Deloitte.
Insights

世界の再生可能エネルギー動向

太陽光と風力は世界の主流電源の一つから、最も選ばれる電源へ

デロイトは、エネルギー事業のバリューチェーンと再生可能エネルギーセクター全体にわたる幅広い業務経験に基づき、インダストリーに対する深い知見、綿密な分析や洞察を統合した実行可能な戦略を提案し、クライアントの皆様が情勢の変化を予期し、新たな事業機会を活かせるように支援しています。データに基づく洞察を明らかにし、構想、戦略、意思決定に必要な判断材料を提供する事、現在および将来の市場の規定的要因に関する洞察を引き出す事、買収機会を見極め、分析し、デューデリジェンスを実施する事、ビジネスモデルを変革し、新たな成長機会をとらえる事、テクノロジーを適用し、事業目標を達成する事。デロイトの専門家は、こうしたさまざまな面で皆様をサポートしています。さらに詳しい情報については、巻末に記載した連絡先までお問い合わせください。

目次

エグゼクティブサマリー | 2

普及条件 | 4

需要 | 13

結論 | 20

巻末注 | 21

エグゼクティブサマリー

再生可能エネルギーが「主流の」エネルギー源と認識されるようになったのはごく最近ですが、今では急速に、「最も選ばれるエネルギー源」となりつつあります。多くの先進国や発展途上国で明らかなように、普及条件と需要のトレンドが相まって強力な追い風となり、太陽光と風力は競争力で従来型エネルギー源と肩を並べ、それらをしのぐようになっています。

第1の普及条件は、再生可能エネルギーが*価格・性能面でグリッドパリティとソケットパリティ*に到達していることです。第2の普及条件は、太陽光と風力がコスト効率よく*系統需給調整*に寄与できることです。第3の普及条件は、*新技術*が太陽光と風力の競争力をさらに高めつつあることです。

再生可能エネルギーは急速に、最も選ばれるエネルギー源となりつつあります。

エネルギー消費者の需要は、概ね3つの目標を軸に形成されています。この3つの目標は、上に挙げた3つの普及条件の下で再生可能エネルギーによって最もよく達成されています。各目標を重視する度合いはさまざまですが、消費者は最も信頼性が高く、低コストで、しかも環境に配慮したエネルギー源を求めています。

こうした消費者の筆頭に挙げられるのは、スマートシティ計画に*再生可能エネルギーを取り入れている都市*、オングリッドとオフグリッドで再生可能エネルギーの恩恵を社会に行き渡らせるコミュニティレベルの*エネルギープロジェクト*、開発の過程で再生可能エネルギーの導入を推し進める新興市場、そして太陽光および風力エネルギーの調達範囲を拡大する*企業*です。

こうしたトレンドは、相互に強め合う好循環を通じて今後も強まるとみられます。新技術の導入に伴い、さらなるコスト削減とグリッド接続性改善が促されます。その結果、ますます多くのエネルギー消費者が自ら望ましいエネルギー源を調達し、世界中で国家レベルのエネルギー移行を促すことが可能になります。

図1

再生可能エネルギーは、信頼性が高く、低コストで、かつ環境に配慮したエネルギー需要のニーズを最も満たすことができる

出所：デロイトによる分析

普及条件

再生可能エネルギーの普及を長らく妨げていた障壁は、グリッドパリティへの急速な接近、コスト効率と信頼性に優れた送配電網統合、技術革新という 3 つの普及条件が揃ったことで取り除かれました。かつては高コストによりニッチ市場を超える拡大は見込めないとされていた太陽光と風力は、今や価格面で従来型のエネルギー源をしのぎ、性能面でもますます肩を並べつつあります。再生可能エネルギーの統合には、解決すべき多くの問題が伴うという見方は逆転しました。太陽光と風力の統合は、送配電網の問題解決に寄与し始めています。再生可能エネルギーはもはや支援技術の成熟を待つのではなく、むしろ従来型のエネルギー源に先駆けて最先端技術を取り込んでいます。

I. 系統電力に対し価格・性能面でパリティに到達

太陽光と風力の普及ペースと急激なコスト低下は、最も楽観的な業界プレイヤーや観測筋の予想をも超えています。風力発電と太陽光発電は、あらゆる予想を超え、根強い懐疑論にもかかわらず、補助金なしでも世界の上位市場すべてで従来型の発電技術と競合するまでに至っています。

太陽光と風力は、従来型のエネルギー源に対し価格面でパリティに到達し、性能面でも急速にパリティに近づいています。実は、補助金を受けない発電所規模の陸上風力および太陽光発電の均等化発電原価（LCOE）は、世界の大部分で他の大半の発電技術と同等以下の水準に低下しています[1]。コンバインドサイクル・ガスタービン（CCGT）などの方式の方が負荷曲線に追従する柔軟性が高いものの、蓄電池のコスト低下やその他の技術革新により、太陽光と風力の間欠性の影響が平滑化され、従来型のエネルギー源との競争に必要な信頼性が向上しています。価格面から見ると、陸上風力は世界最低コストの発電用エネルギー源です。補助金なしの LCOE レンジは 30 ～ 60 米ドル / メガワット時（MWh）で、最低コストの化石燃料である天然ガス（42 ～ 78 米ドル /MWh）のレンジを下回っています[2]。

2017 年末までに、陸上風力の容量は、2011 年の容量 216 ギガワット（GW）から 2 倍以上に増加しました。合計 121 か国が約 495GW の陸上風力発電を導入しており、中国、米国、ドイツ、インド、スペイン、フランス、ブラジル、英国、カナダが上位を占めています。この 9 か国では、陸上風力は価格面でパリティに到達しています[3]。米国では、コストが最も低いのはグレートプレーンズやテキサス州など風の強い地域で、最も高いのは北東部です[4]。世界的に見ると、上記の上位 9 か国とユーラシアおよびオーストラリアが最低コストとなっています[5]。

発電所規模の太陽光が風力の後に続き、2 番目に低コストのエネルギー源となっています。太陽光の LCOE レンジ（43 ～ 53 米ドル /MWh）の上端は、他のいかなる発電方式のレンジをも下回っています[6]。2017 年には、世界の 187 か国で 2011 年の総容量 69GW を上回る 93.7GW の追加を記録し、総容量は 386GW に達しました。上位を占めたのは中国、日本、ドイツ、米国、イタリア、インド、英国です[7]。太陽光は、これらの諸国のうち日本を除く全市場で価格面のパリティに到達しています。日本は主に高水準の資本コストにより、世界最高コストの太陽光市場の 1 つとなっています。日本は競争入札への移行に伴い、2025 ～ 2030 年には太陽光の価格面でパリティに到達すると見込まれます。米国では、コストが最も低いのは南西部諸州とカリフォルニア州です[8]。世界的に見ると、太陽光のコストはオーストラリアが最低で、アフリカが最高コストとなっています[9]。

上記の主導的な諸国以外でも、他の発電方式とのコスト格差が広がる中、太陽光と風力は世界的に価格面のパリティ到達が視野に入っています。コンバインドサイクル・ガスプラントを除くすべての従来型発電方式と、非間欠的な再生可能エネルギーの LCOE は、いずれも過去 8 年間で横ばい（バイオマス、石炭）または増加（地熱、水力、原子力）しています。一方、陸上風力と発電所規模の太陽光の LCOE は、部品コストの急落と効率の向上に伴い、それぞれ 67% と 86% 減少しています。この部品コスト低下と効率化という 2 つのトレンドは、今後も続くと予想されます [10]。Bloomberg New Energy Finance によると、陸上風力と太陽光の発電コストは、2018 年上半期にすでに 18% 低下しています [11]。欧州、日本、中国では、競争入札がさらなるコスト低下の重要な要因です。競争入札は補助金に頼らない、より低価格での導入を促すからです。

先進国における風力タービンの高性能化（リパワリング）も、設備利用率を引き上げることで世界の平均コストを押し下げています。さらに、世界的な開発企業と国際機関が提携してプロジェクト開発を促進しているため、発展途上国におけるコストは低下する可能性があります。そうしたパートナーシップは、世界的な資源の不均衡の解決に寄与しています。この不均衡は、日本、ドイツ、英国が太陽光資源に極めて乏しいにもかかわらず太陽光発電の世界的リーダーである一方、アフリカと南米はそれぞれ太陽光資源と風力資源に最も富みながら、それらの資源がほとんど手つかずのままであるという事実から生じています [12]。太陽光と風力の容量増大に伴い、多くの従来型エネルギー源は設備利用率が低下するため、既存および新規の従来型プロジェクトの LCOE は増加していきます。新規の太陽光および風力発電所のコストは、最終的に新規の従来型発電所のコストを下回るにとどまらず、世界中の既存発電所の運転を継続するコストをも下回る可能性があります。これは昨年、Enel がチリにおける風力、太陽光、および地熱発電所の建設を落札したことにより、すでに実証されています。これらの発電所は、既存の石炭およびガス発電所の燃料費より低いコストで電力を販売する予定です [13]。

蓄電池を併設した発電所規模の太陽光と風力はますます競争力を高め、価格面に加えて*性能面でもグリッドパリティ*に到達しようとしています。蓄電池の追加により、太陽光と風力はより調整可能となり、従来型のエネルギー源が長らく保ってきた優位性を低下させています。蓄電池を併設した再生可能エネルギーの方がコストは高いものの、キャパシティサービスや

洋上風力と CSP もパリティに到達

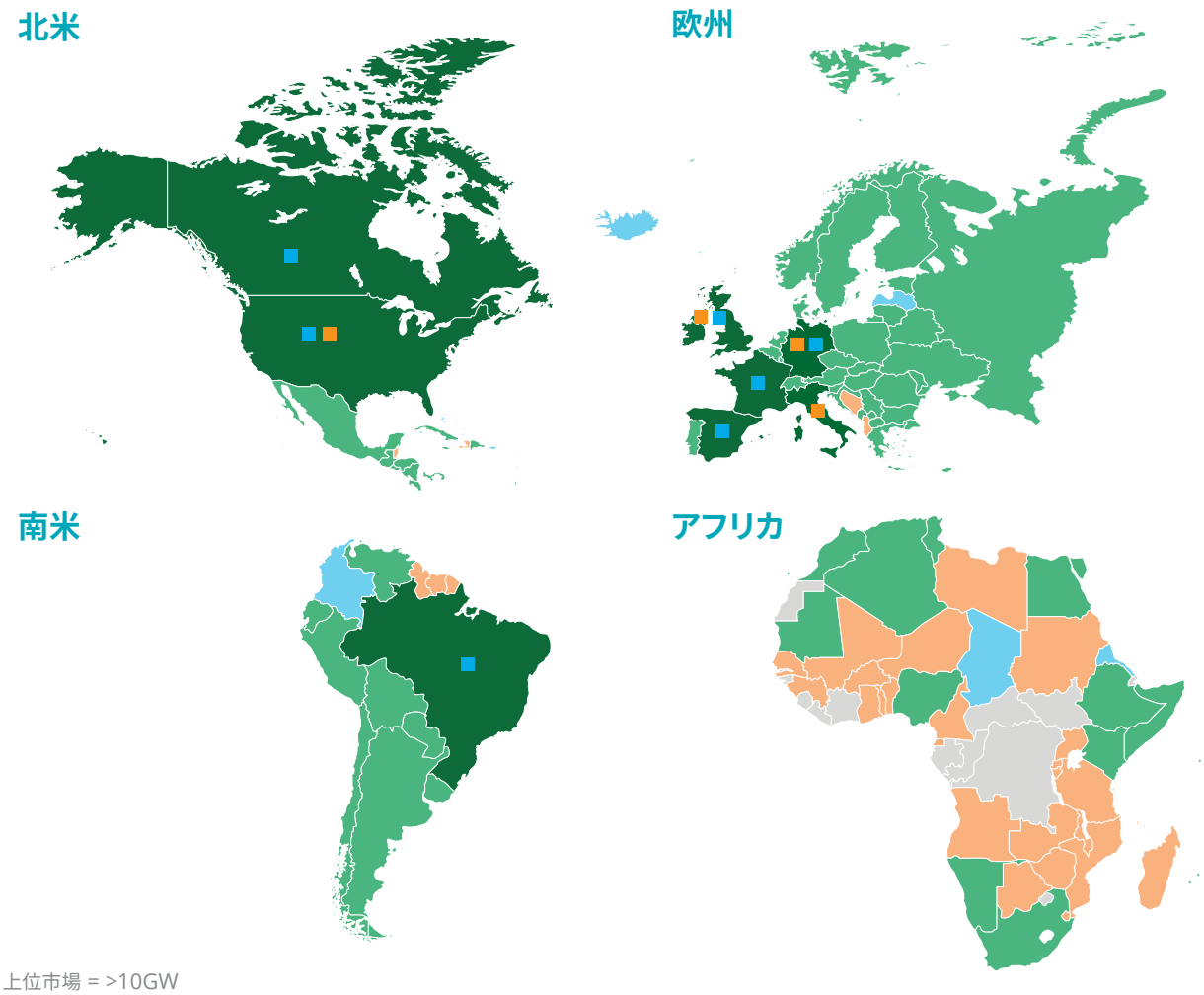
洋上風力と太陽熱発電（CSP）もパリティに到達しつつあります。LCOE レンジは石炭のレンジの上端と重なりますが、まだガス・コンバインドサイクルのレンジを上回っています。2017 年には 15 か国で 4.9GW の洋上風力が追加され、総容量は 19.3GW に達しました。その大部分は英国、ドイツ、中国、デンマークで導入されたものです [14]。洋上風力はドイツとデンマークでパリティに到達しており、英国では 2025 ～ 2030 年、中国では 2024 年にパリティに到達すると予想されます [15]。米国では洋上風力発電所は 1 つしかありませんが、進行中のプロジェクトは増加しており、競争力の高い北大西洋沿岸が大半を占めます。稼働設備が増加するにつれて、米国における洋上風力の LCOE は欧州や中国の水準まで低下し、今後 10 年以内にパリティに到達すると予想されます。CSP 技術を使用する発電所については、スペイン（2.3GW）と米国（1.8GW）が 15 か国計 4.9GW の市場をリードしていますが、スペインでは 2013 年以降、米国では 2015 年以降、容量が追加されていません。その他の CSP 市場は、容量の大きい方から順番に、南アフリカ、インド、モロッコ、アラブ首長国連邦、アルジェリア、エジプト、中国、オーストラリア、イスラエル、イタリア、タイ、ドイツ、トルコです [16]。LCOE が最も低いのは中国とサウスオーストラリア州です [17]。CSP はまだどの市場でもパリティに到達していませんが、最近では記録的な低価格の入札結果が相次いでいることから、2020 年までに化石燃料と競合する水準に達するとみられます [18]。その技術の性質上、CSP は蓄電池を備えており、従来型のエネルギー源に対し性能面でもパリティを達成可能です。

