

# カーボンニュートラル社会を支える技術の展望

Technology Outlook Supporting Carbon Neutral Society

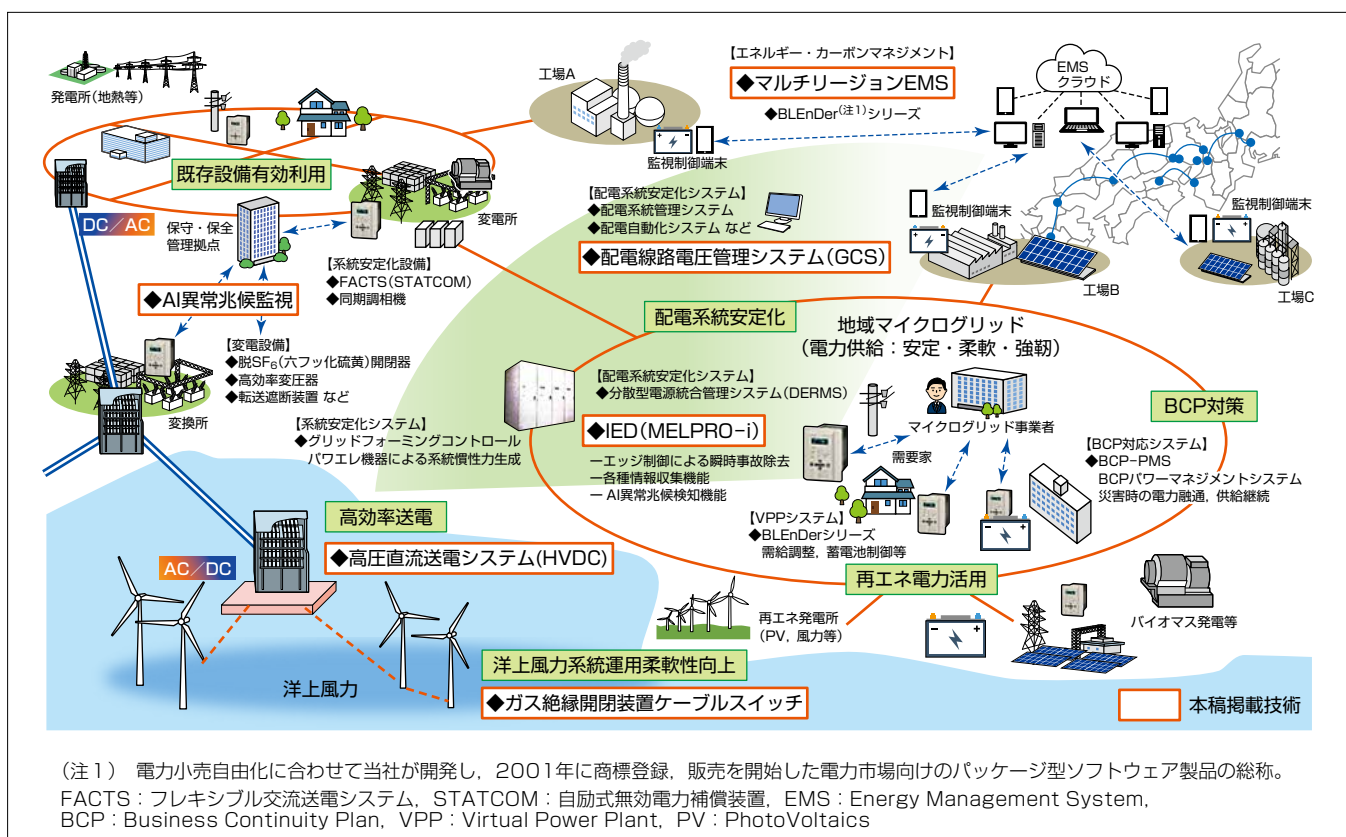


前田英昭\*  
Hideaki Maeda

## 要旨

カーボンニュートラルへの取組みは世界的な趨勢(すうせい)となり、電力分野では電源の脱炭素化と電力の地産地消、需要分野ではエネルギーの電化とグリーン電力の利用による脱炭素化が求められている。また、カーボンニュートラルの実現に向けて経済的手法や金融的手法が導入されるなど様々な角度からのアプローチが試みられている。新たな社会を支える技術についての議論も深まりつつある。電力分野では再生可能エネルギー(以下“再エネ”)という。電源を最大限に利用できる次世代ネットワークへの転換が求められており、分散型電源の接続拡大による配電システムの安定性維持などが課題として顕在化している。系統安定化と電力品質確保に資する技術、高効率送電技術、高経年化設備の有効利用に貢献できる技術の重要性が増して

