な意思決定が求められる。この実運用の時間軸に沿った段階的最適化フレームワークの構築を進めている。各段階で前段の結果を引き継ぎつつ、残された自由度の中で追加的な収益機会を追求する仕組みを実現している。

ただし、段階的アプローチには、前段の意思決定が後段の最適性を制約するという本質的なトレードオフが存在する。このトレードオフを緩和するため、各段階間での情報のフィードバックや、後段の市場価格予測を前段の最適化に反映させるルックアヘッド手法の導入も検討している。

## 5. 商用ソルバーとAI技術の活用

この章では、商用ソルバーとAI技術の活用について述べる。

### 5.1 商用数値最適化ソルバーの活用

4章で述べたフローネットワークモデルや部分問題分解は、問題構造を生かした効率化手法として有効であるが、問題規模の更なる拡大や制約条件の複雑化に対応するためには、高性能な汎用数値最適化ソルバーの活用も重要な選択肢になる。

近年の商用ソルバー(Gurobi Optimizer, CPLEX<sup>(注2)</sup>等)は、混合整数計画問題に対する求解性能が飛躍的に向上しており、数十万変数規模の問題を実用的な時間内で解くことが可能になりつつある。4章で述べたフローネットワークによる週間需給計画でも、Gurobi Optimizerを用いて約6.7万個の離散変数を含む大規模な混合整数計画問題を求解している<sup>(5)</sup>。当社では、これまで長年、独自に開発を進めてきた最適化技術を取り入れたBLEnDerシリーズとこれらの商用ソルバーを連携し、事業者ごとに異なるリソース構成や制約条件に柔軟に対応できる汎用的な最適化サービスの提供を目指している。

具体的には、事業者が持つリソースの情報と制約条件を入力として受け取って、適切な数値モデルを自動生成してソルバーに投入し、最適な運用計画を出力するフレームワークの開発を進めている。これによって、個別の事業者ごとにカスタマイズされた最適化ロジックの開発が不要になり、サービスの展開速度と保守性の向上が期待できる。

(注2) CPLEXは、International Business Machines Corporationの登録商標である。

### 5.2 AI技術の活用可能性

需給最適化の高度化で、AI技術の活用は、今後更に重要性を増すと考えられる。

現時点で特に有望と考えられるのは、需要予測・再エネ出力予測・市場価格予測といった予測領域でのAI活用である。需要・再エネ出力の予測精度向上は、調整力の必要量の見積り精度に直結し、ひいては最適化計算の入力データの品質向上につながる。また、市場価格の予測精度が向上すれば、スポット市場・需給調整市場・時間前市場への入札量の最適化がより精緻なものになる。

さらに、最適化計算そのものへのAI技術の適用も研究が進みつつある分野である。例えば、過去の最適化結果を学習することで良質な初期解を高速に生成する手法や、問題の特徴量から最適なソルバーパラメーターを自動選択する手法などが学術的に提案されている<sup>(6)(7)</sup>。これらの技術が実用レベルに達すれば、大規模な混合整数計画問題の求解時間を大幅に短縮できる可能性がある。

当社としても、予測技術と最適化技術を統合的に扱うことで需給運用全体の高度化を図るとともに、最適化計算の高度化に資するAI技術の研究動向を注視し、BLEnDerシリーズへの適用を検討していく。

### 5.3 市場間の戦略的配分と蓄電池運用の最適化

複数市場の並存は、事業者に新たな収益機会をもたらす一方で、市場間の配分戦略という従来にない意思決定課題を生じさせている。

蓄電池を例にとると、スポット市場でのアービトラージ、需給調整市場での調整力提供どちらの市場に参加するのが最経済となるかを考慮して、蓄電池の充放電を最適化する必要がある。この判断は、市場価格の不確実性の下で行われるため、確定的な最適化だけでなく、シナリオ分析やロバスト最適化の手法も有効になり得る。

火力発電機についても同様の課題がある。出力帯の余裕を調整力として需給調整市場に提供するか、その分の出力をスポット市場での販売に充てるかは、両市場の価格関係に依存する。4章で述べたフローネットワークモデルによるシミュレーション評価では、スポット市場価格と需給調整市場の価格差が小さくなる夜間から早朝の時間帯で、燃料費の高いLNG(Liquefied Natural Gas)発電機が需給調整市場に入札する傾向を確認した。また、スポット市場への入札量が多い時間帯では発電機の出力が大きくなるため、自然と下げ方向の調整力が確保できて、下げ調整力の入札量も増加する。このように、フローネットワークモデルはkWh価値とΔkW価値のトレードオフをネットワーク上のフロー配分として統一的に扱えるため、市場間配分の最適化に適した枠組みと言える。

時間前市場(ザラ場方式)については、スポット市場や需給調整市場の約定結果を踏まえた追加的な調整の場として位置付けられる。当日の需給状況や再エネ出力の実績値に基づいて、計画からの乖離(かいり)を時間前市場で補正する(単純な追加調達だけでなく、スポット市場断面で売り入札を行った同量を買い戻すといった戦略を含む)ことで、インバランスリスクの低減と追加的な収益機会の獲得を図ることができる。

## 6. む す び

電力自由化と再生可能エネルギーの大量導入によって、需給運用業務は複数市場を横断した高度な最適化を求められる時代に入った。約定ブロックの細分化、調整力市場の前日化、リソースの多様化といった環境変化は、最適化問題の規模と複雑性を飛躍的に増大させている。

当社は、BLEnDer BG・BLEnDer PMを基盤とした需給管理ソリューションの提供実績を生かしつつ、フローネットワークモデルによる出力バンドの効率的なモデル化と電力量・調整力の同時最適化、商用数値最適化ソルバーとの連携による汎用的な最適化基盤の構築、さらにはAI技術を活用した予測精度の向上に取り組んでいる。

今後は、市場価格の変動が事業収益に与える影響がますます大きくなることが予想される。将来的には、VaR(Value at Risk)等の金融リスク指標を最適化モデルに組み込んで、期待収益の最大化とリスクの抑制を同時に考慮したリスク考慮型最適化への発展も重要な検討課題である。

電力システムの安定供給と経済効率の両立という社会的要請に応えるため、当社は数値最適化技術とAI技術の融合による次世代の需給最適化ソリューションの実現に向けて、引き続き開発を推進していく。

## 参 考 文 献

- (1) 経済産業省：総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会(第62回)GXに向けた取組と省エネ・非化石転換について(2024)  
[https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic\\_policy\\_subcommittee/2024/062/062\\_004.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2024/062/062_004.pdf)
- (2) 経済産業省：第7次エネルギー基本計画(2025)  
[https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic\\_plan/pdf/20250218\\_01.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20250218_01.pdf)
- (3) 公益財団法人 自然エネルギー財団：太陽光発電の動向(2026)  
[https://www.renewable-ei.org/pdfdownload/activities/REI\\_SolarIP\\_202601.pdf](https://www.renewable-ei.org/pdfdownload/activities/REI_SolarIP_202601.pdf)
- (4) 一般社団法人 日本風力発電協会(JWPA)：2024年12月末時点日本の風力発電の累積導入量～累積導入量は5,840.4MW(2,720基)～  
<https://jwpa.jp/information/11062/>
- (5) 内藤健人、ほか：フローネットワークによる出力バンドのモデル化と需給調整市場を考慮した週間需給計画、電気学会誌、142、No.12、583～593(2022)
- (6) Masti, D., et al.: Learning binary warm starts for multiparametric mixed-integer quadratic programming, 18th European Control Conference (ECC), 1494～1499(2019)
- (7) Hosny, A., et al.: Automatic MILP solver configuration by learning problem similarities, Ann Oper Res 339, 909～936(2024)

# 未来の電力需給を支える 統合ソリューション

松村 洪作\*  
Kosaku Matsumura  
高田 一輝\*  
Ikki Takada  
中野 晴也\*  
Seiya Nakano

前田 はるか\*  
Haruka Maeda

\*電力システム製作所

Integrated Solution for Future Power Supply and Demand

## 要 旨

電力業界は、再生可能エネルギー(以下、“再エネ”という。)や蓄電池など分散電源の増加、データセンター需要拡大、新市場制度の導入など、大きな変革期を迎えている。三菱電機の“電力需給ソリューション”(以下、“本ソリューション”という。)は、これらの変化に対応した電気事業者(以下、“事業者”という。)向けのソリューションであり、事業者の持つ電源と需要ポートフォリオを踏まえた収益最大化の実現や、日々の業務自動化・省力化に貢献する。BG(Balancing Group)運用、分散電源管理、蓄電池監視制御などの需給運用システム開発の豊富な実績を生かして、電力業界の変化に柔軟に対応していくことで、持続可能なエネルギー社会の実現に貢献していく。

## 1. ま え が き

近年、電力業界はかつてない変革期を迎えている。第7次エネルギー基本計画では、GX(Green Transformation)やCN(Carbon Neutral)政策の推進<sup>(1)</sup>によって、今後も再エネや蓄電池などの分散電源増加の見通しが示されている<sup>(2)</sup>。また、AIやDX(Digital Transformation)の進展に伴って、データセンター需要の増加が見込まれている<sup>(2)</sup>。こうした電源や需要の変化に加えて、小売電気事業者の供給力確保義務化を目的とした中長期取引市場の整備<sup>(3)</sup>、需給調整市場全商品の前日市場化<sup>(4)</sup>、企業にCO<sub>2</sub>排出量削減義務と過不足分の市場売買を可能とする排出量取引制度の開始<sup>(5)</sup>など、新たな市場制度の導入も進んでおり、様々な事業環境変化に柔軟に対応する必要性が高まっている。

一方、ビジネス機会も増加している。例えば、発電側では系統用蓄電池を活用して、JEPX(日本卸電力取引所)スポット市場でのアービトラージ運用、需給調整市場の調整力供出、容量市場への供給力供出、BG内でのインバランス回避、再エネ併設による出力抑制回避など、複数の収益機会がある。需要側ではBTM(Behind the Meter：需要家側設備)の分散電源活用によるVPP(Virtual Power Plant：仮想発電所)・DR(Demand Response)の複数市場への供出、需要BG内のバランス調整、需要家構内のエネルギーマネジメント活用に加えて、脱炭素ニーズの高い需要家とのオンサイト/オフサイトPPA(Power Purchase Agreement：電力購入契約)や環境価値付電気メニュー契約など、ビジネスモデルは多岐にわたる。

これらの様々な収益機会とビジネスモデルの中で、事業者の収益最大化を支援するのが本ソリューションである。

## 2. 本ソリューションの概要

電力自由化以降、電力は事業者間で市場を介して自由に売買できるようになった。そのため事業者は常に市場価格を予測しながら、収益最大化と損失リスク管理を両立する取引戦略を立案する必要がある。また、電力需給では、時々刻々と変化する需要と供給のバランスを一致させる必要があり、事業者は“計画値同時同量”制度下で30分単位の発電量(販売量)と需要量(調達量)を計画し、実需給断面で計画と実績を一致させる義務を負っている。

近年はこれら一連の業務の中に、1章で述べた、多種多様な電源を複数市場で活用する戦略やPPA・環境価値付メニューに代表されるCN戦略を織り込むことが重要である。

本ソリューションは事業者のポートフォリオに合わせて戦略立案をサポートする最適化計画機能、日々の需給運用業務を省力化するための自動化機能、実需給断面での計画値同時同量を達成するための自動制御機能、運用実績を基に戦略の見直しを行うためのデータ分析機能を提供し、事業者の収益最大化に貢献する。

また、多拠点の再エネと需要を管理し、市場で購入した環境価値トラッキング情報が付与された非化石証書を、再エネ発電地点から需要地点まで割り当てる機能を提供することで、事業者のCN戦略に寄与する。

さらに、長期需給戦略や精算などのバックオフィス系システム、他のアグリゲーターが持つリソースアグリゲートシステム等の外部システムとシームレスな連携を実現する標準API(Application Programming Interface)や将来の新市場制度が事業戦略や業務に与える影響の検証・評価が可能なシミュレーション環境の提供によって、事業者のニーズに幅広く対応する。

## 2.1 本ソリューションの提供価値

当社は事業者向けの業務支援パッケージアプリケーションとして、“BLEnDer”シリーズを20年以上提供している。電力需給運用業務と関連エンティティーの全体像を図1に示す。

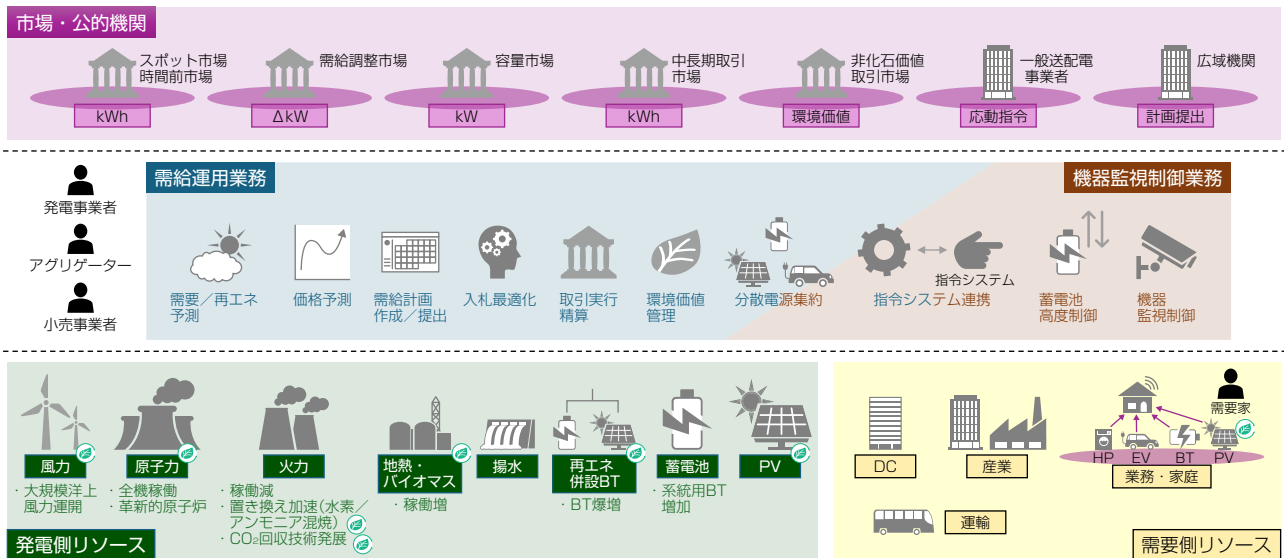


図1-電力需給運用業務と関連エンティティーの全体像

本ソリューションが事業者を提供する価値は大きく次の三つである。

### (1) 戦略立案(需給戦略の立案支援)

従来の大型電源(火力、水力、原子力など)に再エネ、蓄電池、BTMリソースなどの分散電源を加えたBG全体の運用計画最適化による収益最大化を実現する。最適化の際には、再エネ発電量や需要量、各市場の価格など変動要素の予測値と不確実性(予測外れ確率)、運用上下限や出力変化率、最新の制御可能量など電力設備の物理制約、需要家との契約に基づく制約(再エネ比率、相対比率など)を考慮する。またこれらのうち、短時間で変動するデータは定期的に最新値を取得して、計画を更新することで計画精度を維持・向上する。

### (2) 業務自動化(需給業務の効率化支援)

事業者の1日の基本業務には、JEPXのスポット/時間前市場、需給調整市場への複数回入札、約定結果を踏まえた次回以降の再入札や入札取下げ、提出義務のあるOCCTO(電力広域的運営推進機関)への発電販売・需要調達計画の提出業務、計画提出以降に電源トラブルが発生した際の電源差し替え業務など多岐にわたる。また、業務のダブルチェックや人的ミス防止を目的とした承認行為や反復業務(例えば提出漏れ防止のための複数回の計画提出など)を業務に組み込んでいるが、本ソリューションではこれら一連の業務機能を提供することで自動化・省力化が可能になる。

### (3) 自動制御(料金ペナルティーの回避)

実需給断面では計画に合わせたBG内の需給調整に加えて、需給調整市場の約定期間内で送配電事業者から要請があった場合には調整力の供出が必要になり、これらを遵守できない場合はインバランスやアセスメント違反による料金ペナルティーが課せられる。また、複数回違反を繰り返した場合は市場退出になる可能性もある。そのため、事業者にとっては計画を遵守するための監視制御は必須になるが、変動特性の強い再エネ等の分散電源増加に伴って制御の自動化・高度化が必要になる。本ソリューションでは、分散電源を含む複数電源への最適な出力配分や自動追従が可能である。

本ソリューションが事業者提供する価値と機能の関係を表1に示す。

表1-本ソリューションが事業者提供する価値と機能の関係

| No. | 提供価値  | 提供機能                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ①   | 戦略立案  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・需要家、発電所、BG/事業者、OCCTO/送配電事業者のマスターデータを管理。</li> <li>・気象情報等に基づいて、電力需要量、再エネ発電量、市場価格を予測。</li> <li>・各種制約を考慮した需給最適化計算を実行し、需給運用計画を作成。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                |
| ②   | 業務自動化 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・OCCTOのビジネスプロトコルに従って計画を提出。</li> <li>・JEPXや需給調整市場との取引を実施し、取引関連データを蓄積。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                         |
| ③   | 自動制御  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・各リソースの実績値を計測収集、小売BG/発電BGの同時同量監視を実施。</li> <li>・各種実績データ、計画データから記録統計処理を実施。</li> <li>・ローカルEMSに制御指令を連携し、計画値に対する監視と差分補正制御同時同量を実施。</li> <li>・分散電源(小規模リソース)を集約し、VPP単位の取引や群制御を実施。</li> <li>・送配電事業者からの発動要請に基づく制御と応動実績の報告データを連携し、アセスメントI/IIの違反を回避するための追加取引や電源差し替えを実施。</li> <li>・非化石証書の必要量を確認し、非化石証書を買収。需要家との契約内容に合わせて、供給電力に環境価値を割り当てる。</li> </ul> |

EMS : Energy Management System

## 2.2 本ソリューションのシナジー効果

2.1節では事業者提供する三つの価値について述べたが、これらの価値は主に事業者の日々(短期的)の業務に貢献するものである。一方、事業者には短期的なもの以外にも多くの業務がある。例えば、3~5年の中長期的なリスクヘッジを目的とした金融取引(先物取引)による電力調達、機器ベンダーや他事業者を経由した分散電源の新規調達、戦略実行後の分析・評価、戦略に合わせた顧客契約の締結・見直しと契約に基づく毎月の精算業務などである。

