

## トレンド

# 電力ネットワークの次世代化を支える電力流通システム

## Power Transmission and Distribution Systems Enabling Next Generation of Power Grids

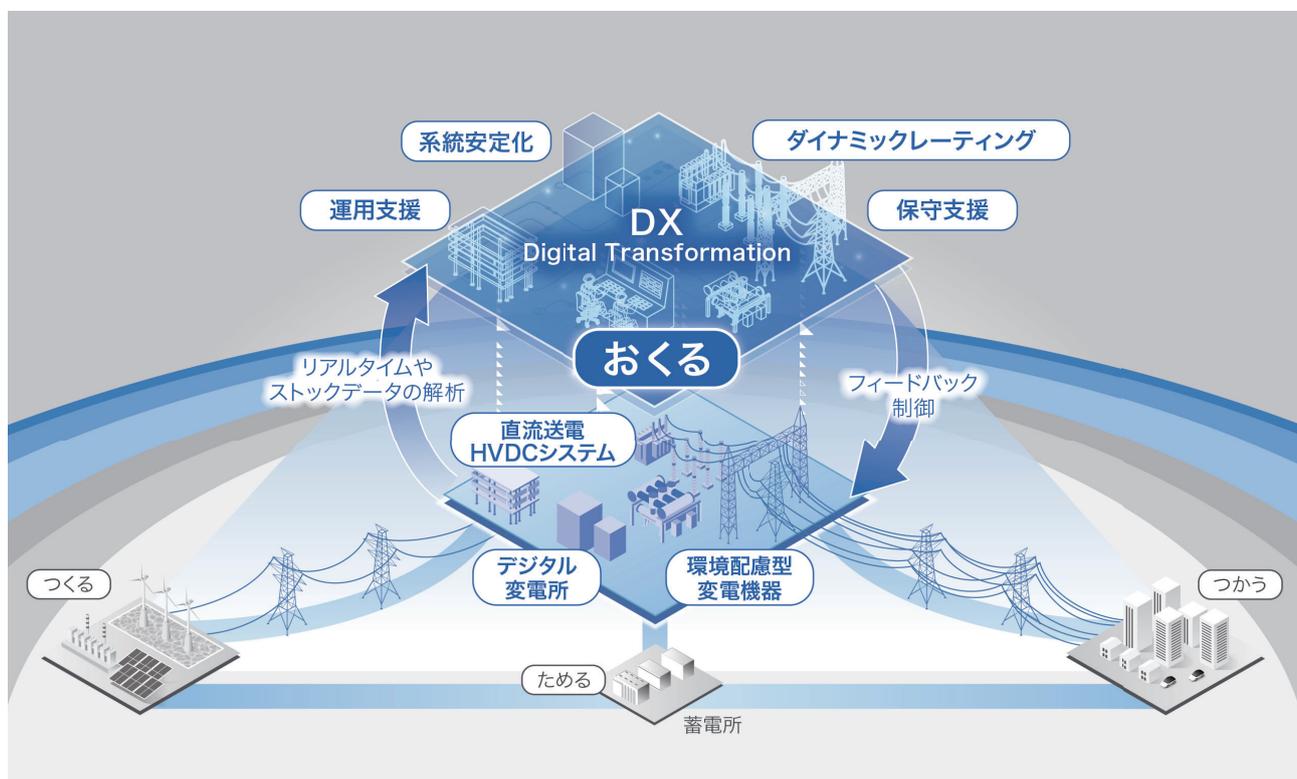
佐藤 純正 SATO Yoshimasa 南 裕二 MINAMI Yuji

2050年のカーボンニュートラル実現に向けて、電力ネットワークの次世代化が進んでいる。すなわち、電力ネットワーク設備の環境負荷低減、既設設備能力の最大限活用による脱炭素化、再生可能エネルギー（以下、再エネと略記）の導入拡大に向けた電力安定供給の基盤強化、自然災害などに備えた電力供給のレジリエンス強化、及び電力系統運用の高度化・デジタル化の進展である。電力ネットワークは、電力の供給と制御を行う様々な機器とシステムから構成されている。これらの機器・システムは電力流通システムと称され、電力ネットワークの次世代化の中核として、その役割は今後一層重要になる。

