

# 国際経験から見た太陽光発電発展と日本

## International perspective of solar PV development and Japan

桑畑玲奈\*

### 1. 世界的な太陽光発電の躍進

国際エネルギー機関（IEA）の最新データ<sup>1)</sup>によると、世界の太陽光発電は歴史的な成長を遂げている。2024年には前年比30%増（475TWh追加）の発電電力量増加を記録し、総発電電力量が2,000TWhを突破した。これは日本の年間総消費電力量の2倍に相当する規模である。2027年までに、太陽光発電は世界の電力需要増加分の約50%を満たすと予測される。

この成長の背景には、製造能力の急激な拡大がある。2024年末にグローバル製造能力は1,100GWを

超え、実際のPV設置需要の2倍となり、供給過剰がモジュール価格の50%下落を引き起こした<sup>2)</sup>。中国が世界新設容量の60%を占める一方、欧州連合も記録的な61GW、米国も33.2GWを設置し、ブラジルが15GWと続いた<sup>2)</sup>。日本は5GWの新設に留まり<sup>3)</sup>、グローバルトレンドととの差が見られる。政策支援に加えて経済性が導入を後押ししている。

しかし、この急速な展開には3つの重要な課題が伴う。

サプライチェーン集中の問題は深刻だ。中国が太陽光パネル製造の80%以上を担っており、地政学的リスクとなっている<sup>4)</sup>。中国の製造コストは他国より大幅に安く（インドより10%、米国より20%、欧州より35%安い）、他地域での製造拡大を困難にしている。それでも、米国<sup>5)</sup>やEU<sup>6)</sup>、インド<sup>7)</sup>はコスト増を承知で自国製造の拡大を進めており、補助金や税制優遇により支援している。米国のインフレ削減法やEUの政策がその例である。

系統統合では、分散型太陽光の増加により複数の課題が懸念されている。配電網が双方向の電力フローに十分対応できず、電圧や電力品質の問題が生じる可能性がある。また、昼間の太陽光発電ピークと電力需要のミスマッチにより、余剰電力の処理が課題となっている。さらに、太陽光の変動により電力需要と供給の差が急激に変化し、調整可能な発電設備や需要応答、蓄電などの対応が追いつかない恐れがある。解決策として、まず配電網の設備更新が必要である。次に、既存の柔軟性を最大活用すべきである：需要応答、水力発電の調整、地域間の電力融通など。比較的高コストで新しい設備の建設が必要になる蓄電池の導入は他の手段が尽きてからとすべきである。