本ソリューションでは事業者業務に対する網羅的な価値提供を目指しており、これらの業務を担う外部システムとのシームレスな連携を実現するために、外部公開可能なAPIと連携データを一元的に収容・管理するプラットフォームの開発を進めている。本ソリューションの機能構成と外部連携を図2に示す。事業者は本ソリューションを利用することで、長期から短期まで一貫性のある戦略の立案と実績データの分析・評価、分散電源の調達リードタイム短縮や電源ポートフォリオの拡張、業務のスムーズな統廃合が容易に実現可能になり、更なる事業拡大が可能になる。

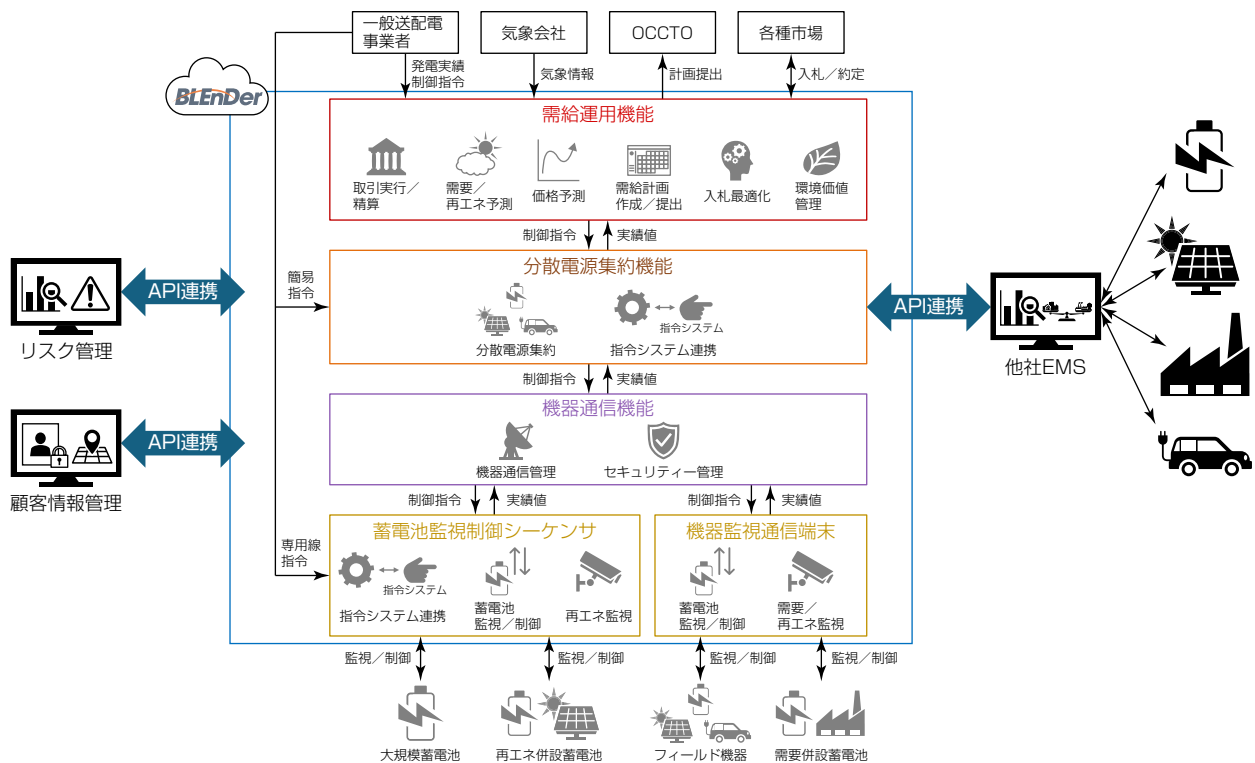


図2-本ソリューションの機能構成と外部連携

### 2.3 事業検証用シミュレーション環境の提供

事業者が新しく事業を開始する場合、投資対効果の評価や業務内容の検討が必要であり、市場の変動性や不確実性が高まる昨今の事業環境で、迅速に仮説検証を行うニーズが高まっている。本ソリューションでは、デジタルツイン技術を活用したシミュレーション環境を2027年度に提供予定である。デジタルツイン上には、当社が開発してきた各種市場シミュレーターや火力・水力・再エネ・蓄電池など電源の模擬環境を配置し、本ソリューションと組み合わせたリアルな事業環境を模擬することで、仮想での取引や業務シミュレーションを可能とする。

デジタルツイン技術を活用した事業検証用シミュレーション環境の全体像を図3に示す。シミュレーション環境は当社のクラウド環境上に構築されて、サービス利用型の提供が可能になる。

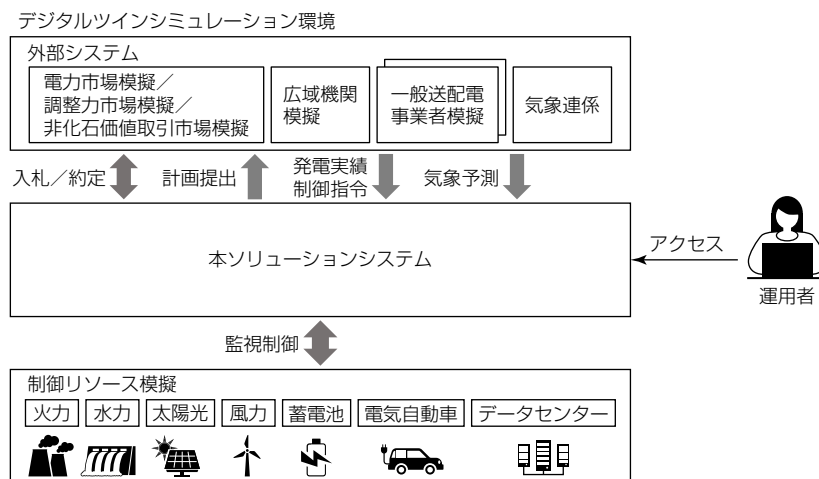


図3-デジタルツイン技術を活用した事業検証用シミュレーション環境の提供

また、この環境には現在検討が進んでいる同時市場の運転開始後の環境模擬や本ソリューションの最新機能を先行でリリースしていくことで、事業者が将来の制度改革に対応した業務検証可能な場や、当社が製品へのフィードバックを提供してもらう場としても活用していく予定である。

## 3. む す び

当社は本ソリューションの提供を通じて、事業者の収益最大化に貢献する。また、単なるシステム提供にとどまらず、同時市場等の制度変化を先取りし、シミュレーション環境を提供することで事業検証を支援する。再エネの大量導入、電力市場の高度化、CN戦略の推進といった潮流の中で、事業者が安定的かつ効率的に運営できるよう支援することで、持続可能なエネルギー社会の実現を支える基盤になることを目指す。

### 参 考 文 献

- (1) 経済産業省：GX(グリーントランスフォーメーション)  
[https://www.meti.go.jp/policy/energy\\_environment/global\\_warming/index.html](https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/index.html)
- (2) 経済産業省：第7次エネルギー基本計画が閣議決定されました  
<https://www.meti.go.jp/press/2024/02/20250218001/20250218001.html>
- (3) 経済産業省：中長期取引市場の整備に向けた検討について(2025)  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku\\_gas/jisedai\\_kiban/system\\_design\\_wg/pdf/005\\_07\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/jisedai_kiban/system_design_wg/pdf/005_07_00.pdf)
- (4) 電力広域的運営推進機関：需給調整市場検討小委員会における議論の方向性と整理(2025)  
[https://www.occto.or.jp/assets/iinkai/jukyuchousei/58/jukyushijyo\\_58\\_sankou\\_01.pdf](https://www.occto.or.jp/assets/iinkai/jukyuchousei/58/jukyushijyo_58_sankou_01.pdf)
- (5) 経済産業省：排出量取引制度  
[https://www.meti.go.jp/policy/energy\\_environment/global\\_warming/ets.html](https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ets.html)

# EV充電最適化ソリューション “HubCharge”の取組み

Initiatives of EV Charging Optimization Solution “HubCharge”

\*モビリティソリューション事業推進部

## 要 旨

カーボンニュートラルの実現に向けた取組みとしてEV(Electric Vehicle)化が世界的に注目・推進されている。特にCO<sub>2</sub>排出量の多いHeavy-Duty Vehicle(HDV)(トラック、バス等)のEV化が求められているが、その際の大きな課題が充電ステーションや高速充電器等の充電インフラの整備と普及である。

そのため、三菱電機ではHDVのEV化促進に貢献するためのソリューションサービスとして“HubCharge”(EV充電最適化ソリューション)を開発するとともに、その導入効果検証シミュレーション環境を構築した。

HubChargeは、HDVの運行スケジュールを順守しつつ、エネルギーコストを低減し、再生可能エネルギー(以下“再エネ”という。)利用を促進するソリューションであり、今後の脱炭素化社会の実現への貢献が期待される。

## 1. ま え が き

HDVのEV化を阻害する主な要因として、①総保有コスト(Total Cost of Ownership : TCO)と②運行オペレーション(エンジン車に比べて航続距離が短く、充電時間が長い)の2点が挙げられる。

①のうち、導入コスト(初期投資)については各国政府や自治体が助成金として支援しているが、運用コスト(電気料金、人件費、車両維持費等)と、②運行オペレーション(航続距離と充電時間)については運輸事業者(以下、“事業者”という)側で解決する必要がある。

HubChargeは、HDVの運行スケジュールを順守しつつ、充電に必要な電力を最適化(電気料金削減、グリーン電力最大活用)するための充電スケジュール・電力需給計画を計算し、そのスケジュールに基づいてEV充電器・電力需給を制御するソリューションである(図1)。これによって、EVの運用コストを抑えつつEVでの運行オペレーションを可能とする。

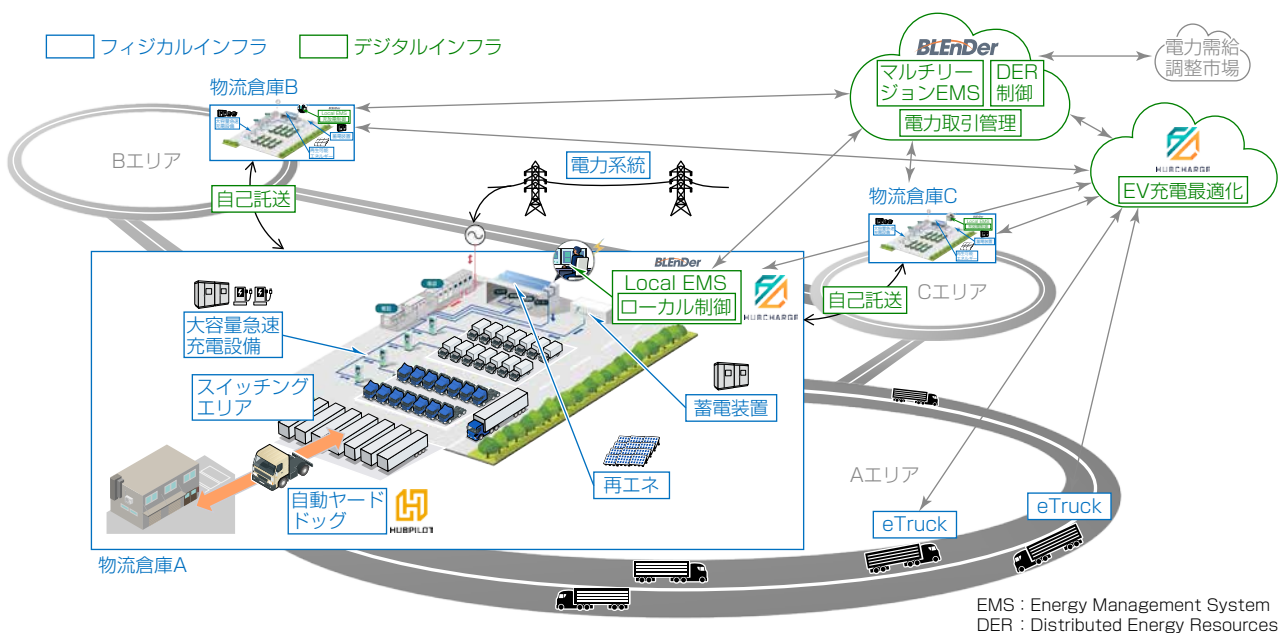


図1 -HubChargeの概要

## 2. 脱炭素化とEV化を取り巻く現状

地球温暖化対策として、脱炭素化に向けた取組みが世界で行われている。特に、エネルギー消費が多い運輸部門では、石油・天然ガスなどの化石燃料への依存度が他産業に比べて多いことから、EV化が積極的に推進されている。

### 2.1 セクター別エネルギー消費と運輸業の状況

世界のセクター別エネルギー消費率及び運輸部門での内訳を図2に示す。全産業のエネルギー消費量のうち、運輸部門の占める割合は28%と、産業部門とほぼ同率を占めている。また、運輸部門ではエネルギー源として石油への依存度が91%と圧倒的に高いことが分かる。さらに、全運輸部門の中で自動車(小型車・大型トラック・バス・二輪・三輪車)によるものが77%を占めていることから、EV化が急務になっている。

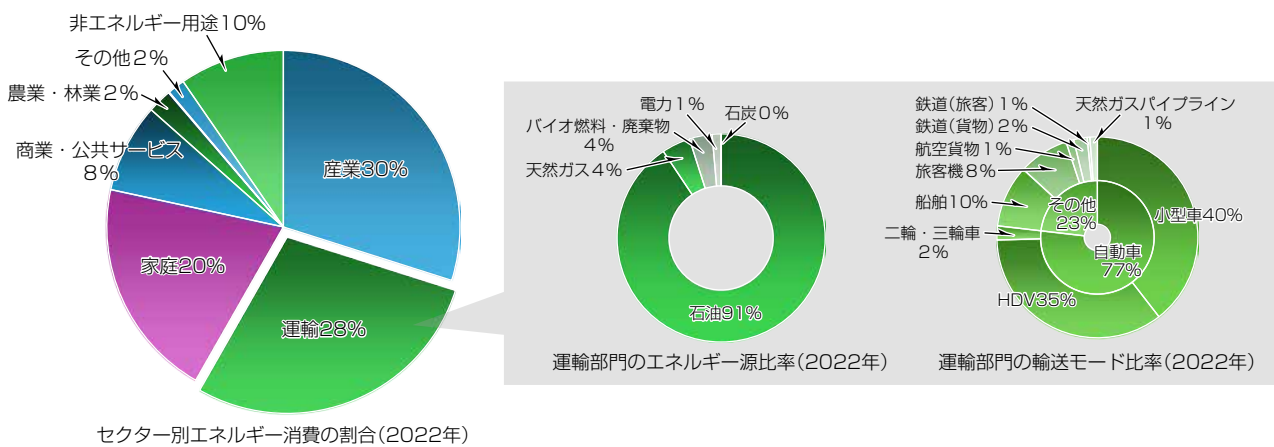


図2-世界のセクター別エネルギー消費率及び運輸部門での内訳(2022年)<sup>(1)(2)</sup>

### 2.2 EV増加に伴う電力系統への影響

EV増加に伴って充電に必要な電力量は急激に増加する。HDVを含む商用車のEV充電電力量は2020年時点の60TWhに対して、2040年では1,411TWhと約24倍になると予測されている(図3)。このため、電力系統に次のような課題をもたらす。

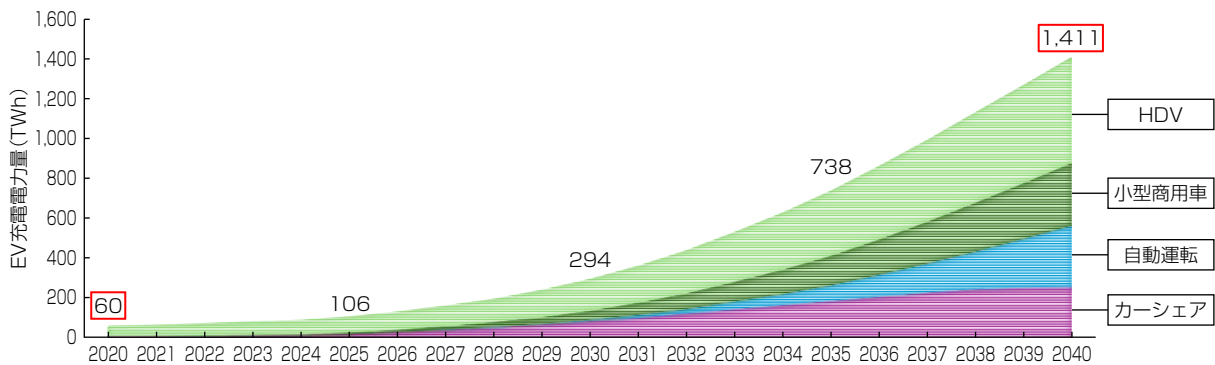


図3-世界のEV充電電力量(商用車)の予測(2020~2040年)<sup>(3)</sup>

(1) 送配電網の容量増強の課題

送配電網の容量は現在でも既にひっ迫しており、EV充電に伴う容量増に対応するためには送配電網の容量増強のために多大なコストが必要になる。

(2) 再エネ活用の課題

EV化の目的がCO<sub>2</sub>排出量の削減であることから、充電に使用する電力も再エネを用いることが求められる。しかし、太陽光発電・風力発電を代表とする再エネは天候や季節による変動が大きく、電力システムの安定性を低下させる。そのため、再エネをEV充電に活用するためには、送配電網の系統強化、需給調整技術の導入、スマートグリッド化などが必要になる。

これらの電力システムの課題によって、EV導入が制限されることが推測される。既に欧州では充電インフラのための電力増強を電力会社に申請してから1～2年以上待たされるケースが発生している。これには世界的な電力トランスの需要急増と原材料不足に伴う供給ひっ迫も影響している。

そのため、EV導入と併せて、充電インフラの電力マネジメントが求められている。




### 3. EV充電最適化ソリューションHubChargeの全体像

当社はこれらの状況を踏まえて、EV充電に伴う電力を最適化することを目的とするEV充電最適化ソリューションHubChargeを開発した。開発に当たっては、欧州側のMitsubishi Electric Europe B.V.(デジタルプラットフォーム開発担当)と、日本側の当社モビリティソリューション事業推進部(スマート充電スケジューラー(Smart Charging Scheduler : SCS)開発担当)及び当社電力システム製作所(当社電力ICT(Information and Communication Technology)ソリューション“BLEnDer”<sup>(4)</sup>開発担当)が連携して取り組んだ。