アンシラリーサービスを提供できるため、有用性に優れています。この追加的な価値を収益化できるかどうかは、規制と市場の構造によって決まります。しかし、それらのサービスを販売できない場合でも、この組み合わせは有用性に優れています。事業者は自らのニーズを効率よく満たせる上、系統電力の利用をピーク時以外の比較的安価な時間帯にシフトできる可能性があるからです。リチウムイオン電池のコストが 2010 年以降 80% 近く低下し、太陽光の普及率が上昇する中、蓄電池を併設した再生可能エネルギーは価格面でもパリティに到達しています [19]。太陽光の上位市場すべてで、蓄電池を備えた発電所規模のプロジェクトが進んでいます。蓄電池市場で先頭を走る米国では、太陽光と蓄電池の併設は一部の市場ですでに高い競争力を備えているため、開発業者の Lightsource は、自社の西部における入札すべてに蓄電池を含めると発表しています [20]。投資税額控除を考慮すると、米国では太陽光と蓄電池の併設プロジェクトが来年以降、まずアリゾナ、次にネバダとコロラドでパリティに到達する見込みです。これらの州では、風力と蓄電池の併設もパリティに到達します [21]。最近の RMI の調査では、再生可能エネルギーと蓄

図2

世界の大半の国が太陽光と風力の両方の容量を有し、1か国（日本）を除くすべての上位市場がパリティに到達

■ 太陽光の上位市場　■ 風力の上位市場　■ 太陽光と風力の両方の容量を有する上位市場　■ 太陽光と風力の容量が1MW未満
■ 太陽光の容量のみ　■ 風力の容量のみ　■ 太陽光と風力の両方の容量

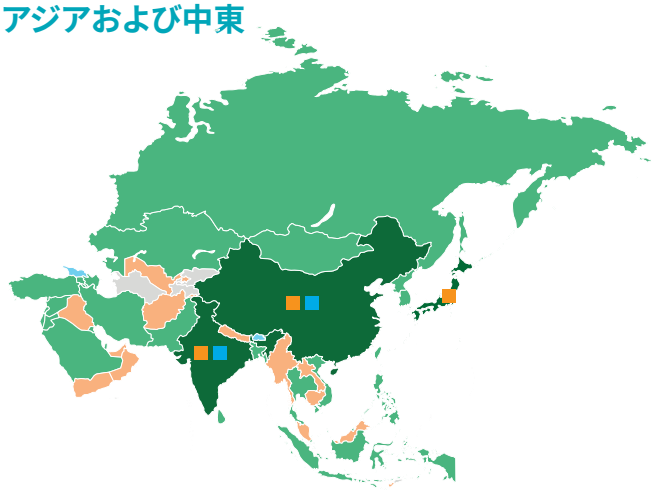


注記：上位市場 = >10GW
出所：IRENA、*「Renewable Capacity Statistics 2018」（再生可能エネルギー容量統計2018）*に基づくマップ。
Lazard、*「Levelized Cost of Energy Analysis—Version 11.0」（均等化発電原価分析 - バージョン11.0、2017年11月）*に基づくLCOEの比較。

電池の併設は、分散型資源やデマンドレスポンスと組み合わせて「クリーンエネルギー・ポートフォリオ」を構成し、現状で新規ガス発電所の建設より低いコストで、また早ければ 2026 年には既存ガス発電所の運転より低いコストで、同じ送配電サービスを提供できることが示されています [22]。

発電所規模でのグリッドパリティは唯一の要素ではありません。屋上太陽光などの分散型再生可能エネルギーは、*価格・性能面でソケットパリティ*に到達しているのです。この場合、価格面でパリティに到達するのは、自家発電のコストが小売電力のコストを下回った時です。商用太陽光は、インドを除くグリッドパリティを達成した太陽光の上位市場の一部において、補助金なしでソケットパリティに到達しています [23]。これらの市場では、税額控除やネットメータリングなどのインセンティブにより住宅用太陽光も競争力を有し、カリフォルニア州では 2020 年以降、新築住宅に設置が義務付けられています。太陽光発電の設置者は、ますます住宅用太陽光に蓄電池を併設しています。米国の住宅所有者は、2018 年第 1 四半期に、それまでの 3 四半期の合計と同じ数の住宅用蓄電設備を導入しました。その大部分はカリフォルニア州と

アジアおよび中東



風力の上位市場

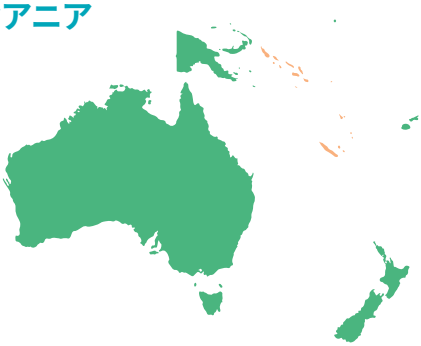
中国
米国
ドイツ
インド
スペイン
フランス
ブラジル
英国
カナダ

太陽光の上位市場

中国
日本*
ドイツ
米国
イタリア
インド
英国

*上位市場のうち、日本はパリティに到達していない唯一の国です。

オセアニア



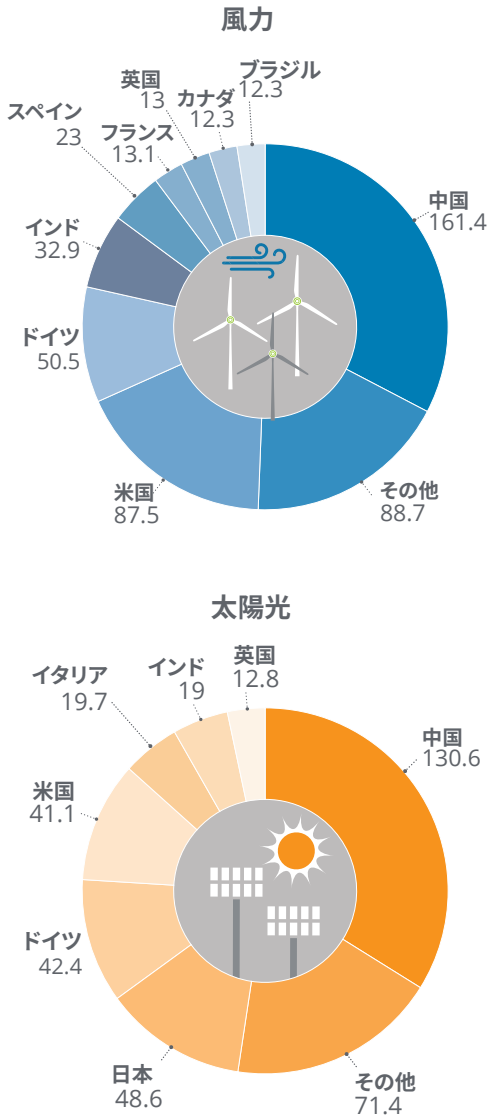
LCOEの比較（ドル/MWh）

風力	30 – 60
太陽光	43 – 53
ガス・コンバインドサイクル	42 – 78
石炭	60 – 143

ハワイ州です[24]。住宅用の太陽光と蓄電池の併設コストは、現在、米国の 19 州、およびオーストラリアとドイツの一部地域で小売電力のコストを下回っています。オーストラリアとドイツでは、2017 年に設置された住宅用太陽光発電システムのそれぞれ 40% と 50% が蓄電池を備えていました[25]。オーストラリアと欧州では、住宅用および商用の屋上太陽光が発電所規模の太陽光の容量を上回っており、太陽光と蓄電池を併設した分散型システムが発電所規模の太陽光・蓄電池併設システムを抑えて、グリッドパリティおよびソケットパリティ到達時の決定的な競合エネルギーとなる可能性が高まっています。

図3

陸上風力と太陽光の上位市場



注記：単位 = GW
出所：IRENA、*「Renewable Capacity Statistics 2018」(再生可能エネルギー容量統計2018)*。

II. コスト効率と信頼性に優れた送配電網統合

太陽光および風力エネルギーの導入に関して最もよく指摘されている障壁の 1 つはその間欠性ですが、状況は逆転しつつあります。太陽光と風力は、間もなく解決すべき問題ではなくなり、むしろ系統需給調整に対する解決策となる可能性があります。実のところ、再生可能エネルギーの統合はそれほど困難でも高コストでもありません。その上、再生可能エネルギーは送配電網のレジリエンスと信頼性を高め、不可欠な送配電サービスを提供できることが実証されています。

太陽光と風力の間欠性の問題は、誇張されているともいえます。ほとんどの国や地域では、再生可能エネルギーの普及率は送配電網に対する*最小限の調整*しか要しない水準です。再生可能エネルギーはシステムレベルではほとんど影響を与えず、運用手法や既存資源の利用には小さな変更しか要求しません[26]。再生可能エネルギーの普及率が高い国や地域では、より複雑なシステム上の変更が必要で、従来型のエネルギー源を調整することにより、より多くの再生可能エネルギーをコスト効率よく統合できるようにしています。例えば、欧州連合、中国、インドでは、事業者が改装した従来型の熱電併給プラントで発電せずに熱を生み出し、石炭および CCGT プラントでさらなる柔軟性と安定性を実現しています。近隣市場との連係は、もう 1 つの重要な手段として北欧や米国の一部地域で成果を上げています。広い地域に分散した再生可能エネルギーを集約することで、よりコスト効率よく出力を平滑化し、負荷抑制を不要にすることができるからです[27]。

太陽光と風力は電力価格に下押し圧力を加えています。理論的には、太陽光と風力は発電の限界費用がゼロであるため、より高コストの発電方式を駆逐し、電力価格を引き下げます。実際の世界では、太陽光の導入は真昼の価格のピークを平坦化し、風力は夜間の価格を引き下げています[28]。米国では、太陽光と風力の上位 20 州のうち 4 分の 3 で電力価格が全米平均を下回っています。4 分の 1 の州は、米国で電力が最も安い 10 州（風力の先進地であるテキサス州など）に含まれます[29]。欧州における太陽光と風力の最上位市場であるドイツでは、卸売価格が過去 10 年で半値以下になっています。間欠的な再生可能エネルギーの割合が世界最高（53%）であるデンマークでは、税金などを除外した電力価格が欧州で最低の水準です。ローレンス・バークレー国立研究所は、米国で再生可能エネルギーの普及率がデンマークの水準である 40 ～ 50% に達すると、一部の州では「計測できないほど安価なエネルギー」の幕開けを迎えると評価しています[30]。

太陽光と風力の割合が増加すると、送配電網の信頼性とレジリエンスが向上します。米国で特に停電が少ない州は、太陽光と風力の上位州に含まれます[31]。テキサス州では、過去 10 年で風力の発電量が 645% 増加し、送配電網の信頼性指標は大幅に向上しました[32]。ドイツとデンマークの送配電網も、過去 10 年で信頼性が向上しています。デンマークでは、1 年の 5 分の 1 は同国西部にある太陽光と風力が消費電力の 90% を生産しているにもかかわらずです。連係したデンマークとドイツの送配電網は、現在、世界最高水準の信頼性を備えた送配電網です[33]。欧州のデータによると、計画外停止は陸上および洋上風力の供給停止のうち少数にすぎないのに対して、大半の石炭およびガス発電所の供給停止は計画外です。陸上風力の供給停止は、他のあらゆる発電方式と比べて少なく、短時間で、しかも迅速に復旧しています[34]。異常気象により送配電網のレジリエンスが試された事例では、再生可能エネルギーが燃料を使用する発電方式の不足分を補いました。風力は、英国が 2018 年に大雪で天然ガスの不足に直面した際、発電量の記録を更新しました。また米国では、石炭パイルが 2014 年に極渦の大寒波で凍結した際や 2017 年にハリケーン「ハービー」により浸水した際、発電量の予想を上回りました[35]。

