

編集チームリーダー 早馬道也
Michiya Hayama

カーボンニュートラルと 分散電源と次世代エネルギー

電気は単にエネルギーを伝送するだけでなく、半導体を含む種々の電気・電子部品を使って高速かつ高度に制御可能であることから、19世紀にエジソンが電気事業を開始して以来、普及と発展を続け、現代では人々の生活になくてはならないものとなっています。本小特集では電気が支えるカーボンニュートラル技術として、分散電源や太陽光発電・風力発電といった次世代エネルギーに焦点を当てて、それを取り巻く政策・標準化動向、関連技術について解説します。

カーボンニュートラル実現に必要な技術の一つとして挙げられているのが、分散電源を活用したデマンドレスポンスです。ここで言う分散電源とは、送電網上に分散している太陽光発電・風力発電といった再生可能エネルギー（再エネ）や蓄電設備、能動的な制御により電力消費を調整可能な電力消費者（需要家）を総称したものです。デマンドレスポンスでは、日照や風況などの自然環境に左右されやすい再エネ電力を、送電網上の分散電源がリアルタイムに電力を入出力制御することで需要と供給を成立させます。デマンドレスポンスが実現された送電網は、もはや通信網そのものであり、そこには分散電源同士が互いに情報を正しくやり取りするためのプロトコルや標準規格が必要不可欠です。本小特集で紹介する3件の解説記事では、こうしたプロトコルや標準規格の国内外動向、実際の通信規格の動作を取り扱っています。

また、2件の解説記事では電力伝送制御に関する次世代技術として「ワット・ビット連携」と「無線電力伝送」という二つのテーマを紹介します。ワット・ビット連携とは、地理的に分散したデータセンター間で計算量（ビット）を調整することで電力消費（ワット）を調整可能な分散電源として機能させるという技術です。

本小特集を通してカーボンニュートラルを中心にエネルギー分野に起きている技術革新と動向を知って頂ければ幸いです。

最後に、小特集の発行にあたり、御執筆頂いた皆様、編集委員の皆様、査読・校閲で御協力頂いた皆様に心から感謝致します。

小特集編集チーム

早馬道也、内田大輔、中西孝行、松室亮之、水野 修

カーボンニュートラル実現に向けた 需要サイドの分散型電源の活用

小林延久 Nobuhisa Kobayashi 早稲田大学

1 カーボンニュートラルの実現の必要性

地球上に生きる全ての生命にとって、掛け替えのない地球環境は温暖化の一途をたどり、既に我々の生存環境を脅かし始めている。国連気候変動に関する政府間パネル（IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change）は第6次報告書⁽¹⁾において、地球温暖化は人間の社会活動により大気中に排出、蓄積された二酸化炭素（CO₂: Carbon dioxide）を主とする温室効果ガス（GHG: Green House Gas）が引き起こしたことに「疑う余地がない」と断言した。一方、国連気候変動枠組条約締約国会議（COP: Conference Of Parties）は地球

環境のリスク低減のため、地球平均温度上昇を2℃未満に抑えることで合意⁽²⁾し、2050年CO₂排出実質ゼロ（カーボンニュートラル）実現を目指している。しかし、グローバルカーボンプロジェクト（GCP: Global Carbon Project）が図1に報告⁽³⁾するように、CO₂排出量は新型コロナウイルス感染症パンデミックによる経済活動沈滞で一時低下したものの、2021年以降、それ以前の約40 GtCO₂/年に戻っている。地球の平均温度上昇は気象観測結果⁽⁴⁾から図2に示すように、2023年には産業革命以前に比べ1.5℃を上回った日数が年

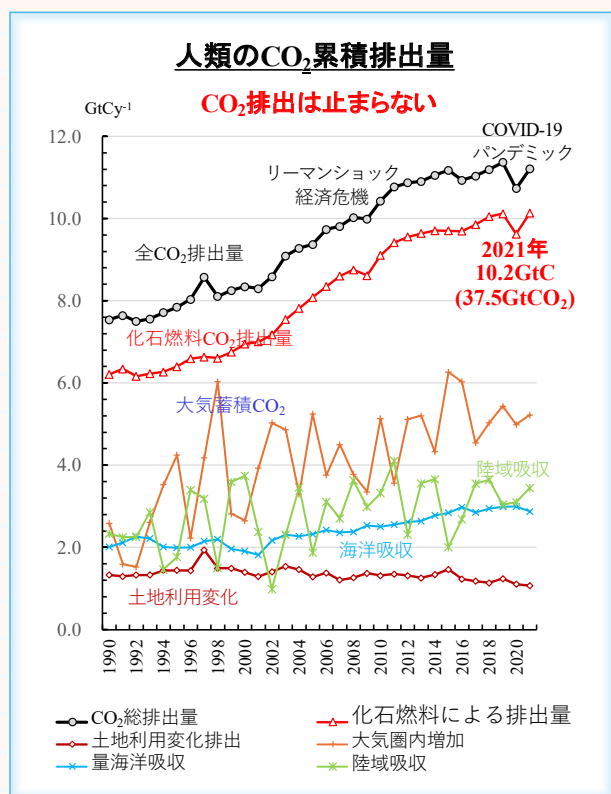


図1 産業革命後のCO₂排出推移
出典: Global Carbon Budget 2022

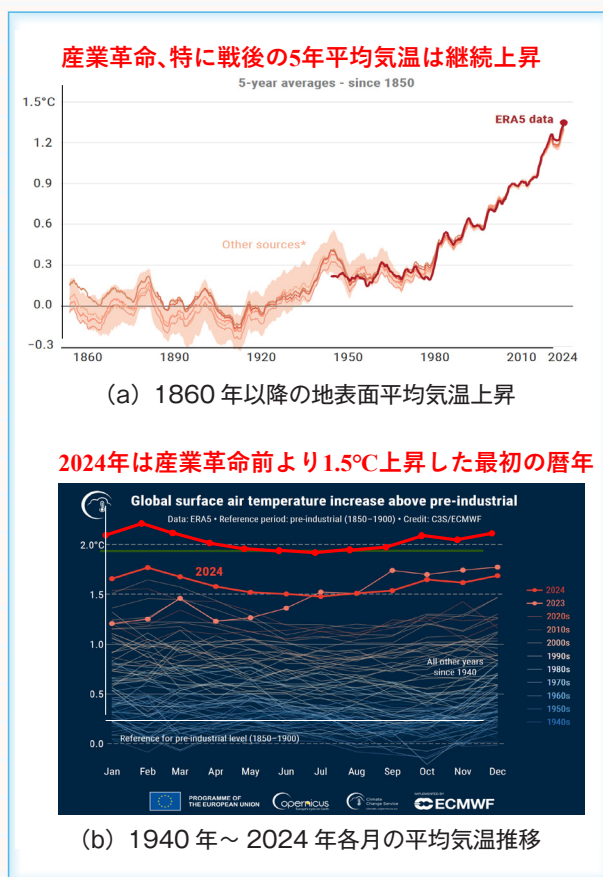


図2 平均気温の推移
出典: Global Carbon Budget 2022

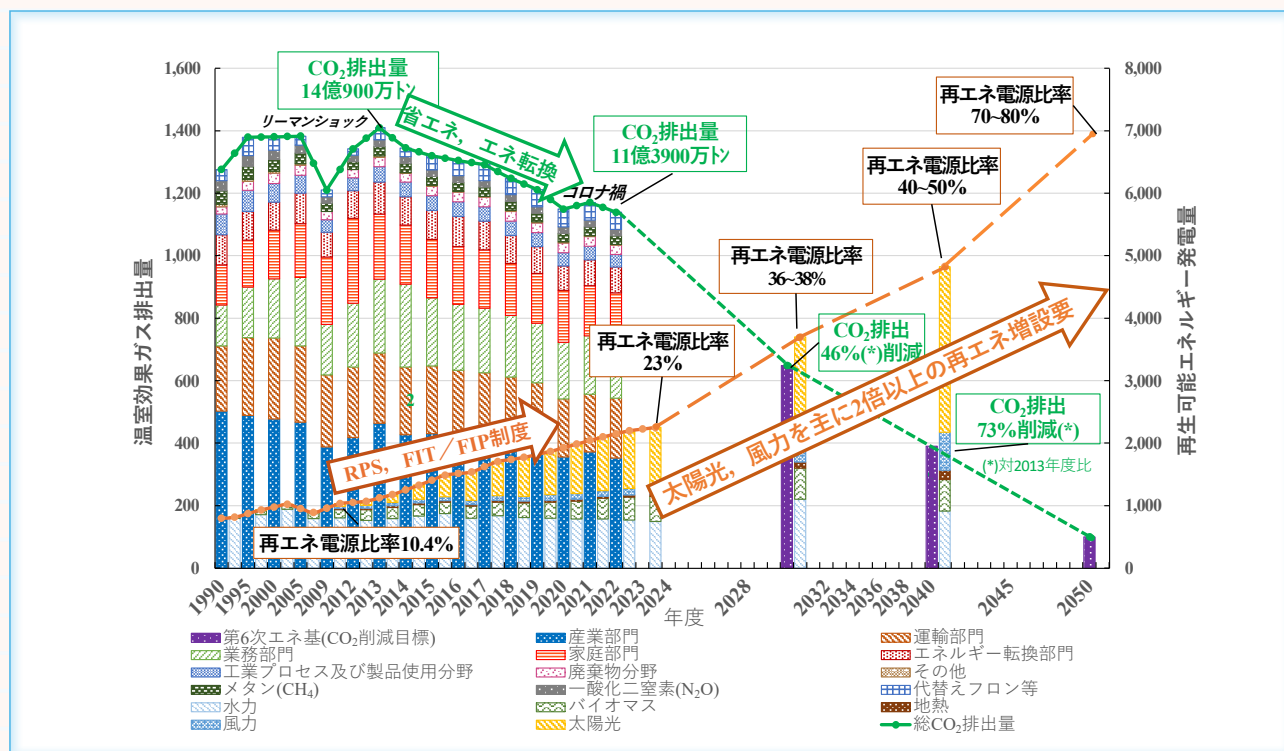


図3 エネルギー基本計画によるCO₂削減と再エネ増設

出典：経産省 2023 年度エネルギー需給実績

間の3分の1程度となり、2024年はついに年間を通じ、全ての月の平均気温が1.5℃以上となった。

カーボンニュートラルを実現するには、CO₂の大きな排出源である化石燃料を使用する火力発電を太陽光発電(PV: Photovoltaic)、風力発電(WT: Wind Turbine)などの再生可能エネルギー(RE: Renewable Energy, 以降、再エネ)に転換し、①再エネの電力による電化、②省エネ、③需給連携による電力最適利用、が必要である。ただし、再エネの発電は人知の及ばない日照、風況の変化などの自然環境に左右されるため、再エネの主力電源化には再エネの発電量(供給力)の確保のみでなく、再エネ発電量の変動を補完し、電力の安定供給を担保するための電力(調整力)が必要である。現在、この調整力のほとんどが化石燃料を使用する大規模火力発電所の発電余力から供給されている。今後、大規模火力発電所は再エネに対する環境性、経済性などから休廃止が必至なため、調整力の供給源の確保が必要である。

この対策に国際エネルギー機関(IEA: International Energy Agency)は電力の消費者である需要家サイドの需要設備、再エネ発電設備などを含む分散型電源(DER: Distributed Energy Resources)からの調整力を活用するデマンドレスポンス(DR: Demand Response)を挙げている。以降、本稿では、電力安定供給に活用するための調整力を、DERの本来の機能を毀損することなく、その設備、運用などの余力から創出し、流通させるアグリゲーション機能について解説する。

2

日本のカーボンニュートラル実現の目標と課題

日本では官民を挙げて「2050年カーボンニュートラル実現」を目指し、関係する法制度の整備、再エネ増設による脱炭素化が推進されている。図3に示すように産業界は省エネを主に、2022年度に2013年度比19%のCO₂排出削減を実現し、更に省エネ努力を継続している。政府は2021年10月に策定した第6次エネルギー基本計画(以降、エネ基)の目標値を、2050年CO₂排出ネットゼロ実現に向けて直線補間し、2040年度にCO₂を排出しない電源割合(再エネ比率)40~50%、CO₂排出量を2013年度比73%削減する、野心的な目標を第7次エネ基⁽⁵⁾として2025年2月に閣議決定している。

この達成には再エネ増設に必要な用地の確保、送配電系統の増強などの問題の解決が不可欠である。また、電力の安定運用には電力の需給バランス調整、送配電系統の混雑/電圧管理、電力貯蔵、系統周波数維持のための慣性力などの技術開発が必須である。

しかし、カーボンニュートラル実現のベースとなる再エネ増設は課題を抱えるものの、電気事業者に一定割合の再エネ利用を義務付ける「再生可能エネルギー導入量割当制度(RPS: Renewables Portfolio Standard)」⁽⁶⁾、再エネ電力を一定期間、一定価格で買取りを保証する「固定価格買取制度(FIT: Feed-in Tariff)」⁽⁷⁾、再エネの

表1 再エネ増設が電力安定供給に与える影響と対策

現象		電力安定供給への影響	需要サイドの対策	流通サイドの対策	
送電系統の課題	平常時	需給バランス乱れ	天気予報ハズレによる再エネ発電変動による周波数乱れ	分散型電源の需要上げ下げ調整【調整力（Δ kW）】、電源確保	
		余剰電力発生	昼間、太陽光発電出力増加、発電機最低出力の供給が需要を超え、余剰電力発生	分散型電源の需要／蓄エネ上げ調整【調整力（Δ kW）／供給力（kWh）】	需給調整【調整力（Δ kW）／供給力（kWh）】、地域間連系線、出力抑制
		ダックカーブ発生	夕刻、太陽光発電出力低下、電力需要ピークと重なり、供給力の追加確保が必要	分散型電源の需要減、放エネ（下げ調整）【調整力（Δ kW）／供給力（kWh）】	需給調整【調整力（Δ kW）／供給力（kWh）】、発電機の出力増
	事故時	系統擾乱拡大	系統事故時、瞬時電圧低下で分散型電源一斉解列、周波数低下	太陽光発電 FRT（フォルトライドスルー）要件対応	系統運用システムによる過渡安定度確保
		系統安定度低下	発電機並列運転台数低下、同期化力、慣性力低減	－	GFM（グリッドフォーミングインバータ）の慣性力確保
配電系統の課題	平常時	配電系統混雑	再エネの逆潮が変電所制約超過、再エネ最大阻害	分散型電源の需要上げ下げ調整【調整力（Δ kW）】	出力制御、配電系統設備増改修
		配電系統電圧上昇	再エネからの逆潮による電圧上昇、適正電圧逸脱	インバータ電源の力率、発電制御【調整力（Var）】	配電自動化システム、調相設備の設備増改修
		フリッカ発生	太陽光発電単独運転検出機能設定不良で電圧変動	太陽光発電の設定修正	配電自動化システムによるフリッカ発生把握
	事故時	分散型電源の相互干渉	太陽光発電が同一系統連系時、単独運転検出機能差で検出信号干渉し全停止	太陽光発電 FRT（フォルトライドスルー）要件対応	－

普及に向け市場統合を目指す「フィードインプレミアム制度 (FIP: Feed-in Premium)」により拡大した⁽⁶⁾。現在、FIT の買取期間の終了、再エネの設備導入コストの高止まりなどから設置が伸び悩んでいるものの、2024 年度末時点の再エネ累積設備容量は PV を主に約 78 GW に迫る状況にある。ただし、カーボンニュートラルの実現には、更に 2 倍以上の再エネ増設が必要である。

再エネの増設が電力安定供給に与える影響と対策を表 1 に示す。特に、天気予報が大きく外れるケースでは一般送配電事業者 (送電事業者 TSO: Transmission System Operator, 配電事業者 DSO: Distribution System Operator) の再エネ発電予測、電力需要予測を狂わせ、電力の需給バランスの乱れを生み、供給電力の周波数、電圧などの電力品質を悪化させる。これに対し、現在、日本では TSO が需給調整市場を介し DER などから調整力を調達、運用して対策している。また、天候状況などによる再エネの発電量と電力需要量の増減は、従来にない配電系統の潮流の変化を生じさせ、配電系統の制約から配電系統に混雑、電圧上昇などの問題を引き起こす。これに対し、欧州では既に対策、検討⁽⁷⁾が行われているが、日本では DSO による個別の配電設備の増改修などによる対策にとどまっている。しかし、今後、住宅屋根置き PV の増加などにより問題の顕在化が予想される。DER によるこれらの対策検討の前提となる日本の法制度について次に述べる。

3

日本の電力供給の流れと同時同量による需給調整

日本では電力システム改革によって、旧電気事業者の発電、小売、送配電の各部門が分離され、独立した事業者となった。独立した小売電気、発電事業者がそれぞれ需要、発電計画を作成、これを守ることで電力需給一致が図られる。これを「計画値同時同量」という。一般送配電事業者は最終的な実需時の需給バランス調整を行う。

日本の電力供給、需給調整の流れを図 4 に示す。小売電気事業者は全国大の需給調整を行う電力広域的運営推進機関 (OCCTO: Organization for Cross-regional Coordination of Transmission Operator) の需要予測に基づき発電販売計画を電力供給を行う前日正午までに提出し、これを実需 1 時間前まで変更する。小売電気事業者はこの計画を満たす供給力 (kWh) を発電事業者との相対取引、スポット市場 (一日前市場) や時間前市場 (当日市場) の市場取引で調達、電力を供給する。発電事業者は小売事業者との相対、市場取引の結果の履行のための需要調達計画を作成、OCCTO に提出し、これに従って発電を行う。一般送配電事業者は天気予報の外れなどにより需給バランスに乱れが生じた場合、実需段階で需給調整市場を介し調達する調整力 (Δ kW) を運用し、需給バランスを取り、需給の一致を図る。小売電気、発電事業者は計画値からのずれである「インバランス」に応じて、ペナルティを負う。

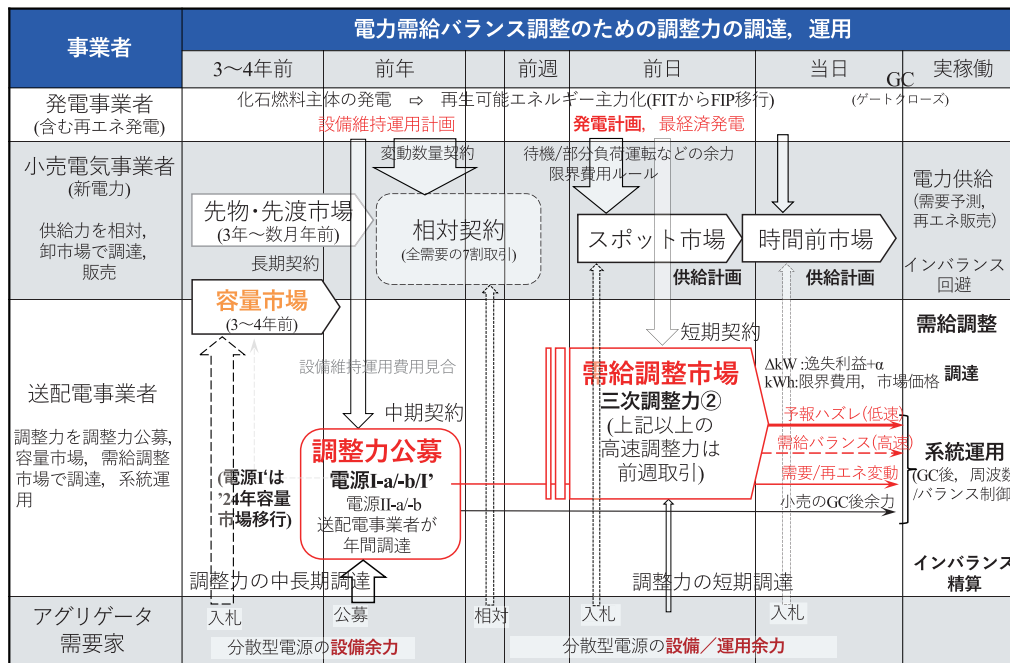


図4 日本の電力供給、需給調整の流れ

表2 需要サイドの調整力創出ポテンシャル

	評価項目	蓄熱システム	定置型蓄電池 (業務、産業用)	空調機 (ビル用マルチ)	常用発電機 (コージェネ)
設備、 調整力特性	設置台数	34,000 台	250,000 台	2150,000 台	13,000 台
	運用余力	蓄熱容量の 30%	蓄電容量の 50%	空調能力の 20%	発電容量の 20%
	創出容量	100MW × 3hr	125MW × 4hr	130MW	129MW
	調整力の 創出可能時期	下 夏季(昼間) 上 春秋(昼間)	夏季(昼間) 春秋(昼間)	夏季(昼間)	春秋冬(20～8時)
	需給調整市場適応	三次調整力②	一 / 三次調整力	二 / 三次調整力	三次調整力①②
経済性	調整力取引収入	○(市場、相対)	○(市場、相対)	○(市場、相対)	○(市場、相対)
	運営費(燃料、水等)	○(電動式熱源機 への移行)	—(現行運営費か ら増えず)	—(現行運営費 から増えず)	—(現行運営費 から増えず)
	カーボン プライシング	○(電動式熱源機 への移行)	○(余剰電力の 蓄熱時)	—	—
環境性	CO ₂ 排出削減	○(電動式熱源機 への移行)	○(余剰電力の 蓄熱時)	○(ヒートポンプ の高効率性)	○(熱も含めた トータル効率)
	水資源	○(電動式熱源機 への移行)	—	—	—
	その他	地域熱供給活用	保守と一体化	保守と一体化	—

アグリゲータとは DER の電力需要増減、蓄放電、発電などにより DER の所期の機能に支障のない範囲で調整力を創出、集約し、需給調整市場で一般送配電事業者と週ごと、日ごとに取引する事業者である。この調整力以外に一般送配電事業者が年度ごとに調達する調整力公募、将来の発電能力である供給力 (kW) を取引する容量市場で取引される発動指令電源がある。これら需要サイドの DER の調整力創出ポテンシャルを表 2 に示す。

4 需要サイドの分散型電源による需給バランス調整

4.1 分散型電源の需給バランス調整適用の問題と標準化

需要サイド、特に業務／産業分野の比較的設備規模の大きな DER の調整力は容量、応動時間、創出の確実性及びアグリゲーション効率などから、天候による再生エネの出力変動に対する需給バランス調整に有用である。しかし、DER を保有する需要家は DER の調整力の創出ポ

分散型電源の余力による調整力の電力安定供給への活用；

アグリゲーションは設備余力を集約し、電力安定供給の要件に合せて商品化。

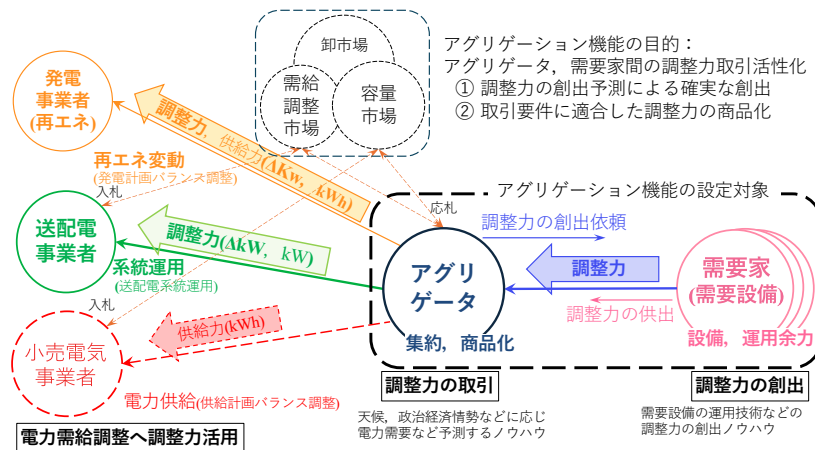


図5 DERからの調整力のアグリゲーション機能と関連

テンシナル、地球環境保全への貢献などを理解しながらも、調整力を取引する事業への参入判断が難しい状況にある。判断を難しくする要因は調整力の取引価格の低迷、DERからの調整力の創出失敗時のペナルティ、DERの本来機能毀損時の影響などである。このうち、取引価格は国際的な政治経済情勢などの関係から、先行き不透明である。ただし、DERの機能を毀損することなく調整力を創出、集約し、電力市場の取引要件を満たす商品を構成する機能を標準化することで、DERの調整力の取引事業への参入リスクを軽減できる。ひいてはDERから調整力の流通量の増加が期待できる。このため、DERの調整力の創出、集約、商品化などのアグリ

ゲーション機能をDERの設備種類によらず、共通に扱うことができるよう需要家、アグリゲータのインタフェースの標準化を検討した⁽⁸⁾。この標準化により、①調整力の評価指標による設備種別によらない公平な取引、②調整力創出の予測指標による高精度な創出管理、③単独で取引要件に適合しないDERの調整力の活用などが実現できる。