#### 3.1 HubChargeの概要

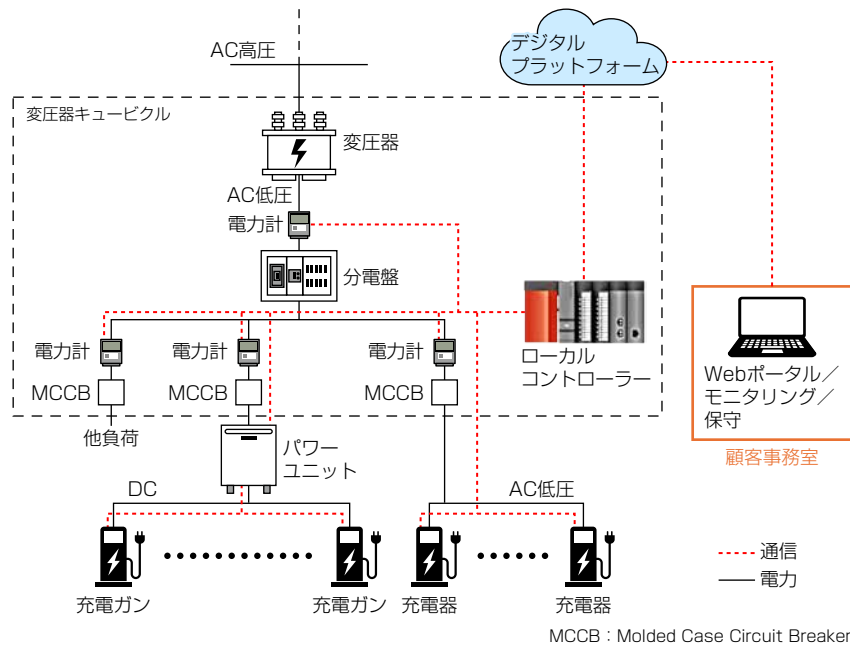
HubChargeは、表1に示すサブシステムで構成される。

表1-HubChargeのサブシステム

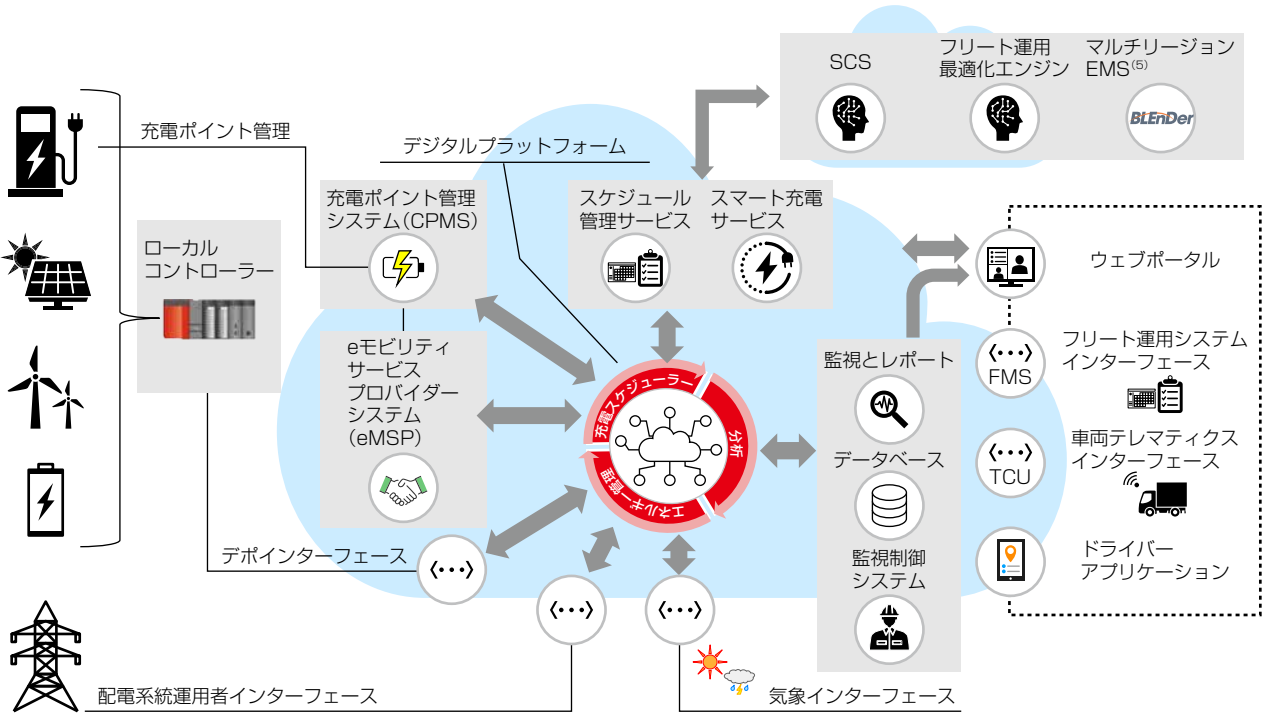
|                                                                                                                           |                                                                                                                                                                    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p><b>HUBCHARGE</b><br/>Essential</p> | <p>HubCharge Essentialは、充電操作を制御・監視する包括的なダッシュボードや、電力消費を完全に制御できるローカル動的負荷管理システム(ローカルコントローラー)など、完全な機能群を提供する。また、コスト効率の高い充電プランを生成する独自のSCSや、補助金報告プラットフォームとの統合も含まれている。</p> |
|  <p><b>HUBCHARGE</b><br/>Fleet</p>     | <p>HubCharge Fleetは、車両テレマティクスデータの統合によって、マルチシフト充電やマルチデポ充電などの高度な機能を備えた大規模な電動車両の管理をサポートする。また、外部パートナー向けに充電インフラへのアクセスを提供し料金請求することも可能である。</p>                            |
|  <p><b>HUBCHARGE</b><br/>Green</p>     | <p>HubCharge Greenには、ネットゼロ目標に向けて進めるための先進的なエネルギー管理システムが含まれている。バッテリーエネルギー貯蔵システムと組み合わせることで、自社の再エネ源を持つメリットを最大限に活用し、新たな収益源化が可能になる。</p>                                  |

#### 3.2 HubChargeの構成

HubChargeの構成例を図4に示す。HubChargeは各デポ(荷物の保管や中継を行う拠点)に設置する充電器(パワーユニット、充電ガン)、受配電設備(変圧器、分電盤等)、ローカルコントローラーなどのハードウェア(図4(a))と、クラウド上に配置したデジタルプラットフォームによるソフトウェア(図4(b))から成る。さらに、クラウド間通信でSCS及びBLEnDerと連携することで、HubChargeの各機能を実現する。



(a) ハードウェア構成



(b) ソフトウェア構成

図4-HubChargeの構成例

#### 4. 統合検証環境の構築

この章では、統合検証環境の構築について述べる。

##### 4.1 SCSの概要

SCSは、HubChargeの充電ソリューションの中核になる充電計画機能を担う。SCSは、HDVのデポへの到着予定時刻やデポからの出発予定時刻、デポでの電気設備構成、電気料金等を基に目標になるHDVの充電量や運用コストの最小化

を制約・目的として最適化問題を解く。これによってHDVに対する最適充電計画を算出する。SCSによって算出した充電計画で充電器を運用することで、事業者は車両の運行オペレーションを守りかつ運用コストを最小化するようデポを管理できる。

## 4.2 統合環境構築

この節では、統合環境を構築する目的やシステム構成、もたらされる効果や今後の取組みについて述べる。

### 4.2.1 構築目的

SCSによる運用コストの削減規模は、事業者が持つ電気設備構成や車両の運行形態に大きく依存する。また、運行オペレーションに対する時間的制約とデポでのピーク需要は相関関係にあり、事業者の重要視する対象によってSCSの算出する充電計画の事業者価値は変化する。事業者の車両電動化を後押しするためには、各事業者の制約や要件に合わせて充電計画を算出及び評価し、さらに車両電動化での導入コスト及び運用コストを算出する必要がある。HubChargeの導入を押し進める上でも、SCSの算出する最適充電計画が特にどのような制約や要件を備える事業者に対して有効かを可視化する必要がある。さらに、その有効性が充電器及びHDV実機と組み合わせて実現できることを、実証や検証を通して示すことが求められる。

これら背景の下、事業者の制約及び要件を基にした充電計画と運用コストの算出、SCSの算出する充電計画の事業者視点での価値定量化、実機を組み合わせた実証及び検証を行うための統合検証環境を構築した。HubChargeは、SCSの提供する充電計画機能以外にデータ管理やデポ監視等の機能を備える。SCSの算出する最適充電計画に特化し、効率的に評価及び検証することを目的に、SCSのソフトウェアだけを対象を絞って検証環境を構築している。

### 4.2.2 システム構成

図5に統合検証環境のシステム構成を示す。動作させるソフトウェアは、運用効率や拡張性を考慮し、パブリッククラウド上に構築している。統合検証環境は、SCSを中心に、充電器・HDV模擬、充電器・HDV実機、ユーザーインターフェースの要素から構成される。

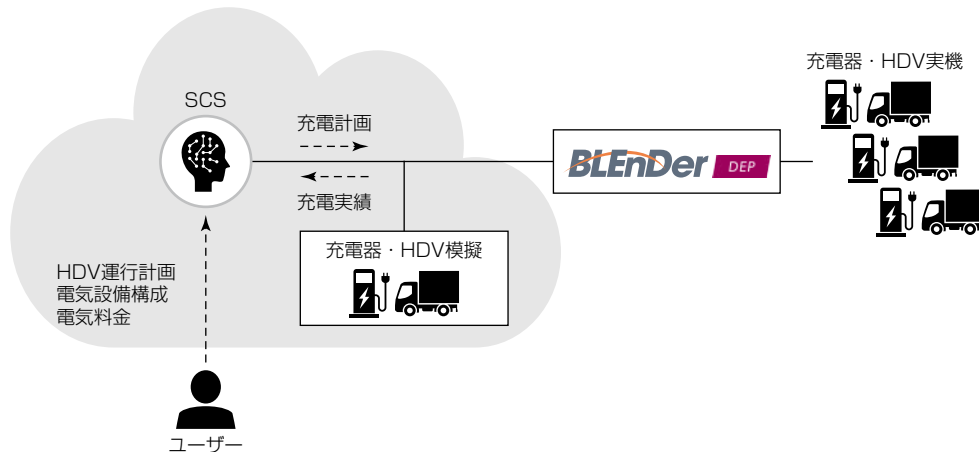


図5-システム構成

充電器・HDV模擬は、運用コストや価値を効率的にシミュレーションするための充電器・HDV実機の模擬である。SCSと同一パブリッククラウド上に展開しており、リアルタイムシミュレーションを可能にする。

充電器・HDV実機は、実際のフィールドでSCSが有効かを実証、検証するために用いる。充電器とは分散電源プラットフォームである“BLEnDer DEP”<sup>(4)</sup>を介して接続する。BLEnDer DEPは、様々な分散電源のプロトコルに対応しており、異なる外部インターフェースを備える充電器とも接続できる。SCSはBLEnDer DEPと共に提供される標準インターフェースで接続することで、充電器ごとの固有のプロトコルを意識せず様々な充電器と接続できる。

ユーザーインターフェースは、SCSの入力データであるHDVの運行計画、電気設備構成、電気料金を入力機能をユーザーに提供する。なお、統合検証環境の特徴として、充電器・HDV模擬と充電器・HDV実機は切り換えることができ、充電器・HDV模擬で用いた入力データをそのまま活用し、実機検証を効率的に進めることができる。

#### 4.2.3 TCO削減効果シミュレーション

SCSは、制約条件を緩和することで充電器接続時点から最大定格電力で充電する場合の充電計画を算出できる。制約条件を緩和する場合(最適充電計画を立てない場合)と緩和しない場合(最適充電計画を立てる場合)の各ケースでシミュレーションを行い、算出された充電計画を比較することで、SCSを用いることによる運用コストの削減幅を算出できる。さらに導入コストを事前に算出し、運用コストと足し合わせることで、TCOを算出し、その削減幅を評価できる。

この環境では、ディーゼルHDV(従来車両)を運用する事業者が持つ車両を電動化することを想定し、①ディーゼルHDV、②電動HDV(公共充電器利用)、③電動HDV(プライベート充電器利用、最適充電計画なし)、④電動HDV(プライベート充電器利用、最適充電計画あり)の四つのケースのTCOを算出できるようにした。図6左は、各ケースでのTCOの算出画面を示す。画面では、①～③と④とを比較し、SCSでHDVを運用する場合のトータルコストが他の三つのケースと比較し、どのタイミングで逆転するかを示すようにしている。この結果は、事業者の投資計画の検討に役立てることができる。図6右は、③と④について充電計画をグラフ表示し、ピーク需要や充電時間がどのように変わるかを視認できるようにしている。



図6-シミュレーション画面

#### 4.2.4 今後の取組み

構築した統合検証環境を用いて、最適充電計画で効果を得られる領域の可視化や事業者ごとの制約及び要件を基にしたTCOシミュレーション、充電器及びHDV実機を組み合わせた実証や検証を進めていく。それと並行して、統合検証環境の高度化を目的に、次の3点の拡張開発に取り組む。

##### (1) 電気設備モデルの精緻化

現状の充電器・HDV模擬はそれぞれの仕様値に基づいている。今後は実機の動作特性を反映したモデルへの調整を行う。また、太陽光発電、定置型蓄電池、及び照明等の一般負荷を含めた包括的なエネルギーマネジメントの模擬へと範囲を拡大する。

##### (2) シナリオの拡充及び最適充電計画ロジックの比較評価

現状は短期間での数パターンでの効果シミュレーションを行っているが、一年を通じた運用スケジュールや将来的な車両台数増加に伴う段階的な設備拡張シナリオなど、より実態に即した長期シミュレーションに対応する。また、充電計画を立てない場合と比較したコスト削減効果の算出に加えて、単純な均等配分によるピークカットを行う簡易ロジックや異なる最適充電計画ロジックとの比較を事業者価値基準に基づいて行う仕組みを構築する。

##### (3) 実機連携検証の拡充

BLEnDer DEPを介した実機接続環境は構築しているが、現状は充電器実機の代わりにサードパーティーの充電器模擬システムと接続している。今後は充電器実機との接続を行い、制御精度や通信遅延の影響検証を行う。

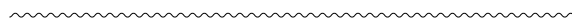
## 5. む す び

脱炭素化やエネルギー問題などの社会課題の解決に当たって、当社が新たに開発したHubCharge及びその効果検証シミュレーションについて述べた。HubChargeによってEV導入が促進され、エネルギーの有効利用やCO<sub>2</sub>削減などの効果が期待できる。

今後、国内外の事業者に向けてHubChargeソリューションを提供していく方針である。これによって世界の脱炭素化・地球温暖化防止に貢献できることを期待している。

## 参 考 文 献

- (1) IEA : Energy Statistics Data Browser License: CC BY 4.0  
<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TESbySource>
- (2) U.S. Energy Information Administration : International Energy Outlook 2023  
<https://www.eia.gov/>
- (3) BloombergNEF Charging Infrastructure Forecast Model (CIFM 6.0.0)
- (4) 三菱電機 電力ICTソリューションパッケージBLEnDer  
<https://www.mitsubishielectric.co.jp/ict-power-system/business/solution1/>
- (5) 三菱電機 マルチリージョンEMS  
<https://www.mitsubishielectric.co.jp/ict-power-system/business/solution7/>



# 浮体式洋上風力向け HVDC変換器システム

灘 香帆\*  
Kaho Nada  
畠尾昌弘\*  
Masahiro Hario  
山中大輔\*  
Daisuke Yamanaka

Floating Offshore Wind HVDC Converter Station

\*系統変電システム製作所

## 要 旨

2050年カーボンニュートラル社会の実現に向けて、大量導入やコスト低減が可能で経済波及効果が期待される、洋上風力発電が再生可能エネルギーの主力電源と考えられている。これまで欧州を中心に洋上風力発電の導入が拡大しているが、洋上で生成された再生可能エネルギーを陸上の需要家エリアまで海底ケーブルを介して送電するために、浮体式洋上プラットフォーム上に高圧直流送電(HVDC(High Voltage DC))用変換器を設置する必要がある。

今回三菱電機は、浮体式洋上プラットフォームへの実装を想定し、HVDC変換器を構成する小型化・低損失化した単位変換器(サブモジュール:SM)の設計・製作とその検証試験及びバルブタワーの設計を実施し、HVDC変換器システムの開発に目途を得た。

## 1. ま え が き

近年、先進各国は、地球温暖化防止に向けてカーボンニュートラルの実現に向けた取組みを進めており、特に発電分野では大型再生可能エネルギー源として主に太陽光発電と風力発電の設置が進んでいる。しかし、陸上では開発可能な地点に限界があるため、洋上を利用した風力発電に期待が寄せられている。特に、欧州では各国の排他的経済水域を活用した洋上風力発電の実用化が既に始まっている。欧州と異なって遠浅海域の少ない日本では、欧州で主流の着床式洋上風力発電設備の建設に適した海域に限られるため、水深源が50mを超えるような海域に展開できる浮体式の洋上風力発電設備が望まれる。洋上の風力発電風車群から遠く離れた陸地までは海底ケーブルで送電することになるが、陸上で一般的な交流送電を海中で適用すると、導体と大地(海水)間でケーブルの絶縁を介して流れる充電電流が大きく、ケーブルの電流容量が制限されて長距離の送電ができない。効率良く海中で長距離送電を行うには、風車から送られてきた交流電力を洋上で集めて一旦直流に変換し、海中を送電した後、陸地で交流に再変換して電力系統に接続するHVDCシステムが必要になる(図1)。このシステムでは風力発電で得られた電力を効率良く交流/直流に変換できるHVDC変換器が、既存系統への接続点となる陸上と風力発電設備近傍の洋上に必要になるが、特に洋上のHVDC変換器は面積の限られた浮体式洋上プラットフォーム上に設置しなければならない。