いる。製造企業などの需要家分野では、サプライチェーン全体での脱炭素化達成への要請が高まりつつあり、企業活動の効率的な脱炭素化が今後必要となってくる。三菱電機では電力の利用を含めたシステム全体が抱える課題の解決に貢献するため、様々なソリューションの開発を推進している。配電システムの安定化に貢献する配電線路電圧管理システム、保護制御機能に加えてエッジでの情報収集・分析機能をパッケージ化したIED(Intelligent Electronic Device)、需要家の脱炭素への移行を支援するカーボンマネジメントシステム等の実用化を進めている。また電力分野で培ったプラント及びシステムエンジニアリング力を社会ニーズに即した技術の探索や新たな製品・サービスの社会実装に向けて活用している。



(注1) 電力小売自由化に合わせて当社が開発し、2001年に商標登録、販売を開始した電力市場向けのパッケージ型ソフトウェア製品の総称。  
FACTS: フレキシブル交流送電システム、STATCOM: 自動式無効電力補償装置、EMS: Energy Management System、  
BCP: Business Continuity Plan、VPP: Virtual Power Plant、PV: PhotoVoltaics

## カーボンニュートラル社会を支える次世代電力システム

電力システムの安定・柔軟・強靱(きょうじん)性の向上に貢献する製品群を例示している。地域マイクログリッドが各地に構築され、再エネ電力は高圧直流送電システム(High Voltage DC: HVDC)によって効率良く消費地へ送電される。系統安定化システム等は最適機能と単位ヘスリム化と分散化が進展し、リアルタイム性を要する制御やエッジデータの一次処理でIEDが活用される。需要家サイドではエネルギー・カーボンマネジメントシステムが導入され経済合理性を伴ったRE100(Renewable Energy 100%)製品のものづくりが実現される。

## 1. ま え が き<sup>(1)</sup>

カーボンニュートラルの実現に向けた取組みが加速している。電力分野では電源の脱炭素化と電力の地産地消、産業・民生・輸送分野ではエネルギーの電化とグリーン電力の利用による脱炭素化が求められている。また、非化石価値の取引を始めとした経済的手法、脱炭素への取組みを投資判断の指標とする金融的手法が導入されるなど、様々な角度からのアプローチが試みられており、産業構造や社会経済の変革を伴う大きな潮流となりつつある。

電力分野では、太陽光発電や風力発電などの非同期・出力変動電源の導入が拡大し、調整力の確保や系統の安定性維持、電力品質の確保が課題となっている。また、近年の自然災害の激甚化に対応するため、安定・柔軟・強靭性を備えた電力システムへの転換が求められている。

製造企業などの需要家サイドでは、温室効果ガスの排出削減だけでなく、サプライチェーン全体での脱炭素化達成への要請が高まりつつあり、製造企業が引き続き持続可能な活動を行うためには、効率的かつ経済的に企業活動のカーボンニュートラル化を進めることが必要となってくる。