4.2 需給バランス調整の調整力のアグリゲーション機能

標準化の対象とする需給バランス調整のための調整力は、需給調整市場の取引規定を満たす三次調整力であ

調整力のアグリゲーション機能仕様

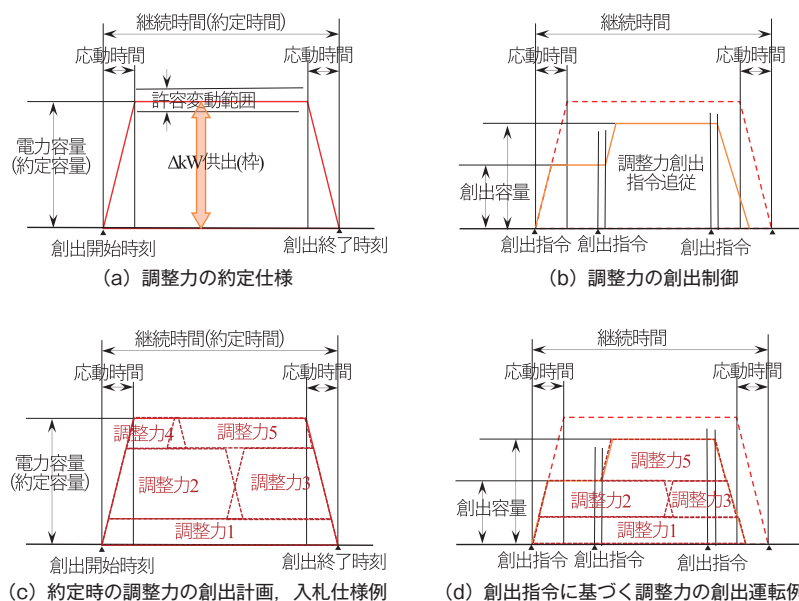


図6 需給調整市場の調整力の約定仕様と創出制御

標準化対象：調整力の創出，アグリゲーション機能とアクタ間授受情報，アルゴリズムは対象外。

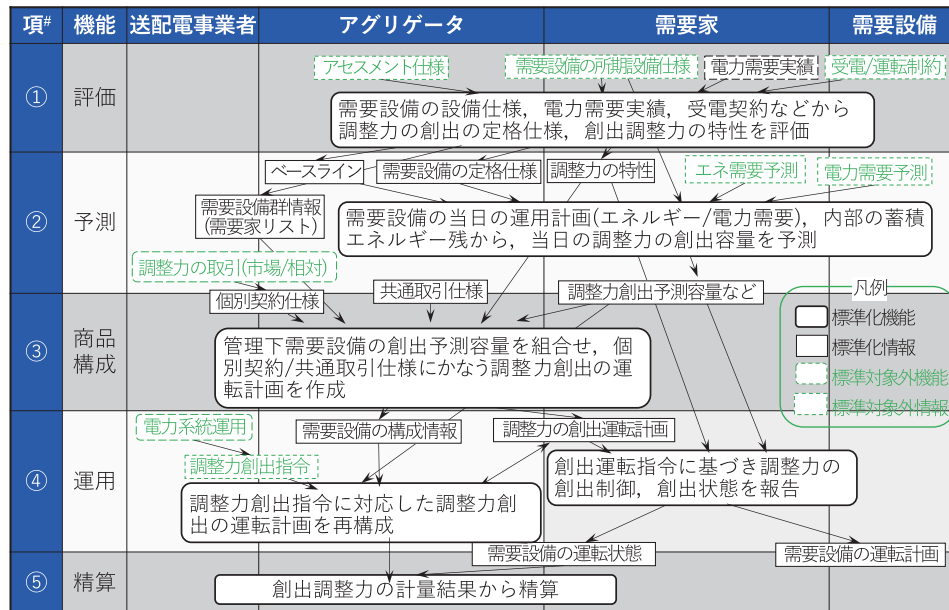


図7 DERからの調整力アグリゲーションの機能情報関連図

表3 アグリゲーション機能の構成

項*	中分類	機能名	機能概要	
①	評価	ポテンシャル評価	需要設備を評価し、調整力の最大創出容量、最大期待容量などを評価。	
②	予測	創出予測	電力需要予測、需要設備の運用実態などから調整力の創出容量を予測。	
③	商品構成	商品構成と創出計画	需要設備からの調整力の創出予測容量とその偏差を考慮して、需要設備からの調整力を組み合わせ、商品要件を満たす創出計画、入札仕様を作成	
		取引、創出計画	需要設備を組み合わせ、入札、約定後、約定仕様に合わせ、創出計画を再作成	
④	運用	容量制御	調整力創出運転	需要設備の電力需要変動、送配電事業者からの調整力の創出（変更）指令に対応し、約定仕様を満たす運転計画を再作成、配分、創出運転
		同時同量制御	需要設備からの調整力の創出値を 30 分ごとに約定仕様と実績値を一致化	
		指令値追従	送配電事業者の調整力の創出（変更）指令に対応し、需要設備からの調整力の創出容量を変更、需要設備の運転計画を再作成、配分、創出運転	
		応動時間高速化		取引要件を満たすため、調整力の立ち上がり、立ち下がり時間の高速化
	要件適合運転	リレー制御	需要設備からの調整力の創出をシリーズに連続して行い、調整力の創出継続時間を延長	
		需要変動対応	需要設備からの調整力の創出基準となるベースラインの変動に対応し、調整力の創出容量を変更制御	
⑤	精算	計量、支払	需要設備から調整力の創出運転完了後、創出した調整力を計測し、創出容量に見合った料金の支払い	
⑥	異常制御	需要設備入替え	需要設備の故障などによる調整力の創出の停止、目標からの逸脱などに対応して、需要設備を入替え	
		再起動時間	需要設備からの調整力の創出運転後、再度、需要設備からの調整力の創出再開時の起動時間間隔を制御	

る。すなわち、旧電気事業者管内の電力系統に連系するDERの「30分精度」の有効電力である。標準の対象範囲、事業者の関係などを図5に示す。対象とする機能はアグリゲータと需要家間のものであるが、調整力を使用するTSO、調整力の取引を行う電力市場との関係も考慮に入れている。更に、今後、調整力のみでなく、供給力の取引も想定されるため、これも含めている。

需給調整市場で約定される(a)調整力の約定仕様、

(b)創出指令、(c)入札仕様、(d)創出運転を図6に示す。調整力は創出容量、継続時間、応動時間で規定される創出枠で取引され、その枠内でTSOの創出指令に追従し、アグリゲータが複数の調整力を組み合わせた約定仕様から創出、提供する。TSOの調整力への要求は必要とときに、必要な要件を満たす調整力が確実に提供されることである。

すなわち、アグリゲータによる調整力の入札は、

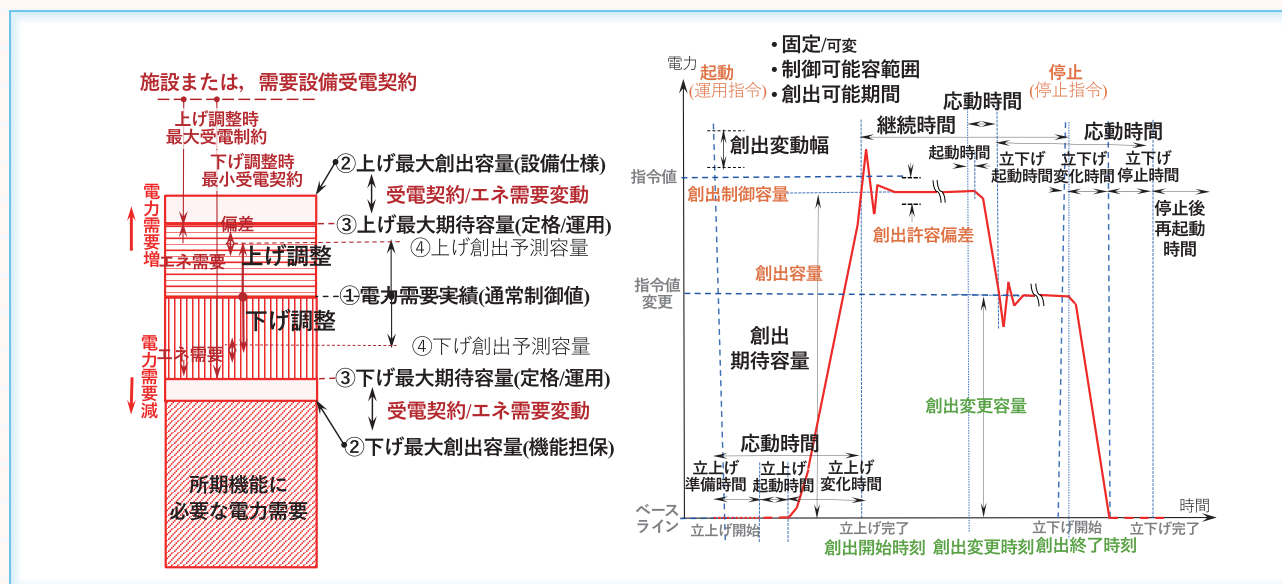


図8 分散型電源及び、その調整力の外部仕様の標準化

TSO が電力の需給バランスを取るために必要な調整力の容量、指定容量の創出継続時間、その変化時間である応動時間から成る調整力の募集仕様に対し行われる。TSO は調整力の約定仕様から電力の需給状態に応じ、アグリゲータに創出指令する。ただし、アグリゲーターは調整力の入札に当たり、複数の DER の調整力を組み合わせ、入札仕様することができる。すなわち、アグリゲータは TSO からの創出指令に従うため、約定した複数の DER の調整力を組み合わせ、創出指令を満たす調整力を創出することとなる。

4.3 調整力のアグリゲーション機能の標準化

需要家の DER の調整力のアグリゲーション機能を実現するアグリゲータ、需要家、TSO の機能分担、情報の流れを図 7、その機能仕様を表 3 に示す。

アグリゲーション機能は①アグリゲータによる DER からの調整力の創出能力の評価、②アグリゲータ、需要家による DER からの調整力の創出容量の予測、その結果を受けた③アグリゲータの入札に向けた複数の調整力を組み合わせた調整力の創出計画と商品構成、④ TSO の創出指令に対応したアグリゲータ、需要家による調整力の創出、その後の⑤アグリゲータによる調整力の創出結果に応じた料金の精算から成る。

また、事業者の機能分担と関連は以下となる。アグリゲータは①評価により、複数の需要家と DER の調整力の創出能力に応じた調整力の取引契約を結ぶ。需要家は②予測により調整力の創出容量を予想し、アグリゲータに報告する。アグリゲータは③商品構成により、調整力の需要と DER の調整力の創出容量の予測を組み合わせ、調整力の創出コストと創出リスクの最適化を図った調整力の創出計画、入札仕様を作成、入札する。約定後、ア

グリゲータは④運用により、TSO からの調整力の創出指令に従い、調整力の創出計画を見直し、需要家に配分し、需要家がDERを制御し、調整力を創出する。調整力創出が終了後、アグリゲータは⑤精算により創出量、創出の失敗時のペナルティを含めた料金の分配を行う。

調整力の創出はアグリゲータが個々の需要家に創出指令を配分し、需要家が自らの責任で DER を制御し、調整力を創出する。これは需要家の DER が外部からの不要な制御の防止、アグリゲータの調整力取りまとめノウハウ／需要家の DER の運転ノウハウを担保するための機能分担である。ただし、需要家は調整力の創出中、調整力の創出状態などをアグリゲータに報告するとともに、DER の本来の運用の都合で調整力の創出量が変動した場合は、自らの責任で調整力の創出精度を確保せねばならない。なお、DER は設備種別ごとに管理するエネルギー形態が異なるが、DER の調整力の創出能力、現在値及び、調整力創出制御に関する監視制御情報はそれぞれ図 8 のように共通に表記できる。

5

需要サイドの分散型電源による 配電系統の問題対策

5.1 再エネ増設による配電系統の問題と標準化

日本の配電システムの構成のイメージを図9に示す。配電システムは地域の電力供給の最末端に位置し、発電所からの特別高圧（7,000 V 超）の電力を高圧（600～7,000 V）に変換する配電用変電所を中心に、放射状に構成された配電線網である。配電システムでは高圧受電する需要家は配電用変電所から直接接続される高圧配電線に、低圧（600 V 以下）受電する需要家は高圧配電線から柱上変圧器を介して分岐する低圧配電線に接続される。また、

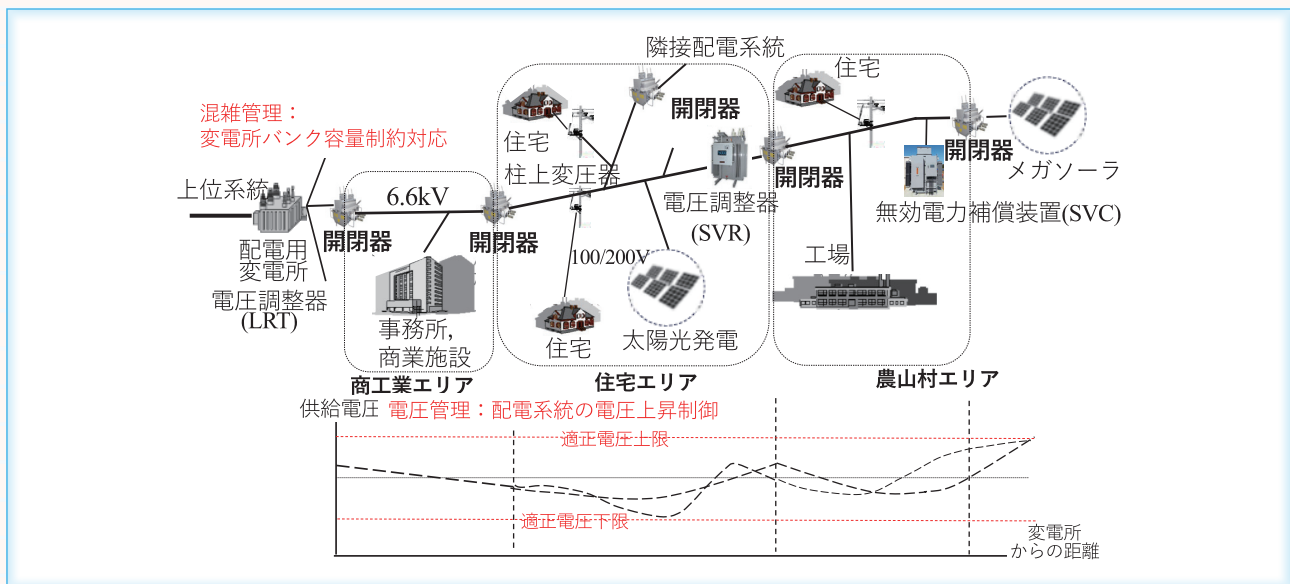


図9 日本の配電システムの構成のイメージ

表4 日本の再生可能エネルギー増設と配電系統の問題状況

	基幹系統	ローカル系統	配電系統			備考
			農山村エリア	住宅エリア	商工業エリア	
現状の再エネ増設状況	大規模再エネ設備（1MW以上）が系統に連系 送配電系統の増強、ノンファーム接続、再給電方式などが審議、制度化進行 対策費は連系協議により送配電事業者、再エネ事業者が分担		高圧系再エネ設備（50kW以上）、低圧系再エネ設備（50kW未満）導入割合ほぼ同じ 家庭用屋根置き太陽光発電（10kW未満）は導入補助と連系協議不要のため、導入拡大期待 低圧系再エネ設備一部（10kW未満）除きノンファーム接続移行 電力需要見通しに応じ送配電事業者負担で配電系統増強を実施			再エネは2010年から2020年で約10倍増加 従来、大規模設備割合多く、今後小形化
現状の混雑発生	送配電系統の空き容量により、再エネ出力制御を含め系統への連系を制御		低負荷期に発生 改修、出力制御	設備増改修などで、顕著な問題発生せず 再エネ増設で問題潜在化		発生時期、発生場所限定から、設備投資回収などから、需要家と連携が必須
現状の電圧上昇発生	—	ローカル系統の電圧上昇懸念あり	晴天、連休などの低負荷期に発生 調相設備、線路太線化 再エネの力率遠隔設定などグリッドコード見直し要			
今後の再エネ増設対策	系統増強、ノンファーム接続、再給電方式などで送配電系統運用		公平、経済的出力制御 余剰電力蓄電	需要家分散型電源の調整力をグリッドコード、市場取引で調達、運用		経済的な最適制御

配電系統は開閉器で区分され、工事、事故などの発生時に、停電区間が最小となるよう隣接配電系統と接続制御される。この配電系統の供給電圧などの電力品質は配電用変電所の負荷時タップ切換変圧器、系統上の自動電圧調整器、無効電力補償装置などの調相装置で制御されている。

現在、日本では旧電気事業者により多少の状況が異なるが、増設が進む再エネの80%以上がPVであり、その7~8割が配電系統に連系している。このため、再エネ増設による発電量の増加と、その季節などによる変化は配電系統の潮流を変化させ、配電系統の運用に影響を与え始めている。再エネ増設と問題発生状況を表4に示す。問題の発生傾向は配電系統の構成、供給エリアの電力需要、再エネの連系状態などにより異なるが、DSOの努

力により大きな問題となっていない。ただし、カーボンニュートラル実現には再エネの倍増が必要であることを考慮すると、配電系統の問題の発生は必然と考えられる。このため、DSOはセンサ付き開閉器、無効電力補償装置などの設備、配電自動化などのシステムの増改修を検討しているが、その投資回収などから、需要サイドのDERからの調整力の活用も選択肢の一つとなっている。

配電系統の問題対策には有効電力に加え、無効電力の調整力が必要である。現在、日本には配電系統の運用のための無効電力を取引する電力市場（Local Flexibility market）が存在せず、かつ無効電力を運用する分散型電源管理システム（DERMS: Distributed Energy Resource Management System）⁽⁹⁾が存在しない。ここでは、今後これらが整備されることを前提に検討する。

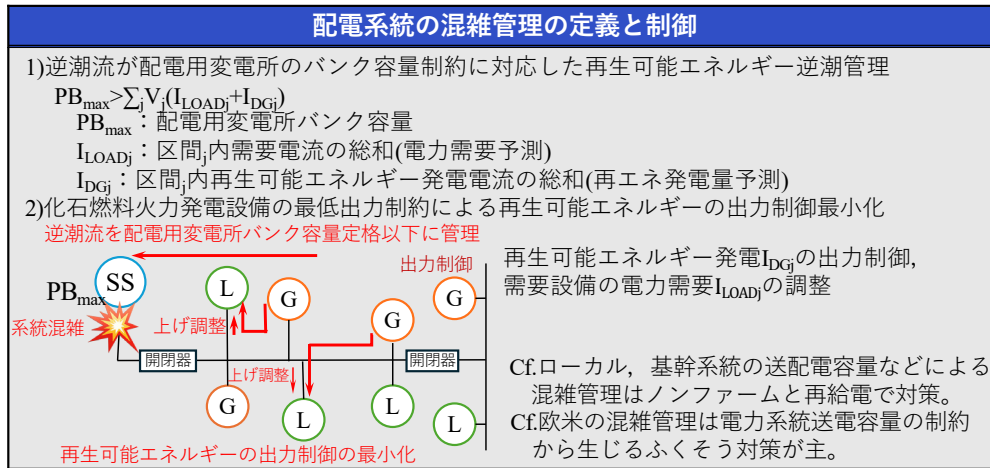


図 10 配電システムの混雑管理の定義と制御

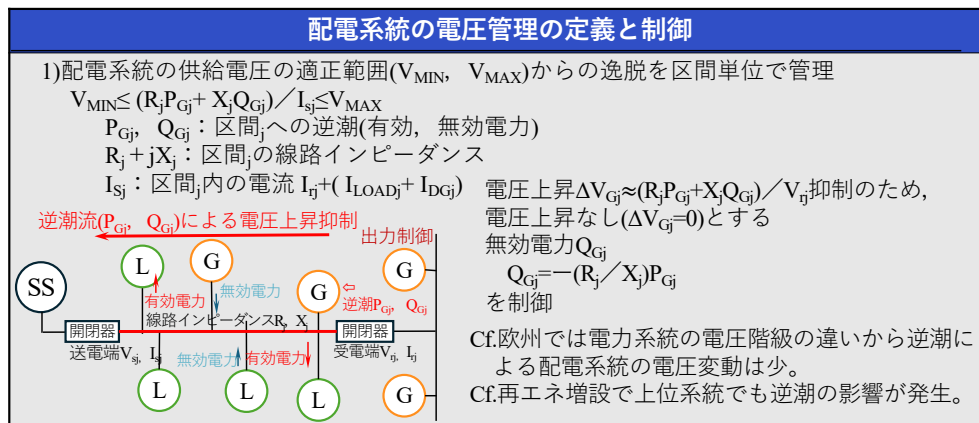


図 11 配電システムの電圧管理の定義と制御

5.2 配電システムの混雑管理の定義と制御

混雑管理は DSO が配電システムに連系する再エネ発電量、電力需要を予測し、これらによる配電用変電所バンク定格容量を超えた潮流による熱問題の発生回避のため、変電所に流入する潮流を変電所バンク定格容量以下に管理するものである。このため、DSO は電力市場を介し、蓄熱設備などの需要設備の電力需要の上げ調整、蓄電池などへの蓄電から創出される有効電力から成る調整力の調達、運用などを行うこととなる。混雑管理の定義と制御を図 10 に示す。混雑管理は調整力の調達、運用に関わる費用と変電所の増改修費用の見合いで実施される変電所の増改修により問題が解消され、その必要はなくなる。将来的に、これは配電用変電所単位の潮流管理による電力の過不足の配電系統間での融通につながり、再エネ電力の最大利用に通じる。

5.3 配電システムの電圧管理の定義と制御

電圧管理は DSO が配電システムの潮流と線路インピーダ

ンスにより生じる供給電圧の適正範囲からの逸脱を予測し、その適正化を図るものである。DER の調整力の使用は DSO 自らが所有する調相設備などの制御に対し、電力市場を介した DER の調整力の調達、運用に経済合理性がある場合に実施される。使用される調整力には電圧の制御性から無効電力を主に、有効電力が含まれる。また、使用される DER は問題の発生する配電システムに連系する力率制御などにより、無効電力の創出が可能な PV、蓄電池のパワコンなど、電力需要の上げ調整により有効電力の吸収が可能な空調機などの需要設備である。電圧管理の定義と制御を図 11 に示す。

電圧管理は、再エネ増設により配電線路に逆潮が生じる限り対策せねばならない供給電圧の制御である。

5.4 分散型電源による配電系統の問題対策の標準化

再エネ増設により配電システムに生じる問題は、混雑管理では特定の配電用変電所下の配電線路、電圧管理では配電系統の特定の開閉器で区分される区間であり、それぞ

表5 配電系統の問題対策の機能と授受情報

	制御の流れ	機能概要	共有／授受情報		特記事項
			配電事業者	アグリゲータ	
1	【情報登録】 配電系統、DER 情報登録 (情報共有 PF、電力市場)	配電事業者は配電系統、需要想定、再エネの増設見通し、アグリゲータ／需要家は 市場登録情報 (調整力取引対象 DER／調整力創出定格、制御方式、供給地点特定番号など)を登録	標準系統 、年間需要想定、再エネ発電予測情報(アグリゲータが調整力需要予測)	DER の 市場登録情報 (市場登録グループ調整力種別、定格値、取引単位、制御方式、供給地点特定番号)	配電事業者、アグリゲータ／需要家の現配電系統構成、運用は未公開。DER 連系位置は配電事業者付与供給地点特定番号
2	【系統情報】 調整力調達 必要量提示 (調整力募集)	配電事業者は配電系統の問題発生予測と対策が必要な場所にある DER (調達グループ) への調整力の 電氣的／経済的調達要件 を提示	タイムスロットごと 調達必要情報 (調達グループの調整力種別、募集量、想定調達価格)	—	配電事業者の潮流管理情報は未公開、系統の問題発生場所、調整力必要量情報を公開
3	【電源情報】 調整力創出 可能量提示	アグリゲータ／需要家は調整力の募集に DER (調達グループ) の調整力を集約し、調整力の 提供可能量 などの情報提示	—	タイムスロットごと 提供可能情報 (調達グループの種別ごと提供可能量)	アグリゲータ／需要家は DER の調整力取引を DER グループ単位で実施
4	【市場取引】 調整力取引	調整力の提供対象 DER (入札グループ) による入札	調整力の 入札 DER (入札グループ) と 入札仕様 、約定結果共有	—	調達場所特定は市場で異なることを許容
5	【運用仕様】 系統運用 仕様決定	配電事業者は問題対策に必要な調整力の創出対象 DER (運用グループ) への調整力の創出指令情報を作成、指示	調整力創出対象 DER の 運用仕様 (グループの調整力創出指令情報)	—	DER グループ一括、個別制御設定選択可 力率設定時、DER 現出力量が要
6	【創出指令】 調整力の創出 制御	配電事業者は調整力の創出をアグリゲータ経由間接、自ら DERMS により直接制御	(運用グループからの調整力の創出制御自体はここでの対象外)	—	調整力創出は運用グループ、タイムスロットに従い実行
7/8	【情報更新】 更新、精算	配電事業者、アグリゲータ／需要家は制御 3~6 繰返し、精算	創出済み調整力の計量情報	調整力価格	精算は取引ごと、特定期間ごとに実施

れの場所に連系する DER が対象となる。しかし、アグリゲータは工事、事故などの対応で日々、構成が変わる配電系統の実構成の把握が不可能なため、対策が必要な配電系統の場所、そこに連系する DER の特定ができない。この対応として、DSO が DER に事前に配電系統との連系位置の識別情報(国内では供給地点特定番号)を付与し、これをアグリゲータと共有することで、アグリゲータが調整力の提供が可能な DER の配電系統の存在位置を DSO が把握でき、更に、DSO は対策に必要な配電系統の場所に連系する DER のグループをアグリゲータに指示することができる。

配電系統の問題対策の標準化の特徴は、DER のグループ管理をベースとする DER の調整力の配電系統の場所に対応した調達、運用である。更に、将来、膨大な数の DER を制御対象とするため、DER グループ管理は制御システムの実装、運用の効率化に寄与する。