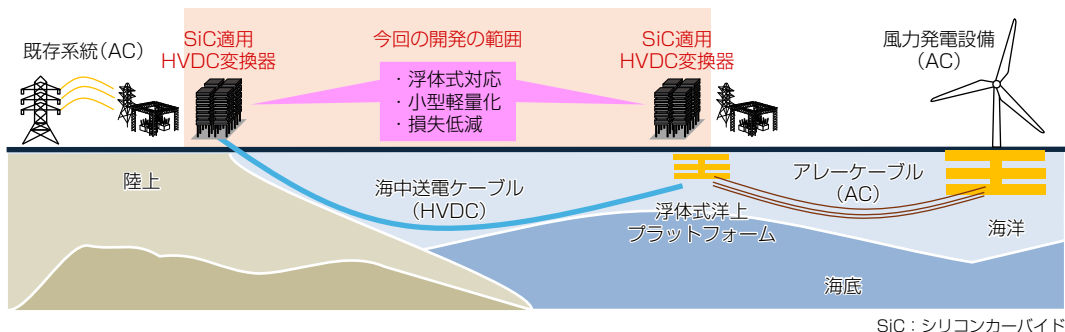
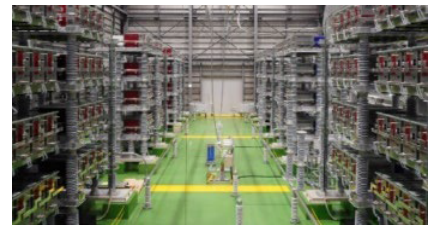
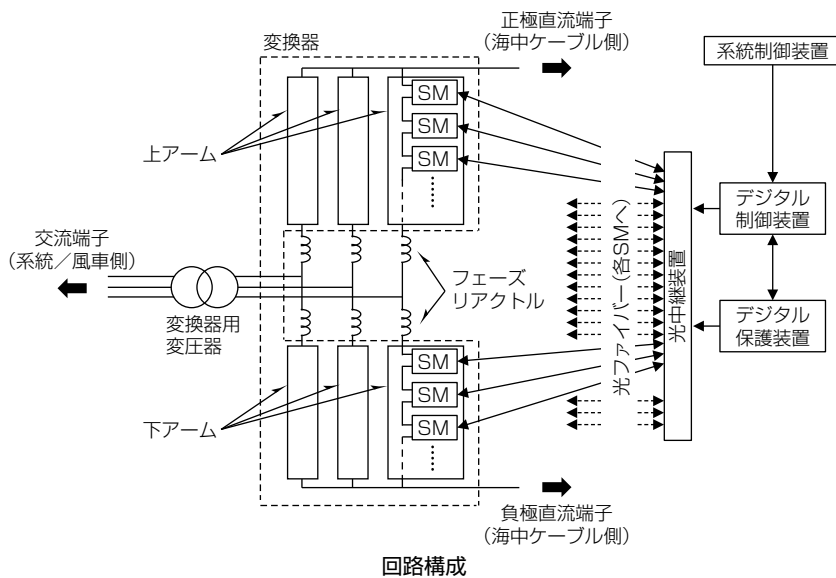


図1-浮体式洋上風力向けHVDC変換器システム

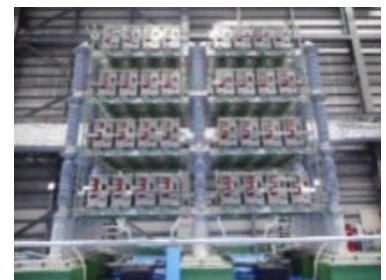
本稿では、当社がカーボンニュートラルへの貢献に向けて浮体式洋上風力向けHVDC変換器システム用に開発したSiCパワー半導体採用の小型で低損失なSMについて、その適用技術と検証試験結果を述べる。

## 2. HVDC変換器のシステム構成

洋上風力発電設備は1GW程度の容量があり、直流側端子で $\pm 250\text{kV}/2,000\text{A}$ 、変圧器の変換器側で交流 $250\text{kV}/2,300\text{A}$ 程度の電圧/電流を制御できる自励式の変換器として、モジュラーマルチレベルコンバーター(MMC)型HVDC変換器が採用されている。MMC型HVDC変換器システムは図2左に示すとおり、変換器用三相変圧器1台と変換器を構成する各相の上下アーム3対の合計6アーム、及び各アームを制御するデジタル制御装置と変換器を保護するデジタル保護装置から構成されている。デジタル制御装置とデジタル保護装置は光中継装置を介して光ファイバーによって各SMと結ばれている。回路はフェーズリアクトルとアーム中の数百台規模のSMが直列に接続された構成(図2左)であるが、物理的にはSMを40~60台ごとにまとめて対地絶縁したバルブタワー(図2右下)(詳細は3.3節を参照されたい。)に搭載する構成になっている。変換器容量に応じてバルブタワー台数が異なるが、変換器システム全体としては、絶縁距離を含めて10m四方で高さ20m近いバルブタワーを多数並べる必要があり、バルブホール(図2右上)と呼ばれるサッカーグラウンドにも匹敵する巨大な構造物になる。



バルブタワーの並んだバルブホールの例  
(4SM×2列×4段/バルブタワー)



バルブタワー

図2-MMC型HVDC変換器システム

## 3. SMの開発

この章では、SMの開発について述べる。

### 3.1 SMの小型化・低損失化

浮体式洋上プラットフォーム上にMMC型HVDC変換器を設置する際、変換器を構成するSMのサイズの小型化が求められる。従来のSMは半導体素子にSi(シリコン)モジュールを適用したハーフブリッジ構成が一般的であるが、今回の開発では半導体素子のサイズが小さくスイッチング損失が低いパワー半導体で、かつ電力事業以外で使用実績のある当社製SiCパワーモジュールを適用し、ハーフブリッジを上下対称に直列接続したデュアルハーフブリッジ構成として半導体素子部分の小型化を実現するとともに、スイッチング周波数の向上とリップルの削減制御によって構成部品のキャパシタの容量を下げることで、SM体積の低減を実現した。低損失化は、SMの半導体素子にSiCパワーモジュールを適用して半導体損失を低減したことに加えて、SM内の電力給電回路を多段直列接続したDC/DCコンバーター方式として変換効率を向上させたことで実現した。多段直列接続のDC/DCコンバーターは段間の電圧バランスを取るのが難しいという課

題がある。このSMでは電圧調整回路を一つにまとめつつ、各段の電圧バランスを図れるDC/DCコンバーターを開発し、採用したことでその課題を解決している。事故時にSM出力を短絡するバイパススイッチについては、エネルギー密度が高いデュアルハーフブリッジ構成のSMの短絡電流を投入できる小型の真空遮断器を開発し、搭載している。図3に開発したSMの外形を示す。



図3-SMの外形

### 3.2 SMの高機能化

MMC型HVDC変換器システムの保護機能の一つとして、各アームに設けた電流センサーを用いた過電流保護機能がある。従来の過電流保護機能では、一部のSM内やSM間で発生する部分短絡等の過電流は保護できないため、部分短絡等の過電流が発生するとSMが破壊し、復旧までに長期間の運転中止を伴うリスクがあった。そこで、リスク抑制と稼働率の向上を狙って、SM内で短絡検出・保護を行うローカル保護機能を搭載した。4章で述べるSMの検証試験の結果、十分な保護機能を持っていることを確認した。

### 3.3 バルブタワーの設計

バルブタワーはMMC型HVDC変換器システムの構成要素であるSMを複数個搭載して対地絶縁を確保した構造物である(図4)。一般には搭載するSMの数が多い方が空間利用効率が高いが、対地絶縁を確保するためのステーションポストがいしにかかる応力が課題になる。また耐電圧仕様に準拠するために、電界緩和シールドや水冷配管の配線経路、支持構造の最適設計が重要である。さらに、浮体式洋上プラットフォームに設置する場合、陸上に設置する場合と耐振動要求が異なり、波浪による繰り返し振動と傾斜を考慮する必要がある。これらの設計条件を考慮し、直流±320kVのバルブタワーの設計を完了した。詳細は参考文献(1)を参照されたい。

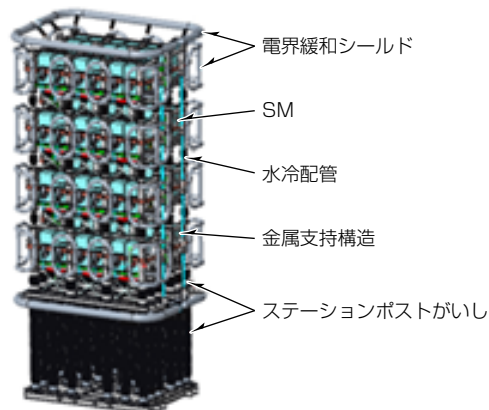


図4-バルブタワーの外形

## 4. SMの検証試験

この章では、SMの検証試験について述べる。

### 4.1 2SM試験

HVDCシステムの電気試験規格であるIEC 62501規格に基づいて、SiCを適用したSMの単体試験を行った。また、複数のSMを接続して試験を行う組合せ試験(Hブリッジ試験)の実施前に、Hブリッジ試験よりも少ないSM台数で実施でき、かつ定格運転相当の通電が可能である2台のSMを用いた主回路通電試験(2SM試験)を行った。2SM試験の回路を図5に示す。リアクトルを介して、2台のSMを対向させて、図5中に示すSM2を通電試験対象、SM1は試験設備として使用した。図6に試験結果を示す。試験対象のSM2は、MMC型HVDC変換器システムの定格運転時と同等の電圧・電流で動作しており、開発したSMが電氣的・熱的性能を満足していることを確認した。

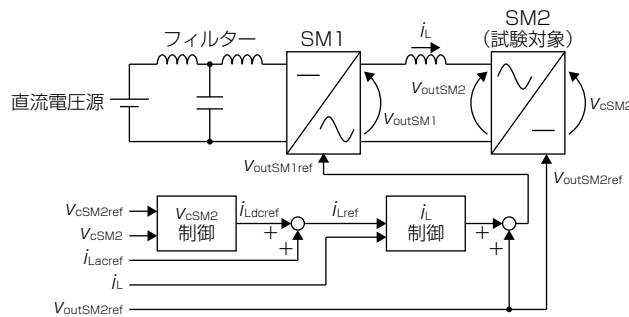


図5-2SM試験の通電試験回路

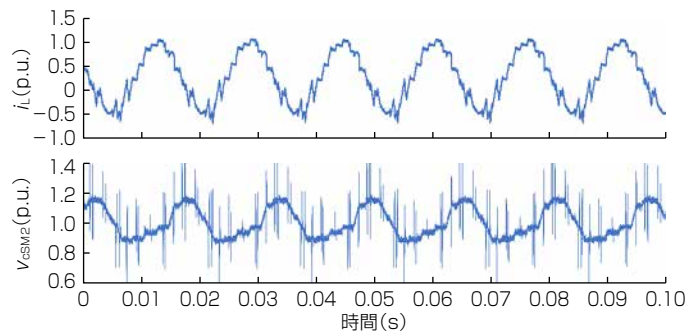


図6-2SM試験の試験結果

### 4.2 Hブリッジ試験

IEC 62501規格に基づいて、20個(10個×2組)のSMを接続した試験回路を構築し、実機最過酷電圧・電流に試験尤度(ゆうど)を加えた条件で連続運転試験を実施し、併せて損失測定も行った(Hブリッジ試験)。図7にHブリッジ試験の回路図と試験風景を示す。その結果、先に述べた条件での運転にSMが耐えられることを確認した。また、目標になるSM損失低減の実現を確認した。先に述べた規格要求に加えて、評価が必要と考えられる条件での試験や測定を実施し、その実力・性能を把握した。全ての試験結果が判定基準を満足しており、SM及び制御盤ソフトウェアは、HVDC変換器システムに対応した定格電流運転、連続安定運転など十分な性能を持っていることを確認した。

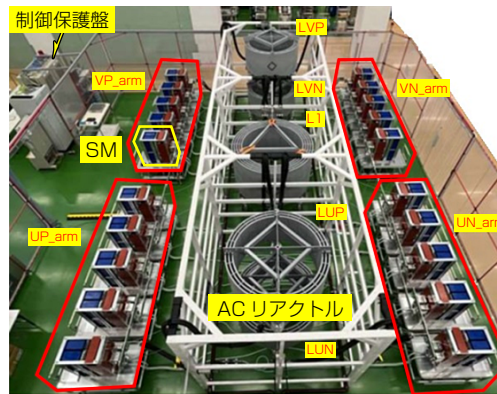
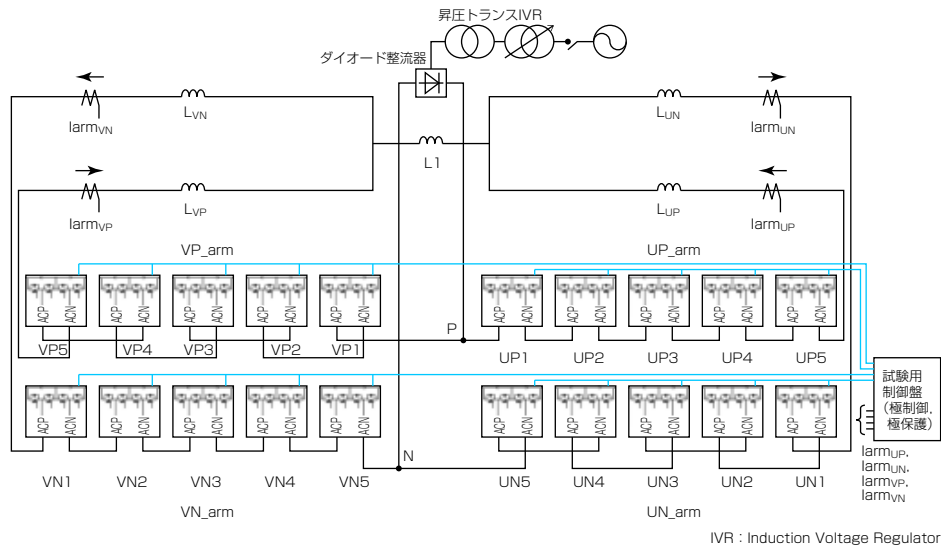


図7-Hブリッジ試験の回路図と試験風景

## 5. む す び

HVDC変換器システムを構成する小型化・低損失化したSMの設計・製作とその検証試験及びバルブタワーの設計を実施した結果、良好な結果が得られて、HVDC変換器システムの開発に目途を得た。この開発では定常時運転をベースとしたが、今後は実運用での過渡特性を考慮した製品化開発が必要になる。現在国内の浮体式洋上プラットフォームは水深1,000mに対応可能な変電所、及び変換所の開発を継続実施中であり、浮体構造に応じた耐振動要求をベースに設計が必要になる。

なお、この開発内容は、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)の助成事業(JPNP21015)として、2022年5月17日～2025年3月31日に実施した成果をまとめたものである。

## 参 考 文 献

- (1) 篠原信行, ほか: 低損失HVDCバルブタワーの基本設計, 電気学会電力・エネルギー部門大会論文集(Web) (2025)

# 上水道プラント運転支援装置 “WE-SMART”

川島啓吾\*  
Keigo Kawashima  
入来院浩司\*  
Koji Irikin  
真辺信也\*  
Shinya Manabe

Operation Support System “WE-SMART” for Water Treatment Plants

\*神戸製作所

## 要旨

国内水道事業では、人口減少に伴う料金収入減少や働き手不足に加えて、運転管理費の中で高い割合を占める電力費の高騰によって経営環境は厳しさを増しており、電力費の削減が強く求められている。このニーズに応えるために、電力費削減を主目的に上水道プラントの様々な運用をシミュレーションし、オペレーターの意思決定を支援する上水道プラント運転支援装置“WE-SMART”(以下、“WE-SMART”という。)を開発した。WE-SMARTは、電力費を削減するための運転計画や運用の見直し、安全安心な運転計画の支援、新入オペレーターの教育など、様々な用途で活用することが可能である。

## 1. ま え が き

国内水道事業では、人口減少に伴う料金収入減少や働き手不足に加えて、運転管理費の中で高い割合を占める電力費の高騰によって経営環境は厳しさを増している。このような背景の下、施設運営に係る電力費削減が強く求められており、電動機のインバーター化など、省エネルギー設備の導入が行われている。そのほかにも、大型ポンプの稼働台数削減による最大デマンド値抑制、電力料金が安価な夜間電力の活用、動力不要な自然流下での配水エリア拡大等、設備運用の工夫による解決が図られているが、水の安定供給を継続しながら運用の変更を試行することは困難である。

そこで、三菱電機では、監視制御システムに蓄積されている過去の運転データを活用して上水道プラントの運用を仮想的にシミュレーションすることで、実運用に影響を与えることなくオペレーターの意思決定を支援するWE-SMARTを開発した。この装置は、(1)電力費削減を含む様々な運用のシミュレーション、(2)平時の運用、特定の運用など様々なシチュエーションを想定した運転計画支援、(3)属人的な運用の解消に向けた、運転計画の可視化によるオペレーター間での認識共有支援、(4)新入オペレーターの操作習熟のための教育ツール、(5)施設の広域化や統廃合に向けたプラント計画支援などの多岐にわたる用途に活用可能である。

本稿では、WE-SMARTの概要、主な機能について述べて、最後に実証実験で得られた成果及び知見について述べる。

## 2. WE-SMARTの概要

上水道プラントでは、(a)運転管理費抑制・削減のための“電力費削減”のほかにも、(b)水の安定供給を実現するための“安全安心な運用”、(c)特定の担当者に依存しない運用実現のための“属人化解消”、(d)熟練技術者のノウハウを次世代へ確実に引き継ぐための“技術継承”、(e)施設の広域化や統廃合に向けた“プラント計画”など、様々な課題が存在する。WE-SMARTは、これらの課題に対して表1に示す様々な支援を実現することを目的とした運転支援装置である。

表1 - WE-SMARTで支援する主な課題と機能

| 課題          | 機能                                                                                                                        |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (a) 電力費削減   | 運転計画によって変化する電力需要をシミュレーションし、ピーク電力平準化による契約電力低減、デマンドレスポンス <sup>(注1)</sup> への対応、夜間電力活用、動力不要な自然流下での給水エリア拡大など電力費の削減方法を探索し、効果を確認 |
| (b) 安全安心な運用 | 平時の運用、特定の運用など様々なシチュエーションを想定したシミュレーション                                                                                     |
| (c) 属人化解消   | オペレーター間での認識共有を改善することによる属人的な運用の解消に向けた、24時間先の運転計画とそれに伴う数値の推移の可視化                                                            |
| (d) 技術継承    | 実運用に影響を与えることなく、運用変更した場合のプラント影響を把握でき、新入オペレーターの操作習熟のための教育支援                                                                 |
| (e) プラント計画  | 施設の広域化や統廃合に向けたシミュレーションによる、プラント計画支援                                                                                        |