東芝グループは、電力流通システムの開発を通して電力ネットワークの次世代化（特集の概要図）に貢献していく。

Efforts to achieve carbon neutrality by 2050 are driving advancements in next-generation power grids. Specifically, this includes lessening the environmental burden caused by power grid facilities, maximizing the capabilities of existing facilities to assist with decarbonization efforts, strengthening the foundation for a stable power supply to expand renewable energy coverage, enhancing power supply resilience against natural disasters, and making power system operations more sophisticated while pushing digitalization forward. Power grids consist of various devices and systems that supply and control electric power referred to as power transmission and distribution systems, and their role will become increasingly important as the backbone of next-generation power grids.

The Toshiba Group is contributing to next-generation power grids through the development of better power transmission and distribution systems.



特集の概要図. 電力ネットワークの次世代化を支える電力流通システム

Outlook for power transmission and distribution system supporting next-generation power grids

## 1. 我が国の電力ネットワークを取り巻く環境

世界全体の平均気温の上昇を工業化前と比べて1.5℃に抑制する努力目標を掲げたパリ協定の発効（2016年11月）を受け、2018年7月に閣議決定された我が国の第5次エネルギー基本計画では、その対応が検討された。加えて、2020年のG20サミットで、日本政府は2050年までに温室効果ガスの排出を実質ゼロにする国際公約を表明した。2021年に策定された第6次エネルギー基本計画では、2013年度比で2030年度の温室効果ガス排出量を46%削減すると具体的な目標が示された。更に、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、2013年度比で温室効果ガスを2035年度に60%、2040年度に73%削減する野心的な目標が検討されている<sup>(1)</sup>。

一方、世界の電力需要は、一時的な鈍化はあるものの基本的に増加傾向にある（図1）。このことから、積極的な温室効果ガス排出削減に向けての取り組みを行わないと、前述のパリ協定で掲げられた削減目標の達成は難しい。

電力ネットワークで使用される設備は、自ら発電を行うものではなく、送電損失も低く抑えられているため、自身が二酸化炭素を直接排出することはほとんどない。しかし、特に高電圧・大容量の開閉装置を中心に長らく絶縁媒体・電流遮断媒体として用いられてきた六フッ化硫黄（SF<sub>6</sub>）ガスの地球温暖化係数は、二酸化炭素の24,300倍<sup>(3)</sup>と非常に大きい。厳しい運用管理の下、その排出量こそ二酸化炭素に比較すればごく僅かであるものの影響は無視できず、世界的にその段階的な使用制限についての議論が進められてお

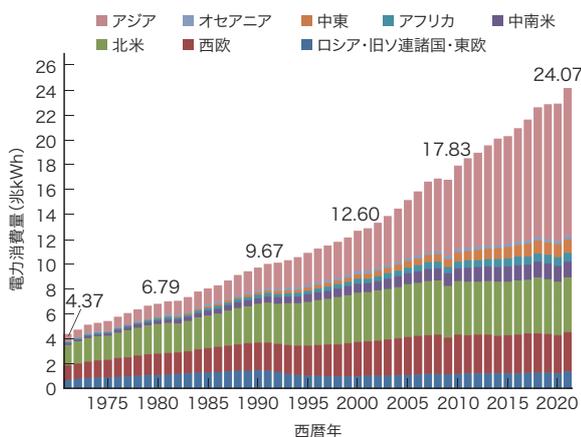
り、一部の国・地域では既に施行されている。

このような状況下、今後も続く予想される電力ネットワーク関連機器の旺盛な需要、及び膨大な既納品への対応のために、代替媒体による製品開発、及び既納品へのソリューションが求められている。

また、環境負荷低減につながる取り組みはSF<sub>6</sub>ガスに限らず多方面で進められている。例えば変圧器の絶縁媒体として用いられてきた鉱油に代わり、相対的に環境負荷が低く難燃性であるエステル油の採用が国内外で低容量機種から進められている。