DER グループ管理による配電系統の問題対策の機能と、これを実現する授受情報を表5に示す。ここでは日本の需給調整市場と同様に、アグリゲータが事前取引対象となる DER を市場登録する。DSO はこれを配電系統にひも付け、配電系統の問題発生予測に基づき対策が必要な場所に対応する DER グループに対し調整力を

募集、アグリゲータがこれに応える。ただし、再エネの潮流変化速度が速いため、このやり取りは「分オーダー」で行われることが想定される。更に3~5分程度のタイムスロットで市場取引が行われ、実需時に系統運用に必要な調整力の運用がグループ単位で行われるものとしている。この調整力の運用には DER を一括管理する DERMS の使用が選択肢としてある。

6 おわりに

再エネが主力電源化されるとき、電力の安定供給を図るには DER の調整力の活用、再エネの電力蓄積などが必要である。今後の技術開発と法制度の整備により、社会便益の最大化が図られる電力システムが実現されるものと考えられる。ここではその一つの形態を提案した。

■ 文献

- (1) IPCC, “AR6 synthesis report: Climate change 2023.” <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>
- (2) The 21th Session of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change. <http://www.cop21.gouv.fr/en>

- (3) Global carbon project, “Global carbon budget 2022,” Nov. 2022. https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/22/files/GCP_CarbonBudget_2022.pdf
- (4) Copernicus climate change service, “The 2024 european state of the climate report.” <https://climate.copernicus.eu/>
- (5) 経済産業省, “第7次エネルギー基本計画について.” https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/
- (6) 経済産業省, “再生可能エネルギー FIT・FIP 制度ガイドブック.” https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/data/kaitori/2024_fit_fip_guidebook.pdf
- (7) European Commission, “Horizon 2020.” https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-2020_en
- (8) 電気学会電気規格調査会, “JEC 規格 電気学会テクニカルレポート JEC-TR59006 需要家電力資源のフレキシビリティのアグリゲーションによるエネルギーサービスに関する標準仕様.” <https://restservice.epri.com/publicdownload/000000003002014468/0/Product>

小林延久

1979 東北大学大学院工学研究科修士課程了。同年日立製作所に入社, 交通システム, 電力システム, 需要家エネルギー管理サービスなどの開発設計, 事業運営を担当。2016 早大先進グリッド技術研究所主任研究員, 研究院講師及び産業技術総合研究所招聘研究員を兼任, 2025 電力中央研究所客員研究員。



カーボンニュートラル実現に向けた政策動向及び標準化

今井 毅 Takeshi Imai 三菱電機

1 はじめに

気候変動問題への対策の一つとして、カーボンニュートラル（CN: Carbon Neutral）実現に向け各国で様々な取組みが進められている。我が国でも 2021 年 10 月に「2050 年カーボンニュートラル実現」に向け、2030 年度の温室効果ガス（GHG）排出量を 46 %削減することが閣議決定された。また、2025 年 2 月の第 7 次エネルギー基本計画⁽¹⁾では、2040 年度の温室効果ガス 73 %削減目標が掲げられている。この目標を達成するためには、非化石電源である再生可能エネルギー（以下、再エネ）の導入拡大が必須となる。再エネの導入拡大のためには、様々な課題を解決する必要がある。

本稿では、カーボンニュートラル実現に向けた国内外の政策動向や標準化動向について述べる。

2 国内動向

2.1 日本の目標

我が国では関係省庁により、カーボンニュートラル実現のための再エネ増設の具体的な目標が設定されている。2021 年 10 月の「第 6 次エネルギー基本計画」では、再エネを主力電源として最大限の導入に取り組むことが掲げられている⁽²⁾。2030 年に再エネ発電電力量を 3・300～3・500 億 kWh（電源構成比率 36～38 %）に向け、太陽光発電の設備容量を 2021 年比で約 1.7 倍とすることが必要である。また、2050 年のカーボンニュートラル実現に向け、2025 年 2 月に閣議決定された「第 7 次エネルギー基本計画」では、第 6 次エネルギー基本計画策定（2021 年）以降の状況変化を踏まえ、エネルギー安定供給や脱炭素化に向けたエネルギー構造の転換、経済成長につなげるための産業政策が強化され、再エネの主力電源化に向けた計画が掲げられている。

これらの目標実現に向け、ノンファーム接続、再給

電、N-1 電制（単一設備故障発生時に瞬時に発電を制限することで、平常時に運用容量を超える送電電力を許容する方式）、同時市場などの施策が進められている。また、再エネ増設時の電力システム全体の需給バランス確保のため、再エネの出力制御のあり方や系統連系要件の審議が実施されている。

しかし、今後の配電系統へ太陽光発電等の変動性再エネが大量に設置されることで、必要と考えられる配電系統の混雑管理や電圧管理に関する政策審議は緒についた段階である。

2.2 再生可能エネルギーの主力電源化の取組み

経済産業省（以下、経産省）では、国民負担の抑制と地域との共生を図りながら、安全性（Safety）を大前提とし、自給率（Energy Security）、経済効率性（Economic Efficiency）、環境適合（Environment）を同時達成するべく「S+3E」を前提に各種の取組みが進められている。

2023 年 4 月に「再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議」が開催され、再エネの導入拡大に向けた関係府省庁連携アクションプランが策定された⁽³⁾。また、再エネ大量導入とレジリエンス強化に向けた「広域系統長期方針（広域連系系統のマスタープラン）」を 2023 年 3 月に策定、2023 年 4 月からローカル系統におけるノンファーム型接続が開始された⁽⁴⁾。脱炭素社会の実現に向けた電気供給体制の確立を図るため、電気事業法等の一部を改正する「GX 脱炭素電源法」が 2023 年 5 月に成立した。

2.3 審議会／委員会等の概況

カーボンニュートラル実現に向けた再エネ主力電源化に向け、様々な課題解決のための検討を行っている審議会、研究会等の概況を表 1 に示す。

表 1 経済産業省、OCCTO におけるカーボンニュートラル実現に関する政策審議状況

審議体名	審議事項と目標	審議状況／結果	対象		
			送電系統	配電系統	需要家 電力資源
GX実行会議	クリーンエネルギー移行のための変革（GX）	GX2040ビジョン、エネルギー基本計画、地球温暖化対策計画に向けた検討を実施。	○	－	△
総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会	エネルギー政策に関する政策提案	GX推進法、脱炭素源法の実行に必要な脱炭素電源への転換などの今後のエネルギー政策に向けた検討。	○	－	○
電力・ガス基本政策分科会 再エネ大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会	エネルギー基本計画を踏まえ、系統新・増設、既存系統の有効活用を検討。透明性、公平性の確保。	系統混雑緩和のためノンファーム型接続全国展開。2021年1月空き容量無い基幹系統、2022年度末ローカル系統受付開始。先着優先からメリットオーダーへの転換政策として再給電方式を2022年開始。再生可能エネルギーの主力電源化に向けた検討。	○	△	－
電力・ガス基本政策分科会 系統ワーキング	接続可能量算定及び出力制御の公平性確保ルール整備	系統制約による出力制御見通しと対策（新設火力最低出力引き下げ）、系統蓄電池による混雑解消などを審議、提案。	○	－	△
OCCTO グリッドコード検討会	再エネ大量導入に対応するグリッドコード検討、一般送配電事業者の「系統連系技術要件」の個別技術要件整備、他規定整合。	電源、蓄電、需要設備など個別要件検討。フェーズ2(2024年3月)検討を終了。フェーズ2'として蓄電池の導入状況や最新の知見を踏まえ、2030年を待たずに要件化が必要と考えられるものについて審議中。	○	－	△

2.3.1 GX 実行会議

再エネの導入拡大に伴い、蓄電池等の活用や、需給ひっ迫時等に適切な電力融通等を可能とする柔軟な電力システムを構築する必要がある。2022年8月のGX実行会議で、定置用蓄電池の導入促進と電力系統整備方針が示された。2024年7月及び8月にGX2040リーダーズパネルが開催され、目標に向けた様々な取組みが検討された。これらの取組みは、GX2040ビジョンや第7次エネルギー基本計画と整合を取って推進される。

2.3.2 総合資源エネルギー調査会基本政策分科会

経産省の「総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会」では、エネルギー政策をめぐる動向を踏まえて議論が行われている。2022年9月に、エネルギー安定供給の再構築に向けた取組み項目における対応及び中長期の対応方針が示された⁽⁵⁾。エネルギー自給率の向上を図りながら、脱炭素とエネルギー安定供給の両立に向けた取組みを加速させていくための具体的な方策の検討が進められている。2040年度エネルギーミックスに向けた検討の方向性について、有識者ヒアリング等を行い実現シナリオの検討が進められている。また、持続可能な電力システム構築小委員会では、2022年1月に「第三次中間取りまとめ」⁽⁶⁾が策定された。

2.3.3 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

資源エネルギー庁（以下、エネ庁）の「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」では、再エネの大量導入とそれを支える次世代電力ネット

ワークの在り方について検討が進められており、ローカル系統へのノンファーム接続、脱炭素型の調整力（揚水・系統用蓄電池）等について方向性が示された⁽⁷⁾。また、将来の市場主導型の導入等に向け、電力系統の準備を整えた上で、混雑発生時に市場の入札情報などを基に混雑処理を行うノードル制の検討の必要性も示された⁽⁸⁾。2024年11月の本委員会において、「再エネ主力電源化アクションプラン（案）」⁽⁹⁾が示された。

2.3.4 次世代の分散型電力システムに関する検討会

経産省の「次世代の分散型電力システムに関する検討会」では、分散型リソースの価値発掘、価値評価、補完共存した分散型システムの構築について、一般送配電事業者、アグリゲータの取組みや分散型リソース活用における国内外の課題の確認と詳細検討が進められている。需給調整市場における機器個別計測、低圧リソースの活用について、2026年度の開始を目指して検討が進められている⁽¹⁰⁾。

2.3.5 新エネルギー小委員会 電力・ガス事業分科会電力・ガス基本政策小委員会系統ワーキンググループ

経産省の「新エネルギー小委員会 電力・ガス事業分科会電力・ガス基本政策小委員会系統ワーキンググループ」では、再エネの接続可能量の算定及び出力制御の公平性確保ルールの整備について検討が進められている。再エネ出力制御の抑制に向けた取組みとして、新たな「出力制御対策パッケージ」が2023年12月に取りまとめられ、系統増強等により、再エネ導入拡大やレジリ

表 2 グリッドコード検討会でフェーズ分けされた課題

フェーズ	時期	項目
フェーズ1	2023年4月要件化完了	早急に対策が必要と考えられる要件 適切な出力制御、需給変動・周波数変動への対応、電圧変動への対応等
フェーズ2	2030年4月要件化予定	再エネ(発電電力量)導入比率36～38%程度を想定し、適切な出力制御や変動対策などに貢献する要件
フェーズ2'	2030年前に要件化	蓄電池の導入状況や最新の知見を踏まえ、2030年を待たずに要件化が必要と考えられるもの
フェーズ3	2030年前後に要件化	再エネ比率50～60%程度を想定し、調整力・慣性や系統の保護・制御に貢献すると考えられるため、2030年前後に要件化するもの
フェーズ4	検討時期を設定する	カーボンニュートラル実現に向け、要件化時期は決めないものの、新規技術や新制度なども意識した主に小容量火力や高低圧に関して要件化するもの

表 3 グリッドコードに関係する国内外の政策及び市場動向

	対象	国内関係審議会	国内 Grid Code (系統連系要件)	欧州 Electricity network codes	米国 Grid Code
方針・戦略 制度・規制	再エネ導入 電力市場	GX実行会議(クリーンエネルギー移行) 2050年カーボンニュートラルを見据えた次世代エネルギー需給構造検討小委員会*(クリーンエネルギー戦略) 基本政策分科会*(第7次エネルギー基本計画) 電力・ガス基本政策小委員会*、制度検討作業部会(小売事業者、電力ネットワーク次世代化資金支援、出力抑制、容量市場、ベースロード市場)	電気設備に関する技術基準を定める省令	<Clean energy package> EU Directive 2001 (Renewable energy, 2018) EU Directive 944 & EU Regulation 943 (Market rules, 2019)	FERC Order NERC Standards
HV 500kV 275kV	【大規模電源】 火力、水力、原子力発電 広域連携(HVDC) 【需要家資源】 データセンター	再エネ大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会*(海底直流送電、ノンファーム型接続) 水素・アンモニア政策小委員会/資源・燃料分科会*(水素基本戦略) OCCTO広域系統整備委員会(広域連携) OCCTOグリッドコード検討会(フェーズ1 再エネ対応)	送配電等業務指針(OCCTO)	EU Regulation 631 RfG (grid connection of generators, 2016) EU Regulation 1447 HVDC (2016)	FERC Order, NERC Standards (発電設備接続)
MV 154kV 77, 66kV 33, 22kV	大規模PV、Wind、蓄電池 【需要家資源】 ビル、工場 CHP(コジェネ) Heat Pump(空調、蓄熱) 充電ステーション	系統ワーキンググループ(出力抑制、コネクト&マージ、系統用蓄電池) 局地的電力需要増加と送配電ネットワークに関する研究会(データセンター、EV充電) OCCTO広域系統整備委員会(ノンファーム型接続、再給電方式) OCCTOグリッドコード検討会(フェーズ1, 2, 3, 4)	電力品質確保に係る系統連系技術要件ガイドライン(特別高圧)	EU Regulation 631 RfG (grid connection of generators, 2016) EU Regulation 1388 DC (Demand Connection, 2016) EN 50549-2	IEEE P2800
LV 6.6kV 110V	【需要家資源】 一般家庭 PV、蓄電池、燃料電池、給湯器、空調、照明、EV	次世代の分散型電力システムに関する検討会(機器個別計量、低圧リソース)、EVグリッドWG OCCTOグリッドコード検討会(フェーズ2'、3、4)	電力品質確保に係る系統連系技術要件ガイドライン(高圧、低圧)	EU Regulation 631 拡張中(V2G) EU Regulation 1388 拡張中(V1G, Heat Pump) EN 50549-1	IEEE 1547

電圧階級区分 海外もほぼ同じ * 経済産業省 総合資源エネルギー調査会

エンス強化を行う対策が検討された⁽¹¹⁾。本委員会では、引き続き、再エネ出力制御の実施状況・課題と新たな「再エネ出力制御対策パッケージ」の進捗について確認が行われている⁽¹²⁾。

2.3.6 グリッドコード検討会

電力広域的運営推進機関(OCCTO: Organization for Cross-regional Coordination of Transmission Operators)の「グリッドコード検討会」では、系統連系技術要件に対応した具体的な個別技術要件の検討を進めており、再エネを大量導入するために必要となるグリッドコードの整備を目的として、表2に示すフェーズ分けされた課題に対応して段階的な検討が進められている。

フェーズ2までの検討は終了し、第18回検討会ではフェーズ分けの見直しが行われ、2030年を待たずに要件化が必要と考えられるものが「フェーズ2'」として

新たに設定された⁽¹³⁾。グリッドコードに関係する国内審議会と海外の取組みの対応を表3に示す。

2.3.7 局地的電力需要増加と送配電ネットワークに関する研究会

2024年3月に電力・ガス取引監視等委員会の研究会として設置された「局地的電力需要増加と送配電ネットワークに関する研究会」では、送配電ネットワークが局地的需要増加を機動的かつ円滑に受け入れるための課題や方策を整理すべく検討が行われた。2024年6月に「局地的電力需要増加と送配電ネットワークに関する研究会報告書」がまとめられた⁽¹⁴⁾。この中で、今後検討を深めることが考えられる事項として下記が報告されている。

① 託送料金制度

- ・新たな時間帯別託送料金の導入の是非(2028年度以降)

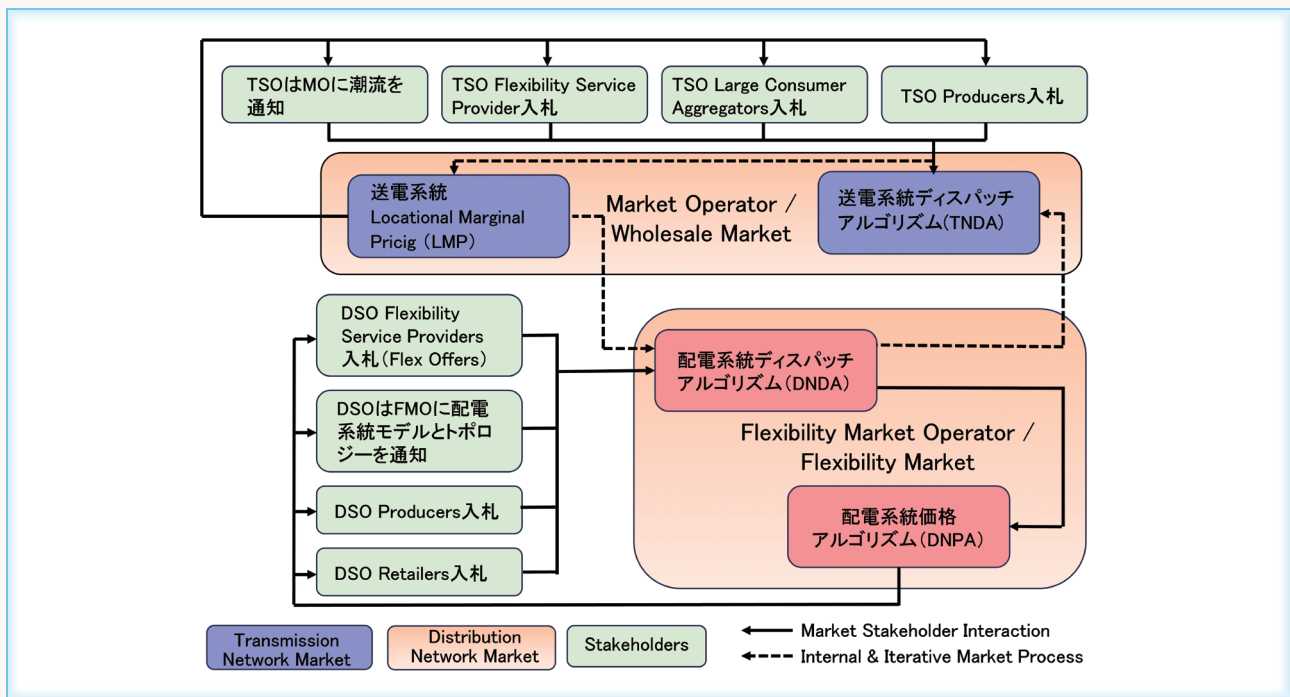


図 1 FLEXGRID システム構成

- ・脱炭素電源地域への需要立地インセンティブ
- ② リソースのコントロール
 - ・遠隔制御が実施可能な仕組み・環境の検討
 - ・需給調整市場等への低圧リソースの参入
 - ・潮流制御用 DR 等の活用
- ③ 迅速な接続が可能な地点への誘導
 - ・ウェルカムゾーンマップの開示
 - ・一般送配電事業者とユーザ・誘致主体の連携
- ④ 計画的な送配電ネットワーク整備
 - ・事業計画策定時のステークホルダーとの協議
 - ・プッシュ型送電線整備の託送料金審査上の整理
- ⑤ 新規需要の接続による影響緩和
 - ・電圧変動対策、実証事業支援、調相設備設置支援等

3 海外動向

3.1 欧州の動向

欧州では PV（太陽光発電）や風力発電等の再エネ導入が進んでおり、需要家側の電力資源を活用したフレキシビリティの利用に関する技術開発、システム構築、関連する国際標準化の取組みも欧米が先行している。

アグリゲータ、送配電事業者、及び電力市場の連携に関しては USEF（Universal Smart Energy Framework）⁽¹⁵⁾、アグリゲータと電力資源を提供する需要との連携に関しては OS4ES（Open System for Energy Services）プロジェクトが共通の情報モデル・通信インタフェース仕様を作成し、欧州の調整力

（Flexibility）の管理のための標準としてまとめられた、USEF では配電システムの混雑管理のために、配電システム運用者（DSO）とアグリゲータの間での Flexibility 取引市場が提案されている⁽¹⁶⁾。

配電システムの混雑管理のため、欧州では Piclo Flex（英国）、NODES（北欧）、豪州では deX などの Local Flexibility Market が導入、運用されている。Piclo Flex は配電システム運用者、VPP アグリゲータ、蓄電池／EV 事業者などが取引を行うためのプラットフォームを提供しており、英国だけでなく欧州や北米にも展開している⁽¹⁷⁾。

欧州の Horizon 2020 プロジェクトでは、今後の電力システムとして、卸電力市場、Local Flexibility Market、TSO（Transmission System Operator、送電システム運用者）、DSO（Distribution System Operator、配電システム運用者）、アグリゲータを統合・最適化したシステムの開発・実証が行われている。代表的なプロジェクトとして、NODES をベースにした統合電力市場の実証プロジェクトである FLEXGRID が進められている⁽¹⁸⁾。FLEXGRID のシステム構成を図 1 に示す。FLEXGRID は、以下を目的としている。

- ① エネルギー市場と送電網運用の間の相互作用改善
- ② DSO と TSO がフレキシビリティを利用して設備投資を削減するためのメカニズム改善
- ③ スマートグリッド・エコシステムの利害関係者のための持続可能なビジネスモデルの調査
- ④ エネルギー部門の利害関係者のエネルギーサービ

ス取引、動的な相互運用の促進

このシステムは、卸電力市場、系統運用、配電市場 (Local Flexibility Market), 配電運用に対して Flexibility を最適に運用し、需要家にも満足を与える最適な電力システムを目指している。また、卸電力市場、配電市場は自動化されたリアルタイム市場とし、送配電系統と Flexibility の提供状況に応じた送配電系統の地点ごとに価格を決めるものとしている。FLEXGRID の実現のためには制度などの大幅な変更が必要であるが、ENTSO-E や欧州委員会などで検討された将来の電力システムの姿を具体的に示すものとなっている。

3.2 米国の動向

米国の再エネ導入については、風力発電及び太陽光発電が目覚ましい伸びを示している。2016 年の再エネの内訳は、風力発電が発電設備容量で 61 %, 発電電力量で 63 % と圧倒的シェアを占め、2020 年における風力発電設備容量は 122 GW に達した。太陽光及び太陽熱発電は、再エネの中のシェアが 2016 年にそれぞれ 26 %, 15 % を占めており、2020 年の太陽光発電設備量は 95 GW に達した。再エネ促進支援策として、連邦レベルでは発電電力量に応じて連邦法人税が控除される発電税額控除や、投資額の一定比率が連邦法人税から控除される投資税額控除などの優遇税制が挙げられる。

州レベルでは、供給電力の一定割合を再エネ電力で賄うことを義務付ける「再生可能エネルギー利用割合基準制度」(RPS: Renewable Portfolio Standard) が再エネの利用拡大に貢献している。州レベルのもう一つの主

要支援策として、家庭や企業の再エネの自家発電余剰電力を、電気事業者が小売料金の価格で買い取るネットメータリング制度がある。本制度は 2017 年 11 月時点で、38 州及びワシントン D.C. で導入され、太陽電池パネルの価格低下と相まって、住宅の屋根置き太陽光発電の設置増大に寄与している。

しかし、再エネ自家発電の急激な増大により、電気事業者側に配電費用の回収不足や売上げ減少等の問題が顕在化してきたため、一部の州で余剰電力の買取価格の引下げや再エネ自家発電需要家向けの基本料金の引上げが実施されている。

4 標準化動向

再エネの大量導入に伴い、配電系統への影響が想定されるため、ここでは配電系統や需要家側に関連する IEC 規格について述べる。配電系統に関連する IEC 規格を図 2 に示す。

IEC TC57 (Power systems management and associated information exchange) は、発電/系統運用/電力市場、送電/配電に対応する規格策定を進めている。WG13 では、系統運用のための規格として IEC 61970 (EMS-API: Energy Management System-Application Program Interface) を策定している。WG14 では、配電管理システムのための IEC 61968 (Application integration at electric utilities -System interfaces for distribution management) を策定した。WG10 は、送電・配電における変電所自動化システム

