

# 東光高岳技報

TAKAOKA TOKO REVIEW

No.12  
2025

未来へ  
そして世界へ



株式会社 東光高岳  
TAKAOKA TOKO CO., LTD.



WEB版はこちら↑

論文	卷頭言：電力・エネルギー分野の未来を切り拓く技術人材の育成	早川 直樹	1
	先端半導体向け超微細パンプ高さ計測センサの開発	水野 佑樹・石原 満宏・日名子 達也	2
	耐熱紙使用変圧器の劣化診断が可能な 新規評価技術の開発	陳 誠・出井 和弘・栗原 二三夫	6
技術紹介	系統安定化に資する電圧源動作スマート PCS 開発 および VSG との並列運転試験	小野 晋也・吉井 誠	10
	再生可能エネルギーの普及拡大や 電力の安定供給・高度利用を実現する DR shifTer	中山 匠・太尾 健・久保 滋	14
	電力の安定供給と高度利用へ貢献する PowerFactory による電圧変動解析技術	森 佑介	19
	電力機器の更なる信頼性向上と開発設計の効率化に向けた 気密構造のゴム解析技術	北村 拓真・森 佑介・滝澤 明広	24
	持続可能な社会に向けたエポキシモールド機器のリサイクル技術	松本 颯・大竹 美佳	28
	植物由来の絶縁油を使用した電力会社向け油入全装輸送変圧器	土屋 龍平・大山 修司	31
製品紹介	電力設備のレジリエンス向上に貢献する 72 kV 移動用ガス絶縁開閉装置の開発	岡村 裕之	32
	エネルギー消費効率を向上した油入形 2026 トップランナー変圧器	松下 洋一	34
	受変電設備の安定稼働に貢献する デジタル形保護計測装置 PACGEAR のモデルチェンジ	市川 隆之・長谷川 誠・山田 康久	36
	経路充電インフラの課題解決に貢献する 最大出力 150 kW EV 用大容量急速充電器	山本 倫斗・鈴木 剛志・鈴木 健司	41
	電気自動車の普及を後押しする 東光高岳製充電器への OCPP2.0.1 対応開始		44
	再エネの最適な利用計画の立案と最大限の活用を支援する需給一体型 EMS の開発		46
トピックス	配電ネットワーク実証試験場への大容量リチウムイオン蓄電池の設備導入		49
	変電所入退管理システム 東京電力パワーグリッド株式会社 全エリアへ納入		50
	JEC 規格準拠の海外製ステーションポストがいしを適用した断路器の納入開始		52
	スマートファクトリー化への取り組み 先進工場技術検証室の紹介		53
	計器センター事業の開始～次世代スマートメーター関連事業の成長に向けて～		54
	ラオスの自律的な広域連系システムの実現に貢献 —送電系統停電事故解析システム案件の完工— タカオカエンジニアリング株式会社		56

# 電力・エネルギー分野の未来を 切り拓く技術人材の育成



早川 直樹\*  
Naoki Hayakawa

「ドクターコースに進学しない？」数年前、博士前期（修士）課程1年の某学生に聞いてみた。彼は前年の卒業研究を精力的かつ自主的に進めてきた優秀な学生であり、大学院進学後も飛躍が期待されたため、早い段階で声を掛けた。「僕は将来は電力会社に就職したいので、ドクターコースに進学するつもりはありません」これが彼の回答であった。電力会社などのインフラ企業への就職を希望する学生は多い。しかし、当時、電力会社が博士後期（博士）課程の新卒学生を採用することは皆無と言って良い程なかった。筆者が就職担当をしていた頃に電力会社の技術者や人事担当者から伺った話もほぼ同様であり、「研究専門職であれば採用可能だが、工務部のような送変電の現場では博士人材を活かせない」というのが主な理由であった。その結果、電力・エネルギー分野の優秀な学生を博士後期課程に引き上げることを断念せざるを得ない事例がこれまでに何度かあった。

筆者は、博士後期課程学生が「自身の研究テーマに対する専門知識だけでなく、その周囲の関連分野に対する俯瞰知識も有し、それらを駆使して問題を発掘・解決する力やチームを牽引するリーダーシップを有した人材」となることをを目指して指導している（専門知識のみであれば、いわゆる「専門バカ」となる）。筆者は、「送変電の現場でこそ、博士人材に活躍してほしい」という思いから、学部生や博士前期課程学生に博士後期課程への進学を推奨するとともに、この思いを電力会社や電力機器メーカーの関係者に訴えてきた。その一環として、社会人の博士後期課程入学を受け入れ、企業・社会が博士人材を必要としていることを学生に示すとともに、電気事業連合会が創設した「パワー・アカデミー」(<https://www.power-academy.jp>, 2008年～) や文部科学省卓越大学院プログラム「パワー・エネルギー・プロフェッショナル育成プログラム」(<https://dpt-pep.w.waseda.jp>, 2018年～) などの産官学連携の取り組みに関わってきた。

上記の活動と関係者の理解・協力を得て、当研究室の2024年度博士後期課程修了生が某電力会社の送変電部門に初採用され、同社の2026年募集要項に「大学院博士了」の項目が新たに追加された。電力・エネルギー分野における博士後期課程修了生の就職環境に風穴が開いた気がした。冒頭の彼は博士前期課程修了後に希望通り電力会社に就職したが、彼に現在の状況を知らせてやりたい。

このように、博士後期課程修了後の就職環境は変革しつつあり、在学中の経済・生活支援も大幅に改善・充実している。より多くの学生が博士後期課程への進学意欲を持ち、今後の電力・エネルギー業界を産学両方から牽引できるように引き続き指導・育成していきたい。

博士後期課程修了生に限らないが、研究室の卒業・修了生が電力・エネルギー分野で活躍している様子を見聞きすることほど、教員冥利に尽きることはない。電力インフラ100年企業である株式会社東光高岳では、当研究室や本学の卒業・修了生が活躍している。また、博士後期課程修了生も多く採用されていると聞き及んでいる。このように早くから多様・多彩な人材を採用され、彼らが活力を持って活躍されている企業は、大学側から見ても期待が大きい。株式会社東光高岳が今後とも技術と共に創で未来のエネルギーネットワークをデザインし続けられることを期待する。

\* 名古屋大学大学院 工学研究科 電気工学専攻 教授

# 先端半導体向け超微細バンプ 高さ計測センサの開発

■ 水野 佑樹

Yuki Mizuno

■ 石原 満宏

Mitsuhiro Ishihara

■ 日名子 達也

Tatsuya Hinago

近年、生成AIや自動運転などの分野により、エレクトロニクス産業は急速に成長している。その成長には、半導体デバイスの性能向上が重要な役割を果たしており、回路の高密度化や複数のICチップ搭載による多機能化が進められている。しかし、回路の高密度化は、回路間を接続するバンプを微細化させ、それに伴いバンプの形成不良による半導体パッケージの不良リスクを高める。東光高岳では、ICチップ搭載の前工程でバンプの高さ不良を検出可能な、超微細バンプ向け計測センサ10300を開発した。今回は、5.7μm径、10μmピッチの球状バンプの計測事例とともに高精度計測の取り組みについて報告する。

## 1 はじめに

超微細バンプ向け計測センサ（以下、三次元センサ）は、物体の高さを計測する機能を有する。東光高岳では、三次元センサを搭載した三次元検査装置を製品展開しており、用途の一例として、半導体パッケージ内部のバンプと呼ばれる電極の高さを検査している（図1）。

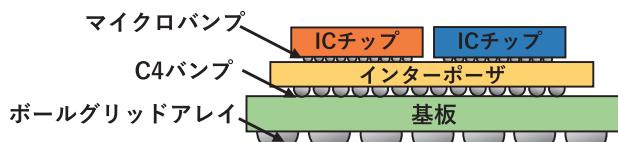


図1 半導体パッケージの構造例

図1の半導体パッケージは、近年の生成AIの急速な普及や自動運転実用化に対応するために、半導体デバイスの性能向上を実現する手段として開発されたものである。構造の特徴として、複数のICチップを高密度配線で接続し、1パッケージ内に収めたアドバンストパッケージ構造が採用されている。アドバンストパッケージは、パッケージに収めるICチップの数を増加させることによって性能向上を図るため、接続配線の微細化とパッケージサイズの大型化が同時に進められている。配線の微細化に伴い、配線の接続に使用されるバンプの微細化も進行しており、既に10μm以下の超微細バンプピッチ構造の半導体基板の製品開発も進められている。そして、パッケージサイズの大型化によって、基板上に載るICチップの数は増加し、結果としてパッケージあたりの接続バンプ数は、爆発的に増大している。このため、パッケージの量産に向けたバンプ検査装置では、増加するバンプ数に対応可能な高速性とバンプの微細化に対応した高精度な高さ検査能力が求められている。

本稿では、三次元センサの原理や構造を交えて、これらの要求に応える新たな三次元センサを開発したことを報告する。

## 2 10300三次元センサの開発

### 2.1 共焦点方式の三次元計測の原理

三次元センサは、光を利用して対象物の形状を三次元的に計測する物である。計測原理は、光計測の一つである共焦点方式を採用している。図2に共焦点方式の計測原理を示す。光源側ピンホールから射出された光が、レンズを通過して、対象物に焦点を結ぶ（合焦）時、反射光が光学的に同じ位置にある検出器側ピンホールに焦点を結ぶ一方で、対象物への焦点を結ぶ度合いによって、検出器側ピンホールを通過できる光の量が変化し、検出器の出力が変化する。この特徴を共焦点効果と呼ぶことになると、この共焦点効果を利用して、対象物の高さを計測することが可能になる。実際の計測では、対象物を光軸方向に駆動する、あるいは、レンズを駆動することで、サンプリング位置における検出器の出力値を取得し、値が最大となる位置を検出することで高さ計測を行っている。三次元計測を実現するためには、さらにXY方向にもスキャニングする必要があり、一般的には計測時間がかかる方式である。

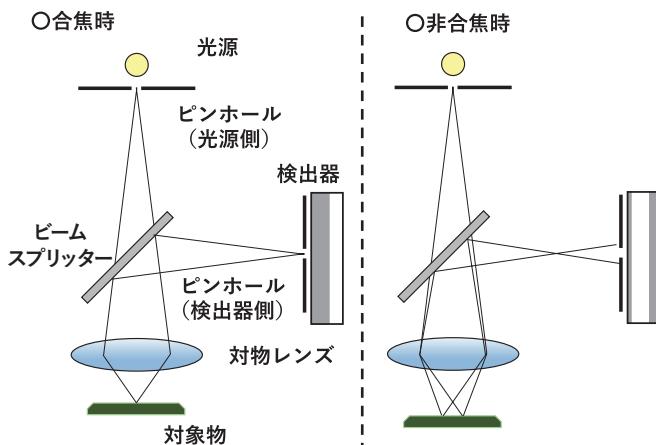


図2 共焦点方式の三次元計測の原理

## 2.2 共焦点撮像系

前節の課題を解決して高速化を図るために、多数のピンホールを二次元に配列したピンホールアレイ（以下、PHA）を採用することで、XY方向のスキヤニングする必要無くその領域を画像として情報を取り得る共焦点撮像系を構成した。PHAを用いる場合、PHA上の各ピンホールの間隔は、共焦点効果を得るために、一定の距離を離して配置する必要がある。ただし、このままでは、ピンホール以外のマスクされた部分は不感領域となり、分解能が著しく落ちてしまう問題が生じる。そこでPHAをリニアモータステージへ搭載し、一方向へ走査することで、マスク領域で取得できなかつた対象物の情報を取得可能とし、高解像度の撮像を実現している。リニア走査の詳細については、参考文献(1)を参照されたい。

## 2.3 従来の光学的焦点移動機構

共焦点効果を得るために、光軸方向に異なる位置でサンプリングする必要があり、これを光学的に実現する機構を光学的焦点移動機構と呼んでいる。従来当社では、光学的焦点移動機構として円板方式を採用していた。

円板方式による焦点移動機構の構造を図3に示す。円板の円周上には、厚みの異なる平行平面ガラスが並べられており、すべての平行平面ガラスの中心が対物レンズの光軸を横切るように円板を連続回転させると、ガラスの厚さに比例して対物レンズの焦点位置が移動する。この特徴を利用して走査することで、高速な光軸方向の走査を実現していた。しかしながら、円板への平行平面ガラスの取付け姿勢誤差（傾き）が完全には取り切れず、入力した画像に横ずれが発生して計測に誤差を生じさせる問題があることがわかっている。現在開発している三次元センサでは超微細バンプを計測する必要があるため、この横ずれ誤差の影響は大きいことは間違いない、新たな光学的焦点移動機構を開発することになった。

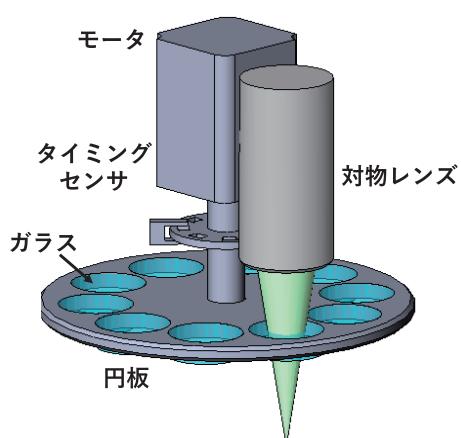


図3 従来の光学的焦点移動機構の構造

## 2.4 新規の光学的焦点移動機構

三次元センサの開発に当たり、新たな光学的焦点移動機構を開発した。焦点移動の機構部をリニアモータステージへ搭載することで、光軸方向の焦点移動が安定し、円板方式で問題となっていた平行平面ガラスの取付け姿勢誤差や回転による振動の影響を解決している。

新たな光学的焦点移動機構の模式図を図4に示す。PHA部とリレーレンズ系をひとまとめとしたユニットを、一軸のリニアモータステージ上に配置し、リニアモータステージの移動により光軸方向の離散的なサンプリング（光学的焦点移動）を実現した。リニアモータステージには、リニアスケールが取り付けられており、リニアスケールの座標によって、検出器であるカメラにトリガーが発せられ、正確な位置での画像取得が可能となっています。

本機構の特徴は、円板方式では不可能であった、画像取得ピッチと高さ計測の範囲を自由に変更できることである。これにより、計測対象に応じた、最適な精度と速度への調整が可能となった。

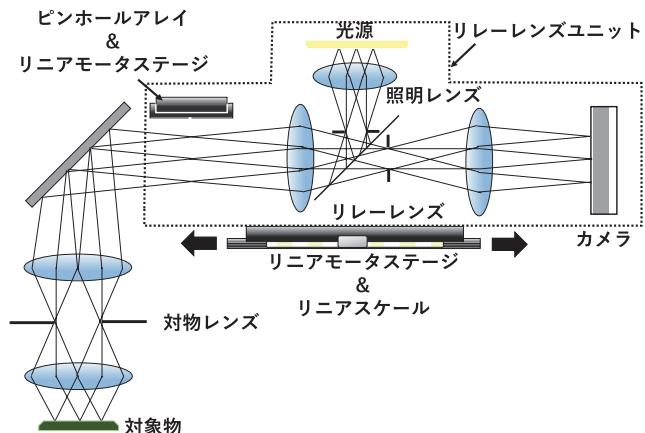


図4 新規光学的焦点移動機構の模式図

## 2.5 三次元センサの仕様・構造

今回開発した10300三次元センサ（型式：SCS-10330R2）の外観図を図5、仕様を表1に示す。SCS-10330R2は、超微細バンプの計測を可能とするためにXY分解能1.11μmと高解像度化している一方で、パッケージの量産に向けたバンプ検査機への適用を前提に、高速性を重視して9×9mmの広視野化も同時に実現している。これにより、高解像度でありながら12インチウェーハ検査5WPH(Wafer Per Hour)の高速検査を可能としている。計測の要である対物レンズに対しては、最終調整および評価用にシャックハルトマン波面収差計測機<sup>注1)</sup>を開発し、リアルタイムに収差状況を把握しながらの光学調整を可能とし、安定した収差<sup>注2)</sup>性能のレンズ製作を実現した。

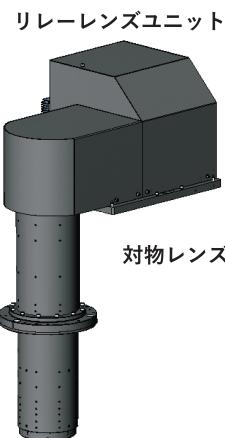


図 5 SCS-10330R2 の外観図

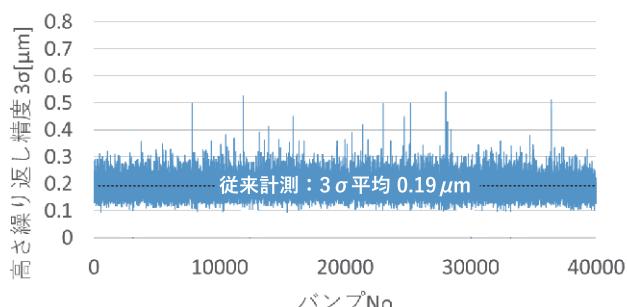
表 1 SCS-10330R2 の仕様

項目	SCS-10330R2
光計測方式	共焦点
視野サイズ	約 9 × 9 mm
XY 分解能	1.11 μm
Z 分解能	0.04 μm
Z 計測範囲	最大 300 μm
スループット ※条件: 12インチウェーハの 28 × 34 mm × 58 die 計測時	5WPH

### 3 SCS-10330R2 の検証結果

#### 3.1 超微細バンプの計測結果一例

超微細バンプの高さ計測の繰り返し精度評価の結果を図 6 に示す。計測対象のバンプは、5.7 μm 径、10 μm ピッチの球状バンプ 40,000 個である。基板からバンプ頂点までの高さを 120 回繰り返し計測し、バンプ毎に計測値のばらつきを表す  $3\sigma$  値をグラフ化している。各バンプの繰り返し精度の平均は約 0.19 μm であり、高精度に計測できていることがわかる。

図 6  $\phi 5.7 \mu\text{m}$  球状バンプの繰り返し精度

#### 3.2 超微細バンプの計測課題

5.7 μm 径の球状バンプを計測した時の全焦点輝度画像を図 7 に示す。全焦点輝度画像とは、立体物の形状に対し、すべての高さで焦点が合っている画像であり、共焦点計測の結果として得られる画像である。バンプ頂点に注目すると、1 画素で光るものもあれば、数画素で光るものも存在し、この見え方によって、計測結果のばらつきに影響があることが判明しており、これを画素割れ問題と称している。この現象は、バンプ頂点と検出器の画素の位置関係で発生している。(図 8)。そして、バンプが微細であるほど本現象は顕著となる。

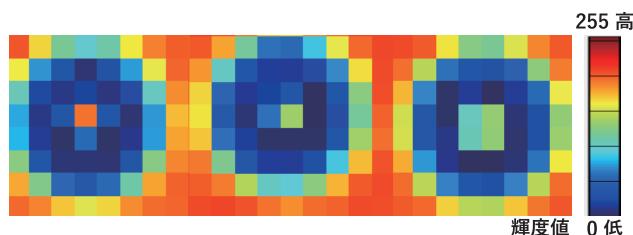
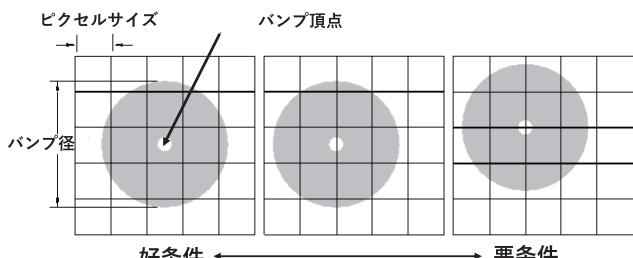
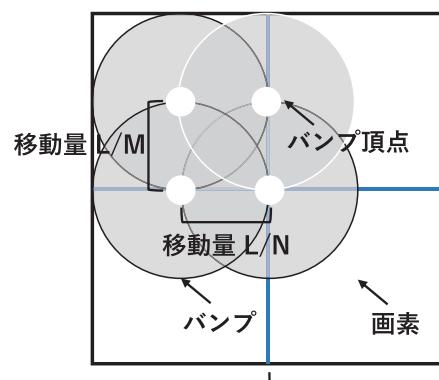
図 7  $\phi 5.7 \mu\text{m}$  球状バンプの全焦点輝度画像

図 8 バンプと画素の位置関係を表す図

#### 3.3 高精度計測処理

上記画素割れ問題への対策として、サブピクセルシフト (図 9) という高精度計測処理方法がある。複数回の計測毎に画素より微小な量 (サブピクセル量) だけ位置をシフトさせることで画素割れによる計測のばらつきを平均化することが可能になる。図 9 では、移動量を画



※M,Nは任意の分割数 画素サイズL

図 9 サブピクセルシフトの模式図

素の半分とし、X方向に2回、Y方向に2回位置を変えて計測する例を示している。さらに複数回計測して平均を取ることで、中心極限定理<sup>注3)</sup>により、その平均値がもつ標準偏差は $\sigma/\sqrt{n}$  (n: 計測回数) となり、繰り返し精度も向上させることが可能である。

本処理よりバンプ高さ計測を実施した結果を図10に示す。使用したサンプルは、前述の計測例と同じものである。4回のサブピクセルシフトを1周期として30周期（計測としては120回）の計測を行いその平均値の繰り返し精度 $3\sigma$ をグラフ化した。本処理を行うことで、各バンプの繰り返し精度の平均が $0.11\mu\text{m}$ と高精度化が実現できている。図6と比べてみると、異常値のような部分が少なくなり、画素割れによるばらつきが改善されていることがわかる。

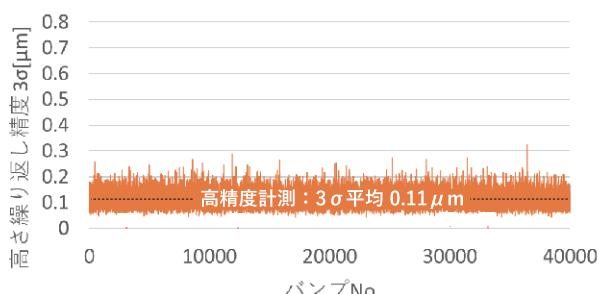


図10 高精度計測処理による繰り返し精度

## 4 おわりに

新たに開発した三次元センサ SCS-10330R2 の構造と超微細バンプの繰り返し精度の評価結果を述べた。SCS-10330R2 は $10\mu\text{m}$ ピッチレベルの超微細バンプの計測が可能であり、かつ5WPHの高速性を有していることから、今後増えてくると考えられる大型のアドバン

ストパッケージに向けたバンプ検査が可能になるとを考えている。今後は、さらなる高精度化、高速化を進めていく所存である。

### ■参考文献

- (1) 石原, 日名子, 井上, 水野: “リニア走査型共焦点光学系による高速マイクロバンプ高さ計測”  
エレクトロニクス実装学会講演論文集, Vol.29, No.17E5-1, (2015)
- (2) 水野, 石原, 日名子: “超微細バンプの計測を可能とする三次元センサの開発”  
エレクトロニクス実装学会春季公演大会プログラム, Vol.39, No.13C4-4, (2025)

### ■語句説明

- 注1) シャックハルトマン波面収差計測機: 光学系における光学性能の指標となる波面の歪みや収差を測定する計測機。計測機内にマイクロレンズアレイが配置されており、各マイクロレンズによって波面の一部が焦点面にスポットとして形成され、そのずれを解析することで、波面の歪みが計算できる。
- 注2) 収差: 光学系を通過した光が、理想的な一点に集光されない光線のズレのことを指す。
- 注3) 中心極限定理: 大きなサンプルサイズであれば、個々のデータの分布に関わらず、標本平均の分布が正規分布に近づくことを示す統計理論のこと。

### 水野 佑樹

光応用検査機器事業本部  
検査機器製造部 開発グループ 所属

### 石原 満宏

光応用検査機器事業本部 所属

### 日名子 達也

光応用検査機器事業本部  
検査機器製造部 開発グループ 所属

# 耐熱紙使用変圧器の劣化診断が可能な新規評価技術の開発

■ 陳 誠

Cheng Chen

■ 出井 和弘

Kazuhiro Idei

■ 栗原 二三夫

Fumio Kurihara

既設受変電設備の高経年化に伴い、変圧器メンテナンスのスマート化が求められている。東光高岳では、センシングにより油温と油中水分量を連続で感度良く測定することで、巻線絶縁紙の劣化度を推定する技術の開発を進めている。近年、変圧器の温度上昇限度格上げのため、耐熱性を付与した絶縁紙を巻線に使用した変圧器の普及が進んでいるが、従来の劣化診断手法が適用できない事例が報告されており、代替となる劣化診断手法が必要とされている。そこで、センシングによる劣化度の推定が、耐熱紙を使用した変圧器に適用できるか検討を行った結果、適用できる可能性が示唆された。

## 1 はじめに

### 1.1 変圧器メンテナンスのスマート化に向けた動き

デジタル化が進む現代において、急速に進展する技術革新や既設受変電設備の高経年化、少子高齢化に伴う産業構造変化などの課題へ対応するため、IoTやAIを活用し、安全性と生産性の向上を両立させる「スマート保安」の取り組みが経済産業省主導のもと官民連携で進められている<sup>(1)</sup>。さらに、各電力機器メーカーにおいても、さまざまな変電所監視・診断システムが検討、実現されている。特に、変圧器メンテナンスの分野においては、安定稼働の担保や予知保全、保守効率向上といった観点で、センシング技術、IoT技術による変圧器の状態監視や診断・解析技術を用いた機器メンテナンスのスマート化が求められている。

### 1.2 変圧器の状態診断

変圧器内部で放電異常や過熱異常が発生した際には、絶縁油が異常時の熱エネルギーによって分解され、水素をはじめとする絶縁油の分解ガスが生成される。変圧器の内部異常を早期に検出する手段として、変圧器から採油した絶縁油中の溶存ガス分析を行うことによる変圧器内部異常診断が広く用いられている。

また、変圧器の寿命については巻線に用いられる絶縁紙の劣化により平均重合度<sup>(注1)</sup>（以下、DP）の低下することで決まる<sup>(2)</sup>。しかし、稼働中の変圧器から絶縁紙を採取して分析することはできない。そこで、絶縁紙の劣化時に生成され油中に溶存する二酸化炭素と一酸化炭素（以下、CO<sub>2</sub> + CO）やフルフラール<sup>(注2)</sup>といった劣化生成物の濃度を分析し、間接的に変圧器の経年劣化診断を行う手法が広く用いられている。

センシング技術、IoT技術により上記のような異常診断・劣化診断をオンラインで実施できれば予知保全、保守効率向上に寄与するため、東光高岳では変圧器メンテナンスのスマート化に向け、センシング技術による異常診断・劣化診断に関する研究を進めている。

これまでの研究で、異常診断については、油中水素の生成挙動を油中水素センサにより連続で感度良く監視することで、その挙動から変圧器内部の放電異常や過熱異常を診断できる可能性を確認している<sup>(3)</sup>。また、劣化診断については、変圧器内部では巻線絶縁紙の劣化に伴って、絶縁油・絶縁紙間の水分平衡関係<sup>注3)</sup>が変化することに着目し、変圧器内の油温変化に伴う油中水分量の変化を、温度センサや油中水分センサを用いて連続で感度良く測定することで、変圧器内の巻線絶縁紙の劣化度を推定できる可能性を見出している<sup>(3)</sup>。

これらの技術により、遠隔地から変圧器を常時監視し状態を把握できるため、メンテナンス業務の省力化や適切な更新時期の予測、異常の予知保全などへの活用が期待できる。

### 1.3 耐熱紙使用変圧器の劣化診断における課題

2014年にJEC-2200が改定されたことにより、変圧器の巻線絶縁紙にクラフト耐熱処理絶縁紙<sup>注4)</sup>（以下、耐熱紙）が使用されている<sup>(4)</sup>。JEC改定前に設置された変圧器に広く用いられているクラフト絶縁紙（以下、普通紙）を用いた場合と比べて、変圧器の温度上昇限度を10 K高めることができると規定されていることから、急速に耐熱紙使用変圧器の普及が進んでいる。

一方で、耐熱紙使用変圧器では、劣化生成物であるCO<sub>2</sub> + COやフルフラールを指標とする従来の劣化診断が困難である。CO<sub>2</sub> + COが普通紙使用変圧器と比較して多く生成される事例や、耐熱紙に添加されたアミン系化合物の影響によりフルフラールが非常に少なくなってしまう事例が報告されている<sup>(5)</sup>。そのため、従来の劣化診断手法の代替となる手法の研究が各所で進められている。

### 1.4 本研究の着眼点

東光高岳で研究を進めているセンシングによる変圧器の劣化診断技術は、高経年化が進んでいる普通紙使用変圧器を中心として実用化を目指している。この技術は、絶縁紙の劣化生成物を指標とせずに劣化度の推定が

可能であることから、従来の劣化診断手法では診断が難しい耐熱紙使用変圧器にも適用できる可能性が考えられる。しかし、耐熱紙の劣化に伴う油温と油中水分量の変化が、普通紙使用変圧器と同様の傾向を示すかは不明であった。そこで、診断技術の前提となっている絶縁油・絶縁紙間の水分平衡関係が、普通紙と耐熱紙で同様の傾向を示していれば、油温と油中水分量の関係についても同様の傾向になると考えた。本研究では、普通紙と耐熱紙で絶縁油・絶縁紙間の水分平衡関係について検証、対比を行い、センシングによる劣化診断が、耐熱紙使用変圧器に適用できるかを明らかにすることを目的とした。