(注1) 電力会社からの要請などで電力の需給バランスに応じて電力使用量を制御すること

図1にWE-SMARTを活用した運用イメージを示す。WE-SMARTでは、監視制御装置に蓄積された各種流量や池の水位、受電電力などの1分間隔の過去のトレンドデータを用いる。ポンプ等の運転計画の変更に伴って、電力や流量・水位などの各種計測データの変化やしきい値超過が画面上で瞬時に反映される。オペレーターはWE-SMARTを用いて、実施しようとする運転操作が所望の運用になるかを、実運用に影響を与えることなく、装置上で仮想的に確認・評価することが可能になる。WE-SMART上で効果が確認できた運転計画をオペレーターが監視制御装置で実行することによって、所望の運用が実現される。

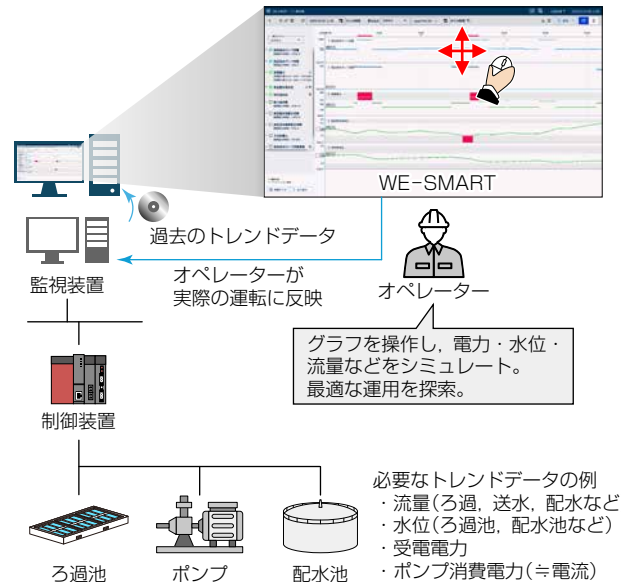


図1 - WE-SMARTの運用イメージ

### 3. WE-SMARTの主な機能

WE-SMARTでは、図2に示すとおり、まず、あらかじめ蓄えられた過去のプラントデータから条件が近似した日のデータを用いて24時間先までの水の需要量を予測し、シミュレーションの初期値とすることができる。次に、ポンプなどの運転計画を設定することで、運転計画に応じた各種計測値の変化や制約条件違反を確認できる。これによって、実際の設備に影響を与えることなく、所望の運転計画になるまでシミュレーションが可能である。

この章では、各機能の概要について述べる。

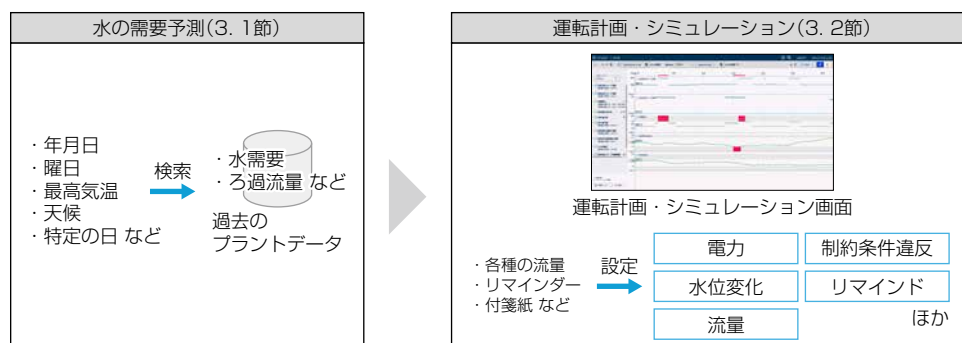


図2 - WE-SMARTの操作フロー

### 3.1 水の需要予測

水の需要量は、曜日や気温、天気などの条件パラメーターによって日々変化する。オペレーターは、あらかじめ蓄えられた過去のデータから条件に近い日のデータを検索・参照し、24時間先までの推移を予測できる。図3(a)に示す条件検索では、年月日、曜日、最高気温、天気や、流量の24時間積算値などの条件で当日に近い過去データを検索し、予測結果をシミュレーションの初期値とする。例えば、“直近の平日”などの通常の検索に加えて大晦日(おおみそか)や大規模スポーツイベントがあった特定の日などを検索し初期値とした上で、運転計画を変更した場合の上水道プラントへの影響をシミュレーションできる。

また図3(b)に示すとおり、24時間積算値のランキング検索も可能で、例えば水の需要量が多い日などの運用が難しい条件を選択して、運転計画をシミュレーションできる。



(a) 条件検索

(b) ランキング検索

図3-過去データの検索

### 3.2 運転計画・シミュレーション

3.1節の過去データの検索結果から得られた水の需要量の予測に基づいて、24時間先までの流量や水位、電力を予測し、図4に示すようなシミュレーション画面に表示する。このとき、図5に示すとおり、目標水位や池の水位上下限、電力などの上限値といった設備や運用上の制約条件をあらかじめ設定できる。



図4-シミュレーション画面

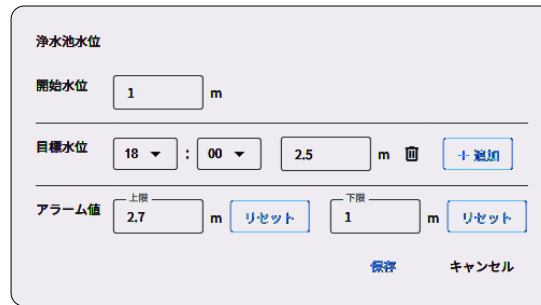


図5-制約事項の設定例

運転計画に応じて各種流量などの数値をトレンドグラフ上でマウス操作によって増減させると、関連する電力や各種水位が連動して変化し、直感的に上水道プラントへの影響を把握できる。また、あらかじめ設定した制約条件に違反した場合には強調表示されて、安全安心な運転計画を探索できる。オペレーターは、WE-SMART上でシミュレーションした結果を監視制御装置に反映することで、所望の運用が実現される。

そのほかにも、WE-SMARTではポンプの発停などの機器操作が必要な時刻になるとオペレーターへ操作が必要であることを知らせるリマインダー機能や、オペレーター間での伝達事項の引継ぎ等に活用できる付箋紙機能など、シミュレーション機能以外にも様々な運転支援機能を持つ。

#### 4. プロトタイプ機による電力費削減効果検証

2022年度から2024年度にかけて、広島県三原市の宮浦浄水場で、プロトタイプ機を使用して電力費の削減を目的とした実証実験を行った。過去1年間のトレンドデータの分析を実施した結果、受電電力が高い時間が一日の中でも局所的であることに着目し、送水ポンプの運転計画を見直すことで受電電力のピークを平準化し、契約電力削減の可能性を見いだした。実プラントで契約電力削減による電力費削減を実現するため、運転支援を行うプロトタイプ機を設計、製作した。プロトタイプ機では、図6に示すように受電電力への影響が大きい送水ポンプの運転計画に応じて、受電電力や、配水池水位等への影響を直感的に把握し、シミュレーションできるようにした。今回、制約事項として送水ポンプの最大運転台数を設定し、受電電力のピークを平準化した運用を実現した。実際にプロトタイプ機を活用した運用を実施した結果、受電電力のピークを平準化することで、当社試算で契約電力を378kWから278kWへ低減できて、年間約180万円の電力費削減効果を得た。また、実証を通してのオペレーターとの協議では、契約電力削減を実現するための目標水位見直しの機会創出や、シミュレーション結果を可視化することによる運転計画での課題意識の共有など、様々な業務改善に活用できたという評価が得られた。

実証中、デマンドレスポンスの実現可能性検討や新人オペレーターの教育などのユースケースが加わって、運転計画を行う予測モードのほかに過去の運用分析を行う分析モードを操作モードとして実現した。さらに、機器操作の時刻をオペレーターに気付かせるためのアラーム機能や、任意の時刻での目標水位の表示といった、オペレーションに必要な各種機能を現場のヒアリングから抽出できて、製品要件に反映できた。

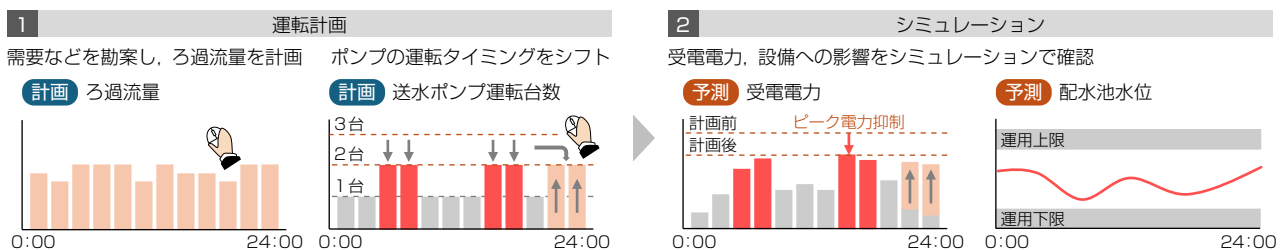


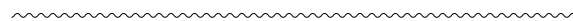
図6-宮浦浄水場での実証実験

## 5. む す び

電力費削減を主目的に上水道プラントの様々な運用をシミュレーションし、実運用に影響を与えることなくオペレーターの意思決定を支援するWE-SMARTについて述べた。WE-SMARTは電力費を削減するための運転計画の策定、平時の運用、特定の運用など様々なシチュエーションを想定した運転計画の支援、新人オペレーターの教育など、多くの用途で活用することが可能であることを述べた。

今後は、監視制御システムと連動することによる操作性の改善や、AI等を活用した高精度な制御の実現、上水道プラント以外の分野での活用を目指す。

最後に、この開発では、広島県水道広域連合企業団、及び榊水みらい広島に実証協力を受けて、多くの有益な助言を受けた。ここに記して深く感謝の意を表する。



# 下水道の脱炭素化を切り拓く センシング技術

吉田 航\*  
Wataru Yoshida  
池田直樹\*  
Naoki Ikeda  
藤原 拓†  
Taku Fujiwara

金海秀紀‡  
Hideki Kinkai

Sensing Technologies Leading the Way in Sewer System  
Decarbonization

\*三菱電機㈱ 先端技術総合研究所  
†京都大学  
‡㈱日水コン

## 要 旨

三菱電機では、下水道の脱炭素化に貢献できる二つのセンシング技術を開発している。脱水汚泥の含水率測定技術では、近赤外センサーを用いることで、従来の乾燥減量法より短時間で脱水汚泥の含水率を測定できる見込みを得た。これによって、測定結果を即座に現場運転に反映し、運転の安定化と脱炭素化の両立が期待される。N<sub>2</sub>O(亜酸化窒素)ソフトセンシング技術では、水処理で排出される温室効果ガスN<sub>2</sub>O量を機械学習によって推定することで、高価なN<sub>2</sub>O計の設置を最小限に抑えて、その排出特性を把握することが可能になる。両技術は現場適用性が高く、今後もセンシングの精度向上と適用拡大を進めて、下水道の脱炭素化実現に貢献していく。

## 1. ま え が き

日本の下水道では、2030年度の温室効果ガス排出量を2013年度比208万t-CO<sub>2</sub>削減することが地球温暖化対策計画の目標として掲げられている(2013年度排出量：約406万t-CO<sub>2</sub>)。図1に下水道からの温室効果ガス排出量の割合を示す<sup>(1)</sup>。日本全体の温室効果ガスの約0.5%(約530万t-CO<sub>2</sub>)が下水道から排出されるが、最大要因は処理場の電力由来(53.7%)である。しかし、電力消費については省エネルギー機器や革新的技術の導入等の具体的な対応策が検討されており、下水道の脱炭素化実現には電力消費削減以外の対策が求められている。

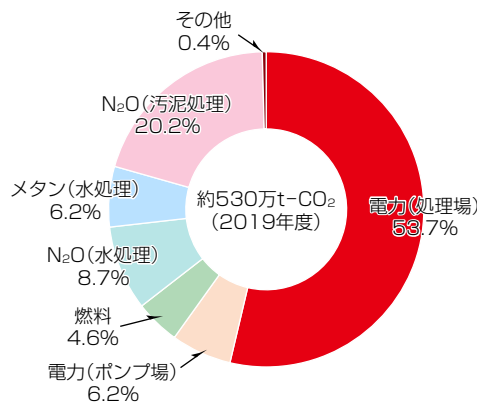


図1-下水道からの温室効果ガス排出量の割合<sup>(1)</sup>

2番目に多く排出される温室効果ガスは汚泥処理でのN<sub>2</sub>Oであり、20.2%を占める。一般には850℃以上の高温で脱水汚泥を焼却することで、N<sub>2</sub>O排出量を抑制できるとされている。しかし、脱水汚泥の含水率は流入下水の性状等によって変動しやすく、これが焼却炉の安定運転を困難にしている。含水率が高いと水分の蒸発潜熱による吸熱が大きくなり、汚泥の発熱量が低下するため燃焼温度が下がり、逆に低いと過熱による設備損傷や煙道閉塞等による運転停止リスクが高まる。従来の含水率測定は乾燥減量法が用いられており、脱水汚泥の乾燥前後の質量から含水率を算出している。乾燥には1~2時間程度要するため、含水率の変化を素早く把握することは困難である。したがって、焼却炉の温度を常に監視しながら適正な焼却温度になるよう流動空気量や炉砂量を細かく調整する必要があり、運転員にとって大きな作業負担になっている。

また近年、水処理から排出されるN<sub>2</sub>Oにも注目が集まっている。下水道から排出される温室効果ガスに占める割合は8.7%と他の項目に比べると小さいが、水処理からのN<sub>2</sub>O排出はメカニズムが明らかになっておらず、明確な抑制対策が

立っていない。今後、他の排出要因への対応が進むに従って、水処理からのN<sub>2</sub>O排出が脱炭素化実現のボトルネックになる可能性が指摘されている。N<sub>2</sub>Oの排出特性を正確に把握するには計測器が不可欠だが、N<sub>2</sub>O計は高価であり、複数の処理系列全てにN<sub>2</sub>O計を導入することには経済的な障壁がある。

これらの背景を踏まえて、三菱電機では下水道の脱炭素化実現に貢献する新たなセンシング技術として脱水汚泥の含水率測定技術、及び水処理でのN<sub>2</sub>Oソフトセンシング技術を開発している。

## 2. 含水率測定技術

水は分子構造や光の波長との相互作用によって700nm以上の赤外線を吸収する。特にO-Hの伸縮振動と変角振動による吸収帯である1,940nm、H-O-Hの伸縮振動による吸収帯である2,900nmやその半分の波長である1,450nmに大きな吸収を持つことが知られている。そこで今回、脱水汚泥の含水率測定のアプローチとして近赤外領域の波長を用いて汚泥中の水分量を推定する手法を試みた。

### 2.1 試験方法

今回対象とした脱水汚泥は、都市住宅地の排水を受水する分流式下水道から発生した初沈汚泥、余剰汚泥を濃縮した後、ベルトプレス脱水機で処理された汚泥である。含水率の測定は、下水処理場を維持管理する企業体の協力を受けて、維持管理業務の一環として実施した。当該下水処理場での脱水汚泥の測定は、作業員が脱水機1台につき乾燥減量法で毎日3回実施している。この試験では、その維持管理業務に近赤外センサーを用いた脱水汚泥の測定を追加した。測定は維持管理業務に従事している汚泥処理班の作業員数十名が担当した。測定手順を図2に示す。

乾燥減量法は、赤外線水分計を用いた。脱水汚泥はベルトプレス脱水機から板状で排出される汚泥を3か所から採取し、それらを数mmほどに砕いて混合した。そこから採取した汚泥を赤外線水分計で測定した。

近赤外センサーは、1,750nm～2,150nmまでの波長帯を持ち、採取・混合した後の汚泥を対象として吸光度を測定した。

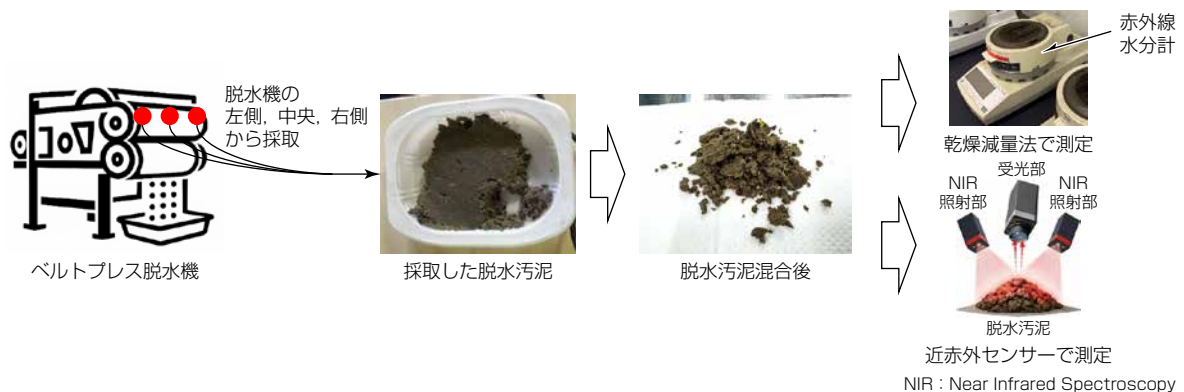


図2-脱水汚泥の含水率測定手順

### 2.2 結果

この節では、試験の結果を述べる。

#### 2.2.1 吸光度と含水率の推移

図3に、試験期間中に測定した脱水汚泥の含水率及び吸光度(測定波長1,940nm)の経時変化を示す。脱水汚泥の含水率は、試験期間全体の平均値が76.5%であり、変動範囲はおおむね76.0～77.0%の間で安定していた。期間中の最大値は79.9%、最小値は75.1%であった。吸光度は、期間平均値が0.248であり、変動範囲は0.210～0.270で推移した。測定波長に対して水分子は強い吸収を示すため、汚泥中の水分量が多いほど照射光の吸収量が増加する。したがって、近赤外センサーによる吸光度測定値は、脱水汚泥の含水率と相関を持つと考えられる。そこで、近赤外吸光度から含水率を推定する回帰式を構築した。