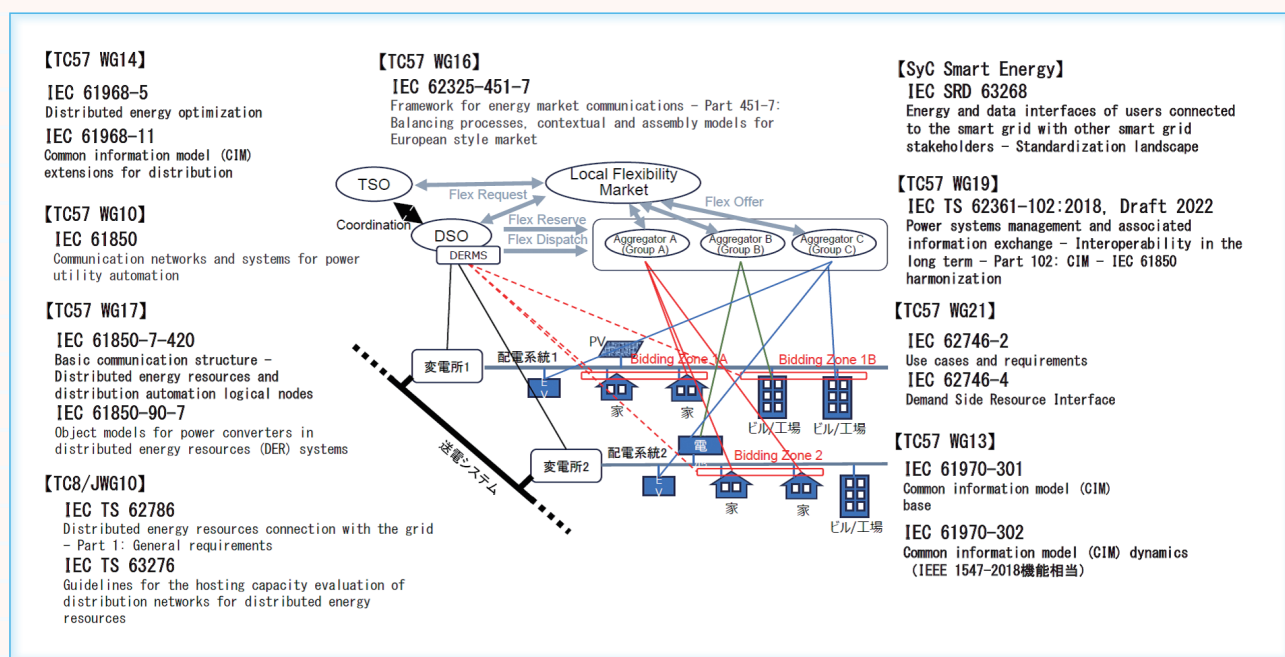


図 2 分散型電源のグループ管理による配電系統の混雑、電圧管理に関する IEC 標準

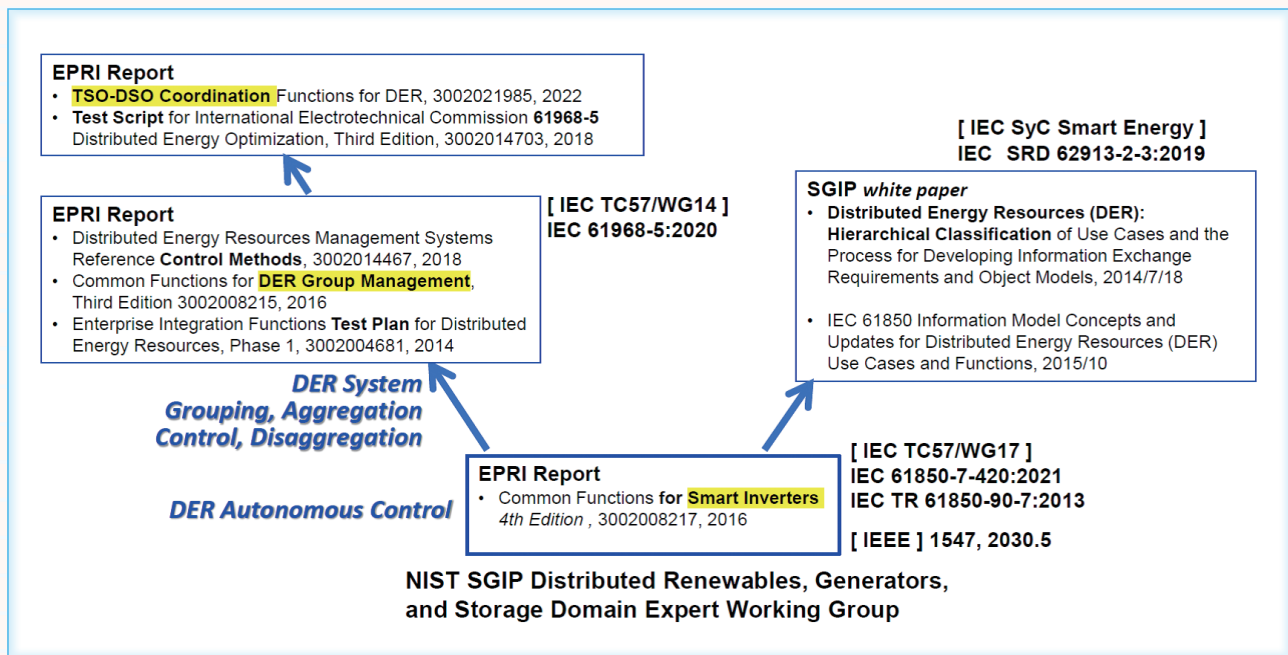


図3 Smart Inverter, DERMS に関する米国の活動状況

のための IEC 61850 (Communication networks and systems for power utility automation) を策定している。WG16 は、市場取引関連の規格である IEC 62325 (Framework for energy market communications) を策定している。WG21 は、系統側と需要家側のエネルギーマネジメントシステムとのインタフェースを定めた IEC 62746 (Systems interface between customer energy management system and the power management system) を策定しており、2024 年 12 月に需要家側との CIM プロファイルを規定した IEC 62746-4:2024 が発行された。

システム全体に関連するものとして、WG19 は相互運用性に関連する規格の策定を進めており、IEC TS 62361-102:2018 (Power systems management and associated information exchange-Interoperability in the long term-Part 102: CIM-IEC 61850 harmonization) を策定した。また、IEC SyC Smart Energy は、スマートグリッドに接続しているステークホルダー間のインタフェースをまとめた IEC SRD 63268:2020 (Energy and data interfaces of users connected to the smart grid with other smart grid stakeholders-Standardization landscape) を策定した。

図3に米国の取組みと関連する IEC 規格の関係を示す。

配電システムの高度化については、2016 年 12 月に米国 EPRI (Electric Power Research Institute) が“Common Functions for Smart Inverters”を発行し、2018 年 12 月に“Distributed Energy Resources

Management Systems Reference Control Methods”を発行した。本 EPRI レポートは、DERMS (Distributed Energy Resource Management System) が、DER (Distributed Energy Resource) 及び複数 DER のグループ制御を行う制御方法について記載されている。本仕様をベースに分散型エネルギーの最適化を行う規格として、IEC 61968-5 (Application integration at electric utilities-System interfaces for distribution management-Part 5: Distributed energy optimization) が 2020 年 8 月に発行された。

また、IEEE ではスマートインバータの仕様として IEEE 1547 (IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces) が策定された。本仕様をベースに、TC57 WG17 では IEC 61850 の論理ノードを分散電源に拡張した IEC 61850-7-420 を策定した。IEC TR 61850-90-7 は、インバータ機能を有する DER (太陽光発電システム、蓄電池システム、EV 充電システムなど) の機能が記載されている。そのほか、Smart Energy Profile 2.0 (SEP2.0) と呼ばれるスマートデバイスとグリッド間の通信を定義する規格として IEEE 2030.5 を策定した。

5

おわりに

2050 年のカーボンニュートラル実現に向け、国内外の政策動向や市場動向について示した。国内ではローカル系統までの検討が進められているが、配電系統への再

エネの大量導入拡大に伴い配電系統での対策の必要性が高まりつつある。今後、配電系統における課題解決のため、需要家電力資源の調整力活用の必要性が増し、国内外の政策動向やフレキシビリティ活用の先進事例も考慮した技術検討や標準化の重要性が高まると考える。

謝辞 本研究は、電気学会「スマートグリッドの電気事業者・需要家間エネルギーサービス技術調査専門委員会」委員各位の御協力と経済産業省の国際標準化事業の御支援によるものである。関係各位に感謝致します。

文献

- (1) 資源エネルギー庁, “第7次エネルギー基本計画,” 2025年2月18日.
- (2) 資源エネルギー庁, “第6次エネルギー基本計画,” 2021年10月18日.
- (3) 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議, “「GX実現に向けた基本方針」を踏まえた再生可能エネルギーの導入拡大に向けた関係府省庁連携アクションプラン,” 2023年4月4日.
- (4) 電力広域的運営推進機関, “広域系統長期方針（広域連系系統のマスタープラン）,” 2023年3月.
- (5) 資源エネルギー庁, “エネルギーの安定供給の再構築,” 2022年9月28日.
- (6) 資源エネルギー庁, “総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 持続可能な電力システム構築小委員会第三次中間取りまとめ,” 2022年1月.
- (7) 資源エネルギー庁, “次期エネルギー基本計画の策定に向けたこれまでの議論の整理（再生可能エネルギー関係）,” 2024年11月28日.
- (8) 資源エネルギー庁, “電力ネットワークの次世代化に向けた中間とりまとめ,” 2021年9月.
- (9) 経済産業省, “再エネ主力電源化アクションプラン（案）,” 2024年11月28日.
- (10) 資源エネルギー庁, “需給調整市場について,” 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力・ガス基本政策小委員会 制度検討作業部会（第75回）, 2023年1月27日.
- (11) 資源エネルギー庁, “再生可能エネルギーの出力制御

の抑制に向けた取組等について,” 新エネルギー小委員会 電力・ガス基本政策分科会 系統ワーキンググループ, 2023年12月6日.

- (12) 資源エネルギー庁, “再生可能エネルギーの出力制御の抑制に向けた取組等について,” 新エネルギー小委員会 電力・ガス基本政策分科会 系統ワーキンググループ, 2024年5月24日.
- (13) 電力広域的運営推進機関, “2025年度以降の要件化候補～フェーズ分類の考え方～,” グリッドコード検討会, 2024年11月7日.
- (14) 資源エネルギー庁, “局地的電力需要増加と送配電ネットワークに関する研究会報告書,” 局地的電力需要増加と送配電ネットワークに関する研究会, 2024年6月.
- (15) USEF, “THE FRAMEWORK EXPLAINED,” 2021年5月25日.
- (16) USEF, “USEF Flexibility Trading Protocol Specifications,” (Revision 1.01), 2020年1月28日.
- (17) Piclo Flex, <https://picloflex.com/>
- (18) FLEXGRID, “The overall FLEXGRID architecture design, high-level model and system specifications,”

今井 毅

三菱電機株式会社知的財産センター 知財戦略部. 1985-04 三菱電機株式会社入社. 通信システムの研究・開発. 2010 からスマートグリッドの標準化に従事.



ECHONET Lite 及び ECHONET Lite Web API のエネルギー分野での活用

佐方 連 Ren Sakata (株) 東芝

1 はじめに

近年、地球温暖化防止やエネルギー安全保障が社会課題となっており、これらに対応する日本のエネルギー政策として政府は2025年2月に第7次エネルギー基本計画を閣議決定した⁽¹⁾。この計画の中では、再生可能エネルギーや原子力を最大限導入・活用して、脱炭素とエネルギー安全保障を図ること、特定の電源や燃料源に過度に依存しないようバランスの取れた電源構成を目指すことやZEH (Net Zero Energy House)⁽²⁾ 基準の住宅の推進などを掲げている。

これらの中でも、特に、DR (Demand Response) に関する記述は興味深い。一部の再生可能エネルギーは、例えば太陽光発電であれば日射量に、風力発電であれば天候により発電量が左右され、電力供給量の変動する。すると需要との差異が生じて電力ネットワークの安定性が損なわれる。この対策として、家庭など需要家側に置かれた蓄電池等を調整力として用い、電力供給が不足した場合は放電、過多の場合は充電する働きをさせることをDRと呼び、第7次エネルギー基本計画でも触れられている。このように電力を蓄え、放出することが可能な、家庭等に置かれた蓄電池、ヒートポンプ給湯機、コージェネレーションやEVなどの機器・設備はDER (Distributed Energy Resources) と呼ばれる。DRとは、通信ネットワークを介して外部から指示を与えてDERを遠隔操作するなどの手段により、需要家側の機器・設備を調整力として働かせることを言う。また、DER機器がDRに対応可能となった状態を「DRready」と呼ぶ⁽³⁾。第7次エネルギー基本計画の中では、各家庭にある膨大な数のDERをDRready化することや、それらを用いたDRの実証を行うと述べている。また「RA (Resource Aggregator)」と呼ばれる事業者が大規模な調整力を供出するために、多数のDER機器を束ねて制御するアグリゲーションビジネスも促進

するとしている。

一方、一般社団法人エコーネットコンソーシアムはこれまで、家庭内のセンサ類、白物家電、設備系機器など省リソースの機器をIoT化し、エネルギーマネジメントやリモートメンテナンスなどのサービスを実現するため、「ECHONET Lite⁽⁴⁾」と呼ばれる通信規格を定めてきた。ECHONET Liteは、通信仕様や各機器の制御コマンドを共通化することで、マルチベンダ環境でのシステム構築の実現を目指している。現在、スマートメータ、エアコン、ヒートポンプ給湯機、そして蓄電池など数多くの機器に搭載されている。更にインターネットなどに代表されるようなサイバー空間における取組みとして、DRなどのためにサービス事業者がインターネットを経由して家庭内の機器を制御する「ECHONET Lite Web API⁽⁵⁾」の整備も進めている。

これらの仕組みは、上述した新たなエネルギー政策の中での様々な場面で活用が期待される。筆者はエコーネットコンソーシアムの企画運営委員長を務めており、本稿ではコンソーシアムの定める通信規格や社会展開について概説する。まず、ECHONET LiteやECHONET Lite Web APIについて説明し、続いて次世代スマートメータ、DRreadyやVPP (Virtual Power Plant) における活用について述べる。

2 ECHONET Lite の特長と実績

エコーネットコンソーシアムは図1に示すように、ECHONET Liteを用いて家庭内の機器を互いに接続するECHONET 1.0と、ECHONET Lite Web APIを用いてサイバー空間上のサービスを連携させるECHONET 2.0の規格策定と普及を活動の柱としている⁽⁶⁾。

ECHONET Liteを用いると、スマートメータ、スマートフォンやHEMS (Home Energy Management System) コントローラを、家庭内のWi-Fiなどを介し

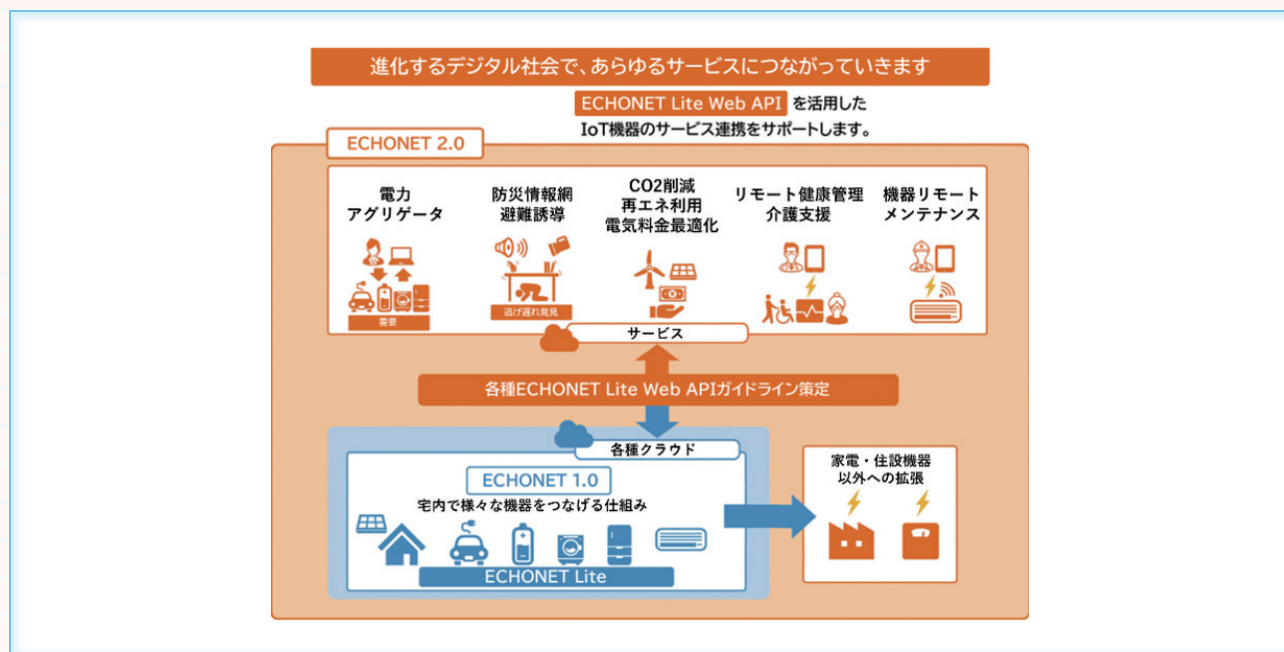


図1 エコーネットコンソーシアムが目指す世界⁽⁶⁾

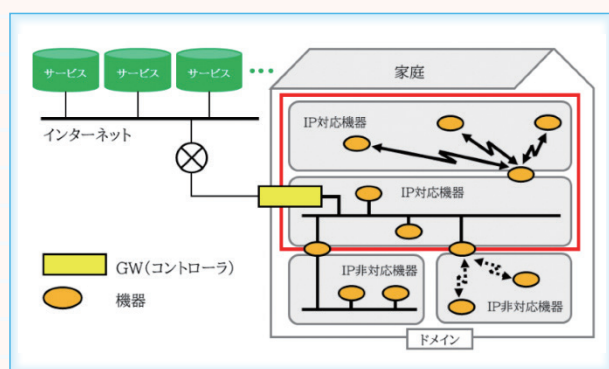


図2 ECHONET Lite を用いたシステム構成例⁽⁴⁾

てエアコンや照明などと接続することができ、電気代の把握や機器の制御が可能となる。ECHONET Lite を用いて各機器が使用する通信仕様や制御コマンドを共通化すれば、複数のメーカーが混在するマルチベンダ環境であっても、システム構築が容易となる。2012年2月に経済産業省が設置したスマートハウス標準化検討会において、ECHONET Lite は HEMS における公知な標準イ

ンタフェースとして推奨された⁽⁷⁾。2023年度末までに ECHONET Lite を搭載した機器の累計出荷台数は1億4,986万台に達した。これらを活用して価値あるエネルギーサービスやスマートホームサービスを展開することが期待される。

ECHONET Lite は、図2のシステム構成例に示すように、インターネット上の各種サービスと家庭内の機器との間に、ゲートウェイ機能を持つコントローラなどの機器があるアーキテクチャを前提としている。コントローラなどをサイバー空間と接続することで、家庭などの外からでも家庭内の機器を操作できるようにしている。

ECHONET Lite が規定する範囲は、図3に示すとおり、OSI 参照モデルにおける第5層以上である。各機器が共通して使うべき通信プロトコルや通信手段を定めた ECHONET Lite 規格、機器をモデル化した機器オブジェクト詳細規定、そして機器の種類ごとに固有の通信手順などをまとめたアプリケーション通信インターフェー

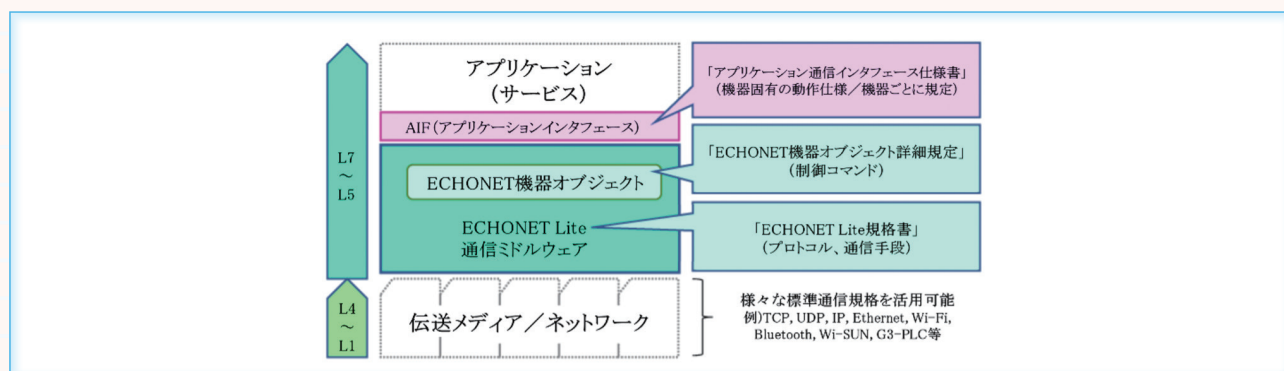
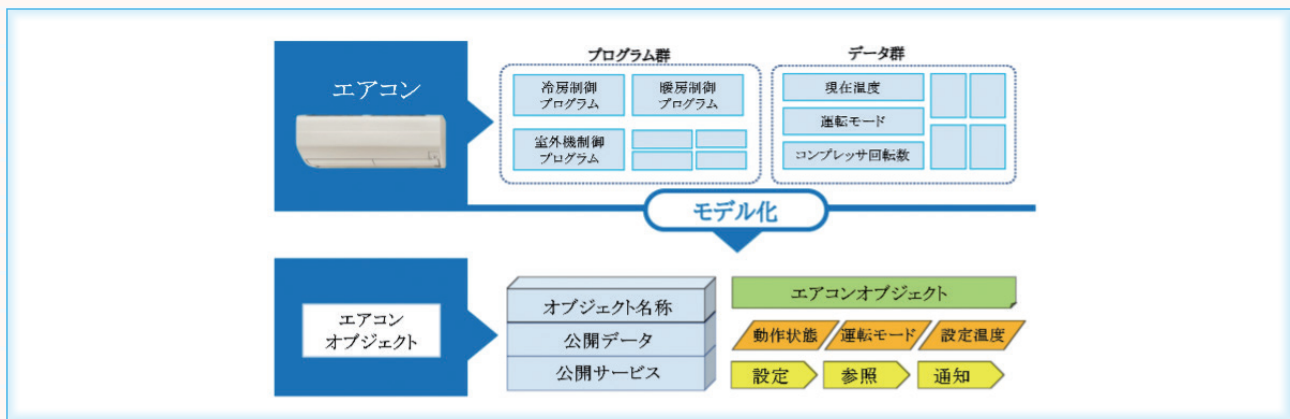


図3 ECHONET Lite を構成する規格群⁽⁴⁾

図4 機器オブジェクト定義の例⁽⁴⁾

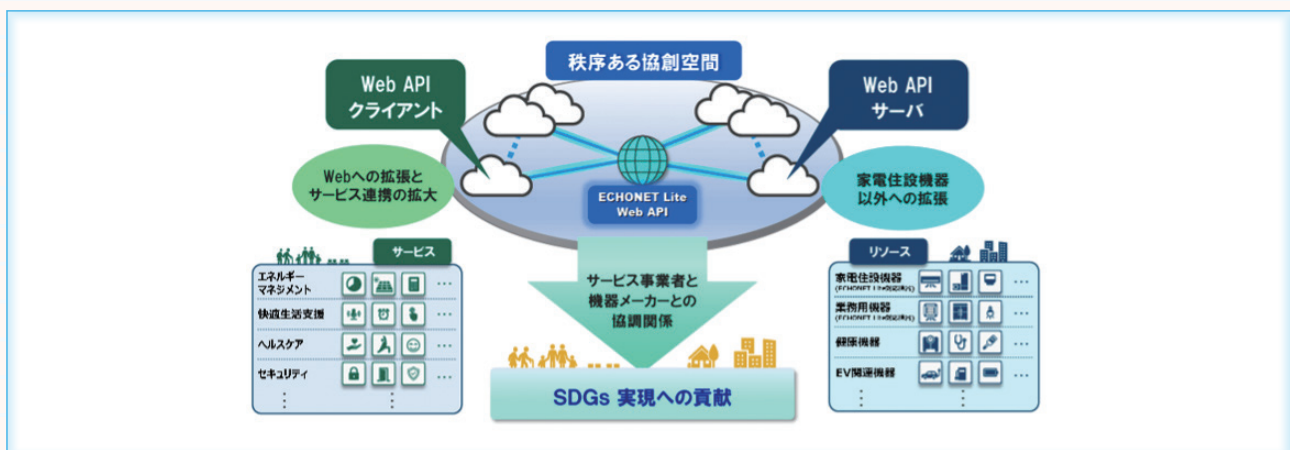
ス（AIF: Application InterFace）仕様から構成される。なお、下位の通信仕様には依存しないため、サービスやアプリケーションなどの様々な要件に基づいて、市場からリーズナブルな伝送メディアを選択することが可能である。

機器オブジェクトとは、図4に示すように様々な機器が持つ多様なプログラム群やデータ群をモデル化したものである。具体的には、エアコンなどの機器の種別を「オブジェクト名称」、動作状態・運転モードなど各々の機器が持つ情報や機能を「公開データ」、各機能の操作方法を「公開サービス」と3階層でモデル化している。プログラム群やデータ群のモデルを共通化することによって、ECHONET Lite 規格に基づく通信（ECHONET Lite 通信）により実際に機器が操作できる⁽⁸⁾。現在、様々な機器に対応した機器オブジェクトが120以上定義されている。この中にはセンサ類、エアコン、照明などの省エネ機器、蓄電池、ヒートポンプ給湯機などのエネルギーを蓄える蓄エネ機器、太陽光発電、燃料電池などのエネルギーを作り出す創エネ機器、各種スマートメーターなどの計測機器、業務用パッケージエアコン、ショーケースなどの業務用機器が含まれている。

3 ECHONET Lite Web API

家庭には、家電、住宅設備、健康関連機器、そして電気自動車など幅広い機器が存在する。またサイバー空間上にはエネルギーマネジメントをはじめ、快適生活支援、ヘルスケアやセキュリティなどのサービスが存在する。ECHONET Lite Web API は、各種のサービスが家庭内の機器を活用して効率的にアプリケーションを実現していくために、エコーネットコンソーシアムが定めたものである⁽⁵⁾。