## 2 劣化診断の代替技術

### 2.1 油温と油中水分量の関係

東光高岳のセンシングによる劣化診断技術の前提となっている絶縁油・絶縁紙間の水分平衡関係について詳しく説明する。変圧器内では、絶縁紙と絶縁油の間で水分が吸脱着することで水分平衡を保っている。油温上昇時には絶縁紙に吸着している水分が脱離することで絶縁油中に拡散し、油温が低下すると絶縁紙に再吸着される。このような水分の吸脱着が生じるため、温度によって水分平衡が変化することが知られている。また、普通紙では絶縁紙の劣化によって絶縁紙の保水力が低下し、水分平衡が絶縁油側にシフトすることが知られている<sup>(6)</sup>。この現象に着目し、油温と油中水分量の傾向を連続で感度良く測定することで、絶縁紙に吸脱着される水分量から、劣化に伴う水分平衡の変化を検出できると考えた。

### 2.2 実験的検討

新品の絶縁紙 (DP1250) と変圧器の寿命レベルとされる劣化度に調整した絶縁紙 (DP350) を用いて、季節や負荷に応じた実変圧器 (以下、実器) の油温を模擬したパターンで油温を変化させ、絶縁油・絶縁紙間で吸脱着する水分を油中水分量としてセンサで連続測定した検証を実施している<sup>(7)</sup>。検証結果の一例を図1に示す。

油温変動に対して、油中水分量はヒステリシスループ

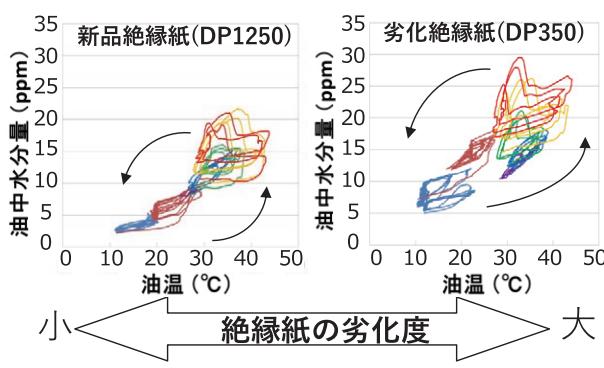


図1 油温変化に対する油中水分量の変化

状の変化傾向を示しており、油温の変化に伴う水分の吸脱着を感度良く捉えていると考えられる。また、絶縁紙の劣化に伴い油中水分量が増加する方向にループがシフトすることが確認された。これは絶縁紙の劣化により、水分平衡が油側へシフトしているという知見と合致している。以上より油温と油中水分量をセンサで取得することで、絶縁紙の劣化度の推定が可能であると示唆された。

### 2.3 実器を用いた検討

既設の経年数の異なる一般産業向け配電用変圧器を用いた実器検証を行った。変圧器の排油弁を介してセンサを取り付け、絶縁油を循環させ連続的に油温と油中水分量のデータを取得した。また、センシングにより推定した劣化度と比較するため、センサ取り付け前に採油を行い、油中  $\text{CO}_2 + \text{CO}$  量および油中フルフラール量からDPを推定し、DP450を劣化度100%として実器の推定劣化度を求めた。図2に実器での検証風景を、図3に実器から取得した油温と油中水分量の関係を示す。なお、図3では検証範囲内の油温と油中水分量の最大値をそれぞれ1.0としてグラフ化した。劣化の進行とともにプロットが高水分側 (上方向) ヘシフトしている傾向が確認された。また、各変圧器のプロットに対して近似曲線を作成すると、劣化に伴い近似曲線の係数が変化していく傾向が見られた。各変圧器における近似曲線の

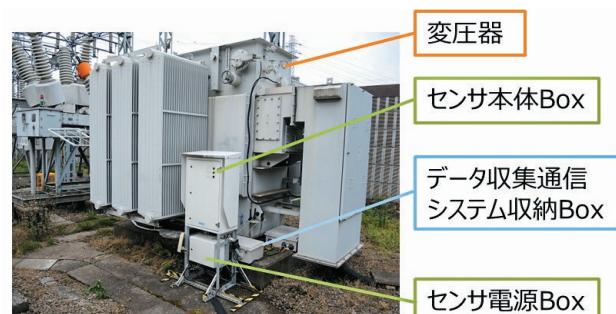


図2 実器検証風景

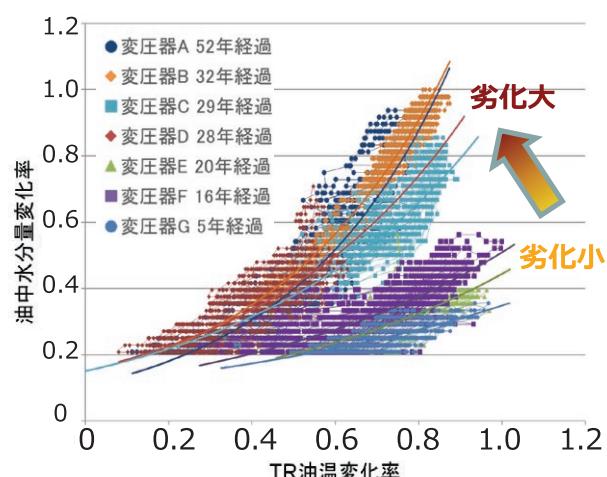


図3 実器から取得した油温と油中水分量の関係

係数と推定劣化度との間には相関が見られることが確認された。この係数を用いることで、センシングによりオンラインで巻線絶縁紙の劣化度が推定できる可能性が示唆された。

### 3 耐熱紙使用変圧器への適用検討

### 3.1 実験方法

2章で示唆された手法が、耐熱紙使用変圧器へ適用できるか確認するため、実験を行った。

ガラスシリンジに DP と紙中水分量を調整した絶縁紙を入れ、脱気した絶縁油を満たした。この際、油と紙の比率が、実際に製造している耐熱紙使用変圧器と同等になるように絶縁紙を秤量した。このシリンジを恒温槽に入れ、所定の温度で水分平衡状態になるまで静置した。JIS C 2101: 2010 に準拠し、平衡化後の油中水分量を測定した。取得した油中水分量と紙中水分量の関係を油温ごとにプロットし、絶縁油・絶縁紙間の水分平衡関係を比較評価した。**表 1** に実験条件を示す。

表 1 実験条件

項目	試験条件
絶縁紙	普通紙：新品（DP991）， 熱劣化品（DP634, 421） 耐熱紙：新品（DP1062）， 熱劣化品（DP646, 578）
絶縁油	鉱油（JIS C 2320:2010 絶縁油 1種 2号）
紙中水分量	0.5%（低水分レベル） 2%（現地据付基準レベル） 4%（高水分レベル）
温度	20°C, 50°C, 80°C

### 3.2 実験結果

### (1) 新品絶縁紙における水分平衡関係の比較

図4に、新品の普通紙・耐熱紙の絶縁紙-絶縁油間の水分平衡関係を示す。普通紙と耐熱紙の水分平衡は、ともに累乗近似で表される曲線となることがわかつた。また、耐熱紙は普通紙と比較して、油中水分量が増加す

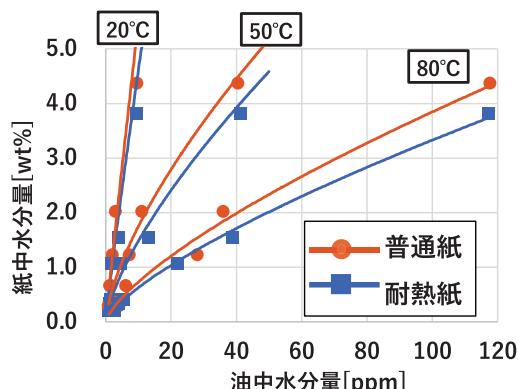


図4 普通紙および耐熱紙の水分平衡関係（新品）

る方向に移動していることから、水分平衡が若干油側へシフトする傾向を確認した。

## (2) 劣化度による水分平衡関係の変化

図5に普通紙、耐熱紙の各DPにおける水分平衡関係を示す。普通紙、耐熱紙のどちらもDPが小さくなるほど油中水分量が増加する方向に移動していることから、耐熱紙においても普通紙と同様に、劣化に伴い水分平衡が油側へシフトする傾向であることが確認できた。

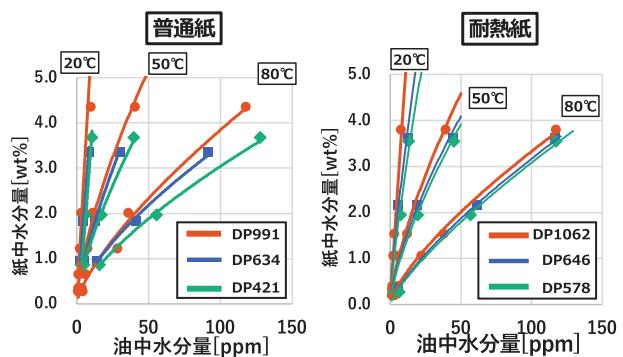


図5 DPごとの水分平衡関係

### 3.3 考察

得られた実験結果から、普通紙と耐熱紙の水分平衡関係に差が生じる原因や、劣化に伴う油温と油中水分量の関係変化について考察した。

### (1) 普通紙と耐熱紙の水分平衡の差に関する考察

絶縁紙に対する水分の吸着熱<sup>注5)</sup>が小さくなると水分平衡が油側へシフトすることが知られている<sup>(6)</sup>。普通紙と耐熱紙の水分平衡の差が吸着熱の差に起因すると考え、普通紙と耐熱紙の吸着熱を算出し、対比を行った。单分子層吸着<sup>注6)</sup>に吸着熱の考え方を取り入れた式として、式(1)が報告されている<sup>(8)</sup>。

$$\frac{1}{x} = \frac{1}{a} + \frac{1}{ac} \cdot \exp\left(\frac{q}{RT}\right) \dots \dots \dots \quad (1)$$

( $x$ : 単分子吸着量,  $a$ : 定数,  $c$ : 吸着質の濃度,  $q$ : 吸着熱,  $R$ : 気体定数,  $T$ : 絶対温度)

式 (1) によれば一定温度における  $1/x$  と  $1/c$  の関係をプロットし、直線関係が得られる範囲では单分子層吸着が起こっていることになる<sup>(6)</sup>。本実験は絶縁紙 - 絶縁油間の水分平衡に関するものであるため、 $x$  は紙中水分量、 $c$  は油中水分量が当てはまる。各紙種、油温ごとに  $1/x$  と  $1/c$  の関係をグラフ化したものを図 6 に示す。普通紙、耐熱紙ともにほぼ直線の関係が得られたことから、本検証の範囲では单分子層吸着が主であると考えられる。これらの直線の近似式から式 (1) を用いて吸着熱を計算すると、普通紙の吸着熱は 27.84 kJ/mol、耐熱紙の吸着熱は 24.12 kJ/mol と求めることができる。したがって、耐熱紙は普通紙に比べて油中での水分の吸

着熱が小さいことから、水分平衡が油側へシフトしていると考えられる。

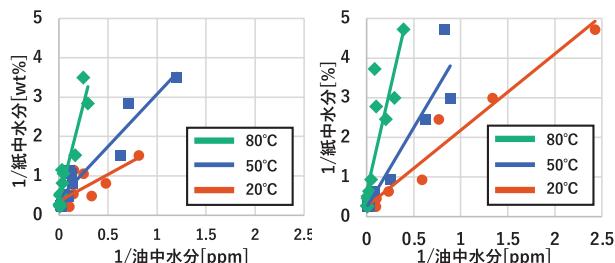


図 6 1/oil 中水分と 1/paper 中水分の関係

(2) 普通紙と耐熱紙の劣化に伴う油温と油中水分量の関係変化に関する考察

水分平衡時には油中水分量、紙中水分量は一定の値になることから、油/紙の水分濃度比 [ppm/%] というパラメータを用いることで、紙中水分量による影響を除いた評価ができると考えた。図 7 に、普通紙と耐熱紙がそれぞれ DP1000 のときの油/紙の水分濃度比を 1 とした場合の、DP と水分濃度比の変化率の関係を示す。普通紙と耐熱紙でおおよそ一致する直線となつたことから、普通紙と耐熱紙で劣化時の水分濃度比の変化率が近いことを表していると考えられる。したがって、劣化に伴う油温と油中水分量の関係変化も、普通紙と耐熱紙で傾向が近いと予想される。

これは普通紙使用変圧器で取得している実器データを活用して耐熱紙使用変圧器の劣化診断が実現できる可能性があることを示唆している。

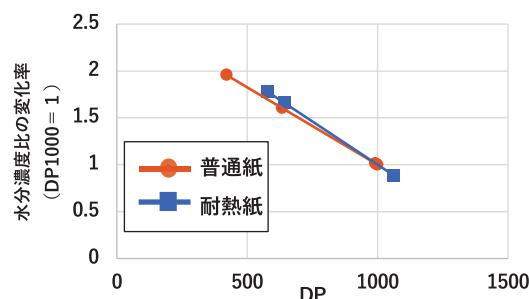


図 7 DP と水分濃度比の変化率の関係 (DP1000 = 1)

## 4 おわりに

普通紙と耐熱紙で水分平衡について検証した結果、普通紙と耐熱紙の水分平衡には差があるが、同様の傾向を示していることがわかった。このことから、従来の劣化診断手法の適用が難しい耐熱紙使用変圧器においても、センシングデータに何らかの補正をすることで、劣化診断ができる可能性が示唆された。

今後はセンシングによる変圧器劣化診断技術について、精度向上を図るとともに、耐熱紙使用変圧器でのセンシングデータ補正方法の検討や耐熱紙を使用した実器

での検証を行い、適用範囲を耐熱紙使用変圧器に拡大することを目指していく。変圧器の信頼性向上やメンテナンスの効率化に加え、耐熱紙使用変圧器の劣化診断ニーズに対応すべく、変圧器メンテナンスのスマート化に向けた取り組みに尽力していく。

## ■参考文献

- 経済産業省：「電気保安分野スマート保安アクションプラン」, (2021)
- 電力用変圧器保守管理専門委員会：「油入変圧器の保守管理」, 電気協同研究, Vol.54, No.5 (その1), (1999)
- 出井和弘, 折戸由貴, 栗原二三夫：「センシングによる受電設備の状態診断技術」, 東光高岳技報, No.9, (2022)
- 電気規格調査会標準規格, JEC-2200-2014, 変圧器
- 宮城克徳, 大江悦男, 山形直樹：「耐熱絶縁紙の油中加熱劣化特性と劣化メカニズムの推定」, 電気学会論文誌 B, Vol.31, No.1, (2011)
- 「絶縁油と絶縁物の水分平衡関係専門委員会活動報告」, 石油学会絶縁油分科会技術資料, No.07034, (2007)
- 栗原二三夫, 出井和弘：「変圧器メンテナンスのスマート化へ向けた状態診断技術の開発」, 電気現場, 11月号, (2021)
- 石井敏次, 上田万次郎：「プレスボードの誘電的性質に及ぼす吸湿機構の影響」, 電気学会雑誌, Vol.87-11, No.950, (1967)

## ■語句説明

- 平均重合度：高分子化合物を構成する繰り返し単位の数を重合度 (DP) とよぶ。重合度には分布があるため平均値を用いる。絶縁紙の化学構造はセルロースを単位構造とし、新品絶縁紙の DP は約 1,000 程度とされる。劣化とともに DP は減少する。
- フルフラール：絶縁紙の劣化指標の一つ。経年劣化などで、絶縁紙を構成するセルロースが分解した際に生成される物質。絶縁油中に溶解する。
- 水分平衡関係：物質間の水分の吸脱着により水分量が一定割合に保たれる状態。本稿では絶縁紙中の水分が油温や絶縁紙の劣化の影響で油中に溶出し、紙中水分量と油中水分量が一定の割合に保たれること。
- クラフト耐熱処理絶縁紙：添加剤を加えるなどの処理により耐熱性を向上させた絶縁紙。
- 吸着熱：気体や液体の分子が固体表面に吸着する際に変化するエネルギー。
- 単分子層吸着：吸着質が固体表面を分子 1 層で覆う状態。本稿では吸着質は水分、固体は絶縁紙である。

## 陳 誠

戦略技術研究所 技術開発センター  
材料技術グループ 所属

## 出井 和弘

戦略技術研究所 技術開発センター  
材料技術グループ 所属

## 栗原 二三夫

戦略技術研究所 技術開発センター  
材料技術グループ 所属

# 系統安定化に資する電圧源動作スマートPCS開発およびVSGとの並列運転試験

■ 小野 晋也

Shinya Ono

■ 吉井 誠

Makoto Yoshii

近年脱炭素を目的として再生可能エネルギーや蓄電池など、IBR<sup>注1)</sup> (Inverter-Based Resource／インバータベース電源) が普及している。将来 IBR が主力電源となる系統においては、系統電圧・周波数を安定化できる GFM (Grid ForMing inverter／系統形成インバータ) が注目されている。東光高岳では GFM を実現する方式の一つである電圧源<sup>注2)</sup>動作スマート PCS<sup>(1)</sup>を開発した。また IBR が主力電源となる系統の諸課題を見据え、同じく GFM を実現する方式の一つである川崎重工業株式会社製 VSG (Virtual Synchronous Generator／仮想同期発電機)<sup>(2), (3)</sup>との並列運転試験<sup>(4)</sup>を実施した。

## 1 はじめに

第7次エネルギー基本計画において、S+3E<sup>注3)</sup>を原則としたうえで再生可能エネルギーの主力電源化が求められている。再生可能エネルギー電源は脱炭素電源である一方、発電量が天候などに左右され発電と需要の傾向が必ずしも一致しない。よって蓄電システムの導入が有効となる。再生可能エネルギー電源や蓄電システムの多くは系統連系インバータを介する IBR<sup>注1)</sup> (Inverter-Based Resource／インバータベース電源) である。IBR の普及が進むと系統内の同期発電機（回転体を持つ発電機）が相対的に減少し、同期発電機の物理特性（慣性<sup>注4)</sup>など）が担ってきた系統調整機能も低下する<sup>(5)</sup>。よって IBR が主力電源となる系統においては、系統連系インバータは自律的な系統電圧や周波数の安定化機能が求められる。従来の系統連系インバータが系統に追従する（following）ことから GFL (Grid Following inverter) と呼ばれるのに対し、系統電圧・周波数を形成する（forming）系統連系インバータは GFM (Grid ForMing inverter) と呼ばれる<sup>(6)</sup>。図1に本稿における語句の定義を示す。

一般的に、系統と電源の連系において SSO<sup>注5)</sup> (Sub-Synchronous Oscillation／低周波電力振動) が課題となる。特に系統連系インバータの並列運転においては、相互干渉（制御系（PLL<sup>注6)</sup>など）や共振現象）により顕著な SSO が生じる場合がある。そのため、SSO の様々な制振手法が提案されている<sup>(7)</sup>。更に IBR が主力電源化した系統には複数メーカーの様々な特性を持つ系統連系インバータの導入が予想される。よって GFM においては単体での安定運転を前提としたうえで、複数メーカーの並列運転状況下においても特別な協調制御を必要としない安定運転が求められる<sup>(8)</sup>。東光高岳は脱炭素と系統安定の両立に貢献すべくスマート PCS を研究<sup>(9)</sup>しており、今回 GFM を実現する方式の一つである電圧源<sup>注2)</sup>動作スマート PCS<sup>(1)</sup>を開発した。小山事業所配

電ネットワーク実証試験場（以下、FDN 試験場）<sup>(10)</sup>において実機検証している。

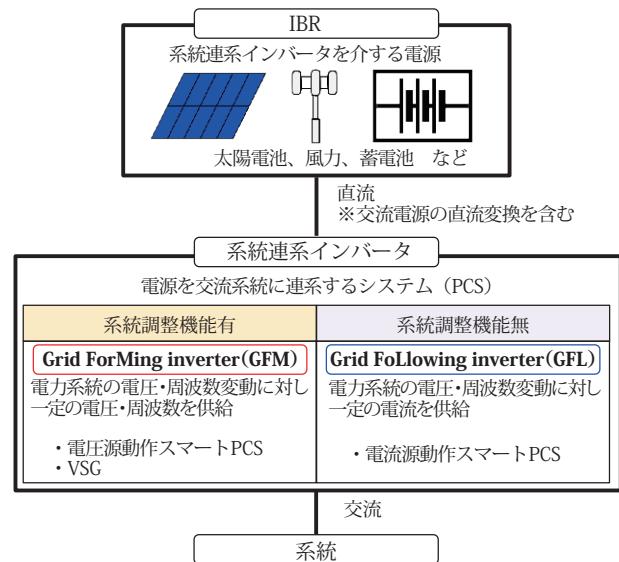


図1 本稿における IBR と系統連系インバータの定義

以降、2章では電圧源動作スマート PCS の開発について報告する。3章では大学法人東洋大学、川崎重工業株式会社との共同試験<sup>(4)</sup>の概要を報告する。小山事業所内で同じく GFM を実現する方式の一つである川崎重工業株式会社製 VSG (Virtual Synchronous Generator／仮想同期発電機)<sup>(2), (3)</sup>と電圧源動作スマート PCS を並列運転させ、IBR が主力電源化した系統における諸課題を検証した。2025年現在での複数メーカーによる GFM の並列運転試験実績は希少である。

## 2 電圧源動作スマート PCS の開発

### 2.1 電圧源動作スマート PCS 概要

#### (1) スマート PCS とは

スマート PCS はスマートインバータ機能を組み込んだ系統連系インバータの一種であり、自律調整機能（電

圧、周波数、力率、有効／無効電力出力制御など)と電力会社などとの双方向通信機能を具備する。これによりきめ細かい系統安定運用に貢献するのが特徴である。

## (2) 電圧源動作スマート PCS 開発方針

文献(9)の従来スマート PCS (GFL) をベースにハード面での改造を行わず、制御系改造および設定変更のみで電圧源動作スマート PCS (GFM) を開発した。表1に実装した主な制御機能を示す。各機能の詳細は文献(9)を参照されたい。また、今回はIBRとしてナトリウム硫黄電池(以下、NaS電池)を使用した。

表1 電圧源動作スマート PCS の主要機能

機能	概要
有効／無効電力充放電制御	定常時の充放電制御
Watt-Freq 制御	有効電力変動に対する周波数調整制御
Var-Volt 制御	無効電力変動に対する電圧調整制御
疑似慣性	慣性模擬の周波数制御
自立運転	系統解列時の運転継続

## 2.2 電圧源動作スマート PCS 自立運転試験

開発した電圧源動作スマート PCS の自立運転機能検証のため、単体試験を実施した。

### (1) 試験条件

図2にFDN(次世代配電ネットワーク)試験場内の試験設備構成を、表2に試験設備諸元を示す。電圧源動作スマート PCS は試験線Aの需要側に接続されている。試験手順は以下の通り。

- 1) 系統連系下で電圧源動作スマート PCS(放電0kW設定)稼働
- 2) 負荷として模擬負荷装置稼働
- 3) 試験線A内開閉器を開放し系統解列(オフグリッド化)、電圧源動作スマート PCS 自立運転
- 4) 電圧源動作スマート PCS が電圧・周波数形成して負荷に電力供給し運転継続

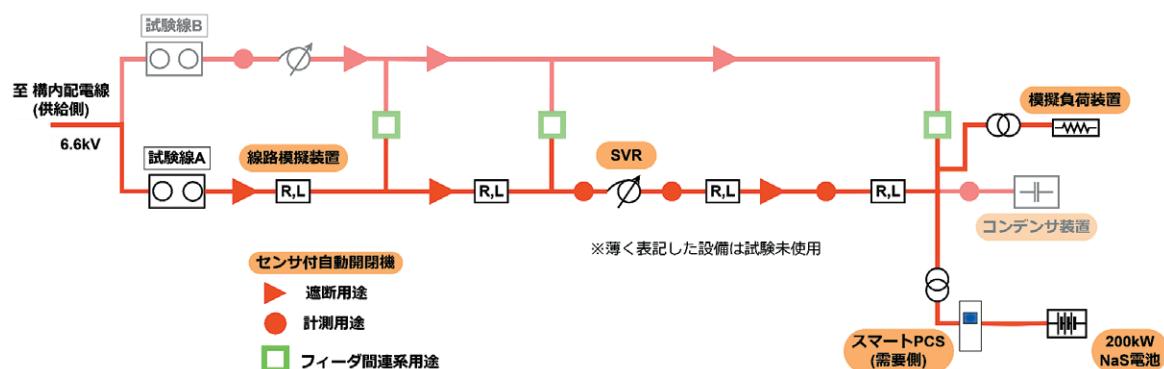


図2 FDN 試験場簡易構成図

表2 自立運転試験主要設備諸元

NaS 電池	
スマート PCS 定格出力	200 kW (50 kW × 4 台) ※試験は 1 台で実施
NaS 電池定格出力	放電 200 kW / 充電 240 kW
NaS 電池定格容量	1,520 kWh
連系点電圧	三相 6.6 kV
模擬負荷装置	
定格容量	123 kW (41 kW × 3 相) ※試験は 2 kW × 3 相で実施
連系点電圧	三相 6.6 kV

### (2) 試験結果

図3に試験結果の例を示す。系統解列後瞬時かつ自律的に電圧・周波数を形成し、負荷(模擬負荷6kW+制御電源)に電力供給できていることが分かる。

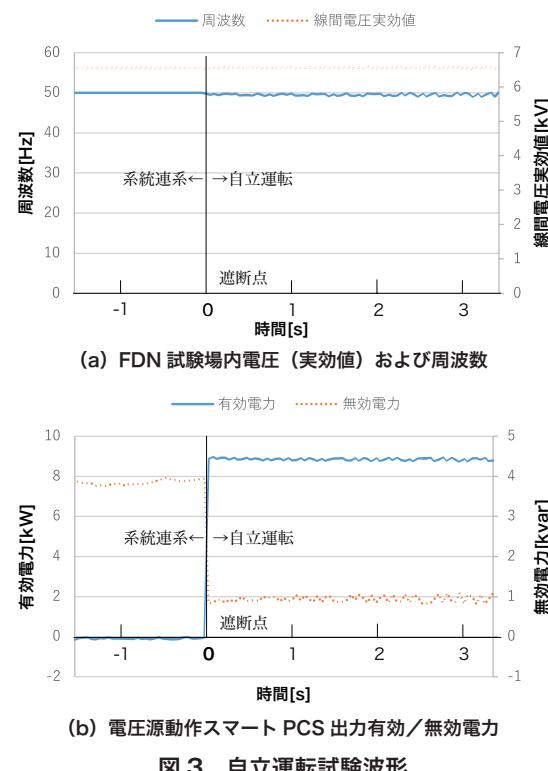


図3 自立運転試験波形

### 3 VSG との並列運転試験

#### 3.1 VSG 概要

##### (1) VSG とは

VSG（仮想同期発電機）は同期発電機の物理特性を模擬した制御系を持ち、GFM を実現する方式の一つである。特徴的な機能の一例として、疑似慣性およびドループ制御<sup>注7)</sup>がある。疑似慣性は同期発電機が持つ慣性を模擬する機能であり、ドループ制御は回転数（周波数）変動に対する有効電力（負荷分担）の特性を模擬する機能である。また川崎重工業株式会社の VSG は、GFM を実現する制御方式として出力電流を演算し用いる電流制御方式に分類されることが特徴である。

##### (2) VSG と電圧源動作スマート PCS 比較

2.1 節および 3.1 節 (1) 項を比較すると、VSG と電圧源動作スマート PCS は同じ GFM であっても異なるシステムのように見える。理由の一つとして研究開発方針がある。東光高岳のスマート PCS は配電機器として系統運用者からの集中制御<sup>注8)</sup>による活用を想定して開発しているが、VSG は一般に集中制御を必要としない。

一方で各機能には類似性がある。図 4 に一例として、VSG におけるドループ制御と電圧源動作スマート PCS における Watt-Freq 制御の特性概念図を示す。異なる制御理念であっても結果として類似した特性を示すため、両者から得られたデータを比較解析することが可能である。

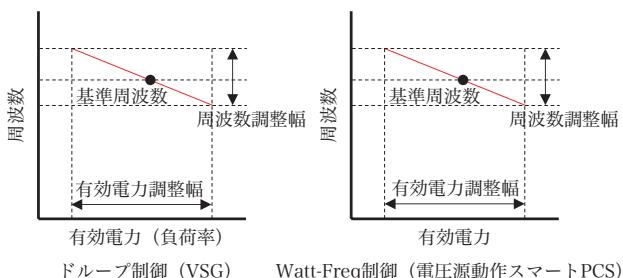


図 4 自立運転時の周波数 - 有効電力特性概念

#### 3.2 スマート PCS-VSG 並列運転試験

IBR が主力電源化した系統における諸課題検証のため、学校法人東洋大学、川崎重工業株式会社と共に複数メーカーの系統連系インバータ並列運転試験を実施した。表 3 に役割分担を示す。