加えて、電力システム全体では、電源の脱炭素化に寄与する再エネの大量導入が推進されており、再エネ増大に伴う電力系統の供給品質や慣性力の低下に対処することが課題になる。更に、海外の地域紛争によるエネルギー資源の不安定な供給・安定電源不足（原子力発電の停止など）に伴う需給ひっ迫、及び大規模地震などの自然災害による大規模停電やその長期化などを回避していく上で、我が国の東西間（50/60 Hz間）の電力融通量増強や、北海道・九州などから電力大消費地への長距離の高圧直流送電（HVDCシステム）実現など、電力供給を維持するためのレジリエンス強化もまた重要である。交直変換技術は、従来のサイリスターバルブを用いた他励式だけでなく、自己消弧型素子を用いた自励式の採用が国内外で進んでいる。また自励式変換器の中でも、従来の2レベル方式から最近ではMMC（Modular Multilevel Converter）方式が開発、採用されるようになり、変換損失が大きく低減されたこともあって、再エネ電源による発電電力の大容量送電への適用が期待される。

また、世界の電力需要の増加傾向と同様に今後の我が国の電力需要も増えることが見込まれており、電力安定供給の重要性は一層高まる。電力広域的運営推進機関（以下、電力広域機関と略記）は2024年に、2024年度から2029年度にかけて電力需要が年率0.6%程度で増加する見通しを報告した<sup>(4)</sup>。我が国の電力需要が増加する背景として、デジタルトランスフォーメーション（DX：Digital Transformation）の進展や、第6次エネルギー基本計画の方針下で政府のGX実行会議などで議論されたグリーントランスフォーメーション（GX：Green Transformation）の実現への基本方針（2023年2月閣議決定）がある。この方針では、今後10年を見据えたGXのロードマップを示しており、2050年カーボンニュートラルの実現とそれに伴う産業構造変化で競争力強化や経済成長を実現する取り組みがまとめられており、GXによる電化の今後の進展が見込まれる。更に、GX基本方針はその後、エネルギー、GX産業立地、



\*資源エネルギー庁、「令和5年度 エネルギーに関する年次報告」<sup>(2)</sup>を基に作成

図1. 世界の電力消費量の推移（地域別）

世界の電力消費量は増加傾向にあり、1971年からの50年間で5倍以上に増加した。

Global trends in electricity consumption by region

GX産業構造、及びGX市場創造を総合的に検討し、より長期的な政策方針（GX2040ビジョン(案)）がまとめられている（2024年12月）<sup>(5)</sup>。このビジョンでは、DXによる電力需要増に対応するために、再エネの拡大や、原子力発電所の再稼働、火力の脱炭素化、電力系統の増強などの必要性が示されている。

## 2. 電力ネットワークの次世代化

我が国の電力産業では、電力システム改革が進められてきた。この改革の目的は、電力市場への参入障壁を低くし、電力関係の新規事業者の参入を増やして、電力市場の競争原理に基づき、電力産業全体の活性化と効率化を促進することであった。2015年4月には、電気事業法が改正され、全国電力ネットワークの広域運用を行う電力広域機関が創設された。加えて、小売りと発電の全面自由化や、発送電の法的分離などが段階的に実施された。更に、一般送配電事業者が電力の安定供給に重要となる電力需要と供給を一致させる電力（調整力）を確保するために、2021年に需給調整市場が開設された。

一方で、再エネの大量導入に向けて、既存送電網を最大限活用するために緊急時用の送電容量を平時に利用すること（N-1電制）や、ノンファーム型電源（再エネの変動性電源）の接続導入を、2018年以降に“日本版コネクト&マネージ”として進めてきた。加えて、2023年に電力広域機関は、再エネの大量導入と電力レジリエンスの確保に必要な地域間連系線を整備する広域連系マスタープランを策定した。同年、一般送配電事業者に対して、業務効率化を前提とし安定収益を得る仕組み（レベニューキャップ制度）も導入された。