太陽光と風力は、重要な送配電網資産として活用できます。間欠的な再生可能エネルギーは、すでに系統需給調整に寄与しています。例えば、風力発電は 2017 年、北部 MISO（Midcontinent Independent System Operator）における 3 時間の急激な出力変動の大部分で深刻さの軽減に寄与しました[36]。しかし、従来型の発電方式は、なお周波数、電圧、出力変動に関連する事実上すべての不可欠な送配電信頼性サービスを提供しています。とはいえ、こうした状況は変化する可能性があります。スマートインバータと高度な制御により、太陽光や風力でもそれらのサービスを他の発電方式と同水準かそれ以上に提供できるようになっているからです[37]。スマートインバータと組み合わせると、太陽光と風力は日没後や風のない時でも従来型の発電方式よりはるかに迅速に出力を上昇させ、送配電網の安定化を促すことができます。太陽光については、他のいかなる発電方式よりもはるかに高い応答精度を発揮（より迅速に必要な発電量で応答）します[38]。また、スマートインバータは、消費者に最小限の影響しか与えずに分散型資源を送配電網資産に変え、それらの資源を電力会社で認識および利用できるようにすることができます。こうした機能を活用しているいくつかの地域では、その提供を義務化し（ケベックなど）、再生可能エネルギーの供給者が市場でアンシラリーサービスを

再生可能エネルギーの統合はそれほど困難でも高コストでもありません。その上、再生可能エネルギーは送配電網のレジリエンスと信頼性を高め、不可欠な送配電サービスを提供できることが実証されています。

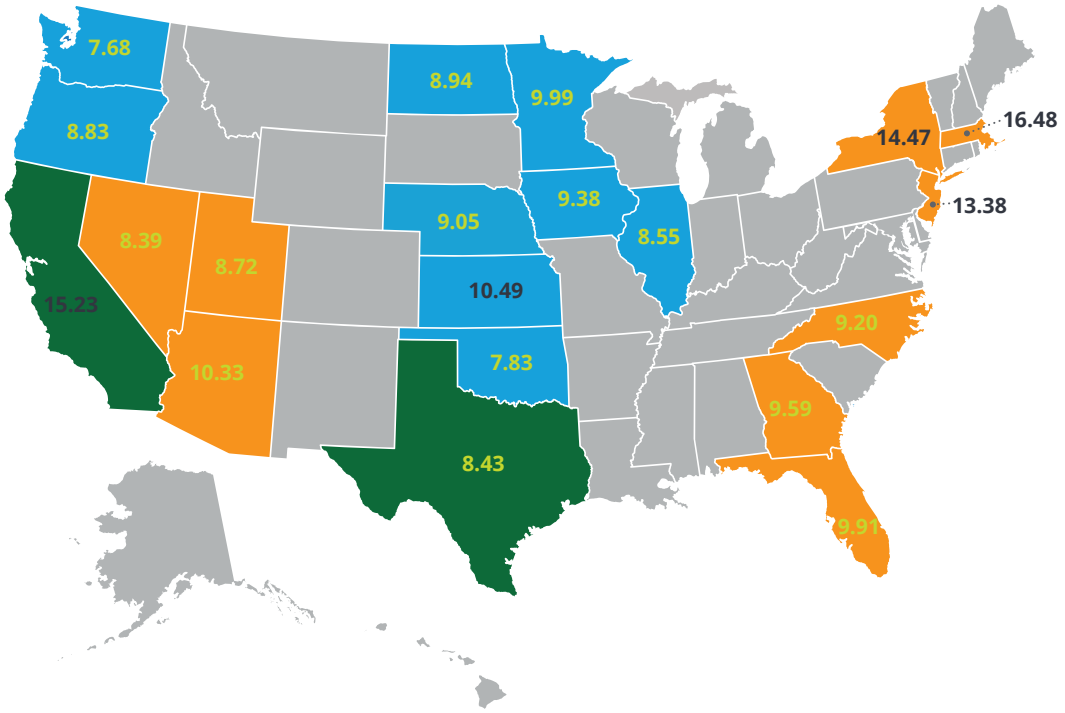
図4

米国では太陽光と風力の電力価格が上位20州のうち4分の3で全米平均を下回る

電力価格は、マサチューセッツ、カリフォルニア、ニューヨーク、ニュージャージー、カンザスを除くすべての州で平均未満

■ 太陽光の上位州　■ 風力の上位州　■ 太陽光と風力の上位州

平均小売電力価格（セント/kWh）：■ 全米平均未満　■ 全米平均超



注記：平均小売価格は10.41セント/kWh。

出所：GTM Research、SEIA、*「U.S. Solar Market Insight, 2017 Year in Review」（米国太陽光市場インサイト、2017年の回顧）*、2018年、p. 8。American Wind Energy Association、「Wind Energy in the United States」（米国における風力エネルギー）、2018年。US Energy Information Administration、「State Electricity Profiles」（各州電力プロフィール）、2018年1月25日（データは2016年）。

販売できるようにし（イタリアなど）、新しいサービス市場を創設しています（英国など）[39]。

III. 再生可能エネルギーの自動化、インテリジェント化、ブロックチェーン化、および変革のための技術

自動化、人工知能（AI）、ブロックチェーン、先進的な材料・製造プロセスなどの新技術は、再生可能エネルギーの導入を促進することができます。そうした新技術は、再生可能エネルギーの生産・運用を合理化する技術（自動化や先進的な製造方式）から、再生可能エネルギーの利用を最適化する技術（気象予報におけるAI）、再生可能エネルギーの市場を改善する技術（ブロックチェーン）、太陽光パネルや風力タービンの材料を変革する技術（先進材料）まで多岐にわたります。こうした技術は、さらなるコスト低下と統合を促すことにより、前述の 2 つのトレンドを後押しします。

自動化は、太陽光と風力の生産・運用に要する時間とコストを劇的に削減しています。FirstSolar は昨年、米国の製造工場を自動化し、中国の競合企業より 30% 低いコストで自社製パネルを 3 倍に大型化しました。これは何日もかかる 100 ステップもの工程から、数時間しか要しない数ステップの工程へと生産を変革することで実現しました[40]。自動化は洋上風力の運転にも重要な影響を及ぼしています。洋上風力は設備容量（GW）当たりの計画保守停止が他のいかなる発電方式よりも長時間です[41]。7 月には、世界最大の洋上風力発電所で完全自動のドローンが

導入され、点検時間が 2 時間から 20 分に短縮されました [42]。将来的には、現在開発中の巡回ロボットにより、太陽光パネルや風力タービンの内部構造と材料に対するマイクロ波および超音波検査が可能になります。

自動化されたプロセスは、AI による予測分析や処方分析に役立つ大量のデータを収集します。

AI は気象予報に微調整を加え、再生可能資源の利用を最適化します。気象予報は、再生可能エネルギーの統合における重要な要素です。気象により、風力および太陽光資源の利用可能性や消費量が大きく左右されるからです。気温が低く風の強い日中には、風力発電の需要と供給はどちらも増加する可能性がある一方、風の強い夜間には、供給は増加するものの需要は変化しない可能性があります。AI システムは、衛星画像、測候所における測定値、過去のパターン、風力タービンや太陽光パネルのセンサーからのデータを処理して気象を予測し、予測と現実を照らし合わせ、機械学習によりモデルを調整して予報の精度を次第に引き上げることができます。AI システムは何百テラバイトものデータを処理し、極めて詳細な予報を頻繁に提供できます。太陽光と風力の先進市場における全国的な予報システムは、AI を組み込み、大幅な精度向上と事業者のコスト削減を促進しています [43]。例えば、スペインの全国的な風力予報システム、AI を活用した Sipreolico は、7 年間の運用で 24 時間予報の誤りの数を半減させています。非常に狭い地域の AI 予測モデルは、今では 1 週間でほぼあらゆる場所に導入できます [44]。さらに、IBM は現在、米国の国立大気研究センターと協力して、初の世界的な気象予報モデルを開発しています。このモデルは、サービスが行き届いていない市場に AI の能力をもたらします [45]。

サービスが行き届いていない市場に恩恵をもたらす可能性があるもう 1 つの技術は、ブロックチェーンです。

ブロックチェーンの利点は、エネルギー属性証書を考えれば明らかです。電力セクターは、ブロックチェーンの適用可能性にあふれています。最も明白なユースケースの 1 つは、エネルギー属性証書（EAC）市場、主には米国の再生可能エネルギー証書（REC）と欧州の発電源証明（GO）です。EAC は概念的には単純です。各エネルギー属性証書は、1MWh の取引可能な再生可能発電を認定します。しかし、追跡プロセスでは、不正に関わる可能性がある複数の当事者による複雑かつ高コストで時間のかかる相互作用が必要です。ブロックチェーンは、全取引の信頼できる共有マスターリストを提供することにより、レジストリ提供者、仲介者、第三者による検証を不要にします [46]。自動化されたプロセスに、透明性、低コスト、迅速さ、小規模な当事者からのアクセス可能性を確保できます。ブロックチェーンによる EAC は、信頼性や管理機関に関わる多くのハードルの解消にも寄与すると考えられます。この点は、EAC 市場の立ち上げに苦慮している発展途上国では特に切実です（*「Powered by blockchain: Reimagining electrification in emerging markets」（ブロックチェーンの活用：新興市場における電化の新たな像を描く）*参照）[47]。スタートアップ企業と大企業の両方が EAC ブロックチェーンへの取り組みを開始しており、最近では電力会社と証券取引所が概念実証のために提携しています [48]。

メーカーは太陽光と風力の需要増加を見込んでいるため、こうした新技術に多額の投資を行っています。

一方、先進的な材料と製造の分野では、2 つの実証済みの概念がパラダイムシフトへの道を開いています。

先進的な材料と製造：ペロブスカイトと 3D プリントは、太陽光および風力業界を変革しようとしています。ペロブスカイトはその登場以来、最も急速に発展する太陽光技術となっており、シリコンでは半世紀かかった効率向上を 10 年足らずで達成しています [49]。2018 年 6 月には、英独系のスタートアップ企業が研究室環境においてペロブスカイト / シリコン・タンデム電池で記録的な 27.3% の変換効率を実証し、研究室環境におけるスタンドアロン型シリコン電池の記録を破りました [50]。ベルギーの研究者は翌月に同様の効率を達成しており、双方とも 30% 超の効率に手が届くところまで来たと主張しています [51]。ペロブスカイトはシリコンと比べて化学的に単純で、広い光スペクトルを捕捉でき、しかも高効率を達成可能です。また、ペ

ロブスカイトは表面への吹き付けやプリントして巻き取りもできるため、生産コスト削減とより広い分野への応用が可能になります。ペロブスカイトモジュールは、早ければ 2019 年にも製品化される可能性があります [52]。

風力分野では、付加製造が新素材の利用に道を開いています。米国では2つの国立研究所が業界と協力して初の3Dプリントされた風力ブレード金型を製造し、試作コストを大幅に削減するとともに、試作に要する時間を1年以上から3か月に短縮しました[53]。次の開拓分野はブレードの3Dプリントです。これにより、材料と内蔵センサーの新たな組み合わせを利用してブレードのコストと性能を最適化するとともに、現地生産で物流のコストとリスクを解消することができます。メーカーは、まず風力発電所における予備部品のオンデマンド3Dプリントを提供し、修理に伴うコストとダウンタイムを削減する計画です[54]。GEは、すでに付加製造を利用して風力タービンブレードの修理や改修を行っています[55]。メーカーは太陽光と風力の需要増加を見込んでいるため、こうした新技術に多額の投資を行っています。

需要

都市、コミュニティ、新興市場、および企業は、信頼性の高い、低コストで一層クリーンなエネルギー源を追求する中で、ますます再生可能エネルギーの需要を牽引しています。太陽光と風力は、普及条件のトレンドに後押しされ、今やこれら 3 つの目標すべてに応える上で最も有利な地位にあります。再生可能スマートシティ（SRC）は、再生可能エネルギーをスマートシティ戦略の不可欠な要素とみなしています。コミュニティレベルの再生可能エネルギーは、消費者が電化の恩恵に浴し、また電力を選択することを可能にしています。新興市場は、開発戦略を推進する最善の手段として太陽光や風力を取り入れています。企業は再生可能エネルギーの調達により、業務を環境に優しいものに変えつつ業績を改善しています。

IV. 再生可能スマートシティ（SRC）

SRC は、太陽光と風力でスマートシティの目標を後押しできると認識しています。今や世界人口のほとんどが拡大する都市に生活しています。一部の都市では、先行的に「スマート」な手法を採用し、コネクテッドセンサー技術やデータ分析によりインフラを管理しています。より高度なスマートシティの焦点は、生活の質、競争力、および持続可能性を高めることです（*「Forces of change: Smart cities」（変革の力：スマートシティ）* 参照）[56]。太陽光と風力は、これらの目標が交わるところに位置しています。太陽光と風力は、汚染の除去、脱炭素化、レジリエンスに貢献しつつ、クリーンな電動モビリティ、経済的エンパワーメント、およびビジネスの成長を可能にするからです。SRC はこの合流点の技術を活かし、最大級の SRC は既存のインフラを変革することにより、これらを行っています。

最大級：人口 100 万人規模の SRC。SRC は、太陽光や風力を活用し、再生可能エネルギーの要素を含むスマートシティ計画を策定しているような都市と定義できます。表 1 は、人口 100 万人以上の都市を風力および太陽光発電の割合が高い方から順に列挙したものです。サンディエゴは世界の首位にあります。太陽光と風力がすでに電源構成の 3 分の 1 超を占めており、2035 年までに 100% 再生可能エネルギーでまかなうという目標を定めています。サンディエゴは、*地域主導型*の SRC でもあります。米国政府が気候変動対策から手を引く一方で、サンディエゴは再生可能エネルギーの導入を続けると明言しています[58]。また、カリフォルニア州全体の目標より野心的な再生可能エネルギー目標を定めています。一方、アジアの先進都市であるジャイプルは、*政府主導型*の SRC です。インドの中央政府は、太陽光エネルギーの要件を含む「100 スマートシティミッション」を策定しました[59]。ジャイプルは再生可能エネルギーの目標を定めていませんが、今年定められた州と国家レベルの野心的な目標を活かそうとしています。ジャイプルの主要な SRC 政策は、屋上太陽光設備によるインフラへの給電です。まず 8 つの地下鉄駅に導