表 3 共同試験役割

学校法人東洋大学	・試験内容への知見提供
川崎重工業株式会社	・VSG 提供
株式会社東光高岳	・スマート PCS 提供 ・実証試験設備構築

##### (1) 試験条件

図 5 に試験構成図を示す。東光高岳小山事業所内に川崎重工業株式会社設備（VSG および系統シミュレータ（系統模擬電源））を設置した。FDN 試験場内のスマート PCS とは構内に敷設した専用線で連系している。はじめにスマート PCS を GFL として一連の試験を行い、その後 GFM として同様の試験を実施した。

##### (2) 試験結果

2024 年 10 月に共同並列運転試験を完了した。主な成果は以下の通りである。

- ・複数メーカーによる GFM を並列運転し、運転継続を確認
  - ・SSO 発生メカニズムの解明および対策立案、効果を検証
- 詳細については、別途共著論文を発表するため本稿では省略する。文献 (8) および今後発表予定の共著論文を参照されたい。

### 4 おわりに

本稿は再生可能エネルギー・蓄電システムといった IBR 導入における課題と GFM タイプ系統連系インバータについて示し、東光高岳におけるスマート PCS の取り組みを紹介した。東光高岳では今後も FDN 試験場設備やシミュレーションを活用して電圧源動作スマート

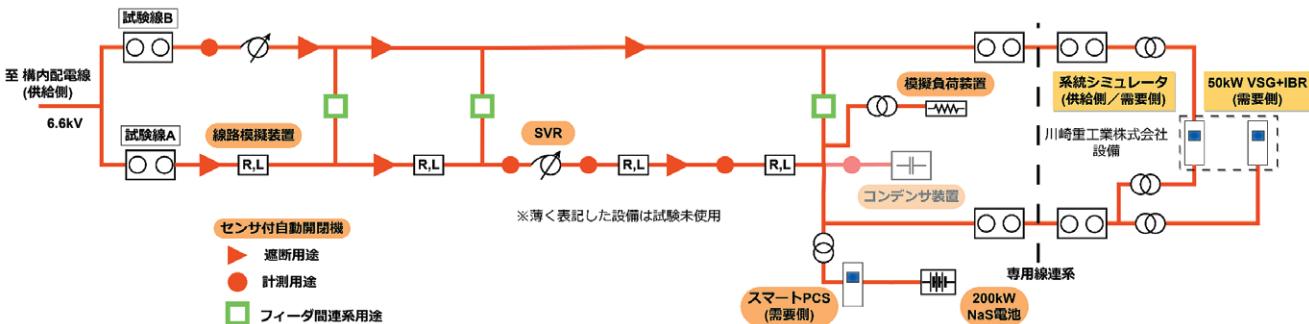


図 5 FDN 試験場簡易構成図 (並列運転試験設備含)

PCS や VSG など GFM の研究を進め、脱炭素電源である IBR の導入拡大と系統安定性維持の両立に貢献する所存である。

## 5 謝辞

本稿の内容は共同研究を行った学校法人東洋大学、平瀬祐子准教授（現在、関西学院大学）、川崎重工業株式会社よりご指導を賜り実施することができました。ここに厚く御礼申し上げます。

### ■参考文献

- (1) 一般社団法人電気学会：「用語解説第 142 回テーマ：スマートインバータ」, [https://www.iee.jp/pes/termbs\\_142/](https://www.iee.jp/pes/termbs_142/) (2025 年 4 月 30 日閲覧)
- (2) 川崎重工業株式会社：「Virtual Synchronous Generator (iVSG™)」, <https://global.kawasaki.com/en/energy/vsg.html> (2025 年 4 月 30 日閲覧)
- (3) 一般社団法人電気学会：「用語解説第 116 回テーマ：仮想同期発電機制御インバータ」, [https://www.iee.jp/pes/termbs\\_116/](https://www.iee.jp/pes/termbs_116/) (2025 年 4 月 30 日閲覧)
- (4) 株式会社東光高岳：「再生可能エネルギーの主力電源化に向けた技術検証を開始」, <https://www.tktk.co.jp/news/entry/000391.html> (2025 年 4 月 30 日閲覧)
- (5) 一般社団法人電気学会：「用語解説第 152 回テーマ：非同期電源比率 (SNSP)」, [https://www.iee.jp/pes/termbs\\_152/](https://www.iee.jp/pes/termbs_152/) (2025 年 4 月 30 日閲覧)
- (6) 電力中央研究所：「電気新聞ゼミナール (280) インバータ電源による電力系統の安定化にはどのような課題があるか？」, <https://criepi.denken.or.jp/press/journal/denkizemi/2023/230329.html> (2025 年 4 月 30 日閲覧)
- (7) 井手、平瀬、吉村、梅津、阪東、杉本：「インバータベース電源で構成されるマイクログリッドの電力動揺要因の特定と安定性向上」, 電気学会論文誌 B, 145 卷 3 号 pp.299-310 (2025)
- (8) 井手、平瀬、梅津、杉本、小野、吉井：「異なるメカの系統連系インバータ間の低周波振動抑制に向けた数学的解析および実証試験報告」, 電気学会電力技術 / 電力系統技術合同研究会, 東北大学 (Web), PE/PSE-24-166 (2024 年 9 月 19-20 日)
- (9) 吉井誠：「蓄電池用スマートインバータの実証試験を配電ネットワーク実証試験場で開始」, 東光高岳技報, No.8 pp.16-19 (2021)
- (10) 茂木規行：「配電ネットワーク実証試験場」, 高岳レビュー, No.175 pp.19-23 (2011)

### ■語句説明

- 注 1) IBR：インバータベース電源。直流発電源である太陽電池、蓄電池などは交流系統に連系するため系統連系インバータ (PCS) を介する必要がある。また風力などの交流発電源についても、電圧や周波数を安定させる目的で直流変換を介して IBR となる場合がある。
- 注 2) 電圧源：負荷（需要）に対し、負荷変動によらず一定の電圧を供給する電源。GFM は系統に対し一定の電圧・周波数を供給するため、電圧源動作が要求される。従来の系統連系インバータは一定の電流を供給しようとする電流源動作である。
- 注 3) S+3E：日本におけるエネルギー政策の基本方針。安全性 (Safety) を大前提とし、同時に自給率 (Energy security), 経済効率性 (Economic efficiency), 環境適合 (Environment) を達成する取り組み。
- 注 4) 慣性：慣性力とも表記される。系統内における同期発電機が持つ回転エネルギーの総量 [J]。同期発電機の定格容量 [W] と慣性定数 [s] の積で表される。電力エネルギーにおける需要と供給間の差異が回転エネルギーとして吸収されることで周波数変化率 (RoCoF) を抑制し、系統安定化制御までの時間を確保する。慣性不足は RoCoF の増大や系統安定化制御までの時間猶予が短くなることを意味し、系統擾乱や大規模停電などのリスクが増加する。
- 注 5) SSO：日本語では低周波電力振動などと表記される。電源間の相互干渉に起因し、定格系統周波数以下の周波数で系統電圧が動揺する現象。系統不安定化や機器損傷などの一因となる。
- 注 6) PLL：Phase Locked Loop の略。位相同期ループ。電圧や電流などの周期波形入力を基準とし、入力に同期した位相や周波数などを出力するフィードバック制御。系統連系インバータにおいては、系統周波数・位相の取得に広く利用される。
- 注 7) ドループ制御：垂下制御とも表記される。入力量増加に対し出力量を抑制させる制御であり、特性として負の傾きを持つ。
- 注 8) 集中制御：系統運用者が系統内のスマートメータや各種センサからリアルタイムでデータを集約して全体最適条件を演算し、その結果に基づいて各地の電力機器を制御する手法。

### 小野 晋也

GX ソリューション事業本部 事業開発推進室  
グリッドイノベーション推進グループ 所属

### 吉井 誠

GX ソリューション事業本部 事業開発推進室  
グリッドイノベーション推進グループ 所属

# 再生可能エネルギーの普及拡大や電力の安定供給・高度利用を実現する DR shifTer

中山 匡

Tadashi Nakayama

太尾 健

Takeshi Tao

久保 滋

Shigeru Kubo

当社では2017年度に東京電力グループの構想を基に、蓄電池などのリソースを電力の需給調整に使用するため、遠隔・統合制御する機器、DR shifTerを開発した。当社はDR shifTerを用い、2017年度、2018年度のVPP実証試験に東京電力エナジーパートナー株式会社とともに参加し、2021年度から開始された需給調整市場にも参入してきた。現状、需給調整市場では一次調整力から三次調整力という区分で取引がされており、DR shifTerは三次調整力で使用されてきた。今後もDR shifTerによる電力の安定供給・高度利用への更なる貢献のため、一次調整力への対応を推進している。本稿では一次調整力に対応するためのDR shifTerの改良内容、および実証試験での成果を説明する。

## 1 はじめに

近年、太陽光発電や蓄電池、電気自動車など、需要家側に導入される分散化された小規模なエネルギー資源（以下、リソース）の普及が進んできた。需要家が有するリソースは、電力の需給バランスを調整するデマンドレスポンス（以下、DR）にも使用される。また、複数のリソースを束ねて遠隔・統合制御する仕組みを「仮想発電所（以下、VPP）」とよぶ。

各需要家が持つリソースの中でも、蓄電池は充放電ができる、天候に左右されることもないため、VPPにおける調整力<sup>注1)</sup>としての期待が大きい。しかし、既存の蓄電池システムを遠隔からのDRに対応させるためには、メーカや機種ごとに異なる改造が必要となり、多くの費用と労力を必要とする。

そこで、東京電力グループでは、蓄電池などのリソースを、メーカや機種に依存せず遠隔DRする仕組みを考案した。当社ではこの技術を実現するための機器、DR shifTerを2017年度に開発した。そのDR shifTerを用い、2017年度、2018年度のVPP実証試験に東京電力エナジーパートナー株式会社（以下、東電EP）とともに参加してきた<sup>(1)(2)</sup>。

今後、DR shifTerを需給調整市場の一次調整力（後述）で活用するために、2023年度に技術実証、制度的課題の洗い出しを行い、2024年度にはその実証試験の結果を基に改良、実証試験を行ってきた。

本稿では一次調整力で活用するために改良したDR shifTerの内容とその実証試験の結果について述べる。

## 2 需給調整市場とは

一般送配電事業者<sup>注2)</sup>が電力の需給バランスを調整するために、「需給調整市場」が2021年4月1日に創設された。この市場では需給予測誤差、時間内変動、電源脱落、再エネ予測誤差の4つの事象に対応する調整力

が必要とされ、順次新しい調整力が導入、市場取引が開始されている<sup>(3)</sup>。

当社はVPP実証試験で得られた知見をもとに、需給調整市場の三次調整力に、東電EPとともにDR shifTerを用いて2021年より参入している。現在、需給調整市場は応動時間<sup>注3)</sup>の速さの違いにより、一次調整力から三次調整力までの区分があり運用されている。一次調整力は、電力系統を安定させるために必要な調整力であり、周波数の維持、事故時の対応等で機能する。

DR shifTerを適用している三次調整力<sup>②</sup><sup>注4)</sup>と、今後適用を目指している一次調整力について主な特徴を表1に示す。

表1 一次調整力と三次調整力②の主な特徴

特徴	一次調整力	三次調整力②
応動時間	10秒以内	60分以内
継続時間 <sup>注5)</sup>	5分以上	30分
特徴	自動で周波数補正、即時対応	人的操作、計画対応、持続的な需給調整
使用目的	周波数の瞬間的な安定化	再生可能エネルギーの予測誤差に対応

### 2.1 三次調整力②

三次調整力②は、再エネ予測誤差に対応するための取引である。応動時間は他の取引より長く、多様なリソースが使用できるように設定されている。

### 2.2 一次調整力

一次調整力は瞬間的な需給バランスの乱れを補正し、周波数を安定させるための取引である。発電所の故障などの電源脱落の調整力としても使用されるため、数秒以内に応動することが求められる。なお、現状では、この一次調整力に、需要家側での蓄電池を用いて参入している製品・サービスは少ないため、DR shifTerを一次調整力に適用する取り組みは重要であるという認識で、開

発・実証試験を推進している。

### 3 一次調整力への参入要件

一次調整力に参入するためには、使用するリソースが必要な応動時間に適合しているかを確認するための事前審査がある。事前審査は平常時と異常時に大別されており、異常時は大規模電源脱落等により 0.2 Hz 以下の周波数低下を継続した場合を指している。

図 1 に事前審査（平常時）の合格条件の一例を示す。 $\Delta P$  はリソースの放電による受電電力（電力会社から需要家が受け取る電力）の変化量、 $\Delta f$  は商用周波数を基準とした偏差を表す。調定率<sup>注6)</sup> 曲線を目標値とし、 $\Delta kW$  供出可能量<sup>注7)</sup> の土 10% の許容範囲内に収まるよう、周波数の変動に合わせたリソースの放電電力の調整が求められている。許容範囲内への滞在率<sup>注8)</sup> は 90% 以上で合格となる。その他、一次調整力の技術要件の一例を表 2 に示す。

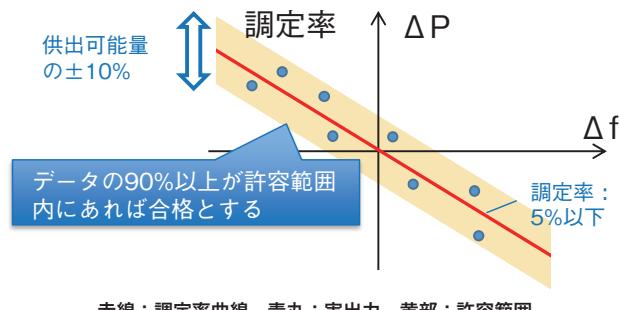


図 1 事前審査（平常時）の合格条件一例<sup>(4)</sup>

表 2 一次調整力 技術要件一例

項目	要件	概要
計測間隔	0.1 秒以下	周波数の計測間隔
計測誤差	± 0.02 Hz 以下	周波数の計測誤差範囲
不感帯	± 0.01 Hz 以下	周波数が変化してもリソースの出力変化をしない範囲
遅れ時間	2 秒以内	周波数の変化からリソースが出力を変化させるのに要する時間

### 4 一次調整力参入への対応

三次調整力②に対応しているこれまでの DR shifTer に対して、一次調整力参入に必要となる機能の追加や拡張を行った。

#### 4.1 周波数の取り込み

これまでの DR shifTer は周波数を測定する機能を有

していないため、周波数を計測する機器および計測データの取り込み機能の追加を行った。

#### 4.2 1 秒値の計測および記録

三次調整力②では制御中の受電電力の 1 分値を計測し、記録したデータを市場運用者に通知する機能が必要要件であった。一方、一次調整力では、受電電力の 1 秒値および周波数を計測し、記録したデータを市場運用者に通知する機能が必要であり、機能の拡張を行った。

#### 4.3 制御方式の改良

DR shifTer は、蓄電池システムを放電制御するための制御方式として、電力の「shifT 技術 (smart harmony information from TEPCO)」と称する技術を採用している<sup>(1)</sup>。ただし、この制御方式では周波数の偏差に基づく充放電量を調整する機能を持っていない。そのため、shifT 技術をもとに周波数の偏差に基づく充放電量を調整する機能を追加した制御方式を考案、開発を行った。

### 5 一次調整力実証試験

一次調整力に参入することを目的として、需要家にて実際に使用されている NaS 電池システムで実証試験を行った。

#### 5.1 試験構成

試験構成を図 2 に示す。一次調整力への対応を行った新型 DR shifTer と NaS 電池システム間の通信および受電電力の計測には 4-20 mA 信号を使用し、試験結果をロガーにて計測・記録している。また、交流電源装置を使用して周波数の各種特定パターンを再現できる試験構成としている。

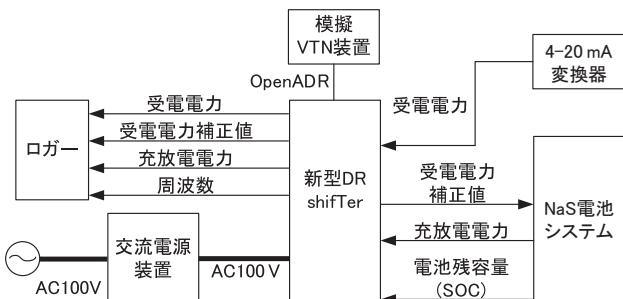


図 2 試験構成

#### 5.2 試験方法

一次調整力では、周波数の変動にあわせてリソースが放電、または充電を行い、受電電力を調整する必要がある。しかし、NaS 電池システムでは急速に放電、充電を切り替えるとその反動で充放電量が大きく変動することがある。そのため、一定量の放電をさせつつ、

周波数の偏差に応じて放電量を変化させる方法で行った。今回は、2つの周波数変動パターンで試験を実施した。

#### (1) 商用周波数を基準に周波数を上下させる方法

交流電源装置により周波数を図3のように意図的に変動させることで、NaS電池システムが想定する放電電力になることを確認した。

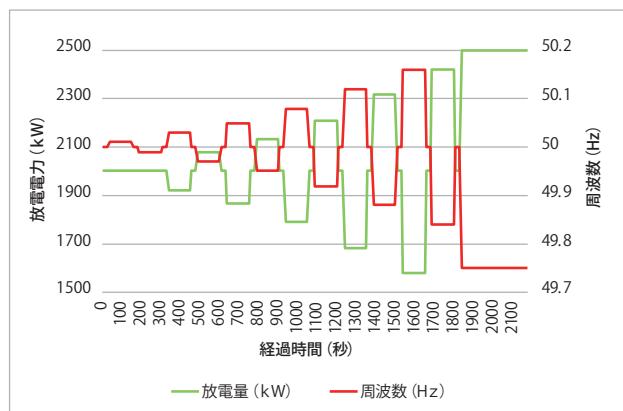


図3 周波数変動パターン (パターン1)

#### (2) 商用周波数を基準に周波数を下げる方法

NaS電池システムの放電量が増える場合に特化したパターンも行った。具体的には、周波数を下げる方向にのみ変動させた(図4)。本パターンは、放電方向を片側に絞ることにより、 $\Delta$ kW供出可能量を増やすことが

できるため、図1の許容範囲を広げることができるところから設定している。

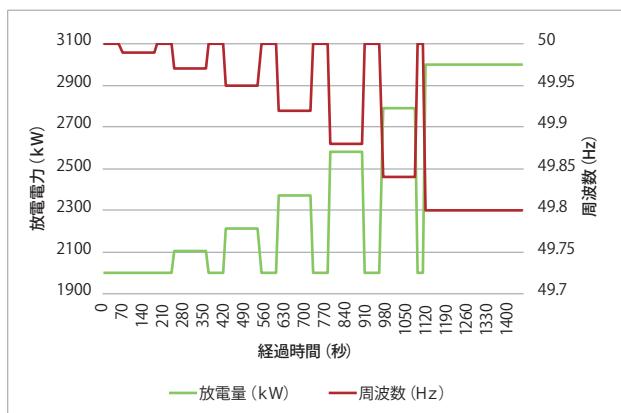


図4 周波数変動パターン (パターン2)

### 5.3 試験結果

#### (1) 商用周波数を基準に周波数を上下させる方法

試験方法の図3に示す周波数変動パターンで2024年度に実施した電力量の1秒値の実測と目標値のグラフを図5に示す。また、参考として2023年度に実施した試験結果を図6に示す。

図5と図6の試験結果から、2023年度と比較して2024年度の試験結果では大きな振動波形は取り除かれ、目標値に沿った受電電力の変動になっていること

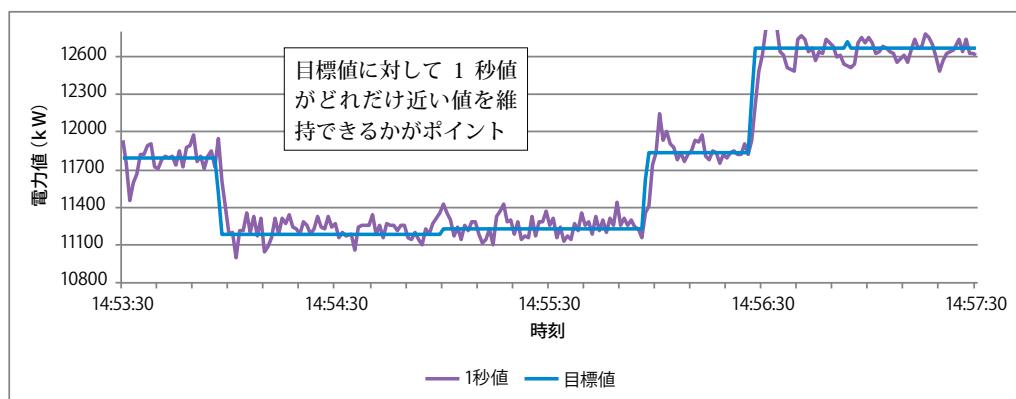


図5 2024年度実証試験 1秒値と目標値 (一部抜粋)

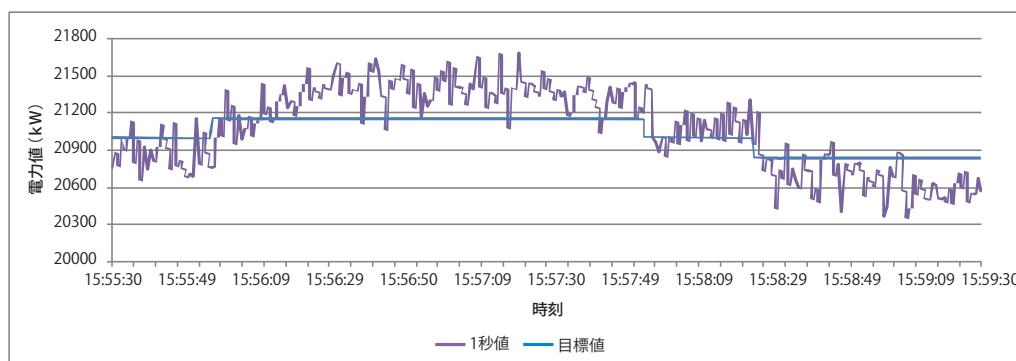


図6 2023年度実証試験 1秒値と目標値 (一部抜粋)

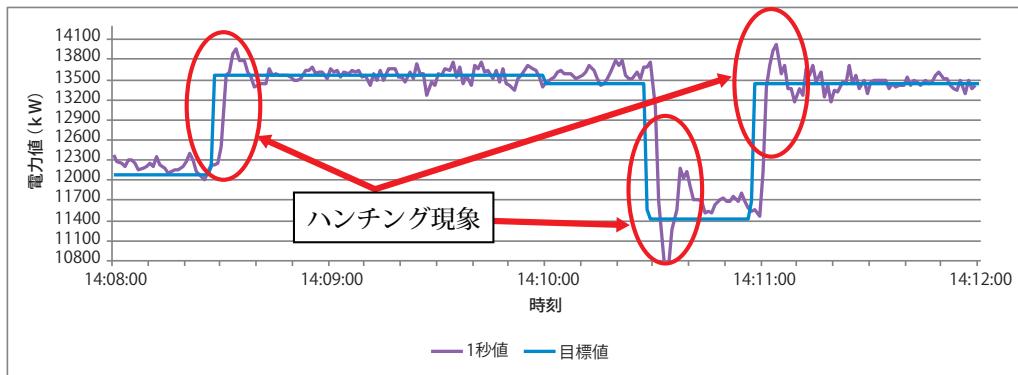


図 7 2024 年度実証試験 1 秒値と目標値（商用周波数を基準に周波数を下げる方法）（一部抜粋）

が分かる。

しかし、試験結果を詳細に確認すると、許容範囲内の滞在率は約 70% であり、一次調整力参入要件である 90% 以上については満たしていなかった。

## (2) 商用周波数を基準に周波数を下げる方法

試験方法の図 4 に示す周波数変動パターンで試験した結果を図 7 に示す。前述した図 5 の試験結果と大差がないように見えるが、誤差範囲内の滞在率は 95% と大きく向上した。すなわち、リソースの  $\Delta kW$  供出可能量を調整することにより、一次調整力参入要件の許容範囲内に調整可能であることを実証した。

なお、放電電力が大きく変わる際にはハンチング現象<sup>注9)</sup>が発生し、一次調整力参入要件である遅れ時間 2 秒以下を逸脱している部分もあることが明らかとなつた。振動成分の制御に関する機能の改良などの対策が必要である。

## 6 将来を見据えた機器点制御

これまでに紹介している実証試験の制御方法は受電点制御であり、受電点（受電電力）の計測情報に基づいて制御を行っている。

一方で、機器点制御は、機器点（リソースの充放電電力）を計測し、その値を基に制御する方法である。

受電点制御の場合には、受電点を計測しながら制御を行うため、負荷による変動が制御にも影響してくる。それに対し、機器点制御の場合には蓄電池の制御機器によるものの、他の影響を受けることが少なく、制御がしやすいのが利点である。

現状においては、需給調整市場における機器点制御の区分は用意されていない。しかし、今後、制度化される可能性も見据え<sup>5)</sup>、機器点制御での実証試験（図 3 の周波数変動パターン）も実施しており、許容範囲内の滞在率も 97% と良好な結果を得られている。

## 7 まとめ

現在、需給調整市場で使用している DR shifTer の更なる高度利用と活用シーン拡大のため、一次調整力参入に向けた開発、実証試験を推進している。一部課題はあるが、需給調整市場の一次調整力への参入要件を満たす開発成果が得られてきている。

現状では、需給調整市場に一次調整力の区分はあるものの、全体的に約定量<sup>注10)</sup>が少なく、一次調整力の需要に対して未達率が高い状況である。再生可能エネルギーの普及拡大や電力の安定供給、高度利用に大きく貢献する DR shifTer の改良開発を推進し、一次調整力の市場にも参入を図っていきたい。

### ■参考文献

- 細谷雅樹、原正典、田中晃司：「DRshifTer（シフター）の開発」、東光高岳技報 No.5 (2018)
- 細谷雅樹、中山匡、田中晃司：「2019 年度 VPP 実証への取り組み (DRshifTer の改良)」、東光高岳技報 No.7 (2020)
- 一般社団法人電力需給調整力取引所：「需給調整市場かいせつ資料」、(2025 年 3 月 14 日)
- 電力需給調整力取引所 取引ガイド（全商品）第 7 版
- 調整力の細分化及び広域調達の技術的検討に関する作業会事務局：需給調整市場における機器個別計測・低圧リソース導入に向けた詳細検討について (2023 年 6 月 29 日)

### ■語句説明

- 調整力：発電事業者、小売電気事業者および一般送配電事業者は、実需給 1 時間前の前後で役割を分担して需給を一致させる。実需給 1 時間前の後に残った誤差など、あらかじめ把握できない需要と供給の差を一般送配電事業者が一致させるために使う供給力が調整力である。
- 一般送配電事業者：送電線・配電線などの送配電網を管理し、電気を発電所からお客様へ届ける事業者。
- 応動時間：需給調整市場において、一般送配電事業

- 者が指令を出してから、リソースが指令値まで出力を変化するのに要する時間。
- 注 4) 三次調整力②：三次調整力には①と②の 2 種類があり、その違いは利用目的と応動時間等である。
- 注 5) 繼続時間：リソースが電力需給調整のために稼働している時間。
- 注 6) 調定率：周波数変化に対するリソースの出力変化の割合を表しており、例えば「調定率 5%」の場合、5%の周波数変動（50 Hz 系では 2.5 Hz の変動）が生じたとき、リソースの定格出力の 100%が応動することを意味しており、調定率が小さいほど周波数に敏感に応動する。
- 注 7)  $\Delta\text{kW}$  供出可能量：リソースが需給調整市場において供給できる電力の最大値。
- 注 8) 滞在率：1 秒値（1 秒間における電力値の平均値）が許容範囲内にどれだけ収まったかをパーセントで表した数値。

注 9) ハンチング現象：充放電電力が目標値の付近で安定せず、上下に変動する現象。

注 10) 約定量：需給調整市場において、売買が成立した電力量のこと。

---

### 中山 国

戦略技術研究所 技術開発センター  
ICT 技術グループ 所属

### 太尾 健

東京電力エナジーパートナー株式会社  
カスタマーテクノロジーイノベーション部

### 久保 滋

東京電力エナジーパートナー株式会社  
カスタマーテクノロジーイノベーション部

# 電力の安定供給と高度利用へ貢献する PowerFactoryによる電圧変動解析技術

森 佑介

Yusuke Mori

カーボンニュートラルの実現に向けて、再生可能エネルギーの導入が進められているなかで、様々な課題への対応が求められており、その検討に電力系統解析技術の活用は欠かすことができない。そのなかでも、潮流解析は從来から広く行われ、電力潮流や電圧分布の予測に利用されてきた。しかし、再生可能エネルギーの導入拡大に伴い、電力系統の運用・管理は複雑・高度化している。これに対応するためには、負荷変動だけでなく、再生可能エネルギーの出力変動、各種機器の制御などの時間変化を考慮した電力系統解析が重要になる。本稿では、PowerFactoryによる各種時間変化を考慮した電圧変動解析技術について、配電系統にPVの導入が進んだことを想定した解析例と併せて紹介する。