\*（フランス パリ在住）

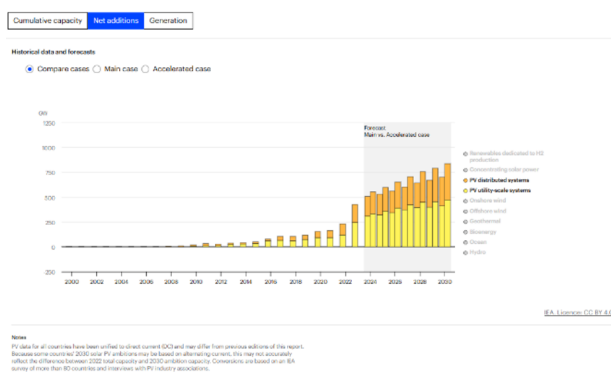


図1 太陽光発電の世界純増の履歴データと予測、IEAの主要ケースと加速ケース

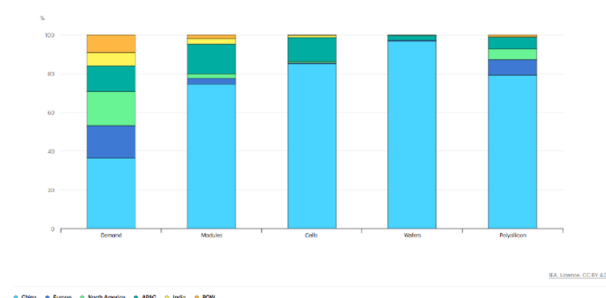


図2 2021年の国別・地域別太陽光発電生産能力

サイバーセキュリティでは、分散型太陽光システムの急増により新たなリスクが生まれている。インバーター経由での遠隔操作による攻撃、機器への不正アクセス、サプライチェーンのセキュリティ問題が主なリスクである。欧州ソーラーパワー・ヨーロッパの調査<sup>8)</sup>では、わずか3GWの容量への攻撃でも欧州電力系統に重大な影響を与え得ることが判明している。日本でも同様の分析が勧められる。対策として、米国エネルギー省とソーラーパワー・ヨーロッパは業界特化型セキュリティ基準の策定を進め、EU域外からの遠隔制御制限、多層防御システムの構築を推進している。

これらの課題に対し、各国で具体的な解決策が実施されている。系統統合では、オーストラリアが南オーストラリア州で大規模蓄電システム<sup>9)</sup>と配電管理システムを導入し、高PV浸透率を実現している。ドイツでは先進的な需要応答システムと地域間連系により変動性を吸収している。サプライチェーンでは、米国のインフレ削減法により国内製造投資が急増し、インドも2025年までに世界第2位の太陽光モジュール製造国となる見込みである<sup>10)</sup>。サイバーセキュリティでは、米国エネルギー省の「Securing Solar for the Grid」<sup>11)</sup>プロジェクトとEUの業界特化型基準策定<sup>12)</sup>が進んでいる。

## 2. 国際経験から見た日本電力セクターの展望

日本、オーストラリア、ドイツ、フランスでの20年超にわたる勤務経験と現在の国際エネルギー機関での電力システム変革・再エネ統合業務を通じ、多様なエネルギー転換を目撃し、世界各国の電力システムに可変再エネ計画・運用・系統影響評価について助言してきた。この国際的視点から、日本は特殊な課題と機会を併せ持つ国として見える。

**地理的・インフラ制約**の国際比較では、日本の課題の特殊性が明確である。3つの周波数制御エリア(50Hz/60Hz分離を含む)、山岳地帯を横断する送電網強化の困難さは、私が経験したオーストラリアや北西ヨーロッパの平坦な大陸とは大きく異なる。

洋上インフラ開発では、欧州北海の浅海盆地(水深30-60m)に対し、日本周辺海域は沿岸から急速に深海となり、洋上風力開発コストを大幅に押し上げるという。農地利用においても、日本は農地転用への厳格な規制と営農型太陽光発電への高い要求(農業収量80%維持義務)により、ドイツやフランスの農業・発電両立支援政策とは対照的に、利用可能な土地が制限され許認可が複雑化している。さら

に、地震や台風などの自然災害対策要求により、他国では見られないPV設置コスト上昇と手続き複雑化が生じている。

**経済構造**の国際比較において、日本の状況は特異である。ドイツでは豊富な風力、フランスでは原子力、オーストラリアでは石炭と豊富な再エネ資源により、相対的に安価な代替電源が存在する。対照的に、日本では石炭・LNG発電コスト(19.7-24.4円/kWh)に対し太陽光(11円/kWh)の優位性が明確であり、原子力(9.3-10.6円/kWh)とも競合可能である<sup>13)</sup>。この経済構造により、分散型太陽光投資の経済的合理性が高くなっている。特に、電力消費地の近くに太陽光を設置することで、高コストな送電線建設を避けられる効果は、山岳地帯の多い日本では特に大きい。

**系統統合アプローチ**の国際差異も興味深い。欧州では広域送電網と各国間連系により、異なる時間帯・気象地域での再エネ変動を平滑化し、多様な電源構成(風力、太陽光、水力、ガス)と需要パターンの違いを活用している。オーストラリアでは州間連系強化により広大な地域の気象の多様性を利用し、大規模蓄電システムと水力発電の調整力で対応している。しかし日本では、島国という地理的制約と3つの周波数エリア分離により、日本でも南北に長い地形により気象の多様性があり、地域間連系強化と水力発電の活用により同様の効果が期待できる。