表 1

上位の再生可能スマートシティ[57]

都市	人口（百万人）	年間発電量に占める太陽光と風力の割合
サンディエゴ	1.4	33%
ロサンゼルス	1	20%
ジャイプル	3	20%
ハンブルク	1.8	14.8%
トロント	2.8	12%
バンガロール	11	10%
サンティアゴ	7.3	9%
ソウル	10.3	6.6%
台南	1.9	5.1%
パリ	2.3	4.2%

出所：デロイトによる分析

入され、日中は完全に太陽光発電でまかなわれます[60]。最後に、欧州の先進都市であるハンブルクは、*地域および国際機関主導型*の SRC です。ドイツは国家レベルのスマートシティ戦略や資金調達の促進策を導入していませんが、欧州連合は多くのプラットフォームや資金源を提供して SRC 政策を支援しています[61]。ハンブルクは再生可能エネルギーの導入に加えて、それらの支援策を活用し、欧州における再生可能エネルギー関連の研究や企業の中心地として地位を高めています。これらの SRC は、既存のインフラやシステムをよりスマートで再生可能なものに変革するという課題を共有しています。

未開発地域の SRC では、それらを一から生み出すことができます。

最新：グリーンフィールド SRC。過去の開発、既得権、官僚主義の制約を受けないグリーンフィールド（未開発地域）SRC では、最新技術を紹介し、試験するモデル都市を建設できます。Peña Station Next は、成長著しいデンバーと拡大するデンバー国際空港（このプロジェクトの 2 大ステークホルダー）を結ぶ鉄道の駅があるという戦略的立地条件の活用を目指す空港都市です[62]。この 382 エーカーのコミュニティは、独立した屋上太陽光・蓄電池併設マイクログリッドで電力をまかなっています。このシステムは Xcel Energy が所有し、Panasonic が運営するもので、これら 2 社もこのスマートシティ開発の主要なパートナーです。国立再生可能エネルギー研究所（NREL）もこの都市と提携し、ネットゼロ・エネルギー、カーボンニュートラルのコミュニティ計画の策定を支援しています。カナダに目を転じると、Quayside はグリーンフィールド SRC で、トロントの 10 大 SRC の 1 つです。屋上および壁面設置型の太陽光設備が、Alphabet の子会社である Sidewalk Labs と提携して開発された、この 800 エーカーのウォーターフロント・コミュニティに電力を供給します[63]。最後に、昨年にはサウジアラビアの皇太子が、ドバイと同様な国際ハブにすることを目指し、紅海のほとりに NEOM という 10,000 エーカーのグリーンフィールド SRC を建設する 5,000 億米ドル規模の計画を発表しました[64]。この計画では、蓄電池を併設した太陽光と風力で全電力をまかなう都市を構想しており、紅海を渡ってエジプトへと至る橋の建設も含まれています。

第 1 世代のグリーンフィールド・スマートシティは人よりも技術を重視した結果、ゴーストタウン化した事例もあり批判を受けましたが、これらの新しい SRC は、既存の都市構造の中に織り込むことを目指しています。Peña Station はデンバーにとって「生きた実験室」の役割を果たし、Quayside はトロントにとって「持続可能なコミュニティのモデル」として機能し、NEOM はアジアとアフリカにとって「接続ハブ」として役立ちます。太陽光と風力はこれらの計画に不可欠です。Peña Station と Quayside は小規模な SRC ですが、技術とビジネスモデルについて将来的に大都市にも拡張可能な概念実証を提供できます。NEOM は同様な成果をはるかに大きな規模で提供できます。自由度が極めて大きいため、グリーンフィールド SRC の課題は、追求する価値のある組み合わせへと選択肢を絞り込むことです。

グリーンフィールドの再生可能プロジェクトは、送配電網に接続されていない地域にとっても重要です。

V. オフグリッド / オングリッドのコミュニティ・エネルギー

当初、「コミュニティ太陽光」に向かったトレンドは、柔軟性を向上させる蓄電池や管理システムを追加して、「コミュニティ・エネルギー」へと拡張されています。こうした拡張の結果、コミュニティ・エネルギーはオフグリッド（送配電網へのアクセスがない）地域とオングリッド（送配電網へのアクセスがある）地域に対して、新たな形で役立っています。オフグリッド地域では、他の選択肢と同水準の価格と性能で電化を実現できます。オングリッド地域では、送配電網から独立してコミュニティに電力を供給できることから、レジリエンスと自己決定の目標を達成できます。多くの国は、再生可能エネルギー導入の恩恵を社会に行き渡らせる中で、どちらの状況でもコミュニティ・エネルギーを受け入れています。

オフグリッド地域では、コミュニティレベルの再生可能エネルギーで最適な電化を実現できます。オフグリッド地域におけるコミュニティ・エネルギーは、電化を可能にし、利益をコミュニティに再投資するコミュニティ所有型のパートナーシップと定義できます。プロジェクトは、主に十分な人口密度を有する農村地域の太陽光・蓄電池併設マイクログリッドで構成されます。太陽光電源のマイクログリッドの主な推進要因は、燃料電源のマイクログリッド、送配電網の延長、石油ランプやディーゼル発電機と比較したコスト効率の高さです。また、再生可能エネルギーのマイクログリッドは通常、発展途上国の送配電網より高い信頼性を備えています[65]。非政府組織（NGO）は、主に

そうしたコミュニティ・エネルギープロジェクトの立ち上げや資金提供を担っています。コミュニティ・エネルギーが他の電化方式より有利な点は、コミュニティの力強い支持とエンパワーメントです。同じ論理が多くの島嶼市場や先進国の辺境地域にも当てはまります。逆に、先進国の一部のコミュニティでは、オフグリッド化の手段としてコミュニティレベルの再生可能エネルギーを追求しています。そうした動きは、2017 年にコミュニティ・エネルギーが大幅に増加したオーストラリアで顕著です [66]。全国的な送配電網より信頼性が高く、低コストで、しかもクリーンな発電を目指して、タイアルガム・エネルギープロジェクトなどのコミュニティは、再生可能エネルギーによる自律型のマイクログリッドを開発しています。余剰電力が生じた場合は、電力会社に販売するか、または完全に切断することが可能です [67]。

送配電網が行き届いた地域で、コミュニティ・エネルギーは風力および太陽光資源の共同所有や共同利用を実現しています。エネルギー協同組合は最も一般的な形態で、市民が再生可能資源を共同で所有し、運営しています。ドイツはエネルギー協同組合の世界的な先進地です。同国で昨年導入された再生可能エネルギーの 5 分の 2 以上は、協同組合の所有でした。ドイツは最近、エネルギー協同組合が公平に電力の入札に参加できるようにするための新たなルールを導入しました [68]。デンマークもエネルギー協同組合を強力に支援し、すべての風力プロジェクトのうち地元コミュニティが主体となる割合を 20% にすることを求めています [69]。エネルギー協同組合は、これら 2 か国で再生可能エネルギーの導入に対する市民の強い関与と支持を確保する上で貢献しています。デンマークのサムセー島は、全国的な競争に促され、コミュニティ・エネルギーモデルの下、10 年足らずのうちに、化石燃料に完全依存した市場から 100% 再生可能エネルギーに基づく市場への移行を果たしました [70]。デロイトの「*Unlocking the value of community solar（コミュニティ太陽光発電の真価を解き放つ）*」で指摘されているとおり、米国でもエネルギー協同組合はコミュニティ・エネルギーの草分けです [71]。協同組合所有の電力会社は、組合員顧客の需要に支えられ、米国のコミュニティ太陽光プログラムの 70% 以上を占めています [72]。一方、容量の大部分を占めるのは、より大規模な電力会社です。米国の家庭と企業のほぼ半分は、屋根に適当またはアクセス可能なスペースがないために太陽光システムを設置できません。コミュニティ・エネルギーは、そうした家庭や企業が共同の太陽光プロジェクトから電力を購入し、公共料金について信用供与を受けることを可能にします。サードパーティの供給業者がコミュニティ太陽光の容量のうち 3 分の 2 を、概してコロラド、ミネソタ、マサチューセッツの各州で、主に法人顧客に対して提供しています。一方、電力会社は残りの容量を担い、主に個人顧客にサービスを提供しています [73]。低コスト、再生可能エネルギーを求める顧客の需要、およびレジリエンスに対する懸念が、コミュニティ・エネルギーの旺盛な需要を牽引しています。最後のレジリエンスに対する懸念は、コミュニティを停電から保護するマサチューセッツ州の CCERI（Community Clean Energy Resilience Initiative）グラントプログラムに反映されています [74]。自然災害や悪天候の後に停電に見舞われた多くのコミュニティは、不可欠なインフラを保護するレジリエンス確保の手段として、コミュニティレベルの再生可能エネルギーによるマイクログリッドに目を向けています。こうした動きは日本で見られます。日本では、コミュニティ・エネルギーを支援する国家レベルのレジリエンス確保計画が策定されています [75]。

先進国市場では都市とコミュニティが太陽光や風力の導入にますます重要な役割を果たす一方、新興市場では国家が最も重要となっています。

先進国市場では都市とコミュニティが太陽光や風力の導入にますます重要な役割を果たす一方、新興市場では国家が最も重要となっています。

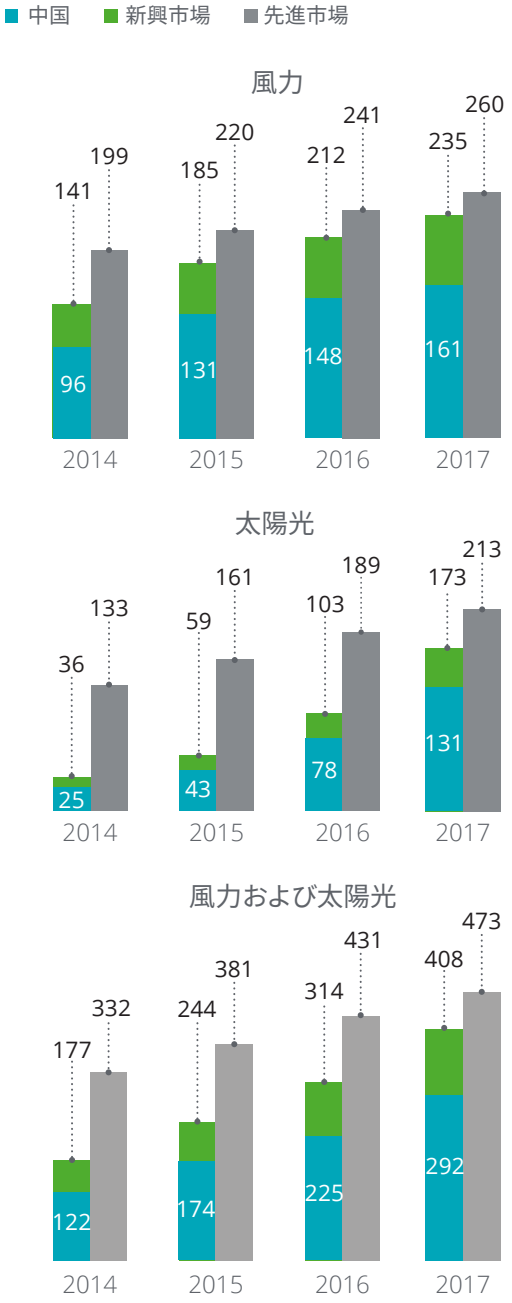
VI. 牽引市場としての新興市場

太陽光および風力の業界と市場は、先進国（所得の高い 33 か国の OECD 加盟国）で誕生して成熟しましたが、その重心は新興市場（先進国以外のすべての国）に移行しています。新興市場は、2013 年に陸上風力の成長率で、また 2016 年には太陽光の成長率で先進国を上回りました。2017 年には、新興市場が再生可能エネルギーに対する世界の新規投資の 63% を占め、先進国との投資格差は過去最大の規模に広がりました [76]。今や新興市場は累積容量でも先進国を超えようとしています（図 5）。新興市場は再生可能エネルギーのコスト低下を促すことにより、再生可能エネルギーの導入で先進国を飛び越え、より CO_2 排出の少ない開発を追求し、先進国にも恩恵をもたらすようなイノベーションを進めることを可能にしています。

中国は世界的なリーダーとして、再生可能エネルギーの成長における新興市場の台頭を後押ししています。中国は 2017 年に太陽光および風力の成長率と総設備容量で最高を記録し、両電源が 100GW を超える唯一の市場となっています。2017 年には、中国だけで太陽光の新規設備容量の半分超、世界の太陽光パネル生産の 3 分の 2 を占めていました。上位 10 社の太陽電池サプライヤーのうち 8 社が中国系で、中国の風力最大手 3 社は合わせると風力市場で最大のシェアを占めます [77]。また、中国は新興市場に対するクロスボーダー・クリーン投資の受入側と投資側の双方で上位 10 か国内にランクされる唯一の国であり、投資側の上位 10 か国中、唯一の新興国です。クロスボーダー・クリーン投資が記録的な規模に達した 2015 年から 2017 年上半期に至るまで、中国は他の 11 か国の新興市場の太陽光と風力に 22 億 3 千万米ドルを投資し、自国の太陽光と風力に 13 か国から 13 億 4 千万米ドルの投資を受け入れました [78]。