## 1 はじめに

近年、世界的に環境意識が高まり、脱炭素化に向けた流れが強まっている。日本においても、2020年に「2050年カーボンニュートラル」が宣言された。その実現に向け第7次エネルギー基本計画では、電源構成における再生可能エネルギー（以下、再エネ）の比率を4~5割程度に拡大する方針が示されている<sup>(1)</sup>。このようにカーボンニュートラルの実現に向けて、再エネの導入が進められていいくなかで、以下のように様々な課題への対応が必要となる。

- (1) 電力系統事故時の安全確保や復旧対策の早期立案
- (2) 火力発電等の需給調整力・周波数維持能力の低下
- (3) 慣性力不足による周波数変動率の増加
- (4) 電圧変動の増大
- (5) 高調波や電圧フリッカなど電力品質への影響

これら各種課題に対して、様々な対応策やルール制定の検討が進められているが、その過程において電力系統解析技術の活用は欠かすことはできない。

この電力系統解析技術のなかでも、從来から潮流解析が広く行われ、各送配電線に流れる電力潮流や電圧分布などの予測に利用されてきた。一般的な潮流解析においては、エンジニアが最も過酷な条件を想定し、特定の時間断面における潮流や電圧分布を求める。しかし、太陽光発電（以下、PV）などの再エネ導入増加に伴い、電力系統の運用・管理は複雑・高度化しており、これから電力系統のあり方を一般的な潮流解析だけで検討するのは困難である。具体的には、負荷変動だけでなく、再エネの出力変動、蓄電池の充放電制御、各種機器の状態変更（変圧器のタップ切替<sup>注1)</sup>など）があり、これらの時間変化を考慮した電力系統解析技術が重要になると考えられる。

東光高岳においては、ドイツのDIgSILENT社が開発・提供している総合電力系統解析ソフトPowerFactoryの国内総代理店として、国内展開に向けた活動や電力系統解析技術の活用検討を進めている<sup>(2)</sup>。PowerFactoryで

は、「Quasi-Dynamic Simulation」機能を追加することで、前述の各種時間変化を考慮した潮流解析が可能となる。本稿では、PowerFactoryを利用し、配電系統にPVの導入が進んだことを想定して、電圧変動を解析した例について紹介する。

## 2 配電系統の電圧調整と課題

配電系統の電圧について、低圧配電線においては電気事業法施行規則により、 $101 \pm 6\text{ V} / 202 \pm 20\text{ V}$ になるよう調整する必要がある。高圧配電線においては、法律上の維持範囲は定められていないものの、健全な配電系統を維持するため、概ね変動幅が5~10%以下となるよう運用・管理されている<sup>(3)</sup>。しかし、配電系統へのPV導入量が増加すると逆潮流<sup>注2)</sup>により電圧変動が大きくなり、適正電圧の維持が難しくなる可能性がある。

配電系統の電圧を適正に維持するため、以下に示す電圧調整が行われており、PVの導入量増加時には、これらの電圧調整をより適切に行うことが求められる。

### (1) 配電用変電所変圧器のタップ切替

この方法は、時間によってタップを切り替える方式や負荷電流に応じて自動的に調整する方式などがある。ただし、負荷特性や再エネの接続状況が異なるフィーダ<sup>注3)</sup>を有する変圧器の場合、この対応だけですべての箇所の電圧を適正に維持することが難しくなる。

### (2) SVR (Step Voltage Regulator) による電圧調整

SVRは、高圧配電線路の途中に設置され、自動的なタップ切替により適正電圧を維持するものである。從来のSVRは逆潮流を想定しない制御仕様であったが、近年では逆潮流にも対応したSVRもある<sup>(4)</sup>。

### (3) SVC (Static Var Compensator) などによる電圧調整

SVCは、連続的に調整した無効電力を電力系統に出力することで電圧を調整する装置であり、SVRよりも高速な調整が可能である。

#### (4) 柱上変圧器による低圧配電線の電圧調整

この方法は、柱上変圧器のタップ切替により、低圧配電線の電圧を調整するものである。東光高岳では、負荷が接続された状態で自律的にタップ切替を制御するオートタップチェンジャー付き柱上変圧器も取り扱っている。

#### (5) PCS (Power Conditioning System) による出力制御

PCSは、PVにより得られた直流電力を交流電力に変換するものである。電力変換機能の他にも、電力系統の異常検出および解列<sup>注4)</sup>、PVの出力制御機能を有する。出力制御方法としては、力率一定制御による電圧変動抑制が現在の主流であるが、PVの導入量増加に対応する柔軟な電圧変動対策としてVolt-var制御<sup>注5)</sup>などの検討も進められている<sup>(5)</sup>。

以上のように、PVの導入量増加に伴い、配電系統の適正な電圧維持に関する検討が重要になるが、その際には、負荷や再エネの出力変動、上記(1)～(5)などを考慮する必要がある。したがって、エンジニアがこれらすべてを考慮して、電圧変動に対して最も過酷な条件を想定することは難しいため、各種時間依存性を考慮した潮流解析により電力系統構成や運用・管理方法を検討する必要がある。

次章では、PowerFactoryの「Quasi-Dynamic Simulation」機能を利用し、各種時間変化を考慮した潮流解析の例を紹介する。

### 3 時間変化を考慮した潮流解析

#### 3.1 解析モデル

図1に示すように、1台の配電用変電所変圧器に、負

荷特性やPVの導入状況が異なる複数のフィーダが接続されたモデルを考える。本解析では、複数台の柱上変圧器、各種負荷、PVなどを一つの要素に集約している。各フィーダの亘長は10kmを想定しており、等間隔に負荷やPVを接続している。各フィーダの概要を表1に示す。

図1のLoad1は一般的な住宅負荷を想定しており、Load2はヒートポンプが多く設置され、深夜帯の消費電力が大きい住宅負荷を想定している。また、Load2にはPVを併設した。それぞれの日負荷曲線およびPV出力を図2に示す。同図は、1日における負荷の最大

表1 各フィーダの概要

フィーダNo.	負荷特性	PV	配電線電圧調整用SVR
1	一般的な住宅負荷	なし	なし
2	一般的な住宅負荷とヒートポンプの設置が多い住宅負荷	あり	なし
3	一般的な住宅負荷とヒートポンプの設置が多い住宅負荷	あり	あり

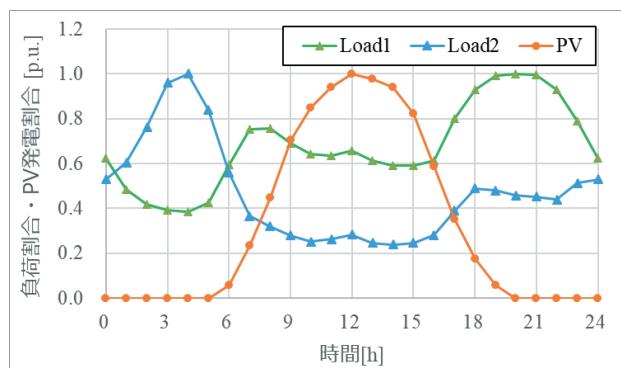


図2 日負荷曲線およびPV出力

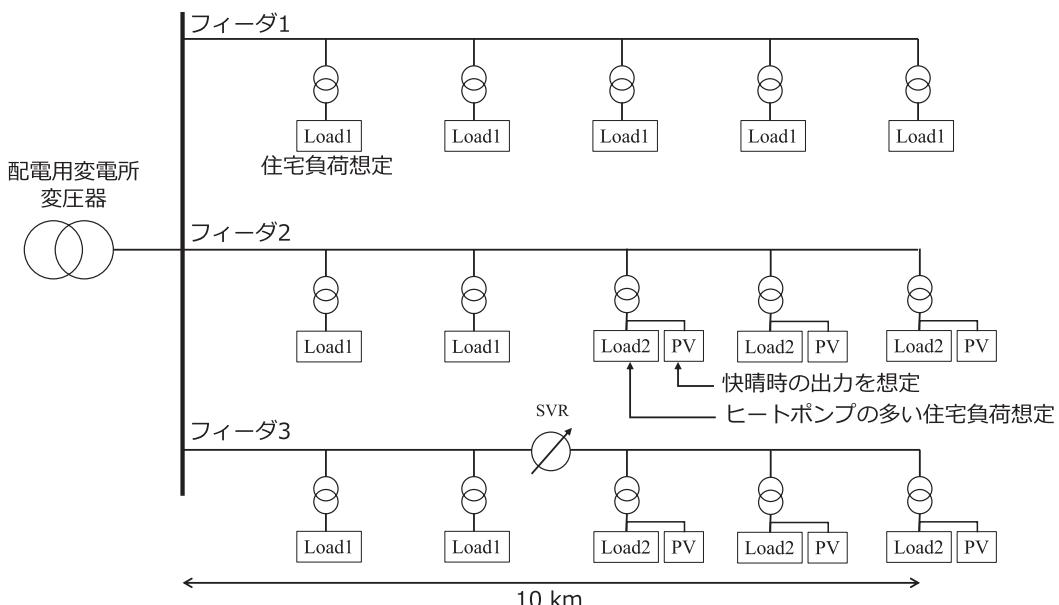


図1 解析モデルイメージ

値、発電量の最大値を 1 p.u. として示している。それぞれの負荷特性は文献<sup>(6)</sup>を参考に、PV 出力は快晴を想定して設定した。

### 3.2 解析条件およびパラメータ

前述のとおり、配電系統の電圧調整方法として複数の方法があるが、本解析では現象を理解しやすくするため、以下の計算仮定を設けた。

- ・配電用変電所の送り出し電圧は、フィーダ 1 の全ての電圧が±5%以内となるタップに調整し、そのタップで固定とした。
- ・電圧逸脱に伴う PV の解列などはないものとした。
- ・柱上変圧器、SVR の漏れインピーダンス、損失は省略した。
- ・SVR は逆潮流の有無によらずタップ制御するものとした。SVR は定格電圧を中心に、100 V 刻みで 9 タップとした。

解析パラメータとして、PV 出力の力率、PV の最大出力  $PV_{max}$  と最大負荷  $Load_{max}$  の比率を表 2 のように変化させた。ここで  $PV_{max}$ 、 $Load_{max}$  は、それぞれ図 2 で示した 12 時における PV の出力と 4 時における  $Load_{max}$  の負荷である。一般的に、低圧配電線に連系する PV は PCS により、力率 0.95 に制御されるが、無効電力の制御による電圧調整の効果をみるため、No.1 では無効電力なし（力率 1）の条件で解析を実施した。No.2~4 は PV の導入量増加をパラメータとして、電圧変動への影響を確認した。

表 2 解析パラメータ

No.	PV 力率	$PV_{max}/Load_{max}$
1	1	0.8
2	0.95	0.8
3	0.95	1
4	0.95	1.4

### 3.3 解析結果

図 3 に、PV が接続されていないフィーダ 1 の電圧変動解析結果を示す。同図はフィーダ内の最高電圧、最低電圧の時間変化を示している。配電用変電所変圧器のタップ調整により、±5%以下の変動に収まっていることが確認できる。

上記の送り出し電圧で調整された際に、PV が接続されているフィーダ 2、3 の電圧変動解析結果を図 4~7 に示す。図 4 のように、PV からの無効電力出力が 0（力率 1）の場合、電圧上昇が大きく、SVR が設置され

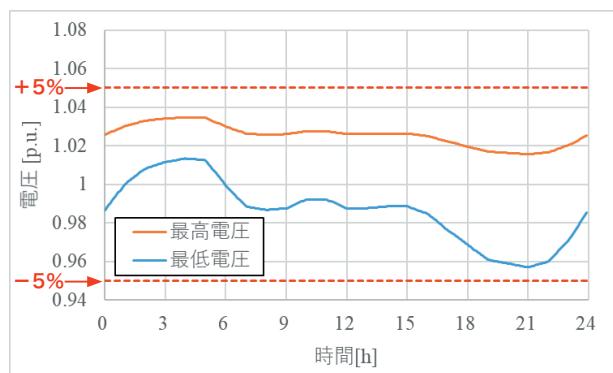
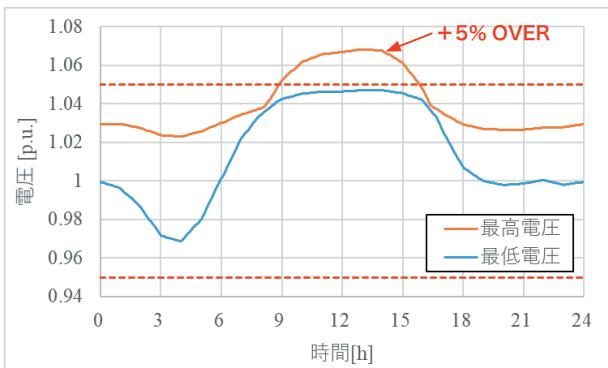


図 3 フィーダ 1 の電圧変動解析結果

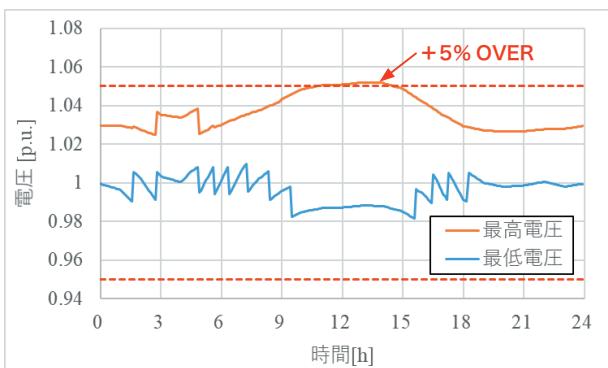
ているフィーダ 3 においても +5% 以上の電圧となる時刻がある。力率を 0.95 とすると、図 5 のように電圧変動が±5% 以内に収まっている。無効電力の制御によって、電圧変動を抑制できることがわかる。しかし、PV の導入量が増加すると、図 6 のように、SVR が設置されていないフィーダ 2 の最高電圧が 10 時~15 時の範囲で +5% 以上となっている。SVR が設置されているフィーダ 3 においても、さらに PV の導入量を増やすと、図 7 に示すとおり、わずかに +5% を上回る。これらの結果から、PV の導入量増加に伴い、力率一定制御や SVR による線路電圧の調整だけでは対応が困難となり、PV の解列頻度の増加などにつながる可能性が示唆される。したがって、PV などの再エネを有効利用するためには、様々な電圧制御方法を適切に組み合わせ、柔軟に電圧変動に対応する必要があると考えられる。

### 3.4 考察

本解析結果より、PV の導入量増加に伴い、PV を最大限有効利用しつつ、適正な電圧を維持することが難しくなってくることがわかる。本解析では、簡易的なモデルを用いていくつかの計算仮定を設けた他、PV 出力も快晴を想定して急峻な変動がない条件で計算しているため、比較的想定しやすい結果となっている。しかし、実際の電力系統は、様々な機器で構成され、それぞれが異なる動的応答性を有するシステムである。また、PV などの出力は天候に大きく左右されるため、気象条件による違いも本来は考慮する必要がある。このような再エネを含む電力系統システムに対して、従来から広く実施してきた時間変化のない潮流解析で詳細な検討を行うことは容易ではない。今後の再エネの導入拡大と適正電圧の維持をはじめとした電力の安定供給を維持するためには、可能な限り、電力系統に含まれる動的な要因を考慮したうえで、本稿で紹介した各種時間変化を考慮した潮流解析技術を活用することが重要だと考えている。

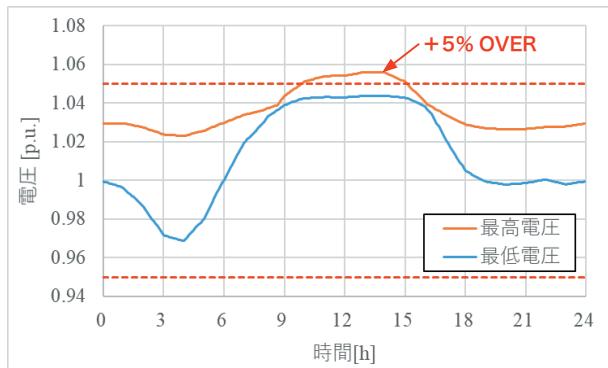


(a) フィーダ 2 (SVRなし)

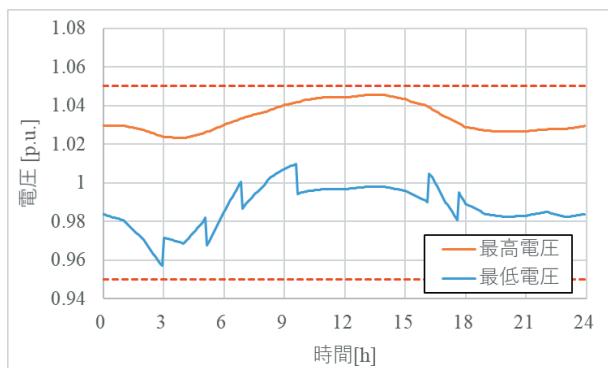


(b) フィーダ 3 (SVRあり)

図4 フィーダ2・3の電圧変動解析結果  
(パラメータ No.1\_PV 力率 1,  $PV_{max}/Load_{max}$  0.8)

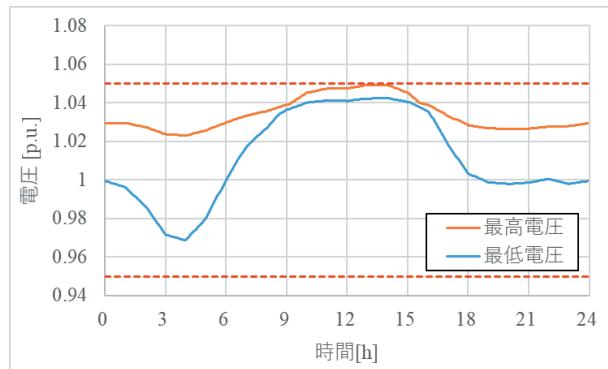


(a) フィーダ 2 (SVRなし)

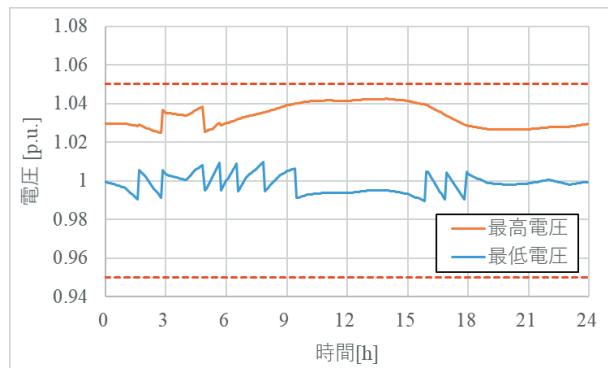


(b) フィーダ 3 (SVRあり)

図6 フィーダ2・3の電圧変動解析結果  
(パラメータ No.3\_PV 力率 0.95,  $PV_{max}/Load_{max}$  1)

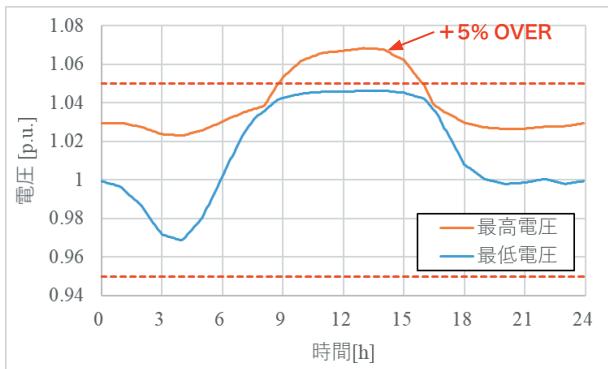


(a) フィーダ 2 (SVRなし)

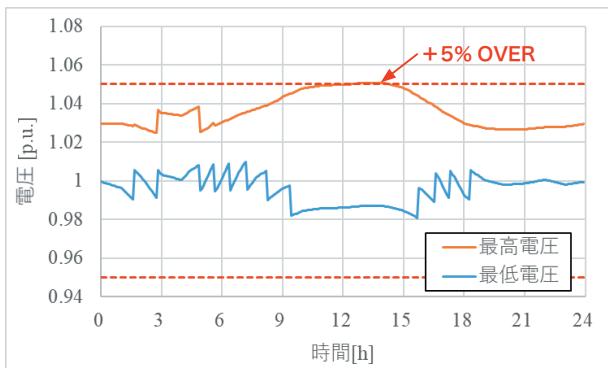


(b) フィーダ 3 (SVRあり)

図5 フィーダ2・3の電圧変動解析結果  
(パラメータ No.2\_PV 力率 0.95,  $PV_{max}/Load_{max}$  0.8)



(a) フィーダ 2 (SVRなし)



(b) フィーダ 3 (SVRあり)

図7 フィーダ2・3の電圧変動解析結果  
(パラメータ No.4\_PV 力率 0.95,  $PV_{max}/Load_{max}$  1.4)

## 4 おわりに

本稿では、負荷変動や再エネの出力変動、SVR のタップ切替などの時間変化を考慮した潮流解析に焦点をあて、PowerFactory の「Quasi-Dynamic Simulation」機能を利用した配電系統の電圧変動解析例を紹介した。本稿で紹介した解析では、現象を理解しやすくするためにいくつかの計算仮定を設けたが、PowerFactory では、各種機器の詳細な制御モデルや様々な運用シナリオを設定することも可能である。これら機能を有効活用することで、電力系統の課題に対する対応策を効率的に検討できる。今後は、PowerFactory を活用した電力系統解析技術、モデル化技術の構築を進め、再エネの導入拡大に伴って複雑・高度化していく電力系統の構築、運用に貢献していきたい。

### ■参考文献

- (1) 資源エネルギー庁：「第7次エネルギー基本計画の概要」、(2025)
- (2) 「系統解析ソフトウェア独国 DIgSILENT 社製 PowerFactory」、東光高岳技報、No.9 (2022)
- (3) 小澤知広：「配電系統における電圧変動」、電気設備学会誌、Vol.25、No.10 (2005)
- (4) 梅山慶太、茂木規行：「6 kV 配電線の電力品質を維

持する分散電源対応型 SVR」、東光高岳技報、No.10 (2023)

- (5) 宮本卓也：「PV 向けスマートインバータの遠方監視制御に対応した DERMS の開発」、東光高岳技報、No.8 (2021)
- (6) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：「再生可能エネルギーの大量導入に向けた次世代電力ネットワーク安定化技術開発 研究開発項目②-1 配電系統における電圧・潮流の最適な制御方式の開発」、(2022)

### ■語句説明

- 注 1) タップ切替：変圧器の一次巻線と二次巻線の巻数比を切り替えることで電圧を調整する方法。
- 注 2) 逆潮流：再エネなどの発電設備から電力系統側に向かう電力の流れのこと。
- 注 3) フィーダ：変電所から分岐し、各需要家に電力を供給するための電線路のこと。
- 注 4) 解列：発電設備を電力系統から切り離すこと。
- 注 5) Volt-var 制御：指定した電圧範囲を逸脱した際に、逸脱量に応じた無効電力を供給して電圧を調整する制御方法。

### 森 佑介

戦略技術研究所 技術開発センター  
解析・試験技術グループ 所属

# 電力機器の更なる信頼性向上と開発設計の効率化に向けた気密構造のゴム解析技術

■ 北村 拓真

Takuma Kitamura

■ 森 佑介

Yusuke Mori

■ 滝澤 明広

Akihiro Takizawa

電力機器には絶縁油や絶縁ガスが封入されているものが多い。これらが内部から漏れないように、または、外部から水などが侵入することを防ぐために、気密構造が必要であり、その気密を確保するための材料として、ゴム材料が広く使用されている。ゴム材料を潰したときの反発力をを利用して、機器の気密を確保しているが、ゴム材料の特性上、力の大きさと変形量が比例すると仮定した単純な材料力学では、詳細を把握することができない。そこで本稿では、製品の品質向上や試作回数の削減、開発設計の効率化に繋がるゴム材料の解析技術について、実測と解析の結果の比較検証例や解析技術の製品への活用方法を交えて紹介する。

## 1 はじめに

気密構造は、多くの製品で気密を確保するために必要であり、気密構造部分には様々な材料が用いられている。特に電力機器には、電気を絶縁するために絶縁油や絶縁ガスが封入されているものが多く、内部からの漏れ、または、外部から水などの侵入を防ぐために、気密構造の検討が重要となっている。気密構造部では、ゴム材料の反発力を利用し、気密を保つことが多い。

満足な気密性能を得るために、ゴム材料を適切に潰し、十分な接触面圧を確保する必要がある。しかし、ゴム材料はその特性上、力の大きさと変形量が比例すると仮定した単純な材料力学では、気密性能の評価で重要となるつぶし代や面圧分布などを把握することができず、構造解析を行うには一般的に難易度が高い。そのため、気密構造を有する機器の開発においては、長年の製品実績をベースとした設計と繰り返しの試作評価により、製品品質を担保してきた。

今回、製品の品質向上や試作回数の削減、手戻り防止による開発設計の効率化を目的としてゴム材料の特性を考慮した解析技術に取り組んだ。

本稿では、ゴム材料を使用した気密構造の解析技術として、ゴム解析技術の特徴と製品設計への活用例について紹介する。

## 2 ゴム材料の特徴

ゴム材料は、力を加えると大きく変形するが、力を除くとほぼ元の形に戻るという特徴から、その際の反発力をを利用して、気密を確保するための材料として広く使われている。

気密構造の開発設計をする際に重要となる機械的特性面での特徴を4つ紹介する。

(1) 応力-ひずみ特性において、強い非線形性を有する  
1つ目は、応力-ひずみ特性において、強い非線形性

を有することが挙げられる。脆性材料と延性材料、ゴム材料の応力-ひずみ特性を図1に示す。脆性材料は、ひずみの増加に伴って応力が上昇し、ほとんど塑性変形せずに破壊する。延性材料は、降伏点までは線形だが、それ以降は非線形性を示し、やがて破断する。ゴム材料は、最初は少ない力で大きく伸びるが、あるところから伸びるために必要な力が大きくなる。また、他の材料と比較しても、破断するまでに大きく変形する。このように、ゴム材料は強い非線形性を示すため、気密構造の検討を手計算で求めるのが難しい材料となっている。

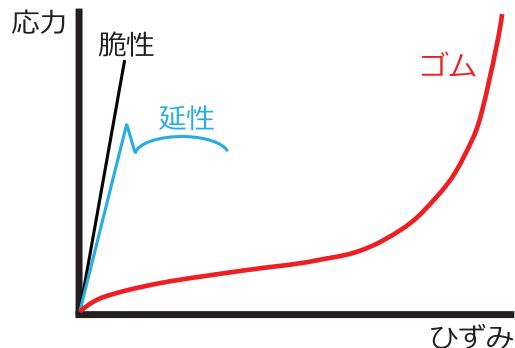


図1 各種材料の応力-ひずみ特性

(2) 非圧縮性であり、変形前後で体積が変化しない

2つ目は、非圧縮性であり、変形前後で体積が変化しない特徴を有している。物体に対して荷重を加えたとき、一般的な金属材料やプラスチックは変形に伴って体積も変化していくが、ゴム材料は荷重によって形が変わっても、変形の前後で体積がほぼ一定に保たれる非圧縮性という特性を有する。

(3) 変形回数によって、変形挙動が変化する

3つ目は、変形回数によって、変形挙動が変化する特徴がある。円柱状のゴム材料を用いてゴムの圧縮試験時の高さ方向の変位と荷重の関係性を確認した結果を図2に示す。図2より、圧縮1回目と2、3回目で変形挙動が異なっていることがわかる。このように、変

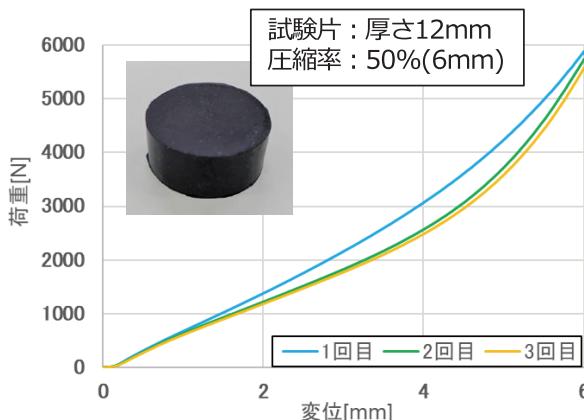


図2 圧縮試験結果例

形挙動が変わることで、ゴム材料の物性値も変化するため、ゴム材料を解析するときには、何回目のデータを用いるべきなのか、製品の用途に合わせた運用が必要となる。

#### (4) 永久ひずみが生じる可能性がある

4つ目は、永久ひずみが生じる可能性がある点にも注意が必要である。ゴム材料は荷重状態を長時間保つと、除荷しても完全には元の厚さに戻らないことがある。この元の厚さに戻らなかつた差分を永久ひずみという。永久ひずみが残ってしまうと、元の形のときと比べてゴム材料の反発力が低下するため、面圧が確保できなくなり、気密が保てなくなる可能性がある。