このように、一連の電力システム改革は進展したが、新たな課題への取り組みも必要になっている。再エネの導入拡大・GX2040ビジョン(案)の実現に伴う電化推進、及び半導体工場の新規立地やデータセンターの増加による局所的な電力需要の増加が見込まれており、引き続き電力の安定供給を維持し、加えて、自然災害に備えて電力供給のレジリエンスを一層強化する必要がある。

このような背景の下、経済産業省の資源エネルギー庁では、電力ネットワークの次世代化が議論されている<sup>(6)</sup>。第一に、再エネの導入拡大と電力安定供給の実現のために、電力ネットワークの地域間連系線（北海道本州間海底直流送電や関門連系線など）や局所的大規模需要なども含めた地内基幹系統の増強などを整備することである。第二に、電力ネットワークの系統運用の高度化やデジタル化への更なる取り組みである。第三に、地域マイクログリッドなどでの、

配電事業者との連携による分散型リソースを活用した脱炭素への取り組みである。

これらの取り組みの中で、特に多様な最新技術が必要となる第二の取り組みを詳しく見てみる。この取り組みでは、脱炭素化、レジリエンス向上、DX・効率化に資する具体的な課題として、一般送配電事業者が取り組んでいる事例がある<sup>(7)</sup>。例えば、脱炭素化では、既存系統の有効活用として、従来の日本版コネクト&マネージに加えてダイナミッククレーティングや混雑管理システムなどの導入、配電運用高度化、SF<sub>6</sub>ガスレス機器の採用などである。レジリエンス向上では、HVDCシステムをはじめとした広域連系の拡大・強化、高耐量酸化亜鉛素子と高機能ポリマー材料による高性能で軽量な避雷器の適用、系統安定化装置の災害対応機能の強化、サイバーセキュリティの強化などが挙げられる。DX・効率化では、AIを活用した設備の異常診断技術、デジタル技術を活用したドローン・ロボットなどの活用、変電所のデジタル化、及び電力データ活用に資するシステム構築などがある。加えて、計測粒度の細分化や通信規格の多様化などを図る次世代スマートメーター（2025年度導入計画）は、レジリエンス強化、デマンドレスポンス・省エネ促進などへの有効活用も期待されている。

更に、将来の電力システム全体を見据えて取り組むべき課題として、電力市場の取引最適化がある。我が国では、電力市場における電源約定に系統制約などを考慮していない。電力の効率的・安定的な調達に向けて、系統制約を考慮して供給力・調整力を同時に約定させる仕組みの市場（以下、同時市場と略記）を検討するために、資源エネルギー庁と電力広域機関を事務局とした検討会が2023年度に設けられた<sup>(8)</sup>。

この同時市場の構想では、系統制約を考慮して、電源起動費、最低出力費用、増分費用（Three-Part情報）を最も経済的にする電源の起動停止（SCUC：Security Constrained Unit Commitment）と出力配分（SCED：Security Constrained Economic Dispatch）が必要であり、その実現が技術課題である。

## 3. 東芝グループの電力流通システムへの取り組み

東芝グループは、電力ネットワークにおいて電力を供給・制御するインフラとして、開閉装置・変圧器・避雷器などの変電機器や、パワーエレクトロニクス技術を応用したHVDCシステム・無効電力補償装置、電力系統を監視・制御・保護する装置などを開発し、電力事業者に提供してきた。以下に東芝グループの取り組みを述べる。

### 3.1 環境負荷低減

1章に述べたとおり、電力流通システムはその稼働時に直接的に地球温暖化ガスを排出するわけではないが、環境負荷低減に向けて貢献できる様々な取り組みを行っている。使用規制が始まったSF<sub>6</sub>ガスの代替技術開発は世界的にも喫緊の取り組みであるし、再エネ大量導入に適した送電方式としてのHVDCシステムは国内外での適用拡大が計画あるいは既に実行されている。