本稿では、カーボンニュートラル社会の実現と、これを支える技術の展望について述べる。

## 2. 電力システムへ求められていること<sup>(2)</sup>

### 2.1 次世代ネットワークの構築と既存設備有効利用

再エネの主力電源化に向けた戦略的な議論が活発化している。既に導入が進む太陽光発電の一層の拡大、陸上風力発電の導入拡大、さらには政府指定海域への大規模洋上風力発電所の建設などが進められ、これら再エネ電源を最大限に利用するための次世代電力ネットワーク(以下“次世代NW”という。)への転換が求められている。太陽光や風力発電は天候によって出力が大きく変動する特性を持っており、導入拡大に対する電力品質の確保と系統の安定性維持が課題となっている。また、電力系統の効率的運用の観点からは、電源と需要地が近接していることが望ましいが、再エネのポテンシャルを持つ地域と電力の需要地が離れていることが多い。送電設備の新増設に対する費用対効果を高めるためには、直流送電システムなどの高効率な送電技術の導入が必要である。さらには、近年の自然災害の激甚化に備えて、電力システムのレジリエンスを向上させることも必要になっている。

次世代NWへの転換は、設備投資を抑制しつつ実現することが求められている。しかし、現在の電力系統を構成す

る設備は高度経済成長期に設置されたものが多く、高経年化が進んでいる。高経年化設備の重大事故を未然防止することで系統の安定性を維持しながら、既存設備を保全し、さらには情報化や環境負荷低減などの価値向上を図る必要がある。これらを実現するためには、設備の劣化・損耗状態を早い段階で、省力かつ効果的に検知し、設備特性(故障による影響度、対策期間等)に合わせて、CBM(Condition Based Maintenance)とRBM(Risk Based Maintenance)を適切に組み合わせたメンテナンスと設備のアップグレードを計画的に行うことが有効である。

### 2.2 地域マイクログリッドの構築

昨今の再エネ大量導入や蓄電設備を含む様々な分散型電源が配電系統へ接続されつつあり、また、配電事業ライセンス制の導入を契機にVPP事業者などの様々なプレーヤーが系統との連系を進める見込みである。これによって、従来、電力の流れは電源から送配電系統を介して需要家へ届く一方向の流れであったが、近年は系統混雑や逆潮流が発生するなど複雑化する傾向にある。既に、系統電圧が適正範囲を超える懸念が指摘されており、近い将来、電気自動車(Electric Vehicle:EV)の普及や充電スタンドの設置が進むと、更に予測困難な系統電圧の変動が生じる可能性がある。今後想定される配電系統が抱える課題に対応するためには、配電系統の状態を可視化し、リアルタイムできめ細かな系統電圧の管理が必要となる。また、分散型電源を統合管理し、制御することで系統の安定化を図る必要性が高まる。レジリエンス向上の観点からは、地域で再エネと蓄電設備などの分散型電源を組み合わせ、自律的に活用するなど、需給一体型の地域マイクログリッドの構築が求められている。

### 2.3 需要家の脱炭素化を取り巻く環境

カーボンニュートラルへの取組みは世界的な趨勢となりつつあり、世界全体で脱炭素・カーボンニュートラルを表明する国や企業が続々と増えている。グローバルな取引では、サプライチェーン全体における脱炭素化達成への要請が高まっており、製品の購入契約の条件に製造企業での脱炭素の取組みを課す事例も出てきている。また、政府主導でカーボンニュートラルにいち早く移行するための挑戦を行い、国際ビジネスで勝てる企業群を育成し、産・官・学が一体となり、経済社会システム全体の変革のための議論と取組みを行う場としてGX(グリーントランスフォーメーション)リーグの創設などが計画されている。

このような背景の中、多くの企業が脱炭素に向けた取組みを加速している。再エネ電源の自社保有だけではなく、オンサイト/オフサイトのPPA(Power Purchase Agreement)

表 1. カーボンニュートラル社会を支える製品の位置付け

カーボンニュートラル社会を支える技術	役割・機能				
	系統安定化, 電力品質向上	高効率化	既存設備 有効利用	レジリエンス, セキュリティ	カーボン マネジメント
配電線路電圧管理システム (GCS) (3. 1節)	○				
先進・高機能IED端末 (MELPRO-iシリーズ) (3. 2節)	○ 保護・制御, エッジ情報収集		○ エッジAI 機能搭載	○ μグリッド保護, セキュリティ強化	
高圧直流送電システム (HVDC) (3. 3節)		○			
電力系統の安定稼働に貢献する異常兆候検知 (3. 4節)			○		
カーボンマネジメントシステム (マルチリージョンEMS) (4章)					○
ガス絶縁開閉装置ケーブルスイッチ (5章)		○ 発電機会最大化			