これらの特徴を踏まえ、ゴム材料を用いた気密構造を解析するために、次章に示すような方法でモデル化がされている。

### 3 ゴム材料のモデル化方法

ゴム材料は、一般的な弾性材料のようにヤング率<sup>注1)</sup>とポアソン比<sup>注2)</sup>のみで材料物性をモデル化することができない。そこでゴム材料を超弾性体として扱うことで、ひずみエネルギー関数を用いてモデル化される。ひずみエネルギー関数とは、物質を変形させたときに、その物質内に蓄えられる単位体積当たりのエネルギーのことをいう<sup>(1)</sup>。このひずみエネルギー関数には、様々な種類の表現式が提唱されており、代表的なひずみエネルギー関数の定義式として、Neo-Hookean や Mooney-Rivlin, Ogden<sup>(2)</sup>などのモデル式がある<sup>(3)(4)</sup>。その中で、精度が高く比較的単純な形で扱いやすいことから、今回使用した一般化 Mooney-Rivlin の式を式(1)に示す。

#### ○ 一般化 Mooney-Rivlin 式<sup>(5)</sup>

$$W = \sum_{i=0, j=0}^{\infty} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (1)$$

W: ひずみエネルギー関数,  $C_{ij}$ : 材料物性値

#### ○ 不変量

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (2)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad (3)$$

$I_1$ : 長さ方向の変化量,  $I_2$ : 表面積の変化量

#### ○ 伸長比

$$\lambda_1 = \frac{dx_1}{dX_1}, \lambda_2 = \frac{dx_2}{dX_2}, \lambda_3 = \frac{dx_3}{dX_3} \quad (4)$$

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ : 伸長比,  $dX_1, dX_2, dX_3$ : 変形前の長さ,  $dx_1, dx_2, dx_3$ : 変形後の長さ

ここで、 $I$ は不变量、 $\lambda$ は伸長比であり、それぞれ式(2)～(4)で表される。不变量は、主応力や相当応力など、座標系によらず変化しない量のことで、伸長比は、変形前後の長さの比率を表す。

### 4 実測と解析の結果比較

実測と解析の結果を比較するために用いたモデルを図3に示す。モデルは蓋とケースの間にOリングを接触させ、ボルトで締め付けることで気密を確保するものである。なお、Oリングにはクロロプロレンゴム（以下、CR）を用いた。解析では、供試器の対称性を考慮して計算時間短縮のために1/4モデルとし、締付位置の上面から鉛直下向きの荷重を設定して、解析を行った。

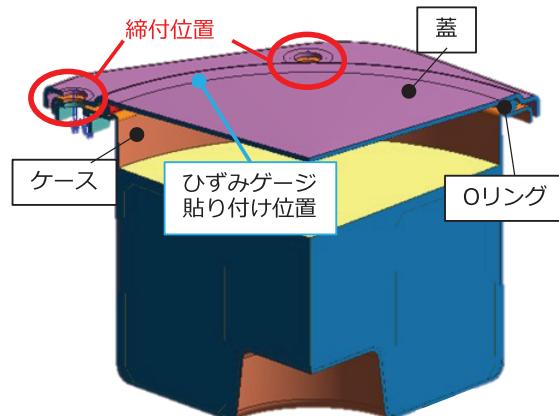


図3 解析モデル図 (1/4 モデル)

実測では、面圧分布と、ゴムの反発力による構造物のひずみを測定項目とした。面圧分布は、感圧紙をケースの上に乗せ、その上にOリングを配置する方法で測定した。ひずみは、締付部中間位置の平坦な部分にひずみゲージを貼り付け、ゴムの反発力による蓋の変形を測定した。

面圧分布の実測結果を図4に、解析結果を図5に示す。面圧値は、実測で発色される最も濃い赤色を1として基準化表示している。

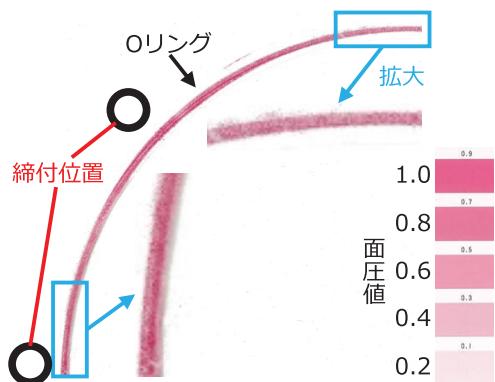


図4 実測結果（面圧分布）

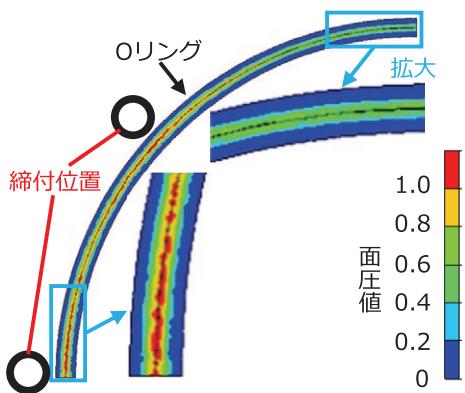


図5 解析結果（面圧分布）

図4および図5より、実測、解析ともにOリングの全周にわたって面圧が確保されていることが確認できる。締付部付近と締付部から離れた箇所の拡大図を見ると、実測および解析とも締付部付近の面圧が強くなっている。また、合わせて実施したひずみ測定においては、実測と解析の差が10%以下であったことを確認している。

以上のように、Oリングの面圧分布や反発力によって生じる構造物のひずみ量が、実測と解析で一致することを確認した。

## 5 ゴム解析技術の活用例

ゴム解析技術の活用例として、開発設計時に締付位置やゴム材料を変更したときのつぶし代および面圧の可視化事例を示す。例として、長方形の蓋とケースの間に、CRを使用した角パッキンを挟んだモデルを作成し、解析を行った。以降の解析結果では、蓋やケースは非表示にして角パッキンのみを表示しており、図中黒枠の丸は、締付位置を表すこととする。

### 5.1 気密構造部の締付位置の検討

締付位置変更前後のつぶし代および面圧分布の解析結果を図6、図7に示す。変更前の解析モデル（a）では、モデルの短手側をボルトで締め付けているが、長手側のパッキンのつぶし代は小さく、面圧も低い。そこで、解

析モデル（b）のように締付位置を長手側に変更することにより、長手部分のつぶし代は大きく、面圧も高くなり、均一な接触面圧が確保できていることがわかる。

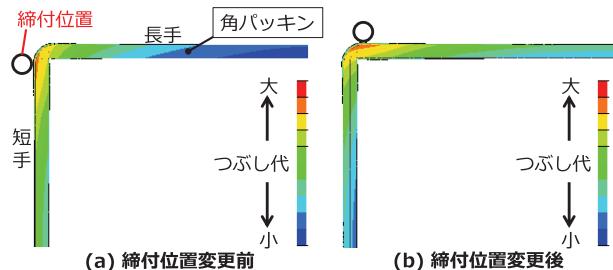


図6 締付位置変更前後のつぶし代分布

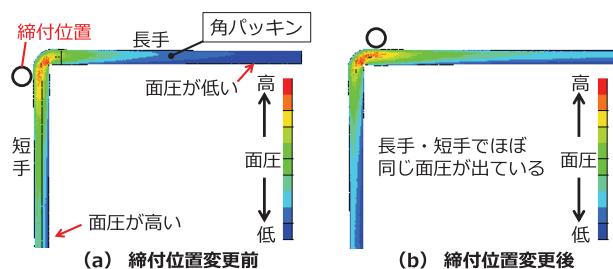


図7 締付位置変更前後の面圧分布

### 5.2 気密構造部のゴム材料硬度の影響

前節の解析モデルから、ゴム材料の硬度を下げた場合（以下、硬度A）と上げた場合（以下、硬度B）のつぶし代および面圧分布をそれぞれ図8、図9に示す。

ゴム材料の硬度を変更した解析結果より、硬度Aは、同じ締付力であってもつぶし代は大きくなるが、面圧は低くなる。一方で、硬度Bでは、つぶし代は小さく、また、局所的に面圧は高くなるといった挙動が明確に可視化できている。

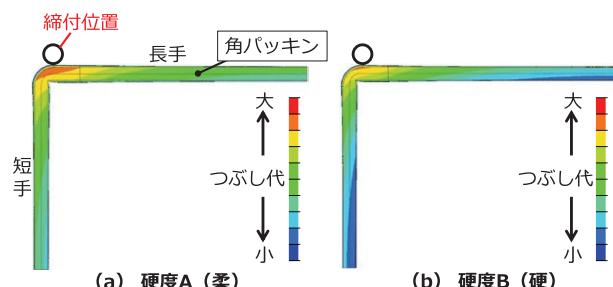


図8 硬度違いによるつぶし代分布

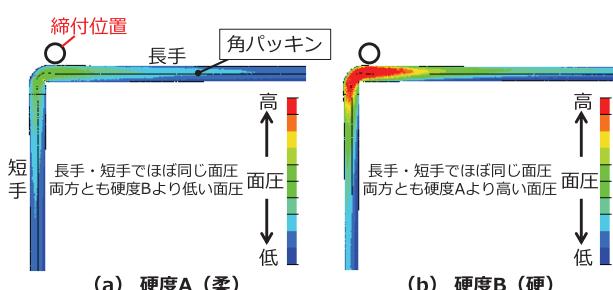


図9 硬度違いによる面圧分布

## 6 おわりに

本稿では、電力機器に用いられているOリング、角パッキンを対象としたゴム解析技術を紹介した。

今回紹介したゴム解析技術を用いることで、ゴム材料の挙動を可視化できるため、気密性能を評価する上で重要なゴム材料のつぶし代や面圧分布などを詳細に把握できるようになり、より適切な気密構造の設計が可能になる。

今後は、このゴム解析技術の適用拡大により、製品の品質向上や試験回数削減、手戻り防止による開発設計の効率化に繋げていきたい。

### ■参考文献

- (1) 河村幸伸、浦山健治、鞠谷信三、深掘美英：「エラストマーのひずみエネルギー密度関数の解析」、日本ゴム協会誌、第73巻、第1号、(2000)
- (2) R.W. Ogden :「Large deformation isotropic elasticity—on the correlation of theory and experiment for incompressible rubberlike solids」, PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY A, Vol.326, pp.565-584, (1972)
- (3) 石川覚志：「〈解析塾秘伝〉ゴムの有限要素法の学び方！—超弾性体の基礎理論と実践—」、日刊工業新聞社、(2015)

- (4) 萩本光広：「ゴムのFEM解析—初心者から中級者のためのはじめの一歩基本のすすめ」、銀河書籍、(2018)
- (5) R.S. Rivlin, D.W. Saunders :「Large elastic deformations of isotropic materials VII. Experiments on the deformation of rubber」, PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY A, Vol.243, pp.251-288, (1951)

### ■語句説明

- 注1) ヤング率：縦弾性係数とも呼ばれる。材料の変形のしにくさを表す物性値。
- 注2) ポアソン比：荷重をかけた方向のひずみ量に対して、それと垂直方向のひずみ量の比率を表したもの。

---

### 北村 拓真

戦略技術研究所 技術開発センター  
解析・試験技術グループ所属

### 森 佑介

戦略技術研究所 技術開発センター  
解析・試験技術グループ所属

### 滝澤 明広

戦略技術研究所 技術開発センター  
解析・試験技術グループ所属

# 持続可能な社会に向けた エポキシモールド機器のリサイクル技術

■ 松本 鳩

Hayate Matsumoto

■ 大竹 美佳

Mika Ohtake

東光高岳では持続可能な社会の実現に向け、エポキシモールド機器のライフサイクル全体を考慮した取り組みを行っている。原料、製造、使用、再資源化のサイクルの中でも再資源化に着目したエポキシモールド機器のリサイクルについて検討を行ってきた。これまでにエポキシ樹脂を溶解することで、金属類、充填材、樹脂分解物の3つを分離、回収できることを確認している。本稿ではエポキシ樹脂のベンチスケールの溶解設備と内蔵物の回収方法、回収した充填材を洗浄しエポキシ樹脂に再度配合した時の特性について紹介する。

## 1 はじめに

近年、カーボンニュートラルの実現は地球環境の持続可能性を確保する上で急務とされており、更なる環境負荷の低減が企業に求められている。その一環として、廃棄物の削減や資源の有効活用が重要な課題となっている。産業廃棄物の最終処分場の残余年数は回復の傾向も見られるが20年程度の見込みであるため依然逼迫した状況となっている<sup>(1)</sup>。また、銅や銀などの金属は累計需要が埋蔵量を超過する懸念もあり、資源の枯渇への対策が必要である。このような背景から、これまでのよう大量生産、大量消費して大量廃棄するといったリニアエコノミーから、ライフサイクル全体で資源の効率的、循環的な利用を最大化するサーキュラーエコノミーへの転換が重要とされている。

エポキシモールド機器は、電力インフラにおける重要な構成要素として広く用いられ、コイル（銅線）などの内蔵物を絶縁体であるエポキシ樹脂で覆っている。エポキシ樹脂は高い絶縁性と機械強度を持つことから、エポキシモールド機器は耐久性の高さに基づく長寿命で環境負荷低減に寄与してきた。一方、課題としてリサイクルしにくいことが挙げられる。またエポキシモールド機器は1960年代から実用化されており、順次更新時期を迎えることから今後も大量に廃棄処理されることが予想される。これらの背景からエポキシモールド機器のリサイクルは日々重要性を増してきている。

東光高岳では、エポキシモールド機器の持続可能な利用を目指し、エポキシ樹脂を溶解することでエポキシモールド機器の内蔵物を取り出してリサイクルすることを目的とした研究を行っている。

これまでにラボスケールの簡易設備を用いて、試験片サイズのエポキシ樹脂を供試材とした溶解条件の検討や、樹脂から回収した充填材<sup>(注1)</sup>の洗浄条件の見極めなど、リサイクルするための諸条件を検証してきた<sup>(2)</sup>。

回収した充填材をエポキシ樹脂に配合した場合、新品の充填材を使用した場合と同等の特性を持つこと、実器へ適用可能などを確認した<sup>(3)</sup>。

本稿では、エポキシ樹脂の溶解と充填材の回収によるリサイクルの実運用化を見据え、小型のエポキシモールド機器を溶解可能とするベンチスケール<sup>(注2)</sup>の溶解設備と回収方法、またそれによって得られた回収充填材の特性について紹介する。

## 2 エポキシ樹脂の溶解と分離

### 2.1 エポキシ樹脂の溶解

エポキシ樹脂は熱硬化性樹脂であり、本来は不溶不融な材料である。しかし同じ熱硬化性樹脂である繊維強化プラスチック（FRP）の溶解で実績のある常圧溶解法<sup>(4)</sup>を適用することで、エポキシ樹脂を溶解できる。これによりエポキシモールド機器から金属類・充填材・樹脂分解物の回収・分離が可能となる。エポキシ樹脂の溶解方法はいくつか挙げられるが、常圧溶解法は常圧、約200°Cと比較的安全な条件での溶解が可能な点で優れている。

小型のエポキシモールド機器を溶解するベンチスケールの溶解設備（以下、本設備）を図1に示す。本設備のオイルバスに、溶解槽（溶解液とエポキシモールド機器を入れた容器）を入れ加熱して溶解する。溶解時には

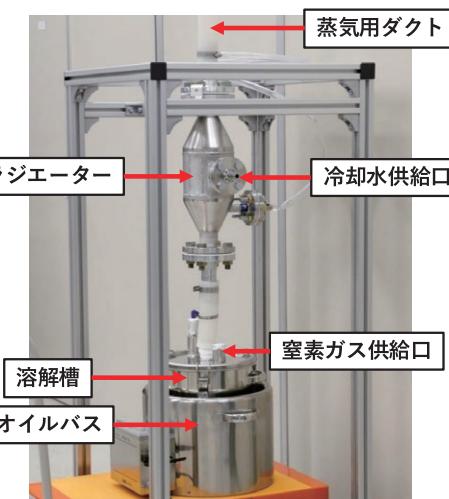


図1 ベンチスケールの溶解設備

冷却水と窒素ガスを供給することで、溶解の効率と安全性を高めている。

以前のラボスケールの設備では1Lのフラスコを用いて樹脂の供試材を溶解していたが、本設備を導入したことにより、小型のエポキシモールド機器を溶解することが可能になった。

## 2.2 樹脂材料と内蔵物の分離

エポキシモールド機器を本設備で溶解し、内蔵物を分離する際のイメージを図2に示す。

カゴに収めた供試器をカゴごと溶解槽に入れ、さらに溶解液に浸している。溶解槽を加熱すると溶けないコイルや端子等の金属がカゴに残り、樹脂だけが溶け出することで分離されることになる。分離された樹脂分解物は溶解槽の中で液体として取り出すことができる。充填材はこの液体中に分散しているため、樹脂分解物と併せて回収した後、分離する。樹脂分解物と比べて充填材の比重が大きいため、一定時間静置させることで充填材が沈降し樹脂分解物と分離することができる。樹脂分解物の液中に一部金属くずが残留するが、ふるいで簡単に除去が可能である。



図2 溶解による内蔵物の分離

## 3 回収した充填材のリサイクル

### 3.1 回収した充填材の洗浄

エポキシ樹脂を溶解し、回収した充填材は、表面に樹脂分解物などが付着している。そのため、エポキシ樹脂の充填材としてリサイクルするには洗浄（充填材から付着物を除去）する必要がある。

図3に充填材の洗浄に用いる加圧ろ過装置を示す。溶媒に分散させた充填材をこの加圧ろ過装置に流し、ろ過層にため込み洗浄する。洗浄は溶剤と精製水をろ過装

置に流して行う。加圧ろ過を用いることで溶解液にベンジルアルコールのような粘度の高い液体を用いても効率よく洗浄することができる。ろ過層のフィルターとして用いるろ布については、ろ過の効率、充填材の回収率について検証し、選定している<sup>(5)</sup>。

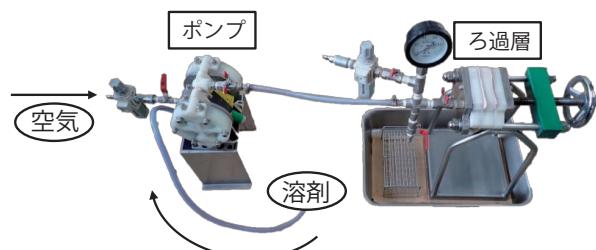


図3 充填材洗浄用加圧ろ過装置

### 3.2 回収充填材の分析

本設備と前節で紹介した方法で回収、洗浄した充填材（以下、回収充填材）をエポキシ樹脂に配合してリサイクルするにあたり、フーリエ変換赤外分光光度計<sup>注3)</sup>（以下、FT-IR）による分析を実施し、新品の充填材との比較を行った。試料は新品の充填材、洗浄前の回収充填材、回収充填材の3種類とし、新品の充填材との比較に加え、洗浄前後を比較し、洗浄効果の有無も確認した。

図4に上記3種類の充填材のFT-IR分析結果を示す。なお、比較しやすくするために3種類のスペクトル<sup>注4)</sup>を縦軸方向に移動して並べている。図4に示した分析結果では、洗浄前の回収充填材が示すスペクトルに樹脂分解物由来と考えられるピーク（1,500 cm<sup>-1</sup>付近と1,700 cm<sup>-1</sup>付近のカルボン酸<sup>注5)</sup>）が確認された。回収充填材のスペクトルではこれらのピークは無くなっています。一方で回収充填材のスペクトルは新品充填材のスペクトルと完全には一致していないことから不純物が混ざっている可能性が考えられた。

回収充填材の不純物を調査するために元素分析した結果、不純物は沈降防止剤であることが確認できた。沈降

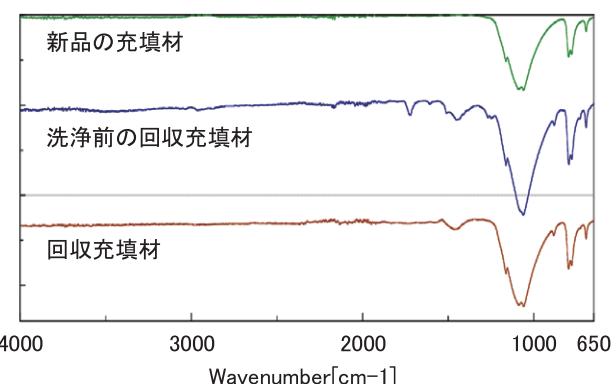


図4 各充填材のFT-IR分析結果

防止剤は樹脂にあらかじめ配合され、分散した充填材が比重差によって沈降しないよう緩和するためのものであり、配合量は充填材に比べごくわずかである。図5に新品の充填材と回収充填剤、沈降防止剤のFT-IRによる分析結果を示す。なお、図4と同様スペクトルを縦軸方向に移動して並べている。図5の赤枠部分は新品の充填材にはない回収充填材特有のピークであり、沈降防止剤が持つピークと一致していることが確認できる。ピークの高さの違いは、回収充填材に含まれる沈降防止剤が微量であるためと考えられる。

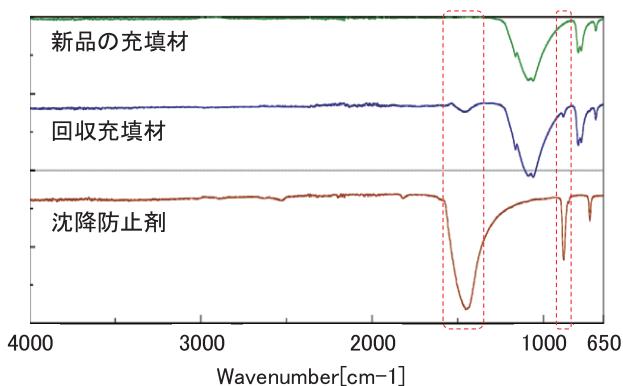


図5 2種類の充填材と沈降防止剤のFT-IR分析結果

これらの結果から、回収充填材には微量の沈降防止剤が含まれているが、表面に付着していた樹脂成分などは洗浄できていることが確認できた。そのため、充填材としてリサイクル可能であると判断した。

### 3.3 回収充填剤配合樹脂の特性

回収充填材を新品の樹脂に配合し、特性を取得した。取得した特性を新品の充填材と比較したもの一部を表1に示す。

回収充填材を配合した樹脂は機械特性、電気特性、熱特性、作業特性のいずれも新品の充填材を配合した樹脂と同等の特性を持つことが確認できた。

表1 回収充填材配合樹脂の特性比較

初期特性		新品との比較
機械特性	引張強さ	95%
	曲げ強さ	100%
	曲げ弾性率	99%
電気特性	誘電率	97%
	絶縁破壊強度	94%
熱特性	ガラス転移温度	100%
作業特性	初期粘度 (80°C)	101%

## 4 おわりに

エポキシモールド機器の溶解と充填材の回収について、設備と回収・洗浄方法、さらには回収充填材を配合した樹脂の特性について紹介した。紹介した方法を用いて回収した充填材を配合したエポキシ樹脂は、新品の充填材を配合した場合と同等の特性を得られた。

今後は実運用に向け、検証規模のスケールアップと充填材以外の回収可能な材料についてのリサイクル方法の確立を検討する。併せて原材料のバイオマス資源活用による低炭素化も推進し、エポキシモールド機器のライフサイクル全体での更なる環境負荷の低減と資源循環に貢献したい。

### ■参考文献

- 環境省 HP:「令和7年版環境・循環型社会・生物多様性白書第2部各分野の施策等に関する報告第3章循環型社会の形成」, <http://www.env.go.jp/policy/hakusyo/> (2025年7月11日閲覧)
- 熊谷美佳, 大塚尊裕:「エポキシモールド変成器のリサイクル」, 平成22年度電気学会全国大会, 5-131 (2010)
- 熊谷美佳, 大塚尊裕:「エポキシモールド変成器の溶解回収物の再利用」, 平成24年度電気学会全国大会, 5-128 (2012)
- 柴田勝司:「FRPのリサイクル技術」, ネットワークポリマー, Vol.28, No.4, pp.247-256 (2007)
- 大竹美佳, 山下太郎:「エポキシモールド機器のライフサイクル全体にわたる環境配慮技術」, 東光高岳技報, No.7, pp.19-20 (2020)

### ■語句説明

- 充填材: 被添加物質の特定の性能を向上させるもの。エポキシ樹脂においては無機物の粉体が多く、機械強度を高めることや熱膨張率を下げることを目的にシリカやアルミナが添加される。
- ベンチスケール: 原理の検証や初期評価に用いられるラボスケールから規模を拡大した段階で、プロセスの評価などに用いられる。
- フーリエ変換赤外分光光度計(FT-IR): 試料に照射した赤外光の透過または反射した光量と周波数から試料の分子構造の定性分析を行う装置。高精度かつ迅速に測定が可能。
- スペクトル: 光や信号などの複雑な情報を成分ごとに並べたもの。FT-IRにおけるスペクトルは物質固有であるため物質の同定に用いられる。
- カルボン酸 (-COOH): 炭素鎖の末端に酸素原子の二重結合とヒドロキシ基 (OH基) を持つ親水性の官能基であり、樹脂成分の残留物有無の判断ができる。

### 松本 鳩

戦略技術研究所 技術開発センター  
材料技術グループ 所属

### 大竹 美佳

戦略技術研究所 技術開発センター  
材料技術グループ 所属

# 植物由来の絶縁油を使用した電力会社向け油入全装輸送変圧器

■ 土屋 龍平  
Ryohei Tsuchiya

■ 大山 修司  
Shuji Oyama

## 1 はじめに

近年、持続可能な社会の実現に向け、環境負荷に配慮した変電設備のニーズが高まっている。それに対応した製品の一つとして、従来の石油由来の鉱物系絶縁油（以下、鉱油）に代わり、植物由来の絶縁油を使用した変圧器があり、当社はこれまで一般産業や公営企業、鉄道会社向けにパームヤシ脂肪酸エステル油（以下、PFAE）を適用した変圧器を多数納入している。

今回、PFAE を適用した電力会社向け油入全装輸送変圧器（以下、本器）を開発し、その初号器を東京電力パワーグリッド株式会社に納入したので紹介する。

## 2 仕様

本器の基本仕様を表1、外観を図1に示す。

表1 基本仕様

	現行器	本器
絶縁冷却媒体	鉱油	PFAE
一次引出方法	気中形、ケーブルヘッド形	
容量・電圧	20 MVA 64.5/6.9 kV	
タップ切換方式	負荷時タップ切換	
結線	Y-Y-(Δ)	
%インピーダンス	15 %	
騒音	50 dB (A) 以下	
全損失	141 kW	129.5 kW
寸法	長さ 6,230 mm 幅 3,000 mm 高さ 3,500 mm	長さ 6,200 mm 幅 3,000 mm 高さ 3,700 mm
総質量	37.0 t	37.6 t
輸送形態	油入全装輸送	



図1 変圧器外観

## 3 特長

本器の主な特長は次のとおりである。

### 3.1 脱炭素化・低環境負荷

- PFAE の原材料であるパームヤシは、成長過程において大気から CO<sub>2</sub> を吸収する効果を見込むことができるため、カーボンニュートラルへの貢献ができる。
- PFAE は高い生分解性<sup>注1)</sup>を有しているため、万が一自然災害などで自然環境中へ油流出が発生した場合においても、生態系への影響を最小限に抑えられる。
- 現行器よりも低損失な設計とすることで消費電力を軽減し、電気的性能面においても環境負荷低減が期待できる。

### 3.2 その他特長

- 低損失設計により重量が増えるが、PFAE は他の植物油と比較して動粘度が低く放熱性が高いため、放熱器の数を削減することで重量を減らせる。それにより、現行器と同等の総重量を維持できるため、完成状態で輸送する油入全装輸送を実現している。油入全装輸送により、現地での注油作業の省略および工事工程の短縮が可能である。
- 電力会社特有のニーズである過負荷運転性能については、絶縁油の熱流体解析を行い、油流を考慮した内部構造を設計することで、求められる性能を確保している。
- PFAE は高い吸湿性能を有していることから、巻線絶縁紙の劣化を抑制し、変圧器の寿命延伸が期待できる。

## 4 おわりに

今後もお客様のニーズを把握しながら、持続可能な社会の実現に貢献する変圧器の開発を推進していきたい。

### ■語句説明

注1) 生分解性：微生物により、二酸化炭素や水、その他 の無機物へ分解される性質。なお、PFAE は酸素存在下においてでのみ分解される。

### 土屋 龍平

電力プラント事業本部  
第一設計部 大型変圧器設計グループ 所属

### 大山 修司

電力プラント事業本部  
第一設計部 大型変圧器設計グループ 所属

# 電力設備のレジリエンス向上に貢献する 72 kV 移動用ガス絶縁開閉装置の開発

■ 岡村 裕之  
Hiroyuki Okamura

## 1 はじめに

近年、電力インフラ設備の老朽化が進み、自然災害の頻発も相まって、変電所設備更新時の送配電維持や設備事故時の早期復旧が電力会社として大きな課題となっている。これらの課題解決に向けて、当社ではこれまでに、ガス絶縁開閉装置をトラックに積載した移動用ガス絶縁開閉装置を開発・納品してきた。

しかし都市部の配電用変電所は、土地や周辺道路が狭い所が多く、設備更新や設備事故時に移動用ガス絶縁開閉装置を現地へ出動させても、設置スペースの確保が困難という新たな課題が生じている。この課題を解決するため、よりコンパクトで軽量化した新形移動用ガス絶縁開閉装置（以下、本器）を開発したので紹介する。