この系統統合の違いは、各国の系統安定性への取り組みにも現れている。オーストラリア国家電力市場での発電設備系統連系適合性評価に従事した経験では、系統強度が低いため、弱い系統慣性と電圧安定性が発電設備連系において常に重要な設計パラメータとなっていた。これは後に経験した西欧との大きな違いであった。ドイツやフランスでは、相互接続されて安定した系統と高密度な同期発電により、当初はこれらの問題が表面化しなかった。しかし近年、再エネ浸透率が系統安定性に挑戦するレベルに達するにつれ、無効電力管理と周波数安定性が深刻な系統計画上の懸念となっている。オーストラリアが必要に迫られて10年前に学んだこと、—周波数、慣性、電圧支援サービスの重要性—を、欧州は今急いで実装しようとしている。この経験から、各国の電力システムが持つ多様性こそが、グローバルなエネルギー転換における重要な学習機会であることが分かる。オーストラリアの系統安定性への早期対応、欧州の広域連系技術、それぞれの地理的・技術的制約から生まれた解決策は、他国の課題解決

にも応用可能である。国際的な技術交流と経験共有により、各国が独自に直面する課題を効率的に解決し、より迅速で持続可能なエネルギー転換を実現できる可能性がある。

**規制枠組み**の国際差異は各国の太陽光発展に大きく影響している。ドイツでは厳格な技術基準と詳細な系統接続規則により、高品質な PV システム導入を実現したが、手続きの複雑化と期間長期化を招いた。対照的にオーストラリアでは、標準化された接続手続きとデジタル申請システムにより、住宅用 PV の接続プロセスの効率化を図っている<sup>14)</sup>。フランスでは中央集権的な許認可制度により大規模プロジェクトの品質は高いが、地方自治体の権限が限定され、地域レベルでの柔軟性に欠ける。日本の現行制度は、複数官庁にわたる縦割り許認可により、国際標準と比較し著しく非効率である。

**市場メカニズム**の国際比較では、各国の電力市場設計の違いが顕著である。ドイツ<sup>15)</sup>では再エネ発電事業者の市場参加を促進する市場プレミアム制度 (FIP) により、太陽光発電が卸電力市場で価格発見機能を果たしている。オーストラリア<sup>16)</sup>では周波数制御補助サービス市場において、大規模蓄電システムと組み合わせた太陽光発電が高収益を実現している。一方、日本の市場設計は依然として集中型電源を前提としており、分散型 PV の市場価値評価メカニズムが不十分である。特に、配電レベルでの価値 (送電損失軽減、配電設備投資回避) が適切に評価されていない。

**技術展開パターンの地理的差異**も興味深い。北欧のフィンランドやスウェーデンでは、雪荷重対応と低照度条件下での効率最適化により、高緯度地域でも PV 事業が成立している。中東の UAE やサウジアラビアでは、砂塵対策と高温環境への適応技術 (冷却システム、高温対応モジュール) が発達している。オーストラリアの砂漠地帯では、極端な気温変化 (日中 50℃、夜間 5℃) に対応する耐久性強化技術が進展している。日本では、台風・地震対応の構造設計技術と高湿度環境での長期信頼性確保技術が世界最高水準に達している。これらの気候適応技術は、各国の地理的特性を活かした技術的差別化の好例である。

**資金調達モデル**の国際差異は、太陽光プロジェクトの実現可能性を左右する。ドイツでは市民出資モデル (Bürgerenergie)<sup>17)</sup>により、地域住民が直接 PV プロジェクトに投資し、収益を地域に還元するシステムが発達している。米国では税額控除制度