の活用などによって再エネ電力の調達を拡大する企業が出てきている。しかしながら、自社保有の土地や工場内に必ずしも十分な再エネ設置スペースがあるとは限らず、また、十分な設置スペースを確保できたとしても、発電場所と需要場所が一致又は近接しているとは限らない。さらには、現在のRE100の枠組みでは、製造拠点の受電端での再エネ利用率で評価されるため、例えば、ある特定の製品や顧客向けの製品だけにRE100を先行して実現したい場合であっても、拠点全体の受電電力全てを再エネ電力で賄う必要があり、相応の再エネを導入しなければならない。再エネの供給力と需要地とが必ずしも一致しない課題を解決することが必要である。

## 2. 4 カーボンニュートラル社会を支える技術展望

次世代NWの構築で不可欠となる配電系統やマイクログリッドシステムの電力品質向上に向けて、次世代配電系統管理システム (ADMS) や配電自動化システムを用いた監視・制御の高度化開発などが進められている。一方、これらシステムが現在の課題に対応した所要の機能と性能を発揮するためには、配電系統の潮流や電圧変動を可視化する必要がある、また適切な電圧整定値をリアルタイムに設定する機能を備えたシステムの実現と連携を要する。

一方、昨今のデジタル化の進展に伴い、上位の監視・制御システムで集中的に処理するデータ量は肥大化する傾向にあり、データの分散化が課題となっている。リアルタイム性が求められる制御や上位層へ伝送すべきデータのスクリーニングはエッジ側で機能を分担することが必要となっている。例えば、系統接続されている電気設備で故障などが発生した場合、その影響が系統へ波及する事態とならないように事故除去はエッジ側で高速処理することが有効であり、また、エッジ側のデータ収集や一次処理はエッジ側で行われることが望ましい。

これら課題を解決するため、当社では、配電線路電圧管理システムを開発するとともに、将来的なDERMSなどとの連携も視野に、保護・制御機能に加えて配電分野で必要とされる情報収集機能やエッジAI機能などをパッケージ

化したエッジ端末を製品化した。また、高効率送電を実現するためのHVDC、高経年化設備の有効活用に貢献できる異常兆候検知技術、需要家の脱炭素への移行を支援するカーボンマネジメントシステム (マルチリージョンEMS)、洋上風力系統の運用の柔軟性を向上させるガス絶縁開閉装置用ケーブルスイッチの開発を行った。3章～5章で述べる技術の役割・機能を表1に示す。

## 3. 次世代NWの実現に貢献する技術

### 3. 1 配電線路電圧管理システム

これまで配電系統の電圧降下対策として、変電所にLRT (Load Ratio Control Transformer: 負荷時タップ切替器付変圧器) や、配電線上にSVR (Step Voltage Regulator: ステップ電圧調整器) を設置して、電力品質の安定・維持に努めてきた。しかしながら、近年、配電系統への再エネ電源や分散型電源の接続が増加するにつれて電圧変動や逆潮流が拡大し、現行のLRT・SVRでは刻々と変化する配電系統の供給電圧を適正範囲に維持することが困難になってきている。

このような課題を解決するために、LRT・SVRなどの現地機器を対象とした電圧管理システムとして配電線路電圧管理システム (Grid Control System: GCS) を開発した。

GCSは、配電自動化システムや高低圧ロードカーブ管理システムとデータ連携し、系統電圧を可視化するとともに、LRT・SVRの整定値を毎日、遠隔から自動的に更新し、電圧急変の際にはリアルタイムに整定値を自動更新する。このような、きめ細かな電圧制御で、配電系統の供給電圧を常に適正に維持することを可能にしている。

### 3. 2 先進・高機能IED端末MELPRO-i<sup>(3)</sup>

保護リレー製品の開発や製品化で培ったリアルタイム制御技術、エッジコンピューティング技術などを応用し、ミドルレンジのエッジ端末、MELPRO-iシリーズを開発した。