図5

新興市場は太陽光と風力の設備容量で先進国を追い抜こうとしている



注記：数値はすべて千MW単位。
出所：IRENA、*「Renewable Capacity Statistics 2018」（再生可能エネルギー容量統計2018）*から計算した容量。

中国を除いても、新興市場は再生可能エネルギーの成長を牽引しており、将来の成長を促進する最大の可能性を秘めています。中国を除く新興市場は太陽光と風力の年間追加容量で先進国に及びませんが、新興市場の追加容量に占める中国の割合は、2016 年から 2017 年にかけて太陽光と風力の両方で減少しました [79]。その他の分野では、中国以外の新興市場が先頭に立っています。太陽光および風力容量の入札では、メキシコとアラブ首長国連邦（UAE）で直近の最安値を更新しており、2017 年に太陽光と風力でそれぞれ世界最低の落札価格を記録しました。入札の結果、インドは世界で最も競争の激しい再生可能エネルギー市場となっており、新規参入も盛んです [80]。インドとトルコでは、2017 年に太陽光の容量が倍増しました。インドは最近、すでに非常に高く設定されていた再生可能エネルギーの目標を「2022 年までに 227GW」へと引き上げました [81]。新興市場は過去 2 年間、新規の CSP 容量すべてを供給しています。南アフリカは、2017 年に新規の CSP 容量を稼働させた唯一の国でした。一方、UAE は、2020 年に稼働する予定の世界最大の CSP プロジェクトを発表しました。再生可能エネルギー投資の対 GDP 比が特に高い国も、マーシャル諸島、ルワンダ、ソロモン諸島、ギニアビサウ、セルビアなど、すべて新興市場です [82]。最後に、最大の未電化市場であるサブサハラ・アフリカは、再生可能エネルギーに極めて大きな成長機会を提供しています。この最も周縁化された地域は未電化で、しかも人口密度が低いため、多くの場合、従量制の戸別太陽光システムが最善の電化方式となります。国際エネルギー機関の推定では、今後 20 年間で、電力を利用していない大半の人々が、分散型の太陽光システムとマイクログリッドによって電力にアクセスできるようになります [83]。

中国を除いても、新興市場は再生可能エネルギーの成長を牽引しており、将来の成長を促進する最大の可能性を秘めています。

新興市場ではイノベーションが生み出されています。先進国は、もともとは新興国で立ち上げられた市場や製品設計の恩恵を受けています。例えば、再生可能エネルギーの入札は、まず新興市場で取り入れられたトレンドであり、全世界で再生可能エネルギーの価格を急落させています [84]。また、新興市場で国内向けに設計されたいくつかの太陽光および風力製品が、今ではリバースイノベーションを通じて先進国市場でも導入されています。例えば、発展途上国のオフグリッド地域を電化するために設計されたマイクログリッドは、先進国の辺境にある鉱山でも活躍しています [85]。

さらに視野を広げると、先進国と発展途上国間の移転を促す上で企業の役割が拡大し、再生可能エネルギーの成長を促進しています。

VII. 企業が関与する範囲の拡大

企業は新しい方法で再生可能エネルギーを調達しており、このプロセスにはますます多くの産業セクターが関与しています。電力購入契約（PPA）は、企業が調達の質に関心を高めるにつれて、特に選好される調達手段となっています。判断基準となるのは追加性、つまり、その調達によって測定可能かつ追加的な再生可能エネルギー容量が生み出されるという保証です。PPA は最大の追加性を提供しますが、この契約を利用できるのは主に大規模な企業です。アグリゲーションは、中小規模の企業に範囲を拡大し始めています。また、最大規模の企業はサプライチェーンにも自社の再生可能エネルギー目標を適用しているため、中小規模の企業に対して、再生可能エネルギーを調達するように要請や支援を行っています。

PPA は企業の調達手段として最も急速に拡大しています。企業は自家発電または調達により、2017 年に世界全体で 465 テラワット時（TWh）の再生可能エネルギーを消費しました [86]。企業が再生可能エネルギーを調達している 75 か国では、さまざまな範囲で、EAC、公益事業グリーン調達プログラム（UGP）、PPA という 3 つの調達手段が利用可能です。

EAC は最も広く利用されている調達手段で、57 か国で利用できる上、調達が容易です。EAC により、企業は再生可能エネルギーに関する政府の要求や自主目標への適合性を認定できます。ただし、EAC は再生可能エネルギーのコスト上の利点を完全に反映するわけではなく、また追加性を必ず提供するとは限りません。UGP は欧州を中心に 39 か国で利用可能ですが、最も事例が少なく、透明性の低い手段です。UGP は EAC に関連付けられ、同じ難点を伴うこと

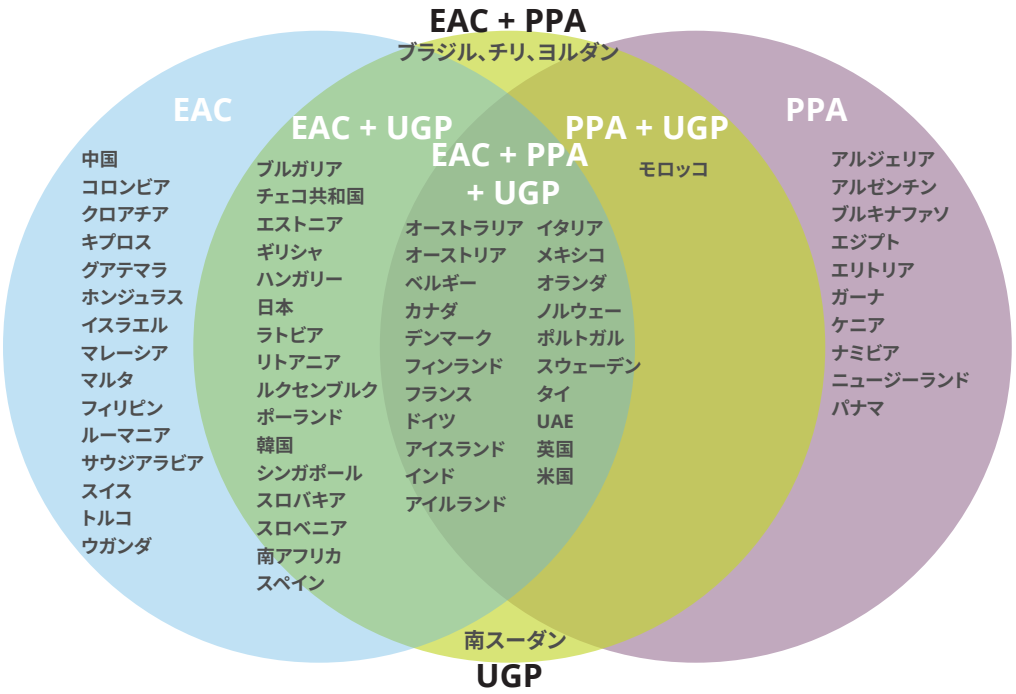
がよくあります。PPA は 35 か国で利用可能で、急速に拡大しています。2017 年に、企業は 10 か国で記録的な 5.4GW もの再生可能エネルギーの PPA を締結しました[87]。2018 年 7 月末までに、企業はこの記録を大幅に超え、28 の市場で 7.2GW を購入しました[88]。PPA は EAC や UGP より大きな追加性とコスト節減を提供するだけでなく、通常の電力価格と比べても有利です。ただし、PPA は中小規模の企業では利用が困難です。PPA は、電力コストが営業費の 15% を超える企業で選好される手段です[89]。そうした企業のほとんどは、エネルギーが重要な費用項目であるため、その調達を積極的に管理しています。

3 つの調達手段は、いずれも北米と大半の欧州諸国で利用可能です。これらの先進国は引き続き企業の主要な調達市場であり、IT は依然として最大の調達セクターです。とはいえ、他のセクターの企業も再生可能エネルギーの調達を増加させており、新興市場では調達を容易にする対策がとられています。新興市場であるインドとメキシコも包括的な調達手段を提供しており、多国籍企業や国内企業による調達の増加が見込まれています。

アグリゲーションとサプライチェーンを通じて、企業は複合的な効果を実現できます。フォーチュン 100 企業のうち 3 分の 2 は再生可能エネルギーの目標を定めており、企業による PPA を通じた世界的な調達をリードしています。これらの企業の多くは RE100 に参加しています。これは、消費電力の 100% を再生可能エネルギーから調達すると約束している 140 社のグループです（2018 年 9 月時点）[90]。これらはすべて前向きな動向ですが、企業による再生可能エネルギー調達の勢いは、中小規模の多くの企業がこの取り組みに参加し、企業の調達手段をすべて利用できる場合にのみ持続可能です。デロイトが 2017 年のレポート「*Serious business: Corporate procurement rivals policy in driving growth of renewable energy*」（*深刻な問題：企業による調達は再生可能エネルギーの成長を促進する上で政策に匹敵*）で指摘しているように、中小規模の企業は

図6

大半の先進市場は企業に3つすべての調達手段を提供



出所：IRENA、「Corporate Sourcing of Renewable Energy: Market and Industry Trends」（企業による再生可能エネルギーの調達：市場と業界の動向）、2018年。

次に控える機会の波といえます。アグリゲーションを通じて、中小規模の企業はパートナーシップを形成し、共同で発電所規模の PPA を実施できます。一部のプロジェクト開発業者は現在、一連の PPA を集約することにより、これら中小規模の企業との妥協を図っています。昨年、あるフォーチュン 1000 企業が 80MW の風力プロジェクトの 10% について PPA を締結しました。その企業がプロジェクトの規模の経済を活かす一方、開発業者は顧客基盤の分散化と、複数の中小規模の企業で構成される財務リスクプールの恩恵を受けます [91]。この同じ企業はその後、290MW の再生可能エネルギー容量を 3 社の企業と共同で購入しました。その中の 1 社は再生可能エネルギーの調達で上位にあり、その他のパートナーなら確保できないようなアクセスと有利な PPA 条項を実現しました。企業による調達の範囲は、サプライチェーンを通じても拡大しています。RE100 企業の 3 分の 1 は、100% 再生可能エネルギーという目標を自社のサプライチェーンにも拡張しています。こうした適用範囲の拡張には、多国籍企業が持つ専門的ノウハウや資本を新興市場の再生可能エネルギーセクターにもたらすという追加的な利点があります。再生可能エネルギーの調達で上位にある企業が最近、3 億米ドル規模のクリーンエネルギー・ファンドを設立し、中国における 1GW の再生可能エネルギー開発に投資しました。その企業は、これをモデルとして他の国で再現したいと考えています [92]。

結論

太陽光発電と風力発電は最近、世界の大部分で主流のエネルギー源から最も選ばれるエネルギー源となり、また１つ境界線を越えました。太陽光と風力が従来型のエネルギー源に対し価格・性能面でパリティに到達し、送配電網を強化できることを実証し、新技術により競争力をますます高めるにつれて、導入を阻む障壁や上限は解消しつつあります。すでに世界的に最低コストのエネルギー源の１つとなった太陽光と風力には、さらなる成長の余地があります。普及条件はまだ向上の途中段階にあります。より一層高い効率と能力を実現する新技術に支えられ、コストは引き続き低下しており、円滑な統合が急速に進んでいます。

一方、再生可能エネルギーの需要は増加の一途をたどっています。太陽光発電と風力発電は、今や信頼性、低コスト、環境配慮というエネルギー消費者の３つの優先事項を満たそうとしています。デンマークなど主導的な再生可能エネルギー市場では、これらの目標について国際機関、政府、地域コミュニティの利害が一致しています。政府が脱炭素化の取り組みから手を引いている米国やオーストラリアなど、その他の市場では、都市、コミュニティ、企業が最も重要な役割を果たすようになっています。それらの当事者が進んで空白を埋め、需要は増加し続けています。最後に、開発や電化に伴い最も大幅な電力需要増加が見込まれる新興市場は、太陽光と風力で一足飛びに主導的地位へと上っています。再生可能エネルギーへの追い風がこれほど強まったことはかつてありません。

巻末注

1. LCOE とは、ドル /MWh 単位の発電コストで、特定の技術につき資本コスト、運転維持費、設備利用率、燃料費を考慮し、耐用寿命全体にわたる平均として算出します。この尺度により、各種エネルギー資源のコストを同一条件で比較できます。

2. Lazard、*「Levelized Cost of Energy Analysis—Version 11.0」（均等化発電原価分析 - バージョン 11.0）*、2017 年 11 月。

3. 以下の文献から計算した容量：IRENA、*「Renewable Capacity Statistics 2018」（再生可能エネルギー容量統計 2018）*、2018 年 3 月。CSIS、*「BNEF' s New Energy Outlook 2018」（BNEF の新エネルギー見通し 2018）*、2018 年 6 月 20 日（中国、インド、米国について）。Canadian Wind Energy Association（カナダについて）。EIA、*「Annual Energy Outlook」（年間エネルギー見通し）における新発電方式の均等化発電原価と均等化回避発電原価*、2018 年 3 月 27 日（米国について）。France Energie Eolienne、*Un vent de transition*、2018 年 9 月 3 日にアクセス（フランスについて）。Fraunhofer ISE、*「Levelized cost of electricity: Renewable energy technologies」（均等化発電原価：再生可能エネルギー技術）*、2018 年 3 月（ドイツについて）。GTM、*「The transformation of solar and the future of energy」（太陽光発電の変革とエネルギーの未来）*、2018 年 5 月 1 日（米国について）。IRENA、「Renewable Power Generation Costs in 2017」（2017 年の再生可能発電コスト）（ブラジル、カナダ、中国、フランス、ドイツ、インド、スペイン、英国、米国について）。英国ビジネス・エネルギー・産業戦略省、*「Electricity Generation Costs」（発電コスト）*、2016 年 11 月（英国について）。