(ITC) と Power Purchase Agreement (PPA) を組み合わせた第三者所有モデル<sup>18)</sup>が主流となり、初期投資ゼロでの導入を可能にしている。オーストラリアでは、住宅用 PV 導入における無利子ローンと電力料金への上乗せ返済システムにより、低所得世帯でも導入可能な仕組み<sup>19)</sup>を構築している。これらの革新的資金調達手法は、従来型の銀行融資中心のアプローチと比較し、太陽光発電の社会的普及を大幅に促進している。

**ステークホルダー関与手法**の多様性は、各国の社会文化的背景を反映している。ドイツでは法定化された住民参加プロセスにより、計画段階から地域住民の意見を反映し、受容性を高めている<sup>20)</sup>。デンマークでは協同組合モデルにより、地域住民が風力・太陽光プロジェクトの共同出資者となり、利益を共有している<sup>21)</sup>。オーストラリアでは法定化されたステークホルダー協議プロセスにより、地域コミュニティとの合意形成を重視している。フランスでは国主導の啓発キャンペーンと教育プログラムにより、国民レベルでの再エネ受容性を向上させている。日本では欧州諸国と比較し、地域住民の実質的参加や経済的利益共有の仕組みが限定的である。

欧州での生活を通じて、ステークホルダー参画に対するアプローチの違いを感じた。ドイツやフランスでは、エネルギープロジェクトに関する地域住民の関心が高く、公的な議論の場も多く設けられているように見受けられる。この背景には、おそらく欧州の市民参加に対する文化的な期待があると思われる。日本と欧州では、プロジェクト開発における地域コミュニティとの関わり方に異なるアプローチが取られており、これが各国の再生可能エネルギー導入の進め方にも影響している可能性がある。

**政策アプローチ**の国際経験から重要な教訓が得られる。ドイツの固定価格買取制度 (FIT) は初期普及に成功したが、系統コスト増大を招いた。チリでは急速な PV 導入により電力価格が劇的に下落したものの、過度な出力制御により太陽光発電事業の破綻が相次いだ<sup>22)</sup>。オーストラリアでは分散型 PV の高浸透率 (一部地域で普及率 50% 超) を実現しつつ、系統安定性を維持している。日本は太陽光発電のノンファーム接続による出力制御を「日本独自の解決策」として掲げるが、実際には世界各国で実施されており、チリの失敗例から事業経済性との両立が重要であることを学ぶべきである。

**人口動態と電力システム**の関係において、日本は他国とは対照的な機会を有している。ドイツ、フラ

ンス、オーストラリアは人口増加または安定しており、集中型電源と送電網拡張が合理的である。しかし日本の人口減少・地方過疎化は、高コスト送電網強化に代わる分散型太陽光によるグリッドエッジサービス維持を費用効果的にしている。この人口動態変化を活用した分散型エネルギーシステムは、他国では見られない日本独自の戦略的機会である。

**結論**として、ソーラープロジェクトの拡大への支援は進んでいるが、重要な政策課題が残されている。国際経験から明らかなのは、系統統合支援政策の重要性である。これらの国際事例から見えてくるのは、系統の柔軟性向上と発電事業の経済性維持のバランスの重要性である。日本では既に容量市場や需給調整市場などの制度が導入されており、これらを段階的に改良して分散型太陽光の価値を適切に評価する仕組みを発展させることが考えられる。また、日本独特の地理的制約（山岳地帯、島国）や人口減少・高齢化といった課題も、分散型エネルギーシステム構築の機会として捉え直すことができるかもしれない。他国の経験を参考にしながら、日本の実情に合った持続可能な太陽光発電統合戦略を構築していくことが、エネルギー安全保障と脱炭素化の両立に寄与する可能性がある。