MELPRO-iは、配電自動化システムなどとの通信に加えて、端末間での高速通信を可能にしている。また、事故情報を相互に通信することによって、例えば、変電所の保護リレーが動作する数百ミリ秒以内に事故区間を特定し、高速に事故区間を遮断できる。従来方式に比べて高速に事故区間の特定・遮断ができるため、停電区間を局所化し、事故復旧時間を大幅に短縮できる。

電力システムのレジリエンスを高めるため、マイクログリッドの実現に向けた検討が進められている。マイクログリッドでは、事故時の電流量の違いなどから上位系統連系時とマイクログリッド単独運転時で系統保護を切り替える必要がある。また、単独運転しているマイクログリッド系統を上位系統へ再連系することがある。遠隔整定機能を備えることで、上位系統連系時からマイクログリッド運用時への整定値変更を遠隔拠点から実施できる。上位系統へ再連系する場合にはマイクログリッド内の分散型電源を制御し電圧や位相を上位系統と同期させることができる。

近年の効率的な設備投資要求などへの対策として、配電線情報を活用した事故予兆検知及び事故原因推定に関する検討が進められている。当社では、事故予兆を検出する機能を独自アルゴリズムによってエッジ端末に搭載可能なAI機能を実現しており、この機能の搭載ができる。配電系統のエッジ側で事故予兆検知や事故原因推定が可能になり、現地作業の効率化、事故復旧の迅速化に寄与できる(図1)。

### 3.3 高圧直流送電システム

再エネ発電の適地から電力需要地までの高効率な長距離送電技術としてHVDCが注目されている。また、国内ではHVDCを適用して50Hzと60Hzを連系する周波数変換所の設備強化も進められている。

当社では、四国と本州の連系強化を目的に2000年に設置された紀伊水道直流連系設備に他励式変換器を含む機器を納入し、さらに自社製IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)を用いたMMC(Modular Multilevel Converter)方式の自励式変換器を適用したHVDCシステムを開発した。当社系統変電システム製作所の敷地内には、容量50MWの直流送電システム検証設備を建設し、2018年から各種検証試験を実施している(図2)。各種検証試験として、電力融通試験、潮流反転試験、無効電力出力試験、ブラックスタート試験、直流短絡事故模擬試験などを実施し、変換器や制御保護装置など実機と同じシステムを用いて性能及び信頼性を確認した。

### 3.4 電力系統の安定稼働に貢献する異常兆候検知

電力系統の安定性確保と既存設備の有効利用が同時に求められている。近年、系統側への電気の流入を抑制する設備や、電源脱落時に連鎖的な電源脱落を回避する設備の導入が進みつつあり、高経年化設備や新たに導入される設備に対して、予期せぬ事故や電源の脱落を未然に防止するこ