## 2 開発コンセプト

移動用ガス絶縁開閉装置に求められるのは、既設の設備更新時はもとより、設備事故などの緊急時にも迅速に現地へ出動し、電力の供給障害を復旧できることである。そのため、特殊車両通行許可申請<sup>注1)</sup>が不要となる重量・寸法にする必要がある。今回はこれを踏襲しつつ、新たに設置スペースの縮小化を開発コンセプトとして掲げた。

従来形は機器をトラックに積載したまま使用する必要があったが、本器はトラックから荷下ろしして使用できるようにすることで、機器を使用する際に必要な設置スペースの縮小化を図った。現地でのトラックからの荷下ろしを考慮して、機器本体の重量は3,300 kg以下とした。

## 3 仕様

### 3.1 外観

図1に本器の外観を示す。



図1 本器の外観

### 3.2 内部構造

図2に本器の概略内部構造を示す。

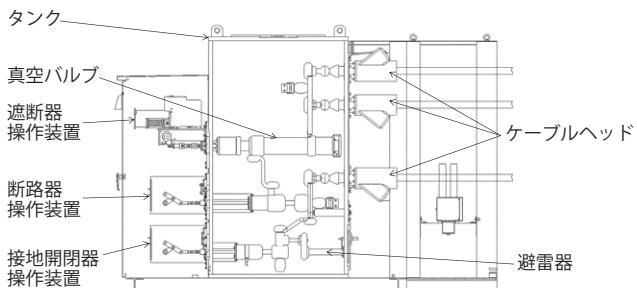


図2 本器の内部構造

### 3.3 仕様概要

お客さまと協議を重ね、必要な仕様を決定した。基本仕様を表1に示す。

表1 基本仕様

項目	仕様
定格電圧	72 kV
定格電流	800 A
雷インパルス耐電圧	250 kV (低減電圧 <sup>注2)</sup>
商用周波耐電圧	115 kV (低減電圧)
定格周波数	50 Hz
定格短時間耐電流	25 kA, 2 s
定格ガス圧力	0.07 MPa
ガス種類	SF <sub>6</sub>
総ガス量	21 kg
総重量	3,300 kg

## 4 特徴

### 4.1 機器の軽量化・機器の縮小化

#### (1) 本体タンクの軽量化

従来形は絶縁ガスを封入するタンクの材質に鉄鋼材を採用していたが、本器ではアルミニウム材を用いることで軽量化を図った。採用にあたり、構造解析を行い、タンク内に封入される絶縁ガス圧力による応力や変形を評価し、最適な板厚と補強位置を決定した。図3にタンクの強度解析結果の一例を示す。

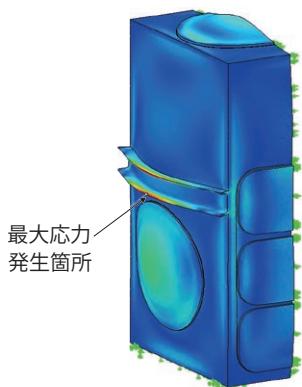


図3 タンクの内部圧力による強度解析例

#### (2) 機器本体の縮小化

お客さまと協議の上で低減電圧を採用することで、定格耐電圧値を低く設定でき、絶縁距離の短縮が可能となった。それにより機器の縮小化を実現した。

表1に示す通り、雷インパルス耐電圧値および、商用周波耐電圧値の低減電圧を採用した。

#### (3) 設置スペースの縮小化

機器をトラックから荷下ろしして使用できるようにしたことで、従来形と比較して、本器とそれを制御する制御盤<sup>注3)</sup>は設置面積を約70%削減することができた。設置スペース比較図を図4に示す。

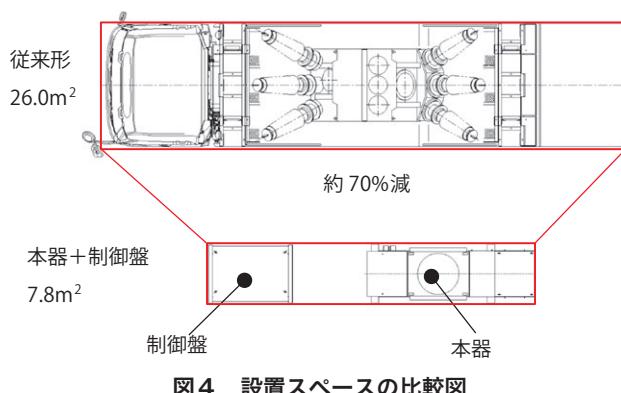


図4 設置スペースの比較図

### 4.2 輸送時のガス減圧不要と環境負荷低減

従来形でも採用している技術を踏襲し、遮断部に高圧のSF<sub>6</sub>ガスを使用しない真空バルブを採用することで、タンク内のSF<sub>6</sub>ガス圧力を低圧力のみで構成している。タンク内のガス圧力が高圧力の場合は機器輸送時に減圧し、現地での機器使用時に昇圧する必要がある。本器は輸送時のガス減圧を不要としつつ、機器の縮小化との相乗効果により、ガス使用量の大幅削減を実現した。

## 5 おわりに

都市部などの土地や周辺道路が狭い変電所でも出動できる軽量・コンパクトな72 kV移動用ガス絶縁開閉装置を開発した。

2024年度には7台を納入済みで、2025年度にも納入を予定している。これにより、電力会社のレジリエンス向上に貢献することが期待される。

#### ■語句説明

- 注1) 特殊車両通行許可申請：道路法で定められた特定の条件（特殊な構造の車両や車両の大きさ、重さなど）を超える車両が公道を走行する際に必要な許可を得るための手続きのこと。
- 注2) 低減電圧：ガス絶縁タンク形高性能避雷器を適用し、大電流放電時においても耐電圧値との間に相当な余裕をもつ場合、定格耐電圧値の低い方を採用できる。この低い耐電圧値を「低減電圧」と呼称する。表2に、定格72 kVの耐電圧値を抜粋して示す。

表2 定格電圧72 kVにおける耐電圧値の抜粋

定格電圧	定格電圧 インパルス耐電圧値	商用周波耐電圧値
72 kV	250 kV*	115 kV*
	350 kV	140 kV

\*今回採用した低減電圧

- 注3) 制御盤：開閉装置の操作・状態表示・故障表示などを担う制御装置。従来形は車両に積載されているが、本器では開閉装置本体同様に荷下ろしして使用する。

岡村 裕之

電力プラント事業本部  
第一設計部開閉装置設計グループ 所属

# エネルギー消費効率を向上した 油入形 2026 トップランナー変圧器

■ 松下 洋一

Yoichi Matsushita

## 1 はじめに

省エネルギーや地球温暖化防止等の背景から、2003年4月に「エネルギーの使用の合理化に関する法律（省エネ法）」が改正施行された。その中には、省エネルギーの基準を定めるトップランナー制度<sup>注1)</sup>についての記載もあり、高圧受配電用変圧器（油入変圧器）が特定機器<sup>注2)</sup>に指定された。2023年にトップランナー制度の第三次判断基準（経済産業省告示127号）が告示され、それに適合した「2026 トップランナー変圧器」の出荷が2026年4月から義務化される。2026 トップランナー変圧器は、識別のためデザインのロゴマークを変圧器本体やカタログに明記することになっている（図1）。

油入変圧器の製造・販売をしている東光高岳でも、2026 トップランナー変圧器に適合した製品を開発しているため紹介する。



図1 2026 トップランナー変圧器ロゴマーク

## 2 2026 トップランナー変圧器

トップランナー変圧器は、表1のように判断基準が更新され、それに伴い呼称も変更されてきた。その最新が2026 トップランナー変圧器となる。適用範囲と除外機種を表2に示す。

表1 トップランナー変圧器

開始年度	呼称	判断基準
2006 年度	トップランナー変圧器	第一次
2014 年度	トップランナー変圧器 2014	第二次
2026 年度	2026 トップランナー変圧器	第三次

表2 トップランナー変圧器の適用範囲と除外機種

適用範囲	機種：油入変圧器、モールド変圧器 容量：単相 10 kVA～500 kVA 三相 20 kVA～2,000 kVA 一次電圧：6 kV 級、3 kV 級 二次電圧：100V～600V
除外機種	ガス絶縁変圧器 H 種乾式変圧器 スコット結線変圧器 モールドド動変圧器 水冷または風冷変圧器 3巻線以上の多巻線変圧器 電力会社向けの柱上変圧器など

第三次判断基準が告示されたことにより、JIS C 4304が改訂され、また、一般社団法人日本電機工業会にて新たにJEM 1520が制定された。2026 トップランナー変圧器が準拠するJIS規格およびJEM規格を表3に示す。

表3 2026 トップランナー変圧器適合規格

規格	名称
JIS C 4304 : 2024	配電用 6 kV 油入変圧器
JEM 1520 : 2024	特定エネルギー消費機器準標仕様 高圧油入変圧器

トップランナー制度の基準にはエネルギー消費効率が用いられる。エネルギー消費効率は無負荷損<sup>注3)</sup>と基準負荷率時<sup>注4)</sup>の負荷損<sup>注5)</sup>を合わせたもので次式により算出する。

$$\text{エネルギー消費効率} = \text{無負荷損} + (m/100)^2 \times \text{負荷損}$$

m : 基準負荷率 500 kVA 以下 40%  
500 kVA 超過 50%

表1の各機器、およびトップランナー制度適用以前の変圧器のエネルギー消費効率の比較を図2に示す。

エネルギー消費効率は、2026 トップランナー変圧器では、トップランナー制度適用以前の変圧器と比較して42%程度、トップランナー変圧器2014との比較では13%程度改善される。エネルギー消費効率の改善により電気料金の削減、CO<sub>2</sub>排出量の削減が図れる<sup>(1)</sup>。

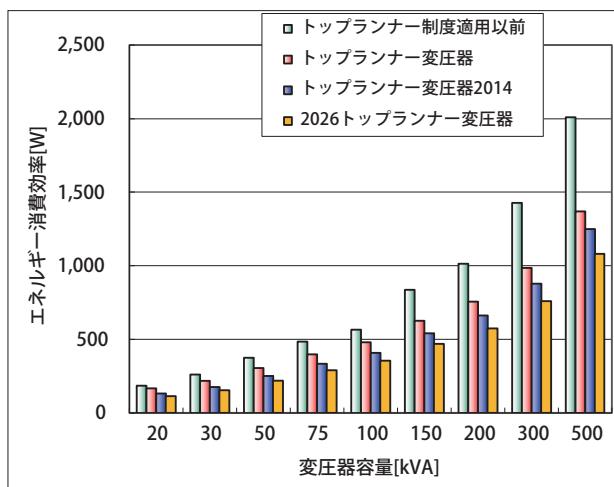


図2 エネルギー消費効率の比較（三相 50 Hz）

### 3 油入変圧器の概要

今回、東光高岳が開発している油入形の 2026 トップランナー変圧器の外観を図3に示す。

図3 油入形 2026 トップランナー変圧器  
(三相 50 Hz 300 kVA)

エネルギー消費効率の向上には、鉄心に使用する電磁鋼板の特性、鉄心断面積、鉄心質量、巻線に使用する導体特性、巻線断面積、巻線の大きさなどの各パラメータから適切な設計を行った。設計の特長は鉄心の低磁束密度化となる。

無負荷損は、鉄心の断面積を大きくし低磁束密度化すると低減することができる。しかし、過度の低磁束密度化は巻線線長の増加による負荷損の増加に繋がるため、最適な磁束密度にて設計を行った。

また、鉄心の低磁束密度化により無負荷損の低減だけでなく低騒音化も期待できる。

### 4 おわりに

2026 トップランナー変圧器の概要およびそれに適合した東光高岳製油入変圧器について紹介した。2026年4月から販売開始する2026 トップランナー変圧器はエネルギー消費量やCO<sub>2</sub>排出量の低減に貢献する。

今後も2050カーボンニュートラル実現に向け、変圧器のさらなるエネルギー消費効率向上を目指していく。

#### ■参考文献

- (1) 日本電機工業会：「地球環境保護・温暖化防止のために 2026 トップランナー変圧器」, pp.5-6 (2025)

#### ■語句説明

- 注1) トップランナー制度：省エネルギー基準を定める方式の一つで、出荷される製品の省エネルギー基準を現在商品化されている最高性能の製品以上に定めること。
- 注2) 特定機器：二酸化炭素排出量を抑えるため、エネルギーの使用の合理化を図ることが特に必要な機器。
- 注3) 無負荷損：負荷がない場合でも発生する損失。変圧器の巻線に電圧が印加され、鉄心に発生する磁束により発生する。
- 注4) 基準負荷率：定格容量に対する利用率。基準負荷率の値は、使用実態に即し、実際に使用される負荷が変動した際にも十分な省エネ効果を発揮することに配慮し、省エネ法における変圧器判断基準に定められた値。
- 注5) 負荷損：負荷により発生する損失。負荷電流と巻線の抵抗により発生する。

松下 洋一

電力機器事業本部  
小型変圧器製造部設計グループ 所属

# 受変電設備の安定稼働に貢献する ディジタル形保護計測装置 PACGEAR の モデルチェンジ

■ 市川 隆之  
Takayuki Ichikawa

■ 長谷川 誠  
Makoto Hasegawa

■ 山田 康久  
Yasuhisa Yamada

## 1 はじめに

受変電設備用の保護、制御、計測機能を一括収納したディジタル形保護計測装置である「PACGEAR (Protection and Control - GEAR)」は、1988年に当社が適用開始してから約40年が経過した現在も、受変電設備用ディジタル・マルチリレー<sup>注1)</sup>として長くご使用いただいている。

適用当初より、市場ニーズや対象設備の形態に合わせて機種を展開し、高機能化や後継機種適用等を進めてきた。近年では、労働人口の減少に伴い、受変電設備での保守・メンテナンス作業の継続が困難になりつつある。

そこで課題解決のために、機能向上を実現したPACGEARシリーズの最新モデルPACe2を開発したので紹介する。

## 2 開発コンセプト

PACe2は、受変電設備の保守・メンテナンスの効率化のため、様々な機能を用意している。PACe2における開発コンセプトを図1に示す。3~5章で各コンセプトを説明する。ここでは主な特徴を紹介する。



図1 PACe2の開発コンセプト

- ・自動リレー試験機能による点検簡素化・点検周期延伸に寄与
- ・各種データの記録による異常データの解析や設備故障の未然防止に寄与
- ・市販の汎用ケーブルを用いてPCから設備状態の確認が容易
- ・汎用的な伝送方式へ対応し既存設備との接続性向上

## 3 生産性・機能性の向上 (Efficiency)

### 3.1 機種統廃合

PACGEARシリーズでは、対象設備やお客様にあわせた様々な機種を展開してきた。そうすることで多様なニーズに応えてきた一方、使用部品の生産中止に伴う生産維持対応や保守・メンテナンスに課題が生じていた。

今回、使用部品を1点ずつ見直し、筐体サイズの異なるPACGEARシリーズの最小サイズに合わせるとともに、使用プロセッサの大幅な性能向上を図ることで、シリーズの統廃合を実現させた(図2)。

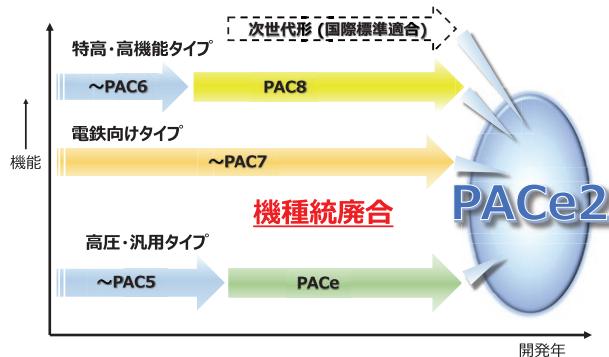


図2 PACGEARシリーズの統廃合

PACe2の外観と他機種サイズ比較を図3、図4に示す。筐体サイズをコンパクト化したことにより、装置の更



図3 PACe2外観

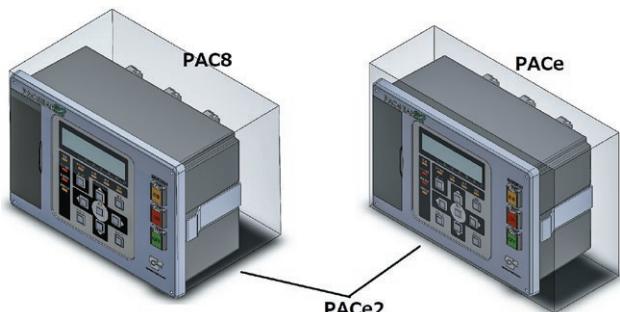


図4 PACe2と他機種との筐体サイズ比較

新時にはアタッチメントを取り付けることで、装置が取り付けられている扉の加工をせずにレトロフィットを行うことを可能とした。

### 3.2 データ利活用

お客様設備の診断や予防保全にもご活用いただくため、PAC8 から搭載しているデータセーブ機能を更に向上させた。これまでのアナログ情報（リレー動作のための基本波抽出後の Ry 入力情報）、リレー動作情報、トリップ出力/Do 出力情報、Di 入力情報に加え、オシロ波形記録として、4,800 Hz (50 Hz 時)/5,760 Hz (60 Hz 時) 周期で、アナログ / ディジタル・フィルタを介さずに、直接サンプリングした系統情報を記録できるようにした。

これにより、非接地系統の地絡事故時に生じる間欠地絡波形（台形波 VO/ 針状波 IO 波形）を解析ツールにより直接確認できるようになった（図 5）。

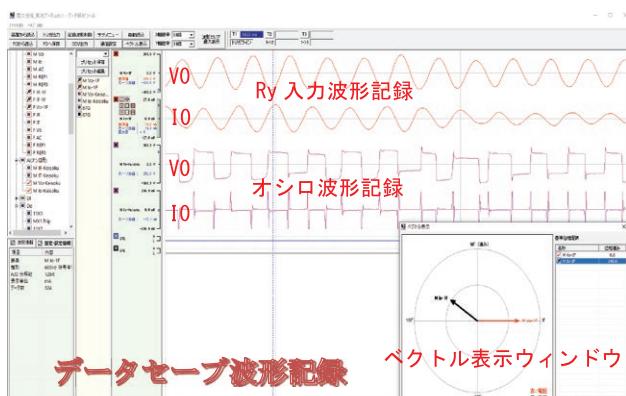


図 5 解析ツールによる波形表示（オシロ波形記録付）

非接地系統においては、地絡事故の様相が多様であることが分かっている（図 6）。本オシロデータは、これらの事故様相を基に、事故内容を迅速に判別するための有効な手段となる。トリップに至る前に自然復旧する事象であっても、PACe2 では即時のリレー検出で波形記録するため、本ツール活用により、事故再発の

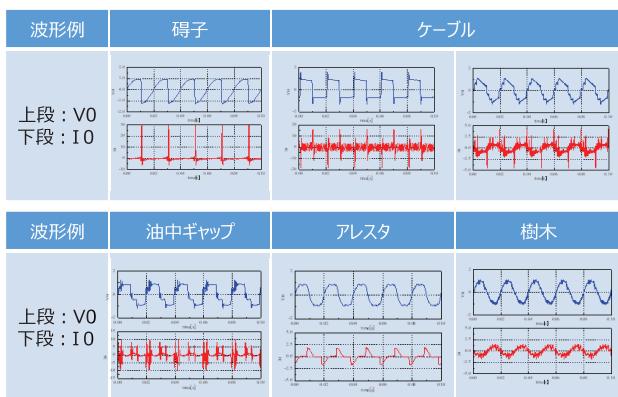


図 6 地絡事故時の VO, IO 波形例（実測結果）

未然防止に活用できる。

PACGEAR に蓄積されたデータを PC で確認する際、従来は専用通信ケーブルで接続し、データ取得していた。

PACe2 では本体に USB Type-C を搭載することで、PC 側に専用ポートが不要となり、市販ケーブルがそのまま使用できるようになった。特に PC とのインターフェースを USB にすることで、データセーブ記録の取得や確認のための待ち時間が少くなり、データ量が大幅に増加しても、ストレス無く作業が行えるようになった。

### 3.3 拡張性

PACe2 では、ハードウェアを共通化し、ソフトウェア設定で機能の有効・無効を設定できるようにしたことで、お客様の要望に合わせた機能追加が容易になった。

また将来的に内蔵した拡張基板により様々なセンシングや通信方式に対応できるようになるため、追加の設備が必要なくなり、設備更新が短期かつ容易となる。

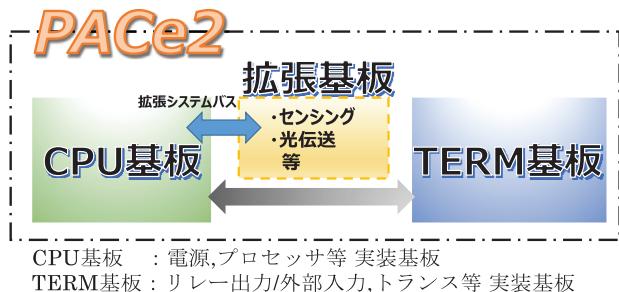


図 7 PACe2 でのオプション基板拡張

## 4 環境負荷低減 (Ecology)

### 4.1 消費電力削減

使用部品の見直しと併せて、消費電力（使用電圧）の最適化も行った。ただ低消費を目指すだけではなく、最新の JEC 規格 (JEC-2500-2010) を満たすよう、最適な使用電圧で構成している。これにより消費電力は、PAC8 に対して約 70%，PACe に対して約 20% 低減できた（表 1）。

表 1 各 PACGEAR シリーズでの消費電力と質量比較

PAC シリーズ	定格	平常時 (W)	最大時 (W)	質量 (kg)
PAC8	20 W	16	19	5.4
PACe	10 W	7	8	2.3
PACe2	10 W	5	6	1.8

## 4.2 部品点数の削減

PACe2 では、実装部品の見直しや再設計による部品の小型化や部品点数の削減を行った。その結果、高性能タイプである PAC7 や PAC8 と同等の性能を有しながら、汎用タイプの PACe と同じ基板枚数にすることができた。

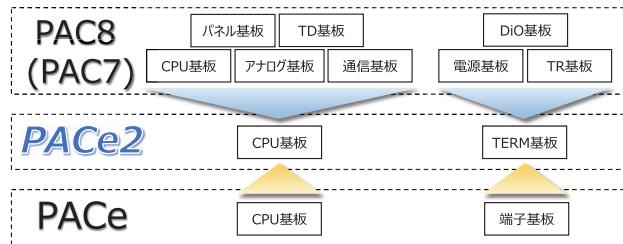


図 8 基板枚数の削減

これら使用部品の見直しにより、使用部品・筐体含めた質量は、消費電力同様 PAC8 に対して約 70%，PACe に対して約 20% 低減した（表 1）。

## 5 高機能・低廉化 (Economy)

### 5.1 機能追加

今回、PACe2 では従来の PACGEAR シリーズでは搭載していなかった表 2 の保護機能を新たにソフトウェアで実現した。新規にハードウェアを追加する必要がなく、設備全体の高機能化・低廉化に貢献できる。

表 2 PACe2 から搭載した保護リレー機能

追加機能	内 容
間欠地絡応動	間欠地絡時でのリレー検出・応動
地絡相表示	非接地系統での地絡相表示
高調波モニタ	高調波監視に影響する系統高調波モニタ

### 5.2 メンテナンスの効率化

現地試験の効率化や点検周期の延伸に貢献するため、PACe2 では自動リレー試験機能を搭載した。この機能は、内部アナログ回路に既知の基本波を印加させることで、リレー動作レベル、動作時間（内部トリップ出力までの時間）を監視・記録できる機能である。試験結果は、ツールを用いて記録・出力できる（図 9）。



図 9 自動リレー試験機能

## 5.3 伝送速度・容量の向上

伝送速度・容量の大幅な向上を実現させるため、PACe2 では伝送機能を改善した。PACe2 では従来の当社独自仕様だけでなく Modbus も使用可能となり、各種 PLC や様々なデバイスとの接続をしやすくした。伝送速度・容量の向上により、さらに多くの設備情報を監視・制御できるようになり、設備監視の効率化に貢献できる。

表 3 従来 PACGEAR シリーズとの伝送方式比較

伝送方式	～PAC8	PACe	PACe2
OPC-N-1 <sup>注2)</sup>	○	—	—
当社専用通信	○	○	○
CC-Link <sup>注3)</sup>	○	○	○
Modbus <sup>注4)</sup>	—	—	○

## 6 試験

### 6.1 準拠規格

PACe2 では、最新の JEC 規格に準拠した設計となっている。表 4 に準拠した JEC 規格を記す。

表 4 PACe2 が準拠する JEC 規格

No.	JEC 規格番号	規 格 名 称
1	JEC-2500-2010	電力用保護継電器
2	JEC-2501-2010	保護継電器の電磁両立性試験
3	JEC-2502-2010	デジタル演算形保護継電器の A/D 変換部
4	JEC-2510-1989	過電流継電器
5	JEC-2511-1995	電圧継電器
6	JEC-2512-2002	地絡方向継電器（※）
7	JEC-2518:2015	デジタル形過電流リレー
8	JEC-2520:2018	デジタル形過電圧リレー

※一部適合せず

JEC-2512-2002 地絡方向継電器では、地絡方向リレー要素の動作整定値が ZCT（零相変流器）の二次側表記で規定されている。従来の PACGEAR シリーズでは ZCT 一次側表記の整定値としており、これを二次表記に変更した場合、現地整定値と同じ値を選ぶことが困難となり、レトロフィットの思想にそぐわなくなる。

そのため本整定値については、JEC 規格には準拠せず、従来の PACGEAR シリーズで採用していた ZCT 一次表記での整定とした。

## 6.2 試験結果

ZCT 一次整定とした JEC-2512-2002 の一部試験以外、**表 4** の JEC 規格で規定されている試験は、全て良好な試験結果が得られた。

### (1) 振動・衝撃試験

**図 10** に振動・衝撃試験の一例を示す。



図 10 振動・衝撃試験

### (2) JEC-2501-2010 規定の試験結果

JEC-2501-2010 保護継電器の電磁両立性試験に規定されている試験を実施し、全て試験結果は良好であった（**表 5**）。

表 5 JEC-2501-2010 試験内容と試験結果

No.	試験項目	試験結果	備考図
1	静電放電イミュニティ試験	良	
2	商用周波数イミュニティ試験	良	図 11
3	減衰振動波イミュニティ試験	良	
4	電気的ファストトランジエント・バースト (EFT/B) イミュニティ試験	良	
5	方形波インパルスイミュニティ試験	良	
6	サージイミュニティ試験	良	
7	商用周波数電磁界イミュニティ試験	良	
8	無線周波数電磁界伝導妨害イミュニティ試験	良	
9	放射無線周波電磁界イミュニティ試験	良	図 12



図 11 商用周波数イミュニティ試験

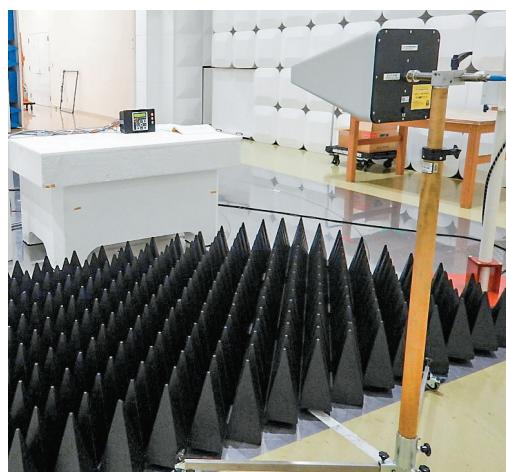


図 12 放射無線周波電磁界イミュニティ試験

## 6.3 国際標準規格に基づいた検証試験

本製品においては、JEC 規格への準拠のみならず性能検証試験の一環として、国際標準規格に基づいたイミュニティ試験の検証も実施し、装置としての妥当性を確認した。

**表 6** は、JEC 規格を超えるイミュニティ性能を求める国際標準規格における検証試験の内容とその結果を示す。

表 6 国際標準規格での検証試験結果

雷インパルス耐電圧試験		
試験仕様	国際規格	結果
1.2/50 $\mu$ s 5.0 kV 電気回路一括 = アース 計器用変成器回路間 計器用変成器回路 = 制御回路間 JEC-2501-2010 : 4.5 kV	IEC60255-5 IEC61850-3 (section6.6.3)	良
1.2/50 $\mu$ s 5.0 kV 計器用変成器回路端子間 制御電源回路端子間 JEC-2501-2010 : 3.0 kV		良
電気的ファストトランジエント・バースト・イミュニティ試験		
試験仕様	国際規格	結果
印加電圧 : 4.0 kV (CLASS-A) 繰返周波数 : 5.0 kHz, 100 kHz 電源回路 = アース間 JEC-2501-2010 : 2.0 kV	IEC60255-22-4	良
印加電圧 : 2.0 kV (CLASS-B) 繰返周波数 : 5.0 kHz, 100 kHz CT/VT 回路 = アース間 Di/Do 回路 = アース間 JEC-2501-2010 : 1.0 kV		良
電力周波数電磁界イミュニティ試験		
試験仕様	国際規格	結果
磁界強度 : 100 A/m 連続 JEC-2501-2010 : 30 A/m 連続 1000 A/m 1~3 sec JEC-2501-2010 : 300 A/m 1~3 sec	IEC60255-26 IEC61000-4-8	良
放射性エミッション		
試験仕様	国際規格	結果
・CE 仕様 (CSPR11) ・FCC 仕様 (FCC-part15-A) JEC-2501-2010 : 規定なし	IEC60255-26	良