ECHONET Lite Web API 利用のイメージを図5に示す⁽⁹⁾。ECHONET Lite Web API は、家庭内の機器が接続されたサイバー空間上のサーバと、同じくサイバー空間にあるエネルギー、ヘルスケア、防災などの様々なサービス（クライアント）との間をつなぐ役割を担う。多数あるサーバもクライアントも、共通でECHONET Lite Web API を用いることで、相互接続性を高めることができ、開発の手間を削減することができる。クライアント側とサーバ側が安心してECHONET Lite Web API を利用できるよう、エコーネットコンソーシアムはサイバー空間における「秩序ある協創空間」を掲げ、クラウド上で接続する事業者が信頼できる

図5 ECHONET Lite Web API 利用のイメージ⁽⁹⁾

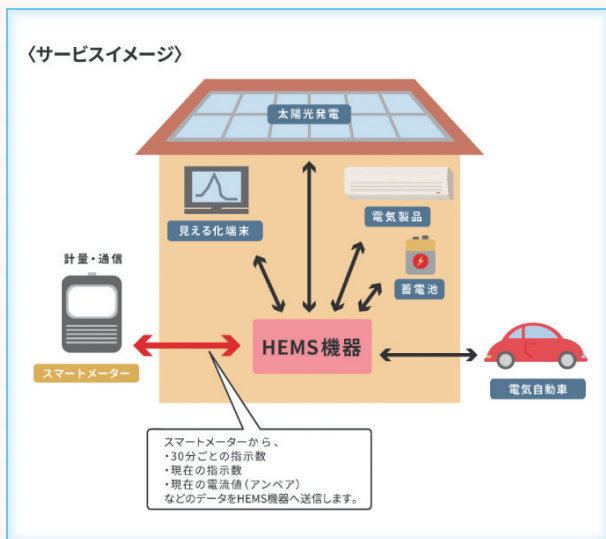


図6 スマートメータと HEMS 機器の接続 ⁽¹¹⁾

ことの証明や、相互接続が円滑に実現できるインタフェースの定義を目指している。

ECHONET Lite と同様に、ECHONET Lite Web API 上では機器がモデル化されており、クライアントはサーバ側に実装された ECHONET Lite Web API に設けられたモデルにアクセスすることで、機器の情報を得たり、機器に命令を送ることができる。

4 スマートメータと ECHONET Lite

スマートメータは、2014 年から各家庭へ順次導入が進んだ電力量計で、毎月の検針業務の自動化や HEMS コントローラ等を通じた電気使用状況の「見える化」を可能にする ⁽¹⁰⁾。図6に示すように、スマートメータを HEMS コントローラと接続する際に、ECHONET Lite が用いられる ⁽¹¹⁾。スマートメータの様々な測定結果を ECHONET Lite 通信によって HEMS コントローラ等へ伝えることで、住人は電力の使用量などを把握することができる。

更に、機能が向上した次世代スマートメータが2025 年から順次導入される予定である。図7に示すように、次世代スマートメータは、停電の早期解消や計画停電の回避のような電力レジリエンスの強化、再エネ大量導入・脱炭素化が進んだ際の系統全体の需給安定化、そして効率化・需要家の利益向上などを目指して開発された ⁽¹²⁾。これらの実現のため、停電検知・復旧検知機能、従来の 920 MHz 帯の Wi-SUN 通信機能に加え、Wi-Fi 機能の搭載、そして電力スマートメータを介してガス・水道などのメータの検針データを収集する共同検針が可能となっている。



図7 次世代スマートメータの特徴 ⁽¹²⁾

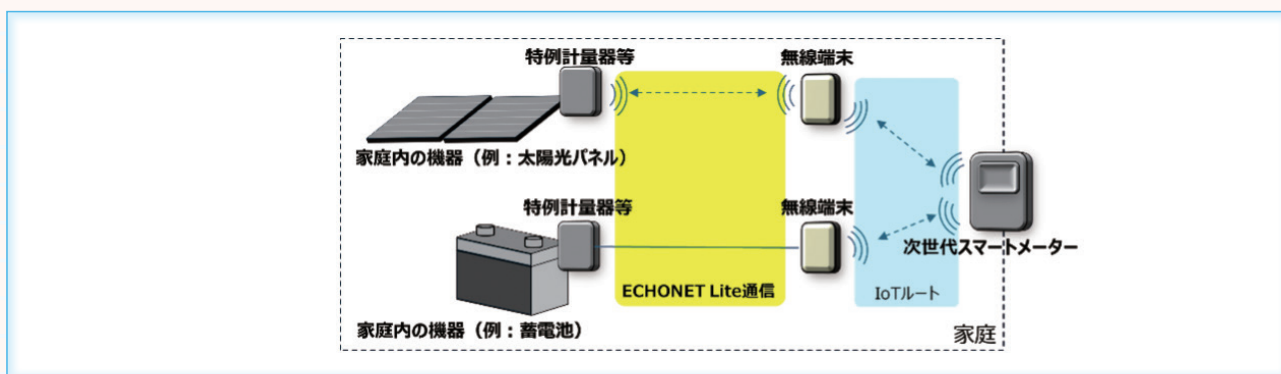


図8 特例計量器と IoT ルート ⁽¹³⁾

表 1 分散電源電力量メータクラスで取得可能な値の例⁽¹⁴⁾

特例計量器に入力される電力・電力量	
現在値	瞬時電力計測値（交流入力）
	積算電力量計測値（交流入力）
履歴値	積算電力量計測値履歴（交流入力）
定時	定時積算電力量計測値（交流入力）
特例計量器から出力される電力・電力量	
現在値	積算電力量計測値（交流出力・自立出力）
	瞬時電力計測値（交流出力・自立出力）
履歴値	積算電力量計測値履歴（交流出力・自立出力）
定時	定時積算電力量計測値（交流出力・自立出力）

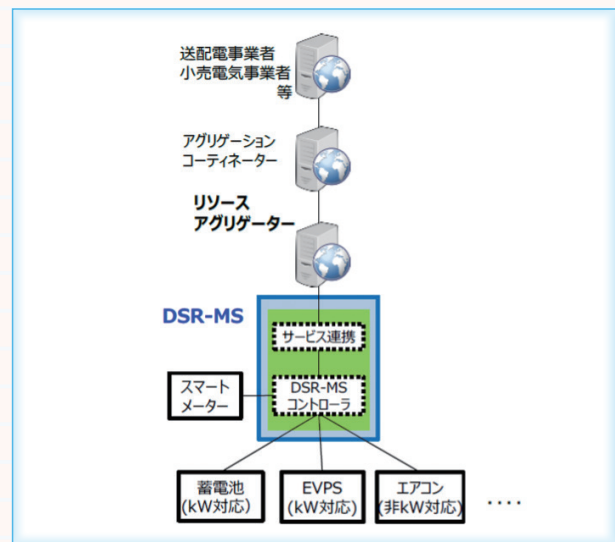
特筆すべき点として、太陽光パネルや蓄電池などの家庭内の機器等に設置された「特例計量器」と呼ばれるメーターと次世代スマートメータは、図8に示すように無線端末を介して接続できる点が挙げられる⁽¹³⁾。スマートメーターと無線端末との間を「IoT ルート」と呼ぶ。また、無線端末と特例計量器の間の通信方式にはECHONET Lite が用いられる。エコーネットコンソーシアムでは、特例計量器等に用いるための「分散型電源電力量メータクラス」と名付けた機器オブジェクトの詳細規定を策定した⁽¹⁴⁾。

分散型電源電力量メータクラスを簡単に紹介する。分散型電源電力量メータクラスを用いることで、特例計量器に接続された無線端末等の機器は、特例計量器から表1に示すような値を得ることができる。特例計量器に電力が入力される方向（例えば、蓄電池なら充電する方向）については、瞬時電力に加え、一定期間の積算電力量やその履歴を取得することができる。また、毎時決まった時間に記録した積算電力量を後から得ることもできる。電力が出力される方向（蓄電池なら放電となる方向）についても同様に、瞬時電力、積算電力量、及びその履歴と、定時の積算電力量を得ることができる。オプションで自立出力についても値を得ることができる。これらを用いることで、蓄電池が蓄えた電力量や太陽光発電の発電量を知ることができるため、正確で効率的なDRなどに役立つ。

5

ECHONET Lite Web API
の更なる活用

上述したECHONET Lite やECHONET Lite Web API の活用が、今後、更に期待される場として、VPP や家庭内の機器をDRに対応させるためのDRready化が挙げられる。

図9 VPP のシステム構成の例⁽¹⁶⁾

5.1 VPP における活用

VPP とは、電力系統に接続されている発電設備や蓄電設備を制御し、必要に応じて電力を設備・機器側から系統側へと逆方向に供給する逆潮流を行うなどして、発電所と同等の機能を提供する概念である⁽¹⁵⁾。このVPPの中でも昨今、家庭にある太陽光パネルや蓄電池・EVなどのDERを制御して、活用する方法が注目を集めている。

DERが家庭の外側の通信ネットワークと接続する手段として、RAがHEMSコントローラ等を介してDERを制御するための「VPPにおける需要家エネルギーリソースの活用に関するガイドライン」（以下、「VPPガイドライン」）を、一般社団法人日本電気工業会（JEMA: Japan Electrical Manufacturers' Association）が提供している⁽¹⁶⁾。このガイドラインの中ではHEMSコントローラ等を「DSR-MS (Demand Side Resources - energy Management System)」と呼んでおり、RAとDSR-MS等との間で通信するデータの内容や手順などが記されている。このガイドラインの中に、ECHONET Lite Web API の活用事例が記載されている。

VPPガイドライン中に記載された家庭の機器を使ったVPPのシステム構成の一例を図9に示す。電力の供給状況に合わせて、家庭内の機器の消費電力量を調整することなどを実現するために、送配電事業者や小売電気事業者等の求めに応じ、アグリゲーションコーディネータ（AC）やRAが家庭等の機器の制御方法を決める。そしてDSR-MSを経由して、RAが機器を制御する。

JEMAはVPPガイドラインの作成のために、VPP実証の関係者、RAや機器メーカーなどに対してヒアリングを行った。ヒアリング結果に基づき、VPPガイドラインには、事業者やメーカーが異なるRA、DSR-MS、及び家庭内機器が円滑に問題なく接続されるための実装方法

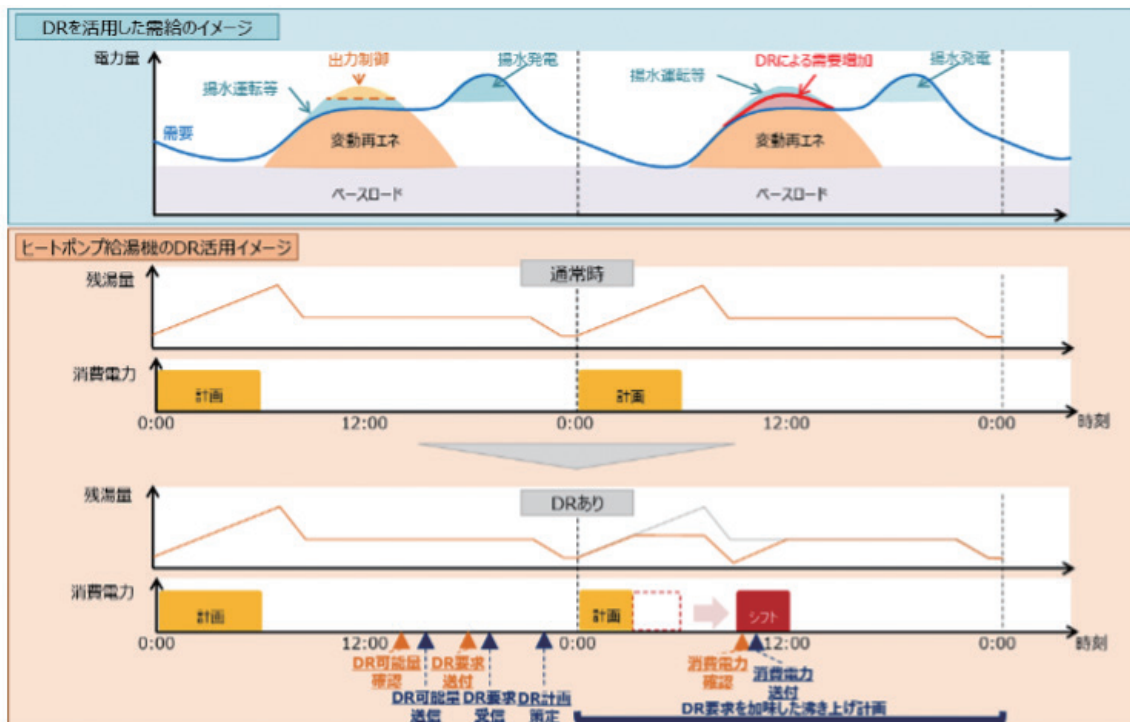


図10 ヒートポンプ給湯機を用いたDR⁽¹⁸⁾

が記されている。特に、RAとDSR-MSの間での家庭側の機器の把握のためのやり取り、機器を制御するために必要な情報や制御指示の授受方法などについて定めている。RAが家庭内の機器の一つ一つを制御したい場合もあれば、まとめて包括的に制御したい場合もあるため、いずれにも対応できることを求めている。

VPPガイドラインには、RAがDSR-MSから情報を入手し、機器制御の指示を出し、その状況や結果を受け取り、制御を終了するまでの各処理において、ECHONET Lite Web APIを利用した実装の例が記されている。エコーネットコンソーシアムではこの記載を参照し、DR関連サービス仕様⁽¹⁷⁾を作成した。RAがVPPに対応する場合や、メーカーがDSR-MSを開発する場合の設計のよりどころとなる。

5.2 DRreadyにおける活用

DRreadyに関して2024年6月から資源エネルギー庁が勉強会を実施しており、資料と議事要旨が公開されている。勉強会ではまず、ヒートポンプ給湯機のDRready化について議論された。従来は夜間の安価な電力を用いて湯沸かしをしていたが、これを太陽光発電量がピークとなる昼間の時間帯にシフトさせることを検討している。更に、現在は蓄電池の充放電制御について検討しており、今後はEV充電器／EV充放電器について検討を進める予定となっている。これら機器がDRready化された折には、サイバー空間から家庭内の

DRready機器を制御するために、ECHONET Lite Web APIを活用できる可能性がある。

ヒートポンプ給湯機において、お湯を沸き上げる時間を夜間から昼間にシフトさせるイメージを図10に示す⁽¹⁸⁾。従来のヒートポンプ給湯機は、電気料金が安価な夜間に沸き上げる動作が主だった。しかし、変動再エネに分類される太陽光発電による発電量が昼間にピークを迎えることから、その電力を無駄なく有効に活用するため、図10上段に示すように、DR指示により昼間に沸き上げをシフトして需要を増加させることを検討している。図10下段に示すとおり、沸き上げ時刻の変更により、夜間早朝の残湯量は減少することになるが、昼間の沸き上げにより回復できる。機器は残湯量の減少を考慮し、一部のみ昼間に移すなどの対応をすることで、湯切れを回避することができる。この実現のため、機器はシフトにより昼間にどれくらいの電力を消費できるかを試算し（DR可能量確認）、この値をクライアントへ送信する（DR可能量送信）。このデータに基づきクライアントは各給湯機の沸き上げ時間を決め、機器に指示を出す。（DR要求送付、受信、DR計画策定。）

これを実現するため、DRready勉強会ではヒートポンプ給湯機側に求められる機能として以下を定めている⁽¹⁹⁾。

- ① DR可能量を送信できる
- ② DR要求による沸き上げ開始時刻を受信できる
- ③ DR要求による沸き上げ開始時刻を加味した沸き

上げ計画を策定できる

- ④ 現在の消費電力の推定値または計量値を送信できる
- ⑤ 個体を識別して制御することが可能な情報を保有, 確認できる

これらの機能を備える数多くのヒートポンプ給湯機と, それを制御するクライアントとの間で, 円滑にデータを伝送し指示を出す仕組みが必要となる. ECHONET Lite Web API は, これらの大量の機器に対して効率的に指示を出すために, バルク処理機能, グループ機能や履歴データ機能を用意している⁽⁵⁾. バルク処理機能では, クライアントが任意の機器に命令を送信する際に, 複数の命令を列挙した命令セット (bulk) を用いる. 一括で複数の機器に対する複数命令を送信することで, 効率的に指示を出すことが可能となる.

またグルーピング機能では, 複数の機器をまとめてグループ化し, 共通の命令などを実行することができる. 各家庭にあるヒートポンプ給湯機や蓄電池の一つ一つに個別に命令を出すのは大変だが, ECHONET Lite Web API を用いれば, グループ機能を用いて機器をまとめ, 1 回の命令でグループに対して指示を出すことができる.

更に履歴データ機能は, クライアントが機器のデータを過去に遡って取得することができる. 機器のデータをサーバが蓄積しておき, クライアントからの求めに応じて提供する. 例えば, 電力使用量などをアプリ上でグラフ表示するためなどに活用できる.

6 まとめ

第7次エネルギー基本計画において, カーボンニュートラルの動きが一段と注目される中, 家庭内やサイバースペースからの機器の制御を実現すべく, エコネットコンソーシアムはECHONET LiteやECHONET Lite Web APIを定めてきた. 将来のエネルギーシステムの重要な一角を担う次世代スマートメータや特例計量器, そして家庭内の機器を用いたDRやVPPなどで, これらの規格の活用が期待される. これらが本格的に普及するに当たり, 引き続きエコネットコンソーシアムは社会に資する規格の策定や活用の支援を継続したい.

■ 文献

- (1) 資源エネルギー庁, “エネルギー基本計画,” Feb. 2025.
- (2) 資源エネルギー庁, “Zero Energy Houseに関する情報公開について.” https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/general/housing/index03.html

- (3) 資源エネルギー庁, “DRready 勉強会.” https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/dr_ready/index.html
- (4) エコネットコンソーシアム, “ECHONET Lite 規格の概要.” <https://echonet.jp/about/features/>
- (5) エコネットコンソーシアム, “ECHONET Lite Web API ガイドライン,” Ver.1.2.0, March 2025.
- (6) エコネットコンソーシアム. <https://echonet.jp/>
- (7) 経済産業省, “J S C A 国際標準化WG スマートハウス標準化検討会とりまとめの公表.” Feb. 2012.
- (8) エコネットコンソーシアム, “APPENDIX ECHONET 機器オブジェクト詳細規定,” Rel. R, Rev.3. March 2025.
- (9) エコネットコンソーシアム, “ECHONET 2.0.” https://echonet.jp/echonet_20/
- (10) 東京電力パワーグリッド, “電力メーターとは.” <https://www.tepco.co.jp/pg/consignment/for-general/basic-knowledge/smart-mater.html>
- (11) 東京電力パワーグリッド, “電力メーター情報発信サービス (B ルート サービス).” <https://www.tepco.co.jp/pg/consignment/liberalization/smartmeter-broute.html>
- (12) 次世代スマートメーター制度検討会, “次世代スマートメーター制度検討会取りまとめ.” May 2025.
- (13) 資源エネルギー庁, “特定計量 (IoT ルート) 運用ガイドライン,” 第 1.0 版. June 2024.
- (14) エコネットコンソーシアム, “分散型電源電力量メータ・HEMS コントローラ間 アプリケーション通信 インタフェース仕様書,” Ver.1.00, Nov. 2022.
- (15) 資源エネルギー庁, “VPP・DR とは.” https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/advanced_systems/vpp_dr/about.html
- (16) JEMA, “VPP における需要家エネルギーリソースの活用に関するガイドライン.” June 2023.
- (17) エコネットコンソーシアム, “ECHONET Lite Web API ガイドライン DR 関連サービス仕様,” Version 1.0.0, June 2023.
- (18) 資源エネルギー庁, “ヒートポンプ給湯機の DRready 要件 (案),” 第 2 回 DRready 勉強会, 資料 3, July 2024.
- (19) 資源エネルギー庁, “ヒートポンプ給湯機の DRready 要件 (案),” 第 4 回 DRready 勉強会, 資料 4, Jan. 2025.

佐方 連 (正員)

(株) 東芝. エコネットコンソーシアム企画運営委員長. 1999 京大・工・電気電子卒. 2001 同大学院修士課程了. 2001 (株) 東芝入社. 無線通信装置の信号処理や通信プロトコルの研究開発に従事. 2006 本会学術奨励賞, 2022 本会通信ソサイエティ活動功労賞各受賞. 京大博士 (情報学), 第一級陸上無線技術士, 気象予報士. 2016 弁理士試験合格.



サステナブルな ICT インフラの実現に向けて

林 俊宏 Toshihiro Hayashi NTT

1 はじめに

近年、生成 AI の急速な発展とともに、計算資源への需要が飛躍的に増加しており、それに伴うデータセンター（DC）の建設、稼動が世界各地で加速している。特に、高度な AI モデルの運用には莫大な電力を必要とし、消費電力の増加が新たな問題として浮上している。日本においても、デジタル技術を活用しビジネスを変革する DX（Digital Transformation）と、再生可能エネルギー（再エネ）への転換により社会を変革する GX（Green Transformation）の両立が求められている。こうした背景から、膨大な計算資源を支える通信インフラと電力インフラの連携がこれまで以上に重要視されている。

本稿では、2. で生成 AI の普及拡大に伴う DC 需要の増加について、続く 3. で DC の電力需要増への対応や脱炭素化に向けた課題についてそれぞれ述べた後、4. では次世代の ICT とエネルギーの効果的な連携を図る概念として注目される「ワット・ビット連携」について解説する。5. では関連する取組み事例を紹介し、最後に 6. ではワット・ビット連携の将来像の実現に向けた課題について論じる。

2 生成 AI の普及拡大に伴う DC 需要の増加

生成 AI では、プロンプトを AI に送ることで文章や画像などが生成される。これらの生成物は AI が過去に学習したデータから生み出されたものであり、その精度を高める上で、AI はより多くのデータを学習する必要がある。多くの生成 AI では、演算処理を高速で行う高性能の GPU（Graphics Processing Unit）サーバを使って学習している。それに伴い大容量のサーバを大量に設置するための DC を確保する必要がある、必然的に

消費電力も高くなる。

生成 AI は実際にどのくらいの消費電力を発生させるのだろうか。米国のスタンフォード大の 2023 年の報告⁽¹⁾によると、AI のモデルの消費電力量はパラメータ数や DC のエネルギー効率などの要因に左右されるが、ChatGPT を生み出した OpenAI 社の言語モデル「GPT-3」の場合、機械学習の際の消費電力量が 1,287 MWh となる試算を出している。これは、原子力発電 1 基の 1 時間分の電力量（約 1,000 MWh）を上回る規模である。

図 1 に日本の電力需要量の年度推移を示す。日本では 2023 年度までは人口減少や節電・省エネルギーなどにより電力需要が減少傾向にあったが、今後、DX や GX の進展により、電力需要が増加に転じることが見込まれている。その要因の一つとして想定されているのが、前述した生成 AI の利用拡大に伴う DC 需要の増加である。2024 年度の国内の電力需要は約 8,000 億 kWh であるが、生成 AI の利用拡大に伴う DC や半導体工場の新増設等により、2034 年度で 465 億 kWh の消費電力量の増加（2024 年度比で約 6 % 増）を見込む想定が示されている⁽²⁾。また、研究機関の試算によれば、2050 年には DC による消費電力量は、現在と比較して 1,000 億 kWh 弱、最大で 2,000 億 kWh まで増加すると想定されている⁽³⁾。言い換えると、将来の DC の電力需要は国全体の 10~20 % を占めることになり、これは関西エリアや中部エリアの電力需要に匹敵する規模である。最先端技術の導入による DC の省エネ化や効率改善は今後進むと思われるが、将来の DC 需要の増加が日本の電力市場に与える影響は非常に大きいと言える。