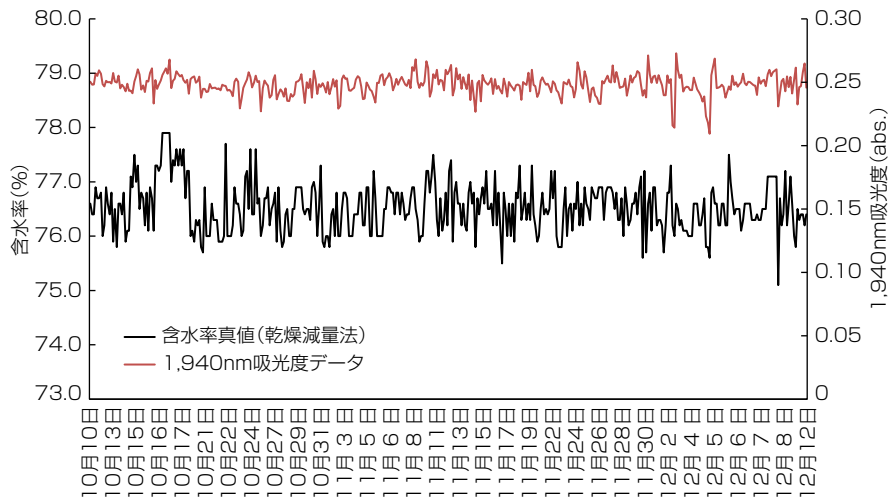


図3-脱水汚泥含水率と吸光度の推移

### 2.2.2 含水率推定精度

近赤外センサーで得られる光学スペクトルデータの解析では、オリジナルの吸光度スペクトルに加えて、その微分スペクトルを活用することで、より詳細な情報抽出や推定精度の向上が可能になる。そのためこの研究では、試験で得られた吸光度データ及びその微分データを用いて含水率を推定する回帰式を構築し、その精度について評価した。推定結果と乾燥減量法による実測値の関係を図4に示す。推定値は実測値と高い一致を示し、平均絶対誤差(MAE)は0.30%、平均絶対誤差率(MAPE)は0.39%であった。これらの値は、近赤外センサーによる吸光度測定と回帰式の組合せによって、実用上十分な精度で脱水汚泥の含水率を推定できることを示している。図5に示す推定誤差の度数分布では、全測定の約85%が誤差±0.6%以内に収まって、±1.0%を超える外れ値はほとんど確認されなかった。これによって、従来法では1~2時間を要していた含水率測定が、数分以内で実施可能になり、現場運転の安定化と脱炭素化の両立に寄与することが期待される。

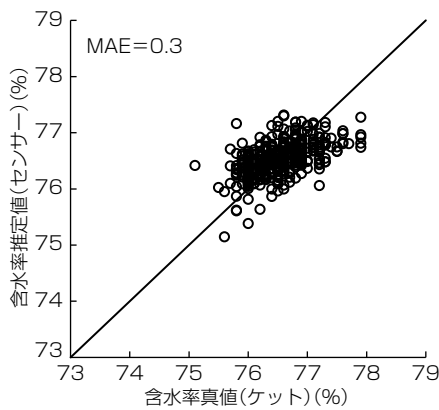


図4-脱水汚泥含水率推定値と真値の関係

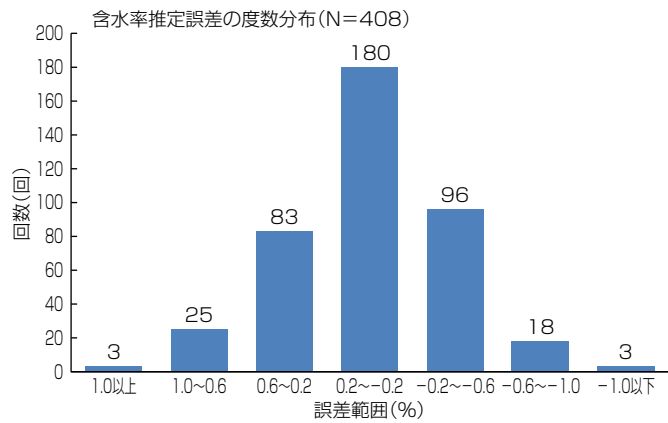


図5-含水率推定誤差の度数分布

## 3. N<sub>2</sub>Oソフトセンシング技術

ソフトセンシングとは、過去のデータベースを用いて、測定が容易な変数を説明変数、測定困難な変数を目的変数として機械学習によって回帰モデル(推定モデル)を構築し、オンラインで得られるデータから測定困難な変数の値を推定する手法である<sup>(2)</sup>。今回、下水処理場で測定可能な水質項目を説明変数として、N<sub>2</sub>O排出速度を推定するソフトセンシングの構築を試みた。なお、この開発は京都大学、(株)日水コンとの共同研究で実施している。

### 3.1 試験方法

図6にこの開発での試験池の設備構成を示す。高知県高須浄化センターの協力を受けて、AO法(嫌気好気法)反応池を対象として、 $N_2O$ と関連水質項目の連続測定を実施した。 $N_2O$ には溶存態 $N_2O$ (D- $N_2O$ )とガス態 $N_2O$ (G- $N_2O$ )が存在するが、D- $N_2O$ は好気槽2と好気槽3の2か所で測定し、G- $N_2O$ は一つの測定器を用いて各槽を順に測定した。さらに $N_2O$ 排出速度の詳細な解析のため、嫌気槽でアンモニア態窒素( $NH_4-N$ )とニコチンアミドアデニンジヌクレオチド(NADH)、好気槽2で溶存酸素濃度(DO)濃度、好気槽3で $NH_4-N$ と硝酸態窒素・亜硝酸態窒素( $NO_3-N \cdot NO_2-N$ )を連続測定した。さらに、既往研究では $N_2O$ 排出速度とアンモニア酸化速度の間に高い相関があることが報告されている<sup>(3)</sup>。そのため、嫌気槽での $NH_4-N$ と好気槽3での $NH_4-N$ の取得データ、及び池内の水の流下時間からアンモニア酸化速度を算出した。

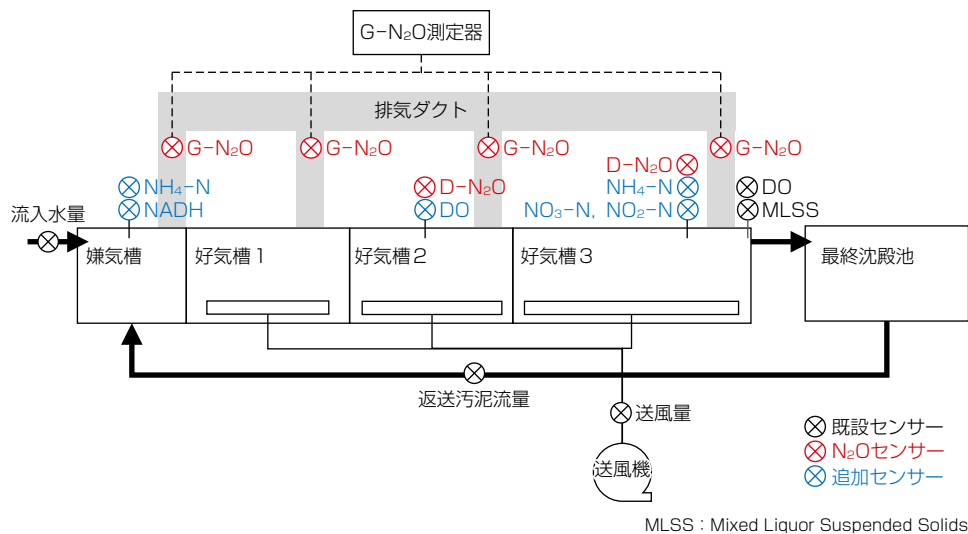


図6-試験池の設備構成

これらのデータに対して、相関分析によって $N_2O$ 排出速度と相関係数の高い水質項目を選定した。その後、これらの水質項目を説明変数、 $N_2O$ 排出速度を目的変数とした回帰モデルを構築した。取得データ期間の2024年11月15~28日に対して、最初の80%の期間を学習期間、残りの20%の期間を検証期間とした。

### 3.2 結果

表1に $N_2O$ 排出速度と他の水質項目との相関係数を示す。相関係数0.6以上の強い相関が見られた項目は送風量、嫌気槽での $NH_4-N$ 、好気槽2でのDO、好気槽3での $NO_3-N$ 、好気槽3での $NH_4-N$ 、アンモニア酸化速度であった。したがって、これらを説明変数として $N_2O$ 排出速度の回帰モデルを構築した。

表1- $N_2O$ 排出速度と他の水質項目との相関係数

| 水温    | 送風量  | MLSS  | 嫌気槽<br>$NH_4-N$ | 嫌気槽<br>NADH | 好気槽2<br>DO | 好気槽3<br>$NO_3-N$ | 好気槽3<br>$NO_2-N$ | 好気槽3<br>$NH_4-N$ | 好気槽3<br>DO | 好気槽3<br>DO | アンモニア<br>酸化速度 |
|-------|------|-------|-----------------|-------------|------------|------------------|------------------|------------------|------------|------------|---------------|
| -0.09 | 0.66 | -0.29 | 0.84            | 0.26        | 0.81       | 0.93             | -0.11            | 0.82             | -0.53      | 0.82       |               |

図7に $N_2O$ 排出速度の推定結果を示す。 $N_2O$ 排出速度は日単位の周期的な変動が見られたが、回帰モデルによる推定値は学習期間、検証期間いずれも $N_2O$ 排出速度の動的挙動をおおむね再現できたと考えられる。したがって、ソフトセンシングによって $N_2O$ 排出速度を推定できる可能性が示唆された。なお、平均絶対誤差としては学習期間で3.39g-N/hr、検証期間で4.84g-N/hrであり、検証期間ではわずかに推定精度が悪化した。

今後、更なる精度向上を目指すとともに、季節変化等を含む長期的なデータを対象として、モデルの汎化性能を確認していく予定である。

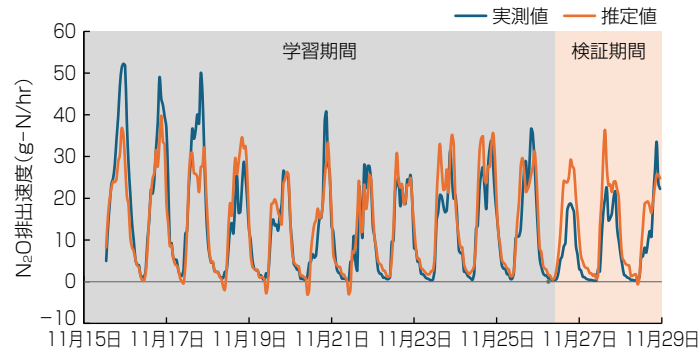


図7 -N<sub>2</sub>O排出速度の推定結果

#### 4. む す び

本稿で述べた含水率測定技術及びN<sub>2</sub>Oソフトセンシング技術に関して、今後も更なる精度向上と適用範囲の拡大を目指して技術開発を継続し、下水道の脱炭素化実現に貢献していく。

最後に、N<sub>2</sub>Oソフトセンシングの開発に協力いただいた高知県高須浄化センターの皆様へ感謝の意を表す。

#### 参 考 文 献

- (1) 国土交通省国土技術政策総合研究所：下水処理に伴うN<sub>2</sub>O排出量の実態把握および削減に向けた調査，下水道技術開発会議エネルギー分科会（2024）
- (2) 船津公人，ほか：ソフトセンサー入門，コロナ社，7～8（2014）
- (3) 李 婷，ほか：実規模嫌気好気活性汚泥法におけるN<sub>2</sub>O排出特性の長期評価と発生機構の推定，第59回日本水環境学会年会



# 温室効果ガス観測センサー TANSO-3の開発と初期運用

二見充輝\*  
Mitsuaki Futami  
黒川正人\*  
Masato Kurokawa  
吉岐 航†  
Wataru Yoshiki

玉田晃均‡  
Akihito Tamada

Development and Initial On-Orbit Operation of Greenhouse Gas Observation Sensor TANSO-3

\*鎌倉製作所  
†同製作所(工博)  
‡情報技術総合研究所

## 要 旨

温室効果ガス観測技術衛星GOSAT(Greenhouse gases Observing SATellite, 愛称: いぶき)シリーズは、気候変動に関する科学の発展への貢献と気候変動政策への貢献(脱炭素社会開発の推進)をミッションとした衛星シリーズである。三菱電機は衛星プライムメーカーとして、契約元となる宇宙航空研究開発機構(JAXA)に加えて、環境省、国立環境研究所(NIES)の指導の下、開発・製造・運用に貢献している。GOSATシリーズの後継である温室効果ガス・水循環観測技術衛星GOSAT-GW(Global Observing SATellite for Greenhouse gases and Water cycle, 愛称: いぶきGW)は、2025年6月29日に種子島宇宙センターからH-IIAロケット50号機で打ち上げられて、計画どおり所定の軌道へ投入された。

GOSAT-GWに搭載されている温室効果ガス観測センサー3型(TANSO-3)は、地上試験で高精度な校正が行われ、打上げ後の初期運用でも分光観測センサーとしての基本性能が確認された。今後、本格運用に向けた詳細な性能評価を行い、高精度な温室効果ガス観測の実現を通じて持続可能な社会への貢献が期待される。

## 1. ま え が き

気候変動が世界的課題になる中、温室効果ガスの排出状況を高精度で把握し、排出削減政策の検証や地球環境変動の理解に役立てることが国際的に強く求められている。2015年のCOP21(国連気候変動枠組条約第21回締結国会議)で採択された“パリ協定”の発効以降、各国は排出量報告の透明性向上や、人為起源・自然起源の寄与を更に精緻に評価する体制の構築を進めており、そのためには全球規模で空間的・時間的に整合性の取れた温室効果ガス観測データが不可欠である。このような背景で、衛星搭載型の温室効果ガス観測センサーは、広範囲を継続的に観測できる手段として重要性を増している。日本では、環境省、NIES、JAXAの三者共同ミッションによって、GOSATシリーズを開発し、これまでGOSAT(2009年打上げ)及びGOSAT-2(2018年打上げ)の運用を通して多くの成果を上げてきた<sup>(1)(2)</sup>。

GOSAT-GWはGOSAT-2の後継機である。GOSAT-GWは、温室効果ガス観測ミッション用のTANSO-3に加えて、水循環変動観測衛星(GCOM-W)に搭載されたAMSR2の後継である高性能マイクロ波放射計3(AMSR3)を搭載し、大気中に含まれる水蒸気のデータを気象庁や世界の気象機関に提供し、台風や集中豪雨などの予測精度向上に貢献する。このようにGOSAT-GWは気候変動、気象観測で、従来以上に重要な役割を担う人工衛星になっている。図1にGOSAT-GWの外観及び主要諸元を示す。



|           |                                |                       |
|-----------|--------------------------------|-----------------------|
| 衛星名       | GOSAT-GW(いぶきGW)                |                       |
| 運用軌道      | 種類                             | 太陽同期準回帰軌道             |
|           | 高度                             | 666km, 回帰3日(GOSATと同様) |
|           | 昇交点通過地方太陽時                     | 13:30±15分(GCOM-Wと同様)  |
| 衛星質量      | 約2.6t                          |                       |
| 発生電力(EOL) | 約5.3kW                         |                       |
| 設計寿命      | 7年以上                           |                       |
| 打上げ       | H-IIAロケット                      |                       |
| 搭載ミッション機器 | TANSO-3<br>AMSR3               |                       |
| 観測運用      | TANSO-3: 地表日照観測<br>AMSR3: 常時観測 |                       |
| 打上げ日      | 2025年6月29日(JST)                |                       |

図1 - GOSAT-GW外観及び主要諸元<sup>(3)</sup>

本稿では、GOSAT-GWに搭載されている温室効果ガス観測センサーTANSO-3の特長、プロトフライト試験の概要及び初期運用の基本状況について述べる。

## 2. TANSO-3の概要と地上校正試験

この章では、TANSO-3の概要と地上校正試験について述べる。

### 2.1 TANSO-3の特長

TANSO-3は、GOSAT-GWの温室効果ガス観測ミッションを担う観測センサーである。TANSO-3の形状及び主要諸元を図2に示す。

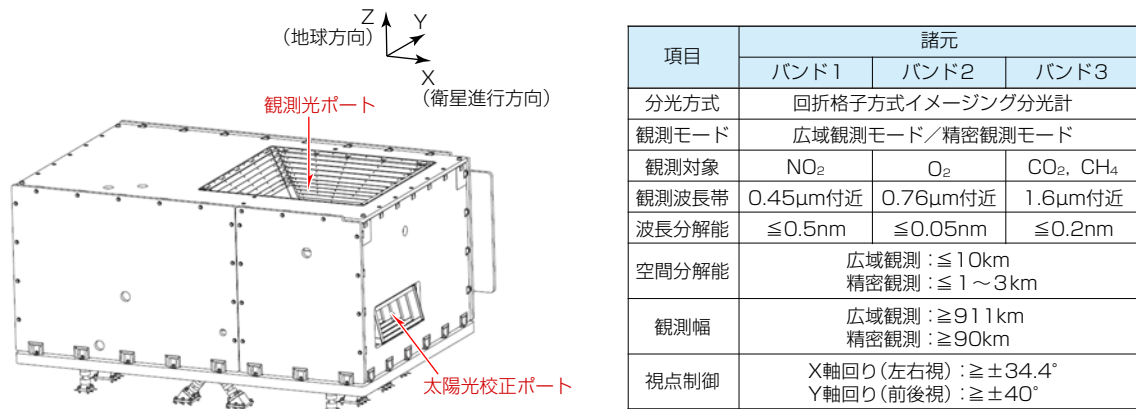


図2 - TANSO-3外観及び主要諸元

大気中に存在するガスは、その種類に応じた特定の波長の光を吸収する。太陽光が地球に入射し、宇宙空間まで反射する過程では、大気を往復で通過する。このため、宇宙空間で観測される地球で反射した太陽光のスペクトルは、大気中に存在するガスによる吸収を受けたものになる。TANSO-3は、地球で反射した太陽光のスペクトルを分光観測するセンサーであり、観測したスペクトルを分析することで、大気中に存在するガスの濃度を導出することが可能である。次にTANSO-3の特長を述べる。

(1) 回折格子型分光方式の採用によって、面的な観測データ取得を実現

GOSAT搭載TANSO-FTS, GOSAT-2搭載TANSO-FTS-2では、太陽光のスペクトルを分光観測する方式(分光方式)としてフーリエ分光方式が採用されている。フーリエ分光方式には、広い波長範囲のスペクトルを高い波長分解能で観測できる特長があるが、多地点を同時に観測することが難しく、TANSO-FTS, TANSO-FTS-2共に一度に観測できる地点は1地点になっている。

これに対して、TANSO-3では、分光方式として回折格子方式を採用し、二次元検出器の1次元を分光、1次元を観測地点に割り当てることで、衛星進行の直交方向(Y方向)に対して多地点を同時に観測することを可能としている。衛星進行に合わせて順次観測を行うことで、観測データを面的に取得できることから、GOSAT搭載TANSO-FTS, GOSAT-2搭載TANSO-FTS-2に対して空間的な観測能力が飛躍的に向上することになる。GOSAT-2とGOSAT-GWの観測イメージを図3に示す。