4. 米国エネルギー省、*「2016 Wind Technologies Market Report」（風力技術市場レポート 2016）*、2016 年。

5. REN21、*「Renewables 2018: Global status report」（自然エネルギー世界白書 2018）*、2018 年。

6. Lazard、*「Levelized Cost of Energy Analysis—Version 11.0」（均等化発電原価分析 - バージョン 11.0）*。

7. IRENA、*「Renewable Capacity Statistics 2018」（再生可能エネルギー容量統計 2018）* から計算した容量。

8. 米国エネルギー省、*「2016 Wind Technologies Market Report」（風力技術市場レポート 2016）*。

9. REN21、*「Renewables 2018: Global status report」（自然エネルギー世界白書 2018）*。

10. IRENA、*「Renewable Power Generation Costs in 2017」（2017 年の再生可能発電コスト）*（バイオマス、地熱、水力について）。Lazard、「Summary Findings of Lazard' s 2017 Levelized Cost of Energy Analysis」（Lazard の均等化発電原価分析 2017 の要旨）（石炭と原子力について）。CSIS、*「BNEF' s New Energy Outlook 2018」（BNEF の新エネルギー見通し 2018）*。GTM、*「The transformation of solar and the future of energy」（太陽光発電の変革とエネルギーの未来）*。

11. Jeremy Hodges、「Fossil fuels squeezed by plunge in cost of renewables, BNEF says」（「再生可能エネルギーのコスト急落、化石燃料を圧迫」、BNEF が報告）、Bloomberg、2018 年 3 月 28 日。

12. IRENA、「VAISALA global wind and solar datasets」（VAISALA グローバル風力・太陽光データセット）、2018 年 9 月 3 日にアクセス。

13. Russell Gold、「Global investment in wind and solar energy is outshining fossil fuels」（世界の風力・太陽光エネルギー投資、化石燃料を上回る）、*Wall Street Journal*、2018 年 6 月 11 日。

14. IRENA、*「Renewable Capacity Statistics 2018」（再生可能エネルギー容量統計 2018）*。

15. Fraunhofer ISE、*「Levelized cost of electricity: Renewable energy technologies」（均等化発電原価：再生可能エネルギー技術）*。Jeff St. John、「Offshore wind reaches cost-competitiveness without subsidies」（洋上風力、補助金なしでコスト競争力を達成）、GTM、2017 年 6 月 8 日。デンマークエネルギー庁、「Levelized cost of energy calculator」（均等化発電原価計算ツール）、2018 年 9 月 3 日にアクセス。英国ビジネス・エネルギー・産業戦略省、*「Electricity Generation Costs」（発電コスト）*。Hodges、「Fossil fuels squeezed by plunge in cost of renewables, BNEF says」（「再生可能エネルギーのコスト急落、化石燃料を圧迫」、BNEF が報告）。

16. IRENA、*「Renewable Capacity Statistics 2018」（再生可能エネルギー容量統計 2018）*。

17. REN21、*「Renewables 2018: Global status report」（自然エネルギー世界白書 2018）*。Lazard、*「Levelized Cost of Energy Analysis—Version 11.0」（均等化発電原価分析 - バージョン 11.0）*。

18. IRENA、*「Renewable Power Generation Costs in 2017」（2017 年の再生可能発電コスト）*。

19. Claire Curry、*「Lithium-ion battery costs and market」（リチウムイオン電池のコストと市場）*、Bloomberg New Energy Finance、2017 年 7 月 5 日。リチウムイオン電池の価格は昨年だけでほぼ 25% 下落しました。Brian Eckhouse、Dimitrios Pogkas、Mark Chediak、「How batteries went from primitive power to global domination」（電池はいかにして初歩的電源から世界を席巻するに至ったか）、Bloomberg、2018 年 6 月 13 日。Paul Denholm、Josh Eichman、Robert Margolis、「Evaluating the technical and economic performance of PV plus storage plants」（太陽光・蓄電池併設プラントの技術的・経済的性能を評価する）、国立再生可能エネルギー研究所、2017 年 8 月。

20. Julian Spector、「Lightsource: No more solar bids without energy storage west of the Colorado」（Lightsource、「コロラド西部に蓄電池なしの太陽光入札はもういらない」）、GTM、2018 年 5 月 7 日。

21. BNEF、「Utilities see value in storage alongside PV, and will pay」（電力会社が太陽光に併設する蓄電池の価値を認め、コストを負担）、2017 年 6 月 12 日。Peter Maloney、「How can Tuscon Electric get solar + storage for 4.5c/kWh?」（Tuscon Electric はどうして 4.5 セント /kWh で太陽光と蓄電池の併設を実現できるか?）、Utility Dive、2017 年 5 月 30 日。Julian Spector、「Nevada' s 2.3-cent bid beats Arizona' s record-low solar PPA price」（ネバダの落札価格 2.3 セント、アリゾナの PPA に基づく太陽光の史上最低価格を下回る）、GTM、2018 年 6 月 12 日。Julian Spector、「Breaking down the numbers for Nevada' s super-cheap solar-plus-storage」（ネバダにおける超低コストの太陽光・蓄電池併設のデータを分析する）、GTM、2018 年 6 月 15 日。Jason Deign、「Xcel attracts 'unprecedented' low prices for solar and wind paired with storage」（Xcel、太陽光・風力と蓄電池の併設で「前例のない」低価格を呼び込む）、GTM、2018 年 1 月 8 日。

22. ガス価格を 5 ドル /MMBtu と想定。Mark Dyson、Alex Engel、Jamil Farbes、*「The economics of clean energy portfolios」（クリーンエネルギー・ポートフォリオの経済学）*、Rocky Mountain Institute、2018 年 5 月。

23. CSIS、*「BNEF' s New Energy Outlook 2018」（BNEF の新エネルギー見通し 2018）*。

24. WoodMackenzie、*「U.S. Energy Storage Monitor」（米国エネルギー貯蔵モニター）*、2018 年 6 月 5 日。

25. John Farrell、「Reverse power flow」（逆パワーフロー）、Institute for Local Self-Reliance、2018 年 7 月。REN21、*「Renewables 2018: Global status report」（自然エネルギー世界白書 2018）*。

26. IEA はこれらをフェーズ 1 および 2 の問題と呼んでいます。国際エネルギー機関、「Status of power system transformation 2018: Advanced power plant transformation」（電力システム変革の現状 2018：先進的な発電所変革）、2018 年 5 月。

27. 国際エネルギー機関、*「Large-scale electricity interconnection」（大規模電力連係）*、2016 年。カリフォルニア ISO、「Exploring a regional independent system operator」（地域独立系統運用機関について）、2018 年 9 月 3 日にアクセス。国際エネルギー機関、「Status of power system transformation 2018: Advanced power plant transformation」（電力システム変革の現状 2018：先進的な発電所変革）。風力発電は 2017 年、MISO North における最も急激な出力変動の大部分について深刻さの軽減に寄与しました。Andrew Twite、「Forget the duck curve. Renewables integration in the Midwest is a whole other animal,」（ダックカーブは忘れよう。中西部では再生可能エネルギーの統合により形がすっかり変わる）、GTM、2018 年 6 月 21 日。電力連係が最も進んでいるデンマークでは、事実上、負荷抑制が行われていません。Gerard Wynn、「Power-industry transition, here and now」（電力業界の移行、今ここで）、Institute for Energy Economics and Financial Analysis、2018 年 2 月。

28. Joachim Seel、Andrew Mills、Ryan Wiser、「Impacts of high variable renewable energy futures on wholesale electricity prices, and on electric-sector decision making」（変動性再生可能エネルギー比率の高い将来が卸売電力価格と電力セクターの意思決定に及ぼす影響）、ローレンス・バークレー国立研究所、電力市場・政策グループ、2018 年 5 月。

29. GTM Research、SEIA、*「US Solar Market Insight: 2017 Year in Review」（米国太陽光市場インサイト：2017 年の回顧）*、2018 年。American Wind Energy Association、「Wind Energy in the United States」（米国における風力エネルギー）、2018 年。米国エネルギー情報局、「State Electricity Profiles」（各州電力プロフィール）、2018 年 1 月 25 日（データは 2016 年）。

30. テキサス電力信頼度協議会（ERCOT）は、1 年のうち 15% について価格がほぼゼロになるとみています。次の文献を参照：Mills、Wiser、「Impacts of high variable renewable energy futures on wholesale electricity prices, and on electric-sector decision making」（変動性再生可能エネルギー比率の高い将来が卸売電力価格と電力セクターの意思決定に及ぼす影響）。米国原子力委員会、「Remarks prepared by Lewis L. Strauss」（Lewis L. Strauss 委員長の発言原稿）、1954 年 9 月 16 日。

31. EIA 提供の最新データである 2016 年の平均停電回数指標（SAIFI）の値に基づきます。ここでは、平均停電継続時間指標（SAIDI）の値は考慮していません。ノースカロライナ州とサウスカロライナ州の高い順位は、主にハリケーン「マシュー」の影響を反映しているためです。SAIFI の値が特に高い州は、メイン、アラスカ、ルイジアナ、ウェストバージニアです。SAIFI の値が特に低い州は、ネバダ、アリゾナ、ニューヨーク（太陽光および風力の上位 20 州の 1 つ）、ネブラスカ（風力の上位 20 市場の 1 つ）です。David Darling、Sara Hoff、「Average frequency and duration of electric distribution outages vary by state」（配電停止の平均的な頻度と継続時間は州により異なる）、米国エネルギー情報局、2018 年 4 月 5 日。

32. *New York Times*、「Can you guess these three surprising energy trends?」（これら 3 つの驚くべきエネルギー動向を推測できるか?）、2018 年 7 月 14 日。Beth Garza、「Wind Integration in ERCOT」（ERCOT における風力の統合）、EIA のカンファレンスにおけるプレゼンテーション、2018 年 6 月 4 日。

33. Energinet、*「Security of electricity supply report 2017」（電力供給セキュリティレポート 2017）*、2017 年。国際エネルギー機関、「Status of power system transformation 2018: Advanced power plant transformation」（電力システム変革の現状 2018：先進的な発電所変革）。

34. 欧州に関する直近のデータ（2010 ～ 2016 年）。欧州委員会、VVA、Copenhagen Economics、Neon、デロイト、*「Study on the quality of electricity market data of transmission system operators, electricity supply disruptions, and their impact on the European electricity markets」（送電系統事業者による電力市場データの品質、電力供給の途絶、それが欧州電力市場に及ぼす影響に関する研究）*、2018 年 3 月。

35. Jason Deign、「What beastly weather says about UK energy security」（悪天候は英国のエネルギー安全保障について何を示すか）、GTM、2018 年 3 月 22 日。Robbie Orvis、Mike Boyle、「DOE rulemaking threatens to destroy wholesale markets with no tangible benefit」（DOE のルール制定、目に見える利益もなく卸売市場を滅ぼす恐れ）、Utility Dive、2017 年 10 月 2 日。Brian Eckhouse、「Harvey pushed this Texas wind farm all the way to the max」（ハービーはこのテキサスの風力発電所を最大限度へと押しやった）、Bloomberg、2017 年 9 月 1 日。

36. Twite、「Forget the duck curve」（ダックカーブは忘れよう）。

37. CAISO と NREL が FirstSolar とともに実施した調査は、「先進的な電力制御の開発により、いかにして太陽電池の真価を活かし、間欠的なエネルギー資源にとどまらず、運転予備力から負荷追従、電圧維持、出力変動、周波数応答、変動の平滑化、周波数調整、電力品質まで、さまざまなサービスを提供できるか」を示しています。Clyde Loutan、Vahan Gevorgian、*「Using renewables to operate a lowcarbon grid: Demonstration of advanced reliability services from a utility-scale solar PV plant」（再生可能エネルギーを利用した低炭素送配電網の運用：発電所規模の太陽光発電設備における先進的な信頼性サービスの実証）*、カリフォルニア ISO、NREL、FirstSolar、2017 年。風力発電では「合成慣性」を利用できます。Peter Fairley、「Can synthetic inertia from wind power stabilize grids?」（風力発電の合成慣性で送配電網を安定化できるか?）、IEEE Spectrum、2016 年 11 月 7 日。

38. 国際エネルギー機関、「Status of power system transformation 2018」（電力システム変革の現状 2018）。太陽光および風力インバータは、アクティブな給電なしで短絡電力を供給できます。Dena German Energy Agency、*「Ancillary services study 2030」（アンシラリーサービス調査 2030）*、2014 年 7 月 3 日。太陽光インバータは、太陽光発電が利用できない場合、系統電力を使用して反応性サポートと電圧制御を提供できます。国立再生可能エネルギー研究所、「Demonstration of essential reliability services by utility-scale solar photovoltaic power plant: Q&A」（発電所規模の太陽光発電設備における不可欠な信頼性サービスの実証：Q&A）、2017 年 4 月 27 日。Loutan、Gevorgian、*「Using renewables to operate a low-carbon grid」（再生可能エネルギーを利用した低炭素送配電網の運用）*。

39. 同上。Peter Behr、「Gas, renewables can replace coal with stronger rules–NERC」（「天然ガスと再生可能エネルギー、より厳格なルールの下で石炭を代替可能」、NERC が指摘）、E&E News、2017 年 12 月 15 日。ENTSOE、「Need for synthetic inertia（SI）for frequency regulation」（合成慣性（SI）による周波数調整の必要性）、2018 年 1 月 31 日。Fairley、「Can synthetic inertia from wind power stabilize grids?」（風力発電の合成慣性で送配電網を安定化できるか?）。国際エネルギー機関、「Status of power system transformation 2018」（電力システム変革の現状 2018）。Emiliano Bellini、「Italy opens ancillary services market to pilot renewable energy and storage projects」（イタリア、アンシラリーサービス市場を再生可能エネルギーおよび蓄電のパイロットプロジェクトに開放）、*PV Magazine*、2017 年 5 月 9 日。Joseph Eto ほか、「Frequency control requirements for reliable interconnection frequency response」（信頼性の高い連係周波数応答の周波数制御要件）、ローレンス・バークレー国立研究所、2018 年 2 月。.