3 DC の電力需要増への対応や脱炭素化に向けた課題

DX や GX の進展による電力需要の増加が見込まれる

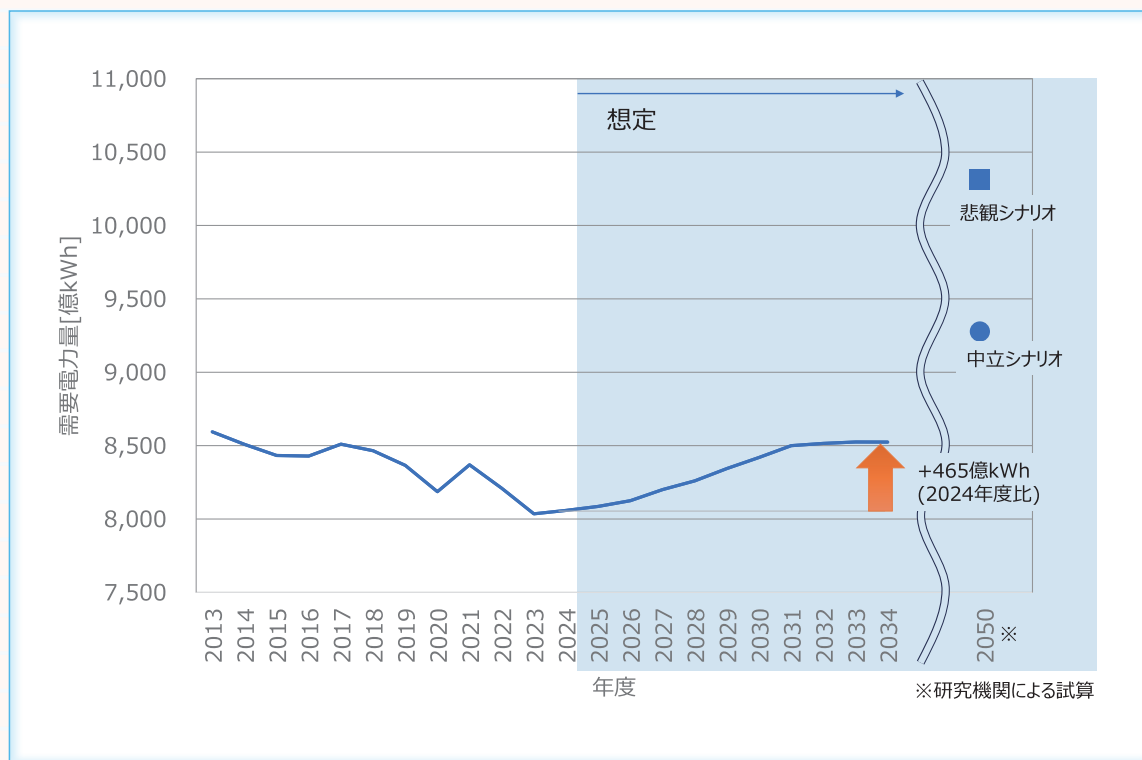


図1 日本の需要電力量の想定

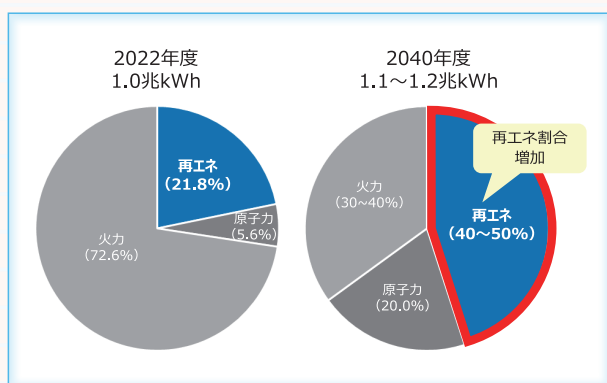


図2 日本の電源構成比率の見通し

https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20250218_02.pdf を元に作成

中、それに見合った脱炭素電源を安定的に十分確保できるかが、産業競争力を左右する状況にある。このような状況下で、日本政府は第7次エネルギー基本計画（2025年2月閣議決定）⁽⁴⁾において、再エネを主力電源として最大限導入する方針を打ち出している。図2のように、再エネの電源構成比率を2022年度の21.8%から、2040年度に40～50%まで増加させる見通しを示している。

以下、DCにおける再エネの活用を進めるに当たっての課題を挙げていく。

3.1 DC需要との地理的なミスマッチ

まず問題となるのが、DCの立地と再エネの導入ポテ

ンシャルとの間に存在する「地理的なミスマッチ」である。DCは、ユーザとの通信におけるレイテンシや、交通アクセス、インフラの利便性、更に東京や大阪を中心とした大都市圏のビジネスニーズに対応する必要性などから、国内では約6割が関東（主に東京、千葉、神奈川）、約2割が関西（主に大阪）に集中して設置されているという現状がある⁽⁵⁾。一方で、再エネの導入ポテンシャルが高いのは、広大な土地や自然資源に恵まれた北海道、東北、中国、九州などのエリアである⁽⁶⁾。こうした再エネポテンシャルの高い地域と、DCの需要が集中する地域の間には地理的ミスマッチが存在し、DCの脱炭素化を実現する上で大きな障壁となっている。

その対策としては、再エネが豊富な地域で発電された電力を、需要のある都市部に送電するための電力システムの増強などが挙げられる。しかし、現行の電力インフラには課題も多い。例えば、電力会社ごとの各エリア間をつなぐ地域間連系線の容量に限界があるため、エリア間で電力を融通するためには送電能力を増強する必要がある。それには多額の投資と長い期間を要する。また、送電ロスの問題や送電コストの上昇といった技術的、経済的なハードルも無視できない。

3.2 DC需要との時間的なミスマッチ

再エネの中でも、太陽光発電や風力発電は自然条件に大きく依存し、その発電量は気象条件や時間帯によって

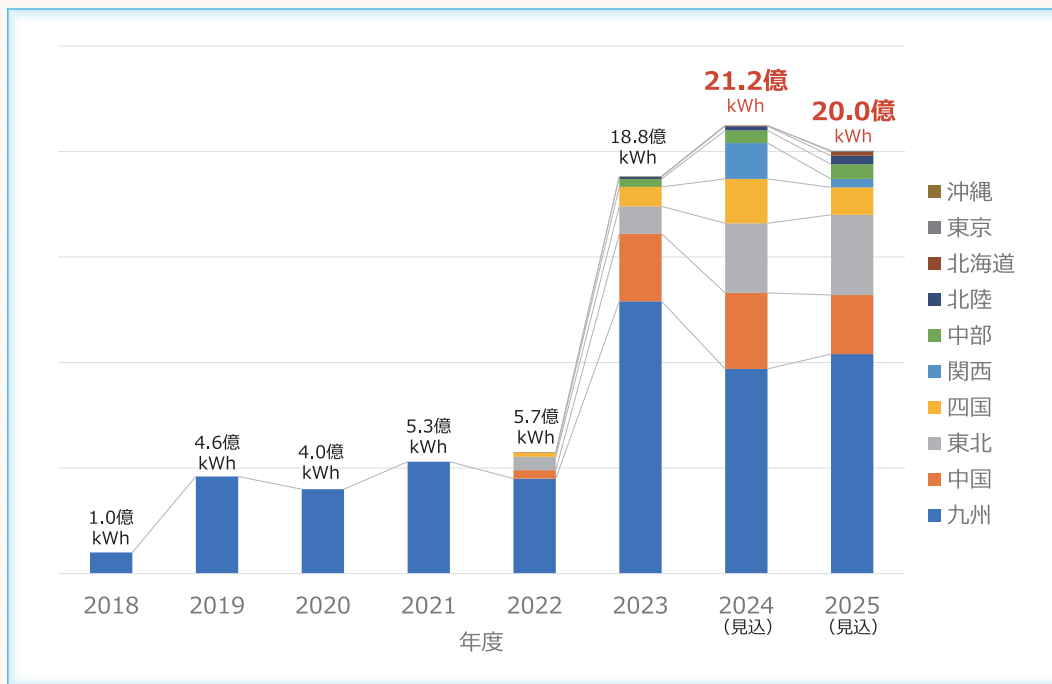


図3 日本における再エネの出力制御量の推移

https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/shin_energy/keito_wg/ を元に作成

変動する。一方で、DC は「24 時間・365 日」の安定稼働が求められており、一定の電力供給を継続する必要がある。そのため、再エネ電源で DC を安定稼働させるには、再エネの発電量の変動によって生じる時間的なミスマッチも解消する必要がある。

その対策として、蓄電池や揚水発電などを活用した電力貯蔵が挙げられる。しかし、DC の電力需要が増大する中、電力供給の安定性を確保するためには十分な設備容量が必要となり、その設備投資は膨大なコストを伴うと考えられる。

加えて、こうした変動性・不安定性のある再エネの導入が拡大するほど、電力系統における発電と需要のバランスの調整、いわゆる需給調整が難しくなる。電気の発電量がエリアの需要量を上回る場合、火力発電の出力の抑制や地域間連系線の活用等による調整が図られる。それでもなお余剰電力が発生する恐れがある場合には再エネ電源の出力制御が行われる。図3に日本における再エネの出力制御量の推移を示す。再エネの導入が先行して進んでいた九州電力では2018年度から、ほかのエリアでも2022年度以降に、太陽光発電や風力発電に対する出力制御が実施されており、2024年度の出力制御は21.2億kWh（前年度比の約1.1倍）、2025年度も20億kWhを超えると見込まれている⁽⁷⁾。出力制御は電力系統における需給バランスを安定させるための必要な措置ではあるものの、余剰電力が活用されず失われることを意味しており、再エネの主電源化に向けた更なる有効活用が課題であるとも言える。

4

ワット・ビット連携の概念とその意義

このように DC の脱炭素化に向けて、DC 需要と再エネの地理的及び時間的なミスマッチの解消などの課題がある中で、「ワット・ビット連携」の概念が注目されている。これは2025年2月に示された「GX2040ビジョン」で提唱され、「効率的な電力・通信インフラの整備を通じた電力と通信の効果的な連携」と定義している⁽⁸⁾。

ワット・ビット連携のイメージを図4に示すが、図4(a)のように、次世代の通信インフラである APN (All-Photonics Network) を活用した DC の分散配置が期待されている。APN はネットワークから端末まで、全てにフォトニクス（光）ベースの技術を導入し、エンド・ツー・エンドでの光波長パスを提供する波長ネットワークにより、圧倒的な低消費電力、高品質・大容量、低遅延の伝送を実現するもので、2024年3月から APN 専用線サービスの提供も開始された⁽⁹⁾。この APN の特性を生かし、DC 間を APN で接続することで、DC の立地制約（レイテンシに由来する需要地からの距離の制限）を緩和することができる。また、通信インフラの整備は一般的に電力インフラに比べてコスト負担が少なく、施工期間も短いことから、増大する直近の DC 需要への迅速な対応が可能となる。そのため、まずは電力供給に適したエリアへの DC 誘致を進め、必要となる通信インフラも計画的に整備する方針が示されている。この

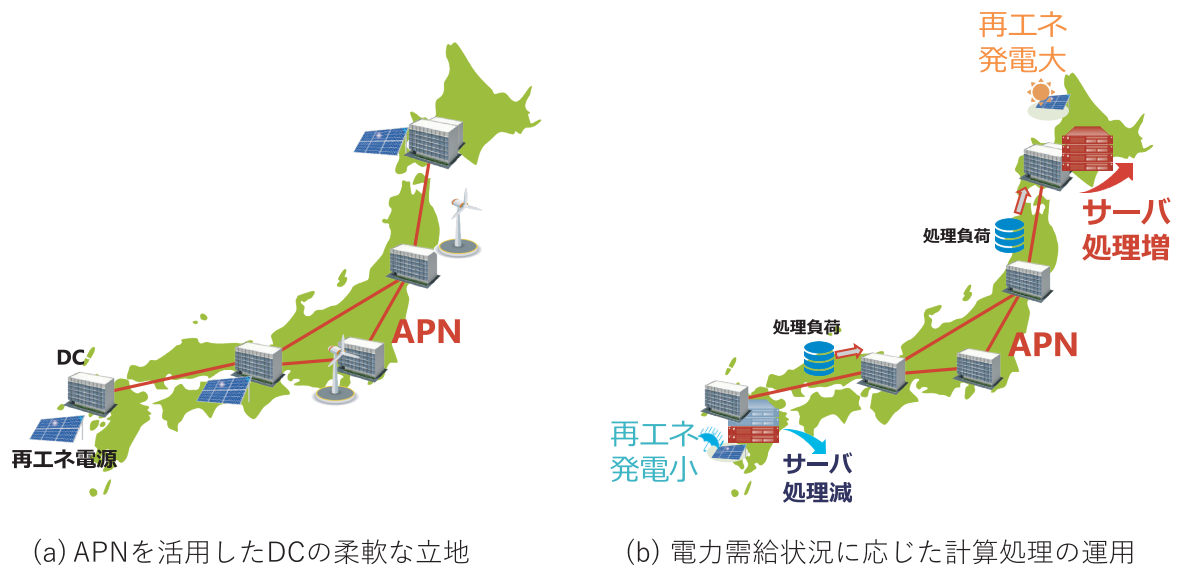


図4 ワット・ビット連携のイメージ

ような地方分散型のDC整備は、関東圏・関西圏への過度な集中によるリスクの低減に寄与するだけでなく、地方創生の観点からも意義のある取組みであると位置付けられている。

また、このようなインフラ整備に加えて、複数のDC間で計算処理（ワークロード）を最適に運用することで、電力の需給調整を図ることも期待されている。近年の仮想化基盤や分散クラウドの発展に伴い、地理的に離れた複数のDCを一つの統合されたDCのように運用し、拠点間の通信経路を柔軟に設定できる環境が整いつつある。この技術を活用することで、図4 (b) のよう

に再エネの発電状況や電力系統の混雑状況などに応じて、DCで稼動するワークロードを異なるエリアのDCへ高速に移動させることが可能となる。つまり、「ビットを動かすことでワットを調整する」制御が実現し、再エネの有効活用を最大化するとともに、DCのカーボンニュートラルに貢献することが期待される。

ワークロードの移動については、許容される遅延時間を考慮した上で、ターゲットとなるサービスやアプリを検討する必要がある。以下、生成AIでの計算処理を例に説明する。生成AIにおけるプロセスごとの計算処理の特徴を表1にまとめる。

表1 生成AIの学習・推論の計算処理の特徴

項目	学習 (Training)	推論 (Inference)
計算ハードウェア	ハイエンド GPU/TPU	多様 (GPU/CPU/ASIC/FPGA/NPU)
負荷パターン	長時間連続でフル負荷	短時間バースト / 平均負荷は低い
処理時間スケール	数時間～数週間 / 周期的	短時間 / 継続的
メモリ (VRAM) ニーズ	大容量	モデルサイズ依存
入出力データ量	大規模データセット	個別 / バッチ入力
データフロー	バッチ / オフライン	リアルタイム / ストリーミング
ネットワークレイテンシ	感度低い	感度高い (リアルタイム)
ストレージ容量	大容量	小容量
モデルと計算ハードウェアとの物理的距離	近距離が理想	DC間相互接続を用いて遠隔配置可能 ※初回モデルロード後はローカルキャッシュで処理
消費電力	大きい	個別は小さい / 効率重視 総消費電力は今後増大 (利用者数・デバイス数に依存)
処理拠点の規模	大規模データセンターが中心	エッジ / デバイスにシフト

生成 AI の開発には、まず巨大なデータセットを使ってモデルを「学習」させるプロセスがある。この「学習」は、高性能な GPU などを用いた数週間に及ぶ長期間の計算処理を伴う。大量の電力を消費する一方で、リアルタイム性は求められておらず、計算処理の中断と再開が可能であることから、実行場所やタイミングを調整できるという特徴がある。この特徴を生かして、再エネ電力が余剰となっているエリアや、DC の稼働率が低いタイミングで計算処理を実行させることで、電力需要の柔軟な調整が可能となる。

続けて、学習済みの AI モデルが実際に動作する「推論」のプロセスでは、入力に応じてリアルタイムで出力を生成する。この「推論」は、1 回当たりの計算量や消費電力は少ないものの、リクエスト数が利用者数やデバイス数によるため、今後、生成 AI の活用が拡大するにつれて、総消費電力は多くなることが予想される。また、自動運転のような低遅延が求められるようなユースケースも将来想定されるため、タイミングをずらして計算処理をすることは難しく、可能な限り需要地の近くで計算処理させることが望ましい。その観点から、地方分散型 DC の整備は理にかなっていると言えるであろう。

5 分散 DC 間の協調制御に関する国内外の事例

前章において述べたワット・ビット連携の概念は、DC の柔軟な立地と、最適な運用による再エネの最大活用を通じて、脱炭素社会の実現に資する新たなアプローチである。現状では、データ需要の二極（東京・大阪）集中傾向による地方 DC の需要確保の難しさ、オペレーション上の手間やレイテンシなどの運用上の問題点、ネットワーク環境整備の遅れや地域住民との対話など、受入れ側の障壁などの観点から、DC の地方分散の動きは限定的ではある⁽¹⁰⁾。一方で、将来の DC 地方分散化を見据え、分散 DC 間の協調制御に関する技術実証が行われている。

以下、国内外の事例を幾つか紹介する。

5.1 NTT コミュニケーションズ*の「GPU over APN」^{(11), (12)}

GPU over APN とは、次世代ネットワーク基盤である IOWN APN で DC 間を接続し、複数拠点間で GPU クラスタを構成するコンセプトである。APN の持つ超低遅延・広帯域という特徴を生かし、物理的に離れた拠

点にある GPU 資源を、あたかも一体の仮想基盤として利用することができる。これにより、一つの DC の床面積や電力供給能力に制限されることなく、計算処理量の変動に応じた GPU リソースをオンデマンドに確保できるようになる。また、利用者の拠点から移動できない機密度の高いデータの取扱いも可能となる。

同社では、三鷹・秋葉原・川崎の 3 拠点の DC 間を APN で接続し、NVIDIA H100 GPU サーバを分散配置した分散 DC 環境を世界で初めて構築した。この実証では分散 DC 環境上で NTT 版大規模言語モデル「tsuzumi」のモデル学習を実施させた結果、単一の DC とほぼ同等の処理時間で学習を完了することが確認された。

同社では、今後、日本全国での分散 DC の配置を見越した、拠点数の増加と距離延伸の実証や、分散 DC における通信方法や GPU リソースの最適化検証を進める予定である。また、法人向けのサービス提供を視野に入れ、AI 社会に必要な大規模・高性能な計算基盤としての展開を進めていく方針である。

5.2 東京電力パワーグリッドと日立による系統連携型エネルギーマネジメント⁽¹³⁾

両社は、今後増加が見込まれる DC を電力の調整力として活用するため、東京都内 2 か所及び神奈川県内の計 3 か所の DC 間で、電力系統連携型エネルギーマネジメントに関する実証実験を実施している。実証では、DC 間で最適にワークロードをシフトすることで各エリアの再エネを有効活用するとともに、大容量ネットワーク並びに蓄電池などを活用することで調整力創出の高速化に成功し、電力需給バランスにおける周波数調整への活用可能性を確認している。また、生成 AI アプリケーションを対象としたワークロード移動も、ダウンタイムはほぼなしで可能であることを実証している。

DC のエネルギーマネジメントによる電力需要調整は、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ために必要な調整力を調達する電力取引市場）における調整力として期待される。両社は将来的な需給調整市場への投入に向けて引き続き実証を重ね、事業化を進めていく方針である。

5.3 アジャイルエナジー X^{(14)~(16)}

再エネの余剰電力と先端半導体技術を組み合わせた、未来型の分散型 DC を日本各地に展開していく事業を展開している。需要以上に発電してしまった再エネの余剰電力の抑制や、電力系統の混雑回避のため、DC などに新しい需要を生み出すことで、再エネの余剰電力を「地産地消」で有効活用していくことを狙いとしている。

2023 年には、太陽光発電追従型のコンテナ型 DC に

* 2025 年 7 月 1 日から「NTT ドコモビジネス」に社名変更。

よる再エネの有効活用に関する実証を開始している。これは、太陽光発電の発電量を追従しながら、分散コンピューティングの一種であるビットコイン・マイニングの処理を自動制御することで、コンテナ型 DC で再エネ電力を自家消費し、再エネの出力制御回避に貢献するものである。また、2024 年には再エネとビットコイン・マイニング、及びマイニング装置からの排熱利用を組み合わせた「究極の循環経済」モデルに関する実証を開始しており、再エネの有効活用だけでなく、新たな付加価値の創出に向けた取組みを進めている。

5.4 Google の「Carbon-Aware Load Shifting」⁽¹⁷⁾

海外の分散 DC の協調制御の事例として、Google の Carbon-Aware Load Shifting を紹介する。グローバルに分散された DC 群において、電力系統の炭素強度に応じて、計算処理の実行タイミングを調整する取組みである。再エネを DC で効率良く利用するためのシステム「carbon-intelligent computing platform」において、翌日の炭素排出予測に基づく電力利用の最適化を行っている。具体的には、バッチ処理型の柔軟なワークロード（データ圧縮、機械学習、シミュレーション、ビデオ処理など）を対象に、再エネ比率の高い時間帯や地域にシフトさせることで、炭素排出量の削減を図っている。

同社は、事業を展開する全ての電力系統で「24 時間 365 日」カーボンフリーエネルギー（CFE）を活用することで、2030 年までに排出ネットゼロを達成するという目標を掲げており、この取組みは目標達成に貢献するものであると言える。

6 将来像実現に向けての課題

前章で紹介した事例を踏まえて、ワット・ビット連携の将来像を実現するためには、まずは DC の地方分散を後押ししていくことが重要である。そのためには、DC 事業者が再エネ電源の活用を促すためのインセンティブ付与（新たな電力料金体系の構築、補助金の充実など）、DC 誘致や脱炭素の取組みに積極的な自治体との連携、地域特性に合わせた DC 設備とエネルギー設備の仕様検討などが必要となるであろう。

また、DC の受入れ側の理解を得ることも重要となる。自治体・住民・事業者が協力し、DC 設置が地域社会の課題解決・地域の活性化・産業振興・雇用創出等につながるような在り方を模索し、ステークホルダー間でビジョンを共有していくことが必要であると考えられる。

加えて、分散 DC 間の協調制御による電力需要調整を実現するためには、電力需給状況と連携した再エネと需

要のマッチングプラットフォームの構築や、プラットフォームと連動した余剰再エネの取引市場のような、新たな制度設計なども今後の検討課題となるであろう。

7 おわりに

ワット・ビット連携の構想は単なる電力効率やコスト効率の向上の観点にとどまらず、レイテンシ最適化、災害時や電力ひっ迫時におけるレジリエンスの強化、更には地域経済との共生といった多面的な価値を持つ。将来にわたって持続可能な ICT インフラを確立する上で、産官学の連携を通じて、構想が具現化していくことを期待したい。

■ 文献

- (1) Stanford University, “The 2023 AI index report.” <https://hai.stanford.edu/ai-index/2023-ai-index-report>
- (2) 経済産業省資源エネルギー庁, “今後の電力需要の見通しについて,” 2025 年 1 月 27 日. https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/085_06_00.pdf
- (3) 電力広域的運営推進機関, “第 4 回将来の電力需給シナリオに関する検討会,” 2024 年 3 月 5 日. https://www.occto.or.jp/iinkai/shorai_jukyu/2023/2023_shorai_jukyu_4_haifu.html
- (4) 資源エネルギー庁, “エネルギー基本計画の概要 (2025 年 2 月閣議決定).” https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20250218_02.pdf
- (5) 総務省, “データセンター等のデジタルインフラ整備の現状と課題について,” 2024 年 10 月 3 日 GX 実現に向けた専門家 WG. https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx_jikkou_kaigi/senmonka_wg/dai8/siryoushu.pdf
- (6) 東北大中田俊彦研究室, “地域エネルギー需給データベース (Version 2.10).” <https://energy-sustainability.jp>
- (7) 資源エネルギー庁, “再生可能エネルギーの出力制御に関する短期見通し等について,” 2025 年 1 月 23 日. https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/smart_power_grid_wg/pdf/001_02_01.pdf
- (8) 内閣官房, “GX2040 ビジョン～脱炭素成長型経済構造・移行推進戦略 改訂～.” https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx_jikkou_kaigi/pdf/gx2040_vision_kaitei.pdf
- (9) NTTコミュニケーションズ株式会社, “ニュースリリース (2024年2月29日).” <https://www.ntt.com/about-us/press-releases/news/article/2024/0229.html>
- (10) Green×Digital コンソーシアム, “データセンターの地方分散立地実現に向けた検討状況,” 2025 年 3 月 31 日. <https://www.gxdc.jp/pdf/regional-dc-report.pdf>
- (11) NTTコミュニケーションズ株式会社, “ニュースリリース (2024年10月7日).” <https://www.ntt.com/about-us/press-releases/news/article/2024/1007.html>

- (12) NTT コミュニケーションズ株式会社, “ニュースリリース (2025 年 3 月 19 日).” <https://www.ntt.com/about-us/press-releases/news/article/2025/0319.html>
- (13) 東京電力パワーグリッド株式会社, 株式会社日立製作所, “プレスリリース (2025 年 7 月 28 日).” <https://www.tepco.co.jp/pg/company/press-information/press/2025/pdf/250728j0101.pdf>
- (14) アジャイルエナジーX, “プレスリリース (2022年12月14日).” <https://agileenergyx.co.jp/2022/12/14/triple1-powergrid/>
- (15) アジャイルエナジー X, “プレスリリース (2023 年 12月6日).” <https://agileenergyx.co.jp/2023/12/06/poc-showamura/>
- (16) アジャイルエナジーX, “プレスリリース (2024年3月29日).” https://agileenergyx.co.jp/2024/03/29/demo_ult-cir-econ/
- (17) A. Radovanovic, R. Koningstein, I. Schneider, B.

Chen, A. Duarte, B. Roy, D. Xiao, M. Haridasan, P. Hung, N. Care, S. Talukdar, E. Mullen, K. Smith, M. E. Cottman, and W. Cirne, “Carbon-aware computing for datacenters,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 38, no.2, pp. 1270-1280, March 2023.

林 俊宏

NTT 宇宙環境エネルギー研究所.
2006 NTT 入社後, マイクログリッド
やデータセンターのエネルギーマネジ
メントに関する研究開発や国際標準
化, 米国での実証プロジェクト等を担
当. 現職では, データセンターやモバ
イルのカーボンニュートラルに向けた
エネルギー制御技術の研究等を担当.