また、膨大な設備量を持つ電力流通システムの全てを短期間で新しい技術に代替することは不可能であり、既存システムの機能・性能を損なわずに環境負荷低減を実現する技術開発に取り組んでいる。

#### 3.1.1 脱SF<sub>6</sub>ガス技術

SF<sub>6</sub>ガスは、優れた絶縁性能・電流遮断性能を持ついるために、長年の研究開発にもかかわらず完全にその性能を代替する絶縁媒体は実用化されておらず、依然として複数の絶縁媒体や方式が提案されている状態にある。特に膨大なSF<sub>6</sub>使用設備量を持つ開閉装置では、脱SF<sub>6</sub>ガス技術の確立が非常に重要な課題である。例えば国内の電力系統の開閉装置では、最上位の定格電圧は550 kV、定格電流は8,000 Aまでが規格化されており、短時間耐電流としては63 kAまでの対応が求められる。環境負荷低減への貢献と、最上位定格機器までの脱SF<sub>6</sub>ガス実現を両立させるために、自然由来ガス及びその組み合わせを絶縁媒体とすることとし、N<sub>2</sub>（窒素）とO<sub>2</sub>（酸素）の人工合成ガスを絶縁媒体とした72/84 kVのガス絶縁開閉装置を開発した（この特集のp.8-11参照）。

一方、変圧器は、高電圧・大容量の電力用として、ガス絶縁方式と油絶縁方式に大別される。ガス絶縁変圧器は、開閉装置と異なり電流遮断を必要としないことから、単一ガスで所要性能を満たせる可能性があり、現在N<sub>2</sub>ガスを絶縁媒体に選定して66 kV-20 MVA器の開発を進めている（同p.12-16参照）。

#### 3.1.2 環境調和技術

油絶縁方式の変圧器は、これまで主に鉱油が使われてきたが、鉱油よりも環境適合性が高く、かつ難燃性という特徴を持つエステル油を絶縁媒体とした変圧器が普及してきており、東芝グループでも天然エステル油を適用した変圧器を開発した（同p.17-20参照）。

#### 3.1.3 HVDCシステム技術

再エネによる発電電力の長距離輸送に適したHVDCシステム向けの自励式交直変換技術が、国内外で注目されている。当社は我が国で初めて<sup>(注1)</sup>自励式交直変換技術を採用

（注1）2019年3月時点、東芝グループ調べ。

したMMC方式HVDCシステムを実現した（同p.21-24参照）。この技術は、単に長距離の大容量送電を可能にするだけでなく、システムの容量の範囲内で無効電力を任意に供給できることから、再エネ電源の発電量変動に伴う系統の電圧変動を抑制することも可能である。STATCOM（Static Synchronous Compensator：無効電力補償装置）は、電力輸送は行わず機能を無効電力補償に特化したシステムであり、電力系統レジリエンスへの貢献が期待される。

### 3.2 系統設備の増強

系統設備の増強に対するソリューションとしては、送変電機器や、HVDCシステム、系統制御システム、系統保護・変電所監視制御システムなどが挙げられる。

送変電機器には、ガス絶縁開閉装置や、変圧器、避雷器などがあり、3.1節に述べたとおり、開閉装置や変圧器は環境対応を併せて行っている。また避雷器は、自然災害（雷）による停電を防ぐとともに絶縁協調を図るために重要な役割を担っている。ポリマー形避雷器は、従来の磁器がいし形と比較して大幅に小型・軽量化が可能であり、耐震性能にも優れるため、国内外を含めて需要が高まっている（同p.25-29参照）。

東芝グループが開発した系統制御システムとしては、最上位の中央給電指令所システムが国内主要電力会社6社の電力ネットワークで運用中であり、近年の電力システム改革における制度設計に基づく新しい機能実装を進めてきた。また、系統監視制御全般では、近年の系統運用の高度化ニーズに応える新たなソリューションの開発に注力しており、3.3節で述べる。