40. Chris Martin、「First Solar is using robots to better tap the sun」（First Solar、ロボットを使用して太陽光パネル製造を効率化）、Bloomberg Businessweek、2018 年 1 月 24 日。

41. 欧州に関する直近のデータ（2010 ～ 2016 年）。欧州委員会、VVA、Copenhagen Economics、Neon、デロイト、*「Study on the quality of electricity market data of transmission system operators, electricity supply disruptions, and their impact on the European electricity markets」（送電系統事業者による電力市場データの品質、電力供給の途絶、それが欧州電力市場に及ぼす影響に関する研究）*。

42. Priyanka Shrestha、「Orsted drones on about robotic wind turbine blades inspection」（Orsted のドローン、自律的な風力タービンブレード検査で活躍）、Energy Live News、2018 年 7 月 18 日。

43. サルディニアの太陽光発電所は、より正確な AI 予測に従い、増収を達成しました。Rosaria Ciriminna ほか、「New energy and weather services in the context of the energy transition」（エネルギー移行との関連における新エネルギーと気象サービス）、*Energy Technology*、2017 年 9 月 21 日。NCAR による AI ベースの優れた予測により、Xcel は 6 千万ドルを節約しました。Quirin Schiermeier、「And now for the energy forecast」（それでは、次はエネルギー予報です）、*Nature*、2016 年 7 月 14 日。

44. Engerati、「Utilities and machine learning–the use cases」（公益事業と機械学習：ユースケース）、2018 年 1 月 12 日。

45. Jon Walker、「AI for weather forecasting–in retail, agriculture, disaster prediction, and more」（AI による気象予報：小売、農業、災害予測など）、TechEmergence、2017 年 10 月 7 日。

46. Andrew Ross Sorkin、「Demystifying the blockchain」（ブロックチェーンの謎を解く）、*New York Times*、2018 年 6 月 27 日。Rachel Ett、「Reality check: blockchain needs proof of concept before revolutionizing the grid」（リアリティチェック：ブロックチェーンが送配電網を変革するには概念実証が必要）、GTM、2018 年 6 月 14 日。Mike Orcutt、「How blockchain could give us a smarter energy grid」（ブロックチェーンはいかにしてよりスマートなエネルギー供給網を実現できるか）、*MIT Technology Review*、2017 年 10 月 16 日。Kevin Stark、「Blockchain companies take aim at clean energy transaction costs」（ブロックチェーン企業、クリーンエネルギーの取引コストに照準）、Energy News Network、2018 年 5 月 7 日。

47. Gireesh Shrimali、Shumala Tirumalachetty、David Nelson、「Falling short: An evaluation of the Indian renewable certificate market」（不十分：インドの再生可能エネルギー認定市場の評価）、Climate Policy Initiative、2012 年 12 月。

48. Rachel Ett、「Reality check: Blockchain needs proof of concept before revolutionizing the grid」（リアリティチェック：ブロックチェーンが送配電網を変革するには概念実証が必要）。Orcutt、「How blockchain could give us a smarter energy grid」（ブロックチェーンはいかにしてよりスマートなエネルギー供給網を実現できるか）。

49. Nitin Tomar、「Industry report–perovskite solar cells: harnessing clean energy for a bright future」（業界レポート - ペロブスカイト太陽電池：クリーンエネルギーを利用して明るい未来へ）、Iam、2018 年 4 月 11 日。

50. Mark Hutchins、「Oxford PV hits world record efficiency for perovskite/silicon tandem cell」（Oxford PV、ペロブスカイト / シリコン・タンデム電池で世界記録の効率を達成）、*PV Magazine*、2018 年 6 月 26 日。シリコン太陽電池の記録は 26.3% です。John Boyd、「Efficiency of silicon solar cells climbs」（シリコン太陽電池の効率が向上）、IEEE Spectrum、2018 年 3 月 20 日。

51. Mark Hutchins、「Imec hits 27.1% on perovskite/silicon tandem cell」（Imec、ペロブスカイト / シリコン・タンデム電池で 27.1% の効率を達成）、*PV Magazine*、2018 年 7 月 24 日。Hutchins、「Oxford PV hits world record efficiency for perovskite/silicon tandem cell」（Oxford PV、ペロブスカイト / シリコン・タンデム電池で世界記録の効率を達成）。

52. 同上。

53. サンディア国立研究所、「First 3-D printed wind-blade mold, energy-saving nanoparticles earn Sandia national awards」（初の 3D プリントされた風力ブレード金型、省エネルギーのナノ粒子により、サンディア研究所が全国賞を獲得）、ニュースリリース、2018 年 4 月 25 日。

54. Jann Dodd、「Additive manufacturing will be a 'gamechanger'」（付加製造は「ゲームチェンジャー」に）、Wind Power Monthly、2017 年 1 月 31 日。

55. Peter Zelinski、「Using hybrid additive manufacturing, GE leverages turbine blade repair into efficiency improvement」（GE、ハイブリッド付加製造を利用してタービンブレードの修理を効率化）、Modern Machine Shop、2017 年 9 月 12 日。

56. William D. Eggers、John Skowron、*「Forces of change: smart cities」（変革の力：スマートシティ）*、Deloitte Insights、2018 年 3 月 22 日。

57. 人口 100 万人以上の都市のリストについては、国連の*「The world' s cities in 2016」（世界の都市 2016）*を参照。風力および太陽光の割合と再生可能エネルギーの目標については、「CDP open data portal」（CDP オープンデータポータル、2018 年 9 月 3 日にアクセス）を参照。

58. Michael D. Shear、「Trump will withdraw U.S. from Paris climate agreement」（米トランプ政権、気候変動に関するパリ協定から離脱へ）、*New York Times*、2017 年 6 月 1 日。Tony Mcallister、「Mayor Faulconer remains committed to Paris agreement: 'San Diego will continue to lead'」（Faulconer 市長、なおパリ協定達成に尽力「サンディエゴは引き続き主導的役割を果たす」）、*Times of San Diego*、2017 年 6 月 1 日。

59. インド政府 都市開発省、*「Smart cities: mission statement and guidelines」（スマートシティ：ミッションステートメントとガイドライン）*、p. 9、2018 年 9 月 3 日にアクセス。

60. ET EnergyWorld、「Rooftop solar plant to make Jaipur metro stations self sufficient」（屋上太陽光設備により、ジャイプルの地下鉄駅が電力を自給）、2016 年 12 月 3 日。

61. Florence Schulz、「Germany: A European laggard on smart cities」（ドイツ：スマートシティにおける欧州の落後者）、Euractiv Germany、2018 年 4 月 9 日。MySmartLife、「Transition of EU cities towards a new concept of smart life and economy」（新たなコンセプトのスマートライフ / エコノミーへの EU 域内都市の移行）、2018 年 9 月 3 日にアクセス。EIP-SCC、「The Marketplace of the European Innovation Partnership on Smart Cities and Communities」（スマートシティ / コミュニティに関する欧州イノベーションパートナーシップのマーケットプレイス）、2018 年 9 月 3 日にアクセス。Covenant of Mayors for Climate and Energy（気候エネルギー首長誓約）。

62. コロラド州交通省、「Colorado aerotropolis visioning study」（コロラド空港都市構想の研究）、2016 年 5 月。

63. Sidewalk Toronto、「About Sidewalk Toronto」（Sidewalk Toronto について）、2018 年 9 月 3 日にアクセス。Nick Summers、「Inside Google' s plan to build a smart neighborhood in Toronto」（Google のトロントにおけるスマートコミュニティ建設計画の内幕）、Engadget、2018 年 3 月 16 日。

64. Alaa Shahine、Glen Carey、Vivian Nereim、「Saudi Arabia just announced plans to build a mega city that will cost $500 billion」（サウジアラビア、工費 5,000 億ドルの巨大都市建設計画を発表）、Bloomberg、2017 年 10 月 24 日。

65. マサチューセッツ工科大学、「Study helps make microgrids a more reliable power source」（研究がマイクログリッドの電源としての信頼性向上に寄与）、*R&D Magazine*、2017 年 9 月 11 日。

66. Janet L. Sawin ほか、*「Renewables 2018: Global status report」（自然エネルギー世界白書 2018）*、p. 42、2018 年。

67. Claire Reilly、「Off the grid: How renewable energy is helping remote towns take back the power」（オフグリッド：再生可能エネルギーは辺境の町がパワーを取り戻す上でいかに役立っているか）、CNET、2018 年 5 月 24 日。

68. 地球の友・欧州、「Energy atlas」（エネルギーアトラス）、メディアブリーフィング、2018 年 4 月 24 日。

69. Danmarks Vinmolleforening、「Cooperatives—a local and democratic ownership to wind turbines」（協同組合：風力タービンに対する地域の民主的所有）、2018 年 9 月 3 日にアクセス。

70. Dyani Lewis、「Energy positive: How Denmark' s Samsø island switched to zero carbon」（エネルギーポジティブ：デンマークのサムセー島はいかにしてゼロカーボンに移行したか）、*Guardian*、2017 年 2 月 23 日。

71. Julia Berg、Suzanna Sanborn、Ashish Kumar、*「Unlocking the value of community solar」（コミュニティ太陽光発電の真価を解き放つ）*、デロイト、2016 年。

72. Julia Pyper、「The challenges for long-term growth in community solar」（コミュニティ太陽光発電の長期的成長への課題）、GMT、2018 年 5 月 18 日。

73. 同上。

74. マサチューセッツ州、「CCERI program goals」（CCERI プログラムの目標）、2018 年 9 月 3 日にアクセス。

75. Andrew Burger、「Lessons from natural disasters spur new microgrids in Japan」（自然災害の教訓から日本で新たなマイクログリッドが始動）、Microgrid Knowledge、2017 年 9 月 26 日。

76. International Renewable Energy Agency、*「Renewable Capacity Statistics 2018」（再生可能エネルギー容量統計 2018）*、2018 年 3 月。FS-UNEP Collaborating Centre、*「Global trends in renewable energy investment 2018」（再生可能エネルギー投資の世界的動向 2018）*、p. 15。

77. Sawin ほか、*「Renewables 2018: Global status report」（自然エネルギー世界白書 2018）*、p. 90–7。

78. Climatescope、「Emerging markets cross-border clean energy investment」（新興市場のクロスボーダークリーンエネルギー投資）、2018 年 9 月 3 日にアクセス。

79. International Renewable Energy Agency、*「Renewable Capacity Statistics 2018」（再生可能エネルギー容量統計 2018）*。

80. Climatescope、*「The clean energy country competitiveness index」（国別クリーンエネルギー競争力インデックス）*、2017 年 11 月 28 日。

81. Kurt Lowder、「India increases its massive 2022 renewable energy target by 28%」（インド、2022 年までの壮大な再生可能エネルギー目標を 28% 引き上げ）、CleanTechnica、2018 年 6 月 10 日。

82. Sawin ほか、*「Renewables 2018: Global status report」（自然エネルギー世界白書 2018）*。

83. IEA、IRENA、国連、世界銀行、WHO、*「Tracking SDG7: The energy progress report 2018」（SDG7 を追跡する：エネルギー進捗報告 2018）*、共同報告書、p. 28。

84. Climatescope、*「The clean energy country competitiveness index」（国別クリーンエネルギー競争力インデックス）*、p. 28。

85. Anshul Dhamija、「Reverse innovation: Made in India, for the world」（リバースイノベーション：メイド・イン・インディア、世界に向けて）、*Forbes India*、2018 年 4 月 26 日。

86. IRENA、「Corporate Sourcing of Renewables: Market and Industry Trends」（企業による再生可能エネルギーの調達：市場と業界の動向）、2018 年。

87. Veronika Henze、「Corporations purchased record amounts of clean power in 2017」（企業は 2017 年に記録的量のクリーンエネルギーを購入）、Bloomberg NEF、2018 年 1 月 22 日。

88. Bloomberg NEF、「Corporations already purchased record clean energy volumes in 2018, and it' s not an anomaly」（企業は 2018 年、すでに記録的規模のクリーンエネルギーを購入。それは例外的な事態ではない）、2018 年 8 月 9 日。

89. IRENA、「Corporate sourcing of renewables」（企業による再生可能エネルギーの調達）。

90. RE100。

91. Ali Rotatori、Roberto Zanchi、「The corporate renewables market is ready for smaller buyers」（企業の再生可能エネルギー市場、中小規模の買い手にも対応）、Rocky Mountain Institute、2017 年 10 月 17 日。

92. Haseeb Ali、「Apple launches joint $300 million clean energy fund with Chinese suppliers」（Apple、3 億ドルのクリーンエネルギー・ファンドを中国系サプライヤーと共同で設立）、SNL、2018 年 7 月 13 日。