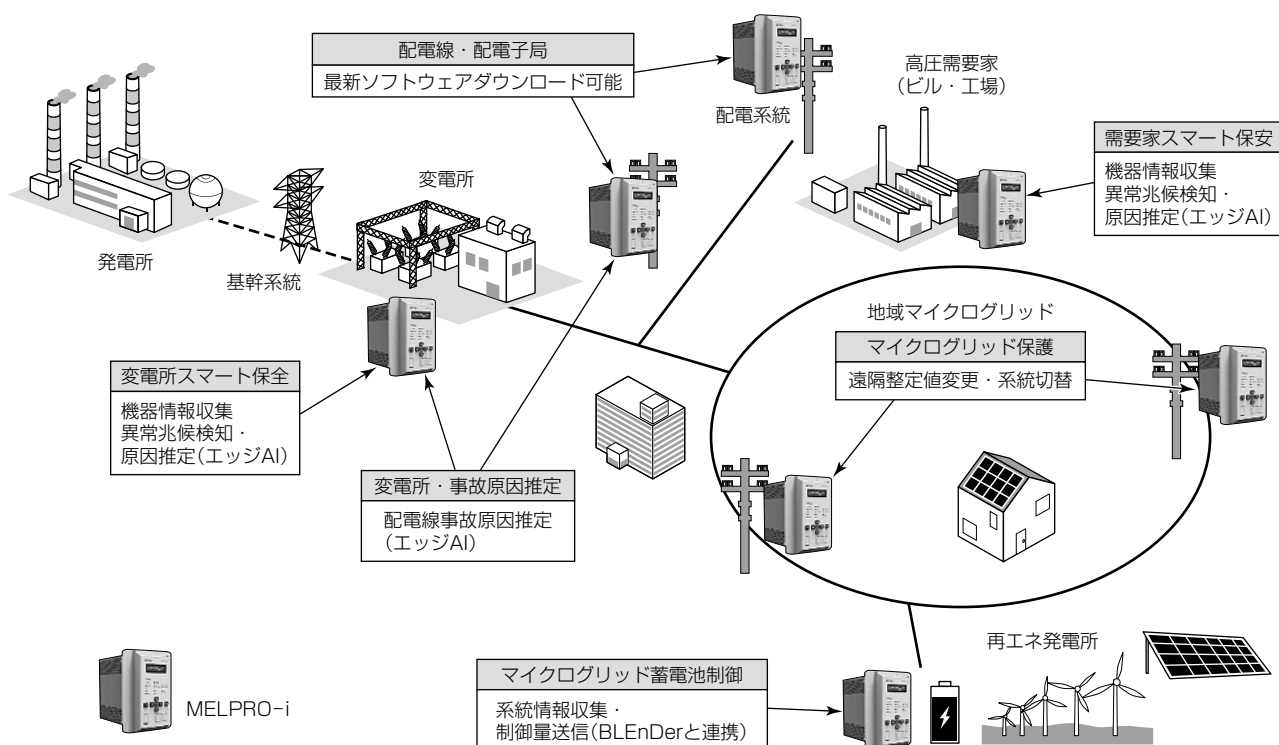


図1. MELPRO-iの活用例



(a) 検証棟



(b) HVDCバルブ

図2. HVDC検証設備

との重要性が増している。

設備によって劣化モードは様々であるが、例えば、絶縁劣化などの配電設備の異常兆候やドローン等によって撮影された鉄塔・送電線の映像からキズや撓(たわ)みなどの劣化兆候を把握するに当たり、AIを活用した異常兆候検知技術の開発を行っている。また、AIには不確実性を含むその技術特性に起因する特有のリスクがあるため、品質保証の共通指針を確立する必要がある。当社は、AI製品の品質保証について研究するAIプロダクト品質保証コンソーシアムに参画し、AIプロダクト品質保証ガイドラインの策定を進めるとともに、このガイドラインを異常兆候検知技術に適用し信頼性の確保を進めている。

#### 4. カーボンマネジメントシステム<sup>(4)</sup>

当社では、再エネ供給力の偏在問題を解決するソリューションとしてマルチリージョンEMSを開発している。再エネの利用を向上させたい拠点にスペースがない場合でも、自社内の他の拠点に導入された再エネの発電電力を既存の電力系統を通じて送ることで、非化石価値が必要な拠点での再エネの利用効率改善に貢献する。

複数の拠点間の再エネ由来の電力融通は、自己託送という国内制度に準拠して行われる。自己託送とは、電力会社

が持つ送配電系統網を利用して、自社保有の発電設備による発電電力を自社内の別の需要地点に送電するサービスであり、再エネの出力変動も含めて30分単位の電力の計画を毎日作成・提出し、実需給断面での同時同量監視・制御を24時間実施するなどの業務が必要となる。

当社のマルチリージョンEMSでは、BLEnDer需給管理パッケージを用いて、これら運用を総合的にサポートしている。また、拠点に蓄電池が導入されている場合には、蓄電池の充電量に占める再エネの発電電力量の割合を管理した上で、最適な充放電制御を行う。再エネ利用率の目標達成手段としては自己託送以外にも、再エネ価値付き電気メニューの契約や、環境価値証書の調達によって得た非化石価値も考慮した上で確実な目標達成計画を提案する(図3)。