世界的なデジタルリレーの実用化をリードする東芝グループは、1980年にデジタル形電流差動リレーを我が国の超高压の実系統に適用した。それ以降、デジタル化された系統保護装置及び変電所監視制御システムは、超高压から配電系統までの広範囲な電力ネットワークで運用されており、現在は3.3節に述べるデジタル変電所システムの開発を行っている。

### 3.3 系統運用の高度化とデジタル化

2章に述べたように、系統運用の高度化とデジタル化には脱炭素化、レジリエンス、及びDX・効率化のトレンドがある。

#### 3.3.1 脱炭素化

脱炭素化では、ダイナミックレーティングや系統混雑管理システムなどが挙げられる。特にダイナミックレーティングは、電力ネットワークの既設設備の能力を最大限に活用するアプローチとして着目されている。大量の再エネ電源の接続、及びデータセンターなどによる負荷の増加から、送

電線の混雑が発生し始めており、この系統混雑は今後ますます顕在化すると考えられる。例えば送電線のダイナミックレーティングは、比較的厳しめの温度や風速の環境条件を基に決められていた従来の許容送電容量を、実際の送電線温度に基づいて増やして運用する技術である。東芝グループのダイナミックラインレーティング(DLR)技術は、送電線の温度や風速などを測定するセンサーを設置せず、気象情報や風況モデルを活用し、送電線地点の風向・風速などを計算して温度を予測する。この技術により、センサーに依存せずに精度の高い予測値を算出できる(同p.30-34参照)。

### 3.3.2 レジリエンス

電力ネットワークのレジリエンスに寄与する技術として、無効電力制御装置などのFACTS(Flexible AC Transmission System)機器や、系統安定化システム・事故波及防止システムなどを提供してきた。

系統安定化システム・事故波及防止システムは、従来、落雷などを起因とする深刻な系統事故発生時に、同期安定度対策や、電圧安定性対策、周波数維持対策、過負荷対策などに適用されてきた。今後の再エネの大量導入に伴って電力系統の構成が変化し、従来にも増して送電線や電力機器における高度な系統事故対策を行う電力系統安定化システムのニーズが高まっている(同p.35-38参照)。

### 3.3.3 DX・効率化

電力ネットワークのDX・効率化に対しても、様々なソリューションを提供してきた。系統運転支援システム、系統訓練シミュレーター、電力運用・計画支援システム、デジタルツインといった系統運用支援や、スマートメーター、省電力無線通信システム、電力機器監視システム、デジタル変電所システム、配電自動化システム、及び配電高度化システムが挙げられる。

系統運用支援は、系統運用の人的な業務に関わるため、内容は多岐にわたる。その一つとして、設備停止計画策定支援がある。従来、各所への設備停止作業要求や作業調整の全てが手作業で行われており、その調整は系統混雑が進むにつれて年々難化している。年間・月間停止作業計画での作業系統の構成と調整を自動化する支援システムを開発し、複雑・多様化する電力系統運用の支援に貢献する(同p.39-43参照)。

スマートメーターは、世界最大規模のスマートメーターシステムの納入実績があり、このシステムに関わる携帯網通信技術、マルチホップ通信技術、及びヘッドエンドシステムの技術とシステムインテグレーションのノウハウを保有している。

電力機器監視システムでは、AIを活用した異常診断技術として、変電機器の保全業務へのIoT(Internet of

Things)技術導入とともに、機器に取り付けた各種センサーによる状態評価や診断自動化へのニーズが高まっており、異常データが希少で、かつデータの説明性の確保が必要な変電設備に対する異常診断を、機械学習と動作解析技術の組み合わせにより実現した(同p.44-48参照)。

変電所システムでは、従来の保護制御システムは屋外の現地機器と屋内の保護制御装置間の情報授受をメタルケーブルで行っていたが、IEC 61850(国際電気標準会議規格 61850)の採用によるデジタル変電所実現の取り組みが、全国で始まっている。デジタル変電所は、遠方監視装置(ゲートウェイ)のステーションレベル、保護制御装置のベイレベル、及び機器情報をデジタル化するプロセスレベルから成り、ステーションレベルとベイレベル間をステーションバス、ベイレベルとプロセスレベル間をプロセスバスで接続した構成が一般的である。これら、いくつかの事例とともに将来の目指す姿について、述べている(同p.49-53参照)。