(2) 2種の観測モードによって、温室効果ガスの排出量を広域・精密に把握

TANSO-3には、精密観測/広域観測の二つの観測モードがあり、観測目的に応じて観測幅/空間分解能を切り替えることが可能である。この機能は、他の衛星の温室効果ガス観測センサーには見られないTANSO-3の大きな特長である。精密観測モードはC40(世界大都市気候先導グループ)などの都市での温室効果ガスの排出分布を詳細に観測するためのモードであり、その空間分解能は3km以下である。精密観測モードでは、ポインティングミラーを用いて指向方向を変更し、衛星直下以外を観測することが可能である。この機能を用いることで、必要な都市の観測を効率的に行うことができる。広域観測モードは、全球での温室効果ガスの分布をグローバルに観測するためのモードであり、その観測幅は

911km以上である。この観測幅は、3日で全球を観測できることに相当しており、高頻度な全球観測を実現し得るものになっている。

(3) 二酸化窒素の観測によって、温室効果ガスの排出源・排出量の観測精度を向上

TANSO-3は、主要な温室効果ガスである二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)及びメタン(CH<sub>4</sub>)の継続的な観測に加えて、新たに二酸化窒素(NO<sub>2</sub>)の観測を可能としている。NO<sub>2</sub>は、化石燃料の燃焼時にCO<sub>2</sub>と同時に排出される一方で、自然界での吸収・放出量が比較的少ないという特性を持つ。このため、CO<sub>2</sub>と同時に観測することで、大気中の自然起源濃度と人為起源排出を更に容易に識別することが可能になる。これによって、温室効果ガス排出源の位置及び特性の特定精度が向上し、排出源及び排出量推定の高精度化に寄与する<sup>(4)</sup>。

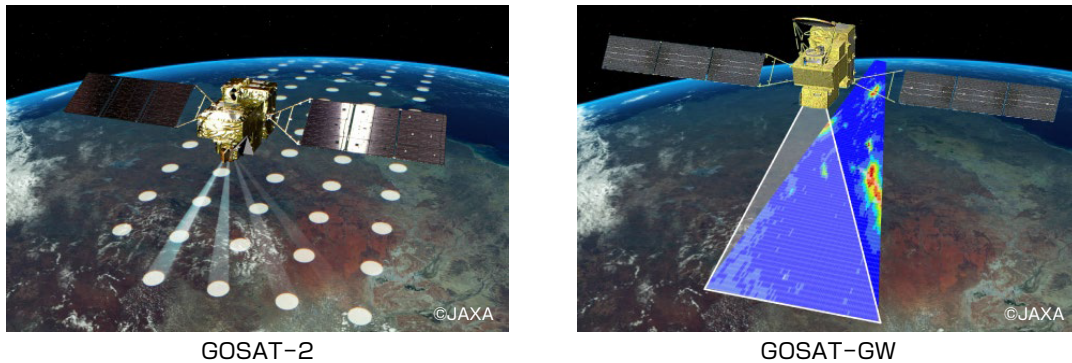


図3- GOSAT-2とGOSAT-GWの観測イメージ

## 2.2 TANSO-3地上試験

TANSO-3では、打上げ用実機(プロトフライトモデル(PFM))を用いた地上試験(プロトフライト試験(PFT))を実施し、打上げ用の実機としての品質を備えていることの確認を行っている。PFTでは、ロケット打上げ時や衛星分離時の衝撃・振動・音響への耐性、及び宇宙特有の環境(真空、太陽光による極端な高・低温環境)での機能性を備えていることを検証する。図4にTANSO-3で実施したPFTの概略フローを示す。

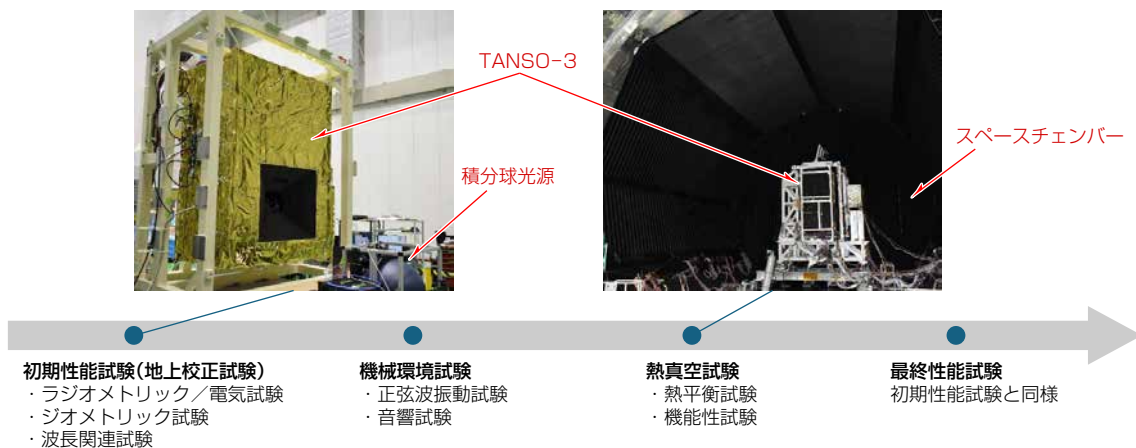


図4- TANSO-3でのプロトフライト試験の概略フロー<sup>(注1)</sup>

(注1) 図4左は、ラジオメトリック試験の様子である。TANSO-3は+X1G姿勢で回転台に設置されて積分球光源に対向している。回転台をX軸回りに回転させて複数回データを取得することで、広域観測の全視野で高精度かつ効率的なデータ取得を実現している。  
図4右は、熱真空試験の様子である。宇宙空間の環境を模擬する大型スペースチェンバー内にTANSO-3が設置されている。TANSO-3の周囲には軌道上の熱入力を模擬するヒーター類に加えて波長評価用の光源を据え付けることで、運用環境を再現した波長特性評価が可能になった。これによって温室効果ガス観測で重要な波長特性の高精度校正を実現している。

これらの環境試験と並行して、TANSO-3では観測性能を規定するための地上校正試験を実施している<sup>(5)</sup>。温室効果ガス観測センサーは、取得したスペクトルデータを物理量に変換するために、波長特性や感度特性を高精度に把握しておくことが不可欠であり、これらの特性は打上げ前の地上環境で体系的に評価される。

地上校正試験では、単色光源や白色光源を用いて各観測帯域の波長割当てや分光分解能を評価するとともに、視野内の

空間方向の特性ばらつきや検出器応答の均一性を確認した。特にTANSO-3では回折格子型のイメージング分光方式を採用していることから、入射角や視野位置に依存した波長・感度特性の変化を把握することが重要であり、これらの特性を校正データとして整理している。

また、PFTの環境試験前後に地上校正試験を実施することで、振動や熱環境負荷が分光性能に与える影響を確認し、波長特性や感度特性が維持されていることを検証した。これによって、軌道上初期運用時の性能評価や、長期運用を見据えた校正・補正の基準データを整備している。

### 3. TANSO-3軌道上運用

GOSAT-GWの打上げ後、クリティカル運用及び初期機能確認運用を経て、2025年10月9日に定常運用へと移行した。2026年3月現在、定常観測運用に向けた初期校正検証運用を実施中である。図5にTANSO-3で観測した画像と、観測データから得られた分光情報を示す。

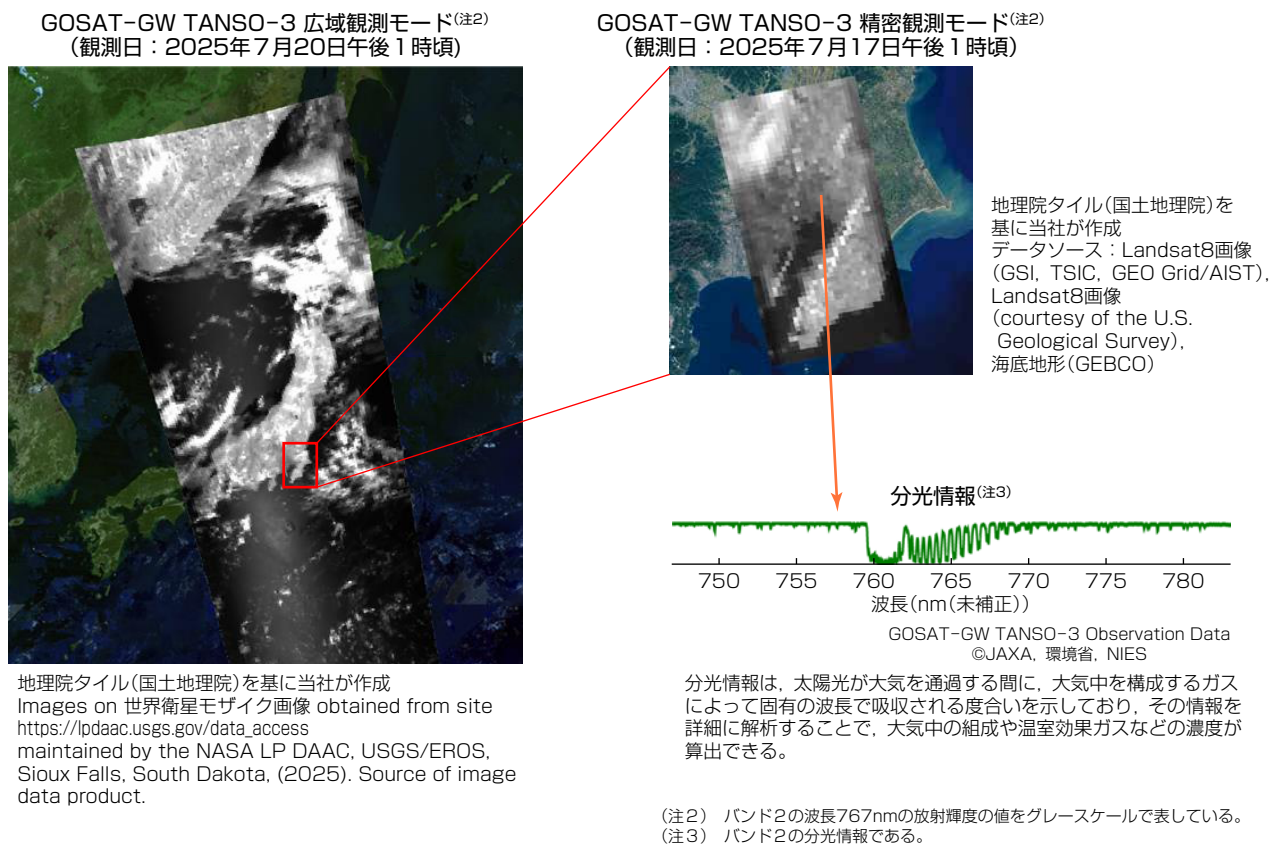


図5 - TANSO-3での観測画像

打上げ後に実施する校正の目的は、放射輝度や波長などの物理量とセンサー出力との対応関係が、打上げや軌道上環境への遷移に伴って地上試験時から変化する可能性があることを前提に、これらの対応付けの妥当性を評価し、必要に応じて補正係数に反映することで、プロダクトの精度を長期にわたって担保することにある。

軌道上校正の一例として、TANSO-3では、波長特性に関する主要な校正手段として太陽光校正機能を備えている<sup>(6)</sup>。太陽光校正は、TANSO-3に搭載された太陽光校正ポート(図2)から太陽光を取り込んで、拡散板を介して精密観測モード集光系に導入して撮像を行う校正観測モードである。太陽光のスペクトルは、含まれる暗線(フラウンホーファー線)の位置やスペクトルの形状が非常に安定していることが知られており、このことから軌道上の校正光源として参照できる。初期機能確認運用期間までに、太陽光校正モードを用いた波長校正機能の確認を完了しており、打上げ前に構築した校正・補正の考え方が軌道上でも有効であることを確認した。波長特性の評価結果は、観測したスペクトルデータから温室効果ガス濃度などの物理量を算出するためのデータ解析(リトリバル処理)にも活用される。

なお、太陽光校正は波長特性の校正に加えて、1周回に1回という高頻度の観測機会を生かしたセンサー感度の相対的なトレンド評価や、その他のラジオメトリック特性の評価・校正にも利用される。また、TANSO-3は太陽光校正以外に月面で反射された太陽光を用いた月校正や、地球観測を通常よりも高空間分解能で実施する明時校正などの校正機能を備えており、様々な校正手段及び評価手法を組み合わせることで、高精度なセンサー校正を実施していく計画である。

初期運用期間を通じて、TANSO-3は軌道上で安定した動作状態に移行し、分光観測センサーとしての基本機能が正常に発揮されていることが確認された。2026年3月現在、より詳細な性能評価を進めながら、温室効果ガス観測の本格運用に向けた準備を進めている。

## 4. む す び

GOSATシリーズ衛星の最新号機であるGOSAT-GWに搭載の、温室効果ガス観測センサー-TANSO-3について、その開発の狙い、設計の特長、プロトフライト試験による性能確認、さらに軌道上初期運用での校正・評価の取組みを述べた。TANSO-3は、回折格子型イメージング分光計を採用した次世代の温室効果ガス観測センサーとして、国際的な気候変動対策への貢献が期待される。当社は、TANSO-3を用いた温室効果ガス観測の本格運用に向けて引き続き取り組むとともに、この開発で培った知見を生かして、地球環境観測分野での信頼性の高い技術開発を通じて持続可能な社会の実現に貢献していく。

## 参 考 文 献

- (1) Kuze, A., et al. : Update on GOSAT TANSO-FTS performance, operations, and data products after more than 6 years in space, *Atmospheric Measurement Techniques*, **9**, 2445~2461 (2016)
- (2) Suto, H., et al. : Thermal and near-infrared sensor for carbon observation Fourier transform spectrometer-2 (TANSO-FTS-2) on the Greenhouse gases Observing SATellite-2 (GOSAT-2) during its first year in orbit, *Atmospheric Measurement Techniques*, **14**, 2013~2039 (2021)
- (3) JAXA : サテナビGOSAT-GW  
<https://www.satnavi.jaxa.jp/ja/project/gosat-gw/>
- (4) Fujinawa, T., et al. : First concurrent observations of NO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> from power plant plumes by airborne remote sensing, *Geophysical Research Letters*, **48**, No.14, e2021GL092685 (2021)
- (5) Futami, M., et al. : Development and ground performance evaluation of the TANSO-3 for the GOSAT-GW satellite, *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XXIX*, **13667**, 136670W (2025)
- (6) Okamura, Y., et al. : Current status and in-orbit calibration plan of TANSO-3 onboard GOSAT-GW, *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XXIX*, **13667**, 136670X (2025)

# 液体燃料合成に向けた SOEC共電解システム

川本 誠\*  
Makoto Kawamoto  
藤岡恭平†  
Kyohei Fujioka  
下笠諒平†  
Ryohei Shimokasa

篠木俊雄\*  
Toshio Shinoki  
西口博人†  
Hiroto Nishiguchi

SOEC Co-electrolysis System for Liquid Fuel Synthesis

\*先端技術総合研究所(工博)  
†同研究所

## 要 旨

三菱電機ではNEDO(国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構)委託事業“次世代FT反応と液体合成燃料一貫製造プロセスに関する研究開発”で、SOEC(Solid Oxide Electrolysis Cell)共電解の動作安定化と高効率化を目指したシステム開発に取り組んでいる。カーボンニュートラル社会の実現に向けては、カーボンリサイクル技術の早期実用化と社会実装が重要になる。SOECを用いた共電解はその一つで、水蒸気とCO<sub>2</sub>を同時に電解し、効率良く、水素とCOから成る合成ガスを得られる。この合成ガスは液体燃料の原料として利用できるため、カーボンリサイクルに貢献する。このプロジェクトでSOECスタックモジュールの動作条件を満足しつつ、システム排熱の約70%を再利用できる50kW級SOEC共電解システムの基本構成と運転シーケンスを開発した。

## 1. ま え が き

2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、NEDOではCO<sub>2</sub>からの液体燃料製造技術の開発を推進している。このプロジェクトは、SOEC共電解とFT(Fischer-Tropsch)合成を組み合わせた、CO<sub>2</sub>からの液体燃料一貫製造プロセスについて、要素技術の確立と事業化を見据えた実証を目標としている(図1)。当社は2023年10月から、一般財団法人 電力中央研究所、日本特殊陶業(株)及び東京科学大学と当該プロジェクトに参画し、50kW級SOEC共電解システムを開発している。

固体酸化物を電解質とするSOECは、約600~1,000℃の高温で動作することから、電極反応の抵抗や理論電解電圧が低減されて、低温で動作する他の電解方式と比較して高い電解効率を得られる(表1)。また、CO<sub>2</sub>を同時に電解する共電解が可能であり、得られるCOと水素から成る合成ガスを合成燃料の原料に利用できるため、カーボンリサイクル技術の一つとして注目されている。実用化に向けては、高温動作による電解セルの腐食劣化やCO<sub>2</sub>電解による炭素析出といったセルスタックの課題、SOECスタックモジュールの動作不安定や高温水蒸気の生成に必要なエネルギー融通といったシステム面の課題などがある。当社ではシステム面の課題を解決する構成や運転シーケンスを開発している。

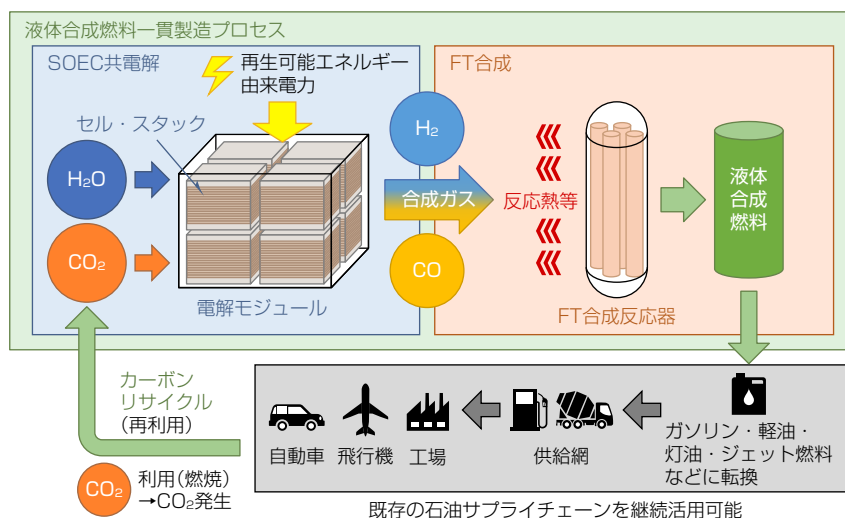


図1-液体合成燃料一貫製造プロセス<sup>(1)</sup>

表 1 - 電解方式の比較

| 方式   | アルカリ水電解               | PEM             | AEM             | SOEC                          |
|------|-----------------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|
| 概念図  |                       |                 |                 |                               |
| 開発段階 | 商用                    | 商用              | 技術開発            | 実証                            |
| 動作温度 | 60~100℃               | 50~90℃          | 50~70℃          | 600~1,000℃                    |
| 電解質  | アルカリ水溶液               | プロトン交換膜         | アニオン交換膜         | 固体酸化物                         |
| 電解効率 | 50~70%                | 45~70%          | 50~70%          | 80~85%                        |
| 主な課題 | ・水素純度が低い<br>・逆電流による劣化 | ・触媒に貴金属を用いるため高価 | ・アニオン伝導性と耐久性の両立 | ・触媒や電解質の劣化<br>・水蒸気生成に要するエネルギー |