#### 5. ガス絶縁開閉装置ケーブルスイッチ

大規模洋上風力発電所の建設は欧州を中心に本格化しており、今後、北米やアジア圏も加わって洋上風力発電の導入が更に加速する見込みである。大規模洋上風力発電所では、発電効率を最大化して安定的な電力供給を実現するため、柔軟なシステムの運用が求められる。

大規模洋上風力発電所は、複数台の風車が海底ケーブルによって直列に接続された連系回路が洋上変電所から複数本ツリー状に配置され、一つの集電システムを構成する。各々の風車には、風車内の発電機と連系回路、そして連系回路上に隣接する別の風車とを相互に接続・断路する役割を担うため、ガス絶縁開閉装置(以下“C-GIS”という)が搭載されている(図4)。

一般的に、風力系統向けC-GISの連系回路側には断路器(Disconnecter: DS)が用いられるが、DSは電流開閉能力を持たないため、増設や点検などに伴い1台の風車を連系回路と接続・断路する際には連系回路上のほか全ての風車もC-GIS内の遮断器(Circuit Breaker: CB)を開極して発電機を連系回路から切り離し、洋上変電所内の連系回路に直結されたCBも開極して当該の風車を含む連系回路全体も電力系統から切り離さなければならない。また送電停止後、海底ケーブルの残留電圧が放電されてからでないと接続・断路ができないことから、回路状態切替の時間だけ発電機会損失が発生する。

そこで既存のDSをベースとして接点部の速動機構を組み入れることで、ケーブル充電状態での電流開閉能力を付与したケーブルスイッチ(Cable Switch: CS)を開発した。C-GISの連系回路側DSをCSへ置き換えることで、洋上変電所のCBを開極することなく、CSを用いて風車と連系回路を速やかに接続・断路することが可能になり、発電機会損失を最小限に抑えた柔軟なシステムの運用が実現できる。