## 7 おわりに

PACe2 は、今までの PACGEAR シリーズの機能を継承しつつ、既設装置のレトロフィットも行えるものとなっている。特高向けや一部お客様向け用途など、ソフトウェアの開発や評価については引き続き対応していく。今後は、更なる価値向上を目指し、以下の機能を搭載する予定である。

- ・ソフト PLC 機能の搭載：市販ツールを活用し、お客様がシーケンスを作成・組込むことができるようになる。
- ・伝送機能の高機能化：国際標準規格（IEC 61850）に基づいた伝送方式を新たに拡張基板に搭載することで、海外製品など様々な機器との接続を可能にし、お客様のニーズに合わせた機器との接続性の向上を目指す。

### ■語句説明

- 注 1) マルチリレー：保護リレー、メータ、操作スイッチ、監視表示器、伝送機能等、複数の機能を 1 つの装置に集約した複合型の保護リレーのこと。
- 注 2) OPCN-1：Open PLC Network 1 の略。FA システムにおける PLC を中心としたステーション管理を目的としたネットワーク規格。JEMA では、2011 年 10 月に認証手続きが終了している。

注 3) CC-Link : Control & Communication Link の略。三菱電機が開発した産業用オープンフィールドネットワーク。PLC や入出力機器などの制御機器とシリアル通信で結び、制御と情報を同時に扱えるようにする。CC-Link のロゴは、三菱電機の登録商標（第 4134745 号）。

注 4) Modbus : Modicon 社が開発した PLC などの制御装置間でのデータ送受信方式。製造業の自動化に欠かせない通信規格となっている。

東光高岳 HP 製品・サービス  
デジタル形保護計測装置



### 市川 隆之

電力プラント事業本部  
第二設計部 制御装置設計グループ 所属

### 長谷川 誠

電力プラント事業本部  
第二設計部 制御装置設計グループ 所属

### 山田 康久

電力プラント事業本部  
第二品質保証部 制御装置品質保証グループ 所属

# 経路充電インフラの課題解決に貢献する 最大出力 150 kW EV 用大容量急速充電器

■ 山本 働斗

Shuto Yamamoto

■ 鈴木 剛志

Takeshi Suzuki

■ 鈴木 健司

Takeshi Suzuki

## 1 はじめに

カーボンニュートラルの実現に向け、電気自動車（以下、EV）の普及が求められており、そのためにも充電インフラの拡充が必要とされている。経済産業省の「充電インフラ整備促進に向けた方針」<sup>(1)</sup>には「車両の電池容量と充電性能を踏まえ、また、利便性向上と費用負担を考慮し、高速道路など充電ニーズが高い場所においては、1口 90 kW 以上の高出力の急速充電器を基本とし、特に需要の多い場所においては 150 kW の急速充電器も設置する。」とあり、より高出力に対応した充電器のニーズは高まっている。EV 電池の大容量化が進み、必要な充電時間は長くなる傾向にあるが、高速道路サービスエリアなど不特定多数の利用者がいる公共向けの経路充電（目的地に着く途中での充電）では、ガソリンの給油時間と同程度の充電時間を求める声も多い。そのような日本国内の経路充電インフラの課題に対応すべく、最大 150 kW 出力の急速充電器（以下、本器）を新たに SERA<sup>(2)</sup>（図 1）シリーズのラインアップに加えたので紹介する。



図 1 SERA（東光高岳登録商標）

## 2 製品仕様と主な特長

### 2.1 製品仕様

本器の製品仕様を表 1、外観を図 2 に示す。

表 1 製品仕様

品名	SERA-150
型式	HFR1-150B12
入力	三相 3 線 AC 400 V, 50/60 Hz
出力	DC 150 V～450 V, 最大 334 A, 最大 150 kW
効率	94%以上（定格出力にて）
充電ケーブル	70 mm <sup>2</sup> タイプ、ケーブル長 5 m
保護等級	IP44
周囲温度	-10～+40°C
周囲湿度	30～90%（結露なきこと）
CHAdemo <sup>注1)</sup>	Ver2.0
通信方式	OCPP <sup>注2)</sup> 2.0.1
課金認証	あり（時間課金／従量課金）



図 2 SERA-150 (HFR1-150B12)

図 3 の通り、本器ではコネクタホルダ部を扉に内蔵したことにより、雨雪対策効果が期待できる。

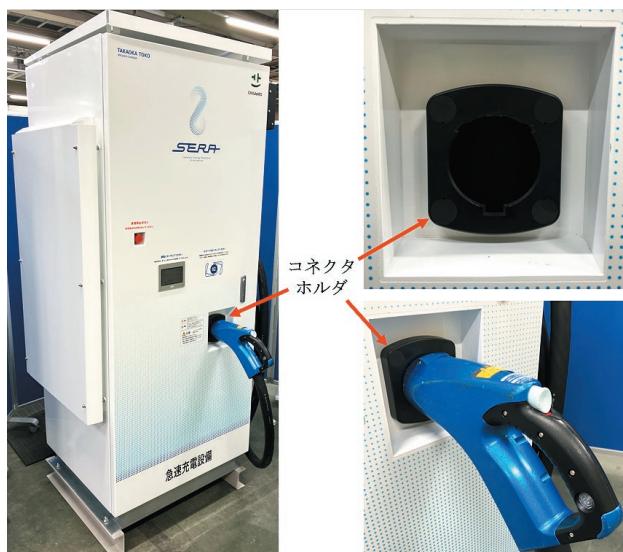


図 3 コネクタホルダ部

## 2.2 大容量でもコンパクトなサイズ

本器は最大出力 150 kW でありながら、東光高岳の現行機種 (SERA-120) と幅と奥行が同寸法にて設置可能な省スペース化を実現した。SERA-120 (120 kW 2 口) との外形比較を表 2、実機比較を図 4 に示す。

表 2 外形比較 (突起部含まず)

品名	SERA-150	SERA-120
型式	HFR1-150B12	HFR1-120B10
幅 (mm)	750	750
高さ (mm)	1,865	2,074
奥行 (mm)	642	642



図 4 実機比較 (左: SERA-150, 右: SERA-120)

## 2.3 ユニバーサルデザイン<sup>注3)</sup>

ユーザの利便性向上を具体化するため、経済産業省および国土交通省が策定した「電動車のための公共用充電施設におけるユニバーサルデザイン・バリアフリー対応に関するガイドライン」<sup>(3)</sup> には緊急停止（非常停止）ボタンを除く急速充電器の操作高さを 1,400 mm 以下とするよう、明記されている。本器はこれに基づき、最大で 200 mm の基礎（台座）上に設置した場合にも急速充電器の操作高さが 1,400 mm 以下となる配置とした。なお、オプションとなる高さ違いのベース（電源引込用の通線口付）使用時においても、本ガイドラインを満たしたものとなっている。標準仕様およびオプション仕様での機器の操作高さを表 3、外形を図 5 に示す。

表 3 SERA-150 操作高さ（基礎 200 mm 時）

操作部位	操作高さ 標準 (mm)	操作高さ オプション (mm)	指針 (mm)
タッチパネル ディスプレイ	基礎無	1,053	1,400 以下
	基礎有	1,253	
コネクタ ホルダ	基礎無	805	1,400 以下
	基礎有	1,005	
IC カード リーダ*	基礎無	1,060	1,400 以下
	基礎有	1,260	

\* 対応カードは FeliCa<sup>注4)</sup>

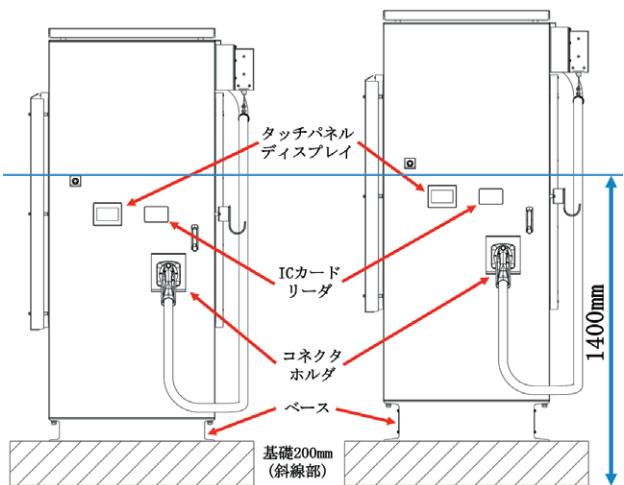


図 5 SERA-150 外形図 (左: 標準, 右: オプション)

## 2.4 特定計量制度対応

家庭の太陽光発電や EV などの直流電力を扱う分散型電源の普及とともに電源ごとの直流電力の取引が新たなニーズとして現れたことから、経済産業省は 2022 年 4 月より「特定計量制度に係るガイドライン」<sup>(4)</sup> を策定した。また、同省が策定した「充電インフラ整備促進に向けた指針」では「充電した電力量 (kWh) に応じた課金 (従量課金) の広範な導入について、25 年度からのサービス実現を目指す。」とある。本器はこの特定計量制度に基づいた直流電力計量機能を搭載したことで、従来の時間課金方式のみならず、従量課金方式にも対応した東光高岳製急速充電器初のモデルである。タッチパネル上の充電電力量表示を図 6 に示す。

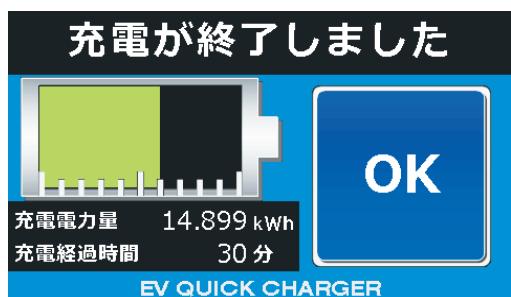


図 6 タッチパネル上の充電電力量表示

## 2.5 OCPP 2.0.1 対応

OCPP は EV 用充電器とそれを管理・運用するシステム間の通信を標準化するプロトコルである。OCPP によって充電事業者は、異なるメーカーの EV 用充電器を容易に統合・管理でき、効率的な充電管理システムの構築が可能となる。本器は東光高岳の現行機種にて搭載された OCPP 1.6 ではなく、OCPP 2.0.1 を製品リリースから採用した初のモデルとなり、遠隔でのより高度な充電器の運用・管理も可能である。

## 3 おわりに

本稿では経路充電インフラの課題解決に向けた最大 150 kW 出力の急速充電器 (SERA-150) について紹介した。本器の追加により、東光高岳では 3~150 kW 出力に対応した EV 用充電器 5 機種のラインアップとなり、クラウド連携含めてお客様の様々な充電シーンに応じた提案が可能となった。

日本政府や CHAdeMO 協議会等が目指す充電インフラの普及促進のため、世界初の取り組みである CHAdeMO 規格の一口最大出力 350 kW (総出力 400 kW) の次世代急速充電器の開発にも引き続き取り組んでいく。

### ■参考文献

- (1) 「充電インフラ整備促進に向けた指針」経済産業省 (2023)
- (2) EV 充電インフラ「SERA」東光高岳 <https://www.tktk.co.jp/ev-quickcharger/> (2025 年 5 月 26 日閲覧)
- (3) 「電動車のための公共用充電施設におけるユニバーサルデザイン・バリアフリー対応に関するガイドライン」経済産業省、国土交通省 (2024)
- (4) 「特定計量制度に係るガイドライン」経済産業省 (2022)

### ■語句説明

- 注 1) CHAdeMO : 2010 年に日本が主導して規格化を実現した EV の急速充電方式であり、2014 年には IEC (国際電気標準会議) にて国際標準として承認された。「CHAdeMO = 動く、進むためのチャージ」、「de = 電気」、「充電中にお茶でも」の 3 つの意味を含んでいる。
- 注 2) OCPP (Open Charge Point Protocol) : 電気自動車用急速充電器を管理する国際標準通信プロトコルの名称である。
- 注 3) ユニバーサルデザイン : すべての人にとって使いやすく、できるだけ多くの人が利用可能であるデザイン。一般的には年齢や性別、障がいの有無や言語の違いにかかわらず、はじめから幅広い利用者を対象に製品や機器、サービス、環境をデザインすることを指す。
- 注 4) FeliCa : ソニー株式会社が開発した非接触 IC カードの技術方式である。「FeliCa」は、ソニーグループ株式会社またはその関連会社の登録商標または商標である。

東光高岳 HP 製品ラインナップ  
SERA-150



### 山本 優斗

GX ソリューション事業本部  
システムソリューション開発部 開発グループ 所属

### 鈴木 剛志

GX ソリューション事業本部  
システムソリューション開発部 開発グループ 所属

### 鈴木 健司

GX ソリューション事業本部  
システムソリューション開発部 開発グループ 所属

# 電気自動車の普及を後押しする 東光高岳製充電器へのOCPP2.0.1 対応開始

## 1 はじめに

日本政府は2050年までにカーボンニュートラルを実現することを宣言しており、その一環として電気自動車（以下、EV）の普及と充電インフラの拡充を推進している。これに関連して、経済産業省の「充電インフラ整備促進に向けた指針」<sup>(1)</sup>では「国内で整備される公共の充電器については、管理・運用に関する機能や課金に適した認証機能をもつ、オープンプロトコルである通信規格を標準的に持つことが望ましい」とある。これに応えて、東光高岳ではこれまで、オープンプロトコルであるOCPP1.6（Open Charge Point Protocol）に対応したEV用急速充電器（以下、EV用充電器）および、充電ステーション管理システム（Charging Station Management System：以下、CSMS）をリリースしてきた。今回、より高度な機能を有するOCPP2.0.1への対応を開始したので紹介する。

## 2 OCPP とは

OCPPとは、EV用充電器とCSMS間の通信を標準化するためのプロトコルである。現在OCPP1.6が主流であり、OCPP2.0.1にシフトが進んでいる。

OCPP2.0.1は、OCPP1.6に比べて、セキュリティの向上や、電力需要の状況に応じた最適な充電制御を実現するスマート充電機能、さらにISO/IEC 15118規格によるEVに充電プラグを接続するだけで、充電と決済をおこなえるプラグ&チャージなどの機能に対応しており、EV充電インフラの安全性や効率性、そしてEVユーザーの利便性が向上している。

## 3 OCPP2.0.1への取り組み

今回、東光高岳のEV用充電器ブランド「SERAシリーズ」より、「SERA-120」、「SERA-150」の2機種をOCPP2.0.1に対応させた。OCPP2.0.1対応のEV用充電器のラインアップを図1に示す。今後リリースする「SERAシリーズ」においてもOCPP2.0.1に対応する予定であり、



図1 OCPP2.0.1対応充電器  
(SERAのロゴは東光高岳の登録商標)

表1 東光高岳のEV用充電器・CSMSの現在の対応状況

機能	概要	対応状況
セキュリティ	セキュリティ要件	○
プロビジョニング	充電設備の構成管理	○
認証	ユーザ認証	○
ローカル認証	充電設備で保持するユーザ認証情報管理	—
トランザクション	充電セッション管理	○
遠隔操作	遠隔からの充電制御など	○
可用性制御	充電設備の運用管理	○
予約	充電設備の利用予約	—
料金表示	ユーザ認証への料金情報の定時	—
計測	電力量などの各種計測データ通知	○
スマート充電	時間帯ごとの出力制御など	—
ファームウェア管理	充電設備を構成するファームウェア管理	○
ISO 15118認証管理	ISO/IEC 15118のサポート	—
診断	充電設備の監視やログの取得など	○
ディスプレイメッセージ	充電設備ディスプレイへのメッセージ表示	—
データ転送	ベンダー固有の拡張機能	—

同規格のバージョンアップに伴う追従も予定している。

また、CSMS の OCPP2.0.1 への対応により、EV 用充電器と CSMS 間において、OCPP2.0.1 での通信が可能となった。OCPP の各機能の対応状況について表 1 に示す。

## 4 おわりに

今回、EV 用充電器と CSMS が OCPP2.0.1 に対応したことにより、同規格に準拠したサービスの提供体制を整備した。今後は、OCPP2.0.1 の特徴的な機能であるスマート充電機能の強化をはじめとした各種機能の実装

を推進し、EV 充電インフラに付加価値を付与していく所存である。東光高岳は、充電器メーカーのトップランナーとして、カーボンニュートラル社会の実現に向けて、技術開発を通じて EV と充電インフラの普及に尽力していく。

### ■参考文献

- (1) 経済産業省：充電インフラ整備促進に向けた指針  
(2023)

---

GX ソリューション事業本部

# 再エネの最適な利用計画の立案と最大限の活用を支援する需給一体型 EMS の開発

## 1 はじめに

太陽光発電（以下、PV）や風力発電など再生可能エネルギー（以下、再エネ）の普及に伴い、電力会社は電気の需要と供給のバランスを保つため、系統への電力出力抑制をおこなっている。

そのため、各需要家にて再エネを無駄なく効果的に使用してもらうことが求められる。その手段として、各需要家に EMS（エネルギー・マネジメント・システム）を導入し、さらにクラウドを利用し各需要家を連携、管理運用することにより、再エネを最大限活用する技術が必要となる。

大成建設株式会社は、「建物の需要電力量と再エネによる発電量の予測を一元的におこない、再エネの最適利用計画を自動で立案し、最大限有効に活用することができるエネルギー需給一体型管理システム「T-Green BEMS<sup>注1)</sup> RE Optimizer」を開発」<sup>(1)</sup>し、大成ユーレック株式会社川越工場（以下、大成ユーレック）に導入した。

T-Green BEMS RE Optimizer の開発にあたり、東光高岳は、大成建設株式会社と協働し、その運転、制御、監視機能を実現する需給一体型 EMS の開発をおこない、納入したので紹介する。

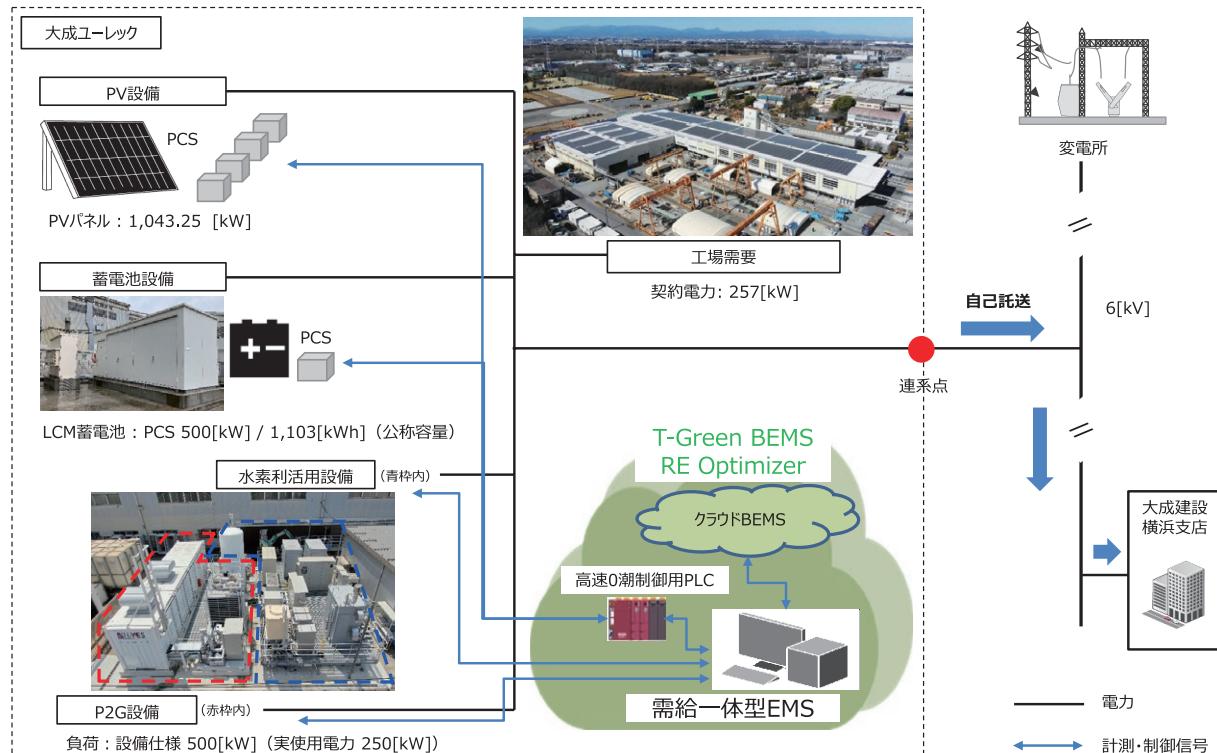


図 1 大成ユーレック川越工場エネルギー設備概要図

## 2 需給一体型 EMS の設備概要

需給一体型 EMS を導入した大成ユーレックのエネルギー運用設備は、PV 設備、蓄電池設備、P2G 設備<sup>注2)</sup>、および水素利活用設備<sup>注3)</sup>があり、連携システムとしてクラウド BEMS（後述）がある（図 1）。

## 3 需給一体型 EMS の主な機能

需給一体型 EMS は、発電した再エネを無駄なく効果的に使用するシステムであり、電力制御機能、計画立案機能、操作・表示機能、クラウド BEMS 連携機能の 4 つの機能を有する。

### 3.1 電力制御機能

PV 設備により発電した再エネ電力を工場需要に充当するが、再エネ余剰電力が発生した場合は、再エネ余剰電力にて蓄電池を充電する。蓄電池設備の充放電電力を活用して、以下の 2 つの機能を実現する。

- ①高速0潮制御機能：PLC<sup>注4)</sup> を用いて kW 単位にて電力負荷変動に対し高速負荷追従制御を実現する。
- ②30 分同時同量制御機能：kWh 単位にて 30 分電力量の同時同量制御を実現する。

### 3.2 計画立案機能

#### (1) 再エネ余剰電力最適配分計画立案機能

クラウド BEMS にて PV 設備で得られる再エネ発電量と各需要電力量を前日に予測し、再エネ発電電力と工場需要電力から再エネ余剰電力を算出する。(図 2 の上段部分参照)。

その再エネ余剰電力の供給先として、蓄電池への充電、P2G 設備の運転によるグリーン水素の製造と水素利活用設備による蒸気製造、大成建設株式会社横浜支店ビルへの電力自己託送(後述)を組み合わせた、ロジックによる最適配分・利用計画の立案をおこなう(図 2 の下段部分参照)。

#### (2) 自己託送機能

自己託送とは、自社の発電設備で作った電力を、遠隔地にある自社、もしくはグループ会社の他の場所にある工場や店舗などの関連施設へ送電する仕組みを指す。

需給一体型 EMS では、各種予測値を基に、翌々日、翌日の自己託送計画を自動で立案し、OCCTO<sup>注5)</sup>へ提出する機能を有する(図 3)。

### 3.3 操作、表示機能

#### (1) SCADA 機能

PV 設備、蓄電池設備、P2G 設備、水素利活用設備、およびクラウド BEMS と通信し、状態の監視・制御を

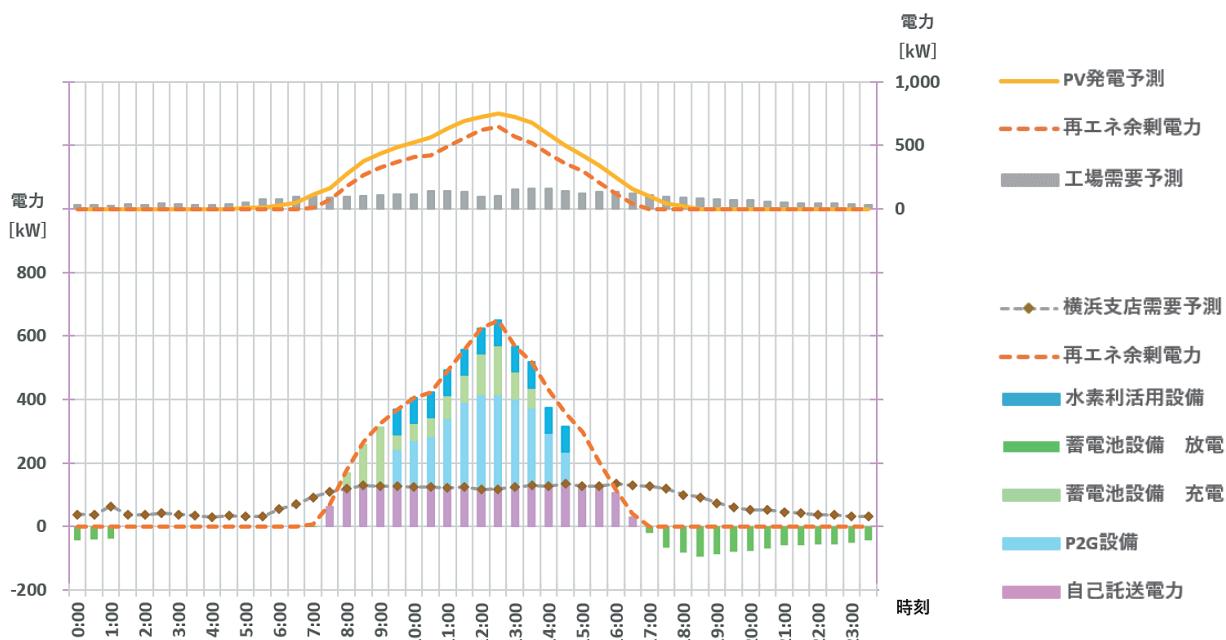


図 2 再エネ余剰電力最適配分

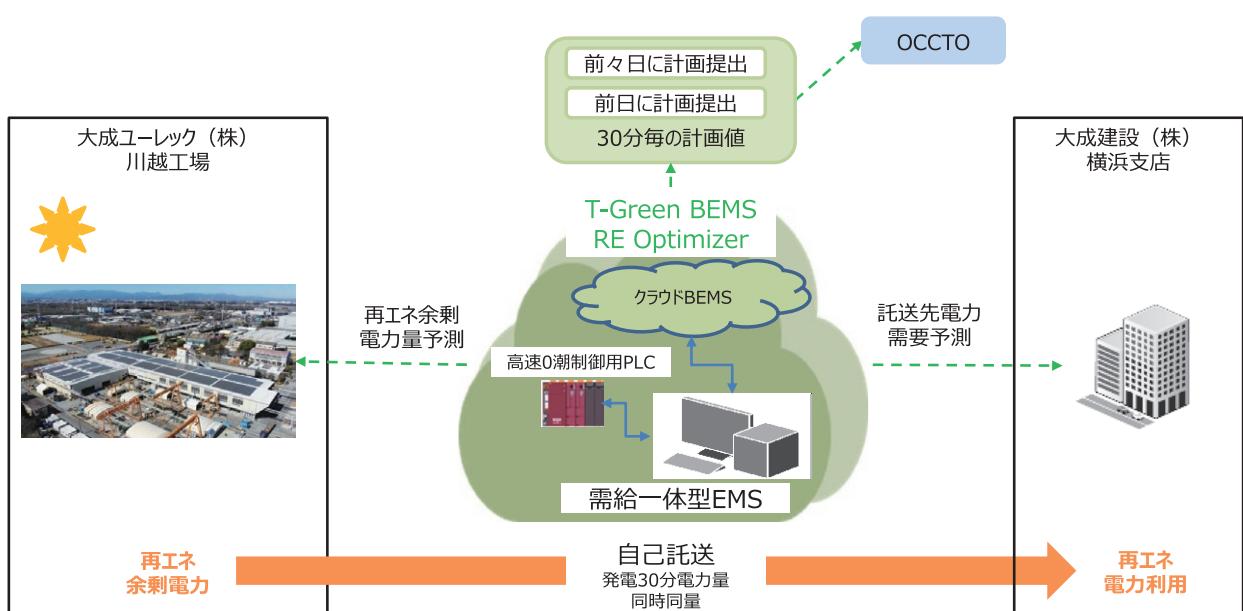


図 3 自己託送

おこなう。また、計画値、計測データなどの表示や保存もおこなう。警報発報や、運転状態変化などについて、メール通知する。

#### (2) 蓄電池充電電力属性内訳機能

充電した再エネ電力のみを自己託送に使用するため、蓄電池の充電電力量について、再エネ電力による充電、買電電力による充電の属性内訳を算出し、表示する。

### 3.4 クラウド BEMS 連携機能

クラウド BEMS は、需給一体型 EMS が制御する運転パターン、P2G 設備が有する運転モード、水素利活用設備が有する運転モードの各々を考慮した運転計画の自動立案をおこなう。需要電力量や再エネ発電量などの各予測を基に、AI を駆使した再エネ余剰電力の最適な配分・利用計画の立案が可能である。なお、需給一体型 EMS とクラウド BEMS とは、通信機能にて連携する。

## 4 おわりに

今後も、大成建設株式会社と協働して、カーボンニュートラルの実現に向けて取り組んでいく。

大成ユーレックに設置した T-Green BEMS RE Optimizer を活用し、さらなる再エネ利用の最大化のための実証を進め、様々なお客様ニーズに合わせた最適なエネルギー・マネジメントの実現に取り組んでいく。