著者略歴

MARLENE MOTYKA は、デロイトの米国および世界再生可能エネルギー部門の責任者で、Deloitte Transactions and Business Analytics LLP では役員を務めています。再生可能エネルギーとエネルギーセクターのバリュエーション、税務、M&A、ファイナンス、事業戦略、財務モデリングに取り組んでいます。MOTYKA は 22 年以上にわたりデロイトで勤務しており、ラトガース大学で金融論を学び、経営学修士号を保持しています。また、リーハイ大学で機械工学を学び、理学士号を取得しています。

ANDREW SLAUGHTER は、Deloitte Services LP の DCES（Deloitte Center for Energy Solutions）の上級ディレクターとして、デロイトの資源・エネルギー・生産財グループと協力して、同センターの戦略策定・実行・管理、エネルギー関連研究プロジェクトの開発と推進、および同センターの広報、発行物を統括しています。石油・ガス業界における過去 25 年のキャリアを通じて大手石油・ガス・化学会社やコンサルティング会社の要職を歴任しています。

CAROLYN AMON は、Deloitte Services LP の DCES のマネジャーとして、石油・ガス、エネルギー、および再生可能エネルギーセクターの世界的なエネルギー動向を分析しています。エネルギー・生産財セクターにおける分析調査、コンサルティング、プロジェクト管理で 15 年もの経験を積んでいます。

謝辞

本レポートに助力をいただいた **Suzanna Sanborn** 氏と **Deepak Vasantlal Shah** 氏にお礼を申し上げます。

また、ご意見や助言をいただいた **Duncan Barnes** 氏、**Bill Eggers** 氏、**Steve Goyne** 氏、**Bob Kumpf** 氏、**Kathleen O' Dell** 氏、**Mike Prokop** 氏、**James Thomson** 氏、**Michel Gevry** 氏、**Boe Mikkel** 氏、**Debasish Mishra** 氏、**Kumar Padisetti** 氏、**Michael Rath** 氏、**Shamal Sivasanker** 氏、**Dieter Vonken** 氏にもお礼を申し上げます。

Deloitte Center For Energy Solutionsについて

DCES（Deloitte Center for Energy Solutions）は、イノベーション、ソートリーダーシップ、革新的な研究、および業界のコラボレーションのための場を提供することで、エネルギー分野の最も複雑な課題を解決しようとする企業を支援しています。デロイトの資源・エネルギーグループでは、当センターを通じ、経営幹部が課題としている重要なトピック、すなわち法規制や政策の影響、業務運営の効率化、サステナブルかつ収益性の高い成長などに関する議論をリードし、また専門家とソートリーダーのグローバルなネットワークを活かして総合的なソリューションを提供しています。

当センターは、ヒューストンとワシントン DC に活動拠点を有し、セミナー、ラウンドテーブル、その他の機会を設けることで、大小様々な企業がともに学び、議論し、意見を交換する場を提供しています。

詳細は、www.deloitte.com/us/energysolutions および @Deloitte4Energy をご覧ください。

お問い合わせ先

再生可能エネルギー担当一覧
問い合わせ：
jpdtrenewableenergyr@tohmatsu.co.jp

Japan Contacts

エネルギーセクターリーダー
磯俣　克平
kappei.isomata@tohmatsu.co.jp

エネルギーセクターリーダー補佐
樋野　智也
tomoya.hino@tohmatsu.co.jp

各サービス　再生可能エネルギー担当

コンサルティング
下田　健司
keshimoda@tohmatsu.co.jp

庵原　一水
iihara@tohmatsu.co.jp

加藤　健太郎
kentakato@tohmatsu.co.jp

神谷　洋次郎
yokamiya@tohmatsu.co.jp

大倉　一郎
iokura@tohmatsu.co.jp

榎本　哲也
teenomoto@tohmatsu.co.jp

向井　元一郎（ナレッジ）
motomukai@tohmatsu.co.jp

リスクアドバイザリー
事業リスク
西本　匡利
masatoshi.nishimoto@tohmatsu.co.jp

山口　匡
tadashi.yamaguchi@tohmatsu.co.jp

ESG アドバイザリー
達脇　恵子
keiko.tatsuwaki@tohmatsu.co.jp

ファイナンシャルリスク
宮崎　大
hiroshi.miyazaki@tohmatsu.co.jp

監査
野澤　啓
akira.nozawa@tohmatsu.co.jp

稲垣　直明
naohiro.inagaki@tohmatsu.co.jp

税務法務
前田　圭
kei.maeda@tohmatsu.co.jp

小山　和憲
kazunori.koyama@tohmatsu.co.jp

伊奈　弘員　（リーガル）
hirokazu.ina@tohmatsu.co.jp

ファイナンシャルアドバイザリー
三木　要
kaname.miki@tohmatsu.co.jp

小早川　ほたか
hotaka.kobayakawa@tohmatsu.co.jp

手計　徹也
tetsuya.tebaka@tohmatsu.co.jp

US and Global Renewable Energy leader
Marlene Motyka
+1 973 602 5691
mmotyka@deloitte.com

Global Power & Utilities leader
Felipe Requejo
Deloitte Touche Tohmatsu Limited
+34 91 438 1655
frequejo@deloitte.es

Global Energy, Resources & Industrials leader
Rajeev Chopra
Deloitte Touche Tohmatsu Limited
+44 20 7007 2933
rchopra@deloitte.co.uk

Shamal Sivasanker
Deloitte Africa
+27112096592
ssivasanker@deloitte.co.za

Arturo Garcia Bello
Deloitte Mexico
+52 55 5080 6274
jbortega@deloitte.com

Michael Rath
Deloitte Australia
+61 39 671 6465
mrath@deloitte.com.au

Gerhard Marterbauer
Deloitte Austria
+43 153 700 4600
GMarterbauer@deloitte.at

Guilherme Lockmann
Deloitte Brazil
+55 21 3981 0446
glockmann@deloitte.com

Jurgen Beier
Deloitte Canada
+1 41 6874 3146
jbeier@deloitte.ca

Kevin Guo
Deloitte China
+86 10 8520 7379
kguo@deloitte.com.cn

Mikkel Boe
Deloitte North West Europe: Denmark
+45 22 20 24 94
mikboe@deloitte.dk

Ragnar Nesdal
Deloitte North West Europe: Norway
+47 55 21 81 85
rnesdal@deloitte.no

Fredrik Jonsson
Deloitte Sweden
+46 73 397 73 11
fjonsson@deloitte.se

Jukka Vattulainen
Deloitte Finland
+35 820 755 5549
jukka.vattulainen@deloitte.fi

Veronique Laurent
Deloitte France
+33 15 561 6109
vlaurent@deloitte.fr

Thomas Schlaak
Deloitte Germany
+45 22 20 24 94
tschlaak@deloitte.de

Marina Tonzetic
Deloitte Croatia
+38512351948
mtonzetic@deloittece.com

Peter Wistoft
Deloitte Greenland
+299 34 3820
pwistoft@deloitte.dk

Shubhranshu Patnaik
Deloitte India
+91 22 6122 8110
debmishra@deloitte.com

Angelo Era
Deloitte Italy
+39 064 780 5647
aera@deloitte.it

Jong Woo Lee
Deloitte Korea
+82 2 6676 1399
jongwlee@deloitte.com

Salam Awawdeh
Deloitte Middle East
+97 14 376 8888
sawawdeh@deloitte.com

Jeroen van der Wal
Deloitte Netherlands
+31 88 288 0608
JvanderWal@deloitte.nl

Suki Hughes
Deloitte Canada
+1 90 2721 5563
sukihughes@deloitte.ca

Kappei Isomata
Deloitte Japan
+818034692546
kappei.isomata@tohmatsu.co.jp

Shoaib Ghazi
Deloitte Pakistan
+922 13 454 6494
sghazi@deloitte.com

Gennady Kamyshnikov
Deloitte Russia
+74 95 787 0600
gkamyshnikov@Deloitte.ru

Ralph Schlaepfer
Deloitte North West Europe: Switzerland
+41 58 279 6686
rschlaepfer@deloitte.ch

Elif Dusmez Tek
Deloitte Turkey
+90 312 295 4700
etek@deloitte.com

Mark Lillie
Deloitte North West Europe: United Kingdom
+44 20 7007 2395
mlillie@deloitte.co.uk

Daniel Grosvenor
Deloitte North West Europe: United Kingdom
+44 20 7007 1971
dgrosvenor@deloitte.co.uk

Scott Smith
Deloitte United States
+1 619 237 6989
ssmith@deloitte.com

Marlene Motyka
Deloitte United States
+1 973 602 5691
mmotyka@deloitte.com

Deloitte.
Insights

Sign up for Deloitte Insights updates at www.deloitte.com/insights.

Follow @DeloitteInsight

Deloitte Insights contributors
Editorial: Rithu Thomas, Rupesh Bhat, Abrar Khan, and Preetha Devan
Creative: Sonya Vasilieff
Promotion: Nikita Garia
Cover artwork: Livia Cives

デロイトインサイトについて
デロイトインサイトはビジネスや公共サービス、そして NGO に関わる人々にインサイトを与える、オリジナルの記事やレポート、定期刊行物を発行しています。私共のプロフェッショナルサービスを提供する組織とビジネスや学術に関わる共著者から研究結果や経験を引き出し、企業幹部や政府のリーダーとなる方々に、幅広い視野で議論を進めていただくことを目的としています。
デロイトインサイトは Deloitte Development LLC. によって発行されています。

本誌について
この出版物は一般に公開されている情報だけを含んでおり、Deloitte Touche Tohmatsu Limited およびそのメンバーファーム、関連法人は、この出版物により、会計・ビジネス・ファイナンス・投資・法律・税務その他のプロフェッショナルとしてのアドバイスやサービスについて影響を受けるものではありません。この出版物はプロフェッショナルとしてのアドバイスやサービスを代替するものではなく、ファイナンスやビジネスの成果に関わる、組織の決断や行動を判断する際の基礎資料となるものでもありません。ファイナンスやビジネスに影響し得るいかなる行動・決断についても、事前に適切なプロフェッショナル・アドバイザーに相談されることをお薦めします。
この出版物に基づく判断により個人が損失を受けた場合でも、Deloitte Touche Tohmatsu Limited およびそのメンバーファーム、または関連法人は、いかなる責任も負うものではありません。

デロイトについて
デロイト トーマツ グループは、日本におけるデロイト アジア パシフィック リミテッドおよびデロイトネットワークのメンバーであるデロイト トーマツ合同会社並びにそのグループ法人（有限責任監査法人トーマツ、デロイト トーマツ コンサルティング合同会社、デロイト トーマツ ファイナンシャルアドバイザリー合同会社、デロイト トーマツ税理士法人、DT 弁護士法人およびデロイト トーマツ コーポレート ソリューション合同会社を含む）の総称です。デロイト トーマツ グループは、日本で最大級のビジネスプロフェッショナルグループのひとつであり、各法人がそれぞれの適用法令に従い、監査・保証業務、リスクアドバイザリー、コンサルティング、ファイナンシャルアドバイザリー、税務、法務等を提供しています。また、国内約 40 都市に 1 万名以上の専門家を擁し、多国籍企業や主要な日本企業をクライアントとしています。詳細はデロイト トーマツ グループ Web サイト（www.deloitte.com/jp）をご覧ください。

Deloitte（デロイト）とは、デロイト トウシュ トーマツ リミテッド（“DTTL”）ならびにそのグローバルネットワーク組織を構成するメンバーファームおよびそれらの提携法人のひとつまたは複数を指します。DTTL（または“Deloitte Global”）および各メンバーファーム並びにそれらの関係法人はそれぞれ法的に独立した別個の組織体です。DTTL はクライアントへのサービス提供を行いません。詳細は www.deloitte.com/jp/about をご覧ください。
デロイト アジア パシフィック リミテッドは DTTL のメンバーファームであり、保証有限責任会社です。デロイト アジア パシフィック リミテッドのメンバーおよびそれらの提携法人は、オーストラリア、ブルネイ、カンボジア、東ティモール、ミクロネシア連邦、グアム、インドネシア、日本、ラオス、マレーシア、モンゴル、ミャンマー、ニュージーランド、パラオ、パプアニューギニア、シンガポール、タイ、マーシャル諸島、北マリアナ諸島、中国（香港およびマカオを含む）、フィリピンおよびベトナムでサービスを提供しており、これらの各国および地域における運営はそれぞれ法的に独立した別個の組織体により行われています。

Deloitte（デロイト）は、監査・保証業務、コンサルティング、ファイナンシャルアドバイザリー、リスクアドバイザリー、税務およびこれらに関連する第一級のサービスを全世界で行っています。150 を超える国・地域のメンバーファームのネットワークを通じ Fortune Global 500® の 8 割の企業に対してサービス提供をしています。“Making an impact that matters” を自らの使命とするデロイトの約 286,000 名の専門家については、（www.deloitte.com）をご覧ください。

本資料は皆様への情報提供として一般的な情報を掲載するのみであり、その性質上、特定の個人や事業体に具体的に適用される個別の事情に対応するものではありません。また、本資料の作成または発行後に、関連する制度その他の適用の前提となる状況について、変動を生じる可能性もあります。個別の事案に適用するためには、当該時点で有効とされる内容により結論等を異にする可能性があることをご留意いただき、本資料の記載のみに依拠して意思決定・行動をされることなく、適用に関する具体的事案をもとに適切な専門家にご相談ください。

Member of
Deloitte Touche Tohmatsu Limited

Copyright © 2018 Deloitte Development LLC. All rights reserved
© 2019. For information, contact Deloitte Touche Tohmatsu LLC, Deloitte Tohmatsu Consulting LLC, Deloitte Tohmatsu Financial Advisory LLC, Deloitte Tohmatsu Tax Co., DT Legal Japan.