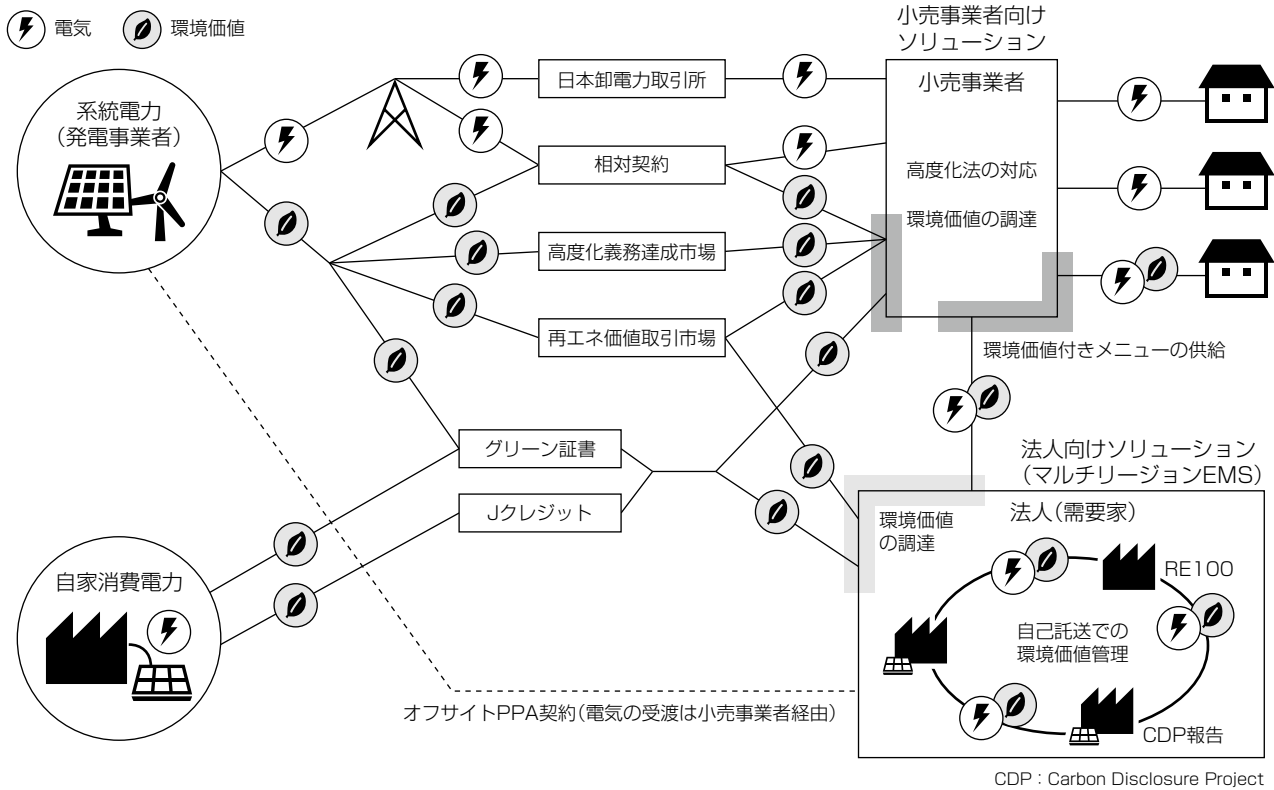


図3. カーボンニュートラル対応ソリューション

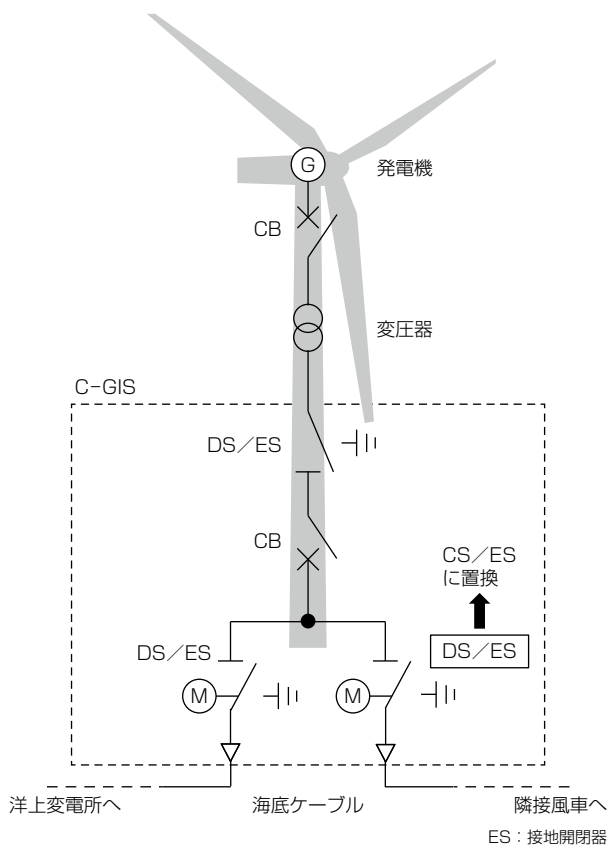


図4. 風車内回路図

## 6. むすび

これまで当社では、発電・送電・変電・配電・利用の各分野で、時代に則した革新的な製品・システムを提供し、電力システムの安定性や効率性、経済性の向上に貢献してきた。これら電力インフラの構築で培われてきた技術は、現在、カーボンニュートラル社会を支える新たなソリューションの開発に応用している。

また、発電・変電分野で培ったプラントエンジニアリングや電力情通・監視制御分野で培ったシステムエンジニアリング能力は、社会のニーズに即した技術の探索、製品・システムを横断的に組み合わせたソリューションの提案、新たな製品やサービスの社会実装に向けて活用している。

引き続き、持続可能な社会の実現に貢献するため製品及びサービスの提供に努めていく。

### 参考文献

- (1) 資源エネルギー庁：令和2年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書2021) (2021)
- (2) 経済産業省：再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会 中間整理(第4次) (2021)
- (3) 石本智之, ほか：次世代配電システムでの配電高度化技術, 三菱電機技報, 95, No.11, 682~685 (2021)
- (4) 西都一浩：カーボンニュートラルに向けたスマートシティへの取り組み, 三菱電機技報, 95, No.11, 699~703 (2021)