PEM : Proton Exchange Membrane, AEM : Anion Exchange Membrane

## 2. SOEC共電解システム構成の開発

この章ではプロセスシミュレーションを用いたSOEC共電解システム構成の開発について述べる。

### 2.1 SOEC共電解システムのプロセスシミュレーションモデル

SOEC共電解システムではスタックモジュールのカソード側に水蒸気とCO<sub>2</sub>を、アノード側に空気を、それぞれ800℃で供給する必要がある。これらの条件を満足するように、SOECスタックモジュールを中心に、ヒーター、冷却器、ブロワー及び気化器などの機器で構成されるシステム基本構成(図2)を決定した。機器の間の物質とエネルギーのやり取りを計算し、システムの成立性やエネルギー効率をシミュレーションするために、プロセスシミュレーターを用いた。商用シミュレーターを利用できるが、SOECスタックモジュールはシミュレーター内に既存のモデルが存在しないため、先行研究<sup>(2)</sup>で開発された性能表示式を用いて要素モデルを構築し、シミュレーターに組み込んだ。これによって、SOEC共電解システムの構成機器での物質とエネルギーのやり取りをコンピューター上で再現し、消費エネルギーの計算が可能になった。

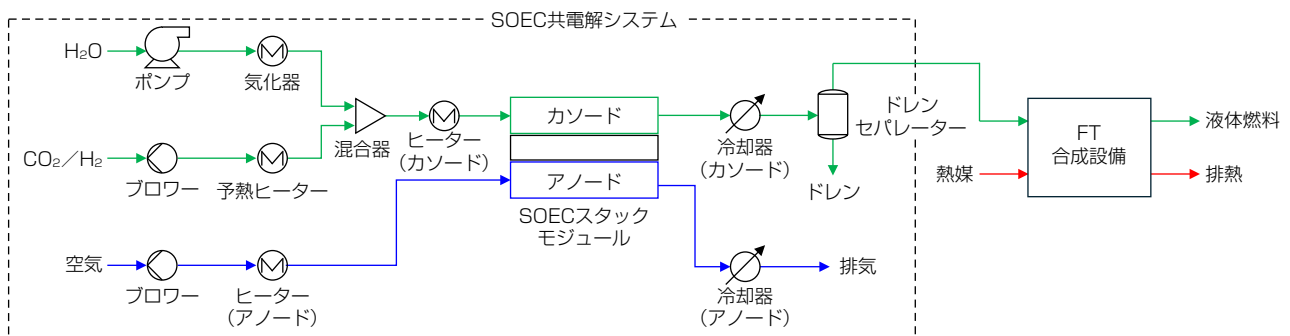


図2-基本構成のプロセスフロー

### 2.2 シミュレーションによるシステム内の熱需要と排熱の分析

図2の構成で、50kW級システムの熱需要とロスを計算した。スタックモジュールのカソード側にはH<sub>2</sub>O : CO<sub>2</sub> : H<sub>2</sub>を56.7 : 33.3 : 10の割合で供給し、ヒーターで800℃まで昇温すると仮定した。カソードからの合成ガスは冷却し、ドレンセパレーターで水分を分離してからFT合成設備に供給する。スタックモジュールのアノード側には、カソード側と同様に800℃まで昇温した空気を供給し、排ガスは冷却して排気すると仮定した。

図3左にシステムの排熱と熱需要の内訳を示す。排熱はカソードが11.7kW，アノードが10.9kWになった。また，FT合成設備からの15.0kWの排熱も利用可能である。システムの熱需要については各系統のヒーターが約9kW，気化器が10.7kWであった。スタックモジュールに供給する水蒸気の生成には多くの熱が必要で，システム熱需要の約36%を占めている。排熱と熱需要の温度は図3右に示すとおりである。

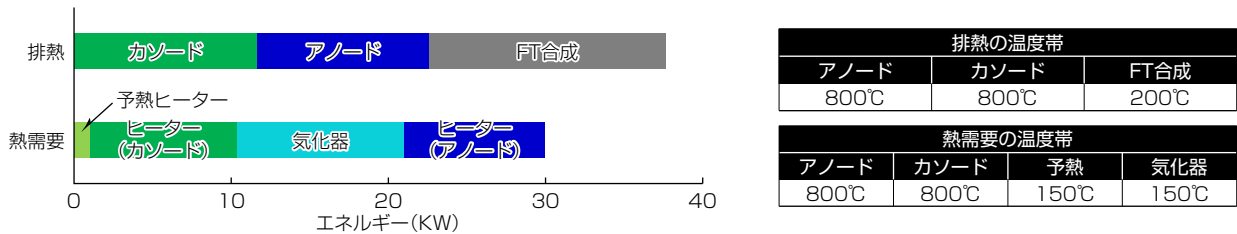


図3-基本構成でのプロセスの排熱と熱需要

### 2.3 熱マネジメントによるシステム消費エネルギー低減効果の試算

シミュレーション結果を受けて，温度帯の近い排熱と熱需要の間で熱融通ができる，図4のようなシステム構成を考案した。アノード，カソードの排熱はプレート型熱交換器を介して，それぞれの系統に供給されるガスの昇温に用いる。FT合成設備からの排熱は約200℃であることから，熱需要側の温度とマッチする水蒸気生成とCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>混合ガスの予熱に用いる。排熱を輸送する熱媒は高粘度のオイルが想定されるため，シェルアンドチューブ型の熱交換器を採用した。このシステムでのシミュレーションに当たって，熱交換器の性能を示す指標であるUA値は，予備検討から，カソード側，アノード側の熱交換器がそれぞれ125W/K，90W/K，水蒸気生成とCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>混合ガスの熱交換器がそれぞれ280W/Kと仮定した。

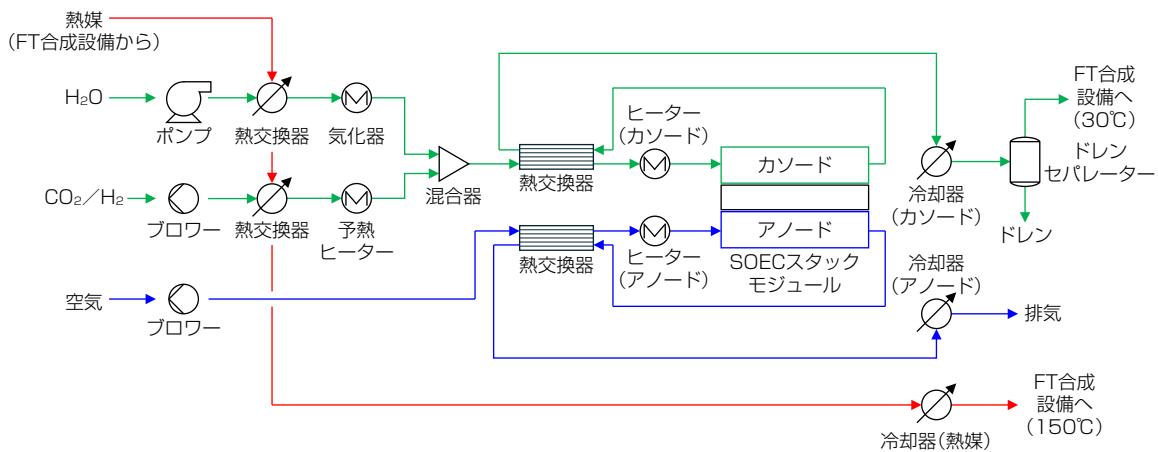


図4-排熱を融通するシステム構成

図5にシミュレーションで得たシステムの消費エネルギーと排熱の内訳を示す。アノード，カソードの排熱，及びFT合成設備からの排熱の72%を再利用し，ヒーター類の消費エネルギーを90%低減できる可能性が示された。しかしなが

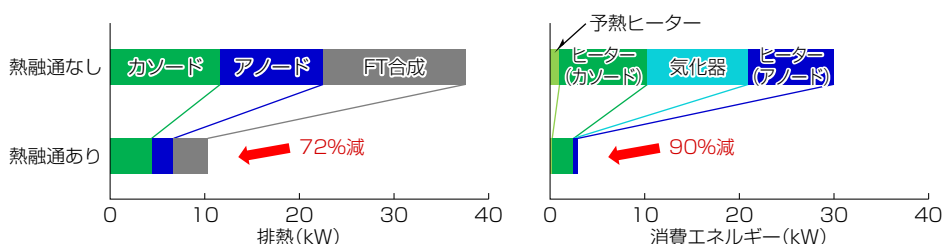


図5-排熱利用によるシステム消費エネルギー低減効果のシミュレーション結果

ら、現在のモデルは配管や機器からの放熱を無視した理想的な状態を仮定した結果である。実際のシステムでは放熱によるエネルギーロスが無視できないため、今後は機器からの放熱をモデル化してプロセスシミュレーションモデルの高度化を図るとともに、システム構成の最適化を進めていく。

### 2.4 システム圧力損失の計算

他のプロジェクト参画機関との情報交換を受けて、SOECスタックモジュールの耐圧は10kPaと仮定した。2.3節で検討した熱交換器の設置に当たっては、SOECスタックモジュールより下流の圧力損失、及びアノード-カソード間の極間差圧が耐圧を下回る必要がある。今回はシステムの主構成機器である熱交換器と配管の仕様を調整することで圧力損失を低減させた。各要素での圧力損失の計算結果を表2に示す。カソード、アノード共に圧力損失の総和は10kPaを下回っており、極間差圧も1.41kPaと、SOECスタックモジュールの耐圧要件を満たすことを確認した。

表2-スタックモジュール下流での圧力損失

| カソード側     |            | アノード側     |            |
|-----------|------------|-----------|------------|
| 機器        | 圧力損失 (kPa) | 機器        | 圧力損失 (kPa) |
| スタックモジュール | 6.00       | スタックモジュール | 4.00       |
| 熱交換器      | 0.47       | 熱交換器      | 0.99       |
| 冷却器       | 0.47       | 冷却器       | 0.43       |
| ドレンセパレーター | 0.01       | 配管類       | 0.20       |
| 配管類       | 0.08       |           |            |
| 総和        | 7.03       | 総和        | 5.62       |
|           |            | 極間差圧      | 1.41       |

## 3. システムの運転シーケンス開発

この章ではSOEC共電解システムの動作を安定化するための運転シーケンス開発について述べる。

### 3.1 制御のためのシステム構成

2章ではシステム運転時の熱効率と圧力損失を検討したが、システム運転のためには、システム起動時の各機器の制御が必要である。信頼性と安全性を保ってシステムを起動させるために、不活性ガスを導入するためのバルブや配管を加えたシステム構成を考案した。図6にシステム構成を示す。

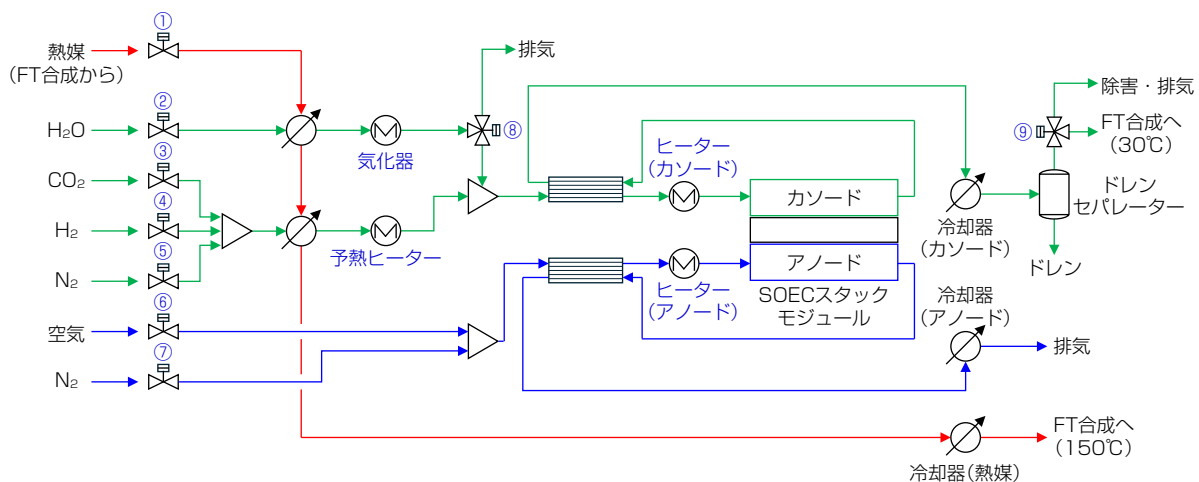


図6-運転シーケンス開発に用いたシステム構成

### 3.2 運転シーケンスの開発

図6のシステム構成でSOECスタックモジュールの動作を安定化するための運転シーケンスを検討した。一例として表3に起動時の運転シーケンスを示す。

表3-起動時の運転シーケンス

| 機器                      | フェーズ i | フェーズ ii | フェーズ iii | フェーズ iv | フェーズ v | フェーズ vi | フェーズ vii | フェーズ viii |
|-------------------------|--------|---------|----------|---------|--------|---------|----------|-----------|
| ① 熱媒                    | 閉      | 閉       | 開        | 開       | 開      | 開       | 開        | 開         |
| ② H <sub>2</sub> O      | 閉      | 閉       | 閉        | 開       | 開      | 開       | 開        | 開         |
| ③ CO <sub>2</sub>       | 閉      | 閉       | 閉        | 閉       | 閉      | 開       | 開        | 開         |
| ④ H <sub>2</sub>        | 閉      | 開       | 開        | 開       | 開      | 開       | 開        | 開         |
| ⑤ N <sub>2</sub> (カソード) | 開      | 開       | 開        | 開       | 閉      | 閉       | 閉        | 閉         |
| ⑥ 空気                    | 閉      | 閉       | 閉        | 閉       | 閉      | 開       | 開        | 開         |
| ⑦ N <sub>2</sub> (アノード) | 開      | 開       | 開        | 開       | 開      | 閉       | 閉        | 閉         |
| ⑧ 蒸気供給弁                 | 排気側    | 排気側     | 排気側      | 排気側     | プロセス側  | プロセス側   | プロセス側    | プロセス側     |
| ⑨ 合成ガス弁                 | 排気側    | 排気側     | 排気側      | 排気側     | 排気側    | 排気側     | 排気側      | プロセス側     |
| 気化器ヒーター                 | オフ     | オフ      | オン       | オン      | オン     | オン      | オン       | オン        |
| 予熱ヒーター                  | オフ     | オフ      | オン       | オン      | オン     | オン      | オン       | オン        |
| ヒーター(カソード)              | オフ     | オフ      | オン       | オン      | オン     | オン      | オン       | オン        |
| ヒーター(アノード)              | オフ     | オフ      | オン       | オン      | オン     | オン      | オン       | オン        |
| スタックモジュール               | オフ     | オフ      | オフ       | オフ      | オフ     | オフ      | 通電       | 通電        |

フェーズ i：窒素を供給し、システム内を窒素で置換する。

フェーズ ii：窒素／水素の混合ガスを供給し、システム内を還元雰囲気にする事でスタックの劣化を抑制する。

フェーズ iii：各ヒーターに通電し、システムの昇温を開始する。後段のFT合成設備で熱媒の昇温が始まっていると仮定する。熱媒を供給するバルブ(図6の①)を開いて、SOEC共電解システムの予熱に利用する。また、次フェーズでの水の供給に備えて、気化器の昇温を開始する。

フェーズ iv：水蒸気の供給を開始する。供給開始直後は水蒸気流量が不安定であり、水滴による異常昇圧などの懸念があるため、気化器の安定を確認してから次フェーズに移行する。

フェーズ v：蒸気供給弁(図6の⑧)を切り替えて、水蒸気をSOECスタックモジュールへ供給を開始する。

フェーズ vi：CO<sub>2</sub>の供給を開始する。水蒸気の供給後にCO<sub>2</sub>の供給を開始することで、SOECスタックモジュールでの炭素析出を回避する狙いがある。

フェーズ vii：SOECスタックモジュールに通電し、共電解を開始する。電解の安定を確認するまで合成ガスは除害してから排気する。

フェーズ viii：合成ガス弁(図6の⑨)を切り替えて、FT合成設備へ合成ガスの供給を開始する。

現在、このシーケンスはバルブの開閉やヒーターのオン／オフだけを対象としているが、今後は実際のシステムに適用できるように、バルブの開度やヒーター出力、PID(Proportional, Integral, Derivative)パラメーターなどを加えた運転シーケンスに高度化していく。

## 4. む す び

SOEC共電解の実用化に向けたシステム開発について述べた。システム内の熱マネジメントによって排熱の70%を再利用できるシステム構成と動作安定化のための運転シーケンスを開発した。

今後、起動・停止までを含めたシステム動作安定化が可能な運転シーケンス、及び動的なプロセスシミュレーションを開発し、SOEC共電解システムの実用化に貢献していく。

本稿の内容は、NEDOの委託事業(JPNP16002)として行った研究成果である。ここに謝意を表する。

## 参 考 文 献

- (1) 三菱電機：液体合成燃料製造に向けた「SOEC共電解実用化の研究開発」をNEDO委託事業として4者共同で開始(2023)  
<https://www.mitsubishielectric.co.jp/ja/pr/2023/pdf/1220.pdf>
- (2) Imabayashi, T., et al.: Evaluation of Electrolytic Characteristics with a Single Cell Developed as SOFC, ECS Transactions, **111**, No.6, 1493~1500 (2023)

三菱電機株式会社