#### ■引用文献

- (1) 大成建設株式会社 NEWS RELEASE 2024 年 7 月 3 日  
再生可能エネルギー需給一体型管理システム「T-Green BEMS® RE Optimizer」を開発－自社グループ施設にて再生可能エネルギー利用の最適化と蓄電池・水素利活用設備技術の実証を開始－  
[https://www.taisei.co.jp/about\\_us/wn/assets\\_cms/pdf/20240703.pdf](https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/assets_cms/pdf/20240703.pdf)

#### ■語句説明

- 注 1) T-Green BEMS：建物の使用エネルギーを 24 時間モニタリングすることで、エネルギー管理にかかる業務をトータルでサポートするシステム。T-Green BEMS のロゴは大成建設株式会社の登録商標第 5594759 号である。

## T-Green BEMS

- 注 2) P2G 設備：P2G とは Power to Gas の略。再エネなどの電力を活用して水素を製造する設備。山梨県、東レ株式会社、東京電力エナジーパートナー株式会社、大成建設株式会社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）の採択を受け、本システムの開発を推進している。
- 注 3) 水素利活用設備：P2G 設備などで製造した水素を貯蔵・利用する設備。
- 注 4) PLC：Programmable Logic Controller の略。シーケンス処理得意とする制御装置。
- 注 5) OCCTO：電力広域的運営推進機関。電気事業法に基づき、全国規模で平常時・緊急時の需給調整機能を強化することを目的に 2015 年に発足した認可法人。

---

GX ソリューション事業本部

# 配電ネットワーク実証試験場への大容量リチウムイオン蓄電池の設備導入

## 1 はじめに

日本政府は、「2050年カーボンニュートラル」の実現に向けた取り組みの一つとして、蓄電池の活用を掲げている。蓄電池の活用は、太陽光発電（以下、PV）や風力発電など天候に左右される再生可能エネルギーの有効活用・安定供給のために必要不可欠である。そのほか、蓄電池には使用電力のピークカット<sup>注1)</sup>による電気料金の削減効果や、需給調整市場<sup>注2)</sup>での電力取引といったビジネスモデルに活用できるなどのメリットがある。また、災害等で停電した際に電源を供給するといった役割もある。

東光高岳では、前述した導入効果を期待するだけでなく、カーボンニュートラル実現に寄与する研究への活用も目的として、2024年度に小山事業所の配電ネットワーク実証試験場に大容量リチウムイオン蓄電池設備（以下、本設備）を導入した。

## 2 設備仕様

今回導入した本設備の仕様を表1に示す。また、設備の外観を図1、設備内部の蓄電池ユニットを図2に示す。

表1 蓄電池設備仕様

蓄電池容量	1,161 kWh
相数	三相 3 線
定格出力容量	± 500 kW
定格出力電圧	AC 330 V



図1 大容量リチウムイオン蓄電池設備外観



図2 大容量リチウムイオン蓄電池設備 蓄電池ユニット

## 3 今後の取り組み

今後、本設備の導入により、再生可能エネルギーの有効活用や非常用電源としての活用をしていくだけでなく、以下のようなユースケースに向けて研究開発を進めます。こうした活動を通じて、脱炭素や電力利用の高度化に向けた取り組みを推進していく。

- 蓄電池やPVなどの分散型エネルギー資源を含め、蓄電池の充放電電力やPVの発電電力などを見える化し、省エネの効果やCO<sub>2</sub>排出量を管理
- EMS（エネルギー・マネジメントシステム）へ本設備を組み込み、電力カラーリング<sup>注3)</sup>技術の実用化やDR<sup>注4)</sup>、自己託送<sup>注5)</sup>などを検証

### ■語句説明

注1) ピークカット：特定の時間帯における電力消費の最大値（ピーク）を抑えること。電力需給の安定性を高め、電力コストを削減できる。

注2) 需給調整市場：送配電事業者が電力の需要と供給のバランスを取る際に必要な「調整力」を調達するための市場。調整力とは、出力の調整ができる発電設備や蓄電池の利用、需要家による節電などによって調整可能な電力リソースのことを指す。

注3) 電力カラーリング：電力を発電方法ごとにデータ上で区別すること。再生可能エネルギー由来の電力（グリーン電力）とそれ以外の電力を区別することで、環境への影響評価を正確に行うことが可能。

注4) DR: Demand Response の略。電力需要の調整のこと。電力需要がピークを迎える時間帯に消費者や企業が電力使用を減らすことで、電力供給の安定性を支える仕組み。

注5) 自己託送：発電設備を持つ個人や企業が自ら発電した電力を、送電網を利用して別の場所にある自分の設備へ送ること。

# 変電所入退管理システム 東京電力パワーグリッド株式会社 全エリアへ納入

## 1 概要

当社の変電所入退管理システム（以下、本システム）は、東京電力パワーグリッド株式会社（以下、東電 PG）における変電所のセキュリティ強化と業務効率化を目的として開発したものである。2008年からの納入開始以来、システム提案から生産、工事、保守に至るまで一貫したサービスを提供し、お客さまのニーズに総合的に応えてきた。このたび、2025年10月に東電 PG 全エリアの変電所（約 1,600 カ所）へのシステム導入を完了する。

## 2 製品の概要

本システムは、IC カード（社員証等）を用いて変電所の入退管理を効率よく行うためのソリューションである。変電所の扉近くに設置されたカードリーダーに IC カードをかざすだけで電気錠を解錠し、その情報は制御拠点に設置された PC（以下、親局 PC）にてリアルタイムで管理される。

## 3 製品の特長

### (1) FeliCa<sup>注1)</sup> 対応 IC カードによる入退管理

FeliCa はセキュリティレベルが高く、偽造が困難である。多くの企業で採用されているため、管理の負担を軽減し、導入コストを抑えることができる。

### (2) 設置場所への適応性

扉用機器は屋外使用に対応しており、門扉等への設置が可能である。

### (3) セキュリティ強化

不正侵入が発生した際に親局 PC へ通知するため、従来の施錠のみの管理に比べセキュリティが強化される。

### (4) 安全なカード管理

IC カード紛失時等には、親局 PC での操作により即時に当該カードを無効化し、不正侵入のリスクを軽減することができる。

### (5) 業務効率化

親局 PC にて現地作業情報（作業内容、作業時間、作業者情報等）を事前に登録し、カードと紐づけ管理することができる。これにより、従来の紙ベースの管理と比較して業務効率が向上する。

### (6) システム連携

入所者の有無に応じて接点信号を出力する機能を備え



図 1 門扉への設置例



図 2 建物扉への設置例



図 3 電動シャッターへの設置例

ている。これをお客様のご要望により他設備に活用し、利便性を向上させることができる。

### (7) 互換性保持

モデルチェンジの際には互換性を保持し、変電所側の機器を追加・更新しても従来と変わらない運用を行うことができる。

## 4 今後の展開

東電 PG の変電所におけるセキュリティと業務効率の向上に貢献すべく、全エリアへのシステム納入を進めてきた。今後は、労働人口の減少に伴う業務効率化のニーズに応えるべく、さらなる機能向上を図る。また、他のお客様に向けても、これまで培った技術と経験を活かし、課題解決の支援に取り組んでいきたいと考えている。

### ■語句説明

注 1) FeliCa : ソニー株式会社が開発した非接触 IC カードの技術方式である。「FeliCa」は、ソニーグループ株式会社またはその関連会社の登録商標または商標である。

---

電力プラント事業本部

# JEC 規格準拠の海外製ステーションポスト がいしを適用した断路器の納入開始

## 1 概要

東光高岳は断路器メーカーとして数多くの製品をお客さまに納入してきている。その断路器に用いるがいしは、主に国内がいしメーカーから調達していたが、大手がいしメーカーの生産縮小や価格高騰という環境変化が進んでいる。

そのような状況においても安定して断路器をお客さまへお届けするために、日本で初めてとなる JEC-5208:2022 に準拠した海外製ステーションポストがいし（以下、海外製 SP がいし）を適用した気中断路器（以下、断路器）の製品化・販売に取り組んでいる<sup>(1)</sup>。この取り組みは、2021 年から海外がいしメーカー PORCELANAS INDUSTRIALES S.A. (POINSA) と共同で始めた。

海外製 SP がいしを適用した断路器にて JEC-2310:2014 に準拠した形式試験を順次実施し、一部の断路器において製品化が完了しており、2025 年 7 月に納入を開始した。初号機は東京電力パワーグリッド株式会社上高尾開閉所（群馬県富岡市）へ納品した（図 1）。

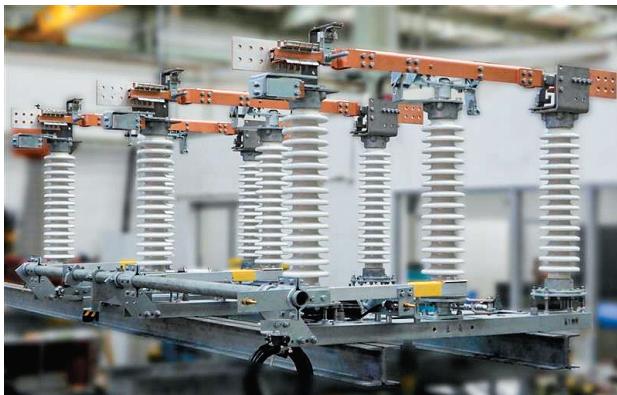


図 1 海外製 SP がいしを適用した断路器  
(THR5 形 72 kV 3,000 A)

## 2 特長

海外製 SP がいしは、JEC-5208:2022 に準拠しており、全高および取合い寸法ならびに電気特性および機

械特性は従来の国内メーカー製作のがいしと同等である。断路器としても、耐震性能および耐電圧性能において従来器と同等であることを形式試験や参考試験にて確認しているとともに、既設断路器の取り替えも容易としている。

## 3 今後の展開

今後の開発については、お客さまニーズを踏まえ海外製 SP がいしの種類を増やしていくとともに、海外製 SP がいしを適用した定格電圧 120 kV から 550 kV までのがいし段積み構造断路器の形式試験を実施し、適用拡大に取り組んでいく。

現在の製品化状況を表 1 に示す。

表 1 製品化状況

定格電圧 (kV)	主な断路器形式	製品化状況	
72	THR5, THR6 <sup>*</sup> THB7, THB8 <sup>*</sup>	2026 年度までに 製品化完了予定	
84			
120	THR5, THR6 <sup>*</sup> THB7, THB8 <sup>*</sup>		
168			
204	THB7, THB8 <sup>*</sup>		
240			
300	THB2, THB3 <sup>*</sup> THB5	2030 年度までに 製品化完了予定	
550			

※THR6, THB8 および THB3 は、THR5, THB7 および THB2 の省メンテナンス形断路器

### ■参考文献

- (1) 大山友幸, 松本崇志, 清水俊博, 梶田聰, 永田清志：  
「JEC 規格に準拠した海外メーカー製ステーションポスト  
がいしの開発とそれを適用した断路器」、東光高岳技報,  
No.11 (2024)

電力プラント事業本部

# スマートファクトリー化への取り組み 先進工場技術検証室の紹介

## 1 概要

当社における DX 戦略の一環として、スマートファクトリー化のさらなる推進のため、図 1 にある 5 つの技術検証カテゴリーを設定した。これらの内容を調査・検証する活動の場として、先進工場技術検証室（通称スマラボ）を 2025 年 4 月に立ち上げた。

## 2 活動内容

AI や画像処理機器を導入することで製品の不良や傷を判断したり、各種シミュレーションソフトを導入することで工場のラインを実際に構築する前にコンピューター上で検証するなど、積極的な技術検証を通じて先進技術の導入を推進していく。また模擬的な自動生産設備を製作し、自動組立や自動搬送の技術検証を実施できる体制を構築していく。

設備・ツール・ソフト等、実際に触れる機会を作り、社員が意欲的に DX を推し進められる場として活動していく。このような活動を通じて、お客様により品質の高い製品を提供していきたい。

### ■語句説明

注 1) i-Reporter : 現場帳票システム。既存の帳票をそのままのフォーマットで電子化できるツール。詳細は、株式会社ミントウェーブまでお問い合わせください。  
<https://www.mintwave.co.jp/i-reporter/>



(a) 蓮田事業所メンバー



(b) 小山事業所メンバー

図 2 スマラボメンバー

DX カイゼン推進本部

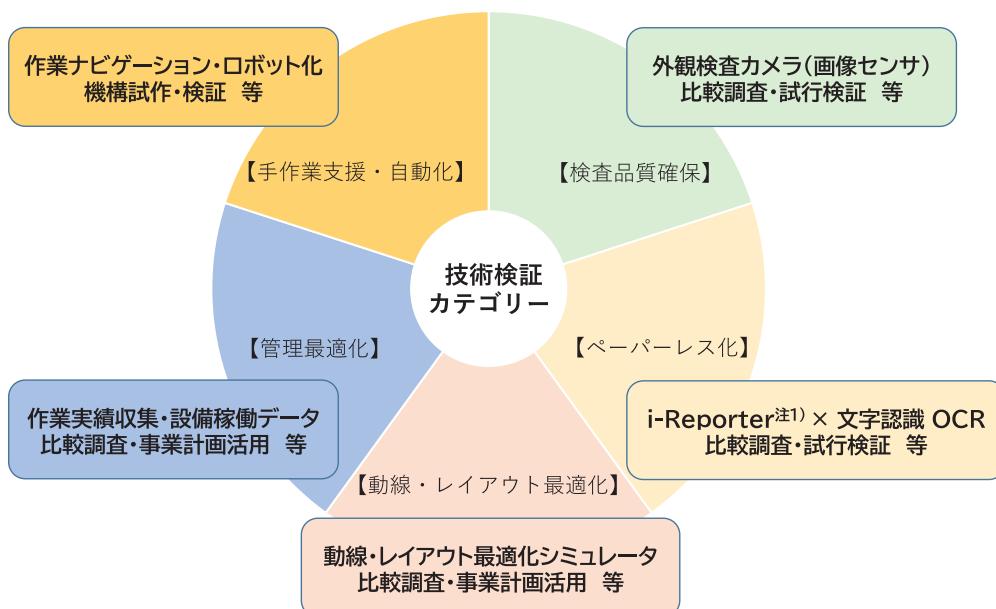


図 1 スマートファクトリー化に向けた技術検証カテゴリー

# 計器センター事業の開始 ～次世代スマートメーター関連事業の成長に向けて～

## 1 計器センター立上げの背景

電力計測用スマートメーター（以下、SM）の本格導入が2014年度から始まり、電力量の遠隔自動検針が可能となった。その後、電力量検針の自動化に留まらず、データを活用した電力ネットワークの運用の高度化、電力分野以外への電力データの利用拡大、需要側電源リソースの拡大に伴う取引ニーズの多様化への対応など、SMの新たなニーズが生じている。

そのような背景を受け、2020年9月に次世代SMの開発と普及を使命として「次世代スマートメーター制度検討会」が発足された。この検討会では、2025年度に次世代SMを本格導入させることを目標に、一般送配電事業者10社が共通して使えるようにSMの仕様統一を図った。

この仕様統一化をきっかけとして、東光高岳では従来電力量計メーカーが行っていたSMの組立、動作試験から電力会社への納品までを一貫して担うことができる計器センターを立ち上げたので、本稿にて紹介する。

## 2 計器センターの役割

計器センターは、次世代SMのサプライチェーンのうち、計器メーカーから入荷されるユニット<sup>注1)</sup>を完成品にまで組み立て、保管、出荷する一連の業務を担う(図1)。当社の蓮田事業所に建設した組立工場は、月産33

万台の組み立て能力を保有し、自動倉庫、自動デパレタイズ<sup>注2)</sup> および自動組立ラインなどの導入により省人化・効率化・高品質化を実現している。また、計器センターの省エネ実現のため、当社の照明・空調の省エネ制御システムを導入した。計器センター事業の主な業務内容は以下となる。

- ① ユニットの受け入れ・保管
  - ② 通信部へ暗号鍵の書き込み
  - ③ 次世代 SM の組み立て
  - ④ 通信部と計量部のペアリング
  - ⑤ 完成品の在庫管理・発送

### 3 計器事業の展望

日本が掲げる 2050 年カーボンニュートラル実現のために再エネ導入が加速することで、需要と供給のバランスを維持する技術的難易度が高まり、太陽光発電や蓄電池など分散化電源の細やかな制御が必要になる。次世代 SM は、新たに IoT ルート<sup>注3)</sup>を採用することで、中継器として分散化電源などの機器やデータをつなぐ重要な位置づけとなる。こうした流れの中、当社は以下の取り組みにより次世代 SM 関連事業の持続的な成長を目指す。

### (1) 次世代SMサプライチェーン全体の最適化

当社は次世代SMのサプライチェーン全体を担い、複

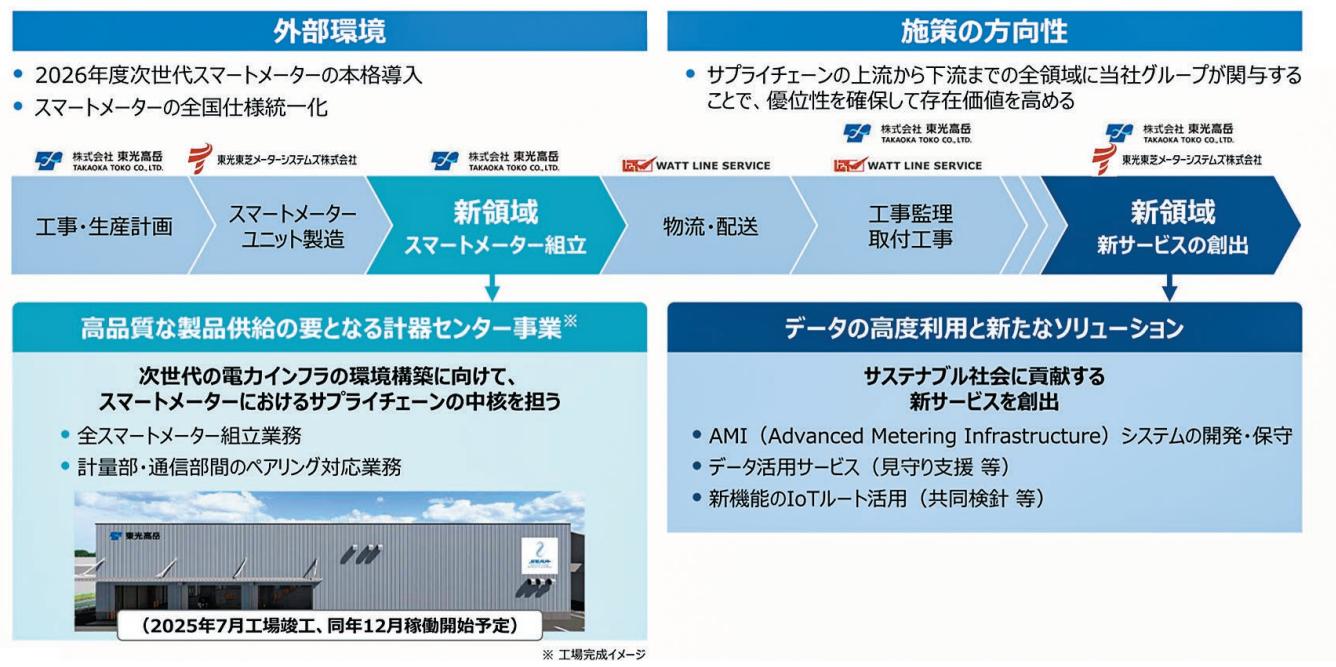


図 1 計器センター事業の位置づけ<sup>(1)</sup>

複化する電力インフラにおける高品質な計量の実現・維持に貢献する。

## (2) 新領域、新サービスの創出

次世代 SM 関連事業の発展に向けて AMI システム<sup>注4)</sup>の開発・保守、見守り支援や電気・ガス・水道の共同検針などの新サービスの提供を通してお客様に貢献していく。

## (3) 技術革新への投資と人材育成

上記を実現するため、新たな事業機会に対応するための技術開発および人材育成に積極的に投資し、技術力の向上を目指す。

### ■語句説明

- 注 1) ユニット：次世代 SM の構造は計量部、通信部、ベース、ケースといったユニットで構成され、異なるメーカーや提供元の製品を組み合わせて組み立てることができる。
- 注 2) 自動デパレタイズ：パレットに積載したコンテナをロボットで荷降しする作業のこと。
- 注 3) IoT ルート：SM から特例計量器／共同検針計量器（ガス・水道メーター）等へのアクセスルートであり、双方向通信が可能である。
- 注 4) AMI システム：AMI は Advanced Metering Infrastructure の略で、次世代 SM を含め、通信機能や端末機器等の管理機能を持つシステムのこと。

### ■参考文献

- (1) 東光高岳：「東光高岳グループ 2027 中期経営計画」p.22, [https://ssl4.eir-parts.net/doc/6617/ir\\_material/158449/00.pdf](https://ssl4.eir-parts.net/doc/6617/ir_material/158449/00.pdf) (2025 年 6 月 16 日閲覧)

---

計量事業本部

# ラオスの自律的な広域連系システムの実現に貢献 —送電系統停電事故解析システム案件の完工— タカオカエンジニアリング株式会社

## 1 背景

ラオス人民民主共和国（以下、ラオス）は、5か国と国境を接する東南アジア唯一の内陸国である。国土面積は、約23万7,000平方キロメートルで、日本の本州ほどの広さである。人口は約755万人であり、首都ビエンチャンの人口が約15%を占める。

ラオスは、水力発電による電力を周辺国（タイ、ベトナム、カンボジア、シンガポール）へ輸出し、外貨獲得の柱としている。しかし、隣国への電力輸出が国内系統とは独立した輸出専用電源線を介して行われており、余剰電力を最適かつ柔軟に国内・隣国間で融通できないことが課題となっている。

そこで、東京電力ホールディングス株式会社、東京電力パワーグリッド株式会社、東電設計株式会社、日本工営エンジニアリング株式会社の共同企業体が、独立行政法人国際協力機構（JICA）の委託を受けて、「グリッドコード<sup>注1)</sup>整備および運用体制強化による電力品質向上プロジェクト」（以下、本技術協力）を実施中である（本稿執筆時点）。

本技術協力は、ラオス国内の電力系統と隣国の電力系統を連系させる広域連系システムを確立することにより、ラオス国内の最適な系統運用が可能となるような技術基準を確立して技術者を育成することを目的としている。

タカオカエンジニアリング株式会社（以下、TEC）は、本技術協力で導入される送電系統停電事故解析システムの供給・据付と技術指導を東電設計株式会社より受注した。

## 2 TEC 担当案件の概要

- (1) 施主：ラオス電力公社（EDL）
- (2) 元請：東電設計株式会社含む4社の共同企業体  
※TECへの発注は東電設計株式会社
- (3) 案件名：ラオス・グリッドコード整備および運用体制強化による電力品質向上プロジェクト向け機材
- (4) 資金：独立行政法人国際協力機構（JICA）
- (5) 工期：2023年3月（契約）～2024年8月（完工）
- (6) 担当範囲：オシログラフデータ記録装置および周辺機材の設計・調達・輸送・据付・現地試験・EDLスタッフへの技術指導

以下に、本案件の詳細を示す。

### (a) システム構成と納入機器（図1, 2）

- ・オシログラフデータ記録装置（以下、FR）  
フォルトレコーダーを内蔵した設備。  
系統事故の発生中および発生前後一定時間の電圧・電流の波形、当該系統の遮断器の開閉状態・保護リレー動作などを記録。また、遠隔のEDL本社にて記録されたデータの閲覧が可能。
- ・付帯設備（GPS時刻同期システム）  
各FRに設置。事故データの時刻同期に使用。

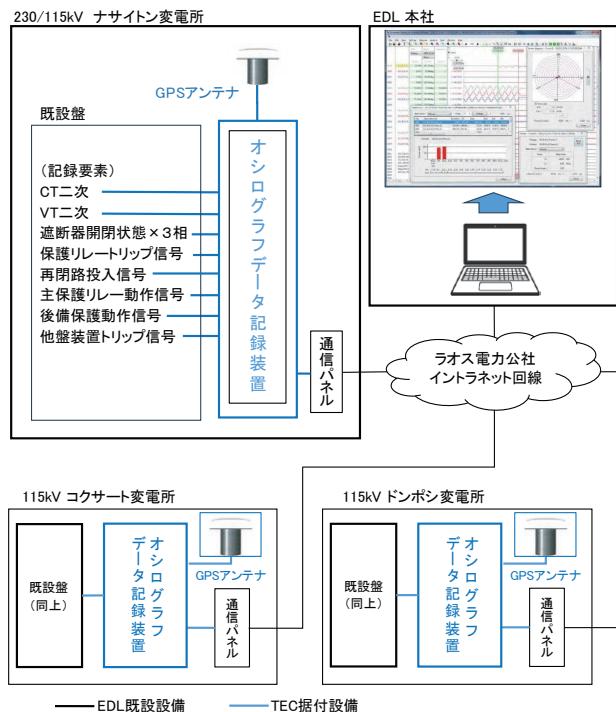


図1 システム構成図



図2 オシログラフデータ記録装置（ドンボン変電所）

- (b) 据付場所、納入機器台数および FR 接続回線数
- ・ナサイトン変電所：FR × 1 (接続送電線：8回線)
  - ・コクサート変電所：FR × 1 (接続送電線：7回線)
  - ・ドンボン変電所：FR × 1 (接続送電線：4回線)



図3 据付場所

(c) 納入機器の現地試験

- ・各変電所の FR について、電流・電圧の入力値と表示値の比較、各遮断器や保護リレーの状態信号の受信、事故データの取得と保存について確認した。
- ・EDL のインターネット回線を介して遠隔地の PC から変電所の FR のデータをモニターできることを確認した。

(d) 現地での技術支援

全3変電所において、使用者である EDL の担当技術者向けに、FR の機能および事故波形解析方法の説明と操作実習を行った (図4)。

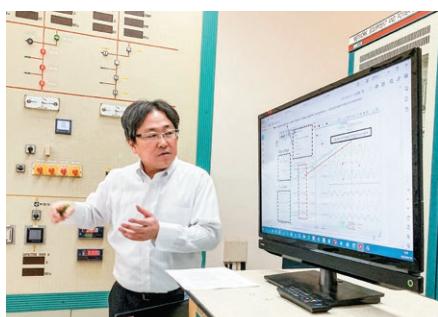


図4 上田順一氏（株式会社近計システム）による技術支援

### 3 本案件における挑戦

- (1) TEC は、約 50 か国において 150 サイトを超える事業経験があるが、ラオス向けでは本案件が初めての取り組みである。また、ラオスでは FR の導入実績がなかったので、電力事情、送電系統や設備構成を理解することからスタートした。
- (2) EDL の保護リレー運用に関する情報が乏しく、FR に接続するリレー要素を、EDL エンジニアと協議を重ねながら決定した。

- (3) FR に接続する既設設備の回路入手が困難であったため、EDL エンジニアと協議を重ねながら全 19 回線の FR への接続回路を確定させた。特に苦労したのは、以下 3 点である。

- ・多くの設備でリレー取替等の改造がされていたため、保護リレーの取扱説明書と既設回路の目視調査により接続回路を確定させた。
- ・別の DC 電源が接続された設備が混在し、それに合わせた FR の電源設計が必要になった。
- ・既設設備の製造者が混在しており、同じ設計の設備はほぼなかった。

- (4) FR の設置後に実施される系統運用の現状分析と改善を含めた全体スケジュールに影響を与えるよう、工期厳守に努めた。

以上のような挑戦を乗り越えて、2024 年 8 月に、TEC の受託業務を完工した。本格稼働して間もなく FR による事故解析により、リレー設定で要改善事項がいくつか抽出できたとの連絡を受け、FR 設置の効果を確認できた。

同月、EDL 主催による完工式典が開催され、ラオスのエネルギー鉱業省副大臣や EDL 副総裁など名だたる方々、日本側関係者が列席された。ラオス政府からの祝辞において、本案件と本技術協力に対する高評価と謝辞の言葉をいただくことができたことは、TEC にとっての悦びとなっている。

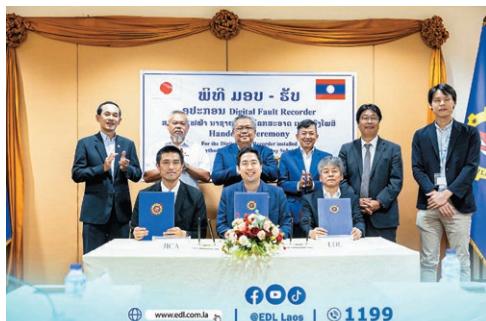


図5 オシログラフデータ記録装置の完工式典  
(2024 年 8 月 6 日、EDL 本社にて開催。写真は EDL 提供)

### 4 今後の展開

TEC はこれまで、電力プラント（送変電・配電・発電など）の建設事業を通じて、新興国の経済発展と市民生活の向上に貢献してきた。今後は、課題特定と解決策提案を指向する独立行政法人国際協力機構 (JICA) の技術協力プロジェクトにも協力し、新興国の電力事情の改善に包括的に取り組んでいきたい。

#### ■語句説明

- 注 1) グリッドコード：電力系統に接続される電源等が従うべきルール。