## 参考文献

- 1) International Energy Agency, Electricity 2025 (accessed Jun. 15 2025), <https://www.iea.org/reports/electricity-2025>
- 2) International Energy Agency, Renewables 2024 (accessed Jun. 15 2025), <https://www.iea.org/reports/renewables-2024>
- 3) RTS Corporation, Forecasting PV installed capacity in Japan 2023 to 2035 (accessed Jun. 15 2025) <https://www.rts-pv.com/en/blogs/12004/>
- 4) International Energy Agency, Solar PV Global Supply Chains (accessed Jun. 15 2025), <https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains>
- 5) US Department of Energy, Inflation Reduction Act of 2022 (accessed Jun. 15 2025), <https://www.energy.gov/lpo/inflation-reduction-act-2022>
- 6) European Commission, Net Zero Industry Act (accessed Jun. 15 2025), [https://single-market-](https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability/net-zero-industry-act_en)
- 7) Ministry of New and Renewable Energy India, Production Linked Incentive Scheme (accessed Jun. 15 2025), <https://mnre.gov.in/en/production-linked-incentive-pli/>
- 8) Solar Power Europe, Solutions for PV Cyber Risks to Grid Stability (accessed Jun. 15 2025), <https://www.solarpowereurope.org/press-releases/new-report-solar-sector-proposes-solutions-to-mitigate-critical-cybersecurity-risks>
- 9) Renew Economy, Big Battery Storage Map of Australia (accessed Jun. 15 2025), <https://reneweconomy.com.au/big-battery-storage-map-of-australia/>
- 10) Wood Mackenzie, Global Solar Module Manufacturer Rankings 2025 Report (accessed Jun. 15 2025), <https://www.woodmac.com/press-releases/2025-solar-ranking/>
- 11) US Department of Energy, Securing Solar for the Grid (accessed Jun. 15 2025), <https://www.energy.gov/eere/solar/securing-solar-grid-s2g>
- 12) European Commission, Critical infrastructure and cybersecurity (accessed Jun. 15 2025), [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-security/critical-infrastructure-and-cybersecurity\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-security/critical-infrastructure-and-cybersecurity_en)
- 13) US Energy Information Administration, Japan (accessed Jun. 15 2025), <https://www.eia.gov/international/analysis/country/jpn>
- 14) International Energy Agency, Digital tools will help keep distributed solar PV growing strongly (accessed Jun. 15 2025), <https://www.iea.org/commentaries/digital-tools-will-help-keep-distributed-solar-pv-growing-strongly>
- 15) Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (accessed Jun. 15 2025) [https://www.gesetze-im-internet.de/eeg\\_2014/](https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/)
- 16) Australian Energy Market Operator, Ancillary Services (accessed Jun. 15 2025), <https://aemo.com.au/en/energy-systems/electricity/national-electricity-market-nem/system-operations/ancillary-services>
- 17) BMWi, Citizen energy : actively shaping the energy transition (accessed Jun. 15 2025),

- <https://www.energiewechsel.de/KAENEF/Redaktion/DE/Standardartikel/buergerenergie.html>
- 18) US Department of Energy, Homeowner's Guide to the Federal Tax Credit for Solar Photovoltaics (accessed Jun. 15 2025), <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2021/02/f82/Guide%20to%20Federal%20Tax%20Credit%20for%20Residential%20Solar%20PV%20-%202021.pdf>
  - 19) Australian Government DCCEEW, Government rebates and loans for solar (accessed Jun. 15 2025), <https://www.energy.gov.au/solar/financial-benefits-solar/government-rebates-and-loans-solar>
  - 20) MWE, Solar Package 1 : Overview of the main new solar regulation in Germany (accessed Jun. 15 2025), <https://www.mwe.com/insights/solar-package-1-overview-of-the-main-new-solar-regulation-in-germany/>
  - 21) International Energy Agency, Denmark community ownership of renewables (accessed Jun. 15 2025), <https://www.iea.org/policies/17800-denmark-community-ownership-of-renewables>
  - 22) PV Tech, Building solar PV without storage in Chile is financially inviable (accessed Jun. 15 2025), <https://www.pv-tech.org/building-solar-pv-without-storage-in-chile-is-financially-inviable/>