無線電力伝送と通信の融合によるミリ波帯中継器

Millimeter-Wave Relay by Fusion of Wireless Power Transfer and Communication

白根篤史 Atsushi Shirane†

Summary

無線通信の高周波化が進み、5G（第5世代移動通信システム）では28 GHz帯、将来的には6Gで100 GHz超の利用も視野に入っている。キャリア周波数の高周波化により通信速度は向上するが、伝搬損失の増大や強い直進性により基地局当りの通信カバレッジが狭くなるため、中継器の高密度な設置が不可欠となる。しかし、電源や光ファイバの制約から設置場所の確保が困難であること、加えて基地局における消費電力が大幅に増加してしまう。そこで、本稿では無線電力伝送（WPT）を用いた低消費電力かつ自由な場所に設置可能な中継器を提案する。WPT信号を活用して電力供給と周波数変換、ビームフォーミングを同時に行うことで、周波数シンセサイザやアクティブ回路が不要となり、中継器に必要な機能を飛躍的に低い消費電力で実現する。初期のプロトタイプであるCMOSプロセスを用いた24 GHz帯WPT型中継器、GaAsダイオードによる256素子大規模・大電力生成可能な中継器、また5.7 GHz帯の利用による長距離化やDバンドを利用した中継器の高速化について紹介し、今後の無線電力伝送型中継器の展開について論じる。

Key Words

Wireless Power Transfer, Wireless Communication, Integrated Circuits, Phased Array, 5G

1 はじめに

1.1 無線通信の高周波化

無線通信に利用するキャリア周波数は、通信速度の向上とともに高くなってきている。現在移行期にある4G LTEにおいては、sub6と呼ばれる6 GHz未満の周波数帯が利用されているが、5Gシステムにおいては、一桁高い周波数の28 GHz帯を利用したサービスが始まっている。移動体通信システムの発展を10年単位で考えると、現在は、次世代の6Gの開始を見込んでいる2030年に対して折り返し地点にきている。6Gにおいては、5Gで導入されたミリ波帯よりも更に高い周波数の利用も検討されており、100 GHzを超えるような周波数帯を利用して、更なる通信の高速化を目指している。

一般に、周波数を高くしていけば、通信速度は向上する一方で、通信カバレッジは狭くなってしまふ。5Gの28 GHz帯では、1チャンネルの帯域幅が400 MHzと、Sub6と比べて10倍以上広いため、帯域幅に応じた高速化が可能となる。更に、6Gにおいては、より高い周波数を利用することで、10

GHzを超える帯域幅の無線通信の実現が期待されている。しかし、周波数の向上に伴い、自由空間伝搬損失が大きくなる。加えて電波の直進性が高くなり、見通し外での通信が困難になる。

ミリ波帯通信のカバレッジを広げるためには、きめ細やかな基地局の設置、そして無線中継器の配置が重要である。これまでのSub6周波数の基地局は、比較的低い伝搬損失や電波の回込みによって、1台の基地局で数km以上の範囲をカバーすることができた。ミリ波帯では、最大でも数百mであり、より多くの基地局、無線中継器が必要となる。

1.2 ミリ波帯中継器の課題

ミリ波帯通信の普及に向けた大きな課題の一つが、基地局や中継器の設置場所である。従来の周波数帯に比べ、飛躍的に高い密度で設置していく必要があるため、新たに基地局や中継器を設置する場所を確保することが難しくなっている。基地局等を設置するためには、電源の確保や光ファイバの敷設が必要であり、設置できる場所は限られる。

もう一つの大きな課題が、高速化が進む無線通信ネットワークが消費する電力である。5Gにおいては、ミリ波帯を利用することで10 Gbit/sを超える通信速度を実現し、6Gにおいては更なる高速化が期待されている。我々が利用するデータ量は指数関数的に増大してきており、それを支えるモバイル通信のトラヒックも急激に増加している。データトラ

† 東京科学大学, 東京都
Institute of Science Tokyo, Tokyo, 152-8552
Japan

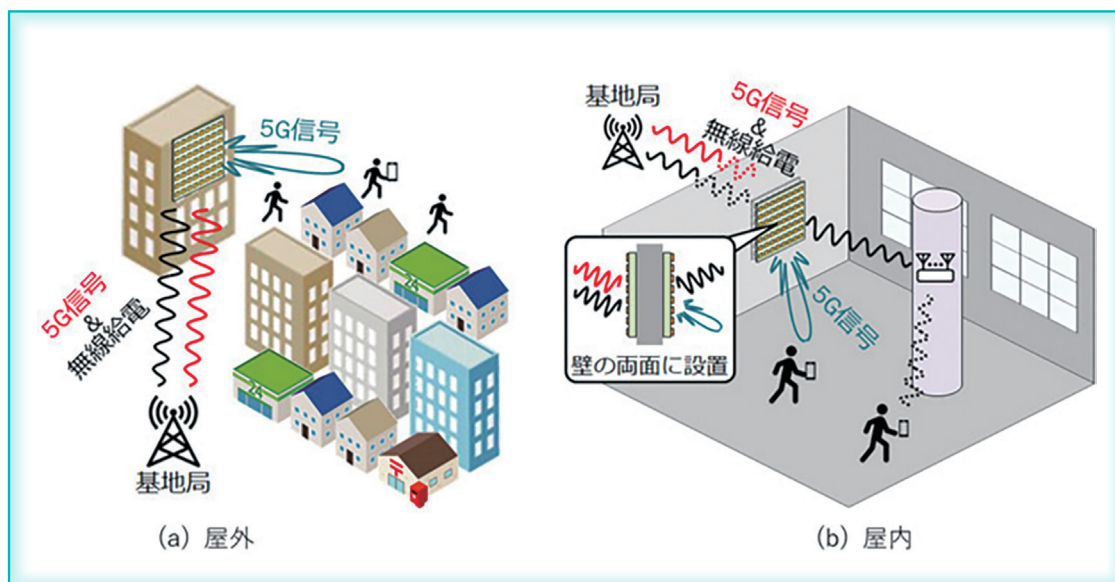


図1 提案する無線電力伝送型中継器のコンセプト

ヒックの増加は、通信インフラにおける信号処理のデータ量の増大や、通信方式の高度化につながり、基地局等の通信インフラにおいて消費される電力の増加をもたらす。このままトラヒックが増大していくと、2030年には年間2,000 TW・hを超える電力がネットワーク全体で消費されると予測されている⁽¹⁾。

持続的な無線通信の進化のためには、あらゆる場所で接続可能で、そして低消費電力の通信ネットワークが必要不可欠である。本稿では、無線電力伝送(WPT: Wireless Power Transfer)を利用することで、あらゆる場所に設置可能で、低消費電力な無線中継器について紹介する。

2 無線電力伝送型の無線中継器

2.1 コンセプト及び基本機能

図1に、提案するWPT型の無線中継器の基本的なコンセプトを示す。一般的な中継器は、外部電源から有線で電力供給することで動作していたが、本中継器では、ミリ波帯の通信信号だけでなく、WPT用の信号も同時に扱うことで、無線で電力供給が可能である。WPTの信号から電力を受け取ると同時に、WPT信号をローカル信号として利用することで周波数変換を行う。また、ミリ波帯通信に必須の機能である指向性を制御するビームフォーミング機能、そして中継信号を増幅するための増幅機能を有する。ビームフォーミング機能は、各アンテナ素子における信号の位相制御を行うことで実現し、高い指向性を実現しながらその指向性を電子的

に走査可能とする。

中継器に必要な電力をコンセントやバッテリーに頼らず、無線電力伝送することにより、電源線の敷設を考慮することなく様々な場所に中継器を設置することが可能となる。送られた電力は中継器においてRF-DC変換を行い、中継器で利用可能な直流電圧に調整した上で電源として利用される。

一方、無線電力伝送で供給できる電力は限られているため、中継器自体の消費電力を大幅に削減する必要がある。限られた電力によって、中継器の周波数変換、ビームフォーミング、増幅機能を実現する。本無線機では、WPT信号をローカル信号として利用し、ミリ波帯から中間周波数帯(IF: Intermediate Frequency)まで周波数変換を行い、低い周波数とすることで、低い消費電力でも信号増幅しやすく、また信号損を少なくできる。また、WPT信号を利用することでローカル信号を生成するための周波数シンセサイザが不要となるため、その分の消費電力も削減できる。このように必要な機能を実現するための消費電力を大幅に低減することで、無線電力伝送による限られた供給電力でも動作可能になり、外部電源そして電源線を不要とすることができる。

ミリ波帯では、自由空間伝搬損が大きいため、対象の方向に対して、利得を高くするためにビームフォーミングを行って指向性を高くする必要がある。中継器においても対象のデバイスに対してビームフォーミングを行う必要がある。従来のミリ波帯フェーズドアレイ無線機によるビームフォーミングでは、電力を消費するアクティブ型移相器や、電力消

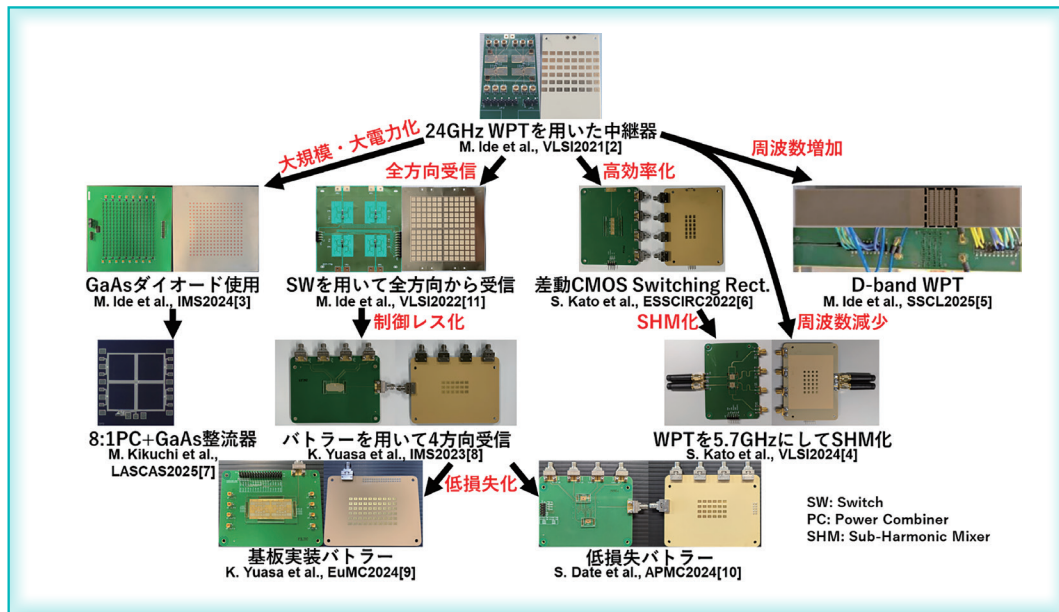


図2 研究グループによるこれまでの無線電力伝送型中継器の技術開発

費の無視できる損失の大きいパッシブタイプ移相器が必要であった。本中継器では、**2.2**で説明するように、WPT 信号を利用したり、WPT 信号の反射位相を調整したりすることで、非常に低い消費電力かつ高い分解能のビームフォーミングを可能にしている。

2.2 WPT 型中継器の技術開発体系

図2に、我々の研究グループでこれまでに研究開発してきた WPT 型中継器を示す。研究開発のスタートは、28 GHz 帯のミリ波 5G 通信用の中継器で、ISM (Industrial Scientific and Medical) バンドの 24 GHz の WPT 信号を利用して、WPT 型中継器を実現した。この中継器を基として、大規模・大電力化、ビーム制御の高度化、WPT の高効率化、利用周波数の多様化という、様々な方向性で研究開発を進めてきた。以降のセクションでは、最初の

WPT 型中継器⁽²⁾ から、大規模・大電力化を実現した中継器⁽³⁾、周波数の多様化によって伝送距離や通信速度を向上させた中継器^{(4), (5)} について紹介する.

3 24 GHz WPT を用いた CMOS ミリ波 5G 中継器

3.1 中継器の構成及び動作

図3に、24 GHzのWPT信号を利用しながら動作するミリ波5G中継器の構成図を示す⁽²⁾。本中継器は、ミリ波帯5G信号に対して周波数変換、ビームフォーミングを行いながら送信及び受信動作を行う。24 GHzのWPT信号をローカル信号として、28 GHz帯の5G通信信号を周波数変換するので、4 GHzのIF帯となる。このような無線通信と同時にWPTによる電力生成を行う。

送信時には、新たに考案したベクトル合成型バッ

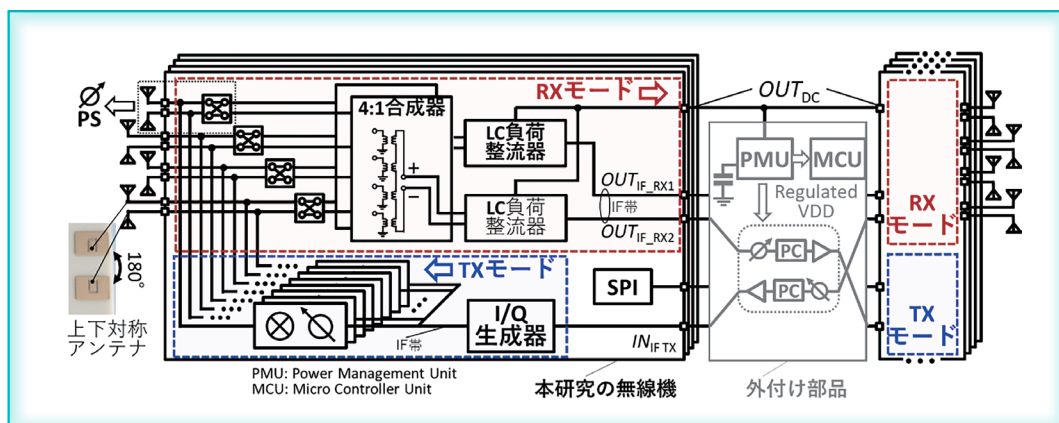


図3 24 GHz WPT を用いた CMOS ミリ波 5G 中継器

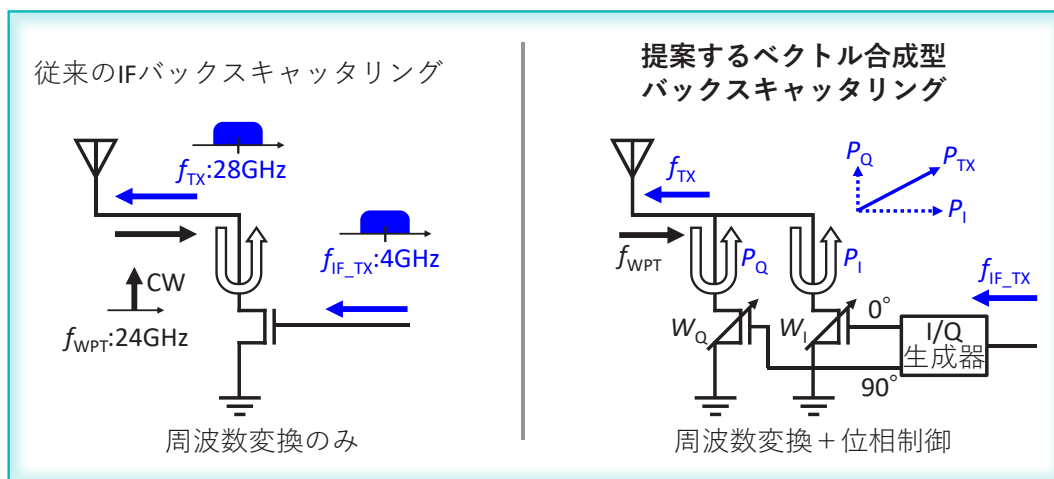


図4 提案するベクトル合成型バックスキッタリングの構成

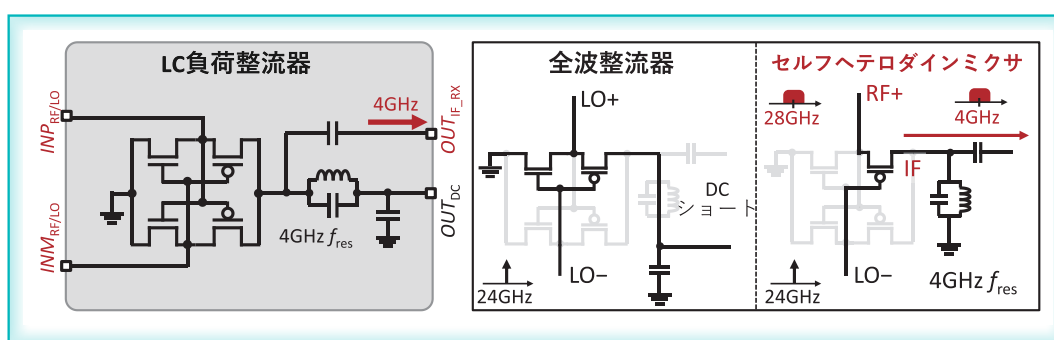


図5 受信側のLC 負荷整流器の動作

ックスキャッタリングを利用することで、WPT 信号の反射位相を調整し、高い精度のビームフォーミングが可能となる。図4に示すように、従来のIF バックスキャッタリング⁽¹²⁾では、IF 信号とWPT 信号をMOSFETのゲート端子とドレイン端子に入力することによって、周波数変換は行うことができるが、位相調整を行うことができなかった。今回、提案するベクトル合成型バックスキッタリングでは、二つのMOSFETに90度位相が異なるIF 信号をそれぞれ入力し、実効的なMOSFETのサイズを可変することによって、図4右上の P_I と P_Q の大きさを変化させ、0度から90度の間の任意の位相を作り出すことができる。実効的なMOSFETのサイズ可変は、5 bitのスウィッチ制御で実現しており、このベクトル合成を第1象限から第4象限まで行うことで、360度の位相制御を7 bitの高分解能で実現できる。

受信時には、LC 負荷整流器にWPT 信号とミリ波5G 信号が入力され、RF-DC 変換による電力生成とRF-IF 変換による周波数変換を行う。図5に、LC 負荷整流器の回路及び動作を示す。回路は、全波整流器の後段にLC 負荷が接続される構成となっており、LC 負荷はIF 帯で共振周波数を持つ。電力

生成の全波整流動作⁽¹³⁾は、n-MOSFET 及びp-MOSFETの双方がダイオードとして動作することで、24 GHzのWPT 信号をDC 信号へと変換する。一方で、周波数変換動作は、整流器の非線形性によって、セルフヘテロダインミキサ⁽¹⁴⁾として動作し、28 GHz帯の5G 信号を4 GHzへと周波数ダウンコンバートする。LC 負荷によって、DC 信号はインダクタを通りDC 出力へ、IF 信号はLC 負荷のインピーダンスが高く見えるので、IF 出力へ分離することができる。

3.2 試作したCMOS 中継器の測定評価結果

図6に試作したCMOS ミリ波5G 中継器を示す。4チップの無線ICを搭載しており、32素子のフェイズドアレー無線機となっている。無線ICはシリコンCMOS 65 nm プロセスを用いて製造し、1チップに8系統のトランシーバを搭載している。2×4の8素子に対して一つの無線ICが接続される。アンテナは、24 GHzと28 GHzの双方に対応するために、スロットを入れて広帯域化を図っている。±30度のビームフォーミングを僅か30 μWの消費電力で実現している。また、32素子全てのアンテナを用いて受電し、各アンテナに対して3 dBmの

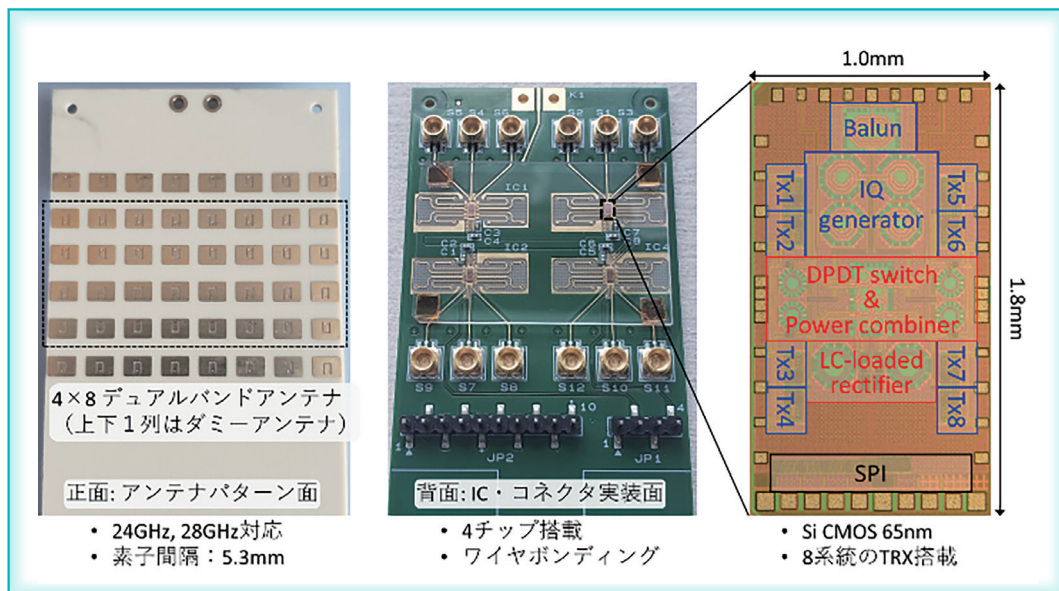


図6 試作した 24 GHz WPT 型 CMO ミリ波 5G 中継器

電力が入力されるときに 3.1 mW の直流電力を生成できることを確認した。今後 32 素子から更に大規模なアレーとすることで、中継器で必要となる増幅器やマイコンなどを動作させるのに十分な電力が供給可能となる。

4 GaAs ダイオードによる大規模・大電力 WPT 型中継器

3. で紹介した CMOS による WPT 型中継器は、直流出力電力が小さい、また試作段階においてはベアの CMOS チップを使ってアレー素子数を増やし大規模化するのが困難という課題があった。本章では、市販のディスクリート GaAs ダイオードデバイスを用いることで、容易に大規模化及び大電力化を実現できる中継器を紹介する。

4.1 中継器の構成と動作

図 7 に GaAs ダイオードをはじめとするディスクリート部品を用いて、大規模・大電力化を目指した 256 素子 WPT 型中継器の構成を示す⁽³⁾。本中継器では、一つのアンテナに対して一つの GaAs ダイオード⁽¹⁵⁾を接続し、整流及び周波数変換動作を行う。また、整流器の後段に 1 bit の移相器を設けることで、ビームフォーミングも可能としている。ディスクリート部品は集積化されていないため、分解能の高い移相器を作ることは面積制約より難しい。本中継器では、アンテナピッチが 5.3 mm となっており、5.3 mm 角に、多くの部品を持つ高分解能の移相器を実現するのは困難である。しかし、本中継器は 256 素子と素子数が多いため、各素子の 1 bit の粗い位相制御による誤差が全体として平均化され、結果としてある程度のビームフォーミングを実現可能である。

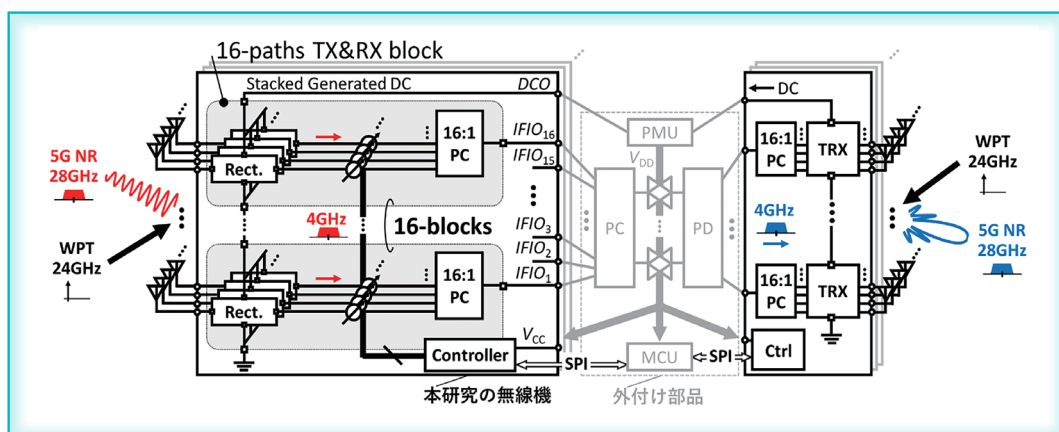


図7 GaAs ダイオードによる 256 素子 WPT 型中継器

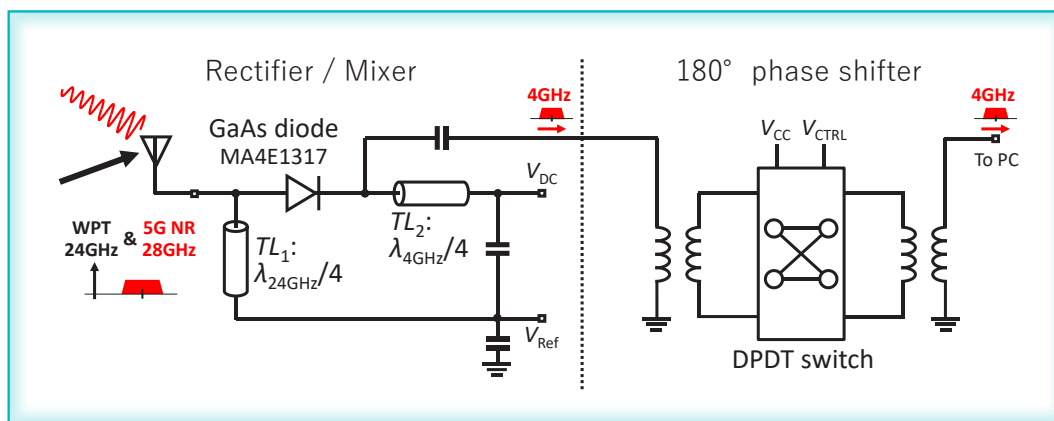


図8 1素子分の詳細回路図及び動作

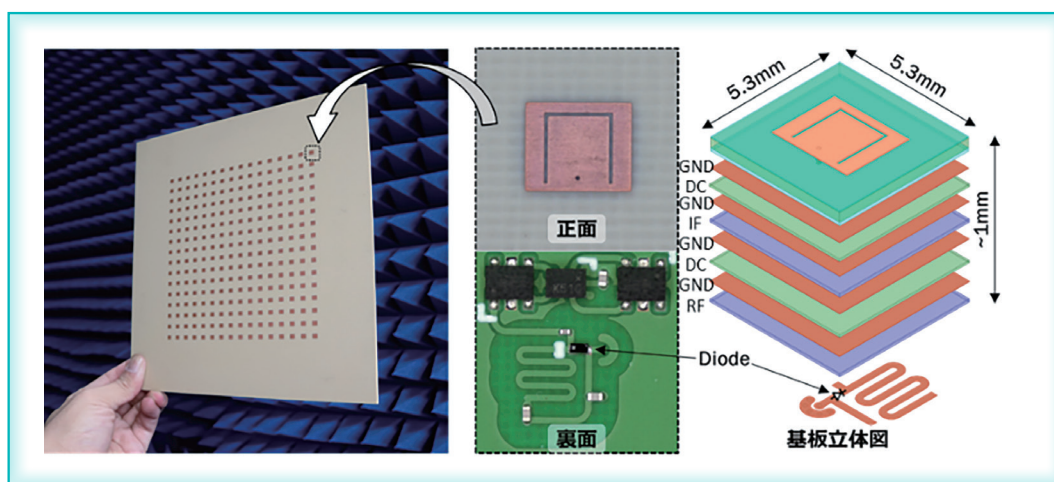


図9 試作した GaAs ダイオードによる WPT 型中継器

図8に、1系統分の詳細な回路図を示し、WPT及びミリ波5G信号の流れを示す。ダイオードと伝送線路で整流器が構成されており、半端整流で直流電力を生成しながら、ダイオードミキサとしても動作し、受信時には、28GHzの5G信号と24GHzのWPT信号を乗算することで、4GHz帯まで周波数変換を行う。送信時は、4GHz帯のIF信号とWPT信号がダイオードのアノード及びカソードそれぞれに入力されて、同様に乗算され、28GHz帯まで周波数アップコンバージョンが行われる。伝送線路のTL1及びTL2は、それぞれ24GHz及び4GHz帯において1/4波長となるように設計し、各周波数においてRFC(Radio Frequency Choke coil)として振る舞う。180度の1bit移相器は、バランとDPDT(Double Pole Double Throw)スイッチで構成し、差動信号の正負を入れ替えることで位相を反転させている。