配電系統の監視・制御では、配電自動化システム及び配電高度化システムを提供している。今後の再エネ導入拡大に伴う配電系統のより一層の混雑の予測、その回避、及び管理が必要になる。これらについては、東芝グループの強みである監視制御や混雑予測の保有技術を基礎とし、新しいエネルギーマネジメントシステムとして、配電系統再生可能エネルギー管理システムμDREAMSを開発中である。

## 4. 今後の展望

東芝グループは、変電機器の環境対応にいち早く対処するとともに、電力ネットワークの次世代化に資するシステム開発や電力事業者の課題解決に貢献できるよう、新しい技術開発に取り組んでいる。

直近の取り組みとして、ハードウェア面(変電機器)では、SF<sub>6</sub>ガス絶縁の代替技術開発や、高分子材料の特性を生かした避雷器開発、エステル系絶縁油を使用した変圧器の実用化、HVDCシステムなどパワーエレクトロニクス技術の応用開発などが挙げられ、実用化及び適用拡大に向けて使用者のニーズを取り込みながら開発を進めている。

加えて、ソフトウェア面(系統制御・監視・支援)では、電力系統監視への混雑管理技術の実装、IEC 61850に準拠した変電所のデジタル化対応製品の拡大、レジリエンス強化に必要な系統安定技術、予測・最適化技術、及びAI活用による電力系統運用支援の高度化などを、推進していく。

## 文献

- (1) 資源エネルギー庁. エネルギー基本計画. 2025, 83p. <<https://www.meti.go.jp/press/2024/02/20250218001/20250218001-1.pdf>>, (参照 2025-02-20).

- (2) 資源エネルギー庁. 令和5年度 エネルギーに関する年次報告. 2024, 287p. <[https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2024/pdf/whitepaper2024\\_all.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2024/pdf/whitepaper2024_all.pdf)>, (参照 2025-02-05).
- (3) Smith, C. et al. The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity Supplementary Material. IPCC, 2021, 35p. <[https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_Chapter07\\_SM.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter07_SM.pdf)>, (accessed 2025-02-05).
- (4) GX実行推進担当大臣. 我が国のグリーントランスフォーメーションの加速に向けて. 2024, 34p. <[https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx\\_jikkou\\_kaigi/dai11/siryou1.pdf](https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx_jikkou_kaigi/dai11/siryou1.pdf)>, (参照 2025-02-05).
- (5) GX実行推進担当大臣. GX2040ビジョン(案)～脱炭素成長型経済構造移行推進戦略 改訂～. 2024, 47p. <[https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx\\_jikkou\\_kaigi/dai14/siryou2.pdf](https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx_jikkou_kaigi/dai14/siryou2.pdf)>, (参照 2025-02-05).
- (6) 資源エネルギー庁. 電力ネットワークの次世代化について. 2024, 21p. <[https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku\\_gas/denryoku\\_gas/pdf/083\\_07\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/083_07_00.pdf)>, (参照 2025-02-05).
- (7) 資源エネルギー庁. 電力ネットワークの次世代化. 2022, 59p. <[https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku\\_gas/saisei\\_kano/pdf/041\\_01\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/041_01_00.pdf)>, (参照 2025-02-05).
- (8) 同時市場の在り方等に関する検討会. 「同時市場の在り方等に関する検討会」中間取りまとめ. 2024, 76p. <[https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/doji\\_shijo\\_kento/pdf/20241108\\_1.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/doji_shijo_kento/pdf/20241108_1.pdf)>, (参照 2025-02-05).



佐藤 純正 SATO Yoshimasa

東芝エネルギーシステムズ(株) グリッド・ソリューション事業部  
電気学会会員  
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



南 裕二 MINAMI Yuji

東芝エネルギーシステムズ(株) グリッド・ソリューション事業部  
電気学会会員  
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.