4.2 試作した GaAs 中継器の測定評価結果

図9に示すような256素子のアレーアンテナを持つWPT型中継器を作成した。基板はMegtron6

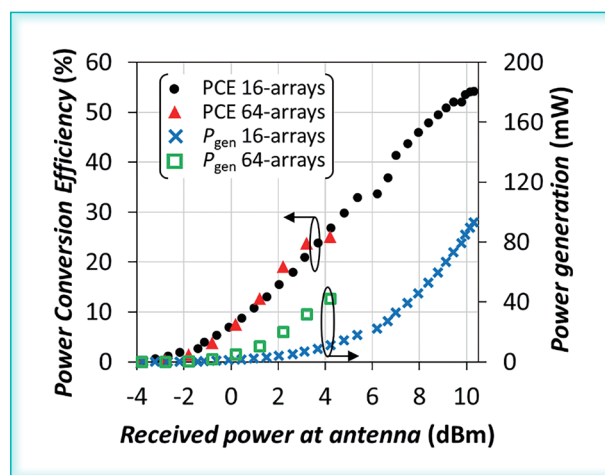


図10 WPTの測定評価結果

材を用いて、GaAsダイオード等、市販のディスクリット部品を実装している。アンテナは3.の中継器と同様に、スロットを入れることで広帯域化を実現している。本中継器をOTA(Over The Air)環境で測定評価を行い、WPTの特性では、1素子当たり54%の電力変換効率を達成し、入力電力3dBmのとき128素子の整流器の合計電力は56

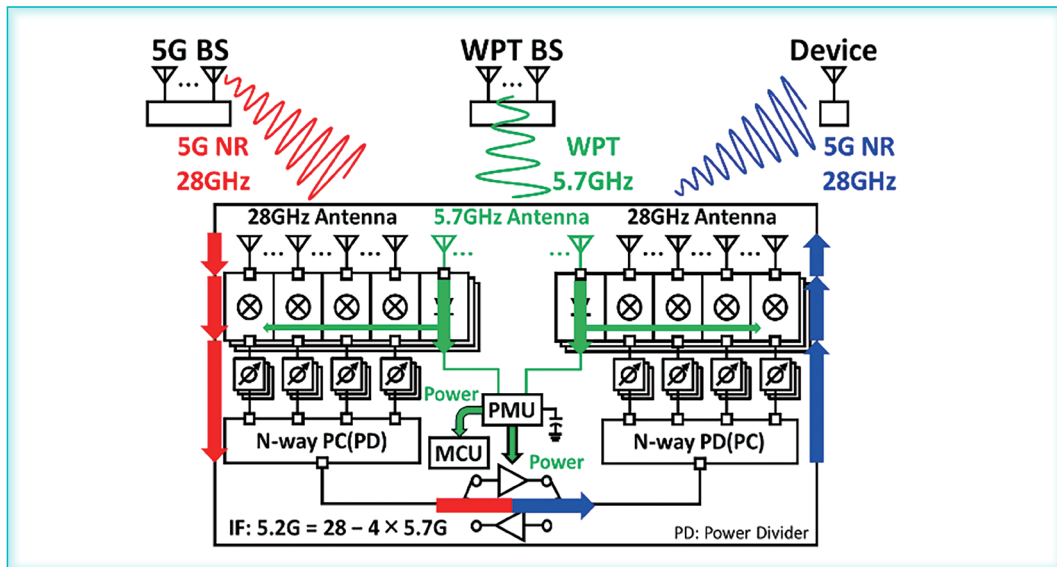


図 11 5.7 GHz 帯 WPT を利用した中継器

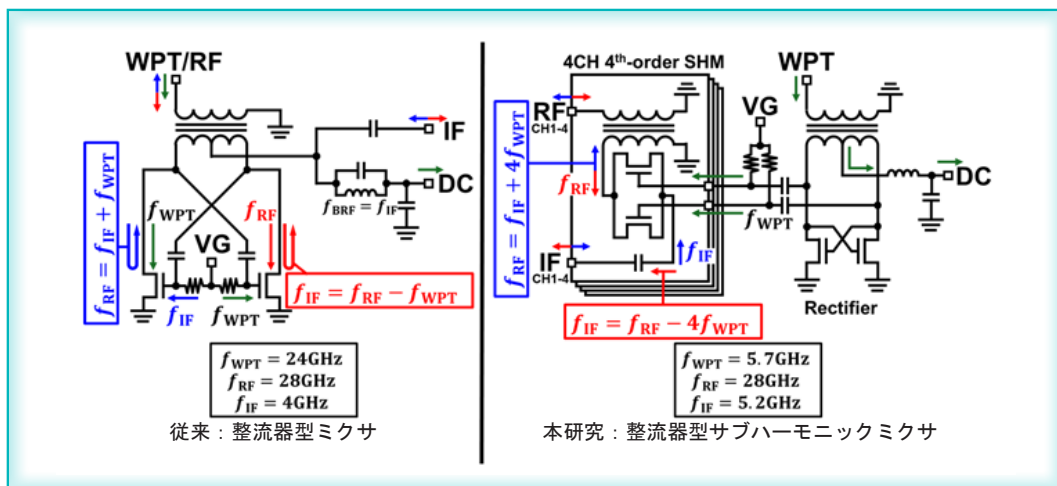


図 12 提案する整流器型 4 次サブハーモニックミキサ回路と動作

mW であった (図 10)。更に大きな WPT 電力を 256 素子全体に入力できれば、1 W 以上の出力電力が生成可能である。これは、高出力かつ高機能な中継器として動作させたときにも十分な生成電力である。また 5G NR の信号を用いて、EVM (Error Vector Magnitude) の測定を行い、送受ともに 64 QAM まで通信が可能であることを確認した。

5 WPT 周波数による中継器の高カバレッジ化と高速化

3. の 24 GHz の WPT 信号を利用した 28 GHz 帯 5G 中継器から、大規模かつ大電力化を目指した GaAs ダイオードによる WPT 型中継器を 4. で紹介した。これまでは、WPT 周波数をミリ波 5G 周波数に近く、かつ ISM バンドである 24 GHz を利用してきた。5. では、WPT 周波数を 5.7 GHz ま

で下げて長距離化を目指した中継器⁽⁴⁾、及び 122 GHz の D バンドまで上げて高速化を目指した中継器⁽⁵⁾ について紹介する。

5.1 5.7 GHz WPT によるスマートファクトリー向け 5G 中継器

WPT 周波数として 5.7 GHz を用いることで、より広い範囲かつ障害物があるような状況でも無線電力伝送が可能となる。これまで紹介した 24 GHz 帯 WPT は、ミリ波 5G のキャリア周波数に近いため、比較的低い IF との周波数変換を行いやすい反面、伝搬損が大きく、また障害物などによって電波が遮られやすいという課題があった。そこで、ISM 帯であり、国内において無線電力伝送用の周波数として割り当てられている 5.7 GHz を利用した WPT 型中継器を実現した。

図 11 は、5.7 GHz 帯の WPT を利用したミリ波

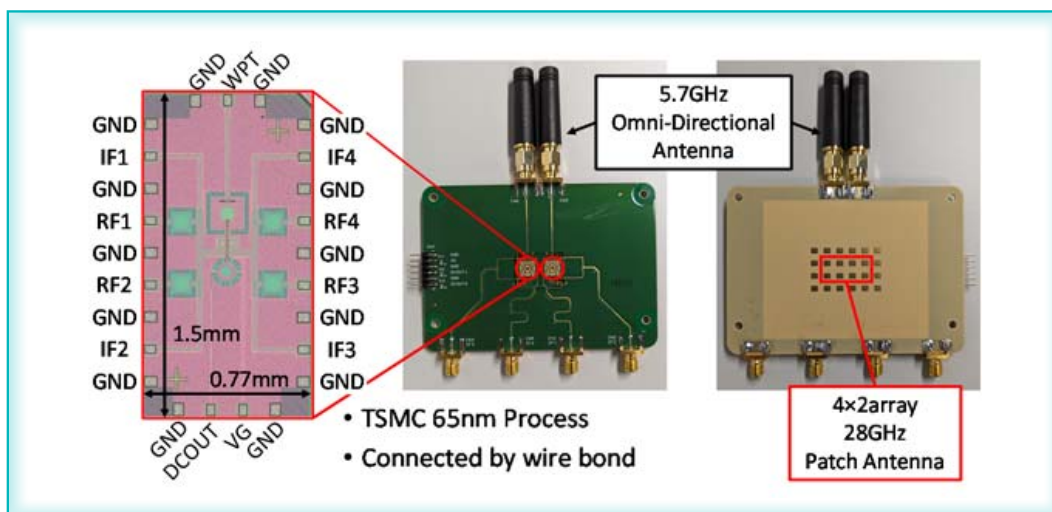


図 13 試作した 5.7 GHz 帯 WPT 型中継器

帯 5G 中継器であり、これまでの中継器と同様に、電力生成、周波数変換、ビームフォーミングといった機能を有する。しかし、一般的な乗算ミキサでは 5.7 GHz を用いて 28 GHz をある程度低い IF 帯に変換することができない。そのため、本中継器では、4 次のサブハーモニックミキサ回路を用いることで、5.2 GHz の IF 帯へと変換することを可能にした。従来の整流器型ミキサ⁽⁶⁾では、WPT の電力変換効率と周波数変換利得の間にトレードオフ関係があり、両方を同時に最大化できなかった。そこで、本中継器では、整流器とサブハーモニックミキサの役割を持つ n-MOSFET を分け、ゲート幅及びゲートバイアス電圧をそれぞれに対して最適化できるように構成とした (図 12)。

図 13 は、実際に作成した 5.7 GHz 帯 WPT 型中継器のプロトタイプであり 2 チップの無線 IC と 8

素子の 28 GHz 帯アンテナ、及び 2 個の 5.7 GHz 帯アンテナで構成している。RF-DC 変換効率は最大で 55 % である。WPT 距離は 24 GHz 帯と比べると同じ変換効率で比べたとき、整流器の効率の向上及び伝搬損の低減により、約 5 倍伸ばすことが可能となる。実際に OTA 環境で、28 GHz の 5G NR MCS19 の信号を周波数変換して、通信特性を評価し、良好な特性を確認した。

5.2 D バンドを利用した高速 WPT 型中継器

最後に 5G の次の世代の高速無線通信に向けた D バンドを利用した WPT 型中継器について紹介する⁽⁵⁾。これまで紹介した中継器のキャリア周波数は 28GHz 帯であったが、更に広い帯域を利用した高速通信が可能な D バンドに対応する中継器を作成した。キャリア周波数は 135 GHz とし、WPT

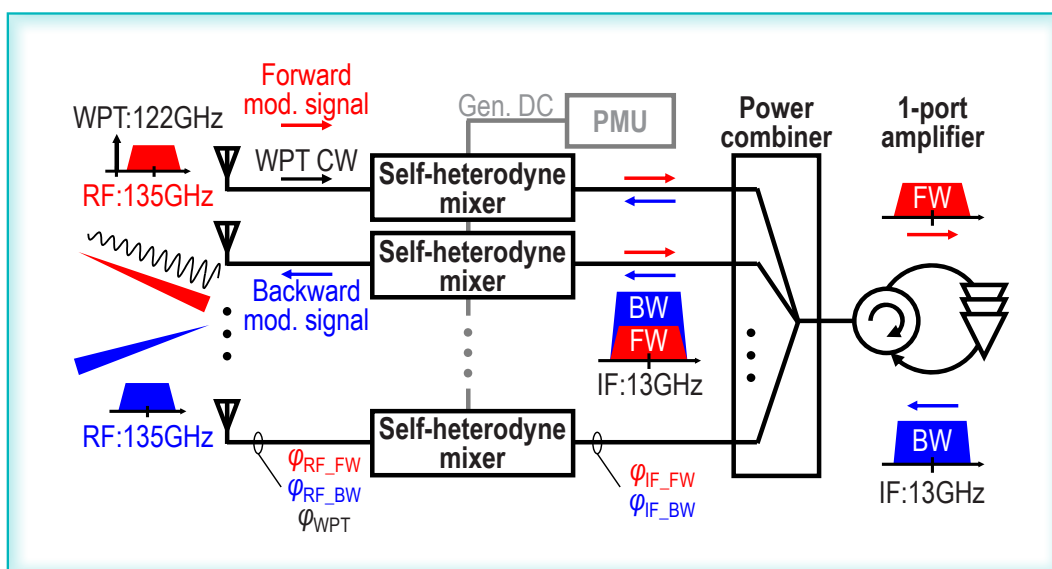


図 14 D バンド WPT 型中継器

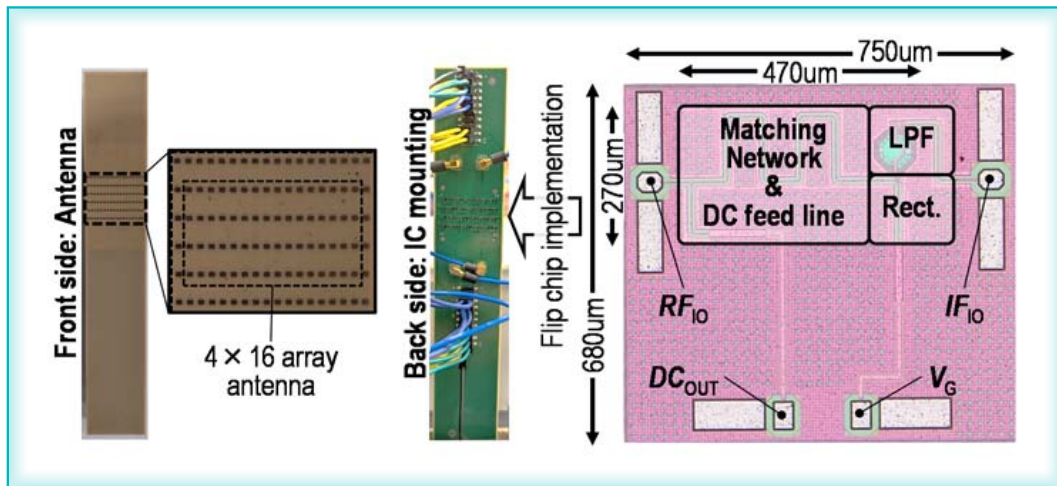


図 15 試作した D バンド WPT 型中継器

周波数は ISM バンドの 122 GHz を利用し、IF バンドを 13 GHz としている。キャリア周波数が高ければ高いほど、広い帯域を確保しやすくなり、無線通信の速度が向上する。その一方で、伝搬損失は高くなり、また増幅器の雑音や出力電力といった性能は落ちていくために、通信距離を確保するのが困難となり中継器の重要性はより高まっていく。

図 14 に、D バンドの WPT 型中継器の構成を示す。この構成では、アクティブ反射板としての動作を目指し、これまでの中継器と同様に WPT 信号を利用して周波数変換を行う。135 GHz 帯の無線通信信号を、122 GHz の WPT 信号を利用して 13 GHz の IF バンドに周波数ダウンコンバートする。そして、電力合成、増幅したのちに再度 122 GHz の WPT 信号で周波数アップコンバートし、WPT 信号の入射角に応じた反射角で反射させる。

実際に図 15 に示すような D バンドで動作する WPT 型中継器を、CMOS 65 nm プロセスを用いて作成した。122 GHz の WPT 信号において、入力電力が 9.3 dBm のとき 12.2 % の電力変換効率を達成している。また 6 GHz の広帯域な信号を用いて 64 QAM 時に 48 Gbit/s のデータレートを達成している。

6 まとめと今後の展開

本稿では、電源の敷設を必要とせず、設置場所の自由度が高く、消費電力が非常に小さい WPT 型ミリ波帯中継器について紹介した。最初のプロトタイプである 24 GHz の WPT を利用した 28 GHz 帯 5G 中継器から、大規模・大電力化、長距離化、高速化といった方向で展開させた WPT 型中継器を実現してきた。

本研究の WPT 型中継器の構成は、28 GHz 帯だけでなく、更に高い 39 GHz 帯や 60 GHz 帯、更には 100 GHz を超える周波数帯においても適用可能であり、今後の 6G 時代に向けて中継器の更なる高周波化を加速させることができる。キャリア周波数が高ければ高いほど、損失が大きく、信号の増幅に必要な消費電力は大きくなるために、アンテナから受信後すぐに中間周波数に落として増幅を行い、アンテナの直前でまたキャリア周波数に上げて出力するという、本中継器の構成は、周波数が高ければ高いほど重要性を増していく。

また、無線電力伝送は、同じ距離かつ同じアンテナサイズにおいては、伝搬損失と送受のアンテナ利得の関係から波長の二乗に反比例して、すなわち周波数が高いほど、伝送できる電力が増えていく。そのため、今後のデバイス・回路技術の進展による整流器及び電力増幅器の効率の向上とともに、本 WPT 型中継器の利用範囲は広がっていく。

究極的には、あらゆる場所で WPT が利用可能な環境が屋内・屋外問わず整備され^{(16)~(18)}、その WPT 信号を利用する中継器がきめ細やかに設置されることで、ミリ波帯通信のカバレッジの大幅な拡大を目指していきたい。

謝辞 本研究の一部は、総務省 SCOPE (192203002, 192103003, JP235003011), NICT 委託研究 (00601), JST A-STEP 産学共同 (JPMJTR211D), 総務省委託研究 (JPJ000254), 並びに東京大学 VDEC 活動を通し、日本ケイデンス株式会社、シノプシス株式会社、メンターグラフィクス株式会社及びキーサイト・テクノロジー株式会社の協力で行われたものである。

文献

- (1) 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, “ワイヤレス電力伝送技術によるカーボンニュートラル社会への貢献,” JST 低炭素社会戦略センター政策提言, 2020. <https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2020-pp-04.pdf> (参照日: 2025 年 5 月 15 日)
- (2) M. Ide, A. Shirane, K. Yanagisawa, D. You, J. Pang, and K. Okada, “A 28-GHz phased-array relay transceiver for 5G network using vector-summing backscatter with 24-GHz wireless power and LO transfer,” 2021 Symposium VLSI Circuits, pp. 1-2, June 2021.
- (3) M. Ide, K. Yuasa, S. Kato, T. Tamura, K. Okada, and A. Shirane, “A 256-element phased-array relay transceiver for 5G network using 24-GHz wireless power transfer with discrete ICs,” IEEE Microw. Wirel. Technol. Lett., vol. 34, no. 6, pp. 793-796, June 2024.
- (4) S. Kato, S. Date, T. Ruoxin, Y. Narukiyo, H. Hayashi, and K. Yuasa, “A 28GHz 5G NR wirelessly powered relay transceiver using rectifier-type 4th-order sub-harmonic mixer,” 2024 IEEE Symposium on VLSI Technol. and Circuits, pp. 1-2, June 2024.
- (5) M. Ide, K. Yuasa, S. Kato, S. Date, T. Tomura, and K. Okada, “A 122GHz wirelessly powered active reflector for D-band communications,” IEEE Solid-State Circuits Lett., vol. 8, pp. 97-100, March 2025.
- (6) S. Kato, K. Yuasa, M. Ide, A. Shirane, and K. Okada, “A CMOS full-wave switching rectifier with frequency up-down conversion for 5G NR wirelessly-powered relay transceivers,” IEEE ESSCIRC, 2022, pp. 345-348, Sept. 2022.
- (7) M. Kikuchi, M. Ide, J. Mayeda, S. Kato, K. Yuasa, and K. Okada, “Millimeter-wave GaAs rectifier with differential signal 4:1 power combiner for simultaneous wireless information and power transmission,” IEEE LASCAS, Feb. 2025.
- (8) K. Yuasa, M. Ide, S. Kato, K. Okada, and A. Shirane, “Beam control free 28GHz 5G relay transceiver and 24GHz wireless power receiver using on-chip butler matrix,” 2023 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium, pp. 199-202, June 2023.
- (9) K. Yuasa, M. Ide, S. Kato, T. Tomura, K. Okada, and A. Shirane, “5G NR transceiver and 24GHz wireless power receiver utilizing a low insertion loss differential output butler matrix for long-range wireless transmission,” 2024 European Microw. Conf., pp. 892-895, Sept. 2024.
- (10) S. Date, K. Yuasa, M. Ide, S. Kato, K. Okada, and A. Shirane, “Beam control free transceiver using CMOS 4×4 matrix for 5G relay communication and wireless power transfer,” IEEE Asia-Pacific Microw. Conf., pp. 713-715, Nov. 2024.
- (11) M. Ide, K. Yuasa, S. Kato, D. You, A. A. Fadila, and J. Pang, “A 28-GHz fully-passive retro-reflective phased-array backscattering transceiver for 5G network with 24-GHz beam-steered wireless power transfer,” IEEE Symposium VLSI Technol. and Circuits, pp. 96-97, June 2022.
- (12) A. Shirane, Y. Fang, H. Tan, T. Ibe, H. Ito, and N. Ishihara, “RF-powered transceiver with an energy- and spectral-efficient IF-based quadrature backscattering transmitter,” IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 50, no. 12, pp. 2975-2987, Dec. 2015.
- (13) K. Kotani, A. Sasaki, and T. Ito, “High-efficiency differential-drive CMOS rectifier for UHF RFIDs,” IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 44, no. 11, pp. 3011-3018, Nov. 2009.
- (14) Y. Shoji, K. Hamaguchi, and H. Ogawa, “Millimeter-wave remote self-heterodyne system for extremely stable and low-cost broad-band signal transmission,” IEEE Trans. Microwave Theory Techn., vol. 50, no. 6, pp. 1458-1468, June 2002.
- (15) S. P. Gao, W. Hu, H. Zhang, and Y. Guo, “Millimeter-wave rectifiers using proprietary Schottky diodes: diode modeling and rectifier analysis,” Proc. Wirel. Power Week (WPW), pp. 180-184, July 2022.
- (16) 東芝インフラシステムズ株式会社, “東芝マイクロ波給電技術とは.” <https://www.global.toshiba/jp/products-solutions/social/telecommunication/microwave-power-supply/about.html> (参照日 2025 年 5 月 15 日) .
- (17) ソフトバンク株式会社, “未来の充電はワイヤレスに. 電力の世界に変革をもたらす無線電力伝送,” ソフトバンクニュース, 2022 年 6 月 22 日. https://www.softbank.jp/sbnews/entry/20220622_02 (参照日 2025 年 5 月 15 日) .
- (18) 京セラ株式会社, “「空間伝送型ワイヤレス電力伝送システム」を実現する基礎技術を開発,” 2023 年 10 月 11 日. <https://www.kyocera.co.jp/newsroom/news/2023/002277.html> (参照日 2025 年 5 月 15 日) .

(2025 年 4 月 7 日受付, 5 月 15 日再受付)

白根篤史 (正員)

2010 東工大・工・電気卒. 2012 同大学院修士課程了. 2015 同博士課程了. 博士(工学). 同年(株)東芝入社. 2017 日本電産株式会社入社. 2018 東工大助教. 2022 同大学准教授. 2024 東京科学大准教授. 現在に至る. 無線通信, 衛星通信, 及び無線電力伝送向け集積回路の研究に従事. IEEE 会員.

